- Appendix 6 : Building Structural Survey Report of the Bayon Temple
- 6.1 Building Structural Survey of the Bayon Temple and so forth
 - Bayon Northern Library, Prasat Suor Prat, and Angkor Wat Northern Library -

IWASAKI Yoshinori, ARAYA Masato

1. Introduction

JSA selected the Northern Library of Bayon, Prasat Suor Prat, and the Northern Library inside the Outermost Enclosure of Angkor Wat as targets for restoration, and conducted various studies and research to date on the structure of these monuments. Study reports related to structural matters have been presented not only in the architecture section of JSA annual reports, but also in the sections on conservation and restoration techniques and geotechnical engineering. This paper will review past JSA annual reports from a standpoint that cuts across these areas, and will discuss the results of studies on architectural structures.

The compilation format of the Japanese and English versions of the JSA annual reports are the same, but since the page numbers differ, relevant citations from the JSA annual reports will be indicated by chapter and section number followed by the year of the annual report in parentheses (chapter and section number, year of annual report), or by the number of the report followed by the year of the annual report (number of report, year of annual report).

2. Northern Library of Bayon

2.1 Structural Overview

The Northern Library of Bayon stands in the northeast corner of the Bayon Temple complex, the central temple of Angkor Thom, and forms a pair with the Southern Library which stands in the southeast corner of the said complex. The connection style of the Inner Gallery and the number of window openings differ between the Northern and Southern Libraries, but otherwise, they are basically buildings of the same style (chapter 2, 2.3, 1996). Nevertheless, detailed studies indicated a strong possibility that the two libraries were constructed for different purposes (chapter 2, 2.3, 1998). For instance, this assumption is supported by the fact that traces of a canopy were found in the center of the paving stones inside the nave of the Southern Library only.

The Northern Library measures approximately 11 m widthwise and approximately 18 m lengthwise in terms of the planar dimension of the platform foundation. It is approximately 5 m high from the upper terrace of the platform foundation to the top surface of the platform, and approximately 8.75 m to the top surface of the beam at the topmost portion of the building that remains. EFEO drafted diagrams of the ground plan, el付録6 バイヨンの建築構造調査報告

6.1 バイヨン寺院などの建築構造調査報告

- バイヨン北経蔵、プラサート・スープラ、およ びアンコール・ワット北経蔵 -

岩崎好規、新谷眞人

1. まえがき

JSAは、その修復の対象として、バイヨン北経蔵、 プラサート・スープラ、およびアンコール・ワット 最外周壁内北経蔵を選定した。これらの遺跡の構造 に関して、種々の調査、研究が実施されてきた。構 造系の事柄に関与する調査報告は、年次報告書の中 の建築学の分野のみならず、保存修復技術や地盤工 学の分野においても議論されている。ここでは、JSA の年次報告に示されるこれらの領域をできるだけ横 断的にレビューしながら、建築構造の調査結果を述 べたい。JSAの年次報告は英文、邦文ともに同じ構 成ではあるが、ページ数が異なっているので、関連 する参照すべきJSA 年次報告書の箇所は(章節、報 告年次)あるいは(論文番号、報告年次)としている。

2. バイヨン北経蔵 2.1 構造の概要

バイヨン北経蔵は、アンコール・トムの中心寺院 であるバイヨン寺院の伽藍の北東隅に位置し、南東 隅に位置する南経蔵と対を成している。北経蔵と南 経蔵とは、内回廊との取り付きや窓開口部の数が異 なっているが、基本的には同じ形式の建造物である (第2章2.3、1996)。しかしながら、詳細に調査をし てみると室内中央の敷石上面には天蓋を立てたと思 われる痕跡が南経蔵だけに見つかるなど、両経蔵に 与えられた意味が異なっていた可能性が高い(第2 章2.3、1998)。

北経蔵は、平面基壇基礎の短手が約11m、長手が 約18mである。高さは、基壇の基礎の上部テラスか ら基壇上端までが約5m、現存する最頂部の梁上端 までが約8.75mとなっている。北経蔵については、 EFEOにより平面図、立面図、断面図、基壇彫刻詳 細図などが作成されているが、一部現状と復元的推 定が混在している。1995年度の調査において実測測 量を実施して、平面図、屋根伏図、天井伏図、東西 南北計4面の立面図などを主として1/50の縮尺で作 成した(Figs. 6.1-1、-2)(第2章2.3、1996)。

2.2 構造形式

バイヨン北経蔵は、3重の基壇上に建つ遺構で、正

evation view, cross-sectional view, and details of the platform decoration of the Northern Library, but some of those diagrams are a mixture of actual conditions and conjectural images of the original form. In a study conducted in 1995, we mainly measured the ground plan, roof plan, ceiling plan, and elevation view of the four cardinal directions, and prepared diagrams at a 1/50 scale (Figs. 6.2-1 and -2) (chapter 2, 2.3, 1996).

2.2 Structural Style

The Northern Library of Bayon is a monument constructed on a three-tier platform. It has an attached structure (aisle) annexed to each of the four faces of a central structure (nave) having one front façade and three side facades. There is a porch forming an entrance on the east and west faces, and a corbelstyle aisle in the north and south faces.

The three-tier platform is composed of a bottom platform that is approximately 1.75 m high, a middle platform approximately 2.25 m high on top of the bottom platform, and a top platform approximately 1 m high placed on top of the middle platform. Each platform is about 50 cm smaller than the one below it.

In the entrance, there are traces which seem to indicate that a wooden lintel had penetrated the top portion of the inside pilasters, and traces that appear to be pivot holes on the threshold. Judging from these traces, we assumed that there had been an inward-opening wooden casement door in the entrance. We have also presented reports of balusters fitted in the windows, but their vestiges are unclear (chapter 2, 2.4, 1996).

Based on the above study of surface forms (Present State Study 1, chapter 2, 1996), we conducted continuous structural surveys spanning a period of several years. Specifically, we surveyed the east and west porches with marked uneven ground subsidence and the four corners where sandstone elements were displaced. Between 1996 and 1997, we dismantled a part of the elements (Present State Study 2, chapter 2, 1997). From March 1997, we removed stone elements of the northwest portion of the platform and conducted an excavation survey (Present State Study 3, chapter 2, 1998). From March 1998, we carried out surveys of the northeast, southwest, and southeast corners of the platform, in addition to a survey for removing the entire upper platform (Present State Survey 3, chapter 2, 1999). Pl. 6.1-1 shows dismantled section at the south-west corner and its trench section is shown in Fig. 6.1-3.

The structural survey of the platform conducted from 1996 to 1997 included the dismantlement of a part of the elements of the platform floor inside the nave and the top platform of the southeast corner, as well as a partial excavation of those areas.

There were two layers of laterite blocks paved beneath the sandstone of the platform surface, but the first laterite block layer was brittle in several places. However, sandstone blocks were used directly beneath pillars. The laterite blocks in the third row were not as deteriorated as the laterite blocks in the second row. The ground below the laterite blocks of the third 面1間、側面3間の中央構造体(身舎)の4面にそ れぞれ付属構造体(庇)を付加した形式である。東 西面には妻庇(porch)があって入口を形成し、南北 面には迫り出し構造の平庇(aisle)がある。

3 重の基壇の構成は、高さ約1.75mの下部基壇の 上に、約2.25mの中間基壇を重ね、その上に約1m 程度の上部基壇を載せている。各基壇は上るにした がってほぼ50cm ずつ逓減を繰り返している。

入口は、室内側壁付柱上部に木製まぐさを貫入し ていたと思われる痕跡が認められ、また、敷居には 軸擦り穴と推定される痕跡が存在することから、内 開きの木製両開き扉が設けられていたものと考えら れる。窓には連子子がはめられていたという報告 もあるが、その痕跡は明瞭ではない(第2章2.4、 1996)。

以上のような表面形状の調査(現状調査1、第2章、 1996)を基礎として、不等沈下が顕著である東西ポー チ部、砂岩部材の移動がみられる四隅部の構造調査 が、数年にわたって継続実施された。

すなわち、1996 年から 1997 年にかけては部分解 体(現状調査2、第2章、1997)、1997 年3 月からは 基壇北西部の解体および発掘調査(現状調査3、第2 章、1998)、さらに 1998 年3 月以降は、基壇の北東、 南西、南東隅部の調査および上部基壇全体の解体調 査(現状調査3、第2章、1999)である。Pl. 6.1-1 に 南西隅部の解体状況および Fig. 6.1-3 にトレンチ掘削 断面を示した。

1996年から1997年にかけて行われた基壇の構造 調査は、身舎内基壇床と東南隅上部基壇の2ケ所に おいて部分的な解体および発掘が含まれている。

基壇表面の砂岩の下には2層のラテライトブロッ クが敷かれていたが第1層目のラテライトブロック は脆弱化しているものが見られた。しかし、柱の直 下においては砂岩ブロックが使用されている。第3 段目のラテライトブロックは第2段のラテライトブ ロックに比べてそれほど劣化が進んでいるとは思え ない程度であった。第3段目のラテライトブロック の下位には、締りのない砂質土が現れた以外はよく 締まっていた。東南隅部上部基壇においては、第2 段目はラテライトブロックであるが、柱の直下にお いては砂岩ブロックが使用されている。ただし、上 部からの荷重がすべてこの砂岩材で受けられている ものでもない。全体としてラテライトブロックは風 化、脆弱化している。調査区域の表面から水を流し てみると、中間基壇の目地から透明な水が流出する ことが確認された。雨水侵入によるラテライトの劣 化、土砂の流出があったことが予想される(第2章2.2、 1997)。

1997年3月からは、北西隅部の上部基壇、中間基壇、

row was well packed, except for loose sandy dirt which appeared in some places. In the southeast corner, the second row of the top platform was composed of laterite blocks, and sandstone blocks were used directly beneath pillars. The sandstone elements, however, did not necessarily support the entire load from above. As a whole, the laterite blocks were weathered and brittle. When we poured water on the surface of the survey area, clear water flowed through the joint openings of the middle platform. This suggested that rainwater infiltration was probably the cause of laterite deterioration and the discharge of sand (chapter 2, 2.2, 1997).

From March 1997, we dismantled the top platform, the middle platform, and the bottom platform in the northwest corner to study their structural characteristics.

In the top platform, the joints between the sandstone elements, between the sandstone elements and laterite elements, and between the laterite elements were filled with 5 mm to several centimeters of adjustment dirt. Dirt in the horizontal joints was as thick as 9 cm in some places, and there was marked subsidence where the adjustment dirt flowed out due to rainwater. Since no adjustment dirt was found in the joints between the sandstone elements beneath the pillars (chapter 2, 3.2.2, 1998), however, it seems the subsidence of the pillars was due to a different reason.

In the middle and bottom platforms, there were laterite blocks beneath the surface sandstone elements, and a ground filling layer further inside. The laterite block layer was basically composed of one row only, but there were places where the layer was composed of two rows. The vertical joints between elements were filled with clay sand, and the filling between the vertical joints between sandstone elements and laterite elements was mixed with small fragments of sandstone and laterite blocks. The number of rows of sandstone and laterite elements differed (chapter 2, 3.2.3 and 3.2.4, 1998).

As shown in Pl. 6.1-2, traces of ant nests were found not only along the laterite blocks, but also inside the filling dirt (chapter 2, 2.2.2, 1999).

According to a dismantlement survey of the northeast corner of the platform, sandstone elements of the terrace floor continued from where the sandstone elements and laterite blocks of the bottom platform ended, but below the dirt filling further inside, there was only more dirt filling and no sandstone elements (chapter 2, 2.3, 1999).

2.3 The State of Collapse and Deterioration

Fig. 6.1-4 shows states of collapses and deterioration as well as traces of repairments. The roof of the central structure is completely lost except for a beam remaining on the pillar. The east and west porches are also extensively collapsed. Both the north and south aisles have a semi-vaulted roof over them, but the nave pilasters in the southeast area are greatly tilted toward the outside, and the entire south face of the south aisle is distorted so that the southeast corner is falling inward. および下部基壇の解体が実施され、その構造的特性 が把握された。

上部基壇においては、砂岩部材間、砂岩部材 - ラ テライト部材間、およびラテライト部材間では、こ れらの部材間の目地には 5mm~数 cm 程度の調整土 が充填されていた。水平目地の調整土は、厚いとこ ろでは 9cm に達するところもあり、調整土は雨水に より流出したところで沈下が顕著であることが判明 した。しかしながら、柱下の砂岩部材間の目地には、 調整土の充填は認められなかったため(第2章、3.2.2、 1998)、柱の沈下は別の原因である。

中間基壇や下部基壇においては、表面の砂岩部材 の内側にはラテライトブロック、さらに盛土層があ る。ラテライトブロック層は基本的に1列であるが、 場合によっては2列となっている場所もある。部材 間の垂直目地には粘土質砂が充填され、砂岩部材-ラテライト部材間の垂直目地には、この充填土の中 に砂岩やラテライトブロックの小片が混入されてい た。砂岩とラテライト部材の段数は同じでない(第 2章、3.2.3、3.2.4、1998)。

Pl. 6.1-2 に示したが、蟻巣の痕跡が盛土内やラテラ イトブロックに沿って存在することが確認された(第 2章、2.2.2、1999)。

基壇北東隅部の解体調査によれば、下部基壇を構 成する砂岩材やラテライトブロックの下にはテラス 床の砂岩材が連続しているように外観からは推測さ れるものの、基壇内側の盛土層の下には砂岩材はな く、盛土層が連続していた(第2章、2.3、1999)。

2.3 崩壊劣化の様態

Fig. 6.1-4 に崩壊の様態および既往修復の跡を示し た。中央構造体の屋根は、柱上の梁材が残るにすぎず、 それより上部は完全に消失している。東西ポーチ部 においても崩壊が甚大である。南北平庇はいずれも 半ヴォールト状の屋根を残しているが、東南の身舎 壁付柱は、大きく外側に傾き、南平庇南面は全体に うねって東南隅が内側に倒れこんでいる。

建築本体では、もっとも大きな荷重が作用したと 思われる中央構造体の4本の独立柱、東西両入口の 縦枠材の沈下が激しく、それによって東西壁体の石 積みに縦方向のズレを生じさせている。これは、身 舎の沈下が基壇内部のラテライトおよび表面の砂岩 ブロックを外方に押し出したことにより、発生した ものであろう(第2章2.5.1、1996)。

クメール建築で多用されている建設手順は、表面 が荒いままの状態で加工材を積み上げて、最後に表 面の仕上げを行うことが一般的であるため、最終的 な仕上げを行った時点では、部材厚が極端に薄くな り、その部材の破損、崩落が容易となっている箇所 In the main building, the four pillars of the central structure and the jambs of both the east and west entrances were severely sunken, probably because they bore the greatest load. In relation to this subsidence, vertical displacement had occurred in the masonry of the east and west walls. The subsidence of the nave had probably pushed the laterite elements inside the platform and the sandstone blocks of the surface outward, and ultimately caused the displacement (chapter 2, 2.5.1, 1996).

One of the most common construction methods in Khmer architecture is to finish the surface of the structure after stacking elements that are merely roughly processed. This often caused the thickness of the elements to become extremely thin after the final finishing work was applied, and indeed, there were places where the elements had become susceptible to damages and collapse (chapter 2, 2.6, 1996).

2.4 Past Restoration

Around 1924, EFEO carried out cleanup tasks. It applied temporary concrete supports and reinforced the building using mortar filling and steel bands and iron cramp (Photo-3)(chapter 2, 2.5.2, 1996).

3. Prasat Suor Prat

3.1 Structural Overview

As shown in Fig. 6.1-5, the Prasat Suor Prat is a compound structure comprised of a long terrace stretching in the northsouth direction and a group of twelve towers. It is located in the eastern area of the vast Royal Plaza which occupies roughly the center of Angkor Thom. The twelve towers are divided into two groups of six towers each on the north and south sides by an east-west road heading toward the Victory Gate. The towers on the north side are called N1 tower, N2 tower...N6 tower from the tower closest to the road, and similarly, the towers on the south side are called S1 tower, S2 tower...S6 tower also from the tower closest to the road. At a glance, the scale and shape of the six towers on both the north and south sides appear to be the same.

However, the N3 tower displays the highest degree of completion in terms of external structure. In addition to the N3 tower, the N1, S2, and S3 towers have also been judged as displaying a higher degree of completion than the other towers (chapter 2, 3.2.3, 1995). Furthermore, later studies revealed additional characteristics common to these four towers, such as the difference in the thickness of the elements and traces of rectangular sandstone beneath both sides of the main chamber door frame. As explanations of these differences, various theories have been raised regarding their construction order, structural modifications, and other construction methods of each of the towers (chapter 2, 6.2, 1999).

We have presented a report on the planar measurement of the six northern towers and the sectional and elevation measurements of the N1 and N4 towers (chapter 2, 2.2, 1995). Because the N2 tower was found to be most in danger of collapse が認められる(第2章2.6、1996)。

2.4 既存の修復

1924 年ころ、EFEO によって清掃作業がなされた 他、応急的なコンクリート支柱の設置や、モルタル 充填による補強と鉄製バンドや鎹(Photo-3)による 補強などが実施されている(第2章 2.5.2、1996)。

3. プラサート・スープラ

3.1 構造の概要

Fig. 6.1-5 に示したが、プラサート・スープラは、 アンコール・トム内のほぼ中央、王宮前の広大な広 場の東辺を区画する位置にあり、南北に長いテラス と12 基の塔からなる一群の複合建築である。

12 基の塔は勝利門に向かう東西道路で2分され、 南北それぞれ6基づつとなるが、この道路に近い方 から北側の塔はN1、N2・・N6、南側の塔は、S1、 S2・・・S6と呼称する。南北に6基ずつの塔は、す べて同規模でどれも同じ形状を有するように一瞥さ れるが、外部構成の最も完成度の高いのはN3で、 これにN1、S2、およびS3を加えた4基が他のもの に比べて完成度が高いと評価される(第2章3.2.3、 1995)。さらに部材の厚さの違いや、主室入り口枠の 両脇下にある直方体の砂岩の痕跡がこれらの4塔に だけ見られるなどの特徴が判明し、これらの違いを 説明するための建設順序であるとか、構造の変更な どについての各塔建築工法の作業仮説が提案されて いる(第2章6.2、1999)。

北群6基の平面実測およびN1、N4の立断面実測 が報告されている(第2章2.2、1995)。N2 塔もN1 塔についで最も崩壊の危険性が高いことが判明した ために、平面図、立面図、断面図などが追加作成さ れている(第2章6.1、1999)。

立断面調査時に、天井や塔内壁面に残された凹面 などの痕跡も調査された。このような痕跡からは、 木材の梁が使用されていたことが考えられるが、実 際、N5 塔内部からは断面寸法にほぼ一致する落下材 がみつかっている。また、足場や迫り出し屋根の建 築工程で使用されたと思われる痕跡も見つかってい る。塔頂部にはまったく屋根がなく、現状の塔上面は、 12 塔すべて平坦な面として残っている(第2章2.3、 1995)。塔頂部の痕跡については、詳細な調査が行わ れた結果、かなり太い木材が使用されていたと思わ れる痕跡がみつかった。このことから、太い木材で 梁を組み、ラテライトブロックで覆う構造が推定さ れている(3、2003)。

プラサート・スープラは、主塔とその各搭の前に 設置してある塔前室とから構成される。各塔前室入 り口の垂直材は、途中で継ぎ足されている(Pl. 6.1-4) following the N1 tower, its ground plan, elevation view, and sectional view have been additionally drafted (chapter 2, 6.1, 1999).

In the survey of the sectional and elevation views of the towers, we also surveyed the traces of hollows and other marks remaining on the ceiling and the walls inside the towers. These traces implied that wooden beams had been used. Indeed, a fallen element that roughly matches the sectional dimension was found inside the N5 tower. Hollows were also found that had apparently been used in the process of constructing footholds and the corbel roof. The top of the towers lacks any roof structure, and the top surfaces of all twelve towers are flat in their present state (chapter 2, 2.3, 1995).

As a result of a detailed survey conducted in regard to the traces at the top of the towers, there were traces which indicated the use of considerably thick wood. Given this finding, we assumed that the structures were constructed using thick wood as beams, and not covered with laterite blocks (3, 2003).

The Prasat Suor Prat towers are composed of a main tower and an antechamber attached to the front of each tower. Judging from the fact that the vertical elements of the entrance to the antechamber of each tower appear to be add-ons (Pl. 6.1-4), modifications were probably made after the initial construction, including the expansion of the entrance (chapter 2, 5.2, 1995). Also, since rounded hollows were found arranged in the shape of a mountain on the wall of the main tower on the front face of the antechamber, it is believed that the tower antechamber and the front part of the antechamber were covered with a wooden roof (chapter 2, 5.3, 1995).

As shown in Pl. 6.1-5, in regard to the pediments of the Prasat Suor Prat, we believe that at the time of their construction, a total of sixteen pediments were created on each tower—that is, four pediments for each layer of the main tower (total of 12 pediments for the three layers), two pediments for the roof of the main tower, and two pediments for the antechamber. In later modifications, it seems the two pediments of the antechamber became one, so that each tower had fifteen pediments. However, of all 180 pediments, 81 were collapsed and 9 partially remained on the tower. Of the 90 pediments remaining in whole, 18 displayed elemental displacement, fractures, or flaking, and were so unsteady that they were in danger of collapse in the near future.

The pediments are composed of multiple sandstone blocks. Because they are stacked by simple dry masonry without using dowels or interlocking joints (Pl. 6.1-6), they could easily fall if the beam on which they are placed is damaged, or if the tower itself tilts. With respect to the pediments at the top of the towers excluding the S1 and N1 towers, there are more remaining on the east side (back side) than the west side (front side). This is probably related to the inclination of the tower to the east (back side). We believe that the antechamber pediments collapsed because many of the antechambers themselves became deformed, and also because the laterite elements became ことなどから、開口部の拡大などの改造がなされた と考えられている(第2章5.2、1995)。また、前室 前面の主塔の壁には角丸形の窪みが山形に並んでい るのが観察できることなどから、塔前室や前室前方 部が木造屋根で覆われていたとされている(第2章 5.3、1995)。

Pl. 6.1-5 に示したが、プラサート・スープラ塔建築 の建設当初のペディメントは、塔本体各層に4枚(3 層で計12枚)、塔本体屋蓋に2枚、前室に2枚の計 16枚が各塔に設置されていたと思われている。その 後の改築で前室の2枚が1枚となり、各塔あたり15 枚となったと思われるが、計180枚のうち、81枚が 崩落しており、塔上に残存するペディメントのうち 9枚は部分的であり、全体が残っている90枚のうち、 部材の移動、破断や剥離現象が認められるものが18 枚で、不安定な状態で近々崩落する危険を孕んでい る。

ペディメントは、複数の砂岩部材で構成されてお り、その設置方法は、「だぼ」や「噛み合い」などな い単純な空積みである(Pl. 6.1-6)から、それを載せ ている梁材の破損とか塔自体の傾斜で容易に落下す ることになる。S1およびN1以外の塔頂位置のペディ メントを見ると、東側(後面側)より西側(前面側) のほうが良く残っている。これは、塔が東側(後面側) に傾斜していることが原因と思われる。前室におけ るペディメントの崩落の原因は、多くの前室自体が 変形し、ラテライト部材も劣化や破損が進行してい るためと考えられる(3、2000)。

3.2 劣化および塔の傾斜

プラサート・スープラの塔の劣化は、いろいろな 要素の複合的作用であるが、使用されているラテラ イトブロックは、積み方に違いがあって応力の作用 も異なり、またラテライトに含まれる泥分が多いと 劣化が進み易いというような違いから構造的バラン スを崩している(第2章3.3.2、1995)と指摘されて いる。地盤の不等沈下が南北の沐浴池の護岸に近い N1、N2、N3、S1、S2、S3 塔において見られる(第2 章3.3.3、1995)。

1998年の時点における各塔の目視による危険箇所 や、崩壊傾向を指摘し、それらの原因について考察 を加え、N 塔群の方が S 塔群より危険な状況にある と報告している(第2章5、1998)。Fig. 6.1-6 に N1 塔の基盤の各辺ステップの相対レベルを示した。

最も傾斜が大きいN1 塔における基壇の傾斜は北池 方向に 4/100 と報告されている(第4章1.5、1995)。 塔の側壁の傾斜を計測した(第4章3.6、1995)(25、 2001)事例が報告されているが、1997年の豪雨時に N1 塔の傾斜が見られ、数ヶ月にわたってクリープ的 increasingly deteriorated or damaged (3, 2000).

3.2 Deterioration and the Inclination of the Towers

The deterioration of the Prasat Suor Prat towers is the compounded effect of various factors. Yet, given the facts that the effect of their stress differs according to their masonry style and that laterite blocks containing large amounts of dirt are more apt to deteriorate, it has been pointed out that the laterite blocks that are used are losing their structural balance (chapter 2, 3.3.2, 1995). Uneven ground subsidence was observed in the N1, N2, N3, S1, S2, and S3 towers, which are near the embankment of the North and South Ponds (chapter 2, 3.3.3, 1995).

In 1998, we conducted a visual confirmation of the danger spots in each tower and the towers' likelihood of collapsing, and discussed possible causes. We also reported that the N towers were more in danger of collapse than the S towers (chapter 2, 5, 1998). Fig.6 shows the relative height of the steps along the peripheral of the foundation.

The platform of the N1 tower, which shows the greatest inclination, was reported as 4/100 in the direction of the North Pond (chapter 4, 1.5, 1995). We presented a case example in which we measured the inclination of the side walls of the towers (chapter 4, 3.6, 1995) (25, 2001). However, in 1997, heavy rainfall caused the N1 tower to tilt more, and thereafter, the tilting movement continued slowly but steadily over several months (chapter 6, 4, 1998).

It has been pointed out that by measuring the positions of the center of the top of the Prasat Suor Prat towers and the center of the openings using a transit and assuming that the inclination between these two points (23, 2002) is the inclination of the tower, it is possible to deduce the inclination trend toward the tower antechamber.

We also measured the inclination of the towers using a plumb bob and presented the results. Specifically, we suspended a 1 kg plumb bob inside the tower interior from the center of the top of the N2 tower, and measured the planar position of the plumb bob on the tower floor 14.365 m from the top of the tower. Monthly measurements from November 2002 to June 2003 showed a shift of 2.5 mm to the east and 1.5 mm to the south (22, 2003).

3.3 Past Restoration

There are various vestiges of restoration work in each of the Prasat Suor Prat towers. They include reinforcements using concrete beams, concrete stays, steel clamps, steel bands, and mortar filling. However, at present, it is not clear who restored the towers and when they were restored, even by consulting EFEO records. The N3 tower was restored most systematically, but deterioration has greatly advanced after the restoration (chapter 2, 3.4, 1995).

3.4 Survey on the Cross-Sectional Form of the Platform

に傾斜の動きが継続していることが報告されている (第6章4、1998)。

プラサート・スープラ塔の塔頂中心点と開口部の 中心部と位置をトランシットを使用して求め、この 2 点間の傾斜を(23、2002)塔の傾斜とすると、当前 室方向への傾斜の傾向がみられると指摘されている。

塔の傾斜を重錘で計測した結果が報告されている。 N2 塔の塔頂部の中心から 1kg の重錘を主塔内部にお ろして、14.365m下の主塔床面における重錘の平面 位置を計測した結果では、1月1回の計測で 2002 年 11 月から 2003 年 6 月までの間、東に 2.5mm、南に 1.5mm 変化している(22、2003)。

3.3 既往の修復

プラサート・スープラの各搭にはさまざまな修復 の痕が見られるが、コンクリート梁による補強、コ ンクリート支柱による補強、鉄筋鎹による補強、鉄 製バンドによる補強、およびモルタル充填などがあ る。現時点で EFEO の記録を参照しても、いつの時 代にだれが修復したかは明確ではない。最も体系的 な修復が行われたのは N3 塔であるが、修復後の劣 化の進行が大きい(第2章3.4、1995)。

3.4 基壇断面形状調査

プラサート・スープラの N1 塔を対象として、基 礎周辺の塔構造を調査するために、主塔内部底面お よび主塔周縁地盤より垂直および 30 ~ 45 度傾斜さ せてハンドオーがーを貫入し基礎構造を推定した。 さらに小規模なトレンチを用いて基壇断面の調査を 実施した。その結果、Figs. 6.1-7、-8 に示したよう に、主塔内部の基壇の内側は盛土構造で、基壇の長 さ約 2.5m のラテライトブロックは長さはそのままで 次第に外側に拡がるように設置され、その内部の盛 土の幅は、それにしたがって深さとともに増大して いる。ラテライトブロックは主塔内部地表面から約 3m の深度まで存在し、主塔下部の盛土はさらに約 2m 深い位置まであるという断面構造が得られた(23、 2001)。その後のトレンチ掘削によってもほぼ同様の 断面が確認された。

3.5 構造解析

プラサート・スープラ N1 塔の構造を検討するために、3 次元弾性体として概ね 44cm の立方体を1 単位の長さとする要素でモデル化し、塔本体を 4804 個、基盤と地盤とを 8542 個の要素の連続体として自重による変形特性が3つのステップにより(Fig. 6.1-9) 求められている。

これは1連続体モデルである。さらに、開口部の 柱と壁には目開きの亀裂が認められることから、開

In order to survey the tower structure around the foundation of the Prasat Suor Prat N1 tower, we used a hand auger in the vertical position and at a 30~45 degree angle to estimate the foundation structure beneath the tower and the ground of the tower periphery. We also surveyed the platform cross-section by digging a small trench. As a result, we found that the interior of the platform inside the tower was composed of dirt filling. We also found that the approximately 2.5 m long laterite blocks of the platform were placed so that they gradually open outward, and the width of the dirt filling on the inside of the blocks increases in accordance with the depth. As shown in Figs. 6.1-7 and 8, the cross-sectional structure showed laterite blocks from the ground surface inside the tower to a depth of about 3 meters, and dirt filling below the tower to a depth approximately 2 meters deeper (23, 2001). Trench excavation performed layer also confirmed the same structures.

3.5 Structural Analysis

In order to examine the structure of the Prasat Suor Prat N1 tower, we created a model of the tower. As a three-dimensional elastic body, a 44 cm cube was basically considered as the element representing the unit of length. The main building was seen as a continuous mass of 4804 elements and the foundation and ground as a continuous mass of 8542 elements to obtain its deformation characteristics based on empty weight through three steps (Fig. 6.1-9). This is the (1) continuum model. Additionally, because there were joint opening cracks in the entrance pillars and walls, we also created a (2) slit model with a slit in the side of the entrance. The structure was analyzed according to these two models.

The unit weight, Young's modulus, and Poisson's ratio of the laterite blocks and the ground were established as follows.

	Laterite block	Ground
Unit weight (ton/m ³)	$\gamma = 2.33$	1.75
Young's modulus (kg/cm ²)	E = 200,000	280
Poisson's ratio	$\nu = 0.25$	0.3

The analysis separates the platform and the main tower, but as long as the tower is assumed to have the dynamic properties of a linear elastic body, the analysis results would be the same. The ground characteristics are not necessarily typical characteristics of Angkor, but we calculated four instances of stress and displacement based on empty weight. The weight of the main building excluding the platform was 885 tons, and when the greatest vertical compression stress functioning on the foundation was obtained, the result was as follows.

- Based on the continuum model
 - Type A The foundation is fixed and level
 - Type B The foundation is fixed and the present inclination of the tower is used (1.18° in the western direction, 2.58° in the northern (pond) direction)

口部の横にスリットをいれた2スリットモデルの二 つのモデルで解析した。

ラテライトブロックおよび地盤の単位体積重量、 ヤング率、ポアソン比をそれぞれ

	ラテライト ブロック	地盤
単位体積重量(ton/m ³)	$\gamma = 2.33$	1.75
ヤング率 (kg/cm ²)	E = 200,000	280
ポアッソン比	$\nu = 0.25$	0.3

と仮定している。

解析は基壇と塔本体を分離して解析されているが、 線形弾性体という力学特性を仮定する限り、解析結 果は同じである。地盤の特性は、必ずしも、アンコー ルの地盤特性ではないが、4つの場合の自重による 場合の応力と変位を計算した。基壇部を除く塔本体 の建物重量は885トンであり、基礎に作用する最大 鉛直圧縮応力度を求めてみると次のようになった。

- ・連続体モデルによるもの
 - タイプA 基礎は固定で水平、
 - タイプB 基礎は固定で塔の現状傾斜(西方向 に 1.18°、北(池)方向に 2.58°)
- ・スリットモデルによるもの
 - タイプC タイプBと同じ
 - タイプD タイプBと同じで(西方向に 1.18°、 北(池)方向の傾斜を 10°と増加さ せた場合)

以上の場合の鉛直方向の圧縮応力度をみると

	圧縮応力度	倍率
タイプA	60.3ton/m ²	1.00
タイプB	81.3	1.35
タイプC	106.2	1.76
タイプD	164.8	2.73

と求められている。

タイプAは、基礎が水平であれば、基礎直下の鉛 直応力は塔中心に対して対称的分布であるときの基 準値。

Fig. 6.1-12 に示したが、タイプBは、塔が傾斜したために塔中心に対して非対称分布となり、傾いた池側に応力が集まったために、約35%増加した。

タイプCは、現在の亀裂の発生している場合のシ ミュレーションであるが、亀裂がなければアーチ効 果によって、開口部の直上部荷重は分散されるが、 スリットがあるために分散されず、開口部の付柱に 集中して作用するために、約76% 増大している。

タイプDは、さらに池方向への傾斜が増大して10

- Based on the slit model (Figs. 6.1-10 and -11) Type C Same as type B
 - Type D Same as type B (1.18° in the western direction, the inclination in the northern (pond) direction increased to 10°)

In the above cases, the compression stress in the vertical direction was as follows.

	Compression stress	Magnification
Type A	60.3ton/m ²	1.00
Type B	81.3	1.35
Type C	106.2	1.76
Type D	164.8	2.73

Type A is the standard value when the vertical stress directly below the foundation is symmetrically distributed over the center of the tower, as long as the foundation is level.

As shown in Fig. 6.1-12, in type B, the inclination of the tower caused the compression stress to become asymmetrical in relation to the center of the tower, and the stress increased roughly 35% because it concentrated on the side of the pond to which the tower was tilted.

Type C simulates the present condition in which cracks have occurred in the tower. If there were no cracks, the arch effect would have dispersed the load directly above the opening. However, because of the slit, the load was not dispersed, but it rather became concentrated on the pilaster of the opening and increased approximately 76%.

Type D is a case where the inclination toward the pond further increased to 10°. It shows a roughly three-fold increase in compression stress (22, 2001).

The analysis showed some displacement, but needless to say, the dynamic properties of the actual ground and their distribution were unknown, so comparing it with the actual displacement was pointless.

The characteristics we obtained indicated that compression stress transmitted to the foundation greatly increases in relation to the inclination of the foundation and the presence of cracks, and these vertical pressures are transmitted to the dirt-filled ground via laterite blocks. It is not a large load for the laterite blocks, but for the dirt-filled ground, it is of a level that would cause significant displacement.

4. Northern Library inside the Outermost Enclosure of Angkor Wat

4.1 Architectural Overview

The Northern Library inside the Outermost Enclosure of Angkor Wat (Fig. 6.1-13, hereinafter referred to as the Wat Northern Library) is located in the area from the center to the north of the approach stretching from the center of the Angkor Wat complex to the West Gate. It forms a pair with the Southern Library in the south side of the complex. There are slight differences between the two libraries, but their structures are 度となった場合であるが、約3倍程度に圧縮応力が 増大していることが分かる(22、2001)。

解析上は変位も得られているが、当然のことなが ら、実地盤の力学特性とその分布が不明なので、実 際の変位との比較は意味がない。

求められた特徴は、基礎に伝達される圧縮応力が、 基礎の傾斜や亀裂によって大きく増幅されることで ある。これらの鉛直応力はラテライトブロックを介 して盛土地盤に伝達されるが、ラテライトブロック にとってはそれほど大きな荷重ではないが、盛土地 盤にとって大きな変位を発生させるレベルとなって いると思われる。

アンコール・ワット最外周壁内北経蔵 1 建築概要

アンコール・ワット最外周壁内北経蔵(Fig. 6.1-13 、以後、ワット北経蔵と呼ぶ)は、アンコール・ワッ ト中央伽藍から西大門へ延びる参道の中央からやや 北側に位置し、南側にある南経蔵と対をなしている。 南北両経蔵では多少の違いはあるが、基本的な構造 は同一である。

ワット北経蔵は、1953年にフランス極東学院 (EFEO)により、1986~89年にインド考古局によ り修復がなされている。北経蔵の平面図、南経蔵の 平面図および立面図などが EFEOによって作成され ているが、推定復元図であって、現状図ではない。

4.2 構造形式

ワット北経蔵の規模は、下部基壇長手が約41.5m、 短手が約25.5mであり、高さ方向は、基礎石積層上 端から上部基礎上端までが約2.1m、現存する最頂部、 大棟上端までの総高は約10.3m となっている。

ワット北経蔵は、2重の基礎の上に建つ遺構で、 十字型平面の主室の東西に長方形平面の側室を、さ らに4方に吹き放ちの妻庇(ポーチ)を付加している。 主室の南北と西側室の入口は、室内側壁付柱上部に 木製マグサが貫入していたと推測させる痕跡があり、 また、直下の蹴放しに軸擦り穴と推測される痕跡が 存在することから、内開きの木製両開き扉が設けら れていたと考えられる(第2章、5.4、1999)。

4.3 破損の状況

ワット北経蔵破損の状況は、屋根部材と妻庇部材 の欠落が顕著である。石積みは、下部基壇から屋根 最上層まで全体的に目開きを起こしている。

西側室北平庇の壁体は明らかに外転びを起こして いるが、他の柱および壁の外転びは比較的に少ない。 基壇においては、石積みの外方向へのズレが観察さ れている。 basically the same.

The Wat Northern Library was restored by EFEO in 1953 and by the ASI between 1986 and 1989. EFEO drafted a ground plan of the Northern Library and a ground plan and elevation view of the Southern Library, but they are conjectural images of the original form, and not diagrams of actual conditions.

4.2 Structural Style

The scale of the Wat Northern Library is as follows. The bottom platform is approximately 41.5 m lengthwise and 25.5 m widthwise. The height from the top surface of the foundation masonry to the top surface of the top foundation is approximately 2.1 m, and the total height of the building up to the top surface of the large ridge, which is the topmost portion remaining, is approximately 10.3 m.

The Wat Northern Library is a monument erected on a twotiered foundation. A rectangular side chamber is attached to the east and west sides of the cruciform main chamber, and a vaulted porch is attached in four directions. The north and south entrances of the main chamber and the west side chamber have traces which suggest that a wooden lintel had penetrated the top portion of the inside pilasters. Immediately below it on the threshold, there are traces that appear to be pivot holes. Judging from these traces, we assumed that there had been an inward-opening wooden casement door in the entrance (chapter 2, 5.4, 1999).

4.3 Damage Conditions

Damage to the Wat Northern Library is particularly severe where the roof and aisle elements have been lost. The entire masonry is riddled with joint openings from the bottom platform to the topmost layer of the roof.

The wall of the north aisle in the west side chamber is clearly tilted toward the outside, but the outward tilting of the other pillars and walls is relatively slight. In the platform, the masonry was displaced outward.

The elements are also deteriorated. In regard to the vertical elements, they are vertically broken or cracked as a result of being used with their bedding plane in the vertical direction. The nave pillars inside the chamber and entrance jambs are tapered toward the bottom (Pl. 6.1-7).

However, this type of deterioration is not found in the porch pillars.

The connecting beams in the main chamber and east side chamber are fractured, probably due to the subsidence of the nave pillars.

Judging from the measurement results of the height of the structure, the greatest level difference of the foundation base is 0.27 m, and that of the top surface of the bottom platform is 0.21 m (Fig. 6.1-14). The subsidence of the foundation base and the top surface of the bottom platform are linked for the most part, and are probably caused by ground subsidence

部材の劣化状況をみると、縦長材においては、層 理面を縦に用いていることに起因する縦われあるい はひび割れを起こしている。室内の身舎柱および入 口縦枠材では裾が細る現象が見られる (Pl. 6.1-7)。 このような現象は妻庇柱ではみられない。

主室および東側室には、繋ぎ梁のせん断破壊が見 られるが、身舎柱の沈下などがその原因であろう。

構造体の高さの測量結果からみると、基礎底面で のレベル差の最大は0.27mで、下部基壇上面のレベ ル差の最大は0.21mであって基礎底面と下部基壇上 面との沈下はほぼ連動しており、地盤沈下によるも のであろう(Fig. 6.1-14)(第2章、5.5、1999)。

ワット北経蔵の構造体の変形状況は、1998年から 2001年にかけて測量結果によって推定されているが、東西南北のポーチを比較すると、東西のポーチは同一高さにあってもっとも高く、東西ポーチの高さに比べて、北ポーチは 250mm 低く、南ポーチは 120mm 低い。

Figs. 6.1-15、-16 に示したが、壁体の傾斜状況を見 ると、室内側に傾斜している傾向が認められている (5、2002)。これらからみると、全体に北側に沈下が 増大する要因が存在するように感じられるが、壁体 が室内側に傾斜するということは、壁体の足元部分 が広がっていることを示しており、地盤が構造体中 心から外方に動いているということになろう。

4.4 既往修復

ワット北経蔵は、これまでに3回修復された。1 回目は16世紀、第2回目はEFEOが1953年に実施、 第3回目はインドのASI (Archaeological Survey of India)により1986~1989年に実施されている(第2 章、5.6、1999)(4、2002)。

5. 振動特性

アンコールの石積構造物のうち、バイヨンの外回 廊北西壁、バイヨン北経蔵、アンコール・ワット最 外壁内側北経蔵などの振動特性を計測した。その結 果によれば、卓越周期は数 Hz、基盤に比較して構造 物頂部では数倍以上の大きさで振動していることが 判明した。Fig. 6.1-17 にバイヨン外壁東部の壁の上と 地盤上での結果を示すが、地盤に比べて数倍の振幅 を有し、ほぼ 0.12sec の周期で東西の方向で振動して いることが計測されている。

アンコール域においては、数十 m/sec という強風 が吹くことがあり、風の構造物に与える影響が大き いと考えられる(第4章、1.5.2、1995)。

(chapter 2, 5.5, 1999).

The deformation conditions of the Wat Northern Library building has been estimated from the results of measurements taken between 1998 and 2001. A comparison of the north, south, east, and west porches show that the east and west porches are the same height and the highest, while the north porch is 250 mm lower and the south porch is 120 mm lower than the height of the east and west porches.

As shown in Figs. 6.1-15 and -16, an examination of wall inclinations revealed that they show a tendency of tilting toward the inside of the chamber (5, 2002). This may seem to imply the presence of a factor that would increase the entire subsidence on the north side, but the fact that the walls are tilted toward the chamber interior means that the bottom of the walls are spread outward and that the ground is moving outward from the center of the structure.

4.4 Past Restoration

The Wat Northern Library has been restored three times in the past. The first restoration was in the 16th century, the second was carried out by EFEO in 1953, and the third was by the ASI between 1986 and 1989 (chapter 2, 5.6, 1999) (4, 2002).

5. Vibration Characteristics

Among the stone buildings in Angkor, we measured the vibration characteristics of the north and west wall of the Outer Gallery of Bayon, the Northern Library of Bayon, and the Northern Library inside the Outermost Enclosure of Angkor Wat. The results showed that the structures were vibrating at a predominant frequency of several Hz, and several times that at the top of the structures compared to the foundation. Fig.17 shows a result of the micro-tremor measurement on the top of the outer wall of Bayon compared with that on the ground surface nearby. Compared to the ground, the top of 0.12sec in east-west direction. In the Angkor region, strong winds of several tens of meters per second blow at times, so we assumed that wind has a greatly effect on the structure (chapter 4, 1.5.2, 1995).



Fig. 6.1-1 Elevation and plan view of Northern Library, Bayon.



Fig. 6.1-2 Section view of the Northern Library, Bayon.







Fig. 6.1-6 Relative level of the foundation of N1 Tower.



Fig. 6.1-7 $\,$ Estimated foundation structure and trench result along N-S section.



Fig. 6.1-9 FEM simulation by three steps (1st step structure analysis, 2nd step ground analysis, and 3rd step structure soil interaction).





Fig. 6.1-10 Slit model: Joint gap to simulate cracks in the tower structure.



Fig. 6.1-11 Plan of slit model.



Fig. 6.1-12 Position of concentration of vertical compression stress.



Fig. 6.1-13 Sections of Northern Library inside the outermost Enclosure, Angkor Wat.



Fig. 6.1-14 Relative level of the foundation and lower platform.



Fig. 6.1-15 Inclination of pillars and walls.



Fig. 6.1-16 Displacement mode in NS direction in Lines 10 and 13 sections.



Fig. 6.1-17 Measurement of micro-tremors at Bayon (top of east wall vs. nearby ground).



Pl. 6.1-1 Dismantling of south-west corner.



Pl. 6.1-2 Traces of ant's nest, compacted mound, Northern Library, Bayon.



Pl. 6.1-3 Iron cramp.



Pl. 6.1-4 Front of porch, N1.





Pl. 6.1-5 Pediment above the east window of N1 Tower.

Pl. 6.1-6 A corner decoration tower N3.



Pl. 6.1-7 Pillar foot of the east wing of the main chamber.

Appendix 6.2 : Bayon Temple Micro-Tremor Measurement Survey

6.2.1 Measurement Survey in 2003

MAEDA Toshiro, SUGIURA Yoshikazu

1. Introduction

In order to examine the effects of Bayon Temple's structural mechanics on the process of its collapse, the monument's deformative movement must be empirically examined. Past studies have attributed the collapse of the monument to climatic factors such as weathering and temperature changes, biological factors associated to plants and animals, and ground-related factors caused by uneven subsidence. In particular, they suggested the constant vibrations caused by strong winds of nearly 20 m/s observed during the rainy season as the potential cause of its collapse.^{1, 2}

This paper has been compiled from the results of a microtremor measurement survey conducted at Bayon Temple and the Royal Plaza in August 2003. It presents our examinations of the vibration characteristics of the central tower of Bayon Temple, eight sub-towers in the northwest quarter of the Bayon complex, and two Prasat Suor Prat towers in the Royal Plaza, as well as the ground structure of the Royal Plaza.

2. Measurement Plan

Micro-tremor measurement was conducted as described below to estimate vibration characteristics at Bayon Temple and the Prasat Suor Prat towers, and the ground structure of the Royal Plaza.

The main tower structure shown in Fig. 6.2.1-2.1 displays a complex structure. The central tower and central sub towers are connected from the platform to the gallery to form a unified structure, but they separate into the main tower and central subtowers above the gallery. The main tower is 31 meters high, and the sub towers are approximately 20 meters high, measured from the platform. For the measurement of the central tower, we established the four cases shown in Fig. 6.2.1-2.2: "(a) vertical sequence case" for the simultaneous measurement of the top of the central tower, gallery, central sub tower, and platform; "(b) central tower measurement case," for the simultaneous measurement of the top of the central tower and four points on the platform; "(c) central sub tower case," for the simultaneous measurement of the four central sub towers and a point on the platform; and "(d) gallery measurement case," for the simultaneous measurement of four points in the gallery and a point on the platform. There are eight central sub towers in all, but for this study we selected the towers standing at 45-degree angles from the north, south, east, and west axes, due to reasons concerning the setup of seismographs. We attempted to grasp the vibration characteristics of the entire central tower by examining micro-tremor intensities, principal directions, predominant frequencies, and damping ratio at each measurement point.

The sub towers shown in Fig. 6.2.1-2.3 stand almost completely axisymmetrically within the complex. Therefore, we selected the towers in the northwest quarter for measurement and,

付録 6.2 バイヨン寺院の微振動測定調査

6.2.1 2003 年度調査

前田寿朗、杉浦良和

1. はじめに

バイヨン寺院の崩壊過程における構造(力学)的 影響を検討するには、遺構の変形挙動の実証的な解 明が不可欠である。既往の研究により、崩壊要因と して風雨や温度変化による気候的要因、動植物によ る生物的要因、不等沈下による地盤的要因などが挙 げられている。特に、雨期には20~40m/sの強風が 観測されており、これにより励起された常時振動に よる遺構崩壊の可能性が示唆されている^{1,2}。

ここでは2003 年 8 月にバイヨン寺院および王宮前 広場内にて実施した微動測定結果をまとめ、バイヨ ン寺院中央主塔、バイヨン寺院敷地内の北西4半分 の副塔8塔、王宮前広場内の遺構プラサート・スー プラ2塔の振動特性および、王宮前広場の地盤構造 を検討した結果を示す。

2. 測定計画

バイヨン寺院およびプラサート・スープラの振動 特性ならびに王宮前広場の地盤構造を推定するため に、以下の常時微動測定を実施した。

Fig. 6.2.1-2.1 に示す主塔構造物は、中央主塔および 中央副塔が基部からギャラリーまで一体の構造とし て立ち上がり、ギャラリー部分で主塔と中央副塔に 別れる複雑な構造を有する。主塔の高さは基部から 31m、副塔は20m程度である。主塔に関する測定ケー スとして、Fig. 6.2.1-2.2 に示す主塔頂部、ギャラリー、 中央副塔、基部を同時測定する「たて系列ケース(a)」、 主塔頂部と基部4点を同時測定する「主塔測定ケー ス(b)」、4つの中央副塔と基部1点を同時測定する「中 央副塔ケース (c)」、ギャラリー4点と基部1点を同 時測定する「ギャラリー測定ケース(d)」を設定した。 中央副塔は8塔あるが、設置上の理由により東西南 北軸から45°振った位置にある塔を測定対象とした。 振動レベル、主軸方向、各測定ポイントの卓越振動数・ 減衰定数を調べることにより中央主塔全体の振動特 性を把握する。

Fig. 6.2.1-2.3 に示す副塔は敷地内にほぼ軸対称に配置されているので、ここでは北西部4半分を測定対象とし、Fig. 6.2.1-2.4 に示すように、それらの副塔頂部1点と基部4点の同時測定を行った。以下においては図中の副塔番号で測定結果を参照するものとし、塔の高さならびに回廊等の付属建築物の有無により振動特性を整理する。劣化・崩壊状況の異なる塔の卓越振動数を比較し、構造物の劣化状態・傾斜状態

as shown in Fig. 6.2.1-2.4, measured a point at the top of those sub towers and four points on the platform simultaneously. The measurement results are presented below in reference to the numbers assigned to each sub tower in the figure, and vibration characteristics are analyzed according to tower height and the presence/lack of a gallery or other attached building. Furthermore, we will compare the predominant frequencies of towers displaying differing conditions of deterioration and collapse, and examine the correlation between the entire structure's state of deterioration and tilting, and its predominant frequencies.

There are twelve Prasat Suor Prat towers, but we selected the N3 and N4 towers and measured a point at the top of the towers and four points in the platform base simultaneously. Since N3 tower had been restored in the past by the French team and N4 tower has not been restored at all, an examination of this difference could also be an interesting point of focus. The assessment of predominant and natural frequencies of these towers will be used as reference in creating an analysis model.

To elucidate the causes of collapse of the Angkor monuments, it is necessary to gain a close estimate of the surrounding ground structure. However, no information exists on the subsurface S-wave velocity structure, except for the N value and ground layer classification obtained from a boring survey. Therefore, for this study, we created a model of the ground down to the deep layer by carrying out a micro-tremor array investigation at a 6-, 10-, and 20-meter radius, as shown in Fig. 6.2.1-2.5, at the Royal Plaza, located to the north of Bayon Temple and adjacent to the west of the Prasat Suor Prat towers, and conducting a simultaneous simulation using H/V spectrum and Rayleigh wave velocity.

3. Measurement Method

We used five GPL-6A3P portable seismographs for microtremor measurement (manufactured by Akashi Corporation; horizontal and vertical three-component accelerometer; frequency range 0.07 \sim 100 Hz). They were set to a 100 Hz sampling and 30 Hz low-pass filter. Micro-tremors of each structure were measured for thirty minutes, and of each ground array, for ten minutes. At the top of the central tower and sub towers, we applied an external sensor (JEP-6A1,V243SH) equivalent to an internal seismographic sensor, and commonly used the NS, EW, and UD measurement components. We placed seismographs at the measurement points of each of the measurement cases, and conducted a multi-point simultaneous measurement using GPS. Pls. 6.2.1-3.1 to -3.12 show the positions of the seismographs for each measurement case and an overview of the task; Tab. 6.2.1-3.1 shows the measurement properties of each measurement case.

4. Measurement Result

4.1 Micro-Tremor Intensity

Figs. 6.2.1-4.1 and -4.2 show micro-tremor time histories at the top and at the platform of the Bayon central tower, Fig. 6.2.1-4.3 those at the top of the Bayon sub tower (N19), and Fig. 6.2.1-4.4 those at the top of Prasat Suor Prat N3 tower. At the Bayon central tower, the average micro-tremor intensity at the time of measurement had a vertical component of about と卓越振動数の関係性を検討する。

プラサート・スープラ塔は12基あるが、そのうち N3 塔および N4 塔の2基を対象に、塔頂部1点と基 壇基礎4点の同時測定を行った。なお、N3 塔はフラ ンスによる修復が行われており、N4 塔は未修復であ るため、その差の検討も着目点となりうる。これら の卓越振動数および固有振動数を把握し、解析モデ ル作成時の参考とする。

アンコール遺跡群の崩壊要因を把握する上で周辺 地盤構造の推定は重要であるが、ボーリング調査に よるN値および地層種別を除いて、表層S波速度構 造に関する情報はない。本研究では、バイヨン寺院 北側に位置し、プラサート・スープラ西側に隣接す る王宮前広場においてFig. 6.2.1-2.5 に示す半径 6m、 10m、20mの微動アレー観測を実施し、H/Vスペク トルとレイリー波位相速度を用いた同時シミュレー ションにより、深部層までの地盤モデルを作成する。

3. 測定方法

測定には5台のポータブル地震計GPL-6A3P((株) アカシ製、水平・上下3成分加速度計、計測振動数 範囲(0.07~100Hz))を使用した。サンプリング振動 数100Hz、ローパスフィルタ30Hzに設定し、構造物 の測定では各30分間、地盤アレー測定では各10分 間の微動測定を行った。主塔および副塔の頂部には、 微動計内蔵センサーと同等の外付けセンサー(JEP-6A1、V243SH)を使用し、測定成分にはNS、EW、 UD成分を共通に用いた。測定ケース毎に決定した 測定ポイントに微動計を設置し、GPSを用いて多点 同時測定を行った。Pls. 6.2.1-3.1~-3.12 に各測定に おける微動計設置状況および作業状況を示し、Tab. 6.2.1-3.1 に各測定ケースの測定緒元を示す。

4. 測定結果

4.1 振動レベル

Figs. 6.2.1-4.1、-4.2 にバイヨン寺院主塔の頂部・基 壇部、Fig. 6.2.1-4.3 に副塔(N19)塔頂部、Fig. 6.2.1-4.4 にプラサート・スープラ N3 塔頂部の加速度波形を 示す。計測時の平均的な振動レベルはバイヨン寺院 主塔で上下成分が0.2gal 程度、水平成分が0.5gal 程度、 副塔で上下成分が0.1gal 程度、水平成分が0.2gal 程度、 プラサート・スープラで上下成分が0.05gal 程度、水 平成分が0.1gal 程度であった。

Fig. 6.2.1-4.5 に、昼夜通して測定した中央主塔頂 部の振動レベルの変化をRMS 値³で示す。バッテリー 交換の為、7:30 ~ 9:00 の間は測定していない。水平 成分に関する RMS 値は夜間の平均が 2 × 10⁴gal、昼 間の平均が 6 × 10³gal であり、昼間は夜間に比べ 10 倍以上大きい値を示した。昼間は人や交通等の外部 0.2 gal and a horizontal component of about 0.5 gal. For the sub tower, the vertical component was about 0.1 gal and the horizontal component was about 0.2 gal. For the Prasat Suor Prat tower, the vertical component was about 0.05 gal and the horizontal component, about 0.1 gal.

In Fig. 6.2.1-4.5, the changes in micro-tremor intensities measured all through the day and night at the top of the Bayon central tower are shown in RMS values.³ No measurement was taken between 7:30 and 9:00 am, due to battery replacement. The average RMS value for the horizontal component was 2×10^{-4} gal during the night and 6×10^{-3} gal during the daytime. This means that the daytime value was more than ten times greater than the nighttime value. The difference in values can be attributed to the averagely high micro-tremor intensities during the daytime caused by external vibrations such as of people and traffic.

During the measurement period, there were no winds stronger than 10 m/s, so we could not measure micro-tremors during strong winds. However, judging from the fact that a slight wind of about 5 m/s increases micro-tremor intensity two- to fivefold, we re-confirmed the need to also measure micro-tremors during strong winds.

4.2 Principal Directions of the vibration

The principal directions of the vibration (the directions in which the structure shakes) of the central tower and central sub towers were unclear, so we identified them by analyzing the principal axes (analysis of principal components), and determined which directions are relevant to assessing vibration characteristics. We took micro-tremor data of two horizontal components at the top of each tower and multiplied it with a band pass filter with a width of 1 Hz centered on the predominant frequencies to derive the principal direction every second.

Fig. 6.2.1-4.6 shows the frequency distribution of the principal directions of the central tower and central sub tower N7. From this figure, we can see that the principal direction of the sub tower is significantly more distinct compared to the central tower. Fig. 6.2.1-4.7 shows the principal directions which occur most frequently. The angles in the figure are shown measured in the counterclockwise direction from the east (E), and the -73° angle at the top of the central tower closely corresponds to the inclination direction of the tower. The principal directions of the central sub towers are tangential directions perpendicular to the radial direction of the central tower. Excluding N3 tower in the southeast, the greatest axis closely corresponds to the tangential direction. Consequently, we can assume that the central sub towers are likely to vibrate in the radial or tangential directions of the central tower.

Fig. 6.2.1-4.8 shows the principal directions of the sub towers which occur most frequently at the natural frequencies with the inclination direction of the tower structure. The N19 and N20 towers are independent towers which have principal axes that open outward in relation to the central tower. The principal axes of the N30, N31, N33, and N34 towers, whose galleries are linearly connected, are perpendicular to the axis connecting the galleries. Additionally, the N32 and N45 towers, which connect with galleries at right angles, have principal axes in 振動により平均的に振動レベルが高いため、このような差が生じるものと推測できる。

測定期間中に10m/sを超える強風は発生しなかったため、強風時の振動を測定することが出来なかった。しかしながら、5m/s程度の微風により、振動レベルが2~5倍程度増大することから、強風時における振動測定の必要性が確認できたと考えられる。

4.2 振動の主軸方向

中央主塔および中央副塔の主軸(構造物が揺れている方向)が明瞭でないため、主軸解析(主成分分 析法)により振動主軸方向を同定し、振動特性を評 価する方向を定めた。各塔の頂部水平2成分の微動 データに卓越振動数を中心としたバンド幅1Hzのバ ンドパスフィルターをかけ、1秒毎の主軸方向を求め ることとした。

Fig. 6.2.1-4.6 に中央主塔および N7 中央副塔の主軸 方向頻度分布例を示す。同図より、主塔に比べて副 塔の主軸方向がきわめて安定していることが認めら れる。Fig. 6.2.1-4.7 に最大頻度をもたらす主軸方向を 示す。図中の角度は東(E)から反時計回りを正とし て表わされており、中央主塔頂部の-73° は実際の傾 斜方向にほぼ一致している。中央副塔の主軸方向は、 中央主塔の半径方向とそれに直交する切線方向にあ り、南東のN3 塔を除いて最大主軸は切線方向にほ ぼ一致する。従って、中央副塔は主塔の半径方向あ るいは切線方向に振動しやすいと考えられる。

Fig. 6.2.1-4.8 に副塔の固有振動数における最大頻度 をもたらす主軸方向を塔体傾斜方向と合わせて示す。 独立塔の N19 塔、N20 塔は中央主塔に対して外に開 く方向に主軸を持ち、回廊が直線上に連結している N30 塔、N31 塔、N33 塔、N34 塔に関しては、回廊 が連結している軸の直角方向に主軸を持つ。さらに、 回廊が直角に連結している N32 塔、N45 塔に関して は東西南北軸に対して 45° 振れた方向に主軸をもつ 特徴を示した。また塔体傾斜方向と主軸方向にはあ る程度の相関関係が認められる。

4.3 中央主塔の振動特性

地盤連成系の卓越振動数⁴推定においては、不規 則振動論に基づいたアンサンブル平均によりパワー スペクトルを評価した。全ての微動データに対しサ ンプル長T=20.48 秒、サンプル数N=100を用いた。

「たて系列ケース (case 5)」より、中央主塔頂部 (Fig. 6.2.1-4.9)、ギャラリー部 (Fig. 6.2.1-4.10)、南西側副 塔 N5 頂部 (Figs. 6.2.1-4.11、-4.12)、中央副塔 N5 基 部 (Fig. 6.2.1-4.13)、中央主塔基壇部 (Fig. 6.2.1-4.14) でのパワースペクトルが求められた。ここで Fig. 6.2.1-4.12 は副塔頂部の低周波部分の振動数を確認す 45-degree angles with the north, south, east, and west axes. There is a certain degree of correlation between the inclination direction of the tower structure and the principal directions of the towers.

4.3 Vibration Characteristics of the Central Tower

To estimate soil-coupled predominant frequencies,⁴ we assessed the ensemble average power spectrum based on the theory of random vibrations. A sample length of T = 20.48 seconds and a number of samples N = 100 was applied to all micro-tremor data.

From the "vertical sequence case (case 5)," we obtained power spectrum densities at the top of the central tower (Fig. 6.2.1-4.9), the gallery of the central tower (Fig. 6.2.1-4.10), the top of the N5 sub tower on the southwest side (Figs. 6.2.1-4.11, -4.12), the bottom of the N5 central sub tower (Fig. 6.2.1-4.13), and the bottom of the central tower (Fig. 6.2.1-4.14). In Fig. 6.2.1-4.12 we used a 20 Hz low-pass filter to confirm the frequencies of the low-frequency range at the top of the sub tower. The horizontal NS component at the top of the tower clearly indicated a first frequency of 2.8 Hz and a second frequency of 4.9 Hz; the EW component also showed a first frequency of 2.8 Hz and a second frequency of 5.0 Hz. The horizontal component in the gallery was dominated by the first frequency observed at the top of the central tower for both the NS and EW components. In the southwest sub tower, the lowest predominant frequency was equal to the first frequency of the central tower. Gathering from the above, we found the first frequency of the entire structure of the central tower to be 2.8 Hz for both NS and EW.

The predominant frequency 6.0 Hz was also measured at the southwest sub tower for both the NS and EW components. We estimate this to be the predominant frequency of the sub tower portion above the gallery. Additionally, the predominant frequency of the vertical component ranged from 5 Hz to 20 Hz. Although no common predominant frequencies could be ascertained, we can assume an overall predominant frequency of about 6 Hz, judging from the fact that a frequency of about 6 Hz observed in the gallery was also confirmed at the top of the central tower and at the southwest sub tower.

From the "central tower measurement case (cases 3 and 4)," we obtained the average motion at the platform base shown in Fig. 6.2.1-4.15 and the transfer function at the top of the tower to the platform. We estimated that the base-fixed NS component had a first frequency of 3.1 Hz and a second frequency of 5.2 Hz; and that the base-specific fixed EW component had a first frequency of 3.0 Hz and a second frequency of 5.3 Hz.

From the "gallery measurement case (case 1)," we obtained the power spectrum densities shown in Fig. 6.2.1-4.16. The vibration characteristics at each of the four points at the gallery level (NE, SE, SW, NW) were basically the same throughout the low-frequency range, and the NS and EW components of the central tower both clearly showed a first frequency of 2.9 Hz and a second frequency of 4.8Hz. At the high-frequency range, the peak was between 25 Hz and 40 Hz, but this is considered to be peculiar to the rock on which the seismograph was placed. るために 20Hz のローパスフィルターを後処理で用 いている。頂部水平 NS 成分には主塔の1次振動数 2.8Hz、および2次振動数 4.9Hz が、EW 成分には1 次振動数 2.8Hz および2次振動数 5.0Hz が顕著に見 られた。ギャラリー部分での水平成分は、NS、EW 成分ともに頂部で見られた主塔の1次振動数で卓越 する。南西側副塔において、もっとも低い卓越振動 数は主塔の1次振動数であり、主塔の構造物全体の 1次振動数が NS、EW 共に 2.8Hz であることがわかっ た。

南西側副塔にはNS、EW 共に固有の卓越振動数 6.0Hz が見られ、ギャラリーから上部の副塔部分の卓 越振動数であると推定される。また、上下成分の卓 越振動数は5~20Hzの間に分布しており、共通の卓 越振動数は判然としないが、ギャラリー部分に見ら れる 6Hz 程度の卓越が、主塔頂部および南西側副塔 においても認められることから、全体としての卓越 振動数は 6Hz 程度と考えられる。

「主塔測定ケース(case 3、4)」より、Fig. 6.2.1-4.15 に示す基壇基礎の平均的な運動とそれに対する頂部 の伝達関数が求められた。NS 成分の基礎固定 1 次振 動数が 3.1Hz、および 2 次振動数が 5.2Hz、EW 成分 の基礎固定 1 次振動数が 3.0Hz、および 2 次振動数が 5.3Hz であることが推定された。

「ギャラリー測定ケース (case 1)」より、Fig. 6.2.1-4.16 に示すパワースペクトルが求められた。 ギャラリーレベル各点 (NE、SE、SW、NW) での振 動特性は低振動数域でほぼ同様であり、NS、EW 成 分共に主塔の1次振動数 2.9Hz、および2次振動数 4.8Hz が顕著に見られた。また、高振動数域では25 ~40Hz にピークがあるがこれは計測器を設置した石 固有のものと考えられる。

「中央副塔ケース(case 2)」より、Fig. 6.2.1-4.17 に 示すパワースペクトルが求められた。各副塔のもっ とも低い卓越振動数は主塔の1次振動数であること から、各副塔は主塔と一体になって振動しているこ とが確認された。各副塔には主塔の固有振動数と異 なる卓越振動数が見られ、N7 塔は切線方向で7.8Hz、 半径方向で6.8Hz、N9 塔は切線方向で7.9Hz、半径 方向で6.8Hz、N3 は切線方向で9.7Hz、半径方向で 9.0Hz であり、ギャラリーから上部の副塔部分の卓越 振動数であると推定される。

「主塔測定ケース (case 3、4)」および「中央副塔ケース (case 2)」より、中央主塔と中央副塔の減衰定数 $5 \times RD$ 法により評価した。卓越振動数を中心とする バンドパスフィルターを適用し、1 次固有周期の約 10 倍を超えるサンプル長 T = 5 秒、重ねあわせ回数 を N = 5000 として、連続的に極大値からの波形を重 ね合わせた。Fig. 6.2.1-4.18 に RD 法による自由振動

From the "central sub tower case (case 2)," we obtained the power spectrum densities shown in Fig. 6.2.1-4.17. Since the first predominant frequency of each sub tower was equal to the first frequency of the central tower, we were able to confirm that each of the sub towers vibrates in unison with the central tower. In the sub towers, we observed predominant frequencies that differ from the natural frequency of the central tower. The N7 tower measured frequencies of 7.8 Hz in the tangential direction and 6.8 Hz in the radial direction; the N9 tower, 7.9 Hz in the tangential direction and 6.8 Hz in the radial direction; and the N3 tower, 9.7 Hz in the tangential direction and 9.0 Hz in the radial direction. We assume these to be the predominant frequencies of the sub towers above the gallery.

From the "central tower measurement case (cases 3 and 4)" and the "central sub tower case (case 2)," we evaluated the damping ratio⁵ of the central tower and central sub towers using the RD method. We applied a band pass filter mainly to the predominant frequency, and continuously superimposed the waveforms starting from the local maxima, where sample length T = 5 seconds, exceeding the first natural cycle by more than ten-fold, and the number of superimposition N = 5000. Fig. 6.2.1-4.18 shows waveforms corresponding to free vibrations using the RD method. The first horizontal damping ratio of the central tower was 2.2%, and that of the central sub towers was $1.1 \sim 3.4\%$. Tab. 6.2.1-4.1 shows the first predominant frequencies and damping ratios of the central sub towers.

4.4 Vibration Characteristics of the Sub Towers

Figs. 6.2.1-4.19 to -4.26 show power spectrum densities at the top of each tower, and Tab. 6.2.1-4.1 shows the estimated first predominant frequencies in relation to height. The first predominant frequencies of the horizontal component ranged from 3.5 Hz to 5.5 Hz, and the first predominant frequencies of the vertical component ranged from 9 Hz to 15 Hz. However, the first predominant frequencies of the N32 tower, which was restored by the French, were rather low, with 2.8 Hz for the NS component, 3.0 Hz for the EW component, and 7.5 Hz for the vertical component, clearly showing that the vibration characteristics of the N32 tower are different from other towers. When categorized according to gallery connection style, the frequencies of both the NS and EW components of independent towers N19 and N20 were 3.7 Hz. Combined with a clear spectral peak, these towers have stable vibration characteristics. In regard to the N30, N31, N33, and N34 towers whose galleries are connected in a linear fashion, we found that they share a common characteristic - that is, their first predominant frequencies tend to be low in the direction perpendicular to the connecting direction of the gallery. The N32 and N45 towers, whose galleries are connected at right angles, have complex vibration characteristics displaying multiple peaks in the lowfrequency range, unlike the other towers. The power spectrum densities of each tower appear to lack any pattern and seemingly reflect the Bayon monument's complex structural properties, but we were able to discover certain common traits by analyzing them according to the attachment direction and height of the gallery.

相当の波形を示す。中央主塔の水平1次の減衰定数 は2.2%、中央副塔の水平1次の減衰定数は1.1~3.4% であった。Tab. 6.2.1-4.1 に各中央副塔の1次卓越振 動数および減衰定数を示す。

4.4 副塔の振動特性

Figs. 6.2.1-4.19 ~ -4.26 に各塔頂部のパワースペク トルを示し、Tab. 6.2.1-4.1 に推定した1次卓越振動 数を高さと共に示す。水平成分の1次卓越振動数は 3.5~5.5Hzに分布し、上下成分の1次卓越振動数は 9~15Hzに分布した。ただしフランスによる修復が 行われた N32 の1 次卓越振動数は NS 成分で 2.8Hz、 EW 成分で 3.0Hz、上下成分で 7.5Hz と低めの値とな り、他の塔と異なる振動特性を有していることが明 らかになった。さらに、回廊の接続方向により分類 すると、独立塔のN19塔、N20塔はNS成分、EW 成分共に 3.7Hz となり、スペクトルのピークも明瞭 であることから安定した振動特性を有している。ま た回廊が直線上に連結しているN30塔、N31塔、 N33 塔、N34 塔に関しては、回廊が接続している方 向と直角方向の1次卓越振動数が低めとなる共通の 特徴が得られた。さらに、回廊が直角に接続してい る N32 塔、N45 塔に関しては、他の塔に比べ低振動 数域に複数のピークが存在し、複雑な振動特性を有 している。各塔のパワースペクトルは、一見すると バラバラでありバイヨン遺構の複雑な構造特性を反 映しているが、回廊の付属方向や高さによって分類 することにより、一定の共通特性を見出すことがで きた。

4.5 プラサート・スープラの振動特性

プラサート・スープラ塔 12 基のうち解析的な検討 モデルを作成するために N3 塔および N4 塔の微動測 定を実施した。

N3 塔の頂部のパワースペクトルを Fig. 6.2.1-4.27 に示す。パワースペクトルより、上下成分の1次卓 越振動数が9.0Hz、NS 成分の1次卓越振動数が2.2Hz、 2次卓越真度数が6.0Hz、EW 成分の1次卓越振動数 が2.7Hz、2次卓越振動数が7.2Hz であることが分かっ た。N4 塔の頂部のパワースペクトルを Fig. 6.2.1-4.28 に示す。上下成分の1次振動数が9.0Hz、NS 成分の 1次、2次卓越振動数がそれぞれ3.3Hz、6.7Hz、EW 成分の1次卓越振動数が4.2Hz であることがわかっ た。以上より、N3 塔、N4 塔ともに、EW 成分1次 がNS 成分1次よりも20% ~ 30% 高い振動数となっ ており、EW 方向が壁の長い方向であることを反映 している。フランスによる修復がなされたN3 塔の 卓越振動数が明瞭に見られ、修復により一体性が向 上し、素直な振動特性を示した可能性がある。ただし、

4.5 Vibration Characteristics of the Prasat Suor Prat Towers

Of the twelve Prasat Suor Prat towers, we conducted microtremor measurements of the N3 and N4 towers to create an analytical study model.

Fig. 6.2.1-4.27 shows power spectrum densities at the top of the N3 tower. Based on this data, the first predominant frequency of the vertical component was 9.0 Hz, the first predominant frequency of the NS component 2.2 Hz, the second predominant frequency 6.0 Hz, the first predominant frequency of the EW component 2.7 Hz, and the second predominant frequency 7.2 Hz. Fig. 6.2.1-4.28 shows power spectrum densities at the top of the N4 tower. The first frequency of the vertical component was 9.0 Hz, the first and second predominant frequencies of the NS component were 3.3 Hz and 6.7 Hz, respectively, and the first predominant frequency of the EW component was 4.2 Hz. This showed that the first predominant frequencies of the EW component were $20 \sim 30\%$ higher than the first predominant frequencies of the NS component for both the N3 and N4 towers, and that the EW direction is the direction of the long side of the wall. The predominant frequency of the N3 tower, which was restored by the French is clearly seen; it is possible that the restoration improved the cohesion of the tower to vibrate in a simple and separated mode. The south side of the top of the N4 tower is somewhat collapsed, and this could have influenced the tower's vibration characteristics. For both components, the predominant frequencies of the N4 tower were higher than the N3 tower. When creating a model, the structural differences of their walls, the effect of the missing mass at the top of the tower, and the completion of the entrance would need to be examined comprehensively.

5. Linear Eigenvalue Analysis

We created FEM models of the Bayon Temple central tower, independent sub tower (N19), and Prasat Suor Prat tower (N4), and estimated their equivalent Young's modulus by matching their natural frequencies with the base-fixed predominant frequencies obtained from micro-tremor measurements. Basefixed predominant frequencies were assessed using transfer functions. Fig. 6.2.1-4.15 shows the transfer functions of the central tower, Fig. 6.2.1-5.1 the transfer functions of the sub tower (N19), and Fig. 6.2.1-5.2 the transfer functions of the Prasat Suor Prat tower (N4). The base-fixed first and second frequencies of the central tower were 3.1 Hz and 5.2 Hz, respectively. For the independent sub tower (N19), they were 4.2 Hz and 10.1 Hz, respectively, and for the Prasat Suor Prat (N4) tower, they were 3.8 Hz and 4.7 Hz, respectively. The predominant frequencies of the N4 tower were unclear, so we referred to its coherence for the estimation of its base-fixed frequencies.

We determined the model shape based on existing diagrams and photos, established Poisson's ratio and mass density in reference to reference-1, and obtained equivalent Young's modulus by FEM eigenvalue analysis so that it corresponds to the first frequency of the horizontal component. For the FEM model, we utilized a hexahedron element having three free angles per nodal point. The equivalent Young's modulus of model A without bridges shown in Fig. 6.2.1-5.3 became 2.2×10^5 N4 塔は頂部南側が多少崩れており、それが振動特性 に影響を及ぼした可能性もある。いずれの成分につ いても、N3 塔に比べて N4 塔の卓越振動数が高めで あり、モデル化にあたっては壁の構成の差異に加え て、頂部欠損部の質量の効果、入り口部分の完全さ も含めて検討する必要があろう。

5. 線形固有値解析

バイヨン寺院中央主塔、独立副塔(N19)、プラ サート・スープラ(N4)塔のFEMモデルを作成し、 その固有振動数と常時微動測定から得られた基礎固 定系の卓越振動数を一致させることにより、等価な ヤング係数を推定した。基礎固定系の卓越振動数は 伝達関数より評価した。Fig. 6.2.1-4.15に主塔の伝達 関数を、Fig. 6.2.1-5.1に副塔(N19)の伝達関数を、 Fig. 6.2.1-5.2にプラサート・スープラ(N4)塔の伝 達関数を示す。主塔の基礎固定1次、2次振動数は それぞれ3.1Hz、5.2Hz、独立副塔(N19)の基礎固 定1次、2次振動数はそれぞれ4.2Hz、10.1Hz、プラサー ト・スープラ(N4)塔の基礎固定1次、2次振動数 はそれぞれ3.8Hz、4.7Hzであった。N4塔の卓越振 動数は不明瞭であり、基礎固定時振動数の推定には コヒーレンスを参考とした。

既往の図面及び写真を基にモデル形状を決定し、 参考文献1を参照してポアソン比と質量密度を決定 し、水平成分1次振動数が合致するように FEM 固有 値解析により等価なヤング係数を求めた。FEM モデ ルには1節点あたり3自由度を有する六面体要素を 用いた。Fig. 6.2.1-5.3 に示すブリッジ部を考慮しな いモデルAの等価なヤング係数は、 2.2×10^{5} tf/m² と なった。ただし、水平2次振動数や上下の卓越振動 数などを説明することができなかった。そこで、崩 壊した石造のブリッジの多くが RC 梁で補強されて いることを考慮して、Fig. 6.2.1-5.4 に示すブリッジ 部を考慮したモデルBを検討した。その結果、等 価なヤング係数を 1.1×10^5 tf/m² とすることにより、 Tab. 6.2.1-5.1 に示すように水平1次振動数だけでな く、高次振動数をも一致させることができた。この ように、バイヨン寺院主塔の振動特性にブリッジの 補強が大きな影響を与えていることが明らかになっ た。Fig. 6.2.1-5.5 に示す副塔(N19) モデルおよび Fig. 6.2.1-39 に示すプラサート・スープラ (N4) 塔モ デルも同様に、等価なヤング係数をそれぞれ 1.2× 10⁵ tf/m² および 1.2 × 10⁵ tf/m² とすることにより、水 平2次振動数までを一致させることができた。この 等価弾性定数は砂岩のヤング係数の 1/15 程度であっ た。ハギア・ソフィア大聖堂等の歴史的組積造建造 物における既往研究例(参考文献 2) ではコンクリー トヤング率の 1/8 ~ 1/3 になるとされており、砂岩の ヤング率とコンクリートのヤング率がほぼ同程度で

tf/m². However, this did not explain the horizontal second frequencies and vertical predominant frequencies. Therefore, we created model B with bridges as shown in Fig. 6.2.1-5.4, taking into consideration the fact that many of the stone bridges that had collapsed were reinforced with RC beams. As a result, the equivalent Young's modulus became 1.1×10^5 tf/m², and we were able to obtain a value that matches not only the horizontal first frequencies but higher frequencies as well, as shown in Table 6.2.1-5.1. In this way, we found that reinforcements of the bridges have a large effect on the vibration characteristics of the Bayon Temple central tower. Similarly, for the sub tower (N19) model shown in Fig. 6.2.1-5.5 and the Prasat Suor Prat (N4) tower model shown in Fig. 6.2.1-5.6, we were also able to obtain an equivalent Young's modulus of 1.2 \times 10⁵ tf/m² and 1.2×10^5 tf/m², respectively, to match the horizontal second frequencies. This equivalent elasticity constant was approximately 1/15 of the Young's modulus for sandstone. According to past studies (reference-2) on historical masonry construction buildings such as the Hagia Sophia Cathedral, such buildings are 1/8 to 1/3 the Young's modulus of concrete. Since Young's modulus of sandstone and concrete are almost the same, the value of 1/15 is rather small even if it is the result of long-term deterioration. This is therefore an issue that must be further examined in the future.

6. Ground Structure of the Royal Plaza

To elucidate the causes of collapse of the Angkor monuments, it is necessary to gain a close estimation of the surrounding ground structure. However, no information exists on the surface S-wave velocity structure, except for the N value and soil layer classification obtained from a boring survey. Therefore, for this study, we created a model of the ground down to the deep layer by carrying out a micro-tremor array investigation at the Royal Plaza, located to the north of Bayon Temple and adjacent to the west of the Prasat Suor Prat towers, and conducting a simultaneous simulation using H/V spectrum and Rayleigh wave velocity. We applied transfer function [Hv] to assess the H/V spectrum, and used the NS component as the horizontal component. For the SPAC method, we extracted 8192 points (81.92 seconds) from the stationary portion to estimate the dispersion curve. In the H/V spectrum shown in Fig. 6.2.1-6.1, a distinct peak resulted around the 2.0 Hz frequency, and a clear trough appeared around the 3.0 Hz to 4.0 Hz and 14 Hz frequencies. In the dispersion curve evaluated according to the SPAC method, the results of frequencies in the range from 10 Hz to 18 Hz at a radius of 6, 10 and 20 meters, formed a continuous, smooth curve, indicating that a valid dispersion curve was obtained.

As shown in Tab. 6.2.1-6.1, the ground layers of the Angkor Wat monuments are composed of four main layers. We estimated the S-wave velocity from the N value obtained in the survey of Prasat Suor Prat which stand adjacent to the Royal Plaza (reference- 3), obtained P-wave velocity from the experimental value of Poisson's ratio and the experimental value of density, and created an initial ground structure model shown in Tab. 6.2.1-6.2. For our calculations of the fundamental mode Rayleigh wave, the first mode of the dispersion curve, あることを考慮すると、1/15という値は経年損傷と して考えても小さめである。したがって、この件に 関しては今後の検討課題とする。

6. 王宮前広場の地盤構造

アンコール遺跡群の崩壊要因を把握する上で周辺 地盤構造の推定は重要であるが、ボーリング調査に よるN値および地層種別を除いて、表層S波速度 構造に関する情報はない。本研究では、バイヨン寺 院北側に位置し、プラサート・スープラ西側に隣接 する王宮前広場において微動アレー観測を実施し、 H/V スペクトルとレイリー波位相速度を用いた同時 シミュレーションにより、深部層までの地盤モデル を作成する。H/V スペクトルの評価には伝達関数評 価 [Hv] を適用し、水平成分に NS 成分を用いた。ま た、SPAC 法は定常的な部分より 8192 ポイント (81.92 秒)を抜き出して分散曲線を推定した。Fig. 6.2.1-6.1 に示す H/V スペクトルには、明確なピークが 2.0 Hz に、明瞭なトラフが 3.0 ~ 4.0Hz および 14Hz 周辺に それぞれ現れる結果となった。また、SPAC 法により 評価した分散曲線には振動数 10 ~ 18Hz において半 径 6m、10m、20m に対する結果が連続した滑らかな 曲線を描き、有効な分散曲線が得られたと考えられ る。

Tab. 6.2.1-6.1 に示すように、アンコール・ワット 遺跡群の地層は大別して4層から構成されている。 王宮前広場に隣接した、プラサート・スープラにお ける調査結果のN値よりS波速度を推定し(参考文 献3)、ポアソン比の実験値と密度の実験値からP波 速度を求めて、Tab. 6.2.1-6.2 に示す初期地盤モデル を作成した。レイリー波の基本モードと1次モード の分散曲線ならびに H/V 比の計算には Luco and Apsel (参考文献 4) の一般化 TR 法を用いた。Fig. 6.2.1-6.1 に示す初期モデルのレイリー波基本モードのH/V比 はピークおよびトラフを示さず、位相速度分散曲線 も SPAC 法より算出した分散曲線を満足しない結果 となった。次に、レイリー波基本モードにより分散 曲線を説明するために、ポアソン比を一定として地 表より試行錯誤的に Vs を変化させ Tab. 6.2.1-6.3 に 示すモデル2を得た。しかし、レイリー波基本モー ドの H/V 比は H/V スペクトルのピークおよびトラフ を表現することができなかった(Fig. 6.2.1-6.2)。ま た、モデル2の第2層のVs=400m/sおよび3層の Vs=531m/sは、地盤調査報告のN値の傾向とは異 なっており、以上の点からモデル2は不適当である と考えられる。そこで、第3層の Vs を低下させたモ デル3を設定し(Tab. 6.2.1-6.4)、レイリー波1次モー ドによる分散曲線の説明を試みた(Fig. 6.2.1-6.3)。 モデル3のレイリー波1次モードの位相速度は分散 and the H/V ratio, we used the generalized T-R technique of Luco and Apsel (reference- 4). The H/V ratio of the fundamental mode Rayleigh wave in the initial model shown in Fig. 6.2.1-6.1 does not indicate any peak or trough, and the phase velocity dispersion curve does not satisfy the dispersion curve calculated by the SPAC method. Next, in order to explain the dispersion curve according to the fundamental mode Rayleigh wave, we changed the Vs from the ground surface on a trial and error basis while maintaining Poisson's ratio and obtained model 2 shown in Tab. 6.2.1-6.3. However, the H/V ratio of the fundamental mode Rayleigh wave could not express the peak and trough of an H/V spectrum (Fig. 6.2.1-6.2). Additionally, the Vs = 400 m/s of the second layer and Vs = 531 m/s of the third layer in model 2 differ from the trend of the N value in the ground survey report. Gathering from these points, model 2 is deemed unsuitable. We therefore established model 3 with a lower Vs in the third layer (Tab. 6.2.1-6.4), and attempted to explain the dispersion curve by the first mode Rayleigh wave (Fig. 6.2.1-6.3). The wave velocity of the first mode Rayleigh wave in model 3 generally expressed a dispersion curve, and simultaneously indicated a tough near the 14 Hz frequency and a peak near the 6 Hz frequency seen in an H/V spectrum. Furthermore, taking into account the rocky ground layer of the Bayon Temple shown in Tab. 6.2.1-6.1, we established model 4 as shown in Tab. 6.2.1-6.5. The deep layer affected low-frequency side of the dispersion curve of the first mode Rayleigh wave and the H/V ratio, and the model could explain the trough in the 3 Hz to 4 Hz range in the H/V spectrum (Fig. 6.2.1-6.4).

7. Conclusion

With a view to formulating a restoration plan for the Bayon Temple, we conducted micro-tremor measurements at the Bayon central tower and sub towers and Prasat Suor Prat towers, and estimated the vibration characteristics of each of the monuments. We also conducted a micro-tremor array investigation at the Royal Plaza to estimate the ground structure.

At Bayon Temple, micro-tremor intensities during the daytime were ten times greater than during the nighttime. This difference can be attributed to the averagely high micro-tremor intensity during the daytime caused by external vibrations such as of people and traffic. During the measurement period, there were no winds stronger than 10 m/s, so we could not measure micro-tremors during strong winds. However, there were slight winds of about 5 m/s, and we were able to confirm a two- to five-fold increase in vibration intensity. Additionally, the principal micro-tremor direction of the Bayon central tower and sub towers was found roughly corresponding to the inclination direction of the entire tower structure. The specific causes, however, must be examined in the future.

The basic horizontal frequency of the Bayon central tower is slightly below 3 Hz, and the height from the surface of the platform is about 30 meters. This means that the frequency of the central tower is higher than the predominant frequency of an average eight-story building, which may be a little lower than 1.5 Hz. The high frequency can be attributed to the facts that the Bayon central tower is made of sandstone, the ratio 曲線を概ね表現し、同時に H/V スペクトルに見られ る 14Hz 付近のトラフと 6Hz 付近のピークを示した。 さらに、Tab. 6.2.1-6.1 に示すバイヨン寺院内での岩 盤地層を考慮して、Tab. 6.2.1-6.5 に示すモデル 4 を 設定した。レイリー波 1 次モードの分散曲線および H/V 比の低振動数側に深部層の影響が現れ、H/V ス ペクトルの 3 ~ 4Hz 付近のトラフをも説明できる結 果が得られた (Fig. 6.2.1-6.4)。

7. まとめ

バイヨン寺院の修復計画立案を念頭において、バ イヨン寺院主塔および副塔、プラサート・スープラ で微動測定を実施し、各遺構の振動特性を推定した。 また王宮前広場で微動アレー測定を行い、地盤構造 の推定をおこなった。

バイヨン寺院における振動レベルは夜間に比べて 昼間で10倍以上大きい値を示した。昼間は人や交通 等の外部振動により平均的に振動レベルが高いため、 このような差が生じるものと推測できる。測定期間 中に10m/sを超える強風は発生しなかったため、強 風時の振動を測定することが出来なかった。しかし ながら、5m/s程度の微風であれ、振動レベルが2~ 5倍程度まで増大することが確認できた。また、バ イヨン寺院主塔および副塔の振動主軸方向はおおむ ね傾斜方向と一致する結果となったが、その具体的 な理由の説明は今後の検討課題である。

バイヨン寺院主塔の水平基本振動数は 3Hz 弱であ り、基壇面からの高さが 30m 程度であることを考え ると、8 階建て程度のビルの卓越振動数 1.5Hz 弱に比 べて高い振動数である。バイヨン寺院主塔は砂岩で 構築され、スパンに対する壁厚の比も大きく、周辺 を副塔で固められた剛な構造物であるため、高めの 振動数を示したと考えられる。またバイヨン寺院副 塔の水平基本振動数の多くは4Hz 前後にあり、同様 な高さのプラサート・スープラに比べて平均的に3 割程度高めである。その原因として、ラテライトと 砂岩の材質の違い、アスペクト比や断面形状による 構造特性の違い、ならびに立地条件の違いが挙げら れる。プラサート・スープラの水平成分基本振動数 は 3Hz 前後であり、基壇上面からの高さが 15m 前後 であることから、通常の4階建て程度のビルと同様 な卓越振動数を示している。

線形弾性固有値解析から、構造全体の等価なヤン グ率を石材物性の 1/15 程度とすることで平均的な固 有振動数が評価された。今後この等価な物性値を組 積構造物の解析に用いる妥当性を検討する予定であ るが、その適用性を解明できれば平均的な構造物の 振動特性評価に利用することができると考えられる。 王宮前広場で実施した微動アレー測定結果をレイ of the wall thickness to the wall span is large, and it is essentially a very stiff structure surrounded by sub towers. The basic horizontal frequency of the majority of the Bayon sub towers is around 4 Hz, and it is approximately 30% higher on the average compared to the Prasat Suor Prat towers which are of similar heights. Possible reasons for this are the differences in the qualities of laterite and sandstone, the differences in structural properties associated with the aspect ratio and crosssectional forms, and the differences in geographical conditions. The basic horizontal frequency of the Prasat Suor Prat towers is around 3 Hz. Because it is about 15 meters from the surface of the platform, their predominant frequency is similar to a regular four-story building.

Comparing the measured natural frequencies with their analytic counterparts, we assessed the equivalent Young's modulus of the entire structure to about 1/15 of the physical property of stone materials. We plan to examine the validity of using this equivalent physical property ratio to assess the vibration characteristics of standard masonry structures in the future

We were able to estimate ground structures corresponding to the N value trend by simulating the results of the micro-tremor array investigation conducted at the Royal Plaza with a higher first mode Rayleigh wave. The reasons for the predominance of the first mode must be pursued in the future, but these examination results can serve as valuable reference material, as there is extremely little information on the ground structure of the Royal Plaza.

6.2.2 Measurement Survey in 2004

MAEDA Toshiro, SUGIURA Yoshikazu, HIRAI Tomonari

1. Introduction

In order to examine the effects of Bayon Temple's structural mechanics on the process of its collapse, the monument's deformative movement must be empirically examined. Past studies have attributed the collapse of the monument to climatic factors such as weathering and temperature changes, biological factors associated to plants and animals, and ground-related factors caused by uneven ground subsidence. In particular, they suggested the vibrations caused by strong winds of nearly 20 m/s observed during the rainy season as the potential cause of its collapse.^{6, 7}

Based on the results of the micro-tremor measurement survey conducted at Bayon Temple and the Royal Plaza in September 2004, this paper examines the vibration characteristics of the central tower of Bayon, 23 sub towers within the Bayon complex, and seven Prasat Suor Prat towers in the Royal Plaza, and estimates an equivalent Young's modulus through a comparison of eigenvalue analysis results. A part of the results include those of the measurement survey we conducted in August 2003.⁸

2. Measurement Plan

We established the following measurement cases in order to estimate the vibration characteristics of Bayon Temple and the リー波高次1次モードでシミュレートすることによ り、N値の傾向に矛盾しない地層構造を推定するこ とができた。1次モードが卓越した理由の探求は今 後の課題であるが、地層構造に関する資料のきわめ て少ない同地域においては、ここでの検討結果が有 用な資料となりうる。

6.2.2 2004 年度調査

前田寿朗、杉浦良和、平井智也

1. はじめに

バイヨン寺院の崩壊過程における構造(力学)的 影響を検討するには、遺構の変形挙動の実証的な解 明が不可欠である。既往の研究により、崩壊要因と して風雨や温度変化による気候的要因、動植物によ る生物的要因、不等沈下による地盤的要因などが挙 げられている。特に、雨期には 20m/s 弱の強風が観 測されており、これにより励起された常時振動によ る遺構崩壊の可能性が示唆されている^{6.7}。

ここでは2004年9月にバイヨン寺院および王宮前 広場内にて実施した微動測定結果に基づいて、バイ ヨン寺院中央主塔、バイヨン寺院敷地内の副塔23塔、 ならびに王宮前広場内の遺構プラサート・スープラ 7塔の振動特性を検討、固有値解析結果との比較に より等価なヤング係数を推定した。なお、結果の一 部には2003年8月の測定結果が含まれている⁸。

2. 測定計画

バイヨン寺院およびプラサート・スープラの振動 特性を推定するために、以下の測定ケースを設定し た。

2.1 中央主塔の測定ケース

Fig. 6.2.2-2.1 に示す主塔構造物は、中央主塔およ び中央副塔が基部からギャラリーまで一体の構造と して立ち上がり、ギャラリー部分で主塔と中央副塔 に別れる複雑な構造を有する。主塔の高さは基部か ら 31m、副塔は 20m 程度である。主塔に関する測定 ケースとして、Fig. 6.2.2-2.1 に示す主塔頂部、ギャ ラリー、副塔頂部、副塔基部、主塔基部を NE 方向 を軸として同時測定する「主塔モード測定ケース」、 Fig. 6.2.2-2.2 に示す主塔頂部の微動と中央副塔頂部 の風向・風速を同時測定する「主塔長期測定ケース」 を設定した。振動レベル、風向・風速、各測定点の 卓越振動数を調べることにより中央主塔全体の振動 特性を把握する。 Prasat Suor Prat towers.

2.1 Measurement Case for the Central Tower

The main tower structure shown in Fig. 6.2.2-2.1 displays a complex structure. The central tower and central sub towers are connected from the base to the gallery to form a unified structure, but they separate into the main tower and central sub towers above the gallery. The main tower is 31 meters high, and the sub towers are approximately 20 meters high, measured from the base. For the measurement of the central tower, we established a "central tower mode measurement case" for the simultaneous measurement of the top of the central tower, gallery, top of the sub towers, the base of the sub towers, and the base of the central tower with the axis running in the NE direction as shown in Fig. 6.2.2-2.1, and a "central tower long-term measurement case" for the simultaneous measurement of the vibration at the top of the central tower and the wind speed and direction at the top of the central sub tower as shown in Fig. 6.2.2-2.2. Based on these cases we aimed to grasp the vibration characteristics of the entire central tower by examining microtremor intensities, wind speed and direction, and the predominant frequencies at each measurement point.

2.2 Measurement Cases for the Sub Towers

The sub towers shown in Fig. 6.2.2-2.3 stand almost completely axisymmetrically within the complex, so we conducted a measurement of the towers which stand in the northwest quarter in August 2003. Therefore, this measurement survey excluded those towers and the N18 sub tower, and targeted thirteen other measurable towers. We measured a point at the top of those sub towers and four points on the base simultaneously, and established these points as the "sub tower standard measurement case" as shown in Fig. 6.2.2-2.4. In order to assess the mode shape of the sub towers, we also established a "sub tower mode measurement case" (Fig. 6.2.2-2.5). In addition to measuring the three components at a point at the top and four points on the base of the N18 sub tower, it also measures a component at two points on the porch (H2, H3) and a point between the porch and top of the tower (H1). The measurement results are presented below in reference to the numbers assigned to each sub tower in the figure. We will examine microtremor intensities and predominant frequencies, and analyze the effect the presence or lack of a gallery or other attached structure has on vibration characteristics.

2.3 Measurement Cases for the Prasat Suor Prat Towers

As shown in Fig. 6.2.2-2.6, there are twelve Prasat Suor Prat towers. Seven towers were selected for the "Prasat Suor Prat standard measurement case" (Fig. 6.2.2-2.7), excluding the N3, N4, and N2 towers which we measured in 2003 and the N1 and S6 towers which are either collapsed or under restoration, where we measured a point at the top of the towers and four points in the platform foundation simultaneously. In order to assess the mode shape of the Prasat Suor Prat towers, we also established a "Prasat Suor Prat mode measurement case" (Fig. 6.2.2-2.8) as we did for the Bayon sub towers. The measurement results are presented below in reference to the numbers

2.2 副塔の測定ケース

Fig. 6.2.2-2.3 に示す副塔は敷地内にほぼ軸対称に配置されているので、2003 年 8 月に北西部 4 半分の塔の測定を行った。ここではそれらと N18 塔を除く測定可能な 13 塔を測定対象とした。それらの副塔頂部 1 点と基部 4 点の同時測定を Fig. 6.2.2-2.4 に示す「副塔標準測定ケース」として設定した。また、副塔のモード形状を把握するために、N18 塔において頂部 1 測点・基部 4 測点の各 3 成分に加え、ポーチ部に 2 測点(H2,H3)、ポーチ部と頂部の間の 1 測点(H1)において 1 成分を測定する「副塔モード測定ケース」(Fig. 6.2.2-5)を設定した。以下においては図中の副塔番号で測定結果を参照するものとし、振動レベルおよび卓越振動数を整理するとともに、回廊等の付属建築物の有無が振動特性に及ぼす影響を把握する。

2.3 プラサート・スープラの測定ケース

Fig. 6.2.2-2.6 のようにプラサート・スープラ塔 は 12 基あるが、そのうち 2003 年に測定済みの N3、 N4、N2 塔と崩壊または改修中である N1、S6 塔を除 く 7 基を対象に、塔頂部 1 点と基壇基礎 4 点の同時 測定を「プラサート・スープラ標準測定ケース」(Fig. 6.2.2-2.7)として設定した。また、プラサート・スー プラのモード形状を把握するため、バイヨン副塔と 同様の測定を「プラサート・スープラモード測定ケー ス」(Fig. 6.2.2-2.8)として設定した。以下において は図中の塔番号で測定結果を参照するものとし、振 動レベルおよび卓越振動数を整理するとともに、前 室等の付属建築物の有無が振動特性に及ぼす影響を 把握する。

3. 測定方法

測定には5台のポータブル地震計GPL-6A3P(株) アカシ製、水平・上下3成分加速度計、計測振動数 範囲 (0.1 ~ 70Hz)、Pl. 6.2.2-3.1) を使用した。主塔 および副塔の頂部及び中間部には、微動計内蔵セン サーと同等の外付けセンサー(JEP-6A1、V243SH、 Pl. 6.2.2-3.2) を使用した。ローパスフィルタを 30Hz に設定し、「主塔長期測定ケース」を除き、各30分 間の微動について GPS を用いた多点同時測定を行っ た。また、「主塔長期測定ケース」の風向・風速の 測定では小型軽量で風向・風速計が一体になった超 音波風速計 FT702(FT 社製、風向計計測範囲(0~ 360°)、風速計計測範囲(0~70m/s))を使用した(Pl. 6.2.2-3.3)。風向風速計の電源装置 PS4824 (Sun 社製、 Pl. 6.2.2-3.4) は、供給電源として AC100V と DC12V の両方使用可能であるが、今回は DC12V バッテリー から供給した。データロガとして使用した GPL には、

assigned to each tower in the figure. We will examine microtremor intensities and predominant frequencies, and analyze the effect the presence or lack of an antechamber or other attached structure has on vibration characteristics.

3. Measurement Method

We used five GPL-6A3P portable seismographs for our measurement (manufactured by Akashi Corporation; horizontal and vertical three-component accelerometer; frequency range $0.1 \sim 70$ Hz; Pl. 6.2.2-3.1). At the top and at the midsection of the central tower and sub towers, we applied an external sensor (JEP-6A1,V243SH; Pl. 6.2.2-3.2) equivalent to an internal seismographic sensor. We set the low-pass filter to 30 Hz, and excluding the "central tower long-term measurement case," we conducted a multi-point simultaneous measurement using GPS for each 30-minute micro-tremor. For the measurement of wind speed and direction in the "central tower long-term measurement case," we used the FT702 ultrasonic anemometer, a compact and lightweight anemometer which measures both wind speed and direction (manufactured by FT Technologies Ltd.; wind direction measurement range $0 \sim 360^{\circ}$; wind speed measurement range 0 ~ 70 m/s; Pl. 6.2.2-3.3). The PS4824 power unit for the anemometer (manufactured by Sun; Pl. 6.2.2-3.4) can run on both AC100V and DC12V power supplies, but we used a DC12V battery for this survey. In the GPL that we used as a data logger, we entered wind speed and direction data through the said power unit. Pls. 6.2.2-3.5 to 6.2.2-3.12 show the positions of the seismographs for each measurement case and an overview of the task; Tab. 6.2.2-3.1 shows the measurement specifications of each measurement case.

4. Measurement Result

4.1 Micro-Tremor Intensity

Fig. 6.2.2-4.1 shows micro-tremor time histories at the top of the Bayon central tower, Fig. 6.2.2-4.2 those at the top of a sub tower, and Fig. 6.2.2-4.3 those at the top of a Prasat Suor Prat tower. The average micro-tremor intensity at the time of measurement had a vertical component of about 0.03 gal and a horizontal component of about $0.1 \sim 0.15$ gal at the Bayon central tower, a vertical component of about $0.05 \sim 0.15$ gal and a horizontal component of about $0.1 \sim 0.25$ gal at the sub tower, and a vertical component of about $0.05 \approx 0.15$ gal and a horizontal component of about $0.05 \approx 0.15$ gal at the sub tower, and a vertical component of about $0.05 \approx 0.15$ gal at the sub tower, and a vertical component of about $0.05 \approx 0.15$ gal at the sub tower, and a vertical component of about $0.05 \approx 0.15$ gal at the sub tower, and a vertical component of about $0.05 \approx 0.15$ gal at the sub tower, and a vertical component of about $0.05 \approx 0.15$ gal at the sub tower, and a vertical component of about $0.05 \approx 0.15$ gal at the sub tower, and a vertical component of about $0.05 \approx 0.15$ gal at the sub tower, and a vertical component of about $0.05 \approx 0.15$ gal at the sub tower, and a vertical component of about $0.05 \approx 0.15$ gal and a horizontal component of about $0.05 \approx 0.15$ gal at the sub tower.

Fig. 6.2.2-4.4 shows changes in micro-tremor intensities and wind speed and direction measured continuously at the top of the central tower over a ten-day period from September 9 to 18 as half-hourly RMS values.⁹ No measurement was taken between 9:00 and 10:00 a.m. due to battery replacement. During the measurement period, the wind blew in the southerly to southwesterly direction, and the wind speed was $0 \sim 3$ m/s. Micro-tremor intensities ranged from $0.005 \sim 0.05$ gal, with a periodicity of high intensities during the daytime and low intensities during the nighttime. In regard to the horizontal component, we obtained a result indicating higher micro-tremor intensities in the NS component compared to the EW component. This can be attributed to the influence, albeit small, of the

同電源装置を介して風向・風速のデータを入力した。 Pls. 6.2.2-3.5 ~ -3.12 に各測定における微動計設置状 況および作業状況を示し、Tab. 6.2.2-3.1 に各測定ケー スの測定緒元を示す。

4. 測定結果

4.1 振動レベル

Fig. 6.2.2-4.1 にバイヨン寺院主塔の頂部、Fig. 6.2.2-4.2 に副塔の頂部、Fig. 6.2.2-4.3 にプラサート・スープラ頂部の加速度波形を示す。計測時の平均的な振動レベルはバイヨン寺院主塔の上下成分が0.03gal 程度、水平成分が0.1 ~ 0.15gal 程度、副塔の上下成分が0.05 ~ 0.15gal 程度、水平成分が0.1 ~ 0.25gal 程度、プラサート・スープラの上下成分が0.05gal 程度、水平成分が0.05 ~ 0.1gal 程度であった。

Fig. 6.2.2-4.4 に、9月9日から9月18日の10日間 において連続測定した中央主塔頂部の振動レベル及 び風向・風速の変化を30分毎のRMS[®]で示す。バッ テリー交換の為、9:00~10:00の間は測定していな い。測定期間中の風向は南~南西であり、風速は0 ~3m/sであった。また、微動レベルは0.005~0.05gal の間にあり、昼間の微動レベルは高く、夜間の微動 レベルは低いという周期性が確認できた。水平成分 においては、EW 成分より NS 成分の微動レベルの方 が高いという結果が得られた。このことに関しては、 風向が南~南西であることがわずかながらでも影響 しているのではないかと考えられる。

4.2 中央主塔の振動特性

「主塔モード測定ケース」より、水平成分におけ る頂部、頂部-ブリッジ中間部(H1)、ブリッジ部2 測点(H2、H3)、ギャラリー部でのパワースペクト ルが求められた(Fig. 6.2.2-4.5)。Fig. 6.2.2-4.5 より、 中央主塔は水平成分に関して2.8Hz、5.1Hz、7.8Hz に卓越振動数を有している。すべての測点で2.8Hz が卓越していることから、2.8Hz が主塔全体の1次卓 越振動数と推定され、5.1Hzが2次の卓越振動数と 推定できる。また、切線成分であるH3の卓越が認 められなかったため、ねじれ成分の確認はできなかっ た。

水平1次、2次の卓越振動数の前後0.5Hzのバンド パスフィルター波形より1次、2次の卓越振動数に おける主塔のモード形状を推定した(Fig. 6.2.2-4.6)。 この結果、1次卓越振動数2.8Hzでは、並進1次のモー ドを示し、2次卓越振動数5.1Hzでは並進2次のモー ドを示すこと確認された。

4.3 副塔の振動特性

「副塔標準測定ケース」より、副塔の地盤連成形卓

southerly to southwesterly direction of the wind.

4.2 Vibration Characteristics of the Central Tower

From the "central tower mode measurement case," we obtained power spectrum densities of the horizontal component at the top of the central tower, a point between the top of the tower and the bridge (H1), the two measurement points on the bridge (H2, H3), and the gallery (Fig. 6.2.2-4.5). Fig. 6.2.2-4.5 shows that the predominant frequencies of the horizontal component of the central tower are 2.8 Hz, 5.1 Hz, and 7.8 Hz. Since 2.8 Hz is predominant at all measurement points, we can assume that 2.8 Hz is the first frequency and that 5.1 Hz is the second frequency of the entire tower. Also, since we did not observe a predominance of the H3 tangential component, we did not confirm any torsion component.

We deduced the mode shape of the first and second frequencies of the central tower from the waveform band pass filtered between frequencies 0.5 Hz higher and lower than the first and second horizontal frequencies (Fig. 6.2.2-4.6). As a result, we confirmed a translational first mode for the 2.8 Hz first frequency and a translational second mode for the 5.1 Hz second frequency.

4.3 Vibration Characteristics of the Sub Towers

From the "sub tower standard measurement case," we obtained soil-coupled predominant frequencies,¹⁰ damping ratios,¹¹ and base-fixed natural frequencies of the sub towers.

1) Soil-Coupled Predominant Frequencies

To estimate soil-coupled predominant frequencies, we assessed the ensemble average power spectrum based on the theory of random vibrations. A sample length of T = 10.24 seconds and number of samples $N = 100 \sim 170$ was applied to all micro-tremor data.

Tab. 6.2.2-4.1 shows predominant frequencies obtained from the power spectrum densities of each sub tower. The first and second frequencies of the horizontal component ranged from 3 ~ 6 Hz and 6 ~ 11 Hz, respectively, and the first frequencies of the vertical component ranged from 9 ~ 20 Hz. However, the N32 tower, which was restored by the French, had vibration characteristics that differed from the other towers. Specifically, the horizontal component values were low on the average. The horizontal component of the first frequencies was 2.8 Hz for the NS component and 3.0 Hz for the EW component, and the horizontal component of the second frequencies was 6.5 Hz for the NS component and 7.8 Hz for the EW component.

Having obtained measurements for all Bayon sub towers including the 2003 measurement results, we then compared influence of their gallery connections. We classified the towers into four patterns according to their gallery connection styles. The N18, N19, and N20 towers are "independent towers" that have no connecting galleries. The N28, N32, N36, N39, N42, N45, and N48 towers are "towers with galleries connected at a 90° angle," in which the connecting galleries are perpendicular to each other. The N22, N29, N30, N31, and N37 towers are "towers with galleries connected in the NS direction," and the N13, N15, N25, N26, N27, N33, N34, and N35 tow-

越振動数¹⁰、減衰定数¹¹、基礎固定系固有振動数を求 めた。

1) 地盤連成系卓越振動数

地盤連成系の卓越振動数推定においては、不規則 振動論に基づいたアンサンブル平均によりパワース ペクトルを評価した。全ての微動データに対しサン プル長T=10.24秒、サンプル数N=100~170を用 いた。Tab. 6.2.2-4.1 に各塔のパワースペクトルより 求められた卓越振動数を示す。水平成分1次卓越振 動数は3~6Hz、2次卓越振動数は6~11Hz、上下 成分の1次卓越振動数は9~20Hzに分布した。た だしフランスによる修復が行われたN32塔の1次卓 越振動数は水平成分のNS成分で2.8Hz、EW成分で 3.0Hz、2次卓越振動数は水平NS成分で6.5Hz、EW 成分で7.8Hzと水平成分が平均的に低めの値となり、 他の塔と異なる振動特性を有している。2003年の測 定結果を加えてバイヨン寺院副塔全塔を測定したこ とにより、回廊連結方法による比較を行った。回廊 連結方法の分け方としては、回廊が連結していない 「独立塔」(N18、N19、N20)、連結した回廊と回廊 が垂直である「90°方向に回廊が連結した塔」(N28、 N32、N36、N39、N42、N45、N48)、「NS 方向に回 廊が連結した塔」(N22、N29、N30、N31、N37)、「EW 方向に連結した塔」(N13、N15、N25、N26、N27、 N33、N34、N35)の4つのパターンに分類し、水平 成分の卓越振動数に注目し比較を行い、Fig. 6.2.2-4.7 に水平NS、EW 成分の卓越振動数の比較を示した。 その結果、回廊連結のない「独立塔」の NS 及び EW 成分の卓越振動数は、ほぼ同一であった。「90°方向 に回廊が連結した塔」は、NS 成分と EW 成分の卓越 振動数の関係にばらつきがあり、一様な傾向を示さ なかった。「NS 方向に回廊が連結している塔」はNS 成分の卓越振動数が、「EW 方向に回廊が連結してい る塔」はEW成分の卓越振動数が他の成分より10% 前後高い値を示した。

2) 減衰定数

バイヨン副塔の減衰定数を、不規則振動論に基づ いた RD 法(Random Decrement Method)により推定 した(Tab. 6.2.2-4.2)。バイヨン副塔の傾向としては、 NS、EW 成分ともに1次の減衰定数は2~3%、2次 の減衰定数は1~3%に分布する。ほとんどの塔は1 次卓越振動数から求めた減衰定数よりも2次卓越振 動数から求めた減衰定数のほうが低い値を示す傾向 にあった。

3) 基礎固定系固有振動数

バイヨン副塔の基礎固定固系の固有振動数を伝達

ers are "towers with galleries connected in the EW direction." Focusing on the predominant frequencies of the horizontal component, we compared the predominant frequencies of the horizontal NS and EW components in Fig. 6.2.2-4.7. As a result, we found that the predominant frequencies of the NS and EW components of "independent towers" having no connecting galleries were basically the same. In "towers with galleries connected at a 90° angle," the relationship between the predominant frequencies of the NS and EW components was variable and failed to show any consistent trend. In "towers with galleries connected in the NS direction," the predominant frequencies of the NS component were 10% or so higher than the other components, and in "towers with galleries connected in the EW direction," the predominant frequencies of the EW were likewise 10% or so higher than the other components.

2) Damping Ratio

We estimated the damping ratio of the Bayon sub towers using the RD (random decrement) method based on the theory of random vibrations (Tab. 6.2.2-4.2). As a general trend of the Bayon sub towers, the damping ratio for both the first NS and EW components was $2 \sim 3\%$, and the damping ratio for the second NS and EW components was $1 \sim 3\%$. In the majority of the towers, the damping ratio obtained for the second frequencies tended to be lower than the damping ratio obtained for the first frequencies.

3) Base-Fixed Natural Frequencies

We obtained base-fixed natural frequencies of the Bayon sub towers by comparing transfer functions, phase, spectrum ratio, and coherence. Tab. 6.2.2-4.3 shows the natural frequencies obtained from the transfer functions of each tower. From this table, we see that in regard to first base-fixed natural frequencies, the UD component ranged from $19 \sim 22$ Hz and the NS and EW components both ranged from $4 \sim 6$ Hz, and in regard to the second base-fixed natural frequencies, the NS and EW components both ranged from $7 \sim 12$ Hz. However, the N32 tower, which was restored by the French, had vibration characteristics that differed from the other towers. As with the soilcoupled predominant frequencies, the first horizontal component values were low on the average. The first base-fixed natural frequency was 3.1 Hz for the NS component and 3.2 Hz for the EW component.

From the "sub tower mode measurement case," we obtained power spectrum densities at the top of the sub tower, a point between the top of the tower and the porch (H1), two measurement points on the porch (H2, H3), and the base of the sub tower from a measurement of the NS and EW components of the N18 tower (Figs. 6.2.2-4.8 and -4.9). As seen in Figs. 6.2.2-4.8 and -4.9, the first frequency of the NS component was 3.8 Hz, the second frequency of the NS component was 8.2 Hz, the first frequency of the EW component was 3.5 Hz, and the second frequency of the EW component was 8.1 Hz. From Figs. 6.2.2-4.10 and -4.11, we confirmed that the first frequency produces a translational first mode shape and the second frequency a translational second mode shape for both the NS and EW components. We also identified a torsion mode 関数、位相、スペクトル比及びコヒーレンスを比較 して求めた。Tab. 6.2.2-4.3 に各塔の伝達関数より求 められた固有振動数を示す。Tab. 6.2.2-4.3 より、1 次基礎固定系固有振動数のUD成分は19~22 Hz に、NS、EW成分はともに4~6Hzに分布し、2次 基礎固定系固有振動数のNS、EW成分はともに7~ 12Hzに分布する。フランスによる修復が行われた N32 塔の1次基礎固定系固有振動数NS成分は3.1Hz、 EW 成分は3.2Hz と地盤連成系卓越振動数と同様 1 次水平成分に関しては平均的に低めの値となり、他 の塔と異なる振動特性を有している。

「副塔モード測定ケース」より、N18 塔のNS、EW 成分測定における副塔頂部、頂部-ポーチ中間部 (H1)、ポーチ部 2 測点 (H2、H3)、副塔基部のパワー スペクトルが求められた (Figs. 6.2.2-4.8、-4.9)。Figs. 6.2.2-4.8、-4.9 より、NS 成分 1 次の卓越振動数が 3.8Hz、2 次の卓越振動数が 8.2Hz、EW 成分 1 次の卓 越振動数が 3.5Hz、2 次の卓越振動数が 8.1Hz となっ た。Figs. 6.2.2-4.10、-4.11 より NS、EW 成分ともに 1 次卓越振動数では並進 1 次、2 次卓越振動数では並 進 2 次のモード形状を示すことを確認した。また、 NS 成分 11.8 Hz ではねじれのモード形状を示すこと を確認した。

4.4 プラサート・スープラの振動特性

「プラサート・スープラ標準測定ケース」より、副 塔の地盤連成系卓越振動数、減衰定数、基礎固定系 固有振動数を求めた。

1) 地盤連成系卓越振動数

Tab. 6.2.2-4.4 に各塔のパワースペクトルより求め られた卓越振動数を示す。Tab. 6.2.2-4.4 より、プラ サート・スープラの水平方向の1次卓越振動数は3.0 ~ 4.2Hz、2 次卓越振動数は 5.3 ~ 13.1Hz に分布する。 フランスによる修復が行われたN3塔の1次地盤連 成系卓越振動数は水平NS成分で2.2Hz、EW成分で 2.8Hz、2次地盤連成系卓越振動数は水平NS成分で 6.3Hz、EW 成分で7.3Hz と水平成分が低めとなり、 他の塔と異なる振動特性を有している。また上下成 分の1次卓越振動数は8.4~9.5Hzに分布した。N1 および S1 塔は NS 方向に、それらを除く塔は EW 方 向に前室が接続している点に注目し、2003年の測定 結果に加えて全塔を測定したことにより、前室接続 方法による比較を行った(Fig. 6.2.2-4.12)。その結果、 前室が接続している方向の1次卓越振動数のほうが、 前室が接続していない方向よりも10~25%高い振 動数を示した。

shape at the 11.8 Hz in NS component.

4.4 Vibration Characteristics of the Prasat Suor Prat Towers

From the "Prasat Suor Prat standard measurement case," we obtained soil-coupled predominant frequencies, damping ratios, and base-fixed natural frequencies of the towers.

1) Soil-Coupled Predominant Frequencies

Tab. 6.2.2-4.4 shows predominant frequencies obtained from the power spectrum densities of each tower. From this table, we see that the first horizontal frequencies of the Prasat Suor Prat towers range from $3.0 \sim 4.2$ Hz and the second horizontal frequencies from $5.3 \sim 13.1$ Hz. However, the N3 tower, which was restored by the French, had vibration characteristics that differed from the other towers. Specifically, the horizontal component values were low. The horizontal component of the first soil-coupled predominant frequencies was 2.2 Hz for the NS component and 2.7 Hz for the EW component, and the horizontal component of the second soil-coupled predominant frequencies was 6.3 Hz for the NS component and 7.3 Hz for the EW component. Additionally, the first frequencies of the vertical component ranged from 8.4 ~ 9.5 Hz. Focusing on the fact that antechambers are connected to the N1 and S1 towers in the NS direction and to all other towers in the EW direction, we compared influence of antechamber connection styles on the predominant frequencies with the data of all towers including the results of the 2003 survey (Fig. 6.2.2-4.12). As a result, we found that the first frequencies in the direction of antechamber connection are $10 \sim 25\%$ higher than in the direction without connection.

2) Damping Ratio

Tab. 6.2.2-4.5 shows the damping ratio of the Prasat Suor Prat towers we estimated through the RD method. From this table, we see that the damping ratio of both the first NS and EW components is roughly 2% and the damping ratio of the second NS and EW components is between 1 and 2%. In the majority of the towers, the damping ratio of the second components tended to be lower than that of the first.

3) Base-Fixed Natural Frequencies

We obtained base-fixed natural frequencies of the Prasat Suor Prat towers by comparing transfer functions, phase, spectrum ratio, and coherence. Tab. 6.2.2-4.6 shows the natural frequencies obtained from the transfer functions of each tower. From this table, we see that in regard to the first base-fixed natural frequencies, the UD component ranged from $12 \sim 17$ Hz, the NS component from $2 \sim 4$ Hz, and the EW component from $3 \sim 4$ Hz. In regard to the second base-fixed natural frequencies, the NS component ranged from $7 \sim 11$ Hz and the EW component from $9 \sim 13$ Hz. However, the N3 tower, which was restored by the French, had vibration characteristics that differed from the other towers. As with the soil-coupled predominant frequencies, the horizontal component values were low. The horizontal component of the first base-fixed natural frequency was 2.2 Hz for the NS component and 2.8 Hz for the

2) 減衰定数

RD 法より推定したプラサート・スープラの減衰定 数を Tab. 6.2.2-4.5 に示す。Tab. 6.2.2-4.5 より、NS、 EW 成分ともに 1 次の減衰定数は 2 % 前後、2 次の減 衰定数は 1 ~ 2% に分布する。ほとんどの塔で 1 次 の減衰定数よりも 2 次の減衰定数のほうが低い値を 示す傾向にあった。

3) 基礎固定系固有振動数

プラサート・スープラの基礎固定固系の固有振動 数を伝達関数、位相、スペクトル比及びコヒーレン スを比較して求めた。Tab. 6.2.2-4.6 に各塔の伝達関 数より求められた固有振動数を示す。Tab. 6.2.2-4.6 より、1次基礎固定系固有振動数のUD成分は12~ 17Hz、NS成分は2~4Hz、EW成分は3~4Hzに 分布し、2次基礎固定系固有振動数のNS成分は7~ 11Hz、EW成分は9~13Hzに分布する。フランスに よる修復が行われたN3塔の1次基礎固定系固有振 動数は水平NS成分で2.2Hz、EW成分で2.8Hz、2次 基礎固定系固有振動数は水平NS成分で6.3Hz、EW 成分で7.3Hzと地盤連成系卓越振動数と同様に水平 成分が低めの値となり、他の塔と異なる振動特性を 有している。

「プラサート・スープラモード測定ケース」より、 N2 塔の頂部、頂部-ポーチ中間部(H1)、ポーチ部 2 測点(H2、H3)、副塔基部頂部のパワースペクトル が求められた(Figs. 6.2.2-4.13、-4.14)。Figs. 6.2.2-4.13、 -4.14より、NS 成分1次の卓越振動数が3.0Hz、NS 成分ねじれ方向の卓越振動数が6.1Hz、EW 成分1 次の卓越振動数が3.2Hzとなった。Figs. 6.2.2-4.15、 -4.16より NS、EW 成分ともに1次卓越振動数では並 進1次のモード形状を示し、NS 成分のねじれ卓越振 動数ではねじれのモード形状を生じていることを確 認した。

5. 線形固有值解析

バイヨン寺院主塔、副塔の内の独立塔、プラサー ト・スープラのFEMモデルを作成し、その固有振 動数と常時微動測定から得られた基礎固定系の卓越 振動数を一致させることにより、等価なヤング係数 を推定した。Tab. 6.2.2-5.1 にバイヨン寺院中央主塔、 副塔独立塔、プラサート・スープラの基礎固定系固 有振動数平均値を示す。主塔の基礎固定系水平1次 および2次固有振動数はそれぞれ3.1Hz、5.2Hz、上 下1次固有振動数は18.2Hz、副塔の基礎固定系1次 および2次固有振動数はNS、EW成分に対してそれ ぞれ4.0、4.1Hz、8.6、8.7Hz、上下1次固有振動数は 19.2Hz、プラサート・スープラの基礎固定系1次お よび2次固有振動数は短辺、長辺成分に対してそれ EW component, and the horizontal component of the second based-fixed natural frequency was 6.3 Hz for the NS component and 7.3 Hz for the EW component.

From the "Prasat Suor Prat mode measurement case," we obtained power spectrum densities at the top of the N2 tower, a point between the top of the tower and the porch (H1), two measurement points on the porch (H2, H3), and the top of the base of the tower (Figs. 6.2.2-4.13 and -4.14). As seen in Figs. 6.2.2-4.13 and -4.14, the first frequency of the NS component became 3.0 Hz, the predominant frequency of the NS component in the torsion direction became 6.1 Hz, and the first frequency of the EW component became 3.2 Hz. From Figs. 6.2.2-4.15 and -4.16, we confirmed that the first frequency corresponds to a translational first mode shape for both the NS and EW components, and that a torsion mode shape was observed at the torsion predominant frequency of the NS component.

5. Linear Eigenvalue Analysis

We created FEM models of the Bayon central tower, independent sub towers, and Prasat Suor Prat towers, and estimated their equivalent Young's modulus by matching their natural frequencies with base-fixed predominant frequencies obtained from micro-tremor measurements. Tab. 6.2.2-5.1 shows mean values of the base-fixed natural frequencies of the Bayon central tower, independent sub towers, and Prasat Suor Prat towers. The base-fixed horizontal first and second natural frequencies of the central tower were 3.1 Hz and 5.2 Hz, respectively, and its vertical first natural frequency was 18.2 Hz. The based-fixed first and second natural frequencies of the sub towers were 4.0 Hz and 8.6 Hz for the NS component, respectively, and 4.1 Hz and 8.7 Hz for the EW component, respectively. The vertical first natural frequency was 19.2 Hz. The based-fixed first and second natural frequencies of the Prasat Suor Prat towers were 3.6 Hz and 9.6 Hz for the shorter-edge component, respectively, and 4.1 Hz and 11.2 Hz for the longer-edge component, respectively. The vertical first natural frequency was 16.3 Hz.

We determined the model shape based on existing diagrams and photos, established Poisson's ratio and mass density as described in Reference 1, and obtained an equivalent Young's modulus by FEM eigenvalue analysis so that it corresponds to the measured horizontal first frequency. For the FEM model, we utilized a hexahedron element having three degrees of freedom per nodal point. Tab. 6.2.2-5.2 shows the material properties of sandstone and laterite, and Tab. 6.2.2-5.1 shows the analysis results of each model. The equivalent Young's modulus in the Bayon central tower model shown in Fig. 6.2.2-5.1 became 1.2×10^5 tf/m². Similarly, in the sub tower model shown in Fig. 6.2.2-5.2, we were able to match the horizontal second frequencies with an equivalent Young's modulus of 9.5 \times 10⁴ tf/m². In regard to the Prasat Suor Prat towers, we estimated the equivalent Young's modulus in the case of model A which excludes the presence of the antechamber and in the case of model B which takes the antechamber into consideration, as shown in Fig. 6.2.2-5.3. As a result, we obtained an equivalent Young's modulus of 1.18 imes 10⁵ tf/m² for model A and 1.24 imes10⁵ tf/m² for model B. We were able to obtain a match up to the horizontal second frequency for both models A and B, but

ぞれ 3.6、4.1 Hz、9.6、11.2Hz、上下 1 次固有振動数 は 16.3Hz であった。

既往の図面及び写真を基にモデル形状を、参考文 献1を参照してポアソン比と質量密度を設定して FEM モデルを作成し、水平1次振動数が合致するよ うに等価なヤング係数を求めた。FEM モデルには1 節点あたり3自由度を有する六面体要素を用いた。 砂岩およびラテライトの材料物性を Tab. 6.2.2-5.2、 各モデルにおける解析結果を Tab. 6.2.2-5.1 に示す。 Fig. 6.2.2-5.1 に示すバイヨン寺院中央主塔モデルの 等価なヤング係数は、1.2×10⁵tf/m²となった。Fig. 6.2.2-5.2 に示す副塔モデルも同様に、等価なヤング 係数をそれぞれ 9.5×10⁴tf/m²とすることにより、水 平2次振動数までを一致させることができた。プラ サート・スープラに関しては、Fig. 6.2.2-5.3 に示す前 室を考慮しないモデル A と前室を考慮したモデル B について、等価なヤング係数を推定したところ、モ デルAの等価なヤング係数は、 1.18×10^{5} tf/m²となり、 モデル B では、 1.24×10^{5} tf/m² となった。モデル A、 モデルBともに水平2次振動数までを一致させるこ とができたが、等価なヤング係数の差は小さく、モ デル化における前室の影響は小さいことが推定でき る。

以上より、石材物性(バイヨン寺院は砂岩、プラサー ト・スープラはラテライト)の1/18~1/14程度の等 価なヤング係数を用いることにより、水平2次まで 測定結果と一致させることができたが、上下成分に おいては測定結果のほうが解析結果よりも30~90% 高い振動数を示す結果となった。また、同じ砂岩を 構造物とするバイヨン寺院中央主塔と副塔の等価な ヤング係数が等しくならなかったので、これについ ても改めて検討する必要がある。

6. まとめ

バイヨン寺院の修復計画立案を念頭において、バ イヨン寺院主塔および副塔、ならびにプラサート・ スープラで微動測定を実施し、各遺構の振動特性を 推定した。

バイヨン寺院における振動レベルは夜間に比べて 昼間で大きい値を示した。強風をとらえることはで きなかったが、風向はおおむね南~南西であり、NS 成分の微動レベルの方が EW 成分よりも大きめであ ることに調和的であった。

バイヨン寺院主塔および副塔の1次および2次卓 越振動数は並進1次および並進2次のモードに対応 した。プラサート・スープラの1次卓越振動数は並 進1次のモードに対応した。また、モード測定の対 象としたバイヨン副塔は11.8Hz、プラサート・スー プラは6.1Hz でねじれのモードを有することを確認
since the difference between the equivalent Young's modulus was small, we can assume that the antechamber had little effect in the models.

Based on the above, we were able to match the natural frequencies up to the second frequency by using equivalent Young's modulus corresponding to roughly $1/18 \sim 1/14$ that of the physical properties of stone materials (sandstone in the case of Bayon Temple and laterite in the case of Prasat Suor Prat). However, in regard to the vertical component, the measurement results indicated $30 \sim 90\%$ higher frequencies than our analysis results. Furthermore, we failed to obtain the same equivalent Young's modulus for the Bayon central tower and sub towers, both of which are made of sandstone, so these issues must be further examined in the future.

6. Conclusion

With a view to formulating a restoration plan for the Bayon Temple, we conducted micro-tremor measurements at the Bayon central tower and sub towers and Prasat Suor Prat towers, and estimated the vibration characteristics of each of the monuments.

At Bayon Temple, micro-tremor intensities during the daytime were considerably greater than during the nighttime. Unfortunately, we did not experience strong winds, but the wind direction was generally southerly to southwesterly, corresponding to the fact that micro-tremor intensities of the NS component were greater than the EW component.

The first and second frequencies of the Bayon central tower and sub towers corresponded to translational first and second modes. The first frequency of the Prasat Suor Prat towers corresponded to a translational first mode. We also confirmed that the Bayon sub tower and the Prasat Suor Prat tower targeted for mode measurement had a torsion mode at 11.8 Hz and 6.1 Hz, respectively.

The horizontal first and second soil-coupled predominant frequencies of the Bayon sub towers were around 4 Hz and 9 Hz, respectively. Its base-fixed natural frequencies were $5 \sim 10\%$ higher than the soil-coupled predominant frequencies. In regard to the damping ratio, it was $2 \sim 3\%$ for the first frequency and $1 \sim 3\%$ for the second frequency.

The horizontal first and second soil-coupled predominant frequencies of the Prasat Suor Prat towers were around 3 Hz and 9 Hz, respectively. Its base-fixed natural frequencies were $5 \sim 15\%$ higher than the soil-coupled predominant frequencies. In regard to the damping ratio, it was around 2% for both the first and second frequencies.

Additionally, the predominant frequencies of the direction in which other structures are attached – the galleries in the case of the Bayon sub towers and the antechambers in the case of Prasat Suor Prat – were 10% or so higher than the predominant frequencies of the other components. Judging from this, we can assume that attached structures have the effect of increasing structural stiffness.

We can match measured natural frequencies with their analytic counterparts, with the equivalent Young's modulus for the entire structure of about $1/18 \sim 1/14$ the physical property of stone materials (sandstone in the case of Bayon Temple and

した。

バイヨン副塔の水平1次地盤連成系卓越振動数は 4Hz前後、2次は9Hz前後に分布し、基礎固定系固 有振動数は地盤連成系卓越振動数に比べて5~10% 高い振動数を示した。減衰定数に関して、1次は2 ~3%、2次は1~3%であった。

プラサート・スープラの水平1次地盤連成系卓越 振動数は3Hz前後、2次は9Hz前後に分布し、基礎 固定系固有振動数は地盤連成系卓越振動数に比べて 5~15%高い振動数を示した。減衰定数に関して、1 次、2次ともに2%前後であった。

また、バイヨン副塔の回廊あるいはプラサート・ スープラの前室などの付属構造物接続方向の卓越振 動数が他成分より10%前後高い振動数を示すことよ り、付属構造物による剛性付加の影響が推定できる。

線形弾性固有値解析から、構造全体の等価なヤン グ係数を石材物性(バイヨン寺院は砂岩、プラサー ト・スープラはラテライト)の1/18~1/14程度とす ることで、固有振動数を解析的に説明できるが、上 下成分については測定結果が解析結果より30~90% 高い振動数を示した。水平、上下ともに固有振動数 を合理的に説明するためには、不連続体としての解 析を含むさらなる検討が必要と考えられる。

註

- 一般に構造物は、地震時でなくとも常に小さく揺れていて、これを常時微動と称している。その振動源として、交通振動、地殻変動、風、海の波浪などが考えられる。
- 2 1999年報告書によると、地盤班によるバイヨン寺院中 央主塔の挙動観測において、風が積石間の目地変化に 影響を与えることが指摘されている。
- 3 RMS値とは二乗平均平方根のことであり、ノイズの影響を受けずに平均的な振動レベルを評価するために用いた。
- 4 構造物を伝播する波を周波数毎に分解した際に波の中 に占める割合が大きい振動数のことを卓越振動数といい、中でも一番低い振動数のことを1次卓越振動数といいう。卓越振動数と質量密度を用いて構造物の剛性を 評価することができる。
- 5 減衰定数は建物の振動が収束する割合を表す定数であ り、一般に RC 造で 3% 前後、S 造で 2% 前後の値が用 いられている。
- 6 一般に構造物は、地震時でなくとも常に小さく揺れていて、これを常時微動と称している.その振動源として、交通振動、地殻変動、風、海の波浪などが考えられる。
- 7 1999年報告書によると、地盤班によるバイヨン寺院中 央主塔の挙動観測において、風が積石間の目地変化に 影響を与えることが指摘されている。
- 8 2003 年度測定結果については前節 6.2.1「2003 年度調 査」を参照のこと。

laterite in the case of Prasat Suor Prat). However, in regard to the vertical component, our measurement results indicated frequencies $30 \sim 90\%$ higher than the analysis results. To rationally explain the natural frequencies of both the horizontal and vertical components, further examination is necessary, including their analysis as a discontinuum.

Notes

- 1 Generally, structures are constantly vibrating to a small extent even when there are no earthquakes. This phenomenon is called micro-tremors. The sources of these micro-tremors include traffic vibration, vibrations of the earth's crust, wind, and ocean waves.
- 2 According to the 1999 annual report, an observation of the movement of the Bayon Temple central tower by the Geotechnology, Geology, and Environment Unit, wind is closely linked to the changes in the joints of stone masonry.
- 3 RMS stands for "root mean square." RMS values were used to assess the average vibration intensity uninfluenced by noise.
- 4 When waves that propagate in structures are broken down into frequency components, a set of frequencies that account for the largest share of those waves are called predominant frequencies, and the lowest frequency within the predominant frequencies is called first predominant frequency. Predominant frequencies and mass densities can be used to assess a structure's rigidity.
- 5 Damping constant expresses the rate at which a building's vibration decreases. Generally, values of about 3% and 2% are used for RC buildings and S buildings, respectively.
- 6 Generally, structures are constantly vibrating to a small extent even when there are no earthquakes. This phenomenon is called micro-tremors. The sources of these micro-tremors include traffic vibration, vibrations of the earth's crust, wind, and ocean waves.
- 7 According to the 1999 annual report, an observation of the movement of the Bayon Temple central tower by the Geotechnology, Geology, and Environment Unit, wind is closely linked to the changes in the joints of stone masonry.
- 8 See Section 6.2.1 "Measurement Survey in 2003".
- 9 RMS stands for "root mean square." RMS values were used to assess the average vibration intensity uninfluenced by noise.
- 10 When waves that propagate in structures are broken down into frequency components, a set of frequencies that account for the largest share of those waves are called predominant frequencies, and the lowest frequency within the predominant frequencies is called first predominant frequency. Predominant frequencies and mass densities can be used to assess a structure's rigidity.
- 11 Damping ratio expresses the rate at which a building's vibration decreases. Generally, values of about 3% and 2% are used for RC buildings and S buildings, respectively.

References

- 1 So Sokuntheary, *The Master Plan for Conservation and Restoration*, Master Thesis, Waseda Univ. Dept. of Architecture Laboratory of Architectural History, 2001.
- 2 T. Aoki, S. Kato, K. Ishikawa, M. Yorulmaz and F. Cili: "Vibrational Characteristics of Hagia Sophia and Some Related Historical Structures Based on Measurement of Micro Tremors," *Journal of Structural Engineering*, vol. 40B, 1994, pp. 87-98.

- 9 RMS 値とは二乗平均平方根のことであり、ノイズの影響を受けずに平均的な振動レベルを評価するために用いた。
- 10 構造物を伝播する波を周波数毎に分解した際に波の中 に占める割合が大きい振動数のことを卓越振動数といい、中でも一番低い振動数のことを1次卓越振動数といいう。卓越振動数と質量密度を用いて構造物の剛性を 評価することができる。
- 11 減衰定数は建物の振動が収束する割合を表す定数であ り、一般に RC 造で 3% 前後、S 造で 2% 前後の値が用 いられている。

参考文献

- 1 So Sokuntheary, *The Mater Plan for Conservation and Restoration*, Master Thesis, Waseda Univ. Dept. of Architecture, Laboratory of Architectural History, 2001.
- 2 青木孝義,加藤史郎,石川浩一郎,ミフィト・ヨルルマ ズ、フェリドゥン・チェル「ハギア・ソフィア大聖堂 を中心とする常時微動測定に基づく振動測定」,『構造 工学論文集』,40B号,1994年,pp.87-98.
- 3 『アンコール遺跡調査報告書 1995』
- J. E. Luco and R. J. Apsel: "On the Green's functions for a layered half-space, Part 1," *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 73, no. 4, 1983, pp. 909-929.
- 5 『アンコール遺跡調査報告書 2001』

- 3 ARJSA 1995.
- J. E. Luco and R. J. Apsel: "On the Green's functions for a layered half-space, Part 1," *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 73, no. 4, 1983, pp. 909-929.
- 5 ARJSA 2001.



Fig. 6.2.1-2.1 Arrangements of seismographs at the Bayon central tower.



Fig. 6.2.1-2.2 Arrangements of seismographs.



Fig. 6.2.1-2.3 Sub towers for Measurement.

Fig. 6.2.1-2.4 Arrangements of seismographs at the Bayon sub tower.



Fig. 6.2.1-2.5 Arrangements of seismographs at the Royal Palace.



Pl. 6.2.1-3.1 Seismograph at the top of the Bayon central tower.



Pl. 6.2.1-3.2 Seismograph at the top of the Bayon N5 central sub tower.



Pl. 6.2.1-3.3 Seismograph at the gallery of the Bayon central tower.



Pl. 6.2.1-3.4 Seismograph at the bottom of the Bayon N5 central sub tower.



Pl. 6.2.1-3.5 Seismograph at the outside bottom of the Bayon central tower.



Pl. 6.2.1-3.6 Seismograph at the inside bottom of the Bayon central tower.



Pl. 6.2.1-3.7 Seismograph at the top of the Bayon N19 sub tower.



Pl. 6.2.1-3.10 View of the micro-tremor measurements 1.



Pl. 6.2.1-3.8 Seismograph set up work 1.



Pl. 6.2.1-3.11 View of the micro-tremor measurements 2.



Pl. 6.2.1-3.9 Seismograph set up work 2.



Pl. 6.2.1-3.12 Seismograph set up work 3.

eite	GPI	point	filter	agin	data	start time	ston time	trigger time
Site	A	BN	inter	gam	Gata	start time	stop time	ungger time
	В	BE						
PSP_N3	С	BS	30Hz	500	2003/8/5	14:25	14:55	1800s
	D	BW						
	A	BN						
	В	BE						
PSP_N4	C	BS	30Hz	500	2003/8/5	15:50	16:20	1800s
	E	TC						
	А	BN			ĺ			
	B	BE	2011	500	2002/0//	10.10	10.40	1000
Bayon_N30	D	BS	30Hz	500	2003/8/6	10:10	10:40	1800s
	E	TC						
	A	BN						
D	B	BE	2011	500	2002/8/7	0.25	0.55	1800-
Bayon_N31	D	BS	30HZ	500	2003/8/7	9:25	9:55	1800s
	E	TC						
	A	BN						
Bayon N31	B	BE	10Hz	2000	2003/8/7	10:30	11:00	1800s
Bayon_101	D	BW	10112	2000	2005/0/7	10.50	11.00	10003
	Е	TC						
	A	BN						
Bayon N32	В	BE	30Hz	500	2003/8/8	9:00	stop time 14:55 16:20 10:40 9:55 11:00 9:30 10:25 10:25 10:25 10:25 10:25 10:50 10:50 11:30 9:20 10:50 11:30	1800s
Bayon_1152	D	BW	50112	500	2005/0/0	2.00		10003
	Е	TC						
	A	BN						
Bayon N32	С	BE	10Hz	2000	2003/8/8	9:55	10:25	1800s
	D	BW						
	E	TC						
	A	BN						
Line_A1	C	BS	30Hz	500	2003/8/8	15:30	16:00	1800s
	D	BW						
	A	BN						
	B	BE						
Bayon_N33	С	BS	30Hz	500	2003/8/9	8:50	9:20	1800s
	D	BW						
	A	BN						
	В	BE						
Bayon_N45	C	BS	30Hz	500	2003/8/9	10:20	10:50	1800s
	E	TC						
	A	BN						
	В	BE						
Bayon_N19	C	BS	30Hz	1000	2003/8/9	14:05	14:35	1800s
	E	TC						
	А	BNE		1	1			
	В	BSE	2011	1000	2002/0/11	10.15	10.45	1000
Bayon_case3	D	BSW	30Hz	1000	2003/8/11	10:15	10:45	1800s
	E	TC						
	A	BNE						
Payon once?	B	BSE	2011-7	1000	2002/8/11	11:00	11:20	1800c
Bayon_cases	D	BNW	50112	1000	2005/0/11	11.00	11.50	10003
	Е	TC						
	A	GNE						
Bayon case4	С	GSE	30Hz	1000	2003/8/11	14.00	14.30	1800s
	D	GNW						
	Е	TC						
	A	BSW sub_N5_B						
Bayon_case5	C	sub_N5_T	30Hz	1000	2003/8/12	8:45	9:15	1800s
	D	GSW						
	A	TC MNF	1					
	B	MSE						
Bayon_case1	С	MSW	30Hz	1000	2003/8/12	9:55	10:25	1800s
	D	MNW						
	D	BC						
Bayon_case5+	Е	TC	30Hz	1000	2003/8/12	16:10	17:30	4800s
Bayon_case5+	D	BC	30Hz	1000	2003/8/12+	18:00	7:30 (truncated)	
	D	BC						
Bayon_case5+	E	TC	30Hz	1000	2003/8/13	9:00	16:30	27000s
Bayon case5+	D	BC	30Hz	1000	2003/8/13+	16:55	8:00 (truncated)	
·	Δ	IU sub N0 T						
	B	sub_N3_T						
Bayon_case2	С	sub_N5_T	30Hz	1000	2003/8/14	9:30	10:30	3600s
	D	Sub_N7_T BC_foiled						
	A	N20						
	В	N13_failed						
Bayon_alley_S	С	N18	30Hz	1000	2003/8/14	14:00	14:10	600s
	D	N19						
	A	N20						
	В	N13						
Bayon_alley_S	С	N18	-	-	2003/8/14	14:15	14:25	600s
	D	N19				1		

Tab. 6.2.1-3.1 Measurement property sheet.

site	GPL	point	filter	gain	data	start_time	stop_time	trigger_time
	A	N34	30Hz	1000		14.40	14:50	600s
Bayon alley M	С	N22 N26	50112	1000	2003/8/14	14.40	14.50	0003
	D	N30	-	-		14:55	15:05	600s
	E A	NI N67						
	В	N55	30Hz	1000		15:20	15:30	600s
Bayon_alley_L	C	N59 N63			2003/8/14	16.26	16.46	(00-
	E	NI	-	-		15:35	15:45	600s
	A	N	30Hz	1000		8:30	8:40	600s
PSP_alley_S	C	S			2003/8/15			
(1011)	D	W	-	-		8:45	8:55	600s
	A	N						
PSP_alley_M	B	E	30Hz/-	1000/-	2002/8/15	9:05	9:15	600s
(20m)	D	W	_	-	2003/8/15	9:20	9:30	600s
	E	C						
PSP alley L	B	E	30Hz	1000		9:50	10:00	600s
(50m)	C	S			2003/8/15	10.05	14:50 15:05 15:30 15:45 8:40 8:55 9:15 9:30 10:00 10:15 10:50 11:05 15:25 13:45 14:00 15:20 15:35 10:30 9:55 10:30 9:55 10:30 9:55 10:30 9:55 10:30 9:55 10:30 15:20 15:35 16:00 11:25 18:00 11:30 12:00	600
	E	C	-	-		10:05	10:15	600s
	A	N	30Hz	1000		10.40	ne stop time 14:50 115:30 15:30 15:45 8:40 8:55 9:15 9:30 10:00 11:05 10:50 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 11:05 10:30 9:55 10:30 10:30 10:40 11:25 10:40 11:30 11:30 11:30 11:50	600s
PSP_alley_LL	C	S			2003/8/15			
(100111)	D	-	-	-		10:55		600s
	A	N						
PSP_alley_LLL	B	E	30Hz	1000	2002/9/15	15:00	15:10	600s
(300m)	D	-	-	-	2003/6/13	15:15	15:25	600s
	E	C						
pSp allow C	B	E N	30Hz	1000		13:35	13:45	600s
(6m)	С	S			2003/8/16			
	E	C	_	-		13:50	14:00	600s
	A	N						
PSP_alley_M	С	S	30Hz	1000	2003/8/16	14:05	14:15	600s
(5011)	D E	C W						
	А	N						
PSP_alley_L	B	E	30Hz	1000	2003/8/16	15.10	15:20	600s
(40m)	D	W						
	E A	C N						
PSP alley L	В	E						
(40m)	C	S W	-	-	2003/8/16	15:25	15:35	600s
	Е	С						
	AB	sub_N9_T sub_N3_T						
Bayon case?	C	sub_N5_T	30Hz	1000	2003/8/18	9:30	10:30	3600s
Buyon_cuse2	D	sub_N7_T BC	50112	1000	2005/0/10	9.30	9.55	1500s
	E	TC				10:00	10:30	1800s
	A	回廊外 N						
Line_A2	C	No_34	30Hz	1000	2003/8/18	15:30	16:00	1800s
	D	No_20						
Bayon case5+	E	TC	30Hz	1000	2003/8/18	15:30	17:00	5400s
	A	No_69						
Line_B1	C	No_67	30Hz	1000	2003/8/19	10:10	10:40	1800s
	D	No_66						
	A	No_61						
Line B2	B	No_62	30Hz	1000	2003/8/19	10.55	11.25	1800s
	D	No_64						
	E	No_65						
Bayon_case5+	E	TC	30Hz	1000	2003/8/19	12:00	18:00	21600s
	A	N E						
PSP_alley_L (40m)	C	S	30Hz	1000	2003/8/20	11:10	11:30	1200s
(4011)	D	W C						
	A	N						
PSP_alley_LL	B	E	30Hz	1000	2003/8/20	11:40	12.00	1200s
(100m)	D	-	20112				12.00	12000
	E	C RN						<u> </u>
	B	BE						
Bayon_N20	C	BS	30Hz	1000	2003/8/20	14:30	14:45	900s
	E	TC						
	A	BN						
Bayon_N34	C	BS	30Hz	1000	2003/8/20	15:30	15:50	1200s
	D	BW						
	£				1			
		: Ext. Sencor		B : Basement		N : North		
] : Failed		G : Gallery		E : East		
						W : West		



Fig. 6.2.1-4.1 Micro-tremor time histories at the top of the Bayon central tower.



Fig. 6.2.1-4.3 Micro-tremor time histories at the top of the Bayon N19 sub tower.



Fig. 6.2.1-4.2 Micro-tremor time histories at the bottom of the Bayon central tower.



Fig. 6.2.1-4.4 Micro-tremor time histories at the top of the Prasat Suor Prat N4 tower.



Fig. 6.2.1-4.5 Micro-tremor intensities at the top of the Bayon central tower (RMS : gal).



Fig. 6.2.1-4.6 Frequency distribution of the principal direction.

N7 32 -13* N5 -13* N3 -13*

Fig. 6.2.1-4.7 Principal direction of the Bayon central tower.



Fig. 6.2.1-4.8 Principal directions of the Bayon central tower and Bayon sub towers.



Fig. 6.2.1-4.9 Power spectrum densities at the top of the Bayon central tower.



Fig. 6.2.1-4.11 Power spectrum densities at the top of the Bayon N5 central sub tower.



Fig. 6.2.1-4.13 Power spectrum densities at the bottom of the Bayon N5 central sub tower.



Fig. 6.2.1-4.10 Power spectrum densities at the gallery of the Bayon central tower.



Fig. 6.2.1-4.12 Power spectrum densities at the top of the Bayon N5 central sub tower (with 20Hz LP filter).



Fig. 6.2.1-4.14 Power spectrum densities at the bottom of the Bayon central tower.



Fig. 6.2.1-4.15 Transfer functions of horizontal motion of the Bayon central tower.



Fig. 6.2.1-4.16 Power spectrum densities at the gallery of the Bayon central tower.



Fig. 6.2.1-4.17 Power spectrum densities at the top of the sub towers.



Fig. 6.2.1-4.18 Free damped waveform by RD method for the Bayon cental tower.

Tab. 6.2.1-4.1 Vibration characteristics of the Central tower.

Central Tower	NS direction	EW direction	
N1	2.8Hz (2.2%)	2.8Hz (2.2%)	
Sub Tower	normal	tangential	
N7 (North-West)	6.8Hz (1,15)	7.8Hz (1.1%)	
N9 (North-East)	6.8Hz (3.1%)	7.9Hz (2.1%)	
N3 (South-East)	9.0Hz (3.4%)	9.7Hz (3.1%)	



Fig. 6.2.1-4.19 Power spectrum densities at the top of the Bayon N19 sub tower.



Fig. 6.2.1-4.21 Power spectrum densities at the top of the Bayon N30 sub tower.



Fig. 6.2.1-4.23 Power spectrum densities at the top of the Bayon N32 sub tower.



Fig. 6.2.1-4.20 Power spectrum densities at the top of the Bayon N20 sub tower.



Fig. 6.2.1-4.22 Power spectrum densities at the top of the Bayon N31 sub tower.



Fig. 6.2.1-4.24 Power spectrum densities at the top of the Bayon N33 sub tower.



Fig. 6.2.1-4.25 Power spectrum densities at the top of the Bayon N34 sub tower.



Fig. 6.2.1-4.27 Power spectrum densities at the top of the Prasat Suor Prat N3 tower.



Fig. 6.2.1-4.26 Power spectrum densities at the top of the Bayon N45 sub tower.



Fig. 6.2.1-4.28 Power spectrum densities at the top of the Prasat Suor Prat N4 tower.

Tab. 6.2.1-4.2 1st predominant frequencies at the sub towers.

1st Predominant F	Frequency ((Hz)
-------------------	-------------	------

			Ba	iyan Sub Tew	of .				Preset.	Spur Prat
	A19.	1420	1000	891	3432	1403	104	145	NJ	214.0
UD	13.2	15.7	13.2	19	7.5	132	31 .	92	9	
NS	3.7	2.7	45	- 5	2.8	-5	25	43	2.2	3.3
EW	3.7	3.7	3.4	43	3	\$5	4.6.	4.7	23	4.2
height	16.2m	135m	15.2m	12.9m	13.9m	12.8m	14.1m	15.2m		15.4m
	econecta	Independent in the NS direct	tion with a corri	50r			orre correcta	ets with a com in the EW direct	iler right-angle tion with a core	id Har



Fig. 6.2.1-5.1 Transfer functions of horizontal motion of the Bayon N19 sub tower.



Fig. 6.2.1-5.2 Transfer functions of horizontal motion of the Prasat Suor Prat N4 tower.

Tab. 6.2.1-5.1 Comparison between FEM eigenvalue analysis and measurement result.

	Bayon Central Tower model A	Bayon Central Tower model B	Bayon Sub Tower N19	Prasat Spur Prat N4
1st mode frequency (Analysis)	3.1Hz	3.1Hz	4.2Hz	3.8Hz
1st mode frequency (measurement)	3.1Hz	3.1Hz	42Hz	3.8Hz
2st mode frequency (Analysis)	5.7Hz	5.2Hz	9.3Hz	4.7Hz
2st mode frequency (measurement)	5.2Hz	5.2Hz	10.1Hz	4.7Hz
Mass density	2.31/m ³	2.3t/m ³	2.5t/m ³	2.31/m ³
Peisson's ratio	0.28	0.28	0.28	0.28
Stone Young's modulus	1.7×10 ⁸ tf/m ²	1.7×10 ⁴ t/m ²	1.7×10 ⁶ tf/m ²	$2.0 \times 10^6 \text{tf/m}^2$
modulus	1.1×10 ⁵ tf/m ²	1.1×10 ⁵ tf/m ²	$1.2 \times 10^{5} \text{tf/m}^{2}$	1.2 × 10 ⁵ tf/m ²



Fig. 6.2.1-5.3 FEM model of the Bayon central tower without bridges.



Fig. 6.2.1-5.4 FEM model of the Bayon central tower with bridges.



Fig. 6.2.1-5.5 FEM model of the Bayon N19 sub tower.



Fig. 6.2.1-5.6 FEM model of the Prasat Suor Prat N4 tower.

Sector and the		Plasat Sub/ Prat.	Bayon	Angkor Wat
Formation 1	Surface layer, alternative layer (clayey-sandy)	GL 0.0-10.0	G.L. 0.0-18.0	GL 0.0-12.5
Formation II	Sandy layer	10.0-26.5	18.0-32.0	12.5-37.5
Formation III	Hard clayey layer	26.5-40.0	32.0-87.0	37.5-74.2
	Base rock		87.0	74.2
-			1000	Úm

Tab. 6.2.1-6.1 Ground layer properties in Angkor region.

Tab. 6.2.1-6.2 Ground structure model 1.

1	Lityer Tickyesa	N-value	Poisson's rabo	We prove	Vp provisi
	7.0	20	0.33	217	431
Pormacon I	30	40	0.33	342	679
Formation if	18.5	25	0.33	292	580
Formation III	it.	30	0.33	366	731

Tab. 6.2.1-6.3 Ground structure model 2.

Layer thickness	Density	Vs	Vp
imi	(1/ m ²)	(m(s)	(mihi)
7	1.58	262	520
3	1.58	400	794
16.5	1.75	531	1055
inf	1.85	770	1528

Tab. 6.2.1-6.4 Ground structure model 3.

Lityer Tackymra	Density	Vit.	V2
(m)	(11-003.)	(m/a)	(m/s)
. Ŧ.	1.58	.262	520
3	1.58	400	794
16,5	1.78	292	580
Ini	1.85	770	1528
			and the second second

Tab. 6.2.1-6.5 Ground structure model 4.

Layer thickness	Density	Vs.	VP
(m)	(V·=1)	(m/s)	(m/s)
7	1.58	262	520
3	1.58	400	794
30.5	1.75	292	580
60.5	1.85	770	1528
int	2.05	1500	2806



Fig. 6.2.1-6.1 Analysis results of model 1.



Fig. 6.2.1-6.2 Analysis results of model 2.







Fig. 6.2.1-6.4 Analysis results of model 4.



Fig. 6.2.2-2.1 Arrangements of seismographs for mode shape of the Bayon central tower.



Fig. 6.2.2-2.2 Arrangements of seismographs and wind speed and direction sensor (The long term measurement).



Fig. 6.2.2-2.3 Bayon sub towers for measurement.



Fig. 6.2.2-2.4 Arrangements of seismographs at the Bayon sub towers.

Fig. 6.2.2-2.5 Arrangements of seismographs for mode shape of the Bayon N18 sub tower.



Fig. 6.2.2-2.6 Towers of Prasat Suor Prat for measurement.



Fig. 6.2.2-2.7 Arrangements of seismographs at the Prasat Suor Prat.

Fig. 6.2.2-2.8 Arrangements of seismographs for mode shape of the Prasat Suor Prat N2 tower.



Pl. 6.2.2-3.1 Portable seismographs.



Pl. 6.2.2-3.5 Top of the Bayon central tower.



Pl. 6.2.2-3.2 External accelerometer.



Pl. 6.2.2-3.6 Bridge of the Bayon central tower.



Pl. 6.2.2-3.3 The wind speed and direction sensor.



Pl. 6.2.2-3.4 The power supply device for wind sensor.



Pl. 6.2.2-3.7 Top of the Bayon N5 central sub tower (The wind speed and direction sensor).



Pl. 6.2.2-3.8 Observation base for the long term measurement.



Pl. 6.2.2-3.11 Top of the Prasat Suor Prat S2 tower.



Pl. 6.2.2-3.9 Top of the Bayon N13 sub tower.



Pl. 6.2.2-3.12 Basement of the Prasat Suor Prat S2 tower.



Pl. 6.2.2-3.10 Basement of the Bayon N13 sub tower.

data	site	GPL	point	filter	gain	trigger time	start time	stop time	weather	
	PSP_N2_modeN	A B C D E	BN BE BS BW TC	30Hz	2000	1800s	10:45	11:15	O	M1 : ch1/H1 M2 : ch2/H2 M3 : ch3/H3
	PSP_N2_modeE	A B C D E	BN BE BS BW TC	30Hz	2000	1800s	13:40	14:10	0	M1 : ch1/H1 M2 : ch2/H2 M3 : ch3/H3
2004/9/7	PSP_N2_modeUD	G A B C D E	M1/M2/M3 BN BE BS BW TC	30Hz	2000	1800s	14:45	15:15	0	M1 : ch1/UD1 M2 : ch2/UD2 M3 : ch3/UD3
	PSP_N5	G A B C D	M1/M2/M3 BN BE BS BW TC	30Hz	2000	1800s	16:45	17:15		
	Bayon_N18_modeN	A B C D E	BR BE BS BW TC	30Hz	500	1800s	10:35	11:05	0	M1 : ch1/H1 M2 : ch2/H2 M3 : ch3/H3
2004/9/8	Bayon_N18_modeE	G A B C D E	ML/M2/M3 BN BE BS BW TC	30Hz	500	1800s	13:55	14:25	0	M1 : ch1/H1 M2 : ch2/H2 M3 : ch3/H3
	Bayon_N18_modeUD	G A B C D E	ML/M2/M3 BN BE BS BS TC	30Hz	500	1800s	14:55	15:25	0	M1 : ch1/UD3 M2 : ch2/UD2 M3 : ch3/UD1
	Bayon_main_modeNE	G A B C D E	M1/M2/M3 BC Bsub Tsub gallery TC	30Hz	1000	1800s	10:25	10:55	0	M1 : ch1/H1 M2 : ch2/H2 M3 : ch3/H3
2004/9/9	Bayon_main_modeUD	G A B C D E	M1/M2/M3 BC Bsub Tsub gallery TC	30Hz	1000	1800s	14:55	15:25	0	M1 : ch1/UD M2 : ch2/UD2 M3 : ch3/UD3
	Bayon_N13	G A B C D G	M1/M2/M3 BN BE BS BW TC	30Hz	1000	1800s	8:50	9:20	0	以降 UD1 を主塔 TOP に使用
2004/9/10	Bayon_N15	A B C D G	BN BE BS BW TC	30Hz	1000	1800s	10:00	10:30	0	
200 11 31 10	PSP_N6	A B C D G	BN BE BS BW TC	30Hz	1000	1800s	13:30	14:00	0	
	PSP_N6	B C D G	BR BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	14:20	14:50	0	
	Bayon_N35	B C D G	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	8:40	9:10	0	
2004/9/11	Bayon_N36	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	9:50	10:20	0	
	PSP_S1	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	13:45	14:15	0	
	Bayon_N37	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	8:25	8:55	0	
2004/9/13	Bayon_N48	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	9:35	10:05	0	
	PSP_S2	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	13:10	13:40	0	
2004/9/14	PSP_S3	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	14:50	15:20	-	
	Bayon_N22	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	8:25	8:55	0	
	Bayon_N39	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	9:30	10:00	0	
2004/9/15	Bayon_N25	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	10:30	11:00	0	
	PSP_S4	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	13:55	14:25	0	
	PSP_S5	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	15:00	15:30	0	
	Bayon_N27	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	8:40	9:10	0	
	Bayon_N28	B C D G A	BE BS BW TC BN	30Hz	1000	1800s	9:45	10:15	0	
2004/9/16	Bayon_N29	C D G A B	BE BW TC BN BE	30Hz	1000	1800s	10:45	11:15	0	
	Bayon_N26	C D G A B	BS BW TC BN RF	30Hz	1000	1800s	14:00	14:30	0	
	Bayon_N42	C D G A B	BS BW TC BN BE	30Hz	1000	1800s	15:05	15:35	0	
2004/9/17	PSP_N5	C D G	BS BW TC : Ex. Sensor	30Hz B : Basement	1000 N : North	1800s S: Sub tower	8:30 E : East	9:00	0	
			: Failed	T : Top	S : South	C : Central tower	W : West			

Tab. 6.2.2-3.1 Measurement history and specifications.

data	site	GPL	point	filter	gain	trigger time	start time	stop time	weather	
		F	TC TS	30Hz 30Hz	500	3h	15:30	18:30	-	
		E	TC	30Hz	500	3h	18:30	21:30	-	
2004/0/0		E	TC	30Hz	500	3h	21.30	0.30	-	
2004/9/10	Bayon_main	E	TS	30Hz 30Hz	1 500	3h	0:30	3:30	-	
		F	TS TC	30Hz 30Hz	1 500	21	2.20	5.30	_	
		F	TS	30Hz	1	3n	3:30	6:30	-	
		F	TS	30Hz	1	2.5h	6:30	9:00	-	
		F	TS	30Hz 30Hz	500	2h	10:00	12:00	-	
		F	TC TS	30Hz 30Hz	500	3h	12:00	15:00	-	
		E	TC	30Hz 30Hz	500	3h	15:00	18:00	-	
2004/9/10 ~		E	TC	30Hz	500	3h	18:00	21:00	-	
2004/9/11	Bayon_main	E	TC	30Hz	500	3h	21:00	0.00	_	
		E	TS	30Hz 30Hz	500	2h	0:00	3:00		
		F	TS TC	30Hz 30Hz	1 500	21	2:00	5.00	_	
		F	TS	30Hz 30Hz	1	311	5.00	0.00	-	
		F	TS	30Hz	1	3h	6:00	9:00	-	
		F	TS	30Hz	1	2h	10:00	12:00	-	
		F	TS	30Hz 30Hz	500	3h	12:00	15:00	-	
		F	TC TS	30Hz 30Hz	500	3h	15:00	18:00	-	
2004/9/11 ~		E	TC	30Hz 30Hz	500	3h	18:00	21:00	-	
2004/9/12	Bayon_main	E	TC	30Hz	500	3h	21:00	0:00	-	
		E	TC	30Hz	500	3h	0:00	3:00	-	
		E	TC	30Hz	500	3h	3:00	6:00	_	
		E	TC TC	30Hz 30Hz	1 500	36	6.00	0.00		
		F	TS TC	30Hz 30Hz	1 500	21	10.00	2.00	-	
		F	TS TC	30Hz 30Hz	1 500	2h	10:00	12:00	-	
		F	TS	30Hz	1	3h	12:00	15:00	-	
		F	TS TO	30Hz 30Hz	300	3h	15:00	18:00	-	
2004/9/12 ~	Bayon main	F	rC TS	30Hz	500	3h	18:00	21:00	-	
2004/9/13	n	E	TC TS	30Hz 30Hz	500	3h	21:00	0:00	-	
		E	TC TS	30Hz 30Hz	500	3h	0:00	3:00	-	
		E	TC	30Hz 30Hz	500	3h	3:00	6:00	-	
		E	TC	30Hz 30Hz	500	3h	6:00	9:00	-	
		E	TC	30Hz	500	2h	10:00	12:00	-	
		E	TC	30Hz	500	3h	12:00	15:00	-	
		E	TS TC	30Hz 30Hz	1 500	3h	15:00	18:00	-	
2004/0/12		E	TS TC	30Hz 30Hz	1 500	21	18.00	21.00		
2004/9/13 ~ 2004/9/14	Bayon_main	F	TS TC	30Hz 30Hz	1 500	311	18.00	21.00	_	
		F	TS TC	30Hz 30Hz	1 500	31	21.00	0.00	_	
		F	TS	30Hz 30Hz	1	3h	0:00	3:00	-	
		F	TS	30Hz	1	3h	3:00	6:00	-	
		F	TS	30Hz	1	3h	6:00	9:00	-	
		F	TS	30Hz 30Hz	1	2h	10:00	12:00	-	
		F	TS	30Hz 30Hz	500	3h	12:00	15:00	-	
		F	TC TS	30Hz 30Hz	500 1	3h	15:00	18:00	-	
2004/9/14 ~	Deven main	F	TC TS	30Hz 30Hz	500	3h	18:00	21:00	-	
2004/9/15	Bayon_main	E	TC TS	30Hz 30Hz	500	3h	21:00	0:00	-	
		E	TC	30Hz	500	3h	0:00	3:00	-	
		E	TC	30Hz	500	3h	3:00	6:00	-	
		E	TC	30Hz 30Hz	500	3h	6:00	9.00	_	
		F	TS TC	30Hz 30Hz	1 500	21	10.00	12:00		
		F	TS TC	30Hz 30Hz	1 500	211	10.00	12.00	-	
		F	TS	30Hz 30Hz	1 500	5N 21	12:00	15:00	-	
		F	TS	30Hz 30Hz	1	5h	15:00	18:00	-	
2004/9/15~	Bayon main	F	TS	30Hz	1	3h	18:00	21:00	-	
2004/9/16		F	rC TS	30Hz 30Hz	500	3h	21:00	0:00	-	
		E	TC TS	30Hz 30Hz	500	3h	0:00	3:00	-	
		E	TC TS	30Hz 30Hz	500 1	3h	3:00	6:00	-	
		E	TC TS	30Hz 30Hz	500	3h	6:00	9:00	-	
		E	TC	30Hz	500	2h	10:00	12:00	-	
		E	TC	30Hz	500	3h	12:00	15:00	-	
		F	TC IS	30Hz 30Hz	500	36	15:00	18.00	_	
2004/0/17		F	TS TC	30Hz 30Hz	1 500	21	12.00	21.00		
2004/9/16 ~ 2004/9/17	Bayon_main	F	TS TC	30Hz 30Hz	1 500	5N 21	16:00	21:00	-	
2004/9/17		F	TS	30Hz 30Hz	1	3h	21:00	0:00	-	
		F	TS	30Hz 30Hz	1	3h	0:00	3:00	-	
		F -	TS	30Hz	300	3h	3:00	6:00	-	
		F	rC TS	30Hz 30Hz	500	3h	6:00	9:00	-	
		E	TC TS	30Hz 30Hz	500	2h	10:00	12:00	-	
		E	TC TS	30Hz 30Hz	500	3h	12:00	15:00	-	
		E	TC TS	30Hz 30Hz	500	3h	15:00	18:00	-	
2004/9/17~		E	TC TS	30Hz 30Hz	500	3h	18:00	21:00	-	
2004/9/18	Bayon_main	E	TC	30Hz	500	3h	21:00	0:00	-	
		E	18 TC 70	30Hz	500	3h	0:00	3:00	-	
		E	TC	30Hz	500	3h	3.00	6.00	_	
		E	TC TC	30Hz 30Hz	1 500	26	6.00	8.00		
		F	TS	30Hz		211	0.00	0.00	-	

The long term measurement

E : micro-trimor UD1/NS/EW F : wind WD/WV



Fig. 6.2.2-4.1 Micro-tremor time history at the top of the Bayon central tower.



Fig. 6.2.2-4.2 Micro-tremor time history at the top of the Bayon N13 sub tower.



Fig. 6.2.2-4.3 Micro-tremor time history at the top of the Prasat Suor Prat S2 tower.





Fig. 6.2.2-4.4 Continuous observation of micro-tremor, wind speed, wind direction at the Bayon central tower.



Fig. 6.2.2-4.5 Auto power spectra of micro-tremor at the Bayon central tower (mode shape).



Fig.6.2.2-4.6 Mode shape of the Bayon central tower with band passed time history.

	TetUD	het/4S	IndNS	TVIEW	2ndEW	FinightCMD
103	16.2	-42	6.7	4.5	8.0	147
N15	16.2	3.8	7.1	3.8	6.9	12.7
NUL	155	3.8	8.2	3.5	8.1	13.4
NIG	16.5	11	9.0	3.7	8.8	16.2
N20	175	11	8.1	2.7	8.0	135
1622	175	42	10.2	38	81	10.3
1025	200	55	11.1	6.1	12.2	12.1
N216	178	40	9.1	42	103	140
NØ7	20.0	52	9.7	55	31.0	12.7
N28	8.7	40	8.0	46	8.9	145
N29	18.9	40	114	4.5	308	12.4
N30	240	45	117	3.4	7.2	15.2
1631	180	5.0	9.2	4.3	7.0	12.8
102	15.0	2.8	0.5	30	7.8	13.9
N33	18.2	6.0	92	55	110	12.8
1434	176	35	8.1	4.6	99	14.1
NOS.	125	- 49	10.9	5.2	114	150
1436	8.5	- 43	8.0	4.2	7.9	145
N37	10.9	41	11.8	52	109	12.1
N09	100	41	88	42	80	15.5
1942	99	42	9.9	4.9	0.1	144
5465	132	4.5	9.2	4.8	8.0	152
1448	132	45	95	52	9.9	15.4

Tab. 6.2.2-4.1 Predominant frequency of Bayon sub towers (Hz).

	1st UD	1st NS	2nd NS	TSL EW	2nd £W
N13	19.0	44	9.0	4.8	8.2
N15	18.8	3.8	7.5	4.0	7,0
N18	20.0	3.9	8.5	3.9	8.5
N19	18.0	4.2	9.3	4.0	9.0
N20	19.5	4.2	8.3	4.1	8.2
N22	18.8	4.5	10.5	4.9	9.6
N25	20.0	5.9	11.2	6.4	12.5
N26	21.0	41	8.6	49	10.9
N27	20.8	5.7	10.1	5.7	12.1
N28	19.7	4.5	8.8	4.0	9.1
N29	21.5	6.1	11.8	48	10.1
N30	24.1	4.7	11.8	3.6	7.7
N31	19.1	5.8	9.3	4.4	8.1
N32	18.5	3.1	7.2	3.2	8.5
N33	20.5	5.4	9.8	5.7	11.4
N34	22.0	3.9	8.7	4.7	10.5
N35	21.5	5.5	10.2	5.7	11.6
N36	18.5	4.9	8.3	4.3	8.7
N37	21.2	6.7	12.1	5.8	11.7
N39	20.2	4.6	9,1	4.7	92
N42	21.0	5.2	10.8	52	9.3
N45	20.5	49	9.7	5.1	10.2
NAR.	223	57	30.1	5.4	10.5

Tab. 6.2.2-4.2 Damping factor of Bayon sub towers (%).

Tab. 6.2.2-4.3 Base-fixed frequency of Bayon sub towers (Hz).

	Tut NS	1 et EW	2nd NS	2nd EW
NI3	3.8	- 23	1.1	2.7
N15	2.7	2.9	1.2	2.9
N18	1.6	15	1.8	2.1
9418	1.7	2.1	1.8	1.5
N20	2.2	2.6	2.1	3.7
N22	25	2.7	0.8	3.5
N25	2.8	38	2.2	1.0
N26	2.6	3.0	1.5	1.5
N27	1.6	2.3	1.0	0.7
M28	3.5	22	2.8	1.0
N29	2.5	2.5	1.0	0.0
N30	3.6	2.3	12	1.6
N31	1.4	2.7	24	2.0
N3Z	2.8	36	1.0	2.7
N33	21	1.0	27	23
N34	2.8	22	1.6	13
N35	1.8	1.3	0.8	1.5
1438	2.8	1.6	21	2.2
.9437	2.5	1.3	11	3.1
N39	1.4	2.1	32	1.8
N42	3.8	32	1.5	1.2
N45	2.7	22	14	1.4
N48	2.0	2.9	1.4	2.8

* The data of N19, N20, N29~N34, N45 are in 2003.



Fig. 6.2.2-4.7 Relation between horizontal frequencies of Bayon sub towers.



Fig. 6.2.2-4.8 NS component auto power spectra of micro-tremor at the Bayon N18 sub tower (mode shape).



Fig. 6.2.2-4.9 EW component auto power spectra of micro-tremor at the Bayon N18 sub tower (mode shape) / (The value of base is about 1/20 as much as real value).



Fig. 6.2.2-4.10 NS component mode shapes of the Bayon N18 sub tower with band passed time history.



Fig. 6.2.2-4.11 EW component mode shapes of the Bayon N18 sub tower with band passed time history.

1stNS 2mdNS ly:EW FatUD 2ridEW N2 3.0 90 8.9 32 8.5 22 N3 9.0 6.3 27 13 N4 6.7 42 11.0 8.5 33 3.4 9.6 N5 0.5 4.0 5.3 N6 9.1 32 93 3.8 8.5 12.6 91 8.8 39 36 82 89 52 12 20 13.1 10.0 31 12.0 \$3 30 38 **S**4 8.4 10.8 10.8 2.1 89 8.5 9.8

Tab. 6.2.2-4.4 Predominant frequency of Prasat Suor Prat towers (Hz). Tab. 6.2.2-4.

Tab.	6.2.2-4.5	Damping	factor of	Prasat S	Suor I	Prat towers	(%)	ł
------	-----------	---------	-----------	----------	--------	-------------	-----	---

	1 at NS	List EW -	2nd NS	2nd EW
112	1.0	1.8	1.6	1.7
N3	1.2	1.3	2.1	2.3
144	22	2.6	21	5342
N5	2.0	1.2	1.9	1.9
(106)	1.2	1.1	2.0	1.9
S1	3.0	0.8	1.8	1.2
52	2.3	1.1	2.0	0.8
-\$3	2.2	2.1	23	1.7
- 54	23	0.9	22	1.0
S5	22	1.6	21	1.0

Tab. 6.2.2-4.6 Base-fixed frequency of Prasat Suor Prat towers (Hz).

	1st UD	Let NS	2nd NS	1th EW	2nd EW
N2	18.2	3.5	9.7	4.8	1.5
N3	12.0	22	6.3	2.8	7.3
N4	12.0	3.8	6.8	4.2	11.0
N5	18.5	37	9,9	4.2	8.7
N6	15.8	3.6	9.9	3.9	8.9
S1.	16.4	39	12.1	3.4	9.0
52	18.5	3.8	8.8	4.2	13.5
\$3	16.5	3.5	10.5	4.0	12.5
S4	18.2	3.6	10.9	4.1	15.2
:55	14.5	3.6	88	4.2	9.8

* The data of N3, N4 are in 2003.

Top

H1(Top-Porch) H2(Porch) H3(Porch) base



Fig. 6.2.2-4.12 Relation between horizontal frequencies of Prasat Suor Prat towers.





at the Prasat Suor Prat S2 tower (mode shape) / (The value of top is about 1/12 as much as real value).

0.0006

20.0077

ğ0.0558

3. OH

1847

Fig. 6.2.2-4.14 EW component auto power spectra of micro-tremor at the Prasat Suor Prat S2 tower (mode shape) / (The value of base is about 1/23 as much as real value).



Fig. 6.2.2-4.15 NS component mode shapes of the Prasat Suor Prat S2 tower with band passed time history.



Fig. 6.2.2-4.16 EW component mode shapes of the Prasat Suor Prat S2 tower with band passed time history.

Bayon central tower				
	instaral frequency (Hz)			
	model	measurement		
NE comp. 1st	3.2	3.1		
NE comp. 2nd	54	5.2		
locsion	8.9			
UD comp.1st	9.5	18.2		

	model	measurement
NE comp. 1st	3.2	3.1
NE comp. 2nd	5.4	5.2
torsion	8.9	
UD comp.1st	9.5	18.2

	natural frequency (Hz)		
		measurement	
	model	average of independent towers	
NS comp. 1st	4.0	4.0	
EW comp. 1st	4.0	4.1	
tonion.	8.4	-	
NS comp. 2nd	9.1	8.6	
EW comp. 2nd	9.1	8.7	
UD comp. 1st	13.3	19.2	

	Pras	ut Suor Prat			
	natural frequency (Hz)				
	model A model B		measurement		
		(with antechamber)	average of all towers		
short side comp. [si	3.6	3.7	3.6		
long side comp. Ist	4.1	45	4.1		
2001 ion	83	8.5			
short side comp. 2nd	9.7	9.8	9.6		
long side comp. 2nd	10.6	11.0	11.2		
UD comp. Int	12,2	12.7	16.3		

	Sandatone	Lutarite
Poisson's ratio	0.28	0.3
density of mass	2.5 v/m ³	2.331/m ³
Young's modulus	1.7×10 ⁶ ti/m ²	2.0×10 [#] tt/m ²

Tab. 6.2.2-5.1 Natural frequencies obtained by analysis and measurement.







model A (without antechamber)

model B (with antechamber)

Fig. 6.2.2-5.3 FEM model for Prasat Suor Prat.

Appendix 7 : Petrology Survey Report of the Bayon Temple

UCHIDA Etsuo, Olivier CUNIN

1. Introduction

The investigations carried out by the Petrology Unit of JSA during the year 2001 were focused mainly on the Bayon style monuments in Angkor area. During the years passed these monuments had been already the subjects of research for the material used for their construction, sandstone and laterite essentially. The obtained results revealed that one of material properties enables us to characterize the sandstone of the Angkor monuments, namely, the magnetic susceptibility shows strong variations in the monuments of this style. Thus in Preah Khan, Ta Prohm, Banteay Kdei and Neak Pean,¹ the average magnetic susceptibility measured in these complexes varies from place to place while in Angkor Wat, temple preceding them, shows a homogeneous magnetic susceptibility on the whole of its structures.²

This heterogeneity of the monuments of the Bayon style is actually the consequence of their architectural history. Indeed, these temples are, as we see them nowadays, the result of a diachronic assembly of buildings consecutive to the modifications of their preliminary project.³ The origin of the sandstones used maybe have changed for each construction phase, thus explaining the variations of the magnetic susceptibility in these temples. However the restricted number of the results of this sandstone's properties already acquired did not enable us to show a sufficiently clear logic allowing to establish a complete relative chronology of each monument and also of the style.

The three missions carried out in 2001 aimed to elucidate these points in collaboration with a specific research program on the comparative architectural history of the monuments of the Bayon style.⁴

1.1 Presentation of the comparative architecture history analysis of Bayon style temples

Because of the complexity of the large monuments of the Bayon style, the research program "From Ta Prohm to Bayon" joined with the research of the petrology team of JSA in order to bring a complementary point of view in the continuation of the investigation started before. This program has a major ambition to contribute to the comprehension of the mechanisms of evolution of the architecture of the great Khmer religious complexes built during the end of the 12th century and the beginning of the 13th century. Currently, only Bayon, temple emblematic of the art of the same name, were the subject of an architectural analysis for this period. The evolution of the other great religious complexes of this art remained to elucidate. The construction of an individual and general relative architectural

付録7 バイヨン寺院の岩石学調査報告

内田悦生、オリビエ・クニン

1. はじめに

2001 年度に JSA の岩石班は、主として、アンコー ル地域におけるバイヨン様式の遺跡を対象に調査を 行なった。これまで、これら遺跡に用いられている 建材のうち砂岩とラテライトを中心に調査が行なわ れた。その調査結果によれば、遺跡により帯磁率の 測定値に差が認められることが判明した。帯磁率は、 アンコール地域の遺跡に用いられている砂岩の特質 を明らかにする上で有効な値である。プレア・カン、 タ・プローム、バンテアイ・クデイやニャック・ポ アンにおいて¹、構造部材に対して測定して得られた 帯磁率の平均値は、場所により差がある。それに対 して、バイヨン期以前に建造されたアンコール・ワッ ト全体においては、平均帯磁率に差が見られない²。

バイヨン様式の遺跡に認められる上述の不均質性 は、その建立の歴史に起因する。今日われわれが目 にしているバイヨン様式の寺院は、最初の造営計画 の変更に伴って種々の建造物が異なった時期に増築 されているからである³。更に、建材として用いられ た砂岩の供給地が、寺院建造期からそれ以降の増築 期にかけて変化した可能性があり、それゆえ、測定 結果である平均帯磁率に違いが認められると解され る。しかしながら、これまでに得られた砂岩帯磁率 の測定結果は限られたものであり、各遺跡の増築に 関して、厳密な意味における様式の変遷に対応した 完全な相対年譜を確立するために十分な考察を行な うことができなかった。

2001年に行なわれた三回の調査は、上述の点を明 らかにすることを目的としたものであり、バイヨン 様式の遺跡の比較建築史に関して現在行なわれてい る調査プロジェクト⁴と協力して進められた。その 調査結果を以下に報告する。

1.1 バイヨン様式の寺院に関する比較建築史の概要

バイヨン様式の巨大遺跡は複雑な建築形態にあり、 「タ・プロームからバイヨンまで」調査プロジェクト は、以前に着手した調査を続行するに際して、視座 をより広げるために、JSA 岩石班が進めている調査 プロジェクトに参加した。このプロジェクトの主た る目的は、12世紀末から13世紀初頭にかけて、クメー ル文明の巨大宗教建築がたどった様式変遷の過程を 解明することである。現在のところ、この時代に関 しては、バイヨン様式を象徴する寺院であるバイヨ ンのみが建築学上の分析対象となっており、それ以 外のバイヨン様式の巨大宗教建築の増築過程につい ては解明されていない。それら個々の建築物の建造 に関する相対年譜と建造群の全体に関わるその年譜 を作成することによって、このプロジェクトを進め る際の基本的な調査手段が揃う。比較研究の対象を 異なった年代にひろげることにより、バイヨン様式 の遺跡における増築過程と、その建造物に関する最

chronology of these monuments is the essential tool of this research. This is a comparative study of these various chronological sequences that can deduce the original concept of these monuments and also the mechanisms of accumulations.

These studies are based on a methodology adapted to specificities of the principal religious complexes of the Bayon style such as Ta Prohm, Preah Khan, Banteay Kdei, Banteay Chmar and Bayon. As it was mentioned in introduction, the apparent complexity and chaos in their compositions is the result of diachronic additions of buildings. The relations which maintain among the monuments constitute the start of the chronological sequencing process of the study. This method is completed by the crossing of multiple architectural and decorative criteria common to the whole of the temples (Fig. 7-1). So the various chronological sequences of the temples are simultaneously elaborated and get information mutually, refining and gradually rectifying the results according to the progress of the research program. The sequences deduced from the structural analysis of the monuments remain the constant reference during this process whose results of the magnetic susceptibility obtained during the investigations of the year 2001 were integrated to bring a tool for checking the result already obtained and to make it possible to refine these.

2. Methodology and results obtained

The measurements of the magnetic susceptibility were carried out, like the previous years, using a portable magnetic susceptibility meter not causing any deterioration to measured materials (Fig. 7-2). The final results for each investigated structure are obtained by the average of fifty different measurements.

The measurements are generally taken inside the buildings selecting the blocks belonging to the analyzed structure in order to avoid all interference of the data making the final result less representative and source of erroneous interpretation. Indeed, although of many additions clearly recognizable required a minimum analysis of the structures in order to ensure which were the walls belonging to the considered unit. Thus the investigation of large complex of the Bayon style, posing this problem, was based on the structural analysis carried out beforehand (Figs. 9-3 to 10). This total reading of one of the aspects of the history of these monuments must be supplemented by a local analysis of masonries during the establishment of sampling because of the reuse blocks that we can found as we will see it.

2.1 Example of structural analysis and measurement

As we show easily, the large monuments of the Bayon style such as Ta Prohm and Preah Khan constitute a difficulty dur初の設計理念を解明することが可能となった。

上述の調査は、バイヨン様式の主な宗教建築 - タ・ プローム、プレア・カン、バンテアイ・クデイ、バ ンテアイ・チュマー、そしてバイヨン-の特殊性に 適した方法論に基づいて行なわれた。「はじめに」の ところでも述べたように、これら宗教建築の形態が 明らかに複雑で混沌としているのは、それらが異なっ た時期に継続して増築されたからである。増築され た諸部分の関係に注目することが、どの時期に増築 されたのか、その点を解明する上で出発点となり、 この方法は、全ての寺院に共通する建築技法と装飾 技法に関する指標をそれぞれ組み合わせることで補 完される (Fig. 7-1)。また、プロジェクトの進行状況 に応じて調査結果を徐々に詳細なものにし、また、 修正しながら寺院のどの造営年代がその他の造営年 代に対応しているのか推定することができる。遺跡 の構造に関する分析から造営年代を推定することが できるが、それは各寺院の造営過程を解明する上で 常に参照されることになる。2001年度の調査期間中 に得られた平均帯磁率の測定結果は、この造営年代 を推定するのに役立つだけでなく、これまでの調査 結果を検証し、更に詳細なものにする上でも役立つ ものである。

2. 調査方法と調査結果

帯磁率測定は、石材を一切損傷しない携帯用帯磁 率計を用いて行なわれた。各構造体に対する帯磁率 の値は、50部材に対して測定を行なった上で、その 平均値を出して求めた (Fig. 7-2)。平均値をもって調 査値とし、更に正しい所見を得るために、誤差を生 みかねない要因を全て取り除く必要がある。そのた め、原則として、調査対象の建造物に用いられてい る石材だけを慎重に選びだし、建造物の内部で測定 を行った。実際のところ増築部分の多くは見分けが つくが、壁面のうちどれが調査対象の建造物に属し ているのかを確認するために、構造部材に関して最 低限の分析を施す必要がある。調査は、バイヨン様 式の巨大建造物について、これまでに行なわれた構 造部材に関する分析を参照しつつ行なわれた。この 調査よりバイヨン様式の巨大建造物の変遷過程が明 らかになり、それに関して以下に報告する (Figs. 7-3 ~10)。バイヨン様式の遺跡の史的展開の或る一面を 広角から眺めようとするならば、この建造物を建立 する際に石材をどのように組立てたのか、その点に 関して鋭角から分析しなければならない。以下で見 るように、調査対象である建造物の石材は転用され ていることがあるからである。

2.1 構造に関する分析と測定

先に簡単に述べたように、タ・プロームやプレア・ カンといったバイヨン様式の巨大遺跡を対象にして 帯磁率を測定するのは困難である。これらの遺跡は、 造営時期の異なった、しかも、その建築技術、建築 装飾そして図像モチーフから判断するに、バイヨン 様式に属する建築物が多数入り組んだ仕方で増築さ ing measurements of the magnetic susceptibility. Indeed, these monuments include many tangled up structures of different period of construction but remaining their construction technique, their decorations and iconographies in the art of Bayon. The structures developing in the west of the second gallery of Ta Prohm, we have in reality three periods of construction corresponding to other many buildings. The structural analysis of this unit showed that the sanctuary-tower 54 was built first without the extension to its east. This edifice was constructed in the second time with probably prolongation made of a perishable material such as the residences of wooden-beams regularly laid out on the east face. This structure was dismounted thereafter at the time of the construction of the second galleryenclosure of the temple. Thus in the case of the building 44 making junction between the tower 54 and the second gallery, only the northern, eastern and southern walls belong to this structure.

Consequently the east part of this building included in the wall of the second gallery needs to be excluded for measurements of this later structure. The results of the measurements taking into consideration these specificities, shows a clear difference between the three buildings measured. Thus the tower 54 shows an AMS of 3.99×10^{-3} SI Unit while the edifice 44 displays a means of 1.35×10^{-3} SI Unit and the second gallery an average fluctuated between 1.58 and 1.94×10^{-3} SI Unit. This example remains simple in comparison with certain place of Ta Prohm where four periods of intervention are found to be concentrated on very narrow area.

2.2 Problem of the reuse stones

In addition to the precaution due to the space-time tangle which constitute the complexes studied during their sampling, a particular attention on the nature of the measured blocks is essential. Indeed, the Bayon style monuments, like other monuments preceding them, comprise in their masonry a certain number of reuse stones, some perhaps coming from old monuments cannibalized for the occasion or already in ruin at the time. With this volume of blocks it is difficult to estimate the real importance with only the stones comprising a carving or of a strange stereotomy for their sites can be identified as reuse and consequently eliminated from our sampling.

On the internal face of the sanctuary-tower of Preah Khan, we can observe the presence of stone blocks comporting a regular alignment of circular holes. This evidence indicates that the stone was before a loading wharf of a window with balusters that were inserted in the different holes. The observations of the construction technique in Angkor area permitted us to say that this type of assembling for the balusters in the window is anterior of the Bayon style and also of Angkor Wat れているからである。タ・プロームの第二回廊を写 したものだが、その構造は西に展開しており、造営 時期を三分することができる。第二回廊の構造部材 の分析によれば、タ・プロームの祠堂塔(54)は第一 期に建立され、その東側に建築物を増築する計画は なかった。祠堂塔東側の増築は第二期に行われたこ とになる。祠堂塔の東側面には、梁を規則的に配置 するための溝が掘られている。梁を規則的に配する この構造は、その後、寺院を取り囲む第二回廊周壁 を建設する際には採用されなかった。祠堂塔(54)と 第二回廊周壁を結ぶ建造物(44)に関しては、北壁、 東壁そして南壁のみがこの構造に属している。した がって、第二回廊の内側に配されているこの建造物 の東部分は、第二回廊そのものを対象とした帯磁率 測定から外す必要がある。この点に注意した上で、 帯磁率の測定値を比較するならば、3棟の建築物に は相互に顕著な相違が認められた。祠堂塔(54)の平 均帯磁率は、3.99 × 10⁻³ SI unit であったのに対して、 その前室 (44)の平均帯磁率は、1.35 × 10⁻³ SI unit で あり、第二回廊の平均帯磁率は、測定箇所によって 1.58×10⁻³ SI unit から 1.94×10⁻³ SI unit の値を示し ている。ただし、四つの造営時期にわたり、非常に 狭い範囲に増改築が集中的に施されたタ・プローム の特定の箇所に比べれば、この事例は複雑なもので はない。

2.2 石材転用の問題

測定に際して、調査対象の建造物が空間的にも時 間的にも錯綜した状況の中で建立されたために注意 しなければならないことの他に、帯磁率測定を行う に際して、石材の供給地についても特に注意しなけ ればならないということが分かった。なぜなら、バ イヨン様式の遺跡は、バイヨン期以前の遺跡と同様、 一定数の石材が転用されて組積されており、その石 材は恐らく、昔の建造物を壊したり、あるいは既に 崩壊していた建造物から持ち出され転用されている からである。実際のところ試料としての重要性を評 価し難いこの石材に関しては、唯一、刳形があった り、転用箇所にあわせて珍しい形に切り出されたも のを転用部材として同定することができた。その結 果、そのような石材は、試料から取り除くことにした。 プレア・カンの祠堂塔の或る1基の迫出し構造内側 表面が示すところによれば、この祠堂塔には、正方 形のホゾ穴が規則的に並んだ石材が用いられている。 ホゾ穴が掘られていることより、この石材はもとも とは、連子子がはめられた窓の上枠、あるいは下枠 に用いられた石材であったと推定されよう。ところ で、アンコール地域における建築技術について確認 したところによれば、窓に連子子をはめ込むこの種 の技法はバイヨン様式以前に属する。しかし、この 技法はアンコール・ワット様式以前にも認められる ものである。したがって、ホゾ穴の掘られているこ の石材は、プレア・カン遺跡の建造期と同時期のも のである可能性は疑わざるを得ない。われわれが調 査を始める際に仮定したように、プレア・カン遺跡 style. So there is no doubt that this stone cannot be contemporary with the construction of Preah Khan which, as postulate of our study, was build principally with a new stone extracted from the quarries. The case of the reuse stone with a decoration on one surface has no particular difficulty in identification.

We observe in general that the reuse blocks in the Bayon style monuments are located in the superstructure. The stone with an old decoration, evidence of their pass life, are observable sometimes in the inside surface of the roof and the tower. This space was originally hided by wooden ceiling.

2.3 Results obtained

All survey done gives the possibility to draw a general map of the distribution of the average magnetic susceptibility of the Bayon style temples in Angkor area. The checked temples was: Ta Prohm, Preah Khan, Banteay Kdei and Bayon including Ta Nei, Banteay Thom, Prei Prasat, the satellite temples of Preah Khan (Prasat Prei, Banteay Prei, Neak Pean, Krol Kô and Ta Som) and the infrastructure of Angkor Thom considered to have been built by Jayavarman VII. The magnetic maps for all temples (Figs. 7-11 to 22) show two numeric data. The first number is the identification number of the structure and the second the average magnetic susceptibility obtained.

3. Interpretations

The interpretations presented here are the results of the crossing of the data of the magnetic susceptibility obtained for every Bayon style temples with their chronological sequence result by the architectural analysis. This permits to make the connection of these temples from the viewpoint of the magnetic susceptibility, and makes refine and correct these sequences. Indeed, certain edifices of the grand complexes of Jayavarman VII, which are isolated and contains few of architectural and decorative elements to situate them chronologically, can find their place in the relative chronology of the ensemble by the crossing information.

The synthesis presented here remains nevertheless a snapshot of the research which will continue to be refined in the future and does not insist to reply to all problems which will appear during the confrontation of the results of the architecture analysis of the monuments studied with the map of the magnetic identification.

The general development of the temples of this style clarified during the posterior research is confirmed again by our studies. In general, it is considered that the construction of the flat temples of the Angkor period started from a centrifuge development whose epicenter is the central sanctuary of the monumental complex, and the ultimate limit is the binomial moatenclosure. However, in the Bayon art, the second enclosure of を建造するために石工によって新たに切り出された 石材が、主に用いられていると考えられるのである。 一方、転用された刳形石材に関しては、測定に際し て問題が特に生ずるということはなかった。したがっ て、この点については取り上げないことにする。

一般的に確認できることとして、バイヨン様式の 建造物において転用された石材の大部分は、建築物 の上部構造に用いられており、その表面は、それが 過去においてどのような用途で用いられたのかを示 す刳形加工が施されており、手抜き工事を示す疑似 天井によって当初覆い隠されたものであった。

2.3 調査結果

帯磁率の測定結果を蓄積することによって、アン コール地域のバイヨン様式の寺院における平均帯磁 率の分布図を作製することができた。調査対象は以 下の通りである。タ・プローム、プレア・カン、バ ンテアイ・クデイ、ならびにタ・ネイ、バンテアイ・ トム、プレイ・プラサート、プレア・カンと密接な 関係にある寺院(プラサート・プレイ、バンテアイ・ プレイ、ニャック・ポアン、クオル・コー、タ・ソム)、 更にアンコール・トムのバイヨン様式に属すると考 えられる建造物の基礎部分である。帯磁率測定を行 なった各寺院について、その分布図(Figs. 7-11 ~ 22) を作成し、この報告の後半部分に掲載する。この分 布図には、測定対象の建物番号とその平均帯磁率の 二点に関する情報が示されている。

3. 所見

以下に報告する所見は、バイヨン様式の各寺院に おいて測定した平均帯磁率の測定結果と建築学的調 査から推定される各寺院の相対年譜における造営年 代を照合したものである。各寺院の造営時期を正確 につきとめ、訂正を施すことにより、バイヨン様式 の各遺跡の相互関係を帯磁率の測定結果から明らか にすることが可能となる。ジャヤヴァルマン VII に よって建立された巨大建造物を構成する幾つかの建 築物は、その造営時期を推定するのに役立つ建築装 飾の要素が認められなかったり、それに乏しかった りする。しかし、その構造部材の調査結果と平均帯 磁率の測定値を照合させることで、バイヨン様式の 相対年譜にこれらの建築物を位置付けることが可能 となる。

しかしながら、以下の報告は、調査の一端をまと めたものにすぎず、今後も調査を継続して、洗練さ せる必要がある。したがってこの報告は、平均帯磁 率の分布図と建築学上の調査結果を照合する上で生 ずる問題の全てにこたえることを意図したものでは ない。

バイヨン様式の寺院の発展過程に関する大枠については、異なったアプローチを採用したこれまでの 調査によって明らかにされてきたが、今回われわれ が新たに行った調査からもこれを裏付けることがで きた。アンコール期に属する平面展開型寺院の建造 過程は、中央祠堂を中心点として、環濠と周壁から
Ta Prohm, Preah Khan and Banteay Kdei was constructed extremely later. The couple moat-enclosure derogates also during this period at our ideal schema of evaluation. In fact, they are surrounded by enclosing wall in many temples of this period. This anomaly, specific to the reign of Jayavarman VII, already remarked before, is confirmed again with the crossing of the magnetic susceptibility of the sandstone with the architecture analysis.

In general, we did not observe a large dissension between the two points of view used in our study. However some anomalies appear in the more complex temples among the monuments analyzed. This gives no effect to the utilization of the data of the magnetic susceptibility to clarify the architectural history of these monuments and we invite contrary new questions which remain to be elucidated in the future.

3.1 Generality on the evolution of the Bayon style

The evolution of the Bayon style, as we know actually, is the result of a patient research published in 1965 by Ph. Stern. This chronology was essentially elaborated based on the comparison of some elements of the ornamental and architectural decoration which is particularly plentiful in the Bayon art. The architecture, in Banteay Kdei temple, assists to verify the hypothesis proposed during the determination of the chronological criteria of which the principal was the *devata*. The chronology, resulted from this work, subdivides the Bayon style into three periods of which only the last has the emblematic element of this art, the four-face towers.

The actual research directed to the comparative chronology analysis of the temple of the Bayon style takes count the results already obtained by Ph. Stern. However, only some criteria of this research, concerning essentially the architectural decoration, were used in these new studies. These selections are linked to the nature of the carriage and the domain analyzed. For convenience, another subdivision of the Bayon style, directly liked to the principal architectural criteria of the style, is used in this study. So the Bayon art is segmented in two large periods which are subdivided in two sub-periods. In order to simplify the interpretation of the magnetic susceptibility of the results for the sandstone, we'll use two division of the Bayon style (Fig. 7-23). This division is constructed on the typo-chronology of some major criteria of this research such as a ridge of a roof, the false-windows and the four-face towers.

So the first half of the Bayon style, in this simplified subdivision, is characterized by the ridge with individual ears and ears jointly liable, the false-windows with true and false baluster, and the tower without faces. The second half of the style, in this simplified subdivision, is characterized by the なる境界線にまで拡がる求心的発展であったと一般 的には理解することができる。しかし、バイヨン様 式に属する遺跡に関して言えば、タ・プローム、プ レア・カン、バンテアイ・クデイの第二周壁は、か なり遅い時期になって着工されたものである。われ われの想定した変遷過程によれば、環濠と周壁の組 み合わせも、バイヨン様式には属さない。バイヨン 期に建造された多数の寺院では、中央祠堂は周壁に よって取り囲まれるからである。この点は、ジャヤ ヴァルマン VII の治世下に建造された遺跡に特徴的 な例外であり、既に指摘されている点であるが、石 材帯磁率の分布図と建築学上の調査結果を照合する ことで確認された。

今回測定した帯磁率の測定値と建築学上の調査結 果の対応関係については、大枠では著しい不一致は 認められなかった。複雑な建立形態にあるバイヨン 期寺院の幾つかには、何がしかの例外が認められる が、その造営年代を推定するために帯磁率の測定結 果を用いること自体は問題ではない。その例外はむ しろ、今後取り組まれるべき新たな検討課題である。

3.1 バイヨン様式の変遷過程の概要

今日われわれに知られているバイヨン様式の変遷 過程は、1965年、Ph.ステルンによる長年の研究成 果が公表され明らかになった。この変遷過程は、主 として、バイヨン様式の建築装飾の要素を比較検討 することにより明らかにされたものである。バンテ アイ・クデイを通じて認められる建築様式が、デー ヴァター像に施された装飾部分を中心に、様式変遷 に関する指標を定める際の仮説を検証する上で役 立った。この検証から明らかになった変遷過程によ れば、バイヨン様式は三つの時代に分けられ、第三 期においてのみバイヨン様式を代表する人面塔が認 められる。

バイヨン様式寺院の相対年譜に関する比較検討に 取り組んだ今回の調査は、Ph. ステルンによって得ら れた研究成果に依拠している。しかし、ステルンの 研究が採用した指標-主として装飾部分に関するそ れ-のうち、幾つかしか今回の調査では採用しなかっ た。どの指標を採用するか、その取捨選択は調査の 性格や分析の対象に由来するものであって、ステル ンの指標設定や調査結果そのものを問題視するもの ではない。上述の時代区分とは異なる時代区分が、 便宜上、この調査において用いられたが、その区分 はバイヨン様式の建築技術に関して定められた主要 な指標に基づくものである。その区分によれば、バ イヨン様式は四段階に分割されるが、それは二段階 をそれぞれ二分して導かれたものである。帯磁率の 測定結果の解釈を簡潔に述べるために、バイヨン様 式の区分として後者(二大区分)を採用することにし たが (Fig. 7-23)、それは様式の類型的年譜に基づいて おり、大棟材、偽窓、人面塔といった建築装飾に関 する調査において採用した幾つかの指標から作成さ れたものである。

この単純化された時代区分における前期バイヨン

ridge with individual ears and a monolithic association of ears, the false-windows with true or false baluster and the towers without faces. Second half of the style is distinguished by the presence of ridge with niche (with *Buddha* or *rishi*), the falsewindows with lowered curtains and the four-face towers. This last criteria does not exclude therefore the utilization of towers with false story during this period. The attentive analysis of Banteay Chmar brings us to suppose that a hegemony period of this type of tower is possible. For memory, the four-face towers are exclusively only in Angkor (Bayon and the gates of Angkor Thom and the domain enclosure of Ta Prohm, Banteay Kdei and Ta Som), in Banteay Chmar and Prasat Preah Stung of Preah Khan of Kompong Svay. However, as we can see in Preah Khan, towers with false story belong to the end to the Bayon style.

3.2 Ta Prohm

This vast complex of Jayavarman VII, including five enclosures, situated in the east of Angkor Thom. Its stele of dedication, now stored in the conservation office of Angkor, indicates the date of 1186 placing Ta Prohm at the beginning of the official reign, located in 1181, of the last great angkorean king.

Taking into consideration its magnetic susceptibility, the construction of Ta Prohm perhaps can be divided into four large phases, each one oscillating between two values (Color Fig. 7-1). The first includes the structures displaying an average magnetic susceptibility between 2.7 and 3.2×10^{-3} SI Unit while the followings vary between 3.0 and 4.1×10^{-3} SI Unit, 1.0 and 2.1×10^{-3} SI Unit and 2.1 and 3.1×10^{-3} SI Unit (Fig. 7-24). As we see it, the average values show two phases of increase with a rupture between the second and the third periods of the evolution of the monument.

The first of these intervals period only the central sanctuary and the first enclosure. Let us note that the enclosure was the object of many repentances or trial and error during the construction whose memory remains in the interior surface of this gallery. The central sanctuary, whose current aspect contrasts with its immediate environment, seems to have been the object of a general rough-casting of its outer surface eliminating in the same occasion the original decoration on sandstone whose only some trace remains. This decoration was replaced thereafter by a decoration on stucco very deteriorated at present whose only some traces attests its existence. The architectural and ornamental decorations of the first gallery show many similarities with those of certain monuments of the end of the Angkor Wat style while the decoration of the second magnetic period includes a great number of the characteristic elements of the first half of the Bayon style.

The second range of magnetic susceptibility contains the

様式は、次の建築装飾によって特徴付けられる。す なわち、独立頂華材がはめ込まれた大棟材、あるい は頂華と屋根との接合部分が一体になった大棟材、 本物の連子子がはめられた偽窓と疑似連子子がはめ られた偽窓、そして人面なしの疑似階を備えた塔で ある。後期バイヨン様式に関しては、壁龕(仏陀や リシを安置するためのもの)を備えた大棟材、カー テン状のものが付いた偽窓、そして人面塔によって 特徴付けられる。後期において、この人面塔に疑似 階が付されることはない。

しかしながら、バンテアイ・チュマーに関して詳 細な調査を行ったところ、この疑似階のついた人面 塔が建造された時期があった可能性がある。人面塔 はアンコール(バイヨン、アンコール・トム城門、タ・ プローム、バンテアイ・クデイ、タ・ソム)、バンテ アイ・チュマー、コンポン・スヴァイにあるプレア・ カンのプラサート・プレア・ステュンにしかないこ とを想起する必要があろう。しかし、プレア・カン におけるように、疑似階のついた塔の建立は、バイ ヨン様式の末期に属する。

3.2 タ・プローム

ジャヤヴァルマン VII によって建立されたタ・プ ロームは、5 つの周壁を有し、アンコール・トムの 東側に位置する。アンコール遺跡保存事務所が保管 しているタ・プロームの奉呈碑には、1186 年という 年代が刻まれており、それゆえこの寺院は 1181 年に 始まるジャヤヴァルマン VII の治世初期に建造され たと推定される。

帯磁率の測定結果によれば、タ・プロームの建造 は四段階を経て行われた可能性があり、それぞれの 段階に対応する帯磁率は二値の間に分布している (Color Fig. 7-1)。第一期に建造された部分の構造部材 は、 2.7×10^3 SI unit から 3.2×10^3 SI unit の平均帯 磁率を示し、第二期は 3.0×10^3 SI unit から 4.1×10^3 SI unit、第三期は 1.0×10^3 SI unit から 2.1×10^3 SI unit、第四期は 2.1×10^3 SI unit から 3.1×10^3 SI unit の値をそれぞれ示している (Fig. 7-24)。この測定 値によれば、第一期から第二期にかけて、そして第 三期から第四期にかけて平均帯磁率は上昇しており、 遺跡の建造過程として第二期と第三期の間に断絶が 認められる。

第一期には、中央祠堂と第一周壁だけが建造され た。第一周壁は、建造に際して多くの改築と試行錯 誤を経ており、その過程は周壁内側の表面にうかが い知ることができる。中央祠堂は、今日、それを取 り囲む付属的な建物と対照的な外観を呈しているが、 第一回廊の改築を機会に、砂岩に施された装飾が取 り除かれ、祠堂の外側表面は全面的に化粧直しが施 されたと考えられる。しかしその痕跡は、石材外側 に施された装飾部分に幾つか認めることができるの みである。その装飾はその後、漆喰表面に施された 装飾に取って代わられたが、その漆喰装飾は今日激 しく損傷しており、幾つか残された痕跡によってそ の存在を確認できるのみである。第一回廊の建築装 third and fourth enclosures as well as a certain number of buildings located in the third enclosure. As we showed the structural analysis of this temple, the second enclosure cannot appear only in the ultimate phase of its development. The average magnetic susceptibility of this second gallery supports this conclusion. Indeed, we see that the latter contrasts with the results of the second period which is much higher.

Although the structural analysis led us to consider that the galleries of the north and south complexes (centered on the towers 60 and 70) is before the third enclosure, the results of their magnetic susceptibility, similar in the whole of these structures, incites us to consider the clearly observable structural disconnection between these cloisters and the third enclosure as the result of one repentance during the construction or related to the logistics of the building site.

Their central sanctuaries (60 and 70) have the same magnetic susceptibility as these galleries surrounding them while the building preceding them in their east displays strong different results. The latter, quite lower than the averages of the second interval is characteristic, as we will see it, of the third magnetic susceptibility range of Ta Prohm. This strong differentiation is found in the level of their architectural and ornamental decoration. Thus the central sanctuaries and their gallery are characterized by a decoration characteristic in the first half of the Bayon style (false-window with false entire balusters, monolithic ridge...) while the building clearly attached to the east of the central sanctuaries shows all indices of the second half of the Bayon style (false-window with lowered curtain, ridge with niche with Buddha...).

Although as a whole the architectural decoration of the galleries in cloisters is, as we said, the typical first half of the Bayon style as in the third enclosure of the temple, we can notice a difference in the level of the ridges that are employed there. Indeed if the whole of the enclosures of Ta Prohm, except for the domain and the second enclosures, have individual ridge-finials embedded in their ridge-cap, it is different from those of the galleries in cloister.

Indeed, the individual ridge-finials made place here with series of blocks in which ridge-finials are carved. These series of ridge-finial blocks take seat in ridge-cap using a system of fitment. This type of ridge once assembled resembles to those which one will find in very great number in Preah Khan and Banteay Kdei accepting for the difference that those have their ridge-finials and their ridge-cap entirely carved in the same block of sandstone and therefore do not show assembly.

This type of one block ridge with ridge-finial is only found in the galleries of the north and south secondary complexes of Ta Prohm. This propagation extremely limited in a style comprising a considerable number of monuments leaves us to think 飾は、アンコール・ワット様式末期に建造された幾 つかの遺跡に施された建築装飾に酷似しているが、 第二期に建造された部分の石材装飾には、前期バイ ヨン様式に特徴的な数多くの要素が認められる。

第二帯磁率期には、第三周壁と第四周壁とともに、 第三周壁に配されている楼が幾棟か建造された。第 二周壁は、タ・プロームの構造部材に関する分析結 果が示しているように、寺院の変遷過程の最終段階 においてようやく建造されたものと推定される。第 二回廊の平均帯磁率だけを判断材料にしても、この 点は支持されるように思われる。なぜなら、第二期 における平均帯磁率の測定結果は非常に高い測定値 を示しており、第二回廊の平均帯磁率の測定結果と は対照的だからである。

第三周壁よりも以前に造築された北側と南側の回 廊付きの建造群(特に塔60と塔70)も分析対象と なったが、構造部材の帯磁率の測定結果に関しては 総じて差が認められなかった。この回廊と第三周壁 の間には、構造部材に関する断絶が明らかに確認さ れるが、それは造築途中で改築されたか、あるいは 資材置場から資材提供をうけて改築された結果であ る。この中央祠堂(塔60と塔70)の帯磁率は、これ を取り囲む回廊の帯磁率と同じであるが、この中央 祠堂よりも先に建造され、その東側に配された建物 (61 と 71)の帯磁率とは全く異なる。後者の平均帯磁 率は第二期よりも低い値を示しているが、以下で見 るように、それはタ・プローム第三帯磁率期の特徴 である。建築装飾に関しても、第二帯磁率期と第三 帯磁率期の間に顕著な差異が認められる。前期バイ ヨン様式に特徴的な装飾(疑似連子子を有した偽窓、 単一大棟材に彫り込まれた頂華など)が、中央祠堂 とこれを取り囲む周壁に施されているのに対して、 中央祠堂東側に配された伽藍には、後期バイヨン様 式を示す装飾要素(カーテン状のものが下ろされた 偽窓、仏陀を安置するための壁龕を備えた大棟材な ど)が認められるからである。

総じて列柱回廊には、上述したように、第三周壁 に施された建築装飾が属する前期バイヨン様式の特 徴が認められるが、その周壁に架けられた大棟材に 関しては、装飾上の異同を指摘することができる。タ・ プロームの周壁には、最外周壁や第二周壁を別にす れば、その全てが屋根との接合部分にはめ込まれた 独立頂華材が用いられている。しかし列柱回廊では、 その頂華材の装飾に関して他の回廊と異なる。列柱 回廊には、独立頂華材の代りに、頂華を彫り込んだ 石材が並べられており、それぞれホゾ繋ぎによって 屋根との接合部分に設置されているからである。こ の種の大棟材は、プレア・カンやバンテアイ・クデ イにおいて数多く確認される大棟材と見間違えるほ どそれらに類似している。しかしそれは、後者の場合、 屋根との接合部分と頂華が同じ砂岩材に彫り込まれ ており、屋根との接合部分に頂華材がはめ込まれて いるわけではないという相違を除いた上でのことで ある。ホゾ繋ぎによって結合され、頂華を同じ石材 に彫り込んだ大棟材は、タ・プロームの北側と南側 that we deal with the prototypes of the ridge which will be employed thereafter until the end of the first half of the Bayon style.

An additional index reinforces this assumption. Indeed we find in the northern cloister the ridge-caps of which the groove being used to receive the blocks of ridge-finals show the traces of cylindrical lodging regularly left over all their length. We think that these latest are the vestiges of the mortises having to receive each one originally ridge-finials as it is the case of ridge-caps of the first, third and fourth enclosures of the temple. We would be here in the presence of the traditional ridge-cap of the beginning of the Bayon style and many preceding style that one would have adapted to the moment of the emergence of a new concept of execution of the ridges. We do not find these traces of mortises in ridge-caps of the southern cloister whose grooves seem to have been projected from the start.

Many sanctuary-towers belong to the second stage of the magnetic susceptibility. We find three towers in the east of the second enclosure comprising an architectural decoration similar to that of the first enclosure of the temple of which we mentioned the similarities with that of certain temples of the end of the Angkor Wat style. Thus the towers 47, 49 and 57 have the false-windows and the dummy carved-tiles similar to those of the first enclosure but that is not the case of towers 42, 45, 46, 53 and the sanctuaries of the north and south secondary complexes. (60 and 70) This similarity with the first enclosure and the clear difference in the average magnetic susceptibility from the latter leaves us to suppose that these three towers could be the first buildings set up during our second magnetic stage. This seems to be confirmed by the simultaneous presence of a false-window with true baluster and of a false-window with false baluster like symmetrical in the front part of tower 49.

Once again, we see in the case of tower 57 that the building connecting to the third gallery does not show a magnetic susceptibility similar to the structures that it connects.

The evaluation of the addition is perfectly readable to train the dissimulation of the pediments of the east front part of the tower 57 and that of pavilion 103. The attentive observation of these pediments informs us that one or two timber structures was originally grafted with these pediments. One or two wooden lean-to was probably dismounted during the construction of building 80.

Although we observe a coherence between the results of the magnetic susceptibility and the results of the structural and the decoration analyses, the first two magnetic periods of Ta Prohm comprises some anomalies. Thus the east and west pavilions of the fourth enclosure would be, based on its magnetic susceptibility, located in the first magnetic period of the temple, but this

に配されている脇伽藍を取り囲む回廊においてのみ 認められる。相当数の遺跡が含まれる特定の様式に おいて、頂華を同じ石材に彫り込んだ大棟材が極め て限定された範囲で採用されていることより、この 大棟材は、それ以後、前期バイヨン様式末期まで用 いられることになる大棟材の原型であると考えられ る。以下の事例からも、そのように考えられよう。 北側回廊で、頂華材をはめ込むための溝が掘られた 屋根との接合部分が発見された。その溝は、頂華材 の長さにあわせて規則的に割りふられた円筒形の穴 を掘った跡である。その穴は、タ・プローム第一周壁、 第三周壁、第四周壁の大棟材と同様に、頂華材の一 つひとつを本来はめ込むために、前もって穿たれた ホゾ穴の跡であると考えられる。北側回廊には、バ イヨン様式以前とその初期においては古典的な、屋 根との接合部分が認められるが、新しい大棟材の設 計理念の現れる時期がその後に続くように思われる。 というのも、南側回廊の屋根との接合部分には、当初、 溝を彫る計画があったと考えられるが、頂華材をは め込むためのホゾ穴の痕跡が認められないからであ る。

第二帯磁率期に属する数多くの祠堂塔のうち、タ・ プローム第一周壁の建築装飾一アンコール・ワット 様式末期に属する幾つかの寺院において確認される 建築装飾との類似性を既に指摘したーに類似した建 築装飾が、第二周壁東側に配されている3基の塔(47、 49、57) に認められる。これらの塔は疑似瓦と偽窓を 有しているため、第一周壁との類似性を先ず指摘す ることができるが、この類似性は、塔42、塔45、塔 46、そして塔 53、あるいは寺院の北側と南側に配さ れている脇伽藍(塔60と塔70)に関しては全く認め られない。第一周壁との建築装飾上の類似と平均帯 磁率の顕著な差異より推定するに、これら3基の塔 は、第二帯磁率期において最初に建造された可能性 がある。このことは塔49の前室において、本物の連 子子をはめ込んだ偽窓と偽物の連子子が彫り込まれ た偽窓がシンメトリーに配置されていることから裏 付けられるものと考えられる。

塔 57 に関して、第三回廊と塔 57 を繋ぐ建築物に おける構造部材の平均帯磁率に類似性が認められな ことが今回の調査で判明した。完全に解読すること ができる増築された部分に関する調査によって、増 築された部分が塔 57 前室東側のペディメントと矩形 建築物 103 のペディメントを覆い隠していることも 今回の調査で判明した。このペディメントを注意深 く観察したところ、一本か二本の木製構造部材が本 来はこのペディメントに付されていたことが判明し た。この構造部材は、建築物 80 を建造する際に取り 外されるまで、恐らくはそこにあったものと思われ る。

帯磁率の測定結果と構造・建築装飾に関する分析 結果の間には一貫性が認められるが、タ・プローム の第一帯磁率期と第二帯磁率期には幾つかの例外が ある。第四周壁の東建造物と西建造物は、その帯磁 率から判断するに第一帯磁率期に属するが、しかし、 pose problem. Indeed, we were previously brought to consider towers 47, 49 and 57 to be intermediate between these periods because of their architectural decoration. However we do not find the singular elements characterizing these three towers and the first enclosure of Ta Prohm to the pavilions of its fourth enclosure. The architectural decoration of this *gopura* would, to the contrary, place it after the three towers previously quoted and before the construction of the galleries of the northern and southern secondary complex. We are satisfied for this time to notice this apparent anomaly.

Another incoherency for these periods resides in the composition of the third enclosure of Ta Prohm. Indeed we count there only one tower located at the western pavilion of this enclosure. This localization is more astonishing while the temple seems directed towards the east. The third enclosure of Preah Khan comprises also towers in only one cardinal point, but to the contrary in that of Ta Prohm, their localizations remains coherence with the orientation of this temple which is also towards the east. Religious or functional reasons could be the origin of what we consider, perhaps wrong, as an anomaly but for this time nothing enables us to advance a viable assumption.

The third magnetic period of Ta Prohm is made up mainly of the second enclosure and a certain number of buildings connected by the building 109 known as "hall of the dancers." The analysis of the structural relations coupled with that of the architectural decoration of buildings constituting this penultimate magnetic range indicates us that the latter covers several waves of additions. Indeed if the architectural decoration of the second enclosure is appreciably the same one as cloister 37 centered by the tower 40, the buildings 3, 5, 44, 61, 71 and 80 and the hall of the dancers, it is not the case with the towers 40, 56 and the long buildings 48 and 58. The latter buildings indeed have a typical architectural decoration of the first half of the Bayon style and then the buildings previously quoted are clearly situated in the second half of the style based on their decoration. The crossing from the various points of view encourages us to consider a change of the origin of the blocks of sandstone during the period of construction of the towers situated in the east of the second enclosure of Ta Prohm which seems to be all contemporary by their decoration.

At this period, we can add "the house of fire" in the east of the fourth enclosure and the *gopura* of the domain enclosure although that of the west has a magnetic susceptibility slightly higher than the others of the temple.

The fourth and last magnetic periods of Ta Prohm include only the building 116, known as "building with columns," and some interior modifications in the western part of cloister 37. The average magnetic susceptibility that this curious building そのように推定するには問題がある。先にわれわれ は、塔 47、塔 49 そして塔 57 を、その建築装飾から 第一帯磁率期と第二帯磁率期を繋ぐものとみなした が、これら3基の塔と第一周壁を特徴付ける装飾要 素が第四周壁に配された建造物には認められないか らである。その建造物に施された建築装飾から判断 するに、それはむしろ反対に、先の3基の塔の建築 以後に、そしてタ・プロームの北側と南側の脇伽藍 を取り囲む回廊の建築以前に位置付けられよう。し かし現時点では、この異質性を指摘するだけにとど める。

第一帯磁率期と第二帯磁率期に関するその他の例 外としては、タ・プローム第三周壁の建築形態その ものを挙げられよう。第三周壁西楼門に塔が1基認 められる。寺院は東側へ展開しているから、この設 置は非常に興味深い。プレア・カン第三周壁もまた 中央部にしか塔は認められないが、タ・プロームの 周壁とは違って、第三周壁における塔の配置は、東 側へ展開しているプレア・カンの展開方向に即した ものとなっている。この点は宗教上の理由、あるい は機能上の理由によるものであって、それを例外と みなすのは誤っているかもしれない。現時点では、 説得力ある推定を行なうことはできない。

タ・プロームの第三帯磁率期においては、主として、 第二周壁とそれに付属する建築物が幾つか、更に No. 109の「舞楽殿」が建造された。構造部材の関係 に関する分析と第三帯磁率期に建造された建築物の 建築装飾に関する分析によって、第三帯磁率期には 増築期が幾つか認められることがわかった。第二周 壁の建築上の装飾は、塔40を中心にした回廊37に 施された装飾、あるいは3、5、44、61、71、80の装飾、 また舞楽殿の装飾と明らかに同じだが、塔40と56、 矩形建物48と58に関しては事情は異なる。後者の 建築装飾は前期バイヨン様式の典型であるのに対し て、前者は、その建築装飾から判断するに、明らか に後期バイヨン様式に属している。種々の点を考慮 した結果、タ・プローム第二周壁ーその建築装飾か ら判断するに同時期に建造された一の東側に位置し ている塔の建造期に、砂岩材の供給地が変更された ものと考えられる。タ・プロームの第三帯磁率期に 関して、その他に、第四周壁の東側宿坊と最外周壁 楼門の建造を指摘することができるが、西楼門では 寺院の他の楼門に比べて少し高い帯磁率が得られた。

タ・プロームの第四帯磁率期においては、「列柱殿」 と呼ばれる No.116 の建築物のみが建造され、回廊 37 西側内部に幾つかの改築が施されたのみである。 この列柱殿は興味深いものだが、その平均帯磁率に よれば、この建造物を第一帯磁率期に含めることも 可能であろう。しかし、この建造物は伽藍配置の全 体像のなかで特異な配置をしているため、その築造 はタ・プローム建立の初期計画には含まれていなかっ たと考えられる。なぜなら、この建築物は、伽藍中 央部とレンガとラテライトが建材に用いられている 46 棟の建築物が林立する北側部分を分かつ内壁をさ えぎる仕方で配されているからである。寺院北部は、 with columns displays allows us to integrate it in the first range of magnetic susceptibility of the temple. However its particulate localization in the general composition of the temple lets us think that this does not belong to the preliminary project of Ta Prohm.

Indeed, this one stops the interior wall separating the central part of the northern subspace where forty-six buildings made of bricks and laterite are distributed. This subspace is counterbalanced by a space equivalent to the south of the center of the religious complex. This one comprises forty-seven buildings made of bricks.

We can note that these partition walls are crowned by ridges similar to those of the first phase of construction of the temple. However, at this period, the hall of the dancers did not exist. Although we cannot know if the current site of this vast building were occupied before, we can explain the fact with difficulty that this hall with the columns is cantilever between two spaces with the deeply different functions so that we feel the utility to separate them physically. This particular position explains, moreover, the difference of the brick buildings between the northern and southern enclosures. Indeed, the hall with columns takes place exactly where the forty-seventh building is situated. Nothing, however, enables us to affirm that this building existed and that it was dismounted at the time of the construction of the building with columns. However, as we will see it, the hall with columns of Banteay Kdei will allow us to bring an additional element to our assumption.

3.3 Preah Khan

This large complex of the Bayon style is located in the north of Angkor Thom. Its dedication stele discovered in 1939 indicates the date of 1191, so five years after that of Ta Prohm. The results of the magnetic susceptibility of Preah Khan are for this time most complex to interpret. We will thus mention here only the broad outline.

We can constitute four groupings of the magnetic susceptibility for the many measurements carried out in this temple (Color Fig. 7-2). However the last one will have to be the subject of a subdivision in the future because in order to make the first interpretation we were in the obligation to regroup a considerable number of buildings of the extremely divergent magnetic behavior with the results of the architectural and decorative analyses.

The first magnetic range of Preah Khan oscillates between 2.5 and 3.3 \times 10⁻³ SI Unit. It consists of the central sanctuary and the building developing in its east. In addition, towers 6 and 33 in the east of the central sanctuary, the first gallery-enclosure and four towers distributed on the cardinal points of temple (63, 73, 95 and 120) are included. Three of these towers

タ・プロームの伽藍中央部の南側と同じ広さであり、 釣り合いがとれている。寺院南側には47棟のレンガ 材建築物が林立している。

われわれが確認したところ、上述の内壁には、タ・ プローム建立の第一期に属する大棟材に類似した大 棟材が架けられていた。ところでタ・プローム第一 建立期には、舞楽殿の建造は未着手であった。この 舞楽殿が現在配されている場所に、その建造以前に 他の建築物が配されていたのかどうか知る術はわれ われにはない。しかしそのように考えなければ、全 く異なった機能を担った二つの空間が外観上、分断 されたものであるとわれわれに感じさせるために、 この列柱殿が偽扉によってこの空間を遮っていると いう事実を説明するのは困難であると思われる。そ の上、列柱殿の配置は、北側と南側の塀にはさまれ たレンガ材建築物とこの列柱殿が異なるものである ことを示している。なぜなら、この列柱殿は、47番 目の建築物が配されるべき場所に正確に建造されて いるからである。しかし、47番目の建築物が実際に 建造され、列柱殿の建造に際して取り壊されたとい うことを確証するものは何もない。それでもわれわ れの仮説的な所見は、以下にみるように、バンテアイ・ クデイの列柱殿の事例より裏付けられる。

3.3 プレア・カン

バイヨン様式の巨大遺跡であるプレア・カンは、 アンコール・トムの北側に位置している。プレア・ カンの奉呈碑は 1939 年に発見され、タ・プロームの 五年後である 1191 年という日付けが刻まれている。 プレア・カンで測定した帯磁率は、現時点では、所 見を述べるにはあまりに複雑であるため、以下では 大枠を述べるにとどめる。

プレア・カンで得られた測定結果より、帯磁率を 四つの時期に分類することができる (Color Fig. 7-2)。 しかし、第四帯磁率期に関しては、将来、更に細分 する必要があろう。今は基本的な考察を行なうため に、建築装飾に関する分析結果に対応しない帯磁率 を示す相当数の建築物を分類しなければならない。

第一帯磁率期の値は、2.5 × 10³ SI unit から 3.3 × 10³ SI unit である。第一帯磁率期には、中央祠堂と 東側へ展開する建築物が建造された。更に、中央祠 堂東側に配された塔 6 と塔 33、第一回廊周壁、そし て中央祠堂の東西南北に配された 4 基の塔 (63、73、 95、120) も建造された。これらの 4 基の塔のうち 3 基はそれ自体、小規模の宗教伽藍を構成し、その中 心部分となっている。

第一帯磁率期に属する建築物の特徴は、タ・プローム第二帯磁率期に属する建築物に認められる建築装飾に類似した装飾が施されていることである。 プレア・カン第一帯磁率期に属する建築物には、二種類の大棟材が用いられていることに注意しなければならない。塔6と塔33には、独立頂華材のはめ込まれた大棟材が用いられているのに対して、それ以外の建築物には、単一石材に頂華と屋根との接合部分を彫り込んだ大棟材が用いられている。中央祠堂 constitute a center of a religious complex of less importance. This first magnetic period is characterized by an architectural decoration extremely similar to that observed on the buildings of the second magnetic range of Ta Prohm. Let us note that we have two types of ridge employed during the first time of Preah Khan. Indeed we find in the towers 6 and 33 the ridge with individual ridge-finials while the other buildings have monolithic ridge-finials and ridge-cap. The state of ruin of the central sanctuary did not allow us to have the absolute evidence of the presence of ridge with individual ridge-finials, but we think that the latter is contemporary with the towers 6 and 33, which we can attach to the period of construction of the third and fourth enclosures of Ta Prohm. The other buildings of our first period would be posterior to the construction of the galleries of the north and south cloisters of Ta Prohm. Indeed we could not observe the presence of the assembly characteristic of these galleries in cloister in Preah Khan.

The second magnetic period includes only the pavilions in the entrance of the third enclosure of the temple. This ensemble oscillating between 1.5 and 2.5 \times 10⁻³ SI Unit shows no notable evolution of its architectural decoration with the first magnetic period.

The third period includes the whole of the buildings ranging between 1.0 and 2.1 $\,\times\,$ 10⁻³ SI Unit. This includes a significant number of additions within the first enclosure as well as the enclosures of the northern, southern and western secondary complexes. This period seems to cover several phases of consecutive addition. Indeed we can observe an evolution of the architectural decoration as well as additions of magnetic susceptibility equivalent to the buildings that it supplements. Thus, we can add to the towers 8 and 31 the buildings 7 and 32 whose architectural decoration is similar. The results of the magnetic susceptibility show however a slight difference which confirms the architectural story of these buildings. Indeed, towers 8 and 31, respectively, display an average value of 1.21 imes 10^{-3} SI Unit and 1.23×10^{-3} SI Unit while buildings 7 and 32 have an average of 1.05 and 1.07 imes 10⁻³ SI Unit. We can notice that these towers have already a false-windows with lowered curtain while their ridges are still monolithic with ridge-finials while the buildings added during this third magnetic period in the western part of the first enclosure have at the same time false-windows at lowered curtain and ridge with niche with Buddha. This leads us to advance the assumption that most of the structures of the third period located in the eastern part of the first enclosure, 7, 8, 9, 30, 31 and 32, were built before the buildings in the western part which has all the same architectural decoration.

The galleries of the north, south and west sanctuaries (73, 95, 120) have all the same architectural decoration. If their

の崩壊状況より、独立頂華材のはめ込まれた大棟材 が用いられたかどうかを決定する上で、確実な証拠 を得ることはできないが、中央祠堂の造営時期は、タ・ プロームの第三周壁と第四周壁の造営時期に属する と推定される塔6と33の建造と同時代である。第一 帯磁率期に属するそれ以外の建築物は、タ・プロー ムの北側と南側に位置している列柱回廊の建築以前 に着手されたものであろう。列柱回廊に特徴的な、 ホゾ繋ぎによって結合された大棟材が、プレア・カ ンには全く認められないからである。

第二帯磁率期には、唯一、第三周壁に配された楼 門が建造された。その帯磁率は、 1.5×10^3 SI unit か ら 2.5×10^3 SI unit の間に分布し、その装飾は、第 一帯磁率期の装飾と比べて、大きな変化はなかった と考えられる。

第三帯磁率期に建造された建築物の帯磁率は、1.0 × 10⁻³ SI unit から 2.1 × 10⁻³ SI unit である。この時 期、第一周壁内側は相当の増築が行なわれ、北脇伽藍、 南脇伽藍そして西脇伽藍も建造された。連続して行 なわれた増築には幾つかの段階が認められるように 思われる。建築装飾の変遷とともに、完成形態にあ る建築物と同じ帯磁率を示す増築部分を確認するこ とができる。建築装飾が類似している No.7 と No.32 の建築物に塔8と塔31が結びつく。しかしながら、 その帯磁率には僅かな違いが認められ、この測定結 果は、上述の建築物に関する建築学的調査の結果を 確証するものである。塔8と塔31の平均帯磁率はそ れぞれ 1.21 × 10⁻³ SI unit と 1.23 × 10⁻³ SI unit の値を 示しているのに対して、No.7 と No.32 の建築物の平 均帯磁率はそれぞれ 1.05 × 10⁻³ SI unit と 1.07 × 10⁻³ SI unit の値を示しているからである。塔8と31には、 既に、カーテン状のものが彫り込まれた偽窓が付さ れ、その大棟材としては、未だに頂華材を彫り込ん だ単一石材が架けられている。第三帯磁率期におい て第一周壁西側に増築された建築物には、カーテン 状のものが彫り込まれた偽窓と仏陀を安置するため の壁龕を備えた大棟材が架けられている。このこと より、第三帯磁率期に属する第一周壁の東側に配さ れている構造体の大部分-7、8、9、30、31、32-は、 それらと同一の建築装飾が全面に施されている第一 周壁の西側に配されている建造物の建築以前に着手 されたと推定される。

北祠堂、南祠堂そして西祠堂を取り囲む回廊には、 同一の建築装飾が全面的に施されている。回廊を装 飾している頂華材を彫り込んだ単一石材が一般的で あるとするならば、それらの偽窓に関しては異なる。 偽窓は、ラテライトによって補強された砂岩の使用 とともに建築物に施される本物の窓として造られて いるからである。この砂岩の使用とともに、欠如を 穴埋めするために本物の連子子をはめ込んだに相違 ない偽連子子が施されるようになる。この種の工法 は、プレア・カンの脇伽藍を取り囲む回廊だけに認 められる極めて特異なものである。この回廊は、第 三周壁の建造以降に着手されたことは疑いようがな く、それはこの周壁北楼門と南楼門が回廊に接続し one-block ridges with ridge-finials remain traditional, it is different with regard to their false-windows. Indeed, these latest are made up as true windows with starters of sandstone filling completed with laterite. The starters of sandstone comprises the beginning of a false baluster in which a true baluster to fill the lack was to be embedded. We find this technique only in the galleries of the secondary complexes of Preah Khan. There is no doubt that these galleries are quite posterior to the construction of the third enclosure as their connections with the north and south pavilions (154 and 160) of this enclosure show.

The fourth magnetic phase posing problem as we mentioned shows greatest incoherence with the results of the architectural and decorative analyses. This magnetic range oscillates between 1.3 and 2.9×10^{-3} SI Unit and includes, notably, the second enclosure with whole of the buildings which are connected to its eastern part (36E, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61 and 62) the halls of dancers and columns as well as the structures connecting the central sanctuaries of the secondary complexes to their surrounding galleries (74, 76, 96, 97, 121 and 123). These latter structures show a first anomaly.

From the structural point of view, the buildings with connection are additions and explain the presence in their interior space the original pediments of the central sanctuaries and the gopura that it connects to. The presence of these pediments with holes to attach a wooden beam was already observed in Ta Prohm and leaves us to suppose that the new buildings replaced structures with perishable material. The true problem is situated at the level of the architectural decoration of the buildings 74, 97 and 121. Indeed, these edifices do not show an obvious difference with the central towers 73, 95, 120 nor with galleryenclosures of these complexes. Thus we find the same type of ridge on these additions as the structures that they connect to while we have to find in all logic of the ridge with niche with Buddha which appeared already during the preceding magnetic period. The many observations carried out in the whole of the Bayon style encourage us to consider that the evolution of the ridge and the other comparison criterions which we employ, except for the towers with or without faces, is linear and without comeback. Thus it seems not to be very probable that these three buildings are also late while their architectural decoration places them clearly in the first half of the Bayon style. We cannot explain for the moment the results of their magnetic susceptibility.

The buildings 96 and 123 do not seem to pose the same problems as their counterpart. Indeed, the ornamental decoration of building 96 can be located clearly in the second half of the Bayon style and comprises *devata* of character similar to that of the second enclosure of Preah Khan or the whole of Bayon. Building 123 does not show a decoration and seems ていることからわかる通りである。

第四帯磁率期は既に述べたように問題のある時期 であるが、それについては、建築装飾に関する分析 との整合性が最も低い点を指摘するにとどめる。平 均帯磁率は、 1.3×10^3 SI unit から 2.9×10^3 SI unit である。第四帯磁率期においては、なかでも、第二 周壁と周壁東側部分に結合している建築物 36E、55、 56、57、58、59、60、61、62、舞楽殿、列柱殿、そ して副伽藍の中央祠堂とそれを取り囲む回廊を結び 付ける建築物が建造された。この建築物に第一の例 外的な側面が認められる。

構造的に結びついている建築物は確かに増築され たものであり、それゆえ、本来は中央祠堂と祠堂へ の入り口である建造物のペディメントであった部分 が、この建築物内部に認められる。骨組材を架ける ためにこのペディメントに穴が掘られている点は、 上述したように、タ・プロームにおいても確認され、 壊れやすい部材を用いた構造体の代わりにこの建築 物が新たに増築されたものと推定される。しかし問 題は、実際のところ、No.74、No.97 そして No.121 の 建築物に施された建築装飾に存在する。それらの建 築物には、中央塔とこの中央塔を取り囲む回廊周壁 と比べて顕著な相違が認められないのである。増築 された No.74、No.97 そして No.121 に架けられてい る大棟材と同じ大棟材が、これらによって結び付け られている構造体にも認められるからである。それ 以前の帯磁率期において、仏陀を安置するための壁 龕を備えた大棟材が既に用いられていることにより、 増築された建築物にもこの種の大棟材が認められる のは当然であろう。これまで多くの調査がバイヨン 様式の建築物に関して行なわれてきたが、その結果 によれば、大棟材の他に、各建造物を比較するため にわれわれが採用した指標-人面塔あるいは人面な しの塔を除いて-の変遷過程は直線的なものであり、 以前の状態に回帰するものではないと考えられるか らである。実際、No.74、No.97 そして No.121 は、そ の建築様式から判断するに前期バイヨン様式に明ら かに属しており、バイヨン後期において建造された と推定することは困難であるように思われる。ただ し、現時点においては、No.74、No.97 そして No.121 において測定した帯磁率に関して何らかの所見を述 べることはできない。

No.96 と No.123 の建築物に関しては、上述の建築 物に関して生じたのと同じ問題が生じるとは思われ ない。No.96 の建築物に施された建築装飾は、後期 バイヨン様式に明らかに属しており、プレア・カン 第二周壁に配された建築物、あるいはバイヨン全体 に類似した特徴であるデーヴァター像を擁している。 一方で、No.123 の建築物には建築装飾が施されてお らず、北側の建造群の東側に位置している No.140 の 建築物と同様に、装飾が完成しなかったと考えられ るからである。

第一周壁西側に配されている No.12 と No.28 の 建築物には、上述の問題と異なった問題が生ずる。 No.12 に建築装飾として施された彫刻の作業は確か not to be completed as structure 140 located at the east of the northern complex.

The buildings 12 and 28 located in the western part of the first enclosure constitute another problem. Indeed, the work of sculpture of the ornamental decoration of building 12 seems to have been completed while that of the building 13 which is quasi coupled with it is only partial and shows a lower quality of completion. We think that this would be due to the lack of place during the execution of the ornamental decoration of this building because of the preliminary existence of building 19 in the moment of its construction. It would be also the same for the building 28 that is the symmetrical one of building 12.

In the same register, taking into consideration our architectural analysis, we consider that tower 10 located in the eastern part of the first enclosure was not to be built after tower 9. This one was inserted between towers 8 and 9 dissimulating thus partially the decoration of these last edifices. Once again we cannot advance satisfactory assumption to explain the fact that the results of the magnetic susceptibility are not the perfect architectural reflection of the chronology of this whole of towers.

For finish, the architectural and decorative analysis of the second enclosure teaches us that buildings 58 and 59 probably form integral part of the enclosure as well as the east extension of the *gopura* 36. Their ornamental decoration shows all the characteristics of that of Bayon. This unit will be supplemented thereafter by the six towers, 55, 56, 57, 60, 61 and 62, situated in the eastern interstices created between the first and the second enclosures. These towers do not comprise the faces as we could find in the late construction. Let us note that this whole of buildings is extremely poor in technique but shows an iconography in the similar theme to the remainder of the Bayon style.

3.4 Banteay Kdei and Srah Srang

This complex of scale smaller than Preah Khan is located near Ta Prohm whose southeastern corner of the domain enclosure are only a few meters of the northwestern corner of the fourth enclosure of Banteay Kdei (Fig. 7-11). It is in the vast space of this last enclosure, of which *gopura* comprises a four-face tower similar to that on the gates of Ta Prohm. This central unit is delimited perfectly by double moat enclosure. The similarity with Ta Prohm is striking and we think that the presence of this moat would mark the ultimate limit of the original project of Banteay Kdei. The fourth enclosure, or domain enclosure, has appeared immediately after the time of the construction of that of Ta Prohm judging from their strong resemblance.

Srah Srang completes the general composition of Banteay Kdei at its east. This basin, with the banks of sandstone steps,

に完成したものであると考えられるが、No.12 に併 設している No.13 の建築物に施された彫刻の作業は、 部分的なものであり、その完成度も低い。それは、 この建物を増築する際に既に No.19 の建築物が建造 されたため、装飾を施すに際して作業のためのスペー スが得られなかったことに起因すると考えられる。 No.12 とシンメトリーに配されている No.28 に関し ても事情は同様である。

建築上の分析の観点から調査するに、第一周壁東 側に位置する塔10は、上述と同様の作風にあるが、 塔9の建造以前に恐らくは建造されていなかったと みなされる。塔10は塔8と塔9の間にはさまれてお り、塔8と塔9に施された装飾は部分的に完成度が 低くなっている。今回の調査により、帯磁率の測定 結果は、プレア・カンの塔全体に関する造営時期に 完全に対応しているわけではないと推定される。

最後に、第二周壁の建築装飾の分析に関して、 No.58 と No.59 の建築物は恐らく、楼門 36 東側の増 築部分と同様に第二周壁に取り込まれた部分である と考えられる。この建物に施された装飾は、バイヨ ンの建物に施された装飾の特徴を有している。その 建物は、その後、6 基の塔(55、56、57、60、61、 62)によって補完された。この塔は、第一周壁と第 二周壁の間に設けられた東側部分に建造されている。 この塔には、特にプレア・カン末期に建造された塔 に施される人面像が施されている。No.58 とNo.59 は、 極めて稚拙な作風となっているが、その装飾部分に は、残りのバイヨン様式の建物に類似した図像学の 主題が彫り込まれている。

3.4 バンテアイ・クデイとスラ・スラン

バンテアイ・クデイはプレア・カンに比べて小規 模であり、タ・プローム附近に位置している。タ・ プロームの最外周壁南東隅とバンテアイ・クデイの 第四周壁北西隅は数メートルしか離れていない (Fig. 7-11)。バンテアイ・クデイは、第四周壁に囲まれた 広大な敷地にある。第四周壁楼門には人面塔が1基 設置されており、それはタ・プロームの入り口に設 けられた人面塔に類似している。バンテアイ・クデ イ伽藍中央部は、周壁をはさんでいる外濠と内濠に よって完全に仕切られている。今回の調査により、タ・ プロームとバンテアイ・クデイの類似性が明らかに なり、結論として、バンテアイ・クデイ建立の初期 計画の段階では、この環濠が伽藍と外を隔てる境界 線であったが、タ・プロームとの類似性から推定す るに、第四周壁、つまり最外周壁はその後、タ・プロー ムの建立時期に着手されたと考えられる。

バンテアイ・クデイ全体を構成する建造物には、 その東側に位置するスラ・スランの池も含まれる。 スラ・スランには砂岩材が組積された築堤が設けら れており、バライとは異なり、掘り下げられたとい う特徴がある。スラ・スランには、西岸に船着き場 が設置されているが、それは池の中心軸上ではなく、 バンテアイ・クデイの東西を貫く参道を中心軸上に 配置されているという特徴がある。この船着き場の has the characteristic to be dug contrary to the *baray*. It is marked with its western borders of an unloading dock not center regarding the basin itself but on the east-west axis of Banteay Kdei. The measurements of the magnetic susceptibility that we carried out on the different levels of this unloading dock vary between 1.42 and 1.57×10^{-3} SI Unit (Fig. 7-15).

The investigation of the Banteay Kdei complex enabled us to determine three distinct magnetic ranges (Color Fig. 7-3). This result, combining with the results of the architectural study of Banteay Kdei, enables us to consider them as corresponding to the great periods of evolution of the temple. The first stage, oscillating between 0.9 and 1.3 imes 10⁻³ SI Unit, includes the central sanctuary surrounded by the first enclosure, the Southern library and the eastern and western gopura (45 and 46) within the third enclosure. The building 10 making the connection with the central tower and the western gopura of the first enclosure will be grouped into this first group of building by its magnetic susceptibility. However the structural analysis suggests that this building is addition of which architectural and ornamental decoration belongs to the second time with the style of Bayon whereas the whole of the structures previously quoted belongs, based on the same criteria, very clearly to the first period of the style.

The case of the Southern library is also characteristic where our sampling was taken. Indeed this one presents an architectural and ornamental decoration which is closer to after the second period of the style, and there is no doubt that this library was set up during the first period of construction of Banteay Kdei as shown by the work of H. Arahi. This building was in reality entirely reworked at the time of the last period of construction of Banteay Kdei for transformation into the image of the Northern library which is currently symmetrical. This singular event remaining marginal in the style of Bayon is explained by the obvious shift between the various parts of the ornamental decoration of this building as well as the inconsistency of its magnetic susceptibility with architectural decoration. This shift perfectly explicable in the case of the Southern library is not similar to the case of the building 10 considered previously. This one neither presents any anachronism at the level of its ornamental and architectural decoration nor obvious traces of transformation. This anomaly remains without answer for a long time.

This first period of construction of Banteay Kdei seems to coincide with constructions of the galleries of the secondary complexes of Preah Khan. Indeed in their architectural and ornamental decoration and in their magnetic susceptibility, the resemblance is more striking. This similarity is also found in the construction techniques of the false-windows whose material mixing employed for their realization seems to be one of 異なった層で測定した帯磁率は、 1.42×10^3 SI unit から 1.57×10^3 SI unit の値を示している (Fig. 7-15)。

バンテアイ・クデイを対象に行なった帯磁率測定 より、三期の帯磁率期を設定することができる (Color Fig. 7-3)。バンテアイ・クデイの建築装飾に関する調 査結果と関連させることで、この帯磁率期を寺院の 変遷過程に対応させることができる。第一帯磁率期 において、測定値は 0.9 × 10⁻³ SI unit から 1.3 × 10⁻³ SI unit の間に分布しており、第一周壁によって取り 囲まれた中央祠堂、南経蔵、第三周壁の東楼門と西 楼門が建造された。中央塔と第一周壁の西楼門に結 合した建築物は、帯磁率を測定したところ、第一帯 磁率期に建造された建築群に含めることができよう。 しかしながら、構造部材に関する分析より、この建 築物は後期バイヨン期に属する建築装飾が施されて いるため、増築された部分であると考えられる。中 央祠堂、南経蔵、第三周壁の東楼門と西楼門は、そ の建築装飾から判断するに、前期バイヨン様式に明 らかに属する。

南経蔵に関しても、幾つかの特徴が認められる。 南経蔵に施された建築装飾から判断するに、南経蔵 は後期バイヨン様式に属していると推定されるが、 荒樋久雄氏の研究が明らかにしたように、第一帯建 造期に築造されたことは疑いえない。しかし南経蔵 は、北経蔵の外観に合わせるため、バンテアイ・ク デイ建造後期に全面的な化粧直しが施され、その結 果、南経蔵は現在、北経蔵とシンメトリーな外観を 呈している。南経蔵に施された化粧直しは、バイヨ ン様式の建築物の中では例外的である。それゆえ、 南経蔵に施された建築装飾には各部において顕著な 異同が認められ、建築装飾に対応しない帯磁率の測 定値が得られることになる。この異同は化粧直しの 事実を念頭におけば完全に説明のつくものであるが、 こういった異同は、中央塔と第一周壁の西楼門と結 合した建築物には全く当てはまらない。これらの建 築物には、建築装飾上の時代錯誤や化粧直しを示す 明らかな痕跡は認められないからである。

バンテアイ・クデイ第一建造期は、プレア・カン 脇伽藍の回廊建造期に対応すると考えられる。建築 装飾の調査結果からも、帯磁率の測定結果からも、 両者の類似性は明らかに認められる。この類似性は 疑似窓の工法に関しても指摘することができるが、 その製作に際して用いられた石材の組み合せが第一 建造期の特徴の一つである。

バンテアイ・クデイ第二建造期の帯磁率は、1.4× 10³ SI unit から 1.9×10³ SI unit の値を示している。 この建造期において、建築物が多く建造されたとい うわけではない。むしろこの時期は、移行期として 位置付けられるように思われる。明らかに増築され た部分と判断される建築物には、バンテアイ・クデ イ第一建造期に類似した建築装飾が施されていた部 分と後期バイヨン様式に属する建築装飾が施された 部分がある。第一周壁の北楼門(18)と南楼門(26)に 中央祠堂を結合させるために、中央祠堂に増築され た部分は明らかに前期バイヨン様式に属する建築装 the characteristics of this period.

The second stage of construction of Banteay Kdei is characterized by the magnetic susceptibility varying between 1.4 and 1.9×10^{-3} SI Unit. This phase, not including a great number of buildings, seems to be a transition period. Indeed, a part of the structures, clearly additional, comprises an ornamental and architectural decoration similar to the first phase of construction of Banteay Kdei while the other part of these buildings show a decoration corresponding to the second half of the style of Bayon. Indeed, the additions carried out to the central sanctuary in order to connect it to the northern and southern gopura (18 and 26) of the first enclosure are clearly of the first half of the style while the east and west towers (30 and 33) of the second enclosure, whose anteriority with this second gallery is obvious from a point of view of the structure analysis and also their magnetic susceptibility, shows an ornamental and architectural decoration corresponding to the second half of the style.

Let us note that the additions 3-8 and 4-12 carried out to the central sanctuary previously quoted seem to have replaced structures with perishable material having possibly the same function so as to incite to think the presence of residences of beams on the front part of the central sanctuary and on these *gopura*. We already encountered the same case in Ta Prohm where a timber structure was probably dismounted at the time of construction of its equivalent with sandstone.

This series of buildings of this second phase of construction is completed by the cruciform terraces 47 and 49 outside of eastern and western *gopura* of the third enclosure as well as interior roadways 43 and 39 connecting these same *gopura* to the inside buildings of the temple. We can add to finish with this unit the unloading dock of Srah Srang whose results of its magnetic susceptibility correspond well to this period.

The third and last phases of evolution of the temple, variable between 2.3 and 2.9 imes 10⁻³ SI Unit, includes the second gallery of the temple and the structure connecting, in the east side, to the first enclosure. We can add the North library 13 and the building 6 connecting the central sanctuary to the east_gopura of the first enclosure as well as the hall of dancers and the building with columns both located in the east part of the third enclosure. These last buildings having a magnetic susceptibility of 2.58 imes 10⁻³ SI Unit and 2.72 imes 10⁻³ SI Unit, respectively, enables us to propose some interesting hypothesis. Indeed we can say that the hall of the dancers of Ta Prohm and Preah Khan show a similar magnetic susceptibility and a similar architectural decoration. This is also confirmed in the field of the construction techniques with the presence of prop in particular. However the hall of dancers of Banteay Kdei differs from its counterparts in the point of view of its decoration and in the

飾が施されているが、第二周壁の東塔門(30)と西塔 門(33)には後期バイヨン様式に属する建築装飾が施 されている。この東塔門と西塔門は、建築装飾の調 査結果からも、帯磁率の測定結果からも、第二回廊 建造以前に着手されていることは疑いえない。

ここで注目したいのは、上述した中央祠堂に増築 された部分(3~8、4~12)が、木材を用いて、場 合によっては増築部分と同じ機能を果たしていた構 造体の代りをしているということである。その場合、 例えば、中央祠堂の前室と楼門に架けられた梁に彫 られた穴がそれにもあったものと考えられる。その ような事例は、タ・プロームにおいても確認される ことは既に述べた通りである。タ・プロームの事例 では、木造構造体が、それに相当する砂岩構造体が 組み立てられる際に取り外された。

バンテアイ・クデイ第二建造期に建造された一連 の建築物に関しては、上述のもの以外に、第三周壁 の東楼門と西楼門の外側に設けられた十字形テラス (47,49)と、この楼門と寺院内の建築物を結ぶ道(43、 39)がある。また最後に、スラ・スランの船着き場 をこれに含めることができる。船着き場で調査した 帯磁率は、第二建造期に確かに対応しているからで ある。

バンテアイ・クデイ第三建造期の帯磁率は、2.3 × 10⁻³ SI unit から 2.9 × 10⁻³ SI unit の値を示してい る。この建造期においては、第二回廊、第一周壁と 第二回廊を結ぶ東側の建築物が建造された。その他 に、北経蔵(13)、中央祠堂と第一周壁の東楼門を結 ぶ建築物(6)、第三周壁東側に位置している舞楽殿 と列柱殿がこの時期に建造された。舞楽殿と列柱殿 の帯磁率はそれぞれ 2.58 × 10⁻³ SI unit と 2.72 × 10⁻³ SI unit の値を示しており、この測定値より幾つかの 興味深い仮説を引き出すことができる。タ・プロー ムとプレア・カンの舞楽殿は両者とも同じ帯磁率を 示し、類似した建築装飾が施されている。特に支柱 柱が施されている点で建築工法の上でも両者には類 似性が確認される。ところで、バンテアイ・クデイ の舞楽殿は、建築装飾の点からも、確認される建築 工法の点からも、タ・プロームとプレア・カンの舞 楽殿とは異なる。バンテアイ・クデイの舞楽殿では、 支柱材は用いられなくなり、その代りに、バイヨン でしか確認されない節柱を伴う窓が登場する。帯磁 率に関しても、バンテアイ・クデイ舞楽殿の測定値 とタ・プロームとプレア・カン舞楽殿の測定値には 明らかな差異が認められる。以上の判断材料から考 察するに、バンテアイ・クデイの舞楽殿はアンコー ル地域において最後に建造された可能性がある。

バンテアイ・クデイの「列柱殿」は、タ・プロー ムの列柱殿に酷似しており、両者の帯磁率も近似値 を示し、柱の種類にも共通性が認められる。それに 対して、プレア・カンの列柱殿は、明らかに円筒形 をした柱を用いており、帯磁率の測定値も前者にく らべるとはるかに低い値を示しているのが特徴的で ある。三つの列柱殿に関する相対年譜を念頭に上述 の判断材料を考察するならば、プレア・カンの列柱 technical choices. Thus we note the disappearance of the props as well as the presence of the windows with colonettes, that we will find only in Bayon. The magnetic susceptibility of the halls of the dancers clearly shows a difference between the halls of Ta Prohm and Preah Khan and the hall of Banteay Kdei. This beam of indices lets us think that the hall of the dancers of Banteay Kdei could be the last construction in Angkor.

The building with columns of Banteay Kdei shows a strong similarity with that of Ta Prohm of which their respective magnetic susceptibility are extremely close and in common have the same type of pillar while that in Preah Khan is characterized by employment of real cylindrical columns and a magnetic susceptibility lower than the two preceding buildings. This whole of index replaced within the framework of the relative chronologies of these three temples makes us to consider that the building with columns of Preah Khan would be quite former than that of Ta Prohm and Banteay Kdei which we think contemporary.

The results of the magnetic susceptibility of the domain enclosure of Banteay Kdei show certain heterogeneity. If the results of the eastern and western *gopura*, displaying 2.37 \times 10⁻³ SI Unit and 2.88 \times 10⁻³ SI Unit, respectively, are in the magnetic range of the third period of this monument, we can say that northern and southern *gopura*'s result, much lower, is closer to those of the *gopura* of the domain enclosure of Ta Prohm, in the west side. We think that this anomaly is not the result of two period of distant construction as shown by the results of the magnetic susceptibility. As we already made it clear, we think that the domain enclosures of Ta Prohm and Banteay Kdei result from the same step of extension of the limits of these temples which could be carried out in parallel in the two monuments.

3.5 Bayon

Our investigations in Bayon were based on the work of J. Dumarçay and also on the recent observations of the architecture history of JSA and on the research "From Ta Prohm to Bayon." The measurement results revealed three periods based on the ranges of the magnetic susceptibility (Color Fig. 7-4). The first one oscillates between 0.8 and 1.3×10^{-3} SI Unit and corresponds to the major part of the center of the monument. This includes as the third stage of the monument, the whole of the central massif (towers 1 to 11), the towers developing with the cardinal point of this unit, and the towers 12, 13 and 15 — northern and southern front parts are excluded —, and the towers 18, 19 and 20 situated in the south, west and east, respectively. The tower 16 is also included, with exception of its east front part, and the tower 21. Some measurements in the middle height of the central tower assure us its homogeneity

殿は、同時代に建造されたと判断されるバンテアイ・ クデイとタ・プロームの列柱殿よりも以前に建造さ れたものと考えられる。

バンテアイ・クデイの最外周壁で測定した帯磁率 には不均質性が認められる。東楼門と西楼門の帯磁 率はそれぞれ2.37×10³ SI unit と2.88×10³ SI unit であり、第三帯磁率期に属するが、北楼門と南楼門 の帯磁率はこの時期に属するものではない。北楼門 と南楼門で測定した帯磁率はこの時期よりも低い値 を示しており、タ・プロームの最外周壁西楼門以外 の楼門で測定した帯磁率に近い。帯磁率の測定結果 から判断するに、最外周壁の帯磁率に認められる不 均質性は、最外周壁の建造が異なった年代にわたる ことに起因するものではないと考えられる。上述の ように、タ・プロームとバンテアイ・クデイは同時 期に拡張され、両者の最外周壁は同一の経緯を経て 建造されたと考えられる。

3.5 バイヨン

バイヨンに関する以下の所見は、J. デュマルセの 研究、ならびに JSA の建築班と「タ・プロームから バイヨンまで|調査プロジェクトが最近行なった調 査に依拠している。帯磁率を測定したところ、三つ の帯磁率期に対応する造営時期のあることが明らか になった (Color Fig. 7-4)。第一帯磁率期の測定値は、 0.8 × 10⁻³ SI unit から 1.3 × 10⁻³ SI unit である。遺跡 中央に配された建築物の大半がこの時期に属する。 この時期に建造された建築物としては、上部テラス に配された伽藍中央部を構成する建造群(塔1から 塔11まで)とその東西南北に配された塔状の楼門が 挙げられる。塔として具体的には、伽藍中央部の東 側に位置している塔 12-北前室と南前室は除く-、 塔13そして塔15-北前室、東前室、南前室は除く-、 南側の塔 18、西側の塔 19 そして北側の塔 20 が挙げ られる。それらに東前室を除いた塔 16 と塔 21 を付 け加えることができる。塔状中央祠堂中程の高さで 帯磁率測定を何箇所かについて行なって確認したと ころ、中央祠堂の帯磁率には分布差が認められなかっ た。ただし、塔 17 のみが全体的に第一帯磁率期の測 定値から掛け離れた帯磁率を示している。

中間テラスには、第一帯磁率期に建造された建築 物として、人面塔とそれを取り囲む内回廊が配され ている。当初の計画では中間テラスは十字平面形に なるはずであったが、現在の平面形に変更された。 その変更に伴って、周壁と人面塔(24、28、32、52) が建造され、更に小人面塔(38、40、41、43、44、 46、47、49)が建造された。塔 22 に関しては、その 東側部分の増築に際して建造された構造体だけが異 なった帯磁率を示しており、第二帯磁率期に属する ものである。

第二帯磁率期の測定値は、1.3 × 10³ SI unit から 2.1 × 10³ SI unit である。レリーフ彫刻の装飾が施された外回廊壁面、外回廊の東西南北四辺に配された楼門、その四維に配された隅楼、ならびに塔 52 がこの時期に属する。外回廊の構造部材のうち単一石材の

from the point of view of the magnetic susceptibility. Only the tower 17 presents a magnetic susceptibility different from this first category.

On the second floor of the temple, we count the unit of the four-face tower and the galleries connecting them in our first period based on the magnetic susceptibility. This includes the galleries and the four-face towers (24, 28, 32 and 36) resulting from the transformation of the original cruciform plan of the second stage into the current plan, and also the small four-face tower (38, 40, 41, 43, 44, 46, 47 and 49). Only the structures resulting from the transformation of the east part of the tower 22 show extremely dissimilar results, corresponding to second magnetic period.

This second period based on the magnetic susceptibility of the sandstone of Bayon varies from 1.3 to 2.1×10^{-3} SI Unit. It represents the whole of the axial and corner pavilions, the walls of the bas-reliefs of the Outer Gallery and also the tower 52. It is noted that the magnetic property of the monolithic pillars of the Outer Gallery is different from this ensemble. We can also include into this group the first level of the cruciform terrace in the east of the temple and the vestiges of the "chapel of passage" originally making connection between the inner and outer galleries. On the third floor, we find the structure excluded from our first period as mentioned above.

The third period, variable between 2.2 and 2.3 \times 10⁻³ SI Unit, is represented only by a very reduced number of buildings which are both libraries in the interior court of the first stage and the higher level of the east cruciform terrace.

In comparison with the temples analyzed previously, the results obtained for Bayon appear particularly simple. We see that the assumption of a first great period of construction comprising some modification is clear. This unit, forming the cruciform plan in the preliminary project, appears to be quickly supplemented by the corner galleries transforming the original plan into rectangular plan. We can note for towers 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35 and 37 that the whole of the tympanums of the pediments of their porches, now included in the masonry of the galleries added, show no trace of decorations while the volume of matter allowed it. However the major part of the pediments now covered by an additional building, as well in Ta Prohm, Preah Khan, Banteay Kdei and Banteay Chmar, show systematically rich iconography. The latter three were voluntarily deteriorated to make place the corbelling of the new building of which the false ceiling dissimulated the under-surface by same pediments.

The magnetic susceptibility showed in the majority of the cases that these associations of buildings showed an extremely different average probably resulting from the use of the materials from distinct origin. We do not see it in the case of Bayon. 柱は、異なった帯磁率を示している。寺院東側に配 された十字平面形テラス下段と本来は外回廊と内回 廊を結ぶものであった「参道殿」の遺構もこの時期 に含めることができる。上部テラスに関しては、先 に第一帯磁率期に含めなかった建築物が第二帯磁率 期に含まれる。

第三帯磁率期の測定値は、2.2 × 10³ SI unit から 2.3 × 10³ SI unit である。この時期に属する建築物は限られており、下部テラスに配された 2 棟の経蔵と寺院東側に配された十字平面形テラス上段がこの時期に含まれる。

これまで分析してきた寺院と比較した場合、バイ ヨンにおける帯磁率の測定結果は極めて単純である。 第一建造期に何らかの増改築が行なわれたと推定さ れるが、その痕跡は明らかに確認されるものである。 初期の造営計画であった凸角十字平面は、四維が直 角の回廊が直ぐに増築されて、矩形平面に変更され た。塔23、25、27、29、31、33、35、37に関して、 そのポーチ部分のペディメントにおけるタンパン部 は全て、今日、増築された回廊の石積みによって覆 い隠されているため、装飾を施すのに十分な広さが あるのに、装飾の施された痕跡は一切確認されない。 しかし、タ・プロームにおいてであれ、プレア・カ ン、バンテアイ・クデイそしてバンテアイ・チュマー においてであれ、今日増築部分によって覆い隠され ているペディメントの大部分には、必ず豪華な図像 的装飾が施されている。このペディメントは、増築 された建築物の迫出し構造部分を取り付けるために 意図的に無効にされており、それと同様に、この建 築物の偽天井によって内側表面も覆い隠されている。

タ・プロームやプレア・カン、バンテアイ・クデ イそしてバンテアイ・チュマーにおいて測定した帯 磁率によれば、増築部分には著しく異なった平均値 が得られた。それは恐らく別の供給地から切り出さ れた石材が用いられているからである。しかし、バ イヨンの増築部分に関して事情は全く異なる。帯磁 率に顕著な違いが認められず、ペディメントのタン パン部に何らか図像的装飾が施された痕跡もないか らであるが、それは二つの造営時期が極めて近接し ていることに起因するからであろう。現在の塔15と 塔16など、上部テラスに増築されたその他の部分に 関しては、増築部分によって装飾が覆い隠された建 築物の帯磁率とは異なった値が得られた。この増築 部分は第二帯磁率期に属する。第二帯磁率期には、 塔 13 と塔 15 に接合している No.14 の建築物、塔 12 の北前室と南前室、恐らく塔17、そして下部テラス に配された、経蔵を除いた建築物の大半が含まれる。

上部テラスで行なった調査から、伽藍中央部の東 側へ展開している建築物の変遷過程に関して得られ た分析結果を裏付けることができる。伽藍中央部を 構成している建築物が示す帯磁率は、塔13と塔15 の帯磁率と全く異なっている。また、構造部材に関 する分析より、塔12と塔13は2棟の建築物の並列 としてではなく、単一の建築物とみなすことができ る。 We find neither strong magnetic variation nor trace of an unspecified iconography on the tympanums of the pediments. This could be the consequence of particularly short time between the two phases of construction. Other additions on the third floor such as towers 15 and 16 show a different magnetic susceptibility from the original building whose decoration was dissimulated by these additions. These additions belong to the second magnetic susceptibility period to which belongs the building 14, making connection between towers 13 and 15, northern and southern front-parts of tower 12, probably tower 17 and also the major part of the structures of the first stage, except for Libraries.

Our investigation on the third floor of Bayon enabled us to confirm the results of our analysis on the evolution of the structures developing in the east of the central massif. Thus we see that the magnetic susceptibility of the parts that we consider to belong to this building shows a clear difference from the results obtained for towers 13 and 15. Let us note that the structural analysis of this ensemble encourages us to consider towers 12 and 13 as the same building but not two juxtaposed structures.

As we indicated previously, the building 14 is the result of an addition joining the towers 13 and 15 that are anterior. However, this addition is a rather particular case in Bayon and in the other complexes of the Bayon style. Indeed this one is not only the result of a joining of a new structure but a combination of disassembling and transformations of a part of the tower 13 which been used as a basis for the new building. In reality, we consider that pillars in the western half space lately formed by the room 14 are the vestiges of the walls of the east front-part of tower 13. The corbelling of this one was partially dismounted at the time of new construction and this part forms entrance. In the north and south walls remaining, a door was open to require the addition of wooden beam in order to reply to the absence of true lintel. It is on this skeleton that was grafted the masonry constituting the actual building 14 that we think being contemporary modifications and additions carried out to towers 12 and 15.

Another confirmation was brought to us by the magnetic susceptibility. Indeed, the ensemble of the small four-face towers of the Inner Gallery does not show an extremely different magnetic behavior from those of this gallery. In fact the assumption of placing these towers at the last stage of evolution of the temple is not confirmed. Their addition on a preexistent roof seems to indicate that the observation of their undersurface does not however call question.

Nevertheless the analysis of the connection of these towers to the galleries of the second stage reveals that these additions were carried out before the overlapping of the galleries of this level.

前述したように、No.14の建築物は塔13と塔15 を結び付けるために増築されたものであり、塔13と 塔15よりも後に建造された。この建築物の増築は、 バイヨンのみならず、バイヨン形式の他の寺院のな かでも特殊な事例である。新しい構造体を単に付加 するというのではなく、塔13の一部分を解体し、 No.14 の土台となるようこれを改築するという過程 を経て No.14 は増築されたからである。実際、No.14 の西側半分の支柱部分は、塔13東前室の壁をもとに している。壁の迫出し構造は東入り口部分とともに、 No.14 の建造を機会に部分的に解体されたが、東前 室の北壁と南壁は解体されていない。その入り口は マグサ石を欠いており、補強するために木製の梁が 架けられていた。No.14の現在の石組みは塔 13の骨 組に接続されており、それは塔12と15に施行され た増改築と同時期に行なわれたと考えられる。

更に帯磁率の測定結果によっても、建築物の変遷 過程に関して得られた分析結果を確認することがで きる。中間テラス内回廊の凸角部分に配された小人 面塔全体の帯磁率は、内回廊の帯磁率とさほど変わ らない。それゆえ、寺院変遷の最終段階にこの小人 面塔に建造されたと推定することはできないように 思われる。内側表面を確認したところ、以前からあっ た回廊の天井部分に小人面塔が増築されたと考えら れるが、しかし、そのように考えることはできない。 むしろ、中間テラス内回廊と小人面塔の結合部に関 する調査から判断するに、小人面塔は内回廊に屋根 が取り付けられる以前に増築されたと考えられる。

これまでに調査が行なわれてきた遺跡と比較した 場合、パイヨン第一建造期に属する建築物の帯磁率 は、プレア・カン脇伽藍の回廊とバンテアイ・クデ イ第一建造期に属する建築物の帯磁率に近いことが 確認された。しかし、建築装飾を指標に判断するな らば、前者は後者と完全に同時期に建造されたわけ ではない。プレア・カン脇伽藍の回廊に施された建 築装飾はバンテアイ・クデイ第一建造期の建築装飾 に確かに類似しているが、バイヨン第一建造期に関 しては事情は全く異なる。バイヨン第一建造期に属 する建築物全体には、後期バイヨン様式に特徴的な 建築装飾が施されている。それに対して、プレア・ カンとバンテアイ・クデイについては、前期バイヨ ン様式に属する建築装飾が施されている。

上述の建築物の帯磁率はそれぞれ近い値を示して いるため、石材供給地が同一であった可能性がある と推定されるかもしれない。しかし、今回調査を行 なったところ、バンテアイ・クデイ第一建造期とバ イヨン第一建造期の前後関係に関して問題が生じた。 前者を後者の直前に位置付けた場合、バンテアイ・ クデイ第二建造期において、バイヨン第一建造期に 施された建築装飾と一致する装飾が認められ、その 時期の帯磁率に相当する値が測定されなければなら ない。しかし、帯磁率に関してそのような測定値は 全く得られず、それどころか、バンテアイ・クデイ 第二建造期(特にデーヴァター像)には、バイヨンに 比べて古風な建築装飾が多く確認される。バイヨン If we compare the ensemble of the monuments already investigated, we note a strong similarity between the results of the magnetic susceptibility of the galleries of the secondary complexes of Preah Khan and the first phase of Banteay Kdei and Bayon. Nevertheless we cannot affirm that the latter two are perfectly contemporary from a view of their ornamental and architectural decoration. Indeed, if the decoration of the galleries of the secondary complex of Preah Khan is quite similar to that of the first period of construction of Banteay Kdei, the situation is quite different concerning the Bayon. This one presents in totality a decoration characteristic of the second half of the Bayon style while Preah Khan and Banteay Kdei can be placed clearly at the first half of the style.

In this case where the results of the magnetic susceptibility are extremely similar, we tempted to consider the possibility that the source of material of these various parts of these temples is of the same origin. But we encounter a problem once again because the temporal continuity between the first phase of Banteay Kdei and that of Bayon poses problems. Indeed if it is considered that the first phase of Banteay Kdei is directly followed by the construction of Bayon, we should observe the similar magnetic susceptibility during the second period of construction of Banteay Kdei whose architectural decoration corresponds to that of Bayon. However, it is not true, rather contrary and the ornamental decorations of the second construction phase of Banteay Kdei, the devata in particular, show many archaisms compared with that of Bayon. Only the hall of dancers and the east gopura of the second enclosure of Banteay Kdei seem to be contemporary with the decoration of Bayon, but, as we saw, their magnetic susceptibility is quite higher than the results for the center of Banteay Kdei and Bayon.

These different possibilities oblige us to consider the assumption of the existence of two site of extraction with the similar magnetic behavior or the exploitation of the same site but in two different times. But the latter assumption remains for this hour indemonstrable and a detail in Bayon seems to enable us to support our former assumption. Indeed we find on certain doorjamb of tower 13 of Bayon a decorative motif unfinished completely anachronistic with the remainder of the ornamental decoration of the temple. This motif is found during the whole of first half and the first part of seconds half of the Bayon style and seems to disappear definitively during the period characterizing the ornamentation of Bayon.

This unfinished decoration of doorjamb seems moreover to have been the subject of a voluntary partial roughcasting. Perhaps this can be linked to the modification of the casing of these doors as indicated by the inappropriate stop of this repetitive motif. All these indices make us to think that the decorations of these doorjambs are quite contemporary with tower と同時期の建築装飾が施されているのは、バンテア イ・クデイの舞楽殿と第二周壁東楼門だけであるが、 上述したように、その帯磁率は、バンテアイ・クデ イ伽藍中央部とバイヨンで測定された値よりも高い のである。

以上の点より、同値の帯磁率が測定される石材の 供給地が二つあると仮定するか、あるいは同一の供 給地から二つの時期に石材が切り出されたと仮定し、 両者を検討しなければならない。現在のところ両者 は推測の域を出ないが、バイヨン遺跡の細部を調査 したところ、むしろ、石材供給地は同一であったと する最初の仮定が支持されるように思われる。塔 13 入り口の表面における或る箇所には未完成の装飾が 施され、それ以外の建築装飾に比べて完全に時代遅 れのモチーフが採用されているからである。このモ チーフは、前期バイヨン様式と後期バイヨン様式前 半に属するものであり、バイヨン遺跡に特徴的な建 築装飾が施される時期には完全に放棄されたと考え られるものである。

更に、入り口構えに施されたこの装飾は未完成の 状態にあるが、意図的な化粧直しが施されたと考え られる。この化粧直しは入り口枠の改築の一環とし て行なわれた可能性があり、その際、上述のモチー フは時宜悪く放棄されたと考えられる。この点に鑑 みて、入り口に装飾が施されたのは塔 13 の建造と同 時期であり、それ以後ではないと考えられる。塔 13 入り口に施された建築装飾はバイヨンに特徴的な建 築装飾に先立つ時期に属するものであり、これまで 考えられてきたよりも古いと推定される。その他の 判断材料より、バイヨンに施された建築装飾の大半 は、塔 13 の建造よりもはるか後に施されたものであ り、したがって、塔 13 に施された建築装飾よりも後 の時期に属すると考えられる。

確証されたわけではないが、バイヨンはその設計 段階においてバンテアイ・クデイ第一建造期の状態 を参照し、石材を共通の供給地から切り出したと考 えることは十分可能であるように思われる。

3.6 アンコール・トム周壁と施療院礼拝堂

バイヨン遺跡そのものに加えて、われわれはアン コール・トムに配された5棟の門、更にその周壁の 四維に配された4棟の寺院に関しても調査を行なっ た。更に施療院礼拝堂に関しても調査を行なった。 この礼拝堂は、ジャヤヴァルマン VII が都城を造営 するにあたり、その計画のうちに数えいれた建築物 であると考えられる。

アンコール・トム城門とプラサート・チュルンで 測定した帯磁率は、0.81 × 10³ SI unit から 1.02 × 10³ SI unit の値を示している (Figs. 7-11、12)。すでに 述べたように、バイヨン遺跡の変遷過程については その帯磁率期を三分することができ、伽藍中央部の 大部分が建造された時期に相当する第一帯磁率期の 測定値は、0.8 × 10³ SI unitから 1.3 × 10³ SI unitであっ た。バイヨン伽藍中央部の建造期は、その石材から 判断するに、アンコール・トム周壁に配された砂岩 13 and not a late work. These vestiges of the anterior period of Bayon bring us to consider the possibility that this monument could be older than the period we thought before.

Other indices bring us, moreover, to consider that most of the ornamental decoration of Bayon is far posterior to the construction of the monument and in fact to the architectural decoration.

Although this remains to be confirmed, it seems to be plausible that Bayon, in a state of roughcast, follows the construction of the first state of Banteay Kdei and that consequently the origin of their material is perhaps the same.

3.6 Enclosure of Angkor Thom and the hospital chapels

In addition to Bayon, our investigation was carried out for the five gates of Angkor Thom and the four temples located at the corner of the enclosure of this old city. Moreover, we extended our investigation to the hospital chapels that we consider to take part in the composition of the capital of Jayavarman VII.

The results obtained for the gates of Angkor Thom and the Prasat Chrung varies between 0.81 and 1.02×10^{-3} SI Unit. As we have just seen, the evolution of Bayon was perhaps divided into three periods of which the first, corresponding essentially to the central part of the monument, oscillates between 0.8 and 1.3×10^{-3} SI Unit (Figs. 7-11 and 12). In fact, we are led to consider that the period of construction of the central part of Bayon is contemporary with all sandstone structures of the Angkor Thom enclosure. This average magnetic susceptibility of 1.0×10^{-3} SI Unit seems to be the characteristic ID of the Bayon style. Indeed we will find the same values for the first period of construction of Banteay Kdei and also for certain additions to Ta Prohm and Preah Khan. The site of exploitation during this period which one can suppose long judging from the extent of the structures was particularly wide and consisted of several quarries with the same magnetic characteristics.

During our investigation of Angkor Thom, specificities of the gates and Prasat Chrung were taken in account. Indeed, the architectural analysis of the gates of the capital invited us to consider two or three construction times. However, these periods do not seem to be the consequences of repented project but of an evolution related to the building site of construction as confirmed by the measurements taken on the various identified parts where no notable variation was perceptible.

In the case of Prasat Chrung, we can observe some additions to the preliminary project. The nature of these structures, essentially terraces, led us to eliminate them from our sampling to concentrate us on the sanctuary-tower. These latter showed however a certain number of reuse stones that were also avoided during measurements. 材建築物の建造と同時期であると考えられる。この 砂岩材建築物の平均帯磁率は1.0×10³ SI unitである。 この平均値はバイヨン第一帯磁率期の測定値に近く、 バイヨン様式に特徴的な測定値であると考えられる。 実際、バンテアイ・クデイ第一建造期に建造された 建築物の帯磁率もこれに近く、タ・プロームやプレ ア・カンの増築部分の帯磁率についても同様であっ た。アンコール・トムの建造は、その遺跡が示す規 模から判断するに、長期にわたると推定され、この 期間の砂岩の石切り場は特別に大きかったか、ある いは、同じ帯磁率を持つ複数の石切り場からなって いたと思われる。

アンコール・トムを調査するにあたり、われわれ は大門とプラサート・チュルンの特殊性に注意を払っ た。アンコール・トム都城周壁に関する建築学的調 査によれば、周壁の建造は二期あるいは三期にわた ると考えられる。しかし、造営時期が複数にわたる ことは、計画の変更によるものではなく、いわゆる 造営に関係する作業場で生じた変更によるものであ り、それは様々な部分の石材について測定した帯磁 率に顕著な違いが認められなかったことから確認さ れる通りである。

プラサート・チュルンの場合、初期計画の段階で 増築が行なわれたことが分かった。プラサート・チュ ルンは特に基壇部分が増築されているため、試料か ら増築部分の石材は除外した。祠堂塔部分を集中的 に調査するためである。しかし、祠堂塔には代替部 材が幾つか用いられているため、帯磁率測定を行な う際には、その部分も測定から除外した。

施療院礼拝堂は、中央祠堂、その東南に配され、 西側に入り口構えが設けられている「経蔵」、そして、 伽藍全体を取り囲み、前室が設けられ十字平面形で ある東楼門が配されている最外周壁といったアン コール・トムを構成する建造物のうちに分類される。 上述の建造物の他に、周壁外側北東に配されている 聖池もそのうちに分類される。最外周壁外側には、4 棟の施療院礼拝堂が配されている。施療院礼拝堂に 関しては、中央祠堂以外の建築物の大半が失われて いるため、4棟の施療院礼拝堂のうち3棟について、 中央祠堂に限定して帯磁率測定が行なわれた。中央 祠堂以外の建築物としては、東施療院礼拝堂の東楼 門についてのみ帯磁率測定を行なうことができた。

3棟の中央祠堂で測定された帯磁率は、アンコール・ トム周壁ならびにプラサート・チュルンの帯磁率と 著しく異なることが判明した。北施療院礼拝堂の平 均帯磁率は2.23×10³ SI unitであった。それに対して、 勝利の門に結合している東施療院礼拝堂と南大門に 結合しているタ・プローム・ケルの平均帯磁率はそ れぞれ3.05×10³ SI unit と 2.97×10³ SI unit であっ た。東施療院礼拝堂と南施療院礼拝堂には、北施療 院礼拝堂と同様に石材が幾つか転用されており、後 者には、バンテアイ・スレイに用いられている構造 部材と同一種類である赤色砂岩材の用いられている 部分があった。南施療院礼拝堂東楼門の帯磁率は1.13 ×10³ SI unit であり、それ以外の構造部材で測定し The hospital chapels have a typical typology consisting of a central sanctuary, a "library" in the southeast and opened to the west, an enclosure stopped in the east by a *gopura* in cruciform plan in the front part of building. An external basin located at the northeast of the enclosing wall finally limits this unit. Of the four chapels of the hospitals situated in the periphery of Angkor Thom, only three were investigated only for the central sanctuary, because the other structures have totally disappeared in general. Only the east *gopura* of the southern chapels could be measured.

The three measured sanctuaries revealed extremely dissimilar results from the gates of Angkor Thom and the Prasat Chrung. Indeed, the chapel located at the north of the city displays an average magnetic susceptibility of 2.23×10^{-3} SI Unit, while the eastern chapel, associated to the Victory Gate, and Ta Prohm Kel, the chapel affiliated to the Southern gate, show a magnetic susceptibility of 3.05×10^{-3} SI Unit and 2.97×10^{-3} SI Unit, respectively. These chapels contain some reuse stones as in the northern chapel where we find in the tower one block of red sandstone similar to the stone constituting Banteay Srei. In the case of the eastern *gopura* of the south chapel, it shows a magnetic susceptibility of 1.13×10^{-3} SI Unit which is strongly different from other structures.

The results of these three sanctuary-towers, not being homogeneous, are difficult to propose a clear position in the chronology sequence.

However they enable us to consider two hypotheses based only on the magnetic susceptibility. Indeed two periods can be associated to the results of these sanctuaries, but each poses some difficulties.

The first assumption would place these chapels before the construction of Bayon and the sandstone structures of the Angkor Thom enclosure. The study of Ph. Stern proposed, based on information available on this subject at the time, to place these chapels in the transition period between the first and the second phases of the Bayon style. Although this assumption seems to agree with the stylistic evolution of *devata* of this study, it contradicts other architectural criteria such as in particular the ridge of the roof.

We have just seen that there was a strong similarity between the magnetic susceptibility of the central part of Banteay Kdei, Bayon, the gates of Angkor Thom and the Prasat Chrung. The study of the architectural decoration of the Bayon style permits to affirm that Banteay Kdei was founded quite before the Bayon and the sandstone structure of Angkor Thom. However the hospital chapels show an architectural decoration extremely similar to that in the Prasat Chrung but not that of Banteay Kdei which should be posterior to those if we admit our first assumption which goes up at least the construction of these た帯磁率と比較して顕著な相違が認められた。

3 基の祠堂塔で測定した帯磁率は、三者ともに一 致していないため、その建造期を正確に推定するこ とは困難である。しかし、帯磁率の測定結果だけを 根拠に建造期を定めるならば、建造期に関して、二 通りの推測が可能と思われる。実際、この祠堂で測 定した帯磁率については二通りの年代設定が可能な のだが、それぞれ問題がないわけではない。

第一の年代設定は、バイヨンとアンコール・トム 石材周壁の建造以前に施療院礼拝堂の建造を位置付 けるものである。Ph.ステルンの研究によれば、施療 院礼拝堂は前期バイヨン様式と後期バイヨン様式の 移行期に位置付けられる。この位置付けは、ステル ンの研究が取り上げたデーヴァター像の様式変遷と 整合するものであるが、それ以外の建築技法に関す る標定基準(特に大棟材)に照らした場合、その基準 には相容れないものとなる。

バンテアイ・クデイ中央伽藍の帯磁率はバイヨン 中央伽藍の帯磁率に極めて近く、アンコール・トム 城門とプラサート・チュルンの帯磁率にも近い。バ イヨン様式に属する建築装飾に関する調査によれば、 バンテアイ・クデイはバイヨン以前に建造され、ア ンコール・トムの砂岩建築物にも先立つ。施療院礼 拝堂に施された建築装飾は、プラサート・チュルン にて看取される建築装飾に酷似しているが、バンテ アイ・クデイの建築装飾との類似点は見いだされな い。われわれの推測によれば、少なくともプレア・ カン第一建造期にまでさかのぼる年代に施療院礼拝 堂を位置付けることもできるが、この推測を認めた 場合、バンテアイ・クデイは施療院礼拝堂よりも後 に建造されたことになる。更に、施療院礼拝堂の造 営はアンコール・トムそのものの造営以前に、ある いは少なくともアンコール・トムへの入植以前に着 手されたということにもなる。しかし、施療院礼拝 堂はアンコール・トムに付属した建築物であるので、 これはいささか大胆な仮説であろう。最後に、タ・ プロームから出土し、今はアンコール遺跡保存事務 所に保管されている石碑にも注意を払わなければな らない。その石碑には施療院礼拝堂に関する記述が あり、それによれば、102棟の施療院礼拝堂がジャ ヤヴァルマン VII の都城下に建造されたとのことで ある。そしてこの石碑は、タ・プロームにおいて大 掛りな増築が施された部分にあったものであり、そ れはプレア・カーン第一建造期以後に位置付けられ るものである。以上の点より、施療院礼拝堂は、バ イヨンの建造とアンコール・トムの石材周壁の建造 よりも以前に着手されたと推定することはできない。

第二の年代設定は、施療院礼拝堂の建造をバイヨ ン様式末期に位置付けるものである。年代設定とし てはこちらの方が適切かもしれないが、実際はそう ではないと考えられる。もし施療院礼拝堂の建造を バイヨン様式末期に位置付けるならば、その建築装 飾はあまりに時代遅れなものとなる。もしそのよう に位置付けたならば、施療院礼拝堂のデーヴァター 像には、バイヨンと同じ装飾が施されているか、あ buildings at the first period of Preah Khan.

Moreover, it seems amazing that the foundation of these chapels was carried out before Angkor Thom — or at least before its general establishment — to which they seem to be associated. Let us recall to finish, that the stele of Ta Prohm mentioning the 102 hospitals distribute in the kingdom of Jayavarman VII, today stored inside the Angkor conservation office, originally was placed in one of the most significant additions carried out in Ta Prohm quite posterior to the first period of Preah Khan. All these difficulties lead us to dismiss this first assumption.

The second assumption places the chapels in the end of the Bayon style. This assumption is more suitable in chronological term but does not seem to be appropriate. Indeed the ornamental decoration in this case is too archaic for the suggested period because the *devata* of these chapels should be the same type of Bayon or of the hall of the dancers of Banteay Kdei, but it is not the situation. Moreover we find in Ta Prohm Kel the doorjamb decoration similar to Ta Prohm and the decorative lintel comprising a Buddha frieze similar to those in the first galleryenclosure of Preah Khan de Kompong Svay. But this lintel is however recut subsequently. All these anachronisms are more curious and we incite the prudence concerning this assumption.

Finally we think that these chapels are probably foreign to the preliminary project of Angkor Thom but their architectural and ornamental decorations are not clearly different from the construction period of this capital. For this time, the events that caused the use of a material different from the supposed period for these chapels remain outstanding. The results of the magnetic susceptibility of the western chapel will perhaps bring additional elements for the comprehension.

3.7 Ta Nei

The architectural study of Ta Nei enabled us to locate clearly its foundation in the first half of the Bayon style. Indeed, many architectural elements place it in direct filiations with the secondary complexes inside of Preah Khan and its first enclosure and also with the first project of Banteay Kdei. We can associate Ta Nei with the central sanctuary of Banteay Prei and the center of Banteay Thom as we will see it.

We can count in this temple three significant additions and also repented project marking the originality of this monument. Indeed, we can note, by analyzing the plan of this temple, that the composition is strongly similar to the typology of the temples such as Ta Som, Banteay Prei and Ta Prohm of Bati. All of these monuments include a central sanctuary limited at its cardinal points by a sanctuary-tower connected by a gallery marked in the corner of a pavilion without a tower. We find this same composition in Ta Nei (Fig. 7-17), but curiously the east sanctuary-tower 4 of this diagram is isolated in the space るいはバンテアイ・クデイの舞楽殿と同じ装飾が施 されていなければならないはずだが、実際はそうで はないからである。なお、タ・プロームの入り口の 表面部分に施された装飾モチーフに類似したモチー フが、タ・プローム・ケルにおいて確認され、また 仏陀のレリーフ彫刻が施されたマグサ石は、コンポ ン・スヴァイのプレア・カン第一回廊周壁において 確認されるマグサ装飾に類似している。ただし、プ レア・カン第一回廊周壁のマグサ石は、後に化粧直 しが施された可能性がある。上述の装飾様式に関す る時期差は非常に興味深いものであり、施療院礼拝 堂をバイヨン様式末期に位置付けるという見方は慎 重に検討する必要がある。

結論として、施療院礼拝堂は恐らくアンコール・ トム造営の初期計画には関係のないものであったが、 その建築装飾から判断するに、アンコール・トム建 造期から施療院礼拝堂の建造を完全に除外すること はできないと考えられる。今のところ、施療院礼拝 堂の建造期と推定される時期に属さない石材を用い るような増改築が行なわれたのかどうかを明らかに することはできない。その点を考察するにあたって、 西施療院礼拝堂の帯磁率の測定結果が恐らく役立つ だろう。

3.7 タ・ネイ

タ・ネイで行なった建築学的調査によれば、タ・ ネイの造営は前期バイヨン様式に明らかに位置付け られる。タ・ネイに施された装飾要素の大半から判 断するに、タ・ネイは、プレア・カンの脇伽藍内部 と第一周壁、更にバンテアイ・クデイ造営の初期計 画の系列に直接属するものである。その他として、 上述したように、バンテアイ・プレイ中央祠堂、な らびにバンテアイ・トム伽藍中央部もその系列に含 めることができよう。

タ・ネイには大規模な増築が三回施され、遺構の 独自性を示している建築計画に修正が加えられたと 考えられる。タ・ネイの伽藍配置を分析したところ、 タ・ネイの伽藍構成は追加されて、タ・ソム、バン テアイ・プレイ、更にはバティのタ・プロームの伽 藍構成に極めて類似したものへと変更されたことが 確認された。これらの遺跡は全て、中央祠堂、その 東西南北に配された搭状の祠堂、その搭状祠堂を結 ぶ回廊、回廊の四隅に配され、普通のクロスヴォー ルトで覆われた隅楼から構成されている。これらの 建築物は夕・ネイにも配されているが (Fig. 7-17)、興 味深いことに、塔状の東祠堂は、回廊周壁によって 取り囲まれた場所のなかで、標準的な配置図からず れたところに位置しており、回廊周壁は東祠堂の東 側へと伸びている。更に、回廊東辺に配された楼門 には塔がないことが注目される。この例外は、M. グ レイズが指摘しているように⁶、タ・ネイの造営過程 において建築計画に修正が加えられた結果であると 考えられる。

第二回廊は、北楼門と中央祠堂を結ぶ中室ととも にこの第一回廊に接合している。第二回廊と中室は formed by the gallery developing in its east. Note that in the *gopura* of this part of the enclosure we do not find a tower. We think, like M. Glaize,⁶ that this anomaly is a result of a repented project during the construction.

On this first gallery, the second gallery and also a building between the northern *gopura* 21 and the central sanctuary were added. In these two cases, the connections to the above mentioned unit does not leave any doubt about their posteriority. The latter significant addition is materialized by the third enclosure of the temple whose only east-west axis shows the *gopura* (35 and 36). They can be located by their ornamental and architectural decoration to the second half of the Bayon style. Their magnetic susceptibility is identical and is beyond 1.6×10^{-3} SI Unit.

We do not find this homogeneity in the center of the temple. Indeed, the results displayed by this part fluctuating from 1.05 \times 10⁻³ SI Unit, for the intermediate building between the central sanctuary and the northern *gopura* 21 to 1.67 \times 10⁻³ SI Unit for the western *gopura* of the first enclosure. Except for the addition we think that the whole of these structures was set up during the same period. For this time we cannot put forth final assumption on this unit and we will satisfy to advance the general characters of this temple.

As we emphasized above, the central part of Ta Nei shows, by its architectural decoration, a strong similarity to Banteay Kdei and also to certain part of Preah Khan. However the average magnetic susceptibility except for the center of Ta Nei does not enable us to establish a direct link with the original structures of Banteay Kdei. It is not the same as Preah Khan but from the point of view of the magnetic behavior the relation seems clear. However the attentive analysis of the individual results of each measured structure in Ta Nei shows that a considerable proportion of blocks are lower than 1.3×10^{-3} SI Unit, which we consider the limiting threshold of the first period of construction of Banteay Kdei, Bayon and the sandstone structures of the enclosure of Angkor Thom. All those invite us to consider the construction of Ta Nei during the second great phase of construction of Preah Khan and slightly before the first work of Banteay Kdei. The variations of the magnetic susceptibility are the result of a transition period between two different exploitation sites. This new site of extraction was used thereafter to build Banteay Kdei and Bayon. It is probably in this period that dates the addition 2 connecting the central sanctuary to the northern gopura of the first enclosure and also the eastern extension of the eastern terrace of the temple so as to explain at the same time its structure and the magnetic susceptibility.

We cannot mention precisely about the second enclosure because of no enough information about it due to restricted quan第一回廊に接合しているため、第一回廊よりも後に 建造されたことは疑いえない。最後に増築されたの は、第三回廊であり、西参道と東参道につながって いる部分にだけ楼門が配されている。楼門に施され た建築装飾から判断するに、それは後期バイヨン様 式に属する。楼門で測定した帯磁率はほとんど同値 であり、1.6 × 10³ SI unit の値を示している。

しかし、伽藍中央部については、帯磁率に分布差 が認められる。伽藍中央部で測定した帯磁率は、中 央祠堂と北楼門を結ぶ中室における測定値である 1.05×10^3 SI unit から、第一周壁に配された西楼門 における測定値である 1.67×10^3 SI unit の間を変動 している。上述した増築部分を除外すれば、伽藍中 央部を構成する建築物は、補修された部分も含めて、 同時期に建造されたと考えられる。しかし今のとこ ろ、伽藍中央部に関しては決定的な見解を述べるこ とはできず、夕・ネイの特徴を指摘するにとどめる。

上述したように、タ・ネイ伽藍中央部に施された 建築装飾は、バンテアイ・クデイ、ならびにプレア・ カン伽藍中央部に施された建築装飾に酷似している。 しかしながら、タ・ネイ伽藍中央部で測定した平均 帯磁率から判断するに、バンテアイ・クデイの増改 築が施される以前の建築物にタ・ネイ伽藍中央部を 直ちに結び付けることはできない。プレア・カンに 関しては、バンテアイ・クデイに比べてタ・ネイ伽 藍中央部の平均帯磁率は近いが、それでも、プレア・ カンとタ・ネイ伽藍中央部を直ちに結び付けること はできない。しかし、タ・ネイの各建築物を対象に 測定を行ない、個々の測定を詳細に検討したところ、 1.3 × 10⁻³ SI unit 以下の帯磁率を示す石材が高い比率 で用いられている建築物があった。1.3 × 10⁻³ SI unit 以下という値は、バンテアイ・クデイ第一建造期な らびにバイヨン第一建造期、そしてアンコール・ト ム周壁に配された砂岩材建築物に相当するものであ る。以上の点より、タ・ネイの建造期はプレア・カ ン第二建造期の間に位置し、バンテアイ・クデイ建 造の初期段階よりも少し前であると考えられる。タ・ ネイで測定された帯磁率に分布幅が認められるのは、 旧石材供給地から新石材供給地への移行期にわたっ てタ・ネイが建造された結果であろう。新石材供給 地から、その後、バンテアイ・クデイならびにバイ ヨンの建造に際して石材が切り出された。恐らくこ の移行期において、タ・ネイ中央祠堂と第一周壁に 配された北楼門を結ぶ中室(2)が増築され、また、 東テラスの構造部材(31)と帯磁率の両者に関する 調査結果から判断するに、東側に向かって拡張工事 が行なわれたと考えられる。

第二周壁に関しては、周壁建造に用いられた石材 と同定できる量が少ないため、帯磁率の測定結果を 得ることができず、確かなことを述べることはでき ない。今のところ、唯一確実に言えることは、第二 周壁の建造は第一周壁建造の後に着手された。この 点に関しては、タ・プローム、バンテアイ・クデイ、 あるいはプレア・カンに、この可能性を示唆する完 全な例を求めることができる。 tity of sandstone. The only certainty that we can say for this time is that this structure was built after the construction of the first enclosure. Indeed, this enclosure was perhaps constructed anterior to the third gallery. Ta Prohm, Banteay Kdei and Preah Khan are perfect examples of this second possibility.

The third enclosure could date to the second phase of construction of Bayon as implied by the magnetic susceptibility of these *gopura*. The architectural and ornamental decorations of these structures do not show some obstacle to this probability. Only the *devata* seems to be slightly former than that of Bayon, but it is extremely probable that the major part of the ornamentation of this temple is exceptionally late in its development.

3.8 Prasat Prei Prasat and Banteay Thom

3.8.1 Prasat Prei Prasat

This temple, located at 800m north of the northwestern corner of the enclosure of Angkor Thom (Fig. 7-11), recalls by its general composition, the "hospital chapels." This modest temple, only the *prasat* is the subject of measurements of which the average was 0.74×10^{-3} SI Unit, coincides with the central part of Banteay Kdei and Bayon. The ornamental and architectural decoration of this sanctuary corroborates with these results to place this temple in the second half of the Bayon style, and also enable us to locate it without risk after the foundation of Banteay Kdei.

3.8.2 Banteay Thom

This relative important complex is located around one kilometer north of Prasat Prei Prasat (Fig. 7-11). Its characteristics are link to the arrangement of the central part constituted by three sanctuary-towers (Fig. 7-18). This composition in triptych is, indeed, sufficiently rare in the Bayon style. Only the central part of Banteay Chmar and Prang Sam Yod in Lopburi (Thailand) show such an arrangement, although in both cases the towers are connected to each other.

This central arrangement, completed by two "libraries," is circumscribed by a gallery-enclosure stopped in the east and in the west by a *gopura* of which only the eastern one was able to be measured during our investigation. This unit is partially surrounded by a U-shaped moat and is prolonged by basins in the east in both sides. We think that this particular typology of water basins corresponds to the inner basins of the fourth and third enclosures of Ta Prohm and Banteay Kdei and not to the moat of these temples. A last enclosure, stopped by a single *gopura* in the east, limits finally this complex.

The analysis of the ornamental and architectural decoration of the monument allows us to distinguish two periods of construction for this complex. The first period shows strong similarity with the second period of construction of Preah Khan and 第三周壁に関しては、周壁に配された楼門の帯磁 率から判断するに、バイヨン第二建造期に対応して いると考えられる。楼門に施された建築装飾は、そ のように推定するにあたって、問題にはならないと 思われる。楼門のデーヴァター像のみが、バイヨン よりも僅かばかり前の作風にある。しかし、タ・ネ イに施された建築装飾の大半は、例外的に遅い時期 に施されたものであると十分推定されることをここ で思い起さなければならない。

3.8 プラサート・プレイ・プラサートとバンテアイ・ トム

3.8.1 プラサート・プレイ・プラサート

プラサート・プレイ・プラサートは、アンコール・ トム周壁北西隅から北に 800 メートル離れたところ に位置しており (Fig. 7-11)、プラサート・プレイ・プ ラサートを構成する建築物から判断するに、「施療院 礼拝堂」であったと考えられる。プラサート・プレ イ・プラサートは簡素なつくりの遺跡であり、プラ サートについてのみ帯磁率を測定した。その平均値 は0.74×10³ SI unit であり、バンテアイ・クデイ伽 藍中央部とバイヨン伽藍中央部の測定値に一致して いる。プラサートに施された建築装飾から判断する に、プラサートの平均帯磁率は後期バイヨン様式に 属するものであり、その建造期は間違いなくバンテ アイ・クデイの建造以後に位置付けることができる。

3.8.2 バンテアイ・トム

バンテアイ・トムは、比較的規模の大きい遺跡で あり、プラサート・プレイ・プラサートから北に1 キロあまりのところに位置している (Fig. 7-11)。3 基 の祠堂塔から伽藍中央部が形成されている点が特徴 的である (Fig. 7-18)。三塔型祠堂塔は、バイヨン様式 では極めて稀であり、特記に値する。バンテアイ・チュ マー伽藍中央部とロッブリー(タイ)のプラン・サム・ ヨッドには三塔型祠堂塔が見られるが、両者の場合、 祠堂の塔部分はそれぞれ連結されている。

バンテアイ・トム伽藍中央部には、他に2基の「経 蔵」が配されており、周壁によって取り囲まれ、そ の周壁の東辺と西辺には楼門が配されている。楼門 のうち、東楼門のみが今回の帯磁率測定の対象となっ た。バンテアイ・トムはU字平面形の環濠によって 部分的に取り囲まれており、この環濠東辺の先には 聖池が配されている。バンテアイ・トムを構成する 建造物のうちにこの小池を含めるという建築計画は、 タ・プロームとバンテアイ・クデイの第三周壁と第 四周壁の内側に配された聖池を参照したものであっ て、その環濠を参照したものではない。最外周壁の 東辺にのみ楼門が配されおり、伽藍はこの周壁によっ て外と隔てられている。

バンテアイ・トムに施された建築装飾を調査した ところ、バンテアイ・トムの造営年代を二分するこ とができる。第一建造期に属する建築装飾は、プレア・ カンの第二建造期、ならびにバンテアイ・クデイとタ・ ネイの第一建造期に属する建築装飾に酷似している。 the first of construction of Banteay Kdei and Ta Nei. We locate the whole structures constituting this first period, including the three sanctuaries, the two "libraries" and the first enclosure, in the first half of the Bayon style. The second period constituting the second enclosure would be, by the architectural decoration, in the second half of the Bayon style.

The results of the magnetic susceptibility does not show however a very clear difference between the two periods that we distinguished. Moreover one strange fact appears about the three central sanctuary-towers. Indeed, two of the towers of this triptych show more than 1.50×10^{-3} SI Unit (tower 1 and 2) while the northern tower show only an average magnetic susceptibility of 0.82×10^{-3} SI Unit. We think that this strong difference is not the result of an anachronism. Indeed we find in this northern tower a certain number of stones of color and texture completely different from the sandstone used in this monument. The particularly low magnetic susceptibility is more similar with the behavior of the red sandstone of Banteay Srei than the gray to yellowish brown sandstone generally constituting the monuments of the Bayon style.

Except this, we think that the first period of Banteay Thom, clarified by the analysis of architectural decoration, shows the same magnetic characteristics as Ta Nei, rather contemporary. In this fact, Banteay Thom would be placed before the foundation of Banteay Kdei. We note, indeed, that the individual results of the central and south tower of the temple, in particular, show for considerable proportion of stone lower than 1.3×10^{-3} SI Unit. We emitted in the case of Ta Nei the possibility that this mixing could be due to a transition period between two extraction sites of the sandstone. Perhaps such a transition period between quarries at the end of the exploitation and the opening of a new site required the provisional foreign stone contribution to these two sites. This may explain the anomaly that the northern tower presents but remains a pure assumption.

The east *gopura* of the second enclosure, more homogeneous on the whole of these measurements, corresponds to the period between the foundation of Banteay Kdei and the end of the first phase of construction of Bayon. Based on the architectural decoration, the period of foundation of Bayon and the sandstone structures of the enclosure of Angkor Thom are preferable rather than the period of Banteay Kdei.

3.9 Neak Pean, Krol Kô, Prasat Prei, Banteay Prei and Ta Som

3.9.1 Neak Pean

This small unit, located on an artificial island surrounded by many basins, symbolically marks the center of the *baray* associated to Preah Khan, the Jayatataka (Fig. 7-11). The investigation carried out for the monumental part of this island was したがって、第一建造期に属する建築物(三塔型祠 堂塔、2基の「経蔵」、第一周壁)は、前期バイヨン 様式に属する。第二建造期(第二周壁)は、その建築 装飾から判断するに、後期バイヨン様式に属する。

しかし、帯磁率を測定したところ、バンテアイ・ トム第一建造期と第二建造期の間には、顕著な差異 は認められなかった。更に、伽藍中央部の三塔型祠 堂塔で測定した帯磁率には、奇妙な点が認められた。 北塔以外の2基の塔で測定した帯磁率は、1.50× 10³ SI unit 以上の値であったが、北塔の平均帯磁率は 0.82×10³ SI unit でしかなかった。この顕著な差異 は、時代誤認の結果であるとは考えられない。北塔 に用いられている石材の幾つかについてわれわれの 確認したところ、その色と組織が、北塔以外の部分 に用いられている砂岩と全く異なっているからであ る。北塔に用いられている帯磁率の低い石材は、バ イヨン様式の遺跡に一般的に用いられている灰黄褐 色の砂岩よりも、むしろバンテアイ・スレイの赤褐 色の砂岩に近いように思われる。

この例外を除けば、建築装飾に関する調査から推 定されたバンテアイ・トム第一建造期には、それと 同時期に建造されたタ・ネイの帯磁率が示す特徴と 同じ特徴が認められる。このことより、バンテアイ・ トムはバンテアイ・クデイの建造以前に着手された と考えられる。バンテアイ・トム三塔型祠堂塔の中 央塔と南塔で個別に測定した帯磁率によれば、1.3× 10⁻³ SI unit 以下の帯磁率を示す石材が高い比率で用 いられていることが確認された。タ・ネイにおいて も、部分的に 1.3 × 10⁻³ SI unit 以下の帯磁率を示す石 材が高い比率で用いられていたが、それは、タ・ネ イの建造期が旧砂岩供給地から新砂岩供給地の移行 期に重なっているからではないとわれわれは考えた。 そのような移行を経るためには、両者以外の原産地 から石材の供給を一時的にうける必要が恐らくあっ たはずだからである。三塔型祠堂塔の北塔に認めら れる例外に関して、場合によっては、そのように考 えることはできるだろうが、しかし今のところそれ は推測の域を出るものではない。

第二周壁の東楼門は、周壁の中でも帯磁率に不均 質性が認められない方であるが、われわれの調査に よれば、その建造期は、バンテアイ・クデイ建造期 とバイヨン第一建造期末期の間にわたる時期に対応 している。東楼門に施された建築装飾をもとに判断 するならば、その建造期は、バンテアイ・クデイ建 造期よりも、バイヨンとアンコール・トム周壁の砂 岩材建築物が建造された時期にむしろ対応している。

3.9 ニャック・ポアン、クオル・コー、プラサート・ プレイ、バンテアイ・プレイ、タ・ソム

3.9.1 ニャック・ポアン

アンコール地域の池の多数には人工島が造営されているが、ニャック・ポアンはその一つに配されており、プレア・カン付属のバライであるジャヤタターカ中央部分を象徴する遺跡である(Fig. 7-11)。H. マーシャルと M. グレイズがその解体作業と修復作業に際

based on the observations of H. Marchal and M. Glaize⁷ during the clearance and conservation. This unit includes a small *prasat* dominating a circular base enclosed by the two *naga* giving the current name to this complex. This symbolic small island is surrounded by square basins with the banks of sandstone step at each cardinal point and chapels opening on a basin of smaller dimension (Fig. 7-19). This unit is supplemented by four another laterite chapels being distributed around this composition. These chapels cannot be measured for the reason of the nature of their materials.

The architectural history of this monument can be decomposed into two parts. The central sanctuary, in the first state, was deprived of the current angle motifs and the false-doors. The platform supporting this first states of the central *prasat*, although already circular and of less importance, was perhaps surrounded by the principal basins in a first state. It is during the second period of construction that the sanctuary and the central small island were added and that the secondary basins with their chapels were constructed.

The architectural decoration of the central sanctuary enables us to locate the original state of this monument at the beginning of the first half of the Bayon style when only the major part of Ta Prohm and the center of Preah Khan are representative. The results of the magnetic susceptibility for the original part of this sanctuary and the central part of the platform, 2.99×10^{-3} SI Unit and 2.98×10^{-3} SI Unit, respectively, confirm this assumption. These results enable us to consider that the foundations of Preah Khan and Neak Pean are contemporary and also that of Jayatataka itself.

For the reason of the limited number of blocks constituting the additions carried out for the central sanctuary, measurements were gathered into only one average. This average of 1.45×10^{-3} SI Unit, shows a strong difference from the first state of the monument. The secondary chapels and the sandstone surface of the basins also show the averages clearly dissociating from the first period, oscillating between 1.16 and 1.83×10^{-3} SI Unit. The architectural decoration of the chapels clearly locates them in the second half of the Bayon style. The magnetic susceptibility of the additions of the central sanctuary and that of the whole of the chapels and surface of the basins, rather high, prefer the second period of construction of Bayon rather than the period corresponding to the foundation of Bayon. This result seems more adequate.

3.9.2 Krol Kô

This modest complex is located slightly in the left of northsouth axis of Neak Pean and in a few meters from the northern bank of Jayatataka (Fig. 7-11). Only the sanctuary-tower, the southeastern library and the eastern *gopura* of the first encloして行なった調査⁷に依拠しつつ、われわれはニャッ ク・ポアン遺構部分に関する調査を行なった。ニャッ ク・ポアンには小プラサートが1基あるが、このプ ラサートは円平面形の基壇上に建造されており、そ の基壇は、寺名の由来となったナーガ2匹の巨像に よって囲まれている。この中央祠堂は、正方形の中 央池に配されており、その池には砂岩材築堤が設け られている。その築堤の東西南北には礼拝堂が配さ れており、この礼拝堂は比較的規模の小さい池に面 している(Fig. 7-19)。それ以外に、中央祠堂周辺には ラテライト材で建造された4棟の礼拝堂が配されて いるが、この礼拝堂はラテライト材で建造されてい るため、帯磁率の測定対象外である。

ニャック・ポアンの造営年代は二分される。現在、 中央祠堂は、その角部分に装飾が施され、偽扉が彫 り込まれている。しかし、第一建造期の段階では、 その装飾モチーフと偽扉は施されていなかった。中 央プラサートの支柱部分である基壇は、第一建造期 において既に円平面形であり、第一建造期に造営さ れた中央池に配された。第二建造期になってから、 祠堂と中央の小島の増築部分、ならびに小池とそれ に面した礼拝堂が建造された。

中央祠堂に施された建築装飾から推定するに、 ニャック・ポアン第一建造期は、前期バイヨン様式 の初期段階(タ・プロームの大部分とプレア・カン の伽藍中央部のみがその代表)に属する。祠堂の第 一建造期部分とその基壇の中央部分において測定し た帯磁率は、それぞれ 2.99 × 10³ SI unit と 2.98 × 10³ SI unit であり、この測定値から上述の推定を確 証することができる。帯磁率の測定結果から判断す るに、プレア・カンとニャック・ポアンの建造は同 時期に行なわれ、更にはジャヤタターカそのものの 建造とも同時期であったと考えられる。

中央祠堂の増築部分に用いられた石材の数が限ら れているため、帯磁率の測定結果から平均値を一つ だけ求めた。その平均値は 1.45 × 10³ SI unit であり、 第一建造期の帯磁率とは大きな開きがある。中央祠 堂の周りに配されている礼拝堂と砂岩材築堤におい て測定した平均帯磁率は、1.16 × 10³ SI unit から 1.83 × 10³ SI unit であり、明らかに第一建造期には属さ ない。礼拝堂に施された建築装飾だけから判断する に、この礼拝堂は明らかに後期バイヨン様式に属す るものである。中央祠堂の増築部分、礼拝堂そして 砂岩材築堤の帯磁率が十分に高い値を示しているた め、バイヨン第一建造期に対応するニャック・ポア ン第一建造期を代表する造営年代よりも、むしろ、 帯磁率の測定結果がより調和的であるバイヨン第二 建造期において建造されたと推定される。

3.9.2 クオル・コー

クオル・コーは簡素なつくりの遺跡であり、ニャック・ポアンの南北縦貫道から左に少しずれたところ、ジャヤタターカの築堤北辺から数メートル離れたところに位置している (Fig. 7-11)。今回の調査では、祠 堂塔、東南経蔵、第一周壁と第二周壁があるクオル・ sure of this unit including two enclosures were measured during our investigations (Fig. 7-20). The results oscillating from 1.01×10^{-3} SI Unit to 1.11×10^{-3} SI Unit, were close to the averages obtained for the center of Bayon, the gates of Angkor Thom and the first period of Banteay Kdei.

The ornamental and architectural decoration leave us to refine this tendency, clearly placing the whole in the second half of the Bayon style after the foundation of Banteay Kdei whereas the absence of face on the sanctuary-towers invites us to locate it before the completion in the first phase of construction of Bayon. Let us recall, however, that it is not excluded that the construction of towers on false floor will endure during the period that will follow the creation of the towers with faces. Nevertheless the case of Banteay Chmar encourages us to think that a part of the second half of the Bayon style was marked by hegemony of this new concept of tower.

3.9.3 Prasat Prei

This small monument, located not far from the northwestern corner of Jayatataka (Fig. 9-11), characteristically dominate a weak lifting ground. The plan and the ornamentation show strong similarities with Prasat Prei Prasat and Krol Kô, which we think is contemporary. In fact, we locate this monument in the second half of the Bayon style but before the creation of the four-face towers. Magnetic susceptibility of the *prasat* of this complex, of a value of 1.04×10^{-3} SI Unit, reinforces this assumptions.

3.9.4 Banteay Prei

This monument is located at a few hundred meters north of Prasat Prei (Fig. 9-11) and is composed of a central sanctuary, three enclosures and moat surrounded by the second enclosures (Fig. 9-21). This lets us suppose that the last enclosure of this complex does not result of the preliminary project and is, as in Ta Prohm, Banteay Kdei and Ta Nei, a late realization in order to delimit a field.

The architectural decoration of the three enclosures of this unit located them in the second half of the Bayon style but this is not the case of the principal *prasat* of which ornamental and architectural decoration places it in the first half of the Bayon style covering the foundations of Ta Nei, Banteay Kdei and certain parts of Preah Khan.

We find in the magnetic susceptibility a difference between the central sanctuary and the first two enclosures, but these enclosures were not able to be measured due to deficiency in sandstone blocks. Indeed, average magnetic susceptibility of the central *prasat*, 1.51×10^{-3} SI Unit, is clearly dissociated from the first and second enclosure which vary between 0.69 $\times 10^{-3}$ SI Unit and 1.03×10^{-3} SI Unit. These results were al-

コーの第一周壁に配された東楼門についてのみ帯磁 率測定を行なった (Fig. 7-20)。帯磁率は、1.01 × 10-3 SI unit から 1.11×10^3 SI unit であり、バイヨン伽藍 中央部、アンコール・トム大門、ならびにバンテアイ・ クデイ第一建造期の平均帯磁率に近い値を示してい る。クオル・コーの建造期に関しては、その建築装 飾から判断するに、後期バイヨン様式に明らかに属 する装飾が、バンテアイ・クデイの建造後に施され たと推定される。しかし、祠堂塔は人面を欠いてい るため、バイヨン第一建造期の完了以前にクオル・ コーの建造期は位置付けられると思われる。ただし、 人面塔が建造されるようになると、疑似階のついた 塔は建造されなくなるというわけではない。しかし ながら、バンテアイ・チュマーの例から判断するに、 後期バイヨン様式の或る段階になると人面塔の建造 が主流になると考えられる。

3.9.3 プラサート・プレイ

プラサート・プレイは小規模な遺跡であり、ジャ ヤタターカ北西隅からそう遠くないところに位置し ており (Fig. 7-11)、盛土が堅固でない箇所に建造され ている。プラサート・プレイの平面、ならびに装飾は、 同時期に建造されたと推定されるプラサート・プレ イ・プラサートとクオル・コーに酷似している。プ ラサート・プレイは後期バイヨン様式に属してはい るが、人面塔が建造されるようになる時期よりは前 に建造されたと推定されるからである。遺跡のプラ サート部分で測定した帯磁率が 1.04 × 10³ SI unit で あった点からも、前述のように推定することができ る。

3.9.4 バンテアイ・プレイ

バンテアイ・プレイは、プラサート・プレイの北 に数百メートルほどのところに位置する (Fig. 7-11)、 比較的規模の大きな遺跡であり、中央祠堂、三つの 周壁、第二周壁を取り囲む環濠からなっている (Fig. 7-21)。第三周壁はバンテアイ・プレイ建造の初期計 画には含まれておらず、タ・プローム、バンテアイ・ クデイ、あるいはタ・ネイと同様に伽藍を外と隔て るために後に建造されたと推定される。

三つの周壁に施された建築装飾から判断するに、 周壁は後期バイヨン様式に属する。しかし、主要プ ラサートは後期バイヨン様式には属さない。建築装 飾の観点からも、また建築技法の観点からも、それ は前期バイヨン様式に属し、その建造期は、タ・ネイ、 あるいはバンテアイ・クデイ、更にはプレア・カン の幾つかの部分が建造された時期に対応すると推定 される。

中央祠堂と第一・第二周壁の帯磁率に関しても、 同様の違いを指摘することができる。なお、第三周 壁に関しては砂岩材の試料が十分に揃わなかったた め、帯磁率を測定することはできなかった。中央プ ラサートの平均帯磁率は 1.51 × 10³ SI unit であり、 0.69 × 10³ SI unit から 1.03 × 10³ SI unit の値を示す 第一・第二周壁の帯磁率と著しく異なっている。第一・ ready obtained for Prasat Prei Prasat, Krol Kô and Prasat Prei. The similarities in the point of view of the magnetic behavior rather than in the ornamental and architectural decoration leaves us to suppose that this whole of temples is contemporary to the two first enclosures of Banteay Prei, and is after the foundation of Banteay Kdei.

The central sanctuary approaches, in the magnetic susceptibility, to Ta Nei rather than Banteay Kdei of which the first period is close to the average of this tower. The detailed analysis of the results reveals that the half of the measured blocks in our investigation does not exceed 1.3×10^{-3} SI Unit as was the case in Ta Nei. We supposed that this phenomenon resulted from a transition between two sites of the sandstone quarries and this assumption implies in the case of Ta Nei a significant time lag between the construction of the central sanctuary and its two first enclosures. This time lag possibly corresponds to the first period of construction of Banteay Kdei. But all those remain only speculation and other interpretations could explain these results.

3.9.5 Ta Som

This monument located at the eastern end of Jayatataka (Fig. 7-11) comprises two periods of construction taking into consideration its architectural analysis. The first of this one covers the major part of the temple: the central sanctuary, two eastern libraries, the first enclosure, the second enclosure and moat enclosing the unit (Fig. 7-22). The second period remains only as the third eastern enclosure and possibly the two eastern inner basins. The typology of the *gopura* of this third enclosure, having each one a tower with faces, is very similar to the domain enclosures of Ta Prohm, Banteay Kdei and Banteay Chmar.

The whole of the ornamental and architectural decoration, largely homogeneous in both period of construction, clearly locates this monument in the second half of the Bayon style. The unique presence of tower with faces in the *gopura* of the third enclosure encourages us to regard the preliminary project of Ta Som as before the creation of the four-face towers and consequently before the completion of the first phase of construction of Bayon.

Thus we locate it in the same period as foundation of Krol Kô, the two first enclosures of Banteay Prei and Prasat Prei. The domain enclosure could date the gates of Angkor Thom, Ta Prohm and Banteay Kdei.

The results of the magnetic susceptibility obtained for Ta Som do not oppose to our assumptions. Indeed, the whole of the monument does not exceed the 1.3×10^{-3} SI Unit delimiting the period between Banteay Kdei and the end of the first period of construction of Bayon.

第二周壁の帯磁率は、既に概観したプラサート・プ レイ・プラサート、クオル・コー、プラサート・プ レイの帯磁率に近い。バンテアイ・プレイ第一・第 二周壁は、建築装飾の観点からも、また建築技法の 観点からも、プラサート・プレイ・プラサート、ク オル・コー、プラサート・プレイに類似しており、 バンテアイ・クデイの建造後、同時期に建造された と推定される。それに対して、中央祠堂は、その帯 磁率から判断するに、バンテアイ・クデイよりもむ しろタ・ネイに対応している。中央祠堂塔の平均帯 磁率は、バンテアイ・クデイ第一建造期の平均帯磁 率よりも高いからである。しかし、この測定を詳細 に分析したところ、今回調査を行なった石材の半分 は、タ・ネイの場合と同様に、1.3 × 10⁻³ SI unit の値 を越えていなかった。この差異は石材供給地の変更 によるものと推定されるが、しかしそれは、中央祠 堂建造期から第一・第二周壁建造期に移行するまで に相当程度の期間を想定した上でのことである。こ の期間は、恐らくは、バンテアイ・クデイ第一建造 期に対応していると推定される。しかしそれは推測 の域を出るものではなく、この測定結果に関して、 異なった所見を提示することも可能であろう。

3.9.5 タ・ソム

タ・ソムは、ジャヤタターカ東辺側に位置してお り(Fig. 7-11)、建築学的調査から判断するに二期にわ たって建造されたと推定される。第一建造期には、タ・ ソムの大部分、具体的には中央祠堂、2棟の東経蔵、 第一周壁、第二周壁、伽藍を取り囲む環濠が建造さ れた(Fig. 7-22)。第二建造期には、第三周壁と恐ら く寺院内部の東側に配された二つの池が建造された。 第三周壁に配された楼門には、それぞれ人面塔が1 基設けられており、その楼門構成は、タ・プローム、 バンテアイ・クデイ、ならびにバンテアイ・チュマー の最外周壁に明らかに類似している。

タ・ソムに施されている建築装飾は、全体としては、 二期の建造期を通じて様式の変遷があまり確認され ず、後期バイヨン様式に明らかに属するものである。 第三周壁だけに人面塔が配されている点から判断す るに、人面塔の建造はタ・ソム建造の初期段階以後 であり、したがって、バイヨン建造第一段階の完了 以前であったと推定される。つまり、タ・ソム建造 の初期段階は、その他の建造物と比較検討した場合、 クオル・コー、バンテアイ・プレイの第一周壁と第 二周壁、そしてプラサート・プレイの建造期に相当 する。タ・ソム最外周壁の建造に関しては、それは アンコール・トム城門、ならびにタ・プロームとバ ンテアイ・クデイの城門と同時期であろう。

タ・ソムで測定した帯磁率は、上述の推定と調和 的である。タ・ソムの建造期を問わずにその測定値は、 バンテアイ・クデイ建造期とバイヨン第一建造期末 期を分かつ上限値 (1.3 × 10³ SI unit) を超出すること がなかったからである。

4. Conclusions and prospects

The various interpretations presented here remains only one preliminary approach. The data of the magnetic susceptibility were stored during the various missions carried out in 2001, and we were satisfied to extract the most obvious elements from them. However these data will find a utility beyond the Bayon style by confronting with the results of investigation for the Angkor periods just preceding the Bayon style.

The several elements resulting from the architectural readings employed during our tentative explanations for the results of the magnetic susceptibility remains simple and show only the most notable features of the great religious complexes of the Bayon style. The figures 24 to 27 showing in a condensed form the relative chronologies of Ta Prohm, Preah Khan, Banteay Kdei and Bayon are the results of the crossing during of our study. The color Fig. 7-5 for these same temples in a relative chronology of the style is based on the magnetic susceptibility. This table can be related to the relative chronology resulting from the architectural analysis (Fig. 7-23).

As we already emphasized, an important magnetic period seems to emerge at the end of our research. Indeed, the magnetic range oscillating around 1×10^{-3} SI Unit covers a considerable number of monuments of the Bayon style in Angkor. The major part of them are clearly located in the second half of the Bayon style, but the employ of this category of the materials start before the first phase of construction of Banteay Kdei or many additions in Preah Khan. Moreover as we proposed in the case of Banteay Prei and Banteay Thom, this category of materials was employed during a transition period with those of the preceding categories, of which material started to become rare. This would explain this decreasing phase of the magnetic susceptibility during the interval preceding this period of low magnetic susceptibility that characterizes Bayon and Angkor Thom.

The first phases of construction of Ta Prohm and Preah Khan seem to be closer to the results displayed by Angkor Wat that precedes them in time. Nevertheless we cannot extract some conclusions based on this apparent similarity because it would be dangerous to consider the Angkor Wat style only with Angkor Wat. The temples like Thommanon, Chau Say Thevoda or Vat Atvear, should be taken into account for better determining the transition between these two styles in the level of the extraction sites of the sandstone.

The end of the Bayon style is characterized by an ascending magnetic susceptibility from the second stage of construction of Bayon. Other additions in the other large complexes follow this same tendency, but we recall, in the case of Preah Khan, that we noted many incoherencies for this period that encour-

4.結語と展望

ここに所見を幾つか報告してきたが、それはあく までも出発点に過ぎない。2001年度、幾つかの調査 ミッションが行なわれ、このミッションを通じて帯 磁率の測定値を相当数蓄積することができた。その 測定結果からわれわれは、確かな知見を引き出すこ とができたので、当面の課題は達成されたこととす る。しかし、この測定結果はバイヨン様式の遺跡を 対象とした考察に役立つだけででなく、バイヨン様 式前後に属するアンコール遺跡に関する調査結果と 突き合わせる上でも有効であろう。

帯磁率の測定結果を分析する上でわれわれは建築 学的な解釈を試みたが、その解釈を通じて得られた 知見は、まだ不十分なものであり、バイヨン様式の 巨大宗教建築に顕著に認められる特徴を明らかにし たものに過ぎない。Fig. 7-24 から Fig. 7-27 は、今回 の調査から得られた幾つかの知見を組み合わせて、 タ・プローム、プレア・カン、バンテアイ・クデイ、 バイヨンの相対年譜を簡潔にまとめたものである。 Color Fig. 7-5 は、帯磁率の測定結果に基づいて作製 したバイヨン様式の相対年譜に、タ・プローム、プ レア・カン、バンテアイ・クデイ、バイヨンを位置 付けたものである。この図は、建築学的調査の結果 に基づいて作製した相対年譜 (Fig. 7-23) と突き合わ せることができる。

前述してきたように、われわれの調査結果に鑑み るならば、帯磁率期に関して一つの重要な時期があ るように思われる。1 × 10⁻³ SI unit 前後の値を示す 帯磁率期に、アンコール地域にあるバイヨン様式遺 跡の相当数が含まれるからである。この時期に属す る遺跡の大部分は、明らかに後期バイヨン様式に属 しているが、1×10⁻³ SI unit 前後の帯磁率を示す石 材の使用は、バンテアイ・クデイ第一建造期に建造 された建築物やプレア・カンに施された多数の増築 部分に認められるように、後期バイヨン様式よりも 以前に始まっている。更に、この種の石材は、バン テアイ・プレイとバンテアイ・トムに関してその可 能性を既に指摘したように、それまで使用されてき た石材が使用されなくなる移行期においても、使用 されていた可能性がある。その点より、この移行期は、 バイヨンとアンコール・トムに特徴的な、帯磁率の 低い時期に先立ち、帯磁率が低下する時期であると 解される。

タ・プロームとプレア・カンの第一建造期に建造 された建築物の帯磁率は、年代的にはそれ以前に建 造されたアンコール・ワットで測定した帯磁率の値 に近い。しかし、この類似性に関して、何らかの結 論を導き出すことはできない。アンコール・ワット 様式を、その最大の典型であるアンコール・ワット だけで考察することは危険だからである。石材供給 地に関して二つの様式の間の移行をより明らかにす るためには、トマノンやチャウ・サイ・テヴォダ、 あるいはワット・アドヴィアといった寺院を検討し なければならないだろう。

バイヨン様式末期の特徴は、その帯磁率が、バイ

ages us to be prudent. The problem of the hospital-chapels of Angkor Thom reinforced this opinion.

The results of the magnetic susceptibility of Preah Khan, in spite of the many interpretation problems, brought us a track of most interesting work during the typological analysis of the monuments of the Bayon style. Indeed, following the first relative chronologies of large complexes of the Bayon style, a comparison analysis of the typology of the original projects of these temples was undertaken. However it is based on the analysis of the data of the magnetic susceptibility of Preah Khan that it appeared to us what we think the common scheme and characteristic of the large temples of the Bayon style. This generic scheme results in the classification into three typology classes of the whole of the Bayon style both in Cambodia and in Thailand (Fig. 7-28).

In Fig. 7-25 we see that the core of Preah Khan was quickly supplemented by its first enclosure associated with four towers at its cardinal points and the third enclosure. The galleries organizing around the north, south and west sanctuary-towers (73, 95 and 120) which will constitute the secondary complex of Preah Khan were built thereafter as the magnetic susceptibility shows us. If we summarize this first phase of construction of the temple, we have a sanctuary-towers, used as epicenter of a deployment, at its principal and secondary cardinal points, and eight towers connected to it form the first gallery. This whole of towers itself is limited on the major axis of the composition by four towers. We think that this extremely clear scheme in Preah Khan is the fundamental program as well as the common denominator between Ta Prohm, Preah Khan and Bayon. Indeed we find such a scheme in Ta Prohm although, as we said before, the cardinal tower located at the east (tower 47) seems to have preceded the north, south and west towers which are each contemporary (tower 54, 60 and 70). The many repentant of the first enclosure, comprising eight towers, and the premises of the evolution of the ridge and the false-windows that we mentioned in Ta Prohm make us to think easily that this temple could be the experimental laboratory of the Bayon style which would have been formalized for the first time our generic scheme which will be employed from the beginning of Preah Khan. We can note indeed that in Preah Khan the distance of the central tower from each tower marking the cardinal points is appreciably equivalent. Thus if we traces a circle having a center in the central sanctuary and a radius of the distance of this one from the northern cardinal tower, for example, we note that this circle passes by the western and east towers and near the southern tower. Let us recall that it was observed for a long time that the Khmer temples having slight asymmetry on the north-south axis as at Angkor Wat, Preah Khan and Ta Prohm do not escape from this rule. This explains why it is not possiヨン第二建造期に建造された建築物の帯磁率よりも 高いことである。バイヨン以外の巨大建築に施され た増築部分の帯磁率もこの傾向にあるが、プレア・ カンの場合は慎重に検討しなければならない。先に 確認したように、バイヨン様式の末期に対応するプ レア・カンの建造期には一貫しない点が多く認めら れるからである。アンコール・トム施療院礼拝堂に 認められる問題性からも、その点は確認されよう。

プレア・カンに関しては、考察上、問題がいろい ろとあるが、その帯磁率を測定することで、バイヨ ン様式の遺跡を分類するに際して非常に興味深い調 査を行なうことができた。これまで、バイヨン様式 に属する巨大建造物の相対年譜を先ず設定してから、 寺院の初期計画を分類するために比較考察が行なわ れてきた。しかし、プレア・カンの帯磁率を測定す ることによってこそ、バイヨン様式に属する巨大建 築物に共通し、それに特徴的であると考えられる図 式を設定することができた。この図式より、カンボ ジアとタイにおけるバイヨン様式の遺跡を三種に分 類することができた (Fig. 7-28)。

Fig. 7-25 によれば、プレア・カン伽藍中央部は、 その建造後直ちに、東西南北の四隅に4基の塔が配 されている第一周壁と第三周壁が増築されたことが わかる。プレア・カンの脇伽藍を構成している北祠 堂塔、南祠堂塔、西祠堂塔(73、95、120)の周囲に 配された回廊は、帯磁率から判断するに、その後に 建造されたものである。以上を第一建造期とするな らば、この時期には、祠堂塔が言わば震源地となっ て、中央祠堂塔と副祠堂塔(73、95、120)の両者は、 それぞれその東西南北に向けて増築が行なわれたこ とになる。中央祠堂塔は、第一回廊で結ばれた8基 の塔の建造に至るまで拡張された。他方、副祠堂塔 そのものは、4基の塔が配された回廊によって取り 囲まれており、その回廊の建造に至るまで拡張され たことになる。プレア・カンに顕著に示されている この建造過程は、寺院の造営計画の基本となるもの であり、タ・プローム、プレア・カンそしてバイヨ ンに共通している。実際、タ・プロームもそのよう な建造過程を経ていると認められる。ただし、前述 したように、伽藍中央部の東側に配されている東塔 (47) は、同時期に建造された北塔(70)、南塔(60)、 西塔(54)よりも以前に建造されたと思われる。第 一周壁には、8基の塔が増築されるなど多数の改築 が行なわれており、また、タ・プロームに関する所 見のところで強調したように、大棟材と偽窓の変遷 に関わる前提条件を考慮に入れるならば、タ・プロー ムはバイヨン様式における実験的な性格の寺院で あった可能性があり、タ・プロームの事例は、プレア・ カンの造営開始以降、その増築過程に関して用いら れる図式を設定する上で材料を提供するものである と考えられる。プレア・カンの東西南北に配されて いる副祠堂塔と中央祠堂塔との距離は、それぞれ同 値である。実際、中央祠堂に中心をおき、例えば北 祠堂塔と中央祠堂との距離を半径にとって円を描く ならば、その円周上に西祠堂塔と東祠堂塔が位置し、

ble to make our circle pass exactly by the four cardinal towers. However we think that Preah Khan is the most perfect temple of the Bayon style based on this scheme, which evoke the composition of some *mandala* of Mahayana Buddhism, because we will not find any more this same rigor in the plan of the third temple that was designed on this same model.

If we consider the installations of the platform of the third stage of Bayon during the first phase of construction of the temple we note that we have a central sanctuary (tower 1) surrounded by eight towers connected to it (towers 3, 4, 5, 6, 7, 8 and 9) comprising an extension to his east. (towers 12 and 13) This unit itself is limited at the cardinal points by four isolated towers. (15, 18, 19 and 20) This resemblance to the scheme highlighted at Preah Khan does not seem fortuitous. Nevertheless as we had mentioned we do not find the rigor of the composition of Preah Khan because although the distances of the western, southern and northern cardinal towers with the central sanctuary is comparable, but that of the east cardinal tower dissociates very clearly.

The similarities between the original projects of the temples, which we have just seen, result us in considering a new formal interpretation of Bayon. Indeed we could consider this monument, in its initial state, like a space compression of Preah Khan, and by extension, of Ta Prohm, where the first enclosure would correspond to the whole of the structures linked to the central tower, giving this form so particular to the centralmassif which was often compared with a *stupa*.

The matrix that we clarified in Preah Khan characterizes major class of the monuments of the Bayon style among which only Ta Prohm, Preah Khan and Bayon were envisaged as their origin. They will be joined partially by Banteay Kdei and Banteay Chmar following the modification of their first enclosure in order to pass from four towers to eight towers. Indeed we can note in Banteay Kdei that the vaults of the corner pavilions of the first enclosure were partially dismounted to place the towers with false-stages while in Banteay Chmar the vaults of these same pavilions were left intact during the construction of the towers that surmounted them today. However in the case of Banteay Kdei the change of class of temples will not be completed as in Banteay Chmar because we do not find the four cardinal towers supplementing the scheme of the major category. This wills of modifying these two temples to close to the model employed in the Ta Prohm - Preah Khan - Bayon triptych⁸ stressed the importance that this organization of the space gives.

Based on the major class, the other typological categories of the Bayon style can be derived. Thus the intermediate class is composed of a central tower surrounded by four towers located at its cardinal points and connected to it. The temples like Ta 南祠堂塔はその円周上か少し離れたところに位置す ることが確認される。クメール期の寺院は、北側と 南側は僅かに非対称的な形態にあることは久しく指 摘されてきたところであるが、それは、アンコール・ ワットやプレア・カン、あるいはタ・プロームの場 合でも例外ではない。それゆえ、プレア・カンの東 西南北に配されている副祠堂塔を全て同一円周上に 置くことができないものと解される。しかし、われ われの設定した図式によれば、プレア・カンはバイ ヨン様式を最も完全に体現した寺院であると考えら れ、その平面構成は、大乗仏教の或る種の曼陀羅構 成を想起させるものである。タ・プロームはプレア・ カンと同じ建造過程を経ていると考えられるが、そ の平面構成はプレア・カンほどに厳密なものではな いからである。

バイヨン第一建造期に着工された中央基壇の増改 築を念頭に置くならば、相互に結び付けられた8基 の塔(1、3、4、5、6、7、8、9)によって取り囲ま れた中央祠堂(塔1)は、東側に向かって拡張された(塔 12、13)ことが確認される。伽藍中央部それ自体は、 その東西南北に相互に離れて配されている4基の塔 (15、18、19、20)によって取り囲まれている。バ イヨンの平面構成に関する図式は、プレア・カンに 関して明白に認められるその図式と類似しているが、 それは偶然ではない。しかしながら、前述したように、 バイヨンの平面構成はプレア・カンほどに厳密なも のではない。北塔、西塔そして南塔と中央祠堂の距離 は、率直に言うならば、掛け離れているからである。

これまで概観してきた諸寺院の初期の造営計画は、 それぞれ類似しており、その点に鑑みるならば、バ イヨンに関して明らかに新しいものと言える解釈を 施すことができる。バイヨンは、当初の段階では、 プレア・カンを、更にはタ・プロームを空間的に圧 縮したものであると考えられるからである。プレア・ カンやタ・プロームの第一周壁は、バイヨン中央祠 堂塔に接合している構造体全体に対応するものであ り、この構造体は伽藍中央部に特別な形態をもたら すものとなっているため、中央祠堂塔はしばしばス トゥーパにたとえられるほどである。

われわれはプレア・カンに関してその伽藍構成と 配置を明らかにしてきたが、その構成と配置はバイ ヨン様式に属する遺跡の大半を特徴付けるものであ り、そのうち、タ・プローム、プレア・カン、そし てバイヨンだけは当初から類似した造営計画のもと で伽藍構成と配置が決められたものと考えられる。 それ以外にも、バンテアイ・クデイとバンテアイ・チュ マーについては、部分的に、第一周壁に配された4 基の塔が8基に増築された後の伽藍構成と配置をそ のうちに含めることができる。バンテアイ・クデイ では、第一周壁の隅楼ヴォールトが、疑似階の付い た塔の増築に際して場所を提供するために、部分的 に取り壊されているのに対して、バンテアイ・チュ マーでは、隅楼ヴォールトの上に塔が増築されてお り、その増築に際してヴォールトは取り壊されてい Som, Banteay Prei or Ta Prohm of Bati are traditional of this category. We can add Ta Nei and Banteay Kdei and Banteay Chmar before the transformation of their first enclosure. Let us notice to finish that the northern, western and southern secondary sanctuaries of Preah Khan are also based on this scheme.

The minor class includes only one tower sanctuary surrounded by a simple enclosure. We count many examples of temple of this class like in particular Krol Kô, Prasat Prei and the hospital chapels.

As we have emphasized, the magnetic susceptibility of the sandstone permits us to put forth some assumptions on logistics related to the use of the sandstone during this period of the Khmer art because of traceability of the categories on the ensemble of the Bayon style in Angkor. Thus, it seems that the stones used during the first phases of construction of Ta Prohm and Preah Khan could be the same source as those of the monuments of the previous period, while certain additions to Ta Prohm and Preah Khan would have inaugurated the exploitation of a new site of extraction used for the construction of Banteay Kdei and Bayon in particular. The geographical distribution of these temples compared with their magnetic susceptibility leaves to consider the possibility of common sites of storage of the stones for certain temple like Ta Prohm, Banteay Kdei, Preah Khan, Prasat Prei and Banteay Prei. But all that remains only speculation.

For this time the information concerning the quarries which were used for the Angkor monuments remains too insufficient to consider the development of a relative chronology of their exploitation by the crossing with the data collected on the Angkor monuments. The task to be achieved in this field remains enormous, but will be essential for a better exhaustive interpretation of the data of the magnetic susceptibility of the whole of the group of Angkor.

The contributions of the magnetic susceptibility to the development of the relative chronologies of each studied temple and their relation were multiple as we have just seen it. On the one hand, they could be used as a tool for checking the results of the architectural analyses and the architectural and ornamental decoration previously carried out, and allowed to supplement these, on the other hand. But beyond these contributions, the approach of this new glance on these monuments of the Bayon style enables us to consider other tracks of research that it is difficult to approach with a simple architectural reading.

Thus the problems of logistics of the large building sites of the reign of Jayavarman VII as well as the exploitation sites of materials, and also the problems of distribution and storage to feed to the construction sites seem more interesting research and would bring some answers to the inconsistencies which we had the occasion to mention in Ta Prohm and Preah Khan in ないからである。しかし、バンテアイ・クデイの事 例は、バンテアイ・チュマーのように、寺院の増築 によってその類型が変わるものではない。第一類に 分類される遺跡には、その東西南北に塔が配される が、バンテアイ・クデイにはその塔が認められない からである。いずれにしても、バンテアイ・クデイ やバンテアイ・チュマーにおけるように、タ・プロー ム、プレア・カン、バイヨンの三遺跡[®]に認められ る伽藍配置に近付けるために、遺跡に増築が施され たということは、この伽藍配置が呈している重要性 を際立たせるものである。

バイヨン様式の遺跡に関して、伽藍構成・配置の 第一類を基本にそれ以外の伽藍構成・配置の分類が 導き出される。中間形態である第二類は、中央塔と、 その東西南北に配され、相互に結びついて中央塔を 取り囲む4基の塔からなる。タ・ソム、バンテアイ・ プレイ、あるいはバティのタ・プロームといった寺 院が第二類に属する。それ以外に、第一周壁に増改 築が行なわれる以前のタ・ネイ、バンテアイ・クデ イ、バンテアイ・チュマーが第二類に属する。プレア・ カンの北副祠堂、西副祠堂、南副祠堂もまた、第二 類に分類される伽藍配置に基づいている点に注意し よう。

第三類に属する伽藍構成としては祠堂塔しかなく、 それは簡素なつくりの周壁によって取り囲まれるこ ともある。第三類には多くの寺院が属するが、特に クオル・コー、プラサート・プレイ、あるいは施療 院礼拝堂が代表的である。

アンコール地域に建造されたバイヨン様式の寺院 が分類可能である点に鑑みた場合、前述したように、 砂岩帯磁率の測定結果を根拠にして、クメール芸術 が開花する時期における砂岩材の使用と石材の供給 について幾つかの仮定を立てることが可能である。 例えば、タ・プロームとプレア・カンの第一建造期 に使用された石材は、特に、それ以前に建造された 遺跡に使用された石材と同じ供給地から切り出され た可能性があるのに対して、タ・プロームとプレア・ カンの増築部分の或る箇所には、新しい供給地から 初めて切り出された石材が使用され、特にバンテア イ・クデイとバイヨンの建造に際しては、この供給 地から切り出された石材が全面的に使用されたもの と思われる。以上の寺院が占める地図上の分布とそ の帯磁率を突き合わせてみた場合、タ・プロームと バンテアイ・クデイ、またプレア・カンとプラサート・ プレイおよびバンテアイ・プレイといった幾つかの 寺院には、両者に共通の石材置場があった可能性も 考えられよう。しかし、以上のことは全て推測の域 を出るものではない。

アンコール地域の遺跡建造に携わった石工に関す る知見は、今のところ、それほど多くないため、ア ンコール遺跡群に関するその他の調査結果と照合し て、石材採掘に関する相対年譜を構築することがで きない。石材供給に関して取り組むべき調査は数多 く残されているが、アンコール遺跡全体を対象に網 羅的な帯磁率測定が終了することは、この測定結果 particular. Such a plan could be only the product of an interdisciplinary collaboration where petrology, geology, architecture and archaeology would be the principal links.

Notes

- 1 ARJSA 1997, p. 259; ARJSA 1998, p. 373 and ARJSA 1999, p. 249.
- 2 ARJSA 2000, p. 221.
- 3 See especially: Ph. Stern, *Les monuments khmers du style du Bayon et Jayavarman VII*, PUF, Paris, 1965 and J. Dumarçay, *Le Bayon, Histoire architecturale du temple*, EFEO, Paris, 1973; *ditto, Le Bayon, Histoire architecturale du temple, Atlas et notice des planches*, EFEO, Paris, 1967.
- 4 "De Ta Prohm au Bayon, Analyse comparative de l'histoire architecturale des principaux monuments du style du Bayon" these doctoral in architecture of the National Polytechnic Institute of Lorraine accomplish in the Research Center in Architecture and engineering (UMR MAP – CNRS/Ministry of Culture and Communication).
- 5 See: H. Arahi, Étude préalable pour la conservation de la bibliothèque Sud du sanctuaire de Banteay Kdei, à Angkor, Cambodge, Kathalieke Universiteit Leuven, Belgium, 1997.
- 6 See especially: M. Glaize, *Les Monuments du Groupe d'Angkor*, p. 179.
- 7 See: H. Marchal, "Notes sur l'architecture de Neak Pean," *BEFEO* 26, 1926, pp. 1-9, and M. Glaize, "Essai sur la connaissance de Nâk Pân après anastylose," *BEFEO* 40(2), 1940, pp. 351-362.
- 8 This triptych can have a double reading. Indeed, these temples are simultaneously dedicated to the father of Jayavarman VII and to Avalokiteçvara for Preah Khan, probably to Jayavarman VII itself and to the Buddha for Bayon and to the mother of Jayavarman VII and Pranjnapârâmita in Ta Prohm.

References

Georges CŒDÈS :

"La stèle de Ta Prohm," BEFEO 6, EFEO, 1909, pp. 44-81.

"La stèle du Preah Khan d'Angkor," *BEFEO* 41, 1942, Hanoi, pp. 255-301.

Jean DELVERT :

"Recherches sur l'érosion des grès des monuments d'Angkor," BEFEO 51(2), Paris, 1963, pp. 453-534.

Jacques DUMARÇAY :

Le Bayon, Histoire architecturale du temple, Atlas et notice des planches, EFEO, Paris, 1967.

Le Bayon, Histoire architecturale du temple, EFEO, Paris, 1973.

Documents graphiques de la Conservation d'Angkor, 1963-1973, EFEO, Paris, 1988.

Pierre FUSEY :

Altérations biologiques des grès cambodgiens et recherche de moyens de protection (Essai de synthèse), EFEO, Paris, 1991.

Maurice GLAIZE :

"Essai sur la connaissance de Nâk Pân après anastylose," *BEFEO* 40(2), 1940, pp. 351-362.

Les monuments du groupe d'Angkor, 4e éd., Adrien-Maisonneuve, 1993.

Henri MARCHAL :

に関してより精緻な検討を施すためには不可欠であ ろう。

個別に調査してきた寺院の相対年譜、ならびに各 寺院の相互関係に関する相対年譜を構築するにあた り、帯磁率測定が果たす役割は、前述してきたよう に、多岐にわたるものである。一方で、帯磁率の測 定結果と突き合わせることで、建築装飾と様式に関 して以前に行なわれてきた調査結果を検証すること ができ、他方で、この調査に欠如していた知見を補 うことができた。しかし、帯磁率測定がもたらす寄 与は上述の点だけにとどまらない。この測定結果を 考慮に入れることで、バイヨン様式に属する遺跡に ついて新しい視座から接近し、別の手がかりからこ の遺跡に関して調査を進めることが可能となったか らである。ジャヤヴァルマン VII の治世には広大な 建築現場が出現したわけであるが、その現場で使用 される資材の提供に関する石材供給地の問題も、建 築資材の補給に関する資材の貯蔵と配分の問題も、 単なる建築学的調査では扱うことの難しかったもの である。この問題は、調査を行なう上で、非常に興 味深いものであると思われるし、また、この問題に 取り組むことで、特にタ・プロームとプレア・カン について指摘したような帯磁率と建築装飾の不一致 に関して、何らかの説明が可能となるかもしれない。 いずれにしても、そのような試みは、今後、岩石学、 地質学、建築学そして考古学を核とする学際的な協 力態勢を整え、その態勢のもとでしか実現不可能で ある。

註

- 1 『アンコール遺跡調査報告書 1997』, p. 219;『アンコー ル遺跡調査報告書 1998』, p. 361;『アンコール遺跡調査 報告書 1999』, p. 229.
- 2 『アンコール遺跡調査報告書 2000』, p. 181.
- 3 See especially: Ph. Stern, Les monuments khmers du style du Bayon et Jayavarman VII, PUF, Paris, 1965 and J. Dumarçay, Le Bayon, Histoire architecturale du temple, EFEO, Paris, 1973; ditto, Le Bayon, Histoire architecturale du temple, Atlas et notice des planches, EFEO, Paris, 1967.
- 4 "De Ta Prohm au Bayon, Analyse comparative de l'histoire architecturale des principaux monuments du style du Bayon" these doctoral in architecture of the National Polytechnic Institute of Lorraine accomplish in the Research Center in Architecture and engineering (UMR MAP – CNRS/Ministry of Culture and Communication).
- 5 See: H. Arahi, Étude préalable pour la conservation de la bibliothèque Sud du sanctuaire de Banteay Kdei, à Angkor, Cambodge, Kathalieke Universiteit Leuven, Belgium, 1997.
- 6 See especially: M. Glaize, *Les Monuments du Groupe d'Angkor*, p. 179.
- 7 See: H. Marchal, "Notes sur l'architecture de Neak Pean," *BEFEO* 26, 1926, pp. 1-9, and M. Glaize, "Essai sur la connaissance de Nâk Pân après anastylose," *BEFEO* 40(2), 1940, pp. 351-362.
- 8 This triptych can have a double reading. Indeed, these temples

"Notes sur l'architecture de Neak Pean," *BEFEO* 26, 1926, pp. 1-9. "Bayon," *BEFEO* 33(2), 1933, pp. 1116-1117.

"Sondages au Bayon," BEFEO 37(2), 1937, pp. 637-651.

Henri PARMENTIER :

"Modifications subies par le Bayon au cours de son exécution, Notes d'archéologie Indochinoise VIII," *BEFEO* 27, 1927, pp. 149-161.

"Autre modification subies par le Bayon au cours de son exécution, Notes d'archéologie Indochinoise X," *BEFEO* 36(1), 1936, pp. 281-286.

Philippe STERN :

Les Monuments khmers du style du Bayon et Jayavarman VII, Publications du musée Guimet. Recherches et documents d'art et d'archéologie, Tome IX, PUF, Paris, 1965.

Etsuo UCHIDA, Yoshinori OGAWA and Takeshi NAKAGAWA : The stone materials of the Angkor monuments, Cambodia. – The magnetic susceptibility and the orientation of the bedding plane of the sandstone. J. Min. Pet. Econ. Geol. 93, 1998, pp. 411-426.

* Many of the plan drawings used in this report are quoted from the publication of EFEO.

are simultaneously dedicated to the father of Jayavarman VII and to Avalokiteçvara for Preah Khan, probably to Jayavarman VII itself and to the Buddha for Bayon and to the mother of Jayavarman VII and Pranjnapârâmita in Ta Prohm.

参考文献

Georges CŒDÈS :

"La stèle de Ta Prohm," *BEFEO* 6, EFEO, 1909, pp. 44-81. "La stèle du Preah Khan d'Angkor," *BEFEO* 41, 1942, Hanoi,

pp. 255-301. Jean DELVERT :

"Recherches sur l'érosion des grès des monuments d'Angkor," *BEFEO* 51(2), Paris, 1963, pp. 453-534.

Jacques DUMARÇAY :

Le Bayon, Histoire architecturale du temple, Atlas et notice des planches, EFEO, Paris, 1967.

Le Bayon, Histoire architecturale du temple, EFEO, Paris, 1973.

Documents graphiques de la Conservation d'Angkor, 1963-1973, EFEO, Paris, 1988.

Pierre FUSEY :

Altérations biologiques des grès cambodgiens et recherche de moyens de protection (Essai de synthèse), EFEO, Paris, 1991.

Maurice GLAIZE :

"Essai sur la connaissance de Nâk Pân après anastylose," *BEFEO* 40(2), 1940, pp. 351-362.

Les monuments du groupe d'Angkor, 4e éd., Adrien-Maisonneuve, 1993.

Henri MARCHAL :

"Notes sur l'architecture de Neak Pean," *BEFEO* 26, 1926, pp. 1-9.

"Bayon," BEFEO 33(2), 1933, pp. 1116-1117.

"Sondages au Bayon," BEFEO 37(2), 1937, pp. 637-651.

Henri PARMENTIER :

"Modifications subies par le Bayon au cours de son exécution, Notes d'archéologie Indochinoise VIII," *BEFEO* 27, 1927, pp. 149-161.

"Autre modification subies par le Bayon au cours de son exécution, Notes d'archéologie Indochinoise X," *BEFEO* 36(1), 1936, pp. 281-286.

Philippe STERN :

Les Monuments khmers du style du Bayon et Jayavarman VII, Publications du musée Guimet. Recherches et documents d'art et d'archéologie, Tome IX, PUF, Paris, 1965.

- Etsuo UCHIDA, Yoshinori OGAWA and Takeshi NAKAGAWA : The stone materials of the Angkor monuments, Cambodia. – The magnetic susceptibility and the orientation of the bedding plane of the sandstone. J. Min. Pet. Econ. Geol. 93, 1998, pp. 411-426.
 - ※ この報告に使用されている多くの平面図はフランス 極東学院 (EFEO)の出版物から引用した。



Fig. 7-1 Schema of the process of the construction sequence for the individual and general chronology of the Bayon style monuments.



Fig. 7-2 Bayon. Example of the seize of the measurements of the magnetic susceptibility.



Fig. 7-3 Ta Prohm. Diagram of the structural relations of the 3rd enclosure.



Fig. 7-4 Ta Prohm. Structural chronological sequence.



Fig. 7-5 Preah Khan. Diagram of the structural relations of the 3rd enclosure.



Fig. 7-6 Preah Khan. Structural chronological sequence.



Fig. 7-7 Banteay Kdei. Diagram of the structural relations of the 2nd enclosure.



Fig. 7-8 Banteay Kdei. Structural chronological sequence.



Fig. 7-9 Bayon. Diagram of the structural relations of the Outer Gallery.



Fig. 7-10 Bayon. Structural chronological sequence.














ig. 7-17 Plan of Ta Nei showing the distribution of the magnetic susceptibility of the grey to yellowish brown sandstones by 10⁻³ SI Unit.









Fig. 7-21 Plan of Banteay Prei showing the distribution of the magnetic susceptibility of the grey to yellowish brown sandstones by 10⁻³ SI Unit.



of the grey to yellowish brown sandstones by 10⁻³ SI Unit.

End of Angkor Wat style			Bayon style						
6)		La part of the Barry style						1
subdivision use	in the research	t of Ph.	Stern.						
tratiation period to Record acide		A Part	print	Prové A3	las permi		Bernepetind		Trenevint period
				For Pouls Kheeperned	2nd	Print Dan period	Fol Brook partial	Set Arms privad	
subdivision use	in "from Ta Pr	rohm to	Bayon*	research.	-				
la bag				f de Arme stale	264 half of the Brook of the				
subdivision sim	plified.		-		-				-
Ty Proba	Cestral ium/torry & Interstonate	Not & not excitoneed Notet & Six (Phy-periods of		th chinton Preah Khate	Important additions in the space of the 3rd and/source		Domain's each more with fine faces process	2ni melosore	Modification of the original toracgraphy
	Preah Khan		inter a	name ist & 2nd exclosurer, North, South A West choisess		stanti etadosetti soluting additore aide tila tittepte		20 million	Modification or the original lanengraphy
	Penne a	arma)		Tuesde Milde geolier	manine of the cooled ay & addition of Sy is & according beam			Modification of the original isomography	
Bunteev Kdei Bunteev Thom Ta Nei Banteav Pret			Solutions central, for & 3rd packositos			Demail's endower	. Del mittane	Madification of the original Accessibility	
			Forend southway & In each start	0o	an ini ma			Modification of the original according to by	
			Costud muchany R-14 exchange			Domin's enclosure?		Modification of the uniqueak investigation	
			y Pret	Finited universe	To exclusive				Modification of the original turns graphy
			Ta Son		i et & 2nd endroser		Domain's enclosure with has dates towers		Modification of the implication lossing to by
				Krot Kil	14 A 2st industri		Densie's cocharas 7		Modiliorem or the original looking taply
				Pranar Prei	Require dicknow				Modification of the original tomography
			Prasa Prei Prasat	All put of the screpe				Modification of the original lossegraphy	
			Bunteay Chesar	Nat	intré senteny Un prolongy & South cloness ?	Addison of the Tase complex Hall of Dancen 7	Addition of the West constants, A publicate with face ormery	Original incongraphy non-alluring	
				Vat Bianon	All commit part of the immulie				Modification of the coupled according to
				Ta Proton of Batt	AB	out of the inteple			Original inconstrativy in a maxim
				Bayern	Mana considered of the 2nd local & the owner gallery	Addition of the series of the local patient constraints of the source patient & parameter despite	And a second sec	Multipaire of the original iconography	
				Gates of Angkor	Thum	Main strations.			Modification of the original toonography
				Provat C	WHER	All searcome			Modification of the original latencytophy
						Hospital chapels of Angkor Thom	Great sectors		Multi-steel of the original sciences/phy
							Clephant's terrace	Countipor	Original konceptority art alarted

Fig. 7-23 Temporary chronological table of the main monuments of the Bayon style.











Fig. 7-28 Distribution of the principal Bayon style monuments by typological category.

Appendix 8 : Conservation Science Survey Report of the Bayon Temple

ARAI Hideo

We have conducted the conservation science survey in Angkor since 1994. For the Appendix Chapter 8, instead of overlapping the survey report which are already shown in the JSA annual report, the items for reference are described as the following.

ARJSA 1995

Chapter 6. Conservation Science and Restoration Technique

- 1. Investigations of Deteriorating Organisms and Control Methods (ARAI Hideo)
 - 1.1 Introduction
 - 1.2 Sampling of Deteriorating Organisms
 - 1.3 Identification of Organisms
 - 1.4 Cleaning of Lichens, Waterproof Treatment and Inhibiting Test on Stone Materials
 - 1.5 Water Permeability Test
 - 1.6 Future Prospect
- 2. The Results of Exposured Tests for the Water Repellent Impregnant (FUJIKI Yoshiaki)
 - 2.1 Introduction
 - 2.2 Test and Observation for [Test Sample No.1]
 - 2.3 [Test Sample No.2 Group] Apply the Agent, Test and Observation
 - 2.4 Summary and the Subjects for Future Investigations
- 3. A Proposal of the International Standard Specifications of the Technologies applied for the Conservation/Restoration Works of Angkor Monuments (FUJIKI Yoshiaki)

Chapter 7. Conclusion

5. Conservation Science

ARJSA 1996

Chapter 6. Conservation Science

- 1. Introduction (ARAI Hideo)
- 2. Aerial Algae Collected from Angkor Monuments (YAM-AGISHI Takaaki)
- 3. Experiments of Controlling Methods for Growth of Al-gae and Lichens (ARAI Hideo)
- 4. Report on Sandstone Repair Materials of Northern Library of Bayon, and Adhesive Bond of Ruins in Vietnam (FU-JIKI Yoshiaki)
- 5. Conclusion
- Chapter 8. Conclusion
- 5. Conservation Science (ARAI Hideo)

ARJSA 1998

- Chapter 8. Conservation Science (ARAI Hideo, YAMAGISHI Takaaki)
 - 1. Introduction
 - 2. Deteriorating Process of Stone Materials by Lichens

付録8 バイヨン寺院の保存科学調査報告

新井英夫

アンコール遺跡における保存科学調査は、1994年 から実施してきたが、既往の報告との内容の重複を 避けるため、ここでは以下に各年次報告書における これまでの報告の目次を挙げ、代わりとする。

『アンコール遺跡調査報告書 1995』

第6章保存科学·修復技術

- 1. 生物劣化とその防除(新井英夫)
- 1.1 はじめに
- 1.2 加害生物の採集
- 1.3 加害生物の同定
- 1.4 石材の保存対策
- 1.5 今後の課題
- 2. 浸透性吸水防止材暴露試験結果(藤木良明)
 2.1 はじめに
 - 2.2 [試験体-1] の試験・観察
 - 2.3 [試験体-2 群] の塗布・試験・観察
 - 2.4 まとめと今後の課題
- アンコール遺跡保存修復技術に関する国際標準 仕様書の提案(藤木良明)
- 第7章まとめ
- 5. 保存科学

『アンコール遺跡調査報告書 1996』

- 第6章保存科学
- 1. はじめに(新井英夫)
- 2. アンコール遺跡建造物に着生する藻類(山岸高 旺)
- 3. 防藻·防地衣試験(新井英夫)
- バイヨン北経蔵砂岩補修材、およびヴィエトナム遺跡接着剤に関する報告(藤木良明)
- 5. 結語
- 第8章結論
- 5. 保存科学(新井英夫)

『アンコール遺跡調査報告書 1998』

- 第8章保存科学(新井英夫、山岸高旺)
 - 1. はじめに
- 2. 地衣類の石造物劣化機構
- 3. 新防地衣剤について
- 4. アンコール遺跡における防藻・防地衣試験
- 5. 小結
- 第 11 章 まとめ
- 7. 保存科学

- 3. New Anti-lichen Treatments
- 4. Tests to Control Lichens and Algae at Angkor: Materials, Methods and Results
- 5. Conclusion
- Chapter 11. Conclusion
- 7. Conservation Science

ARJSA 1999

- Chapter 5. Conservation Science (YAMASATO Kazuhide, KURA-ISHI Hiroshi, KATAYAMA Yoko, ARAI Hideo)
 - 1. Introduction
 - 2. Microbiological Analyses of Deteriorating Stone Materials
 - 3. Records of Algaecidal and Lichenocidal Tests
 - Termite of the Northern Library of Bayon (YAMANO Katsuji)
 - 5. Conclusion

Chapter 10. Conclusion

4. Conservation Science

ARJSA 2000

- 12.Details of Conservation Science Survey (Conservation Science Survey for 1999-2000, Part 1) (ARAI Hideo)
- 13.Notes on Bat fauna in Angkor Wat and Bayon Temple in Cambodia (Conservation Science Survey for 1999-2000, Part 2) (YOSHIYUKI Mizuko, MUKOUYAMA Mitsuru and SAITO Hisashi)

ARJSA 2002

- 18.Conservation Science Survey (I) Conservation Measures (SO Sokuntheary, CHEAM Pross, TOJO Yuki, SHIMODA Ichita, YAMAGISHI Takaaki, KASUYA Hirokazu, IMAI Nobuhiro, MIYAKE Yasuhiro, IHARA Fuminori, OMOTE Yu'ichi, and ARAI Hideo)
- 19.Conservation Science Survey (II) Research on Microorganisms (KATAYAMA Yoko, OGUMA Kenji, and KURAISHI Hiroshi)
- 20.Conservation Science Survey (III) Bat Research of Angkor Monument - Bat Ecological Research for Exchange the Roosting Sites - (YOSHIYUKI Mizuko, MUKOUYAMA Mitsuru, HARADA Masasi, and SAITO Hisashi)

ARJSA 2003

- 13.Conservation Science Survey (1) Test for the Removal of Algae and Lichens (SO Sokuntheary, CHEAM Pross, SHIMODA Ichita, KASHIWADANI Hiroyuki, YAMAGI-SHI Taka'aki, IMAI Nobuhiro, and ARAI Hideo)
- 14.Conservation Science Survey (2) Research on Microorganismus (KATAYAMA Yoko, SHIMODA Ichita, and ARAI Hideo)
- 15.Conservation Science Survey (3) Discussion on Measures for Preventing Deterioration of the Reliefs of the Inner Gallery of Bayon (EBISAWA Takao, SHIMODA Ichita, and AKAZAWA Yasushi)

- 『アンコール遺跡調査報告書 1999』
- 第5章保存科学(山里一英、倉石衍、片山葉子、新 井英夫)
 - 1. はじめに
 - 2. 劣化石材の微生物分析
 - 3. 防藻・防地衣試験の経時記録
 - 4. バイヨン北経蔵のシロアリ(山野勝次)
 - 5. おわりに
- 第10章結論
- 4. 保存科学
- 『アンコール遺跡調査報告書 2000』
 - 12. 保存科学調査の経緯 1999 年度保存科学調査-1(新井英夫)
 - 13. アンコール・ワットおよびバイヨン寺院内におけるコウモリ類の調査 1999 年度保存科学調査
 -2(吉行瑞子、向山満、斉藤久)

『アンコール遺跡調査報告書 2002』

- 18. 保存科学調查(1)保存対策(SO Sokuntheary、 CHEAM Pross、東條由紀、下田一太、山岸高旺、 山野勝次、柏谷博之、今井信廣、三宅靖宏、居 原史典、表雄一、新井英夫)
- 19. 保存科学調查 (2) 微生物学的調查 (片山葉子、 小熊健二、倉石衍)
- 20. 保存科学調査(3)アンコール・ワット遺跡のコウモリ類調査 -移住のためのコウモリ類生態調査-(吉行瑞子、向山満、原田正史、斉藤久)
- 『アンコール遺跡調査報告書 2003』
 - 13. 保存科学調査(1)藻類・地衣類の除去試験(SO Sokuntheary、CHEAM Pross、下田一太、柏谷博 之、山岸高旺、今井信広、新井英夫)
 - 14. 保存科学調查(2)微生物学的調查(片山葉子、 下田一太、新井英夫)
 - 15. 保存科学調査(3)バイヨン内回廊のレリーフ劣 化防止対策の検討(海老澤孝雄、下田一太、赤 澤泰)

Appendix 9 : Evaluation of the Restoration of Bayon Northern Library

AKAZAWA Yasushi

1. Introduction

Conservation and restoration work on the Northern Library of Bayon began with the dismantlement of the monument in February 1996 and continued until September 1999. Movement surveys and other maintenance and management work have since been implemented on a monthly basis to this day. This paper presents the results of those surveys as well as provides an evaluative report of the conservation and restoration of the Northern Library of Bayon, including reflections on various aspects of the work.

2. Periodic monitoring after restoration

Since September 1999, a survey on the movement of the monument has been conducted every month. The method of the survey is simple; the measurement point established after completion of the restoration work is measured and compared to a datum point. This method was chosen because it satisfied the basic condition that it could be implemented regularly and continually as part of the maintenance and management of the monument by the Cambodian people. Results of the periodic measurements so far have not shown any movement of the Northern Library after restoration. It therefore appears to be maintaining its stable condition.

Cleaning is another important maintenance and management task. This includes the cleaning of the drainage ditch installed in the floor of the building after restoration and the removal of trees. Since water and trees are the major factors of deterioration and damage, to effectively controlling them would help reduce their impact on the monument.

3. Evaluating the conservation and restoration work

It is particularly worthy of mention that the conservation and restoration of the Northern Library of Bayon took a different course from other conservation and restoration work previously conducted in the Angkor region. In line with its policies on restoring monuments, JSA aimed not only to restore the monument to its original form, but to simultaneously conserve its structural properties and construction method as well.

The restoration of the platform interior is a good example. Severely deteriorated areas were decided to be dismantled, examined and rebuilt, but in doing so, JSA developed and applied restoration techniques that were based on techniques employed in the initial construction of the building. Even the compacted sand layer inside the platform was restored in consideration of the above. Instead of using concrete, which is basically a molten mass, improved soil containing lime hydrate was used so that the original compacting method could be conserved.

By stabilizing the platform through the above method, it also became possible to rebuild the upper structure using the "dry masonry" technique employed in the initial construction of the building.

Additionally, in regard to compensating for missing elements, a noteworthy progress was made from past restorations. That is, the procurement of new sandstone materials became possible. Gaining access to new sandstone materials—from the investigation of potential quarries to the quarrying and transporting of the material—has brought about major improve-

付録9 バイヨン北経蔵修復工事の評価

赤澤泰

1. はじめに

バイヨン北経蔵保存修復工事は、1996年2月に開 始された解体工事から、1999年9月にかけて実施さ れた。以降2004年現在まで、毎月挙動調査をはじめ 維持管理を継続して行っている。本稿では、その観 測調査結果と同時に、バイヨン北経蔵保存修復工事 での反省点などを含めた評価的な報告をする。

2. 修復後の定期観察

1999年9月以降、毎月遺構の挙動観測調査が継続 されている。調査方法は、竣工後に設置された測量 点を基準点と比較して計測するという簡便な方法で ある。この測量方法が選択された理由は、カンボジ ア人によって維持管理を行っていく上で、定期的、 継続的に可能であることが条件としてあったためで ある。この定期計測結果では、これまでのところ、 バイヨン北経蔵の修復後の挙動は確認されていない。 安定した状態が維持されている結果となっている。

維持管理のもう一つの作業として清掃がある。修 復により設置された床排水溝の清掃、更には樹木の 除去などがあげられる。劣化・損傷要因である、水、 樹木などをある程度コントロールして遺構への影響 を低減させるためのものである。

3. 保存修復工事の評価

バイヨン北経歳保存修復工事は、それまでアンコー ル地域でなされてきた保存修復工事とは異なった方 向性を示している点が特筆される。JSA では、修復 の方針として、その形態のみでなく構法、工法の保 存も同時に配慮した修復を目標とした。

まず、基壇内部修復を例にあげる。劣化の著しい 部分を解体調査し、再構築するという手法であるが、 基壇内部の版築砂層においても、創建時の技法を踏 襲した修復技法を開発、実践している。そのため材 料としても、コンクリートという溶融一体性のある 材料ではなく、消石灰を加えた改良土を使用し、版 築という工法を使用できるようにしている。

基壇の安定化を、上記工法にて実施することによ り、上部構造体についても、創建時の工法である「空 積み」にての再構築が可能となっている。

欠損部材の補充についても、これまでの修復から 一歩進んだ事象が挙げられる。新材砂岩の供給を可 能としたことである。カンボジアの国勢や環境など が大きく影響しているが、供給可能な石切り場の調 査から、切り出し、輸送などを含めた、新材砂岩の 入手は、修復方法や技術、材料に大きな変化を生み ments in restoration methods, technologies, and materials. Various situations in Cambodia and its environment were largely responsible for those changes as well. Implementation of the new material, however, requires thorough discussions and examinations before use.

In regard to the repairing of deteriorated elements, the repair methods differed little from those employed in the past in the Angkor region. However, the fact that the restoration materials were examined extensively in conjunction with various confirmation tests and experiments, and that those results were disclosed, should be highly evaluated.

One of the problems of the conservation and restoration work was the inadequacy of studies made prior to commencing the dismantlement. Given the rapid worsening of the state of the Northern Library, there is no question that it needed to be dismantled urgently. However, the monument should have been sufficiently reinforced, and the necessary studies should have been conducted to the greatest extent possible, before dismantling the building.

Another problem lay in the treatment of the junction between the non-dismantled area and the rebuilt area. This is the most vital part of the partial dismantlement and rebuilding process. If an inspection of the monument' s condition deems it unnecessary to dismantle a certain area, that area is conserved in its existing state. It may be stable, but there is apt to be some degree of movement as time passes. Compared to the building at the time of its construction, there are apt to be minute subsidences, joint openings, or other such damages. Distortions caused by uniform movements can be remedied relatively easily, but it is extremely difficult to correct the junction between an area where uneven subsidence has occurred and an area where partial restoration has recovered some of the original appearance.

In the restoration work on the Northern Library, raising materials were inserted in areas where ground subsidence was large in order to raise them to the level of parts where the subsidence was small. Depending on the amount (height and size) of raising that was needed, sandstone, lime mortar, and lead were used. There is plenty of scope for further study on this issue.

The third problem pertains to the repair of elements that was performed with a long-range outlook. The said conservation and restoration work stopped short of complete restoration because many of the roof elements and other elements had yet to be discovered. However, analyses were made and reinforcements were selected so that the building can maintain its structural stability even when the missing elements are found in the future and the load of the roof in added on top. For this reason, a seemingly excessive amount of reinforcements was used. It was necessary to take this method because the restoration of elements, and especially the repair of elements that require structural reinforcements, are not tasks that can be done over many times.

Five years have passed since the conservation and restoration of the Northern Library of Bayon was completed, but it is still stable. Perhaps it is a bit too early to draw a conclusion at this point, but nevertheless, as things stand, the conservation and restoration work can be said to have been successful. Although it depends on whether the monument can be maintained and managed effectively in the years to come, the true value of the said restoration work will surely be appreciated 50 years, or even 100 years, from now. だしている。ただし、その新材の使用については十 分な議論と検討が必要である。

劣化部材の修理については、基本的には、これま でアンコール地域でなされてきている修復方法とそ れほど大きな差はないのであるが、修復材料の十分 な検討とその裏づけとなる各種の試験、実験を実施 し、その結果を公表している点では評価されてよい のではないだろうか。

問題点としてあげられることは、解体着手前調査 の不足がある。北経蔵の急激な状態悪化によりやむ を得ず解体に着手せざるを得なかった経緯はあるが、 本来であれば、十分な補強を施し、解体前に必要な 調査を可能な限り実施すべきであったとの反省があ る。

部分解体・再構築手法の最も重要な点である、非 解体部分と再構築部の接合部の処理について次に述 べる。遺構の状態観察から解体の必要がないと判断 された部分は、現状のまま保存される。安定してい るとはいえ、時間の経過により多少の挙動があり創 建時と比較した場合は、微小な沈下や開きといった 現象が確認される。均一な挙動への対応はそれほど 困難ではないが、不等沈下などが確認される部位と、 部分的に修復され創建時に近い状態となった部位と の接合部の調整は困難な課題である。

北経蔵修復工事においては、沈下量の最も少ない 部位にあわせ、沈下量が大きい部分にはかさ上げの ための材料を挿入している。かさ上げにはその量と 大きさにより砂岩、石灰モルタル、鉛がそれぞれ使 用された。今後もこの課題については研究を進める 必要がある。

問題点の3点目としては、将来的な展望のもとに 行われた部材修理について述べる。今回の保存修復 工事では、屋根など未発見の部材が多々あり、復原 的な工事はされていない。しかしながら、将来部材 が発見され、上部に屋根荷重がかかった場合でも構 造的な安定が保たれるような、解析、補強材の選択 がなされている。そのため、一見過剰に思われる補 強材が使用されている。部材の修復自体、特に構造 補強を伴うような修理は、何度も繰り返し実施でき るものではないため、今回はこのような方法を選択 している。

バイヨン北経蔵は、保存修復工事後5年を経たが、 これまでのところ安定した状態を維持している。こ の時点で結論を出すのは早急に過ぎるが、ここまで の時点では、今回の保存修復工事が成功したものと いえよう。今後の維持管理状態にもよるが、50年後、 100年後に今回工事の本当の評価がなされるのでは ないだろうか。 Appendix 10: Standard Specifications for Specialty Works in the Restoration of the Bayon Temple

Appendix 10.1 : Compiling a Manual of Restoration Techniques

AKAZAWA Yasushi, TSUCHIYA Takeshi

The Angkor monuments have undergone various conservation and restoration work by l'Ecole Française d'Extrême Orient (EFEO) beginning in 1908. In 2004, today, restoration teams from various countries are continuing the conservation and restoration of the monuments. Judging from the progress of their work to date, it seems that having a standard specification manual would be highly effective.

The viewpoints below clarify the need to create standard specifications.

Significance of compiling a manual of restoration techniques

As previously described, restoration methods differ according to the conditions and causes of deterioration or damage, and to the objectives of the restoration work. However, it is certainly necessary to classify those conditions, causes, and objectives to a certain extent, to develop and establish restoration techniques corresponding to each classification, and to ultimately compile the information into a manual.

Firstly, such a manual would serve as a technical guideline that would make it easier to unify materials and other specifications. In the Angkor region today, various countries and organizations are working to conserve and restore the monuments each using its own technology and materials. This multifariousness provided an invaluable basis for comparing various methods and techniques up to now, but hereafter, they must be coordinated, and the results of that coordination must be firmly established as the standard specifications of Cambodia. A manual would also facilitate the organizing and categorizing tasks required when documenting the monuments, and would raise the value of the documentation as reference for subsequent work.

Secondly, the creation of a manual could improve efficiency of various tasks. When having to repair a large number of elements, the repair task would normally involve a lot of manpower. In such cases where many people engage in the same task, a manual that defines specifications and guidelines could facilitate their understanding of the work process and their decisions concerning materials to be used. Essentially, the efficiency of all tasks can be greatly improved.

Thirdly, one of the advantages of having a manual is that it allows specifications and guidelines to be altered once they are established in the manual. That is, changes cannot be made unless something is first established. Also, taking into consideration the course of time and the speed at which materials are developed, good changes should be made whenever needed. In 付録 10 バイヨン寺院修復のための各専門工事標準 仕様

付録10.1 修復技法のマニュアル化

赤澤泰、土屋武

アンコール遺跡では、1908年以降フランス極東学 院によってさまざまな保存修復がなされてきた。ま た、2005年の現在も各国の修復隊により保存修復が 継続されている。これまでの保存修復の経過から、 標準仕様的なマニュアルの整備が望まれていると思 われる。

標準仕様の必要性は、以下の観点から判断される。

修復方法は先にも述べられているように、その劣 化・損傷の状態や、原因、目的によってそれぞれ異なっ てくる。しかしながら、それらの劣化・損傷の状態や、 原因、目的をある程度分類し、その分類に応じた修 復技法を開発、確立しマニュアル化する必要もある。 一つは技術的なガイドラインの役割として、材料や 仕様の統一性を図ることが可能となる。現在、この アンコール地域では、さまざまな国や機関がそれぞ れの技術・材料にて保存修復を進めている。これま では、このようないろいろな方法や技法を比較検討 する上で貴重な経験であったともいえるが、今後、 その技術的な調整を図り、いずれはその成果をカン ボジアとしての標準仕様に高める必要がある。

また、記録時にも整理・分類が容易となり、後の 資料としての価値が高まるものと考えられる。二つ 目は、作業の効率化に影響する。膨大な数の修理部 材を扱う場合、多くの人数にての作業となることが 予想される。その際、マニュアル化された仕様、指 針が存在することで、作業工程の理解、材料の判断 などが容易になる。しいては、作業効率全体の向上 が図れるものと考えられる。

3番目としては、一度マニュアル化され確立され た仕様や指針は、変更できる、という利点がある。 変更ということは、一度決まっていないと出来ない ことであり、その時間的経過と材料開発のスピード などを勘案して、その都度改良されていってよいも のである。改良するためには、どこがどのように変 わったかが分からなければいけない。そういう意味 からも、技法をマニュアル化し、仕様、指針を作成 することには大きな意味があるものと考えられる。

1) 解体前調査

修復計画を作成するための各種調査。現状図面の 作成、破損状況調査、地盤工学調査、環境調査、考 order to make improvements, it is always important to clarify what was changed, and how it was changed. In consideration of the above, there is great meaning in compiling a manual of techniques and creating specifications and guidelines.

1) Pre-dismantling investigations

Conduct various investigations in order to formulate a restoration plan. Produce drawings portraying the current situation; survey the extent of damage; perform geotechnical, environmental, archaeological, architectural, and petrologic studies; carry out structural analysis and a microbiological survey; and so on.

2) Dismantling

Buildings with marked damage or deformation must be dismantled and reassembled in their original configurations. Keep detailed records and conduct the appropriate investigations at each level during the dismantling process.

3) Stone repair and replacement with new materials

Dismantled blocks and reusable fallen stone elements must be repaired in accordance with each piece's state of deterioration in order to restore enough strength to support the structure. Differences in the characteristics of sandstone and laterite blocks mean they require separate, specialized repair methods.

4) Trial assembly

Dismantling and reassembly involve restoring a misshapen building to its original configuration. Preliminary investigation can make total restoration possible to a certain extent, but this cannot be verified without actually replacing each block into its original position. Therefore, it is necessary to attempt to reassemble the reconstructed portions several times over to determine if the entire building can be restored. As this involves making fine adjustments to each block's height and slope, it is the most time-intensive step of the restoration process.

5) Reassembly

In reassembly, the blocks are rebuilt into their definitive configuration based on the data acquired in the trial assembly process. In addition, bank raising and reinforcement of structurally instable portions are carried out in order to correct the age distortion of each block. 古学調査、建築学調査、構造分析、岩石学調査、微 生物調査など。

2) 解体工事

破損及び変形が著しい部分については建物を解体 し、オリジナルの形状に積み直す必要がある。建物 の解体は各層ごとに現状記録と各種試験・試験を行 いながら実施する。

3) 部材修理および新材補填

解体された部材および再利用する崩落部材は、各 部材の劣化状況に応じて、駆体を支えるのに充分な 強度を回復させるために修理が必要である。砂岩材 とラテライト材とではその性質の違いからそれぞれ に応じた異なる修理方法が適用される。

4) 仮組み

解体・再構築は変型した建物をオリジナルの形状 に積み直す作業である。オリジナルの全体的な形状 は事前調査によってある程度推定可能であるが、各 部材の位置関係は実際に組み上げてみなければ確認 できない。そのため何度か再構築部分の部材を組ん でみて、うまく全体が組み上がるのか試してみる必 要がある。これは各部材の高さや傾きを微妙に調節 しながらの作業となるため、全体工程の中でもっと も時間を必要とする。

5) 再構築

再構築では仮組みによって得られたデータに基づ いて最終的な部材の組み上げを行う。併せて各部材 の経年変形を補正するための嵩上げや構造不安定部 分への補強を行う。

Appendix 10.2 : Survey for the Settlement of the Original Position of the Fallen Stone Elements TSUCHIYA Takeshi, AKAZAWA Yasushi

Nearly 800 years have passed since Bayon was constructed; parasitic trees and unequal settling have caused a great deal of the upper portion of the ruins to crumble and fall. Such collapse is more prominent in the outer corridor and the Northern and Southern Libraries than within the inner corridor; this may signify that the terraces were more solidly constructed than in other monuments. The remaining tens of thousands of fallen stone elements have been refitted into the outer corridor by EFEO. The original positions of these fallen stone elements are largely unknown due to insufficient EFEO records from the refitting process, but we may consider the elements as having been placed fairly close to their original positions. During restoration of the Northern Library, JSA performed surveys to identify the original locations of fallen elements, but nearly all of the blocks that make up the window back and roof segments remain missing.

In JSA's third phase, our first goal is the restoration of the Southern Library. The Southern Library features deformation of its three pediments, leading to wall deformation and roof collapse. EFEO is already refitting fallen stone elements into the building's wings. About 1000 fallen stone elements lie piled up between the Southern Library pediment and the outer corridor, including, it is supposed, a large number of elements from the Southern Library. However, based on investigations during restoration of the Northern Library, it is also highly possible that the elements have been moved. The first task that must be undertaken during Southern Library restoration will be finding the Library's fallen stone elements and identifying their original positions.

Presented here are the steps necessary for replacing and identifying fallen stone elements, based on the same work that JSA has carried out in Bayon, Angkor Wat, and Prasat Suor Prat.

1. Numbering and location mapping of fallen stone elements

In order to record the location of fallen stone elements within the structure, draw a layout or floorplan of the monument that indicates the position of each element. At the same time, number each fallen stone element according to a unified, standardized system, noting these numbers on the layout. This is to ensure that the original location of all fallen stone elements can be ascertained even if the elements are moved during the course of a restoration project.

2. Inventory of fallen stone elements

Create an inventory of each fallen stone element, being sure to include the following information:

付録10.2 崩落部材の原位置同定調査

土屋武、赤澤泰

バイヨンは建造後既に800年近く経過しており、 樹木の寄生と基壇の不等沈下により遺構の上部構造 のかなりの部分が崩落してしまっている。崩落は内 回廊の中央部寄りに対して外回廊及び南北経蔵に顕 著である。これは他遺構の破損状況と比べるならば、 中段テラス部より上が丁寧堅固につくられていたこ とを示しているだろう。全体の崩落部材は数万個の オーダーで残されており、EFEO によって外回廊の 内側と北側に積み上げて整理されている。それらの 崩落部材の原位置は、EFEO が整備を行った際の記 録が足りないため多くが不明であるが、おおよそ原 位置の近くに配置されていると考えてよいであろう。 JSA では北経蔵修復工事の際に北経蔵の崩落部分の オリジナル部材を同定するために調査を行ったが、 腰壁及び身舎屋根部分の部材はほとんどが行方不明 の状態である。

JSA 第3フェーズにおいて初めの目標となるのは 南経蔵の修復工事である。南経蔵の現状は、3重の 基壇の変形に伴い建物壁部が傾倒、身舎屋根部が崩 落している。崩落部材はすでに EFEO によって建物 脇に整理されている。南経蔵基壇と外回廊の間には 約1000 個の崩落部材が積み並べられており、おそら くはこの中に南経蔵の崩落部材の多くが含まれてい ると推測されるが、北経蔵修復時の調査の経過を踏 まえるとそれ以外の場所に移動されている可能性も 高い。南経蔵修復工事において初めに必要な作業の 一つが、南経蔵の崩落部材を見つけだし、その原位 置の同定を行うことである。

ここでは崩落部材の整理と同定について、これまでJSAがバイヨン及びアンコール・ワットとプラサート・スープラで行ってきた同作業を踏まえて、作業に必要とされる手順を示す。

1. 崩落部材の番付および現状配置図の作成

崩落部材の遺構内における現位置を記録するため に、遺構の配置図・平面図内に各崩落部材の位置を 示した図面を作成する。同時に各崩落部材に統一さ れた規格で番号を付け、配置図内にその番号を記す。 これは修復工事開始後に崩落部材を移動した場合に 元の位置を確認できるようにすることが目的である。

2. 崩落部材インヴェントリーの作成

個々の崩落部材についてインヴェントリーを作成 する。インヴェントリーに必要な内容を以下に挙げ る。

- 1) The block's position and number
- 2) 1 to 3 photographs that give a good overview of the block's general appearance
- Diagrams conveying the block's shape, size, and extent of damage
- 4) Notes on repairs necessary given the block's damage
- 5) Possible original site, judging from the block's shape
- 6) Project status

Shared standards must be observed throughout the project in order to include a statement on project status. Therefore, it is necessary to create a chart that carefully tracks the overall progress of the Bayon project. The extent of damage will be determined according to material repair specifications. Work will proceed more smoothly if this inventory is created as a database.

3. Reordering

Starting with catalogued elements, reorder them in a designated area outside the monument according to their placement and probable area. A space as close to the monument as possible is preferred, to the extent that the location does not interfere with restoration efforts. Leave a moderate amount of space between the blocks; do not stack them or allow them to overlap. Exercise caution when moving the blocks, as many are cracked or have deteriorated. If movement is too dangerous, try to repair or reinforce the block before moving it. Place wooden rails on the ground before laying down blocks. In order to set out many layers' worth of fallen stone elements without overlapping, we would need 10 to 20 times the space currently available. Therefore, we must construct a space that takes into account block-moving methods, tourist movement, and the monument's setting. For more about specific methods of moving elements, refer to the page on dismantling procedures.

4. Identification via catalog information

Roughly approximate a fallen stone element's original position by comparing its shape and finish to those of the remaining portions of the monument.

5. Identification via trial assembly

After having generally determined a fallen stone element's original position, set the element in its place in the monument for more accurate position identification. Similar to assembling a jigsaw puzzle, this process involves finding a likely gap that will accommodate the block's shape and masonry. Because blocks will need to be moved again and again, there is a high likelihood of the blocks being damaged. Therefore, steps must be taken to keep the blocks as safe from damage as possible. Some concrete methods of doing so are outlined below:

1) Complete all repairs on fallen stone elements (except patching missing portions) before attempting trial assem-

- 1) 部材の位置と番号
- 2) 部材の概形がおおよそ判別できる写真 1~3 枚
- 3) 部材の形状と大きさ、破損状況がわかる図面
- 4) 破損状況と必要とされる修理内容についての記述
- 5) 形状から推測される部位
- 6) 仕上げの状況

仕上げの状況を記述するためには全体に共通した 基準が必要である。そのためにはバイヨン全体の仕 上げ状況を把握して仕上げの過程の細かいチャート を作る必要がある。また破損状況については部材修 理の仕様に従って判定する。このインヴェントリー はデータベースとして作られているとその後の作業 が容易になる。

3. 並べ直し

目録を作成した部材から、配置と推測された部位 に応じて、遺構外に設営されたスペースに並べ直し を行う。移動場所は遺構本体の修復工事の妨げにな らない範囲で、なるべく遺構に近い場所が望まれる。 各部材は重ねずに適度な間隔を確保して並べる。部 材の多くはひび割れや表面の劣化を起こしているた め、移動する際には、細心の注意が必要である。移 動に危険が見込まれる部材についてはその場である 程度の修理あるいは補強を施してから移動する。ま た部材を地上に置く際は、下に枕木を敷く。現状で は何層にも重ねて並べられている部材を重ねずに並 べるためには、現状の 10~20 倍のスペースが必要で ある。そのため、部材の移動方法と観光客の移動、 遺構の景観を考慮したスペースの設営が必要である。 部材移動の具体的な方法については解体工事の項を 参照されたい。

4. 目録情報による同定作業

崩落部材の形状、仕上げ状況と遺構の残存部分の 仕上げ状況を比較して、部材の原位置のおおよその 推定を行う。

5. 仮組みによる同定作業

おおよその原位置を割り出した後、その崩落部材 を実際の遺構の上に仮組みすることにより正確な原 位置の同定を行う。この作業はジグソーパズルと同 じものであり、部材の形状と組積過程において残さ れた上下面の当たりが有力な推測材料となる。この 作業は何度も部材の移動を繰り返すことが必要なた め、部材を傷つける可能性が高い。そのためなるべ く部材を傷つけないようにする工夫が必要である。 具体的な方法を以下に挙げる。

1) 崩落部材の修理は欠損部の補充を除いて仮組みの

bly.

- 2) Pad a block's sharp corners with thin wood chips, expanded polystyrene, or the like.
- 3) To eliminate having to move blocks into and out of slings, use anchors to allow a crane hook to attach directly to the top of the fallen stone element. This would require at least four anchors to be embedded into the surface of an original stone element, but it can be much more effective when one considers how efficient it is and the damage that can be done to blocks when using slings. Anchors should be installed during the reordering process.

6. Recording identified positions

Having identified the original position of a fallen stone element, record that position on the floorplan. While developing a restoration plan, this document will help decide to what extent reassembly should take place.

7. Identification of the original positions of fallen stone elements, their restoration, and supply of new materials

Each fallen stone element must have originally occupied a single position. Therefore, the fallen stone elements and the building in its existing state must be compared and analyzed so that the original positions of those elements can be identified. Once the original position of an element is confirmed, the element is washed and repaired, and returned as much as possible to its original condition.

When the elements of a missing part of the building cannot be found even after surveys and searches are conducted of fallen stone elements, but the missing area needs an element for structural reasons, a new material may at times be used to create an alternative element. In this case, it must be possible to determine the dimensions and shape of the element from the surrounding elements. Also, the quality of the new material to be used as the alternative stone element should resemble that of the original element to the greatest extent possible. 前に全て終了させる。

- 2) 部材の鋭角部分に薄い木片あるいは発砲スチ ロール等の緩衝材を施す。
- 3) スリングの取り付け・取り外し作業を省くために、部材上面にクレーンのフックを接続するためのアンカーを施す。これにはオリジナル部材の上面の4点以上に着脱可能なアンカーを埋め込む必要があるが、スリングの着脱作業がもたらす部材の破損と作業の効率性を考慮するならばきわめて有効な手段であろう。アンカーの設置は並べ直し作業の時点で行われることが望ましい。

6. 同定された位置の記録

原位置が同定された崩落部材について、その原位 置を遺構の図面上に記録する。この図面を元に、修 復計画の策定において、どの範囲までの再構築を行 うのかについて決定がなされる。

7. 崩落部材の修復及び新材供給

一つの崩落部材は、必ず一箇所の原位置を確保し ていたはずである。崩落部材と遺構の現状を比較検 討し、部材の原位置を同定する。原位置が確認され 復帰が可能となった部材については、可能な限り元 に戻すように洗浄や修理が施されることになる。

遺構の欠損部のうち、崩落部材の調査・探索によっ ても部材が発見されない箇所で、構造的な理由によ り部材が必要と判断された箇所については、新材に より部材の加工が実施される場合がある。この場合、 部材の寸法・形状を隣接する部材によって判断する ことが可能なことを基本的な条件とする。また、新 材として使用される石材も、可能な限り創建時の部 材と同質なものが望ましい。 Appendix 10.3: Dismantlement Work Specification YAMAMOTO Shigenori, AKAZAWA Yasushi, TSUCHIYA Takeshi

1. Objective

In the process of conserving and restoring buildings of cultural significance, it may at times be necessary to conduct restoration work that entails dismantlement of the building. This document provides the specifics of the dismantling method, tools, and other necessary matters when dismantlement work is to be implemented.

2. Preparations for dismantlement

Prior to beginning the dismantlement work, the existing condition of the building must be documented as accurately as possible by making actual measurements, digital scanning, photographing, and using various other means as necessary. Not only will these data serve as references for conducting restoration work, but they will also provide a basis for comparative studies when restoration work is completed, as well as become a part of the building's history of changes.

2.1 Measurement surveys

The existing condition of the building should be measured and diagrammed. Ideally, the diagram should be drawn at a scale in which the collapsed condition of the building could be accurately understood, and the distortions and joint openings of the structure as well as the deterioration and damaged conditions of the elements can be added in later (a scale of about 1:20).

2.2 Photographic records

Conditions of the building that cannot be adequately documented in a measurement diagram should be documented by photographs. They should be taken in color where the colors of the surface layer need to be distinguished or wherever it is deemed necessary. Photographs showing the damaged conditions of various parts are especially important in order to confirm the differences in the building before and after restoration.

2.3 Numbering

All elements to be dismantled are managed by a numbering system. There are a number of possible ways to apply numbers on the elements, but most importantly, the numbers must be discernible throughout a construction work spanning a period of several years.

 In the case of sandstone elements, the easiest and surest method is to inscribe the number code directly onto a hidden surface of the element. If the elements should be left unprocessed as much as possible, then the number code could be stamped on a thin lead plate and the plate attached to a hidden surface with a removable adhesive.

付録 10.3 解体工事

山本成則、赤澤泰、土屋武

1. 目的

文化財構築物の保存修復工事の際には、時に解体 を伴う修復が実施されることがある。その際の、解 体の方法や道具などについて仕様を定めるものであ る。

2. 解体準備

解体に着手する以前に、遺構の現状を正確に記録 することが重要となる。実測やデジタルスキャン、 写真など各種手法により解体前の状態を正確に記録 する。このことは、工事中の資料としての使用はも ちろんのこと、工事完了後の比較調査などにも使用 され、遺構の遍歴の一部となるものである。

2.1 実測調査

遺構の現状を実測し、図面化する。建物の崩落の 状況が正確に判別でき,また後から構造体の変形・ 目地開き、各部材の劣化・損傷状態などを書き込め る程度の縮尺(1/20など)での図面化が望ましい。 必要とされる図面の種類を以下に挙げる。

- 1) 配置図
- 2) 各層平面図
- 3) 立面図(4面)
- 4) 断面図 建物の各構造体(塔本体・主室・側室・ポーチ など)の構造が正確に判別できるもの。また室

内の全ての石組みの状態が分かるように、1 断 面について2 方向の図面を作成する。

5) 屋根伏せ図・天井見上げ図

2.2 写真記録

実測図面では記録しきれない遺構の状態は、写真 により記録される。表層の色彩など必要な部分はカ ラー写真が用いられる。特に修復前後の相違を確認 するため,各部の破損状況を記録した写真が重要で ある。

2.3 番付け

解体を行う全ての部材を管理するために番号を付ける。部材に番号を書き込む方法は幾つか考えられる。ここで注意すべき点は,数年の期間に渡る工事中に,その番号が確実に判別可能な状態にある耐久性である。

1)砂岩材の場合,隠れた面に直接記号を刻みこむ方 法が,最も容易で確実性がある。部材への加工も なるべく少なくしたい場合には刻印した鉛の薄い Directly writing the number code on the surface of the elements with an oil-based marker has the least effect on the elements, but there is the problem of durability.

2) In the case of laterite elements, number codes cannot be directly inscribed on them because their surface is brittle. It would be necessary to take an indirect method, such as embedding a stamped plate in the elements. In the restoration work of Prasat Suor Prat, the surface of the elements was slightly scraped off, an epoxy resin adhesive agent mixed with laterite powder to adjust the coloring was applied over it and dried, and the number code was inscribed on the new surface.

2.4 Creating an inventory of the deterioration state of the stone elements

For each element, an inventory recording its deterioration condition must be created. Details to be included in the inventory are as follows.

- 1) Position and number of element
- 2) One to three photographs showing somewhat clear images of the deterioration conditions of each element
- 3) A sketch showing a somewhat clear image of the deterioration condition of each element
- 4) Description of the deterioration condition and the necessary repair details
- 5) Mapping of the deterioration condition (indicated in an elevation view and a sectional view)

In order to describe deterioration conditions, a common standard is necessary. In order to establish a common standard, a detailed classification chart must be created based on an accurate understanding of the deterioration conditions of all elements throughout Bayon. Additionally, physical deterioration should be assessed in accordance with an element repair specification. Creating this inventory as a database would facilitate the ensuing tasks.

3. Dismantlement work

3.1 Precautions regarding dismantlement work

Dismantlement work should basically start from the top of the building, beginning with elements that are easiest to handle, but most importantly, it must be conducted safely. This certainly applies when hoisting elements to be dismantled, but precautions must also be taken in anticipation of the movement of the bottom elements when the top elements are lifted. Below is a list of precautions to be observed in order to conduct dismantlement work as safely as possible without causing damage to the elements.

3.2Confirming the presence or absence of "cracks" on elements.

Before hoisting an element, it should be checked for external cracks. Hoisting an element without first confirming the presence or absence of cracks is dangerous, because the element プレートを着脱可能な接着剤で隠れない面に張り 付ける方法もある。部材への加工が最も少ないの は,油性のマーカー等で部材の表面に番号を直接 書き込む方法であるが,耐久性に問題がある。

2) ラテライト材の場合,部材表面がもろいため,直接 記号を刻み込む方法は使えない。刻印したプレー トを埋め込むなどの間接的な方法が必要である。 プラサート・スープラの修復工事では,部材表面 を若干削り込み,ラテライトパウダーを混ぜて色 を合せたエポキシ樹脂接着材を盛り,乾燥後その 表面に記号を刻み込んだ。

2.4 石材劣化状態調査・記録(インベントリー)

各部材について,その劣化状況を記録したインヴェ ントリーを作成する。インヴェントリーに必要な内 容を以下に挙げる。

- 1) 部材の位置と番号
- 各部材の劣化状況がおおよそ判別できる写真 1~3枚
- 3) 各部材の劣化状況がおおよそ判別できるスケッ チ
- 劣化状況と必要とされる修理内容についての記述
- 5) 劣化状況のマッピング(立面図及び断面図に記入)

劣化状況を記述するためには全体に共通した基準 が必要である。そのためにはバイヨン全体の部材劣 化状況を把握して細かい分類表を作る必要がある。 また物理的な劣化状況については部材修理の仕様に 従って判定する。このインヴェントリーはデータベー スとして作られているとその後の作業が容易になる。

3. 解体工事

3.1 解体作業注意事項

解体作業は、基本的には遺構の上部より、また、 取り扱い易い部材より解体していくが、まず、安全 に行われることが第一である。解体するその部材を 安全に吊り上げることもそうだが、その部材をとる 事で下の部材が動くこともあるので充分気をつける 必要がある。部材を解体する際に、いかに安全に、 部材を損傷させることなく実施できるかについての 注意事項を記す。

3.2 部材の「傷」の有無の確認

部材を吊り上げる前に、まずはその部材に外観上 の傷がないかを確認する。確認せずに部材を吊り上 げると、部材が破断し落下の危険がある。ただ、外 観からは確認しにくい傷もあるので充分な観察が必 要である。 may break or fall. However, some cracks may be difficult to confirm from its external appearance, so careful observation is necessary.

Even when an element is cracked, if the crack is small, the element can be hoisted by placing a nylon sling perpendicular to the crack. If the crack is large, a wire net sling or other sactype sling should be used to hoist the element. When hoisting such elements, there is always the possibility that they may fall. Needless to say, the task should be conducted carefully, and nobody should be working underneath the hoisted element.

3.3 Separating the joints

In the case of sandstone blocks, and more so with laterite blocks, the accumulation of dirt and debris between the elements becomes like an adhesive that bonds the elements together when the pressure of the above weight bears down. It is extremely dangerous to attempt to hoist such elements without first separating the joints. The element would be pulled by a larger load than its own weight and may jerk when the joint separates. To avoid this, be sure to separate the joints before hoisting elements.

3.4 Moving the elements

In order to rig an element with a sling or to separate the joints between elements, a part of the element must be lifted. However, it is important to know from which direction to lift the element and where to insert a lever. This task must be performed with utmost care, because it is possible for the part of the element that is lifted by the lever to break off or for the part supporting the fulcrum to fracture.

3.5 Handling angular elements

If angular elements are directly hoisted with a sling, the angular points may get chipped. To protect the angles, wooden supports should be applied around them so that the sling does not come directly into contact with the angles.

3.6 Handling sculptured elements

When moving elements that are sculptured up to the corners, metal splints should be inserted carefully in the same way as with angular elements and adjusted so that the sculptured part does not support the weight of the element when lifted. Additionally, the sculptured part should be protected by applying padding to the surface of the sculpture to prevent the sling from coming in direct contact with it, and using wooden supports in areas that are free of sculptures.

3.7 Using stone clamps

Stone clamps are a highly efficient tool capable of hoisting stone elements simply by clamping them by their sides. It eliminates the need to pass a sling under the element. When using stone clamps, the element must be checked for cracks. Special care is required particularly in the case of sandstone elements, 部材に傷がある場合、傷が小さければ、ナイロン スリングなどを傷に対して垂直方向に掛けるように すればそのまま吊り上げることが出来るが、傷が大 きい場合は、ワイヤーモッコなど袋状の吊り具を使 用して吊り上げるようにする。吊り上げた部材の下 での作業をしないことは言うまでもなく、部材の落 下があるということを念頭において作業にあたる必 要がある。

3.3 目地切り

砂岩材でもそうだが、特にラテライトブロックで は部材間に土等が入り、その土等が上からの圧力で 接着剤のようになり、部材同士がくっついてしまっ ていることがある。目地切りをせずにそのままの状 態で吊り上げようとすると、自重以上の負荷がかか り、目地が切れた時点で部材が跳ね上がり非常に危 険である。そのため、必ず一度目地を切ってから吊 り上げるようにする。

3.4 部材を動かす

部材にスリングなどを掛ける際、また、目地切り をする際など部材を動かすために、部材の一部を持 ち上げる必要がある。そのときにどちらの方向から 持ち上げるか、金梃子を入れる場所に注意する必要 がある。金梃子を部材下に入れて持ち上げたときに その部分が欠けてしまうことがある。また、持ち上 げたとき、支点になった部分が欠けてしまうことも あるので注意する必要がある。

3.5 部材の角が鋭角なとき

角が鋭角な部材にそのままスリングなどをかけて 吊り上げると、角が欠けてしまう可能性がある。角 部の保護のため、スリングが直接角部に接しないよ うに「盤木」などを角部の前後に当て吊り上げるよ うにする。

3.6 部材に彫刻がある場合

彫刻部分が部材の角まである部材を動かす際には、 角が鋭角な部材と同様に金鏝等を入れる場所に注意 し、さらに持ち上げたときに支点となる場所が彫刻 部分にならないようにする必要がある。また、スリ ングなども直に彫刻面に接しないように当て物を入 れたり、彫刻部以外に盤木を入れて彫刻部を保護す るようにする。

3.7 石材用クランプ(つかみ器具)の使用

石材用クランプは、石材用クランプはスリングな どを部材下部に通さずそのまま部材の側面を挟んで 吊り上げることの出来る非常に効率的な道具である。 because they are often used with the graining (bedding) in the horizontal direction, and the layers of the grain may peel off or break off when stone clamps are used to hoist them. Even if there are no cracks, the above breakage is more likely to occur in elements that have sharply-defined grains. Stone clamps should be not be used in this case. Also, when the stone clamp padding (the part that comes into contact with the stone element) or the element itself is wet, the element can slip from the clamps, so stone clamps should not be used under such conditions either.

3.8 Hoisting long elements

When hoisting elements whose lengths are greater than their heights or widths (long elements), a single sling placed in the center of the element may cause it to break in two due to its own weight. They should be hoisted using two slings positioned so that the element is divided into three equal sections. If the element has a crack, a beam should be placed beneath the element and the beam and element hoisted together with a sling.

3.9 Rotating hoisted elements

Before rotating a hoisted element, any dirt and debris adhered to the bottom and sides of the element should be removed so that they do not fall when the element is being rotated. 石材用クランプを使用する場合は、部材が傷を負っ ていないかの確認後に使用しなければならない。特 に砂岩部材の場合、石目(層理)が水平方向に使用さ れている場合が多く、石材用クランプにて吊り上げ る際に、その石目での層間剥離、破断が起こること も考えられるので注意が必要である。傷までいかな くとも、石目がはっきりと出ている場合は、前記破 断などが起こりやすいため石材用クランプでの吊り 上げは行わない。また、石材用クランプのパッド(石 材にあたる部分)や部材自体が濡れた状態では、非 常に滑りやすくなるため、この場合も石材用クラン プは使用しない。

3.8 長尺材の吊り方

部材の高さ、幅に比較して長さが大きな部材(長 尺物)を吊り上げる場合、部材の中央で1本のスリ ングなどで吊り上げると、自重のみで折れてしまう 可能性があるため、長尺物の長さを3等分した部位 にスリングなどを2本掛けて吊り上げる。また、傷 などがある場合は、部材の下面に角材を敷き、角材 ごとスリングなどを掛けて吊り上げるようにする。

3.9 吊り上げ旋廻移動

部材を吊り上げ、旋廻移動する前に、部材の下面 や側面に付いている土などを落として、旋廻移動時 に土や小片が落下しないようにする。

Appendix 10.4: Construction Specification for Foundation and Platform Compacted Layers

AKAZAWA Yasushi

The construction method of the platform and foundation, comprised of a multi-tiered structure of compacted sand layers, is one of the characteristic construction techniques seen in the Angkor monuments. The restoration of these parts can be approached through various techniques and methods. If the original construction method is to be reproduced or inherited, the restoration work would require the dismantlement and rebuilding of the upper structure, and the scale of the work would necessarily become large. However, it is meaningful from the perspective of succeeding the original construction method. As stated in the Introduction, Chapter 3, "Destruction and Degradation Phenomenon in the Bayon Temple," the stability of the platform and foundation is directly related to the stability of the upper structure.

This method (restoration of the platform and foundation) should only be selected if pre-restoration surveys revealed that the deterioration and damage of the platform and foundation are the major cause of deterioration to the entire building. Naturally, the principle of leaving unaffected parts as they are, applies. Therefore, parts whose stability has been confirmed should be left alone, and only the parts that are markedly deteriorated and damaged and in need of repair from the platform and foundation should be dismantled to the minimum extent as possible, their inner structure restored and reassembled, and the dismantled area rebuilt.

One of the problems of this method lies in the area connecting the non-dismantled area and the dismantled and restored area. In other words, the treatment of that junction is an issue that still must be addressed.

The conservation and restoration work on the foundation and platform at Bayon may entail partial or entire dismantlement where appropriate. In such cases, construction work on the compacted layers inside the foundation and platform should conform to the below specification. However, the actual materials, numeric values, and methods should be calculated and determined through a detailed study of the said construction area at Bayon, so numeric targets and other such details will not be specified in this specification.

The construction specification outlined below is based on a specification that was established for the conservation and restoration work of the Prasat Suor Prat N1 tower.

1. Construction specification for the foundation and platform compacted layers

1) Materials to be used

Materials to be used should be determined based on the results of an indoor material test.

Gathering from past experience, it can be assumed that the

付録10.4 基礎・基壇版築層の工事

赤澤泰

版築砂層の積層構造からなる基壇・基礎の構築方 法は、アンコール遺跡建造技術の特色のひとつであ る。この部位の修復でも、さまざまな手法、工法が 選択可能である。創建時の工法を再現もしくは継承 しようとした場合、上部構造の解体・再構築が含ま れるため修復工事規模が大きくなってしまうことも 否めないが、オリジナルな工法の継承という側面か らは望ましい工法とも言える。序論、第3章の「バ イヨン寺院の破損と劣化」でも述べているが、基礎・ 基壇部安定化はその上部構造の安定化に直結する。

この手法(基礎・基壇分の修復)が選択される条 件としては、修復前調査結果から、劣化・損傷部位 および劣化原因として基壇・基礎部分ということが 判明している場合に限られる。当然の事であるが、 悪くない部分には手をつけないという原則がここで も適応される。そのため、安定性が確保されている と判断されている部位には手をつけずに、劣化・損 傷が著しく基壇・基礎からの修理が必要と判断され た部位のみ、必要最小限の部分解体、内部構造の修復・ 再構築、解体部分の再構築という手法が選択される。

この手法での問題点の一つに、非解体部分と解体 修理部位との取り合い、いわゆる接合部の処理があ げられる。

バイヨンにおける、基礎・基壇の保存修復工事に おいて、必要に応じ部分的もしくは全解体を伴う場 合が生じる可能性がある。その際の、基礎・基壇内 部版築層の工事についての仕様を以下のように整理 する。ただし、実際の材料や数値、方法などは、バ イヨンにおける当該工事箇所の詳細調査によって算 出・決定されるべきものであるから、今回の仕様内 容では、上記数値目標などは明示しないこととする。

以下に示す工事仕様は、プラサート・スープラN1 塔保存修復工事にて設定された仕様を参考としてい る。

1. 基礎・基壇版築層の工事仕様書

1) 使用材料

使用材料は室内材料試験結果に基づき決定する。

これまでの実績からは、1. 基壇掘削土、2. 粘性土、 3. ラテライト性赤土、4. 消石灰の4種の原材料が使 用されることが予想される。

2) 材料土の準備

各材料は、あらかじめ気乾状態にし、粒度調整の ため篩を通過したものを使用する。篩の径は、室内 following four types of raw materials will be used: 1. platform excavation soil, 2. viscous soil, 3. red laterite soil, and 4. lime hydrate.

2) Preparation of the soil material

Each of the materials to be used should be air-dried in advance and passed through a sieve to regulate grain size. The diameter of the sieve should be determined according to the test results of the indoor experiment.

3) Preparation of lime hydrate

Lime hydrate from Cambodia should be used, and it should also be passed through a sieve. The diameter of the sieve should be determined according to the test results of the indoor experiment, but generally it should be smaller than 2 mm.

4) Mixing proportion of the materials

In regard to the mixing proportion of the materials, the planned strength of the compacted layers should be determined based on the analysis results of the conditions and supporting load of the existing foundation and platform, and a blend appropriate to that strength should be selected based on an indoor test.

5) Soil material mixing method

When lime hydrate or similar soil material is to be used, it should be mixed according to the following procedure.

- 1. Measure out the required amounts of the three types of soil materials (other than lime hydrate) that have been airdried, and knead them as they are on a flat board (using a spade or shovel).
- 2. After confirming that the soil materials have been sufficiently mixed together, add lime hydrate and mix again in the same manner.
- 3. Measure the initial moisture content of the soil material mixture, and add water until the optimum moisture content is achieved. After adding water, perform the same manual mixing procedure.
- 4. After confirming that the materials have been uniformly mixed and kneaded, put the mixture into an airtight bag and store it.

6) Curing the soil material mixture

Cure the soil material mixture prepared in step 5) above for 24 hours in an airtight bag. (The standard curing time is 24 hours, but taking construction needs into consideration, it could be from approximately 5 hours at the shortest to about 3 days at the longest.)

When curing time is long, the moisture content of the soil material is likely to decrease, so measure the moisture content again and adjust the moisture before construction. If moisture seems to be considerably lacking during construction (if the soil material appears dry and cannot be compacted), apply water as necessary using an aerosol.

実験試験結果により決定される。

3) 消石灰の準備

消石灰はカンボジア産のものを使用し、これも篩 を通過したものを使用する。篩の径は、室内実験試 験結果により決定されるが、概ね 2mm 以下とする。

4) 使用材料の混合割合

使用材料の混合割合は、既存基礎・基壇部の状態、 支持荷重などの解析結果を基に、版築層の設計強度 を決定し、その強度に適合する配合を室内試験によ り選定する。

5) 材料土の混合方法

消石灰系の材料土の使用が決定された場合の混合 方法は、以下の手順によるものとする。

- 1. 準備した気乾状態の3種(消石灰以外)の材料 土を所定量計量し、平板上で空練りする(鋤、 スコップ使用)
- 2. 材料土の十分な混合状態を確認してから、消石 灰を投入して、同様に混合する。
- 混合材料土の初期含水比を測定し、混合材料土 の含水比が最適含水比になるように加水する。 加水後の混合方法は同様に手作業による。
- 均一な混練状態を確認してから、気密性の袋に 投入・保管する。

6) 混合材料土の養生

5)の手順によって準備された混合材料土は24時間 気密性の袋内で養生する(養生時間は24時間を標準 とするが、施工上の必要性を考慮し、最短5時間程度、 最長3日間程度を許容する)。

なお、養生期間の長い材料土は含水比が低下して いることが予想されるので、施工前に再度含水量を 測定し、含水量調整を行う。施工中に含水量が著し く不足していると考えられる場合(材料土が見掛け 上、パサパサして突き固め効果が得られない場合) 噴霧器による散水を適宜実施する。

7) 版築施工

版築の施工についても、試験施工により、撒き出 し厚さ、つき上がり厚を決定する。突き固め方法は、 撒きだし時に直径 3cm 程度の突き棒(硬質な木材) で一様に一次突き固めをし、その後、平板突き固め 具(通称:象の足)で入念に二次突き固めを実施する。 さらに、エンジン駆動方式のランマーなどの使用が 可能な箇所であれば、当該機械を使用して仕上げ転 圧を行う。所定の厚さに達したことを確認し、別途 規定する品質管理試験によって、版築層の品質を確

7) Compacting work

In regards the compacting work, determine the thickness of the soil application and thickness after tamping through a trial compaction. Tamping method: for the primary compaction, use a tamping rod (hard lumber) about 3 cm in diameter to uniformly tamp the soil; for the secondary compaction, use a planar tamping tool (commonly known as "elephant feet") to more thoroughly tamp the soil. If the area allows for the use of an engine-driven rammer, use it to perform the finishing compaction. After making sure the predetermined thickness has been achieved, confirm the quality of the compacted layer by means of a quality control test specified separately.

8) Surface roughening for the next stage compacted layer construction

The completed compacted layers as a whole form a layered compaction structure with a certain degree of thickness. However, to ensure the cohesiveness of each layer, the surface of the compacted layer already created should be roughened before constructing the next compacted layer. Use manpower to perform surface roughening with a steel rake.

9) Creating the compacted foundation layer

When beginning the basic compaction, the ground layer is likely to be exposed. It is highly possible that the ground layer exposed during excavation was subject to the impacts of weathering, rainwater infiltration, and aridity, and turned into a technically inhomogeneous ground. Prior to compacting, laterite gravel should be compacted on the surface ground layer to create a uniform and sufficiently strong foundation layer (compacted foundation layer).

- Curing the compacted layers during the construction period
- 1. During the construction period, efforts should be directed to draining water so that subsurface water in the vicinity and rainwater do not infiltrate the compacted layers.
- 2. After each day's work, cover the surface of the newly created compacted layer with a curing sheet and let it cure.

2. Quality control test related to improved soil compaction

2.1 Construction management specification for foundation and platform compacted layers

Conduct the various tests prepared by the construction management in conjunction with the actual construction work of the compacted layers. Employ a management method based on dry density as a basic management item immediately after compaction. The dry density for this purpose should be calculated from the trial compaction, indoor test, etc. The items and objectives of the various tests other than the on-site density test are listed below.

認する。

8) 次段階版築層構築時の面荒し

完成された全版築層はある程度の層厚を持つ版築 の塁層構造を形成するが、各層の密着性を確保する 目的で、次施工の版築予定層の施工前に、既施工の 版築層表面の面荒しを実施する。面荒しは鋼製レー キを用い、人力で行う。

9) 版築基盤層の造成

基礎版築の開始時には地山層が露出された状態で あることが予想される。地山層は掘削により露出し、 風化、雨水等の浸入、乾燥等の影響をうけ、工学的 に不均質な地盤となっている可能性が高い。版築を 実施する前に、地山層の表層にラテライト質礫を転 圧し、均質で十分な強さを持つ基盤層(版築基盤層) を造成する。

10) 工事期間の版築層の養生

- 1. 工事期間中は周辺から地下水や雨水が浸入しな いように、排水に務める。
- 2,1日の工事終了後、造成された版築層の表面を 養生シートで覆い、養生する。

2. 改良土版築関連品質管理試験

2.1 基礎·基壇版築層施工管理仕様

版築層の実施施工に伴い施工管理で準備している 各種試験を実施する。締め固め直後の基本的管理項 目として、乾燥密度による管理方法を設定する。こ の際の乾燥密度は、試験施工や室内試験などから算 出される。現場密度試験以外の各種試験項目及び目 的などを次項にて列記する。

2.2 基礎・基壇版築層配合及び締め固め管理手法 1) 試験項目

- 俗日料共計廠 (料共計)
- 1. 簡易載荷試驗(載荷試驗、密度、含水比)
- 2. 簡易貫入試験(5cmマークまでの貫入試験、密 度、含水比)
- 3. 山中硬度計
- 4. 衝擊加速度試驗(貫入試驗器利用)
- 5. 材料試験(74 μ m フルイ質量通過率、含水比 養生後、一軸圧縮試験)

2) 試験目的

- 1. 設計支持力以上の支持力(*kgf/cm²以上)
- 2. 設計変形係数以上の変形係数(*kgf/cm²以上)
- 3. 均一な締め固め
- 4. 材料条件
 - *: 構造解析及び設計により決定される。

2.2 Composition and compaction management method of the foundation and platform compacted layers

1) Test items

- 1. Simplified load test (load test, density, moisture content)
- 2. Simplified penetration test (penetration test, density, and moisture content up to the 5-cm mark)
- 3. Yamanaka penetration tester
- 4. Impact acceleration test (utilizing penetration test equipment)
- 5. Material test (74-µm sifter mass passage rate, post-curing moisture content, uniaxial compression test)

2) Test objectives

- Bearing power surpassing the planned bearing power (greater than * kgf/cm²)
- 2. Deformation modulus surpassing the planned deformation modulus (greater than * kgf/cm²)
- 3. Uniform compaction
- 4. Material condition
- * : Determined from structural analysis and plan.

3) Test frequency

- 1. Grid separation (approx. 2-m mesh or excavation grid)
- 2. Simplified load test (approx. 1 location per 1 compacted layer)
- 3. Simplified penetration test (approx. 9 locations per 1 compacted layer)
- 4. Yamanaka penetration tester, impact acceleration test (1 location within entire grid)
- 5. Material test (per batch)

4) Objective of platform completion degree management

- 1. Prevention of sudden tilting (favorable finish of the compacted layer, uniformity of hygroscopic conditions)
- 2. Prevention of long-term swelling and tilting (vegetation management, erosion prevention, hygroscopic uniformity)

3) 試験頻度

- 1. 格子分割(約2mメッシュ or 発掘格子)
- 2. 簡易載荷試験(版築層1層当り1箇所程度)
- 3. 簡易貫入試験(版築層1層当り9箇所程度)
- 4. 山中式硬度計、衝撃加速度試験(全格子内1箇所)
- 5. 材料試験 (バッチ毎)

4) 基壇出来高管理目的

- 1. 促時的傾斜の防止(版築層の良好な仕上がり、 乾湿条件の均一化)
- 2. 長期的はらみ・傾斜防止(植生管理、浸食防止、 乾湿均一化)

Appendix 10.5 : Judgment on Repairing Elements YAMAMOTO Shigenori, AKAZAWA Yasushi

1. Introduction

For a preservation and restoration of monuments, we choose in some case a method which involves dismantling. This method is selected mostly for the purpose of restoring the bearing power that has been impaired by a secular change or the like. In such case, repairs are carried out on the elements which were dismantled from the monuments. In this chapter we would like to present the criteria for the judgment applied by JSA as to the necessity for the repair of the elements above stated. In the meantime, with respect to the various methods for repair we will be describing in a separate report.

2. Judgment Criteria, Diagnosis

Restoration of elements begins by observing dismantled elements or fallen stone elements around the monuments, including observation of the elements during the dismantling. To facilitate the observation, we wash the elements in the first place. Washing is done, in order not to damage the elements further, by brushing gently and applying water without pressure.

There are various methods for confirming the condition of the elements and depending on the situation, a method of diagnosis varies. For the protection of the elements, first we conduct non-destructive inspection by sounding or ultra-sonic inspection. However, when it is difficult to confirm the condition by non-destructive inspection and where it is possible to do destructive inspection, we conduct strength test, microscopic observation, chemical composition analysis and so forth on the sample taken from the elements in order to investigate the condition and cause of deterioration of the elements. These observations and diagnoses are conducted for the purpose of confirming the present condition of the elements in detail and making judgment whether it is possible to make reuse of the elements or not.

3. Judgment Criteria

After washing, each element is segregated by visual inspection into two categories, in terms of necessity and non-necessity of restoration. At this stage, there are two kinds of elements which are judged as non-necessity of restoration; the element which has no problem for reuse, and the elements which are not possible for reuse.

3.1 Judgment on Necessity

With respect to the judgment of elements, criteria for possible reuse are described below.

• No external damage of missing or fracturing (especially on the contacting area for bordering elements)

付録10.5 部材修理の判定

山本成則、赤澤泰

1. はじめに

遺構の保存修復における手法として、解体を伴う 方法が選択される場合がある。この手法は、経年変 化などにより脆弱化した構造体の支持力の回復を目 的とした場合に選択されることが多い。その際には、 解体された遺構の構成部材の補修が実施されること になる。本章では、上記部材修復の必要性について、 JSAにて実施した判断基準を述べる。また、各修復 方法の詳細については、別項にての記載とする。

2. 判定準備、診断

部材修復は、解体時の観察も含め、解体後の部材 もしくは遺構周辺に存在する崩落部材の観察から始 められる。その観察を容易にするため、まずは部材 を洗浄する。洗浄は部材を現状よりも傷めることの 無いように、軽度のブラシがけおよび圧をかけない 状態での水洗とで行う。部材状態の確認にはさまざ まな方法があり、その状況により診断方法も異なっ てくる。部材の保護のために、まず打診や超音波測 定といった非破壊検査による診断を行う。しかし非 破壊検査では状況の確認が困難で破壊検査可能な場 合には、サンプル採取後に、強度試験、顕微鏡観察、 化学分析などを用いて劣化の状態と原因の究明が行 われる。これらの観察、診断は各部材の現状を詳細 に確認し、再使用可能か否かの判定を行うために実 施される。

3. 判定基準

洗浄後、個々の部材について目視観察により修復 の要否という2区分にて部材を判定していく。この 際、修復不要と判定される部材は2種類あり、観察 結果から再使用に問題がないと判断される部材と再 使用不可と判定される部材である。

3.1 要否判定

- 部材の判定について、再使用可能とされる場合の 判断基準を以下に示す。
- ・ 外観上、欠損、破断などの損傷がない(特に周 辺部材との接触面)。
- ・ 彫刻などが施されている部材の場合、その浮き
 や劣化が確認されない。

3.2 修復必要判定

修復不要と判断される部材については、前記再使 用に問題なしと判定される部材のほか、再使用不可 と判断される部材がある。解体時及び崩落、崩落状 • No confirmation of deterioration of bas-relief, in case the elements are decorated with carving

3.2 Judgment on Necessity for Restoration

Among the materials judged as non-necessity of restoration, there are elements that are not possible for reuse besides the elements for reuse without problem as described above. We make judgment on whether it is possible or not possible to reuse based on the condition of the elements during dismantling or in the fallen situation. We describe the criteria that give judgment of no reuse as follows.

- Elements in a condition that they may be broken during dismantling
- Elements that may bear dismantling, but its durability extremely decreased due to internally advanced deterioration damage
- Elements that have turned into many pieces after being neglected in a fallen condition

The elements that are judged to meet any of these conditions are considered not necessary to be restored and regarded as no reusable elements. Even in case that these conditions were not met, however, at the time of reconstruction we may replace the original material with new material from the structural or protection viewpoint of the monument. Regarding processing new material we classify it as a restoration of elements and describe its details later on.

Apart from above, even being judged it is possible to reuse from the condition or durability of the element itself, the elements that require restoration, such as repair of simple fracturing or partial replacement with a new material are classified into further detailed categories, depending on a position of reused element, damage condition or structural problems at the time of foundation. For such detail specification please referred to the element restoration specification (sandstone, laterite).

3.3 Special Case

With the elements of reuse candidate that were once regarded as non-necessity for restoration by the first judgment, we occasionally damage them at the time of investigation of trial assembly or reconstruction. In such case we repeat from the diagnosis of the elements to judgment and restoration, which is the same procedure as before. We need to pay special attention on laterite material, as it sometimes has minute hairline cracking, which is difficult to confirm by visual inspection, and internal damage, not visible externally, but emerges after elapse of time.

3.4 Remark on Structural Reinforcing

As we stated in the beginning, it is one of purposes of preservation and restoration construction which involves dismantling to 態での部材の状況から、再使用可能か否かが判断される。再使用不可と判定される基準を以下に示す。

- 解体時に崩壊してしまうような状況である部 材。
- 解体は可能であるが、部材内部まで劣化損傷が 進行し耐力低下が著しい状態の部材。
- ・ 崩落放置状態におかれ、部材が多くの砕片と化 してしてしまっている部材。

これらの条件に適合すると判定された部材は修復 不要とされ再使用対象外と判定される。ただしこの 条件に適合しない場合でも、再構築にあたり、構造 上もしくは遺構の保護の必要性から新材を加工し旧 材と交換する場合もある。この新材加工については、 部材修復の一つの区分とし、詳細は後に述べる。

上記以外で、部材自体の状態や耐力などから再使 用は可能であるが、単純破断や部分的な新材への交 換など、修復を要すると判定された部材については、 その使用部位や損傷程度、または創建時の構造上の 問題などから、さらに細分化された分類に区分され る。この詳細仕様は、部材修復仕様(砂岩、ラテライト) を参照願いたい。

3.3 特例

当初の判定にて、一旦修復不要と判断された再利 用の候補部材においても、その後の仮組み調査時や、 再構築時に損傷する場合もある。このような部材に ついては、再度、部材の診断から開始し、判定、部 材修理と同様の手順を追って修復が進められること になる。特に、ラテライト部材の場合、目視観察で は確認が困難な微細な傷(ヘアークラック)や、外観 からは判断不可能な内部の損傷などが時間を経過し た後に現象して確認されることがあり、留意が必要 である。

3.4 構造補強についての特記

初めにも述べたが、解体を伴う保存修復工事では、 遺構全体及び個々の部材の支持力の回復が目的の一 つとされ、場合によっては構造的な補強を伴うこと もある。修復後の維持管理や修復周期なども勘案し、 さらには観光客の安全も考慮して補強の要否及び程 度が定められる。この補強について、JSAでは、部 材を極力当初の状態のままで残すためにも、遺構の 外観を損なわないためにも、「必要最小限の補強」に 留めることを指針としている。

参考文献

・稲垣栄三,「日本の文化遺産憲章検討上の課題」,『文化遺 産保護憲章 研究・検討報告書』,日本イコモス国内委 員会,1993. restore the bearing power of the monument at large and individual elements. In some cases it requires structural reinforcing. The requirement of structural reinforcing and its extent are decided upon considering the maintenance and administration after restoration, period of the restoration and, further, safety of the tourists. As to reinforcing of this kind, JSA has established a guiding principle of keeping it to the minimum necessity in order to preserve the elements as close as to the original condition and not to deteriorate appearance of the monuments.

Reference

- E. Inagaki : "Theme for Study in the Charter of Japanese Cultural Heritage," Research and Study Report on Cultural Heritage Preservation Charter, The Japanese National Committee of ICOMOS, March 1993.
- Y. Takei and M. Nakayama, Stone and Construction, Kajima Publishing co., 1992.

・武井吉一,中山實,『石と建築』,鹿島出版会,1992.

Appendix 10.6 : Sandstone Repair

CHEAM Pross

付録 10.6 砂岩材の修復

チェム・プロス

1. Objective

Care must be taken during the restoration and conservation of historical monuments, with consideration given to the authenticity of the deteriorated original elements. Restoration and reuse of materials goes hand in hand. We must provide structural reinforcement as necessary, taking care to retain the original form as much as possible and to minimize any further loss or damage. Moreover, when reusing repaired materials, we must consider not only the exterior appearance, but also the strength and durability that contribute to the reinforcement and stability of the entire structure. Another important issue is to determine the best balance between reusing the original materials and making technical improvements. In fact, however, the original construction method has had certain technical failures which have brought about the monuments' deterioration. Therefore, while it is not feasible to pursue a perfect presentday reproduction of the original construction, we can make use of our experience and the results of our practical work over several years of sandstone repair in the Angkor area.

Repair work on diverse building components has been carried out since 1996. To obtain sufficient and standardized results in each instance, we have determined the extent of deterioration for each component and are investigating the necessary courses of action based on these results.

2. Classification of the physical destruction

2.1 Breakage

Breakage occurs due to a concentration of compressive or shearing force related to displacement of the structure. It can also occur when a specific area (such as edge) of a comparatively small part is subjected to compressive load. In most cases, the broken fragments can be reattached and the block reused.

2.2 Detachment

Generally, detachment occurs when a block receives an uneven shearing or bending force, causing a crack to run from one side of the block to the other that eventually breaks the block apart.

2.3 Degradation

The degradation of sandstone is caused by weathering and environmental factors, chiefly rainwater, living organisms, guano, and chemical reactions; those blocks can be reinforced and reused.

3. Repair methods

3.1 Categories of repair methods

Case 1: Attaching small edge fragments broken from larger

1. 目的

歴史的な記念建造物の保存修復において、劣化し た当初材の修復は、オーセンティシティに配慮して 慎重にこれを行わなければならない。部材の修復と 併行してその再利用を行うが、可能な限り原形を留 めるよう配慮し、更なる破損を最小限に食止めるべ く、必要に応じて構造的な補強を施す。そして修復 された部材の再利用に際して、その外観だけではな く、構造体の補強と安定に資する強度、耐久性も考 慮されるべきである。また、当初材の再利用と技術 的な改良との良好なバランスを判断することも重要 な課題となる。しかし実際には、当初の建設方法に は技術的な欠陥があり、それによって建造物の劣化 が引き起こされている。従って当初の構造物を完全 に再現するのではなく、長年にわたる砂岩修復に関 わる各種試験や実地作業の成果や経験を生かすこと が有用となる。

様々な建物の部材の修復作業は、1996年から行われてきた。各々の修復事例における十分かつ標準的な結果を得るため、各部材の劣化状況の診断を行い、その状況に基づき必要な処置について検討が行われている。

2. 物理的破損状況の分類

2.1 破損状況

構造体の変位に関連した圧縮ないし剪断力の集中 により破損は生じる。また比較的小さな部材の端部 の特定部分に圧縮荷重がかかった場合に破損が生じ やすい。殆どの破損は、再接合ないしその後の再利 用が可能である。

2.2 破断状況

一般に部材の破断は、不規則な剪断・曲げ応力が 加わった時に生じ、材の一方から他方へと亀裂が始 まり、最終的に破断へと至る。

2.3 劣化部材

砂岩材の劣化は、雨水、生物、鳥糞、そして化学 的作用の影響を始めとする、天候や環境要因に起因 している。これらの石材は補強の上、再利用が可能 である。

3. 修復方法

3.1 修復方法の分類

事例1:あまり荷重のかからない箇所で、大きな 部材から欠け落ちた小片を母材へ接合す る端部小片の接着。屋根瓦先端、壁体隅部、 部材角などで適用。複数に砕けている場 合、1 片ずつ繰り返し修復を実施。 blocks under low load-bearing conditions. Used in locations such as roof points, wall corners, or block edges. The repair operation is repeated as needed for multiple fragments.

- **Case 2:** Reassembling for record-keeping purposes, for stones that have become rubble. These stones will become models when making substitutions with new materials.
- **Case 3:** Stone bonding, to make a stone able to bear its own weight and a certain amount of compressive load when the stone itself can be reused but is broken into segments with simple cross-sections. Some stones require additional reinforcement with metal rods.
- **Case 4:** Replacing missing sections. When corners of stones are missing, new stone will be filled with cement mortar.
- Case 5: Reinforcement of fragile stone.
- Case 6: Reattaching carved sections that have become detached.
- Case 7: Conducting structural reinforcement.

Case 8: Immobilize continuous cracks.

3.2 Basic repair process

- 3.2.1.Bonding and attaching stone fragments
 - 1) First collect broken pieces and blocks, clean with water and a soft brush, then dry under the shadow.
 - 2) Treat the joint surface: Roughen the surface with a wire brush or chisel in order to ensure a tight bond.
 - 3) Positioning: Check if the broken surfaces fit together; mark the exact position with chalk or a colored pencil. If the joint surfaces do not match because of long years of deformation, make fine adjustments.
 - 4) Apply adhesive: Epoxy resin adhesives are used to bond small fragments or repair simple fractures. Mix lowviscosity rigid epoxy resin adhesives with inorganic material (sandstone powder sifted through a 0.425 μ m sieve). Epoxy is initially dotted onto one joint surface to about 5 cm from its edge before placing both surfaces together. These specifications were determined after reconfirming the adhesive's bonding strength and permeability, the thickness of the joint surfaces, durability, and whether it would meet international standards. Stainless steel pins are used when necessary, according to the size, quality, and shape of the materials to be bonded. The depth of the holes to be drilled for rod insertion was determined according to the number of pins and their length.

3.2.2 Patching missing portions

There are two categories of missing parts: when a missing portion is not visible from the outside and when it is both visible and large enough to be replaced by a new sandstone piece. These two categories require two

- 事例2: 診断により廃材が確定したものを、形状 記憶のため接着しておく。新材加工時の 寸法モデルとなる。
- 事例3: 石材の材質自体は再利用に耐えるが、単 純な切断面で割れているため、石材自体 の重さや一定の圧縮荷重に耐えるように するために接着する。ピン補強が必要な 場合もある。
- 事例4: 欠損部分補填接着。部材の隅部が欠損し ている場合、新規石材ないしセメントモ ルタルで充填する。
- 事例 5: 脆弱化した石材の強化。
- 事例 6: 破断した彫刻付き部材を再接合する。
- 事例 7:構造的な補強を施す。
- 事例 8: 連続クラックを固定する。

3.2 基本的な石材修復の過程と技術

- 3.2.1 石材破断部の接着および接合
 - 1)準備:破断した石片や部材を集め、水と柔らかい ブラシにより洗浄し、日陰で乾燥させる。
 - 2) 接着面の処理: 接着面の食い付きがよくなるよう
 に、ワイヤーブラシ・はつりたがねで表面処理 を行う。
- 3) 位置合わせ:破断面が完全に一致するかを確認し、一致する位置にてチョークや色鉛筆でマーキングする。長年の変形により接合面が一致しない場合、接合面の微調整を行う。
- 4) 接着剤塗布:エポキシ樹脂系接着剤は、小片の接着や単純な破断の場合に使用される。低粘度・ 硬質型エポキシ樹脂系接着剤は、無機物(0.425 µmのふるいにかけた砂岩粉)と混合する。その塗布方法として、まず接着面の片面に、その 面の端から約5cmのところに点づけし、一度あ わせて両面に付着させる。接着強度、浸透性、 接合部厚み、耐久性、また国際的な標準と成り 得るかどうかの、接着剤の性能を再確認して仕 様を定める。接着される材の大きさや質、形状 に従って、必要に応じてステンレス鋼材のピン が使用される。ピンの挿入のために掘削する穴 の深さは、ピンの数とその長さに応じて定めら れる。

3.2.2 欠損部の補填

欠損部を補填する修復作業では、外から視認でき ない箇所に欠損がある場合と、欠損部が目に見え、 新砂岩材を挿入するに十分な大きさを保持している 場合の2つの場合に分類し、その修復方法を使い分 けている。前者においてはポリマーセメントモルタ ルを、また後者では欠損部に石材を補充する。欠損 部の補填に使用されるポリマーセメントモルタルに
different repair methods. Polymer cement mortar was used for patching in the former case, while the latter permitted stone to be used to fill in the missing portion. The two types of polymer cement mortar used for patching missing portions are injection polymer mortar and gap-filling mortar.

3.2.3 Injection

Some blocks were seen to be peeling along the sandstone's bedding planes, casting doubt as to whether these blocks could be reused during reassembly. A polymer cement slurry was injected into the stone under low pressure. Injecting this slurry into surface cracks and peeled strata served to reinforce the block itself by seeping into cracks and gaps within. A syringe was used to inject the slurry, a polymer cement mortar containing microscopic cement particles.

3.2.4 Joint treatment

Surface joints must be treated after bonding or injection to prevent deterioration of the adhesive by ultraviolet rays and to guard against deterioration of the stone material by rainwater seepage. Because this treatment is applied to the stone's surface, the treated part must harmonize with the surrounding surfaces both in texture and in color. Until the adhesive has dried and hardened, avoid the sudden drying of polymer cement mortar on the joint surfaces and keep away from rainwater and direct sunlight. The treatment is applied only to the width of the joint and does not "blur" or bleed outside this area.

3.2.5 Attached pieces

Blocks that had broken into two or three parts must be attached before tower reassembly. They are embedded with stainless steel bolts and affixed with epoxy mortar.

Procedure:

- 1) Clean with water and a soft brush, then dry in direct sunlight or shade.
- 2) Reassemble the detached parts to check if the broken surfaces fit together; mark with chalk or a colored pencil.
- 3) Determine the pins' positions.
- 4) Drill holes vertically into both parts, the base and the broken segment.
- 5) Reassembling the parts again to confirm that the pins can be inserted properly and that the broken surfaces fit together well.
- 6) Roughen the bonding surface with a wire brush or chisel in order to ensure a tight bond.
- 7) Wash the holes and bonding surface with a wire brush and air blower.
- Apply epoxy mortar into the holes on the base and insert the pins. Fit the broken segment onto the base. Check that the joint surfaces match, then secure the

は、注入用と目地充填用の2種が使用される。

3.2.3 注入

砂岩の層理面に沿って剥離が生じている石材については、再構築時に再利用できることについて確認した上で、ポリマーセメントスラリーを低圧にて石材内部に注入して処置する。ポリマーセメントスラリーは、石材表面のクラックや層剥離面に注入され、それが内部のクラックや目地に浸透することによって、石材自体の強化が図られる。注射器を使用し、 超微細セメントを使用したポリマーセメントモルタルを注入材料として用いる。

3.2.4 目地処理

ポリマーセメントモルタルや無機性顔料を用いた 接着ないし注入による表面目地の処理は、紫外線に よる接着剤の劣化や、雨水侵入による石材の劣化を 防止するために行われる。この目地処理は石材の表 面に施すものであるため、母材と目地処理を施した 部分とが、質感と色調の両面で調和しなければなら ない。接着剤が乾燥・硬化するまでは、ポリマーセ メントモルタルの接合部における急激な乾燥を避け、 また雨水や直射日光を遮断する。処理は目地幅内と し、ボカシは施さない。

3.2.5 再接合処理

2、3 個の部分に破断された部材は、再構築の前に 再接合の必要がある。破断した部材は、ステンレス 鋼ボルトを埋め込み、エポキシモルタルを充填して 接合する。

- 作業手順:
- 1) 水と柔らかいブラシにより洗浄し、天日干 しないし陰干しで乾燥させる。
- 破断した部材を仮組みして破断面が一致するか確認し、一致する位置にてチョークや
 色鉛筆でマーキングする。
- 3) ピンの位置を決定する。
- 4) 母材と受け材に電動ドリルで垂直に窄穴。
- 5) 再び仮組みして、適切にピンが挿入され、 破断面が一致するかを確認する。
- 6) 接着面の食い付きがよくなるように、ワイ ヤーブラシ・はつりたがねで表面処理を行う。
- ワイヤーブラシやエアーブロアーで穴や接 着面を清掃する。
- エポキシモルタルを母材の穴の内部に充填 し、ピンを固定させた後、受け材を載せる。 破断面が一致していることを確認し、ベル トで固定して24時間おく。
- 受け材を下にして、その穴の内部にエポキ シモルタルを充填し、その上に母材を載せ、 ベルトで固定させる。
- 10) 雨水をさけ、乾燥した場所で24時間養生す

block with a belt and let it sit for 24 hours.

- 9) Turn the broken segment upside down. Apply epoxy mortar into the holes on the broken segment, then fit the base onto it. Secure with a belt.
- 10) Protect the repaired block from rainwater and allow it to cure in a dry place for 24 hours.
- 11) Fill the joint between both parts with-gap filling mortar. Keep away from rainwater and direct sunlight and allow it to cure for at least two weeks before using.

3.2.6 Adding new sandstone

Even when a broken portion is seriously damaged and cannot be reused, the remaining portion may be reused as long as its shape, size, and quality are acceptable. In this case, the broken part is replaced by new sandstone of similar quality and texture. Color-matching is often difficult, since the new sandstone block is slightly gray. Because new blocks are immediately visible on a structure, it is further recommended that the blocks be "aged" with a liquid tint or mud solution to match the color of the surrounding blocks as close as possible, thus ensuring a harmonious appearance.

Procedure:

- 1) Confirm the portions of the original blocks that will be replaced with new material.
- Cut new sandstone piece and make it fit with the base block as closely as possible. The new piece should be larger than the remaining base portion.
- 3) Attach the new piece and the base portion using the same method for reattaching detached pieces.
- 4) Use a chisel to roughen the surface of the new portion.

3.2.7 Record keeping

Record keeping is very useful for everyone in the field of conservation and restoration in the Angkor area and beyond. We have recorded all types of information on the damaged blocks before, during, and after repair work, using such media as photographs and sketches. The record format is as follows:

- Procedure:
- 1) Mapping of blocks to be repaired
- 2) List of broken blocks to be repaired
- Record of broken blocks before, during, and after repair
- 4) List of repair records

4. Materials

The necessary materials are prepared in advance before starting work. Some specific materials, such as epoxy glue and polymers, are chiefly imported from Japan. Stainless steel pins were purchased from China through a company in Phnom Penh. New sandstone materials were quarried from the southeast base of Mount Kulen in Srok Svayleu commune, Siem Reap province. Cement (Diamond brand) was bought from a る。

 目地に目地充填用モルタルを塗布し、雨水や直射日光をさけ、使用前に少なくとも2 週間の養生を施す。

3.2.6 砂岩新材の挿入

欠け落ちた部分の損壊が著しく再利用に耐えない 場合も、残りの部分の形状、大きさ、材質に問題が 無ければ、その部分に限り再利用される。この場合、 遺失した箇所は原材料と近似の新材をもって補填す る。新材はやや灰色がかっており、色合いの調整に 難が生じる場合も多い。調和の取れた外観を確保す る上で、建物全体を一望する際に一目瞭然で新材と 判るため、新材の色あいが周囲と馴染むまでの助け として、着色溶液や泥土による古色付けを行うのが 望ましい。

作業手順:

- 当初材にて新材へ置換する必要のある箇所 を確認。
- 2) 新材を切り出し、母材と接合して接着面を 出来る限り一致させる。
- 3) 破断部材の接合と同様の手順で接合を図る。
- 新材であることが識別できるように、表面 仕上げはノミで粗めに仕上げる。

3.2.7 作業記録

アンコール地域は勿論のこと、保存修復分野に関 わる関係者にとって、記録作業は極めて有用である。 損傷を受けた部材のあらゆる情報は、修復前・中・ 後の全ての過程で、写真やスケッチなどの形で記録 される。記録用のフォーマットは以下の通りである: 作業手順:

- 1) 修復を要する部材の位置記録
- 2) 修復を要する部材のリスト
- 3) 修復前・中・後の被損傷部材の記録
- 4) 修復記録のリスト

4. 資材

工事に先立ち、予め必要な資材が準備される。エ ポキシ系接着剤やポリマーのような、特定の資材は 主に日本から輸入される。ステンレス鋼材のピンは、 中国からプノン・ペンの企業経由で購入。砂岩新材は、 シェムリアップ州スワイ・ル郡クレン山の南東側の 裾野から採取されている。セメント(ダイアモンド・ ブランド)はシェムリアップの建設資材業者から購 入。砂はシェムリアップ州のロリュオスから調達さ れる。

4.1 ピンとボルト

破損を受けた石材は出来る限り再利用されるのが 望ましい。通常、修復後再利用される石材は、破損 部に十分な強度を与えて再接合するため留め具が挿 construction goods supplier in Siem Reap. Sand was sourced from Rolous, Siem Reap.

4.1 Pins and bars

Ideally, the broken stone should be reused to the extent that reuse is possible. Usually, fasteners were inserted to reattach broken parts and to provide the broken areas with enough strength that the repaired blocks could be reused. Screw pins were inserted into blocks that had borne shearing force, while bars were inserted into those that had borne bending force. The sizes of the stainless steel pins and bars are calculated by an appropriate specialist in advance.

4.2 Mortar

We use several kinds of mortar in repairing sandstone in Bayon, the northern library in Angkor Wat, and Tower N1 at Suor Prat.

4.2.1 Mortar for pin fixing

A type of epoxy mortar was used to reinforce pins in detached parts and cracks. The mortar was applied around the pins in their drilled holes and dotted onto the joint surfaces.

Mortar mix (ratio):

Epoxy B7 (4 parts) + sandstone powder (6 parts)

4.2.2 Mortar for filling cracks, peeling strata, and gaps

Two kinds of mortar are used on decayed portions of original stone (with or without carvings) and after installing new materials.

Mortar mix (quantity ratio) for original blocks without carvings and for new materials:

Initial application:

Polymer solution P2 (1 part) + clean water (2 parts) Secondary application:

Cement powder C2 (100g) + P2 (63g)

Mortar mix (quantity ratio) for original blocks with carvings Initial application:

Polymer solution P3 (1 part) + clean water (2 parts) Secondary application:

Cement powder C3 (100g) + P3 (60g)

4.2.3 Mortar for patching missing parts

Used on new material that replaces missing portions of original blocks.

Mortar mix (quantity ratio):

Cement C4 (100g) + polymer solution P4 (30~35g)

4.2.4. Mortar for filling gaps

A polymer cement mortar used to seal any post-bonding gaps to block out rainwater and direct sunlight. It can also be removed if any abnormalities should occur. The mortar can match color and texture for a gap-filling treatment. 入される。石材が剪断力を受けた場合にはネジが、 また石材に曲げ応力が働いた場合にはボルトが挿入 される。ステンレス鋼材のピンやボルトの大きさも、 しかるべき専門家により事前に算定される。

4.2 モルタル

バイヨン、アンコール・ワット北経蔵、そしてスー プラ N1 塔において、砂岩材の修復では、数種のモ ルタルが用いられた。

4.2.1 ピン固定用モルタル

破断箇所およびクラックのピン補強の際に、エポ キシモルタルの一種が使用される。このモルタルは 窄口したピン穴に充填され、また接合面に点状に塗 布される。

エポキシ B7(4)+砂岩粉(6)

4.2.2 クラック、剥離箇所、目地充填用モルタル

彫刻付き、ないし彫刻無しの当初材の劣化箇所、 そして新材供給後の接合に際して2種のモルタルが 使用される。

彫刻無しの当初材、および新材用のモルタルの調 合(重量比)

初期注入:ポリマー溶剤 P2 (1) + 浄化水 (2) 二次注入:セメント粉 C2 (100g) + ポリマー溶剤 P2 (63g)

彫刻付き当初材用モルタルの調合(重量比) 初期注入:ポリマー溶剤 P3(1)+浄化水(2) 二次注入:セメント粉 C3(100g)+ポリマー溶剤 P3(60g)

4.2.3 欠損部充填用モルタル

当初材の欠損箇所に充填される新材に用いられ る。

モルタルの調合(重量比)

セメント C4 (100g) + ポリマー溶剤 P4 (30~35g)

4.2.4 目地充填用モルタル

このポリマーセメントモルタルは、雨水や直射日 光を遮断するため、接着後の目地部分に塗布される ものである。もし何らかの異常が生じた場合には、 除去することができる。この目地処理によって、色 調や質感を整えることができる。

モルタルの調合(重量比)

セメント粉 Clc (100g) + Sand (350g) + ポリマー溶 剤 Plc(20g) + 浄化水 (80g) + メチルセルロース (0.6g) + 必要に応じて無機顔料(黒/緑)

4.2.5 シーリング用モルタル

このモルタルは部材の接合に際してシーリングに 使用され、剥離やクラックなどの補強後、簡単に除 去することができる。

モルタルの調合(重量比)

Mortar mix (quantity ratio):

Cement powder C1c (100g) + sand (350g)

- + polymer P1c (20g) + clean water (80g)
- + methylcellulose MC (0.6g)

4.2.5 Mortar for sealing

Used to seal the area surrounding a joint, this mortar is easily removed after reinforcing cracks and the like.

Mortar mix (quantity ratio):

Cement (100g) + sandstone powder (300g)

+ water (30~35g)

4.2.6 Mortar for attaching metal

Used to fix stainless steel bars embedded into a stone for structural reinforcement.

Mortar mix (quantity ratio):

Main ingredients:

undiluted polymer P1a (1 part) + water (2 parts) Cement bond C10 (1500g) + P1c (180g) + water (180g)

5. Conclusion

Since the restoration of the Bayon library came to a close, we have continued to examine and evaluate the restoration methods and materials gleaned from that project. Through our more than ten years' experience in historical restoration in the Angkor area, the JSA team has established standard specifications for repairing sandstone in both small- and large-scale restorations.

- Restoration of the northern library, Bayon, 1995 to 1999
- Sandstone terrace pavement, Bayon, 2000
- Minor repairs of the inner and outer pavement, Bayon, 2001
- Sandstone repair in the northern library, Angkor Wat, 2002 to 2004
- Conservation of wall reliefs in cooperation with the GACP team, Bayon, 2002
- Sandstone in Tower N2's antechamber, PSP, 2002
- Sandstone in Tower N1, PSP, 2003-2004

These achievements can contribute to the Bayon Master Plan at present and in the future, and may well be applied to other restoration sites in the Angkor region as well. For more detailed documents, please refer to the "Annual Report on Technical Survey of Angkor Monument", published annually by JSA:

- "Report on Sandstone Repair Materials of Northern Library of Bayon, and Adhesive Bond of Ruins in Vietnam," *ARJSA* 1996, pp. 442-449.
- "Outline of Repair Work of Decayed Blocks," *ARJSA* 1997, pp. 298.

セメント (100g) + セメント粉 (300g) + 水 (30~35g)

4.2.6 金属接着用モルタル このモルタルは、補強用に石材内部に埋め込むス テンレス鋼材を固定する際に使用される。
モルタルの調合(重量比)
主要材料:純粋ポリマー Pla(1)+水(2)
セメントボンド C10(1500g)+ポリマー溶剤 Plc
(180g)+水(180g)

5. 結語

バイヨン北経蔵の修復作業の完遂以来、我々はそ こで得られた修復手法や資材の吟味・評価を継続し ている。そしてアンコール地域における 10 年間にわ たる修復の経験(下記)を通じて、JSA は砂岩材修復 のための標準仕様を確立してきた。

- バイヨン北経蔵の修復(1995-1999)
- バイヨンテラスの砂岩ペーブメント (2000)
- バイヨン外、内回廊のマイナーリペア (2001)
- アンコール・ワット北経蔵の砂岩材修復 (2002-2004)
- GACP との協同によるバイヨン壁面レリーフの保存 (2002)
- プラサート・スープラ N2 塔前室の砂岩材 (2002)
- プラサート・スープラ N1 塔の砂岩材 (2003-2004)

以上の成果は、現在、そして未来のバイヨンマス タープランへ寄与し、またアンコール地域の他の遺 跡にも適用し得るものとなろう。更なる詳細につい ては、JSAの年次報告書である『アンコール遺跡調 査報告書』を参照されたい(以下、掲載書を記す)。

- -「バイヨン北経蔵砂岩補修材、およびヴィエトナム遺跡接着剤に関する報告」,『アンコール遺跡調査報告書 1996』, pp. 410-417.
- 「部材修復の概要」,『アンコール遺跡調査報告書 1997』, pp. 255-260.
- 「部材修復の概要」,『アンコール遺跡調査報告書 1998』, pp. 430-453.
- -「石材工学」,『アンコール遺跡調査報告書 1999』、 pp.301-303.
- 「部材修復」,『バイヨン北経蔵修理工事報告書』, pp. 441-443.
- -「バイヨン外回廊上仮設道路・発掘調査箇所復旧工事報告3オリジナル砂岩石材の修復について」,『アンコール 遺跡調査報告書2001』, pp. 255-269.
- 「砂岩部材修理における JSA と GACP との共同研究 バイ ヨン壁面レリーフの保存修理に関する報告」,『アンコー ル遺跡調査報告書 2003』, pp. 215-242.
- -「バイヨン寺院メンテナンスのための小規模修理『アン コール遺跡調査報告書 2003』, pp. 243-264.

- "Restoration of Stone Elements," ARJSA 1998, pp. 445-469.
- "Stone Engineering," ARJSA 1999, pp. 329-332.
- "Repair Works for Decayed Stone Elements," *Report on the Conservation and Restoration Work of the Northern Library of Bayon, Angkor Thom, Kingdom of Cambodia*, pp. 252-287
- "Report on the Work of Reinstating Parts Excavated for Investigation around the Temporary Pathway at the Outer Gallery of Bayon-3- Repair of Original Stone Blocks, Bayon Excavated Trench," ARJSA 2001, pp. 291-305.
- "JSA-GACP Cooperatoion for Sandstone Blocks Repairing Report on Conservation Work of Wall Relief in Bayon," *ARJSA* 2003, pp. 239-265.
- "Minor Repair Work for Bayon Maintenance Plan," *ARJSA* 2003, 267-287.





Case 1: Attachment of small fragments.



Case 2: Reassembling for recording purposes.







Case 3: Stone bonding of uncomplicated detachments.





Case 4: Filling of missing sections.









Case 5: Consolidation of fissile materials.



Case 6: Reattachment of detached section with carving.





Case 7: Constructional reinforcement.





Case 8: Fixing continued cracks.

Tab. 10.6-1 Table of materials and treatment methods.

O ITTMS	1.98	TERA/MENT MEANINES	CODE	NAME	(NORMOWY)	CO0681113
ESIN MATERIALS						
1	Trans adaptement	Main chemid (WTki-2	:85	Mail: channel of	Maghand type A spirit minister manifest distant stationer filterationers annul	122003 TOHEY KADDI GA
	Mod samid statement	Mardeen (B'Thin) Dealerner provider-3-40 (Mainre)	15	Selid Syng ameliat	Polyanti ancertitethopic ages	
EMENTTICIOUS M/	ATERCALS					
2 Financia scottar	for solid gaps	Company (Objecturing): (1.87 sizes) Bande Styly:Stanlagh (1.427 sizes) Projecturing): 29g	0 R+	Digenet brand constr Local and Polyane (genet	Regular portional sustaint (sign-graint) Another and visiol ediptions	Deg unter statemet
	Institution and a	Chair expected p MCr0.99-11.10g	-	Martin and American	annini metininganin	
-	Pilling of stacks antholiaiste Anthone	Primary supergradion Polymer solution Polymer 22:14 + clear water:2 Content C2:100 + Polymer-63	12 (2	Representation polymer Distance league contents	Artylic examina Regular parland ementionistic granic	top-to-control
dapagentine	Filling of stocks and withibution of bar-orderly and annexe	Printery impropriation Polyneer adultus Piptur Phill + olice transm2 Consett provider (2010) + Phillip	15	Merce grant polymer. For impropulities Merce grant commit	10R lativine inteller solder hars Begalar partiaal annest + water retaining aged + shell mold eller + water retailing	Songe spintes miller
3 Reput of winning paths	og accend inse galanding worker, wy	Pendel Cir-100 + polyant alation Satilized Pii-30 31	104	ennest motion for report of mining paths Polyana for space of recording paths	DBE (elliption butalise other) have Regular partiaul research ensure returning agent + deel stolet black re-and expelimentanogam playmod DBE (elliptice butalise other) have	
6 Sealing joint	Stating percentling year during instrugiation	Carport CP+100g + cashinee proviner300e cione water 30-30	0.10	Observed Strand commit	Regular portland consummation grants) presidence provider through 0.65 serve	Menan New continue
Anabasa	Metal attachment	Plant + clear war-2	His	Polyner des	Acres with copy about an	1.1.1.1.1.1.1
		Cole (200); + 25++ (Mig. + mean + Mig	1.74	Linease South	Register portional consent conception hand blockers resilt copellosis	Pergeneri HP 2007 MINOR AADDI CA
			111	Polyane (grow)	Acute and veryl elbyloise results as everypein-	A1628272395111

Appendix 10.7 : Laterite Block Repair

SOEUR Sothy

1. Introduction

In Khmer architecture, laterite is the second most widely used material after sandstone. Of the two stones, laterite is unlikely to be reused because it often sustains complex damage upon being removed from its original location. However, the use of original materials is one of the important businesses to maintain authenticity of a historic building. JSA established the technique through various experiments to realize the most important principle in this restoration work of laterite.

This paper reports on a preliminary specific standard of laterite repair obtained from our past experiences.

2. Categories of historical damage

Observation of the Northern Library of the Bayon, the pavement in the Bayon inner courtyard, the structure of the Suor Prat terrace, the antechamber of Tower N2, and the entire structure of Tower N1 revealed the following classifications of the extent of physical damage to the original laterite construction.

2.1. Fractures or simple breakage

Uneven compression or tension detaches a piece from the entire block. Usually, the detached parts are still in good condition because the block broke into two or three parts. These blocks can almost all be reused after being repaired.

2.2. Breakage and Missing portion

Laterite blocks are naturally of low quality and break easily. When a block is displaced and unevenly compressed or when a block is sharply curved, small broken pieces fall from its edges. Where smaller blocks are used, they also crumble in the same way. Most broken pieces cannot be reused, but the larger portion can be reused after being patched with new material.

2.3. Deterioration and degradation into soil

Compared to sandstone, laterite has low compressive strength and is not resistant to humidity. It is rich in mineral clay and other minerals that allow microorganisms and small plants to grow.

A laterite block in a very humid environment infested with microorganisms and small plants will become more and more damaged over hundreds of years, eventually crumbling and turning into soil due to heavy loads and natural forces. These fragments are then gradually worn away by the wind and rain. These phenomena repeated again and again produce missing and damaged areas on the blocks.

3. Repair categories and process

Based on the condition of the damaged laterite and our past repair experiences, we would like to define the following repair categories and process.

付録 10.7 ラテライト材の修復

スー・ソティ

1 はじめに

クメール建築の造営に際し、ラテライトは砂岩に 次いで広く用いられた建材であった。砂岩とラテラ イトとを比較した場合、ラテライトは原位置から取 り外した際に複雑に損壊していることも多く、再利 用には適していない。しかしながら、当初材の利用 は歴史的建造物のオーセンティシティーを保持する ための重要な用件の一つである。この保存修復にお ける最重要の原則をラテライトにおいて実現するた めに、JSA は各種の実験を通じて、その手法を確立 した。

本稿では、これまでの我々の経験を通じて抽出さ れた、ラテライト材に特化した修復仕様に関する予 備的な報告を行う。

2. 物理的損傷の分類

バイヨン北経蔵および伽藍内ペーブメント、スー プラ・テラスの構造、N2塔前室、N1塔全体の修復 を通じた観察の結果、オリジナルのラテライト材の 物理的な損傷の状態は下記のように分類される。

2.1 破断ないし単純切断破壊

本来、岩石としてのラテライト材の質は低く、容 易に破断してしまう。不均等な圧縮荷重ないし引張 力を受けることにより、部材には破断が生じる。通常、 石材が2、3材に割れている場合には、石材そのもの の状態は比較的良好であり、これらの殆どは修復の 後、再利用に耐える。

2.2 破損および欠損

部材が変位し、不均等な圧縮荷重を受けた時、ま たその形状が鋭角的な場合、石材端部からの欠損が 生じる。また小さな部材が使用された時も同様の破 損が生じる。欠け落ちた小片の殆どは再利用に耐え ないが、母材はその欠損部を新材などで補填した後、 再利用が可能である。

2.3 劣化と土壌化

ラテライトは砂岩に比べ圧縮強度が低く、湿度に も弱い。また鉱物を含む泥土に富み、微生物や小植 物の発生を促す他の鉱物をも含有している。

高湿度で微生物や小植物が繁殖する環境に晒され たラテライトは、何百年もの時間を経て徐々に被害 を受け、大きな荷重や自然の猛威により土壌化、チッ プ化していく。そしてその部分は、風雨の影響を受 けて少しずつ磨り減っていくが、この現象は再三繰 り返されて部材に欠損を引き起こす要因となる。

3.1 Case 1: Fixing fractures or simple breakage

3.1.1 Target areas

- For blocks broken into simple cross-sections by compression or bending stress.
- * Materials are reusable after being repaired.
- * Can be applied to blocks in any location.

3.1.2 Repair process

- (1) Reassemble the detached parts vertically to confirm the joint surfaces, then mark with ink
- (2) Drill holes vertically into both parts (fragment and base).
- (3) Reassemble both parts again to confirm the pins can be placed properly and that the joint surfaces meet well.
- (4) Clean the holes with a toothbrush and water.
- (5) Inject mortar into the holes on the fragment.
- (6) Place the stainless-steel bolt screws into the holes on the fragment with the base portion on top of the fragment to fix the pin in the correct position.
- (7) Turn both parts upside and keep in a shelter for two days.
- (8) Clean the holes on the base, washing both surfaces with a wire brush and chisel.
- (9) Fill the holes with polymer cement mortar and spread mortar over both surfaces.
- (10) Fix both parts together, fastening them with a belt or string.
- (11) Protect the repaired block (both portions) from rainwater.
- (12) Wait one day, then cover the joint surfaces with mortar.
- (13) Adjust outer dimensions of applied mortar with a chisel.
- (14) Allow the block to cure for at least two days after being bonded. It will be ready for use after two weeks.
- 3.2 Case 2: Bonding fragments
- 3.2.1.Target areas
 - * For bonding broken parts to their base.
 - * Materials are reusable after being bonded.
 - * Can be applied to blocks in any location, but specifically to damaged areas.

3.2.2 Repair process

- (1) Check shape of broken part and reassemble it with its base
- (2) Clean both parts with water and wire brush or chisel until all dirt and soil has been completely removed.
- (3) Blow compressed air into any surface pits and wait until both parts are completely dry.
- (4) Confirm that the broken surfaces match up, then mark

3. 修復作業の分類と施工手順

ラテライトの損傷状況および我々の過去の修復経 験から、修復分類および施工手順は以下のように示 される。

3.1 事例 01: 単純切断破壊部材の接合

3.1.1 対象部材

- *荷重及び曲げ応力による単純な切断面で割れてい るもの。
- * 接合後、再利用が可能な部材。
- *全ての位置の部材に適用可。
- 3.1.2 施工手順
- (1) 接合面の確認のため、垂直に仮組して墨でマーキング。
- (2) 両方の部分へ垂直に窄穴(母材と受け材)。
- (3) ピンが適切に通り、接合面が適切に一致するか の確認のため再度仮組。
- (4) 歯ブラシを使って穴を水で洗浄。
- (5) 母材の穴にモルタルを注入。
- (6) 母材の穴へピン(ステンレス全ねじボルト)を立 て、正しい位置に固定するため受け材を上に重 ねる。
- (7) 両材を上下逆にして小屋の中に二日間置く。
- (8) 受け材の穴を洗浄し、両面をワイヤーブラシと はつりたがねで洗浄。
- (9) 穴へポリマーセメントモルタルを充填し、接着 面にモルタルを馴染ませる。
- (10) ベルトないし紐によって母材と受け材を固く締め付け固定。
- (11) 両材を雨水から遮断。
- (12) 一日寝かせてからモルタルの一種で接合部を充填。
- (13) 充填したモルタルの外寸をノミで修正。
- (14) 接着後、ブロックは少なくとも二日間の養生を 施す。ブロックの使用は固定の二週間経過以後 が適当。

3.2 事例 02: 小片接着

3.2.1 対象部材

- *欠け落ちた小片を母材に接着。
- *接着後、再利用が可能な部材。
- *全ての位置の部材に適用し得るが、特定の破損状 況にあるもの。
- 3.2.2 施工手順
- (1)小片の形状を確認し母材に仮接合。
- (2) 両材の汚土が完全に除去されるまで、ワイヤーブ ラシないしはつりたがねを用いて水で洗浄。
- (3) 圧縮空気を穴に送風し、両材の乾燥を待つ。
- (4) 破断面が一致することを確認し、一致する位置に 墨でマーキンング。
- (5) 両接着面にエポキシモルタル (二液型硬質型エポ

with ink.

- (5) Dot epoxy mortar (two-component hardening type epoxy resin adhesive B7) onto both joint surfaces.
- (6) Bond both parts together, fastening them with a belt or string.
- (7) Cover the bonded block with a plastic sheet and let it dry.
- (8) Apply mortar to the bond joint; after one day, adjust outer dimensions with a chisel.
- (9) Allow the block to cure for at least two days after being bonded. It will be ready for use after one week.

3.3 Case 3: Inserting pins

- 3.3.1 Target areas
 - * For cracked blocks.
 - * Materials are reusable after being reinforced.
 - * Can be applied to blocks in any location.

3.3.2.Repair process

- (1) Check crack lines and confirm depth.
- (2) Drill holes into the block vertical to crack lines.
- (3) Clean drill holes with water and toothbrush or bolt screw.
- (4) Blow compressed air into holes to remove dirty water.
- (5) Keep holes in the sun or shade until completely dry.
- (6) Half-fill hole with liquid epoxy mortar, then push a pin (stainless-steel bolt screws) through the mortar to the bottom of the hole. The pin should be inserted at least 2 cm below the hole's edge.
- (7) Completely fill hole with liquid epoxy mortar, to the hole's edge.
- (8) When epoxy mortar is dry, apply laterite chips immediately or apply cement mortar.
- (9) Cover holes with a plastic sheet and let the block dry.
- (10) After one day, adjust shape of the hole's edge.
- (11) Do not move the block for at least two days after inserting the pins. It will be ready for use after one week of curing.

3.4 Case 4: Patching with new materials

3.4.1.Target areas

- * For repairing missing block edges; patch the original block with new materials when the missing portions are big enough or is heavily compressed
- * Materials are reusable after being patched
- * Can be applied to blocks in any location

3.4.2 Repair process

- (1) Examine the missing part and confirm that a replacement is needed.
- (2) Cut uneven portions from the missing part with a straight line.
- (3) Select new laterite part similar in quality and texture

キシ樹脂系接着剤 (B7)) を点状に塗布。

- (6) 両部材を接着し、ベルトあるいは紐で固く締め付ける。
- (7) 接着した部材をビニールシートで覆い乾燥させる。
- (8) 接着部にモルタルを充填し、一日後に外寸を修正。
- (9) 接着後、少なくとも二日間は養生を施す。部材の 使用は固定の一週間経過以後が適当。

3.3 事例 03: ピンの挿入

3.3.1 対象部材

- *クラックが生じた部材の修復。
- *強化後の再利用が可能な部材。
- *全ての位置の部材に適用可。
- 3.3.2 施工手順
- (1) クラックの線を調べてその深さを確認。
- (2) クラックの線に鉛直な注入口を窄穴。
- (3) 注入口を歯ブラシないし全ねじボルトと水で洗 浄。
- (4) 注入口が乾くまでコンプレッサーで送風し汚水5) を除去。
- (5) 注入口が完全に乾くまで天日干しないし陰干しする。
- (6) 注入口の半分まで液体エポキシモルタルを注入し、底までピン(ステンレス全ねじボルト)を押し込む。ピンは穴端から少なくとも2cm以上の深さまで挿入。
- (7) 再度穴端までエポキシモルタルを注入。
- (8) エポキシモルタルが乾いた際に、ラテライトチッ プを直に散布するか、セメントモルタルを充填。
- (9) 穴をビニールシートで覆い、ブロックを乾燥させる。
- (10) 一日経過後、穴端の形状を調整。
- (11) ピンの挿入後、少なくとも二日間はブロックを 動かさず、一週間の養生の後に使用するのが適切。

3.4 事例 04: 新材補填

3.4.1 対象部材

- *端部が欠損した部材の修復を目的とする。欠損部 が十分に大きいか、そこに大きな荷重を受ける場 合、母材の欠損部に新材を補填。
- *新材補填後、再利用が可能なものを対象。
- *全ての位置のブロックに適用可。
- 3.4.2 施工手順
- (1) 欠損部を調べ、新材補填の必要性を確認。
- (2) 欠損部の不陸箇所を切断。切断線は直線とするの が適当。
- (3) 当初材と同質または近似の新ラテライト材を選 択。
- (4) 新材を加工して一時的な外寸の調整。

to the original block.

- (4) Cut the replacement part and make temporary size adjustments.
- (5) Drill holes directly vertical to joint surface.
- (6) Set pins (stainless-steel bolt screws) and fit both parts together to confirm joint condition.
- (7) Clean holes and surfaces of both parts with water and wire brush or chisel.
- (8) Clean drilled holes again before fixing.
- (9) Proceed with fixing process as outlined in Case 1.
- (10) One day after fixing, fill bond joint with cement mortar.
- (11) When mortar is dry, adjust size and shape of replacement portion
- (12) Two days after fixing, make rough adjustments to new part and mortar.
- (13) Allow block to dry and cure for at least one week before using.

3.5 Case 5: Patching missing portions

3.5.1 Target areas

- * For repairing missing block edges; fill missing part with cement mortar when the part is too small to be patched with new material or to avoid a dangerous situation
- * Materials are reusable after being patched
- * Can be applied to blocks in any location

3.5.2 Repair process

- (1) Examine the missing part and confirm that patching is needed.
- (2) Drill holes for pins.
- (3) Clean holes and surfaces of both parts with water and wire brush or chisel.
- (4) Let holes dry, then fix pins (iron rods, stainless-steel pins) in holes with epoxy mortar.
- (5) Built a wooden framework, binding it with steel wire.
- (6) Apply cement mortar when epoxy mortar is dry.
- (7) Cover mortar with wet sandbag and protect from rainwater to guard against cracking.
- (8) Two days after applying mortar, make fine adjustments with a chisel to the new part surface only.
- (9) Allow block to cure in a dry place for at least one week before using to avoid a white crust forming on the mortar.

3.6. Case 6: Replacement with new laterite block

3.6.1.Target areas

- * For blocks determined to have lost their structural strength but must be rebuilt in their original shape for stability and record keeping
- * These blocks will become models when making substitutions with new blocks
- * Uses new laterite of a quality similar to that of the original

- (5) 接着面に鉛直に正確な窄穴。
- ピン(ステンレス全ねじボルト)を仮固定し、母材と新材の接合具合を確認。
- (7) 母材と新材の穴と表面を鉄ブラシないしはつりた がねを用いて水で洗浄。
- (8) 固定前に再度穴を洗浄。
- (9) 事例 01 同様の固定工程を踏襲。
- (10) 固定の一日経過後、接合部にセメントモルタル を充填。
- (11) モルタルが乾いたら、新材の大きさと形状を調整。
- (12) 固定の二日経過後、新材およびモルタルの概形 を加工。
- (13)部材は使用前に少なくとも一週間乾燥させ養生を施す。

3.5 事例 05: 欠損部補填

3.5.1 対象部材

- *端部が欠損した部材の修復。新材を加工してはめ 込むには欠損部が小さ過ぎる場合、また危険な状 態を回避するためにセメントモルタルを充填する。
- *部材補填後、再利用が可能な部材を対象。
- *全ての位置の部材に適用可。
- 3.5.2 施工手順
- (1) 欠損部を調べ、補填の必要性を確認。
- (2) ピンを立てるために窄穴。
- (3) 部材の穴をワイヤーブラシないしはつりたがねを 使用し水で洗浄。
- (4) 穴を乾かし、エポキシモルタルを用いてピン(鉄 棒、ステンレスピン)を穴に固定。
- (5) スチールの針金を結って木製の骨組みを作成。
- (6) エポキシモルタルの乾燥後、セメントモルタルを 充填。
- (7) 充填したモルタルを濡れた土嚢で覆い、クラック が生じないよう雨水から保護。
- (8) 充填の二日後、付加部分の表面の外形をのみで微調整。
- (9) モルタルを充填した部分の白華現象避けるため、 使用前の最低一週間は乾燥した状態で養生させ る。

3.6 事例 06: 新ラテライト材への交換

3.6.1 対象部材

- *構造的な強度は失われたと診断されたが、構造上 の安定、記録保存の観点から、当初の形状を復原 すべき部材を対象とする。
- *これらの部材は、新材の代用品を作る際のモデル となる。
- *新ラテライト材は、オリジナルのラテライトと質 的に近似するものを使用。

laterite

3.6.2 Repair process

- (1) Reassemble block for data recording (sketch, photographic record, measurements).
- (2) Select a new high-quality block.
- (3) Confirm size and shape of original block.
- (4) Roughen surface during reconstruction to make new block blend in with surrounding original laterite blocks.

3.7 Case 7: Reinforcement

3.7.1 Target areas

- For reinforcing longer material that has broken under tension or compression; structural reinforcement is considered before the fixing process
- * Materials are reusable after being reinforced
- * Can be used on beam material or longer wall and roof material that has broken
- 3.7.2 Repair process
 - (1) Fix parts as outlined in Case 1.
 - (2) Two days after fixing, place block horizontally with its bottom surface facing up; carve a groove into the bottom for embedding of stainless-steel bar.
 - (3) Embed bar, then adjust it until it lies parallel to the block' s bottom surface using lead plate as an adjuster; clean groove with water and wire brush or chisel.
 - (4) Pour cement mortar into groove up to top of lead plate (less than 1 cm) and re-embed bar in center of groove. Use lead plate to maintain gap between laterite surface and bar. Use wooden stick to push mortar into laterite pits and completely fill ditch with cement mortar. Mortar surface should be above laterite surface.
 - (5) After filling, immediately cover mortar with wet sandbag and water it every hour. Protect from sunlight and rainwater to guard against cracking.
 - (6) Two days after applying mortar, carve out mortar until it is below the laterite surface.
 - (7) Allow block to cure for at least three weeks after embedding bar.

- 3.6.2 施工手順
- (1) 記録のためブロックを仮組 (製図、写真記録、測量)。
- (2) 良質の新ラテライト材の選択。
- (3) 部材の当初の寸法および形状の確認。
- (4) 再構築時に周辺のラテライトと調和を図るため、 化粧面を粗めに仕上げる。

3.7 事例 07: 補強

3.7.1 対象部材

- * 引張力ないし圧縮力により破損した長尺部材の補 強を目的とする。構造的補強は固定する前に検討。 * 補強後の再利用が可能な部材を対象。
- *梁材および壁・屋根に付属する破損した長尺部材 に適用。
- 3.7.2 施工手順
- (1) 事例 01 のような分離した部材を固定。
- (2) 固定した2日後に、部材底面を上向きとして水 平に置き、ステンレス鋼材を埋め込むために部 材底面に溝を彫り込む。
- (3) ステンレス鋼材を埋め込む。ラテライト部材の 底面と平行に鋼材を配置するための調整材とし て鉛板が使用される。鉄のブラシないしのみを 用いて水で溝を洗浄。
- (4) 鉛板の上面まで(1cm 未満)セメントモルタルを 溝に注ぎ、また溝の中心にステンレス鋼材を埋 め込む。鉛板は、ラテライト表面およびステン レス鋼材の間に隙間つくるために使用。ラテラ イトの穴にモルタルを埋め込む際には木材を利 用し、次いでセメントモルタルで溝を充填。そ の際モルタル表面はラテライト表面より高くな ければならない。
- (5) 充填した後、直ちに濡れた土嚢でモルタルを覆 い、毎時給水する。亀裂の発生を避けるために 日光と雨水から保護。
- (6) モルタルを充填した2日後、ラテライト表面よ り低いところまでモルタルを削り出す。
- (7) ステンレス鋼材を埋め込んだ後に、部材を少な くとも3週間養生させる。

Appendix 11 : Maintenance Activities of the Bayon Temple

AKAZAWA Yashushi

Even after completion of the conservation and restoration work at the Northern Library of Bayon in September 1999, JSA activities of monitoring and carrying out maintenance tasks for the entire Bayon Temple complex are still ongoing. The following is a summary of the major activities implemented by JSA to date.

1. Small-Scale Element Repair

Among the fallen stone elements, we have bonded or injected adhesive agents to those elements that were clearly damaged and were in danger of losing fragments or small pieces if left abandoned, and those that were markedly deteriorated and needed to be treated urgently. However, such treatments merely addressed the immediate conditions of the elements. If the original positions of these fallen stone elements are identified and they are used to rebuild a structure, it is more than likely that some form of treatment will again be applied as necessary for the rebuilding work. As with the documentation of the repair of regular elements, the prerepair and post-repair conditions of elements that have been treated one way or another up to now have been documented, along with their treatment methods and materials and the locations in which they are stored. ¹

2. Observation of Danger Areas and Emergency Reinforcement

By closely observing of the entire Bayon Temple complex, it is possible to confirm several places that are in danger of collapse even today. Indeed, the deterioration of Bayon Temple is still advancing, so it is necessary to regularly observe the complex and to treat places that are in danger of destruction and collapse. Up to now, we have checked the complex and provided emergency reinforcements on a monthly basis, as well as installed signs and barricades to keep general tourists away from danger areas.

The removal of vegetation growing around the monument is also an important part of maintenance activities. Vegetation grows quickly in this area, so if left abandoned, the overgrowth of tree roots may cause gaps to form between the joint openings of stone elements or rockfalls. Moreover, plant seeds tend to germinate and start growing again inside joints that have widened, thus creating a vicious cycle for the monument. To avoid this from happening, efforts must be made to promptly remove the vegetation and keep them from growing on the buildings as much as possible.

3. Movement Monitoring and Maintenance of the Northern Library of Bayon

As also mentioned in Appendix 9 on the evaluation of

付録11 バイヨン寺院のメンテナンス活動

赤澤泰

1999年9月、バイヨン北経蔵の保存修復工事完了 後も、JSAではバイヨン寺院全体の観察及びメンテ ナンス活動を継続している。これまでなされてきた 主な活動を以下に示す。

1. 小規模部材修理

崩落部材のうち、破損が確認され、放置すると破 片や小片が滅失してしまう可能性のあるもの、また は、劣化が著しく早急な対処を必要としている部材 については、接着や注入などの処置を施している。 ただし、これらの処置はあくまで現状での処置であ り、崩落部材の原位置同定がなされ、再構築などに 使用される場合は、再度、再構築に必要な処置が施 される可能性がある。これまでに、何らかの処置が 施された部材については、通常の部材修理記録と同 様に、修理前、修理後の各状態の記録、処置方法や 材料の記録、さらにその部材のおかれている位置が 記録されている¹。

2. 危険箇所観察及び応急補強

バイヨン寺院全体を観察すると、崩落の危険にさ らされている箇所が何箇所か現在でも確認できる。 このように、バイヨン寺院は今でも劣化が進行して おり、定期的な観察と、倒壊や崩落などの危険箇所 に対する処置が必要である。JSAでは、これまで、 月毎のチェックと応急補強、さらに、一般の観光客 への対処としての立ち入り禁止のサイン表示や、バ リケード設置などを実施してきている。

また、メンテナンスの一貫として、遺跡で成長し てくる植物の除去も大切な項目である。この地域の 植物は成長が速く、放置すると樹根の生育による石 材間の目地開きや落石などが発生する。また、開い た目地部では再度植物の種子が発芽、生育すること も有り、遺跡にとっては悪循環となる。そのため、 早期に植物を除去し、遺構上での植物の育成を可能 な限り抑える努力が必要である。

3. バイヨン北経蔵の挙動観測及びメンテナンス

付録9のバイヨン北経蔵修復工事の評価でも触れ ているが、バイヨン北経蔵修復工事完了後も毎月の 挙動観測及びメンテナンスが継続されている。修復 後の遺構の挙動観察では、垂直変位計測で26箇所、 水平変位計測については、ポイント間の距離測定が 16箇所、さらに梁材上部を通しての計測が2箇所、 また、東西開口たて枠材の垂直性も確認している。

これまでのところ、大きな挙動は確認されていな

the restoration work at the Northern Library of Bayon, we are continuing to monitor the movements of the Northern Library of Bayon and are carrying out maintenance activities of the building each month following completion of the restoration work. In the post-restoration monitoring of the movements of the building, we have measured vertical displacement measurement in 26 places and, in regard to horizontal displacement, the distance between points in 16 places and the length of upper beam elements in two places, as well as the verticality of the east and west door jambs.

So far, no large movements have been confirmed.²

Such meticulous activities as described above have been carried out continuously at Bayon to this day. Maintenance is extremely important to buildings, and is indispensable for their conservation. When formulating a comprehensive conservation and restoration plan for a monument, it is essential to draft a plan that gives due consideration to the need for regular maintenance and post-restoration maintenance activities.

Notes

- 1 "Minor Repair Work for Bayon Maintenance Plan," ARJSA 2003.
- 2 "Monitoring Structural Movement of the Northern Library of the Bayon after Restoration," *ARJSA* 2002.

٤، دی

以上のような地道で継続的な活動が、これまでバ イヨンでは実施されてきている。メンテナンスは、 遺構にとって非常に重要で必須の事項であり、保存 していく上で欠かすことの出来ない項目である。遺 跡の保存修復全体計画を策定するにあたっては、こ の通常のメンテナンス及び修復後のメンテナンスま で視野に入れた計画を立案することが重要である。

註

- 1 「バイヨン寺院メンテナンスのための小規模修理」,『ア ンコール遺跡調査報告書 2003』
- 2 「バイヨン北経蔵修復後の構造的挙動モニタリング調査」、『アンコール遺跡調査報告書 2002』

Appendix 12 : Survey on Fallen Stone Elements of the Bayon Temple

AKAZAWA Yasushi, TSUCHIYA Takeshi

JSA has continuously implemented a wide range of surveys at Bayon Temple. A part of those efforts was directed to the assessment of collapsed stone elements. It aimed to confirm the present state of those elements in regard to their numbers and positions.

The survey also held meaning as a means of reconfirming past surveys and conservation activities. At Bayon, most of what we refer to as collapsed stone elements have already been cleared to a certain extent or temporarily left in a piled-up state. Hardly any materials remain that indicated the conditions of the elements before they were sorted, so we expect the identification of their original positions to prove an extremely difficult task. This is a part of the reason why it is necessary to grasp and document the present state of the elements. Furthermore, because the information would serve as an important reference for future conservation and restoration activities at Bayon, it shall be properly disclosed.

For each stone element, we note its present position, take a photograph, draw a picture, and record its state of deterioration. The documenting task for a single stone element requires a worker about half a day to a full day. Including the trouble of moving the elements, it would take a day at the least. Of the thousands of collapsed elements confirmed throughout Bayon, roughly 3,000 have been documented to date. An understanding of the entire situation concerning the collapsed elements is essential to considering the conservation and restoration of Bayon, and the creation of a database containing sufficient information is desired as early as possible. Supposing ten workers were constantly assigned to this task, approximately 2,500 pieces could be documented in a year. This means that even if more workers engage in the task, it would take at least ten years to complete. Although we would eventually need to implement labor-saving measures, improve workers' skills, and upgrade the documenting technology in the future, for now, it is important to install a permanent work team and create an environment that would allow steady progress of the task. In this paper, we will introduce a part of the database we are currently developing as a reference for examining the course of future tasks.

付録 12 バイヨン寺院の崩落石材調査

赤沢泰、土屋武

JSAでは、バイヨン寺院におけるさまざまな調査 を継続して実施してきている。その一項目として、 崩落石材の把握にも努めてきている。これは、現状 における崩落石材の数量や配置などを確認すること を目的としている。

また、これまでの既往調査や保存活動の再確認の 意味も含まれる。バイヨンにおいて、崩落石材と呼 ばれるものは、これまでにある程度片付けられたも のや、整理された状態で放置されているものが多い。 整理前の状態については、現状ではほとんど資料が 確認できないため、原位置の同定が非常に困難とな ることが予想される。その意味からも、現時点での 状態を把握し、記録することが必要であり、今後の バイヨンにおける保存修復活動においての重要な資 料として提供されることになる。

作業では石材の一つ一つについて現状の位置、写 真、図面、劣化状況を記録してゆく。1つの石材の 記録作業には作業員が1人で約0.5~1日必要であ る。さらに石材の移動の手間を加えるならば、最小 で1日の見積もりになる。バイヨン全体に確認され る数万個の崩落部材のうち、これまでに約3000個の 記録を行った。バイヨンの保存修復を検討する上で、 崩落石材の全体の把握は不可欠なものであり、可能 な限り早く、かつ充分な情報を備えたデータベース が作成される事が望まれる。仮に10人の作業員を常 時この作業に投入すると一年間で約2500個分が記録 できる。つまりより多くの作業員を投入しても最低 10年は掛かる作業である。将来的には作業の省力化 の工夫、作業員の技能の向上、記録技術の更新など が見込まれるが、とりあえずの目標は作業チームを 常設、作業が確実に進む環境を整えることである

No	Date	Location grid	Sub-grid	Total blocks	Remark	
1	25.0ct.01	AS	m	46	capital, pediment, beam, collonette	
2	26.0ct.01	A6	2	34	capital, pediment, beam	m
3	25.0ct.01	A6	e	21	capital, pediment, roof tile, balustrade	
4	25.0ct.01	A7	2	21	pediment, wall	
S	8.Nov.01	A7	e	13	piller, wall	
9	8.Nov.01	AB	2	9	roof tile, wall	
2	21.Nov.01	6V	4	4	wall	
80	24,0ct.01	83	1	12	roof tile	- 11
6	24.0ct.01	83	2	e	pillar	
10	24.0ct.01	84	4	52	pediment, wall	
11	24.0ct.01	85	1	44	pediment, wall, beam	
12	6.Nov.01	B5	2	31	roof tile	
13	25.0ct.01	BS	e	46	pediment, beam	
14	5.Nov.01	86	1	12	pediment, beam	
15	5.Nov.01	87	1	13	pediment, roaf tile	
16	8.Nov.01	87	e	74	wall, beam, base pillar	
17	8.Nov.01	87	4	49	wall, beam, base pillar	
18	8.Nov.01	B8	1	63	door frame, beam, capital, pediment, wall	
19	8.Nov.01	88	2	83	beam, roof tile, pediment, eave tile	
20	13.Nov.01	88	6	22	pediment, beam	
21	14.Nov.01	68	2	38	capital , pediment	
22	15.Nov.01	89	en	68	pediment, beam	
23	17.Nov.01	810	2	41	pediment, beam	
24	20.Nov.01	810	e)	44	beam, capital	
25	22.Nov.01	811	2	12	wall, beam, base pillar	
26	24.Nov.01	23	4	đ	capital , pediment	1
27	20.0ct.01	ខ	3	8	pediment, beam, collonette	
28	25.Oct.01	C4	1	29	pediment, wall	
29	24.0ct.01	C4	2	62	pediment, wall	
30	26.Oct.01	5	в	6	nagar	
31	26.Oct.01	8	4	42	pediment, wall	

Tab. 12-1 A sample of the list of scattered stones and collapsed stones in Bayon.

Appendix 13 : Monitoring and Emergency Measures of the Bayon Temple

AKAZAWA Yasushi, TSUCHIYA Takeshi

As with the materials on collapsed stone elements, JSA has been working to assess danger areas and to apply emergency countermeasures in Bayon. As also mentioned in the section on maintenance activities, Bayon Temple is still showing signs of further deterioration, so regular observations and treatment of areas in danger of collapse are needed. Danger areas and temporarily treated parts which JSA has confirmed so far have been documented, and regular follow-up monitoring activities are carried out based on this documentation.

The list of collapsed stone elements and list of danger areas are both a part of the maintenance activities JSA has continuously conducted up to the present, and are also important documents from the perspective of actually implementing smallscale repair and emergency treatment.

The monitoring (regular observation) task involves a monthly observation of structurally unstable areas and parts where elements are severely deteriorated throughout Bayon and a confirmation of the progression of their conditions. At the same time, the monument is searched for new danger areas that have gone unnoticed so far. Reinforcement frames are installed in areas that are increasingly becoming structurally unstable to stop the progression of other distortions. An adhesive agent or solidification treatment is applied to areas where deterioration such as the cracking and erosion of elements is becoming more severe. In the third phase of JSA activities, JSA is expected to carry on the same activities as it has up to now, and to also create a detailed specification of those activities

付録13 バイヨン寺院の危険箇所のモニタリングと 応急対処

赤澤泰、土屋武

崩落石材関係資料と同様に、JSA ではバイヨンに おける危険箇所についての把握、及びその応急処置 を実施してきている。メンテナンス活動の項にて も述べられている様に、バイヨン寺院は今でも劣化 が進行しており、定期的な観察と、倒壊や崩落など の危険箇所に対する処置が必要である。これまでに JSA にて確認された、危険箇所及び応急的な処置が 施された部位に関しては、それぞれが記録されてい る。また、その記録に基づいての定期的な追跡観察 がなされている。

崩落石材リスト及び危険箇所リストは、共にバイ ヨンにおいてJSAがこれまで継続してきたメンテナ ンス作業の一環であり、実際の小規模修理や応急処 置を実施する観点からも必要なものである。

モニタリング(定期的な観察)作業では、バイヨン 全体の構造的に不安定と見られる箇所、及び部材の 劣化が著しい箇所を毎月観察し、状況が進行してい るかどうかを確認する。また同時にこれまでに気付 いていない新たな危険箇所がないかを捜査する。構 造的な不安定性が大きくなっていると見られる箇所 には、順次木製の補強フレームを設置し、それ以上 の変形の進行を止める。また部材のひび割れや腐食 などの劣化が進行していると見られる箇所には接着 や固化などの処置を施す。JSA第三フェーズにおい ても、これまでと同様の作業を継続していくととも に、その作業仕様を細かいところまで確立すること が求められる。

	10	S.D R.I	1	R.A		
	Road tile of onne worth porch of T.37	RA	combact and reserved sust		W.	
4.25	Step of stair super cast of T.25	N N	council	ľ	M	Ĩ
	on the top of the roof	1	phase growth			
	Column of 1.25	C 8				
	Pillar west of 1.26	P 4	inter corridor vertical share.	_		
	leaser pitter mech.of T.A0	4 4	outer corridor sham areas			
92	Winism surface of inner gallery, cours consider between T.29-Mi	We C	if the foot of pillar are booken the whole attacture of this part will collapse			
	Window fuetwork conducts practs of T.31.	= 3	it is book on struck			
	Upper uniques of southers of T.29	4 A	denses			
	Upper limit of western continues of T.31	L A	heavy hand has and in proported		1.8	-
	Column of T.M.	P. A	drack			
1.33	Column & nod from work to out of 1.32	V P	much	¢.		
8	Column Ned from 232		widdle crack	63		
Ę	Column and fisse of Odenne	C A	Devel		7.5	
8	Step of mater weature poorls of 1.03	u z	1011		CM.	
	taset tool tile	# #	says to collepte			
	Withdow figure of orth-west position 17.33	*	restination crack			
	window frame between T.33-54	0 8	decas			
191	upper window frame	w C	If still docus at the opper part	CBD		
135	Beam 2nd in the cast while of 1.34	11 V	and the enset.	M		
	Roof tile	L N	weddfe canek			
	Between of 1.255	N N	creat trans			
8	Beam 2nd wast of T.36		decay at the tectum			
	finant content studi tille.	a c	cruck it will full down	_		
	Reamment purch of 1,56	a c	homomo de cory and crinch			1
	Limit of emisers estimate of T.M.	L A	hen collect import and crack at the morth ode of listed		¥.S	
	Inter pattery of T.M.	N 0	east points have no supported right side crack			
134	Foot of estimate of inner 2nd gardly, went part	C. A.				
	farmer hamel south side of T.27	10 H	have no suppose			
	Roof his numer of anoth-west of T.AT	N N	moving from the stating position		12	

Tab. 13-1 A sample of the list of dangerous parts in Bayon.

Caption Theme : N = N

Reinf P : TO = S.D / D.M: B = Ы

: A = Urgent, B = Warning, C = Observing Progress : C = filling up with Concrete, M = filling up with Mortar, C.P = supported with Concrete Pillar, C.B = supported with Concrete Pillars and Beams : C = filling up with Concrete, M = filling up with Mortar, C.P = supported with Concrete Pillar, C.B = supported with Concrete Pillars and Beams R.D R.A

Beam : I = Iron Clamp, I.B = Iron Bend, I.C = Iron Clamp and filling up with Concrete, I.M = Iron Clamp and filling up with Mortar, C.S = Concrete Structure, I.B.C.S = Iron Bend and Concrete Structure, W.B = supported with Wooden Beam **R.J.** : T.S = Timber Support, M = Move back to the existing position, P = Putting in order, W.T = Wooden Triangle structure, P.S = Put a sign, C = Cleaning, W = Wooden wedge **R.P.J** : I.B = maybe Iron band, T.S = Timber Support, D.m = Dismantle, C.S = Concrete Support