


# Main Discourse

本論





Main Discourse - Chapter 1

**Fundamental Idea for the Conservation and Restoration,  
and the Utilization of the Bayon Temple**

本論 第一章

バイヨン寺院の保存修復と活用のための基本理念

Main Discourse - Chapter 1

- 1.1 Characteristics of the Bayon Temple
- 1.2 Environmental Preservation
- 1.3 The Dimensional Plan of the Bayon Temple
  - A Comparison between the Bayon Northern Library and Southern Library-
- 1.4 Restoration Techniques
- 1.5 International Partnership for the Conservation of the Angkor Monuments
  - and its Influence on the Region, People, and Country of Cambodia

本論 第1章

- 1.1 バイヨン寺院の特質
- 1.2 環境保全
- 1.3 バイヨン寺院の寸法計画 -バイヨン北経蔵と南経蔵の比較を中心に-
- 1.4 修復技術
- 1.5 国際協調によるアンコール遺跡の保存とカンボジアの地域、民族、国家への影響

## Chapter 1 : Fundamental Idea for the Conservation and Restoration, and the Utilization of the Bayon Temple

### 1.1 Characteristics of the Bayon Temple

NAKAGAWA Takeshi

#### 1. Introduction

The first time I actually saw the Bayon Temple was in October 1992. Giant deity faces that can either be interpreted as sculptures or a part of the architecture, the dense, three-dimensional structure that emanates a sense of spaciousness that is rare in Asia, and the appearance that exudes a mysterious aura full of energy, were just as I had imagined. However, I also felt something resembling a sense of balance within the overall atmosphere of Bayon. It was a strange atmosphere that could perhaps be described as a fragile equilibrium between destruction and peace. This sensation was unexpected to me, and hit me only after I actually stood facing Bayon. Over half the masonry of the central tower was collapsed, but regardless, the towering appearance was a bold sight. At the same time, there was also a precariousness that tended to impose a feeling of tension in all who lay eyes on the building. Indeed, throughout the intricate appearance of Bayon, the masonry of pillars and walls everywhere were in danger of collapse, and the monument almost seemed to be eloquently demonstrating the fact that even stones fall into decay. Yet, there was also a sense of security in the air. This ambivalent feeling was beyond my imagination, and came as a complete surprise. Personally, it was this wonderment that stirred in me the desire to participate in the project to restore and conserve Bayon. Since then, I have studied Bayon in depth with many specialists from different fields, but its mysteries seem only to keep deepening. Naturally, this is a good sign, and there is much that I have learned.

#### 2. Overview of Bayon

Bayon is the central temple of Angkor Thom, but the center of the royal city and the center of Bayon are slightly but clearly non-concentric. It is the accepted view that Bayon was built by Jayavarman VII (ruled 1181 - 1219) as a Mahayana Buddhist temple, but it was converted to a Hindu temple in later years and also used as a Theravada Buddhist temple as well as a place of worship of the native religion up to the present. However, JSA expert teams in art history and architecture have presented different theories based on the results of studies conducted by the archaeology and petrology teams. In regard to the construction purpose of Bayon, there are theories that claim Bayon is a tomb or a monastery, but I must agree with the art history view that it was constructed as a temple.

The temple faces east. The main building forms a rectangular plan with a front face that is approximately 130 meters wide and side faces that are approximately 140 meters long. A

## 第1章 バイヨン寺院の保存修復と活用のための基本理念

### 1.1 バイヨン寺院の特質

中川武

#### 1. はじめに

私のはじめて実物のバイヨン寺院を見たのは1992年10月であった。彫刻なのか建築なのか分からない巨大な顔面、豊かな空間を感じさせるアジアには稀な高密度な立体的構成、謎と溢れるエネルギーを秘めた形態などは想像していた通りのものであった。しかしバイヨン全体の佇まいの中に、何かバランス感覚のようなもの、あるいは破壊と静けさの危うい均衡とでも呼べそうな不思議な空気が感じられたことは意外であった。この感じは実際バイヨンの前に立つまでは分からなかった。中央塔の積石が半分以上も落下しているにも関わらず、そそり立っている様子は、とても雄々しい。しかし危なっかしさもあって、見る者に緊張を強いてくる。複雑に入り組んだバイヨンのアチコチは、まさに至るところ柱や壁の積石が落下の危険に直面していたり、石もまた腐ることを雄弁に物語っている遺跡のように思われてくる。なのに、どこか安心感のようなものが同時に漂っている。このアンビバレントな情感は想像の埒外であり、大きな驚きであった。個人的には、この驚きによって私はバイヨンを修復して保存するプロジェクトに参加したい、と願った。その後多くの分野の専門家とともに、このバイヨンについて勉強してきたが、謎は深まるばかりのように思われる。勿論これはよい傾向であり、判ったことも実に多い。

#### 2. バイヨンの概要

バイヨンとはアンコール・トムの中心寺院である。都城の中心とバイヨンの中心は、微妙に、しかしはっきりと視認できる形で偏心している。ジャヤヴァルマンVII（在位1181～1219年頃）が大乗仏教の寺院として建立したが、後にヒンドゥー教寺院に変更され、さらには南方上座部仏教寺院や土着信仰の場として使用され、現在に至っているとするのが定説である。しかし、JSAの美術史、建築史の専門家チームは、考古学チームおよび岩石学チームの調査成果を参照しながら、異なる説も発表している。バイヨンの建立目的に関して、墓廟、修道院などの説もあるが、美術史の見解より寺院と捉えざるをえない。

寺院は東を正面とする。寺院本体は正面約130メートル、側面約140メートルの矩形平面を有し、東正面にアプローチなどのための大きなテラスが突出し

large terrace projects out from the east frontal to accommodate an approach. There is a rectangular pond on both the north and south sides of the terrace.

The perimeter of the temple is surrounded by two galleries. They will be referred to as the inner gallery and outer gallery in this paper. The inner gallery has a ground plan with a complex shape. It is comprised of a gallery having a cruciform-shaped ground plan (hereinafter referred to as the cruciform gallery) and another gallery which was later added in a shape created by connecting the four corners of the cruciform gallery (hereafter referred to as the corner gallery).

The temple is composed of three levels: an upper terrace (central terrace), a middle terrace, and a lower terrace. The upper terrace was constructed so that it touches the inside of the cruciform gallery, and a group of buildings forming the central complex was placed on top of it. The tower-shaped central sanctuary in the center of the complex has a somewhat oval ground plan. It is connected to a tower-shaped gate pavilion on all four sides (north, south, east, and west), and tower-shaped, same-style side sanctuaries at the diagonal point. Furthermore, a group of four pavilions (worship towers) is attached to the east frontal, and another pavilion is attached to each of the north, south, and west faces. In addition, three small sanctuaries stand separately on the upper terrace.

The middle terrace is mainly composed of the inner gallery. A cruciform-shaped terrace conforming to the outline of the cruciform gallery is placed on a rectangular terrace. A gate pavilion composed of three tower-shaped structures forms each of the four end faces in the north, south, east, and west directions of the cruciform gallery. Similarly, a corner pavilion composed of three tower-shaped structures stands in the reentrant part of the four corners. There is also a tower-shaped pavilion in the four corners of the corner gallery. On the inside of the cruciform gallery, there are two small sanctuaries and a small structure covering a well, partly overlapping with the upper terrace.

The outer gallery surrounding the perimeter of the lower terrace has a gate pavilion in the four directions and a corner pavilion in the four corners. On the lower terrace inside the outer gallery, a single pavilion stands inside the east gate pavilion of the outer gallery, and the Northern Library and Southern Library stand in the northeast corner and southeast corner, respectively. There are also traces of sixteen rectangular-based structures connecting the small gates constructed on each side of the outer gallery, the gate pavilions and corner pavilions of the inner gallery.

In addition to the complex architectural style mentioned above, other characteristics of Bayon in terms of Khmer architecture include the forest of towers carved with massive deity faces and the sculptural decorations applied to the walls of the galleries. There are 52 towers adorned with deity faces. The deity faces are primarily carved so that they face the four directions, but some towers do not necessarily conform to this rule.

ている。テラスの南北にはそれぞれ矩形の沐浴地が配されている。

四周に二重に回廊を巡らした寺院で、ここでは、それぞれ内回廊、外回廊と呼称する。内回廊は、十字形平面を有した回廊（以下、十字回廊と呼称）とその四隅を結んで後に増築されたとする回廊（以下、隅回廊と呼称）が配され、複雑な平面形態となっている。

寺院は上部テラス（中央テラス）、中間テラス、下部テラスの三層から成る。上部テラスは、十字回廊内側に接するように構築されており、この上に中軸伽藍を形成する遺構群が載っている。中央の塔状中央祠堂はやや楕円形平面を有し、東西南北四方に塔状の楼門、四維に塔状同形式の副祠堂が接続している。東正面はさらに四塔の楼群（礼拝塔群）、西南北三方向にも各一棟の楼が付属する。その他にも上部テラス上には三棟の小祠堂が独立して建造されている。

中間テラスは主として内回廊によって構成されており、矩形平面のテラス上に十字回廊の輪郭に沿って十字平面形のテラスが載る。十字回廊には、それぞれ三棟の塔状建築から成る門楼が東西南北四端の辺を形成し、同様にそれぞれ三棟の塔状建築から成る隅楼が四維の入隅に位置している。また、隅回廊四隅にも塔状の楼一棟が配される。十字回廊内側には、上部テラスの一部と重なるようにして二棟の小祠堂、井戸を覆った一棟の小建造物がある。

下部テラス四周に巡る外回廊は、東西南北四方に門楼、四維には隅楼を配している。外回廊内側、下部テラス上には、外回廊東門楼内側に一棟の楼、南東角、北東角にそれぞれ南・北経蔵が建つ。また、外回廊各辺に設けられた小門と内回廊の門楼、隅楼を結ぶ、計十六棟の矩形平面の建造物の痕跡が認められる。

クメール建築におけるバイヨンの特徴として、上述したような複雑な建築形態とともに、林立する尊顔塔、回廊の壁面に施された彫刻装飾があげられる。尊顔塔は52塔が数えられる。原則として四面に尊顔彫刻を施しているが、数塔は必ずしもこれに準じないため、バイヨン全体で約180の尊顔が計画されたが現存するものは173面である。

JSA 美術史班（朴亨國、他）はこれらの尊顔は、デーヴァ、デーヴァター、アシュラの三体から成るという分析を提出している。異なる性格を持つ、一般名称としての当時の神の類型であり、神々に守護された寺院の表現であったと考えられる。また、内回廊では主として門楼及び隅回廊の壁面に、外回廊では各楼を含めほぼすべての壁面に、それぞれ浅浮彫りによる彫刻装飾が施されている。題材は、仏教・ヒ

Therefore, although roughly 180 deity faces were planned to be carved in all of Bayon, only 173 faces actually exist.

The JSA Art History Unit (PARK Hyounggook *et al.*) conducted an analysis of the deity faces and submitted that they represent the faces of Deva, Devata, and Asura. They are common stereotypes of deity figures of the time, and display different characteristics. It is believed that they were carved on the towers as an expression of the protection of the temple by the might of the gods and goddesses. Also, there are sculptural decorations in the form of bas-reliefs mainly on the walls of the gate pavilion and corner gallery of the inner gallery and on almost all the walls of the outer gallery, including the pavilions. The subject matters of the bas-reliefs are diverse, ranging from Buddhist and Hindu myths, to the lifestyles of the nobles and the people of the time, and battles with Champa forces.

From 1908 to 1937, l'Ecole Française d'Extrême Orient (EFEO) almost continuously carried out restoration work at Bayon, although there were some brief intervals of discontinuation. Specifically, it sorted collapsed and fallen stone elements, partially dismantled, and rebuilt the building, and conducted temporary repair of places in danger of collapse. EFEO also implemented an excavation survey centered on an architectural measurement survey, and compiled reports containing diagrams of the actual state of the monument and conjectural images of the monument's original form, as well as the process of additional constructions and modifications. In 1990, a Polish team conducted an excavation survey around the east terrace. The collapsed and fallen stone elements they gathered in various places inside and outside the complex are still left as they are, because aside from a few journal entries, no records have been discovered to date that indicate how the fallen stone elements from which area were organized, much less their numbering system. The identification of fallen stone elements is therefore posing one of the greatest difficulties for future restoration work. The exact same situation was also true at the Northern Library. With a focus on the Northern Library, we conducted a search and an identification survey of fallen stone elements of the northeast portion of the temple grounds which account for roughly one-fourth the total area of Bayon Temple. We carried out each task sequentially, beginning with (1) a rough discrimination of the elements according to style details such as the presence of sculptural decoration. We then (2) roughly categorized them based on a study of the susceptibility of stone elements, (3) divided elements thought to belong to the Northern Library from those that do not, (4) classified them by the parts of the Northern Library, and (5) identified them through partial trial assembly. Tasks (3) to (5) above were a survey of individual elements. There were a total of about 7,000 elements, and we created survey sheets for a total of 411 elements. Of these elements, 57 elements were identified as those belonging to the Northern Library of Bayon. In regard to the other stone elements, we documented them and temporarily grouped and placed them in appropriate locations separate

ンドゥー神話、当時の庶民や王族の生活風景、チャンパとの戦いの図など多種にわたるものである。

1908年から1937年にかけて、部分的な中断期間があったとはいえ、ほぼ継続的にフランス極東学院(EFEO)による倒壊崩落部材の整理や部分的な解体・再構築修理、倒壊危険箇所の応急修理が行われてきた。さらに建築測量調査を中心に発掘調査も実施されており、報告書などで遺構の現状図や復原図、増改築の過程などが報告されている。また1990年にはポーランド隊による東側テラス付近の発掘調査も実施されている。倒壊崩落部材の整理については、現在も伽藍内外各所に集積されているが、若干の日記の記述以外、番付けはもとより、どのエリアの崩落部材をどこに整理したのか、という記録は現在まで発見されておらず、崩落部材の同定は今後の修復作業にとって大きな困難の一つになっている。北経蔵についても全く同様であった。北経蔵を中心に、バイヨン寺院全域のほぼ四分の一の面積に当たる境内北東部に関して崩落部材の探索、同定調査を行った。まず、(1)彫刻装飾があるもの等、細部様式によって大まかに判別、(2)石材の帯磁率調査による大まかな区分、(3)北経蔵の部材と考えられるものとそうでないものの区分、(4)北経蔵の部位別区分、(5)部分的仮組による同定、と順次作業を行った。この中で項目(3)以降が部材一個ずつの探査であり、部材総数七千個、調査票作成部材総数411、そのうちバイヨン北経蔵のものと断定できた部材数は57個であった。それ以外の石材は判明したものからグループ別に、記録をとって各々ふさわしい場所に仮置きした。これらすべての作業のために、平均十人のチームで、約四カ月の期間と相当の熟練が必要であった。

現状では、南経蔵を筆頭に、中央祠堂など脱落の危険性が高い建造物が多くある。外回廊は、ゴープラの一部を除きほぼ全体にわたり屋蓋が崩れ落ちており、壁面の彫刻装飾が雨ざらしのまま放置されている。また至るところに劣化が進行しており、どこから手をつけるべきか分からないような様相を呈している。これらの問題に加えてバイヨンは、生きた寺院であり、かつアンコール・ワットと並んで最大の観光のメッカであること、境内地が狭小であることなどがさらに保存修復工事の困難さを増幅させている。しかし、もっと大きな困難は、多様な彫刻による複雑な宗教的意義付けと、高密度で、エネルギーに溢れた高塔群の形態、そして原則性を逸脱し続ける寸法計画や組積法と細部モチーフの配置など、要するにバイヨンはなぜ生まれたのか、どのようにして計画され、実際につくることが可能であったのかを解明することにある。このような寺院が世界に突出しているようにまさに眼前に実在すること、それ

from those that were identified. It took a team composed of an average of ten members approximately four months and considerable skill to carry out all the necessary tasks.

At present, beginning with the Southern Library, there are many buildings such as the central sanctuary which are in great danger of collapse. The roof of the outer gallery is almost entirely collapsed, excluding a part of the gopura, and the sculptural decorations on the walls are left exposed to the rain. Deterioration is progressing everywhere, and there seems no way of determining where to begin restoration. In addition to these problems, the facts that Bayon is a living temple and the greatest tourist mecca along with Angkor Wat, and that the temple grounds is extremely small are further exacerbating the difficulty of implementing conservation and restoration work. However, an even larger problem is in revealing the complex religious significance of Bayon through the various sculptures, the dense and energy-filled form of the group of high towers, and the dimensional planning, masonry method, and arrangement of detailed motifs which continue to deviate from any basic principle. In other words, it is important to elucidate the reason why Bayon came to be, how it was planned, and what made its actual creation possible. The very existence right before our eyes of a temple which seems to jut out into the world is itself the greatest mystery of Khmer.

Our challenge of solving this mystery took shape through the process of partial dismantlement and rebuilding of the Northern Library of Bayon (ARJSA 1997-2000).

Our exploration of the origin of Bayon still continues today through the survey of the Sambor Prei Kuk monument of the pre-Angkor era (7th~9th century).

The section below is an interim report up to the present of our findings regarding the characteristics and transition of Bayon Temple compiled from the above results and the results of surveys conducted by the JSA Architecture Inventory Unit and the Art History Unit.

### 3. The Characteristics and Transition of Bayon Temple

By integrating various specialized surveys conducted by JSA to date, we have come to the following provisional conclusion as of the present.

The most noteworthy characteristics of Bayon Temple are the following three points.

- (1) The three-deity composition of Deva, Asura, and Devata, which was originally used in Indian and Khmer tradition to symbolize the creation of a new world through the cooperation of different elements, such as represented by the "Churning of the Sea," was skillfully placed on the city gate and temple entrances to create a new formation of guardian deities.
- (2) The formation of the above three deities was represented in the structure of the unique and giant deity faces on the towers.
- (3) With the religion of Jayavarman VII himself and of the

自体がクメールの偉大な謎である。

この謎への私たちの挑戦は、パイヨン北経蔵の部分解体再構築工事のプロセスによって続けられた(1997年~2000年 JSA 報告書)。

パイヨンの源流に対する探索は、プレ・アンコール期(7~9世紀)のサンボール・プレイ・クック遺跡の調査によって現在も続けられている。

これらの成果と JSA の建築インベントリー班および美術史班の調査成果を総合して、以下にパイヨン寺院の特質と変遷に関する現段階の中間的なまとめを述べる。

### 3. パイヨン寺院の特質と変遷

これまでの JSA による各専門調査を総合して、私たち JSA は現在、以下のような暫定的な結論に達している。

パイヨン寺院の特徴について注目すべきことは、以下の三点である。

- (1) 従来〈乳海攪拌〉などインド・クメールの伝統において新しい世界を異質なものの協力によって生み出すという意味で用いられていたデーヴァ/アシュラ/デーヴァターの三神の構成を城門と寺院の出入口に巧みに配置する新たな守門神の構成をつくりあげた。
- (2) 以上の三神の構成をユニークで巨大な尊顔塔の構成としてつくりあげた。
- (3) ジャヤヴァルマン VII 自身と王家の信仰を中心軸に据え、当時の三大宗派であったシヴァ派、ヴィシュヌ派、仏教の各々の要望に応えるために、各派の著名な伝説モチーフを取り入れ、なおかつジャヤヴァルマン VII 自身の統治の正統性と権威を巧みに表現している。

パイヨン寺院の変遷については、クメールの碑刻文に関するクロード・ジャック教授の長年の研究からの発言に注目しつつも、建物に残された real trace(現実の痕跡)より、ほぼジャック・デュマルセ教授の四段階変遷説に従わざるをえない。

ただ現段階の JSA の各専門調査からは、パイヨンの創成期はヒンドゥー(ヴィシュヌ)寺院であって、その後、仏教、ヒンドゥーと宗旨が変更されたと考えられるが、この可能性を更に吟味すること、そして、各施設、各部位が縮小、増拡、位置の変更などが大胆になされた過程を注意深く追跡することが期待される。

### 註

- 1 H. Park, "Notes on the Character of the Chambers on the Terrace of Bayon Temple And Pilgrimages Made To Them," ARJSA 2001, pp 107-150.

symbolize, famous legendary motifs of the three major religious sects—Siva worship, Vishnu worship, and Buddhism—were incorporated to respond to the wishes of each religious sect. At the same time, the legitimacy and authority of Jayavarman VII's reign were ingeniously expressed.

In regard to the transition of Bayon Temple, we should take notice of the views of Professor C. Jacques, who spent many years studying Khmer inscriptions. However, given the real traces left in the building, we feel inclined to agree to a large extent with Professor J. Dumarçay's four-stage transition theory.

At the present stage of studies by JSA experts, we believe that Bayon was initially created as a Hindu (Visnu) temple, later converted to Buddhism, and then converted back to Hinduism. However, we must further investigate this possibility and carefully track the process through which each of the facilities and parts were boldly scaled down, expanded, and repositioned.

## Notes

- 1 H. Park, "Notes on the Character of the Chambers on the Terrace of Bayon Temple and Pilgrimages Made To Them," *ARJSA* 2001, pp. 107-150.
- 2 H. Park, "Notes on the Reliefs of the Inner Gallery of the Bayon Temple (Supplementary Notes: Reliefs of the Gallery of Banteay Chmar)," *ARJSA* 2003, pp. 141-155.
- 3 T. Narita *et al.*, "Outline of Excavations and Investigations at the Outer Gallery of the Bayon Complex," *ARJSA* 2000, pp. 3-22.
- 4 O. Cunin and E. Uchida, "Contribution of the Magnetic Susceptibility of the Sandstones to the Analysis of Architectural History of Bayon Style Monuments," *ARJSA* 2002, pp. 205-254.

According to Dumarçay's research, it is believed that Bayon achieved its appearance today after additions and modifications were made in four separate stages (Dumarçay/Groslier, 1973). However, C. Jacques presents a different theory from Dumarçay based on his study of inscriptions ("Historical Aspect of the Bayon Temple," Bayon Symposium, 1998).

In particular, Dumarçay's above literature reports not only on the history of studies and restoration at Bayon, but also other details such as the meaning of the monument, construction technologies, the architectural structure of the monument, molding styles, construction procedure, construction period, and excavated artifacts.

PKZ ed.: *The Bayon Temple – The Report of the Polish-Cambodian Archaeological and Preservation Mission* 1990-vol.1, Warsaw, 1999.

- 2 H. Park, "Notes on the Reliefs of the Inner Gallery of the Bayon Temple (Supplementary Notes: Reliefs of the Gallery of Banteay Chmar)," *ARJSA* 2003, pp. 141-155.
  - 3 T. Narita *et al.*, "Outline of Excavations and Investigations at the Outer Gallery of the Bayon Complex," *ARJSA* 2000, pp. 3-22.
  - 4 O. Cunin and E. Uchida, "Contribution of the Magnetic Susceptibility of the Sandstones to the Analysis of Architectural History of Bayon Style Monuments," *ARJSA* 2002, pp. 205-254.
- デュマルセの研究によれば、バイヨンは4期に渡る増築、改築の結果、現在の形態ができあがったと考えられている (J. Dumarçay / Groslier, 1973)。しかしクロード・ジャックは碑文学研究より、デュマルセとは異なる説を展開している ("Historical Aspect of the Bayon Temple," Bayon Symposium, 1998)。
- 特にデュマルセによる上記文献では、バイヨンの調査研究・修復史を含め、遺跡の意味、建造技術、遺跡の建築構成、モールドイングの様式、建設手順、建立年代、出土遺物などについて詳しく報告されている。
- PKZ ed.: *The Bayon Temple – The Report of the Polish-Cambodian Archaeological and Preservation Mission* 1990-vol.1, Warsaw, 1999.

## 1.2 Environmental Preservation

NAKAGAWA Takeshi

There is no doubt that a culture system is born from a certain environment and is maintained by that environment. We can say that mankind has continued to protect and nurture culture at times by receiving the blessing of nature, and at times by confronting and controlling severe environmental conditions. In this respect, the preservation of the environment is essential to conserving cultural heritages in living form. The term "environment" in this sense can be roughly taken to mean the natural environment, culture, and social environment, but these three types of environment are actually fused together, so "environment" here refers to the interconnected concept of environment. Take, for example, the expression "Angkor, the city of water." It expresses the nature and value of the Angkor monuments which flourished by attractively and aesthetically utilizing the abundant natural resource of water. However, at the same time, it also refers to the efforts that were made to overcome climatic constraints and expand agricultural production. In other words, our views of the environment supporting culture are determined on how we interpret the value of a cultural heritage.

### 1. Monitoring and Preservation of the Natural Environment

#### *Climate:*

We are inclined to think that unstable climatic fluctuations of recent years are closely linked to global environment trends, and are a problem which cannot be solved by Cambodia or Angkor alone. However, the relationship between the movements and deterioration trends of monument buildings and climatic fluctuations are recently garnering widespread attention. Additionally, basic weather data are extremely important to the conservation of water and forest environments. The fact that a local governmental institution in Siem Reap has begun to disclose weather data is a welcome development, but weather conditions greatly differ between Siem Reap city and the Angkor monument area. Also, since the accumulation of weather data over many years is vital, weather data should be collected from at least three locations (e.g., Angkor Wat, Angkor Thom, Banteay Srei, etc.) under the leadership of APSARA, without depending on foreign teams engaged in each of the monuments.

#### *Water:*

The water environment of the Angkor monuments is roughly comprised of rainwater, surface water from Siem Reap River and other rivers, pooled water of the West Baray and Lake Tonle Sap, and groundwater, such as in wells. However, it is receiving serious damage from today's rapid development of the city, the increase in population and number of tourists, and changes in lifestyles and industries. In regard to urban

## 1.2 環境保全

中川武

一つの文化の体系は一定の環境の中から生まれ、その環境によって維持されてきたことは間違いがない。ある場合は環境からの恵みにより、またある場合はたたかいによって厳しい環境を制御して、文化を守り、育んできたといえる。その意味で文化遺産を生きたかたちで保存するためには、その背景である環境の護持が不可欠である。そしてこの場合の環境の意味は、大まかに自然、文化、社会的環境に分けられるが、実際には、それらが融合し、相互に関連した概念としての環境である。たとえば、“水の都 アンコール”という言葉がある。これは、水という豊かな天然資源を景観的、美的に活用することにより開花したアンコール遺跡の性格や価値を表していると同時に、気象的制約を克服して農耕生産を発展させた努力も意味している。つまり文化遺産の価値のどこに注目するかにより、その背景としての環境への視座も決まってくるといえよう。

### 1. 自然環境の保全とそのモニタリング

#### 気象:

近年の気象の不安定な変動は地球環境の動向と結びついており、カンボジアやアンコールだけではどうにもならない問題と思いがちである。しかし、遺跡建造物の挙動や劣化傾向と気象の変動関係は、近年特に重大な関心が寄せられている。また、水と森環境の保全にとって気象の基礎データは極めて重要である。近年シェムリアップ地方政府機関が気象データを発表し始めたことは喜ばしいが、シェムリアップ市内とアンコール遺跡地区は気象条件にかなりの差がある。気象データは長年の蓄積が生命であるので、各遺跡を担当する外国チームに頼るのではなく、最低限3ヶ所(たとえば、アンコール・ワット、アンコール・トム、バンテアイ・スレイ等)の気象データの収集をアプサラの責任のもとに続けるべきであろう。

#### 水:

アンコール遺跡の水環境は、大別して雨水、シェムリアップ川などの表流水、西バライ、トンレサップ湖などの滞留水、井戸水等の地下水からなる。現在の急激な市街地の発展と、人口・観光客の増加、生活スタイルと産業の変化などにより、アンコールの水環境は深刻な被害を受けている。現在、市街地については、JICA チームや政府によって対策が考えられているが、遺跡地区についてはこれからである。たとえば、クーレン山域から流れる

development, a JICA team and the Cambodian government are presently in the process of preparing countermeasures, but the monument areas have yet to be addressed. For example, it is necessary to study how rainwater flowing from the Mount Kulen region fluctuates when it reaches rural villages, the monument areas, the city, and the mouth of Lake Tonle Sap. Detailed data must be collected on the seasonal fluctuations in the water level of ponds, moats, barays, and the vast numbers of wells, and the water environment of the entire Siem Reap and Angkor region must be structurally understood based on that data. It is also important to engage the cooperation of residents to discover and learn about traditional wisdom concerning water use. For example, this may involve collecting data on the amount of rainwater in Bayon or other monuments that seeps into the ground. This data should then be analyzed in relation to the composition of the water environment of the entire area, and used to address the conservation and restoration of Bayon's unique wastewater facility. The cause and effect of utilizing great amounts of well water in large hotels and the structural stability of the ground under the monuments cannot be easily established. Additionally, although the cause and effect of the conservation of forests, agriculture, and the urban landscape and the conservation of the traditional water environment can be understood at the commonsense level, it is similarly difficult to say for certain. Comprehensive monitoring of the water environment is a significant means of analyzing such relationships.

#### *Forests:*

According to JSA botanists, a large part of the royal city of Angkor Thom is occupied by secondary virgin forests. Even so, there are surprisingly few small animals beside monkeys. Leaving that aside, however, the surrounding forests are an indispensable part of the appearance and scenic attraction of the Angkor monuments. This makes us wonder, then, what it was like during the old Angkor era. In addition to the stone temple, it is believed that wooden dwellings existed inside Angkor Thom. Therefore, the virgin forests we see today probably did not exist in the same way. Nevertheless, reliefs at Angkor Wat and the galleries of Bayon show images abound with trees and forests, so it would be safe to assume that forests were also familiar and essential to the Angkor era.

As represented by Ta Prohm temple, the appearance of massive tree roots tangled around monuments looks like a stifling battle between the man-made and the natural, and is considered one of the enticements of the Angkor monuments. However, the giant trees of Angkor are unexpectedly weak. As they grow, the core becomes hollow, causing the trees to fall easily in a thunderstorm, or their branches to break from their own weight. From the perspective of monument protection, giant trees near the monuments are extremely

雨水量が、農村地区、遺跡地区、市街地、トンレサンプ湖の入口でどのように変動するのか。沐浴地、環濠、バライ、膨大な数の井戸の水位に関して、季節的変動のデータを細かく収集し、シェムリアップ・アンコール地域全体の水環境について、構造的に、データとして把握する必要がある。また、水の活用に関する伝統的な知恵を住民とともに発掘し、学び合うことも大切であろう。各遺跡、たとえばバイヨンに降る雨水のうち、地中にしみ入る水量はどれだけなのかをデータとして把握する。このデータを地区全体の水環境の構造の中で検討し、バイヨンのオリジナルな排水施設の保存と修復について考えなければならない。大型ホテルで井戸水を大量に使用することと、遺跡の地下構造の安定性の因果は簡単に決定することはできない。また、森林、農業、都市景観の保全と伝統的な水環境の保全の因果も常識的には理解されるが、決定することは難しい。総合的な水環境のモニタリングはそれらの関係について考察するための重要な手段である。

#### *森:*

アンコール・トム of 城内の大部分は、JSA の植物学者によれば、第二次原生林化しているとのことである。それにしても、猿以外の小動物が少ないのがかえって驚きであるが、それはさておきアンコール遺跡の佇みや景観にとって、周辺の森はなくてはならないものになっている。それでは、かつてのアンコール時代はどうだったのだろうか。アンコール・トムの中は、石造の寺院以外にも、木造の住居等があったと考えられているので、今のような原生林というわけにはいかないのかもしれない。しかし、アンコール・ワットやバイヨン回廊のレリーフを見ると、樹木や森の豊かな表現が随所に見られる。アンコール時代も森は馴染み深く、不可欠なものであったと考えてよさそうである。

タ・プローム寺院に代表されるように、遺跡にからまる巨木の根は、人工と自然の息づまる格闘のように見え、アンコール遺跡の魅力の一つとなっている。しかし、アンコールの巨木は意外と脆い。成長すると芯の部分が空洞化し、雷で簡単に倒れたり、枝が自重で落下したりするので、遺跡近傍の巨木は遺跡の保護の上で極めて危険な代物なのである。かといって取り除きも容易ではなく、森林保護の面からも政府の許可と慎重な技術が必要になる。この問題も含めて、森を保護するためには、遺跡周辺の森への住民の立ち入りをただ禁止するだけではなく、アンコール時代のレリーフにある

dangerous. Yet, they cannot be easily removed, and require governmental permission and careful technology from the standpoint of forest conservation. To address this problem as well as to protect the forests, it is not sufficient to merely prohibit local residents from entering the forests surrounding the monuments. Most important is to restore the harmonious co-existence of residents and the forests as depicted in the reliefs of the Angkor era. Residents can contribute to the conservation of monuments by fostering and protecting the forests.

## 2. Monitoring and Preservation of the Cultural Environment

### *Religious Belief:*

The seated image of Buddha, which is the principal deity image of the early Bayon era, has been repaired and ensconced in the modern temple located to the east of the Royal Plaza of Angkor Thom, and is not found in Bayon today. However, Angkor Wat and Bayon are apparently significant places of spiritual worship for people not only from the vicinity of Angkor Thom, but also from throughout Cambodia. In other words, Bayon as well as most of the other Angkor monuments are living places of worship in two respects that are expected to offer a quiet space for worship.

### *Intangible Cultural Heritages:*

The apsara dance is one of the representative intangible cultural heritages of Angkor. When performed at Angkor Wat and the Terrace of the Elephants in Angkor Thom, it produces a most splendid atmosphere. In a way, this is to be expected, since social life revolved around the temple during the Angkor era, and the temple served as the stage for culture and the arts. It would be ideal to actively maximize this traditional function of monuments and to utilize them as places to stage performances of shadow plays, music, and other small-scale intangible cultural heritages.

### *Cultural Tourism:*

The Angkor monuments compel visitors to dialogue with the inner self. This is perhaps because of the liberating feeling of blending into the far sky and vast forest. It may also come from the mystic aura emanating from the reliefs, structural technologies, and the appearance of the buildings. Bayon, in particular, is a monument having the potential to attract tourists as a place to learn about the findings of academic surveys and studies related to such mysteries. Conservation of the cultural environment should focus on harmonizing the reverent atmosphere of the monuments as places of quiet worship with cultural tourism aiming to offer traditional performances and provide academic information to enhance people's understanding of the monuments.

ような、住民と森の共生関係の回復が何よりも必要であろう。森を生かし、守ることが遺跡保存への住民参加である。

## 2. 文化環境の保全とそのモニタリング

### 信仰:

バイヨン創生期の本尊である仏陀座像は、修理されてアンコール・トム王宮広場東の近代寺院に安置されていて、現在バイヨンにはない。しかし、アンコール・ワットやバイヨンは、周辺地域だけでなく、カンボジア全体の精霊信仰にとっても重要な場所であるらしい。つまり、バイヨンだけでなく、ほとんど全てのアンコール遺跡は、二重の意味で生きた信仰の場であり、静かな祈りの空間が期待されている。

### 無形文化遺産:

アンコールの代表的な無形文化遺産であるアプサラダンスは、アンコール・ワットやアンコール・トムの象のテラスなどで演じられる時、最も素晴らしい雰囲気が生まれる。アンコール時代は、寺院を中心に社会生活が営まれ、そこが文化・芸術の舞台であったからある意味で当然のことかもしれない。このような伝統的性格を積極的に活用して、影絵や音楽などの小さな無形文化遺産の活躍の場として遺跡が活用されることが望ましい。

### 文化観光:

アンコール遺跡には、高い空と広大な森へ溶け込んでいくような開放感と、レリーフや造営技術や建築の佇まいなどが謎に包まれているように見えることからくるものであろうが、自分自身の内面との対話を強いてくるものがある。特にバイヨンはそれらの謎と関連した学術調査研究の成果を学び、知ることが、観光の目的となり得る遺跡である。静かな祈りの場としての敬虔な雰囲気と、遺跡への理解を深化させるための、伝統的パフォーマンスと学術情報の提供からなる文化ツーリズムを調和させることが文化環境保全の目標となろう。

## 3. バイヨン寺院、アンコール・トム、アンコール遺跡全体の連関性と遺跡景観の保全

アンコール・ワットとバイヨンはかなり性格の異なる遺跡である。しかし、アンコール遺跡としての統合的なイメージが損なわれてしまえば、その個々の異質性の意義も失われてしまうことを忘れるべきではない。統合的なイメージは、基本的な保存の理念と直結している。その理念による全ての行動の結果が、遺跡景観として現象する。アンコール遺跡と

### 3. The Relationship between the Bayon Temple, Angkor Thom, and the Angkor Monuments area

Angkor Wat and Bayon are monuments with different characteristics. However, we must remember that their differences will lose all significance if the cohesive image of the Angkor monuments is lost. The cohesive image is directly linked to the basic principle of conservation, and the results of all activities based on this principle are embodied in the appearance of the monuments. This is because individual studies and restoration work exist to collectively provide answers and contribute to the common questions of what the Angkor monuments are, and why they must be conserved. Even if specific restoration methods differ according to each site, the monuments would still display a common image in regard to temporary site plans, construction operations, and the policies of environmental conservation after restoration. Underlying it all is perhaps the feeling of love and respect for the traditional culture of the Angkor monuments, and the explicit expression of that feeling materializes as the appearance of the monuments.

は何であり、その何を、何のために保存するのか、という共通の課題に、答えを出し、貢献するために、個々の研究や修復工事があるからである。個々の現場によって具体的な修復方法等が異なったとしても、現場の仮設計画や工事運営や修復後の環境保全の佇まいに同一の志向性のイメージが認められるだろう。それは多分アンコール遺跡の伝統文化への敬愛であり、そのあらわれが遺跡景観だからである。

### 1.3 The Dimensional Plan of the Bayon Temple -A Comparison between the Bayon Northern Library and Southern Library-

MIZOGUCHI Akinori

#### 1. Introduction

The question regarding the type of planning technique that was employed in planning Khmer architectures is the subject of a massive research encompassing the characteristics of the measurement system and construction technologies of those times. The process of examining the concepts and architectural plans of monuments at the time of their construction often tends to be considered an unessential aspect to the restoration activities of cultural properties. However, the elucidation of a monument's margin of construction errors and distortions caused by aging could be pivotal to carrying out restoration activities on individual monuments starting from their present state of ruin. That is, if such elucidation could shed light on the target appearance as well as the planned and conceptual appearance of a monument, then there is nothing that could provide a greater clue for the formulation of a basic restoration policy.

To understand the actual conditions of past architectural plans, it is first of all necessary to gain an understanding of the construction measure of that time. However, to investigate the construction measure, a certain level of knowledge concerning the general conditions of architectural plans is required. It would be difficult to understand the construction measure without first gaining an accurate grasp of what the architectural plans were like in those days. At the same time, it would be difficult to deduce past architectural plans without a clear understanding of the actual length of the construction measure. Therefore, we hardly had any clues to rely on, and the only research method we possessed was to apply various possibilities and hypotheses to the monuments and develop in increasingly substantial argument by examining each. This is clearly the case even when dealing with the research history of the construction measure, which will be discussed later. We must bear in mind that the results of these trials and errors in studying the research history are the only clues, albeit negative ones. However, the difficult challenges notwithstanding, this study topic is undoubtedly the latest significant issue in the restoration of cultural properties.

The exploration of the construction measure which was employed to build the Bayon Temple is a particularly complex issue. As is widely known, the numerous architectural structures composing the Bayon Temple are not only severely ruined, but many parts of the stone elements are unshaped or display traces indicative of hasty work. These conditions make it extremely difficult to seek a precise estimation of the construction measure from the actual dimensions of the monument. This problem is also a conspicuous feature of the two libraries discussed in this chapter.

### 1.3 バイヨン寺院の寸法計画 -バイヨン北経蔵と南経蔵の 比較を中心に-

溝口明則

#### 1. はじめに

クメール建築がどのような計画方法に基づいて計画されたか、という問題は、当時の度制制度や建造技術の特質を包含する壮大な研究対象である。文化財の修復事業にとって、遺構が造営される当時の構想や建築計画を考察するという問題は、ともすれば迂遠な問題であるかのように受け止められることも多い。しかし、個々の遺跡の荒廃した現状から出発して修復事業を進めていくとき、建立当初の施工誤差や経年変化による変形の背後に、多少なりとも、その遺跡のめざされた姿、計画上、理念上の姿を理解することが出来るとすれば、修復の基本方針を策定するに当たって、これほど大きな手がかりはないといつてよい。

往時の建築計画の実相を理解するためには、まず、当時の造営尺度を理解する必要があるが、造営尺度を探究するためには、ある程度建築計画の様相が理解できることが不可欠である。建築計画がどのようなものであったかという理解なしに、造営尺度を理解することは困難であるが、しかし同時に、造営尺度の実長に対する確かな理解なしに、建築計画を推定してゆくことも困難である。したがって私たちは、ほとんど何の手がかりもないまま、さまざまな可能性や仮説を遺構に当てはめ、検証を繰り返すことを通じて、より確かな議論として鍛えていく以外に、研究の方法を持ち合わせていない。これは後に述べる造営尺度の研究史をみても明らかである。私たちはこの研究史の試行錯誤の成果だけが、反証的な手がかりであることを理解しておかなければならない。しかし、このように困難な研究であっても、文化財の修復にとって最優先の研究課題であることに違いはない。

バイヨン寺院を生み出した造営尺度を探究するとき、この問題は、より複雑な様相を呈する。周知のように、バイヨン寺院を構成する夥しい建築遺構は、著しく荒廃しているばかりか、各部に石材の未整形な部位や、拙速に整形されたと思われる痕跡を残しており、実測寸法値から精度の高い造営尺度を求めるという作業をひどく困難にしている。これは、本節で扱う2つの経蔵にとっても顕著な特徴である。

本節は、このような特質を持つバイヨン寺院の2つの経蔵を対象に、造営尺度の推定値を示すことを目的とする。今後進められるであろうバイヨン寺院

This study is intended to present estimated values of the construction measure of the two libraries of the Bayon that are characterized by the above conditions. We hope it will provide a significant clue to future restoration work on the various parts of the Bayon Temple. Numerical references we utilized for the analysis of the Northern Library are based on numerical data obtained after JSA's restoration work on the Northern Library, and that which we utilized for the analysis of the Southern Library are based on current measurement data obtained through a JSA-APSARA joint study.

As previously mentioned, the restoration work on the Northern Library has been completed, but the current state of the two libraries does not satisfy the conditions required to gain an understanding of their systematic dimensional plans. Before conducting further analyses of the libraries, other monuments should perhaps be addressed in search of substantial clues. Therefore, this paper will introduce the results of a survey conducted by the JSA Architecture Unit on the dimensional plan of the complexes of Banteay Samre Temple and Thommanon Temple, and use those results as clues to analyzing the two libraries of the Bayon.

## 2. Characteristics of the construction measure

### 2.1 History of studies on the Khmer measurement

At the end of the 19th century, academic researches into Khmer monuments were begun by French researchers. Until now, noteworthy results have been accumulated, especially such as the chronology of monuments which is elucidated through the decipherment of inscriptions and the studies of art styles, and the discovery of construction techniques which is revealed through restoration works. Even so, in regard to aspects concerning the dimensional plan and design technology of Khmer architecture, the ancient measure remained undiscovered. Except for an attempt to estimate the standard measurement by deciphering inscriptions, the studies produced little result. In recent years, however, certain discussions have gradually emerged in this field, and each of the studies that are now being conducted is focused on revealing the module of the construction measure based on data obtained from actual measurements of monuments.

Within the history of studies in this field, one of the commonly held perceptions was that the unit of measurement employed by the Khmer dynasty was probably similar in length to the *hasta* or *hatta* observed throughout Indian culture. The "*hasta*" and "*hat*" found in Khmer inscriptions and the presence of "*hatta*" in Cambodia today provide the basis for this estimation.

*Hatta* is said to refer to the portion "from the tip of the middle finger to the elbow," with the hand open and extended. It is a unit of length based on the human body, and corresponds to the *mḥ* of ancient Egypt, the *cubit* of Mesopotamia, and the *hasta* of ancient India. However, as will be discussed later, it must be noted that an anatomy-based measure which allows

各部の修復工事にとって、重要な手がかりとなることを期待している。分析に際して用いる数値資料は、北経蔵についてはJSAによる修復工事竣工後の数値資料を、南経蔵については、JSAとAPSARAの共同調査として行われた、現状の実測数値資料に基づいている。

しかし述べたように、北経蔵では修復工事が終了しているとはいえ、2つの経蔵の現状は、整然とした寸法計画を理解するための条件を満たしていない。経蔵の分析を進めるためには、他の遺構に、確かな手がかりを求めるところから始めるべきであろう。このため本章では、まず、JSA建築班によって進められたバンテアイ・サムレ寺院とトマノン寺院の伽藍の寸法計画の分析結果を紹介し、これを手がかりとしてバイヨン寺院の2つの経蔵の分析を進めることにしたい。

## 2. 造営尺度の特質

### 2.1 クメールの尺度の研究史

19世紀末からフランス人研究者らによって始められたクメール建築遺構の学術調査は、特に碑文の解読や美術史的な様式調査による遺構の編年、修復工事などを契機とした構築技術の解明など、注目に値する多くの研究成果を蓄積してきた。しかしクメール建築の寸法計画、設計技術の様相については、いぜんとして往時のものさしが未発見であることもあって、碑文の解読から単位寸法を推定する試みなどを除き、見るべき成果に乏しかった。しかし最近になって、この分野にもまとまった論考が現われつつある。いずれの研究も、遺構の実測調査資料に基づいて、造営尺度の実長を探索しようとするものである。

クメール王国の度制単位は、インド文化圏の各所で見いだされる *hasta* ないし *hatta* に近い長さを持っていたであろうことは、研究史において共有された認識である。これはクメール碑文に見いだされる "*hasta*" や "*hat*" とともに、現在のカンボジアに伝わる「ハッタ」の存在から推定されてきたものである。

ハッタは掌を開いてまっすぐ伸ばしたときの「中指の先から肘の先まで」を意味すると伝えられており、古代エジプトのメフ *mḥ*、メソポタミアのキュービット *cubit*、そして古代インドのハスタ *hasta* に共通する、人体に起源を持つ長さの単位である。とはいえ後述するように、個体差を許容する人体に依存するものさしと、国家によって管理される公定尺は、長さの基準として異質なものである点を明記しておかなければならない。

また、このほかに「両腕を広げた長さ」、すなわち

individual differences and an official, nationally-controlled measure are two completely different standards of length.

On the other hand, the existence of a unit of length, called "vyama" or "a span of the extended arm," has been known and was discussed sometimes in the field of epigraphy. Louis Finot interpreted 1 vyama as 1.6 m<sup>1</sup> or 1.7 m,<sup>2</sup> while George Cœdès suggested that 1 vyama is equals to around 2 m and corresponds to 4 *hat*.<sup>3</sup> He also mentioned that 1 hasta equals approximately 0.45 m.<sup>4</sup>

Both arguments were developed in the first half of the 20th century, and they are undeniably noteworthy precedent studies in terms of the fact that they take into account the meticulous decipherment of inscriptions, the knowledge of the measure used in Cambodia today, as well as the conversion relationship with the *sok* and *wa* of Thailand. However, at the time, those arguments were not sufficiently verified through measurement surveys of monuments.<sup>5</sup>

Eleanor Mannikka performed a dimensional analysis of Angkor Wat, and derived a construction measure of 436 mm. This theory is also interesting—it was analyzed based on the belief that design plans were created according to special numbers related to ancient astronomy. The relevance of this type of argument is, however, difficult to judge. As it accepts a certain form of numerology, it retains a problem which must be addressed with special discretion in the process of numerical analyses. In the future, a thorough examination must be carried out to verify whether design techniques could have received numerological influences originating in ancient astronomy and astrology, and whether they can be justified as effective design methods. At this stage, however, the construction measure of 436 mm is not completely acceptable.<sup>6</sup>

In his concise report on a dimensional analysis limited to the central area of Angkor Wat, Sébastien Saur estimates that the unit of a measurement system called *hat* is 28.753 cm and that a module is 25 cm. However, his argument only offers abrupt conclusions, and fails to present any clear reasoning. In order to clarify the relevance of his estimated measure, he must present a restorative account of his designing procedure and proof of its relevance. Even if the standard measurement that was estimated through an arbitrary study of certain architectural parts is somehow fitting, that alone is not sufficient as a persuasive basis of argument. Yet to begin with, Saur's argument does not even indicate which architectural part actually matched his theory.<sup>7</sup> As such, it fails to satisfy the level that can be acknowledged as an analytical study of construction measures.

Another analysis of Angkor Wat was conducted by Takeshi Tsuchiya, who derived a module of 485 mm. His argument does not pursue construction measures that strictly comply with a certain measurement system, however, but is limited to the unit of length that emerges secondary to the designing method. Tsuchiya therefore makes no mention of the measure that gives origin to the module, and for this reason, his argument that his estimated module is in fact the module, is not a

「尋」に対応するものとして vyama という単位の存在が知られており、碑文研究において度々論議の対象となってきた。レイ・フィノは 1 vyama = 1.6 m<sup>1</sup>、あるいは 1 vyama = 1.7 m<sup>2</sup> とする解釈を述べており、ジョルジュ・セデスは 1 vyama = 約 2 m、1 vyama = 4 *hat* とする解釈<sup>3</sup>、また hasta に関しては 1 hasta = 約 0.45 m<sup>4</sup> とする説を述べている。

いずれの議論も 20 世紀前半に進められたもので、緻密な碑文の解読と現在のカンボジアの尺度の知見、タイの *sok* と *wa* の換算関係などを参考に考えられた議論であり、注目すべき先行研究に違いない。しかし一方、遺構の実測調査などによる検証は、当時十分に進められることがなかった<sup>5</sup>。

エレノア・モニカのアンコール・ワットを対象に進められた寸法分析は、436mm という造営尺度を見いだしている。この議論もまた興味深く、古代天文学に基づいた特別な数値が設計計画を支配していた、という考えにしたがって分析が進められている。しかしこの種の議論の妥当性は、判断の難しいところである。これは一種の数秘術を容認した議論であり、数値分析の過程でもっとも慎重に進めなければならない問題を抱えている。古代の天文学、占星術などに由来する数秘術的な影響を設計技術に想定できるかどうか、そして、実効性のある設計方法として妥当性を持つかどうかという検証は、今後、十分に検討されるべき課題であり、したがって 436mm という造営尺度も、現段階では容認しきれないものである<sup>6</sup>。

セバスチャン・ソーによるアンコール・ワットの中央部に限定した寸法分析の簡単な報告では、度制の単位である *hat* を 28.753cm とし、またモジュールを 25cm としている。しかしこの議論はやや唐突に結論を示すばかりで、明確な論拠を示していない。推定した尺度の妥当性を明示するためには、同時に設計の手順に対する復元的な解読とその妥当性を示す必要がある。建築部位を恣意的に採り上げて推定された単位寸法が適合したとしても、それだけでは積極的な論拠にはならない。しかしこの議論は、適合する建築の部位がどこであったかを示していない<sup>7</sup>。したがって造営尺度の分析研究として認められる水準を満たしていないものである。

同じくアンコール・ワットを対象にした分析で、土屋武による 485mm のモジュールを想定した議論がある。この議論は、厳密には度制に準拠した造営尺度を追求したものではなく、設計方法として 2 次的に現われる単位長に限定して議論したものである。したがってモジュールの起源となる尺度については、一切言及していない。このため、想定されたモジュールがたしかにモジュールであるとする立論が成立

sound argument. In order for Tsuchiya's estimated module to be accepted, he must present the actual length of the measure that serves as the origin of the module, as well as the plan and procedure through which he derived the module.<sup>8</sup>

Takahiko Chubachi extracted a construction measure from a measurement survey of the twelve Prasat Suor Prat towers, and came up with the same 436 mm as Eleanor Mannikka. Chubachi's argument is also interesting, but as is well known, the Prasat Suor Prat towers are incomplete, and do not display their final form. The laterite terraces and wall surfaces were to be trimmed even more and shaped to be smaller toward completion. This means that a straightforward analysis of the construction measure from numeric values obtained from the present state of the towers would necessarily give a somewhat larger construction measure than originally intended. Therefore, the problem with this argument is that it was constrained by the low degree of completion of the targeted monuments, and requires further investigation.<sup>9</sup>

Tatsuya Fujita and the author conducted an analytical study of the construction measure of the Northern Library of the Bayon. Their study was restricted by certain limitations of measurement surveys at the time, and their argument goes no further than to point out that their estimated standard measurement of about 1245 mm corresponds to three times the length of 400 mm – 450 mm, which is considered the most likely construction measure. Restricted by the fact that the monument was not formed completely, their argument had become highly circumspect, and as a result, they failed to present a persuasive argument concerning the construction measure.<sup>10</sup>

In addition to the above, discussions have also been presented which attempted to seek the golden ratio in the plan of Angkor Wat. However, such arguments are completely irrelevant to the restoration study of construction measures and planning methods.

As seen above, there are a variety of arguments and conclusions concerning the construction measure of Khmer architecture. It is interesting to note that, excluding a few, they all estimate the actual length of the construction measure as falling somewhere between 400 mm and 500 mm. We believe this coincidence is grounded in the common understanding that the *hasta* or *hat* of the Khmer era has its origin in the *hasta* of ancient India.

## 2.2 Characteristics of the measure of ancient architectural technology

The system of weights and measures established by autocratic nations must meet an absolute requirement to go beyond individual bodily differences and provide a universal and transcendental standard. In other words, whatever the length, the actual length of a measure established as a system of measurement must principally be a single length. The measure defined by an autocratic king must be the only absolute standard which governs all (measurements of) lengths, and no other standard

していない。想定されたモジュールの妥当性を認めるためには、起源となる尺度の実長と、ここからモジュールが生成される計画手順が示される必要がある<sup>8</sup>。

また、プラサート・スープラの12基の塔の実測調査から造営尺度を抽出した仲鉢貴彦の議論は、結果としてエレノア・モニカの説と同じ436mmという値を結論としている。この議論も興味深い、周知のように、プラサート・スープラは最終的な完成形に到達していない。ラテライトの基壇や壁面は、完成に向けて一段と削ぎ落とされ、より小さく整形されるはずであった。したがって現状から得られた数値から素直に造営尺度を分析すれば、どうしても大きめの造営尺度が現われることになる。この議論は、対象とした遺構の完成度の低さに制約された問題を抱えており、さらなる検証が必要である<sup>9</sup>。

パイヨン北経蔵を対象にした造営尺度の分析研究として、溝口明則、藤田達哉による議論がある。この議論は、当時の実測調査の限界を抱えており、想定された1245mm程の単位寸法が、造営尺度として可能性の高い400mm～450mmの3倍の長さに相当することを指摘するに留まっている。遺構の整形が十分でないことに制約を受け、慎重な議論となった結果、造営尺度について積極的な議論を展開できていない<sup>10</sup>。

この他にもアンコール・ワットの平面図に黄金比を見出そうとした論考などが発表されているが、この種の議論は、造営尺度や計画方法を復元的に研究する立場にとっては、まったく意味を持たない議論である。

クメール建築の造営尺度に関する議論は、以上のように多様な結論が認められるが、一部の議論を除き、いずれも実長として400mm～500mmの範囲に収まる造営尺度を想定している点が興味深い。この背景は、クメール時代の *hasta* ないし *hat* が古代インドの *hasta* に起源を持つという共通の認識があるためだと思われる。

## 2.2 古代的建築技術の尺度の特質

専制国家の制定する度量衡制度は、個々の身体の個体差を超えた、普遍的で超越的な規準であることが絶対の条件である。つまり度制として制定されたものさしの実長は、どのような長さであれ、理念として単一の長さを持つ。専制王権の支配下にある尺度は、あらゆる長さ（の計測）を支配するスタンダードとして、唯一絶対の存在であり、これ以外に基準となるべきものは存在しない。これは税の徴収システムの基礎を形成するものであるから、量制、衡制

can exist. Since the systems of weights and measures formed the basis of the tax collection system, they were extremely important to the kingship, and they necessarily had to continue to be an unalterable standard. It is reasonable to assume that the construction measure of same-era monuments, at the least, is an identical length in principle.

Additionally, the modality of ancient design technologies, which largely hinges on the construction measure, generally shows a marked dependency on a measurement planning system by whole numbers (hereafter called "whole number system"). In this system, the size and lengths of an entire building and its parts are controlled by the integral multiple of the numerical value which serves as the unit of measurement. It is a dimensional plan that is commonly being discovered in ancient architecture throughout the world.

The operation of controlling lengths and the process of measurement are in a sense characterized by the manipulation of numbers. The essence of a measure is its ability to convert various lengths into numerals and to replace them into a form that can be manipulated numerically. It is also the only method capable of reproducing lengths and sizes. The basic characteristic of a measure, therefore, is that it is governed by numerical attributes.

The "whole number system" is a planning method that best shows how the dimensional plan was completely dependent on numerical attributes. Numbers in the ancient world were exclusively synonymous with integers. This was an ancient feature of the numeric culture dominated by Pythagoras and Plato. Decimals and fractions as understood by us modern researchers were beyond their concept of numbers. Therefore, the act of controlling lengths by numbers meant depending on the convenience of integers in ancient times. Even numeric control, which seemingly utilized fractions, was essentially the act of dividing something based on integers, and not a mathematical manipulation. This act of dividing is unrelated to the concept of fractions, and presents the modality of technologies before the existence of arithmetic. The mathematical concepts of fractions and divisions should instead be considered to have originated from this type of numerical manipulation. The essential difference between fractions and the procedure of dividing is whether the object to be divided is a number or a physical entity. The dividing of numbers, or division, is simply an operation which metaphorically expresses the concept of dividing.

The "positional notation system," which forms the core of the decimal concept, is unrelated to the measurement system hierarchy. For instance, in the ancient Indian measurement system, the multiplication of 8 is regarded as a unit, and the units seem to keep changing for each multiplication of 8. However, actually, it is a chain of conversions made between units of lengths that were conceptually established, and not a notation system of numbers. It also coincides with the fact that the ancient Indian notation system of numbers used base 10. What we must note here is the complex characteristic of the measure.

とともに専制王権にとってきわめて重要なものであり、不変の基準であり続けなければならなかった。したがって少なくとも同時代の遺構の造営尺度は、原則として同一の実長をもつという前提が成り立つであろう。

また、造営尺度に大きく依存する古代的設計技術の様相は、完数制に依存する顕著な傾向を見せることが通例である。「完数制」は単位となる寸法値の整数倍をもって、建物の全体や各部の大きさ、長さを制御する方法であり、世界各地の古代建築に共通して発見されつつある寸法計画である。

長さを制御する操作、計測の過程は、一面で数の操作という性格を持っている。尺度の本質は、多様な長さを数に変換し、数的に操作できる対象に置き換えることである。これはまた、長さや大きさに確実な再現性を与えることのできる唯一の方法である。したがって尺度は、数の特質に支配されるという基本的な特質を付随させる。

完数制は、寸法計画が数の特質に全面的に依存したものであることを、もっともよく物語る計画方法である。古代世界における数は、例外なく整数だけを意味する。これはピタゴラスやプラトンも支配した数文化の古代的特質であり、私たち現代の研究者が理解している少数や分数は、彼らの数の概念の外にあった。したがって数によって長さを制御するという行為は、古代においては、整数の利便性に依存することを意味する。一見して分数を用いたとみえる制御においても、本質は整数を手がかりとした対象の分割という行為であり、数学的な操作ではない。この行為は、分数という概念とは無関係なもので、算術以前の技術の様相を示すものである。かえって分数や除法という数学の概念が、このような操作を起源として現われたものと考えなければならない。分数と分割の操作との本質的な相違は、分割の対象が数であるのか実体であるのかという相違であり、数の分割、つまり除法は演算に過ぎず、分割の概念を比喩としたものに過ぎないのである。

また、少数の概念の中心を形成する「位取り表記法」は、度制の階梯とは関係のないものである。たとえば古代インドの度制は8倍を1つの単位として、つぎつぎに単位を変えて行くように見えるが、実態は、観念的に構築された、長さの単位 (unit) の間に取り交わされた換算の連鎖であり、数の進法ではない。したがってこれは、古代インドの数の進法が10進法であることと矛盾しない。私たちが注意しなければならないのは、ここにみられる尺度の複合的性格、つまり場合によって度制の階梯が計画を支配し、また別な場面では、数の進法が計画を支配すること

In other words, the hierarchy of a measurement system may at times govern a plan, while in other contexts the notation system of numbers may govern a plan. It is important to be aware of such complex problems that exist behind the whole number system.

Based on the above preliminary discussion, the following two points can provide clues as preconditions for dimensional analyses.

1. The construction measure is a standard length which conforms to a measurement system. It is controlled by the kingship, and philosophically maintains a single length. Therefore, in principle, it can be considered a standard length that was commonly applied to monuments built in the same era.
2. As an essential characteristic of the measure, lengths were practically controlled using numbers, and the numbers that were used were principally restricted to integers. Elucidating dimensional plans which utilized integral multiples of the standard measurement could be considered a universal technique which can provide clues to the analysis of monuments.

### 3. Construction measures of Thommanon Temple and Banteay Samre Temple

#### 3.1 Overview of the studies

Studies on the Thommanon and Banteay Samre Temples were conducted as part of JSA's surveys and research on Khmer architecture, and especially as a preliminary research to the investigation of the construction measure of the Angkor Wat period.

The on-site measurement survey was conducted over a month and a half long duration from the middle of July to August in the summer of 2002. Thereafter until the summer of 2004, supplementary measurement surveys were conducted and data were inspected on the occasion of each JSA mission. Numerical data were accumulated through measurement surveys which involved measuring several hundred points and positions established throughout the monuments using Total Stations. They were then plotted using CAD software to create an accurate diagram.

#### 3.2 Thommanon Temple and Banteay Samre Temple

Thommanon Temple was built immediately preceding the construction of Angkor Wat. Banteay Samre Temple is a temple monument considered to have been built at the end of the same period. Both are small-scale temples in the Angkor region. Although they are monuments of the same era, their construction period seems to differ by a half century at the longest. They both have a similar central sanctuary (tower) with a connecting pavilion on the east side. They are located in almost the same region, and when comparing Thommanon Temple and the central part of Banteay Samre Temple excluding the outer gallery, they are extremely similar in scale as well. On account of these

がありうる、ということである。完数制の背後には、以上のような複雑な問題が控えていることを承知しておかなければならない。

以上の予備的考察から、寸法分析の前提として、以下の2点を手がかりにすることができる。

1. 造営尺度は度制に準拠し王権によって管理された長さのスタンダードであり、理念として単一の長さを持つものである。したがって、原則として同時代の遺構に共通して用いられた長さの基準と考えることができる。
2. 尺度の本質的な特質として、長さを制御する場面は、実質的に数を用いた操作であり、その際、用いられた数は、原則として整数に限られる。単位寸法の整数倍を用いる寸法計画は、普遍的技法として遺構分析の手がかりになりうるのである。

### 3. トマノン寺院とバンテアイ・サムレ寺院の造営尺度

#### 3.1 調査の概要

トマノン寺院とバンテアイ・サムレ寺院は、JSAのクメール建築調査研究の一環として行われたもので、とくにアンコール・ワット期の造営尺度の探求の前段的研究として進められた。

現地実測調査は2002年の夏、7月半ばから8月に至る1ヶ月半を以て行われた。以後2004年の夏まで、JSA ミッションの機会ごとに、実測調査の補足、資料の点検を行ってきた。実測調査は光波測定器を用いて遺構各部に設定した数百点のポイント位置を計測し、CADソフト上にプロットし精確な図面を作成する、という方法で数値資料を蓄積した。

#### 3.2 トマノン寺院とバンテアイ・サムレ寺院

トマノン寺院はアンコール・ワット建立の直前に建立され、バンテアイ・サムレ寺院は同期の末期に建立されたと考えられている寺院遺構で、いずれもAngkor地域では小規模な寺院である。同時代の遺構であるとともに、建立時期は、最長半世紀近い開きも予想されている。またよく似た中央祠堂（塔）とこの東に付属する拝殿を持っている。ほぼ同一地域にあり、バンテアイ・サムレ寺院の外回廊を除く中央部で比較すれば、寺院規模もきわめてよく似ている。このような特徴に注目すれば、両遺構は、造営尺度の探求にとって相互にもっとも比較検討のしやすい遺構と判断される。

具体的な遺構を対象に、ここから造営尺度や設計技法を復元的に採り上げようとする研究は、単一の遺構を対象に分析を進めるだけでは限界がある。と

characteristics, it is easy to mutually compare and analyze the two monuments in search of the construction measure.

In restoration studies aiming to elucidate the construction measure and design techniques of a specific monument, there is a limit to how much information can be obtained simply by analyzing a single monument. Especially when the research theme is the elucidation of the construction measure, a comparison of multiple monuments is certainly an essential method for achieving a common perception in this type of research.

Thommanon Temple is a rectangular complex that is long in the east-west direction. The east side is its main façade. It has a simplistic structure with *gopura* on the east and west sides and a enclosure wall surrounding the complex. Only the bottom-most layer of the laterite enclosure wall remains; in particular, the northeast and northwest corners are completely missing. As there are no traces indicating the presence of other buildings in the vicinity of the complex, it is difficult to conjecture the conditions outside the enclosure wall and the boundaries of the temple at the time the complex was constructed. Inside the enclosure wall, there is a central sanctuary (tower, *prasat*) in the center of the complex with a connecting pavilion (*mandapa*) on the east side, and a library in the southeast area.

Banteay Samre Temple is a complex with two concentric galleries, with *gopura* in the four directions of the galleries. As with Thommanon Temple, the buildings inside the inner gallery include a central sanctuary and pavilion in the center of the complex. However, unlike Thommanon, Banteay Samre Temple has two libraries, one in the southeast corner and the other in the northeast corner. Compared to the scale of each of the buildings, the inner side of the inner gallery is narrow and exudes a distinct atmosphere. The reasons for this will be discussed later.

At a glance, the complexes of the two monuments appear to differ greatly in structure and scale, but when the inner gallery of Banteay Samre Temple is compared with Thommanon Temple, it is easy to see that their rectangular outlines and dimensions are very similar. Plans of the complexes shown in Figs. 1.3-1a and on were all drawn on a same scale. The dimensions indicated in Fig. 1.3-1a are values derived from the measurements of the four sides of the complex. Specifically, they are the values of the outer edges of the short elements directly below the platform of the enclosure wall and galleries that come directly into contact with the ground surface and compose the foundation of the building (plinth). The plinth is composed of elements that form the foundation of Khmer architecture, and extends outward from the outer edges of the platform. Various parts could be considered to represent the standard positions of the dimensional plan, but as will be discussed later, numerical data indicates that only some positions are significant, and the most fundamental position is the outline formed by the plinth. Because this outline has the largest value among the measurements of the monument, it is believed to be the source of scale plans and dimensional plans for the other parts.<sup>11</sup> For this rea-

く造営尺度の解明が研究のテーマである場合、複数の遺構を比較し、共通する考え方の抽出を試みることは、おそらくこの種の研究にとって不可欠な方法である。

トマノン寺院は東を正面とする東西に長い矩形の伽藍を持ち、東西にゴープラを配置して周壁で囲んだ簡単な構成の寺院である。ラテライト造の周壁は最下段だけが残し、とくに北東と北西の隅は完全に失われている。伽藍の周辺に施設跡を示す痕跡は見当たらず、建立当初の周壁の外の様相、寺域の四至を知ることは困難である。周壁内は中央祠堂（塔、プラサート）とこの東に接続する拝殿（マンダパ）を中央に配置し、南東に経蔵を配置している。

一方、バンテアイ・サムレ寺院は、二重の回廊を持つ伽藍構成で、各回廊の四面にそれぞれゴープラを配置する。内回廊内部の施設はトマノン寺院と同様に、中央祠堂と拝殿を伽藍の中心に配置するが、経蔵が2つあり、それぞれ南東隅、北東隅に布置されている。各建物の規模に比して内回廊の内部は狭く、独特の雰囲気を持っているが、この原因については後述する。

2つの遺構は、一見して伽藍構成、規模ともに異なるように見えるが、バンテアイ・サムレ寺院の内回廊だけを採り上げてトマノン寺院と比較すると、矩形の輪郭、プロポーションともによく似ていることが判る。Fig. 1.3-1a以下の伽藍平面図は、すべて等尺スケールである。Fig. 1.3-1aに示した実測値は4辺を実測した値を整理したもので、周壁および回廊の基壇の直下にあり、背が低く地表と接している建物底部の部材（plinth、以下「基座」と呼称）の外端の値を示したものである。基座は、クメール建築に通底する部材で、基壇外端の輪郭より一回り大きく外に踏み出している。寸法計画の規準位置を体現する可能性のある部位はさまざまに考えられるが、後述するように、数値資料から有意と見られる位置は限られ、もっとも確かな位置が基座で形成される輪郭である。この輪郭は遺構のなかで最大値を持つため、規模計画や各部寸法計画の起点を形成していると考えられる<sup>11</sup>。このためFig. 1.3-1aでは煩雑を避け、この位置の寸法値だけを明示した。2つの伽藍の類似点を整理すると、以下のようである。

1. トマノン寺院の周壁の外法が区画する東西に長い矩形は、バンテアイ・サムレ寺院の内回廊の外法の輪郭と比較すると、東西幅、南北幅とも、ほぼ同一の寸法値を持っているように見える。南北幅にわずかな相違が見られる点については後述したい。
- 2 周壁および内回廊の輪郭のなかで、2つの寺院

son, we indicated only the dimensions of this position in Fig. 1.3-1a to avoid complications. The similarities of the two complexes can be summarized as follows.

1. The external dimensions of the enclosure wall of Thommanon Temple which demarcates the east-west elongated rectangle appears to have almost the same east-west and north-south widths as the outline of the external dimensions of the inner gallery of Banteay Samre Temple. The slight difference in their north-south widths will be discussed later.
2. Within the outline of the enclosure wall and inner gallery, the central sanctuaries of the two temples appear to occupy almost the same relative position.
3. The scale and layout of each of the buildings are similar, but the scales of the central sanctuary and pavilion bear a particularly close resemblance.

The position of the center of the enclosure wall of Thommanon Temple differs greatly from the position of the reference line that passes through the center of the inner gallery of Banteay Samre Temple. However, the outlines of the outer edges of the plinth of the two monuments imply that a similar implicit dimensional plan exists between the two.

Here, we are comparing the outline of the plinth of the enclosure wall of Thommanon Temple and the outline formed by the outer edges of the plinth of the inner gallery of Banteay Samre Temple, not including the *gopura* and protrusions of the gallery corners. In many existing monuments, these elements lie buried in the ground and do not appear above the ground. However, as can be seen in Thommanon Temple, the end of the plinth are sometimes decorated with reliefs, even if the base is only 200 mm to 400 mm high from the ground surface. This means that those elements were not components of the underground foundation.

Banteay Samre Temple has four *gopura* each in its inner and outer galleries. The layout plan of the *gopura* appears to be governed by the axis line running through the center of the central sanctuary. This indicates that the relative position of the central sanctuary and the layout plan of the *gopura* mutually influence each other. Although Thommanon Temple does not have *gopura* in the north and south sides of its enclosure wall, its central sanctuary appears to occupy a position closely similar to the central sanctuary of Banteay Samre. Therefore, it is highly possible that the layout plan of the *gopura* is unilaterally governed by the position of the central sanctuary. At the same time, we can assume that the layout plan of the central sanctuary conforms to a separate rule independent of the *gopura*. Details on the dimensional plan of the central sanctuary and other buildings will be discussed separately, and will not be examined in this paper.

### 3.3 The modification process of Banteay Samre Temple

It is believed that Banteay Samre Temple has undergone at least two major modifications. There are vestiges of the modi-

の中央祠堂の相対位置はほぼ同じ位置を占めているように見える。

3. 各建物の規模、配置ともによく似ているが、とりわけ中央祠堂、拝殿の規模は、ほぼ同一とみられるほどよく似ている。

トマノン寺院の周壁芯の位置とバンテアイ・サムレ寺院の内回廊の芯を通る規準線の位置は、ずいぶん異なっている。しかしそれぞれ基座外端の輪郭に注目すると、よく似た寸法計画が潜在していることを予想させる。

いま比較の対象としているのは、トマノン寺院の周壁基座の輪郭とバンテアイ・サムレ寺院内回廊の基座外端が形成する輪郭であり、ゴーブラや回廊隅部の突出部を含めたものではない。現存遺構ではこの部材が埋没し、地表面に現われない場合も多い。しかし地表面からわずか 200mm ~ 400mm 程の高さをもつ基座は、トマノン寺院に見られるように、木口に装飾レリーフが施されることもあり、地下に埋没する基礎の構成材でなかったことが明らかである。

バンテアイ・サムレ寺院は内回廊、外回廊それぞれ4つずつのゴーブラを持っている。いずれの配置計画も、中央祠堂の中心を通る軸線に支配されているように見える。したがって中央祠堂の相対位置は、ゴーブラの配置計画と相互に影響しあうことが予想される。しかし周壁の南北辺にゴーブラを持たないトマノン寺院においても、バンテアイ・サムレとほぼ同位置に中央祠堂が配置されているように見える。このためゴーブラの配置計画は、一方的に中央祠堂の配置に支配されている可能性が高い。つまり中央祠堂の配置計画は、ゴーブラと無関係に自律的な方法を持っていることが予想される。なお、中央祠堂以下、各建物の寸法計画についてはあらためて立論することとし、本論考では取り上げない。

### 3.3 バンテアイ・サムレ寺院の改造過程

バンテアイ・サムレ寺院は、少なくとも2度、大きな改造を受けていると考えられている。痕跡は各所に残っており、改造の過程は比較的理解しやすいものである。まず、各ゴーブラの両端、内回廊内部に取り込まれた壁面に、例外なく周壁が取りついていた痕跡が残っている<sup>12</sup>。これはもと、内回廊の位置に周壁が巡らされていたことを示している。また内回廊とゴーブラの取りつきも、後から石材を当てて整形した痕跡が認められる。内回廊の構成は特殊なもので、入口を持たない。ゴーブラ側面両端の幅の狭い壁面、したがって開口部を持たない壁面によって分断されるため、回廊の中を巡回することが出来ないためであろうか、内壁に並ぶ開口部をすべて連

fication work throughout the temple, and the process of modification can be understood relatively easily. First of all, there are traces that indicate that a enclosure wall was attached to the wall inside the inner gallery on both sides of each *gopura*, without exception.<sup>12</sup> This points to the fact that a enclosure wall had once been erected in the place of the present inner gallery. Additionally, traces at the joints of the inner gallery and *gopura* indicate that stone elements were added and shaped afterwards. The construction of the inner gallery is unique—that is, it has no entrance. The gallery is cut off by the narrow walls on both ends of the side faces of the *gopura*. They are walls that cannot have openings. Perhaps because it is not possible to pass inside the gallery, the openings along the inside wall are windows with balusters instead of entrances, and all thoughts of entering the gallery seems to have been abandoned. For this reason, the gallery has a projected terrace on the inner side corresponding to the height of the *gopura* platform, each *gopura* platform is widened as though to form a matching terrace, and a balustrade runs along the outline. Because such a terrace running the perimeter of the inner side of the inner gallery was established, the platform of the libraries ended up connecting to this terrace, producing a complex of unprecedented narrowness. It is believed that this modification was performed almost immediately following the construction of the enclosure wall.<sup>13</sup>

The JSA Art History Unit, however, believes the outer gallery may have been formed before the inner gallery. This estimation is based on the determination of the styles of the relief remaining on the pediment on the inner and outer *gopura* and the *naga* balustrades on the inner gallery terrace. This presents the possibility that there was a time when Banteay Samre Temple displayed a unique complex structure in which a gallery was created on the outside of a complex that was already enclosed by a wall. However, it seems unlikely that the enclosure wall was modified into a gallery after the outer gallery was completed.

Thereafter, another large-scale modification appears to have been carried out, centering on the east *gopura*. The timing of this modification is unclear, but judging from the post-modification laterite masonry which displays the characteristics of the Bayon period and from the JSA Art History Unit's determination of the style of the pediment outside the east *gopura*, it appears to have been performed about a half century to a century after the initial construction. This judgment is also as already reported.<sup>14</sup>

In the beginning, the very center of the Banteay Samre complex was enclosed by a wall and four *gopura*. The bottom part of this wall is embedded in the gallery platform and cannot be confirmed in its present state, but it could not have been the same outline as the present inner gallery. Rather, it should have been positioned inward a maximum of 2 m. Therefore, it was probably only after the modification produced the current outline of the inner gallery that the total width of the plinth acquired a similar appearance to the complex of Thommanon

子窓として入口を設けず、回廊の中に入ることを放棄している。このため回廊は、ゴープラの基壇高さに合わせて内側にテラスを張り出し、各ゴープラの基壇もこれに合わせてテラスを形成するよう拡張し、輪郭に合わせて勾欄を巡らせている。こうして回廊内側に接する外部に巡回路となるテラスを設けたため、経蔵基壇はこのテラスと繋がってしまい、他に例を見ない狭小な伽藍が生まれることになった。この改造過程は周壁を設けた後、ほとんど直後に行われたと考えられている<sup>13</sup>。

しかし JSA 美術史班は、外回廊の形成が内回廊よりも早い時期であった可能性があると判断している。これは内外ゴープラのペディメントに残るレリーフと、内回廊テラスのナーガ勾欄の様式判定にしたがったものである。したがってバンテアイ・サムレ寺院は、内側を周壁で囲みながら外に回廊を巡らすという、あまり例のない伽藍構成を採った時期があった可能性も残る。しかし外回廊が完全に完成してしまった後に、内に閉じこめられた周壁を回廊に改修することは考え難いであろう。

この後、東ゴープラを中心に大規模な改造が施されたようである。この時期は明確ではないが、改造後のラテライトの積み方などにバイヨン期の特徴が現われている点、JSA 美術史班による東ゴープラ外のペディメントの様式判定などから、創建後、半世紀から 1 世紀程度の間になされたと予想される。この改造についても、すでに報告されている通りである<sup>14</sup>。

当初、バンテアイ・サムレの伽藍中枢部は、周壁と 4 つのゴープラによって囲まれていた。この周壁の下部は回廊基壇のなかに埋没しており、現状では確かめることができない。しかし、現状の内回廊の輪郭と同じものだったはずはなく、最大 2m ほど内側に位置していたはずである。したがって、改造後の内回廊の輪郭になって初めて、基座の全幅はトマノン寺院の伽藍と相同の姿になったと考えられる。この事態をどのように考えればいいのだろうか。トマノン周壁、バンテアイ・サムレ周壁、バンテアイ・サムレ内回廊というヴァリエーションを許容できる基本計画が潜在していたと推定することになるであろう。この計画を踏襲する限り、トマノン周壁とバンテアイ・サムレ内回廊の輪郭が相同の寸法をとる可能性が非常に大きくなる、そのような基本計画である。以上の確認を念頭に置いて、分析を始めたいと思う。

### 3.4 伽藍の寸法計画

Fig. 1.3-1a に示したように、トマノン寺院の圍繞壁

Temple. What should we make of this situation? It leads us to assume that there was an underlying basic plan which allowed variations as seen in the Thommanon enclosure wall, the Banteay Samre enclosure wall, and the Banteay Samre inner gallery. As long as it was followed, the basic plan would have produced even greater similarities in the dimensions of the outlines of the Thommanon enclosure wall and the Banteay Samre inner gallery. Based on this understanding, let us begin our analysis.

### 3.4 The dimensional plan of the complex

As shown in Fig. 1.3-1a, the north-south width (outermost dimension) of the base of the Thommanon Temple enclosure wall is 40660 mm, and that of the inner gallery of Banteay Samre Temple is 41400 mm. There is an approximately 740 mm difference between the two. However, given the fact that the east-west width of Thommanon is 46671 mm and that of Banteay Samre is 46505 mm, and taking into consideration construction errors, weathering effects, slight individual differences in the scale of the construction site, and measurement errors, they are values that can be considered to have been the same at the time of planning. A similar trend can also be confirmed regarding the length of the north-south axis which runs through the center of the distance between the east end and the central sanctuary (the center of the *gopura* in the case of Banteay Samre Temple).

The group of architectural structures at Angkor which appears to be neatly arranged, has been shaped after the sandstone elements and laterite elements were stacked. Since the process of shaping the elements simply involved scraping away their surface by hand, the finishing surface did not play an important part in the structure itself. This means that a relatively large margin of error was allowed. It is a feature rarely seen in wooden architecture that is usually built by intricately combining various elements, but in stone structures, it is not rare for even clearly symmetrical structures to have a 200 mm or so difference between the left and right sides. Therefore, the fact that two completely different temples have extremely similar values must be assumed to be a significant part of their plans.

The north-south width of the Banteay Samre outer gallery is 81852 mm at the outer edges of its base. Like Thommanon Temple, it is almost double the total north-south width of the inner gallery. The difference between the total east-west widths of the outer and inner galleries seems to be the same value as the difference between the north-south widths of the two galleries. Therefore, when the inner and outer galleries are compared in terms of the rectangle formed by the outer edges of the gallery plinth, it is clear that the two galleries are concentric rectangles and that the north-south width of the inner gallery is half the north-south width of the outer gallery.

During the process of estimating the standard position of the dimensional plan, it is possible to seek the reference line in various positions, such as the central line of the inner gallery,

基座の南北幅（外々寸法）は 40660mm、バンテアイ・サムレ 寺院内回廊では 41400mm である。ここでは 740mm 程の寸法差があるが、一方、東西幅はトマノン 46671mm、バンテアイ・サムレ 46505mm となって、施工誤差、経年変化、造営現場尺のわずかな個体差、実測誤差などを勘案すれば、計画上、同寸であったと予想してよい値である。さらに東端から中央祠堂の中心を通る南北軸線（したがってバンテアイ・サムレ寺院ではゴープラ中心）までの長さにおいても同様の傾向を認めることができる。

一見して端正に加工されたようにみえるアンコールの建築群は、石材やラテライト材を積載したのちに整形している。整形の過程は手作業で石材表面を削り落として行くから、仕上げ面は構造に大きな影響を与え難い。したがって、比較的大きな誤差を許容してしまう。これは、多様な部材を複雑に組み合わせで構築する木造建築には見いだしがたい特質で、あきらかに左右対称の構成であっても、左右で 200mm 程度の相違をもつことも稀なことではない。したがって異なる寺院の間でこれほどよく似た値が現われることは、計画上、有意なものと判断しなければならない。

バンテアイ・サムレ寺院外回廊の南北幅は、同様に基座外端で 81852mm という値、つまり内回廊南北全幅のおよそ 2 倍の値を示している。また外回廊と内回廊の東西全幅の寸法差は、同様の南北幅寸法差と同じ値と見られる。したがって内回廊と外回廊は、回廊基座外端が形成する矩形として比較すれば、正しく同心方形の位置関係にあり、内回廊南北幅は、外回廊南北幅の 1/2 の値をとることが判る。

寸法計画の規準となった位置を推定して行く過程では、回廊中心線、回廊内側の輪郭線、回廊基壇上建物の内外輪郭線、壁体の中心線、外法、内法など、さまざまな位置に規準線を想定することが可能である。しかし、上記のように明快な相互関係を見いだすことが出来る推定規準線は、基座外端の輪郭線以外には存在しない。したがってこの輪郭線こそ、基本となる規模計画、寸法計画を体現するものであったと考えることができる。

### 3.5 造営尺度の推定

上記の際立った特徴をもとに、造営尺度を推定しよう。造営尺度はすでに指摘した通り、およそ 400mm ~ 500mm の間に位置すると見て大過ないであろう。この範囲の中で、計画的に有意な値をとるものを検証していくと、412mm（以下  $u$  とする）程の値を想定したとき、バンテアイ・サムレ寺院の外回廊南北全幅が  $200u$ 、同内回廊全幅が  $100u$  という

the inner outline of the inner gallery, the inner and outer outlines of the building above the gallery platform, the central line of walls, external dimensions, and internal dimensions. However, there is no reference line other than the outline formed by the outer edges of the plinth that can provide a clear mutual relationship such as the above. Therefore, we can assume that this outline served as the basic scale plan and dimensional plan.

### 3.5 Estimation of the construction measure

Let us estimate the construction measure based on the above salient characteristics. As already mentioned, we can safely assume that the construction measure falls somewhere between 400 mm and 500 mm. If we examine values within this range that could be considered significant to the plan, we obtain a value of 412 mm (referred to as  $u$  below). When  $u$  equals 412 mm, the total north-south width of the outer gallery of Banteay Samre Temple is  $200u$ , and that of the inner gallery is  $100u$ . This is shown in Fig. 1.3-1b. In most monuments of Khmer temples, no buildings are placed on the central line which equally divides the north-south width. Without exception particularly in east-facing complexes, an axial line is commonly established slightly toward the north, and the central sanctuary, pavilion, and the east and west *gopura* are arranged to coincide with this line.<sup>15</sup> In the case of Banteay Samre, the difference between the north-south asymmetry in reference to the axial line is 618 mm. This suggests that an axial line was newly established  $1.5u$  to the north of the central line which equally divides the total width of the complex. At Thommanon, on the other hand, the distance from the center of the *gopura* to the south end of the enclosure wall is 20818 mm, and the distance from the center of the *gopura* to the north end of the enclosure wall is 19754 mm, so their difference is 1064 mm. Since the distance from the center of the *gopura* to the south end of the enclosure wall can be considered to be  $50u$ , we can assume that the north-south width of the enclosure wall was shortened by  $1.5u$  from only the north side so that the axial line is in effect shifted to the north. In other words, we can estimate a dimensional plan that is  $50u$  on the south side and  $48.5u$  on the north side.

As opposed to the dimensional plan of the total north-south width, the value of the total east-west width is somewhat unclear. The total width of the enclosure wall of Thommanon Temple is 46671 mm, and the total east-west width of the inner gallery of Banteay Samre Temple is 46505 mm. When converted to  $u$ -values, the measurements are equal to  $113.3u$  and  $113.0u$ , respectively, and do not clarify the dimensional plan.

Fig. 1.3-1c is the result of repeated examinations of methods that can create an east-west elongated rectangle. It shows that when one side of a  $100u$  square is divided into eight equal lengths and one of those lengths is added to the east-west width, the east-west width becomes  $112.5u$ . For convenience sake, Fig. 1.3-1c is drawn as a square that is extended to the west. The veracity of this procedure cannot be determined, but

値を採ることが判る。これを Fig. 1.3-1b に示す。クメール寺院のほとんどの遺構は、南北幅を等分する中心線上に各建物を配置せず、東面する伽藍では例外なく、北側にわずかにずらした中軸線を設け、この軸線に合致するように中央祠堂、拝殿、東西ゴープラを配置することを常法としている<sup>15</sup>。バンテアイ・サムレの場合、中軸線を挟んで南北非対称の寸法差は 618mm である。これは、伽藍の全幅を等分する中心線から  $1.5u$  北側にあらたに中軸線を設けたと推定される値である。一方、トマノンでは、ゴープラ中心から囲繞壁南端の距離 20818mm と北端までの距離 19754mm で 1064mm の相違を持つが、ゴープラ中心から囲繞壁南端までが  $50u$  と判断されるため、囲繞壁の南北全幅から北側だけ  $1.5u$  分短くすることで、結果的に中軸線を北側にずらした効果を与えていると判断することができる。つまり、南側  $50u$ 、北側  $48.5u$  とする寸法計画が想定できるであろう。

南北全幅の寸法計画に対し、東西全幅はやや不明瞭な値である。トマノン寺院囲繞壁全幅は 46671mm、バンテアイ・サムレ 寺院内回廊の東西全幅は 46505mm という値を採っており、 $u$  値に換算して  $113.3u$  と  $113.0u$  程になるため、このままでは寸法計画の内容がよく判らない。

Fig. 1.3-1c は、東西に長い横長矩形をつくる技法を念頭に置いて検討を繰り返した結果である。 $100u$  の正方形 1 辺を 8 等分し、ひとつ分を東西に加えたとき、東西幅は  $112.5u$  という値をとることが判る。Fig. 1.3-1c では便宜上、正方形をもとに西側に拡幅した状態として描いているが、そのような手順であったという断定は難しい。しかし、一旦  $100u$  の正方形が形成され、これに基づいて東西幅  $112.5u$  が生成されたという過程を想定することが可能である。

Fig. 1.3-1c のようにグリッドは南北 8、東西 9 の小正方形を生み出すが、バンテアイ・サムレ 寺院の内回廊で注目される点は、想定されたグリッドの四辺の中軸線と回廊建物の中心線とが合致しているように見えることである。この中心線はゴープラを貫く中心線でもあり、当初の囲繞壁の中心線に合致している。したがって回廊建物の中心線を繋ぐ矩形は、南北 7 グリッド、東西 8 グリッド分となるから、理論上、南北  $87.5u$ 、東西  $100u$  という大きさの矩形であるように見える。この想定に従えば、寸法計画の第 1 次的決定事項は、内回廊建物の中心線を対象に、東西回廊間を  $100u$  とした可能性も残ることになる。しかし、外回廊の寸法計画は南北幅を  $200u$  とするから、内回廊の東西幅が計画の出発点であった可能性は少なく、南北幅に基本計画が現われていると予想すべきである。

it is possible to assume from this figure that a 100u square was first formed, and the east-west width of 112.5u was derived from it.

As shown in Fig. 1.3-1c, the grid produces eight small squares in the north-south direction and nine small squares in the east-west direction. Especially noteworthy in regard to the inner gallery of Banteay Samre Temple is the fact that the axial lines of the four sides of the envisioned grid appear to correspond to the central lines of the gallery building. These central lines are also the central lines running through the *gopura*, and correspond to the central lines of the initial enclosure wall. The rectangle which connects the central lines of the gallery is equal to seven grids in the north-south direction and eight grids in the east-west direction, so theoretically, it appears to be a rectangle with a north-south width of 87.5u and an east-west width of 100u. According to this estimation, the possibility remains that the primary determining factor of the dimensional plan was to make the distance between the east and west galleries 100u in reference to the central lines of the inner gallery building. However, because the dimensional plan of the outer gallery has a north-south width of 200u, it is unlikely that the east-west width of the inner gallery served as the source of the plan. We should rather assume that the basic plan originated with the north-south width.

From the envisioned grid, the central line of the inner gallery building can be estimated to be half the 12.5u value of the outer edges of the inner gallery, or at the 6.25u position. As shown in Fig. 1.3-1e, the measurement of the cross section of the gallery is such that the central line of the gallery is 6.75u from the outer edges of the inner gallery. Taking into account the margin of error during construction, this value can be safely assumed to match the central axes of the four-sides of the envisioned 100u/8 grid. Although the *gopura* of Banteay Samre Temple are clearly arranged more on the inside than those of Thommanon Temple, it can be said that the reference line governing these positions was also subject to a grid plan similar to that of Thommanon. If even the half interval position adjustments of the grid are regarded as having a definite significance, then there are many points that have yet to be clarified, but for now we will consider them methods of adjusting positions in relation to the *gopura* of the outer gallery. The positions of the inner *gopura* which appear to be inexplicable, in fact support the possibility of the envisioned grid.

The standard grid plan which divides 100u into eight equal lengths closely resembles the "Manduka plan," one of the mandalas described in "Manasara," an ancient Indian treatise, which divides a square into eight equal portions. It not only functions as a foundation of the ground-purifying ritual performed when building a central structure of a Hindu temple, but also as the planar planning lines for a sanctuary. However, since it is a simplistic technique that repetitively divides lengths in two, we cannot necessarily ascertain the underlying mandala concept. At this point, we can only suggest the possibility.

想定したグリッドから、内回廊の建物中心線は、内回廊外端から 12.5u の半分の値、つまり 6.25u の位置にあることが予想される。Fig. 1.3-1e に示したように、回廊断面の実測値は、回廊建物の中心線が内回廊外端から 6.75u の位置と判断される。これは施工上の誤差を予想すれば、想定された 100u/8 グリッドの四辺のグリッド中心軸に合致すると考えてさしつかえない値である。したがってトマノン寺院に比べてバンテアイ・サムレ寺院のゴープラは明らかに内側に位置しているが、この位置を支配する規準線も、トマノンと同様のグリッド計画に従って現われたと考えられる。グリッドの歩み (interval) 半分の位置調整を確かなものとして想定するには、未だに不明瞭な点も残されているが、外回廊ゴープラとの相対位置を調整するための方法だったと考えておきたい。一見して不可解にみえる内ゴープラの位置は、かえって想定したグリッドの可能性を裏付けるものである。

100u を 8 等分する規準格子の計画は、古代インドの建築書「マナーサーラ」に記されたマンダラのうち正方形を 8 等分する Manduka plan によく似ている。これはヒンドゥー寺院の中心建築を構築する際に行われる地鎮祭の土壇として機能するばかりでなく、祠堂の平面計画線としても機能する。しかし全幅の 2 等分を繰り返すという簡単な技法であるから、マンダラが潜在したと断定できるわけではない。可能性を示唆するに留めておきたい。

### 3.6 中央祠堂の相対位置

両寺院の中央祠堂は、囲繞壁ないし内回廊の中の相対位置が、ほとんど同じ位置であるように見える。この相対位置も、上記の東西に長い矩形計画線に基づいて分析を試みた。これを Fig. 1.3-1d に掲載する。東西の全幅を 5 等分し、中央から西よりの軸線を以て中央祠堂の中心位置に当てたことが判る。したがって東西 112.5u の全幅に対し、東から 67.5u、西から 45u の位置が中央祠堂の中心位置であり、バンテアイ・サムレ寺院の各回廊に付属する南北のゴープラは、いずれも南北に貫くこの規準線に従って位置が決定されたと考えられる。南北にゴープラを持たないトマノン寺院においても同様の計画法が認められるため、中央祠堂の位置はゴープラと直接関わることなく決定され、ゴープラはこの規準線に一方的に従属して布置されたことが判る。

### 3.7 まとめ

以上の検討から、トマノン寺院、バンテアイ・サムレ寺院の伽藍規模計画、配置計画の大略を理解することができたと思われる。両遺構に共通する造営

### 3.6 Relative position of the central sanctuary

The relative position of the central sanctuaries of both temples within the enclosure wall or inner gallery appears to be almost the same. It was also analyzed based on the above plan lines of the east-west elongated rectangle. This is shown in Fig. 1.3-1d. From this figure we can see that the total east-west width was divided into five equal lengths, and the axis line west of the center was used to determine the central position of the central sanctuary. We can also assume that the central position of the central sanctuary is 67.5u from the east and 45u from the west in relation to the total east-west width of 112.5u, and that the north and south *gopura* attached to the galleries of Banteay Samre Temple were placed in accordance with the reference line running north-south. Thommanon Temple does not have *gopura* in the north and south, but a similar planning method can be confirmed. Therefore, it is clear that the position of the central sanctuary was not determined in direct relation to the *gopura*, but rather, the *gopura* were arranged in unilateral conformity to this reference line.

### 3.7 Summary

We hope the above discussion provided a general understanding of the scale plan and layout plan of the complexes of Thommanon Temple and Banteay Samre Temple. The construction measure common to both monuments was 412 mm, and this was presumably a common measure employed throughout the Angkor Wat period. We also believe that it is equivalent in length to 1 *hat* of this era.

The scale plan of the complexes is based on a length of 100 *hat*. The fact that this is a clear perfect whole number dimensional plan based on the notation system of numbers as well as a simple value, indicates that it was the primary starting point of the dimensional plan. This length is applied to the north-south width, and 1/8 the length of 100 *hat* is added to the east-west width to produce 112.5 *hat*, thereby creating an east-west elongated rectangle. This horizontal rectangle is the basic outline of the complex plan. The scale of the outer gallery of Banteay Samre can be determined from the dimensional plan of the inner gallery. It measures 200 *hat* in the north-south direction and 212.5 *hat* in the east-west direction. In other words, it forms a concentric rectangle with the standard rectangle of the inner gallery. The total east-west width of 212.5 *hat* appears as though it reflects the total east-west width of the inner gallery of 112.5 *hat*, but it is not clear whether the scale of the outer gallery unilaterally conforms to the inner gallery. By comparing it with Thommanon, it may seem that the scale of the inner gallery was determined first, but the 200 *hat* total north-south width of the outer gallery is a perfect whole number dimensional plan with relatively strong independent properties.

At Thommanon, we can determine that the 112.5u east-west width of the reference line of the established rectangle was divided in five equal lengths, and the center of the central sanctuary was arranged to coincide with three of those lengths from

尺度は 412mm であり、これはおそらくアンコール・ワット期に共通する造営尺度で、この時代の 1*hat* に相当する長さと考えられる。

伽藍の規模計画は 100*hat* の長さを基本としているが、これは数の進法に依存した明快な完数寸法計画であり、同時に平明な数値であることが、寸法計画の第 1 次的な出発点であったことを物語っている。この長さを南北幅にあて、東西幅は 100*hat* の 1/8 の長さを加えて 112.5*hat* とすることで、東西に長い矩形を形成している。この横長矩形が伽藍計画の骨子である。バンテアイ・サムレ寺院の外回廊の規模は、内回廊の寸法計画から、南北 200*hat* とし東西 212.5*hat* とする寸法計画であったと判断することができる。つまり内回廊の規準矩形と同心となる矩形を形成している。東西全幅 212.5*hat* の長さは、内回廊東西の全幅 112.5*hat* が反映したように見えるが、外回廊の規模が内回廊に一方的に従属しているのかどうかは明瞭ではない。トマノン寺院と比較したことによって、内回廊の規模が先行して決定されたように見えるが、外回廊の南北全幅の 200*hat* は、相対的に自律的な性格の強い完数寸法計画である。

トマノン寺院では、形成された矩形の規準線の東西幅 112.5u をあらためて 5 等分し、東から 3 つ分の位置に中央祠堂の中心を当てていると判断することができるが、バンテアイ・サムレ寺院では、この位置を通る規準線は、同時に南北のゴープラの位置を支配している。

規準線を生み出す操作の過程で、1 辺の 8 等分や 5 等分という操作を想定した。この等分割技法は自由に選択することができるもののようにみえるが、いずれも 100*hat* を分割した際に、0.5*hat* の単位で割りきれない分割値が選択されている点に注目すべきである。これは基本となった 100*hat* に合わせて、完数寸法計画に親和的な値を生み出す分割値を選択した結果であろう。

アンコール・ワット期の初期と末期の 2 つの伽藍規模計画における基本計画と、ここから派生する各手順との想定は、ほぼ矛盾なく説明できる。したがってアンコール・ワット期の造営尺度 1*hat* ないし 1*hasta* は、412mm 程であった可能性が高い。この値を手がかりとして、バイヨン寺院の 2 つの経蔵の寸法計画を検討しよう。

## 4. バイヨン寺院経蔵の造営尺度

アンコール・ワット期の初期と末期に位置づけられる 2 つの寺院遺構の実測調査結果から導かれた造営尺度は、412mm を単位寸法とする、という結論に達した。専制国家の尺度論的な特質の一つとして、

the east. However, in the case of Banteay Samre, the reference line that runs through this position simultaneously governs the positions of the north and south *gopura*.

In the process of generating the reference line, we envisioned the process of dividing one side into eight or five equal lengths. It may seem as though this division method was selected arbitrarily, but it should be noted that in either case, a value capable of dividing 100 *hat* by a 0.5 *hat* increment was originally selected. This is probably because a value had to be selected that can produce a value relevant to the perfect whole number dimensional plan in conjunction with the basis of 100 *hat*.

The basic plan of the scale plan of the two complexes built in the beginning and at the end of the Angkor Wat period, as well as its relationship to the various procedures derived from it, can be explained almost completely without contradiction. Therefore, it is highly probable that the construction measure of 1 *hat* or 1 *hasta* during the Angkor Wat period was around 412 mm. Using this value as a clue, let us examine the dimensional plan of the two Bayon libraries.

#### 4. The construction measure of the Libraries of the Bayon Temple

The construction measure derived from the results of the measurement survey of the two temples built in the beginning and at the end of the Angkor Wat period is a unit of 412 mm. One of the characteristics of the theory of measures in an autocratic nation is that the measurement system is carefully maintained and controlled by the kingship so that it continues to be the only standard of length. In ancient Egypt, a single measure was maintained for roughly 3000 years. In ancient China, where there were frequent interchanges of royal power, old systems of weights and measures were aggressively eliminated and new systems were constantly established. However, when taking into consideration the great confusion that a change in standards can cause, it would be most realistic to maintain a fixed system.

If large changes in the regime between the Angkor Wat period and the Bayon period could be envisaged to a certain degree, estimations of the changes in the measurement system would also change. However, no significant changes in regime can be envisaged between the two periods. In other words, between the two periods defined by modern research, there is no reason to assume that the measurement system had changed. Therefore, the unit of measurement 1 *hat* = 412 mm should also be positively assumed for the Bayon era as well. Based on this premise, let us examine the dimensional plans of the two libraries of the Bayon Temple.

##### 4.1 Structure of the Libraries

As shown in Fig. 1.3-2a and Fig. 1.3-2b, the two libraries of the Bayon have an unusually high platform. At the bottom is a plinth commonly seen in Khmer architecture. A two-layer

度制制度は、長さの唯一のスタンダードであり続けるために、王権によって注意深く維持され管理され続けるものである。古代エジプトは、約 3000 年の間、単一のものさしが維持されてきた。しかし王権の交代が激しかった古代中国では、旧い度量衡制度を積極的に排除し、新しい制度を施行することが繰り返された。しかし、スタンダードを変更することが引き起こす大きな混乱を予想すれば、度制は固定的に維持管理することがもっとも現実的である。

アンコール・ワット期とバイヨン期の間に、国家体制の大きな変動をどの程度予想できるかによって、度制の変質の様相に対する予測も変化するが、両時期の間に国家の体制の甚大な変化は予想されていない。つまり、現代の研究によって区分された 2 つの時期の間に、度制が変化したと予測すべき理由は何もない。したがって、バイヨン期においても 1hat = 412mm という単位寸法を積極的に予想すべきである。この前提に従って、バイヨン寺院の 2 つの経蔵の寸法計画を検討しよう。

##### 4.1 経蔵の構成

Fig. 1.3-2a と Fig. 1.3-2b に示したように、バイヨン寺院の 2 つの経蔵は、異例といえる高い基壇を持っている。底部に、クメール建築に共通して見られる基座を置き、この上にまず、二重の下部基壇を載せ、さらにこの上に上部基壇を積載する。基壇上に載る建物本体は、東西 3 間、南北 1 間の中央構造体 (nave) を中心に、南辺と北辺に、東西幅 3 間、南北幅 1 間の庇 (aisle) を接続し、東と西に方 1 間の吹き放しのポーチを配している。南北の庇を除き、屋根はすべて失われているが、ポーチの独立柱上に梁が残り、中央構造体の上部壁と屋根が積載される大梁が残っている。

##### 4.2 経蔵の寸法分析

Fig. 1.3-2a と Fig. 1.3-2b は、それぞれ北経蔵、南経蔵の平面図および立面図を、412mm の 1/2 である 206mm のグリッドの上に配置したものである。細部の石材が形成する輪郭は、不均一で凹凸が著しいにも関わらず、よく観察すればこのグリッドが各部に適合していることは明瞭である。より分かりやすく、グリッドに沿って平面図の各部の輪郭を整理し、太線によって示したものが Fig. 1.3-2c である。この図は理念的な寸法計画の復原案としての意味を合わせ持つ。この理念モデルに従って、各部の基本となる寸法計画を、各部の輪郭線に注目して Fig. 1.3-2d に整理した。この図に従って、基本的な寸法計画を見よう。

lower platform is first placed on top of the plinth, and an upper platform is placed on top of the lower platform. The main structure which goes on top of the platform has a central nave three spans wide in the east-west direction and one span wide in the north-south direction. The north and south sides of the central nave is connected to an aisle three spans wide in the east-west direction and one span wide in the north-south direction, and the east and west sides are connected to a one-span square porch. Excluding the aisles on the north and south sides, the roof is completely lost, but a beam remains on the porch pillars and main beams also remains on which the upper wall and roof of the nave was placed.

## 4.2 Dimensional analysis of the Libraries

Fig. 1.3-2a and Fig. 1.3-2b are the respective planar and elevation views of the Northern and Southern Libraries arranged on a grid measuring 206 mm, or half of 412 mm. The detailed outline formed by the stone elements is rough and markedly uneven, but a close observation clearly indicates that the grid conforms to the parts of the planar and elevation views. In Fig. 1.3-2c, the outlines of each part of the planar view were organized in accordance with the grid and made darker so that they are easier to understand. This diagram is significant as presenting a conceptual restoration proposal of the dimensional plan. Based on this conceptual model, the dimensional plan which forms the basis of each part was organized focusing on the outlines of those parts and shown in Fig. 1.3-2d. Let us examine the basic dimensional plan according to this diagram.

The total east-west width of the outer edges of the base of both the Northern and Southern Libraries is 45 *hat*. Because the total north-south width of the Northern Library is about 27 *hat* and that of the Southern Library is 26 *hat*, the Northern Library appears to be 1 *hat* larger. However, the base plinth of the Northern Library tends to be particularly large on the north side where the wall of the outer gallery looms close. For this reason, we can assume that the total north-south width of both libraries was originally planned to be 26 *hat*.

Of the two-layer lower platform, the outline of the bottom platform is reduced by 1 *hat* in each of the east-west faces and 1 *hat* in each of the north-south faces for both libraries, so the basic plan has an east-west width of 43 *hat* and north-south width of 24 *hat*. In regard to the size of the top platform of the two-layer lower platform, in the Southern Library, it is 1.5 *hat* smaller than the outline of the lower platform, so the east-west width is 40 *hat* and the north-south width is 21 *hat*, but in the Northern Library, the west face is reduced by 2 *hat* where the other three sides are reduced by 1.5 *hat*, so the east-west width is 39.5 *hat* and the north-south width is 21 *hat*.

The outline of the upper platform is 1.5 *hat* smaller in all directions from the outline of the top half of the lower platform for both libraries. Therefore, the upper platform of the Southern Library is 37 *hat* in the east-west direction and 18 *hat* in the north-south direction. The upper platform of the Northern

北経蔵、南経蔵は、基座外端の東西全幅をいずれも 45 $\hat{a}$ t としている。一方、南北全幅は北経蔵では 27 $\hat{a}$ t 程、南経蔵では 26 $\hat{a}$ t と判断されるから、北経蔵は 1 $\hat{a}$ t 分大きいようにみえる。しかし北経蔵の基座は、とくに外回廊の壁面が迫る北辺にかぎって大きい傾向がある。このため、両経蔵とも南北全幅を 26 $\hat{a}$ t とすることが本来の計画であったと判断すべきであろう。

二重の下部基壇のうち下部の基壇の輪郭は、基座の寸法に対して、両経蔵いずれも東西各面で 1 $\hat{a}$ t、南北でも各面 1 $\hat{a}$ t ずつ縮減させているから、基本計画は東西幅 43 $\hat{a}$ t、南北幅 24 $\hat{a}$ t である。下部基壇の上部の基壇の大きさは、南経蔵では、下部の基壇輪郭より 1.5 $\hat{a}$ t 分を縮減させ、東西幅 40 $\hat{a}$ t、南北幅 21 $\hat{a}$ t とするが、北経蔵では、三方の縮減を 1.5 $\hat{a}$ t としながら、西面に限って 2 $\hat{a}$ t 分を縮減させているため、東西幅 39.5 $\hat{a}$ t、南北幅 21 $\hat{a}$ t となる。

上部基壇の輪郭は、両経蔵とも下部基壇の上半の輪郭から、各面 1.5 $\hat{a}$ t を縮減させている。したがって南経蔵では東西幅 37 $\hat{a}$ t、南北幅 18 $\hat{a}$ t となるが、北経蔵は直下の下部基壇上半の縮減に呼応するため、東西幅 36.5 $\hat{a}$ t、南北幅 18 $\hat{a}$ t となる。

建物本体を構成する壁体は、クメール建築様式の通例に沿って、壁体下部（台座 base に相当）を外側に向けて一段と厚くしている。壁体厚さの寸法計画は、下部の厚さ 1.5 $\hat{a}$ t、壁体 1 $\hat{a}$ t と見ることができる。壁体上部の軒型（cornice）も同様に 1.5 $\hat{a}$ t の厚さを持つと判断される。中央構造体（nave）と南北の庇（aisle）を含めた、壁体下部の輪郭に注目すると、北経蔵では壁体南西角がやや内に入り込んでおり、南経蔵では南東角が内に拠っているが、両経蔵とも東西幅 23 $\hat{a}$ t、南北幅 16 $\hat{a}$ t と判断される。したがって壁体外法で東西幅 22 $\hat{a}$ t、南北幅 15 $\hat{a}$ t、壁体内法幅つまり室内の内法幅は、東西 20 $\hat{a}$ t、南北 13 $\hat{a}$ t である。なお、東西の入口脇に設けられた付柱は、室外、室内ともに壁面から 1 $\hat{a}$ t の厚さを持ち、室外付柱下部は、柱面から 0.5 $\hat{a}$ t 分大きい、壁体下部と連続する台座形を伴っている。付柱上部の柱頭形も同様である。

ポーチの 2 本の柱と室内の 4 本の独立柱は、柱身（shaft）の幅で 1.5 $\hat{a}$ t 角であり、柱頭（capital）は 2 $\hat{a}$ t か、やや小さく 1.75 $\hat{a}$ t 角と見られる。ポーチの柱に付属する台座幅、柱頭幅も同様である。ポーチの柱の位置は、Fig. 1.3-2d に示したように、壁体台座外面から柱台座の外法まで 6 $\hat{a}$ t となる位置で、これはまた、ポーチ梁の外端の位置である。しかし南経蔵の西ポーチに限りやや短く 5.5 $\hat{a}$ t とみなされる。したがってポーチを含む建物の東西全幅は、北経蔵 35 $\hat{a}$ t、南経

Library complies with the reduced size of the top half of the lower platform immediately below it, so its east-west width is 36.5 *hat* and its north-south width is 18 *hat*.

The walls which constitute the main structure is slightly thicker toward the outside at the bottom (corresponding to the base) in conformity with the convention of the Khmer architectural style. The dimensional plan of the wall thickness can be regarded as 1.5 *hat* at the base and 1 *hat* at the body of the wall. The cornice at the top of the wall is assumed to have a thickness of 1.5 *hat*. When focusing on the outline formed by the base of the wall, including the nave and north-south aisle, the east-west width of both libraries is 23 *hat* and the north-south width is 16 *hat*, although the southwest corner of the wall of the Northern Library and the southeast corner of the Southern Library are slightly shifted toward the inside. Therefore, the external dimensions of the wall is 22 *hat* in the east-west direction and 15 *hat* in the north-south direction; the interior dimensions of the wall, or the internal dimensions of the chamber is 20 *hat* in the east-west direction and 13 *hat* in the north-south direction. The pilaster erected on the sides of the east and west entrances are 1 *hat* thick from the surface of the wall both inside and outside the chamber. The base of the pilaster outside the chamber is 0.5 *hat* larger than the surface of the pilaster and connects to the base of the wall. The capital at the top of the pilaster is the same shape.

The two pillars of the porch and the four pillars inside the chamber have 1.5-*hat* square shafts, and 2-*hat* or slightly smaller 1.75-*hat* square capitals. The widths of the base and capital of the porch pillars are the same. The porch pillars are, as shown in Fig. 1.3-2d, positioned so that the distance from the outer surface of the wall base to the external dimension of the pillar base is 6 *hat*. This corresponds to the position of the outer ends of the porch beam. However, the west porch of the Southern Library is slightly shorter, and measures 5.5 *hat*. Therefore, the total east-west width of the building including the porch is 35 *hat* in the Northern Library and 34.5 *hat* in the Southern Library.

Let us indicate the mutual relative positions of the four pillars inside of the chamber in reference to the outline connecting the external dimensions of the pillars and the outline of the internal dimensions of the pillars. In the Southern Library, they form concentric squares measuring 8.5 *hat* and 5.5 *hat*, respectively, but the Northern Library is somewhat elongated in the east-west direction, so they form a rectangle that is 9 *hat* in the east-west direction and 8.5 *hat* in the north-south direction, and another rectangle that is 6 *hat* in the east-west direction and 5.5 *hat* in the north-south direction. The relative position of the chambers is such that they are arranged in the center, but the distance to the east-west wall differs slightly depending on the library. The distance from the inner side of the east-west wall to the outer surface of the pillars is 5.75 *hat* in the Southern Library and 5.5 *hat* in the Northern Library.

蔵 34.5*hat* である。

室内中央の4本の独立柱相互の相対位置を、柱外法を結ぶ輪郭と柱内法の輪郭で示すことにしよう。南経蔵ではそれぞれ 8.5*hat* 角、5.5*hat* 角の同心正方形を形作るが、北経蔵では東西にやや延びており、東西 9*hat*、南北 8.5*hat* の矩形、および東西 6*hat*、南北 5.5*hat* の矩形を形作っている。室内の相対位置は、いずれも中央に布置されているが、経蔵によって、東西の壁面までの距離に僅かな相違が生じている。東西壁内面から独立柱外面までの距離は、南経蔵で各 5.75*hat*、北経蔵では各 5.5*hat* である。

#### 4.3 経蔵の高さの計画

高さ寸法の制御に付いても、想定した造営尺度の単位 412mm がよく適合している。この様子を Fig. 1.3-2e に示す。底部の部位である基座の高さは、2つの経蔵で相違がある。北経蔵は、西端と東端で高さに僅かな相違がある。おそらく西端で 0.5*hat* の高さを確保して水平をとったため、東辺の高さが 1*hat* になったようである。一方南経蔵では、基座の高さに変化が見られず、0.5*hat* である。

南経蔵の基壇高さは、下部基壇の下半を 4*hat*、上半を 6*hat*、上部基壇高さを 2*hat* としており、基座上端から始まる基壇全高を 12*hat* としている。一方北経蔵では、下部基壇の下半 3.5*hat*、上半 6*hat*、上部基壇高さ 2.5*hat* としている。南経蔵と相違があるが、基座上端から始まる基壇全高を 12*hat* とする点は同様である。北経蔵の基壇は、部分的にわずかな傾きがある。南側立面では、下部基壇下半の高さが 4*hat* に近く、上半は 5.5*hat* に近い。したがって下部基壇全高 9.5*hat* に変化はなく、上部基壇高さ 2.5*hat*、基壇全高 12*hat* も北側と同様である。

建物本体の高さは、Fig. 1.3-2e に図示したように大梁上端まで 10*hat* と見られる。ポーチの柱は 8*hat* の高さを持つが、これは室内の4本の独立柱も同様である。この上に 2*hat* の高さをもつ大梁が積載され、おそらく 3*hat* の高さの小壁が積載され、さらに 5*hat* の高さの屋根が積載されていた。ポーチ屋根も同様の高さが予想されるが、小壁を持たないため、中央より 3*hat* 低い屋根であったことが予想される。南経蔵は、修復によって整備された北経蔵ほど上部の様子が判らないが、西ポーチ上に残る梁の高さから、同様の計画を予想することができる。

#### 4.4 北経蔵の特質

平面各部、立面各部の検討を通じて考察を進めてきたように、412mm の単位寸法を想定することによって、経蔵の寸法計画をよく理解することができ

### 4.3 The height plan of the libraries

The envisioned construction measurement unit of 412 mm also applies to the control of the height dimension. This is shown in Fig. 1.3-2e. The height of the plinth, the part composing the bottom, is different between the two libraries. In the Northern Library, there is a slight difference between the heights of the east and west edges. It seems that the height of the east side became 1 *hat* because the height of 0.5 *hat* of the west edge was maintained when making the base level. On the other hand, in the Southern Library, there are no changes in the height of the plinth, and is 0.5 *hat* all around.

The height of the platform of the Southern Library from the upper edge of the plinth totals 12 *hat*. The height of the bottom half of the lower platform is 4 *hat*, the top half is 6 *hat*, and the upper platform is 2 *hat*. In regard to the Northern Library, the height of the bottom half of the lower platform is 3.5 *hat*, the top half is 6 *hat*, and the upper platform is 2.5 *hat*. The breakdown is slightly different from that of the Southern Library, but in both libraries, the total height of the platform from the top edge of the plinth is the same 12 *hat*. Some parts of the platform of the Northern Library are slightly slanted. In the south elevation, the height of the bottom half of the lower platform is close to 4 *hat*, and the top half is about 5.5 *hat*. The total height of the lower platform therefore remains 9.5 *hat*, and the height of the upper platform of 2.5 *hat* and the total height of the plinth of 12 *hat* are the same as the north side.

The height of the main structure is 10 *hat* up to the upper edge of the main beam, as shown in Fig. 1.3-2e. The height of the porch pillars is 8 *hat*, as are the four pillars inside the chamber. On top of these pillars were placed a 2-*hat* high main beam, a small wall that was probably about 3-*hat* high, and furthermore, a 5-*hat* high roof. We assume that the porch roof was of the same height, but since it did not have a small wall, it was probably 3 *hat* lower than the central portion. The conditions of the upper structure of the Southern Library is not as clear as the Northern Library which was restored, but judging from the height of the beam remaining on the west porch, it was probably planned in the same way as the Northern Library.

### 4.4 Characteristics of the Northern Library

As analyzed through discussions on each planar and elevation part, we can better understand the dimensional plan of the libraries by assuming the standard measurement of 412 mm. Since we now have a general understanding of the dimensional plan, let us reorganize the characteristics of the Northern Library.

The width and height of the platform, the features of the pillars inside the building, and other general aspects appear to conform to the dimensional plan of the Southern Library. However, compared to the Southern Library, the Northern Library displays a somewhat peculiar trend. As compared in Fig. 1.3-2d, the nave of the Southern Library is precisely arranged in the center of the platform, but in the Northern Library, it is

と思われる。寸法計画の大略が理解できたため、あらためて北経蔵の特質を整理しておきたい。

基壇の幅、高さ、建物内部の独立柱の特徴など、全体的な傾向は、南経蔵の寸法計画が標準的なものであることを窺わせる。北経蔵は、南経蔵と比較すると、やや特殊な傾向を持っている。Fig. 1.3-2d で比較したように、南経蔵の建物中央構造体は、精確に基壇中央に載るが、北経蔵では 0.5*hat* 東に寄っている。これは下部基壇の上半が西側にかぎって 0.5*hat* 短くなっていることに呼応したもので、基座西端の階段上り口から建物入口までの距離は、東端からの距離に比べて 1*hat* 分長くなっている。建物が東に偏していることによって、東面では上部基壇東端とポーチの柱との間が詰まり、1*hat* 分のところ 0.5*hat* を残すことになった。東西の階段は、平面上に投影された長さで西側 6.5*hat*、東側 5.5*hat* であり、1*hat* の相違を持っている。西側階段は、東側階段より勾配が緩く、やや昇りやすくなっているが、これは、東西対称の建築形式にも関わらず、西側を主要な入口とみなし、この形式を逸脱しない範囲で調整を施したためと見るべきであろう。

この修正は、おそらく プラ・ダクシナ (pra-dakshina 右回り) の礼拝に関わるもので、伽藍内を右回りに周回する動線にとって、経蔵の西面が正面とみなされるためであり、クメール寺院では、通例、東面する伽藍内の経蔵が西に限って入口を設けることが多いのも同様の理由によるのであろう。しかし南経蔵は、北経蔵のように明確な偏向がなく、東西の対称性を忠実に守っている。ただ、先に述べたように、西のポーチが 0.5*hat* 短く、階段はこの分内に入り込んでいる。東の階段は、西の階段と同様に、平面投影の距離で東西 6*hat* を取っているが、東ポーチの長さに合わせ、0.5*hat* 分外側に踏み出している。これは東辺基座の東面と基座上に設けられたステップによって補填されている。したがって南経蔵においても、西面を正面とする意識を、微かに窺うことができる。

### 5. 小結

部分的にすぎないが、バイヨン寺院の2つの経蔵について、細部についても踏み込んだ分析を試みた。この結果、経蔵の寸法計画を支える単位寸法は 412mm であったと判断することができる。経蔵の規模計画は、基座の規模によって決定され、東西 45*hat*、南北 26*hat* である。この規模計画は、南経蔵の基壇北西隅部が内回廊基壇上に重なっていることから、敷地に合わせて自在に調整できるものではなく、あらかじめ決められた範形を、やや強引に実現

shifted 0.5 *hat* to the east. This accords with the fact that the west side of the top half of the lower platform is 0.5 *hat* shorter than the east side. The distance from the bottom of the stairs on the west edge of the plinth to the entrance of the building is 1 *hat* longer than the distance from the east edge. Because the building is shifted toward the east, on the east face, the distance between the east edge of the upper platform and the porch pillars were made closer, so that only a length of 0.5 *hat* remained instead of 1 *hat*. The lengths of the east and west stairs as projected on the planar surface are different by 1 *hat*, with 6.5 *hat* on the west side and 5.5 *hat* on the east side. The gradient of the west side stairs is more moderate than the east side stairs and easier to climb, but a probable reason for this is that, regardless of the east-west symmetrical architectural style, the west side was considered the main entrance and adjustments were made within the scope of this style.

This correction is probably related to the *pra-dakshina* (clockwise) method of worship. The west face of the library is considered the main façade in relation to the flow of worship which rotates clockwise around the complex. This is perhaps the same reason why in Khmer temples, the entrance of the library within an east-facing complex is usually created in the west for most cases. However, in regard to the Southern Library, no clear deflection can be observed as in the Northern Library, and the east-west symmetry is faithfully maintained. Yet, as mentioned earlier, the west porch is 0.5 *hat* shorter, and the stairs is positioned this same amount inward. The east stairs, like the west stairs, is 6 *hat* in the east-west direction as projected on the planar surface, but it is shifted 0.5 *hat* toward the outside to correspond to the length of the east porch. This amount is compensated by the step established on the east face of the east side base and on top of the base. Therefore, it is possible to perceive the intention of making the west face the main façade of the Southern Library as well.

## 5. Conclusion

We attempted to conduct a detailed analysis of the two libraries of the Bayon, if only partially. As a result, we came to the conclusion that 412 mm is the standard measurement supporting the dimensional plan of the libraries. The scale plan of the libraries was determined by the scale of the plinth, and measured 45 *hat* in the east-west direction and 26 *hat* in the north-south direction. In this scale plan, the northwest corner of the platform of the Southern Library is positioned on top of the platform of the inner gallery. Taking this into consideration, we can see that the scale plan was not something that could be freely adjusted to match the premises, but that a predetermined shape was somewhat forcibly realized. According to the study results of the JSA Architecture Unit, the east-west width of the Innermost Library of Angkor Wat is also 45 *hat* (the standard measurement is slightly longer than 412 mm), so we must assume the possibility that a scale plan based on a unit of 5 *hat* had existed. If this inference is correct, there is the possibility

したものであると考えられる。JSA 建築班の調査結果では、アンコール・ワット最内経蔵の東西全幅もまた 45*hat* (単位寸法は 412mm よりも若干長い) であることが確認されており、少なくとも 5*hat* を単位とした規模計画が存在した可能性を予想しておく必要がある。このような推測が可能であれば、南北全幅を 26*hat* とした規模計画は、25*hat* に基づいて、対称性の寸法計画を容易にするため偶数値に変更した可能性も予想できるであろう。

寸法計画と建築形式は強く結びつけられていると考えることができるが、いずれにしても上述の分析結果によって、経蔵の造営尺度は 412mm であったと判断することができる。また、これはアンコール・ワット期から引き継がれた造営尺度と考えられる。クメール帝国の時代のものさしは、いぜんとして未発見であるが、おそらく当時の度制単位である 1*hat* の実長が 412mm 程であったことも、以上の考察から予想されることである。

## 註

- 1 L. Finot, "Notes d'archéologie cambodgienne : I. Nouvelles inscriptions cambodgiennes, II. Deux bas-reliefs d'Angkor Vat", *BCAI* 1912, pp. 187-188.
- 2 *ditto*, "Inscriptions d'Angkor," *BEFEO* 25, 1925, pp. 289-407, esp. pp. 393-406.
- 3 G. Coedès, "Études cambodgiennes," *BEFEO* 24, 1924, pp. 345-358, esp. pp. 348-349.
- 4 *ditto*, *IC*, I, pp. 69-71.
- 5 G. Coedès, "Études cambodgiennes," *op. cit.*
- 6 E. Mannikka, *Angkor Wat ; Time, Space, and Kingship*, University of Hawaii Press, Honolulu, 1996.
- 7 S. Saur, "Étude numérique des formes du troisième étage d'Angkor Vat ; Recherche de l'unité du mesure," *BEFEO* 82, 1995, pp. 301-305.
- 8 『アンコール遺跡調査報告書 2000』
- 9 『アンコール遺跡調査報告書 1996』
- 10 『バイヨン北経蔵修復工事報告書』

*Report on the Conservation and Restoration Work of the Northern Library of Bayon, Angkor Thom, Kingdom of Cambodia*, 2000.

この論考は<中川武監修『アジアの歴史的建造物の設計方法に関する実測調査研究』, 早稲田大学アジア建築研究室, 1999 年 (*Research Reports of the Field Investigation of Asia's Historic Architecture*, Waseda Univ. Asian Regional Architecture Laboratory, 1999.) > に掲載した、東タイのクメール遺構の分析結果に基づいたものである。東タイにおける実測調査は、Jayavarman VII によって各地に作られた街道駅舎付属寺院に比定された小規模な 19 件の伽藍を実測し分析したものである。遺構の残存状態は大きくばらついており、制約された調査から求めた結論であるが、対象遺構の件数が多く、一定の傾向を認めることができた。修復工事報告書に

that the scale plan which indicated the total north-south width as 26 *hat* was actually based on 25 *hat* but was changed to an even value to facilitate the symmetrical dimensional plan.

The dimensional plan and architectural style can be considered to be strongly interrelated, but given the above analysis results, we can conclude that the construction measure of the libraries was 412 mm. We also have reason to believe this construction measure was succeeded from the Angkor Wat period. Although the measure employed during the era of the Khmer Empire is yet undiscovered, we can still assume from the above analyses that the actual length of 1 *hat*, the unit of measurement of those times, was around 412 mm.

## Notes

- 1 L. Finot, "Notes d'archéologie cambodgienne : I. Nouvelles inscriptions cambodgiennes, II. Deux bas-reliefs d'Angkor Vat," *BCAI*, 1912, pp. 187-188.
- 2 L. Finot, "Inscriptions d'Ankor," *BEFEO* 25, 1925, pp. 289-407, esp. pp. 393-406.
- 3 G. Cœdès, "Études cambodgiennes," *BEFEO* 24, 1924, pp. 345-358, esp. pp. 348-349.
- 4 G. Cœdès, *IC*, I, pp.69-71.
- 5 G. Cœdès, "Études cambodgiennes," *op cit*.
- 6 E. Mannikka, *Angkor Wat: Time, Space, and Kingship*, University of Hawaii Press, 1996.
- 7 S. Saur, "Étude numérique des formes du troisième étage d'Angkor Vat. Recherche de l'unité du mesur," *BEFEO* 82, 1995, pp. 301-305.
- 8 *ARJSA* 2000.
- 9 *ARJSA* 1996.
- 10 *Report on the Conservation and Restoration Work of the Northern Library of Bayon, Angkor Thom, Kingdom of Cambodia*, 2000.  
This report is based on the results of an analysis of Khmer monuments in Eastern Thailand, which was presented in T. Nakagawa ed., *Research Reports of the Field Investigation of Asia's Historic Architecture*, Waseda Univ. Asian Regional Architecture Laboratory, 1999. In the East Thailand measurement survey, nineteen small-scale complexes built throughout the region by Jayavarman VII and designated as ancillary temples to highway station buildings were measured and analyzed. Their preservation conditions differ greatly according to monument, and there were many constraints to the survey, but a certain trend was discovered thanks to the large number of relevant monuments. The analysis of the Bayon library presented in the report respected the results of the East Thailand survey results and presents discussions within its scope.
- 11 Also in the East Thailand analysis results mentioned in note 10 above, the position of the outer edges of the elements composing the bottommost part of the enclosure wall was believed to form the reference position of the dimensional plan.
- 12 The shape of the cross section of the enclosure wall is created on the wall on both sides of the *gopura*. The bottom half of the enclosure wall is buried in the podium platform of the gallery and only the top half can be confirmed, but there is no doubt that it was attached to this wall. Additionally, there are also examples where reliefs were engraved at the top of the *gopura* wall, indicating that the enclosure wall directly appeared on the outside before

おいて行ったバイヨン寺院経蔵の考察は、東タイの分析結果を尊重し、この範囲に留めて議論を進めたものである。

- 11 前掲註 10 に記した東タイ調査の分析においても、圍繞壁最下部の部材の外端位置が寸法計画上の規準位置を形成すると考えられた。
  - 12 ゴープラの両端の壁に、圍繞壁の断面の形状が作り出されている。圍繞壁の下半は回廊基壇の中に埋没し、確認できるのは上半に限られるが、この壁面に圍繞壁が取りついていたことは確実である。またゴープラ壁面上部にレリーフが施されている例もあり、入口のない回廊の中に組み込まれてしまう以前、この壁面が外部に直接表れていたことが判る。現在は連子が失われた窓から回廊の中に入ることができるが、この回廊は入口を持たないため、本来、中に入ることは不可能であった。したがって圍繞壁の痕跡は、ひとの目に触れることがなかったはずである。整形を施されずに痕跡が残された原因はこのためであろう。
  - 13 Glaize, M., *RCA*, 1941 年 2 月, 1942 年.
  - 14 Glaize, M., *RCA*, 1944 年 1 月, 1944 年 2 月.
  - 15 前掲註 10 に掲載した論考「アジアの歴史的建造物の設計方法に関する実測調査研究」にて、中軸線をタブー視する理由について考察している。
- 
- it was incorporated into the entry-less gallery. Today, it is possible to enter the gallery from the windows without balusters, but since the gallery does not have an entrance, it was originally impossible to enter it. This means that the vestiges of the enclosure wall could not have been visible, and is perhaps why the vestiges remained on the walls without any attempts of processing the wall surface.
- 13 M. Glaize, *RCA*, 1941-2 and 1942.
  - 14 M. Glaize, *RCA*, 1944-1 and 1944-2.
  - 15 Analyses are made of the reason why the axial line was considered taboo in the "Research Reports of the Field Investigation of Asia's Historic Architecture" mentioned in note 10 above.

Fig. 1.3-1a Site Plan.

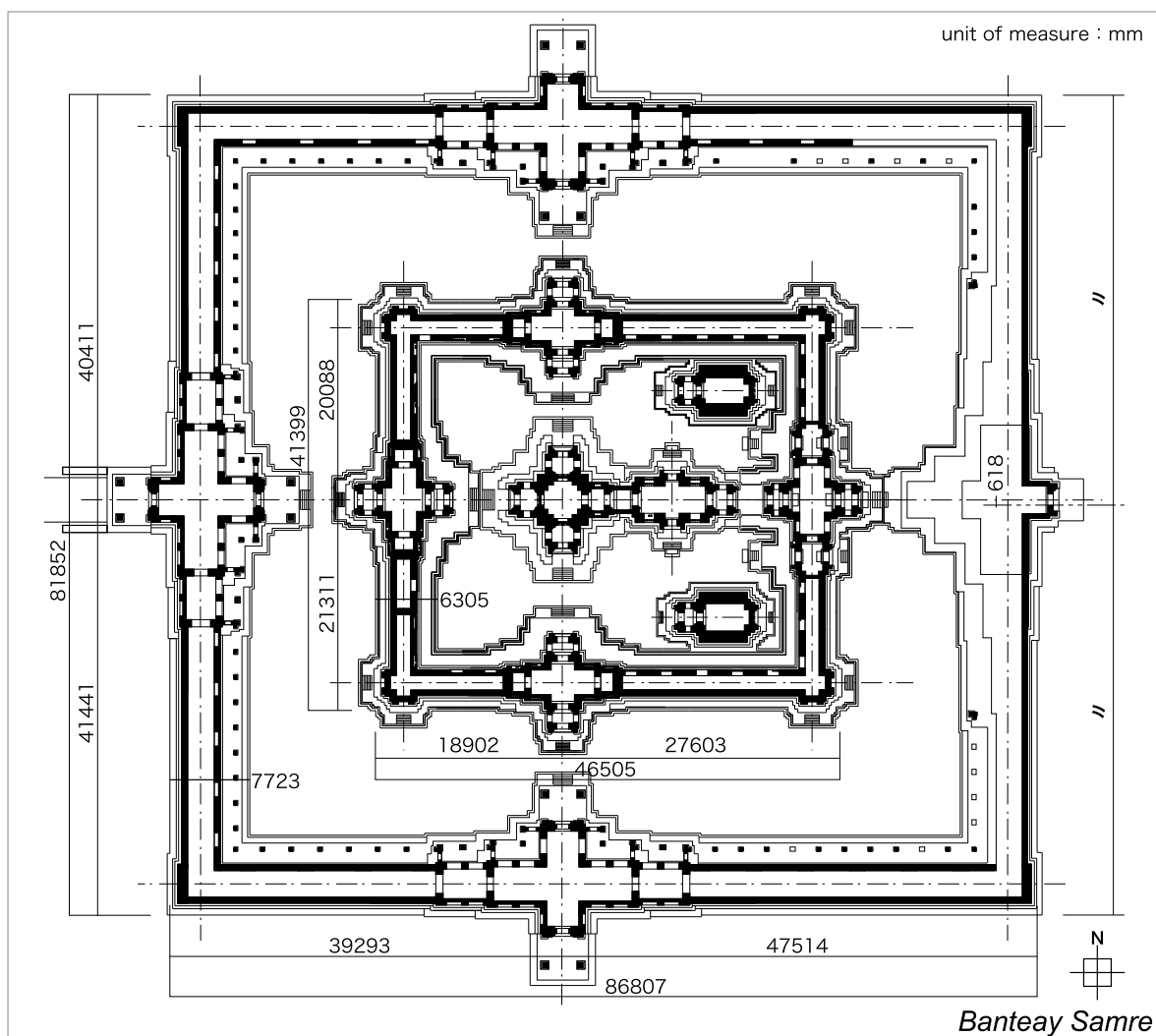
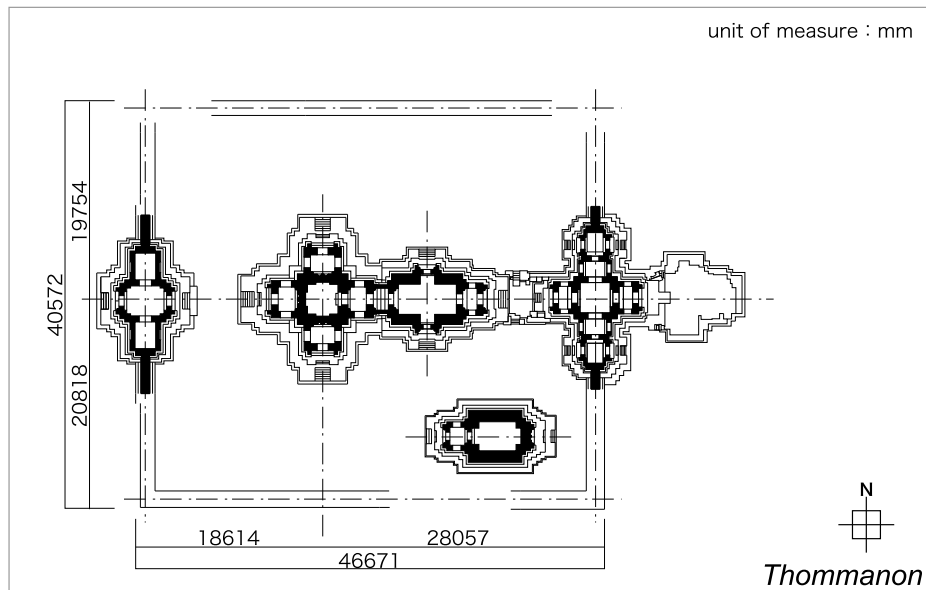


Fig. 1.3-1b  
Abstraction  
the unit of measure.

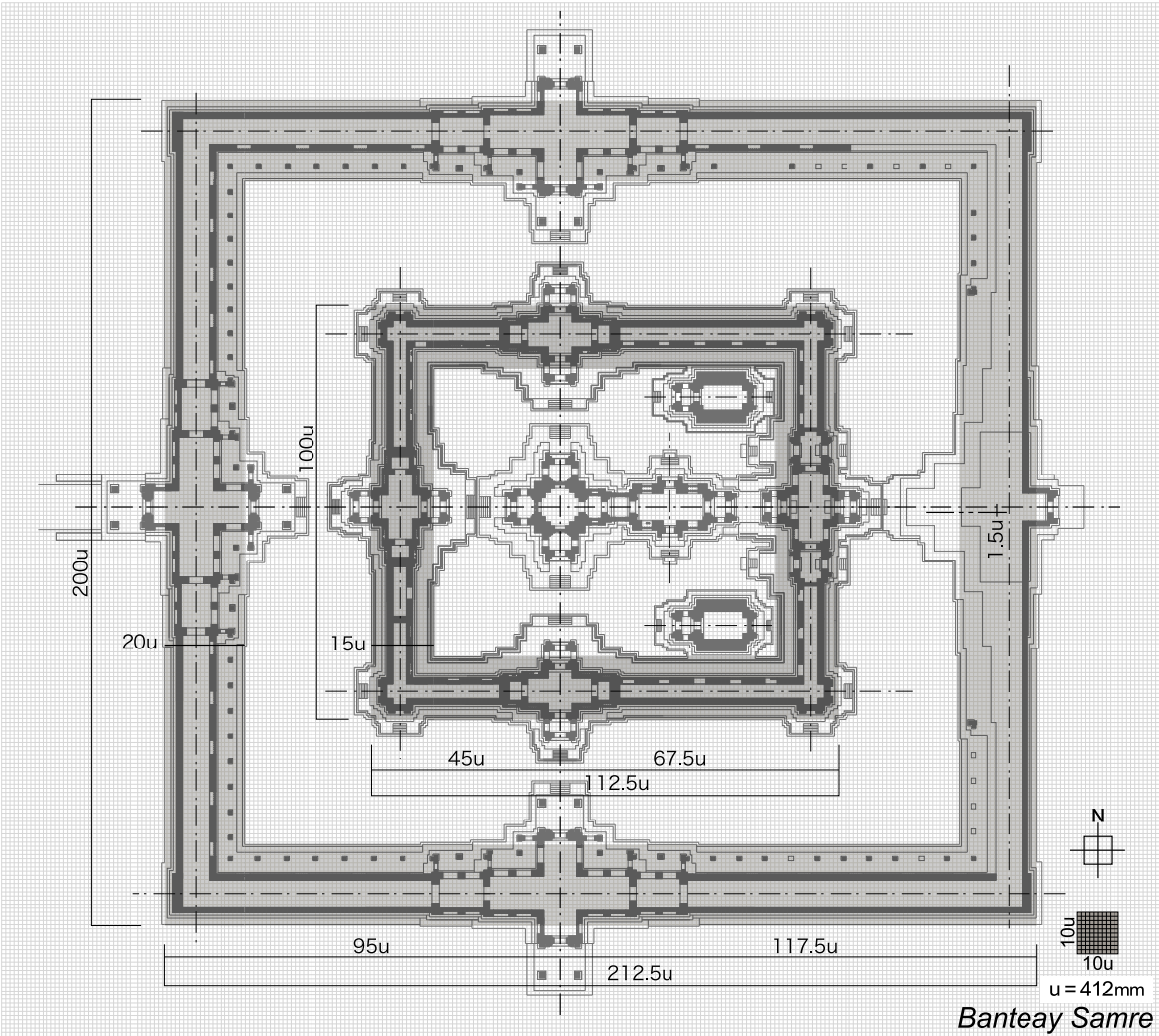
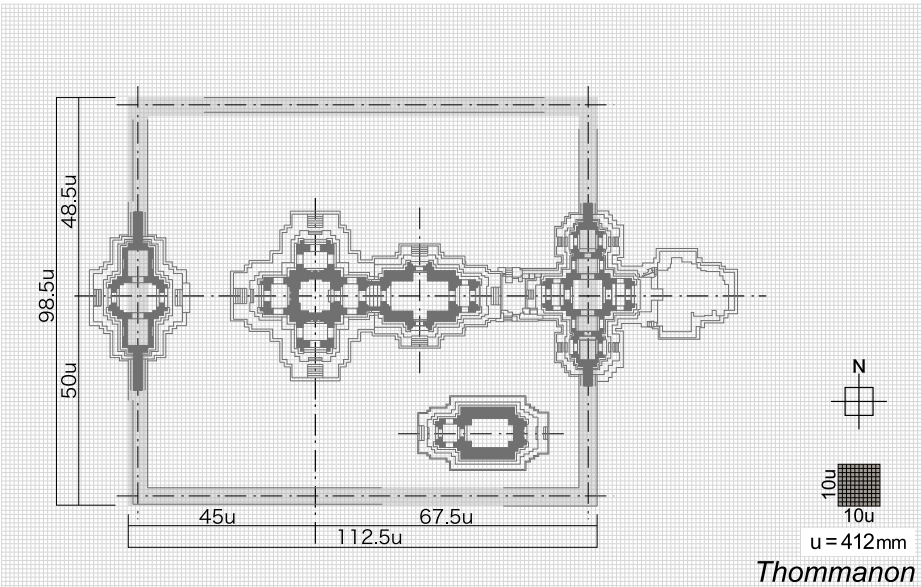


Fig. 1.3-1c

Method of plan  
for the scale  
of complex.

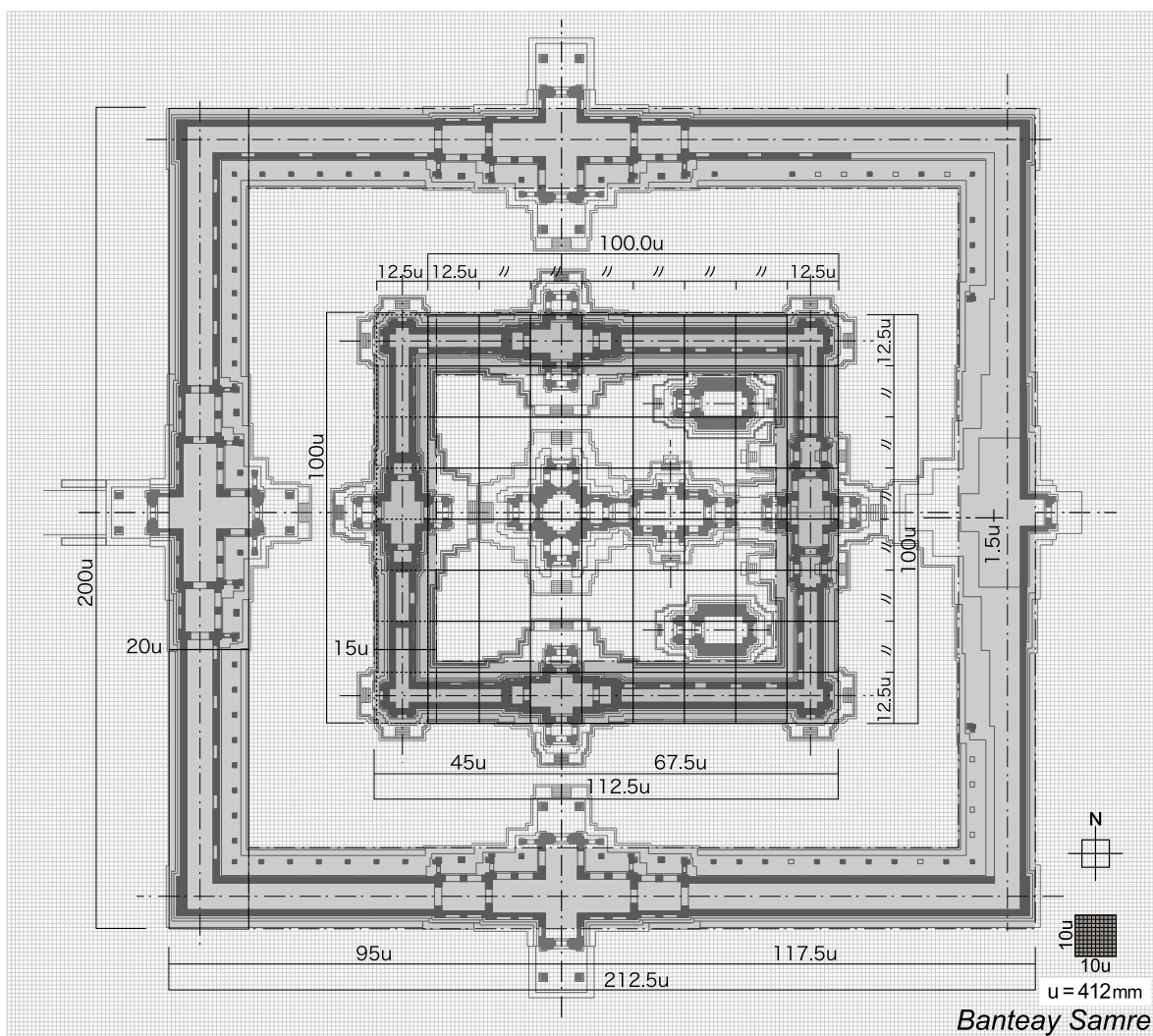
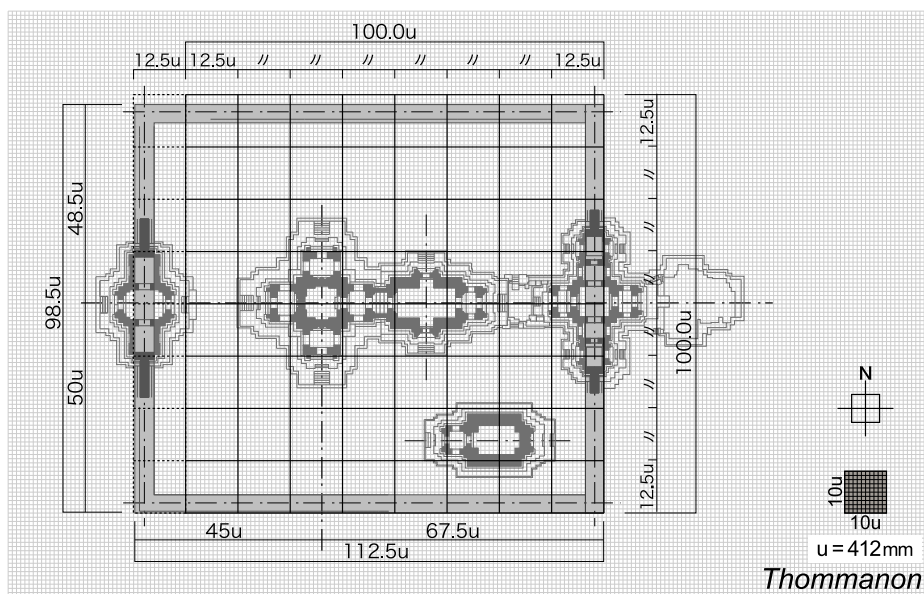
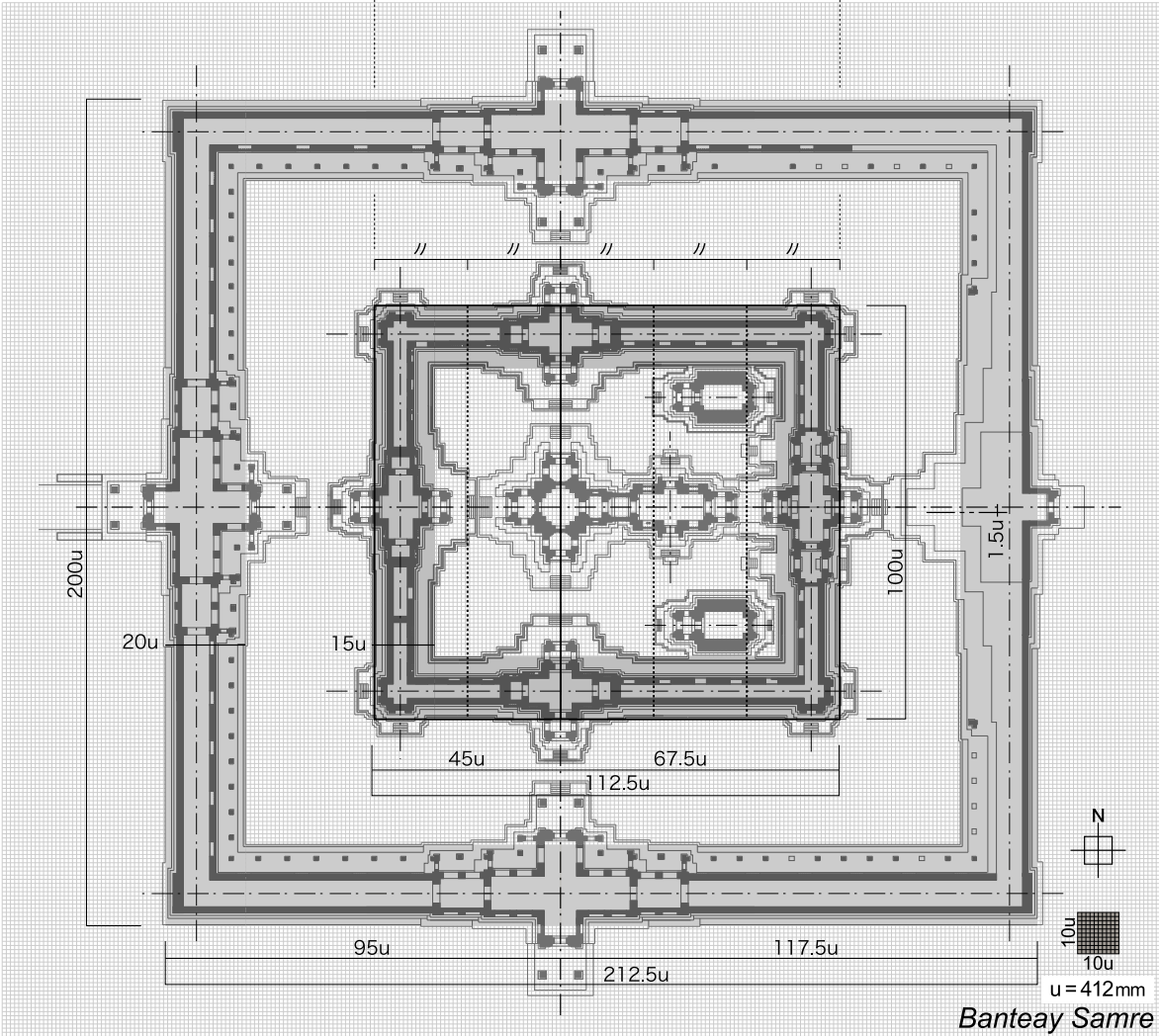
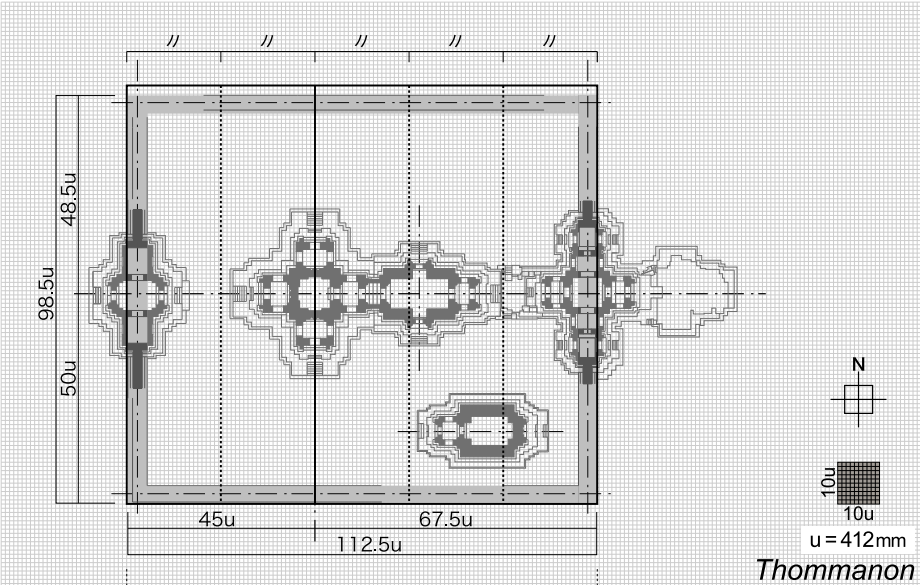


Fig. 1.3-1d  
Method of plan  
for placement  
of buildings.



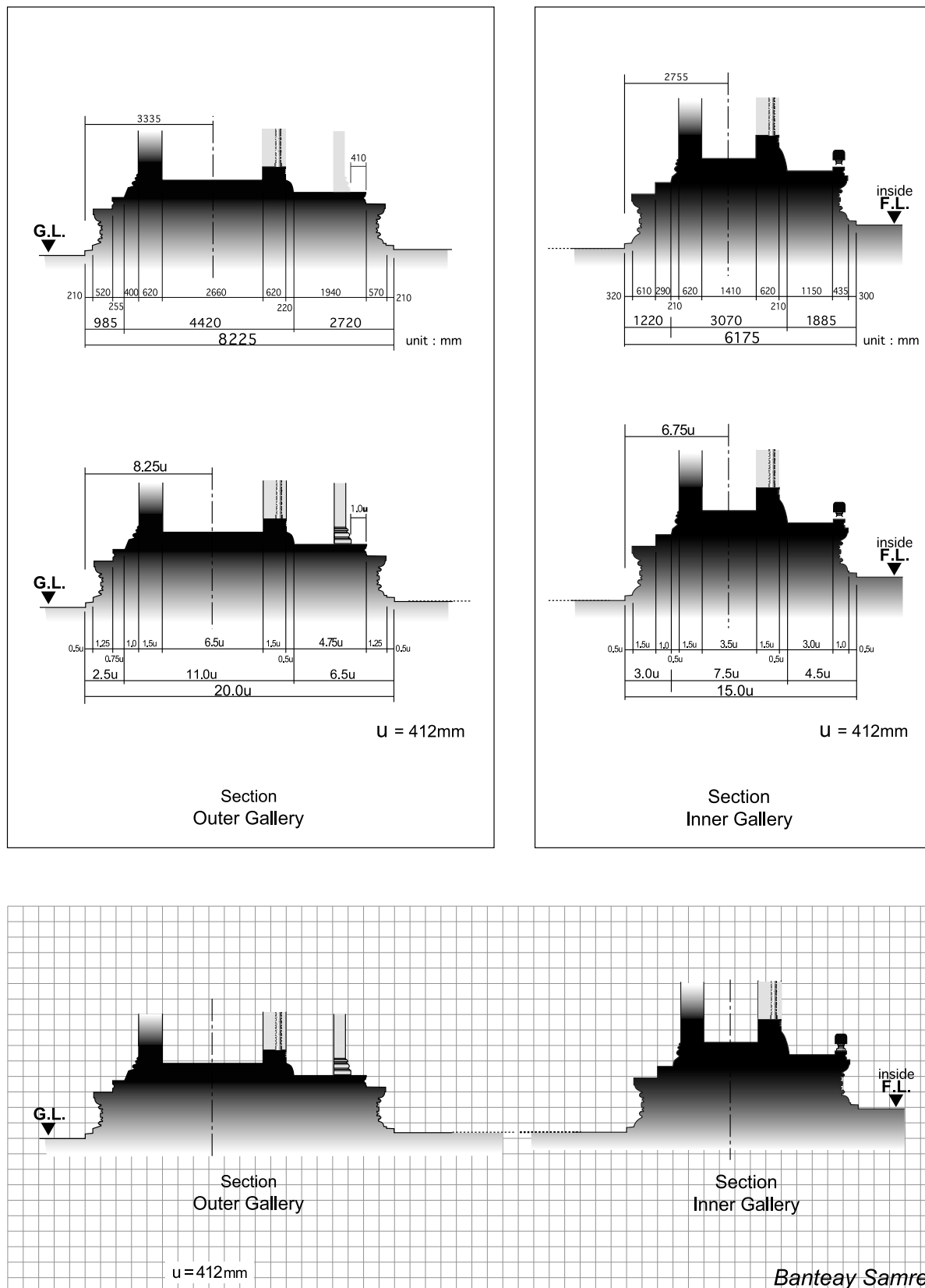


Fig. 1.3-1e Abstraction the unit of measure in Sections of Galleries, Banteay Samre.

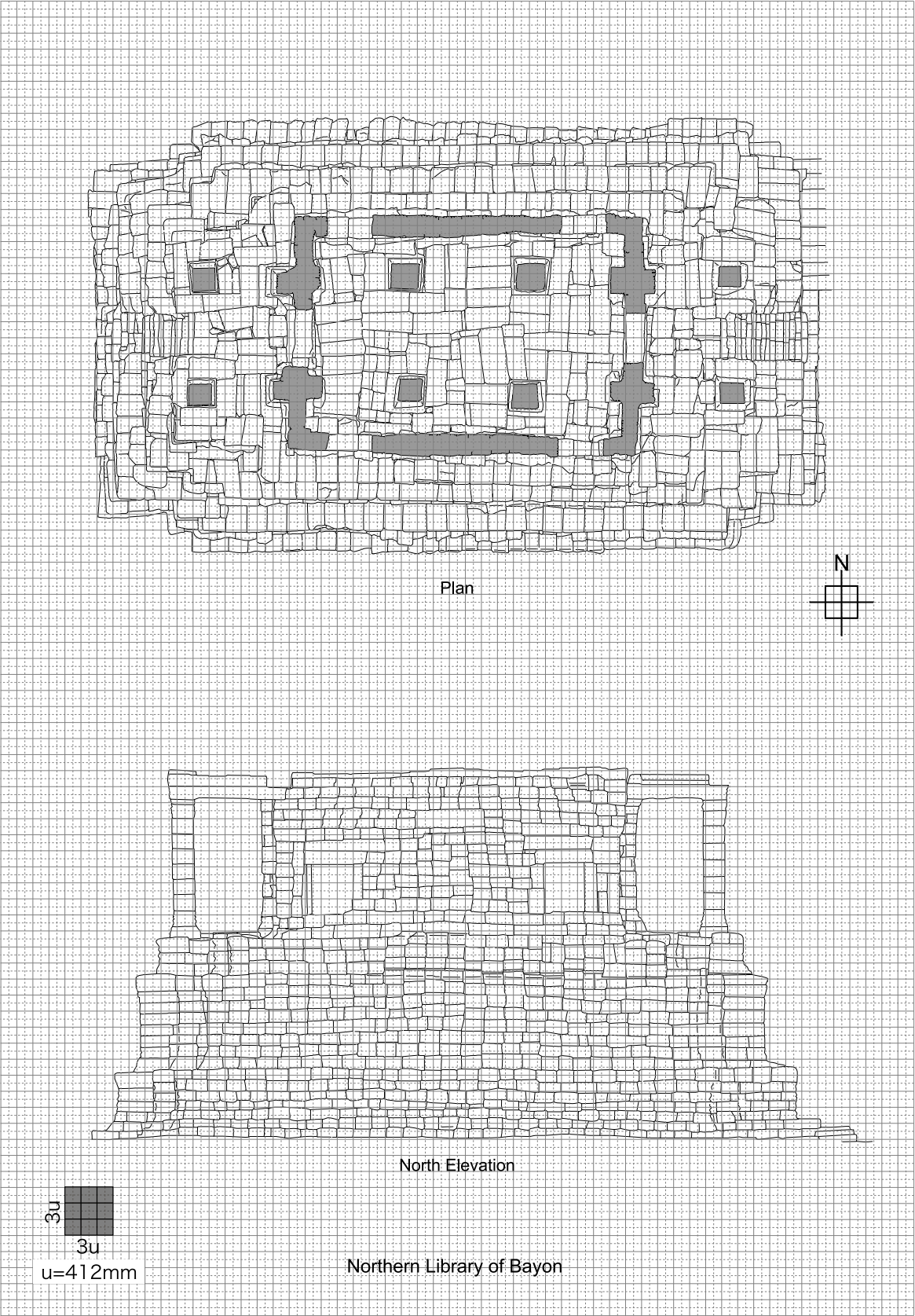


Fig. 1.3-2a Abstraction of plan of measurements in Northern Library of Bayon.

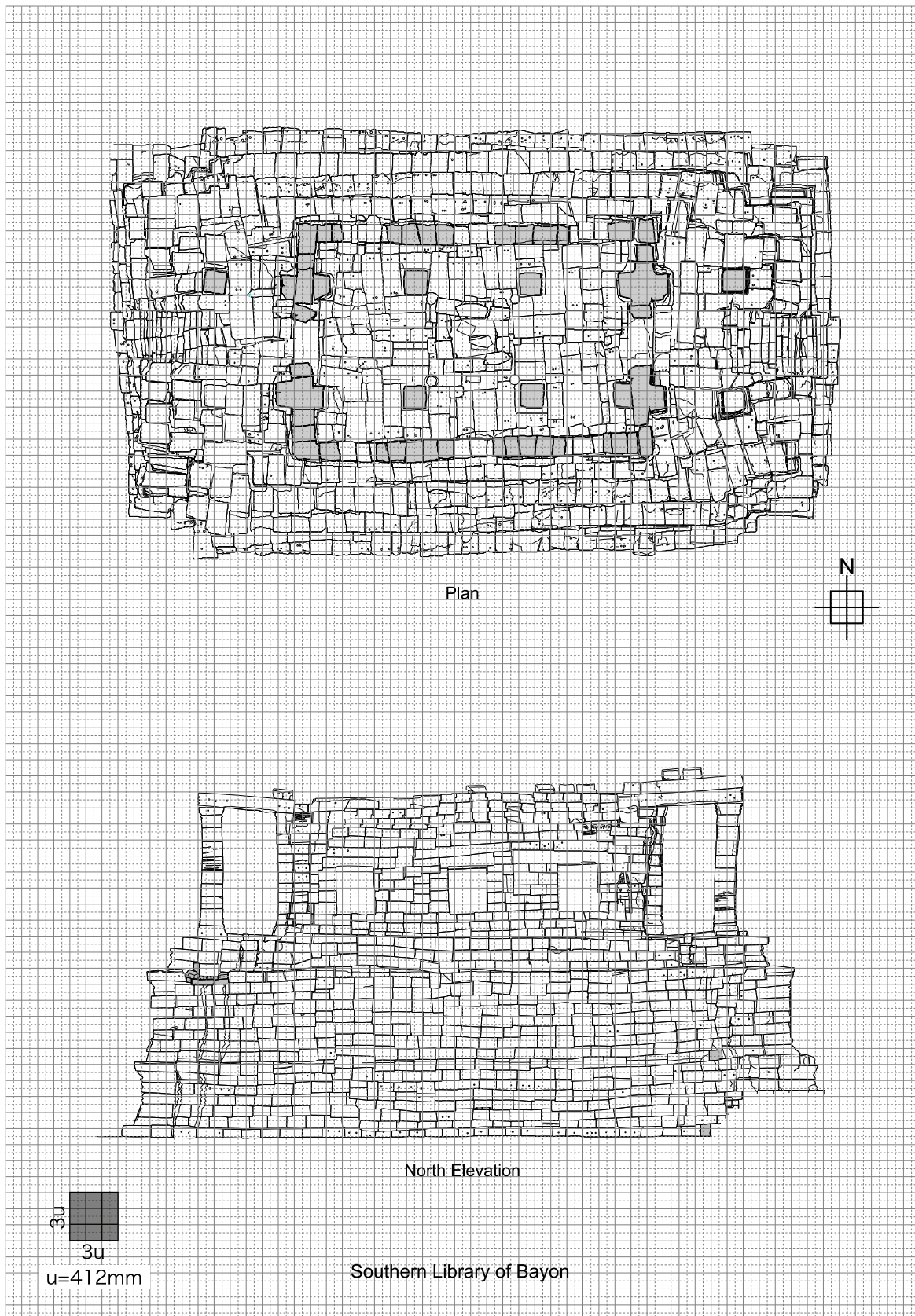


Fig. 1.3-2b Abstraction of plan of measurements in Southern Library of Bayon.

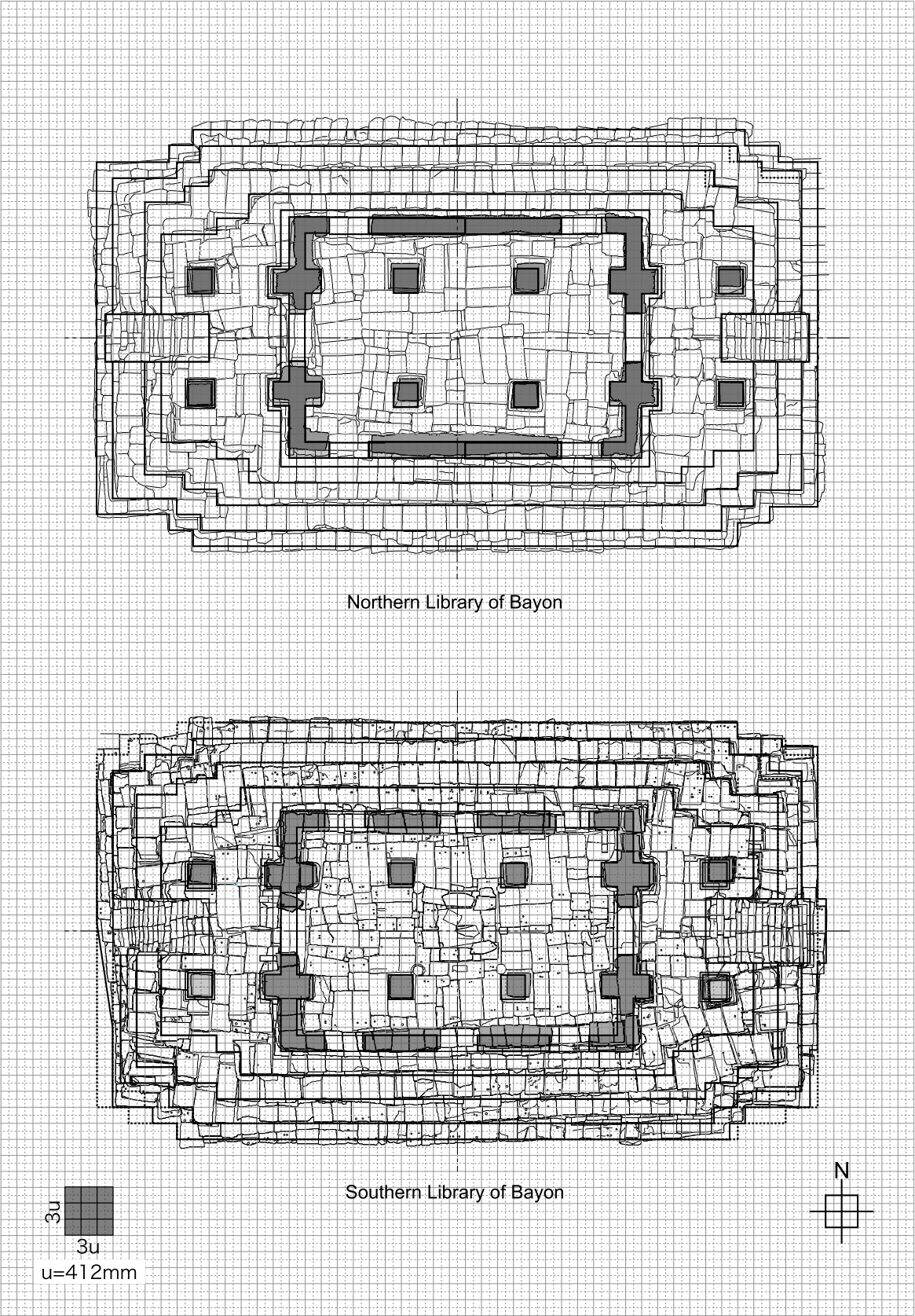


Fig. 1.3-2c Abstraction the unit of measure in Libraries of Bayon.

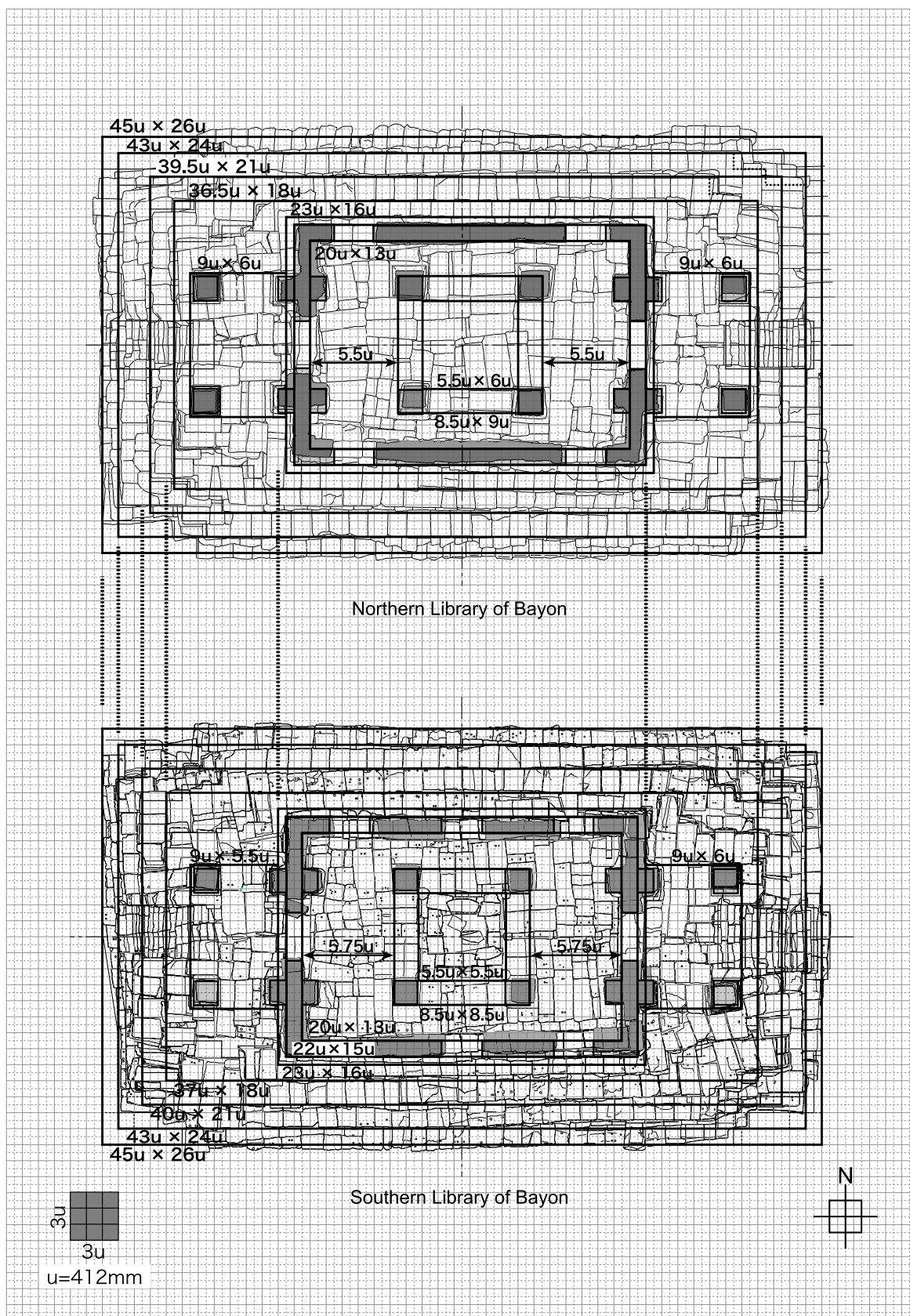


Fig. 1.3-2d Method of plan for measurement in Libraries of Bayon.

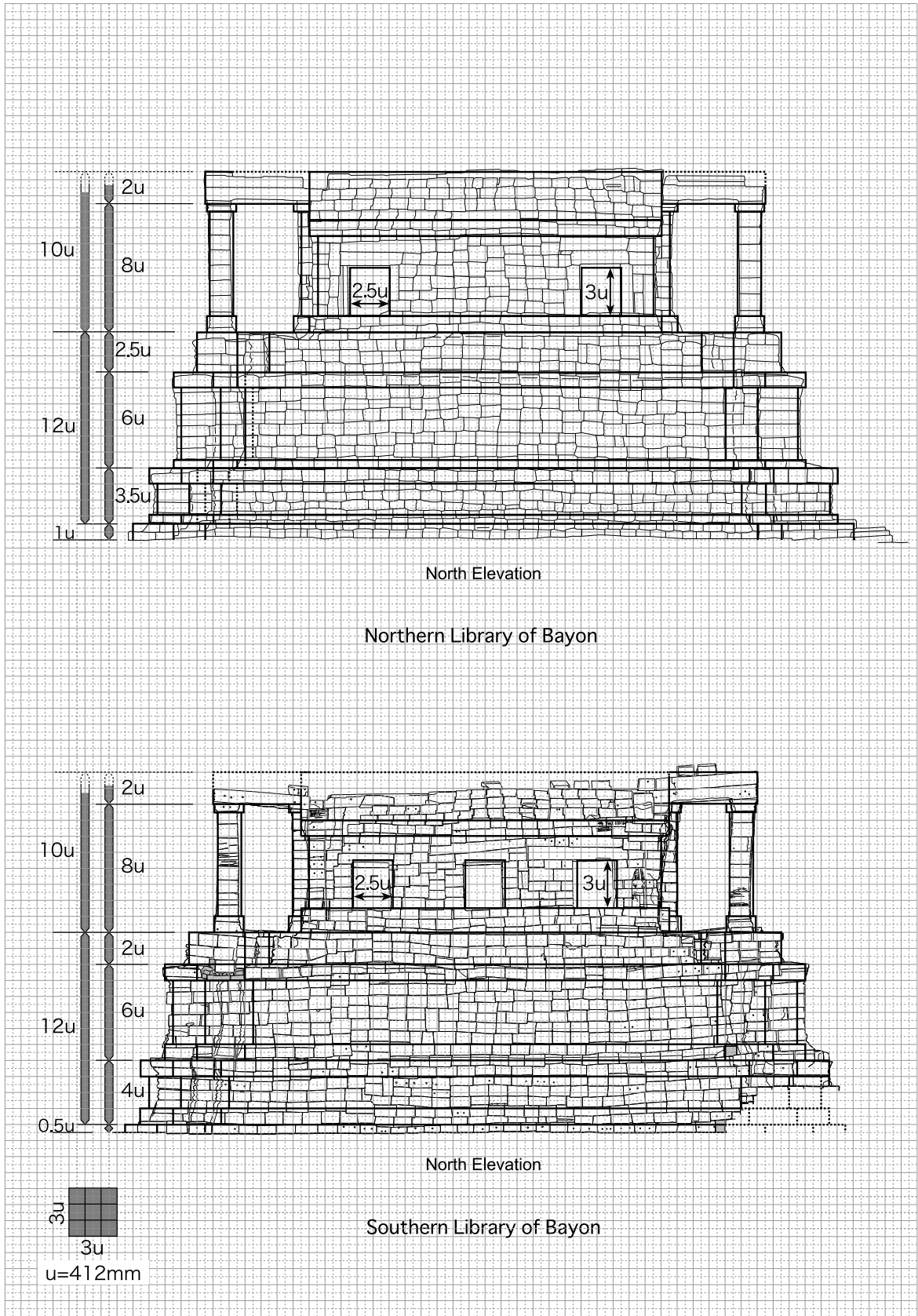


Fig. 1.3-2e Abstraction of plan of measurements in elevation of Libraries.

## 1.4 Restoration Techniques

## 1.4 修復技術

### 1.4.1 Traditional Construction and Structural Method of the Bayon Period and the Techniques of Conservation and Restoration

TSUCHIYA Takeshi

### 1.4.1 バイヨン期の伝統構法と保存修復技術

土屋武

#### 1. Introduction

In this chapter, the structure of buildings symbolic of Khmer architecture and the methods by which they are constructed in reference to the characteristics, damage trends, and conservation and restoration techniques of Angkor Wat and Bayon in particular is briefly described.

In their restoration projects, EFEO and other organizations have similarly conducted structural analyses of the monuments and assessed their problems, as well as examined and implemented various restoration methods.<sup>1</sup> G. Croci also gives a detailed account of the structural properties and restoration methods common to all Khmer architecture in his reports and published works.<sup>2</sup> Please see the previous chapter for an overview of construction techniques.<sup>3</sup> Structures of Khmer architecture, including their characteristic corbel vault roof, demonstrate movements and damage trends that are basically similar to those commonly seen in stone architecture. There is a wealth of studies and restoration experiences accumulated primarily by project teams from Western Europe that is related to the structural properties, damage processes, and conservation and restoration techniques of stone architecture. The study and restoration of Khmer architecture could therefore be regarded as an extension of those studies and experiences. However, it is also a fact that there are many subjects that need to be studied in more detail.<sup>4</sup> These include the relationship between ground composition, natural environment and foundation compacting method, and the movement of the lower structure; the relationship between the natural environment and the deterioration of materials; and the relationship between dry masonry stonework and the movement of the upper structure.

## 2. Traditional construction methods and damage characteristics

### 2.1 General structure and damage processes

Structures of Khmer architecture can be divided into the subbase consisting of the ground, the basic foundation, and the platform, and the upper structure that includes walls, pillars, and the roof. The upper structure is for creating an internal space, and the subbase is structured to stabilize the upper structure. In other words, the upper structure can be said to be the significant part of the building, while the subbase is a subordinate structure. However, in temple architecture, where the building itself is an object of worship along with deity images and the linga, it is frequently more important to achieve a majestic appearance than to create an internal space. In this case, the high platform and terrace of temples are constructed more for the sake of appearance than for the purpose of supporting the upper structure. Also, one-story buildings and galleries often have a corbel vault so that the roof, which is an adoption of

#### 1. はじめに

本章では、クメール建築の建造物を成り立たせている構造とそれを造るための構法について、アンコール・ワットとバイヨンを中心に、その特性と破損傾向、保存修復技術について簡単にまとめた。

このテーマについては、EFEOをはじめとする各組織の修復プロジェクトにおいて、それぞれ対象遺構の構造解析と問題点の把握、修復方法の検討とその実施が行われている<sup>1</sup>。また、クメール建築全体の構造特性と修復方法に関しては、ジョリュジュ・クローチの報告と著作に詳しくまとめられている<sup>2</sup>。建造技法全般に関しては前章を参照されたい<sup>3</sup>。クメール建築の構造は、その特徴ともいえる迫出し積みヴォールト屋根も含めて、基本的に石造建築一般に見られるものと同様の挙動と破損傾向を示している。石造建築の構造特性と破損プロセス、保存修復技術については西欧各国を中心として多くの研究と修復経験の蓄積があり、クメール建築における研究と修復もその延長線上に捉えることができよう。その上で、地盤構成・自然環境・地業版築構法と下部構造の挙動との関係、自然環境と材料の劣化の関係、石材ブロックの空積み構法と上部構造の挙動の関係など、より詳細な研究を必要とする課題も多い<sup>4</sup>。

## 2. 伝統構法と破損の特徴

### 2.1 全体構造と破損プロセス

クメール建築の構造は、地山・基礎地業・基壇から構成される基部と壁・柱・屋蓋から構成される上部架構とに分けて考えることができる。上部架構は屋内空間を構えるための構造であり、基部は上部架構を安定させるための構造である。つまり建造物としては上部架構が目的であり、基部は従属的な構造と考えることができる。しかし寺院建築では、神像やリングだけでなく建造物そのものが信仰の対象となっているため、しばしば屋内空間を構えること以上に外観を荘厳化することに設計の重点が置かれる。そのため高く築き上げられた基壇やテラスは上部架構を支持する目的以上にそれ自体が目的として造られている。また平屋建物や回廊は木造建築の意匠を踏襲した屋根を載せるために迫出し積みのヴォール

the design of wooden architecture, can be placed on top. Materials normally used include wood, burnt bricks, sand, laterite, and sandstone, but the compound utilization of these materials can be seen in many places as a result of the gradual shift in the chief construction material, from wood to brick structures, and finally to sandstone ashlar masonry. This shift occurred in the process of seeking a more durable, high caliber material and experimenting with various sandstone construction methods. However, it was not necessarily an improvement from the long-term perspective, because buildings with a sandstone upper structure have many structural disadvantages.

The main characteristic of the subbase structure of Khmer architecture is the sustaining wall built by dry masonry and the compacted filling of the basic foundation and platform. The wall is comprised of vertically stacked blocks and is vulnerable to shear stress originating from the internal soil pressure. The compacted ground composed primarily of sand has slid in some cases, such as in the periphery of the multi-tier terrace of Baphuon, while in the multi-tier terraces of Angkor Wat and Bayon, it continues to support the massive load of the upper structure to this day. Deformations seen at the subbase of monuments are more or less stable today because the soil has consolidated, but they probably advanced rapidly at an early stage after construction. It is highly likely that many towers and galleries collapsed during the Angkor era.

There are four construction methods for the upper structure of Khmer architecture: wooden roof truss (Fig. 1.4.1-2.1a), corbel dome (Fig. 1.4.1-2.1b), corbel vault (Fig. 1.4.1-2.1c), and pillar and beam structure. They feature 1. a corbel upper structure placed on thin walls, and 2. the concomitant use of corbel masonry and a pillar and beam structure. The planar shape of the towers in most monuments shows that wall thickness is normally less than one-third its span. Because the upper load is concentrated on thin walls, large deformations occur in the subbase, and ultimately cause the upper structure to collapse. This is in direct contrast to corbel towers in India in which wall thickness is usually greater than half its span. Similarly, in many one-story buildings and galleries, pillars and beams support the massive load of a corbel roof, so shear and flexure fractures of pillars and beams occur in conjunction with concentrated uneven subsidence. In the 11th century, a corbel three-aisle layout appeared (Fig. 1.4.1-2.1d). The layout of wooden architecture was probably adopted to create a more expansive interior space. The roof of the aisle and connecting beams of this layout function as flying buttresses and help stabilize the roof of the nave. We do not know to what extent the builders of the time were aware of this function, but various measures were applied to the joints of the connecting beams. The nonuse of connecting beams and the vaulted aisle in the gallery of Bayon were probably one of the conclusions achieved by Khmer construction. The thick pediment of one-story buildings is another feature of Khmer architecture. Because a pediment weighs much more than other components of a building, the platform subsides greatly in proportion to the pediment. Along with pillar height, it is a principle factor that causes a porch to collapse easily. In one-story buildings, there is often loss of elements at the corners of the aisle wall. This is primarily due to

トを架けている。材料としては主に木、焼成煉瓦、砂、ラテライト、砂岩を用いるが、木造架構から煉瓦造を経て砂岩造切石積みへと主材料が徐々にシフトしていった結果、材料を複合的に使用している例が所々見られる。主材料のシフトは、永続性のある格の高い材料を志向して砂岩造の構法を思考錯誤しながら改良していった過程であるが、砂岩材による上部架構の建造は構造上不利な点が多く、長期的に見た場合その改良が必ずしも成功しているわけではない。

クメール建築の基部構造の特徴は、石ブロックの空積みによる擁壁と版築による基礎地業・基壇盛土である。擁壁は垂直に整層積みするため、内部の土圧によるせん断応力に対して弱い。砂を主材料とした版築は、バプーオンの多層テラス周縁部のように滑りをおこしている例がある一方で、アンコール・ワットやバイヨンの多層テラスでは巨大な荷重を良く支えて今日に至るまで多くの上部架構を残している。遺構に観察される基部の変形は、現在は土の圧密が終わりほぼ安定した状態にあるが、建造後は早いうちに進行したと予想され、おそらくアンコール時代中に崩落していた塔や回廊も多くあっただろう。

クメール建築の上部架構は、木造小屋組 (Fig. 1.4.1-2.1a)・迫出し積みドーム (Fig. 1.4.1-2.1b)・迫出し積みヴォールト (Fig. 1.4.1-2.1c)・柱梁構造の4種の架構法を持つ。その特徴は、1. 薄い壁体にかかる迫出し積みの屋蓋、2. 迫出し積みと柱梁構造の併用、である。塔の平面形状を見ると多くの遺構ではスパンに対する壁厚が1/3以下であり、上部荷重が薄い壁体に集中した結果基部に大きな変形を生じさせ、屋蓋が崩落する主要原因となっている。これはインドの迫出し積みの塔がスパンに対する壁厚を1/2以上にしていることと対照的である。また平屋建物や回廊では迫出し積み屋根の大荷重を柱と梁で支えようとしたため、集中した不等沈下と同時に多くの柱と梁にせん断・曲げ破壊が発生している。また11世紀には迫出し積みによる三廊形式 (Fig. 1.4.1-2.1d) が出現する。これは屋内空間を拡張するために木造建築の形式を写したものと思われる。この三廊形式の底の屋根と繋ぎ梁はフライングバットレスとして働き身舎の屋根を安定させる。当時の工匠がその効果をどこまで認識していたのか分からないが、繋ぎ梁の仕口には様々な試みがなされている。バイヨンの回廊に見られる繋ぎ梁の不使用と底のヴォールト化はクメールの構法が行き着いた一つの結論であろう。また平屋建物の妻壁が厚く造られることも特徴に加えられる。妻壁の荷重は他に比べて極端に大きく、基壇の沈下量もそれに応じて大きい。これは柱成の

the extreme concave deformation of the platform caused by the difference in the weight of the pediment over the nave and over the aisle.

The damage process of an entire structure can be considered as shown in Fig. 1.4.1-2.1e. General damages to a building are fundamentally perceived as upper structure deformations and collapse. Put another way, general damages are shifts and failure of the dynamic equilibrium of a building structure. The primary cause of upper structure damage is subbase deformation. The firmness of the subbase is directly reflected in the stability of the building. The second cause is the collapse of upper structure elements. The uneven load produced by corbel masonry can easily cause sandstone and laterite elements to fracture, as they are relatively weak stone elements. Regular maintenance work was probably carried out to repair leaks and to remove plants. However, short of changing the construction style, there was no way to halt the damages, because the above causes of damage are all related to the structural properties of a building. Dismantlement and rebuilding of an existing building would have been impossible with the technology of those days. Therefore, although repairs were made, we assume the repair work simply involved the partial replacement of damaged elements and the addition of structural reinforcement.

The section below will discuss the characteristics and damage trends of structures and construction methods that are characteristic of stone structures.

## 2.2 Corbel dome

Towers in Khmer architecture are structured as a pointed corbel dome. Because a rectangular plane is used, the upper load concentrates on the central parts of each wall surface. However, as the subbase of those central parts compresses and subsides, an arch effect is produced in each wall surface and works to gradually disperse the load. If the subbase slides, the structure becomes unstable. Thus the problem lies in the thinness of the walls. The weight of the load per unit area directly influences the movements of the tower. When towers began to be used in combination with a vault-roofed side chamber, we see the emergence of structures in which an arch is opened in each wall surface to support the upper structure, as well as structures where the tower is built on a cloister vault. If the tower is supported by an arch or a cloister vault, the subbase is more likely to deform, but because the four faces of the upper structure is supported by the side chamber, this structure is generally stable.

Major damages related to the corbel dome include the falling and vertical cracking of the entire upper structure and the collapse of the elements at the foot of the walls.

The falling of the entire upper structure is caused by the tilting of the platform. This phenomenon in which the entire platform subsides unevenly in a certain direction occurs most readily in an environment where the soil pressure of the foundation tends to be released in one direction.

Vertical cracking of the entire upper structure is caused by platform deformation. Vertical cracks are caused by horizontal joint openings and by vertical shifts. Horizontal joint openings in the upper structure occur from the top down when the bot-

高さとともにポーチを容易に崩落させる原因になっている。平屋建物では底の壁体角部にしばしば部材の欠損が生じている。これは妻壁の身舎部分と底部分の重量差により基壇が極度に凹型変形することが原因である。

全体構造の破損プロセスは Fig. 1.4.1-2.1e のように考えられる。建物全体の破損は基本的には上部架構の変形および崩落として認識されるが、これは建物構造の力学的平衡のシフトと破綻と言い換えることができる。上部架構の破損の第1の原因は基部の変形であり、基部がどれだけ堅固かが建物の安定性にそのまま反映される。第2の原因は上部架構の部材破壊であり、迫出し積みによる偏荷重は石材としては比較的強度の低い砂岩とラテライトを容易に破壊する。定期的なメンテナンスにより雨漏りの修理や草木の除去は行われていたであろうが、これらの破損原因は構造特性に基づくものであるため、構法が変更されない限り破損の進行を止めることはできない。一度建造された建物の解体再構築は当時の技術では難しく、当時も修理は行われたであろうが破損部材の部分的な交換と構造補強に留まったものと思われる。

以下、石造架構の特徴的な構造と構法についてその特性と破損傾向を記す。

## 2.2 迫出し積みドーム

クメール建築の塔は尖塔形の迫出し積みドーム構造で造られる。矩形平面を用いるため荷重が壁体各面の中央部に偏りはするが、中央部の基部が圧密沈下してゆくにつれ壁体各面にアーチ効果が発生し、荷重は徐々に分散してゆく。これに対して基部の滑りが発生すると構造は不安定になってゆく。問題はやはり壁体が薄いことであり、単位面積当たりの荷重の大きさは、各挙動をそのまま拡大してしまっている。塔がヴォールト屋根の側室と組み合わせて用いられるようになると、壁体各面をアーチで開口して屋蓋を支える構造とクロイスターヴォールトの上に塔を載せる構造が現れる。塔をアーチやクロイスターヴォールトで支えると基部に変形をおこしやすいが、この場合上部架構の4面が側室で支えられるため、全体としては安定しているようである。

破損は、上部架構全体の傾倒と縦割れ、壁体裾部の部材の圧壊、などが代表的なものである。

上部架構全体の傾倒は、基壇の傾斜が原因である。これは基壇全体が一方向に偏って沈下してゆく現象であるため、基礎の土圧が一方向に解放されやすい環境で発生する。

tom surface of the platform wall subsides outward, and occur from the bottom up when the subbase filling slides outward. In the former, each of the wall surfaces gradually open outward as the joints continue to open, and the roof eventually collapses. When a platform slides, vertical shifting accompanies the horizontal opening of the joints. When this happens, the interlocked elements of the structural frame try to resist the shifting of elements. Therefore, joint openings are more likely to occur where the elements are small and their masonry allows for only a small amount of interlocking. Particularly in the towers of Bayon, there are noticeable fractures in the corners of the upper structure. This is because the stonework at the corners of the towers' upper structure has almost straight joints. It is not known, however, why such masonry style was taken. Also, when a doorway is installed in the middle of a wall in the tower, the upper load becomes concentrated on the left and right sides of the doorway span and tends to cause the subbase to slide. At this time, horizontal joint openings are produced from the lintel over the doorway in an upward direction in accordance with the displacement of the platform. In the case of joint openings caused by intruding tree roots, the roots often serve to reinforce the entire upper structure from the outside and essentially protect it from collapse. However, as the trees grow, the elements gradually collapse and the building eventually loses its shape. Moreover, trees that take root in the upper structure cause it to collapse under their weight.

The collapse of elements at the foot of walls occurs when the upper load concentrates on the outer side of the foot of the walls. It occurs more readily in towers with a large span. In the case where a sustaining platform wall extends from the foot of the walls, the elements of the sustaining wall may also collapse. These damages are extremely dangerous, because they may undermine the structural balance of the building if there are too many of them.

### 2.3 Corbel vault

The corbel vault is the most distinguishing feature of Khmer architecture. It has the following properties: 1. because the friction between elements supports the horizontal shear stress, thrust size is restricted by the maximum static friction of the upper surface elements, and 2. due to the extremely unbalanced load, the weight and span of the vault is restricted by the strength of the material. In order to create a vault, it is necessary to distribute the weight evenly across the cross section of the frame structure. Khmer builders probably came to this conclusion through long years of experience and gradually worked up to constructing vaults with larger spans. However, despite the fact that the load per unit area on the platform is much smaller than that placed on the tower, the majority of the roofs of existing monuments are collapsed. Judging from this situation, it is clear that the method went beyond what was structurally reasonable.

Major damages related to the corbel vault include the tilting and collapsing of walls and pillars, inner shifting of roof elements, horizontal cracks in the cornice element of the breast wall, vertical cracks and flexure fractures in the pillar elements, flexure fractures in the connecting beam of the aisle, and ero-

上部架構全体の縦割れは、基壇の変形が原因である。縦割れは目地の横開きと縦ズレとの2要素に分けて考えられる。目地の横開きは、基壇の壁体数面が外転びに沈下する場合には上部架構の上から下に向かって生じ、基部盛土が外方向に滑る場合には上部架構の下から上に向かって生じる。前者は進行するにつれて壁体の各面が外転びに開いてゆき、最終的に屋蓋が崩落する。目地の縦ズレは、基壇に滑りが発生する場合に目地の横開きに伴って発生する。このとき躯体を構成する部材は相互の噛み合いによって部材間のズレに抵抗する。よって目地開きは部材が小さく噛み合いが少ない積み方をしているほど発生しやすい。バイヨンの塔では屋蓋角部の崩落が顕著である。これは塔屋蓋の角部の石積みが芋目地に近くなっていることが原因であるが、何故そのような石積みをしたのか理由が分からない。また、塔の壁体中央に入口が設けられる場合、上部荷重が入口のスパンを開けて左右に集中するため、基部の滑りを生じやすい。このとき、基壇の変位に応じて、入口のマグサから上に向かって目地の横開きが発生する。樹根の侵入による目地開きの場合、上部架構全体は外側に絡まった樹根により逆に補強されるため崩落を免れることが多いが、樹木が育つにつれて徐々に部材が崩落してゆき建物形状を失ってゆく。また、屋蓋に根付いた樹木はその荷重により屋蓋を崩落させる。

壁体裾部の部材の圧壊は、上部荷重が壁裾外側に集中することによって生じる。これはスパンが大きい塔に発生しやすい。壁体裾部に基壇の擁壁石組みが連続する場合、擁壁の部材も圧壊が発生する。これらの破損は数が増えると構造のバランスを大きく崩してしまうため危険である。

### 2.3 迫出し積みヴォールト

迫出し積みヴォールトは、クメール建築で最も特徴的な構造である。迫出し積みヴォールトは、1. 水平せん断力を部材間の摩擦によって支えるため、スラストの大きさが上端部材の最大静止摩擦力によって制限される、2. 極端な偏荷重が生じるため、ヴォールトの重さとスパンが材料の強度によって制限される、という特性を持つ。ヴォールトを成立させるには架構断面の重量分布のバランスが重要であり、クメールの工匠は経験の蓄積からそれを学び、徐々に大きいスパンのヴォールトを設計してゆくようになったと想像される。しかし、塔に比べて基壇に掛かる単位面積当たりの荷重ははるかに少ないにも関わらず、遺構の過半の屋根が崩落している状況を見

sion of stone elements in the rear surface of the roof and the interior of the breast wall.

Walls and pillars tilt and collapse due to the concentrated load applied to the platform. Uneven subsidence may either occur in an inward or outward manner, depending on the direction of the unbalanced load of the upper structure and the inner structure of the subbase. In the outer gallery of Bayon, the nave wall is relatively thin compared to its height, clearly indicating a lack of understanding regarding structures. The walls are largely tilted outward, and the entire roof is collapsed.

Inner shifts of roof elements occur when the thrust exceeds the frictional force between the roof elements. Small slides indicate that the thrust was automatically adjusted, and therefore help stabilize the entire structure rather than the opposite. On the other hand, if the span increases due to the tilting and collapsing of the walls and pillars or from element damage, the roof tilts greatly inward. The increased thrust causes the entire structure to become unstable. If the roof tilts inward and cannot maintain its balance, it collapses.

Horizontal cracks in the cornice element of the breast wall occur when an unbalanced load is placed on the elements between the lower edges of the vault to the cornice. This is because the unbalanced load creates a large compression and tensile stress in the cornice element and causes damage along the bedding plane.

Vertical cracks in pillar elements refer mainly to the cracks in the porch pillars and aisle pillars of the gallery. Porch pillars directly support the vault roof by their small cross sections, so the load per unit area is larger than when the vault roof is supported by a wall. Also, compared to a three-aisle layout, the load imbalance, or the bending moment, is large. When the direction of the resultant force and the tilting of the bedding plane of pillar elements are almost the same, a shear fracture occurs in that direction. Vertical cracks in aisle pillars are especially conspicuous in the outer gallery of Angkor Wat. This is thought to be the result of the large stress applied from the connecting beam to the pillar, which is used with its bedding plane in the direction of the aisle beam to compensate for the unbalanced load produced by the deflection of the aisle beam. The flexure fracture of pillar elements can be seen mainly at the base of insert-type pillars, where the bending moment from the thrust is basically thought to be greatest.

The flexure fracture of the connecting aisle beam is especially pronounced in one-story buildings and galleries of Angkor Wat. This is because the nave pillars at Angkor Wat are erected so that a connecting beam is tucked between the elements of the pillar shaft and pillar capital. This construction is extremely effective as a buttress, because it can disperse the torque placed on the nave pillars to the aisle wall as a normal vertical stress. However, once the nave pillars begin to subside, the displacement increases the bending moment of the connecting beam and immediately causes flexure fracture. Since even a compression distortion of a shaft element could cause flexure fracture of a connecting beam, it is questionable why this method was applied to Angkor Wat. Moreover, even if the connecting beam does not fracture, any tilting would make the contact area with the shaft element extremely small and would cause vertical

れば、構法に構造的な無理があったことは明らかであろう。

破損は、壁と柱の傾倒、屋根材の内ズレ、腰壁コーニス材の水平亀裂、柱材の縦割れ・曲げ破壊、庇繋ぎ梁の曲げ破壊、屋根裏面と腰壁内面の石材腐食、などが代表的なものである。

壁と柱の傾倒は基壇への集中荷重によって生じる。不等沈下は内向きに生じる場合と外向きに生じる場合とがあるが、その向きは上部架構の偏荷重の向きと基部の内部構造によって決まってくる。バイヨン外回廊の身舎壁体は大きな成に対して壁厚が小さく、明らかに構造に関する認識を欠いている。壁は大きく外転びを起こしており、屋根は全て崩落している。

屋根材の内ズレは、スラストが屋根材間の摩擦力を超えてしまった場合に発生する。そのスライドが小さい場合、これはスラストが自動的に調整される現象であるため、全体構造としてはむしろ安定する。一方、壁と柱の傾倒や部材破壊によってスパンが増加する場合は、屋根が大きく内転びをおこす。これはスラストを大きく増加させるため、全体構造が不安定になる。内転びが平衡状態に留まらない場合、屋根は崩落する。

腰壁のコーニス材の水平亀裂は、ヴォールト下端からコーニス材に掛かる偏荷重によって生じる。これは偏荷重を受けたコーニス材の部材内に大きな圧縮と引張が発生し、層理面に沿って破壊がおこるためである。

柱材の縦割れは、主にポーチの柱と回廊の庇柱に見られる。ポーチの柱は小さい断面でヴォールト屋根を直接支えるため、壁で支える場合に比べて単位面積当たりの荷重が大きく、また三廊式と比べて荷重の偏り、つまり曲げモーメントが大きい。ここでその合力方向と柱材の層理面の傾きが近いと、その方向にせん断破壊が発生する。一方、庇柱の縦割れはアンコール・ワット外回廊に顕著である。これは、庇梁のたわみによる偏荷重を考慮して柱の層理面を庇梁の方向に合わせて使っている状態に、繋ぎ梁からの大きな応力を受けてしまった結果であると推測される。柱材の曲げ破壊は、挿し込み式柱の根元に見られる。これは基本的にスラストによる曲げモーメントが根元で最大になるためであると考えられる。

庇繋ぎ梁の曲げ破壊は、アンコール・ワットの平屋建物と回廊に顕著である。これはアンコール・ワットの身舎柱が柱身材と柱頭材の間に繋ぎ梁を挟むように積まれているためである。この構法は、身舎柱に掛かる回転モーメントを庇の壁体に垂直応力として分散することができるため、バットレスとしては

cracking.

In the inner gallery of Bayon and many other monuments of the Bayon era, the aisle roof is constructed using a vault instead of a half-vault. This method was probably adopted so that the span of the aisle could be increased, but in effect, the increased size of the aisle enhanced its function as a flying buttress and helped stabilize the nave structure. In the outer gallery of Bayon, a method of directly abutting the upper surface of the aisle roof against the sides of the nave beams is applied instead of using a connecting beam. If the upper elements of the aisle roof are made to rest on the sides of the nave beams, it would take much effort to process the rebated joints. It is possible that the aisle roof was made directly abutting the beam at Bayon in order to eliminate the trouble of processing the joint. However, the collapse rate of aisle roofs is generally high regardless of the construction method, so the pros and cons of using rebated joints are difficult to evaluate from a structural perspective.

The erosion of stone elements occurs when rainwater is retained behind the roof and inside the breast wall due to leaks in the roof. In order to prevent the infiltration of rainwater, a rebated joint that is slanted toward the outside is applied to the side faces of the roof elements in most monuments. However, it is actually difficult to completely prevent the leaks because joint openings in the roof are closely linked to deformations of the platform and walls. Moreover, due to the subsidence of the nave pillars, the upper surface of the aisle roof tilts inward, making it easy for rainwater to penetrate the building. As a result of the above, the underside of the aisle roof is especially eroded.

Details on the corbel vault structure will be discussed again section 4 in this paper.

## 2.4 Pillar and beam structure

In order to make an opening in the wall, the pillars and beams are structured so that the beams receive the load of the roof and transmit most of it to the pillars. However, this causes the beam elements to sag and applies a large pressure to the pillar elements. Door and window frames basically have the same structure; that is, the head element (lintel) receives the load of the upper elements and conveys it to the jamb elements (mullions). In other words, a horizontal frame element and supporting pillar elements are combined. The construction method of doorway openings has undergone many major changes within the development process of Khmer architecture, and is testimony to the efforts of the great builders of the time.

Major damages related to the pillar and beam structure include flexure fractures of horizontal elements and threshold elements, vertical cracking and buckling of stay elements, loss of top and bottom surfaces of stay elements, and erosion of stone elements in stress-concentrated parts.

The most typical flexure fracture of horizontal elements is the bending of beams. In monuments built after the 12th century, nave beams were reinforced by aligning two beams to serve as one. A more effective reinforcement would have been to increase the beam height, but perhaps because of the difficulty of hoisting such an element during the construction work, there are few examples of this. Most nave beams in Bayon-era

極めて効果的である。ところが身舎柱が沈下を始めると、その変位によって繋ぎ梁の曲げモーメントが増大し、直ぐに曲げ破壊をおこしてしまう。柱身材の圧縮ひずみだけでも繋ぎ梁の曲げ破壊が発生する可能性が高く、何故このような構法がアンコール・ワットに用いられたのか分からない。また繋ぎ梁が破壊されない場合、その傾きによって柱身材との接触面積が極度に小さくなり、縦割れを発生させる。

バイヨン内回廊ほかバイヨン期の多くの遺構では、底の屋根を半ヴォールトではなくヴォールトで組む構法が採用されている。この構法は底のスパンを大きくすることが目的であったと推測されるが、底が相対的に大きくなることによりフライングバットレスの効果が増加し身舎架構を安定させている。また、バイヨン外回廊では、繋ぎ梁を架けず底屋根上端を身舎梁側面に突き付ける構法を用いている。底屋根上端材を身舎梁側面に腰掛けるように造ると腰掛け部分の加工に手間がかかる。バイヨンではこの手間を省くために底屋根を突き付けにした可能性がある。底屋根は構法に関係なく全般的に崩壊率が高いため、腰掛けの有無についての構造的な評価は難しい。

石材腐食は、屋根が雨漏りして屋根裏面や腰壁内面に雨水が保持される状態で発生する。雨漏りを防ぐために多くの遺構の屋根材側面には外側に傾斜する相欠きを施しているが、屋根の目地開きは基壇と壁体の変形に連動してしまうため防ぐことは難しい。また底屋根の上端が身舎柱の沈下により内側に傾斜すると雨水の浸入が容易になる。その結果底の屋根裏面の腐食が特に著しい。

迫出し積みヴォールトの構造については本稿 4 節で改めて考察する。

## 2.4 柱梁構造

柱梁構造は、壁を開放するために屋根荷重を梁で受けて柱に集中させる構造であり、梁材にたわみを、柱材に大きな圧縮を生じさせる。入口枠組と窓枠組も基本的にはこれと同じ構造で、上部荷重を上枠材(マグサ)で受け縦枠材(方立)に集中させる。つまり、横架材と支柱材の組み合わせである。クメール建築の発達過程の中で入口周りの構法は変化の顕著な箇所であり、当時の工匠の努力がうかがえる。

破損は、横架材と敷居材の曲げ破壊、支柱材の縦割れと座屈、支柱材上下端部の欠損、応力集中部分の石材腐食、などが代表的なものである。

横架材の曲げ破壊の典型的な例は、梁の中折れである。12 世紀以降の遺構では身舎梁を 2 重に架けることにより梁を強化している。より効果的な手法は

monuments are composed of two elements placed side by side, apparently in an effort to increase the speed of construction. Beam elements are the next heaviest elements beside pillars, so reducing their weight by half would greatly facilitate the construction process. However, this places an unbalanced load on the inner side of the beam, and because only one of the beam elements on the inside must support the load of the roof, flexure fracture occurs.

Doorway frames are usually created in the center of a wall of a tower or a pediment of a one-story building, so the upper load is heavy. If the load is placed directly on the head element, it would easily bend and fracture. There are two types of flexure fractures: those in which cracks appear from the center of the bottom surface where tensile stress is greatest to the joint corners in an upward direction, and those in which the bottom surface peels off along the bedding plane. To reduce the upper load that is placed on the center of the lintel, a small arch is commonly made in the head element to disperse the load to the left and right sides. In the case where jamb elements stand on a threshold element, the difference in the amount of subsidence at the center and at the ends of the threshold element could cause flexure fracture. In the inner gallery of Bayon, the threshold is prevented from such flexure fracture by either creating doorway frames with a threshold comprised of multiple elements or by not placing the jamb elements on the threshold.

Vertical cracking and buckling of stay elements are most often caused by the unbalanced load of the vault roof in the case of pillars. In the case of doorway jamb elements, they are caused by extreme concentration of the upper load.

Loss of the top and bottom surfaces of stay elements is caused by the deflection of horizontal elements and threshold elements. At Bayon, the upper surfaces of pillars are often made of a different material from the rest (Pl. 1.4.1-2.4c). This was probably to avoid transmitting the load of the beam unevenly to the pillar elements that were used with the bedding plane in vertical orientation. The pillars support the two ends of the beam but, because the beam element deflects due to the load of the roof, the load concentrates on the edges of the top surface of the pillars (Fig. 1.4.1-2.4c). When directly placing a beam on pillar elements, the shear stress that occurs along the bedding plane becomes large and causes the edges to chip easily. However, if the beam is cribbed by an element whose bedding plane is used horizontally, the load placed on the top surface of the pillar element can be evened out, and thereby reduce the risk of chipping. This method is also used for the mullions of the doorway frame in the outer gallery.

Erosion of stone elements occurs when micro-cracks in stress-concentrated areas suck in rainwater based on the capillary phenomenon. Therefore, deep erosion is likely to occur at the bottom edges of mullions where compression stress concentrates, the underside of lintels and top surface of thresholds where tensile stress concentrates, and at the base of embedded nave pillars that have a large bending moment.

### 3. Conservation and restoration techniques

Engineering and chemical technologies used in the conservation and restoration of cultural property buildings were

梁成を大きくすることであるが、建造時の吊り上げ作業が難しくなるためか、そのような例は見られない。バイヨン期の遺構の身舎梁の多くは横並びの2材で構成される。これは建設速度を上げるためであったと考えられる。梁材は柱に次いで重い部材であるため、その重量を半分に出来れば設置作業は相当楽になる。このとき梁には内側に偏荷重が掛かっているため、屋根荷重を内側の梁一材で支えることになり、曲げ破壊を生じやすい。

入口枠組は塔の壁面あるいは平屋建物の妻壁の中央に造られるため上部荷重が大きく、そのまま上枳材で荷重を受けると簡単に曲げ破壊を生じる。この曲げ破壊には、引張応力が最大になる下面中央と仕口入隅から上に向かって亀裂が入るものと、下面が層理面に沿って剥離するもの、とがある。このマグサ中央に掛かる上部荷重を軽減するために、上枳材上に小アーチを造り荷重を左右に逃がす構法が一般化している。また、縦枳材が敷居材の上に載る構法の場合、敷居材の中央部と端部の沈下に差が生じて曲げ破壊をおこす。バイヨン外回廊の入口枠組では、敷居を複数材で造るか、縦枳材を敷居に載せないで造ることにより、敷居の曲げ破壊を回避している。

支柱材の縦割れと座屈は、柱についてはヴォールト屋根の偏荷重に起因するものが多い。入口枠縦枳材については上部荷重の極度の集中に起因する。

支柱材上下端の欠損は、横架材と敷居材のたわみによって生じる。バイヨンの柱には上端のみ別材で造るものが多い (Pl.1.4.1-2.4c)。これは層理面を縦使する柱材に梁の荷重が偏って伝達することを避けるためと考えられる。柱は2つの梁の端部を支えるが、梁材には屋根荷重によるたわみが生じているため、柱天面の端部に荷重が集中する (Fig. 1.4.1-2.4c)。柱材に直接梁を載せる場合、層理面に沿って働かせん断応力が大きく、端部の欠損を生じやすい。ここに層理面を横使した材を噛ませると、柱材天面に掛かる荷重が均されるため、欠損が生じにくくなる。この手法は外回廊の入口枠方立にも用いられている。

石材の腐食は、応力集中部分のマイクロクラックが毛細管現象で雨水を吸い込むことによって生じる。よって、圧縮応力の集中する方立の下端、引張応力の集中するマグサ下面と敷居上面、曲げモーメントの大きい埋め込み式身舎柱の根元、には深い腐食が生じやすい。

### 3. 保存修復技術

文化財建造物の保存修復に用いられる工学的・化学的技術は、基本的に他分野で開発された技術を流

basically taken from technologies developed in other fields and modified. Conservation and restoration techniques refer to the method of applying those engineering and chemical technologies to conservation and restoration work. The applications of engineering and chemical technologies to conservation and restoration can be broadly divided into two purposes: preliminary surveys and conservation and restoration measures.

The focus of preliminary surveys is wide-ranging. Firstly, preliminary surveys are conducted to elucidate the historical and archaeological properties and values of a monument, as well as the construction methods and technologies used. Secondly, they are to analyze the structural and scientific condition of a monument as well as the causes of its damages. The third is to assess the relationship between the monument and social and natural environments in order to predict future conservation and development activities. The above three points must be examined comprehensively from the perspective of multiple academic fields, which is a time-consuming task. As long as survey results are the determinants of the future course of conservation and restoration, however, surveys are given considerably more weight than the implementation of countermeasures in the field of conservation and restoration. Moreover, compared to countermeasure developments, new survey technologies are constantly being adopted, reflecting the sudden and recent development of information technology.

Conservation and restoration measures also have three focal points corresponding to the objectives of preliminary surveys. The first point pertains to the question of what properties and values of monuments should be conserved. The second is determining the engineering and scientific measures to be applied. The third concerns how to implement environmental maintenance and regional development measures in surrounding areas. The first point is especially important because it defines the guiding principle for the second and third points. It must be clear, and it must be based on a long-term perspective. In regard to technologies used to implement the measures, versatility based on an accumulation of practical applications is more important than the innovativeness of advanced technologies.

The question of what properties and values of monuments should be conserved has already been widely examined and discussed in the New Charter of Athens, the Venice Charter, and at the Nara Conference. Therefore, in this report I will simply give an overview of some points that may pose problems in the conservation and restoration of Khmer architecture.

### 3.1 Should the existing state of a monument be maintained or should its original form be restored?

Monuments are large-scale objects of art. At the same time, they are an aggregation of information that may be of particular interest to studies in the fields of history, archaeology, and other disciplines. The former has enormous value as symbols of ethnic identity and as tourism resources. The latter provides the greatest primary data on studies in Southeast Asian history and Khmer culture. The two mutually complement each other, and unless their development can be pursued concomitantly as a project, it would be difficult to manage them politically

用・応用したものである。保存修復の技術とは、これらの工学的・化学的技術を保存修復の目的にどのように適用するのか、その手法を指している。保存修復における工学的・化学的技術の使用は、事前調査と保存修復処置とに対象が大別される。

事前調査の内容は多岐に渡る。第一に、遺構がどのような歴史的・考古学的な特徴と価値をもっているのか、どのような構法と建設技術を用いて造られたのか、を明らかにすること。第二に、遺構が構造的・化学的に遺構がどのような状態にあるのか、どのような原因によって破損したのか、を分析すること。第三に、遺跡と社会環境及び自然環境の関係を把握し、保存と開発の将来像を予測すること。これらは何れも複数の学問分野を複合しての検討が必要であり、かつ時間の掛かる作業である。保存修復の方向を決めるのがこれらの調査の結果である以上、保存修復における比重は処置よりも調査のほうが大きいといえる。また、用いられる技術も処置に比べると、近年のITの急速な発達を反映して、新しい技術が逐次投入されている。

一方、保存修復処置は事前調査の内容に対応して3つの焦点を持つ。第一に、遺構のどのような特徴と価値を保存するのかということ。第二に、どのような工学的・化学的処置を施すのかということ。第三に周辺の環境整備と地域開発をどのように行うのかということ。特に第一の点は第二、第三の点の指針となるため、それが明確であることと長期的な視野に立っていることが求められる。また、処置に用いる技術には、その作業の性格上、最新の技術を導入した先進性よりもむしろ実践の蓄積に基づいた汎用性が求められている。

遺構のどのような特徴と価値を保存するのか、という問題についてはアテネ憲章、ヴェニス憲章、奈良会議をはじめとして既に多くの議論がなされている。ここではクメール建築の保存修復において問題となる要点にのみ言及したい。

#### 3.1 遺構の現状を維持するのか、復原を行うのか？

遺構は、規模の大きな美術品であると同時に、歴史学・考古学ほかの研究対象となる情報体である。前者は民族のアイデンティティーの象徴として、また観光資源としての価値が大きい。後者は東南アジア史とクメール文化の研究における最大の一次資料である。両者は相互補完的な関係にあり、政治的・資金的な側面からも、事業としての伸展を両立させてゆかなければ運営は難しい。保存修復処置に限定して考えれば、美術品としての価値とそれの持つ情

as well as financially. From the perspective of conservation and restoration measures, the basic issue is how much of a monument's value as an artwork and its intrinsic information can be maintained. Monuments not only possess historical, archaeological, and artistic information, but they also offer other useful information for elucidating the civil construction technologies and the social and natural environments of ancient times. Monuments also possess hidden aspects and factors that have remained unrecognized to this day. Therefore, when dealing with monuments, conservation and restoration tasks must be conducted with an eye to matters that may even appear to be insignificant.

The policy of placing priority on maintaining a monument in its existing condition is essentially based on two fundamental principles of conservation and restoration: 1. there is historical value in the existing damaged condition itself and, leaving aside the pros and cons of that concept, 2. a certain amount of information will be lost if direct action is taken on the structure and elements. As the capacity to treat such a vast number of monuments is absolutely lacking today, it cannot be helped that maintenance of the existing condition is usually established as the primary goal. Possible measures are limited to the application of external supports to structurally dangerous areas and the treatment of wastewater around the monument.

As opposed to the above, in cases where the existing condition cannot be maintained without directly acting upon the structure or its elements, a decision must be made between either 1. stabilizing the monument in its existing condition or 2. repairing the inner structure and elements of the subbase and restoring the original form. Once direct action is taken, it becomes difficult to return the building to its state before the action was taken. Therefore, judgment should be based on what kinds of information could be preserved by implementing the selected method. Based on this awareness, technologies and materials that are durable and that do not have profound influence on the original materials must be selected. At the same time, since restoration work is an extension of maintenance work from a long-term viewpoint, methods that allow the reimplementation of restoration measures are ideal.

The problem is even clearer in the case of partially or completely collapsed monuments. Monuments that have already collapsed have four options: 1. maintain the existing condition, 2. reproduce the monument in a drawing based on surveys, 3. reassemble only the collapsed elements, or 4. restore the original form using new materials in places where the original elements have collapsed and are lacking. In terms of surveys and investigations, their objective can be fulfilled by accurately documenting the details of the existing condition and taking measures to conserve that condition. On the other hand, when a monument is considered an artwork, its overall value can be increased by restoring the appearance of bygone days. In this case, securing sufficient records of the existing condition as well as the credibility of the restoration work are the prerequisites for restoration, although a long survey period would be required. Additionally, when reassembling fragile sandstone and laterite elements, an effective repair method and an experienced construction organization must be established.

報量をどれだけ多く維持できるかが根本的な課題である。遺構の持つ情報は、単に歴史学的・考古学的・美術学的なものだけでなく、古代の土木建設技術や社会環境、自然環境を探るための様々な情報を含んでおり、さらにこれまでに認識されていないような側面や要素が隠されている。そのため遺構を取り扱う際には、一見意味がないと思われる事柄についても注意を払いつつ作業する必要がある。

現状の維持を優先する方針は、1. 現在の破損状況自体に歴史的価値がある、という考え方の是非はともかく、2. 構造と部材に直接的な処置を施すと少なからず情報が失われる、という点において保存修復の基本といえる。また、膨大な遺構の量に対して処置能力が絶対的に不足している現在では、現状の維持自体の達成が第一の目標とならざるを得ない。処置としては、構造的な危険箇所への外部からの支持の設置と遺構周辺の排水処置の2つに留まる。

これに対して、構造と部材に直接的な処置を施さないと現状の維持ができない場合、1. 現状のままに固定作業を行うのか、2. 基部の内部構造と部材に修理を施して構造を復原するのか、の選択が必要になる。直接的な処置は一度行くと処置以前の状態に戻すことが難しいため、その選択によってどのような情報を保存するのが判断基準となる。その上で、用いる技術と材料については、長期的に強度が期待できること、かつオリジナル材に影響が少ないことが優先される。一方で、修復処置は長期的に見るならばメンテナンスの延長線上にある作業であり、再度の処置が行えるような手法が理想である。

半壊あるいは全壊した遺構の場合、その問題点はより明確になる。既に崩落した遺構については、1. 現状を維持する、2. 調査に基づいて図面上での復原を行う、3. 崩落部材のみを再構築する、4. 崩落部材が不足する部分についても新しい材料を用いてオリジナルの形状を復原する、という選択肢がある。調査研究の面から考えるのであれば、現状を詳細かつ正確に記録し、現状の保存処置をとれば、必要は満たされる。一方、美術品としての面から考えるのであれば、往事の姿が復原されることで一般的な価値を増大させることができる。この場合、現状の十分な記録と復原の真実性が確保されることが復原の前提条件となる。これには長期の調査期間が必要である。また、脆弱な砂岩材とラテライト材を再構築するためには、的確な部材修理方法と熟練した施工組織が確立されていないと、遺構と部材の現状を損ねてしまう危険性がある。さらに、大規模な調査と工事には多くの資金と人材が必要である。それらの点が解

Otherwise, there is risk of undermining the existing condition of the monument and its elements. Furthermore, large-scale surveys and construction require a substantial amount of money and manpower. If these needs can be fulfilled, the social significance of restoring cultural properties is huge. Partial or complete restoration should also be conducted as a means of effectively preventing the loss and deterioration of collapsed elements. The same goes for the entire dismantlement and rebuilding of monuments.

### 3.2 What kind of methods should be used to implement restoration measures?

First, let us take a look at the problem of how to prevent the collapse of the upper structure, most of whose elements are damaged and its structure is largely deformed. As an indirect measure for small deformations, it is common to use wood and steel reinforcements in the damaged areas of the elements and tie a steel belt around the entire monument. As opposed to this, direct measures are taken on structures that are clearly in danger of collapse. Depending on the damage condition, the following five methods have been used to date: 1. embedding steel clamps, beams, and other tension materials in the damaged areas of elements as reinforcement, 2. bonding elements together with steel clamps or cement mortar, or applying tension to the entire frame using wire or steel bars to stop the deformation, 3. supporting the entire structure with reinforced concrete or a steel reinforcing frame, 4. dismantling parts that are particularly in danger of collapse and reassembling them so that they are more stable, and 5. dismantling the entire structure and rebuilding it from the subbase to ensure stability. Methods 1, 2, and 3 are relatively easy to implement but, because they are external measures, the exposure of concrete and other materials to the natural environment shortens their useful life, not to mention undermines the appearance of the monument. Methods 4 and 5 have such advantages as being able to restore the monument to a state close to its original form and being able to make repairs to the elements in a dismantled state. However, these two methods cost more and require more time and more advanced technologies than the first three methods. They also require thorough analysis of such issues as the stability of the structure that is to be rebuilt, the extent of reinforcement needed, and the required strength of repair elements. The methods to prevent the collapse of the upper structure are different phases of measures corresponding to the damage condition, and allow little scope for selection. It is therefore important to refine each of those methods and to standardize their specifications.

Subbase damage is the principle cause of damage to a monument. The greatest problem is how to conserve or restore a subbase that is greatly deformed. Some of the mainstream approaches that have been taken up to now include 1. creating a sustaining wall of reinforced concrete inside the subbase and rebuilding the upper structure above it, and 2. constructing a reinforcing frame of reinforced concrete around the subbase. Other methods have also appeared in recent years, such as 3. repairing the deformation of the subbase by externally adjusting the soil pressure and reinforcing it with piles and impregnated adhesive, and 4. using adjusted soil that can be expected

決されるのであれば、文化財が復原されることの社会的な意味は大きく、また崩落部材の散失と劣化を確実に防ぐという意味でも、部分的あるいは全体的な復原は行われるべきであろう。これは全体再構築処置についても同じことがいえる。

#### 3.2 処置にどのような手法を用いるのか？

まず、主要な課題として、全体的に部材の破損が多く変形の大きい上部架構の崩落をどのように防止するのか、という問題を挙げる。変形が小さい状態での間接的な処置としては、部材の破損箇所に木材や鉄骨による補強を行い、遺構全体をスチールベルトなどで締結する手法が一般的である。これに対して、明らかに崩落の危険性がある架構への直接的な処置としては、状況に応じて段階的に、1. 部材の破損箇所にスチールのクランプや梁、テンション材を埋め込み部材を補強する、2. 部材間をスチールのクランプやセメントモルタルで接着して、あるいは躯体全体にワイヤーやスチールバーでテンションを掛けて、変形を止める、3. 鉄筋コンクリートや鉄骨の補強フレームで架構全体を支持する、4. 特に崩壊の危険性が高い部分を解体して安定した状態に再構築する、5. 架構全体を解体して基部から安定した状態に再構築する、などの手法がこれまでに用いられている。1、2、3の手法は、施工が比較的容易である一方、外部からの処置であるためコンクリートなどが自然環境に曝され耐用年数が比較的短くなり、また外観を損ねるという欠点を持つ。4、5の手法は、オリジナルに近い状態に復旧できる、部材を解体した状態で修理できる、という利点がある。一方で、この手法は前者に比べて多くの費用と時間と技術が必要である。また、再構築される架構がどの程度の安定性を持つのか、どの程度の補強処置が必要なのか、修理する部材にどの程度の強度が必要なのか、などの綿密な分析が不可欠である。上部架構の崩落防止の手法は、状況に対応した段階的な処置であり、手法の選択の余地が少ない。よって各手法がそれぞれ洗練されてゆくこと、仕様が標準化されてゆくことが必要である。

遺構の破損の主原因の一つである基部の破損については、大きく変形をおこした基部をどのように保存あるいは修復するのか、という問題がある。これまでに主流であったのは、1. 基部の中に鉄筋コンクリートの擁壁を造り、その上に上部架構を再構築する、2. 基部の周囲に鉄筋コンクリートで補強フレームを造る、などの手法である。これに対して、近年提案されたものには、3. 外部から土圧を調整するこ

to retain its strength for a long time or adding geotextile and other reinforcing materials to rebuild the subbase to a state close to its original form. Methods 1 and 2 are the most versatile, since reliable strength can be achieved in a short time and their implementation period is shorter than the other methods. Method 3 can be implemented without dismantling the entire monument, so it has the advantage of being applicable to other monuments made of brick or other materials which are not suitable for restoration involving dismantlement and rebuilding. However, a complete restoration of the subbase deformation is difficult using this method, not to mention the fact that a high level of technology is required for its implementation. The advantage of method 4 is that the entire structure including the subbase can be almost completely restored to its original form. This, however, requires careful implementation and quality control, because implementation inconsistencies could cause deformations again. In future restoration work, the frequency of methods 3 and 4 will likely increase, but construction specifications would still need to be standardized in this case.

Another principle cause of damage is the presence of trees. This would not be a problem if an effective management system is in place for regular maintenance activities. However, the majority of the monuments in Cambodia were left abandoned since the fall of the Angkor dynasty. Damages caused by trees have intensified more rapidly than other structural deteriorations in a monument. Therefore, when considering the conservation of Cambodian monuments in general, the priority lies in forming countermeasures to this problem. Major damages caused by trees are the following: 1. collapse of the upper structure due to the intrusion of roots and the load of trees ensnared around the monument, 2. deformation of the subbase caused by the intrusion of tree roots, and 3. collapse of the upper structure brought on by the impact of trees falling near the monument. In the cases of 1 and 2, damage to the monument will be aggravated if left to take its own course. From a short-term perspective, measures should be taken to inhibit the growth of trees by cutting off their branches or using a growth-retarding agent. However, other than dismantling and rebuilding the entire monument and completely removing all trees, there are no effective long-term measures. Also in these cases, if the monument is made of brick, appropriate technology would be needed to cut the brick walls into blocks and handling them so they will not break. In regard to 3, wires could be used to prevent the trees from falling toward the building in the short run, but if and when a tree actually falls, the damage would be greater than that caused by other factors. Therefore, in any case, the trees would need to be cleared as early as possible.

With respect to materials, one of the problems is determining what type of adhesive should be used to halt the peeling and flaking of decorated parts. Adhesives used up to now include portland cement, epoxy resin, acrylic resin, polymers, and ethyl silicate. These materials were considered the best choices at the time each restoration work was conducted. However, in most cases, their actual useful life and impact on original materials can only be confirmed after several months or years. Solidification of the deteriorated areas of elements is one of the most

とで基部の変形を復旧し、杭と含浸接着材で基部を補強する、4. 長期的強度の期待できる調整土を用いて、あるいはジオテキスタイルなどの補強材を加えて、オリジナルに近い基部を再構築する、などの手法がある。1と2は、短期的に確実な強度が得られることと工期が他と比べて短いことから、汎用性は一番高い。3は、遺構を全解体せずに施工が可能のため、煉瓦造などの解体再構築が難しい遺構に適用できるという利点がある。一方で、この手法では基部の変形の完全な復旧は難しく、また施工に高い技術力が必要とされる。4は、基部を含めた全体構造をオリジナルに近い状態に復原できるという利点がある。一方で、この手法では施工ムラが基部に再度の変形をもたらすため、丁寧な施工と品質管理が必要とされる。今後の修復では3と4の手法の比重が増えたと予想されるが、そのためには工事の仕様が標準化される必要がある。

もう一つの破損の主要原因は、樹木である。これは、定期的なメンテナンスを行う管理体制が維持されているのであれば、発生しない問題である。しかし、カンボジアではアンコール朝の没落以降、大多数の遺構が放置されままで今日に至っている。樹木による破損は遺構の構造的な劣化より進行が早いため、カンボジア全体の遺跡の保存を考える場合、これへの対処が最優先の課題である。樹木による破損は、1. 遺構に取り付いた樹木の根の侵入と荷重による上部架構の崩落、2. 樹根の侵入による基部の変形、3. 遺構の周囲に立つ樹木の倒木の衝撃による上部架構の崩落、が主なものである。1と2については、そのまま放置すれば確実に遺構の破損が進行する。短期的には樹木の成長を遅らせるために枝撃ちを行うか薬品による処置が有効であるが、長期的には遺構の全解体再構築を行い樹木を完全に取り除く以外確実な処置はない。この場合、煉瓦造の遺構については、煉瓦壁をブロックに切断し、それを崩壊しないように取り扱う技術が必要である。3については、短期的にはワイヤーなどを用いた遺構方向への倒木の防止が可能であるが、実際に倒木が発生した場合の被害が他い比べて著しく大きいと、やはり早々に伐採を行うことが必要である。

材料については、一例として、装飾部位の剥離とフレーキングを止めるためにどのような接着剤を使うのか、という問題がある。これまで用いられてきた接着材には、ポルトランドセメント、エポキシ樹脂、アクリル樹脂、ポリマー、エチルシリケートなどがある。これらは各修復が行われた時点で最善と考えられた材料であるが、それらの耐用年数とオリ

difficult measures to re-implement, and it is also a measure accompanied by extreme urgency. For these reasons, it is necessary to implement repair measures beginning with areas that are at greater risk of collapse, while simultaneously conducting systematic studies and experiments in search of new materials. In regard to adhesives used today, the more recent ones are more expensive. Therefore, in terms of future versatility, their widespread application would be difficult, and the procurement of more inexpensive, alternative materials must be considered. The above points can also be said of adhesives and reinforcements used to repair damaged elements, fillers to be injected in joint openings of elements, and other materials in general used for restoration.

#### 4. Structural properties of corbel masonry

The structural properties of corbel masonry in Khmer architecture were studied by G. Croci, who reviewed the movement and damage trends of arches in his published work. Other than that, there are no reports that deal dynamically with the movements of corbel masonry<sup>4</sup>. This section will present an analysis of basic load distribution and movement trends using a simple block model and a model of the cross-section of a monument.

##### 4.1 Cantilever corbel masonry

Let us first examine the projection width of cantilever corbel masonry from the position of its center of gravity and its balance. Please refer to the drawing plates.

<Fig. 1.4.1-4.1a>

Let us place block 1 with width  $w$  and height  $h$  on a horizontal plane. At this time, the block's center of gravity (indicated by the black dot) should be at the center of the block. Therefore, the resultant force of the block can be said to be applied to the center of the bottom surface (indicated by the white dot). This point is called the point of application of the resultant force.

<Fig. 1.4.1-4.1b>

Next, let us place block 1 on top of block 2 of the same size, with block 1 projecting out on the right. When the projection width is  $1/3*w$ , the center of gravity of block 1 will be on the inside of the right shoulder of block 2. Therefore, block 1 can be placed on top of block 2 in a stable manner.

<Fig. 1.4.1-4.1c>

When the projection width is  $2/3*w$ , the center of gravity of block 1 extends outside the right shoulder of block 2, so block 1 will fall to the right in a clockwise motion using the right shoulder of block 2 as leverage.

<Fig. 1.4.1-4.1d>

When the projection width is  $1/2*w$ , the center of gravity of block 1 coincides with the right shoulder of block 2. The mass distribution of block 1 is evened out to the left and right sides with the right shoulder serving as leverage. A slight touch to the right half will cause block 1 to fall to the right in a clockwise motion. This then is the threshold limit of the projection.

ジナル材への影響は実際に年月が経過してから初めて分かることが多い。部材劣化箇所の固化は最も再処置が難しい作業であると同時に、処置の緊急性が最も高い作業の一つでもある。そのため危険性の高い箇所から作業を進めつつ、計画的に新しい材料の研究と実験を行う必要がある。また、接着剤は近年に用いられるものほど高価な材料が選択されている。将来的な汎用性を考慮するならばそれらの広範な適用は難しく、安価な代用材の調達方法の検討が必要である。これらの点は、破損部材の修理に用いる接着剤や補強材、部材の目地開きへの充填材、など修復に用いられる材料全般について同じことがいえる。

#### 4. 迫出し積み構法の構造特性

クメール建築の迫出し積み構法の構造特性については、G. Croci の著作の中でアーチに関する挙動と破損の傾向が概説されている以外、力学的にその挙動を取り扱った報告がほとんどない<sup>4</sup>。ここでは、簡単なブロックモデルと遺構断面モデルを使って、その基本的な荷重分布と挙動の傾向について分析を行いたい。

##### 4.1 片持ちの迫出し積み

初めに、片持ちの迫出し積みについて、重心の位置と釣り合いからその迫出し幅を考える。図版を追って説明をしてゆく。

<Fig. 1.4.1-4.1a>

幅  $w$ 、成  $h$  のブロック 1 を水平面に置く。このときブロックの重心（黒丸点）はブロックの中心にある。よってブロックの荷重合力は敷面の中心（白丸点）に作用していると見なすことができる。この点を荷重合力の作用点と呼ぶ。

<Fig. 1.4.1-4.1b>

次に同じ大きさのブロック 2 の上にブロック 1 を右側に迫出すように載せる。迫出し幅が  $1/3*w$  のとき、ブロック 1 の重心はブロック 2 の右肩より内側に載るため、ブロック 1 はブロック 2 の上に安定した状態で載せることができる。

<Fig. 1.4.1-4.1c>

迫出し幅が  $2/3*w$  のとき、ブロック 1 の重心はブロック 2 の右肩よりも外側に出てしまうため、ブロック 1 はブロック 2 の右肩を支点として右回りに落下する。

&lt;Fig. 1.4.1-4.1e&gt;

At this threshold condition, let us add another block to the bottom. When blocks 1 and 2 are considered as one, the center of gravity is at the center of the two centers of gravity, or point  $c_2$ . Since the shift between blocks 1 and 2 is  $1/2*w$ ,  $c_2$  is a point  $1/4*w$  from the right end of block 2. Therefore, the projection width threshold of block 2 in reference to block 3 is  $w/4$ . At this time, the projection width threshold of block 1 in reference to block 3 becomes  $(1/2+1/4)*w$ .

&lt;Fig. 1.4.1-4.1f&gt;

Let us add another block in a similar manner. When blocks 1, 2, and 3 are considered as one, the center of gravity is at  $c_3$ , a point that divides the line connecting  $c_2$  and the center of gravity of block 3 by 1:2, the opposite of the weight ratio of 2:1. Since the horizontal distance between  $c_2$  and the center of gravity of block 3 is  $1/2*w$ ,  $c_3$  is a point  $1/6*w$  from the right end of block 3. Therefore, the projection width threshold of block 3 in reference to block 4 is  $1/6*w$ . At this time, the projection width threshold of block 1 in reference to block 4 becomes  $(1/2+1/4+1/6)*w$ .

&lt;Fig. 1.4.1-4.1g&gt;

When more layers are added in a similar manner, the projection width threshold of each tier becomes  $w/2n$ , and the projection width threshold of the entire corbel structure becomes  $\Sigma w/2k$ . If, for example, 16 tiers of blocks are stacked, the projection width threshold becomes  $1.659w$ . However, in actuality, it is not possible for blocks to be projected to the threshold limit, because distortions occur in proportion to the upper load and the tiers start tilting to the right with each additional tier.

Two conclusions can be drawn from the above.

1. If the height of each block is the same, block height has no bearing on projection width. In other words, if all blocks are of the same height, in theory more tiers can be stacked using blocks of small height and with a larger projection width. However, in practical terms, if the block height is small, the cross section secondary moment acting against the bending of the projection becomes smaller, and the blocks reach their limit of strength at an early stage. Therefore, block height should be made smaller as the blocks become higher to maintain good balance in terms of both weight and strength. In this case, the lower the blocks, the heavier their weight is, so the center of gravity of the entire structure shifts outward, and the structure becomes stable.
2. If the width of each block is the same, the amount of projection width would be directly proportional to block width. If, for example, the width of the topmost block is doubled and its height is reduced by half, the projection width can be increased  $w/2$  without changing the weight balance. Alternatively, by expanding the curve of the left shoulder to the outside, the center of gravity of the entire structure will also shift toward the outside and stabilize the structure. In other words, in cantilever corbel masonry, it is possible to attain a greater projection in reference to the width of the bottommost block by changing the width and height of the

&lt;Fig. 1.4.1-4.1d&gt;

迫出し幅が  $1/2*w$  のとき、ブロック 1 の重心はブロック 2 の右肩に合う。ブロック 1 の質量分布はブロック 2 の右肩を支点に左右の釣り合いがとれた状態になり、右半分に少し触れるだけで右回りに落下する。つまりこれが迫出し幅の限界値である。

&lt;Fig. 1.4.1-4.1e&gt;

この限界状態で下にもう 1 段ブロックを増やす。ブロック 1 とブロック 2 を一体として考えるとその重心は各重心間の中点  $c_2$  にある。ブロック 1 とブロック 2 のズレは  $1/2*w$  なので、 $c_2$  はブロック 2 の右端から  $1/4*w$  の位置にある。よってブロック 2 のブロック 3 に対する迫出し幅の限界値は  $w/4$  になる。このときブロック 1 のブロック 3 に対する迫出し幅の限界値は  $(1/2+1/4)*w$  になる。

&lt;Fig. 1.4.1-4.1f&gt;

同様にう 1 段ブロックを増やす。ブロック 1、2、3 を一体として考えるとその重心は、 $c_2$  とブロック 3 の重心を結んだ線を重量比 2:1 の逆比 1:2 に分割した位置  $c_3$  にある。 $c_2$  とブロック 3 の重心との水平距離は  $1/2*w$  なので、 $c_3$  はブロック 3 の右端から  $1/6*w$  の位置にある。よってブロック 3 のブロック 4 に対する迫出し幅の限界値は  $1/6*w$  になる。このときブロック 1 のブロック 4 に対する迫出し幅の限界値は  $(1/2+1/4+1/6)*w$  になる。

&lt;Fig. 1.4.1-4.1g&gt;

同様に段を増やしてゆく場合、各段の迫出し幅の限界値は  $w/2n$ 、全体の迫出し幅の限界値は  $\Sigma w/2k$  となる。仮にブロックを 16 段積んだ場合、その迫出し幅の限界値は  $1.659w$  となる。但し実際には荷重に応じてブロックに歪みが発生し、段が増す毎に右に傾いてゆくため、限界値まで迫出すことはできない。

ここまでで考察されることは以下 2 点になる。

1. 各ブロックの成が一定の場合、迫出し幅の大きさはブロック成に関係しない。つまり全体が同じ高さであれば成の小さい方が段数が稼げて迫出し幅も大きくなる。但し実際にはブロック成が小さいと迫出し部分の曲げに対する断面 2 次モーメントが小さくなり強度的限界が早く生じる。よって下から上に向かってブロック成を徐々に小さくすると重量的・強度的にバランスが良い。このとき下のブロックほど重量が大きくなるため全体の重心が外側に移動してゆき安定する。

blocks in each tier.

#### <Pl. 1.4.1-4.1>

We used the corbel masonry technique to stack ten tiers of sandstone blocks having vertical and horizontal lengths of 30cm, height of 10cm, and average mass of 21.6kg. Each tier was stacked with a projection width that is 1cm less than the projection width threshold of  $w/2n$ . According to this method, the overall projection became 33cm, and completely exceeded block width  $w$ .

### 4.2 Load distribution in corbel masonry

Next, in regard to the load between each tier in the corbel block structure, let us calculate the load distribution in the case where the reactive force between the blocks is uniformly distributed. First, let us establish a coordinate system for each block with the  $x$  axis extending horizontally to the right and the  $z$  axis extending vertically in the upward direction from the lower left corner.

#### <Fig. 1.4.1-4.2a>

When the block is placed on a horizontal plane, its load is evenly distributed along the bottom surface. Where  $m$  is block mass and  $g$  is acceleration of gravity, the load on the horizontal plane is represented by the equation  $N = mg$ . At this time, the loading strength per length ( $q$ ) of the bottom surface of the block is calculated by the equation  $q = N/w = mg/w$ . The point of application of the resultant force of the load applied to the horizontal plane is the position where  $x = 1/2 \cdot w$  when  $x = 0$  at the left end of the bottom surface of the block.

#### <Fig. 1.4.1-4.2b>

When two blocks are stacked with a projection of  $1/5 \cdot w$  each, in regard to block 1, the point of application of the resultant force of load  $N_1$  is  $x = 1/2 \cdot w (= u_1)$ , and the loading range of  $N_1$  is the contact surface with block 2, or  $x = w - 4/5 \cdot w$ . At this time, the precondition for the stability of block 1 is  $N_1 = \int q_1(x) dx = mg$ ,  $M_1 = N_1 \cdot u_1 - \int q_1(x) \cdot x dx = 0$ , where  $M_1$  is the torque of block 1 at  $x = 0$  and  $q_1(x)$  is the loading strength per length at position  $x$ . Assuming  $q_1$  is distributed evenly by  $q_1(x) = k_1 \cdot x + a_1$ ,  $k_1$  and  $a_1$  can be obtained by solving the simultaneous equations for  $N$  and  $M$ . As shown in the figure, the load distribution is greater toward the right as a result of the disproportionate center of gravity in relation to the application range.

#### <Fig. 1.4.1-4.2c>

When three blocks are stacked with projections of  $1/5 \cdot w$  and  $2/5 \cdot w$ , solving the simultaneous equations of  $N$  and  $M$  for block 1 gives  $k_1 = (100/9) \cdot (mg/w)$  and  $a_1 = (-5/3) \cdot (mg/w)$ . In other words,  $q_1(x)$  becomes a tension at the left end and a compression at the right end. However, because block 1 is stacked by dry masonry, no tension occurs between blocks 1 and 2, and the loading range of  $N$  becomes narrower towards the right side. When  $q$  is distributed evenly, the loading range is wider than the point of application of the resultant force by 2:1 due to the equilibrium of  $M$ . Therefore, the distribution of  $q_1(x)$  is  $q_1$

2. 各ブロックの幅が一定の場合、迫出し幅の大きさはブロック幅に比例する。ここで仮に最上段のブロックの幅を2倍、成を半分にすれば、重量のバランスを変えずに迫出し幅  $w/2$  増やすことができる。あるいは左肩のカーブを外側にふくらませると全体の重心が外側に移動してゆき安定する。つまり、片持ちの迫出し積みは、各段の幅と成を変化させることで、最下段のブロック幅に対する迫出し幅をより大きくすることが可能である。

#### <Pl. 1.4.1-4.1>

実際に縦横 30cm ; 成 10cm ; 平均質量 21.6kg の砂岩ブロックを迫出しで 10 段積んでみた。各段の迫出し幅は限界値の  $w/2n$  からそれぞれ 1cm 少なくして積んでいる。このとき全体の迫出し幅は 33cm で、すでにブロック幅  $w$  を超えている。

### 4.2 迫出し積みの荷重分布

次に、迫出し積みのブロック各層間の荷重について、ブロック間に働く反力が等偏分布すると仮定した場合の分布を求める。ここで、各ブロック毎に左下端から水平右方向を  $x$  軸、鉛直上方向を  $z$  軸とする座標系を設定する。

#### <Fig. 1.4.1-4.2a>

ブロックが水平面上に置かれる場合、その荷重はブロックの敷面に等分布する。ブロックの質量を  $m$ 、重力加速度を  $g$  とすると、水平面への荷重は  $N = mg$  となる。このときブロック底面の長さ当たりの荷重強度  $q$  は、 $q = N/w = mg/w$  となる。また水平面に作用する荷重の合力作用点は、ブロック底面の左端を  $x = 0$  とすると、 $x = 1/2 \cdot w$  の位置になる。

#### <Fig. 1.4.1-4.2b>

ブロックを2つ  $1/5 \cdot w$  ずつ迫出して積んだ場合、ブロック1について、荷重  $N_1$  の合力作用点は  $x = 1/2 \cdot w (= u_1)$ 、 $N_1$  の载荷範囲はブロック2との接触面  $x = w - 4/5 \cdot w$  である。この時、ブロック1の安定条件は、 $x = 0$  におけるブロック1の回転モーメントを  $M_1$ 、位置  $x$  における長さ当たりの荷重強度を  $q_1(x)$  とすると、 $N_1 = \int q_1(x) dx = mg$ 、 $M_1 = N_1 \cdot u_1 - \int q_1(x) \cdot x dx = 0$  である。 $q_1$  を等偏分布と仮定し  $q_1(x) = k_1 \cdot x + a_1$  とすると、 $N$  と  $M$  について連立方程式を解くことで  $k_1$  と  $a_1$  を求めることができる。荷重の分布は図のように作用範囲に対する重心の偏りに応じて右側ほど大きくなる。

$(x) = (200/9) \cdot (mg/w) \cdot x - (20/3) \cdot (mg/w)$  at a range of  $x = 0.3w - 0.6w$ . Load distributions  $q_2$  and  $q_3$  of the combined load of blocks 1 and 2 ( $N_2$ ), and the combined load of blocks 1, 2, and 3 ( $N_3$ ) also lean toward the right, as shown in the figure.

#### 4.3 Arch 1: Changes in the horizontal thrust

Next, let us assume a condition where equilibrium of the forces in a corbel structure is not established and calculate the external pressure needed to support it.

<Fig. 1.4.1-4.3a>

When three blocks are stacked with projections of  $2/5 \cdot w$  each, the point of application of the combined loads of blocks 1 and 2 ( $N_2$ ) extend beyond the right shoulder of block 3 by  $1/10 \cdot w$ . At this time, the torque of blocks 1 and 2 which uses the right shoulder of block 3 as leverage is  $M_2 = N_2 \cdot 1/10 \cdot w$ . If no external force is applied, blocks 1 and 2 will fall to the right in a clockwise motion, as shown in Fig. 4-3b. To stop this rotation, the same amount of counterclockwise moment should be applied, as shown in Fig. 4-3c. When external force  $T$  is applied to the right shoulder of block 1 in a horizontal direction, a counterclockwise moment of  $T \cdot 2h$  is produced. At this time, the external force that works to achieve  $M_2 = 0$  is  $T = N_2 \cdot 1/10 \cdot w / 2h$ . The counterclockwise moment produced by external force  $T$  is directly proportional to vertical distance  $v$  from the leverage point to the point of application of  $T$ . Therefore, if the point of application of external force  $T$  is at the lower right corner of block 1, the vertical distance is reduced by half ( $h$ ), and  $T$  would need to be twice as large to stop the rotation of the block.

<Pls. 1.4.1-4.3a, -4.3b>

We used the corbel masonry technique to stack sandstone blocks having vertical and horizontal lengths of 30cm, height of 10cm, and average mass of 21.6kg, and measured  $T$ . When the specific gravity of sandstone was  $2.4\text{kg/cm}^3$ , the clockwise moment of blocks 1 and 2 produced by their own weights was

$M = N_2 \cdot 1/10 \cdot w = 43.2\text{kgf} \cdot 3\text{cm} = 129.6\text{kgf} \cdot \text{cm}$  When applying horizontal external force  $T$  to the lower right corner of block 1, the rotation could be stopped if

$$T = 129.6\text{kgf} \cdot \text{cm} / 10\text{cm} = 12.96\text{kgf} \quad (\text{Pl. 1.4.1-4.3a})$$

When applying  $T$  to the right shoulder of block 1, the rotation could be stopped if

$$T = 129.6\text{kgf} \cdot \text{cm} / 20\text{cm} = 6.48\text{kgf} \quad (\text{Pl. 1.4.1-4.3b})$$

Provided that, when the measure for measuring  $T$  is used horizontally, the display shows a value 2.0kgf less than the actual value.

<Fig. 1.4.1-4.3d>

Let us examine the load distribution between each block when the corbel structure is supported by external force  $T$ .

Where  $R_1$  is the resultant force of  $N_1$ , which is applied from block 1 to block 2, and  $T$ , its point of application is at the center of the torque produced by  $N_1$  and  $T$ , and the vertical component is equal to  $N_1$ .

In regard to the vertical loading strength per length  $q_1(x)$  applied from block 1 to block 2,  $N_1 = \int q_1(x) dx$ ,  $M = 0$  stands

<Fig. 1.4.1-4.2c>

ブロックを3つ  $1/5 \cdot w$  と  $2/5 \cdot w$  迫出して積んだ場合、ブロック1について  $N$  と  $M$  の連立方程式を解くと、 $k_1 = (100/9) \cdot (mg/w)$ 、 $a_1 = (-5/3) \cdot (mg/w)$  になる。つまり  $q_1(x)$  は左端で引張、右端で圧縮となる。しかし、ブロック1は空積みであるため、ブロック1とブロック2の間には引張は働かず、実際には  $N$  の載荷範囲は右側に狭くなっている。 $q$  が等偏分布の場合、 $M$  の釣合より、載荷範囲は合力作用点に対して  $2:1$  の広さを持つ。よって  $q_1(x)$  は、 $x = 0.3w \sim 0.6w$  の範囲で、 $q_1(x) = (200/9) \cdot (mg/w) \cdot x - (20/3) \cdot (mg/w)$  の分布になる。ブロック1-2を合わせた荷重  $N_2$ 、ブロック1-2-3を合わせた荷重  $N_3$  に対する荷重分布  $q_2$ 、 $q_3$  も同様に右に偏り、図のようになる。

#### 4.3 アーチ1：水平スラストの変化

次に、迫出し積みの力の平衡が成り立っていない状態を想定し、それを支えるために必要な外力を求める。

<Fig. 1.4.1-4.3a>

ブロックを3つを  $2/5 \cdot w$  ずつ迫出して積んだ場合、ブロック1-2の荷重  $N_2$  の作用点はブロック3の右肩より  $1/10 \cdot w$  だけ右外に出てしまう。この時、ブロック3の右肩を支点にブロック1-2の回転モーメントは  $M_2 = N_2 \cdot 1/10 \cdot w$  となる。これに外力が加わらない場合、ブロック1-2はFig. 4-3bのように右回りに回転して落下する。この回転を止めるためには、Fig. 4-3cのように、右回りのモーメントに対して同じだけの左回りのモーメントを加えればよい。ブロック1の右肩に水平方向の外力  $T$  を加えると、 $T \cdot 2h$  の左回りのモーメントが生じる。このとき  $M_2 = 0$  とするための外力の大きさは  $T = N_2 \cdot 1/10 \cdot w / 2h$  である。外力  $T$  による左回りのモーメントは支点から  $T$  の作用点までの垂直距離  $v$  に比例する。よって外力  $T$  の作用点がブロック1の右下であれば、垂直距離は半分の  $h$  となり、ブロックの回転を止めるために  $T$  は2倍の大きさを必要とする。

<Pls. 1.4.1-4.3a, -4.3b>

実際に、縦横 30cm、成 10cm、平均質量 21.6kg の砂岩ブロックを迫出して積んで、 $T$  の測定を行った。ブロック1-2の自重による右回りモーメントは、砂岩の比重を  $2.4\text{kg/cm}^3$  とすると、

$$M = N_2 \cdot 1/10 \cdot w = 43.2\text{kgf} \cdot 3\text{cm} = 129.6\text{kgf} \cdot \text{cm}$$

である。これに対して水平外力  $T$  をブロック1の右下に加える場合、

true when block 1 is stable. Where  $v_1$  is the vertical distance from the contact surface to the point of application of  $T$ ,  $q_1(x)$  can be determined by solving the following simultaneous equations:

$$N_1 = \int q_1(x) dx = mg \quad M_1 = N_1 * u_1 - T * v_1 - \int q_1(x) * x dx = 0$$

Similarly,  $q_2(x)$  and  $q_3(x)$  can also be determined for  $N_2$  and  $N_3$ .

At this time, the point of application of  $R_2$  for calculation purposes is at the right shoulder of block 3. If left in this condition, the loading range of  $R_2$  will concentrate on one point,  $q_2$  will become infinitely great, and the right shoulder of block 3 will fracture from shear stress. In reality, however, sandstone will distort, but will not fracture.

<Fig. 1.4.1-4.3e>

Assuming that  $q_2$  applies a load over an extremely small range, the right shoulder of block 3 distorts in proportion to that load distribution. Where  $\theta$  is the tilting angle of block 2 due to the distortion, the clockwise moment produced by  $N_2$  increases by  $N_2 * h \theta$ . To support this,  $T$  also increases by  $N_2 * h \theta / 2h$ . However, if  $T$  further increases, the point of application of  $R_2$  shifts to the left and  $\theta$  becomes smaller. Therefore, to actually support the corbel structure,  $T$  increases slightly until  $\theta$  is close to 0 from the value obtained by the equation of balance for  $M$ . At this time, the distortion is extremely small, so the increase of  $T$  is negligible for calculation purposes.

<Fig. 1.4.1-4.3f>

Next, let us stack the blocks symmetrically and create an arch. First, the arch is created by placing the block 1s of both the left and right sides so that their side surfaces are closely adjoined, while supporting them by hand. Then, gradually release the hands supporting the blocks.

At this time, the right shoulder of block 3 distorts due to  $N_2$ , and block 2 gradually begins to tilt as the supporting force is weakened. When there is no arch (Fig. 1.4.1-4.3e), this tilt of  $\theta$  causes the upper surface of the right side of block 1 to shift horizontally by  $2h \theta$  and the lower surface by  $h \theta$ . However, if an arch is assembled, any distortions to the arch would be symmetrical, so the right side of block 1 cannot shift in the horizontal direction. Instead, a horizontal compression distortion and horizontal reactive force  $T$  corresponding to  $\theta$  are produced in blocks 1 and 2. At this time, assuming that the distribution of the distortion of blocks 1 and 2 is equal to the projected horizontal shift of the side surface of block 1, the point of application of  $T$  can be considered to be roughly at the center of the side surface of block 1.

When  $T$  increases in response to the increase of  $\theta$ , the point of application of  $R_2$  eventually shifts to the left, and in turn, the load distribution of  $R_2$  gradually evens out. At the point where  $\theta$  becomes equal to the tilting of the distortion of block 3 due to the load distribution, the load and reactive force acting between blocks 2 and 3 become the same, and  $\theta$  stops increasing. In other words,  $\theta$  and  $T$  reach equilibrium when the distortions related to them coincide.

$$T = 129.6 \text{ kgf} * \text{cm} / 10 \text{ cm} = 12.96 \text{ kgf}$$

で回転を止めることができる (Pl. 1.4.1-4.3a)。また  $T$  をブロック 1 の右肩に加える場合、

$$T = 129.6 \text{ kgf} * \text{cm} / 20 \text{ cm} = 6.48 \text{ kgf}$$

で回転を止めることができる (Pl. 1.4.1-4.3b)。但し、 $T$  の測定に用いた量りは水平に用いた場合、表示が実際の値から 2.0kgf 少なくなっている。

<Fig. 1.4.1-4.3d>

迫出し積みが外力  $T$  で支えられている時の各ブロック間の荷重分布を考える。

ブロック 1 から 2 に働く  $N_1$  と  $T$  の合力を  $R_1$  とすると、その作用点は  $N_1$  と  $T$  による回転モーメントの中心点にあり、垂直成分は  $N_1$  に等しい。

ブロック 1 から 2 に働く長さ当たりの垂直荷重強度  $q_1(x)$  について、ブロック 1 が安定している場合、 $N_1 = \int q_1(x) dx$ 、 $M = 0$  が成り立つ。接触面から  $T$  の作用点までの垂直距離を  $v_1$  とすると、

$$N_1 = \int q_1(x) dx = mg$$

$$M_1 = N_1 * u_1 - T * v_1 - \int q_1(x) * x dx = 0$$

の連立方程式を解くことで  $q_1(x)$  が求まる。同様に  $N_2$ 、 $N_3$  に対する  $q_2(x)$ 、 $q_3(x)$  が求まる。

このとき計算上の  $R_2$  の作用点はブロック 3 の右肩にある。そのままであれば、 $R_2$  の載荷範囲は 1 点に集中し、 $q_2$  は無限大になり、ブロック 3 の右肩はせん断破壊される。しかし、実際には砂岩がひずみをおこすため、破壊はおこらない。

<Fig. 1.4.1-4.3e>

$q_2$  が図のように微小な範囲に載荷していると仮定すると、ブロック 3 の右肩はその荷重分布に応じてひずみを生じる。このひずみによるブロック 2 の傾きを  $\theta$  とすると、 $N_2$  による右回りのモーメントは  $N_2 * h \theta$  だけ大きくなる。これを支えるために  $T$  も  $N_2 * h \theta / 2h$  だけ大きくなる。逆に  $T$  がさらに大きくなれば  $R_2$  の作用点は左にシフトして  $\theta$  は減少してゆく。よって、実際に迫出し積みを支えるためには、 $T$  は  $M$  の釣合式より得られた値から  $\theta$  を 0 に近づけるまで若干量増加する。このとき、ひずみは極めて小さいため、この  $T$  の増加量は計算上無視することができる。

<Fig. 1.4.1-4.3f>

次に、このブロック積みを左右対称に組んでアーチを造る。初めに、ブロックを手で支えながら左右のブロック 1 側面が密接するようにアーチを組む。その後、徐々にブロックを支える力を弱めてゆく。

<Fig. 1.4.1-4.3g>

On the other hand, when horizontal reactive force  $T$  arises between the two block 1s on the left and right sides, a horizontal shear stress of the same amount as  $T$  is produced between blocks 1 and 2. This is also true for blocks 2 and 3 and for block 3 and the ground surface. The frictional force applied between the blocks works to resist the horizontal shear stress, but when the shear stress exceeds maximum static friction, the blocks begin to slide. Maximum static friction is directly proportional to the load's vertical component on the contact surfaces, so it is extremely small between blocks 1 and 2. Where  $f$  is the maximum static friction coefficient, the maximum static friction between blocks 1 and 2 is  $F_{lmax} = f \cdot N_1 = fmg$ . Through experiments, a value of approximately 0.4 was obtained as the maximum static friction coefficient between smooth surfaces of sandstone, so in this case,  $F_{lmax} = 0.4mg$  can be assumed.

If, for example, vertical load distribution is calculated when  $h/w = 0.5$ ,  $T = 0.4mg$ , the result is as shown in Fig. 1.4.1-4.3g. At this time, it is clear that  $\theta$ ,  $T$ , and the distortion are not balanced, but rather,  $\theta$  and  $T$  further increase. In other words,  $T$  tries to exceed  $F_{lmax}$ , and as a result, block 1 begins to slide. When this happens, two changes occur in the relationship between  $\theta$ ,  $T$ , and the distortion.

1. The horizontal distortion is reduced by an amount equal to that of the slide and  $T$  decreases. At the same time,  $\theta$  begins to increase once more. In other words,  $T$  becomes smaller by the amount of the slide in relation to  $\theta$ .
2. The two block 1s on the left and right sides are only in contact with each other at the upper edges, so the point of application of  $T$  shifts from the center of the side surface to the upper edges. As a result, the minimum necessary  $T$  to keep the blocks from falling inward ( $T_{min}$ ), or in other words the  $T$  obtained from  $M = N \cdot u - T \cdot v = 0$ , becomes smaller. In this case,  $T_{min}$  decreases from  $(2/15) \cdot (w/h) \cdot mg = 0.267mg$  to  $(1/10) \cdot (w/h) \cdot mg = 0.2mg$ . As a result of the smaller contact surface, the rate of increase of  $T$  in relation to  $\theta$  also becomes smaller.

<Graph 1.4.1-4.3>

Graph 1.4.1-4.3 shows the relationship between  $\theta$  and  $T$ .

1. When the supporting force is removed from the arch,  $T$  increases in response to the increase of  $\theta$ . When  $T$  exceeds  $F_{lmax}$ , sliding occurs.
2. When the slide is smooth, the slide and the increase of  $\theta$  are simultaneous, and a balance between  $\theta$ ,  $T$ , and the distortion is achieved while  $T = F_{lmax}$  is maintained. At this time, the vertical load distribution in this balanced state is as shown in Fig. 1.4.1-4.3h.
3. When the slide is small and occurs accompanied by small bounces,  $T$  greatly decreases the instant the slide occurs, and increases once more in response to the increase of  $\theta$ . Due to the shifting of the point of application of  $T$ , the inclination of  $T/\theta$  becomes small. The slide occurs little by little repeatedly until a balance is achieved between  $\theta$ ,  $T$ , and the distortion. At this time, the equilibrium value of  $T$  is close to  $F_{lmax}$ .

この時、ブロック 3 の右肩は  $N_2$  によりひずみを生じるため、支える力が少なくなるにつれて、ブロック 2 は徐々に傾いてゆく。アーチが組まれていない状態 (Fig. 1.4.1-4.3e) では、この傾き  $\theta$  によってブロック 1 の右側面は上端が  $2h \cdot \theta$ 、下端が  $h \cdot \theta$  だけ水平に変位する。しかしアーチが組まれている場合、アーチの変形は左右対称になるため、ブロック 1 の右側面は水平方向に変位することができない。よってブロック 1-2 には  $\theta$  に見合うだけの水平方向の圧縮ひずみと水平反力  $T$  が発生する。このとき、ブロック 1-2 のひずみの分布がブロック 1 側面の想定水平変位量に等しいとすると、 $T$  の作用点はブロック 1 側面のほぼ中心と見なせる。

$\theta$  の増加に従い  $T$  が大きくなると、 $R_2$  の作用点は次第に左にシフトしてゆき、それによって  $R_2$  の荷重分布も均等に近づいてゆく。 $\theta$  がこの荷重分布によるブロック 3 のひずみの傾きに等しくなったところで、ブロック 2 と 3 間に働く荷重と反力が等しくなり、 $\theta$  の増加は止まる。つまり、 $\theta$  と  $T$  はそれぞれに関連したひずみが一致したところで平衡点に達する。

<Fig. 1.4.1-4.3g>

一方、左右のブロック 1 の間に水平反力  $T$  が生じるとき、ブロック 1 と 2 の間には  $T$  と同じだけの水平せん断力が生じる。これはブロック 2 と 3 の間、ブロック 3 と地面との間でも同様である。この水平せん断力に抵抗するのは各ブロック間に働く摩擦力であり、水平せん断力が最大静止摩擦力を上まわるとブロックはスライドを始める。最大静止摩擦力は荷重の接触面直交成分に比例するため、ブロック 1-2 間の最大静止摩擦力が最も小さい。最大静止摩擦係数を  $f$  とすると、ブロック 1-2 間の最大静止摩擦力は  $F_{lmax} = f \cdot N_1 = fmg$  となる。砂岩の平滑面間の最大静止摩擦係数は実験から約 0.4 という値が得られており、この場合  $F_{lmax} = 0.4mg$  と仮定できる。

仮に  $h/w = 0.5$ 、 $T = 0.4mg$  の場合の垂直荷重分布を求めると、Fig. 1.4.1-4.3g のようになる。この時、 $\theta$ - $T$ -ひずみは明らかに平衡に至っておらず、 $\theta$  と  $T$  はさらに増加する。つまり  $T$  は  $F_{lmax}$  を超えようとする。その結果、ブロック 1 はスライドを起こす。スライドが起ると  $\theta$ - $T$ -ひずみの関係に 2 つの変化が生じる。

1. スライドの量だけ水平方向のひずみが緩和され  $T$  が減少する。同時に再び  $\theta$  の増加が始まる。つまり  $T$  はスライドの量だけ  $\theta$  に対して小さくなる。
2. 左右のブロック 1 間の接触面は上端のみになり、 $T$  の作用点は側面の中心から上端にシフトする。そ

4. 5. When the slide occurs accompanied by large bounces, the amount of distortion in relation to  $\theta$  and  $T$  is compensated in a single slide. At this time, the equilibrium value of  $T$  falls in the range  $F_{lmax} - T_{min}$  according to the size of the slide. If, for example, equilibrium is achieved by  $T = 0.3mg$ , the vertical load distribution is as shown in Fig. 1.4.1-4.3i.

The following two conclusions can be drawn from the above points.

1. In a corbel arch, the size of  $T$  is adjusted by the sliding of the blocks.
  2. The size of  $T$  and the load distribution between the blocks greatly differ depending on the manner of the slide.
- Here,  $T$  functions as the horizontal component of the thrust of the arch. Therefore,  $T$  refers to horizontal thrust. When the blocks are small, the above process is difficult to apply, because distortions of sandstone elements would be extremely small compared to the larger inconsistencies in the arch assembly and roughness of the elements and the ground. The balance of  $\theta$ ,  $T$ , and the distortion is constantly maintained, but the size of  $T$  is more likely to be determined by how the arch is assembled.

#### <Pl. 1.4.1-4.3c ~ f>

We assembled a four to six tier arch using sandstone blocks having horizontal and vertical lengths of 30cm, height of 10cm, and average mass of 21.6kg, and measured the thrust that was produced (Pl. 1.4.1-4.3c ~ f). In this experiment, the equipment was set up so that the lower right edge of the arch would slide to the side in accordance with the expansion and contraction of the spring measure. Therefore, block 1 does not slide, and a balance is maintained by the expansion/contraction of the spring measure and the rotation of the block. The equipment had two horizontal stainless steel round bars placed on top of two vertical round bars on a tiled floor that served as rollers. The measurement value included a margin of error for the precision of the spring measure, the sloping of the floor surface, and distortions of the round bars. When used on a level surface, the display on the measure indicated a value 0.3kgf less than the actual value. The  $T$  applied to each arch showed a value close to the  $T_{min}$  obtained from calculations. In this condition, pushing block 1 slightly to the inside of block 2 increased their  $T$  to around 11kgf. In other words, we were able to confirm that the maximum static friction coefficient of the block used in the experiment is approximately 0.5, and that  $T$  changes according to the adjustment function of the slide.

#### 4.4 Arch 2: Collapse process

Next, let us analyze the state of equilibrium where the collapse of an arch halts with the tilting of the blocks.

#### <Fig. 1.4.1-4.4a>

When three blocks with  $h/w = 0.5$  are stacked with projections of  $1/2 \cdot w$  each, the point of application of  $R_2$  is on the inside of the right shoulder of block 3 even when  $T$  equals  $0.4mg$ , which is the maximum static friction of block 1. In other words, when sufficient  $T$  is applied that could counter the

の結果、ブロックが内側に崩れないために必要な最低限の  $T$  ( $T_{min}$  とする)、つまり  $M = N \cdot u - T \cdot v = 0$  から求まる  $T$ , が小さくなる。この場合、 $T_{min}$  は  $(2/15) \cdot (w/h) \cdot mg = 0.267mg$  から  $(1/10) \cdot (w/h) \cdot mg = 0.2mg$  に低下する。また、接触面が小さくなる結果、 $\theta$  に対する  $T$  の増加率が低くなる。

#### <Graph 1.4.1-4.3>

$\theta$  と  $T$  の関係を Graph 1.4.1-4.3 に示す。

1. アーチから支持を取り除くと、 $\theta$  の増加に応じて  $T$  が増加してゆく。  $T$  が  $F_{lmax}$  を超えるとスライドが始まる。
  2. スライドが滑らかに行われる場合、スライドと  $\theta$  の増加が平行しておこり、 $T = F_{lmax}$  を維持したまま  $\theta$  - $T$  ひずみの平衡に到達する。この時、平衡状態における垂直荷重分布は Fig. 1.4.1-4.3h のようになる。
  3. スライドが小さく跳ねながら行われる場合、スライドが起きた瞬間  $T$  は大きく減少し、その後  $\theta$  の増加に応じて再び  $T$  が増加してゆく。  $T$  の作用点のシフトにより  $T/\theta$  の傾きは小さくなる。  $\theta$  - $T$  ひずみの平衡に到達するまで小刻みなスライドが繰り返される。この時、  $T$  の平衡値は  $F_{lmax}$  に近い。
  - 4, 5. スライドが大きく跳ねて行われる場合、  $\theta$  と  $T$  に対するひずみ量の補正が一度のスライドで行われる。この時、  $T$  の平衡値はスライドの大きさにより  $F_{lmax} \sim T_{min}$  の範囲に収まる。仮に  $T = 0.3mg$  で平衡が成立した場合、垂直荷重分布は Fig. 1.4.1-4.3i のようになる。
- ここまでで考察されることは以下 2 点になる。

1. 迫出し積みアーチはブロックのスライドによって  $T$  の大きさが調整される。
2. スライドの仕方によって  $T$  の大きさとブロック間の荷重分布は大きく異なってくる。

ここで、 $T$  はアーチの推力 (スラスト) の水平成分をなしている。以後、 $T$  を水平スラストと呼ぶ。

以上のプロセスは、ブロックが小さい場合、砂岩材のひずみが極めて小さく、アーチ組みの斑やブロックや地面の凹凸の方が遥かに大きいため、適用することは難しい。  $\theta$  - $T$  ひずみの平衡は常に成立しているが、  $T$  の大きさはむしろアーチの組み方によって決まってくると考えられる。

#### <Pl. 1.4.1-4.3c ~ f>

実際に、縦横 30cm; 成 10cm; 平均質量 21.6kg の砂岩ブロックを用いて、4 層から 6 層までのアーチを組んで、そこに生じているスラストを測定した。様

clockwise torque of the blocks produced by their own weights, the frictional force of block 1 cannot withstand the horizontal shear stress. Therefore, block 1 greatly slides and the arch begins to collapse inward.

<Fig. 1.4.1-4.4b>

When block 2 tilts to a large degree and block 1 keeps sliding, the rotation of the block stops at a certain angle. At this time, the load of blocks 1 and 2 is supported only by the right shoulder of block 3, and therefore  $M = 0$  for blocks 1 and 2. Based on this, let us consider the force applied to blocks 1, 2 and 3 when block 2 is tilted by  $\theta$ .

Where  $p$  is the projection from the right shoulder of block 3, the point where the center of gravity of blocks 1 and 2 coincide, and  $v$  is the vertical distance of the contact point between the two block 1s on the left and right sides from the right shoulder of block 3,  $p$  and  $v$  are expressed by equations (4) and (5). At this time,  $T$  in relation to  $\theta$  can be determined from  $M = N_1 \cdot p - T \cdot v = 0$ .

Where coordinate system  $x'-z'$  is coordinate system  $x-z$  rotated by  $\theta$ , the  $x'$  components of the force applied to block 1 are the  $x'$  component of  $T$ , the  $x'$  component of  $N_1$ , and the frictional force between blocks 1 and 2. The shear stress between blocks 1 and 2 is  $S_{1x} = T_{x'} - N_{1x'}$ , and because the maximum static friction between the said two blocks is directly proportional to the vertical component of the contact surface of the load,  $F_{1\max} = f \cdot (N_{1z'} + T_{z'})$ . At this time, the precondition for preventing block 1 from sliding is  $F_{1\max} \geq S_{1x}$ , or  $f \cdot (N_{1z'} + T_{z'}) \geq T_{x'} - N_{1x'}$ .

On the other hand, the  $x$  components of the force applied to block 3 are  $T$  and the frictional force between block 3 and the ground. The maximum static friction between block 3 and the ground is  $F_{3\max} = f \cdot N_3$ . At this time, the precondition for preventing block 3 from sliding is  $F_{3\max} \geq T$ .

Calculating from the above, the precondition for the arch to stop collapsing is  $F_{1\max} \geq S_{1x}$  and  $F_{3\max} \geq T$ . Of these four elements,  $F_{1\max}$ ,  $S_{1x}$ , and  $T$  are functions of  $\theta$ , while  $F_{3\max}$  is unrelated to  $\theta$  and is a constant. Graph 1.4.1-4.4 shows the values of the four elements in relation to  $\theta$  when  $f = 0.4$ . The range of  $\theta$  which satisfies the precondition is  $0.15r \sim 0.64r$  ( $9^\circ \sim 37^\circ$ ), and considerably broad.

We used the corbel masonry technique to stack sandstone blocks having horizontal and vertical lengths of 30cm, height of 10cm, and average mass of 21.6kg, with projections of 14cm each, and confirmed the process of collapse. When the supporting force was removed after assembling the arch, block 1 began to slide, and blocks 1 and 2 began to rotate. They stopped when they tilted  $0.14r$  (Pl. 1.4.1-4.4a). When pressure was applied intermittently from above block 1 in this condition, blocks 1 and 2 rotated and stopped repeatedly (Pl. 1.4.1-4.4b). The arch collapsed when the tilting exceeded  $0.44r$ .

The following two conclusions can be drawn from the above points.

1. A corbel arch has two types of balance.
2. Because the large range of  $\theta$  in which balance can be maintained, the rotation stops even if the collapse of the arch is symmetrical.

子を Pl. 1.4.1-4.3c ~ f に示す。この実験では、アーチ右下端がバネ量りの伸縮によって横にスライドするように装置を組んでいるため、ブロック 1 のスライドはおこらず、バネ量りの伸縮とブロックの回転との間で平衡が成立する。装置はタイル床上にステンレス鋼の丸棒を井型に組んでコロにしている。測定値には、バネ量りの精度、床面の傾斜、丸棒の歪みによる誤差が含まれる。測定に用いた量りは、水平に用いた場合、表示が実際の値から 0.3kgf 少なくなっている。それぞれのアーチに生じた  $T$  は計算から得られる  $T_{\min}$  に近い値を示した。アーチはこれらの状態からブロック 1 をブロック 2 に対して微量量内側に押し込むと、いずれも 11kgf 前後まで  $T$  を大きくすることができた。つまり、実験に用いたブロックの最大静止摩擦係数は 0.5 前後であることと、 $T$  はスライドの調整で変化すること、が確認できた。

#### 4.4 アーチ 2：崩壊プロセス

次に、崩壊を始めたアーチがブロックを斜めにし、停止する現象について、その平衡状態を分析する。

<Fig. 1.4.1-4.4a>

$h/w = 0.5$  のブロックを 3 つ  $1/2 \cdot w$  ずつ迫出して積んだ場合、 $T$  をブロック 1 の最大静止摩擦係数に等しい  $0.4mg$  としても、 $R_2$  の作用点はブロック 3 の右肩より内側にある。つまり、自重による右回りの回転モーメントに対して、それを打ち消すだけの  $T$  を与えた場合、ブロック 1 の摩擦係数はその水平せん断力に対抗できない。よってブロック 1 は大きくスライドを起こし、アーチは内側に崩れ始める。

<Fig. 1.4.1-4.4b>

ブロック 2 が大きく傾いてゆき、ブロック 1 のスライドが進行すると、ある角度でブロックの回転が停止する。このとき、ブロック 1-2 の荷重はブロック 3 の右肩 1 点で支持されているため、ブロック 1-2 について  $M = 0$  が成立している。そこで、ブロック 2 が  $\theta$  傾いた状態における、ブロック 1-2-3 に作用する力を考える。

ブロック 1-2 の重心のブロック 3 右肩からの迫出しを  $p$ 、左右のブロック 1 間の接触点のブロック 3 右肩からの垂直距離を  $v$  とすると、 $p$  と  $v$  はそれぞれ式 (4)、式 (5) のように与えられる。このとき、 $M = N_1 \cdot p - T \cdot v = 0$  より、 $\theta$  に対する  $T$  が求まる。

$x-z$  座標系が  $\theta$  回転したものを  $x'-z'$  座標系とすると、ブロック 1 に作用する力の  $x'$  成分は、 $T$  の  $x'$  成分、 $N_1$  の  $x'$  成分、ブロック 1-2 間の摩擦係数、の 3 つ

#### 4.5 Cross sectional structure of a monument

Next, let us calculate the load distribution of an actual monument, taking the cross sectional structure of the Northern Library inside the Outermost Enclosure of Angkor Wat as an example. This Library is composed of a cruciform-shaped main chamber with a planar three-aisle layout, rectangular east and west side chambers also with a planar three-aisle layout, and a four-sided porch.

##### 4.5.1 Low porch

Let us first analyze the cross sectional structure of the east-west porch (Fig. 1.4.1-4.5.1a), which is the smallest structure. The east-west porch is approximately 5.6m high from the top surface of the platform to the large ridge of the roof. The distance from pillar center to pillar center is approximately 2.4m, the width of the pillar shafts is approximately 0.48m, and the height of the pillars are approximately 3.1m. A nave beam lies across the pillars, and there are five tiers of roof elements and a tier of ridge elements stacked on it. When the blocks are numbered from the top, the left and right sides of the vault roof coincide with block 3. Block 2 is a single element. The bottom corner on the inside of block 6 is set back from the nave beam. This is thought to be the crossbeam trestle for installing the wooden lattice ceiling.

A model of this cross section is created using elements with a height of 0.12m. The distance between pillars in the ridge direction differs in places, but here let us assume a distance four times the width of the pillar shafts, or 1.92m, and that a pair of pillars supports their portion of the roof load (Fig. 1.4.1-4.5.1b). In this cross sectional structure, the pillars are deformed in such a way that their top surfaces open outward due to the thrust (Fig. 1.4.1-4.5.1c). At this time, the left and right sides of the roof adjoin the upper surface of the inner side of block 3, and cause a horizontal thrust to take effect. This will be called horizontal external force  $H_1$ . At the same time, a horizontal reactive force the same size as the horizontal thrust is applied to the lower parts of the pillars. This will be called horizontal external force  $H_2$ . Also, since block 3 tilts inward due to the deformation of the cross sectional structure, the weight of blocks 1 and 2 bears down on the outer edges of block 3. At this time, we assume that no distortions occur in the floor surface.

For each element of the cross sectional structure, let us solve the equations for  $N$  and  $M$  from the above, and calculate the point of application of the resultant force (thrust) of the vertical load and horizontal thrust of the block ( $uR$ ), the vertical load distribution per unit area ( $s(x)$ ), and deformation of the element due to the load. Provided that, the specific density of sandstone is  $2400\text{kg/m}^3$ , the maximum static friction coefficient of the smooth surface is 0.40, Young's modulus is 10GPa, and Poisson's ratio is 0.20. In regard to load distribution, both compression and tensile stress act between consecutive elements, while only compression load acts between non-consecutive elements. For element deformation caused by the load, the vertical distortion is calculated in relation to the load distributed on the top surface of the element, and the horizontal displacement of

である。ブロック 1-2 間のせん断力は  $S_{1x}=T_x-N_{1x}$ 、ブロック 1-2 間の最大静止摩擦力は、荷重の接触面直交成分に比例するため、 $F_{1\max}=f*(N_{1z}+T_z)$  となる。このとき、ブロック 1 がスライドしないための条件は、 $F_{1\max}\geq S_{1x}$ 、つまり  $f*(N_{1z}+T_z)\geq T_x-N_{1x}$  である。

一方、ブロック 3 に作用する力の  $x$  成分は、 $T$ 、ブロック 3- 地面間の摩擦力、の 2 つである。ブロック 3- 地面間の最大静止摩擦力は、 $F_{3\max}=f*N_3$  となる。このとき、ブロック 3 がスライドしないための条件は、 $F_{3\max}\geq T$  である。

以上より、アーチの崩壊が止まるための条件は、 $F_{1\max}\geq S_{1x}$  且つ  $F_{3\max}\geq T$  である。これら 4 要素のうち、 $F_{1\max}$ 、 $S_{1x}$ 、 $T$  は  $\theta$  の関数で、 $F_{3\max}$  は  $\theta$  に関係なく一定である。 $f=0.4$  としたときの  $\theta$  に対する 4 要素の値を Graph 1.4.1-4.4 に示す。条件を満たす  $\theta$  の範囲は  $0.15r\sim 0.64r$  ( $9^\circ\sim 37^\circ$ ) で、かなり広い。

実際に、縦横 30cm、成 10cm、平均質量 21.6kg の砂岩ブロックを 14cm ずつの迫出しで積み、崩壊のプロセスを確認した。アーチを組んだ後支えを取り除くと、ブロック 1 のスライドとブロック 1-2 の回転が始まり、 $0.14r$  傾いたところで停止した (Pl. 1.4.1-4.4a)。ここで、ブロック 1 の上から断続的に力を加えると、ブロック 1-2 は回転と停止を繰り返した (Pl. 1.4.1-4.4b)。傾きが  $0.44r$  を超えたところでアーチは崩落した。

ここまでで考察されることは以下 2 点になる。

1. 迫出し積みアーチは、2 種類の平衡状態を持つ。
2. 平衡が成り立つ  $\theta$  の範囲が広いと、アーチの崩壊は左右対称でなくても、回転が停止する。

#### 4.5 遺構の断面構造

次に、実際の遺構について、荷重分布の計算を行ってみる。ここではアンコール・ワット最外周壁内北経蔵の断面構造を例に用いる。この経蔵は十字形平面三廊式の主室、矩形平面三廊式の東西側室、4 面のポーチから構成される。

##### 4.5.1 低いポーチ

まず、最も規模の小さい東西ポーチの断面構造 (Fig. 1.4.1-4.5.1a) について分析を行う。東西ポーチは基壇上面から屋根大棟までの高さが約 5.6m、柱間真々が約 2.4m、柱身幅が約 0.48m、柱成が約 3.1m の大きさである。柱の上に身舎梁が架かり、その上に屋根材を 5 層と大棟材を 1 層積む。それぞれのブロックに上から番号を振る。ヴォールトはブロック 3 で左右の屋根面が突き合う。ブロック 2 は左右面が 1 材で造られる。ブロック 6 の内側は下隅が身舎梁から

the element is determined from the tilting of the distortion. The finite element method can be applied to each element to derive an approximation of each block's actual deformation, but note that we are using the above method for the sake of simplicity. The point of application of the resultant force, load distribution, and deformation caused by the load can be obtained as functions of  $H_1$ . Here, because the cross sectional structure is symmetrical, horizontal displacement of the upper surface of the vault is 0. Therefore, in order to establish H1, the sum of the horizontal displacements from the lower surface of the pillar to the upper surface of block 3 ( $hd_3$ ) must be 0. The load of the roof and breast wall on a single pillar is 102kN, and that on the part from the bottom of the pillar to the platform is 123kN.

Graph 1.4.1-4.5.1a shows the analysis result. At this time,  $H_1 = 6.6\text{kN}$ , corresponding to 0.56 times the maximum static friction between blocks 3 and 4. Therefore, block 3 does not slide. The point of application of the resultant force is slightly outside the center line of the pillar at the bottom surface of the pillar, and the vertical load on the floor surface is distributed unevenly toward the outside, but at 0.39MPa at the outer edges of the plinth, this is not a large force. The vertical stress ( $s(x)$ ) becomes greatest at the upper and lower surfaces of the pillar shaft. The largest is a compression stress of 0.90MPa, and no tensile stress is produced. This stress distribution largely corresponds to the actual damage condition of the pillars. However, the uniaxial compression strength of sandstone used in Khmer architecture is 40–50MPa in the orthogonal direction to the bedding plane, so as long as no distortions occur in the platform, the cross sectional structure can be evaluated as stable.

Now let us examine what would happen if the floor of this cross sectional structure subsides unevenly.

In the case where uneven subsidence causes the floor to tilt outward,  $H_1$  becomes 0 when the horizontal displacement of block 3 caused by the gradient of the subsidence reaches 4.9mm (Graph 1.4.1-4.5.1b). The cross sectional structure of the porch can stand by itself even without a horizontal thrust. However, if the gradient of the subsidence becomes larger, the load of blocks 1 and 2 applies to the inner surface of block 3 so that the roof falls inward and eventually collapses. At this time, the point of application of the resultant force is toward the inner surface of the pillar, so a large vertical stress is applied to the inner surface of the pillar shaft.

In the case where uneven subsidence causes the floor to tilt inward,  $H_1$  exceeds the maximum static friction (to be called  $F_{3\text{max}}$ ) between blocks 3 and 4, and block 3 begins to slide when the horizontal displacement of block 3 caused by the gradient of the subsidence reaches 3.8mm (Graph 1.4.1-4.5.1b). At this time, the point of application of the resultant force is toward the outer surface of the pillar, so a large vertical stress is applied to the outer surface of the lower edges of the pillar shaft.

#### 4.5.2 High porch

Next, let us analyze the cross sectional structure of the north-south porch (Fig. 1.4.1-4.5.2a). The porch is approximately 6.8m high from the top surface of the platform to the large ridge of the roof, the distance from pillar center to pillar center is approximately 2.9m, the width of the pillar shaft is approxi-

セットバックしている。これは木造の格子天井を設置するための桁の敷代と推測される。

この断面構造を成 0.12m の要素から構成されるモデルに見立てる。桁行き柱間は場所によって異なるが、ここでは柱身幅の 4 倍 1.92m として、その分の屋根荷重を 1 組の柱が受けることにする (Fig. 1.4.1-4.5.1b)。この断面構造はスラストによって柱上端が外に開くように変形をおこしている (Fig. 1.4.1-4.5.1c)。このとき、左右屋根面はブロック 3 の内側上端で接するため、そこに水平スラストが発生している。これを水平外力  $H_1$  とする。一方、柱の足下には水平スラストと同じ大きさの水平反力が作用している。これを水平外力  $H_2$  とする。また、ブロック 3 は断面構造の変形により内転びになるため、ブロック 1-2 の重量はブロック 3 の外端に掛かってくる。また、床面は変形をおこさないものと仮定する。

断面構造の各要素について、上から N と M の方程式を解き、ブロックの垂直荷重と水平スラストとの合力 (スラスト) の作用点 ( $uR$ )、単位面積当たりの垂直荷重分布 ( $s(x)$ )、荷重による要素の変形を求める。但し、砂岩の比重を  $2400\text{kg/m}^3$ 、平滑面の最大静止摩擦係数を 0.40、ヤング率を 10GPa、ポワソン比を 0.20 とする。荷重分布は、連続する要素間については圧縮・引張応力がともに働き、非連続の要素間については圧縮荷重のみが働く。荷重による要素の変形は、要素上面に架かる荷重分布に対して垂直方向のひずみを求め、そのひずみの傾きから要素の水平変位のみを求めている。実際の各要素の変形は個別に有限要素法を適用することで近似値が求められるが、ここでは計算の簡略化のためこのような方法を用いていることを断っておく。合力の作用点と荷重分布、荷重による変形は何れも  $H_1$  の関数として解が得られる。ここで、断面構造は左右対称なためヴォールト上端の水平変位は 0 である。よって、 $H_1$  を定めるための条件は、柱下端からブロック 3 上端までの水平変位の総和 ( $hd_3$ ) が 0 となることである。柱 1 本が受ける屋根と腰壁の荷重は 102kN、柱底から基壇が受ける荷重は 123kN である。

分析の結果を Graph 1.4.1-4.5.1a に示す。このとき、 $H_1 = 6.6\text{kN}$  であり、これはブロック 3-4 間の最大静止摩擦力の 0.56 倍に相当する。よってブロック 3 はスライドをおこさない。合力の作用点は柱下端で柱の中心線より少し外に寄り、床面への垂直荷重の分布は外向きの偏荷重となるが、柱脚外端で 0.39MPa とそれほど大きくない。垂直応力度 ( $s(x)$ ) は柱身の上下端で最も大きくなる。最大値は圧縮で 0.90MPa、引張はほとんど生じない。この応力分布は、実際の

mately 0.48m, and the height of the pillars is approximately 3.8m. A nave beam lies across the pillars, and there are six tiers of roof elements and a tier of ridge elements stacked on it. The vault is such that the left and right sides of the roof coincide with blocks 3 and 4. This is applied to the same model as the east-west porch. The north-south porch is approximately 1.2m higher and the distance between pillars is approximately 0.5m longer than the east-west porch. The roof projects slightly outward. This has the effect of reducing the weight of the roof, but it also brings the roof's center of gravity inward. Once the supports are removed after construction and the roof begins to deform due to its own weight, horizontal external force  $H_1$  is first produced on the inner side of the upper edges of block 3. When  $H_1$  exceeds  $F_{3\max}$ , block 3 begins to slide, and the inner side of the upper edges of block 4 becomes abutted against it. Where  $H_2$  is the horizontal external force produced where blocks 3 and 4 adjoin, the horizontal thrust is the sum of  $H_1$  and  $H_2$ , and horizontal reactive force  $H_3$  applied to the bottom of the pillar becomes equal to the horizontal thrust. The load of the roof and breast wall on a single pillar is 112kN, and the load on the part from the bottom of the pillar to the platform is 137kN.

Graph 1.4.1-4.5.2a shows the analysis result. Unless the deformations of the platform are included in the calculation, the cross sectional structure of the north-south porch will show the same deformation and load distribution as the east-west porch. At this time,  $H_1 = 10.9\text{kN}$ , corresponding to 0.97 times  $F_{3\max}$ . Therefore, block 3 will not slide, and  $H_2$  will not be produced. The point of application of the resultant force will again be slightly outside of the center line of the pillar at the bottom edges of the pillars, and the vertical load on the floor surface will be distributed unevenly toward the outside. The load at the outer surface of the plinth becomes 0.57MPa. The vertical stress ( $s(x)$ ) also becomes greatest at the upper and lower surfaces of the pillar shaft. The largest is a compression stress of 1.46MPa and a tensile stress of 0.44MPa.

In the case where uneven subsidence causes the floor to tilt outward (Fig. 1.4.1-4.5.2b), the point of application of the resultant force between blocks 7 and 8 moves toward the inner surface of the bottom of block 7, and the roof begins to fall inward when the horizontal displacement of block 3 caused by the gradient of the subsidence becomes greater than 31.6mm. At this time,  $H_1$  decreases once to 8.4kN and increases again according to the degree of rotation. When  $H_1$  exceeds  $F_{3\max}$ , block 3 begins to slide. At the same time, the point of application of the resultant force between the pillar bottom and the floor surface moves close to the center line of the pillar, and the vertical load on the floor surface more or less evens out.

In the case where uneven subsidence causes the floor to tilt inward (Fig. 1.4.1-4.5.2c),  $H_1$  will exceed  $F_{3\max}$  and  $H_2$  will be produced when the horizontal displacement of block 3 caused by the gradient of the subsidence becomes greater than 6.9mm. At this time, the point of application of the resultant force between the pillar bottom and the floor surface moves toward the outer edges of the pillar bottom, and the inner surface of the pillar bottom begins to rise.

#### 4.5.3 Three-aisle structure

柱の破損状況によく一致している。但し、クメール建築に用いられる砂岩の一軸圧縮強度は層理面直交方向で 40 ~ 50MPa であり、基壇に変形が生じない限りは、この断面構造はよく安定していると評価できる。

この断面構造について、床面が不等沈下した場合を考える。

床面が外転びに不等沈下する場合、その沈下の勾配によるブロック 3 の水平変位が 4.9mm に達すると、 $H_1$  は 0 になる (Graph 1.4.1-4.5.1b)。このポーチの断面構造は水平スラストが無くても自立することができる。しかし、沈下の勾配が大きくなるとブロック 1, 2 の荷重がブロック 3 の内端に掛かるようになるため、やがて屋根が内転びをおこし、最終的には崩落することになる。このとき、合力作用点は柱の内面に寄るため、柱身の内面に大きな垂直応力が生じる。

床面が内転びに不等沈下する場合、その沈下の勾配によるブロック 3 の水平変位が 3.8mm に達すると、 $H_1$  はブロック 3-4 間の最大静止摩擦力 ( $F_{3\max}$  とする) を超えてしまい、ブロック 3 のスライドが始まる (Graph 1.4.1-4.5.1b)。このとき、合力作用点は柱の外面に寄るため、柱身外面下端に大きな垂直応力が生じる。

#### 4.5.2 高いポーチ

次に、南北ポーチの断面構造 (Fig. 1.4.1-4.5.2a) について分析を行う。南北ポーチは基壇上面から屋根大棟までの高さが約 6.8m、柱間真々が約 2.9m、柱身幅が約 0.48m、柱成が約 3.8m の大きさである。柱の上に身舎梁が架かり、その上に屋根材を 6 層と大棟材を 1 層積む。ヴォールトはブロック 3 と 4 で左右の屋根面が突き合う。これを東西ポーチと同様のモデルに見立てる。南北ポーチは東西ポーチに比べて、高さが約 1.2m、柱間が約 0.5m 大きい。屋根面は外側への張り出しが少なく、これは屋根の重量を小さくする効果がある一方、屋根の重心を内側に寄せてしまう。建設後屋根の支持を取り外して自重による変形が始まると、まずブロック 3 の内側上端に水平外力  $H_1$  が生じる。この  $H_1$  が  $F_{3\max}$  を超えるとブロック 3 のスライドが始まり、ブロック 4 の内側上端が突き合うようになる。そこに生じる水平外力を  $H_2$  とすると、水平スラストは  $H_1$  と  $H_2$  の合計であり、柱底に掛かる水平反力  $H_3$  はこれに等しくなる。柱 1 本が受ける屋根と腰壁の荷重は 112kN、柱底から基壇が受ける荷重は 137kN である。

分析の結果を Graph 1.4.1-4.5.2a に示す。基壇の変形を計算に入れない限り、南北ポーチの断面構造は

Next, let us analyze the cross sectional structure of the main chamber (Fig. 1.4.1-4.5.3a). The main chamber is approximately 8.2m high from the top surface of the platform to the large ridge of the nave roof. The distance from pillar center to pillar center in the nave is approximately 3.4m, the width of the nave pillars is approximately 0.48m, the height of the pillars is approximately 3.6m, the distance between aisle center to aisle center is approximately 1.5m, and the height of the aisle wall is approximately 2.8m. A nave beam lies across the nave pillars, and there are three tiers of breast wall elements, seven tiers of roof elements, and one tier of ridge elements stacked on it. The aisle walls are made of seven tiers, and there is a window in the middle three layers. Three tiers of roof elements are further stacked on top of them. The nave pillars are composed of the pillar shaft element, connecting beam element, and pillar capital element, and the connecting beam lies across the upper surface of the aisle walls. The bottom edges of the pillar shaft element are tucked into the platform floor element. This is applied to the same model as the porch. There are five horizontal external forces at work in the nave structure:  $H_1$  applied to the upper edges of the inner surface of block 3,  $H_2$  applied to the upper edges of the inner surface of block 4,  $H_3$  applied to the area from the upper edges of the aisle roof to the upper edges of the outer surface of the nave beam,  $H_4$  applied to the area from the aisle wall to the connecting beam, and  $H_5$  applied to the area from the upper surface of the floor element to the base of the pillar. At this time, the values of  $H_3$  and  $H_4$  can only be established when the horizontal displacement of the nave and aisle are the same at the height of the upper surface of the aisle roof and the height of the lower surface of the connecting beam. Also, the vertical external forces in effect on the nave structure are the reactive force from the nave pillars and  $V_4$  from the aisle wall to the connecting beam. The load of the roof and breast wall on a single pillar is 170kN, and the load on the area from the pillar bottom to the platform when  $V_4=0$  is 214kN.

Classified broadly, there are three types of three-aisle structures: those without a connecting beam, those in which a connecting beam abuts against the nave pillar, and those in which the connecting beam is tucked into the nave pillar. In order to confirm their differences in structural properties, let us examine their differences in load distribution by applying each condition to the cross sectional structure of the Northern Library.

An analysis of a structure that has no aisle and whose nave stands alone (single-aisle structure) produces the results shown in Graph 1.4.1-4.5.3a. At this time,  $H_1 = 12.1\text{kN}$ ,  $H_2 = 1.7\text{kN}$ , and the sum of the horizontal thrusts is 13.8kN. The point of application of the resultant force at the lower edges of the roof is at the inner surface of the bottom of block 8, and the load of the roof is concentrated toward the inside of the upper surface of the breast wall. In other words, even when there is no platform deformation in the nave structure, the outer sides of the roof had begun to rise. The vertical load on the area between the pillar bottom and platform is also distributed unevenly, with the force at the outer edges being 2.70MPa. Maximum horizontal displacement is 3.64mm on the upper surface of the breast wall. This means that an approximately 4mm distortion

東西ポーチと類似の変形と荷重分布を生じる。このとき、 $H_1 = 10.9\text{kN}$ であり、これは  $F_{3\text{max}}$  の 0.97 倍に相当する。よって、ブロック 3 はスライドをおこさず、 $H_2$  は生じない。合力の作用点はやはり柱下端で柱の中心線より少し外に寄り、床面への垂直荷重の分布は外向きの偏荷重となる。柱脚外端の荷重は 0.57MPa になる。垂直応力度 ( $s(x)$ ) もやはり柱身の上下端で最大になる。最大値は圧縮で 1.46MPa、引張で 0.44MPa になる。

床面が外転びに不等沈下する場合 (Fig. 1.4.1-4.5.2b)、その沈下の勾配によるブロック 3 の水平変位が 31.6mm 以上になると、ブロック 7-8 間の合力作用点がブロック 7 底面内端に寄ってしまい、屋根が内転びを始める。このとき、 $H_1$  は一度 8.4kN まで低下した後、回転度に応じて再び増加してゆく。その  $H_1$  が  $F_{3\text{max}}$  を超えるとブロック 3 のスライドが始まる。一方、柱底 - 床面間の合力作用点は柱の中心線に寄り、床面への垂直荷重はほぼ均等分布する。

床面が内転びに不等沈下する場合 (Fig. 1.4.1-4.5.2c)、その沈下の勾配によるブロック 3 の水平変位が 6.9mm 以上になると、 $H_1$  は  $F_{3\text{max}}$  を超えてしまい、 $H_2$  が生じる。このとき、柱底 - 床面間の合力作用点は柱底外端に寄ってしまい、柱底内側が浮き始める。

#### 4.5.3 三廊式架構

次に、主室の断面構造 (Fig. 1.4.1-4.5.3a) について分析を行う。主室は、基壇上面から身舎屋根大棟までの高さが約 8.2m、身舎柱間真々が約 3.4m、身舎柱身幅が約 0.48m、柱成が約 3.6m、底間真々が約 1.5m、底壁成が約 2.8m の大きさである。身舎柱の上に身舎梁が架かり、その上に腰壁材を 3 層、屋根材を 7 層、大棟材を 1 層積む。底壁は 7 層積みで、中 3 層に窓を開口する。その上に屋根材を 3 層積む。身舎柱は柱身材、繋ぎ梁材、柱頭材の 3 材から構成され、繋ぎ梁は底壁上端に架け渡される。柱身材下端は基壇床材の中に挿し込まれている。これをポーチと同様のモデルに見立てる。身舎架構に作用する水平外力は、ブロック 3 内側上端に掛かる  $H_1$ 、ブロック 4 内側上端に掛かる  $H_2$ 、底屋根上端から身舎梁外側上端に掛かる  $H_3$ 、底壁から繋ぎ梁に掛かる  $H_4$ 、床材上端から柱元に掛かる  $H_5$ 、の 5 つがある。このとき、 $H_3$  と  $H_4$  の値を定める条件は、底屋根上端高さと繋ぎ梁下端高さにおける身舎と庇の水平変位が等しくなることである。また、身舎架構に作用する垂直外力は、身舎柱から反力が、底壁から繋ぎ梁へ  $V_4$  が作用している。柱 1 本が受ける屋根と腰壁の荷重は 170kN、

occurred in the stone masonry of the roof when the supports were removed after construction. As a frame structure, it is a failure. In the case where no openings are made in the wall using pillars but a solid wall is created instead, the load per unit area decreases by approximately 1/4, so the horizontal displacement also decreases by approximately 1/4. Therefore, a structure this high can be made relatively stable if it is built by walls. Indeed, among existing monuments, there are single-aisle structures made of high walls, but there are no single-aisle structures made of pillars and breast walls.

The next analysis is of the cross sectional structure without a connecting beam and whose aisle structure connects to the nave structure at the upper surface of the roof only. Graph 1.4.1-4.5.3b shows the results. At this time,  $H_1 = 12.1\text{kN}$ ,  $H_2 = 3.4\text{kN}$ , and the sum of the horizontal thrusts is  $15.4\text{kN}$ . A horizontal stress of  $6.7\text{kN}$  is applied to the area from the nave beam to the aisle roof, and due to the reactive force ( $H_3$ ), the maximum horizontal displacement is reduced from  $3.64\text{mm}$  to  $0.74\text{mm}$ . In other words, the outward collapse of the nave is controlled. When the aisle structure is added to the nave structure, two changes occur: 1. a larger area of the nave roof and breast wall adjoin, and the concentration of the roof load lessens, and 2. the bending moment which applied to the nave pillars with the increase of horizontal thrust decreases, and the unbalanced load on the area from the pillar bottom to the platform also lessens.  $H_3$  causes the point of application of the resultant force of the aisle structure to move down and toward the outside, so that at the bottom half of the wall, it is almost outside the wall. The largest vertical compression force is  $1.66\text{MPa}$  at the upper surface of the pillar shaft, and hardly any tensile stress is produced. In other words, as long as no deformations occur in the platform, the structure is stable even without a connecting beam.

The next analysis is of the cross sectional structure with a connecting beam abutting against the nave pillar. Graph 1.4.1-4.5.3c shows the results. At this time,  $H_1 = 12.1\text{kN}$ ,  $H_2 = 3.1\text{kN}$ , and the sum of the horizontal thrusts is  $15.2\text{kN}$ . A horizontal force of  $14.3\text{kN}$  is applied by the connecting beam to the area from the nave pillar to the aisle wall, and the conductivity of the horizontal force from the nave beam to the aisle roof becomes 0. The maximum horizontal displacement becomes  $0.49\text{mm}$  in the upper half of the breast wall. The addition of the connecting beam brings about two changes. The first change is that a large horizontal reactive force was able to be produced between the aisle and nave. The reactive forces ( $H_3$ ,  $H_4$ ) are supported by the frictional force that acts between the elements of the aisle. The maximum static friction of the upper surface element of the aisle roof (block 16) is  $6.9\text{kN}$ , while the static friction of the upper surface element of the aisle wall (block 19) is  $24.9\text{kN}$ . Therefore, the beam connected to the upper surface of the aisle roof can support a greater reactive force. On the other hand, depending on how the joint between the connecting beam and the upper surface of the aisle wall is processed, the limitation of the reactive force to support the connecting beam will differ. The upper surface element of the aisle wall is also the head element of the aisle window, so in many cases it is made of two long elements in the horizontal

$V_4 = 0$  のとき柱底から基壇が受ける荷重は  $214\text{kN}$  である。

三廊式の架構には大別して、繋ぎ梁がないもの、繋ぎ梁を身舎柱に突き付けるもの、繋ぎ梁を身舎柱に挟み込むもの、の3種類がある。これらの構造特性の違いを確認するために、この北経蔵の断面構造にそれぞれの条件を設定して、荷重分布の違いを見てゆく。

まず、底架構が無く身舎架構が独立している状態（単廊架構）を分析すると、結果は Graph 1.4.1-4.5.3a ようになる。このとき、 $H_1 = 12.1\text{kN}$ 、 $H_2 = 1.7\text{kN}$  で、水平スラストは合計  $13.8\text{kN}$  となる。屋根下端における合力作用点はブロック 8 の下面内端にあり、屋根荷重が腰壁上端の内側に集中している。つまり、身舎架構は基壇に変形がない状態でも、すでに屋根外側が浮き始めている。また、柱底 - 基壇間に作用する垂直荷重の分布も偏りが大きく、外端で  $2.70\text{MPa}$  になっている。最大水平変位は腰壁上端で  $3.64\text{mm}$  になる。これは、屋根の構築後、支持を取り除くと屋根の石積みに約  $4\text{mm}$  の歪みが生じることであり、架構としては失敗である。壁体部を柱で開放せず壁で造る場合、単位面積当たりの荷重が約 1/4 に減少するため、水平変位も約 1/4 に減少する。つまりこの高さの架構も壁で造るのであれば、それなりに安定性が見込める。実際の遺構にも、成の高い壁による単廊架構はあっても、柱と腰壁による単廊架構は見られない。

次に、繋ぎ梁を持たず底架構が屋根上端のみで身舎架構に接続している状態を分析すると、結果は Graph 1.4.1-4.5.3b ようになる。このとき、 $H_1 = 12.1\text{kN}$ 、 $H_2 = 3.4\text{kN}$  で、水平スラストは合計  $15.4\text{kN}$  となる。身舎梁から底屋根へは  $6.7\text{kN}$  の水平力が伝わり、その反力  $H_3$  によって最大水平変位が  $3.64\text{mm}$  から  $0.74\text{mm}$  に減少する。つまり、身舎の外転びが抑えられる。底架構が身舎架構に付加されることによる変化は、第一に、身舎屋根と腰壁の接合面積が広くなり、屋根荷重の集中が緩和されることである。第2に、水平スラストが大きくなることによって身舎柱に掛かる曲げモーメントが減少し、柱底から基壇への偏荷重も緩和されることである。底架構の合力作用点は、 $H_3$  により下へゆくほど外に移動し、壁下半では壁外面近くまで迫っている。最大の垂直圧縮応力は柱身上端の  $1.66\text{MPa}$  で、引張はほとんど生じていない。つまり基壇に変形が生じない限り、繋ぎ梁が無くても、架構としてはそれほど問題はない。

次に、繋ぎ梁は身舎柱に突き付けて接続している状態を分析すると、結果は Graph 1.4.1-4.5.3c のよう

direction. This serves to disperse  $H_4$  entirely across the upper surface of the aisle wall. The second change is that the horizontal force applied to the nave pillars becomes close to 0, because the horizontal thrust is almost entirely supported by the connecting beam. This can control the unevenness of the load on the pillars and reduce the bending moment. Many monuments with a three-aisle layout are actually constructed according to this method.

Finally, Graph 1.4.1-4.5.3d shows the results of an analysis of the cross-sectional structure where the connecting beam is tucked between the pillar shaft and pillar capital elements. At this time,  $H_1 = 12.1\text{kN}$ ,  $H_2 = 4.8\text{kN}$ , and the sum of the thrusts is  $16.9\text{kN}$ . A horizontal force of  $14.5\text{kN}$  is applied from the nave pillar to the aisle wall through the connecting beam, and conductivity of the horizontal force from the nave beam to the aisle roof is 0. The connecting beam conveys the horizontal force and also disperses the vertical load onto the nave pillars and aisle wall. This makes it possible for the aisle structure to support a greater torque of the nave structure. The maximum horizontal displacement is  $0.24\text{mm}$  in the upper half of the breast wall. In other words, it is restricted to  $1/3$  the case where there is no connecting beam, and  $1/2$  the case where the connecting beam abuts against the pillar. For this reason, in terms of achieving stability of the nave roof, this method is the best. That is, if the deformation of the platform and the vertical displacement of the pillars are not taken into consideration.

When the connecting beam is tucked between the pillar shaft and pillar capital elements, the vertical load applied to the top surface of the pillar shaft element is  $192\text{kN}$ . This causes a  $0.2\text{mm}$  vertical distortion in the pillar shaft element. Also, because a concentrated load causes most pillars to subside due to the structural properties of the platform, the nave subsides unevenly in relation to the aisle. When the nave sags in relation to the aisle, the deflection maintains the bottom surface area of the connecting beam while the amount of subsidence is small, but if the amount of subsidence becomes larger, the inner surface of the pillar shaft element and the inner surface of the aisle wall must support the connecting beam at two points, as shown in the left half of Fig. 1.4.1-4.5.3c. When the connecting beam tilts, the nave structure above it also tilts and causes the roof to shift inward.

Graph 1.4.1-4.5.3e shows the analysis results when the subsidence of the nave in relation to the aisle is  $1\text{mm}$  and the deflection of the connecting beam is ignored. At this time, a load of  $192\text{kN}$ , or approximately 20 tons, is concentrated on the inner surface of the nave pillar shaft element, and causes flexure fracture. Also, the horizontal thrust reaches the maximum static friction of block 4, and blocks 3 and 4 begin to slide. The shift between blocks 3 and 4 becomes  $0.14\text{mm}$ , and between blocks 4 and 5 becomes  $3.35\text{mm}$ . This shift increases almost proportionally to the amount of subsidence of the nave pillars, so if the nave pillars subside  $10\text{mm}$ , the shift between blocks 4 and 5 become approximately  $34\text{mm}$ . Also, because the vertical load of  $56\text{kN}$  from the connecting beam is concentrated on the inner surface of the aisle wall, the point of application of the resultant force of the wall moves inward and causes an unbalanced load to be placed on the inner side.

になる。このとき、 $H_1 = 12.1\text{kN}$ 、 $H_2 = 3.1\text{kN}$ で、水平スラストは合計  $15.2\text{kN}$ となる。身舎柱から庇壁へ繋ぎ梁により  $14.3\text{kN}$ の水平力が伝わり、身舎梁から庇屋根への水平力の伝達は0になる。最大水平変位は腰壁上半で  $0.49\text{mm}$ になる。繋ぎ梁が付加されることによる変化は、第一に、庇から身舎に大きな水平反力を与えられるようになったことである。反力( $H_3$ ,  $H_4$ )を支えるのは庇の部材間に働く摩擦力である。庇屋根上端材(ブロック16)の最大静止摩擦力が  $6.9\text{kN}$ であるのに対して、庇壁上端材(ブロック19)の静止摩擦力は  $24.9\text{kN}$ である。よって庇屋根上端に接続した繋ぎ梁の方が支えられる反力が大きい。一方、繋ぎ梁と庇壁上端との仕口の取り方によって、繋ぎ梁が支えられる反力の限界が異なってくる。庇壁上端材は、庇窓の上梁材でもあるため、多くの場合は桁行きの長材2材で造られる。これが  $H_4$ を庇壁上端全体に分散させる役割を果たしている。第2に、水平スラストがほとんど繋ぎ梁によって支えられるため、身舎柱に掛かる水平力が0に近くなる。これにより、柱に掛かる荷重の偏りと曲げモーメントが少なく抑えられる。実際の三廊式の遺構には、この構法が多く用いられている。

次に、繋ぎ梁が柱身材と柱頭材に挟み込まれている状態を分析すると、結果は Graph 1.4.1-4.5.3d のようになる。このとき、 $H_1 = 12.1\text{kN}$ 、 $H_2 = 4.8\text{kN}$ で、スラストは合計  $16.9\text{kN}$ となる。身舎柱から庇壁へ繋ぎ梁により  $14.5\text{kN}$ の水平力が伝わり、身舎梁から庇屋根への水平力の伝達は0になる。繋ぎ梁は水平力を伝えると同時に、垂直荷重を身舎柱と庇壁に分散させる。これにより庇架構はより大きな身舎架構の回転モーメントを支えられるようになっている。最大水平変位は腰壁上半で  $0.24\text{mm}$ になる。つまり繋ぎ梁が無い場合の  $1/3$ 、繋ぎ梁が突き付けの場合の  $1/2$ に抑えられている。よって身舎屋根の安定性を考えるならばこの構法が最も優れている。しかし、これは基壇の変形と柱の垂直変位を考慮に入れない場合の話である。

繋ぎ梁は柱身材と柱頭材に挟み込まれている場合、柱身材上面に掛かる垂直荷重は  $192\text{kN}$ である。これにより柱身材は約  $0.2\text{mm}$ 垂直方向のひずみを生じる。また基壇の構造上、ほとんどの柱はその荷重の集中により沈下するため、身舎は庇に対して不等沈下をおこす。庇に対して身舎が沈むと、沈下量の小さいうちはたわみにより繋ぎ梁の敷面面積が維持されるが、沈下量が大きくなると繋ぎ梁は Fig. 1.4.1-4.5.3c 左半のように柱身材内端と庇壁内端の2点で支えられるようになる。繋ぎ梁が傾くと、それより上の身

If the nave pillars continue to subside, the connecting beam will not be able to withstand the bending moment, and flexure fracture occurs at the pillar side. In this case, the connecting beam abuts against the pillar, so the dynamic condition of the structure can be considered the same as shown in Fig. 1.4.1-4.5.3c. However, because the inner shifting of the roof remains as it is, an inward-rotation such as that shown in the right half of Fig. 1.4.1-4.5.3c is needed to obtain a horizontal thrust that can sufficiently support the roof once more.

The following three points can be drawn from the analyses of a monument's cross sectional structure.

1. Each of the structures is stable as long as the platform is not deformed. Neither the load produced between the elements nor the stress inside the elements exceeds a maximum compression force of 2MPa. In other words, the collapse of the upper structure is caused by deformation of the platform, and the degree of stability differs according to the size of the structure in relation to the deformation and the construction method.
2. In order to stabilize a high vault roof structure, the use of pillars should be avoided, or an aisle should be added. At this time, if a connecting beam is installed, it can keep the deformation of the nave structure to a minimum.
3. The construction method in which the connecting beam is tucked between the pillar shaft and pillar capital elements can effectively control the deformation of the nave structure, but in actuality, it is not practical, because an uneven subsidence could easily fracture the connecting beam.

## Notes

- 1 - K. M. Srivastava ed.: *Angkor Wat and Cultural Ties with India, Archaeological Survey of India*, New Delhi, 1987.
  - B. Narasimhaiah ed.: *Angkor Wat: India's Contribution in Conservation 1986-1993, Archaeological Survey of India*, New Delhi, 1994.
  - *Technical Report*, The Royal Angkor Foundation, Budapest.
  - P. Gavrilovich, *Preah Khan: Conservation project historic city of Angkor, Report 5, Field Campaign II, Appendix V/A, Structural Repair and Conservation Method*, World Monument Fund, New York, 1994.
  - G. Pipolo, *Program of in situ and laboratory investigations and study of the Pre Rup temple*, UNESCO, Technical Report, 1995.
  - JSA ed.: *Report on the Conservation and Restoration Work of the Northern Library of Bayon*, 2000.
- Others
- 2 - G. Croci, *Conservation and restoration of monuments of Angkor*, UNESCO, Technical Report, 1994.
  - *The structural behavior of the temples of Angkor*, APSARA, Phnom Penh, 1998.
  - G. Croci, *The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*, Southampton, 1998.
  - 3 - H. Parmentier, "La construction dans l'architecture Khmère classique," *BEFEO* 35(2), 1936, pp. 243-309.
  - J. Boisselier, *Le Cambodge*, Paris, 1966.
  - J. Dumarçay, *Le Bayon*, PEFEO, 1967.

舎架構も傾き、屋根に内ズレを生じさせる。

底に対する身舎の沈下量が 1mm で繋ぎ梁のたわみを見無視した場合の分析結果を Graph 1.4.1-4.5.3e に示す。このとき、身舎柱身材の内端には、192kN つまり約 20 トンの荷重が集中するため、せん断破壊が生じる。また、水平スラストはブロック 4 の最大静止摩擦係数に達してしまい、ブロック 3 とブロック 4 がスライドをおこす。ブロック 3-4 間のズレは 0.14mm、ブロック 4-5 間のズレは 3.35mm になる。このズレの量は、身舎柱の沈下量にほぼ比例して増えてゆくため、10mm 沈下すればブロック 4-5 間のズレは約 34mm になる。また、庇壁の内面に繋ぎ梁からの垂直荷重 56kN が集中して掛かるため、壁の合力作用点が内側に寄り、偏荷重を内側に生じさせる。

身舎柱の沈下が更に続くと、繋ぎ梁は曲げモーメントに耐えられなくなり、柱側で曲げ破壊をおこす。この場合、繋ぎ梁は突き付けになるため、架構の力学的な状態は Fig. 1.4.1-4.5.3c と同様に考えられる。しかし屋根の内ズレはそのまま残るため、再び屋根を支えるのに十分な水平スラストを得るためには Fig. 1.4.1-4.5.3c 右半のように内転びに回転をしなければならぬ。

以上の遺構の断面構造の分析から考察されることは以下の 3 点である。

1. 各架構は、基壇が変形しない限りは安定している。部材間に生じる荷重分布及び部材内の応力分布も最大圧縮が 2MPa を超えることはない。つまり、上部架構の崩落の原因は基部の変形にあり、その変形に対して架構の大きさと構法により安定性の度合いが異なっている。
2. 成の高いヴォールト屋根架構を安定させるためには、柱の使用を避けるか、底を付加することが必要である。このとき、繋ぎ梁を設けると、身舎架構の変形を小さく抑えることができる。
3. 柱身材と柱頭材に繋ぎ梁を挟み込む構法は、身舎架構の変形を小さくする点で優れているが、実際には不等沈下により繋ぎ梁が容易に曲げ破壊されるため、実用には適していない。

## 註

- 1 - K. M. Srivastava ed.: *Angkor Wat and Cultural Ties with India, Archaeological Survey of India*, New Delhi, 1987.
- B. Narasimhaiah ed.: *Angkor Wat: India's Contribution in Conservation 1986-1993, Archaeological Survey of India*, New Delhi, 1994.
- *Technical Report*, The Royal Angkor Foundation, Budapest.
- P. Gavrilovich, *Preah Khan: Conservation project historic city of Angkor, Report 5, Field Campaign II, Appendix*

- 
- T. Moriai ed.: *Geology of the Angkor Monuments*, Rengo Shuppan, Tokyo, 2000; Katagiri, M. ed.: *Architecture of the Angkor Monuments*, Rengo Shuppan, Tokyo, 2001.
  - ARJSA 1995-2003.
  - T. Nakagawa ed.: *Bayon Survey 1995-2001: Report on the Photographic Records of the Bas-reliefs in the Outer Gallery of Bayon Temple, Angkor Thom, and their Analysis from the Perspective of Art History*, 2002.
  - Others
  - 4 - Z. Hirayama, "The Dynamics of Angkor Wat," Katagiri, M. ed.: *Architecture of the Angkor Monuments*, Rengo Shuppan, Tokyo, 2001, pp. 277-308. A simple analysis of corbel arches is provided, but there seem to be some errors in the interpretation of the processing of the thrusts and the properties of corbel masonry in Khmer architecture.
  - V/A, *Structural Repair and Conservation Method*, World Monument Fund, New York, 1994.
  - G. Pipolo, *Program of in situ and laboratory investigations and study of the Pre Rup temple*, UNESCO, Technical Report, 1995.
  - 中川武編、『バイヨン北経蔵修復工事報告書』、JSA、2000.
  - ほか
  - 2 - G. Croci, *Conservation and restoration of monuments of Angkor*, UNESCO, Technical Report, 1994.
  - *The structural behavior of the temples of Angkor*, APSARA, Phnom Penh, 1998.
  - G. Croci, *The Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*, Southampton, 1998.
  - 3 - H. Parmentier, "La construction dans l'architecture Khmère classique," *BEFEO* 35(2), 1936, pp. 243-309.
  - J. Boisselier, *Le Cambodge*, Paris, 1966.
  - J. Dumarçay, *Le Bayon*, PEFEO, 1967.
  - 盛合禧夫編『アンコール遺跡の地質学』、連合出版、東京、2000；片桐正夫編『アンコール遺跡の建築学』、連合出版、東京、2001.
  - 『アンコール遺跡調査報告書』、JSA, 1995-2003.
  - 中川武監修『1995～2001年バイヨン調査：アンコール・トム、バイヨン寺院内・外回廊のレリーフ彫刻に関する写真記録の作成と建築美術史的解析：報告書』、2002.
  - ほか
  - 4 - 平山善吉「アンコール・ワットの力学」、片桐正夫編『アンコール遺跡の建築学』、連合出版、東京、2001, pp. 277-308 では迫出し積みアーチについて簡単な分析が示されているが、クメール建築のスラスト処理と迫出し積みの特性の解釈に誤解が見受けられる。



Fig. 1.4.1-2.1a Wooden Truss Structure.

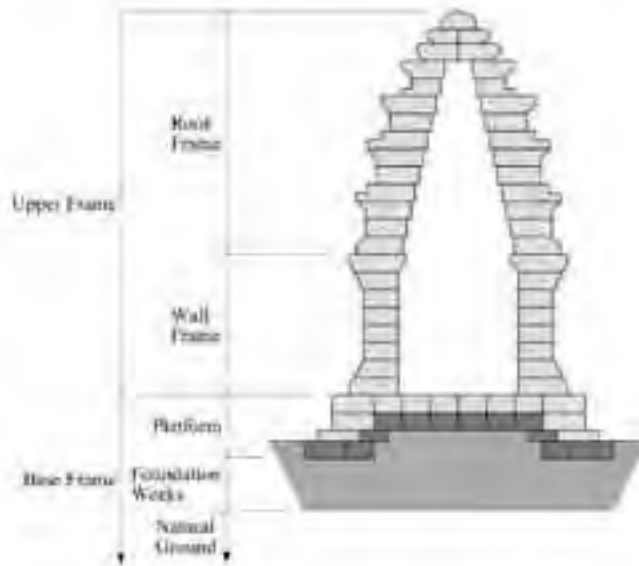


Fig. 1.4.1-2.1b Corbel Dome Structure.



Fig. 1.4.1-2.1c Corbel Vault Structure.

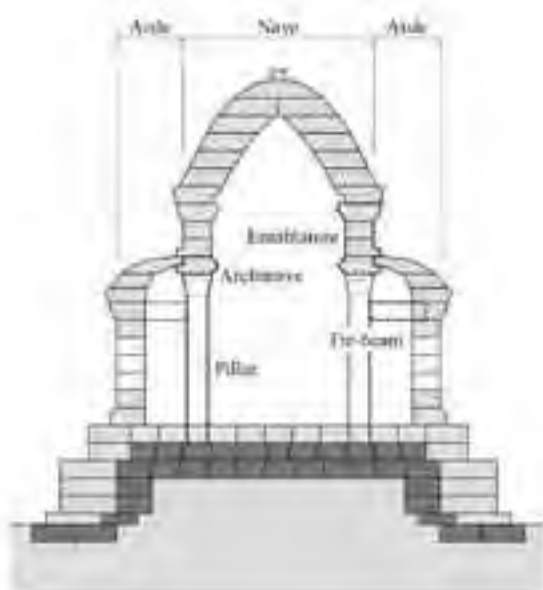


Fig. 1.4.1-2.1d Corbel Vault Structure with Aisles.

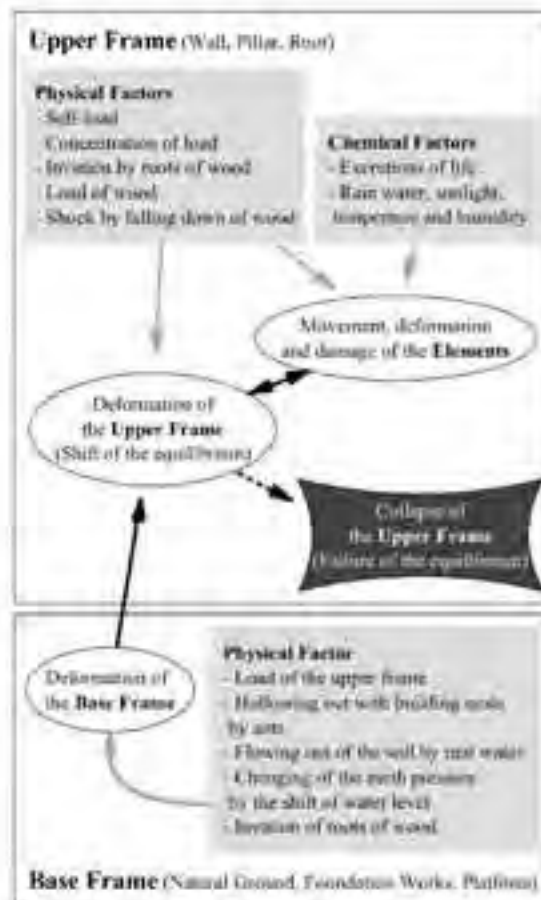


Fig. 1.4.1-2.1e Process of damage.



Fig. 1.4.1-2.1a 木造小屋組.

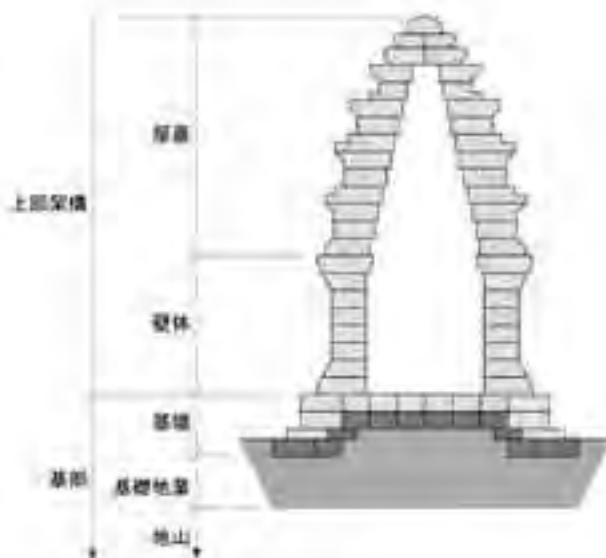


Fig. 1.4.1-2.1b 迫出し積みドーム.



Fig. 1.4.1-2.1c 迫出し積みヴォールト.

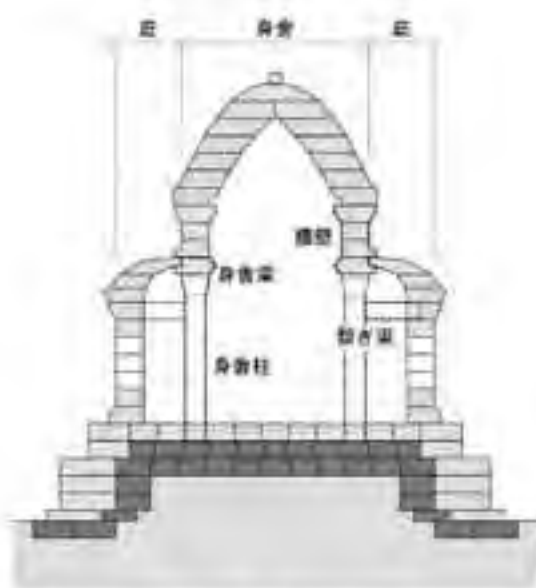


Fig. 1.4.1-2.1d 三廊式迫出し積みヴォールト.



Fig. 1.4.1-2.1e 破損プロセス.



Fig. 1.4.1-4.1a



Fig. 1.4.1-4.1b

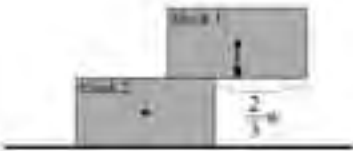


Fig. 1.4.1-4.1c

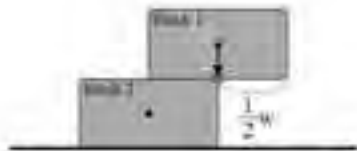


Fig. 1.4.1-4.1d

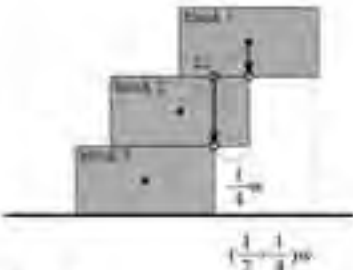


Fig. 1.4.1-4.1e

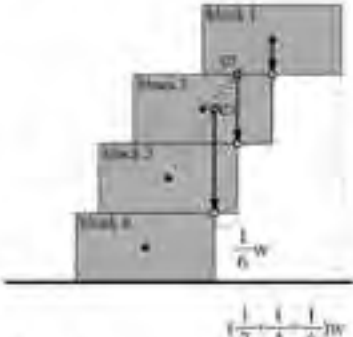


Fig. 1.4.1-4.1f

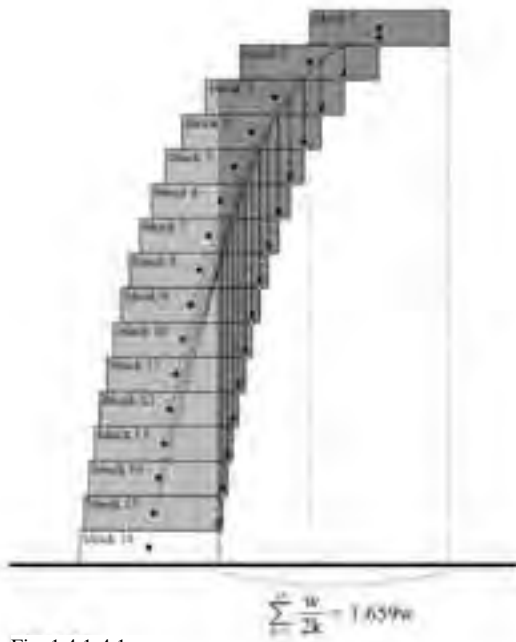


Fig. 1.4.1-4.1g



Pl. 1.4.1-4.1

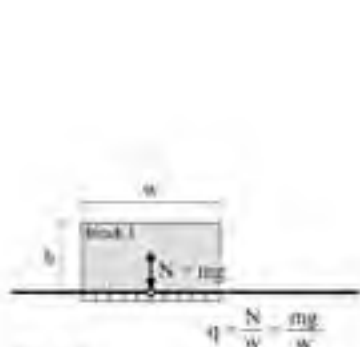


Fig. 1.4.1-4.2a

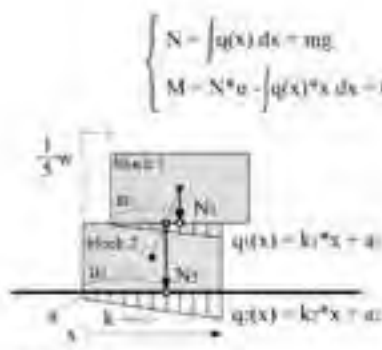


Fig. 1.4.1-4.2b

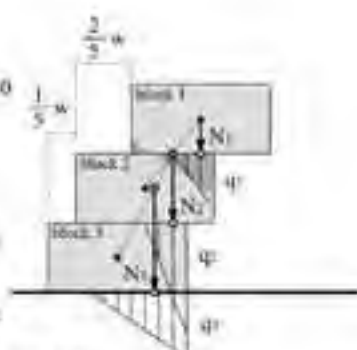


Fig. 1.4.1-4.2c

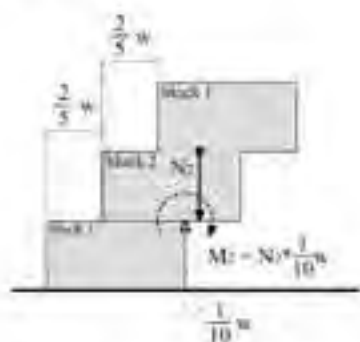


Fig. 1.4.1-4.3a

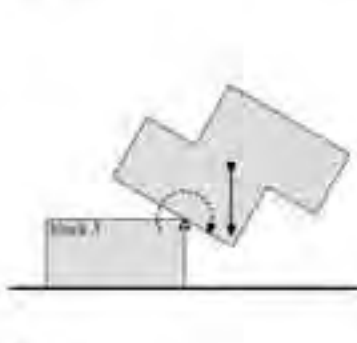


Fig. 1.4.1-4.3b

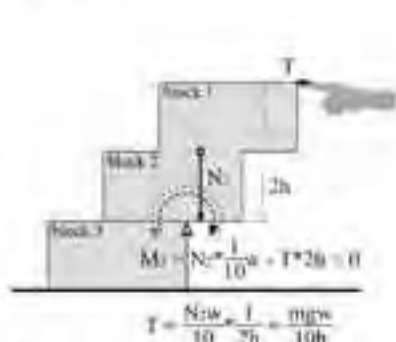


Fig. 1.4.1-4.3c



Pl. 1.4.1-4.3a

block 1 gets the thrust at bottom.

measured value

$$T = 10.3 + 2.0 = 12.3 \text{ kgf}$$



Pl. 1.4.1-4.3b

block 1 gets the thrust at top.

measured value

$$T = 4.5 + 2.0 = 6.5 \text{ kgf}$$



Pl. 1.4.1-4.3c

4 layers corbel arch.  
span: 2w (60cm)  
projection by layer: even  
(10+10+10 cm)

measured value

$T = 10.2 + 0.3 = 10.5 \text{ kgf}$   
 $T_{\min} = 10.8 \text{ kgf}$



Pl. 1.4.1-4.3d

5 layers corbel arch.  
span: 2w (60cm)  
projection by layer: even  
(7.5+7.5+7.5+7.5 cm)

measured value

$T = 7.9 + 0.3 = 8.2 \text{ kgf}$   
 $T_{\min} = 8.1 \text{ kgf}$



Pl. 1.4.1-4.3e

6 layers corbel arch.  
span: 2w (60cm)  
projection by layer: even  
(6+6+6+6+6 cm)

measured value

$T = 6.3 + 0.3 = 6.6 \text{ kgf}$   
 $T_{\min} = 6.48 \text{ kgf}$



Pl. 1.4.1-4.3f

6 layers corbel arch.  
span: 2.5w (75cm)  
projection by layer: increase  
(4.4+5.3+6.5+8.3+13 cm)

measured value

$T = 7.1 + 0.3 = 7.4 \text{ kgf}$   
 $T_{\min} = 7.47 \text{ kgf}$

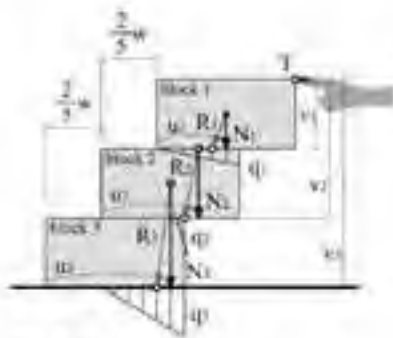


Fig. 1.4.1-4.3d

$$\begin{cases} N = \int q(x) dx \\ M = N^*u - T^*y - \int q(x)^*x dx = 0 \end{cases}$$

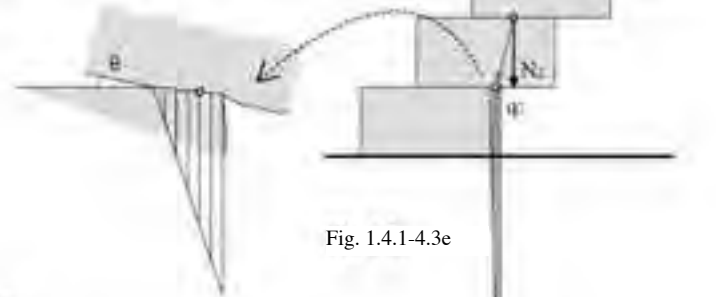


Fig. 1.4.1-4.3e

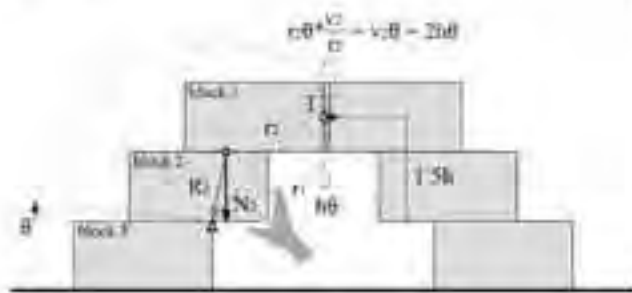
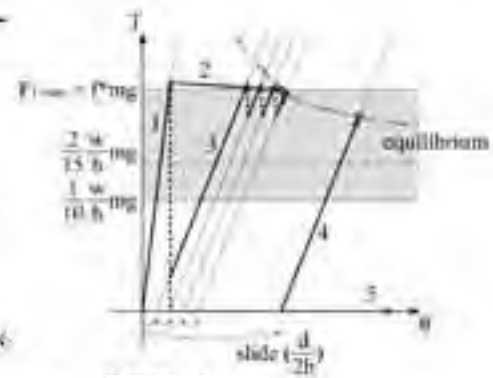


Fig. 1.4.1-4.3f



Graph 1.4.1-4.3

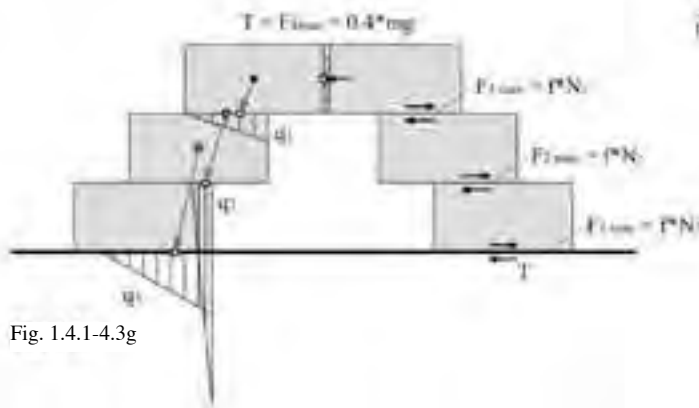


Fig. 1.4.1-4.3g

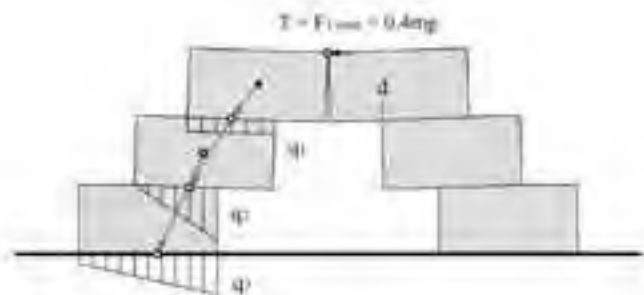


Fig. 1.4.1-4.3h

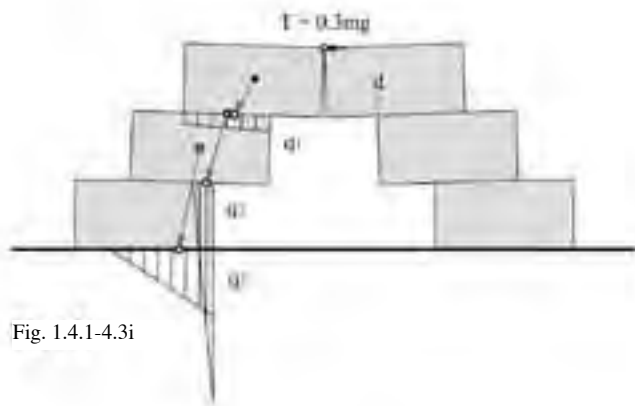


Fig. 1.4.1-4.3i

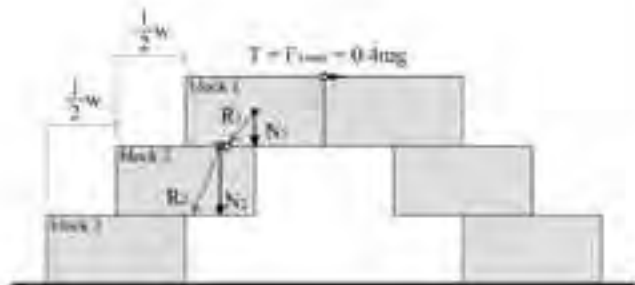


Fig. 1.4.1-4.4a

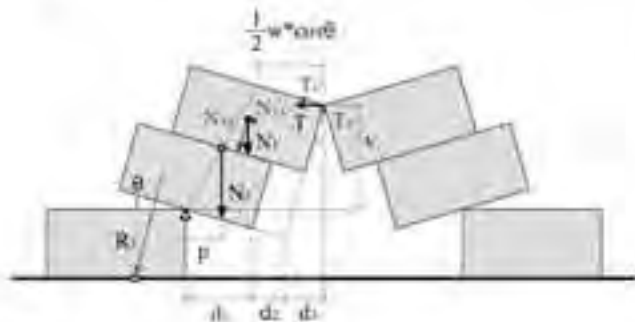


Fig. 1.4.1-4.4b

$$d_1 = \frac{1}{2}w \cos \theta \quad (1)$$

$$d_2 = 2h \sin \theta \quad (2)$$

$$d_3 = w - d_1 - d_2 \quad (3)$$

$$p = \frac{1}{2} \left( w - \frac{1}{2}w \cos \theta \right) \quad (4)$$

$$y = 2h \cos \theta - (d_1 - d_2) \tan \theta \quad (5)$$

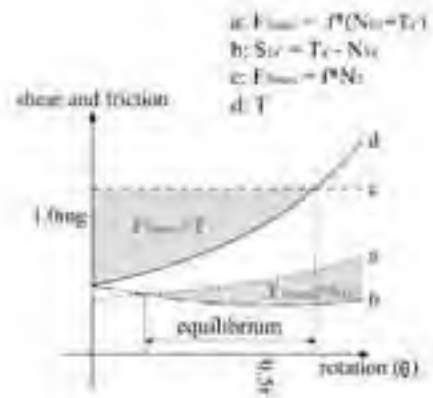
$$M = N_2 p - T y = 0 \quad (6)$$

$$S_{12} = T_1 - N_{12} \quad (7)$$

$$F_{12} = F^*(N_{12} - T_1) \quad (8)$$

$$F_{12} \geq S_{12} \quad (9)$$

$$F_{12} \geq T \quad (10)$$



Graph 1.4.1-4.4



Pl. 1.4.1-4.4a



Pl. 1.4.1-4.4b

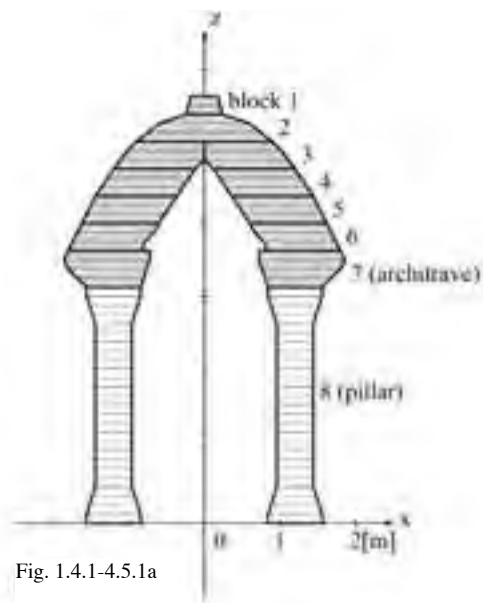


Fig. 1.4.1-4.5.1a

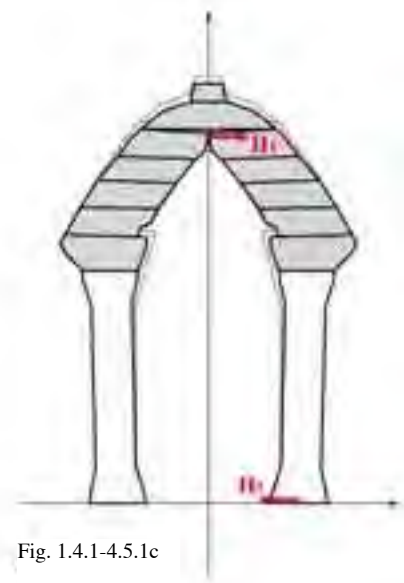
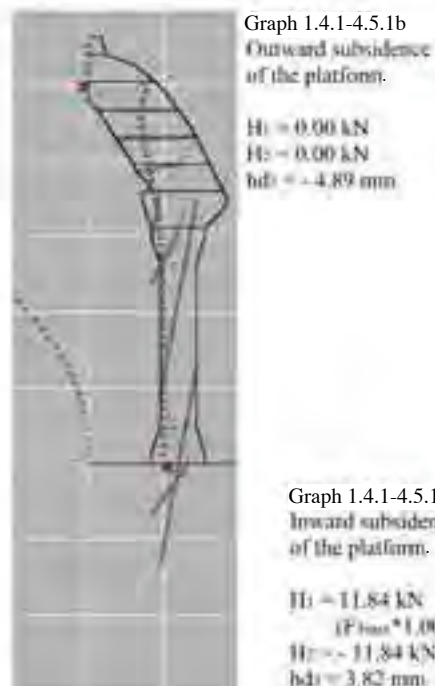
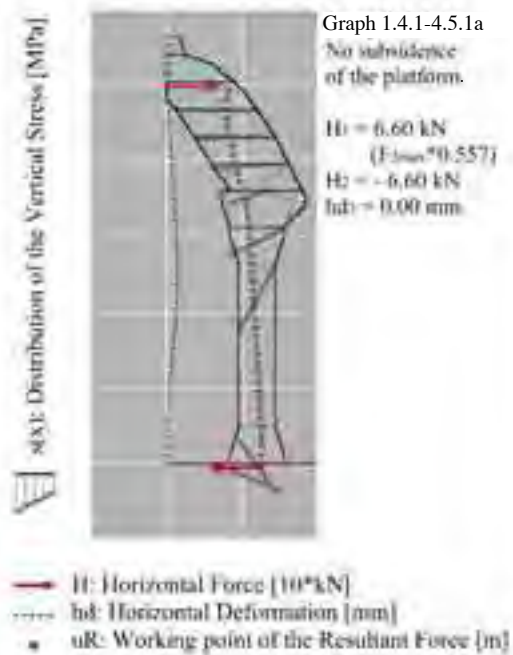


Fig. 1.4.1-4.5.1c



Fig. 1.4.1-4.5.1b



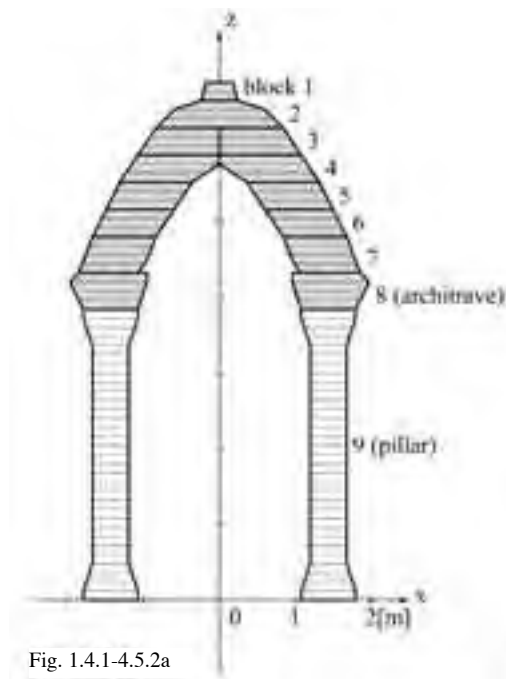


Fig. 1.4.1-4.5.2a



Fig. 1.4.1-4.5.2b

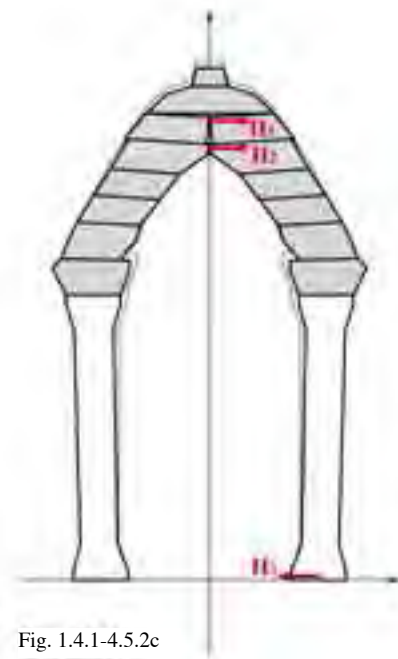
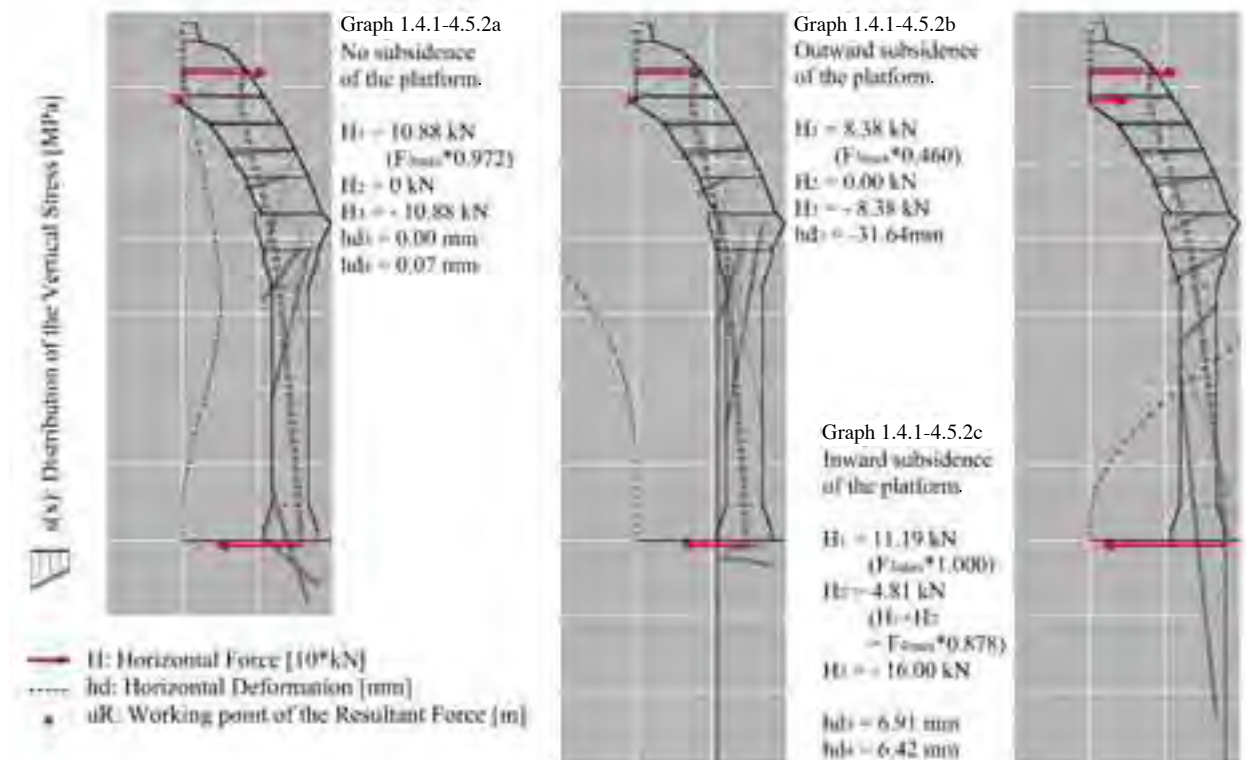


Fig. 1.4.1-4.5.2c



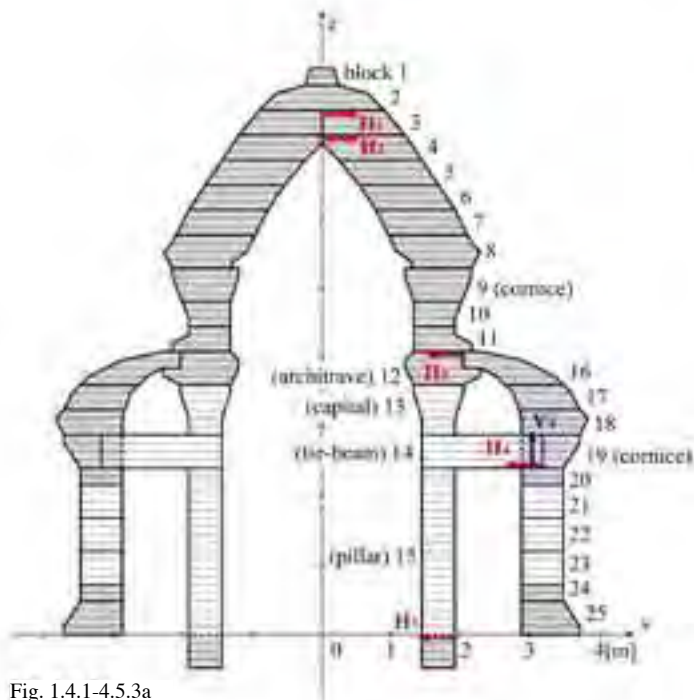


Fig. 1.4.1-4.5.3a



Graph 1.4.1-4.5.3a

Nave only.

$$\begin{aligned}
 H_1 &= 12.10 \text{ kN} \\
 &\quad (F_{\text{base}} \cdot 0.000) \\
 H_2 &= 1.73 \text{ kN} \\
 &\quad (H_1 + H_2) = F_{\text{base}} \cdot 0.686 \\
 H_3 &= 12.83 \text{ kN} \\
 h_{d1} &= -0.68 \text{ mm} \\
 h_{d2} &= 0.00 \text{ mm}
 \end{aligned}$$



Fig. 1.4.1-4.5.3b

Graph 1.4.1-4.5.3b

Tie-beam-less type.

$$\begin{aligned}
 H_1 &= 12.10 \text{ kN} \\
 &\quad (F_{\text{base}} \cdot 0.000) \\
 H_2 &= 3.39 \text{ kN} \\
 &\quad (H_1 + H_2) = F_{\text{base}} \cdot 0.768 \\
 H_3 &= 6.73 \text{ kN} \\
 &\quad (F_{\text{base}} \cdot 0.976) \\
 H_4 &= 8.76 \text{ kN} \\
 h_{d1} &= -0.11 \text{ mm} \\
 h_{d2} &= 0.00 \text{ mm} \\
 h_{d3} &= 0.69 \text{ mm}
 \end{aligned}$$



- $\sigma(x)$ : Distribution of the Vertical Stress [MPa]
- $H$ : Horizontal Force [10\*kN]
- $V$ : Vertical Force [100\*kN]
- $h_{d1}$ : Horizontal Deformation of the Nave [mm]
- $h_{d2}$ : Horizontal Deformation of the Aisle [mm]
- $uR$ : Working point of the Resultant Force [m]



Graph 1.4.1-4.5.3c

Thrusting tie-beam type.

$H_1 = 12.10 \text{ kN} (F_{max} * 1.000)$   
 $H_2 = 3.08 \text{ kN} (H_1 + H_2 = F_{max} * 0.753)$   
 $H_3 = 0.00 \text{ kN}$   
 $H_4 = -14.34 \text{ kN} (F_{max} * 0.577)$   
 $H_5 = -0.84 \text{ kN}$   
 $h_{d1} = -0.09 \text{ mm}$   
 $h_{d2} = 0.00 \text{ mm}$   
 $h_{d3} = 0.29 \text{ mm}$



Graph 1.4.1-4.5.3d

Binding tie-beam type  
without vertical deformation.

$H_1 = 12.10 \text{ kN} (F_{max} * 1.000)$   
 $H_2 = 4.84 \text{ kN} (H_1 + H_2 = F_{max} * 0.840)$   
 $H_3 = 0.00 \text{ kN}$   
 $H_4 = -14.47 \text{ kN} (F_{max} * 0.582)$   
 $V_4 = -13.66 \text{ kN}$   
 $H_5 = -2.47 \text{ kN}$   
 $h_{d1} = -0.04 \text{ mm}$   
 $h_{d2} = 0.00 \text{ mm}$   
 $h_{d3} = 0.19 \text{ mm}$



Graph 1.4.1-4.5.3e

Binding tie-beam type  
with vertical deformations.  
Subsidence of the pillar: 1mm

$H_1 = 12.10 \text{ kN} (F_{max} * 1.000)$   
 $H_2 = 8.07 \text{ kN} (H_1 + H_2 = F_{max} * 1.000)$   
 $H_3 = 0.00 \text{ kN}$   
 $H_4 = -0.85 \text{ kN} (F_{max} * 0.034)$   
 $V_4 = -55.71 \text{ kN}$   
 $H_5 = -9.42 \text{ kN}$   
 $h_{d1} = -3.59 \text{ mm}$   
 $h_{d2} = -3.35 \text{ mm}$   
 $h_{d3} = -0.32 \text{ mm}$

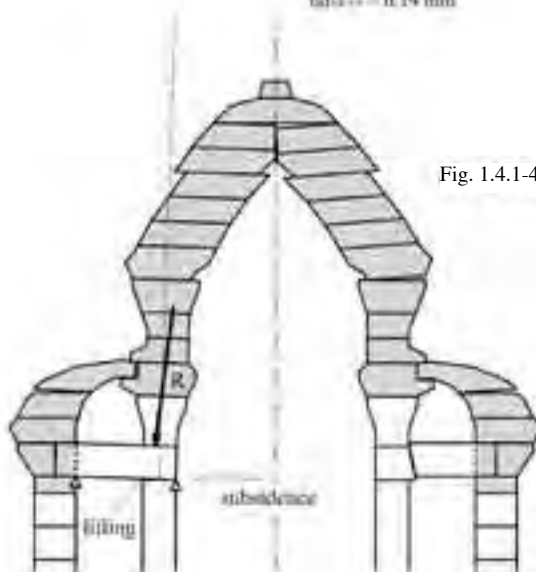


Fig. 1.4.1-4.5.3c

#### 1.4.2 The Cultivation of Cambodian Restoration Workers, Engineers, and Researchers

NAKAGAWA Takeshi

Conservation and restoration of cultural heritages fundamentally require the reenactment of original, traditional technologies. This is especially important in regard to the Angkor monuments. Conventionally, a complete reenactment of traditional technologies was considered theoretically impossible, and the mainstream view was to preserve the originality of the monuments without making any changes. However, even in regard to cultural heritages, there are rising expectations of restoration technologies. Various restoration efforts have begun to receive recognition, such as efforts to secure the effectiveness of conservation activities that would allow monuments to be used even while they are being restored, the importance of returning fallen stone elements to their original positions, and the authenticity of monumental appearances. Yet, we must be fully aware of the fact that technologies for preserving original elements no matter how weathered they are and the reenactment of traditional technologies are two different concepts.

Within the course of elucidating traditional technologies, it is an extreme privilege to be able to witness the dismantlement of a monument. Even for this reason alone, we are obligated to leave a record of our work for future generations. It is the responsibility of researchers to uncover original techniques, for example by carrying out comparative studies as necessary. Let us assume that new materials must be employed as supports when returning existing original elements to their original positions. It is the role of restoration engineers to design the work process for creating the new materials based on dimensional information derived from studies of the original form, and the role of restoration workers to actually produce the new materials according to that work process while harmonizing the understanding of original technologies with the principles of restoration. Such separation of work details and division of roles also apply to a large extent to other work, including the conservation and restoration of reliefs. Naturally, it is not completely impossible for one person to organically perform the roles of researcher, engineer, and worker alone, but in most cases, various people in charge of different tasks work in close cooperation with each other. Essentially, each person is expected to have a clear understanding of his role and its mutual relationship with other roles, to efficiently combine on-site training with desk work, and to engage in the assignments of short-term, mid-term, and long-term training systems. It would be particularly necessary for training systems to promote interactions with other monuments and other teams, presentations at public opportunities, and if possible, overseas study. Additionally, the establishment of a qualification recognition system and the guarantee of a workplace are most essential for human resource development. This issue may pose limitations to foreign teams, but we must actively disseminate the sig-

#### 1.4.2 カンボジア人修復技能士、技術者、研究者の養成

中川武

文化遺産の保存修復は基本的にはオリジナルな伝統技術の再現が必要となる。アンコール遺跡では特にその比重が高い。従来は、理論的には伝統技術の完全な再現は不可能であり、遺跡に手を付けないでオリジナリティを保存するという考え方が主流であった。しかし、文化遺産といえども、修復されながら使い続けることの保存に対する有効性、崩落部材の原位置復帰の重要性、そして遺跡景観としてのオーセンティシティー（真実性）の確保への努力が評価されるようになり、修復技術への期待が高まりつつあるといえよう。しかし、どんなに風化したものであってもオリジナルな部材を保存することと、伝統技術の再現は異なる意味を持つことを十分に自覚する必要がある。

伝統技術の解明にとって、建物の解体調査に立ち会うことは、極めて特権的なことである。それだけに記録を後世に残すことは義務であって、必要な比較調査を加えるなどして、オリジナルな技法を解明することが研究者の役割となる。残存したオリジナル部材を原位置に復帰させるために新材を挿入して支持する必要があるとする。復原考察により導き出された寸法情報をもとに、新材製作のための加工図を設計するのは修復技術者の機能であり、その加工図をもとにオリジナルな技術の理解と修復理念を調和させて新材を製作する仕事は修復技能工の役割である。このような仕事内容の分節と役割分担は、レリーフの保存修復工事など他の業務についてもほぼ同様である。勿論、一人が研究、技術、技能の役割を有機的に果たすこともあり得ないことではないが、多くは各々の担当者の連繫によって対応することが多い。要は、各自の役割と相互の連関をよく認識して、現場での訓練とデスクワークを有効に組み立て、短・中・長期の各養成システムの課題に適應することが求められる。とりわけ、他の遺跡や他チームとの交流そして公的機会での発表、できれば外国留学なども養成システムに取り入れる必要があろう。さらに人材養成にとって、資格の認定制度と職場の確保は最も重要な事項である。この問題は、外国チームには限界もあるが、考え方の重要性は積極的に発言し、できるだけ協力をすべきであろう。いずれにしても、文化遺産の保存修復に対する国際協力の主眼は人材養成にあることは疑いないので、バランスの良い修復技能工—技術者—研究者の養成に勤めなければならない。

nificance of this way of thinking and cooperate to the greatest extent. In any event, there is no doubt that the principal aim of international cooperation in the conservation and restoration of cultural heritages is human resources development. Therefore, so we must concentrate on achieving a good balance of restoration workers, engineers, and researchers.

1.5 International Partnership for the Conservation of  
the Angkor Monuments and its Influence on the  
Region, People, and Country of Cambodia

NAKAGAWA Takeshi

1.5 国際協調によるアンコール遺跡の保存とカンボ  
ジアの地域、民族、国家への影響

中川武

The Angkor monuments naturally hold different phases of significance to the Siem Reap and Angkor region, to the Khmer people, and to the country of Cambodia, but their significance forms the core of concentric circles formed by the region, the people, and the country. Even as a world heritage, this is a rare situation. It can be said that the Angkor monuments are a strong afferent symbol of the traditional spiritual culture of Cambodia. They might well be considered the mainstay of Cambodian nationalism. Meanwhile, as part of the peace process and social recovery of Cambodia after one of the most tragic civil wars in modern world history, the global community planned to harness their cooperative efforts to safeguard the Angkor monuments. It was a groundbreaking attempt in terms of the fact that there was to be a constant participation of restoration teams from seven to eight countries at all times in actual restoration activities. Such a feat probably could not have been achieved even in UNESCO-based conservation projects at the Nubia monument in Egypt and the Borobudur in Java.

UNESCO's philosophy that acknowledgment of cultural diversity forms the foundation of world peace is certainly true in a sense, but it is also true that cultural differences are tending to generate conflicts in today's world. Is it really alright for foreign teams to descend en masse on the sacred land of Cambodia's traditional spiritual culture? Generally speaking, the situation can trigger off a serious conflict at any time. I believe, however, that the very nature of the Angkor monuments helped mitigate any conflicts between nationalism and internationalism.

The basis of existence of the Angkor monuments lies in the power to control water, to blend into the forests, and to harmonize the native tradition with new culture. In other words, the Angkor monuments constantly seek to maintain harmony with the environment. If this is true, efforts to contribute to restoration and conservation based on an understanding of the harmony concept, whether by Cambodians or foreigners, cannot be completely unrelated to this concept. Rather, it can be said that the significance of the harmony concept in today's world has come to be universally accepted owing to international cooperation, and is what reconciles the two factors. The various efforts made in Angkor over the past ten years received high praise at the Second Intergovernmental Conference for the Safeguarding and Sustainable Development of the Historic Site of Angkor held in Paris in November 2003. In fact, they were regarded as a model of international cooperation for the safeguarding of cultural heritages as part of the peace process and social recovery of conflict-affected regions. The significance of protecting the wealth of human heritages through international cooperation is becoming increasingly important.

アンコール遺跡の意義は、シェムリアップ・アンコール地域—クメール民族—カンボジア国家にとって、各々位相が異なるのは当然であるが、アンコール遺跡を中心に、地域—民族—国家が同心円的な広がりの中にその意義がある例は世界遺産といえども珍しいことかもしれない。アンコール遺跡はカンボジアの伝統的精神文化にとって、強い求心的な象徴性を持っているといえよう。アンコール遺跡はカンボジアにとってはナショナリズムの牙城になってもおかしくはないものである。一方、近現代世界史上でも特筆すべきほど悲痛なカンボジア内戦からの和平と社会的復興の一貫ではあったが、アンコール遺跡の救済を国際協力で行おうとする目論見は、常時7～8カ国のチームが実際の修復事業に参加するという意味で画期的な試みであった。これはユネスコが主体となったエジプト・ヌビア遺跡やジャワ島・ボロブドゥールの保存事業でもできなかったことだと思う。

文化の多様性の認識が世界平和の基礎であるというユネスコの理念は、一面では正しいと思われるが、文化の異質性が対立を産んでいることも現代世界の動向の一面ではある。カンボジアの伝統的精神文化の聖地に、大挙して外国チームが押しかけて問題はないのであろうか。一般的には深刻な対立が発生してもおかしくない。私はアンコール遺跡の性格が、ナショナリズムとインターナショナリズムの対立を緩和したのではないかと考えている。

アンコール遺跡の存立基盤は水のコントロールに立脚し、森林に溶け込み、土地の伝統と新しい文明の併存を目指したものである。つまり環境との調和と思想がアンコール遺跡が常に訴えてくる当のものである。とすればそれを理解し、修復し、保存することに荷担する試みは、カンボジア人にとっても、外国人にとっても、その思想とは無縁ではありえない。むしろ現代世界における調和的思想の意義が国際的協調によってより普遍的に理解され、両者の結束を促さずにはおかないのだと考えられる。2003年11月の第二回アンコール救済パリ国際会議において10年間にわたるアンコールでの試みが高く評価され、紛争地域における和平と社会復興の一環としての文化遺産救済のための国際協力のモデルと見做されるようになった。多様な人類の遺産を国際協力により保護することの意義は以前にも増して重要性を帯びているといえよう。

