

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14797

研究課題名(和文) クメール宗教建築の排水システムに関する基礎的研究

研究課題名(英文) Basic study on the drainage system of khmer architecture

研究代表者

小島 陽子 (KOJIMA, Yoko)

日本大学・理工学部・研究員

研究者番号：30548095

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000 円

研究成果の概要(和文)：本研究は、雨季に苛烈な豪雨に見舞われるアンコールを中心に展開するクメール王国時代の宗教建築の雨水排水システムに焦点をあてている。本研究期間では、10世紀中葉に創建されたヒンドゥー教寺院プレ・ループとイースト・メボンにおいて、排水路や基壇敷石レベルの測量結果から、各所の排水能力とそれに関する遺構の沈下状況の検証を行った。

検証の結果、プレ・ループ寺院では、①排水路の形状から、場所により、排水を促す計画と水の滞留を促す計画の違い、②各排水路の許容流量と雨水流出量の比較から、伽藍背面の西側で排水能力が高いこと、③許容流量が小さい排水路の付近では、基壇の沈下が大きいこと、などが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

クメール宗教建築の多くは版築を石材で被覆した基壇にのり、雨水の排水不全による基壇の沈下が遺構崩壊の主要な因子とする議論が繰り返しなされている。しかし、基壇沈下のメカニズムは、地下水位の変動や雨水の滞水など、その因子は指摘されてきたが、それらの因果関係については明らかにされていない。

本研究では、遺跡の排水路を詳細な現地調査や実測に基づき検証し、排水能力の定量的な評価を行った。本研究で得られた知見は、遺構を持続的に保存するための包括的かつ迅速な対策方法を示す上で、重要な基礎資料となる。雨水の排水不全が遺構へ与える影響は、短期間では顕在化しないが長期に亘り遺構を保全する上での重要な課題であろう。

研究成果の概要(英文)：In the city of Angkor, where heavy rainfall occurs in the rainy season, it is important for maintaining urban functions that rainwater drains rapidly. This study focuses on the drainage system of khmer architecture in Angkor period. We aim to clarify the drainage system of Pre Rup temple and East Mebon temple established in 10th century.

We examined cross section shape of these drainages from the survey data and examined the drainage capacity. In addition, from the level survey data of the foundation, we examined the foundation settlement. Then, we analyzed relationship between the drainage capacity of the drainage channel and the foundation settlement. As the result, it was revealed that the foundation settlement was large near the drainage channel with low drainage capacity. From this, with regard to the limited drainage channel assumed to function properly, it was possible to show the relationship between the drainage capacity and the foundation settlement with a certain probability.

研究分野：建築史

キーワード：クメール アンコール 排水システム 排水路 排水能力 基壇沈下

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

雨季に苛烈な豪雨に見舞われる古都アンコール（現カンボジア王国シュムリアップ州）では、雨水を迅速に排水することが、都市機能を維持する上で肝要である。アンコールを中心に展開するクメール王国時代の宗教建築の多くは、版築層を石材で被覆した基壇にのり（図1）、雨水の排水不全（図2）による基壇の沈下が遺構崩壊の主要な因子とする議論が繰り返しなされている。

研究代表者が伽藍の検証を進めている10世紀中葉のヒンドゥー教寺院プレ・ループでは、伽藍下層部の基壇に不陸が散見され、レンガ造祠堂に傾きが認められる。特に変位の大きな南東祠堂では、近年、イタリア隊によって基壇及び上部構造における挙動変位のモニタリング及び耐力試験がなされ、基壇の耐力不足を変位の主要因として、基壇の構造補強が行われた。しかし、基壇沈下の変位のメカニズムについては、地下水位の変動や雨水の滞水など、その因子は指摘されてきたが、それらの因果関係については明らかにされていない。雨水の排水不全が遺構へ与える影響は、短期間では顕在化しないが、長期に亘り遺構を保全する上での重要な課題である。

このような雨水排水に関する研究は、フランス極東学院によるバコン寺院やプレ・ループ寺院の排水路の調査を端緒とする。デュマルセによりバイヨン寺院（12世紀末創建）の排水方法が論じられ、近年には、JSAによる同寺院の修復整備計画の下、ソクテンリーにより伽藍全体の排水手法の報告がなされている。現地調査から雨水の大半が基壇内に浸透する現状を定量的に示した重要な論考といえる。バイヨン寺院（12世紀末創建）以前の伽藍については、同氏により排水路の類型がなされ、各時代の排水装置が明らかにされた。排水路の機能不全が遺構の崩壊を招く要因であることが指摘されているが、それらの関係性や伽藍全体の排水手法については十分な検証がなされていない。このように12世紀末以前の伽藍における雨水排水の研究の蓄積は少なく、各伽藍の資料も限られている現状を鑑みると、各伽藍の雨水排水の様相と伽藍の現状を把握することが第一の課題であろう。

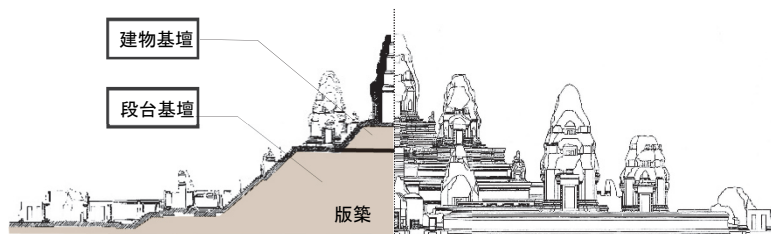


図1 プレ・ループの東面の断面図（左）・立面図（右）



図2 イースト・メボンの滞水状況

2. 研究の目的

本研究は、クメール宗教建築の雨水排水システムに焦点をあて、雨水排水が遺構へ与える影響を検証することで、今後の遺構保存のための技術的課題に着目することの重要性を示すことを目的とする。

本研究期間では、既往研究で排水方法の詳述が行われている12世紀末以前の伽藍の内、10世紀中葉に造営されたヒンドゥー教寺院プレ・ループ（961年創建）とイースト・メボン（952年創建）を対象とし、伽藍各所にみられる排水路の排水能力と基壇の沈下状況の関係性について考察を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、カンボジアのAPSARA Authorityの協力を得て、プレ・ループ寺院とイースト・メボン寺院の排水路及び基壇敷石レベルの測量を実施し、調査データから、次の検証を行った。

- (1) 各遺構における排水路の測量結果から、排水路の勾配や導水方法等を分析し、排水計画を検証
- (2) 建築設備の専門家に協力いただき、各排水路の測量結果から管水路の一般的な平均流速公式であるヘーゼン・ウィリアムス式を用いて許容流量を算出し、アンコール地域における降雨データから各排水路の雨水流出量を算出し、両者を比較することで排水能力を検証
- (3) 基壇の敷石上面の測量データから、各所のレベルの偏差を求め、過去の修復記録に照らして、基壇の沈下状況を検証
- (4) 各排水路の排水能力と基壇の沈下状況の検証結果から、両者の関係性について検討し、各伽藍における雨水排水の様相と、それが基壇床面に与える影響について考察

4. 研究成果

(1) 排水計画の検証

プレ・ループ寺院は、3つのゾーンから構成される複合ピラミッド式伽藍で（図1・3）、第1・第2ゾーンの周壁下部にそれぞれ8本の排水路が設けられている（図3・4・5）。排水路の多くは、溝内に多量の土砂やゴミが堆積しており、豪雨時にも雨水の排水が確認できなかった。このような排水路を含めて、全ての排水路のクリアランスを行った上で、光波測定器を用いて溝内の

測量を行った。測量データから排水路の断面図を作成し（図 6・7）、各排水路の形状について、①流入口から流出口へ至る基壇内の溝の勾配と、②流出口の管路の勾配及び断面積を中心に分析を行った。各排水路の流入口先端の位置を A、流出口の管路最奥部の位置を A' とし、基壇内の溝及び管路内における勾配の変節点に記号を順に付し（図 6・7）、これらの各点間の勾配と、流出口の管路各点の断面積を求めた。これらの 16 本の排水路は、第 1・第 2 ゾーン及び東側・西側と設置場所により断面形状が異なり、排水計画に次のような違いがみられた。

伽藍正面の東側の流出口は、奥窄まりの管路を有しており、精緻な装飾が施されたマカラの口から雨水が放物状に放水される。これらは、水の流れ方を意識した排水計画がなされたことを示している。一方、西側の流出口は、管路の通水断面が大きく、放物状の放水状態はみられない。伽藍背面の排水路は、正面に比して人の目に触れることが少ないことから、多くの雨水を迅速に排出することが重要視されたと考えてよい。

また、流出口が流入口より低い位置にある（図 5-b）第 2 ゾーンは、基壇内の溝が一貫する下り勾配となり（図 7）、排水を促進する計画がなされたとみられる。一方、流出口が流入口とほぼ同じ高さにある（図 5-a）第 1 ゾーンでは、溝は中程から上り勾配であるため（図 6）、水の滞留を促す造作となっている。第 1 ゾーンには、排水路の敷設作業の中断により、数 cm の壁を残して貫通していない排水路がみられる。これらより、水処理に係る計画変更によって雨水の滞留が容受されたことも示唆される。

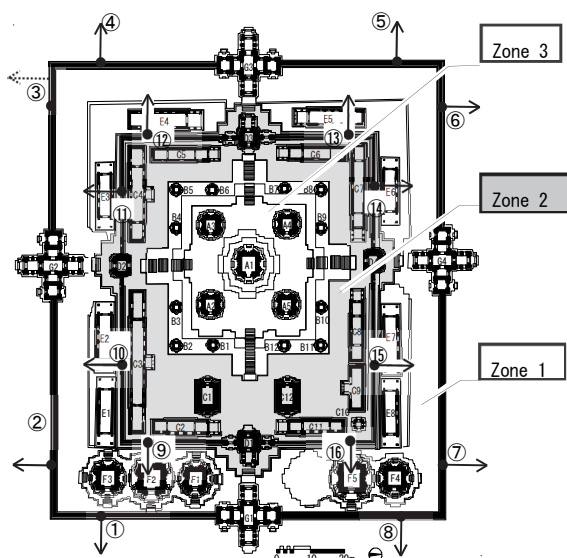


図3 プレ・ループの排水路

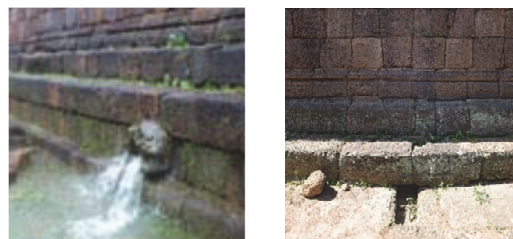


図4 排水路の流出口（左）と流入口（右）の様子

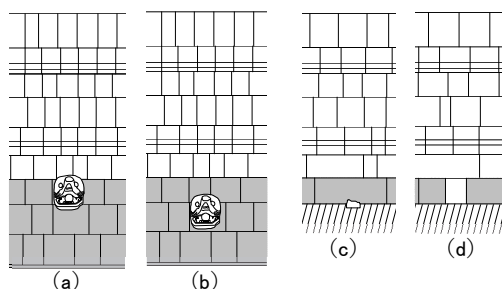


図5 排水路の流出口（左）と流入口（右）の立面図

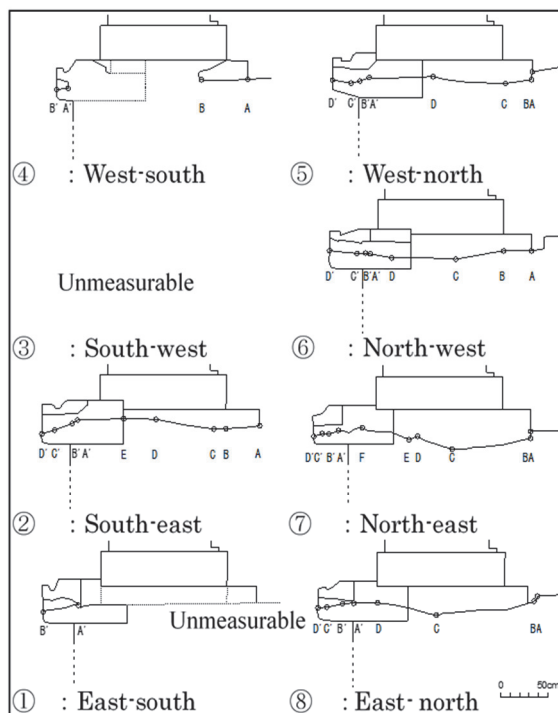


図6 第1ゾーンの排水路の断面図

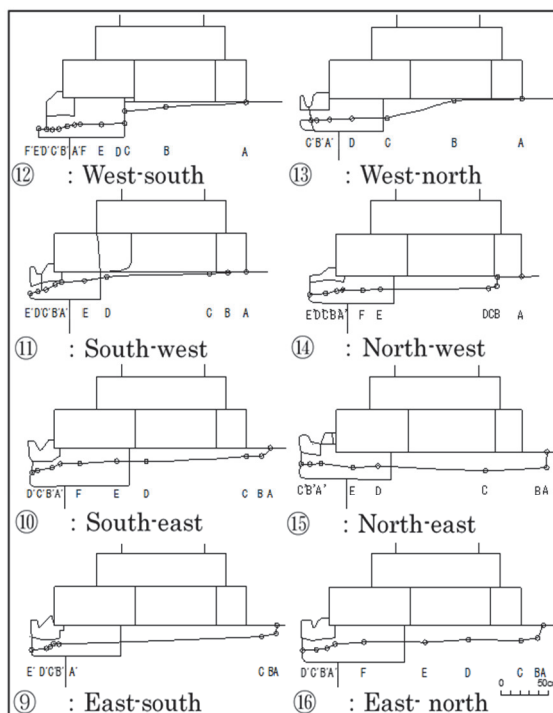


図7 第2ゾーンの排水路の断面図

(2) 排水路の排水能力の検証

各排水路には、破損や変位が認められ、土砂が堆積している箇所も散見される。これらのことから、各排水路が正常に機能した時に有する排水能力に着目した。前述した検証1より、プレ・ループ寺院の各排水路の流出口内の管路勾配及び流水断面は、一定でないことから、流出口内を勾配及び流水断面が異なる複数の管路が接続した複合管路と捉え、水理的等値関係を保ちながら、勾配及び流水断面が一定な単一管路に置き換える。そして、管路の最も一般的な平均流速公式であるヘーゼン・ウィリアムス式を用いて、置換した単一管路内の平均流速及び流量を算出し、その結果より排水能力の検討を行った。ヘーゼン・ウィリアムス式は(1)式で示される。

$$v = 0.84935 \cdot C \cdot R^{0.63} \cdot I^{0.54} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 v は平均流速(m/s)、 R は径深(m)、 I は勾配、 C は流速係数である。径深 R は、管路の流水断面積 A をその断面において流水に接している辺の長さ(潤辺長 p)で割った値で、(2)式で示される。

$$R = \text{流水断面積} / \text{潤辺長} = A / p \quad \dots\dots\dots (2)$$

排水が管径 d (m)の円形管を満水状態で流れるとすると、

$$A = \pi d^2 / 4, \quad p = \pi d$$

従って、この場合の R は、

$$R = A / p = \pi d^2 / 4 / \pi d = d / 4$$

この関係を(1)式に代入すると、円形管の場合の関係式として(3)式が得られる。

$$v = 0.35464 \cdot C \cdot d^{0.63} \cdot I^{0.54} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、平均流速 v (m/s)の代わりに流量 Q (m³/s)を水理要素として用いれば、

$$v = Q / A = Q / (\pi d^2 / 4) = 4Q / \pi d^2$$

の関係から、(3)式に変わって(4)式が得られる。

$$Q = 0.27853 \cdot C \cdot d^{2.63} \cdot I^{0.54} \quad \dots\dots\dots (4)$$

本検討では、 Q が各流出口の雨水の許容流量であり、 Q が排水路1本あたりの雨水流出量よりも大きければ、その流出口は豪雨時にも雨水を適切に排水できる性能を持つと判定し、逆の場合は第2または第1ゾーンの冠水を引き起こすおそれのある流出口と判定を行った。各排水路の流出口の断面形状から、許容流量と雨水流出量を算出し、両者を比較した結果、次のような排水能力の違いがみられた。

プレ・ループ寺院の各排水路の許容流量は、一部を除いて、東側より西側で大きな値となっており、第2ゾーンの西側2本の排水路では、豪雨時にも適切な雨水排水が可能であることがわかった。伽藍背面の西側では、正面東側にみられた放水形状を意識した計画ではなく、雨水をより多く排出することが重要視された計画に基づいた結果と考える。

また、各ゾーン全体の排水能力をみると、豪雨時には両ゾーンともに冠水するとみられるが、単位時間あたりの冠水量は、第1ゾーンの方がはるかに大きい。これは、第1ゾーンの流入雨水量が大きいことや、貫通していない流出口が存在することが影響する。これらより、プレ・ループ寺院では、各ゾーンの排水能力に差がみられることが明らかとなった。

(3) 基壇の沈下状況の検証

伽藍内の各遺構は、上部構造の材料や構造が異なり、多様な条件下にあることから、変位の要因を一律に検証できない。これより、伽藍の現状は、表面の構成がほぼ等しい基壇床面の沈下状況に着目した。段台基壇の測点は、東西・南北方向に引いた2m格子の交点と、その格子と各構築物との接点とした。建物基壇の測点は、各入隅と出隅、また直線部分では概ね0.5m間隔で、それぞれ基壇の外端と壁体付近の2点とした。伽藍各所の位置関係は、既報で示した測量データを用いた。異なる高さの基壇のデータは別に分類し、同じ高さの基壇の測点の中で最も高い点を基準として、各所のレベルデータとして整理した。さらに、各基壇において、全測点の平均値から各所の値の偏差を求め、1階調50mmの全6階調(濃い程低い)の高低差分布図に表し(図8～13)、それを指標として、過去の修復記録に照らして基壇の沈下状況を検討した。

プレ・ループ寺院の基壇の沈下状況の検証の結果、各ゾーンで次のような違いが明らかとなった。

第3ゾーンの3段の段台基壇のうち、上層2段の敷石中心部には大きな不陸がないが、各段の縁石の中央と隅部、1段目敷石の中心側が沈下している。

第2ゾーンは、上層の段台基壇脚部とその周辺の敷石は不陸が少ないが、付属建物の基壇の排水路側が沈下している。

第1ゾーンは、北東部の基壇に不陸はないが、南西部は大きく沈下している。東面祠堂群では、南・北の祠堂基壇のほぼ線対称の位置に大きな沈下が認められ、その前面に排水路があることから、雨水排水との関連がみられる。

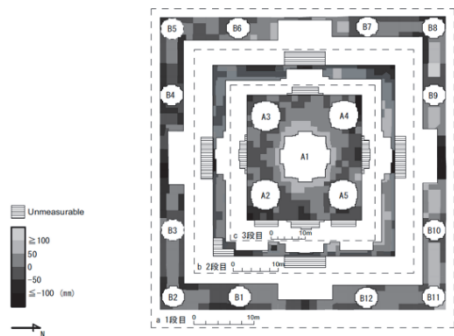


図8 第3ゾーン段台基壇の高低差分布図

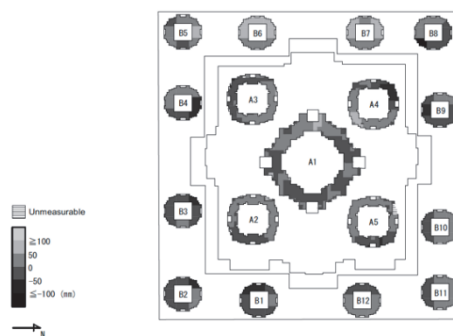


図9 第3ゾーン建物基壇の高低差分布図

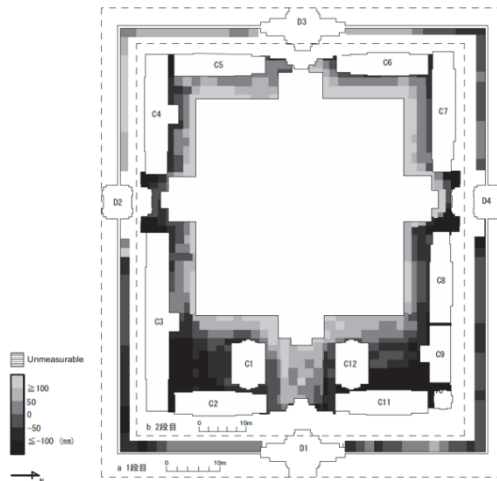


図10 第2ゾーン段台基壇の高低差分布図

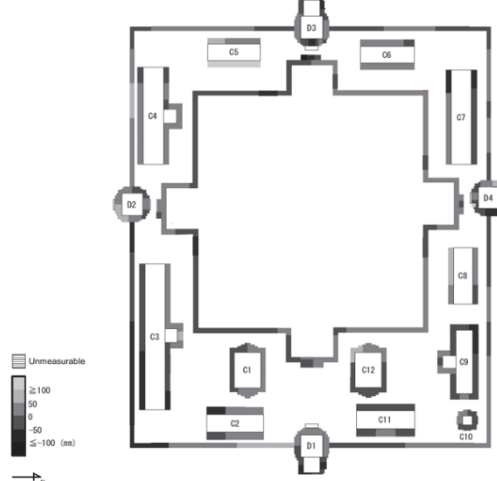


図11 第2ゾーン建物基壇の高低差分布図

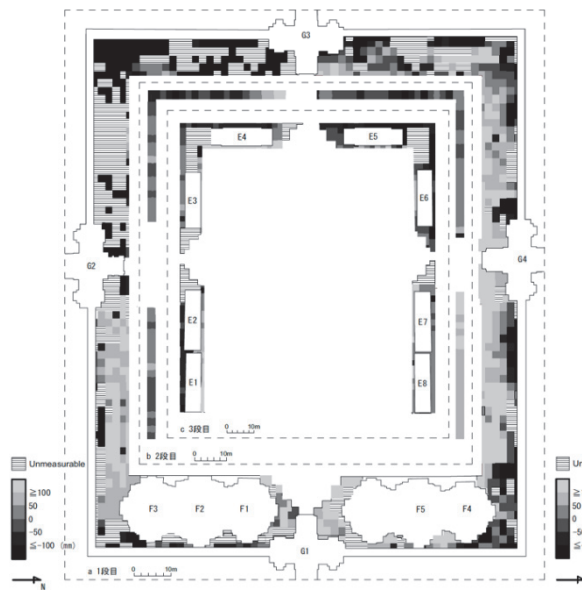


図12 第1ゾーン段台基壇の高低差分布図

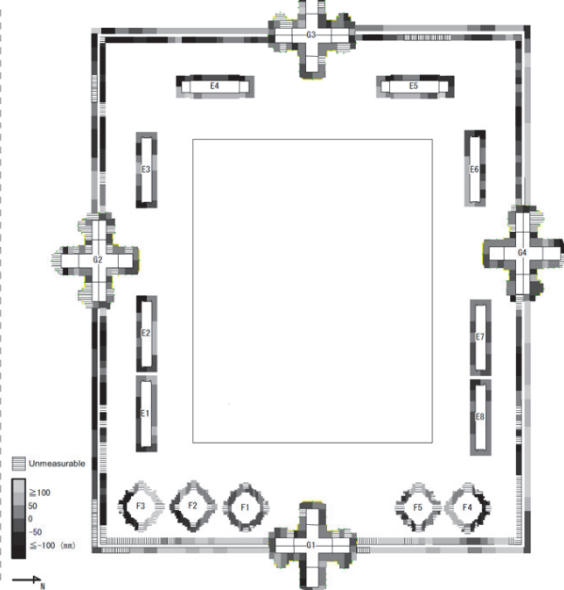


図13 第1ゾーン建物基壇の高低差分布図

(4) 排水路の排水能力と基壇の沈下状況の関連性の検証

各排水路の排水能力と基壇の沈下状況との関連性の検証を行った。基壇沈下の要因は、多様で複合的に作用すると考えられる。しかし、プレ・ループ寺院では、同じ条件化にある複数の祠堂の基壇で、線対称の位置に同様の沈下がみられることから、その主要因として、前面に位置する排水路の排水能力不足が関連することが明らかになった。伽藍全体では、許容流量が小さい排水路の付近で、基壇の沈下が大きくなることが明らかになった。以上の分析を通じて、プレ・ループ寺院では、正常に機能すると想定した限定的な排水路の分析において、その排水能力と基壇の沈下状況について、一定の蓋然性を持ってその関係性を示すことができた。雨水排水の影響による基壇の沈下は短期間で顕在化しないが、長期に亘り遺構を保全する上での重要な課題である。

本研究で得られた知見は、遺構を持続的に保存するための包括的かつ迅速な対策方法を示す上で、重要な基礎資料となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 小島陽子, 重枝 豊	4. 巻 84
2. 論文標題 タ・ケオにおける段台基壇の寸法構成と建物の位置関係について	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会計画系論文集	6. 最初と最後の頁 1247～1257
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aija.84.1247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 —

1. 著者名 小島陽子, 三上功生, 塩川博義, 重枝豊, 我妻宏紀	4. 巻 84
2. 論文標題 ブレ・ループにおける排水路の排水能力と基壇の沈下状況との関係性について	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会計画系論文集	6. 最初と最後の頁 1451～1461
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3130/aija.84.1451	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 —

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小島陽子, 三上功生, 塩川博義, 重枝豊
2. 発表標題 イースト・メボン寺院における小祠堂の基壇の沈下状況についてークメール宗教建築の排水システムに関する実証的研究 その8ー
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 我妻宏紀, 小島陽子, 三上功生, 塩川博義, 重枝 豊
2. 発表標題 ブレ・ループにおける排水溝の断面形状ークメール宗教建築の排水システムに関する実証的研究 その5ー
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三上功生, 我妻宏紀, 小島陽子, 塩川博義, 重枝 豊
2. 発表標題 プレ・ループにおける排水性能の検討ークメール宗教建築の排水システムに関する実証的研究 その6ー
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小島陽子, 我妻宏紀, 三上功生, 塩川博義, 重枝 豊
2. 発表標題 プレ・ループにおける排水性能と伽藍の現状との相関性に関する一考察ークメール宗教建築の排水システムに関する実証的研究 その7ー
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 我妻宏紀, 小島陽子, 三上功生, 塩川博義, 重枝 豊
2. 発表標題 プレ・ループにおける中心部の排水方法ークメール宗教建築の排水システムに関する実証的研究 その2ー
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島陽子, 我妻宏紀, 三上功生, 塩川博義, 重枝 豊
2. 発表標題 プレ・ループにおける周辺部の排水方法ークメール宗教建築の排水システムに関する実証的研究 その3ー
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三上功生，我妻宏紀，小島陽子，塩川博義，重枝 豊
2. 発表標題 ブレ・ループ寺院における排水能力についてークメール宗教建築の排水システムに関する実証的研究 その4ー
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 布野修司編	4. 発行年 2019年
2. 出版社 昭和堂	5. 総ページ数 976
3. 書名 世界都市史事典	

〔産業財産権〕

〔その他〕

ー

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----