公益財団法人大林財団

研究助成実施報告書

助成実施年度	2016 年度（平成 28 年度）
研究課題（タイトル）	水利都市アンコールの排水システムに関する基礎的研究
研究者名※	小島　陽子
所属組織※	日本大学　生産工学部　建築工学科　助教
研究種別	研究助成
研究分野	都市建築史、都市と文化
助成金額	100 万円
概要	雨季に苛烈な豪雨に見舞われるアンコール（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。特に、宗教建築の基壇の多くは、版築層を石で被覆した構成であり、雨水の排水不全が、遺構崩壊の重要な因子であるとみなされている。本研究は、水利都市アンコールの排水システムを解明し、長期にわたる遺構の保存のための技術的課題を検討することを目的とする。本研究期間では、961 年創建のヒンドゥー教寺院プレ・ループにおいて、排水路の実測データから各排水路の排水能力の評価を試みた。また、基壇のレベル測量データから基壇の沈下状況を分析し、その結果と排水路の排水能力の相関性を検討することで、基壇沈下の主要因と雨水排水計画について考察を行った。また、遺構の崩壊を防ぐための処置について検討を行った。
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

（　）は、報告書提出時所属先。

１．研究の目的

本研究の目的は、水利都市アンコール（カンボジア王国シュムリアップ州）の排水システムを解明し、長期にわたる遺構の保存のための技術的課題を検討することにある。

雨季に苛烈な豪雨に見舞われるアンコールでは、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。特に、宗教建築の基壇の多くは、版築層を石で被覆した構成であり、雨水の排水不全が、遺構崩壊の重要な因子であるとみなされている。しかし、伽藍全体の修復が行われている一部の遺跡をのぞいて、各伽藍の排水システムの検証は充分とはいえない。プレ・ループ寺院の南東祠堂は、その変位について繰り返し議論がなされている遺構の一つである。祠堂の傾きを抑制するために、基壇及び上部構造の挙動変位のモニタリングや耐力試験が行われ、その結果に基づいて、基壇の耐力不足を補うコンクリートボックスが基壇内部に設置された。遺構そのものに対する構造補強としてのアプローチは評価されるが、基壇沈下のメカニズムについては、地下水位の変動や、滞水する排水路の問題が指摘されているが、いずれも検証が充分とはいえない。基壇沈下の主要因を究明することが、今後の遺跡の保全にとって不可欠であろう。

本研究期間では、961 年に創建されたヒンドゥー教寺院プレ・ループにおいて、排水路の実測データから各排水路の排水能力の評価を試みる。また、基壇のレベル測量データから基壇の沈下状況を分析し、その結果と排水路の排水能力との相関性を検討することで、基壇の沈下の主要因と雨水排水計画について考察を行う。これらより遺構の崩壊を防ぐための処置の検討を行う。

２．研究の経過

本研究は、以下の二つの段階に分けられる。

１）アンコールの寺院における排水に係る遺構調査の実施。

２）基壇沈下の主要因と雨水排水計画の考察及び遺構の崩壊を防ぐための処置の提案。

第一段階として、カンボジア王国シュムリアップ州アンコールにおいて、遺構調査を実施した。調査対象は、遺構変位の主要因に関する議論が行われているヒンドゥー教寺院プレ・ループ（961 年創建）とした。当該寺院の予備調査から、各排水路の構成が異なり、場所により排水能力に差がみられ、それが基壇沈下と関連することが想定された。そこで現地調査では、①各排水路内部の形状について、光波測定器を用いて測量を行い、②基壇敷石上面のレベルについて、デジタルオートレベルを用いて測量を実施した。これらの測量データを基に、各排水路の断面図を作成し（図４）、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 50 ㎜の全 6 階調（濃い程低い）の高低差分布図の作成を行った（図５）。

第二段階として、遺構調査のデータを基に、①伽藍全体の雨水の流れを把握し、②各排水路の形状分析から各排水路の計画の検討を行い、③各排水路の許容流量と雨水流出量を算出し、両者を比較して排水能力の検討を行った。次に、④文献より抽出した過去の修復箇所を考慮して、段台基壇及びその上の建物基壇の沈下状況について、基壇各所の敷石上面レベルの偏差を基に検討を行い、⑤排水路の排水能力と基壇の沈下状況との相関性を検討することで、各基壇の沈下の主要因と雨水排水計画について考察を行った。また、これらの結果を基に遺構の崩壊を防ぐための処置の検討を行った。

３．研究の成果

1. プレ・ループにおける雨水排水について

プレ・ループは、アンコール東部に位置する 10 世紀中葉の国家鎮護寺院である。巨大貯水池である東バライに隣接しており、環濠を有しない唯一の国家鎮護寺院として知られている。伽藍は、積層する基壇（以下、段台基壇と呼ぶ）上に、建物を配置した複合ピラミッド式で、 3 つのゾーンにわけられる（図 1・2）。下層の第 1・第 2 ゾーンは、それぞれ 1 段の段台基壇上にのり、第 1・第 2 周壁で囲繞されている。第 3 ゾーンは、中心部にのる 3 段の段台基壇上に展開している。ここには周壁はないため、第 3 ゾーンに降り注ぐ雨水は集水されず、段台基壇各面から下層に流出される。第 2 ゾーンでは、上層より流入する雨水と第 2 ゾーンに降り注ぐ雨水が排水溝で合流され、第 2 周壁下の排水路から下層の第 1 ゾーンに排出される（写真 1）。第 1 ゾーンも同様に、各所より合流した雨水が第 1 周壁下の排水路から伽藍外へ排出される。このような排水路は各面に 2 本、計 16 本（図 1：第 1 周壁南東部の排水路を①とし、時計回りに番号を付す）が確認される。

2. 排水路の構成について

各排水路の実測データから、各排水路にみられる排水計画の特性を明らかにした。

排水路は、周壁内側の段台基壇の敷石に設置された流入口（図 3ab）と、基壇内部をのびる溝、そして周壁外側の基壇に突出する流出口（図 3cd）から構成される。流出口は、約 50cm 角の砂岩ブロックが基壇より約 30cm 突出している。突出部には、水を象徴する想像上の生物であるマカラの頭部が施され、その口に円形や丸みを帯びた方形の穴が穿たれ管路をなしている。砂岩ブロックに穿たれた管路の奥は、砂岩ブロック上端より深さ 20cm 程の溝が穿たれており、その溝が基壇内の溝に接続している。

伽藍正面の東側の流出口は、奥窄まりの管路形状を有し、精緻な装飾を施したマカラの口から、

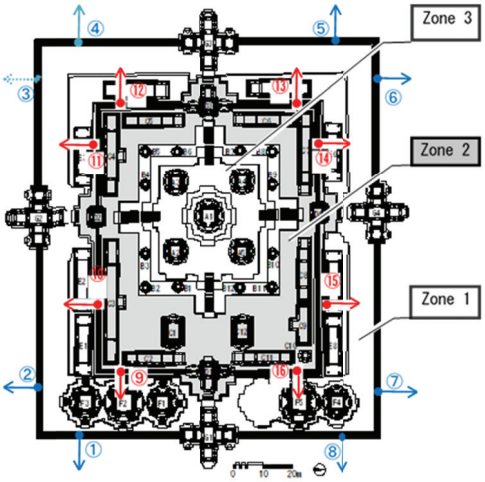

図 1　プレ・ループの排水路の位置

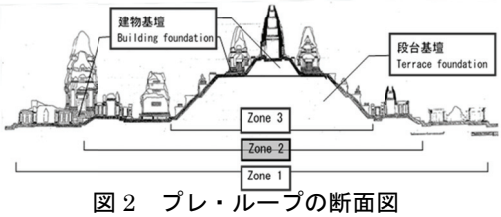

図 2　プレ・ループの断面図

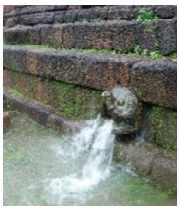
写真 1　排水路からの排水

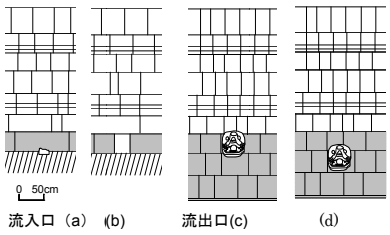

図 3　排水路の立面図

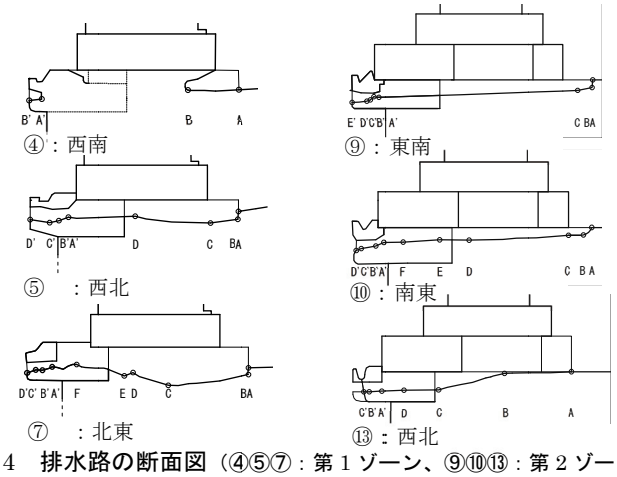

図 4　排水路の断面図（④⑤⑦：第 1 ゾーン、⑨⑩⑬：第 2 ゾーン）

美しい放物状に雨水が放水されるとみられ、水の流れ方を意識した計画がなされたとみられる。一方、西側の流出口は、通水断面積が大きく、美しい放水状態はみられない。正面に比して目に触れることの少ない背面の排水路では、放水の見せ方よりもより多くの雨水を排出することが重視された計画がなされたと考えられる。

また、マカラの流出口が基壇中段に設置され（図 3d）、流入口と流出口の高低差の大きい第 2 ゾーン（図 4⑨⑩⑬）では、基壇内の溝は一貫する下り勾配となっており、排水を促進する計画がみられる。一方、基壇上端にマカラが位置する（図 3c）第 1 ゾーン（図 4④⑤⑦）では、溝の中程から上り勾配となっており、水の滞留を促すような造作がみてとれる。第 1 ゾーンには、排水路の敷設作業の中断により、貫通していない排水路がみられる（図 4④）。これらより、水処理に係る計画の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。

3. 排水路の排水能力について

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、管水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う。ヘーゼン・ウィリアムス式は(1)式で示される。

$$v = 0.84935\, C \cdot R^{0.63} \cdot I^{0.54} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

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。また、管を円形管とし、管径 d(m)と流量 Q(m3/s)を用いて(1)式を変形すると次式となる。

$$Q = 0.27853\, C \cdot d^{2.63} \cdot I^{0.54} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

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した。

算出した各流出口の許容流量と判定結果を表 1 に示す。豪雨時でも雨水を適切に排水できる性能を持つ流出口は、第 2 ゾーンに 2 つ（流出口⑫⑭）あるのみであった。

豪雨時における第 2, 1 ゾーンの冠水量の概算値は、表 1 に示す排水路 1 本あたりの雨水流出量から各流出口の許容流量を引いた値を積算することで算出できる。それによると単位時間あたりの冠水量は、第 2 ゾーンが約 133m³/h、第 1 ゾーンが約 769m³/h となり、第 1 ゾーンの方がはるかに大きくなる結果となった。これは、流入雨水量が第 2 ゾーンよりも第 1 ゾーンの方が大きく、また第 1 ゾーンには貫通していない流出口と逆勾配(出水側高さよりも入水側高さの方が低く、許容流量は 0 と設定）の流出口があることが影響していると考えられる。

表 1　各出水口の雨水の許容流量と

第2ゾーン			第1ゾーン		
排水溝1本あたりの雨水流出量（m^3/s）					
0.011			0.030		
各出水口の雨水の許容流量（m^3/s）					
出水口番号	計算結果	判定	出水口番号	計算結果	判定
9	0.004	×	1	貫通無し(0)	×
10	0.006	×	2	0.005	×
11	0.001	×	3	周壁崩壊(0)	×
12	0.017	○	4	貫通無し(0)	×
13	0.009	×	5	0.015	×
14	0.013	○	6	逆勾配(0)	×
15	0.006	×	7	0.006	×
16	0.003	×	8	0.001	×
冠水量概算値					
m^3/s	0.037		m^3/s	0.214	
m^3/h	132.475		m^3/h	768.820	

※降雨強度は75.4（m^3/hr）と設定した

4. 基壇の沈下状況について

基壇敷石上面のレベルデータ（段台基壇の測点は、東西・南北方向の 2m 格子の交点と、その格子と各構築物との接点。建物基壇の測点は、入隅と出隅及び直線部分では 0.5m 間隔で、各所それぞれ壁体付近と外端の 2 点）から、各所の偏差を示し

た高低差分布図（図 5）を指標として、各ゾーンにおける基壇の沈下状況の検討を行った。

第 3 ゾーンは、3 段目段台基壇敷石の中心部は沈下が少なく、水勾配がみられるが、縁石は、各面の中央と隅部で局所的に沈下している。1 段目段台基壇敷石は、各面の中心側が沈下している。その上の建物基壇は、段台基壇に連動して沈下している。第 2 ゾーンは、上層の段台基壇の周囲の敷石レベルが高く、その値は各面で異なるが、いずれも水勾配がみられる。上層の段台基壇脚部は安定しているが、付属建物の基壇は、排水路が設置されている側に沈下している。第 1 ゾーンでは、北東側は水勾配がみられ他面に比して安定している。南西部は全体的に沈下が大きく、周壁が一部倒壊している。東面の祠堂群では、南・北ほぼ線対称の位置に大きな沈下がみられ、その前面に排水路があることから、基壇沈下と雨水排水との関連が予想される。

5.　各ゾーンにおける排水能力と基壇沈下との相関性について

各ゾーンにおける排水路の排水能力と、基壇の沈下状況との相関性を検討することで、各基壇の沈下の主要因と雨水排水計画について考察を行った。また、これらの結果を基に遺構の崩壊を防ぐための処置の検討を行った。

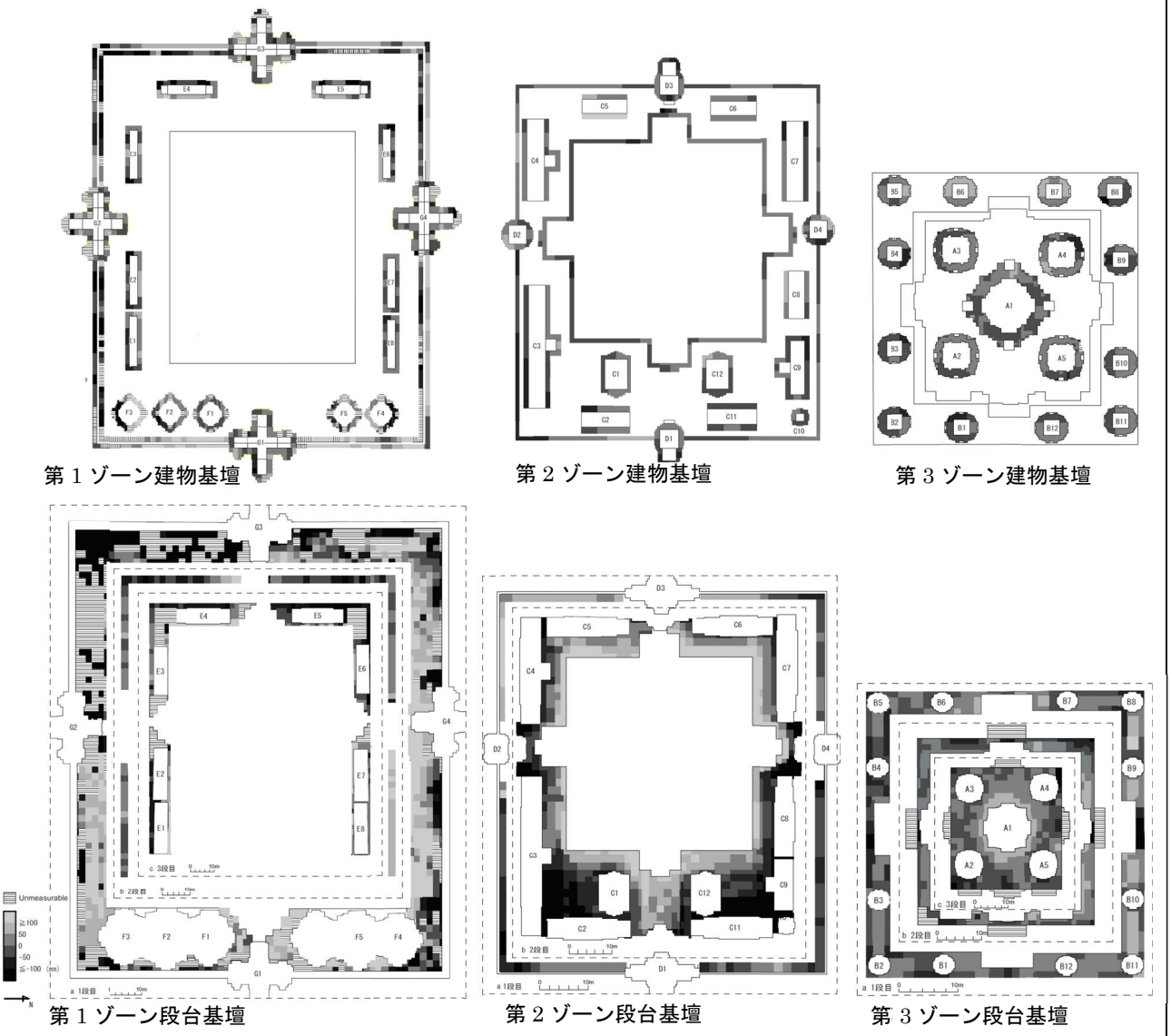

図 5　基壇敷石上面の高低差分布図

第 3 ゾーンでは、基壇の全方位に水勾配が設けられており、雨水は迅速に下層へ流出されるとみられる。ここでは、高塔祠堂群の荷重を支持していることから圧密沈下を生じることが予想される。これを抑制するためには、基壇内への水の浸透を阻止することが肝要であり、迅速な排水を促す計画がなされたと考える。ここでは、上段中心部には大きな沈下はみられないが、下段にみられる圧密沈下や縁石の開きにより、基壇内への雨水の浸透量が増加しているため、早期に雨水浸透を防ぐ処置を講じることが求められる。

第 1・2 ゾーンの排水路の排水能力は不足しており、豪雨時には雨水が滞留して基壇内に浸透することが予想される。しかし、両ゾーンでは一部を除き、大きな荷重を支持しておらず、圧密沈下は予想されない。これより、伽藍正面の東側には、精緻な装飾を施したマカラの口から美しい放水を見せる、水の流れ方を意識した排水計画がなされたと考える。しかし、第 1 ゾーンでは、途中で施工が中断しており、貫通していない排水路がみられ、排水路付近に滞留する雨水が、基壇内部の盛土に浸透することで土砂が流出し、大きな沈下が生じている。これより、早期に排水能力を確保するための処置を講じることが求められる。

6、まとめ

10 世紀中葉に創建されたプレ・ループでは、上部荷重の大きさによる圧密沈下を想定して段台基壇の構造を決め、床面の面積から予想される流入雨水量を検討して各排水路の流量や流速、放水形状の計画がなされていることが明らかとなった。このような排水計画を考えると、第 1 ゾーンにみられる排水能力の不足は、単に技術的な問題と捉えることは難しく、排水計画の変更がなされた可能性が高い。排水能力の低い排水路付近では、大きな基壇沈下が認められることから、往時の排水計画の解明と排水能力を確保するための処置を講じることが早急に求められる。

４．今後の課題

本研究では、アンコール遺跡における排水路の排水能力の評価を試みたが、基壇の沈下状況との相関性を検討することで、一定の蓋然性を示すことができた。今後は、敷石にみられる水勾配や排水溝の分析から各排水路への導水方法の検討を行い、プレ・ループにおける伽藍全体の排水計画について、その計画変更も含めて復元的に考察を行いたい。プレ・ループ第１ゾーンの祠堂や倉庫は、プレ・ループを創建した王の息子による後の建造とみなされており、その時に排水路の計画変更がなされた可能性も考えられる。環濠を有しない唯一の国家鎮護寺院とされるプレ・ループにおいて、水処理に係る計画の変更によって、伽藍周辺部に雨水の滞留が容受された可能性を検討することは、クメール宗教建築における伽藍構成と水処理思想を読み解く上でも重要であると考える。また、遺構をより長く保存するためには、排水路の維持管理に加えて、不足している排水能力を補うことが必要である。これより、新たな排水路の設置など、遺構保存のための処置を講じる上での技術的な課題についても併せて検討を進めてゆきたい。さらに、本研究を援用して、他の伽藍の排水システムの検証を進める。既にプレ・ループと同じ王により 952 年に創建されたイースト・メボン寺院において、予備調査結果の検証を進めており、準備が整い次第、本調査を実施する予定である。