

研究助成実施報告書

助成実施年度	2021 年度
研究課題（タイトル）	都城アンコールの版築技術に関する基礎的研究
研究者名※	小島 陽子
所属組織※	浅野工学専門学校 建築デザイン学科 准教授 (日本大学 理工学部 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	80 万円
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。

大林財団2021年度研究助成実施報告書

所属機関名 日本大学 理工学部
(申請時:浅野工学専門学校)

申請者氏名 小島 陽子

研究課題	都城アンコールの版築技術に関する基礎的研究
<p>(概要) ※最大10行まで</p> <p>アンコール都城の遺構を持続的に保存するには、遺構の変位の主要因子である雨水の排水不全と基壇沈下のメカニズムの解明が求められている。本研究は、基壇内部に浸入した雨水が版築に及ぼす影響に焦点をあて、クメール宗教建築の版築技術の一端を明らかにすることを目的とする。</p> <p>本研究期間では、現地採取の版築土を用いた実験の前段階として、文献調査から判明した版築土を模擬した試料を作製して室内試験を行った。本室内試験は、まず、雨水が浸入した状況として、異なる含水比の版築土を想定し、粒度分布と含水比が版築土の一軸圧縮強度に及ぼす影響について検証を行った。さらに版築内の雨水浸透にラテライトチップ層の狭在および目地への接触が与える効果の検証を行った。版築にラテライトチップ層があると、側部からの排水が促進され、さらに側部目地にラテライトチップ層が接することで、より大きく側部から排水が促され、下部への水の浸透を減少させることを明らかにした。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>本研究は、都城アンコールに現存する9～13世紀頃に造営されたクメール宗教建築の版築技術の一端を明らかにすることを目的とする。クメール宗教建築の基壇は、土を突き固めた版築を石やレンガで被覆した基壇を有し、その上に、石やレンガを空積みした建物をのせる。遺構の中には、上部構造が大きく変位しているものが見られ(図1)、これらの遺構の修復・保存では、崩壊要因を明らかにして、科学的根拠に基づいた手法を採ることが重要である。遺構の変位は、多様な因子が複合的に作用するとみられるが、その主要な因子とされる雨水の排水不全による基壇沈下について、申請者らは10世紀の伽藍の排水路の排水能力と基壇の沈下の関係を定量的に示した。しかし、基壇内部に浸入した雨水が版築に及ぼす影響については検証に至っておらず、課題として残された。そこで、本研究期間では、現地採取の版築土を用いた実験の前段階として、文献調査(課題1)から判明した版築土を模擬した試料を作製(課題2)して室内試験を行う。本室内試験は、まず、雨水が浸入した状況として、異なる含水比の版築土を想定し、粒度分布と含水比が版築土の一軸圧縮強度に及ぼす影響について検証を行う(課題3)。さらに版築内の雨水浸透にラテライトチップ層の狭在および目地への接触が与える効果の検証を行う(課題4)。</p>	



図1 遺構の崩壊状況
(イースト・メボン寺院小祠堂)

2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究では、主に以下の4つの課題について調査及び試験を行った。

- ①都城アンコールの基壇の版築に関わる文献調査。
- ②文献調査(①)から判明した版築土を模擬した試料の作製と土質試験。
- ③粒度分布と含水比が版築土の一軸圧縮強度に及ぼす影響についての検証(室内試験1)。
- ④版築内の雨水浸透にラテライトチップ層の狭在および目地への接触が与える効果の検証(室内試験2)。分析結果については「研究の成果」で詳述する。

3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

3.1 文献にみる版築土

本研究では、日本国政府アンコール遺跡救済チーム(JSA)による『プラサート・スープラ塔修復工事報告書』から、N1塔の版築土の特性を読み取った。N1塔の基壇の地業層(図2)は、基本地業層である表面被覆層(粘土分が多い砂質土)、砂地業層1(ラテライトチップの薄層を挟在する版築層)、砂地業層2(ラテライトチップ層の薄層を含まない版築層)と補完層である暗褐色層、挟在残留層の5層に区分される。本研究では、砂地業層1を対象とする。

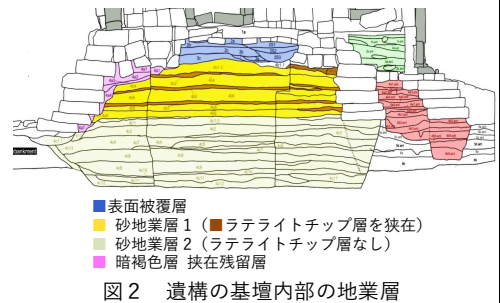


図2 遺構の基壇内部の地業層

3.2 文献調査から判明した版築土を模擬した試料の作製と土質試験

粘土はベトナム産ラテライト粘土、砂は三河産珪砂、および混合砂(山砂:石灰砕砂=60:40)を使用した。粘土に砂を加え、上述した文献から判明した版築土の粒度分布を模擬した土(以下、模擬土)、模擬土よりも粘土分が多い土(以下、粘土多)および粘土分が少ない土(以下、粘土少)の3種類の調整土を用意した。また、この模擬土に礫を加え、ラテライトチップ層の粒度分布を模擬した調整土(以下、模擬ラテライトチップ混合土)を用意した。各調整土の物理的性質を表1に、粒径加積曲線を図3に、締固め特性を図4に示す。文献から判明した版築土の粒度分布を模擬した土(模擬土)は、締固め特性や密度についても現地の版築土に近似した。

表1 使用材料の物理的特性

試験項目	土粒子の密度試験	土の粒度試験			突き固めによる土の締固め試験		
試験方法	JIS A 1202	JIS A 1204			JIS A 1210		
試験結果	調整土	土粒子密度 (g/cm ³)	礫分 (%)	砂分 (%)	粘土分 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)
	模擬土	2.70	2	79	19	2.01	11.3
	粘土多	2.77	2	64	34	1.94	12.2
	粘土少	2.72	2	89	9	1.87	11.7

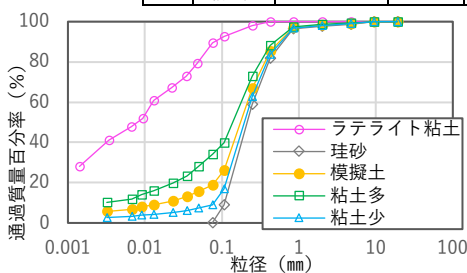


図3 使用材料の粒径加積曲線

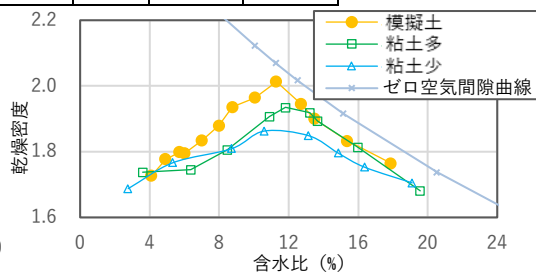


図4 使用材料の締固め特性

3.3 粒度分布と含水比が版築土の一軸圧縮強度に及ぼす影響

1) 実験の目的

本室内試験は、基壇内に雨水が浸入した状況として、異なる含水比の版築土を想定し、粒度分布と含水比が一軸圧縮強度に及ぼす影響を明らかにする事を目的とする。

2) 試験体の作製

型枠はφ50×100 mmの鋼製型枠を使用し、ランマーはJCAS L-01「セメント系固化材による改良体の強さ試験方法」に準拠し、質量1.5 kgのものを使用した。

試料を、表1に示す最適含水比となるよう、加水調整を行った後、ほぼ等しい量の5回に分けて投入し、各層とも試料の表面を軽く水平に均した後、ランマーを20 cmの高さから自由落下させた。突き固め回数は各層12回とし、各層の上面にはへらで刻みを付し、その上の層と良く馴染むようにした。なお、5層目の突き固め面は刻み付けをせずに、平らに均した。

成形した試験体は直ちに脱型し、温度20℃、相対湿度65%の恒温恒湿槽内に静置して恒量にした。恒量となったのを確認した後、試験体総数の2/3を、温度を20℃、相対湿度を33%および95%とした2種類の容器内に移し、それぞれ静置して恒量にした。

3) 測定項目及び試験方法

・圧縮強度

JIS A1216「土の一軸圧縮試験方法」に準拠して行った。

・平衡含水比

試験後の試験体の質量と、その後110±5℃の炉内で恒量とした時の質量から試験時の含水比を算出した。なお、各試験体は、所定の相対湿度で恒量であるため、以下、試験時の含水比を平衡含水比と呼ぶ。

4) 実験結果

・相対湿度と平衡含水比の関係

各相対湿度に対する平衡含水比を図5に示す。各調整土において、相対湿度が高いほど、平衡含水比は高くなる傾向が認められた。また、粘土分が多い土ほど、平衡含水比は高くなり、相対湿度が高い場合ほど、その傾向は顕著であった。

・平衡含水比と圧縮強度の関係

平衡含水比と圧縮強度の関係を図6に示す。各調整土において、平衡含水比が高くなるほど、圧縮強度は低くなる傾向が認められた。また、粘土分が多い土において、平衡含水比が低い場合では、圧縮強度は最も高くなったが、平衡含水比が高い場合では、模擬土と同程度となった。これは、先の「相対湿度と平衡含水比の関係」の結果と併せて考えると、粘土分が多いものほど、同じ相対湿度においても含水比が高くなりやすいためだと考えられる。

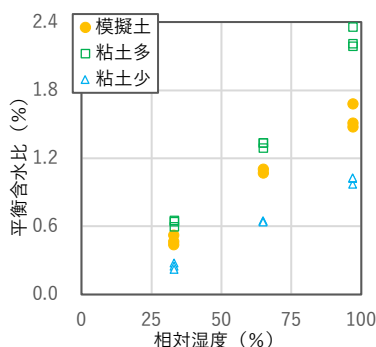


図5 相対湿度と平衡含水比の関係

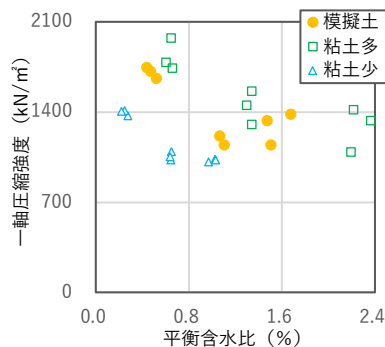


図6 平衡含水比と一軸圧縮強度の関係

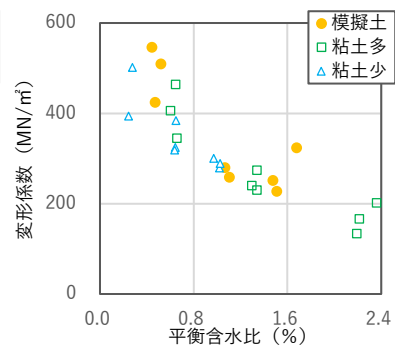


図7 平衡含水比と変形係数の関係

・平衡含水比と変形係数の関係

平衡含水比と変形係数の関係を図7に示す。調整土の種類によらず、平衡含水比と変形係数には比例的な関係がみられ、平衡含水比が高くなるほど、変形係数は小さくなる傾向が認められた。また、粘土分が多い土ほど、変形係数は小さくなる傾向が認められる。圧縮強度と同様に、粘土分が多い土ほど含水比が高くなりやすいためだと考えられる。

5) まとめ

文献から判明した版築土の粒度分布を模擬した土（模擬土）を含めた各調整土について、含水比が一軸圧縮強度に及ぼす影響の検証を行った。模擬土より粘土分が多い土は、圧縮強度がより大きくなるが、相対湿度による含水比の変動が大きく、相対湿度95%では、模擬土と同程度の圧縮強度となる。

3.4 版築内の雨水浸透にラテライトチップ層の狭在および目地への接触が与える効果

1) 実験の目的

クメール宗教建築の基壇の版築には、砂地業層に礫分（ラテライトチップ）が混じる層が挟入する事例が報告されている。この様な粒径の異なる土を相互に締固めた層を設けることで排水効果が期待されることは、宋代の『营造方式』に記されている。プラサート・スープラ N1 塔の地業層によれば、ラテライトチップ層は、基壇の石材の目地に接する傾向がある（図2）。そこで、雨水の一部が石の目地から滲み出ると想定し、版築内の雨水浸透にラテライトチップ層の狭在及び目地への接触が与える効果を明らかにすることが本実験の目的である。

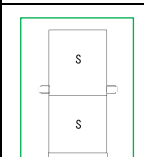
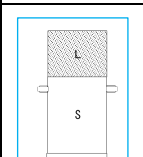
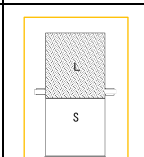
2) 実験の要因

実験の要因は、ラテライトチップ層の狭在及びラテライトチップ層の目地への接触とし、試験体はそれらを組合せた3体とした（表2）。実験の要因を試験体モデルとしたものを表3に示す。

表2 実験の要因

試験体 No.	A	B	C
ラテライトチップ層の狭在	無	有	有
ラテライトチップ層の目地への接触	—	接しない	接する

表3 試験体モデル

試験体 No.	A	B	C	
項目				
各段に用いられる版築土の種類	上段	模擬砂質土	模擬ラテライトチップ混合土	模擬ラテライトチップ混合土
	下段	模擬砂質土	模擬砂質土	模擬砂質土
側部排水目地に接する版築土	模擬砂質土	模擬砂質土	模擬ラテライトチップ混合土	
模式図				

3) 試験体の作製

型枠材は、アクリル製とし、内法寸法を直径100mm、高さ270mm（上段：高さ150mm、下段：高さ120mm）とした。型枠底板には直径2mmの孔を適当な間隔で設け、型枠側面には2mmの隙間を設けた（図8）。底部には、フィルターとして下から順にと金網（網目425 μ m）及び粗砂（厚さ10mm）を設置した。下段について、試料が最適含水比となるまで加水調整を行った後、約1/4回に分けて投入し、試料の表面を軽く水平に均した後、質量2.5kgのランマーを30cmの高さから自由落下させた。突き固め回数は各層25回とし、上面にはへらで刻みを付し、その上の層と良く馴染むようにした。残りの3層も同様の手順で行なった。また、上段についても下段と同様の手順で成形した。なお、4層目については、上面の刻み付けをせずに平らに均した。最上面にフィルターとして用いる粗砂（厚さ10mm）と金網(425 μ m)を設置した。

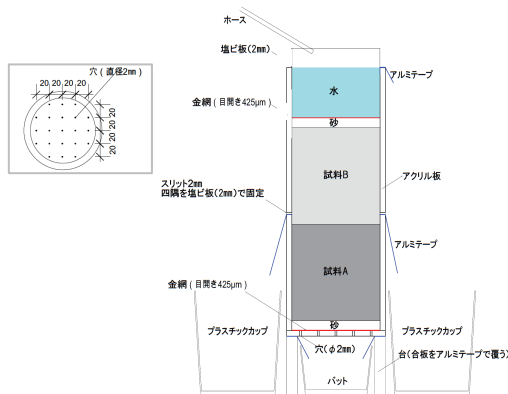


図8 試験体の断面及び平面図(左上)



図9 試験の様子

4) 試験方法

試験方法は、試験体の上面に継続的に水を供給し(図9)、経過時間ごとの底部及び側部からの排水量を測定する。試験体上面からの水の高さは500mmとした。

5) 実験結果

各試験体の排水量と時間との関係を図10に示す。いずれの試験体も側部及び底部からの排水が確認された後、継続的に一定量の排水が確認された。注水してから排水が確認された時間と排水量を表4に示す。

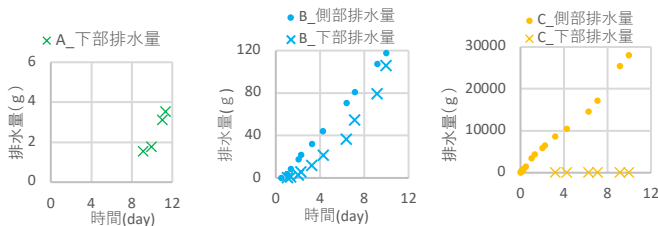


図10 試験体の排水量
(左:試験体A、中:試験体B、右:試験体C)

表4 排水が確認された時間と排水

項目		試験体 No.		
		A	B	C
側部排水目地	排水が確認された時間	—	24h	0.33h
	排水量	0	0.53g/h	約117g/h
底部排水孔	排水が確認された時間	216h	32h	96h
	排水量	約0.04g/h	約0.13g/h	約0.05g/h

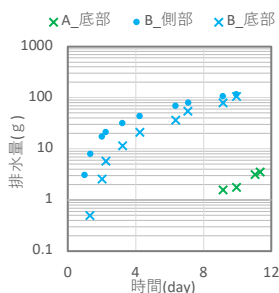


図11 試験体AとBの排水量

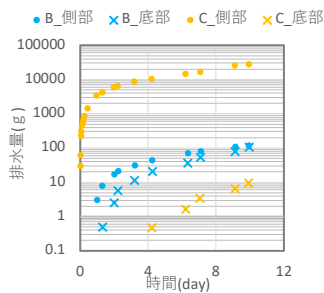


図12 試験体BとCの排水量

・ラテライトチップ層の挟在の影響

ラテライトチップ層が無い試験体(A)と有る試験体(B)の排水量と時間との関係を図11に示す。ラテライトチップ層が無い場合(A)は、側部付近の土が湿る程度でほぼ全て底面からの排水となった。それに対してラテライトチップ層が有る場合(B)は、底部よりも側部から多くの排水が確認された。

・ラテライトチップ層の目地への接触の影響

ラテライトチップ層が側部の目地に接しない試験体(B)と接する試験体(C)の排水量と時間との関係を図12に示す。ラテライトチップ層が目地に接する場合(C)は、接しない場合(B)に比べて、側部目地から極めて短時間に、極めて多量の排水が確認されたのに対して、底部からはゆっくり少量の排水が確認され、下段への透水量は少なくなった。

6) まとめ

版築内の雨水浸透に挟在するラテライトチップ層が与える効果について検証を行った結果、版築にラテライトチップ層が有ると、側部からの排水が促進され、さらに側部目地にラテライトチップ層が接することで、より大きく側部から排水が促され、下部への水の浸透を減少させることが明らかとなった。

本研究成果は、下記の通り日本建築学会の大会で発表予定である。

長坂直輝, 小島陽子, 名島友基, 山田雅一, 重枝豊: クメール宗教建築の基壇の版築技術に関する基礎的研究 その3 版築内の雨水浸透に挟在するラテライトチップ層と締固めエネルギーが与える効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2023

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究期間では、現地採取の版築土を用いた実験の前段階として、文献調査から判明した版築土を模擬した試料を作製して室内試験を行った。今後は、アンコール都城に位置する遺構のうち、解体修復工事が行われているアンコール・ワット西参道において基壇版築の土質調査を実施し、土の密度・締固め度・強度等を確認したい。その上で、現地での土質調査の結果を参考にした室内試験から排水性および沈下特性の評価を行い、基壇沈下の要因について明らかにする。併せて、古代の版築技術の考察を行い、これらの成果を修復現場へ還元することを目指す。