

アンコール遺跡の石積建造物の基礎の築造技術に関する地盤工学的研究

Geotechnical investigation on construction technique of foundation of masonry buildings in the Angkor ruins

広島大学大学院先進理工系科学研究科 准教授 橋本涼太

(研究計画ないし研究手法の概略)

カンボジアの世界遺産、アンコール遺跡は9～15世紀にクメール王朝が建造した石積建造物群であるが、数百年以上が経過した現在、崩壊の危機に瀕する建造物が多数存在する。その劣化要因の一つは、盛土と石段からなる基壇と呼ばれる基礎(図1)の破壊と不同沈下であり、修復時には基壇が十分な支持力を発揮するように設計する必要がある。一方、基礎も文化財の構成要素であることを鑑みれば、当時の設計思想を歴史的変遷を含め考察し、それを最大限に尊重し修復方法を検討することが望ましい。

研究代表者はこれまで自ら開発してきた不連続体解析手法の一つであるマニフォールド法—不連続変形法連成解析(NMM-DDA)を用いて、盛土が粘着力のみを持つc材料の場合を対称として基壇の支持力特性に関する数値解析的検討を行ってきた。本研究ではカンボジアの現地で一般的に見られる摩擦性地盤と石材からなる基壇を対象とし、アルミ棒積層体とアルミブロックを用いた基壇模型載荷実験とNMM-DDAによる再現解析を実施した上で、異なる石材組積条件下での支持力特性の違いを実験的、数値解析的に評価した。

なお、当初の研究計画では、カンボジアでの現地調査に基づき、実際の建造物の石材の状況を反映した検討を行う予定であったが、新型コロナウイルス感染症の拡大に伴い渡航が困難となったため、実験とその再現シミュレーションを主体とした検討を実施することとした。

以下に実験、および解析法の概要を示す。

1. アルミ棒積層体とアルミブロックを用いた基壇模型載荷実験

本研究では摩擦性地盤と石材からなる基壇構造の支持力問題を模擬するため、アルミ棒積層体を用いた模型実験手法を使用した。本手法では細長い円柱形のアルミ棒を多数積み重ねることで粒状体である地盤を、アルミブロックで石材を模擬し、その変形・破壊挙動を観察する。アルミ棒積層体は前後側面を壁体で支えることなく自立するため、実験過程において地盤工学上の問題で多く見られる平面ひずみ条件を満足しながら粒状体の二次元的な挙動

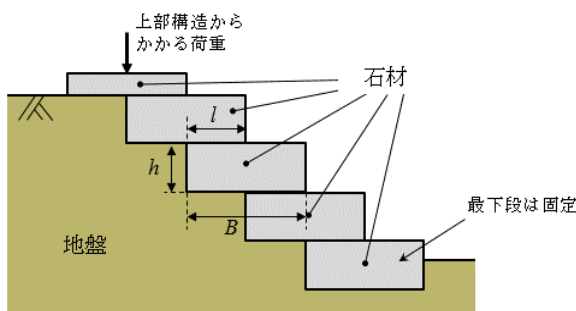


図1 基壇構造の支持力問題

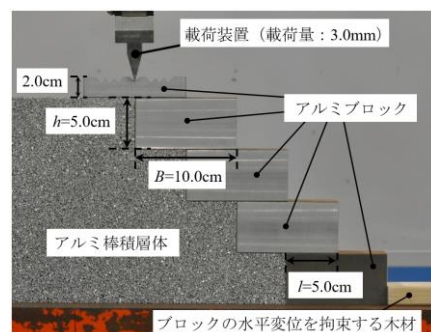


図2 使用した基壇模型

が表現できる。

対象は図 1 の同一寸法（幅 B 、厚さ h ）の石材を積み重ねた基壇構造で、そこに上部構造の重量が作用したときの安定問題を検討した。石材は全段をオーバーラップ幅 1 ずつ均等に重ね、勾配が一定と仮定した。最下段の石材は動かないとした。荷重は最上段石材の上面中央に集中荷重として作用し、石材の回転や水平移動は自由にできるものとした。

図 2 に本実験で用いた模型の構成と寸法を示す。模型は鋼製のフレームで側方を拘束しながら作成した。石材を五つのアルミブロックで、基壇内部の地盤にはアルミ丸棒の積層体で模擬した。アルミブロックは最上段ブロックを除きすべて同じ大きさで、長さ 50.0mm、幅 100.0mm、高さ 50.0mm であり、摩擦強度を確保するため周囲に#240 のサンドペーパーを貼付した。アルミ棒積層体は、長さ 50.0mm で直径 1.6mm および 3.0mm の 2 種類のアルミ丸棒を重量比 3 : 2 で混合したものである。また、石材の積み方の影響を検討するため、ブロック幅に対するオーバーラップ幅の比 l/B を 0.50、0.60、0.70 と変化させた 3 ケースを実施した。また、アルミ棒の間隙比は 0.26 とした。以上の条件で、最上段のブロックに下向きに 3.0mm の変位を与えて載荷した。載荷中は最上段ブロックに与えた変位とそこに作用する鉛直荷重を計測した。

2. 数値解析手法 NMM-DDA を用いた再現解析

上記の基壇模型載荷実験を数値解析手法 NMM-DDA を用いて再現解析を行った。NMM-DDA は、ともに不連続体の解析手法であるマニフォールド法（Numerical Manifold Method: NMM）と不連続変形法（Discontinuous Deformation Analysis: DDA）の連成手法であり、解析対象を地盤内の局所的な挙動を扱えるマニフォールド法（NMM）と、物体それぞれの回転などを含む挙動を個別に表現できる不連続変形法（DDA）でモデル化する領域に分け、両者の接触を新たに定式化することで地盤と石積構造物の相互作用を考慮した解析を可能にしている。先行研究にて、粘着性地盤からなる基壇構造の検討に用いられているが、模型実験等に基づく妥当性検証はこれまでなされていなかったことから、まず、先述の載荷実験をシミュレートすることで同手法の適用性を検証することとした。

図 3 に $l/B=0.50$ のケースの再現解析に使用したモデルを示す。モデル寸法は模型実験と同様とし、アルミブロックを DDA、アルミ棒積層体を NMM でモデル化した。各材料の構成モデルと物性値を表 1 に記す。アルミ棒積層体は Drucker-Prager の破壊規準を用いた弾完全塑性体とし、その物性値は基壇模型の載荷実験に先立って実施した帯状フーチング模型の支持力実験の再現解析によって得た表-1 に示す値を用いた。

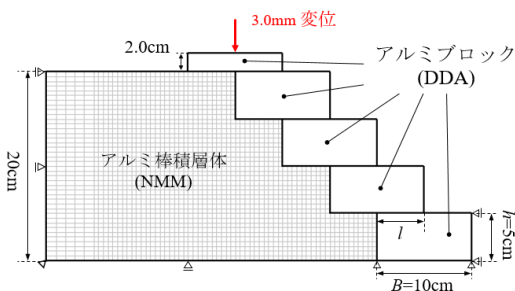


図 3 基壇模型載荷実験の
再現解析モデル ($l/B=0.50$)

表 1 基壇模型載荷実験の再現解析に用いた物性値

		パラメータ	設定値
石材	単位体積重量: γ	[kN/m ³]	26.6
	ヤング率: E	[GPa]	10.0
	ポアソン比: ν		0.2
地盤	単位体積重量: γ	[kN/m ³]	21.0
	ヤング率: E	[kPa]	6.5×10^2
	ポアソン比: ν		0.375
	内部摩擦角: ϕ	[°]	27.0
	ダイレイタンス角: ψ	[°]	27.0
	粘着力: c	[kPa]	0.0

アルミブロックはアルミ棒積層体に比べて剛な弾性体とした。アルミブロック間およびアルミブロックーアルミ棒積層体間の接触面の摩擦角は事前に行った摩擦試験より、それぞれ 31.3° および 31.4° とした。以上の条件で、自重による初期応力を与えた状態から最上段ブロック上部中央に下向きに 3.0mm の変位を与え、載荷点に作用する反力を支持力として評価した。

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 模型実験の結果

図4~6に模型実験の各ケースで得られた荷重-変位関係を赤線と青線で示す。実験は各ケース2回ずつ実施しており、いずれも最終的な極限荷重は概ね一致し、再現性が確認できた。変位量の変化にともない荷重が細かく増減しているがこれは載荷による応力の蓄積とアルミ棒の配置の移動による解放を繰り返しながら破壊が進むためである。また、 $l/B=0.70$ で支持力の急減部が存在するが、これは基壇模型が不安定化した際に変形が急に進んだことで載荷装置が最上段ブロックから離れたためである。極限支持力は $l/B=0.50$ で $20\sim 30\text{N}$ 、 $l/B=0.60$ で $35\sim 45\text{N}$ 、 $l/B=0.70$ で $70\sim 80\text{N}$ であり、 l/B が大きくなる、すなわち石材を組積する際の勾配が急になるほど支持力が大きくなっており、一般的な斜面法肩に設置された直接基礎の支持力特性とは異なる性質を示すことがわかった。

2. 再現解析の結果

図4~6に各ケースの再現解析で得られた荷重-変位関係を黒の実線で示す。いずれのケースも曲線の勾配や収束後の支持力が定量的に再現できている。なお、載荷初期の勾配が実験よりも若干急になっている。これは、実験では初期に地表面付近の地盤の拘束圧が低く剛性も小さいのに対し、解析では全過程で同じ弾性係数を使用していることが考えられる。本解析は基壇の構造条件のみを変化させたものであるから、NMM-DDAは実験で得られた支持力特性を再現できており、同解析手法の妥当性が確認された。

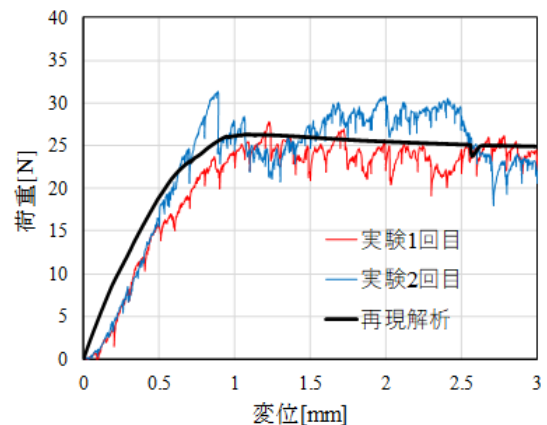


図4 実験と解析から得られた荷重-変位関係 ($l/B=0.50$)

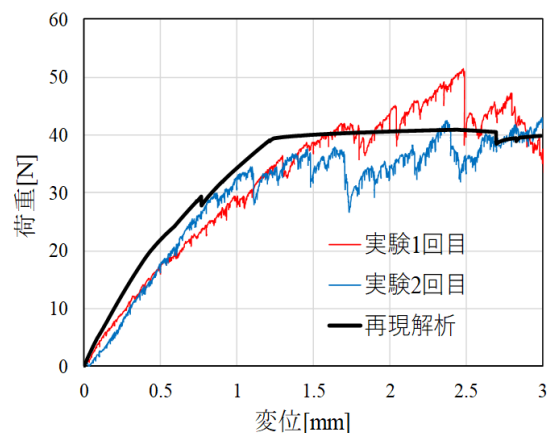


図5 実験と解析から得られた荷重-変位関係 ($l/B=0.60$)

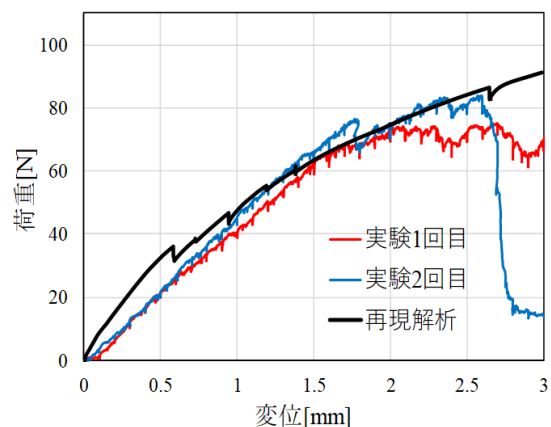


図6 実験と解析から得られた荷重-変位関係 ($l/B=0.70$)

3. 数値解析結果に基づく基壇の支持力特性の分析

前項において、数値解析手法 NMM-DDA による基壇構造の支持力評価の妥当性が検証された。本項では、模型載荷実験の再現解析結果から、基壇の呈する破壊形態について考察する。まず、 $l/B=0.50$ の基壇構造の模型載荷支持力試験の再現解析から得られる偏差ひずみの分布図および水平方向の変位の分布図（図 7）に着目する。偏差ひずみ分布図と水平方向変位分布図は、再現解析により得られる荷重－変位関係（図 4）で支持力の収束が確認される変位量 2.0mm を基壇に与えた状態のものを示している。また、図中に示してある基壇は載荷前の初期状態のものを示している。以降で示される偏差ひずみ分布図、水平方向変位分布図においても同様である。

まず、偏差ひずみの分布図からはアルミブロックを用いて模擬している最上段石材の左下角部から円弧上の偏差ひずみの集中帯が発生し、上から 3 段目および 4 段目の石材の底面に至っており、アルミ棒積層体で模擬している地盤内部で破壊が生じていることが分かる。その一方で、水平方向の変位分布図では、石材に着目すると上から 3 段目と 4 段目、および 4 段目と 5 段目の間に変位の不連続な分布が確認される。これはすなわち、石材底面に接している地盤および石材との間のせん断力が摩擦強度に達し、滑動していることを示している。また、この変位の不連続部の位置は、偏差ひずみの分布図にて、ひずみの集中帯が生じていた段と一致していることから、 $l/B=0.50$ の基壇構造は地盤内部の円弧上の滑りと石材の滑動の双方を伴う複合的な破壊形態を示している。研究代表者の既往の研究では粘着力のみを有する c 材料地盤からなる基壇において同様の破壊メカニズムを生じることが示しているが、摩擦性地盤でも同様の形態を示すことが明らかとなった。

次に、 $l/B=0.60$ 、 $l/B=0.70$ の基壇構造の模型支持力試験の再現解析から得られた偏差ひずみ分布図及び水平方向変位分布図（次ページ図 8、図 9）に着目する。これらはいずれも偏差ひずみの分布図において、最上段石材の左下角部から 3 段目および 4 段目の石材の底面に接続する円弧上の偏差ひずみの集中帯が発生し、地盤内部で破壊が生じていることが確認される。また、水平方向の変位分布図では、石材に着目すると上から 3 段目と 4 段目、および 4 段目と 5 段目の間に変位の不連続分布が確認される。これらのことから、 $l/B=0.60$ 、 $l/B=0.70$ の基壇構造においても地盤内部の円弧上の滑りと石材の滑動の双方を伴う複合的な破壊形態を示した。

以上のように、基壇模型載荷試験結果に対して再現解析を行い、得られる支持力を比較するとともに、破壊時の地盤内部の変位の形態を検討した。偏差ひずみ分布や水平変位分布から確認されたすべり線の位置・形状や石材の滑動位置からは、粘着性の盛土からなる基壇を対象とした先行研究で示されている地盤内部の円弧すべりと石材の滑動による破壊形態が確認された。

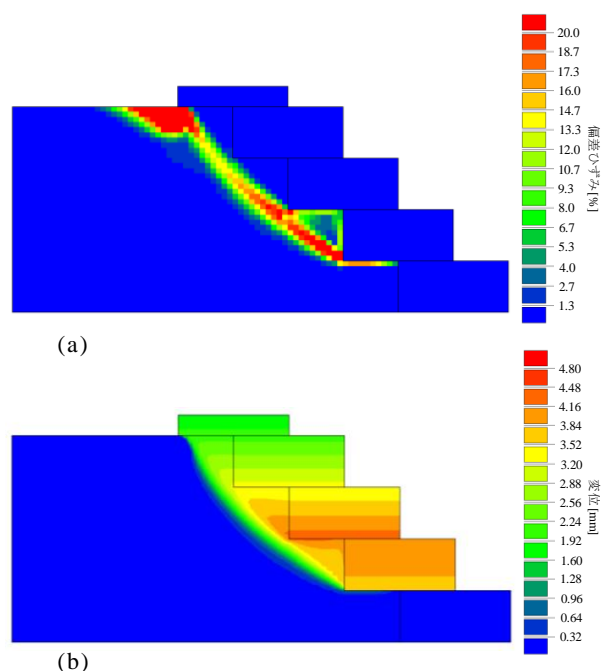
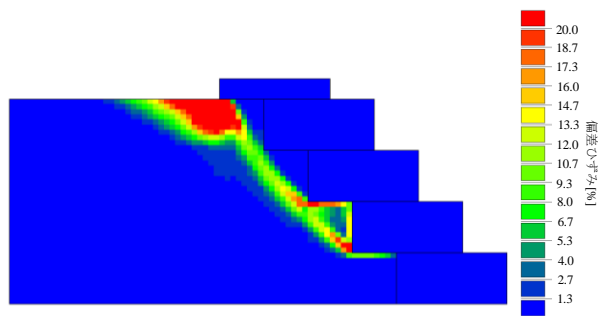
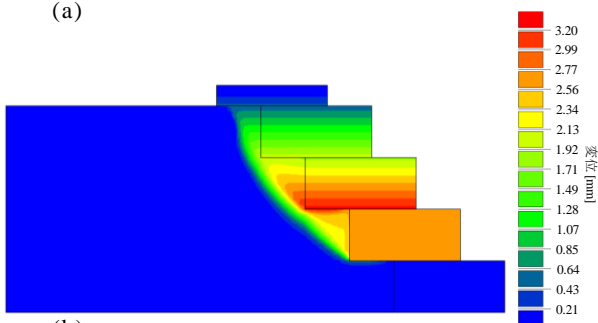


図 7 基壇模型($l/B=0.50$)の解析結果：
(a) 偏差ひずみ分布図，(b) 水平方向変位分布図



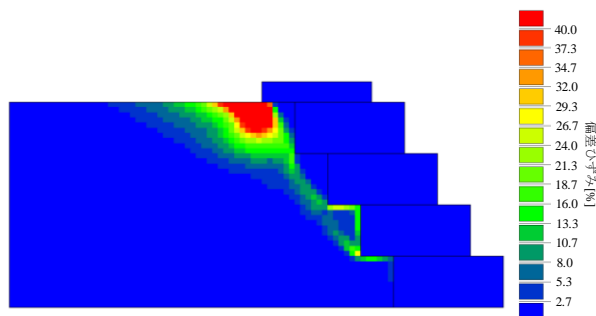
(a)



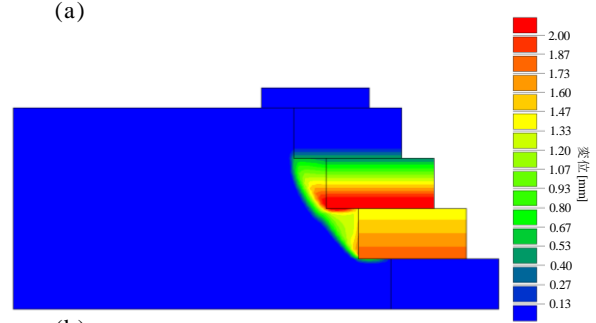
(b)

図 8 基壇模型($l/B=0.60$)の解析結果：

(a) 偏差ひずみ分布図, (b) 水平方向変位分布図



(a)



(b)

図 9 基壇模型($l/B=0.70$)の解析結果：

(a) 偏差ひずみ分布図, (b) 水平方向変位分布図

4. まとめ

本研究では、カンボジアのアンコール遺跡における石積建造物の安定性に強く影響する基壇の築造技術、特に支持力特性に着目して模型実験および数値解析による検討を行った。

現地で一般的に見られる摩擦性地盤を模擬するためのアルミ棒積層体を用いた模型載荷実験を数値解析手法 NMM-DDA によってシミュレートした結果、変位－荷重関係を定量的に再現することができ、同手法の妥当性が確認された。

また、解析結果から得られた変位およびひずみの分布からは、粘着性地盤からなる基壇と同様に地盤内部の円弧すべりと石材の滑動による破壊形態が確認された。粘着性地盤からなる基壇構造に関しては、研究代表者の先行研究において、極限平衡法による支持力計算法が提案されているが、本研究で得られた結果は同様の手法が摩擦性地盤においても適用可能であることを示唆するものである。今後、解析結果を元に定式化を進めることで遺跡の修復設計に大きく寄与すると期待される。また、変状を生じた実建造物の基壇内部の状況を調査し、本研究の結果と比較することで、得られた知見の妥当性検証を目指す。

(発表論文)

栗原歩, 橋本涼太他：NMM-DDA による基壇模型支持力実験の再現解析, 第 55 回地盤工学研究発表会, No. 21-8-2-05, 2020.