

京都大学工学部	学生会員	○橋本	涼太
京都大学大学院工学研究科	正会員	小山	倫史
早稲田大学創造理工学部	非会員	山田	俊亮
早稲田大学理工学術院	非会員	新谷	真人
地域地盤環境研究所	正会員	岩崎	好規
京都大学	正会員	大西	有三

1. はじめに

世界には崩壊の危機に瀕する石積構造物が数多く存在し、その安定性評価・修復計画において、地盤を含めた構造物の安定解析が重要である。また、古くから存在する構造物の地盤には、長年にわたって劣化が蓄積されており、地盤の非線形的な変形挙動を考慮した解析が求められる。本研究では、不連続体解析手法である、マニフォールド法・不連続変形法連成解析<sup>1)</sup>(NMM-DDA)に新たに弾塑性構成則を導入し、その妥当性を二軸試験の解析から検討した後、アンコール遺跡、プラサート・スープラ N1 塔の安定解析に適用した。

2. NMM-DDA の基礎理論

NMM-DDA はマニフォールド法(NMM: Numerical Manifold Method) および不連続変形法 (DDA : Discontinuous Deformation Analysis) の連成解析手法であり、その定式化はポテンシャルエネルギー最小化原理に基づいて行われる。解析対象全体のポテンシャルエネルギー $\Pi_{sys}$ は

$$\Pi_{sys} = \Pi_{sys}^d + \Pi_{sys}^m + \sum_{B,i} \sum_{E,j} \Pi_{i,j} \quad (1)$$

と表され、右辺第 1 項が DDA, 第 2 項が NMM でモデル化された部分に関するポテンシャルエネルギーであり、第 3 項が DDA ブロックと NMM 要素の接触に関するポテンシャルエネルギーである。支配方程式である運動方程式は、Hamilton の原理により定式化され、接触を含むシステム全体のポテンシャルエネルギーを変位変数に関して最小化し、剛性マトリックスを導出する。詳細は参考文献<sup>1)</sup>に譲る。

3. 弾塑性構成則の導入

本研究では、NMM-DDA に式(2)の Drucker-Prager 式を降伏関数とした弾完全塑性モデルを導入し、塑性ポテンシャルについても式(2)を用いる関連流れ則を採用した。

$$f = -\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - \kappa = 0 \quad (2)$$

ここで、 $I_1$ : 応力の第 1 不変量,  $J_2$ : 偏差応力の第 2 不変量である。本研究では、平面ひずみ条件下で Drucker-Prager 式と Mohr-Coulomb 式が一致する場合を仮定し、式(2)の材料定数  $\alpha$  と  $\kappa$  について、次の式(3)を使用した<sup>2)</sup>。

$$\alpha = \frac{\sin \phi}{\sqrt{9+3 \cdot \sin^2 \phi}}, \kappa = \frac{3c \cdot \cos \phi}{\sqrt{9+3 \cdot \sin^2 \phi}} \quad (3)$$

ここに、 $c$  は粘着力,  $\phi$  は内部摩擦角である。

NMM-DDA に導入した関連流れ則 Drucker-Prager モデルの計算の妥当性の確認のために平面ひずみ条件下での二軸試験の解析を行い、理論値との結果を比較した。解析モデルは図 1 のように、載荷板と供試体の 2 つの物理メッシュからなる。物性値は表 1 の黄色の部分、後に述べるプラサート・スープラ N1 塔の原地盤の物性値を参照し、単位体積重量のみ  $0\text{kN/m}^3$  と変更し、自重を無視した。また、境界条件として左端の水平変位と下端の鉛直変位を固定した。

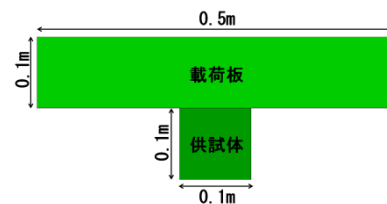


図 1 解析モデル

表1 解析で用いた物性値

項目	石積ブロック	版築	原地盤
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	30	18	18
弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	1.0×10 <sup>6</sup>	2.5×10 <sup>4</sup>	1.0×10 <sup>4</sup>
ポアソン比	0.2	0.3	0.3
内部摩擦角 (°)	—	30	30
粘着力 (kN/m)	—	25	20
引張強度 (kN/m <sup>2</sup> )	—	0	0
不連続面の摩擦角 (°)	—	36	36

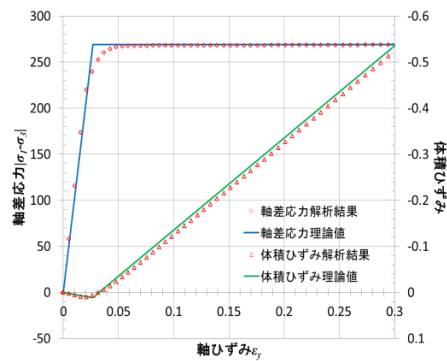


図2 二軸試験解析の結果

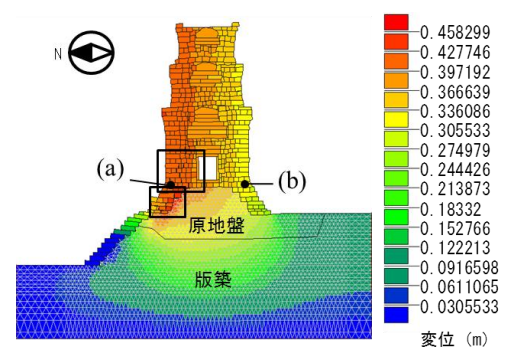


図3 安定解析の結果 (鉛直変位)

以上の条件下で、供試体に 100kN/m<sup>2</sup> の初期拘束圧を与え、載荷板を降下させて供試体に鉛直方向のひずみを与え、二軸試験の解析を行った。

図2に解析から得られた軸ひずみと軸差応力および体積ひずみの関係を理論値とともに示す。解析結果は、理論値と一致しており、NMM-DDA に導入した Drucker-Prager モデルの妥当性が検証できた。

#### 4. プラサート・スーブラ N1 塔<sup>3)</sup> の安定解析

弾塑性構成則を導入した NMM-DDA の、石積構造物と地盤の相互作用を考慮した安定解析への適用例として、カンボジアのアンコール遺跡、プラサート・スーブラ N1 塔の安定解析の結果を示す。N1 塔はかつて崩壊の危機にあった石積構造物であり、主な損壊状況として、地盤の不同沈下による北西方向への 4.96% の傾斜や、石積ブロックの目地の開きなどが報告された<sup>3)</sup>。現在は JSA により修復済みである。

解析モデルは、修復後の図面を基に作成し、石積ブロックを DDA、地盤を NMM でモデル化することにより、石積ブロックの変位および、地盤内の応力・ひずみに着目した解析を行った。地盤は版築と原地盤という 2 種類の土からなる。なお、石積ブロックは線形弾性体、地盤は弾完全塑性体 (関連流れ則 Drucker-Prager モデル) と仮定している。物性値は、表1を使用した。解析開始と同時に全ブロック・要素に自重を与え、挙動が収束するまで解析を行った。

解析の結果、図3のような鉛直変位 (沈下量) の分布が得られた。塔の北側に向かうにつれて沈下量が大きくなっており、ブロック(a)と(b)の位置関係から塔の傾斜を求めると、北向きに 1.45% 傾いていた。また、塔の壁面および基壇には、図4の様に目地の開きが発生し、実現象に沿った結果が得られた。

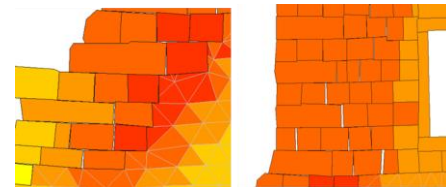


図4 目地の開き

#### 5. 結論

本研究により、NMM-DDA に導入した弾塑性構成モデル (Drucker-Prager モデル) の妥当性が示された。また、それをプラサート・スーブラ N1 塔の安定解析では、実現象に沿う崩壊パターンを確認することができ、弾塑性 NMM-DDA の石積構造物と地盤との相互作用を考慮した安定性評価への適用性が示された。今後、塔の傾斜に影響を与えたとされている地盤の乾湿の繰り返しや風雨といった履歴の影響を考慮することでより精度の高い解析モデルの構築を目指す。

#### 参考文献

- 1) S. Miki, T. Sasaki, T. Koyama, S. Nishiyama and Y. Ohnishi : "Development of Coupled Discontinuous Deformation Analysis and Numerical Manifold Method (NMM-DDA) and Its Application to Dynamic Problems", Proc. of the 9<sup>th</sup> International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (ICADD-9), 2009, 255-263.
- 2) Chen, Wai-Fah., Mizuno, E.: Nonlinear analysis in soil mechanics: theory and implementation, Elsevier, 1990, (Developments in geotechnical engineering ; 53).
- 3) 日本国政府アンコール遺跡救済チーム, ユネスコ文化遺産保存日本信託基金: プラサート・スーブラ塔修復工事報告書, 小川印刷株式会社, 2005.