

## 第Ⅲ部門

## NMM-DDA によるアンコール遺跡プラサート・スープラ塔の安定解析

京都大学工学部	学生会員	○安田 祐樹
京都大学大学院	正会員	小山 倫史
早稲田大学創造理工学研究科	非会員	山田 俊亮
京都大学大学院	正会員	西山 哲
地盤研究財団	正会員	岩崎 好規
京都大学理事	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。そこで本研究では、アンコール遺跡プラサート・スープラ塔を解析対象とし、新たに開発したマニフォールド法・不連続変形法連成解析<sup>1)</sup>(NMM-DDA)を用いて、石積構造物と地盤の相互作用を考慮した安定解析を実施し、NMM-DDAの適用性を検討した。

## 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、その定式化は両手法と同様に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エネルギーである。支配方程式である運動方程式も、NMMあるいはDDAと同様にHamiltonの原理により定式化され、変位に関して接触を含むシステム全体のポテンシャルエネルギーを最小化することで剛性マトリックスを導出する。従来のDDAおよびNMMでは、DDAブロックはブロック重心で定義された変位 $D^d$ 、NMM要素は該当する要素節点における変位 $D^m$ に関してポテンシャルエネルギー

の最小化を行っていた。一方、NMM-DDAでは、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は、ブロック重心における変位 $D^d$ および要素節点における変位 $D^m$ で最小化することになる。したがって、NMM-DDAの定式化においては、DDAブロックとNMM要素の接触マトリックスについてのみ新たに定式化を行えばよく、ブロックと要素の接触項において連成が行われる。

## 3. プラサート・スープラ塔概要

アンコール遺跡プラサート・スープラ塔群は、アンコール・トム王宮広場に位置し、南北に連なる12基の塔で構成される。その中で本研究の解析対象としたN1塔は、JSA<sup>2)</sup>によって最も崩壊の危険性がある塔と判断されている。主な損壊状況として、北西方向への4.96%の傾斜、石積みブロックの目地開き等が報告されている。これらの現象は地盤の不同沈下に起因するものと考えられ、地盤を含めた安定性評価が必要である。N1塔は現在はJSAによる修復作業が完了しており、図1に修復後の外観を示す。

N1塔はラテライトブロックを積み重ねた塔構造であり、基壇以下は原地盤を掘削して版築土で置き換えた構造となっている。版築部は砂質土、原地盤は粘性土から成る。

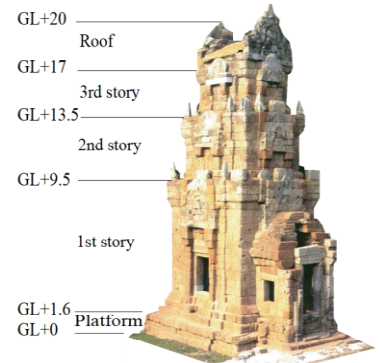


図1 N1塔外観

#### 4. N1 塔の安定解析

図2に示す解析モデルは、JSA作成の修復後の図面を基に、実際の寸法を反映させて作成した。モデルはN1塔を西側から見たものであり、北側の基壇は隣接する北沐浴池の護岸へと続いている。石積みブロックをDDA、地盤をNMMでモデル化することにより、地盤内の応力・ひずみ、さらには石積みブロックの変位、すなわち目地開きに着目した解析を行った。地盤は物性の異なる2種類の土で構成され、それぞれを版築、原地盤と呼び、その境界は連続として扱った。解析は石積みブロックを地盤に上載した状態から開始し、ブロックおよび要素の挙動が落ち着くまで行った。また、固定点は地盤ブロックの下端に設け、側端については水平方向のみ固定した。表1に解析に用いた物性値を示す。

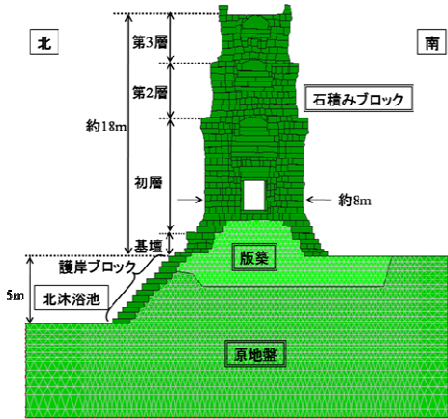


図2 解析モデル

表1 解析に用いた物性値

	石積みブロック	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>4</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	36

図3に解析結果の鉛直変位分布、図4 a),b)に南北ブロックの鉛直方向の挙動を示す。両図より、最も変位の大きかった塔中央から北側部分で、30cm以上の沈下が見られたことが分かる。また、塔南側ブロック

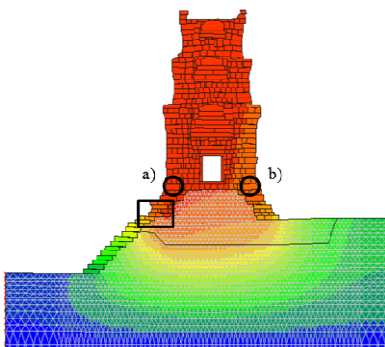


図3 鉛直変位分布

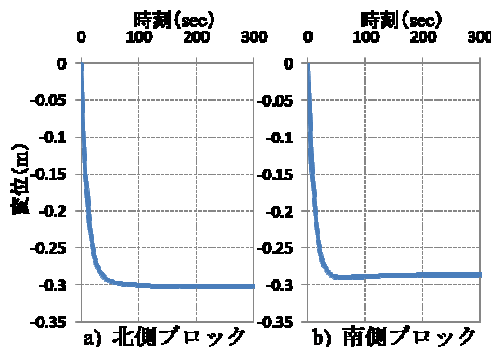


図4 南北ブロックの鉛直変位

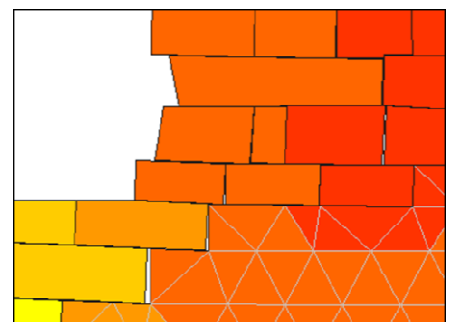


図5 北側基壇の目地開き

の沈下量が、中央から北側ブロックの沈下量に比べて小さいことが分かり、ブロック a), b)の沈下量差は約1.3cmである。このことから、不同沈下が生じ、それに伴って塔が北側へ傾斜していると考えられる。また、図5に示すように北側基壇に目地開きが確認できる。これらはいずれも実現象に沿う結果である。

#### 5. 結論

本研究により、NMM-DDAを用いたプラサート・スープレ N1 塔の安定解析において、実現象に沿う崩壊パターンを確認でき、また、地盤の変形が石積構造物に与える影響についても表現することができた。したがって、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をある程度示せたといえる。しかし、N1塔の傾斜は僅かに0.19%と実現象に比べて遥かに小さいものであった。傾斜の原因については地盤の乾湿の影響や風雨の影響等も挙げられており、今後これらを検討することで、解析精度の向上と適用範囲の拡大が期待される。

#### 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), pp.255-263, 2009
- 2) 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・スープレ塔修復工事報告書, 小川印刷株式会社, 2005