## NMM-DDA によるアンコール遺跡バイヨン寺院と地盤の安定解析

京都大学	学生会員	○橋本	涼太
関西大学	正会員	小山	倫史
横浜国立大学	学生会員	齋藤	徹
横浜国立大学	正会員	菊本	統

(1)

1. はじめに

カンボジアの世界遺産,アンコール遺跡には崩壊の危機に瀕する石積構造物が数多く存在する.既往の調査・修 復により構造物の安定性を脅かす一因として基礎である地盤の変状が挙げられており,その安定性を適切に評価す るためには地盤との相互作用を考慮することが不可欠である.本研究では,それに対する数値解析的アプローチと して,新たに飽和過圧密土の弾塑性構成則を導入したマニフォールド法 - 不連続変形法連成解析 (NMM-DDA)を 用いて,現在修復計画が進められているアンコール遺跡の実構造物,バイヨン中央塔<sup>1)</sup>に適用した.

## 2. NMM-DDA

NMM-DDAは、離散体の接触解析手法であるDDA(不連続変形法)とNMM(マニフォールド法)を組み合わせた統合的な解析手法である.両手法はともに複数の多角形ブロックからなる系の,相互接触条件を含む運動方程式,

$$Mu + Cu + Ku = F$$
  
(M:質量マトリックス, C:減衰マトリックス, K:剛性マトリックス)

を解く手法であるが、その空間離散化において違いが現れる. NMM は一つのブロック内部の任意点の変位を、ブロックを覆うカバーによって形成されるメッシュの節点変位に離散化しており、有限要素法と同様に地盤の連続体的な変形挙動も表現することが可能である. 一方、DDA ではブロック内部の変位をブロックの重心における剛体変位、回転、ひずみに離散化しており、石材の崩落などブロックの回転を伴う挙動の表現に適する. NMM-DDA は、これら DDA のブロックと NMM の要素の間の接触を新たに定式化することで両者を同時に扱うことを可能にした手法であり、地盤と石積構造物の相互作用問題をより適切に解くことができる. 理論の詳細は参考文献<sup>2)</sup>に譲る.

## 3. 下負荷面修正 Cam clay モデル

齋藤ら<sup>3)</sup>は、アンコール遺跡のバイヨン寺院の基礎である人工の版築盛土および自然地盤の力学挙動が、飽和過 圧密土の弾塑性構成則の一つ、下負荷面修正 Cam clay モデルにより表現できることを示した.本研究ではその力学 特性を考慮した解析を行うため、NMM-DDA に下負荷面修正 Cam clay モデルを導入した.本モデルの降伏関数は、

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln\left\{1 + \left(\frac{\eta}{M}\right)^2\right\} - \frac{\rho - \rho_0}{1 + e_0} - \varepsilon_{\nu}^{p} = 0$$
<sup>(2)</sup>

で表される.ここに、 $\lambda$ は圧縮指数、 $\kappa$ は膨潤指数、 $e_0$ は初期間隙比、pは平均主応力、 $\eta$ は応力比、Mは限界応力 比、 $\varepsilon_v^p$ は塑性体積ひずみ、そして $\rho$ は土の過圧密の程度を表す状態変数である.

## 4. アンコール遺跡バイヨン中央塔の基壇掘削時挙動解析

以上で述べた解析コードを,現在日本国政府アンコール遺跡救済チーム (JASA) によって修復計画が進められているバイヨン寺院の中央塔

(図1)に適用した.本構造物では,過去の発掘調査時に掘削された版 築の埋め戻し土がN値2以下という非常に緩い状態にあることがわか っており,今後塔体の安定性を脅かす要因の一つとして懸念され,埋め 戻し部の再掘削・補強工事が検討されている<sup>1)</sup>.ここでは,その再掘削



図1 バイヨン中央塔 (南北断面図)

が周辺地盤・構造物に与える影響を事前に検討するために、NMM-DDA を用いて以下の掘削時挙動解析を実施した.

キーワード 数値解析, NMM-DDA, アンコール遺跡, 石積構造物, 不連続体解析

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2 棟 TEL: 075-383-3306

-169

中央塔の南北断面図(図1)および基壇のボーリング結果を基に作成した解析モデルを図2に示す.石積ブロックは DDAで,地盤は NMM によってモデル化した.続いて,使用した物性値を表1にまとめた.石積ブロックは 線形弾性体として扱い,一方,地盤に対しては先述の下負荷面修正 Cam clay モデルを適用した.版築および自然地 盤の物性値は齋藤ら<sup>3)</sup>が実施した原位置試料の力学試験を元に与えている.また,初期間隙比として,版築には最 適含水比で締固めた場合の値を,自然地盤には地盤部分の自重解析によって得られた初期応力状態に対応する正規 圧密状態の間隙比を与えた.その他接触に関するパラメータとして,垂直ペナルティばね剛性を1.0×10<sup>9</sup>[kN/m],せん断ペナルティばね剛性を1.0×10<sup>3</sup>[kN/m]として与えた.以上の条件下で,石積ブロックの自重を与えた後,掘削部 (図2の赤四角部)の掘削を実行し,構造物全体の変位が収束するまで解析を行った.

以下,解析結果を示す.図3に掘削直前を基準とした解析終了時の鉛直変位および水平変位分布図を示す.この 図から掘削によって塔中央部を中心として沈下が進行していることがわかる.また,沈下によって副塔が内側へと 傾斜していることが水平変位分布図から読み取れる.

続いて地盤の状態を観察する.まず,図4に示した解析終了時の偏差ひずみ分布図を示す.本図からは,主働破壊的に掘削部周辺でせん断が進行している様子が読み取れる.ただし,ひずみの大きな箇所においても破壊には達しなかった.次に,図5に示した掘削直前を基準とした解析終了時の体積ひずみ増分の分布図を見てみると掘削部 直下を中心として自然地盤の圧縮が観察される.これは,掘削前には構造物脚部から基壇内に広く分散されていた 鉛直荷重が,掘削部の消失によって下方へと伝達されるようになったことに起因すると考えられる.

上述の沈下および塔の傾斜は、これらのせん断現象および自然地盤の圧縮によって引き起こされたものと推察され、実際の工事にあたっては構造物に変状をきたさないよう、地盤の変形を抑制しなければならない.したがって、 今後は支保工を考慮した解析などを通して、修復計画に役立てることを目指す.なお、詳細な検討を行うには現地 の土試料の試験データの蓄積による材料物性値の精度の向上が重要である他、乾湿条件の変動が大きいアンコール 地域の地盤が抱える多様な問題を考慮するため解析手法そのものの不飽和土 - 水連成解析への拡張も課題である.

**参考文献** 1)JASA ほか: "アンコール遺跡救済 ユネスコ信託基金による日本政府第3期事業報告書 Book II: バイヨン寺院 保存修復研究報告書", 2011. 2)Miki ら: "Development of Coupled Discontinuous Deformation Analysis and Numerical Manifold Method (NMM-DDA)", 2010. 3)齋藤ら: "アンコール遺跡バイヨン寺院の版築および周辺の自然地 盤の力学特性", 第49回地盤工学研究発表会講演概要集, 2014.

