

NMM-DDA を用いた城郭石垣の構造条件に関するパラメータスタディ

(株)三菱地所設計 正会員 ○神谷 圭祐 横浜国立大学 正会員 菊本 統
 広島大学 正会員 橋本 涼太

1. はじめに

日本各地の城郭石垣は、地震によって変状や崩落等の被害にさらされてきた。このような城郭石垣の地震時崩壊メカニズムの解明を目的として、著者らのグループは 2016 年熊本地震の後、実地調査¹⁾や振動台実験、数値解析による検討を進めている。ここでは、崩壊挙動に及ぼす城郭石垣の構造条件の影響の把握を目的とした数値パラメトリックスタディの結果を紹介する。

2. マニフォールド法—不連続変形法連成解析の概要

NMM-DDA²⁾は、解析対象を変形可能な弾性多角形ブロックの集合体としてモデル化し、それらの相互接触を考慮しながら個々のブロックの運動を解く不連続変形法 (DDA: Discontinuous Deformation Analysis) と、DDA と同様に複数の物体間の接触問題を対象としつつ FEM と同様に物体内部の連続体としての変形を考慮できるマニフォールド法(NMM: Numerical Manifold Method) を組み合わせた解析法である。DDA と NMM はどちらも陰解法であり、対象物をどちらかの方法でモデル化し、両者の接触をペナルティ法により解くことで、強連成解析を実現している。ここでは末岡ら³⁾を参考に、石材を DDA、地盤を NMM でモデル化して城郭石垣の地震応答解析を試みた。

3. 解析モデル

解析モデルは廣石ら⁴⁾の検討を参考に図 1 に示すもたれ式の石垣形状とし、石材の段数を 4, 6, 8 段と変化させて解析を行った。解析に用いた物性値を表 1 に、入力加速度を図 2 に示す。いずれも著者らが実施した鉛直動を考慮した振動台実験⁵⁾の地盤条件と入力地震動に即した条件である。なお、2016 年熊本地震では顕著な鉛直加速度が確認されており、鉛直動による石材間に働く拘束圧の変化と城郭石垣の地震時安定性への影響を検証することも本検討の目的である。準静的条件で自重を作用させた後、石材間の不連続面に沿う方向に DDA でモデル化した振動台を加振させた。

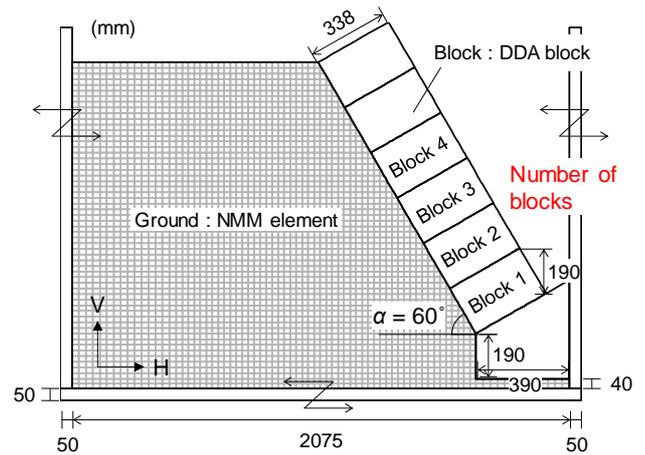


図 1 解析モデル

表 1 解析用物性値

Material properties of blocks (Elastic)			
Young's modulus : E	(GPa)	10.0	
Poisson's ratio : ν		0.2	
Unit weight : γ	(kN/m ³)	8.6	
Material properties of ground (Drucker-Prager)			
Young's modulus : E	(MPa)	100.0	
Poisson's ratio : ν		0.3	
Unit weight : γ	(kN/m ³)	14.8	
Friction angle : ϕ	(deg)	33.7	
Cohesion : c	(kPa)	1.6	
Material properties of the contact surface between blocks			
Contact penalty coefficient	Normal direction : p_N	(GN/m)	1.0
	Shear direction : p_S	(MN/m)	100.0
Friction angle	Static : ϕ_s	(deg)	37.0
	Dynamic : ϕ_d	(deg)	27.5
Material properties of the contact surface between ground and blocks			
Contact penalty coefficient	Normal direction : p_N	(GN/m)	1.0
	Shear direction : p_S	(GN/m)	100.0
Friction angle	Static : ϕ_s	(deg)	31.0
	Dynamic : ϕ_d	(deg)	31.0

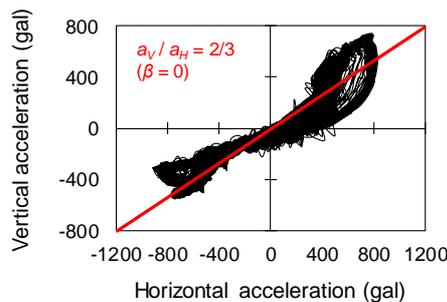


図 2 入力加速度

キーワード 城郭石垣, 直下型地震, NMM-DDA, マニフォールド法, 不連続変形法, 地震応答解析
 連絡先 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-1 横浜国立大学都市イノベーション研究院 TEL 045-330-4030

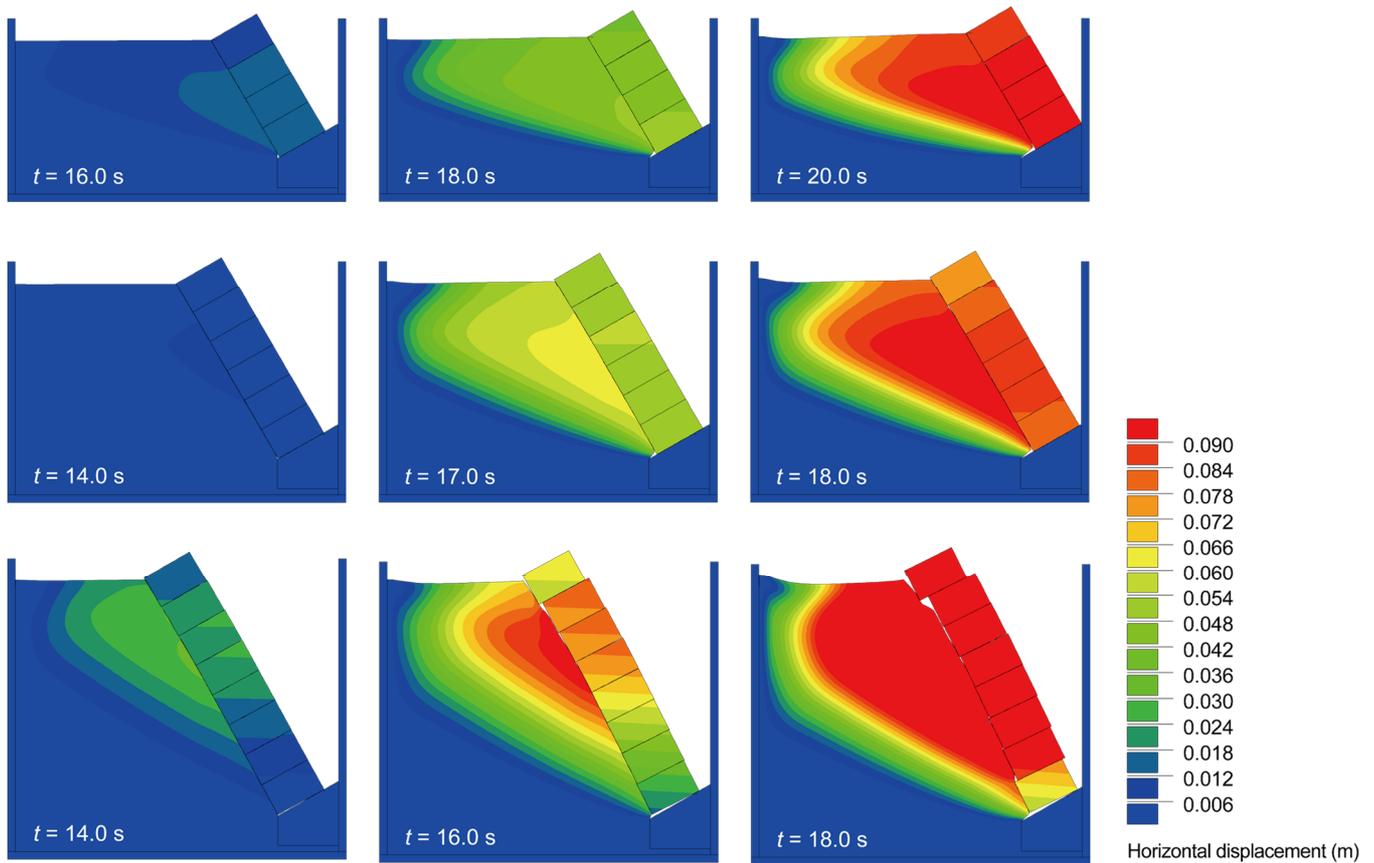


図3 各時刻における振動台に対する相対水平変位量

4. 解析結果と考察

図3に各時刻における振動台に対する相対水平変位量を示す。最下の石材の相対水平変位0.001 m発生時の水平入力加速度は、4段石垣で513gal、6段と8段では490galとなり、石積みの高さが増すことで僅かに安定性が低下した。また、石積み全体の挙動に着目すると、4段石垣では石材全体が滑動するのに対して、6段石垣では石積みの中腹で僅かにはらみ出しを生じること、8段石垣では最下段のブロックの回転も伴ってはらみ出しが顕著になることがわかった。これは、石積みの高さが高くなると石積み全体の慣性モーメントが小さくなり、石材間の滑動と回転が同時に起こるためと考える。はらみ出し現象は実際の城郭石垣の被災事例においても確認されている¹⁾が、本解析においても同様の挙動は概ね捉えられることができた。

5. まとめ

NMM-DDAを用いた、城郭石垣の石積み高さに関するパラメータスタディについて紹介した。本検討により、石積みの高さが増すことで耐震安定性が幾らか低下することや、崩壊モードが変化することが明らかになった。今後は、城郭石垣の勾配を含めたパラメータスタディを進めるとともに、石積みの反りや積み方、栗石、上載荷重といった各要因について力学的な考察を行う予定である。

参考文献

- 1) 神谷ら：2016年熊本地震による熊本城石垣の変状の分析，自然災害科学，vol. 37，特別号，pp. 1-16，2018.
- 2) Miki et al.: Development of coupled discontinuous deformation analysis and numerical manifold method, *Int. J. Comput. Methods* 7(1), 1-20, 2010.
- 3) 末岡ら：石垣の地震時安定性に対する鉛直動の影響に関する基礎的研究，第53回地盤工学研究発表会，講演集 (CD-ROM)，2018.
- 4) 廣石ら：石垣の地震エネルギー吸収能力を考慮した耐震性能評価，構造工学論文集 B 58, 125-131, 2012.
- 5) 神谷ら：石積みー地盤複合構造物の耐震安定性に及ぼす鉛直地震動の影響とその評価法，土木学会論文集 C，投稿中。