

第Ⅲ部門

個別要素法による石垣石の摩擦特性と城郭石垣の地震時変形挙動

関西大学工学部

学生員 ○尾崎 悠平

関西大学環境都市工学部

正会員 西形 達明

株式会社間組

正会員 山本 浩之

1. はじめに

日本に現存する貴重な文化遺産である石垣の中には、築造から長い年月を経て老朽化が進行しているものも数多く存在する。このような状態にある石垣に地震力が作用すると、過大な変形やさらには崩壊が生じる可能性もある。そのため、石垣構造の地震時挙動に対する検討が重要な課題となる。本研究では、石材の表面粗さと摩擦特性を考慮した石垣石モデルを作成し、これを用いることで地震時の城郭石垣構造の変形挙動を個別要素法（DEM）解析によって検討した。

2. 石垣石の摩擦実験

実験は、**図-1**に示すように実際の石垣石を横から油圧ジャッキで載荷を行い、その時の荷重と変位の計測を行った。実験に用いた石材は一般的に「打ち込みはぎ」による石垣に用いられる石材であり、概要は寸法が 50（幅）×70（長さ）×45（高さ）cm で、荷量が 2.6 kN の花崗岩である。また、実験に用いた石材の表面粗さは ISRM 指針に示されている JRC 値にして 6~8 であった。

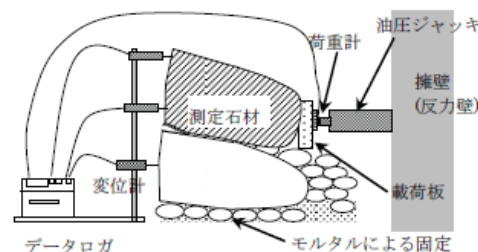


図-1 摩擦試験の概要

3. 石垣石の摩擦実験シミュレーション

DEM 解析における定数値については、摩擦実験を参照しながら決定した（**表-1** 参照）。本研究で用いた DEM 解析法では円形要素を用いるため石垣石の不規則な表面粗さを表現するのが困難である。そこで、本研究では**図-2**に示すように石モデルの表面に不規則な状態で小径の個別要素を付着させることで石表面の形状を表現した。なおこの場合の表面粗さの程度は実験と同じく、JRC 値で 6~8 となるようにしている。**図-3**にシミュレーションと実験結果におけるせん断力と水平変位量の関係を示す。上載荷重を変化させて2ケースの比較検討を行った。シミュレーション結果は実験結果との間に少し差があるものの、ほぼ石垣石間の摩擦特性を表現できているものと考えた。

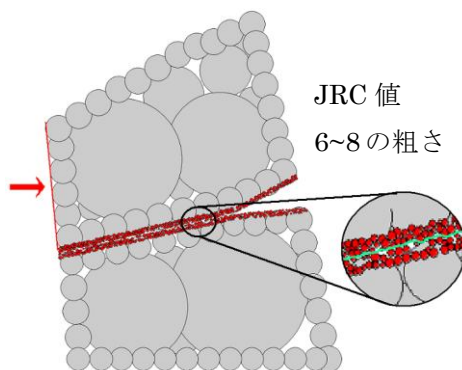


図-2 摩擦試験の DEM 解析モデル

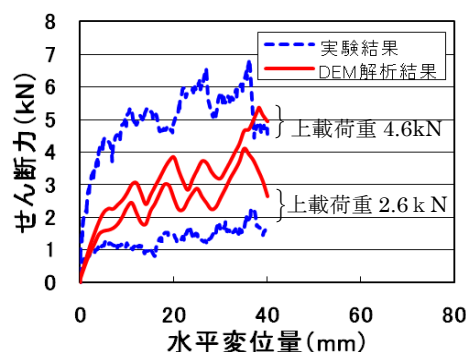


図-3 せん断力と水平変位量の関係

4. 城郭石垣の地震時挙動の解析

摩擦試験シミュレーションから得られた石垣石の表面の粗さと解析の定数値を用いて石垣の地震時挙動の解析を行った。**表-1**に石垣石とともに栗石、背面地盤の定数値を示す。そして解析対象とした石垣モデルを**図-4**に示す。なお、この石垣モデルは昨年実施された実物大の振動実験に用いられたものをモデル化した。解析に用いた振動条件は、正弦波で周波数 3Hz、加速度は 200gal、400gal、500gal、600gal の4ケースである。

加振後の石垣の各高さにおける水平変位量分布（孕み出し形状）を**図-5**に示す。比較のために大型振動実験の結果も示している。この実験結果と比較すると変位量にはまだ大きな差があるが、石垣の孕み出しは良く一致したものとなっている。このことから、地震時の石垣の定性的な変形挙動について考察できると考えた。

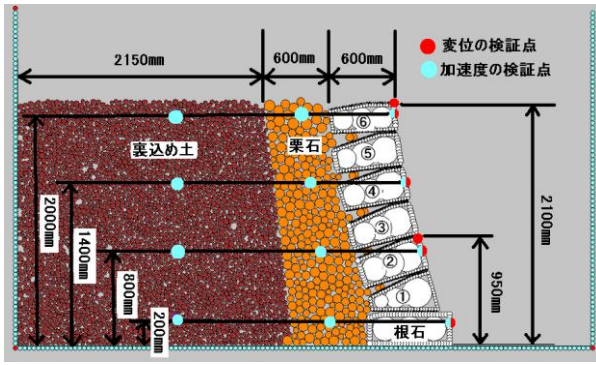


図-4 城郭石垣の DEM 解析モデル

図-6 は DEM 解析における石垣構造各要素の加速度増幅率を示したものである。入力加速度が小さい場合には、石垣石、栗石、裏込め土の増幅率には大きな差がないが 600gal と大きくなると各要素に特有の変化が現れ、石垣の変形形状と栗石における加速度増幅率の形状が類似してくる（図-5 参照）。このことから、石垣の地震時の変形は栗石の動的な影響が大きいといえる。

さらに、石垣の変形には石垣石自身の局所的な変位が影響しているように思われた。そこで、振動前と振動後の石垣石の座標から各々の石垣石の回転角を求めた結果を図-7 に示す。なお、回転角は右回りを正としている。やはり、入力加速度が 600gal と大きい場合には、下から 2 段目と 3 段目の石の間で回転方向が逆転し、これにより石垣の孕み出し変形が助長されたものと考えられる。一般には、地震時の土圧変化が原因で孕み出し変形が生じるものと考えられているが¹⁾、本解析の結果から石垣の孕み出しの原因には石間の相対変位（ずれ変位）だけでなく、石垣自身の回転も要因になっているものと考えられる。

5. まとめ

- 1) DEM解析において、解析モデルに石垣石表面の粗さを考慮することで、石垣石の摩擦特性の表現が可能となった。また、その条件を反映させた城郭石垣構造の解析でも、実験から得られた石垣の地震時挙動を定性的に表現することができた。
- 2) 加速度600galほどの大きな振動になると、石垣の変形挙動は栗石の動的な影響が大きいといえる。
- 3) 一般には、石垣の孕み出しは背後の土圧による影響が大きいとされているが、石垣の回転による影響もあることが分かった。

6. 参考文献

- 1) 西田，西形ら：城郭石垣の安定性に影響する各種要因の検討，土木史研究講演集,Vol.24，2004.

表-1 DEM 解析に用いた各要素の物性値

	石垣石	栗石, 介石	裏込め土
粒径 (mm)		50~110	30~50
密度 (kg/m ³)		2650	2650
kn, ks (N/m)	1×10^5	1×10^5	1×10^5
摩擦係数	1.0	3.0	3.0
粒子間粘着力 (N)	0	0	1×10^2

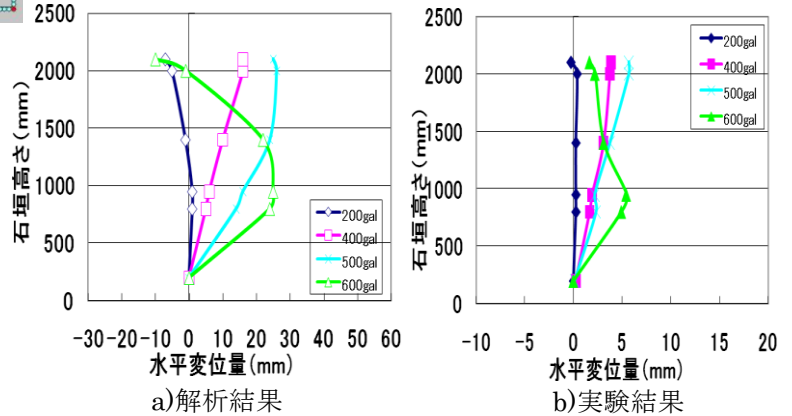


図-5 地震時の石垣の水平変位量

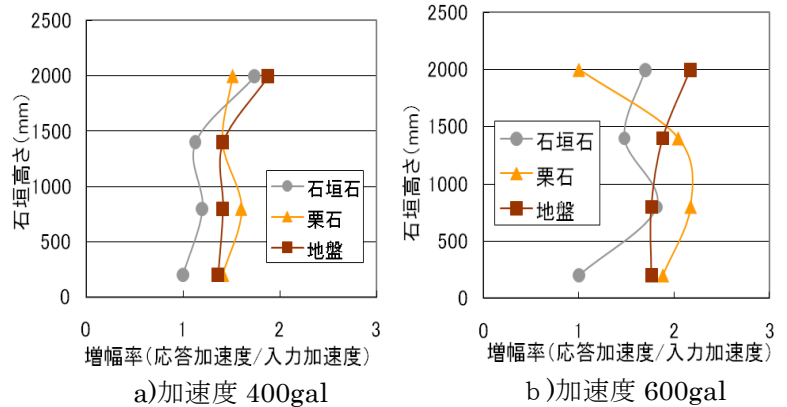


図-6 石垣構造各要素の加速度増幅率

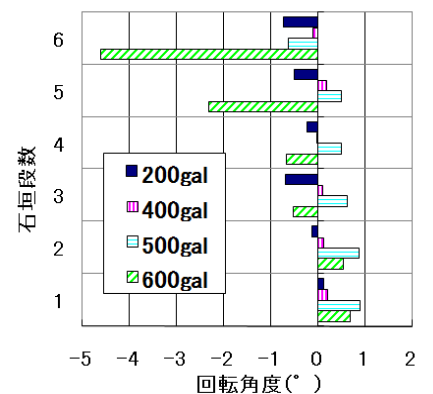


図-7 地震時の石垣石の回転角度