個別要素法を用いた城郭石垣の安定性解析による振動台実験の変形挙動の検討

ハザマ　正会員　○西村　毅，野間　康隆，笠　博義，山本　浩之
関西大学　正会員　西形　達明

１．はじめに

筆者らは、城郭石垣の動的状態での安定性を力学的に評価することを目的として、実物大の石垣の大型振動台実験を実施するとともに、個別要素法（DEM）による解析を実施してきた[1),2)]。石垣の構造は、大きさの異なる石材である築石、栗石および背面の土質材料である地山からなり、その安定性のメカニズムは解明されていない部分が多い。そこで振動台実験を実施することにより、これらの不連続体としての挙動を観察し、入力加速度の大きさにより石垣の変形が転倒モードからはらみ出しモードに変化すること、各材料の応答加速度や位相差に変化があることを明らかにしてきた。

本研究では、実験結果を数値シミュレーションで再現する目的で個別要素法による解析を実施したものである。個別要素法の入力パラメータの決定に際しては、事前に二軸圧縮試験のシミュレーションを行い、石垣材料の物性を反映する入力パラメータを決定した。

２．解析モデル

解析手法としては、個々の要素の接触・分離やすべりを表現できる不連続体解析の一手法である個別要素法のうち円形要素および円形要素の集合体を用いる粒状体個別要素法（解析コード：PFC2D）を使用した。

図-1、**表-1** にそれぞれ、解析モデルおよび入力物性値を示す。石垣構造前面の石材（築石）は、多数の円形要素の集合体であるクランプ要素でモデル化した。クランプ要素では、構成材料となる円形要素の互いの位置関係は固定されており、全体として剛体として挙動するものである。長辺の長さは 600mm 程度の大きさとした。築石背面の栗石は、実際にはさまざまな形状、大きさの小石を敷き詰めたものであるが、扁平な形状のものが多いことから最大直径が 150～200mm となる土星形状要素でモデル化した。土星形状要素は、中央の円形要素とその両側のやや小さい２個の円形要素の集合体からなり、円形要素を用いる場合よりも高い内部摩擦角を表現できる。最背面の地盤部は、直径 25～50mm の大きさの異なる円形要素を用いた。

入力物性値としては、粒子間の粘着力は 0kN とし、粒子間摩擦係数は築石部、栗石部、地盤部でそれぞれ、2.0, 0.65, 0.21 とした。栗石部、地盤部については、事前に二軸圧縮試験のシミュレーションを行い、内部摩擦角 40°,17° に相当する摩擦係数となっている。

解析では、最初の 10 秒間は加振せず、鉛直下方に重力のみを作用させた静的解析を行い、安定した初期状態を作

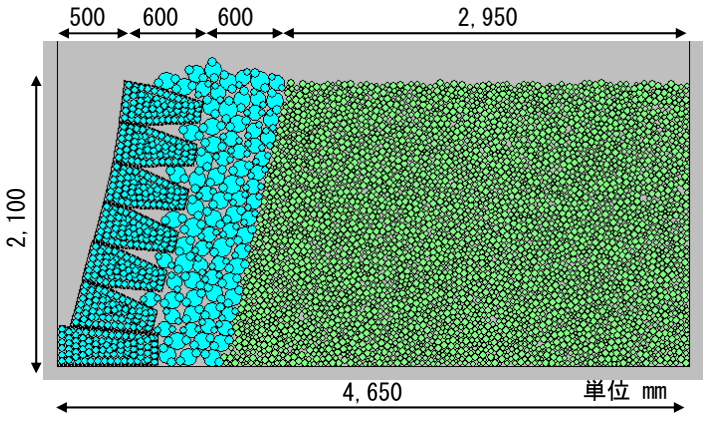

図-1 解析モデル

表-1 入力物性値

	築石部	栗石部	地盤部
要素形状	多数の円形要素の集合体（クランプ要素）	土星状クランプ	円形
寸法（mm）	900程度	最大直径 150～200	直径 25～50
密度（kg/m^3）	2650	2650	2650
法線・接線方向バネ定数(N/m)	1x10^8	1x10^8	1x10^8
法線・接線方向粒子間粘着力(kN)	0	0	0
粒子間摩擦係数	2	0.65	0.21

キーワード　城郭石垣，個別要素法、動的解析、振動実験，
連絡先　〒305-0822 茨城県つくば市苅間 515-1　TEL 029-858-8813，FAX 029-858-8819

り出した。その後は、実験と同様の入力加速度で解析を実施した。すなわち、入力加速度の周波数は 3Hz の正弦波とし、振幅は 223～825gal で徐々に 9 ステップに分けて累積して加えた。各加振ステップでは、20 サイクルずつモデル底面および右側面の境界に入力波を作用させた。各ステップ終了後は 1 秒間の静的解析を実施した後に、次ステップの解析を開始した。

３．解析結果

図-2 に最終ステップ後の変形図、**図-3** に石垣前面の累積残留変位量を示す。図-3 では、左側に振動台実験の結果を示し、右側に個別要素法解析の結果を示した。最終の 825gal 加振後の最大変位は、実験では 59mm、解析では 53mm となり、ほぼ同等の変位量となった。また、両者とも中央部の石垣の変位が大きくなるというはらみ出しの変形モードとなり、個別要素法による解析で振動大実験結果をほぼ再現できたものと考えられる。

ただし、785gal 以下の解析結果でははらみ出しモードは再現できているものの、変位量は実験よりも解析のほうがやや大きくなった。また、実験では 645gal から 688gal の間で転倒モードからはらみ出しモードへ変化することがわかるが、解析ではこの変化が明瞭ではなかった。

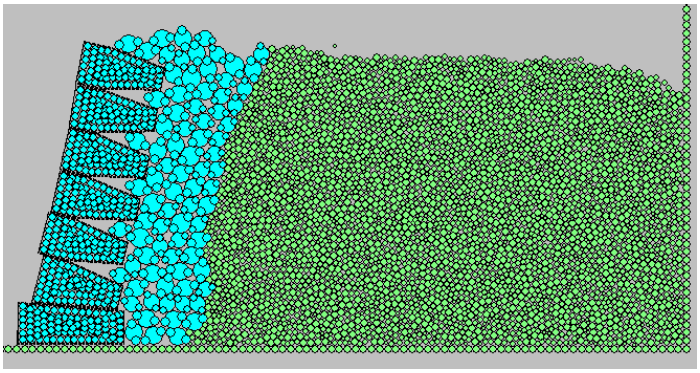

図-2 最終ステップ後の変形図

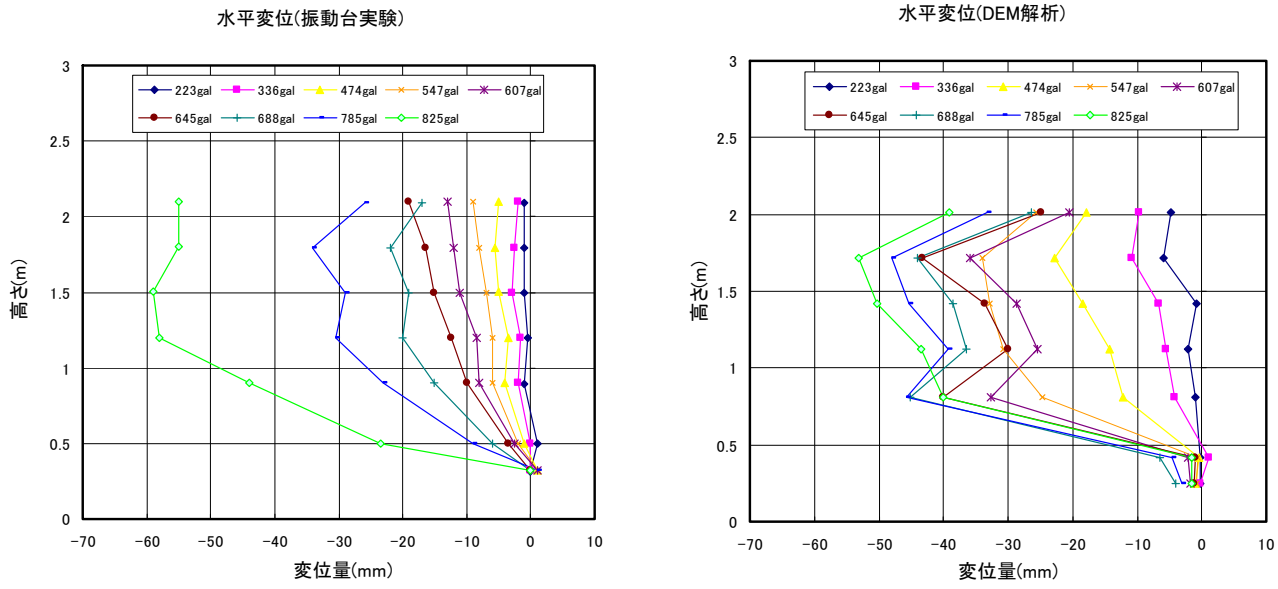

図-3 石垣前面の累積残留変位

４．まとめ

個別要素法を用いた石垣構造の動的解析を実施し、実物大の振動台実験結果の変形状況と比較した。その結果、最終変位量や変形のはらみ出しモードをほぼ再現できる結果が得られた。今後は、解析モデルや入力物性値の検討を進め、より再現性の高い解析を実現したいと考えている。また、実際の石垣構造に解析を適用して安定性の検討を行うとともに、変状メカニズムの原因推定や対策工の計画に利用できる手法として確立させてゆく予定である。

【参考文献】

1) 山本浩之ら：実物大モデルを用いた城郭石垣の地震時挙動の検討,土木学会論文集C,Vol.66,No.1,pp.43-57, 2010.
2) 笠博義ら：個別要素法による城郭石垣の安定性解析の試み，土木学会土木史研究論文集，Vol.27，pp. 45-51，2007