

3 次元多面体要素を用いた DEM による石垣崩壊に対する適用性の研究

法政大学大学院 学生会員 ○森田 大成, 正会員 酒井 久和

1. はじめに

石垣構造物は地震動に対して脆弱な構造をしており、2016年に起きた熊本地震では熊本城の石垣の崩落を含む損傷を受けた。被害を受けた石垣構造物を修復するだけでなく、人命尊重の立場から耐震補強の必要がある。しかし、城郭石垣はそれ自体が文化財であり、現場での実験や損傷を伴う調査は困難であるため、ジオグリッドやアンカーなどの耐震補強を適用した場合の有効性を示す根拠が不足している現状である。対策工の効果を示す方法として DEM (個別要素法) が用いられることが多いが、櫓のように 3 次元効果を考慮する必要がある構造物に対して対策工を施す場合に 3 次元解析はあまり行われていない。そのため、本研究では石垣構造物の 3 次元解析の妥当性を検討することを目的とし、石垣構造物の形状を表現しやすい多面体要素を用いて数値シミュレーションを行う。

2. 研究方法

本研究では、小型石垣模型の積み石の高さを変えた場合の 2 ケースの傾斜実験を実施し、この実験を対象として自由な形状で 3 次元多面体要素を構成することが可能な解析ソフト YADE (Yet Another Dynamic Engine) を用いて再現解析を行う。YADE は個別要素モデルのための拡張可能なオープンソースで構成された解析ソフトであり、C++ 言語で新たなアルゴリズムの実装、Python 言語でシミュレーションの制御を行う。

3. 小型石垣模型の傾斜実験の概要

50mm×60mm×85mm の寸法のレンガを積み石要素として、奥に 2 個、縦に 4 個積んだ場合を CASE1 (図 1 参照)、奥に 2 個、縦に 3 個積んだ場合を CASE2 とする。ここで、両ケースとも根石は傾斜台と固着させる。約 20mm の玉石を栗石要素として、レンガを積んだ高さまで充填させたものを実験モデルとし、毎秒 1 度の傾斜角が発生するようにジャッキで実験モデルを傾斜させる。



図 1: CASE1 の実験モデル

4. 数値シミュレーション

4.1 解析パラメーター

傾斜・平面台の木材の弾性係数は澤田¹⁾の試験値を用いると積み石要素が発散するため試験値の 1/5 とした。アクリル板の弾性係数は試験値では解析が途中で実行停止されるため値を 1/10 の値に低減した。ここで、摩擦が生じる運動は弾性係数よりも摩擦係数の影響が大きいため、弾性係数を低減させても影響は少ないと考えた。また、すべてのシミュレーションにおいて減衰定数は 0.3、計算時間間隔は 2.5×10^{-5} 秒とした。

表 1: 解析パラメーター

	栗石	積み石	傾斜台	アクリル板
密度 (kg/m ³)	2,500	2,160	400	1,190
弾性係数 (KN/m ²)	1.62×10^4	5.00×10^6	2.00×10^5	3.00×10^5
ポアソン比	0.3	0.22	0.5	0.35
摩擦係数	30.8 (内部摩擦角)	0.86	0.70	1.00×10^{-2}

キーワード 3次元 DEM オープンソースフレームワーク 傾斜実験 数値シミュレーション

連絡先 〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33 法政大学デザイン工学研究科 TEL03-5228-1347

4.2 解析モデル

解析モデルの積み石は直方体とし、栗石はサイズ指定してランダムな形状で作成した。YADE では指定した体積を満たすように要素を密に配置するモジュールが存在しないため、栗石を自由落下によって充填させたシミュレーションを行い、初期状態とした（図2参照）。また、YADEのRotationEngineを用いて傾斜台モデルを傾斜させるプログラムを作成し、解析時間の短縮のため、角速度は開始から2秒間は毎秒5度、以降は毎秒1度の角速度になるように設定した。

4.3 傾斜解析結果

<CASE1>

実験と比べて、崩壊前に積み石は滑り出し栗石が沈下しているが、実験と同様に積み石が一体化したように崩壊する挙動は再現できている。また、図3より、解析の積み石の残留状態は実験とほぼ同様の傾向を示しており、表2より、すべての積み石の変位量が非常に整合した結果となった。ただし、崩壊に至った傾斜角は解析が約1割小さい値であった。

<CASE2>

解析モデルの積み石の変位と栗石の沈み込みは実験より大きいが同様な挙動をしており、積み石が一体化したように崩壊する挙動も実験を再現できた。また、図4より、崩壊後の状態として解析では、栗石が積み石の間に入り込む状態と根石の背面側の栗石が傾斜角よりも大きな角度を持つ表面形を保つ状態が再現されている。表3より、2つの積み石の変位は近い値であるが、崩壊に至った傾斜角はCASE1とは逆に約1割大きい値になった。

5. まとめ

本研究では小型石垣模型の傾斜実験を行い、YADEを用いて実験に対する3次元多面体要素のDEMによるシミュレーションを行った。解析では崩壊に至った傾斜角は約1割異なったが、全積み石の変位量、積み石と栗石の残留状態を高精度で再現することができた。ただし、解析モデルの積み石の滑りを過大評価したため、物的噛み合わせを再現するモデルの形状を検討する必要がある。また、本研究の数値シミュレーションでは3次元効果を示すまでに至っていないため、3次元効果を考慮すべきモデルに対して数値シミュレーションを行う予定ある。

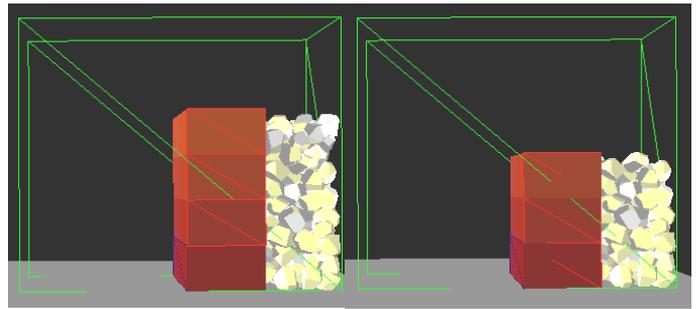


図2：解析モデル（左：CASE1，右：CASE2）

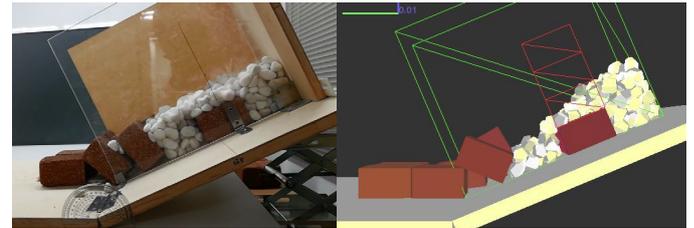


図3：CASE1の崩壊後（左：実験，右：解析）

表2：CASE1の変位と崩壊角度

積み石の番号		1	2	3	4
基準からの変位 (cm)	解析	0	16.0	24.5	31.0
	実験	0	16.0	23.5	31.5
崩壊傾斜角 (°)	解析	20.6			
	実験	23.2			

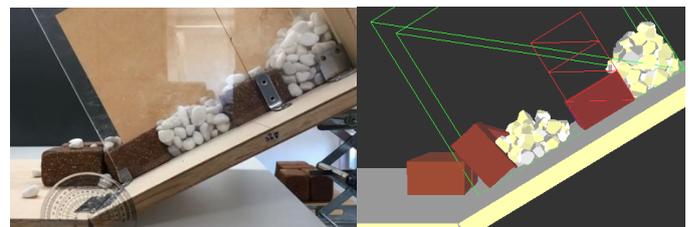


図4：CASE2の崩壊後（左：実験，右：解析）

表3：CASE2の変位と崩壊角度

積み石の番号		1	2	3
基準からの変位 (cm)	解析	0	17.5	25.0
	実験	0	18.5	28.0
崩壊傾斜角 (°)	解析	29.7		
	実験	26.2		

参考文献

- 1) 澤田稔：木材の変形挙動，日本材料学会，材料 32 巻，第 359 号，pp.838-847，1983.