

# 3次元DEMによる石垣崩壊崩 に対する適用性の研究

森田 大成<sup>1</sup>・大塚 鎮<sup>2</sup>・酒井 久和<sup>3</sup>・小野 祐輔<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 法政大学大学院 デザイン工学研究科 都市環境デザイン工学専攻

(〒162-0843 東京都新宿区市ヶ谷田町 2-33)

E-mail: taisei.morita.3c@stu.hosei.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東電設計株式会社 土木本部 耐震技術部 設計高度化グループ

(〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 KDX 豊洲グランスクエア 9階)

E-mail: mamoru-otsuka@tepsco.co.jp

<sup>3</sup>正会員 法政大学教授 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科

(〒162-0843 東京都新宿区市ヶ谷田町 2-33)

E-mail: hisakai@hosei.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 鳥取大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

(〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101)

E-mail: ysk@tottori-u.ac.jp

2016年熊本地震では熊本城の石垣や櫓は崩落を含む甚大な損傷を受けた。熊本市は地震に対する補強も考慮しているが、対策工を適用した場合の耐震補強効果を示す根拠が不足している。補強効果を定量的に示す方法としてDEM（個別要素法）を用いる事例はあるが、石垣や櫓のように3次元効果を考慮すべき構造物に対して対策工を適用した場合の3次元解析はほとんど行われていないのが現状である。

本研究では3次元DEM解析ソフトYADEを用いて、石垣構造物に対する解析の妥当性を検討した。まず、解析対象として傾斜実験・振動実験・安息角試験を実施した。次に各実験に対して数値シミュレーションを行い、実験結果との比較を行った。結果、各実験を整合する解析結果が得られた。

**Key Words:** DEM, inclination tests, shaking table tests, YADE, 3-dimensional analysis, numerical simulation

## 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4月14日、16日に起きた熊本地震では、熊本城石垣の50箇所が崩落に至り、重要文化財に指定されている建物全13棟が倒壊を含む損傷を受けた<sup>1)</sup>。熊本城は国の特別史跡に指定されており、その復旧にあたり文化的価値を損なわないよう地震前の状態に復元するのを原則とされているが、年間200万人近い観光客が訪れることから安全性確保のために耐震補強を行う必要がある。しかし、対策工を適用した場合の耐震補強効果を定量的に示す根拠がないのが現状である<sup>2)</sup>。

耐震補強効果を定量的に示す方法として数値解析が多数用いられている。野間ら<sup>3)</sup>は実物大城郭石垣モデルを

用いた振動台実験<sup>4)</sup>に対して個別要素法（Distinct Element Method: DEM）を用いた解析を行い、城郭石垣の変形から崩壊に至る過程を定量的に予測できる可能性を示している。笠ら<sup>5)</sup>は吉田城の石垣補修工事を事例に対して、石材の個別要素法を用いた解析モデルの構築方法の提案、補修工事による安定性向上効果の検討を行った。結果として、限定された1つの解析モデルの検討結果ではあるが、静的な条件下および地震動を加えた条件での石垣の推定することによって、補修工事が石垣の安定性を向上させる効果があることを示した。村上ら<sup>6)</sup>は2次元拡張個別要素法（2-Dimensional Extended Distinct Element Method: 2D-EDEM）を用いて石垣構造物の地震応答解析を行い、アンカーを用いた耐震補強策の有効性を示した。しかし、この研究では江戸城外郭の石垣を対象としたものに留ま

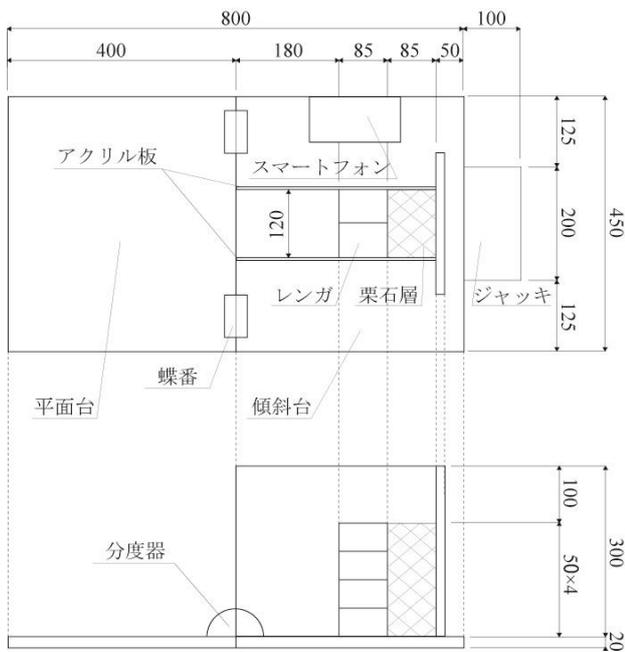


図-1 実験台の概略図 (mm)

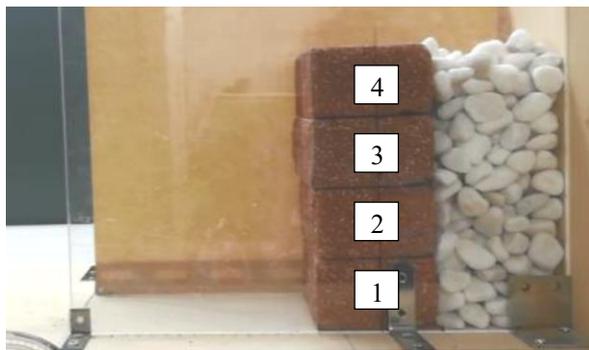


写真-1 小型石垣模型の傾斜実験のモデル (Case1.1)

っており、一般的な石垣破壊の挙動把握の段階まで至っていない。また、2次元解析では石垣の断面が一様に続く場合には適しているが、熊本城の石垣や櫓のように3次元効果を考慮する必要がある構造物に対して2次元解析を行うと解析精度が極めて悪くなる。そのため、3次元解析を行う必要があるが対策工を適用した石垣や櫓に対して3次元DEMによる研究は、伊吹<sup>7)</sup>の研究を除いてほとんど行われていない。しかし、伊吹の研究では3次元ブロックDEMプログラム上で直方体要素のみを扱うことを想定しているため、さまざまな形状の積み石に対応可能ではない。

そこで、本研究では解析ソフト YADE (Yet Another Dynamic Engine)<sup>8)</sup>を用いて、石垣構造物に対する3次元解析の妥当性を検討する。YADEは離散要素モデルに焦点を当てた拡張可能なオープンソースで構成された解析ツールである。本研究では、解析の妥当性を示すため、小型石垣模型の傾斜実験、玉石の安息角試験、積み木を用いた模型振動実験を実施した。実施した実験と試験に

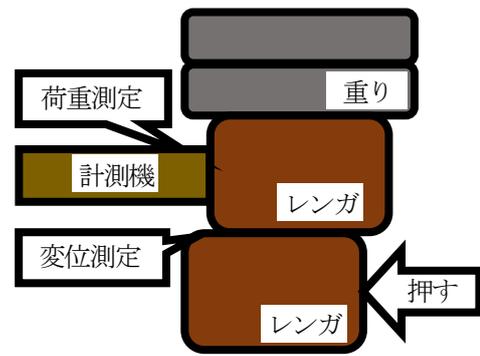


図-2 摩擦試験の概要

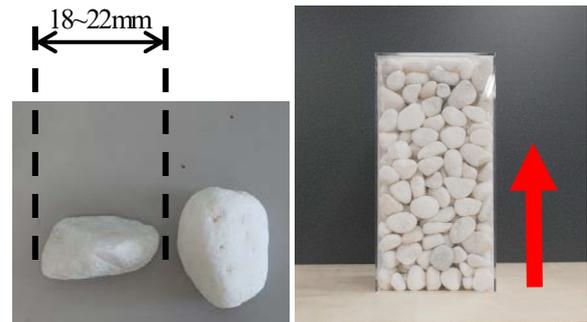


写真-2 安息角試験に使用した礫試料

対して多面体モデルとクランプモデルでの数値シミュレーションを行い実験・試験結果との比較を行う。

## 2. 小型石垣模型の傾斜実験

### (1) 使用器具

本実験では、土台と背面を木材、側面はアクリル版を用いて作成した実験台を図-1に示す。plaincode社の傾斜計アプリ Clinometer とストップウォッチを確認しながら、小型ジャッキを使用して毎秒1度の傾斜角が発生するに実験台を傾斜していく。

### (2) 実験ケース

本実験では、小型石垣模型の積み石要素として50mm×60mm×85mmの寸法のレンガ、栗石要素として18mm-22mmの玉石を用いる。レンガを2×4個積んだ場合をCase1.1、2×3個で積んだ場合をCase1.2とし、レンガの天端高さまで玉石を自由落下で充填させた実験モデルを写真-1に示す。一番下のレンガ(根石)は固定し、下から順にレンガに番号を付ける。初期位置からの変位を測定するために、アクリル板に基準線を引いた。

### (3) レンガの摩擦試験

レンガ間の摩擦係数の取得を目的として摩擦試験を実施した。試験は図-2に示すように2つ重ねたレンガの上に重りを載せ、下のレンガを万力でゆっくり押し出し変



写真-3 安息角の測定位置

表-1 安息角試験の結果

	安息角(°)
10回の平均	30.75
標準偏差	1.4

位及び荷重を計測する。また、重りの質量は1.009kg, 2.018kg, 4.026kgの3ケースであり、計測した変位及び荷重を用いて荷重と変位の関係から摩擦係数を得る。それぞれのケースで3回実施した試験で得られた摩擦係数の平均値は0.86であり、これをすべてのレンガの摩擦係数とする。

#### (4) 玉石の安息角試験

栗石要素として用いる玉石の安息角の取得を目的として安息角試験を実施した。試験は写真-2のように、縦10cm×横10cm×高さ20cmの亚克力ボックスに粒径18~22mm程度の玉石（やや扁平の物有り）を密に詰め、木板上で引き抜いた後の玉石の傾斜角を計測する。計測は写真-3に示すように、4方向から安息角を計測した。試験は計10回行い、全ケースの平均を解析に用いる安息角とし、その結果及び安息角の標準偏差を表-1に示す。

#### (4) 実験結果の整理

実験結果として、実験モデルの最終的な状態、崩壊後の基準線からのレンガの変位（基準線と垂直の方向）及び崩壊した際の角度をケースごとに整理する。なお、実験はレンガの崩壊が開始する時点まで傾斜を行っており、変位は0.5cmごとに概算して測定した値を用いる。

### 3. 安息角試験の数値シミュレーション

本研究ではYADEを用いてDEM解析を行う。YADE

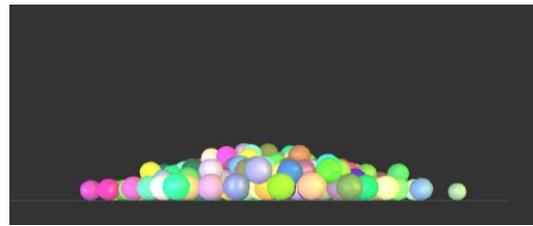
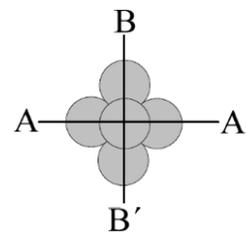
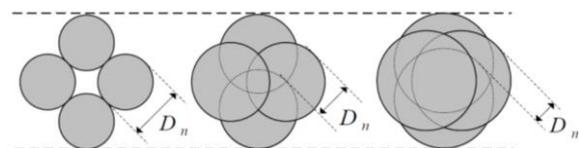


図-3 単一粒子による解析



(a)基本形状



(b)重複程度

図-4 クランプモデルの凸度<sup>9)</sup>

は2004年に最初のバージョンがリリースされ、Gitlab上でソースコードが公開されている。C++言語で新たなアルゴリズム実装など計算に関わる部分を記述し、Python言語でシミュレーションのセットアップ、制御などを行う。PraViewなどの一部の外部プログラムと互換性があることやSTLファイルやCSVファイルといった一般に使用されやすい形式のデータをインポート可能である。

YADEでは解析モデルを構成する要素として球形要素や多面体要素などの単体だけでなく、それら要素の集合体で作成することも可能である。

#### (1) 解析モデル

YADEでは栗石のような粒状体を特定の形状に詰めるには、pack moduleを用いることで指定した領域に要素をパッキングすることができる。しかし、内部摩擦角30度の単一粒子を用いた粒状体モデルによる解析では、図-3に示すように安息角が20度となった。既往研究でもDEMでは単一粒子による粒状体解析では所定の内部摩擦角の特性を表現できないという報告がされている<sup>9)</sup>。

そこで、堀口<sup>9)</sup>らは、安息角の主要な支配因子となり得る要素の凹凸形状に着目し、3次元において長さ、幅及び高さを任意に変化させることができる最小球数である、6個の球形要素による集合体（以降クランプモデル）を用いて、凹凸度の変化が解析結果の安息角に及ぼす影響についての考察を行った。クランプモデルの基本形状は図-4のように表され、重複していない部分が球の

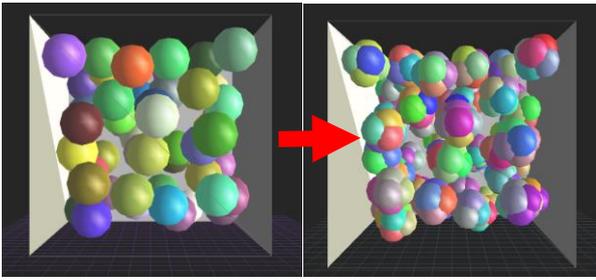


図-5 単一粒子をクランプモデルに置き換え

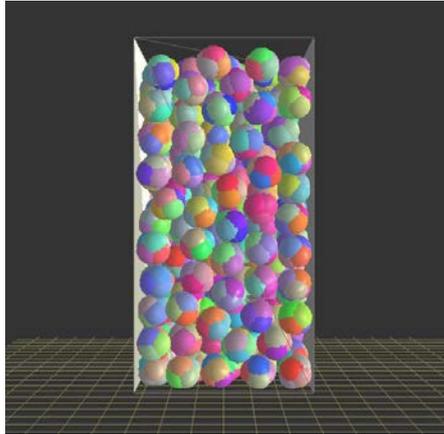


図-6 安息角試験の解析モデル

表-2 解析ケース

	凸度 $\beta$	seed 値
Case2.1	0.328	1~10
Case2.2	0.5	

直径  $D$  に対してどの程度凸部を形成しているかを表すパラメータとして、凸度を (1) 式で表している。

$$D_n = \beta D \quad (1)$$

ここで、 $D_n$  は非重複領域の長さ、 $\beta$  は凸度を表すパラメータ (0.0~1.0)、 $D$  は球形要素の直径である。

この解析によって安息角  $\theta$  と凸度  $\beta$  に相関関係が明確となり、(2) 式のような関係式が提案された。

$$\theta = 60.0\beta^{0.60} \quad (2)$$

本研究ではこの提案式を用いてモデルの作成を行う。しかし、YADE では堀口らが提案したようなクランプモデルの実装はされていないが、直接クランプモデルを指定した領域にパッキングできない。そこで、事前にクランプモデルを作成し、要素を事前作成した要素に置き換える `replaceByClumps` を使用することで図-5 に示すようにクランプモデルでパッキングを可能にした。パッキングしたクランプモデルの自重解析を行い、微振動を与え要素

表-4 各ケースの安息角

	Case2.1	Case2.2
seed 値 1~10 の平均	30.70	35.63
標準偏差	0.8	1.4
試験値との差	-0.05	+4.88

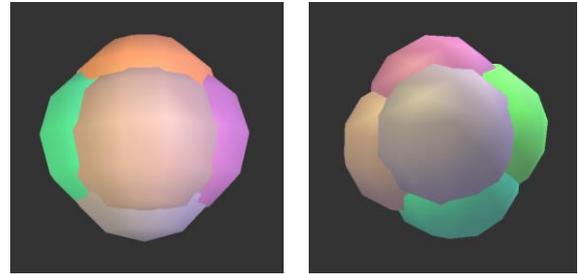


図-7 クランプモデル (左: 凸度 0.328, 右: 凸度 0.5)

表-3 解析パラメータ

	玉石	アクリルボックス	木板
弾性係数(kN/m <sup>2</sup> )	$1.62 \times 10^4$	$3.00 \times 10^6$	$1.00 \times 10^6$
ポアソン比	0.3	0.35	0.5
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2500	1190	800
摩擦係数	30.75 (内部摩擦角)	0	0.4
減衰係数	0.8		
計算時間間隔(s)	$5.0 \times 10^6$		

を密に詰めることによって、実施した試験と同様の条件クランプモデルでパッキングを可能にした。パッキングしたクランプモデルの自重解析を行い、微振動を与え要素を密に詰めることによって、実施した試験と同様の条件となるように解析を行う。なお、要素の初期配置は `pack module` 中で seed 値なる変数を変更することでランダムに設定される。得られた解析モデルを図-6 に示す。

## (2) 解析ケース

解析ケースを表-2 に示す。クランプモデルの凸度  $\beta$  は、安息角 30.75 度として (2) 式より算出した 0.328 と比較のため凸度 0.5 の 2 ケースとしたモデルを図-7 に示す。また、各ケースにおいてパッキングの際に異なる初期配置が解析結果に及ぼす影響を確認するために seed 値が 1~10 の解析を行った。

## (3) 解析パラメータ

解析に用いたパラメータを表-3 に示す。玉石の弾性係数とポアソン比は伊吹<sup>7)</sup>が設定した値、密度は密度試験より、内部摩擦角は試験で得られた値を用いる。アクリルボックスのパラメータは製造会社の三菱レイヨン<sup>11)</sup>の公称値、木板のパラメータは澤田<sup>11)</sup>の研究で得られた値、

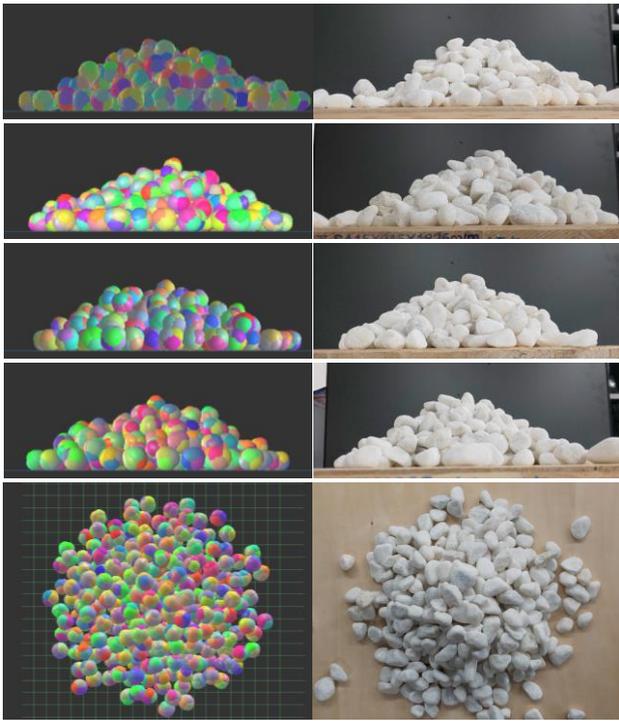


図-8 Case2.1と実験結果の比較 (seed1)

摩擦係数については孟ら<sup>13)</sup>の研究を参考に決定した。YADE では法線及び接線方向のばね定数 $K_n$ 、 $K_s$ は、弾性係数とポアソン比を用いて決定する<sup>14)</sup>。ここで、2つの要素1と2を考えた場合、要素間のばね定数はそれぞれ式より与えられる。

$$K_n = \frac{E_1 l_1 E_2 l_2}{E_1 l_1 + E_2 l_2} \quad (3)$$

$$K_s = \frac{\nu_1 k_{n1} \nu_2 k_{n2}}{\nu_1 k_{n1} + \nu_2 k_{n2}} \quad (4)$$

ここで、添え字1, 2は要素1, 2を意味し、 $E$ は弾性係数、 $\nu$ はポアソン比、 $l$ は重心から接点のまでの距離、 $k_n$ は法線方向のばね定数を表す。

#### (4) 解析結果

試験と同様に各 seed 値において4方向から安息角を計測し、得られた安息角の平均を各ケースの安息角とする。凸度を0.328としたCase2.1の安息角試験の解析及び試験の残留状態を図-8に示す。また、各ケースの全 seed 値の安息角の平均値、標準偏差、試験値との差を表-4に示す。表-4より、安息角30.75度として(2)式より算出した凸度0.328としたCase2.1の解析では試験との安息角の差が-0.05度と非常に近い結果が得られた。次に、比較のために実施した凸度0.5としたCase2.2の解析では、試験との安息角の差が+4.88度と大きくなる結果となった。そして、単一粒子となる凸度0では試験値より約10度安息角が過小評価されており、凸度に応じて安息角が大きくなることが確認できた。また、異なる seed 値で詰め方の

表-4 各ケースの安息角

	Case2.1	Case2.2
seed 値 1~10 の平均	30.70	35.63
標準偏差	0.8	1.4
試験値との差	-0.05	+4.88

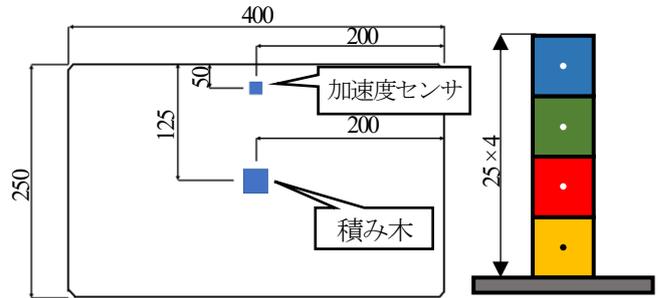


図-9 小型振動台の概要と初期状態 (mm)

初期パターンを変更しても解析結果に大きな違いがないことから、球形要素のクランプモデルを用いた安息角試験のシミュレーション解析の妥当性が確認されたと考える。

### 3. 模型振動実験の数値シミュレーション

大塚ら<sup>15)</sup>は多面体要素を用いて積み木の模型振動実験の数値シミュレーションを実施し、実験を高精度に再現した。本章では、この模型振動実験に対して球形要素のクランプモデルを用いて数値シミュレーションを行い、実験結果と比較することでクランプモデルの妥当性を検討する。

#### (1) 模型振動実験の概要

実験では誠研社のパルスモーターサーボ式小型振動台を使用した。加速度センサは東京測器研究所のARF-50Aを用いる。解析対象は積み木表面が塗装されており摩擦係数のばらつきが小さく、計算負荷の小さい一辺25mmの立方体の積み木を4個重ねたケースとする。加速度センサ及び実験に用いる積み木の設置位置と実験の初期状態を図-9に示す。

撮影はデジモ社の高速度ビデオカメラVCC-H300を用いて撮影を行う。撮影コマ数90コマ/秒で512×512画素での撮影を行うことが可能であり、撮影した動画は動画解析ソフトイメージトラッカー(PTV)を用いて積み木の挙動を追跡し変位を求める。

#### (2) 解析モデル

YADEには設定した半径の球形要素を指定した領域内を六方最密充填構造の配列方法で満たすことができるモ

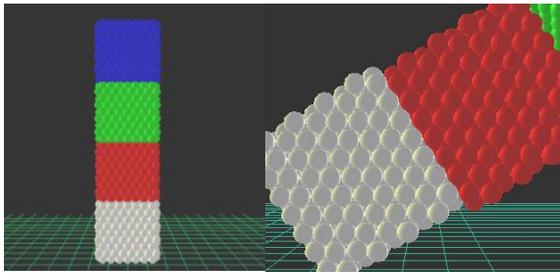
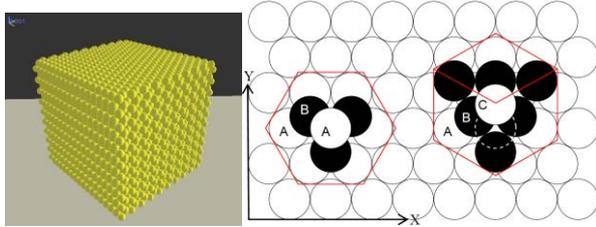


図-10 モジュールで作成したモデルと要素同士の噛み合わせ



(a) モジュール作成のモデル (b) 球形要素の密な配置<sup>16)</sup>

図-11 積み木モデルの球形要素の配置

ジュールが存在する。しかし、このモジュールを用いて積み木のクランプモデルを作成して地震波を与えると図-10に示すようにモデル間で要素同士が噛み合いモデルが一体となって転倒した。DEMはモデルの形状による影響を受けるため、噛み合わせ効果を低減しないと滑動表現を再現できず、実際の挙動と異なる可能性がある。

そこで、球形要素による噛み合わせ効果の低減を目的として、実施した振動実験を対象に積み木モデル間の要素が噛み合い難くなるように隣接するモデルの要素半径を変えて解析を行う。

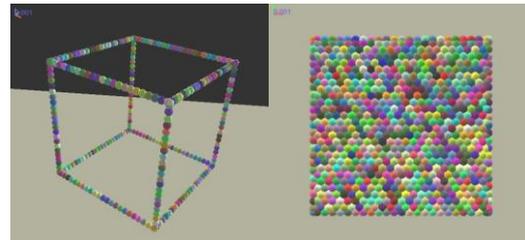
#### a) 表面要素の配列

YADEの六方最密充填構造の配列方法のモジュールで積み木モデルを作成すると、底面から順番に球形要素を配列させているため図-11(a)に示すように上面より側面の表面形状の方の凹凸が大きくなる。この形状を石垣の積み石要素などに用いると、上下と左右で隣接するモデルの摩擦特性が大きく異なると考えられる。

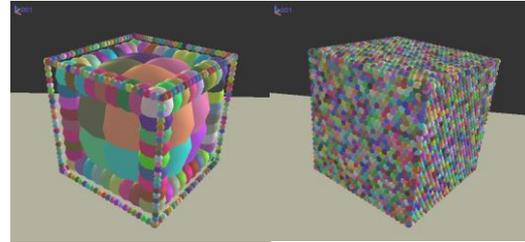
そこで、図-11(b)に示す隣接する要素の中心を結ぶと正六角形となるような配列方式を全6面に適用させるプログラムを新たに構築する。橘ら<sup>17)</sup>が3次元DEMのクランプモデルの形状精度指標の1つと要素重合比(OverlapRatio: OR)を(5)式で表している。

$$OR = \frac{d}{L} \quad (5)$$

ここで、 $d$ は球形要素の直径、 $L$ は隣接する要素の中心間距離であり、値が大きいほど形状精度が高いことを意味する。本研究でも要素を配列させる際の要素間距離の指標として、この要素重合比を用いる。



(a) 頂点と辺の要素配置 (b) 面の要素配置



(c) 内部の要素配置 (e) 全体の要素配置

図-12 積み木の解析モデル

表-5 各ケースの段ごとの要素半径と重合比

	奇数段の半径 (mm)	偶数段の半径 (mm)	要素重合比	要素数
A-1	0.7	0.6	1.143	13,145
A-2	0.7	0.6	1.000	10,297
B-1	0.8	0.7	1.143	9,737
B-2	0.8	0.7	1.000	7,729
C-1	0.9	0.8	1.143	7,577
C-2	0.9	0.8	1.000	6,105
D-1	1.0	0.9	1.143	6,065
D-2	1.0	0.9	1.000	4,813
E-1	1.1	1.0	1.143	4,925
E-2	1.1	1.0	1.000	3,921

まず、立方体の角頂点に要素を配置し、辺に要素を等間隔で配置したモデルを図-12(a)に示す。次に、立方体の全6面に図-11(b)の配列方式で、隣り合う全ての要素が密着するように同一径で要素重合比を調節して配列させたモデルを図-12(b)に示す。

#### b) 内部要素の配置

図-12(c)に示すように解析モデルの内部には、半径を立方体の辺長の3/4とする球形要素を対角にある要素以外は均等に重なり合うように配置し、辺付近の隙間を埋めるようにさらに球形要素を重なり合うように配置した。積み木のクランプモデルを図-12(e)に示す。なお、完成したモデルの充填率は96%である。

### (3) 解析条件

隣接する積み木モデルの要素半径と要素重合比をそれぞれ変更させた解析ケースを表-5に示す。また、積み木モデルの質量及び密度を表-6に、解析条件と物性値を表-7に示す。ただし、実際の密度を適用させると積み木モ

表-6 積み木モデルの質量及び密度

	質量 (g)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
黄	9.9	633.60
赤	11.0	704.64
緑	11.1	711.68
青	10.3	657.92

表-7 解析パラメータ

弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比	減衰係数	摩擦係数	計算時間 間隔(s)
1.303×10 <sup>6</sup>	0.5	0.03	0.151	4.0×10 <sup>-7</sup>

表-8 模型振動実験の解析結果

実験	転倒時の角 (°)	0.8秒時の実験との変位差 (mm)		
		赤	緑	黄
A-1	17.5	-1.665	0.322	1.906
A-2	16.9	-1.494	-0.223	1.890
B-1	18.5	-1.653	0.978	3.918
B-2	14.7	5.328	0.986	-1.425
C-1	20.0	-1.196	1.683	5.643
C-2	17.9	-2.477	-0.050	4.133
D-1	20.7	-1.127	2.235	6.280
D-2	12.5	-4.165	-3.262	-0.970
E-1	12.6	-4.012	-2.225	0.009
E-2	10.7	-6.465	-7.411	-2.904

デルの充填率が 100%に満たないため質量が少なくなる。そこで、モデルの質量が実際の質量に対して誤差 1%未満になるように粒子密度を調整したため、表-6の積み木密度とは見かけ上の密度である。また、大塚ら<sup>15)</sup>が構築した要素に外力を与える関数を使用した地震動プログラムは計算コストが高く、クランプモデルに対して過度な力を与えるため毎ステップごとに直接加速度を変更する様に改良した。

#### (4) 解析結果

実験と各ケースの解析と 0.8 秒の転倒時の角度と実験との変位差を表-8に示す。表-8より、要素半径が小さく、要素重合比が大きいモデルほど噛み合わせ効果が低減される傾向が確認できた。CaseA-1の転倒時の角度は実験結果に最も近い値ではないが、全体的な変位では最も実験に整合する結果となった。CaseA-1の変位の時刻歴と挙動を実験結果とともに以下に示す。ここで、変位は黄色の積み木を基準とした相対変位（右方向：正，左方向：負）である。

図-13より、解析と実験では0.2-0.55秒まで全積み木の変位が約1mmとほぼ一致し、0.55秒以降の変位も非常に実験と整合している。図-14に示した各時刻の積み木の挙動を見ると積み木間のずれの程度から左方向へ倒れるまで、ほぼ完全に一致していることが確認できる。

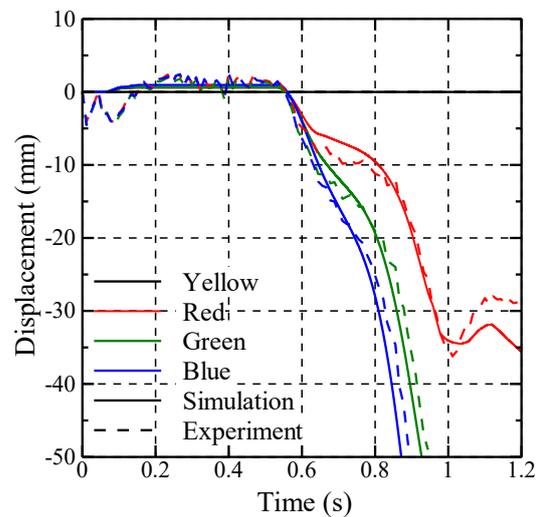
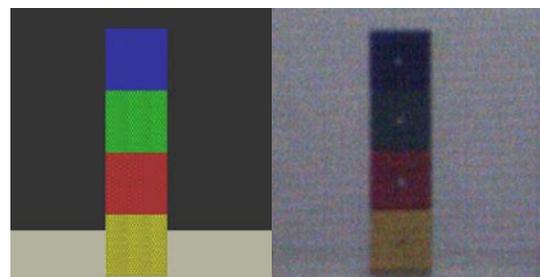
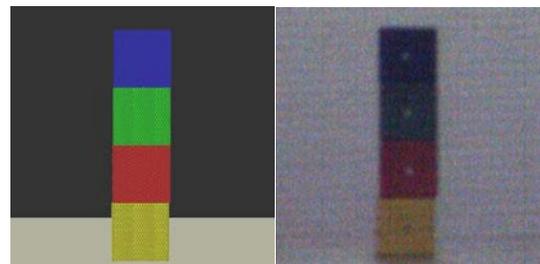


図-13 変位の時刻歴



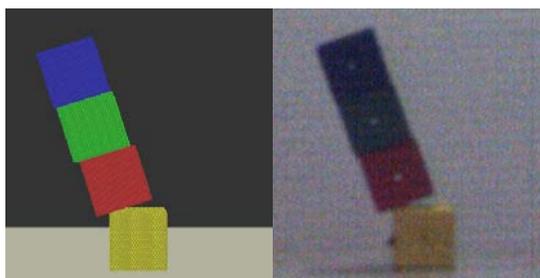
(a)初期状態



(b)0.2秒時



(c)0.6秒時



(d)0.8秒時

図-14 CaseA-1積み木の挙動 (左:解析, 右:実験)

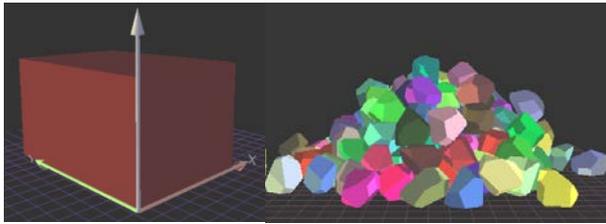


図-15 多面体のモデル (左: レンガ, 右: 玉石)

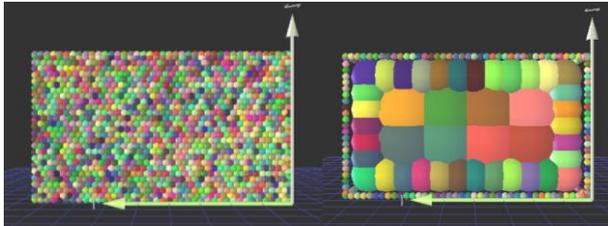


図-16 レンガモデルの球形要素配置 (左: 表面, 右: 内部)

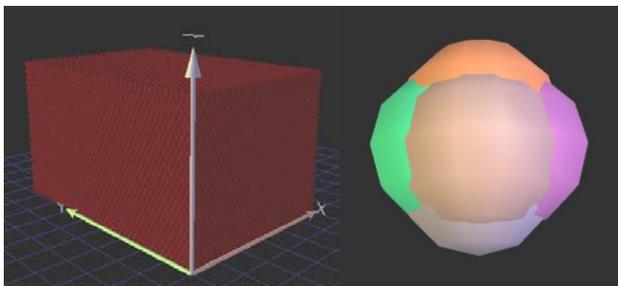


図-17 球形要素のクランプモデル (左: レンガ, 右: 玉石)

#### 4. 小型石垣模型の傾斜実験の数値シミュレーション

##### (1) 解析モデル

実験に使用したレンガと玉石を球形要素のクランプモデルと多面体要素で作成した2種類の要素タイプで解析を行う。

##### a) 多面体モデル

寸法を指定して作成したレンガのモデルと 18~22mmのサイズを指定してランダムな形状で作成した玉石のモデルを図-15に示す。

##### b) クランプモデル

図-16に示すように表面を積み木クランプモデルと同じ配列方式でレンガモデルを作成した。ここで、模型振動実験の数値シミュレーションにおいて最も形状精度が高い CaseA-1 の球形要素の半径と立方体の辺長の比を採用した。そのため、レンガの最短の1辺は 50mm であることから、球形要素の半径は 1.2mm とした。また、内部要素は半径を直方体の最短の辺長の 3/4 とする球形要素を上下左右に隣接する要素と重なり合うように配置し、辺付近の隙間を埋めるようにさらに球形要素を重なり合

表-9 解析ケースの概要

	レンガの個数	奇数段の半径	偶数段の半径
CaseP-1.1	2×4	単体の要素	
CaseP-1.2	2×3		
CaseC-1.1	2×4	1.2 mm	1.1 mm
CaseC-1.2	2×3	1.1 mm	1.2 mm

表-10 小型石垣模型の傾斜実験の解析パラメータ

	玉石	レンガ	木材	アクリル板
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2,500	2,160	900	1,190
弾性係数 (KN/m <sup>2</sup> )	1.62×10 <sup>5</sup>	2.50×10 <sup>6</sup>	2.00×10 <sup>6</sup>	3.00×10 <sup>6</sup>
ポアソン比	0.3	0.22	0.5	0.35
摩擦係数	30.75 (内部摩擦角)	0.86	0.4	0
減衰定数	0.3			
計算時間間隔	5.00×10 <sup>6</sup>			

うように配置した。レンガのクランプモデルを図-17に示す。なお、完成したモデルの充填率は96%である。

また、傾斜実験と安息角試験に使用した玉石は同じである。安息角試験の数値シミュレーションで使用した凸度 0.328 の玉石モデルを図-17に再掲する。

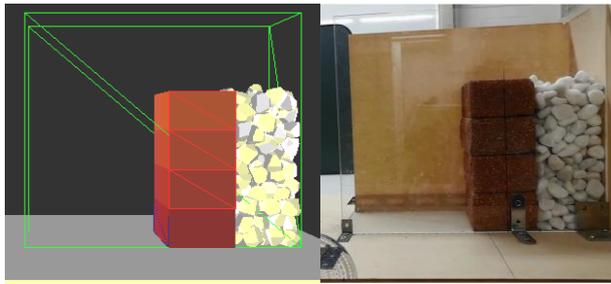
##### (3) 解析条件

##### a) 解析ケース

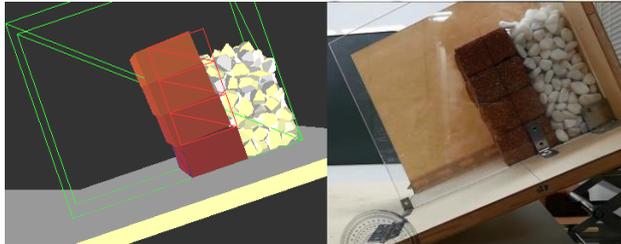
各ケースの概要を表-9に示す。ここで、多面体 (Polyhedra) モデルを使用する場合は CaseP、クランプ (Clump) モデルを使用する場合は CaseC とする。ただし、表-9の CaseC では図-20-21 で手前に積んだレンガモデルの球形要素の半径を示している。手前と奥で隣接するレンガモデルの球形半径が同じであると図-10で示したようにモデル間で要素同士の噛み合いが発生する可能性があるため、奥に積んだレンガの球形要素段ごとの半径は手前に積んだレンガの奇数・偶数段の球形要素半径が逆になるように設定した。

##### b) 解析パラメータ

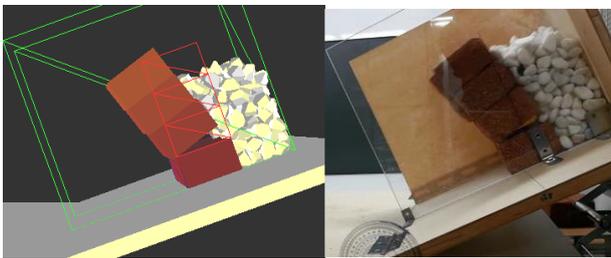
小型石垣模型の傾斜実験の数値シミュレーションの解析パラメータを表-10に示す。玉石とアクリル板の物性値は安息角試験の数値シミュレーションの設定値を用いる。レンガの密度と摩擦係数は試験値、弾性係数は渡辺ら<sup>18)</sup>の試験値、ポアソン比は松田ら<sup>19)</sup>が取得した値を用いる。木材のポアソン比は澤田<sup>12)</sup>の研究で得られた値を用いる。解析パラメータは全ケース同じ値を採用するが、レンガのクランプモデルの密度は模型振動実験の数値シミュレーションと同様に見かけ上の密度である。



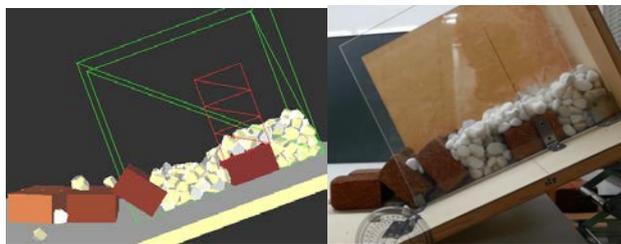
(a)初期状態



(b)崩壊1秒前



(c)崩壊の様子

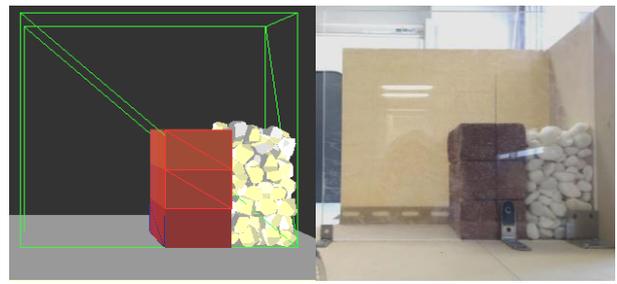


(d)崩壊後の状態

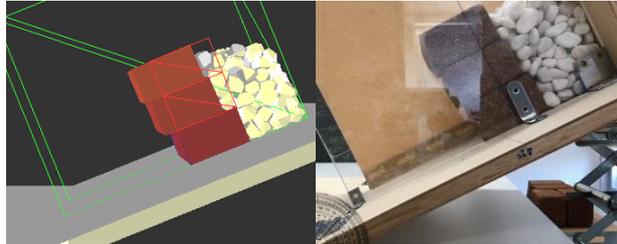


(e)崩壊後の状態 (上面方向)

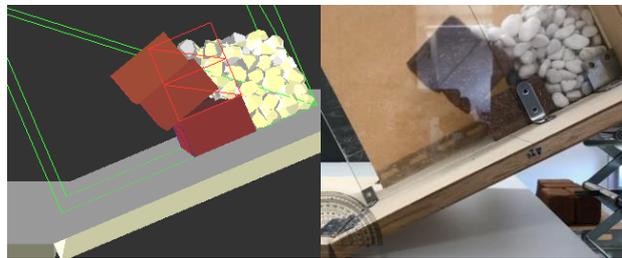
図-18 CaseP-1.1の挙動 (左:解析, 右:実験)



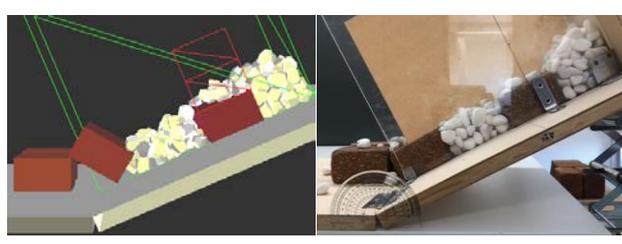
(a)初期状態



(b)崩壊1秒前



(c)崩壊の様子

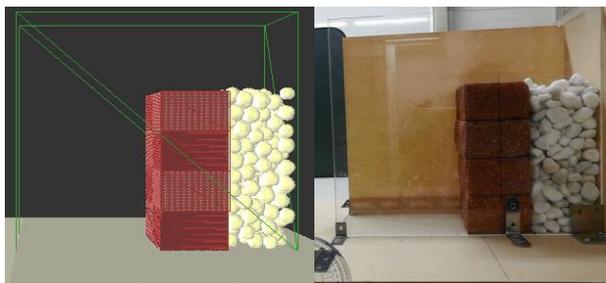


(d)崩壊後の状態

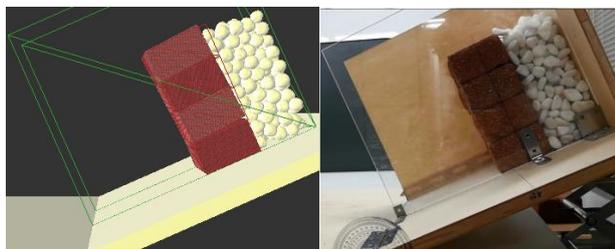


(e)崩壊後の状態 (上面方向)

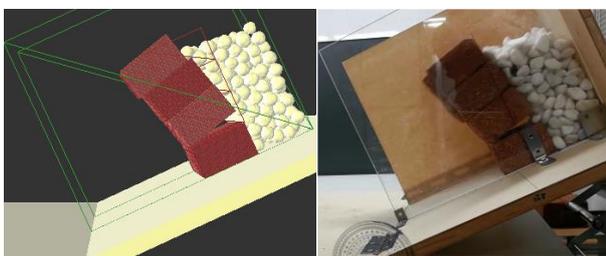
図-19 CaseP-1.2の挙動 (左:解析, 右:実験)



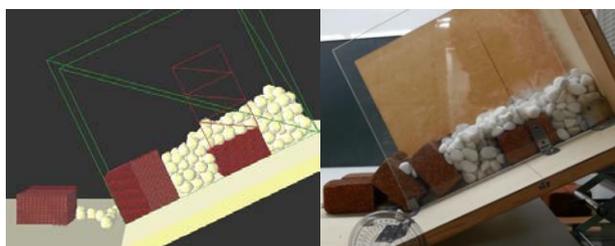
(a)初期状態



(b)崩壊1秒前



(c)崩壊の様子

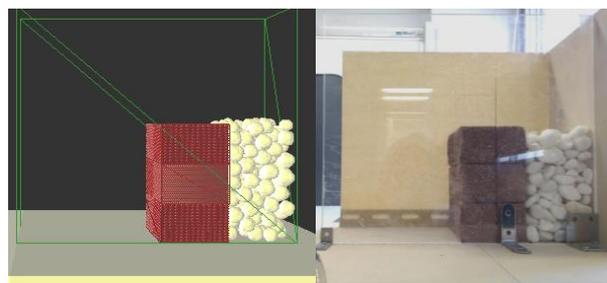


(d)崩壊後の状態

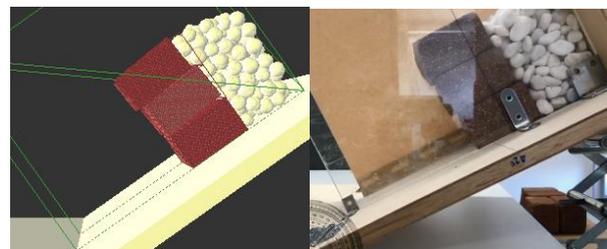


(e)崩壊後の状態 (上面方向)

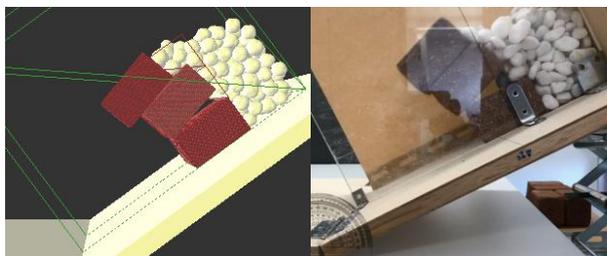
図-20 CaseC-1.1の挙動 (左:解析, 右:実験)



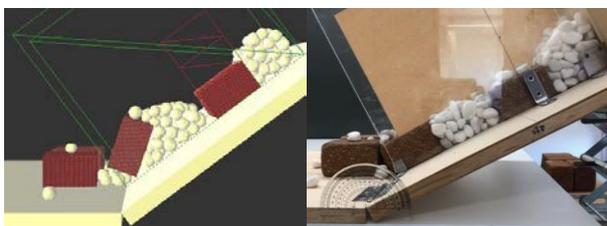
(a)初期状態



(b)崩壊1秒前



(c)崩壊の様子



(d)崩壊後の状態



(e)崩壊後の状態 (上面方向)

図-21 CaseC-1.2の挙動 (左:解析, 右:実験)

表-11 CaseP-1.1 の変位と崩壊傾斜角

レンガの番号		1	2	3	4
基準からの変位 (cm)	解析	0	20.5	30.5	41.5
	実験	0	16.0	23.5	31.5
崩壊傾斜角 (°)	解析	20.6			
	実験	23.2			

表-12 CaseP-1.2 の変位と崩壊傾斜角

レンガの番号		1	2	3
基準からの変位 (cm)	解析	0	19.0	31.5
	実験	0	18.5	28.0
崩壊傾斜角 (°)	解析	23.6		
	実験	26.2		

表-13 CaseC-1.1 の変位と崩壊傾斜角

レンガの番号		1	2	3	4
基準からの変位 (cm)	解析	0	15.0	20.0	37.0
	実験	0	16.0	23.5	31.5
崩壊傾斜角 (°)	解析	26.0			
	実験	23.2			

表-14 CaseC-1.2 の変位と崩壊傾斜角

レンガの番号		1	2	3
基準からの変位 (cm)	解析	0	17.0	30.5
	実験	0	18.5	28.0
崩壊傾斜角 (°)	解析	37.5		
	実験	26.2		

### c) 解析の初期状態

解析モデルの初期状態を実験と同じにするため、全ケース玉石モデルに自重解析を行い充填させた。また、レンガの変位を視覚的にわかりやすくするため側面方向のレンガの初期位置を赤枠で示す。

### d) 傾斜の高速化

YADE の RotationEngine という関数を用いて解析モデルの傾斜台を傾斜させるプログラムを作成した。ただし、解析時間の短縮させるため、レンガの個数が 2×4 個のケースでは 0~2 秒間、2×3 個のケースでは 0~3 秒間の角速度を毎秒 5 度とし、それ以降は実験と同じ毎秒 1 度と設定した。

## (4) 解析結果

各ケースの解析結果を実験結果とともに以下に示す。なお、傾斜は一番上のレンガの変位が 15cm を超えるまで行っており、変位は 0.5cm ごとに概算した値を用いる。

### a) CaseP-1.1 (レンガ個数 2×4 個, 多面体モデル)

図-18(b)より、実験と比べて解析モデルのレンガが前方に滑り出し玉石の沈下が生じた。図-18(c)より、実験と同様にレンガが一体化したように崩壊挙動を再現した。図-18(d), (e)より、解析モデルのレンガの残留状態は実験とほぼ同様の傾向を示しており、根石の上までの玉石の残留状態は実験と同様に傾斜角と平行に層をなした。しかし、根石から 2 番目のレンガの間の玉石は実験よりも厚みが少ない状態となった。また、表-11 より、全てのレンガの変位は実験値よりも約 30%大きくなり、崩壊傾斜角は実験値よりも約 11%小さい値となった。

### b) CaseP-1.2 (レンガ個数 2×3 個, 多面体モデル)

図-19(b)より、実験と比べてわずかに解析モデルのレンガが前方に滑り出している。図-19(c)より、実験と同

様にレンガが一体化したように崩壊挙動を再現した。図-19(d), (e)より、解析モデルのレンガの残留状態は実験とほぼ同様の傾向を示しており、根石から 2 番目のレンガの間にある玉石の残留状態は実験と同様の傾向を示めた。しかし、根石背面側の玉石は実験の傾斜角よりも大きな角度を持つ表面形を保つ状態を再現しなかった。また、表-12 より、2 番目のレンガの変位は実験と非常に整合した結果となり、3 番目のレンガの変位は実験値よりも約 13%大きい値となった。崩壊傾斜角は実験値よりも約 10%小さい値となった。

### c) CaseC-1.1 (レンガ個数 2×4 個, クランプモデル)

図-20(b)より、実験と同様に崩壊の直前までレンガと栗石に変化はない。図-20(c)より、2 番と 3 番のレンガは実験と同様に一体化したように崩壊挙動を再現したが、一番上にある 4 番のレンガが解析では 5mm ほど滑り出した。図-20 (d), (e)より、解析モデルの 2 番と 3 番のレンガは傾斜台と面積の小さい面に垂直に接するような残留状態となったが、傾斜角と平行に層をなすという玉石の残留状態は実験と非常に整合した結果となった。また、表-13 より、2, 3 番目のレンガの変位は実験値よりも小さい値となり、4 番目のレンガの変位は実験値よりも約 17%大きい値となった。崩壊傾斜角は実験値よりも約 12%大きい値となった。

### d) CaseC-1.2 (レンガ個数 2×3 個, クランプモデル)

図-21(b), (c)より、解析モデルでは 3 番目のレンガだけが滑り出しており、2 番目のレンガは滑り出していない。図-21 (d), (e)より、解析モデルの 2 番目のレンガの下に玉石が入り込む残留状態となったが、根石背面側の玉石は実験の傾斜角よりも大きな角度を持つ表面形を保つ状態に近い表面形の状態となった。また、表-14 より、全てのレンガの変位は実験値と約 10%異なる値となった。

が、崩壊傾斜角は実験値よりも約43%大きい値となった。

## (5) まとめ

多面体モデルを用いた CaseP ではレンガの滑り出しは実験よりも大きくなったが、レンガが一体化したように崩壊した様子は実験とほぼ同じ挙動となった。また、両ケースとも崩壊傾斜角は10%ほど小さくなったが、レンガの段数が1つ減ると崩壊傾斜角が3度大きくなる傾向を再現した。多面体モデルのレンガが滑り出す原因としては、DEM ではモデルの形状の影響が大きく、実際の摩擦を再現できなかつたためであると考えられる。

クランプモデルを用いた CaseC では崩壊時までのレンガと玉石の挙動は実験とほぼ同じ挙動となった。崩壊後のレンガの残留状態は実験の残留状態とあまり整合しなかったが、特に CaseC-1.1 の栗石の残留状態は実験に非常に整合した結果となった。また、レンガの段数が1つ減ると崩壊傾斜角が大きくなる傾向を CaseC においても示すことはできたが、CaseC-1.2 の崩壊傾斜角は実験と大きく異なる結果となった。CaseC-1.2 の崩壊傾斜角が大きくなった原因としては、使用したレンガの慣性モーメントや表面の摩擦特性を作成したレンガのクランプモデルでは再現できていないためであると考えられる。

## 5. 結論

本研究では、オープンソースフレームワークである YADE を用いて、実施した実験と試験に対する数値シミュレーションによって3次元解析の妥当性を検討した。以下に研究成果を示す。

- 粒径 18-22mm 程度の玉石を用いて安息角試験を計 10 回実施した。また、その安息角試験に対して、堀口らの提案式より算出した凸度に設定した球形要素のクランプモデルを用いて数値シミュレーションを実施した。解析の結果、要素の初期配置を変更しても解析結果に大きな違いがなく試験との平均した安息角の差が-0.05 度と非常に近い結果が得られたことから、球形要素のクランプモデルを用いた安息角試験のシミュレーション解析の妥当性が確認された。
- 大塚らが実施した模型振動実験に対して、球形要素を用いて積み木のクランプモデルを作成し地震動プログラムを改良して数値シミュレーションを実施した。この際、球形要素による噛み合わせ効果の低減を目的として、積み木モデル間の要素が噛み合い難くなるように隣接するモデルの要素半径を変化させた。解析の結果、要素半径が小さく、要素重合比が大きいモデルほど噛み合わせ効果が低減されていく傾向を示し、モデルの形状精度が最も高いとされる CaseA-1 の変位は実

験と非常に整合した結果となった。このことから、模型振動実験の数値シミュレーションにおいて球形要素を用いて作成した積み木のクランプモデルの妥当性が確認された。

- レンガを積み石要素、玉石を栗石要素として小型石垣模型の傾斜実験を2ケース実施した。また、傾斜実験に対して、RotationEngine を使用した傾斜プログラムを作成し、多面体モデルと球形要素のクランプモデルを用いて計4ケースの数値シミュレーションを実施した。解析の結果、CaseP ではレンガが一体化するような崩壊挙動、レンガ段数が減ると崩壊傾斜角が3度大きくなる傾向を高精度で再現した。CaseC では、崩壊時までのレンガと玉石の挙動、崩壊後の玉石の残留状態を高精度で再現した。

## 参考文献

- 1) 熊本市 経済観光局 熊本城総合事務所：熊本城復旧基本計画，2018。
- 2) 沢田紫門，福井悠介，千種辰弥：文化財，耐震化にジレンマ歴史的価値と安全確保の間で，朝日新聞 DIGITAL, <https://www.asahi.com/articles/ASL465D3PL46TIPE015.html> (2020年8月31日閲覧)
- 3) 野間康隆，山本浩之，西村毅，笠博義，西形達明，西田一彦：城郭石垣の地震時変形予測と安全性評価に関する研究，土木学会論文集 C (地圏工学)，Vol.69, No.4, pp.444-456, 2013。
- 4) 山本宏之，西形達明，八尾眞太郎，西田一彦，笠博義：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。
- 5) 笠博義，西田一彦，西形達明，森本浩行，阿波谷宜徳，山本浩之：個別要素法による城郭石垣の安定性解析の試み，土木史研究論文集，Vol.27, 2008。
- 6) 村上友基，沼田宗純，目黒公郎：2次元拡張個別要素法による石垣構造物の地震動応答解析，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.70, No.4 (地震工学論文集第33巻)，pp.506-512, 2014。
- 7) 伊吹竜一：石積み擁壁に対する大変形 SPH-DEM 解析法の開発，法政大学大学院デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻修士論文，2018。
- 8) Similauer Vaclav, Emanuele C., Chareyre Bruno, Dorofeenko S, Donze J., Dyck N.: Yade documentation, (2nd ed.) 2015。
- 9) 堀口俊行，澁谷一，香月智，田附正文：集合体要素の形状特性が安息角に及ぼす影響に関する解析的検討，構造工学論文集，Vol.57A, pp.136-146, 2011。
- 10) 堀口俊行，香月智，田附正文：集合体要素を用いた個別要素法による柔性鋼製砕堰堤の抵抗力推定法，構造工学論文集，Vol.59A, pp.208-220, 2013。
- 11) 伝熱解析材料物性研究室, <http://materiallab.seesaa.net/article/155240823.html>, (2020年8月31日閲覧)
- 12) 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, 1983.8
- 13) 孟慶軍，平井卓郎，小泉章夫：木材と各種構造用面材との摩擦係数，木材学会誌，Vol.54, No.5,

- pp.281-288, 2008.
- 14) V.Similauer, B.Chareyre: Yade dem formulation The Yade Project, 1st ed. 2010.
- 15) 3次元DEMによる地震時の組積構造に対する適用性の研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.75, No.4, pp.I\_199-I\_206 doi:10.2208/jscejsee.75.I\_199,2019.
- 16) Close-packing of equal spheres, [http://en.wikipedia.org/wiki/Close-packing\\_of\\_equal\\_spheres#Simple\\_hcp\\_lattice](http://en.wikipedia.org/wiki/Close-packing_of_equal_spheres#Simple_hcp_lattice) (2020年8月31日閲覧).
- 17) 橘一光, 森口周二, 寺田賢二郎, 高瀬慎介, 京谷孝史, 加藤準治: 個別要素法を用いた落石シミュレーションにおける形状精度と解析精度の定量的関連付け, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.70, No.2 (応用力学論文集 Vol.17), pp.519-530, 2014.
- 18) 渡辺和明: 石・レンガ積み橋脚の耐震性に関する研究, 大成建設技術センター報, 39号, 2006.
- 19) 松田芳範: 既設レンガ部材の力学的性状について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, 1997.

## NUMERICAL SIMULATIONS BASED ON 3D DEM FOR MASONRY BLOCKS SHAKING TABLE TESTS AND MASONRY STONE WALLS INCLINATION TESTS

Taisei MORITA, Mamoru OTSUKA, Hisakazu SAKAI and Yusuke ONO

Since a masonry stone wall is vulnerable structure to strong earthquake motion, the masonry stone walls and the turrets of the Kumamoto castle have suffered severe damages during the 2016 Kumamoto earthquakes. Although Kumamoto city has been considering some seismic reinforcements for the damaged structures, they have not been able to confirm the effects of the countermeasures yet. In this study, we conducted two tests; the repose angle tests of cobblestones and the inclination experiments of brick walls with back-fill cobble stones. We constructed three dimensional Discrete Element Method (DEM) by extending the open source analytical software YADE. We investigated the validation of the methods with polyhedral and some spherical clump models for the above two tests and the past shaking table test for wooden blocks. As the results, all of the three tests were accurately reproduced by the numerical analyses, and we confirmed the validation of analytical method with the clump models.