

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

大塚 鎮¹・酒井 久和²・小野 裕輔³

¹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: mamoru.otsuka.9a@stu.hosei.ac.jp

²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

³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損傷を受け、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。構造物の変形から崩壊までの挙動を定量的に示す方法としてDEMを用いることが多いが、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適用した場合の3次元DEM解析は行われていない。

本研究では3次元DEM解析ソフトYADEを用いて、地震動の3次元シミュレーション解析プログラムを構築し、組石構造に対する有効性を検討した。解析の妥当性を示すために積み木を用いた振動実験を実施し、数値シミュレーションと実験結果との比較をした。結果、模型振動実験を精度よく再現し、プログラムの妥当性を検証ができた。

Key Words: DEM, shaking table tests, YADE, polyhedra model,

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、熊本城石垣が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¹⁾。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財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²³⁾。

耐震補強効果を定量的に示す方法として数値解析が用いられることが多く、野間ら⁴⁾は実物大城郭石垣モデルを用いた振動台実験⁵⁾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。村上ら⁶⁾は2次元拡張拡張個別要素法(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による研究は行われていない。

そこで、本研究では解析ソフトYADE⁷⁾を用いて地震動の3次元シミュレーション解析プログラムを作成し、組石構造に対する有効性を検討する。YADEは離散要素

表-1 小型振動台の仕様

テーブル寸法 (mm)	400×250
搭載質量 (kg)	30
最大加振加速度 (m/s^2)	3.0
最大加振変位 (mm)	±25

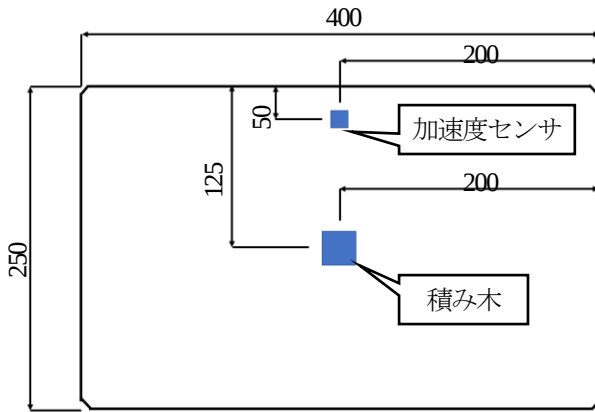


図-1 加速度センサ及び積み木の設置位置(mm)

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積み木を用いた模型振動実験を実施し、各ケース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う。

2. 模型振動実験

(1) 使用器具

本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。仕様を表-1に示す。加速度センサは東京測期研究所のARF-50Aを用いる。加速度センサ及び実験に用いる積み木の設置位置を図-1に示す。

実験の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) 実験ケース

本実験では表面が塗装された一辺 2.5cm の積み木及び塗装のされていない白木の一辺 5.0cm の積み木を前者は 4 個及び 5 個重ねたケース、後者は 5 個及び 6 個重ねた計 4 ケースで行う（写真-1）。また、実験は各ケース 5 回行い、同じ結果が得られた周波数を表-2に示す。ただし、入力波は正弦波 5 波である。2.5cm の積み木は下から黄、赤、緑、青、橙の積み木と呼び、5.0cm の積み木は下から A、B、C、D、E、F の積み木と呼ぶこととし、

表-2 各ケースの概要

	入力周波数 (Hz)	積み木の個数	積み木の一辺の長さ (cm)
Case1	1.2	4	2.5
Case2	1.2	5	2.5
Case3	1.7	5	5.0
Case4	1.7	6	5.0

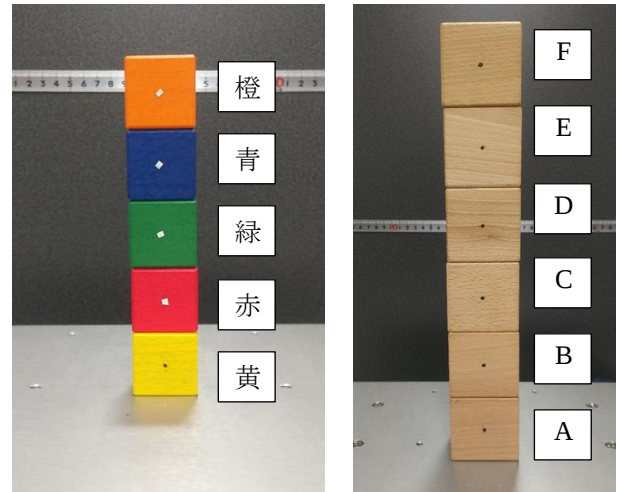


写真-1 Case2 及び Case4 の初期状態

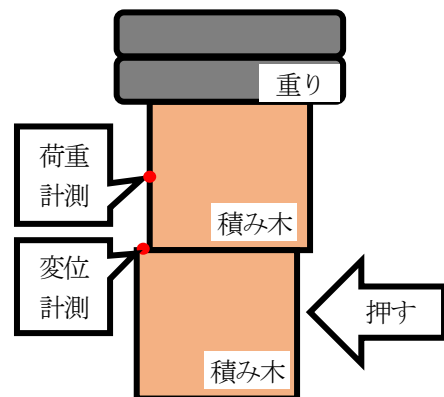


図-2 摩擦試験の概要

橙と F の積み木はそれぞれ Case2 と Case4 のみ用いる。また、本研究では振動台と積み木との摩擦を考慮する必要がないよう、黄及び A の積み木は振動台に固着して実験を行う。積み木の手前の面の中心には白または黒の点を付けることで動画解析を行う際に積み木の追跡を可能にした。

(3) 摩擦試験

積み木間の摩擦係数を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 つ重ねた積み木の上に重りを載せ、下の積み木を万力でゆっくり押しだし変位及び荷重を計測する。試験は荷重が 1.009kg, 2.018kg, 4.026kg となる 3 ケースで行う。計測した変位及び荷重を

表-3 2種の積み木の摩擦係数

	2.5cm 積み木	5.0cm 積み木
摩擦係数	0.151	0.189

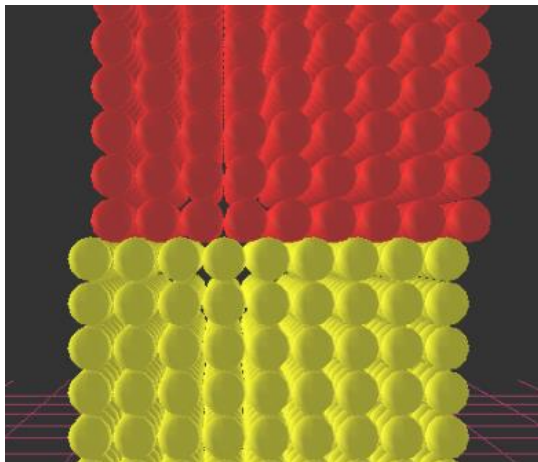


図-3 球体集合要素間の噛み合わせ

用いて荷重と変位の関係から摩擦係数を得る．2種の積み木それぞれに対して摩擦試験を複数回行い得られた摩擦係数の平均値をその積み木の摩擦係数とし，その結果を表-3に示す．

(4) 実験結果の整理

加速度波形及び積み木の挙動，PTVを用いて求めた最下部の積み木の黄及びAを基準とした相対変位（右方向が正，左方向が負）をケースごとに整理する．ただし，動画を解析する際に上に載っている積み木の挙動が速くなると追跡できなくなるため落ちる瞬間または落ちる途中までの相対変位を実験結果として用いる．

3. 模型振動実験の数値シミュレーション

本研究では YADE(Yet Another Dynamic Engine)を用いて DEM 解析を行う．YADE は拡張性の高いオープンソースで構成される 3 次元 DEM の可能な解析ツールであり，2004 年に最初のバージョンがリリースされ，Github 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の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することも可能である．

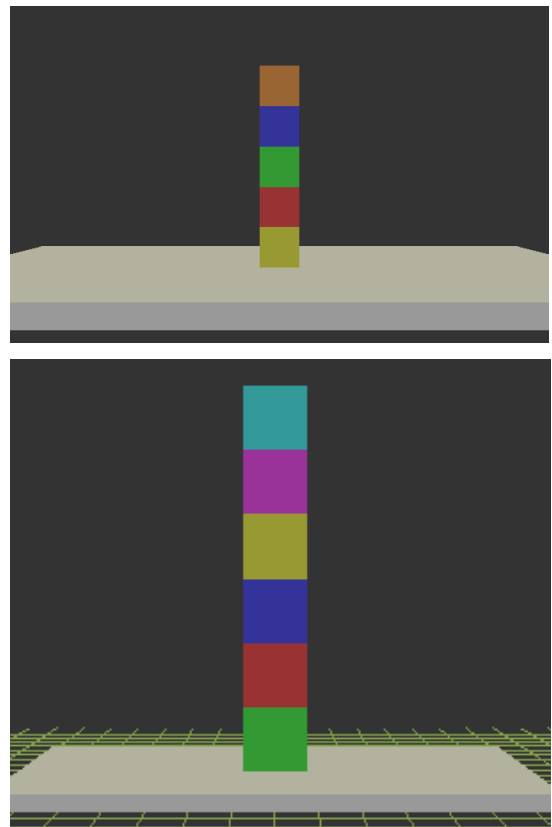


図-4 解析モデル(上図: Case2, 下図: Case4)

(1) 地震動入力 of the 導入

YADE では要素に重力や回転の力を与えるソースコードはあるが，振動を与えるようなソースコードがないためプログラムを構築する必要がある．そこで，シミュレーション中に指定したステップ数毎に定義した関数を呼び出す PyRunner を使用し，要素に外力を与える O.force.addF 関数を使用することで，プログラムに地震動入力の導入を行った．次に，加速度と時間のデータがある CSV データを読み込むプログラムを構築しシミュレーションを行う．

(2) 解析モデル

DEM では計算が容易で計算負荷の低い球要素を用いてモデルを作成することが多い．しかし，本実験で用いた積み木をモデル化する場合，球要素の集合体を用いてモデルを作成する必要があるが，滑動時に図-3に示すように要素間で噛み合わせが発生し，滑動現象が阻害される YADE では Boon ら⁹⁾により DEM による非球形要素を用いたモデル化に関して，多面体要素同士の接触時の相互作用アルゴリズムが提案され，その解析コードを公開している．多面体要素を用いたモデルは，球形要素で作成したときに起こるようなモデル表面の粗さや噛み合わせが起こることがない．また，要素間の相互作用を計算するには球形要素より計算負荷はかかるが，本実験で用いた積み木のように簡単な立方体・直方体の形状を作成

表-4 解析パラメータ

Case1, Case2	質量 (g)	密度 (kg/m ³)
黄	9.9	633.60
赤	11.0	704.64
緑	11.1	711.68
青	10.3	657.92
橙	10.1	648.96

Case3, Case4	質量 (g)	密度 (kg/m ³)
A	84.7	677.36
B	86.1	688.40
C	90.9	727.20
D	94.8	758.64
E	99.0	791.76
F	81.7	653.60

	弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン 比	減衰 係数	摩擦 係数	計算時間 間隔 (s)
Case1	1.303×10 ⁶	0.5	0.05	0.151	3.0×10 ⁻⁷
Case2					
Case3			0.025	0.189	4.5×10 ⁻⁷
Case4					

するのに1個の要素で作成できることから、球要素の集合体より要素数が少ないためトータルの計算コストは軽減される。そのため、本研究では多面体要素を用いて解析を行う。

作成した解析モデルを図-4に示す。実験と同様に振動台に一番下の積み木（Case1 と Case2 は黄の要素、Case3 と Case4 は緑の要素）固着する。

(3) 解析パラメータ

本研究における、振動台実験の数値シミュレーションにおける解析パラメータを表-4に示す。実験で用いた積み木は2種ともブナ材（広葉樹）であるため、弾性係数とポアソン比の値は澤田の研究⁹⁾で得られた概数値を用いる。また、摩擦係数は実施した摩擦試験から得られた値を用いる。

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¹⁰⁾。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。

$$K_n = \frac{E_1 l_1 E_2 l_2}{E_1 l_1 + E_2 l_2} \quad (1)$$

$$K_s = \frac{\nu_1 k_{n1} \nu_2 k_{n2}}{\nu_1 k_{n1} + \nu_2 k_{n2}} \quad (2)$$

ここで、添え字1, 2は要素1, 2を意味し、 E は弾性係

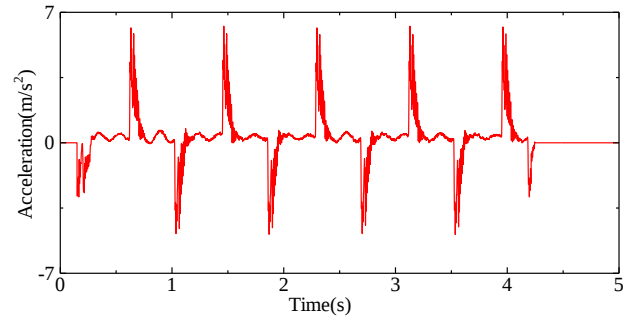


図-5 実験で得られた加速度波形(Case1)

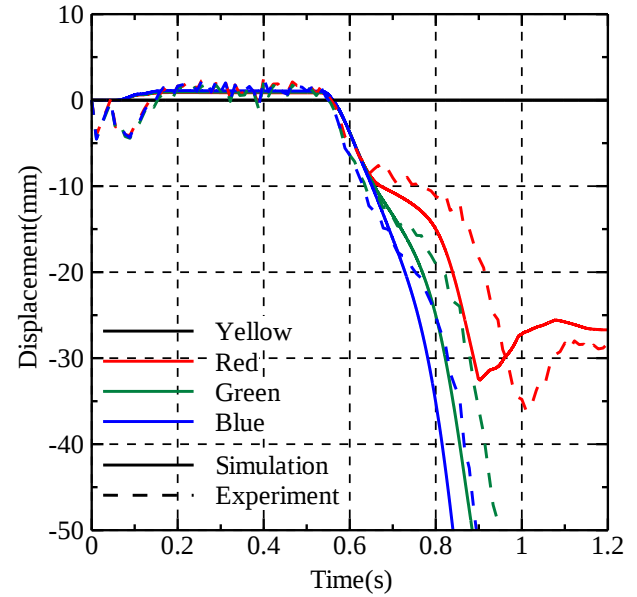


図-6 Case1: 変位の時刻歴

数、 ν はポアソン比、 l は重心から接触点のまでの距離、 k_n は法線方向のばね定数を表す。

また、解析で用いる入力加速度は小型振動台に入力した波形ではなく、図-1に示す積み木から75mm離れた位置にある加速度センサより得られた波形(図-5)を用いる。

(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。ここで、解析で得られる変位は実験と同様に黄及びAの積み木を基準とした相対変位である。

a) Case1(積み木：小、4段)

図-6より、Case1では解析と実験では0.2秒から0.55秒まで積み木全体の変位が約1mmとほぼ一致しており、積み木が倒れ始める時間も0.65秒と同じとなった。倒れている途中の0.8秒を見ると、解析の各積み木の変位は赤が-15mm、緑が-25mm、青が-35mmであり、実験の各積み木の変位は赤が-11mm、緑が-19mm、青が-25mmである。その差が-4mm、-6mm、-10mmと積み木の位置が高いほど大きくなったが、積み木の挙動としてはほぼ同じ傾向を示していることが分かる。

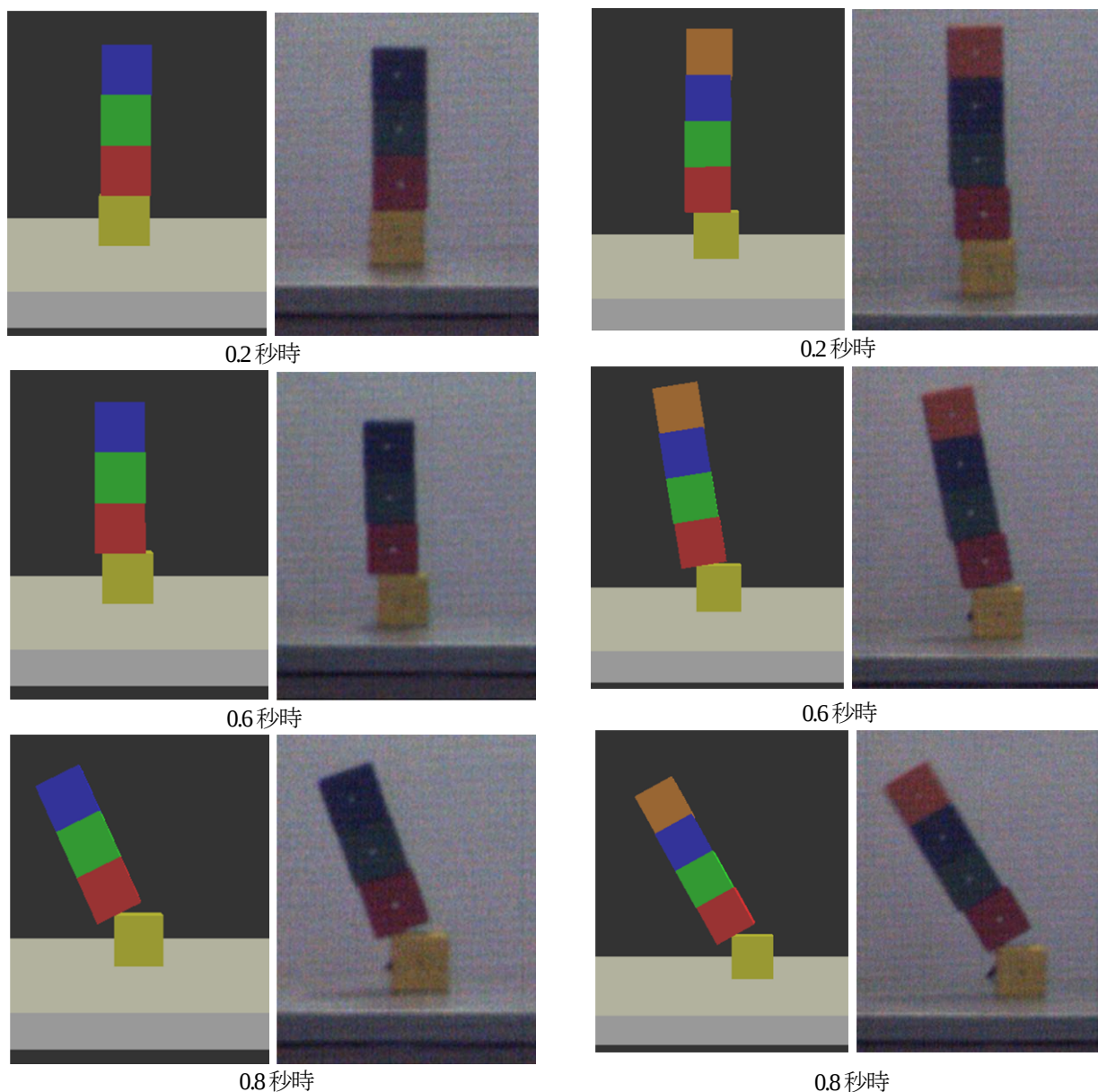


図-7 Case1:積み木の挙動 (左: 解析, 右: 実験)

また、図-7 に示した各時刻の積み木の挙動をみても、積み木の挙動は、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。

b) Case2(積み木：小、5段)

図-8 より、Case2 の解析では積み木が揺れ始めてから倒れるまで全部の積み木が一体となって動いていたが、実験では 0.2 秒時から赤の積み木が他の積み木より少々右にずれたまま積み木全体が左方向へ倒れた。全体の挙動としては解析と実験でほぼ一致していることが確認できる。

図-9の変位の時刻歴を見ると、実験では0.1秒から0.55秒で3mm程度変位しているのに対し解析では1mm程度と実験ほど変位をしなかったが、左方向へと変位していく時間が0.55秒と一致した。解析及び実験ともに積み木の変位が-9mm程度となる0.6秒から左方向へ倒れ始めて

図-8 Case2:積み木の挙動 (左: 解析, 右: 実験)

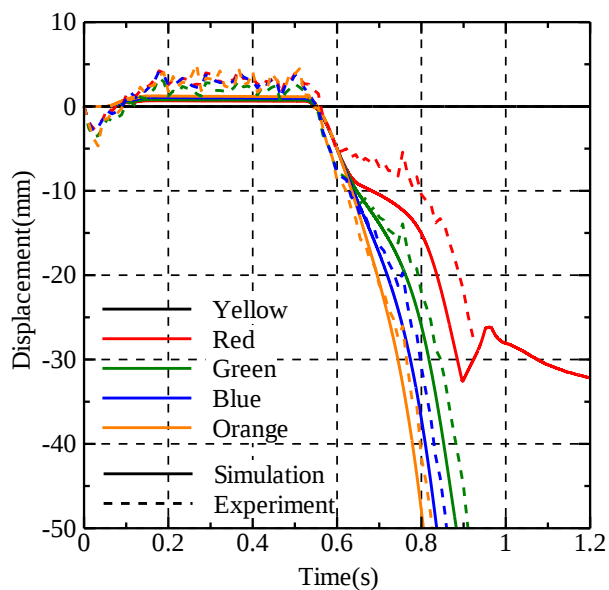


図-9 Case2: 変位の時刻歴

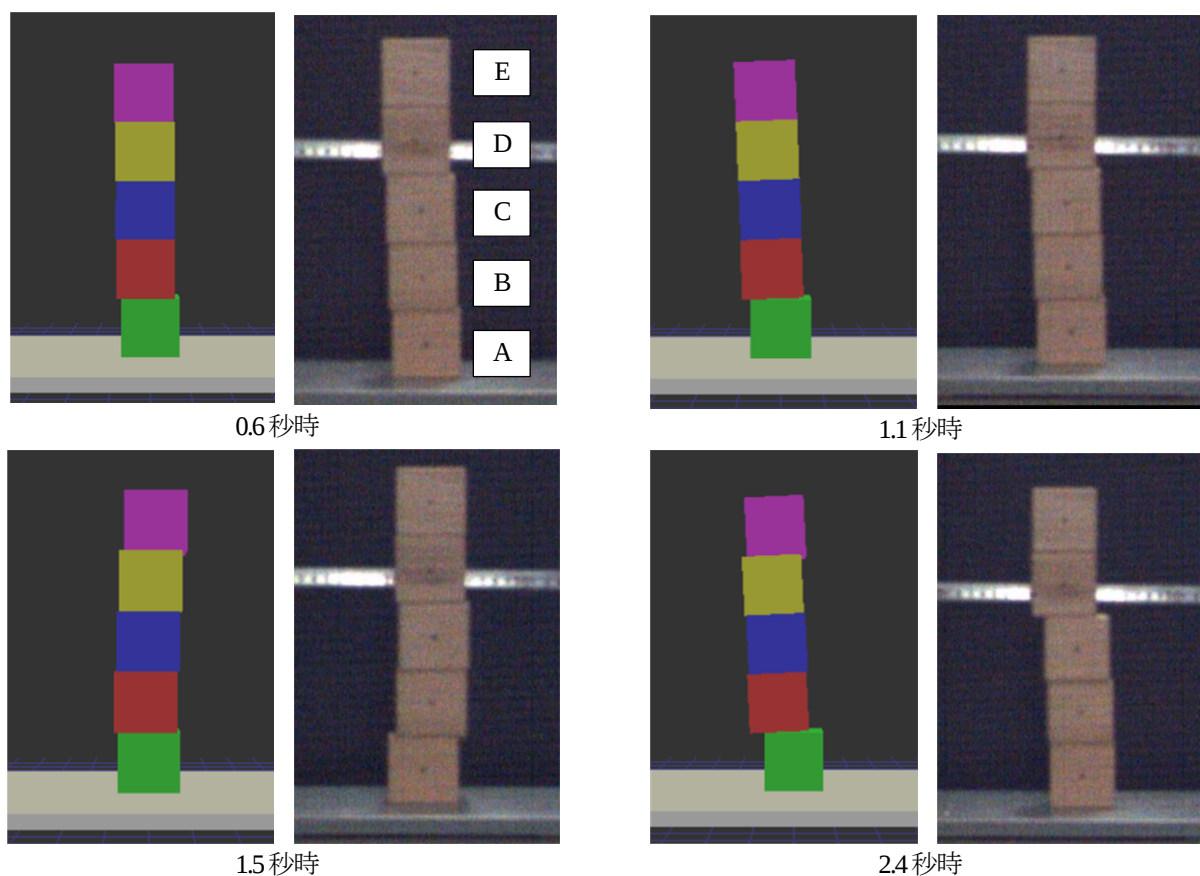


図-10 Case3:積み木の挙動 (左: 解析, 右: 実験)

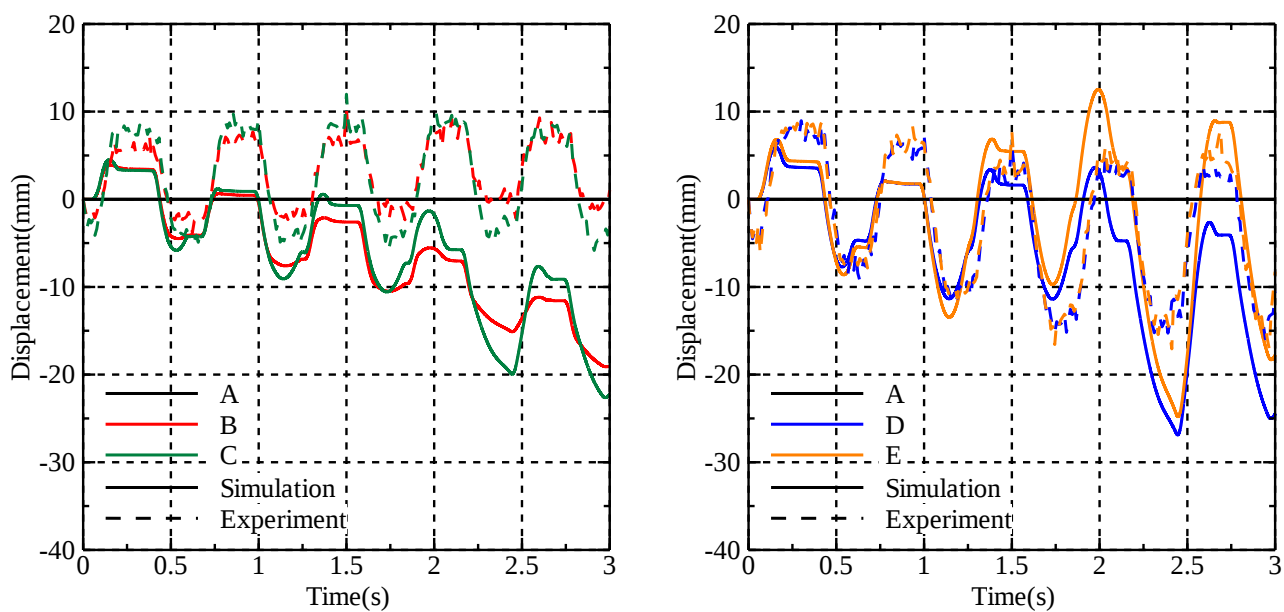


図-11 Case3: 変位の時刻歴(左: B, C, 右: E, D)

いるが、実験の赤の積み木のみ変位が-5mmから倒れ始めており、0.6秒以降赤の積み木のみ他の積み木と比べ変位の差が出ているが、解析と実験ではほぼ同じ挙動を示していることがわかる。

c) Case3(積み木: 大, 5段)

図-10より、Case3の解析では0.6秒時までは実験とほぼ

一致していることが分かる。1.1秒になると解析ではB, Cが実験よりも5mmほど左方向へずれ、1.5秒では実験の積み木は原点位置より右方向へずれるのに対し、解析では原点位置より左方向へずれた。2.4秒以降も実験の積み木が右方向へずれる場合でも、解析ではB, Cの右方向へのずれが小さいため、実験と多少異なる挙動をした

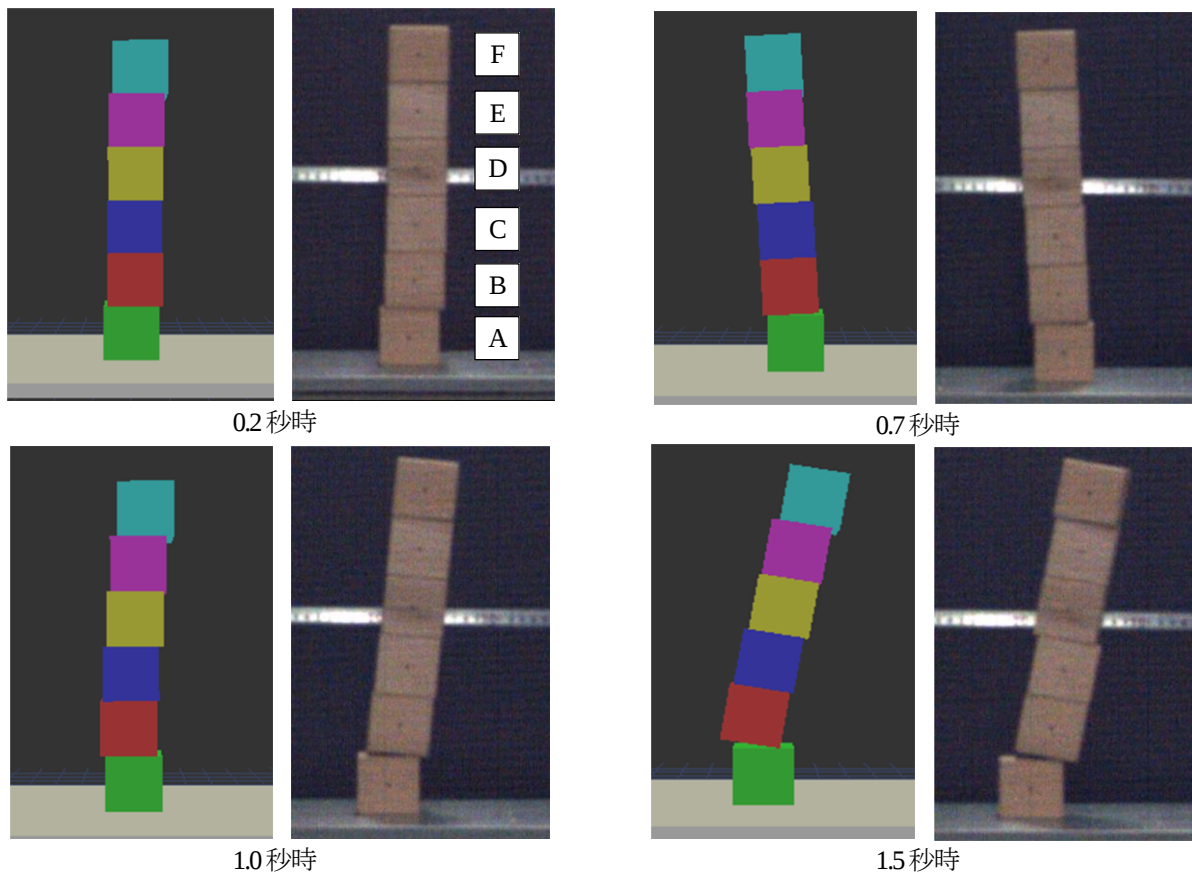


図-12 Case4:積み木の挙動 (左: 解析, 右: 実験)

が、実験と同様に解析の積み木は最後まで倒れなかった。図-11 より B, C の変位の時刻歴を見ると、実験では右方向へ 5~10mm 程度の間で変位し続け、左方向へは 5.0~0mm 程度の間で変位し続けるのに対し、解析では左方向への変位量に比べ右方向への変位量が少ないため、時間が経過するに連れて左方向へと変位する右下がりのグラフとなり実験の挙動と異なることが確認できる。

D, E の変位の時刻歴を見ると、1.5 秒までは解析と実験でほぼ同じ値となった。2.0 秒時には D の変位量は 2.8mm と同じであったが E は実験と解析で 5.0mm 程度の変位の差があり、2.4 秒時には D, E ともに変位の差が 10mm 程度生まれたが、変位の時刻歴は近いものとなった。

d) Case4(積み木: 大, 6段)

図-12より、Case4の解析では、0.7秒までは実験とほぼ同じ挙動をしているが 1.0 秒では B の積み木が右方向へずれが生じず、全体が右方向へ揺れるような挙動をしなかった。そのため、1.5 秒では B の積み木の揺れる位置が解析と実験で異なったため、解析では B の積み木が左方向へ押し出されるように落ちた。しかし、1.5 秒の積み木全体の挙動を見ると解析と実験では同じような挙動をしていることがわかる。

図-13を見ると、0.8秒までは解析と実験の変位量はほ

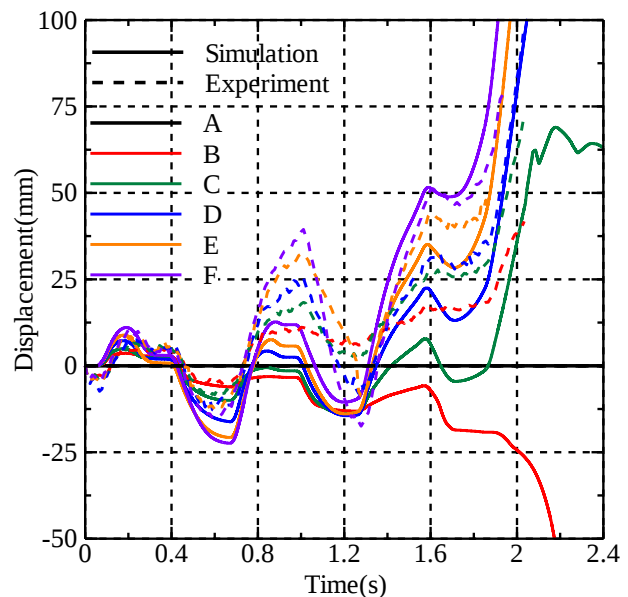


図-13 Case4: 変位の時刻歴

ぼ一致していることがわかる。しかし、1.0 秒の変位量を見ると実験と解析で F の変位量の差が 26mm 生じた。1.25 秒後からは B と C 以外の変位量は近い値を示しており、F は 1.25 秒から最後まで変位量がほぼ一致した。また、E と D のは 1.6~1.9 秒間で変位の差が 10mm 程度できたが、1.25~1.6 秒間と落ちる瞬間の 1.9 秒時の変位量はほぼ一致した。実験では B は 0.75 秒から 1.9 秒まで 15mm

程度とほぼ一定の変位量であったが、解析では 0.5 秒時に左方向へずれてから原点位置から右方向へすることがなく左方向へ倒れた。全体としては、0.75~1.25 秒間において解析と実験で変位量に差が生じたが、B 以外の挙動と変位の時刻歴は近い傾向を示した。

4. 結論

本研究では、YADE を用いて地震動の 3 次元シミュレーション解析プログラムを作成し、実施した模型振動実験に対する数値シミュレーションにより解析の妥当性を検討した。以下に研究成果を示す。

- ・解析コード YADE に波形データを取り込む機能を導入し、動的応答解析プログラムを構築した。
- ・一辺 2.5cm の積み木を 4 個及び 5 個重ねたケース(Case1, Case2)、一辺 5.0cm の積み木を 5 個及び 6 個重ねたケース(Case3, Case4)の計 4 ケースの模型振動実験を行った。
- ・開発した解析プログラムを用いて、模型振動実験に対して数値シミュレーションを実施した。
- ・解析の結果、Case1, Case2 では積み木の時刻歴変位や転倒する時間を非常に精度良く再現することができた。Case3, Case4 では積み木の変位量に多少の違いが生じたが、変位波形の形状や転倒する時間を精度良く再現することができた。

今後は開発した解析プログラムを用いて、城郭石垣に対し数値シミュレーションを行う予定である。

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，2018.3.
- 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，2018.4.
- 3) 熊本市 経済観光局 熊本城総合事務所：熊本城復旧基本方針，2016.12.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 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) Similauer Vaclav, Emanuele C., Chareyre Bruno, Dorofenko S, Donze J., Dyck N. : Yade documentation, (2nd ed.), 2015.
- 8) C.W.Boon, G.T.Houlsby, S.Utili : A new algorithm for contact detection between convex polygonal and polyhedral particles in the discrete element method, Computers and Geotechnics Vol.44, pp.73-82, 2012.6.
- 9) 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.
- 10) V.Similauer, B.Chareyre: Yade dem formulation, The Yade Project, 1st ed. 2010.

(?)

THREE DIMENSIONAL DEM DYNAMIC NUMERICAL SIMULATIONS FOR SHAKING TABLE TESTS OF MASONRY BLOCKS

Mamoru OTSUKA, Hisakazu SAKAI , 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 structures, they have not been able to confirm the effects of the countermeasures yet.

In this study, We investigated the validation of the dynamic simulation for masonry structures by using 3D analytical code, YADE. First, I introduced a dynamic input motion system to YADE. Second, I conducted a series of shaking table tests with two types of wooden blocks. Finally, I performed the dynamic response analyses for all of the shaking table tests. As the results, the deformations and the collapsed times of all cases were in very good coincidence between the experiments and the numerical analyses. I could make the validation of the numerical code I have extended.