3次元個別要素法における 異形多面体要素の開発

柳田 尚毅¹·酒井 久和²

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: naoki.yanagida.8f@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

石積み擁壁は地震に対して非常に脆弱な構造物であり、多数の被害事例が報告されている. これらの被 害を軽減するため、石積み擁壁の地震時の崩壊メカニズムを数値解析によって解明しようとする試みがな されているが、多様な積み石形状を考慮した3次元数値シミュレーションはほとんど行われていない. 本研究では、DEM(個別要素法)を用いて、様々な要素形状に対応可能な3次元 DEM 要素の開発を目 的とする. はじめに、複数の多面体要素を剛結することで任意の形状を再現し、それらを1つの剛体とし て挙動を追跡できる異形多面体要素を開発した. そして、凸形状を持たせた積み木の落下実験を実施し、 実験に対して数値シミュレーションを行った. その結果、積み木の落下実験を精度よく再現しており、開 発した3次元 DEM 要素の妥当性が確認された.

Key Words: DEM, 3-dimensional analysis, rigid body, deformed polyhedron elements, drop experiments

1. はじめに

石積み擁壁は材料となる石材の入手が容易であり、コ ンクリート擁壁に比べて自然に馴染みやすく、かつ景観 形成にも優れていることから、多くの土木構造物や建築 物に古くから用いられてきた ¹⁾. しかし, 石積み擁壁は 地震に対して非常に脆弱な構造物であり、2011年の東北 地方太平洋沖地震や 2016 年の熊本地震でも多数の被害 事例が報告されている²⁾. 地震による石積み擁壁の被害 を軽減するためには、石積み擁壁の崩壊メカニズムを解 明し、適切な安全性評価や対策等を行うことが必要であ る. 近年では、コストや時間の効率面から、数値シミュ レーションによって、石積み擁壁の崩壊メカニズムを解 明しようとする試みがなされている. これまで, 主に有 限要素法(Finite Element Method, FEM),不連続変形法 (Discontinuous Deformation Analysis, DDA), SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法³⁾, 個別要素法(Distinct Element Method, DEM)⁴といった解析手法が用いられてきた.

小野ら⁵や伊吹ら⁶は,石積み擁壁に対する地震時安 定性評価手法の確立を目的に,SPH 法と個別要素法を組 み合わせた SPH-DEM 法を用いて,2次元解析を行った. その結果,無対策模型における傾斜・振動実験や間知石 引き抜き実験に対して,SPH-DEM 法の有用性が示され た.しかし,崩壊防止ネットや地山補強材を用いた対策 模型による傾斜・振動実験に対する数値シミュレーショ ンでは,3次元的効果を有する地山補強材等を2次元解 析で表現することが困難であったため,変形モード等の 再現には至っていない.

そこで伊吹^つは、3次元 SPH-DEM 法を開発し、地山補 強材を用いた対策模型の振動実験に対する3次元解析を 実施した.結果、加振による擁壁全体の崩壊を防ぎ、背 面地盤の変形も抑制され、地山補強材の効果が定性的に 表現された.しかし、積み石の挙動を計算するために使 用された6面体 DEM ブロック要素では、直方体形状の みを想定しているため、多様な積み石形状に対応できて いないという課題を残している.

本研究では、個別要素法を用いて、様々な要素形状に 対応可能な3次元 DEM 要素の開発を目的とする.また、 開発した3次元 DEM 要素の妥当性を検証するため、積 み木の落下実験を実施し、この実験を対象に3次元数値



図-1 6面体 DEM ブロック要素⁷



図-2 接触パターン⁸

シミュレーションを行い,実験結果と解析結果を比較検 討した.

2. 解析手法

(1) 異形多面体要素

本研究では、3次元個別要素法において、異形多面体 要素を取り扱うために、伊吹⁷の6面体DEMブロック要 素を剛結することで任意の形状を再現する.この作成法 によって、6面体 DEM ブロック要素と同様の接触モデ ルを取り扱うことが可能であり、接触判定および接触力 の計算には、異形多面体要素を構成する個々の6面体 DEMブロック要素を用いる.なお、異形多面体要素は1 つの剛体とみなすため、剛結された6面体 DEMブロッ ク要素間では接触判定を行わないこととする.

(2) 接触モデル

前節で述べたように,異形多面体要素の接触モデルは 6面体 DEM ブロック要素と同様の取り扱いが可能であ



図-3 接触力モデル

る. 以下に, 6 面体 DEM ブロック要素の接触モデルに ついて, その概要を示す.

図-1で示すように、6面体 DEM ブロック要素は適当 な半径 r を用いて、頂点を球、辺を円柱と仮定した要素 で構築される⁷. この仮定により、接触パターンが球と 球、球と円柱、球と平面、円柱と円柱の4種類に分類さ れ(図-2参照)、接触力算定の簡便化と鋭い角を有し た要素を用いた場合に生じる頂点の引っかかりなどの問 題が解決された⁸. また、球と球以外の接触パターンに おいて、仮想粒子との接触を仮定することによって、す べての接触力計算は粒状要素間の接触力モデルが用いら れた.図-3 で示すように、接触力モデルの法線方向は バネ要素とダッシュポットで表され、接線方向はそれら に加えてスライダーが考慮された.

(3) 質量・重心・慣性モーメントの算出

異形多面体要素の挙動を運動方程式から計算するため には、各要素の質量、重心、慣性モーメントを求める必 要がある.以下に、それらの算出方法を示す.

a) 質量と重心

伊吹 η は、6 面体 DEM ブロック要素を四面体要素の集合とみなし、6 面体 DEM ブロック要素の質量と重心を求めている.そこで、個々の6 面体 DEM ブロック要素の質量を M_i とすると、異形多面体要素の質量 M_k はそれらの合計で求まる.

$$M_k = \sum_i M_i \tag{1}$$

また,個々の6面体 DEM ブロック要素の質量 M_i と重 心の位置ベクトル G_i を用いて,異形多面体要素の重心 G_k は次式で求まる.



図-4 6面体 DEM 要素を分割する四面体要素

$$\boldsymbol{G}_{k} = \frac{\sum_{i} M_{i} \boldsymbol{G}_{i}}{\sum_{i} M_{i}}$$
(2)

b) 慣性モーメント

本研究では、図-4 で示すように、質量と重心の計算 同様、6 面体 DEM ブロック要素を四面体要素で分割す ることによって、慣性モーメントを算出した.よって、 6 面体 DEM ブロック要素の原点まわりの慣性モーメン ト $[I_0]_i$ は、個々の四面体要素jの原点まわりの慣性モ ーメント $[I_0]_j$ の合計として求めることができる⁹.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix}_{i} = \sum_{j} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix}_{j}$$
(3)

ここで、図-4に示した四面体要素*j*を構成する三角形 の頂点を $a_j = (a_{xj}, a_{yj}, a_{zj}), b_j = (b_{xj}, b_{yj}, b_{zj}),$ $c_j = (c_{xj}, c_{yj}, c_{zj})$ とすると、四面体要素の原点まわ りの慣性モーメントは、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{0} \end{bmatrix}_{j} = \frac{m_{j}}{20} \begin{vmatrix} k_{y}^{2} - k_{yy} + k_{z}^{2} - k_{zz} \\ -\frac{1}{2} (k_{x} k_{y} + k_{xy}) \\ -\frac{1}{2} (k_{x} k_{z} + k_{xz}) \end{vmatrix}$$

$$-\frac{1}{2} (k_{x} k_{y} + k_{xy}) \qquad -\frac{1}{2} (k_{x} k_{z} + k_{xz}) \\ k_{x}^{2} - k_{xx} + k_{z}^{2} - k_{zz} \qquad -\frac{1}{2} (k_{y} k_{z} + k_{yz}) \\ -\frac{1}{2} (k_{y} k_{z} + k_{yz}) \qquad k_{x}^{2} - k_{xx} + k_{y}^{2} - k_{yy} \end{vmatrix}$$

$$(4)$$



写真-1 実験モデル(左:実験台,右:積み木)

$$k_{x} = a_{xj} + b_{xj} + c_{xj} \qquad k_{xx} = a_{xj}^{2} + b_{xj}^{2} + c_{xj}^{2}$$

$$k_{y} = a_{yj} + b_{yj} + c_{yj} \qquad k_{yy} = a_{yj}^{2} + b_{yj}^{2} + c_{yj}^{2}$$

$$k_{z} = a_{zj} + b_{zj} + c_{zj} \qquad k_{zz} = a_{zj}^{2} + b_{zj}^{2} + c_{zj}^{2}$$

$$k_{xy} = a_{xj}a_{yj} + b_{xj}b_{yj} + c_{xj}c_{yj}$$

$$k_{yz} = a_{yj}a_{zj} + b_{yj}b_{zj} + c_{yj}c_{zj}$$

$$k_{xz} = a_{xj}a_{zj} + b_{yj}b_{zj} + c_{xj}c_{zj}$$

で得られる¹⁰. そして,6面体DEMブロック要素の重心 まわりの慣性モーメント $[I]_i$ は平行軸の定理より,6面 体 DEM ブロック要素の重心 $G_i = (x_i, y_i, z_i)$ を用い て次式で与えられる.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \end{bmatrix}_{i} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{o} \end{bmatrix}_{i} + M_{i} \begin{bmatrix} y_{i}^{2} + z_{i}^{2} & -x_{i}y_{i} & -x_{i}z_{i} \\ -y_{i}x_{i} & z_{i}^{2} + x_{i}^{2} & -y_{i}z_{i} \\ -z_{i}x_{i} & -z_{i}y_{i} & x_{i}^{2} + y_{i}^{2} \end{bmatrix}$$
(5)

したがって、異形多面体要素の重心まわりの慣性モー メント $[I]_k$ は、異形多面体要素の質量 M_k と重心 $G_k = (x_k, y_k, z_k)$ を用いて次式で求まる.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} \end{bmatrix}_{k} = \sum_{i} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{I} \end{bmatrix}_{i} + \frac{y_{k}^{2} + z_{k}^{2} - x_{k}y_{k} - x_{k}z_{k}}{-y_{k}x_{k} - z_{k}^{2} + x_{k}^{2} - y_{k}z_{k}} - z_{k}x_{k} - z_{k}y_{k} - x_{k}^{2} + y_{k}^{2} \end{bmatrix} \right)$$
(6)

3. 積み木の落下実験

(1) 使用器具

本実験では、表面が塗装された1辺2.5cmのものを3 つ結合し、凸形状を持たせた積み木と、積み木が転落する実験台を使用した(写真-1参照).また、実験台上 部には積み木を落下させるための落下台を作成しており、



写真-2 落下台とガイド



写真-3 摩擦試験

積み木をまっすぐ落下させるため、厚さ1mmの金属製 定規でガイドを設けた(写真-2参照).

(2) 実験内容

本実験では、積み木を傾斜角 30 度の斜面へと落下させた.積み木の落下方法については、斜面から高さ10cmの位置に配置した落下台から、ゆっくりと後ろから押し出す方法を採用した.実験は青色の積み木が下になるように設置した状態から落下させた Case 1 と、赤色の積み木が下になるように設置した状態から落下させた Case 2 の 2 ケースをそれぞれ 12 回ずつ繰り返し実施した.

(3) 実験結果の整理

実験時の積み木の挙動を把握するため、実験台の正面 と側面の2方向から同時に撮影した.撮影には、スマー トフォンのスローモーション機能を使用しており、撮影 コマ数240 コマ/秒での撮影が可能である.撮影した動画 をパソコン上で1コマずつ(約0.004秒)再生すること により、積み木が転落する挙動を追跡し、ケースごとに 挙動の特徴を整理した.また、2ケース合計24回それぞ れにおいて、転落後の積み木の最終到達点の座標を lcm 単位で計測し、到達距離と中心線からの開き角を算出し た.



図-5 解析モデル(上図:実験台,下図:積み木)

(4) 摩擦試験

積み木と実験台との摩擦係数の取得を目的として摩擦 実験を行った. 試験は**写真-3**で示すように, 傾斜角 30 度の斜面上を積み木が 50cm 滑りきるまでの時間を計測 し, 次式から摩擦係数μを算出する.

$$\mu = \tan \theta - \frac{2L}{gt^2} \frac{1}{\cos \theta} \tag{7}$$

ここで、L は斜面上を滑らせる距離、t は滑りきるま での時間、 θ は傾斜角である.また、落下実験と同様に、 実験台側面から動画を撮影し、積み木が滑り落ちるまで にかかった動画のコマ数を確認することで、滑り落ちる までの時間を計測した.今回、動画が 240 コマ/秒で撮影 されることから、1 コマ当たり 0.004 秒 (\approx 1/240) と してt を算出した.本試験を計 15 回実施し、平均値と して、摩擦係数 0.47 が得られた.

4. 落下実験に対する数値シミュレーション

(1) 解析モデルの構築

図-5 で示すように、実験で使用した実験台および落 下台は、単体の6面体 DEM ブロック要素を用いてモデ ル化し、積み木は異形多面体要素よって解析モデルを作 成した.具体的には、3つの6面体 DEM ブロック要素を 剛結することで、実験で使用した積み木と同じ凸形状を







(b)並進時 (d)落下時 写真-4 積み木の落下方法



	球および円柱の半径r(m)	
Case A	0.005	
Case B	0.001	

再現した.解析モデルの構築には、球と円柱の半径 rを 与える必要がある.そこで、実験で採用した積み木の落 下方法を、解析上で精度よく再現できるかを検証するこ とにより、半径 rの大きさを決定する.

a) 落下方法の再現

採用した落下方法とは、積み木の背後に別のブロック を設置し、落下台上のガイドに沿ってゆっくりと押し出 すことにより、積み木が自重のみで傾き、落下するとい う方法である(写真-4 参照). そのため、解析上でも 1 辺2.5cmの6面体 DEM ブロック要素を積み木の背後に設 置し、ゆっくりと並進するような一定の速度を与え、積 み木の解析モデルを押し出すこととした. そして、表-1 で示すように半径の大きさを変えた 2 ケースで積み木の 解析モデルを構築し、落下方法の再現解析を行う.

b) 解析パラメータ

解析パラメータを表-2に示す.密度および摩擦係数は 試験により得た値である.また,要素同士の過度な貫入 や解析の発散を防ぐため,法線方向のバネ定数 K_n を設 定し,次式より接線方向のバネ定数 K_s と法線,接線方 向の減衰係数 C_n , C_s を求めた.

$$K_s = \frac{K_n}{2(1+\nu)} \tag{8}$$

表-2 解析パラメータ

		質量(g)	密度(kg/m ³)		
	青	10.14	649.0		
積み木	赤	9.91	634.2		
	黄	9.99	639.4		
実験台(木板)		1490	443.5		
積分時間間隔(i(s)	2.0×10^{-6}		
バネ定数	法	線方向K _n	1.00×10^{7}		
(N/m) 接		線方向K _s	3.33×10^{6}		

法線方向Cn

$(N \cdot s/m)$	接線方向Cs	1.85×10^{2}
摩擦係数 µ		0.47
ポアソン比v		0.50

$$C_n = 2h\sqrt{MK_n} \tag{9}$$

 3.20×10^{2}

$$C_s = 2h \sqrt{M} K_s \tag{10}$$

ここで、 ν はポアソン比、Mは質量、hは減衰定数を 表している.実験で使用した積み木が、大塚ら¹⁰によっ て行われた模型振動実験で用いられた積み木と同じ製品 であることから、ポアソン比の値は 0.5 を採用した.ま た、減衰定数は橘らの研究¹³で木球の反発係数より算出 された値h = 0.47を用いた.

c) Case A の解析結果

減衰係数

図-6(b)より,積み木を落下台の前方に押し出す挙動を 再現できたことがわかる.しかし,図-6(c),(d),(e)で は,積み木の角が落下台に乗った状態で傾斜する挙動が みられ,最終的に,滑るように落下した.これは,積み 木および落下台に対する解析モデルの再現性が低いこと が要因であると思われる.6面体 DEM ブロック要素の 特徴の1つとして,要素の頂点と辺を球と円柱でモデル 化することで,鋭い角を有した要素の頂点が引っ掛かる ことを防いでいる.一方,CaseAの解析結果のように, 要素の頂点や辺において滑りが発生しやすくなる可能性 があると考えられる.

d) Case Bの解析結果

Case B の解析結果と実験における落下までの状態を図 -7 に示す.図-7(c),(d)より,Case B の解析では傾斜時お よび落下時の挙動が,実験で得られた結果とほぼ同じ状 態を再現できおり,Case A のような滑りも見られなかっ た.このことから,半径を0.001 m に設定することによ って,実物に対する解析モデルの再現性を十分に保つこ とができており,解析結果に与える影響が小さくなると 考えられる.





図-8 Case1の実験結果と解析結果の比較

(2) 解析条件

本研究では、青色の積み木が下になるように設置した 状態から落下させた Case 1 と、赤色の積み木が下になる ように設置した状態から落下させた Case 2 の 2 ケースに ついて解析を行った.両ケースとも、半径 0.001 m の球 および円柱を用いて解析モデルを作成した.また、解析 パラメータは前節の解析と同様に、表-で示した値を用 いた.

(3) 解析結果

Case 1の実験結果と解析結果の比較を図-に示す.実験 結果は Case 1の中で,解析結果と最も整合したものであ る.ただし,Case 2を含め,その他の実験結果でも一連 の挙動において,下記と同様の特徴がみられた.図-8よ り,実験,解析とも斜面上において合計 5 回の接触が発 生した.図-8(a)-(d)より,1~4回目まで各接触時の積み 木の姿勢が実験と一致しており,回転を伴いながら斜面 を落下する挙動が再現された.また図-8(e)より,4回目 から5回目の接触の間に,ともに大きな移動を行う現象 も確認できた.ただし,解析では積み木の回転量が実験 より大きく表れており,図-8(f)で示した5回目の接触時 の姿勢を再現することはできていない.しかし,合計5 回の接触が発生した各地点は実験と概ね一致していた. また、Case 1 の実験における積み木の最終到達位置を 図-9に示す.ここで、進行方向右側をy方向変位の負と する.図-9(a)で示した実験結果では、最終到達位置の座 標より算出した到達距離の平均値は40.6 cm であり、中 心線からの開き角(絶対値)の平均値は6.7 度となった. また、y方向の変位が負となる傾向が表れた.一方、 Case 1 の解析結果を図-9(b)に示す.ちなみに、解析では 同一の実験ケースで解は同一であり、到達距離が26.7 cm、開き角が1.6 度となり、どちらも実験よりも小さい 結果となった.しかし、y方向の変位が負の位置で停止 しており、実験で得られた傾向と一致した.

さらに、Case 2 における積み木の最終到達位置を図-10 に示す.図-10(a)で示した実験結果では、到達距離の平 均値が35.2 cmであり、開き角(絶対値)の平均値は11.4 度となった.また、Case 2 の実験結果では、Case 1 とは 対称的に、y方向の変位が正となる傾向が得られた.図-10(b)で示した解析結果では、到達距離が25.2 cm、開き 角が0.0度であり、どちらも実験よりも小さい結果とな った.しかし、Case 1 に比べ Case 2 の解析結果は、y方向 の変位が負に移動することを抑制しており、Case 1 と対 称的な傾向が得られたという点では共通している.











図-9 Case1における最終到達位置

5. 結論

本研究では、多様な要素形状に対応可能な3次元DEM 要素として、異形多面体要素を開発した.また、開発し た異形多面体要素の妥当性を検証するために、積み木の 落下実験を実施し、この実験を対象に3次元数値シミュ レーションを行った.研究成果を以下に示す.

- ・伊吹ⁿの6面体DEMブロック要素を剛結することにより,任意の形状を再現可能な異形多面体要素を開発した.
- ・1辺2.5cmの積み木を3つ結合して凸形状を持たせたものを斜面に投下する落下実験を行った.積み木の上下を反対にして落下させる2ケースをそれぞれ12回実施し、転落時の挙動の特徴を整理した.
- ・開発した異形多面体要素を用いて、積み木の解析モデルを構築するにあたり、実験で採用した落下方法の再現解析を実施した.結果、解析上で高精度で再現することができ、実物に対する解析モデルの妥当性が確認された.
- ・異形多面体要素を用いて、積み木の落下実験に対する 3次元数値シミュレーションを実施した.実験結果と



図-10 Case2における最終到達位置

解析結果を比較したところ,積み木と斜面が接触する 回数や各接触時における積み木の姿勢,および各接触 地点が概ね一致するなど,実験を精度よく再現した.

以上より,実施した実験に対して,異形多面体要素に よる解析の妥当性が確認された.しかしながら,計 24 回の実験で生じた到達距離や開き角のばらつきを解析で は考慮できていない.そのため,積み木を押し出し,落 下させる際の速度の大きさや向きに変化を加えるなどの 工夫が必要である.今後は,研究で扱った凸形状の積み 木だけでなく,様々な形状のモデルに対してや石積み擁 壁等の大きなスケールのものを対象とした数値シミュレ ーションを行う予定である.

謝辞:本研究を進める中で,鳥取大学の小野祐輔教授な らびに鉄道総合技術研究所の伊吹竜一様からご助言をい ただいた.また,JSPS 科研費 20K05052 の助成を受けた. ここに,感謝の意を表する.

参考文献

- 1) 国土交通省河川局河川環境課:河川の景観形成に資 する石積み構造物の整備に関する資料,2006.8.
- 被災宅地危険度判定連絡協議会:被災宅地事例, http://www.hisaitakuti.jp/case.html (2021.8.17 閲覧)
- 小野祐輔,内藤正輝,酒井久和,太田直之:SPH法 による石積擁壁の模型振動実験の再現解析,土木学 会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.515-522, 2016.
- 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) 小野祐輔,相澤類,酒井久和,太田直之,中島進, 藤原寅士良,高柳剛,湯浅友輝,池田勇司:石積擁 壁の耐震補強効果の検討のための SPH-DEM 連成解 析法の開発,土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.73, No.4, pp.357-365, 2017.
- 伊吹竜一,小野祐輔,酒井久和,高柳剛,湯浅友輝, 池田勇司:SPH-DEM 法に基づく石積み擁壁の引き 抜き模型実験に対する数値シミュレーション,土木 学会論文集 A1(構造・地震工学),Vol.74,No.4, pp.608-616,2018.
- 伊吹竜一:石積み擁壁に対する大変形 SPH-DEM 解 析法の開発,法政大学大学院紀要,Vol.8, pp.1-8, 2019.

- 榎本美咲,目黒公郎:三次元拡張個別要素法を用いた家具の動的シミュレーション,土木学会第57回年次学術講演会,pp1493-1494,2002.
- 9) 牛島省,福谷彰,牧野統師:3次元自由水面流中の 接触を伴う任意形状物体運動に対する数値解析,土 木学会論文集 B, Vol.64 No.2, pp.128-138, 2008.
- F. Tonon : Explicit Exact Formulas for the 3-D Tetrahedron Inertia Tensor in Terms of its Vertex Coordinates, Journal of Mathematics and Statistics 1 (1), pp.8-11, 2004.
- 清野純史,原口裕子,古川愛子,Charles SCAWTHORN:地震時における建物倒壊挙動の解明 に関する研究,土木学会論文集A,Vol.63 No.4, pp.617-627, 2007.
- 大塚鎮,酒井久和,小野祐輔: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,土木学会第 73回年次学術講演会概要集, pp.51-52, 2018.
- 13) 橘一光他: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, Vol.70, No.2, I_519-I_530, 2014.

(Received ?) (Accepted ?)

DEVELOPMENT OF DEFORMED POLYHEDRAL 3D-DEM ELEMENT AND ITS VALIDATION BASED ON BRICK DROP EXPERIMENTS

Naoki YANAGIDA, Hisakazu SAKAI

Masonry retaining walls are very fragile structures against earthquakes and a great number of damages has been reported. In order to mitigate these damages, it is necessary to elucidate the collapse mechanism of masonry walls during an earthquake and evaluate stabilities and countermeasures. In recent years, several elucidations of the collapse mechanism have been conducted by using numerical analyses. However, there are few three-dimensional numerical simulations of masonry retaining walls with various masonry shape model.

The purpose of this study is to develop the three-dimensional DEM elements which is applicable to various arbitrary polyhedron element shapes using the Distinct Element Method (DEM). First, we developed the deformed polyhedral elements that can reproduce the arbitrary shape by combining a number of polyhedral elements and track their behaviors as the rigid body. Then, we conducted drop experiments using wooden blocks with a convex shape and sliding tests for obtaining the friction coefficient. In order to examine the validation of the developed deformed polyhedral elements, we carried out the three-dimensional numerical simulations for the drop experiments. As the result, the block behaviors of experiments and analyses are quite similar, then the validity of the developed deformed polyhedral elements was verified.