

### 3次元個別要素法における異形多面体要素の開発

法政大学大学院 学生会員 ○柳田 尚毅, 正会員 酒井 久和

#### 1. はじめに

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。伊吹<sup>1)</sup>の研究では、背面地盤や栗石層を SPH 法で、積み石を個別要素法（以下：DEM）で計算する 3次元 SPH-DEM 法が開発され、石積み擁壁に対する大変形評価手法としての有効性が検討された。しかし、DEM 要素としての積み石は直方体要素を使用するため、多様な積み石形状に対応できていない。そのため本研究では、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。プログラムの妥当性を検証するため、積み木の落下実験を実施し、実験結果と解析結果を比較検討する。

#### 2. 剛結ブロック DEM 要素

異形多面体要素を取り扱うために、伊吹<sup>1)</sup>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した。この多面体要素の作成法では、接触判定が従前のプログラムと同様の取り扱いが可能であり、6 面体 DEM ブロック要素の頂点を球、辺を円柱と仮定することで、接触パターンを球と球、球と円柱、球と平面、円柱と円柱の 4 種類へと分類する。これにより、接触判定及び接触力算定の簡便化や鋭い角を有した要素を用いた際に生じる頂点の引っ掛かりなどの問題が解決された。さらに、慣性モーメント、重心等は、剛結要素を構成する 6 面体 DEM ブロック要素の特性を集積することにより求められる<sup>2)</sup>。

#### 3. 積み木の落下実験の概要

本実験では、表面が塗装された 1 辺 2.5cm の積み木を 3 つ結合し、写真 1 のような凸形状を持ったものを傾斜角 30 度の斜面へと落下させる。また、積み木の落下方法については、斜面から高さ 10cm の位置に固定した落下台から、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設置した状態から落下させた Case1 と、赤色の積み木が下になるよう設置した状態から落下させた Case2 の 2 ケースをそれぞれ 12 回ずつ繰り返し実施しており、スマートフォンのスローモーション機能を用いて同時に 2 方向から撮影することによって、積み木が斜面を転落する挙動を追跡した。

#### 4. 数値シミュレーション

開発した 3次元 DEM 要素を用いて、落下実験の数値シミュレーションを行う。

##### 4.1 解析モデル

落下実験で使用した実験台は、単体の 6 面体 DEM ブロック要素を用いてモデル化した。積み木は 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再現した（図 1 参照）。



写真 1 実験モデル (左: 実験台, 右: 積み木)

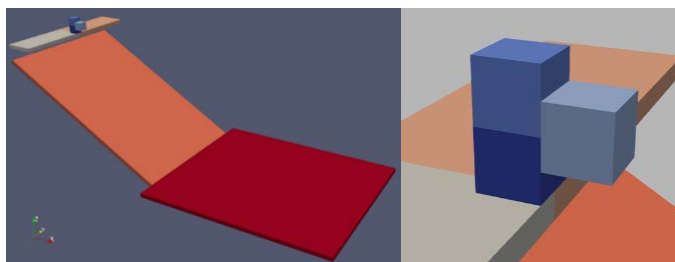


図 1 解析モデル (左: 実験台, 右: 積み木)

キーワード 3次元個別要素法 多面体要素 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 解析パラメータ

解析パラメータを表1に示す. 要素同士の過度な貫入や解析の発散が生じないようにバネ定数を設定し, 橘らの研究<sup>3)</sup>で木球の反発試験より求められた減衰定数の値を用いて減衰係数を設定した. 密度および摩擦係数は試験により得た値であり, 積分時間間隔は $2.0 \times 10^{-6}$ 秒とした.

## 4.3 解析結果

Case1の実験結果と解析結果の比較を図2に示す. 実験結果はCase1の中で, 解析結果と最も整合したものである. ただし, その他の実験結果でも一連の挙動において, 同様の特徴がみられた. 図2より, 実験, 解析とも斜面上において合計5回の接触が発生している. 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ている. また, 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る. ただし, 解析では回転量が実験より大きく表れており, 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る.

## 5. まとめ

本研究では, 実施した落下実験に対して, 開発した3次元DEM要素を用いた数値シミュレーションを行った. 実験結果と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することができた. ただし, 解析では積み木の落下時の姿勢が毎回同一であるため, 計24回の実験で生じた結果のばらつきを考慮することができていない. 解析上でも結果のばらつきを表現するためには, 落下時の積み木に回転角を与え, 姿勢を変化させるなどの工夫が必要である. 今後は, 本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.

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.

表1 解析パラメータ

バネ定数 (N/m)	法線方向	$1.00 \times 10^7$
	接線方向	$3.33 \times 10^6$
減衰係数 (N · s/m)	法線方向	$3.20 \times 10^2$
	接線方向	$1.85 \times 10^2$
密度 (kg/m <sup>3</sup> )		640.9
摩擦係数		0.47

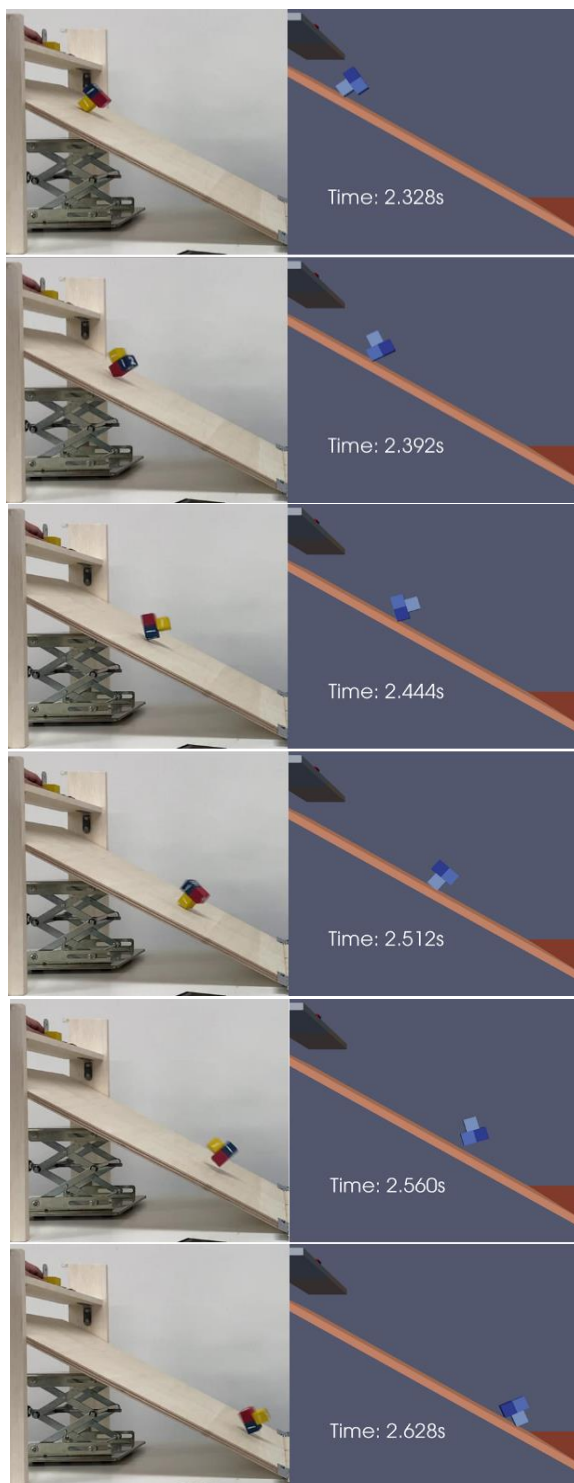


図2 実験結果と解析結果の比較