

個別要素法 (DEM) における簡易な接触力算定手法の提案

法政大学大学院

学生会員 ○伊吹 竜一, 正会員 酒井 久和

鳥取大学大学院

正会員 小野 祐輔

1. はじめに

個別要素法 (以下: DEM) を用いた解析では, 多面形要素によってモデルを構築することがあるが, 近年では接触判定の簡便さから粒状要素 (円や球) を用いた解析が盛んに行われている. ただし, この場合は, モデルを構築する粒子の大きさとその充填度合いによって精度が大きく異なることが確認されており, 橋らはこの問題の落石現象に対する検討を行っている¹⁾. 筆者らは, 石積み擁壁の積み石部分を DEM でモデル化した結果, 平滑な面のモデル化ができないことから粒状要素が噛み合い, 摩擦係数の再現に課題を残した²⁾. そこで, 本研究では DEM の粒状要素の噛み合いを改善し, 平滑な面を表現可能な手法を提案するとともに, 大塚らの積み木の振動実験³⁾に対して数値シミュレーションを行いその妥当性を検討する.

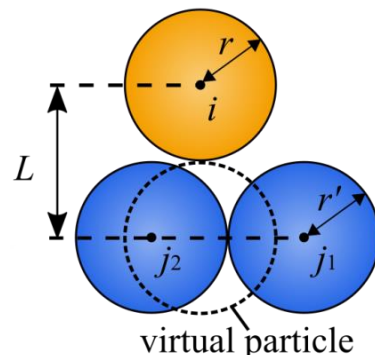
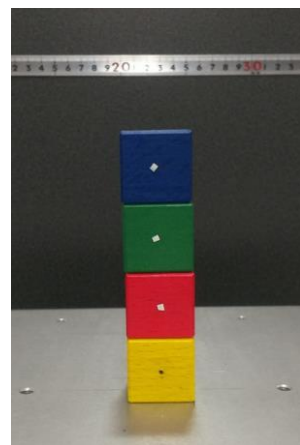


図-1 仮想粒子の接触

2. 接触力の算定方法

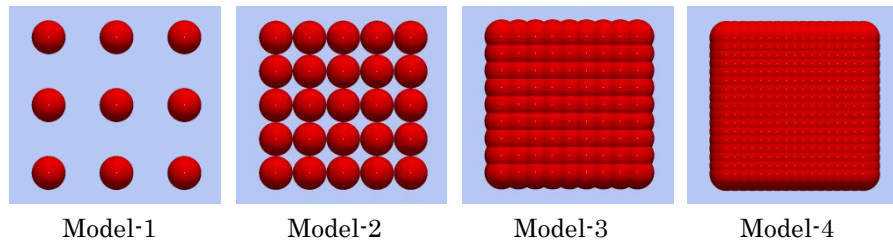
多面形要素を用いた2次元のDEMでは, 辺と辺, 辺と頂点, 頂点と頂点の3種類の接触タイプを定義している. 本研究で提案する手法は, 辺の代わりに仮想粒子 (virtual particle) との接触を計算することで全ての接触タイプを粒状要素同士の接触へと帰着させる. このとき, 着目する粒子 i とその最近傍の2粒子 j_1, j_2 の中心を結ぶ直線との距離 L を用いて接触判定を行う (図-1 参照). さらに, その直線上に仮想粒子を配置し, 粒子 i と仮想粒子の接触を計算することで, 平滑な面間の相互作用力を算定する. これにより, 辺と辺の接触による複雑な計算は粒状要素の接触問題に単純化され, 簡易な接触判定が可能となる.

写真-1 対象実験³⁾

3. 振動実験の数値シミュレーション

3.1 解析条件

対象は大塚らの積み木の振動実験³⁾のうち, 写真-1に示す表面が塗装された一辺2.5cmの積み木を4個積み重ねたケースとした. 解析モデルは, 1個の積み木を構成する粒子数が9, 25, 81, 289となる4パターンを直径が0.5cmの粒子を用いて構築した (図-2 参照). 解析ケースは表-1に示すように仮想粒子の有無と解析モデルの異なる6ケースとした. 使用したパラメータを表-2に示す. 外力には振動台で測定された加速度波形 (図-3 参照) を使用し, 積分時間間隔は 2.0×10^{-6} (s)とした.



Model-1

Model-2

Model-3

Model-4

図-2 積み木モデル一覧 (左から粒子数が9, 25, 81, 289)

表-1 解析ケース

	仮想粒子	解析モデル
Case-A1	なし	Model-2
Case-A2		Model-3
Case-A3		Model-4
Case-B1	あり	Model-1
Case-B2		Model-2
Case-B3		Model-3

表-2 解析パラメータ

密度 (kg/m ³)		676.96
摩擦係数		0.151
ばね係数 (N/m)	法線方向	2.5×10^5
	接線方向	8.3×10^4
減衰係数 (N・s/m)	法線方向	1.3×10^2
	接線方向	7.5×10^1

キーワード 2次元粒状体個別要素法, DEM, 数値シミュレーション, 振動実験

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

3.2 解析結果

ここでは、積み木を上から積み木 A, B, C, D と呼び、実験、解析ともに振動台に固定された積み木 D を基準とした水平方向の相対変位（右を正）として結果を整理する。

3.2.1 Case-A1～3（仮想粒子なし）

従来の粒状体個別要素法で解析を行った Case-A1～3 では、3 ケース全てにおいて図-4 に示すような粒状要素の噛み合いが生じ、積み木間に過度な結合力が発生した。また、解析モデルを構成する粒子数の増加に従って噛み合いは減少したが、完全に除去することはできなかった。

3.2.2 Case-B1～3（仮想粒子あり）

仮想粒子を考慮した解析 Case-B1～3 と実験における積み木崩壊時の比較を図-5 に示す。仮想粒子を用いて平滑な面間の接触を表現することで、加振によって積み木がすべり、左方向へと崩壊する挙動を再現できた。さらに、Case-B2 と実験における各積み木の水平変位の経時変化を図-6 に示す。図より、積み木の変位量は実験よりも大きい値となったが、左方向へ大きく変位し始める時刻は解析と実験ではほぼ一致していることがわかる。また、モデルを構成する粒子数が異なる 3 ケース（Case-B1～3）において、解析結果の差はほとんど見られなかった。

計算開始から 1 秒間のシミュレーションにかかる時間は、Case-A1 が 3 分 10 秒、Case-B2 が 2 分 16 秒、Case-A2 が 13 分 30 秒、Case-B3 が 15 分 25 秒であった。よって、解析モデルが同じであれば計算時間は同程度であり、仮想粒子の有無は計算負荷に大きな影響を与えないと考える。

4. まとめ

本研究では、DEM において粒状要素で平面をモデル化したときに発生する要素の噛み合わせを改善する目的で、仮想粒子を用いた簡易な接触力算定方法を提案した。そして、手法の妥当性を検証するために、大塚らの積み木の振動実験³⁾に対する数値シミュレーションを行った。その結果、粒状要素の噛み合わせを除去し、実験における積み木のすべりや崩壊を非常に高精度に再現することができた。

参考文献

1)橋一光他：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, I_519-I_530, 2014. 2)伊吹竜一他：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，第 37 回地震工学研究発表会，2018. 3)大塚鎮他：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，(2018.投稿中)

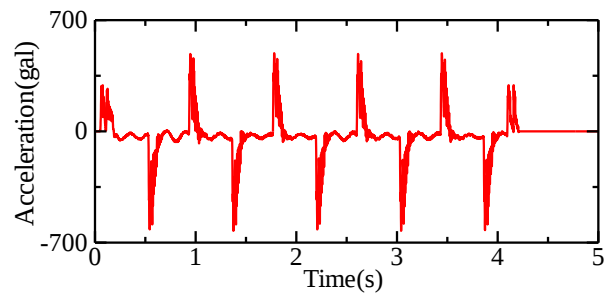


図-3 入力加速度

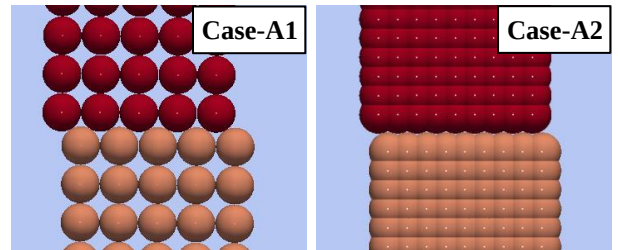


図-4 粒状要素の噛み合い

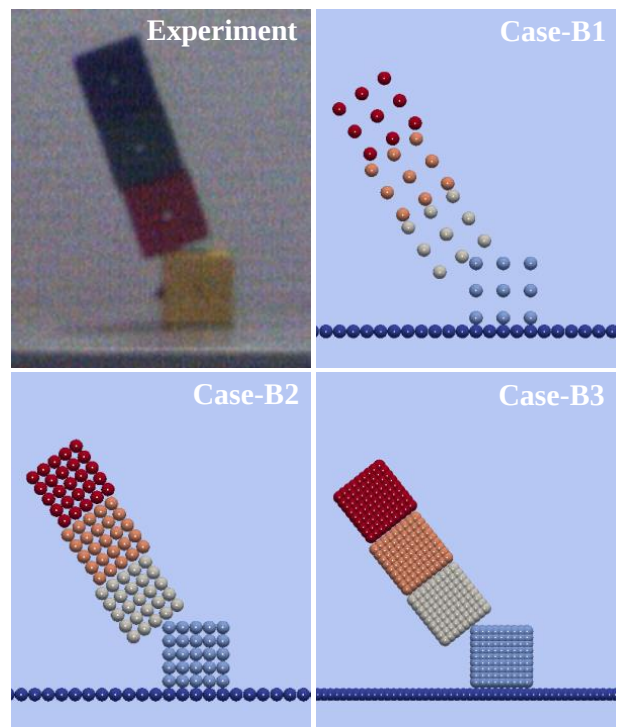


図-5 Time=0.8(s)における挙動の比較

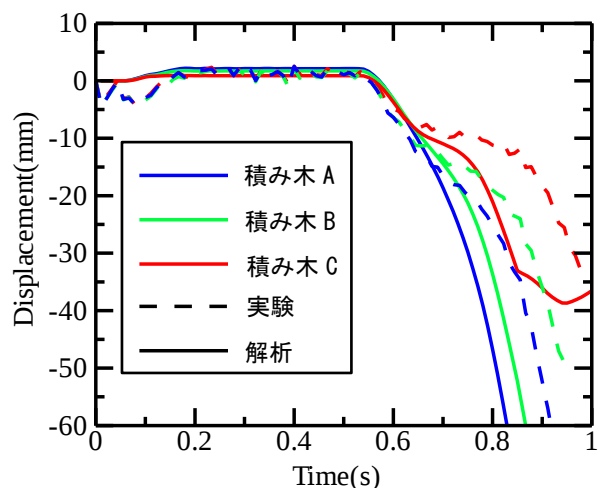


図-6 積み木の水平変位 (Case-B2, 実験)