

## 個別要素法による落石シミュレーションにおける 形状精度と解析精度の関係

○東北大学大学院工学研究科 学生員 橘 一光  
 東北大学災害科学国際研究所 正 員 森口 周二  
 東北大学災害科学国際研究所 正 員 寺田 賢二郎  
 東北大学大学院工学研究科 正 員 京谷 孝史  
 東北大学災害科学国際研究所 正 員 加藤 準治

### 1. 序論

個別要素法<sup>1)</sup> (DEM; Discrete Element Method) は, 形状を考慮したうえで不連続体の運動を解析可能な手法であり, 特に土木工学においては, 個別要素法を落石の挙動解析に用いる機運が高まっている. しかし, 形状を考慮できる一方で, 個別要素法を用いた解析においてどの程度の形状表現精度が必要かについては明確な基準がない.

そこで本研究では, 既往の研究<sup>2)</sup> で実施された模型実験の再現解析を行うことにより, 形状表現精度が結果に与える影響を調べた. なお, 本研究では既往の研究で用いられた個別要素法解析プログラムに改良を加え, より実現象に近い解析を実現するとともに, CADを用いた落石モデル作成手法を用いて, 既往の研究による実験データを対象とした再現解析を行った. また, 既往の研究に対してより一般的な条件で定義した形状表現指標とモデルエラー (解析モデルの表現精度に起因する実現象と解析との差) との関係から, 落石現象を追求するために工学的に必要な形状表現精度を示した.

### 2. 模型実験の概要

本研究で実施した再現解析の対象である模型実験は鷹巣<sup>2)</sup> らが行ったものであり, 落石解析を対象とした個別要素法のモデルエラー定量化を目的として実施された. 図-1に, 実験で用いられた模型斜面と模擬落石を示す. 模型実験に使用された模擬落石は立方体に近い形状の模擬落石 A と正四面体に近い形状の模擬落石 B の 2 種類であり, どちらも直径 3cm の球状の木材を紙やすりで削って作成されている. 実験では模型斜面に模擬落石を落下させ, その挙動を図-1(d) に定義する到達距離  $l$  及び開き角  $\theta$  として計測している.

### 3. 再現解析

本研究では, 球要素を基本とする個別要素法を用いて, 模型実験を再現する. 再現解析を行うにあたり, 異なる形状精度を持つように球要素の個数や大きさを変化させて, 複数の落石モデルを作成した. 既往の研究のモデル作成手法を改め, 本研究では模擬落石の形状を CAD データとして入力し, 落石モデルを作成した. また, 解析プログラムの改良



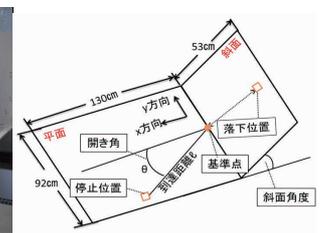
(a) 模擬落石 A



(b) 模擬落石 B

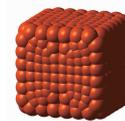


(c) 模型斜面



(d) 測定値の定義

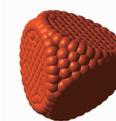
図-1: 模型実験概略図



(a) CaseA1



(b) CaseA7



(c) CaseB1



(d) CaseB7

図-2: 解析モデル例

表-1: 解析に用いたパラメータ

法線方向バネ定数 $K_n$ [N/m]	接線方向バネ定数 $K_s$ [N/m]	摩擦係数 $\mu$	反発係数 $e$	時間刻み幅 $\Delta t$ [s]
$1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6$	0.445	$1.0 \times 10^{-6}$

も行い, 改良による解析結果への影響も別途考察した. 図-2に, 解析に用いた落石モデル例を示す. 解析に用いたパラメータは, 別途検証の上で表-1の値を用いた. 再現解析で得られた落石モデル毎の到達距離  $l$  の分布を図-3に示す. 得られた結果より, 本研究で改良したプログラムと CAD によるモデル作成方法の優位性を確認している.

### 4. 形状精度とモデルエラーの関係

形状精度とモデルエラーの関係を論ずるために, それぞれの指標を定義する. 形状表現については, 要素サイズ比  $s$  及び要素重合比  $t$  をそれぞれ

**Key Words:** 落石, 個別要素法

〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06, TEL 022-795-7425, FAX 022-795-7423

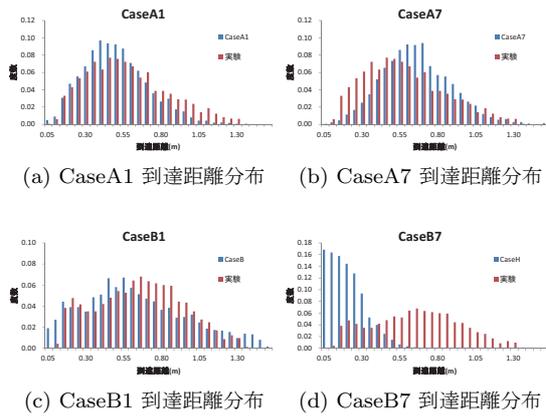


図-3: 落石モデル毎の到達距離分布

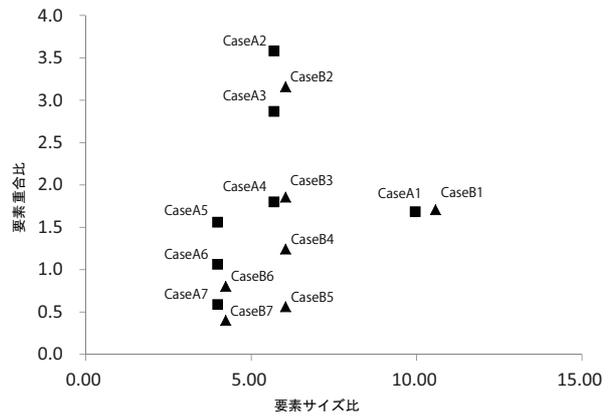


図-5: 指標による落石モデルの形状表現精度分布

表-2: 各 Case の形状表現精度指標とモデルエラーの指標

(a) 模擬落石 A

Case	d [mm]	L [mm]	要素サイズ比	要素重合比	D 値 [%]	
					到達距離	開き角
CaseA1	4.0	2.38	9.96	1.68	12.5	22.9
CaseA2	7.0	2.00	5.69	3.58	15.9	22.4
CaseA3	7.0	2.44	5.69	2.87	16.7	24.2
CaseA4	7.0	3.89	5.69	1.80	15.5	22.9
CaseA5	10.0	6.41	3.98	1.56	20.2	25.9
CaseA6	10.0	9.41	3.98	1.06	20.3	26.8
CaseA7	10.0	16.96	3.98	0.59	20.0	25.0

(b) 模擬落石 B

Case	d [mm]	L [mm]	要素サイズ比	要素重合比	D 値 [%]	
					到達距離	開き角
CaseB1	4.0	2.34	10.57	1.71	9.5	18.6
CaseB2	7.0	2.22	6.04	3.16	7.9	24.5
CaseB3	7.0	3.77	6.04	1.86	6.6	21.2
CaseB4	7.0	5.63	6.04	1.24	7.1	19.3
CaseB5	7.0	12.43	6.04	0.56	23.6	21.5
CaseB6	10.0	12.43	4.23	0.80	9.6	17.6
CaseB7	10.0	24.87	4.23	0.40	70.6	37.4

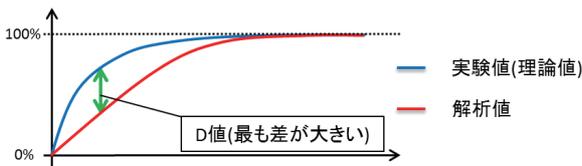


図-4: 累積分布比較による D 値の定義

$$s = \frac{\sqrt[3]{V}}{d}, \quad t = \frac{d}{L}$$

のように定義した。V は落石モデルの体積、d は球要素の直径であり、L は要素間距離である。一般的な形状の落石モデルに適用するために、本研究では表面積を A、球要素数を n とし  $L = \sqrt{A/n}$  のように一般化した要素間距離を用いた。また、落石モデル毎のモデルエラーを定量化するために、図-4 に示す D 値をモデルエラーの指標として用いた。表-2 に、模擬落石 A 及び B の再現解析について、形状表現精度に関する情報とモデルエラー指標とをまとめて示した。表-2 から、本研究で行った解析は開き角に関して有意な差が見られないため、以降の議論は到達距離に関し

て行う。

各落石モデルの形状表現精度を要素サイズ比及び要素重合比で平面上にプロットしたものが図-5 である。模擬落石 A、B に関するシミュレーションでそれぞれ最も単純な CaseA7 及び B7 は実験の挙動から大きく外れているため、これらのモデルが持つ D 値と近い値を持つモデルを危険なモデルとして分離することを考える。すなわち、模擬落石 A、B に関するシミュレーションでそれぞれ D 値が特に大きい CaseA5、A6、A7 及び CaseB5、B7 は、その他のモデルと比較した時に模型実験の現象を十分に再現できていないと考えられる。これらのモデルを図-5 上で今回の落石モデル群から安全側に分離することを考えることで、落石モデルが満たすべき形状表現精度を図中の実線のように具体的に考察することが可能となる。

### 5. 結論

本研究では、個別要素法を用いた落石解析に含まれるモデルエラーの定量化および解析モデルの形状精度とモデルエラーの関係の明確化を目的とし、模型実験の再現実験を行った。その結果、球の半径や配置密度を変化させることで生じる落石モデルの形状精度の差が、解析結果に明らかな影響を及ぼすことを確認した。また、落石モデルの形状表現精度を指標を用いた分布に示し、モデルエラーの分布と比較することで、モデルエラーの小さい落石モデルを検討するための、形状表現精度に基づいた基準を示せる可能性があると考える。一方、本研究で達成されなかった模擬落石の開き角に関する挙動の再現には、形状表現の他にも支配的な要因があると考えられる。

### 参考文献

- 1) Cundall P. A. and Strack O. D. L: A discrete numerical model for granular material, Geotechnique, 29, pp.47-65, 1979.
- 2) 鷹巣将己: 模型実験に基づく個別要素法のモデルエラーの評価, 岐阜大学卒業論文, 2013.