

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

○東北大学工学部	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	高瀬 慎介
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

個別要素法は、形状を有する不連続体の運動を解析できる非質点系の手法である。土木工学においては、従来の経験則や質点系のシミュレーションに代わって、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。一方、個別要素法を用いた場合、どの程度の形状精度が必要であるかを解析精度の観点から考察した例は数が少なく、現状では形状精度に関する十分な知見が蓄積されていない。そこで本研究では、鷹巣ら¹⁾によって行われた模擬落石実験を対象として、複数の異なる形状精度を持つ落石モデルを用いた再現解析を行い、各落石モデル毎の解析結果と実験結果との差を定量的に比較した。

2. 個別要素法による再現解析

本研究で行った再現解析の対象である模型実験の概説、解析条件の設定、落石モデルの順に説明する。

(1) 模型実験

鷹巣ら¹⁾の模型実験は、**図-1**に示すような模型斜面、模擬落石を用いて行われた。模型斜面は木製であり、水平な面と斜面の角度は30度である。模擬落石は直径3cmの木球から6面を削って作成されており、2cm角の立方体に近い形状である。模擬落石の落下位置は計測基準点からx方向に-39cm地点であり、水平面を基準に27.5cm上方から落下している。実験で計測した到達距離と開き角、及び計測基準点と各軸の方向は**図-2**に定義する通りである。

(2) 解析条件

再現解析で用いたパラメータは、**表-1**に示した通りである。バネ定数と時間増分は解析の解が収束することを検証して設定した値であり、動摩擦係数と反発係数は模型実験の中で別途計測された値を用いた。

(3) 落石モデル

本研究では、**図-3**に示したように、球要素を連結させて物体の表面形状を表現する。落石のモデルは、CADを用いて作成したソリッドモデルの表面メッシュから節点の情報を取り出し、球要素の中心座標に置き換えて作成した。モ

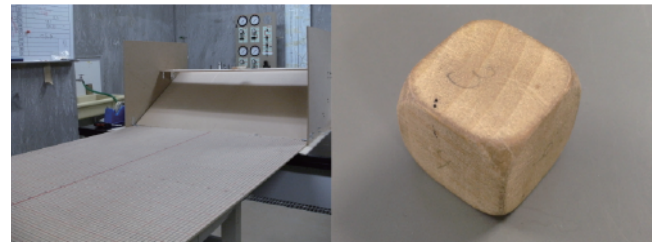


図-1 模型斜面と模擬落石の写真

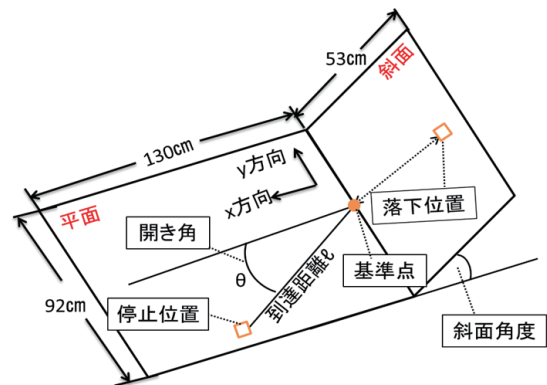


図-2 計測値の概念図

表-1 解析パラメータ

バネ定数 [kN/m]	1.0×10^6
時間増分 [sec]	1.0×10^{-6}
動摩擦係数	0.451
反発係数	0.521

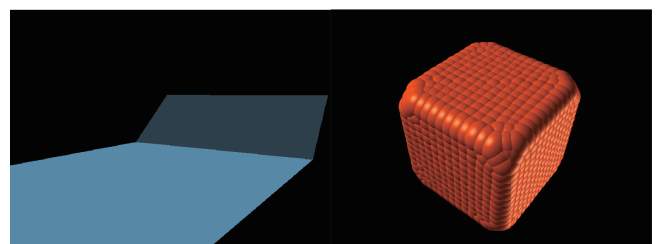


図-3 模型斜面と模擬落石の解析モデル

デル毎の形状精度に差をつけるため、球要素の半径 r と配置の密度を調整することによりモデルを複数作成した。**図-4**は落石モデルの例であり、8種類のモデルのうち最も密なモデル(**図-4-a**)と最も疎なモデル(**図-4-b**)を示している。

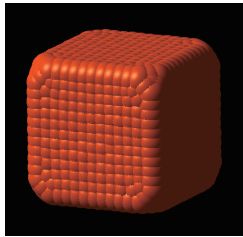


図-4-a Case1

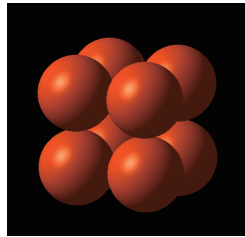


図-4-b Case8

図-4 モデルイメージ

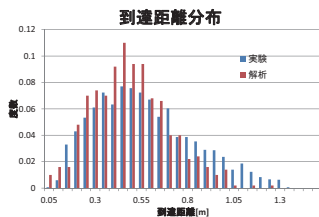


図-5-a Case1

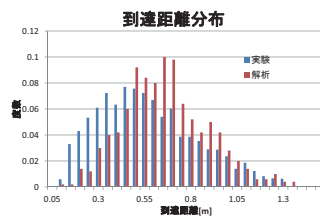


図-5-b Case8

図-5 異なるモデルによる到達距離の比較

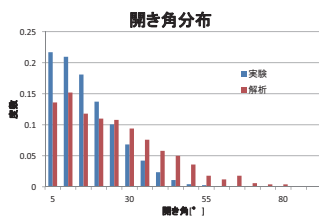


図-6-a Case1

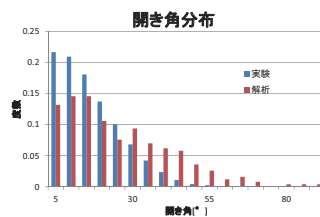


図-6-b Case8

図-6 異なるモデルによる開き角の比較

3. 解析結果

各落石モデルについて解析を行い、到達距離と開き角のヒストグラムを得た。図-4に表示した2つのモデルの解析結果を図-5（到達距離）及び図-6（開き角）に示す。これらの図中には、比較のために実験結果を併せて載せている。

モデル毎の特徴を掴むために、全てのモデルの精度に関する情報と解析結果の統計量を表-2に実験値と併せて整理した。要素代表値にある半径とは連結した球要素の半径であり、値が小さくなるほど細かい形状表現が可能なモデルである。また、要素間平均距離は隣接する球要素の中心距離の平均値であり、値が小さくなるほど球要素配置の密度が高いことを示す。すなわち表中の解析 Case 群は、概して数字が小さくなるほど形状精度の高いモデルである。オーバー回数とは計測範囲外への落下による再試行の数である。D 値とは2つの累積分布に対して階級ごとに差の絶対値を取ったときの最大値であり、本来は K-S 検定に用いられる指標であるが、本研究では図-7に示すように実験結果と解析結果の差を定量化するための指標として用いている。

本研究においてもっとも形状表現の低い Case8 のモデル

表-2 異なるモデルによる解析結果一覧

解析Case	要素代表値(mm)		到達距離[m]			開き角[°]			試行数	オーバー回数[%]	D値	
	球半径	粒子間平均距離	最小	平均	最大	最小	平均	最大			到達距離	開き角
Case1	2.0	1.3	0.017	0.463	1.213	0.1	22.2	78.0	510	2.0	14.9	22.9
Case2	2.0	2.6	0.030	0.482	1.206	0.0	22.3	88.7	514	2.7	11.3	21.3
Case3	3.5	1.3	0.034	0.467	1.158	0.0	22.2	88.8	515	2.9	18.1	22.8
Case4	3.5	1.6	0.055	0.458	1.157	0.0	23.3	82.1	508	1.6	16.7	24.9
Case5	3.5	2.6	0.053	0.461	1.018	0.0	22.4	74.5	512	2.3	16.9	22.8
Case6	5.0	3.3	0.019	0.426	0.988	0.0	24.4	86.9	509	1.8	22.7	28.9
Case7	5.0	5.0	0.044	0.443	1.034	0.1	24.3	80.6	512	2.2	20.5	27.0
Case8	5.0	10.0	0.094	0.637	1.461	0.0	22.7	88.6	588	15.0	20.8	24.0
実験	-	-	0.050	0.508	1.315	0.0	11.9	72.6	3102	3.3	-	-

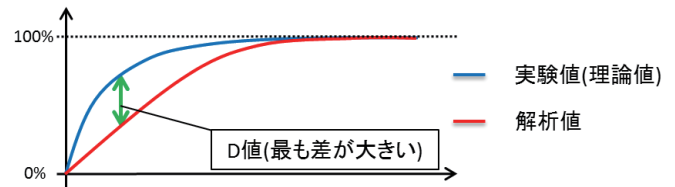


図-7 D 値の定義

は、実験値よりも到達距離が大きくなる傾向から他のモデルと異なっており、かつオーバー回数の割合が実験データに対しておよそ5倍大きくなっているため、再現解析から逸脱した挙動を示していると判断できる。その他のモデルについて、モデル毎に到達距離の最大値を見ていくと、形状精度が高いモデルほど実験値に値が近づいていることがわかる。また、到達距離のD値の変動を見ると、例外的なものもあるものの、全体的に見れば形状精度の低いモデルになるにつれて値が大きくなる傾向があると同時に、Case1-4のモデルグループの解析結果群とCase5-7のモデルグループの解析結果群との間には比較的大幅な精度の向上が見られる。モデルグループ内では2つの指標に基づくモデルの精度変化に対して値の変動が比較的小さく、解析結果全体を通して見た場合の到達距離分布の変化は段階的であると言える。開き角に関しては、異なるモデル間の到達距離の変動に対して開き角の変動は振れ幅が小さく、全体的な変化の傾向も希薄である。

4. 結論

本研究では、球の半径や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。全体的な傾向としては、形状精度を高くすることで実現象により近づいた挙動を得ることができると結論付けられる。グループ単位でまとめた解析結果の比較から、到達距離を精密に再現するためには異なる指標に裏付けられた相応の形状精度が求められると言える。また、本研究では解析モデルの変化に対して開き角のD値の変動が小さい結果になったため、開き角の再現には形状表現の他にも支配的な要因があることが示唆される。

参考文献

- 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。