

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

橘 一光¹・森口 周二²・寺田 賢二郎³・高瀬 慎介⁴・京谷 孝史⁵・加藤 準治⁶

¹学生会員 工学 東北大学 工学研究科 (〒 980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

E-mail: tachibana@mm.civil.tohoku.ac.jp

²正会員 工博 東北大学 災害科学国際研究所 (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

³正会員 工博 東北大学 災害科学国際研究所 (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

⁴正会員 工博 東北大学 災害科学国際研究所 (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

⁵正会員 工博 東北大学 工学研究科 土木工学専攻 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

⁶正会員 工博 東北大学 工学研究科 土木工学専攻 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

本研究では、個別要素法を用いた落石シミュレーションについて、形状表現の差が解析精度に及ぼす影響を調べた。落石を模擬した模型実験とその再現解析を行い、それぞれ異なる形状精度を持つ複数の落石モデルの解析結果を実験結果と定量的に比較した。落石モデルの形状精度を定量的に論じるために、無次元の形状精度指標を2種類導入し、これによって表された形状精度と解析精度との間に関連性があることを示した。これにより、落石シミュレーションの解析精度を形状精度の観点から定量的に制御するための枠組みを提案した。

Key Words: DEM, Rockfall

1. 序論

落石の挙動は、地形や落体の形状の影響を強く受け、非常に複雑なものとなる。そのため、過去の落石事例から統計的に一般的な挙動評価を試みても、想定する条件次第ではその範疇を超えた落石が発生することが考えられる。このため、落石のリスクを正確に評価するためには、局所的な条件を詳細に表現可能な解析手法が必要である。

一般に、落石の形状は想定する現場によって異なるが、今日の落石対策で用いられている評価式¹⁾や質点系のシミュレーション^{2),3),4)}は、対象とする落石の形状の影響を詳細に考慮することが難しい。そのため、従来の評価手法に替わって、形状を直接的に表現できる非質点系シミュレーションを用いる事例が増えてきており、そのような評価手法の中でも代表的な一つとして挙げられるのが、個別要素法⁵⁾である。

個別要素法は不連続体の接触問題を得意とする非質点系の解析手法であり、解析対象の形状を有限個の多面体要素や球要素として表現し、要素間の相互作用を定義することで様々な現象を表現することができる。近年の計算機能力の向上に伴ってその適用範囲を拡げており、落石の挙動解析に関する研究例^{6),7),8)}や落石対策工に関する解析例^{9)~12)}などの研究成果が報告されている。ペナルティ法による接触判定を導入した有限要素法や、不連続変形法¹³⁾などの評価手法が、現象を仮

想仕事の原理に基づくエネルギー問題として毎ステップで力のつり合いを満足するのに対し、個別要素法は要素間の接触力モデルと陽的な時間積分によって現象を表現する点で区別される。すなわち収束計算を必要としない手法であるため、力学的な厳密性という観点で劣る部分はあるものの、解析の規模が大きく複雑になるほど個別要素法は強力なツールとなる。また、近年の計算機能力の発達により、大規模な解析に対する個別要素法の使用環境も整いつつある。

今日の落石シミュレーションにおける個別要素法の利用においては、多面体を用いた解析¹⁴⁾の他に、球要素を用いた簡明な接触判定アルゴリズムによる解析が広く用いられており、そのような解析では複雑な形状を球要素同士の連結によって表現している。また、実際の落石現象により近い解析を行うために、条件として与える材料パラメータの具体的な考察^{15),16),17)}も盛んに行われている。解析対象が持つ形状効果の存在も認識されており^{18),19),20)}、離散体の解析として一括りに述べれば、不連続変形法を用いた2次元解析における形状表現の定量的な考察例²¹⁾もある。しかし、3次元解析における形状表現の妥当性について評価するための知見は、2次元解析に対する知見と比較して不足している。落石の数値シミュレーション手法として3次元の個別要素法の工学利用を進めていくためには、3次元空間における適切な形状表現に関する定量的な評価が必要であり、その実現のためにまず基礎的な研究として、

個別要素法における物体の形状表現の精度が解析結果に与える影響を定量的に考察する必要がある。

本研究では上記の背景に基づき、球要素をベースとする個別要素法を用いて模型実験の再現解析を行い、3次元の落石シミュレーションにおける形状表現の精度が解析結果に及ぼす影響を考察した。考察に際して、形状表現の度合を定量的に扱うための無次元指標を提案するとともに、実験値に対する解析結果の誤差評価値と組み合わせて、形状表現と誤差の関係を定量的に評価する枠組みを示す。

2. 模型実験

本研究では、**図-1, 2**に示す模擬落石（落石を模擬した実験モデル）と模型斜面を用いた模型実験を行い、これを再現解析の対象とした。模擬落石は**図-3**に示すように木球を削り出して、**A**と**B**の2種類を作成した。模擬落石**A**は正六面体、模擬落石**B**は正四面体をイメージしている。ただし、辺と角は丸みを帯びており、また、**図-3**に示す模擬落石の黒く塗られた面は、元の球面を削らずに残している部分である。実験では、試行ごとに模擬落石**A**及び**B**を模型斜面の上部に**図-4**のように固定し、斜面上に投下した。一回の試行ごとに最終到達位置の座標を計測し、この情報を基に、**図-5**に示す到達距離及び開き角を算出した。模擬落石**A**及び**B**について、それぞれ3000回の試行に関する計測を行った。なお、模型実験は風などの擾乱を避けるために全て屋内で実施している。到達距離及び開き角について、**図-6, 7**に模擬落石**A**の結果のヒストグラムを、**図-8, 9**に模擬落石**B**の結果のヒストグラムをそれぞれ示す。

到達距離の分布を比較すると、模擬落石**A**の分布が1つのピークを持つのに対し、模擬落石**B**の分布は2つのピークが存在しており、2つの模擬落石の結果には明らかな差が見られる。開き角に関して、到達距離ほどの明確な形状の違いはないものの、模擬落石**B**の分布は模擬落石**A**の分布に比べて広がりを持っていることが確認できる。

3. 解析手法

個別要素法が開発された当初は多角形要素が用いられていたが、今日では接触判定の容易さから、球要素が広く用いられている。本研究で用いた個別要素法も同様に球要素を基本とするものであり、球要素同士及び球要素と面要素の接触を扱うことが可能である。

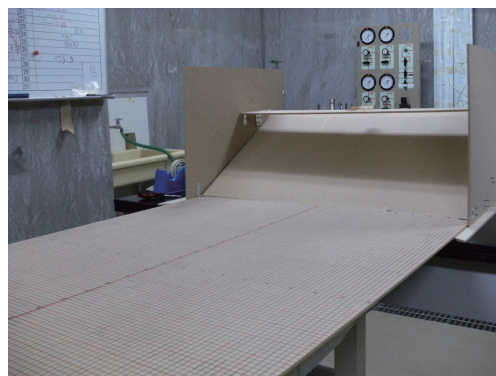


図-1: 模型斜面

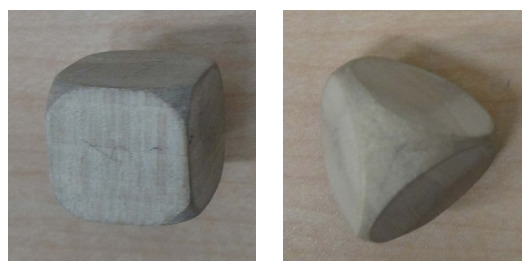


図-2: 模擬落石 A(左)と B(右)



図-3: 模擬落石の寸法と質量

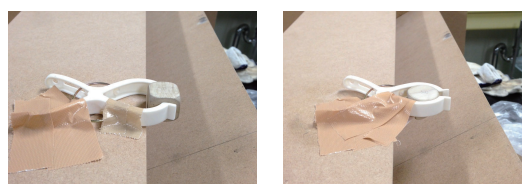


図-4: 模擬落石 A(左)と B(右)の固定

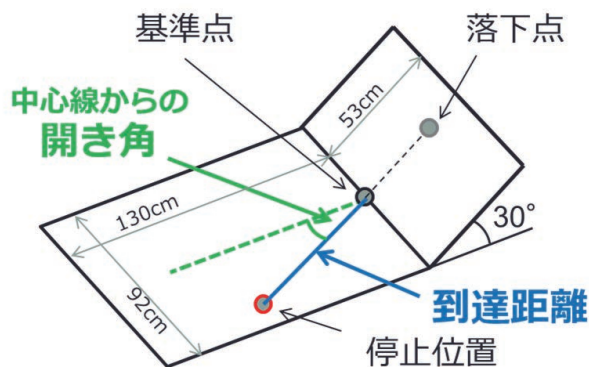


図-5: 測定値のイメージ

(1) 接触力モデル

本研究で用いた接触力モデルは図-10に示すとおりであり、物体に働く接触力を2方向に分解し、法線方向の接触力をバネとダッシュポットで、接線方向の接触力をバネ・ダッシュポット及びスライダーでそれぞれ表現している。接触している要素の間には、このモデルに基づく接触力が貫入量及び貫入速度に応じて計算され、これをもとに要素ごとの運動方程式を解くことになる。具体的には、物体に作用する接触力は法線方向の力 F_n と接線方向 F_s を用いて以下のように表される。

$$F_n + C_n \dot{u} + K_n u = 0 \quad (1)$$

$$F_s + C_s \dot{v} + K_s v = 0 \quad (2)$$

ここに、 u, v はそれぞれ接線方向、法線方向の貫入量ベクトル、 \dot{u}, \dot{v} はそれぞれ接線方向、法線方向の貫入速度ベクトルであり、 K_n は法線方向のバネ定数、 C_n は法線方向のダッシュポットの減衰係数、 K_s は接線方向のバネ定数、 C_s は接線方向のダッシュポットの減衰係数である。また、スライダーは次式のようにクーロンの摩擦則に基づいて接線方向の接触力を制限することを意味する。

$$F_s = \begin{cases} F_s & (\text{if } |F_s| \leq \mu |F_n|) \\ \mu F_n \frac{|F_s|}{|F_n|} & (\text{if } |F_s| > \mu |F_n|) \end{cases} \quad (3)$$

球要素 i に接触している要素 j に対して、それぞれ式(1), (2), (3)のように接触点ごとの接触力を評価し、球要素 i の重心に作用する力 F_i 及びモーメント M_i を、球要素 i に対して接触しているすべての要素 j に関する総和として

$$F_i = \sum (F_n + F_s) \quad (4)$$

$$M_i = \sum (r_i \mathbf{n} \times F_s) \quad (5)$$

のように書き下せる(図-11)。ただし、 \mathbf{n} は球要素 i の重心から球要素 j の重心へ向かう法線方向の単位ベクトル、 r_i は球要素 i の半径である。上式を用いて要素ごとの運動方程式を解くことで、運動が計算される。

(2) 剛体要素

球要素を用いる個別要素法では、球要素を剛結することで複雑な形状を表現することが可能である。このとき、剛体を構成する球要素がそれぞれ個別に接触判定を行っており、球要素ごとに計算された接触点と接触力の情報を剛体の重心に対する作用に換算することで剛体の運動を表現している(図-12)。すなわち、剛体要素 I の重心に関する運動方程式を解くことになり、重心に作用する力 F_I 及びモーメント M_I は剛体を構成する球要素 i に対して接触しているすべての要素に関

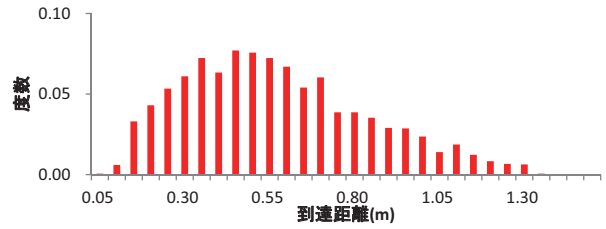


図-6: 模擬落石 A の実験結果 (到達距離)

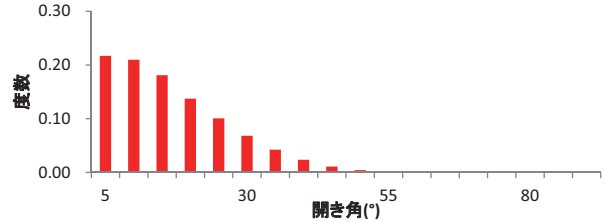


図-7: 模擬落石 A の実験結果 (開き角)

する接触力の総和として

$$F_I = \sum_i (F_n + F_s) \quad (6)$$

$$M_I = \sum_i (N \times F_s) \quad (7)$$

のように書き下せる。このとき、 \mathbf{x}_i を球要素 i の重心座標、 \mathbf{x}_I を剛体の重心座標として $N = (\mathbf{x}_i + r_i \mathbf{n}) - \mathbf{x}_I$ である。なお、本研究では剛体の姿勢管理にクォータニオン(四元数)を導入している。

(3) ランダム性の表現方法

模型実験では、同一条件であっても毎回異なる結果が得られる。これに対して数値解析では、同一条件の下では毎回同じ結果となる。これは、数値解析の中では厳密に同一な条件が保たれる一方で、模型実験における条件は初期姿勢や落下時の姿勢が微妙に異なっているためと考えられる。本研究では解析の中で落石のランダム性を表現するために、3次元空間の各軸周りにあらかじめ回転角を与えて、落下時の初期姿勢を変化させた。この回転角は初期角度振幅 $\pm\theta_0$ の範囲で動く乱数として、毎回変化させた。初期角度振幅に関しては、次節で解析パラメータとしての検証を行っている。

4. 再現解析

形状表現の違いによる解析結果の変動を調べるため、模型実験で用いられた模擬落石の諸元を基に、形状表現の異なる落石モデルを作成した。模擬落石 A の解析に用いる落石モデルを図-13、模擬落石 B の解析に用いる落石モデルを図-14にそれぞれ示した。各落石モデ

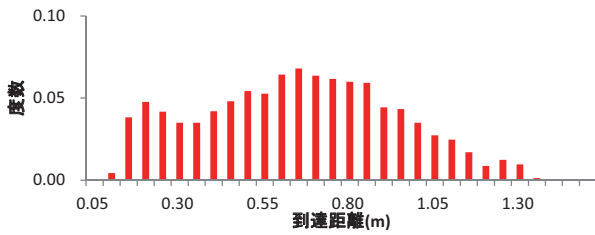


図-8: 模擬落石 B の実験結果 (到達距離)

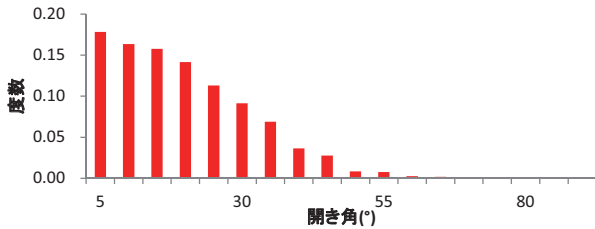


図-9: 模擬落石 B の実験結果 (開き角)

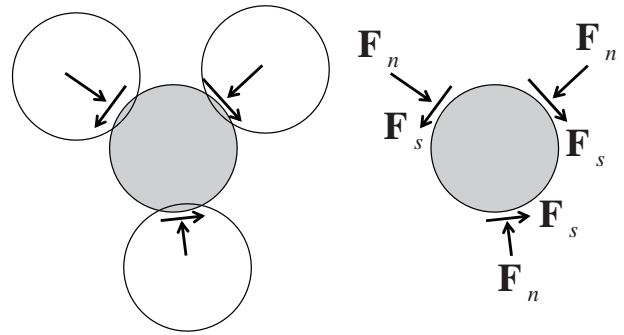


図-11: 球要素に作用する接触力イメージ

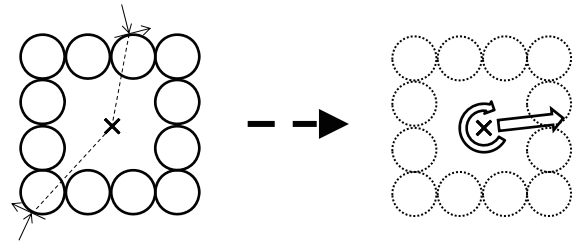


図-12: 剛体要素に作用する接触力イメージ

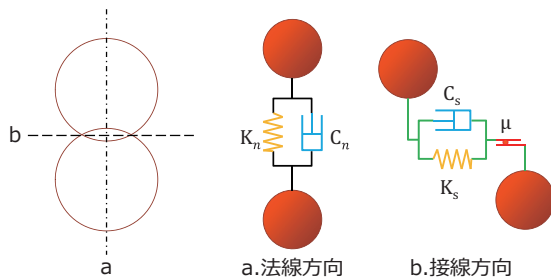


図-10: 接触力モデル

ルは、それぞれ数字が若くなるほど形状精度が良くなる事を期待して、若い番号のモデルほど球要素の半径が小さく、あるいは要素間距離が小さくなるように作成している。

(1) 材料パラメータの決定

前節の接触力モデルを用いて解析を行う場合、以下の材料パラメータを決定する必要がある。

- 法線方向のバネ定数 K_n
- 法線方向のダッシュポットの粘性係数 C_n
- 接線方向のバネ定数 K_s
- 接線方向のダッシュポットの粘性係数 C_s
- スライダの摩擦係数 μ
- 材料の密度 ρ

本研究では、バネ定数と減衰定数に関しては、法線方向と接線方向で同一の値であると仮定した。 K_n は、弾性波 (p 波) の伝播速度 V_p を用いて以下の式²²⁾により

推定することができる。

$$K_n = \frac{1}{4} \pi \rho V_p^2 \quad (8)$$

また、 C_n は 1 自由度系の運動方程式を基にして、

$$C_n = 2h\sqrt{mK_n} \quad (9)$$

と表せる。 m は落石の質量、 h は減衰定数であり、 h は反発係数 e を用いると

$$h = \sqrt{\frac{(\ln e)^2}{(\ln e)^2 + \pi^2}} \quad (10)$$

のように求められる^{23),24)}。以上から、P 波速度 V_p 、反発係数 e 及び摩擦係数 μ を決定することで、解析に必要なパラメータが求められることになる。

反発係数及び摩擦係数に関しては、模型斜面を用いて別途実施した実験により決定した。反発係数は、模擬落石と同一材料でできた球を模型斜面の水平部に自由落下させ、自由落下時の初期高さ H_0 と跳ね返り高さ H の比から

$$e = \sqrt{\frac{H}{H_0}} \quad (11)$$

として算定できる。解析に用いる値は、25cm の高さからの自由落下実験を 30 回行った際の平均跳ね返り高さ 6.8cm から算定し、0.521 とした。

摩擦係数は、模擬落石を用いた斜面上での滑動実験を行い、滑動距離 L 、滑動時間 t 、斜面角度 θ による関係

$$\mu = \tan \theta - \frac{2L}{gt^2} \frac{1}{\cos \theta} \quad (12)$$

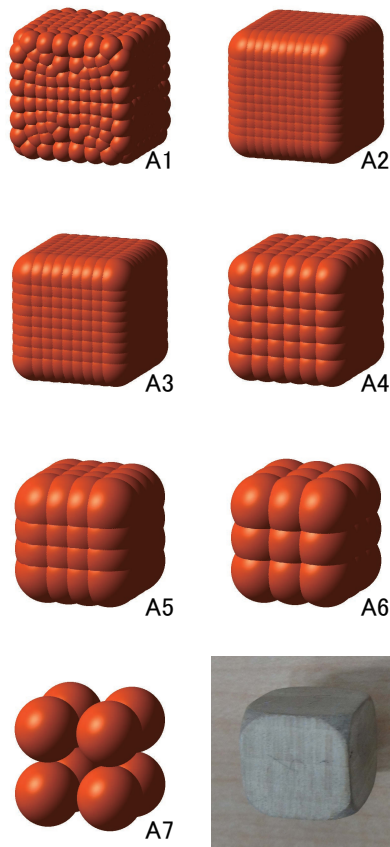


図-13: 模擬落石 A と対応する落石モデル一覧

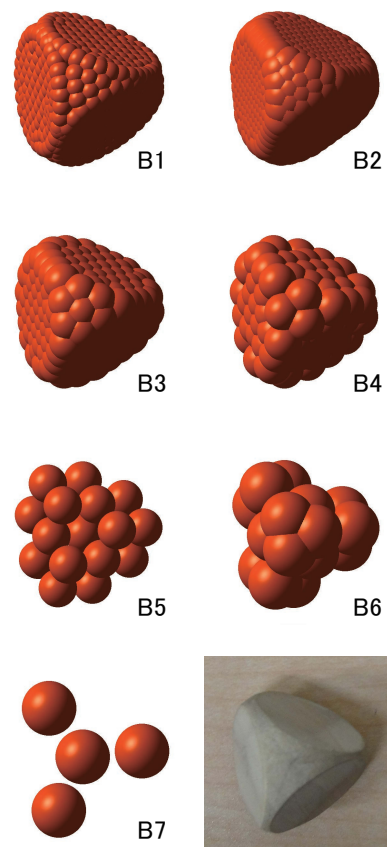


図-14: 模擬落石 B と対応する落石モデル一覧

として算定できる．滑動実験では 30° の模型斜面上を 90cm 滑りきるまでの時間を計測し，模擬落石の面全体の平均的な摩擦係数を評価するために，模擬落石 A は $6 \times 4 \times 2 = 48$ 回，模擬落石 B は $4 \times 3 \times 2 = 24$ 回の測定を行った．ここに，それぞれの測定回数は、『面の数 \times 面の持つ辺の数（滑動させる方向） $\times 2$ 回ずつ』とした．それぞれの平均値は，模擬落石 A が 0.439，模擬落石 B が 0.451 であり，解析で用いる値はこれらの値を平均して 0.445 とした．

(2) バネ定数，時間増分，初期角度振れ幅の決定

一般に，個別要素法では高いバネ定数を用いる場合，解の安定性を確保するために時間増分 Δt の制約が厳しくなる．よって，バネ定数が高ければ高いほど計算コストが大きくなる．式 (8) で求めるバネ定数の値をそのまま用いることは可能ではあるものの，非常に小さな時間増分を用いる必要がある．他方，経験的な知見として，実際のバネ定数よりもある程度バネ定数を低く設定して解析を行っても結果に大きな影響を与えないことが多いことが知られている．すなわち，工学的に十分な精度の解を得られる範囲でバネ定数の値を調整することで，時間増分の制約をある程度緩和することが可能である．また，本研究のように剛体を球要素

の集合体として表現した場合は，球要素の配置の密度等によっても時間増分の満たすべき条件が変わってしまうため，別途時間増分を検証して適正に設定する必要がある．加えて，先に述べたように，本研究では落石のランダム性を表現するために，初期姿勢を微小に変化させて落石モデルを投下しており，この微小な傾きは，初期角度振れ幅 θ_0 の範囲で動く乱数を用いて変化させている．ここに挙げたバネ定数・時間増分・初期角度振れ幅の 3 つのパラメータは，それぞれ解析精度に影響するものであるため，先述の模型実験と同条件で検証解析を行い，解析の安定性や収束性を確認した上でこれらの値を決定することとした．検証解析では，3 つのパラメータの中で着目するパラメータ以外の 2 つを固定し，着目するパラメータを変化させて解析を行うことで，各パラメータが解析に与える影響を確認した．ランダム性を持たせた解析を比較するため，全解析ケースで 300 回ずつ解析を行い，到達距離と開き角のそれぞれに関する累積分布を用いて検証を行った．以降では各パラメータの検証解析について説明する．

バネ定数の検証解析として，表-1 に示すような解析条件を与えた上で 300 回の解析を行い，バネ定数が解の収束傾向に与える影響を確認した．検証に用いた落石モデルは A1 である．図-15, 16 に解析ケースごとの

到達距離および開き角の累積分布を示す。ケース K1 から順に分布の変化をたどると、ケース K3 の時点で解が十分に収束していると判断できるため、本研究の解析ではバネ定数をケース K3 の解析に合わせて

$$K_n = K_s = 1.0 \times 10^6 \quad [\text{kN/m}] \quad (13)$$

とした。

時間増分の検証解析として、表-2 に示すような解析ケースでそれぞれ 300 回の解析を行い、時間増分が解の収束傾向に与える影響を確認した。検証に用いた落石モデルは A1 である。図-17, 18 に解析ケースごとの累積分布を示す。ケース D3 よりも時間増分を大きく取った解析ケースでは解が発散して不連続な分布が見られる一方、ケース D3 よりも時間増分の小さい解析ケースでは解がほぼ同一に収束していることがわかる。この結果に基づき、本研究では時間増分をケース D4 の解析に合わせて

$$\Delta t = 1.0 \times 10^{-6} \quad [\text{s}] \quad (14)$$

とした。

初期角度振れ幅の検証解析として、表-3 に示すような解析条件を与えた上で 300 回の解析を行い、解の収束傾向を確認した。初期角度振れ幅の検証に関しては、落石モデルの形状による影響が強く出ることが予想されるため、模擬落石 A 及び模擬落石 B のそれぞれについて検証を行った。図-19-22 に解析ケースごとの累積分布を示す。模擬落石 A については解析ケース間の分布にあまり大きな変化が見られない。また、模擬落石 B に関しては、ケース R1 の結果は他のケースの結果と異なる傾向を示しているものの、それ以外のケースではほぼ結果が一致している。つまり、解析パラメータとして与える初期角度振れ幅の値が $\pm 5^\circ$ 程度の範囲であれば、A と B のどちらの模擬落石を想定した解析においても、振れ幅の大きさの違いがほとんど影響しないことがわかる。ここに、実験の試行で生じる初期角度振れ幅は $\pm 5^\circ$ よりも微小な範囲だと考えられるため、解析で与える初期角度振れ幅に $\pm 5^\circ$ 程度までの範囲を任意に与えても問題ないと考え、本研究の解析では、初期回転角の振れ幅を

$$|\theta_0| \leq 5.0 \quad [^\circ] \quad (15)$$

とした。

(3) 解析結果

各落石モデルに関して、模型実験と同様の条件で個別要素法による解析を行い、到達距離及び開き角について実験と同様に 3000 回分の解析結果を得た。落石モデル A1-A7 の結果を図-23,24 に、落石モデル B1-B7 の結果を図-25,26 にそれぞれ示す。模擬落石 A 及び B のどちらについても、番号の若い落石モデルの分布がよ

表-1: バネ定数の検証解析に用いたパラメータ

解析ケース	バネ定数 [kN/m]	時間増分 Δt [sec]	初期角度振れ幅 [°]
K1	1.0×10^4	1.0×10^{-6}	± 5.0
K2	1.0×10^5	1.0×10^{-6}	± 5.0
K3	1.0×10^6	1.0×10^{-6}	± 5.0
K4	1.0×10^7	1.0×10^{-6}	± 5.0

表-2: 時間増分の検証解析に用いたパラメータ

解析ケース	バネ定数 [kN/m]	時間増分 Δt [sec]	初期角度振れ幅 [°]
D1	1.0×10^6	1.0×10^{-5}	± 5.0
D2	1.0×10^6	5.0×10^{-6}	± 5.0
D3	1.0×10^6	1.0×10^{-6}	± 5.0
D4	1.0×10^6	5.0×10^{-7}	± 5.0
D5	1.0×10^6	1.0×10^{-7}	± 5.0

表-3: 初期角度振れ幅の検証解析に用いたパラメータ

解析ケース	バネ定数 [kN/m]	時間増分 Δt [sec]	初期角度振れ幅 [°]
R1	1.0×10^6	1.0×10^{-6}	± 1.0
R2	1.0×10^6	1.0×10^{-6}	± 3.0
R3	1.0×10^6	1.0×10^{-6}	± 5.0
R4	1.0×10^6	1.0×10^{-6}	± 7.0

り実験値に近づくような結果が得られた。また、模擬落石 B の解析に関しては、実験値における到達距離の分布に存在する 2 つのピークを B1 のみが再現できていることがわかる。

5. 形状精度が解析結果に与える影響

本研究では異なる形状精度を持つ落石モデルの解析を行ったが、これらの比較から形状精度に関連する知見を得るためには、着目する落石モデルが他のモデルと比べてどの程度優れた形状精度を持つかを把握する必要がある。すなわち、落石モデルの形状精度を定量的に示す指標を用いて比較を行うことが重要である。同様に、解析精度に関連付けた考察を行うためには、模型実験の結果と落石モデルの解析結果から誤差（実現象と解析結果の差）の定量的な評価を行う必要がある。

落石モデルの形状精度を考えると、落石モデルを構成する球要素が小さいほど、形状表現はきめ細かくなると考えられる。また、同じ大きさの面を表現するときにより多くの球要素を用いるほど、形状表現が滑らかになると考えられる。このような推量から、本研究では球要素のサイズと充填度合に関する 2 通りの形状精度

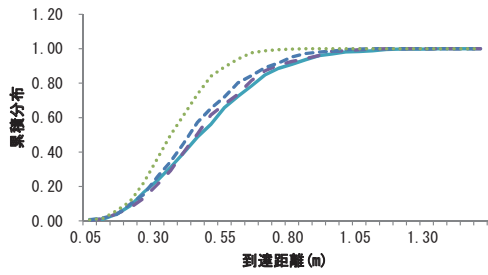


図-15: バネ定数の検証 (到達距離)

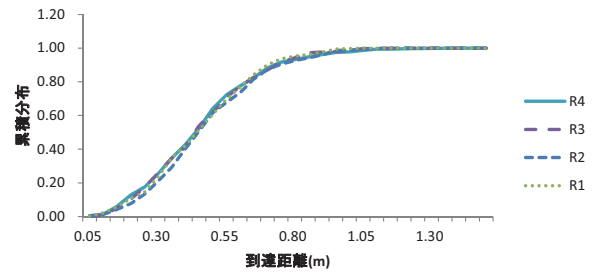


図-19: 初期角度振幅の検証 (模擬落石 A:到達距離)

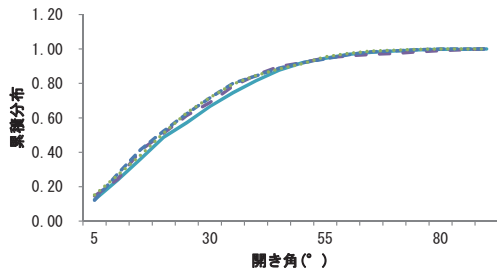


図-16: バネ定数の検証 (開き角)

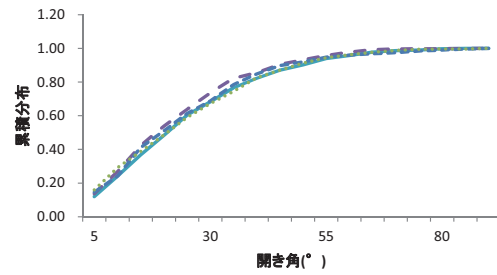


図-20: 初期角度振幅の検証 (模擬落石 A:開き角)

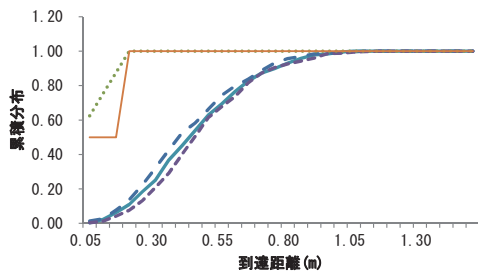


図-17: 時間増分の検証 (到達距離)

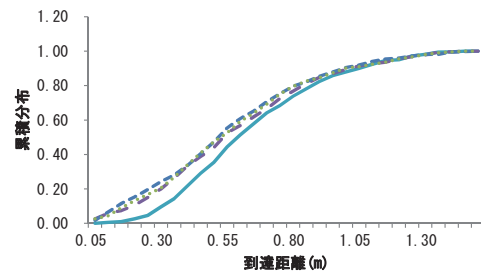


図-21: 初期角度振幅の検証 (模擬落石 B:到達距離)

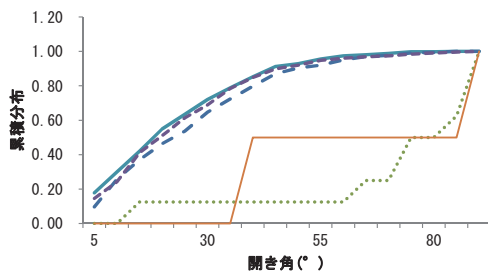


図-18: 時間増分の検証 (開き角)

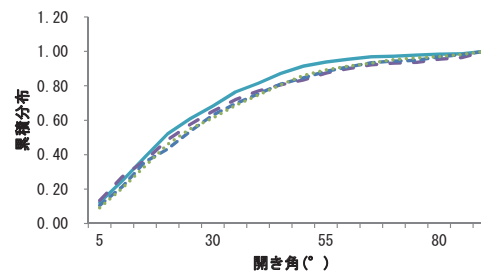


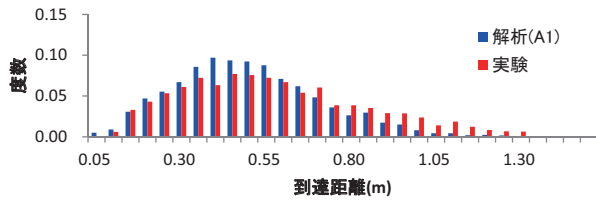
図-22: 初期角度振幅の検証 (模擬落石 B:開き角)

を評価することを狙い、形状精度指標として要素サイズ比 (Element Size Ratio: ESR) と要素重合比 (Overlap Ratio: OR) をそれぞれ以下のように定義した。

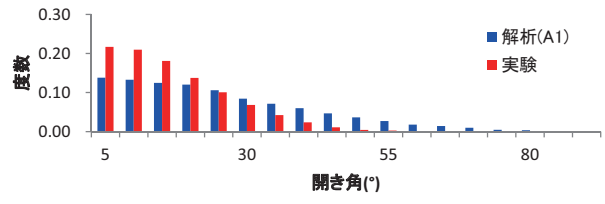
$$ESR = \frac{\sqrt[3]{V}}{d} \quad (16)$$

$$OR = \frac{d}{L} \quad (17)$$

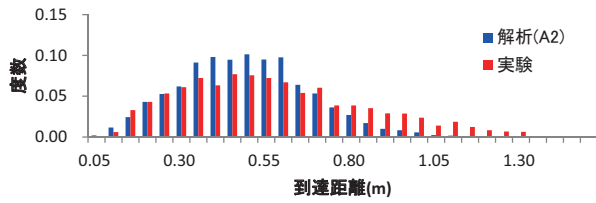
ここに、 V は落体の体積、 d は球要素の直径、 L は隣り合う球要素の中心間距離である。 ESR が落体の代表長さに対する球要素直径のスケール比、 OR が充填による球要素同士のオーバーラップ度合を示しており、どちらも無次元の値である。球要素が小さくなるほど d は小さくなり、球要素が密に充填されるほど L が小さ



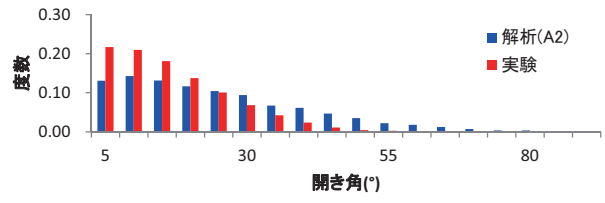
(a) A1 の解析結果 (到達距離)



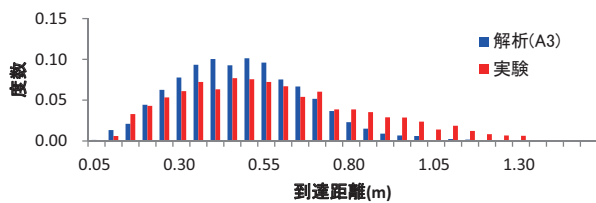
(a) A1 の解析結果 (開き角)



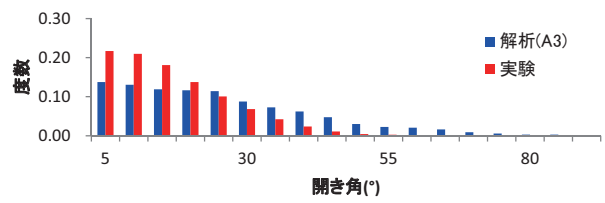
(b) A2 の解析結果 (到達距離)



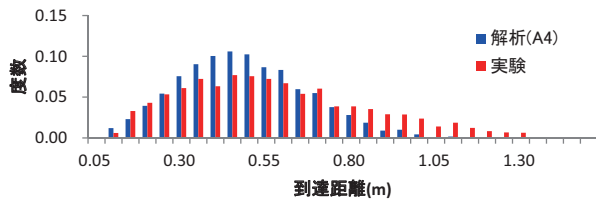
(b) A2 の解析結果 (開き角)



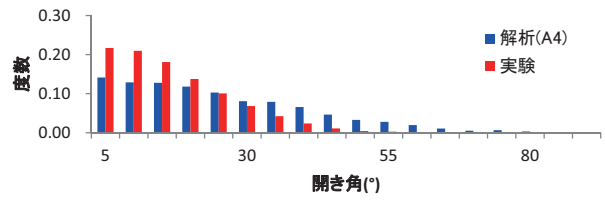
(c) A3 の解析結果 (到達距離)



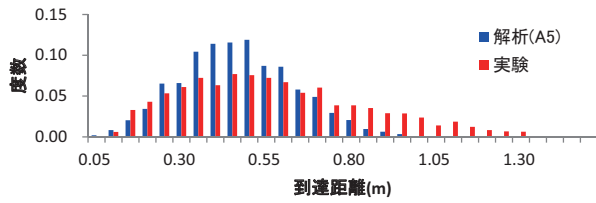
(c) A3 の解析結果 (開き角)



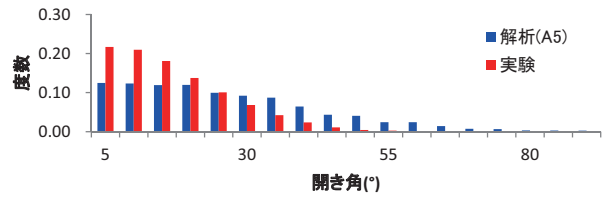
(d) A4 の解析結果 (到達距離)



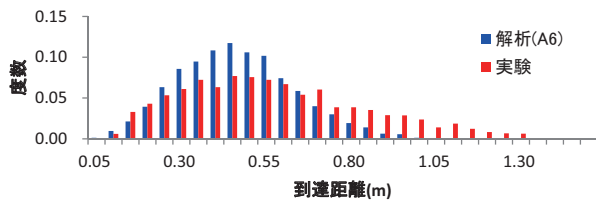
(d) A4 の解析結果 (開き角)



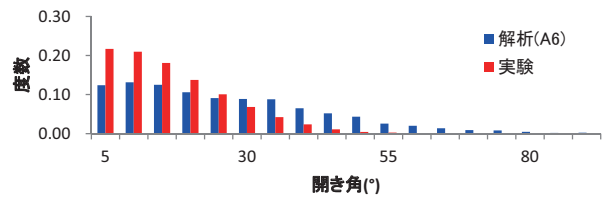
(e) A5 の解析結果 (到達距離)



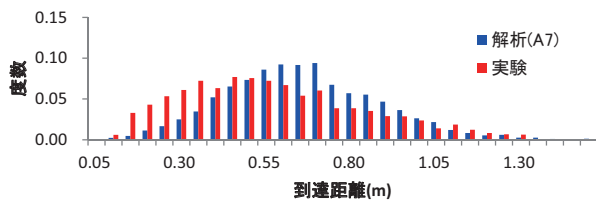
(e) A5 の解析結果 (開き角)



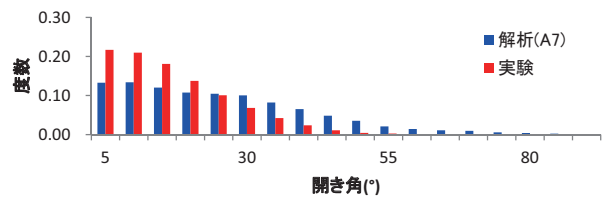
(f) A6 の解析結果 (到達距離)



(f) A6 の解析結果 (開き角)



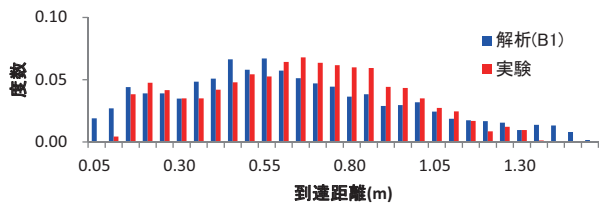
(g) A7 の解析結果 (到達距離)



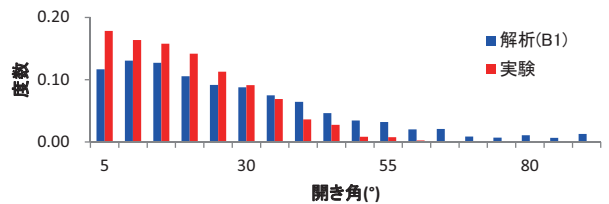
(g) A7 の解析結果 (開き角)

図-23: 模擬落石 A に関する解析結果一覧 (到達距離)

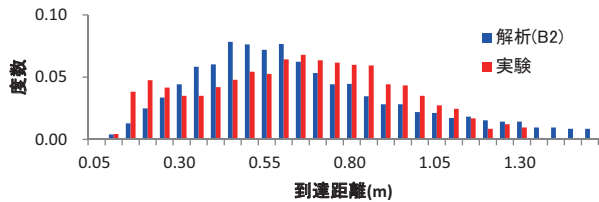
図-24: 模擬落石 A に関する解析結果一覧 (開き角)



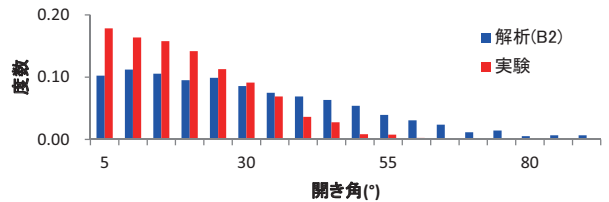
(a) B1 の解析結果 (到達距離)



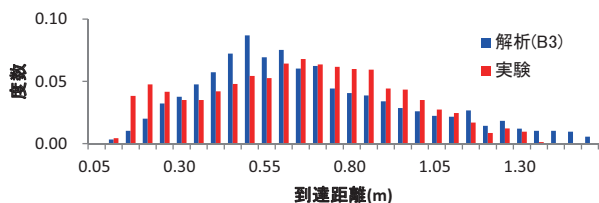
(a) B1 の解析結果 (開き角)



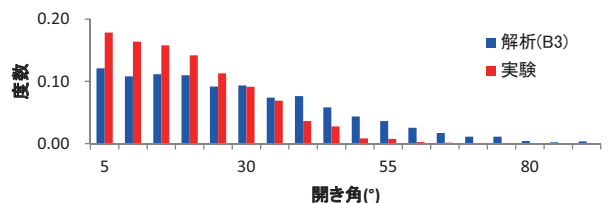
(b) B2 の解析結果 (到達距離)



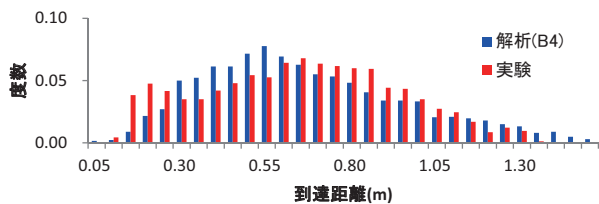
(b) B2 の解析結果 (開き角)



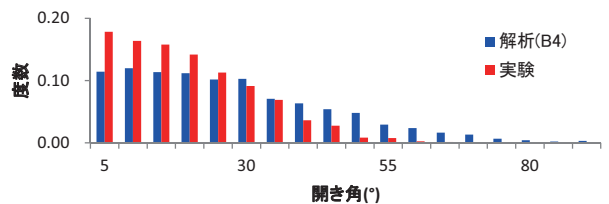
(c) B3 の解析結果 (到達距離)



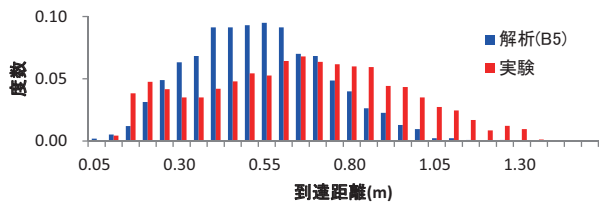
(c) B3 の解析結果 (開き角)



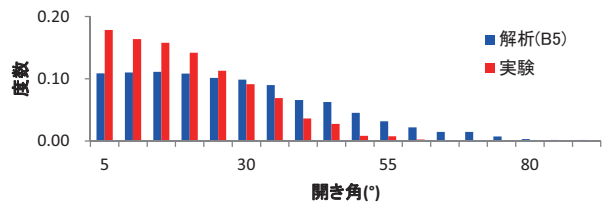
(d) B4 の解析結果 (到達距離)



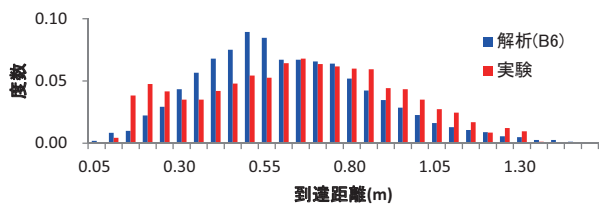
(d) B4 の解析結果 (開き角)



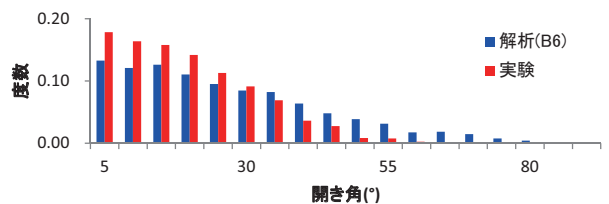
(e) B5 の解析結果 (到達距離)



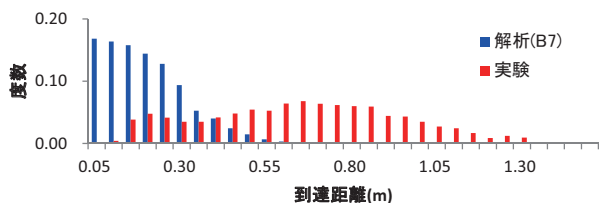
(e) B5 の解析結果 (開き角)



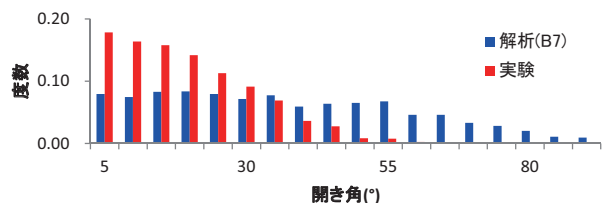
(f) B6 の解析結果 (到達距離)



(f) B6 の解析結果 (開き角)



(g) B7 の解析結果 (到達距離)



(g) B7 の解析結果 (開き角)

図-25: 模擬落石 B に関する解析結果一覧 (到達距離)

図-26: 模擬落石 B に関する解析結果一覧 (開き角)

くなることから、形状精度指標はそれぞれ値が大きくなるほど落石モデルの形状精度が高いことを意味する。なお、本研究で作成した落石モデルは隣り合う球要素の中心間距離はある程度一定にはなっているものの、完全に一定ではない。そのため、球要素の平均中心間距離として L を以下のように定義した。

$$L = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (18)$$

ここに、 A は落石モデルの表面積、 n は球要素の数である。上記の L の値は、落体の表面を n 個の合同な図形に分割した時の図形の代表長さと言える。

落石シミュレーションの解析精度は、実験と解析のヒストグラムから以下のように誤差評価値を定義して評価した。

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (\text{sim}_i - \text{exp}_i)^2} \times 100 \quad [\%] \quad (19)$$

但し、 sim_i は落石シミュレーションによるヒストグラムの区分 i における値であり、 exp_i は模型実験によるヒストグラムの区分 i における値、 n は区分の総数である。すなわち、 ϵ は解析と実験のヒストグラムに含まれる誤差を区分で平均した値である。

各落石モデルに関して、形状精度指標と誤差評価値を表-4, 5にまとめた。解析結果は、到達距離と開き角に対して、どちらも形状精度の指標の値が大きくなるほど誤差が小さくなる傾向があるが、到達距離の方が明確な傾向を持っていると考えられるため、以降は到達距離の解析結果を用いて考察する。模擬落石 A の解析誤差を図-27、模擬落石 B の解析誤差を図-28にそれぞれ図示した。模擬落石の形状に関わらず、落石モデルの形状精度が高くなるにつれて解析誤差が小さくなっていることがわかる。また、両方の模擬落石に関する解析結果を比べると、模擬落石 A においては要素サイズ比の変化に対して解析誤差が大きく変化している一方、模擬落石 B においては要素重合比の影響も大きいことが確認できる。これより、要素サイズ比と要素重合比の示す落石モデルの形状精度はそれぞれ独立して解析精度に影響していると考えられ、これらのパラメータを組み合わせることで、落石モデルの適切な形状を効果的に表現できる可能性がある。

図-29に、要素サイズ比と要素重合比によって表示された各落石モデルの形状精度分布を示した。図-27, 28の到達距離に関する誤差値をもとに、同程度の誤差を持つ落石モデルのグループを色分けして示している。形状精度指標の定義から、図-29は図中の右上に存在する落石モデルが形状精度の良いものであることを示しており、色分けされたモデルの分布傾向もまた、概ね図の左下から右上にかけて変化していることがわかる。すなわち、形状精度指標で表現された空間の領域はある

表-4: A 群の形状表現精度指標と解析精度の指標

ケース	d [mm]	L [mm]	要素 サイズ比	要素 重合比	誤差 [%]	
					到達距離	開き角
A1	4.0	2.38	9.96	1.68	1.17	3.79
A2	7.0	2.00	5.69	3.58	1.56	3.71
A3	7.0	2.44	5.69	2.87	1.57	3.92
A4	7.0	3.89	5.69	1.80	1.54	3.83
A5	10.0	6.41	3.98	1.56	2.08	4.32
A6	10.0	9.41	3.98	1.06	1.98	4.29
A7	10.0	16.96	3.98	0.59	2.07	4.07

表-5: B 群の形状表現精度指標と解析精度の指標

ケース	d [mm]	L [mm]	要素 サイズ比	要素 重合比	誤差 [%]	
					到達距離	開き角
B1	4.0	2.34	10.57	1.71	1.28	2.78
B2	7.0	2.22	6.04	3.16	1.53	3.81
B3	7.0	3.77	6.04	1.86	1.48	3.33
B4	7.0	5.63	6.04	1.24	1.34	3.09
B5	7.0	12.43	6.04	0.56	2.48	3.42
B6	10.0	12.43	4.23	0.80	1.61	2.64
B7	10.0	24.87	4.23	0.40	6.74	5.46

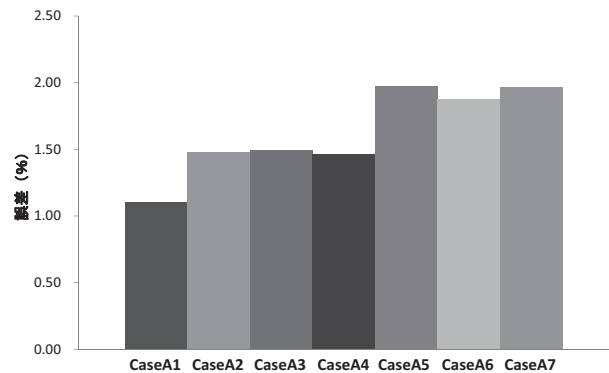


図-27: 模擬落石 A の解析誤差 (到達距離)

程度の解析精度と対応づけることが可能であり、落石モデルを形状精度指標で表現することで解析精度を定量的に論じられる可能性がある。本研究における解析精度の議論は、再現解析で扱った落石モデルの存在する範囲に限られるものの、図-30に示すように形状精度指標の空間と解析精度の明確な関連性を見出すことが可能であることを示唆するものである。今後、同様の枠組みで評価した解析結果を蓄積し、より多様な解析結果に基づく関連性評価を行うことで、適切な解析精度を確保するための形状精度の基準を考える判断材料が得られると考えられる。

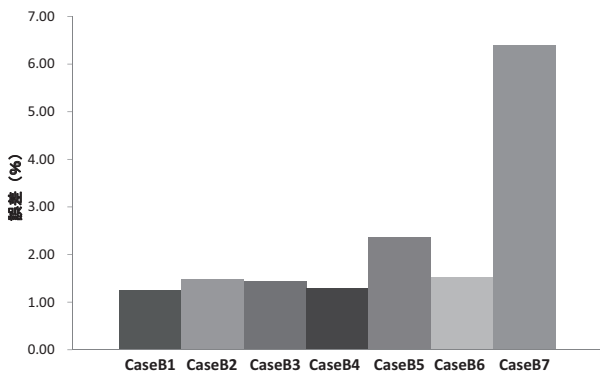


図-28: 模擬落石 B の解析誤差 (到達距離)

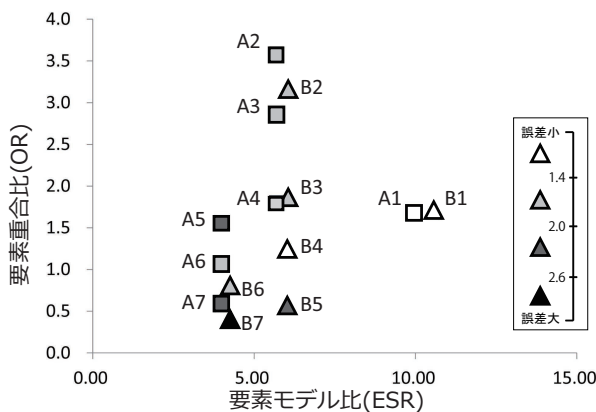


図-29: 形状精度指標による落石モデルの表示

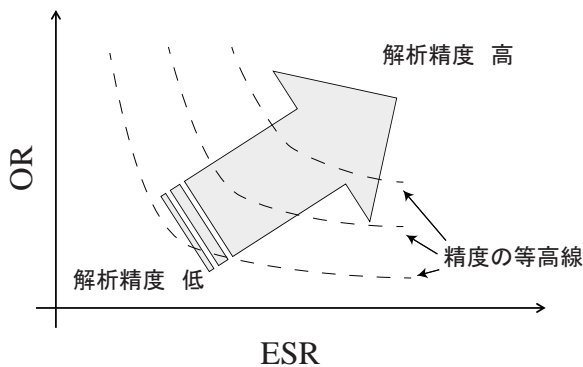


図-30: 指標空間と精度の等高線のイメージ

6. 結論

本研究では、個別要素法を用いた落石解析における解析モデルの形状精度と解析精度の関係を調べることを目的とし、模型実験の再現実験を行った。本研究で導入した2つの形状精度指標を用いて、解析精度との

定量的な対応付けが可能であることが確認された。この結果に基づいて、形状精度と解析精度の関係を定量的に評価する枠組みを提案した。本研究では2種類の異なる形状を持つ模擬落石を対象として計算結果を整理し、基礎的な形状精度指標の提案及び解析精度との関連性を検討したが、この関係を更に踏み込んで論じるためには、更に多様な形状の落石に関する模型実験や再現解析の実施が必要である。重ねて、本研究で扱った模擬落石の形状に比べて複雑な形状を持つ落石に対し、今後同様な手法で精度評価を行うためには、形状精度指標の適用できる条件・仮定の緩和、指標の表現力向上等の課題が残されている。

また、本研究で着目した形状精度の他にも、落石現象に対して支配であると考えられる要因として、斜面上の物性や植生の影響²⁵⁾も挙げられるが、本研究で行った実験は一律な材料で構成された平板上で行っており、斜面性状に関して検討することはできない。個別要素法を用いた3次元シミュレーションを落石解析に適用する上では、別途斜面性状の定量化を考案し、今後の研究で考慮する必要があると考えられる。

参考文献

- (社) 日本道路協会: 落石対策便覧, 丸善, 2000.
- 吉田博, 荒田久和: マイコンによる落石の飛跡シミュレーション, 第1回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.55-6, 1983.
- 右城猛: 落石の運動軌跡の予測法に関する検討, 土木研究センター, 土木技術資料 31(8), p418-423, 1989.
- W. D. Stevens: Rocfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls, A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science, University of Toronto, 1998
- Cundall P. A. and Strack O. D. L: A discrete numerical model for granular material, *Geotechnique*, 29, pp.47-65, 1979.
- 表真也, 岡田慎哉, 石川博之, 伊東佳彦, 日下部裕基: 2次元および3次元DEMを用いた落石シミュレーションに関する検討, 第37回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 講演番号 24, 2008.
- 前田健一, 羽柴寛文, 山口悟, 牛渡裕二, 川瀬良司: 堆積層の衝撃力伝達特性を考慮した落石挙動の二次元個別要素法解析とパラメータ決定に関する考察, 斜面災害における予知と対策技術の最前線に関する国際シンポジウム論文集, 2011.
- 石丸真, 栃木均, 中島正人, 白井孝治: 重要構造物周辺斜面の地震時崩壊後の影響評価手法の構築—3次元個別要素法による崩落岩塊群の挙動解析—, 電力中央研究所報告, N11051, 2012.
- J. P. Plassiard and F. V. Donzé: Optimizing the design of rockfall embankments with a discrete element method, *Engineering Structures*, 32, pp.3817-3826, 2010.
- K. Thoeni, C. Lambert, A. Giacomini and S. W. Sloan: Discrete Modelling of a Rockfall Protective System, *International Conference on Particle-based Methods - Fundamentals and Applications*, 2011.
- Klaus Thoeni, Anna Giacomini, Cédric Lambert, Scott W. Sloan and John P. Carter: A 3D discrete element modelling

- approach for rockfall analysis with drapery systems, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 68, pp.107-119, 2014.
- 12) 原木大輔, 香月智, 田代元司: 円柱形要素を用いた個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析, 土木学会論文集 A, Vol.65 No.2, pp.536-553, 2009.
 - 13) G. -H. Shi and R. E. Goodman: Discontinuous Deformation Analysis, *Proceedings of the 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, pp.260-277, 1984.
 - 14) 例えば 中川光雄, 山田正雄, 中谷紀行, 近重朋晃: 合理的な接触判定法に基づく 3 次元個別要素法による落石・岩盤崩落シミュレーション, 日本地すべり学会誌, 47(3), 147-154, 2010-5-25
 - 15) 表真也, 岡田慎哉, 日下部裕基: 落石シミュレーションの定数設定法に関する検討, 国土交通省北海道開発局第 52 回 (平成 20 年度) 北海道開発技術研究発表会, 技 45, 2008.
 - 16) 倉岡千郎, 太田敬一, 杉山実: 立木の影響をモデル化した落石の個別要素法による解析, 第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.97-100, 2000.
 - 17) 牧野孝久, 倉岡千郎, 杉山文乃: 落石ハザードマップ作成のための 3 次元個別要素法の検討, 第 4 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 2008.
 - 18) Sakaguchi, H. and Igarashi, T.: Plugging of the flow of granular materials during the Discharge from a silo, *International Journal of Modern Physics*, B7, pp.1949-1963, 1993.
 - 19) 榊原辰雄, 加藤正司, 吉村優治, 澁谷啓: 砂のような粒状材料のせん断挙動およびせん断層に与える粒子形状の影響, 土木学会論文集 C, Vol.64 No.3, pp.456-472, 2008.
 - 20) 山田祥徳, 酒井幹夫, 茂渡悠介, 土屋将夫, 平山修一: 離散要素法における回転抵抗モデルの開発, *J. Soc. Powder Technol. Japan*, 47, pp.214-221, 2010.
 - 21) 萩原育夫, 大西有三, 佐々木武, 西山哲: 非質点系落石シミュレーションにおける落石形状指標に関する検討, 地盤工学ジャーナル, 4(4): 357-367, 2009.
 - 22) 伯野元彦: 破壊のシミュレーション, 森北出版, 2004.
 - 23) 大町達夫, 荒井靖博: 個別要素法で用いる要素定数の決め方について, 構造工学論文集, Vol.32A, pp.715-723, 1986.
 - 24) 地盤工学会: 地盤に関する解析技術 (個別要素法) 講習会, 配布資料, 2012.
 - 25) 萩原育夫, 佐々木勝司, 島内哲哉, 中村公一, 西山哲, 大西有三: 現場落石実験から得られる斜面性状を考慮した速度比の特徴について, 第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会, 2009, pp. 57-62

(2014. 6. 20 受付)

Quantitative relationship between shape representation quality and calculation accuracy

Ikkoh TACHIBANA, Shuji MORIGUCHI, Kenjiro TERADA, Shinsuke TAKASE,
Takashi KYOYA and Jyunji KATO

In this study, the effect of shape representation in rockfall simulations using DEM was investigated. A model test and its simulation were performed. In the simulation, different numerical models were prepared by changing shape representation to figure out a quantitative relationship between shape representation and calculation accuracy. Every simulation was done in the same condition as experiment, except the shape representation quality of calculation models. Two non-dimensional indexes, namely ESR and OR, were defined to enable quantification of the shape representation quality. Eventually, the relationship between the shape representation quality and the accuracy of DEM simulation were found through comparison of simulated data with experiment. Based on the results obtained in this study, the framework to enable quantitative design of calculation accuracy by controlling shape representation quality was proposed.