

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820189

研究課題名(和文) 落石挙動予測解析の妥当性を保証する計算条件の明示

研究課題名(英文) Explicit calculation conditions to guarantee the validity of rockfall simulations

研究代表者

森口 周二 (Moriguchi, Shuji)

東北大学・災害科学国際研究所・准教授

研究者番号：20447527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：高度な落石シミュレーションにおいて、工学的に意味のある解析結果を得るための計算条件の基準や計算パラメータに関する情報を整備した。これらの情報は、今後の落石防災事業における数値解析の利用に対しての基礎データとなる。また、実際の落石事例を対象として、整備した情報の有用性を確認するとともに、高度な落石シミュレーションの結果から落石のリスクを確率論的に評価する手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：The criteria of calculation conditions and the information of input parameters for rockfall simulations are analyzed from the viewpoint of engineering. Obtained knowledges can be used as basic information for numerical simulations in rockfall disaster prevention. Based on the obtained information, a real rockfall was reproduced to validate the availability of the information. Furthermore, a new method for probabilistic rockfall risk analysis based on numerical simulations was proposed.

研究分野：地盤工学

キーワード：落石 個別要素法 数値解析

### 1. 研究開始当初の背景

落石は、世界各国で共通の問題であり、我が国においてもそのリスクは高い。計算機能力の発達した現代では、数値解析による落石挙動予測が重要な役割を担っているが、簡易的な質点系の評価手法だけでなく、より現実に近いモデル化が可能な非質点系による高精度予測が必要となる場面が増えてきた。非質点系手法は、斜面や落石の形状を直接的に表現できることが利点であるが、高精度な落石挙動予測を実現するための計算条件などの基準や評価の枠組みについては議論が十分ではない。今後、非質点系手法の利用拡大が期待される中で、このような状況は危険である。

### 2. 研究の目的

(1) 非質点系手法の一種である個別要素法を対象として、高精度な落石挙動予測を実現するために、解析結果の妥当性を保証するための条件を整理する。

(2) 非質点系手法による解析結果に基づいて、定量的かつ効率的な落石危険度評価を実現する手法を提案する。

### 3. 研究の方法

(1) 過去に実施された木製の模擬落石を用いた小規模模型実験、および碎石を用いた中規模模型実験を対象として、それらの再現解析を実施する。この中で、解析の条件やモデルの精度などを様々に変化させ、それらの影響を定量化し、工学的に意味のある解析結果を得るための基準や条件を整理する。

(2) 落石の実事例を題材として、非質点系手法を用いた落石挙動予測解析を実施し、その結果に基づいて、落石リスクを定量的かつ効率的に評価する手法を提案する。

### 4. 研究成果

(1) 個別要素法を用いて、図1および図2に示す模型実験の再現解析を実施した。図1は木製の模擬落石および模型斜面を用いた実験であり、図2は碎石とコンクリート製の模型斜面を用いた実験である。これらの実験では、模型斜面上で模擬落石を落下させ、到達位置を観測している。両実験ともに、十分な試行回数の下で実験が実施されており、空間内に広がる到達位置の情報が分布として得られている。再現解析についても、実験と同様の試行回数の条件で実施し、解析結果と実験結果のそれぞれの到達位置の空間分布を定量的に比較することで、各解析条件や入力パラメータの影響、および工学的に意味のある解を得るための基準に関する分析を行った。図3は、図1に示した実験の再現解析から得られた結果の一部のケースについて到達位置の空間分布と到達距離のヒストグラムを示したものである。



図1 模型実験の概要 (木片を用いた実験)



図2 模型実験 (碎石を用いた実験)

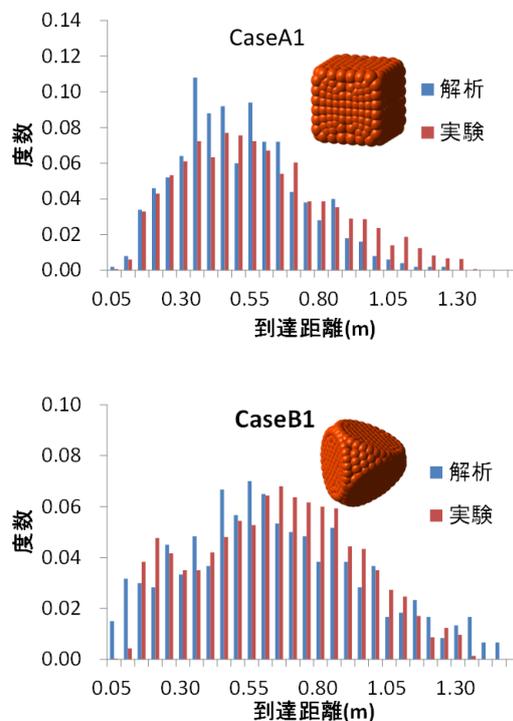


図3 到達距離のヒストグラム

これらの再現解析の結果を分析することにより、下記に示す知見が得られた。

#### ① 初期姿勢の変動幅について

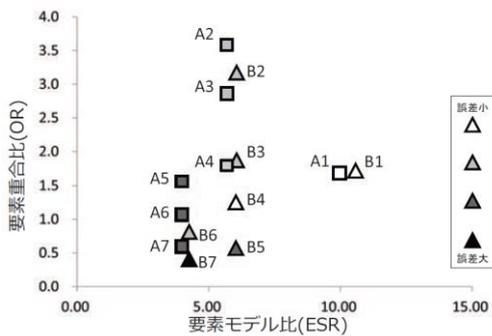
実際の落石のランダム性を表現するために、数値解析では初期の落体の姿勢に微小な変化を与えることがよく行われる。この変動量を変化させて、再現解析を行い、実験結果と比較することで初期姿勢の変動幅について分析を行った。その結果、変動幅は解析結果にそれほど大きな影響を与えず、厳密に限られた範囲で設定する必要がないことを明らかにした。

② バネ定数の値について

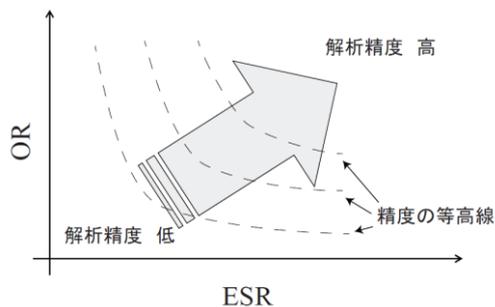
個別要素法では、実際の材料の物性値から推定されるバネ定数をそのまま使用すると計算コストが高くなり、実務レベルの利用に耐えられないケースが多い。この問題に対して議論を進めるために、バネ定数を変化させて実施した再現解析の結果を分析した。その結果、バネ定数はある程度高い値の領域では、到達距離の分布にほとんど影響を与えないことを確認した。つまり、必ずしも実際の物性値から推定されるバネ定数を用いる必要はなく、解が変化しない領域のバネ定数の下限値を用いることで、工学的にも意味のある解を得ることができることを明らかにした。

③ 落体の形状表現精度について

球要素を連結させて落体の形状を表現するモデル化が広く用いられているが、モデル化の形状精度（解像度）に関する明確な基準はなく、また、それに関する議論も十分に進んでいない。そこで、落体の形状精度を変化させた解析結果を実験結果と比較することにより、必要となる形状表現精度の基準の作成を試みた。その結果、落体サイズに対する球要素の相対的なサイズ比に関する指標（要素モデル比）と、表面の滑らかさを示す球要素のオーバーラップ率に関する指標（要素重合比）を考案した。また、これら2つの指標で表現される空間において、その基準を与えることができる可能性を示した。



(a) 指標空間と各ケースの誤差の関係



(b) 指標空間における基準の考え方

図4 形状精度に関する指標空間

④ 斜面物性値の空間分布について

実験結果との比較による分析ではないが、斜面の物性値の空間分布が結果に与える影

響について分析した。空間分布の特性を変化させるため、平均値の他に、分布の幅に関する指標として標準偏差、分布の偏り度合いに関する指標として自己相関距離を導入し、これら3つの特性値の変化が解析結果に与える影響を調べた。図6~9は、各入力パラメータ（バネ定数、反発係数、摩擦係数）および標準偏差と自己相関距離を変化させた場合解析結果の変化量（基準ケースに対するズレを定量化したもの）を示している。この結果より、バネ定数の影響は他のパラメータに対して小さいこと、反発係数については、平均値を変動させた場合に、プラス側とマイナス側で同程度の影響があるのに対して、摩擦角については特にマイナス側で解析結果に大きな影響を与えることなどを確認した。また、標準偏差と自己相関距離は解析結果に大きな影響を与えず、平均値が極めて強い影響力を持っていることが明らかになった。つまり、落石解析を実施する上では、斜面全体の平均値を精度よく推定することが最も重要であり、従来からよく使われている物性が均質な斜面の仮定は、工学的にはある程度妥当と考えられる。

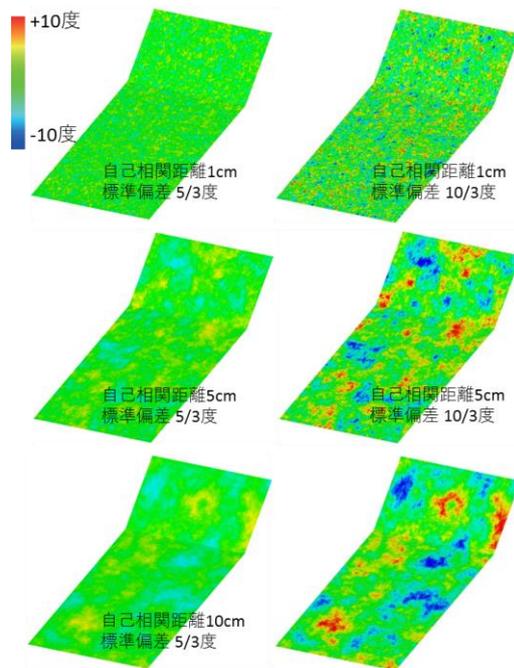


図5 標準偏差と自己相関距離のイメージ

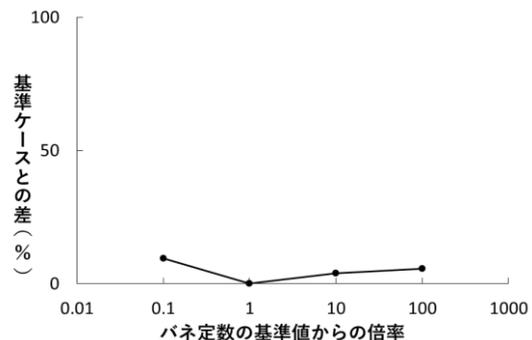


図6 バネ定数の変動に伴う解析結果の変化

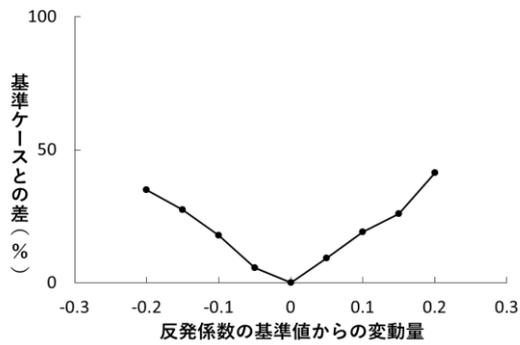


図7 反発係数の変動に伴う解析結果の変化

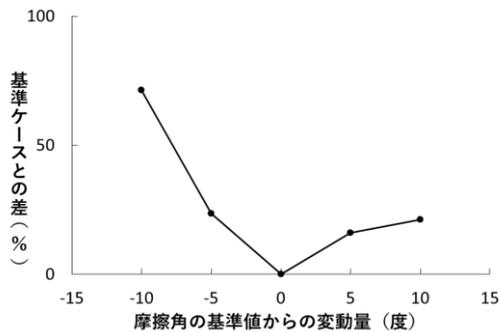


図8 摩擦係数の変動に伴う解析結果の変化

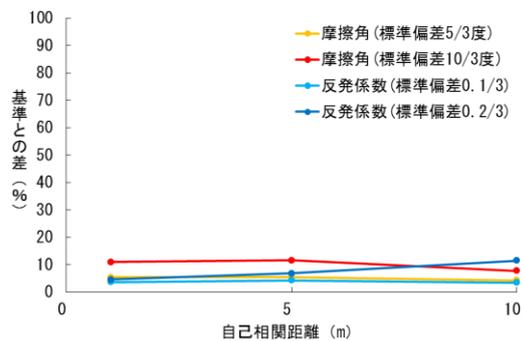


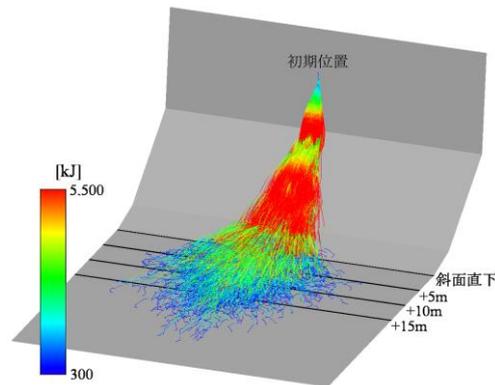
図9 標準偏差と自己相関距離の変化に伴う解析結果の変化

(2) 2015年に愛知県で直径5メートルの巨大な落石が発生し、設置されていた防護柵を破壊して隣接する駐車場に被害を与えた。この事例を題材として、個別要素法による定量的かつ効率的な落石リスク評価手法の開発を試みた。まず、実際の落石の形状をモデル化し、初期の姿勢や向きを変化させて複数ケースの解析を実施した。この際、先述の工学的に必要な解析条件を考慮して解析を実施している。解析結果は、実際の落石発生現場の様子（季節防護工の破壊など）とよく整合するものであり、既存の落石エネルギー評価式（落石対策便覧）と比較して、数値解析の実現象表現能力の優位性も確認された。さらに、この結果に基づいて、落石リスクの確率論的危険度評価の手法を開発した。この手法では、複数ケースの落石解析の結果から、混合ガウスモデルを用いて破壊確率の空間分布を構築し（図9）、さらにその結果から任

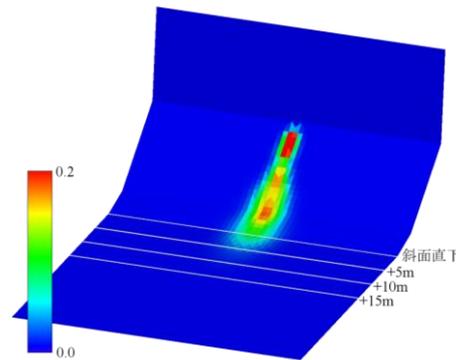
意形状の防護工の設置位置に対する破壊確率を算出できることを確認した。また、混合ガウスモデルによる空間補間の効果によって、必要となる解析コストを大幅に削減できることを確認した。これにより、今後の数値解析を用いた落石防災事業に対して、有効な評価手法を提案することができた。



図10 落石事例（2015年、愛知県）



(a) 個別要素法による解析結果



(b) 破壊確率の空間分布

図11 解析結果に基づく超過確率分布生成

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 6件）

①菅野蓮華, 森口周二, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 沢田和秀, 児波昌則, 混合ガウスモデル

を用いた落石リスクの空間的・確率論的評価、地盤工学ジャーナル、査読有、2017。(掲載決定)

②森口周二, 太田勇真, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 阿部慶太, 青木尊之, 個別要素法を用いた大規模土砂流動実験の再現解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 査読有, Vol. 72, pp. 449-457, 2016.  
DOI: [http://doi.org/10.2208/jscejam.72.I\\_449](http://doi.org/10.2208/jscejam.72.I_449)

③橘一光, 森口周二, 寺田賢二郎, 高瀬慎介, 京谷孝史, 加藤準治, 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 (応用力学), 査読有, Vol. 70, pp. 519-530, 2015.  
DOI: [http://doi.org/10.2208/jscejam.70.I\\_519](http://doi.org/10.2208/jscejam.70.I_519)

④森口周二, 大竹雄, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 小坂祐司, 堀内克, 沢田和英, 八嶋厚, 個別要素法による落石の確率論的危険度評価, 地盤工学ジャーナル, 査読有, Vol. 10, No. 4, pp. 503-515, 2015.  
DOI: <http://doi.org/10.3208/jgs.10.503>

⑤森口周二, 前田健一, 松島亘志, 1次元の個別要素法(地盤工学のための個別要素法), 地盤工学会誌, 査読有, Vol. 63, No. 5, pp. 53-60, 2015.

⑥S. Moriguchi, I. Tachibana, K. Terada, S. Takase, T. Kyoya, J. Kato, S. Sawada, and A. Yashima, A study on a shape effect in rockfall simulation using DEM, Geomechanics from Micro to Macro, 査読有, Vol. 1, pp. 213-218, 2014.  
DOI: 10.1201/b17395-37

[学会発表] (計 7件)

①上原直秀, 橘一光, 菅野蓮華, 森口周二, 寺田賢二郎, 大竹雄, 個別要素法を用いた落石解析における不確実性の定量化, 平成 28 年度土木学会東北支部技術研究発表会, 宮城県仙台市, 2017 年 3 月 4 日.

②菅野蓮華, 森口周二, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 混合ガウスモデルを利用した落石リスク評価手法の提案, 第 71 回土木学会全国大会, 宮城県仙台市, 2017 年 9 月 8 日.

③森口周二, 太田勇真, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 阿部慶太, 青木尊之, 個別要素法による実大規模土砂流動実験の再現解析, 第 21 回計算工学講演会, 新潟県新潟市, 2016 年 5 月 31 日.

④S. Moriguchi, I. Tachibana, S. Takase, K. Terada, Uncertainty quantification of DEM Simulations with a benchmark test for rigid body motions, 12th world congress on computational mechanics and 6th Asia-Pacific congress on computational mechanics, Seoul, Korea, July 25, 2016.

⑤森口周二, 橘一光, 寺田賢二郎, 高瀬慎介, 松島亘志, 中瀬仁, 個別要素法による碎石落下実験の再現解析, 第 20 回計算工学講演会, 茨城県つくば市, 2015 年 6 月 8 日.

⑥森口周二, 橘一光, 寺田賢二郎, 高瀬慎介, 京谷孝史, 加藤準治, 球要素 DEM を用いた落石挙動予測におけるモデル化誤差, 第 19 回計算工学講演会, 広島県城島市, 2014 年 6 月 9 日.

⑦S. Moriguchi, I. Tachibana, K. Terada, S. Takase, T. Kyoya, J. Kato, S. Sawada, and A. Yashima, A relation between calculation error and modeling resolution of DEM. 11th World Congress on Computational Mechanics, Barcelona, Spain, July 21, 2014.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

森口 周二 (MORIGUCHI Shuji)  
東北大学・災害科学国際研究所・准教授  
研究者番号: 20447527