

落石解析における不確実性の影響の定量化

○東北大学大学院工学研究科	学生会員	上原 直秀
東北大学大学院工学研究科	学生会員	橘 一光
東北大学大学院工学研究科	学生会員	菅野 蓮華
東北大学災害科学国際研究所	正会員	森口 周二
東北大学災害科学国際研究所	正会員	寺田 賢二郎

1. はじめに

個別要素法 (DEM: Discrete Element Method)¹⁾を用いた落石解析は、斜面に関する物性値を一定とした均質場で実施されることが多い。しかし、実際の斜面は空間的ばらつきを有しており、その影響に関しては十分に研究されていない。自然現象をシミュレーションで表現する場合、各種の不確実性の存在により、現象を完全に再現することは不可能であるが、各種の不確実性を定量化して分析することで、各不確実性の影響度などの分析が可能となり、工学的に有意な結果を得ることできる。本研究では、特に落石解析の斜面に関する空間的ばらつきに注目し、解析パラメータの不確実性が解析結果に与える影響を定量化し、その結果を分析した。

2. 3次元個別要素法の概要

本研究では、3次元個別要素法によって落石の挙動を表現する。なお、落石は球要素の集合体、斜面については三角形要素（ポリゴン）の集合体として表現する。使用したDEMは、法線方向の接触力を表現するバネとダッシュポット、および接線方向の接触力を表現するバネとダッシュポットがあり、接線方向には摩擦力を制御するためのスライダーも存在する。接触力モデルに関するパラメータとしては、法線方向と接線方向のバネ定数、ダッシュポットの係数、摩擦係数があるが、法線方向と接線方向で共通の値であると仮定し、さらに振動方程式の解から得られる関係を使ってダッシュポットの係数を反発係数から求めるものとする。これにより、本研究で考慮する入力パラメータは、バネ定数、反発係数、摩擦係数の3種類となる。

3. 不確実性分析の方針

落石現象の中には、様々な不確実性が含まれる。地形表現精度や解析パラメータの推定精度、それらの空間的ばらつき、さらには落石挙動そのもののばらつきなどが考えられ、これら全てを同時に分析するのは極めて難しい。そのため、本研究では、解析パラメータとその空間的ばらつきに関する不確実性に限定して評価を行うものとする。図-1は、本研究で対象とした解析モデルのイメージであり、既往の研究²⁾で実施された模型実験を想定している。解析では実験と同様に、斜面上から立方体の落石モデル（1辺2cm）を落下させ、最終到達位置の分布を計測する。なお、

本研究では、解析結果同士を比較することで不確実性の影響を定量化するものであり、この模型実験との比較を行うものではない。斜面は単純形状であり、地形表現精度に関する不確実性は除外される。また、十分な試行回数（各解析ケースで3000回）を確保し、落石挙動の偶発的不確実性も十分に評価できる条件で研究を行った。先述のように、分析対象は解析パラメータの精度とその空間的ばらつきに関する不確実性であり、これを評価するために、①均質場における解析パラメータの影響、②不均質場における解析パラメータの空間的ばらつきの影響、に関する2種類の解析を実施した。不均質場における解析では、自己相関距離を一定にしつつ、1回の解析毎に異なる斜面を用いた。解析パラメータについては、特に落石挙動に強い影響を持つと思われる反発係数と摩擦角を変化させて、そのときの解析結果の変化を調べた。反発係数と摩擦角については、鷹巣の模型実験の中で計測されている値（摩擦角23.989度、反発係数0.521）を基準として、摩擦角は ± 10.0 度、反発係数は ± 0.2 の範囲でばらつきを与えた。また、解析結果として得られる到達位置の散布図から確率密度分布を構築し、これを用いて解析結果の違いを定量化している。この定量化には混合ガウスモデル（GMM: Gaussian Mixture Model）³⁾⁴⁾と呼ばれるデータクラスタリングなどに利用される手法を用いた。基準値による解析ケースの確率密度分布を基準分布として、その他の解析ケースから得られる確率密度分布との差を積分することで誤差を表現する。

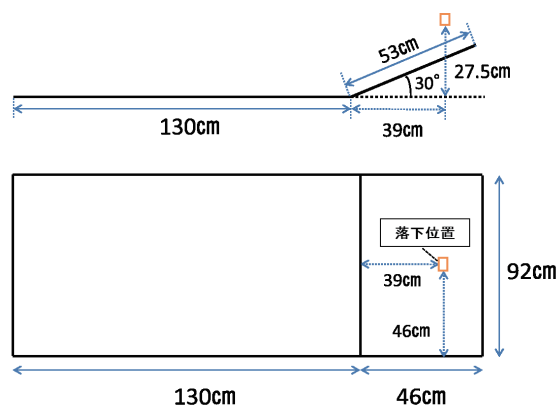


図-1 斜面モデル寸法

キーワード：個別要素法，不確実性，落石

〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, TEL 022-752-2132, FAX 022-752-2133

4. 解析結果および考察

図-2 に不均質場の解析斜面の一例を示す。これは摩擦角に ± 10 度のばらつきを与えたもので、この図より自己相関距離を変化させた場合の空間分布特性の変化が確認できる。また、図-3 と図-4 は、それぞれ摩擦角と反発係数を均質場で変化させた場合の物性値と、その条件における誤差を示している。これらの結果より、反発係数はプラス側とマイナス側で概ね同じような傾向を示すのに対して、摩擦角はマイナス側に振れた場合に誤差が発生しやすいことがわかる。これは、摩擦角はある程度高い値の条件では転がりの運動モードが卓越するのに対して、摩擦角が低い条件では、滑動の運動モードが卓越するため、その運動モードの違いが誤差の発生傾向に影響しているものと考えられる。つまり、摩擦角を実際よりも低めに設定することが大きな誤差につながる可能性を示唆している。次に、不均質場で自己相関距離を変化させた場合の結果を図-5 に示す。平均値を先述の均質場の基準値として、摩擦角の標準偏差を $5/3$ 度と $10/3$ 度、反発係数の標準偏差を $0.1/3$ と $0.2/3$ のそれぞれ2種類設定し、自己相関距離を 0.01m 、 0.05m 、 0.10m の3種類に変化させた場合の誤差を定量化した。この結果より、均質場の結果と比べて誤差は小さく、自己相関距離によっても大きな違いがないことが確認できる。これらの結果を総合的に考えれば、DEMで落石解析を行う場合、斜面の物性値の空間的ばらつきはそれほど大きな意味を持たず、平均値の精度の方が解析結果に与える影響が大きいということが理解できる。

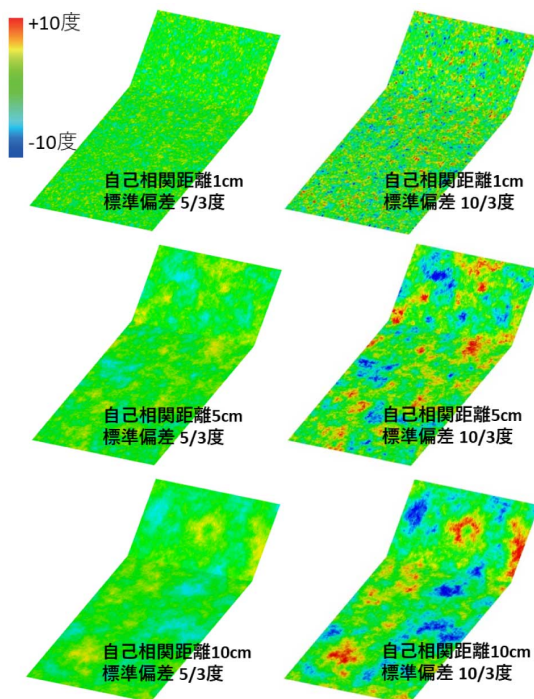


図-2 不均質場の解析斜面の一例

5. 終わりに

本研究では、DEMによる落石解析における斜面物性の不確実性が解析結果に与える影響について分析した。その結果、落石解析において斜面物性値の空間的なばらつきはあまり影響せず、特に摩擦角と反発係数の平均値を精度を高めることが重要であることが明らかとなった。ただし、ここに示した結論は、本研究で実施した解析ケースの範囲内に限定するという条件付きであり、今後他の不確実性も考慮しつつ分析を進めていく予定である。

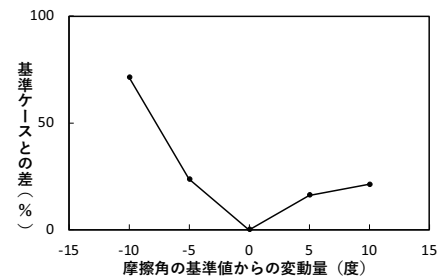


図-3 均質場における摩擦角の影響

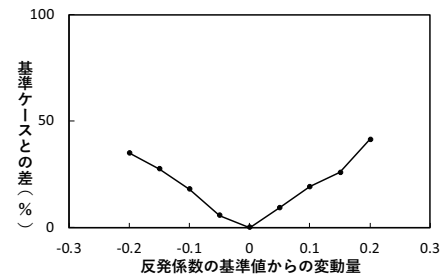


図-4 均質場における反発係数の影響

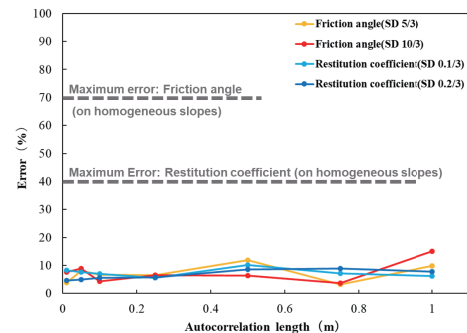


図-5 不均質場の解析結果

参考文献

- 1) Cundall, P. A. : A Computer model for simulating progressive, Large Scale movement in blocky rock system, Proceedings of ISRM Symposium, pp.11-18, 1971.
- 2) 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), Vol.70, No.2, pp.I519-530, 2014.
- 3) McLachlan, G. J., K.E. Basford : Mixture Models: Inference and Applications to Clustering, Marcel Dekker, 1988.
- 4) McLachlan, G. J., D. Peel : Finite Mixture Models, Wiley, 2000.