

落石形状特性が到達分布に与える影響のモデル化

Modeling the Influence of Rock Shape on Run-out distribution of Rockfall

吉田大活¹⁾ 野村怜佳²⁾ 森口周二³⁾ 寺田賢二郎⁴⁾ 津田悠人⁵⁾ 吉田郁政⁶⁾
Taiki Yoshida, Reika Nomura, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada, Tuda Yuto, Ikumasa Yoshida

- ¹⁾工博 東北大学 工学研究科 修士 (〒 980-8547 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1, E-mail: taiki.yoshida.p3@gmail.com)
²⁾工博 東北大学 工学研究科 助手 (〒 980-8547 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)
³⁾工博 東北大学 工学研究科 准教授 (〒 980-8547 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)
⁴⁾工博 東北大学 工学研究科 教授 (〒 980-8547 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)
⁵⁾工博 東京都市大学 総合理工学研究科 博士 (〒 158-8557 東京都 世田谷区 玉堤 1-28-1)
⁶⁾工博 東京都市大学 総合理工学研究科 教授 (〒 158-8557 東京都 世田谷区 玉堤 1-28-1)

This study aims to numerically investigate the effects of rock shape on the run-out distribution characteristics of rockfall, and to construct a GPR-based model for a novel approach of rockfall risk assessment. To this end, a series of rock fall simulations are performed under various calculation conditions and rock shapes characterized by the concept of sphericity. The simulation results indicate a strong correlation between the two sphericities and run-out distribution. Based on the finding, we constructed a model to predict run-out distribution at a low computational cost. Although the prediction model could benefit from further improvement in accuracy, it could be concluded that the run-out distribution of rockfall can be predicted using two sphericities, material property, and slope angle.

Key Words : Rockfall, DEM, Sphericity, Predict Model

1. はじめに

落石は斜面災害の一種であり、特に山岳地帯で多くの人的被害や経済的損失をもたらしている。特に道路や鉄道における安全を考える上で、落石のリスク低減は重要な課題であり、わが国のように山岳地帯が広く分布する国々の共通の悩みである。落石リスクを低減するためには、その高精度なリスク評価が必要不可欠であり、近年では高度な数値シミュレーションを用いた研究が多く報告されている。これまでは、計算コストの低い質点系シミュレーションを用いた二次元解析が主体的に適用されてきたが、近年の計算機能力や数値解析技術の向上に伴い、個別要素法 (DEM: Discrete Element Method) [1] を代表とする非質点系手法がリスク評価の強力なツールとして認知されている。

落石に関する研究については、斜面の材質や粗さが岩塊の反発特性や摩擦特性に与える影響など、多くの研究成果が報告されている。一方で、岩塊の形状特性が落石の到達分布特性に与える影響については、未解明な部分が多く、体系的には整理されているとはいえない。そのため、本研究では、個別要素法による落石シミュレーションの結果に基づいて、落石の形状特性が到達分布特性に対して与える影響を、物性値の影響を含めて評価することを目的とする。さらに、その分析結果に基づいて、到達分布特性を岩塊の形状特性から回帰するモデルを構築し、その有用性や可能性について議論する。

表-1 岩塊の物性値

密度 (kg/m ³)	体積 (m ³)	バネ定数 (N/m)
2650	1.0	1.0 × 10 ¹⁰

2. DEM (個別要素法)

DEM は、不連続体の接触や衝突を扱うことができる手法である。各要素を剛体ブロックとして表現し、要素同士の貫入を許容するという仮定に基づいて要素間力を評価し、剛体並進と剛体回転に関する運動方程式を解く。

本研究では、多角形要素を扱うことが可能である ESSI (Engineering Simulation and Scientific Software) 社の DEM ソフトウェアである Rocky-DEM[2] を用いる。各方向の接触力モデルに関しては、法線方向の接触力モデルにヘルツばね・ダッシュポットモデルを、接線方向の接触力モデルに線形ばね摩擦モデルをそれぞれ採用した。

3. 岩塊形状と到達分布特性の指標

岩塊モデル (以下、岩塊) の物性値を表 1 に、斜面モデル (以下、斜面) の物性値を表 2 にそれぞれまとめた。斜面勾配については 3 種類とし、全ての斜面勾配の条件で、斜面下から岩塊の重心までの鉛直高さを 6m として静かに落下させる。これにより、各斜面勾配での落石の初期位置における位置エネルギーを一定にしている。また、計算の試行毎に初期姿勢を変化させ、落石挙動のばらつきを表現する。

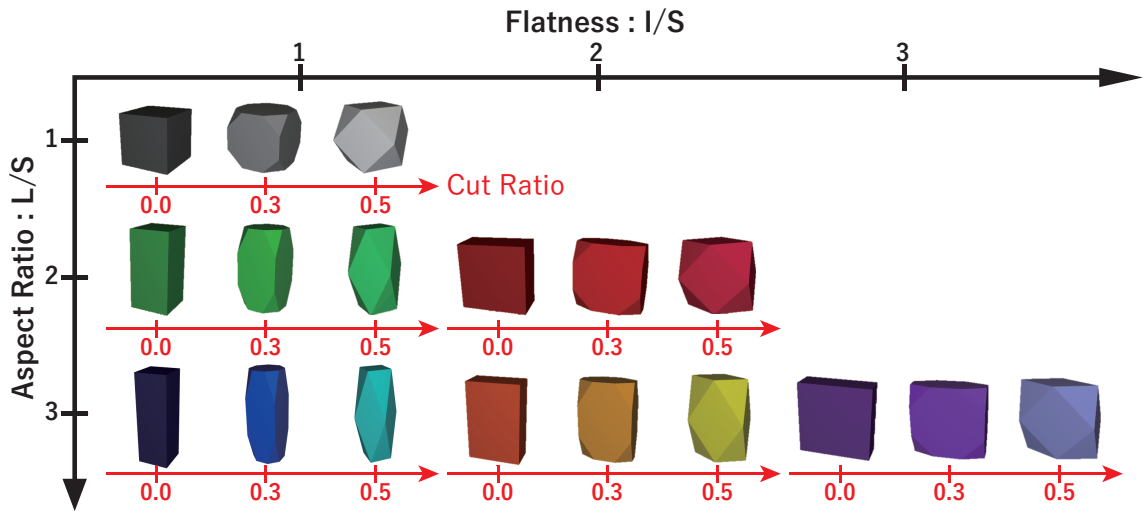


図-1 岩塊形状のイメージ

表-2 斜面の物性値

反発係数	0.1	0.3	0.5
摩擦角 θ	20 度	30 度	40 度
斜面勾配	30 度	45 度	60 度

落石の到達分布に対して、岩塊の形状変化が及ぼす影響を表現するために、岩塊のアスペクト比、扁平率、カット比をそれぞれ変化させ、複数の異なる岩塊形状を用意した。アスペクト比と扁平率の組み合わせで6種類の岩塊形状を設定し、この6種類の岩塊に3種類のカット比をそれぞれ適用することで、計18種類の岩塊を作成した。作成した岩塊のイメージを図-1に示す。

岩塊の形状特性を表現する指標として、球形度を用いる。先述のように、岩塊形状は、アスペクト比、扁平率、カット比をパラメータとして変化させているが、アスペクト比と扁平率は、対象とする方向が異なるだけでその物理的な意味は同じであり、さらにこれらの3つの指標が到達分布に与える影響は、互いの相関が複雑なものになると予想される。そのため、形状特性の指標として、それらの指標を直接的に用いるのではなく、多くの関連研究で到達分布との関係性が指摘されている球形度を岩塊形状の形状特性の指標として採用した。球形度は対象物体がどれだけ球体に近いのかを示すパラメータであり、球形度の値が1.0に近いほど、対象とする岩塊が球体に近いことを意味する。ただし、Reisら[3]によると、下記のように球形度には複数の定義が提案されている。

$$\Psi_W = \frac{\sqrt[3]{36\pi V^2}}{A} \tag{1}$$

$$\Psi_{B\&G} = \frac{D_i}{D_C} \tag{2}$$

$$\Psi_A = \frac{V}{V_C} \tag{3}$$

$$\Psi_{R1} = \frac{A}{\pi D_C^2} \tag{4}$$

$$\Psi_{R2} = \sqrt{\frac{A}{\pi D_C^2}} \tag{5}$$

$$\Psi_{R3} = \sqrt{\frac{D_i}{D_C}} \tag{6}$$

ここで、 A は対象物体の表面積、 V は体積、 V_C は最小外接球の体積、 D_i は最大内接球の直径、 D_C は最小外接球の直径である。 Ψ_W はWadell[4]が、 $\Psi_{B\&G}$ はBullardとGarboczi[5]が、 Ψ_A はAlshibliら[6]がそれぞれ考案した球形度の式であり、 $\Psi_{R1} \sim \Psi_{R3}$ はReisらが提案したものである。

次に、到達分布特性の指標について説明する。分布特性を定量的に表現するため、 x 方向（斜面断面方向）の到達距離の平均値（ X_{ave} ）、および z 方向（斜面延長方向）の中央線からの距離の平均絶対値（ Z_{ave} ）をそれぞれ定義した。また、到達分布のばらつきを表現するため、 x 方向と z 方向の変動係数（ X_{CV} 、 Z_{CV} ）も指標として採用した。

4. 形状特性が到達分布特性に与える影響の定量的評価

表2に示す各物性値を総当たりで変化させて27種類の計算条件を設定し、先述の18種類の岩塊モデルを考慮して、合計488ケースの落石シミュレーションを実施した。また、先述のように、落石経路のばらつきを表現するため、試行毎で岩塊の初期姿勢を100回変化させている。そのため、本研究で実施した落石シミュレーションは合計で48800回となる。以上の落石解析の結果をもとに、岩塊形状が到達分布特性に与える影響を定量的に評価する。

球形度と各到達分布特性の関係を主成分分析により分析した結果を図-2に示す。到達分布特性は赤（ x 方向）と青（ z 方向）で、球形度は緑で示している。図より、球形度は2つのグループに分類されることが理解できる。そのため、6種類の球形度は必要なく、2種類の球形度で各グループを代表させることが可能と考えられる。本研究では、各球形度と各到達分布特性指標の相関係数を確認し、 $\Psi_{B\&G}$ と Ψ_A の2種類の球形度を岩塊形状特性を表現する指標として用いるものとした。

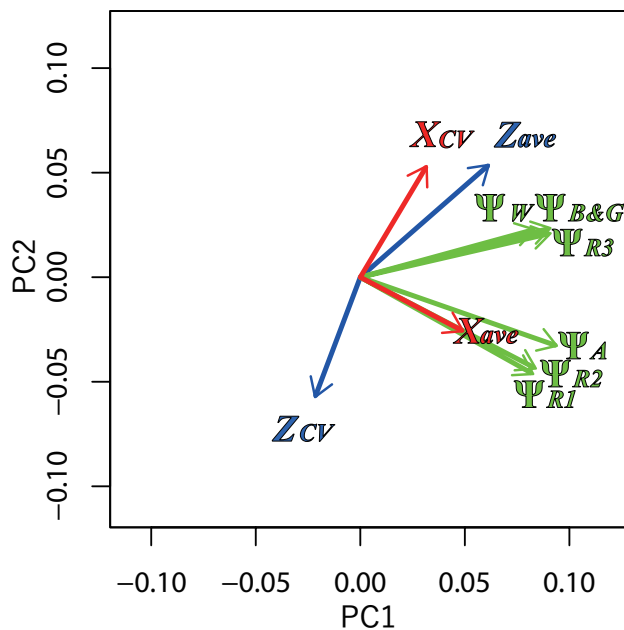


図-2 主成分分析の結果

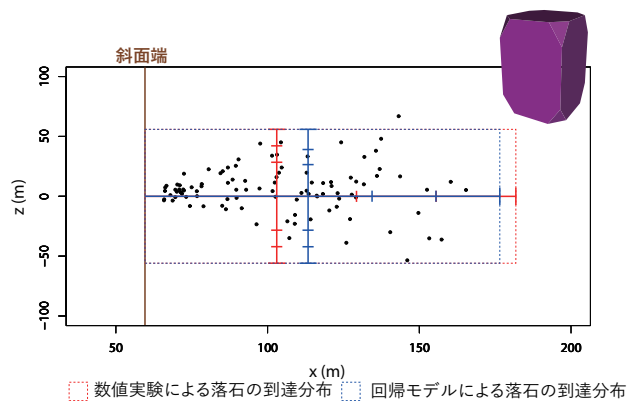


図-3 数値解析と回帰モデルの比較

5. 落石到達分布の回帰モデル作成

ここまで得られた知見に基づいて、斜面の物性値と岩塊形状の情報から到達分布を予測するモデルを構築する。具体的には、ガウス過程回帰（GPR: Gaussian Process Regression）を用いて、物性値（材料パラメータと斜面角度）と2種類の球形度（ $\Psi_{B\&G}$ と Ψ_A ）を説明変数とする落石到達分布の回帰モデルの構築した。また、その精度を検証するために、図-1 に示した岩塊モデル以外の形状を持つ検証用の岩塊モデルを作成し、DEMシミュレーションを実施するとともに、その結果を回帰モデルで表現可能かどうかを確認した。図-3 はその検証結果の一例であり、数値解析による落石の到達分布と、回帰モデルを用いて求めた落石の到達分布を比較している。この図より、回帰モデルは数値解析の結果を精度よく表現していることが確認できる。いくつかの検証ケースでは、やや精度が悪くなるものもあり、改良の余地は残されたものの、2種類の球形度と物性値を説明変数として、DEMシミュレーションによる到達

分布特性を回帰モデルで代替できる可能性を確認した。

6. 結論

本研究では、物性値と岩塊形状を変化させたDEMによる落石シミュレーションを実施し、その結果を分析することで、落石の到達分布特性と岩塊形状の関係を調べた。その結果、岩塊形状が落石の到達分布特性に及ぼす影響は、2種類の球形度（ $\Psi_{B\&G}$ と Ψ_A ）を用いて定量的に評価できることが明らかとなった。また、それらの球形度を説明変数とする回帰モデルは、数値シミュレーションによって得られる落石の到達分布を概ね再現できることを確認した。回帰モデルは、その精度について改良の余地は残されたものの、球形度と物性値を説明変数として到達分布特性を回帰できる可能性を確認した。

参考文献

- [1] Cundall, PA: A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics, pp.11-18, 1971.
- [2] Rocky DEM Inc: Rocky software version 4.3.1, 2015.
- [3] Emerson dos Reis and Canales, Bruno Godoy and Matheus Ferreira Felix de Andrade: Assessment of mathematical expressions for morphological parameters of solid particles based on common geometric shapes, Powder Technology, pp.215-225, 2020.
- [4] Hakon Wadell: Volume, shape, and roundness of quartz particles, The Journal of Geology, Vol.43, No.3, pp.250-280, 1935.
- [5] Jeffrey W Bullard and Edward J Garboczi: Defining shape measures for 3D star-shaped particles: Sphericity, roundness, and dimensions, Powder technology, Vol.249, pp.241-252, 2013.
- [6] Khalid A. Alshibli, Andrew Druckrey, Riyadh al-raoush, Taylor M Weiskittel, Nickolay Lavrik: Quantifying morphology of sands using 3D imaging, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.27, No.10, 04014275, 2015.