

岩塊形状特性が落石挙動に与える影響の評価

○東北大学工学部建築・社会環境工学科
東北大学大学院工学研究科
東北大学大学院工学研究科
東北大学災害科学国際研究所
東北大学災害科学国際研究所

学生会員 吉田 大活
学生会員 菅野 蓮華
学生会員 渡邊 大規
正会員 森口 周二
正会員 寺田 賢二郎

1. はじめに

落石の減災対策には、跳ね返りの高さ、落石移動距離、運動エネルギー、斜面水平方向の分散などの情報が必要となる。本研究では、落石形状が落石移動距離に与える影響に焦点を当てる。

使用する落石シミュレーション手法は、落石の形状を直接的に表現できる非質点系シミュレーション手法である個別要素法（DEM：Discrete Element Method）である。

本研究では、落石岩塊形状が到達特性を表す2つのパラメータである、落石が斜面下端から最終到達位置までに移動した距離と（以下、総移動距離）、ケース中の平均総移動距離と最大総移動距離との比（以下、突出移動距離比）に与える影響を定量的に調べることを目的とする。

2. 解析手法

2.1 個別要素法

シミュレーションでは、ESSS社のDEMソフトウェアであるRocky-DEM¹⁾を用いる。Rocky-DEMは、非真円形粒子形状や破損、そして物理的摩擦を処理できる強力なソフトウェアである。Rocky-DEMでは多数の接触力モデルが実装されており、本研究では、法線方向の接触力モデルに線形ばね・ダッシュポットモデル（Linear spring-dashpot model）を、接線方向の接触力モデルには線形ばね摩擦モデル（Linear spring Coulomb limit model）をそれぞれ使用した。

2.2 解析条件

先述のように、岩塊形状を複数のパラメータに従い変化させ、その変化が落石の到達特性にどのような影響を与えるのかを評価する。岩塊と斜面の物性値は変化させず一定とした。岩塊の物性値は、密度が2650kg/m³、体積が1m³、バネ定数は1.0×10⁹N/mmとした。

次に斜面の物性値は、反発係数が0.5、摩擦角 θ が30°、動摩擦係数と静摩擦係数はともに $\tan \theta$ とした。また斜面形状は、斜面方向656m、斜面水平方向900m、斜面勾配を45°とした。落石に使用する岩塊は、斜面下端から50m、底辺から56mの位置から初期姿勢を200通りに変化させ、シミュレーションを行った。

岩塊は立方体を基本としており、 L を長辺、 I を中辺、 S を短辺とし、 C_L, C_I, C_S はそれぞれの辺のコーナーカット長さを表す²⁾。さらに、形状を変化させるパラメータとしてアスペクト比 $a^3)$ 、扁平率 f 、カット比 c を使用する。コー

ナーカット比は各辺の長さでカットされた辺の長さの比であり、次式でそれぞれのパラメータを表すことができる^{2,4)}。

$$a = \frac{L}{S} = 1.0, 2.0, 3.0 \quad (1)$$

$$f = \frac{I}{S} = 1.0, 2.0, 3.0 \quad (2)$$

$$c = \frac{C_L}{L} = \frac{C_I}{I} = \frac{C_S}{S} = 0.0, 0.2, 0.4, 0.5 \quad (3)$$

以上のパラメータを組み合わせ、計18種類の岩塊を使用した。全ての岩塊を図-1に示す。図中で岩塊の下に示めた番号は、本研究で定義した岩塊の名称である。

岩塊の到達特性を定量的に評価するために、複数のパラメータを定義する。まず、平均運動エネルギーと総移動距離である。平均運動エネルギーは、回転運動エネルギーと並進運動エネルギーに分けることができる。このパラメータは、各タイムステップごとの運動エネルギーを時間積分し、その値をシミュレーションを行った総時間で割った値である。次に、結果を定量的に評価する回転エネルギー比、突出移動距離比、そして球形度である。回転エネルギー比は、落石運動中に岩塊が持つ回転エネルギーと、並進運動エネルギーと回転運動エネルギーの合計である総運動エネルギーとの比である。球形度は対象の岩塊がどれだけ球に近いのかを示すパラメータ⁵⁾であり、この値は次式を用いて求めることができる。

$$\Psi = \frac{\sqrt[3]{36\pi V^2}}{A} \quad (4)$$

ここで、 V は岩塊の体積、 A は表面積である。

3. 解析結果と考察

図-2に各岩塊の総移動距離の平均値を、図-3に各岩塊の突出移動距離比の平均値をそれぞれ示す。この結果より、岩塊形状1-1が全体的に総移動距離が長く、岩塊形状2-1と2-2も1-1に次いで長かった。一方、アスペクト比が3の岩塊形状3-1、3-2、3-3は全体的に総移動距離が短い結果となった。この結果から、総移動距離は、アスペクト比が大きくなると短くなるといった負の相関があることがわかる。また、ほぼすべての岩塊がカット比 $c = 0.4$ までその値が増大し、 $c = 0.4$ を超えると値が減少するといった傾向がみられる。カット比が大きくなるということは、球形度が大きくなることに等しい。すなわち、球形度と総移動距離には、カット比0.4まで増大傾向で、カット比0.4以降減少傾向に

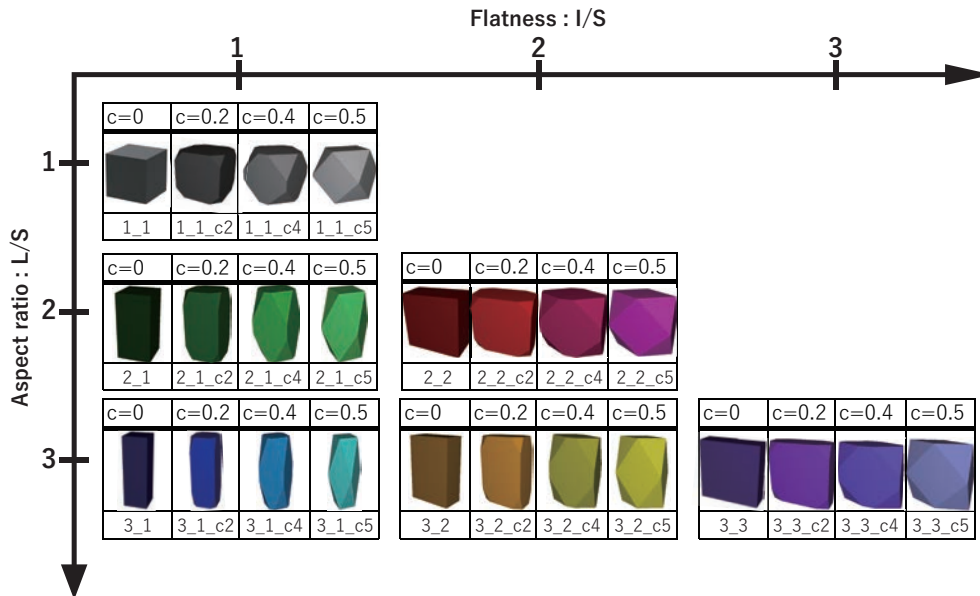


図-1 岩塊形状

なるといった、アスペクト比に比べて弱い正の相関があるといえる。

一方、突出移動距離比は、アスペクト比1の岩塊形状1-1から、アスペクト比3の岩塊形状3-3にかけて大きくなっている。この結果から、突出移動距離比は、アスペクト比が小さくなると大きくなるといった正の相関があることがわかる。また、総移動距離とは違い、カット比が与える影響が結果より、扁平率によって違っていた。ほぼすべてカット比 $c = 0.4$ までその値が減少し、 $c = 0.4$ を超えると値が増大するといった影響がみられるが、扁平率によってカット比ごとの突出移動距離比の大小関係が変わっている。扁平率が1の場合（岩塊形状2-1, 3-1で1-1は除く）は $c = 0.2$ の時が、扁平率2の場合（岩塊形状2-2, 3-2）は $c = 0.5$ の時が、そして扁平率3の場合（岩塊形状3-3）は $c = 0.4$ の時がそれぞれ一番大きくなっている。扁平率が同じな岩塊同士は、カット比から受ける影響がほとんど同じであるため、突出移動距離比は扁平率からも影響を受けていると考えられる。また、球形度と突出移動距離比には、カット比0.4まで減少傾向で、カット比0.4以降増大傾向になるといった、アスペクト比に比べて弱い負の相関があるといえる。

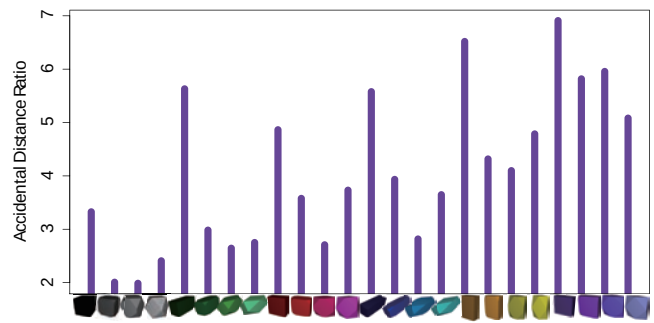


図-3 各岩塊の突出移動距離比の平均値

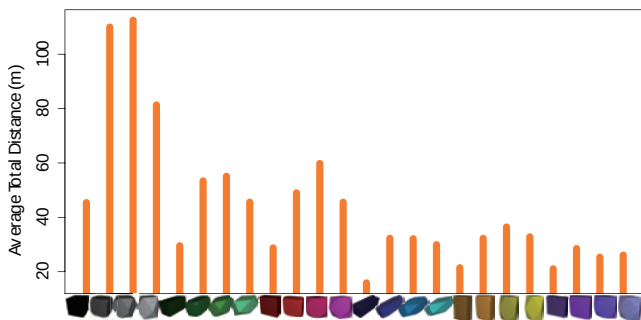


図-2 各岩塊の総移動距離の平均値

4. まとめ

総移動距離はアスペクト比と球形度、そしてカット比の3つのパラメータの影響を、突出移動距離比はアスペクト比と、球形度、カット比、そして扁平率の4つのパラメータの影響をそれぞれ受けていることを確認した。

参考文献

- 1) Rocky DEM Inc: *Rocky software version 4.3.1*, 2015.
- 2) Mollon, G., Richefeu, V., Villard, P. and Daudon, D.: Discrete modelling of rock avalanches: sensitivity to block and slope geometries, *Granular Matter*, Vol. 17, No. 5, pp. 645–666, 2015.
- 3) 倉岡千郎: 亀裂間隔と動摩擦角が崩壊岩塊の到達距離に及ぼす影響に関する研究, 日本地すべり学会誌, Vol. 56, No. 2, pp. 77–86, 2019.
- 4) BLOTT, S. I. J. and PYE, K.: Particle shape: a review and new methods of characterization and classification, *Sedimentology*, Vol. 55, pp. 31–63, 2008.
- 5) Emerson dos Reis, Bruno Godoy Canales, M. F. F. d. A.: Assessment of mathematical expressions for morphological parameters of solid particles based on common geometric shapes, *Powder Technology*, Vol. 370, pp. 215–225, 2020.