

楕円形 2 次元個別要素法による落石シミュレーション

防衛大学校 ○ 学生員 原木大輔 正会員 香月 智
学生員 白石博文 学生員 中島浩亮

1 緒言

写真-1 に示すようなロックシェッドの合理的な設計を行うためには、落石の衝突速度および落下位置をシミュレートし、適切な衝撃力を推定することが重要である。しかし、これまでの落石シミュレーションは円形要素を対象としたものが多く、落石形状の異方性が落石の運動特性に及ぼす影響について研究した例は少ない。そこで本研究は、楕円要素を用いた 2 次元個別要素法による落石シミュレーションを行い、落石の衝突速度および落下位置について検討したものである。

2 解析手法

2.1 個別要素法(DEM)による解析

本解析では、斜面を剛体壁に、落石を楕円形要素にモデル化した個別要素法を用い、その挙動を解析する。斜面と落石の衝突の際には、図-1 に示すように法線方向と接線方向について接触バネを挿入し、接触判定を行う。なお、落石要素の運動方程式は次のようになる。

$$m_i \ddot{u}_x + \sum_{j=1}^n C_{ij} \dot{u}_x + \sum_{j=1}^n k_{ij} u_x = F_x \quad (1a)$$

$$m_i \ddot{u}_y + \sum_{j=1}^n C_{ij} \dot{u}_y + \sum_{j=1}^n k_{ij} u_y = F_y \quad (1b)$$

$$m_i \ddot{u}_\phi + \sum_{j=1}^n C_{ij} \dot{u}_\phi + \sum_{j=1}^n k_{ij} u_\phi = F_\phi \quad (1c)$$

ここで、 m : 質量、 C : 減衰定数、 k : バネ定数、 u : 変位、 ϕ : 回転変位、 F : 要素に働く合力。

2.2 解析法の検証

ここでは、本研究で使用するシミュレーション法の妥当性を検証するため、能野¹⁾の既往解析結果との比較を行った。斜面は、図-2 に示すように標高差 55m で平均勾配 45° の緩やかに勾配が小さくなる斜面とし、図中の A 地点に 4m の地上高さから直径 0.7m の円形落石モデルを落下させた。表-1 に用いた各バネ定数等を示す。また、得られた解析結果を図-2 に示す。図より本解析による落石軌道と既往の解析結果は、ほぼ同様な軌道が得られ、本解析法の妥当性が検証された。

3 落石の姿勢や長短径比の感度分析

3.1 モンテカルロシミュレーション法

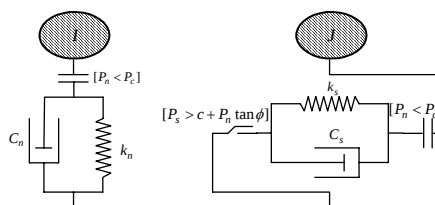
落石の初期姿勢や長短径比(形状)がロックシェッド面における衝突速度や位置に及ぼす影響を調べるために、図-3 に示す斜面に、図-4 の楕円形要素を使用したシミュレーションを行う。この際、初期傾き θ 、長短径比 a/b 、粘着力 c 、すべり摩擦角 ϕ を表-2 のようにばらつかせて図-3(a)に示す、速度 V 、離隔距離 L を評価した。

表-1 解析パラメータ

項目	数値 (N・sec/m)
垂直方向バネ定数 K_n	1.54E+07
垂直方向減衰定数 η_n	4.44E+03
接線方向バネ定数 K_s	2.22E+05
接線方向減衰定数 η_s	9.19E+04



写真-1 ロックシェッド



(a)法線方向

(b)接線方向

図-1 局座標系の接触力モデル

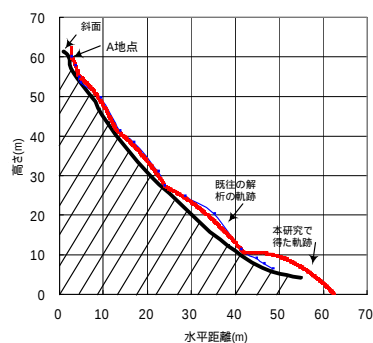
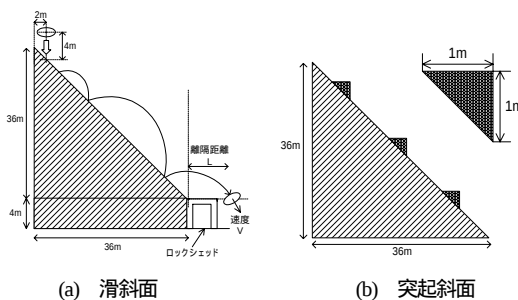


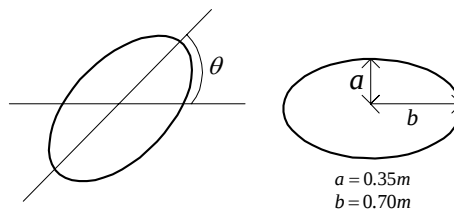
図-2 既往の解析と本研究との落下軌道の比較



(a) 滑斜面

(b) 突起斜面

図-3 斜面モデルの設定



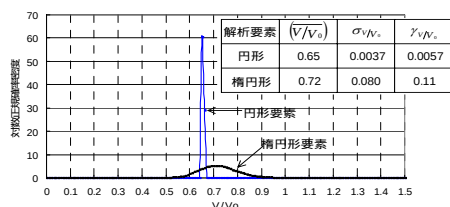
(a) 初期傾き

(b) 長短径比

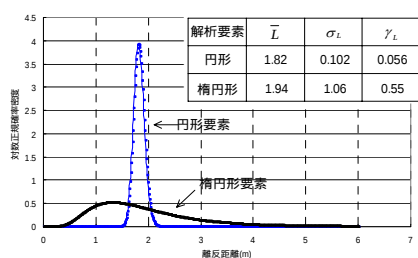
図-4 楕円モデルの設定

表-2 平均値および標準偏差

ばらつかせるパラメータ	平均値	標準偏差
θ	0°	90°
a/b	0.5	0.25
c	0.5	0.25
ϕ	5.71°	2.86°

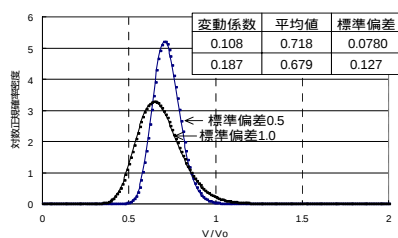


(a) 速度

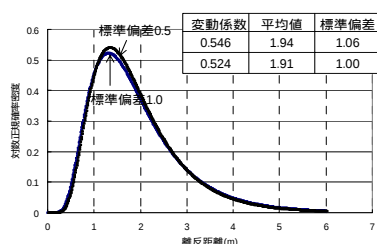


(b) 離隔距離

図-5 滑斜面における円と楕円の比較



(a) 速度

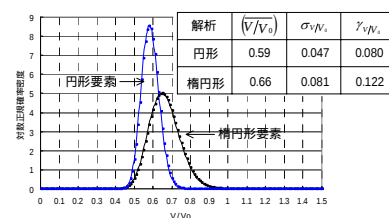


(b) 離隔距離

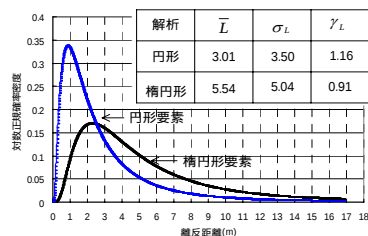
図-7 対数正規分布(滑斜面)

3.2 円形要素と楕円形要素との比較

図-5 に速度と離隔距離の分布を示す。なお、速度については、自由落下速度 $V_0 = \sqrt{2gh} = 28\text{m/s}$ によって規定化している。図-5(a)より、楕円形要素における平均速度は自由落下の70%程度であり、円形要素は約60%である。つまり、両ケースとも斜面との衝突により落下エネルギーは損失しているものの、その影響は円形要素の方が大きい。図-5(b)に示す離隔距離については、楕円形要素の場合のばらつきが大きく、分布形状が円形の場合と大きく異なる。図-6には、突起斜面を対象とした場合の同様の分布を示すが、この場合も滑斜面の場合と同じ傾向にある。

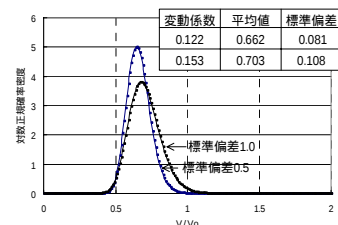


(a) 速度

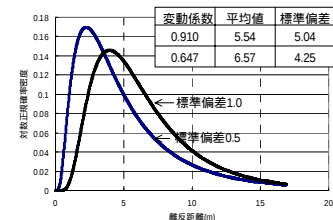


(b) 離隔距離

図-6 突起斜面における円と楕円の比較



(a) 速度



(b) 離隔距離

図-8 対数正規分布(突起斜面)

3.3 斜面形状の影響

図-7,8 には、斜面形状を変えて楕円形要素を用いた場合の速度および離隔距離の分布を示す。図-7 に示す滑斜面の場合、速度の減衰は約60~70%となっており、突起斜面においても同程度であることから、斜面形状における速度への影響はあまりないと考えられる。一方、離隔距離に関しては、滑斜面に比べ突起斜面における平均離隔距離が大きく、ばらつきが大きいことも分かる。

4 結 言

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 円形要素と楕円形要素を比較したとき、平均速度および平均離隔距離は楕円形要素の方が大きくなり、ばらつきも大きくなる。
- 2) 斜面形状は、速度に与える影響は少ないが、離隔距離には大きく影響を及ぼし、斜面に突起を設けた場合の離隔距離は大きくなる。

参考文献

- 1) 能美一美, 山上拓男: 落石運動解析に要する個別要素法パラメータの同定法, 土木学会論文集 No.701/ -58, pp.409-420, 2002.3.