

楕円要素を用いた 2D-DEM 落石シミュレーション

防衛大学校 学生員 中島浩亮 学生員 白石博文
防衛大学校 学生員 深澤 仁 正会員 香月 智

1. 緒言

より合理的なロックシェッド(写真-1)の設計を行うために、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、非常に重要である。このため、落石シミュレーションが着目されている。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は明らかになっていなかった。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。



写真-1 ロックシェッド

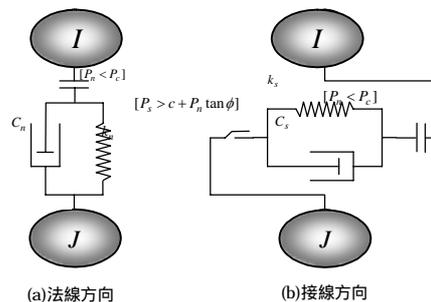


図-1 局部座標系の接触力モデル

2. 解析手法

2.1 個別要素法 (DEM) による解析

本解析では、剛体壁でモデル化された斜面と楕円形要素でモデル化された落石について個別要素法を用い、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、このときの落石要素の運動方程式は次のようになる。

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

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

$$m_i \ddot{u}_z + \sum_{j=1}^n C_{ij} \dot{u}_z + \sum_{j=1}^n k_{ij} u_z = F_z \tag{1c}$$

ここで、 m : 質量、 I : 慣性モーメント、 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、 F_R : 要素に働く合モーメント、 $(\dot{\quad})$: 時間に関する 1 次微分、 $(\ddot{\quad})$: 時間に関する 2 次微分

2.2 解析法の検証

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に、まず能美および山上ら¹⁾の既往解析結果と比較した。表-1 に用いた各バネ定数等を示す。また、図-2 には本解析で得られた落石挙動と既往の解析結果¹⁾と比較して示す。解析は、標高差 55m の平均勾配 45° の緩やかに勾配が小さくなる斜面であり、この A 地点に 2m の地上高さから直径 0.4m の円形落石を落として、その後の挙動を追うものである。図より、本解析法においても、能美らの解析と同様な跳躍を行っており、本解析法の妥当性が検証された。

表-1 解析に用いたパラメータ

	数値(N・sec/m)
垂直方向バネ定数 K_n	1.54×10^7
垂直方向減衰定数 n	4.44×10^3
接線方向バネ定数 K_s	2.22×10^5
接線方向減衰定数 s	9.19×10^4

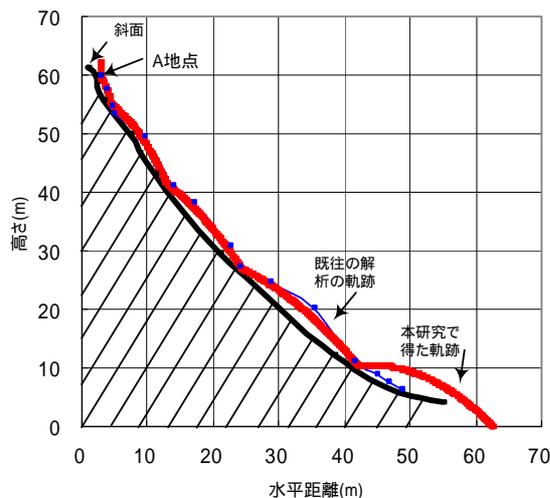


図-2 既往の解析と本研究との落下軌道の比較

キーワード：個別要素法, 楕円要素, 落下速度, 跳躍高さ

連絡先：〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校 TEL: 046(841)3810 e-mail: s50368@ed.nda.ac.jp

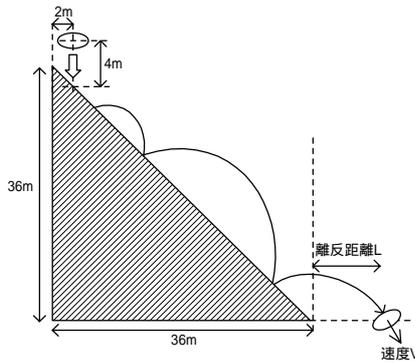
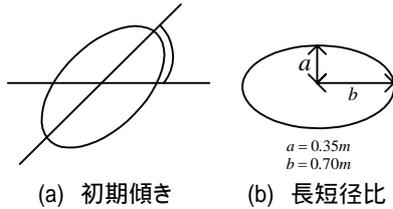


図-3 斜面モデルの設定

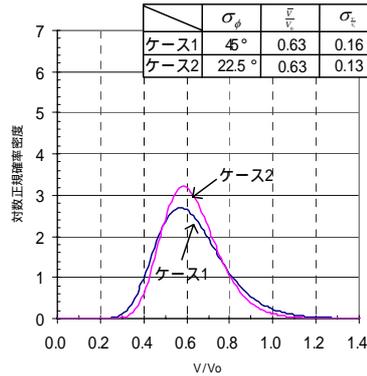


(a) 初期傾き (b) 長短径比

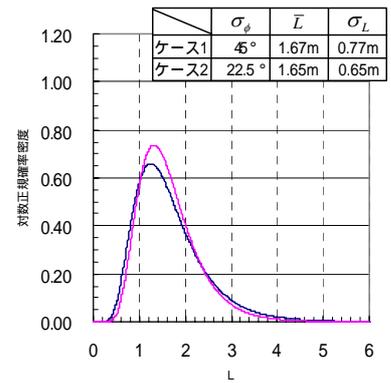
図-4 楕円モデルの設定

表-2 平均値および標準偏差

解析ケース	ばらつきを与えるパラメータ	平均値	標準偏差	変動係数
1	ϕ	$\phi = 0^\circ$	$\sigma_\phi = 45^\circ$	0.5
2	ϕ	$\phi = 0^\circ$	$\sigma_\phi = 22.5^\circ$	0.25
3	a/b	$a/b = 0.5$	$\sigma_{a/b} = 0.25$	0.5
4	a/b	$a/b = 0.5$	$\sigma_{a/b} = 0.125$	0.25

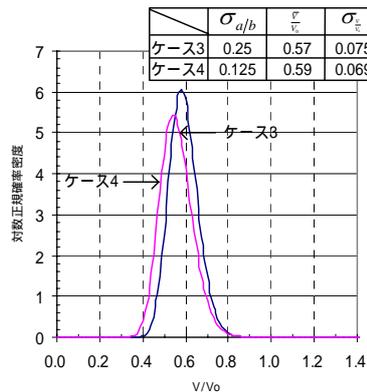


(a) 速度

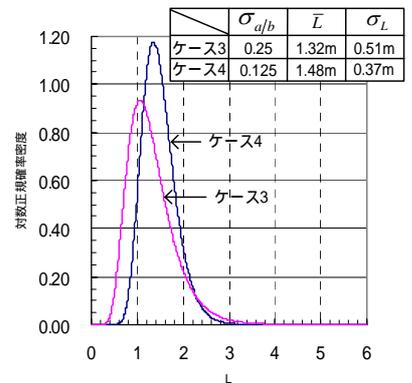


(b) 離反距離

図-5 初期角度の影響



(a) 速度



(b) 離反距離

図-6 長短径比(a/b)の影響

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 に示す楕円形要素を使用したシミュレーションを行う。この際、初期姿勢の代表値 と長短径比 a/b をモンテカルロシミュレーション法により表-2 のようなばらつかせてその影響を調べた。すなわち、ケース1は、 $a/b = 0.5$ に保ったうえで、姿勢平均値として水平にあり、標準偏差 45° でばらつく場合であり、ケース2は標準偏差 22.5° とややばらつきの少ない場合である。ケース3 初期姿勢 $= 0^\circ$ に保ったうえで、 a/b の平均値を 0.5 として、標準偏差 0.25 でばらつかせた場合であり、ケース4 は標準偏差を 0.125 とした場合である。

3.2 初期姿勢の影響

図-5 に標高 $4m$ に落石が達した時の速度と、斜面からの水平方向への離反距離の分布を示す。なお、速度については、自由落下速度 $V_0 = \sqrt{2gh} = 28m/s$ によって規定化している。ケース1と2で若干異なるもののその平均値は自由落下の 60% 程度になっており平均的に落下エネルギーが衝突によって、約半分近く奪われることが分かる。その姿勢自体の影響は速度の標準偏差に現れ、初期角度のばらつきが小さいケース2の方が速度のばらつきも小さい。その水平方向の距離については、姿勢のばら

つきにかかわらず平均値は $1.6m$ 程度であり、最大でも $5m$ 程である。

3.3 長短径比の影響

図-6 に長短径比にばらつきを与えた場合の速度および斜面からの水平離反距離の分布を示す。図-6(a)より長短径比にばらつきを与えた場合も、速度の平均値は 60% 程度となり初期角度 ϕ をばらつかせた場合とほぼ同じとなる結果が得られた。また、そのばらつき度(標準偏差/平均値)もケース3, 4とも 10% 程度となり、 V/V_0 が 1.0 を上回ることはない。一方、離反距離については、図-6(b)に示すように a/b のばらつきが小さいケース4の方が平均値はやや小さく、ばらつきも小さい。この場合の最大離反距離は $4m$ であり、初期角度をばらつかせた場合とほぼ同値である。

4. 結言

本解析で得られた結果を以下に示す。

- 1) 初期角度のばらつきは速度、離反距離の分布にほとんど影響を与えない。
- 2) 長短径比のばらつきは速度分布にほとんど影響を与えないが、離反距離の分布には影響を与えやすい。

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, 409-410, 2002.3