

3次元斜面における落石落下運動について

金沢大学工学部 正 榎谷 浩
 金沢大学工学部 井原 朋美
 金沢大学工学部 福田 尚晃

1. まえがき

斜面に落石防護工を設置する場合、落石の危険度評価が必要である。現在は過去の落石の状況に基づいて経験的に評価されているのが現状である。著者らは2次元斜面を対象に落下経路の推定に関する研究を行ってきた¹⁾、2次元的に落下する場合は実際には多くなく、実際の落石を精度よく再現する手法の開発が望まれてきた²⁾。本研究では新たに開発した3次元落石落下シミュレーション解析手法とその数値解析例について紹介する。

2. 落石落下シミュレーション解析

(1) 斜面のモデル化

実際の斜面を本研究では3角形の平面に分割して表現した。すなわち図1に示す斜面の場合、対象とする斜面は n_s 個の斜面と n_p 個の節点で表される。ここで斜面内の一つの平面を S とし、平面 S の3つの節点を $i(x_i, y_i, z_i)$, $j(x_j, y_j, z_j)$, $k(x_k, y_k, z_k)$ とすると平面 s は次式で表される。

$$ax + by + z = d \quad (1)$$

ここに a, b, d は定数であり、節点 i, j, k を通る平面の場合、

$$a = \{(z_i - z_k)(y_j - y_i) - (z_j - z_i)(y_i - y_k)\} / \{(x_i - x_j)(y_j - y_k) - (x_j - x_k)(y_i - y_j)\} \quad (2.a)$$

$$b = \{(z_i - z_k)(x_j - x_i) - (z_j - z_i)(x_i - x_k)\} / \{(y_i - y_j)(x_j - x_k) - (y_j - y_k)(x_i - x_j)\} \quad (2.b)$$

$$d = ax_i + by_i + z_i \quad (2.c)$$

(2) 落石の運動について

落石の運動形態としては、跳躍、滑動、回転が考えられる。ここではもっとも重要な運動形態である跳躍の取り扱いについて説明する。図1に示すような落石の運動方程式は次式で表される。

$$M d^2 \mathbf{x} / dt^2 = \mathbf{f} \quad (3)$$

ここに、 M は落石の質量、 $\mathbf{x}$ は変位ベクトル $\mathbf{x} = [x, y, z]$ 、 $\mathbf{f}$ は作用力ベクトル $\mathbf{f} = [0, 0, Mg]$ 、 g は重力加速度である。

本研究では $t = t + \Delta t$ の変位ベクトルが $t = t$ での変位、速度そして加速度を用いて次式で表現できるものとし数値解析的に時間積分を行った。

$$\mathbf{x}(t + \Delta t) = \mathbf{x}(t) + \{d\mathbf{x}(t)/dt\}\Delta t + \{d^2\mathbf{x}(t)/dt^2\}\Delta t/2 \quad (4)$$

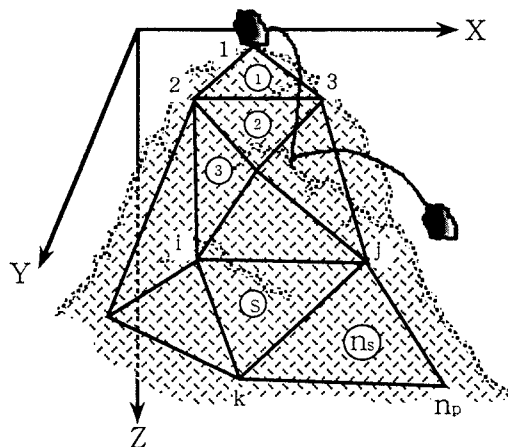


図1 斜面のモデル化

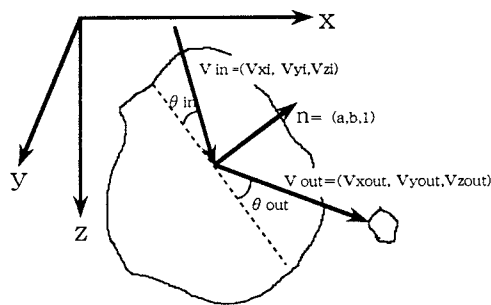


図2 斜面との衝突と飛び出し

(3) 落石の斜面への衝突

跳躍運動している落石は一般に斜面と衝突を繰り返し落下していくことになる。図2に示すように速度 $\frac{dx}{dt} = \mathbf{v}_{in} = (v_{xin}, v_{yin}, v_{zin})$ の落石が入射角 θ_{in} で斜面に衝突し反射角 θ_{out} で飛び出す場合、反発係数を e 低減係数を η とすると入射角と反射角の関係は $\tan\theta_{out} = (-e/\eta)\tan\theta_{in}$ と表される。 $\tan\theta_{in}$ は斜面の法線ベクトル $\mathbf{n}=(a,b,1)$ を用いて

$$\tan\theta_{in} = \frac{av_{xin} + bv_{yin} + v_{zin}}{\sqrt{(a^2 + b^2 + 1)(v_{xin}^2 + v_{yin}^2 + v_{zin}^2)} - (av_{xin} + bv_{yin} + v_{zin})} \quad (5)$$

と表され、反射角 θ_{out} と反発後の速度ベクトル $\mathbf{v}_{out}$ を求めることができる。

3. 解析結果

図3は高さ150mの直線斜面の上方5mの位置より質量1000kgを自由落下させた場合の落石の落下経路を示したものである。また図4はエネルギーの時間変化を示したものである。4回の衝突があり計5区間の跳躍運動となっている。本計算例では、反発係数 $e=1.0$ 、低減係数を $\eta=1.0$ としているため衝突時にエネルギー損失はなく落下とともに位置エネルギーが単調に減少し運動エネルギーは増加している。

図5は3次元斜面への応用例を示したものである。高さ100m、幅200m、奥行き200mの斜面に初速を-2、-1、-0.5、1、2 (m/s)と変化させてその様子を描いたものである。これより本シミュレーション手法の有効性と3次元の特徴的な落下経路の計算が可能であることが確認できる。

4. あとがき

本研究では、3次元斜面上の落石落下シミュレーションを行うための基本的な解析方法を説明し、開発したプログラムによる解析例を示した。今後、落石の回転の影響、各種エネルギー損失を考慮したシミュレーション手法の開発が必要と考えている。

参考文献

- 1) 吉田、右城、樹谷、藤井：斜面性状を考慮した落石覆工の衝撃荷重評価、構造工学論文集、Vol.37A、1993.3.
- 2) 土木学会衝撃問題研究小委員会：構造物の衝撃挙動と設計法、土木学会、構造工学シリーズ6、1994.1.

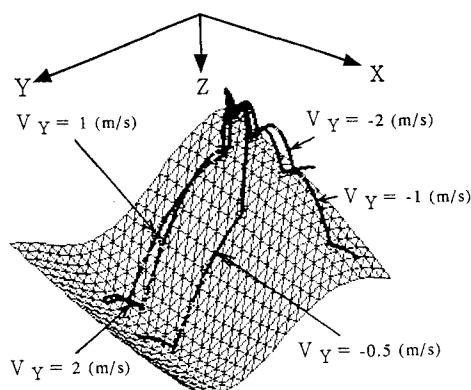


図5 3次元斜面での落石シミュレーション例

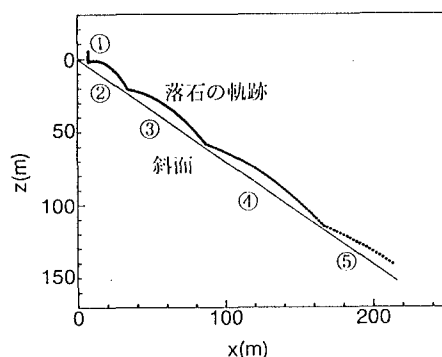


図3 直線斜面と落石落下軌跡

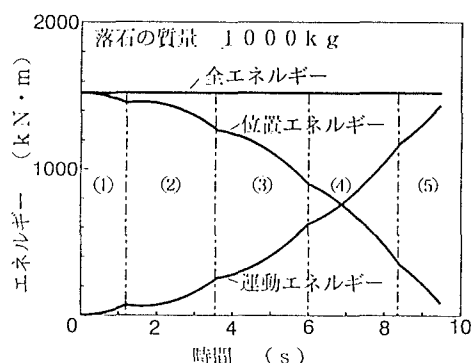


図4 エネルギーの時間変化