

I-B 152

斜面上の落石落下運動の解析手法について

金沢大学工学部 正 榎谷 浩
 金沢大学工学部 井原 朋美
 株式会社鴻池組 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。落石の発生予測をはじめ落石の運動形態や考慮すべき落石の運動エネルギーなどに関しては不明な点が多いため、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り、実際の斜面上の落石落下状況を合理的に推定できる方法が求められている。このような現状より、著者らはより実用的なシミュレーション手法の確立をめざし、3次元斜面上での落石の運動機構の解析手法の開発を行っている。本論文では解析方法の基本理論の概要を紹介する。

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。

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

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

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

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

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

(2) 落石の運動について

落石の運動を考える上で、考えている時刻に落石がどの斜面上にあるか判定する必要がある。図2に示すように斜面 S の XY 平面への投影を面 S' すると、図中に示したベクトル u , v , P が次式を満たせば、落石は斜面 S 内あるいは S 上にあると判定できる。

$$P = su + (1-s)v, \quad \text{ただし } 0 \leq s \leq 1 \quad (3)$$

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。落石の運動方程式は次式で表される。

$$M \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = f \quad (4)$$

ここに、 M は落石の質量、 x は変位ベクトル $x = [x, y, z]$ 、 f は作用力ベクトル $f = [0, 0, Mg]$ 、 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。

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \frac{dx(t)}{dt} \Delta t + \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \frac{\Delta t^2}{2} \quad (5)$$

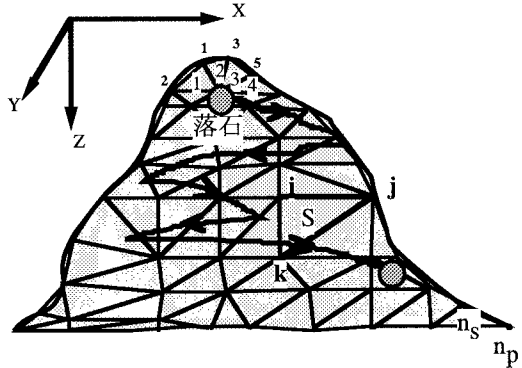


図1 斜面のモデル化

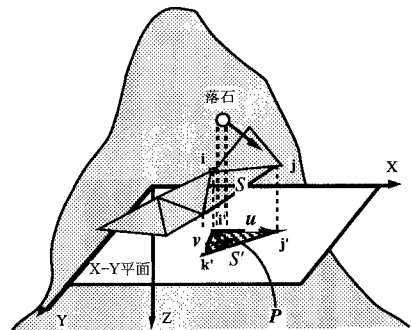


図2 落石位置の判定

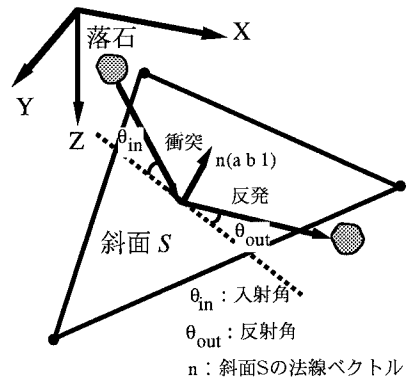


図3 斜面との衝突と反発

（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3に示すように速度 $dx/dt = v_{in} = (v_{xn}, v_{yn}, v_{zn})$ 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、

$$\tan\theta_{in} = \frac{av_{xn}+bv_{yn}+v_{zn}}{\sqrt{(a^2+b^2+1)(v_{xn}^2+v_{yn}^2+v_{zn}^2)} - (av_{xn}+bv_{yn}+v_{zn})^2}$$

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4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5はその場合についての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6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の斜面に対して初速を $V_x=5.0(\text{m/s})$ と固定し、 V_y を $-2, -1, -0.5, 1, 2(\text{m/s})$ と変化させて落石落下経路を示したものである．落下経路は全く異なることがわかる．これより本シミュレーション手法の3次元斜面における有用性が確認できる．

4．あとがき

落石シミュレーションに関する本報告の内容は以下のようにまとめられる．

- 1) 落石落下運動経路推定について3次元斜面上の基本的解析手法を示した．
- 2) 従来の解析手法では、跳躍、回転運動、滑り運動と便宜上明確な運動形態の区別が必要であったが、本解析理論では、滑りを伴う回転など現実的な挙動の取り扱いが可能である．
- 3) 本解析方法により落石運動経路の地形的な影響を考慮したより実際に近い推定が可能であることを示した．

今後、本解析手法に用いる斜面の特性値などを考慮し、より実用的なシミュレーションを行えるよう検討すべきと考えている．

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧、日本道路協会、1983．
- 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．

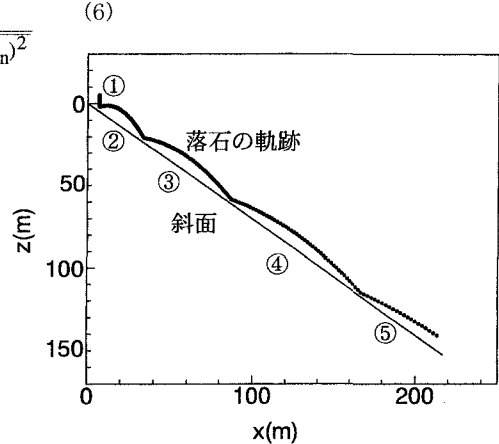


図4 直線斜面と落石落下軌跡

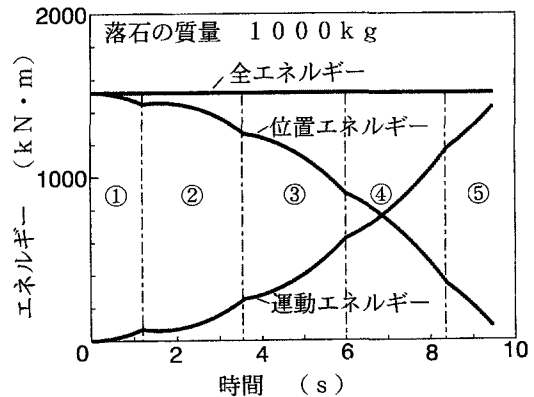


図5 エネルギーの時間変化

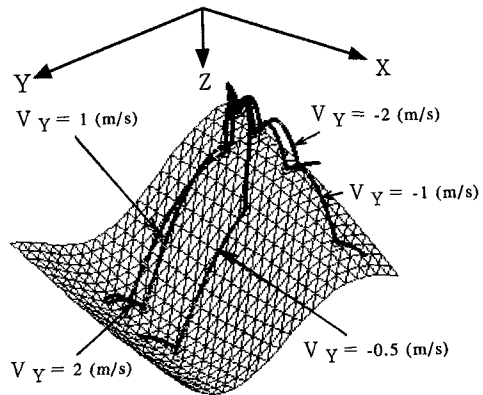


図6 3次元斜面での落石シミュレーション例