

(43) 3次元斜面における落石落下運動シミュレーション手法について

A STUDY ON SIMULATION FOR THE MOTION OF FALLING STONE ON THREE DIMENSIONAL SLOPE

福田尚晃^{*}、梶谷 浩^{**}、梶川康男^{***}、井原朋美^{****}

Naoaki FUKUDA, Hiroshi MASUYA, Yasuo KAJIKAWA and Tomomi IHARA

^{*} (株)鴻池組 (〒541 大阪市中央区北久室寺町3-6-1)^{**} 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)^{***} 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (同 上)^{****} 金沢大学技術官 工学部土木建設工学科 (同 上)キーワード： 落石、落石の運動機構、斜面
(falling stone, motion of falling stone, slope)

1. まえがき

急傾斜地を通る道路、鉄道は、斜面崩壊や雪崩などの自然災害により交通の安全性が損なわれる場合が多い。落石は斜面崩壊の中の一つの現象であり、岩盤の割れ目の拡大により岩塊や礫が剥離したり、固結力の小さな地層中の岩塊が風雨などにより表面に浮きだして落下する現象と定義されている^{1,2)}。このような落石に対する防護施設の設計には、対象とする落石の規模と発生位置、斜面上の落石の運動形態、防護施設位置での運動エネルギーあるいは衝撃力が必要とされる。この中で落石が落石防護工に衝突した場合の荷重評価、設計方法については近年積極的な研究が行われている^{3,4,5)}。

一方、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、既往の実験結果を参考に2次元斜面を用いたシミュレーションが試みられている^{6,7,8)}。しかし、どのような斜面に対しても十分に落石の運動を予測できないのが現状であり、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。本論文ではその骨子となる解析方法の基本理論の概要を紹介する。

2. 解析方法

2.1 落石の運動形態

落石が斜面を落下する場合、図-1に示すように跳躍（飛翔）運動、回転運動そして滑り運動のいずれかまたはこれらが組合わさった運動形態をとる。実際には組合わさった場合が多いと考えられ、落石は斜面との衝突を繰り返し落下していくことになる。

2.2 斜面のモデル化

落石の運動を解析する場合、実際の斜面には大きささまざまな凹凸が存在するが、本研究では大きな変化点に着目し、斜面を三角形の平面に分割して表現した。つまり、図-2に示すように n_s 個の平面と n_p 個の節点で表される。ここで、ある任意の一つの平面 S について、その節点を $i(x_i, y_i, z_i)$ 、

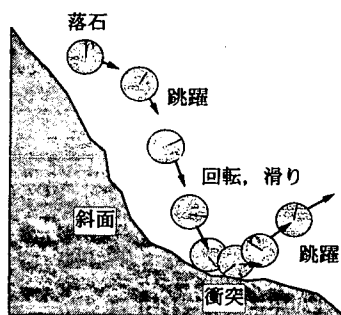


図-1 落石の運動形態

$j(x_j, y_j, z_j)$ 、 $k(x_k, y_k, z_k)$ とすると、平面Sは次のように表される。

$$aX + bY + Z = d \quad (1)$$

ここに、 a, b, c は定数であり、平面Sについては次のように表される。

$$a = \frac{(Z_i - Z_k)(Y_i - Y_j) - (Z_i - Z_j)(Y_i - Y_k)}{(X_i - X_j)(Y_j - Y_k) - (X_i - X_k)(Y_i - Y_j)} \quad (2.a)$$

$$b = \frac{(Z_i - Z_k)(X_i - X_j) - (Z_i - Z_j)(X_i - X_k)}{(Y_i - Y_j)(X_i - X_k) - (Y_i - Y_k)(X_i - X_j)} \quad (2.b)$$

$$d = aX_i + bY_i + Z_i \quad (2.c)$$

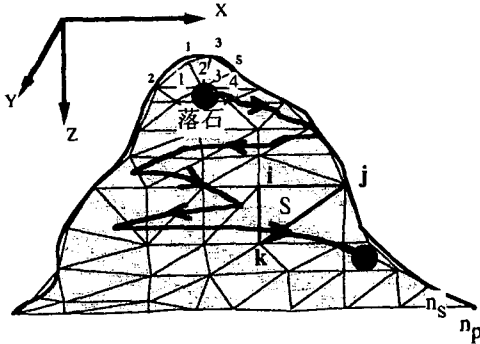


図-2 斜面のモデル化

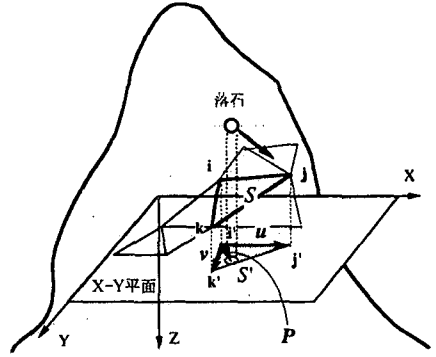


図-3 落石位置の判定

2. 3 落石運動の基本解析

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-3に示すように落石がある斜面上にあると考えられる場合、斜面Sと節点*i, j, k*のXY平面への投影を面S'と点*j', k'*とすると、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。

$$P = su + (1-s)v, \text{ ただし } 0 \leq s \leq 1 \quad (4)$$

落石の運動は前述のように跳躍、回転、滑りの3つが考えられるが、回転を無視した場合、跳躍運動についての落石の運動方程式は次のように表される。

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} = f \quad (5)$$

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。時刻 $t=t$ での変位、速度そして、加速度を用いて $t=t+\Delta t$ での変位ベクトルを次式で表現すると、数値解析的に時間積分を行うことができる。

$$X(t+\Delta t) = X(t) + \frac{dX(t)}{dt} \Delta t + \frac{1}{2} \frac{d^2 X(t)}{dt^2} \Delta t^2 \quad (6)$$

跳躍運動をしている落石は、図-4に示すように斜面と衝突することになる。速度 $V_{in} = [V_{xin} \ V_{yin} \ V_{zin}]$ の落石が θ_{in} で斜面に衝突し反射角 θ_{out} で飛び出すと仮定すると、入射角と反射角の関係は

$$\tan \theta_{out} = (e/\eta) \tan \theta_{in} \quad (7)$$

と表される。ここで、 e は反発係数、 η は低減係数である。また、 $\tan \theta_{in}$ は斜面Sの法線ベクトル $n = [a \ b \ 1]$ を用いて、

$$\tan \theta_{out} = \frac{e}{\eta} \frac{aV_{xin} + bV_{yin} + V_z}{\sqrt{(a^2 + b^2 + 1)(V_{xin}^2 + V_{yin}^2 + V_{zin}^2) - (aV_{xin} + bV_{yin} + V_z)^2}} \quad (8)$$

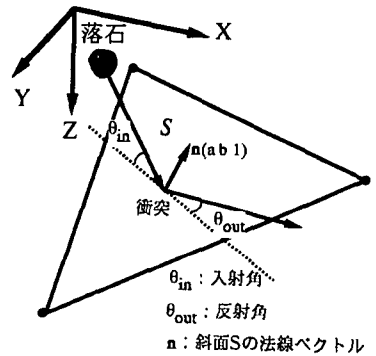


図-4 衝突時の入射角と反射角

と表され、反射角 θ_{out} と衝突後の速度ベクトル V_{out} を求めることができる。

2.4 落石の回転を考慮した解析

2.3では跳躍運動の解析方法を示したが、落石と斜面との衝突時には回転と滑りを伴い、跳躍中にも落石に回転があるのが一般的である。ここではこれらを考慮する解析手法について述べる。

(1) 斜面座標系

まず、図-5のように各斜面に局所座標 x - y - z を設定する。 z 軸をまず斜面の法線方向に決め、右手系をなすように y 軸を全体座標の XY 平面に平行な面内に、 x 軸を z 軸と y 軸に直交するようにとる。この場合、全体座標 $[X Y Z]$ は斜面に設けた局所座標 $[x y z]$ と次の関係式で結ばれる。

$$x = T_r X \quad (9)$$

ここに、 $x=[x y z]^T$ 、 $X=[X Y Z]^T$ であり、 T_r は座標変換マトリックスで、

$$T_r = \begin{bmatrix} \frac{-a}{\sqrt{a^2+b^2}} & \frac{-b}{\sqrt{a^2+b^2}} & \sqrt{a^2+b^2} \\ \frac{-b}{\sqrt{a^2+b^2}} & \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}} & 0 \\ a & b & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

と表され、 $n=[a b 1]$ は斜面 S の法線ベクトルである。

(2) 落石と斜面の接触の取り扱い

従来のシミュレーション手法では落石と斜面の衝突が瞬時に生じ、衝突前後の落石の運動変化は反発係数と低減係数あるいは速度エネルギー比を用いて取り扱われている。しかし、このような手法では落石の回転運動の変化を説明することができない。ここでは、衝突時に落石が斜面より摩擦力を受けると考えた。これにより落石の回転運動に変化が生じ、結果として並進運動（跳躍運動）にも影響を与える。具体的な例として、図-6のように落石の衝突時に斜面地盤との間に接触ばねを仮定することができる。ばね定数を k としばねは線形弾性であり、落石は剛体であると仮定すると、斜面と落石の衝突時の接触時間は、

$$T_c = \pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (11)$$

と表される。ここで、 m は落石の質量である。

図-7は回転している落石が斜面に接触している場合について、接触点における落石の相対速度と摩擦力の働く方向を示したものである。この場合斜面座標の x 方向について示しているが、 y 方向についても全く同様である。この場合落石の回転に関する運動方程式は次式で表される。

$$I \frac{d\omega}{dt} = h \quad (12)$$

ここに、 ω は角速度（回転速度）ベクトル、 $\omega=[\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]$ 、 h は接触点における作用力ベクトル、 I は落石の回転慣性であり、半径 r の球と仮定すると $I = \frac{2}{5} m r^2$ で与えられる。この運動方程式を数値解析的に時間積分を行うことにより衝突時の滑りを伴う回転の変化を求めることができる。

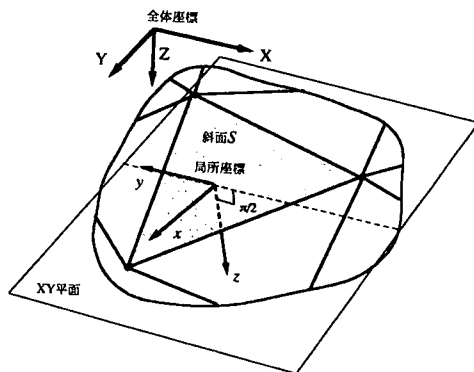
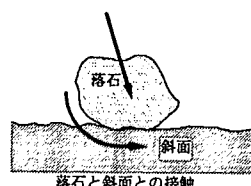
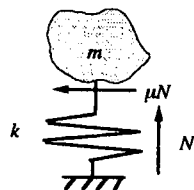


図-5 斜面における局所座標系



↓ モデル化



- k : 地盤（斜面）の等価ばね
- N : 斜面法線方向抗力
- μ : 落石と地盤間の摩擦係数
- m : 落石の質量
- $T = \pi \sqrt{\frac{m}{k}}$: 落石と地盤の接触時間

図-6 落石と斜面の接触時のモデル化

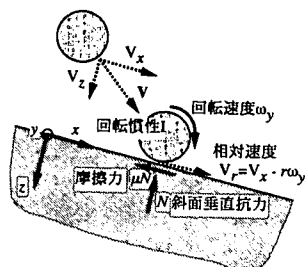


図-7 相対速度と摩擦力

3. 解析例

2. で解析シミュレーションの基本的考え方について説明した。ここではこの方法により行った解析例を紹介する。

図-8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-9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。

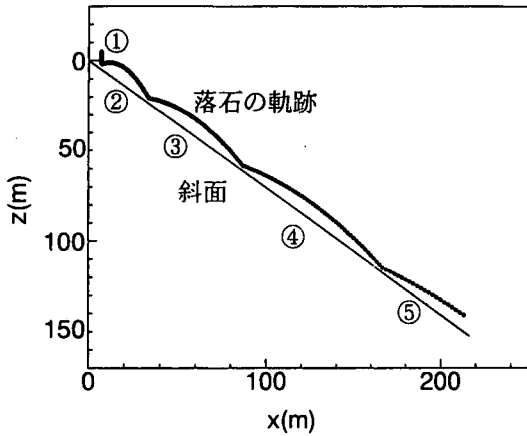


図-8 直線斜面と落石の軌跡

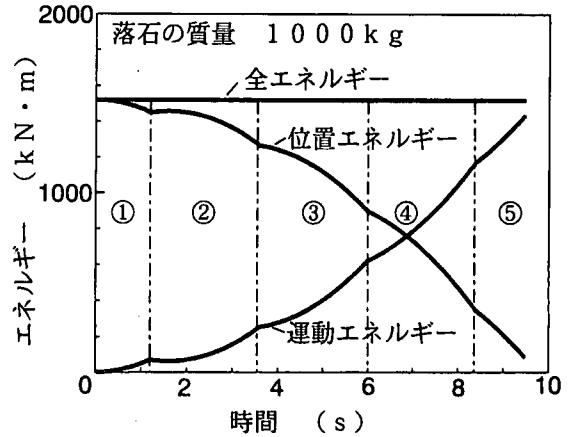


図-9 エネルギーの時間変化

図-10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 $V_x=5.0$ (m/s)と固定し、 V_y を-2、-1、-0.5、1、2(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。

本解析手法はまだ開発途中で完成したものではなく、今後、斜面の地質や植生などの影響を考慮し、さらに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。

4. あとがき

著者らは実用的なシミュレーション手法をめざし研究を行い、解析方法の基本理論を中心に紹介したが、本研究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(仮定)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。
- 4) 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である。

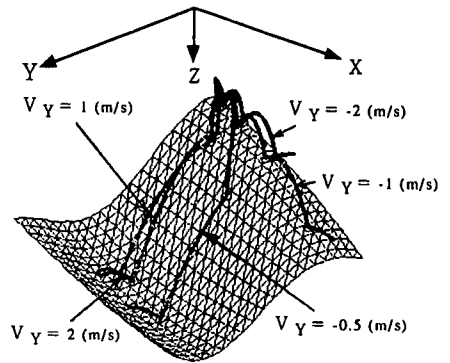


図-10 3次元斜面でのシミュレーション例

参考文献

- 1) 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.
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧、日本道路協会、1983.
- 3) 園田恵一郎：落石覆工の設計法についての一提案、構造工学論文集、Vol.39A、pp.1563-1572、1993.
- 4) 園田佳巨、石川信隆、園田恵一郎、大田俊昭：PC落石覆工の耐荷力評価と安全性照査法に関する研究、土木学会論文集、No.495、pp.83-92、1994.
- 5) 中野修、岸 徳光、松岡健一：三層緩衝構造の緩衝性能に及ぼす裏面材料の影響、第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.192-198、1993.6.
- 6) 古賀泰之、伊藤良弘、鷺田修三、森下 義：落石の運動予測法に関する検討、土木技術資料、Vol.31、No.8、1989.8.
- 7) 右城 猛、村上哲彦：落石の飛翔高の推定、第1回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集、pp.48-54、1983.7.
- 8) 吉田 博、右城 猛、榎谷 浩、藤井智弘：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.

