

斜面における落石の落下運動解析に関する一考察

金沢大学大学院	学	堤下克彦
金沢大学工学部		田中志人
金沢大学工学部	正	榎谷 浩
金沢大学工学部	正	梶川康男

1. はじめに

落石は降雨、積雪、風、地震などの自然作用を原因として斜面上を石が落下する現象である。特に道路沿いの斜面などから発生する落石は、規模も多様で、一般に落石の発生予測を始めとする落石の運動形態や考慮すべき落石の運動エネルギー、衝撃力など不明な点も多く、その現象が十分解明されているとは言えない。

本研究では、斜面における落石の落下運動の解明を目的とし開発した3次元斜面上の落石落下運動のシミュレーション手法を紹介する。また基本的な運動形態について解析例とともに本手法の有効性を示す。

2. 落石運動の基本解析方法

2.1 斜面のモデル化

本研究では斜面を三角形の平面に分割し、図1のように示される。図1では ns 個の斜面と np 個の節点で表され、個々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 は次のようになる。

$$aX + bY + Z - d = 0 \quad (1)$$

ここで a, b, d は定数であり、節点 i, j, k を通る平面では、

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

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

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

2.2 落石の運動

落石の運動を解析には、落石がある時刻にどの斜面にあるかを判定しなければならない。図2に表された斜面 S の XY 平面への投影を S' とすると、図に示したベクトルが次式を満たせば、落石は斜面 S 内または S 上にあると判定できる。

$$p = su + (1-s)v \quad (0 \leq s \leq 1) \quad (3)$$

また落石の運動形態は、跳躍、回転、滑り運動がある。ここでは最も重要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のようになる。

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

ここで 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、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。

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

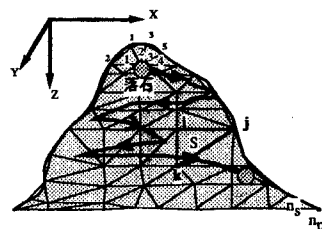


図1 斜面のモデル化

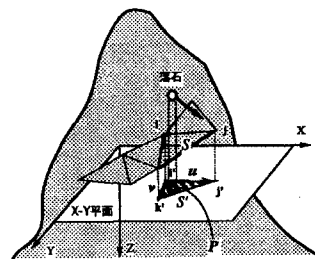


図2 落石位置の判定

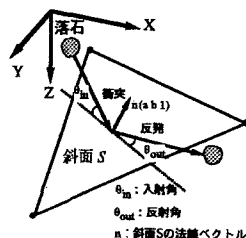


図3 斜面への衝突と跳びだし

2.3 落石の斜面への衝突

図3で示すように跳躍運動をしている落石が斜面と衝突する場合を考える。速度 $V_{in}=(V_{xin}, V_{yin}, V_{zin})$ の落石が入射角 θ_{in} で斜面に衝突し、その後速度 $V_{out}=(V_{xout}, V_{yout}, V_{zout})$ 、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。 $\tan \theta_{out}$ は斜面の法線ベクトル $n=(a,b,1)$ を用いて次のように表される。

$$\tan \theta_{out} = \frac{e}{\eta} \frac{aV_{xin} + bV_{yin} + V_{zin}}{\sqrt{(a^2 + b^2 + 1)(V_{xin}^2 + V_{yin}^2 + V_{zin}^2) - (aV_{xin} + bV_{yin} + V_{zin})^2}} \quad (6)$$

3. 解析結果

ここで、落石の跳躍運動を基本とする落石運動の基本解析方法の解析例を紹介する。図4は、質量1000kg、半径1.0mの落石を高さ20mより水平面に鉛直自由落下させた場合の解析結果を示したものである。図4(a)と図4(b)は反発係数 $e=1.0, 0.8, 0.6$ の時の落石位置と速度の時間変化を示したものであり、図4(c)は反発係数が $e=0.8$ の時の位置エネルギー、運動エネルギー、全体エネルギーの時間変化を示したものである。それぞれの図より各反発係数に応じて位置、速度また全体のエネルギーが減少しており本解析が現象を正確に予測していることが分かる。

図5は3次元斜面への応用例を表したものである。高さ100m、幅200m、奥行き200mの斜面に対して初速度を $V_x=5.0(m/s)$ に固定して、 V_y を-2.0、-1.0、-0.5、1.0、2.0(m/s)と変化させて落石の軌跡を表したものである。図より軌跡がそれぞれ異なることが分かる。このことから本研究の解析方法の3次元斜面における有用性が示されている。

4. まとめ

- 1) 3次元斜面上の落石の運動のシミュレーションを行うための基本的解析方法を開発し、開発したプログラムによる解析例を示した。
- 2) 跳躍、回転、滑り運動のように運動形態を明確に区別する必要がある従来の解析手法と違い、本解析手法では、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) 本解析手法により落石運動の軌跡の地形的な影響を考えたより現実に近い予測がkの宇土になった。
- 4) 今後は本解析に用いる斜面における特徴を考え、より有効なシミュレーションを行えるように検討するべきである。

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.
- 3) 吉田、右城、梶谷、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.

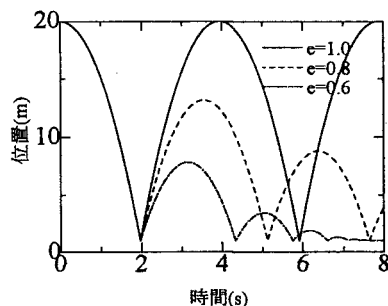


図4(a) 位置

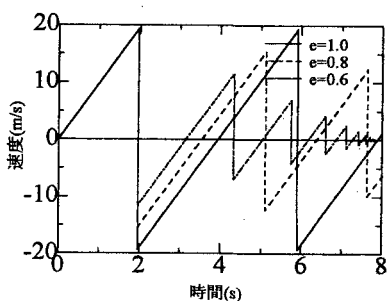


図4(b) 速度

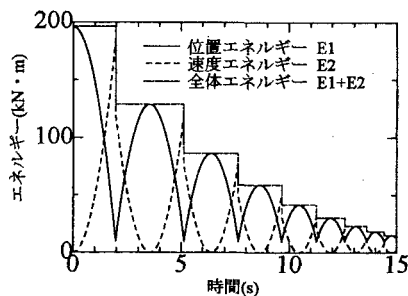


図4(c) エネルギー($e=0.8$)

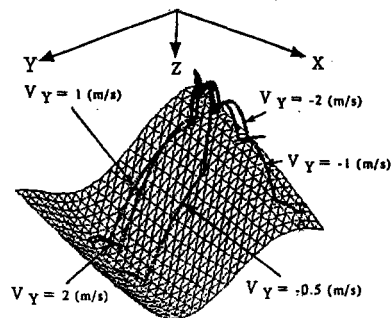


図5 3次元斜面での計算例