

斜面における落石落下運動解析について

金沢大学大学院 学生員 堤下 克彦
 金沢大学大学院 学生員 田中 志人
 金沢大学工学部 正会員 榎谷 浩
 日本サミコン(株)技術部 正会員 音田 奨

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を岩が落下する現象である。落石の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や考慮すべき運動エネルギーあるいは衝撃力が必要とされるが、不明な点が多く、把握するのが難しいのが現状である。そのため、防護施設の設計については経験や現地の判断に負うところが多い。

本研究において、斜面における落石の運動の解明を目的とした 3 次元斜面における落石落下運動のシミュレーション手法を紹介する。また、落石の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. 落石の基本解析方法

2.1 斜面のモデル化と落石の位置判定

小さな凹凸は無視して、大きな変化点のみに着目し、斜面を三角形の平面に分割しモデル化する。また、落石の運動解析を行う場合、考えている時刻に落石がどの斜面にあるかを判定しなければならない。そこで落石が斜面上にある時、その斜面 S と接点 i, j, k の $X-Y$ 平面への投影を面 S' と点 i', j', k' とし、落石の現座標の位置ベクトルを $\mathbf{P}=[X \ Y]$ とするとベクトル $\mathbf{u}=[X_j-X_i \ Y_j-Y_i]$ 、 $\mathbf{v}=[X_k-X_i \ Y_k-Y_i]$ 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。

$$\mathbf{P} = s\mathbf{u} + (1-s)\mathbf{v} \quad (\text{ただし } 0 \leq s \leq 1) \quad (1)$$

2.2 落石の衝突

跳躍している落石が衝突している場合、図 3 のように考える。速度 $\mathbf{V}_{in}=[V_{Xin} \ V_{Yin} \ V_{Zin}]$ の落石が入射角度 θ_{in} で斜面に衝突し、その後、速度 $\mathbf{V}_{out}=[V_{Xout} \ V_{Yout} \ V_{Zout}]$ 、反射角度 θ_{out} で飛び出すと仮定し反発係数を e 、低減係数を η とすると入射角度と反射角度の関係は次のように表される。

$$\tan \theta_{out} = \frac{e}{\eta} \frac{aV_{Xin} + bV_{Yin} + V_{Zin}}{\sqrt{(a^2 + b^2 + 1)(V_{Xin}^2 + V_{Yin}^2 + V_{Zin}^2) - (aV_{Xin} + bV_{Yin} + V_{Zin})^2}} \quad (2)$$

3. 解析例

図 4、図 5 は斜面上に質量 500kg、半径 50cm の石を最初の衝突地点上 3m の高さより鉛直自由落下させたときの落石の落下経路である。反発係数は $e=0.6, 0.5, 0.4$ の 3 種とし、ばね定数は $k=10^6 \text{N/m}$ 、摩擦係数は一定

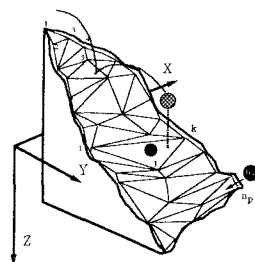


図 1 斜面のモデル化

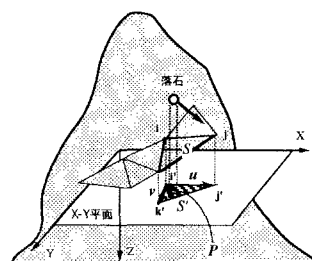


図 2 落石の位置判定

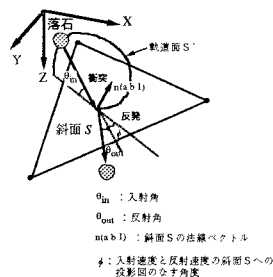


図 3 斜面への衝突と飛び出し

とし $\mu=0.2$ とした。ただし、図4と図5の落石防護柵の位置が異なっている。図4では落石が柵を超えるものがあるが、1m上方に柵を設置した図5においては落石がすべて止まっている。この2つの図よりこのシミュレーションでは落石防護柵をどのような位置に設置すればよいかを推測することができることを示した。図6は3次元斜面における応用例で、凹型斜面に質量1000kg、半径1mの落石を高さ20mから鉛直落下させたときの経路であり、この時の反発係数 $e=0.8$ 、バネ定数 $k=10^6\text{N/m}$ 、摩擦係数 $\mu=0.2$ である。図7はX-Y平面における落石の落下経路、図8は落石の落下におけるエネルギーと時間の変化を表したものである。図6より凹型斜面であるものは谷筋に落石の軌跡が集中する経験的に知られた現象がよく再現されていることが分かる。また、図7より谷筋から離れた所で落石が発生した場合は斜面との衝突回数が多く、谷筋に近い所では衝突回数は少なく、回転エネルギーの増加が谷筋から離れた所で発生した場合より少ない。したがって、落石が斜面の衝突により回転数が生じ、回転エネルギーが減少していくことから、谷筋から離れた所から落石が落下したほうが衝突回数が多く、落石の落下速度が小さくなることが分かる。

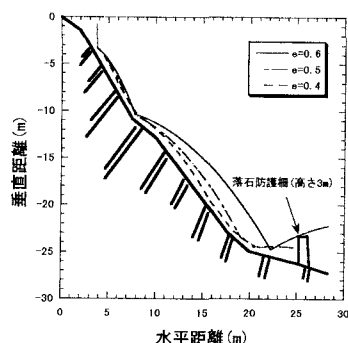


図4 2次元斜面(例1)

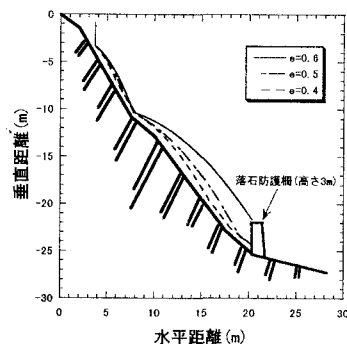


図5 2次元斜面(例2)

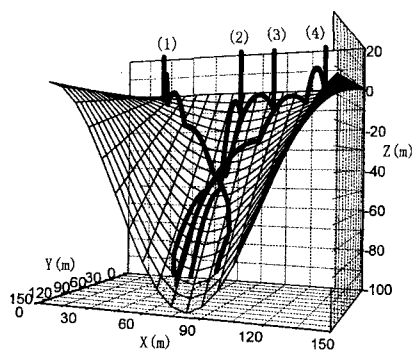


図6 3次元斜面における解析

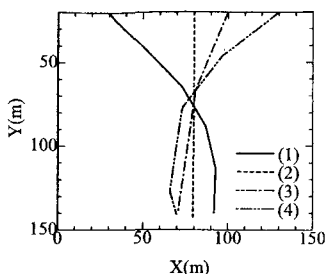


図7 X-Y平面の落下経路

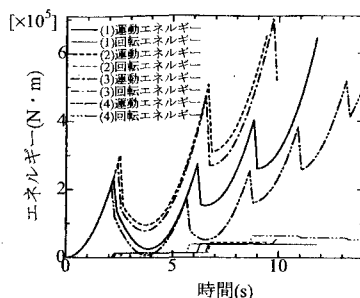


図8 エネルギーの時間変化

4. まとめ

本研究では斜面における落石の運動形態の解析例を示したが、本研究の結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 3次元斜面上の落石の落下運動についての基本的手法を示した。
- 2) 滑り運動を伴う回転を考慮したより現実的な落石の運動の取り扱いが可能であることを示した。
- 3) 3次元を対象とすることから、落石運動経路の地形的な影響を考慮した現実に近い推定が可能になった。
- 4) 落石防護柵設置位置の検討に本シミュレーションが役立つことを示した。

今後はより実際に近いシミュレーションを行うために斜面の地質、形状の影響などを考慮していくことが必要と考えられる。