

I - B193

3次元斜面における落石落下運動に関する解析について

金沢大学工学部 正会員 榎谷 浩
 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 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。また落石の現象は様々な原因が複雑に重なり合っていることが多く、特に落石の発生予知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、衝突現象など不明な点が多いというのが現状である。そのため、防護施設の設計についても経験や現地の判断に負うところが多い。

本研究では、斜面上における落石の落下運動の解明を目的とした3次元斜面上の落石落下シミュレーション手法を開発し、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. 落石運動の基本的解析方法

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、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。また落石の運動を解析するには、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とき、その斜面 S と節点 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 $P=[X \ Y]$ とするとベクトル $u=[X_i-X_j \ Y_j-Y_i]$ 、 $v=[X_k-X_i \ Y_k-Y_i]$ 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。

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

2.2 落石の衝突

跳躍している落石が斜面と衝突している場合、図1のように考える。速度 $V_{in}=[V_{xin} \ V_{yin} \ V_{zin}]$ の落石が入射角度 θ_{in} で斜面に衝突し、その後、速度 $V_{out}=[V_{xout} \ V_{yout} \ V_{zout}]$ 、反射角 θ_{out} で飛び出すと仮定し反発係数を e 、低減係数を η とすると入射角と反射角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. 解析結果

図2は凹型斜面上に質量1000kg、半径1mの落石を高さ20mから鉛直落下させたときの3次元斜面上における落石の落下経路であり、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3は X - Y 平面における落石の落下経路、図4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3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という経験的によく知られている現象がよく再現されていることが分かる。また図4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の回数が多く、その衝突で回転エネルギーが増加する。一方、谷筋に近い所で落石が発生した場合は衝突の回数が少なく、回転エネルギーの増加が谷筋から離れた所で落石が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エネルギーが生じ、運動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方が衝突回数が多く、落石の落下していく速度が小さくなることがわかる。図5は凸型斜面上に落石を鉛直落下させたときの3次元斜面上における軌跡である。図6より凸型斜面であるものはいろいろな方向へ分散して落下する様子がよく再現されている。また図7より急な勾配を落下しているものが衝突回数が少なく最終的に運動エネルギーが大きいことがわかる。

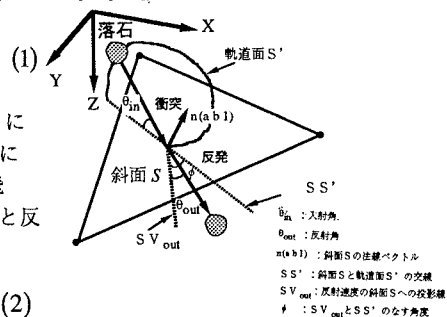


図1 衝突時の入射角と反射角

キーワード：落石、落石の運動形態、斜面、衝突

〒920 石川県金沢市小立野2-40-20 金沢大学工学部 TEL(0762)34-4603 FAX(0762)34-4632

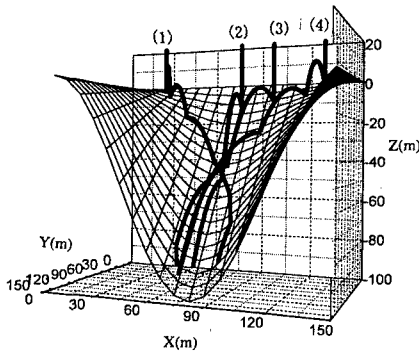


図2 3次元斜面における解析(例1)

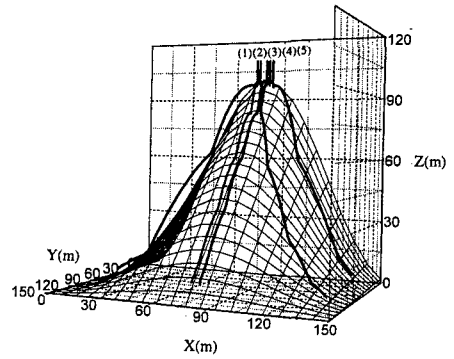


図5 3次元斜面における解析(例2)

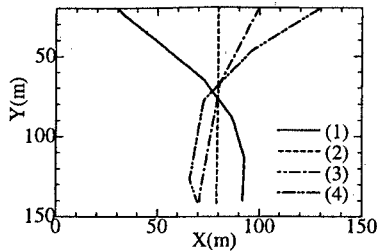


図3 X-Y平面における落下経路(例1)

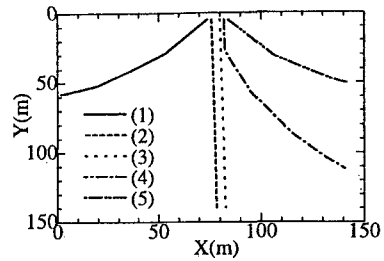


図6 X-Y平面における落下経路(例2)

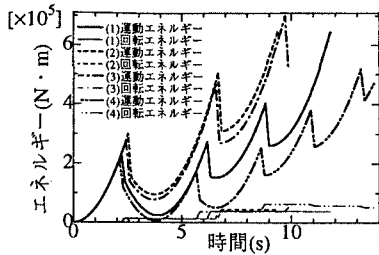


図4 エネルギーの時間変化(例1)

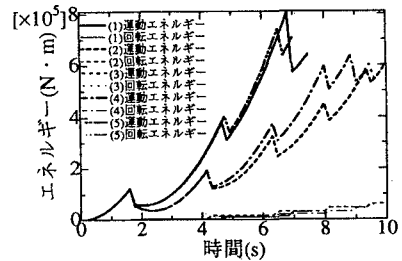


図7 エネルギーの時間変化(例2)

4. まとめ

本研究では斜面上の落石落下運動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次元斜面上の落石落下運動についての基本的手法を示した。
- 2) 滑りを伴う回転などを考慮したより現実的な落石の運動挙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実際に近い推定が可能であることを示した。
- 4) 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今後必要と考えられる。

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、榊谷、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, pp.1603-1616, 1991.3.