

斜面のラフネスを考慮した落石運動の3次元シミュレーション

金沢大学 正 ○西川幸成
金沢大学 正 榎谷 浩
三重県 森口優子

1. はじめに

実際の落石現象は、地表面の形状や地質条件、落石の形状や樹木の有無などの影響により複雑であるため、落石防護施設の設計における荷重条件は、落石対策便覧を参考に経験的に設定されることが多い。しかしながら、落石対策便覧に示された経験則を適用することが適切でない場合も多いことから、落石の運動挙動を予測評価するための落石シミュレーション手法が開発・提案されている。著者らも、これまでに、3次元斜面における落石運動機構の解析手法の開発を行っている^{1,2,3)}。本研究は、より実用的なシミュレーション手法の確立をめざし、さらに実斜面に近い状態を再現するために、斜面表面の凹凸を考慮した3次元斜面における落石の運動シミュレーション手法を開発し、検討を行ったものである。

2. ラフネスを考慮した斜面のモデル化

本手法では、斜面の凹凸による落石衝突時のランダム性の影響を図-1に示すように落石が斜面に衝突した瞬間に、モデル化により三角形に分割した平面の法線ベクトルにある角度 θ を加えることで表現するものとした。ここに、 θ は斜面の凹凸の程度(ラフネス)を表す角度(ラフネス角)である。図-2は考えている平面の法線ベクトル n_1 とラフネス角 θ を考慮した平面の法線ベクトル n_2 などを示したものである。ここに、 $n_1 = (l_1, m_1, n_1)$ 、 $n_2 = (l_2, m_2, n_2)$ である。ベクトル n_2' は、 n_2 を n_2 と並行ではない単位ベクトル n_1 の回りに、任意角 ϕ だけ回転させたものである。P点はラフネスを考慮したある平面の一つの法線ベクトル OP の終点であり、 $n_2' = (l_2', m_2', n_2')$ で示されるQはラフネスを考慮し、さらにベクトル ON 回りに任意角 ϕ だけ回転させた点である($0 < \phi < 2\pi$)。落石が斜面との接触時、接触後の運動方向を決定する場合に法線ベクトルが $n_1 = (l_1, m_1, n_1)$ である平面の代わりに、その都度乱数を発生させて法線ベクトルが $n_2' = (l_2', m_2', n_2')$ である平面を仮定し、反発方向の不規則性を考慮することにした。

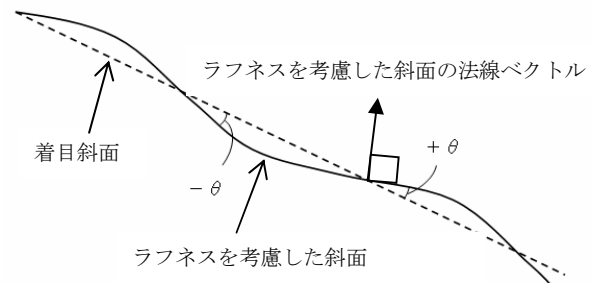


図-1 ラフネスの概念図

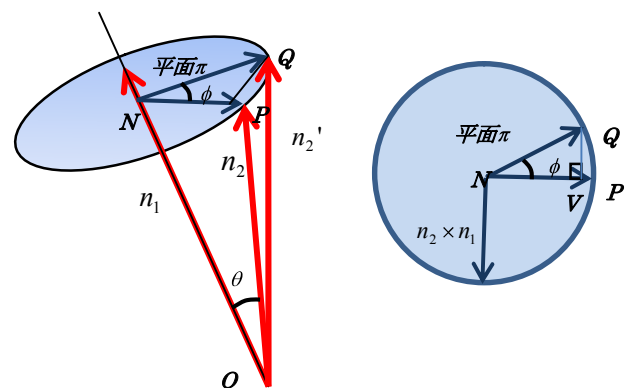


図-2 法線ベクトル n_1 とラフネス角 θ および回転角 ϕ を有するベクトル n_2' との関係

3. 斜面の凹凸を考慮した3次元落石シミュレーション

(1)解析条件

実際の斜面への適用前に、理想的なモデル斜面で試行解析を行いその妥当性について確認することにした。解析に用いた斜面は、図-3に示すように、幅200m、奥行き100m、傾斜20°の様な3次元の単純斜面とした。解析における初期投下条件を表-1、落石条件を表-2に示す。以上の条件を用いて斜面の

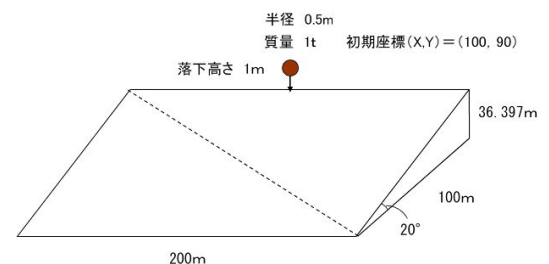


図-3 解析断面

キーワード 落石, 3次元シミュレーション, ラフネス

連絡先 〒920-1192 石川県金沢市角間町 金沢大学 E-mail:nishikawa_yukinari@kokudonet.co.jp

凹凸を表すラフネス角 θ を変化させて解析を実施し、落石運動の軌跡の変化や最終速度について比較した。なお、解析の試行回数は、乱数の有意水準 α を0.05として、それぞれ300回とした。

(2) 解析結果および考察

表-3に θ を0度から20度まで変化させた場合の最終速度の平均値と標準偏差を示す。また、図-4と図-5に $\theta=0^\circ$ と $\theta=10^\circ$ の場合におけるX-Y平面での軌跡図とY-Z平面での軌跡図を示す。落石運動の軌跡について時刻刻みにおける落石位置を点で示した平面軌跡は、図-4や図-5に示したように、 $\theta=0^\circ$ の場合は、反発係数、摩擦係数が一定で、ラフネスを考慮しないため、落石落下地点からそのままX-Y平面では斜面下方にまっすぐに落下する結果となっている。Y-Z平面での軌跡でわかるように、すべて同じ経路をたどり、斜面下方に来るほど単調に跳躍距離が長くなっていることがわかる。一方、 $\theta=10^\circ$ とした場合からもわかるように θ を変化させると、X-Y平面軌跡より、 $\theta=0^\circ$ の場合に比べて落石の平面的な広がりが大きくなっている。また、Y-Z断面軌跡でも $\theta=10^\circ$ の場合に比べて跳躍高の変化も大きくなっている。このことは斜面下方でより顕著に確認できる。

落石速度については、表-3に示したように $\theta=0^\circ$ の場合、斜面末端での最終速度は22.2m/sであるが、 $\theta=5^\circ$ とすると最終速度は24.1m/sと少し大きくなっている。次に $\theta=10^\circ$ とすると最終速度は23.4m/sと少し小さくなり、さらに $\theta=20^\circ$ とすると最終速度は22.4とさらに小さくなっている。いずれにせよ、 $\theta=0^\circ$ に比べ1%から8%程度の増加であり大きな差異はないといえる。ただ、標準偏差は、いずれの場合も θ が大きくなるとともに大きくなっている。すなわち、ラフネス角 θ を考慮した結果、落石速度の変動が大きくなることがわかる。

4. 結論

以上のことから、斜面の凹凸を表すラフネス角 θ を考慮した結果は、最終速度にはあまり影響を与えないが、飛翔高も含め落石軌跡の空間分布が広がることが確認できた。すなわち、本手法により一様斜面での単調な落石の挙動に変化を与えることができることより、ここで示したラフネスの取り扱いは実斜面の凹凸に伴う落石運動の不規則性を表現できる有効な手法であると考えられる。

参考文献

- 1) 榎谷浩, 福田尚晃, 堤下克彦: 斜面上の落石の運動解析手法の開発, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.1589-1596, 1997.
- 2) 小村辰彦, 村石隆之, 西澤謙二, 榎谷浩: 落石シミュレーション解析における落石の斜面衝突現象, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1613-1620, 2001.
- 3) 西川幸成, 榎谷浩, 天沼康平: 斜面樹木の幹と枝葉の影響を考慮した落石の運動シミュレーション, 応用力学論文集, Vol.13, pp.555-564, 2010.

表-1 初期投下条件

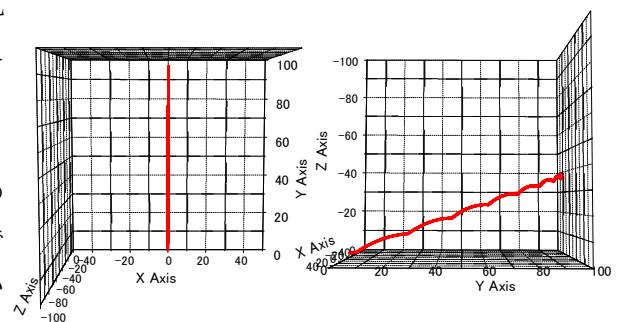
項 目	x(m)	y(m)	z(m)
投 下 位 置(m)	0	90	-37.397
初 期 速 度(m/s)	0	0	0
初期角速度(rad/s)	0	0	0

表-2 落石条件

落石質量(t)	0.17
落石直径(m)	0.50
斜面反発係数	1.00
斜面摩擦係数	0.10

表-3 シミュレーション結果

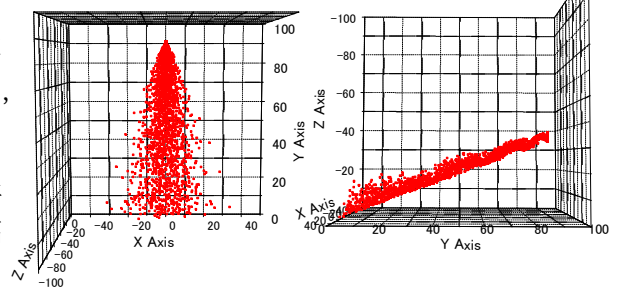
θ ($^\circ$)	最終速度(m/s)	
	平均値	標準偏差 (変動係数)
0	22.2	0 (0)
5	24.1	0.90 (0.037)
10	23.4	1.2 (0.051)
20	22.4	1.9 (0.085)



(a) X-Y 平面軌跡

(b) Y-Z 平面軌跡

図-4 軌跡図 ($\theta=0^\circ$)



(a) X-Y 平面軌跡

(b) Y-Z 平面軌跡

図-5 軌跡図 ($\theta=10^\circ$)