

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

金沢大学 正 ○西川幸成
金沢大学 正 梶谷 浩
滋 賀 県 天沼康平

1. はじめに

落石防災対策においては、発生源における不安定岩塊の危険度評価とともに、岩塊が落石した場合の運動形態を把握することが重要である。落石の運動形態の評価は、これまで、落石対策便覧を参考に既往の現場落石実験等の実績に基づいて安全側に設定された経験則により行われているが、近年、落石の運動形態などを定量的・合理的に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)}。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、これまであまり考慮されていなかった斜面における幹と枝葉を考慮した3次元斜面における落石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. 樹木の幹と落石の衝突現象のモデル化

落石が樹木の幹に衝突した場合、樹木には、幹の曲げ破壊やせん断破壊、根の破壊や根の浮き上がりによる周辺地盤の破壊などが生じる。樹木の衝撃緩衝効果は、このような現象を伴うものであるが、自然の樹木は、幹の太さなど、樹木によって様々であり、また、落石が衝突する位置によっても緩衝効果は異なるため、これらを定量的に評価するためのデータはまだ少ないのが現状である。

本研究では、現在利用できる十分なデータは無いものの、樹木の衝撃緩衝効果をより一般的に考慮して落石シミュレーションに組み込むために過去に行われた実験結果³⁾に基づき、図-1に示すように、樹木を片持ち梁として、衝突荷重 P が衝突点に静的に作用した時の根元断面における曲げモーメントが降伏値に達した場合に破壊するものと仮定し、破壊すると判定した場合にあるエネルギー量が吸収されると設定した。

3. 落石と樹木の枝葉の衝突現象のモデル化

樹木の枝葉については、図-2のような高さによって円の半径が変わる円筒空間が幹の周りに存在すると想定し、落石が枝葉と衝突した場合には、落石が持つ運動エネルギーを低減係数 γ に応じて減衰するが、その運動方向は変化しないものと仮定した。

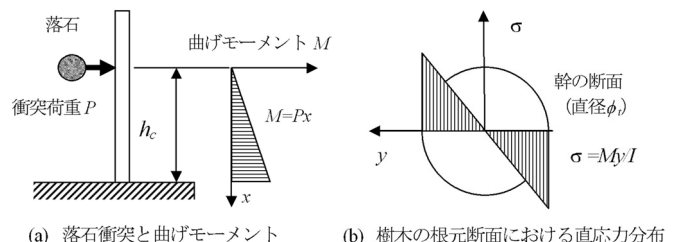


図-1 落石衝突時における樹木の破壊形態

4. 樹木の破壊を考慮した落石シミュレーション

(1)解析条件

解析に用いた斜面は、図-3に示すように、幅 400m、奥行き 200m、傾斜 15 度の一様斜面とした。また、解析条件は、表-1～表-3 に示す通りである。これらの条件を用いて、樹木の破壊を考慮しない場合と考慮した場合について比較した。なお、解析の試行回数はそれぞれ 300 回とした。

(2)解析結果および考察

各幹径における破壊を伴う衝突回数は、表-4 に示すように幹径が細くなるとともに増加している。落石速度については、解析条件で樹木の密度を同じとしているため幹径が大きいほど

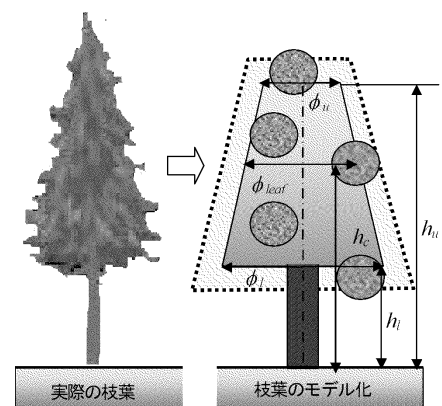


図-2 落石衝突時における樹木の破壊形態

キーワード 落石, 植生, 幹, 枝, シミュレーション, エネルギー吸収

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

総衝突回数が多くなり、落石速度の低減割合が大きい。また、幹径別の落石速度については、樹木がない場合で平均 29.51 (m/s) であるが、Case 1 や Case 2 においては、樹木を考慮すると大幅に減速し、さらに、樹木の破壊を考慮すると、落石速度は減速する結果となった。一方、Case 3 の場合では、破壊を伴う衝突回数が他のケースに比べて多くなっているものの、破壊を考慮しない場合に比べて、最終速度は若干大きくなっている。これは、本解析では衝突時に樹木に破壊が生じた場合、落石の運動方向は変化しないと仮定しているため、衝突回数の多い場合、結果として落石経路の広がりも小さくなり、斜面の最下端での速度が若干大きくなったものと考えられる。

5. 枝葉の影響を考慮した落石シミュレーション

(1)解析条件

斜面条件や落石条件については、樹木の破壊を考慮したシミュレーションと同じとするが、植生条件は、衝突が枝葉となることから、表-5 に示す条件とした。なお、枝葉によるエネルギーの低減係数 γ は、参考となる実験データがないため、本解析では、枝葉と衝突した場合、並進運動エネルギーと回転エネルギーは 20%低下すると仮定した。これらの条件を用いて枝葉がない場合とある場合について比較した。この際、枝葉がある場合は表-6 に示すように、枝葉の高さを変化させて解析を行った。なお、解析の試行回数はそれぞれ 300 回とした。

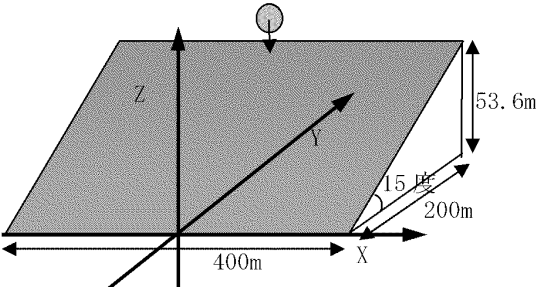


図-3 解析斜面

表-1 解析における初期投下条件

項 目	x (m)	y (m)	z (m)
投 下 位 置 (m)	0	199	56.6
初 期 速 度 (m/s)	0	0	0
初 期 角 速 度 (rad/s)	0	0	0

(2)解析結果および考察

各ケースについて、樹木への衝突回数と枝葉への衝突回数を比較すると、表-7 に示すように、樹木への衝突回数はほぼ同じ値となるが、枝葉への衝突回数は、枝葉の高さが高くなるとともに少なくなっている。最終速度は、樹木・枝葉なしの場合は 29.94(m/s)であるが、樹木のみの場合、7.27(m/s)と大きく減速し、さらに、枝葉を考慮すると減速している。また、枝葉の位置を変化させた場合については、枝葉の位置が高くなることによって枝葉への衝突回数が減少し、最終速度の減少量も少なくなっている。

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 植生条件

樹木の反発係数	0.90
樹木の摩擦係数	0.05
樹木の高さ (m)	4.00
樹木の密度(本/m ²)	0.10
樹木曲げ応力 (kN/m ²)	39200
樹木弾性係数 (kN/m ²)	3.82×10 ⁶

表-4 落石シミュレーション結果

項 目	樹木なし	Case 1		Case 2		Case 3	
		幹径 0.70m	幹径 0.60m	幹径 0.60m	幹径 0.50m	幹径 0.50m	幹径 0.50m
		破壊の考慮	破壊の考慮	破壊の考慮	破壊の考慮	破壊の考慮	破壊の考慮
総衝突回数	—	なし	あり	なし	あり	なし	あり
		33.3	33.5	29.7	30.5	25.1	26.2
破壊を伴わない衝突回数	—	33.3	31.6	29.7	26.0	25.1	17.0
破壊を伴う衝突回数	—	0.0	1.9	0.0	4.5	0.0	9.2
最終速度平均 (m/s)	29.51	6.27	5.47	6.52	5.96	7.21	8.21

6. 結 論

本研究では、斜面上の樹木の破壊や枝葉による落石の緩衝効果を表現できる一つのシミュレーション手法を示した。今後、実斜面に適用していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 梶谷浩，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，梶谷浩：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) 土木研究所，土木研究資料：立木の衝撃緩衝効果に関する試験報告書，1988。

表-5 落石条件

樹木の反発係数	0.90
樹木の摩擦係数	0.05
樹木の高さ (m)	4.00
樹木の密度(本/m ²)	0.10
樹木曲げ応力 (kN/m ²)	39200
樹木弾性係数 (kN/m ²)	3.82×10 ⁶

表-6 植生条件

項 目	Case 4	Case 5	Case 6
枝葉の高さ h ₁ (m)	0.50	1.00	1.50
植生密度 ρ (本/m ²)	0.10	0.10	0.10
枝葉径 φ ₁ (m)	2.00	2.00	2.00
枝葉径 φ ₂ (m)	0.20	0.20	0.20
低減係数 γ	0.20	0.20	0.20

表-7 落石シミュレーション結果

解析ケース	樹 木 衝突回数	枝 葉 衝突回数	最終速度 (m/s)	標 準 偏 差
樹木なし ・枝葉なし	0.00	0.00	29.94	0.35
樹木のみ	25.2	0.00	7.27	3.88
Case 4 (h ₁ =0.5m)	24.0	42.7	5.64	2.18
Case 5 (h ₁ =1.0m)	26.1	14.2	5.71	2.55
Case 6 (h ₁ =1.5m)	24.7	7.3	6.93	3.47