

# (41) 樹木との衝突による緩衝効果を考慮した落石の運動シミュレーション

Simulation of rockfall motion with consideration of buffering effect by the collision with trees

西川幸成\*, 榎谷 浩\*\*, 天沼康平\*\*\*

Yukinari Nishikawa, Hiroshi Masuya, Kouhei Amanuma

\*修(工), 金沢大学大学院, 自然科学研究科環境科学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

\*\*工博, 金沢大学教授, 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

\*\*\*修(工) 滋賀県, 甲賀土木事務所 (〒528-8511 滋賀県甲賀市水口町水口 6200 番地)

Key Words: rockfall, vegetation, trunk, branch, slope, simulation, energy absorption

キーワード: 落石, 植生, 幹, 枝, 斜面, シミュレーション, エネルギー吸収

## 1. はじめに

落石現象の多くは, 突発的に発生するものであるため, 現象の解明に直接役立つ落石事例の集積が難しいという性格を有している. このため, 落石の発生予測をはじめ落石の運動形態や考慮すべき落石の運動エネルギーなどに関しては不明な点が多く, 落石防護工の設計における跳躍量や落石荷重などの設計条件は, 落石対策便覧を参考に経験的に設定されることが多い<sup>1,2,3)</sup>.

落石運動シミュレーションに関しても既往の実験結果を参考に 2次元斜面を用いたシミュレーションが試みられる場合がほとんどである<sup>4)</sup>. しかしながら, このような手法では, どのような斜面に対しても十分に落石の運動を予測できるとはいえないのが現状であり, 実際の斜面上の落石落下状況を合理的に推定できる方法が必要となっている. このような現状より著者らはより実用的なシミュレーション手法の確立をめざし 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<sup>5,6)</sup>.

本論文では, さらに実斜面に近い状態を再現するために, これまであまり考慮されていなかった斜面の植生の存在と植生と落石との衝突によるエネルギー吸収を考慮した解析手法を示すとともに数値解析事例により本手法の妥当性や有用性を検証した結果について述べる.

## 2. 植生の影響を考慮した落石シミュレーション

### 2.1 樹木の幹と落石の衝突現象

#### (1) 樹木の幹のモデル化

実際の樹木は, 高さ方向で幹の太さが一定ではないが, これをモデル化するのは困難であるため, 本手法では, 高さ方向の幹の太さを一定とした.

図-1 に樹木のモデル図を示す. また, 図-2 に落石

と樹木の位置関係を示す.

樹木は, 全体座標系において  $X-Y$  平面に垂直に立っているものと仮定し, 高さ  $h_t$  (m), 幹の太さ(樹木の直径)  $\phi_t$  (m),  $X-Y$  平面へ投影した単位面積あたりの樹木の本数(樹木密度)を  $\rho_0$  (本/m<sup>2</sup>)とした. また, それぞれのパラメータは, 標準偏差  $\sigma_{ht}, \sigma_{\phi_t}, \sigma_{\rho_0}$ , 平均値は  $M_{ht}, M_{\phi_t}, M_{\rho_0}$  の正規乱数として, 不規則性を表現するものとした.

#### (2) 樹木と落石の衝突判定

ある斜面上に落石が存在するとき, 落石の跳躍量  $h$  は, 式(5)のように表される.

$$h = \frac{|aX_r + bY_r + Z_r - d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \quad (1)$$

ここに,  $X_r, Y_r, Z_r$ は落石の中心座標,  $a, b, d$ は, 落石鉛直下方の斜面方程式の係数である.

また, この斜面からの落石の鉛直距離  $h_r$  は, 式(2)で表すことができる.

$$h_r = \frac{h}{\cos \theta} \quad (2)$$

図-2 に示すように, 落石の跳躍高さより樹木の高さが高いとき落石は木に衝突する. そこで密度  $\rho_0$  のうち, 落石の高さ  $h_r$  以上の樹木の密度を求める必要がある. 高さ  $h_r$  以上の樹木の密度  $\rho$  は式(3)のように表わされる.

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 \int_{h_r}^{\infty} f(h)dh \\ &= \rho_0 \frac{1}{\sigma_{h_r} \sqrt{2\pi}} \int_{h_r}^{\infty} \text{EXP} \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{h - M_{ht}}{\sigma_{ht}} \right)^2 \right] dh \quad (3) \end{aligned}$$

ここで, 落石直径を  $\phi_r$ , 樹木の幹直径を  $\phi_t$  とし落石

が  $\Delta t$  秒間に  $v$  (m/s) の速度で  $\Delta l$  (m) 進むとすると  $\Delta t$  秒間に落石が衝突する樹木の本数は、図-3 に示す衝突可能領域を考慮することにより式(4)のように表される。

$$(\phi_r + \phi_t) \Delta l \rho \quad (4)$$

式(8)は、落石と樹木の幹の衝突確率となる。本手法では、この衝突確率に基づき乱数によって衝突判定する。

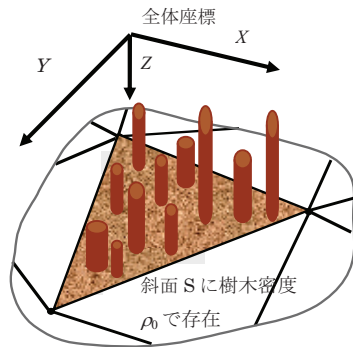


図-1 樹木のモデル化

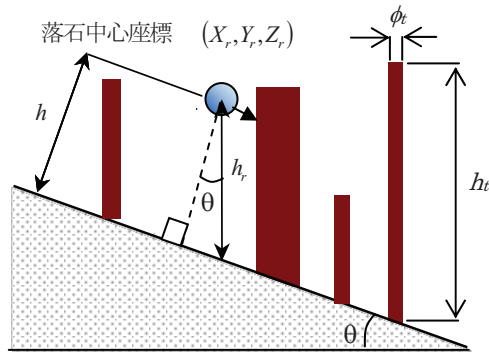


図-2 落石と樹木の位置関係

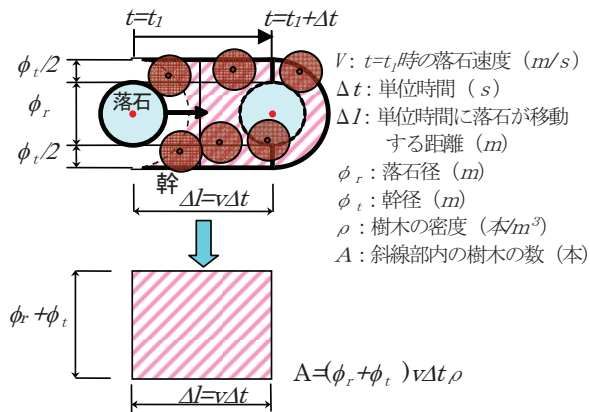


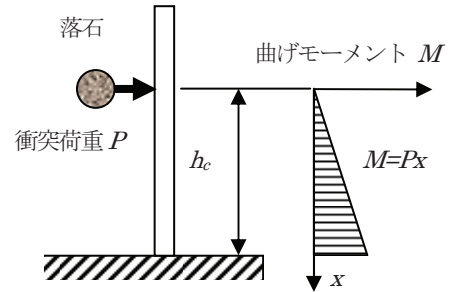
図-3 樹木への衝突可能領域

### (3) 樹木の弾性降伏エネルギー $E_v$ と吸収エネルギー $E_a$

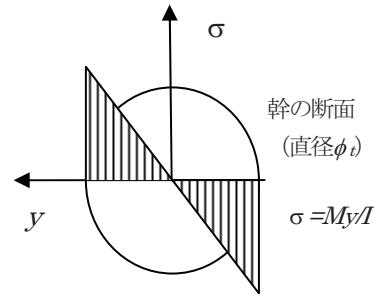
自然の樹木は、幹の太さや枝葉の状態、根張り具合など、樹木によって様々であり、また、樹種や植生密度、荷重の作用位置によっても緩衝効果は異なるため、これらを定量的に評価するためのデータは、まだまだ少ないのが現状である。本研究では、現在利用できる十分なデータは無いものの、樹木の衝撃緩衝効果をより一般的に考慮して落石シミュレーションに組み込むために、過去

に行われた実験結果  $\eta$  に基づき、破壊形態を仮定して樹木の衝撃吸収エネルギーを設定した。

樹木の破壊形態は、図-4 に示すように、樹木を片持ち梁とし、衝突点に静的に衝突荷重  $P$  が作用した時に、最大曲げモーメントが生じる根元で曲げ破壊するものと仮定した。



(a) 落石衝突と曲げモーメント



(b) 樹木の根元断面における直応力分布

図-4 落石衝突時における樹木の破壊形態

落石の運動エネルギーは、落石速度から算定し、樹木の幹の太さと衝突高さ  $h_c$  から樹木との衝突判定を行う。そして、衝突すると判定された場合は、さらに、樹木が破壊するかどうかを、落石の運動エネルギー  $E_r$  と衝突した樹木が持つ衝撃吸収エネルギー容量  $E_a$  との比較により判定することとした。なお、本研究では、衝突時に破壊が生じない場合を「単純衝突」、樹木に破壊が生じる場合を「破壊衝突」と呼ぶこととし、落石が樹木の幹に衝突した場合は、この二つの形態に分類した。

具体的には運動エネルギー  $E_r$  と樹木の衝撃吸収エネルギー  $E_a$  の大小関係より、落石の運動エネルギー  $E_r$  が衝撃吸収エネルギー  $E_a$  より小さい場合は、落石と幹は単純衝突するだけであり、樹木は破壊しないものと仮定し、落石の運動エネルギー  $E_r$  が衝撃吸収エネルギー  $E_a$  を上回る場合には、樹木の破壊によりエネルギー量  $E_a$  が吸収されるとした。

## 2.2 落石と樹木の枝葉の衝突現象

### (1) 枝葉のモデル化

樹木の枝葉については、図-5 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てモデル化を行った。

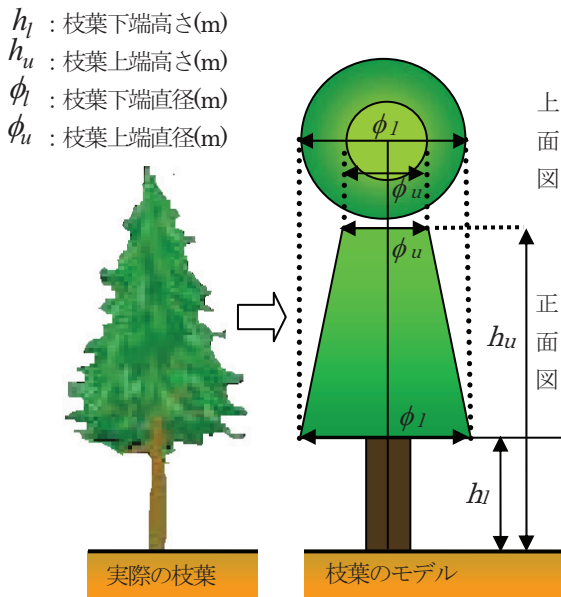


図-5 枝葉のモデル化

## (2) 枝葉と落石の衝突判定

落石が枝葉と衝突する場合は、図-6 に示すように、落石高さは、対象とする樹木の一番下の枝に接触する場合が最も低く、最も上の枝に接触する場合が最も高い場合となる。

すなわち、落石中心位置の高さ  $h_r$  が  $h_l - \phi_l/2 \leq h_r \leq h_u + \phi_l/2$  の範囲にある場合である。樹木の幹の中心から枝の先端までの距離の 2 倍を  $\phi_{leaf}$  とし、以後便宜上これを枝葉直径と呼ぶことにする。

枝の存在する範囲で任意の高さ  $h$  における枝葉直径  $\phi_{leaf}$  は式(5)で表される。

$$\phi_{leaf} = \left( \frac{\phi_l - \phi_u}{h_l - h_u} \right) (h - h_l) + \phi_l \quad (5)$$

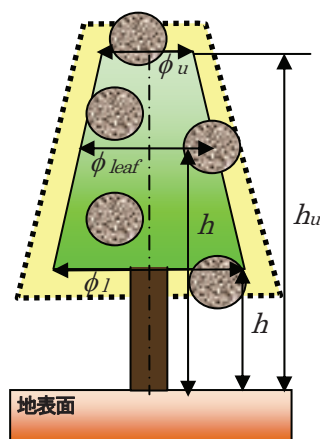


図-6 枝葉と落石の衝突判定

また、斜面奥行き方向の衝突判定は、図-3 に示した幹との判定とまったく同様な方法で接触判定を行う。すなわち、図-3 の幹の直径  $\phi_t$  を枝葉直径  $\phi_{leaf}$  に置き換えた式(6)に示す  $A_b$  を用いて衝突判定を行う。

$$A_b = (\phi_r + \phi_t)t \quad (6)$$

すなわち、落石と枝葉の衝突判定は、衝突高さの判定条件と斜面奥行き方向の衝突判定条件の両方を満たした場合にのみ、枝葉と衝突したと判定する。

また、枝葉との衝突が落石に及ぼす運動への影響については、枝葉と衝突した場合、落石が持つ運動エネルギーは、低減係数  $\gamma$  によって減衰するが、運動方向は変化しないものと仮定する。衝突後の運動エネルギーは、

$$E_a = (1 - \gamma_t)E_b \quad (7)$$

衝突後回転エネルギーは、

$$T_a = (1 - \gamma_r)T_b \quad (8)$$

で表されるものとする。ここに、 $E_a$  : 衝突後運動エネルギー、 $E_b$  : 衝突前運動エネルギー、 $T_a$  : 衝突後回転エネルギー、 $T_b$  : 衝突前回転エネルギー、 $\gamma_t, \gamma_r$  : 並進と回転に関する低減係数である。

## 3. 植生を考慮した落石シミュレーション

### 3.1 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-7 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、解析における初期投下条件を表-1、落石条件を表-2、植生条件を表-3 に示す。なお、本解析では、樹木の破壊による影響に着目するため、斜面の反発係数や摩擦係数、幹径に関する標準偏差は考慮しないものとした。

以上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解析を実施し、樹木への衝突回数や最終速度、落石運動の軌跡の違いについて比較した。

解析の試行回数は、乱数の有意水準  $\alpha$  を 0.05 として、それぞれ 300 回とした。また、解析における時間刻みは、解析結果が収束するように  $t=0.01(\text{sec})$  とした。なお、本解析では、落石が樹木に衝突し樹木が破壊した場合には、簡単のため、落石の運動方向には変化がないと仮定した。

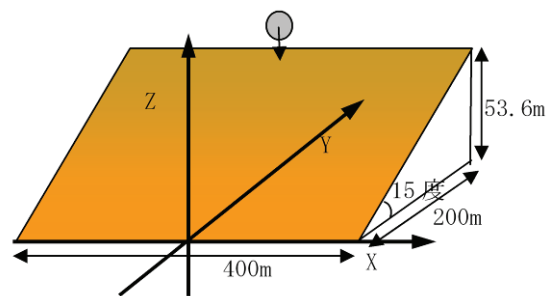


図-7 解析斜面

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

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 <sup>2</sup> )	0.10
樹木曲げ応力 (kN/m <sup>2</sup> )	39200
樹木弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	$3.82 \times 10^6$

## (2) 解析結果および考察

解析結果を表-4, 図-8に示す。また図-9, 図-10に幹径 0.50m の破壊なしと破壊ありの場合の平面軌跡図, 図-11, 図-12に断面方向の軌跡図を示す。

表-4に示すように、各幹径における破壊を伴う衝突回数は、Case 1の場合は1.9回であるが、幹径が細くなるとともに増加し、Case 3の場合では、9.2回となっている。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、幹径が大きいほど総衝突回数が多くなり、落石速度の低減割合が大きい。

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の破壊を考慮しない場合の最終速度は平均 6.27 (m/s) であり、破壊を考慮した場合の最終速度は平均 5.47 (m/s) となった。また、Case 2の場合でも破壊を考慮しない場合の最終速度は平均 6.52 (m/s) であり、破壊を考慮した場合の最終速度は平均 5.96 (m/s) となった。樹木の総衝突回数(単純衝突回数+破壊回数)は、いずれのケースも同じ値となるため衝突1回あたりのエネルギー減少量は、単純衝突よりも破壊衝突の方が大きいことを示している。

一方、Case 3の場合では、破壊を考慮しない場合の最終速度は平均 7.21 (m/s) に対し、破壊を考慮した場合の最終速度は平均 8.21 (m/s) となっている。

図-8に示すように、Case1, Case2については、破壊を考慮した場合の方が落石速度は減少している。一方、Case3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が、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。

これらの結果は、これまで樹木の緩衝効果を反発係数や摩擦係数で表現していた場合に比べ、樹木の幹径による破壊時の吸収エネルギーの違いを考慮できており、樹木の破壊が落石の運動に与える影響をうまく表現できているものと考えられる。

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 0.50m	
		破壊の考慮なし	破壊の考慮あり	破壊の考慮なし	破壊の考慮あり	破壊の考慮なし	破壊の考慮あり
総衝突回数	—	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

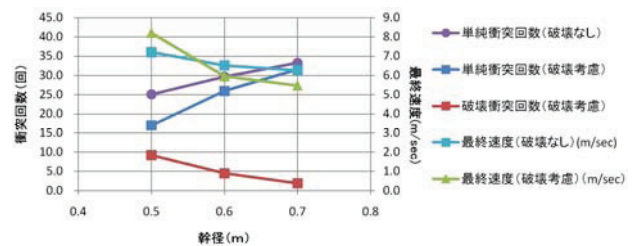


図-8 幹径別の衝突回数と最終速度の関係

一方、落石運動の軌跡については、図-9, 図-10に示すように、時間刻みにおける落石位置を点で示した平面軌跡は、破壊を考慮しない場合に比べ、落石の広がりが狭くなっている。

本手法では、破壊を考慮しない場合や幹への単純衝突では進行方向を変化させるが、破壊を伴う場合では、衝突後の進行方向は変化させていないことからその影響が考えられるが、時間刻みにおける落石位置を点で示した断面方向の軌跡は、図-11, 図-12に示すように、落石開始間もない斜面上方では、両者に違いはあまり見られないが、その後、樹木の破壊による緩衝効果によって破壊を考慮しない場合に比べて落石の跳躍量は小さくなっており、樹木の破壊に伴う落石速度の減少による影響も大きいと考えられる。

以上のことから、樹木の破壊による落石速度や跳躍量の低減といった緩衝効果を本手法により表現できることが確認できた。

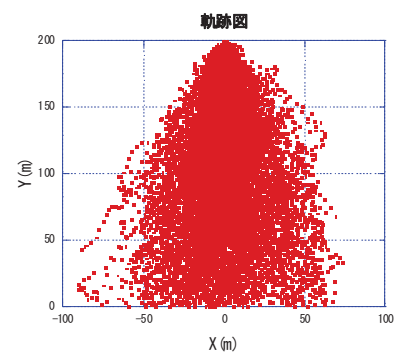


図-9 平面軌跡図 (幹径 0.50m, 破壊なし)

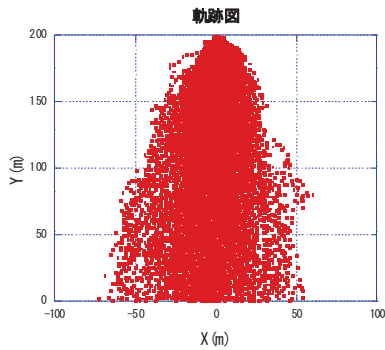


図-10 平面軌跡図 (幹径0.50m, 破壊あり)

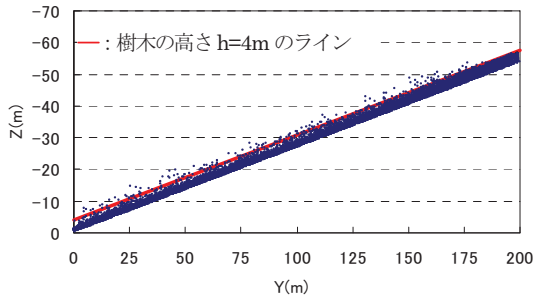


図-11 断面方向軌跡図 (幹径0.50m, 破壊なし)

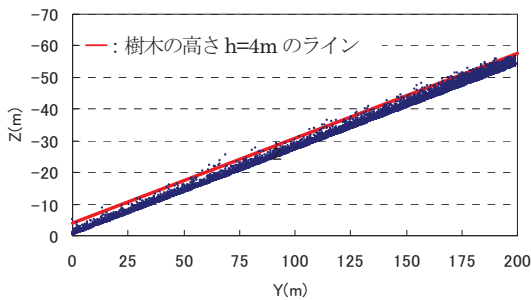


図-12 断面方向軌跡図 (幹径0.50m, 破壊あり)

### 3.2 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

解析は、樹木の破壊を考慮したシミュレーションと同じ斜面条件とし、解析の初期投下条件や落石条件も同じ条件とした。本解析では、枝葉の影響に着目するため、斜面の反発係数や摩擦係数に関する標準偏差は考慮しないものとした。また、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 $\gamma_t$ と $\gamma_r$ は、参考となる実験データがないため、本解析では、両者とも0.2すなわち、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、衝突後の運動方向は変化しないものとした。

さらに、解析は、枝葉がない場合とある場合について実施し、枝葉への衝突回数や最終速度、落石運動の軌跡の違いについて比較した。この際、枝葉がある場合については表-6に示すように、枝葉の高さを地表面から0.5m, 1.0m, 1.5mの3ケースについて解析を行った。

なお、解析の試行回数は、乱数の有意水準 $\alpha$ を0.05

として、それぞれ300回とした。また、解析における時間刻みは、解析結果が収束するように $t=0.01(\text{sec})$ とした。

#### (2) 解析結果および考察

表-7は各ケースにおける樹木への衝突回数と枝葉への衝突回数を示している。そして、表-8には、各ケースの最終速度の平均値と標準偏差を示す。また、図-13と図-14に樹木のみの場合とCase 4の場合の平面軌跡図、図-15と図-16にCase 4の場合の断面方向の軌跡図を示す。

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 $h_l$ が高くなるとともに、少なくなっている。

最終速度については、表-8に示すように、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、Case 4の場合で5.64(m/s)となっている。

次に、 $h_l$ の高さを変化させた場合についてはCase 4の場合で5.64(m/s)であったが、Case 5では5.71(m/s)、Case 6では6.93(m/s)と、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。

一方、落石運動の軌跡については、図-13と図-14に示すように、時間刻みにおける落石位置を点で示した平面軌跡は樹木のみの場合に比べ、Case 4の方が落石の広がりが狭くなっている。本手法では、枝葉への衝突後の進路は変化させていないことからその影響も考えられるが、時間刻みにおける落石位置を点で示した断面方向の軌跡は、図-15と図-16に示すように、落石開始間もない斜面上方では、両者に違いはあまり見られないが、その後、Case 4の場合では、樹木のみの場合に比べて落石の跳躍量は小さくなっていることから、枝葉の緩衝効果に伴う落石速度の減少による影響も大きいものと考えられる。

以上の結果より、枝葉が落石速度に与える影響を本手法で表現することが確認できた。

表-5 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 <sup>2</sup> )	0.10
樹木の幹径 (m)	0.50

表-6 解析ケース

項目	Case 4	Case 5	Case 6
枝葉の高さ $h_l$ (m)	0.50	1.00	1.50
植生密度 $\rho$ (本/m <sup>2</sup> )	0.10	0.10	0.10
枝葉径 $\phi_l$ (m)	2.00	2.00	2.00
枝葉径 $\phi_u$ (m)	0.20	0.20	0.20
低減係数 $\gamma$	0.20	0.20	0.20

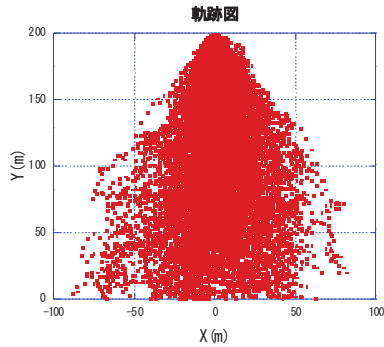


図-13 平面軌跡図 (樹木のみ)

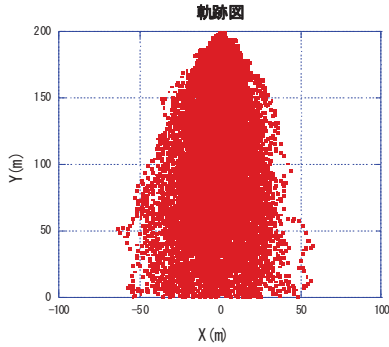


図-14 平面軌跡図 (case 4 枝葉の高さ  $h_1=0.5\text{m}$ )

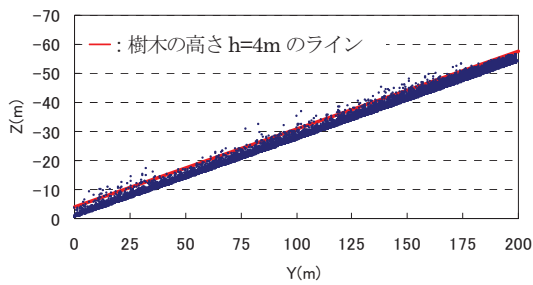


図-15 断面方向軌跡図 (樹木のみの場合)

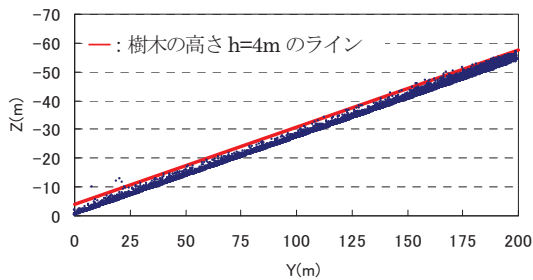


図-16 断面方向軌跡図 (case 4 枝葉の高さ  $h_1=0.5\text{m}$ )

表-7 衝突回数

解析ケース	樹木衝突回数	枝葉衝突回数
樹木なし・枝葉なし	0.00	0.00
樹木のみ	25.2	0.00
Case 4 ( $h_1=0.5\text{m}$ )	24.0	42.7
Case 5 ( $h_1=1.0\text{m}$ )	26.1	14.2
Case 6 ( $h_1=1.5\text{m}$ )	24.7	7.3

表-8 衝突後の平均最終速度と標準偏差

解析ケース	最終速度 (m/s)	標準偏差
樹木なし・枝葉なし	29.94	0.35
樹木のみ	7.27	3.88
Case 4 ( $h_1=0.5\text{m}$ )	5.64	2.18
Case 5 ( $h_1=1.0\text{m}$ )	5.71	2.55
Case 6 ( $h_1=1.5\text{m}$ )	6.93	3.47

## 4. 結論

本研究では、これまであまり考慮されていなかった斜面の植生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て、検討を行った。

今回の研究で得られた結果は、以下のとおりである。

- (1) 樹木の吸収エネルギーを、既往の実験データで得られた樹木の弾性降伏エネルギーから推定し、それを本手法に組み込むことにより、樹木の緩衝効果を表現できた。
- (2) 樹木の枝葉をモデル化し、落石の衝突高さや斜面奥行き方向の衝突判定を行う具体的な手法を組み込むことにより、枝葉の緩衝効果についても本手法により表現することができた。
- (3) 本手法では、斜面上の植生に対して新たな捉え方をし、樹木の破壊による落石の緩衝効果や枝葉の影響を落石シミュレーションに取り入れることができた。
- (4) 樹木の落石緩衝効果については、まだ不明な点が多く、また、枝葉の影響についても実際への適用に当たっては、枝葉の緩衝効果に関するデータを蓄積していく必要である。特に低減係数 $\gamma$ に関しては、実際の挙動を再現できる現実的な値を設定することが重要である。

本研究で示したシミュレーション手法は、落石対策を行う上での自然の植生の評価や有効利用に向けた取り組みにおける一つの有効な方法を示すことができたと考えている。また、実際の斜面には、表面部に雑草や低木などが繁茂している場合が多く、改良を加えることでこれら表現することができるものと考えられる。

今後はさらに精度の良い落石シミュレーション手法の確立を目指すためにも実際の落石事例に適用し、改良していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000。
- 2) 松尾修：落石対策 1. 講座を始めるにあたって，土と基礎，Vol.50, No.1, pp.39-40, 2002。
- 3) 松尾修，池田憲二，村石尚：落石対策 2. 落石対策の概要，土と基礎，Vol.50, No.1, pp.41-44, 2002。
- 4) 日本道路協会：落石対策便覧に関する資料-落石シミュレーション手法の調査研究資料，2002。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 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。