

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

Simulation of rockfall motion with consideration of trunk and branch of vegetation on the slope

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)

The estimation of risk due to rockfall is often done empirically. Rockfall simulation helps to describe the motion of rockfall on a slope and to consider the effect of vegetation. This paper details a typical simulation method and analysis of the manner of rockfalls. The probabilistic method to treat the collisions with trunk and branch of vegetation on slope is introduced. Fundamental idea is concretely shown to consider the loss of the kinetic energy by the bending failure of trunk and also the energy dissipation by the contact with branch of vegetation. The validity of proposed simulation method becomes clear by investigations through some numerical examples. Finally, further development of the simulation method to evaluate and utilize the natural vegetation aiming disaster prevention plans and rockfall protection measures in the mountainous area is recommended.

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

落石現象は、斜面災害の中でも発生頻度の比較的多い災害現象の一つであり、発生箇所によっては、交通を遮断し、時には人命を脅かすなど、住民生活に大きな影響を与えることもある。近年では、落石防止対策の必要性が高まり、落石に関する研究・開発が進められてきた。

しかしながら、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する。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^{1,2,3)}。

落石運動シミュレーションを行う場合で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。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^{4,5)}。

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について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 落石の運動予測

(1) 経験的手法

落石は、ほとんどの場合偶発的に発生する。落石に関わる問題は、表-1に示すように大きく4つに分類される。この中で、落石発生の具体的な予知に関しては、有用な資料が十分得られていないため、現状では困難な場合がほとんどである。ただ、落石がどのような箇所にとどのような頻度で発生するかについては、データの蓄積がある現場では、かなり明らかである。落石に関する対策を検討する場合、落石の質量、衝突速度そして跳躍量が必要となる。

斜面上の落石の速度は、残存係数 α と自由落下速度を用いて、式(1)のように表す場合が多い¹⁾。

$$V = \alpha \cdot \sqrt{2gH} \quad (1)$$

ここに、 V :落石速度、 g :重力加速度、 H :落下高さである。残存係数は、斜面の土質、岩質、凹凸、勾配、ならびに落石の形状によって異なる。斜面を直線斜面とし落石が摩擦のある斜面 θ に沿って滑り落ちると仮定する

と、斜面の等価摩擦係数 μ と斜面勾配 θ を用いて残存係数 α は式(2)で表される。

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\mu}{\tan \theta}} \quad (2)$$

表-2 は、既往の実験から得られた値を整理した等価摩擦係数 μ である。これより斜面を落下する落石の速度を経験的に求めることができる。ただし、樹木などの植生がある場合については、明らかにされていない。

表-1 落石問題の分類

番号	問題の分類	内容説明
1	落石発生	落石の発生の時期、場所および規模を予知・推定する。
2	斜面上の落石運動	発生した落石の斜面上の動的挙動を推定し、危険度を決定する。
3	落石衝突による発生衝撃力	衝突落石による運動エネルギー、発生衝撃力を算定する。
4	落石防護構造物の挙動	落石衝突による防護構造物の動的挙動を算定する。

表-2 等価摩擦係数¹⁾

区分	落石特性	斜面特性	摩擦係数 μ	設計値
A	硬岩、丸状	凹凸小、立木無し	0~0.1	0.05
B	軟岩、丸状~角状	凹凸中~大、立木無し	0.11~0.2	0.15
C	土砂・崖錐、丸状~角状	凹凸小~中、立木無し	0.21~0.3	0.25
D	崖錐・巨礫まじり崖錐、角状	凹凸中~大、立木無し~有り	0.31~	0.35

(2)落石運動シミュレーション

落石シミュレーションは、経験的な方法では落石の跳躍量、速度、運動エネルギーの設定が困難な場合に適用して設計条件の設定に利用する場合が増えてきている。このシミュレーションによる方法は、落石のモデル化の違いにより質点系シミュレーション手法と非質点系シミュレーション手法の2つの手法に大別される⁶⁾。

非質点系シミュレーション手法では、形状を持ったブロックとして落石を取り扱い、斜面を一つあるいは複数のブロックの集合体として取り扱う方法である。この手法としては、個別要素法 DEM (Distinct Element Method) と不連続変形法 DDA (Discontinuous Deformation Analysis) があり、いずれも不連続面を有する岩盤などの挙動解析に用いられている比較的厳密な数値解析手法である^{7,8)}。しかし、落石シミュレーションでは、実際の斜面の形状や落石の形状をどこまで詳細に表せば良いか、また多くのパラメータを必要とするなどの課題を有している。質点系シミュレーション手法は、基本的には落石を大きさのない質量を持った質点、または、形状の簡単な円柱や球形の剛体と仮定し、斜面を線状あるいは面状の剛壁と仮定した斜面などからの作用力を考慮して落石

の飛行、衝突、すべり・回転等の運動を初等力学により定式化し、数値的に解く手法であり、当初より斜面上の落石運動の再現のため開発されてきた手法である。

図-1 は、この手法における落石運動の取り扱いの概念図を示したものである。最も左に示したものは、質点の力学の基本であり落石の回転は考慮しない。この理論を拡張すると、回転を考慮し作用力の位置や落石形状の影響も取り入れた解析も可能になる。質点系手法では、落石運動の形態を判別して運動を定式化しており、このような様々な落石のモデル化のもとで各種の運動形態の遷移を必要に応じ考慮するシミュレーション手法が現在数多く存在する。質点系シミュレーションの重要な影響因子としては、考慮する運動形態、衝突運動のモデル化、回転運動の考慮、落石運動の不規則性のモデル化等が上げられる。我々が開発しているシミュレーション手法もこの手法の一つである。

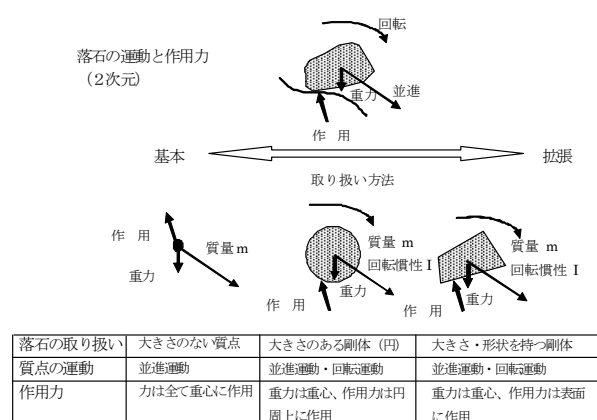


図-1 落石の取り扱い概念

2.2 落石と斜面のモデル化

(1)落石のモデル化

様々な形状の落石と斜面を忠実に反映できる運動方程式を解くことは、一般に困難である。このため、本手法では、落石を球と仮定してその方程式を用いることにした。落石が斜面と衝突した場合、落石は、図-2 に示すように斜面より法線方向力と接線方向力を受けると仮定し、反発係数や摩擦係数を確率的な取り扱いにすることで落石形状による実際の不規則性を表現することとした。

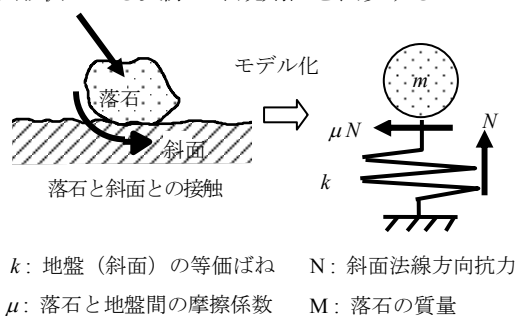


図-2 落石と斜面の接触モデル

(2)斜面のモデル化

実際の斜面には大小様々な凹凸が存在し、落石の形状を含め運動に影響を与えるが、その影響について著者ら

は過去に研究を行い考慮方法についてある程度の知見を得ている⁹⁾。本研究では、植生の影響に焦点を当てるため、斜面の小さな凹凸による不規則性はあえて無視し大きな変化点のみに着目して、図-3 に示すように斜面を三角形の平面に分割してモデル化した。すなわち、本手法において実際の斜面は n_s 個の三角形平面と n_p 個の節点で表されるものとした。このとき、斜面のある任意の三角形平面 S は式(3)で表される。

$$aX + bY + Z = d \quad (3)$$

ここに、 a, b, d は定数であり、三角形平面 S の3つの節点を、 $i(X_i \ Y_i \ Z_i)$, $j(X_j \ Y_j \ Z_j)$, $k(X_k \ Y_k \ Z_k)$ とすると式(4a)～式(4c)で表される。

$$a = \frac{(Z_i - Z_k)(Y_i - Y_j) - (Z_i - Z_j)(Y_i - Y_k)}{(X_i - X_j)(Y_j - Y_k) - (X_i - X_k)(Y_i - Y_j)} \quad (4a)$$

$$b = \frac{(Z_i - Z_k)(X_i - X_j) - (Z_i - Z_j)(X_i - X_k)}{(Y_i - Y_j)(X_i - X_k) - (Y_i - Y_k)(X_i - X_j)} \quad (4b)$$

$$d = aX_i + bY_i + Z_i \quad (4c)$$

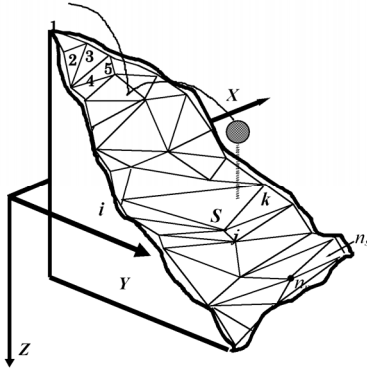


図-3 斜面のモデル化

2.3 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-4 に樹木のモデル図を示す。また、図-5 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) ϕ_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 ρ_0 (本/m²)とした。また、それぞれのパラメータは、標準偏差 σ_{ht} , σ_{ϕ_t} , σ_{ρ_0} 、平均値は M_{ht} , M_{ϕ_t} , M_{ρ_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。

$$h = \frac{|aX_r + bY_r + Z_r - d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \quad (5)$$

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(6)で表すことができる。

$$h_r = \frac{h}{\cos \theta} \quad (6)$$

図-5 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 ρ_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 ρ は式(7)のように表わされる。

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 \int_{h_r}^{\infty} f(h) dh \\ &= \rho_0 \frac{1}{\sigma_{ht} \sqrt{2\pi}} \int_{h_r}^{\infty} \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h - M_{ht}}{\sigma_{ht}} \right)^2 \right] dh \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、落石の直径を ϕ_r 、樹木の幹の直径を ϕ_t とし落石が Δt 秒間に v (m/s)の速度で Δl (m)進むとすると Δt 秒間に落石が衝突する樹木の本数は、図-6 に示す衝突可能領域を考慮することにより式(8)のように表される。

$$(\phi_r + \phi_t) \Delta l \rho \quad (8)$$

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。

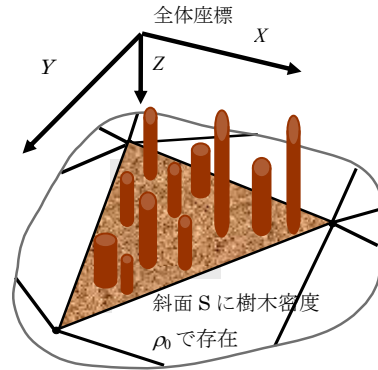


図-4 樹木のモデル化

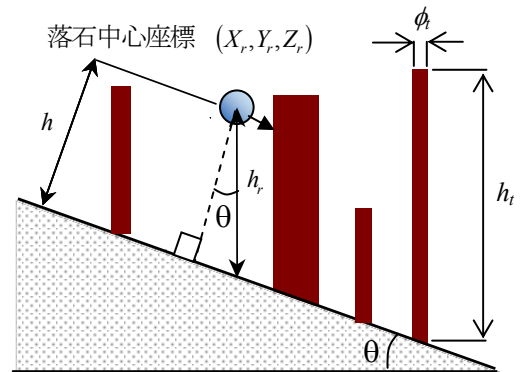


図-5 落石と樹木の位置関係

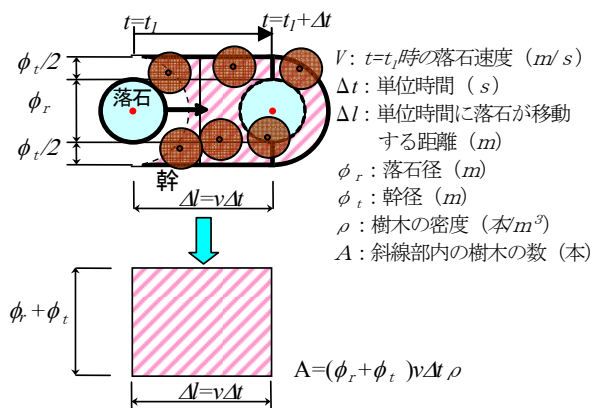


図-6 樹木への衝突可能領域

(3) 樹木の弾性降伏エネルギー E_y と吸収エネルギー E_d

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り、これまでに幾つかの研究報告が行われている^{9,10,11,12,13,14}。

Hir⁹は、落石が樹木に衝突した際の挙動を落石が樹木に衝突した瞬間と衝突により樹木が破損した時の2段階で考え、さらに、樹木の破損は、木の根ごと破壊する場合、木の根元で破壊する場合、木の先端で破壊する場合の3ケースについて考慮したモデルを構築した。そして、斜面上に樹木が存在した状態の3次元モデルによる運動シミュレーションを行い、実斜面での実験結果と対比して、検証を行っている。

Oskar¹⁰は、1本の樹木について、落石が樹木に衝突した際の幹の破損や変形、根の起き上がりなどの挙動を非線形動的解析と、実際の樹木による実験結果を対比して、その挙動を検証している。

櫻井ら^{11,12,13}は、同一斜面において、樹木がある場合と一定の高さで伐採した場合について落石実験を行い、落石速度の減少状況や樹木による落石の捕捉効果について報告している。

右城ら¹⁴は、樹木の伐採前と伐採後の斜面において落石実験を行い、落下速度や平面的・縦断的落下経路を計測し、落石の運動形態について考察している。

また、土石流や落石に対する樹木の衝撃緩衝効果を明らかにするために実験的研究が行われている^{15,16,17}。実際に生育している樹木に重錘を横方向から衝突させて、その衝突エネルギー吸収能を求めるとともに、樹木の静的引き倒し試験を行い、静的エネルギー吸収能や破壊形態について報告されている。また、落石防護のために木材の衝撃緩衝能力を調べる実験的研究も行われている¹⁸。

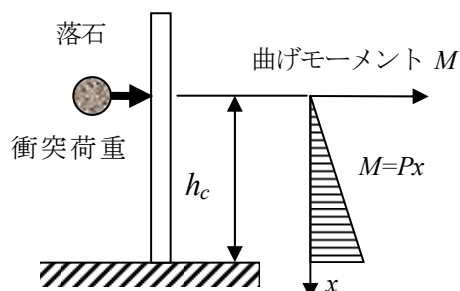
これらの報告は、樹木に衝撃荷重が作用した際の樹木の挙動をある限定された条件下で行った実験やその実験結果に対して数値解析で再現しようとしたものである。

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、

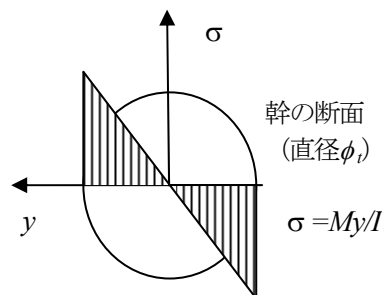
荷重の作用位置によっても緩衝効果は異なるため、これらを定量的に評価するためのデータは、まだまだ少ないのが現状である。このため、斜面樹木をより合理的な考えに基づいて考慮する手法が必要と考えられる。

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-7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-7 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_d 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_d を比較して、その大小関係で以下のように判定することとした。

落石の運動エネルギー E_r が衝撃吸収エネルギー E_d より小さい場合、すなわち、

$$E_r < E_d \quad (9)$$

の場合、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た。また、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、すなわち、

$$E_r \geq E_a \quad (10)$$

の場合には、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。なお、この場合に吸収されるエネルギー量は、式(11)により表されると仮定した。

$$E_a = \beta E_y \quad (11)$$

ここに、 E_y は、根元断面の降伏時の樹木のひずみエネルギーである。図-8 は、落石衝突時の荷重-変位関係を示したものであるが、 E_y は斜線で表現した理想的な静的関係より得られる三角形の面積で表される。

M_y を幹の根元が降伏点に達する曲げモーメント、 E を樹木の弾性係数、 I を断面2次モーメント、 h_c を地面からの衝突高さ、 σ_y を降伏応力、 y を断面の図心から距離とすると、樹木降伏時のひずみエネルギー量 E_y は式(12)のように表すことができる。

$$E_y = \frac{1}{2} \int_0^{h_c} \frac{M_x^2}{EI} dx = \frac{M_y^2 h_c}{6EI} = \frac{\sigma_y^2 I h_c}{6E \left(\frac{\phi_l}{2}\right)^2} \quad (12)$$

ここに、式(11)に示す β については、 E_y と既往の実験¹⁷⁾ によって求められた吸収エネルギー E_a を比較し、その平均値より式(13)のように設定した。

なお、樹木の弾性係数として $E = 3.82 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ 、降伏応力として $\sigma_y = 39,200 \text{ kN/m}^2$ を用いた。

$$\beta = E_y / E_a = 8.5 \quad (13)$$

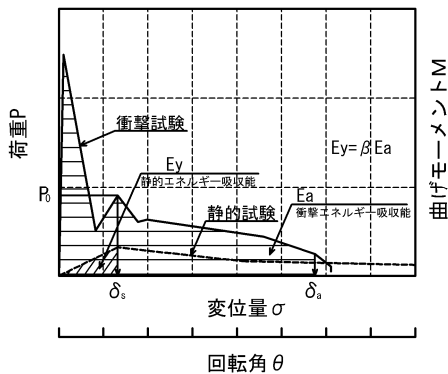


図-8 樹木の衝突応答 (荷重-変位曲線)¹⁷⁾

2.4 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-9 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。

(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-10 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 ϕ_{leaf} とする。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 ϕ_{leaf} は式(14)で表される。

$$\phi_{leaf} = \left(\frac{\phi_l - \phi_u}{h_l - h_u} \right) (h - h_l) + \phi_l \quad (14)$$

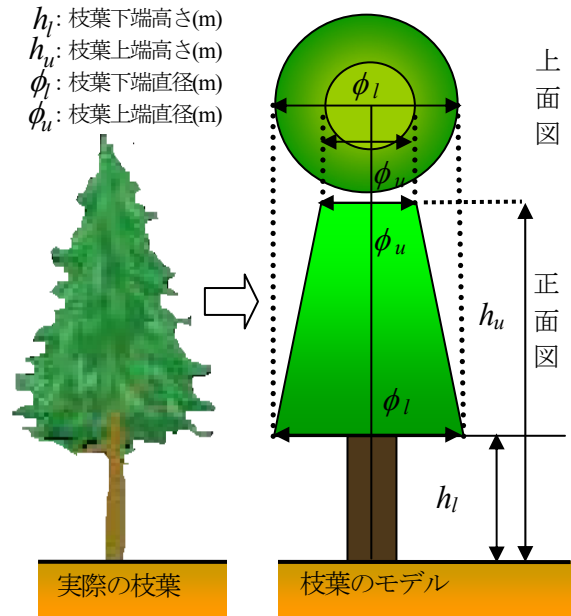


図-9 枝葉のモデル化

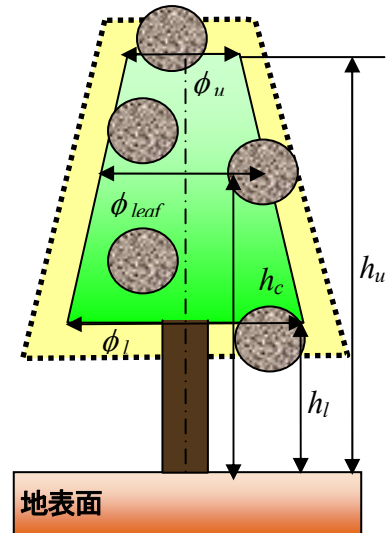


図-10 枝葉と落石の衝突判定

また、斜面奥行き方向の衝突判定は、図-6 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-6 の幹の直径 ϕ_l を枝葉直径 ϕ_{leaf} に置き換えた式(15)に示す A_b を用いて衝突判定を行う。

$$A_b = (\phi_r + \phi_l) t \quad (15)$$

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 γ 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、

$$E_a = (1 - \gamma_t) E_b \quad (17)$$

衝突後回転エネルギーは、

$$T_a = (1 - \gamma_r) T_b \quad (18)$$

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、 γ_t, γ_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-11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-3、落石条件を表-4、植生条件を表-5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。また、樹木の幹径が0.70m、0.60m、0.50mの場合における吸収エネルギーを図-12に示す。どの幹径においても衝突点高さが大きくなると吸収エネルギーが大きくなり、幹径が大きいほど吸収エネルギーが大きくなる。

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 α 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。

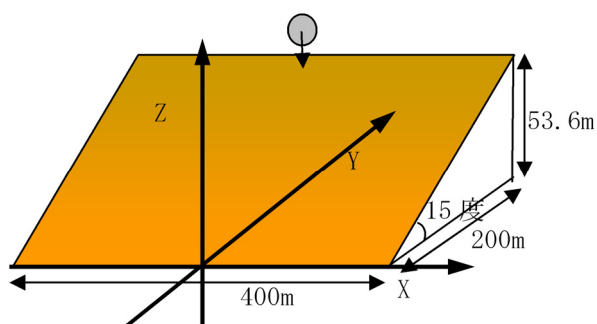


図-11 解析斜面

表-3 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-4 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-5 植生条件

樹木の反発係数	0.90
樹木の摩擦係数	0.05
樹木の長さ (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

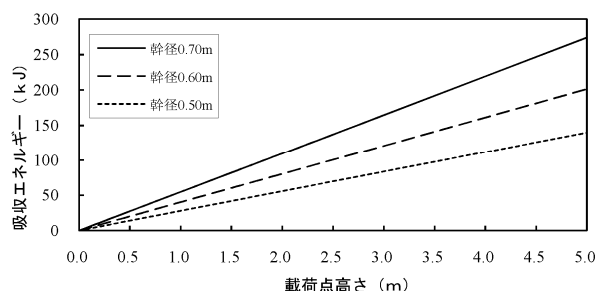


図-12 樹木の吸収エネルギー

(2)解析結果および考察

解析結果を表-6に示す。また、それぞれの条件における最終速度のヒストグラムを図-13～図-18に示す。また、図-19、図-20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-21、図-22に断面方向の軌跡図を示す。

表-6 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		破壊の考慮		破壊の考慮	
		なし	あり	なし	あり	なし	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

表-6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。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 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-17 と図-18 を比較すると、破壊を考慮した場合の方が、20~25m/s の速度帯と 0~5m/s の速度帯が減少しており、その分、5~15m/s の速度帯が多くなっている。Case3 の破壊を伴う衝突回数は、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。

一方、落石運動の軌跡については、図-19、図-20 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-21、図-22 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。

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。

なお、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-7 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_t と γ_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。

また、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-8 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 α 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。

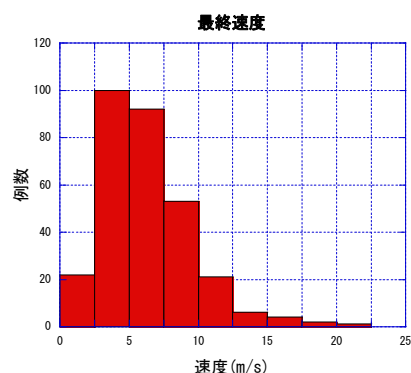


図-13 最終速度（幹径 0.70m, 破壊なし）

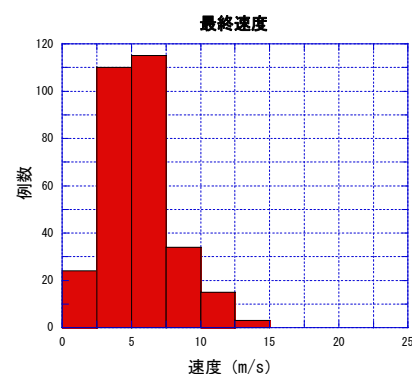


図-14 最終速度（幹径 0.70m, 破壊あり）

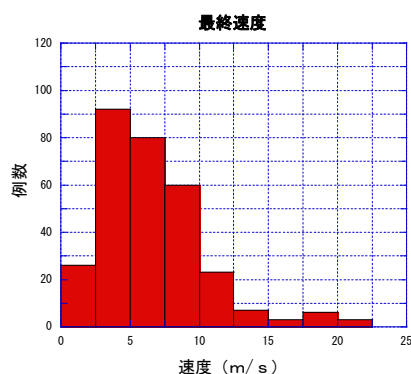


図-15 最終速度（幹径 0.60m, 破壊なし）

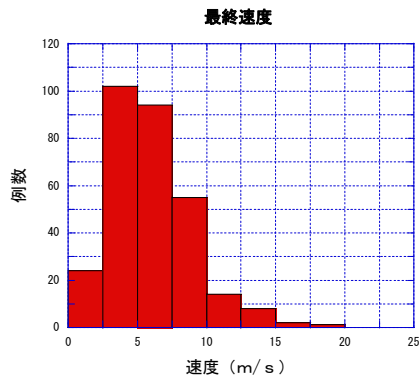


図-16 最終速度 (幹径 0.60m, 破壊あり)

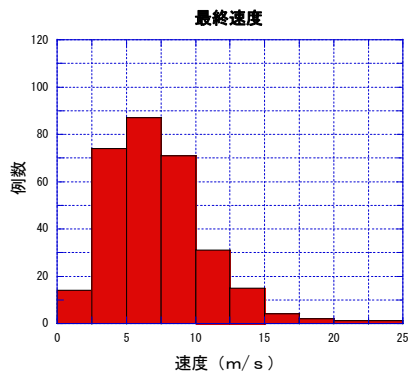


図-17 最終速度 (幹径 0.50m, 破壊なし)

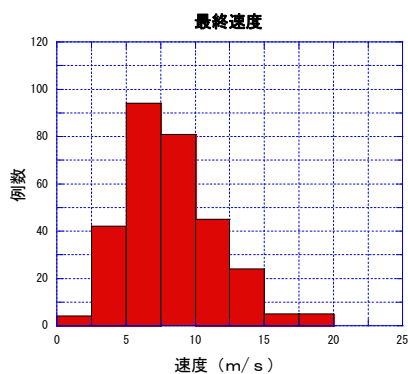


図-18 最終速度 (幹径 0.50m, 破壊あり)

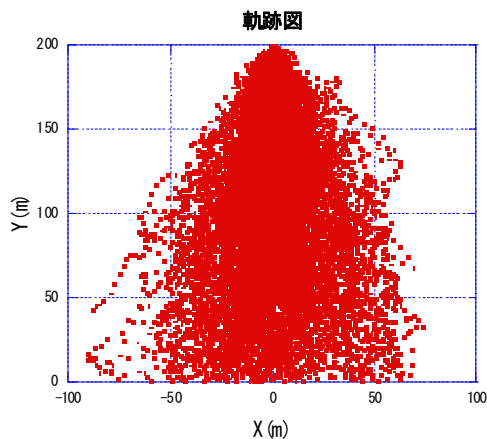


図-19 平面軌跡図 (幹径 0.50m, 破壊なし)

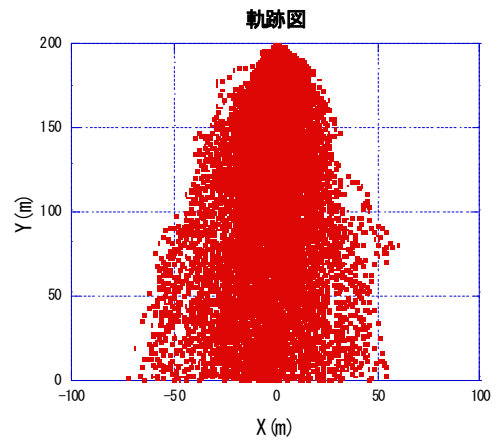


図-20 平面軌跡図 (幹径 0.50m, 破壊あり)

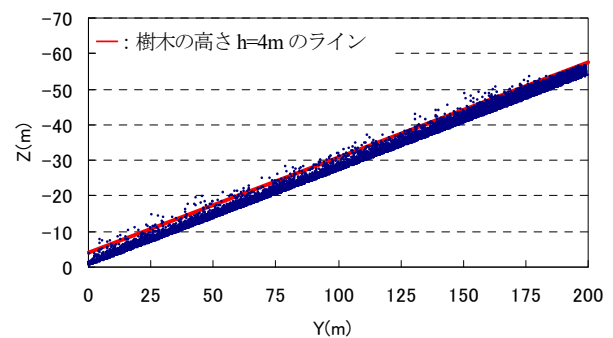


図-21 断面方向軌跡図 (幹径 0.50m, 破壊なし)

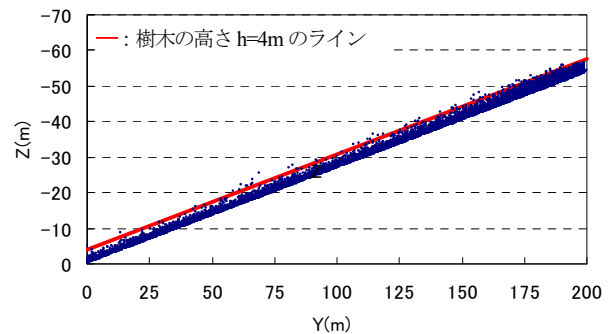


図-22 断面方向軌跡図 (幹径 0.50m, 破壊あり)

(2)解析結果および考察

図-23 は、各ケースにおける最終速度のヒストグラムである。また、表-9 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-10 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-24 と図-25 に樹木の場合と Case 4 の場合の平面軌跡図、図-26 と図-27 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-9 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-10 に示すように、樹木・枝

葉なしの場合は 29.94(m/s)であるが、樹木のみの場合は 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。また、速度分布は、図-23 に示すように、樹木のみ場合は、速度分布の範囲が 1～21m/s であるが、Case 4 の場合では、その範囲が 1～13m/sec と狭くなっている。そして、枝葉の位置が高くなる Case 5 や Case 6 は、樹木なしの場合に類似した速度分布となっている。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-24 と図-25 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-26 と図-27 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-7 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
樹木の幹径 (m)	0.50

表-8 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 ρ (本/m ²)	0.10	0.10	0.10
枝葉径 ϕ_l (m)	2.00	2.00	2.00
枝葉径 ϕ_u (m)	0.20	0.20	0.20
低減係数 γ	0.20	0.20	0.20

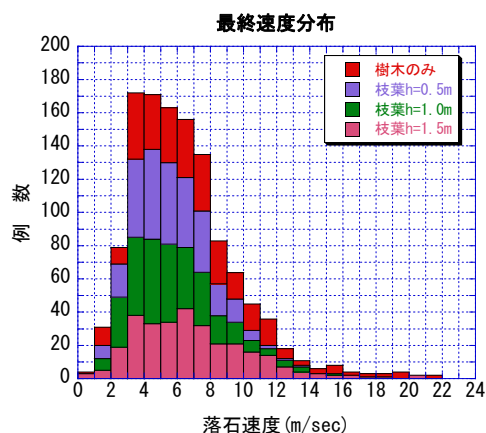


図-23 落石の最終速度

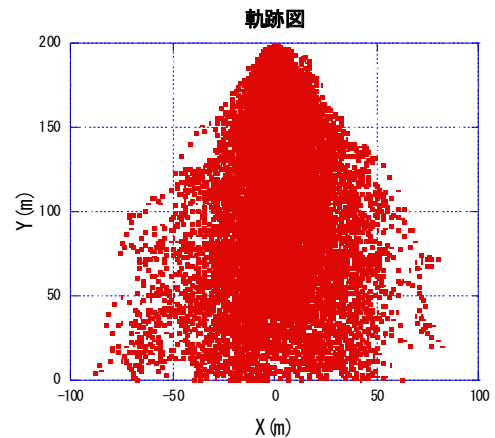


図-24 平面軌跡図 (樹木のみ)

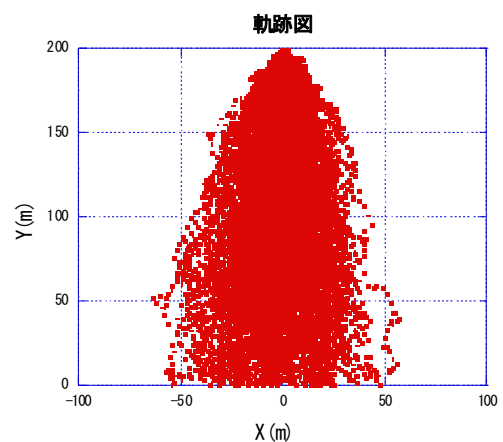


図-25 平面軌跡図 (case 4 枝葉の高さ $h_l=0.5m$)

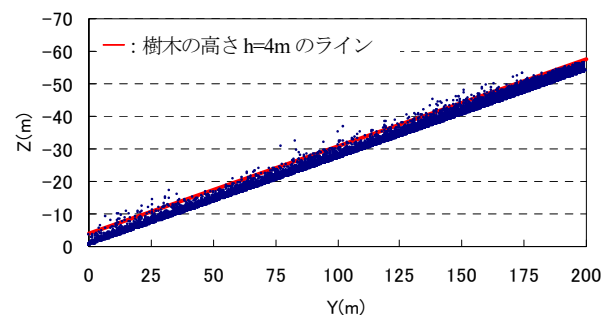


図-26 断面方向軌跡図 (樹木のみの場合)

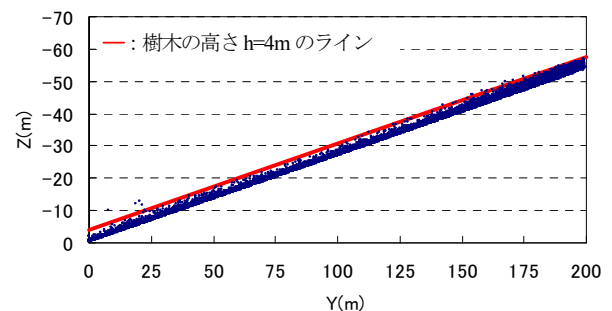


図-27 断面方向軌跡図 (case 4 枝葉の高さ $h_l=0.5m$)

表－9 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－10 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、落石の衝突高さと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 γ 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、環境整備のみならず山岳地帯の防災計画や落石対策を行う上での自然の植生の評価・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を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) 桝谷浩，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。
- 5) 小村辰彦，村石隆之，西澤謙二，桝谷浩：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。
- 6) 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
- 7) 倉岡干郎：DEM（個別要素法）による落石運動の数値解析，ITASCA consulting group, INC. UDEC version 3.0 Vol. II appendices，1998。
- 8) G. Shi：Forward and backward discontinuous deformation analysis of rock block systems, Proc. of the International symposium on rock joints, pp.731-743, 1990。
- 9) Céline Le Hir, Frédéric Berger, Luuk K.A. Dorren, Caroline Quétel：Forest: A natural means of protection against rockfall, but how to reach sustainable mitigation? Advantages and limitations of combining rockfall models taking the forest into account, Internationales Symposium Interpraevent 2004, pp.v/59-v/69, 2004
- 10) Martin Joel Oskar：Energy absorption of trees in a rockfall protection forest, Doctoral dissertation of Swiss Federal Institute of Technology, 2007
- 11) 櫻井正明，松田伸一，奥谷由行，高橋和彦，内藤洋司：森林の持つ落石緩衝効果に関する実験的研究，第53回砂防学会研究発表会概要集，pp.452-453，2004。
- 12) 櫻井正明，奥谷由行，今泉栄二，内藤洋司，前川峰志：森林の持つ落石緩衝効果に関する実験的研究Ⅱ，第54回砂防学会研究発表会概要集，pp.252-253，2005。
- 13) 櫻井正明，谷由行，今泉栄二，内藤洋司，渡部扶三男：森林の持つ落石緩衝効果に関する実験的研究Ⅲ，第55回砂防学会研究発表会概要集，pp.356-327，2006。
- 14) 右城猛，楠本雅博，篠原昌二，木下賢司：落石の運動機構に関する実験的研究，土木学会論文集 F Vol.62 NO.2，pp.377-386，2006。
- 15) 小林直行，斎藤英明，石川信隆，水山高久：巨礫による立木の衝突応答実験に関する一考察，土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，Vol.15，pp.22-25，1988。
- 16) 真柄泰央，櫻井正明，小林一隆，石川信隆，香月智：落石防護施設の緩衝林への間伐材の利用に関する実験的研究，第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.25-28，1998。
- 17) 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。
- 18) 鈴木浩之・水山高久・栗原淳一：立木の土石流衝撃緩衝効果，第38回砂防学会研究発表会概要集 pp.291-294，1989。

(2010年3月9日 受付)