

(14) 斜面の植生を考慮した落石運動シミュレーション による危険度評価について

The risk estimation for rock fall by use of the simulation considering vegetation on slope

天沼 康平*, 榎谷 浩**, 辻 直志***
Kouhei Amanuma, Hiroshi Masuya, Tadashi Tsuji

*金沢大学, 自然科学研究科社会基盤専攻 (〒920-1192 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系 (〒920-1192 金沢市角間町)

***アルスコンサルタンツ株式会社, 地域整備部 (〒921-8805 野々市町稲荷 2-277)

Key Words: rock fall, slope, vegetation, simulation, performance-based design

キーワード: 落石, 斜面, 植生, シミュレーション, 性能照査型設計

1. まえがき

急傾斜地を通る道路, 鉄道は, 斜面崩壊や雪崩などの自然災害により交通の安全性が損なわれることが多い. このような落石に対する防護施設の設計には, 対象とする落石の規模と発生位置, 斜面上の落石の運動形態, 防護施設位置での運動エネルギーあるいは衝撃力が必要とされる. この中で落石が落石防護工に衝突した場合の荷重評価, 設計方法については積極的な研究が行われている^{1,2,3,4)}. また, 落石防護施設建設においては, 落石に対して防護する一つの合理的な方法として性能照査型設計に基づく設計方法への移行が求められている. これにより多様で経済的な防護構造物の選択が可能になると期待されている^{5,6)}. 現在までは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いため, 落石対策便覧⁷⁾を参考に経験的に防護工の重要な対象荷重である落石の条件が設定されることが多い. 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落石の衝撃を受ける防護工の設計上必要とされている⁷⁾.

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た. 本論文では落石の飛

翔を基本とする落石運動解析方法の基本理論, さらに回転と滑りを考慮した解析方法を示す. また, 実際の斜面への数値解析例を用いて本手法の妥当性と有用性を示している.

2. 植生の影響を考慮した落石運動シミュレーション

2.1 落石と斜面および植生のモデル化

(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. しかし本研究においては簡単のため落石を球と仮定して, その方程式を用いることにした. 著者らが過去に提案したように落石が斜面と衝突した場合に, 図-1に示すように落石は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実際の不規則性を表現することとした⁸⁾.

(2) 斜面のモデル化

落石の運動を解析する場合、実際の斜面には大小様々な凹凸が存在するが、これを完全にモデル化するのは困難であるため、本研究においては小さな凹凸は無視し大きな変化点のみに着目することとし、図-2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、本研究においては実際の斜面は 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 は次式で表される。

$$aX + bY + Z = d \quad (1)$$

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、 $i(X_i, Y_i, Z_i)$, $j(X_j, Y_j, Z_j)$, $k(X_k, Y_k, Z_k)$ とすると次式で表される。

$$a = \frac{(Z_i - Z_k)(Y_i - Y_j) - (Z_i - Z_j)(Y_i - Y_k)}{(X_i - X_j)(Y_j - Y_k) - (X_i - X_k)(Y_i - Y_j)} \quad (2a)$$

$$b = \frac{(Z_i - Z_k)(X_i - X_j) - (Z_i - Z_j)(X_i - X_k)}{(Y_i - Y_j)(X_i - X_k) - (Y_i - Y_k)(X_i - X_j)} \quad (2b)$$

$$d = aX_i + bY_i + Z_i \quad (2c)$$

(3) 植生のモデル化

植生として仮定した木立のモデルは円柱形とする。木立は高さ h_i (m)、幹の太さ(木立の直径) ϕ_i (m)、 $X-Y$ 平面へ投影した単位面積あたりの木の本数(樹木密度)を ρ_0 (本/m²) の3つのパラメータで表現した。なお、すべての木立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し、枝葉は無視した。

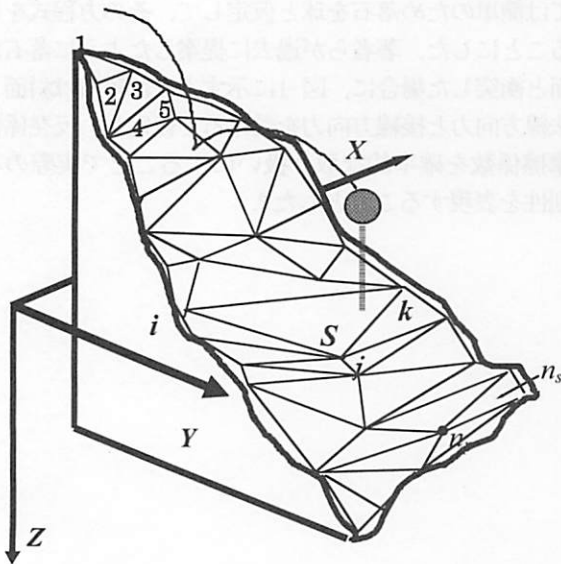


図-2 斜面のモデル

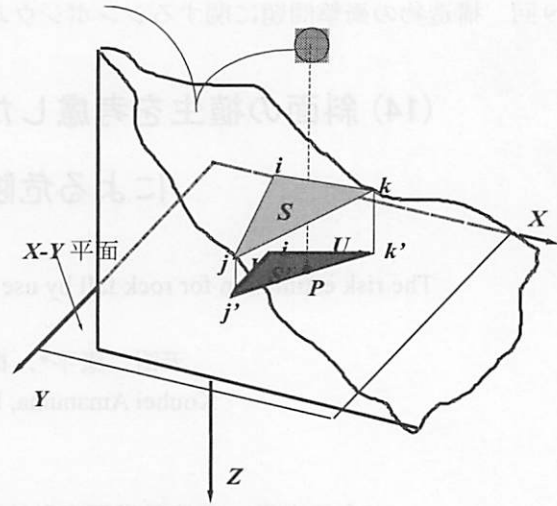


図-3 落石の位置判定

2.3 衝突判定

(1) 落石の位置判定

落石の運動を解析するためには、考えている時刻にその落石がどの斜面上にあるかを判定しなければならない。そこで図-3に示すように落石がある斜面上にある時、その斜面の三角形平面にモデル化した平面 S と節点 i, j, k の $X-Y$ 平面への投影を面 S' と点 i', j', k' とすると、 i' から j' へのベクトルを \mathbf{u} 、 i' から k' へのベクトルを \mathbf{v} とすると次式のように表される。

$$\mathbf{u} = (X_j - X_i, Y_j - Y_i) \quad (3a)$$

$$\mathbf{v} = (X_k - X_i, Y_k - Y_i) \quad (3b)$$

また i' から落石の投影位置までのベクトルを \mathbf{P} とすると次式を満たせば落石は斜面のモデル化した平面 S 内にあると判定できる。

$$\mathbf{P} = t\mathbf{u} + (1-t)\mathbf{v} \quad (4)$$

ただし、 $0 \leq t \leq 1$ である。

(2) 落石と斜面の衝突判定

さらに、ある斜面上に落石が存在することが上式より確認できた場合、その斜面に落石が接しているかどうかは、落石の半径 r を球と仮定すると次式で判定できる。

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

右辺は落石中心から斜面までの垂直距離であるため、

これが半径 r より小さい場合には、落石が斜面に接触していると考えられる。ここに X_r, Y_r, Z_r は落石中心の座標 a, b, d は式(2a), (2b), (2c) で与えられる落石の鉛直下方にある斜面の方程式の係数である。

(3) 落石と植生の衝突判定

ある斜面上に落石が存在するとき、落石の跳躍量を h とすると、

$$h = \frac{|aX_r + bY_r + Z_r - d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \quad (6)$$

と表すことができる。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。

この斜面からの落石の鉛直距離を h_r とすると、 h_r は、

$$h_r = \frac{h}{\cos \theta} \quad (7)$$

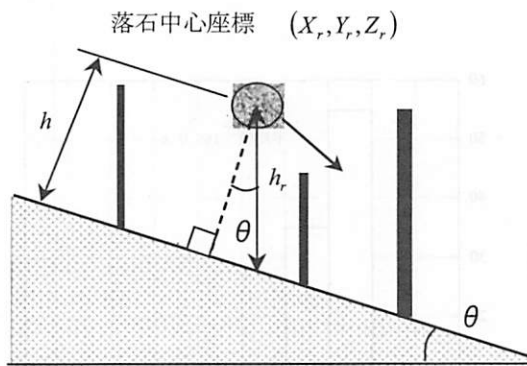


図-4 斜面における落石と木立

と表すことができる。図-4 に落石と斜面の位置関係を示す。

落石の跳躍高さが木の高さより大きい場合には衝突しないが、小さな場合に落石は木に衝突する可能性がある。そこで樹木密度 ρ_0 のうち、落石の高さ h_r 以上の密度を求める必要がある。高さ h_r 以上の木立の密度 ρ は、次式のように表される。

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 \int_{h_r}^{\infty} f_x(h) dh \\ &= \rho_0 \frac{1}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} \int_{h_r}^{\infty} \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h - M_h}{\sigma_h} \right)^2 \right] dh \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、落石の直径を ϕ_r 、樹木の直径を ϕ_t とし、落石が Δt 秒間に v の速度で Δl 進むとすると、 Δt 秒間に

落石が衝突する樹木の本数は、図-5 に示す衝突可能領域を考慮することにより、

$$(\phi_r + \phi_t) \Delta l \rho \quad (9)$$

と与えられ、これが落石が立木への衝突確率となる。本解析では、この衝突確率に基づき衝突判定した。

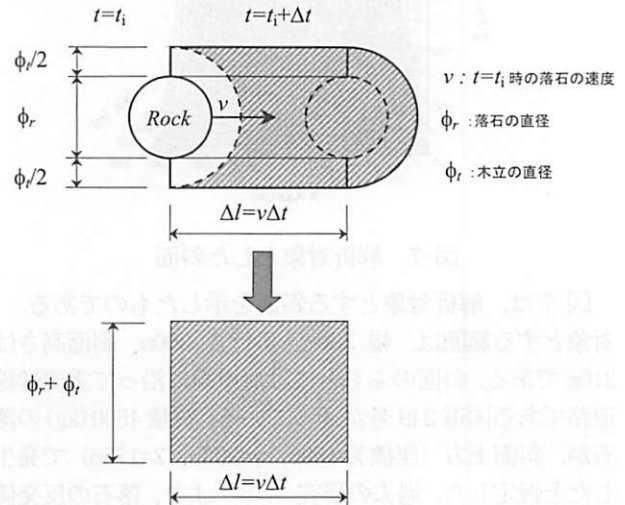


図-5 木立への衝突可能領域

図-6 に示すように落石が立木に衝突した場合、斜面との衝突時と同様に、接触点において接触平面 π' の法線方向力と接線方向力として摩擦力が作用するものとした。

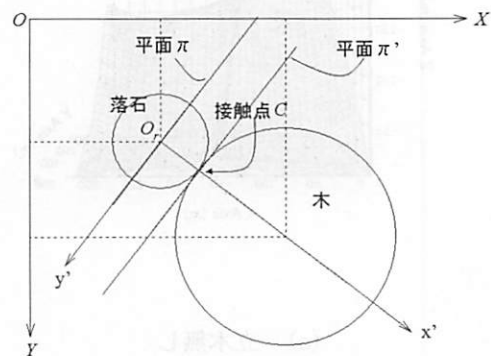


図-6 落石と木立の接触

3. 実斜面への適用

3.1 立木の影響について

石川県の能登半島の珠洲市M地区は、景勝地であるとともに大小の不安定岩塊が存在し、頻りに落石が発生する危険地帯としても知られている。このM地区の斜面には植生が存在している。ここでは、立木の影響について実斜面を用いてその影響について検討した。

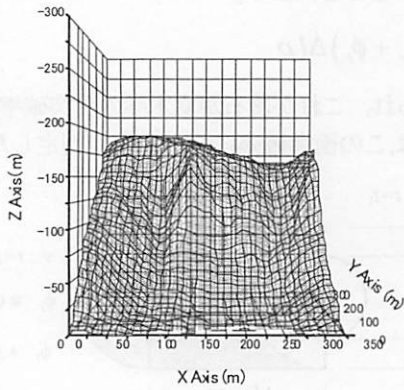
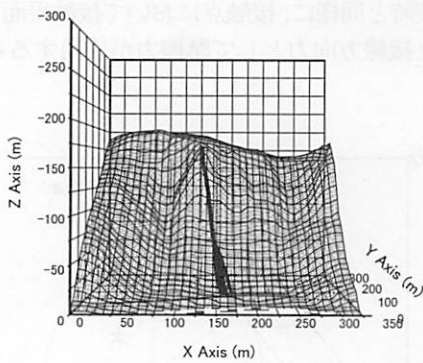
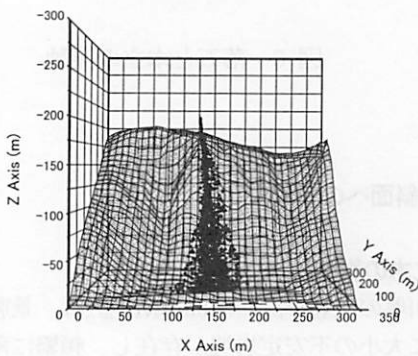


図-7 解析対象とした斜面

図-7は、解析対象とする斜面を示したものである。対象とする範囲は、幅 350m、奥行き 300m、斜面高さは 210m である。斜面のふもとには海岸線に沿って重要幹線道路である国道 249 号が通っている。質量 4500(kg)の落石が、斜面上方(座標 $X=150m$, $y=200m$, $Z=175m$)で発生したと仮定した。過去の研究^{9,10,11,12)}より、落石の反発係数は 0.15, その標準偏差を 0.01, 斜面と落石の摩擦係数 0.3, その標準偏差を 0.05 とした。植生として考慮し



(a) 立木無し

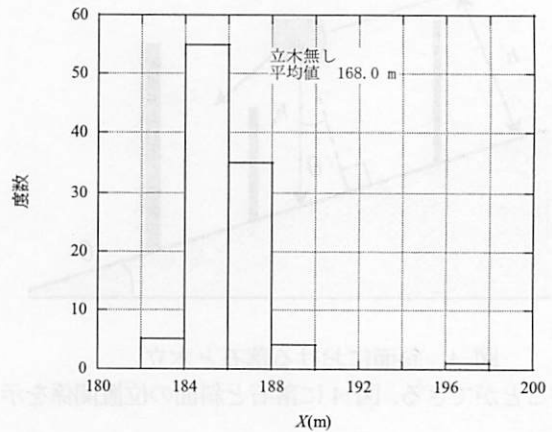


(b) 立木有り

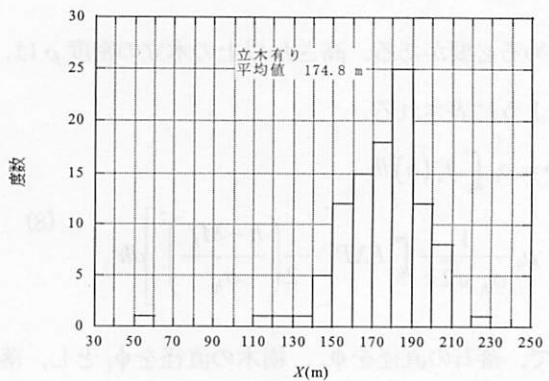
図-8 立木と落石の軌跡

た木立については、現場の状況より、立木の密度を 0.01 (本/m), 立木の高さは 5 (m), 半径は 0.1(m)とした。なお、落石と木立の衝突時については参考にすべき実験データがほとんどないため、本研究では反発係数 0.1, 摩擦係数は 0.05 と仮定した。

植生である立木が無い場合とある場合のシミュレーションを各々 100 ケース行った。図-8は、落石の軌跡を示したものである。これより、立木の有無に関わらず全ての落石が海岸にまで落下していることが確認された。また立木がある場合は、無い場合に比べ落石到達範囲が広いことがわかる。なお、海岸沿い国道 249 号の最も山側での落石の到達範囲と落石速度が防災上重要な情報である。図-9は道路山側に到達した落石の X 座標の頻度を示したものである。立木の有無に関わらず平均では $X=170m$ 程度の位置に落下しているが、上述したように立木が無い場合には X 座標で 4m 程度の狭い範囲に集中しているのに対し、立木がある場合には $X=140m$ から 210m の 70m 程度の非常に広い範囲に分布していることがわかる。



(a) 立木無し

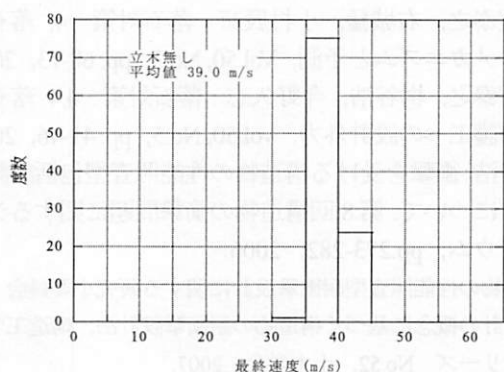


(b) 立木有り

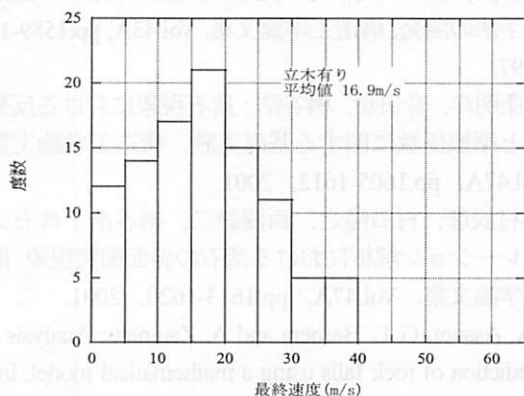
図-9 最終位置の X 座標

また、図-10 は最終速度分布を示したものである。これより、立木がある場合には 35m/s~45m/s 程度の速度に達している。これに対し、立木がある場合には、ばらつきは大きいのが平均で 17m/s と小さく最大でも 40m/s を超えるものは無かった。

この事例により立木を考慮した解析手法の有用性を示すことができたと考えている。なお、立木と落石の接触に関する諸定数については今後の更なる研究が必要であるが、少なくとも立木の影響が比較的大きなことが明らかとなった。また、環境に配慮でき、斜面災害に有効な樹木の積極的な利用も今後検討に値する課題と考えている。



(a) 立木無し



(b) 立木有り

図-10 落石の最終速度

3.2 落石のハザードマップ

落石の危険地帯では、必要とされる道路通行者と住民の安全を確保するために性能照査型設計を合理的かつ経済的に行うことが望ましいと考えられる。落石の発生確率を知ることが困難な場合も多いが、その場合でも過去のデータや現地調査により対象落石を設定することは可能である。ただ、対象とする落石を設定できても、

その落石に対してどのように対策するかを決定するかが実務において問題であり重要であろう。本研究で用いる落石運動シミュレーションの利用は、具体的な落石防護対策を決定する上で有効な支援方法の一つであると考えられる。そのような観点から前節で対象とした同じ斜面を用いた落石のハザードマップの作成について示す。

解析に用いた落石は、現場の調査で最も大きな石として質量 11000 (kg) の落石を対象とした。斜面と落石の反発係数 0.15, その標準偏差を 0.01, 斜面と落石の摩擦係数 0.3, その標準偏差を 0.05 とした。植生と落石の反発係数 0.1, 植生と落石の摩擦係数 0.05. 植生の高さ 5 (m), 植生の密度 0.01 (本/m), 植生の半径 0.1 (m) とした。現場の状況より落石の発生位置を表-3 に示す 5 箇所とした。各発生位置での落石運動シミュレーションを 100 回ずつ行った。

図-11 は、落石経路すなわち落石の軌跡を 3 次元の鳥瞰図で示したものである。落石の発生位置により斜面下での到達範囲は異なるが、この斜面の下の道路ではどこも落石到達の可能性があることがわかる。図-12 は、この結果を用いて平面図として落石の運動エネルギー別に色分けした落石のハザードマップである。斜面下では、一部エネルギーの小さな箇所が左に見られるものの、その箇所以外ではかなり大きな運動エネルギーが生じていることがわかる。斜面上方では、当然ながらエネルギーは比較的小さい。以上より、この斜面に対して落石防

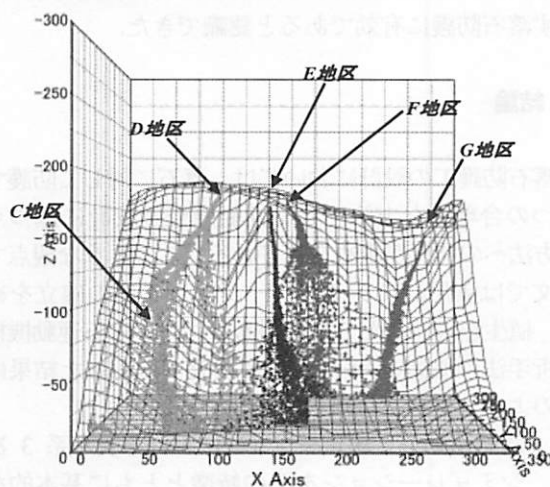


図-11 落石の軌跡

護対策を考える場合、斜面上方の落石を除去したり、落下しないように落石を固定する発生源対策、あるいは斜面下方の道路において、高エネルギーの落石に対して必要な安全性を確保する防護対策工の設置が考えられる。このように、落石のハザードマップの作成が落石防護対策に役立つことが期待できる。2007年3月25日に発生した能登半島地震により、斜面崩壊や落石が各所で発生

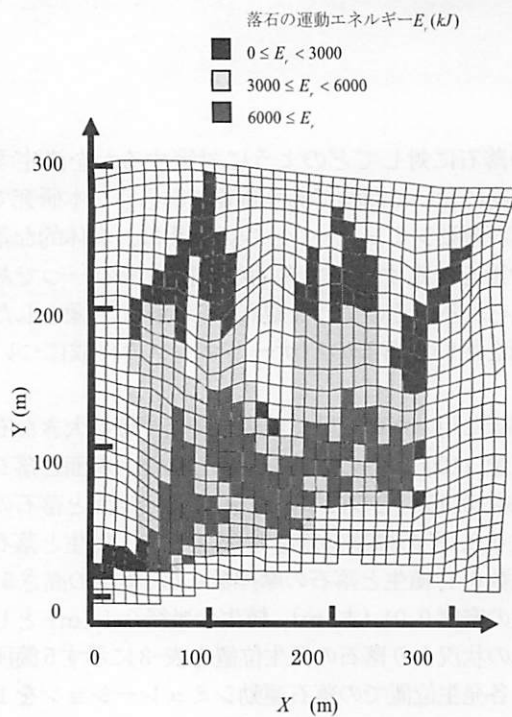


図-12 落石のハザードマップ

した。本研究で示した植生を考慮した落石シミュレーションによりハザードマップを作成した斜面においても、2000kg から 4000 kg の計 4 個の落石が図-11 に示した E 地区付近から実際に発生した。これらは全て海岸沿いの道路まで落下し、一つは海まで達した。推定される落石経路は写真-1 に示す通りである。幸い、この落石による通行者や通行車両に被害は無かった。

落石防護対策を考える上で植生を考慮した落石運動シミュレーション手法は、有用な一つの方法であることを示した。また、斜面での樹木の育成が環境問題のみならず落石防護に有効であると認識できた。

4. 結論

落石防護工の設計においては、落石に対して防護する一つの合理的な方法として性能照査型設計に基づく設計方法への移行が求められている。このような観点で本論文では実用的なシミュレーション手法の確立をめざし、植生を考慮した 3 次元斜面における落石運動機構の解析手法の検討を行った。本研究で得られた結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 落石運動シミュレーションにおける質点系 3 次元シミュレーションをその特徴とともに基本的な手法を具体的に示した。
- 2) 斜面の植生として木立を取り上げ、木の太さ、高さそして樹木密度をパラメータとする方法を提案した。
- 3) 落石運動シミュレーションにおいて木立のパラメータを用いて確率に基づき落石との衝突判定を行う考えと具体的な手法を示した。
- 4) 落石運動シミュレーション手法が斜面の木立の考慮に有効なことを示し、斜面における木立が落石運

動に与える影響が大きいことを明らかにした。

- 5) 本研究で開発したシミュレーションにより、落石危険地帯のハザードマップの作成と性能照査型設計に向けたその利用方法についてについて具体的に示した。
- 6) 落石危険地帯の植生が、環境問題のみならず落石防護に対しても重要な役割を担う可能性を示した。植生の影響を表現するパラメータについては、今後実験的検討を含めさらに検討を進めていく必要があると考えている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，日本道路協会，2000.
- 2) 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.
- 3) 古賀泰之，右城猛，小村辰彦：落石対策 4. 落石運藤のメカニズムと予測，Vol.50, No.3, pp. 68-73, 2002.
- 4) 古賀泰之，榎谷浩，今野久志：落石対策 4.4 落石運の防護工への設計外力，Vol.50, No.5, pp. 41-46, 2002.
- 5) 榎谷浩：衝撃を受ける構造物の性能照査型包括設計コードについて。第 8 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム，pp.273-282, 2006.
- 6) 構造物の性能照査型耐衝撃設計に関する研究小委員会：性能設計の概念に基づく構造物の耐衝撃設計法，構造工学技術シリーズ No.52, 土木学会，2007.
- 7) 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-，日本道路協会，2002.
- 8) 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.
- 9) 上条明洋，音田奨，榎谷浩：落石現象における反発係数と摩擦係数に関する基礎実験，構造工学論文集，Vol.47A, pp.1605-1612, 2001.
- 10) 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.
- 11) A. Assoni, G. L. Barbera and A. Zaninetti: Analysis and prediction of rock falls using a mathematical model, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr., Vol.32, No.7, pp.709-724, 1995.
- 12) B. Heidenreich and V. Labiouse: Proc. of interdisciplinary workshop on rockfall protection, pp.37-39, 2008.