

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

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

*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)

**金沢大学, 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (〒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)

The estimation of the risk of rock fall has been done empirically at the most cases. As a rational and the effective method towards to performance-based design, we have developed the three-dimensional simulation method the concerning the motion of falling rock on the slope, which can consider the effect of vegetation. The details of simulation method, namely, the model of slope, the pursuit manner of a rock fall, treatment of vegetation etc have been explained concretely. We show the example of application to the slope which rock fall actually generated in the Noto-Hanto earthquake, in which there is good agreement between the result of simulation and an actual phenomenon. Finally the validity and the usefulness of this method are shown.

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場合が多い. 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¹⁾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, 回転, 滑りを基本とする落石運動解析方法の基本理論, さらに実斜面に近い状態を再現するために斜面の植生を考慮に加えた解析方法を示す. また植生による緩衝効果, 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 落石問題と落石運動予測

(1) 落石問題と経験手法

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、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される。

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、次式のように表す場合が多い。

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

ここに、 V : 落石速度、 g : 重力加速度、 H : 落下高さである。残存係数の値は斜面の土質、岩質、凹凸、勾配、ならびに落石の形状によって異なる。斜面を直線斜面と仮定し、落石が摩擦のある斜面 θ の直線斜面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 は次式で表される。

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

等価摩擦係数の値について既往の実験から得られた値を整理したものが、表-2 である¹⁾。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、立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。

(2) 落石運動シミュレーション

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数値シミュレーションを用いて設定に役立て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。

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^{8,9)}。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における重要な影響因子として、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。本研究で用いるシミュレーション手法もこの手法の一つである。

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 等価摩擦係数の値

区分	落石特性	斜面特性	摩擦係数 μ の値	設計用
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

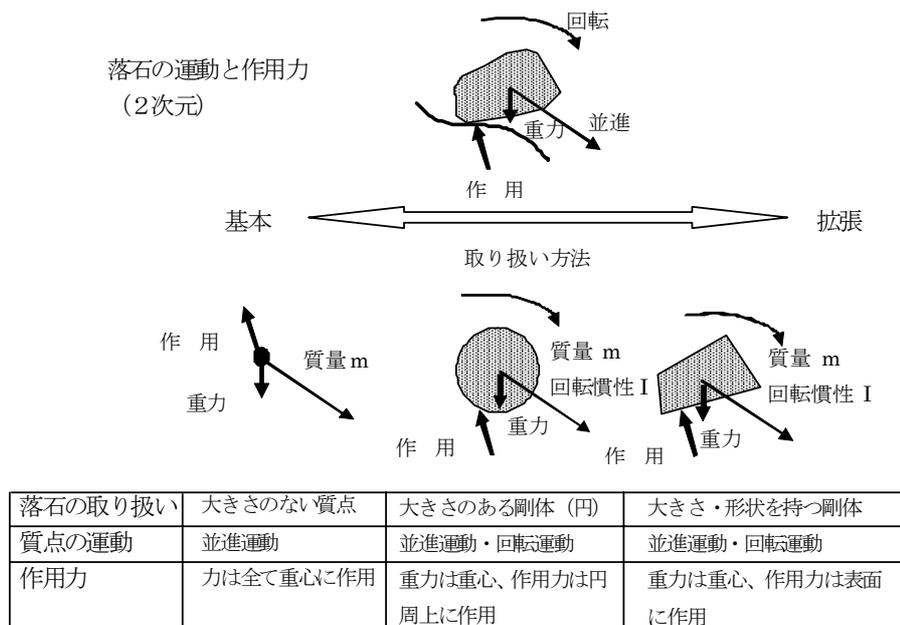
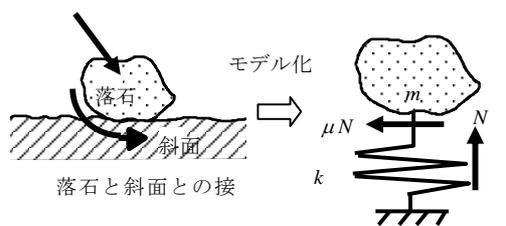


図-1 落石の取り扱いの概念

2.2 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-2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¹⁰⁾。



k : 地盤 (斜面) の等価ばね N : 斜面法線方向抗力
 μ : 落石と地盤間の摩擦係数 M : 落石の質量

図-2 落石と斜面の接触モデル

(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-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

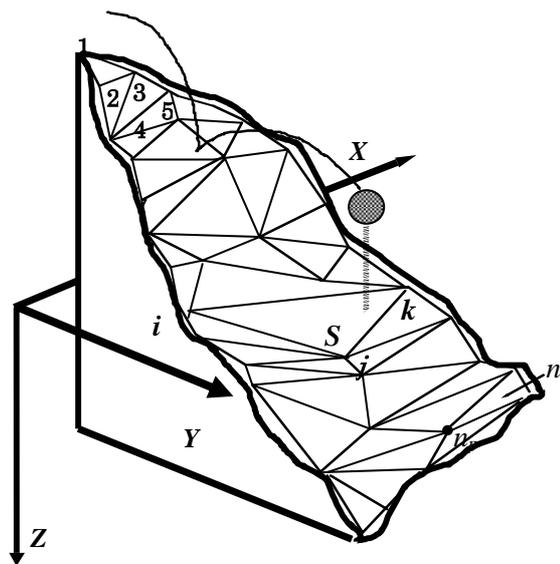


図-3 斜面のモデル

任意の三角形平面 S は次式で表される。

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

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。

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

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

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

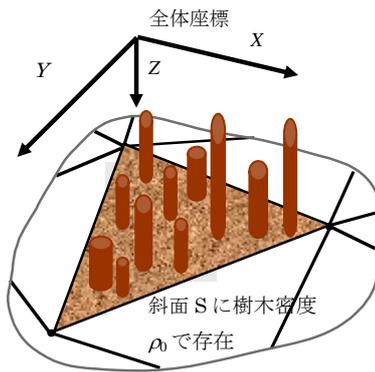
(3) 植生のモデル化

図-4に植生として仮定した木立のモデル化を示す。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)の確率を考慮した3つのパラメータで表現した。なお、すべての木立は、全体座標系における X - Y 平面に垂直に立っていると仮定し、枝葉は無く、変形が生じず破壊しない剛体として取り扱った。

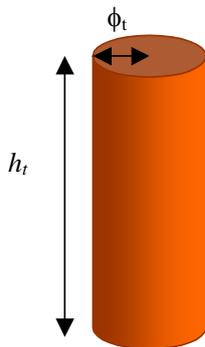
2.3 衝突判定

(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-5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



(a) 斜面における木立



(b) 木立の高さと直径

図-4 木立のモデル化

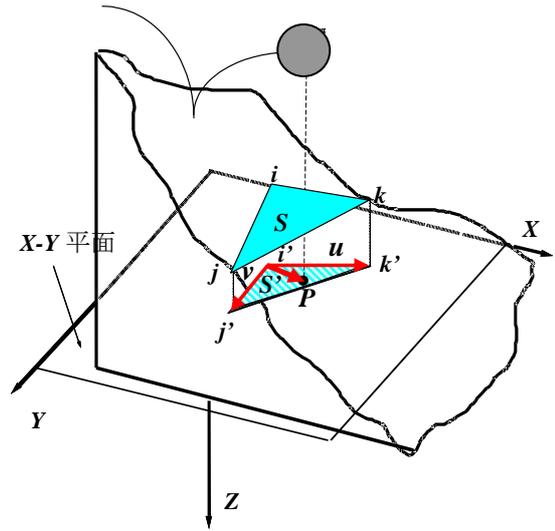


図-5 落石の位置判定

し、 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。

$$\mathbf{u} = (X_j - X_i, Y_j - Y_i) \quad (5a)$$

$$\mathbf{v} = (X_k - X_i, Y_k - Y_i) \quad (5b)$$

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。

$$\mathbf{P} = t\mathbf{u} + (1-t)\mathbf{v} \quad (6)$$

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、その斜面上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。

$$\frac{|aX_r + bY_r + Z_r - d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \leq r \quad (7)$$

左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(4a), (4b), (4c)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、

$$h = \frac{|aX_r + bY_r + Z_r - d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \quad (8)$$

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、

$$h_r = \frac{h}{\cos \theta} \quad (9)$$

と表すことができる。図-6 に落石と斜面の位置関係を示す。

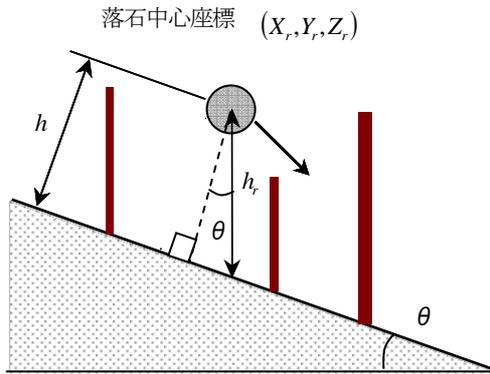


図-6 斜面における落石と木立

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。

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 \int_{h_r}^{\infty} f_x(h) dh \\ &= \rho_0 \frac{1}{\sigma_h \sqrt{2\pi}} \int_{h_r}^{\infty} \text{EXP} \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h - M_{h_r}}{\sigma_h} \right)^2 \right] dh \end{aligned} \quad (10)$$

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 n_t は、図-7 に示す衝突可能領域を考慮することにより、

$$n_t = (\phi_r + \phi_t) \Delta l \rho \quad (11)$$

と与えられ、これが落石と立木の衝突確率となる。本解析では、この衝突確率に基づき衝突判定した。図-8 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。なお、図-9 に本シミュレーションのフローチャートを示す。

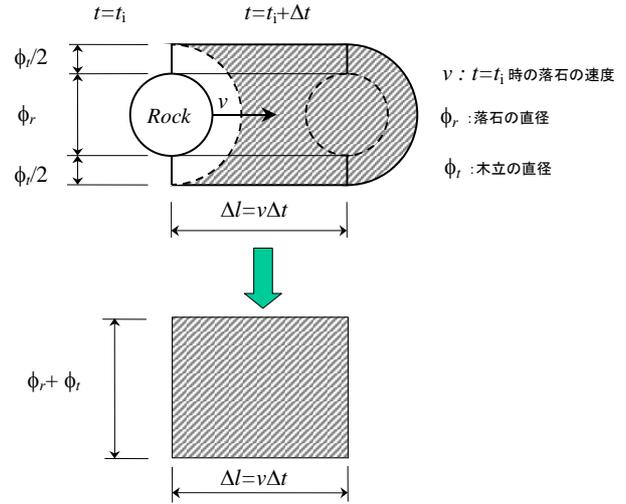


図-7 木立への衝突可能領域

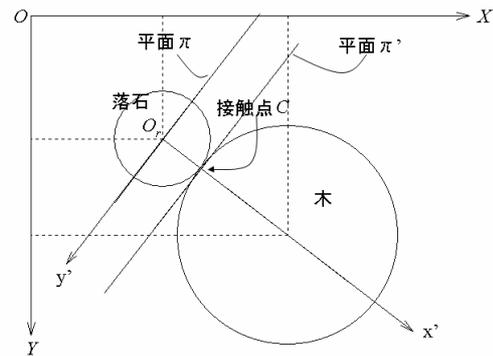


図-8 落石と木立の接触

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、頻繁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-10 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 $X=150\text{m}$, $y=200\text{m}$, $Z=175\text{m}$) で発生したと仮定した。過去の研究^{11,12,13,14}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。

植生として考慮した木立については、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、落石と立木の衝突時については参考にする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。

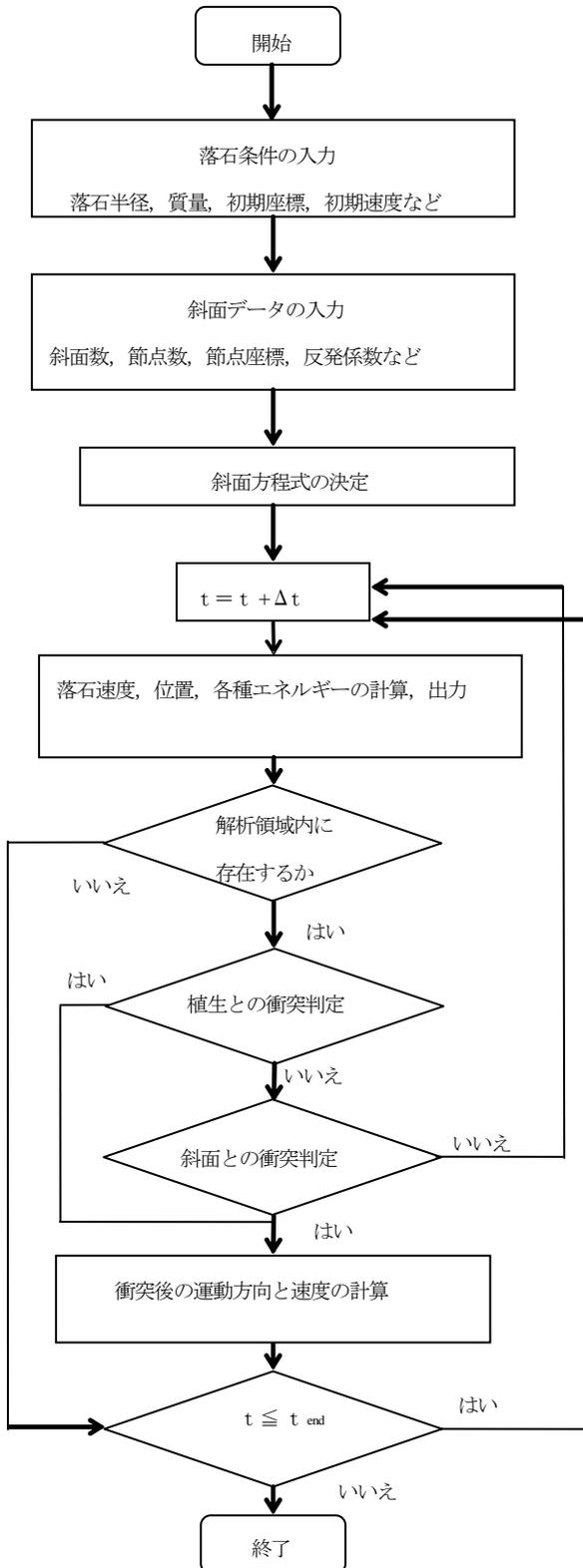


図-9 シミュレーションのフローチャート

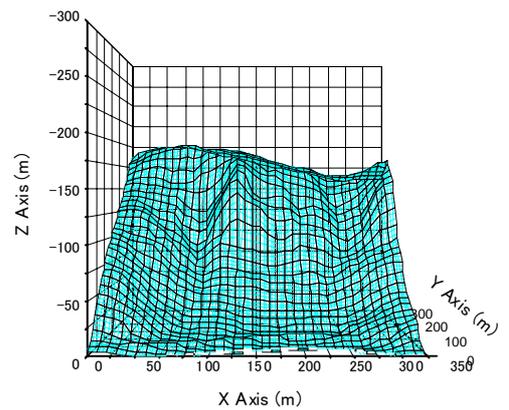
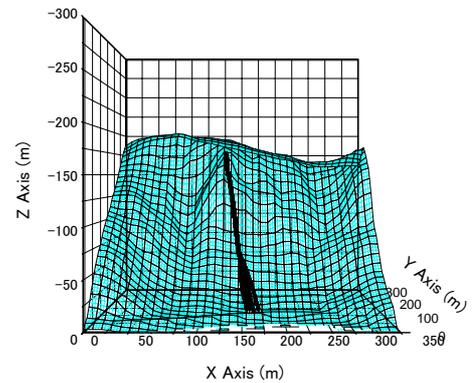
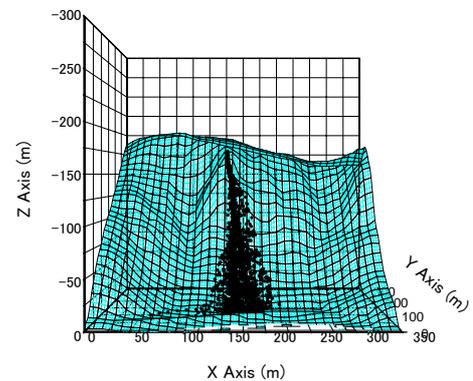


図-10 解析対象とした斜面

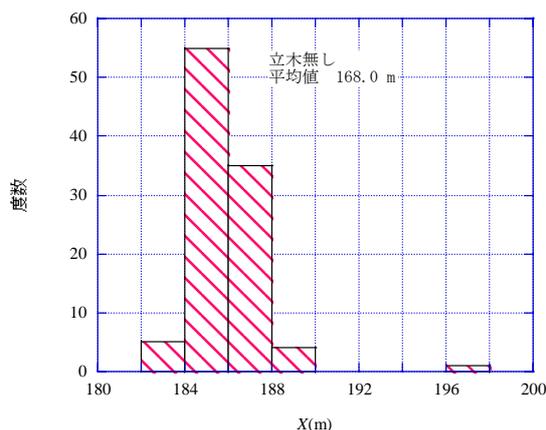


(a) 立木無し

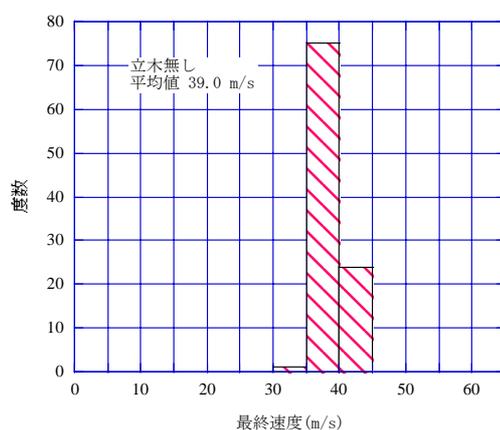


(b) 立木有り

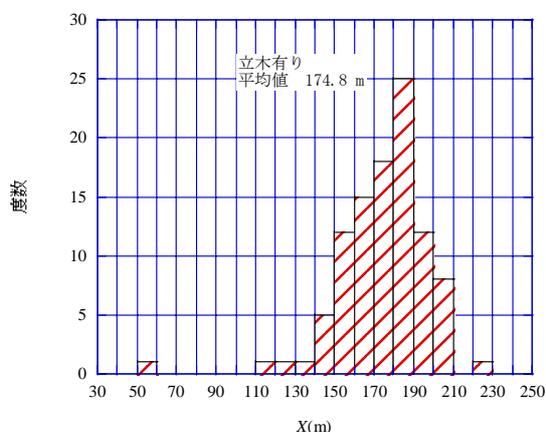
図-11 立木と落石の軌跡



(a) 立木無し

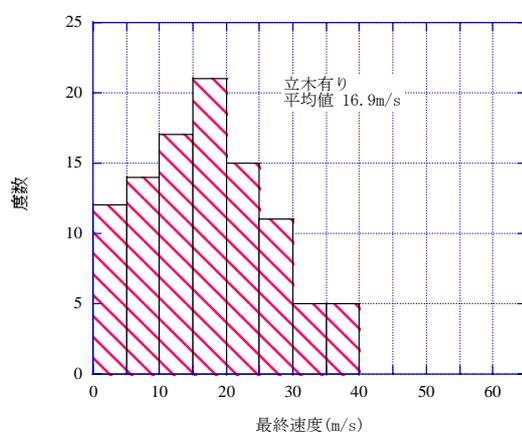


(a) 立木無し



(b) 立木有り

図-12 最終位置の X座標



(b) 立木有り

図-13 落石の最終速度

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-11 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-12 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。なお、落石対策便覧によれば、平均勾配 $\theta = 45^\circ$ とし、表-2 の等価摩擦係数 $\mu = 0.35$ とすると斜面裾野での到達範囲は 45 度の範囲とされているのでその幅は 190m である。これは本解析で得られた、立木有りの場合の 120m 程度に比べてもかなり大きく、安全側であることがわかる。

また、図-13 は最終速度分布を示したものである。これより、立木がない場合には 35m/s~45m/s 程度の速度に達している。立木がある場合には、ばらつきは大きい平均で 17m/s と小さく最大でも 40m/s を超えるものは無かった。なお、落石対策便覧によれば、平均勾配 $\theta = 45^\circ$ とし、表-2 の等価摩擦係数 $\mu = 0.35$ とすると、斜面下での最終速度 $v = 47.2\text{m/s}$ が得られる。これは本解析で得られた立木無しの場合に得られた上限値 45m/s とほぼ一致し、やはり安全側の値である。

この事例により、今まで全く考慮されることの無かった立木を考慮した本手法の有用性を示したと考えている。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。

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される。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。3.1 の検討で用いたように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, 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-14 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、この斜面の下で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-15 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。

表-3 落石発生位置

地区	地区C	地区D	地区E	地区F	地区G
X座標	20m	100m	153m	160m	310m
Y座標	145m	280m	217m	254m	240m
Z座標	97m	201m	175m	195m	150m

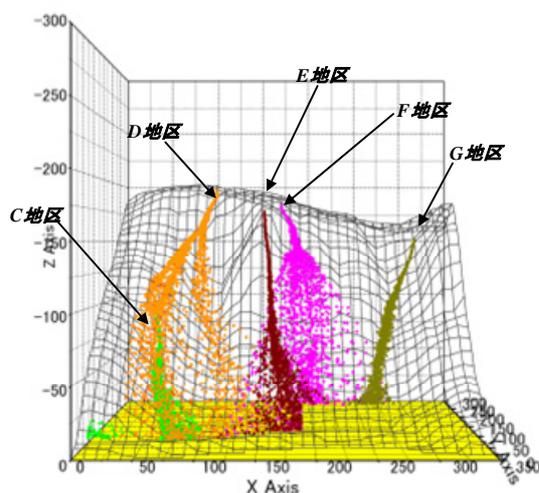


図-14 落石の軌跡

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。

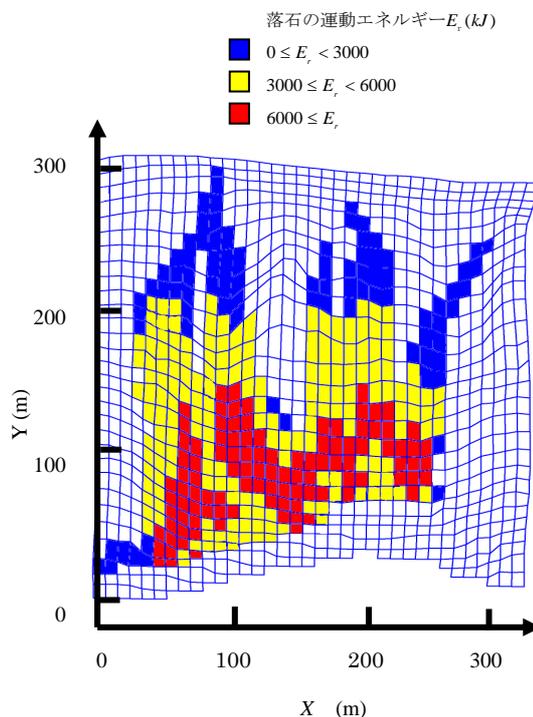


図-15 落石のハザードマップ

以上より、この斜面に対して落石防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などの計画・選択が可能となる。

このように、本手法でを利用した落石のハザードマップの作成により、表-4 に示すように想定するレベルに応じた落石防護の要求性能⁶⁾を満たすような安全性を明確にした防護対策の選択あるいは現地における各種対策の組み合わせの決定、設計に大きく寄与できると考えられる。

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した。本研究で示した植生を

表-4 落石防護対策工の要求性能

落石の作用レベル	防護構造物の重要度		
	最重要	重要	通常
作用レベル1 頻繁に発生する落石	使用限界状態	使用限界状態	修復限界状態
作用レベル2 供用期間中に発生する可能性の高い落石	使用限界状態	修復限界状態	終局限界状態
作用レベル3 発生する確率は低いが規模の大きい落石	修復限界状態	終局限界状態	—

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 4000kg の計 4 個の落石が図-14 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。

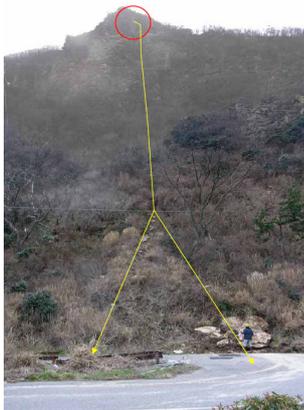


写真-1 能登半島地震での落石発生と落下経路

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。

謝辞

本研究を進めるにあたり、照井真司氏（研究当時金沢大学自然科学研究科社会基盤工学専攻）と里見俊輔氏（研究当時金沢大学土木建設工学科）には貴重なご協力をいただいた。ここに記し深く感謝の意を表す。

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) 倉岡千郎：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。
- 9) G. Shi: Forward and backward discontinuous deformation analysis of rock block systems, Proc. of the International symposium on rock joints, pp.731-743, 1990。
- 10) 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。
- 11) 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。
- 12) 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。
- 13) 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。
- 14) B. Heidenreich and V. Labiouse: Proc. of interdisciplinary workshop on rockfall protection, pp.37-39, 2008。

(2008 年 9 月 18 日受付)