

## KRSP (Kanazawa Rockfall Simulation Program) を用いた 落石運動解析の一考察

Study of rockfall motion analysis with Kanazawa Rockfall Simulation Program

飯作 啓太\*, 榎谷 浩\*\*, 松田 宗一郎\*\*\*  
Keita Hansaku, Hiroshi Masuya, Soichiro Matsuda

\*修(工), 株式会社プロテックエンジニアリング (〒660-0072 兵庫県尼崎市大庄川田町13)

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

\*\*\*学(工) 石川労働局 (〒920-0024 石川県金沢市西念3丁目4-1)

*Key Words : (Rockfall, simulation, roughness, basic parameter)*

キーワード: 落石, シミュレーション, ラフネス, 基礎パラメータ

### 1. はじめに

我が国において落石は道路、鉄道や住宅等へ影響を及ぼす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る。しかしながら、落石現象は、多くの場合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具体例データの集積が難しいという性格を有する。

日本は、国土の4分の3が山岳、丘陵地で占められている上、地質は、度重なる造山運動の結果、極めて脆弱かつ複雑なものになっている。さらに、台風や梅雨前線による集中豪雨、冬における積雪・凍結などの厳しい気象条件にあること、また環太平洋造山帯に位置する世界でも有数の地震国である。このため、落石、土石流、雪崩などによる道路災害が毎年あとを絶たず、時には人命・財産を奪ったり、交通を遮断し、地域住民の生活を脅かすこともある。落石等の危険箇所は、全国に77,000箇所あり、それによる道路災害は、1年間に約4,000件発生している。毎年、多くの予算を計上し、落石対策が行われているが、新規の道路が毎年延長され、それらの法面の劣化が経年的に進行しているため、危険箇所は減少することなく増加している。環境条件が厳しいこと、生活基盤の整備に伴って新たな災害の可能性が発生したことなどから、近年では、落石災害防止の必要性が高まり、落石に関する研究、開発が進められるようになってきた<sup>1)</sup>。

落石防災対策においては、発生源における落石発生危険性の評価とともに落石がどのような経路、跳躍高さ、および速度を持って道路へ到達するかを評価することが必要である。落石の運動形態の評価は、実務においては一般に、既往の現場落石実験等の実績に基づいて概ね安全側に設定された経験則によりなされている。他方、落

石対策を必要とするような現場条件はきわめて多様であり、落石対策便覧に示された経験則を適用することが必ずしも適当でないと考えられることが往々にしてある。このような場合には経験則以外の予測評価方法によらざるを得ない。

このようなことから、近年、落石が斜面を落下する際の落下軌跡および速度等をより定量的・合理的に予測評価するための各種の落石シミュレーション手法が開発・提案されてきている。これらの手法は限られた数の実験事例等をもとに設定された経験則に比べれば、力学的な合理性に優れている、あるいは多様な現地条件などに適応しうる等の利点があると考えられるが、現地条件に対応したモデル化、計算パラメータの設定法、計算結果の妥当性の検証、計算結果の評価法など、多くの課題が残されているのも事実である。落石シミュレーション手法を落石防災対策の実務において利用するにあたっては、それらの特徴と限界を把握しておくことが大切であり、そのためには課題を解決していくことが求められる。これらの課題を解決していくための唯一の方法は現象の正しい観察と検証の積み重ねである。

そこで本研究では、特に研究が不十分とみなされる落石の運動形態について、より実用的なシミュレーション手法の確立を目指し3次元解析を行っている。また、落石運動をより正確に把握するため、実際の落石運動は跳躍運動、回転運動、すべり運動の組み合わせだった場合が多いことを考慮して解析を行う。加えて、斜面の反発係数や摩擦係数といった基礎パラメータ、斜面上の細かい凹凸を表現することで、より複雑な落石の挙動を再現する。最終的には、本手法を実際に起きた落石事例へ適用し、落石事故の危険度評価を行うことを目的とする。

## 2. 落石・斜面のモデル化

### 2.1 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飛翔運動中は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-1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。

ただし、本シミュレーションでは落石と斜面の接触は瞬時に行われると仮定した。すなわち瞬時に落石運動が変化するものとしている。

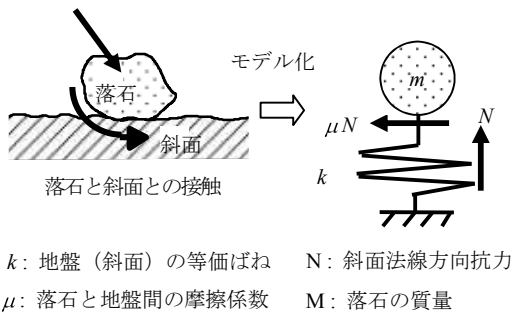


図-1 落石と斜面の接触モデル

### 2.2 斜面のモデル化

本手法では、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する。

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(1)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、 $i(X_i, Y_i, Z_i)$ ,  $j(X_j, Y_j, Z_j)$ ,  $k(X_k, Y_k, Z_k)$ とすると式(2a)～式(2c)で表される。

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

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

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

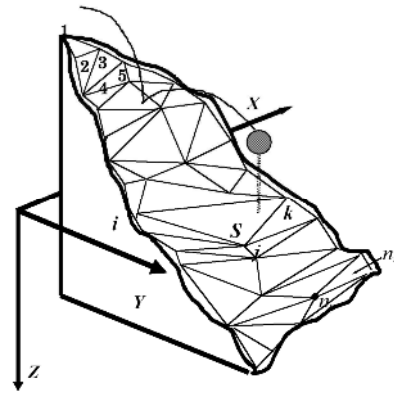


図-2 斜面のモデル化

## 3. 基礎パラメータを考慮した解析手法

### 3.1 反発係数の速度依存性を考慮した解析手法

解析上、落石の斜面への衝突は斜面を平面として取り扱われることが多く、このとき、斜面への接触による落石エネルギーを表現するために、一般に、斜面法線方向成分では力学上の反発係数を利用し、斜面接線方向では速度比や摩擦係数が利用される。しかし、解析手法によって、衝突時に生じる不確定を表現するために構成式や乱数の取り扱いが異なり、パラメータの定義も異なる。したがって、実用的な落石シミュレーション手法の確立にあたり、パラメータの定義を明確にし、実斜面における不確定な現象に対して、信頼性のある表現が望まれる。

過去に建設省土木研究所が高松市で実施した実斜面における実験の結果から反発係数に速度依存性があることが明らかとなった<sup>3)</sup>。本研究では斜面の状況に応じ、最大反発係数を設定できるような速度依存式を(3a)式のように設定した。この入射線速度の斜面法線方向成分 $V_{Z0}$ と反発係数 $e$ の関係式はカナダやアメリカなどの諸外国で実績があり広く使用されているCRSP (Colorado Rockfall Simulation Program)でも取り扱われており、このCRSPについて反発係数 $e$ の関係式は(3b)式で表される。

$$e = e_{MAX} \exp(-0.122V_{Z0}) \quad (3a)$$

$$e = e_{MAX} / (1 + (V_{Z0}/9.14)^2) \quad (3b)$$

ここで $V_{Z0}$ : 落石速度の斜面法線方向成分である。

### 3.1 単純斜面における性能検証

実際の斜面への適用前に、簡単な斜面で試行解析を行いその妥当性について確認する。比較対象として、他シミュレーション手法であるCRSPを取り入れた。解析に用いた斜面は、図-3に示すように、幅200m、奥行き100m、傾斜角度は $30^\circ$ とする。また解析における落石の初期条件を表-1に示す。

斜面の凸凹を表すラフネス角については、 $10^\circ$ とし、斜面に植生はないと仮定した。斜面摩擦係数については逆解析により0.35とした。①反発係数固定値、②速度依存反発係数、③CRSPの3つについて落石跳躍高、最終速度を比較検討した。

表-1 初期投下条件

項目	x(m)	y(m)	z(m)
投下位置(m)	0	99	-37.397
初期速度(m/s)	0	-0.3	0.3
初期角速度(rad/s)	0	0	0

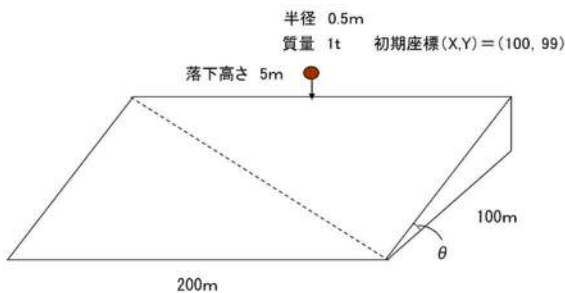


図-3 解析断面

① 反発係数固定値、②速度依存反発係数、③CRSPについて図-4～図-6に末端部跳躍高を示す。また跳躍高、最終速度の平均値を表-2に示す。末端部落石速度についてはさほど変化が見られなかったが、跳躍高について①反発係数固定値が大きく跳ねている結果となった。一方②速度依存反発係数と③CRSPについては、CRSPで跳躍高平均が約40cm上回る結果となった。これは、CRSPは回転運動を考慮しておらず、スーパーボールのような跳ね方をしていることが考えられる。今回、反発係数の速度依存性効果をシミュレーションに反映し、単純斜面による性能検証でその効果を確認することができた。

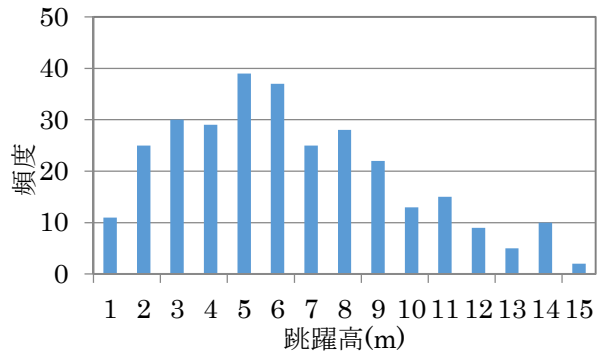


図-4 末端部落石跳躍高 (①反発係数固定値)

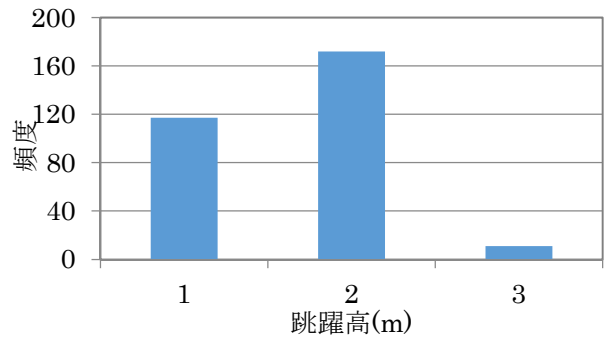


図-5 末端部落石跳躍高 (②速度依存反発係数)

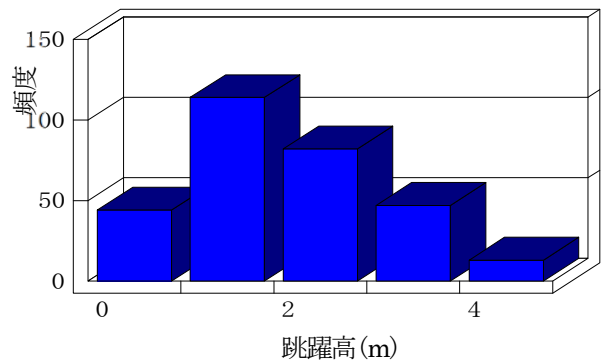


図-6 末端部落石跳躍高 (③CRSP)

表-2 解析結果

	跳躍高(m)	最終速度(m/s)
	平均値	平均値
①反発係数固定	5.92	27.3
②速度依存反発係数	1.19	26.25
③CRSP	1.56	25.79

#### 4. ラフネス（斜面の凸凹）を考慮した解析手法

##### 4.1 ラフネスを考慮した斜面のモデル化

落石運動は、落石形状とその特性、斜面形状や地質岩質、植生の影響などいろいろな影響を受ける。前節で述べたように、本手法では、斜面を三角形平面に分割してモデル化を行うが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。落石形状をある程度詳細にモデル化することは可能であるが、斜面の凹凸を詳細にモデル化して再現することは簡単ではないと考えられる。斜面表面の凹凸を簡略化してモデル化するにしても図-7に示すように、斜面のモデル化次第でシミュレーション結果は大きく異なってくる。現在利用できる実験結果は少なく、実データによるキャリブレーションなどが今後必要と考えられるが、斜面の凹凸の影響は指摘されてされており、著者らも重要と考えている<sup>45)</sup>。

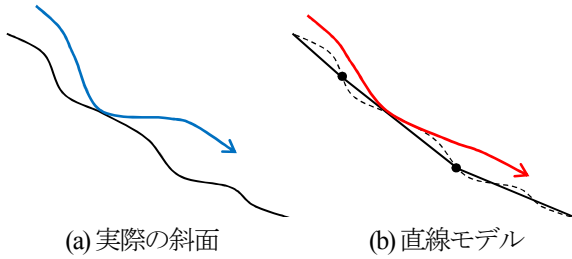


図-7 斜面ラフネスのモデル化

そこで、本研究では、斜面の凹凸による落石衝突時のランダム性の影響を考慮する方法について検討した。具体的には、図-8に示すように落石が斜面に衝突した瞬間にだけ三角形平面の法線ベクトルにある角度 $\theta$ を加え、その後斜面の連続性を保つために元の法線ベクトルに戻すことで斜面の凹凸を表現するものとした。

ここに、 $\theta$ は斜面の凹凸の程度（ラフネス）を表す角度（ラフネス角）である。

図-9は考えている平面の法線ベクトル $n_1$ とラフネス角 $\theta$ を考慮した平面の法線ベクトル $n_2$ などを示したものである。ここに、 $n_1 = (l_1, m_1, n_1)$ 、 $n_2 = (l_2, m_2, n_2)$ である。ベクトル $n_2'$ は、 $n_2$ を $n_2$ と並行ではない単位ベクトル $n_1$ の回りに、任意角 $\phi$ だけ回転させたものである。 $P$ 点はラフネスを考慮したある平面の一つの法線ベクトル $OP$ の終点であり、 $n_2' = (l_2', m_2', n_2')$ で示される $Q$ はラフネスを考慮し、さらにベクトル $ON$ 回りに任意角 $\phi$ だけ回転させた点である( $0 < \phi < 2\pi$ )。落石が斜面との接触時、接触後の運動方向を決定する場合に、法線ベクトルが $n_1 = (l_1, m_1, n_1)$ である平面の代わりにその都度乱数を発生させて法線ベクトルが $n_2' = (l_2', m_2', n_2')$ である平面を仮定し、反発方向の不規則性を考慮することにした。

図-10に示すようにベクトル $n_2'$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} n_2' &= \overline{ON} + \overline{NV} + \overline{VQ} \\ &= n_1(n_1 \cdot n_2) + [n_2 - n_1(n_1 \cdot n_2)] \cos \phi - (n_2 \times n_1) \sin \phi \\ &= n_2 \cos \phi + n_1(n_1 \cdot n_2)[1 - \cos \phi] - (n_2 \times n_1) \sin \phi \end{aligned} \quad (4)$$

よって

$$n_2' = \begin{bmatrix} l_2 \cos \phi + l_1 \cos \theta(1 - \cos \phi) - (m_2 n_1 - n_2 m_1) \sin \phi \\ m_2 \cos \phi + m_1 \cos \theta(1 - \cos \phi) - (n_2 l_1 - l_2 n_1) \sin \phi \\ n_2 \cos \phi + n_1 \cos \theta(1 - \cos \phi) - (l_2 m_1 - m_2 l_1) \sin \phi \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

ここでFig6に示すように $N$ を極座標表示すると、

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta_0 \cos \varphi \\ y &= r \sin \theta_0 \sin \varphi \\ z &= r \cos \theta_0 \end{aligned} \quad (6)$$

と表わされる。

$n_1$ は単位ベクトルであり、その成分は

$$\begin{aligned} l_1 &= \sin \theta_0 \cos \varphi \\ m_1 &= \sin \theta_0 \sin \varphi \\ n_1 &= \cos \theta_0 \end{aligned} \quad (7)$$

と表される。これより、 $xy$ 平面内での回転角 $\varphi$ は、

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{m_1}{l_1} \right) \quad (8)$$

となる。また、 $z$ 軸と $ON$ のなす角 $\theta_0$ は

$$\theta_0 = \cos^{-1} n_1 \quad (9)$$

である。

一方、ベクトル $n_1$ を $\theta$ 回転させた $P$ 点を表すベクトル $n_2$ の成分は次式で表される。

$$\begin{aligned} l_2 &= \sin(\theta_0 + \theta) \cos \varphi \\ &= [\sin \theta_0 \cos \theta + \cos \theta_0 \sin \theta] \cos \varphi \\ m_2 &= \sin(\theta_0 + \theta) \sin \varphi \\ &= [\sin \theta_0 \cos \theta + \cos \theta_0 \sin \theta] \sin \varphi \\ n_2 &= \cos(\theta_0 + \theta) \\ &= \cos \theta_0 \cos \theta - \sin \theta_0 \sin \theta \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)を式(5)に代入すると点 $Q$ を表す法線ベクトル $n_2'$ が得られる。以上により、ある区間の斜面で落石衝突時にランダムな任意角 $\theta$ を考えて斜面のラフネスを表現できる。

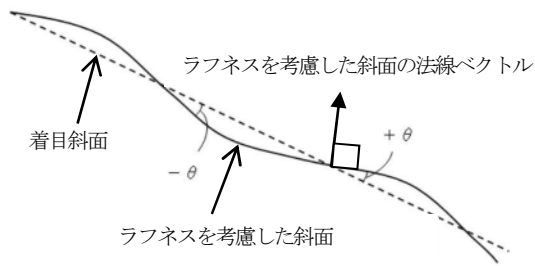


図-8 ラフネスの概念

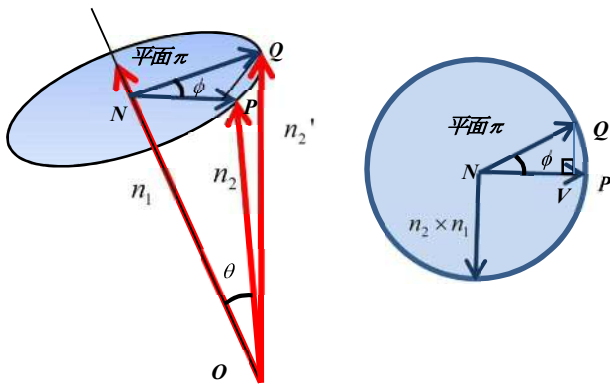


図-9 法線ベクトル  $n_1$  とラフネス角  $\theta$  および回転角  $\phi$  を有するベクトル  $n_2'$  との関係

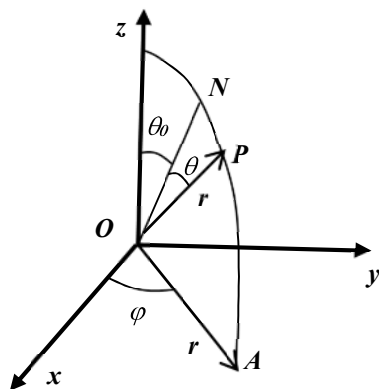


図-10 法線ベクトルの極座標表示

## 5. 石川県白山別当出合落石事例への適用

### 4.1 概要

白山別当出合は、白山登山のメインルートの登山口であり、休憩小屋とトイレを備えた登山センターがある。平成17年5月22日から断続的に続いた26mmの降雨を直接の誘因として、山開きを控えた5月26日に、一般権道33号の上方斜面で3箇所の崩壊が発生した。崩壊で発生した複数の落石は、道路山側の待受擁壁を一部損壊させ、さらに県道路面へ到達した。道路へ到達した落石は最大で  $\phi$  1.2m であった。



図-11 白山別当出合斜面概要

### 3.2 KRSPによる評価

解析に用いた斜面は、白山別当出合の地形図に基づいて斜面を20m四方で格子状に区切り、各四角形をさらに二つの三角形に分割して作成した。また、解析における落石条件を表-3に示す。

落石発生地点は、A側線の崩壊地とし、 $X=75\text{m}$ 、 $Y=85\text{m}$ 、落下高さ5mとした。また、斜面の状況を考慮し、摩擦係数  $\mu$  は0.35、最大反発係数は0.8とし、白山別当出合における落石事例の再現を行った。初めに、斜面の凸凹を現すラフネス角  $\alpha=0^\circ$  としたが、すべて斜面の形状に沿って落石する結果となった。そこでラフネスの影響を見るためにラフネス角を  $3^\circ$  とし、有意水準5%に従い300回解析を行った。

表-3 解析条件

落石質量(t)	0.278
落石直径(m)	0.730
斜面摩擦係数	0.35
最大反発係数	0.80

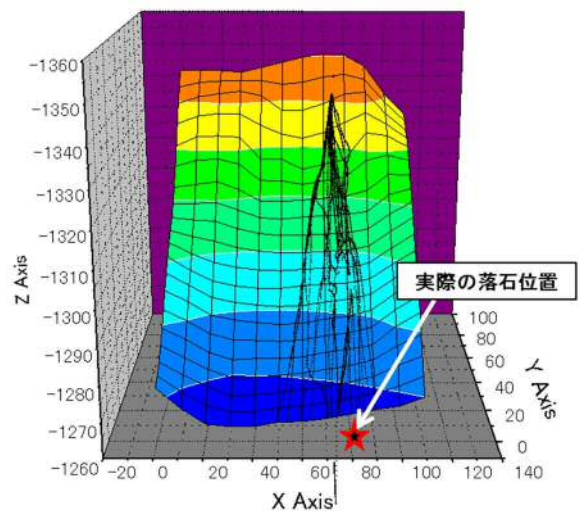


図-12 モデル化した斜面及び解析結果 ( $\alpha=3^\circ$ )

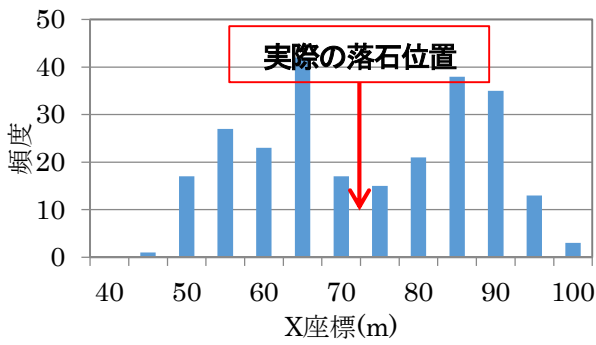


図-13 斜面末端部における落下範囲 ( $\alpha=3^\circ$ )

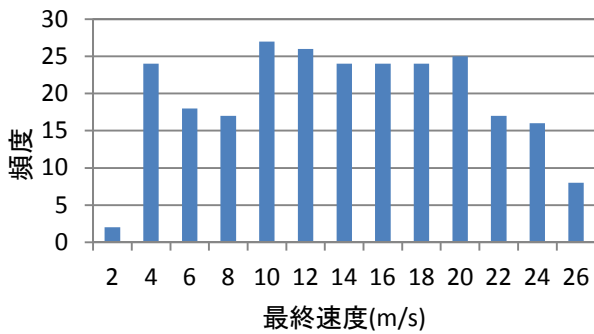


図-14 斜面末端部における落石速度 ( $\alpha=3^\circ$ )

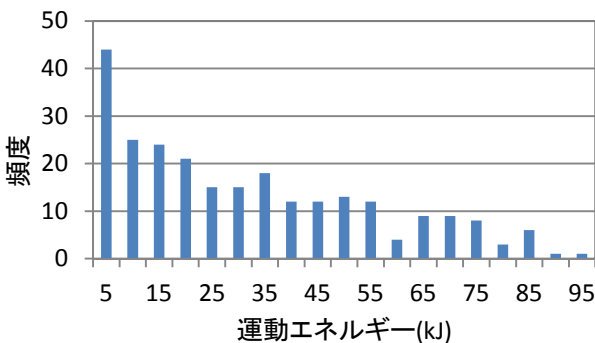


図-15 斜面末端部における落石運動エネルギー ( $\alpha=3^\circ$ )

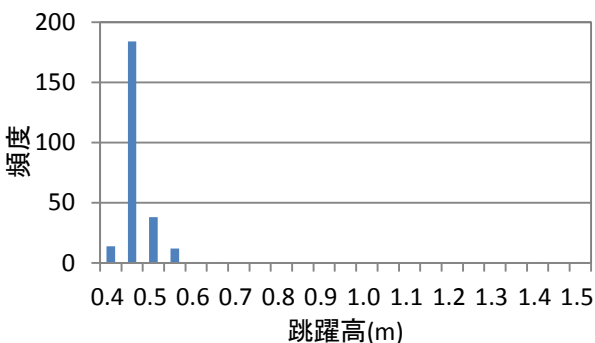


図-16 斜面末端部における落石跳躍高 ( $\alpha=3^\circ$ )

ラフネス角  $\alpha=3^\circ$  のときの結果を図-13～図-16示す。斜面のラフネスを表現することで、実際の落石位置がシミュレーション結果の範囲内に収まる結果となった。落石の運動エネルギーについて、最大で95kJとなった。しかし、今回の落石事故後に設置された防護柵の吸収可能エネルギーは72.23kJであるため、防護柵が壊れてしまう危険性が少なからずある。また斜面末端部跳躍高については、平均が0.442mとなった。斜面角度が $39.8^\circ$ と急な斜面であるにもかかわらず、小さな値となったが、これは速度依存性の反発係数が影響しているものと考えられる。

## 6. 結論

本研究では、3次元斜面における基礎パラメータ、斜面のラフネスを考慮した落石シミュレーション手法を開発し検討を行った。

基礎パラメータである反発係数について、これまで考慮されてこなかった反発係数の速度依存性をシミュレーションに反映した。さらに性能検証では落石跳躍高の低減効果が確認できた。ラフネスについて、落石が斜面に衝突した瞬間にモデル化した3角形平面の法線ベクトルにあるランダムな傾斜を与えて表現することにより複雑な落石の衝突挙動を再現できた。

実際の石川県白山別当出合における落石事例について、KRSPを利用し、事例を再現することができた。シミュレーション結果より、反発係数の速度依存性、ラフネスの影響が確認できた。

今後は本シミュレーションの実用性、信頼性を向上させるため、落石事例検証の積み重ねが必要である。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000。
- 2) Azzoni, A., Barbera, G., and Zaninetti, A.: Analysis and prediction of rock falls using a mathematical model, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomech. Vol.32, 709–724, 1995.
- 3) 小村辰彦：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，2001年3月
- 4) Pfeiffer, T. and Bowen, T.: Computer simulation of rockfalls, Bulletin of the Association of Engineering Geologist, vol. 26, pp. 135–146, 1989.
- 5) Hungr, O.: Characterization of rockfall and rockslide hazards for the design of protective measures, Interdisciplinary Rockfall Workshop 2011, Innsbruck, Keynote lecture, 2011.