

運動解析シミュレーションを用いた山岳道路における落石危険度評価

Evaluation of rockfall risk on mountain roads using motion analysis simulation

藤 誉 成*, 榎 谷 浩**, 栗 橋 祐 介***, 仲 西 香 保 里****

Takanari Fuji, Hiroshi Masuya, Yusuke Kurihashi, Kaori Nakanishi

*金沢大学大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

**工博, 金沢大学教授, 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

***博(工), 金沢大学准教授, 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

****金沢大学理工学域地球社会基盤学類 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

キーワード: 落石, シミュレーション, 斜面, ロックシェッド

Keywords: rockfall, simulation, slope, rock shed

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⁾³⁾。

運動解析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⁴⁾⁵⁾。

本論文では、著者らがこれまでに開発した運動解析シミュレーションを実斜面に適用し、斜面下の道路における落石危険度評価を行う。また、運動解析シミュレーションにおいて反発係数とラフネスが与える影響について検討を行う。

2. 斜面の概要

2.1 地形

今回の解析対象斜面を図-1に示す。解析対象斜面は石川県内の山岳地帯にあり、全体的に凸状となっている尾根部にあたる。斜面下には道路およびロックシェッドがあり、さらにその下は谷となっている。



図-1 解析対象斜面

2.2 斜面上の石

斜面上には大小様々な石が多数存在する。図-2に示すように落石径が0.6mを超えるものは、落石予防工(ロープ掛け工, 浮石除去)が施されている。一方で0.6mを下回る石については落石予防工が施されておらず、落石防護工(ロックシェッド)による落石対策が検討されている。



落石径 $\geq 0.6\text{m}$



落石径 $< 0.6\text{m}$

図-2 斜面上の石

2.3 ロックシェッド

現在、斜面下には1983年（昭和58年）に竣工された全長64mのPC製逆L形式ロックシェッドがある。しかし、近年行われた斜面の落石調査結果（図-3）から、現在のロックシェッドの範囲だけでは不十分である事が分かり、ロックシェッドの延長が計画された。新たなロックシェッドは、図-3の黒色の丸で示した3点から落石が発生すると仮定し、落石対策便覧に沿って設計された。その結果、図-4に示すように42mの延長が決定した。新設ロックシェッドの諸元を表-1に示す。なお、既設ロックシェッドは設計書が残っておらず、詳細は不明である。

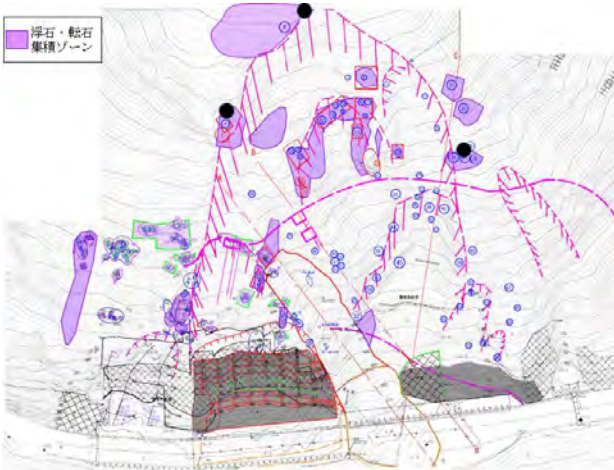


図-3 落石調査結果

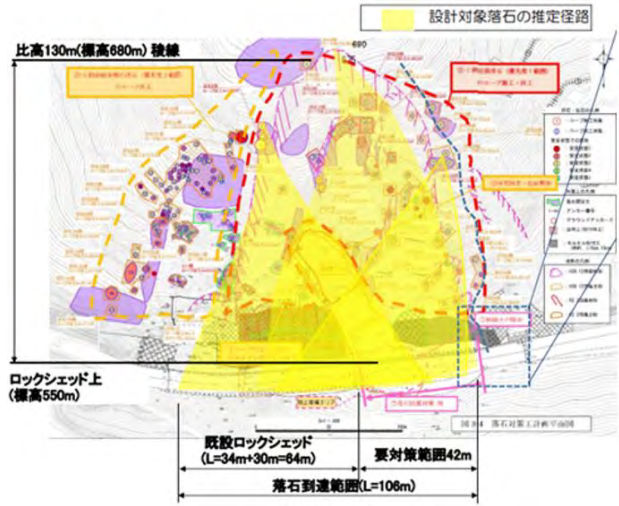


図-4 ロックシェッドの延長

表-1 新設ロックシェッドの諸元

構造形式	PC製逆L形式	
全長	42m	
対象落石	直径	0.62m
	質量	325kg
	最大落下高さ	130m
落石衝撃力	1239kN	

3. シミュレーションの基本解析手法

3.1 落石のモデル化

本手法では落石を球体とし、落石と斜面が衝突した際、斜面より法線方向力と接線方向力を受けると仮定する。法線方向は反発係数を用いて衝突後の速度を計算する。一方、接線方向は図-5に示すように落石の運動方向と反対向きに摩擦力が単振動の半周期の間働くとし力積より速度を算出する。また、落石形状による不規則性を表現するため、反発係数と摩擦係数は確率的に取り扱う。

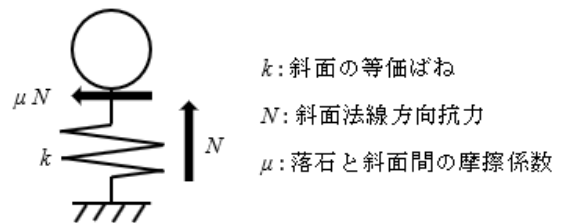


図-5 落石と斜面の接触モデル

3.2 斜面のモデル化

図-6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。任意の三角形平面は式(1)のように表される。

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

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、それぞれ式(2a)、式(2b)、式(2c)で表される。

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

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

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

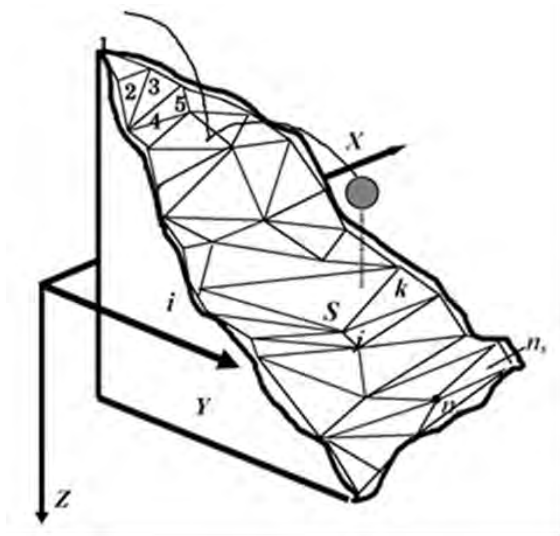


図-6 斜面のモデル化

3.3 斜面凹凸の考慮

本手法では、前節で述べたように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運動に影響を与える。

そこで、図-7に示すように落石が斜面に衝突する瞬間にのみ三角形平面の法線ベクトルにある角度 θ を加えることで斜面凹凸を表現した。 θ は斜面凹凸の程度(ラフネス)を表す角度であり、以下よりラフネス角と呼ぶ。ラフネス角 θ は、 $-\theta$ から $+\theta$ の範囲の角度を乱数により発生させ与える。

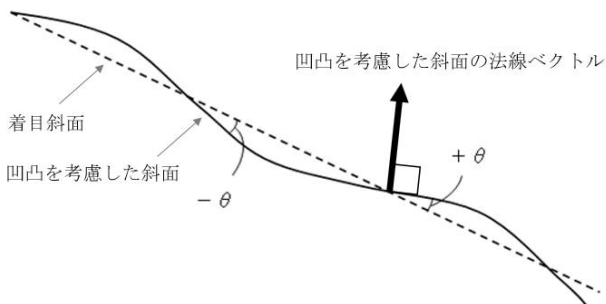


図-7 斜面凹凸(ラフネス)の概念

4. シミュレーションの適用

4.1 解析条件

(1) 斜面および落石条件

解析に用いる斜面は測量データ(図-8)をもとに図-9のように作成した。幅 X は260m、奥行き Y は150m、高さ Z は140m、節点の間隔は約10mである。また、斜面下にある道路およびロックシェッドについても斜面と同様にモデル化した。なお、道路面(標高550m)を0mとする。

落石は直径0.62m、質量325kgと仮定し、落石調査結果より落石の危険性が高いとされ、ロックシェッド設計時の対象落石となったA、B、Cの3点から発生させた(表-2)。

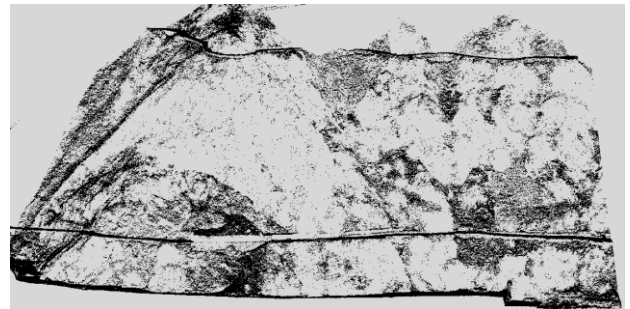


図-8 測量点群データ

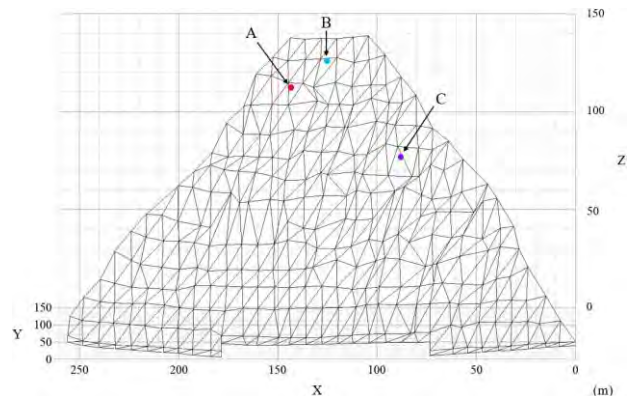


図-9 解析斜面モデル

表-2 落石初期座標

落石発生地点名	X (m)	Y (m)	Z (m)
A	144	113	118
B	123	133.5	130
C	88	96	86

(2) パラメータ条件

パラメータは1つの値に特定することが難しい。そのため、表-3のように12通りのパラメータ条件で解析を行った。反発係数と摩擦係数の標準偏差は、変動係数を0.2として計算した。なお、これらの値は過去に行った実験⁹⁾を参考に設定した。

表-3 パラメータ

	反発係数 e (標準偏差)	摩擦係数 μ (標準偏差)	ラフネス角 θ
No.1	0.1 (0.02)	0.3 (0.06)	0°
No.2			10°
No.3			20°
No.4			30°
No.5	0.2 (0.04)		0°
No.6			10°
No.7			20°
No.8			30°
No.9	0.3 (0.06)		0°
No.10			10°
No.11			20°
No.12			30°

(3) その他条件

解析回数は、乱数の有意水準 α を 0.05 とし、それぞれ 300 回とした。

解析の終了条件は、落石が道路またはロックシェッドに衝突した瞬間あるいは、道路、ロックシェッドの谷側の端に達した瞬間とした。

4.2 解析結果

紙面の都合上、表-4 に示す解析条件の結果のみ取り上げた。

表-4 解析条件

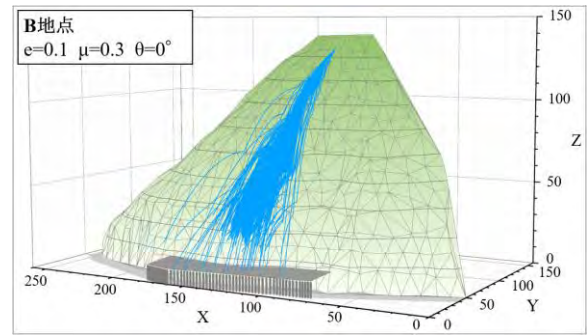
CASE	落石発生地点名	反発係数 e	摩擦係数 μ	ラフネス角 θ
1	B	0.1	0.3	0°
2		0.1	0.3	30°
3		0.3	0.3	0°
4	C	0.1	0.3	0°

(1) 落石の軌跡

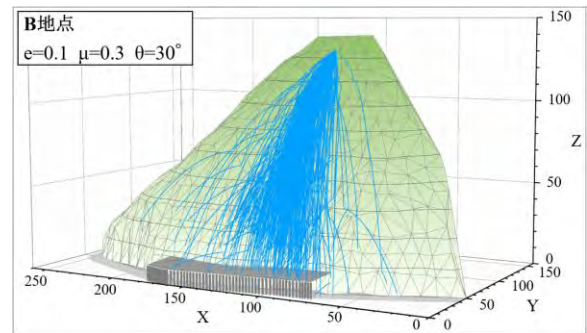
図-10 は落石の軌跡を示したものである。B 地点が発生源である落石のうち、ラフネス角が 0°(CASE1) と 30°(CASE2) の場合を比較すると、斜面の凹凸の有無により、落石の広がり方が大きく異なることが分かる。一方、反発係数が 0.1(CASE1) と 0.3(CASE3) の場合を比較すると、落石と斜面の衝突位置、衝突回数が異なることが分かる。CASE1 の場合、落石は発生源からロックシェッド付近の斜面まで衝突と飛行を繰り返し、最終的にロックシェッドを飛び越え谷へ落下するものが多い。しかし、反発係数の大きな CASE3 の場合、落石は発生源付近で数回衝突と飛行を繰り返したのち、斜面から離れロックシェッドに自由落下するものが増えることが分かる。

また、落石発生源が B 地点(CASE1) と C 地点(CASE4)

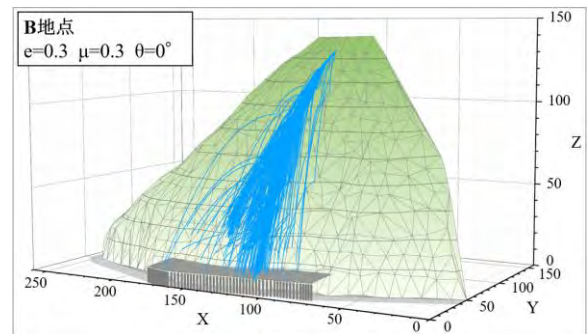
の場合を比較すると、CASE4 は落下高さが低いため、落石の広がり方が小さく、ロックシェッドを飛び越えることはほとんどないことが分かる。



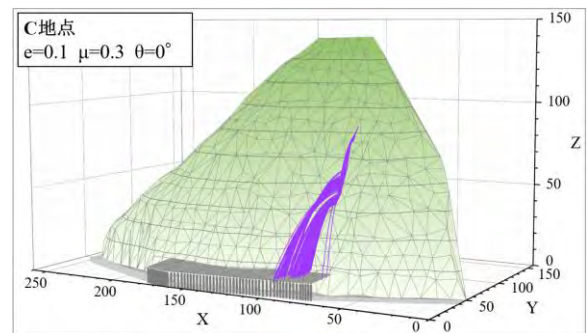
(a) CASE1



(b) CASE2



(c) CASE3



(d) CASE4

図-10 落石軌跡

(2) 最終位置の X 座標

図-11 は最終位置の X 座標のヒストグラムである。なお、ロックシェッドの範囲は灰色で、平均値は \bar{X} で示した。ラフネス角の値の変化が X 座標に与える影響は、斜面の凹凸の有無によるばらつきである。一方で、反発係

数の値の変化が与える影響はほとんどない。

また、B 地点からの落石は斜面を正面から見て右側にそれる傾向があり、C 地点からの落石はほぼ真下に落下する傾向がある。

落石対策便覧によると、到達範囲 L は次式で表される。

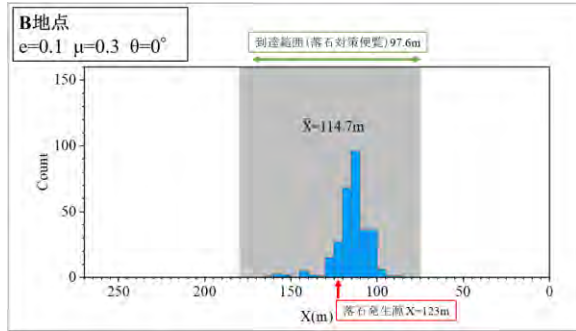
$$L = 2S \tan 22.5^\circ \quad (3)$$

ここに、 S は落石発生源と落石対策工の水平距離である。B 地点からの落石の場合、到達範囲は 97.6m と計算され

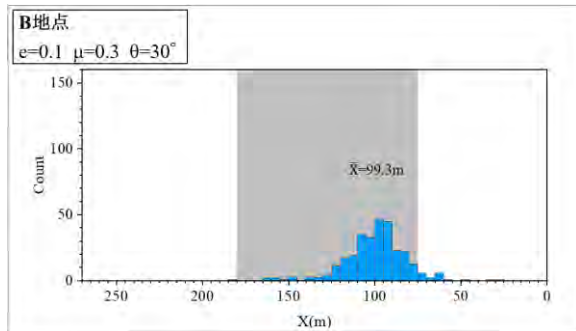
る。ラフネス角が 30° と大きい CASE3 の場合、到達範囲は 155.1m と大きいのが、93.7%の解析結果が 97.6m の範囲に収まっている。

(3) 最終位置の Z 座標

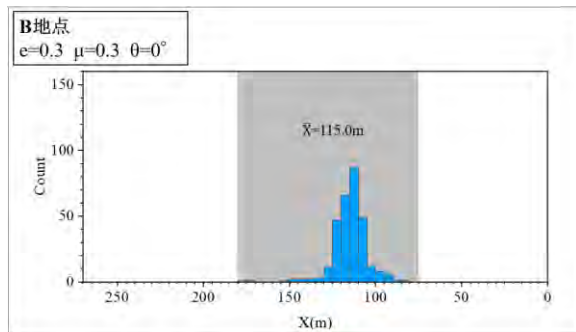
図-12 は最終位置の Z 座標のヒストグラムである。なお、道路面が 0m であり、ロックシェッドの高さは 7m である。したがって、ヒストグラムにおいて 7~8m の範囲



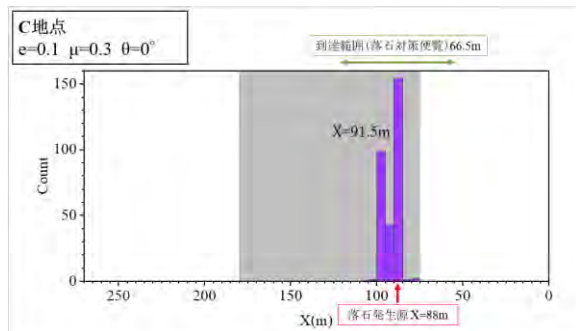
(a) CASE1



(b) CASE2

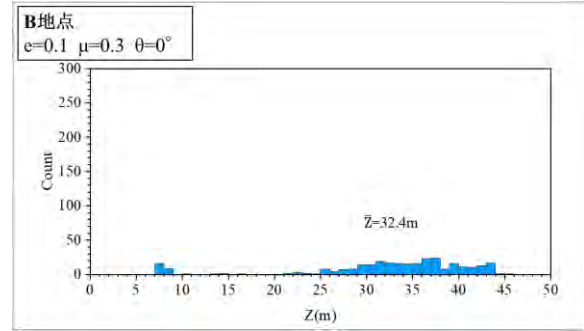


(c) CASE3

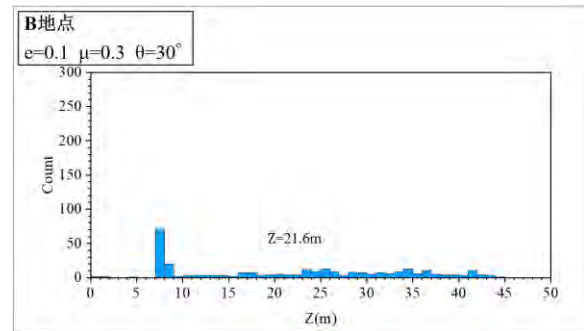


(d) CASE4

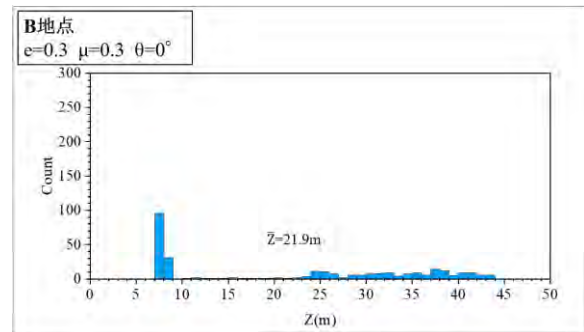
図-11 最終位置の X 座標



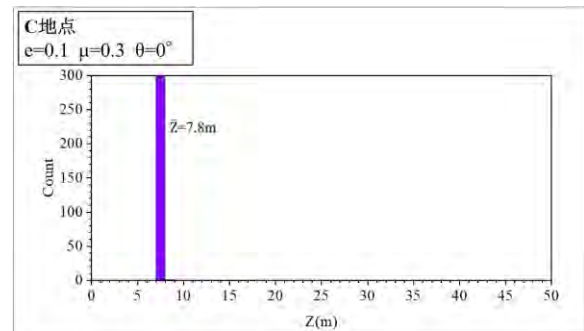
(a) CASE1



(b) CASE2



(c) CASE3



(d) CASE4

図-12 最終位置の Z 座標

の落石はロックシェッド上に衝突したものであり、その値より大きなものは道路の谷側を通過した時のZ座標を表している。

ラフネス角の値の変化が与える影響は、斜面の凹凸の有無によるばらつきである。一方、反発係数の値が与える影響は、ロックシェッドに衝突する落石の割合である。(1)の落石の軌跡でも述べたように、反発係数が0.1と小さいCASE1では、落石はロックシェッドを飛び越え谷へ落下する割合が多く、反発係数が0.3と大きいCASE3ではロックシェッドに自由落下する割合が増える。しかしながら、反発係数の大きいCASE3においても68%の落石がロックシェッドを飛び越え谷へ落下する。

CASE4はC地点からの落石であり、反発係数が0.1と小さいが、落下高さが低いため、ロックシェッドを飛び越えずロックシェッド屋根部に99.7%が衝突することが分かる。

(4) 最終位置での落石速度

図-13は最終位置での速度のヒストグラムである。ラフネス角の値の変化が与える影響は、斜面の凹凸の有無によるばらつきである。一方、反発係数が与える影響は、35m/s付近の速度と45m/s付近の速度の割合である。(1)の落石の軌跡で述べた通り、反発係数が0.1と小さいCASE1では、落石は発生源からロックシェッド付近の斜面まで衝突と飛行を繰り返し、谷へ落下するものが多く、反発係数が0.3と大きいCASE3では、発生源付近で数回衝突と飛行を繰り返したのち、ロックシェッドに自由落下するものが増える。斜面に衝突する回数が少ないと、速度損失が少なくなるため、最終位置での速度は大きくなる。したがって、CASE3は、CASE1に比べて斜面に衝突する回数が少ない落石の割合が多いため、45m/s付近の割合が多くなる。

C地点からの落石発生であるCASE4では、落下高さが低いため、B地点からの落石と比べ速度が小さくなる。また、B地点と同様に衝突回数の違いにより、二つの山ができる。

落石対策便覧によると、落下速度 V は次式で表される。

$$V = \sqrt{2g \left(1 - \frac{\mu}{\tan \alpha}\right) H} \quad (4)$$

ここに、 g は重力加速度、 μ は斜面の等価摩擦係数、 α は斜面の勾配、 H は落石の落下高さである。

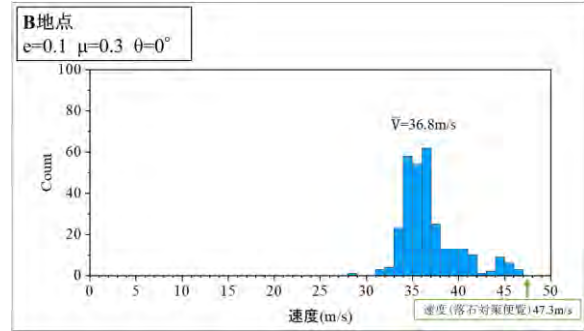
B地点、C地点からの落石の落下速度はそれぞれ47.3m/s、38.4m/sと計算され、解析結果はどの条件においても全てこの値を下回った。

(5) 最終位置での落石エネルギー

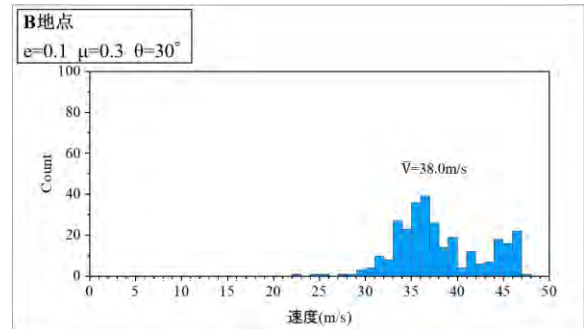
図-14は最終位置での運動エネルギーおよび回転エネルギーのヒストグラムである。運動エネルギーについては速度と同じ考察となるため、省略する。回転エネルギーに対して、ラフネス角が与える影響は、斜面の凹凸

の有無によるばらつきである。一方で、反発係数が与える影響は、回転エネルギーの大小である。反発係数が0.1であるCASE1の場合は、衝突回数が多いため、回転エネルギーは大きくなり、反発係数が0.3であるCASE3の場合は、衝突回数が少ないため、回転エネルギーは小さくなる。

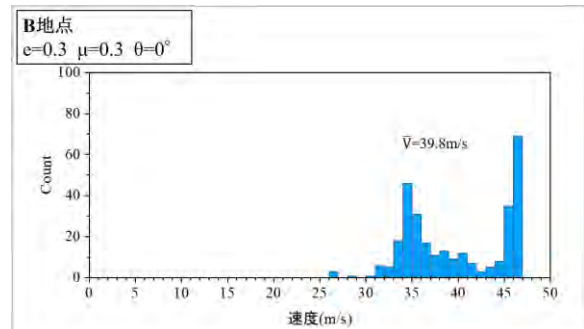
また、C地点が発生源である落石(CASE4)は落下高さが低いため、B地点からの落石と比べ運動エネルギー、



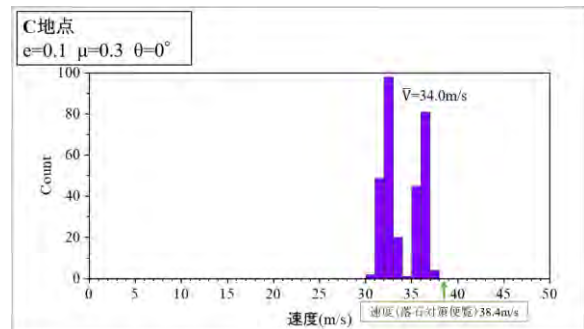
(a) CASE1



(b) CASE2



(c) CASE3



(d) CASE4

図-13 最終位置での落石速度

回転エネルギーはともに小さくなる。

落石対策便覧によると、B地点、C地点からの落石の運動エネルギーはそれぞれ363kJ、240kJと計算される。回転エネルギーは、運動エネルギーの10%とされるため、それぞれ36.3kJ、24.0kJと計算される。解析結果と比較すると、運動エネルギーは、どの条件においても全ての値を下回った。一方で、回転エネルギーは、解析結果の平均値は落石対策便覧による予測値より大きくなった

が、解析結果の最頻値はほぼ一致した。また、回転エネルギーは運動エネルギーの10%とはならず、15.1%から24.0%となった。

5. 結論

本論文では、運動解析シミュレーションを様々なパラメータ条件で適用し、山岳道路における落石の危険度評価について検討した。本研究により得られた知見は下記の通りまとめられる。

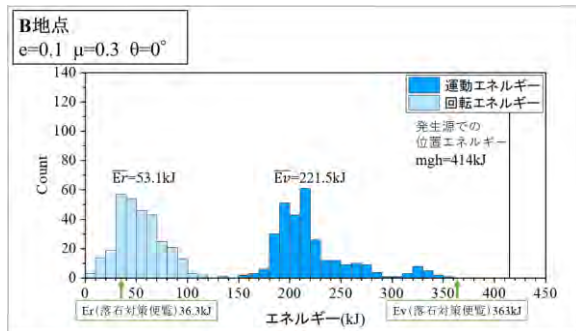
- 1) A地点からの落石は谷に74.1%，ロックシェッドに25.6%，道路に0.3%落下する。
- 2) B地点からの落石は谷に75.4%，ロックシェッドに24.1%，道路に0.5%落下する。
- 3) C地点からの落石は谷に15.3%，ロックシェッドに82.9%，道路に1.9%落下する。
- 4) 落下高さの大きい落石は、ロックシェッドの上空を通過し谷に落下する確率が高く、落下高さの小さい落石は、ロックシェッド上に落下する確率が高いことが明らかとなった。
- 5) 反発係数が落石運動に与える影響を具体的に明らかにした。

謝辞

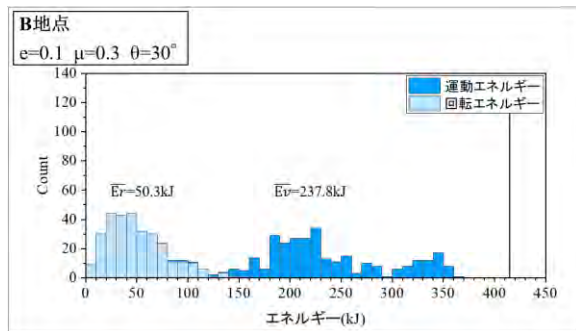
本論文作成に当たっては、公益財団法人石川県林業公社の皆様から多大なご協力をいただいた。また、現場斜面状況については、株式会社ホクコク治水から、ロックシェッドの状況・設計については東京コンサルタンツ株式会社からご協力をいただいた。ここに記して深謝申し上げる。

参考文献

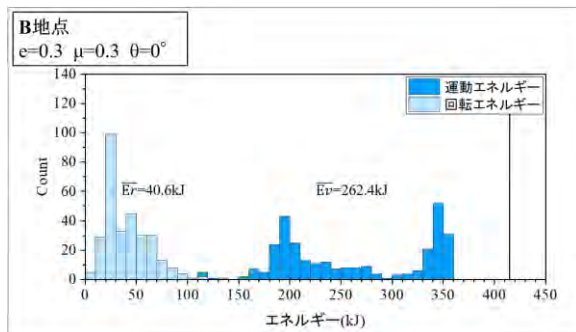
- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000。
- 2) 松尾修：落石対策 1.講座を始めるにあたって，土と基礎，Vol.50，No.1，pp.39-40，2002。
- 3) 松尾修，池田憲二，村石尚：落石対策 2.落石対策の概要，土と基礎，Vol.50，No.1，pp.41-44，2002。
- 4) 榎谷浩，福田尚晃，堤下克彦：斜面上の落石の運動解析手法の開発，構造工学論文集，Vol.43A，pp.1589-1596，1997。
- 5) 小村辰彦，村西隆之，西澤謙二，榎谷浩：落石シミュレーション解析における落石の斜面衝突現象，構造工学論文集，Vol.47A，pp.1613-1620，2001。
- 6) 上條明洋，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。



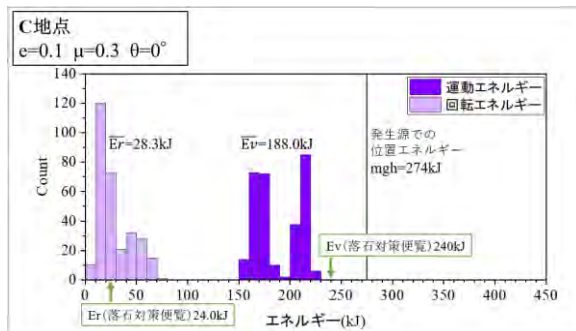
(a) CASE1



(b) CASE2



(c) CASE3



(d) CASE4

図-14 最終位置での落石エネルギー