

■長大斜面における落石運動エネルギー推定に必要な等価摩擦係数の提案

A proposal of equivalent friction coefficient to estimate kinetic energy of rock fall on large slope

勘田益男* Masuo KANDA / 有限会社斜面防災研究所 Institute of Slope Stability

荒井克彦 Katsuhiko ARAI / 福井大学大学院 University of Fukui

キーワード：落石，シミュレーション，運動エネルギー，等価摩擦係数
Key words : rock fall, simulation, kinetic energy, equivalent friction coefficient

1. まえがき

落石対策における落石運動エネルギーの推定には，落石対策便覧¹⁾による推定式（以下では便覧式と称する）が実務で広く用いられている。便覧式は次式で与えられる。

$$E = (1 + \beta)(1 - \mu / \tan \theta) W \cdot H \dots\dots\dots(1)$$

ここで， E ：落石の運動エネルギー， β ：回転エネルギー係数（0.1）， μ ：等価摩擦係数（表-1 参照）， θ ：斜面勾配， W ：落石重量（kN）， H ：落石の落下高さ（m）である。便覧式は図-1 に示す既往の落石実験データに基づいているため，落下高さや落石重量が既往の落石実験を大きく上回る場合には，精度に問題がある。落石対策便覧では，「落下高さが40mを超えると落下速度は一定値（終端速度）に達する傾向があるが，終端速度に及ぼす斜面や落石の特性の影響についてはよくわかっていない」とされている。また，同便覧では，個々の現場状況に応じた落石運動シミュレーション解析（以下では落石シミュレーションと称する）を実施することが望ましいとされている。

表-2 は落下高さが40m以上の長大斜面を対象として，

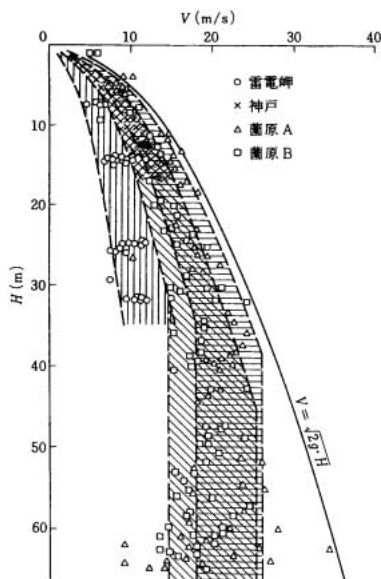


図-1 落石高さ と 落石速度の関係¹⁾

著者が行った落石シミュレーションと便覧式による運動エネルギーを比較した例²⁾を示したものである。表-2 から，40m以上の長大斜面を対象として便覧式を適用する場合，実際の落下高さを代入すると，運動エネルギーが落石シミュレーションより大きく評価され，落下高さとして上限の40mを代入すると，運動エネルギーが小さく評価されることが分かる。この原因は，便覧式では落下高さにかかわらず，一定の等価摩擦係数を用いることによると思われる。したがって，長大斜面では落石シミュレーションを行うことが適切であるが，費用や時間の制約から実施できない場合も多い。

本論文では，40m～200mの長大な崖錐斜面を対象として，著者が過去に実施した落石シミュレーションによる落石運動エネルギーから，便覧式における等価摩擦係数 μ を逆算して，その傾向を把握する。この結果を用いて，等価摩擦係数を実際に近い値に設定することによ

表-1 斜面の種類と等価摩擦係数 μ の値¹⁾

区分	落石および斜面の特性	設計に用いる μ	実験から得られる μ の範囲
A	硬岩，丸状；凹凸小，立木なし	0.05	0～0.1
B	軟岩，角状～丸状；凹凸中～大，立木なし	0.15	0.11～0.2
C	土砂・崖錐，丸状～角；凹凸小～中，立木なし	0.25	0.21～0.3
D	崖錐・巨礫混じり崖錐，角状；凹凸大～中，立木あり～なし	0.35	0.31～

表-2 一般国道8号親不知地区のシミュレーション結果と便覧式との比較²⁾

地点	落石重量 (kN)	落下高さ (m)	平均斜面勾配 (θ)	シミュレーション結果		便覧式		
				運動エネルギー (kJ)	等価摩擦係数 (μ 逆算値)	運動エネルギー (kJ)	等価摩擦係数 (μ)	
勝山8号	A沢	10	153	47	640	0.62	1031	0.35
	B沢	10	168	46	440	0.76	1112	0.35
	C沢	10	159	49	540	0.76	1106	0.35
勝山9号	10	223	42	680	0.63	1363	0.35	
勝山10号	10	223	42	1180	0.42	1363	0.35	
勝山11号	10	226	43	430	0.75	1412	0.35	
向山2号 ^{注1)}	10	63	53	400	0.48	-	-	
	50	63	53	2010	0.48	-	-	
浄土1号 ^{注2)}	17	30	41	400	0.19	420	0.15	
浄土4号	120	89	40	5260	0.43	6379	0.35	
三段滝	A沢	5	148	42	320	0.51	452	0.35
	B沢	5	197	40	260	0.62	574	0.35
三段滝7号	5	83	43	190	0.51	259	0.35	
三段滝10号	10	169	44	730	0.55	1077	0.35	
	30	75	47	860	0.66	1516	0.35	
三段滝14号	10	120	45	160	0.87	780	0.35	

注1：上部岩盤急崖，下部は崖錐の緩斜面。注2：岩盤露出部分が多く地形的凹凸も多い

* 連絡著者 / corresponding author
〒923-0861 石川県小松市沖町2番地
No 2, Oki-machi, Komatsu-city, Ishikawa

り, 40m以上の落下高さを有する長大斜面に対して便覧式を適切に利用する方法を提案する。

2. 落石シミュレーションの概要

2.1 シミュレーション手法

落石シミュレーションには, 確率論的質点系解析法³⁾と個別要素法等を用いる確定論的手法がある。前者は, 過去の落石実験データより得られた斜面の凹凸や地盤状態及び落石の不規則な形状などの影響を表わす係数を用いて確率論的に運動形態を再現する。後者は, 斜面と落石の形状や特性を与え, 不連続変形法や個別要素法を適用する方法であり, 形状が大きく影響する岩盤崩壊に用いられるケースが多い。ここでは, 実績が多くて信頼性の高い確率論的質点系解析法を対象とする。

確率論的質点系解析法による落石シミュレーションでは, 以下のことが可能である。a) 例を図-2に示すように, 防護する衝突面AやBにおける運動エネルギー(衝突速度)や衝突する位置(高さ)を求めることができる。b) 落石重量が大きい場合, 図-3に示すように斜面中に緩衝施設を設けて落石運動エネルギーを減ずる方法も用いられるが, この場合, 衝突する落石運動エネルギーから緩衝施設の吸収エネルギー分を減じて, 落石の運動が継続するか, あるいは停止するか判断も可能である。c) 断面上の任意の位置で, 任意の傾斜, 任意の落石エネルギー減衰を考慮できる。落石エネルギー減衰を考慮する断面上の範囲を指定できる。d) 断面上の任意の位

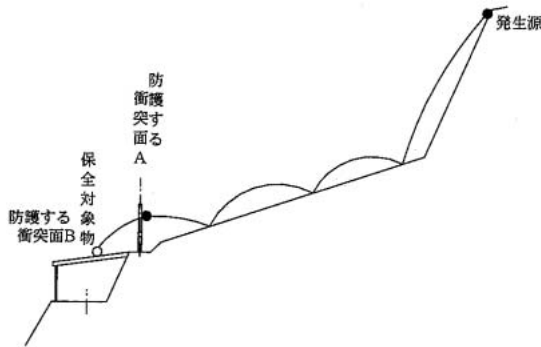


図-2 斜面を落下する落石の運動

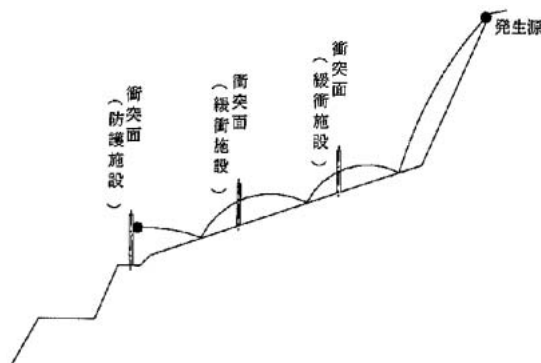


図-3 緩衝施設のある斜面を落下する落石の運動

置で, その面を通過する落石の位置, 水平となす角度, 落石の速度, 運動形態などを出力できる。e) シミュレーションの試行回数を指定し, その軌跡を作画でき, これを用いて落石対策工設置位置の検討ができる。落石の停止位置を出力でき, 落石の到達範囲を確率的に検討できる。

2.2 落石の運動形態とシミュレーションに必要なパラメータ

表-3は, 落石の運動形態をa) すべり運動, b) 回転運動, c) 跳躍運動, d) 衝突運動に分類し, 運動形態ごとの要因と, その要因を表現するためのパラメータを求める方法を示す。

表-3に示す運動形態ごとの基礎運動方程式は以下のとおりである。

a) すべり運動

図-4(a)に示すように斜面勾配を θ , 摩擦係数を μ' とする。初速度を V_0 として, 斜面に沿った t 秒後のすべり速度 V , および t 秒間に斜面に沿ってすべる距離 S は次式で与えられる。

$$V = V_0 + gt(\sin \theta - \mu' \cos \theta) \dots\dots\dots(2)$$

$$S = V_0 t + \frac{1}{2} g t^2 (\sin \theta - \mu' \cos \theta) \dots\dots\dots(3)$$

斜面上を落石がすべり落ちる場合, 落石はすべり摩擦以外にも, 草や樹木, 斜面上の微少な凹凸などからの抵抗を受ける。それら全ての抵抗は, 運動速度に比例すると仮定する。この粘性抵抗係数を C_k とすれば, 式(2)および(3)は次式となる。

$$V = \frac{a}{C_k} + \left(V_0 - \frac{a}{C_k} \right) e^{-C_k t} \dots\dots\dots(4)$$

$$S = \frac{a}{C_k} t + \frac{1}{C_k} \left(V_0 - \frac{a}{C_k} \right) (1 - e^{-C_k t}) \dots\dots\dots(5)$$

上式中の a は斜面方向の加速度であり, 次式で表される。

$$a = g(\sin \theta - \mu' \cos \theta) \dots\dots\dots(6)$$

ここで, g は重力の加速度である。また, すべり始める

表-3 落石の運動形態の分類とシミュレーションに必要なパラメータ³⁾

運動形態	要因	パラメータ	パラメータの算出法
すべり運動	斜面の状況 斜面の状況(斜面の凹凸, 地盤へのめりこみ, 植生)	摩擦係数(μ') 粘性抵抗係数(C_k)	実験データ(乱数) 実験実測値に基づくシミュレーションによる逆算
回転運動	落石の形状 斜面の状況(斜面の凹凸, 地盤へのめりこみ, 植生)	回転半径(k) 粘性抵抗係数(C_k)	理論 実験実測値に基づくシミュレーションによる逆算
跳躍運動	空気抵抗	空気抵抗係数(α_d)	理論
衝突運動	落下の速度	法線反発係数(e) 接線反発係数(ρ)	実験データ(乱数)
すべり運動から回転運動への移行	落下の加速度	落下の加速度(a)	理論
回転運動から跳躍運動への移行	落石の形状 斜面の状況	限界速度(V_0)	実験データ(乱数)

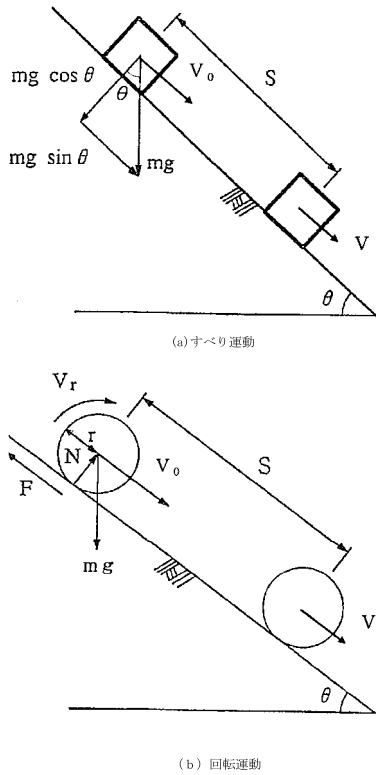


図-4 落石のすべり運動・回転運動

条件は次式で表される。

$$\tan \theta > \mu' \dots\dots\dots(7)$$

b) 回転運動

図-4(b)に示すように、質量 m 、半径 r の一様な球状の落石がすべることなく、回転しながら斜面を落下する場合の斜面に沿った t 秒後の移動速度 V 、および t 秒間に斜面に沿って進む距離 S は次式で与えられる。ここで、

F は落石と斜面の摩擦力、 N は落石の斜面反力である。

$$V = V_0 + \frac{r^2}{k^2 + r^2} g t \sin \theta \dots\dots\dots(8)$$

$$S = V_0 t + \frac{r^2}{2(k^2 + r^2)} g t^2 \sin \theta \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 V_0 は初速度、 k は球の回転半径である。すべり運動の場合と同様に粘性抵抗係数を考慮すると、速度および距離は式(4)、(5)と同じ式で与えられる。ただし、式中の加速度は次式で与えられる。

$$a = \frac{r^2}{k^2 + r^2} g \sin \theta \dots\dots\dots(10)$$

すべらずに、回転しながら落下する条件は次式で与えられる。

$$\frac{r^2}{(k^2 + r^2)} \tan \theta \leq \mu \dots\dots\dots(11)$$

c) 跳躍運動

図-5に示すように、斜面上のある点 (x_0, y_0) から、水平となす角 β で初速度 V_0 で飛び出す物体の落下点の座標 (x_d, y_d) は次式で与えられる。

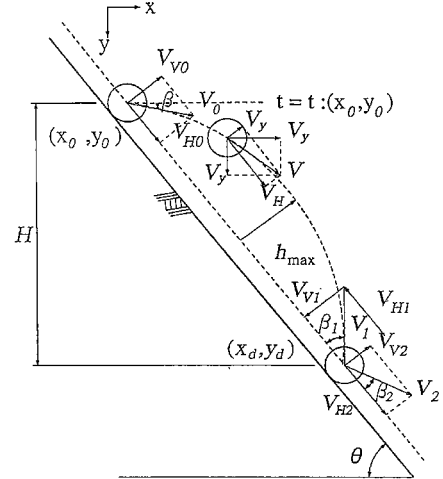


図-5 落石の跳躍運動・衝突運動

$$x_d = x_0 + \frac{2V_0^2 \cos^2 \beta}{g} (\tan \theta - \tan \beta),$$

$$y_d = y_0 + (x_d - x_0) \tan \theta \dots\dots\dots(12)$$

また、空気抵抗係数 α_k を考慮した場合の t 秒後の x 方向、 y 方向の速度 (V_x, V_y) および位置座標 (x, y) は次式で与えられる。

$$V_x = V_0 \cos \beta e^{-\alpha_k t}, \quad V_y = \frac{g}{\alpha_k} + \left(V_0 \sin \beta - \frac{g}{\alpha_k} \right) e^{-\alpha_k t} \dots\dots(13)$$

$$x = x_0 + V_0 \cos \beta \frac{1 - e^{-\alpha_k t}}{\alpha_k},$$

$$y = y_0 + \frac{gt}{\alpha_k} + \left(V_0 \sin \beta - \frac{g}{\alpha_k} \right) \frac{1 - e^{-\alpha_k t}}{\alpha_k} \dots\dots\dots(14)$$

跳躍開始から t 秒後の斜面垂直方向の速度 V_V は次式で与えられる。

$$V_V = V_{V0} - gt \cos \theta \dots\dots\dots(15)$$

最大跳躍量は $V_V = 0$ とおくことにより求められる。ここで、 V_{V0} は V_0 の斜面直角方向の成分である。

回転運動から跳躍運動に移行する限界速度 V_{or} は、実験データから決定される。

$$V > V_{or} \dots\dots\dots(16)$$

d) 衝突運動

図-5に示すように、斜面への衝突前の入射角度を β_1 、入射速度を V_1 、衝突後の反射角を β_2 、反射速度を V_2 とすると、衝突後の速度の斜面に対して鉛直方向および斜面方向の速度成分 V_{V2} 、および V_{H2} は次式で与えられる。

$$V_{V2} = e V_1 \sin \beta_1, \quad V_{H2} = \rho V_1 \cos \beta_1 \dots\dots\dots(17)$$

ここで、 e は速度の斜面直角方向の法線反発係数、 ρ は速度の斜面方向成分の接線反発係数である。落石の衝突前後の運動エネルギーの比は法線反発係数および接線反発係数を用いて次式で与えられる。

$$\gamma = \rho^2 \cos^2 \beta_1 + e^2 \sin^2 \beta_1 \dots\dots\dots(18)$$

以上, 表-3 に示したパラメータの中で, 理論的に求められるものは基礎運動方程式に関連して述べた。理論的に求められないパラメータは既往の落石実験に基づいて求める。これらのパラメータを求めた結果を表-4 にまとめて示す。

2.3 その他の必要なデータ

落石シミュレーションは上述のパラメータの他に次のデータを必要とする。①落石径または重量とその位置, ②落下が予想される経路の縦断面図, ③斜面の岩質・土質, 植生。落石径は回転運動の場合に必要な。落石重量は, 求められた速度から運動エネルギーを求めるために必要であり, その位置は落下するスタート位置として重要である。また, 落石重量によって異なるパラメータ(反発係数)もある。落下経路の縦断面図は, 斜面勾配やその変化によって落石がたどる軌跡を再現するうえで必要となる。また, 斜面の岩質・土質や植生によって, 摩擦係数, 粘性抵抗係数, 反発係数, 限界速度の数値が決定される。

2.4 落石シミュレーションの手順

落石の運動形態が様々な条件で変化することを考慮して, 落石シミュレーションを図-6 に示すフローチャートに従って行う。運動形態の変化の基本的な考え方は以下のとおりである。

落石がある斜面上を回転運動している場合, そのまま回転運動を続けるか, すべり運動に移行するかを式(11)で判定する。跳躍運動への移行は式(16)で判定する。すべての運動形態に対し, 速度が0になった場合, 落下は停止し計算を終了する。

落石がすべり運動している場合は, すべり運動を続けるか, 回転運動に移行するかを式(11)で判定する。法線反発係数 e を $0 < e < 1$ の範囲で取り扱っているため, 落石が跳躍運動を一度始めると, 他の運動形態に移行しなくなる。そこで, 斜面衝突後の斜面方向の跳躍距離が落石直径の10分の1以下となった場合には, 回転運動かすべり運動に移行させる。

落石シミュレーションにおける主なパラメータは, 信頼区間95%をもつ正規乱数を用いている。参考文献⁽⁴⁾の

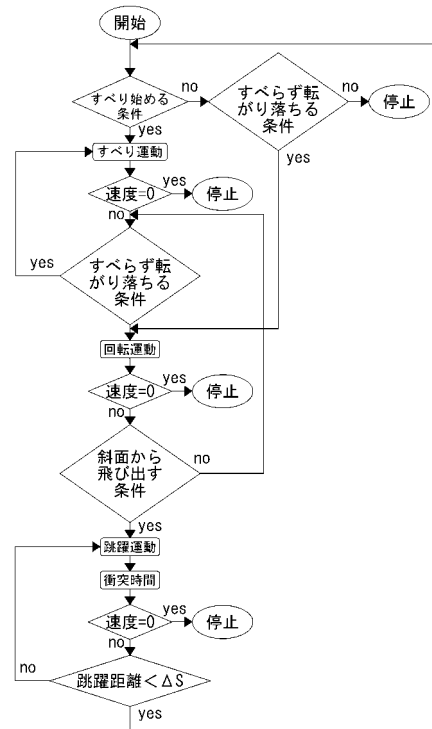


図-6 落石シミュレーションの手順³⁾

検討結果に従い, 落石シミュレーションの試行回数は300回, 採用値は平均値 + 2 × 標準偏差の値をとる。落石シミュレーションの入力データ例を図-7 に示す。

3. 落石シミュレーションからの等価摩擦係数の推定

3.1 落石シミュレーションの信頼性

富山県の立山有料道路における長大斜面で実施された大規模な落石実験結果と落石シミュレーション結果の比較が報告されている⁵⁾。発破で落下させた多数の落石(総数219個, 最大400kN)の実際の停止位置が, 図-8 に示すように落石シミュレーションで求めた停止位置と極めて近い結果となり, 落石の運動を精度よく表現したことの一つの証明となる。この他, 落石シミュレーションは極めて多数の実際斜面の落石対策に適用されており, 信頼性が高いと考えられている。したがって, 落石シミュレーションによる長大斜面での落石運動エネルギーの推定も信頼性があると考えられ, その結果に基づく等価摩擦係数の逆算も実際的な意味があると言える。

3.2 落石シミュレーションからの等価摩擦係数の逆算

著者が過去に行った多数の現場での落石シミュレーションから求まる運動エネルギーから, 式(1)を用いて, 便覧式における等価摩擦係数 μ を逆算した結果を表-5 に示す。対象とした現場は以下の条件で選択した。1) 落下高さは40m以上, 2) 大部分が崖錐(土砂)からなる斜面, 3) 落石重量には制限を設けない, 4) 試行回数300回, 採用値は「平均値 + 2 × 標準偏差」を用いているケース, 5) 発生源から照査位置(山麓部)への到達数が極端に少ないケースは対象としない。

表-4 既往の落石実験に基づいて求めたパラメータ

()は標準偏差を示す

名称	数値	落石重量条件(kN)	斜面条件	データの出典
摩擦係数	平均値 0.69(0.18)	なし	岩盤	蘆原A斜面(日本道路公団)の実験
	平均値 0.48(0.06)	なし	崖錐	蘆原B斜面(日本道路公団)の実験
粘性抵抗係数	0~1.2	なし	植生や細部の凹凸	蘆原A・B斜面, 岩殿(日本道路公団), 甲田(金沢大学)の実験
法線反発係数	平均値 0.54(0.28)	$W < 10$	岩盤	蘆原A斜面(日本道路公団)の実験
	平均値 0.58(0.26)	$W < 10$	崖錐	蘆原B斜面(日本道路公団)の実験
	平均値 0.275(0.28)	$W \geq 10$	岩盤	立山有料道路(富山県)の実験
	平均値 0.275(0.22)	$W \geq 10$	崖錐	甲田(金沢大学)の実験
接線反発係数	平均値 0.58(0.25)	$W < 10$	岩盤	蘆原A斜面(日本道路公団)の実験
	平均値 0.63(0.18)	$W < 10$	崖錐	蘆原B斜面(日本道路公団)の実験
	平均値 0.78(0.25)	$W \geq 10$	岩盤	立山有料道路(富山県)の実験
	平均値 0.78(0.18)	$W \geq 10$	崖錐	立山有料道路(富山県)の実験
限界速度	平均値 4.69(2.02)	なし	岩盤	蘆原A斜面(日本道路公団)の実験
	平均値 8.5(2.5)	なし	崖錐	蘆原B斜面(日本道路公団)の実験

表-5中に示す「到達率」は、図-7に示すように、発生源から照査位置（山麓部）まで止まらずに到達した割合である。「崖錐の占める割合」は、発生源から照査位置（山麓部）までの斜面表面の土質を崖錐と岩盤に区分したときの崖錐の割合である。

3.3 逆算した等価摩擦係数の傾向

図-9に、逆算した等価摩擦係数と平均斜面勾配の関係を示す。斜面勾配について顕著な傾向はみられないが、45°以上の急勾配斜面では等価摩擦係数が比較的小さく、緩斜面のように減衰が顕著ではない。図-10に、逆算した等価摩擦係数と落石重量の関係を示す。斜面勾配が45°以上のデータ数がやや少ないが、落石重量によ

る顕著な傾向は認められないようである。後述するように、図-10の下限として等価摩擦係数を設定するが、下限を設定するためのデータとしては、45°以上の場合も、ある程度のデータ数があると考えられる。図-11に、逆算した等価摩擦係数と落下高さの関係を示す。落下高さが大きく、勾配45°程度以下の緩斜面では、等価摩擦係数が落下高さに応じて増加する傾向がある。図-9と同じであるが、斜面勾配45°を境として、かなり明確な差が認められる。図-11中の実線および破線は、以上のことを考慮して設計で用いる等価摩擦係数を安全側に小さく提案するものである。

3.4 長大斜面における落石運動エネルギー推定に必要な等価摩擦係数の提案

以上の結果を表-6にまとめる。表-1に加えて、表-6の等価摩擦係数を用いて、40m以上の落下高さの斜

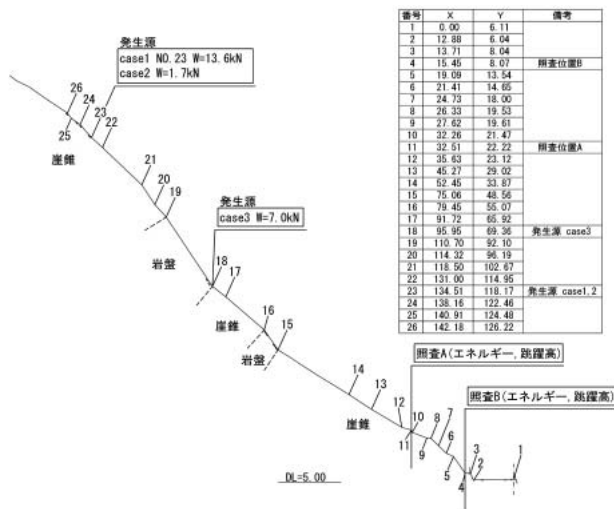


図-7 落石シミュレーションの入力例

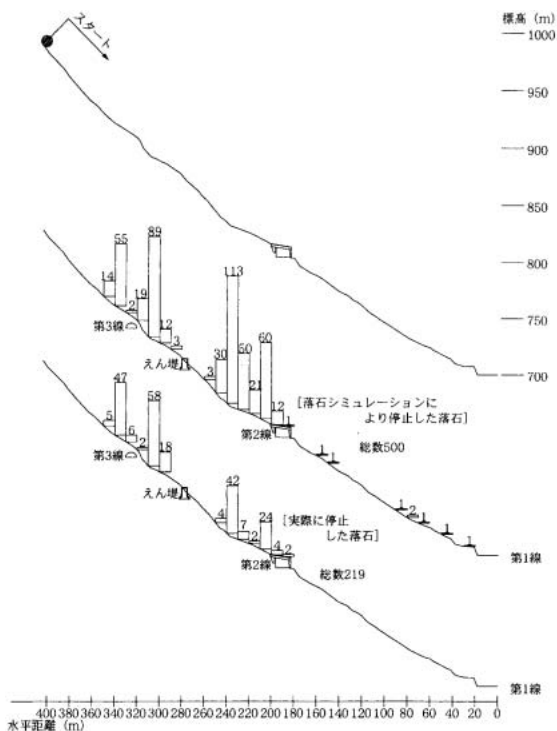


図-8 立山有料道路における落石実験とシミュレーションの度数分布⁵⁾

表-5 (a) 過去に行ったシミュレーションの結果集計 (その1)

地点	落石重量 (kN)	落下高さ (m)	平均斜面勾配 (θ)	運動エネルギー (kJ)	換算等価摩擦係数	到達率 (%)	崖錐の占める割合
石川A	21.0	49.5	36.7	217.1	0.60	199/300	100%
石川B	2.0	42.4	39.3	35.4	0.51	290/300	100%
福井A	66.3	159.0	39.7	1419.3	0.73	300/300	100%
福井B	37.0	159.0	39.7	592.1	0.75	300/300	100%
福井C	13.6	96.0	43.2	105.9	0.87	292/300	80%
福井D	13.6	110.1	42.8	213.4	0.81	180/300	80%
福井E	1.7	96.0	43.2	31.3	0.78	218/300	80%
福井F	1.7	110.1	42.8	37.3	0.76	145/300	80%
福井G	7.0	61.3	37.3	74.2	0.64	240/300	90%
福井H	7.0	47.1	36.6	28.1	0.69	101/300	90%
富山A	20.0	140.3	41.5	356.6	0.78	300/300	100%
富山B	10.0	119.2	46.2	371.5	0.75	300/300	60%
富山C	10.0	133.4	44.2	594.4	0.58	300/300	100%
富山D	10.0	159.2	43.8	662.3	0.60	300/300	60%
富山E	10.0	130.5	46.9	832.3	0.45	293/300	100%
富山F	15.0	130.5	46.9	1270.4	0.44	297/300	100%
富山G	20.0	130.5	46.9	1741.0	0.42	298/300	100%
富山H	30.0	130.5	46.9	2359.5	0.48	291/300	100%
富山I	10.0	110.6	42.3	308.8	0.68	244/300	100%
富山J	15.0	110.6	42.3	465.8	0.68	230/300	100%
富山K	20.0	110.6	42.3	736.3	0.63	240/300	100%
富山L	30.0	110.6	42.3	1307.4	0.58	112/300	100%
富山M	10.0	42.1	43.0	187.1	0.56	299/300	100%
富山N	30.0	42.1	43.0	604.3	0.53	300/300	100%

表-5 (b) 過去に行ったシミュレーションの結果集計 (その2)

地点	落石重量 (kN)	落下高さ (m)	平均斜面勾配 (θ)	運動エネルギー (kJ)	換算等価摩擦係数	到達率 (%)	崖錐の占める割合
新潟A	55.0	135.3	39.6	258.0	0.80	236/300	100%
新潟B	1.7	42.1	46.9	24.8	0.73	300/300	100%
新潟C	468.0	193.3	36.1	13004.1	0.63	275/300	100%
新潟D	109.0	41.4	43.0	2128.4	0.53	300/300	90%
新潟E	5.0	84.8	40.5	1419.3	0.73	281/300	90%
新潟F	10.0	84.8	40.5	197.3	0.49	299/300	90%
三重A	5.1	45.5	44.2	87.0	0.64	283/300	80%
三重B	5.1	53.5	44.7	43.8	0.61	283/300	80%
三重C	5.1	58.6	45.0	159.1	0.52	283/300	80%
三重D	17.85	44.2	44.2	315.4	0.62	292/300	80%
三重E	17.85	52.2	44.7	447.3	0.56	292/300	80%
三重F	11.0	42.8	40.6	150.6	0.61	300/300	80%
三重G	41.0	49.2	42.3	1019.7	0.49	300/300	80%
三重H	41.0	57.6	41.3	858.9	0.59	300/300	80%

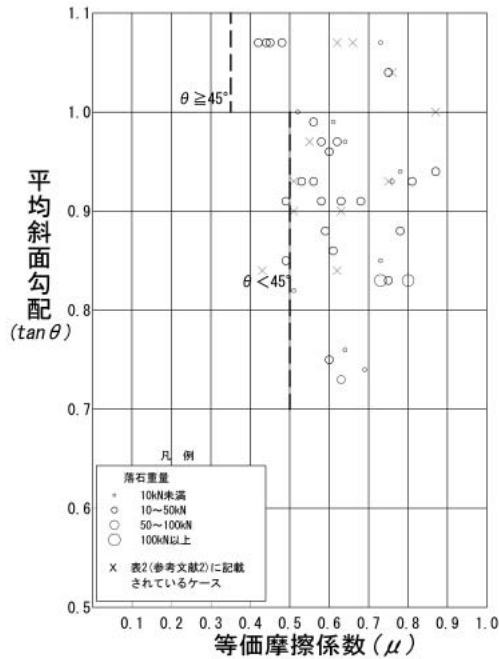


図-9 平均斜面勾配と等価摩擦係数の関係

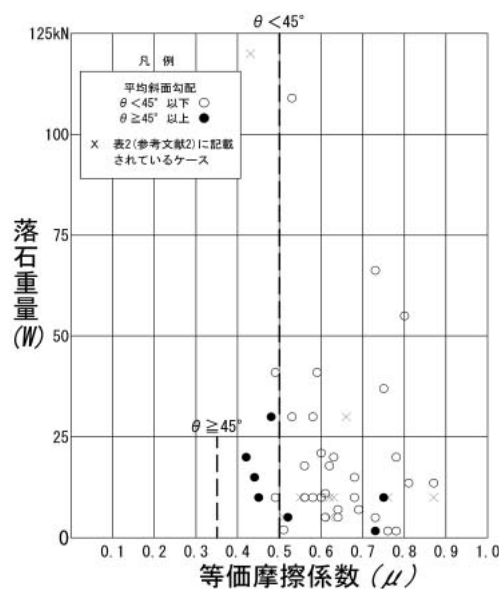


図-10 落石重量と等価摩擦係数の関係

面に便覧式を適用することを提案する。表-6では、斜面勾配45°でボーダーラインを設け、45°未満では落下高さ50mで等価摩擦係数を0.5とした。45°以上では落下高さ50mで等価摩擦係数0.35を目安とする。45°以上のデータ数がやや少ないので、今後さらにデータを蓄積する必要がある。また、岩盤主体の急勾配斜面や、多段切土斜面のように形状の変化が大きい場合は、跳躍運動が主体となり、表-6のように減衰する傾向とはならない可能性が高いので表-6の適用が困難と考えられる。

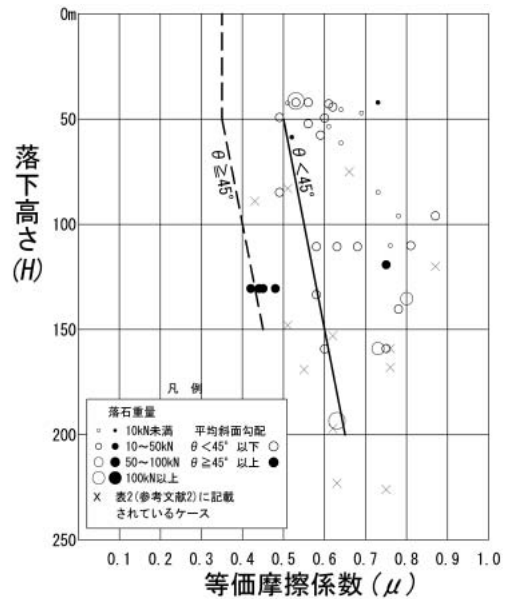


図-11 落下高さと等価摩擦係数の関係

表-6 落下高さ40m以上で用いる等価摩擦係数(崖錐斜面を対象)

平均斜面勾配(θ)	落下高さ(H)	等価摩擦係数(μ)	等価摩擦係数の提案式
45° 未満	≤50m	0.50	$\mu = 0.45 + 0.001 \cdot H$
	≤100m	0.55	
	≤150m	0.60	
	≤200m	0.65	
45° 以上	≤50m	0.35	$\mu = 0.30 + 0.001 \cdot H$
	≤150m	0.45	

4. あとがき

著者が過去に実施した多数の落石シミュレーション結果を用いて、落下高さ40m以上の長大斜面での便覧式を適切に適用するための等価摩擦係数を求めた。この等価摩擦係数を用いることで、長大斜面についても簡便に落石対策のための運動エネルギーを推定することが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会 (2000): 落石対策便覧, 日本道路協会, 422p.
- 2) 土木学会 (2004): 岩盤崩壊の考え方-現状と将来展望-[実務者の手引き], 土木学会, CD版.
- 3) 勘田益男 (2002): 落石対策工設計マニュアル, 理工図書, 210 p.
- 4) 日本道路協会 (2002): 落石対策便覧に関する参考資料-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, 422 p.
- 5) 土肥行雄・清水晴彦・佐伯滋・吉田博・四藤勝彦 (1993): 立山有料道路における巨岩処理と落石エネルギー評価, 土木学会第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp. 140-145.
(原稿受付2008年10月31日, 原稿受理2009年1月15日)