

(25) 斜面上を落下する落石のエネルギー評価法

(株) エイ・シー・デイ ○ 勘田益男
 東京コンサルタンツ (株) 鈴木俊裕
 (株) 第一コンサルタンツ 右城 猛
 (株) エイ・シー・デイ 吉田 博

1. はじめに

平成2年7月、福井県越前海岸・一般国道304号における岩盤崩壊によって、ロックシェッドが倒壊し、多数の死者を出す事故が発生した。この後、全国一斉に道路防災点検が実施され、防災対策が積極的に進められ、防災に対する意識も高まってきている。

斜面防災対策工はその目的に応じて、ロックシェッド、ストーンガード、スノーシェッド、雪崩予防柵等の多種にわたるが、設計荷重や設計手法は十分に確立されているとは言いがたい。

特に、落石対策工は設計荷重や設計手法が経験的に決められている場合が多いため、落石の運動特性を精度よく推定し、現地に適合した設計を行なう必要がある。これまで数々の実験や研究において、落石の運動形態・最終落下位置・落下速度などを求める試みが行なわれているが、落石の運動特性を決定づけるファクターは明確ではない。本研究は、著者らが開発したモンテカルロ方式落石シミュレーション解析によってこれらを検討し、落石対策工の合理的な設計の一助となることを目的としたものである。

2. 落石の運動形態と要素

落石の運動形態は、1. 滑り運動、2. 回転運動、3. 跳躍運動、4. 衝突運動に分けられ、これらの運動形態の相互の移行を繰り返しながら落下すると考えられる。各運動形態の詳細説明は紙面の関係で省略するが、落石の軌跡および速度に係わるファクターを表—1に示す。

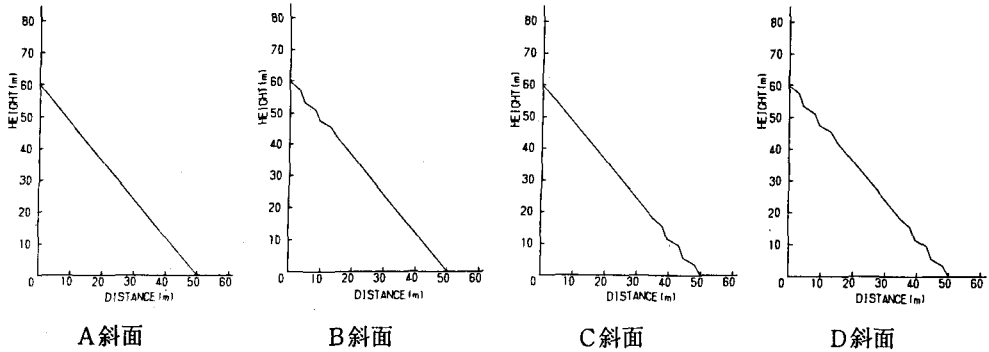
表—1 落石の軌跡および速度に係わるファクター

運動形態	要因	要素	算出法
滑り運動	斜面の状況	摩擦係数 (μ)	実験データ (乱数)
	斜面の状況 (斜面の凹凸、地盤へのめりこみ、植生)	抵抗係数 (C_k)	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	慣性半径 (k)	理論
	斜面の状況 (斜面の凹凸、地盤へのめりこみ、植生)	抵抗係数 (C_k)	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 (a_k)	理論
衝突運動	落下の速度	反発係数 (e) 減衰係数 (p)	実験データ (乱数)
滑り運動↔回転運動	落下の加速度	落下の加速度 (a)	理論
回転運動↔跳躍運動	落石の形状 斜面の状況	限界速度 (V_{cr})	実験データ (乱数)

表一より、落石の軌跡および速度に係わるファクターとして、1. 抵抗係数 (C_k)、2. 反発係数 (e)、3. 減衰係数 (p) に着目し、これらの数値の大小による落石の軌跡および落下速度の変化を検証する。

3. 落石のシミュレーション

落石シミュレーションの対象斜面は、岩斜面、平均傾斜角 50° とし、落石条件は落下高さ $H=60\text{ m}$ 、落石重量を $W=1.0\text{ tf}$ とした。ただし、対象斜面は4斜面を設定し、それぞれ地形的変化に配慮した。このうちD斜面が自然斜面に近いと言える。



図一 対象斜面

落石シミュレーションを行なう各斜面および各係数の組合せを表二に示す。

表二 落石シミュレーションのケース一覧表

落石重量, 落下高	W=1.0 tf, H=50 m															
	A				B				C				D			
斜面	A1-1	A1-2	A2-1	A2-2	B1-1	B1-2	B2-1	B2-2	C1-1	C1-2	C2-1	C2-2	D1-1	D1-2	D2-1	D2-2
摩擦係数 (μ)	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
抵抗係数 (C_k)	0.1	0.1	0.4	0.4	0.1	0.1	0.4	0.4	0.1	0.1	0.4	0.4	0.1	0.1	0.4	0.4
反発係数 (e)	0.55	0.275	0.55	0.275	0.55	0.275	0.55	0.275	0.55	0.275	0.55	0.275	0.55	0.275	0.55	0.275
	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
減衰係数 (p)	0.58	0.78	0.58	0.78	0.58	0.78	0.58	0.78	0.58	0.78	0.58	0.78	0.58	0.78	0.58	0.78
	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
限界速度 (V_{cr})	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69
	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02	2.02

※摩擦係数, 反発係数, 減衰係数, 限界速度の上段は平均値, 下段は標準偏差を示す。

著者らは各係数を各種実験データより検討し、表三に示す条件において使用している。

表一3 各係数の使用条件

係数名	数値	条 件
摩擦係数	0.69	岩斜面
	0.18	
抵抗係数	0.1	斜面に凹凸が比較的多く、立木が少ない。
	0.4	斜面に凹凸が比較的少なく、立木が少ない。
反発係数	0.55	落石重量が比較的小さい場合。
	0.28	
	0.275	落石重量が比較的大きい場合。
減衰係数	0.58	落石重量が比較的小さい場合。
	0.25	
	0.78	落石重量が比較的大きい場合。
限界係数	4.69	岩斜面
	2.02	

以上16ケースについて各250回、計4000回の落石シミュレーションを行った。

4. 落石シミュレーション結果

落石シミュレーションによる落下速度より落石対策便覧（日本道路協会）に記述されている残存係数（ α ）を求め、各ケースごとに平均値、標準偏差ヒストグラフ、変動係数を作成した。

$$V = \alpha \cdot \sqrt{2gH}$$

ここに、

α ：残存係数

V ：落石の速度 (m/s)

H ：落石高さ (m)

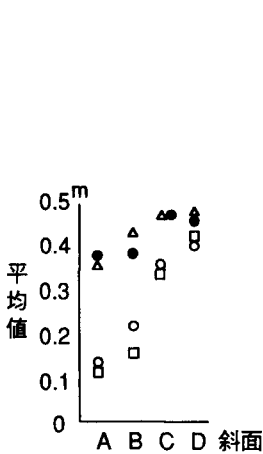
※摩擦係数、反発係数、減衰係数、限界速度の上段は平均値、下段は標準偏差を示す。

4.1 残存係数

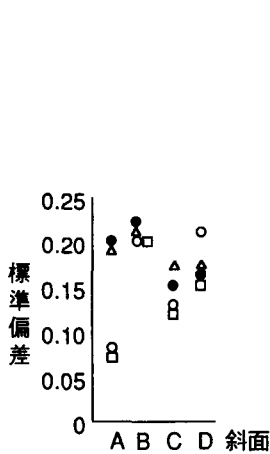
残存係数は落下速度や設計に用いる衝撃力の指標となり、残存係数が大きくなれば落下速度や衝撃力も大きい値となる。表一4は、シミュレーションより得られる残存係数の平均値、標準偏差、変動係数を示す。また、各斜面ごとのそれらの値の比較を図一2～4に示す。

表一4 各ケースごとの残存係数の平均値と標準偏差、変動係数

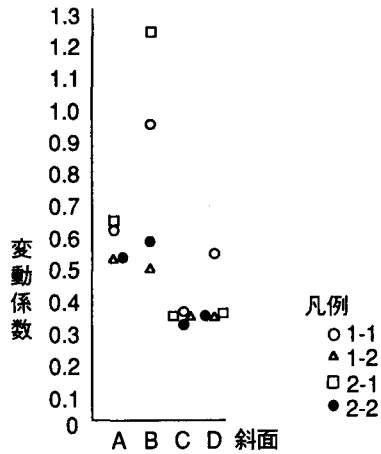
	AI-1	AI-2	A2-1	A2-2	BI-1	BI-2	B2-1	B2-2	CI-1	CI-2	C2-1	C2-2	DI-1	DI-2	D2-1	D2-2
平均値	0.13	0.35	0.11	0.37	0.21	0.42	0.16	0.37	0.35	0.47	0.33	0.47	0.39	0.47	0.41	0.46
標準偏差	0.08	0.19	0.07	0.20	0.20	0.21	0.20	0.22	0.13	0.17	0.12	0.15	0.21	0.17	0.15	0.16
変動係数	0.62	0.54	0.64	0.54	0.95	0.50	1.25	0.59	0.37	0.36	0.36	0.32	0.54	0.36	0.37	0.35



図一2 各ケースごとの残存係数の平均値



図一3 各ケースごとの残存係数の標準偏差



図一4 各ケースごとの残存係数の変動係数

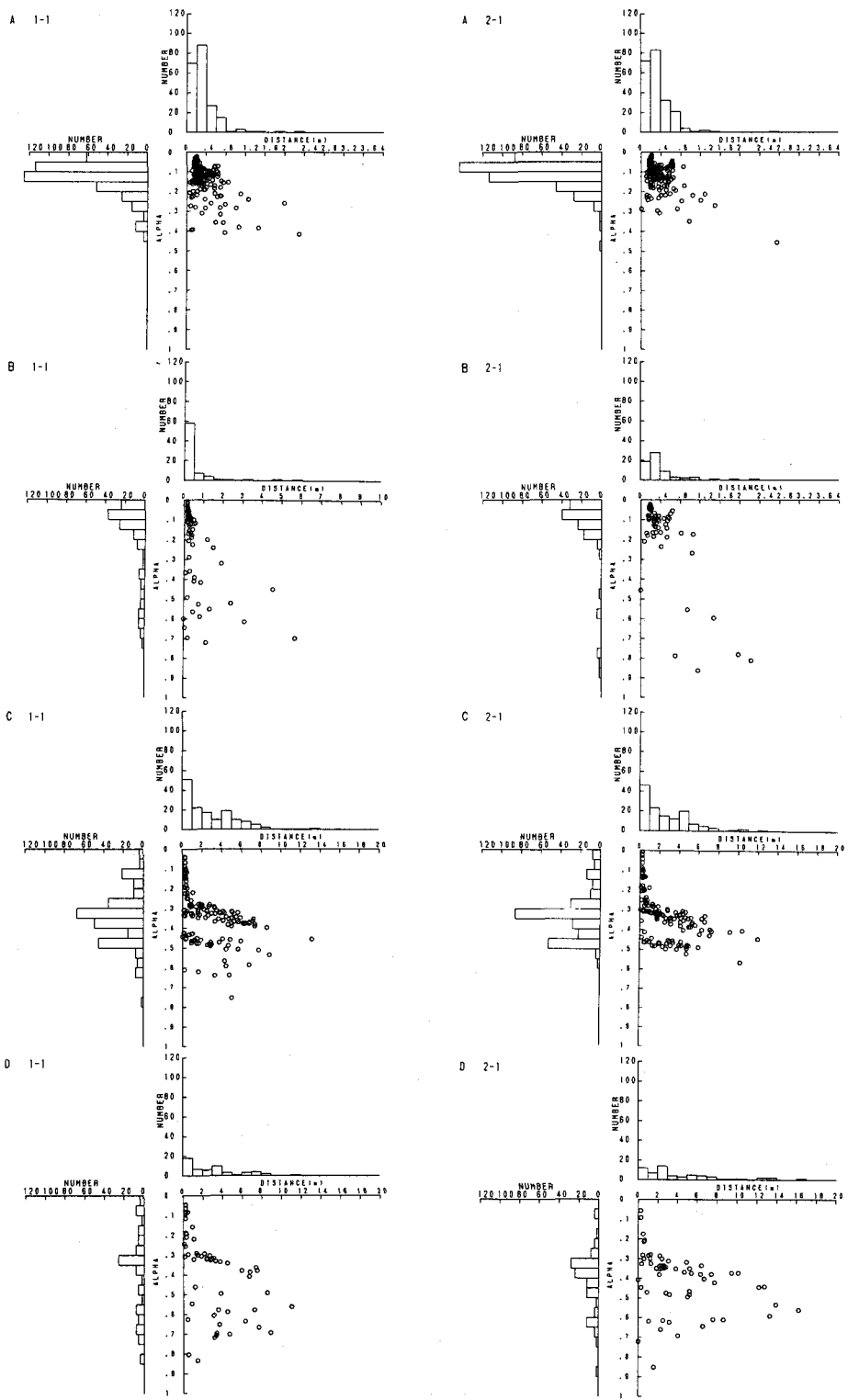


図-5 残存係数と跳躍量のヒストグラフ

表—4 および図—2～4 より以下の傾向が把握できる。

- 1) 残存係数の平均値は、地形的起伏の多い斜面で大きくなる傾向にあり、全体的な起伏の多いD斜面が最も大きく、斜面下部に起伏を有するC斜面が次に大きい。
- 2) 抵抗係数による影響は、いずれのケースにおいても少ない。
- 3) 反発係数・減衰係数による影響は、平均値では直線斜面ほど大きく、B斜面よりC斜面が大きい。C斜面において反発係数・減衰係数による影響が大きく変動係数が突出するケースが見られる。

以上の傾向の原因を以下に推定する。

- 1) D斜面では全体的な地形的起伏によって、跳躍運動が支配的となり速度が上昇し、斜面下部に起伏の多いC斜面は上部に起伏の多いB斜面と比べて、落下速度が上昇した後、起伏部分に達し跳躍するため、速度がさらに上昇すると考えられる。
- 2) 斜面の細部の凹凸や立木の影響は、全体的に小さく、係数値の差異による影響はわずかであることが判明した。
- 3) 平均値において反発係数・減衰係数による影響が直線斜面ほど大きい理由は、地形的起伏の影響を受けない上、反発係数と減衰係数値の絶対値差が大きいためと考えられる。変動係数はC斜面において突出した値を示すが、落下速度が小さいため斜面形状の影響を受けやすいと考えられる。

4. 2 跳躍量

最下部水平面において斜面下端より落下地点までの距離を跳躍量として、平均値および最大値を表—5に示す。

残存係数と同様に以下の傾向が見られる。

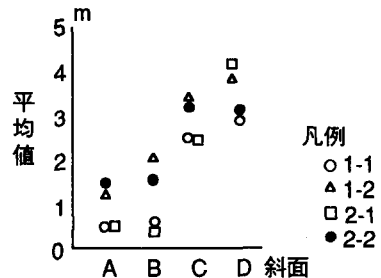
- 1) 跳躍量は地形的起伏の多い斜面において大きく、A→B→C→D斜面の順に大きくなる。
- 2) 抵抗係数による差異は小さい。
- 3) 反発係数・減衰係数による影響は大きく、特に地形的起伏が少ない場合に顕著である。

表—5 各ケースごとの跳躍量と平均値と最大値

	AI-1	AI-2	A2-1	A2-2	BI-1	BI-2	B2-1	B2-2	CI-1	CI-2	C2-1	C2-2	DI-1	DI-2	D2-1	D2-2
平均値	0.34	1.30	0.35	1.53	0.55	2.03	0.42	1.45	2.73	3.36	2.65	3.20	2.97	3.82	4.13	3.25
最大値	2.29	14.25	2.75	19.62	5.69	14.66	2.20	13.46	13.18	20.22	12.02	17.37	1.05	16.68	16.22	14.77

以上の傾向の原因を以下に推定する。

- 1) 地形的起伏が多ければ跳躍運動が支配的となるため、D断面の跳躍量が大きいと考えられる。またC断面では斜面上部で跳躍が見られるが、斜面下部では起伏の影響を受けないため最終跳躍量が小さい。
- 2) 残存係数と同様に斜面細部の凹凸や立木の影響は小さい。
- 3) 反発係数・減衰係数による差異は、残存係数の場合とほぼ同様である。



図—6 各ケースごとの跳躍量の平均値

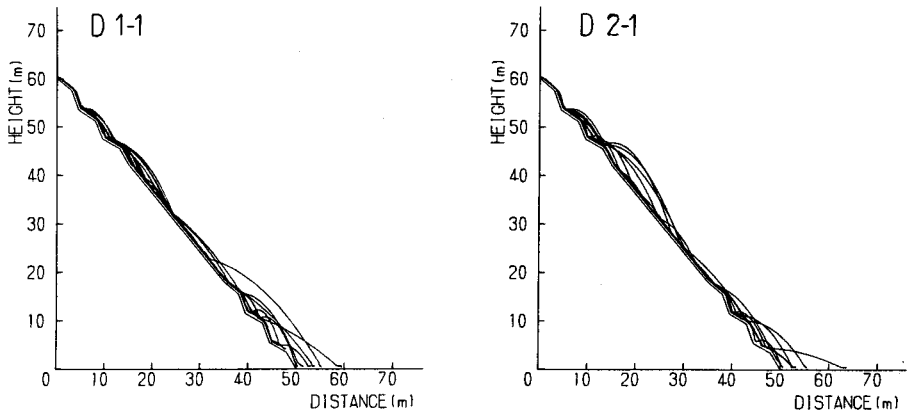
5. 実斜面への適用

本シミュレーションにおける結果を既往の実験結果と比較し、適合性について検証する。なお、最も自然斜面の形状に近いD斜面1-1（立木なし）、2-1（立木あり）を対象とする。

表一六 既往の実験概要とシミュレーション結果

表一六に示すように、残存係数は既往の実験結果ときわめて類似しており、本シミュレーション解析の実斜面への適用は十分に可能である。

地名	実験	斜面				落石		運動特性
		地質	立木	凹凸	平均斜面	落差(m)	重量(kgf)	最大速度 残存係数
菌原 A	1973	軟岩	無	大	55°	65	30~80	0.95
高松	1980	軟岩	無	中	52°	30	19~900	0.925
鳴門	1983	軟岩	無	小	48°	25.5	6~47.5	0.85
大月町	1988	軟岩	有	小	56°	46	—	0.74
D1-1	—	軟岩	無	中	50°	60	1000	0.84
D2-1	—	軟岩	有	中	50°	60	1000	0.85



図一七 落石シミュレーション (D斜面) の一部

6. 結 口

本研究では、落石の軌跡、跳躍量、速度を決定づけるファクターを解明する目的で落石シミュレーションを行なったが、おおむね以下の2つのファクターが支配的であることが判明した。

- 1) 斜面の地形的形状が最大のファクターである。
- 2) 斜面条件によって反発係数・減衰係数の設定に留意する必要がある。

本研究の今後の課題として、斜面傾斜、落石重量、斜面地質（崖すい）等を変えることによって同様の検証を行ない、次回の報告としたい。

落石対策工を設計する場合、経験的手法が多く用いられているが、落石シミュレーション解析を併用することによって、より合理的かつ現地に適合した設計が可能となると考えられるため、完成度の高い落石シミュレーション解析の提供に今後共努力を続けたい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧1983年7月
- 2) 吉田博・右城猛・榎谷浩・藤井智弘：斜面形状を考慮した落石覆工の衝撃荷重の評価，構造工学論文集VOL. 37A, pp1603~1615, 1991年3月
- 3) 吉田博・榎谷浩・右城猛・柴田健次：落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ，土木学会論文集第421号-13, pp213~222, 1990年9月