

Ⅲ-25 落石運動における残存係数と等価摩擦係数に関する考察

(株)第一コンサルタンツ 右城 猛・○岡田 健

1. まえがき

落石の跳躍量を予測する方法には、経験則による方法と数値シミュレーションによる方法とがある。近年、数値シミュレーションが増えているものの、斜面特性を適切に評価するパラメータの決定が難しいなどの理由で、落石対策の実務においては、今なお、経験則による予測が主流を占めている。

本論文では、残存係数または等価摩擦係数を用いた経験則による速度予測法の問題点について考察する。

2. 落石対策便覧における残存係数と等価摩擦係数

落石対策便覧(日本道路協会, 2000)では、落石の落下速度 V は式(1)あるいは式(2)で表されるとしている。この式を最初に提案した高速道路調査会報告書では、「残存係数 α の値は斜面の勾配 θ に影響されることは少なく、斜面の地質や凹凸、落石形状に影響されるので、 α を θ と無関係の値に変換するため等価摩擦係数 μ を式(3)で求め、式(2)で落石の速度 V を算定する」と述べている。また、等価摩擦係数の値として、表 1 を推奨している。

高速道路調査会報告書では、菌原の落石実験から得られた知見より、落下高さ 40m で終端速度に達すると考えられるが、終端速度については今後より詳細な調査、研究を要すると述べている。

$$V = \alpha \sqrt{2gH} \cdots \cdots (1) \quad V = \sqrt{2g \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) H} \cdots \cdots (2) \quad \mu = \tan \theta (1 - \alpha^2) \cdots \cdots (3)$$

表 1 等価摩擦係数

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、丸状~角状、凹凸中~大、立木なし	0.15	0.11~0.2
C	土砂・崖錐、丸状~角状、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、凹凸中~大、立木なし~あり	0.35	0.31~

3. 既往の現場落石実験から得られた残存係数と等価摩擦係数

既往の落石実験では、実験で得られた速度を概ね包絡する残存係数 α を算出している。その結果をまとめて表 2 および図 1 に示す。残存係数は斜面勾配に比例して増加する傾向がある。また、残存係数は落下高さが低い範囲で大きく、落下高さがある値以上になると減少する傾向が見られる。落下高さがある値以上で速度が一定値に収束するという報告もあるが、これは、残存係数が減少することと同じである。

表 2 落石実験による残存係数

種別	実験名称	斜面高	地質	残存係数 α	落下高さ H による残存係数の変化
現場実験	雷電岬	32m	混在	0.60	落差に伴って増加し $H=15m$ で 0.6。15m を超えると減少し 32m で 0.5 になる。
	岩殿	24m	土砂	0.65	顕著な変化はない。
	浅利	26m	混在	0.75	変化なし
	神戸	20m	岩盤	0.88	$H=13m$ で最大値が出現するが、顕著な変化はない
	菌原 B	65m	混在	0.85	$H<15m$ では 1.0 を超える。40m で 0.85 になり以降は速度が一定
	菌原 A	75m	岩盤	0.95	$H<15m$ では 1.0 を超える。38m で 0.95 になり以降は速度が一定
	高松	30m	岩盤	0.95	$H<35m$ の範囲で 1.0 を超えるデータが見られる、
	鳴門	26m	岩盤	0.85	$H<10m$ で 1.0 を超えるデータがある。 $H=20m$ 以降は速度一定の傾向
	広島	63m	混在	0.85	$H=25m$ で速度が一定値に収束するが $H=40m$ で再び速度が増加
	東根	50m	岩盤	1.45	残存係数が 1.0 を超えるデータが多数。最大は 1.9
	下呂	75m	混在	0.60	$H<40m$ の区間は 0.60。40m 以降は減少し $H=100m$ で 0.24 まで低下
	釣鐘	14m	岩盤	***	等価摩擦係数 0.75
	谷花	110m	混在	0.75	
	小樽	65m	混在	0.78	$H<10m$ では 1.0、 $H=65m$ では 0.75
	高知	18m	混在	0.75	$H<10m$ では 0.85
現地調査	北川村島	82m	混在	0.50	
	北川村二股	48m	混在	0.50	
	大月町	46m	岩盤	0.72	
	鳴門市北灘	63m	混在	0.40	

斜面を落下する落石の運動は、ころがり運動と跳躍運動が卓越することが落石実験で明らかにされているが、ころがり運動に関しては微少な跳躍が連続した運動である可能性が高い。跳躍運動では、斜面への衝突の際に速度を減速させるが、入射速度の斜面法線方向成分の増加に伴って減速の程度が増大する。したがって、斜面勾配が緩いほど、落下高さが大きいほど衝突時の入射速度の斜面法線方向成分が大きくなるので衝突後の速度減衰も大きくなる。この結果、残存係数は、斜面傾斜角が緩いほど、落下高さが大きいほど小さくなる。

表 2 で、落下高さ 10m～15m 以下の範囲で残存係数が 1.0 を超えたデータが多くの実験で見られる。このような力学的に不合理な結果が得られた原因は、観測誤差と思われる。現場落石実験による速度測定には以下の問題点があり、正しい速度が求められていない可能性がある。

- ① 投石の際、何らかの形でエネルギーが加えられるが、データ処理の際にその影響が無視されていると、落下高さが小さい箇所で残存係数の誤差が大きくなる。
 - ② 落石の並進・回転運動は共に三次元的であること、落石の形状が複雑で重心がハッキリしないことから、落石の移動距離を正確に測定し難い。
 - ③ 画像のひずみ修正が難しい。
 - ④ 一般のビデオカメラでは、落石速度、角速度が大きくなると残像が残り、画像がぼやけ落石の移動距離を正確に測定し難い。
 - ⑤ 観測の安全性および視野角の面から、接近した撮影が難しい。
- 今後は、より信頼性の高いデータを蓄積してゆく必要がある。

図 2 は等価摩擦係数 μ をパラメータとして、斜面平均勾配と残存係数の関係を示している。実験から逆算される等価摩擦係数は、0～0.75 の範囲に分布している。立木のある斜面では特に残存係数が大きい値を示している。

落石対策便覧では、設計に用いる等価摩擦係数の値として 0.05～0.35 の範囲を示しているが、これまでの実験の約半数は 0.35 を超えている。このことから、等価摩擦係数の上限 0.35 については立木の影響をも踏まえ再考する余地がある。

4. あとがき

落石対策では跳躍量の予測と共に速度の予測が極めて重要である。しかしながら、速度予測のパラメータとして実務で採用されている等価摩擦係数は、実際よりも小さすぎると思われる。さらに、落石の運動は跳躍ところがりが主体的であるにも関わらず、すべり運動と見なし等価摩擦係数を用いて速度を算出すること自体に無理があるように思われる。

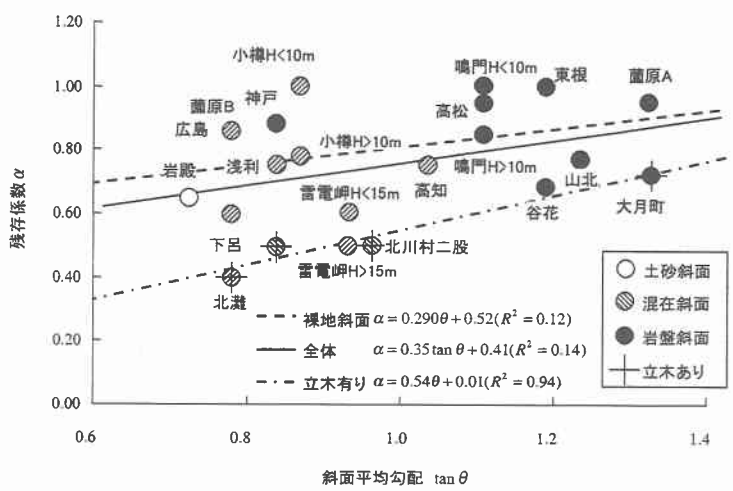


図 1 斜面勾配と残存係数の関係

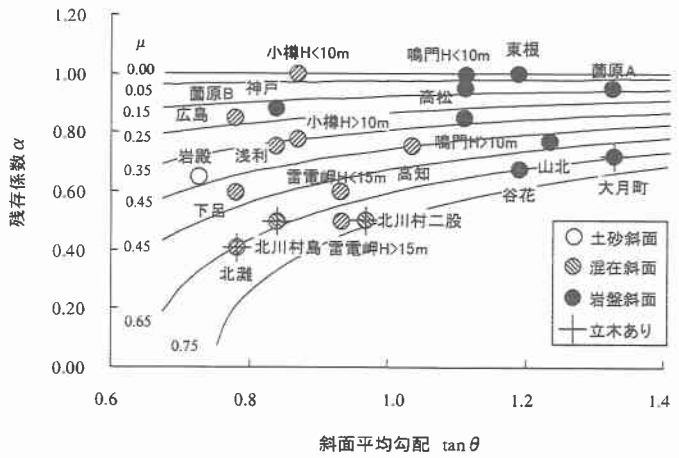


図 2 等価摩擦係数