

Ⅲ-24 落石跳躍量の簡易予測法

(株)第一コンサルタント 右城 猛・○柴岡孝行

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、経験則による跳躍量予測法の問題点を明確にした上で、より合理的な簡易予測法を提案する。

2. 経験的方法とその問題点

落石跳躍量は「①落下高さ 30m までは 2 次曲線で増大する、②最大跳躍量は約 2m に収束する」ということが経験的に知られており、この経験則が落石対策の実務に適用されている。

表 1 は、既往の現場落石実験で観測された跳躍量を整理したものである。ほとんどは 2m 以下であるが、中には 6m(高松)、7.5m(谷花)の跳躍量が出現している。2m を超える跳躍は、斜面内の突起(露出岩盤、切株)や転石への衝突、斜面衝突時の落石破碎による飛散する場合にも生じるが、多くは崖部や小段部など斜面勾配急変箇所で見出されている。

表 1 既往の現場落石実験と観測された跳躍量

実験名	斜面高	勾配	地質	落石規模	跳躍量	
神戸	20m	40	岩盤	65～600kg	1.0～1.8m	
茵原 A	65m	53	軟岩	30～800kg	落下高 $H=30\text{m}$ で 2m に収束。崖錐部では 1m 以下、斜面の突起により最大 4.5m	
茵原 B	75m	38	混在	30～800kg		
高松	35m	48	岩盤	0.09～1.5m	多くは 1m 以下、20%が 2m を超える。最大 6m	
鳴門	26m	48	岩盤	6～47.5kg	$H=15\text{m}$ で 2m に収束	
広島	63m	38	混在	20～4,000kg	2m に収束するが多くの 1m 以下。1t 以上の巨石は 1m 以下。落石が二分割すると 5m 以上となる。	
山北	22m	51	岩盤	14～2,000kg	ほとんど 2m 以下。小段に衝突すると最大 4m。	
東根	50m	50	岩盤	1.8～33.5kg	落下高 $H>15\text{m}$ では 2m 以下。 $H>15\text{m}$ では 2 から 4.5m	
下呂	75m	38～60	混在	0.3～0.5m	60 ケース中 56 ケースは 2m 以下。滑落崖部で最大 4m	
釣鐘	14m	50	岩盤	0.3～1.3m	ほとんどが 1m 以下。最大 1.5m	
谷花	110m	40～80	混在	0.05m～1m	崖部 3m～7.5m。それ以外はほとんどが 2m 以下(1 個のみ 4.5m)	
小樽	65m	39～43	混在	0.4m 以上	ほとんどが 2m 以下。小段部で 4 個 2m を超える。最大 2.7m	
高知	18m	46	混在	16～200kg	2m 以下。切り株に当たらない場合は 1m 以下。	
災害斜面	北川島	82m	40	混在	10,000kg	0.8m
	北川二股	48m	44	混在	1,000kg	1.6m
	大月町	46m	53	岩盤	80kg	1.1m
	鳴門市	63m	38	混在	1,430kg	0.9m

落石は三次元空間を回転しながら飛行するので真の跳躍量を測定することが困難であることから、通常、図 1(a)のように落石の重心が描く軌跡から斜面までの垂直距離 h が測定され、 h を跳躍量と定義している。

跳躍量をこのように定義すると、図 1(b)のように斜面勾配が変化している場合、跳躍量は落石運動と関係なく

斜面勾配 θ_2 に影響されるし、図 1(c)に示すように落石径にも影響される。したがって、経験則が適用できるのは、斜面勾配が一様と見なされ、かつ、落石径が 1m 程度以下の場合に限られることに留意すべきである。

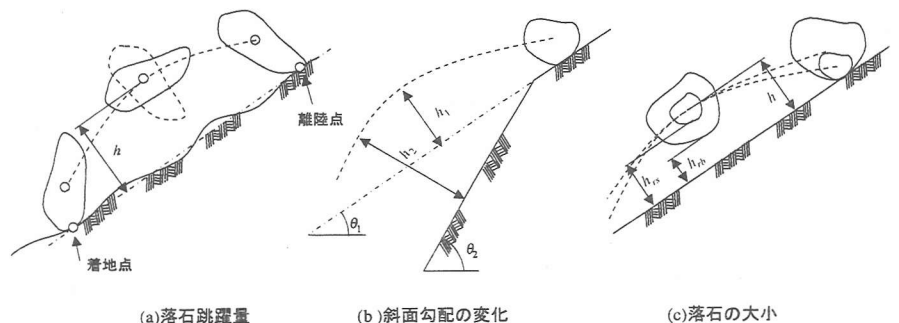


図1 跳躍量

3. 跳躍量の合理的な簡易予測法

半径 r の落石が速度 V_i 、入射角 λ_i で勾配 θ の斜面に衝突し、法線方向の速度成分 V_m をもって飛び出したとすれば、跳躍量 h は式(1)で与えられる。また、法線方向速度比 R_n と入射速度の法線方向成分 V_{in} との関係が式(2)の双曲線関数で表されるとすると、式(1)は式(3)となる。 a 、 b は双曲線関数パラメータであり、斜面の地質によって決まる定数である。

$$h = \frac{V_m^2}{2g \cos \lambda_i} + r \cdots (1) \quad R_n = \frac{a}{1 + b V_{in}^2} = \frac{a}{1 + b (V_i \cos \lambda_i)^2} \cdots (2) \quad h = \frac{1}{2g \cos \theta} \left[\frac{a V_i \cos \lambda_i}{1 + b (V_i \cos \lambda_i)^2} \right]^2 + r \cdots (3)$$

式(3)で入射角 λ_i は未知量であるが、 $\theta \leq \lambda_i \leq 90^\circ$ の範囲で λ_i を変化させて計算し、 h の最大値を探索すれば、それが求める跳躍量と考えることができる。

落石半径を $r=0.5\text{m}$ とし、斜面特性を表す双曲線関数のパラメータとして Wu(1985)らの岩盤斜面での実験値から求められた $a=1.0$ 、 $b=0.014$ を用いて入射速度 V_i と跳躍量 h の関係を求めると図3となる。落石の速度に伴って跳躍量は増加し、速度がある値に達すると 2m 付近に収束する。また、斜面勾配が急なほど跳躍量は大きくなっている。跳躍量に関する経験則の妥当性は、理論的にも説明できる。

斜面勾配が変化している場合には、跳躍量は勾配の変化の状態により異なるため、一義的に与えることはできない。このような場合には、跳躍軌跡を描いて落石防護工の安全性を判断する必要がある。

図4のように勾配変化点 A から跳躍を開始するものとすれば、落石の跳躍軌跡方程式は式(4)で与えられる。

$$y = \frac{g}{2} \left(\frac{x}{V_r \cos \beta} \right)^2 + x \tan \beta \cdots (4), \quad V_r = \sqrt{V_m^2 + V_{rt}^2}, \quad V_m = R_n V_i \cos \lambda_i, \quad V_{rt} = R_t V_i \sin \lambda_i, \quad \beta = \theta - \tan^{-1} \frac{V_m}{V_{rt}} \cdots (5)$$

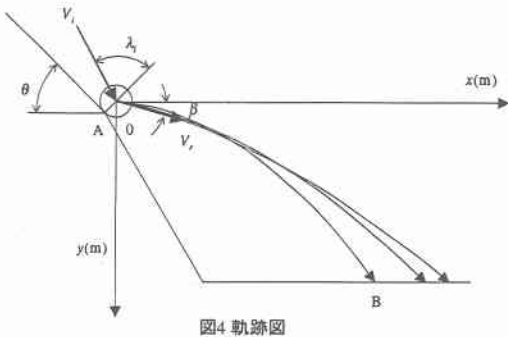


図4 軌跡図

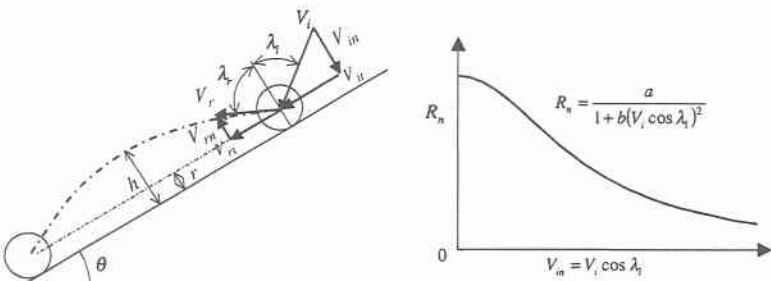


図2 提案式の記号の説明

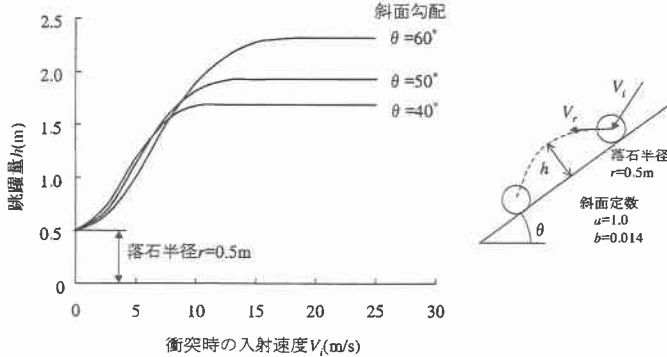


図3 提案式による試算結果

ここに、 V_i は衝突時の入射速度(m/s)である。 V_r は衝突後の反射速度(m/s)、 λ_i は入射角、 V_m は反射速度の斜面法線方向成分、 V_{rt} は反射速度の斜面接線方向成分、 R_n は法線方向速度比であり、式(2)で求められる。 R_t は接線方向速度比であり、 $R_t = 1.0$ と仮定すれば安全側となる。 θ は上部斜面勾配、 β は飛び出し角である。

式(5)に含まれる λ_i は未知量であるので、 $\theta \leq \lambda_i \leq 90^\circ$ の範囲で適当に λ_i 決めれば、図4のように軌跡を描くことができる。

4. あとがき

跳躍量は、落石の速度、落石半径、斜面勾配、斜面地質などの影響を受ける。今後とも基礎データを蓄積し、これらの要因を考慮した合理的な予測式の確立が望まれる