

斜面に残された窪みからの落石運動の推定

香川県林務課 大久保政利

香川県東部林業事務所 内原伸司, 藤井淳哉
 林業土木コンサルタンツ四国支所 片田博士
 ㈱第一コンサルタンツ 正会員 ○右城 猛

1. まえがき

2001年5月25日、香川県小豆郡土庄町の皇踏山(標高394m)南斜面の標高291m付近崖部より0.7m×0.8m×1.3mの岩塊が向け落ち、約189m落下し、樹木に衝突して停止した。落石は標高215m付近から跳躍運動を開始し、停止するまでの間に24個の衝突跡を残した。斜面に残された窪みから落石運動を逆解析したので、その方法と結果について発表する。

2. 落石運動の逆解析法

落石が飛行した場合、軌跡上の任意の3点の座標値が既知であれば、落石の運動を特定できるが、当該斜面で明らかになっていたのは飛行開始点と着地点の2点のみであった。そこで、式(1)、式(2)に示す斜面接線方向と法線方向の運動方程式の他に式(3)のエネルギー最小定理を適用して落石の運動を求めた。ただし、 M は落石質量、 θ は斜面傾斜角、 β は落石の飛び出し傾角、 V_1 は初速度である。

$$M \frac{d^2\xi}{dt^2} = Mg \sin \theta \quad (1) \quad M \frac{d^2\eta}{dt^2} = -Mg \cos \theta \quad (2) \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{M}{2} V_0^2 \right) = 0 \quad (3)$$

式(1)～式(3)を連立させて解けば、落石の運動を表す式(4)～式(8)が求められる。 S は飛び出し点から着地点までの斜距離、 t は着地までの飛行時間、 V_2 は着地速度、 h は跳躍高である。

$$\beta = \theta - \tan^{-1}(\tan \theta + \sec \theta) \quad (4) \quad V_1 = \frac{1}{\sin(\theta - \beta)} \sqrt{\frac{gS \cos \theta}{2\{\tan \theta + \cot(\theta - \beta)\}}} \quad (5)$$

$$t = \frac{2V_1 \sin(\theta - \beta)}{g \cos \theta} \quad (6) \quad V_2 = \sqrt{V_0^2 + (gt)^2 + 2V_1 g t \sin \beta} \quad (7)$$

$$h = \frac{V_1^2 \sin^2(\theta - \beta)}{2g \cos \theta} \quad (8)$$

また、図-2のように斜面*i*で飛行している落石が $V_i(V_{i\xi}, V_{i\eta})$ の速度で斜面*i*と斜面*j*の境界に衝突したとすると、入射角 λ_i 、反射角 λ_j は式(9)、式(10)で表される。斜面に衝突した落石は図3に示す方向から抗力 N と摩擦力 T を受けるものとする、法線方向反発係数 e_η 、接線方向反発係数 e_ξ はそれぞれ式(11)、式(12)となる。

$$\lambda_i = \frac{1}{2}(\pi - \theta_i + \theta_j) - \tan^{-1} \left(-\frac{V_{i\eta}}{V_{i\xi}} \right) \quad (9), \quad \lambda_j = \frac{1}{2}(\pi - \theta_i - \theta_j) + \beta_j \quad (10), \quad e_\eta = -\frac{V_j \cos \lambda_j}{V_i \cos \lambda_i} \quad (11), \quad e_\xi = \frac{V_j \sin \lambda_j}{V_i \sin \lambda_i} \quad (12)$$

3. 皇踏山の斜面概要

落石の落下経路に沿った斜面縦断図を図-3に示す。斜面の地質は花崗岩が主体で、頂上付近に安山岩が露頭し、これが風化し落石発生源となっている。落石発生源付近の斜面傾斜角は 55° と急であるが、跳躍運動した区間は $30 \sim 40^\circ$ と比較的緩い。

植生は、標高70～160mの間はアベマキ、マツ等の疎林で、それより上部は1999年2月の山火事で禿げ山になっている。

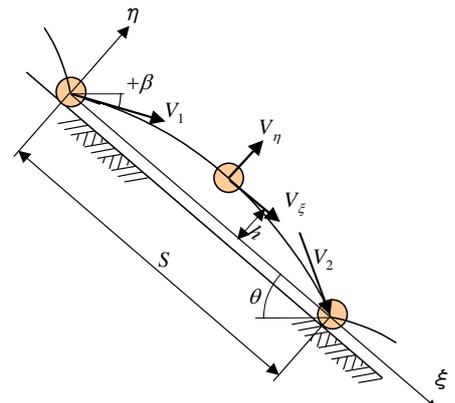


図-1 飛行運動

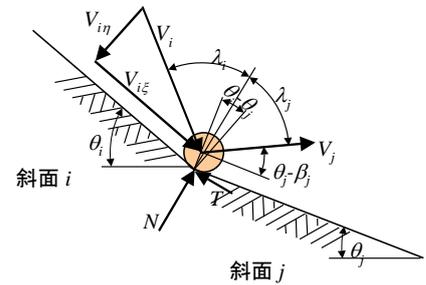


図-2 斜面への衝突

キーワード：落石、反発係数、跳躍高、速度残存係数、等価摩擦係数

連絡先：〒781-8122 高知市高須新町 3-1-5 ㈱第一コンサルタンツ TEL088-885-2123

4. 逆解析結果

(1) 跳躍軌跡

痕跡から逆解析された跳躍軌跡を図-5に示す。最も大きな跳躍を示したのは、飛行開始後6回目の跳躍で、初速度 8.25m/s、斜面方向の飛行距離 16.63m と推定された。

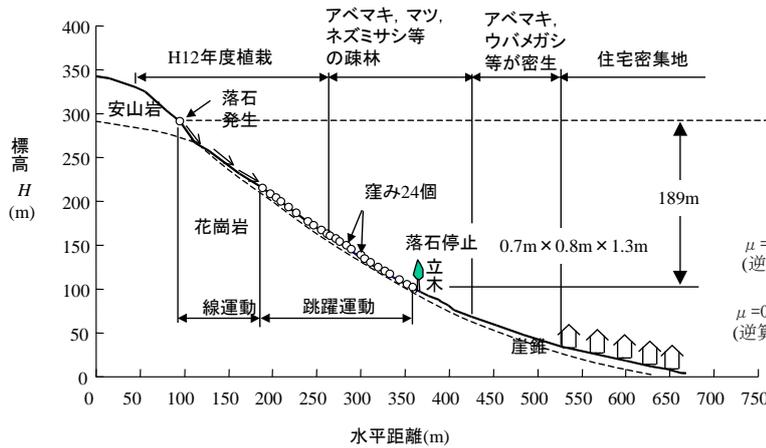


図-3 皇踏山の斜面形状

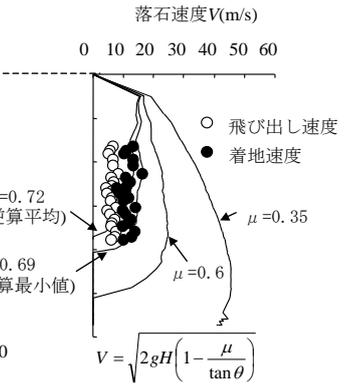


図-4 落石の速度と等価摩擦係数

(2) 落下速度

落石発生位置からの落下高と速度の関係を図-4に示す。跳躍開始後、位置エネルギーが運動エネルギーに変換されるため速度は増加するが、着地するとエネルギーが消費され大きく減速する。この結果、速度は落下高に伴って増加する傾向は見られない。

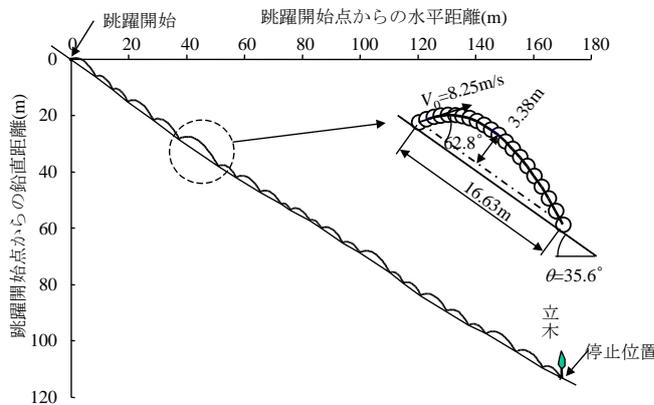


図-5 落石の跳躍軌跡

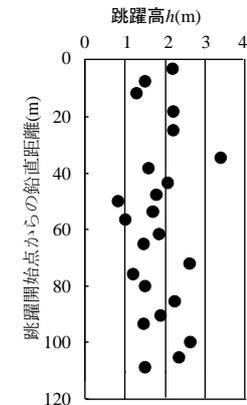


図-6 落石の跳躍高

着地速度 V_2 より式(13)で斜面の等価摩擦係数 μ を求めた結果を図-4に示す。ただし、落石発生源から速度算定位置までの鉛直距離を H 、水平距離を L とする。

$$\mu = \left(1 - \frac{V_2^2}{2gH}\right) \frac{H}{L} \quad (13)$$

μ の平均値は 0.72、最小値は 0.69 であり、落石対策便覧に示されている $\mu = 0.05 \sim 0.35$ の値に比べて非常に大きい。

当該斜面には、上部から落下した転石が多数分布するが、それは標高 70m 以上の範囲である。落石対策便覧の等価摩擦係数 $\mu = 0.35$ を用い速度を計算すると、落石は標高 40m より下方の民家を速度 45m/s で直撃することになり、実態と全く異なることになる。

(3) 跳躍高

跳躍高を図-6に示す。平均値 1.8m、最大値 3.4m となった。この値は、実質跳躍高であるので、斜面からの跳躍高は平均値が 2.3m、最大値が 3.9m となり、落石対策便覧に示されている 2.0m よりも大きい。

(4) 反発係数

反発係数の逆算結果を図-7に示す。法線方向反発係数、接線方向反発係数とも平均値 0.55、標準偏差 0.14 となった。反発係数は、速度依存性を示し、速度が大きくなると減少する。

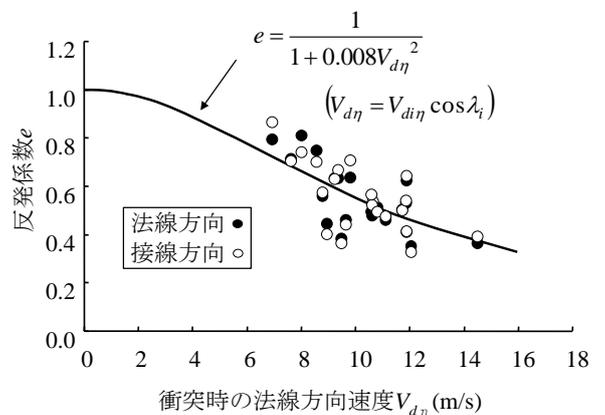


図-7 反発係数

参考文献

日本道路協会：落石対策便覧，2000.6