

1. まえがき

落石の速度を解析的に予測するには、斜面特性や落石形状を反映した運動パラメータを必要とするが、これに関する研究はほとんど行われていない。こうしたことから、落石対策の実務では、落石の運動をすべり運動と見なし、斜面特性に対応した等価摩擦係数を用い速度を算定している。

本論文では、斜面上の落石の痕跡から推定された速度を示し、等価摩擦係数の問題点を明らかにする。

2. 斜面上の痕跡から落石速度を推定する方法

図-1 に示すように落石の飛行経路上の3点が確認できれば、質点の運動方程式を用いて飛び出し角度 β 、飛び出し速度、着地速度を求めることができるが、3点を特定できる場合は希で、飛行開始点と着地点の2点しか分からない場合が多い。この場合は、運動方程式の他にエネルギー最小定理を適用すれば落石の速度を式(1)で求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= \frac{1}{\sin(\theta - \beta)} \sqrt{\frac{gS \cos \theta}{2\{\tan \theta + \cot(\theta - \beta)\}}} \\ V_d &= \sqrt{V_0^2 + (gt_d)^2 + 2V_0gt_d \sin \beta} \\ t_d &= \frac{2V_0 \sin(\theta - \beta)}{g \cos \theta}, \quad \beta = \frac{\theta}{2} - \frac{\pi}{4} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

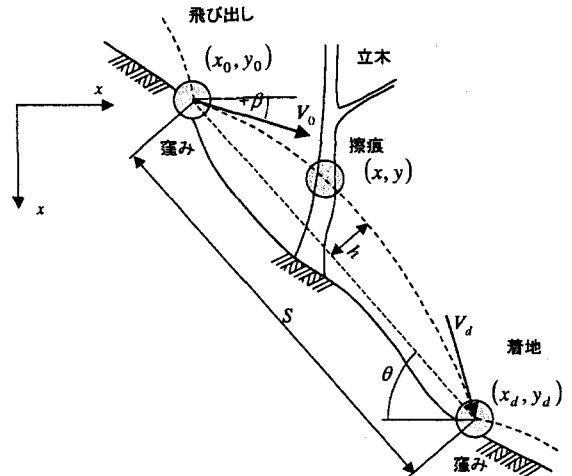


図-1 飛行運動の記号の説明

3. 落石速度と等価摩擦係数

落石対策便覧では、落石運動をすべり運動にモデル化し、線速度に変換される運動エネルギー以外は全て摩擦で消費されるものとしている。そうすれば、エネルギー保存則は式(2)表される。 μ は回転運動エネルギー、斜面や立木への衝突によるエネルギー損失なども含む見掛けの摩擦係数(等価摩擦係数)である。

式(2)より、落石の線速度 V は式(3)となる。 θ は、落石発生源から速度を算出する位置までの平均傾斜角、 H は鉛直落下高である。任意位置 H の速度 V が既知になっておれば、式(4)で等価摩擦係数を求めることができるが、求める位置によって等価摩擦係数は異なる。

$$\frac{1}{2}mV^2 + \mu \cdot mg \frac{H}{\tan \theta} = mgH \quad (2) \quad V = \sqrt{2gH \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right)} \quad (3) \quad \mu = \left(1 - \frac{V^2}{2gH}\right) \tan \theta \quad (4)$$

4. 痕跡から推定される等価摩擦係数

図-3 は 2001 年 5 月に土庄町の皇踏山の南斜面において、標高 291m 付近の崖部より 0.7m×0.8m×1.3m の岩塊が向け落ち、約 189m 落下し、標高 102m 地点の樹木の幹に衝突して停止した事例である。落石は、標高 215m 付近から跳躍を開始し、停止するまでに 24 個の窪みを残していた。痕跡から求めた着地速度の等価摩擦係数の最小値は 0.69、平均値は 0.72 であった。図中の $\mu=0.35$ の値は、落石対策便覧に示されている設計用値の最大値である。この値で計算すると、落石は民家を 45m/s の速度で直撃することになるが、過去にそのような事故は皆無である。

図-4 は 7 箇所の落石斜面の痕跡から推定した等価摩擦係数と、落石発生源から速度算出点までの平均勾配 $\tan \theta$ との関係を整理したものである。等価摩擦係数は $0.6 \tan \theta < \mu < \tan \theta$ の範囲にある。図-4 には、既往の落石実験から得られた等価摩擦係数も併記してある。落石実験による等価摩擦係数は、落石斜面から逆算された値に

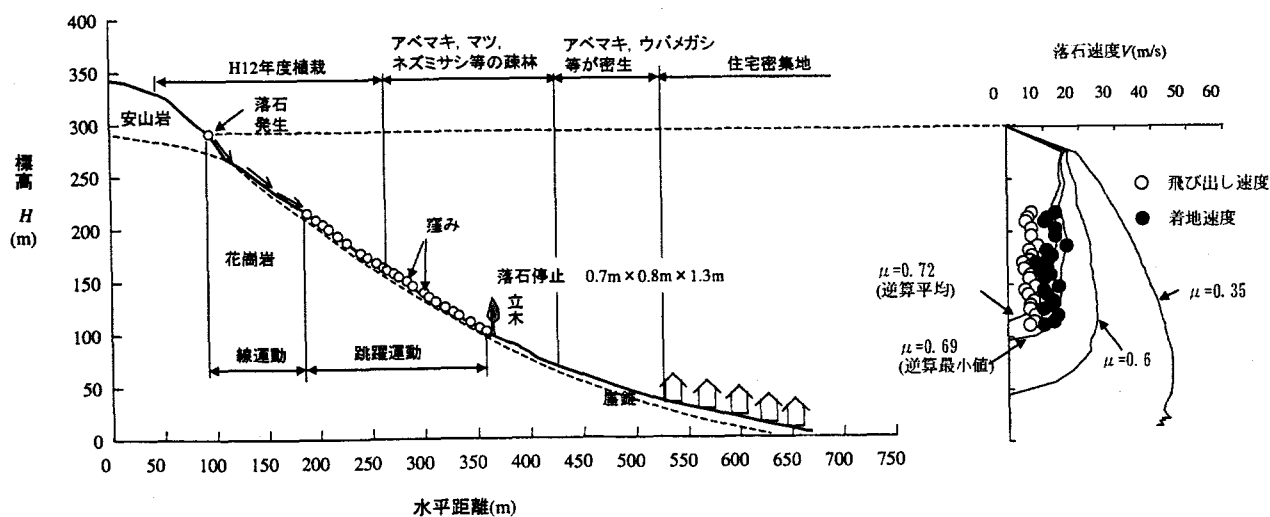


図-3 皇踏山の落石斜面と逆算された落石速度

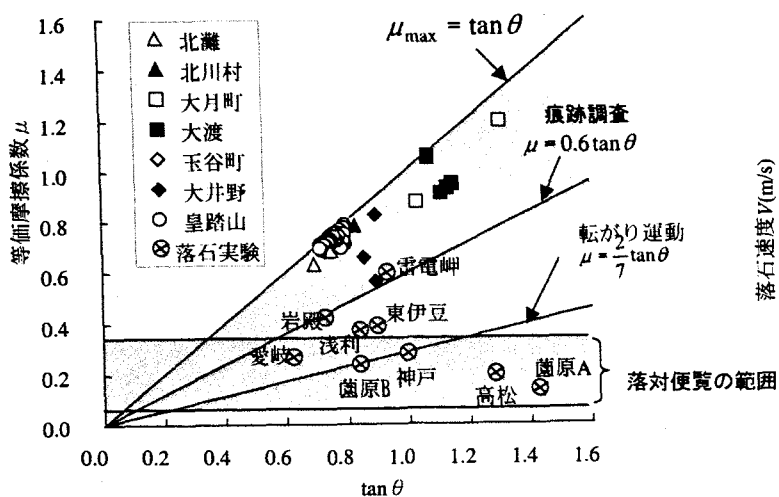


図-4 $\tan \theta$ と等価摩擦係数の関係

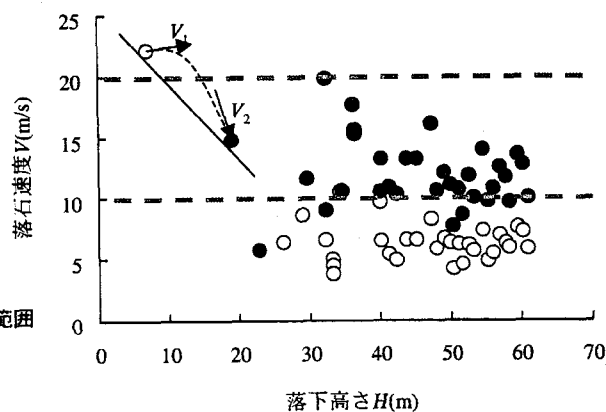


図-5 落石速度と落下高さの関係

比べて非常に小さい。エネルギーロスが0で転がり運動をしたと仮定して求めた等価摩擦係数の値さえも下回ったデータがいくつか見られる。また、 $\tan \theta$ に比例するような関係も見られない。

図-5 は痕跡から推定した速度と落下高の関係を示している。落下高に関係なく着地速度は10～20m/sであるが、飛び出し速度は10m/s以下になっている。

5. 速度に関する考察

等価摩擦係数は運動期間中 $0 \leq \mu \leq \tan \theta$ の範囲で変化し、停止位置では $\mu = \tan \theta$ となる。痕跡から推定される等価摩擦係数が、落石実験に比べて大きくなっている原因は、等価摩擦係数を算出した位置の相違にあると考えられる。落石実験では、投石初期の飛行運動の着地速度から等価摩擦係数を算出しているが、痕跡調査では、数度の跳躍を繰り返し道路脇に到達した落石の速度から算出しているためと考えられる。

図-5 で大きな着地速度が出現しているのは急斜面である。落石は斜面の傾斜角が急であると飛行と衝突運動を繰り返す。傾斜が急なほど飛行落下距離が増えるため着地速度が大きくなる。しかし、衝突時のエネルギー損失も大きくなるため、衝突後の速度はある限界速度以上にならない。図-5 では10m/sになっているが、斜面の傾斜角や地盤の変形特性などとの関係は不明である。

6. あとがき

落石の速度には、運動形態、斜面傾斜角、衝突時のエネルギー損失が大きく関与する。単純に等価摩擦係数で評価するのは無理である。今後は、衝突時の落石の挙動を実験的に解明した上で実用的速度予測法を提案する予定である。