

実斜面での落石実験2(落石の運動特性)

株式会社第一コンサルタンツ 国際会員 右城 猛
株式会社第一コンサルタンツ 正会員 筒井 秀樹

1. まえがき

落石運動のメカニズムを解明する目的で、高知県幡多郡西土佐村岩間のヒノキの植林地内で落石実験を実施した。本文では、デジタルビデオカメラの画像解析から求められた落石の線速度、角速度、運動エネルギー、跳躍量について発表する。

2. 線速度

ビデオカメラの画像から1コマ間(1/30s)の移動距離を読みとって線速度を算出した。その際、基線から大きく外れた落石は除外した。また、速度算出位置の画像縮尺は、画像の落石寸法と実測寸法から求めた。なお、自然石の重心位置は画像を見て目測で決定した。

落石の跳躍開始点で入射速度と反射速度を求めれば図1(a)となる。入射速度をほぼ包絡する残存係数は0.75である。また、落石の形状別に入射時における残存係数の平均値と標準偏差を求めれば図1(b)となる。平均値の最小は碎石、最大は立方体であった。

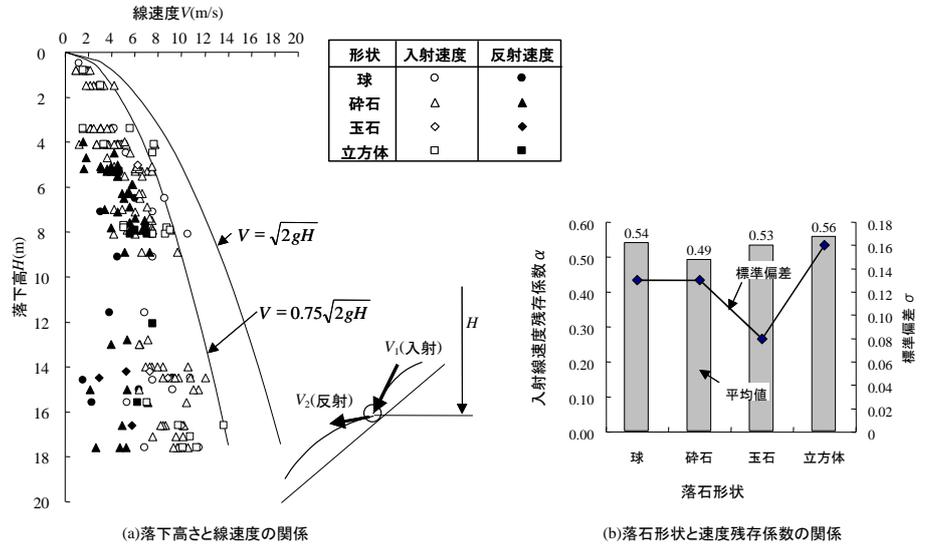


図1 線速度

残存係数 α と等価摩擦係数 μ の関係は $\mu = (1 - \alpha^2) \tan \theta$ で表される。平均斜面勾配は $\theta = 46^\circ$ であるので、残存係数を0.75として等価摩擦係数を算定すれば $\mu = 0.45$ となる。落石対策便覧(日本道路協会, 2000)では、当該斜面は区分Bまたは区分Cに該当し、 $\mu = 0.11 \sim 0.3$ の範囲になるが、実験結果はこれよりはるかに大きい。

3. 角速度

飛行中に慣性主軸の変化が比較的少ない落石を選定し、側面から撮影したビデオ画像より角速度を読みとった。自然石の慣性主軸の方向については画像から目測で決定した。落下高と角速度の関係を示せば図2となる。角速度の包絡線は、落下高6mまでは増加するがそれ以降は47rad/sで一定となっている。落石の回転は三次元的であるので、このように求められた角速度は、実際よりも小さめになっていると思われる。

落下初期はころがり運動あるいはころがり運動に近い跳躍運動であるので、角速度は落下高に比例して増加していると考えられる。跳躍運動に移行すれば、衝突過程で角速度の減少と増加(衝突による角速度の減少→ころがりによる角速度の増加)のバランスが保たれ、一定値になっているものと思われる。

球がすべらずにころがれば、角速度は $\omega = V/r$ で表されるので、線速度Vが同じなら半径rが大きいほど角速度は小さくなる。巨石の角速度が小さくなっているのはこの影響と考えられる。

立方体のコンクリート塊は質量、形状が一定であるにも関わらず大きくばらついている。角速度は衝突の仕方に大きく支配されるものと思われる。

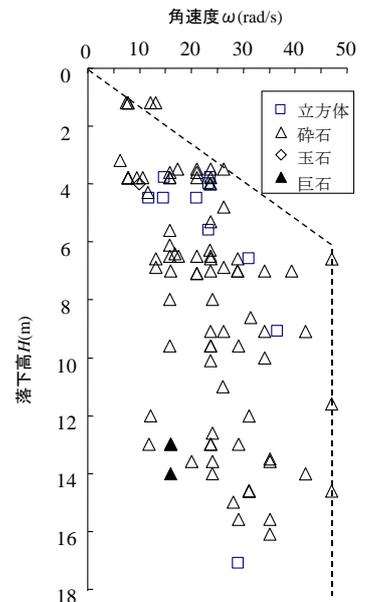


図2 角速度

4. 運動エネルギー

線速度エネルギー E_V と回転エネルギー E_R の関係を図 3 に示す。既往の落石実験では、 $E_R \leq 0.1E_V$ という報告が多いが、本実験では $E_R = 0.34E_V$ の関係が得られた。

衝突前後の運動エネルギーの変化は図 4 となった。衝突によって線速度エネルギーは減少するが逆に回転エネルギーは増加する傾向にある。また、衝突後の全運動エネルギーは、衝突前の 0.50~0.98(平均 0.69)である。なお、自然石の慣性モーメント I は、近似的に式(1)で求めた。

$$I = \frac{m}{3} (a^2 + b^2 + c^2) \left(\frac{m}{abc\rho} \right)^{\frac{2}{3}} \times \frac{2}{3}$$

.....(1)

ここに、 m は落石の質量、 a, b, c はそれぞれ短辺、中辺、長辺の長さ、 ρ は密度である。

5. 法線方向速度比と接線方向速度比

落石が斜面へ衝突すると、衝突点の地盤は衝撃力でせん断破壊されるか変形する。さらに、斜面および落石の表面は複雑なため衝突面点の法線方向すなわち入射角と反射角を特定するのは困難である。このため、法線方向速度比(反発係数、はね返り係数とも呼ぶ)、接線方向速度比を求めることはできなかった。

6. 跳躍量

従来、跳躍量は「落石が飛行運動するとき重心が描く軌道から地盤までの距離」とされてきたが、跳躍量をこのように定義すると、実質的に跳躍しない場合でも跳躍量は落石半径となる。また、地形が一様勾配の場合と変化している場合とで異なった跳躍量が与えられる。したがって、跳躍量は物理的の意味を持たないが、設計上概略の目安値には成り得る。

図 5 は落下高さとの関係を示している。落石が切り株に当たらない場合の跳躍量は 1m 以下であるが、切り株に当たってバウンドした場合には最大 2.1m の跳躍を示した。

7. あとがき

現場落石実験は下記の点に問題がある。精度の高いデータを得るためには、今後、これらの点を改良した実験が必要である。

- ① 落石は形状が複雑で重心がハッキリしなく、運動が三次元的であるため並進・角速度の測定が難しい。
- ② 画像のひずみ修正が難しい。
- ③ 一般のビデオカメラでは、並進速度、角速度が大きくなると残像のため画像がぼやけ落石の移動距離を正確に測定し難い。

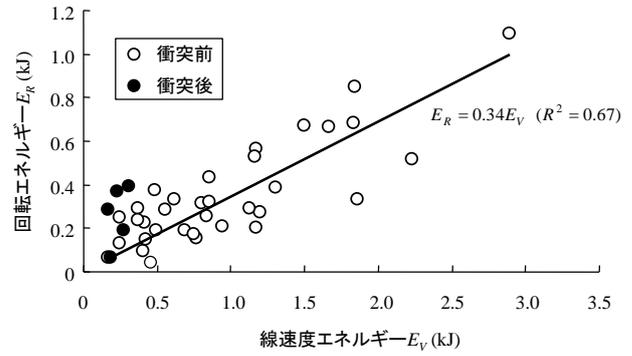


図3 線速度エネルギーと回転エネルギーの関係

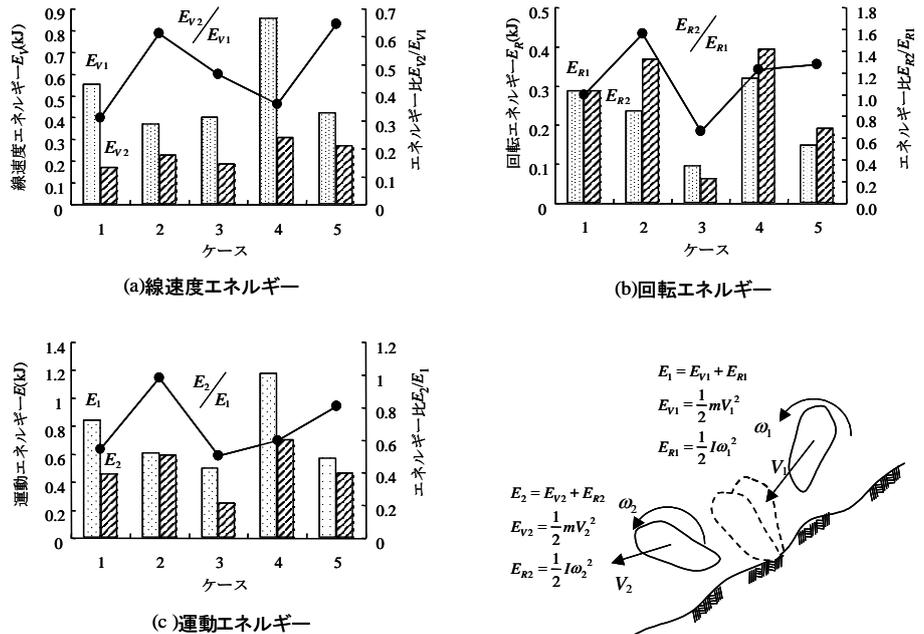


図4 衝突による運動エネルギーの変化

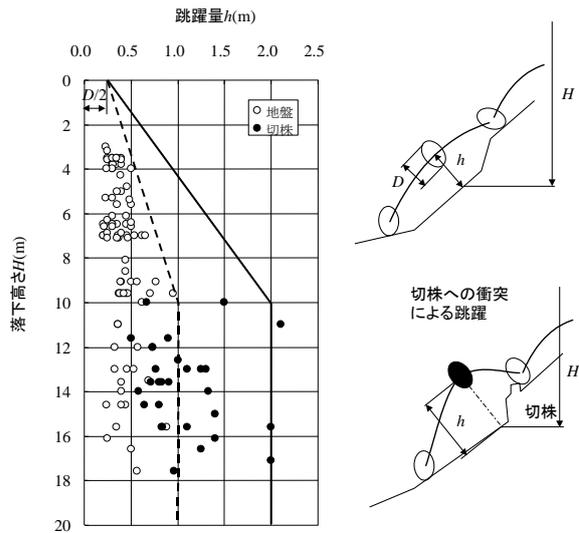


図5 跳躍量

第 36 回地盤工学研究発表会 2001 年 6 月

④ 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。