

実斜面における落石実験

MOVEMENT OF ROCKFALL AND A STUDY ON IT SPREDICTION

右城猛*, 筒井秀樹**, 篠原昌二***

Takeshi USHIRO, Hideki TSUTSUI, Shouji SHINOHARA

*博(工) (株) 第一コンサルタンツ 専務取締役 (〒781-8122 高知市高須新町 3-1-5)

** (株) 第一コンサルタンツ 技術主任 (〒781-8122 高知市高須新町 3-1-5)

*** (株) 第一コンサルタンツ (〒781-8122 高知市高須新町 3-1-5)

キーワード：落石，実験，実斜面
(rockfall, experiments, natural slope)

1. まえがき

落石の運動メカニズムを解明する目的で、高知県西土佐村の植林地内の自然斜面において落石実験を実施した。

その結果、落石が転がりから飛行に移行するメカニズム、飛行時の落石の回転、落石が斜面あるいは立木に衝突したときの速度の変化、平面的な落下経路、落下距離と速度の関係、跳躍量などを明らかにすることができた。

本論文では、これらの実験結果を紹介する。

2. 落石実験を行った斜面と実験の方法

落石実験を行った斜面の断面形状を図1に示す。斜面の地質は風化した砂岩と泥岩が互層になっており、2～5cm 大の礫とシルトが混ざった表土が3～50cmの厚さで堆積している。所々には、基岩盤が露出している。

供試落石は、図2に示す49個の砂岩碎石(質量16～200kg)、4個の砂岩玉石(質量21～48kg)、3個のコンクリート製球体(質量16kg)、13個のコンクリート製立方体(質量38kg)の合計69個である。

実験は、斜面上部にあるコンクリートブロック積み擁壁の下端($x=0, y=0$)の位置に供試落石を置き静かに手を離す実験I(35case)と、擁壁の天端から自

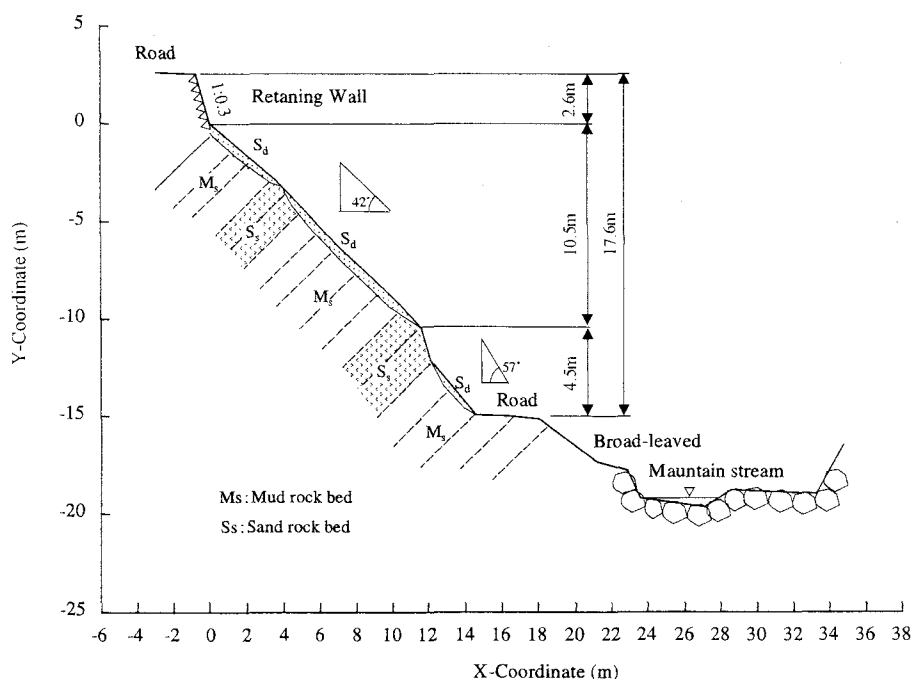


図1 実験斜面の横断面図

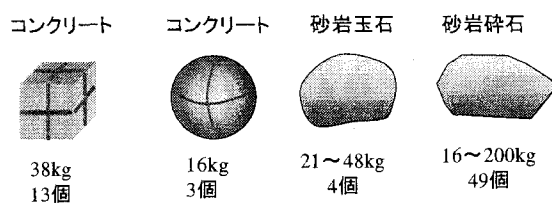


図2 実験に用いた落石

由落下させる実験II(34case)の2種類を行った。落石の運動は、上方の道路に1台、対岸に1台、斜面上に4台のデジタルビデオカメラ(30コマ/秒)を設置して撮影した。カメラの配置を図3に示す。

3. 落石の運動形態

3.1 落石の初動

落石の初動を図4に示す。実験Ⅰのうち、77%がころがり→飛行、23%がころがり→すべり→飛行のパターンを示した。細長い落石が最大慣性主軸回りでころがる場合には、初期状態から $1/2 \sim 2/3$ 回転 ($180 \sim 250^\circ$) する間に飛行へ移行するが、最小慣性主軸回りに回転する場合には2回転～数回転しないと飛行へ移行しない。飛行に移行する速度は $1.2 \sim 1.8 \text{ m/s}$ 、角速度は $7 \sim 8 \text{ rad/s}$ 程度であった。

なお、斜面および落石の表面形状は複雑であるため、跳躍量が小さい場合には、ころがり運動か飛行運動かの識別は難しい。

3.2 飛行運動

落石が飛行運動する際は、重心を中心に三次元的に回転する。図5は、投石したコンクリート立方体の中で最も慣性主軸の方向が安定したものを選んで、それでも慣性主軸の時間的变化が著しい。

3.3 跳躍運動

落石が斜面に衝突したときは、図6(a)のように衝突した次の瞬間に飛行を再開するモードと、(b)のように衝突後ころがり運動を経てから飛行を再開するモードが現れる。前者のモードは岩盤、土砂の両方で出現した。

衝突による地盤の塑性変形で力学的エネルギーが失われ跳躍できずころがりとなり、回転運動による遠心力で斜面抗力が0になった時点で飛行を再開するものと考えられる。

衝突後の角速度が大きいとわずかに $1/8$ 回転程度で飛行を始めるが、角速度が小さいと $1/2$ 回転ほどで飛行を再開する。

落石が斜面下部の私道へ衝突したときの挙動は、図7に示すように斜面上とは異なる。投石のうち4個は斜面内で停止し、65個が私道に到達したが、私道へ衝突後45個はわずかな跳躍またはころがり幅員 3.5 m の私道内で停止、12個は路側部まで跳躍、7個は路側部を越えて跳躍した。

私道は泥岩斜面を切土して造られたもので、表面の数 cm は風化し土砂化しているものの斜面地盤に比べてはるかに堅い。約70%の落石は、私道への衝突により法線方向運動エネルギーのほとんどを失っ

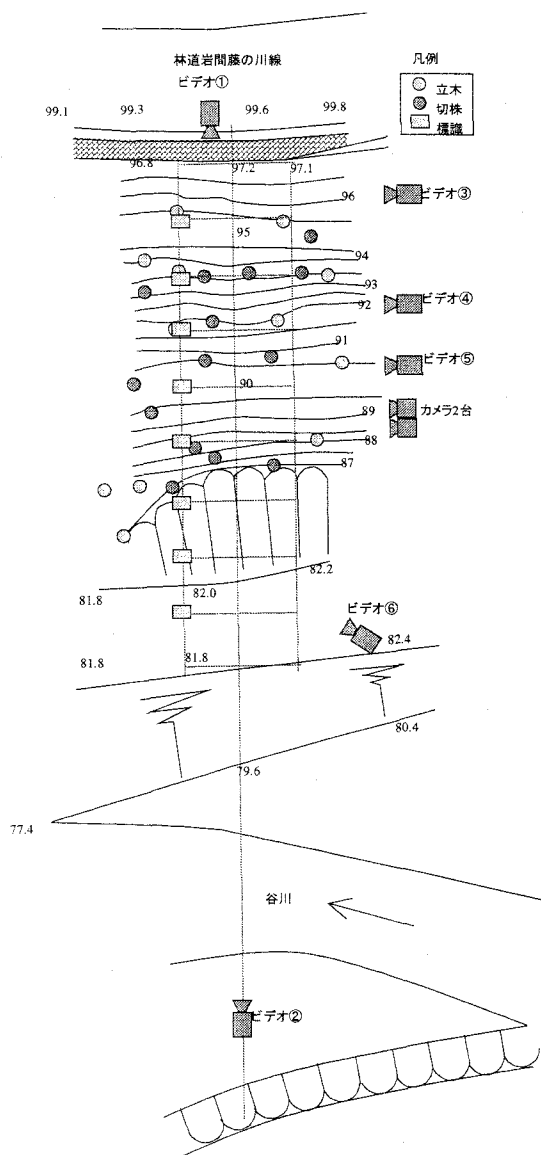


図3 カメラ配置

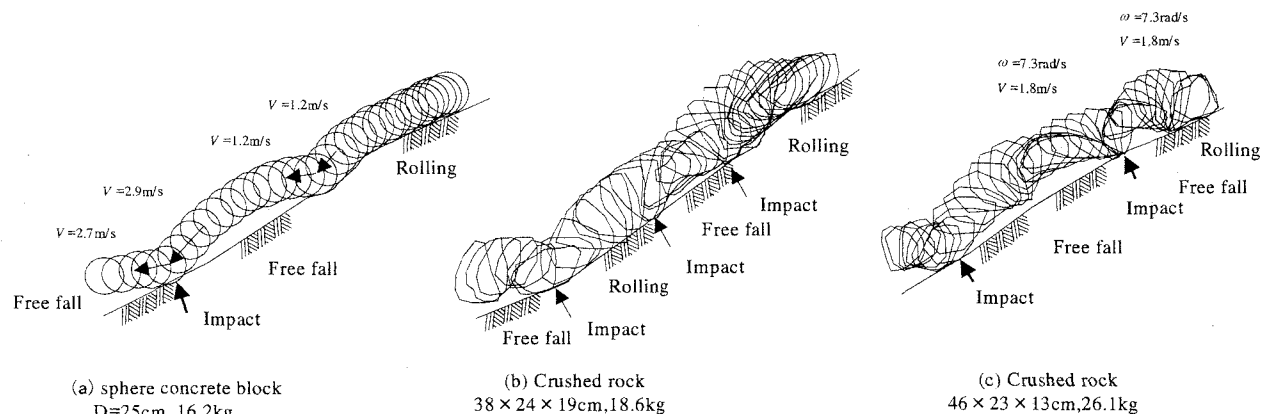


図4 落石の初動

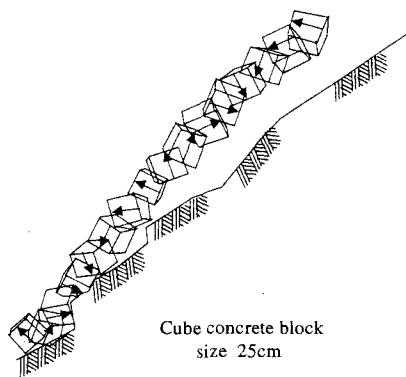


図 5 飛行運動

たことになる。衝突後に跳躍した落石についても跳躍量は約 0.5m であるので、衝突後の法線方向速度は $v=3\text{m/s}$ 程度である。

3.4 樹木への衝突

投石 69 個の内 8 個が落下中に樹木へ衝突した。その中の 2 例を図 8 に示す。飛行中の落石が樹木の根元へ真正面から衝突すれば、落石は樹木と斜面に挟まれて停止する。根元より上に当たれば、跳ね返って斜面に落下し、線速度 0 の状態からころがり運動を再開する。当たる角度が薄いと少し減速はするものの進行方向を変えて飛行運動を継続する。

3.5 落下軌跡

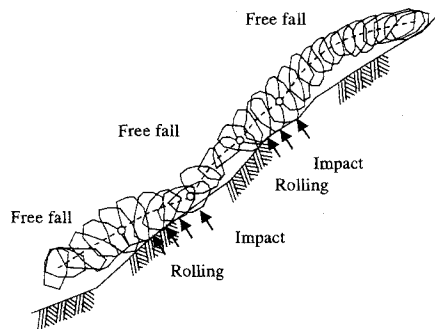
図 9 は投石全ての平面的落下経路である。矢印の付いた線は、落石停止位置が確認できなかったものを表している。落石の運動方向は、初動位置の地形に支配される。また、樹木や切株、露頭岩盤に衝突すると運動の方向を急変させる。投石位置からの落石の拡がり、初動地点の等高線の法線方向から左右にそれぞれ 30° (93%は 15°), 拡がり角 $\theta=60^\circ$ であった。

4. 落下速度と跳躍量

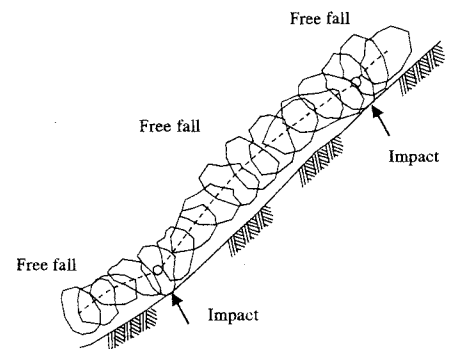
4.1 落下速度

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 10(a)となる。入射速度をほぼ包絡する速度残存係数は 0.75 である。また、落石の形状別に入射時における速度残存係数の平均値と標準偏差を求めれ



(a) Crushed rock (48 × 23 × 21cm, 31.1kg)



(b) Crushed rock (45 × 26 × 24cm, 32.6kg)

図 6 跳躍運動

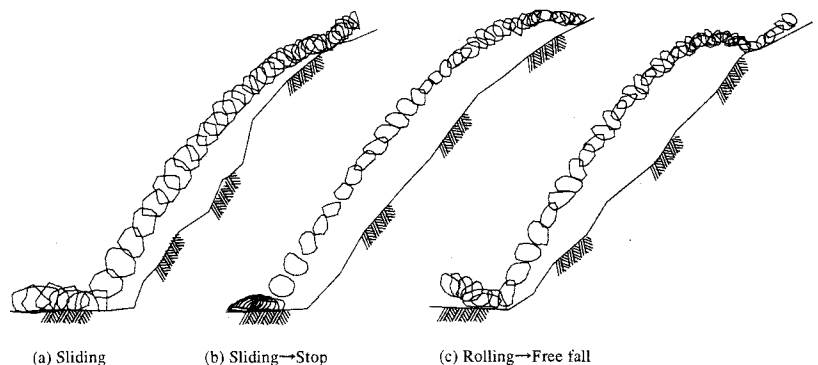


図 7 道路への衝突

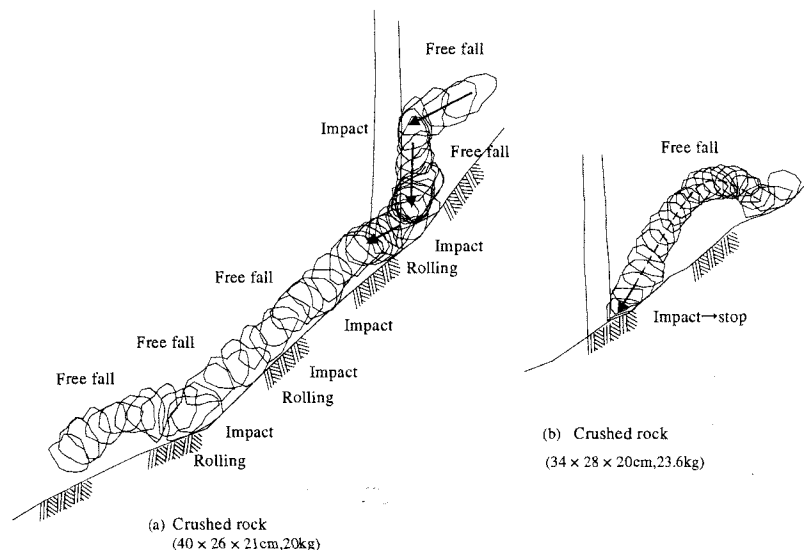


図 8 樹木への衝突

ば図 10(b)となる。平均値の最小は砂岩碎石，最大はコンクリート立方体であった。

速度残存係数 α と等価摩擦係数 μ の関係はで表される。斜面の平均傾斜角 $\theta=46^\circ$ であるので、速度残存係数を 0.75 とし等価摩擦係数を算定すれば $\mu=0.45$ となる。

4.2 跳躍量

図 11 は、落石の初期位置からの落差 H と跳躍量の関係を示したものである。落石が切り株に当たら

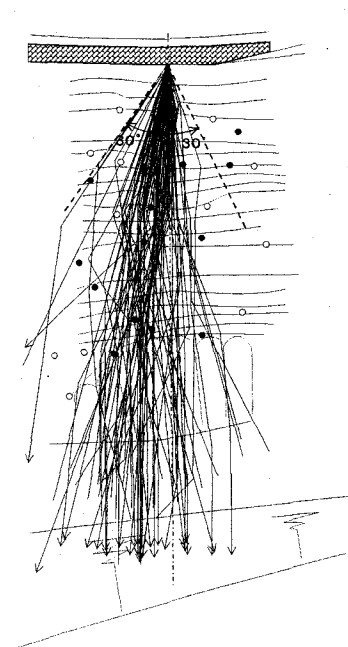


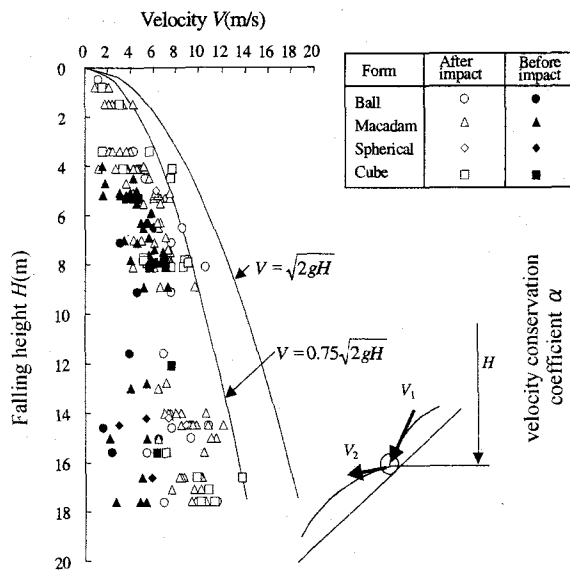
図 9 落下経路

ない場合の跳躍量は 1m 以下であるが、切り株に当たって跳躍した場合には最大 2.1m の跳躍量を示した。

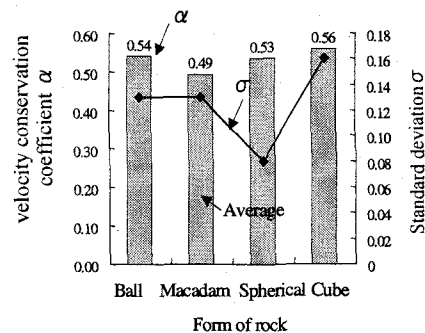
6. まとめ

実験の結果をまとめると以下のようなになる。

- ①落石の初動はころがりである。角速度が 7～8m/rad で飛行へ移行する。
- ②跳躍量が小さい場合には、ころがりか飛行かの判定が困難である。
- ③落石が飛行する際には、三次元的に回転する。
- ④落石がすべりと衝突する場合に運動エネルギーの損失が大きい。特に、衝突時の入射角が小さいと運動エネルギーの損失が大きい。
- ⑤落石が樹木の根元に正面から衝突すれば、地面と樹木に挟まれて停止する。樹木の根元より上方に当たれば跳ね返って地面へ落下する。当たる角度が小さいと、少し速度を落とし、方向を変えて運動を続ける。
- ⑥落石の運動の方向は、初動位置の地形に影響される。そして、樹木や切り株、基岩の突起に衝突し運動の方向を急変させる。
- ⑦落石の跳躍量は、切り株に当たらない場合 1m 以下であったが、切り株に当たった場合には最大 2.1m の跳躍量を示した。



(a) Relation between Falling height and velocity of rockfall



(b) Relation between Form of rock and velocity conservation coefficient

図 10 落下高さと落石の速度の関係

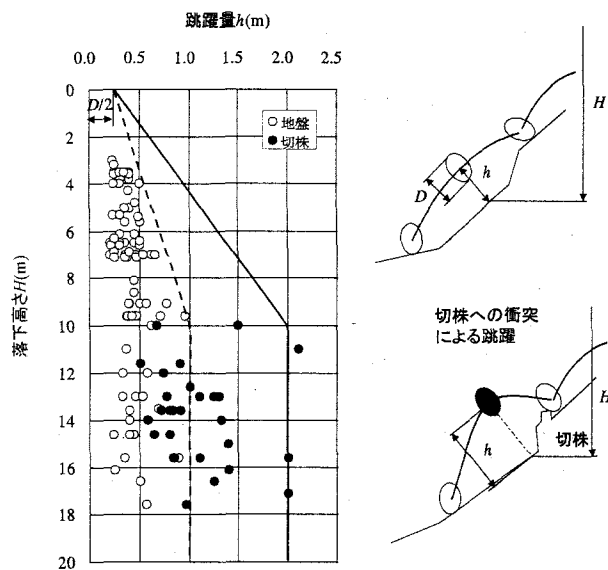


図 11 跳躍量