

## 落石の運動機構

運動形態，落石速度，跳躍量

(株)第一コンサルタント 国際会員 ○ 右城 猛  
(株)第一コンサルタント 奥村昌史

### 1. まえがき

四国の道路では日常的に落石が発生している。2010 年 8 月 16 日に越知町で発生した落石では，国道 33 号が 20 日の午後まで全面通行止めとなり，買い物客，人工透析患者，救急患者など地域の人々の生活に多大な影響を与えた。「四国の道は命の道である。通行止めにはしてはならない」ことを改めて認識させられた。

本論文では，筆者らがこれまでに行ってきた落石実験に基づいて落石の発生形態と運動形態について述べた上で，落石の速度と跳躍量の予測に関する現行の問題点について言及する。

### 2. 落石の発生形態

四国では過去 20 年間に 5 件の落石による死亡事故が発生している。高知県道東洋安田線の北川村二股(1988)，国道 321 号の大月町才角(1988)，国道 11 号の鳴門市北灘(1990)，高知県道東洋安田線の北川村島(1996)，国道 195 号那賀町(2006)である。いずれも道路上方の崖部の崩落であった。

2010 年 8 月 16 日の国道 33 号の落石も写真 1 に示すように，道路の約 15m 上方に露頭していた基岩が崩落したものであった。

### 3. 落石の運動形態

写真 2 は，白色のペンキで着色した質量 18kg の砂岩塊を斜面上で転がしたときの挙動である。最初は転がり運動をするが，すぐに飛行運動へ移行した。

写真 3 は直径 54cm，質量 200kg のコンクリート球を平坦地で転がした実験である。運動形態は飛行と衝突を繰り返すバウンドである。地面が完全に平滑でない限り，転がり運動にはならない。

写真 4 は，自然斜面から一辺 60cm で質量 520kg



2010年1月4日撮影

3.7×7×3m(推定150t)土佐国道工事事務所のHPより

写真 1 国道 33 号越知町の落石 (2010. 8)



写真 2 砂岩塊

写真 3 コンクリート球



写真 4 斜面を落下するコンクリート立方体

の立方体のコンクリート塊を落下させた映像である。コンクリート塊が写っている箇所が斜面への衝突点である。コンクリート塊は，バウンドを繰り返しながら斜面を落下した。

落石の運動はバウンドが主体的といえる。

### 4. 落石の速度

写真 4 に示した斜面の上から重さ 0.12~2.06t の砂岩塊 11 個を投下し，ビデオ画像から速度を求めた。その結果を図 1 に示す。

落石は，飛行中は加速するが斜面へ衝突すると減速する。加速と減速を繰り返しながら落下し，斜面下方の傾斜角が 14° と緩くなった崖錐部で停止した。

図 1 のグラフには，すべり運動と見なした落石対策便覧式で，等価摩擦係数  $\mu$  をパラメータとして計算した速度曲線も描いてある。

逆算される等価摩擦係数は，斜面の上部では  $\mu = 0$

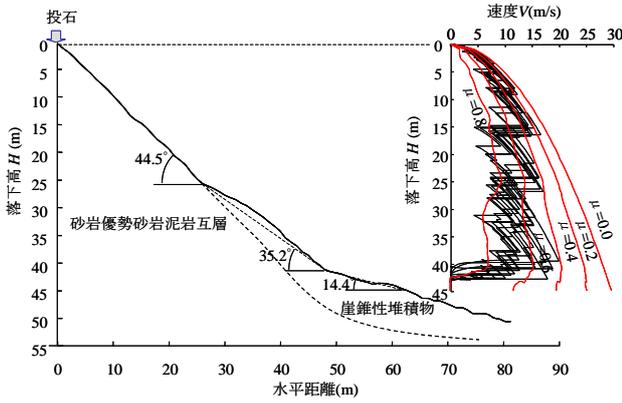


図 1 落石実験から得られた速度

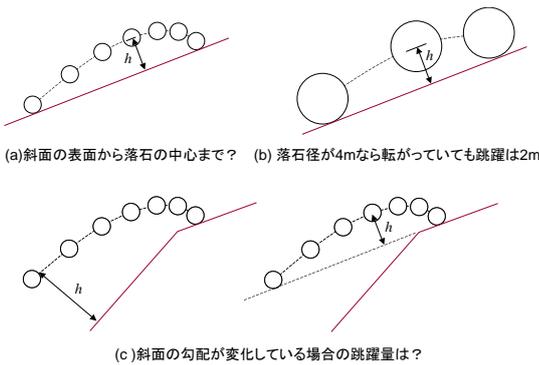


図 2 跳躍量の定義

～0.2, 中腹では  $\mu=0.4\sim0.6$ , 下部では  $\mu=0.4\sim0.7$ , そして斜面の下端では  $\mu=0.8$  となり落石が停止する。落石対策便覧では  $\mu=0.1\sim0.35$  を用いることとしているが、実験結果とは整合しない。

### 5. 跳躍量と終端速度

落石の跳躍量については、明確に定義されないまま用いられている。一般的には図 2(a)のように地表面から落石中心が描く飛行軌跡までと認識されているようであるが、図 2(b)のように落石径が大きい場合や図 2(c)のように斜面勾配が変化している場合の取り扱いが問題となる。

落石対策では跳躍量を 2m として一般に設計している。しかし、既往の現場実験によれば、図 3 に見られるように跳躍量が 2m を超えるケースも少なくない。斜面傾斜角が大きいほど跳躍量は大きくなる傾向が見られる。

落石が傾斜角  $\theta$  の斜面において水平  $u_0$  の速度で飛び出すと仮定すると、跳躍量  $h$  は式(1)で、着地速度  $v$  は式(2)で表される。

$$h = \frac{(u_0 \sin \theta)^2}{2g \cos \theta} \quad (1)$$

$$v = u_0 \sqrt{1 + 4 \tan^2 \theta} \quad (2)$$

図 3 には、 $u_0=5\text{m/s}$ ,  $10\text{m/s}$  として計算した跳躍量

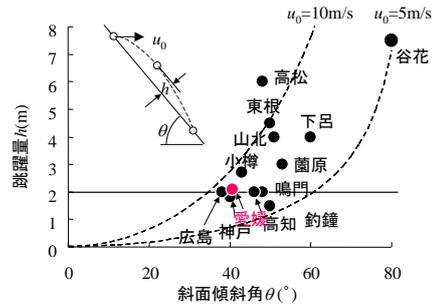


図 3 既往の落石実験による最大跳躍量

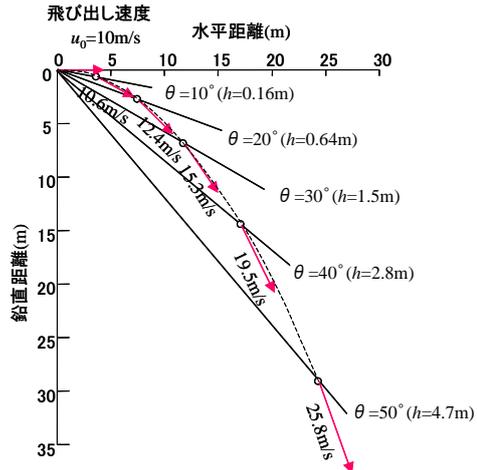


図 4 斜面傾斜角と落石速度および跳躍量の関係

曲線を破線で示している。実験結果は、2本の曲線の範囲に収まっている。

図 4 は、落石の飛行軌跡と速度を  $u_0=10\text{m/s}$  の条件で計算したものである。斜面傾斜角が大きいと飛行時間が長くなるので、着地速度と跳躍量が大きくなるのが容易に理解される。

### 6. 考察

以上から下記のことが考察される。

- (1) 四国における落石の多くは岩盤崩落であるため、崩壊時期や場所を特定することが非常に難しい。
- (2) 落石の運動は主として飛行と衝突を繰り返すバウンドである。設計には、すべり運動と仮定した等価摩擦係数法が採用されているが、速度を過大に評価しすぎる傾向がある。
- (3) 落石の速度を予測するには、斜面への衝突における速度減衰と回転エネルギーの影響を適切に評価する必要がある。
- (4) 「跳躍量は 2m である」「落下高さが 40m で終端速度に達する」ということがあたかも自然法則のように言われてきたが、根拠のない誤った考えであることがその後の多くの現場実験から明らかになっている。