

(80) ビデオによる落石運動の解析

建設省新潟国道工事事務所	関 博
(財)道路保全技術センター	伊藤 與一
建設省土木研究所	笹原 克夫
埼玉大学工学部	吉中龍之進
(株)パスコ	○下村 博之

Analysis of the Rockfall Motion using the Pictures of Videotape

Hiroshi SEKI,	Ministry of Construction
Yoichi ITO,	Road Management Technology Center
Katsuo SASAHARA,	Ministry of Construction
Ryunoshin YOSHINAKA,	Saitama University
Hiroyuki SHIMOMURA,	PASCO Corporation

Abstract

For the purpose of making countermeasures against rockfall disasters, we analyzed rockfall motion through the videotape monitoring the work of letting stones fall on to the surface of a slope. The objective slope has complex features; over 200m height, 40-55 degrees angle in its upper part, a bluff in its middle part, 40 degrees in its lower part.

The results are summarized as follows;

- 1) The velocities of rockfalls and the heights of jump differ drastically according to the parts of the objective slope. At the bluff, the observed velocities and heights of jump far more exceed the figures indicated by Manual of the countermeasure against rockfalls. On the contrary, in the lower part of this slope, the observed velocities are smaller than that of Manual.
- 2) The loss of the kinematic energy by colliding correlates to the angle of reflection at a slope.

1. はじめに

斜面において落石対策を講ずる上で、その工種や規模は、落石エネルギーや跳躍等の落石挙動を想定して決定されなければならない。しかしながら、特に長大斜面においては、落石速度や跳躍の程度をどのように設定するかは未解決の問題であり、落石の挙動を明らかにすることは重要な課題である。著者らは、斜面の浮石除去作業を撮影したビデオ画像を用いて、落石速度、軌跡等を計測した。その結果得られた知見を以下に報告する。

2. 調査地の概要

調査地は、図-1, 2に示すように、阿賀野川右岸側のJR磐越西線および国道49号と平行している山岳地域である。道路はフラットスラブで阿賀野川に張り出した構造で、山側を通るJR線と国道は極めて近接している。斜面は最頂部が標高200~400mで、国道との比高差は最大200mにおよび、山腹は平均50°の斜面勾配である。浮石除去において落石経路となった箇所は、斜面最上部(標高200m)から道路直上

(同60m)まで立木がなく、かつ露岩している。標高90～100m間は勾配80°の急崖で、それより上位は40～55°、下位は40°の勾配を呈しており、地質条件によって斜面勾配を異にする複合斜面である。地質は、斜面中部～下部には中・古生代の砂岩・粘板岩、上部には新第三紀の流紋岩の貫入岩が分布する。浮石除去の対象は斜面のほぼ最上部に分布する流紋岩の岩塊で、小割りにして平均φ50cm大の石を約100個落下させた。

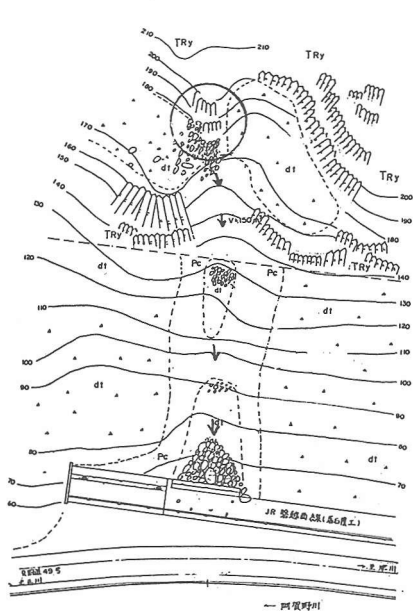


図-1 調査地平面図

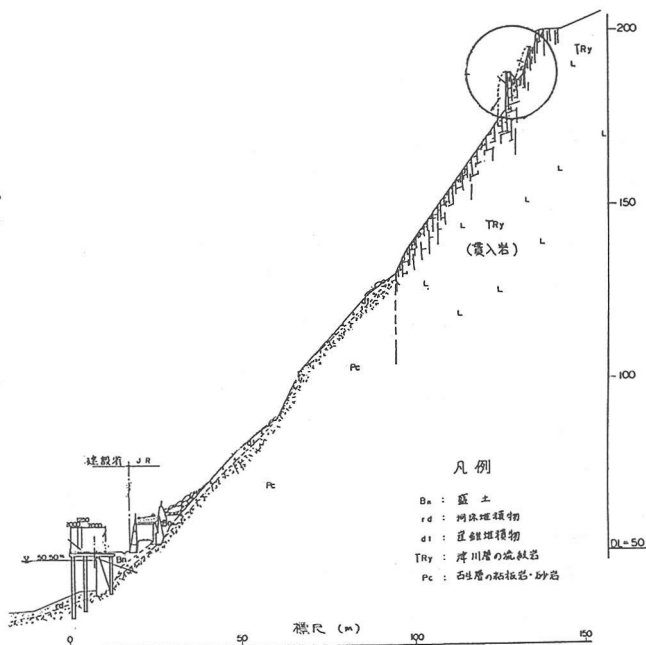


図-2 調査地横断面図

3. 計測方法

浮石除去作業における落石ビデオ撮影は、道路路肩にビデオカメラを固定し、斜面に向かって斜め上方を見上げる方向で撮影した(写真-1)。落石は跳躍しながら落下してくるため、ビデオ画像では落石速度は直接的には計測できない。したがって、以下の手順で間接的に速度を計測した。

まず、斜め空中写真を用いて落石経路の詳細地形図を作成する。この等高線を再び斜め空中写真上に投影し、その写真とビデオ画像の地形を照らし合わせて、ビデオ画像に映る斜面部の標高値を設定する。ビデオ画像上では空中を飛跳中の落石の位置は特定できず、斜面に接している場合のみ位置標定が可能である。そのため、落石跳躍の離陸から着地までの移動時間と2地点の標高をビデオ画像から計測し、地形図から2点間の水平距離を求めて、落石速度を計算した。



写真-1 ビデオ画像

4. 計測結果

ビデオに録られている落石のうち、跳躍運動および斜面接地箇所が明瞭なもの33個について計測した。これらは大部分が立方状でこぶし大から1 m径の大きさである。ビデオ画像で測定可能な範囲は、斜面最下部から急崖直上の標高 110 m程度までである。その間で落石は1回ないしは数回の跳躍運動を行っており、各跳躍毎に計測して落石速度および軌跡を計算した。なお測定誤差は、速度値に換算して $\pm 2 \sim 5 \text{ m/s}$ 程度である。

(1) 落石の軌跡

各跳躍の離陸・着地地点が得られており、その間は放物運動していると考えられることから、落石の軌跡を描くことが可能である。落石軌跡を断面図に示したものが図-3である。便宜上標高110～90 m間の跳躍を第1跳躍、その後再び跳躍するものを第2跳躍と呼ぶ。第1跳躍は急崖部を落下することにより、落下距離が20～30 mと大きく、軌跡・着地位置もばらついている。第2跳躍を行うものは、ほぼ同形の軌跡を描き、移動距離は概ね15 m、跳躍量は1例を除いて2 mを超えていない。

(2) 落石速度

落石の跳躍中の運動を放物運動とすると、水平方向は等速度運動、垂直方向は重力による加速度運動であるから、離陸時と着地時の速度は次式で表される。

$$V_{sx} = V_{ex} = Dx / t$$

$$V_{sy} = \frac{Dy - 1/2 g t^2}{t}$$

$$V_{ey} = \frac{Dy + 1/2 g t^2}{t}$$

ここに、 V_{sx} , V_{sy} ; 離陸速度の水平・垂直成分、 V_{ex} , V_{ey} ; 着地速度の水平・垂直成分、 Dx , Dy ; 移動水平・垂直距離、 t ; 跳躍時間、 g ; 重力加速度である。

各落石の離陸速度・着地速度とその変化を図-4に示した。また各跳躍における離陸速度・着地速度の頻度分布を図-5に示した。第1跳躍は速度のばらつきが大きく、離陸速度は10～20 m/s、着地速度22～32 m/s が卓越する。第2跳躍は、第1跳躍に比べて小さい速度となり、離陸時は5～10 m/s、着陸時12～16 m/s を示すものが多い。

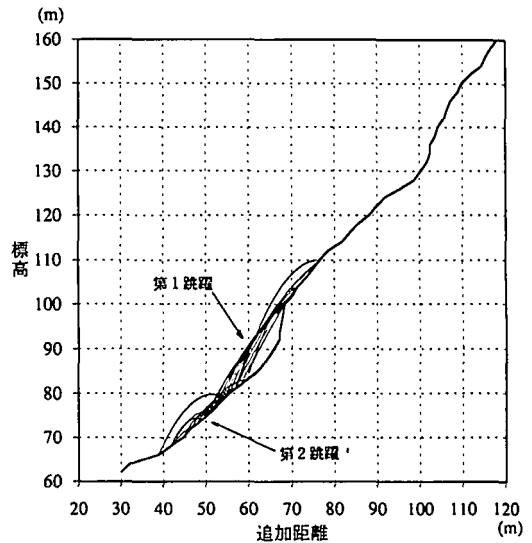


図-3 落石の軌跡

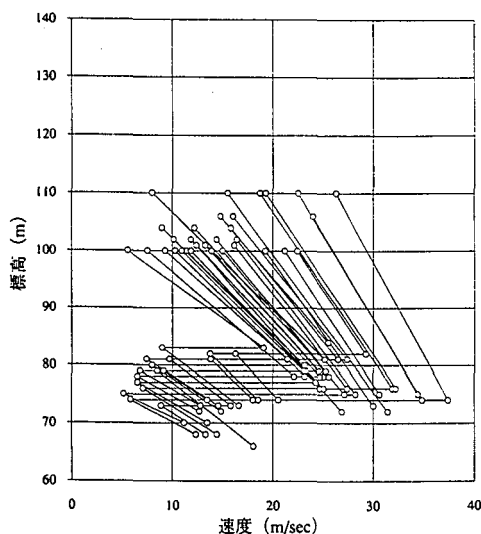


図-4 落石の速度変化

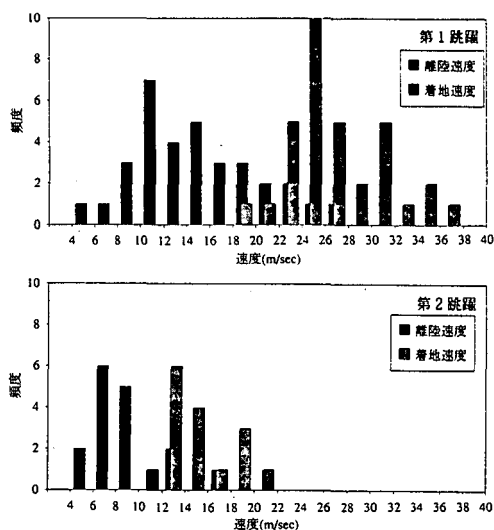


図-5 落石速度の頻度分布

5. 考察

(1) 落石対策便覧値との比較

落石対策便覧¹⁾には、実験に基づく落石速度の推定式として次式が示されている。

$$V = \alpha \cdot \sqrt{2gH}$$

ここに、 V ；落石速度、 α ；残存係数、 g ；重力加速度、 H ；落下高さで、残存係数の値は、斜面の勾配、斜面の土質、岩質、凹凸および落石の形状に左右される。また斜面が長大となって落下高さが40mを超えると、落石速度は一定値（終端速度）に達する傾向があるとしている。

ここで、落石対策便覧式から導き出される落石速度と本調査の解析結果を比較してみる（図-6）。図中実線は自由落下速度、破線は当該斜面（残存係数 $\alpha = 0.95$ ）での速度推定値である。落下高さ70～80m地点での速度は、推定終端速度（27 m/s）以内に収まっているが、そこから落下高さ100～110mまでは急崖部で自由落下するため、終端速度を大きく上回っている。しかしその後急激に速度を減衰し、落石対策便覧式による推定値より小さい速度となっている。

落石の跳躍量は、落石対策便覧によれば、一般に2mを超えることはほとんどなく、局所的な突起や凹凸がある場合には2m以上になることがあるとし

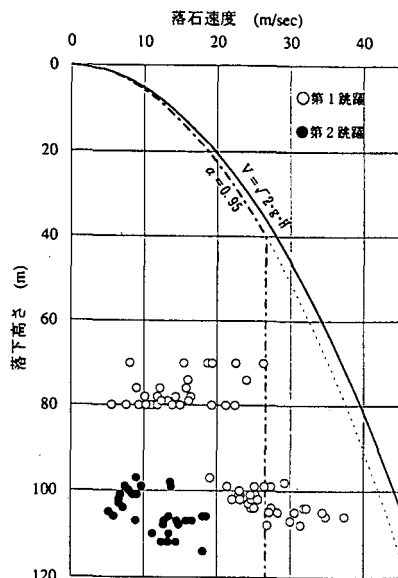


図-6 落石速度と落下高さ

ている。本調査によって得られた落石跳躍量を図-7に示す。第1跳躍では選急線から射出される軌跡をとるため、跳躍量は3～8mと大きい値を示す。第2跳躍では例外はあるものの、概ね2m以内に収まっている。

これらのことから、落石速度や跳躍量は途中の地形変化に伴い大きく変化することが明らかであり、単純に落石対策便覧式を適用すると、場所により過小もしくは過大に評価されることが示唆される。特に長大斜面においては一律な地形を呈することは希であり、落石対策を検討する上で、個々の斜面の詳細地形を考慮し、実績の解析やシミュレーション解析をおこない、的確な落石挙動を把握する必要がある。

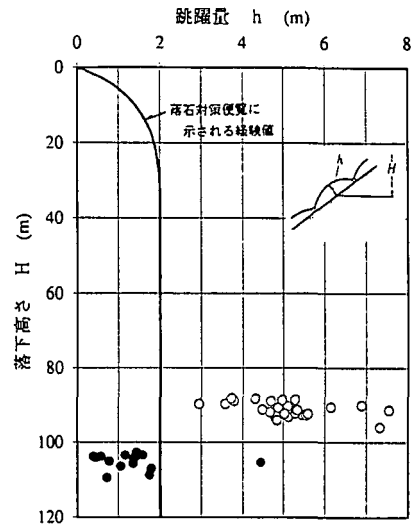


図-7 落石の跳躍量と落下高さ

(2) 斜面衝突時の速度減衰

先に示した図-4でも明らかのように、第1跳躍から第2跳躍へ移行する時、すなわち斜面に衝突して再びバウンドする時に、突入速度22～32m/sから射出速度5～10m/sへと大幅な速度減衰がみられる。両速度には単純な相関はみられず、また斜面勾配との直接的な関係も明瞭ではない。

斜面衝突時には、落石の運動エネルギーは、落石の振動や回転エネルギーへの変換とともに、斜面に吸収される分もあり、速度エネルギーとしては損失を受けることになる。そこで突入速度 V_i と射出速度 V_o の2乗比を速度エネルギー損失比($\nu = V_o^2 / V_i^2$)として着目し、関係のあるパラメータを検索した。その結果、図-8に示すように、落石の入反射角度と相関が認められた。これは斜面に直交に近い角度で衝突する程エネルギーが吸収され、逆に斜行して突入する程エネルギーロスが少ないことを示している。

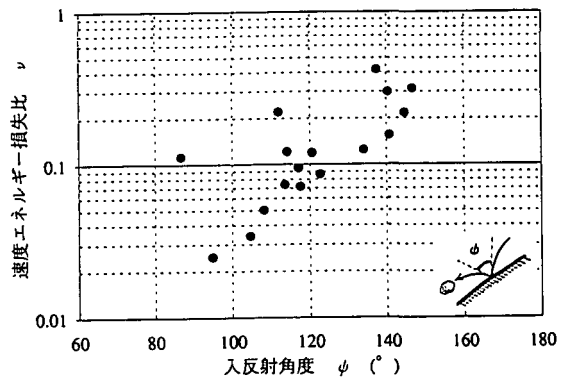


図-8 斜面衝突時の入反射角度と速度エネルギー損失比

6. おわりに

落石状況を撮影したビデオを用いて、落石運動を計測し、落石速度・軌跡・跳躍量を求めた。その結果、落石速度や跳躍量は、地形変化により大きく変化することが明らかとなった。落石挙動の実態を把握することは重要であり、浮石除去等の機会には積極的に記録・計測していくことが必要であろう。

文末ではあるが、本解析にあたりご協力頂いた建設省新潟工事事務所の方々に深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，1983
- 2) 岩井一夫他：一般国道49号を例とした落石のシミュレーションについて，第12回土木学会新潟会研究調査発表会，1994.10