

デジタルビデオを用いた自然斜面の落石運動の解析

ANALYSIS OF MOTION FOR ROCK FALLING ON A NATURAL SLOPE
BY USING DIGITAL VIDEO IMAGE

寺岡正人*, 井口 斉**, 市川智宏***, 西垣好彦****, 櫻井春輔*****

Masato TERAOKA, Hitoshi IGUCHI, Tomohiro ICHIKAWA, Yoshihiko NISHIGAKI, Syunsuke SAKURAI

* 阪神高速道路公団 神戸第一建設部 有野工事事務所 (〒651-1100 神戸市北区有野中町 4-12-4)

** 阪神高速道路公団 神戸第一建設部 設計課 設計第二係長 (〒650-0041 神戸市中央区新港町 16-1)

*** 基礎地盤C(株) 岩盤工学センター (〒636-0822 奈良県生駒郡三郷町立野南 3-12-21)

**** 理博 基礎地盤C(株) 岩盤工学センター 所長 (〒636-0822 奈良県生駒郡三郷町立野南 3-12-21)

***** 工博 広島工業大学 学長 (〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅 2-1-1)

キーワード：落石、斜面、落石の運動形態

(falling rock, slopes, motion of falling rocks)

1. はじめに

北海道の豊浜トンネルでの岩盤崩壊事故後、平成8年に道路防災点検が全国的に実施された。その結果、落石発生危険箇所がかなり指摘され、落石防護工が多く施工されている。

落石防護工を設計する際には、落石発生位置の特定と共に、斜面上を落石が運動する軌跡の予測が必要となる。

落石の運動を予測する方法は、経験則に基づく方法と数値解析による方法に分けられる。現在、シミュレーションによる数値解析の手法としてDDA法、DEM法、モンテカルロ法等が提案されている。

これらのシミュレーションでは、斜面や岩塊の特性を運動パラメータとして入力する必要がある。しかし、運動パラメータの入手を目的とした現場落石実験は、数が限られており、落石対策便覧¹⁾以後のデータはまだ数が少ないのが現状である。

本稿では、道路建設現場の斜面で行われた不安定岩塊除去の際に、デジタルビデオを用い落石状況の撮影を行った。それを元に、運動パラメータを解析した結果について報告する。

2. 現場概要

現場は、兵庫県神戸市の阪神高速道路建設予定地で、幅30m、比高50m、傾斜角は露岩部で60~90°、崖錐部で約45°であり、全体に緩やかな尾根地形を形成している(写真-1)。地質は、流紋岩質凝灰角礫岩より構成され、岩質は硬いが亀裂も多く見られる。

写真測量及び登坂調査の結果から、非常に不安定と評価された10個の岩塊・転石に対し、除去作業を行った。その内2個の岩塊(No.14, 15)について撮影及び解析を行った。図-1に岩塊No.14, 15を通る断面図を示した。

岩塊の除去作業は、岩塊の背後にある開口亀裂にエアージャッキを差し込み、圧縮空気の圧力を利用して行われた。それぞれの岩塊は、複数回に分かれて除去・落下となったため、No.14の1回目の落石を今後No.14-1と表記する。

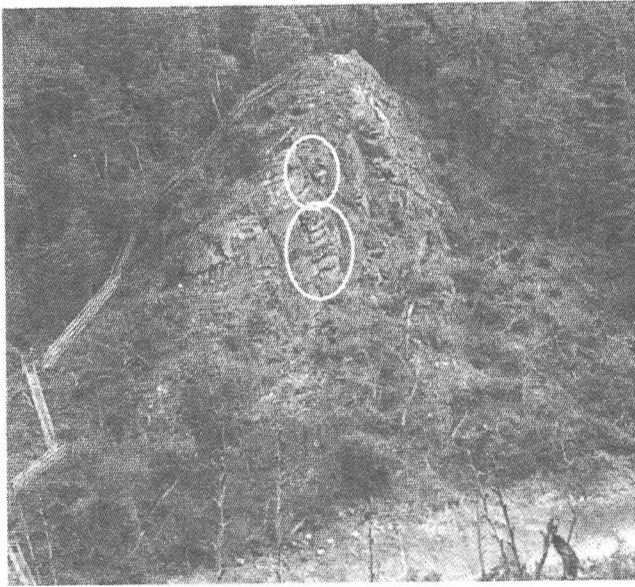


写真-1 現場写真 丸印は解析岩塊

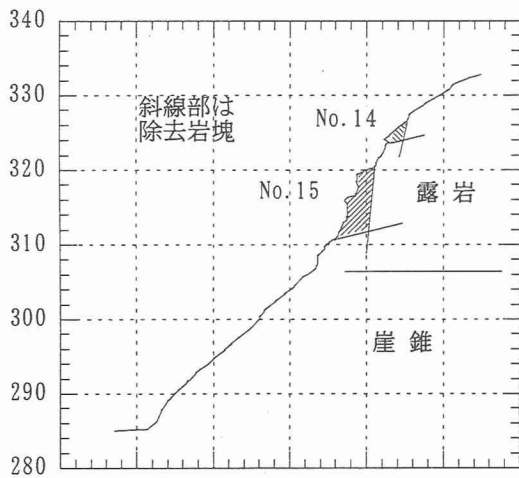


図-1 現場斜面断面図

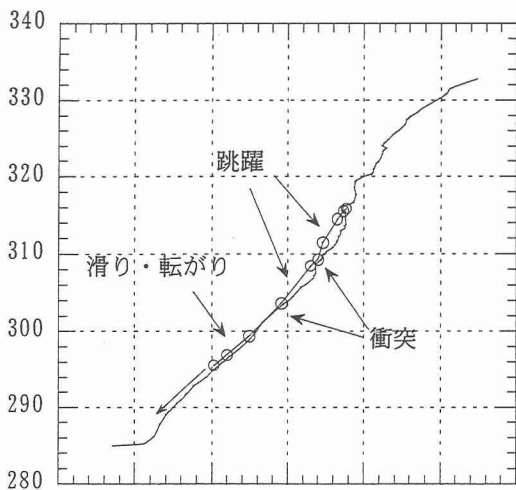


図-2 落石軌跡 (No.15-4)

3. 解析手法

除去作業の際に、斜面全体と写真測量で使用した基準点が映るように2台のデジタルビデオカメラを設置し、除去作業の様子をステレオ撮影した。

撮影したビデオデータから同時期の画像を抽出し、解析プログラムによって各瞬間の落石の3次元座標を計算した。写真測量で計測された斜面の断面図上に落石の位置をプロットすることによって落石の軌跡が求められる。その例として、No.15-4の落石軌跡を図-2に示した。図中に示したように、落石は、跳躍、衝突、転がり、滑り等の運動を繰り返しながら落下する様子が分かる。

除去岩塊はほぼ全てが斜面上では停止せず、斜面下の作業用道路まで到達したが、解析は斜面途中までとした。

4. 解析結果

4.1 落石速度

落石の持つ位置エネルギーの一部は、斜面の摩擦抵抗等により散逸し、落石速度は自由落下速度よりも遅くなる。

エネルギー散逸を考慮した落石速度 V は、式(1)で求められる。¹⁾

$$V = \alpha \sqrt{2gH} \quad (1)$$

g : 重力加速度、 H : 落下高、 α : 速度残存係数

図-3に解析結果を示す。図中のNo.14-1とNo.15-3に示した矢印は、衝突により破壊した箇所を示す。後者についてはその後の破片岩塊についても解析したがばらつきが大きかった。

過去に行われた現場落石実験では、落下高が30mまでの範囲では、速度残存係数は、0.6~0.8程度の数値が多くなっている^{1), 2)}。

今回の解析では、落下高が15mまでは、落石は主に跳躍運動を行っており残存係数が0.5~0.8程度となっている。それ以降になると滑り及び転がり運動が主体となり0.5以下になる傾向が見られる。これは斜面下部の崖錐部にはいり斜面の摩擦抵抗が大きくなったためと考えられる。

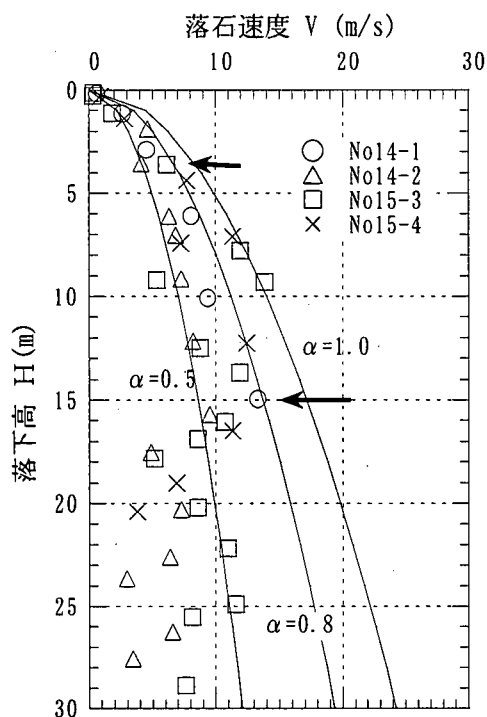


図-3 落石の速度

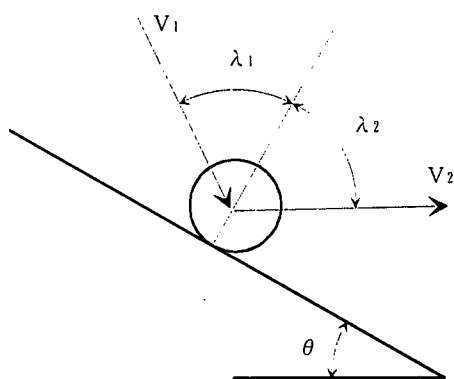


図-4 斜面衝突時の落石の運動

4. 2 反発係数・減衰係数及び等価摩擦係数
 図-4に示すように落石が速度 V_1 、入射角 λ_1 で斜面に衝突すると斜面法線方向の速度成分は $V_1 \cos \lambda_1$ から0になった後 $V_2 \cos \lambda_2$ へと回復する。反発係数 e は、斜面法線方向の回復の程度を表す係数で、式(2)で定義される。

$$e = \frac{V_2 \cos \lambda_2}{V_1 \cos \lambda_1} \quad (2)$$

また、減衰係数 ρ は斜面接線方向の速度成分の比であり、式(3)で定義される。

$$\rho = \frac{V_2 \sin \lambda_2}{V_1 \sin \lambda_1} \quad (3)$$

等価摩擦係数 μ は、斜面を落下する落石の運動を滑り運動に置き換えた場合に双方の速度が等価になる摩擦係数を意味し、等価摩擦係数を用いると落石の速度 V は次式となる。

$$V = \sqrt{2g \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) H} \quad (4)$$

表-1に今回の解析で得られた運動パラメータをまとめた。反発係数及び減衰係数は、落石が斜面と衝突するごとに求めた。

反発係数、減衰係数とも崖錐部では小さい傾向を示すがデータ数が少ないため平均値は分けずに示した。反発係数は、平均値で0.65、減衰係数は0.71であり、過去の事例²⁾と似た値になっている。

表-1 各岩塊の運動パラメータ

運動パラメータ	No.14-1	No.14-2	No.15-3	No.15-4	平均値	標準偏差
反発係数 e	-	0.951	-	0.654	0.650	0.326
		0.998		0.329		
		0.317				
減衰係数 ρ	-	0.938	-	0.918	0.707	0.222
		0.487		0.710		
		0.481				
等価摩擦 係数 μ	露岩	0.39~0.70	-	0.31~0.71	0.587	0.152
	崖錐	-	0.72~0.82	0.45~0.80	0.51~0.81	0.703

て求めた。等価摩擦係数は露岩部で0.59,崖錐部では0.70と過去の事例²⁾に比べ大きな値になっている。しかし、これらの値の標準偏差は、反発係数・減衰係数に比べ、かなり小さいので、信頼できる値といえる。このように大きな値となった理由として、過去の実験では投石または落下により初期速度が自由落下に近いのに対し、今回は落下初期から斜面との摩擦を受けていること。また、崖錐斜面では落石が滑り運動時に転石を弾きながら落下したため、エネルギーの損失が大きかったことが原因として考えられる。

4. 3 平面的落下軌跡

今回の落石では、既存の亀裂及び斜面への衝突時の衝撃によって、岩塊の破壊が起きている。破壊時の衝撃や斜面の凹凸によって落石の軌跡は、平面的な広がりを見せる。

図-5に今回観測された落石の平面的落下軌跡を示している。落下軌跡を包絡する線の広がり角は50°程度となっている。これは、破壊時の衝撃による拡散に加え、斜面が緩やかな尾根地形になっているためと思われる。

5. まとめ

除去岩塊の落石運動をデジタルビデオで記録し、落石の3次元的軌跡を解析した。その結果から、実際に発生した落石時の運動パラメータの計算を行った。速度残存係数は、露岩部では大きく、崖錐部では小さい傾向を示している。反発係数や減衰係数は、いずれも崖錐部で小さい傾向を示している。しかし平均値は、過去の事例と類似した値が得られた。等価摩擦係数は、露岩部より崖錐部の方が大きい値を示している。これは、速度残存係数が崖錐部で小さい傾向を示すことと整合している。今回求めた等価摩擦係数は、過去の事例より大きい傾向を示した。

ただ、デジタルビデオの分解能は、あまり高性能ではなく、落石の回転速度などを計算できなかった。したがって転がり運動については論じることが出来なかったため、滑りの中に入れたことになる。今後、撮影手法等に工夫の余地があると思われる。

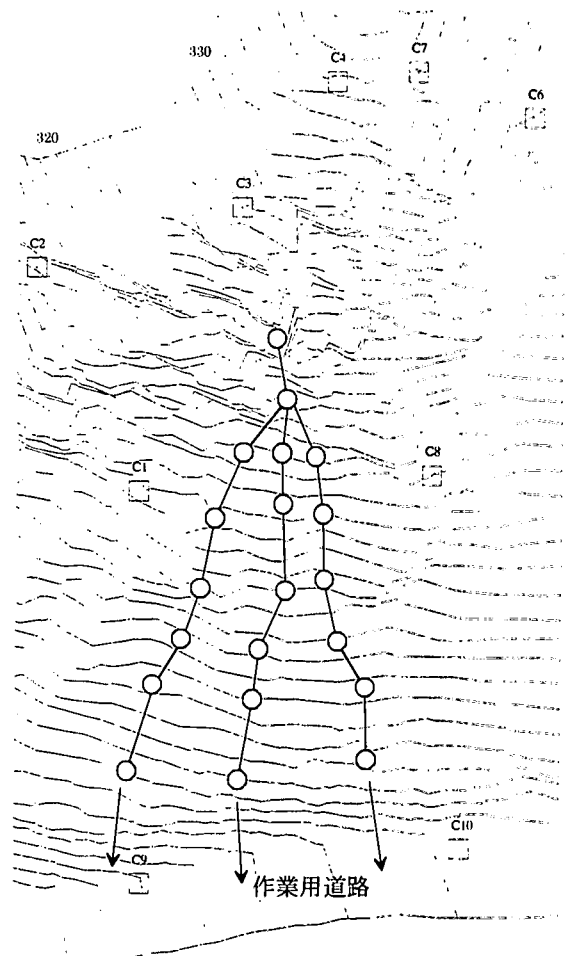


図-5 落石の平面的落下軌跡 (No15-3)

現地調査およびビデオ撮影にあたり多大な協力を頂いた、五洋・アイサワJ Vの山岸所長ならびに事務所の方々にここに謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，1983
- 2) 右城猛ほか：斜面を落下する落石の運動定数と跳躍量に関する考察，土木学会論文集，No.581/VI-37，pp380-389，1997