

I-B311 フィールドにおける落石の終末速度の測定

(株)構研エンジニアリング 正会員 塩野康浩
北海道開発局開発土木研究所 正会員 佐藤昌志
北海道開発局開発土木研究所 正会員 今野久志
北海道開発局開発土木研究所 正会員 佐藤 京

1. まえがき

急崖斜面における防護柵・覆工・防護ネットなど落石防護工の設計において、落石の衝突力、衝突エネルギーは、仮設防護工の重要な設計条件である。その算出には一般に、落石の落下高さを用いて斜面の勾配・摩擦などを考慮した換算落下高さおよび落石衝突速度を算出し、この値を各推定式に入力して衝突力、衝突エネルギーを求める方法がとられる。しかし現在一般に用いられている換算落下高さおよび落石衝突速度の算出式では、落下高さが高くなると衝突力、衝突エネルギーも増大し、高所からの落石に対する落石防護工の設計条件は非常に厳しくなり、安全側ひいては過大な設計となることが指摘されている。これまでに行なわれた実験結果によれば¹⁾、落石が落差 40m を超えると落下速度が一定の値(終末速度)に達する傾向があることが報告されている。そこで本報告では、落差 50m 以上からの人工落石をビデオカメラにより撮影し、落石の軌跡、法尻での落下終末速度を測定し、従来使われている落石速度算出式から求めた値と比較することで設計条件の妥当性について検討した。

2. 測定箇所および測定方法

2-1 測定箇所

測定箇所は日本海岸の急崖斜面である。斜面は大きく分けて上部の直立した急崖部分と下部の 50° の斜面部分からなる。直立した急崖部分は玄武岩溶岩が露岩しており、鉛直方向の開口する亀裂および、板状で亀裂間隔 10cm 以下の水平方向の亀裂が発達している。斜面の落差は 20m である。また下部の斜面部分は凝灰岩～凝灰角礫岩からなり、比較的平坦な露岩斜面となっている。斜面の落差は 36m である。



写真 1. 落石落下斜面

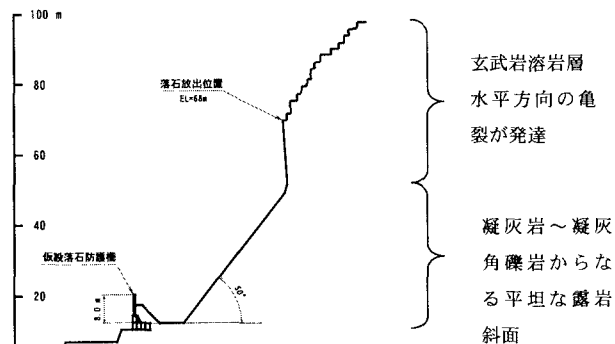


図 1. 測定斜面断面図

落石、終末速度

〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1 (株)構研エンジニアリング (Tel)011-780-2813(Fax)011-785-1501

2-2 測定方法

落石を撮影するためのビデオカメラは、崖斜面の側面方向へ 100m 離れた位置に設置した（図2）。落石は、ダイナマイトによる発破時の落石、および、発破後斜面上に残った岩塊を人力により落下させた落石を撮影した。斜面下部に設置されている落石防護柵（地盤面から高さ 8m）を基準寸法として、柵上端を通過してから地盤面に到達するまでの時間を計測し、その平均速度を落下終末速度とした。また、各落石の運動形態を目視により観察し、分類した。落下する落石の形状は写真2に示すように当箇所の岩盤の亀裂に支配された板状のものが大半を占め、大きさは1辺がダイナマイト装薬時の削孔間隔である 80cm 以下であった。

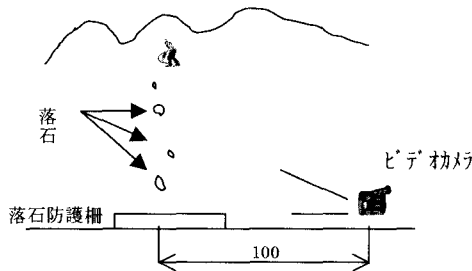


図2. 撮影状況

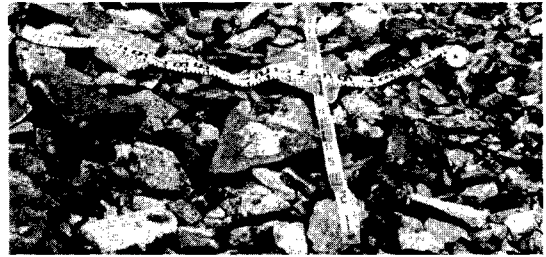


写真2. 落石

3. 測定結果および考察

撮影した落石の運動形態は自由落下型と斜面転落型とに分類した。

3-1 自由落下型の落石

ダイナマイトにより水平方向に放出され、斜面上でバウンドすることなく地面に落下した落石の鉛直方向への落下終末速度をビデオ画像から解析したところ、終末速度 V_{mr} は 26.7～40.0km/sec. であり平均 31.7km/sec. となった。また次式を用いて、落石放出位置から地盤までの落差（h）56m を自由落下した場合の終末速度（ V_{cal} ）を算出すると 33m/sec. となり、 V_{mr} とほぼ一致した。

$$V_{cal} = \sqrt{2gh}$$

3-2 斜面転落型の落石

法尻に到達した時の落石は斜面に沿って落下してくるものと、斜面上で跳躍しながら落下してくるものと大きく2種類の形態があったため、これをすべり又は回転運動型と飛跳運動型とに分類した。ビデオ画像から求めたそれぞれの落下終末速度の平均値は、すべり又は回転運動型で $V_{ms} = 12.3\text{km/sec.}$ 、飛跳運動型で $V_{mj} = 19.8\text{ km/sec.}$ であった。いずれの場合も、始めに直立斜面部（ $h_1 = 20\text{m}$ ）を自由落下した後、下部斜面（ $h_2 = 36\text{m}$ ）上を落下する形態となった。既往の実験結果²⁾によると軟岩における反発係数 e は 0.48 ± 0.26 であり、軟岩で凹凸小～中、立木なしの斜面と形状が角状～丸状の落石の等価摩擦係数 μ は $0.11 \sim 0.2$ である。 $e = 0.48$ 、 $\mu = 0.15$ として次式を用いて終末速度 V_{cal} を算出すると 26.8m/sec. となった。

$$V_{cal} = \sqrt{2gh_2 \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) + (e\sqrt{2gh_1})^2}$$

ビデオ画像から求めた終末速度（ V_{ms} 、 V_{mj} ）と既往の実験式から求めた終末速度（ V_{cal} ）との関係は $V_{ms} < V_{mj} < V_{cal}$ となり、高所からの斜面転落型の落石に対する落石防護工の設計に既往の実験式により算出した終末速度を適用すると過大な設計となる可能性もあることが明らかになった。

参考文献

- 1) 落石対策便覧：昭和 58 年 社団法人日本道路協会
- 2) 落石防護施設の設置に関する調査研究報告書：昭和 49 年 （財）高速道路調査会