

斜面を転倒する落石速度の計測とその解析

崇城大学大学院 学生会員 ○川窪秀樹

崇城大学 正会員 村田重之

正会員 田代敬大

正会員 渋谷秀昭

1. まえがき 落石防護柵は設計基準に基づいて設計されているはずであるが、設計外力である衝撃力や落石エネルギーはまだ正確に把握されていない。そこで本研究では、設計外力に必要な落石速度を決定するために、最も基礎的な平面的斜面の中型模型実験装置を用いて基本的な落石実験を行い、落石速度を計測し、それを線形重回帰によって推定する式を導きその相関性が高かったことが確かめられたので報告する。

2. 実験装置および実験方法 実験装置は合板を使って幅 35cm、斜面長 600cm、側壁幅 35cm の斜面を作成し、斜面側面の片側にアクリル版を設置し落石形態が調べられるようになっている。転倒距離の最下 1m 部分に速度計を設置し、斜面の勾配は自由に変えられる構造になっている。実験に用いた落石は、コンクリート供試体を球体、立方体、20 面体の 3 種類を準備し、質量はすべて 1.1kg である。これに加え自然岩石をできるだけ球状に整形し、質量も他のものと様々に 1.1kg にした。またこれらの供試体に番号をつけ、形状の変化による速度の違いが分かるようにした。20 面体の実験については、一面の形状が三角形なので三角形の頂点が斜面に対して上側に来るように一面を斜面につける場合と、下側に来るようにつける場合の 2 種類で行い、立方体の実験については、重心線が斜面に対して垂直方向になるように一辺を斜面につける場合と、角を斜面に着ける場合の 2 種類で行った。そして、これらを転倒距離 3m、4m、5m および 6m の位置から自由落下させた。斜面勾配は 30 度から 10 度おきに 70 度までである。1 ケースについての実験回数は 50 回とする。

3. 実験結果

(1) 落石の転倒形態 落石の転倒形態は落石の形状によって大きく変わる傾向がある。球はどの場合でも転がるのに対して、自然岩石は転倒距離や斜面角が小さい場合は跳ねが多く、50 度あたりから角度が大きくなると転がりが多くなる。また、20 面体や立方体では転倒距離や斜面角が小さい場合は転がりが多く、大きくなると滑りが多くなる傾向が観察された。

(2) 落石速度 図 1 に転倒距離 5m の場合の平均落石速度と斜面角の関係を示す。斜面角が 30 度・40 度の場合は落石の形状によって落石速度が変わ

ってくるが、50 度から 70 度の場合は落石の形状による落石速度の変化はあまり見られない。また、他の 3m・4m・6m においても同様な傾向が観測された。これらのことより、落石速度は斜面角が小さい場合は落石形状に影響されるが、斜面角が大きい場合にはあまり落石形状に影響されないことが推測される。

(3) 線形重回帰による推定式 これまでの実験から、落石速度は転倒距離と落石角度に影響されることが分かっている。さらに、図 1 より落石速度は角度が小さい場合には落石形状に影響され、50 度を境に角度が大きい場合には落石形状に影響されない傾向が確認された。そこで確認のために、落石角度 50 度を境にして角度が小さい場合と大きい場合に分け、さらに、それぞれにおいてダミー変数として落石形状が存在する

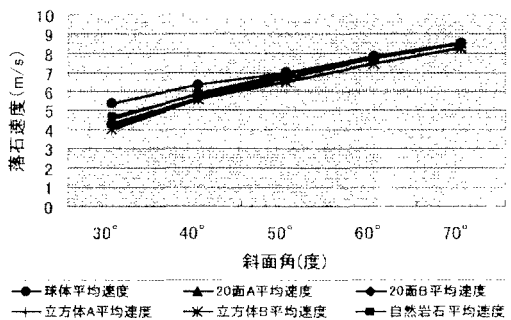


図 1 落石速度と斜面角の関係 (L=5m)

場合と存在しない場合について、落石速度（v）を従属変数とし転倒距離（L）、斜面角（θ）を独立変数として重回帰分析を行った。その結果を以下に示す。

① 斜面角 30 度から 40 度で、落石形状を含まない場合

$$R=0.918 \quad R^2=0.844 \quad \bar{R}=0.918 \quad \bar{R}^2=0.843 \quad N=2023$$

$$V=-2.309+0.120 \theta +0.662L$$

$$(-30.8) \quad (64.8) \quad (81.2)$$

② 斜面角 30 度から 40 度で、落石形状を含む場合

$$R=0.963 \quad R^2=0.928 \quad \bar{R}=0.963 \quad \bar{R}^2=0.928 \quad N=2023$$

$$V=-1.763+0.120 \theta +0.665L-0.534 \delta_1-0.627 \delta_2-0.729 \delta_3-0.859 \delta_4-0.801 \delta_5$$

$$(-33.7) \quad (95.5) \quad (120.0) \quad (-23.9) \quad (-31.4) \quad (-32.9) \quad (-43.1) \quad (-40.0)$$

③ 斜面角 50 度から 70 度で、落石形状を含まない場合

$$R=0.982 \quad R^2=0.965 \quad \bar{R}=0.982 \quad \bar{R}^2=0.965 \quad N=3205$$

$$V=-1.620+0.0760 \theta +0.936L$$

$$(-48.2) \quad (164.7) \quad (272.2)$$

④ 斜面角 50 度から 70 度で、落石形状を含む場合

$$R=0.987 \quad R^2=0.974 \quad \bar{R}=0.987 \quad \bar{R}^2=0.974 \quad N=3205$$

$$V=-1.518+0.0763 \theta +0.936L-0.166 \delta_1-0.0328 \delta_2-0.0520 \delta_3-0.158 \delta_4-0.322 \delta_5$$

$$(-51.4) \quad (192.8) \quad (317.6) \quad (-15.5) \quad (-3.1) \quad (-4.9) \quad (-14.9) \quad (-29.3)$$

ここで、V：回帰式による落石速度、θ：斜面、L：転倒距離、N：データ数

R：重相関係数、R²：寄与率、 $\bar{R}$ ：自由度調整済み重相関係数、 $\bar{R}^2$ ：自由度調整済み寄与率

δ₁：自然岩石ダミー変数、δ₂：20 面 A ダミー変数、δ₃：20 面 B ダミー変数

δ₄：立法 A ダミー変数、δ₅：立法 B ダミー変数、() 内は t 値

上述①と②より角度が小さい場合、落石形状を含んで解析した方が、回帰式の当てはめがうまくいっていることを示している。これは、両者の自由度調整済み寄与率（R²）を比較することからも明らかである。つまり、落石形状を含んだ方の回帰式の有効性が高いと言える。両者の予測値と実験値の散布図は図 2 の通りである。これに対して、上述③と④の角度が大きい場合においては、自由度調整済み寄与率（R²）にほとんど差がない。これは①と②の落石角度が小さい場合に比べて、落石形状について大差がないことを示している。

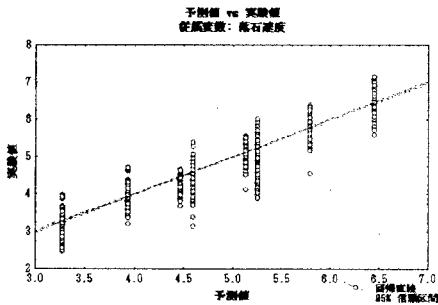


図 2 (a) 30・40 度 予測値と実験値の散布図
落石形状を含まない場合

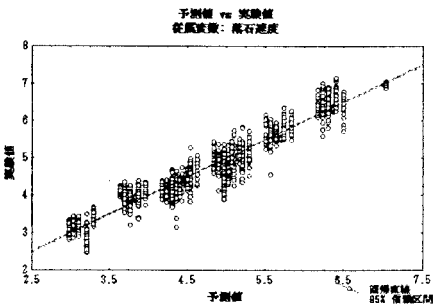


図 2 (b) 30・40 度 予測値と実験値の散布図
落石形状を含む場合

4. まとめ 今回の研究から次のようなことが明らかになった。落石速度は斜面角が小さい場合には落石形状に影響されるが、斜面角が大きい場合には落石形状にほとんど影響されない。