

落石形状の違いが落石運動に及ぼす影響とその速度の推定

熊本工業大学大学院 ○学生会員 田口博之

熊本工業大学 正会員 村田重之 正会員 田代敬大

正会員 渋谷秀昭 正会員 荒牧憲隆

1. まえがき 落石防護柵は当然ある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はまだ正確に把握されていない。そこで本研究では、最も基礎的な平面的斜面の中型模型実験装置を用いて繰り返し実験を行い、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非常に高い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 1 m 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、二十面体の 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、質量も他のものと同様に 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。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着ける場合と、角を斜面に着ける場合の 2 種類で行った。これらを転倒距離 3m、4 m、5m および 6m の位置から自然落下させた。斜面勾配は 30 度、50 度および 70 度である。1 ケースについての実験回数はそれぞれ 10 回である。

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ってくる。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転がり、大きくなると跳ねる。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滑り、大きくなると転がりや跳ねに変わる。

(2) 落石速度 図 1 に転倒距離 6m の場合の落石速度と斜面角の関係を示す。斜面角が 30 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 度および 70 度の場合で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。このことより、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影響されないことが分かる。また、斜面角が 30 度の場合は球体が最も速くついで自然岩石、20 面体で、最も遅いのが立方体となっている。図 2 に落石形状、斜面角別の落石速度と転倒距離の関係を示す。どの形状でも転倒距離、斜面角に比例

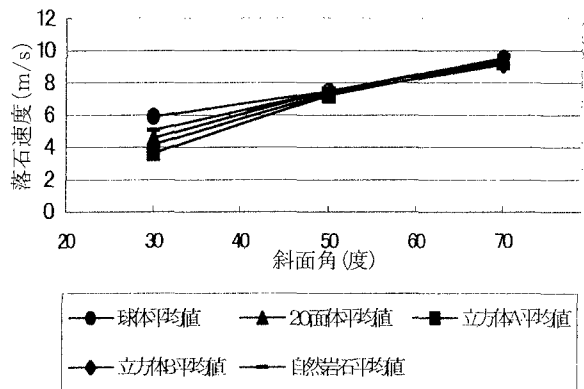


図1 落石速度と斜面角との関係

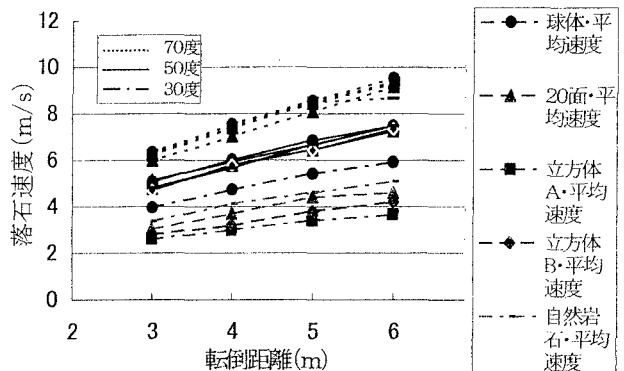


図2 落石速度と転倒距離との関係

して落石速度も増加し、転倒距離、斜面角が落石速度に影響することが分かる。

(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斜面角に影響されることが分かっている。さらに、落石速度は斜面角が 30 度の場合には落石形状に影響され、斜面角が 50 度および 70 度の場合には落石形状に影響されないということが明らかになった。そこで、落石形状に影響されない斜面角 50 度および 70 度について、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、落石速度を推定する式として $v = -1.984 + 0.915L + 0.081\theta \dots$ ① が得られた。この回帰モデルの決定係数 (R^2) は、0.9482 であり実験値をよく推定していると言える。また、標準回帰係数 (β) の大きさを比べることで落石速度を予測する各独立変数の貢献度を比較することができる。独立変数に対する標準回帰係数は転倒距離が 66.93、斜面角が 52.82 である。このことから落石速度に最も大きな貢献をするのが転倒距離で次に斜面角であることが分かる。実験による落石速度と式①の重回帰式から得られる推定値との散布図を図 3 に示す。実験値 $v = 4 \sim 10 \text{ m/s}$ 付近でややばらつきがあるものの、実験値と推定値の多くは 45 度線近くに集まっており式①の回帰式が全体として比較的良好な推定値を得ている。

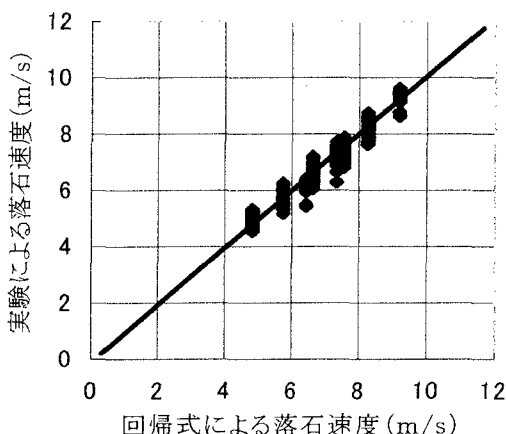


図3 実験値および回帰式による落石速度の関係

(4) 理論式に基づく重回帰分析 理論式を背景とした回帰式 $\ln(v/\sqrt{2g}) = a_0 + a_1 \ln L + a_2 \ln(\sin \theta) \dots$ ② を想定して再度重回帰分析を行った。その結果、落石速度を推定する式として $v = 0.707 + \sqrt{2g} L^{0.581} \sin^{0.708} \theta \dots$ ③ が得られた。この回帰モデルの決定係数 (R^2) は、0.9604 であり実験値をかなりよく推定していると言える。独立変数に対する標準回帰係数は転倒距離が 77.57、斜面角が 60.04 であり、ここでも落石速度に最も大きな貢献をするのが転倒距離で次に斜面角である。実験による落石速度と式③の重回帰式から得られる推定値との散布図を図 4 に示す。これも前述と同様に実験値 $v = 4 \sim 10 \text{ m/s}$ 付近でややばらつきが見られるが、実験値と推定値の多くが 45 度線近くに集まっており式③の回帰式が全体として比較的良好な推定値を得ている。

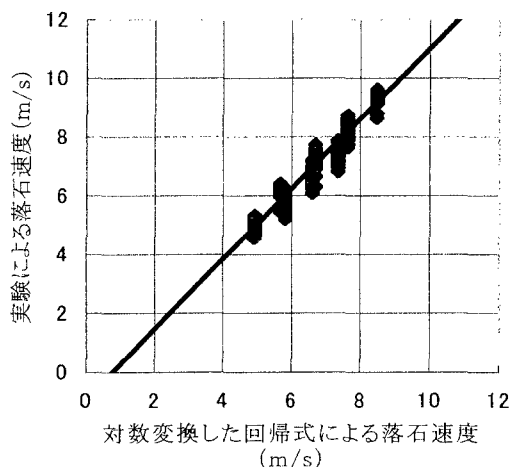


図4 実験値および対数変換した回帰式による落石速度の関係

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。(1) 落石速度は斜面角が小さい場合には

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影響されない。(2) 斜面角が 30 度の場合には球体が最も速くついで自然岩石・20 面体で、最も遅いのが立方体となっている。(3) 落石速度に対して最も大きな貢献をするのは転倒距離で次に斜面角である。(4) 転倒距離および斜面角の 2 変数で重回帰分析を行った結果、落石速度を推定する式 $v = -1.984 + 0.915L + 0.081\theta \dots$ ① が得られた。(5) 理論式を背景として重回帰分析を行った結果、落石速度を推定する式 $v = 0.707 + \sqrt{2g} L^{0.581} \sin^{0.708} \theta \dots$ ③ が得られた。これらの①・③の式は実験値をかなりよく推定していると言える。