

模型斜面を用いた落石速度の計測とその推定

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

熊本工業大学

正会員 渋谷秀昭

1. まえがき 落石による衝撃力に関する研究はすでに多くのものがあるが、その多くは空中を鉛直に落下した場合のもので、斜面を転倒してくる落石の衝撃力に関するものはわずかである。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。そこでいくつかの主要な要因を取り上げて基礎的な落石実験を数多く行い、それから落石速度を誘導することが有効な方法として浮かび上がってくる。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 実験装置の概略を図1に示す。合板を使って幅35cm、斜面長600cm、側壁幅35cmの斜面を作成している。斜面の勾配は自由に変えられる構造になっている。実験に用いた落石には碎石を使用している。碎石の形状をできるだけ球状になるように整形しながら質量が0.5Kgf、1.0Kgf、1.5Kgf、2.0Kgf、2.5Kgf、3.0Kgfのものを準備した。碎石の形状や質量が変化した場合に備え予備のものも作成した。落石の直径の最大誤差は、0.5Kgfで2.6mm、1.0Kgfで8.2mm、1.5Kgfで3.9mm、2.0Kgfで6.5mm、2.5Kgfで14.1mm、3.0Kgfで9.6mmで、質量の誤差は ± 50 gの範囲であった。これらを転倒距離3m、4m、5m、および6mの位置から自然落下させた。斜面勾配は60度、70度、80度、および90度である。1ケースについての実験回数はそれぞれ30回で合計2880回である。

3. 実験結果

(1) 落石速度 図2に落石質量3.0Kgfの場合の落石速度と斜面角との関係を示す。落石速度は斜面角の増加に比例して増加する傾向を示している。また、転倒距離の増加によって落石速度も大きくなる。図3に落石質量3.0Kgfの場合の落石速度と転倒距離との関係を示す。落石速度は転倒距離に比例して増加する。また、斜面角が大きくなると落石速度も増加する。図4に転倒距離6mの場合の落石速度と落石質量との関係を示す。これより、落石速度は落石質量には関係無くほぼ一定値を示して落石質量が落石速度に影響しない事がわかる。

(2) 落石の転倒形態 落石の転倒の仕方は一定ではなく、斜面角の大きさによって変わってくる。斜面角60度の場合では転がったり途中で跳ねたりする。それに比べ斜面角70・80度の場合は落石が斜面を滑って落下している感じであるが途中で跳ねた場合その跳ね方は大きい。

線形重回帰による推定式 これまでの研究から、落石速度は、転倒距離と斜面角に影響されるが、落石質量にはほとんど影響されないことが分かっている。したがって、ここでも落石速度(v)を従属変数とし、落石距離(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 $v = -3.8444 + 1.073L + 0.084\theta \cdots (1)$ が得られた。この回帰モデルの決定係数(R^2)は、0.9047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

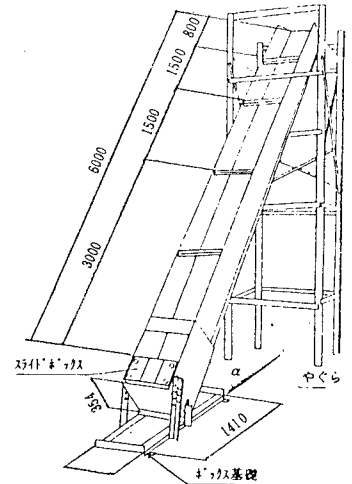


図1 落石実験装置の概略図

するための各独立係数の貢献度を比較することができる。独立係数に対する標準回帰係数は転等距離が 131.8070、斜面角が 99.7006 であり、このことから落石速度に最も大きな貢献をするのが転等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 5 に示す。実験値 $v=4\sim 12\text{m/s}$ 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と言える。

(4) 理論式に基づく重回帰分析 理論式を背景として次の回帰式 $\ln(v/\sqrt{2g})=a_0+a_1\ln L+a_2\ln(\sin\theta)\cdots$ (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 $v=0.718+\sqrt{2g}L^{0.634}\sin^{2.03}\cdots$ (3) が得られた。この回帰モデルの決定係数 (R^2) は、0.8116 であり実験値をかなりよく推定していると言える。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 6 に示す。これも前述と同様に実験値 $v=4\sim 12\text{m/s}$ 付近でややばらつきが見られるが、実験値と推定値のほとんどが 45 度線近くに集まっており回帰式が全体として比較的良好な推定値を与えている。

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) 落石速度に対して最も大きな貢献をするのが転倒距離でついで斜面角であり、落石質量はほとんど貢献しない。したがって、斜面角および転倒距離の 2 変数で重回帰分析を行った。その結果、落石速度を推定する式 $v=-3.8444+1.073L+0.084\theta$ が得られた。(2) 理論式を背景として再度重回帰分析を行った結果、落石速度を推定する式として $v=0.718+\sqrt{2g}L^{0.634}\sin^{2.03}$ が得られた。(1)、(2) の式は実験値をかなりよく推定している。

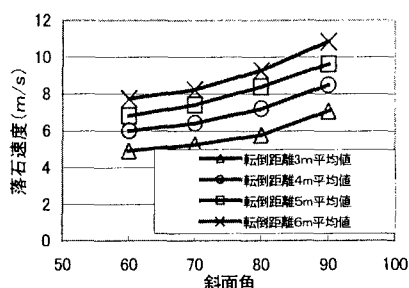


図 2 落石速度と斜面角との関係

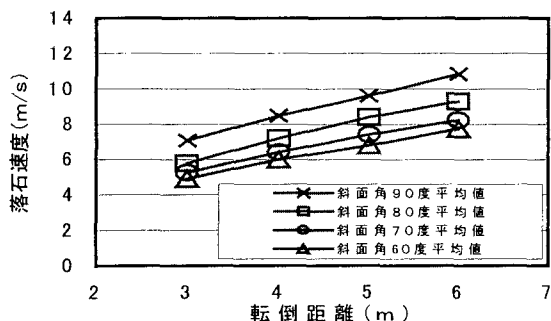


図 3 落石速度と転倒距離との関係

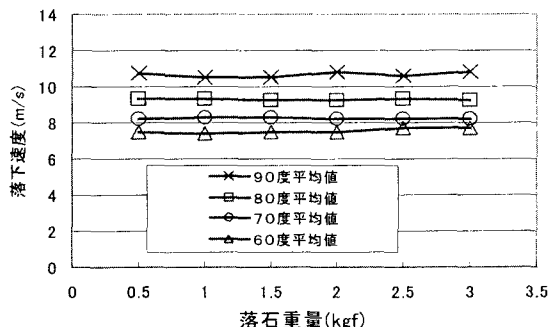


図 4 落石速度と落石質量との関係

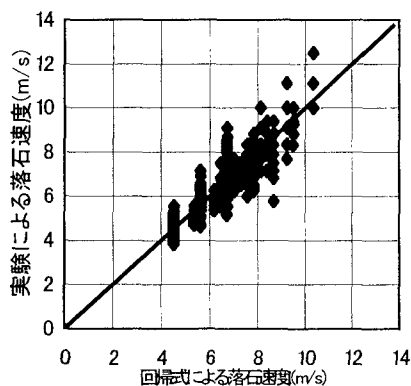


図 5 実験および回帰式による落石速度の関係

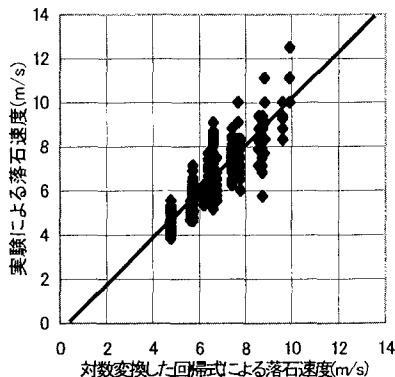


図 6 実験および対数変換した回帰式による落石速度の関係