

落石形状が落石速度に及ぼす影響

INFLUENCE OF SHAPES OF FALLING ROCK IN FALLING ROCK SPEED

村田重之*, 田代敬大**, 川窪秀樹***, 澁谷秀昭****

Shigeyuki MURATA, Takahiro TASHIRO, Hideki KAWAKUBO and Hideaki SHIBUYA

*工博 崇城大学教授 工学部環境建設工学科 (〒860-0082 熊本市池田 4-22-1)

**工博 崇城大学助教授 工学部宇宙航空システム工学科 (〒860-0082 熊本市池田 4-22-1)

***工修 兵庫県立白鷺工業高等学校講師 (〒670-0871 姫路市伊伝居 600-1)

****崇城大学技師補 工学部環境建設工学科 (〒860-0082 熊本市池田 4-22-1)

キーワード：落石速度、落石形状、模型実験、重回帰分析

(Falling rock speed, Shape of falling rock, Model test, Multiple regression analysis)

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。従って、現実には経験的な手法で落石防護柵等の設計が行われている。落石に関するこれまでの研究では、空中を落下する場合のものが圧倒的に多い。それは落石運動に複雑な要因が入ってこないの取り扱いが比較的容易であることによるものと考えられる。しかし、日本の道路や住宅事情ではそのようなケースよりも斜面を落下してくる落石の場合が圧倒的に多く、落石が構造物に及ぼす外力を評価できる式の確立が切実な問題として存在している。

斜面を落下する落石の速度には、落石の重量や形状、落石の落下形態、斜面高さ、斜面勾配、斜面の形状、斜面の性質、斜面の植生や立木の有無など様々な要因が複雑に絡み影響すると考えられる。落石防護柵等の防災施設を設計するには、これらの要因を包含した落石速度や衝撃力を推定する理論式を確立する必要があるが、それは極めて困難である。そこで浮かび上がってくるのが落石実験を数多く行い、統計的な手法で落石速度や衝撃力を推定する実験式を誘導する方法である。

実験としては、実際の斜面で実物大の落石を用いて行うのが望ましいが、このような実験には膨大な費用と時間がかかり、統計的な処理をするために必要なデータを集めることは容易なことではない。そこでまず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、それから落石速度や衝撃力を推定する実験式を誘導することが最初のステップとして有効な方法と考えられる。

このような観点から、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数多くの実験を行い、斜面角、落下距離、落石形状などが落石速度にどのように影響するのかを実験的に明らかにし、さらに重回帰分析によって落石速度を推定する実験式を導き出すことにする。

このような単純な条件下での実験やさらにより複雑な条件下での実験から、落石速度や衝撃力を推定する実験式が得られれば、将来的には実物大の実験をいくつか行って、落石速度や衝撃力の実験式を推定し、主要な要因を包含した落石防護柵等の防災施設の設計に必要な設計外力を決定する実験式の確立を目指している。

2. 落石速度の計測

2.1 実験装置

実験装置の概略を図1に示す。幅 350mm、斜面長 6800mm の模型斜面を合板を使って作製した。落石運動は非常に複雑でたとえ平面的斜面であってもどこに転がって行くか分からない。そこで側壁を設けてある範囲内に落下してくるようにしている。なお、斜面側壁の片側は斜面の運動形態が撮影できるようにアクリル板で作製した。斜面最下部に距離 1000mm で計測器を設置して落石速度を計測している。また、斜面の勾配は自由に変えられる構造になっている。

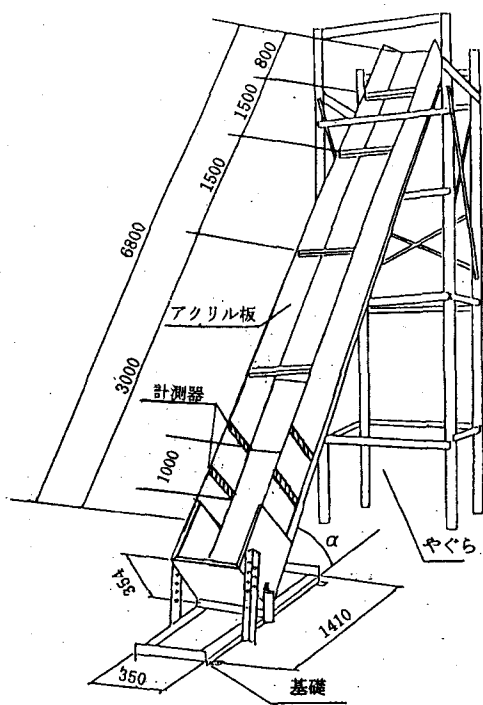


図1 落石実験装置の概略図

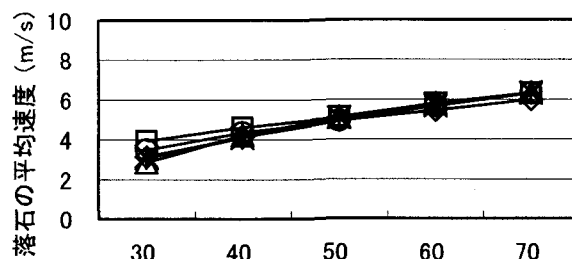
2.2 実験方法

実験に用いた落石には、球体、20面体、立方体、自然岩石の4種類を使用し、その質量はともに1.1kgである。なお20面体と立方体については、斜面に対しての設置方法によって落石の運動形態が異なってくる事が考えられるので、その設置方法によって20面体A、20面体B、立方体A、立方体Bとし、合計6種類の落石形態として実験をした。落石は3m、4m、5m及び6mの位置から斜面を自由落下させた。斜面角は30度から70度まで10度刻みの5種類である。したがって、実験の種類は合計120ケースとなり、1ケースの実験回数を50回としたので総実験回数は6000回になる。ただし、実験の中で落石が側壁に接触したデータは除いて分析や解析をしている。また、計測器の性能上の問題のため斜面角70度、落下距離6mの実験に関しては高速ビデオカメラを使用し、撮影距離を撮影時間で割って落石速度を測定した。

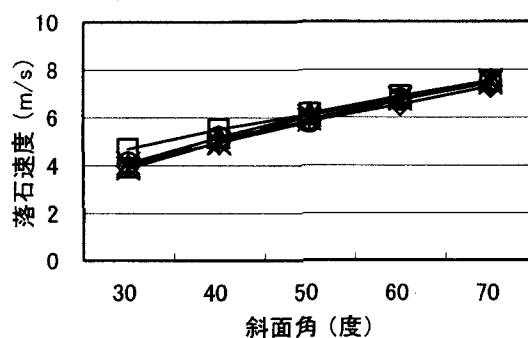
3. 落石速度の計測結果

3.1 落石の平均速度と斜面角との関係

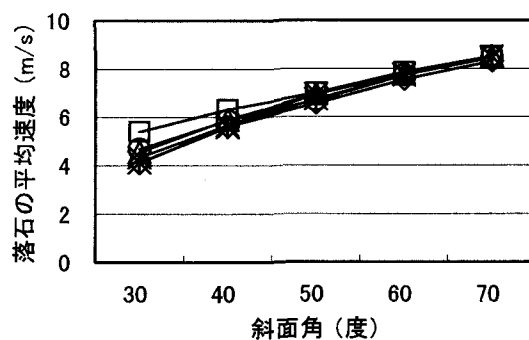
図4(a)、(b)、(c)および(d)に、落下距離3m、4m、5mおよび6mのそれぞれに対して落石形状が球状から自然岩石の4種類の場合の落石の平均速度と斜面角との関係を示している。これらの図より、まず斜面角が小さい30度および40度においては、落石



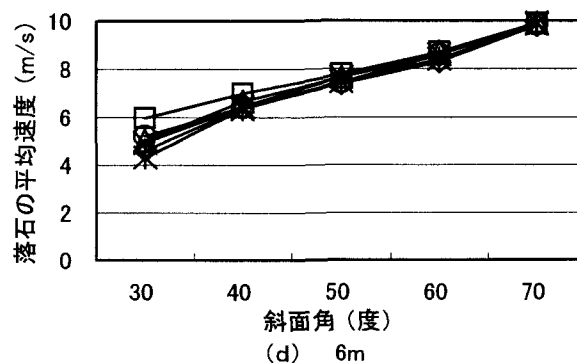
(a) 3m



(b) 4m



(c) 5m



(d) 6m

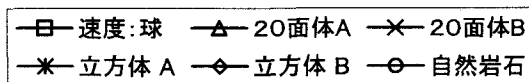


図2 落石の平均速度と斜面角の関係

形状による落石の平均速度の差が観察される。特に、斜面角が小さい 30 度について検討すると、落下距離が 3m から 6m と長くなるにつれて落石の平均速度に落石形状による差が明瞭に現れていることが分かる。これに対し、斜面角が 50 度以上の勾配になると、落石形状にかかわらず落石の平均速度はほとんど差が現れていないことが分かる。すなわち、落石形状は斜面角が小さいときは落石速度に影響を及ぼし、斜面角が大きくなると落石速度にほとんど影響を与えないことが推測される。

3.2 落石の平均速度と落石形状の関係

図 5(a)、(b)、(c)、(d)および(e)に、斜面角 30 度から 70 度のそれぞれに対して落下距離が 3m、4m、5m および 6m の 4 種類の場合の、落石の平均速度と落石形状との関係を示している。斜面角が小さい 30 度、40 度の場合は球体の落石の平均速度が、すべての落下距離において抜きに出て早い。また、30 度に関しては落石形状に対して落石の平均速度に差が見られ、落下距離が短い 3m においては、その差が明瞭に現れている。他方、50 度から 70 度に関しては、落石形状による落石の平均速度にほとんど差が現れていないことが分かる。

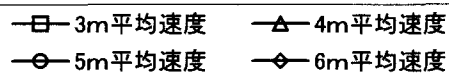
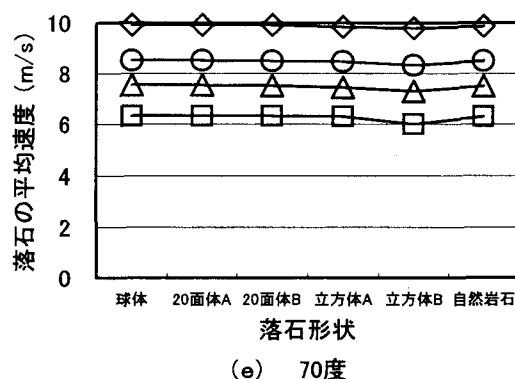
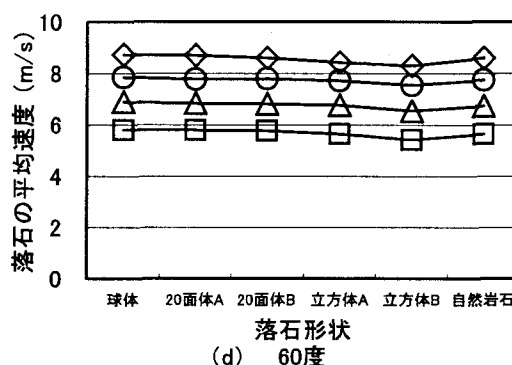
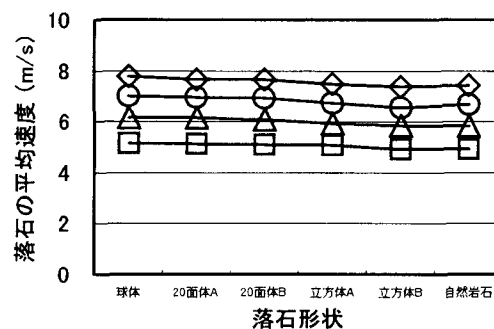
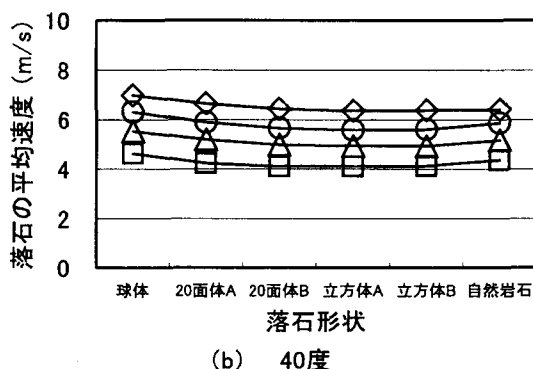
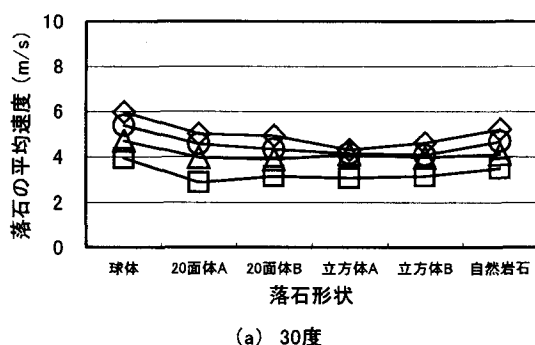


図3 落石の平均速度と落石形状との関係

4. 落石速度の重回帰分析

4.1 回帰モデルと回帰式

3章において落石の平均速度と落下距離、斜面角および落石形状のそれぞれの間の関係を調べた。しかし、落石速度には落下距離、斜面角および落石形状等が同時に影響をするので、これらの要因のすべてを含んだ関係を求めることが必要で、そのためには多変量的に解析する必要がある。そこで以下に線形重回帰分析を適用してこれら

の間の関係について究明する。

前節のグラフから 50 度を境にして斜面角が小さい場合は落石形状が落石速度に影響を及ぼすが、斜面角が大きい場合は落石形状が落石速度に影響を及ぼさないような傾向が観測された。そこで、視覚的に判断された斜面角 50 度を境界とし、斜面角が小さい 30 度と 40 度、斜面角が大きい 50 度から 70 度の 2 種類にサンプルを分割し、さらに落石形状を考慮して解析した場合と落石形状を考慮せずに解析した場合の、都合 4 種類の線形重回帰分析を行った。想定した線形重回帰モデルは次のとおりである。

$$v = a_0 + a_1 L + a_2 \theta + \sum_{n=1}^5 b_n \delta_n \cdots (1)$$

ここに、 v ：落石速度、 θ ：斜面角、

L ：転動距離、 δ_1 ：20 面体 A、

δ_2 ：20 面体 B、 δ_3 ：立方体 A、

δ_4 ：立方体 B、 δ_5 ：自然岩石。

ここで、 δ は該当する落石形状のときは 1、該当しない場合は 0 を与えるダミー変数である。落石形状を考慮しない場合はこのダミー変数は導入しないことになる。

その結果、各独立変数に対する回帰係数は表 1 のように求められた。これから落石速度を推定する式として次のような式が得られる。

(1) 斜面角が 30 度・40 度

落石形状を考慮しない場合

$$v = -2.347 + 0.657L + 0.121\theta \cdots (2)$$

落石形状を考慮する場合

$$v = -1.784 + 0.662L + 0.121\theta - 0.627\delta_1 - 0.743\delta_2 - 0.859\delta_3 - 0.824\delta_4 - 0.540\delta_5 \cdots (3)$$

(2) 斜面角が 50 度から 70 度

落石形状を考慮しない場合

$$v = -2.284 + 0.994L + 0.083\theta \cdots (4)$$

落石形状を考慮する場合

$$v = -2.188 + 0.994L + 0.084\theta - 0.027\delta_1 - 0.053\delta_2 - 0.150\delta_3 - 0.297\delta_4 - 0.157\delta_5 \cdots (5)$$

表1 重回帰分析による回帰係数

	30度・40度		50度から70度	
	落石形状を考慮しない	落石形状を考慮する	落石形状を考慮しない	落石形状を考慮する
切片	-2.347	-1.784	-2.284	-2.188
斜面角	0.121	0.121	0.083	0.084
転動距離	0.657	0.662	0.994	0.994
20面体A		-0.627		-0.027
20面体B		-0.743		-0.053
立方体A		-0.859		-0.150
立方体B		-0.824		-0.297
自然岩石		-0.540		-0.157

ここで上記以外の統計的諸量について検討を行う。

4.2 自由度調整済み決定係数(R^2)についての検討

(1) 30 度、40 度について

表 2 より、落石形状を考慮して解析を行った場合の方が 0.92450 と、落石形状を考慮せずに解析を行った場合の 0.83874 よりも値が大きく、その差も 0.08576 と明瞭に現れた。つまり、斜面角が小さい 30 度、40 度の場合は、落石形状を考慮して解析を行った方が回帰式の適合度が高いと判断できる。

(2) 50 度から 70 度について

表 2 より、落石形状を考慮して解析を行った場合の 0.96751 と、落石形状を考慮せずに解析を行った場合の 0.96213 と値的にほとんど差が現れなかった。つまり、斜面角が大きい 50 度から 70 度の場合は、共に回帰式の有用性が高いと判断できる。

表2 重回帰分析における決定係数

	30度・40度		50度から70度	
	落石形状を考慮しない	落石形状を考慮する	落石形状を考慮しない	落石形状を考慮する
N	2984	2084	3502	3502
F値	5417.8	3644.7	44471	14894
p値	$p < 0.0000$	$p < 0.0000$	$p < 0.0000$	$p < 0.0000$
R	0.91591	0.96164	0.98089	0.98365
R^2	0.83889	0.92475	0.96215	0.96757
R^*	0.91583	0.96151	0.98088	0.98362
R^{2*}	0.83874	0.92450	0.96213	0.96751

N: データ数

R: 重相関係数、 R^2 : 寄与率

R^* : 自由度調整済み重相関係数

R^{2*} : 自由度調整済み寄与率

4.3 t 値についての検討

(1) 落石形状を考慮しない場合の斜面勾配別の比較

表 3 より、斜面角度、落下距離ともに、30、40 度の場合の値よりも 50 度から 70 度の場合の値の方

が大きいことが分かる。つまり、斜面角が大きくなるにつれて落石速度を推定する上での斜面角度と転動距離の貢献度が高くなると判断できる。

(2) 落石形状を考慮した場合の斜面勾配別の比較
表3より、落石形状について比較すると、30度・40度の場合の値の方が50度から70度の値よりも大きいことが分かる。つまり、斜面角が小さい場合は落石速度を推定する上での落石形状の貢献度が高いと判断できる。

表3 重回帰分析におけるt値

	30度・40度		50度から70度	
	落石形状を考慮しない	落石形状を考慮する	落石形状を考慮しない	落石形状を考慮する
切片	-31.334	-33.881	-61.804	-61.914
斜面角	66.275	96.755	155.837	168.664
転動距離	81.048	119.208	254.273	274.491
20面体A		-30.985		-1.956
20面体B		-33.812		-3.800
立方体A		-42.573		-10.809
立方体B		-37.960		-20.625
自然岩石		-24.560		-11.201

(3) 標準回帰係数についての検討

表4より、落石形状の標準回帰係数(β)について比較すると、斜面角が30度・40度の値の方が、斜面角が50度から70度の値よりも大きく、その差も明白に現れている。つまり、斜面角が30度・40度の場合では、落石形状の影響が大きいといえる。

表4 重回帰分析による標準回帰係数				
	30度・40度		50度から70度	
	落石形状を考慮しない	落石形状を考慮する	落石形状を考慮しない	落石形状を考慮する
斜面角	0.583	0.583	0.513	0.514
転動距離	0.713	0.718	0.836	0.836
20面A		-0.237		-0.008
20面B		-0.248		-0.015
立方体A		-0.326		-0.042
立方体B		-0.280		-0.079
自然岩石		-0.180		-0.044

以上のことより、斜面角が小さい場合は、落石形状を考慮して重回帰分析を行った方が、自由度調整済み決定係数の値が高いことより、落石速度を推定する上で落石形状の貢献度が高いと判断できる。一方、斜面角が大きい場合は、落石形状を考慮して線形重回帰分析を行った場合と、落石形状を考慮せずに行った場合ともに高い自由度調整済み決定係数を

示している。ただし、t値、標準回帰係数などの検討により、斜面角が大きい場合の落石形状の影響は小さくなるので、斜面角が大きい場合は落石形状を考慮せずに落石速度を推定してもそれほど問題はないと考えられる。

5. 落石の理論と重回帰式との関係

5.1 理論式の展開

前節では複雑な落石現象のデータを整理するため、落石速度と説明変数とを線形式で単純に結び付けたにすぎない。ここでは、落石速度の理論に基づく重回帰式について検討する。

斜面上にある落石は鉛直方向に重力の加速度を受けているので、落石速度は次のように与えられる。

$$v = \sqrt{2gL \sin \theta} \quad \dots (6)$$

ここに、gは重力加速度である。

式(6)を変形すると

$$\ln \left[\frac{v}{\sqrt{2g}} \right] = \frac{1}{2} \ln L + \frac{1}{2} \ln(\sin \theta) \quad \dots (7)$$

が得られる。この理論式を背景として、次の回帰式を想定して再度重回帰分析を行う。

$$\ln \left[\frac{v}{\sqrt{2g}} \right] = a_0 + a_1 \ln L + a_2 \ln(\sin \theta) + \sum_{n=1}^5 b_n \delta_n \quad \dots (8)$$

5.2 理論式に基づく重回帰分析

式(8)に基づき $\ln \left[\frac{v}{\sqrt{2g}} \right]$ 、 $\ln L$ および $\ln(\sin \theta)$

を求め、それらの値に落石形状を加えて重回帰分析を行った結果、統計的諸係数が表5のように得られ

表5 重回帰分析による回帰係数

	30度・40度		50度から70度	
	落石形状を考慮しない	落石形状を考慮する	落石形状を考慮しない	落石形状を考慮する
切片	-0.249	-0.134	-0.245	-0.229
斜面角	1.011	1.009	1.120	1.123
転動距離	0.605	0.609	0.605	0.605
20面体A		-0.137		-0.004
20面体B		-0.154		-0.008
立方体A		-0.179		-0.021
立方体B		-0.173		-0.043
自然岩石		-0.106		-0.024

た。これから落石速度を推定する式として最終的に次式が求められ、これらが理論式と対応した落石速度を推定する線形重回帰式になる。

(1) 斜面角が 30 度・40 度の場合(落石形状を考慮)

$$\ln \left[\frac{v}{\sqrt{2g}} \right] = -0.134 + 0.609 \ln L \\ + 1.009(\sin \theta) - 0.137\delta_1 - 0.154\delta_2 \\ - 0.179\delta_3 - 0.173\delta_4 - 0.106\delta_5 \\ \dots (9)$$

すなわち、

$$v = 0.875e^{(-0.137\delta_1 - 0.154\delta_2 - 0.179\delta_3 - 0.173\delta_4 - 0.106\delta_5)} \\ \times \sqrt{2gL}^{0.609} \sin^{1.009} \theta \dots (10)$$

(2) 斜面角が 50 度から 70 度の場合(落石形状なし)

$$\ln \left[\frac{v}{\sqrt{2g}} \right] = -0.245 + 0.605 \ln L + 1.120(\sin \theta) \\ \dots (11)$$

すなわち

$$v = 0.783\sqrt{2gL}^{0.605} \sin^{1.120} \theta \dots (12)$$

表 6 より、式(9)、式(10)の自由度調整済み決定係数は 0.92514 であり、式(11)、式(12)のそれは 0.97452 である。前述の変数を対数に変換しない式(3)、式(4)に比べて自由度調整済み決定係数は少し増加している。

表6 重回帰分析による諸量

	30度-40度		50度から70度	
	落石形状を 考慮しない	落石形状を 考慮する	落石形状を 考慮しない	落石形状を 考慮する
N	2084	2084	3502	3502
F値	5478.7	3678.4	66957	25045
p値	p<0.0000	p<0.0000	p<0.0000	p<0.0000
R	0.91673	0.96197	0.98719	0.99018
R ²	0.84039	0.92539	0.97454	0.98046
R*	0.91665	0.96184	0.98718	0.99016
R ^{2*}	0.84024	0.92514	0.97452	0.98042

N: データ数

R: 重相関係数、 R²: 寄与率

R*: 自由度調整済み重相関係数

R^{2*}: 自由度調整済み寄与率

6. 結論

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 落石の平均速度のデータ整理より、斜面角が小さいときは落石形状の違いが落石速度に影響を及ぼし、斜面角が大きくなると落石形状の違いは落石速度にほとんど影響を与えないことが推測された。

- (2) 斜面角 50 度を境にして、落石形状を考慮する場合と考慮しない場合で線形重回帰分析を行い、自由度調整済み決定係数、t 値の比較検討を行った結果、(1)の傾向が統計的に確認された。また、4 種類の実験式が得られが、斜面角が小さい場合は落石形状を考慮した式が望ましく、斜面角が大きい場合は落石形状を考慮しない式が簡明である。
- (3) 落石速度の理論式を背景として、再度重回帰分析を適用し、落石速度の推定の実験式が得られた。この結果は、(2)の場合の線形回帰式よりも若干ではあるが適合度が改善された。
- (4) 今回の落石実験において、落石速度を推定する実験式としては、理論的見地と適合度の観点から式(10)と式(12)が有用である。