

# 実規模斜面における落体の反発係数に関する実験的検討

The experimental study about restitution coefficient of falling objects rolling on the full-scale slope

名古屋工業大学	○学生員	杉山直優 (Naomasa Sugiyama)
名古屋工業大学	学生員	松尾和茂 (Kazushige Matsuo)
(株)構研エンジニアリング	非会員	阿部和樹 (Kazuki Abe)
(株)構研エンジニアリング	フェロー	川瀬良司 (Ryoji Kawase)
名古屋工業大学	正員	前田健一 (Kenichi Maeda)
東電設計(株)	正員	中瀬仁 (Hitoshi Nakase)

## 1. はじめに

わが国では落石対策施設の設計・施工を行う際の参考資料として「落石対策便覧」が広く用いられている。同便覧には落石に関する幅広い情報が収録されているものの、落石の跳躍量に関しては「落石径 30~70cm の落石の 80~85%は 2m 以下の跳躍量となっている」との記述に留まっており、巨石等の大きな径の落石に関して明確な記載はない。

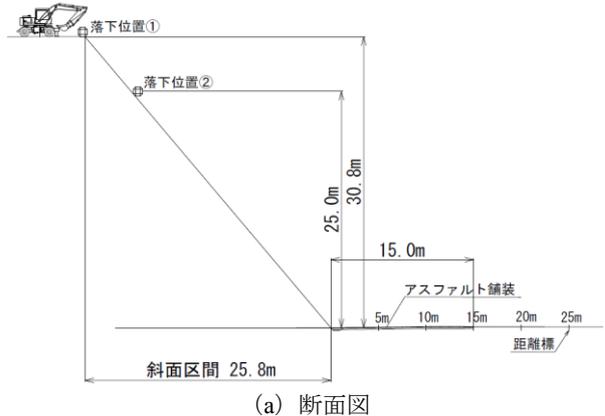
一方、落石の運動形態について把握するための手法として、個別要素法 (DEM) といった数値解析を用いた落石シミュレーションが挙げられる。しかし、その解析結果は設定するパラメータの値により変わってくることから、適切な値を設定する必要がある。中でも最も重要なパラメータの一つである反発係数は未だ明らかにされていない部分が多く、その解明が求められている。

また、落石対策施設の周辺にはアスファルト舗装といった比較的弾性係数の大きい材料により構築された構造物が多いため、衝突する落石の大きさ (落石径) や質量により反発係数が大きく変化すると考えられる。過去の研究において、「0.11t、0.3t、1.0t、1.6t、2.0t の重錘をアスファルト舗装面へ鉛直落下させる実験<sup>2)</sup>」から、重錘質量が大きくなるほど反発係数が小さくなる傾向にあることが確認されている。しかしながら、実際の斜面からの落石を想定し、反発係数を検証した事例は少ない。

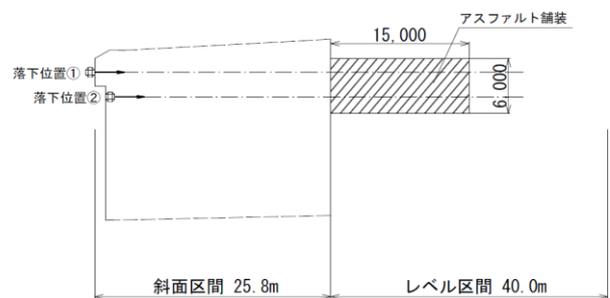
そこで、本稿では落石の運動形態を再現するために必要な反発係数の適正評価を目的として、巨石を模擬した重錘を実斜面からアスファルト舗装面へ斜入射させる実験を行い、実験で得られた結果と考察を報告する。

## 2. 実験概要

実験概要図を図-1 に示す。また、実験ケース一覧を表-1 に示す。本実験では、高さ 30m または 25m の斜面上から所定の質量 (0.25t、0.49t、1.0t、1.6t) の重錘をアスファルト舗装面へ斜入射させ、挙動を高速度カメラで撮影し、重錘の模様 (ターゲット) を PTV 解析で計測することにより重錘の反発挙動を求めた。なお、高速度カメラのフレームレートは 400fps である。図-2 に高速度カメラで撮影した重錘落下画像の一例を示す。なお、画像はアスファルト面への衝突前後における 30 フレームごとの重錘の位置を示した合成写真としている。



(a) 断面図



(b) 平面図

図-1 実験概要図

表-1 実験ケース一覧

No.	重錘質量 (t)	球体換算時の重錘直径(m)	落下高さ (m)
1	1.6	1.062	30
2	1.6		
3	1.6		
4	1.6		
5	1.6		25
6	1.6		
7	1.0	0.930	30
8	1.0		25
9	1.0		30
10	0.49	0.720	30
11	0.49		
12	0.49		
13	0.25	0.564	30
14	0.25		
15	0.25		

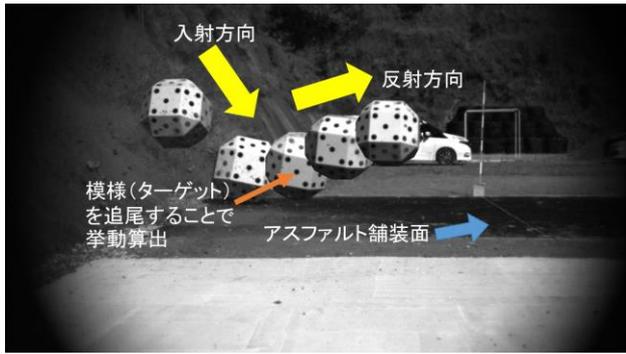


図-2 高速度カメラによる重錘落下画像 (実験ケース No.1)



図-3 1.6t 重錘写真

表-2 実験結果一覧

No.	重錘質量 (t)	落下高さ (m)	反発係数	最大跳躍高 (m)	跳躍高比	水平方向速度比	エネルギー減衰率	衝突直前時線速度エネルギー(kJ)	衝突直前時回転エネルギー(kJ)	
1	1.6	30	0.274	0.843	0.028	0.719	0.559	232.0	10.38	
2			0.456	1.254	0.042	0.809	0.479	224.1	44.96	
3			0.243	0.933	0.031	0.750	0.666	355.5	47.85	
4			0.429	1.454	0.048	1.250	0.485	108.6	32.99	
5			25	0.239	0.705	0.028	0.757	0.433	244.8	38.06
6				0.187	0.621	0.025	0.571	0.707	137.2	24.28
7	1.0	30	0.375	0.986	0.033	0.667	0.680	99.43	3.536	
8		25	0.250	0.449	0.018	0.250	0.787	105.7	29.53	
9		30	0.250	0.330	0.011	0.400	0.388	128.0	27.57	
10	0.49	30	0.333	1.983	0.066	0.333	0.771	106.2	0.506	
11			0.400	0.747	0.025	0.750	0.472	68.46	4.263	
12			0.375	0.600	0.020	1.143	0.482	42.39	20.18	
13	0.25	30	0.135	0.169	0.006	0.794	0.513	30.92	14.11	
14			0.278	0.667	0.022	0.230	0.864	73.19	15.53	
15			0.714	1.773	0.059	0.222	0.320	51.02	6.080	

また、実験に用いた重錘はコンクリート製で形状はEOTA<sup>3)</sup>であり、質量によりその大きさが異なる。実験に用いた重錘の一例として、1.6t 重錘の写真を図-3に示す。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 実験結果一覧

表-2に実験結果一覧を示す。反発係数  $e$  は重錘のアスファルト舗装面衝突直前および衝突直後の鉛直方向速度を用い、式(1)により算出した。

$$e = \frac{\text{衝突直後における鉛直方向速度}}{\text{衝突直前における鉛直方向速度}} \quad (1)$$

ここで、鉛直方向速度は鉛直上向きを正とした。

水平方向速度比はアスファルト舗装面衝突直前および衝突直後の水平方向速度の比をとることにより算出した。

$$\text{水平方向速度比} = \frac{\text{衝突直後における水平方向速度}}{\text{衝突直前における水平方向速度}} \quad (2)$$

ここで、水平方向速度は重錘進行方向の水平成分を正とした。

線速度エネルギー  $E_v$  は重錘重心の速度を、回転エネルギー  $E_r$  は重錘進行方向の角速度を用いて、それぞれ式(3)、(4)により算出した。

$$E_v = \frac{1}{2} M V^2 \quad (3)$$

$$E_r = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (4)$$

ここに、 $M$ : 重錘質量

$V$ : 重錘の進行方向速度

$I$ : 重錘の慣性モーメント

$\omega$ : 重錘の回転角速度 (rad/s)

また、エネルギー減衰率は式(5)により算出した。

$$\text{エネルギー減衰率} = 1 - \frac{E_2}{E_1} \quad (5)$$

ここに、 $E_1$ : 衝突直前における全運動エネルギー

$E_2$ : 衝突直後における全運動エネルギー

であり、全運動エネルギー  $E$  は線速度エネルギー  $E_v$  と回転エネルギー  $E_r$  の和により算出される。

なお、最大跳躍高は重錘がアスファルト舗装面へ衝突後に跳ね上がったときの、アスファルト舗装面から重錘の底面までの最大高さとし、跳躍高比は最大跳躍高を落下高さで割った値とする。

#### 3.2 反発係数と重錘質量に関する考察

図-4に重錘質量ごとの反発係数を表したグラフを示す。グラフより、0.49t、1.0t、1.6tにおいて重錘質量が大きくなるほど反発係数が小さくなる傾向にあり、既往の実験結果<sup>2)</sup>と一致している。しかし、重錘質量0.25tの実験ケースにおいてはこの関係に当てはまらない。これは、重錘がアスファルトの損傷面へ衝突したことで挙動が変化したことが原因であると考えられる。本実験では同じアスファルト舗装面へ重錘を落下させていたため、それまでの重錘落下によりアスファルト舗装が損傷している箇所が見受けられた。挙動が変化した例として図-5に No.15における落体の挙動を示した写真を示す。この写真から、重錘がアスファルトの損傷面に衝突したの

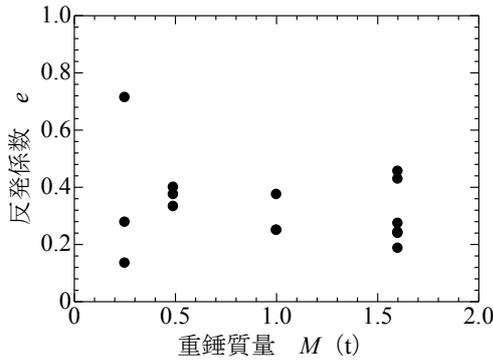


図-4 重錘質量と反発係数の関係

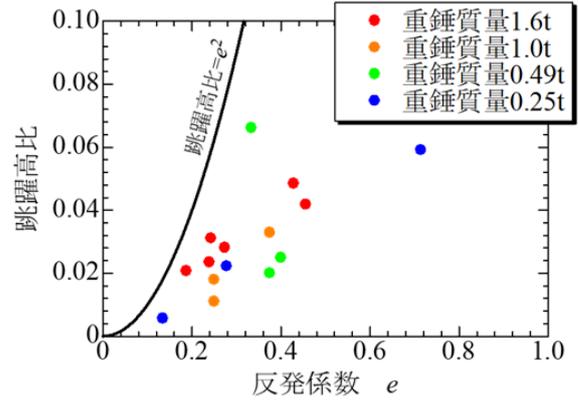


図-6 反発係数と跳躍高比の関係



図-5 落体挙動 (No.15)

ち、非損傷面との境界に当たったことで挙動が上向きに変化していることがわかる。これにより No.15 では反発係数が大きくなっていると考えられる。

また、No.13 では反発係数が 0.135 と最も低くなっているが、水平方向速度比が 0.794 と、同じ質量の重錘の中では極めて大きい値 (No.14は0.230、No.15は0.222) となっている。このことから、鉛直方向の速度がアスファルト損傷面への衝突により水平方向速度に変換されたと考えられる。

### 3.3 反発係数と跳躍高比に関する考察

図-6 に反発係数と跳躍高比の関係を表したグラフを示す。なお、グラフには理論的な反発係数と跳躍高比の関係を示す 2 次曲線を黒実線にて示している。グラフより、跳躍高比が大きくなるほど反発係数は大きくなる傾向にあることがわかる。また、表-2 と図-6 より、全 15 ケースのうち No.10 と No.15 を除いた 13 ケースで跳躍高比が 0.05 を下回っており、11 ケースで 0.04 を下回っている。さらに、跳躍高比が 0.04 以下の実験ケースでは反発係数が概ね 0.4 以下となっていることがわかる。

加えて、理論式と比較すると、すべての実験ケースで跳躍高比に対する反発係数の値は大きくなっているが、これはアスファルト舗装面の損傷による変状や重錘の回転によるものと考えられる。

### 3.4 反発係数とエネルギー減衰率に関する考察

図-7 にエネルギー減衰率と反発係数の関係を表したグラフを示す。なお、グラフには鉛直落下と仮定したときの理論的な反発係数とエネルギー減衰率の関係式を黒実線にて示している。グラフより、エネルギー減衰率が

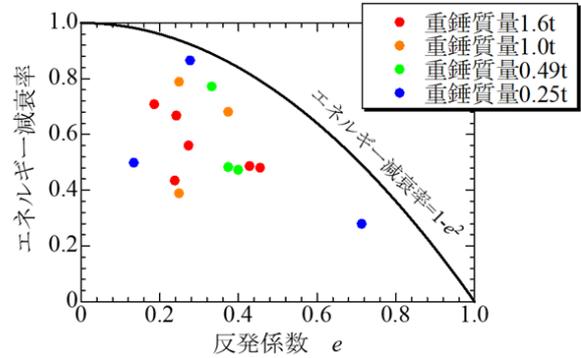
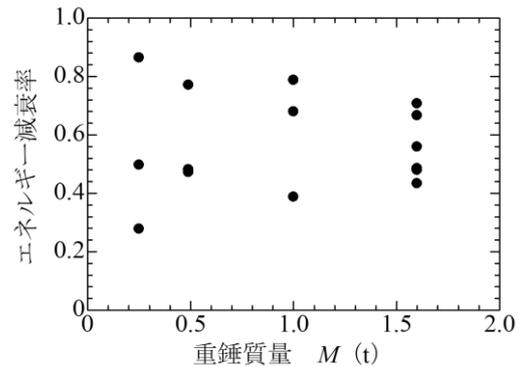
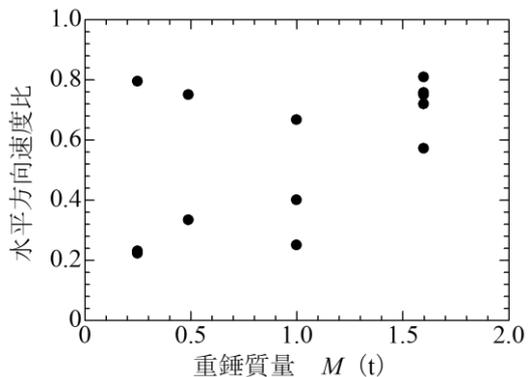


図-7 エネルギー減衰率と反発係数の関係



(a) 重錘質量とエネルギー減衰率の関係



(b) 重錘質量と水平方向速度比の関係

図-8 重錘質量とエネルギー減衰率、水平方向速度比の関係

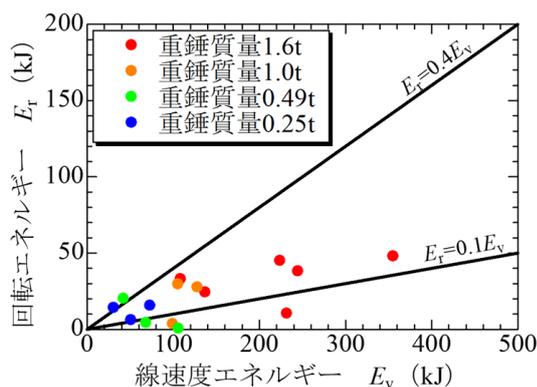


図-9 線速度エネルギーと回転エネルギーの関係

大きくなるほど反発係数は小さくなる傾向にあることがわかる。また、全15ケース中13ケースでエネルギー減衰率が0.4以上であることがわかる。

理論式と比較するとすべての実験ケースにおいて、反発係数の値に対してエネルギー減衰率が低い値となっている。これは、理論式が水平方向速度を考慮していないことや、水平方向速度が鉛直方向速度ほど減衰していないためであると考えられる。

また、図-8に重錘質量とエネルギー減衰率、水平方向速度比の関係を表したグラフを示す。重錘質量が大きくなるほど反発係数が小さくなることを考慮すると図-8から、重錘質量が大きくなるほどエネルギー減衰率は大きくなり、水平方向速度比は小さくなると考えられる。

### 3.5 反発係数とエネルギー比に関する考察

重錘落下時の線速度エネルギーに対する回転エネルギーの割合について評価するために、図-9に重錘のアスファルト舗装面への衝突直前時における線速度エネルギー $E_v$ と回転エネルギー $E_r$ の関係を表したグラフを示す。落石対策便覧に回転エネルギーは線速度エネルギーの10%~40%となるとの記載があることから、目安として直線 $E_r=0.1E_v$ 、 $E_r=0.4E_v$ をグラフ中に記載した。グラフから、重錘質量が大きくなるほど線速度エネルギーは大きくなっていることがわかる。また、エネルギー比が0.1を下回る点は見受けられるものの、0.4を超越する点はない。落石対策便覧に収録されている落石の直径は30cm~70cmであるが、図-9から、落石の直径がこの値を上回る場合についても概ね落石対策便覧の記載どおりの結果となっていることがわかる。

なお、重錘を球と仮定すると、重錘が斜面上を回転しながら落下しているとき、つまり、線速度と回転速度が一致するときは $E_r=0.4E_v$ が成り立ち、線速度が回転速度の2倍となるときは $E_r=0.1E_v$ が成り立つ。このことから、重錘がアスファルト舗装面へ衝突する際、線速度は回転速度の概ね1~2倍となっていることがいえる。

## 4. まとめ

本稿では、実斜面から落下された重錘のアスファルト舗装面に対する反発挙動を把握するため、最大跳躍高、運動エネルギーといった観点から様々な重錘質量における反発係数の違いについて考察をした。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 重錘質量が大きくなるほど反発係数は小さくなるというこれまでの知見は、実斜面からの斜入射実験においても成立する。しかし、衝突面の凹凸等により特異な値となる場合もありうる。
- 2) 跳躍高比が大きくなるほど反発係数は大きくなる。多くの場合、跳躍高比は0.04以下に、反発係数は0.4以下となる。また、反発係数が大きくなるほど跳躍高比は理論値と離れた値になる。これは、衝突面の凹凸や重錘の回転によるものであると考えられる。
- 3) エネルギー減衰率が大きいほど反発係数は小さくなる。また、同じ反発係数における鉛直落下でのエネルギー減衰率よりも小さい値をとる。さらに、重錘質量が大きくなるほど水平方向速度比は小さくなる傾向にある。
- 4) 落石対策便覧に収録されていない径の落石においても線速度エネルギーに対する回転エネルギーの割合は概ね便覧通りの結果となる。このとき、落石の線速度は回転速度の1~2倍ほどである。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、実験場の提供および実験実施に向けての助言等、株式会社ライテック、富山鉱山株式会社の皆さまに多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧、2017.12
- 2) 高橋浩司、牛渡裕二、保木和弘、前田健一、堀耕輔、中釜裕太：落体の反発挙動に関する鉛直落下実験、平成29年度土木学会北海道支部論文報告集、Vol.74、2017.
- 3) European Organization for Technical Approvals (EOTA) : ETAG27、GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL of FALLING ROCK PROTECTIONKITS、p.34、2008.2.1