

落石の外力が反発係数に及ぼす影響

The influence that the external force of the rockfall gives to coefficient of restitution

名古屋工業大学
名古屋工業大学
名古屋工業大学
名古屋工業大学
(株)構研エンジニアリング
東電設計(株)

○学正員
正 員
学生員
学生員
非会員
正 員

松尾和茂 (Kazushige Matsuo)
前田健一 (Kenichi Maeda)
堀 耕輔 (Kosuke Hori)
峯 祐貴 (Masaki Mine)
阿部 和樹 (Kazuki Abe)
中釜裕太 (Yuta Nakagama)

1. はじめに

落石対策工を合理的に設計するには落石の運動機構を適切に評価することが重要である。現在、落石対策工を設計する際に用いられているマニュアルとして、「落石対策便覧¹⁾」がある。本文献では、落石の跳躍量に関する記載があるが、その適用範囲は、落石径 30～70cm、落下速度 70m/s 以下であり、比較的小規模の落石のみに適用される。しかし、実際の落石災害では直径 2m を超える落石なども報告されており、現行のマニュアルでは適用範囲外の事例も存在する。

そこで本研究では、比較的大規模な落石の反発挙動把握を目的に、鋼製重錘またはコンクリート球をコンクリート面、アスファルト面、土砂に鉛直自由落下させ、その反発係数を算出し、落下高さと同重錘質量の違いによる反発係数について考察をした。その後、異なる算出方法で反発係数を求め、その違いについて考察した。

2. 実験概要

本実験の概要図を図 1 に示す。本実験は、所定の落下高さ(1m、3m、5m)から、質量の異なる鋼製重錘またはコンクリート球を鉛直自由落下させ、その挙動を高速度カメラ(400fps)で計測した。そして、計測で得られた連番画像を画像解析にかけ、落体に貼られたターゲットを追跡することで落体の変位、速度を算出した。落体の変位、速度を算出する際は、落体の地面衝突の衝撃による高速度カメラの揺れを補正する必要がある。そのため、落体の落下位置から十分離れた場所に不動点としてターゲットを設置し、落体の挙動から不動点の挙動を差し引くことで補正を行った(図 2)。本研究では質量 0.11ton、0.3ton、0.89ton、2ton、3ton の鋼製重錘と、9ton のコンクリート球を用いてそれぞれ 1 回、もしくは 3 回実験を行った。実施ケース一覧を表 1 に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 反発係数の算出方法

反発係数の算出には、下記の 4 パターンで算出した。

- 1) 落体の地表面衝突前後の速度比から算出
- 2) 落下高さと同重錘質量との比から算出
- 3) 落下高さと同重錘質量との初期地表面からの跳躍高との比から算出
- 4) 落下高さと同重錘質量との全跳躍高から衝突跡のへこみ分を差し引いた高さとの比から算出

表 1 実施ケース一覧

落下高さ(m)	重錘質量 (ton)	被衝突体	重錘形状
1	0.11	コンクリート	重錘
3	0.11	コンクリート	重錘
5	0.11	コンクリート	重錘
1	0.11	土砂	重錘
1	0.3	コンクリート	重錘 (丸底)
3	0.3	コンクリート	重錘 (丸底)
5	0.3	コンクリート	重錘 (丸底)
1	0.3	コンクリート	重錘 (平底)
1	0.89	コンクリート	重錘
3	0.89	コンクリート	重錘
5	0.89	コンクリート	重錘
1	0.89	土砂	重錘
1	2	コンクリート	重錘
3	2	コンクリート	重錘
5	2	コンクリート	重錘
1	3	コンクリート	重錘
3	3	コンクリート	重錘
5	3	コンクリート	重錘
1	9	アスファルト	球体
1	9	土砂	球体
1	9	コンクリート	球体

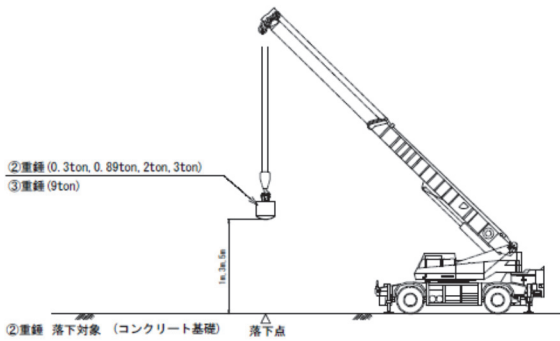


図 1 実験概要図

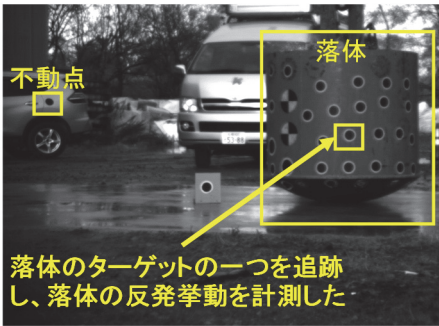


図 2 落体挙動の計測例

表2 反発係数一覧

落下高さ(m)	重錘質量 (ton)	被衝突体	重錘形状	反発係数(全路程)	反発係数(全路程-塑性変形分)	反発係数(地表面からの路程)	反発係数(速度で算出)
1	0.11	コンクリート	重錘	0.323~0.355	0.323~0.355	0.304~0.345	0.335~0.381
3	0.11	コンクリート	重錘	0.255	0.252	0.242	0.328
5	0.11	コンクリート	重錘	0.259	0.256	0.254	0.279
1	0.11	土砂	重錘	0.002~0.063	0.000	0.000	0.064~0.095
1	0.3	コンクリート	重錘(丸底)	0.258~0.301	0.255~0.297	0.243~0.286	0.299~0.305
3	0.3	コンクリート	重錘(丸底)	0.266	0.263	0.259	0.265
5	0.3	コンクリート	重錘(丸底)	0.209	0.206	0.201	0.243
1	0.3	コンクリート	重錘(平底)	0.310~0.339	0.308~0.337	0.302~0.338	0.329~0.356
1	0.89	コンクリート	重錘	0.211~0.229	0.211~0.223	0.202~0.223	0.219~0.222
3	0.89	コンクリート	重錘	0.068	0.050	0.003	0.063
5	0.89	コンクリート	重錘	0.066	0.054	0.000	0.155
1	0.89	土砂	重錘	0.032~0.126	0.000	0.000	0.086~0.111
1	2	コンクリート	重錘	0.134~0.162	0.126~0.156	0.078~0.140	0.155~0.168
3	2	コンクリート	重錘	0.109	0.099	0.051	0.109
5	2	コンクリート	重錘	0.083	0.071	0.044	0.083
1	3	コンクリート	重錘	0.139~0.158	0.128~0.148	0.096~0.138	0.131~0.161
3	3	コンクリート	重錘	0.081	0.069	0.070	0.101
5	3	コンクリート	重錘	0.09376098	0.079	0.061	0.103
1	9	アスファルト	球体	0.153179472	0.000	0.000	0.103
1	9	土砂	球体	0.170679932	0.000	0.000	0.116
1	9	コンクリート	球体	0.336268132	0.322	0.313	0.405

なお、算出方法の詳細な計算方法は後述する。表2に反発係数一覧を示す。

反発係数の算出方法を分けて考えるのは、落体の地面衝突後に、地面が弾塑性変形しているためである。地面の弾塑性変形を定量的に示すため、図3のように、落体の落下位置から約2mの位置にターゲットを貼り付けた板を地面に固定し、ターゲットを画像解析により追尾し地面の挙動を求めた。その際、落体の挙動算出時と同様に、不動点によるカメラの揺れの補正も行った。

図4に地表面の移動量のグラフを示す。グラフより、地表面は衝突直後、4mm程度沈下した後、再び浮上し、最終的に1mm沈下している。このことから、落体の地面衝突後、地面が弾塑性変形していることが分かる。

従来の反発係数の定義は、衝突直前と直後の速度比(高さの比)である。しかし被衝突体が複雑な運動をしているため、衝突後の速度(高さ)は複数通り考えられる。そのため、それぞれの衝突後の速度(高さ)を用いて算出した反発係数の傾向を確認する必要がある。

3.2 落下高さと落体質量による考察

被衝突体がコンクリートであるケースの落下高さ、落体質量が反発係数に及ぼす影響について考察する。図6に落下高さと反発係数の関係、図7に重錘質量と反発係数の関係を示す。なお、3回実施したケースについては、中央値を採用している。また、これらは算出方法1の速度比による算出方法で求めた反発係数である。速度比による反発係数は、落体の地表面衝突直前の鉛直下向きの最大速度(図5の赤のプロット)と地表面衝突後の鉛直上向きの最大速度(図5の青のプロット)の比から求めたものである。

落下高さと反発係数の関係に着目すると、同じ種類の重錘では落下高さが高くなるにつれ反発係数が小さくなる傾向にある。また、この傾向は重錘質量が小さいほど顕著に表れていることが分かる。

重錘質量と反発係数の関係に着目すると、同じ落下高さでは重錘質量が大きくなるにつれ反発係数が小さくなる傾向にある。また、この傾向は重錘質量が小さいほど顕著に表れていることが分かる。

これらのことから、落体の外力が大きくなるにつれ反

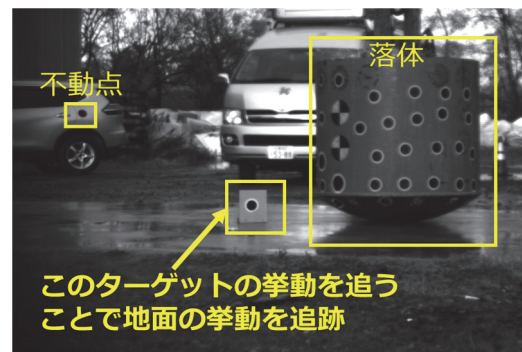


図3 地表面の揺れの計測方法

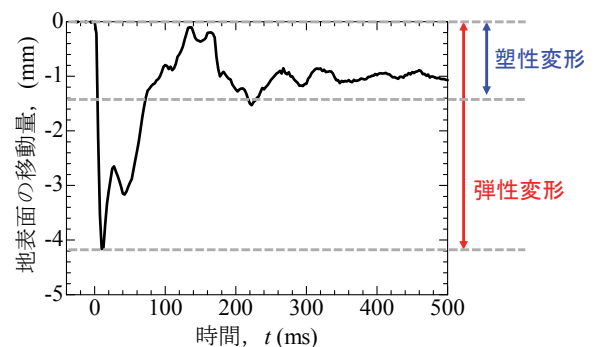


図4 地表面の移動量(2ton、5m)

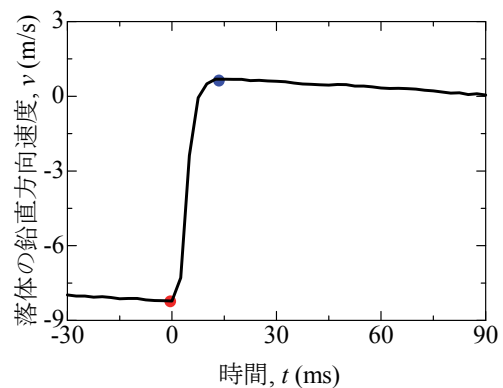


図5 鉛直方向落体速度の時刻歴データ (2ton、5m)

発係数は小さくなる傾向にあることが分かった。

3.3 被衝突体の違いが反発係数に及ぼす影響

被衝突体が土砂である場合の速度比による反発係数を図8に示す。グラフより、同じ落下高さ、重錘質量で被衝突体がコンクリートであるケースに比べて小さくなっていることが分かる。これは、被衝突体の剛性の違いによるものだと考えられる。一般に、コンクリートの方が土砂に比べて剛性が大きい。そのため土砂に落下させた場合、コンクリートに比べて反発しにくくなると考えられる。

また、土砂に落下させたケース間で比較すると、重錘質量が大きくなるほど反発係数が大きくなるという傾向は表れていない。このことから、被衝突体の剛性がある程度小さいと、重錘質量が大きくなるほど反発係数は小さくなる傾向は表れなくなる可能性がある。

3.4 反発係数の算出方法の違いによる影響

下記の式を用いて高さの比から反発係数を算出し、比較する。

$$e = \sqrt{\frac{h'}{h}} \quad (h: \text{落下高さ}, h': \text{跳躍高})$$

なお、 h' については図6のような3パターンの跳躍高を用いて反発係数を算出した。算出方法2では、落体が地表面に最も沈み込んだ地点から、最も跳躍した高さまでの距離(全跳躍高)を h' とした。算出方法3では、鉛直下向きの速度が最大となる時刻における鉛直方向の座標を地表面とし、地表面から最大跳躍高までの距離を h' とした。算出方法4では、衝突跡の深さを計測し、全跳躍高から衝突跡の深さを差し引いた高さ(全跳躍高-塑性変形分)を h' とした。

以上3パターンの跳躍高から算出した反発係数と速度比により算出した反発係数を比較するため反発係数比を算出した。下記に反発係数比の式を示す。

$$\text{反発係数比} = \frac{e'}{e}$$

(e : 速度から求めた反発係数、 e' : 高さから求めた反発係数)

図10に算出方法2、図11に算出方法3、図12に算出方法4で算出した反発係数と速度比の反発係数比と落下

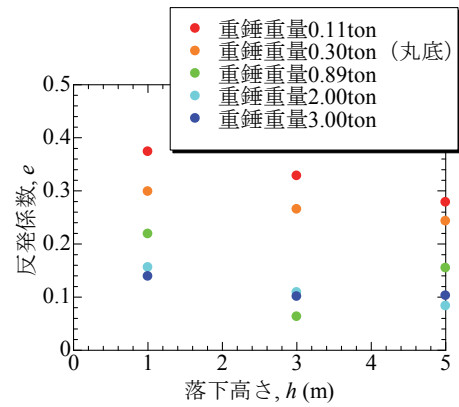


図6 落下高さと反発係数の関係

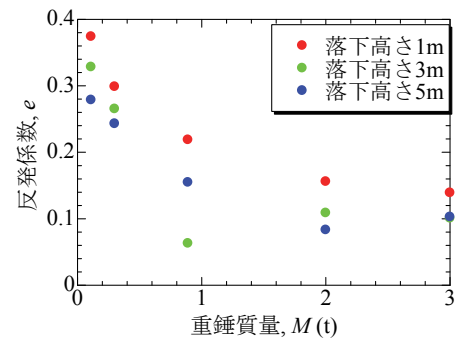


図7 重錘質量と反発係数の関係

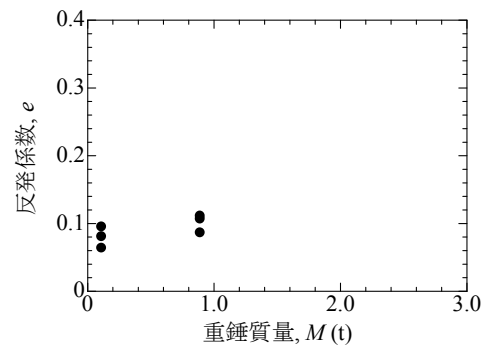


図8 被衝突体を土砂とした場合の反発係数

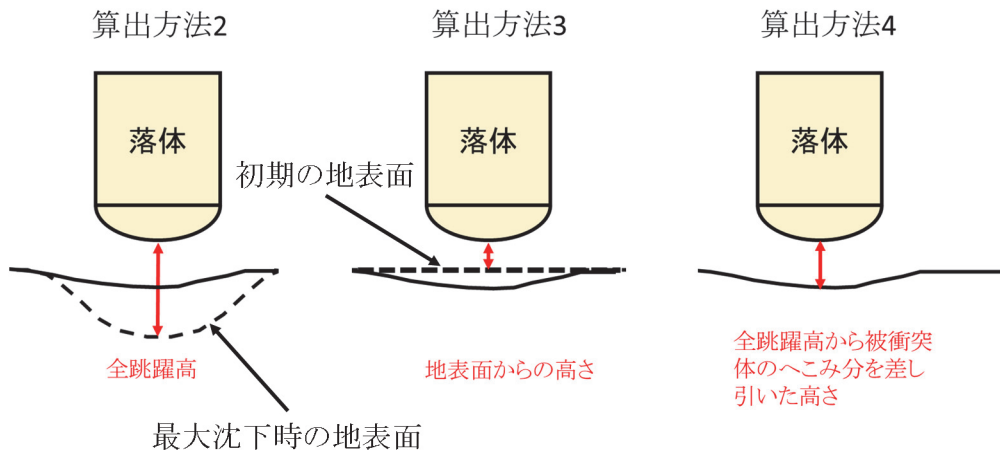


図9 各反発係数の算出方法における跳躍高の定義

高さ、重錘質量との関係のグラフを示す。

図 10-12 より、反発係数比が 1.0 以下のケースがほとんどである。すなわち、速度比から求めた反発係数は高さ比から求めた反発係数に比べて大きくなりやすい傾向がある。また、算出方法ごとに比較すると、算出方法 2 の反発係数比は概ね 0.8 から 1.0、算出方法 3 の反発係数比は概ね 0.5 から 9.5(一部のケースでは 0 に近い値もある)、算出方法 4 の反発係数比は概ね 0.7 から 1.0 である。このことから、算出方法 2 で求めた反発係数が速度比で求めた反発係数の値に近いと言える。

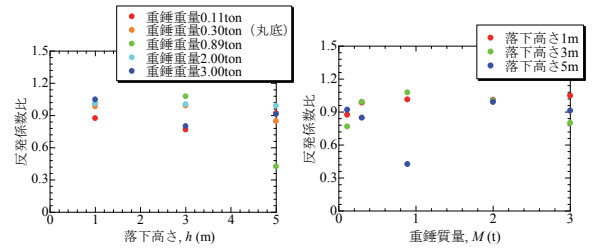
また、図 7-9 より反発係数比は落下高さが大きくなるほど小さくなり、重錘質量が大きくなるほど小さくなる傾向にある。算出方法 3、4 によって反発係数を算出すると、被衝突体の変形量を考慮するため、その分反発係数が小さくなる。また、落体の外力が大きくなると、その分被衝突体の変形量も大きくなるため、このような結果になったと考えられる。

このように、反発係数の定義の違いによって、反発係数も大きく異なってくる。そのため、シミュレーション上での現象の再現度合いによって適用する反発係数を変化させる必要があると考えられる。地面の塑性変形を考慮したシミュレーションであれば、算出方法 2 で算出した反発係数を適用する必要がある。また、地面を完全な剛体としたシミュレーションであれば、算出方法 3 で算出した反発係数を適用するのが適切である。

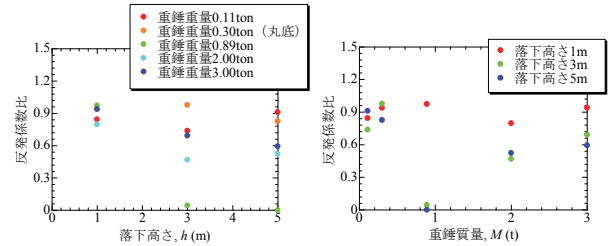
4. まとめ

本研究は比較的大規模な落体の反発挙動把握を目的に、落下高さと重錘質量の違いによる反発係数の違いについての考察をした。その後、異なる算出方法で反発係数を求め、その違いについて考察した。得られた主な知見は以下の通りである。

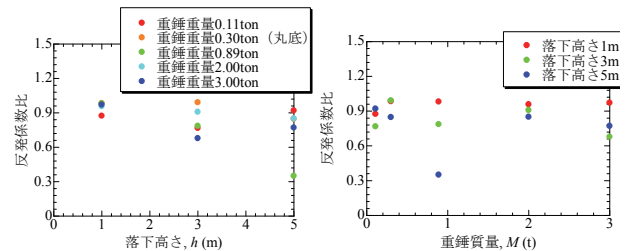
- 1) 落下高さが大きくなるほど、重錘質量が大きくなるほど反発係数は小さくなる傾向にあることが分かった。また、この傾向は落下高さ、重錘質量が小さいほど顕著に表れるということが分かった。
- 2) 被衝突体を土砂とした場合、被衝突体をコンクリートとした場合に比べて反発係数が小さくなる傾向にある。これは、剛性の違いによるものと考えられる。
- 3) 土砂を被衝突体としたケースでは、重錘質量が大きくなるほど反発係数が小さくなる傾向にならない。このことから、被衝突体の剛性が小さい場合、重錘質量が大きくなるほど反発係数が小さくなる傾向は表れない可能性がある。
- 4) 速度比から算出された反発係数は、高さ比から算出された反発係数に比べて大きくなる傾向にあり、この傾向は落体の外力が大きくなるほど顕著に表れる。このことから、落石シミュレーションで反発係数のパラメータを用いる場合、どの方法で算出された反発係数を用いるべきか検討していく必要がある。
- 5) 落体の地面衝突と共に地表面は沈下し、その後浮上するが、元の地表面の位置までは戻らない。このことから、落体の地面衝突後、地面は弾塑性変形が生じている。



(a)落下高さとの関係 (b)重錘質量との関係
図 10 算出方法 2 を用いた場合の反発係数比



(a)落下高さとの関係 (b)重錘質量との関係
図 11 算出方法 3 を用いた場合の反発係数比



(a)落下高さとの関係 (b)重錘質量との関係
図 12 算出方法 4 を用いた場合の反発係数比

今後は、更なる実験的検討や数値解析を行うことで、落下高さ、重錘質量から反発係数を算出できる式を定式化する予定である。

参考文献

- 1) 日本道路教会：落石対策便覧，2018. 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.