

落体の反発挙動に関する斜入射実験

A sloping drop experiment on the repulsive behavior of falling objects

(株)構研エンジニアリング ○正会員 高橋浩司 (Koji Takahashi)
 (株)構研エンジニアリング 正会員 牛渡裕二 (Yuji Ushiwatari)
 (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 正会員 前田健一 (Kenichi Maeda)
 名古屋工業大学 学生会員 堀 耕輔 (Kosuke Hori)
 東電設計(株) 正会員 佐藤恭兵 (Kyohei Sato)

1. はじめに

落石対策を検討する際の参考文献として「落石対策便覧¹⁾」が広く用いられている。本文献は、種々の実験・解析に基づく落石挙動について述べられているが、落石の跳躍量に関しては、落石径30cm, 50cm, 70cmの試験体による斜面落下実験の結果より「総落石数の80~85%が2m以下の跳躍量」と収録されていることに留まる。

落石問題を検討するにあたり、落石の挙動把握は重要なポイントとなるが、落石対策便覧収録範囲外の扱いについては課題が残る。

解決策として、落石の挙動を把握するツールとしての個別要素法 (DEM) など数値解析手法を用いた落石シミュレーションの整備が求められており、反発係数が最も重要なパラメータとなっているが、明らかにされていないのが現状である。

過去の研究においては、直径φ10~30cmの小型試験体を用いた反発係数に着目した実験²⁾や我々研究グループが実施した直径2mのコンクリート製模擬球体をアスファルト舗装面に斜入射させる実験³⁾において、試験体の落下高さが高くなるほど反発係数が小さくなる傾向が確認されている。

以上のことから、落下対象がコンクリート面のような固い地盤においても同様に反発係数が小さくなる可能性が高く、反発係数を適切に評価することで、施設整備や対策工設計の合理化を図ることが可能と考える。

本研究では、落石シミュレーションの精度向上を最終目的として、特に径の大きい落体の反発挙動に関する実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験方法

本研究では、落体の反発挙動の適正評価を目的として、巨石を模擬したコンクリート製の落体を用い、図-1に示すような斜入射実験装置を製作し、コンクリート面への斜入射実験を行った。表-1に実験ケース一覧を示す。また、図-2にはコンクリート製の落体形状を示す。実験には、直径2m、質量は8.3tonの模擬球体を使用した。コンクリートの設計基準強度 $f_{ck}=55\text{MPa}$ 、衝突時の破損を抑制する目的でポリプロピレン短繊維をコンクリート体積4.1m³あたり5袋 (体積混入率 $V_f=6.1\%$) 混入した。

写真-1に実験状況を示す。実験時の斜入射装置から放たれる高さ (放射高さ) は地表面からそれぞれ0.545 m および5.647 m となっている。実験は北海道江別市寒地土木研究所角山実験場内のコンクリート面上にて行った。衝突部であるコンクリート面の強度は、シュミットハンマー試験の結果33.7~46.2MPa程度となっている。

2.2 計測方法

本実験では、コンクリート面に対する衝突痕形状計測のほか、試験体にはターゲットを貼り付け、高速度カメラにより反発挙動の計測を行った。高速度カメラのフレームレートは 400fps であり、PTV 解析により落体速度等の算出を行った。

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	放射高 (m)	落体設置高 (m)	位置エネルギー (kJ)	架台角度 (°)
H0.5	0.545	3.000	24.90	10
H5.0	5.647	7.720	64.08	10

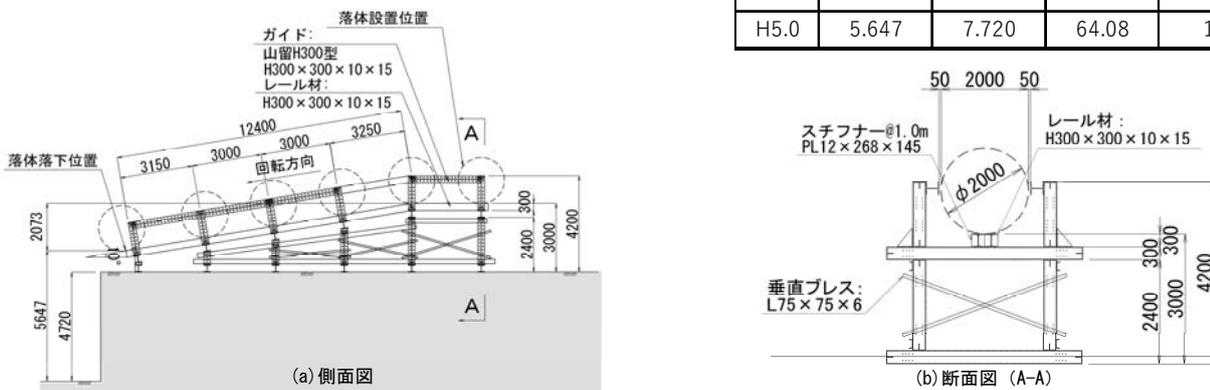
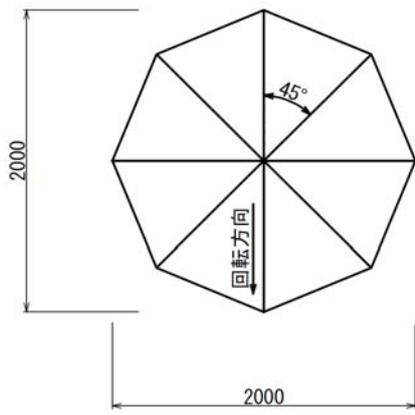
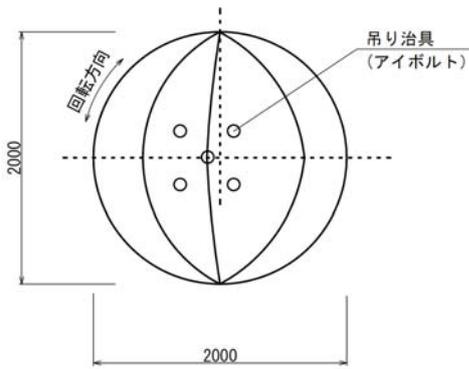


図-1 斜入射実験概要図 (H5.0)

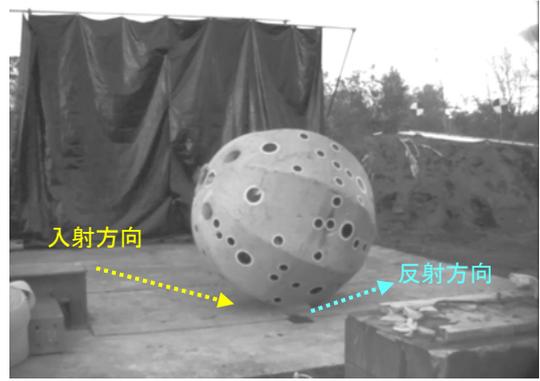


(a) 平面図

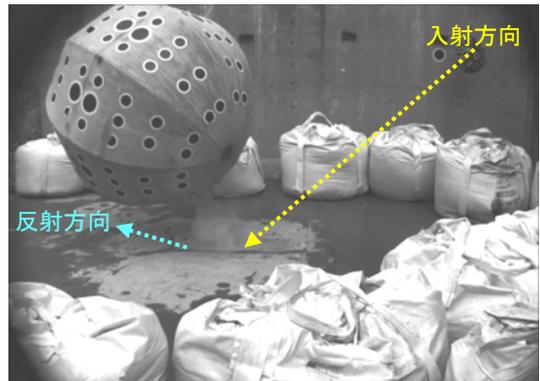


(b) 側面図

図-2 落体形状図



(a) H0.5



(b) H5.0

写真-2 落体最大跳躍時の高速度カメラ画像



(a) H0.5

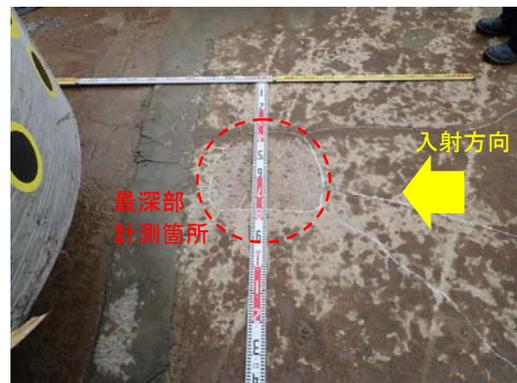


(a) H0.5



(b) H5.0

写真-1 実験状況写真



(b) H5.0

写真-3 衝突位置の表面状況

3. 実験結果

3.1 計測結果

写真-2 にコンクリート面での落体最大跳躍量時における高速カメラ画像, 写真-3 に衝突後のコンクリート面の状況を示す. また, 表-2 には, コンクリート面の衝突痕形状計測値を示す.

衝突痕からは, H0.5 は衝突時には落体がコンクリート面に全く陥入せず反発している. 一方, H5.0 については, 最大深さ 23mm まで陥入しており, H0.5 に比べて影響の大きさが伺える.

表-2 コンクリート面の衝突痕形状

	衝突痕の深さ (鉛直方向)	衝突痕の幅 (水平方向)	衝突痕の幅 (延長方向)
H0.5	0	0	0
H5.0	23	420	460

単位: mm

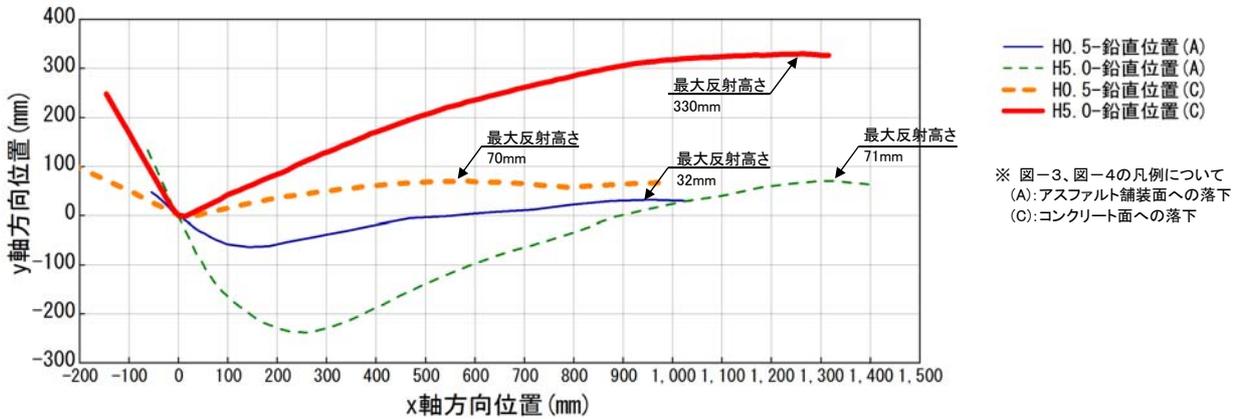
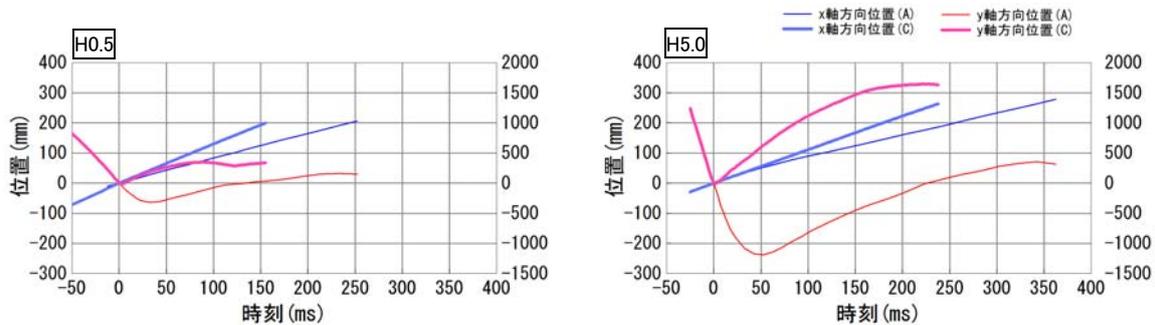
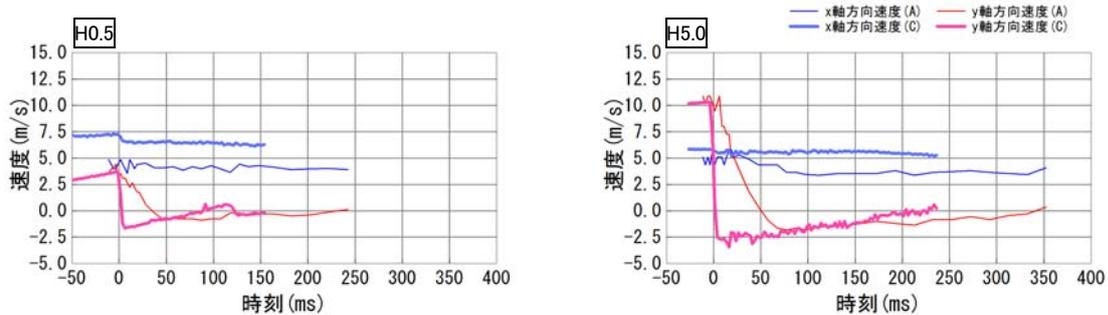


図-3 落体の軌跡図



(a) 時刻-位置



(b) 時刻-速度

図-4 落体位置・角速度に関する時刻歴波形

3.2 落体の軌跡

図-3 に衝突位置付近における落体の位置図(軌跡図)を示す. この落体位置は高速カメラの撮影画像におけるターゲットの変位量を読み取っている. 便宜上, 水平方向は入射方向を, 鉛直方向は反射方向をそれぞれ正とし, コンクリート面との接触位置をゼロとして整理している. また, 過去に実施した同一模擬球体によるアスファルト舗装面へ落下させた落体の軌跡を重ねて示す.

アスファルト舗装面への落下は, 衝突位置から水平方向に 142mm(H0.5)~260mm(H5.0)移動したところで最大貫入量となり, さらに水平移動しながら上方(反射方向)へ向かって移動している. 一方, コンクリート面においては H0.5, H5.0 どちらのケースにおいてもほとんど下方へ移動せず, 即座に水平移動しながら上方へ移動しており, 反射高さもそれぞれ 70mm, 330mm と大きい値となっている.

表-3 高速度カメラ計測結果一覧(鉛直方向)

	H0.5				H5.0			
	時刻	単位	計測値	単位	時刻	単位	計測値	単位
(a)衝突前の最大入射速度	-3.75	(ms)	3.690	(m/s)	-6.25	(ms)	10.301	(m/s)
(b)最大貫入深さ	2.50	(ms)	3.849	(mm)	2.50	(ms)	1.478	(mm)
(c)衝突後の最大反射速度	6.25	(ms)	-1.670	(m/s)	16.25	(ms)	-3.445	(m/s)
(d)地表面離脱時刻	5.00	(ms)	0.000	(mm)	2.50	(ms)	0.000	(mm)
(e)最大反射高さ	90.00	(ms)	-70.212	(mm)	227.50	(ms)	-329.761	(mm)

3.3 落体位置・速度に関する時刻歴波形

図-4に各ケースにおける落体の位置および速度の時刻歴波形を示す。波形は衝突面に接触した時刻をゼロとし、速度については落体位置の変化量を速度に変換している。こちらについても図-3同様に、過去に実施したアスファルト舗装面へ落下させた結果を重ねて示す。

(a)時刻-位置より、水平方向の落体位置は、落下高さおよび落下対象の違いによらずほぼ線形となっている。また、鉛直方向の落体位置は、衝突前はほぼ線形となっているが、衝突後は線形とならずに、減衰しながら緩やかに上方へと移動している。

(b)時刻-速度より、y軸方向(落下方向)速度は、落下対象がアスファルト舗装面においては、衝突から32.5~52.5ms経過後ゼロとなっている。一方、コンクリート面においては、衝突から2.5~5.0(ms)経過後にゼロとなっている。これは、前者においては、アスファルト舗装面への貫入により徐々に速度が減衰したのに対して、コンクリート面については、ほとんど陥入せずに反発したことによるものと推察される。

また、両者において反発後に速度が減衰していることから、アスファルト舗装面においては、地盤の変形による吸収、コンクリート面においては、表面の局部破壊によるエネルギー損失によるものと推定される。

x軸方向(水平方向)速度については、落下対象および落下高さによらず減衰していないことから、鉛直方向の速度変化に影響を受けずに変位していることがわかった。

4. 反発係数に関する考察

表-3に各時刻における高速度カメラ計測結果一覧を示す。計測値(速度、位置)は鉛直方向を示している。

(a)衝突前の最大入射速度はH0.5およびH5.0でそれぞれ $V_{0.5}=3.690(\text{m/s})$ 、 $V_{5.0}=10.301(\text{m/s})$ 、(c)衝突後の最大反射速度はH0.5およびH5.0でそれぞれ $V'_{0.5}=1.670(\text{m/s})$ 、 $V'_{5.0}=3.445(\text{m/s})$ となる。

反発係数 $e_{0.5}$ および $e_{5.0}$ は、入射速度と反射速度の比で示されることから、これらの値を用いた反発係数はそれぞれ下記の通り算出される。

$$e_{0.5} = V'_{0.5} / V_{0.5} = 1.670(\text{m/s}) / 3.690(\text{m/s}) = 0.45 [0.20^{**}]$$

$$e_{5.0} = V'_{5.0} / V_{5.0} = 3.445(\text{m/s}) / 10.301(\text{m/s}) = 0.33 [0.17^{**}]$$

※ [参考] 落下対象がアスファルト舗装面

また、落下高さおよび最大反射高さから求めた反発係数を下記に示す。

$$e_{0.5} = \sqrt{(H'_{0.5} / H_{0.5} = 0.070(\text{m}) / 0.545(\text{m}) = 0.36 [0.25^{**}]}$$

$$e_{5.0} = \sqrt{(H'_{5.0} / H_{5.0} = 0.330(\text{m}) / 5.647(\text{m}) = 0.24 [0.12^{**}]}$$

※ [参考] 落下対象がアスファルト舗装面

どちらの算出方法においても、落下対象によらず落下高さが高くなるほど反発係数が小さくなる傾向がわかった。また、コンクリート面での反発係数は、アスファルト舗装面に比べ2倍近く高い値となった。

5. まとめ

本研究では、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、過去にアスファルト舗装面、今回はコンクリート面において巨石を模擬したコンクリート模擬球体を用いた斜入射実験を行った。

本研究で得られた結果を下記に示す。

- 落体位置に関する時刻歴波形より、落下高さおよび落下対象の違いによらず、水平方向位置は、ほぼ線形移動となる。
- 落体速度に関する時刻歴波形より、x軸方向(水平方向)速度については、落下対象および落下高さによらず減衰していないことから、鉛直方向の速度変化に影響を受けずに移動する。
- 落体の速度または高さの関係から、それぞれ反発係数の算出を行ったが、両者において落下高さが高くなるほど反発係数が小さくなる傾向が確認された。

謝辞:

本研究を行うにあたり、国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所の寒地構造チームの皆さまに多大なご支援を戴いた。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) 表真也, 岡田慎哉, 日下部祐基: 落石シミュレーションの定数設定法に関する検討, 第53回北海道開発局技術研究発表会, 技45, 2009.
- 3) 鈴木健太郎, 阿部和樹, 川瀬良司, 前田健一, 田中敬大, 中瀬仁: 落体の反発挙動に関する斜入射実験, 平成29年度土木学会北海道支部論文報告集, Vol.74, 2017.