

落下方法の違いによる落体の反発挙動に関する実験的検討

Experimental study on rebound behavior of falling bodies due to different drop methods

(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)
名古屋工業大学 学生会員 杉山直優 (Naomasa Sugiyama)
名古屋工業大学 正会員 前田健一 (Kenichi Maeda)
東電設計(株) 正会員 中釜裕太 (Yuta Nakagama)
寒地土木研究所 正会員 今野久志 (Hisashi Konno)

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、反発挙動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各種重錘の鉛直落下実験³⁾および直径約2mのコンクリート製模擬球体を斜入射架台を用いて舗装面に落下させるさせる実験⁴⁾等において、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。一方で、回転を伴う斜入射実験では、水平方向速度が減衰せず、衝突によってできた衝突痕を駆け上がる形で上方への反発が確認された。

これらより落体の反発挙動は落下方法 (速度成分の構成や回転運動の有無、程度) に影響されるものと考えられ、反発挙動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、落下方法の違いによる落体の反発挙動に関する実験的検討を行った。鉛直落下については、過去の実験において実施済みのため、本研究では、実斜面での転落実験を行い、過去の結果と対比する形で検討を行う。

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、落石を模擬した重錘 (EOTA 1.6t) を用い、図-1、写真-1、2に示すような実規模斜面から重錘を転落させ、アスファルト舗装面への落下実験を行った。アスファルト舗装は、第1落下点から第3落下点までカバーするもの

として幅W=6.0m、延長L=15mの範囲で、一般的な管理用道路程度の舗装厚t=12cm、路盤厚t=15cmとした。

表-1に実験ケース一覧を示す。また、写真-3、図-2には重錘の仕様を示す。実験には、直径0.96m、質量は1.6tonのEOTA重錘を使用した。

実験は、以下の手順で実施した。

- 1) 重錘 (EOTA1.6t) を比高h=30.8m、勾配θ=50°の斜面頂部に設置する。
- 2) 設置した重錘をバックホーで押し出すことにより、斜面に放出・転落させる。
- 3) 落下対象面 (平坦面) での衝突および跳躍等の挙動について、高速度カメラおよび4 Kビデオカメラで撮影し、衝突痕および到達距離の計測を行う。
- 4) 落下した重錘が自然停止する迄を一連の実験とするが、所定の範囲内で停止しないことも想定し、法尻から延長L≒40mのところに防護工として大型土のうを設置する。

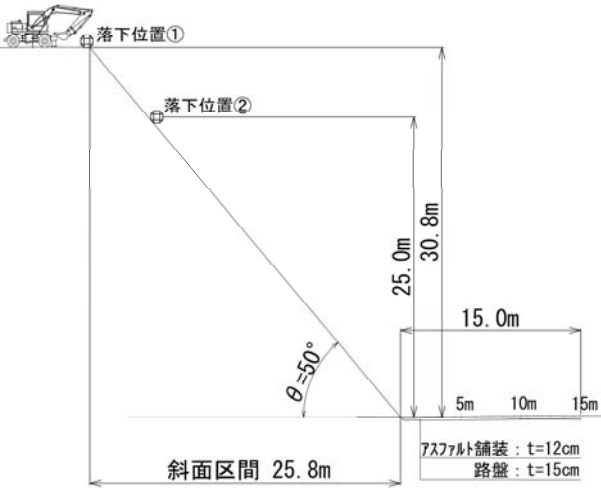


図-1 実験状況概要図

表-1 実験ケース一覧

ケース名	形状	重さ(t)	レーン No.	落下高さ (m)	落下対象
E1.6-H30-A01	EOTA	1.6	①	30	アスファルト舗装
E1.6-H30-A02					
E1.6-H30-A04					
E1.6-H30-A05					
E1.6-H25-A01					
E1.6-H25-A03			②	25	



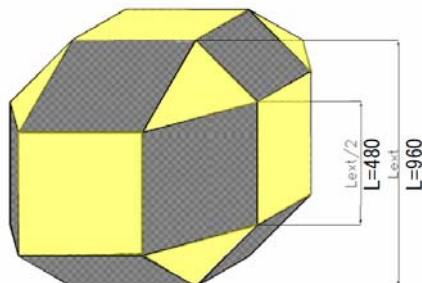
写真-1 実験場斜面(側面)



写真-2 実験場斜面(正面)



写真-3 重錘(EOTA 1.6t)



重量(t)	重量(kN)	体積(m ³)	単位体積重量(kg/m ³)	単位体積重量(kN/m ³)	L:1辺の長さ(m)	φ:球形換算(m)
1.60	15.68	0.627	2,552	25.0	0.960	1.062

図-2 重錘の仕様

2.2 計測方法

本実験では、アスファルト舗装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 (2.5ms 間隔) であり、PTV 解析により落体速度等の算出を行った。高速度カメラによる撮影画像を写真-3に、重錘の衝突位置に関する画像を写真-4～6に示す。

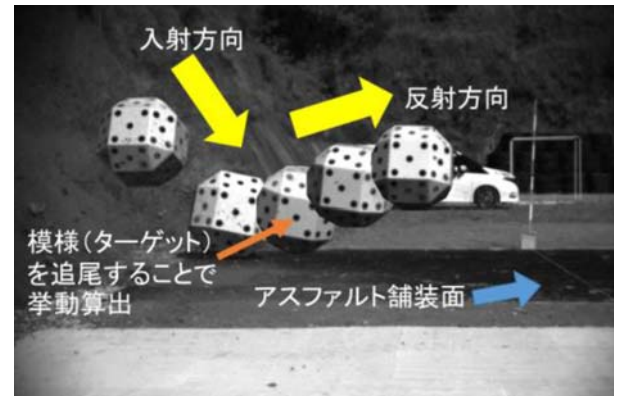


写真-3 高速度カメラによる重錘落下状況

3. 実験結果

3.1 衝突位置および衝突痕の計測結果

表-2に重錘衝突の位置および衝突痕の形状を示す。斜面を転落した重錘は、法尻から概ね2m前後の位置に衝突(第1落下点)したのち、第2落下点までバウンドし、舗装範囲外へと移動している。一例として、写真-4にケース「E1.6-H30-A01」における衝突後のアスファルト舗装面の状況を示す。

表-2 重錘衝突痕の位置および形状

ケース名	第1落下点				第2落下点	
	(a)落下方向幅 (cm)	(b)直角方向幅 (cm)	(c)距離 (m)	深さ (mm)	(d)距離 (m)	深さ (mm)
E1.6-H30-A01	82	62	1.35	80	10.00	20
E1.6-H30-A02	60	60	1.73	110	11.43	40
E1.6-H30-A04	85	50	2.10	90	11.50	30
E1.6-H30-A05	130	130	1.80	155	12.30	35
E1.6-H25-A01	70	100	1.20	150	7.60	—
E1.6-H25-A03	—	—	0.80	160	6.40	—

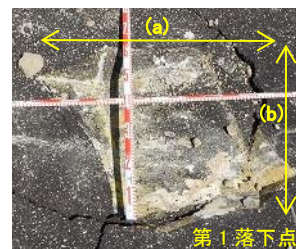
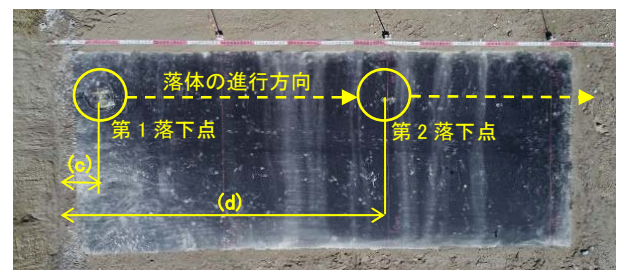
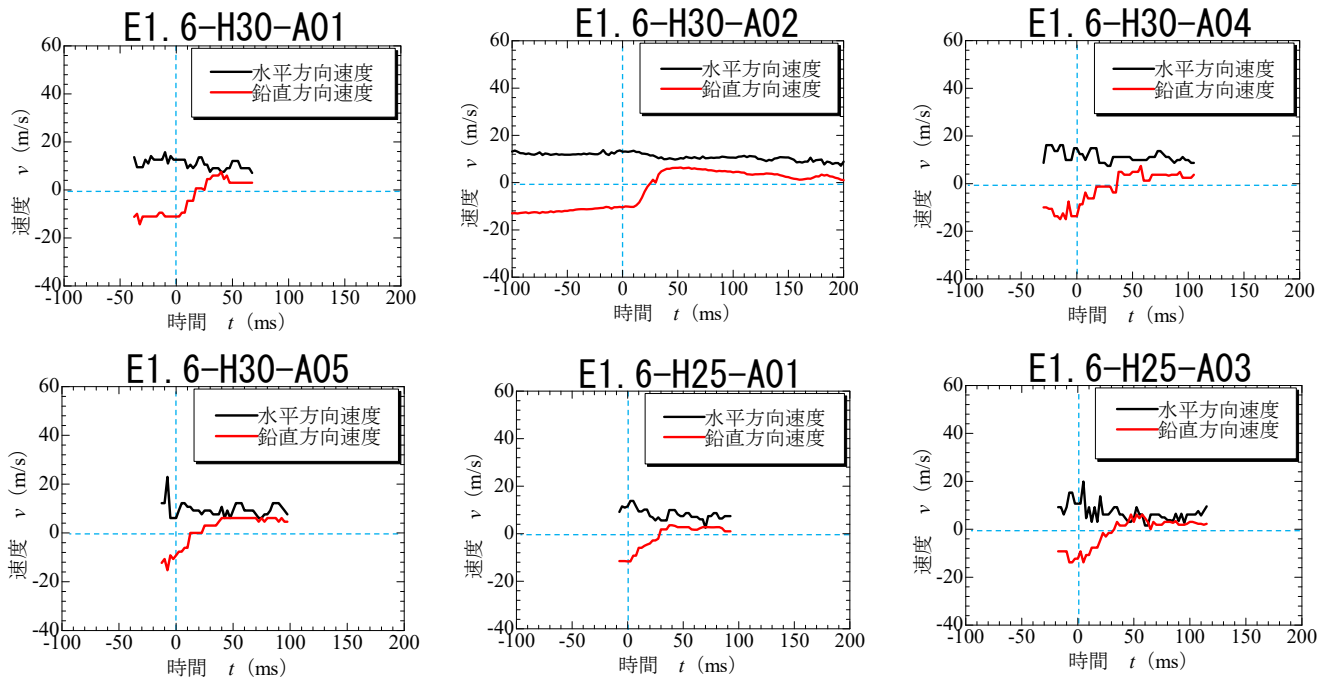


写真-4 落下位置の状況

表－3 実験結果一覧

ケース名	重さ(t)	落下高さ(m)	衝突直前鉛直速度(m/s)	衝突直後鉛直速度(m/s)	反発係数(鉛直速度比)	最大跳躍高(m)	実質最大跳躍高(m)	貫入時間(s)
E1.6-H30-A01	1.6	30	-11.02	3.02	0.274	1.374	0.843	0.0475
E1.6-H30-A02			-10.50	4.79	0.456	1.785	1.254	0.085
E1.6-H30-A04			-13.66	3.32	0.243	1.464	0.933	0.0825
E1.6-H30-A05			-10.71	4.59	0.429	1.985	1.454	0.080
E1.6-H25-A01	1.6	25	-11.68	2.80	0.239	1.236	0.705	0.080
E1.6-H25-A03			-12.26	2.30	0.187	1.152	0.621	0.098



図－3 落体の速度に関する時刻歴波形

3.2 高速度カメラ計測結果

表－3に高速度カメラ計測による実験結果一覧を示す。衝突直前の鉛直方向速度は 10.50～13.66m/s と近い範囲を示すが、衝突直後の鉛直方向速度は 2.30～4.79m/s と2倍近い差がみられた。一方、最大跳躍高 1.152～1.985と2倍近い差がみられるが、これについては、第1落下点での重錘の舗装面への当たり方（向き、角度、衝突する面）や舗装の損傷度合いが影響しているものと考えられる。

3.3 落体の速度に関する時刻歴波形に関する考察

図－3に各ケースにおける落体の速度に関する時刻歴波形を示す。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。

鉛直方向速度は、重錘衝突から概ね 20～30ms 経過後ゼロとなっている。これはアスファルト舗装面への貫入により、舗装面の局部破壊や地盤の変形によるエネルギー損失が影響し、徐々に速度が減衰したものと考えられる。

一方、水平方向速度については、どのケースも大きく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しているものと推察される。

3.4 反発係数に関する考察

表－3に各ケースにおける「衝突直前鉛直速度」および「衝突直後鉛直速度」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後の鉛直方向速度を用いて、下記式により算出した。

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

ここで、鉛直方向速度は鉛直上向きを正とした。

表－3に示すどのケースにおいても反発係数 e は 0.187～0.459 と比較的高い値を示している。また実質最大跳躍高（アスファルト舗装面からの浮き上がり高さ）についても、0.621～1.545m と明らかに舗装面から浮き上がっていることが確認できる。

4. 過年度実験結果との比較

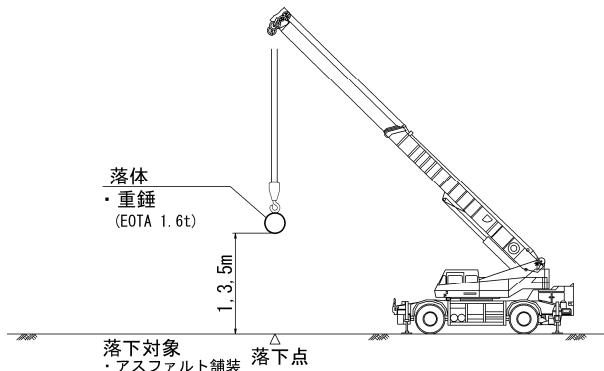
4.1 実験方法と実験結果

図－4に実験概要図を示す。実験は、今回と同様の重錘(EOTA1.6t)を使用し、アスファルト舗装面に自由落下させ、高速度カメラで捉えることにより、反発挙動の把握を行ったものである。

表－4 過去の実験結果一覧（鉛直落下実験）

ケース名	形状	重さ(t)	落下高さ (m)	落下方式	衝突直前鉛直速度 (m/s)	衝突直後鉛直速度 (m/s)	反発係数 (鉛直速度比)	最大跳躍高 (m)
F-W1.60E-H1.0	EOTA	1.6	1.0	鉛直 (自由落下)	-4.20	0.41	0.098	0.000
F-W1.60E-H3.0			3.0		-7.61	0.41	0.054	0.000
F-W1.60E-H5.0			5.0		-10.00	0.73	0.073	0.000

表－3に実験結果一覧を示す．衝突直前の鉛直方向速度は落下高さに応じて4.20～10.00m/sとなっている．一方，衝突直後の鉛直方向速度は落下高さによらず0.41～0.73m/sと非常に低い値を示す．最大跳躍高については，アスファルト舗装面からの離脱が見受けられなかったことからゼロとなっている．



図－4 実験概要図（H29）

4.2 落下方法の違いによる落体の反発挙動

表－3および表－4より主要項目を抜粋し表－5に示す．比較すると落下方式や落下高さの違いがあるものの，反発係数および最大跳躍高が大きく異なっている．特に表－4の落下高さ5mのケース（F-W1.60E-H5.0）においては，衝突直前鉛直速度が10.00m/sと今年度実施した実規模斜面転落実験と速度が大きく変わらないのに対し，反発挙動が大きく異なっていることがわかる．

これは，先に述べた回転を伴う衝突の場合には，衝突直後から鉛直方向速度は減衰するが，回転と水平方向速度は大きく減衰せず，衝突痕を駆け上がる形で，鉛直方向速度に移行し，見かけの反発が生じたものと推察される．

表－5 過年度実験結果と比較

実施年度	落下方式	形状	重さ (t)	落下高さ (m)	衝突直前の 鉛直速度 (m/s)	衝突直後の 鉛直速度 (m/s)	最大 跳躍高 (m)
R1	実規模斜面 からの転落	EOTA	1.6	25～30	10.50～13.66	2.30～4.79	1.152～ 1.985
H29	自由落下			1～5	4.20～10.00	0.41～0.73	0.00

5. まとめ

本研究では，落下方法の違いによる落体の反発挙動を把握する目的で，実規模斜面から重錘（EOTA1.6t）を転落させ，高速度カメラによりその挙動を把握する実験を行った．

また，過去に実施した同様の重錘を使用した鉛直落下の実験結果を用いて，重錘の挙動の違いに着目した検討を行った．

本研究で得られた結果を下記に示す．

- 落下高さがほぼ同様のケースにおいても最大跳躍高1.152～1.985と2倍近い差がみられるが，これについては，第1落下点での重錘の舗装面への当たり方や舗装の損傷度合いが影響しているものと考えられる．
- 落体速度に関する時刻歴波形より，水平方向速度については，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．
- 鉛直（自由落下）に比べ反発係数 e は0.187～0.459とばらつきはあるが，比較的高い値を示している．
- 重錘の反発挙動は，重錘の回転と衝突痕による駆け上がりが大きく影響するものと考えられる．

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る．

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) 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.
- 4) 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.