

落体の反発挙動に関する鉛直落下実験

A vertical 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)
正会員 牛渡裕二 (Yuji Ushiwatari)
正会員 保木和弘 (Kazuhiro Hoki)
名古屋工業大学 正会員 前田健一 (Kenichi Maeda)
学生員 堀 耕輔 (Kosuke Hori)
東電設計(株) 正会員 中釜裕太 (Yuuta Nakagama)

1. はじめに

落石対策を検討する際に、準拠する参考図書として「落石対策便覧¹⁾」が広く用いられている。本文献は、種々の実験および解析に基づく落石挙動について述べられているが、その適用範囲は、跳躍で落石径30～70cm、落下速度は70m/s程度以下であり、現実には適用範囲外の落石も多数発生している状況にある。

過去の災害では、70cmを超える落石が殆ど跳躍していなかった事例もあり、過去の研究²⁾ではφ10～30cmと小径の岩体落石実験ではあるが、径が大きくなると反発係数が小さくなる傾向が確認されている。

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。この解決策として近年精度が向上している落石シミュレーションの採用が挙げられるが、より信頼性を高めるためには反発係数などのインプットデータの整理が必要となる。

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、落石の反発係数に着目し、既往の衝突実験に用いられてきた重錘を落石に見立て、図-1に示すような鉛直落下実験を行った。落下対象は、特に道路際での跳躍が最も道路利用者の安全性に影響があるものと考え、一般的なアスファルト舗装面を対象として実験を実施した。

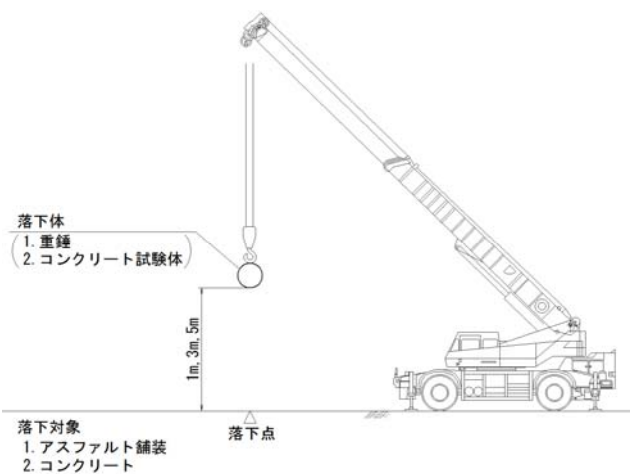
2. 実験概要

実験は、重錘またはコンクリート試験体について、落下対象をアスファルトとして自由落下させ、その反発挙動を高速度カメラで捕らえることにより、反発係数を算出することとした。図-1に実験概要を示す。

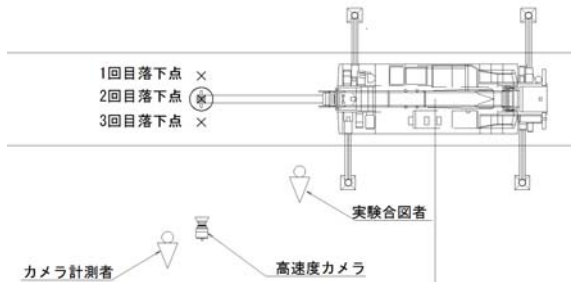
落下対象については、実際の道路上を想定し、アスファルト舗装を基本とした。また、抽出した1落体(1.6t多面体)については、比較を目的に落下対象をアスファルト舗装より固いコンクリート面でも行うこととした。表-1に実験ケース一覧を示す。

表-1 実験ケース一覧

質量	落体種類	底面形状	落下高さ	落下対象	回数
0.11t	重錘	球底面	1m	アスファルト	3
			3m		3
			5m		3
0.3t	重錘	球底面	1m	アスファルト	3
			3m		1
			5m		1
			7m		1
1.0t	重錘	球底面	1m	アスファルト	3
			3m		1
			5m		1
1.6t	多面体	平底面	1m	アスファルト	1
			3m		1
			5m		1
			1m	コンクリート	1
			3m		1
2.0t	重錘	球底面	1m	アスファルト	2
			3m		1
			5m		1



(a)側面図



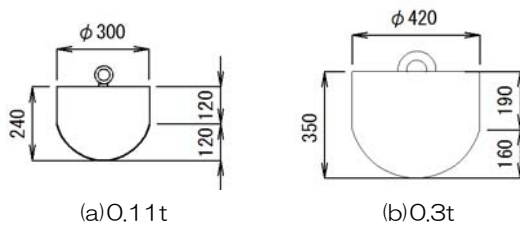
(b)平面図

図-1 実験概要図

また、図－2および写真－1には代表的な重錘形状を示す。実験に用いた落体は、重錘が 0.11t, 0.3t, 1.0t, 2.0t の 4 種類、これにコンクリート多面体 1.6t を加えた計 5 種類である。実験はこれら落体をレーンで吊上げ、自由落下させて実験を行った（写真－2）。落下高さは 1.0m, 3.0m, 5.0m, 7.0m の 4 種類である。なお、基本は 1 つの高さで 3 回実施しているが、一部は 1 回のみの実施となっている。

また本実験では、重錘にターゲットを貼り付け、高速カメラにより反発挙動の計測を行った。

実験実施は写真－3 (a) に示す北海道江別市にある土木研究所寒地土木研究所の角山実験場内のアスファルト舗装を基本として行った。衝突部であるアスファルト舗装の厚さは $t=5\text{cm}$ 程度であり、その直下は砂礫主体の盛土地盤となっている。簡易動的コーン貫入試験結果は、表層 1m までは $N_d=10\sim30$ 程度であった。この他、写真－3 (b) に示すコンクリート面においても一部の実験を行った。コンクリート厚さは 1m 程度である。



図－2 鋼製重錘

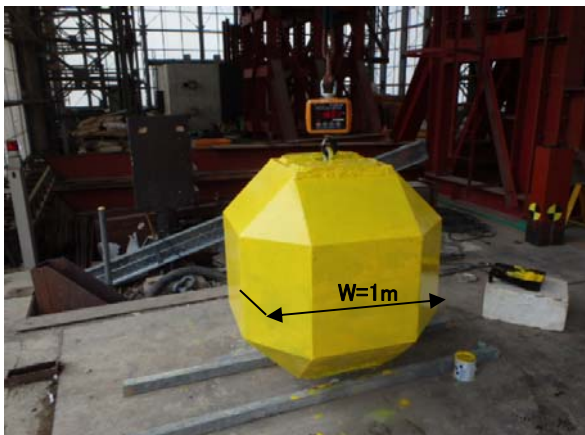


落下対象：(a) アスファルト



落下対象：(b) コンクリート

写真－3 実験箇所



写真－1 コンクリート多面体 (1.6t)

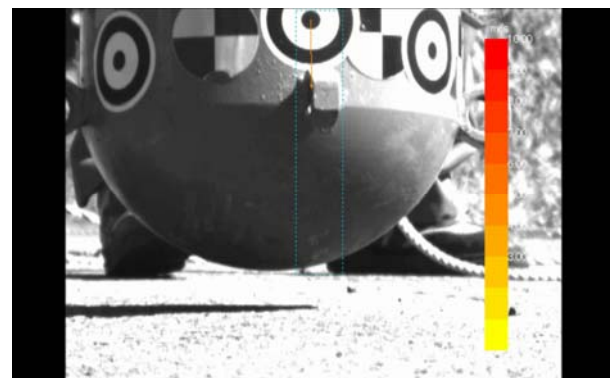
3. 実験結果

写真－4 に、重錘 0.11t, 落下高さ $h=1\text{m}$ による高速カメラ画像を示す。高速カメラによる計測結果は撮影画像のターゲットの変位量を読み取り、変位の変化量を速度に変換している。高速カメラ画像による自動追跡結果から算出した地表面衝突直前の速度および衝突直後の速度をもとに反発係数を算出した。また、1.6t 多面体のコンクリートへの落下は、高速カメラ画像による自動追跡が出来なかったため、画像を目視で読み取り、速度および反発係数を算出した。

表－2 に実験結果一覧を示す。



写真－2 実験状況



写真－4 高速カメラ画像(重錘 0.11t)

表-2 実験結果一覧

質量	落体種類	底面形状	落下高さ	底面材料	No.	落体速度計測による 直前速度(m/s)	反発係数 (落体速度計測)	反発係数 (平均値)	備考	
0.11t	重錘	球底面	1m	アスファルト	1	5.486	0.113	0.112		
					2	4.647	0.100			
					3	4.728	0.123			
			3m		1	9.637	0.060	0.071		
					2	7.888	0.079			
					3	7.486	0.073			
					5m	1	10.895	0.073	0.105	
						2	10.244	0.056		
						3	10.028	0.036		
0.3t	重錘	球底面	1m	アスファルト	1	4.507	0.101	0.105		
					2	4.042	0.106			
					3	4.179	0.108			
			3m		1	7.529	0.096	0.096		
					1	9.914	0.079	0.079		
			5m		1	11.793	0.056	0.056		
					7m					
1t	重錘	球底面	1m	アスファルト	1	4.201	0	0	最大貫入量＞跳躍高さ	
					2	4.307	0		〃	
					3	4.441	0		〃	
			3m		1	7.803	0	0	〃	
					1	9.776	0	0	〃	
1.6t	多面体	平底面	1m	1	5.409	0	0	〃		
			3m	1	8.433	0	0	〃		
			5m	1	10.806	0	0	〃		
			1m	1	4.383	0.177	0.177	手動による計測		
				3m	1	7.958	0.077	0.077	〃	
2t	重錘	球底面	アスファルト	1	5.250	0	0	最大貫入量＞跳躍高さ		
				2	5.539	0		〃		
				1	9.122	0		0	〃	
				3m	1	12.245	0	0	〃	

図-3 に 2.0t 重錘の落下高さ $h=1.0\text{m}$ および 5.0m の速度-時間の関係を示す。図-4 にはこれらの地表面からの変異を示す。表-2 の落体質量が 1t, 1.6t, 2t, 落下高さがいずれのケースにおいても底面材料がアスファルトのケースについては、目視により地表面と落体が一体となって挙動していると見受けられ、実際には速度が計測されているが、地表面よりも上に跳ね上がっていないため、反発係数は限りなく $e=0$ に近いものと判断した。

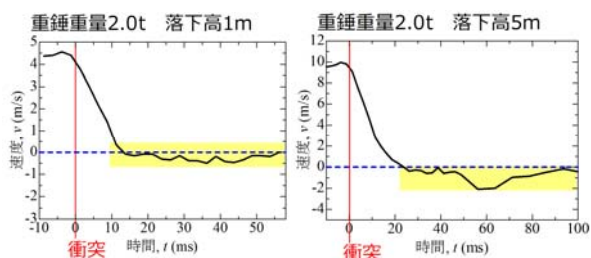


図-3 時間-速度

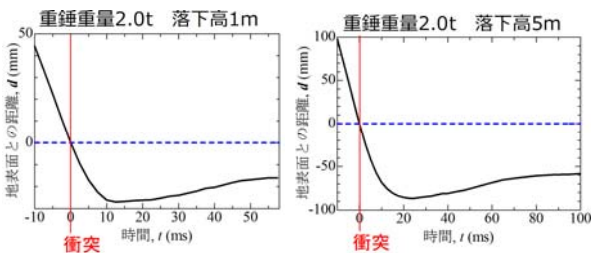


図-4 地表面からの変異

4. 反発係数に関する考察

4.1 落下高さによる考察

図-5 に、落下高さで得られた反発係数を示す。重錘質量が 0.11t や 0.3t では、落下高さが高くなるにつれて反発係数が小さくなる傾向が示された。また 1.0t 以上の質量の重錘においては、落下対象がアスファルト舗装面ではほとんど反発が見られず、反発係数は限りなく 0 に近いものと判断される。ただし、落下対象がコンクリートの場合については、アスファルト舗装に比べて地盤の変異がほとんど見受けられないことから反発係数は大きくなったものと考えられる。この場合においても落下高さ $h=1.0\text{m}$ に比べ $h=3.0\text{m}$ の反発係数が小さくなっていることから、落下高さと反発係数の関係は、アスファルト舗装の場合と同様の傾向を示すことが分かった。

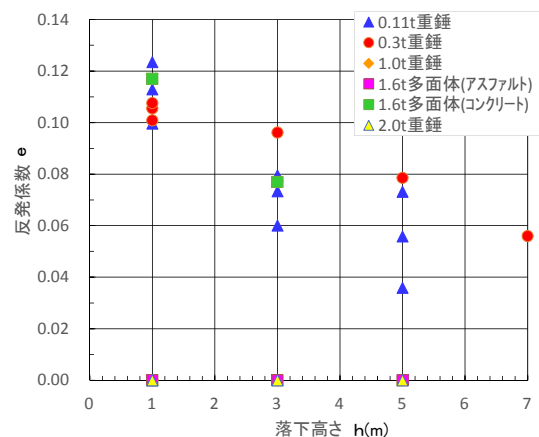
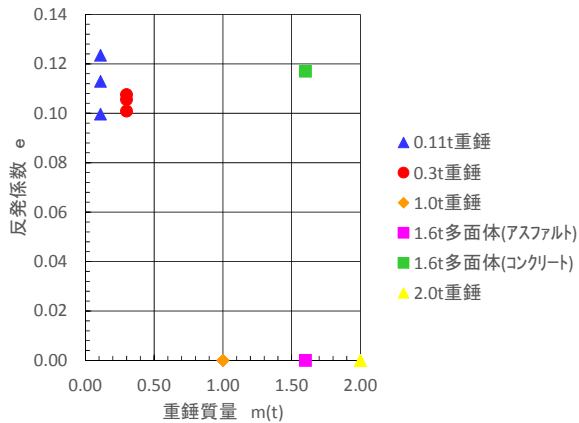


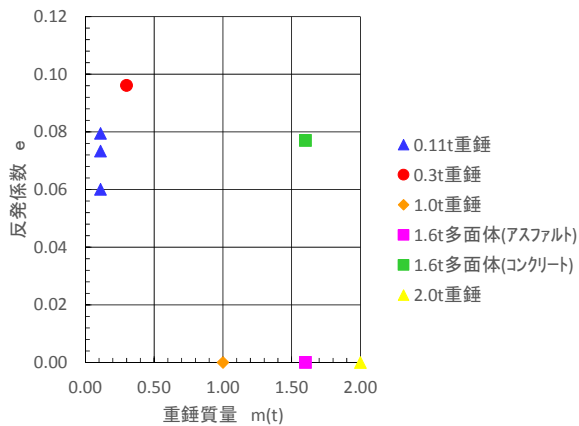
図-5 反発係数-落下高さ

4.2 重錘質量による考察

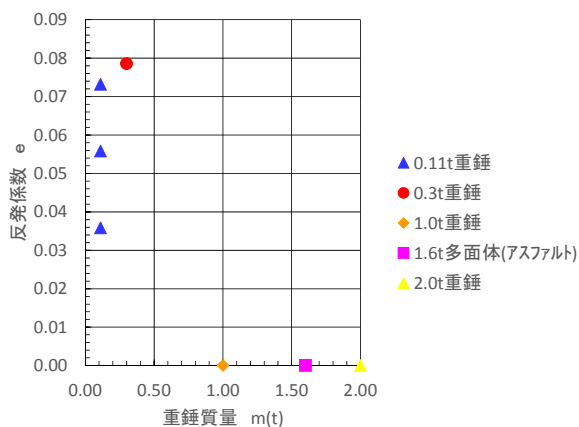
図－6に各落下高さ($h=1.0\text{m}$ 、 3.0m 、 5.0m)における重錘質量と反発係数の関係を示す。落下高さ $h=3.0\text{m}$ 、 5.0m 、 0.3t 重錘のケースおよび 1.6t 多面体の落下対象がコンクリート面の場合を除けば、全てにおいて、落体質量が大きくなるにつれ、反発係数が小さくなる傾向が確認できた。



(a) 落下高さ 1m



(b) 落下高さ 3m



(c) 落下高さ 5m

図－6 反発係数－重錘質量

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について、より合理的な値を提案することを目的として、各種重錘を落石に見立て、アスファルト舗装およびコンクリート面への鉛直落下実験を行った。本研究で得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- ・同一落体による高さを変化させた場合においては、落下高さが高くなるほど、反発係数は小さくなる傾向を示す。
- ・同一高さで重錘質量を変化させた場合においては、質量が大きくなるほど、反発係数は小さくなる傾向を示す。
- ・衝突対象が固くなる（コンクリート面）と反発係数は大きくなるが、落下高さと反発係数の関係は同様の傾向を示す。
- ・アスファルト舗装などの比較的弾性係数が低い地盤に重錘などの落体を衝突させると、貫入現象が生じることにより、反発速度は生じるものの地表面以上への反発高さは生じない場合がある。
- ・今後は、反発係数が0と見なせる境界線を実験的に模索するとともにDEM落石シミュレーションによる再現および数値実験を行い更に詳細に落石の挙動を検討する予定である。

謝辞：

本研究を行うにあたり、土木研究所寒地土木研究所の西弘明氏、今野久志氏をはじめとした寒地構造チーム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，2000.6
- 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。