

落体反発挙動に関する実験的検討

An experimental study on the repulsive behavior of falling objects

高橋 浩司*, 山内 翼*, 川瀬 良司**, 中瀬 仁***, 前田 健一****
Koji Takahashi, Tsubasa Yamauchi, Ryoji Kawase, Hitoshi Nakase, Kenichi Maeda

- * (株)構研エンジニアリング防災施設部 (〒065-0018 北海道札幌市東区北18条東17丁目1-1)
- ** 工博, (株)構研エンジニアリング専務取締役 (〒065-0018 北海道札幌市東区北18条東17丁目1-1)
- *** 工博, 東電設計(株)新領域研究開発推進室 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12)
- **** 工博, 名古屋工業大学教授 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Key Words: Rock fall, Coefficient of restitution, Lamé's constants, Weight drop experiment

キーワード: 落石, 反発係数, ラーメ定数, 重錘落下実験

1. はじめに

道路施設等の落石対策設計においては、特に落石衝撃力の推定および落石の反発挙動の把握が重要となる。現設計では落石対策便覧¹⁾中の衝撃力算出式に準拠して設計荷重を算出することが多い。同算出式は、落石の質量、重力加速度、ラーメ定数および落下高さから衝撃力を算出しているが、ラーメ定数の設定に依存しているため、ラーメ定数は重要なパラメータであると言える。また、落石の運動形態を再現するには、落石シミュレーションが一般的に用いられるが、反発係数等のパラメータ設定が重要な要素となっている。

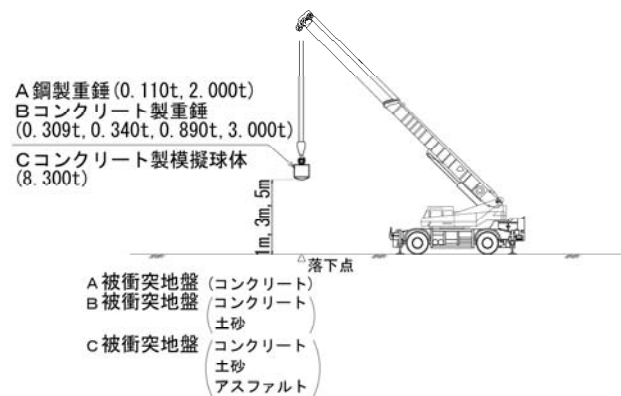
今回我々研究グループは落体の反発挙動を評価するため異なる地盤に対して重錘落下実験を行い、高速度カメラによる撮影、加速度計計測の結果から衝撃力を算出し、そこからラーメ定数の推定を行った。あわせて過去に発表²⁾した反発係数との関係性について考察を行った。

2. 実験概要

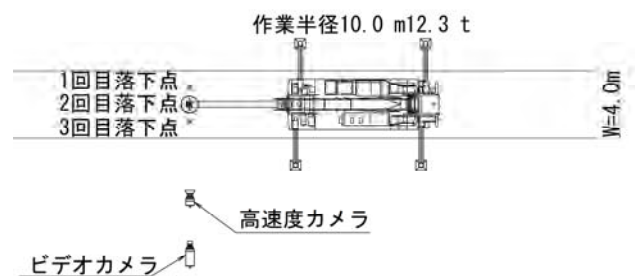
2.1 実験方法

実験はクレーンで重錘を吊り上げ、着脱装置により重錘を対象地盤に自由落下させて実施した。重錘質量、落下高さ、被衝突地盤によってケース分類した。図-1に実験概要図を、表-1にケース一覧を示す。

また、写真-1、写真-2にコンクリート、土砂での実験状況を示す。実験に用いた落体は、重錘が0.11t, 0.309t, 0.309t(平底), 0.89t, 2.0t, 3.0tの6種類、これにコンクリート製模擬球体8.3tを加えた計7種類である。



(a) 側面図



(b) 平面図

図-1 実験概要図

落下高さは1.0m, 3.0m, 5.0mの3種類である。なお、重錘落下は1mのケースを各3回、3m, 5mについては各1回実施した。

表一 実験ケース一覧

重錘質量 (t)	落体種類	落下高さ (m)	底面形状	被衝突地盤	回数	加速度センサ
0.110	鋼製重錘	1	球底面	コンクリート	3	有
0.110		3		コンクリート	1	無
0.110		5		コンクリート	1	無
0.110	コンクリート製重錘	1	球底面	土砂	3	無
0.309		3		コンクリート	3	有
0.309		5		コンクリート	1	無
0.309	コンクリート製重錘	1	球底面	コンクリート	3	有
0.890		1		コンクリート	3	有
0.890		3		コンクリート	1	有
0.890	鋼製重錘	5	球底面	コンクリート	1	無
2.000		1		コンクリート	3	有
2.000		3		コンクリート	1	有
2.000	コンクリート製重錘	5	球底面	コンクリート	1	無
3.000		1		コンクリート	3	無
3.000		3		コンクリート	1	無
3.000	コンクリート製重錘	5	球底面	コンクリート	1	無
8.300		1		コンクリート	1	無
8.300		1		土砂	1	無
8.300	模擬球体	1	球底面	アスファルト	1	有



写真一 実験状況 (コンクリート地盤, 重錘 3.0t)



写真二 実験状況 (土砂地盤, 模擬球体 8.3t)

アスファルトは舗装厚 6cm, その直下は砂礫主体の路盤材であり, 簡易動的コーン貫入試験結果は表層 1m までは $N_d=10\sim30$ (N 値換算: 5~10) 程度であった. また, 平板載荷試験の結果, 地盤反力係数はアスファルトで $1.7\times 10^{-3} \text{N/mm}^2$ 程度, 土砂で $6.3\times 10^{-4} \text{N/mm}^2$ 程度であった. コンクリートの厚さは 1m 程度, 強度はテストハンマー等を用いて計測した結果, 平均 36N/mm^2 程度で, それ以深はアスファルト舗装箇所と同等である.

2.2 計測方法

高速度カメラを用いた計測は, 重錘にターゲットを貼り付け PTV 解析により行った. ターゲットのパターンから座標値を求め, 移動距離を微分することで速度を, 速度を微分することで加速度を算出した. カメラのフレームレートは 400fps (2.5ms 間隔) で撮影した.

加速度センサによる計測は, 重錘の頂部に加速度センサを接着剤により取付け, デジタルデータレコーダにて加速度データを収録した. 加速度センサはひずみゲージ式を用いた. 8.3t 模擬球体, アスファルト地盤のケースには定格容量 1000G のものを, その他のケースには定格容量 500G のものを使用した.

レンジは 1000μ , サンプリング周波数は 10kHz とした. 写真-3 に, 重錘 2.0t ケースにおける高速度カメラ画像を示す.



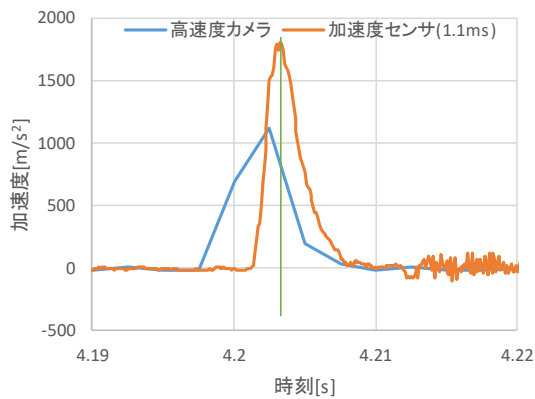
写真三 高速度カメラ画像(重錘 2.0t)

3. 実験結果

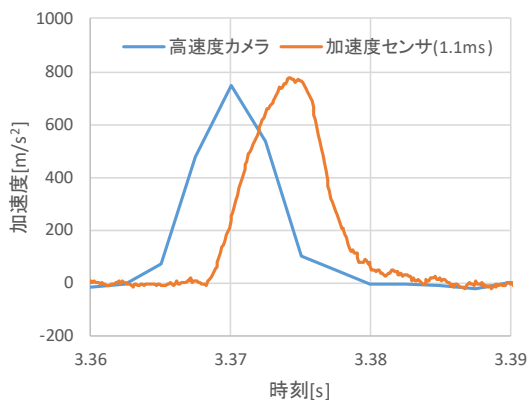
3.1 加速度波形

図-2 に異なる地盤における加速度波形の一例を示す. コンクリートの加速度波形においては高速度カメラの波形と加速度センサの波形が大きく異なることがわかる. また, 加速度センサによる加速度が約 $1,800 \text{m/s}^2$ であるのに対し高速度カメラによる加速度は約 $1,100 \text{m/s}^2$ と大きな差が生じている. 加速度センサの波形はこれまでの衝撃実験での実績から, 十分細かなサンプリングタイムで収録可能であることがわかっている. これに対し, 高速度カメラのフレームレートでは十分なデータを得られなかったことが考えられる. また, 高速度カメラの方では加速度のピーク値を算出できていない可能性が想定される.

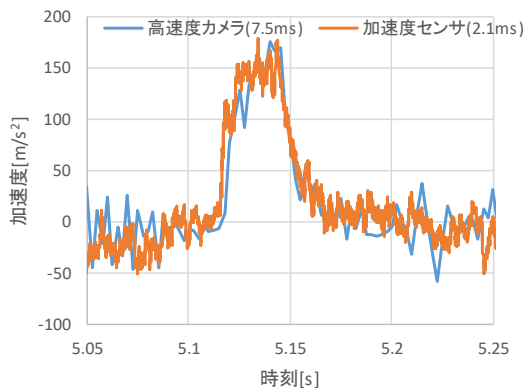
土砂の加速度波形を見ると高速度カメラと加速度センサで大きさ, 形がほぼ一致していることがわかる. これは波形継続時間が約 15ms とコンクリートの場合に比べ長く, 高速度カメラのフレームレートでも加速度の変化を追うことができたためと考えられる. 一方, 加速度



重錘2.00t, コンクリート, 1m, 1回目(G2.0_1_1)



重錘0.89t, 土砂, 1m, 1回目(G0.89_1_1)



多面体8.3t, アスファルト, 1m(A8.3_1)

図-2 異なる地盤における加速度波形の一例

センサの波形と高速度カメラの波形の開始位置が異なる原因としては、計測開始時間の同期に用いたトリガーのタイムラグ等が考えられる。なお、加速度センサの波形はノイズが大きかったため1.1msの移動平均処理を行っている。アスファルトの波形は土砂の場合と同様に高速度カメラと加速センサで大きさ、形がほぼ一致している。波形継続時間は約40msと土砂のケースよりも長くなっている。なお、このケースでは、高速度カメラの波形に7.5ms、加速度センサの波形に2.1msの移動平均処理を行っている。

図-3に波動継続時間(t1:高速度カメラ, t2:加速度センサ)の関係を示す。土砂およびアスファルトのケ

ースは同程度となっているのに対し、コンクリートのケースではt1がt2のおよそ2倍となっていることから、コンクリートのケースでは高速度カメラによる加速度計測は適切に行えていないと考えられる。よって、ラーメ定数の算出においては加速度センサを用いたケースに限定し行った。

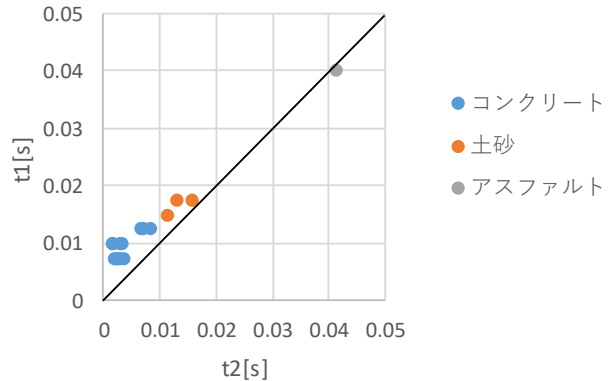


図-3 波動継続時間 t1 と t2 の関係

3.2 衝撃力とラーメの定数

衝撃力は重錘質量に加速度を乗じて算出、ラーメ定数は落石対策便覧の推定式(1)から逆算してそれぞれ算出した。算出結果を表-2に示す。

$$P_{max} = 2.108 \cdot (m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \dots (1)$$

(Pmax:落石の衝撃力(kN), m:落石の質量(ton), g:重力加速度, H:落下高さ(m), λ:被衝突体のラーメ定数(kN/m²))

表-2 実験結果一覧

重錘質量 (t)	落下高 (m)	被衝突地盤	速度エネルギー (kJ)	衝撃力 (kN)	ラーメ定数 (kN/m ²)	反発係数
0.110	1	コンクリート	1.1	703~751	1,800,000~2,100,000	0.33~0.38
0.110	1	土砂	1.1	67~78	5,100~6,000	0.06~0.10
0.110	1	アスファルト	1.2~1.7	150~170	38,000~51,000	0.10~0.12
0.110	3	アスファルト	3.1~1.7	178~276	11,000~33,000	0.06~0.08
0.110	5	アスファルト	5.5~6.5	302~313	19,000~21,000	0.04~0.07
0.309	1	コンクリート	3	1,432~1,471	1,900,000~2,200,000	-
0.309	1	アスファルト	2.5~3.1	280	32,000	0.10~0.11
0.309	3	アスファルト	8.8	362	12,000	0.1
0.309	5	アスファルト	15.2	549	15,000	0.08
0.309	7	アスファルト	21.5	602	12,000	0.06
0.340	3	アスファルト	9.6	451	17,000	0.04
0.890	1	土砂	8.7	572~664	33,000~48,000	0.09~0.11
0.890	1	コンクリート	8.7	2,698~2,805	1,600,000~1,700,000	0.22
0.890	3	コンクリート	26.2	4,483	1,100,000	0.06
2.000	1	コンクリート	19.6	3,393~3,601	730,000~850,000	0.15~0.17
2.000	3	コンクリート	58.8	5,142	400,000	0.11
8.300	1	土砂	81.4	917	2,600	0.12
8.300	1	アスファルト	81.4	1,457	8,200	0.10

表-2より、コンクリート地盤、重錘質量0.11t、落下高さ1mの場合にラーメ定数は最大(2,100,000 kN/m²)となり、土砂地盤、重錘質量8.3t、落下高さ1mの場合にラーメ定数は最小(2,600kN/m²)となった。

図-3にコンクリート地盤での速度エネルギーとラーメ定数の関係を示す。コンクリート地盤の場合エネルギーが大きいほどラーメ定数は小さくなる。また図-4にはアスファルト地盤での速度エネルギーとラーメ定数の関係を示す。全体的にはエネルギーが大きいほどラーメ定数は小さくなる傾向があるが、8.3tのケースなど一部相関関係が明瞭でない場合も見受けられた。土砂の場合はエネルギーとラーメ定数に明瞭な相関関係は認められなかった。

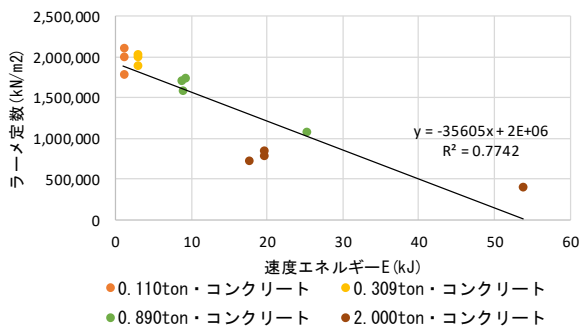


図-3 速度エネルギーとラーメ定数(コンクリート地盤)

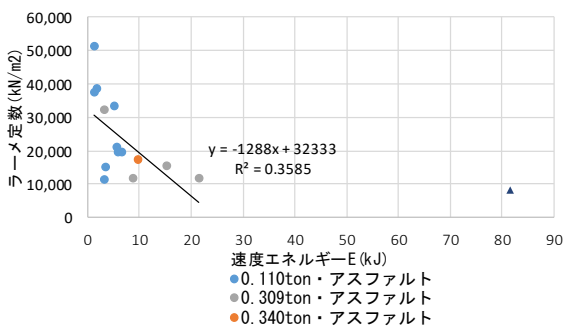


図-4 速度エネルギーとラーメ定数(アスファルト地盤)

4. ラーメ定数と反発係数

図-5にラーメ定数と反発係数の関係を示す。

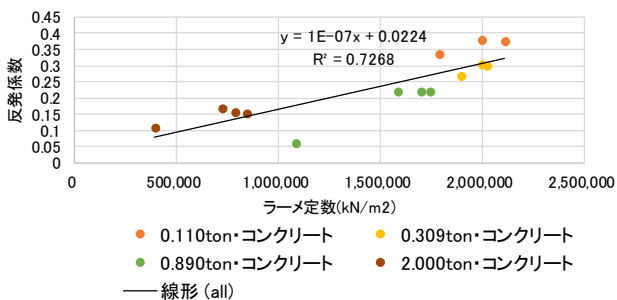


図-5 ラーメ定数と反発係数

ラーメ定数については、前述より被衝突地盤がコンクリート面を対象とした。反発係数については、高速度カメラによる計測結果より、入射速度と反射

速度比に関する計算式(2)で算出している。

$$e = V' / V \dots (2)$$

(e: 反発係数, V: 入射速度, V': 反射速度)

結果、ラーメ定数が大きくなるほど反発係数が大きくなる傾向がわかった。

5. まとめ

本研究では、高速度カメラを用いて計測した加速度波形と加速度センサを用いて計測した加速度波形についての比較検討、および被衝突地盤とラーメ定数の関係についての考察を行った。異なる衝突地盤や計測機器における加速度波形、ラーメ定数や反発係数との関係について以下のことがわかった。

- 1) 被衝突体がコンクリートのような固い地盤の場合、加速度波形の継続時間が短く、高速度カメラで計測する際にはフレームレートを大きくする必要がある。一方、土砂やアスファルトのような比較的軟らかい地盤の場合は高速度カメラのフレームレートを400fpsとしてもこれによる波形と加速度センサによる波形はほぼ一致する。
- 2) 本実験範囲では、ラーメの定数は被衝突体がコンクリートの場合約 800,000~2,000,000kN/m²、土砂の場合約 40,000~50,000kN/m²、アスファルトの場合約 9,000kN/m²と地盤によっておおよその値が推定できた。
- 3) ラーメ定数が大きくなるほど反発係数が大きくなる傾向が確認できた。

ラーメ定数および反発係数は、衝突体および被衝突体の強度、エネルギーおよび接触面積等によって変化するものと推察されるため、引き続きパラメータを変化させた検討が必要と考えられる。最終的に、ラーメ定数等の諸条件と反発係数の関係性を整理し、落石シミュレーション等の精度向上につなげたいと考える。

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、名古屋工業大学前田研究室の学生の皆さまに多大なるご支援、ご協力を戴いた。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) 松尾和茂, 前田健一, 堀耕輔, 峯祐貴, 阿部和樹, 中釜裕太: 落石の外力が反発係数に及ぼす影響, 平成 30 年度年次技術研究発表会 公益社団法人 土木学会北海道支部