# 落体衝突時におけるラーメの定数に関する実験的検討

An experimental study on Lame's Constants at colliding collision

(株)構研エンジニアリング	○正会員	山内	翼	(Tsubasa Yamauchi)
	正会員	鈴木健太郎		(Kentaro Suzuki)
	非会員	杉山	裕	(Yutaka Sugiyama)
名古屋工業大学	正会員	前田	健一	(Kenichi Maeda)
	学生員	松尾	和茂	(Kazushige Matsuo)
東電設計(株)	正会員	中瀬	仁	(Hitoshi Nakase)

# 1. はじめに

道路施設等の落石対策設計においては,落石による衝撃力の推定が重要となる.現状の設計では落石対策便覧<sup>1)</sup>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,ラーメの定数,および落下高さから衝撃力を算出している.こ の推定衝撃力はラーメの定数の設定に依存しているため, ラーメの定数は重要なパラメータであると言える.

今回我々研究グループは落石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,重錘の加速 度を高速度カメラおよび加速度センサを用いて計測した. 重錘が落下し地盤に衝突した際の加速度を重錘質量に乗 じることで衝撃力を算出することができる.求めた衝撃 力を前述の算出式と比較することにより,ラーメの定数 を推定する.

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.

#### 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.**表**-1に ケース一覧を,図-1に実験概要図を示す.

表-1 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		1		コンクリート	3	有	
0.110	鋼製	3	球底面	コンクリート	1	無	
0.110	重錘	5	小心田	コンクリート	1	無	
0.110		1		土砂	3	無	
0.309	コンクリート制	1		コンクリート	3	有	
0.309	コンノリー表	3	球底面	コンクリート	1	無	
0.309	里理	5		コンクリート	1	無	
0.340	コンクリート製 重錘	1	平底面	コンクリート	3	無	
0.890		1		土砂	3	有	
0.890	コンクリート製	1	球底面	コンクリート	3	有	
0.890	重錘	3	~小心田	コンクリート	1	有	
0.890		5		コンクリート	1	無	
2.000	全田 伟リ	1		コンクリート	3	有	
2.000	前衣	3	球底面	コンクリート	1	有	
2.000	重理	5		コンクリート	1	無	
3.000	コンクリート制	1		コンクリート	3	無	
3.000	「二ノノノ」「表	3	球底面	コンクリート	1	無	
3.000	重理	5		コンクリート	1	無	
8.300	コンクリート制	1		コンクリート	1	無	
8.300	「ゴンノ」「表荷野球体	1	球底面	土砂	1	無	
8.300	"天风水小平	1		アスファルト	1	有	

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.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.





写真-1 実験状況(コンクリート地盤, 重錘 2.0t)



写真-2 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盛 土地盤であり, 簡易動的コーン貫入試験結果は表層 1m までは Nd=15~30 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1.7×10<sup>-3</sup>N/mm<sup>2</sup>程 度, 土砂で 6.3×10<sup>-4</sup>N/mm<sup>2</sup>程度であった.コンクリート 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<sup>2</sup>程度であった.

# 2.2 計測方法

高速度カメラを用いた加速度の計測は、重錘にターゲットを貼り付け PTV 解析によって行った.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.



写真-3 高速度カメラ画像(重錘 2.0t)

レンジは 1000 µ, 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.

#### 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,表 -2に実験結果一覧を示す. 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,加速度センサの加速 度が約1,800m/s<sup>2</sup>であるのに対し高速度カメラの加速度 は約1,100m/s<sup>2</sup>と大きな差が生じている.この原因とし て加速度センサの波形継続時間が約7msと短く,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.



図-2 異なる地盤ケースにおける加速度波形の一例

						245 TZ 616 64	24 TZ 614 61		(作業)上口1	行きた上口の		ラーメ定数	ラーメ定数
	重錘質量	落下高さ	하는 성도 다가 보니 요즘	位置エネルギー	加速度センサの	)	波形継続	時間比	(キャノ=)	(ha)ま在計)	衝撃力比	λ1	λ2
ケース名	(t)	(m)	被衝尖地盜	(kJ)	移動半均処埋時间	時间[]	時间[Z (ho)ま在三1)	t1/t2	(カメラ)	(加速度計)	P1/P2	(カメラ)	(加速度計)
					(ms)	(高速度カメフ)	(加迷度計)		(KN)	(KIN)		$(kN/m^2)$	$(kN/m^2)$
C0.11_1_1	0.110	1	コンクリート	1.08	_	0.0075	0.0018	4.17	158	751	0.21	43,088	2,109,396
C0.11_1_2	0.110	1	コンクリート	1.08	_	0.01	0.0016	6.25	271	735	0.37	165,170	2,000,528
C0.11_1_3	0.110	1	コンクリート	1.08	-	0.01	0.0017	5.88	222	703	0.32	100,875	1,789,174
C0.11_3	0.110	3	コンクリート	3.24	-	0.0075	-	-	375	-	_	71,605	j —
C0.11_5	0.110	5	コンクリート	5.39	-	0.0075	-	-	370	-	_	32,133	
G0.11_1_1	0.110	1	土砂	1.08	-	0.0175	-	-	72	-	_	5,973	
G0.11_1_2	0.110	1	土砂	1.08	-	0.015	-	-	68	-	_	5,237	·
G0.11_1_3	0.110	1	土砂	1.08	-	0.0125	-	-	67	-	_	5,066	; —
C0.309_1_1	0.309	1	コンクリート	3.03	_	0.0075	0.0025	3.00	527	1,471	0.36	155,850	2,026,875
C0.309_1_2	0.309	1	コンクリート	3.03	_	0.0075	0.0022	3.41	587	1,462	0.40	203,646	1,995,773
C0.309_1_3	0.309	1	コンクリート	3.03	-	0.0075	0.0022	3.41	535	1,432	0.37	161,353	1,896,428
C0.309_3	0.309	3	コンクリート	9.09	-	0.01	_	_	747	-	_	71,792	
C0.309_5	0.309	5	コンクリート	15.15	_	0.0125	—	_	1,054	-	_	78,830	) —
C0.309F_1_1	0.340	1	コンクリート	3.03	_	0.0075	—	_	420	-	_	88,263	. –
C0.309F_1_2	0.340	1	コンクリート	3.03		0.0075	—	-	627	-	_	240,102	
C0.309F_1_3	0.340	1	コンクリート	3.03	_	0.0075	-	-	431	-	_	93,952	-
G0.89_1_1	0.890	1	土砂	8.73	1.1	0.0175	0.0156	1.12	664	692	0.96	47,559	52,823
G0.89_1_2	0.890	1	土砂	8.73	1.1	0.0175	0.0131	1.34	609	647	0.94	38,295	44,620
G0.89_1_3	0.890	1	土砂	8.73	1.1	0.015	0.0114	1.32	572	605	0.95	32,777	37,676
C0.89_1_1	0.890	1	コンクリート	8.73	0.3	0.0075	0.003	2.50	1,220	2,778	0.44	217,810	1,703,872
C0.89_1_2	0.890	1	コンクリート	8.73	0.3	0.01	0.0032	3.13	1,468	2,805	0.52	345,994	1,745,674
C0.89_1_3	0.890	1	コンクリート	8.73	0.3	0.0075	0.0035	2.14	1,163	2,698	0.43	193,185	1,584,568
C0.89_3	0.890	3	コンクリート	26.18	0.3	0.01	0.0029	3.45	2,207	4,483	0.49	184,545	1,084,647
C0.89_5	0.890	5	コンクリート	43.64	0.3	0.01	_	-	2,813	-	_	157,238	. –
C2.0_1_1	2.000	1	コンクリート	19.61	1.1	0.0125	0.0069	1.81	2,228	3,601	0.62	254,487	845,415
C2.0_1_2	2.000	1	コンクリート	19.61	1.1	0.0125	0.0068	1.84	2,454	3,500	0.70	324,019	787,506
C2.0_1_3	2.000	1	コンクリート	19.61	1.1	0.0125	0.0065	1.92	2,188	3,393	0.64	243,337	728,408
C2.0_3	2.000	3	コンクリート	58.84	1.1	0.0125	0.0084	1.49	2,854	5,142	0.56	91,021	. 396,525
C2.0_5	2.000	5	コンクリート	98.07	_	0.015		-	3,926	-	-	93,843	
C3.0_1_1	3.000	1	コンクリート	29.42	_	0.0125	—	_	3,463	—	_	390,249	
C3.0_1_2	3.000	1	コンクリート	29.42	_	0.0125		-	3,005	-	-	273,716	; —
C3.0_1_3	3.000	1	コンクリート	29.42	_	0.01		-	2,715	-	-	212,290	) —
C3.0_3	3.000	3	コンクリート	88.26		0.0125	-		4,350	-		132,809	
C3.0_5	3.000	5	コンクリート	147.10		0.0175			6,021	-		139,080	)
C8.3_1	8.300	1	コンクリート	81.40		0.015			9,401			868,764	+ <u> </u>
G8.3_1	8.300	1	土砂	81.40		0.06	_		917			2,585	i —
A8.3_1	8.300	1	アスファルト	81.40	2.1	0.04	0.0412	0.97	1,457	1,488	0.98	8,211	. 8,665

表-2 実験結果一覧

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 と t2 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. この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.

# 3.2 衝撃力とラーメの定数

前述の表-2における衝撃力は重錘質量に加速度を乗 じて, ラーメの定数は落石対策便覧の推定式から逆算し てそれぞれ求めた.

Pmax=2. 108 • (m • g)  $^{2/3}$  •  $\lambda^{2/5}$  • H $^{3/5}$ ...(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  $(kN/m^2))$ 

同便覧では、非常に軟らかいものが 1,000kN/m<sup>2</sup>、軟ら かいものが 3,000 ~ 5,000kN/m<sup>2</sup>, 固いものが 10,000kN/m<sup>2 と</sup>して定数を設定している. 図-4に衝撃 カP1とP2の関係を示す.



図-3 波動継続時間 t1 と t2 の関係



図-4 衝撃力 P1 と P2 の関係



図-5 異なる地盤における位置エネルギーEと衝撃力Pの関係(加速度センサのデータのみ)

この図よりコンクリートのケースではカメラによる衝撃 力は加速度センサによる衝撃力のおよそ半分となってい る.よって、以降の地盤とラーメ定数の関係の検討は加 速度センサを用いたケースのみを対象に行っていく.

図-5に異なる地盤における位置エネルギーE と衝撃 カPの関係を示す. (a)には被衝突地盤コンクリート、0  $\leq E \leq 10 kJ$ の場合の実測値をプロットし、ラーメ定数 2,000,000kN/m<sup>2</sup>とした場合の理論衝撃力曲線を示した. この場合ラーメ定数はおよそ 2,000,000kN/m<sup>2</sup> であると 言える. (b)には被衝突地盤コンクリート、10 $\leq E \leq 60 kJ$ の場合の実測値をプロットし、ラーメ定数 800,000kN/m<sup>2</sup>とした場合の理論衝撃力曲線を示した.こ の場合ラーメ定数はおよそ 800,000kN/m<sup>2</sup> であると言える.

(c)には被衝突地盤土砂の場合の実測値をプロットし, ラーメ定数 40,000kN/m<sup>2</sup> および 50,000kN/m<sup>2</sup> とした場合 の理論衝撃力曲線を示した.この場合ラーメ定数はおよ そ 40,000~50,000kN/m<sup>2</sup>であると言える.

(d)には被衝突地盤アスファルトの場合の実測値をプロットし、ラーメ定数 8,000kN/m<sup>2</sup>とした場合の理論衝撃力曲線を示した.この場合ラーメ定数はおよそ 9,000kN/m<sup>2</sup>であると言える.

これらより, 被衝突地盤がコンクリートの場合約 800,000~2,000,000kN/m<sup>2</sup>, 土砂の場合約 40,000~ 50,000kN/m<sup>2</sup>, アスファルトの場合約 9,000kN/m<sup>2</sup>と推定 できた.

### 4. 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,ラーメ定数に関して以下のことがわかった.

- 被衝突体がコンクリートのような固い地盤である場合,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カメラによる波形と加速度センサによる波形はほぼ一致する.
- 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/m<sup>2</sup>、土砂の 場合約 40,000~50,000kN/m<sup>2</sup>、アスファルトの場合 約 9,000kN/m<sup>2</sup>と地盤によっておおよその値が推定 できた。

これらラーメ定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.また、反発係数とラーメの定数の関係 についても検討を進めていく予定である.

#### 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