

## (34) 重錘衝撃を受ける敷砂材のラーメ定数の推定

専修大学北海道短期大学 ○三上敬司  
室蘭工業大学 岸 徳光

北海道開発局 中野 修  
室蘭工業大学 松岡健一

### 1. まえがき

落石覆工上には、落石衝撃力を緩和するために緩衝材として敷砂等が多く用いられている。砂の緩衝効果に関する実験は多くの研究機関によって行われている。最初に鋼材倶楽部<sup>1)</sup>によって比較的乾燥した砂を用いて実験が行われ、実験式が提案されている。その後、金沢大学では、当時多く用いられた山砂を主とした実験から重錘衝撃力に関する実験式<sup>2)</sup>を提案している。また、落石の重量、形状などを変化させて重錘の衝撃加速度と落石覆工構造物に及ぼす衝撃土圧を測定した実験結果<sup>3),4)</sup>を振動便覧式および前記の実験式と比較検討している。北海道開発局開発土木研究所<sup>5)~6)</sup>では海砂を用いた砂の緩衝性能を検討するために、重錘衝撃力と落石覆工に直接作用する伝達衝撃力を測定して、実験結果と振動便覧式および吉田等の式と比較検討している。その結果、伝達衝撃力は重錘衝撃力の1.5倍以上大きいことを報告している。

落石覆工構造物の合理的な設計法を確立するためには、覆工上に直接的に作用する伝達衝撃力を評価することが肝要である。この伝達衝撃力を覆工の断面設計に用いるためには、敷砂の材料定数を合理的に推定することができれば、簡便さからも振動便覧式の利用が得策であろう。文献<sup>5)</sup>では、2、3の例を挙げて敷砂厚90cmの場合にラーメ定数を $1000\text{tf}/\text{m}^2$ とする振動便覧式の利用を提案している。そこで、本研究では、重錘重量、敷砂厚、落下速度を変化させた場合のラーメ定数について、著者らが行った40ケースの実験結果を基に評価検討を行うこととする。

### 2. 実験概要

#### 2.1. 実験内容

図-1に実験風景を示している。重錘落下衝撃実験は $6.8\text{m}\times 6.8\text{m}\times 1\text{m}$ のコンクリート基礎上に、 $4\text{m}\times 4\text{m}$ の敷砂緩衝工を設置し、重錘を所定の高さまでトラッククレーンで引き上げ自由落下させることによって行っている。重錘は、重量 $W=2\text{tf}$ 、 $3\text{tf}$ ともに同一形状(直径100cm、底部高さ17.5cmの球底)を有する鋼製で、コンクリートを充填して重さを調整している。

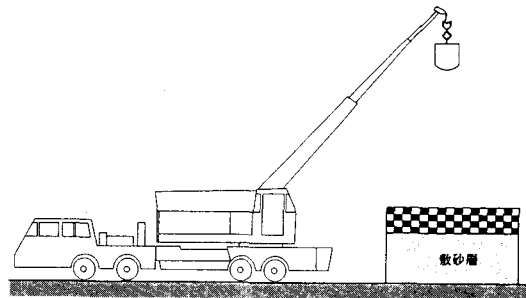


図-1 実験風景

測定項目は、重錘加速度およびコンクリート基礎上に設置したロードセルから得られる伝達衝撃応力、重錘の敷砂への最終貫入量である。

本実験で用いた敷砂緩衝材は、比重2.53、吸水率2.45%の石狩当別産で、粒度試験結果は表-1に示すとおりである。敷砂は、20cmごとに足踏みによって締め固めを行い、所定の高さに整地している。また、層厚30cmごとにサンプリングして砂層の平均湿潤密度、含水比を測定している。この測定結果を表-2に示している。

実験は、表-3に示しているように重量 $W=2\text{tf}$ と $3\text{tf}$ の各重錘について、敷砂材の敷厚 $h=60$ 、 $90$ 、 $120\text{cm}$ に対して、落下高さを $H=5\sim 30\text{m}$ の間で変化させた合計40ケースについて行っている。

#### 2.2. 重錘加速度計およびロードセル

本実験では、重錘衝撃力の算定評価のために、重錘中心底部に歪ゲージ型加速度計を、 $2\text{tf}$ の重錘には容量100Gを2個、200G、500Gを1個ずつ、また $3\text{tf}$ の重錘には容量200G、500Gを2個ずつ取り付けている。また、基礎上への伝達衝撃力を算定するためにコンクリート基礎上にコンクリート表面と面一になるようにロードセルを設置している。

ここで採用したロードセルは受圧部直径 25 mm、容量300kgf/cm<sup>2</sup>、応答周波数範囲がDC ~ 1.5kHz の衝撃荷重測定用ロードセルである。本実験では最小間隔を 10cm として一列に合計 25 個設置している。

### 2.3. 計測システム

実験に用いられた計測システムのフローチャートを図-2 に示す。本実験におけるセンサーは、重錘に取り付けている歪ゲージ型加速度計およびコンクリート基礎上のロードセルである。各センサーからの出力波形は、応答周波数範囲がDC ~ 50kHzのシングルコンディショナを介し、DC ~ 40kHz帯域まで記録可能なデータレコーダに一括収録している。各波形の再生は、重錘加速度の 1 波形を共通トリガーとして用いて時間軸を固定し、サンプリングタイム 100μsec/word でA/D変換の後、ワークステーションを用いて各種のデータ処理を行っている。

## 3. 実験結果

### 3.1. 重錘衝撃力波形と伝達衝撃力波形の比較

ここでは重錘衝撃力と伝達衝撃力を総和して得られる伝達衝撃力の経時変化についての検討を行う。伝達衝撃力は、伝達応力が落下点を中心として軸対称に分布するものと仮定し、台形則を用いてその応力を積分し評価することとした。

図-3 (a)~(c) は、重錘重量  $W=3tf$ 、落下高さ  $H=10m$ 、敷厚がそれぞれ 60、90、120cm の場合の重錘衝撃力波形(実線)と伝達衝撃力波形(点線)とを比較して示している。各波動分布状況は、いずれの場合も重錘衝撃力波形の方が伝達衝撃力波形より早く立ち上がっており、その差は敷厚の増大とともに大きくなる傾向にある。このことは、衝撃力がある特定の速度で敷砂中を伝播していることを意味している。

その後は、両波形ともほぼ同時点で最大値を示し、同様な減衰傾向を示して零レベルに減衰しているようである。主波動の継続時間は、30~40msecとなっているようである。各ケースにおける両者の振幅を比較すると、いずれも伝達衝撃力の方が重錘衝撃力より 1.6 倍以上大きいことがわかる。このことは、重錘落下部の敷砂が一端固定の一次元波動状態によく似た現象となっているためと思われる。

表-1 敷砂材の粒土試験結果

10%粒径 D <sub>10</sub> (mm)	30%粒径 D <sub>30</sub> (mm)	60%粒径 D <sub>60</sub> (mm)	均等係数 U <sub>c</sub>	曲率係数 U <sub>c'</sub>
0.28	0.60	1.15	4.11	1.12

表-2 敷砂層の平均湿潤密度および含水比

敷砂厚	60	90	120
平均湿潤密度 (t/m <sup>3</sup> )	1.62	1.54	1.61
平均含水比 (%)	10.05	8.88	11.31

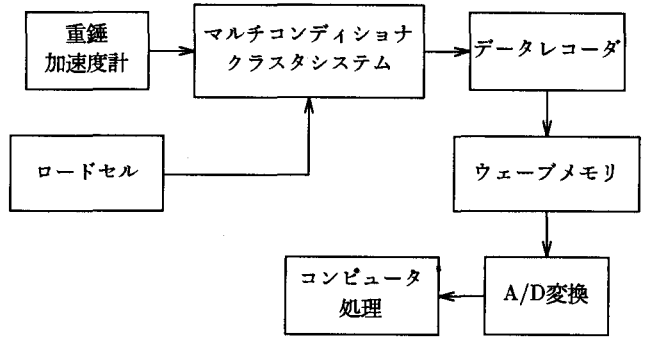


図-2 計測システムのフローチャート

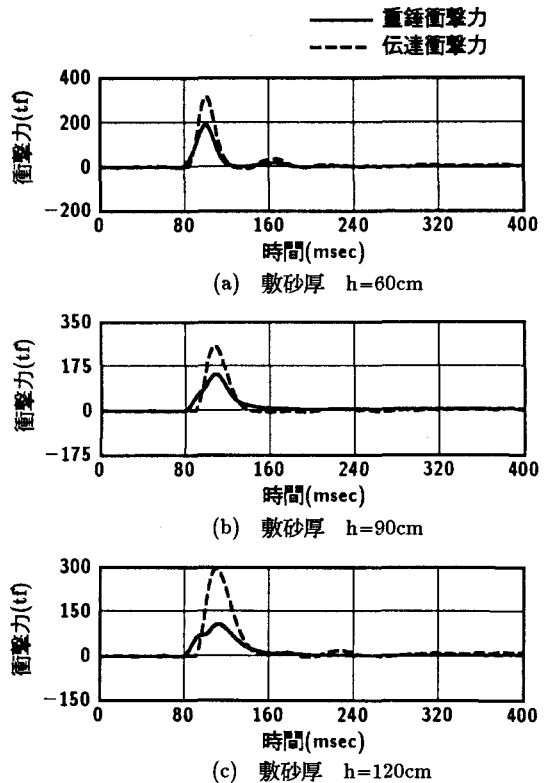


図-3 重錘衝撃力波形および伝達衝撃力波形

### 3.2. ラーメ定数と衝突速度との関係

重錘衝突によって載荷点部の敷砂の挙動は締め固まりや側方流動等を示すことにより、その物性値が位置的にもまた時間的にも変化するため、波動伝播速度も時々刻々変化するものと考えられる。

文献 5) は、波動が一定速度で伝播するものと仮定し、波動の立ち上がりの時間差を用いて敷砂中の波動伝播速度を求めている。ここでは 40 ケースに対して、設定敷砂厚から重錘落下後の貫入量を考慮した場合と設定砂厚を直接用いる場合の 2 種類の伝播距離に対して、波動伝播速度を求めた。その結果を前掲の表-3 に示している。ただし、重錘の貫入量は、重錘落下後の貫入量を 4 箇所測定し平均して求めたものである。伝播速度およびラーメ定数は、敷砂の密度を  $\gamma = 1.6 \text{ t/m}^3$ 、ポアソン比を  $\nu = 0.45$  と仮定して、弾性理論より  $C = \sqrt{E/\gamma}$ 、 $\lambda = \nu \gamma C^2 / (1 + \nu)(1 - 2\nu)$  から算定した。表より、いずれの重錘重量でも設定敷砂厚を伝播距離と仮定して伝播速度を求めた場合は、ほとんどが 100m/sec 以上とな

表-3 実験結果、敷砂の波動伝播速度およびラーメ定数

実験 ケース No.	h (cm)	H (m)	W (tf)	t (msec)	$\delta$ (cm)	$C_1$ (m/sec)	$C_2$ (m/sec)	$\lambda_1$ (tf/m <sup>2</sup> )	$\lambda_2$ (tf/m <sup>2</sup> )
1-1-1	60	5	3	4.8	35.0	125	52	7920	1370
1-1-1R	60	5	3	5.6	27.0	107	59	5820	1760
1-1-2	60	10	3	5.4	34.0	111	32	6260	1170
1-1-3	60	15	3	4.4	37.0	136	52	9420	1380
1-1-4	60	20	3	5.4	42.5	111	32	6260	530
1-1-4R	60	20	3	7.2	44.0	83	22	3520	2500
1-1-5	60	30	3	5.6	49.0	107	20	5820	1960
2-2	90	10	3	9.1	56.0	99	37	4970	710
2-3	90	20	3	9.4	57.0	96	35	4670	620
2-4	90	30	3	7.6	57.0	118	43	7610	960
2-2R	90	10	3	7.0	44.0	129	66	8430	2190
2-3R	90	20	3	6.8	46.5	132	64	8830	2070
2-4R	90	30	3	6.5	49.0	138	63	9710	2020
4-1-1	90	5	3	1.8	35.0	500	306	-	-
4-1-2	90	10	3	9.2	38.0	98	57	4850	1620
4-1-3	90	15	3	9.6	44.5	94	47	4450	1140
4-1-4	90	20	3	10.0	52.5	90	38	4100	710
4-1-5	90	30	3	10.0	61.0	90	29	4100	430
2-1-1	120	5	3	11.6	37.0	103	72	5420	2600
2-1-2	120	10	3	10.4	45.0	115	72	6750	2640
2-1-3	120	15	3	10.2	52.5	118	66	7010	2220
2-1-4	120	20	3	9.0	56.0	133	71	9010	2560
2-1-5	120	30	3	7.4	68.0	162	68	13320	2310
1-2-1	60	5	2	6.2	26.0	97	55	4750	1520
1-2-2	60	10	2	6.2	28.0	97	52	4750	1350
1-2-3	60	15	2	6.0	33.5	100	44	5070	990
1-2-4	60	20	2	6.2	32.5	97	44	4750	1000
1-2-5	60	30	2	5.3	42.0	113	34	6500	580
4-2-1	90	5	2	7.8	28.5	115	79	6750	3150
4-2-1R	90	5	2	8.2	26.5	110	77	6100	3040
4-2-2	90	10	2	8.0	33.0	112	71	6410	2620
4-2-3	90	15	2	6.6	36.0	136	82	9420	3390
4-2-4	90	20	2	8.4	39.0	107	61	5820	1870
4-2-5	90	30	2	7.8	46.0	115	56	6750	1610
2-1	90	30	2	6.8	44.0	132	68	8880	2320
2-2-1	120	5	2	12.0	38.0	100	68	5070	2370
2-2-2	120	10	2	13.0	47.5	92	56	4320	1580
2-2-3	120	15	2	9.6	45.0	125	78	7920	3090
2-2-4	120	20	2	10.2	51.5	118	67	7010	2290
2-2-5	120	30	2	9.4	54.0	128	70	8260	2500

ただし、表中の t は立ち上がりの時間差、 $\delta$  は重錘貫入量、 $C_1$  は貫入量を無視して評価した場合の伝播速度、 $C_2$  は貫入量を考慮して評価した場合の伝播速度、 $\lambda_1$  は貫入量を無視して評価した場合のラーメ定数、 $\lambda_2$  は貫入量を考慮して評価した場合のラーメ定数である。また実験ケース No. の R は再実験を意味している。

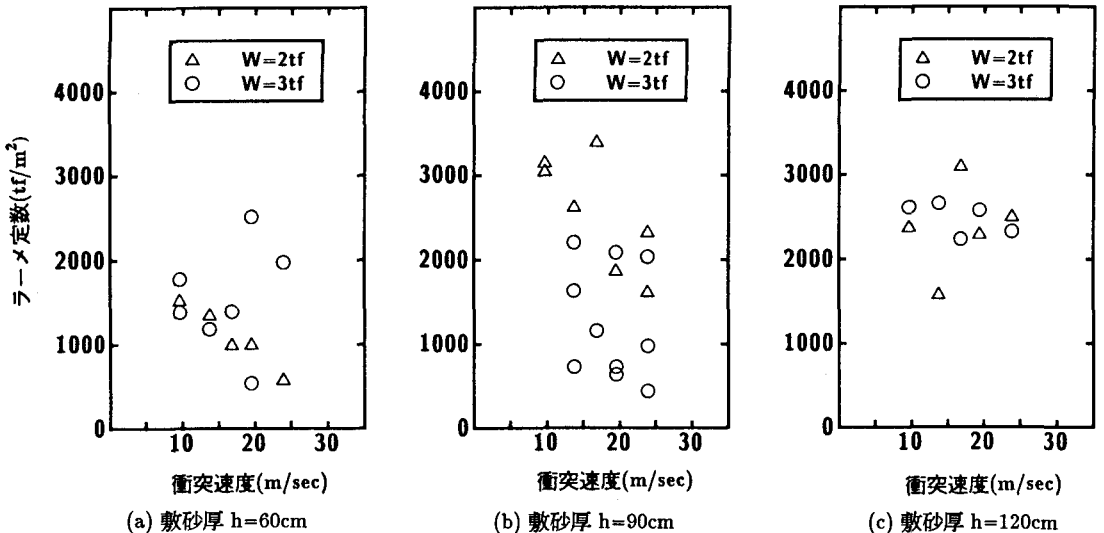


図-4 衝突速度とラーメ定数との関係

る。その時のラーメ定数は  $3500\sim 13000\text{tf}/\text{m}^2$  に相当する。これらの値は、広範囲かつかなり大きな値であり、実務に用いるには適当でないものと判断される。

表-3に示した結果より、重錘重量が  $2\text{tf}$  および  $3\text{tf}$  で、敷砂厚  $60\sim 120\text{cm}$  における重錘貫入量を考慮する場合のラーメ定数を、衝突速度に対して示すと図-4(a)～(c)のようになる。

図-4(a)のラーメ定数は、 $W=2\text{tf}$  および  $3\text{tf}$  で  $h=60\text{cm}$  の場合であり、いずれの重錘重量でも低速度ではほぼ  $1000\text{tf}/\text{m}^2$  ぐらいを示している。しかし、 $W=2\text{tf}$  の場合は、衝突速度が増大するとほぼ直線的に減少する傾向を示している。また、 $W=3\text{tf}$  では、かなりばらついているが衝突速度に対して増大傾向にある。(b)図の  $h=90\text{cm}$  の場合は、ばらつきが大きいようである。 $W=2\text{tf}$  の場合は、 $h=60\text{cm}$  の場合より2倍以上の値を示し、また衝突速度に対しては  $h=60\text{cm}$  の場合と同様な傾向を示している。一方、 $W=3\text{tf}$  では、平均すればほぼ一定な  $1000\text{tf}/\text{m}^2$  程度になるが、測定値はかなりばらついている。(c)図の  $h=120\text{cm}$  の場合では、いずれの重錘重量のラーメ定数も多少のばらつきを示すものの、平均値としては  $2500\text{tf}/\text{m}^2$  となりほぼ一定である。このように、 $h=120\text{cm}$  が他の場合と異なるのは、重錘重量が  $W=2\text{tf}$  の場合では敷砂の厚さが厚くかつ重錘重量が軽いため、重錘重量が  $W=3\text{tf}$  の場合には敷砂が厚いために、重錘のリバウンドが大きく、最終貫入量と最大貫入量とが必ずしも一致していないためと推察される。

#### 4. あとがき

落石覆工に作用する衝撃力を合理的に評価することを目的として、敷砂緩衝工を設置した大型野外実験より砂層の波動伝播速度を求め、ラーメ定数の評価検討を試みた。本実験の範囲で得られた結果をまとめると、

- 1) 重錘加速度と伝達応力の主波動は、波動の立ち上がりに時間差が見られるが、両者の波形はほぼ同様な形状となっている。
- 2) 最大伝達衝撃力は最大重錘衝撃力に比べて1.6倍以上となっている。このことは、重錘落下部の敷砂が一次元波動状態によく似た現象となっていることを示している。
- 3) 重錘重量  $W=3\text{tf}$  で敷砂厚  $h=60, 90\text{cm}$  の場合には、それぞれのラーメ定数を平均すれば  $1000\text{tf}/\text{m}^2$  となる。敷砂厚  $h=120\text{cm}$  ではこれらの2倍以上の約  $2500\text{tf}/\text{m}^2$  となっている。一方、重錘重量  $W=2\text{tf}$  の場合では敷砂厚  $h=60, 90, 120\text{cm}$  の場合でそれぞれ衝突速度に対して異なった傾向を示し一定の値に収斂していない。

以上のことより、ラーメ定数を  $1000\text{tf}/\text{m}^2$  として振動便覧式に代入して衝撃力を求めると文献 5) に示されているように実験結果の伝達衝撃力に比較的良く一致している。しかし、敷砂が厚い場合と重錘重量が軽い場合に実験結果も少なく、明確な傾向がみられなかった。

#### 参 考 文 献

- 1) 新しい落石覆いの開発に関する研究、鋼材倶楽部、研究報告書、1973年4月。
- 2) 吉田 博、石塚賢吉、細川 豊：落石によるロック・シェッド上の落石による衝撃力の推定法に関する研究、道路、No.444、pp.38～43、1978年2月。
- 3) 吉田 博、榊谷 浩、鈴木哲治：敷砂上の落石による衝撃加速度と衝撃土圧に関する実験的研究、土木学会論文集、第352号、pp.61～70、1984年12月。
- 4) 吉田 博、榊谷 浩、岡 衛：落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について、土木学会論文集、第362号、pp.461～470、1985年10月。
- 5) 岸徳光、中野修、松岡健一、西 弘明：野外実験による敷砂の緩衝性能、構造工学論文集、Vol.39A、pp.1587～1597、1993年3月。
- 6) 中野修、松岡健一、岸徳光、金子 学、尾山靖史：敷砂を緩衝材とした場合の重錘加速度と底部伝達力、土木学会北海道支部論文報告集、第47号、pp.161～166、1992年2月。