

## (30) 落石覆工に作用する落石衝撃力に関する 重錘落下実験

建設省土木研究所 正会員 ○米田義弘、鷺田修三、古賀泰之  
日本サミコン㈱研究所 松葉美晴、佐藤彰

### 1. はじめに

一般に落石覆工には落石衝撃力の緩衝材として砂が使用されている。落石覆工の設計に用いられる落石荷重は、落石対策便覧<sup>1)</sup>により算出式が与えられているが、これは重量3tf以下、落下高さ1.4m以下で行われた重錘落下実験で得られた敷砂上の重錘衝撃力に基づいている。

本稿では重錘重量5tf、落下高さ3.0mと、より大規模な条件下で行った実験により計測した敷砂上の重錘衝撃力、それが敷砂層を伝播した土圧およびそれらの力と影響因子である落下高さ、敷砂層厚との関係について報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 実験装置

実験は、厚さ30cmの鉄筋コンクリート製スラブ上に設置した6m四方の土槽内に敷きならした砂層上に、自走式クレーンで吊りあげた重錘を落下させ行った。表一に実験一覧を示す。

落石を模した重錘は、鋼製の外殻にコンクリートを充填して製作し、形状は底面が円錐形の円柱である。

なお重錘直径は同一重量の落石を比重2.6の球と仮定したときの直径とした。

敷砂層に用いた材料は、茨城県鹿島郡から採取した川砂であり、その特性の主なもの次のとおりである。

比重  $G_s$  2.686  
10%粒径  $D_{10}$  0.122mm  
60%粒径  $D_{60}$  0.287mm  
均等係数  $U_c$  2.35

項目	含水比 (%)	湿潤密度 ( $g/cm^3$ )	乾燥密度 ( $g/cm^3$ )
データ幅	7.091~16.50	1.590~1.758	1.440~1.509
平均値	11.91	1.643	1.467

土槽内の敷砂層は30cm毎に重量約60kgの振動プレートで1回転圧して製作した。一回の重錘落下毎に落下地点周囲の砂を掘り返し同様の締め固めを行うとともに最上層の任意の3地点から試料を採取し砂の含水比および乾燥密度を測定した。表二に含水比および湿潤、乾燥密度のデータを示す。

#### 2.2 測定項目

主な測定項目は、重錘の鉛直加速度、敷砂層底面の土圧、重錘の敷砂層への貫入量および砂の移動量である。

加速度計は重錘の重心付近に2個、土圧計は土槽底面と水平になるように重錘落下位置直下から25cm間隔に5個、そこからは50cm間隔に2個直線上に設置した。重錘の貫入量は落下前後の敷砂表面高さを水準

表一 実験一覧

ケース番号	敷砂層厚 $h$ (cm)	重錘重量 $W$ (tf)	落下高さ $H$ (m)	敷砂層締固回数
1	9.0	1	10, 20, 30	1回
	9.0	3	10, 20, 30	1回
	9.0	5	10, 20	1回
2	12.0	1	10, 20, 30	1回
	12.0	3	10, 20, 30	1回
	12.0	5	10, 20, 30	1回
3	15.0	1	10, 20, 30	1回
	15.0	3	10, 20, 30	1回
	15.0	5	10, 20, 30	1回

表二 含水比および密度

測量することにより求めた。砂の移動量は敷砂層内に小型のア  
ルミブロックを設置し、このブロックの重錘落下前後の移動量  
より測定した。

重錘加速度および砂層を伝播した土圧の測定データは、サン  
プリング間隔 $500\mu\text{sec}$ で直接A/D変換したデジタル信号を記  
録し、解析に用いることとした。なお、サンプリング間隔 $500\mu\text{sec}$   
で直接A/D変換した場合とアナログで収録後サンプリ  
ング間隔 $10\mu\text{sec}$ および $500\mu\text{sec}$ でA/D変換した場合の3者  
の時間-加速度の波形には有為な差が見られないことを事前に  
確認している(図-1)。

### 3. 最大重錘衝撃力

#### 3.1 落石対策便覧の衝撃力

落石対策便覧においては落石の衝撃力の最大値は次に示す、  
土木技術者のための振動便覧<sup>2)</sup>の衝撃力算定式でラーメ定数  
 $\lambda = 100\text{tf/m}^2$ とおいた式で与えられている。

$$P_{\max} = 2.455 \lambda^{2/5} W^{2/3} H^{3/5}$$

ここに、 $P_{\max}$ : 落石の最大衝撃力 (tf)、 $\lambda$ : 緩衝材のラ  
ーメ定数 ( $\text{tf/m}^2$ )、 $W$ : 落石重量 (tf)、 $H$ : 落石の落下高  
さ (m)。

また、緩衝材として効果がある敷砂層の厚さは90cmまでで、  
それ以上層厚を増加してもその効果はほとんど変わらず、90  
cmより薄い場合は層厚に応じて衝撃力を割り増すこととしてい  
る。

#### 3.2 落下高さと最大重錘衝撃力

図-2は最大重錘衝撃力と落下高さの関係を示したものであ  
る。最大重錘衝撃力は測定された重錘加速度の最大値に重錘重

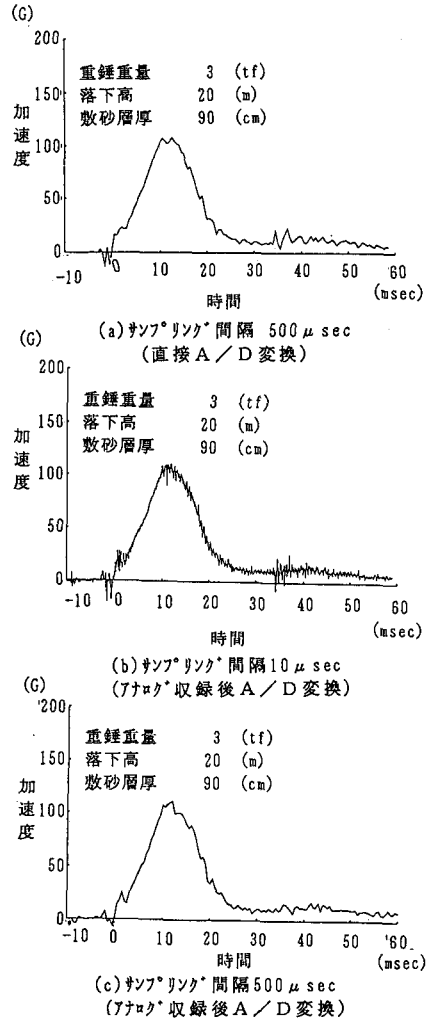


図-1 時間-加速度波形

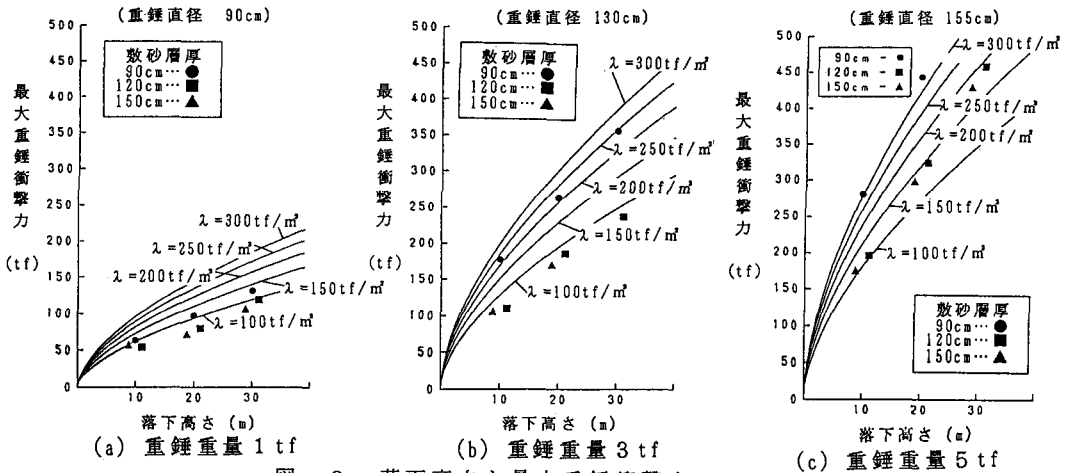


図-2 落下高さと最大重錘衝撃力

量を乗じて求められる。図中に示した実線は振動便覧の衝撃力算定式においてラーメ定数をそれぞれ100～300tf/m<sup>2</sup>とした線である。

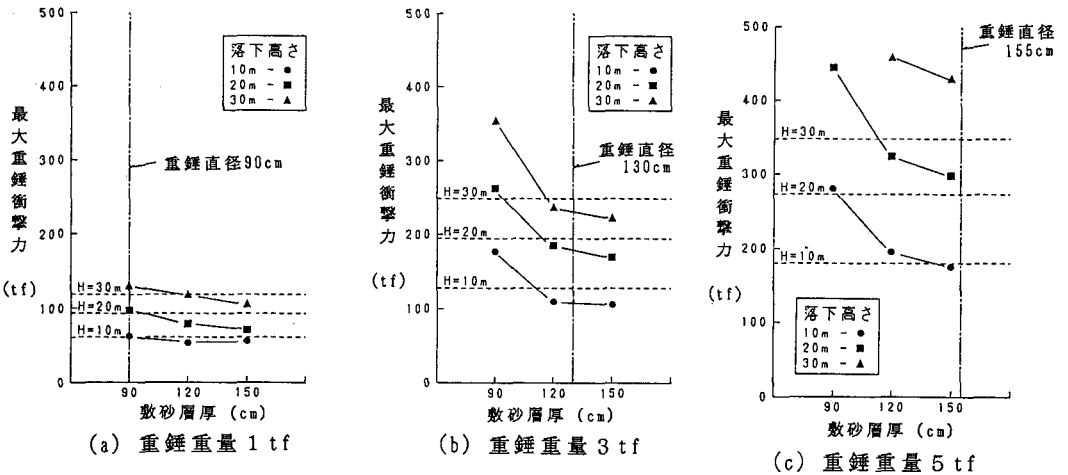
これらの図より、最大重錘衝撃力は落下高さが大きくなると増加し、敷砂層厚が十分確保されていると思われる場合の最大重錘衝撃力は、振動便覧式にラーメ定数を100tf/m<sup>2</sup>として算出される計算値にほぼ等しいことがわかる。

また、最大重錘重量が3、5tfで敷砂層厚が90cmの場合、振動便覧式にラーメ定数 $\lambda = 100\text{tf/m}^2$ を代入した値を越える場合もあるが、これは重錘直径にくらべ敷砂層厚が小さい場合である。

### 3. 3 敷砂層厚と最大重錘衝撃力

図一3に重錘重量ごとの敷砂層厚と最大重錘衝撃力の関係を示す。図中の破線は落下高さごとに振動便覧式にラーメ定数 $\lambda = 100\text{tf/m}^2$ を代入した計算値であり、一点鎖線は重錘の直径を示した線である。

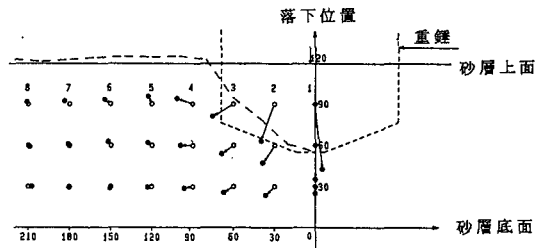
敷砂層厚が十分に確保されている場合は、最大重錘衝撃力は計算値に等しいかそれ以下であるが、敷砂層厚が薄いと思われる場合には計算値よりも大きくなり、その境界はほぼ重錘直径に相当する。



図一3 敷砂層厚と最大重錘衝撃力

### 3. 4 砂の移動

重錘落下後の砂の移動状況を把握するため、アルミブロックを敷砂層表面から30、60、90cmの各層に土槽中心から水平方向に30cmおきに設置した。測定を行ったのは重錘重量3tf(直径130cm)、落下高さ20mの条件下で敷砂層厚90、120および150cmの場合である。



図一4 砂の移動

図一4にアルミブロックの移動例を示すが、各実験とも移動量は落下中心から離れるに従い徐々に減少している。また、土槽中心から重錘直径分の範囲内に配置されているアルミブロックは土槽底面の方向へ沈下し、重錘直径範囲外に配置されているものは側方または上方に移動している。

### 3. 5 重錘貫入量と最大重錘衝撃力

図一5は重錘貫入量と最大重錘衝撃力との関係を示したものである。一点鎖線は振動便覧式および振動便覧式の導入過程で得られる最大貫入量の式にラーメ定数 $\lambda = 100\text{tf/m}^2$ を代入したときの計算値である。

各重錘重量とも、落下高さが大きくなると重錘貫入量も大きくなる。また、各重錘重量とも落下高さが同一の場合、敷砂層厚の違いによる貫入量の差は少ないが、最大重錘衝撃力は重錘直径に比べ敷砂層厚が薄いと急激に大きくなる傾向がみられる。

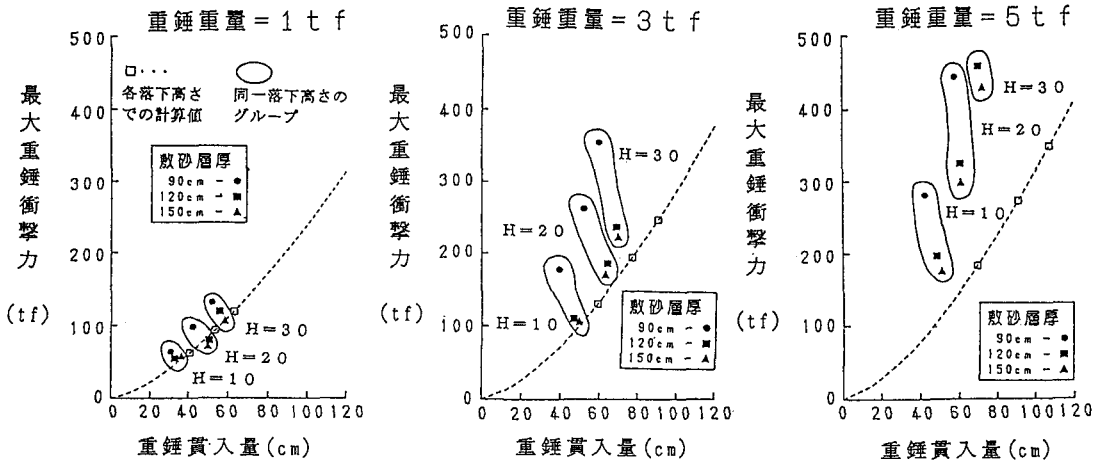


図-5 重錘衝撃力と重錘貫入量

### 3.6 敷砂層厚、重錘直径の影響

以上の結果より、重錘の最大衝撃力は敷砂層厚、重錘直径と密接な関係があると思われる。

図-6は敷砂層厚、重錘直径と重錘衝撃力との関係を調べるため、横軸に敷砂層厚 $T$ を重錘直径 $D$ で割った値( $T/D$ )、縦軸に実験で得られた最大重錘衝撃力 $P_{max}$ を振動便覧式にラメ定数 $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ を代入して求めた値 $P_{max}(\lambda=100)$ で割った値( $P_{max}/P_{max}(\lambda=100)$ )を示したものである。

図中の実線は回帰曲線であり、次式で表される。

$$\begin{aligned} \alpha &= P_{max} / P_{max}(\lambda=100) \\ &= 1.046 (T/D)^{-0.58} \\ &\approx 1.0 (T/D)^{-0.58} \end{aligned}$$

ここに、 $\alpha$ ：衝撃力の割増し係数、 $P_{max}$ ：最大重錘衝撃力の実験値 (tf)、 $P_{max}(\lambda=100)$ ：振動便覧式より求めた最大重錘衝撃力の計算値 (tf)、 $T$ ：敷砂層厚 (m)、 $D$ ：重錘直径 (m)。

実験値は敷砂層厚と重錘直径が等しい場合に計算値とほぼ一致 ( $P_{max}/P_{max}(\lambda=100) \approx 1$ ) し、敷砂層厚が重錘直径より薄いと計算値より大きくなる。また、敷砂層厚が重錘直径より厚いと実験値は計算値より若干小さくなるが、敷砂層厚が増加しても緩衝効果は小さい。

また、図-7は落下高さ毎に割増し係数 $\alpha$ を表したものである。これより、 $\alpha$ に対する落下高さの影響度

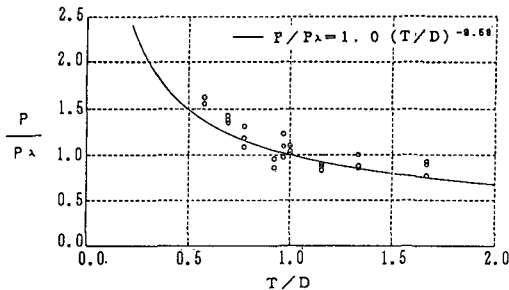


図-6 敷砂層厚/重錘直径と最大重錘衝撃力比

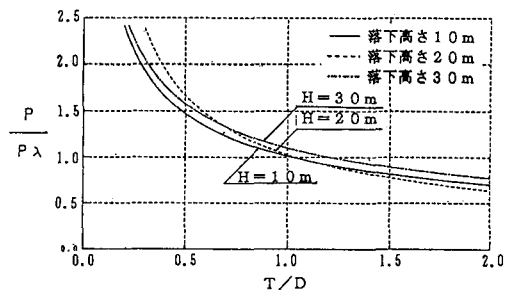


図-7 落下高さとも最大重錘衝撃力比

は低いことがわかり、割増し係数 $\alpha$ のパラメータとしては敷砂層厚 $T$ 、重錘直径 $D$ の比 ( $T/D$ ) が妥当であると思われる。

#### 4. 衝撃土圧

##### 4.1 重錘衝撃力と衝撃土圧

図-8は、砂層を伝達した衝撃土圧の計測例であり、横軸が重錘落下位置を原点とした土圧計設置位置を示し、縦軸が土圧の測定値、奥行きが計測時間である。また、右端の波形は重錘加速度を示し、一点鎖線は最大加速度発生時刻を表す。

測定された土圧は25cmあるいは50cmおきに離散的に配置された土圧計による値であるが、となりあう値の間は直線で結ばれると仮定し、各時刻ごとのコンクリート床版に作用する衝撃土圧合力を算出し、最大のものを最大衝撃土圧合力とした。

図-9は横軸に最大重錘衝撃力を縦軸に最大衝撃土圧合力をとったものである。これより、最大衝撃土圧合力は最大重錘衝撃力にほぼ等しいものから2倍程度に達するものまである。

また、図-10には最大重錘衝撃力と最大衝撃土圧合力の比と落下高さの関係、図-11には同比と敷砂層厚の関係を示したものである。落下高さ、敷砂層厚が大きくなると最大重錘衝撃力と最大衝撃土圧合力は近づく傾向にあるが、いずれもデータのばらつきが多く明確な関係はみられない。

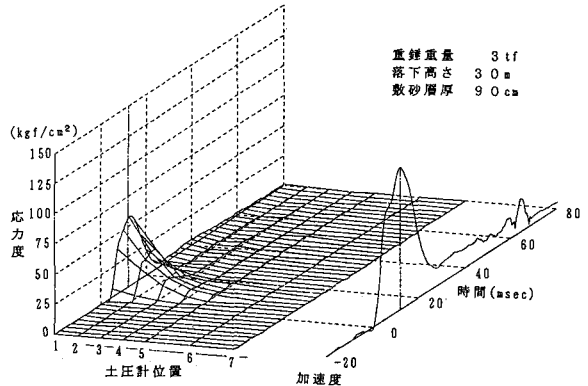


図-8 衝撃土圧測定例

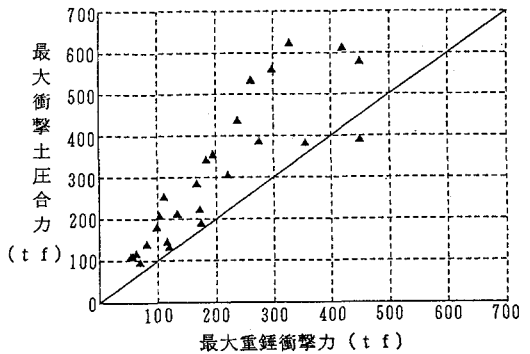


図-9 最大重錘衝撃力と最大衝撃土圧

##### 4.2 重錘落下位置直下の土圧

図-12は重錘落下位置直下(土槽中心)の土圧計で測定された土圧の最大値と敷砂層厚 $T$ を重錘直径 $D$ で割った値 ( $T/D$ ) との関係を示したものである。土圧と $T/D$ との関係は図-6の重錘衝撃力割増し係数と $T/D$ との関係と同様の傾向を示すが、より $T/D$ の影響を受けやすいものと思われる。

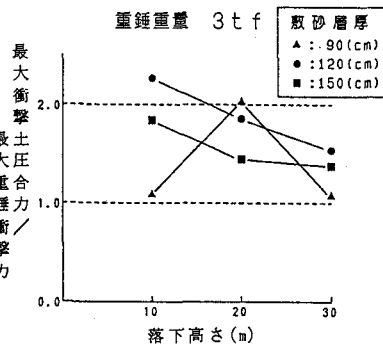


図-10 最大衝撃土圧合力 / 最大重錘衝撃力と落下高さ

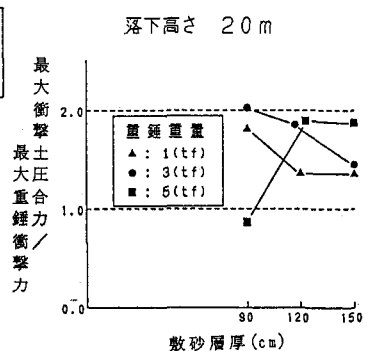


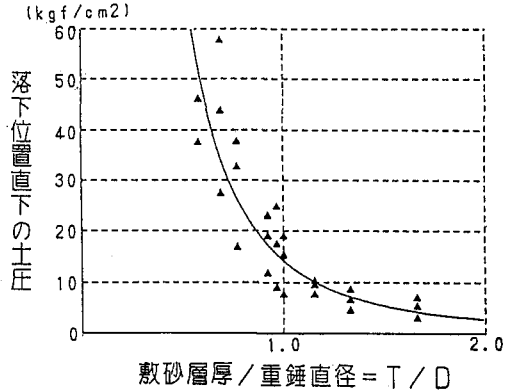
図-11 最大衝撃土圧合力 / 最大重錘衝撃力と敷砂層厚

### 4. 3 衝撃土圧の分布幅

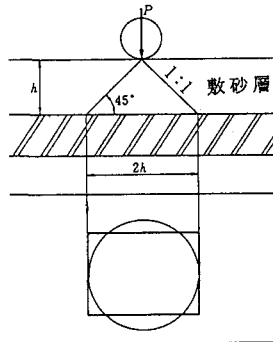
図一8の測定例に示すように、最大衝撃土圧の分布は重錘落下位置を中心軸としたつりがね状に曲線分布していると考えられるが、落石対策便覧においては落石覆工の設計は落石衝撃力が敷砂層厚に対し1:1の範囲に等分布するものとして行っている(図一13)。

今回の実験で測定された衝撃土圧を等分布荷重におきかえるため、この土圧分布の最大値を変えずに全衝撃土圧(中心軸回りに曲線を回転させた体積)が等しくなるような円柱を考え土圧の分布角度 $\theta$ をとる(図一14)。

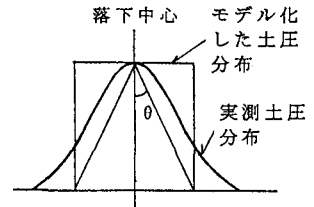
図一15は分布角度 $\theta$ と敷砂層厚 $T$ を重錘直径 $D$ で割った値( $T/D$ )との関係を示したもので、 $\theta$ は $27^\circ \sim 40^\circ$ となり、これは敷砂層厚に対する勾配になおすと1:0.5~1:0.8で落石対策便覧の分散勾配1:1より急勾配となる。



図一12 落下位置直下の土圧と敷砂層厚/重錘直径



図一13 等分布荷重の考え方<sup>1)</sup>

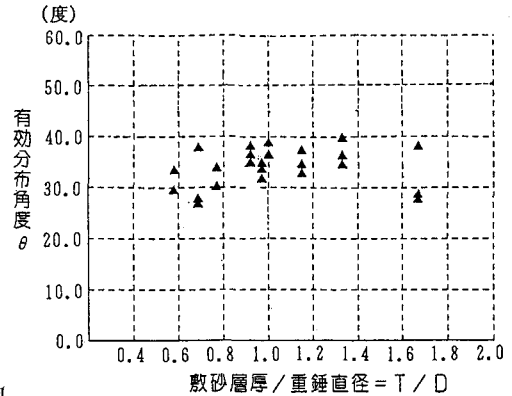


図一14 分布角度

### 5. まとめ

今回の実験の結果の要約を以下に示す。

- 1) 重錘重量5tf、落下高さ30mと実験規模が大きくなっても最大重錘衝撃力は、落石直径と敷砂層厚が近い場合、振動便覧式において $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ とおいた計算値程度である。
- 2) 重錘落下による砂の移動は重錘直径範囲内と重錘直径範囲外とで異なる。
- 3) 最大重錘衝撃力は敷砂層厚、重錘直径と密接に関係し、敷砂層厚が落石直径より薄い場合、衝撃力は上記計算値より大きくなり、敷砂層厚と落石直径の比に応じて割増し必要がある。
- 4) 衝撃土圧合力の最大値は最大重錘衝撃力の1~2倍とばらつきが多い。また、敷砂層厚、重錘直径との明確な関係もみられず、敷砂層を伝播した土圧に関しては今後の検討課題となった。
- 5) 敷砂層厚に対する土圧の分散勾配は1:0.5~1:0.8の値をとり、落石対策便覧より分散範囲は狭くなる。



図一15 敷砂層厚/重錘直径と分布角度

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧、昭和58年7月。
- 2) 土木学会：土木技術者のための振動便覧、昭和60年10月。
- 3) 建設省土木研究所：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験報告書、土木研究所資料第1822号、昭和57年3月。