

## 野外実験による敷砂の緩衝性能

## FIELD TEST ON ABSORBING CAPACITY OF SAND CUSHION

岸 徳光\* 中野 修\*\* 松岡健一\*\*\* 西 弘明\*\*\*\*

By Norimitsu KISHI, Osamu NAKANO, Ken-Ichi G. MATSUOKA and Hiro-Aki NISHI

To reduce the impact force by rock falling, sand cushion with 90 cm height is commonly used on the roof of rock-shed. The impact force in this case is usually evaluated by the conventional equation which is derived based on Hertz's contact theory. However, according to the analytical results by one-dimensional and/or axisymmetric wave theory, the transmitted impact force to rigid base is to be twice of the inputted one.

In this paper, to get the real impact forces caused by rock falling, the large field test on heavy weight falling on sand cushion is performed. The heavy weights of 2 and 3 tf weight are used and they are dropped from a maximum 30m height. Measuring weight acceleration and transmitted stresses on the rigid base, two kind of impact forces are estimated which are obtained from weight acceleration and summing up the transmitted stresses.

From the results, it has been shown that 1) the maximum transmitted impact force may become the twice of one obtained from dropped weight, 2) the maximum transmitted impact force can be estimated using the conventional equation assuming Lamé's constant  $\lambda = 1000 \text{ tf/m}^2$ .

## 1. はじめに

落石覆道の屋根部には、一般に落石衝撃力を緩和するために敷砂が用いられている。落石対策便覧<sup>1)</sup>によれば、敷砂を用いた場合の衝撃力算定に関する研究は、我が国では1973年の鋼材クラブが最初のものであり、1982年までに種々の研究機関で行われている。たとえば、吉田等<sup>2)</sup>は砂の種別(海砂、山砂、砕砂)ごとに対する算定式を求めており、北海道開発局土木試験所(現在の開発土木研究所)<sup>3)</sup>では粘土に対しても衝撃力算定式を与えている。これらの衝撃力算定式は、いずれも重錘質量に最大重錘加速度を乗じて得られた重錘衝撃力(以後、ここではこれを最大重錘衝撃力と呼ぶこととする)の値を基本にして定式化されたものである。

一方、奥行きを単位幅に仮定した二次元衝撃応答解析<sup>4)</sup>や軸対称問題と仮定した解析結果<sup>5)</sup>によれば、敷砂材のラーメ定数が小さい場合には、敷砂底部に伝達される衝撃力(以後、ここでは伝達衝撃力と呼ぶこととする)が入力荷重の2倍程度になることが示されている。力学的には、本構造(覆工)に作用する荷重は敷砂底部に伝達された衝撃力であるものと考えられる。従って、重錘加速度に基づく重錘衝撃力および敷砂底部に伝達される伝達衝撃力が等しいかどうか、また構造物の応答がいずれの衝撃力を入力した場合と対応しているかを明らかにすることは、覆工構造物の合理的な設計法確立のために重要なものと考えられる。

\* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (050 室蘭市水元町27-1)

\*\* 工修 北海道開発局開発土木研究所室長 構造研究室 (062 札幌市豊平区平岸1-3)

\*\*\* 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (050 室蘭市水元町27-1)

\*\*\*\* 工修 北海道開発局開発土木研究所研究員 構造研究室 (062 札幌市豊平区平岸1-3)

このような観点から、本論文では、重錘衝撃力と伝達衝撃力の評価に限定し重錘衝撃力測定のための加速度計や伝達衝撃力測定のためのロードセルを用いた野外実験を行ったので、その結果を報告する。

本研究では、4 m 四方の敷砂緩衝工を基礎コンクリート上に設置して、重量 2 tf と 3 tf の二種類の重錘を用い、高さを 5 ~ 30 m まで変化させて実験を行った。また、敷砂厚による緩衝性状を検討するために敷厚を 60 ~ 150 cm まで変化させている。実験結果より得られた最大重錘衝撃力や最大応答時の伝達応力を総和して求められる最大伝達衝撃力は、Hertz の弾性衝撃理論から導かれる振動便覧式や吉田らの式の結果と比較検討されている。

## 2. 実験の概要

### 2.1. 実験内容

写真-1 に実験の状況を示す。重錘落下衝撃実験は 6.8m×6.8m×1m のコンクリート基礎上に、4m×4m の敷砂緩衝工を設置し、その中央部に重量  $W = 3 \text{ tf}$  または  $2 \text{ tf}$  の重錘 (直径 100 cm、高さ 17.5 cm の球底) を所定の高さまでクレーンで引き上げトランシット 2 台を用いて重錘位置を決定の後自由落下させることによって行っている。

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(詳細は後述)、重錘落下終了後の重錘貫入量である。

敷砂材は各実験毎に敷厚 20 cm ごとに足踏みにより締固め、所定の高さに整地している。また、サンプル容器を用いて重錘落下前の敷砂を採取することにより実験時の敷砂の湿潤密度および含水比の測定を行っている。

実験は、重量  $W = 2 \text{ tf}$  と  $3 \text{ tf}$  の各重錘について、敷砂材の敷厚  $h = 60, 90, 120, 150 \text{ cm}$  に対して、落下高さを  $H = 5 \sim 30 \text{ m}$  の間で変化させ、合計 34 ケースについて行った。



写真-1 実験状況

### 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、重錘中心底部には応答周波数範囲が  $2 \text{ kHz}$  以上の歪ゲージ型加速度計を、 $2 \text{ tf}$  重錘には容量  $100 \text{ G}$  を 2 個、 $200 \text{ G}$ 、 $500 \text{ G}$  を 1 個ずつ、また  $3 \text{ tf}$  重錘には容量  $200 \text{ G}$ 、 $500 \text{ G}$  を 2 個ずつ取り付けている。

本実験では衝撃力の算定、評価のために重錘加速度の他、基礎上への伝達衝撃力を算定するために、ロードセルを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  $25 \text{ mm}$ 、容量  $300 \text{ kgf/cm}^2$ 、周波数帯域が  $DC \sim 1.5 \text{ kHz}$  の衝撃荷重測定用ロードセル<sup>6)</sup>で、基礎上一列に中心部での最小間隔を  $10 \text{ cm}$  とし計 25 個設置している。写真-2 にロードセルの設置状況を示している。

ロードセル出力は、各設置点における直径  $25 \text{ mm}$  の円内に作用する荷重として出力されるが、本実験では基部への伝達応力を評価するために用いているため、ここでは応力の単位を用いることとし、これを伝達応力と呼ぶこととする。

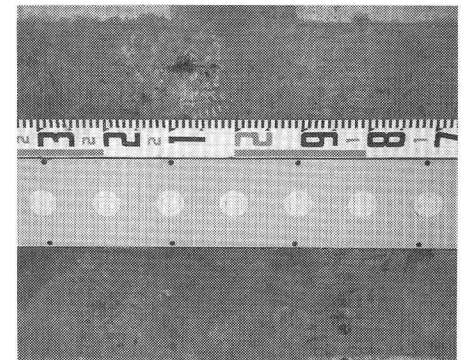


写真-2 ロードセル設置状況

### 2.3. 敷砂材

本実験で用いた敷砂緩衝材は、比重 2.53、吸水率 2.45% の石符当別産砂であり、粒度試験結果は表-1 に示すとおりである。

現地踏査によれば、覆工上の敷砂の状態は雑草で覆われ排水状態も良好であることより、かなり締固まった状態であるものと考えられる。しかしながら、現位置における砂の締め固まりの程度に関する明確な測定値がないことより、実験時に現場の状態を再現することは不可能である。そのため、ここでは吉田等と同様の方法<sup>7)</sup>によって 20 cm 毎に平均的に足踏みによって締固めを行い、所定の敷厚に整形するとともに、砂層の湿潤密度、含水比を測定するために層厚 30 cm 毎にサンプルを回収し実験を行っている。砂層の平均湿潤密度、含水比の測定結果は表-2 のようになった。なお、サンプリングした試料の測定は各実験毎に行っているが、設定敷砂厚毎にほぼ一定であるため、ここでは敷砂厚毎に整理している。

表-1 敷砂材の粒度試験結果

10%粒径 $D_{10}(mm)$	30%粒径 $D_{30}(mm)$	60%粒径 $D_{60}(mm)$	均等係数 $U_c$	曲率係数 $U'_c$
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(cm)	60	90	120	150
平均湿潤密度 ( $g/cm^3$ )	1.62	1.54	1.61	1.58
平均含水比(%)	10.05	8.88	11.31	8.25

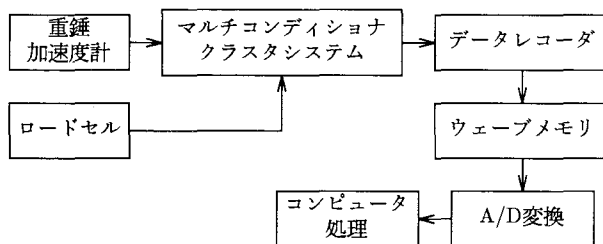


図-1 計測システムのフローチャート

### 2.4. 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-1 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  $DC \sim 50 kHz$  のシグナルコンディショナを介し、 $DC \sim 40 kHz$  帯域まで記録可能なデータレコーダに一括集録している。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、 $100 \mu sec / word$  サンプリングタイムで 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. 実験結果および考察

### 3.1. 重錘加速度波形と中央部伝達応力波形

図-2 に重錘重量  $W = 3 tf$ 、落下高さ  $H = 20 m$ 、敷砂厚  $h = 60, 90, 120 cm$  の場合における重錘加速度波形と中央部伝達応力波形を比較して示している。敷砂厚  $h = 60 cm$  の重錘加速度波形に注目すると、その概形は最初に応答時間が  $35 msec$  程度の単純な正弦半波状を示し、その後約  $20 msec$  経過後に第 1 波目と同程度の継続時間を有する第 2 の波動が示されている。全体としては、 $110 msec$  程度の現象となっている。一方、伝達応力波形は加速度波形より数  $msec$  遅れて立上がり、ほぼ同一時点で現象が終了している。第 2 波目の第 1 波目に対する振幅の割合は約 0.35 で、加速度波形 (0.1 以下) に比べて大きく示されている。

敷砂厚  $h = 90 cm$  以上の場合は、重錘加速度、伝達応力波形とも第 2 波動が第 1 波動の端部に吸収され、全波動継続時間が、敷砂厚  $h = 60 cm$  の場合とほぼ等しい 1 波のみの波動となっている。伝達応力波形は単純な分布を示しているが、加速度波形は最大応答値を示す前に高次波動が重ね合わされたような分布となっている。各敷砂厚に対する重錘加速度と伝達応力の主波動を比較すると、波動の立上がりに数  $msec$  の差があるものの、両波形は

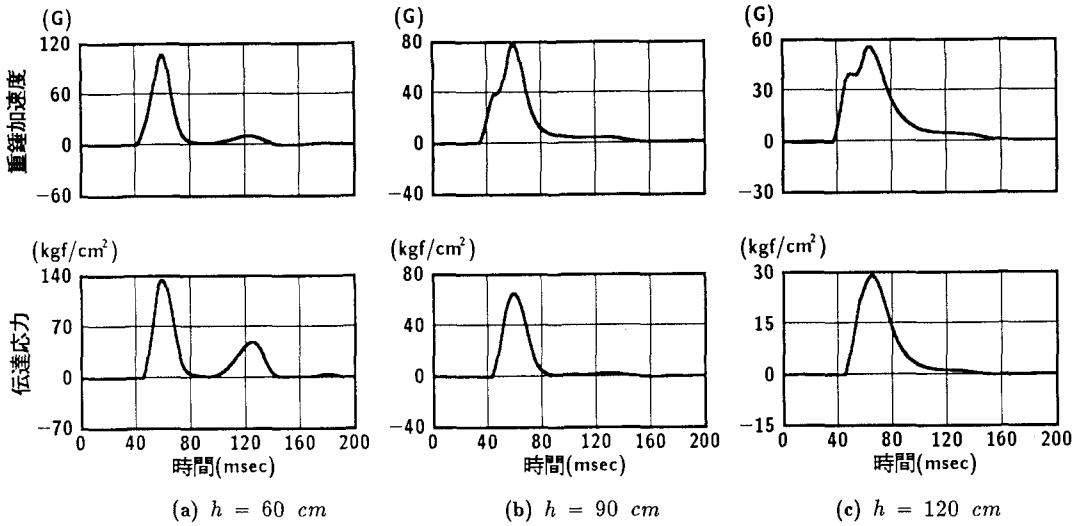


図-2 重錘加速度波形および中央部伝達応力波形 ( $W = 3 \text{ tf}$ ,  $H = 20 \text{ m}$ )

大略相似な分布形状を示している。

### 3.2. 伝達応力の三次元分布波形

図-3 には前節と同様の実験ケースにおける敷砂底部伝達応力の三次元分布波形を比較して示している。図中、横軸が重錘落下中心点を原点としてロードセル設置位置を示しており、奥行き方向は測定時間を示している。

分布図より、敷砂厚  $h = 60 \text{ cm}$  の場合には載荷点中央部で  $p = 140 \text{ kgf/cm}^2$  前後の伝達応力を示し、半径の増大とともに指数関数的に減少しており中央部への応力集中度が極めて大きいことがわかる。この場合の応答範囲は、ほぼ  $60 \sim 80 \text{ cm}$  程度で重錘半径 ( $50 \text{ cm}$ ) とそれほど差がなく敷砂による応力分散効果が小さいことがわかる。

一方、敷砂厚  $h = 90 \text{ cm}$ ,  $120 \text{ cm}$  の場合には中心より  $100 \text{ cm}$  程度までロードセルが応答しているようである。敷砂厚  $h = 90 \text{ cm}$  の場合は中心より  $20 \text{ cm}$  までの伝達応力が  $p = 60 \text{ kgf/cm}^2$  と比較的大きい応答を示し、その後徐々に減少している。敷砂厚  $h = 120 \text{ cm}$  の場合には、中央部の振幅が  $p = 30 \text{ kgf/cm}^2$  前後にまで減少し、敷砂厚  $h = 90 \text{ cm}$  の場合と同様の傾向を示している。

これより、特に敷砂厚  $h = 90 \text{ cm}$  の場合における伝達応力の半径方向の分散性状は落石対策便覧<sup>1)</sup>に示されているような等分布なものではなく載荷点中央部が大きい円錐状分布になっていることが明らかになった。

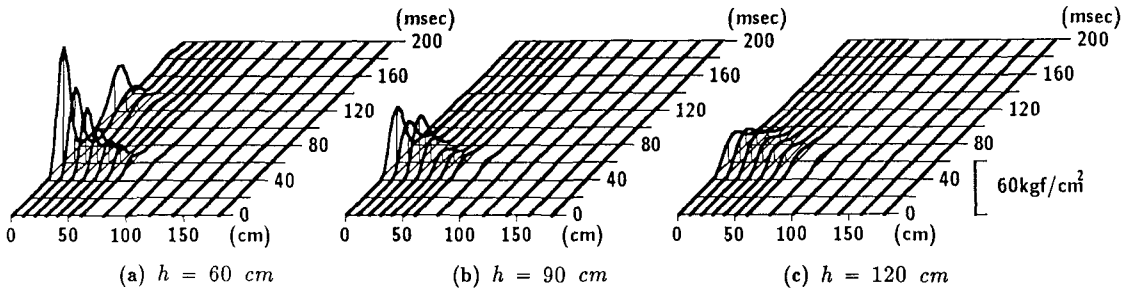


図-3 伝達応力の三次元分布波形 ( $W = 3 \text{ tf}$ ,  $H = 20 \text{ m}$ )

### 3.3. 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応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集積し評価することとした。

図-4 に、前節同様の実験ケースについて、重錘衝撃力波形と伝達衝撃力波形とを比較して示している。まず各波動の分布状況について検討すると、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り、その差は敷砂厚の増大とともに大きくなっている。これは衝撃波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ものと考えられる。波動の立ち上がり時間差より敷砂中の波動伝播速度を概算してみると表-3 のようになる。重錘衝突によって載荷点部の敷砂が締固まりや側方流動等を示すことにより、物性値が位置的にも時間的にも変化するため波動の伝播速度も時々刻々変化するものと考えられる。ここでは設定敷砂厚と重錘落下後の貫入量を差し引いた砂層厚の 2 種類の伝播距離に対して波動が一定速度で伝播するものと仮定して評価を試みた。表より、設定敷砂厚を伝播距離と仮定する場合には平均 100 m/sec 以上の伝播速度を示し、敷砂が非常に硬く評価されることがわかる。一方、重錘の貫入量を考慮する場合には敷砂厚  $h = 60 \text{ cm}$  で伝播速度が  $c = 30.7 \text{ m/sec}$ 、平均でも  $c = 42.4 \text{ m/sec}$  となる。この状態におけるラーメ定数  $\lambda$  は、一次元波動問題を仮定して弾性係数  $E$  を縦波伝播速度  $c = \sqrt{E/\rho}$  ( $\rho$ : 単位体積重量) より算定し、 $\lambda$  と  $E$ 、ポアソン比  $\nu$  の関係式 (1) を用いることにより求めることができる。

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (1)$$

いま、敷砂の密度を  $\gamma = 1.6 \text{ t/m}^3$ 、 $\nu = 0.45$  と仮定すると、ラーメ定数は  $\lambda = 910.9 \text{ tf/m}^2$  となる。

その後両波形はほぼ同時点で最大値を示し、同じよう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。敷砂厚  $h = 60 \text{ cm}$  の場合の第 2 波動や  $h \geq 90 \text{ cm}$  の波動端部の低振幅の部分を除いた主波動の継続時間は 30 ~ 40 msec 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大きいことがわかる。それらの最大値 (以後、それぞれ最大重錘衝撃力、最大伝達衝撃力と呼ぶ) を比較すると敷砂厚  $h = 60 \text{ cm}$  の場合は 1.5 倍、 $h = 90 \text{ cm}$ 、 $120 \text{ cm}$  の場合が 1.8、2.5 倍といずれも 1.5 倍以上の値を示している。これは、まえがきでも述べているように重錘衝突初期の敷砂中の波動伝播速度 (ラーメ定数  $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$  で  $c = 14 \text{ m/sec}$ ) が重錘の衝突速度 ( $H = 10, 20, 30 \text{ m}$  落下でそれぞれ  $V = 14.0, 19.8, 24.2 \text{ m/sec}$ ) と同程度あるいはそれよりも遅いため、重錘による砂粒子の強制変形速度も含め基部方向への波動伝播が法線方向への伝播よりも卓越するため、重錘落下部の敷砂が一端固定の一次元波動伝播状態に酷似した現象を示したものと考えられる。

表-3 敷砂中の波動伝播速度

敷砂厚(cm)	60	90	120
重錘貫入量(cm)	42.5	52.5	56.0
① 波動伝播速度 (m/sec)	105.2	96.9	104.0
② 波動伝播速度 (m/sec)	30.7	40.4	56.0

①: 波動伝播距離を設定敷厚とした場合

②: 波動伝播距離を (設定敷厚-貫入量) とした場合

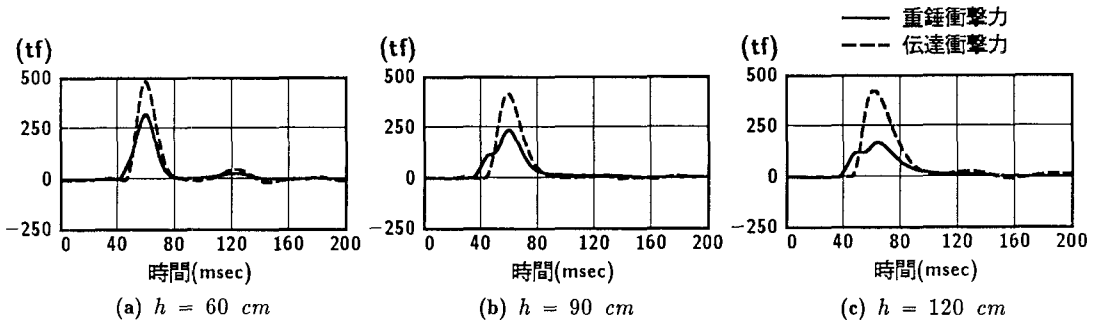


図-4 重錘衝撃力波形および伝達衝撃力波形 ( $W = 3 \text{ tf}$ ,  $H = 20 \text{ m}$ )

### 3.4. 最大重錘衝撃力と最大伝達衝撃力

#### 3.4.1. 最大重錘衝撃力

図一五に、最大重錘衝撃力についての実験結果を落下高さから換算した衝突速度  $V$  を横軸にとり、他衝撃力算定式ここでは振動便覧式と吉田らの式<sup>1)</sup>(敷砂として砕砂を用いる場合に限定)と比較して示している。(a) 図が重錘重量  $W = 2 \text{ tf}$  の場合で、(b) 図が  $W = 3 \text{ tf}$  の場合である。各直線は重錘衝撃力が衝突速度に線形に比例すると仮定して得られた回帰直線である。なお、振動便覧式および吉田らの式を明記すると、振動便覧式は衝撃力を  $P \text{ (tf)}$  とすると、

$$P = 2.455 \lambda^{2/5} W^{2/3} H^{3/5} \quad (2)$$

である。ここで、 $\lambda$  : 敷砂層のラーメ定数 ( $\text{tf}/\text{m}^2$ )、 $W$  : 重錘重量 ( $\text{tf}$ )、 $H$  : 重錘落下高さ ( $\text{m}$ ) である。一方、吉田らの式の場合は敷砂として砕砂を仮定すると、

$$P = 8.21 W^{0.95} H^{0.58} \quad (3)$$

として示される。図より、重錘衝撃力の実験結果は、敷砂厚  $h = 60 \text{ cm}$  の場合を含め重錘重量  $W = 2 \text{ tf}$ ,  $3 \text{ tf}$  のいずれの場合とも重錘の衝突速度にほぼ比例して増大しているようである。また敷砂厚の増大とともに衝撃力も減少していることがわかる。本実験結果と他衝撃力算定式との比較を行うと、重錘重量  $W = 2 \text{ tf}$  の場合には、敷砂厚  $h = 90 \text{ cm}$  の結果はラーメ定数  $\lambda = 100 \text{ tf}/\text{m}^2$  における振動便覧式の結果より若干大きい分布となっている。吉田らの式は敷砂厚  $h = 120 \text{ cm}$  の  $V = 9.9 \text{ m}/\text{sec}$  ( $H = 5 \text{ m}$ ) の実験結果とよく一致している。

一方、重錘重量  $W = 3 \text{ tf}$  の場合には、敷砂厚  $h = 90 \text{ cm}$  の結果はラーメ定数  $\lambda = 200 \text{ tf}/\text{m}^2$  における振動便覧式の結果より若干小さい分布となっている。吉田らの式は敷砂厚  $h = 150 \text{ cm}$  の場合の実験結果と比較的よく一致しているようである。

#### 3.4.2. 最大伝達衝撃力

図一六は前項と同様にして最大伝達衝撃力について、他衝撃力算定式と比較して整理している。図より、重錘重量  $W = 2 \text{ tf}$ 、敷砂厚  $h = 60 \text{ cm}$  の場合の実験結果が多少ばらついているようであるが、他は重錘衝撃力同様衝突速度にほぼ比例して増大していることがわかる。また敷砂厚の効果について検討すると、前記重錘衝撃力の場合は敷砂厚の増加とともに減少する傾向にあるが、伝達衝撃力の場合は敷砂厚  $h = 90 \sim 120 \text{ cm}$  の間ではその差が明確に示されないようである。

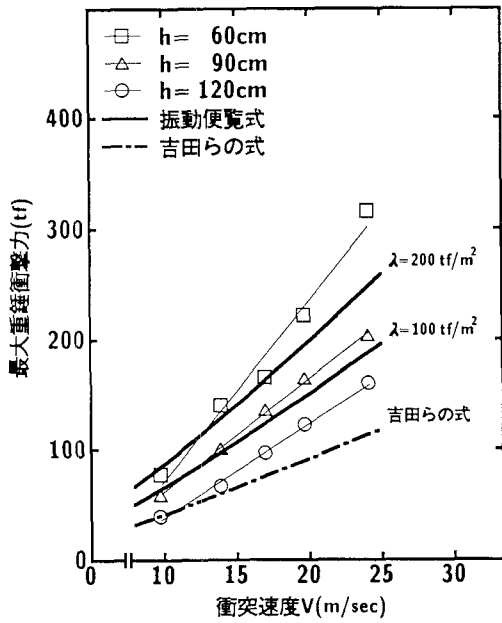
他衝撃力算定式と比較すると、重錘重量  $2 \text{ tf}$  の場合には、敷砂厚  $h = 90 \sim 120 \text{ cm}$  の結果はラーメ定数  $\lambda = 1000 \text{ tf}/\text{m}^2$  における振動便覧式の結果より若干小さな分布になっているようである。一方、重錘重量  $3 \text{ tf}$  の場合には、特に敷砂厚  $h = 60 \sim 120 \text{ cm}$  の実験結果に明確な特性が示されず、それらはラーメ定数  $\lambda = 1000 \text{ tf}/\text{m}^2$  の振動便覧式の結果を上限值とする分布になっている。ラーメ定数  $\lambda = 1000 \text{ tf}/\text{m}^2$  の振動便覧式の値は  $\lambda = 100 \text{ tf}/\text{m}^2$  および  $200 \text{ tf}/\text{m}^2$  の場合のそれぞれ 2.5 倍、1.9 倍の大きさである。これより、伝達衝撃力は重錘衝撃力のほぼ 1.9 ~ 2.5 倍の大きさになっていることがわかる。

吉田らの式は  $W = 2 \text{ tf}$  および  $3 \text{ tf}$  の場合とも実験値より小さい値を与え過小評価する傾向にあるようである。

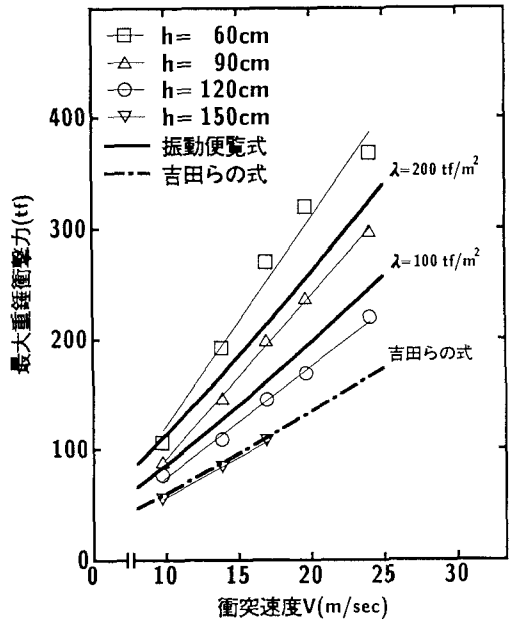
#### 3.4.3. 基準重錘重量に対する衝撃力

ここでは数少ない実験結果を有効に利用するために、 $W = 2 \text{ tf}$  に関する実験結果を  $W = 3 \text{ tf}$  の場合に基準化して整理検討することとした。

落石重量はその単位体積重量が約  $\gamma = 2.6 \text{ tf}/\text{m}^3$  である。しかしながら、本実験では衝撃力に対する重錘重量の影響についてのみ検討を行うために、 $W = 2 \text{ tf}$  と  $3 \text{ tf}$  の重錘の形状寸法を同一にして重錘周辺における摩擦

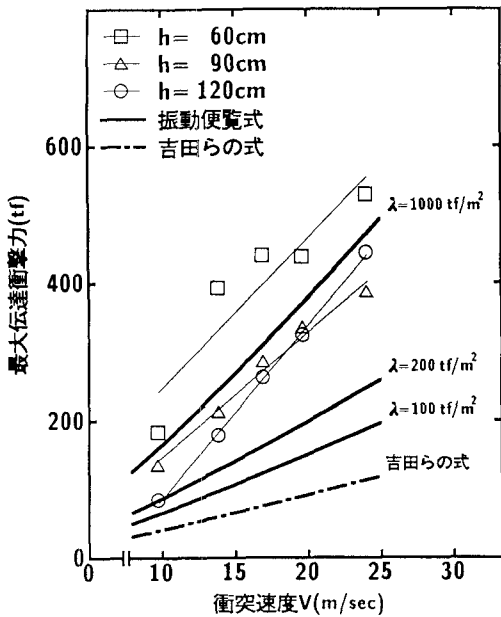


(a) 重錘重量  $W = 2 \text{ tf}$  の場合

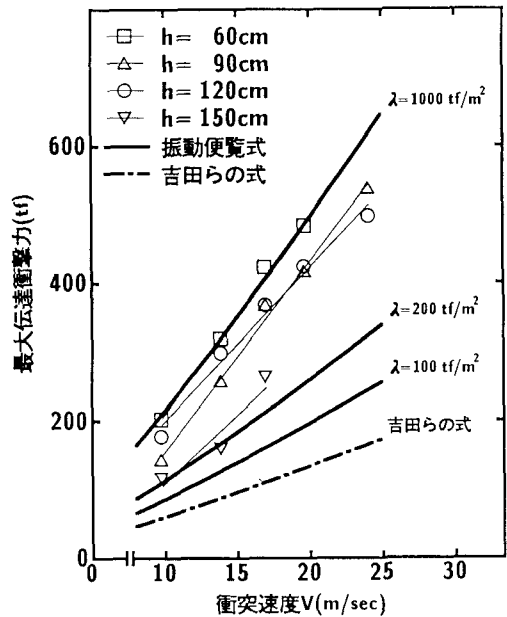


(b) 重錘重量  $W = 3 \text{ tf}$  の場合

図-5 最大重錘衝撃力

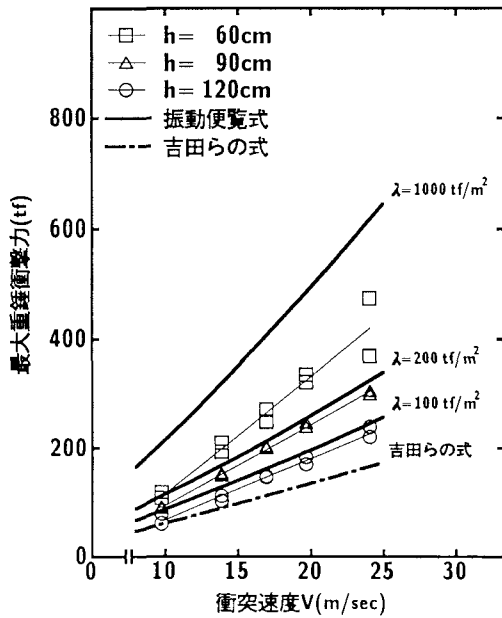


(a) 重錘重量  $W = 2 \text{ tf}$  の場合

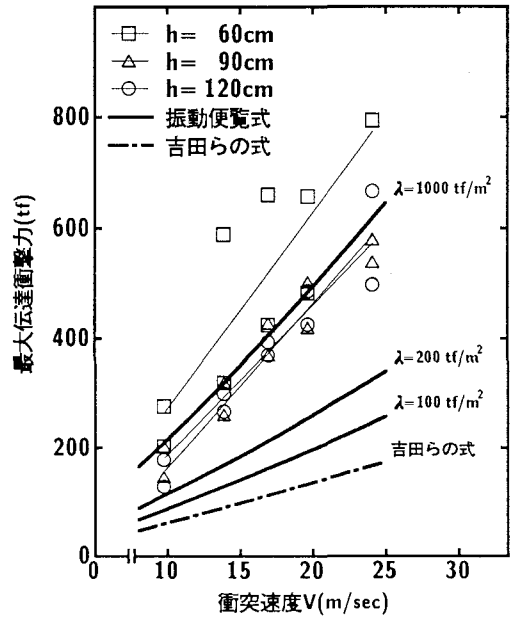


(b) 重錘重量  $W = 3 \text{ tf}$  の場合

図-6 最大伝達衝撃力

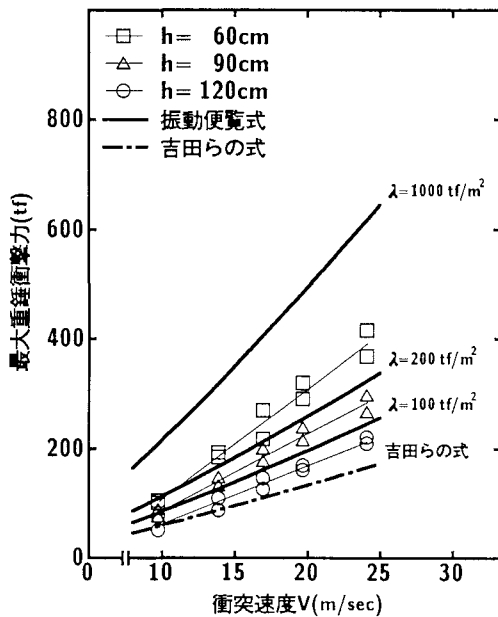


(a) 最大重錘衝撃力

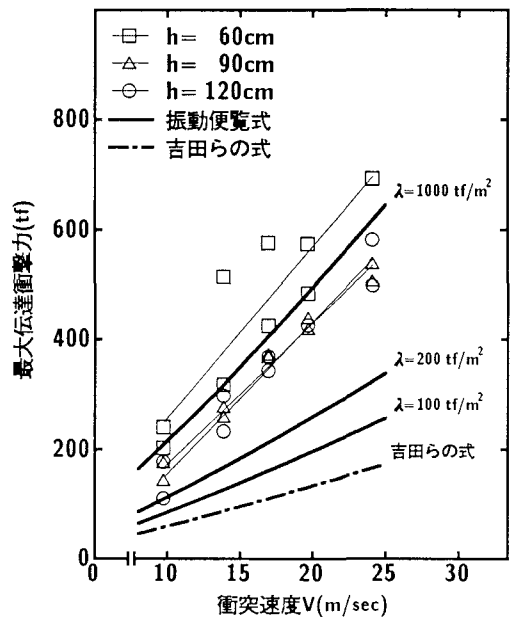


(b) 最大伝達衝撃力

図-7  $W = 3 \text{ tf}$  に基準化した場合の最大衝撃力 ( $P \propto W$ )



(a) 最大重錘衝撃力



(b) 最大伝達衝撃力

図-8  $W = 3 \text{ tf}$  に基準化した場合の最大衝撃力 ( $P \propto W^{2/3}$ )



や重錘形状による衝撃緩衝効果の影響を除去することとした。これより、本実験結果の場合には、衝撃力は重錘重量に線形に比例するものと考えられる。一方、Hertzの球と平面との衝突に関する理論を用いて導かれる振動便覧式は衝突衝撃力が重錘重量の $2/3$ 乗に比例する形で定式化されている。以上より、本論文ではこれら2つの考え方に基づいた基本重錘重量に対する衝撃力を求め、両者の妥当性を含め衝撃力特性に関する検討を行うこととする。

図-7 (a), (b) に衝撃力が重錘重量に線形に比例すると仮定した場合 ( $P \propto W$ ) の衝突速度に対する最大重錘衝撃力と伝達衝撃力の分布を、図-8 (a), (b) には衝撃力が重錘重量の $2/3$ 乗に比例すると仮定した場合 ( $P \propto W^{2/3}$ ) における図-7と同様の分布を他衝撃力評価式による結果と比較して示している。ここでは、他の衝撃力評価式として $\lambda = 100, 200, 1000 \text{ tf/m}^2$ における振動便覧式と砕砂を仮定する吉田らの式を用いている。

図-7, 8の(a)図より最大重錘衝撃力の場合、図-7(a)の敷砂厚 $h = 60 \text{ cm}$ の場合の衝突速度 $V = 24.2 \text{ m/sec}$ の場合を除いて、図-7, 8ともに重錘重量 $W = 2 \text{ tf}$ のデータを $3 \text{ tf}$ に基準化した結果と $3 \text{ tf}$ の場合の結果がほぼ等しい値を示していることがわかる。また、いずれの敷砂厚に対しても重錘衝撃力が衝突速度にほぼ比例していることも前項同様である。これより本実験の範囲では、重錘形状が同一の場合の重錘衝撃力は重錘重量 $W$ の $2/3 \sim 1$ 乗に、また衝突速度に線形にほぼ比例しているものと考えられる。振動便覧式による結果と本実験結果を比較すると、ラーメ定数 $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ の結果が敷砂厚 $h = 120 \text{ cm}$ の実験結果と、 $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ の結果が敷砂厚 $h = 90 \text{ cm}$ の実験結果と比較的よく一致しているようである。

図-7, 8の(b)図は伝達衝撃力について示している。両図は類似の分布を示しており、伝達衝撃力は重錘衝撃力同様 $W$ の $2/3 \sim 1$ 乗にほぼ比例しているようである。両図より、敷砂厚 $h = 60 \text{ cm}$ の場合はデータのばらつきが大きく、かつ敷砂厚 $h = 90 \text{ cm}$ や $120 \text{ cm}$ の結果から離れていることがわかる。敷砂厚 $h = 90 \text{ cm}, 120 \text{ cm}$ の場合は、(a)図の最大重錘衝撃力の結果と異なり二つの敷砂厚の回帰式は類似なものとなっている。それらの結果は振動便覧式のラーメ定数が $\lambda = 1000 \text{ tf/m}^2$ の場合と比較的よく一致している。一方、吉田らの式は上記結果より過小な値を与えることが分かる。

以上の結果より、落石対策便覧で推奨されている敷砂厚 $h = 90 \text{ cm}$ に限定して振動便覧式と対比して整理する

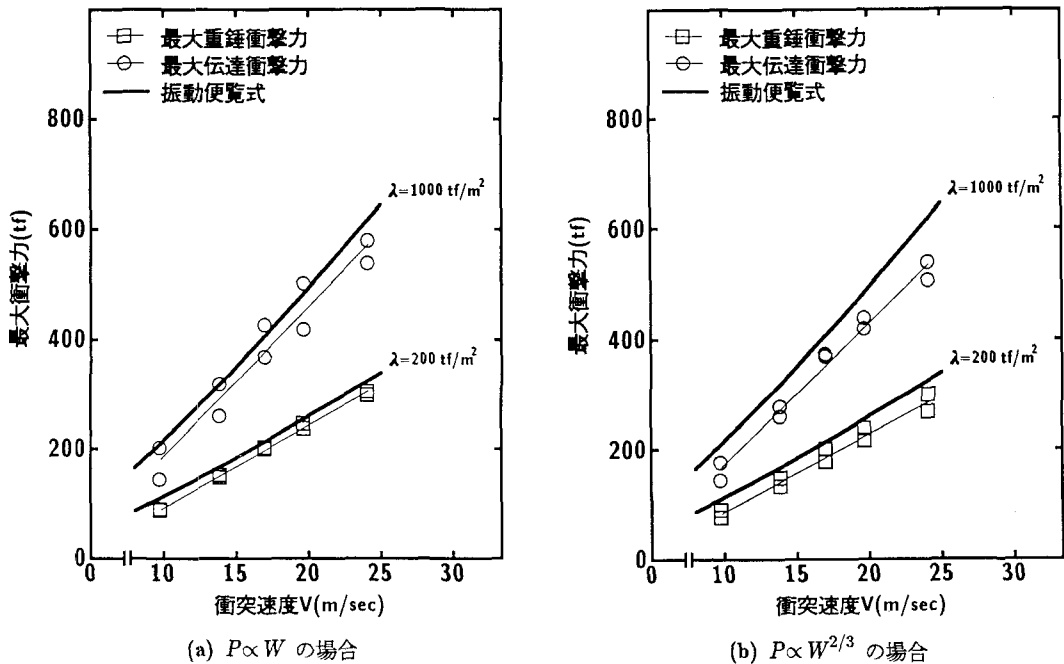


図-9  $W = 3 \text{ tf}$  に基準化した場合の最大衝撃力 (敷砂厚  $h = 90 \text{ cm}$ )

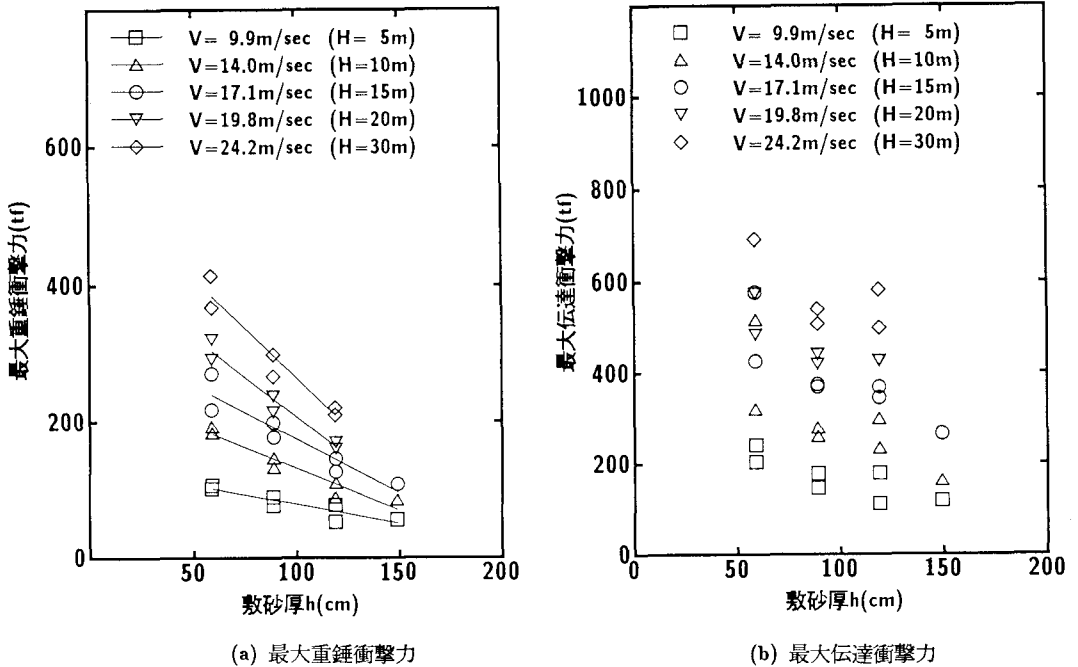


図-10  $W = 3 \text{ tf}$  基準化した場合の最大衝撃力と敷砂厚の関係 ( $P \propto W^{2/3}$ )

と図-9 のようになる。本実験結果から得られた最大重錘衝撃力はラーメ定数  $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ 、最大伝達衝撃力は  $\lambda = 1000 \text{ tf/m}^2$  を用いることによって振動便覧式より評価可能であることが明らかになった。この場合には、最大伝達衝撃力は最大重錘衝撃力の約 1.9 となる。また、特に振動便覧式を用いて最大伝達衝撃力を評価する場合には、ラーメ定数が 3.3 において波動の敷砂中の伝播速度より逆算した値に近似していることより、ラーメ定数は重錘落下によって締めめられた状態における値を採用することが賢明であるものと考えられる。

図-10 (a), (b) には、 $P \propto W^{2/3}$  の関係を仮定して  $W = 3 \text{ tf}$  に基準化した場合の各最大衝撃力について、敷砂厚を横軸にとって整理している。(a) 図より、重錘衝撃力は敷砂厚が厚くなるほど減少し、その緩衝効果の割合はほぼ線形に衝突速度が大きくなるほど高くなるようである。一方、(b) 図は最大伝達衝撃力に関する結果である。敷砂厚が大きくなるほど衝撃力が減少する傾向にあるが、データのばらつきが大きいので (a) 図のような明確な特性は示されていないようである。なお、ここでは示していないが、 $P \propto W$  を仮定する場合も図-10 と同様の結果を得ている。

#### 4. まとめ

敷砂を用いた場合の衝撃力算定に関する研究は、従来まで主に重錘加速度を用いて行われてきた。しかしながら、本構造に作用する荷重は敷砂底部に伝達された衝撃力であるものと考えられる。本論文では、敷砂底部に伝達される衝撃力は敷砂表面に入力された衝撃荷重の 2 倍になるという波動理論による解析結果も踏まえ、本構造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、コンクリート基礎上に 4 m 四方の敷砂緩衝工を設置し野外実験を試みた。本実験では、重錘形状による衝撃吸収効果の影響を除去し、衝撃力に対する重錘重量の影響についてのみ検討を行うために、 $W = 2 \text{ tf}$  と  $3 \text{ tf}$  の重錘の形状寸法を同一 (直径 1 m, 高さ 17.5 cm の球底) とした。実験は、

均等係数  $U_c = 4.11$ , 平均湿润密度が  $1.58 \text{ g/cm}^3$  の敷砂を用い、重錘を最大高さ  $H = 30 \text{ m}$  から自由落下させ、重錘加速度および底部伝達応力を測定する形で実施した。本実験の範囲で得られた結果を要約すると以下のようである。

- 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数 msec の差があるが、両者大略相似な分布形状を示している。
- 2) 伝達応力の分散性状は敷砂厚が小さいほど中央部が大きい円錐状分布になっている。
- 3) 最大伝達衝撃力は最大重錘衝撃力に比べて 1.5 倍以上の大きい値を示しており、重錘落下部の敷砂が一次元波動状態に酷似した現象を示している。

$P \propto W$  あるいは  $\propto W^{2/3}$  と仮定して、重錘重量  $W = 2 \text{ tf}$  の結果を  $W = 3 \text{ tf}$  に基準化した場合の結果より、

- 4) 最大重錘衝撃力および伝達衝撃力は重錘重量  $W$  の  $2/3 \sim 1$  乗に、また衝突速度にほぼ線形に比例している。
- 5) 敷砂厚  $h = 90 \text{ cm}$  の場合には、最大重錘衝撃力および伝達衝撃力は、それぞれラメ定数  $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ ,  $1000 \text{ tf/m}^2$  として振動便覧式を用いて評価することが可能である。
- 6) 敷砂厚の緩衝効果の割合は、重錘の衝突速度が大きいほど大きく示される。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本道路協会、落石対策便覧、pp. 1~239、1983. 7.
- 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. 2.
- 3) 岡田治憲、中松俊裕：覆道の衝撃実験について、第23回北海道開発局技術研究発表会、pp. 112~123、1979. 2.
- 4) 岸 徳光、吉田絃一、松岡健一、能町純雄：層状弾性体にモデル化した覆工敷砂部の衝撃応答解析、構造工学論文集、Vol. 34A、pp. 817~826、1988. 3.
- 5) 小林治俊、園田恵一郎、上林厚志、中岡健一：落石覆工に作用する衝撃土圧の三次元動弾性論による一検討、落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp. 99~100、1991. 3.
- 6) 中野 修、岸 徳光、松岡健一、後藤雪夫：衝撃荷重測定用ロードセルの試作、土木学会論文集、No.453/VI-17、pp. 155~161、1992. 9.
- 7) 吉田 博、拵谷 浩、鈴木哲次：敷砂上の落石の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、No. 352/III-2、pp. 61~70、1984. 12.

( 1992 年 9 月 21 日受付 )