

敷砂を緩衝材とした場合の重錘加速度と底部伝達力

開発土木研究所 正 員 中 野 修
 室蘭工業大学 正 員 松 岡 健 一
 室蘭工業大学 正 員 岸 徳 光
 開発土木研究所 正 員 金 子 学
 室蘭工業大学 学生員 尾 山 靖 史

1. はじめに

落石覆道の屋根部には、落石衝撃力を緩和する目的で一般に敷砂が用いられている。落石対策便覧によれば、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年まで種々の研究機関で行われている。たとえば、吉田等は砂の種別ごとに對する算定式を求めており、北海道開発局土試では粘土に對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、いずれも重錘重量に最大重錘加速度を乗じて得られた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や軸対称問題と仮定した解析結果によれば、敷砂材のラーム定数が小さい場合には、敷砂底部における伝達衝撃力の振幅が入力荷重の2倍程度になることが明らかになっている。力学的には、真に本構造（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。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によるものかを明確にすることは、これら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。

本論文では、このような観点から、重錘衝撃力と底部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大型実験を行ったのでその結果を報告する。本実験では、4 m 四方の敷砂緩衝工を基礎コンクリート上に設置し、重錘重量 2 tf, 3 tf の二種の重錘を落下高さ 5~30 m に敷砂厚 60~150 cm まで変化させて重錘加速度波形およびロードセル波形を測定し重錘衝撃力、伝達衝撃圧力の分布性状や総伝達衝撃力について他評価式と比較検討を行っている。

2. 実験概要

2.1. 実験方法

写真1に実験の状況を示す。実験は 680 cm × 680 cm × 50 cm のコンクリート剛基礎上に、400 cm × 400 cm の敷砂緩衝工を設置し、その中央部に重量 3 tf または 2 tf の重錘（直径 100 cm、高さ 17.5 cm の球底）を所定の高さより自由落下させることによって行っている。重錘には容量 100 G から 500 G の歪ゲージ型加速度計を数個取り付け、重錘の加速度波形を測定できるようにしている。

図-1に実験の流れ図を示す。図に示すように、敷砂材は各回ごとに敷き厚 20 cm ごとに踏み固めによって転圧し、所定の高さに整地し、重錘落下実験を行っている。また、敷砂材の締固め度を把握するため落下前後においてコーン締固め度試験を、落下前に設置したサンプルより密度、含水比測定を行っている。



写真 1

実験は重量 2, 3 tf の各重錘について、落下高さを 5～30 m の間で変化させ、敷砂材の敷厚を 60, 90, 120, 150 cm として行った。実験ケースの一覧を表-1に示す。

2.2. ロードセル

本実験では衝撃力の算定、評価のために重錘加速度の他、コンクリート剛基礎上への伝達衝撃力を算定するために、剛基礎上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 300 kgf/cm² の衝撃荷重測定用ロードセルで、剛基礎上に一列に最小間隔を 10 cm とし計 25 個埋設している。

ロードセル出力は各設置点における直径 25 mm の円内に作用する荷重として出力されるが、本実験では伝達土圧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た。

2.3. 敷砂材

本実験で用いた敷砂材は、単位体積重量 1.604gf/cm³、比重 2.53、吸水率 2.45 % の石狩当別産である。また図-1に示されているように敷砂材は 20 cm 毎に平均的に踏み固めを行い、所定の敷厚を形成するとともに土の力学的状態を知るために実験前後においてコーン試験による締固め度の測定、実験後におけるサンプル回収における湿潤密度、含水比の測定が行われた。なお、繰返し載荷時には、重錘衝突部を掘り返し、再度前記同様踏み固めを行い、所定の高さに整地している。

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-2に示す。本実験におけるセンサー

表-1 実験ケース一覧

実験ケース (tf)	重錘重量	落下高さ (m)	敷砂厚さ (cm)	実験ケース (tf)	重錘重量	落下高さ (m)	敷砂厚さ (cm)
1-1-1	3	5	60	1-2-1	2	5	60
1-1-2		10	60	1-2-2		10	60
1-1-3		15	60	1-2-3		15	60
1-1-4		20	60	1-2-4		20	60
1-1-5		30	60	1-2-5		30	60
4-1-1	3	5	90	4-2-1	2	5	90
4-1-2		10	90	4-2-2		10	90
4-1-3		15	90	4-2-3		15	90
4-1-4		20	90	4-2-4		20	90
4-1-5		30	90	4-2-5		30	90
2-1-1	3	5	120	2-2-1	2	5	120
2-1-2		10	120	2-2-2		10	120
2-1-3		15	120	2-2-3		15	120
2-1-4		20	120	2-2-4		20	120
2-1-5		30	120	2-2-5		30	120
3-1-1	3	5	150				
3-1-2		10	150				
3-1-2		15	150				

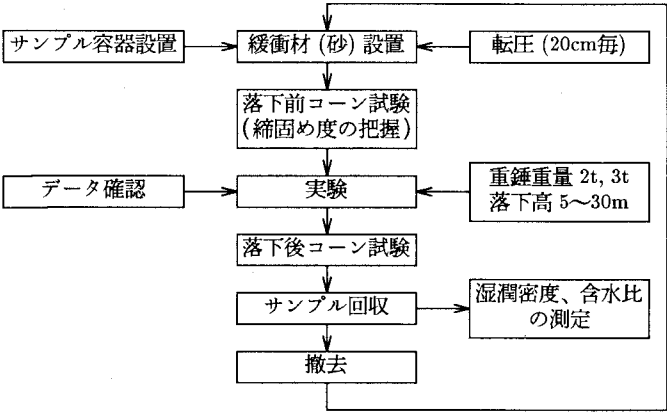


図-1 実験の流れ図

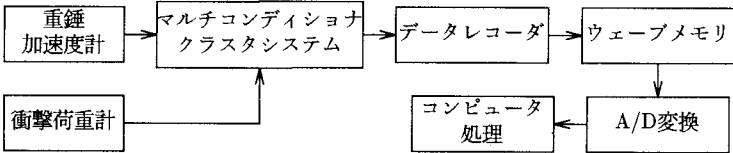


図-2 計測システムのフローチャート

は、重錘に取り付けている歪ゲージ型加速度計および剛基礎上のロードセルである。各センサーからの出力はデータレコーダーに一括収集した後、オフラインでウェブメモリーを用いて設定時間軸に拡大し、A/D変換した後コンピュ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ロードセル波形

図-3に重錘重量 3 tf、落下高さ 30 m、敷厚 60, 90, 120 cm の場合における重錘加速度波形と中央部ロードセル波形を比較して示している。

まず、重錘加速度波形に注目すると敷厚 60 cm の場合には、その概形は単純な正弦半波状を示し、その後同程度の時間に小さな第 2 波の波動が示されている。その第 2 波目の波動は、敷厚の増大とともに徐々に第 1 波目の端部に吸収されるようになり、敷厚 120 cm の場合には 1 波のみの波動となっている。

一方、ロードセル応力波形は、重錘加速度波形とほぼ同様の分布性状を示しており、重錘からの衝撃力がほぼ直接的に伝達されていることがわかる。

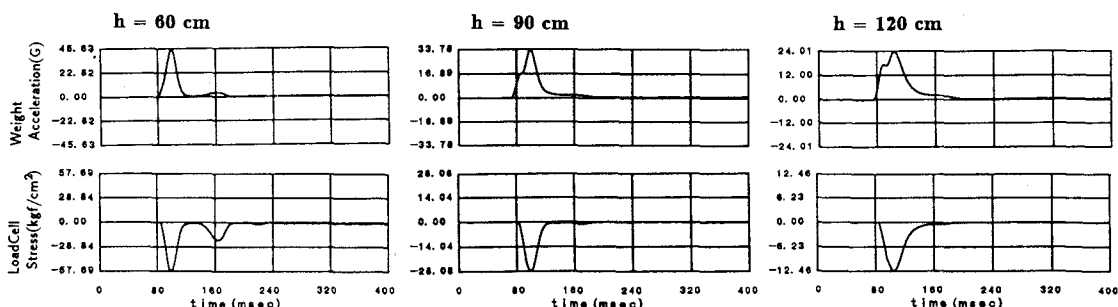


図-3 重錘加速度および中心部ロードセル波形

3.2. ロードセル応力の三次元分布波形

図-4には 3.1 と同様の実験ケースにおける敷砂底部ロードセル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、縦軸は計測時間を示している。

分布図より、敷厚 60 cm の場合には載荷点中央部で 60 kgf/cm^2 前後の応力を示し、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 60~80 cm 程度で重錘半径とそれほど差がなく敷厚 60 cm の場合には、敷差による応力分散効果が少ないことがわかる。

一方、敷厚 90 cm, 120 cm の場合には中心より 100 cm 程度までロードセルが応答しているようである。敷厚 90 cm の場合は中心より 20 cm までが比較的大きい応答 (30 kgf/cm^2) を示し、その後徐々に減少している。敷厚 120 cm の場合には中央部の振幅が 10 kgf/cm^2 前後と減少し、敷厚 90 cm の場合と同様の傾向を示している。

これより、伝達衝撃力は敷厚が増大する場合でもそれほど分散していないことが明らかとなった。また分散領域の評価に関しては、落石対策便覧で示されているように重錘衝撃力は敷砂表面に等分布荷重的ではなく、集中荷重的に作用するとした方が良いものと考えられる。

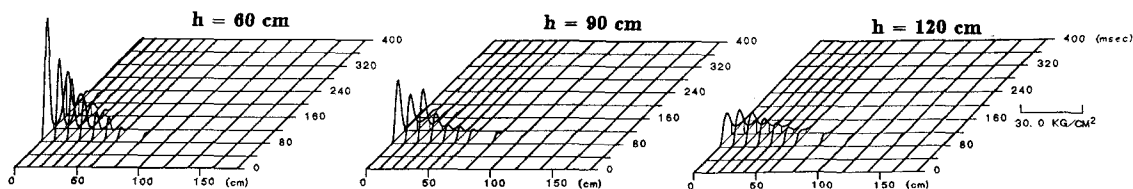


図-4 ロードセル応力分布

3.3. 重錘衝撃力波形と総伝達衝撃力波形の比較

図-5に、前節同様の実験ケースについて、重錘衝撃力波形と総伝達衝撃力波形とを比較して示している。なお、重錘衝撃力は重錘重量に衝突時の重錘加速度(G)を乗じて求めたものであり、総伝達衝撃力はロードセル応力が落下

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評価したものである。図中、実線が重錘衝撃力波形であり、破線が総伝達力波形を示している。

まず各波動に注目すると、いずれの場合も重錘衝撃力波形の方が総伝達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っている。この差は重錘衝撃力が敷砂中を伝搬して基部に到達するまでロードセルが感知できないため生じたものと考えられる。その後両波形はほぼ同時点で最大値に達し、同じような減衰傾向を示して零レベルに到達しているようである。各ケースにおける両者の振幅を比較するといずれも総伝達力の方が重錘衝撃力より大きいことがわかる。最大値を比較すると $h=60\text{ cm}$ の場合は 1.5 倍、 $h=90\text{ cm}$ 、 120 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、敷砂の弾性係数が小さい結果波動伝播速度が遅くなり、周辺への波動伝播よりも基部方向への伝播が卓越するために一次元波動伝播状態に酷似した現象（基部が固定支持の場合には基部応答値が入力荷重の 2 倍の振幅となる）を示したものと考えられる。

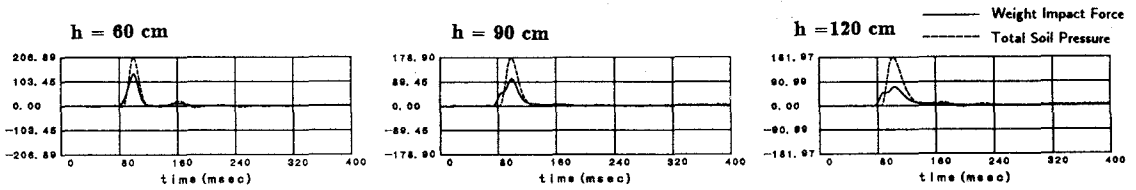


図-5 重錘衝撃力および総伝達力波形

4. 解析結果(2)-最大重錘衝撃力と最大伝達力

4.1. 中心部のロードセル応力

図-6に重錘落下点下のロードセル応力の最大値について衝突速度を横軸にとって整理した。(a)が重錘重量 3 tf の場合で、(b)が 2 tf の場合である。

各直線は応力が線形的に比例すると仮定して得られた回帰直線である。敷厚が 60 cm の場合には、いずれの結果も多少ばらついていようであるが他の敷厚に関する最大応力はほぼ衝突速度に比例して増大しているようである。敷厚 60 cm の場合には敷厚が薄いため重錘の落下姿勢のわずかな誤差が直接的に影響を与えるためと考えられる。

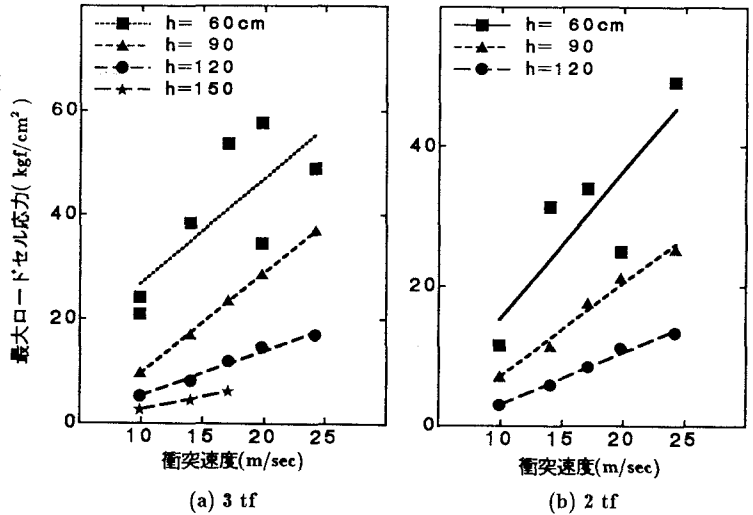


図-6 ロードセル最大応力

4.2. 最大重錘衝撃力

図-7に前記同様最大重錘衝撃力についての結果を振動便覧式や吉田の式（敷砂として碎砂を用いる場合に限定）と比較して示している。なお、振動便覧式および吉田式を明記すると、まず振動便覧式は衝撃力を $P(\text{tf})$ とすると、

$$P = 2.455 \lambda^{2/5} W^{2/3} H^{3/5} \quad (1)$$

である。ここで、 λ :敷砂層のラーメ定数 (tf/m^2) (本文では 100 tf/m^2 を仮定している), W :重錘重量(tf), H :落下高さ(H)である。

一方、吉田式の場合は敷砂として碎砂を仮定すると、

$$P=8.21W^{0.95}H^{0.58} \quad (2)$$

として示される。

実験結果は敷厚 60 cm の場合を含めいずれの場合もロードセル応力同様衝突速度に関し線形に比例して増大しているようである。また敷厚の増大とともに衝撃力も減少していることがわかる。他算定式と比較すると便覧式の結果は敷厚 60 cm の場合の結果よりも大きいようである。

一方、吉田式の場合は碎砂を仮定する場合であるが、敷厚 60 cm の場合と比較的良く一致しているようである。

4.3. 最大総伝達衝撃力

図-8は 4.2 と同様にして最大総伝達衝撃力について整理している。

実験結果は、重錘重量 2 tf、敷厚 60 cm の場合多少ばらついているようであるが、他はほぼ衝突速度に比例して増大している。敷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厚の増加とともに減少する傾向にあるが総伝達衝撃力の場合は敷厚 90 cm から 120 cm の間ではその差が明確に示されないようである。

一方、他衝撃力算定式と比較すると、便覧式は敷厚 90 cm 以上の場合の上限值を与えているようである。吉田式は重錘重量 3 tf、敷厚 150 cm の場合の結果と類似

の分布性状を示しており、敷厚 90 cm を想定する場合は多少過小評価する傾向にあるようである。

4.4. 基準重錘重量に対する衝撃力

本実験で用いた 2tf, 3tf の重錘は、形状寸法が同一である。従って、衝突時の周辺摩擦や底部形状による衝撃吸収効果は、両者まったく等しいものと仮定できる。これまでは各重錘重量に対する検討を行ってきた。ここでは上記仮定の下に、少ない実験データを有効に利用するために、各応答値が重錘重量に比例するものと仮定し全ての実験デー

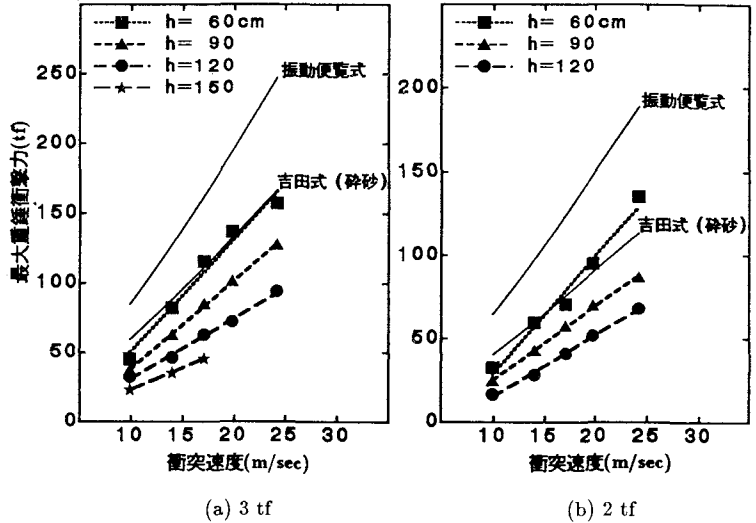


図-7 最大重錘衝撃力

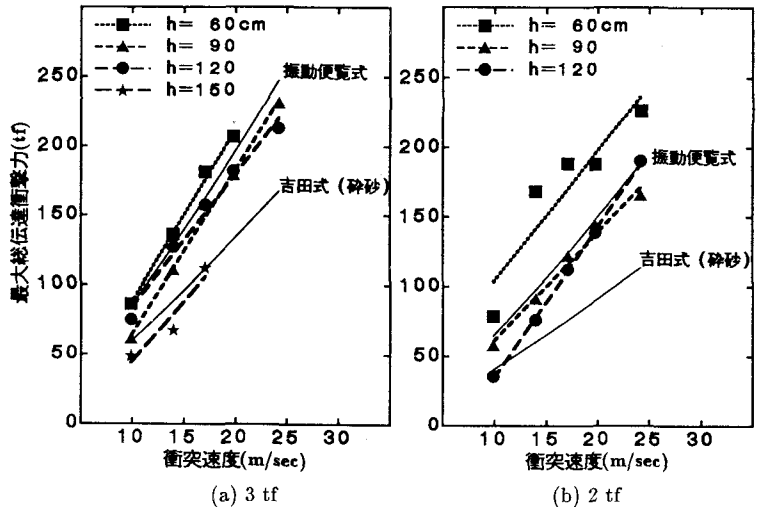


図-8 最大総伝達衝撃力

タを重錘重量 3 tf に基準化し検討を行うこととする。結果を図-9に示す。

図-9の(a)は最大重錘衝撃力と衝突速度に関する実験結果である。

敷厚 60 cm の場合の 1 点を除いて、他は全ての重錘重量 2 tf, 3 tf の結果はほぼ等しい値を示していることがわかる。従って、いずれの敷厚に対しても衝撃力は衝突速度に比例しており、振動便覧式は実験値よりも大きい値を与えること、吉田式（砕砂の場合）は敷厚 60 cm の場合に近い値を与えることが再確認できる。

図-9の(b)は総伝達衝撃力について示している。図より、(a)と同様に敷厚 60 cm の場合はデータのばらつきが大きいこと、それらは敷厚 90 cm, 120 cm の結果から離れていることが分かる。敷厚 90 cm,

120 cm の場合は、(a)の重錘衝撃力の結果よりは収斂性が悪く、20~30 tf 程度の幅を持って分布しているようであり、回帰式は振動便覧式を含め三者類似なものとなっている。一方、吉田式はこれら三回帰式より、過小な値を与えることが分かる。

4. まとめ

緩衝材として敷砂材を用いた場合の重錘衝撃力、および底部総伝達衝撃力を詳細に検討することを目的として、野外大型実験を行った。

本実験で得られた結果を要約すると、

- 1) 伝達衝撃力に関しては敷厚が増大する場合でもそれほど分散が期待できない。分布幅を仮定する場合には落石対策便覧同様、重錘衝撃力を集中荷重と仮定して評価した方がよい。
- 2) 総伝達衝撃力の場合は敷厚 90 cm から 120 cm の間ではその差が明確に示されないようである。
- 3) 便覧式は敷厚 90 cm 以上の場合の総伝達力の上限值を与えている。吉田式（砕砂を仮定）は重錘重量 3 tf, 敷厚 150 cm と比較的良く合うが敷厚 90 cm を想定する場合には多少過小評価の傾向にあるようである。
- 4) 敷厚 90 cm, 120 cm の基準重錘重量に対する総伝達衝撃力の回帰式は振動便覧を含め類似的なものとなっている。また便覧式は重錘衝撃力の立場から判断すると過大な値を与えるようであるが、伝達衝撃力としては妥当な値を与えることが明らかになった。

参考文献

- 1) 岡田憲治, 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, 1979.2.
- 2) 吉田 博, 榎谷 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, 1984.12.
- 3) 吉田 博, 榎谷 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, 1985.10.
- 4) 三上敬司, 能町純雄, 松岡健一: 落石覆工への落石による衝撃力衝撃力に関する評価, 第2回落石の衝撃力及びロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集別冊, pp.1~10, 1986.7.

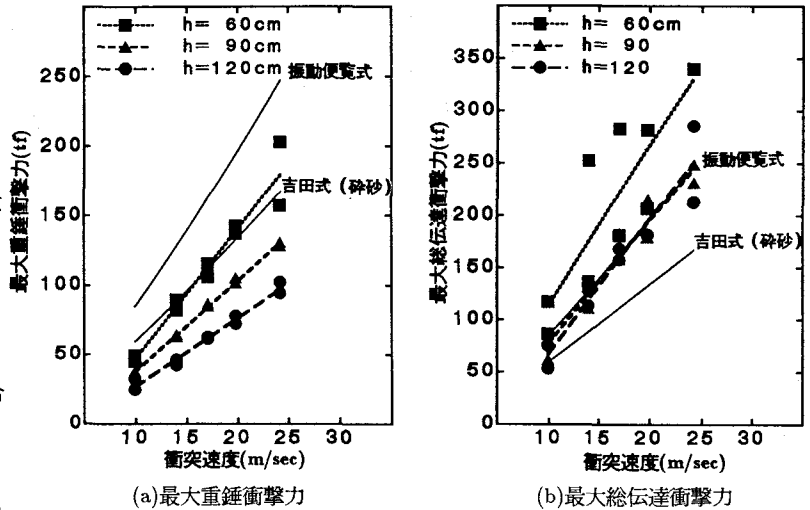


図-9 基準重錘重量に対する衝撃力