

土木研究所資料

第1822号

敷砂上の落石の衝撃力に関する実験 報告書

昭和57年 3 月

建設省土木研究所
動土質研究室

Copyright © 1982 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行なってはならない。

概 要

落石覆工に作用する落石の衝撃力の特性を明らかにするため、敷砂層上の重錘の落下実験を行ない、重錘の形状・寸法・重量敷砂層厚等の影響について明らかにした実験結果を報告したものである。さらに、既往の振動便覧式の意義について再考し、有限砂層厚の影響を考慮する新しいモデルの提案を行なった。

昭和57年3月

動土質研究室長	佐々木	康
主任研究員	古賀	泰之
研究員	舟見	清己
〃	谷口	栄一

目 次

1. まえがき	1
2. 落石の衝撃力に関する従来の研究	3
3. 実験目的	6
4. 実験方法・条件	7
4-1 実験装置	7
4-2 敷砂層材料及び床版	10
4-3 敷砂層の製作方法	11
4-4 実験条件	11
4-5 測定項目・方法	13
5. 実験結果	16
5-1 測定波形及びその整理法	16
5-2 実験結果の再現性	16
5-3 衝撃加速度・衝撃力の測定結果	20
5-4 重錘のめり込み量と砂層の変形	60
5-5 衝撃土圧	73
5-6 床版のひずみ	82
5-7 実験結果のまとめ	84
6. 重錘落下による衝撃問題の理論的考察	85
6-1 振動便覧式の再考	85
6-2 落石形状の影響	86
6-3 有限砂層厚の影響	89
6-4 理論的考察のまとめ	92
7. 結論及び今後の検討課題	95
付 録	96
理論的考察に関する補遺	96
参考文献	109

1. まえがき

山地道路における斜面上方からの落石は、道路交通に重大な影響を与えることがあり、一般的にその対策が要請されている。具体的な対策工としては、本来の原因である落石の恐れのある石等を事前に取り除いたり抑えたりする発生源側での対策と、実際に石等が転落してきたときにそれが道路に与える影響をできる限り軽減・防護するために斜面途中及び道路側で行なう対策とに分けられる。この後者についても、予想される落石の規模等により落石防護柵・壁、落石覆工等いくつかの工法がある。中でも、落石覆工は予想される落石・崩土の規模が大きく、他の工法のみでは道路への影響が避けられそうもない場合に他の工法とも合わせて用いられる本格的な構造物であり、それだけに予想される落石等の大きな荷重に十分耐えるべく設計しなければならない。実際には、落石自体のもつエネルギー乃至は衝撃力は大きなもので、落石覆工を現実的な規模で設計施工するために、衝撃力の緩和と作用荷重の分散を図るため落石覆工上部に砂を敷くことが行なわれている。この場合には、敷砂の重量が死荷重の一部ともなるが、敷砂を介して作用する落石による荷重の算定が必要である。この算定のために提案された理論式、実験式はいくつかあるが、理論上の仮定や実験条件と現実により得られる様々な条件との差異等から、算定式が確立されたものとはなっていない。本報告書は、このような背景の下に、いくつかの単純化された条件で敷砂上の落石の衝撃力がどのように変化するかを実験的に調べ、既往の他の理論や実験結果の検討と合わせて、落石覆工の設計に用いる落石の衝撃力及び敷砂の設計法（特に敷砂厚さ）に関する知見を得ようとした実験解析結果を現時点（57年2月）でとりまとめたものである。なお、この実験の実施にあたっては、㈱建設企画コンサルタンツの齊藤孝夫氏、西幸博氏等の協力を得た。感謝の意を表したい。

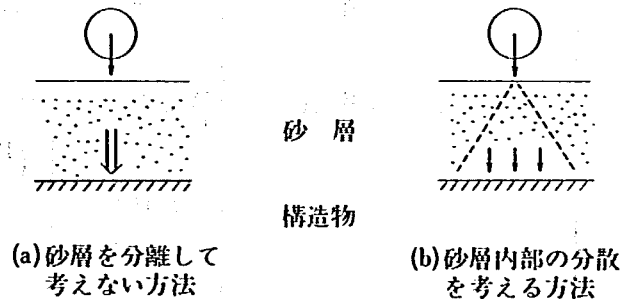
CHAPTER I

The first part of the book is devoted to a general survey of the history of the subject. It begins with a discussion of the early attempts to explain the origin of life, and then proceeds to a more detailed examination of the various theories which have been advanced. The author then turns to a consideration of the evidence which has been accumulated in support of these theories, and finally discusses the present state of the question. The second part of the book is devoted to a more detailed examination of the various theories which have been advanced. The author then turns to a consideration of the evidence which has been accumulated in support of these theories, and finally discusses the present state of the question. The third part of the book is devoted to a more detailed examination of the various theories which have been advanced. The author then turns to a consideration of the evidence which has been accumulated in support of these theories, and finally discusses the present state of the question. The fourth part of the book is devoted to a more detailed examination of the various theories which have been advanced. The author then turns to a consideration of the evidence which has been accumulated in support of these theories, and finally discusses the present state of the question. The fifth part of the book is devoted to a more detailed examination of the various theories which have been advanced. The author then turns to a consideration of the evidence which has been accumulated in support of these theories, and finally discusses the present state of the question. The sixth part of the book is devoted to a more detailed examination of the various theories which have been advanced. The author then turns to a consideration of the evidence which has been accumulated in support of these theories, and finally discusses the present state of the question. The seventh part of the book is devoted to a more detailed examination of the various theories which have been advanced. The author then turns to a consideration of the evidence which has been accumulated in support of these theories, and finally discusses the present state of the question. The eighth part of the book is devoted to a more detailed examination of the various theories which have been advanced. The author then turns to a consideration of the evidence which has been accumulated in support of these theories, and finally discusses the present state of the question. The ninth part of the book is devoted to a more detailed examination of the various theories which have been advanced. The author then turns to a consideration of the evidence which has been accumulated in support of these theories, and finally discusses the present state of the question. The tenth part of the book is devoted to a more detailed examination of the various theories which have been advanced. The author then turns to a consideration of the evidence which has been accumulated in support of these theories, and finally discusses the present state of the question.

2. 落石の衝撃力に関する従来の研究

本章では、落石の衝撃力を算定する上で参考となる従来の研究を総括し、それらの位置づけを行なう。

1. まえがきで述べたとおり、落石覆工に作用する落石の衝撃力という場合には、衝撃力を緩和するための砂層が敷かれていることが前提とされる。したがって、構造物に作用する衝撃力の考え方は、図-2.1に模式的に示すように(a)敷砂による応力分散は考えず、衝撃力の緩和効果だけを考慮して落石条件から衝撃力を求める場合と、(b)落石の衝撃力を砂層表面に作用するものとし、それが砂層中を分散伝播して構造物に作用すると考える場合とがあり得る。したがって、ここで対象とする従来の研究は、砂層表面での落石の衝撃力に関するものと、その表面荷重の砂層内部での伝播分散に関するものとに大別できる。



落石の衝撃力を算定する際に参考となる研究とし、図-2.1 落石による外力と構造物への作用力との関係の考え方(模式図)では、振動便覧の式(土木学会編)¹⁾、鋼材クラブの実験²⁾、吉田らの実験^{3) 4)}、北海道土木試験所の実験⁵⁾、山口らの理論的考察⁶⁾等がある。これらの既往の理論的及び実験的知見及びそれらの前提を明確にするために、共通的な事項を対比させて表-2.1のように整理した。この表及びこれに記さなかった事も含めて、既往の研究から次の事が言える。

衝撃力 P を算定する上で必ず考慮されている因子は、落石の重量 W 及び落下高さ H である。振動便覧式や山口らの理論式では、被衝撃体(砂層)の変形性にも影響される事が表わされている。実用のために振動便覧式では、算定式に含まれた変形特性係数であるラーメの定数 λ に対して次のような値を用いる事を適当としている。

非常に軟かい土に対して $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$

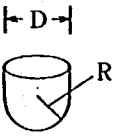
軟かい土に対して $\lambda = 300 \sim 500 \text{ tf/m}^2$

固い土に対して $\lambda = 1000 \text{ tf/m}^2$

実験値を基に導かれた鋼材クラブ、吉田ら、土木試験所の算定式では、上のような土の変形特性の影響は、式中の諸係数中に含まれていると考えられる。衝撃力に寄与する W 、 H の影響度を表わすべき指数について見れば、それぞれ少しずつ異なっている。ここで注意しなければならないのは、これらの理論・実験において、後に見るように落石による衝撃力に影響する因子である落石の形状や砂層を支持する条件等は一定でない事である。これらの因子が最終的な衝撃力にどのように反映するかについては、後に統一的に考察する。

又、これらの研究においては、落石による衝撃力を求める事を第一義としているが、さらに、吉田らや土木試験所、山口らの実験においては、砂層内の土圧の伝播分散性状を測定している。又、山口らは、表面衝撃力により砂層に励起される慣性力を考慮した土圧分布を理論的に求めている。鋼材クラブの実験では、表面衝撃力が砂層内で、 45° に分布するとして、砂層を支えるはりに作用する荷重

表-2.1 落石の衝撃

研究出典	方 法	落 錘 条 件			落 下 条 件	
		材質・形状	寸法(直径D)	重 量 W	落 下 法	落下高H
振動便覧	2弾性体衝突理論	剛球体		W	初速度 v_0 $=\sqrt{2gH}$ 重力加速度を無視	H
鋼材クラブ	室内実験	鉄殼にコンクリート充填底部半球 	40, 60, 72, 80, 90 cm	100, 300, 500, 700, 1000 kg	鉛直自由落下	1~10m
	屋外実験	" 	72, 80, 90	500, 700, 1000 kg	"	3~10m
吉 田 ら	屋外実験	鉄殼にコンクリート充填底部部分球面 	D = 60, 90, 130 cm (R = 30, 45, 65 cm)	0.3, 1.0, 3.0 t	鉛直自由落下	1~13m
北海道開発局土木試験所	現地実験	鋼板重ね 	底面 71 cm × 45 cm 75 cm × 75 cm	1.0, 2.0 t	鉛直自由落下	1~7.5 m
	屋外実験	"	底面 71 cm × 43 cm 75 cm × 75 cm	0.3, 0.5, 1.0 t 2.0 t	"	1~5 m
山 口 ら	1次元弾性棒の縦衝撃波動理論	剛球底			初速度 v_0 の水平衝突	
	室内実験	鉄球(砲丸)	1.23 cm	7.26 kg	鉛直自由落下	0.1~3 m

力に関する従来の研究

敷 砂 条 件			敷砂支持条件	P ~ W, H 関係	敷砂層内の応力分散の取扱いの有無								
材 料	層 厚 h	製 作 法											
半無限弾性体	無限大			$P = 2.455 \lambda^{2/5} W^{2/3} H^{3/5}$	なし								
砂	30 ~ 110cm	砂箱まき (自由落下) 締固め (ローラ)	H形鋼 コンクリート 合成版		45°分布と仮定して床版のたわみを計算								
川砂	50cm	締固め	落石覆工	$P = (4 \sim 8) WH$ (比例定数は落石覆土への) (落下位置による)									
砕砂 海砂 山砂	30 ~ 150cm	締固め	コンクリート 舗装 PC桁	砕砂 $P = 8.21 W^{0.95} H^{0.58}$ 海砂 $P = 22.89 W^{0.99} H^{0.23}$ 山砂 $P = 10.45 W^{0.61} H^{0.61}$ 又は $P = \frac{W}{g} \cdot \frac{2}{T_0} \sqrt{2gH}$ 緩衝材の種類と T_0<table><tr><th>緩衝材</th><th>T_0</th></tr><tr><td>砕 砂</td><td>$0.0102W + 0.0755$</td></tr><tr><td>海 砂</td><td>$0.0051W + 0.0614$</td></tr><tr><td>山 砂</td><td>$0.0220W + 0.0485$</td></tr></table>	緩衝材	T_0	砕 砂	$0.0102W + 0.0755$	海 砂	$0.0051W + 0.0614$	山 砂	$0.0220W + 0.0485$	土圧分布を測定
緩衝材	T_0												
砕 砂	$0.0102W + 0.0755$												
海 砂	$0.0051W + 0.0614$												
山 砂	$0.0220W + 0.0485$												
レキ混り土 粘土混り土	1.55, 2.0m		覆工		土圧分布を測定								
砂 砂質粘性土	0.3 ~ 2.0m		RC床版	砂 $P = 1.141 W^{0.632} H^{0.520}$ $h^{-0.934} E^{0.423}$ 粘性土 $P = 7.391 W^{0.632} H^{0.52}$ $h^{-0.223} E^{0.059}$ E : 土の動弾性係数 砂 $E = 255 q_c^{1.83}$ 粘性土 $E = 200 w^{0.369} q_c^{2.04}$ w : 含水比 q_c : コーン支持力	Frohlichの応力集中係数を考慮した土圧分布を提案								
1次元弾性棒	無限大			簡単な式では表わせない。 P ~ めり込み量の関数 めり込み量 ~ t の関数 (数値積分による)	地盤慣性力も考慮した 応力分散の理論式を誘導								
乾燥砂	30 ~ 60cm	ゆる詰め 密詰め	コンクリート 床		土圧分布を測定								

を求めはりのたわみを計算すると、実測されたたわみとよく一致する事が示されている。

静的な表面載荷重下の地盤内土圧分布については、Boussinesqらの弾性解があるが、それを地盤中の実状に合うように応力集中係数を導入したFrohlichの式や、近似的に応力分散則を用いるStroh-schneiderやKoglerの解がある⁷⁾。それら以外に、荷重が衝撃的である事により、地盤内に慣性力が生ずる事を考慮した場合に参考となるものとして、地表面に周期加振される場合の圧力球根を求めた伯野らの研究⁸⁾がある。

3. 実験目的

今回（56年度）実施した敷砂上の落石の衝撃力に関する実験目的は次のとおりである。

- (1) 敷砂上の落石の衝撃力に及ぼす落石寸法・形状・重量，落下高，敷砂厚等の諸因子の影響度を実験的に調べ，既往のデータ・理論式の適用範囲を明らかにすること。
- (2) 落石の衝撃力の下部への伝播・緩和機構を敷砂の変形や土圧分布観測により検討し，(1)と合わせて，落石衝撃力緩和のための敷砂層厚の合理的算定法を立てること。

4. 実験方法・条件

4-1 実験装置

(1) 土 槽

実験は、土木研究所内材料構造実験棟内に鋼製枠を設け敷砂層を製作し行なった。使用した鋼製枠の内寸法は大略 $240\text{ cm} \times 240\text{ cm} \times 180\text{ cm}$ (平面 $\times$ 高さ) であり、底板はなく、砂層の製作・撤去が容易なるように前面の一部が $100\text{ cm} \times 133\text{ cm}$ (巾 $\times$ 高さ) にわたって上下にスライド取外し可能なようになっている。枠の詳細な寸法・形状は図-4.1に示すとおりである。

(2) 重 錘

落石を模した重錘は、表-4.1、図-4.2に示したような寸法・形状・材質の通りとした。すなわ

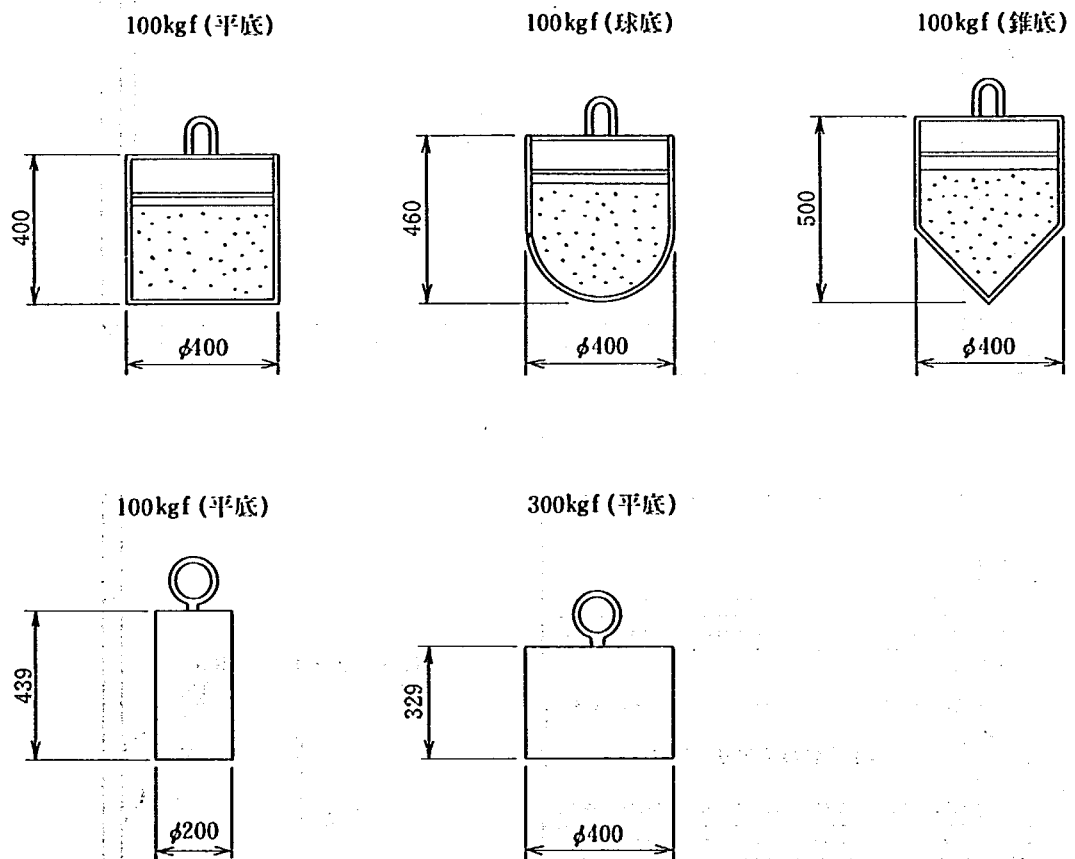


図-4.2 重錘寸法形状図

表-4.1 重錘寸法形状表

公称重量W (kgf)	実重量W ₀ (kgf)	底 面 形 状	直 径 (cm)	備 考
100	94	平 底	40	
300	284	平 底	40	
100	91	平 底	20	
100	99	球 底	40	
100	91	錐 底	40	

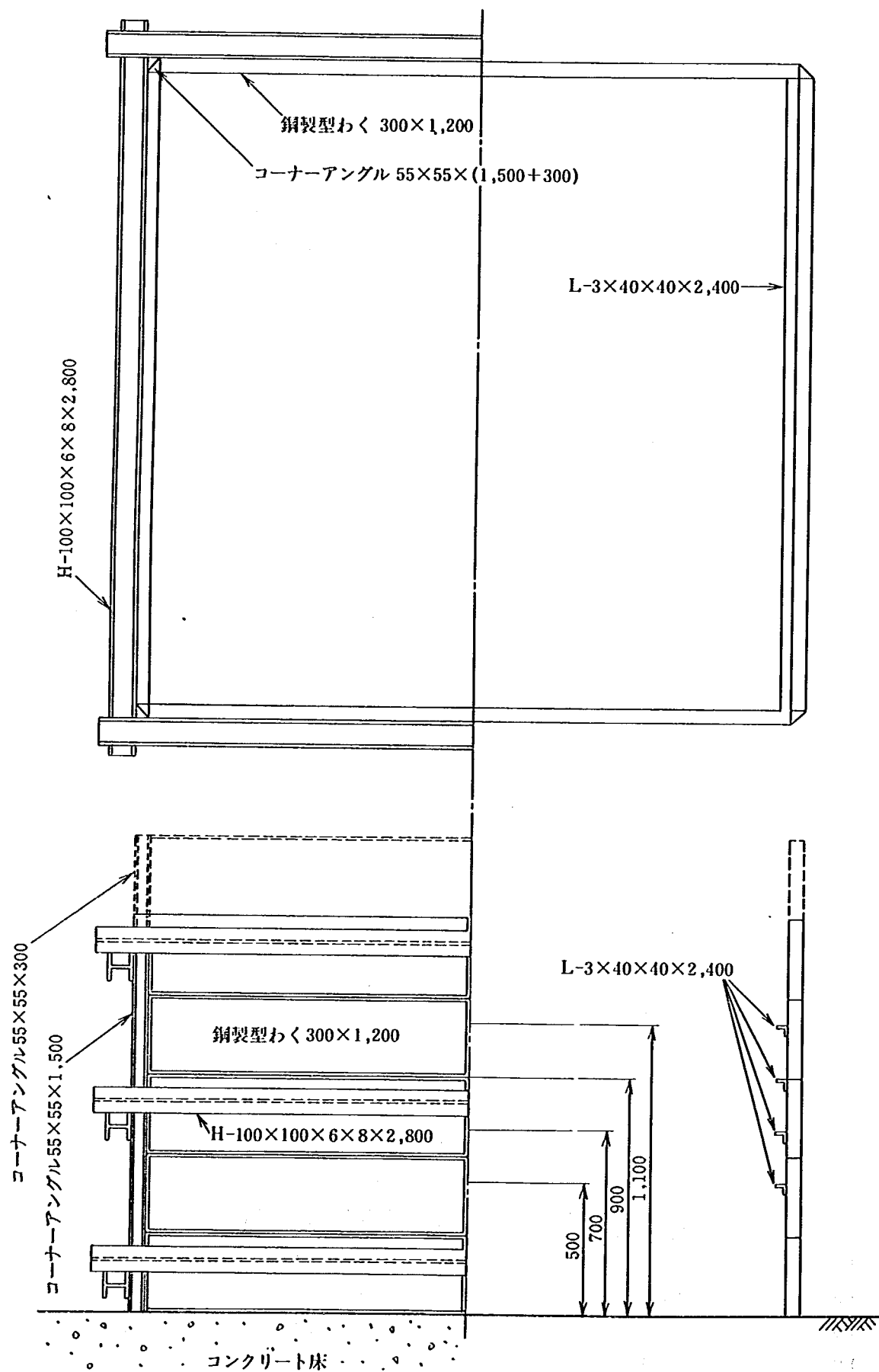


図-4.1 実験土槽

(3) 重錘落下裝置

Technical drawing of a mechanical part, likely a bracket or support, showing dimensions and geometry.

Main View Dimensions:

- Total width: 400
- Total height: 425
- Top horizontal section thickness: 125
- Left arm radius: $r=75$, angle: $\theta=45^\circ$
- Right arm radius: $r=25$, angle: $\theta=135^\circ$
- Central vertical section width: 50, thickness: 15
- Horizontal section at bottom width: 50, thickness: 10
- Label: シヤックル (Shackle)

Detail View:

- Width: 450

なお、実験装置の全体を写真-4.2に示す。

- 9 -

4-2 敷砂層材料及び床版

(1) 敷砂層材料

敷砂層に用いた材料は、千葉県浅間山から採取した山砂であり、その特性の主なものを表-4.2、図-4.4に示す。

表-4.2 砂の特性

比重 G_s	10%粒径 D_{10} (mm)	60%粒径 D_{60} (mm)	均等係数 U_c	曲率係数 U_c
2.71	0.18	0.40	2.22	0.035

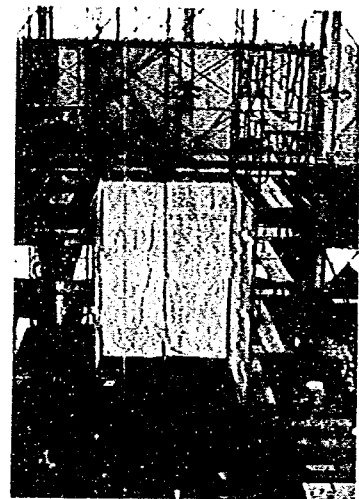


写真-4.2

(2) 床版

従来 of 理論解で扱っている被衝突体は半無限の広がり と無限大の質量を有している事を考慮して、実験棟のコンクリート床 (厚

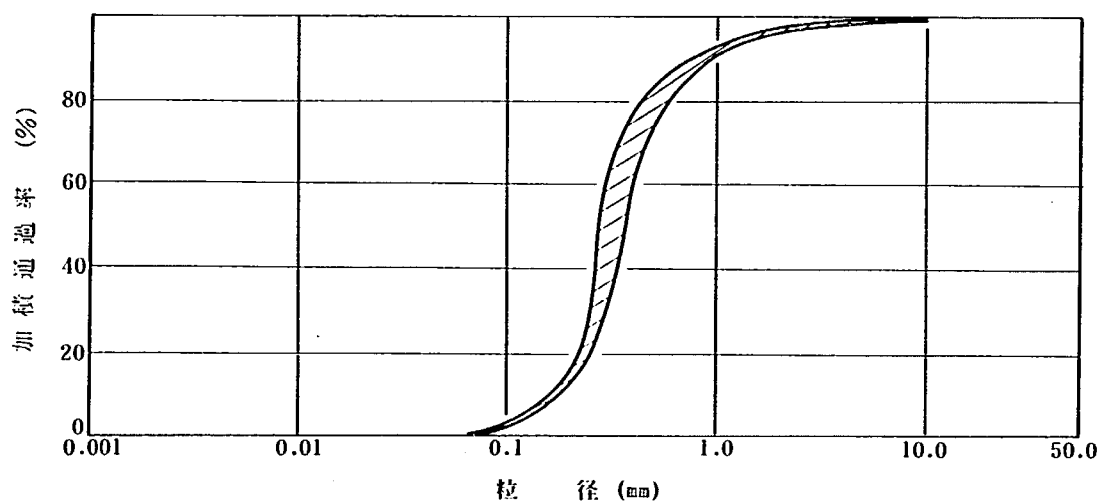


図-4.4 砂 の 特 性

さ 1.5 m で十分大きな厚さを有していると考えられる) を変形による衝撃力吸収能力のない被衝突体

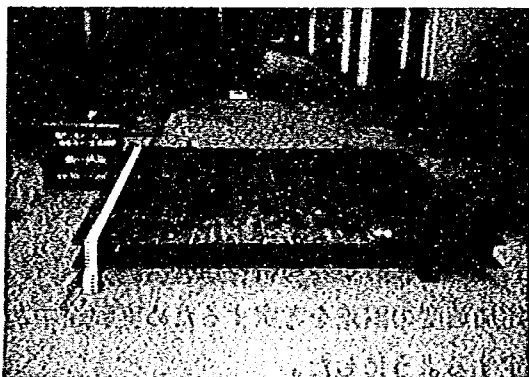


写真-4.3(a)

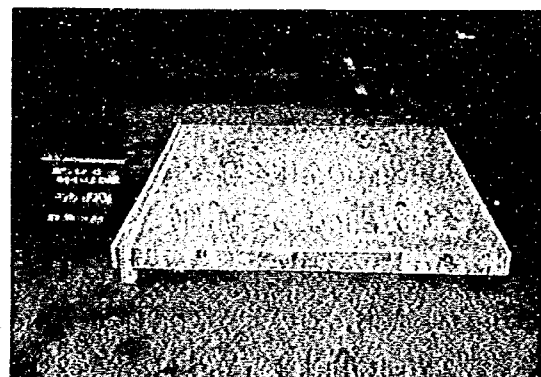


写真-4.3(b)

とし、この上に緩衝材としての砂を敷いて実験を行なった。

又、この内に現実の落石覆土に近い条件として、床版が衝撃力によってたわみを生じ得る場合を想定し、砂層が床版上に敷かれた場合についても実験を行なった。用いた床版は、コンクリート製、鋼製であり、寸法・形状は図-4.5に示すようなものであり、写真-4.3にも示す。

4-3 敷砂層の製作方法

敷砂層の製作方法は、3つに大別される。実験分類については、4-4実験条件において詳述する。

- 1) 予備実験の場合 一旦 50cm 厚の砂層を 20cm 厚ずつ足踏みにより製作した後は、一つの重錘落下ごとに、その影響範囲と想定された周囲 30cm、深さ 20cm 程度の範囲をシャベルでほぐし再度足踏みで整地した。
- 2) 実験 1 の場合 (砂層内部変形測定せず) 20cm 厚ずつ、最後の表面は 10cm 厚で、足踏みにより締固めた。重錘落下ごとに、厚さ 50cm 以上の場合、それを越える部分は土槽外に排土し、残る部分については、シャベルでほぐし、部分的に 20cm 厚程ずつ、足踏みにより整地した。
- 3) 実験 2, 3 の場合 (砂層内部変形測定) 10cm 厚ずつ、変形測定のためのアルミフォイルを敷きながら、足踏みにより締固めた。この場合は、重錘落下ごとに、上述のアルミフォイルが層状に見えるように、砂層を切出し観察・写真撮映を行なった後に、アルミフォイル上の砂層を順に掘出し、フォイル面の沈下を測定し、最終時には、砂層のほぼ全体を排土し、再び先と同様の方法で砂層を製作した。

4-4 実験条件

実施した実験条件は、以下に述べる本実験 3 種とそれに先立つ予備実験 1 種とに分けられる。

- (1) 予備実験：敷砂層は毎回一定の製作法をとるようにしたが、そのような方法をとったときに実験結果にどの程度の再現性が保持されるかを明らかにする実験、又、この実験時に敷砂層の変形性状を測定するために用いる材料の選定及び土圧測定のための土圧計埋設法の検討を合わせて行なった。
- (2) 実験 1：敷砂層をコンクリート床上に直接作った場合に、重錘の落下衝撃が重錘の寸法・形状・重量とともにどのように異なるかを調べる実験。
- (3) 実験 2：敷砂層をコンクリート床上に直接作った場合に、重錘の落下に伴う砂層の変形性状及び砂層底面での土圧散性状を調べる実験。
- (4) 実験 3：敷砂層を床版上に作った場合に、重錘の落下衝撃が(1)(2)の場合とどのように異なるか、又、土圧分散性状及び床版の変形性状を調べる実験。

各実験系列の実験条件の概要は表-4.3のとおりである。この表にまとめたもの以外に、次のようなものも実施した。

- 1) 実験 1 の一環として、パイプランマーで砂層を密に締固めた場合で、落下高を 0.5, 1, 2 m と低くした場合の実験を行なった。これは、砂層の強度・剛性を高め、衝撃力を小さくすることにより砂層が弾性的な挙動にどの程度近づくかを検討したものである。
- 2) 実験 2 の一環として、締固めをしないゆるい砂層を作り、その場合の土圧分布性状を調べる実験を実施した。又、砂層表面を静的に載荷する実験も行なった。これは、一般に正確な測定が難

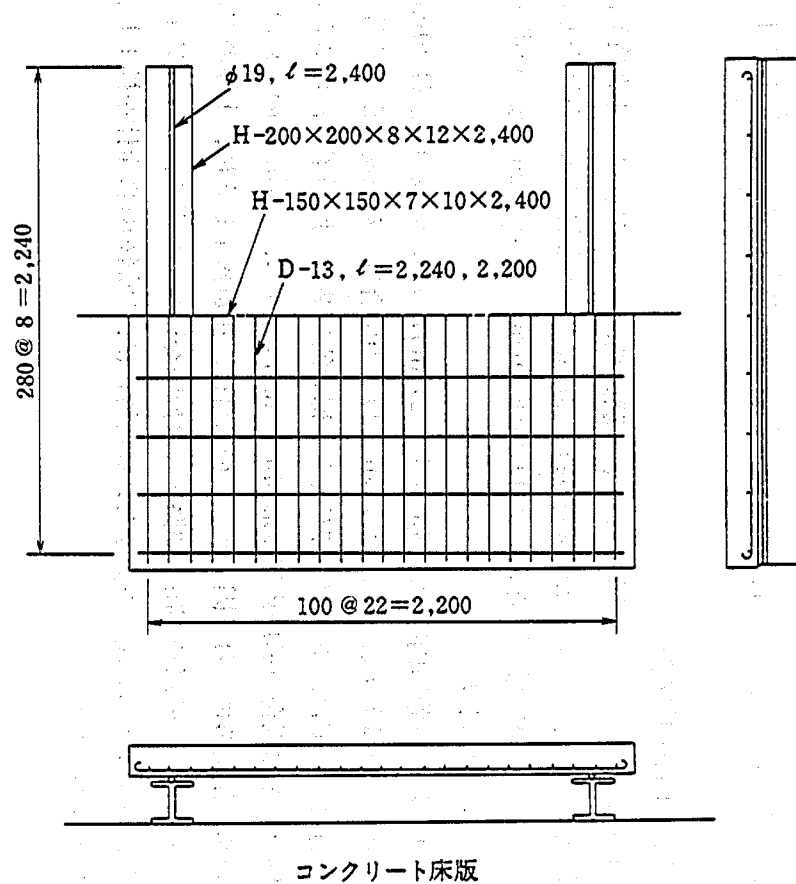
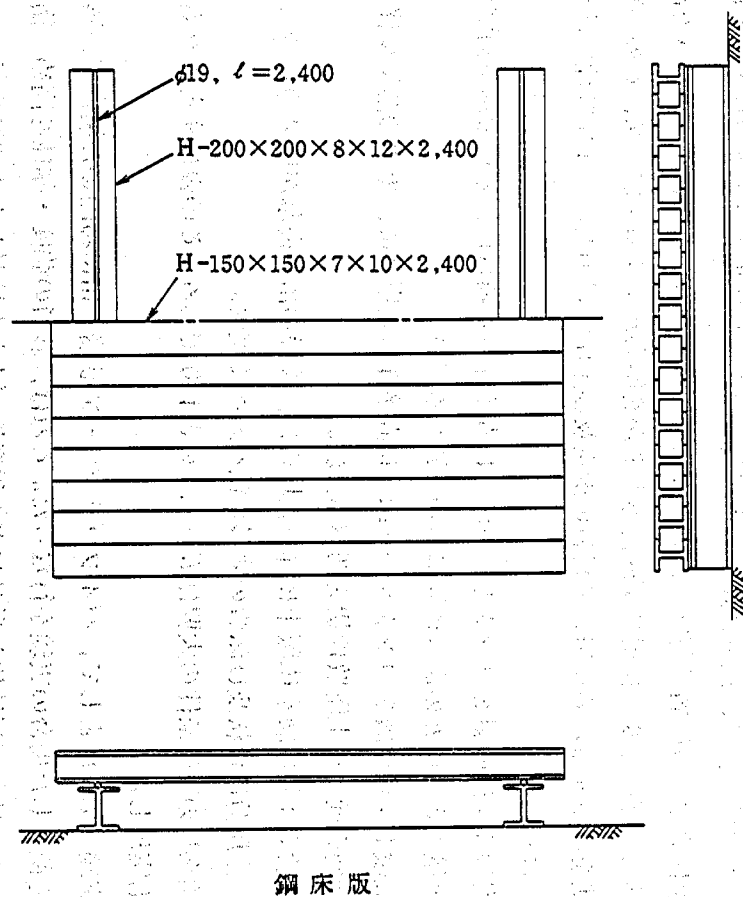


図-4.5 床版寸法形状図

表-4.3 実験条件一覧

実験 タイプ	重 錘 タ イ プ			落下高 H (m)	砂 厚 h (cm)	支持条件	砂 層 製作方法	測定項目
	公称重量W(kgf)	形状(円)	直径D (cm)					
予備	100	円柱(平)	40	4, 8	50	コンクリート床		衝撃加速度 表面めり込み量
1	100	円柱(平)	40	2~8	30~90	コンクリート床	20cm 毎足踏み	衝撃加速度 表面めり込み量
	300	"	"	"	30~110			
	100	"	20	"	30~70			
	100	円柱(球)	40	"	30~50			
	100	円柱(錐)	"	"	"			
2	100	円柱(平)	40	2~8	30~70	コンクリート床	10cm 毎足踏み	衝撃加速度 表面めり込み量 砂層変形 砂層底面土圧
	100	円柱(球)	"	8	"			
	100	円柱(錐)	"	"	"			
3	100	円柱(平)	40	4, 8	30~70	鋼 版	10cm	衝撃加速度, 表面 めり込み量, 砂層 変形, 砂層底面土 圧, 床版・支承電
	100	"	"	"	"	コンクリート版	毎足踏み	

かしいと言われる土圧計による土圧測定が静的な载荷状態でどのように行なわれているかを調べたものである。

3) 実験3に用いた床版だけについて、静的な载荷試験を行ない床版の変形特性を調べた。

4-5 測定項目・方法

各実験系列において測定した項目は次のようである。

(1) 予備実験及び実験1

- ・重錘の加速度：鉛直加速度，一部を除いては2水平成分も加えて計3成分。
- ・敷砂層の表面沈下（重錘のめり込み量）

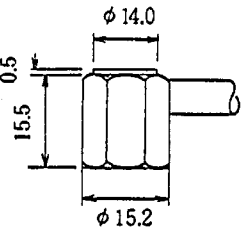
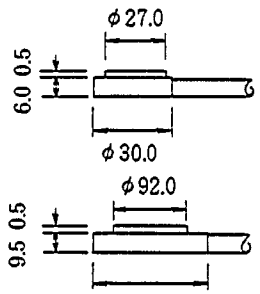
(2) 実験2

- ・重錘の加速度
- ・敷砂層の表面沈下（重錘のめり込み量）
- ・敷砂層の層別変形
- ・敷砂層底部での土圧

(3) 実験3

- ・重錘の加速度
- ・敷砂層の表面沈下（重錘のめり込み量）
- ・敷砂層の層別変形
- ・敷砂層底部（床版上部）での土圧

表-4.4 計測機器一覧

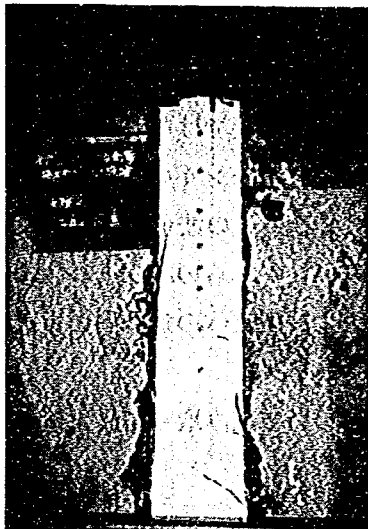
	検出器			増幅器		記録器	
	型 式	製作・型番	容量・寸法(mm)	型 式	製作・型番	型 式	製作・型番
重錘加速度	ひずみゲージ式 加速度計 鉛直成分 200 G 水平成分 100 G	(共和) AS-200A (") AS-100A	 周波数範囲 0 ~ 1200HZ	動ひずみ測定器	(共和) DPM-220 A 応答周波数範囲 0 ~ 2 KHZ	電磁オシログラフ	(三栄) FR-301 周波数範囲 DC~70~1600HZ
土 圧	ひずみゲージ式 小型土圧計 5 kgf/cm ² 10kgf/cm ²	(共和) BE-5KC (共和) BE-10KA	 周波数範囲 0 ~ 2 KHZ			アナログ式 データレコーダ	(TEAC) R280 (TEAC) R270A (共和) RTP-160A
ひ ず み	ひずみゲージ 箔フェステルゲージ	(共和) KFC-20 (共和) KFC-5	抵抗値 120Ω ゲージ長 20mm グリッド幅 5mm 抵抗値 120Ω ゲージ長 5mm グリッド幅 2mm				
砂 層 変 位	アルミファイル		幅 20cm				

- ・床版のひずみ
- ・床版支承のひずみ

上述した測定項目の測定方法及び使用機器は表－4.4 のようである。電氣的に測定される重錘加速度・土圧・ひずみは、すべてデータレコーダにより磁気テープに記録し、実験後に電磁オシログラフに再生記録した。一部の測定項目については、実験中（重錘落下時）にも、電磁オシログラフによりモニター出力した。なお、電磁オシログラフに用いたガルバノメータは、固有振動数 370 H Z のものであり、今回のような早い現象の記録に対しても問題はないと考えられる。

土圧計については、予備実験の結果から、どちらの型を用いた場合にも、周囲 20 cm 半径内位を土圧型の受圧面高さまで石コウを溶かしたもので固め（写真－4.4）応力集中を軽減し、又、均一な測定結果を得る事ができるという見通しを得た。

砂層の層別変位は、砂層製作段階で幅 20 cm のアルミフォイルを敷き、その時点の位置を土槽枠の上端を基準として測定し、又、重錘落下後に砂層を慎重に掘出し、やはり土槽上端からの距離を測定し、沈下量を測定した（写真 4.5）。



写真－4.4



写真－4.5

5. 実験結果

実験条件は既に4-2で述べたとおり、予備実験及び実験-1, 2, 3に分かれ、それぞれは少しずつ異なった目的を有している。しかし、特定の測定項目、具体的には重錘の衝撃加速度及び敷砂表面沈下量等は、すべての実験において測定されており、すべての実験結果を合わせて比較考察すべきものである。したがって、以下の記述では、実験条件ごとに結果を説明するのではなく、実験条件全体にわたって得られる知見・考察ごとに説明を行なうことにする。なお以下の記述において、重錘の重量は実重量でなく公称重量によって呼ぶ。

5-1 測定波形及びその整理法

測定した重錘の加速度記録は、一般に短い立上り部分と一つの高いピークの後の単調減衰部分とからなり、振動的な性状は一般には少ない。しかし、実験ごとに細かく見てゆくと波形のパターンはいくつかのものがあ、それらは重錘条件と関係があるようである。図-5.1は、これらのいくつかのパターンを現時点で4つに分類してみたものである。重錘の形状が円柱平底で直径40 cm, $W = 100$ kgf のときには特に立上りの短いパターン1である。重錘重量が $W = 300$ kgf と増加するとパターン3のように立上りがやや長く、一つの高いピークの後に単調な減衰ではなく、振動的な部分がある。重錘重量が $W = 100$ kgf であっても直径が20 cmのときは、パターン4のようになる。 $W = 100$ kgf の球底・錘底の場合にも立上りは長いパターン2又は3になる。この波形の特徴は、砂層密度が異なるとやや変化する。又、砂層支持が床版に変わっても変わらない。これらのパターンは、重錘の形状・寸法に伴う砂層との間の見かけの剛性の違い、重錘の重量と被衝突体の敷砂層の重量の比率等の動力学的特性を反映したものであろう。

以下の実験結果の整理では、上述した波形の第1のピークについて読み取って最大値を求めた。

5-2 実験結果の再現性

ここでいう実験結果の再現性は、主として4-3のような方法で製作した砂層上に同一の重錘を、一定の高さから一定の方法で落下させたときの衝撃及びめりこみ量がどの程度の範囲にあるかによって検討した。又、落下時の重錘の傾きも目視によって観察した。

(1) 実験結果の再現性

落下時の重錘の傾きは定量的に測定したものではないが、かなり傾いて落下する場合もあった。この傾きが大きい場合には、鉛直加速度も他の場合と比べて小さく、測定結果は参考値に留めた。

(2) 予備実験における重錘加速度及び砂層めり込み量

予備実験は表-4.3に示したように、直径40 cm, 公称重量100 kgf の円柱平底の重錘を、敷砂層厚 $h = 50$ cmの砂層上に高さ $H = 4, 8$ mから繰返し落下させたものである。砂層は重錘を1回落下させる毎に重錘の落下中心付近の上部30 cm程度を土槽外に搬出し再度足踏みによる整地を行ない製作したものである。この際、地盤の密度測定は行なっていない。

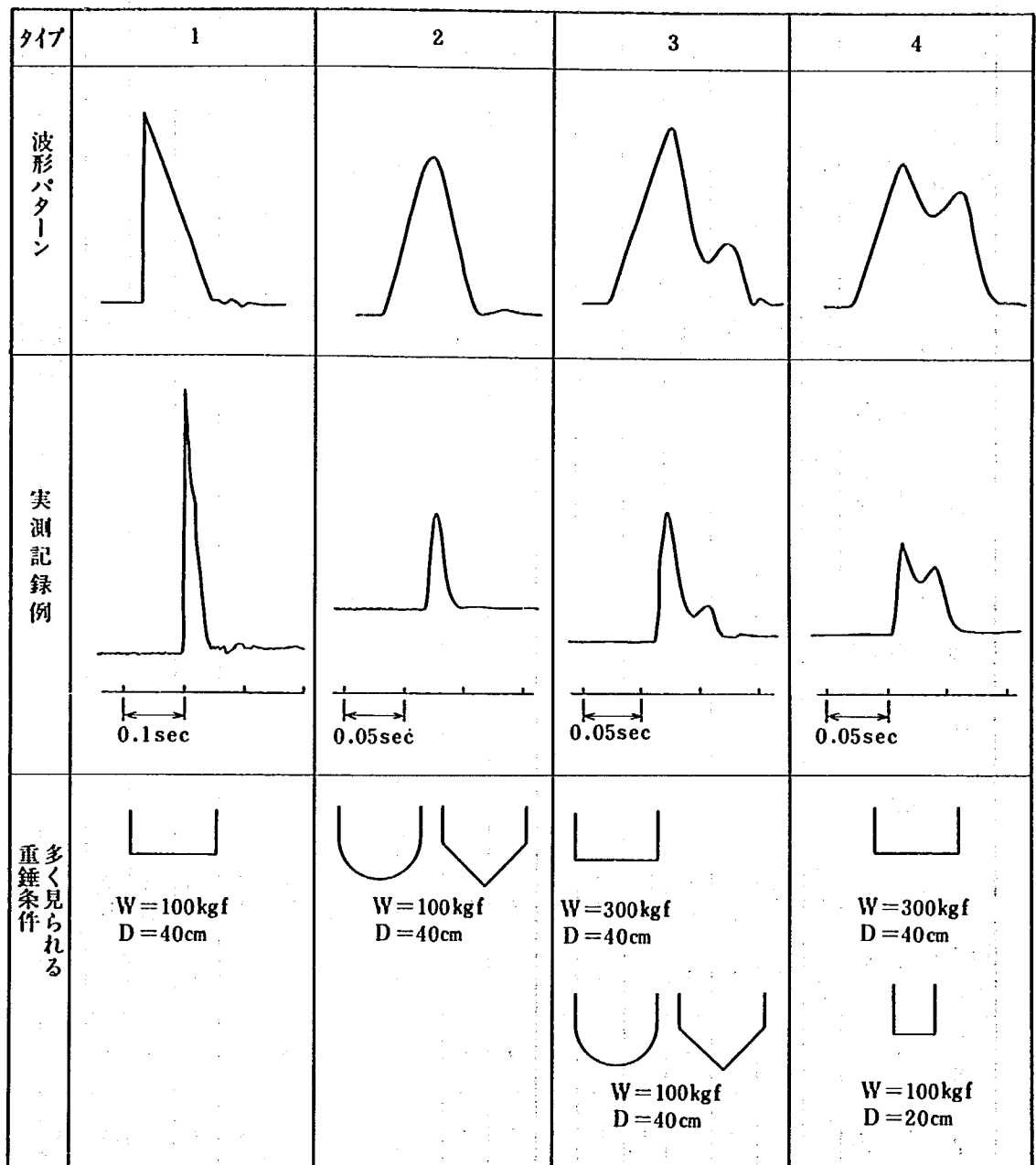


図-5.1 実測加速度波形パターン

実測した加速度 $\alpha_{\max}$ 及びめり込み量 $\delta_{\max}$ の結果は、表-5.1、図-5.2のようであり、一様に製作した砂層においても、若干のばらつきがある。このばらつきを、変動係数で評価すると、落下高 $H=8\text{m}$ のとき加速度について0.053、めり込み量について0.062 $H=4\text{m}$ のとき加速度について0.11、めり込み量について0.24 でばらつきは比較的小さいと見られる。又、図-5.3のように、加速度とめり込み量とを対比すると、両者の間には、相互に反比例的な関係がある事が分る。

表-5.1 予備実験結果一覧

実験 No.	ケース No.	重 錘 タ イ プ				砂厚 h (cm)	落下高 H (m)	初 期 エ ネ ル ギ $W_0 \cdot H$ (tf·m)	衝 撃 加 速 度							衝 撃 力		砂層平均 単位 体積重量 γ_d (gf/cm ³)	最大めり 込 み 量 δ (cm)	H/δ
		重量 W (kgf)	実重量 W_0 (kgf)	底面 形状	直径 D (cm)				α_z (G)	静止 時間 (sec)	α_x (G)	時間 差 (sec)	α_y (G)	時間 差 (sec)	合成 α (G)	P_z (tf)	P_α (tf)			
1	1-1	100	94	平底	40	50	4	0.376	69.20							6.505			3.2	125
2	1-2	"	"	"	"	"	"	"	63.20							5.941			5.2	77
3	1-3	"	"	"	"	"	"	"	65.40							6.148			4.2	95
4	1-4	"	"	"	"	"	"	"	59.00							5.546			5.7	70
5	1-5	"	"	"	"	"	"	"	60.70							5.706			5.0	80
6	1-6	"	"	"	"	"	"	"	61.70							5.800			4.4	91
7	1-7	"	"	"	"	"	"	"	69.80							6.561			4.5	89
8	1-8	"	"	"	"	"	"	"	53.20							5.001			6.4	63
9	1-9	"	"	"	"	"	"	"	55.70							5.236			6.5	62
10	1-10	"	"	"	"	"	"	"	49.70							4.672			7.3	55
11	1-11	"	"	"	"	"	8	0.752	89.70							8.432			8.7	92
12	1-12	"	"	"	"	"	"	"	84.50							7.943			8.5	94
13	1-13	"	"	"	"	"	"	"	82.40							7.746			8.3	96
14	1-14	"	"	"	"	"	"	"	88.40							8.310			9.3	86
15	1-15	"	"	"	"	"	"	"	85.20							8.009			8.8	91
16	1-16	"	"	"	"	"	"	"	90.30							8.488			8.4	95
17	1-17	"	"	"	"	"	"	"	77.60							7.294			9.4	85
18	1-18	"	"	"	"	"	"	"	94.40							8.874			7.5	107
19	1-19	"	"	"	"	"	"	"	87.00							8.178			8.5	94
20	1-20	"	"	"	"	"	"	"	86.90							8.169			8.6	93

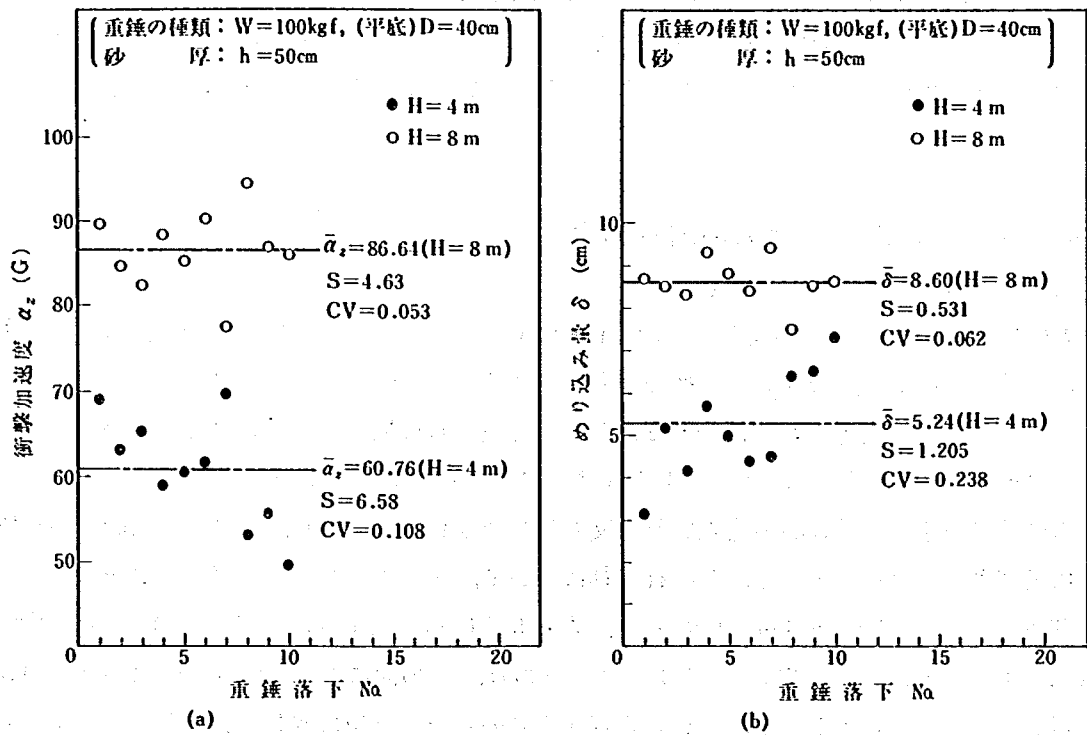


図-5.2 予備実験の衝撃加速およびめり込み量

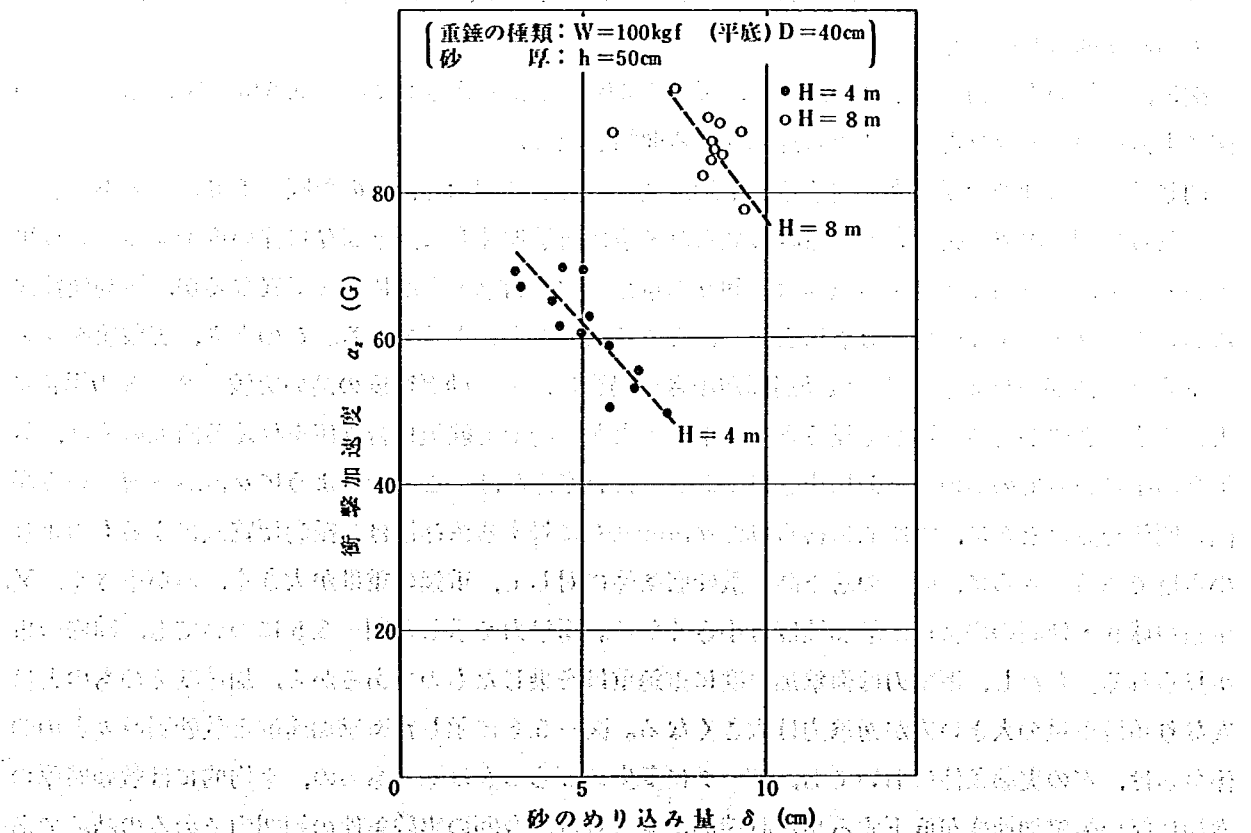


図-5.3 予備実験の衝撃加速およびめり込み量

すなわち、めり込み量が大きいと、加速度は小さく、めり込み量が小さいときは、加速度が大きい。このような関係は、6.に後述する弾性理論からも推測される。

上述した事から見て、以後に述べる諸条件での実験においても、個々の実測値は実験ごとに砂層製作上のばらつきの影響をある程度反映したものとなっているが、その影響は比較的小さいと考えられる。

5-3 衝撃加速度・衝撃力の測定結果

(1) 衝撃加速度と衝撃力の実測結果

重錘の衝撃力は、重錘の衝撃加速度を重錘重量に乗じて求められる。今回の実験では、重錘の重量・形状・寸法、落下高、敷砂層厚、敷砂層密度、敷砂支持条件を変えて実験を行なった。各実験ケースごとの実験条件、測定した重錘加速度、めり込み量、敷砂層密度等、計算した衝撃力、落下高～めり込み量比 $H/\delta_{\max}$ 等の結果を一覧にしてまとめたものが表-5.2である。

これらの結果をまず、敷砂層の盛立層厚を反映して密度範囲がほぼ明確に分れ、敷砂層の支持条件も明瞭に区別される実験-1, 2, 3それぞれについて、個々の重錘ごとの実験結果として、衝撃加速度と落下高の関係を図-5.4(a)-(i)に示す。表-5.2に示したように、実験1の、円柱平底 $W=100\text{ kgf}$ 、 $D=40\text{ cm}$ については、鉛直加速度成分のみ、その他についてはさらに水平2方向成分を加えて測定した。表-5.2中には、それら3方向成分のピーク値を合成して計算した値も記入した。しかし、鉛直及び水平方向の加速度のピークとは、時間差があり同時刻に生じたものとは考えられないため、ここでは鉛直方向加速度のみを図示した。又、図中には参考のために、振動便覧式により計算される曲線をパラメータ λ （砂層のラーメの定数）を変えて、又、吉田の式（山砂の場合）により与えられる曲線を図示した。

次に、重錘の衝撃力と落下高の関係を、図-5.4(a)-(i)に対応させて図-5.5(a)-(i)に示す。この図にも振動便覧式及び吉田の式から計算される曲線を記した。

同じ結果を敷砂層の厚さ h に対する衝撃加速度・力として図示したものが図-5.6, 7である。

これらの図の中で、図-5.4から直接見られる事は衝撃加速度は落下高 H に伴い増加するという事である。又、落下高 H に対する傾向は、個々の重錘、敷砂層厚・密度によって異なるが、振動便覧式においてパラメータ λ を変える事によって得られるものと近いようである。このとき、実験値をフィットさせる曲線を与える λ は、敷砂層厚が小さい場合に、又、砂層密度の高い実験-2, 3の場合に大きくする必要がある。細かく見ると、落下高の大きい所で実験値に合う値を与える曲線の λ は、落下高の小さい所でのもより λ は小さ目である。言い換えれば、この図のように $\alpha_{\max} \sim H$ という局面の関係を見たときに、実験的に得られた $\alpha_{\max}$ の H に対する依存性は、振動便覧式によるものより小さ目である。さらに、同一の落下高、敷砂層条件に対して、重錘の重量が大きく、径が小さく、又、重錘が球底・錘底の場合に衝撃加速度は小さくなる。衝撃力を示した図-5.5についても、同様の事が見られる。ただし、衝撃力は衝撃加速度に重錘重量を乗じたものであるから、加速度そのものとは異なり重錘重量の大きい方が衝撃力は大きくなる。図-5.6に示した衝撃加速度と敷砂層厚 h との関係からは、どの実験条件においても、データに多少のばらつきはあるものの、平均的には敷砂層厚の増加に伴い衝撃加速度が低下する事が直接的に見られる。今回の実験条件の範囲内でのみの結論であるが、敷砂層厚のこのような影響は、薄い所程著しく、敷砂層厚 h が90～100 cm程度以上になると

表-5.2 実験結果一覧表(a) (実験1)

実験 No.	ケース No.	重 錘 タ イ プ				砂層 h (cm)	落下高 H (m)	初 期 エネルギー $W_0 \cdot H$ (tf·m)	衝 撃 加 速 度							衝 撃 力		砂層平均 単位 体積重量 γ_d (gf/cm ³)	最大めり 込み量 δ (cm)	H/δ
		重量 W (kgf)	実重量 W_0 (kgf)	底面 形状	直径 D (cm)				α_x (G)	静止 時間 (sec)	α_x (G)	時間 差 (sec)	α_y (G)	時間 差 (sec)	合成 α (G)	P_x (tf)	P_y (tf)			
1	1-13	100	94	平底	40	30	2	0.188	51.26	0.055						4.818		1.520	2.5	80
2	1-14	"	"	"	"	"	4	0.376	61.84	0.060						5.813		1.502	3.7	108
3	1-15	"	"	"	"	"	6	0.564	158.18	0.050						14.869		1.520	3.5	171
	1-15'	"	"	"	"	"	"	"	96.49	0.055						9.070		1.501	4.8	125
4	1-16	"	"	"	"	"	8	0.752	118.80	0.055						11.167		1.495	5.6	143
	1-16'	"	"	"	"	"	"	"	101.83	0.055						9.572		1.494	5.8	138
5	1-1	"	"	"	"	50	2	0.188	32.61	0.055						3.065		1.493	5.0	40
6	1-2	"	"	"	"	"	4	0.376	51.32	0.057						4.824		1.472	5.7	70
7	1-3	"	"	"	"	"	6	0.564	57.06	0.060						5.364		1.468	7.6	79
	1-3'	"	"	"	"	"	"	"	78.49	0.050						7.378		1.503	4.1	146
8	1-10	"	"	"	"	"	8	0.752	88.32	0.055						8.302		1.506	5.8	138
9	1-4	"	"	"	"	70	2	0.188	33.39	0.047						3.139		1.491	4.8	42
10	1-5	"	"	"	"	"	4	0.376	50.81	0.057						4.776		1.513	6.1	66
11	1-6	"	"	"	"	"	6	0.564	65.10	0.055						6.119		1.521	7.6	79
	1-6'	"	"	"	"	"	"	"	60.82							5.717		1.525	5.1	118
12	1-11	"	"	"	"	"	8	0.752	73.47	0.060						6.906		1.500	8.2	98
13	1-7	"	"	"	"	90	2	0.188	38.26	0.045						3.596		1.537	3.1	65
14	1-8	"	"	"	"	"	4	0.376	50.38	0.045						4.736		1.515	5.8	69
15	1-9	"	"	"	"	"	6	0.564	53.44	0.063						5.023		1.523	7.3	82
	1-9'	"	"	"	"	"	"	"	73.11	0.048						6.872		1.520	4.9	122
16	1-12	"	"	"	"	"	8	0.752	66.34	0.055						6.236		1.505	7.3	110
	1-12'	"	"	"	"	"	"	"	78.71	0.053						7.399		1.523	6.9	116

表-5.2 実験結果一覧表(b)(実験1)

実験 No.	ケース No.	重 錘 タ イ プ				砂層 h (cm)	落下高 H (m)	初 期 エネ ルギ $W_0 \cdot H$ (tf·m)	衝 撃 加 速 度							衝 撃 力		砂層平均 単位 体積重量 γ_d (gf/cm ³)	最大めり 込み量 δ (cm)	H/δ
		重量 W (kgf)	実重量 W_0 (kgf)	底面 形状	直径 D (cm)				α_z (G)	静止 時間 (sec)	α_x (G)	時間 差 (sec)	α_y (G)	時間 差 (sec)	合成 α (G)	P_z (tf)	P_a (tf)			
17	1-17	300	284	平底	40	30	2	0.568	51.97	0.050	7.42	-0.001	6.32	-0.005	52.88	14.759	15.018	1.519	3.9	51
18	1-18	"	"	"	"	50	2	"	27.02	0.060	14.83	-0.010	7.43	-0.009	31.71	7.674	9.006	1.507	7.5	27
19	1-19	"	"	"	"	"	4	1.136	41.63	0.055	27.19	-0.008	11.06	-0.008	50.94	11.820	14.467	1.518	11.3	35
20	1-20	"	"	"	"	"	8	2.272	58.02	0.068	13.60	-0.009	19.59	-0.008	62.73	16.478	17.815	1.521	17.4	46
21	1-21	"	"	"	"	70	2	0.568	22.76	0.056	15.31	-0.014	8.98	-0.012	28.86	6.464	8.196	1.509	7.8	26
22	1-22	"	"	"	"	"	4	1.136	32.81	0.060	9.80	-0.010	2.37	-0.010	34.32	9.318	9.747	1.512	11.7	34
23	1-23	"	"	"	"	"	8	2.272	49.43	0.067	4.37	-0.006	19.38	-0.008	53.27	14.038	15.129	1.488	17.6	45
24	1-24	"	"	"	"	90	4	1.136	24.86	0.078	21.44	-0.003	15.98	-0.002	36.51	7.060	10.369	1.491	15.4	26
25	1-25	"	"	"	"	"	8	2.272	41.60	0.070	12.25	-0.004	14.86	-0.004	45.84	11.814	13.019	1.526	18.7	43
26	1-26	"	"	"	"	100	8	"	38.86	0.083	30.68	-0.005	4.69	-0.003	49.73	11.036	14.123	1.501	24.2	33
27	1-27	100	91	"	20	30	2	0.182	25.12	0.052	9.46	-0.006	3.87	-0.006	27.12	2.286	2.468	1.529	9.1	22
28	1-28	"	"	"	"	"	4	0.364	31.28	0.054	15.30	-0.007	3.30	-0.006	34.98	2.846	3.183	1.516	12.3	33
29	1-29	"	"	"	"	"	8	0.728	43.29	0.056	11.33	-0.006	9.91	-0.006	45.83	3.939	4.171	1.520	17.6	45
30	1-30	"	"	"	"	50	2	0.182	25.81	0.053	10.20	-0.009	1.67	-0.009	27.80	2.349	2.530	1.514	7.7	26
31	1-31	"	"	"	"	"	4	0.364	25.49	0.056	9.45	-0.011	6.96	-0.011	28.06	2.320	2.553	1.506	16.2	25
32	1-32	"	"	"	"	"	8	0.728	37.04	0.070	7.12	-0.010	10.83	-0.009	39.24	3.371	3.571	1.522	23.5	34
33	1-33	"	"	"	"	70	2	0.182	20.76	0.055	1.72	-0.014	6.96	-0.013	21.96	1.889	1.998	1.520	19.1	22
34	1-34	"	"	"	"	"	4	0.364	23.53	0.058	5.10	-0.013	7.04	-0.012	25.08	2.141	2.282	1.501	14.0	29
35	1-35	"	"	"	"	"	8	0.728	29.44	0.073	6.23	-0.002	5.71	-0.003	30.63	2.679	2.787	1.506	26.9	30

表-5.2 実験結果一覧表(c) (実験1)

実験 No.	ケース No.	重 錘 タ イ プ				砂層 h (cm)	落下高 H (m)	初 期 エネルギー $W_0 \cdot H$ (tf·m)	衝 撃 加 速 度							衝 撃 力		砂層平均 単位 体積重量 γ_d (gf/cm ³)	最大めり 込み量 δ (cm)	H/δ
		重量 W (kgf)	実重量 W_0 (kgf)	底面 形状	直径 D (cm)				α_x (G)	静止 時間 (sec)	α_x (G)	時間 差 (sec)	α_y (G)	時間 差 (sec)	合成 α (G)	P_x (tf)	P_y (tf)			
36	1-36	100	99	球底	40	30	2	0.198	26.71	0.047	2.36	-0.006	2.48	-0.002	26.93	2.644	2.666	1.521	9.0	22
37	1-37	"	"	"	"	"	4	0.396	43.12	0.053	6.45	-0.004	2.45	-0.003	43.67	4.269	4.323	1.510	11.9	34
38	1-38	"	"	"	"	"	8	0.792	71.02	0.056	2.96	-0.001	17.96	-0.001	73.32	7.031	7.259	1.507	14.3	56
39	1-39	"	"	"	"	50	2	0.198	29.03	0.040	1.74	-0.007	1.58	0	29.12	2.874	2.882	1.514	7.7	26
40	1-40	"	"	"	"	"	4	0.396	39.65	0.054	2.93	-0.005	2.45	-0.003	39.83	3.925	3.943	1.515	11.6	34
41	1-41	"	"	"	"	"	8	0.792	56.87	0.061	1.73	-0.007	7.27	-0.003	57.36	5.630	5.679	1.515	16.9	47
42	1-42	"	91	錐底	"	30	2	0.182	24.12	0.055	2.86	0	1.53	0	24.34	2.195	2.215	1.513	14.7	14
43	1-43	"	"	"	"	"	4	0.364	37.03	0.058	7.93	0	3.83	0	38.06	3.370	3.463	1.524	17.2	23
44	1-4	"	"	"	"	"	8	0.728	64.32	0.055	10.85	0	5.42	0	65.45	5.853	5.956	1.508	19.0	42
45	1-45	"	"	"	"	50	2	0.182	22.36	0.057	1.70	+0.008	2.32	+0.008	22.54	2.035	2.051	1.524	14.9	13
46	1-46	"	"	"	"	"	4	0.364	35.85	0.060	9.06	-0.002	4.60	0	37.26	3.262	3.391	1.507	17.8	22
47	1-47	"	"	"	"	"	8	0.728	54.66	0.063	16.16	-0.004	3.06	-0.002	57.08	4.974	5.194	1.514	21.7	37
51	1-51	100	94	平底	40	50	2	0.188	80.38		26.78		3.65		84.80	7.556	7.971	1.573	0.6	333
52	1-52	"	"	"	"	"	1	0.094	37.62		36.05		3.65		52.23	3.536	4.910	"	0.9	111
53	1-53	"	"	"	"	"	0.5	0.047	36.44		9.27		22.40		43.77	3.425	4.114	"	0.2	250

表-5.2 実験結果一覧表(d) (実験2)

実験 No.	ケース No.	重 錘 タ イ プ				砂層 h (cm)	落下高 H (m)	初 期 エネルギー $W_0 \cdot H$ (tf·m)	衝 撃 加 速 度							衝 撃 力		砂層平均 単位 体積重量 γ_d (gf/cm ³)	最大めり 込み量 δ (cm)	H/δ
		重量 W (kgf)	実重量 W_0 (kgf)	底面 形状	直径 D (cm)				α_x (G)	静止 時間 (sec)	α_x (G)	時間 差 (sec)	α_y (G)	時間 差 (sec)	合成 α (G)	P_z (tf)	P_a (tf)			
1	2-1	100	94	平底	40	30	2	0.188	68.36	0.026	29.46	-0.004	7.60	-0.001	74.82	6.426	7.033	1.576	2.2	91
2	2-2	"	"	"	"	"	4	0.376	83.14	0.026	49.32	-0.003	11.67	0	97.37	7.815	9.153	1.543	3.5	114
3	2-3	"	"	"	"	"	8	0.752	118.15	0.027	58.92	0	9.83	0	132.39	11.106	12.495	1.553	5.2	154
4	2-4	"	"	"	"	50	2	0.188	50.23	0.030	26.68	-0.006	5.59	-0.006	57.15	4.722	5.372	1.559	2.0	100
	2-4'	"	"	"	"		"	"	48.15	0.027	28.51	-0.006	1.05	-0.006	55.97	4.526	5.261	1.567	2.3	87
5	2-5	"	"	"	"	"	4	0.376	67.39	0.029	30.67	-0.005	3.06	-0.004	74.10	6.335	6.965	1.541	3.3	121
6	2-6	"	"	"	"	"	8	0.752	97.79	0.031	54.04	-0.006	3.91	-0.001	111.80	9.192	10.509	1.551	5.3	151
7	2-7	"	"	"	"	70	2	0.188	48.44	0.030	23.46	-0.006	13.58	-0.006	55.51	4.553	5.218	1.566	2.0	100
8	2-8	"	"	"	"	"	4	0.376	59.20	0.026	26.02	-0.006	21.11	-0.006	68.02	5.565	6.394	1.550	3.0	133
9	2-9	"	"	"	"	"	8	0.752	87.81	0.030	60.49	-0.005	7.43	-0.005	106.89	8.254	10.098	1.559	4.2	190
10	2-10	"	99	球底	40	30	8	0.792	78.90	0.046	13.60	-0.001	13.31	0	81.16	7.811	8.035	1.560	12.6	63
11	2-11	"	"	"	"	70	8	"	63.43	0.049	6.80	-0.005	2.32	0	63.84	6.280	6.320	1.548	13.7	58
12	2-12	"	91	錐底	40	30	8	0.728	64.98	0.047	4.53	0	12.92	0	66.41	5.913	6.043	1.595	17.2	47
13	2-13	"	"	"	"	70	8	"	59.59	0.051	11.10	0	3.48	0	60.71	5.423	5.525	1.565	19.1	42
20	2-20	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
21	2-21	"	94	平底	40	50	4	0.376	25.27	0.096	4.34	-0.003	7.43	-0.003	26.69	2.375	2.509	1.530	21.8	18

表-5.2 實驗結果一覽表(e)(實驗3)

[illegible]

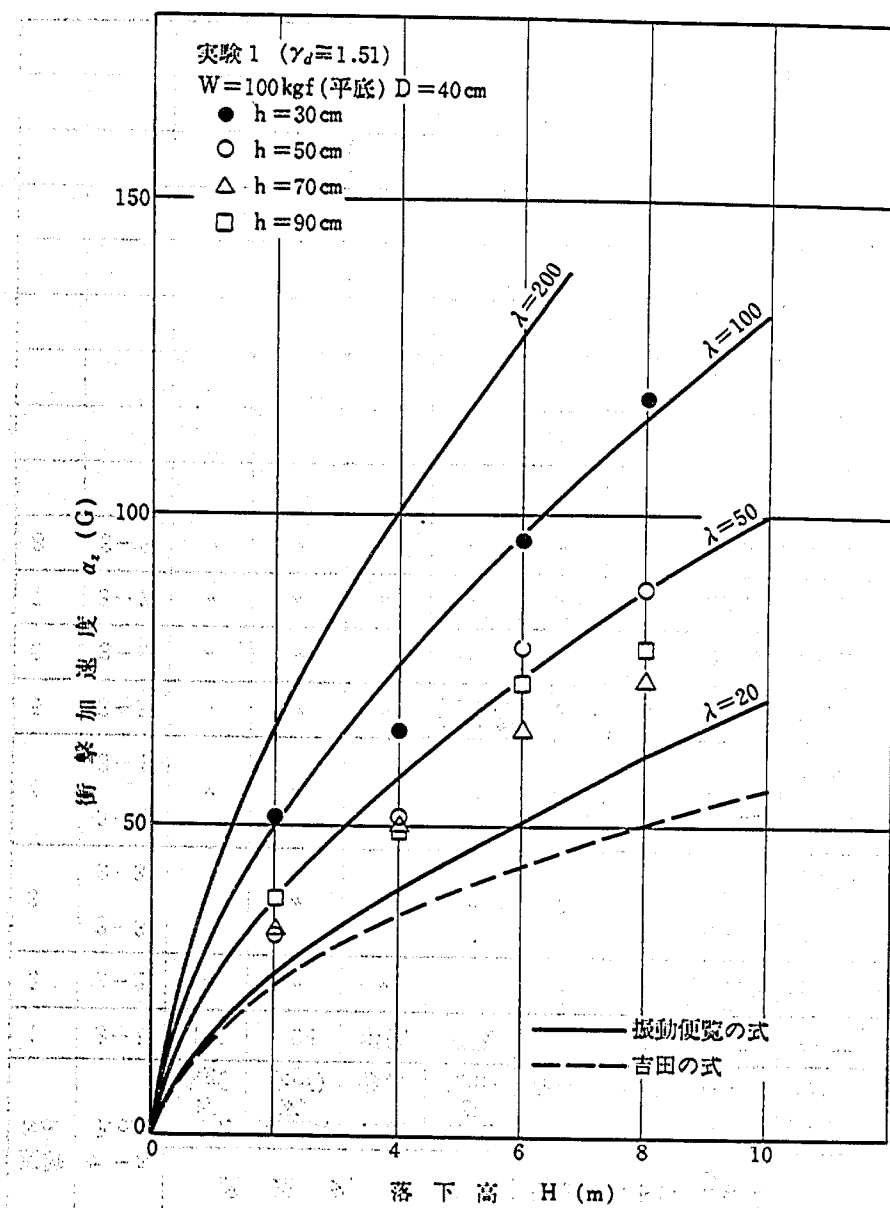


図-5.4(a) 落下高と衝撃加速度の関係

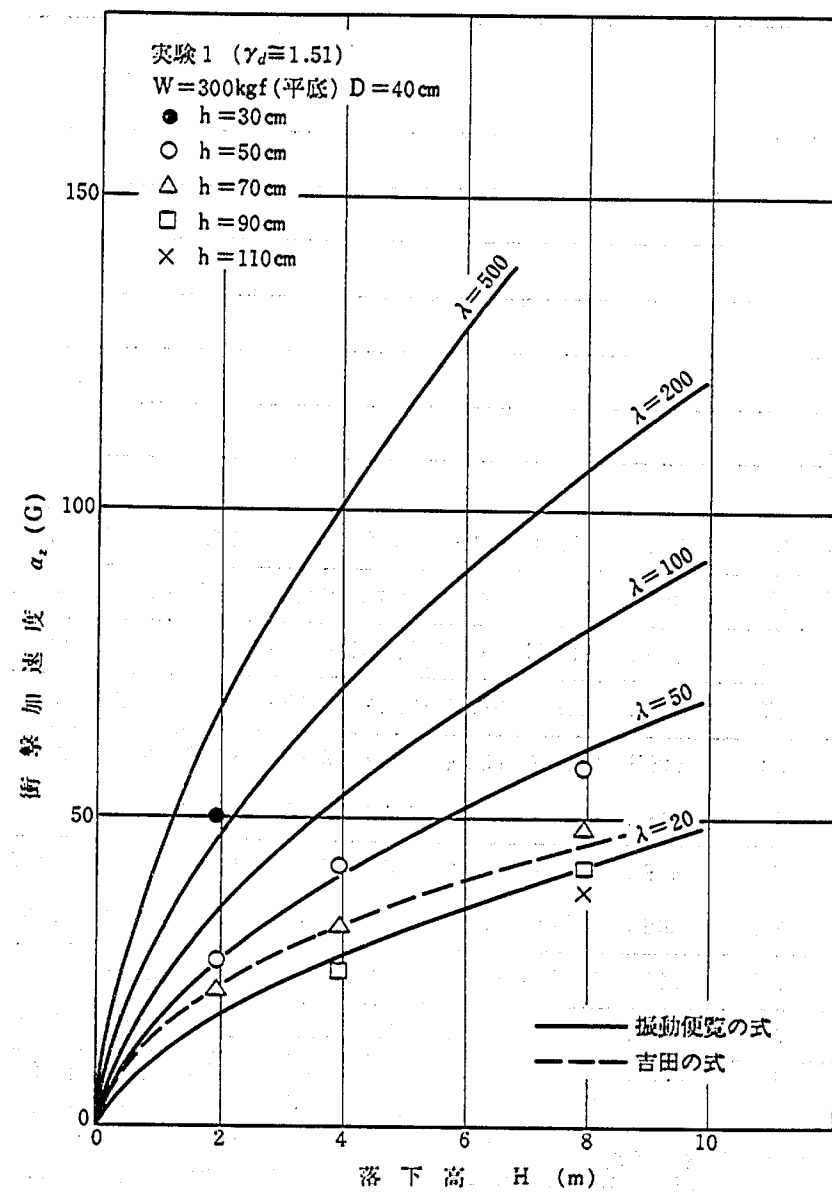


図-5.4(b) 落下高と衝撃加速度の関係

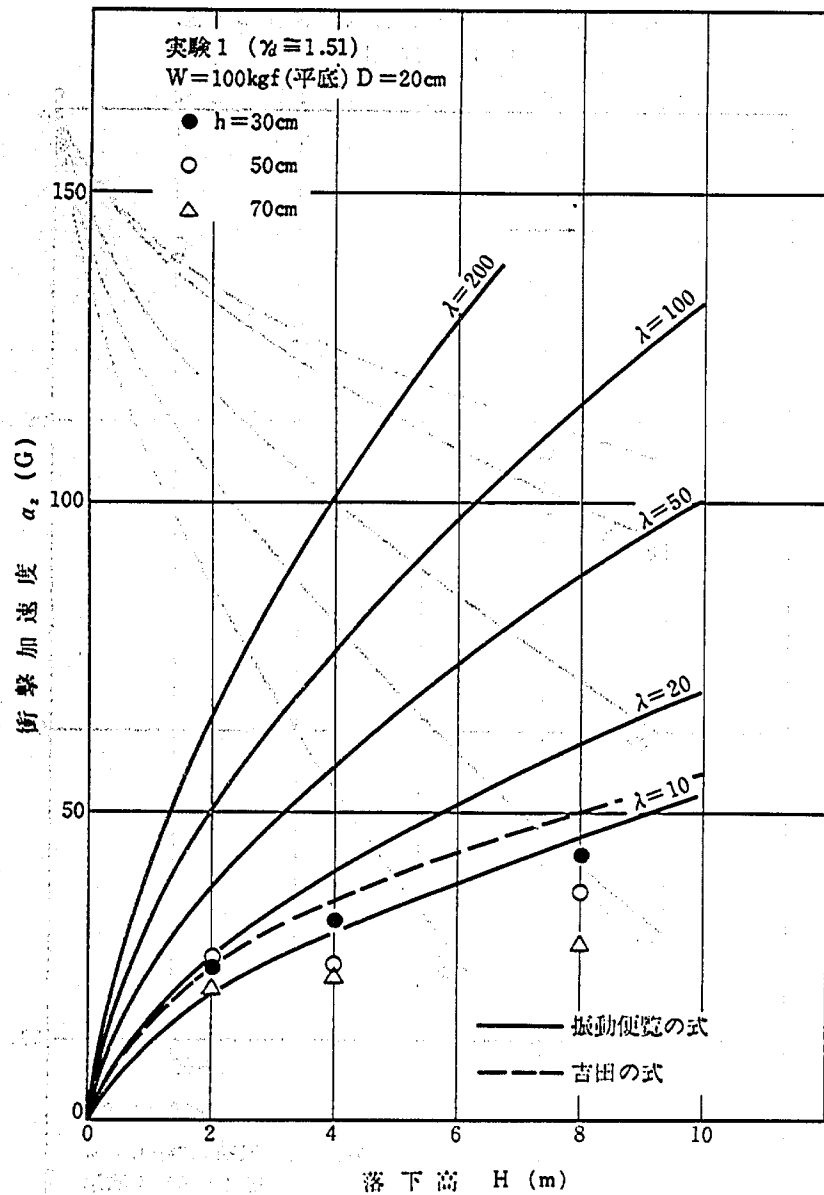


図-5.4(c) 落下高と衝撃加速度の関係

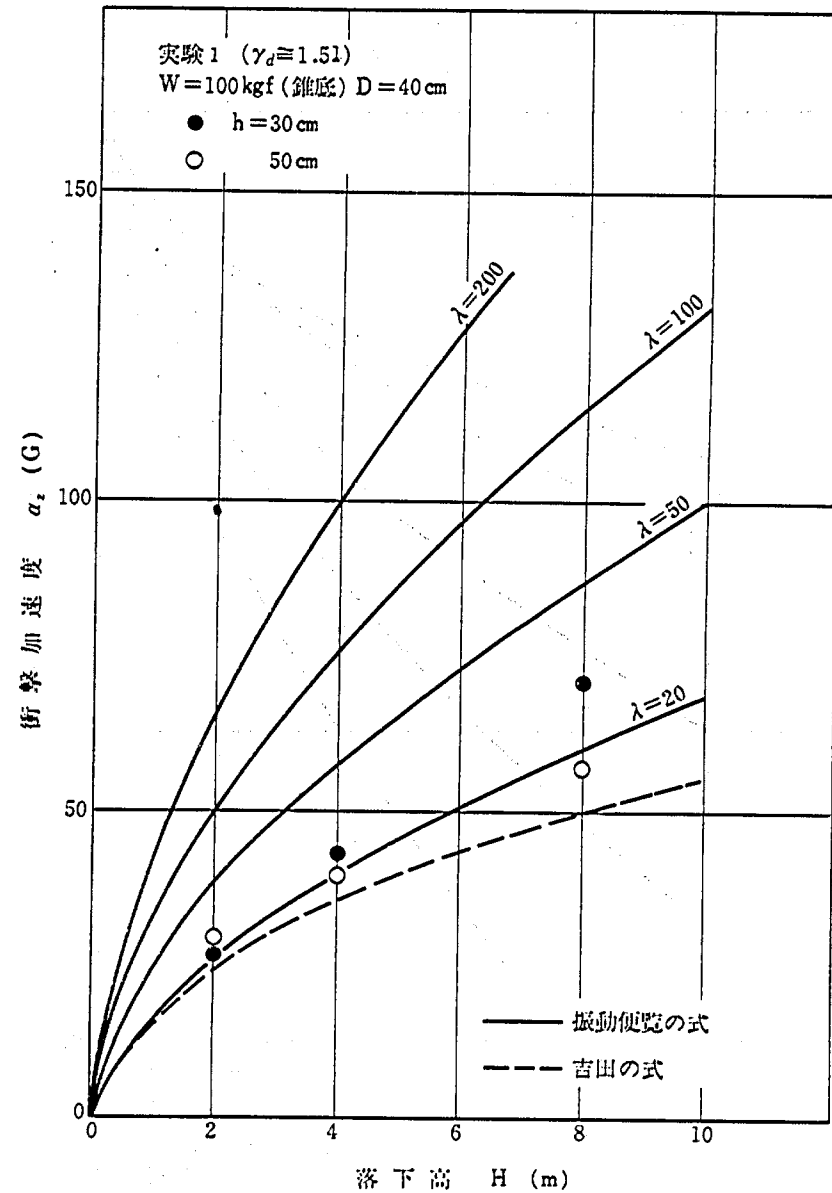


図-5.4(d) 落下高と衝撃加速度の関係

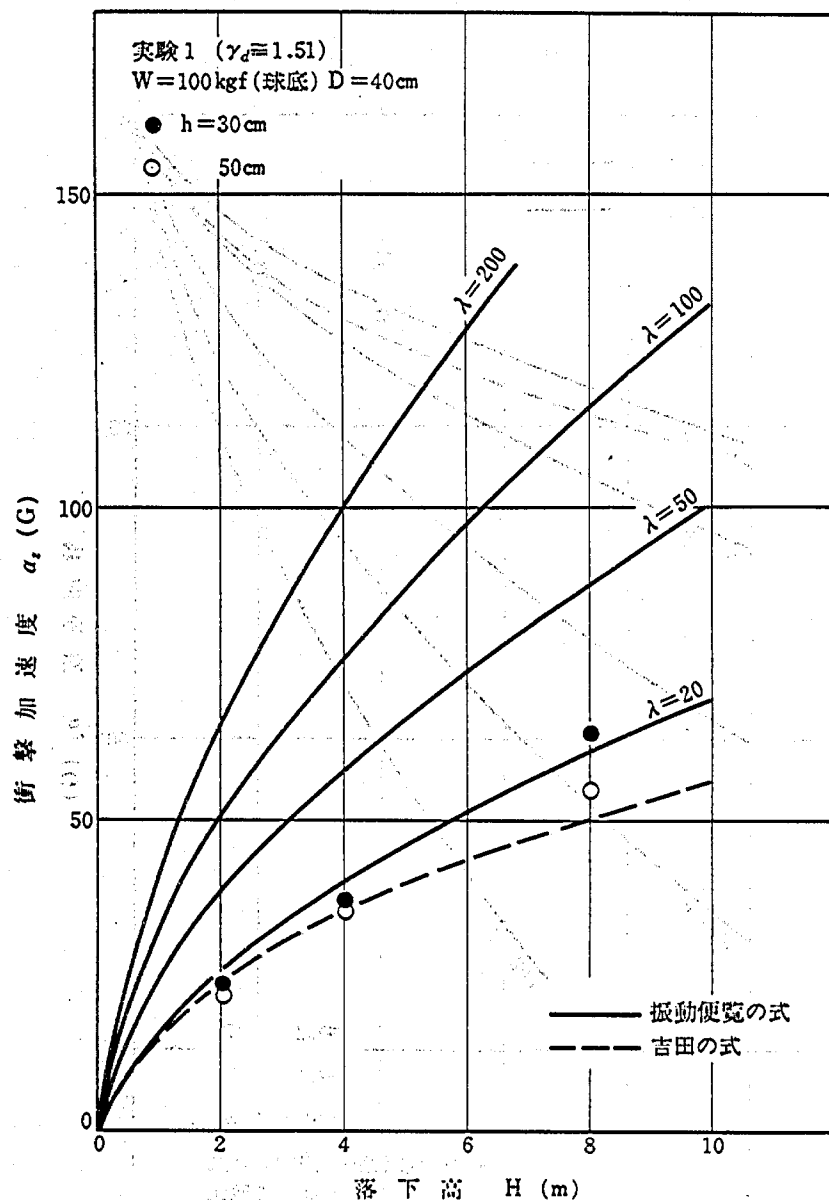


図-5.4(e) 落下高と衝撃加速度の関係

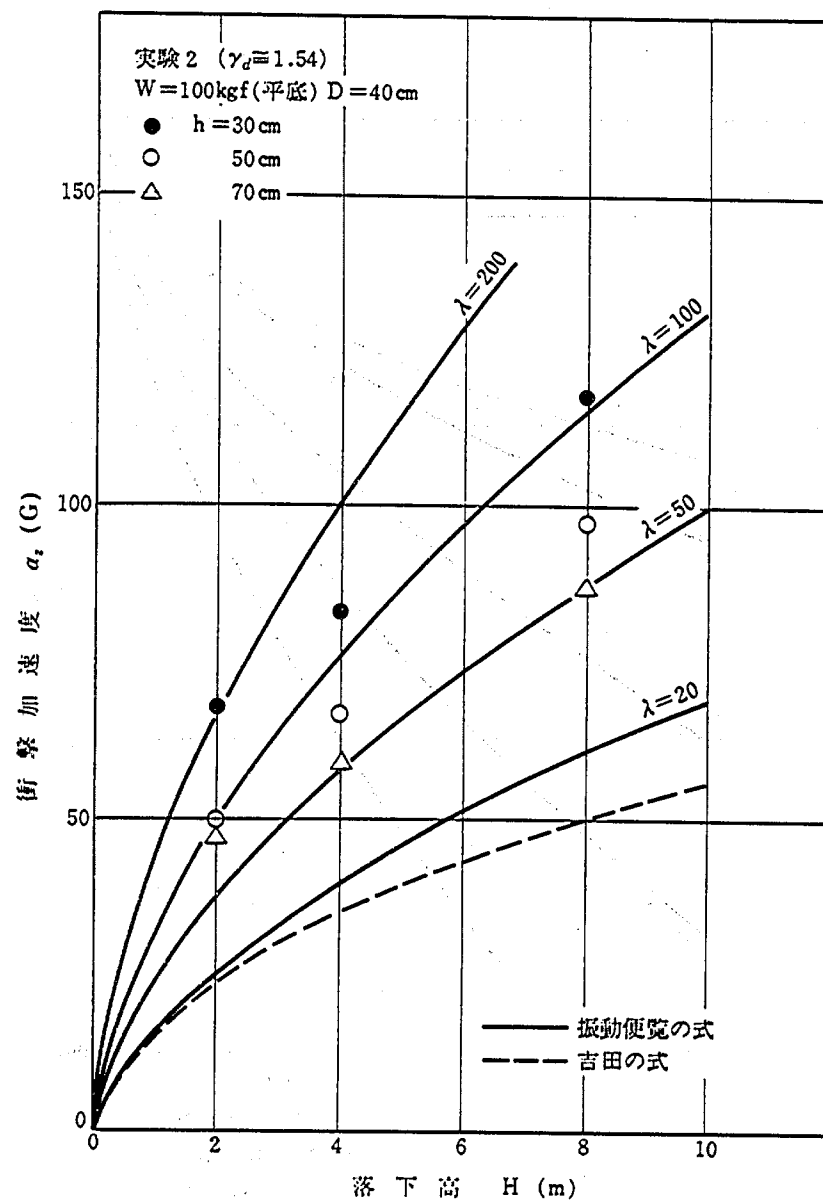


図-5.4(f) 落下高と衝撃加速度の関係

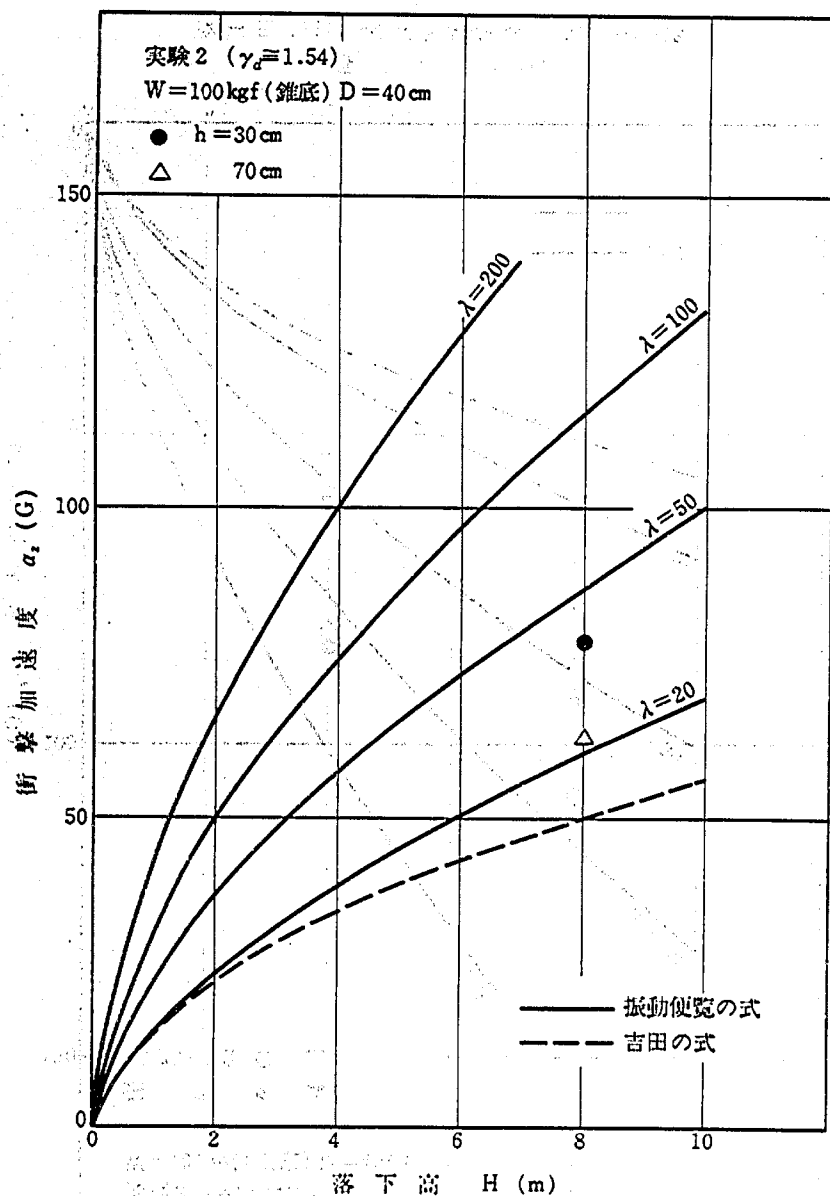


図-5.4(g) 落下高と衝撃加速度の関係

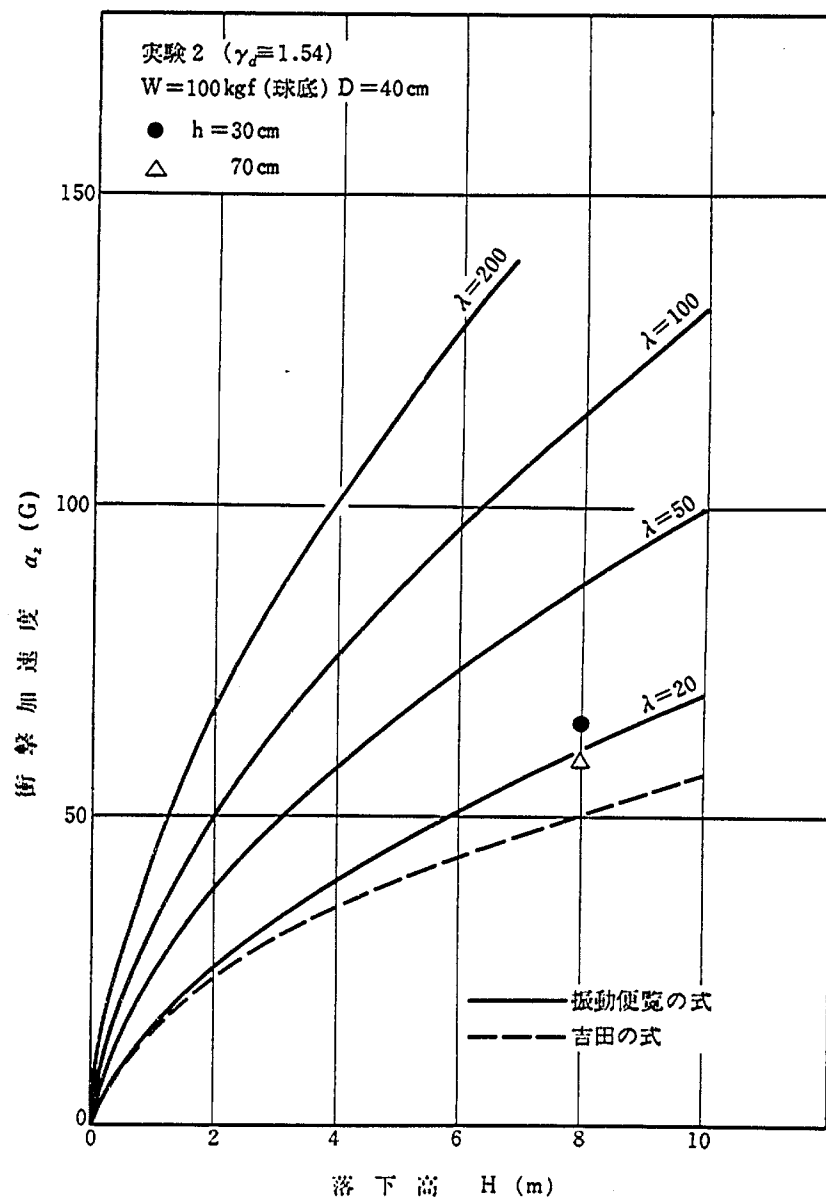


図-5.4(h) 落下高と衝撃加速度の関係

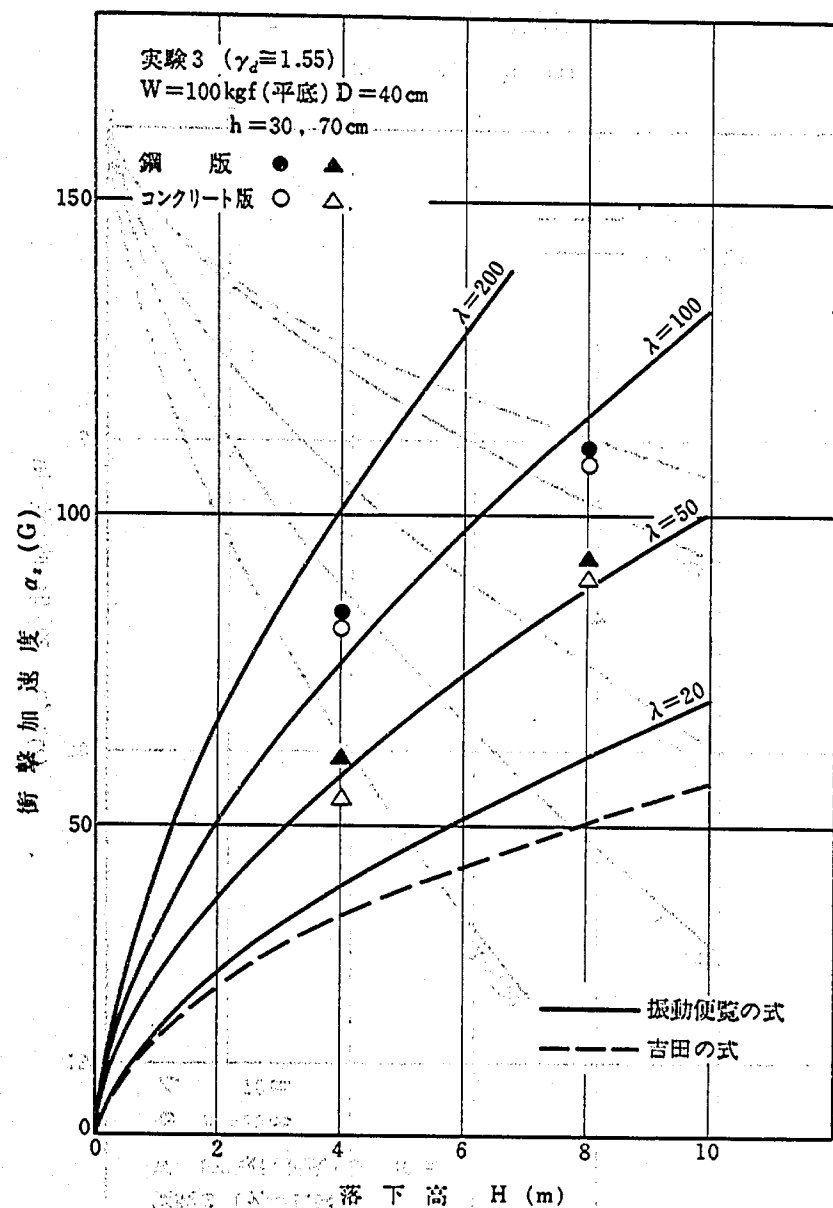


図-5.4(i) 落下高と衝撃加速度の関係

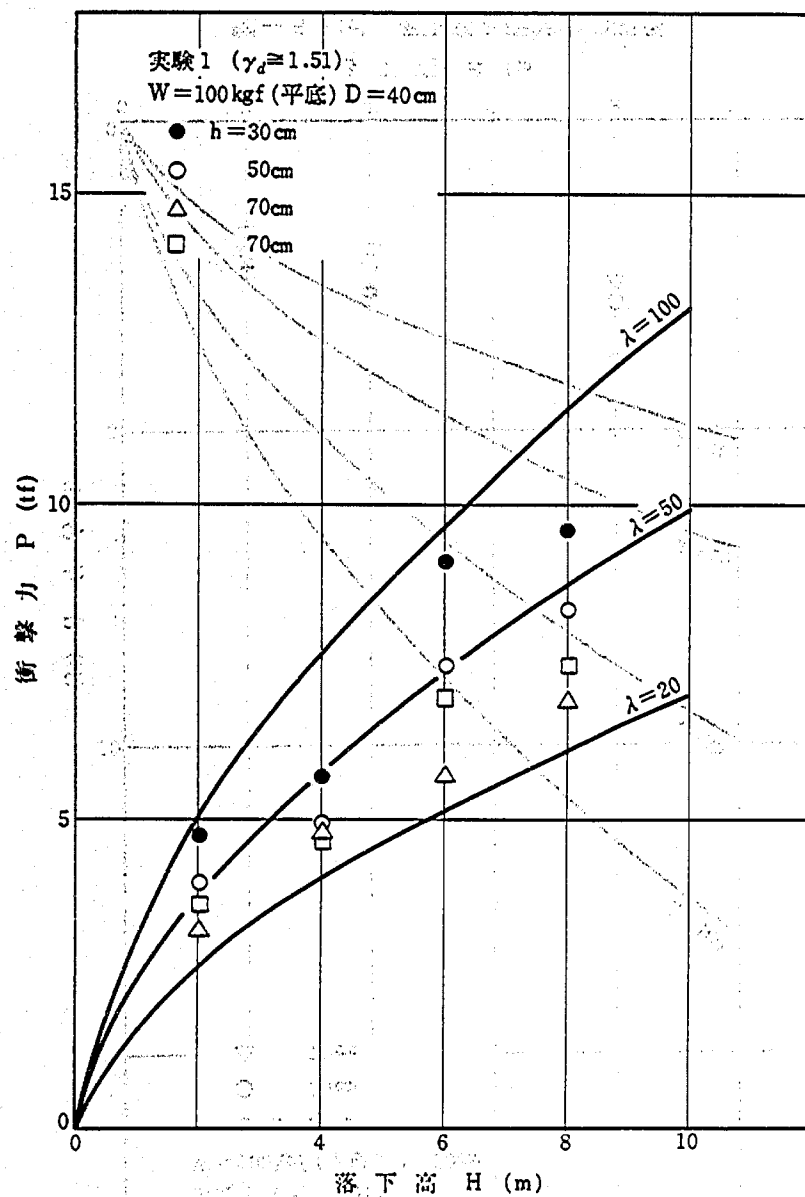


図-5.5(a) 落下高と衝撃力の関係

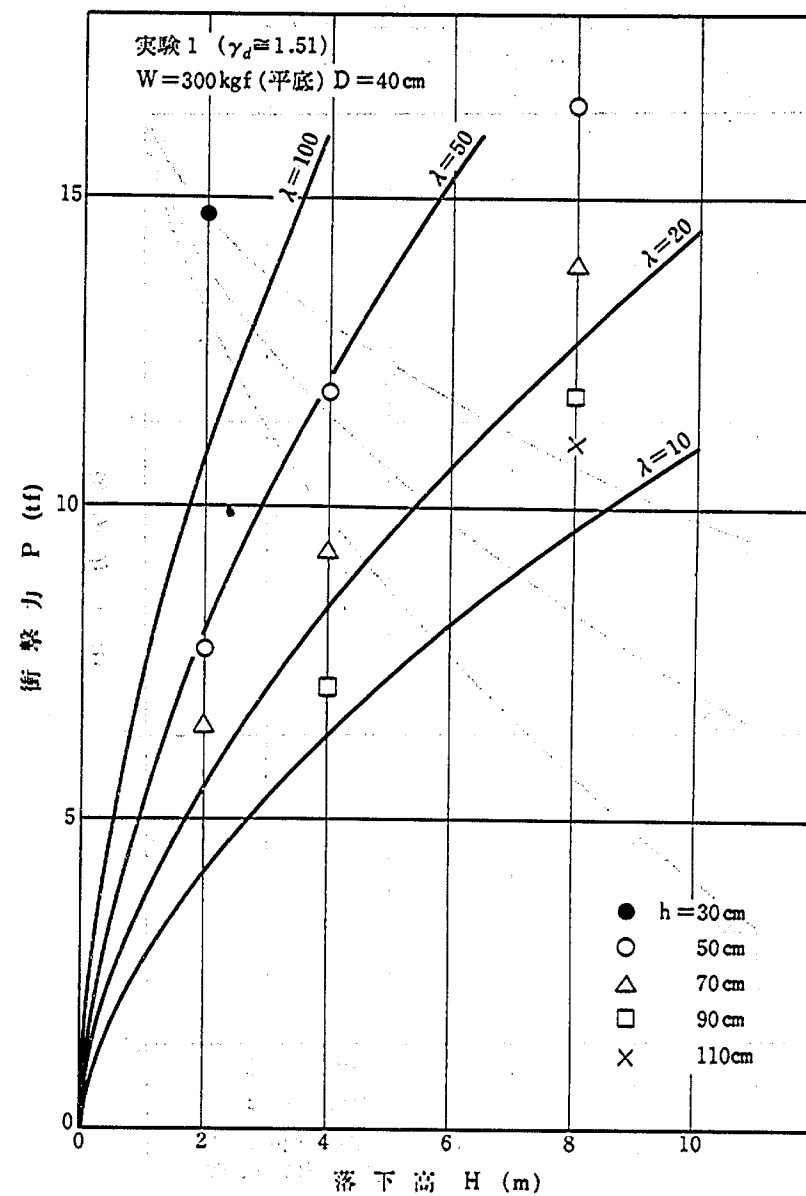


図-5.5(b) 落下高と衝撃力の関係

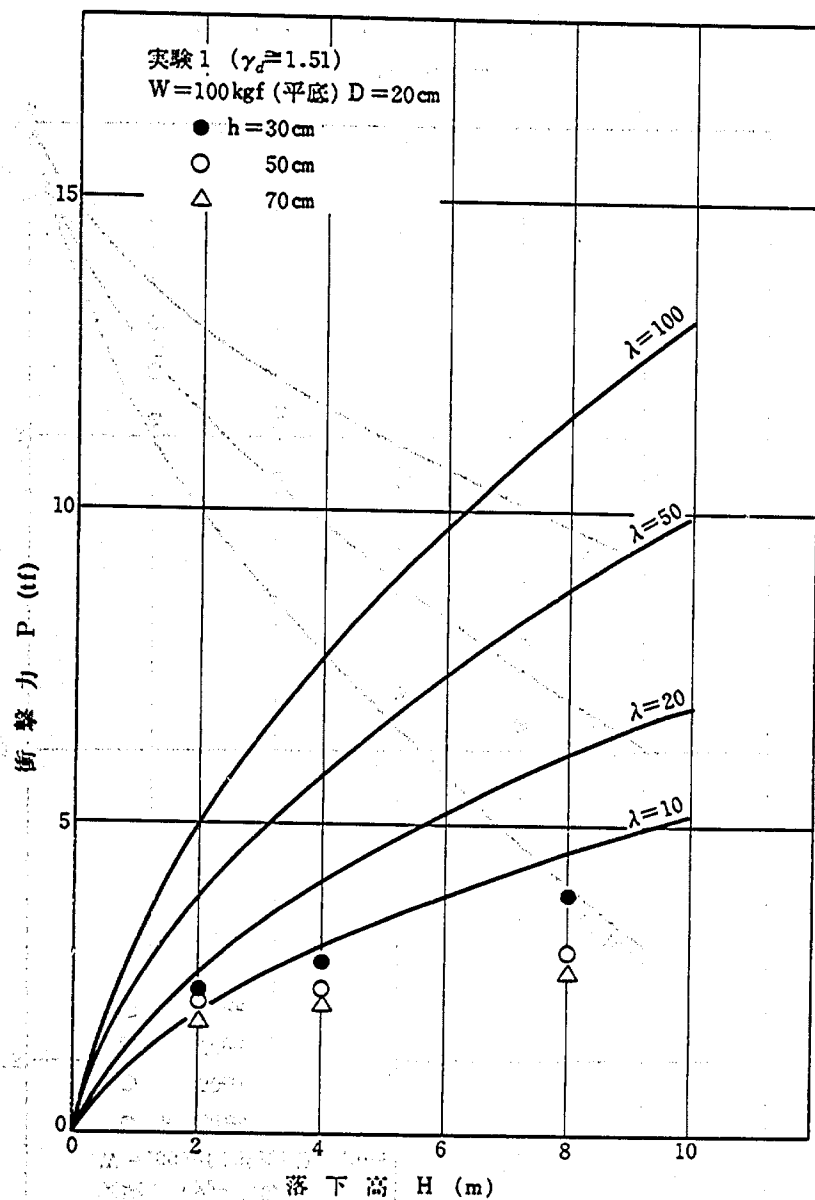


図-5.5(c) 落下高と衝撃力の関係

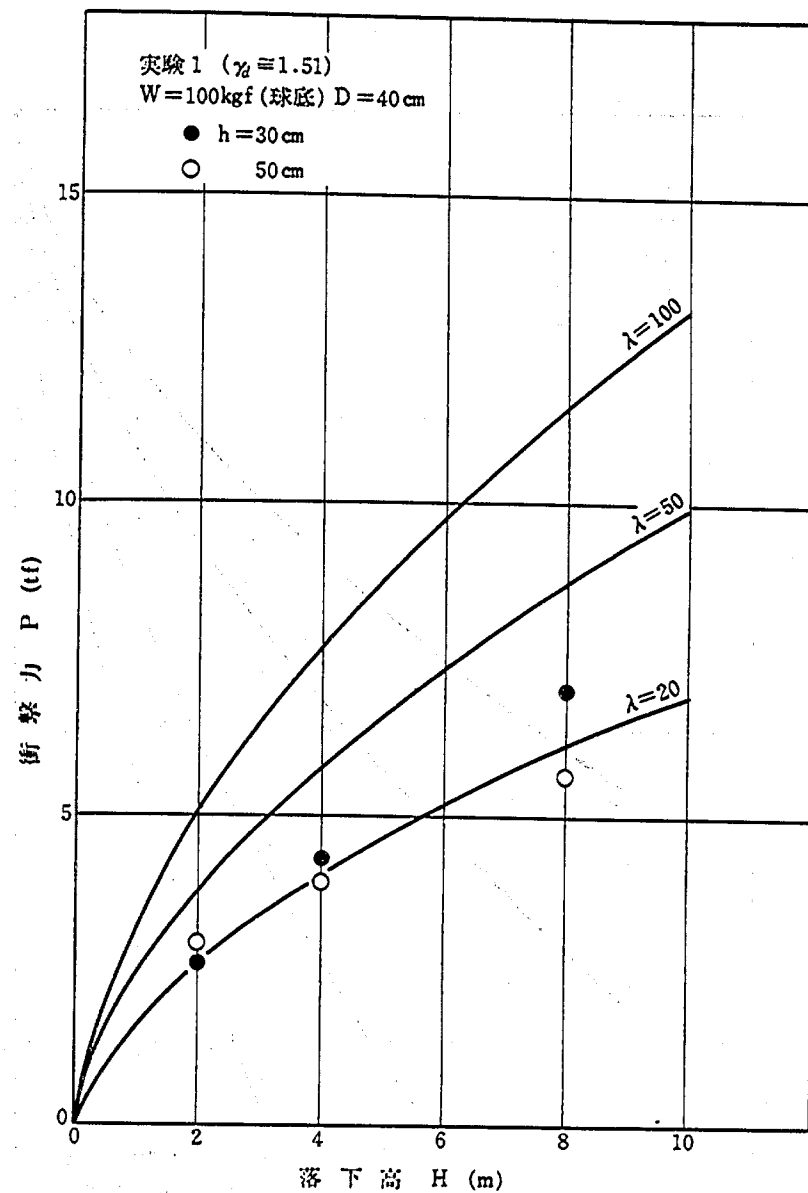


図-5.5(d) 落下高と衝撃力の関係

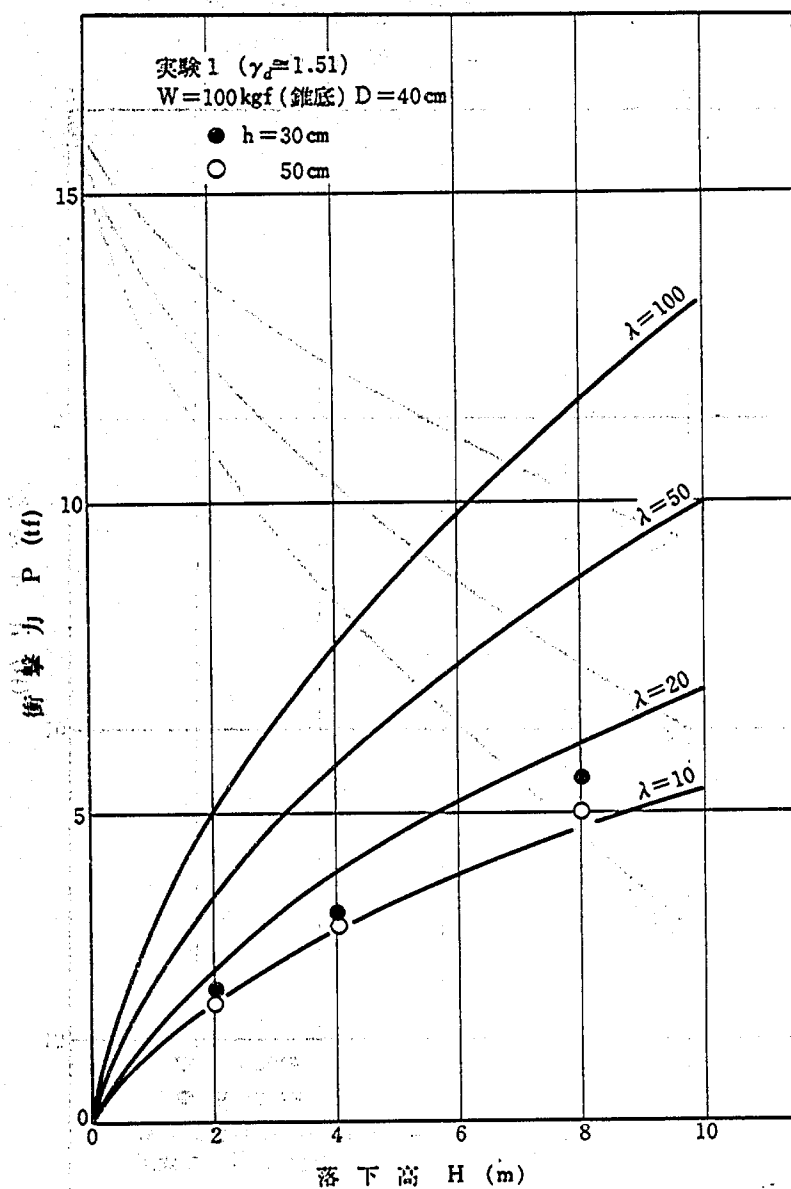


図-5.5(e) 落下高と衝撃力の関係

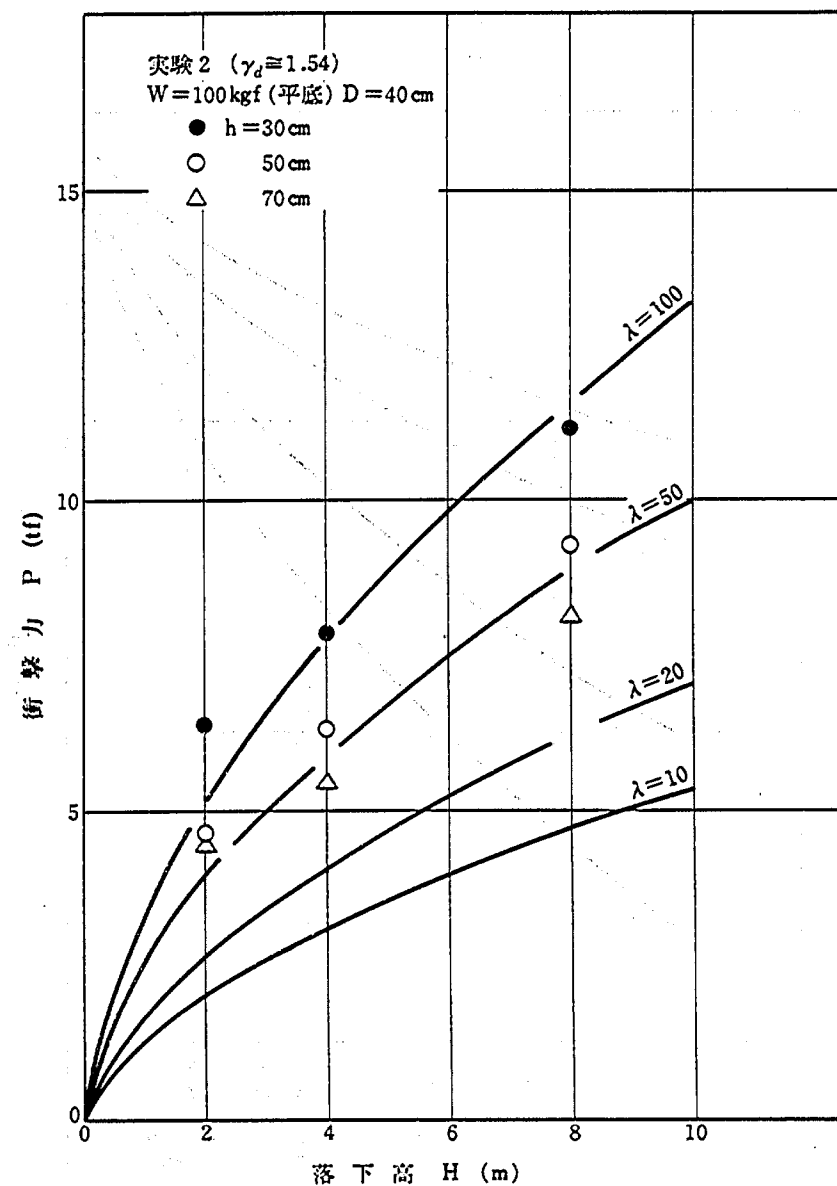


図-5.5(f) 落下高と衝撃力の関係

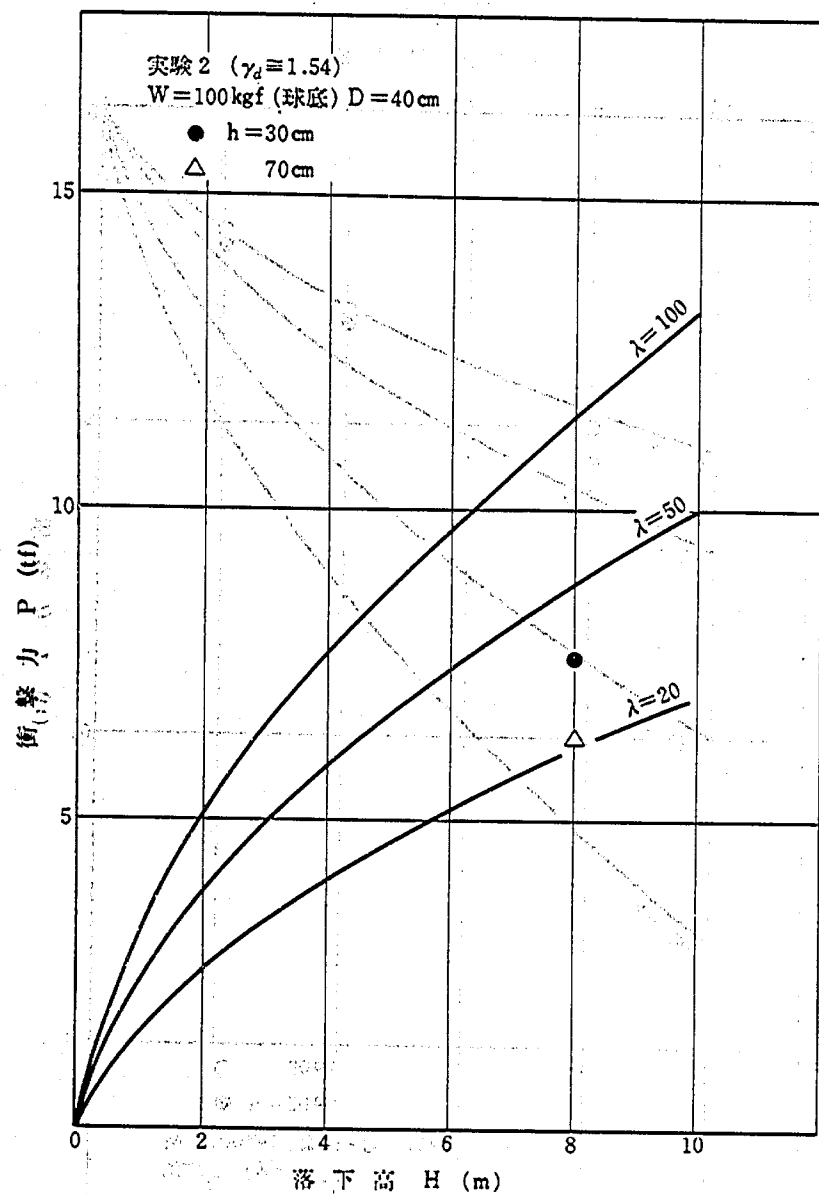


図-5.5(g) 落下高と衝撃力の関係

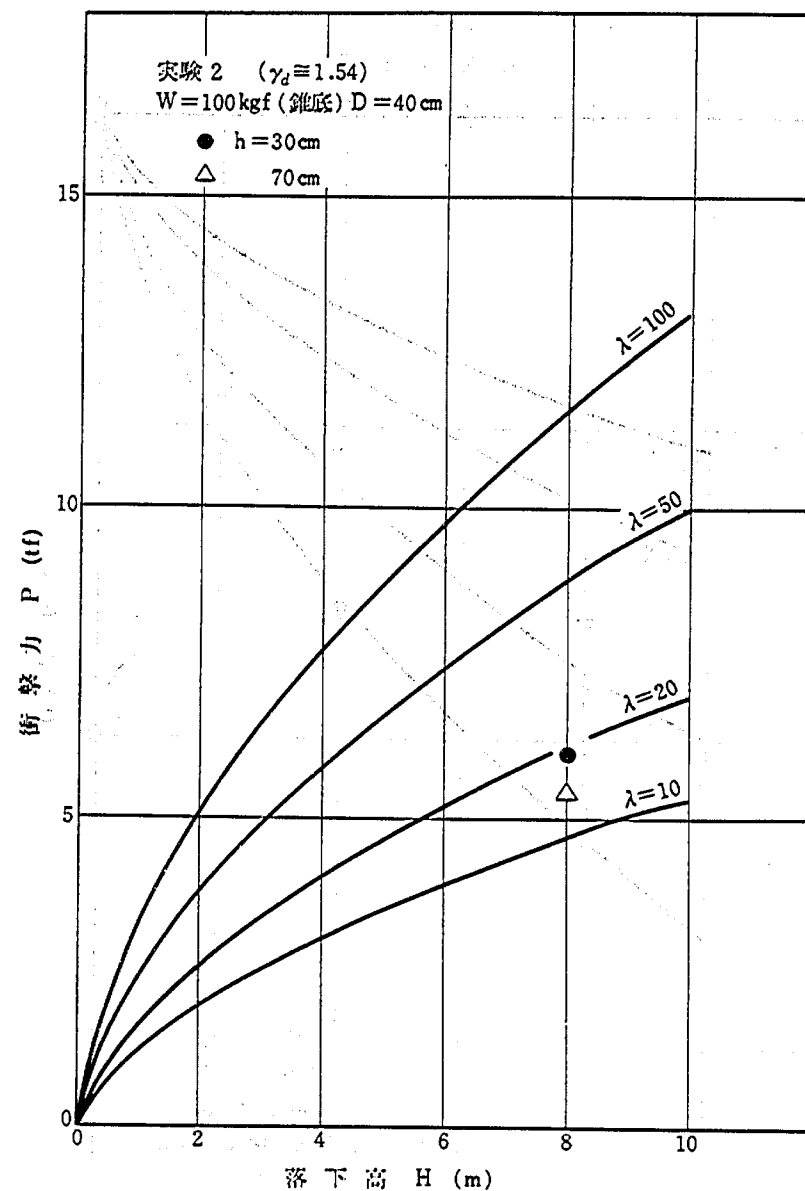


図-5.5(h) 落下高と衝撃力の関係

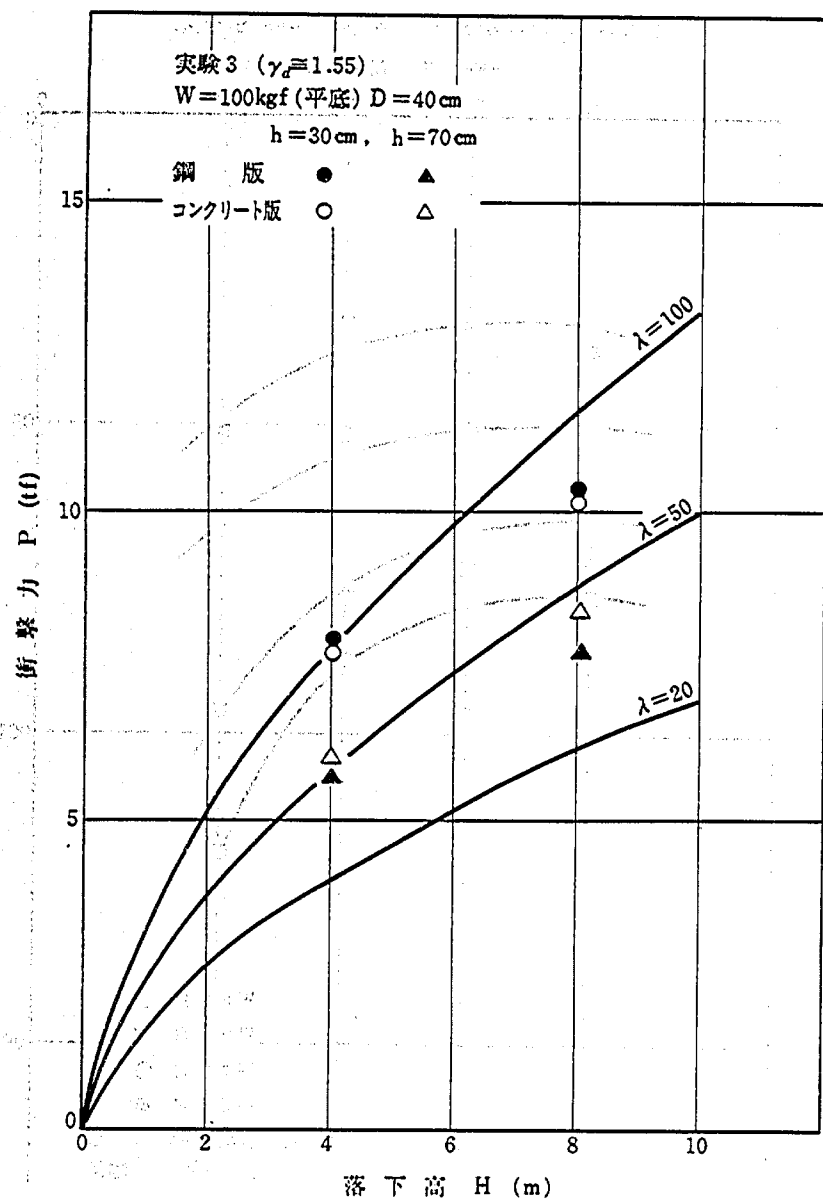


図-5.5(i) 落下高と衝撃力の関係

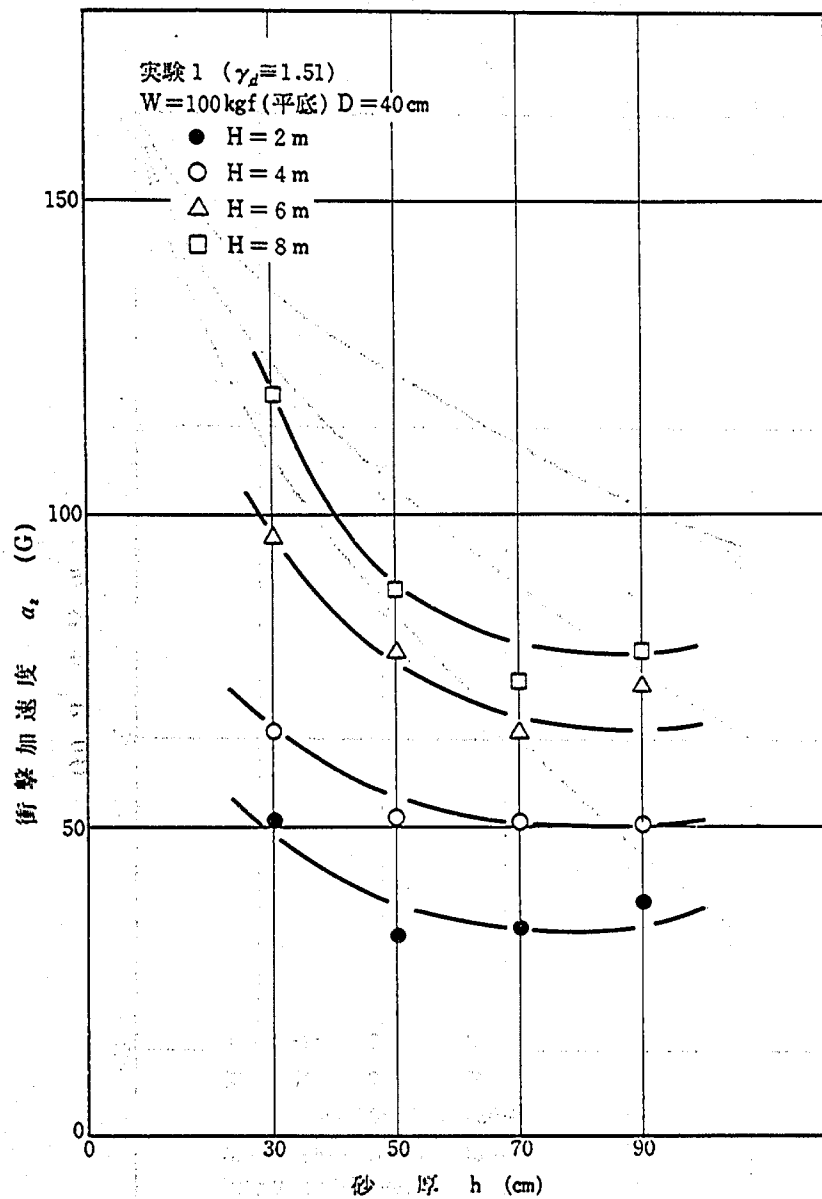


図-5.6(a) 敷砂厚と衝撃加速度の関係

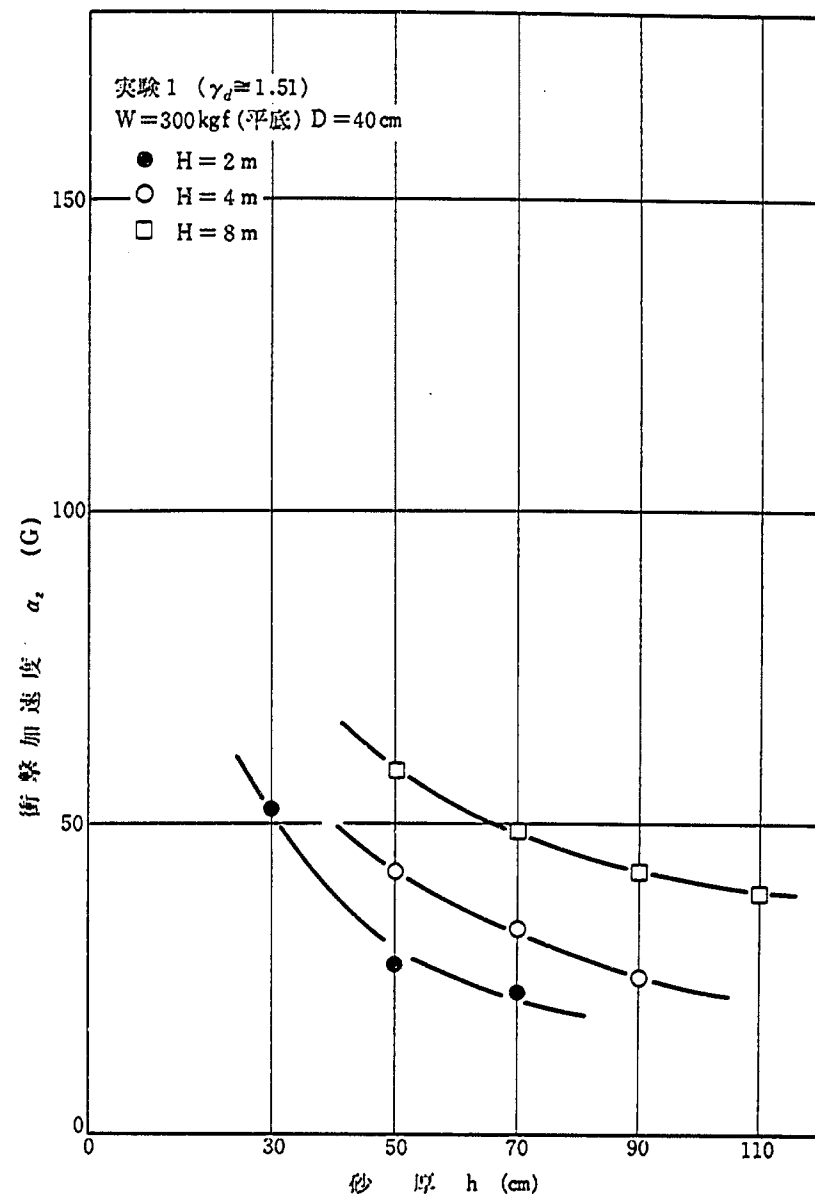


図-5.6(b) 敷砂厚と衝撃加速度の関係

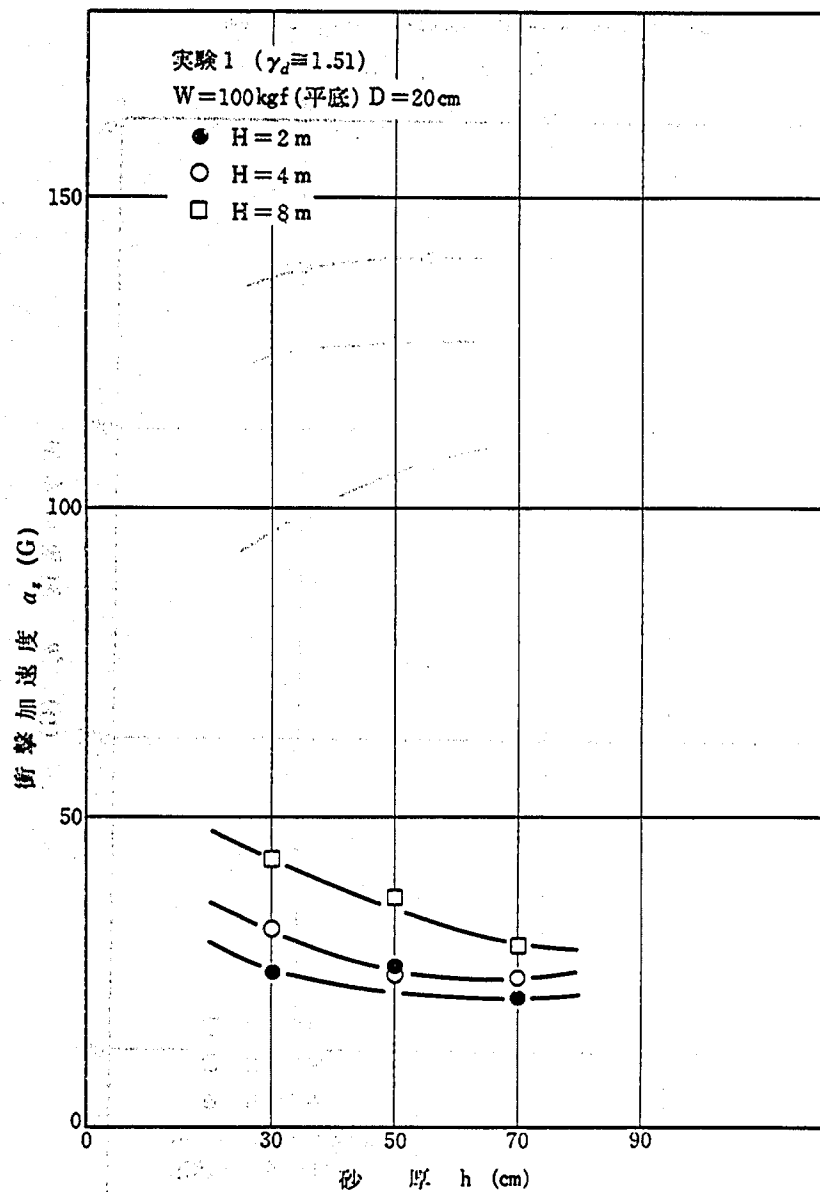


図- 5.6(c) 敷砂厚と衝撃加速度の関係

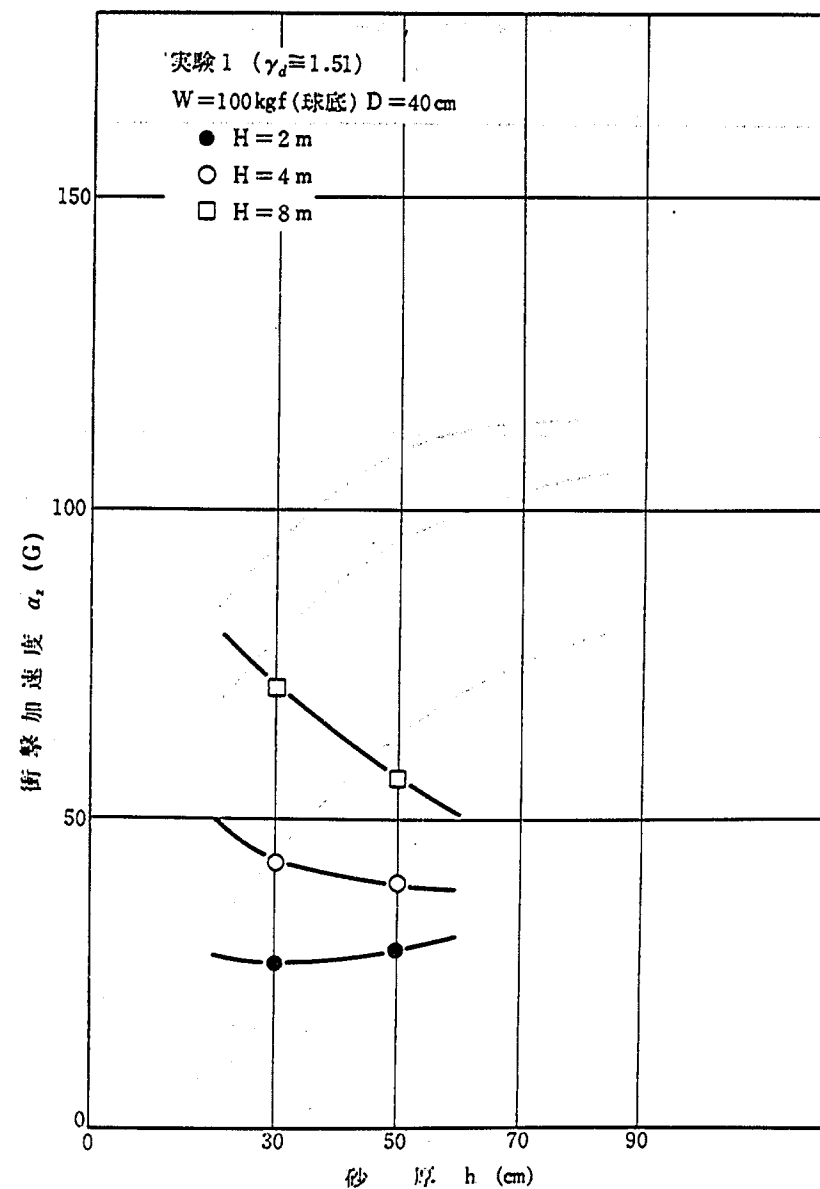


図- 5.6(d) 敷砂厚と衝撃加速度の関係

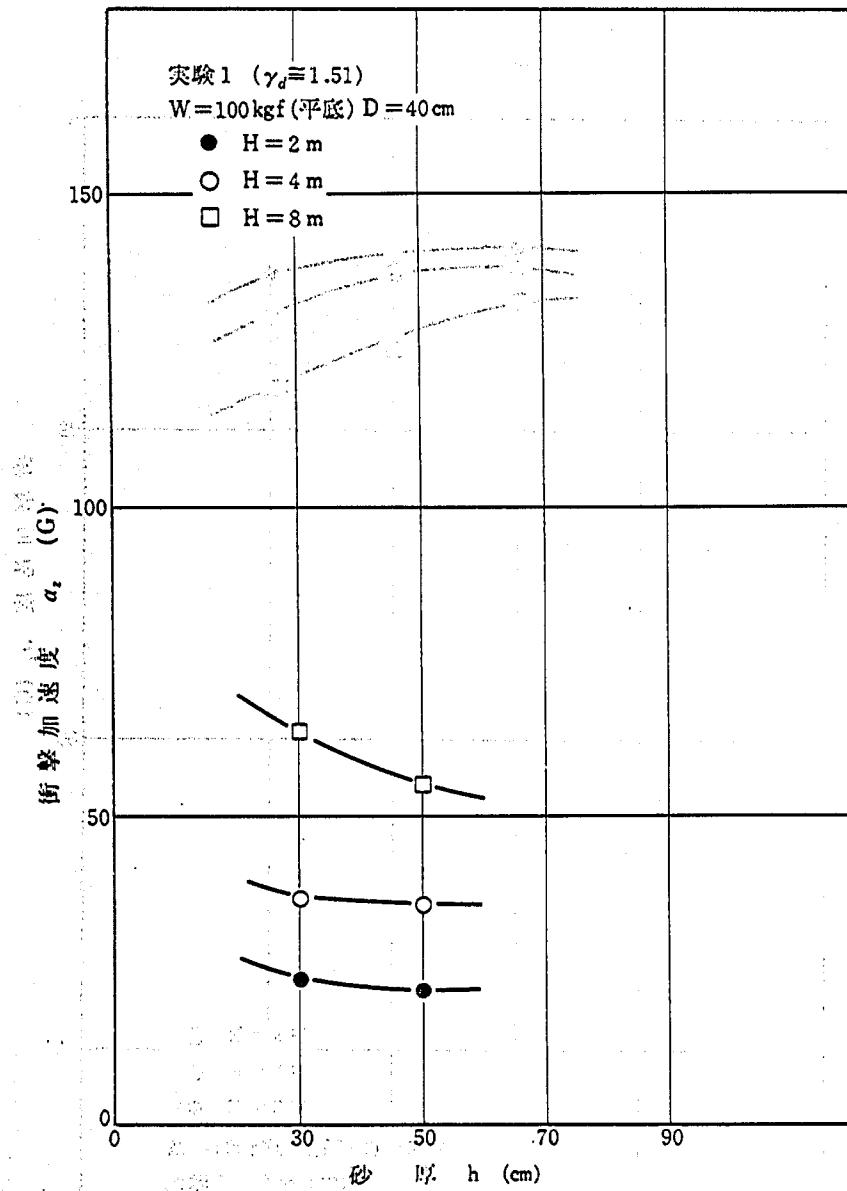


図-5.6(e) 敷砂厚と衝撃加速度の関係

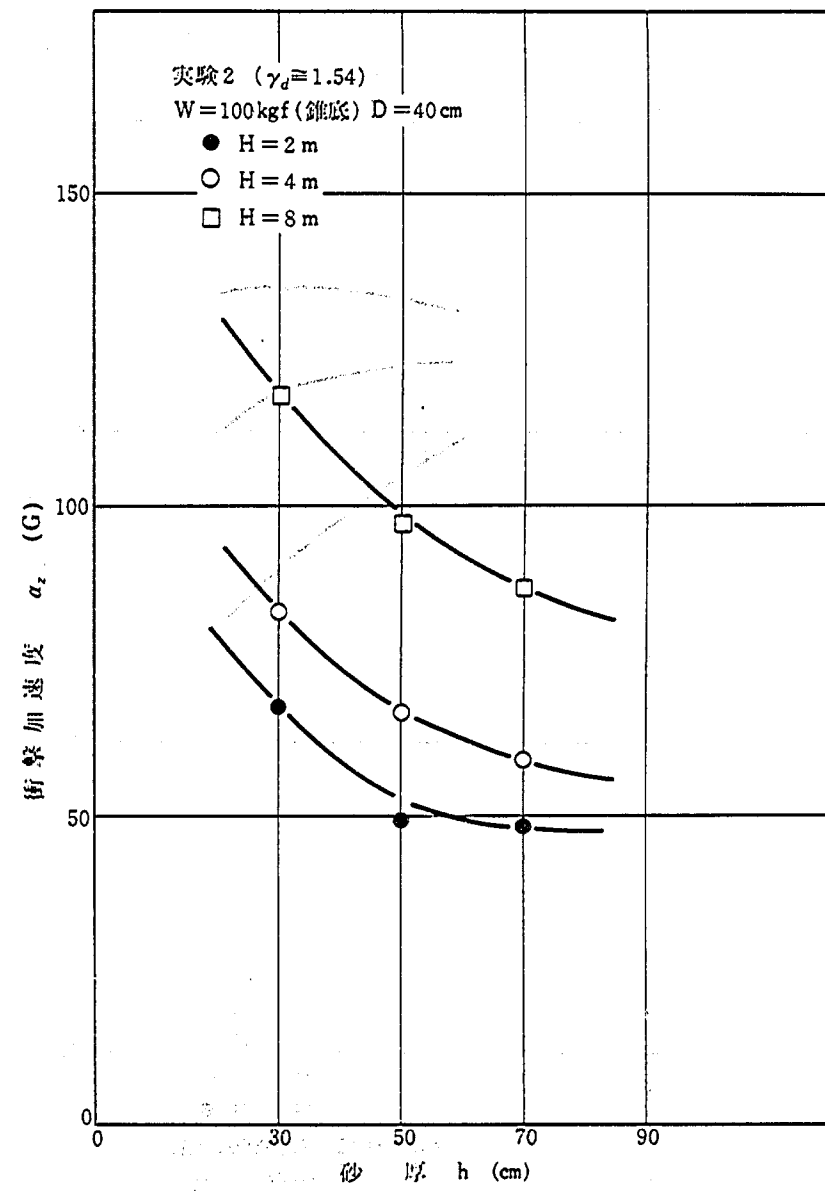


図-5.6(f) 敷砂厚と衝撃加速度の関係

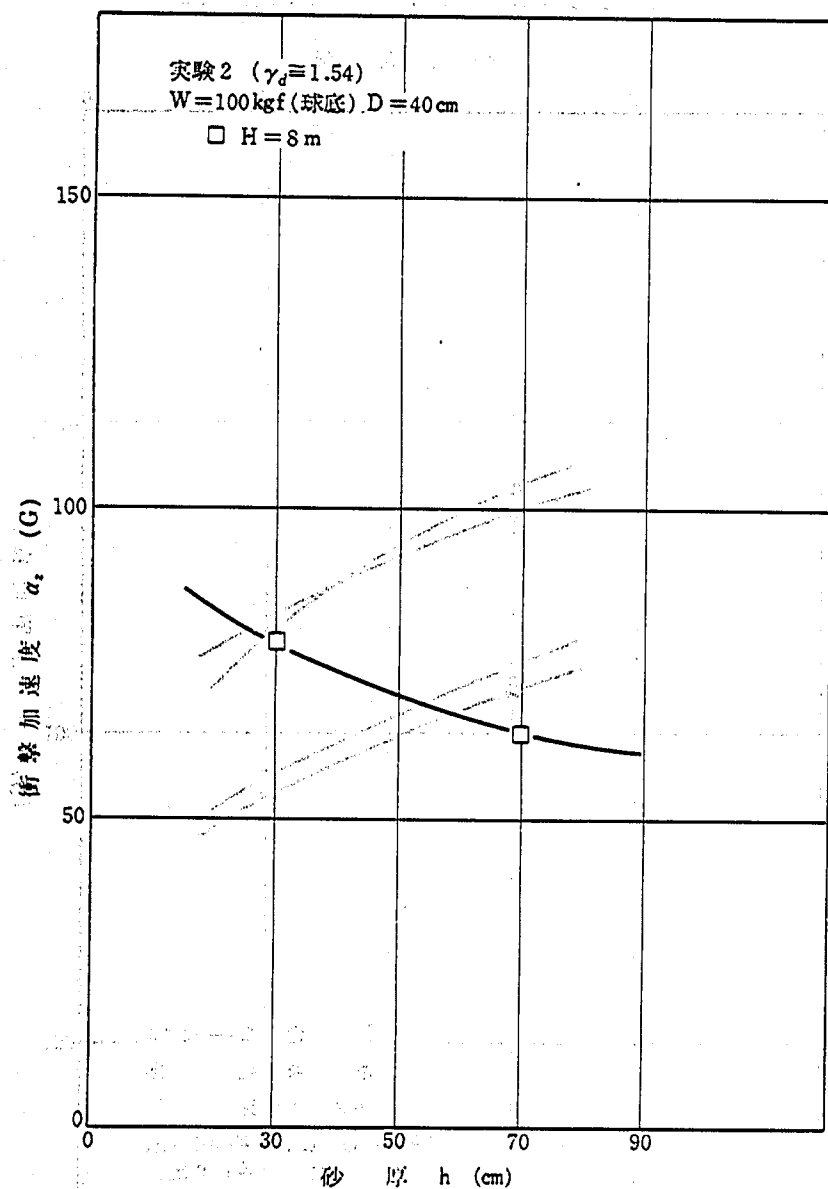


図-5.6(g) 敷砂厚と衝撃加速度の関係

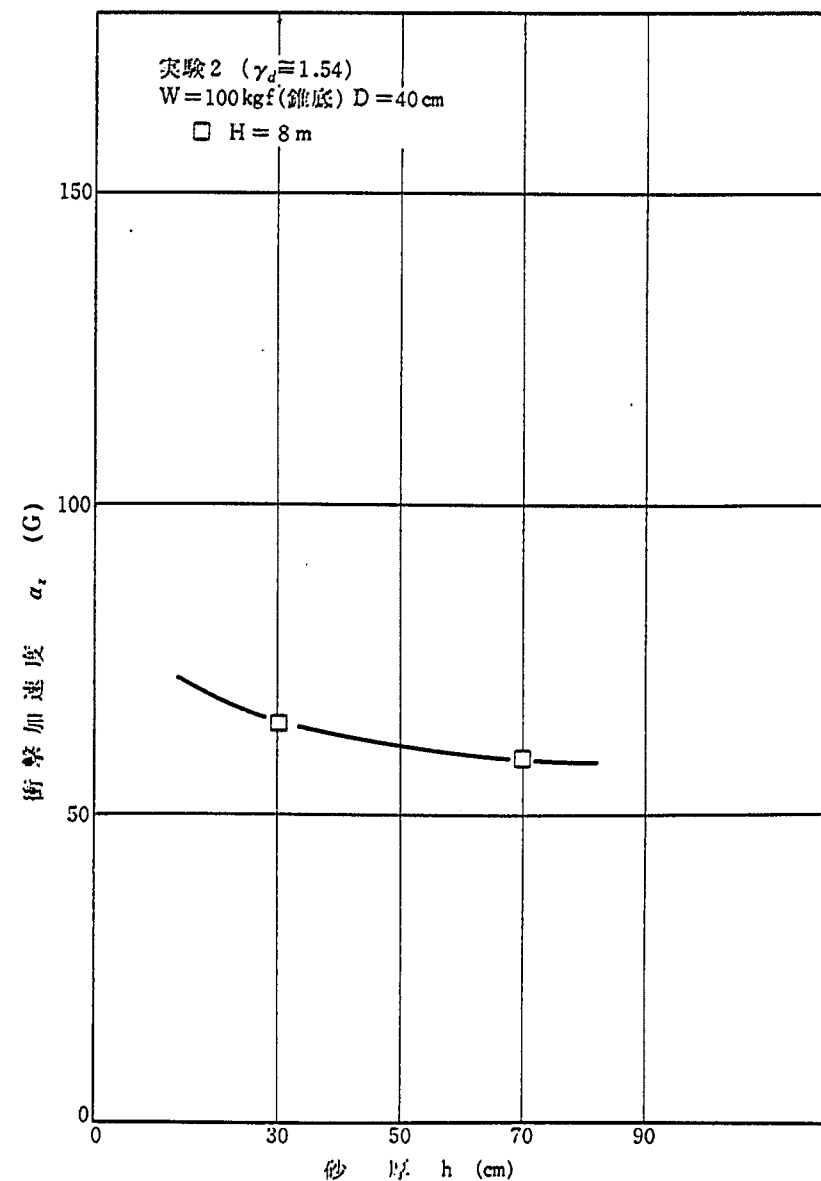


図-5.6(h) 敷砂厚と衝撃加速度の関係

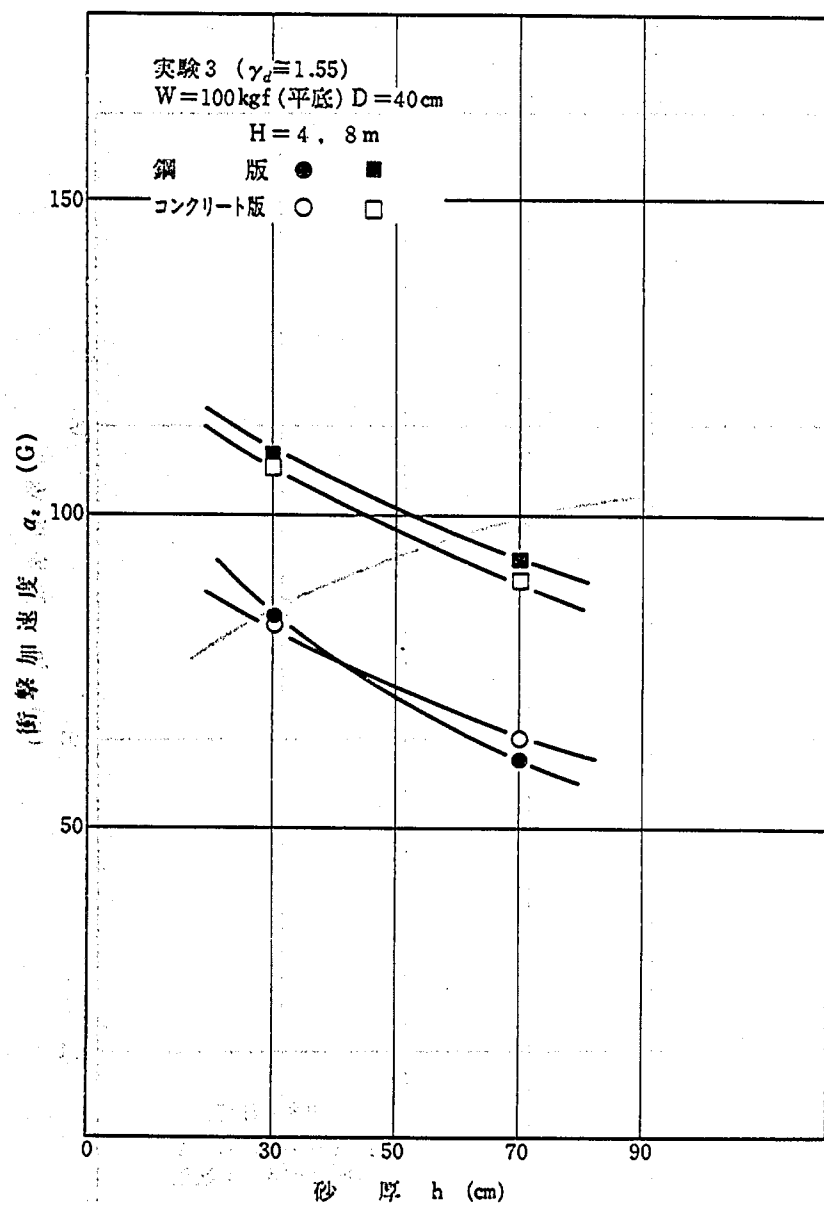


図-5.6(i) 敷砂厚と衝撃加速度の関係

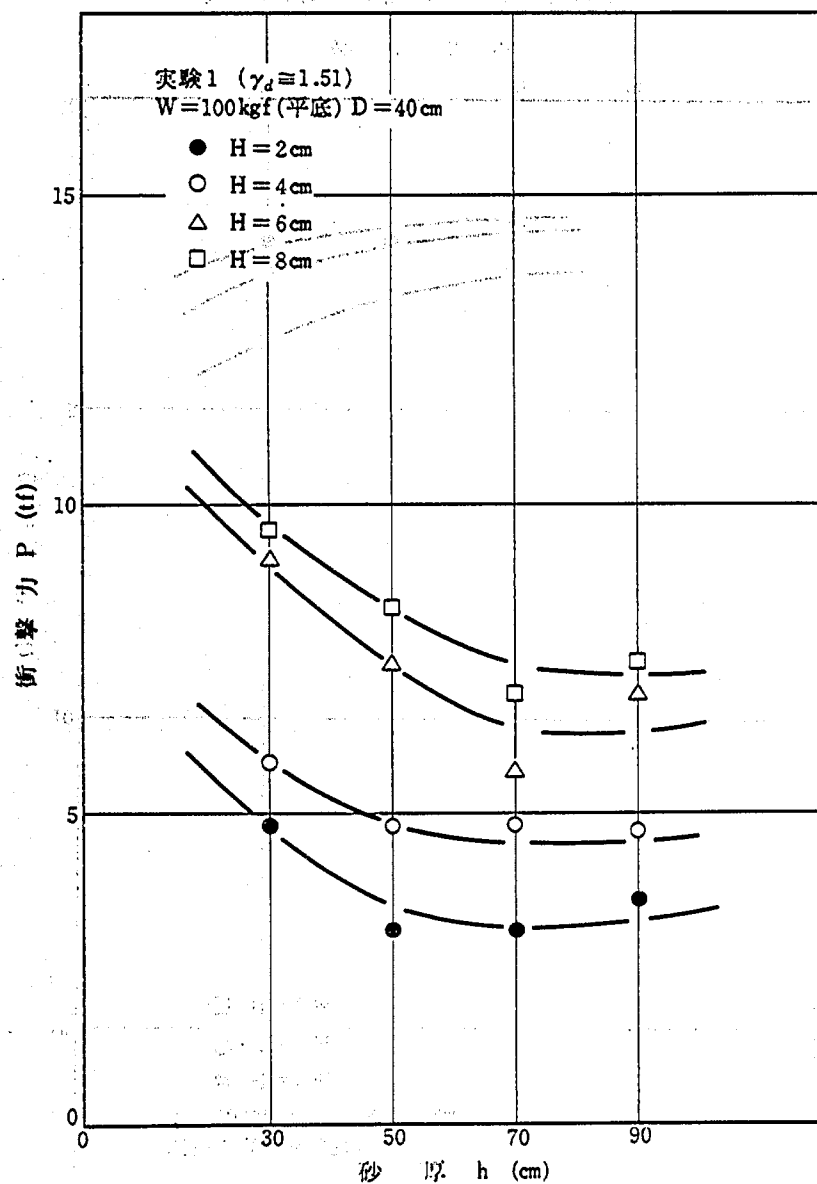


図-5.7(a) 敷砂厚と衝撃力の関係

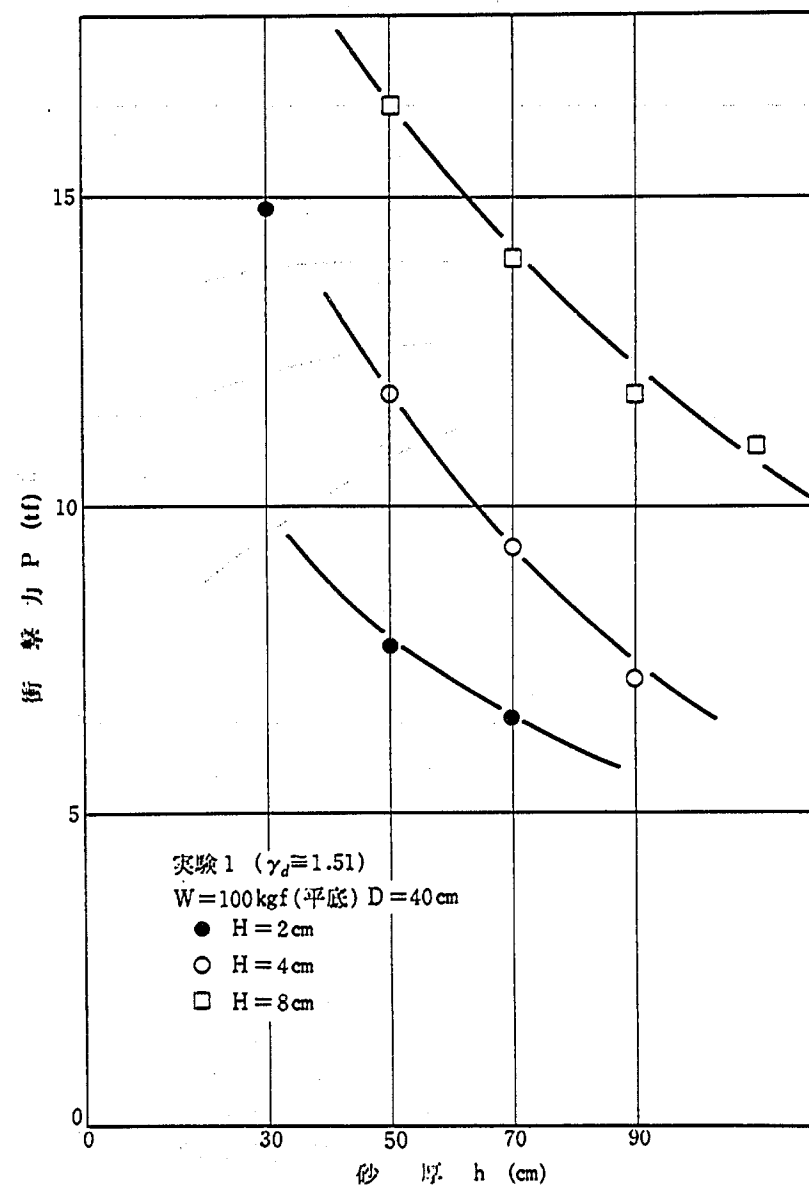


図-5.7(b) 敷砂厚と衝撃力の関係

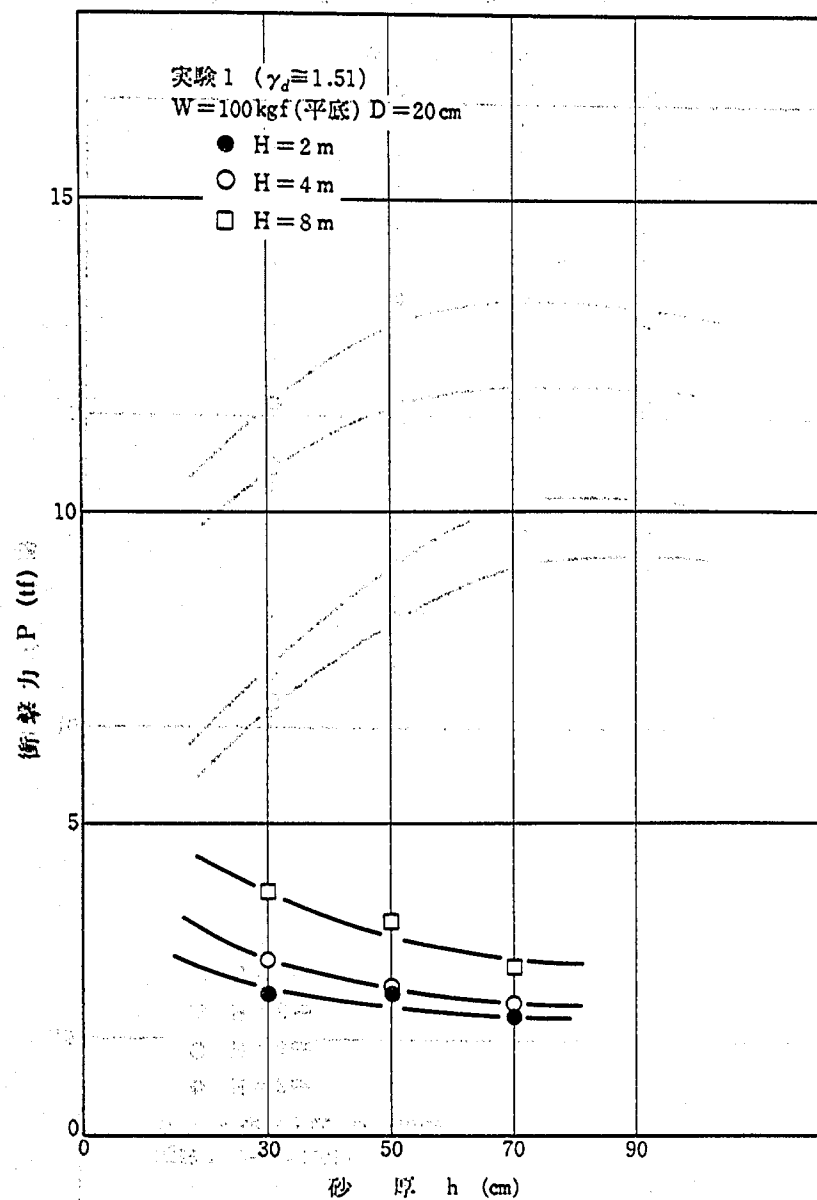


図- 5.7(c) 敷砂厚と衝撃力の関係

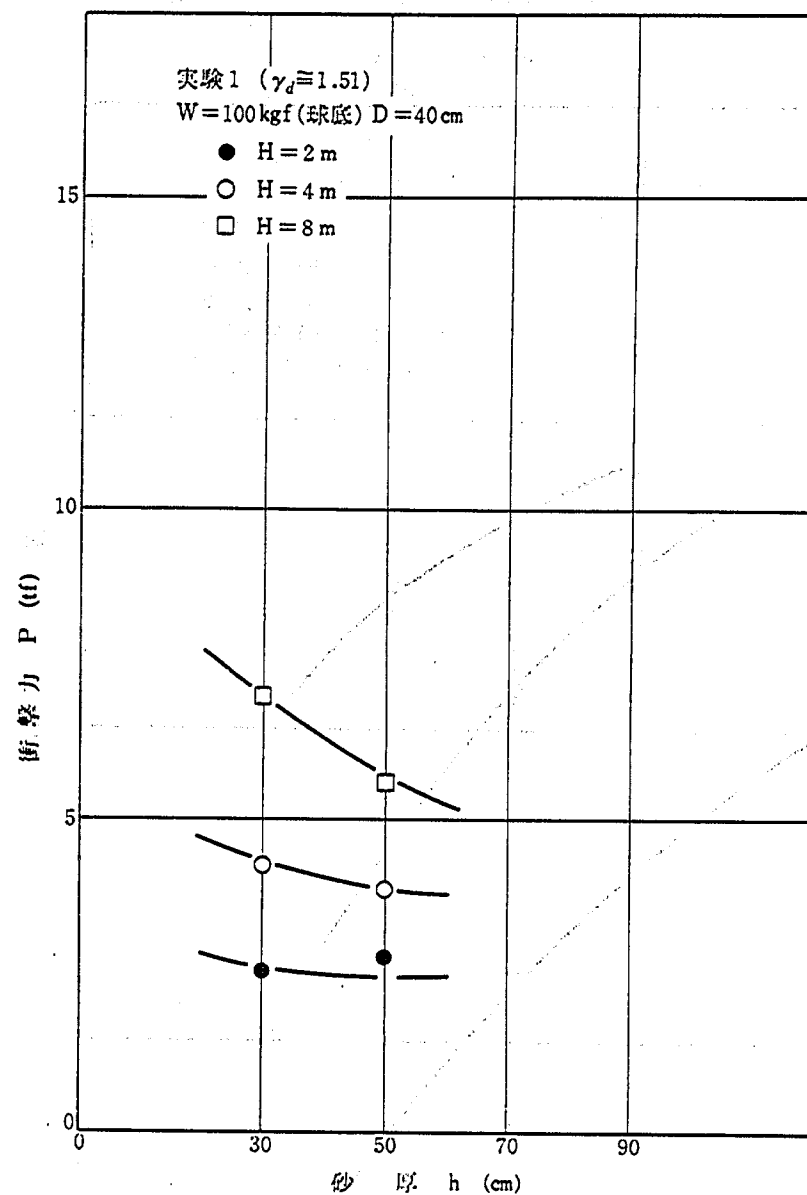


図- 5.7(d) 敷砂厚と衝撃力の関係

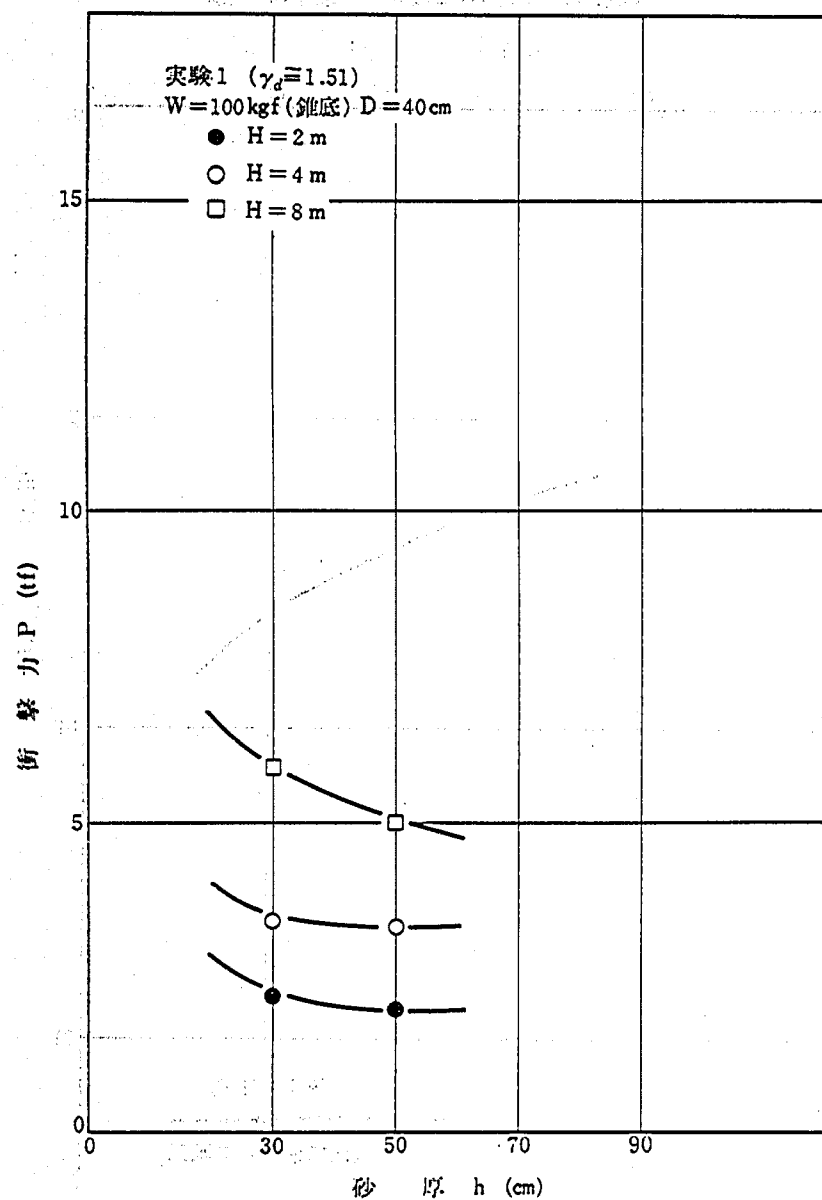


図-5.7(e) 敷砂厚と衝撃力の関係

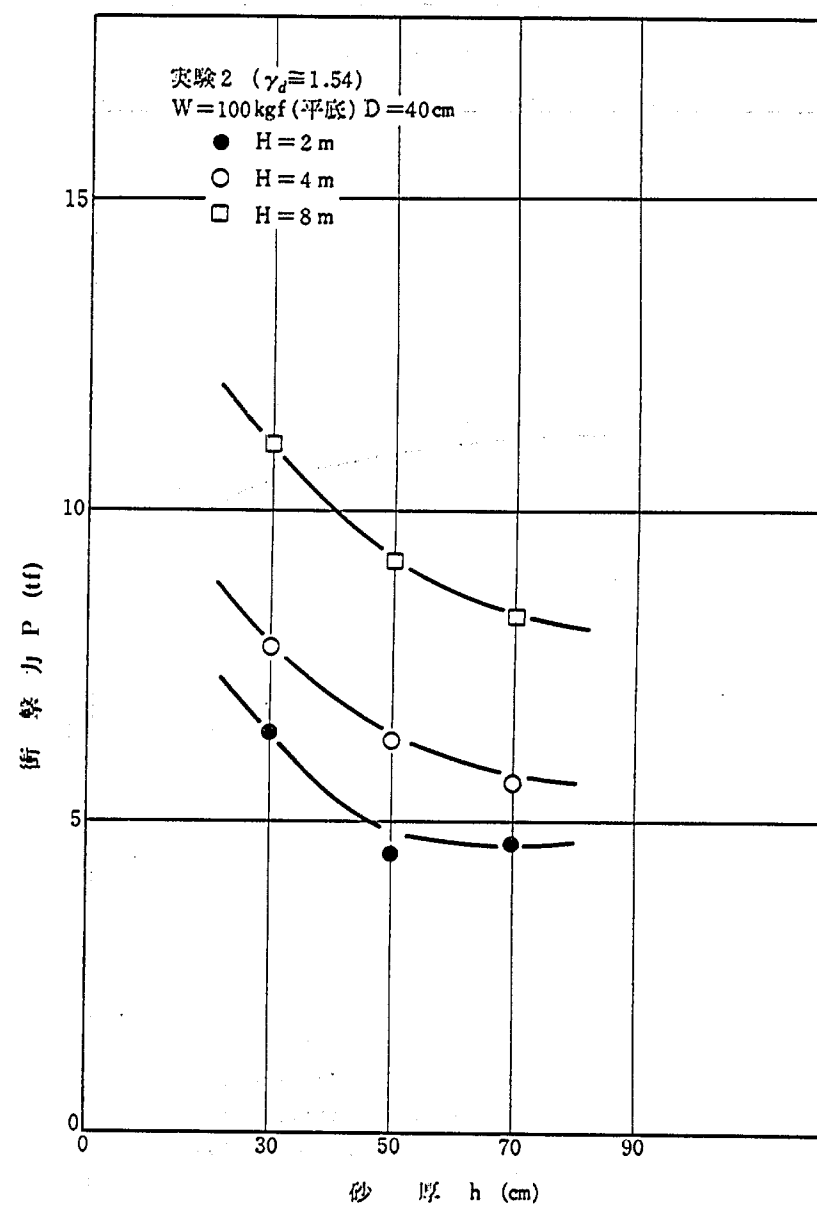
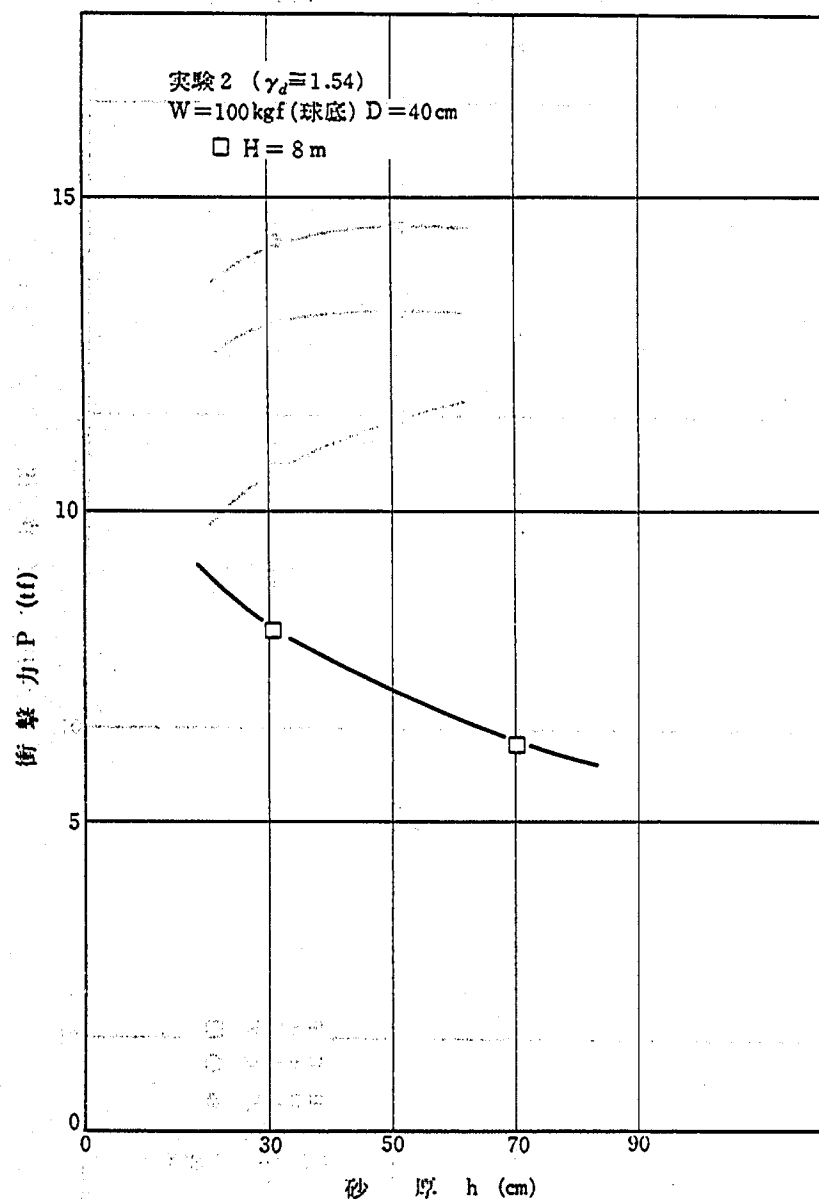
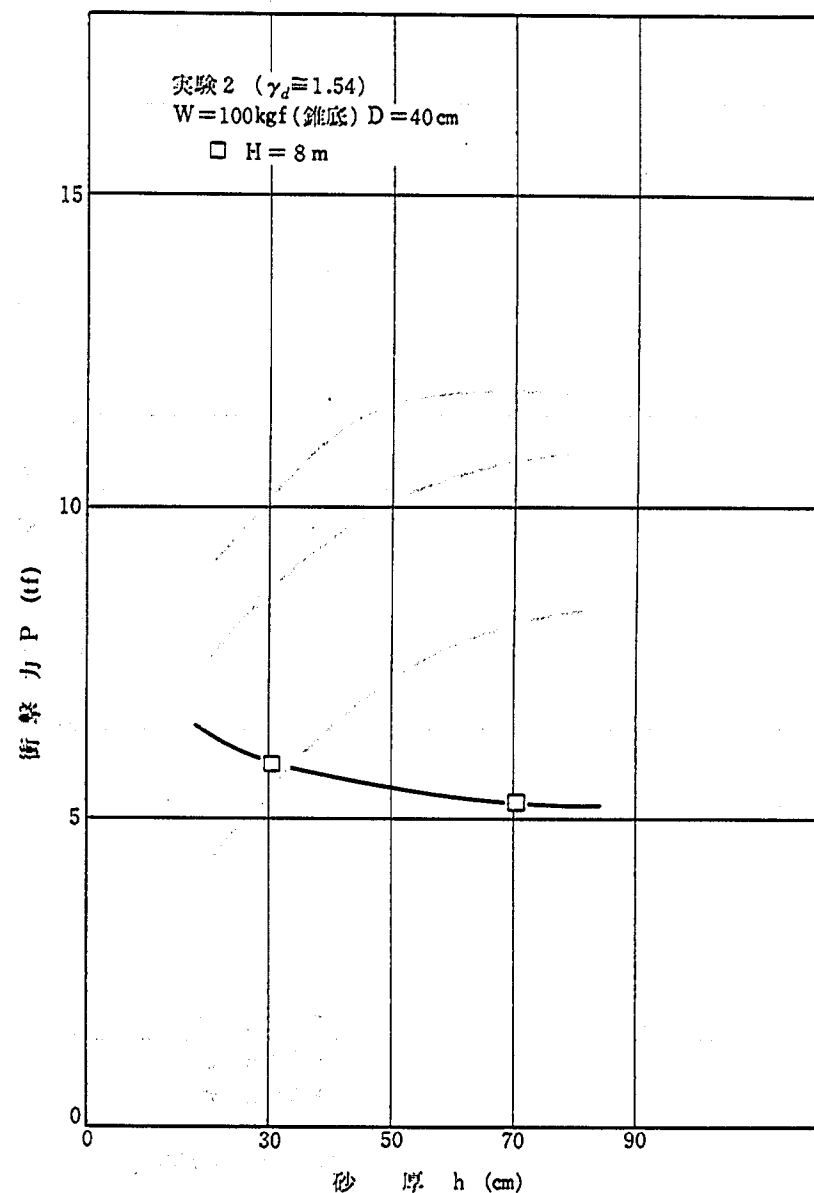


図-5.7(f) 敷砂厚と衝撃力の関係



図— 5.7 (g) — 敷砂厚と衝撃力の関係



図— 5.7 (h) — 敷砂厚と衝撃力の関係

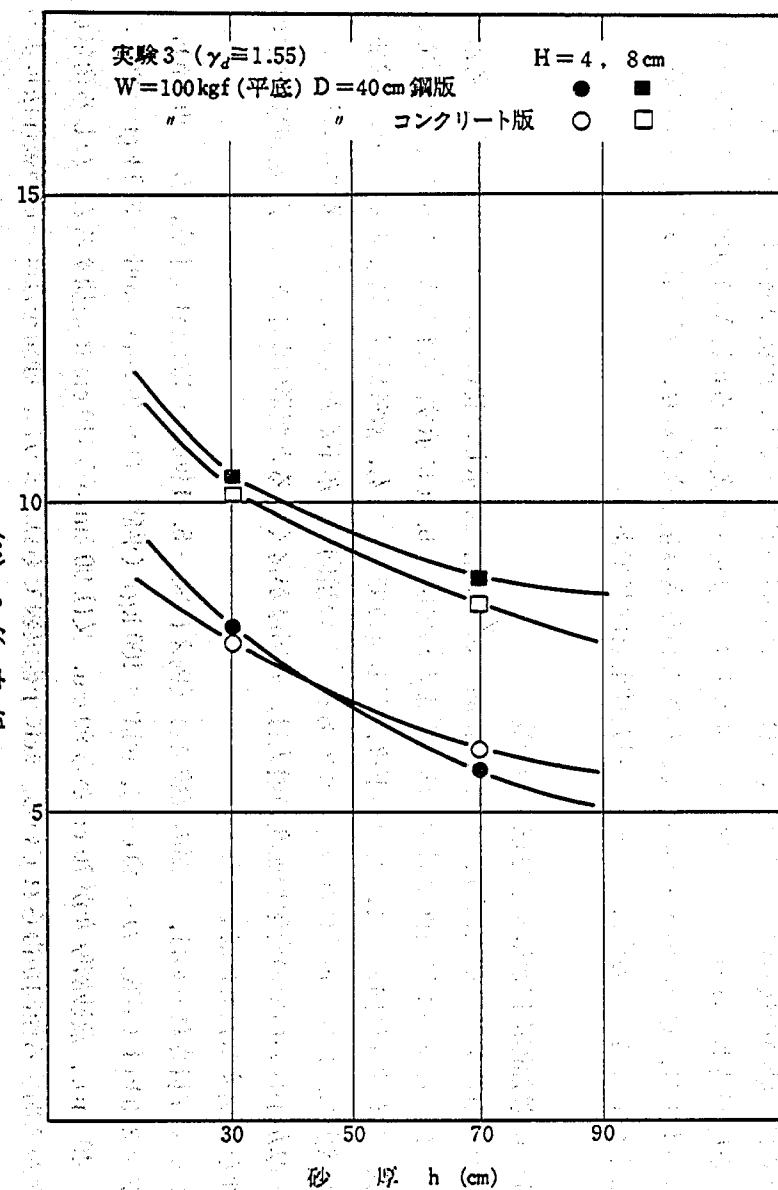


図-5.7(i) 敷砂厚と衝撃力の関係

その影響はほとんどないようである。ただし、このような特性は、重錘の重量にも依存するものであろうから、今回の実験だけで一般的に結論づけるためにはもう少し検討を要する。図-5.7の衝撃力と敷砂層の関係においても同様の事が見られる。

以上では、個々の実験ケース・重錘ごとの結果を図により示したが、以下では、それら相互の関係の考察を行なう。

(2) 衝撃加速度に及ぼす重錘重量・寸法の影響

図-5.8は、重錘の重量・寸法により衝撃加速度がどのように変るかを示したものである。これは、実験1に対する結果として得られたものである。これによると、今回の重錘の中で、径の小さいものが最も衝撃加速度が小さく、その次に重量の大きいものが衝撃加速度が小さい。これは、重量が大きい、又は断面積が小さい重錘では単位面積あたりの衝撃力が大きく、敷砂層へ深くめり込むためと考えられる。この事を単位面積あたりの重錘重量と衝撃加速度として整理したものが、図-5.9である。以上のような実験結果は同一の重量の落石によって生ずる衝撃力は、とがったものより偏平なものの方が大きくなる事を示しており、構造物の設計外力として扱うときには偏平な落石を想定する方が安全側の結果となる事を示している。

(3) 衝撃加速度に及ぼす重錘形状の影響

重錘の寸法・重量を一定にして重錘の形状による影響を見たのが図-5.10である。これは、密度条件が多少異なる実験1、2の結果である。どの条件の場合にも、平底の場合に衝撃加速度が最も大きく、球底・錐底では平底に対して6~7割の値である。細かく見ると球底の方が錐底よりやや大きい。これらは、砂層の状態がすべての実験条件において同一であっても、形状の違いにより貫入過程において単位面積あたりの応力度が異なる、すなわち、球底・錐底のように貫入初期において接触面積が小さいものは、見かけの剛性が小さく、砂層のめり込み量が深くなり、衝撃加速度が小さくなると考える事ができる。この事は図-5.9で見た結果と同じである。

(4) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響

個々の重錘条件の結果については、既に図-5.6に結果を示し、特徴を述べた。ここでは、各落下高ごとに、種々の重錘条件に対する結果をまとめて図-5.11に示す。これによると既に述べた事であるが、平均的な傾向として、どの落下高、どの重錘であっても、敷砂層厚が増加するにつれ衝撃加速度が減少し、ほぼ一定値に近づくようである。この傾向は、落下高が大きいほど顕著に見られる。敷砂層厚が小さい所での衝撃加速度の増大は、砂層厚が薄くなると変形性が小さく、敷砂層の見かけの剛性が増加するために帰せられる。

ここで注目されるのは、一部の実験では(例えば図-5.11(a) $W=100\text{ kgf}$ (平底, $D=40\text{ cm}$), (b) $W=300\text{ kgf}$ (平底, $D=40\text{ cm}$), (c) $W=100\text{ kgf}$ (平底, $D=40\text{ cm}$), (d) $W=300\text{ kgf}$ (平底, $D=40\text{ cm}$)), 敷砂層厚 h が70 cmから90 cm, 又は90 cmから110 cmに増加すると、むしろ衝撃加速度が増加する傾向が得られている。既に予備実験でも見たように、砂層をほぼ一定の製作法によって作っても、実験的に得られる衝撃加速度等はある範囲にばらつくもので、このような傾向が有意なものであるかは、さらに検討を要するが、このような傾向を次のように理解する事もできる。後に、

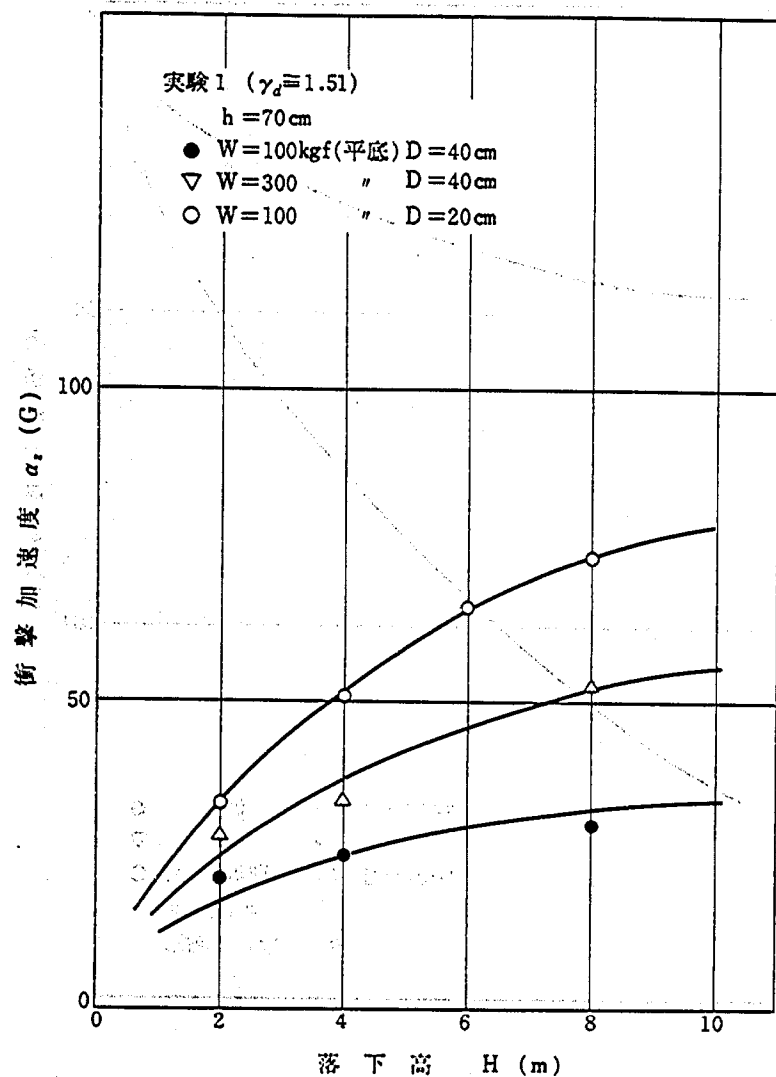


図-5.8(c) 衝撃加速度に及ぼす重錘の重量寸法の影響

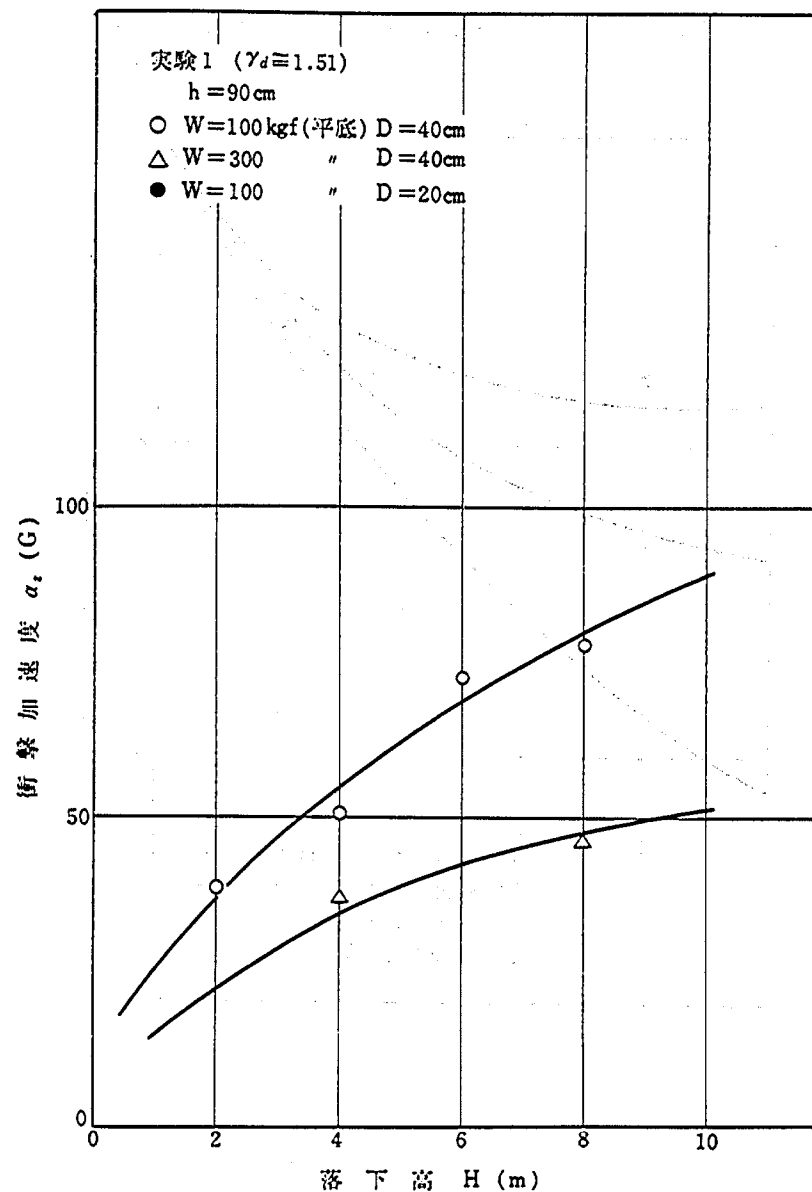


図-5.8(d) 衝撃加速度に及ぼす重錘の重量寸法の影響

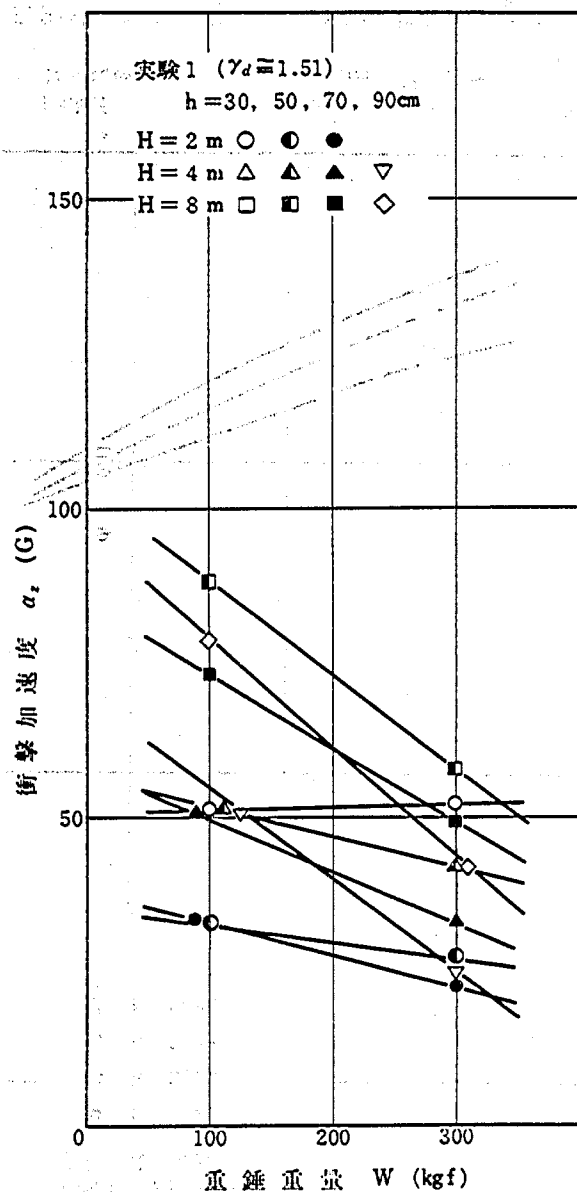


図- 5.8(e) 衝撃加速度に及ぼす重錘の重量寸法の影響

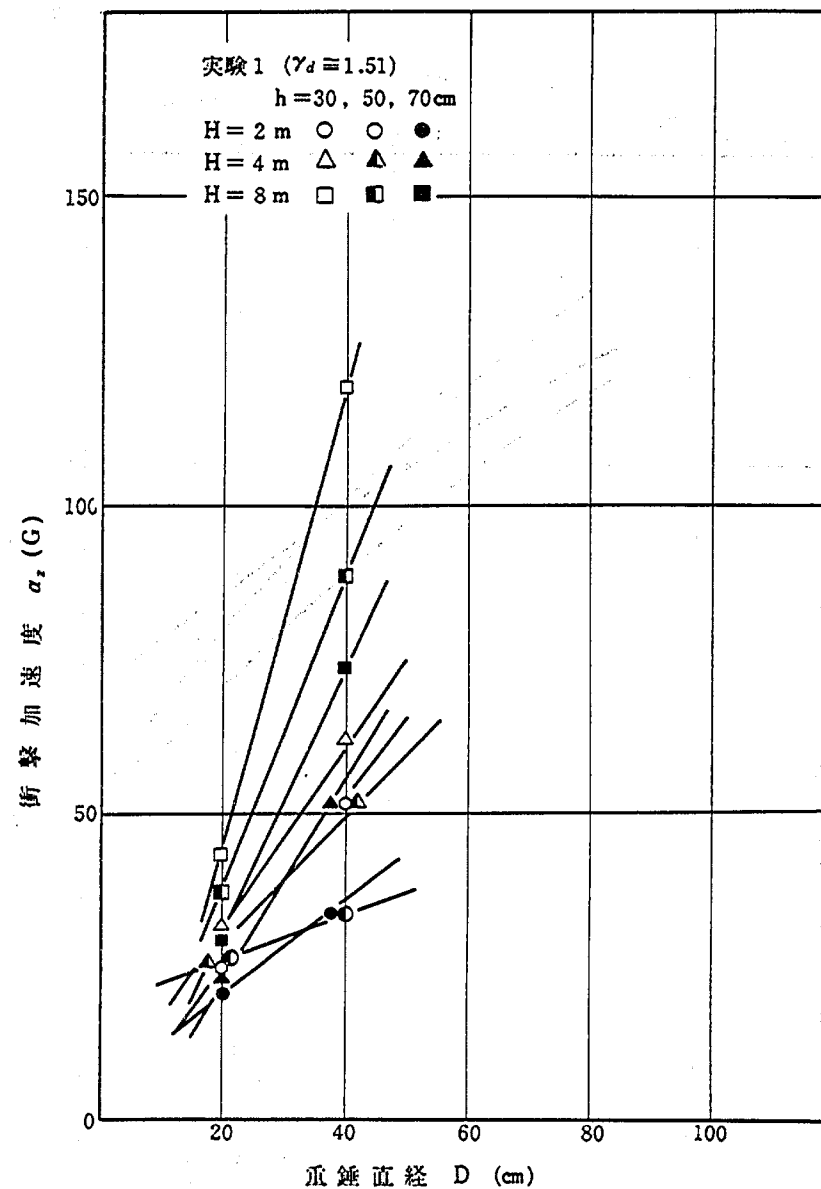


図- 5.8(f) 衝撃加速度に及ぼす重錘の重量寸法の影響

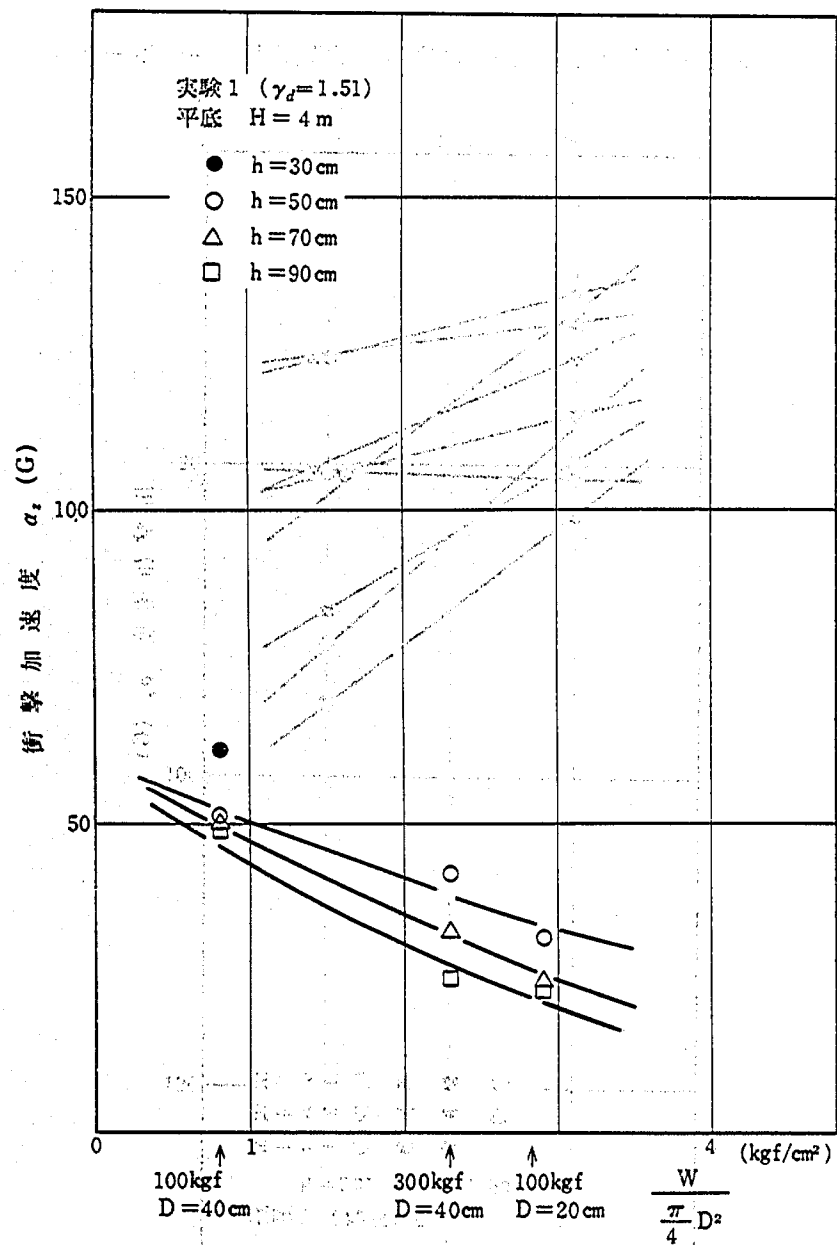


図- 5.9(a) 単位面積あたりの重錘重量と衝撃加速度の関係

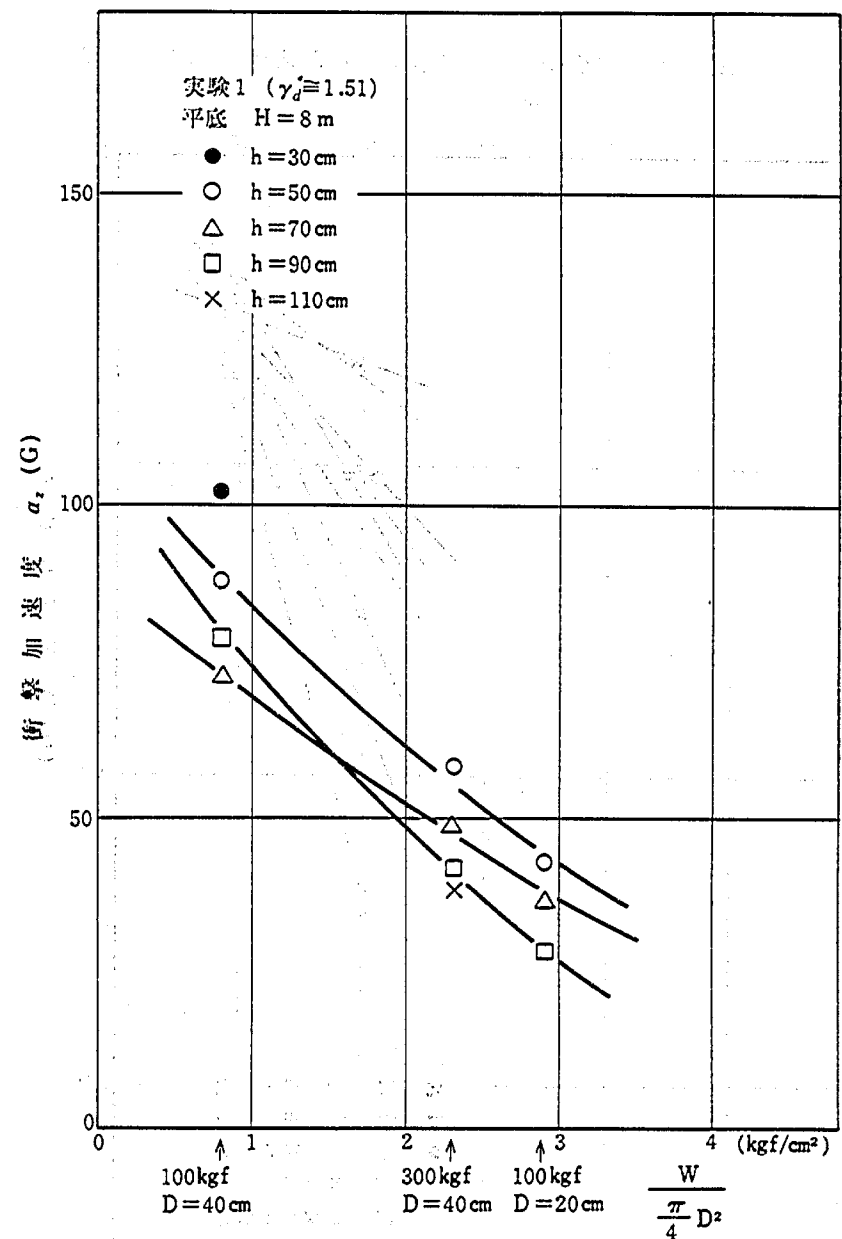


図- 5.9(b) 単位面積あたりの重錘重量と衝撃加速度の関係

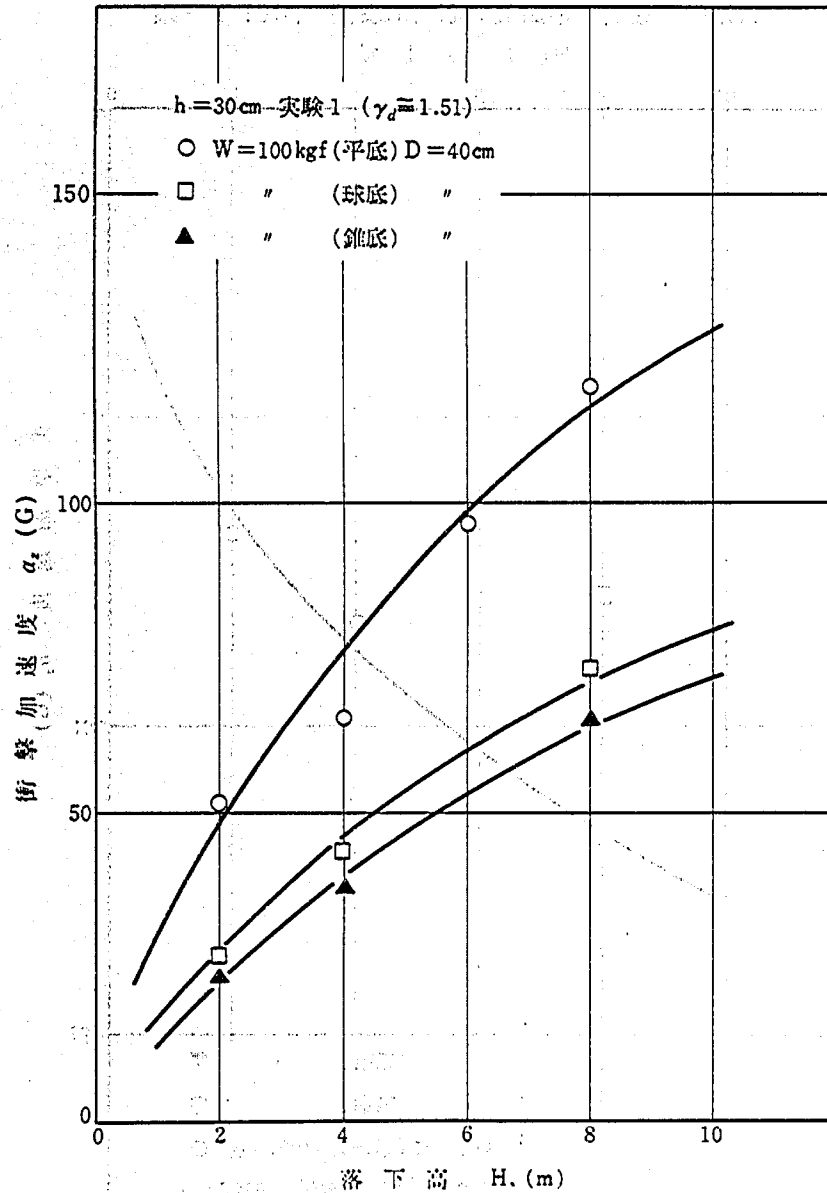


図-5.10(a) 衝撃加速度に及ぼす重錘形状の影響

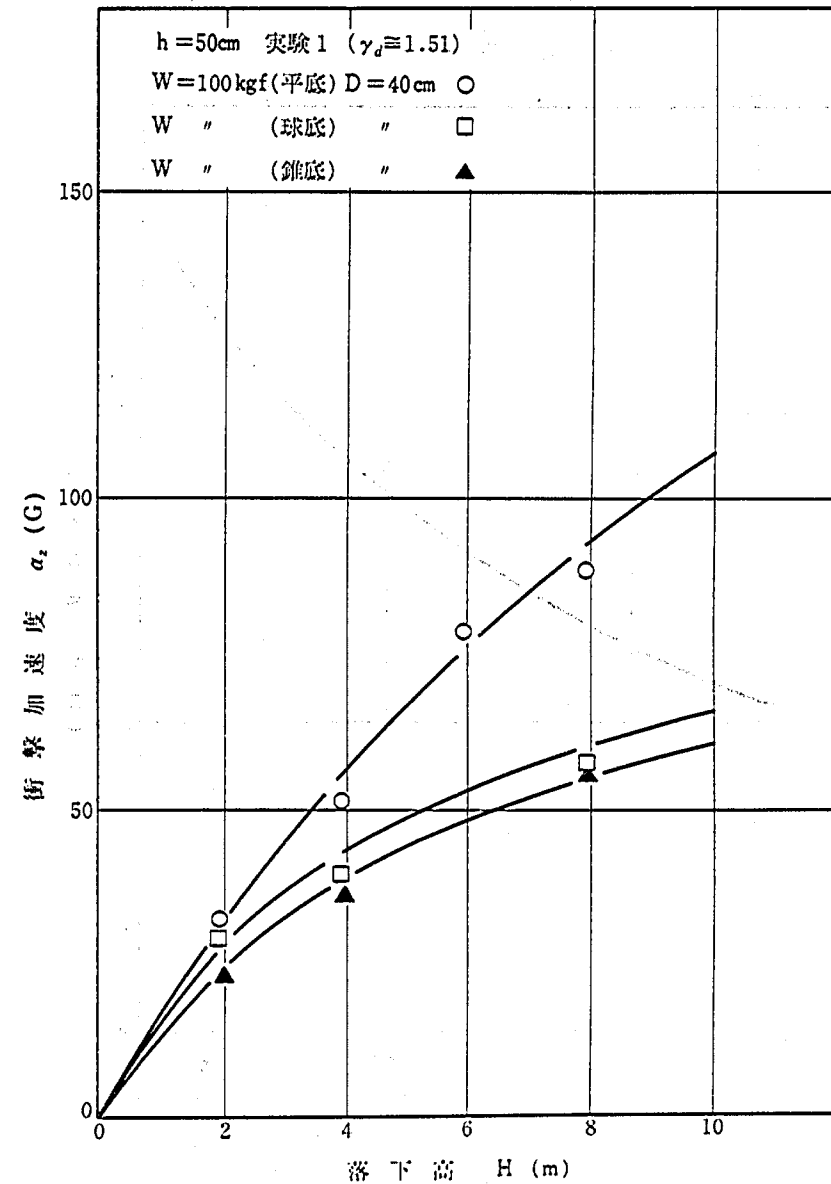


図-5.10(b) 衝撃加速度に及ぼす重錘形状の影響

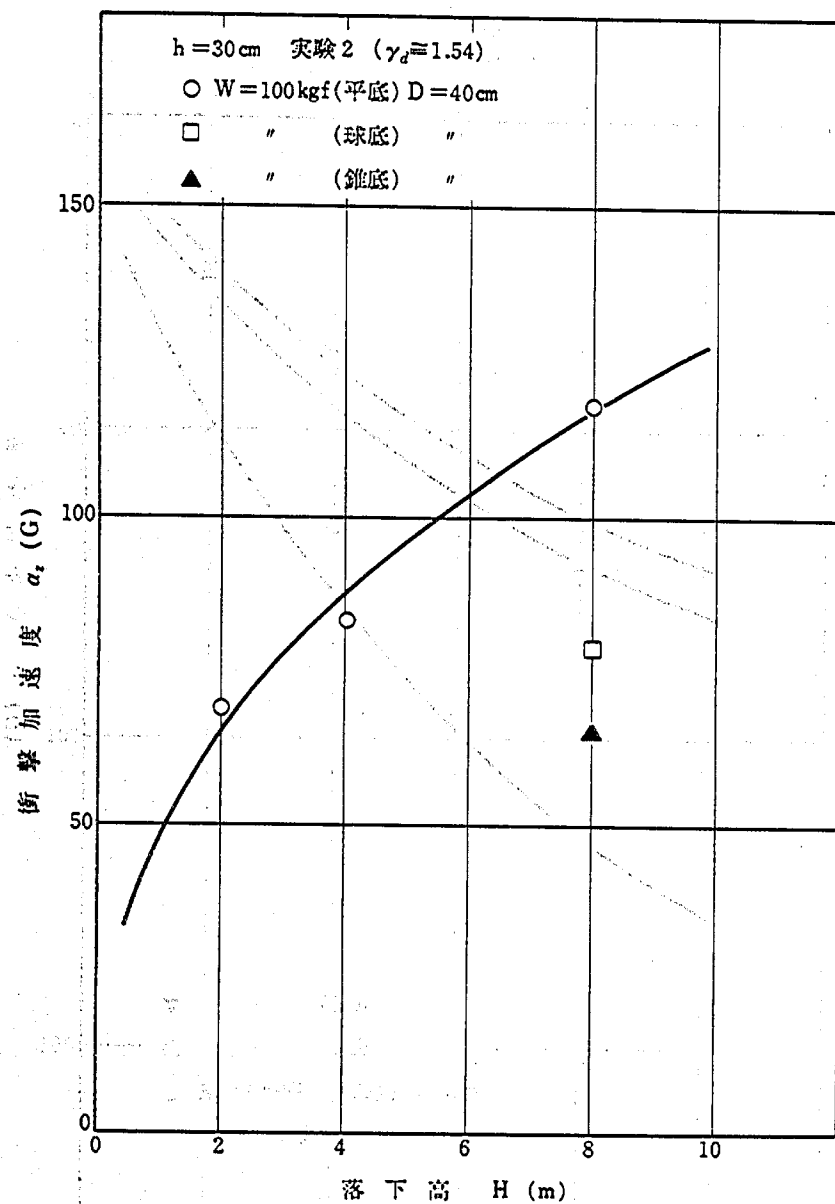


図- 5.10(c) 衝撃加速度に及ぼす重錘形状の影響

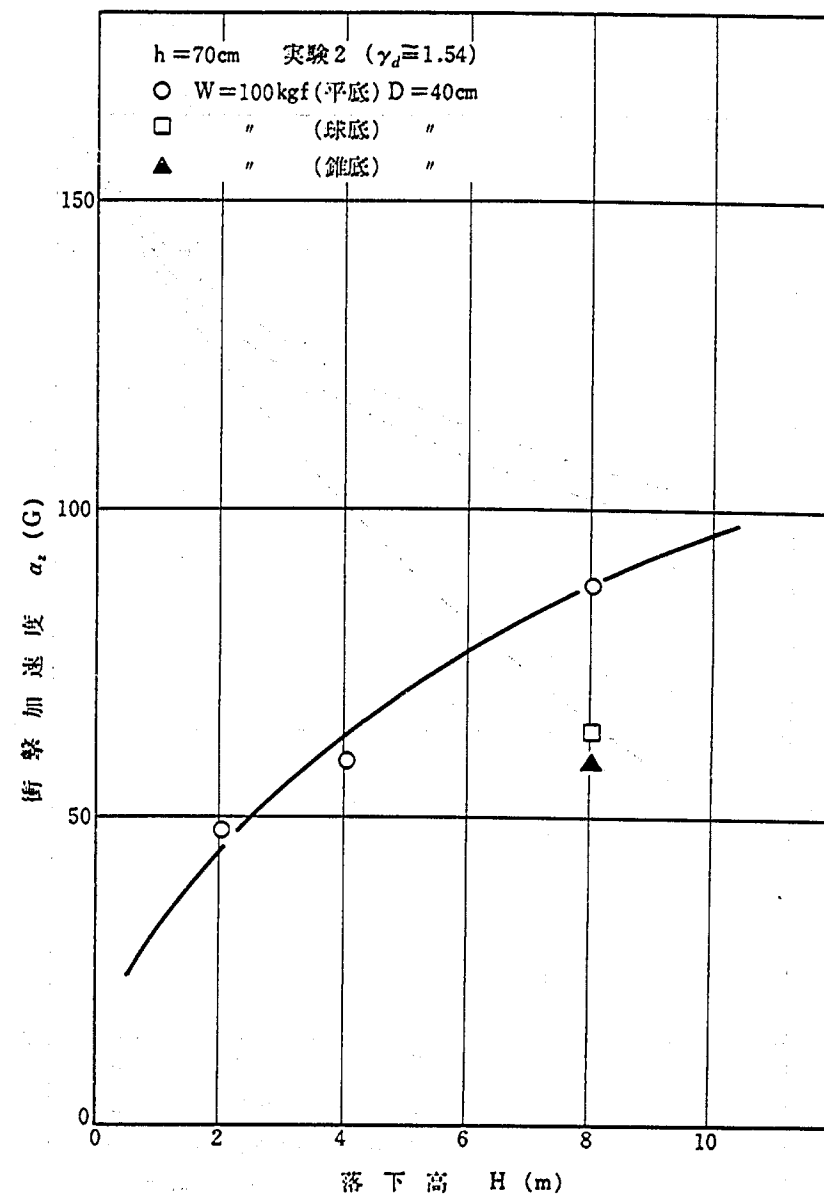


図- 5.10(d) 衝撃加速度に及ぼす重錘形状の影響

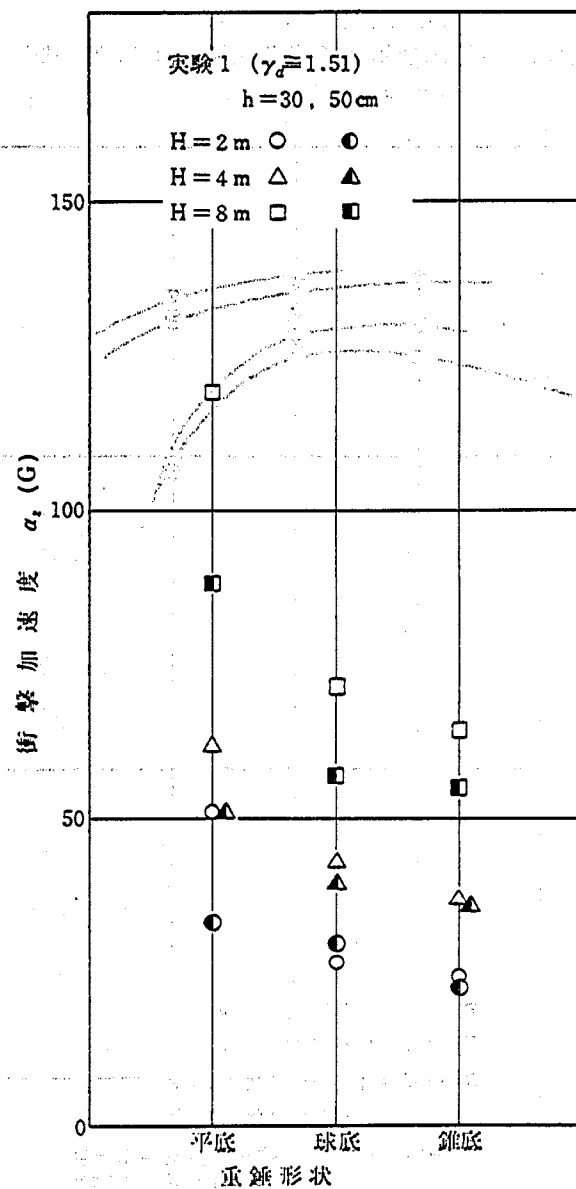


図- 5.10(e) 衝撃加速度に及ぼす重錘形状の影響

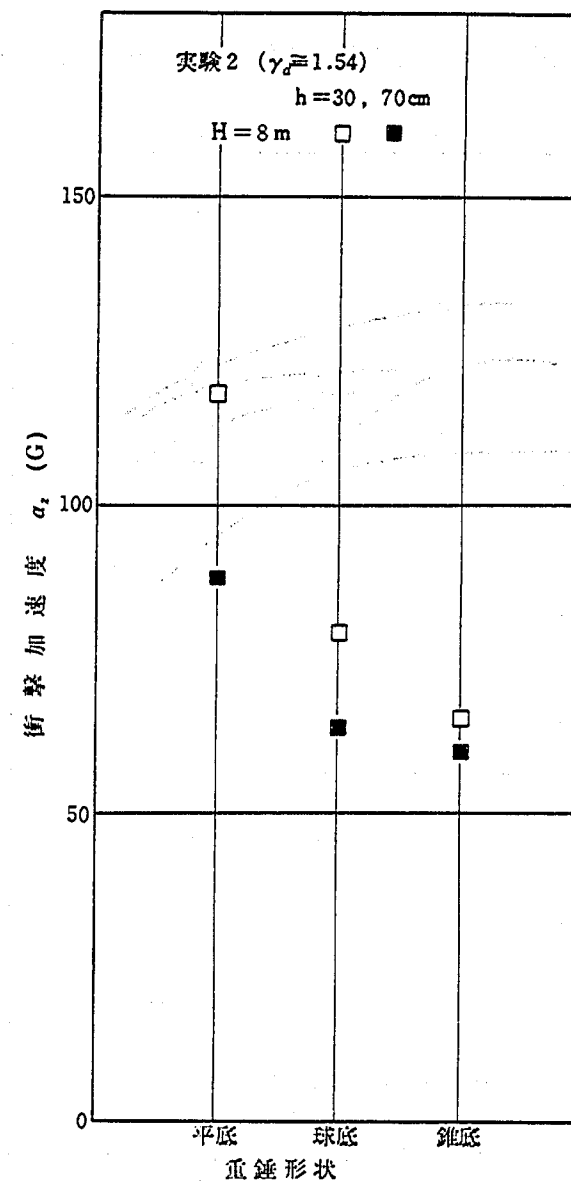


図- 5.10(f) 衝撃加速度に及ぼす重錘形状の影響

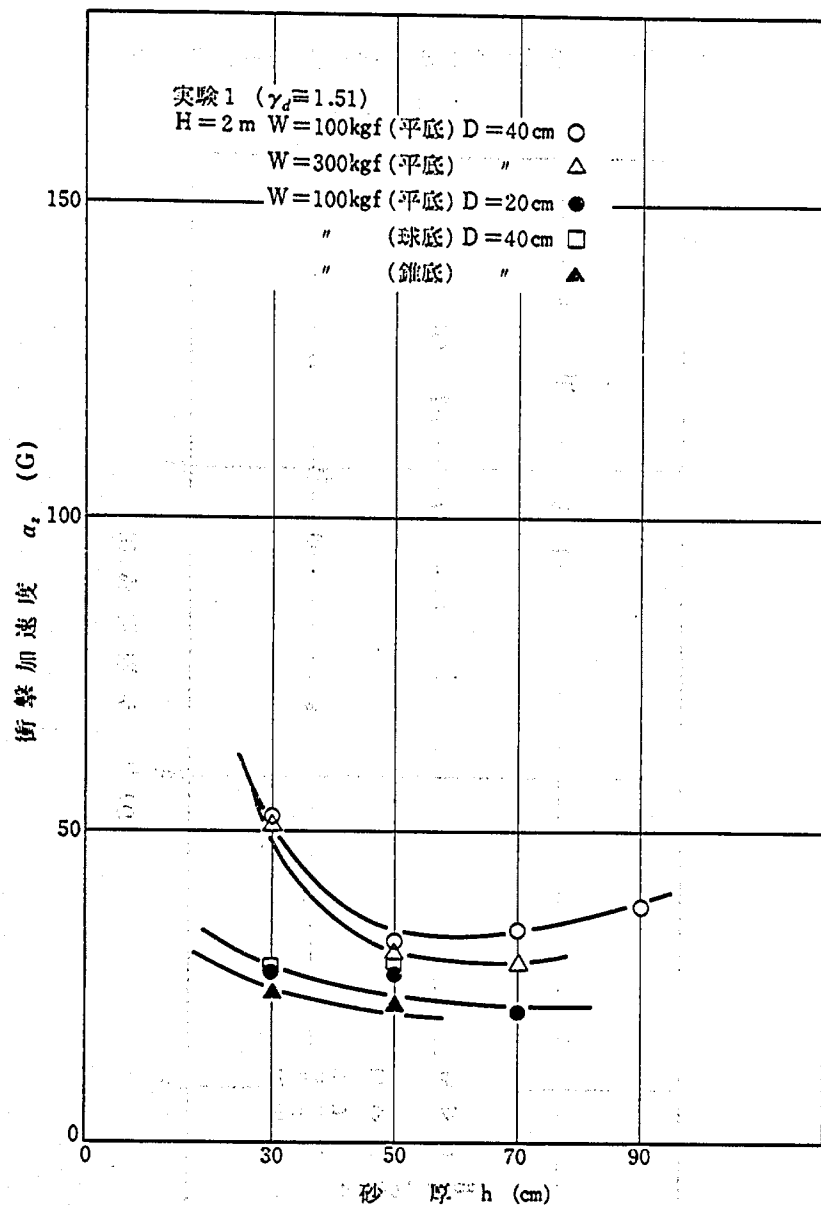


図- 5.11 (a) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響
(すべての重錘を含む)

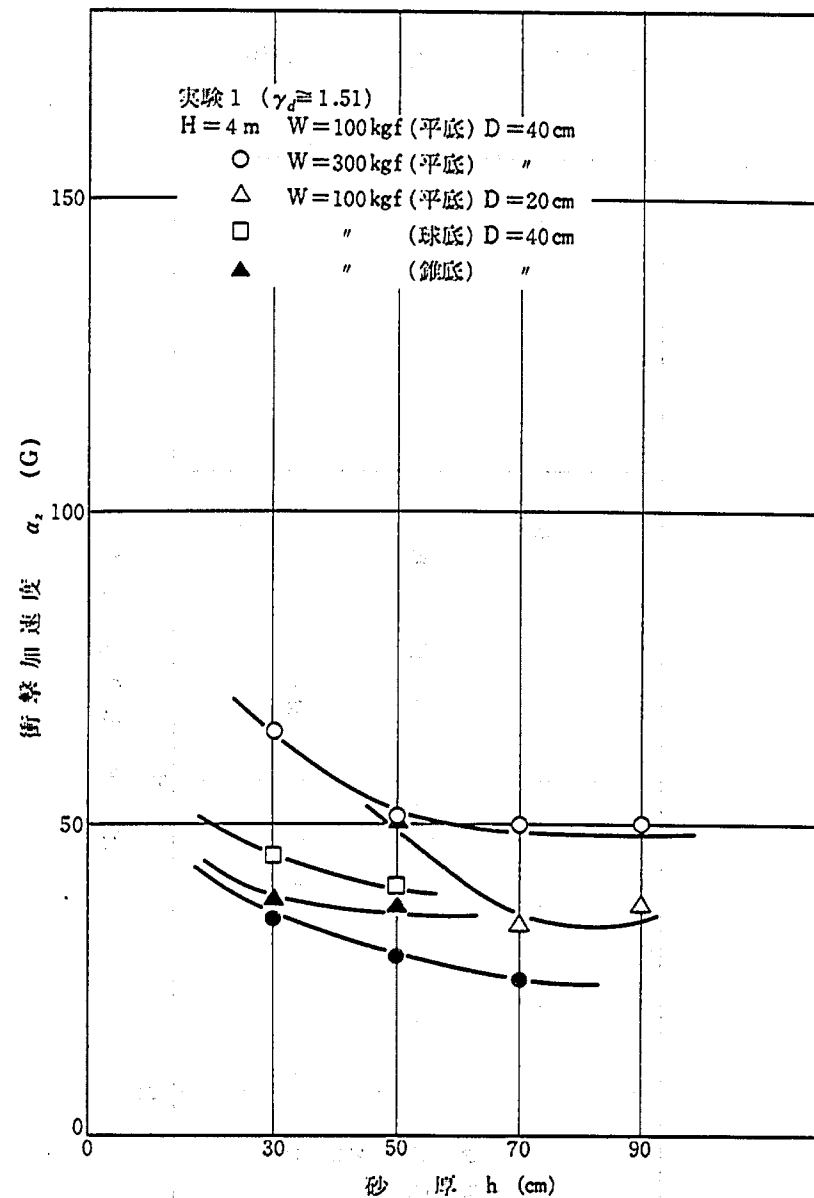


図- 5.11 (b) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響
(すべての重錘を含む)

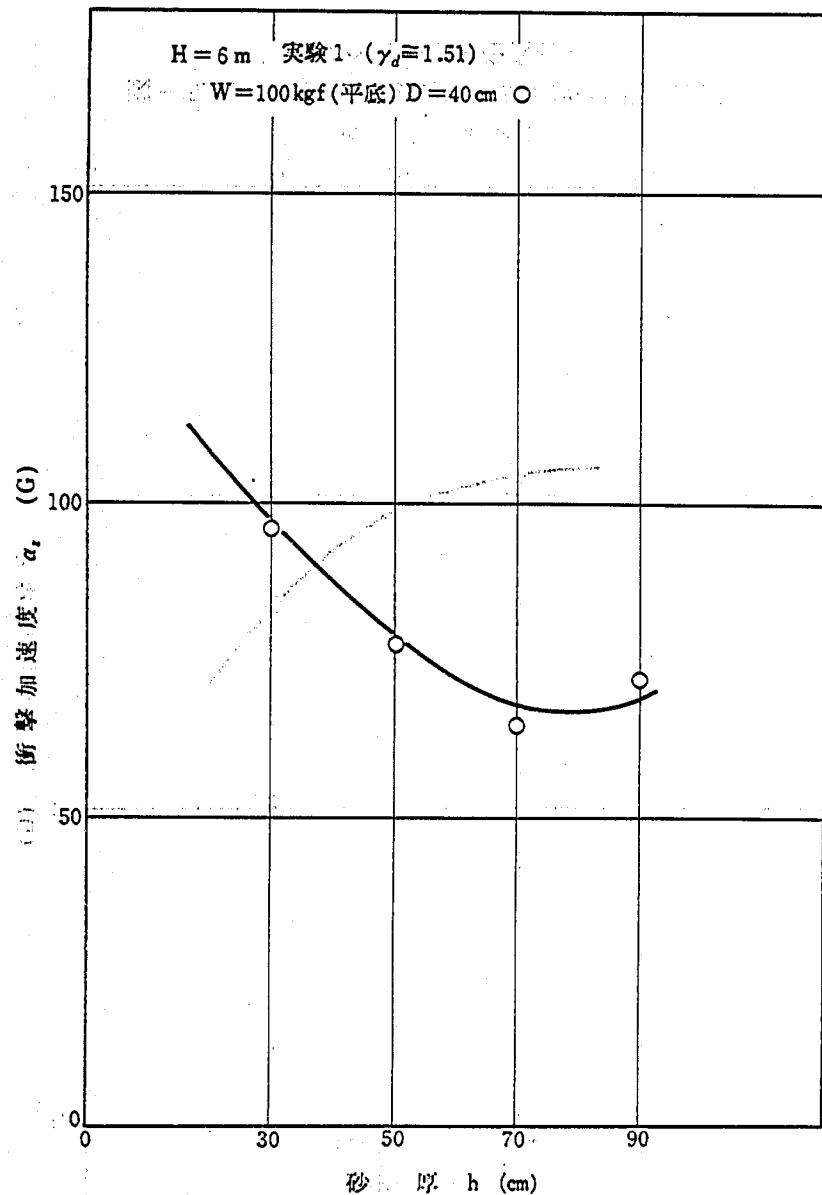


図-5.11(c) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響
 (すべての重錘を含む)

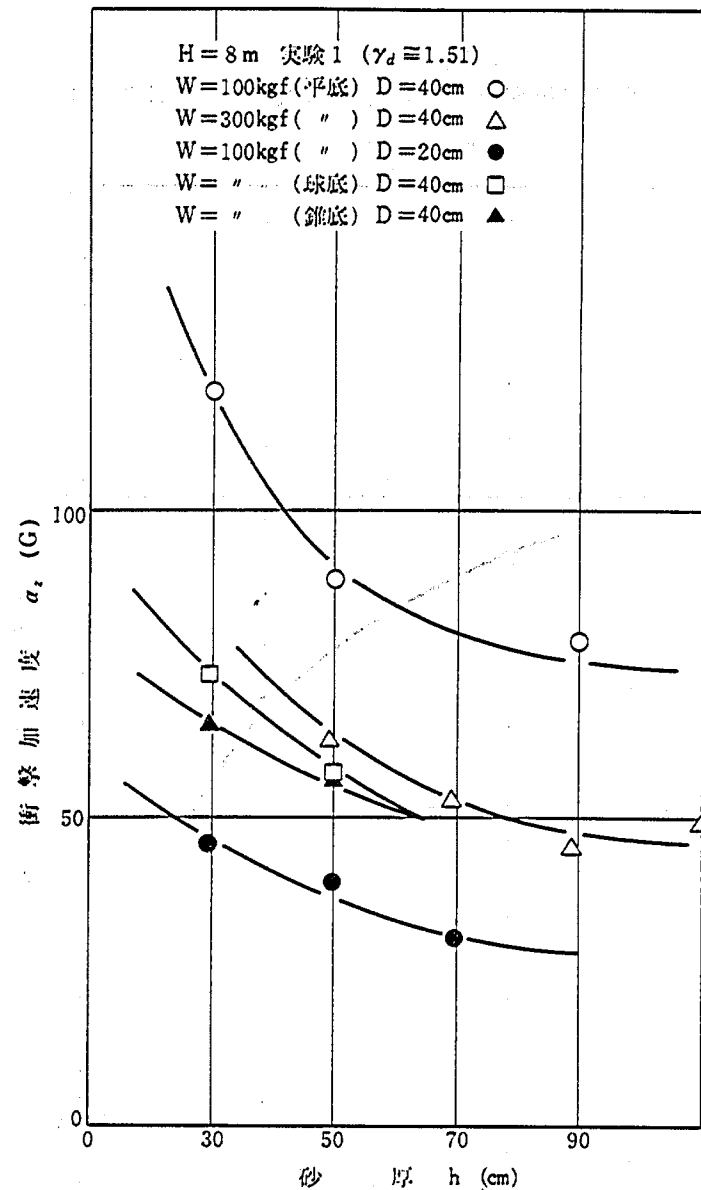


図-5.11(d) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響
 (すべての重錘を含む)

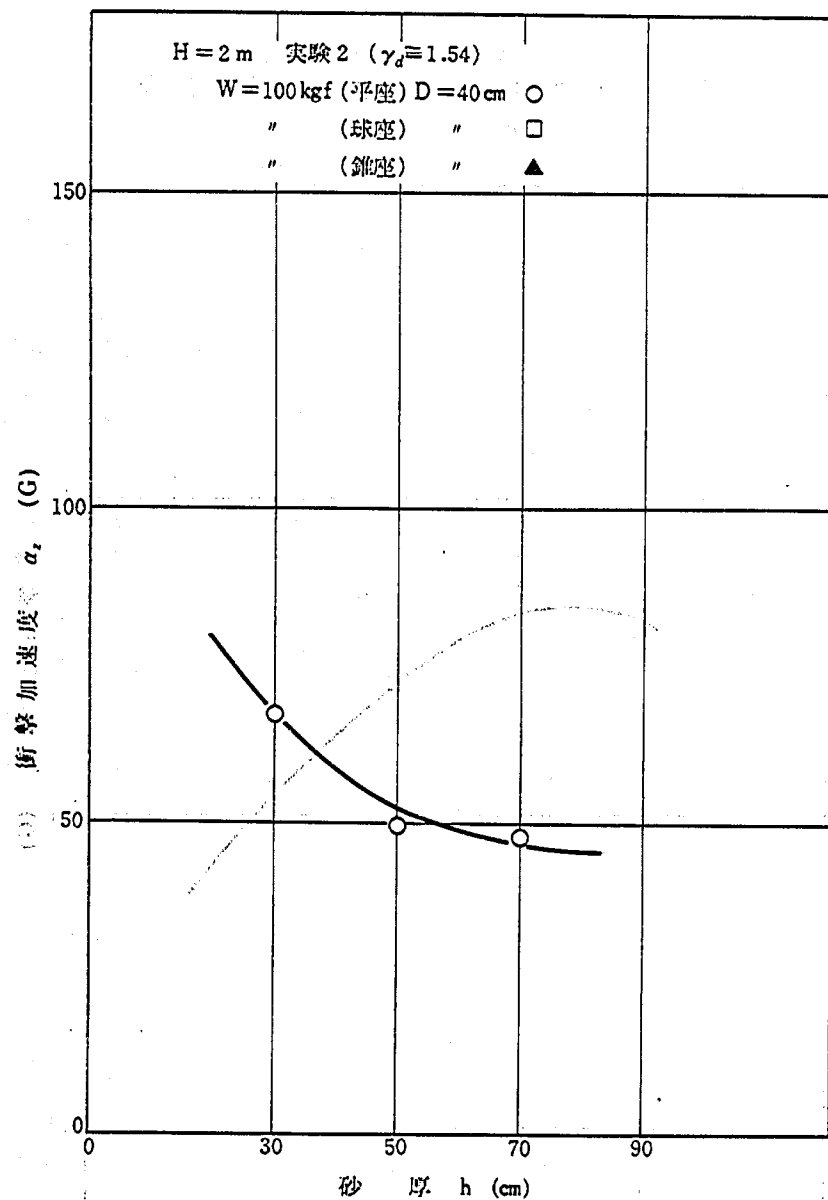


図-5.11(e) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響
(すべての重錘を含む)

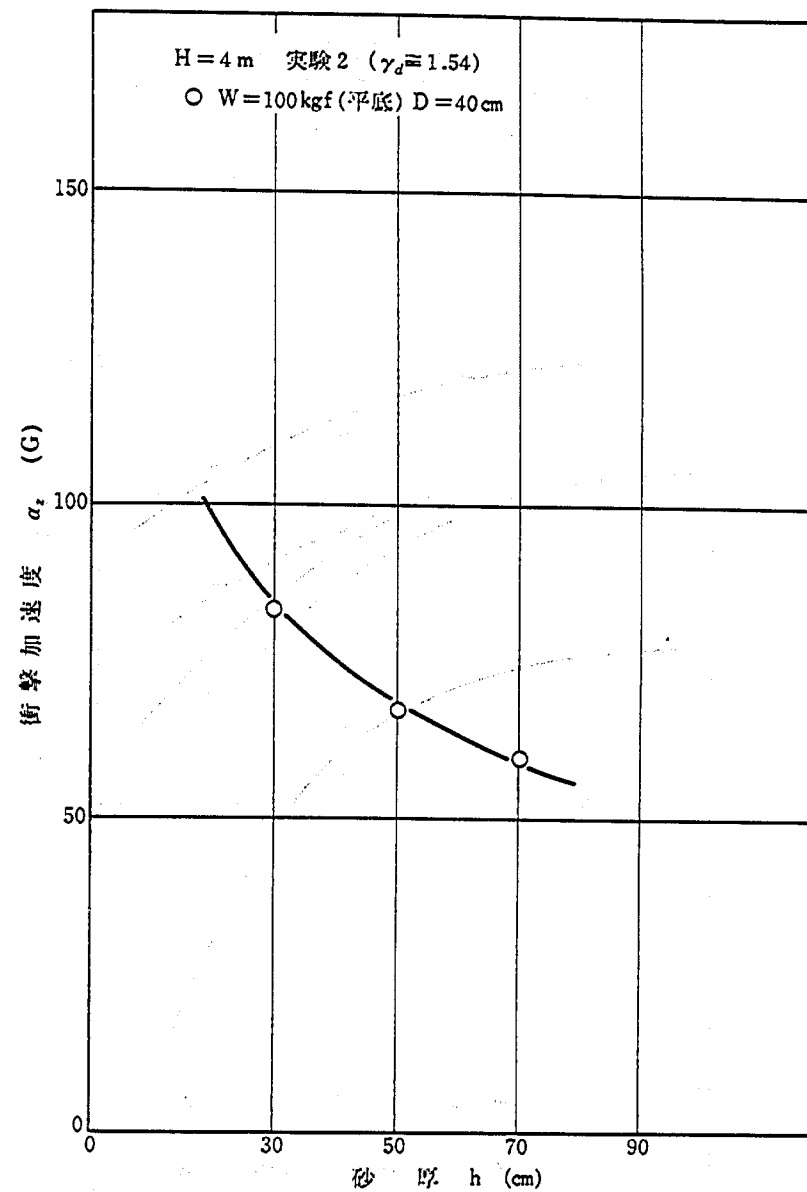
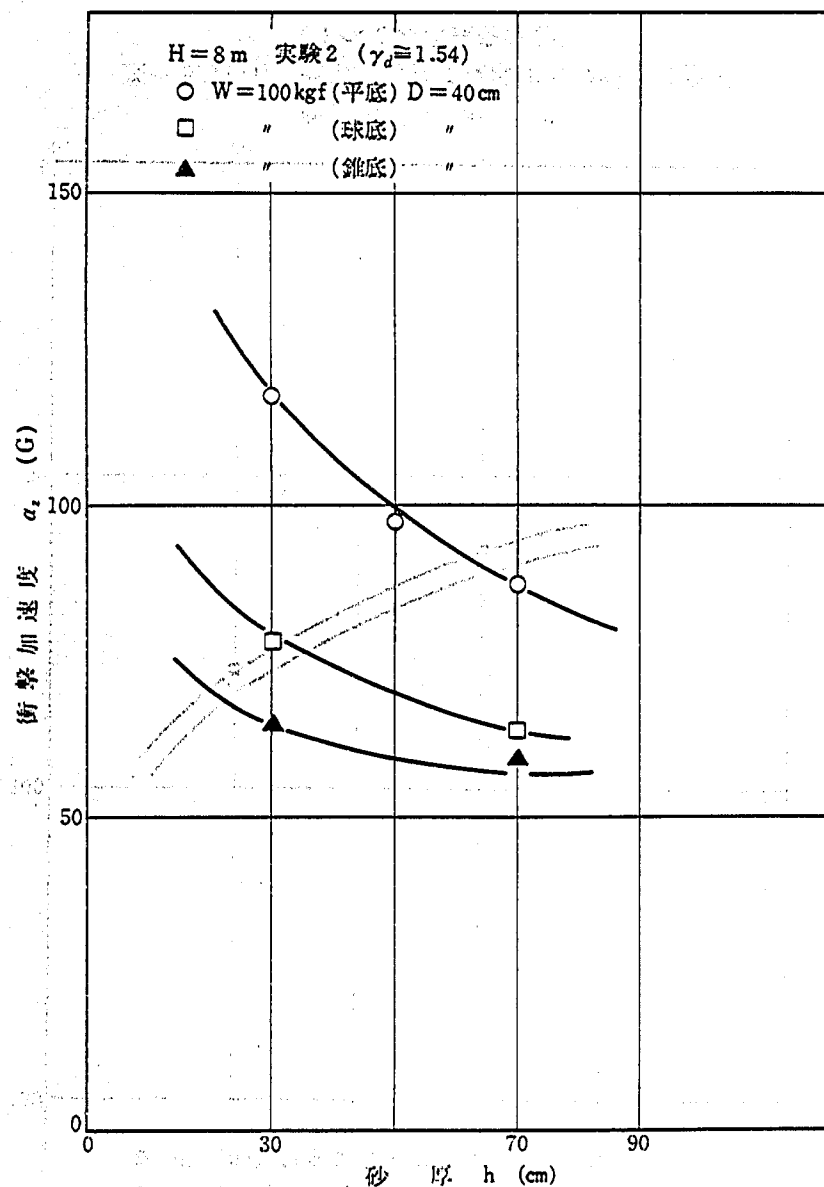
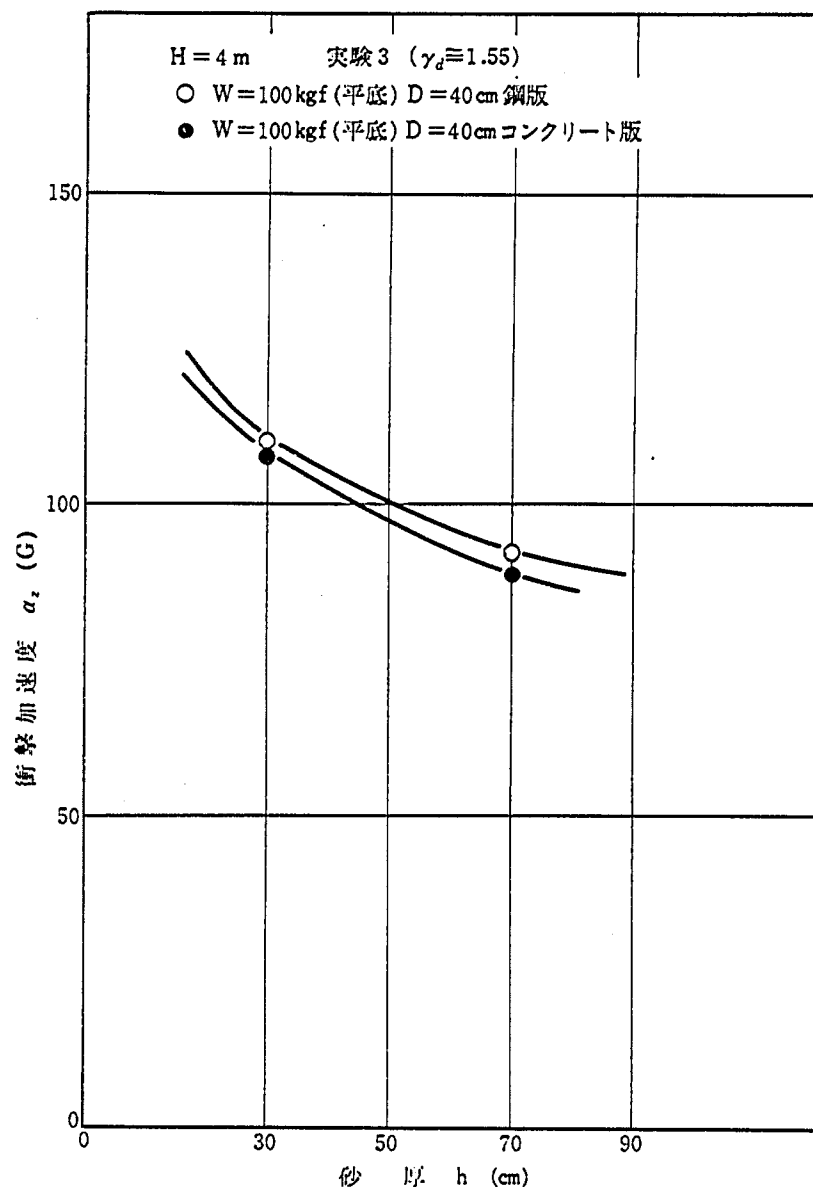


図-5.11(f) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響
(すべての重錘を含む)



図— 5.11 (g) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響
(すべての重錘を含む)



図— 5.11 (h) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響
(すべての重錘を含む)

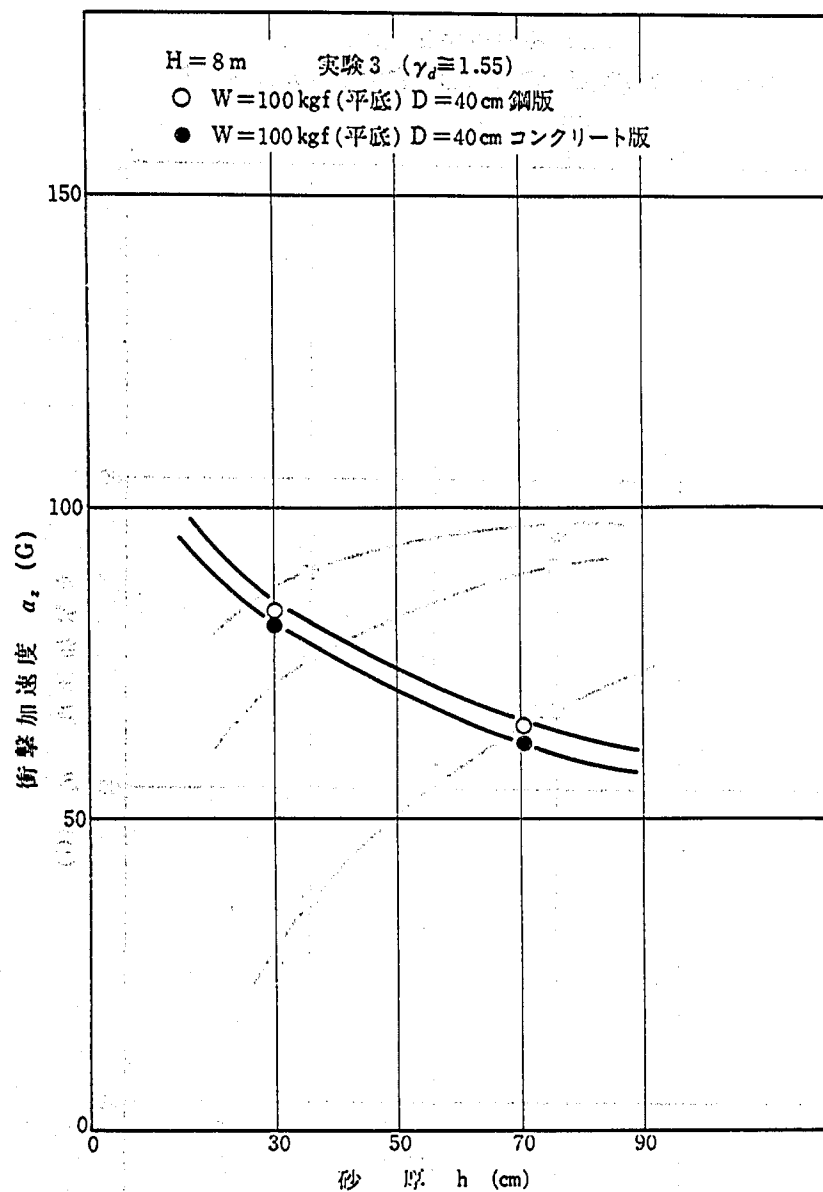


図- 5.11 (i) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層厚の影響
(すべての重錘を含む)

6.で考察するように、落石又は重錘による衝撃問題は、重錘と砂層という2体の衝突問題として考える事もできる。このとき、砂層の層厚を増加させると、前述した2体間のばね剛性を小さくする効果に加えて、被衝突体の質量を増加させる効果とがある。前者は、衝撃加速度を低下させ、後者は増加させる効果がある。現実とは、この両者の効果の合わさった効果がある。上に例示した敷砂層厚増大とともに衝撃加速度が増加する現象は、この後者の質量増大効果が優ったものとする事もできるのではないだろうか。さらに今後検討を加えたい。

(5) 衝撃加速度の従来の結果との比較

図-5.4, 5.5は、実測された衝撃加速度・力と落下高の関係を、振動便覧の式及び吉田の式から計算される特性と合わせて示した。これらの結果をまとめたのが、図-5.12である。既に個別に見たように、実験値をフィットさせる曲線を振動便覧式から求めるとすれば、敷砂層が薄く、($W=100$ kg) のときに、 λ は大きくしなければならない。図-5.12(a)(b)(c)によると、平底の場合、敷砂層厚30 cmを除いて $\lambda=100 \text{ tf/m}^2$ で算定される値を越えていない事が分る。なお、図-5.12(d)は、実験-1, 2に対して、やや番外的に行なわれた敷砂層厚 $h=50$ cmで、地盤を非常に密に締固めた場合(実験No. 1-51, 52, 53)及びベルトコンベアで落し入れるだけで全く締固めず整地のみを行なった場合(実験No. 2-21)のデータを含めて、平底重錘、敷砂層厚が50 cmの場合の測定結果を描いたものである。この図は、地盤が非常に密に締固められ落下高が低い場合には、敷砂層厚が50 cmあっても、上述したように $\lambda=100 \text{ tf/m}^2$ の計算値が上限値であるとは言えない事を示している。しかし、現実には、敷砂層がこの場合程密に締固められる事はないから、上のような結論は是認されると思われる。又、敷砂層が非常にゆるい場合は、衝撃加速度は非常に小さい。敷砂層の密度の影響については、(7)に後述する。

又、吉田の式での計算値は、平底の実測値に対してかなり小さ目の値を与える。これは、表-2.1に引用したように、吉田らの実験が球底重錘に対して行なわれたものであるためである。吉田の式は、今回の球底・錐底重錘の実測値に対する下限値に近いが、両実験における敷砂層製作法の違いと合わせて、吉田らの式は今回の実験よりかなり大きな重錘を用いて行なった実験結果に基いている事も一つの理由であろう。

次に、表-2.1に引用した大規模実験の内、鋼材クラブのデータとの比較をする。鋼材クラブの実験は、底面球形が半球体であるので、今回の実験データの内、底面球底のもののみを描いたものが、図-5.13である。鋼材クラブの実験結果は、重錘が落石覆工に落ちる場所によって衝撃加速度が異なる事を示しており、図中にはその上下限の値を記してある。今回の実験で得られた結果は、その上限の値に近い。両者の間には、重錘重量、落石覆工のたわみ特性等の影響があり、鋼材クラブのデータの方が小さ目になっているものと考えられる。

(6) 衝撃加速度に及ぼす床版支持条件の影響

敷砂層をコンクリート床ではなく、鋼製及びコンクリート製床版に支えられた場合の結果は、図-5.4(i), 5.5(i), 5.6(i), 5.7(i), 5.11(i)に示した。比較のために、衝撃加速度と落下高の関係について、コンクリート床と両床版の場合を合わせて、図-5.14に示す。この図は、両床版の実験を行なった実験3の砂層製作法と同一であった実験2の結果とを合わせたものである。実験前には、床

版支持の場合、床版のたわみ性により衝撃加速度は軽減するであろうという予想であったが、図-5.14で見る限り、今回の床版支持条件では、衝撃加速度に明瞭な差は見られなかった。これは、今回の床版のたわみ性が衝撃加速度に影響を与えるほど大きくなかったためであろう。

(7) 衝撃加速度に及ぼす敷砂層密度又はめり込み量の影響

砂層の剛性の大小は、衝撃加速度・力に大きく影響する。今回の実験では一種類の砂を用いたので、砂層の剛性は締固め法又は砂層密度と対応しているであろう。図-5.15は、砂層の密度と衝撃加速度の関係を、図-5.16、17は砂層のめり込み量との関係を示すものである。同一の支持条件で（コンクリート床）、砂層密度にある幅以上に差があるのは、実験1と2であり、図-5.15は、実験1、2の中で共通の重錘条件がある $W = 100 \text{ kgf}$ 、 $D = 40 \text{ cm}$ の平底、球底、錐底の場合を示したものである。球底・錐底の場合は比較できるだけのデータが少ないが平底の場合は同一の落下高・敷砂層厚条件に対して、砂層の密度増大とともに衝撃加速度の増大が明らかに見出される。予備実験において、実験結果の再現性を調べるために同一条件の下での衝撃加速度とめり込み量の関係を図-5.3に整理し、両者の間には反比例的な関係がある事を示したが、実験1、2についても同様の整理を試みたのが図-5.16である。この図と予備実験結果をまとめた図-5.3との違いは、重錘の形状・重量、敷砂層厚が様々に変化している事である。なお、図中には、振動便覧式と同様に被衝突体の質量が無限大とした2弾性体衝突問題の理論解から導かれる衝撃加速度と最大めり込み量の関係を記入した。誘導過程については、6.及び付録に述べた。実測値は理論的に予想される関係より小さ目になる。さらに、これと同じ理論的考察から、衝撃加速度と落下高 H とめり込み量 $\delta \text{ max}$ の比 $H/\delta \text{ max}$ の間には関係がある事が見出されるので、それに沿って実験結果を描いたものが図-5.17である。この場合も理論直線を参考のために記した。これから、衝撃加速度は重錘重量には直接的にはよらず、落下高とめり込み量の比 $H/\delta \text{ max}$ に比例的な関係がある事が実験的にも見られる。ただし、種々の重量・寸法の重錘の実験結果を含む円柱平底の場合には、データのばらつきは多い。又、形状に対する影響度の順序は理論的に予測される順序であるが、衝撃加速度の値は理論値の方がかなり大きくなる。これは、衝撃加速度 $\alpha \text{ max}$ に対応させる $\delta \text{ max}$ が、理論値においては $\alpha \text{ max}$ の時刻と同時刻の運動過程中的のものであるのに対し、実験値においては重錘が停止したときのものという事で、現実には後者は前者より大きくなるためと考えられる。

5-4 重錘のめり込みの砂層の変形

(1) 重錘のめり込みと砂層の変形状

重錘のめり込みと砂層の変形状の測定例を図-5.18に示す。又、めり込みと砂層の層別変形を写真-5.1～5.5に示す。平底の場合に顕著であるが、重錘のめり込みの傾きをなくし完全に均一にするのは困難であった。これは落下時の目視観察性状からも予想された事である。どの重錘の場合にも重錘の落下周辺に僅かの盛り上がりがある。特に球底・錐底の場合に著しい。砂層の変形の深度方向への影響範囲は、重錘の中心直下が大きく、平面的には重錘をはずれた所では、測定し得る僅かな変形を基にして、重錘周縁から5～10 cm以内である。中心直下の砂層の変形に注目すると、深さ方向の影響範囲は敷砂層厚によって増加し、平底、球底の場合、どの条件の場合も敷砂層底面から10 cm上部付近まで達しているようである。錐底の場合は、敷砂層厚が薄い場合には、さらに深部にまで達している。

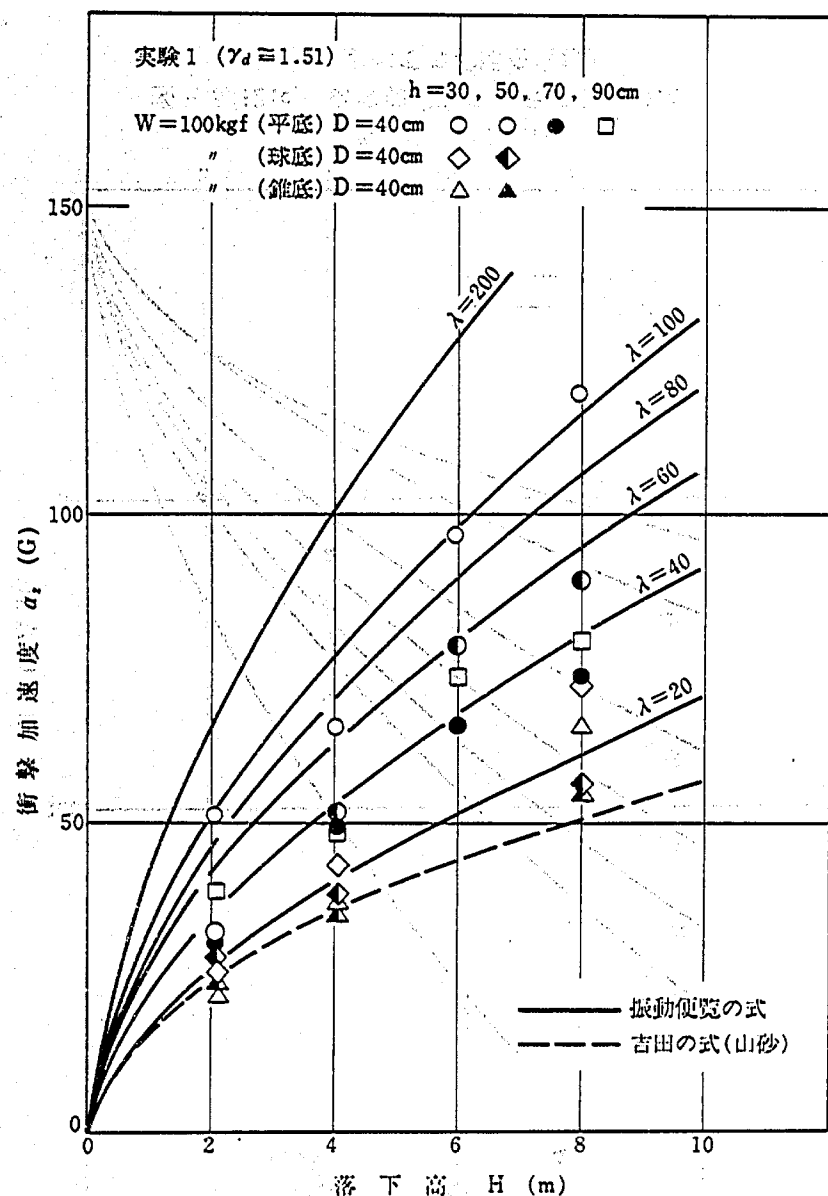


図-5.12(a) 衝撃加速度の従来結果との比較
(すべての重錘を含む)

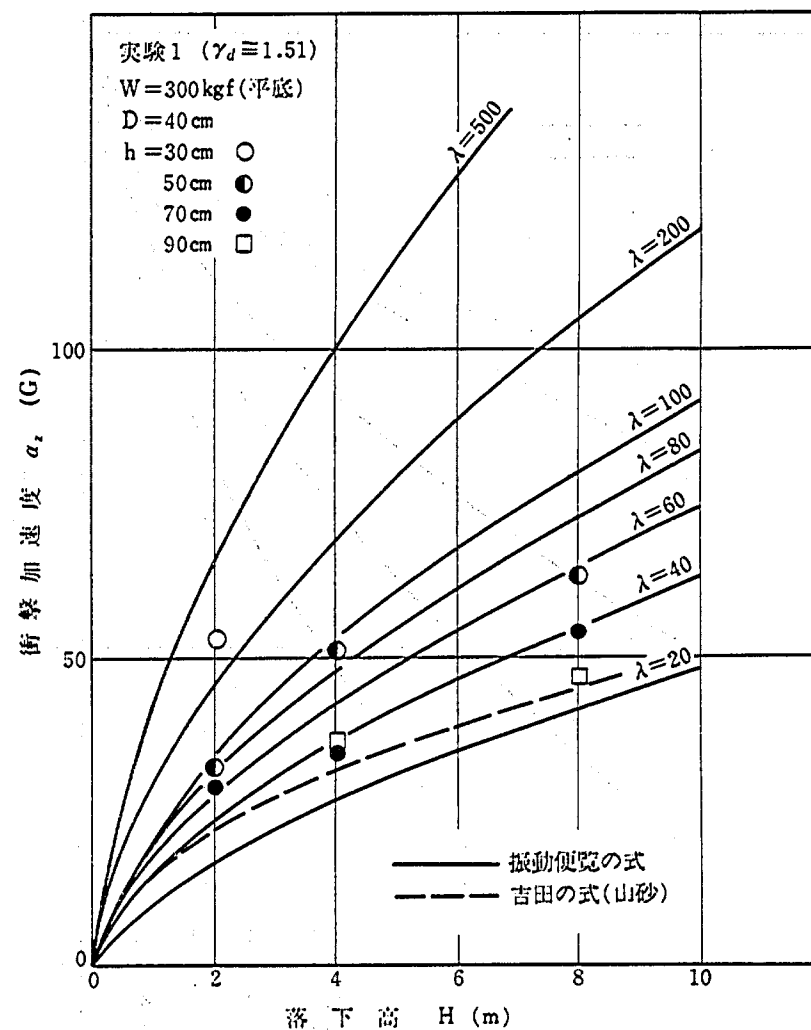


図-5.12(b) 衝撃加速度の従来結果との比較
(すべての重錘を含む)

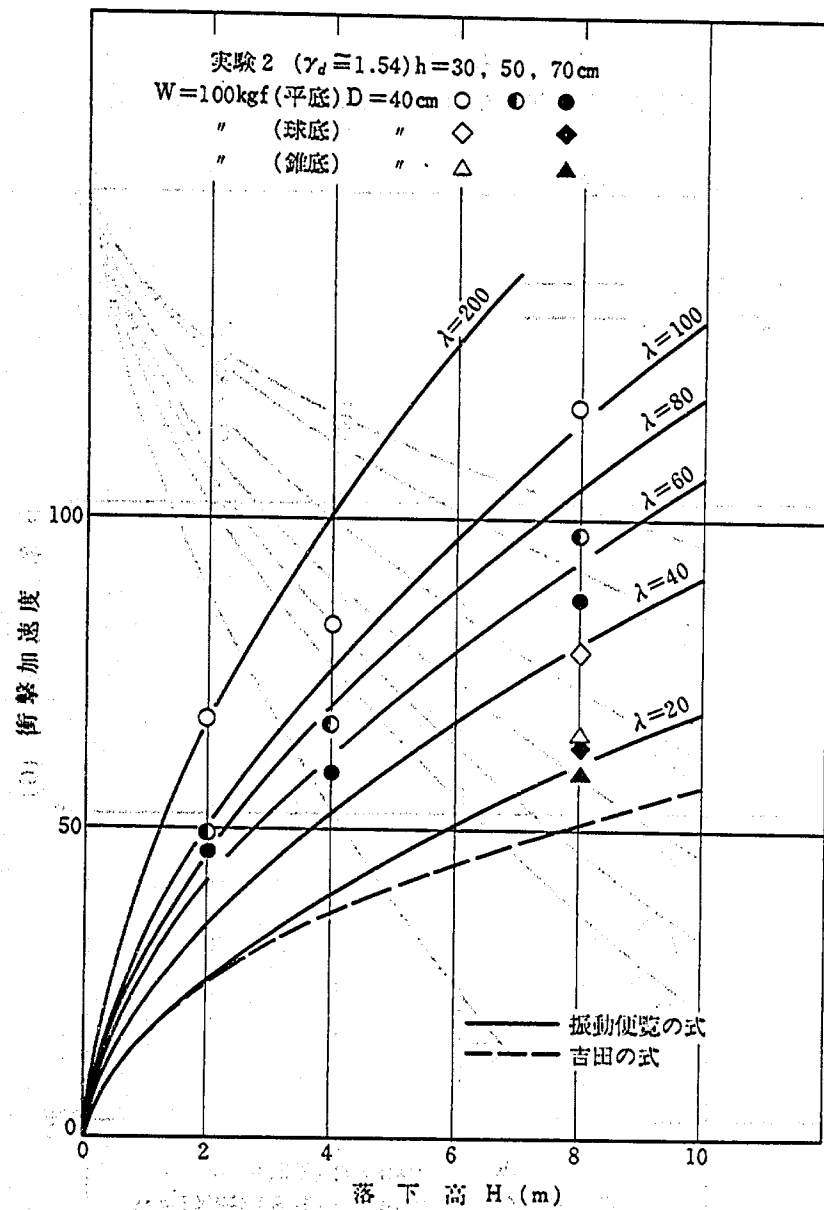


図-5.12(c) 衝撃加速度の従来結果との比較
 (すべての重錘を含む)

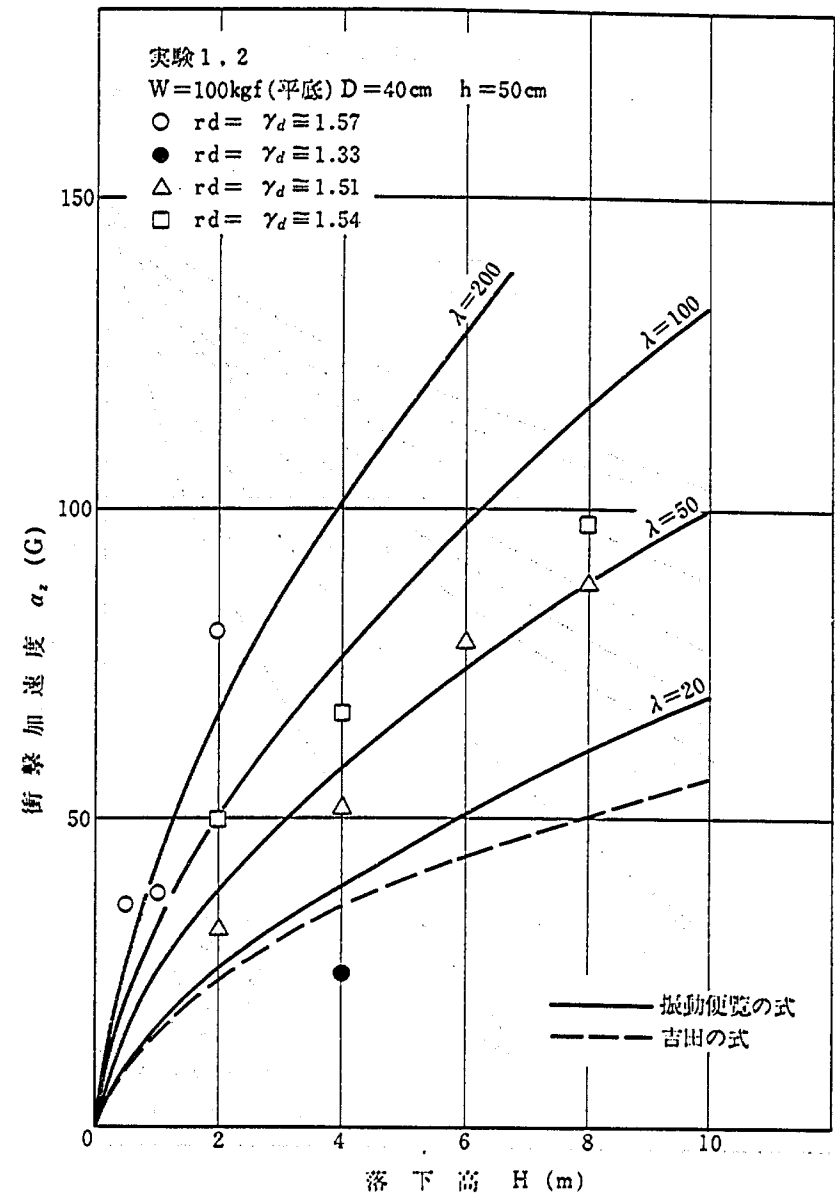


図-5.12(d) 衝撃加速度の従来結果との比較
 (すべての重錘を含む)

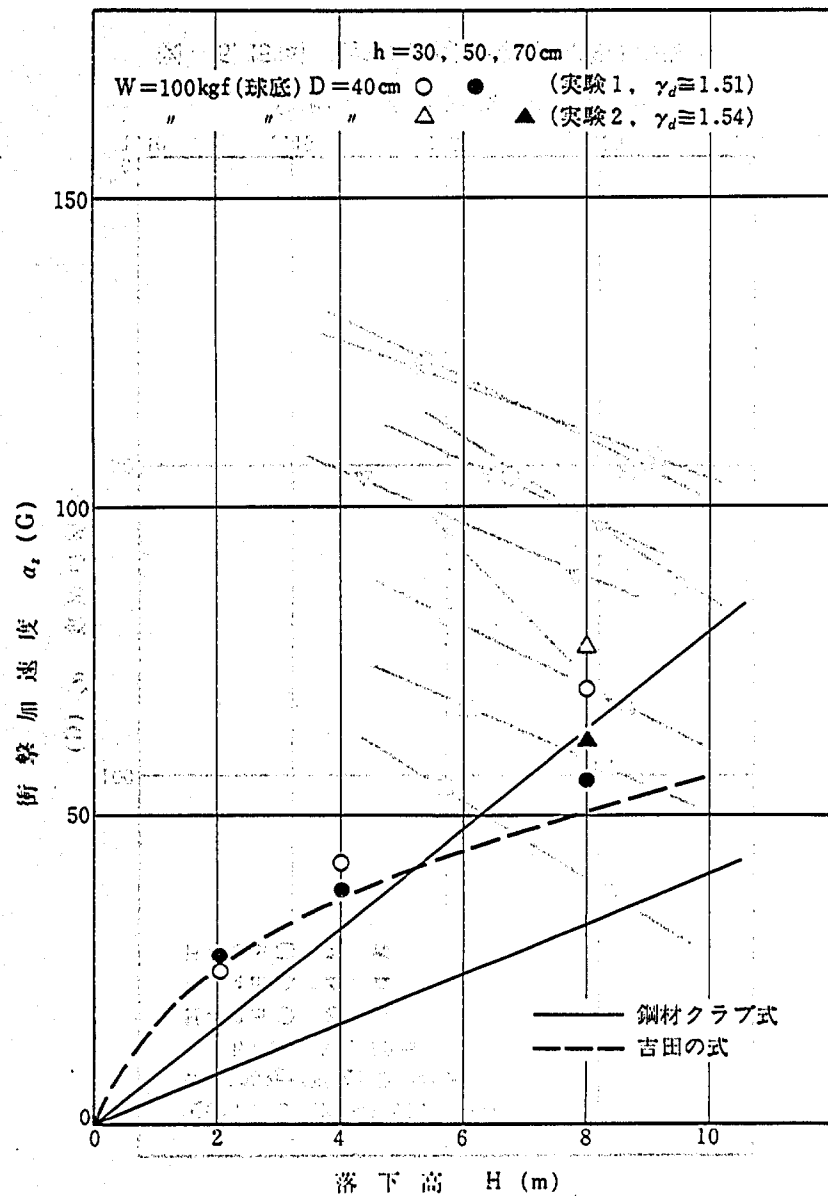


図-5.13 衝撃加速度の従来結果との比較
(球底重錘)

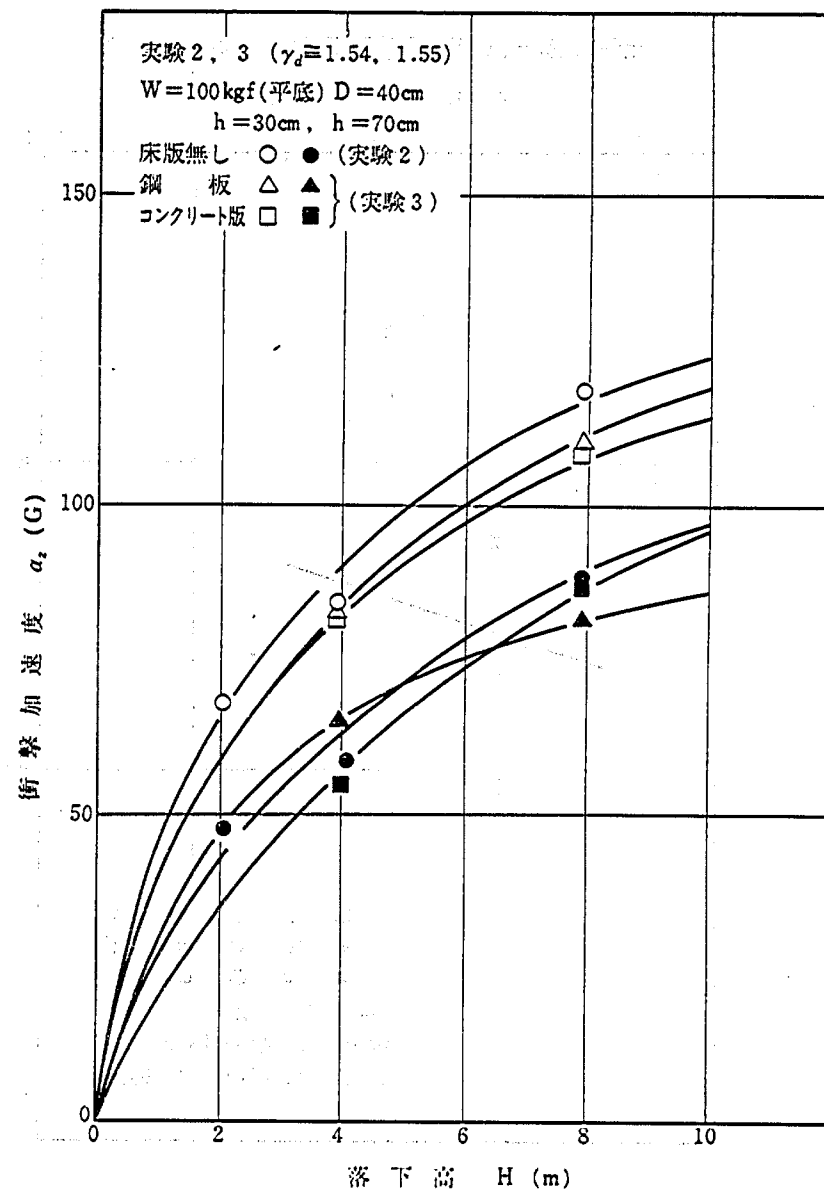


図-5.14 衝撃加速度に及ぼす床版支持条件の影響

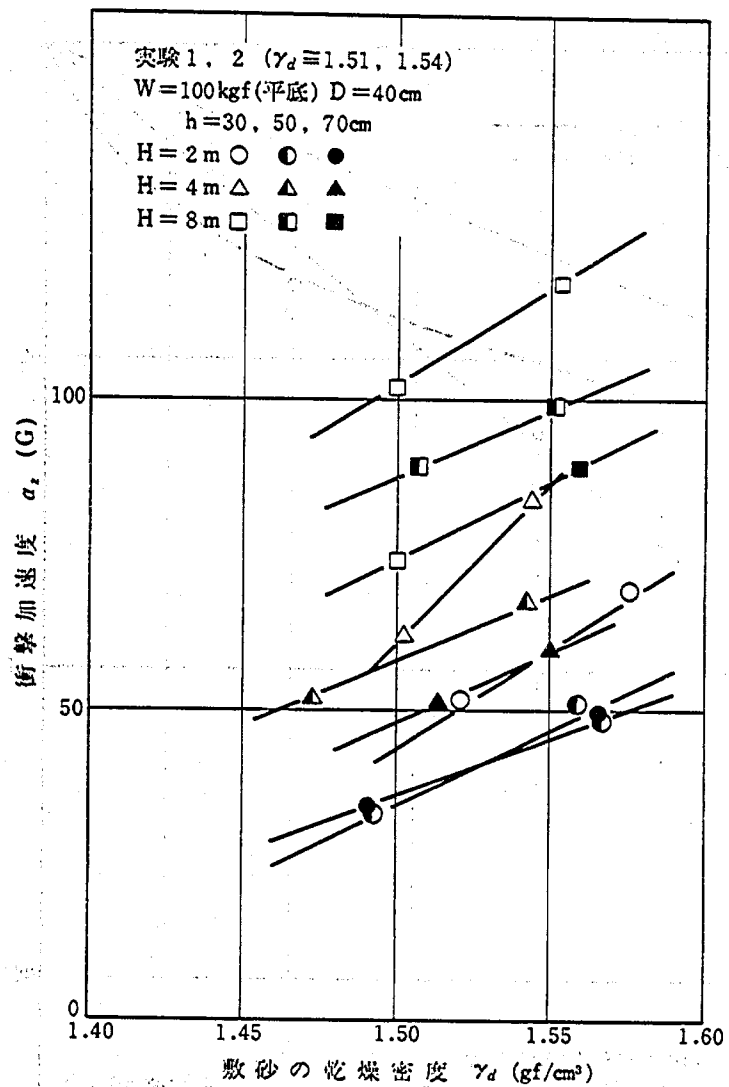


図-5.15(a) 衝撃加速度と敷砂層密度の関係

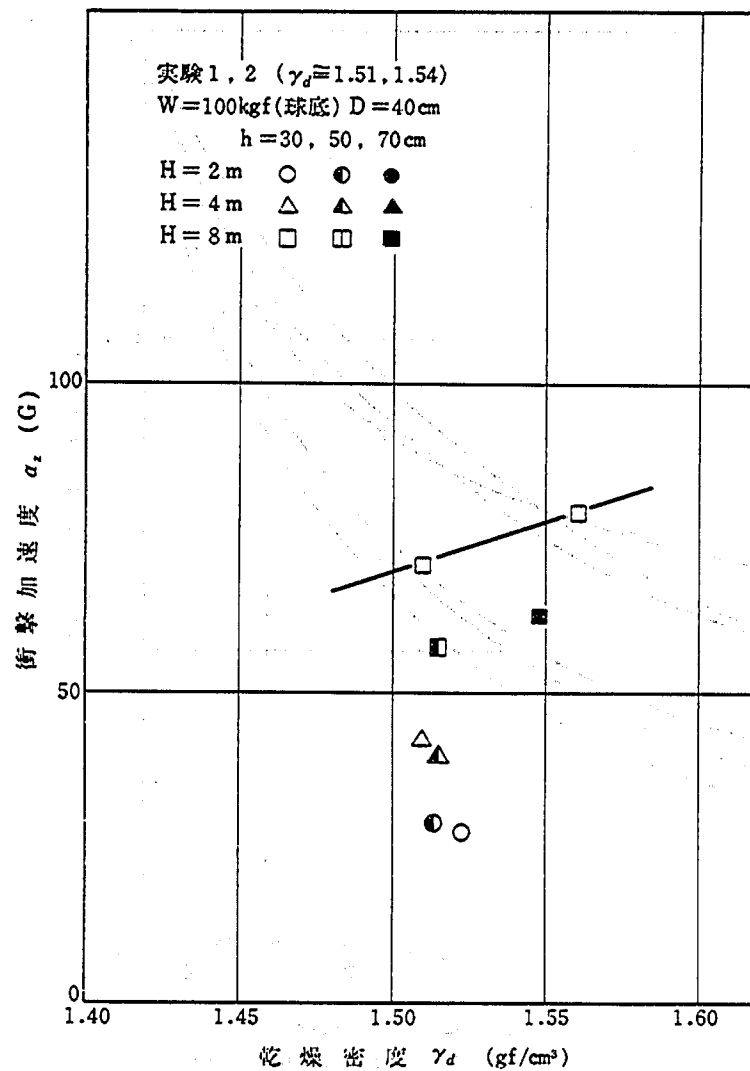


図-5.15(b) 衝撃加速度と敷砂層密度の関係

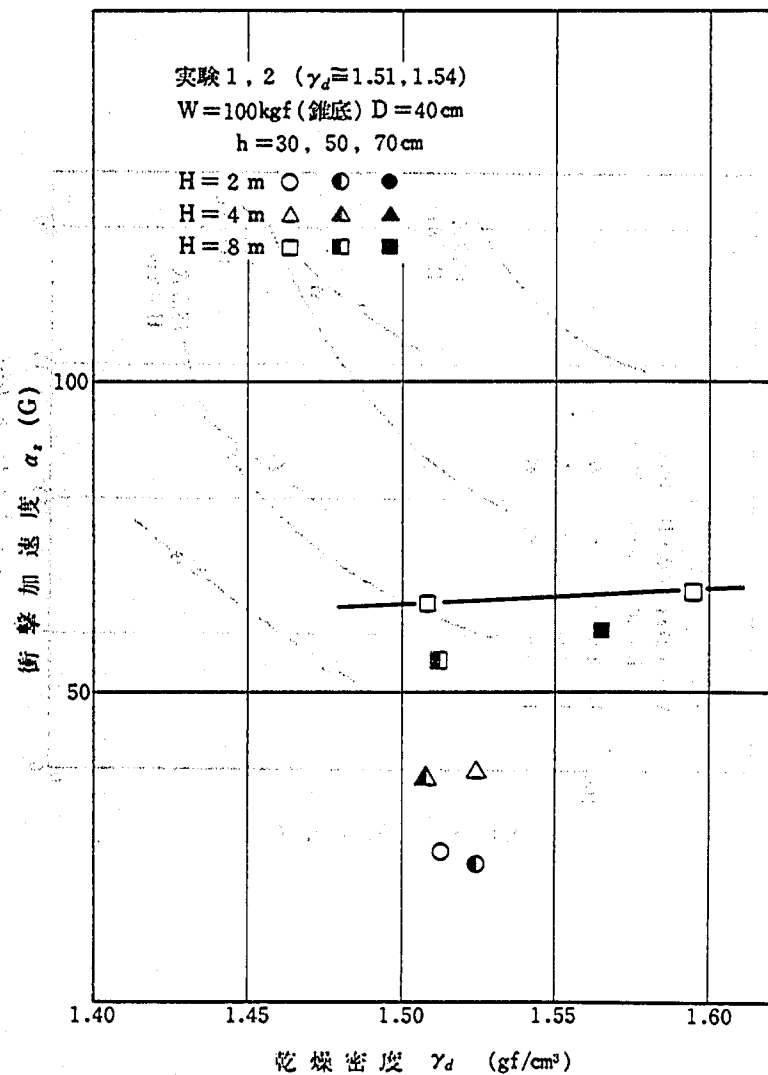


図-5.15(c) 衝撃加速度と敷砂層密度の関係

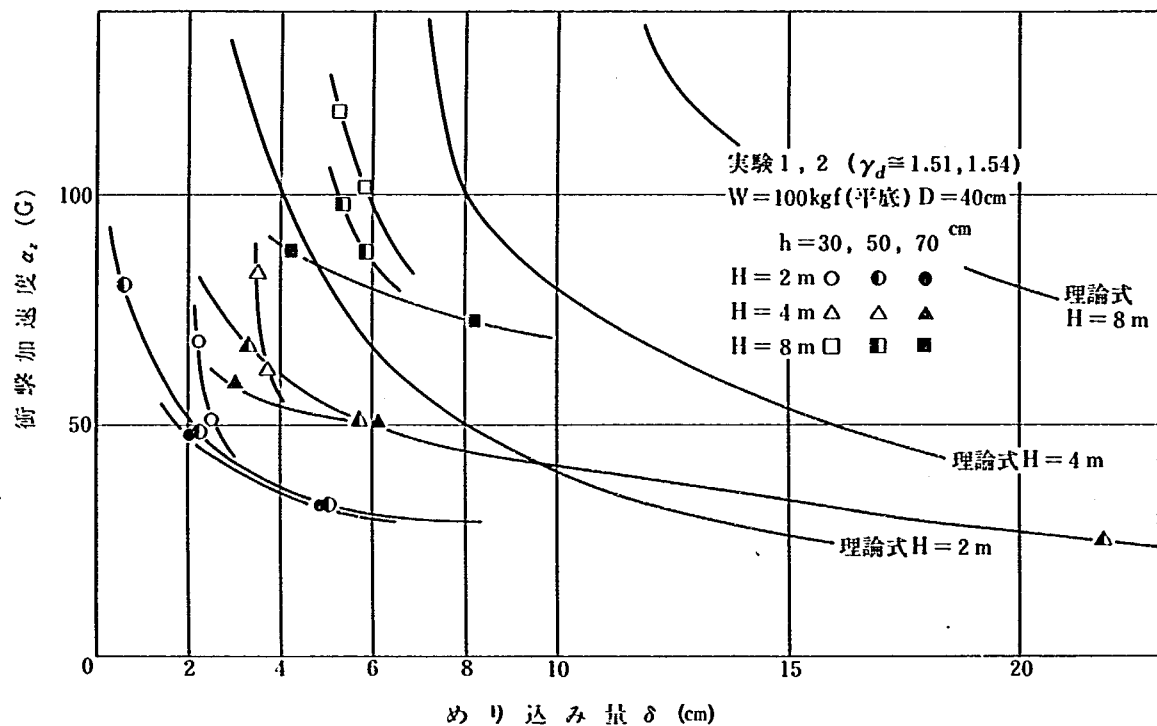


図-5.16(a) 衝撃加速度とめり込み量の関係 (落下高別)

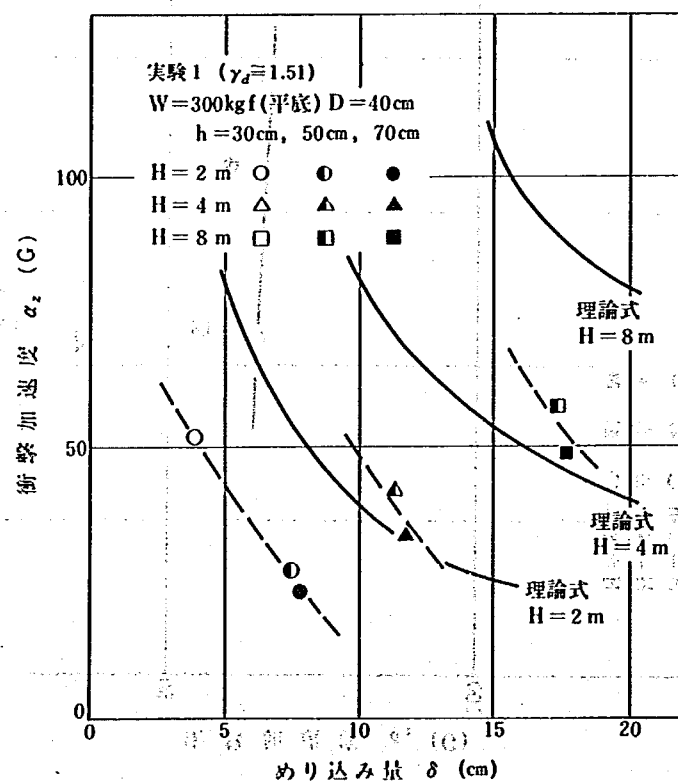


図-5.16(b) 衝撃加速度とめり込み量の関係 (落下高別)

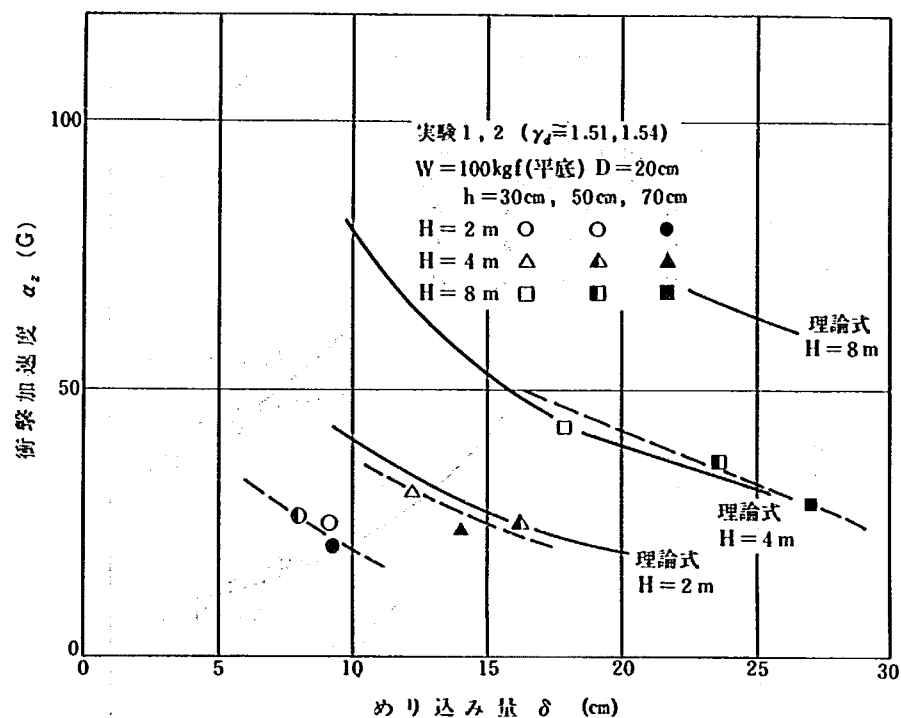


図- 5. 16(c) 衝撃加速度とめり込み量の関係 (落下高別)

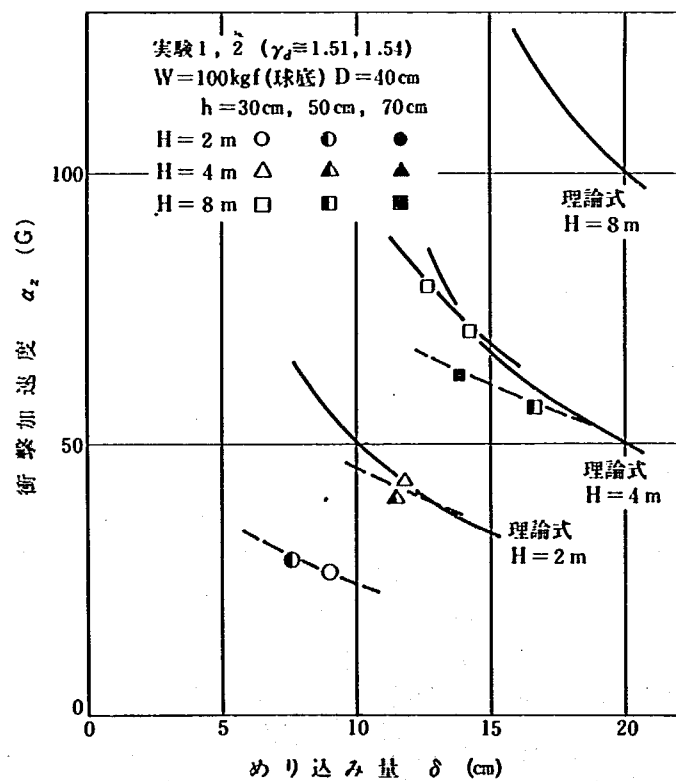


図- 5. 16(d) 衝撃加速度とめり込み量の関係 (落下高別)

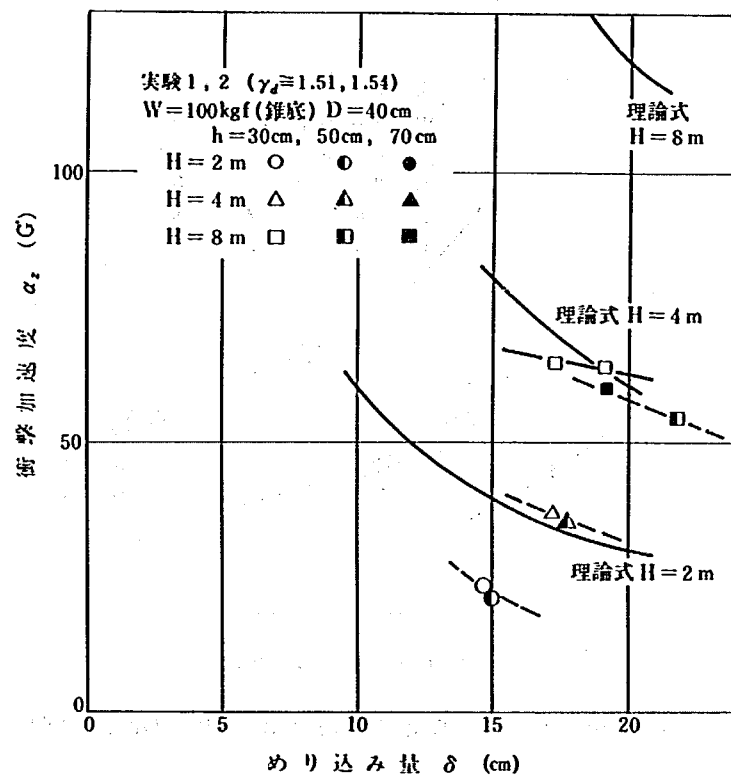
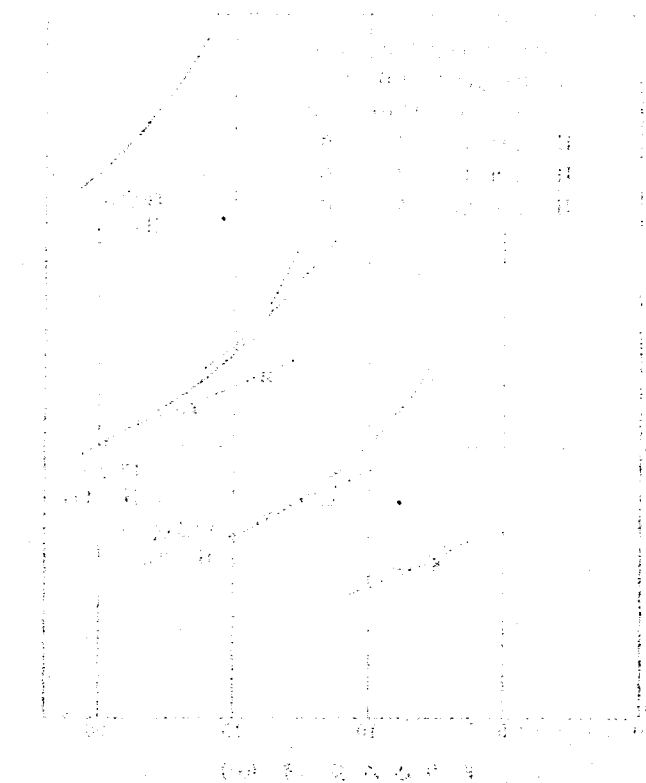


図- 5.16(e) 衝撃加速度とめり込み量の関係 (落下高別)



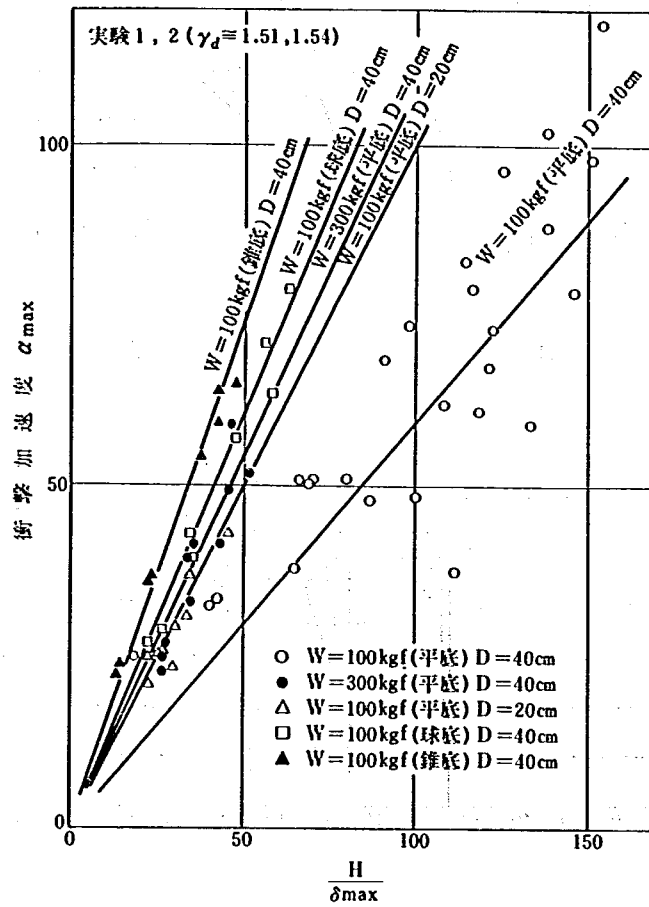


図-5.17 衝撃加速度と落下高／めり込み量の関係

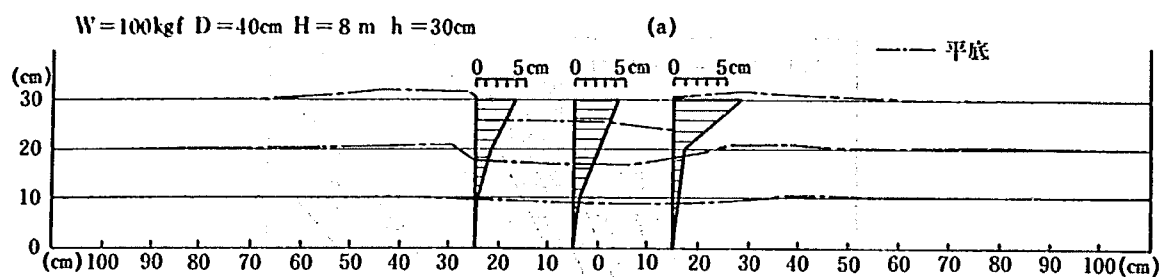


図-5.18(a) 敷砂層の変形性状測定例

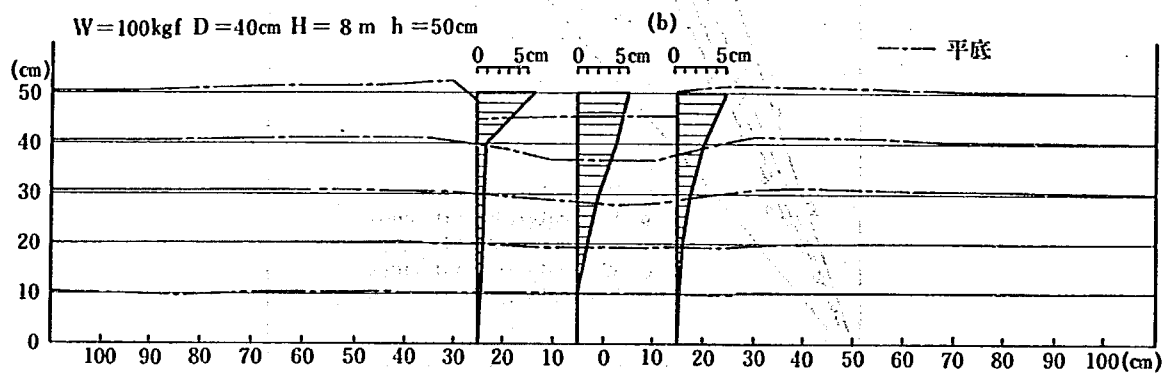


図-5.18(b) 敷砂層の変形性状測定例

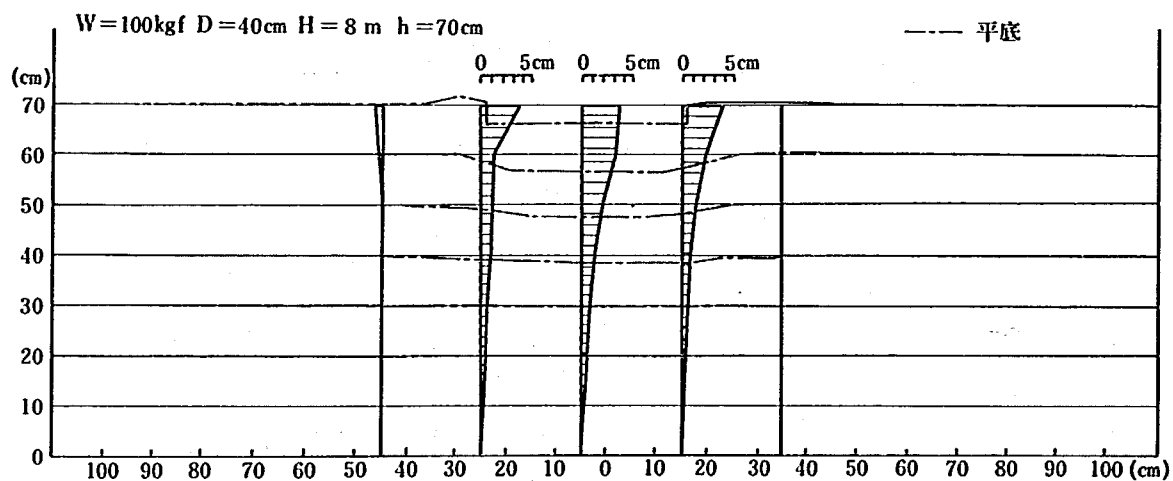


図-5.18(c) 敷砂層の変形性状測定例

- L -

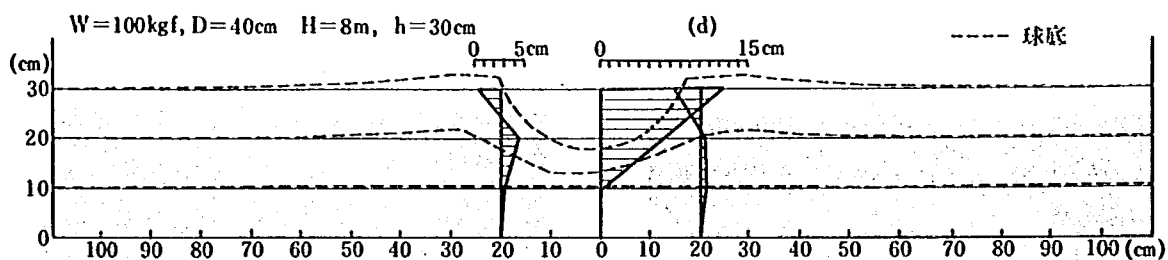


図-5.18(d) 敷砂層の変形性状測定例

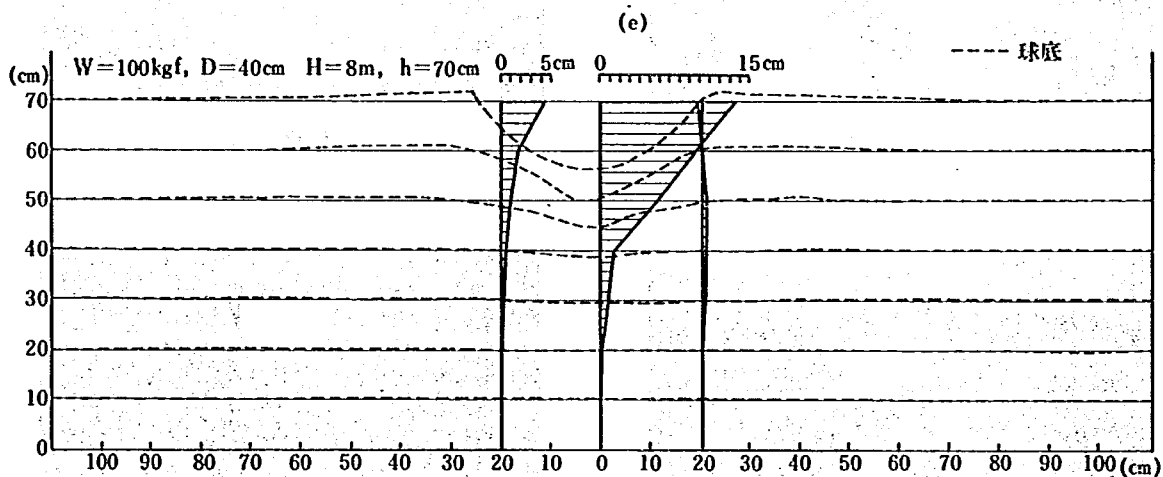


図-5.18(e) 敷砂層の変形性状測定例

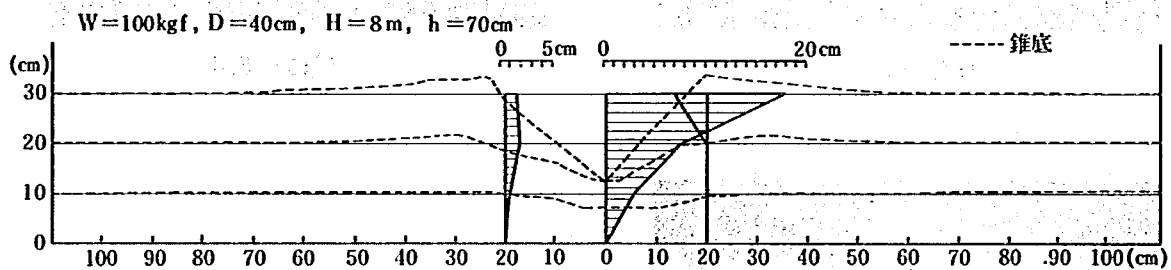


図-5.18(f) 敷砂層の変形性状測定例

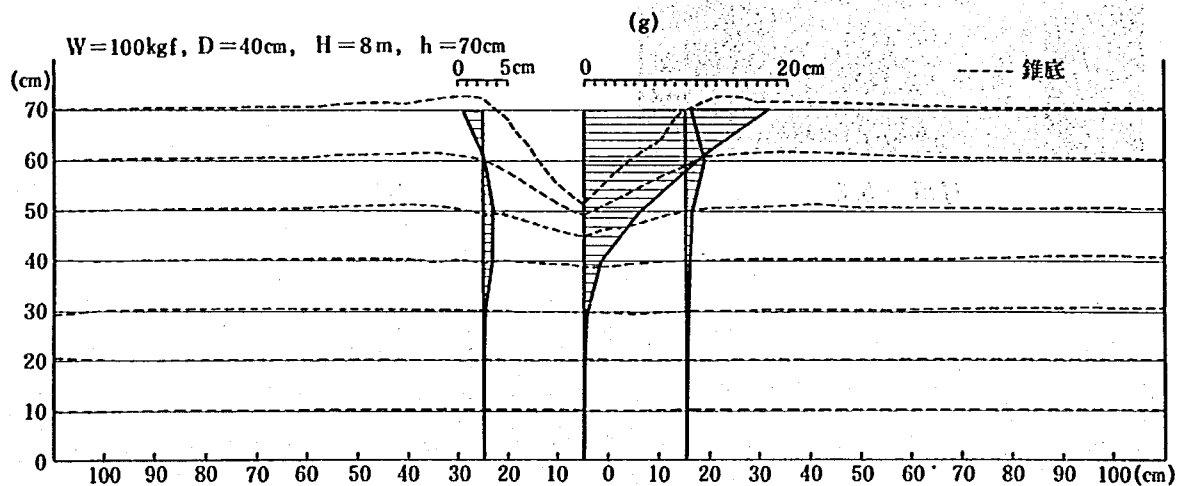


図-5.18(g) 敷砂層の変形性状測定例

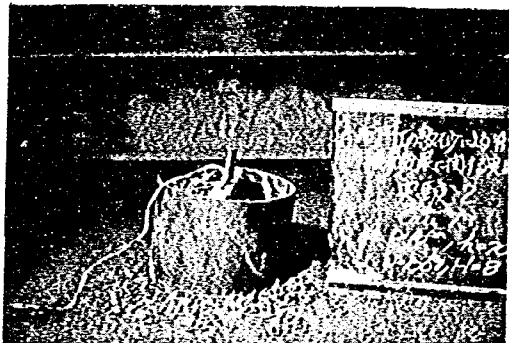


写真- 5.1

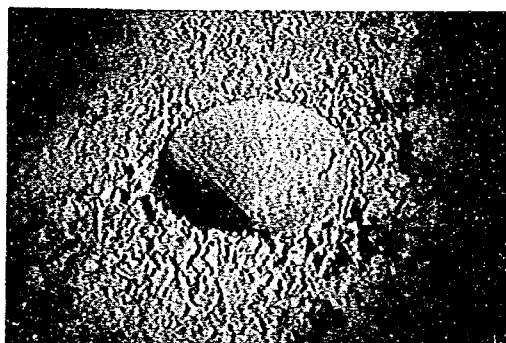


写真- 5.2

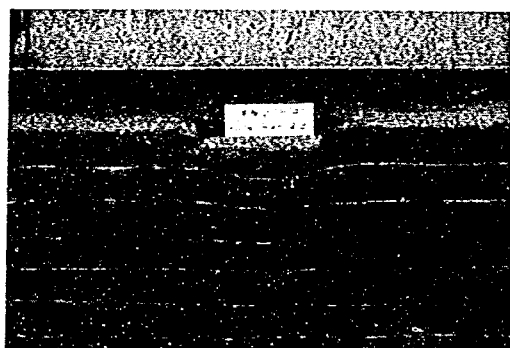


写真- 5.3

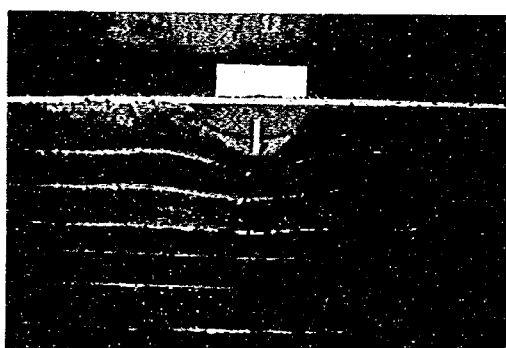


写真- 5.4

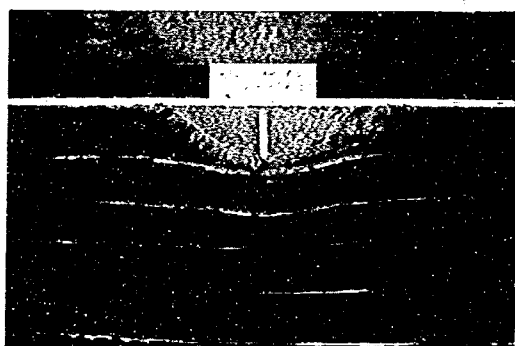


写真- 5.5

(2) めり込み量

衝撃加速度とめり込み量の関係は、既に図－5.16, 17で示した。図－5.19には、実測された落下高とめり込み量との関係をまとめた。一般に敷砂層厚が30 cmの場合に、めり込み量は最も小さいが、その他の場合には特徴的な事は見出し難い。この事は、敷砂層厚がある程度以上になると、めり込み量は敷砂層厚には余り影響しない事を示していると考えられないであろうか。めり込み量が衝撃加速度に大きく影響する事は、図－5.16, 17に見たが、そのめり込み量は、敷砂層厚全体の影響を受けるものではなく、浅層部の変形性に依存する面が多く、結果として敷砂層厚は、極く薄い場合を除いて衝撃加速度には影響しないと言えるのではなかろうか。この事は、直ちに敷砂層厚が最低限の厚さがあればよいという事を意味せず、適正厚さは、そのような表面又は浅層部に作用する衝撃荷重が床版への作用位置において適度に分散するという条件から定まる。敷砂層中における荷重の分散については、5－5において述べる。

5－5 衝撃土圧

図－5.20に実験2, 3で測定した敷砂層底面での衝撃土圧分布例を示す。ここで、用いた土圧計は、径30 mm, 厚さ6.5 mm, 容量5 kgf/cm²の小型土圧計と径94 mm, 厚さ10 mm, 容量10 kgf/cm²の土圧計の2種がある。これらは、実験条件、測定場所により使い分けて用いられた。両者とも、使用時には、4－5で述べたように周囲を右コウで受圧面と同じ高さまで固め応力集中を避けるようにしたが、両者共に同一の又は理想的な使用条件で用いたとは言えないであろう。そのために測定値に対しては、何らかの補正が必要となろう。現時点では、取敢えず測定した土圧そのものの例を、図－5.20に示した。

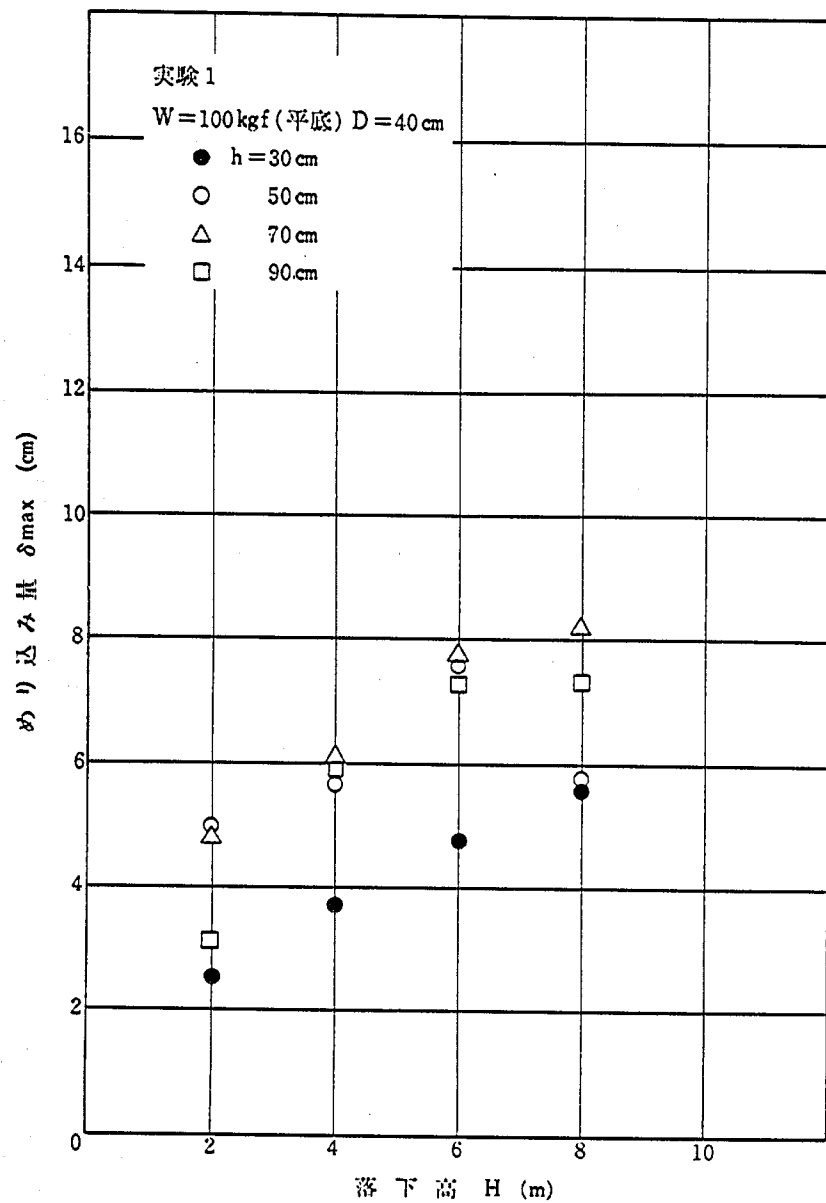


図-5.19(a) 落下高とめり込み量の関係

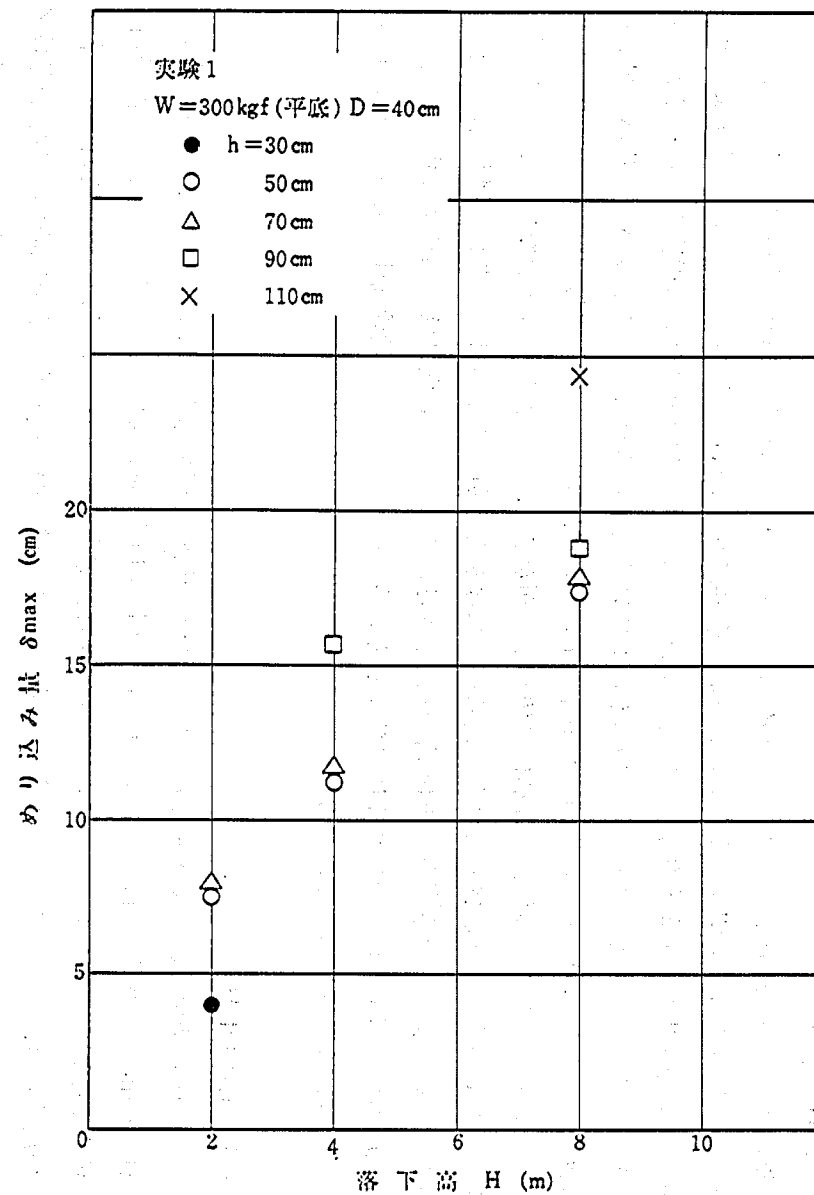


図-5.19(b) 落下高とめり込み量の関係

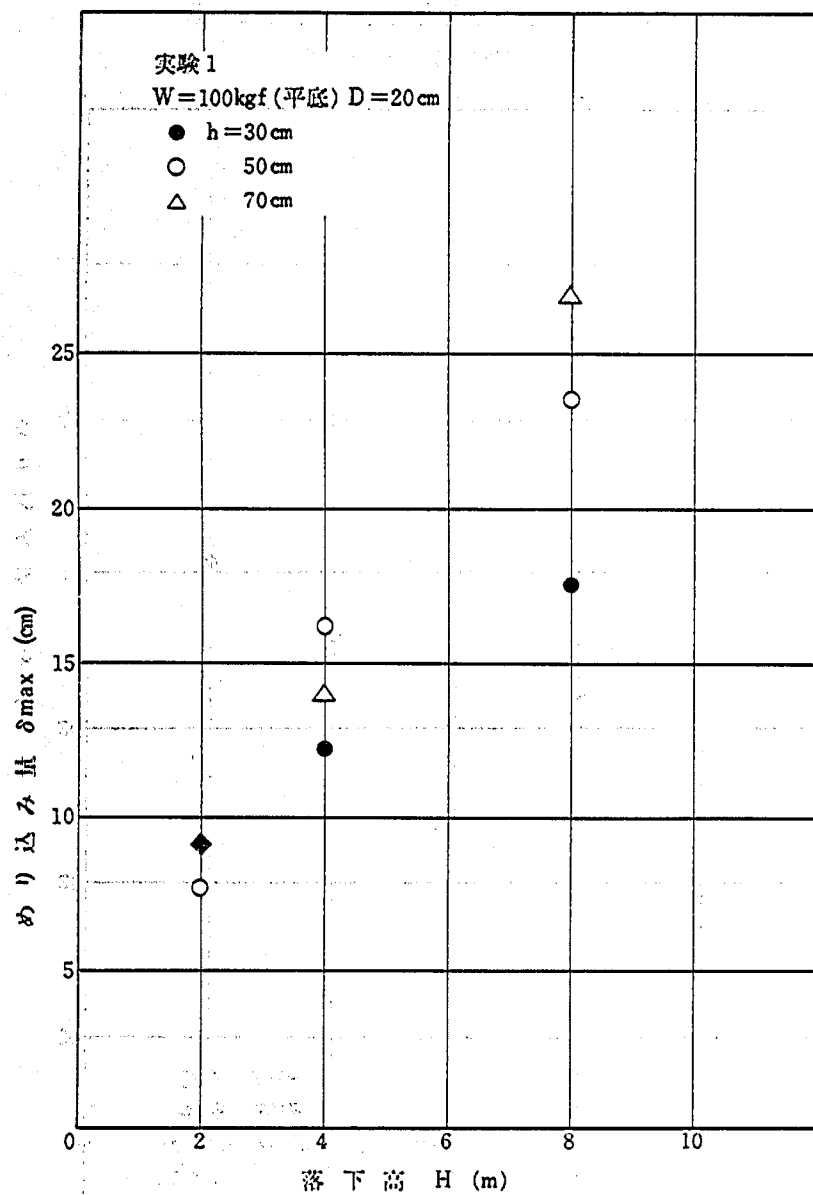


図-5.19(c) 落下高とめり込み量の関係

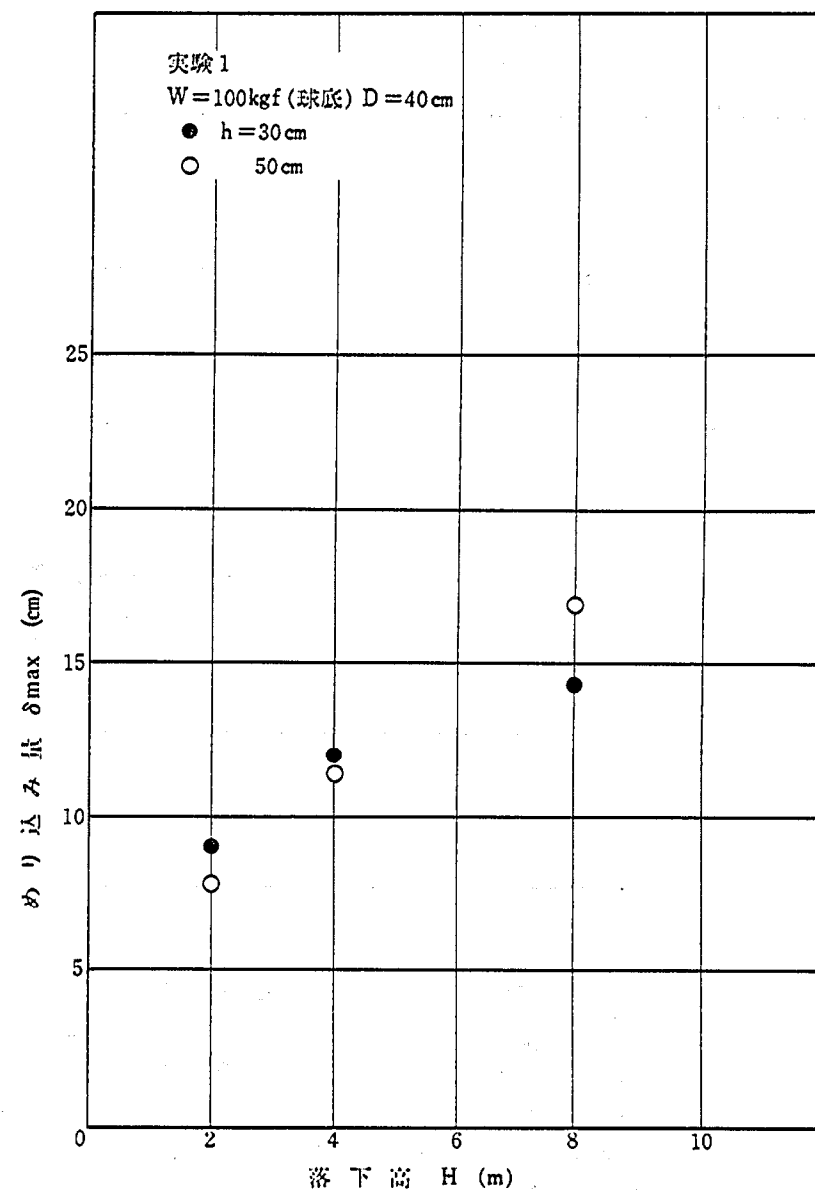


図-5.19(d) 落下高とめり込み量の関係

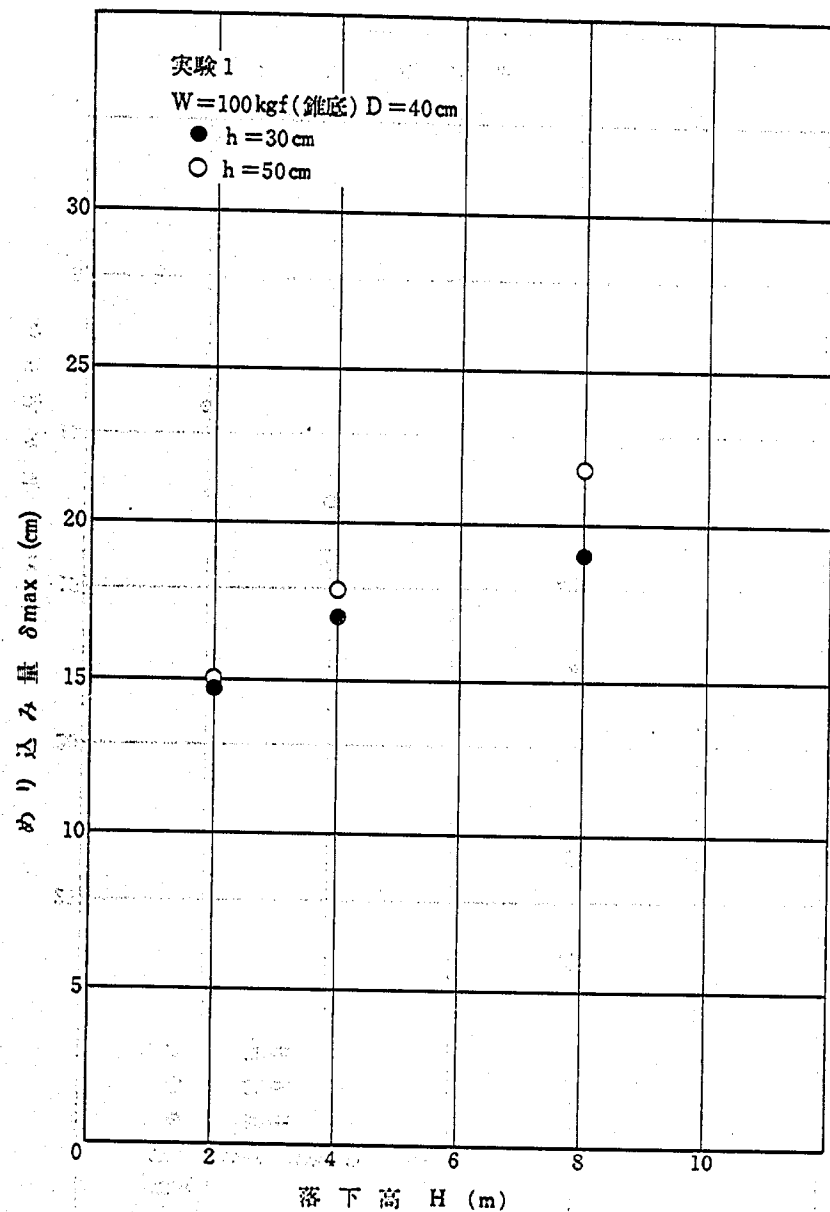


図-5.19(e) 落下高とめり込み量の関係

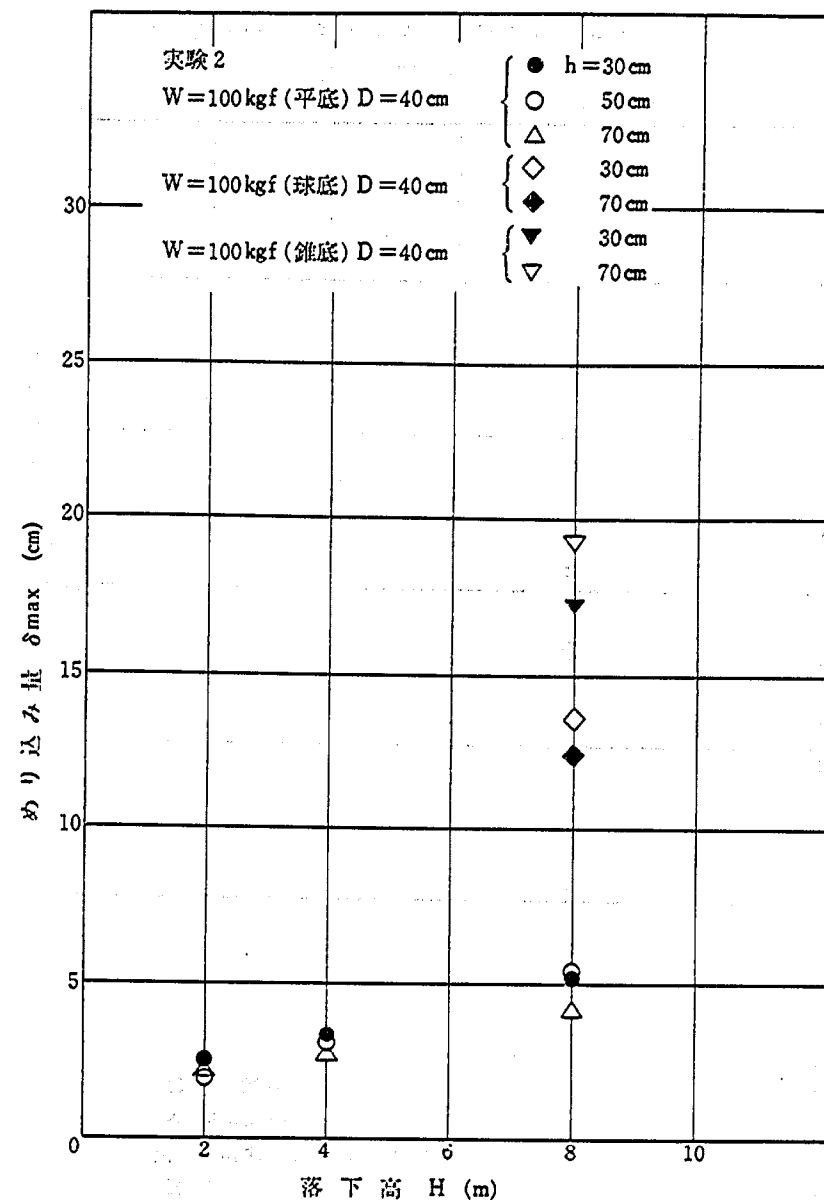


図-5.19(f) 落下高とめり込み量の関係

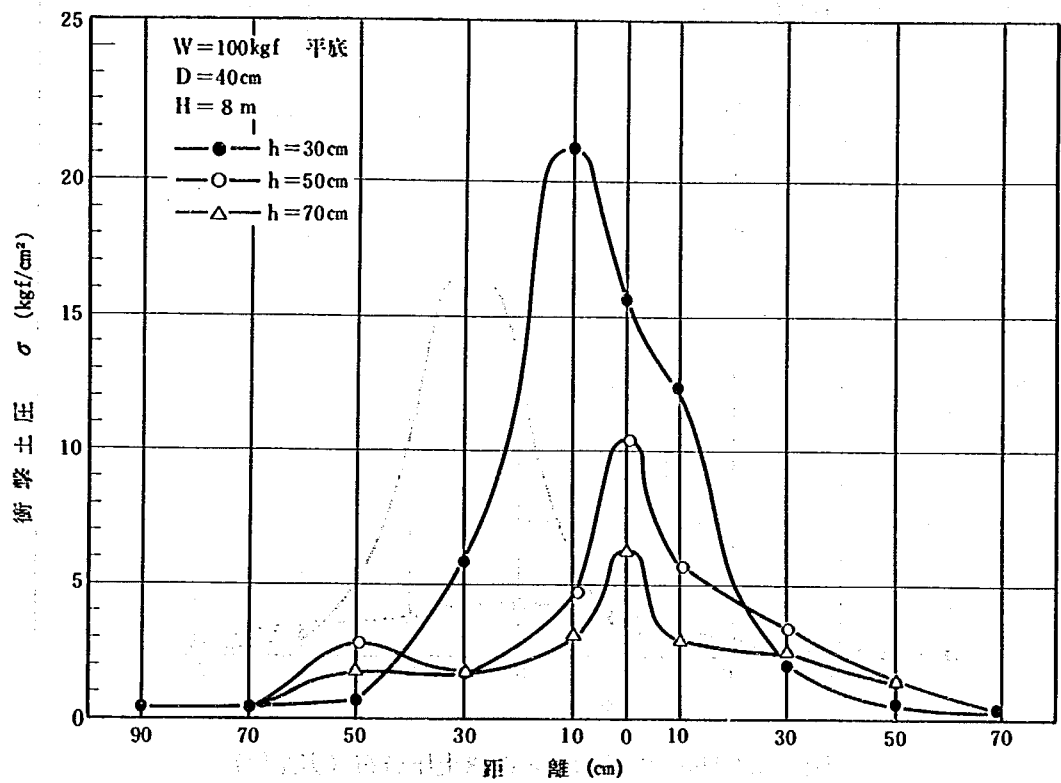


図-5.20(a) 敷砂層厚と衝撃土圧分布 (実測値)

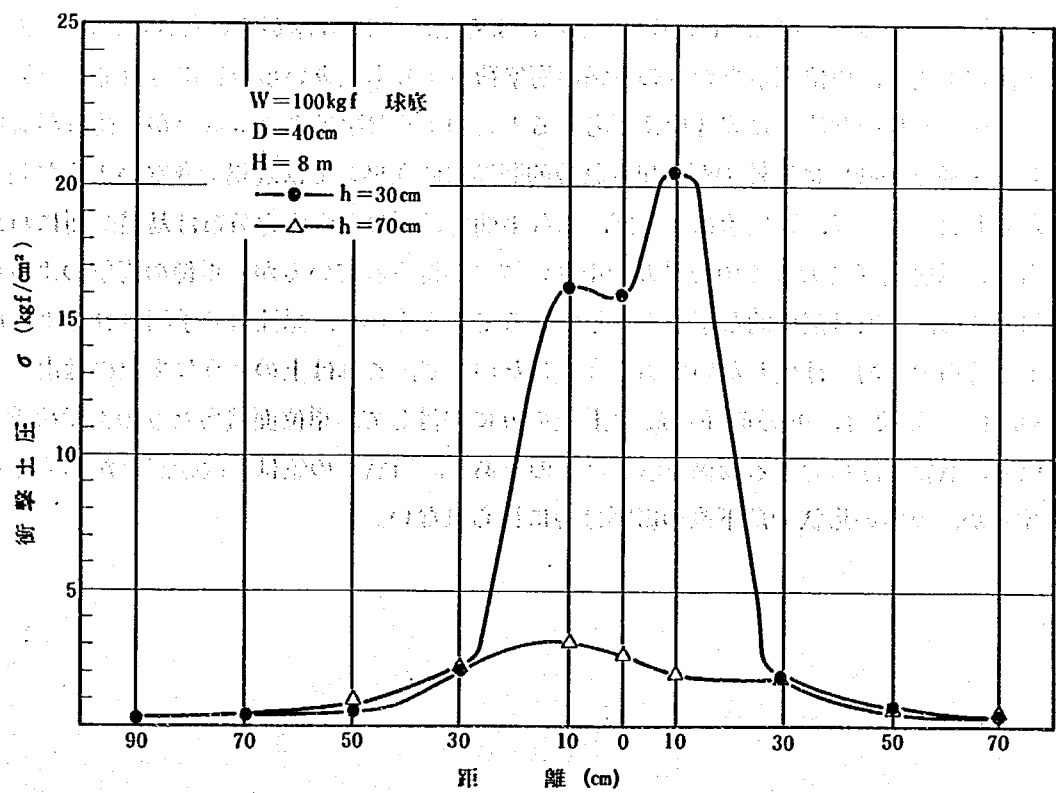


図-5.20(b) 敷砂層厚と衝撃土圧分布 (実測値)

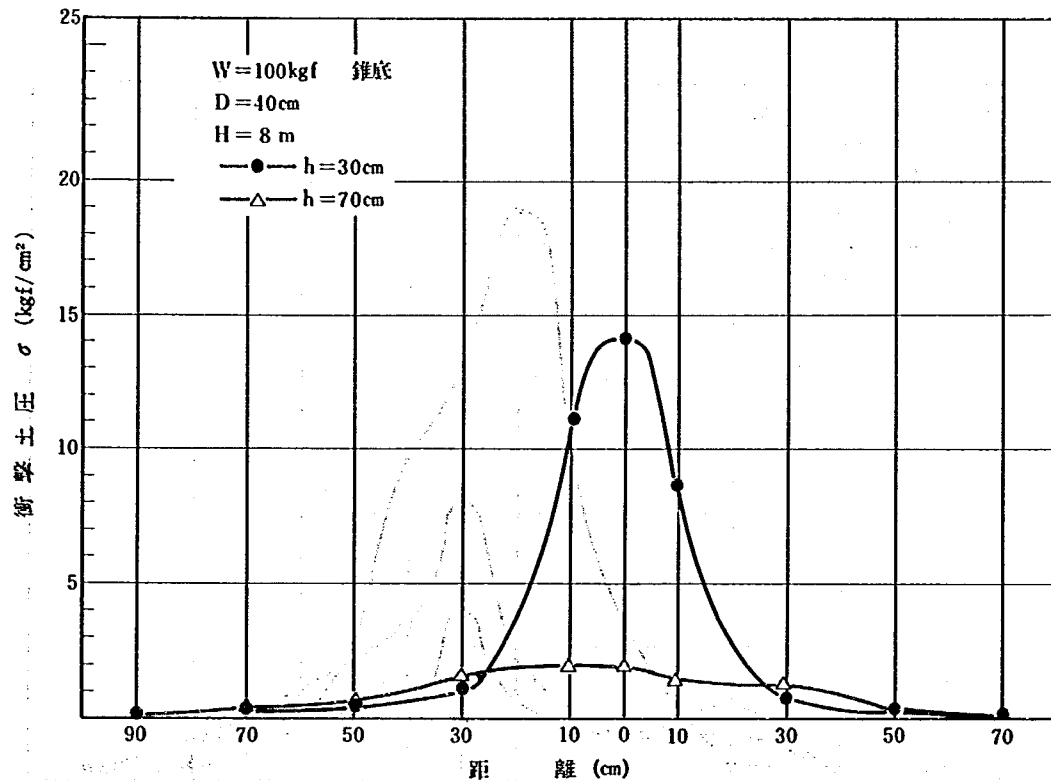


図-5.20(c) 敷砂層厚と衝撃土圧分布 (実測値)

測定土圧は、一般に重錘の衝撃力が大きくかつ敷砂層厚が薄いと大きくなる。そのために、まず、図-5.20に示した土圧分布を、重錘の衝撃力を重錘の断面積で除した単位面積あたりの衝撃力で無次元化して描いたものが、図5.21である。これによると、敷砂層厚が薄いときには、砂層底面での重錘下部測定土圧は、単位面積あたりの重錘の衝撃荷重よりも大きい事が見出される。重錘の衝撃荷重（の最大値）を静的な荷重に置き換えて考えるとこのような事はあるが、荷重が衝撃的であるために、重錘下の砂層に慣性力が励起され静的問題に置き換えては表現できないような動土圧が生ずるのかもしれない。又、弾性論によれば、剛な平面基礎下の垂直応力分布は基礎全面にわたって一定ではなく、基礎同縁で大きく中心付近で小さい結果が得られているが、重錘の衝撃のような大きな荷重に対しては、砂層は塑性的な挙動を示しているであろうから、弾性論で予測されるような基礎底面での応力分布の不均一は生じないであろう。したがって、これは上のような現象の理由としては採用し難い。図-5.22は、重錘直下の最大土圧のみに注目して、単位面積あたりの衝撃荷重で無次元化した値の、敷砂層厚に対する関係を示したものである。当然この値は、敷砂層厚が厚くなるにつれて減少するが、重錘の形状や落下高の影響は特に見られない。

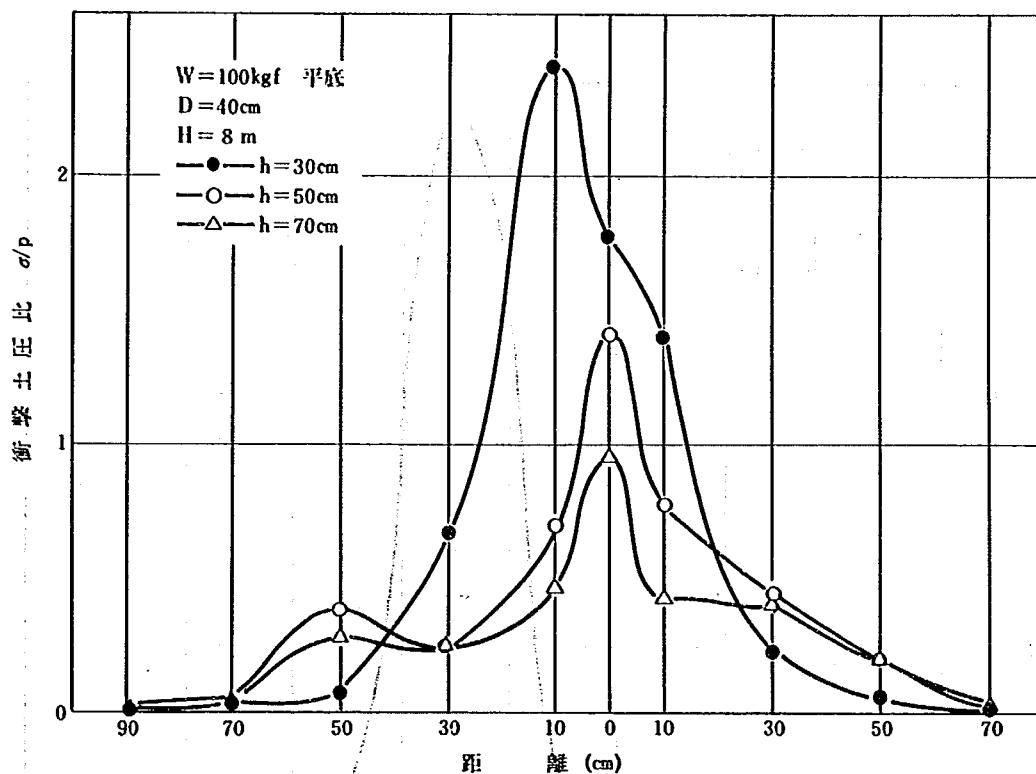


図-5.21(a) 敷砂層厚と衝撃土圧分布 (単位面積あたりの衝撃力で無次元化)

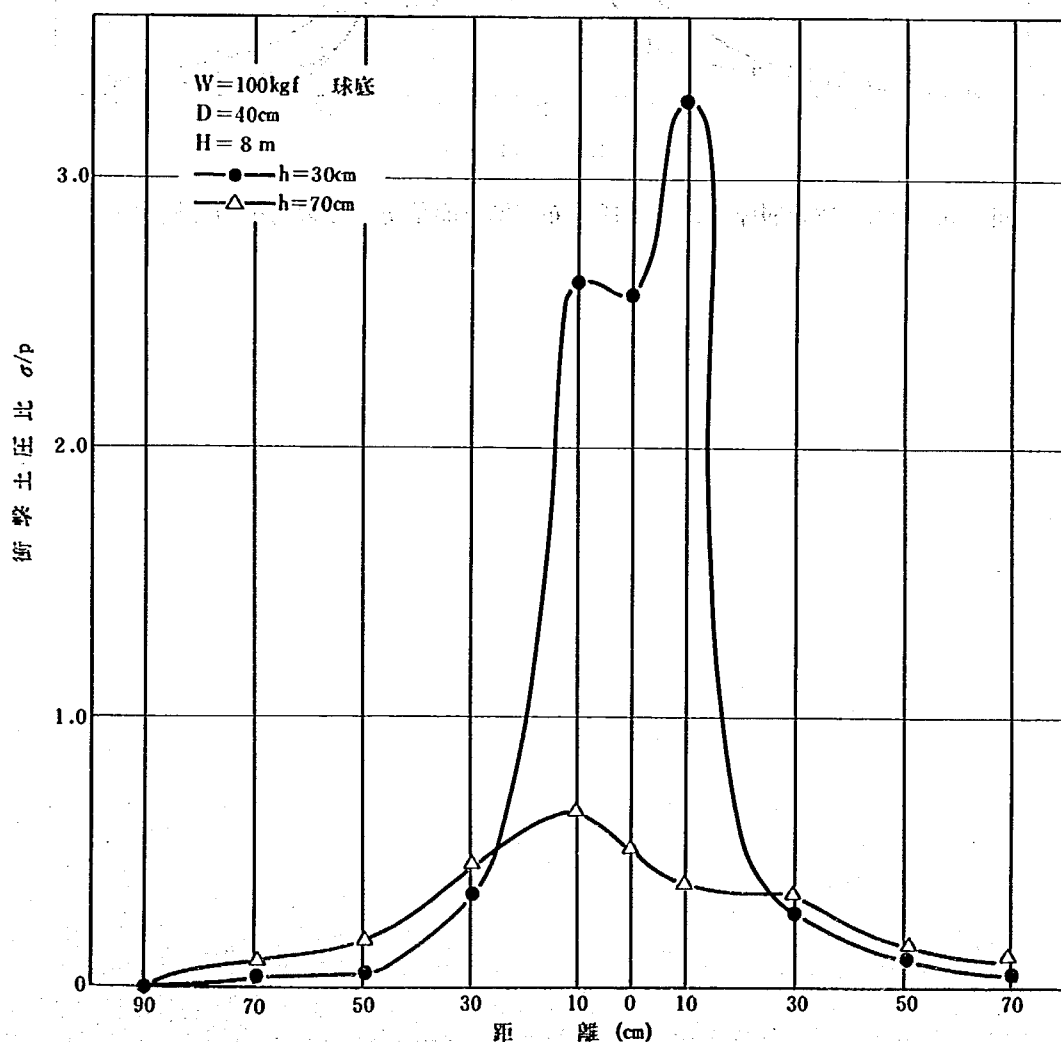


図-5.21(b) 敷砂層厚と衝撃土圧分布 (単位面積あたりの衝撃力で無次元化)

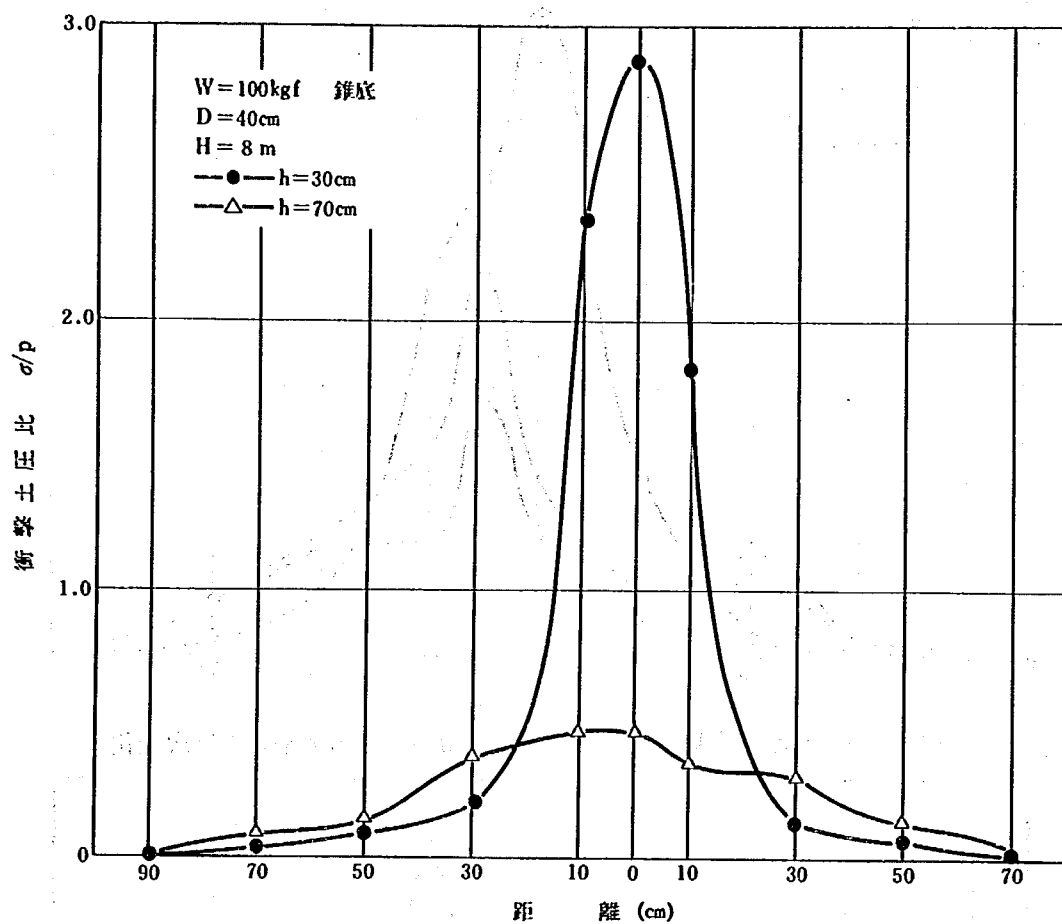
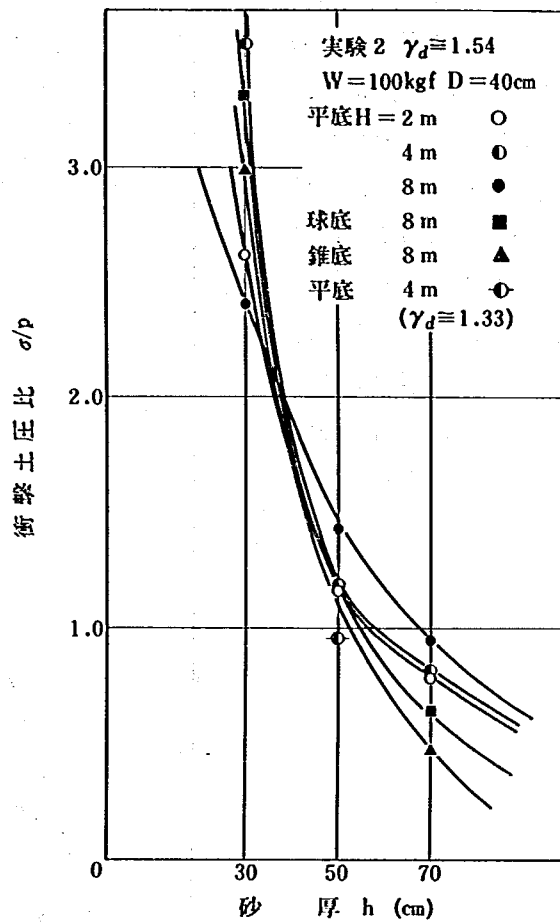


図-5.21(c) 敷砂層厚と衝撃土圧分布 (単位面積あたりの衝撃力で無次元化)



図一 5.22 敷砂層厚と衝撃土圧の最大値

さらに、図-5.23は、敷砂層の上部に作用した衝撃荷重 P_{max} と、底面で測定した土圧分布から、そのピーク値が同時に生じたものとして底面合力の最大値 Q_{max} を求め比較したものである。図には、静的載荷時の結果も含めてある。図から次の事が見られる。静的載荷時には、全荷重は小さいが、土圧計で測定した砂層下部合力は、上部からの荷重にほぼ一致する（特に小型土圧計を用いた場合）、しかし、荷重が衝撃的な場合、底面で測定される土圧合力は、入力である衝撃荷重の2～3倍に達する事がある。これは、前述した敷砂層の慣性力の影響が第一の理由と考えられ、さらに土圧がピークに達する時刻のずれの影響等があるものと思われる。

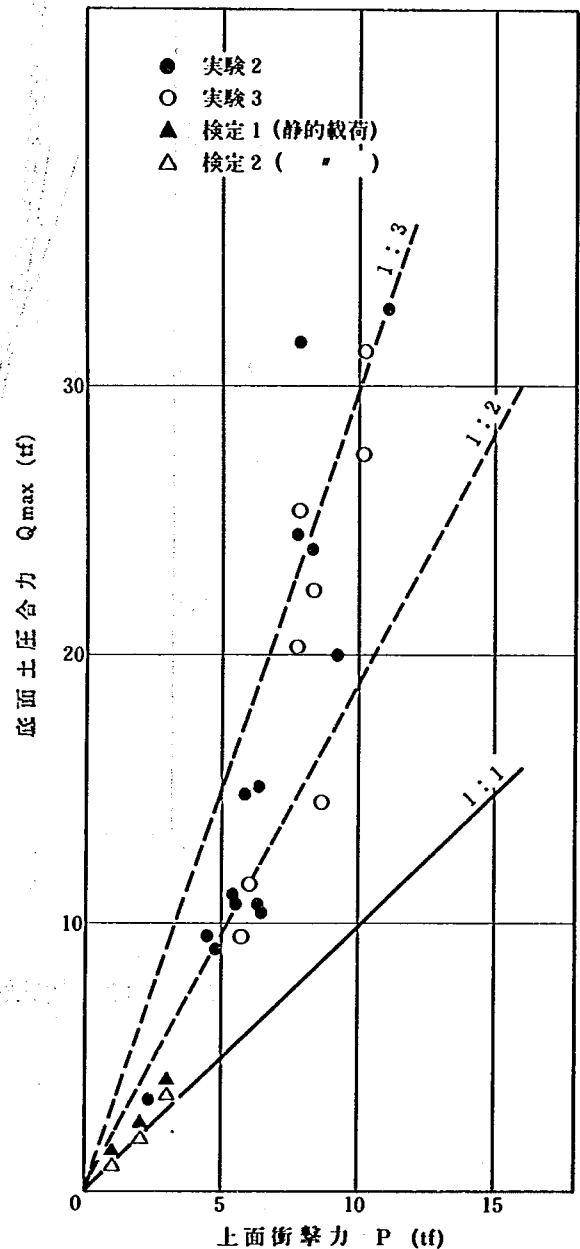


図-5.23 重錘の衝撃力と衝撃土圧合力の関係

5-6 床版のひずみ

実験3において床版のひずみを測定した。今回の実験供試体とも言うべきコンクリート床版では、実験順序でいって 番目の敷砂層厚 $h =$ cm, 落下高 $H =$ mのときに、中心から放射状に細かいクラックが生じ、その後の実験においては良好なひずみ測定記録は得られなかった。現時点では床版のひずみ測定結果に関し十分な検討がなされていないが、一応図-5.24に鋼床版のひずみ測定結果を土圧測定結果と合わせて示す。今後は、この土圧分布とひずみ分布の斉合性のチェックと合わせて、設計に用いるべき土圧の分散特性の計算式の確立が必要である。

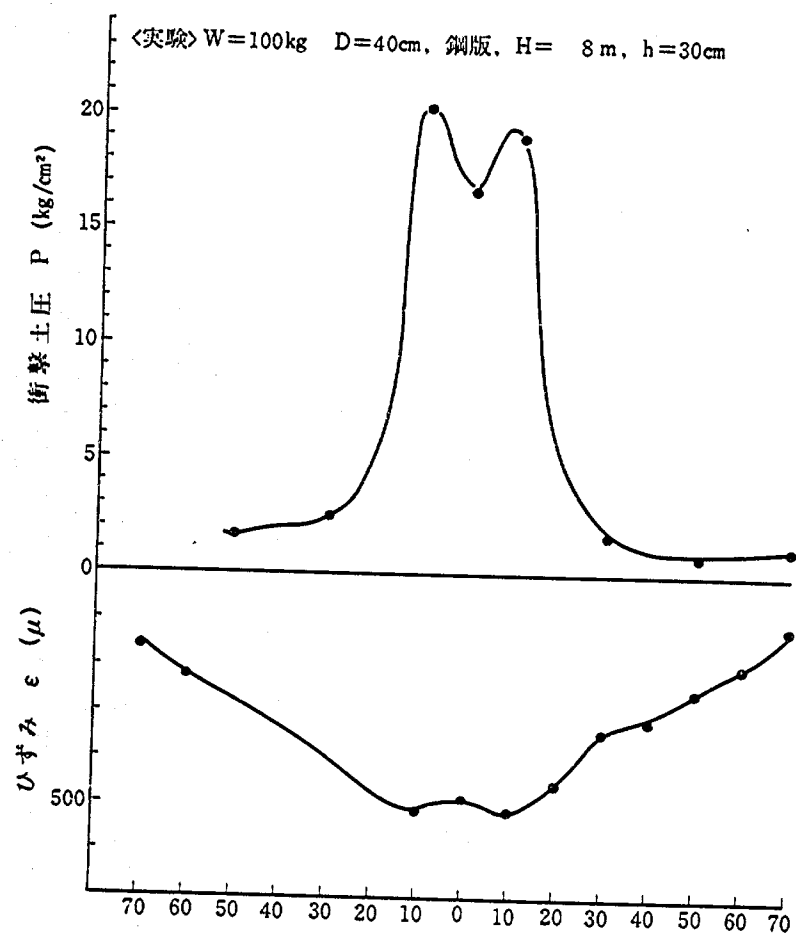


図 - 5.24 (a)

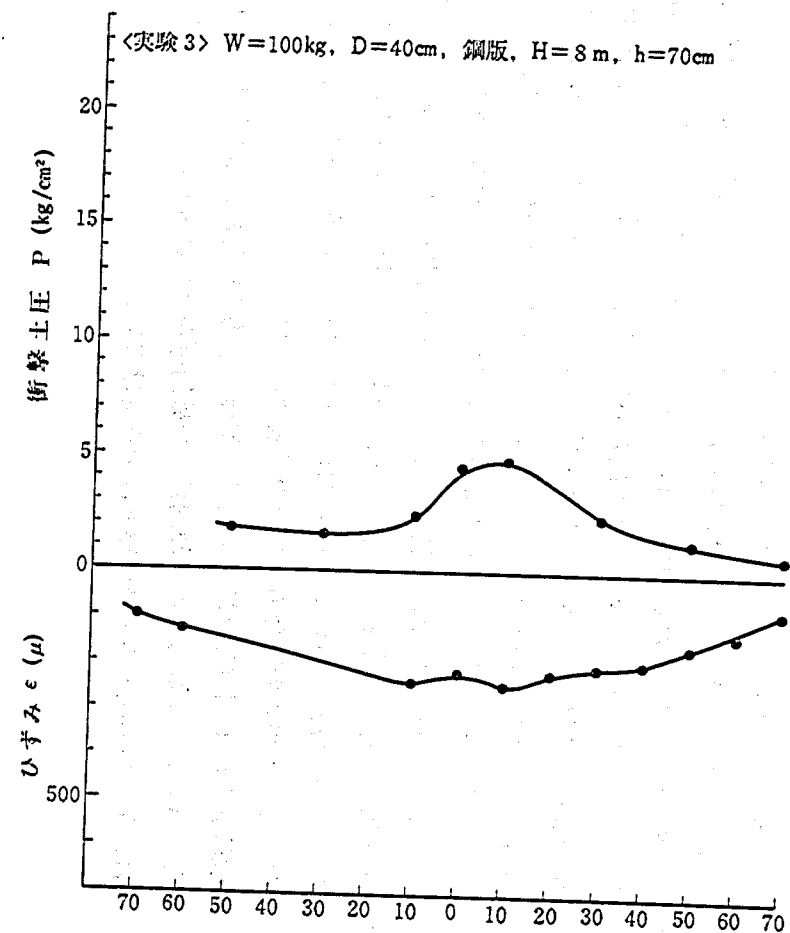
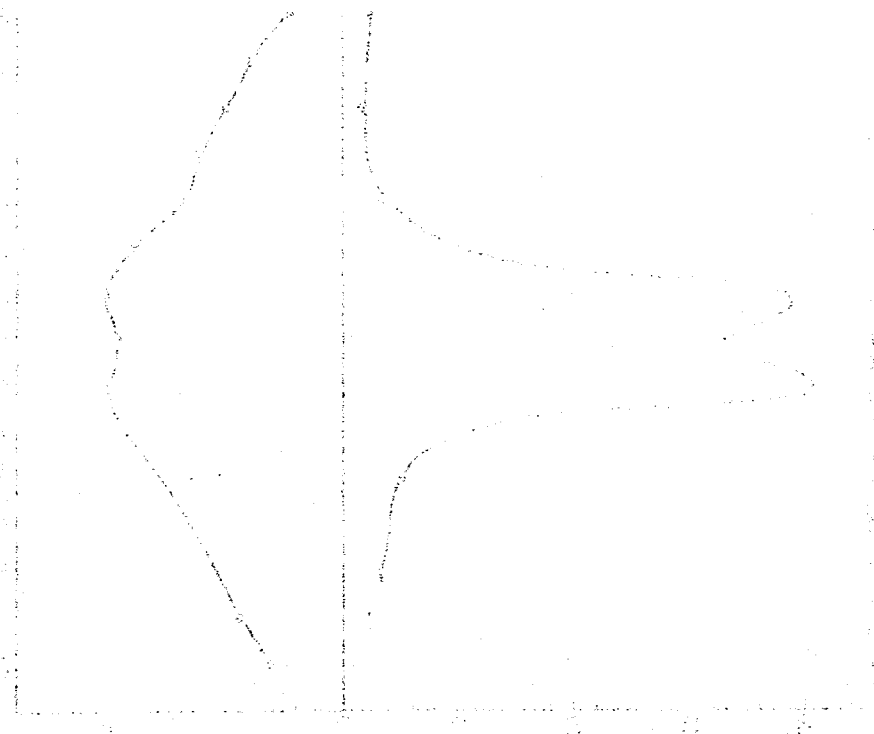


図 - 5.24 (b)

5-7 実験結果のまとめ

5-1～5-6で明らかにされたのは次の事項である。

- 1) 衝撃加速度の波形は、重錘の形状・重量等によって異なったパターンを示す。
- 2) 同一の方法で製作した敷砂層に対しても、同一の落下条件に対して衝撃加速度の測定値はかなりばらつく。しかし、衝撃加速度と最大めり込み量との間にはよい対応関係がある。
- 3) 衝撃加速度には、重錘重量・形状・寸法、落下高、敷砂層厚、密度等が影響因子である。従来余り注目されていなかった因子として重錘形状の影響はかなり大きく、同一径・重量では平底が最も大きく、球底・錐底ではその6～7割程度である。敷砂層厚 h が厚くなると衝撃加速度は減少するが、今回の実験重錘の範囲内で、 $h = 90$ cm程度以上になるとその減少効果は少なくなる。
- 4) 実測衝撃加速度を従来の式と比べて、最も大きい平底の場合でも、敷砂層厚が30 cm程度を除いて、振動便覧式において $\lambda = 100$ tf/m²とおいた計算値を越えるものはない。吉田の式の計算値は、球底・平底の場合の実測値の下限值に近い。
- 5) 敷砂層下部で測定した最大土圧は、重錘衝撃力を重錘断面積で除した単位面積あたりの衝撃力よりかなり大きくなる。この傾向は、敷砂層厚が薄い程著しい。敷砂層厚に対する土圧の減少傾向は、重錘の形状・落下高の影響は余り受けない。



6. 重錘落下による衝撃問題の理論的考察

敷砂上への重錘落下による衝撃問題を取扱った研究は表-2.1にまとめた。又、今回我々が実施した実験も含めて、これらの理論・実験が取扱ってきた重錘形状・寸法・重量、敷砂層条件等は様々であり、現時点では簡単に相互比較はできない。又、現実の落石には様々な条件のものが考えられ、それらの実験を統一的に解釈し、又、それらの実験範囲を越えて適用するためには、何らかの理論的補強が望まれる。

理論的考察の基として用いられるものは、現在の所、振動便覧式のように2物体の衝突問題（これは振動問題となる）として扱うものと、山口らのように1次元棒の縦衝撃（これは波動問題である）として扱うものがある。図-5.1で見たような衝撃加速度の波形を考えると後者の方がよりよい解を与えるようにも見えるが、ここでは、振動便覧式の方法に基き、それらを拡張する方向で考察を進めた。落石のような大きい衝撃力を受ける砂層の剛性は、一般に非弾性的である事は自明であり、弾性論の適用性は少ないように考えられる。しかし、その一方、振動便覧式にも見られるように、単純な計算過程の下に落石重量・落下高、砂層の変形特性等の影響を推定する事ができるという長所もある。このような観点から、ここでは、振動便覧式に用いられているモデル化に準じて、それに考慮されていないいくつかの因子の影響の評価を試みた。

6-1 振動便覧式の再考

振動便覧式の誘導に用いられた基本式・仮定の詳細については、8.(1)を参考にされたい。その過程を要約すると、振動便覧式は、基本的には二つの弾性球の衝突理論に基くものであり、実用的には衝突体を剛球、被衝突体を質量無限大の半無限弾性体としている。このような仮定によって、最大衝撃力 $P_{\max}$ は次のように与えられる。

$$P_{\max} = k \delta_{\max}^{3/2} \quad (6.1)$$

$$\delta_{\max} = \left(\frac{5}{2k} WH \right)^{2/5} \quad (6.2)$$

ここに、 k : 半無限弾性体上に、剛球面を接触させて圧縮したときの荷重 P とめり込み量 δ の関係を与えるばね係数で、 $P = k \delta^{3/2}$ と与えられる。

(6.1, 2) 式を合わせて、次式を得る。

$$P_{\max} = 1.73 k^{0.4} (WH)^{0.6} \quad (6.3)$$

ここで、ばね係数 k は、砂層のポアソン比 $\nu = 1/4$ とすると、砂層のラーメの定数 λ 及び球の半径 R と次の関係がある。

$$k = \frac{32}{9} \lambda \sqrt{R} \quad (6.4)$$

振動便覧式では、衝突体の衝突面が球面であるというだけでなく、衝突体の全体形状が球体であるという仮定と、その球の単位体積重量を 2.6 と仮定する事によって、 k と衝突体重量 W と関係づけて k を変形し、(6.3) 式に用いて次式のように $P_{\max}$ を表現している。

$$P_{\max} = 2.46 \lambda^{2/5} W^{2/5} H^{3/5} \quad (6.5)$$

したがって、ここで注意をしておかなければならないのは、接触面が球面であっても、全体形状が球体でなければ、球面半径 R と重錘重量 W の間には単位体積重量を仮定しても一義的な関係にないから、(6.5) 式の形にはならないという事である。そのような場合には、(6.3) 式と (6.4) 式とを結びつけて用いるべきである。

例えば、 λ を tf/m^2 で表わすとして、

$$\left. \begin{aligned} R=0.2\text{mのとき, } P_{\max} &= 2.08 \lambda^{0.4} (WH)^{0.6} \\ R=0.4\text{mのとき, } P_{\max} &= 2.39 \lambda^{0.4} (WH)^{0.6} \\ R=0.8\text{mのとき, } P_{\max} &= 2.75 \lambda^{0.4} (WH)^{0.6} \end{aligned} \right\} (6.6)$$

ついでながら、今回我々が用いた球底重錘の例 ($W=0.1 \text{ tf}$) について、振動便覧式 (6.5) 式とより厳密な (6.6) 式とを比較してみると、

$$\frac{P_{\max}(\text{振動便覧式})}{P_{\max}(\text{厳密式})} = \frac{2.46 \lambda^{0.4} W^{0.3} H^{0.6}}{2.39 \lambda^{0.4} (WH)^{0.6}} = 1.03 (W)^{0.067} = 0.88$$

となり、振動便覧式は約 1 割ほど小さい値を与える。

いずれにしても、振動便覧式は、落石又は重錘がどのような形状であれ、その重量をもつ単位体積重量 2.6 の球体と考えている事になる。

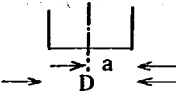
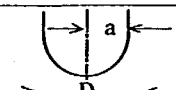
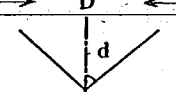
6-2 落石形状の影響

上述したように、振動便覧式は弾性衝突問題の特殊な条件下の解と言える。落石の形状の影響を考慮した式を導き、その影響を検討する。

誘導上の仮定として被衝突体が半無限弾性体であるという振動便覧式の仮定は用いる。詳細は 8.(2) に述べられているが、結果は次のようである。今回我々が用いた重錘形状について、荷重 P ～ り込み量 δ 関係は次のようにまとめられる。

$$P = k \delta^n \quad (6.7)$$

表-6.1 重錘形状によるパラメータ

重錘形状			備考
円柱平底		$\frac{2aE}{1-\nu^2}$	1
半球底		$\frac{4}{3}\sqrt{R} \frac{E}{1-\nu^2}$	$\frac{3}{2}$
円錐底		$\frac{\pi \tan \alpha}{2} \frac{E}{1-\nu^2}$	2

とにおいて、 k 、 n は表-6.1 のように与えられる。最大衝撃力 $P_{\max}$ 、最大衝撃加速度 $a_{\max}$ 、最大 り込み量 $\delta_{\max}$ は次式で与えられる。

$$P_{\max} = k \left\{ (n+1) \frac{WH}{k} \right\}^{\frac{n}{n+1}} \quad (6.8)$$

$$\frac{\alpha_{\max}}{g} = \left(\frac{k}{W} \right)^{\frac{1}{n+1}} \{ (n+1) H \}^{\frac{n}{n+1}} \quad (6.9)$$

$$\delta_{\max} = \left\{ (n+1) \frac{WH}{k} \right\}^{\frac{1}{n+1}} \quad (6.10)$$

表-6.1に与えられた k は砂層剛性と重錘寸法（球底の場合）又は重錘の形状（錐底の場合）に依存するばね係数、 n は重錘の形状のみに依存する係数である。

(6.9)式を、実験に用いた重錘の形状・寸法・重量に合わせ、又、 $\nu=0.25$, $E=125 \text{ tf/m}^2$ ($\lambda=50 \text{ tf/m}^2$ に相当)と仮定して行なった計算結果を、実験結果と合わせて、図-6.1に示す。この図から次の事が分る。まず形状による影響度は弾性論から予測されるものとはかなり異なったものとなる。これは、(6.9)式に用いられるばね係数の基となる砂層のヤング率 E は、形状による買入機構の違いのために同一の値を想定する事が適当でない事を示している。なお、図-6.1に示したような解析的に求まる形状の影響の順序は、一定のものではなく、重錘の寸法、形状（錐底の場合の頂角）、落下高の影響を受けて変化する。なぜならば、(6.8, 9)式の基になるのは、各重錘についての荷重～めり込み量関係(6.7)式である。(6.7)式に表-6.1の關係を用いると次のように表わす事ができる。

$$\left. \begin{aligned} \text{平底: } \frac{P}{E/(1-\nu^2)} &= 2a\delta \\ \text{球底: } \frac{P}{E/(1-\nu^2)} &= \frac{4\sqrt{R}}{3} \delta^{3/2} \\ \text{錐底: } \frac{P}{E/(1-\nu^2)} &= \frac{\pi \tan \alpha}{2} \delta^2 \end{aligned} \right\} \quad (6.11)$$

これは、いわば基準化された荷重 $\eta=P/E/(1-\nu^2)$ とめり込み量 δ の關係を与えるものである。この3形状における η と δ の相互關係は、 a , R , α の影響を受けて変るが、模式的には図-6.2(a)のように表わされる。後に、付録A(2)で述べるように、それぞれの $P \sim \delta$ 關係に対する仕事は、重錘の初期位置エネルギー WH に等しくならなければならない。このような關係を与える $P_{\max}$, $\delta_{\max}$ の各形状毎の關係は、図-6.2(a)の $\eta \sim \delta$ 關係上の相対的な位置に依存し、どの形状のものが1番大きい衝撃力を与えるかは種々の場合があり得る(図-6.2(b)(c)参照)。

ついでながら、円柱について、 $W=100\text{kgf}$, $D=40\text{cm}$ を基準として見た場合、重量が大きい、径が小さくなると加速度が小さくなる傾向は計算式によっても表わされているが、特に径の小さい場合には、計算で予測される以上に実測加速度は小さくなり、この場合も、径の小さい場合は見かけのばね係数を小さくとらなければならない事を示している。この事は次のように理解される。重錘によ

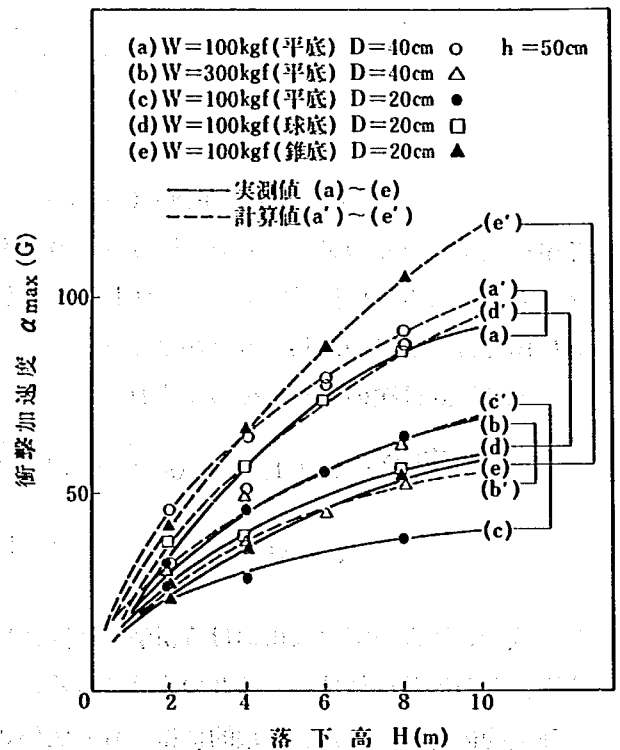


図-6.1

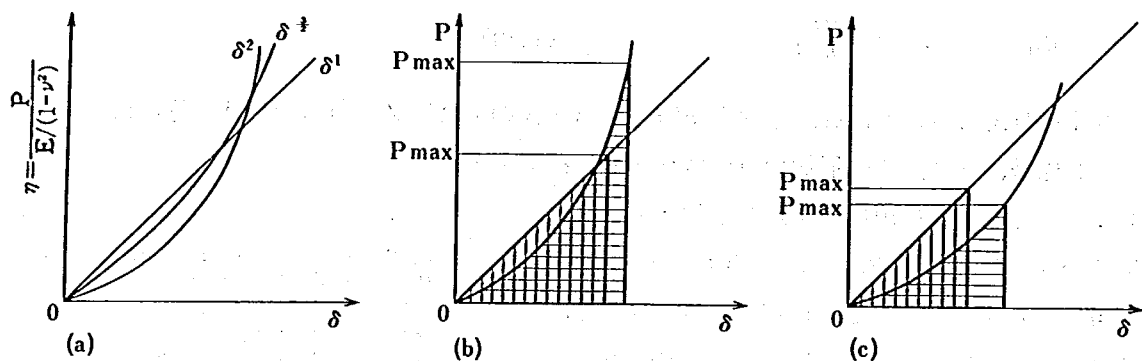


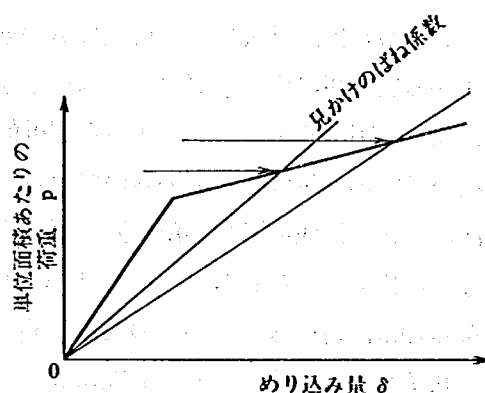
図-6.2 重錘形状による重錘荷重とめり込み量の関係模式図

る単位面積あたりの荷重 p とめり込み量 δ の関係を
図-6.3 のような軟化傾向であるとすれば、 p が大
きい所では見かけのばね係数は小さくなる。

(6.9) 式は次のように書換えられる。

$$\frac{\alpha_{\max}}{g} = (n+1)^{\frac{n}{n+1}} \cdot (R)^{\frac{1}{n+1}} \cdot (W)^{\frac{1}{n+1}} \cdot (H)^{\frac{n}{n+1}} \quad (6.11)$$

この式や、従来の実験式における衝撃加速度に及ぼす W 、 H の影響指数は表-6.2 のようになる。



理論的に得られた式と実験的に得られた関係式と 図-6.3 重錘の荷重強度とめり込み量の関係および見かけのばね係数模式図
の間に差があるのは、理論式では、 W 、 H と砂層のばね係数 k とは独立であるとして式が導かれているが、実際には、砂層のばね係数 k は作用する衝撃力又は単位面積あたりの衝撃力の大きさに依存し、したがって、 k は W 、 H とは独立ではないである

表-6.2 衝撃加速度計算式における W 、 H の影響度(べき指数)

		重錘形状	W のべき指数	H のべき指数
今回の解析		円柱平底	-0.5	0.5
		球底	-0.9	0.6
		錐底	-0.333	0.667
振動便覧		球体	-0.333	0.6
鋼材クラブ		球底	0.0	1.0
吉田	砕砂	球底	-0.050	0.576
	海砂		-0.005	0.226
	山砂		-0.389	0.611
	まとめて		0.0 *	0.5

* 落石の静止時間 T_0 。 W の影響があるがその影響は小さい。

う事から、実験式からは、弾性理論のように本来的な独立の W , H の影響指数を見出す事は難しい事を示唆している。今後、我々の実験結果についても、実験式化を図り、総合的に検討を行ないたい。

(6.9) 式による衝撃加速度は、現実には変動範囲の広いばね係数 k の影響を大きく受ける。しかし、(6.9, 10) 式からばね係数 k の影響を消去すると次の関係式を得る。

$$(\alpha_{\max}/g) \cdot \delta_{\max} = (n+1)H \quad (6.12)$$

$$\alpha_{\max}/g = (n+1)H/\delta_{\max} \quad (6.13)$$

両式は、最大加速度がめり込み量と密接な関係にある事を示している。この両関係は、既に図-5.16, 17の関係を描くときに参考として用いている。

6-3 有限砂層厚の影響

以上に見てきた振動便覧式的前提条件と現実の敷砂条件とを比べた場合、後者では層厚が有限である事、したがって被衝突体としての質量が有限である事、さらに敷砂は有限のばね特性を有する落石覆土工の床版によって支えられている事等の違いがある。これらの事を考慮して理論の拡張を試みた。

まず、敷砂層の変形特性は表-6.1中のばね係数 k によって表わされるが、これは本来半無限体表面に载荷した場合のものであり、敷砂層厚が有限の場合、ばね係数がどのように変化するかを考える。

有限層厚の弾性体に等分布荷重が作用する場合の内部応力・変形の問題は、Burmister¹³⁾によって解が導かれているが、ここでは、より簡単に次のように考える。図-6.4において、円形平底重錘による荷重 P の分布が敷砂層上面で半径 a 、下面で半径 b とする。このような近似の下に荷重 P によるめり込み量 δ を次のように近似する。

$$\delta = \delta(z=0 \text{ 以深の半無限体}) - \delta(z=h \text{ 以深の半無限体})$$

$$= \frac{P(1-\nu^2)}{2Ea} - \frac{P(1-\nu^2)}{2Eb}$$

したがって有限層厚に対するばね係数 k は、

$$k = \frac{P}{\delta} = \frac{2Ea}{1-\nu^2} \cdot \frac{b}{b-a} = k_0 \cdot \frac{a+\mu h}{\mu h} \quad (6.14)$$

ここに、 k_0 : 半無限体に対するばね係数 $(= \frac{2Ea}{1-\nu^2})$

μ : 図-6.2に示される応力分散勾配

したがって、 $b > a$, i.e., $\mu > 0$ とする限り、 $k > k_0$ である。有限層厚であっても、その質量が重錘質量に比して十分大きいとすると、衝撃力、衝撃加速度の計算には、(6.8, 9) 式がそのまま用いられる(ただし、(6.14) 式のばね係数が用いられるのは、平底の場合であり、したがって、(6.8, 9) 式において $n=1$ の場合である)。このようにして有限層厚における衝撃加速度の半無限体の場合に対する比を計算した。すなわち、(6.9, 14) 式から次のようになる。

$$\left(\frac{\alpha_{\max}}{g}\right)_{\text{半無限体}} = \left(\frac{k_0}{W}\right)^{\frac{1}{2}} (2H)^{\frac{1}{2}} \quad (6.15)$$

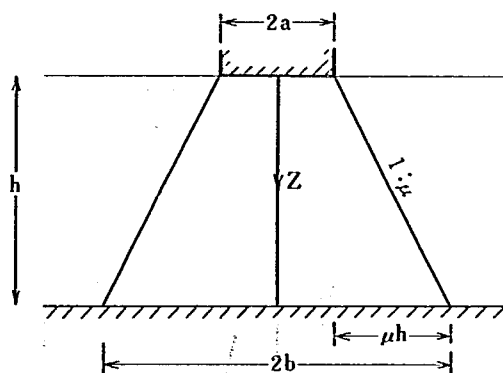


図-6.4 有限層厚の場合のばね係数を求めるための応力分散の仮定

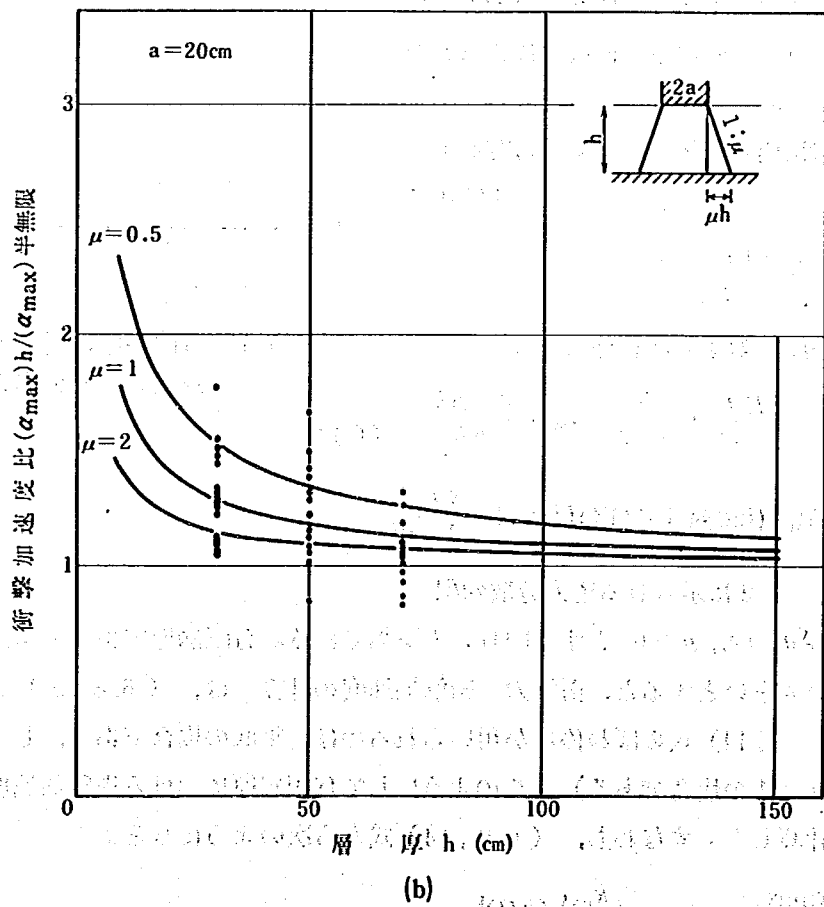
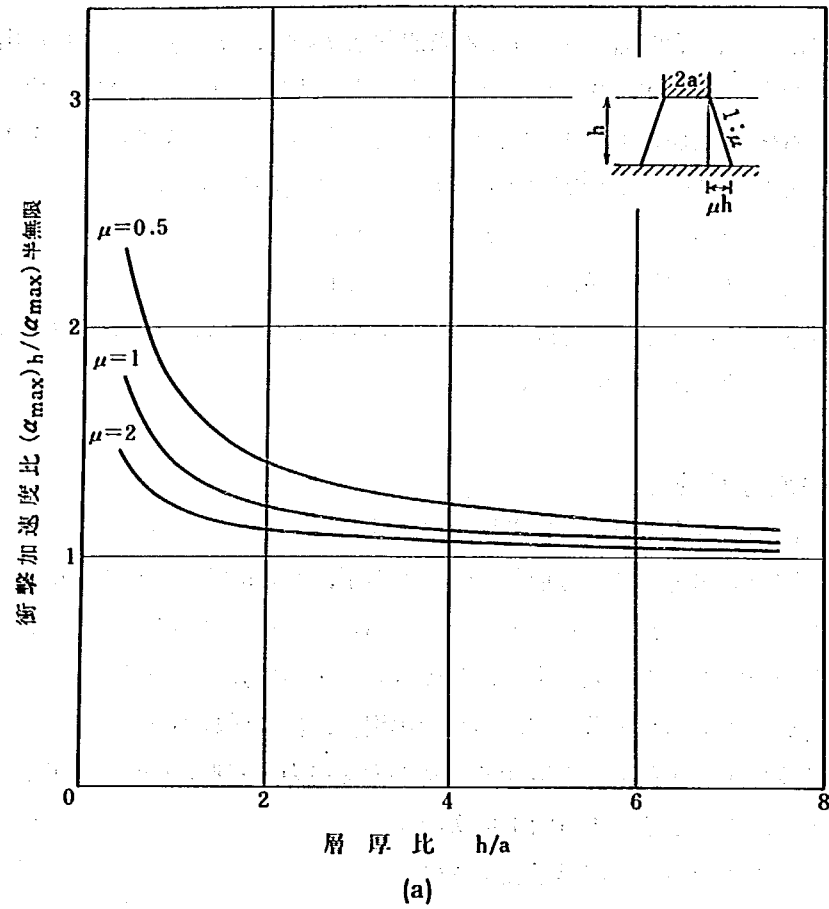


図-6.5 無次元化された衝撃加速度と層厚の関係

$$\left(\frac{\alpha_{\max}}{g}\right)_{\text{有限層厚 } h} = \left(\frac{k}{W}\right)^{\frac{1}{2}} (2H)^{\frac{1}{2}}$$

したがって、

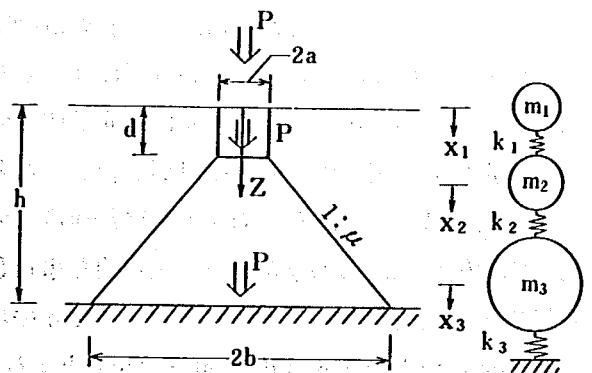
$$\frac{(\alpha_{\max})h}{(\alpha_{\max})_{\text{半無限}}} = \left(\frac{k}{k_0}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(1 + \frac{1}{\mu} \frac{a}{h}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.15)$$

この式の形から明らかなように、この衝撃加速度の比は、敷砂層厚 h の重錘半径 a に対する比 h/a と応力分散勾配 μ の関数である。このように無次元化された形で、衝撃加速度と敷砂層厚の関係を描いたものが図-6.5(a)である。さらに、図-6.5(b)は、実験条件に合わせて $a = 20 \text{ cm}$ としたときのこの理論的關係と実験値の關係を示したものである。実験値では、半無限体に対する衝撃加速度は不明であるため、便宜上 $h = 90 \text{ cm}$ における実測値又は、推定値を基準値として衝撃加速度の比を求めて描いた。実験結果はそうにして求めた値のばらつきの範囲を示している。半無限体に対する衝撃加速度が知られば、実際には図-6.5(b)中の実験値はもう少し全体に大きくなる事を考えれば、例えば $\mu = 0.5$ 位の応力分散勾配を考えると実測關係と理論關係はよく合致するようである。この $\mu = 0.5$ という値は、通常静的土圧の分散に近似的に用いられるものよりやや小さいようである。

このように実験値に計算値の傾向を合わせるために仮定する応力分散勾配 μ がやや急である事と、重錘落下による敷砂層の内部変形の觀察から、上述した有限層厚を考慮したばね係数の変化に加えて、さらに敷砂層の質量が有限である事及び砂層を支持

する床版の質量及び剛性を考慮したモデルを次のように考えた。基本的考えは、重錘のめり込む場合に、

応力分散が小さく重錘と共に運動する領域があると
する仮定に基くものである。図-6.6はこの考えに
基く領域の区分及び力の分散性状の仮定を模式的に
示したものであり、この領域の区分に対応して、重
錘、重錘と共に運動する直下の土塊、それより下部
の力が分散する土塊の部分それぞれ1個ずつの衝
突体と考えて図-6.7のようにモデル化される。こ



こではね k_1 は重錘直下の土塊の圧縮性に基くもので、
ある。ばね k_2 は力の分散する土塊の圧縮性に基くものである。このばねは、先に述べた (6.14) 式と
同様に考える。ばね k_3 はそれらの土塊全体を支持する床版のばね特性を表わすものである。したがっ
て、床版がない場合には、ばね k_3 は無限大の剛さと考える。このモデルには、細かく見ると問題点も
多く今後の検討が残されている。例えば、重錘直下での土塊部分での土圧分散を考慮していないため
に、その部分ではそれだけ変形量も大きく、この d が大きくなると全体のばね係数の剛さが半無限体
の場合よりむしろ小さくなるという矛盾が生ずる場合がある。

この計算モデルでは、重錘直下の土塊深さ d や、力の分散勾配 μ のとり方については現時点では不
明な点が多く、仮定に基かねばならない。このモデルによる計算例は、図-6.4, 5 に示すようなも
のである。用いた砂層の弾性係数は図-6.1 に示した計算例に用いたものと同じである。現在までの
計算では、 $\mu = 1$ と固定し、 d を変えて行なった。図-6.4 は、敷砂層厚 h に対する衝撃加速度の変
化を示す。この結果では、重錘重量の如何にかかわらず、 $h = 50 \text{ cm}$ 付近までは層厚の影響が大きく、

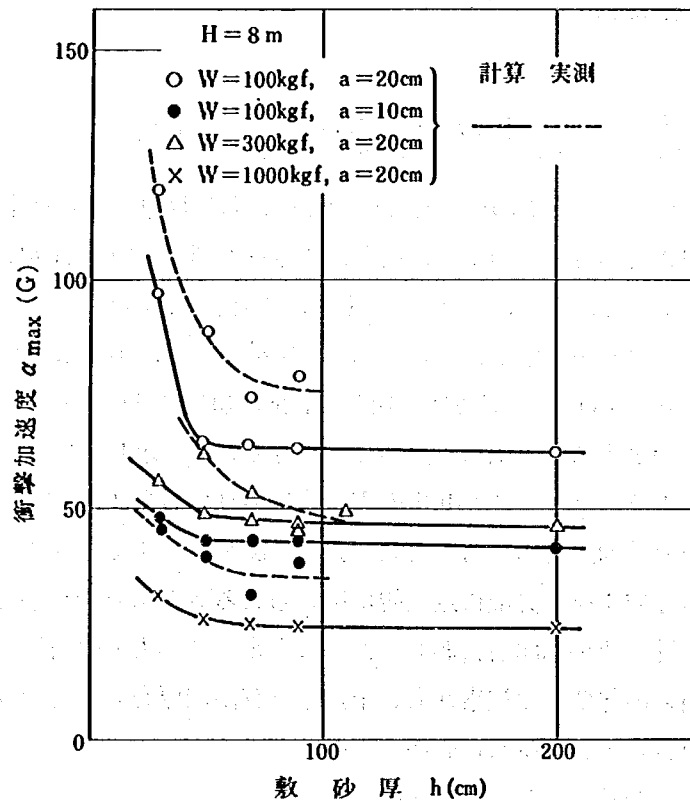


図-6.8 衝撃加速度の敷砂厚による変化の計算結果

それ以上では余り影響しないという事になる。重錘の重量・寸法による影響度の順序は、実測されたものと同一であるが、上述した h に対する依存傾向や、衝撃加速度の値の不一致等から見てこのモデルの定数の設定等に今後の検討が必要とされる。

図-6.9 は、落下高 H に対する衝撃加速度の変化性状を d を変えた計算結果により示したものである。実験値にもばらつきがあり、確定的な事は言えないが、実験値と計算結果を近似させるためには、重錘直下の土塊深さ d は重錘直径 $D = 40\text{cm}$ の場合、敷砂層厚 $h = 30\text{cm}$ のときは $d = 10 \sim 20\text{cm}$ 、 $h = 50\text{cm}$ 以上のときは $d = 20 \sim 30\text{cm}$ とすればよいであろう。なお、今回の計算モデルはやや複雑になったが、衝撃加速度の落下高 H に対する依存性は常に一定で 0.5 乗に比例するものである。

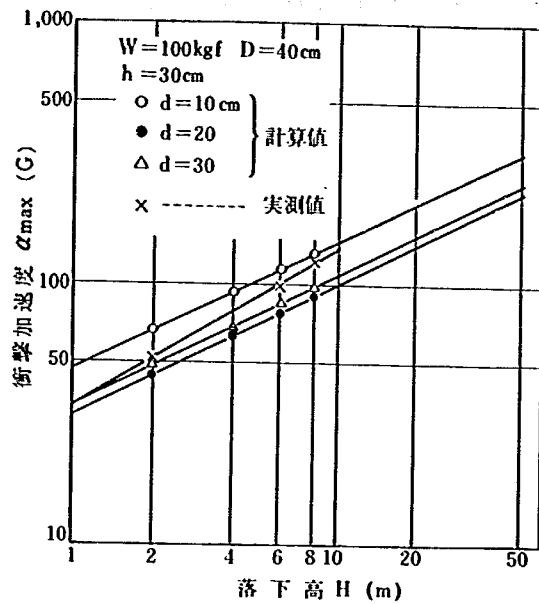
床版のばね係数を考慮した計算条件を実験条件に合わせて行なった所、剛基礎（コンクリート床）の場合に比べて極く僅か（2%以下）衝撃加速度が減少するという結果を得た。これは、実験的に両者の差がほとんどないという事と合致するものと考えられる。

さらに、砂層底部に生ずる力と重錘衝撃力とを合力で比べると砂層下部の方が大きいという結果も得られている。又、この傾向は敷砂層が薄い程著しい。

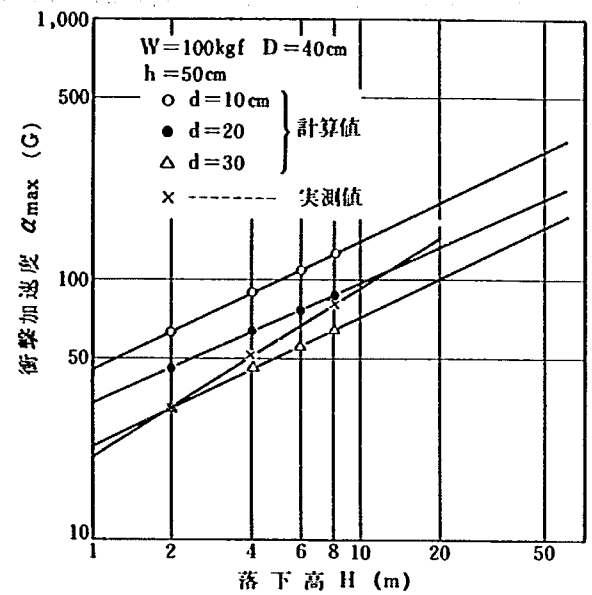
6-4 理論的考察のまとめ

6-1～6-3の考察は次のようにまとめられる。

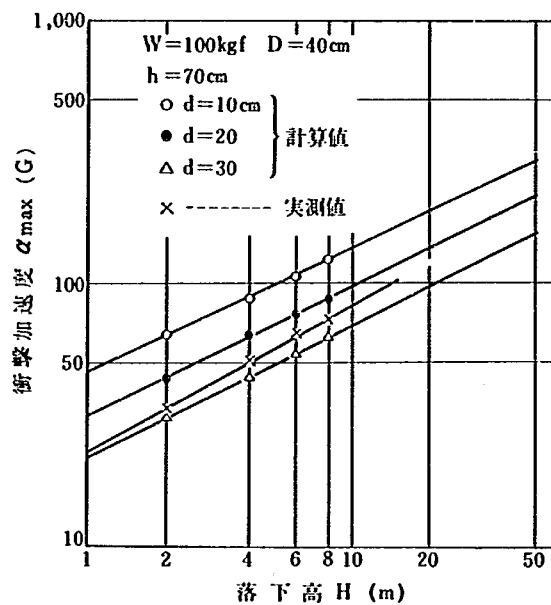
1) 重錘の底面形状が、平底、球底、錐底の場合に衝撃加速度・力を計算する弾性理論解を導いた。ただし、それらの結果を実測された結果と矛盾のないものとするためには、それぞれにおいて用いられる砂層剛性を使い分けなければならない。



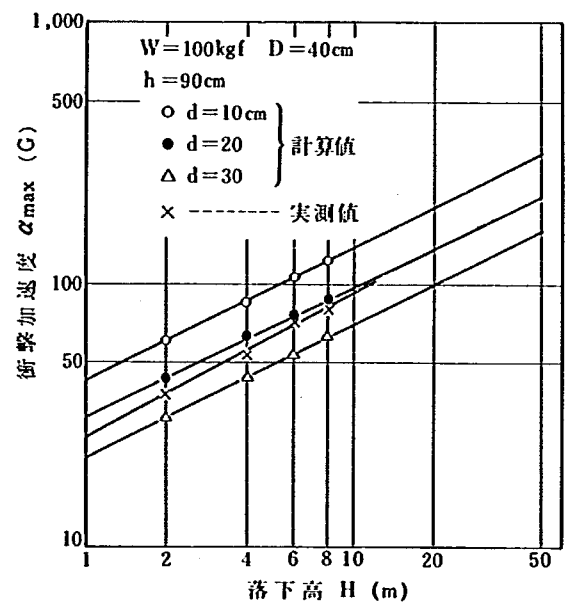
(a)



(b)



(c)



(d)

図-6.9 落下高と衝撃加速度の計算結果

- 2) 上の過程で、振動便覧に用いられている落石が球体であるという仮定と球底であるという仮定とでは若干その特性が異なる事を示した。
- 3) 同じく弾性論を用いて、衝撃加速度・力とめり込み量の間には密接な関係がある事が導かれた。
- 4) 敷砂層が有限厚さである事を考慮した3体衝突モデルを提案した。3体モデルについては、合理的分割法、荷重分散・質量の合理的設定法、既往データの統一の見直し等が必要である。

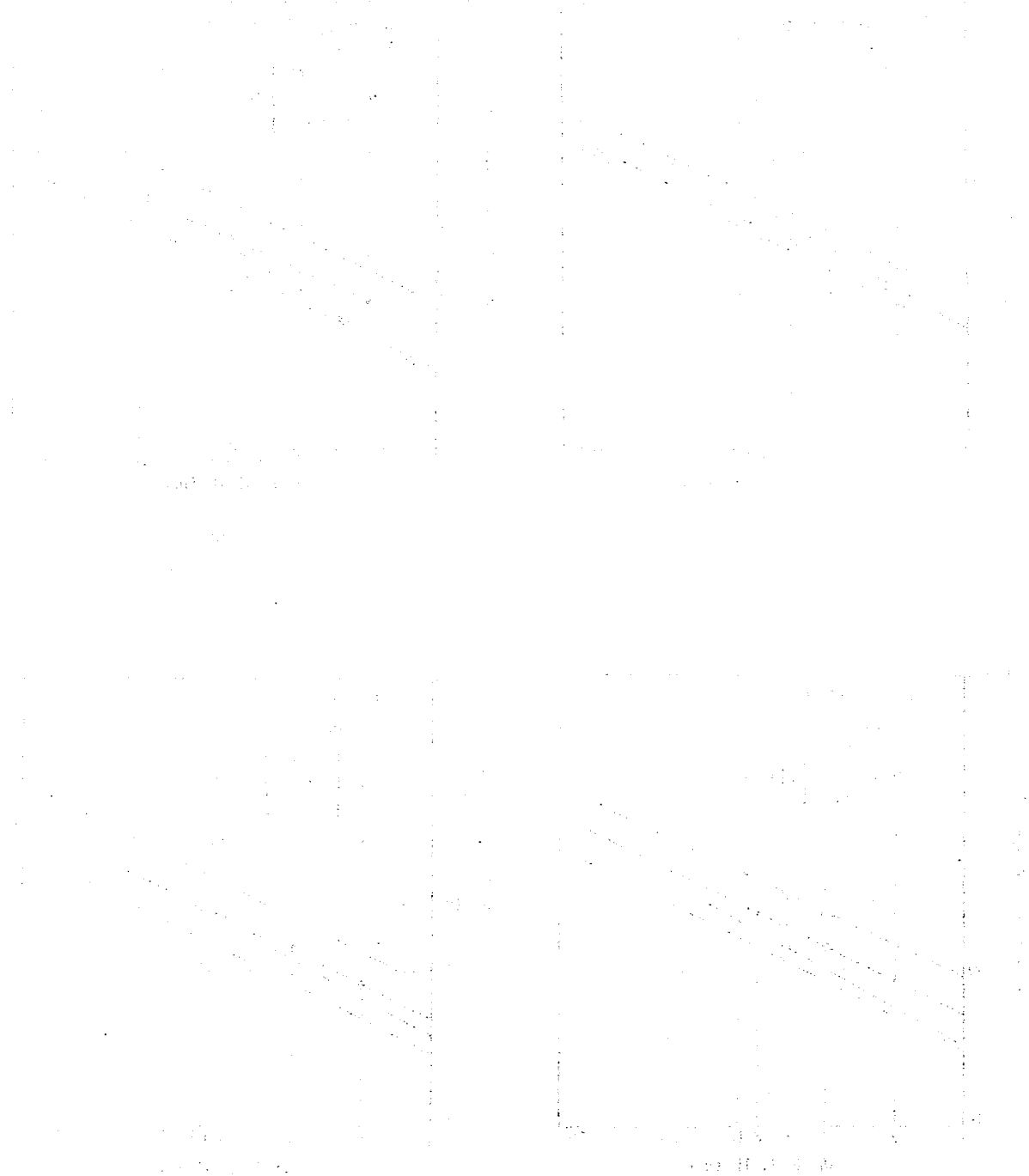


図 10 落石の衝撃加速度とめり込み量の関係

7. 結論及び今後の検討課題

今回の実験及びその考察により次の事が明らかにされた。

- 1) 衝撃加速度・力は、重錘重量・形状・寸法、落下高、敷砂層厚・密度の影響を受ける。特に、従来余り注目されていなかった因子として重錘形状の影響はかなり大きく、同一径・重量では平底が最も大きく、球底・錐底ではその6~7割程度である。敷砂層厚 h が厚くなると衝撃加速度は減少するが、今回の実験重錘の範囲内で、 $h = 90\text{cm}$ 程度以上になるとその減少効果は少なくなる。
- 2) 実測衝撃加速度を従来の式と比べて、最も大きい平底の場合でも、敷砂層厚が 30cm 程度を除いて、振動便覧式において $\lambda = 100\text{ tf/m}^2$ とおいた計算値を越えるものはない。吉田の式の計算値は、球底・平底の場合の実測値の下限値に近い。
- 3) 敷砂層下部で測定した最大土圧は、重錘衝撃力を重錘断面積で除した単位面積あたりの衝撃力よりかなり大きくなる。この傾向は、敷砂層厚が薄い程著しい。
- 4) 重錘の底面形状が、平底、球底、錐底の場合に衝撃加速度・力を弾性理論解により計算する場合には、球底・錐底については、平底の場合より砂層剛性を小さ目に設定するのが合理的である。
- 5) 衝撃加速度・力とめり込み量の間には密接な関係がある事が理論的に導かれ、実験結果によっても確認された。
- 6) 敷砂層が有限厚さである事を考慮した3体衝突モデルを提案した。これにより、敷砂層が有限である事により敷砂層の変形係数が変化し、被衝突体の質量が有限である事が考慮できる。

今後の検討課題として次の事が挙げられる。

- 1) 敷砂層状態から衝撃加速度・力の計算に用いる重錘・砂層間のばね係数を簡便に求める方法の考案。
- 2) 今までに行なった弾性論の考察を踏え、今回我々が行なった実験結果及び従来の実験結果を合わせて、統一的な解釈ができるかの検討。

付録 理論的考察に関する補遺

(1) 振動便覧式の説明

振動便覧式の基本は、落石の衝突現象を2弾性体間の衝突現象と見なすものであり、最終的な形に至るまでにはいくつかの仮定を踏えた段階がある。以下に、Timoshenko⁹⁾によって説明する。

最も一般的には、質量 m_1 , m_2 の弾性体が、
図-A 1のように衝突したときの両体の運動方程式は次式で表わされる。

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = -P \quad m_2 \frac{dv_2}{dt} = -P \quad (\text{A 1})$$

ここに、 P : 両弾性体間の相互圧縮力

v_1 , v_2 : 両体の速度

両体は、局所的な変形により相互に近づくが、その距離変化(互のめり込み)を δ とすると

$$\dot{\delta} = v_1 + v_2 \quad (\text{A 2})$$

(A 1, 2) 式によって

$$\ddot{\delta} = -P \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \quad (\text{A 3})$$

ここで、両体の接触側の形状を共に球面とすると(全体が球でなくてもよい)、Hertzの接触理論により

$$P = k \delta^{\frac{3}{2}} \quad (\text{A 4})$$

$$k = \frac{4}{3\pi} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \cdot \frac{1}{k_1 + k_2} \quad (\text{A 5})$$

ここに、

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1}, \quad k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \quad (\text{A 6})$$

R_1, R_2 : 両体の球面の半径

E_1, E_2 : 両体のヤング率

ν_1, ν_2 : 両体のポアソン比

(A 3, 4) 式を合わせて、両体の衝突時初速度が v_0 のときの、両体の最大めり込み量 $\delta_{\max}$ 及び最大圧縮力 $P_{\max}$ が次のように得られる。

$$\delta_{\max} = \left(\frac{5}{4k} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} v_0^2 \right)^{\frac{2}{5}} \quad (\text{A 7})$$

$$P_{\max} = k \delta_{\max}^{\frac{3}{2}} \quad (\text{A 8})$$

(A 7, 8) 式は、衝突面の形状が球面であるとしたときのかなり一般的な式であるが、これらを落石現象に適用するため次のような条件設定を行なう。

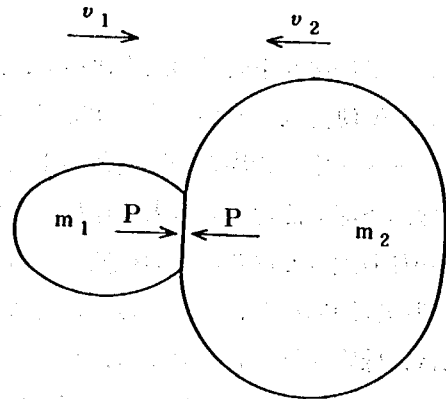


図-A 1 2体の衝突

第1の物体(落石)は、第2の物体(土)に比べて十分に剛であるから、 $E_1 = \infty$ 、落石は完全球体、土は半無限体とすると $R_2 = \infty$ 、 $m_2 = \infty$ となる。又、 $\nu_2 = 1/4$ とすると、 E_2 とラーメの定数 λ の間に $\lambda = 0.4 E_2$ の関係があるから

$$k_1 = 0, \quad k_2 = \frac{3}{8\pi\lambda}, \quad k = \frac{32}{9} \lambda \sqrt{R_1} \quad (\text{A9})$$

この k に対して (A7) 式の $\delta_{\max}$ は、

$$\delta_{\max} = \left(\frac{5}{4k} m_1 v_0^2 \right)^{\frac{2}{5}} \quad (\text{A10})$$

$m_1 = W/g$ 、 $v_0 = \sqrt{2gH}$ (W : 落石の重量、 H : 落石の落下高さ) として

$$\delta_{\max} = \left(\frac{5}{2k} WH \right)^{\frac{2}{5}} \quad (\text{A11})$$

これを (A8) 式に代入すると衝撃力 $P_{\max}$ が求まる。

(A9) 式に見られるように、 k は球状と仮定した落石の半径 R_1 と関係があるから、落石の単位体積重量 r ($= 2.6$ と仮定する) を介して、落石重量 W とも関連づけられる。

$$W = r \cdot \frac{4\pi R_1^3}{3} = 2.6 \times \frac{4\pi R_1^3}{3} \quad (\text{A12})$$

$$\text{だから, } R_1 = 0.451 \sqrt[3]{W} \quad k = 2.36 W^{\frac{5}{6}} \lambda \quad (\text{A13})$$

(A11, 8) 式に用いて

$$\delta_{\max} = 1.02 \lambda^{-\frac{2}{5}} W^{\frac{1}{3}} H^{\frac{2}{5}} \quad (\text{A14})$$

$$P_{\max} = 2.46 \lambda^{\frac{2}{5}} W^{\frac{2}{3}} H^{\frac{3}{5}} \quad (\text{A15})$$

を得る。これが振動便覧に見られる衝撃力算定式である。したがって、主な仮定としては、半無限弾性体上に単位体積重量 2.6 の剛球が自由落下(重力加速度は無視した水平衝突に相当)した場合の衝撃力を求めるものである事があげられる。

(2) 落石形状の影響について

上述したように、振動便覧式は弾性体衝突現象の特殊な条件下に導いたものである。ここでは、落石の形状の影響を含んだ式の誘導を行なう。

一般弾性体の衝突に対する方程式は (A3) 式で表わされるが、単純化のために被衝突体(土)が半無限体の場合 ($m_2 = \infty$ 、 $m_1 = m$) を考える。すなわち

$$\ddot{\delta} = -P \cdot \frac{1}{m} \quad (\text{A16})$$

圧縮力 P とめり込み量 δ の関係を一般的に

$$P = f(\delta) \quad (\text{A17})$$

とおく。(A16, 17) 式から

$$m \ddot{\delta} + f(\delta) = 0 \quad (\text{A18})$$

この式を δ について解けば、 P も求まる。しかし、我々が注目するのは、 P の最大値 $P_{\max}$ であり、したがって、 δ の最大値 $\delta_{\max}$ を求めればよく、それは (A18) 式から次のように簡単に解かれる。

(A18)式に $\dot{\delta}$ をかけて、 $m \ddot{\delta} \dot{\delta} + f(\delta) \dot{\delta} = 0$

これは次式のように書改められ積分が可能となる。

$$\frac{m}{2} d(\dot{\delta}^2) + f(\delta) d\delta = 0$$

$$\frac{m}{2} (\dot{\delta}^2 - v_0^2) + \int_0^\delta f(\delta) d\delta = 0 \quad (\text{A19})$$

$\delta = \delta_{\max}$ となるのは、 $\dot{\delta} = 0$ の場合であるから、(A19)式から

$$I = \int_0^{\delta_{\max}} f(\delta) d\delta = \frac{m}{2} v_0^2 = WH \quad (\text{A20})$$

となる。この関係は図-A2のように表わされる。この図において、荷重～変形関係 $P=f(\delta)$ の関係がどのようなものであれ、ハッチングをした面積 I は一定であることが分る。この図を用いた土の荷重～めり込み量の間の関係の考察は後に行なう。

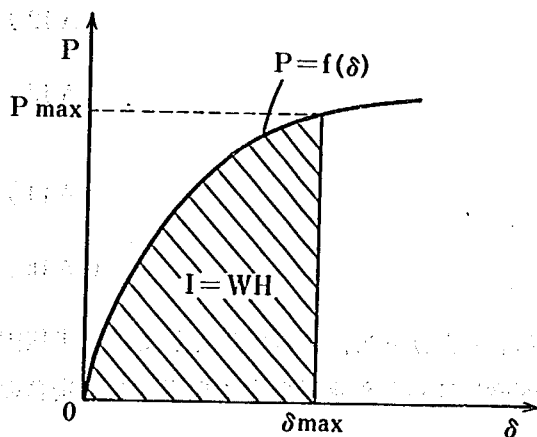


図-A2 荷重～めり込み量関係

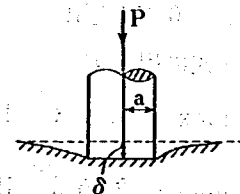
剛体を半無限弾性体上に置いたときの荷重～めり込み量の関係については、南雲が岩石の変形機構を考察する際にいくつかの場合についてまとめている¹⁰⁾。ここでは、次の3つの場合を紹介する。荷重～めり込み量関係を

$$P = f(\delta) = K\delta^n \quad (\text{A21})$$

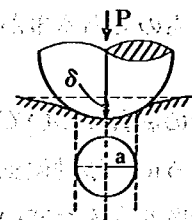
と表わす。

(i) 円柱の場合(図-3(a))

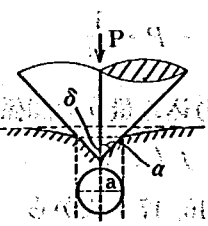
$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{2aE}{1-\nu^2} \delta \\ k &= \frac{2aE}{1-\nu^2}, \quad n=1 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A22})$$



(a)半無限弾性体表面への完全剛体底平面円柱のめり込み



(b)半無限弾性体表面への完全剛体球のめり込み



(c)半無限弾性体表面への完全剛体円錐のめり込み

図-A3 形状別のめり込み模式図

(iii) 球の場合 (図 - A 3(b))

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{4}{3} \sqrt{R} \frac{E}{1-\nu^2} \delta^{\frac{3}{2}} * \\ \therefore k &= \frac{4}{3} \sqrt{R} \frac{E}{1-\nu^2}, \quad n = \frac{3}{2} \end{aligned} \right\} \quad (A23)$$

(iii) 円錐の場合 (図 - A 3(c))

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{\pi E \tan \alpha}{2(1-\nu^2)} \delta^2 \\ \therefore k &= \frac{\pi E \tan \alpha}{2(1-\nu^2)}, \quad n = 2 \end{aligned} \right\} \quad (A24)$$

* 南雲によると右辺の係数は $E/(1-\nu)$ となっているが、これは $E/(1-\nu^2)$ であるべきである。

これらから分るように、 n は落石の形状のみに関係する指数であり、 k は寸法及び土の剛性に関する量である。指数 n が形状によって異なるのは、めり込みによる接触面積の変化の割合が異なるためである。

$P \sim f(\delta)$ を (A21) 式で表わすとき、(A20) 式は容易に積分可能である。結果として、

$$\delta_{\max} = \left\{ \frac{n+1}{k} WH \right\}^{\frac{1}{n+1}} = k^{-\frac{1}{n+1}} \{(n+1)WH\}^{\frac{1}{n+1}} \quad (A25)$$

$$\begin{aligned} P_{\max} &= k \delta_{\max}^n = k \left\{ \frac{(n+1)}{k} WH \right\}^{\frac{n}{n+1}} \\ &= k^{\frac{1}{n+1}} \{(n+1)WH\}^{\frac{n}{n+1}} \end{aligned} \quad (A26)$$

ここで、(A22, 23, 24) 式の k , n を代入すると、異なった形状の落石に対する衝撃力が求められることになる。 $P_{\max}$ の W , H の依存特性を表わす指数 $n/(n+1)$ は、表 - A 1 のようになる。

表 - A 1

形 状	n	WH のべき指数 $n/(n+1)$
円 柱	1	0.5
球	1.5	0.6
円 錐	2	0.667

なお、(A25, 26) 式から次の関係が導かれる。

$$P_{\max} \cdot \delta_{\max} = (n+1)WH \quad (A27a)$$

$$\text{又は、} (\alpha_{\max}/g) \cdot \delta_{\max} = (n+1)H \quad (A27b)$$

この式中には、被衝突体の弾性係数は含まれていない。したがって、落石の形状及び重量、落下高さを一定にしたときには、被衝突体の弾性係数が変化したときにも、 $P_{\max} \cdot \delta_{\max}$ は一定になることを意味している。これは、弾性論の範囲内であるが、既に図 - 5 で見た実験的事実の裏付けとなるものである。

さらに、(A27) 式から次のような関係も導かれる。最大衝撃力に対応する落石の最大加速度 $\alpha_{\max}$

は次のように表わされる。

$$\frac{\alpha_{\max}}{g} = \frac{m \alpha_{\max}}{mg} = \frac{P_{\max}}{W} \quad (\text{A28})$$

(A27)式を用いると

$$\frac{\alpha_{\max}}{g} = (n+1) \frac{H}{\delta_{\max}} \quad (\text{A29})$$

この式には(A27)式と同様に被衝突体の弾性係数が含まれていないと同時に、落石の重量も含まれていない。したがって、同一形状の落石に対しては、実験結果からも見たように、落下高とめり込み量の比と最大加速度の間には比例的な関係がありそうである。

(3) 水平衝突と鉛直衝突の対比

既に、弾性体の衝突のかなり一般的な方程式として(A3)式を示したが、この基となった両体の運動方程式(A1)式から自明のように、この基本式は鉛直落下体の衝突の運動方程式に含まれるべき重力加速度の影響が入っておらず、その意味で水平衝突というべきものである。ここでは、省略された重力加速度の影響を調べる。

図-A4において、落下衝突した第1の弾性体の運動方程式は、

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = -P + m_1 g \quad (\text{A30})$$

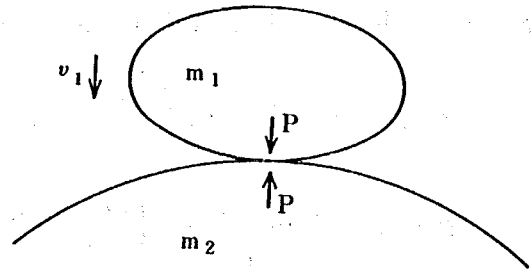


図-A4 鉛直落下衝突

である。被衝突体である第2の弾性体の運動方程式はたてない。これは、 m_2 が m_1 に比べて十分大きく

動かないとしているためである。しいてたてれば、 $m_2 g$ も考える必要があり、さらにこの m_2 を支える反力又は固定境界といったものが必要になる。以下の誘導では、 m_1 を m 、 v_1 を v 、めり込み量を δ とすわすと、(A30)式は次のように書換えられる。

$$m \ddot{\delta} = -P + m g \quad (\text{A31})$$

$P \sim \delta$ 関係として、(A21)式を採用する。

$$P = k \delta^n \quad (\text{A21bis})$$

K 、 n は落下物体の形状により変化することは既に述べた。(A31)式は、

$$\ddot{\delta} = -\frac{k}{m} \delta^n + g \quad (\text{A32})$$

となり、 $t=0$ において、 $\delta=0$ 、 $\dot{\delta}=v_0=\sqrt{2gH}$ という初期条件を用いると、めり込み量 δ に関して

$$\frac{1}{2} (v_0^2 - \dot{\delta}^2) = \frac{k}{m} \frac{1}{n+1} \delta^{n+1} - g \delta \quad (\text{A33})$$

なる方程式を得る。ここでも、最大衝撃力 $P_{\max}$ に対応する最大めり込み時にのみ注目すると、上式から $\delta_{\max}$ に関して次の方程式を得る。

$$\frac{k}{m} \frac{1}{n+1} \delta_{\max}^{n+1} - g \delta_{\max} = \frac{1}{2} v_0^2 \quad (\text{A34})$$

重力加速度を無視した、すなわち $g = 0$ とおいた場合の水平衝突に対する解 $\delta_{\max} = \delta_h$ は既に (A 25) 式のように得られている。すなわち、

$$\delta_v = \left\{ \frac{(n+1)}{k} mgH \right\}^{\frac{1}{n+1}} \quad (\text{A 35})$$

重力加速度 g を考慮した (A 34) 式の解 $\delta_{\max} \delta_v$ を δ_h と関連づけて

$$\delta_v = x \delta_h \quad (\text{A 36})$$

とおく。(A 35, 36) 式を (A 34) 式に用いると、 x に関する方程式

$$x^{n+1} - x \cdot \frac{\delta_h}{H} - 1 = 0 \quad (\text{A 37})$$

を得る。現実に対象とする条件において、 $\delta_h \ll H$ ゆえ、(A 37) 式の解 x はほぼ 1 であり、結局 (A 36) 式から $\delta_v = \delta_h$ と見なせる。したがって、鉛直衝突の代りに、水平衝突で代用してよいことが分る。

(4) 地盤塑性に関する考察

(2)の末尾において、落石側の条件が一定の場合に、地盤弾性が変化しても成立する最大衝撃力 $P_{\max}$ と最大めり込み量 $\delta_{\max}$ との関係式

$$P_{\max} \cdot \delta_{\max} = (n+1) WH \quad (\text{A 27 a bis})$$

$$(\alpha_{\max}/g) \cdot \delta_{\max} = (n+1) H \quad (\text{A 27 b bis})$$

について述べた。この関係を既に示した予備実験結果図-5 と比べて描いたものが図A-5である。

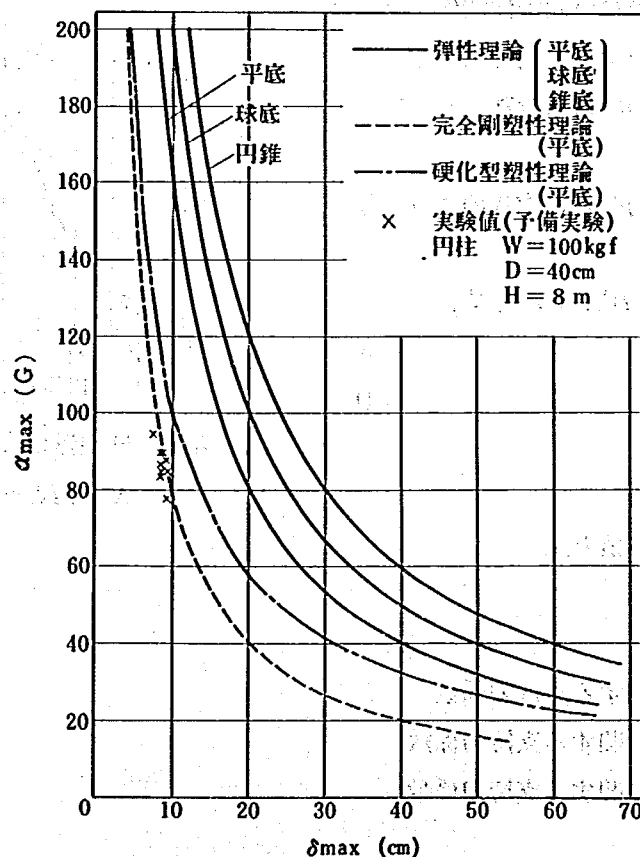


図-A. 5 めり込み量と衝撃加速度

計算条件は図中に示したとおりである。実験結果は、円柱のみに対するものであるが、参考のために球底、円錐に対する計算結果も示した。この弾性理論からの予想結果と実験結果の対比から言えることは、同じ衝撃力に対するめり込み量は、実験値の方がはるかに小さいということである。衝突のような大きい荷重に対して弾性論を適用して荷重～めり込み関係を求めるのは、一つの近似的な方法であり実際には地盤の塑性的性質も大きく寄与していると考えられる。図-A 2 に荷重～めり込み量の一般的関係と落石の条件（初期エネルギー）との関係とを示したが、この図にならって、一定の初期エネルギー条件下において、 $P_{\max} \cdot \delta_{\max}$ の積が最小となる場合を考えると、それは $P = f(\delta)$ が剛塑性関係にある場合であることが分る（図-A 6）。この場合、

$$P = f(\delta) = P_{\max} \quad (\text{A38})$$

だから、(A20)式によると、

$$P_{\max} \cdot \delta_{\max} = WH \quad (\text{A39})$$

を得る。これが、図-A 5 中の破線で示した剛塑性関係の線である。実験値は、剛塑性体と仮定した理論限界に非常に近い付近にある。なお、図-A 6 には、極限状態として硬化のない剛塑性関係を考えたが、参考のために、フーチングの支持力理論によった硬化のある剛塑性関係の場合も考察したのでここに記しておく。

円形フーチングの支持力公式は次式のように与えられている¹¹⁾。

$$q_d = 1.3cN_c + 0.6 \cdot \frac{1}{2}rBNr + rDfN_q \quad (\text{A40})$$

$$P = q_d \cdot \frac{\pi}{4} B^2 \quad (\text{A41})$$

ここに、

c : 地盤粘着力

r : 地盤単位体積重量

B : 直径

D_f : 根入れ深さ

N_c : 粘着力に関する支持力係数

N_r : 内部摩擦に関する支持力係数

N_q : 土被り圧に関する支持力係数

$c = 0$ のとき、

$$P = \left(0.6 \cdot \frac{1}{2} r B N_r + r D_f N_q \right) \cdot \frac{\pi}{4} B^2 \quad (\text{A42})$$

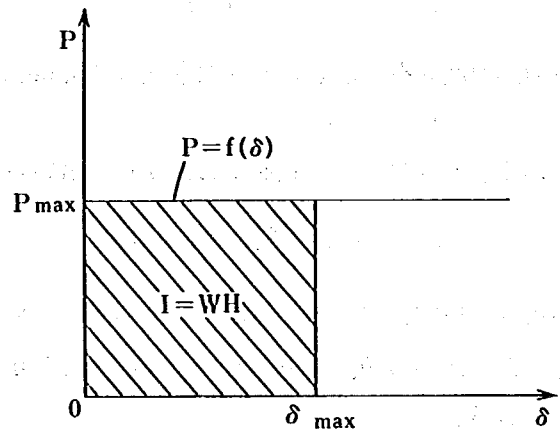


図-A 6 荷重～めり込み関係が剛塑性関係の場合

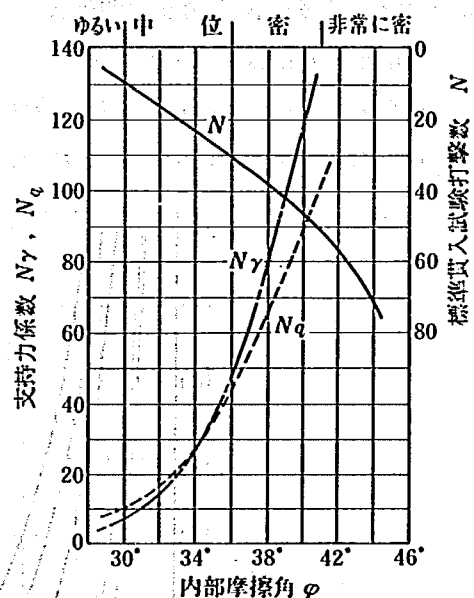


図-A 7 砂地盤の支持力係数および N -値と内部摩擦の関係

$Df = \delta$ において, (A42) 式を

$$P = f(\delta) = a\delta + b \quad (\text{A43})$$

と表わす。

$$a = rNq \cdot \frac{\pi}{4} B^2, \quad b = 0.6 \cdot \frac{1}{2} rBNr \cdot \frac{\pi}{4} B^2 \quad (\text{A44})$$

(A43) 式を, $\delta_{\max}$ を与える (A20) 式に代入する。

$$\int_0^{\delta_{\max}} f(\delta) d\delta = \int_0^{\delta_{\max}} (a\delta + b) d\delta = WH$$

これから,

$$a\delta_{\max}^2 + 2b\delta_{\max} - 2WH = 0 \quad (\text{A45})$$

$$\delta_{\max} = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 2aWH}}{a} \quad (\text{A46})$$

又,

$$P_{\max} = a\delta_{\max} + b = \sqrt{b^2 + 2aWH} \quad (\text{A47})$$

と, $\delta_{\max}$, $P_{\max}$ が与えられる。

支持力係数 N_r , N_q は, 図-A7 に示されるようなものであるから, 簡略化のために

$$N_r = N_q = Nb \quad (\text{A48})$$

とおく。とすると

$$a = \frac{\pi}{4} rB^2Nb, \quad b = \frac{0.3\pi}{4} rB^3Nb \quad (\text{A49})$$

(A49) 式を (A47) 式に代入して

$$P_{\max} = \sqrt{\left(\frac{0.3\pi}{4} rB^3Nb\right)^2 + 2 \cdot \frac{\pi}{4} rB^2Nb \cdot WH} \quad (\text{A50})$$

を得る。これは, $P_{\max}$ を支持力係数 Nb の関数として与える式である。この支持力係数 Nb は砂の内部摩擦角 ϕ に依存する。一方, (A46) 式の $\delta_{\max}$ は,

$$\delta_{\max} = -\frac{b}{a} + \frac{b}{a} \sqrt{1 + 2\frac{a}{b} \cdot \frac{1}{b} WH} \quad (\text{A51})$$

と書換えられ, 又, (A49) 式から

$$\frac{b}{a} = 0.3B$$

となるから,

$$\begin{aligned} \delta_{\max} &= 0.3B \left(\sqrt{1 + \frac{2}{0.3B} \cdot \frac{1}{b} WH} - 1 \right) \\ &= 0.3B \left(\sqrt{1 + \frac{2}{0.3B} \cdot \frac{4}{0.3\pi rB^3Nb} WH} - 1 \right) \end{aligned} \quad (\text{A52})$$

これは, $\delta_{\max}$ を支持力係数 Nb の関数として与える式である。地盤を弾性体としてモデル化した場合に, 地盤弾性の影響を消去した (A27) 式を導いたように, この場合にも, 地盤の ϕ , したがって Nb の影響を消去した $P_{\max}$ と $\delta_{\max}$ の間の関係式を導く。

(A50) 式を N_b について解き, (A49) 式の a に用いると, a が $P_{\max}$ の関数として表わされる。
(A47) から,

$$\delta_{\max} = -\frac{b}{a} + \frac{P_{\max}}{a} = -0.3B + \frac{P_{\max}}{a}$$

となるから, $P_{\max}$ の関数として表わした a を用いると, $P_{\max}$ と $\delta_{\max}$ の間の関係式として次式を得る。

$$\delta_{\max} = -0.3B + \frac{8(0.075B)^2 P_{\max}}{-0.5WH + \sqrt{(0.5VH)^2 + 4(0.075B)^2 P_{\max}^2}} \quad (\text{A53})$$

計算条件として, これまでの計算条件と合わせて, $B=0.4\text{m}$, $W=0.1\text{tf}$, $H=8\text{m}$, $\gamma=1.5\text{tf/m}^3$ を用いて計算した結果は, 図A5中に一点鎖線で記してある。この関係は, 弾性理論と完全剛塑性理論との間にあることは当然である。

なお, 上の条件に加えて, $N_b=40$ ($\phi=35^\circ$) としたときの落下高 H と衝撃加速度 $\alpha_{\max}$ との関係を図-A8に示す。

(5) 弾性理論による拡張

振動便覧式的前提条件と現実の敷砂条件と比べた場合, 後者では層厚が有限である事と, 従って質量も有限である事, さらに敷砂は有限のばね特性を有する落石覆工上の座版によって支えられている事等の違いがある。これらの事を考慮して, 理論の拡張を試みた。

衝突の一般式として(A3) 式を既に示した。

$$\ddot{\delta} = -P \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \dots\dots\dots (\text{A3 bis})$$

これまでの解析では, $m_2 \gg m_1$ として

$$\ddot{\delta} = -P \cdot \frac{1}{m_1} \quad (\text{A54})$$

を, $P=f(\delta)$ と合わせて解いてきた。このとき, $P_{\max}$ は衝突体の質量 m_1 に対して単調に増加する。
 $m_2 \gg m_1$ としない一般式(A3) 式において

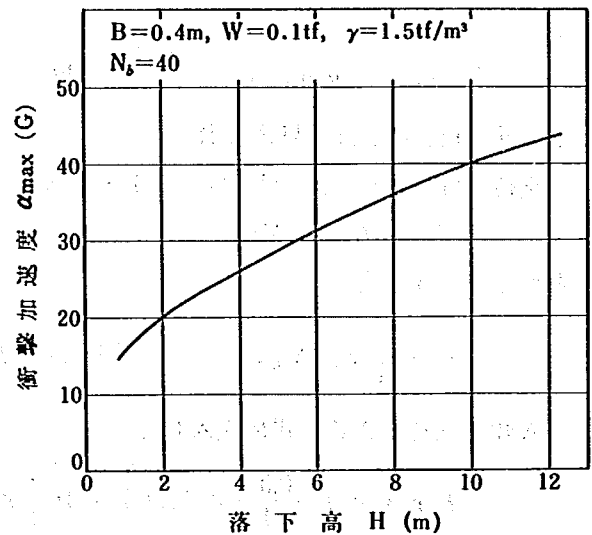
$$m_e = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (\text{A55})$$

とおくと, (A3) 式は

$$\ddot{\delta} = -P \cdot \frac{1}{m_e} \quad (\text{A56})$$

と表わされ, 衝突体の質量が m_e , 被衝突体の質量が ∞ と考えた場合に等価となる。そして,

$$\frac{1}{m_e} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} > \frac{1}{m_1}$$



図=A8 支持力理論による落下高～衝撃加速度関係

であるから、 $m_e < m_1$ となり、最大衝撃力 P_{max} が、衝突体の質量の単調増大関数であることと考
え合わせれば、被衝突体の質量が有限と考えることにより最大衝撃力は減少する。これは、被衝突体
の質量が有限であれば、衝撃力に対して、被衝突体は衝突体から逃げる方向に運動するから、最大衝
撃力が減少すると理解すればよい。

このような考え方は、図-A 5 における $P_{max} \cdot \delta_{max}$ の理論限界値や弾性理論値と実験値との差
の原因を示唆するものであるが、上の運動機構によれば、被衝突体は衝撃を受けた後、両体の間には
引張力は作用しないことを考えると、衝撃力を受けた方向に運動をし続けるというやや現実とは異な
った性状を示すことになる。実際には、被衝突体の質量が有限としても、それを支える固定部分がさ
らに存在するはずである。このような観点から、落
石の衝突モデルを次のように考えてみた。図-A 9

は、そのモデルと実物との対応を示すものである。

質量 m_1 は、落石を表わす。

次に、被衝突体を次の二つに分けて考える。

質量 m_2 は、落石の衝突と共に運動する土塊を表わす。これは、フーチングの支持力理論になぞらえ
ると、フーチング直下の楔部分に相当する部分のよ
うに考えられる。

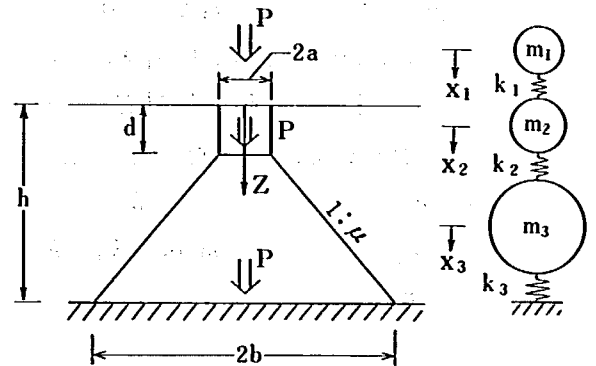


図-A 9 3体モデル図

質量 m_3 は、質量 m_2 の衝突を受ける残りの土塊及び床版の質量を表わす。

ばね k_1 は、 m_2 部分の圧縮による力を m_1 、 m_2 の相対変位に依存する力として表わすものである。

ばね k_2 は、 m_2 と m_3 の相対変位に基づく力を表わすものである。

ばね k_3 は、 m_3 が固定境界に対して動くとき、すなわち、版支持の場合のたわみ力を表わすもので
ある。したがって、版支持でない場合には、ばね k_3 は無限大と考えるべきである。

さらに、 x_1 、 x_2 、 x_3 は、質量 m_1 、 m_2 、 m_3 の基準位置からの変位量を表わす。基準位置は、そ
れぞれ m_1 の衝突に基づくばね力が作用しない所とする。

又、 R_1 、 R_2 、 R_3 は、ばね力を表わす。

図-9.9 のモデルにおいて、ばねをすべて線型弾性ばねとして、 m_1 が m_2 に衝突した場合の運動方
程式から、衝突に起因する衝撃力及びめり込み量等を求める。

各質点の運動方程式は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -R_1 = -k_1 (x_1 - x_2) \\ m_2 \ddot{x}_2 &= R_1 - R_2 = k_1 (x_1 - x_2) - k_2 (x_2 - x_3) \\ m_3 \ddot{x}_3 &= R_2 - R_3 = k_2 (x_2 - x_3) - k_3 x_3 \end{aligned} \right\} \quad (A57)$$

(A57) 式は、被衝突体が半無限体の場合の (A18) 式に相当するものであり、(A18) 式について
は、最大めり込みの時に、めり込み速度 = 0 という条件を用いて、最大衝撃力を簡単に求めるという
方法をとった。3体問題の (A57) 式においては、そのような簡易な方法がとられないので、以下に
示すような方法による¹²⁾。

各体が同位相の運動をするとして

$$x_1 = X_1 f(t), \quad x_2 = X_2 f(t), \quad x_3 = X_3 f(t) \quad (A58)$$

と表わす。 X_1 、 X_2 、 X_3 は定数。(A58) 式を (A57) 式に代入すると、 $f(t)$ 、 X_1 、 X_2 、 X_3

に関する条件式が得られる。

$$-\frac{\ddot{f}(t)}{f(t)} = \frac{k_1 X_1 - k_1 X_2}{m_1 X_1} = -\frac{k_1 X_1 - (k_1 + k_2) X_2 + k_2 X_3}{m_2 X_2} \\ = -\frac{k_2 X_2 - (k_2 + k_3) X_3}{m_3 X_3} = \omega^2 \quad (\text{A59})$$

これから, $\omega \neq 0$ として

$$f(t) = \cos(\omega t - \phi) \quad (\text{A60})$$

ここに, は (A54) 式から求まる。すなわち,

$$\left. \begin{aligned} (m_1 \omega^2 - k_1) X_1 + k_1 X_2 &= 0 \\ k_1 X_1 + \{ \omega^2 - (k_1 + k_2) \} X_2 + k_2 X_3 &= 0 \\ k_2 X_2 + \{ \omega^2 - (k_2 + k_3) \} X_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A61})$$

X_1, X_2, X_3 について, 自明な解 $X_1 = X_2 = X_3 = 0$ 以外の解があるための条件から

$$\begin{vmatrix} m_1 \omega^2 - k_1 & k_1 & 0 \\ k_1 & m_2 \omega^2 - k_1 - k_2 & k_2 \\ 0 & k_2 & m_3 \omega^2 - k_2 - k_3 \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{A62})$$

これを書下して

$$m_1 m_2 m_3 \cdot \omega^6 - \{ m_1 m_2 (k_2 + k_3) + m_1 m_3 (k_1 + k_2) + m_2 m_3 k_1 \} \cdot \omega^4 \\ + \{ m_1 (k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2 k_3) + m_2 (k_1 k_2 + k_1 k_3) + m_3 k_1 k_2 \} \cdot \omega^2 \\ - k_1 k_2 k_3 = 0 \quad (\text{A63})$$

これは ω^2 に関する 3 次方程式で, $\omega = \omega_1, \omega_2, \omega_3$ が求まる。これらの $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ に対して, x_1, x_2, x_3 は次のようになる。

$$x_i = \sum_{j=1}^3 X_{ij} \cos(\omega_j t - \phi_j) \quad (i=1, 2, 3) \quad (\text{A64})$$

$X_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$ については (A63) 式から求まる $\omega_j (j = 1, 2, 3)$ に対して次の条件が付加される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{X_{2j}}{X_{1j}} &= -\frac{m_1 \omega_j^2 - k_1}{k_1} = a(\omega_j) \\ \frac{X_{3j}}{X_{1j}} &= \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{m_1 \omega_j^2 - k_1}{m_3 \omega_j^2 - k_2 - k_3} = b(\omega_j) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A65})$$

($j = 1, 2, 3$)

(A64) 式と合わせて

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \sum_{j=1}^3 X_{1j} \cos(\omega_j t - \phi_j) \\ x_2 &= \sum_{j=1}^3 a(\omega_j) X_{1j} \cos(\omega_j t - \phi_j) \\ x_3 &= \sum_{j=1}^3 b(\omega_j) X_{1j} \cos(\omega_j t - \phi_j) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A66})$$

初期条件として、次のものを考える。

$$t = 0, \quad x_1 = x_2 = x_3 = 0, \quad \dot{x}_1 = v_0, \quad \dot{x}_2 = \dot{x}_3 = 0 \quad (\text{A67})$$

これから、 $X_{1j}, \phi_j (j = 1, 2, 3)$ は次のように求まる。

$$\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \pi/2 \quad (\text{A68})$$

$X_{1j} (j = 1, 2, 3)$ は次の連立方程式の解

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^3 X_{1j} \omega_j &= v_0 \\ \sum_{j=1}^3 X_{1j} a(\omega_j) \omega_j &= 0 \\ \sum_{j=1}^3 X_{1j} b(\omega_j) \omega_j &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{A69})$$

(A69) 式から $X_{1j} (j = 1, 2, 3)$ が求まった後、(A68) 式を (A66) 式に用いると、各体の変位 x_1, x_2, x_3 が求まる。落石に生ずる衝撃力 P は、 R_1 であり、

$$P = k_1 (x_1 - x_2) \quad (\text{A70})$$

であり、上の結果を用いて、時間 t の関数として与えられる。

以上の計算フローをまとめたものが図-A 10 である。

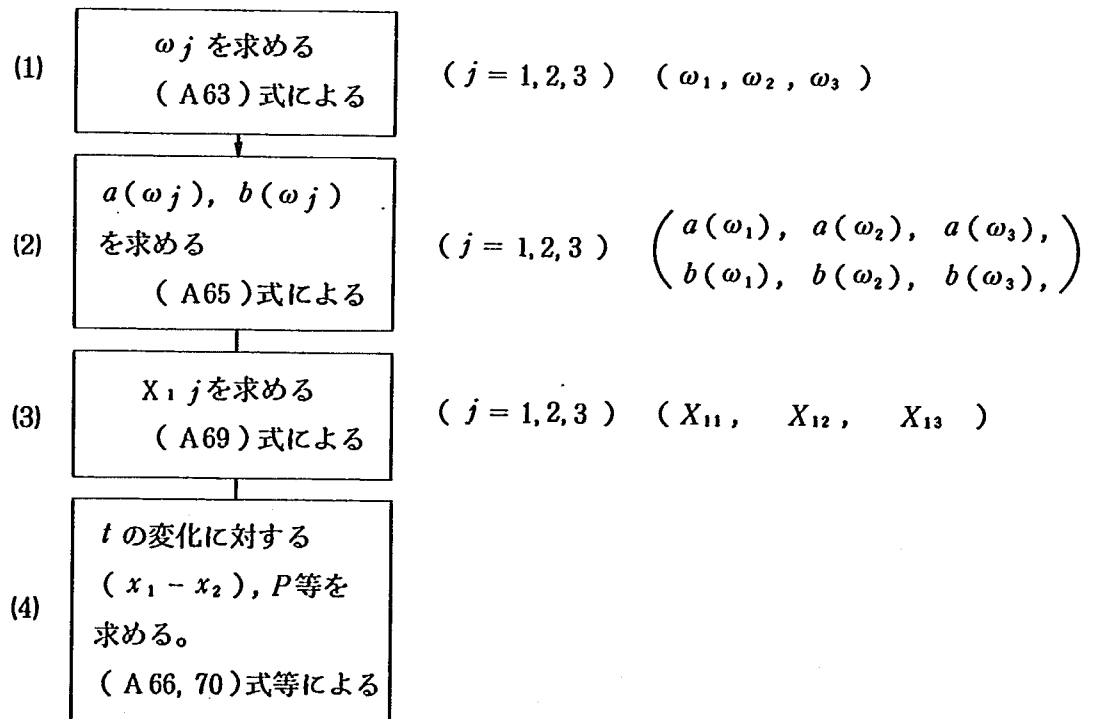


図-A 10 衝撃力等を求める計算フロー

具体的な質量 m_2, m_3 , ばね係数 k_1, k_2, k_3 の評価法は未だ確定していないが、6-3の計算例に用いたのは次のような方法である。

図-A 9(a)について説明する。

m_1 : 重錘質量

m_2 : 重錘直下の深さ d の円柱土塊の質量

$$m_2 = \frac{\gamma_t \cdot \pi a^2 d}{3 \mu g}$$

m_3 : 土圧が分散する領域の土塊の質量

$$m_3 = \frac{\gamma t \cdot \pi \{ \{ a + \mu (h - d) \}^2 - a^2 \}}{3 \mu g}$$

敷砂層が床版上にあり、全体が床版のばねに対して振動する場合は、敷砂全質量+床版質量 - m_1 とする。

k_1 : 側方拘束 1 次元円柱の縦ばね係数、すなわち、

$$k_1 = \frac{\pi E (1 - \nu)}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \cdot \frac{a^2}{d} \quad (A71)$$

k_2 : 応力分散勾配 μ の領域の変形を考慮したばね係数で (A14) 式による。すなわち、

$$k_2 = \frac{2 E a}{1 - \nu^2} \cdot \frac{b}{b - a} = \frac{2 E a}{1 - \nu^2} \cdot \frac{a + \mu h}{\mu h} \quad (A72)$$

k_3 : 床版のばね係数

参 考 文 献

- (1) 土木学会：土木技術者のための振動便覧，1966，pp.320 - 324
- (2) 鋼材クラブ：新しい落石覆の開発に関する研究，1973
- (3) 吉田博他：ロック・シェード上の落石による衝撃力の推定に関する実験，道路，1976 - 10
- (4) 吉田博他：ロック・シェード上の落石による衝撃力の推定法に関する研究，道路，1978 - 2
- (5) 岡田治憲他：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
- (6) 山口柏樹他：落体衝撃力に対する地盤応答，第8回土質工学研究発表会，1973
- (7) 例えば，赤井浩一：土質力学，朝倉書店，1966年，pp.193 - 224
- (8) 伯野元彦他：動的圧力球根について，第24回土木学会年次講演会，Ⅲ - 36，1969
- (9) Timoshenko, S and Goodier, J., N. : Theory of Elasticity, McGraw-Hill, 1951, pp.383-384
- (10) 南雲昭三郎：粒状媒質の弾性(Ⅲ)，物理探鉱，vol.16, No.3, 1963
- (11) 例えば，(7) p.179
- (12) 例えば，Metrovitch, L. : Elements of Vibration Analysis, McGraw-Hill, 1975, pp. 137 - 140
- (13) 例えば，土質工学会：土質工学ハンドブック第5章，pp. 123, 124

敷砂層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
建設省土木研究所
動土質研究室
昭和57年3月(1982)

キーワード：落石，衝撃

要旨

落石覆工に作用する落石の衝撃力の特性を明らかにするための、敷砂層上の重錘の落下実験についてまとめたものである。



郵便はがき

いは40
つ円切
て手を
下さ

305-□□

茨城県筑波郡豊里町大字旭一
建設省土木研究所
動土質研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第1822号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印