

土 木 研 究 所 資 料

落石衝撃力に関する重錘落下実験 報 告 書

平成7年3月

建設省土木研究所
地震防災部動土質研究室

Copyright © (1995) 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 General 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、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

落石衝撃力に関する重錘落下実験 報告書

地震防災部 動土質研究室 室長 松尾 修
研究員 堤 達也
近藤 浩市

要 旨

ロックシェッドの屋根には、落石による衝撃力を吸収するために砂が敷かれている。その衝撃力緩衝効果を調べることを目的として、今回は、重錘重量、落下高さ、敷砂層厚等を変化させて大規模な重錘落下実験を行い、重錘の衝撃力、敷砂層を伝達した衝撃土圧等を測定した。また、実験結果を用いて、既往の衝撃力算出式の適用性をより広い範囲で検証し、さらに、伝達衝撃力の分布幅、大きさ、衝撃力緩和のための敷砂層厚の算定法について検討を行った。

キーワード：ロックシェッド，重錘衝撃力，ラーメ定数，重錘直径，敷砂層厚

目 次

第1章 まえがき	1
第2章 実験目的	2
第3章 実験方法、条件	3
3.1 実験設備	3
3.1.1 土槽	3
3.1.2 重錘	4
3.1.3 落下装置	4
3.1.4 使用機器	5
3.2 使用砂・敷砂層製作方法	6
3.2.1 使用砂	6
3.2.2 敷砂層製作方法	7
3.3 実験条件	8
3.3.1 予備実験	11
3.3.2 平成3年度本実験	11
3.3.3 平成4年度本実験	11
3.4 測定項目・測定方法・データ処理方法	12
3.4.1 測定項目	12
3.4.2 測定方法	13
3.4.3 データ処理方法	17
第4章 実験結果	19
4.1 予備実験（締固め密度の影響）	19
4.2 平成3年度の実験結果	19
4.2.1 重錘衝撃力	19
4.2.2 重錘貫入量および砂の挙動	28
4.2.3 伝達衝撃土圧	33
4.3 平成4年度の実験結果	39
4.3.1 重錘衝撃力	39
4.3.2 重錘貫入量および砂の挙動	48
4.3.3 伝達衝撃土圧	58

4. 4 実験結果のまとめ	58
第5章 考察	70
5. 1 重錘衝撃力と敷砂層厚・重錘直径との関係	70
5. 2 重錘衝撃力と衝撃土圧との関係	75
5. 2. 1 重錘衝撃力と衝撃土圧の推定	77
5. 2. 2 落下高さと土圧合力ー衝撃力比	79
5. 2. 3 敷砂層厚と土圧合力ー衝撃力比	79
5. 2. 4 重錘重量と土圧合力ー衝撃力比	79
5. 2. 5 重錘落下位置直下の土圧	86
5. 3 衝撃土圧の分布幅	86
5. 3. 1 有効分布幅 B_e	87
5. 3. 2 分布角度 θ	87
5. 4 衝撃土圧測定値の信頼性に関する検討	92
5. 4. 1 重錘衝撃力の測定値の信頼性	92
5. 4. 2 土圧測定値の信頼性	92
5. 5 考察のまとめ	96
第6章 まとめおよび今後の課題	97
参考文献	98

第1章 まえがき

(社)日本道路協会発行の「落石対策便覧」(昭和58年)は、山岳部道路の落石対策について、当時の知見をはじめて体系的にとりまとめたものである。落石対策工のうち、予想される落石の規模が大きい場合に用いられる本格的な構造物がロックシェッド(落石覆工)である。上記便覧では、落石の衝撃力を緩和し、かつ荷重の分散を図るために、ロックシェッドの上部に砂を敷くことを原則としている。ロックシェッドの設計にあたっては、その落石衝撃力を算定することがまず第一に必要なが、上記便覧では土木研究所で実施された実験等に基づく算定式が提示されている。しかしながら、その算定式は限定された条件、すなわち落石の質量3t、落石高さ14mの範囲での適用に限られており、それ以上の落石エネルギーに対する適用性は明らかでなかった。そこで、本研究はより大きな落石エネルギーによる衝撃力を大規模落石実験により明らかにしようとしたものである。なお、本報告書は、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)の続報である。

第2章 実験目的

今回の実験目的は次の通りである。

- 1) ロックシェッド上の緩衝材（敷砂）に落石が衝突した際に生じる衝撃力に及ぼす落石重量、落下高さ、敷砂層厚等の諸因子の影響度を実験的に調べ、既往の衝撃力算出式の適用範囲を明らかにする。
- 2) ロックシェッドの屋根部（上面）への落石衝撃力の伝播、緩和機構を敷砂の変形や土圧分布観測により検討し、1)とあわせて、伝達衝撃土圧の分布幅、大きさや落石衝撃力緩和のための敷砂層厚の算定法を立てる。

第3章 実験方法、条件

3. 1 実験設備

3. 1. 1 土槽

土槽は、鉄筋コンクリート製スラブ（平成3年度830cm×890cm×30cm，平成4年度860cm×860cm×30cm）の上に、プレキャスト製L型擁壁を12枚組合わせたものを使用し、L型擁壁のはらみを防ぐために鋼材で補強した。土槽の内寸法は6000cm×5700cm×200cmであった。なお、基礎の補強のため平成3年度は土槽直下6m四方においては、あらかじめ80cm堀削し、30cmの砕石層と50cmの無筋コンクリート層を設け、また、L型擁壁の1面は取り外せる構造となっている。平成4年度においては、L型擁壁の1面を現場打ちのコンクリートで補強した。土槽の詳細を図-3.1に示す。

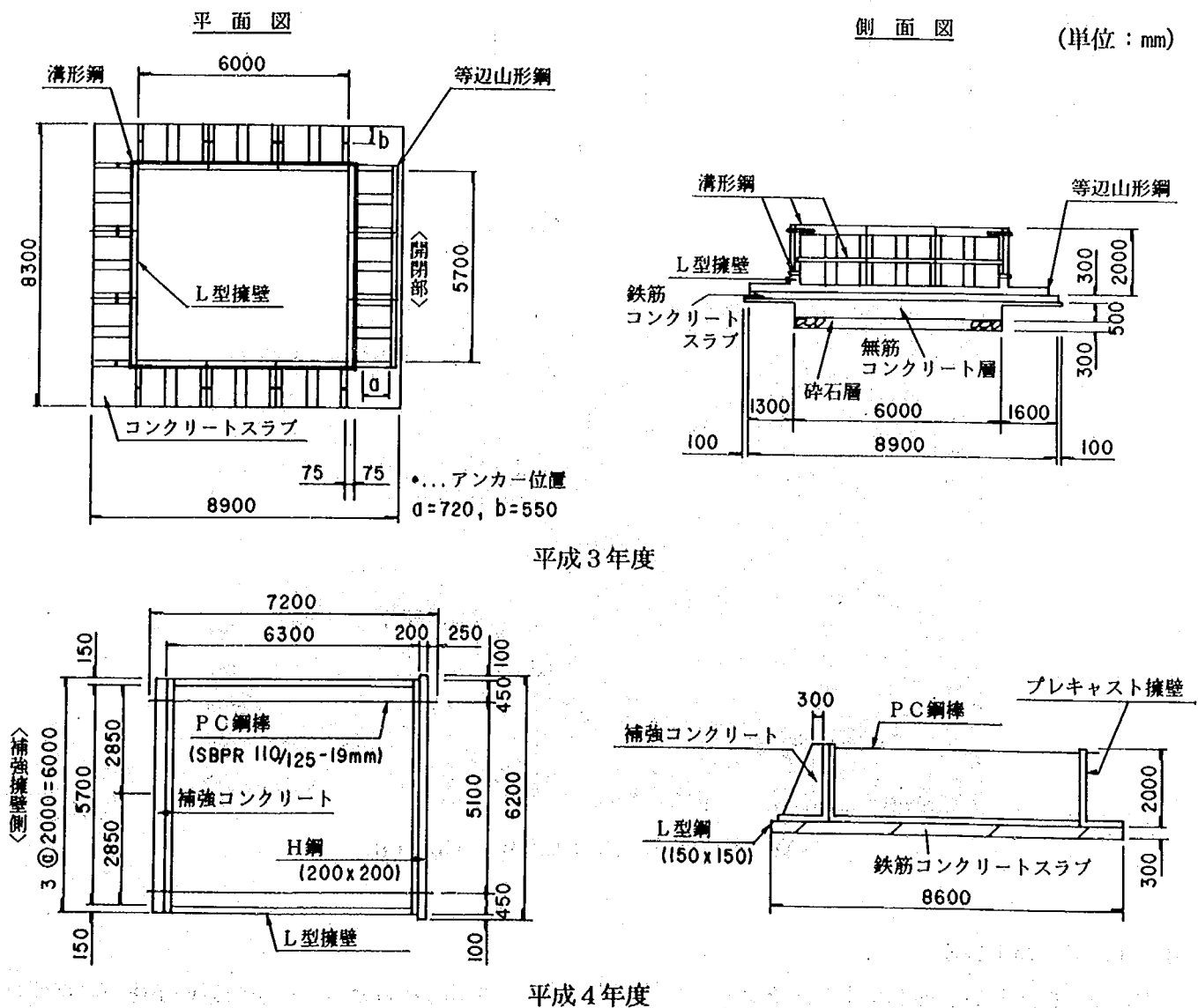


図-3.1 実験土槽詳細図

3. 1. 2 重錘

実験に用いた重錘の重量は1tf、3tf、5tfの3種類で、図-3.2、写真-3.1に示す形状・寸法を有しており、重心付近に加速度計を2個取り付けてある。

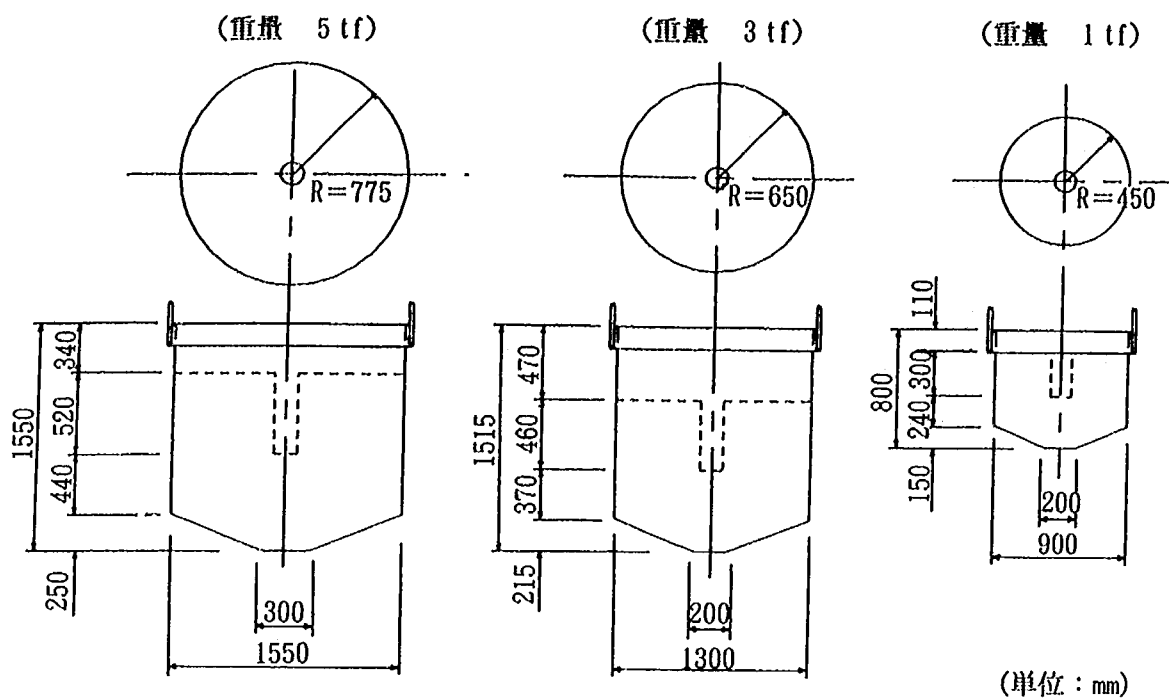


図-3.2 重錘形状・寸法

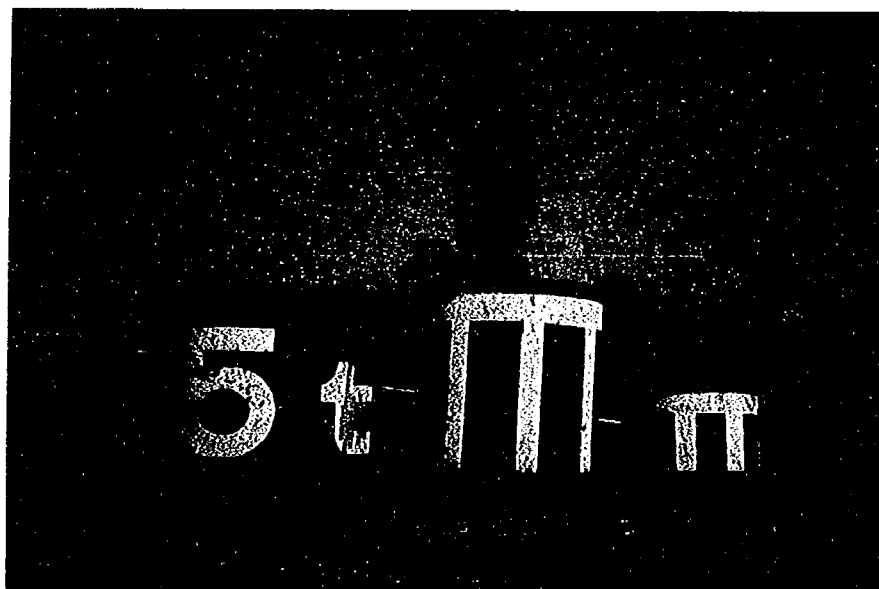


写真-3.1 重錘 (左から5tf、3tf、1tf)

3. 1. 3 落下装置

重錘は、落下装置を介してトラッククレーンで所定の高さまで吊り上げた後、落下装置の電磁石の電源を切ることにより重錘を自由落下させた。落下装置の形状寸法を図-3.3に示す。

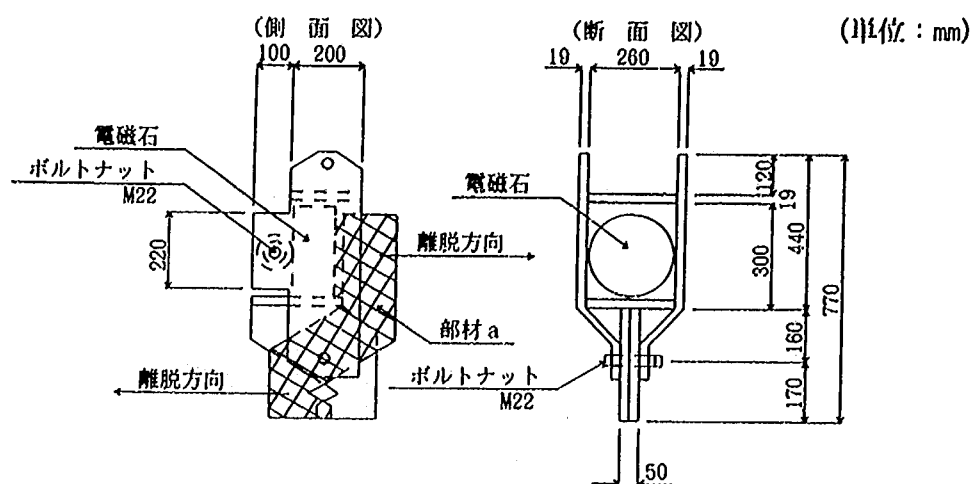


図-3.3 重錘落下装置形状図

3. 1. 4 使用機器

平成3年度には加速度計・荷重計・土圧計、平成4年度には加速度計・荷重計・土圧計・変位計をそれぞれ用いた。センサー、収録装置の一覧を表-3.1に示す。

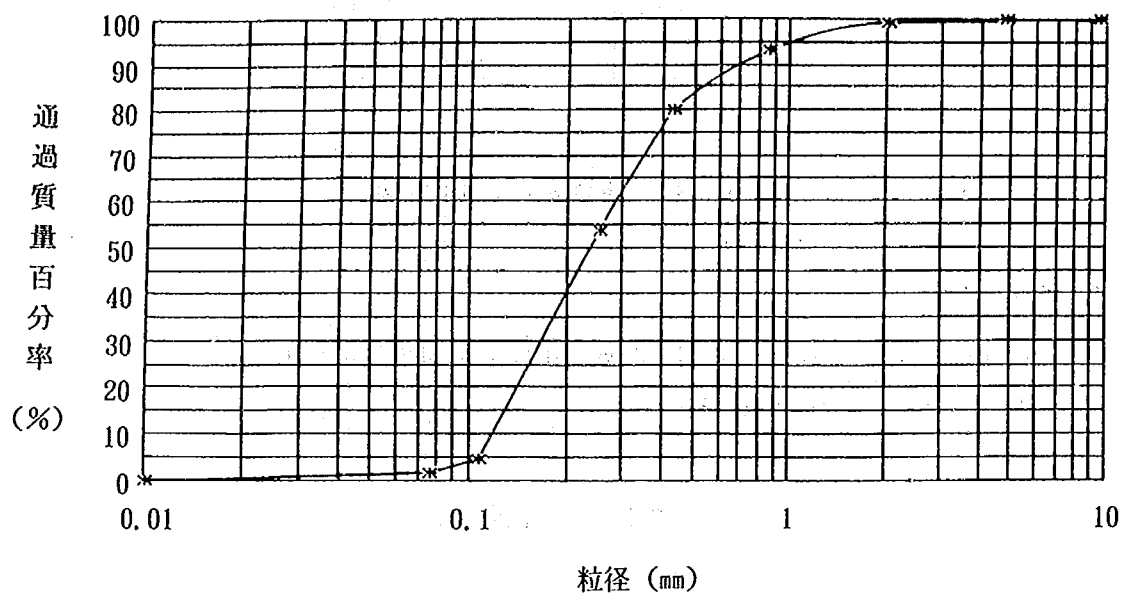
表-3.1 測定機器一覧表

検出器	平成3年度			平成4年度		
	測定項目	型式・容量	製作・型番	測定項目	型式・容量	製作・型番
	重錘加速度	ひずみゲージ式 鉛直成分 200G	東京測器 AR-200B	重錘加速度	ひずみゲージ式 鉛直成分 200G	東京測器 AR-200B
	土圧(底面) (荷重計)	ひずみゲージ式	計測技販 KGN-300B	土圧 (底面・側面) (荷重計)	ひずみゲージ式 2tf	共和電業 LUK-2TBS
	土圧(側面) (土圧計)	ひずみゲージ式 10kgf/cm ²	共和電業 BE-10KC	擁壁に作用 する土圧 (荷重計)	ひずみゲージ式 20tf	東京測器 CLC-20A
				擁壁の 回転変位量 (変位計)	ひずみゲージ式 50mm	東京測器 CDP-50
増幅器	名 称	製 作 ・ 型 番		名 称	製 作 ・ 型 番	
	動ひずみ測定器	共和電業 CDV-230C		動ひずみ測定器	共和電業 CDV-230C	
変換器	名 称	製 作 ・ 型 番		名 称	製 作 ・ 型 番	
	A/D変換器	日本電気三栄 9A16 金沢コントロール機器 ADC-121B		A/D変換器	金沢コントロール機器 ADC-121B	
記録器	名 称	製 作 ・ 型 番		名 称	製 作 ・ 型 番	
	アナログ式 データレコーダ	TEAC SR-50		パーソナル コンピュータ	日本電気 PC-98	
	パーソナル コンピュータ	日本電気 PC-98		XYプロッター	グラフテック GD9411F	
				レーザー プリンタ	フジゼロックス 4105	

3. 2 使用砂・敷砂層製作方法

3. 2. 1 使用砂

敷砂層に用いた材料は、茨城県鹿島郡神栖町神栖地先から採取した川砂である。主な特徴は図-3.4、表-3.2の通りである。



60%粒径	D_{60} (mm)	0.287
10%粒径	D_{10} (mm)	0.122
均等係数	U_c	2.35

図-3.4 粒径加積曲線

表-3.2 敷砂層材料特性

土粒子の密度	ρ_s (g/cm ³)	2.686
最大乾燥密度	ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.747
最小乾燥密度	ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.429
最大間隙比	e_{max}	0.880
最小間隙比	e_{min}	0.538
最適含水比	w_{opt} (%)	15.9
最適含水比のときの乾燥密度	(g/cm ³)	1.657

3. 2. 2 敷砂層製作方法

敷砂層は、層厚30cmごとに振動プレートで転圧して製作した。転圧回数は、平成3年度が3回／層、平成4年度が1回／層（ただし実験タイプSのみ5回／層）である。

敷砂層厚ごとの層数は以下の通りである。

層厚90cm	… 3層
120cm	… 4層
150cm	… 5層
180cm (H3のみ)	… 6層

実験後は土槽の砂全てを取り除くのではなく、平成3年度の予備実験の結果（この時の実験条件等は、3. 3. 1を参照）より掘り返し範囲を決めた。その結果を図-3.5に示す。この図より衝撃力の影響範囲は、重錘重量1, 3tfについては3m四方以内、5tfについては4m四方以内であることが確認された。そのため、図-3.6に示すように平成3年度では、重錘1, 3tfの時は中央部3m四方、5tfの時は4m四方の範囲とした。平成4年度では、実験タイプB, Sの時は中央部4m四方、実験タイプQ, Rの時は5m×4mの範囲とした。（実験タイプは表-3.4を参照のこと）

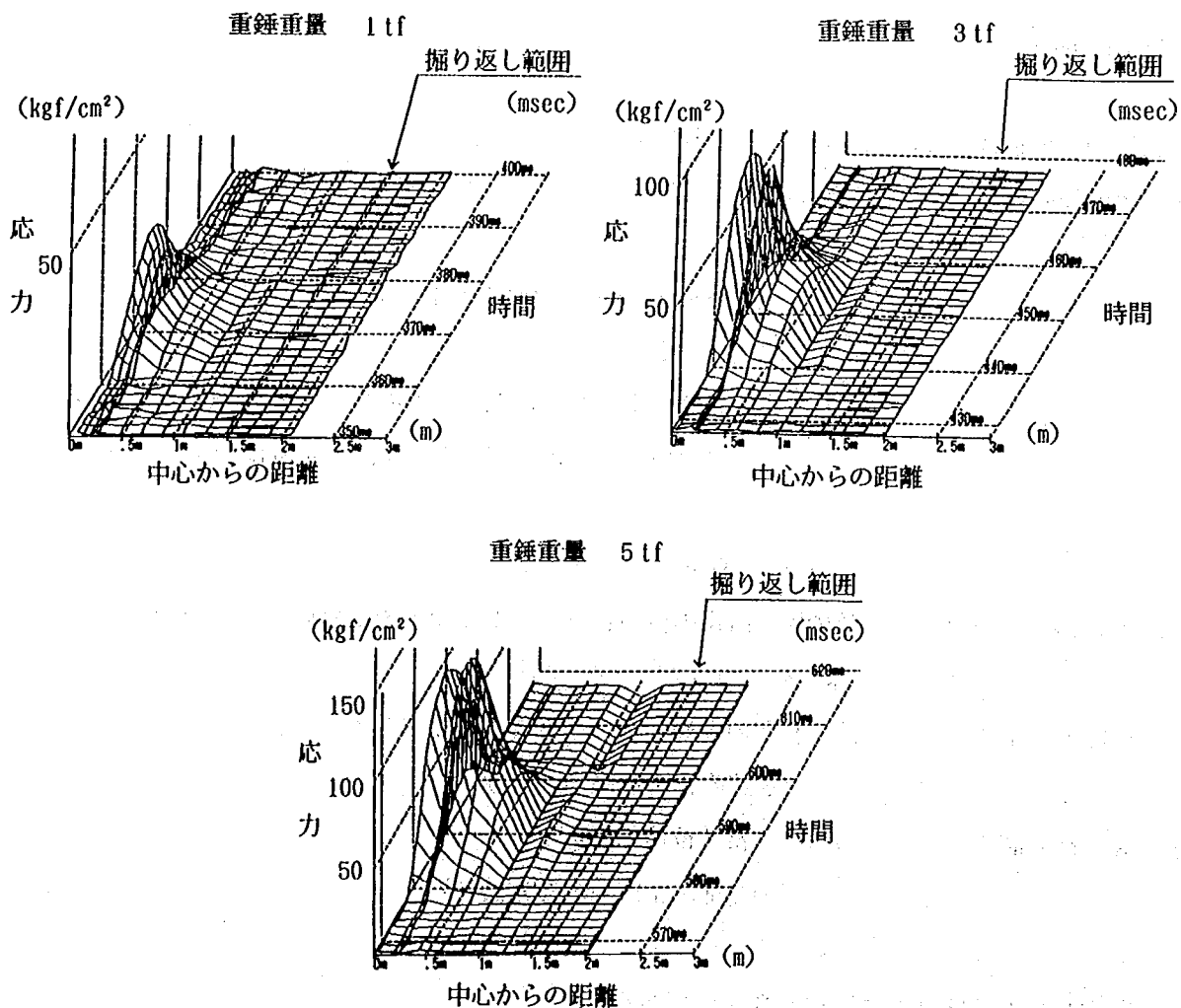
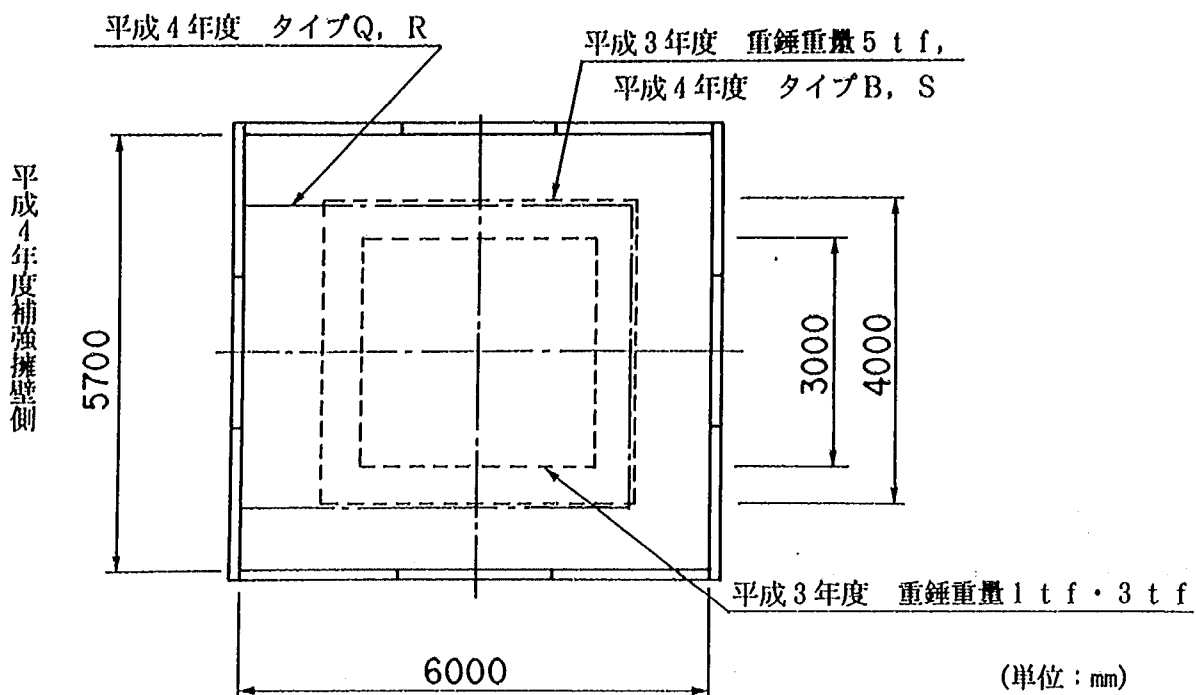


図-3.5 敷砂層底面の土圧分布図



図一3.6 敷砂層の掘り返し範囲

3. 3 実験条件

実験状況の概要を図一3.7、写真一3.2、3.3に示す。また実験の手順は次のとおりである。

1. 敷砂層の製作 — 掘り返し→1)30cm埋戻し

- ↓
- 2)振動プレートで所定の回数転圧
- ↓
- 3)砂の含水比および乾燥密度の測定
(平成3年度は各層ごと；平成4年度は最上部のみ)
- ↓
- 所定の厚さが完成

2. 重錘のつり上げ — 敷砂層の所定の位置にセットした重錘を所定の高さまでつり上げる。

3. 重錘の落下 — 落下装置の電磁石を切り重錘を落下させる
(加速度、土圧等の測定開始)

4. 落下後の測定 — 貫入量、落下位置の座標等
(加速度、土圧等の測定終了)

また実施した実験は以下に述べる3種類である。

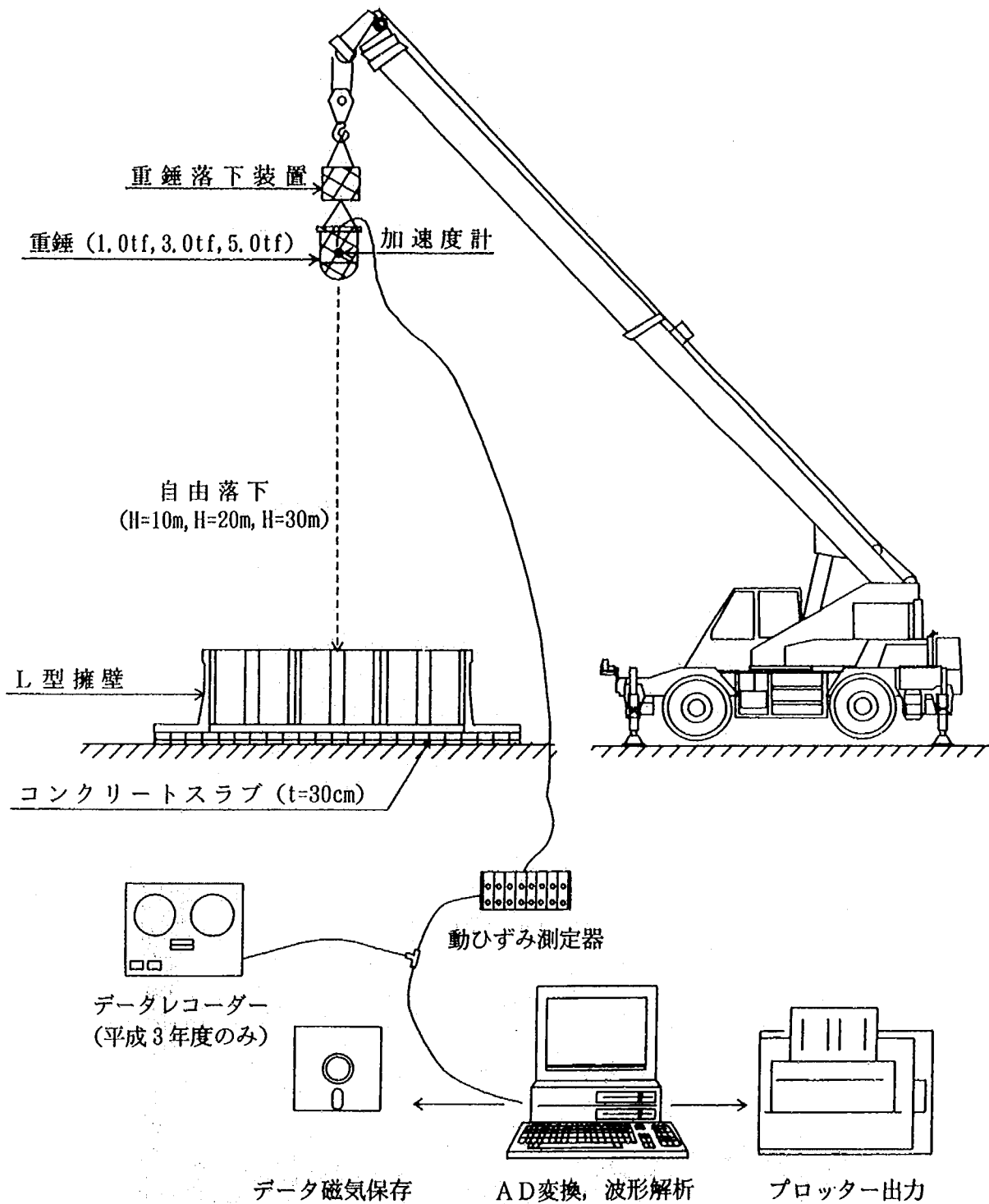


図-3.7 実験概要図

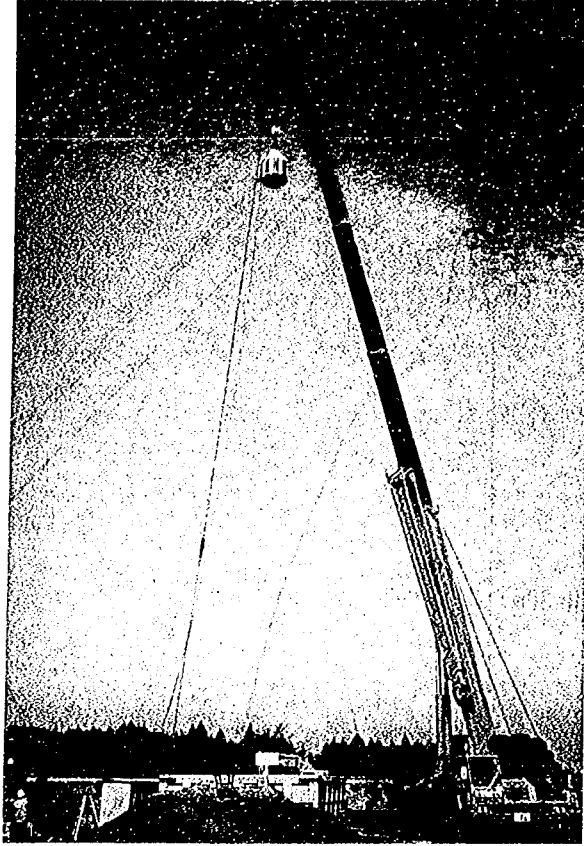


写真-3.2 実験状況（重錘落下前 全体図）



写真-3.3 実験状況（重錘衝突時：砂が飛散している）

3. 3. 1 予備実験

本実験における敷砂層の製作は、振動プレートを用いて締め固めながら行うことにした。しかし、砂の締め固め度が衝撃力に及ぼす影響が明確でないこと、また敷砂層の掘り返し範囲を衝撃力の影響を受けた最小とするために、その影響範囲を重錘落下時の敷砂層底面土圧の分布状況から確認するための実験を行った。

実験条件を表-3.3に示す。また、この時の敷砂層の製作は毎回全ての砂を土槽内から排除し、30cm毎に締め固め、最終的に90cmまで埋戻した。

表-3.3 予備実験の実験条件一覧表

ケース番号	敷砂層厚 h(cm)	重錘重量 W(kf)	落下高さ H(m)	敷砂一層あたりの 締め固め回数	実験回数	調査内容
1	90	1	20	1回	1回	締め固め回数 の決定
	〃	〃	〃	3回	〃	
	〃	〃	〃	5回	〃	
2	90	1	10	3回	2回	掘り返し 範囲の決定
	〃	3	〃	〃	〃	
	〃	5	〃	〃	〃	

3. 3. 2 平成3年度本実験

90cm以上の敷砂層上への落石の衝撃力に及ぼす諸因子の影響度を調べるために、敷砂層厚・重錘重量・落下高さを変化させて重錘を落下させる実験を行った。

3. 3. 3 平成4年度本実験

ロックシェッド上の緩衝材（敷砂）に落石が衝突した際に生じる衝撃力と屋根部（コンクリートスラブ面）に作用する土圧およびその分布範囲を諸因子の影響度とともに明らかにするために、平成3年度と同様に、敷砂層厚・重錘重量・落下高さを変化させ重錘を落下させる実験を行った。また、ロックシェッドの擁壁背面のポケット部（敷砂）に落石が衝突した際に、擁壁背面に作用する土圧およびその分布範囲を明らかにするために、重錘落下位置を土槽の中心と擁壁から1.5m、2mとして重錘を落下させる実験を行った。

平成3年度、4年度の本実験における実験条件の一覧を表-3.4に示す。

表-3.4 本実験の実験条件一覧表

実験年度	実験タイプ	重錘落下位置	敷砂層厚 h(cm)	重錘重量 W(tf)	重錘落下高さ H(m)	敷砂一層あたりの 締固め回数	実 験 回 数
平成 3 年 度	1	土 槽 中 心	90 " "	1 3 5	10, 20, 30 " 10, 20	3 回 " "	2 回 " "
	2		120 " "	1 3 5	10, 20, 30 " "	3 回 " "	2 回 " H=10, 20m: 2 回, H=30m: 1 回
	3		150 " "	1 3 5	10, 20, 30 " "	3 回 " "	2 回 " H=10, 20m: 2 回, H=30m: 1 回
	4		180 " "	1 3 5	10, 20, 30 " "	3 回 " "	1 回 " "
平成 4 年 度	B	土 槽 中 心	90 " "	1 3 5	10, 20, 30 " 10, 20	1 回 " "	1 回 " "
			120 " "	1 3 5	10, 20, 30 " "	1 回 " "	1 回 " "
			150 " "	1 3 5	10, 20, 30 " "	1 回 " "	1 回 " "
	S		120	3	20	5 回	1 回
	Q	擁壁より1.5m	150 " "	1 3 5	20 " "	1 回 " "	1 回 " "
	R	擁壁より2.0m	150 " "	1 3 5	20 " "	1 回 " "	1 回 " "

3. 4 測定項目・測定方法・データ処理方法

3. 4. 1 測定項目

本実験における測定項目は以下の通りである。

(1) 予備実験

- 1) 重錘の加速度
- 2) 重錘の貫入量
- 3) 敷砂の含水比および乾燥密度
- 4) 敷砂層底面の土圧

(2) 平成3年度実験

- 1) 重錘の加速度
- 2) 重錘の貫入量と敷砂表面の変位
- 3) 敷砂の含水比および乾燥密度
- 4) 敷砂層底面の土圧
- 5) 敷砂層背面の土圧
- 6) 重錘落下位置の座標
- 7) 敷砂の移動量 (層厚90cm, 重錘3tf, 落下高10m, 層厚120cm, 重錘3tf, 落下高10mの場合にのみ測定)

(3) 平成4年度実験

- 1) 重錘の加速度
- 2) 重錘の貫入量と敷砂表面の変位
- 3) 敷砂の含水比および乾燥密度
- 4) 敷砂層底面の土圧 (タイプB, Sのみ)
- 5) 敷砂層背面の土圧 (タイプQ, Rのみ)
- 6) 重錘落下位置の座標
- 7) 敷砂の移動量 (タイプB、重錘3tf、落下高さ20mの場合の時のみ)
- 8) 擁壁の回転変位量 (タイプQ, Rのみ)
- 9) 擁壁全体に作用する土圧 (タイプQ, Rのみ)
- 10) コーンペネトロメーターによる貫入量および貫入抵抗

3. 4. 2 測定方法

各測定項目における測定方法は次のとおりである。

(1) センサーを用いて測定する項目

動ひずみ計で増幅した後、A/D変換器でデジタル信号に変え、数値データとしてフロッピーディスクに収録した。本実験における各年の測定システムを図-3.8に示す。

(2) 重錘の貫入量と敷砂表面の変位

落石中心位置から20cm間隔で1方向測定した。また平成4年度のタイプQ, Rについては2方向測定した。

(図-3.9参照)

(3) 含水比および乾燥密度

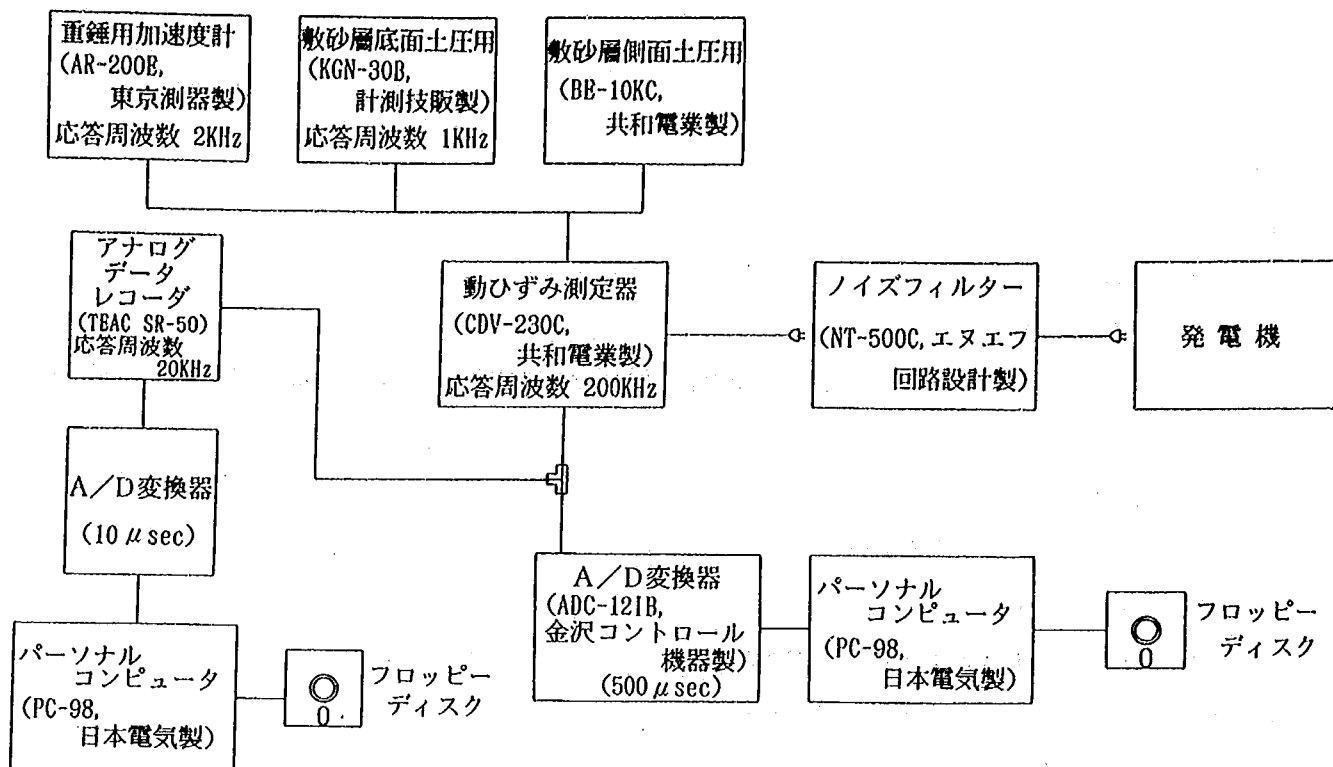
実験前に平成3年度は各層ごと、平成4年度は敷砂最上層のみの任意の3カ所から採取して測定した。

(4) 重錘の落下位置の水平座標

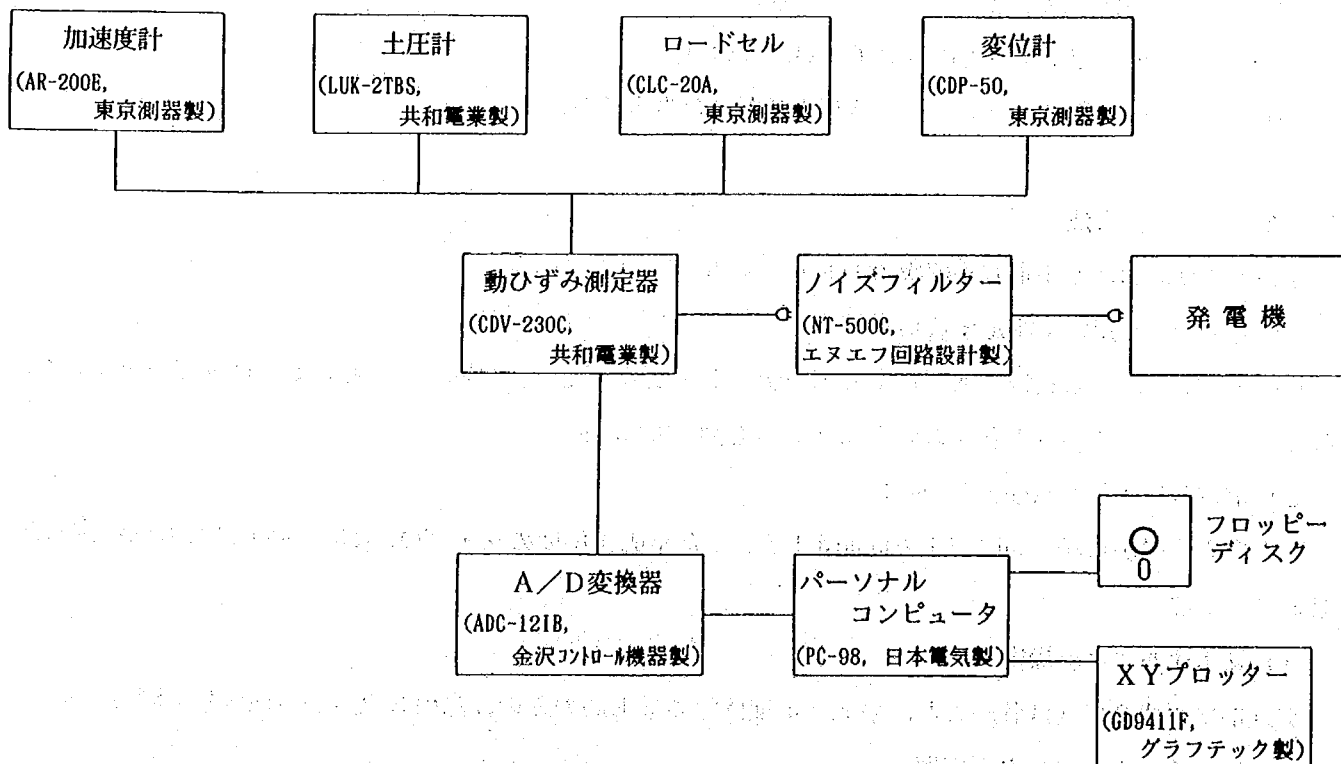
重錘落下後に土槽中心点を原点としたXY座標で測定した。(写真-3.4参照)

(5) 敷砂内部の移動量

締固めを行った各敷砂層の表面に平成3年度はアルミブロックと加速度計を、平成4年度はアルミブロックを埋設し、重錘落下前後の位置を測定した。(図-3.10参照)



平成3年度



平成4年度

図-3.8 測定システム図

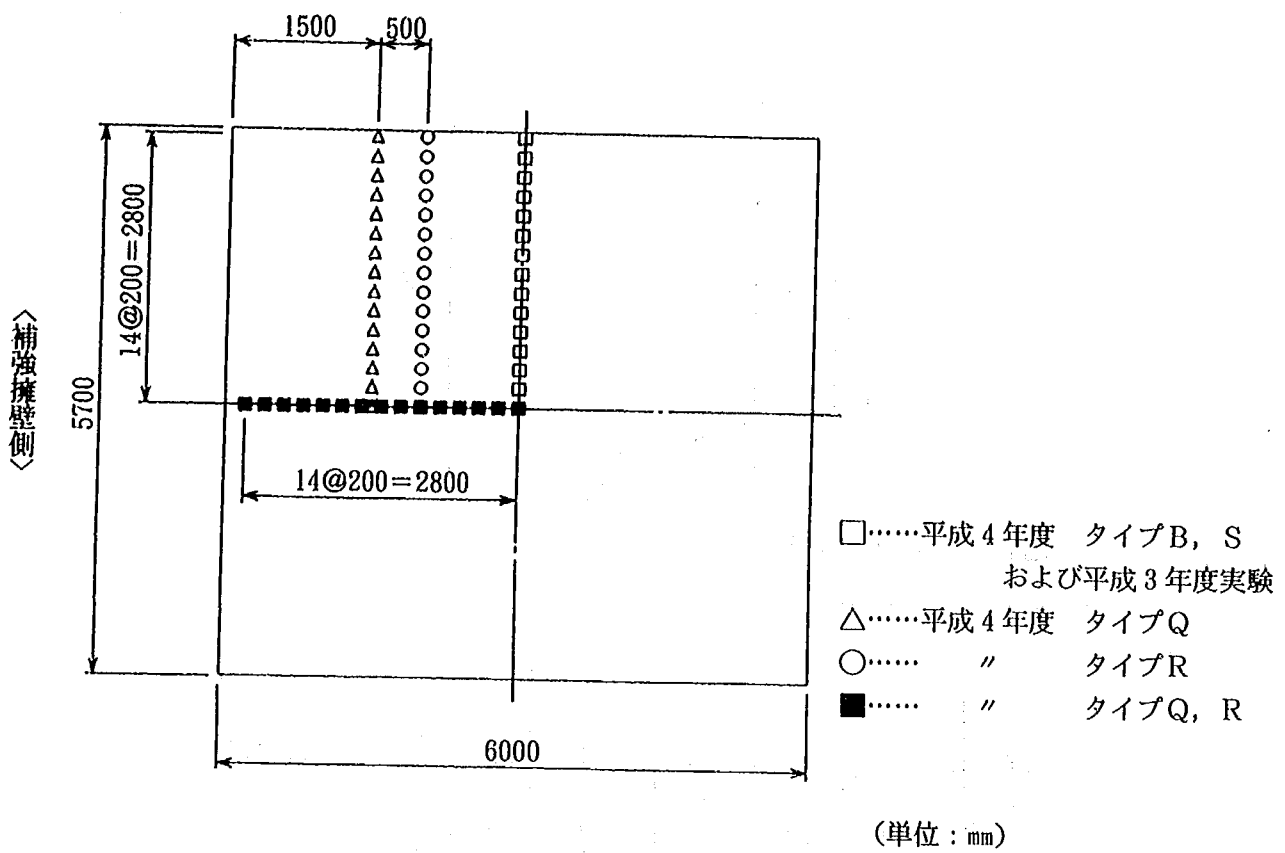


図-3.9 重錘の貫入量および敷砂層表面の変位量測定位置図

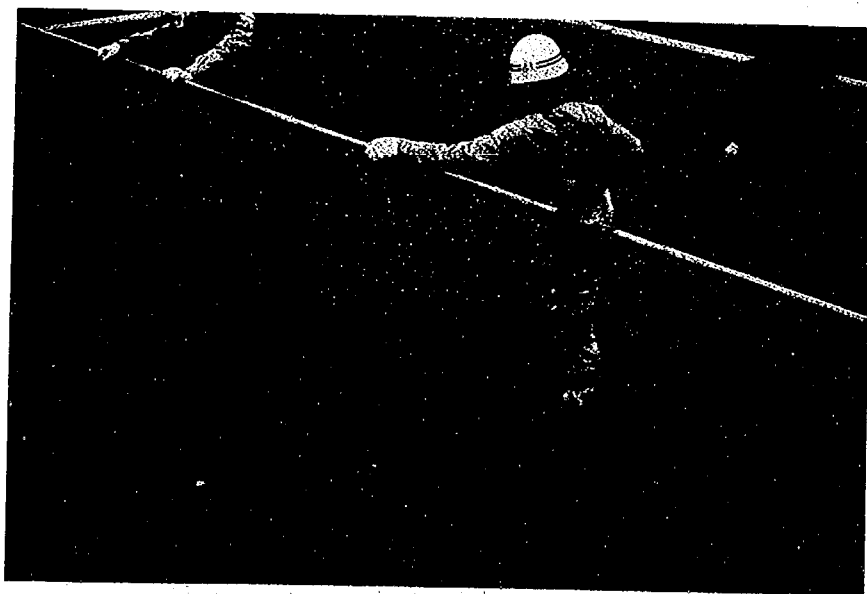
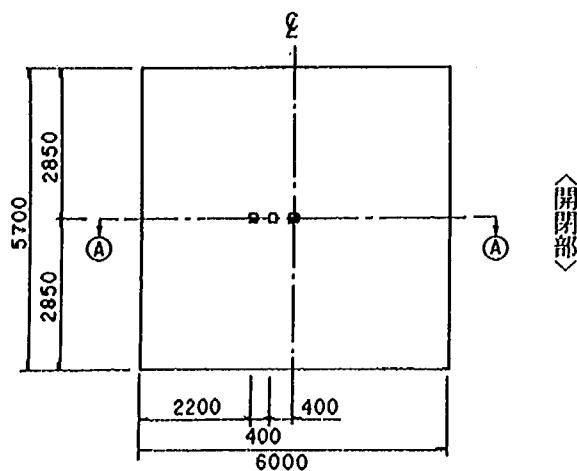


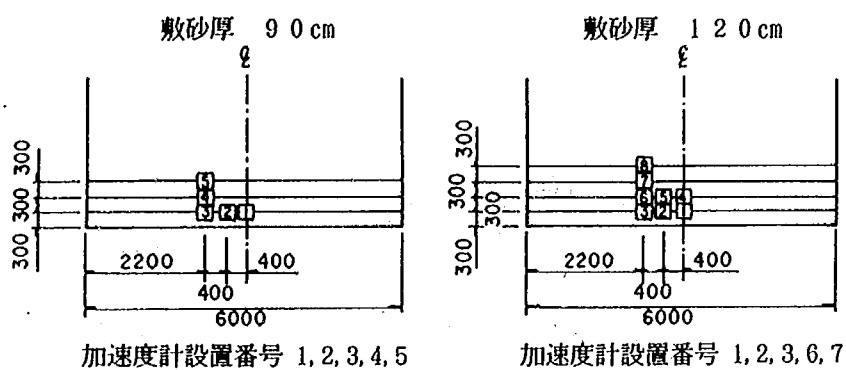
写真-3.4 重錘の落下位置の測定状況

[平面図]

(単位 : mm)

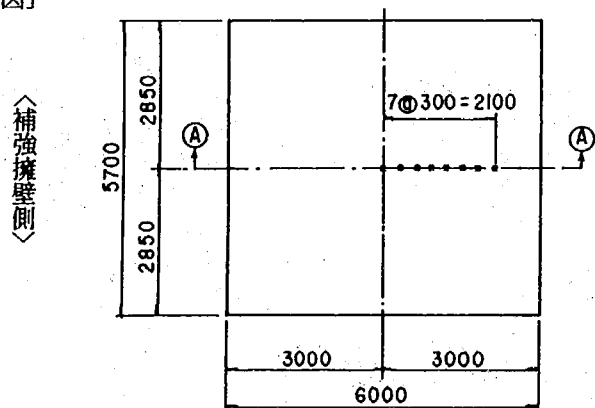


[断面図] ①-① 断面

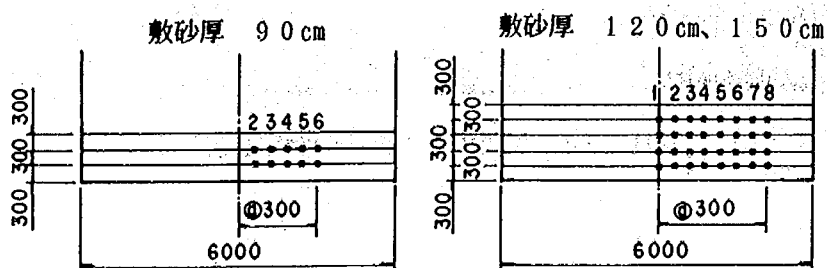


平成3年度

[平面図]



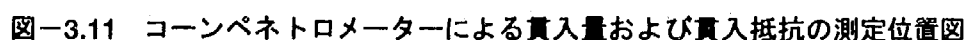
[断面図] ①-① 断面



平成4年度

図-3.10 敷砂内部の移動量の測定位置

重錘落下前は、最上層の任意の3カ所で測定、落下後は中心位置から30cm間隔で測定した。(図-3.11参照)



測定器から動ひずみ計で増幅し、A/D変換器（サンプリング間隔 $500\mu\text{sec}$ ）を通した後、数値データとして収録する際、忠実に信号を収録するため、ローパスフィルターをかけずに測定した。また、リアルタイムで処理するために、フロッピーディスクに収録し同時にプロッターにて作図を行った。

このように収録された数値データにはノイズが含まれているので、多項式適合法による13点平滑化²⁾を行ってノイズ処理をし、数値解析はすべてこのデータをもとに行った。

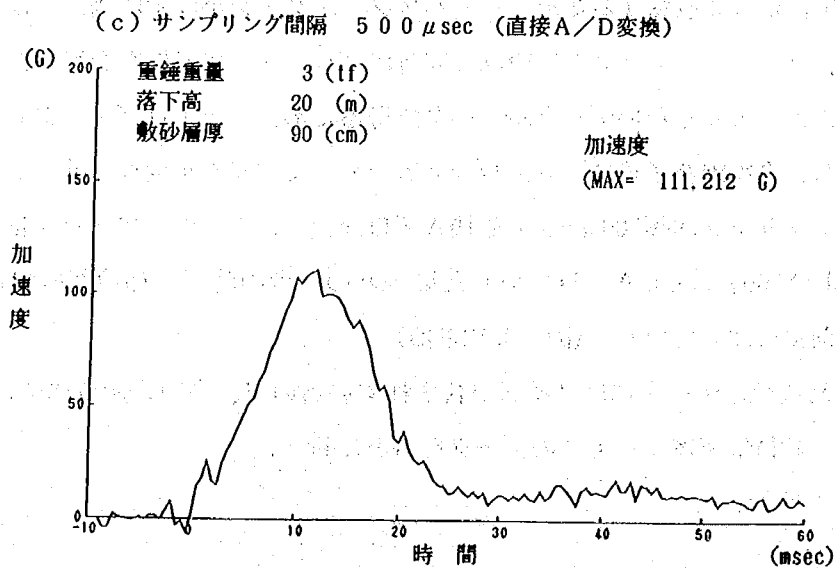
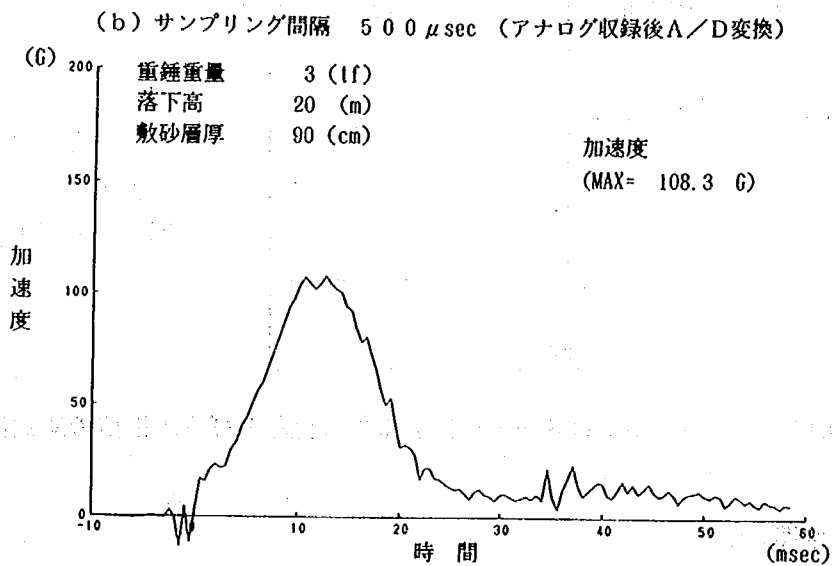
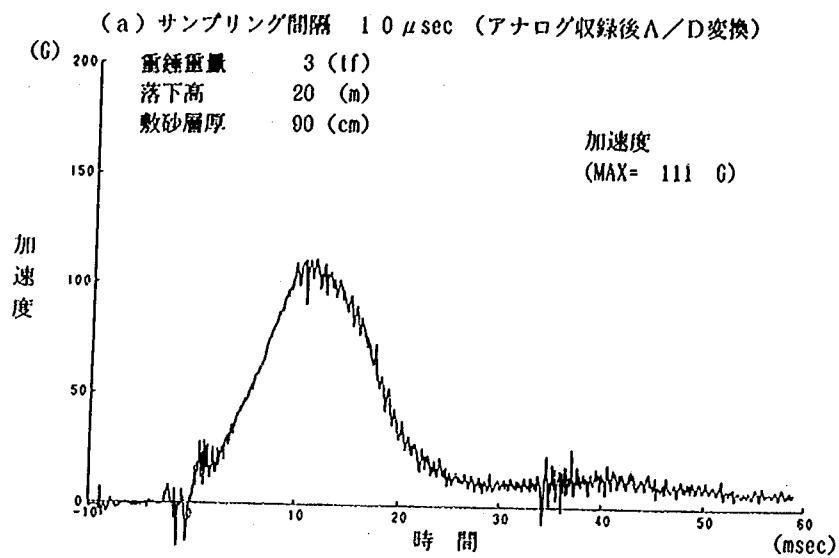


図-3.12 データサンプリング方法と加速度波形との関係

第4章 実験結果

4. 1 予備実験（締固め密度の影響）

今回の実験では、砂の締固め度が衝撃力に及ぼす影響を確認するために、予備実験として、振動プレートによる転圧回数を1回、3回、5回と変化させ、それぞれ1tfの重錘を高さ20mから落下させた。実験条件、測定した重錘加速度、衝撃力、貫入量、敷砂の含水比、乾燥密度、計算衝撃力（振動便覧式²⁾（式（4.1））により算出）の結果を一覧にしてまとめたものを表-4.1に示す。

$$P = 2.455 \cdot \lambda^{2/5} \cdot W^{2/3} \cdot H^{3/5} \quad \text{式 (4.1)}$$

ここに、P：重錘衝撃力（tf）

λ ：ラーメの定数（tf/m²）

W：重錘の重量（tf）

H：落下高さ（m）

ここでは、重錘に取り付けた2個の加速度計のピーク値を平均した値を重錘加速度とし、それに重錘質量を乗じ重錘衝撃力を求めている。この表から、転圧回数3回で締固め密度はほぼ最大値に達していることがわかる。乾燥密度と重錘衝撃力、重錘貫入量の関係を図-4.1に示す。これより、締固め度が大きいほど重錘衝撃力は大きくなり、貫入量が小さくなることがわかる。計算衝撃力と比較してみると、転圧回数1回の場合はラーメの定数 λ を100tf/m²とした値、転圧回数3回および5回の場合は200tf/m²とした値とほぼ一致している。このことから、ラーメの定数 λ は敷砂の締固め密度により変化することがわかる。

本実験では、平成3年度は転圧回数3回、4年度は1回として比較を行った。

4. 2 平成3年度の実験結果

今回の実験は、重錘重量、落下高さ、敷砂層厚を変えて行った。各実験ケースごとの実験条件、測定した重錘加速度、衝撃力、貫入量、敷砂の含水比、乾燥密度、計算衝撃力の結果を一覧にしてまとめたものが表-4.2である。

4. 2. 1 重錘衝撃力

（1）加速度波形

測定した重錘加速度の波形は、全般的に図-4.2に示すように衝突直後から発生するピークを有する波形と、それに続くなだらかな波形とからなる。ピーク値は、各重錘重量とも、落下高さが高くなるにつれて大きくなり、敷砂層が厚くなると小さくなる傾向がある。一方、なだらかな波形はいずれのケースにおいても同じような形状である。

表-4.1 予備実験結果一覧

番号	実験 タイプ	実験番号	重錘タイプ		敷砂層厚 T (cm)	落下高さ H (m)	転圧 回数	重錘加速度 α (G)	重錘衝撃力 P (tf)	計 算 衝 撃 力				貫入量 C (cm)	含水比 w (%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)
			重量 W (tf)	直径 D (cm)						$\lambda = 100$		$\lambda = 200$				
										P_{100} (tf)	P/P_{100}	P_{200} (tf)	P/P_{200}			
1	Y	Y091201	1	90	90	20	3	126.3	126.3	93.5	1.35	123.3	1.02	36.5	8.7	1.523
2		Y091202	1	90	90	20	5	124.6	124.6	93.5	1.33	123.3	1.01	38.5	9.3	1.518
3		Y091203	1	90	90	20	1	108.8	108.8	93.5	1.16	123.3	0.88	45.5	10.1	1.477

実験番号:

B 09 1 30 1

--- 同一実験条件における通し番号

--- 落下高さ (m)

--- 重錘重量 (tf)

--- 敷砂層厚 09: 90cm、12: 120cm、15: 150cm、18: 180cm

--- 実験タイプ

予備実験 Y

3年度本実験 なし

4年度本実験 { B, S: 重錘落下位置が土槽中心
R, Q: 重錘落下位置がそれぞれ擁壁より1.5、2.0m

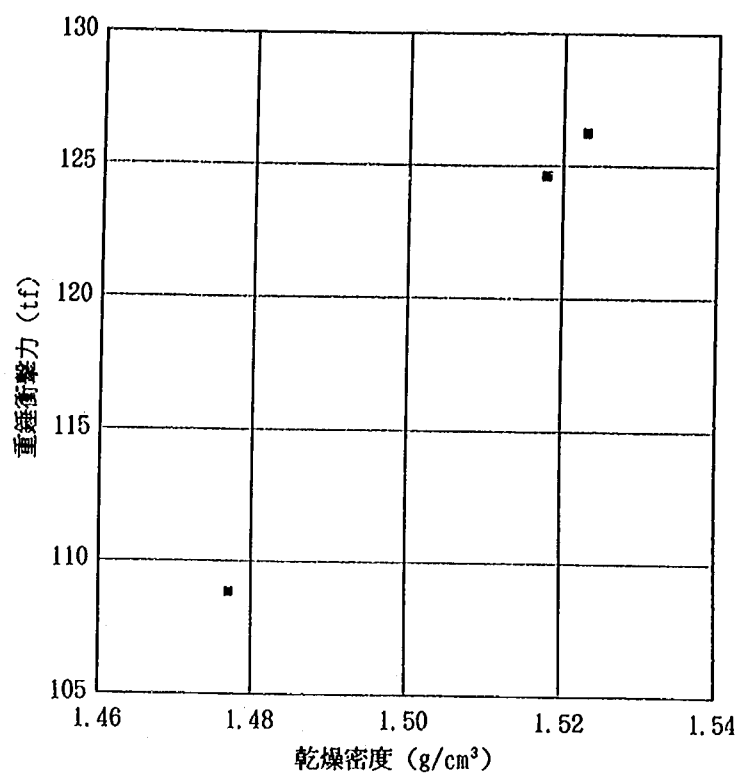


図-4.1 (a) 乾燥密度と重錘衝撃力

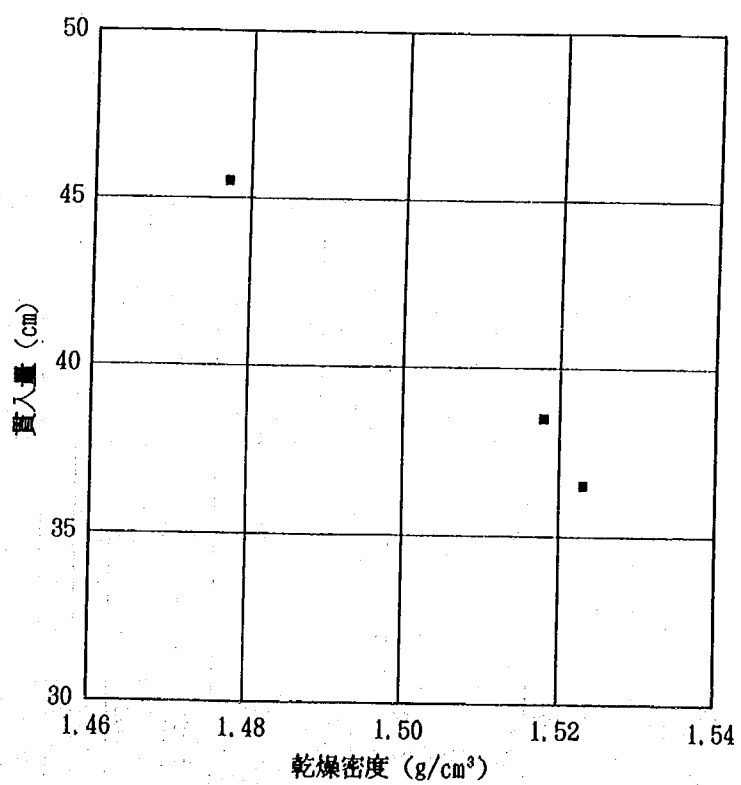


図-4.1 (b) 乾燥密度と重錘貫入量

表-4.2 実験結果一覧 (a) (3年度)

番号	実験 タイプ	実験番号	重錘タイプ		敷砂層厚 T (cm)	落下高さ H (m)	転圧 回数	重錘加速度 α (G)	重錘衝撃力 P (tf)	計 算 衝 撃 力				貫入量 C (cm)	含水比 w (%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)
			重量 W (tf)	直径 D (cm)						$\lambda = 100$		$\lambda = 200$				
										P_{100} (tf)	P/P_{100}	P_{200} (tf)	P/P_{200}			
1	1	091101	1	90	90	10	3	57.7	57.7	61.7	0.94	81.4	0.71	31.2	11.4	1.508
2		091102	1	90	90	10	3	75.1	75.1	61.7	1.22	81.4	0.92	28.5	11.5	1.528
3		091201	1	90	90	20	3	104.1	104.1	93.5	1.11	123.3	0.84	37.4	12.1	1.534
4		091202	1	90	90	20	3	106.4	106.4	93.5	1.14	123.3	0.86	36.0	12.7	1.539
5		091301	1	90	90	30	3	147.7	147.7	119.2	1.24	157.3	0.94	43.0	12.9	1.517
6		091302	1	90	90	30	3	132.7	132.7	119.2	1.11	157.3	0.84	43.5	12.7	1.526
7		093101	3	130	90	10	3	58.8	176.5	128.3	1.38	169.3	1.04	38.8	10.0	1.486
8		093102	3	130	90	10	3	59.9	179.6	128.3	1.40	169.3	1.06	38.0	9.7	1.525
9		093201	3	130	90	20	3	109.1	327.2	194.4	1.68	256.5	1.28	46.0	8.4	1.484
10		093202	3	130	90	20	3	106.6	319.7	194.4	1.64	256.5	1.25	48.1	10.4	1.508
11		093302	3	130	90	30	3	163.0	489.1	248.0	1.97	327.2	1.49	51.0	10.3	1.492
12		093303	3	130	90	30	3	142.9	428.7	248.0	1.73	327.2	1.31	53.0	11.1	1.512
13		095101	5	155	90	10	3	58.8	294.0	180.3	1.63	237.9	1.24	38.0	10.3	1.513
14		095102	5	155	90	10	3	57.4	287.0	180.3	1.59	237.9	1.21	40.0	10.2	1.510
15		095201	5	155	90	20	3	99.3	496.6	273.3	1.82	360.6	1.38	48.2	10.9	1.513
16		095202	5	155	90	20	3	104.7	523.7	273.3	1.92	360.6	1.45	49.6	11.4	1.508
17	2	121101	1	90	120	10	3	54.6	54.6	61.7	0.89	81.4	0.67	30.4	12.1	1.509
18		121102	1	90	120	10	3	51.0	51.0	61.7	0.83	81.4	0.63	30.0	11.8	1.508
19		121201	1	90	120	20	3	100.4	100.4	93.5	1.07	123.3	0.81	38.4	10.9	1.504
20		121202	1	90	120	20	3	111.8	111.8	93.5	1.20	123.3	0.91	38.0	11.6	1.510
21		121301	1	90	120	30	3	144.3	144.3	119.2	1.21	157.3	0.92	44.0	12.1	1.513
22		121302	1	90	120	30	3	141.4	141.4	119.2	1.19	157.3	0.90	43.0	11.4	1.508
23		123101	3	130	120	10	3	53.3	160.0	128.3	1.25	169.3	0.95	35.7	11.4	1.507
24		123102	3	130	120	10	3	51.7	155.2	128.3	1.21	169.3	0.92	37.2	10.0	1.501
25		123201	3	130	120	20	3	74.3	222.9	194.4	1.15	256.5	0.87	0.0	11.1	1.509
26		123202	3	130	120	20	3	96.1	288.2	194.4	1.48	256.5	1.12	44.8	10.9	1.522
27		123301	3	130	120	30	3	102.8	308.4	248.0	1.24	327.2	0.94	55.8	11.1	1.519
28		123302	3	130	120	30	3	103.9	311.8	248.0	1.26	327.2	0.95	56.3	10.9	1.517
29		125101	5	155	120	10	3	44.8	223.8	180.3	1.24	237.9	0.94	40.9	10.3	1.511
30		125102	5	155	120	10	3	46.6	232.9	180.3	1.29	237.9	0.98	39.5	10.9	1.519
31		125201	5	155	120	20	3	74.6	373.2	273.3	1.37	360.6	1.03	50.7	10.9	1.506
32		125202	5	155	120	20	3	87.0	435.2	273.3	1.59	360.6	1.21	51.0	10.6	1.519
33		125301	5	155	120	30	3	91.7	458.5	348.6	1.32	460.0	1.00	63.7	10.6	1.511

表-4.2 実験結果一覧 (b) (3年度)

番号	実験 タイプ	実験番号	重錘タイプ		敷砂層厚 T(cm)	落下高さ H(m)	転圧 回数	重錘加速度 α (G)	重錘衝撃力 P(tf)	計 算 衝 撃 力				貫入量 C(cm)	含水比 w(%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)
			重量 W(tf)	直径 D(cm)						$\lambda=100$		$\lambda=200$				
										P_{100} (tf)	P/P_{100}	P_{200} (tf)	P/P_{200}			
34	3	151101	1	90	150	10	3	60.2	60.2	61.7	0.98	81.4	0.74	29.6	11.3	1.496
35		151102	1	90	150	10	3	63.8	63.8	61.7	1.03	81.4	0.78	26.4	11.6	1.518
36		151201	1	90	150	20	3	84.9	84.9	93.5	0.91	123.3	0.69	41.2	11.4	1.513
37		151202	1	90	150	20	3	106.6	106.6	93.5	1.14	123.3	0.86	38.2	11.4	1.518
38		151301	1	90	150	30	3	113.4	113.4	119.2	0.95	157.3	0.72	51.3	11.2	1.503
39		151302	1	90	150	30	3	154.6	154.6	119.2	1.30	157.3	0.98	44.4	11.5	1.501
40		153101	3	130	150	10	3	41.2	123.7	128.3	0.96	169.3	0.73	39.3	11.0	1.511
41		153102	3	130	150	10	3	41.0	123.1	128.3	0.96	169.3	0.73	39.6	11.7	1.510
42		153201	3	130	150	20	3	75.2	225.6	194.4	1.16	256.5	0.88	51.5	11.8	1.514
43		153202	3	130	150	20	3	78.3	234.9	194.4	1.21	256.5	0.92	51.5	12.2	1.511
44		153301	3	130	150	30	3	101.6	304.8	248.0	1.23	327.2	0.93	58.3	11.6	1.512
45		153302	3	130	150	30	3	113.9	341.6	248.0	1.38	327.2	1.04	59.5	11.9	1.515
46		155101	5	155	150	10	3	38.6	193.0	180.3	1.07	237.9	0.81	46.0	9.9	1.493
47		155102	5	155	150	10	3	39.7	198.7	180.3	1.10	237.9	0.84	41.8	10.4	1.499
48		155201	5	155	150	20	3	62.6	313.0	273.3	1.15	360.6	0.87	54.8	10.0	1.509
49		155202	5	155	150	20	3	69.6	348.2	273.3	1.27	360.6	0.97	55.6	9.8	1.497
50		155301	5	155	150	30	3	93.4	467.1	348.6	1.34	456.0	1.02	65.5	10.2	1.510
51	4	181101	1	90	180	10	3	60.2	60.2	61.7	0.98	81.4	0.74	27.7	11.3	1.505
52		181201	1	90	180	20	3	107.5	107.5	93.5	1.15	123.3	0.87	38.3	11.4	1.498
53		181301	1	90	180	30	3	118.0	118.0	119.2	0.99	157.3	0.75	47.3	11.5	1.499
54		183101	3	130	180	10	3	43.9	131.8	128.3	1.03	169.3	0.78	39.4	11.1	1.490
55		183201	3	130	180	20	3	77.8	233.5	194.4	1.20	256.5	0.91	52.3	11.5	1.500
56		183301	3	130	180	30	3	102.0	306.1	248.0	1.23	327.2	0.94	60.9	11.8	1.496
57		185101	5	155	180	10	3	39.1	195.7	180.3	1.09	238.0	0.82	40.5	11.2	1.500
58		185201	5	155	180	20	3	62.5	312.5	273.3	1.14	360.6	0.87	55.2	11.1	1.491
59		185301	5	155	180	30	3	99.7	498.4	348.6	1.43	460.0	1.08	65.4	10.7	1.493

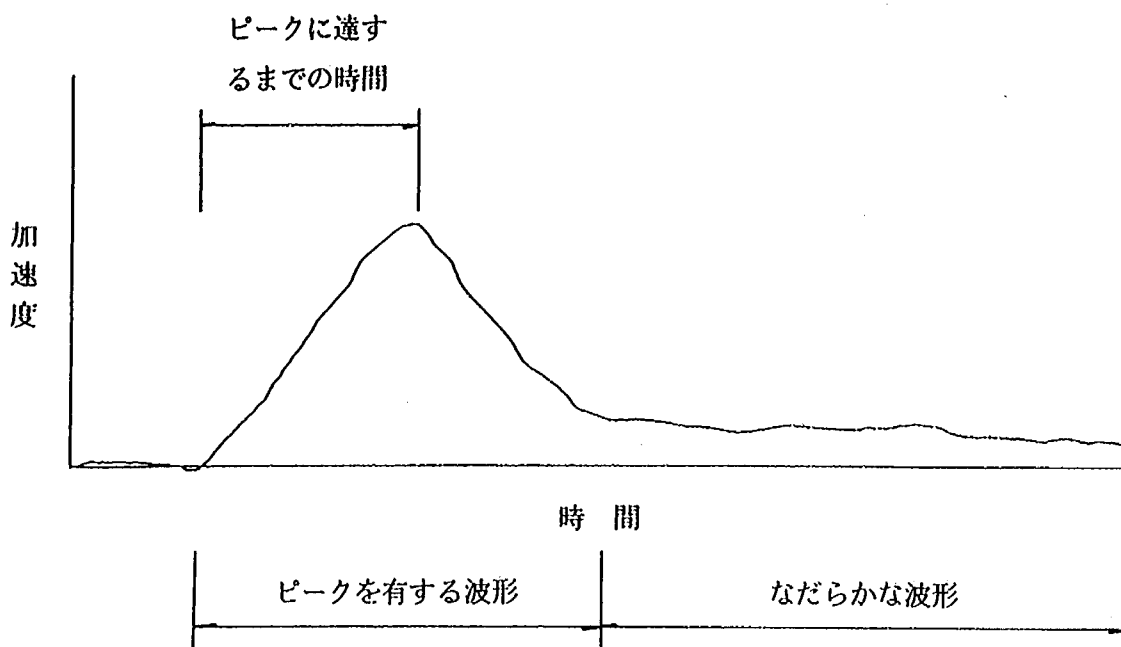


図-4.2 加速度波形の実測例

重錘重量が1tfの場合の波形を図-4.3に示す。重錘が敷砂層に衝突してから静止するまでの時間（以下、静止時間と呼ぶ）は、重錘重量が1tfの場合80～100msec、3tf、5tfの場合100msec～130msecとなっている。一方、加速度の最初のピークは衝突後5～15msecに発生している。各重錘重量とも、落下高さが高くなるにつれてピークに達するまでの時間が早くなり、静止時間が長くなる。同一落下高さでは、各敷砂層厚とも重錘重量が大きくなるとピークに達するまでの時間及び静止時間が長くなる傾向がある。

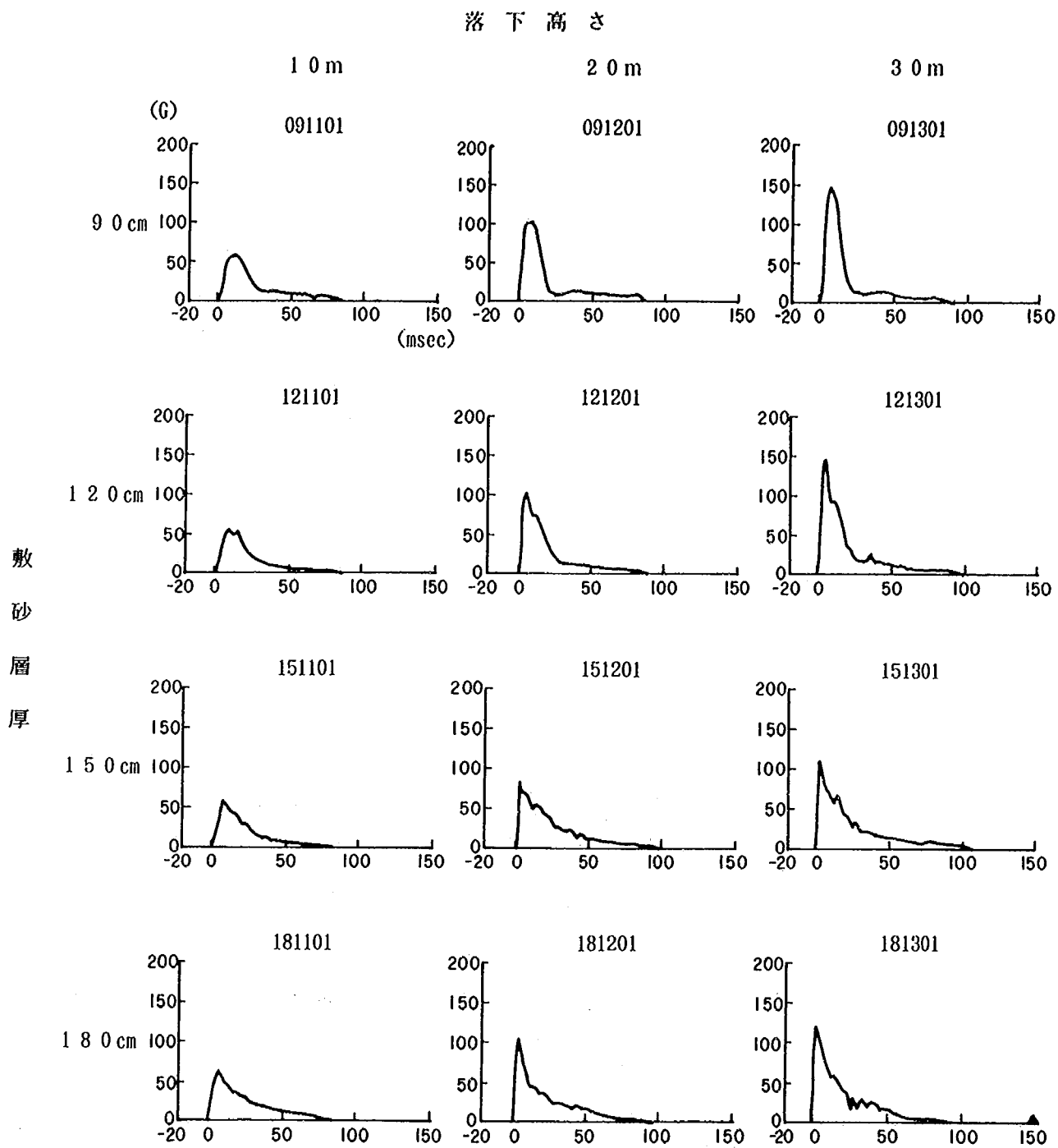
(2) 落下高さと重錘衝撃力

図-4.4に重錘重量ごとの落下高さと重錘衝撃力の関係を示す。図中の実線は式(4.1)においてラーメの定数 λ をそれぞれ100、200、300、400tf/m²として求めた線である。この図から、重錘衝撃力は、落下高さとともに増加し、 $\lambda=200\text{tf/m}^2$ とした値とほぼ一致していることがわかる。このことは予備実験の結果からも確認できる。また、いずれのケースとも敷砂の含水比、乾燥密度はほぼ均一であったので、以下の検討においては理論値として $\lambda=200\text{tf/m}^2$ の値を用いる。なお、図中の破線で囲んだ範囲は、その理論値($\lambda=200\text{tf/m}^2$)を越える値である。

参考に、重錘重量ごとの落下高さと重錘加速度の関係を図-4.5に示す。この図から重錘重量が大きくなると、衝撃力とは逆に重錘加速度は減少する傾向が確認できる。このことは式(4.1)から式(4.2)が導かれることによっても確認できる。

$$\begin{aligned}\alpha &= P/W = 2.455 \cdot \lambda^{2/5} \cdot W^{2/3} \cdot H^{3/5} / W \\ &= (2.455 \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5}) \cdot W^{-1/3}\end{aligned}\quad \text{式 (4.2)}$$

ここに、 α ：重錘加速度 (G)



(注) 図中の数字は実験番号を表す。

図-4.3 重錘加速度波形 (重錘重量 1 tf)

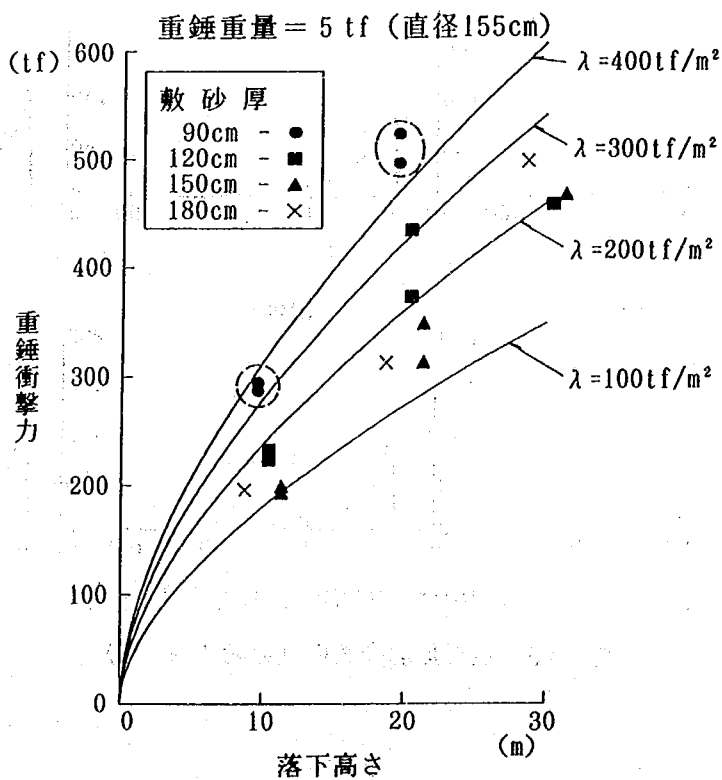
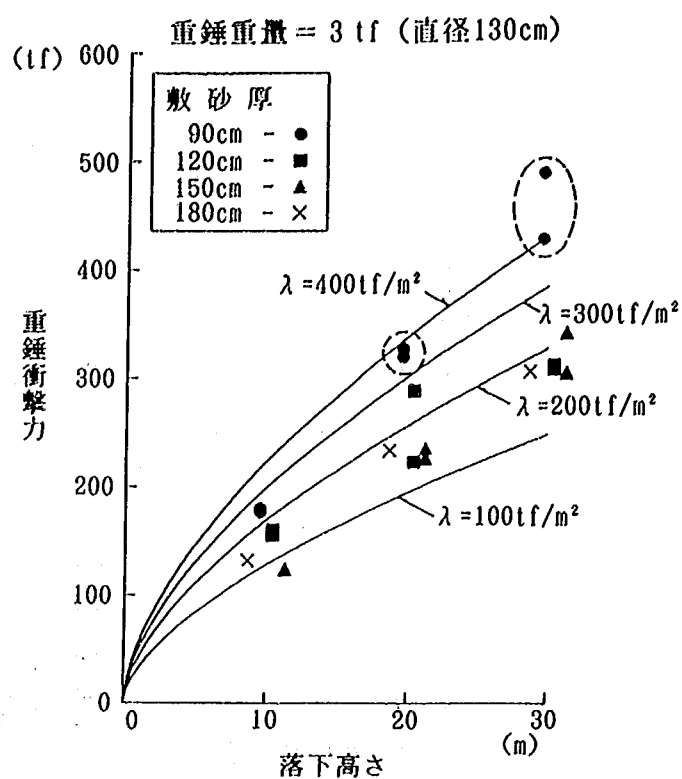
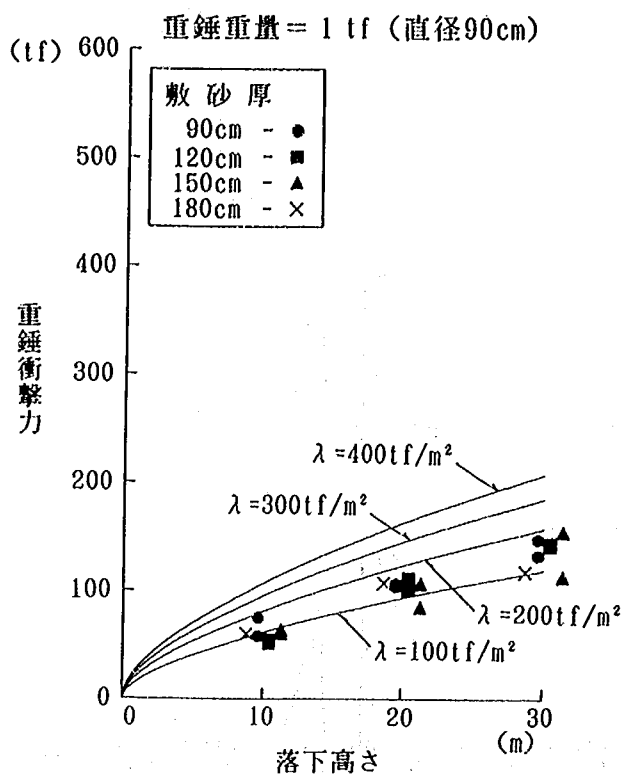


図-4.4 落下高さと重錘衝撃力の関係

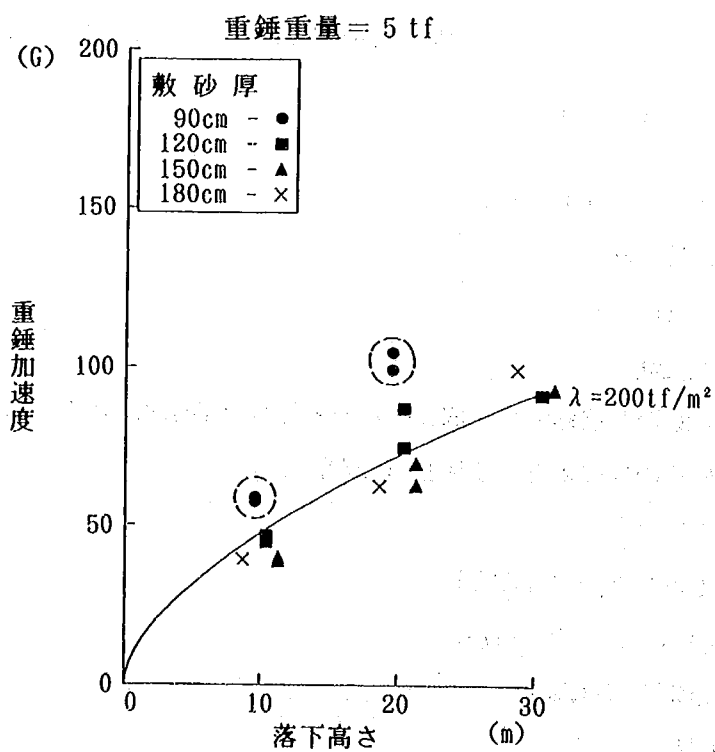
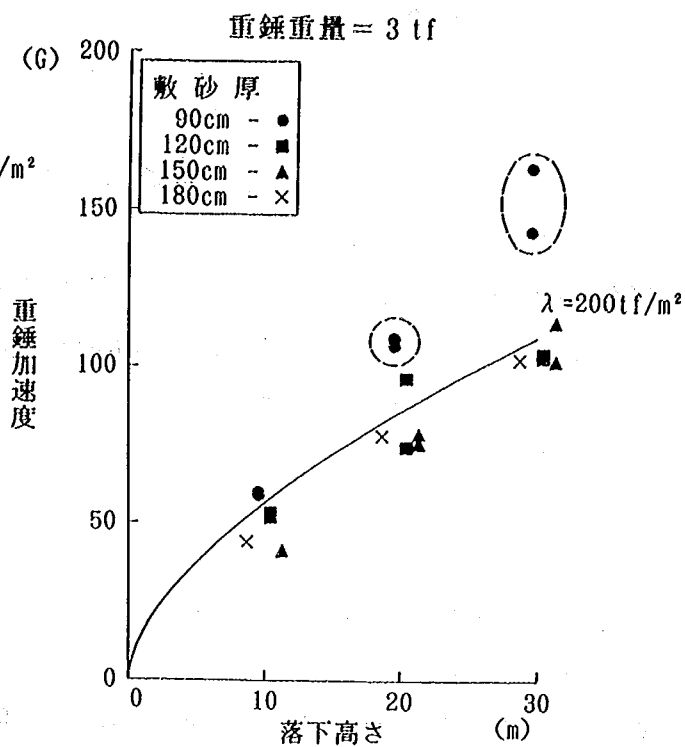
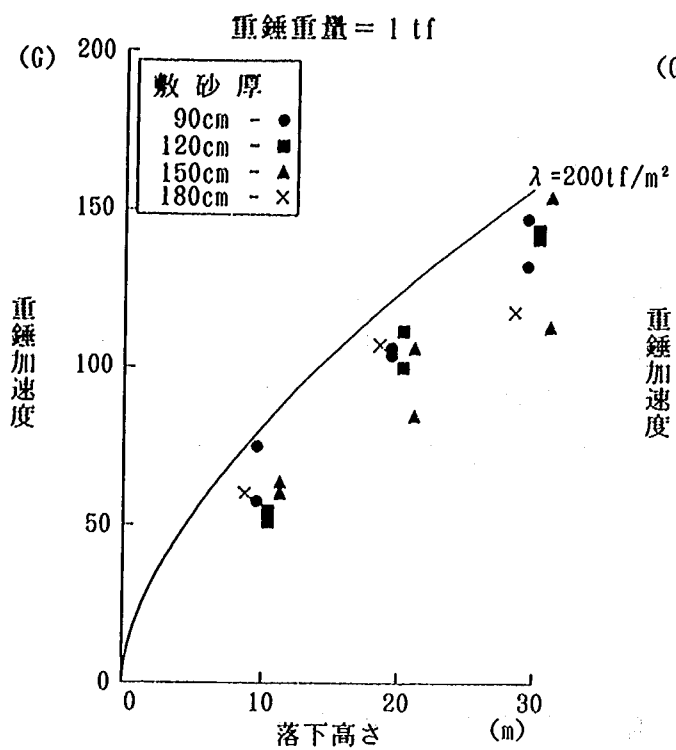


図-4.5 落下高さと重錘加速度の関係

(3) 敷砂層厚と重錘衝撃力

図-4.6に重錘重量ごとの敷砂層厚と重錘衝撃力の関係を示す。図中の破線は $\lambda=200\text{tf/m}^2$ とした線であり、一点鎖線は重錘の直径を示した線である。また、曲線は2回の実験の平均値を結んだ線である。

この図から同一落下高さにおいては、重錘重量が1tfのときは重錘衝撃力は敷砂層厚によりほとんど変化しない。他方、重錘重量が3tf、5tfのときは敷砂層厚が増加すると重錘衝撃力が減少し、ある一定値に近づく傾向が見られる。また、一定値になる敷砂層厚はほぼ重錘の直径と一致し、敷砂層厚がそれ以上の場合は理論値に等しいかそれ以下であるが、敷砂層厚が直径以下の場合は衝撃力が増大し、理論値を越える様子がわかる。敷砂層厚が薄くなると変形性が小さく、見かけの剛性が増加するためと考えられる。

以上のことから砂を緩衝材として使用する場合、層厚と落石の直径との大小関係が落石衝撃力の支配要因となると言える。

4. 2. 2 重錘貫入量および砂の挙動

(1) 落下高さと重錘貫入量

図-4.7に重錘重量ごとの落下高さと重錘貫入量の関係を示す。図中の実線は式(4.3)³⁾においてラーメの定数 λ を 200tf/m^2 とした理論値を示した線である。この図から、落下高さが高くなれば貫入量も大きくなり、いずれのケースとも理論値と等しいかそれ以下となっているが、重錘重量が大きくなるにつれて、理論値と実験値との差が広がっていることがわかる。これは、敷砂層厚が有限であることによると思われる。

$$Y_{\max} = \{(n+1) \cdot W \cdot H / k\}^{1/(n+1)} \quad \text{式 (4.3)}$$

ただし、 $k = 4/3 \cdot \sqrt{R} \cdot E / (1-\nu^2)$

ここに、 $Y_{\max}$: 最大貫入量 (m)

W : 重錘重量 (tf)

H : 落下高さ (m)

k : 敷砂層の剛性と重錘寸法に依存するバネ係数 (半球底の場合) ($\text{tf/m}^{3/2}$)

n : 重錘の形状のみに依存する係数 (=3/2)

R : 重錘の半径 (m)

E : 敷砂層のヤング率 (=5/2 λ)

ν : 敷砂層のポアソン比 (=1/4)

λ : ラーメの定数 (tf/m^2)

(2) 敷砂層厚と重錘貫入量

図-4.8に落下高さごとの敷砂層厚と重錘貫入量の関係を示す。図中の破線は $\lambda=200\text{tf/m}^2$ とした理論値である。この図から、落下高さ10mについては敷砂層厚による顕著な差は認められないが、20mおよび30mについては敷砂層厚が増加すると貫入量が増加し、ある一定値に収束する傾向が確認できる。

(3) 重錘衝撃力と重錘貫入量

図-4.9に重錘重量ごとの重錘貫入量と重錘衝撃力の関係を示す。図中の実線は $\lambda=200\text{tf/m}^2$ とした理

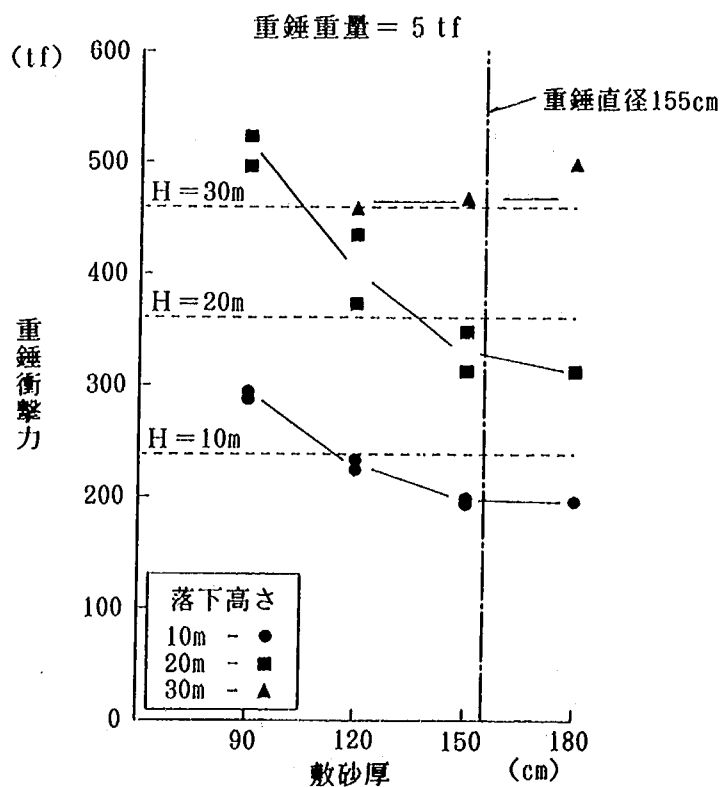
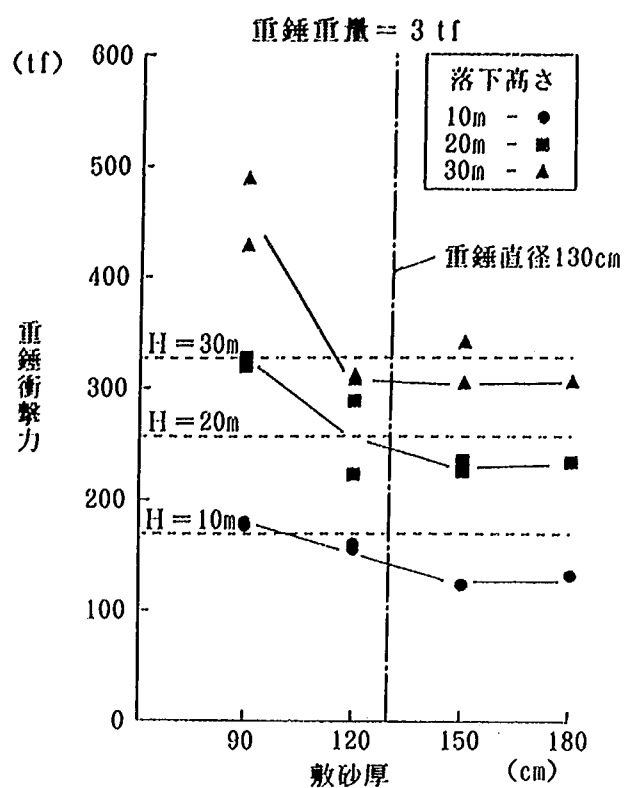
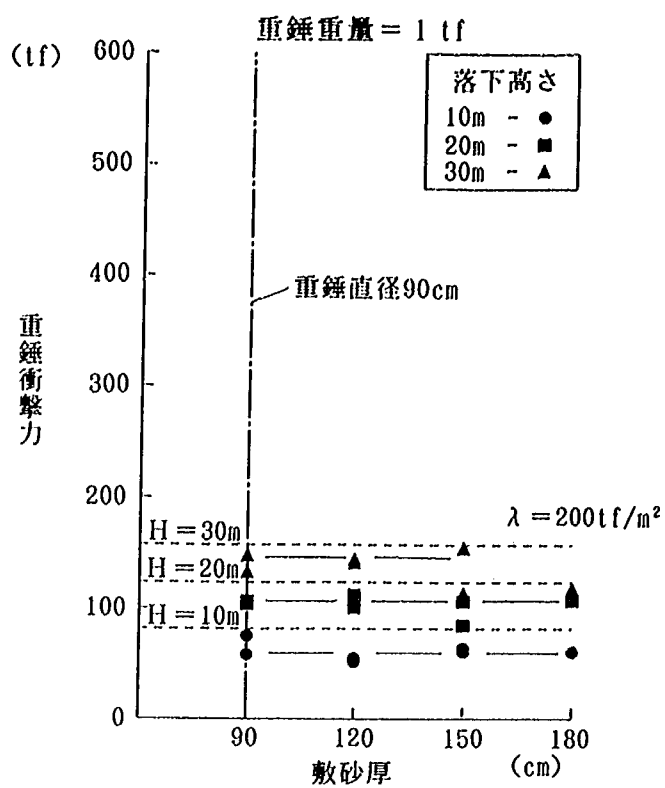


図-4.6 敷砂層厚と重錘衝撃力の関係

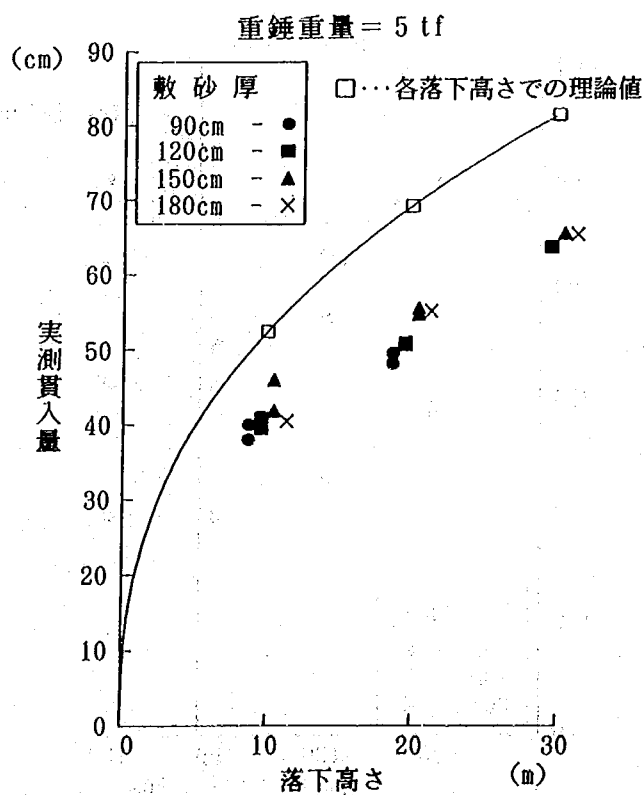
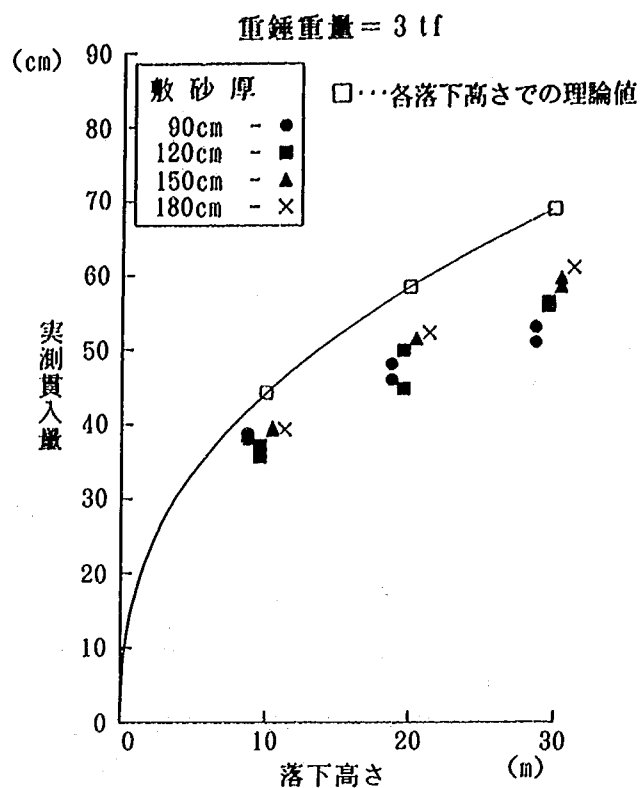
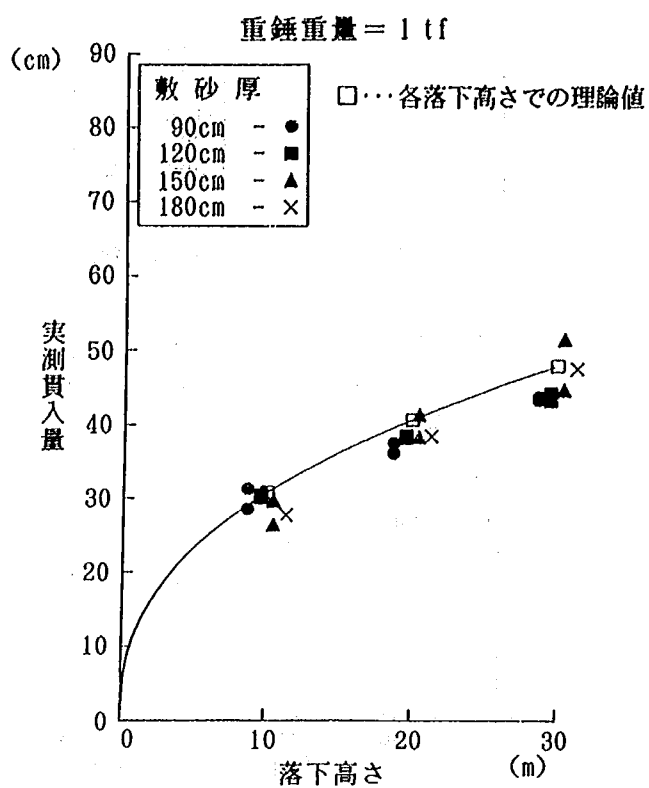


図-4.7 落下高さと実測貫入量の関係

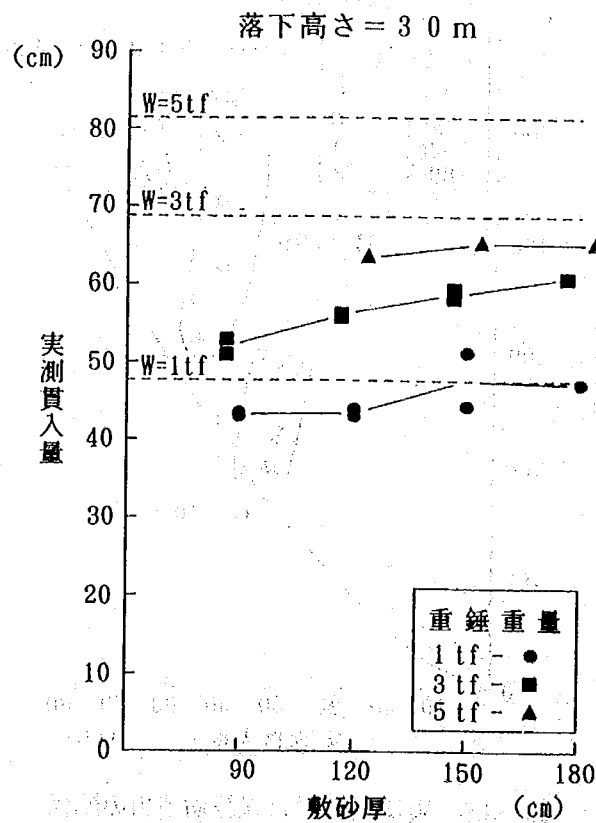
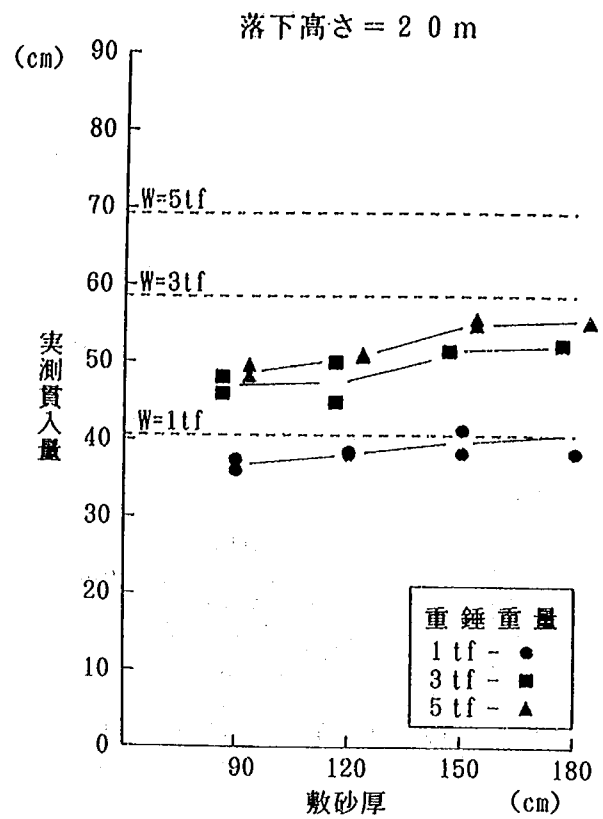
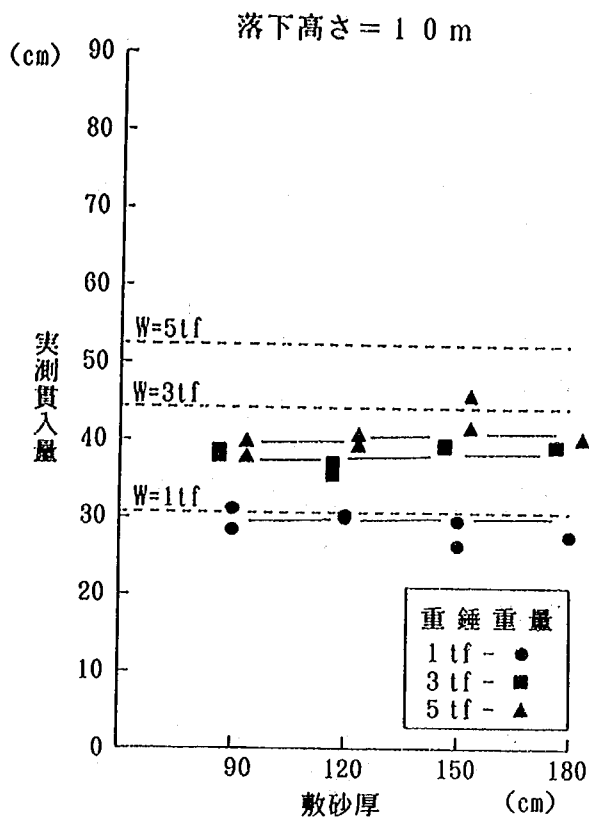


図-4.8 敷砂層厚と実測貫入量の関係

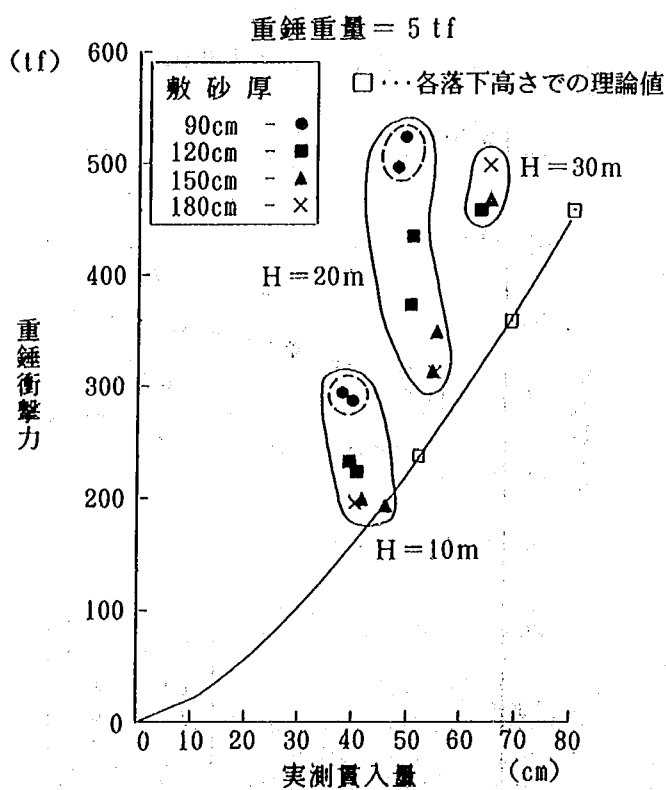
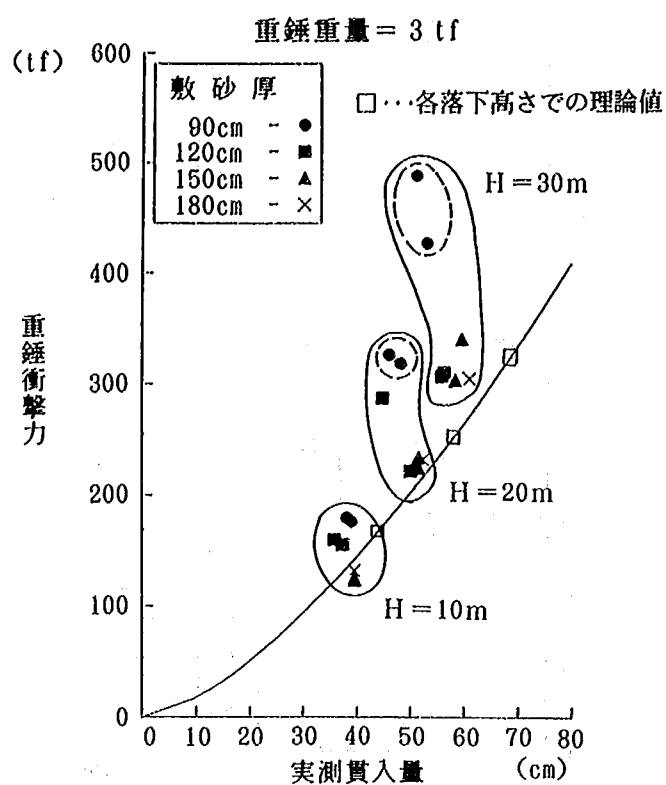
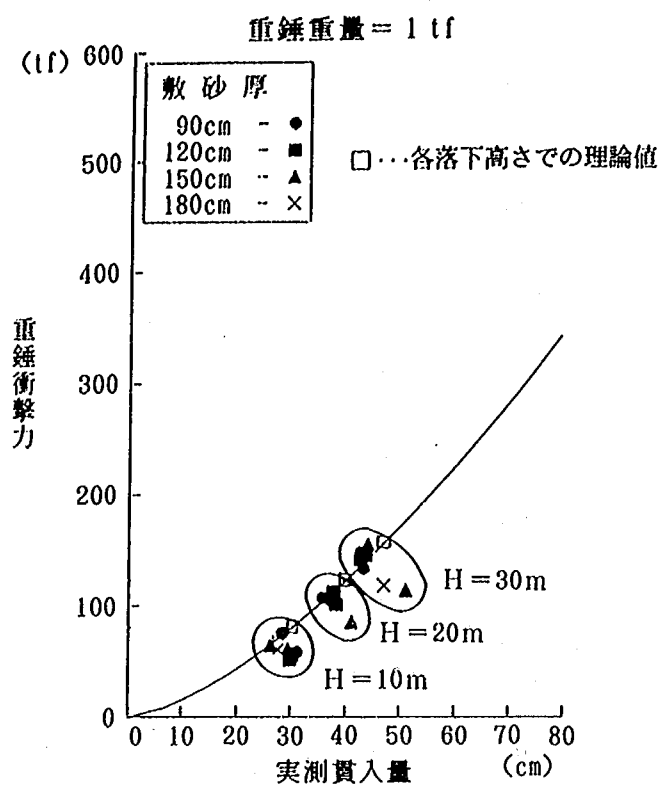


図-4.9 実測貫入量と重錘衝撃力の関係

論値を示す。この図から、衝撃力と貫入量はほぼ比例している様子がわかるが、重錘重量、落下高さが同一の条件について見ると、敷砂層厚による貫入量の差は僅かであるが、敷砂層厚が薄くなると貫入量が小さくなり、重錘衝撃力が大きくなる傾向がある。また、破線で囲んだ点は緩衝材の厚さが不足しており、衝撃力は極端に大きい値を示す。

(4) 砂の挙動

重錘重量 3 tf、落下高さ 10m、敷砂層厚 90cm および 120cm の実験において敷砂の移動量を測定した結果を表-4.3、図-4.10 に示す。

まず、重錘直下の砂は一樣に沈下しておらず、底面から 30cm の位置ではどちらも移動量は少ないが、層厚 120cm の場合の底面から 60cm の位置では大きく沈下している。これは、土槽底面から鉛直方向の移動を拘束されている層と、移動性能を有している層とが存在することを意味し、緩衝効果を高めるためには後者の層の存在が重要であると考えられる。したがって、この層厚が不十分の場合、重錘衝撃力が理論値を上回るのであろう。

また、土槽内の敷砂は横方向には自由度が高いため、重錘直下以外の部分は横方向にも移動しており、重錘の側方では貫入によって砂が押され盛り上がっている様子がわかる。

4. 2. 3 伝達衝撃土圧

ここでは、重錘衝撃力が敷砂層を伝達してコンクリート床版上に作用する力を伝達衝撃土圧と呼ぶ。

(1) 土圧波形

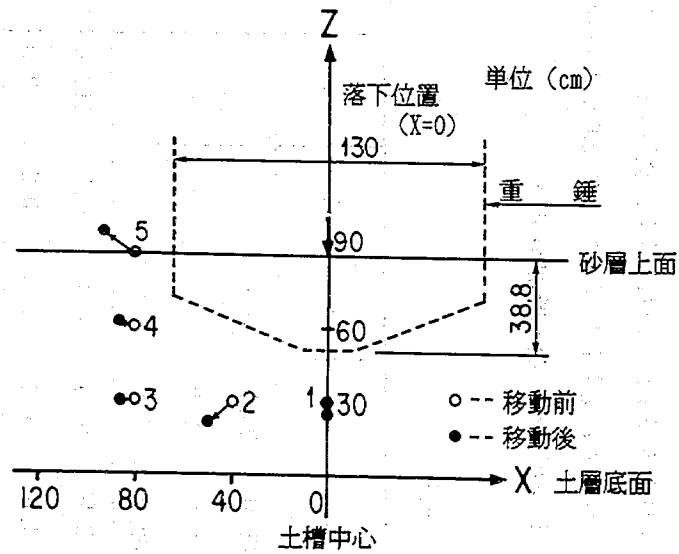
重錘重量 1 tf、落下高さ 20m、敷砂層厚 90cm の場合の衝撃土圧波形を図-4.11 に示す。全般的に、土圧波形は加速度波形と同様に、衝突直後から発生するピークを有する波形とそれに続くなだらかな波形からなる。重錘落下位置から近いほどピーク値は大きく、立ち上がりおよびピークとなる時間が早い。

表-4.3 敷砂の移動量

条件 \ 番号		1	2	3	4	5	6	7	8
重錘重量 3tf 落下高さ 10m 敷砂層厚 90cm	x	0.0	-50.0	-86.0	-86.0	-93.0	—	—	—
	y	0.0	-1.5	-1.0	-0.5	-2.0	—	—	—
	z	25.2	22.0	30.0	62.0	98.5	—	—	—
重錘重量 3tf 落下高さ 10m 敷砂層厚 120cm	x	-0.5	-46.0	-85.0	3.0	-46.5	-84.0	-83.0	-112.0
	y	-3.0	-2.0	-1.0	-4.0	-4.0	-2.5	0.0	2.0
	z	27.5	25.3	29.1	43.1	49.4	58.4	97.0	128.4

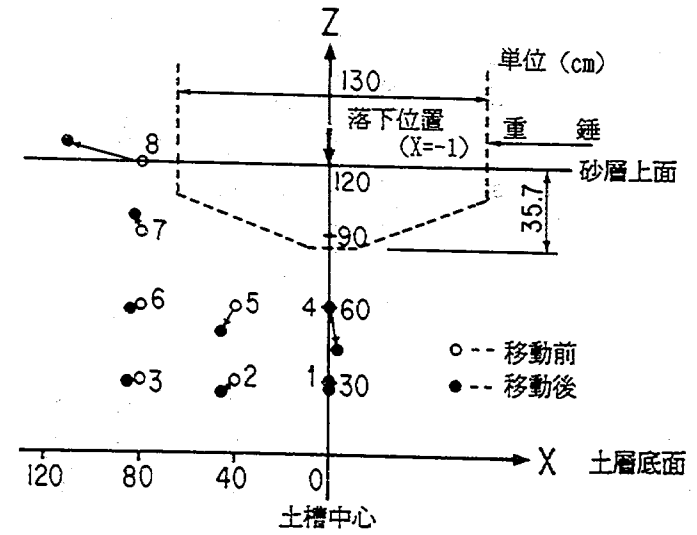
(注) 番号は図-4.10中の点に対応

実験番号093101

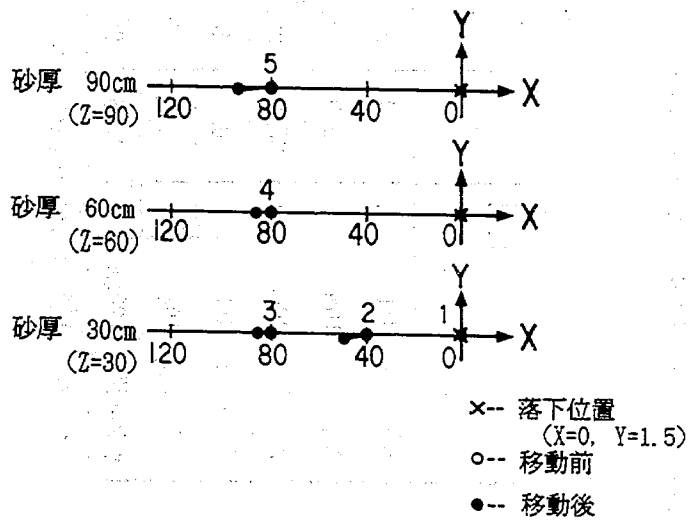


断面図

実験番号123101

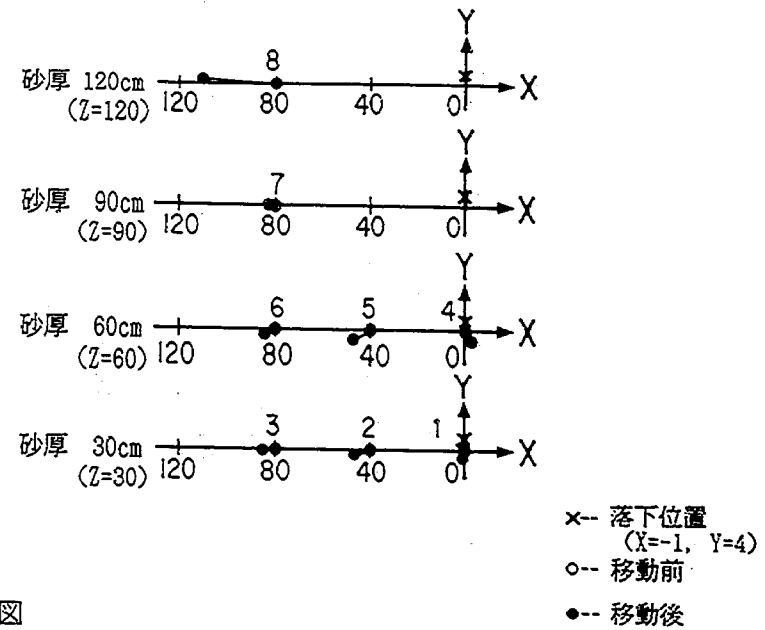


断面図



平面図

図-4.10 敷砂の移動量



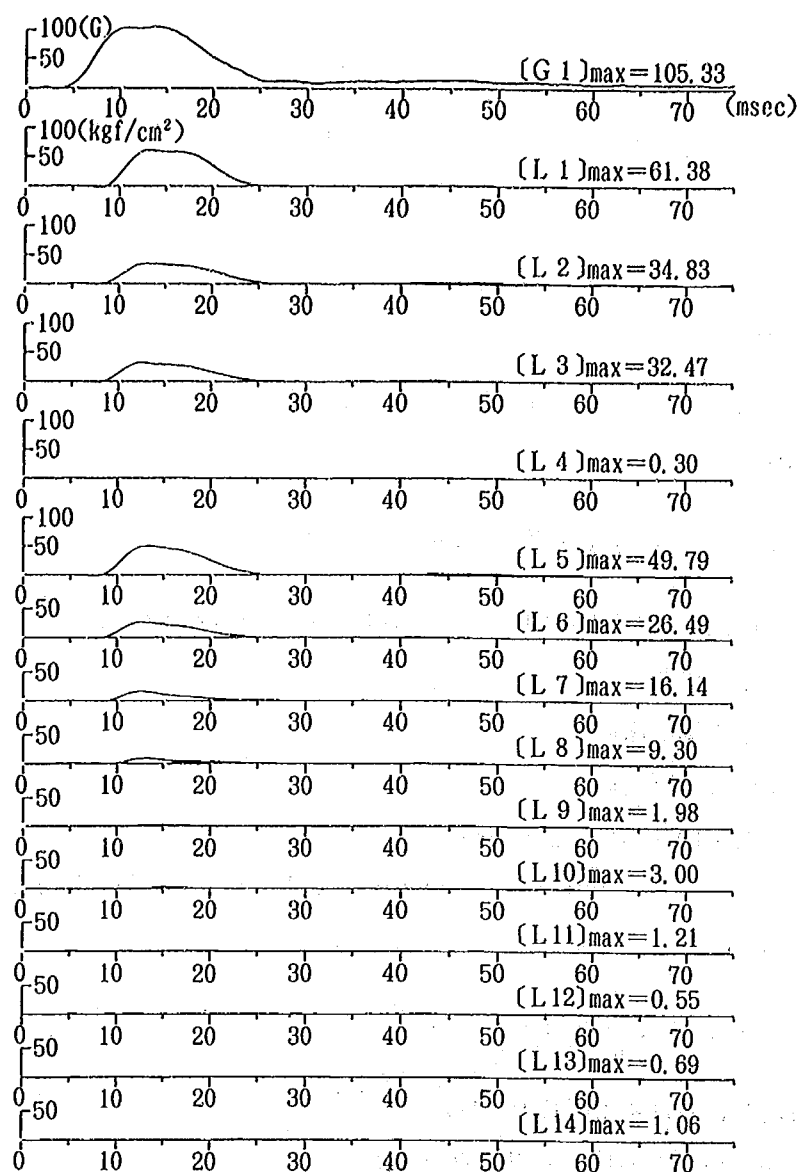


図-4.11 (a) 衝撃土圧波形例 (実験番号091201)

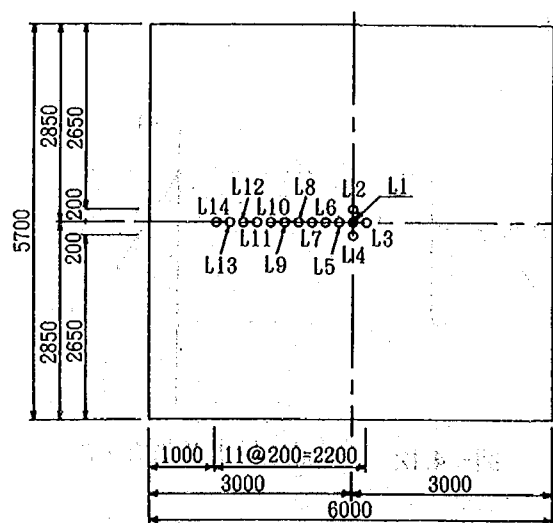


図-4.11 (b) 敷砂層底面土圧計配置図 (G1は重錘加速度)

(2) 土圧合力

測定される土圧は落下中心からある間隔で配置された離散的なものであるため、フローリッヒの土圧分布の式⁹⁾ (図-4.12、式 (4.4)) を参考に式 (4.5) の形の回帰曲線を求めた。図-4.13に実測データと回帰曲線の例を示す。

$$\sigma_z = \frac{\nu}{2\pi} \cos^{\nu+2} \phi \frac{Q}{Z^2} \quad \text{式 (4.4)}$$

ここに、 σ_z : フローリッヒによる深さ Z の鉛直方向の地中応力

ν : 応力集中係数

$$s(t, r) = A(1) \cdot A(2) \cos^{(A(2)+2)} \{ \tan^{-1}(r/z) \} \quad \text{式 (4.5)}$$

ここに、 $s(t, r)$: 時刻 t における落下中心から距離 r の位置での土圧

$A(1)$: 倍率係数

$A(2)$: 応力集中係数

z : 敷砂層厚 (m)

r : 落下位置からの距離 (m)

これを用いて、各時刻ごとの土圧合力 $S(t)$ を以下の式で算出し、その最大値を最大土圧合力とした。表-4.4に結果の一覧表を示す。

$$S(t) = 2\pi \int_0^{r_{\max}} r \cdot s(t, r) dr \quad \text{式 (4.6)}$$

ここに、 $S(t)$: 各時刻における土圧合力 (tf)

$r_{\max}$: 落下位置からの積分範囲 (=2.5m)

この表からわかるように、土圧の計測値にはばらつきが大きく、それぞれの実験条件に対して定量的な評価を導くことが困難であるので、ここでは特定の条件 (重錘重量1tf、落下高さ10m) での実測値を基準にして定性的および相対的な評価を行う。

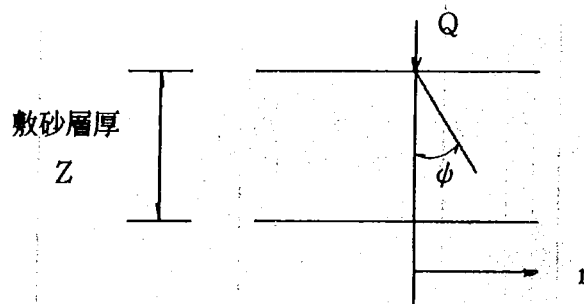


図-4.12 Fröhlichによる鉛直土圧

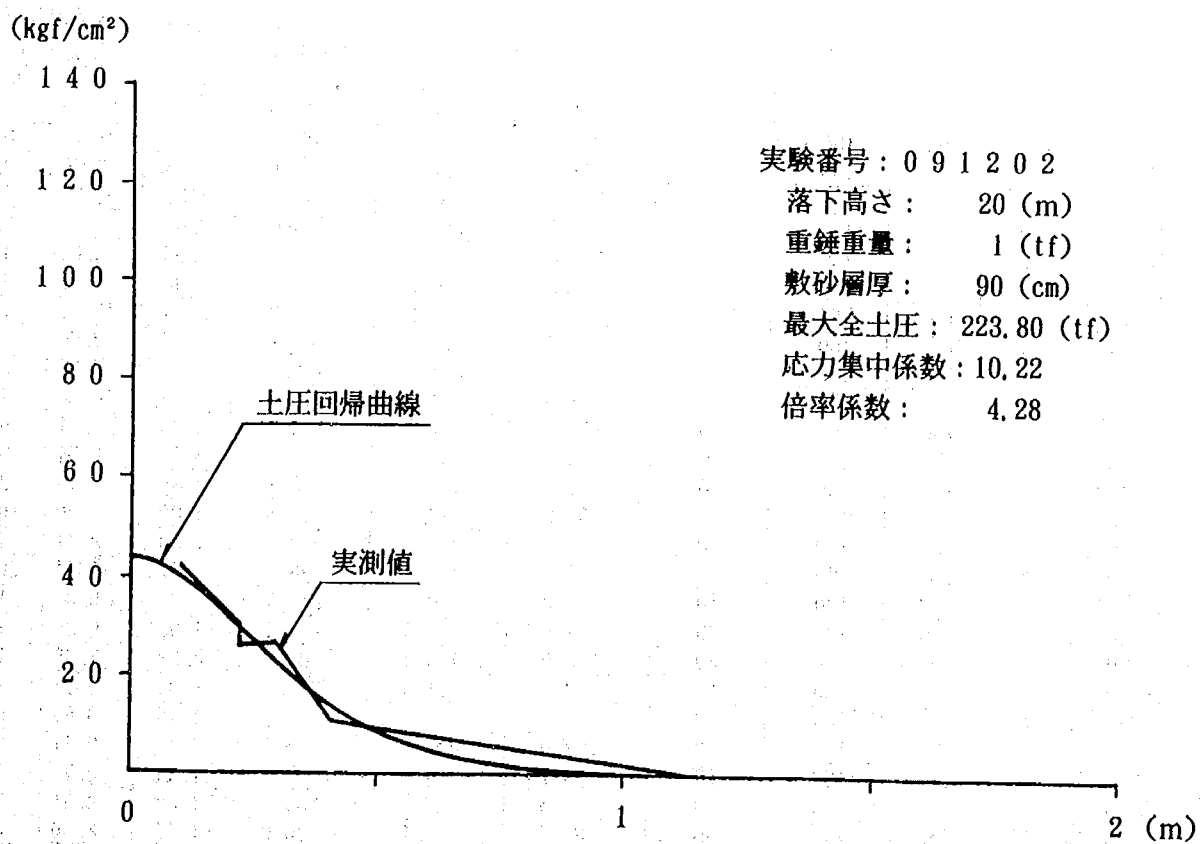
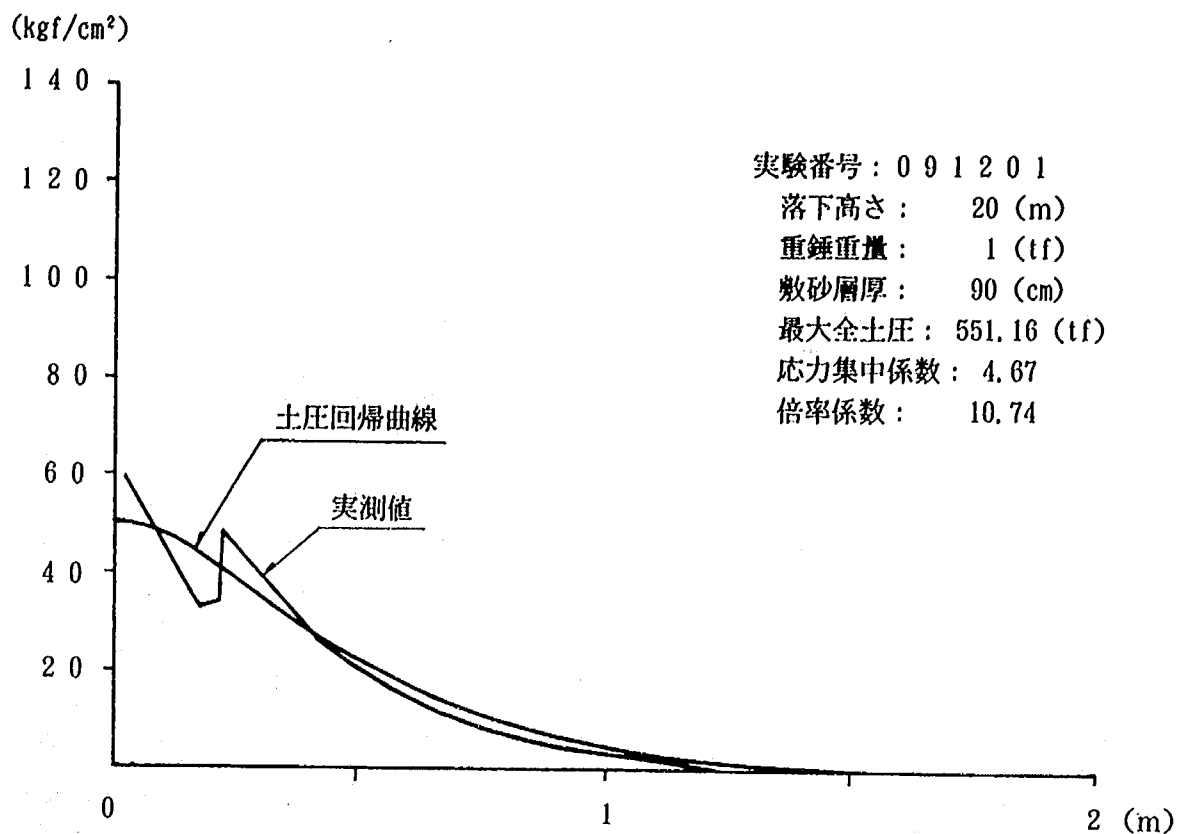


図-4.13 土圧の実測データと回帰曲線の例

表-4.4 土圧合力一覧 (3年度)

番号	受験番号	重錘タイプ		敷砂層厚 T(cm)	落下高さ H(m)	重錘加速度 α (G)	重錘衝撃力 P (tf)	土圧合力 S (tf)	S/P	応力 集中 係数	倍率 係数
		重量 W (tf)	直径 D (cm)								
1	091101	1	90	90	10	57.7	57.7	87.2	1.51	13.88	1.04
2	091102	1	90	90	10	75.1	75.1	158.4	2.11	10.57	3.04
3	091201	1	90	90	20	104.1	104.1	551.2	5.30	4.67	10.74
4	091202	1	90	90	20	106.4	106.4	223.8	2.10	10.22	4.28
5	091301	1	90	90	30	147.7	147.7	564.4	3.82	5.12	10.96
6	091302	1	90	90	30	132.7	132.7	574.9	4.33	4.83	11.19
7	093101	3	130	90	10	58.8	176.5	618.2	3.50	3.50	12.27
8	093102	3	130	90	10	59.9	179.6	413.5	2.30	6.70	7.99
9	093201	3	130	90	20	109.1	327.2	1408.0	4.30	3.05	28.33
10	093202	3	130	90	20	106.6	319.7	640.2	2.00	6.26	12.38
11	093302	3	130	90	30	163.0	489.1	1221.7	2.50	4.24	23.85
12	093303	3	130	90	30	142.9	428.7	819.8	1.91	5.98	15.82
13	095101	5	155	90	10	58.8	294.0	670.1	2.28	6.65	12.95
14	095102	5	155	90	10	57.4	287.0	412.3	1.44	9.88	7.93
15	095201	5	155	90	20	99.3	496.6	2683.4	5.40	1.48	64.47
16	095202	5	155	90	20	104.7	523.7	948.7	1.81	5.21	18.33
17	121101	1	90	120	10	54.6	54.6	117.2	2.14	14.73	1.27
18	121102	1	90	120	10	51.0	51.0	312.9	6.13	4.65	3.44
19	121201	1	90	120	20	100.4	100.4	481.9	4.80	4.65	5.34
20	121202	1	90	120	20	111.8	111.8	434.8	3.89	6.95	4.75
21	121301	1	90	120	30	144.3	144.3	746.2	5.17	3.76	8.52
22	121302	1	90	120	30	141.4	141.4	554.2	3.92	5.48	6.12
23	123101	3	130	120	10	53.3	160.0	513.4	3.21	4.99	5.67
24	123102	3	130	120	10	51.7	155.2	270.2	1.74	11.09	2.93
25	123201	3	130	120	20	74.3	222.9	652.5	2.93	7.63	7.11
26	123202	3	130	120	20	96.1	288.2	974.5	3.38	5.24	10.73
27	123301	3	130	120	30	102.8	308.4	1482.4	4.81	3.64	17.01
28	123302	3	130	120	30	103.9	311.8	1327.4	4.26	3.97	15.06
29	125101	5	155	120	10	44.8	223.8	301.3	1.35	10.93	3.27
30	125102	5	155	120	10	46.6	232.9	814.0	3.50	4.98	9.01
31	125201	5	155	120	20	74.6	373.2	1372.1	3.68	4.08	15.45
32	125202	5	155	120	20	87.0	435.2	1331.5	3.06	4.45	14.84
33	125301	5	155	120	30	91.7	458.5	1807.4	3.94	2.44	22.62
34	151101	1	90	150	10	60.2	60.2	126.2	2.09	15.20	0.88
35	151102	1	90	150	10	63.8	63.8	105.2	1.65	21.14	0.73
36	151201	1	90	150	20	84.9	84.9	287.1	3.38	3.50	2.23
37	151202	1	90	150	20	106.6	106.6	492.4	4.62	4.32	3.66
38	151301	1	90	150	30	113.4	113.4	317.6	2.80	7.39	2.24
39	151302	1	90	150	30	154.6	154.6	564.3	3.65	5.02	4.10
40	153101	3	130	150	10	41.2	126.7	612.8	4.96	4.41	4.54
41	153102	3	130	150	10	41.0	123.1	249.8	2.03	12.22	1.74
42	153201	3	130	150	20	75.2	225.6	400.2	1.77	12.00	2.79
43	153202	3	130	150	20	78.3	234.9	498.3	2.12	9.62	3.49
44	153301	3	130	150	30	101.6	304.8	579.6	1.90	10.86	4.05
45	153302	3	130	150	30	113.9	341.6	976.2	2.86	5.71	6.99
46	155101	5	155	150	10	38.6	193.0	553.2	2.87	6.51	3.92
47	155102	5	155	150	10	39.7	198.7	573.1	2.88	7.15	3.98
48	155201	5	155	150	20	62.6	313.0	1355.8	4.33	3.29	10.71
49	155202	5	155	150	20	69.6	348.2	638.7	1.83	8.01	4.49
50	155301	5	155	150	30	93.4	467.1	2248.3	4.81	2.24	20.25
51	181101	1	90	180	10	60.2	60.2	217.7	3.62	6.34	1.10
52	181201	1	90	180	20	107.5	107.5	209.1	1.95	6.85	1.04
53	181301	1	90	180	30	118.0	118.0	381.5	3.23	7.38	1.89
54	183101	3	130	180	10	43.9	131.8	374.2	2.84	6.94	1.87
55	183201	3	130	180	20	77.8	233.5	1028.1	4.40	3.83	5.73
56	183301	3	130	180	30	102.0	306.1	653.1	2.13	9.47	3.19
57	185101	5	155	180	10	39.1	195.7	282.2	1.44	3.79	1.58
58	185201	5	155	180	20	62.5	312.5	398.5	1.28	4.41	2.14
59	185301	5	155	180	30	99.7	498.4	720.0	1.44	8.80	3.53

(3) 敷砂層厚と土圧合力

図-4.14に重錘重量1tf、落下高さ10m、敷砂層厚90cmの時の最大土圧合力で基準化した最大土圧合力と敷砂層厚の関係を示す。この図から、最大土圧合力は落下高さおよび重錘重量とともに増加し、敷砂層厚の増加に伴い減少することがわかる。また、敷砂層厚の増加に伴う減少は、落下高さおよび重錘重量の増加に伴い顕著となっている。

(4) 土圧の分布幅

ここでは、時刻による分布幅の変化は無視して、重錘衝撃力が終了するまでに発生する土圧の最大分布幅を検討する。

衝撃土圧計には、無負荷状態で最大1.5kgf/cm²のノイズが発生している。そこで、土圧計L1～L14の中で最大値が1.5kgf/cm²以上の土圧を示すもので、重錘落下位置から最も遠い土圧計の位置から重錘落下位置までの水平距離の2倍を、土圧の分布幅と定義する。表-4.5に結果の一覧表を示す。

1) 重錘重量と分布幅

図-4.15に落下高さごとの敷砂層厚と分布幅の関係を示す。この図から、重錘重量1tfと3tf、5tfとの間には分布幅に大きな差異が認められるが、3tfと5tfとの間にはいずれの敷砂層厚においても明確な差が認められない。落下高さが10mの場合、いずれの重錘重量でも敷砂層厚の増加に伴い分布幅も増加する傾向があるが、落下高さが20m、30m、重錘重量が3tf、5tfの場合、敷砂層厚が120cm以上になると、分布幅が土圧計の測定範囲限界の約4mに達し、傾向を把握できない。

2) 落下高さと分布幅

図-4.16に重錘重量ごとの敷砂層厚と分布幅の関係を示す。この図から、落下高さ10mと20m、30mの間には分布幅に差異が見られるが、20mと30mの間には明確な差が認められない。

4. 3 平成4年度の実験結果

3年度と同様に、重錘重量、落下高さ、敷砂層厚を変えて実験を行った。各実験ケースごとの実験条件、測定した重錘加速度、衝撃力、貫入量、敷砂の含水比、乾燥密度、計算衝撃力の結果を一覧にしてまとめたものを表-4.6に示す。

平成3年度は、敷砂の締固めの際に振動プレートを用いて3回転圧を行ったが、4年度は転圧回数を1回に減らし、敷砂層の締固めを緩くした状態で行った（実験番号33を除く）。3年度及び4年度の敷砂層の含水比、湿潤密度、乾燥密度の測定結果を表-4.7に示す。乾燥密度では、4年度は3年度に比べて2.7%小さいことがわかる。

4. 3. 1 重錘衝撃力

(1) 加速度波形

重錘重量が1tfの場合の波形を図-4.17に示す。3年度と同様の傾向が見られるが、静止時間が20msec程度長くなっている。重錘重量1tfの場合100～120msec、3tfの場合120～150msec、5tfの場合130～160msec

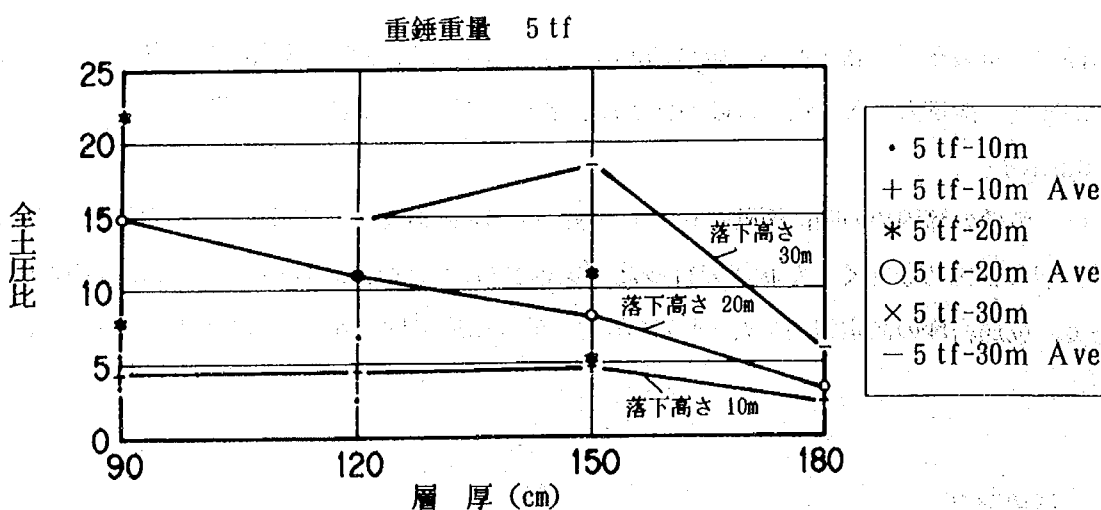
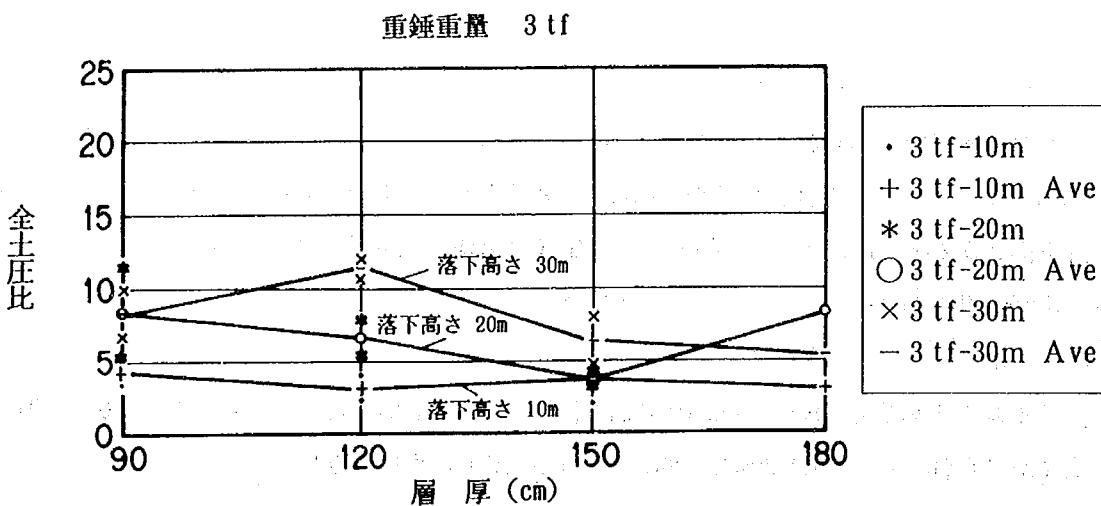
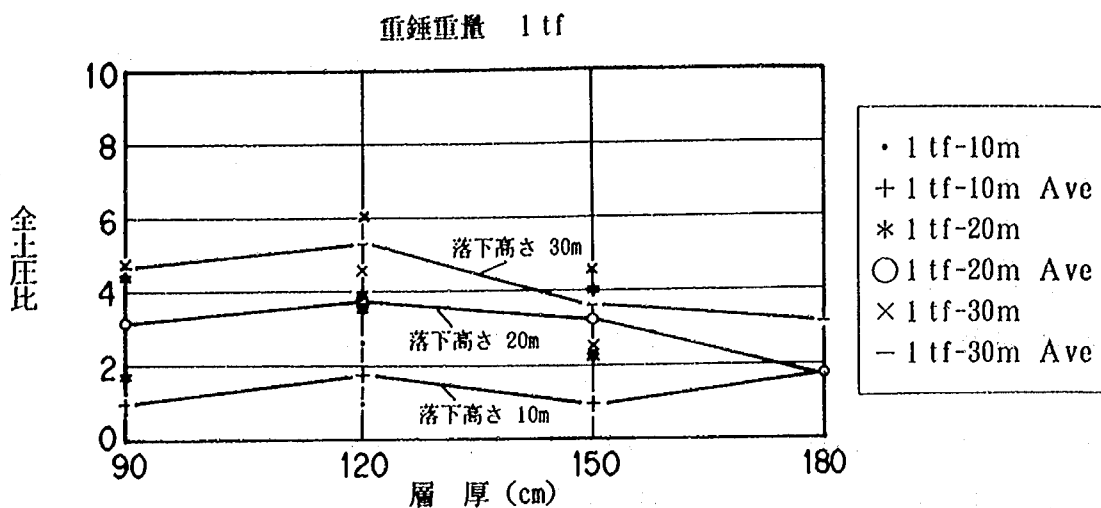


図-4.14 (a) 敷砂層厚と全土圧比の関係 (その1)

(全土圧比は重錘重量 1 tf、落下高さ 10m、

敷砂層厚 90cm の平均全土圧を 1 としたときの値)

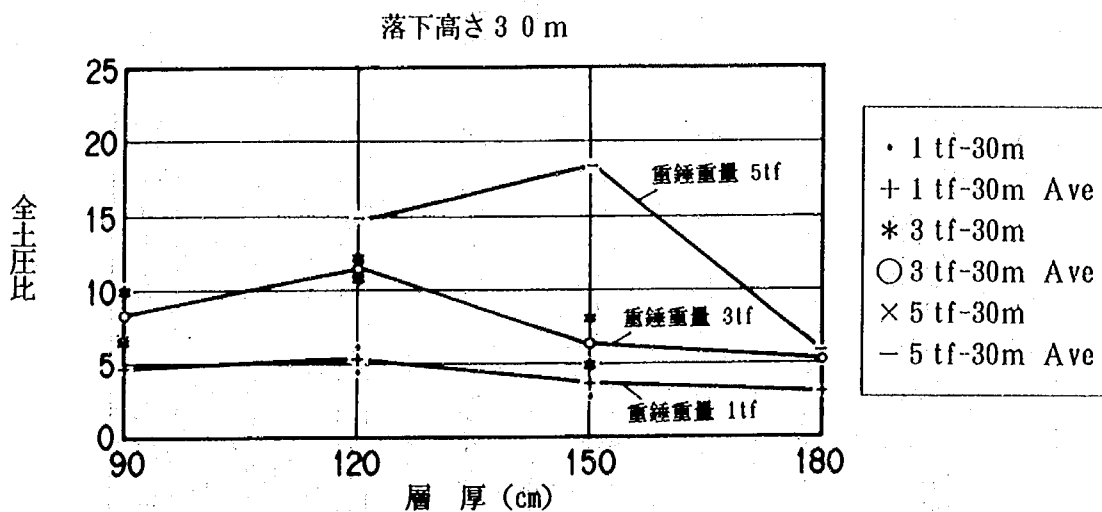
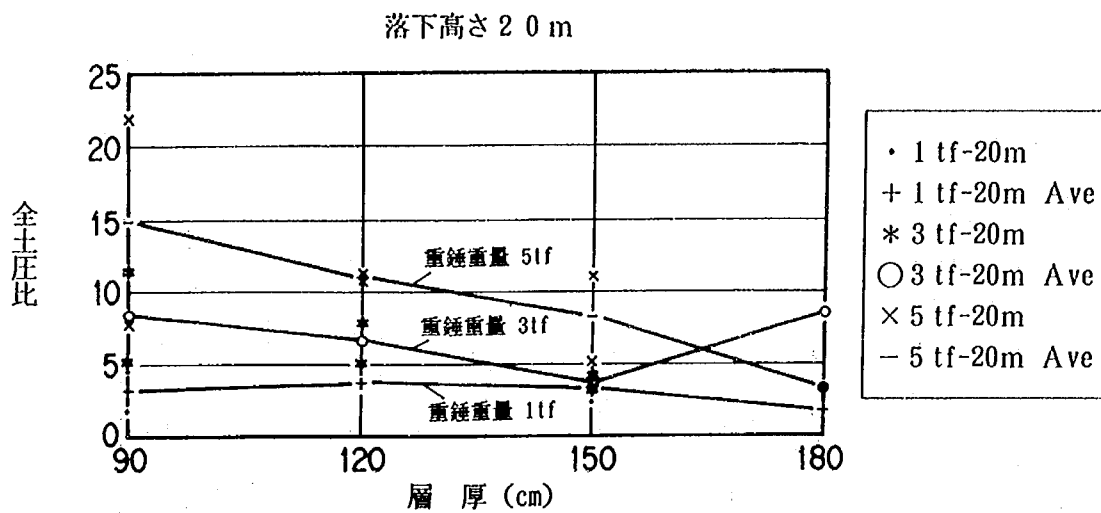
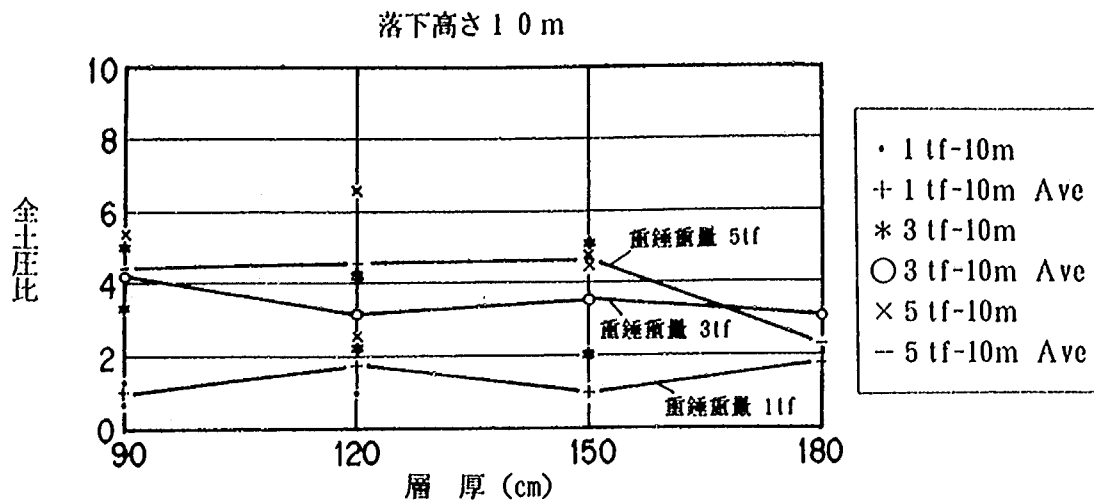


図-4.14 (b) 敷砂層厚と全土圧比の関係 (その2)

(全土圧比は重錘重量 1 tf、落下高さ 10m、

敷砂層厚 90cm の平均全土圧を 1 としたときの値)

表-4.5 土圧分布幅一覧(3年度)

番号	受験番号	重錘タイプ		敷砂層厚 T(cm)	落下高さ H(m)	衝撃 荷重計 番号	判定 距離 R(m)	分布幅 B(m)
		重量 W(lf)	直径 D(cm)					
1	091101	1	90	90	10	L8	0.80	1.59
2	091102	1	90	90	10	L8	0.88	1.76
3	091201	1	90	90	20	L10	1.22	2.44
4	091202	1	90	90	20	L10	1.20	2.41
5	091301	1	90	90	30	L10	1.20	2.40
6	091302	1	90	90	30	L10	1.22	2.43
7	093101	3	130	90	10	L11	1.40	2.80
8	093102	3	130	90	10	L10	1.16	2.32
9	093201	3	130	90	20	L11	1.45	2.90
10	093202	3	130	90	20	L14	2.01	4.01
11	093302	3	130	90	30	L14	2.22	4.43
12	093303	3	130	90	30	L10	1.26	2.52
13	095101	5	155	90	10	L10	1.19	2.38
14	095102	5	155	90	10	L10	1.22	2.44
15	095201	5	155	90	20	L12	1.62	3.23
16	095202	5	155	90	20	L10	1.18	2.35
17	121101	1	90	120	10	L10	1.24	2.48
18	121102	1	90	120	10	L10	1.17	2.34
19	121201	1	90	120	20	L10	1.26	2.52
20	121202	1	90	120	20	L11	1.42	2.84
21	121301	1	90	120	30	L11	1.46	2.92
22	121302	1	90	120	30	L10	1.30	2.60
23	123101	3	130	120	10	L12	1.59	3.18
24	123102	3	130	120	10	L10	1.14	2.27
25	123201	3	130	120	20	L14	2.03	4.05
26	123202	3	130	120	20	L14	2.01	4.02
27	123301	3	130	120	30	L14	1.99	3.97
28	123302	3	130	120	30	L14	1.97	3.93
29	125101	5	155	120	10	L11	1.41	2.82
30	125102	5	155	120	10	L11	1.48	2.95
31	125201	5	155	120	20	L14	2.00	4.00
32	125202	5	155	120	20	L14	2.00	3.99
33	125301	5	155	120	30	L14	2.05	4.09
34	151101	1	90	150	10	L10	1.17	2.34
35	151102	1	90	150	10	L10	1.20	2.40
36	151201	1	90	150	20	L11	1.36	2.71
37	151202	1	90	150	20	L11	1.52	3.05
38	151301	1	90	150	30	L11	1.43	2.86
39	151302	1	90	150	30	L14	2.06	4.12
40	153101	3	130	150	10	L12	1.62	3.23
41	153102	3	130	150	10	L12	1.61	3.22
42	153201	3	130	150	20	L12	1.62	3.24
43	153202	3	130	150	20	L13	1.81	3.61
44	153301	3	130	150	30	L14	1.89	3.78
45	153302	3	130	150	30	L14	2.02	4.03
46	155101	5	155	150	10	L11	1.46	2.92
47	155102	5	155	150	10	L12	1.62	3.23
48	155201	5	155	150	20	L13	2.06	4.12
49	155202	5	155	150	20	L14	1.80	3.60
50	155301	5	155	150	30	L14	2.05	4.09
51	181101	1	90	180	10	L11	1.40	2.81
52	181201	1	90	180	20	L11	1.39	2.78
53	181301	1	90	180	30	L11	1.40	2.80
54	183101	3	130	180	10	L11	1.48	2.96
55	183201	3	130	180	20	L14	2.09	4.18
56	183301	3	130	180	30	L14	2.08	4.15
57	185101	5	155	180	10	L13	1.78	3.55
58	185201	5	155	180	20	L14	1.99	3.97
59	185301	5	155	180	30	L14	1.99	3.97

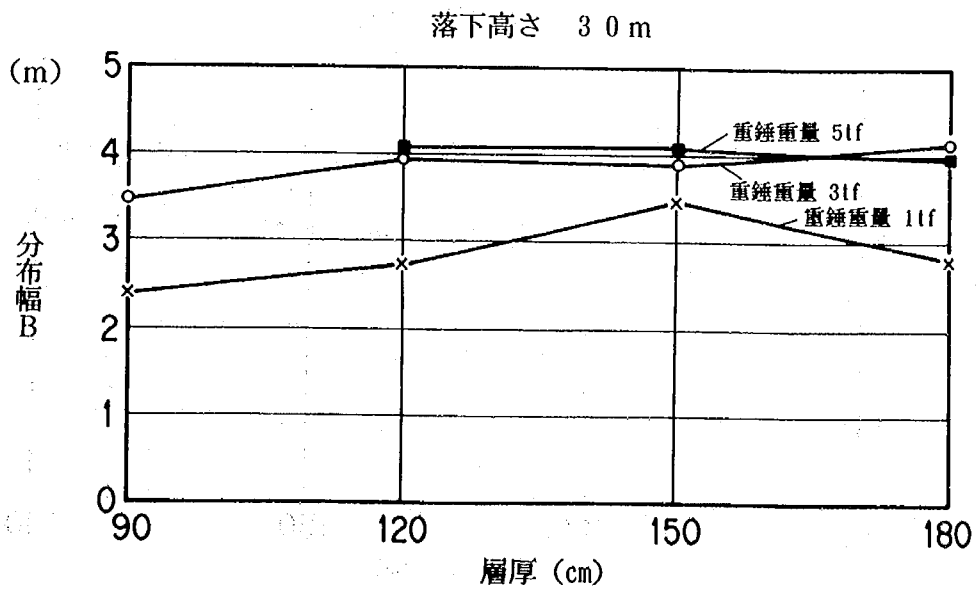
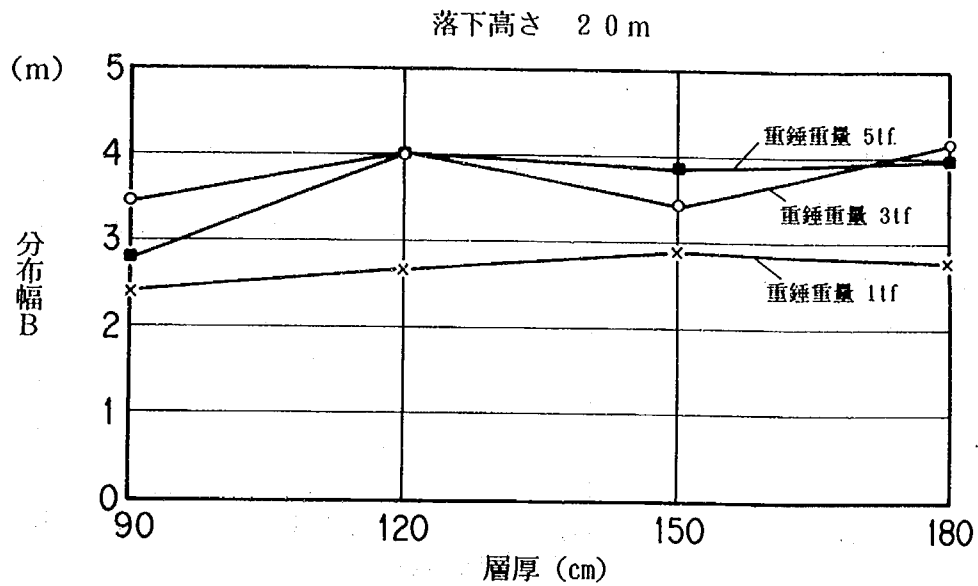
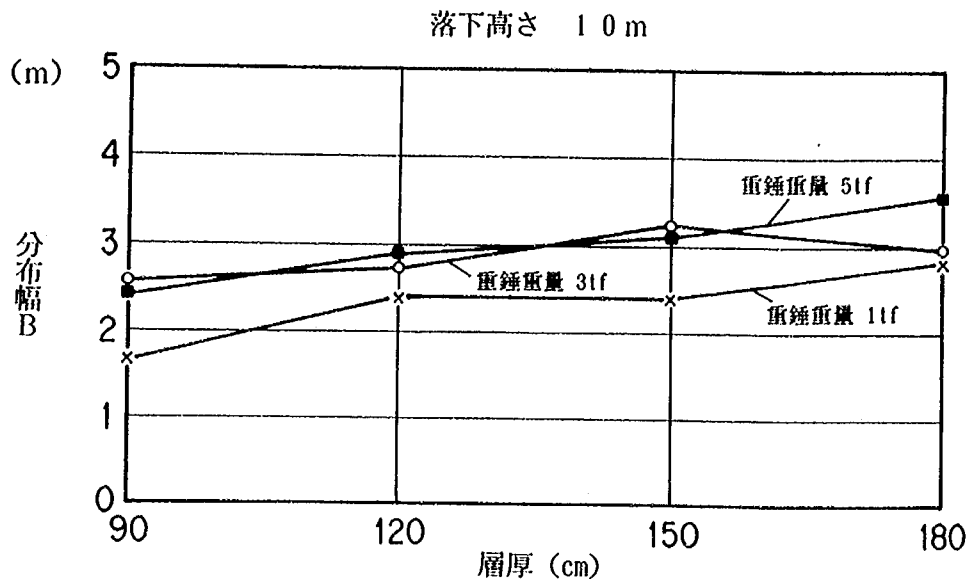


図-4.15 敷砂層厚と分布幅Bの関係 (その1)

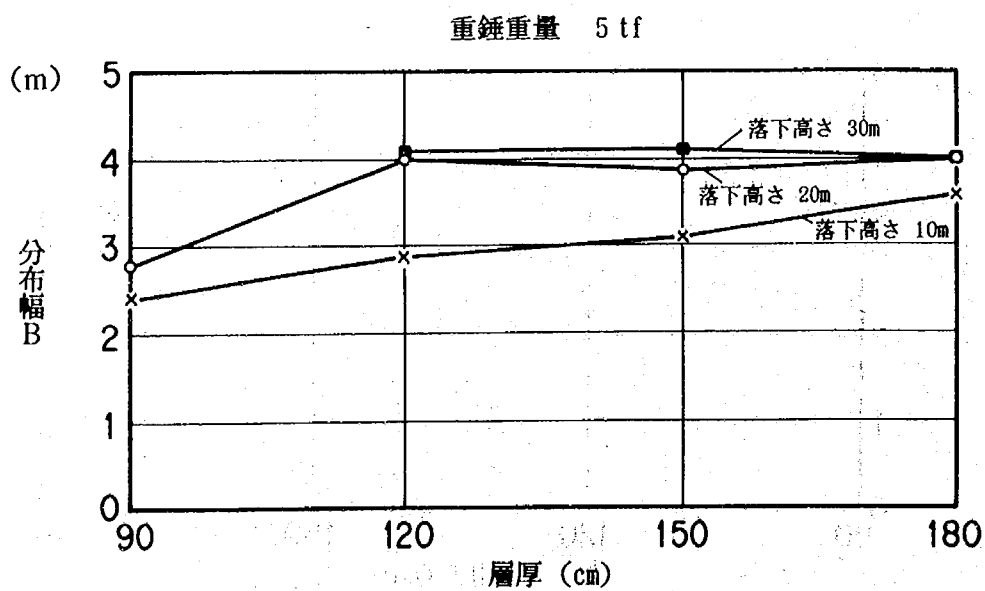
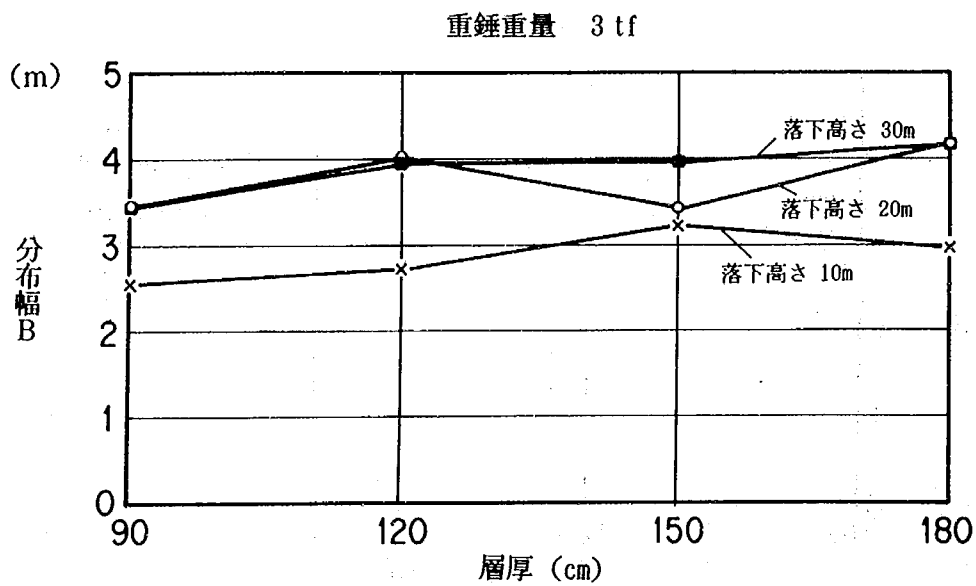
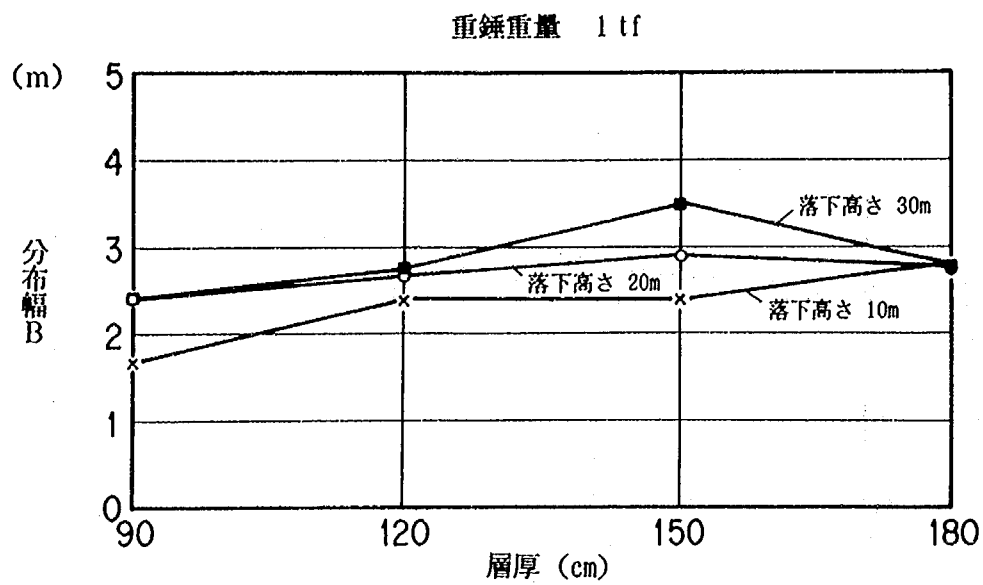


図-4.16 敷砂層厚と分布幅Bの関係 (その2)

表-4.6 実験結果一覧(4年度)

番号	実験 タイプ	実験番号	重錘タイプ		敷砂層厚 T(cm)	落下高さ H(m)	転圧 回数	重錘加速度 α (G)	重錘衝撃力 P(tf)	計 算 衝 撃 力				貫入量 C(cm)	含水比 w(%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)
			重量 W(tf)	直径 D(cm)						$\lambda=100$		$\lambda=200$				
										P_{100} (tf)	P/P_{100}	P_{200} (tf)	P/P_{200}			
1	B	B091101	1	90	90	10	1	63.1	63.1	61.7	1.02	81.4	0.78	30.8	12.9	1.487
2		B091201	1	90	90	20	1	97.7	97.7	93.5	1.05	123.3	0.79	42.0	11.4	1.484
3		B091301	1	90	90	30	1	131.5	131.5	119.2	1.10	157.3	0.84	51.6	9.4	1.467
4		B093101	3	130	90	10	1	59.1	177.3	128.3	1.38	169.3	1.05	39.5	10.3	1.445
5		B093201	3	130	90	20	1	87.6	262.7	194.4	1.35	256.5	1.02	51.8	10.6	1.452
6		B093301	3	130	90	30	1	118.3	355.0	248.0	1.43	327.2	1.08	59.5	11.1	1.441
7		B095101	5	155	90	10	1	56.2	281.0	180.3	1.56	237.9	1.18	42.3	11.0	1.472
8		B095201	5	155	90	20	1	88.8	444.2	273.3	1.63	360.6	1.23	57.6	8.2	1.470
9		B121101	1	90	120	10	1	54.2	54.2	61.7	0.88	81.4	0.67	32.9	11.6	1.453
10		B121202	1	90	120	20	1	79.7	79.7	93.5	0.85	123.3	0.65	50.7	14.3	1.478
11		B121301	1	90	120	30	1	119.4	119.4	119.2	1.00	157.3	0.76	55.7	10.6	1.465
12		B123101	3	130	120	10	1	36.6	109.8	128.3	0.86	169.3	0.65	46.6	12.4	1.455
13		B123201	3	130	120	20	1	61.9	185.7	194.4	0.96	256.5	0.72	64.4	11.1	1.459
14		B123303	3	130	120	30	1	79.0	237.0	248.0	0.96	327.2	0.72	69.9	10.8	1.452
15		B125101	5	155	120	10	1	39.2	196.2	180.3	1.09	237.9	0.82	48.6	12.0	1.440
16		B125201	5	155	120	20	1	65.0	324.8	273.3	1.19	360.6	0.90	60.7	13.2	1.453
17		B125301	5	155	120	30	1	91.7	458.7	348.6	1.32	460.0	1.00	70.2	11.9	1.447
18		B151101	1	90	150	10	1	60.0	60.0	61.7	0.97	81.4	0.74	36.4	16.5	1.509
19		B151201	1	90	150	20	1	71.6	71.6	93.5	0.77	123.3	0.58	49.8	12.2	1.473
20		B151301	1	90	150	30	1	106.4	106.4	119.2	0.89	157.3	0.68	58.1	10.9	1.443
21		B153102	3	130	150	10	1	35.3	105.9	128.3	0.83	169.3	0.63	49.4	11.4	1.463
22		B153202	3	130	150	20	1	56.6	169.8	194.4	0.87	256.5	0.66	63.3	11.1	1.464
23		B153301	3	130	150	30	1	74.2	222.6	248.0	0.90	327.2	0.68	69.8	11.2	1.461
24		B155101	5	155	150	10	1	35.0	175.2	180.3	0.97	237.9	0.74	51.0	12.8	1.459
25		B155201	5	155	150	20	1	59.8	298.9	273.3	1.09	360.6	0.83	60.9	14.2	1.473
26		B155301	5	155	150	30	1	85.9	429.6	348.6	1.23	460.0	0.93	72.4	14.5	1.483
27	Q	Q151201	1	90	150	20	1	99.6	99.6	93.5	1.07	123.3	0.81	45.3	12.0	1.477
28		Q153201	3	130	150	20	1	73.0	219.1	194.4	1.13	256.5	0.85	57.8	13.8	1.491
29		Q155201	5	155	150	20	1	59.9	299.3	273.3	1.09	360.6	0.83	60.6	12.8	1.473
30	R	R151201	1	90	150	20	1	68.6	68.6	93.5	0.73	123.3	0.56	50.7	11.3	1.509
31		R153202	3	130	150	20	1	65.5	196.6	194.4	1.01	256.5	0.77	62.3	12.5	1.492
32		R155201	5	155	150	20	1	61.0	305.0	273.3	1.12	360.6	0.85	59.6	12.2	1.467
33	S	S123201	3	130	120	20	5	84.7	254.1	194.4	1.31	256.5	0.99	46.5	11.3	1.547

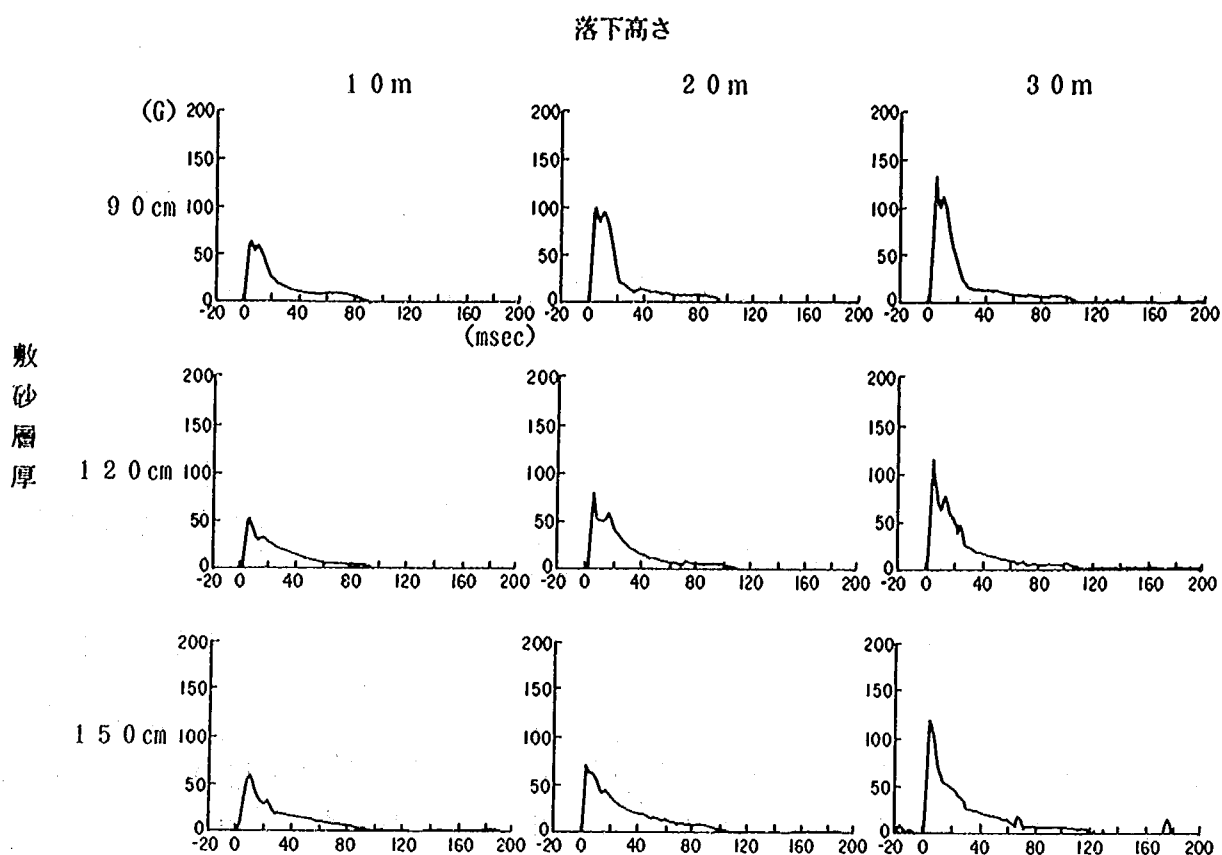
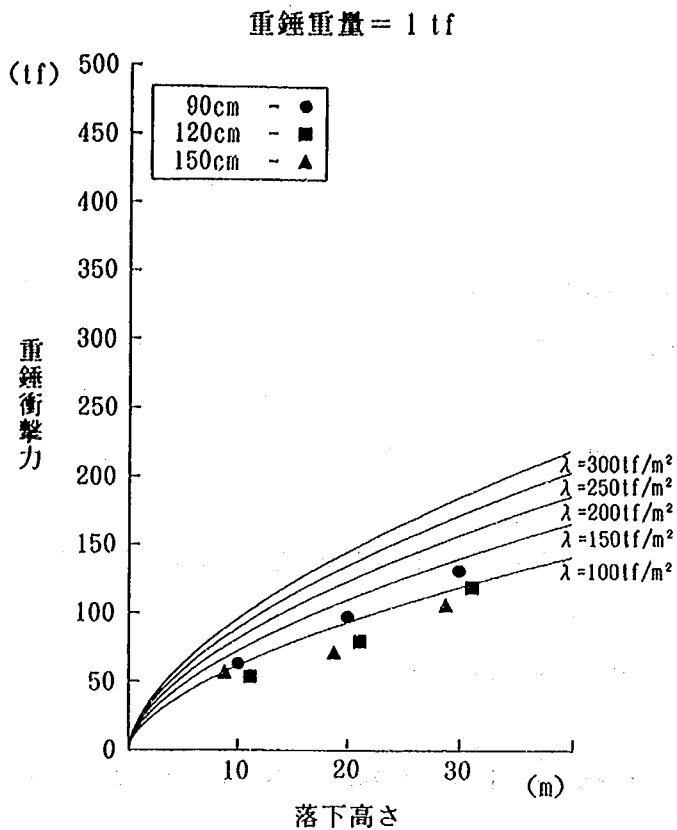


図-4.17 重錘加速度波形 (重錘重量 1 tf)

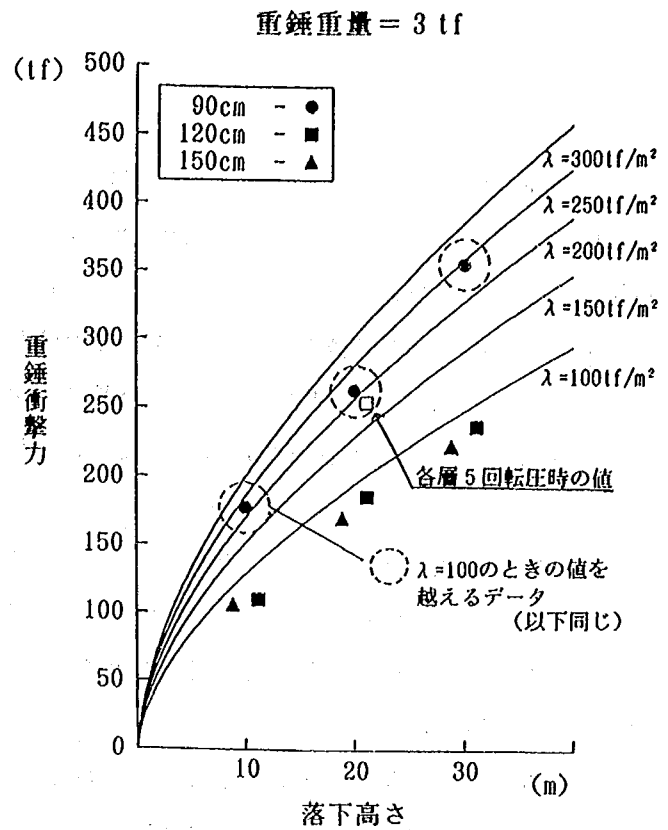
表-4.7 含水比および各密度の比較

		含水比	湿潤密度	乾燥密度
3 年 度	データ数	59	59	59
	データ幅	8.4 ~ 12.9 (%)	1.610 ~ 1.730 (g/cm ³)	1.484 ~ 1.539 (g/cm ³)
	平均値	11.1 (%)	1.676 (g/cm ³)	1.508 (g/cm ³)
	変動係数	7.4 (%)	1.25 (%)	0.74 (%)
4 年 度	データ数	32	32	32
	データ幅	8.1 ~ 16.5 (%)	1.590 ~ 1.758 (g/cm ³)	1.440 ~ 1.509 (g/cm ³)
	平均値	11.9 (%)	1.643 (g/cm ³)	1.467 (g/cm ³)
	変動係数	13.3 (%)	2.30 (%)	1.23 (%)

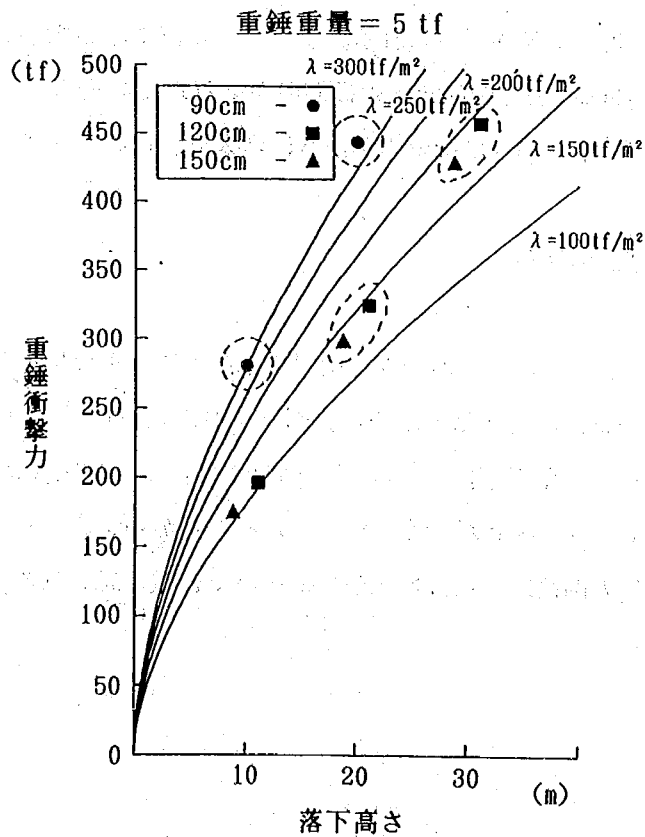
(注) 実験タイプSのデータは転圧回数が異なるため含まれていない。



*グラフ中の実線は、便覧式を表す。



*グラフ中の実線は、便覧式を表す。



*グラフ中の実線は、便覧式を表す。

図-4.18 落下高さと重錘衝撃力の関係

の範囲である。また、加速度の最初のピークに達するまでの時間は、5～10msecであり、3年度とほぼ同じである。

(2) 落下高さと重錘衝撃力

図-4.18に重錘重量ごとの落下高さと重錘衝撃力の関係を示す。図中の実線は式(4.1)においてラーメの定数 λ をそれぞれ100、150、200、250、300tf/m²とおいた線である。この図から、敷砂層厚90cmあるいは重錘重量5tfの場合を除き、ほぼ $\lambda=100\text{tf/m}^2$ とした値と一致していることがわかる。したがって、以下の比較検討においては理論値として $\lambda=100\text{tf/m}^2$ の値を用いる。また今回の実験では、重錘重量3tf、落下高さ20m、敷砂層厚120cmの条件で5回転圧した場合の実験を行ったので、その結果を図の中に□で示している。この衝撃力は、 $\lambda=200\text{tf/m}^2$ とした値とほぼ同じであり、このことは3年度に行った予備実験の結果と一致する。

重錘衝撃力を理論式で比較すると、3年度が $\lambda=200\text{tf/m}^2$ 、4年度が $\lambda=100\text{tf/m}^2$ とした値とほぼ一致しており、締固め密度を緩くした4年度の方が小さいことがわかる。

なお、参考に重錘重量ごとの落下高さと重錘加速度の関係を図-4.19に示す。

(3) 敷砂層厚と重錘衝撃力

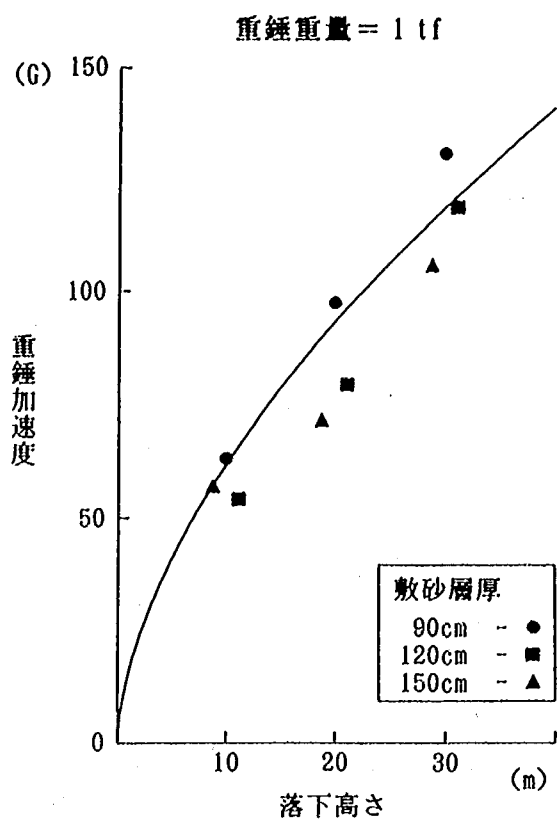
図-4.20に重錘重量ごとの敷砂層厚と重錘衝撃力の関係を示す。図中の破線は $\lambda=100\text{tf/m}^2$ とした線であり、一点鎖線は重錘の直径を示した線である。

この図から3年度と同様な傾向が見られる。同一落下高さにおいては、重錘重量が1tfのときは重錘衝撃力は敷砂層厚によりほとんど変化しない。他方、重錘重量が3tf、5tfのときは敷砂層厚が増加すると重錘衝撃力が減少し、ある一定値に近づく傾向が見られる。また、一定値になる敷砂層厚はほぼ重錘の直径と一致し、重錘重量5tf、落下高さ30mの場合を除き、敷砂層厚がそれ以上の場合は理論値に等しいかそれ以下である。一方、敷砂層厚が直径以下の場合は衝撃力が急激に増大し、理論値を越える様子がわかる。

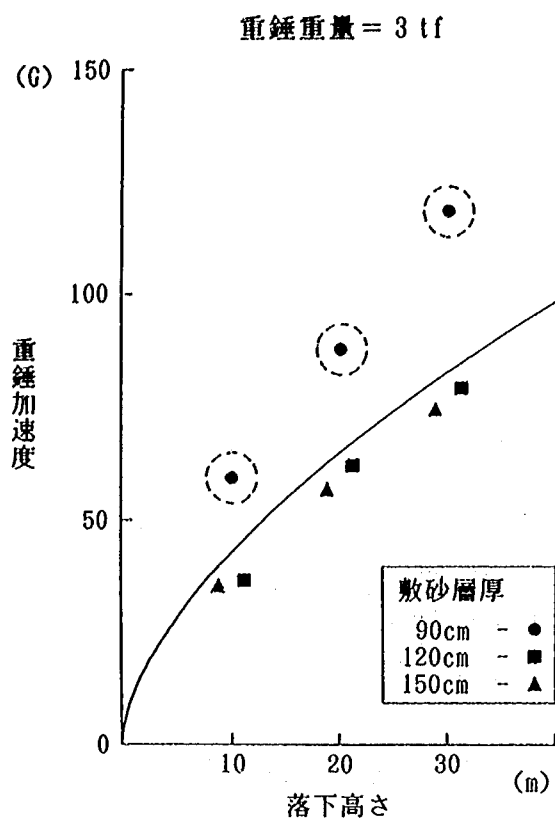
4. 3. 2 重錘貫入量および砂の挙動

(1) 重錘の貫入過程

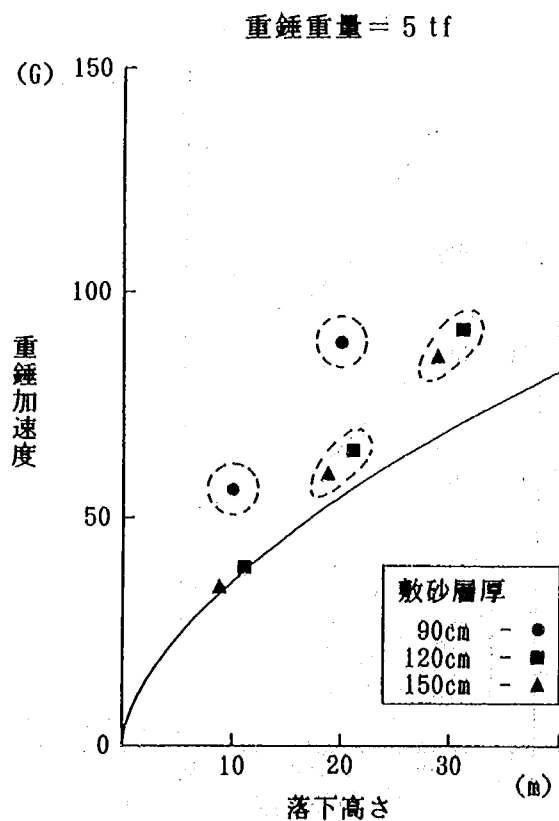
重錘が敷砂層に衝突してから静止するまでの過程を把握するために、重錘に取り付けた加速度計から測定された加速度を時間で2回積分を行い貫入量を求めた。図-4.21に重錘重量3tf、落下高さ30m、敷砂層厚120cmの場合の各積分波形、図-4.22に実測した貫入量と積分した貫入量の比較結果をそれぞれ示す。なお、図-4.22中の実線は傾きが1であり、両者がよく一致していることがわかる。したがって、重錘が敷砂層に衝突してから静止するまでの貫入過程は、積分貫入量で推測ができると思われる。



*図中の実線は、便覧式 ($\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$) を表す。

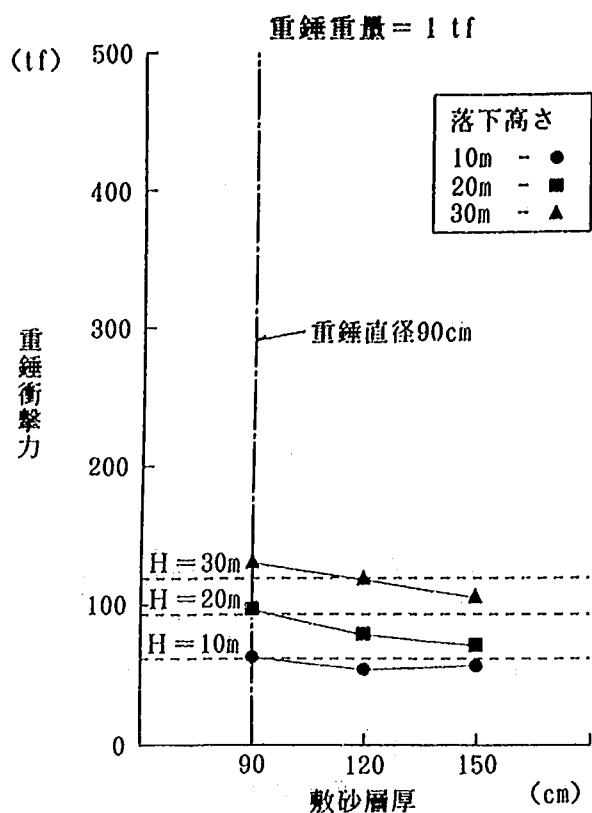


*図中の実線は、便覧式 ($\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$) を表す。

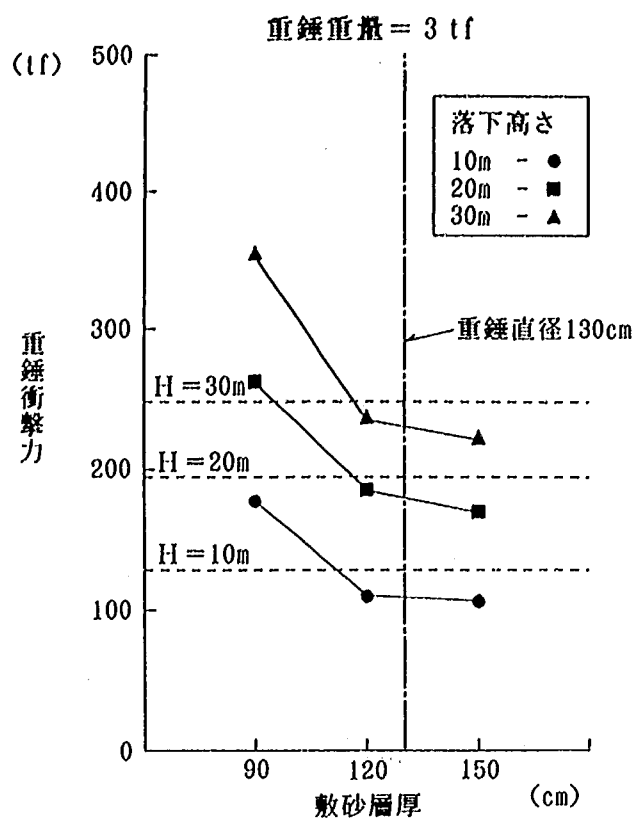


*図中の実線は、便覧式 ($\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$) を表す。

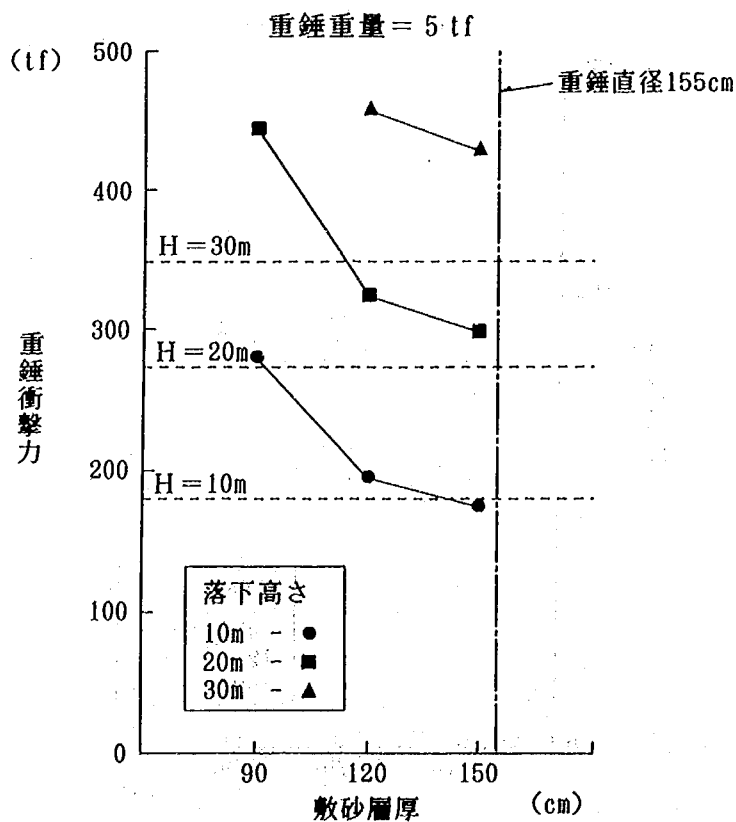
図-4.19 落下高さと重錘加速度の関係



*図中の破線は、便覧式 ($\lambda=100\text{tf/m}^2$) を表す。



*図中の破線は、便覧式 ($\lambda=100\text{tf/m}^2$) を表す。



*図中の破線は、便覧式 ($\lambda=100\text{tf/m}^2$) を表す。

図-4.20 敷砂層厚と重錘衝撃力の関係

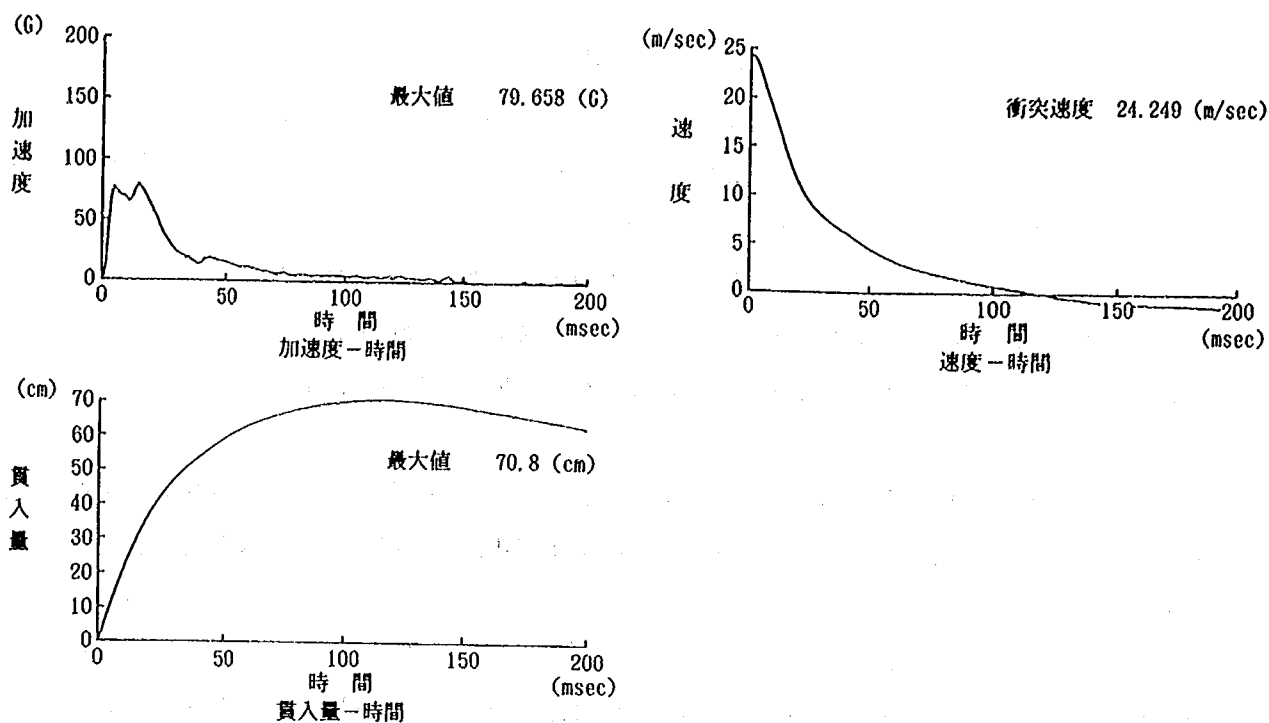


図-4.21 重錘加速度の積分波形例 (実験番号B123303、重錘重量3tf、落下高さ30m、敷砂層厚120cm)

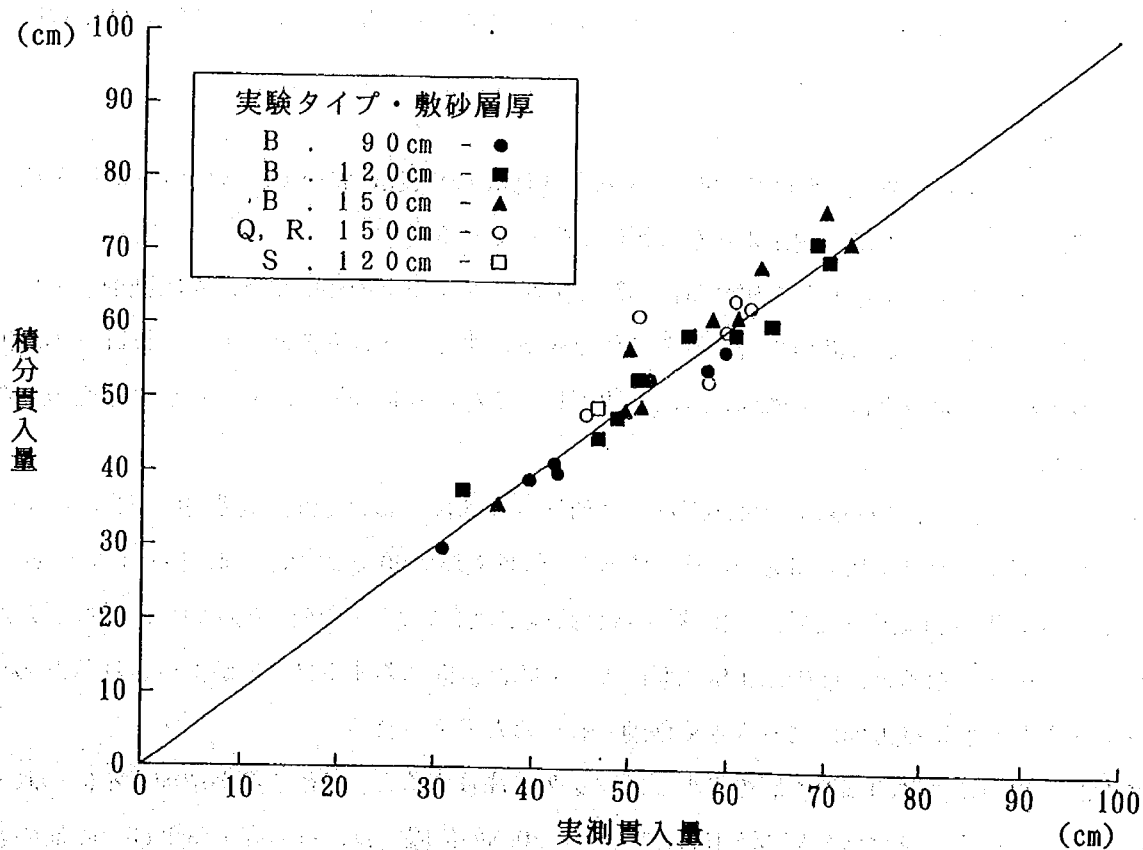


図-4.22 実測貫入量と積分貫入量

(2) 落下高さと重錘貫入量

図-4.23に重錘重量ごとの落下高さと重錘貫入量の関係を示す。図中の実線は式(4.3)においてラーメの定数 λ を 100tf/m^2 とした理論値を示した線である。この図から、3年度と同様に落下高さが高くなれば貫入量も大きくなり、いずれのケースとも理論値と等しいかそれ以下となっているが、重錘重量が大きくなるにつれて、理論値と実験値との差が広がっていることがわかる。

表-4.8、図-4.24に3年度と4年度の同一条件における重錘貫入量の比較結果を示す。図中の実線は傾きが1であるので、4年度の貫入量は3年度の貫入量に比べて大きくなっていることがわかる。このことは、式(4.3)においてラーメ定数が小さくなると貫入量は大きくなることから確認できる。

(3) 敷砂層厚と重錘貫入量

図-4.25に落下高さごとの敷砂層厚と重錘貫入量の関係を示す。図中の破線は $\lambda=100\text{tf/m}^2$ とした理論値である。この図から、いずれの落下高さについても敷砂層厚が増加すると貫入量が増加し、ある一定値に収束する傾向が確認できる。

(4) 重錘衝撃力と重錘貫入量

図-4.26に重錘重量ごとの重錘貫入量と重錘衝撃力の関係を示す。この図から、3年度と同様な傾向が見られる。衝撃力と貫入量はほぼ比例している様子がわかるが、重錘重量、落下高さが同一の条件について見ると、敷砂層厚による貫入量の差は僅かであるが、敷砂層厚が薄くなると貫入量が小さくなり、重錘衝撃力が大きくなる傾向がある。また、破線で囲んだ点は緩衝材の厚さが不足しており、衝撃力は極端に大きい値を示す。

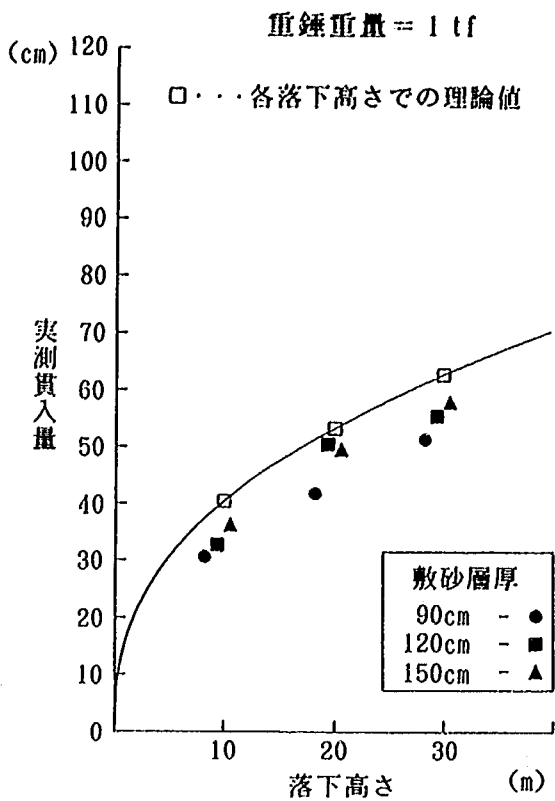
(5) 砂の挙動

重錘重量3tf、落下高さ20m、敷砂層厚90、120および150cmの実験において、敷砂の移動量を測定した結果を図-4.27に示す。4年度は、測定点数を大幅に増やしている。

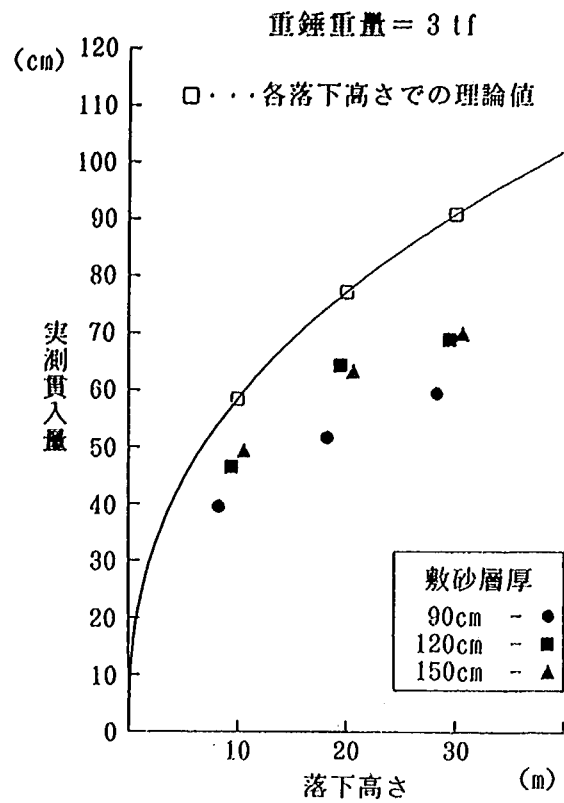
まず、各条件とも重錘落下中心から離れるにつれてアルミブロックの移動量が徐々に減少している。このことから、重錘衝撃力による敷砂の影響範囲を予想できる。また、各敷砂条件とも、重錘直下の範囲内に配置されているアルミブロックは土槽底面の方向へ沈下し、それ以外に配置されているものは側方移動または上昇している傾向がみられる。

土槽中心から水平方向に30cmおよび60cm離れた2列目、3列目においては、敷砂層厚が120cmおよび150cmの場合のアルミブロックは土槽底面方向に移動するが、敷砂層厚が90cmでは横方向に移動している。これは、敷砂層厚が大きい場合は敷砂の鉛直方向に対する自由度が大きいため重錘衝撃力を吸収することができるが、敷砂層厚が小さくなると、敷砂は土槽底面によって鉛直方向に対する自由度が拘束されるため重錘衝撃力が大きくなるとともに横方向により大きく移動するためと考えられる。

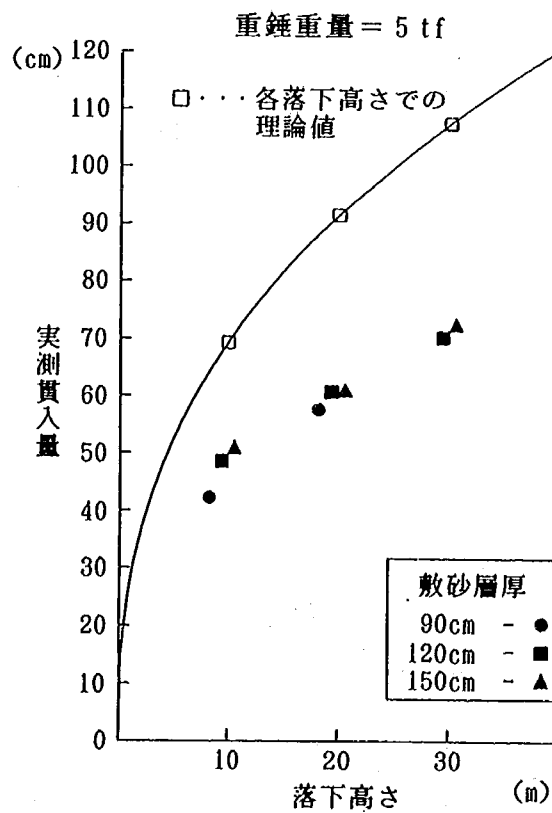
土槽底面から30cmおよび60cmの各層のアルミブロックに注目すると、敷砂層厚が増加するにつれて移動量が徐々に減少してくる。特に敷砂層厚が150cmの場合に30cmの位置では、重錘直下およびその他の範囲でもほとんど移動は見られない。したがって、土槽底面から30cmまでの層には緩衝効果が小さいと考えられる。このことは、図-4.20において敷砂層厚120cmと150cmとで重錘衝撃力に大差がないことから確認できる。



*図中の実線は、便覧式 ($\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$) を表す。



*図中の実線は、便覧式 ($\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$) を表す。



*図中の実線は、便覧式 ($\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$) を表す。

図-4.23 落下高さと実測貫入量の関係

表-4.8 重錘貫入量の比較

重錘タイプ		敷砂層厚 T(cm)	落下高さ H(m)	3年度 貫入量 C3(cm)	4年度 貫入量 C4(cm)	差 C4-C3(cm)
重量 W(tf)	直径 D(cm)					
1	90	90	10	31.2	30.8	-0.4
1	90	90	20	37.4	42.0	4.6
1	90	90	30	43.0	51.6	8.6
3	130	90	10	38.8	39.5	0.7
3	130	90	20	46.0	51.8	5.8
3	130	90	30	51.0	59.5	8.5
5	155	90	10	38.0	42.3	4.3
5	155	90	20	48.2	57.6	9.4
1	90	120	10	30.4	32.9	2.5
1	90	120	20	38.4	50.7	12.3
1	90	120	30	44.0	55.7	11.7
3	130	120	10	35.7	46.6	10.9
3	130	120	20	50.0	64.4	14.4
3	130	120	30	55.8	68.9	13.1
5	155	120	10	40.9	48.6	7.7
5	155	120	20	50.7	60.7	10.0
5	155	120	30	63.7	70.2	6.5
1	90	150	10	29.6	36.4	6.8
1	90	150	20	41.2	49.8	8.6
1	90	150	30	51.3	58.1	6.8
3	130	150	10	39.3	49.4	10.1
3	130	150	20	51.5	63.3	11.8
3	130	150	30	58.3	69.8	11.5
5	155	150	10	46.0	51.0	5.0
5	155	150	20	54.8	60.9	6.1
5	155	150	30	65.5	72.4	6.9

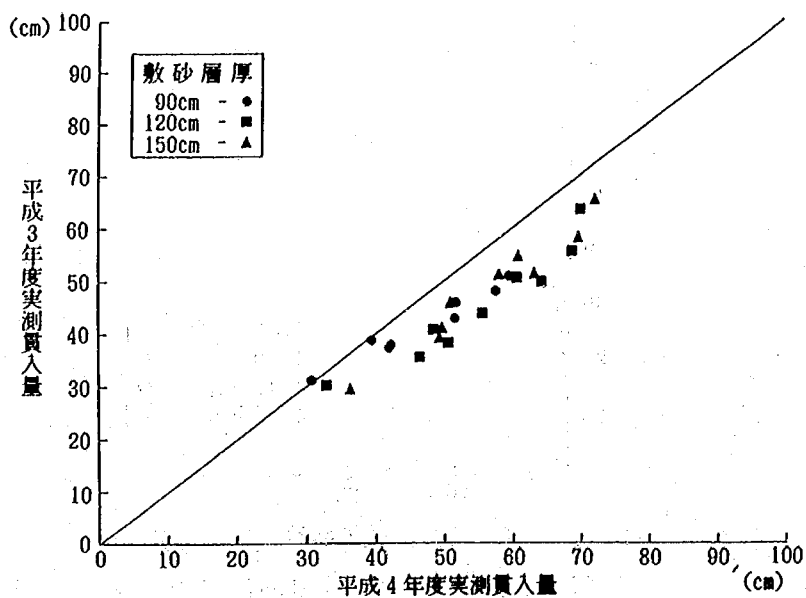
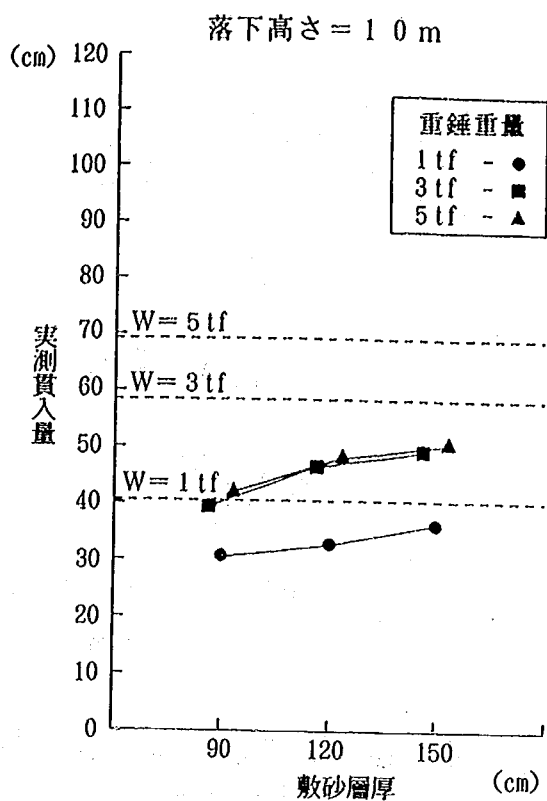
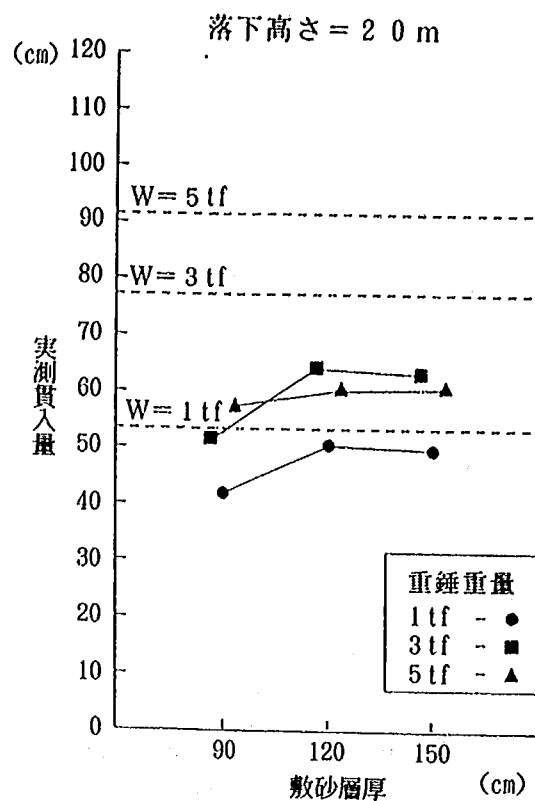


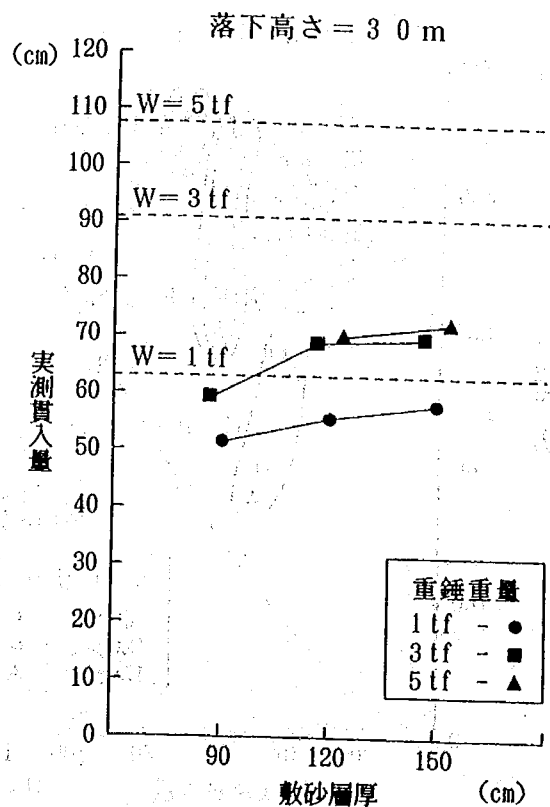
図-4.24 実測貫入量の比較



*図中の破線は、便覧式 ($\lambda=100\text{tf/m}^2$) を表す。

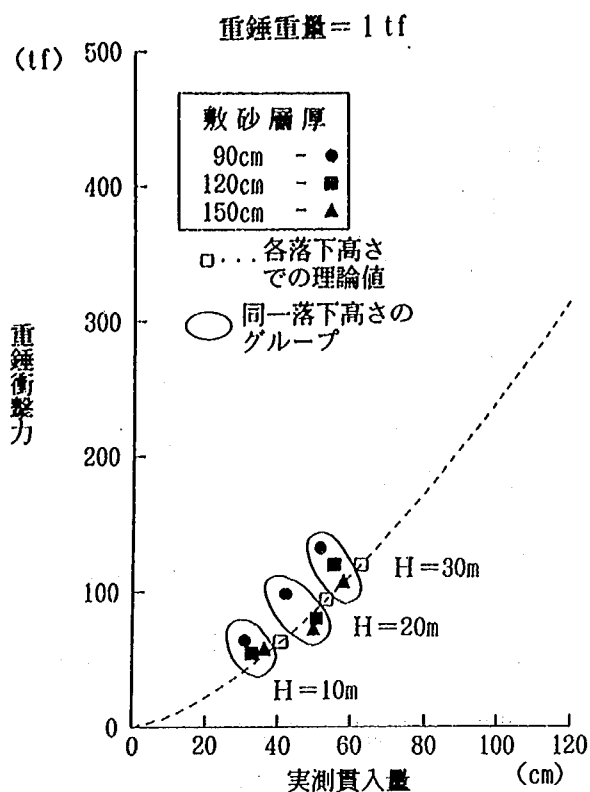


*図中の破線は、便覧式 ($\lambda=100\text{tf/m}^2$) を表す。

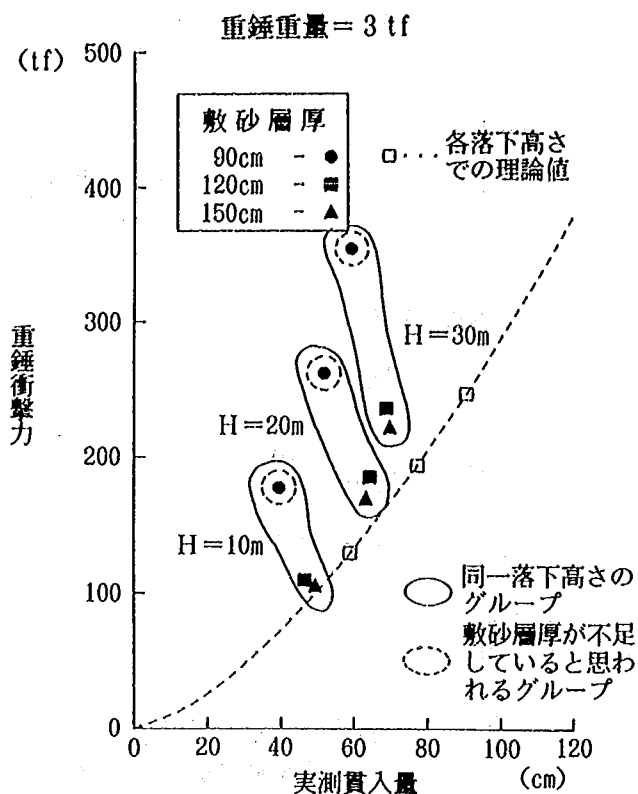


*図中の破線は、便覧式 ($\lambda=100\text{tf/m}^2$) を表す。

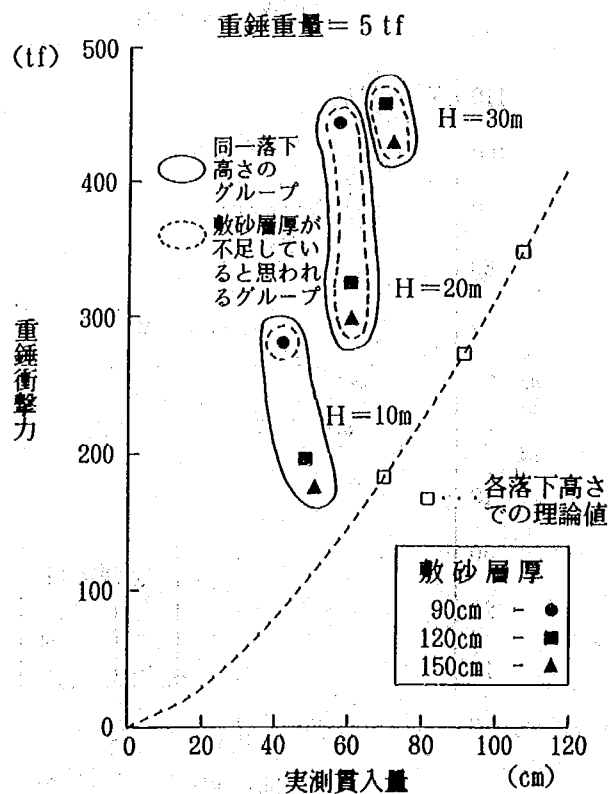
図-4.25 敷砂層厚と実測貫入量の関係



*図中の破線は、便覧式 ($\lambda = 100 \text{tf/m}^2$) を表す。



*図中の破線は、便覧式 ($\lambda = 100 \text{tf/m}^2$) を表す。



*図中の破線は、便覧式 ($\lambda = 100 \text{tf/m}^2$) を表す。

図-4.26 実測貫入量と重錘衝撃力の関係

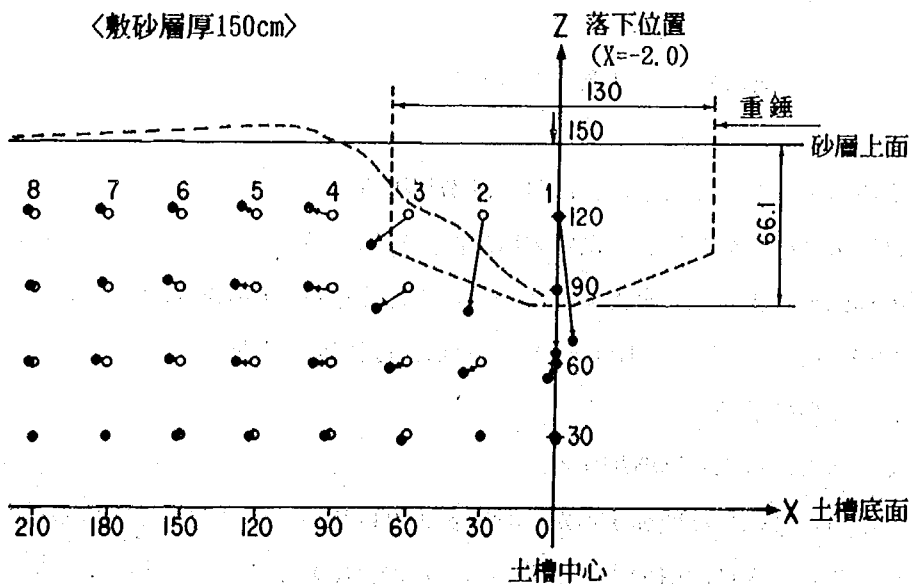
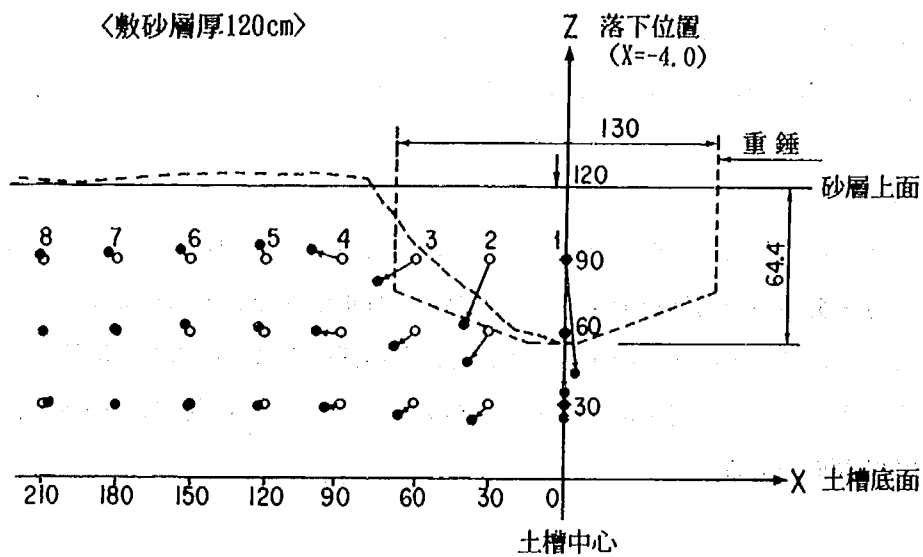
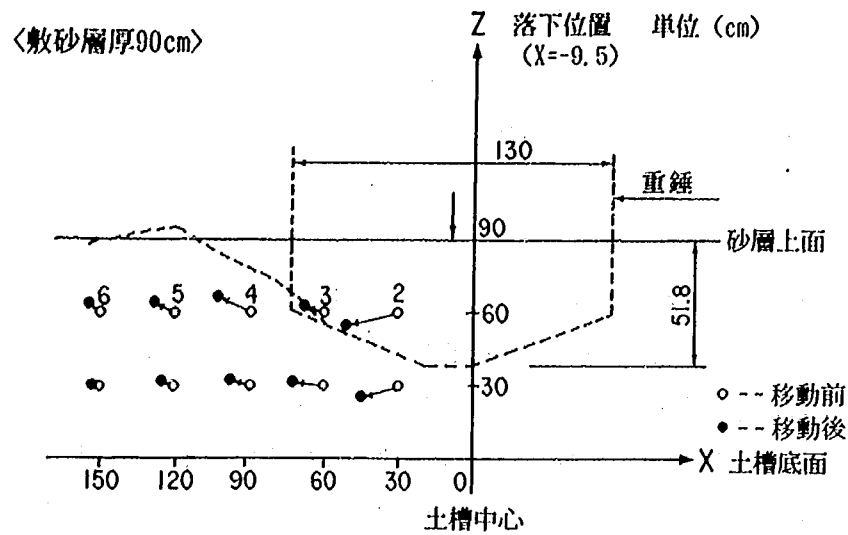


図-4.27 敷砂の移動量 (重錘重量 3 tf、落下高さ 20m)

4. 3. 3 伝達衝撃土圧

(1) 土圧波形

重錘重量3tf、落下高さ20m、敷砂層厚90cmの場合の衝撃土圧波形を図-4.28に示す。3年度と同様に一般的に、土圧波形は衝突直後から発生するピークを有する波形とそれに続くなだらかな波形からなる。重錘落下位置から近いほどピーク値は大きく、立ち上がりおよびピークとなる時間が早いことがわかる。

(2) 土圧合力

3年度と同じ方法で土圧合力を算出した。その際、土圧の分布形としてフローリッヒの分布と元波形の折れ線分布の2種類を用いた。表-4.9に計算結果の一覧表、図-4.29に土圧の分布図の例、図-4.30にフローリッヒの分布による土圧合力と元波形の折れ線分布による土圧合力の関係をそれぞれ示す。表中の②/③の値は、元波形による土圧合力とフローリッヒによる土圧合力の比であるが、平均値は0.985となっている。また、図-4.30の中の実線は傾きが1であり、両者はよく一致していることがわかる。

(3) 敷砂層厚と土圧合力

図-4.31に重錘重量ごとおよび落下高さごとの敷砂層厚と土圧合力の関係を示す。この図から、一部逆転する場合もあるが、一般的に土圧合力は落下高さおよび重錘重量とともに増加し、敷砂層厚の増加に伴い減少することがわかる。

(4) 土圧の分布幅

3年度と同様に土圧の最大分布幅を求めた。表-4.10に結果の一覧表、図-4.32に重錘重量ごとおよび落下高さごとの敷砂層厚と分布幅の関係を示す。この図から、分布幅は敷砂層厚および落下高さによって変化しないことがわかる。これは3年度と傾向が違うが、土圧計の間隔が3年度の20cmに比べて4年度は25cmまたは50cmと広がったことによって精度が落ちた可能性がある。また、一部逆転しているが、重錘重量が増えると分布幅が増加する傾向がある。

4. 4 実験結果のまとめ

4.1～4.3で明らかにされたことは次の事項である。

(1) 重錘衝撃力

- ・落下高さおよび重錘重量が大きくなると、衝撃力は増加する。
- ・敷砂層厚が重錘直径より小さくなると、衝撃力は理論値を越える。
- ・衝撃力は敷砂層の締固め状態により変化し、緩いほど小さくなる。振動便覧式におけるラーメ定数を比較すると、3年度は 200tf/m^2 、4年度は 100tf/m^2 とした値にほぼ等しくなる。

(2) 重錘貫入量および砂の挙動

- ・落下高さが大きくなると、貫入量は増加する。
- ・重錘重量が大きくなると貫入量は増加するが、理論値よりは小さくなりその差が広がる。
- ・敷砂層厚が大きくなると貫入量は増加するが、ある一定の値に収束する。
- ・貫入量は敷砂層の締固めが緩いほど大きくなる。

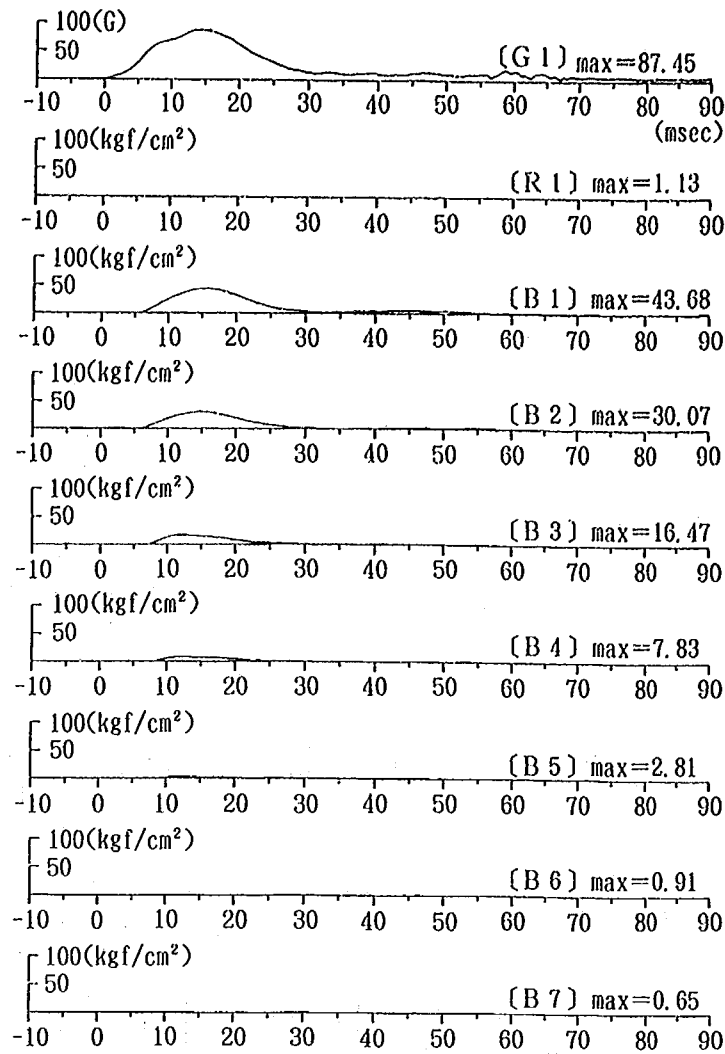


図-4.28 (a) 衝撃土圧波形例 (実験番号B093201)

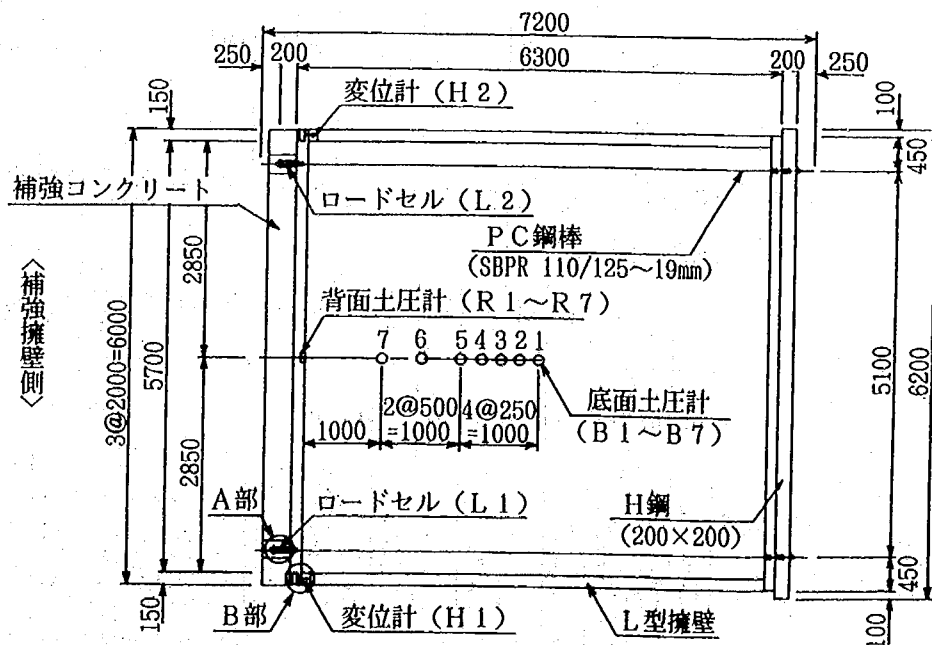
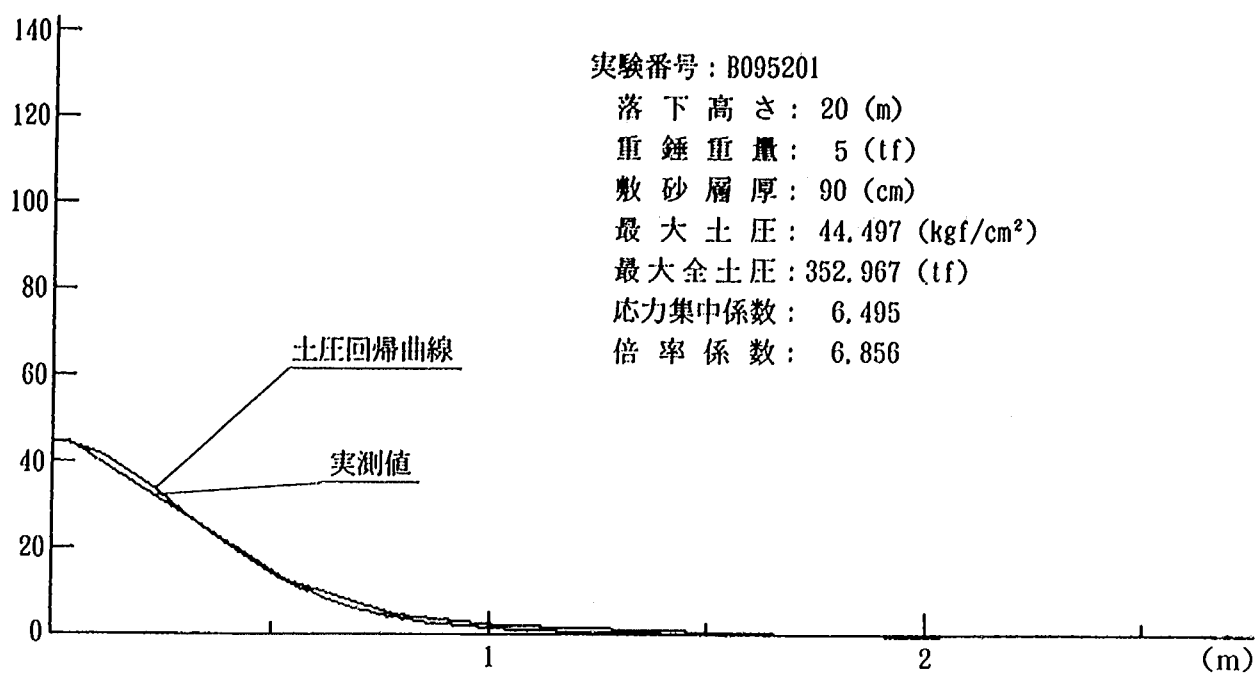


図-4.28 (b) 測定器配置図 (G1は重錘加速度)

表-4.9 土圧合力一覧(4年度)

番号	実験番号	重錘タイプ		敷砂層厚 T(cm)	落下高さ H(m)	重錘加速度 α (G)	重錘衝撃力 P (tf)	土圧合力 (元波形) S_1 (tf)	土圧合力 (7 σ -リット) S_2 (tf)	S_1/P	S_2/P	S_1/S_2	応力 集中 係数	倍率 係数
		重量 W(tf)	直径 D(cm)											
1	B091101	1	90	90	10	63.1	63.1	114.5	122.5	1.81	1.94	0.93	2.88	2.57
2	B091201	1	90	90	20	97.7	97.7	178.7	217.3	1.83	2.22	0.82	3.70	4.38
3	B091301	1	90	90	30	131.5	131.5	209.9	247.2	1.60	1.88	0.85	3.77	4.97
4	B093101	3	130	90	10	59.1	177.3	187.9	133.0	1.06	0.75	1.41	8.13	2.57
5	B093201	3	130	90	20	87.6	262.7	531.2	632.8	2.02	2.41	0.84	3.28	12.59
6	B093301	3	130	90	30	118.3	355.0	381.2	358.6	1.07	1.01	1.06	7.43	6.93
7	B095101	5	155	90	10	56.2	281.0	385.2	353.4	1.37	1.26	1.09	4.64	6.96
8	B095201	5	155	90	20	88.8	444.2	389.6	353.9	0.88	0.80	1.10	6.50	6.86
9	B121101	1	90	120	10	54.2	54.2	106.8	122.0	1.97	2.25	0.88	2.19	1.74
10	B121202	1	90	120	20	79.7	79.7	136.9	133.8	1.72	1.68	1.02	3.54	1.62
11	B121301	1	90	120	30	119.4	119.4	142.1	150.6	1.19	1.26	0.94	3.85	1.79
12	B123101	3	130	120	10	36.6	109.8	251.3	241.6	2.29	2.20	1.04	3.49	2.91
13	B123201	3	130	120	20	61.9	185.7	341.1	361.4	1.84	1.95	0.94	3.86	4.27
14	B123303	3	130	120	30	79.0	237.0	435.0	524.3	1.84	2.21	0.83	2.78	6.81
15	B125101	5	155	120	10	39.2	196.2	353.8	347.4	1.80	1.77	1.02	4.34	4.00
16	B125201	5	155	120	20	65.0	324.8	622.6	655.9	1.92	2.02	0.95	4.31	7.58
17	B125301	5	155	120	30	91.7	458.7	578.4	528.9	1.26	1.15	1.09	5.94	5.86
18	B151101	1	90	150	10	60.0	60.0	107.9	118.6	1.80	1.98	0.91	2.99	1.06
19	B151201	1	90	150	20	71.6	71.6	93.7	98.9	1.31	1.38	0.95	7.29	0.71
20	B151301	1	90	150	30	106.4	106.4	130.1	123.5	1.22	1.16	1.05	6.84	0.89
21	B153102	3	130	150	10	35.3	105.9	204.8	183.5	1.93	1.73	1.12	4.34	1.44
22	B153202	3	130	150	20	56.6	169.8	220.2	248.2	1.30	1.46	0.89	3.66	2.05
23	B153301	3	130	150	30	74.2	222.6	303.3	369.9	1.36	1.66	0.82	2.72	3.45
24	B155101	5	155	150	10	35.0	175.2	283.2	279.9	1.62	1.60	1.01	4.10	2.24
25	B155201	5	155	150	20	59.8	298.9	559.2	610.5	1.87	2.04	0.92	3.37	5.19
26	B155301	5	155	150	30	85.9	429.6	611.0	641.2	1.42	1.49	0.95	4.86	4.90
33	S123201	3	130	120	20	84.7	254.1	450.5	391.3	1.77	1.54	1.15	5.29	4.40

(kgf/cm²)



(kgf/cm²)

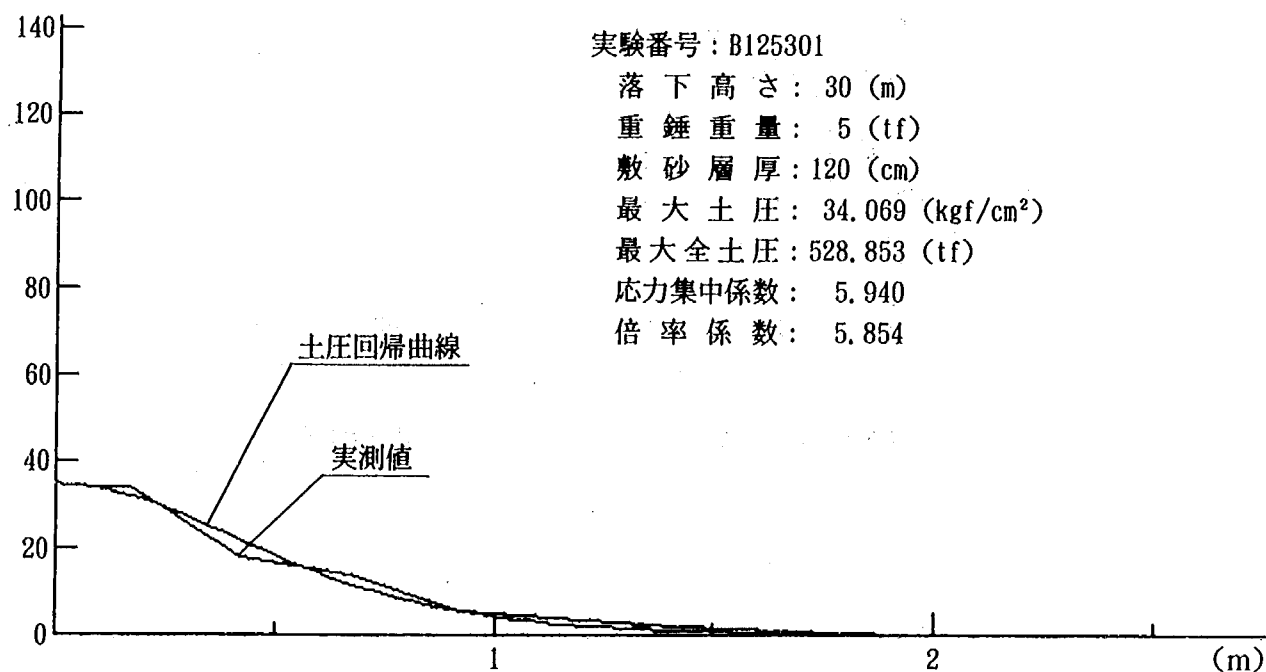


図-4.29 土圧分布図

・緩衝効果を高めるには、移動性能を有する砂層の存在が重要と考えられる。

(3) 伝達衝撃土圧

・土圧の測定値は非常にばらつきが大きい。

・落下高さおよび重錘重量が大きくなると、土圧合力は増加する。

・敷砂層厚が大きくなると、土圧合力は減少する。

・重錘重量が大きくなると分布幅も増加するが、落下高さおよび敷砂層厚との明確な関係は認められない。

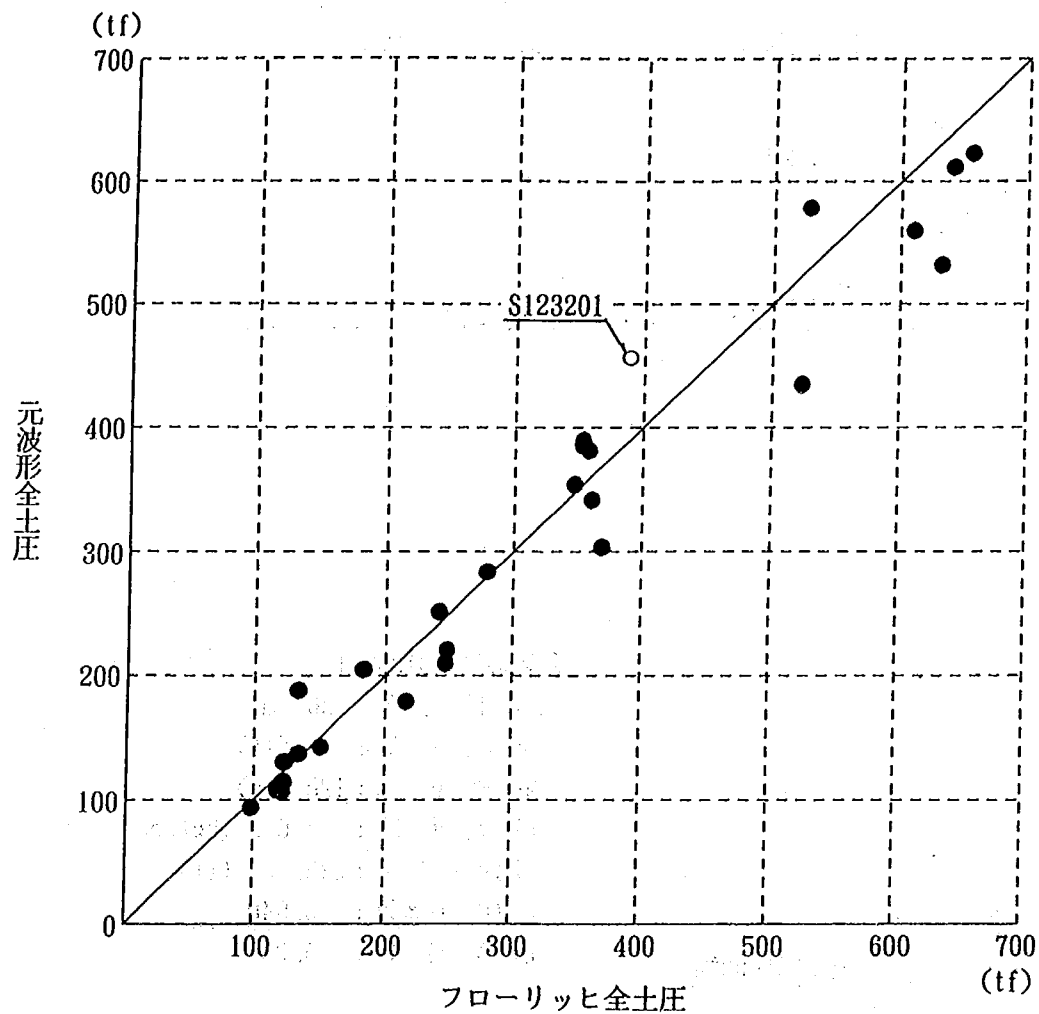


図-4.30 フローリッヒ全土圧と元波形全土圧の関係

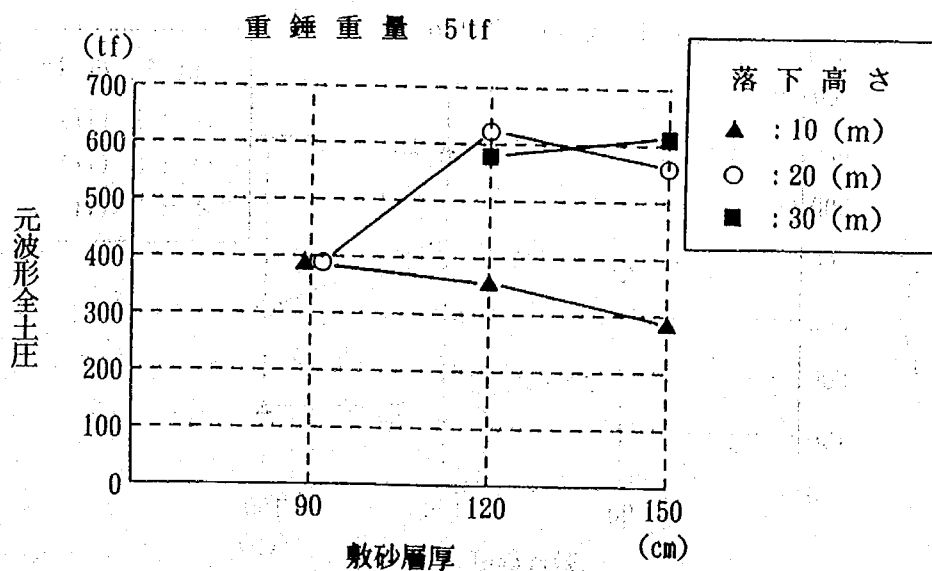
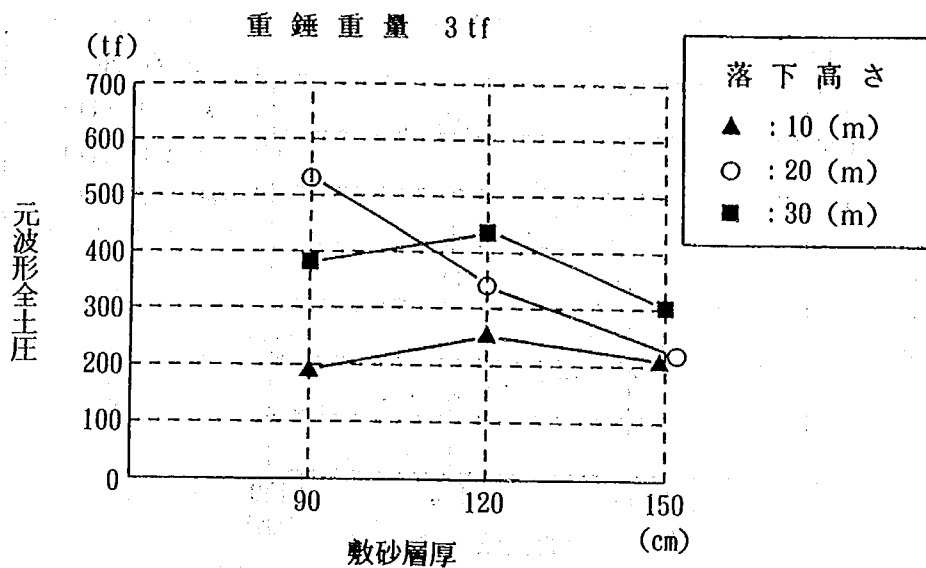
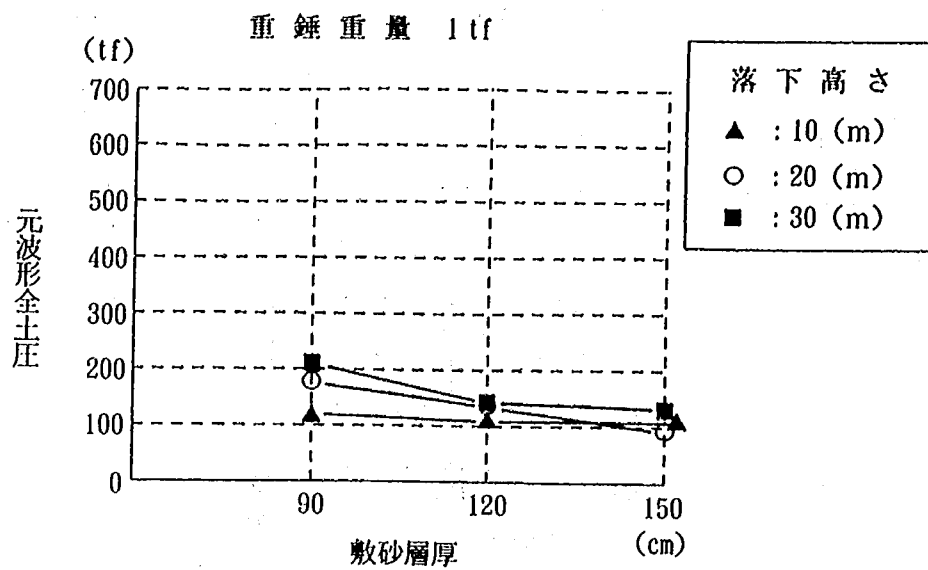
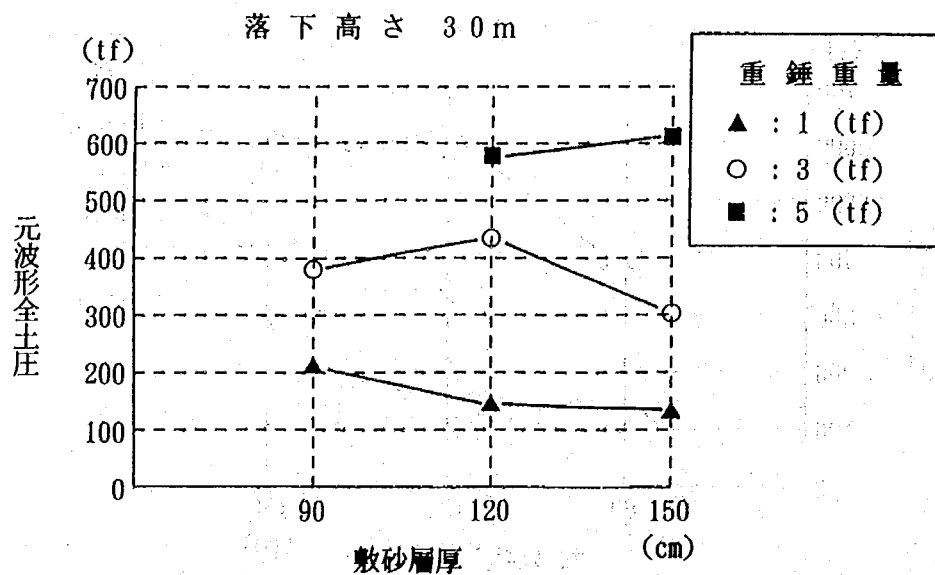
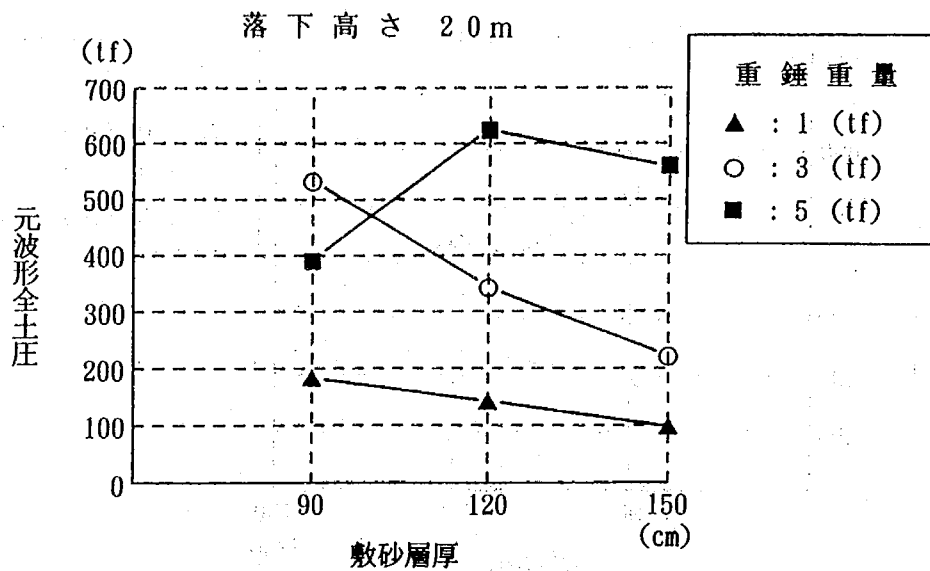
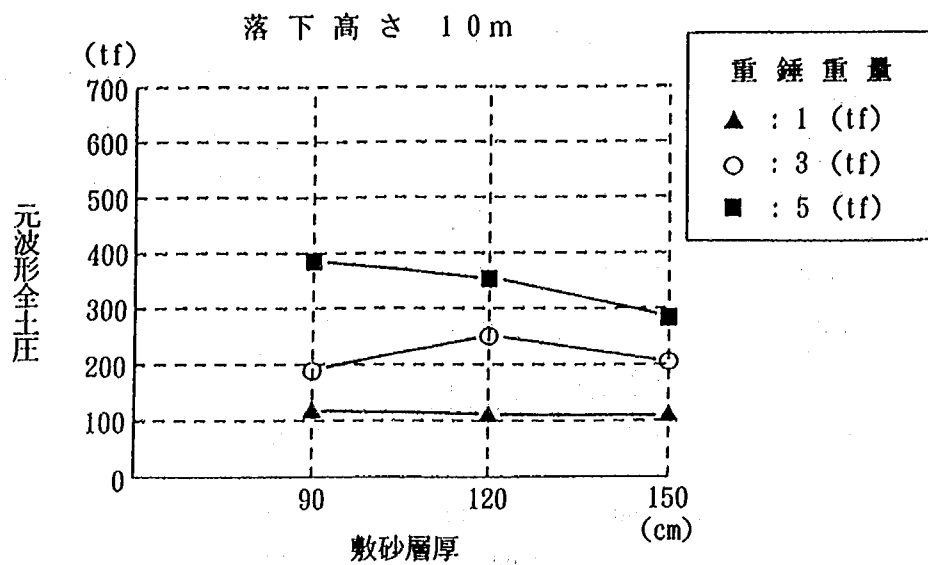


図-4.31 (a) 重錘重量ごとの敷砂層厚と元波形全土圧との関係



図一4.31 (b) 落下高さごとの敷砂層厚と元波形全土圧との関係

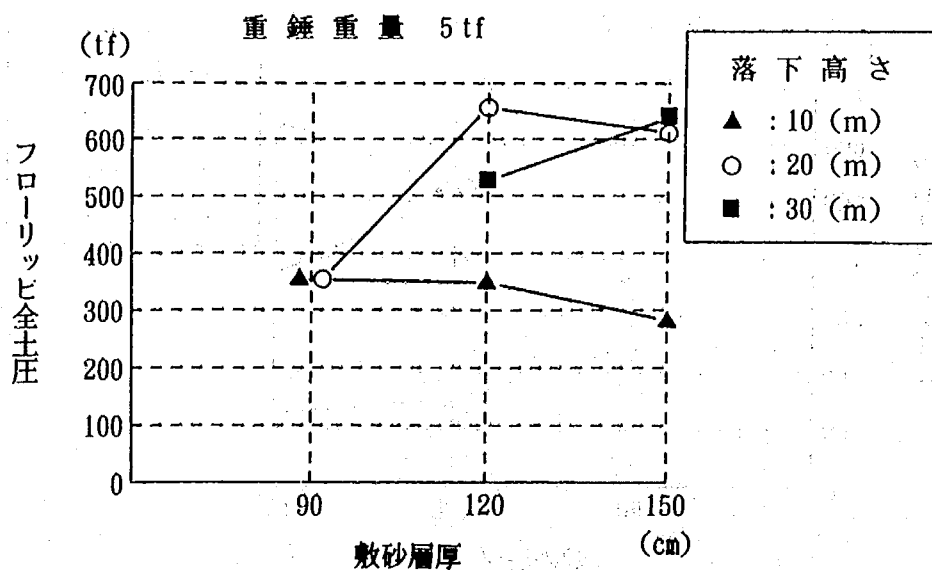
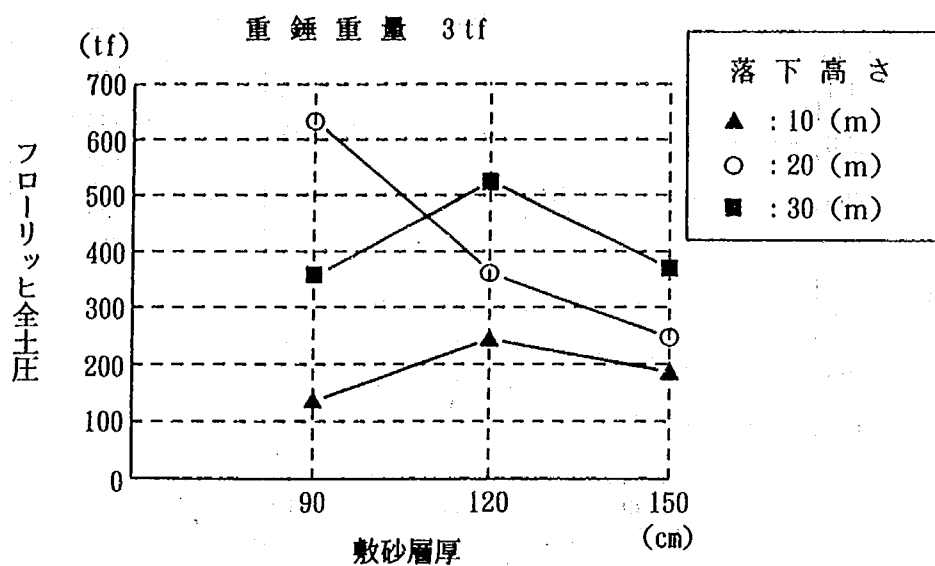
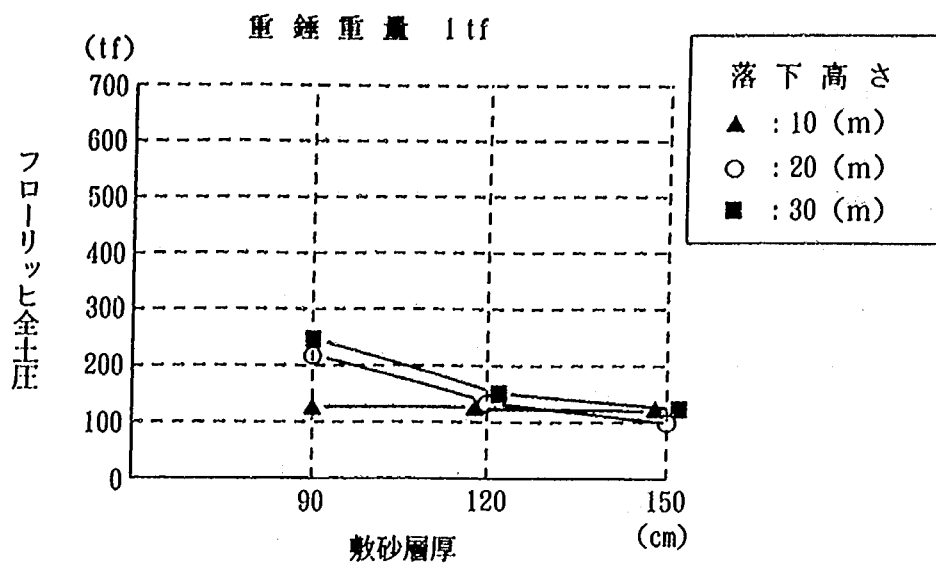


図-4.31 (c) 重錘重量ごとの敷砂層厚とフロオリッヒ全土圧との関係

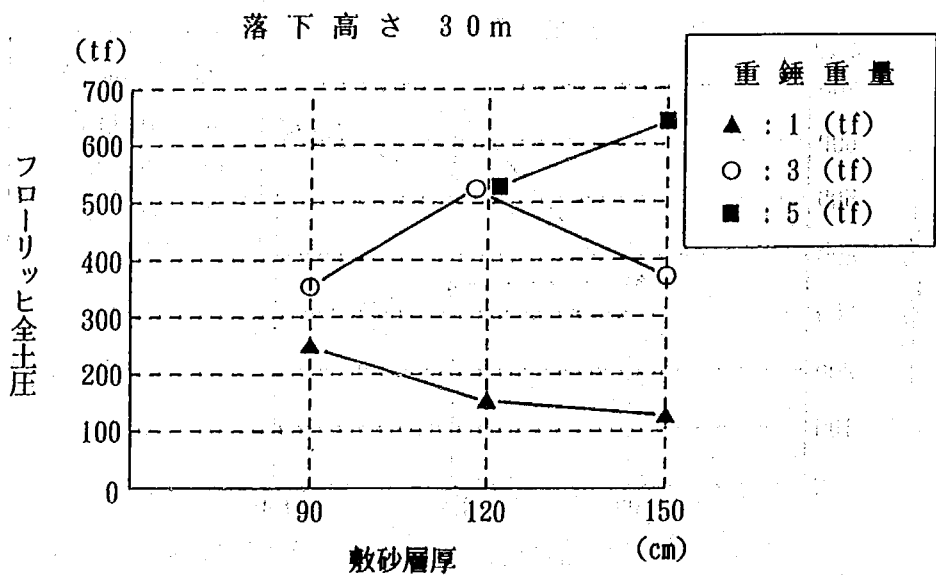
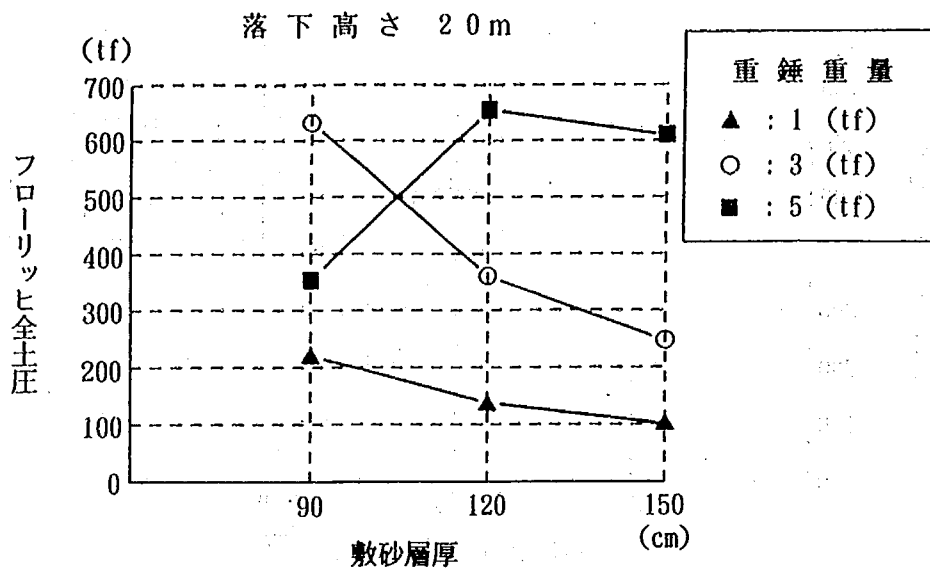
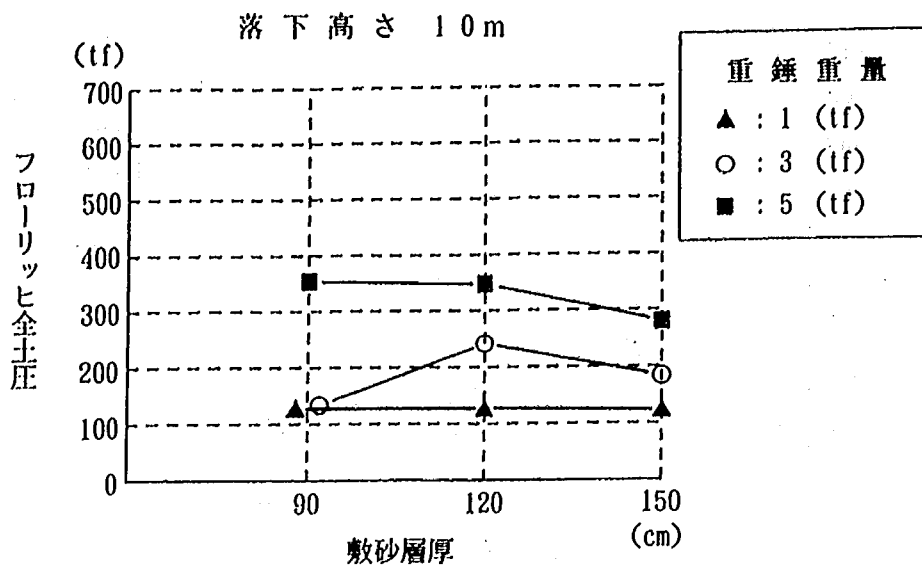


図-4.31 (d) 落下高さごとの敷砂層厚とフロアリッヒ全土圧との関係

表-4.10 土圧分布幅一覧(4年度)

番号	実験番号	重錘タイプ		敷砂層厚 T(cm)	落下高さ H(m)	衝撃 荷重計 番号	判定 距離 R(m)	分布幅 B(m)
		重量 W(tf)	直径 D(cm)					
1	B091101	1	90	90	10	B5	1.23	2.45
2	B091201	1	90	90	20	B5	1.30	2.59
3	B091301	1	90	90	30	B4	1.07	2.14
4	B093101	3	130	90	10	B4	0.99	1.97
5	B093201	3	130	90	20	B5	1.36	2.72
6	B093301	3	130	90	30	B5	1.29	2.57
7	B095101	5	155	90	10	B5	1.27	2.53
8	B095201	5	155	90	20	B5	1.29	2.57
9	B121101	1	90	120	10	B4	1.09	2.18
10	B121202	1	90	120	20	B4	1.00	2.00
11	B121301	1	90	120	30	B4	1.09	2.18
12	B123101	3	130	120	10	B5	1.32	2.63
13	B123201	3	130	120	20	B5	1.29	2.59
14	B123303	3	130	120	30	B5	1.24	2.47
15	B125101	5	155	120	10	B5	1.20	2.40
16	B125201	5	155	120	20	B5	1.32	2.64
17	B125301	5	155	120	30	B6	1.42	2.84
18	B151101	1	90	150	10	B5	1.24	2.47
19	B151201	1	90	150	20	B4	1.02	2.04
20	B151301	1	90	150	30	B4	1.11	2.22
21	B153102	3	130	150	10	B5	1.32	2.64
22	B153202	3	130	150	20	B5	1.31	2.61
23	B153301	3	130	150	30	B5	1.24	2.48
24	B155101	5	155	150	10	B5	1.30	2.59
25	B155201	5	155	150	20	B6	1.56	3.12
26	B155301	5	155	150	30	B6	1.54	3.08
33	S123201	3	130	120	20	B5	1.27	2.53

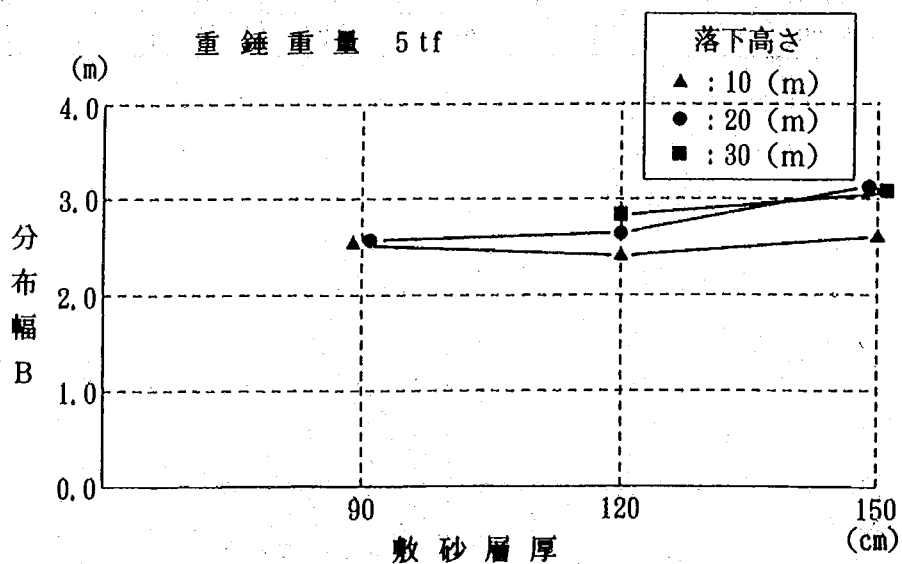
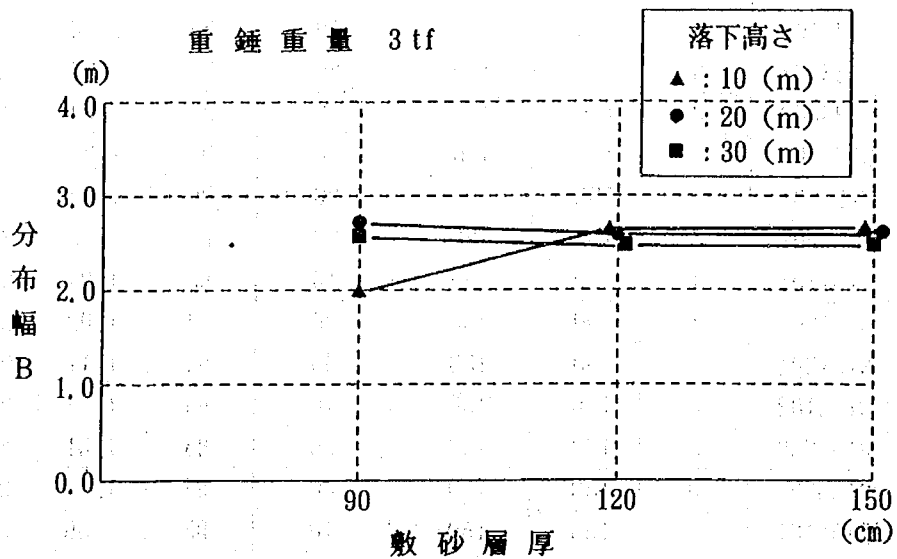
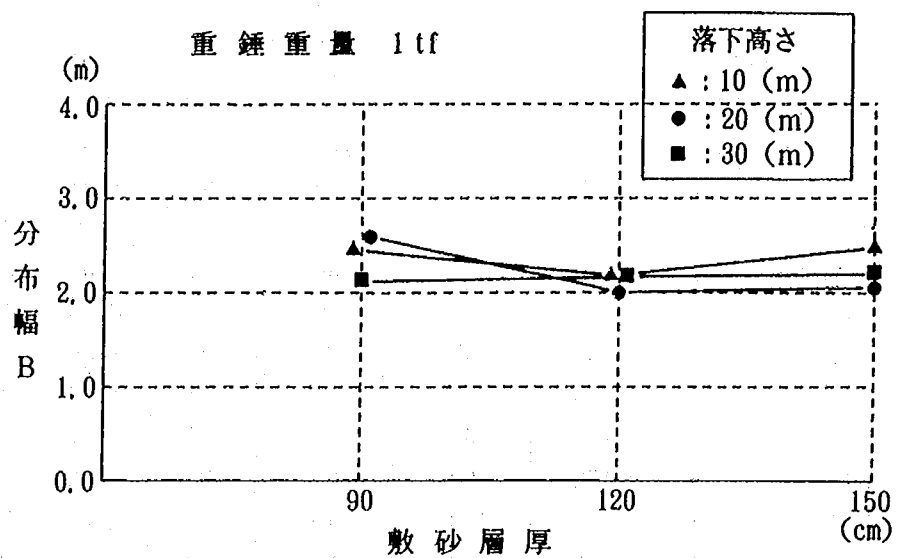


図-4.32 (a) 重錘重量ごとの敷砂層厚と最大分布幅Bとの関係

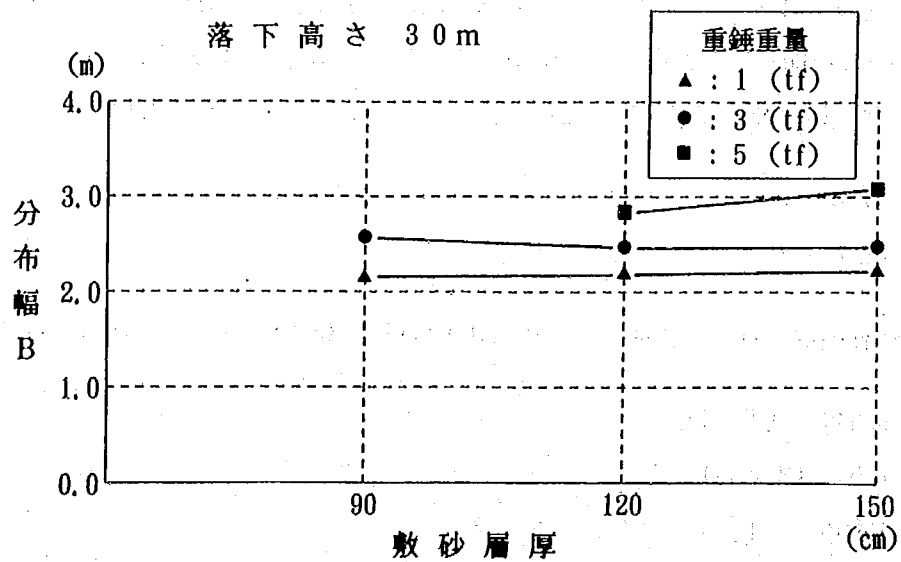
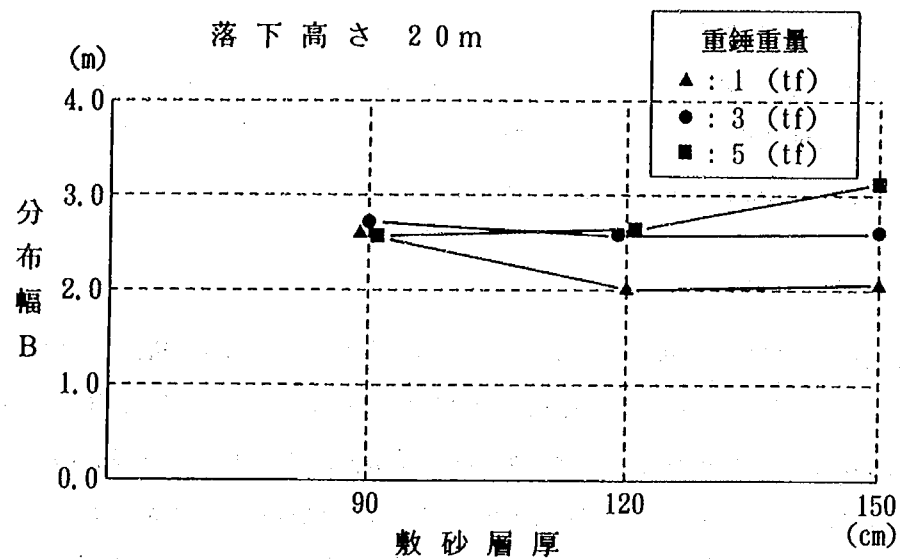
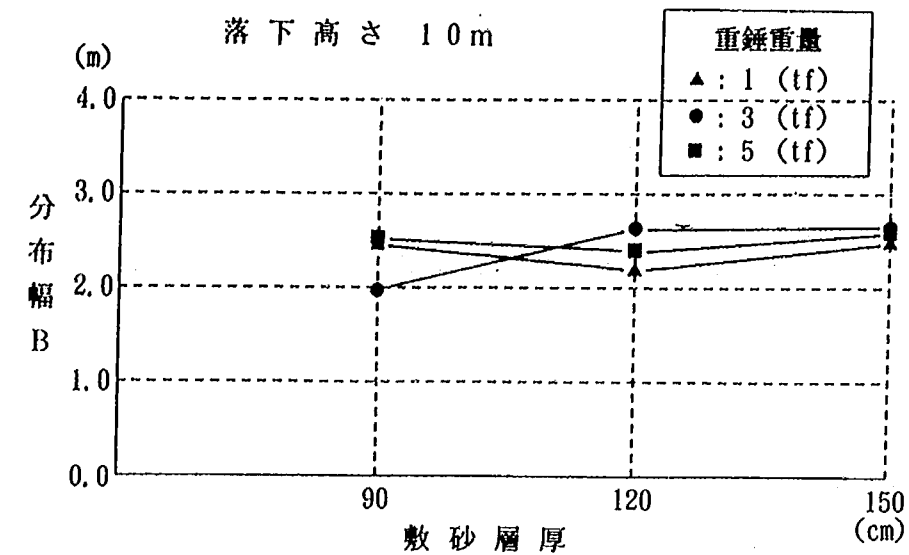


図-4.32 (b) 落下高さごとの敷砂層厚と最大分布幅Bとの関係

第5章 考 察

5. 1 重錘衝撃力と敷砂層厚・重錘直径との関係

従来、落石の衝撃力は振動便覧式に敷砂層厚の係数を乗じて、式 (5. 1) で算出している。

$$P = 2.455 \cdot W^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \cdot \alpha \quad \text{式 (5. 1)}$$

ここに、P : 落石の衝撃力 (tf)

W : 落石の重量 (tf)

λ : ラーメの定数 (tf/m²)

H : 落下高 (m)

α : 敷砂層厚による割増係数

この式は、過去の実験結果においても、ラーメの定数の設定を適切に行えば比較的实验値と一致している。さらに通常は、過去の実験結果より $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ を超えることはないとして、落石対策便覧⁵⁾では上式に $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ を代入して、式 (5. 2) が提示されている。

$$P = 15.49 \cdot W^{2/3} \cdot H^{3/5} \cdot \alpha \quad \text{式 (5. 2)}$$

しかし、過去の実験は敷砂層厚が90cm以下のものであったために、 α は敷砂層厚が90cmの場合を1.0とし、それ以下の敷砂層厚に対する割増し係数しか提示されていなかった。今回の実験では180cmまで敷砂層厚を変化させた結果、重錘直径を境に衝撃力が大きく変わることが確認できた。つまり、落石の衝撃力は落石重量、落下高さ、敷砂の性状、敷砂層厚以外に落石の直径の影響を受けるものと思われるので、敷砂層厚によって一意的に係数を決定することは困難である。そこで、敷砂層厚 (T) を重錘直径 (D) で割った値と実験で得られた重錘衝撃力 (P) を理論値 (P_λ) で割った値 (以下、重錘衝撃力比と呼ぶ) の関係を調べることにした。その結果を図-5. 1に示す。重錘衝撃力の理論値は、3年度は $\lambda = 200 \text{ tf/m}^2$ 、4年度は $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ とおいた半無限体の敷砂層厚に対する値とし、それぞれ以下の式で算出した。

$$3 \text{ 年度 : } P_\lambda = 20.44 \cdot W^{2/3} \cdot H^{3/5} \quad \text{式 (5. 3)}$$

$$4 \text{ 年度 : } P_\lambda = 15.49 \cdot W^{2/3} \cdot H^{3/5} \quad \text{式 (5. 4)}$$

図中の実線は実験値から求めた回帰曲線であり、3年度は式 (5. 5)、4年度は式 (5. 7) で表わされる。

$$\alpha = P / P_\lambda = 0.949 \cdot (T/D)^{-0.44} \quad \text{式 (5. 5)}$$

$$\approx 1.0 \cdot (T/D)^{-0.44} \quad \text{式 (5. 6)}$$

$$\alpha = P / P_\lambda = 1.046 \cdot (T/D)^{-0.58} \quad \text{式 (5. 7)}$$

$$\approx 1.0 \cdot (T/D)^{-0.58} \quad \text{式 (5. 8)}$$

ここに、 α : 重錘衝撃力比 (敷砂層厚の影響係数)

P : 実験で得られた重錘衝撃力 (tf)

P_λ : 重錘衝撃力の理論値 (tf)

T : 敷砂層厚 (m)

D : 重錘直径 (m)

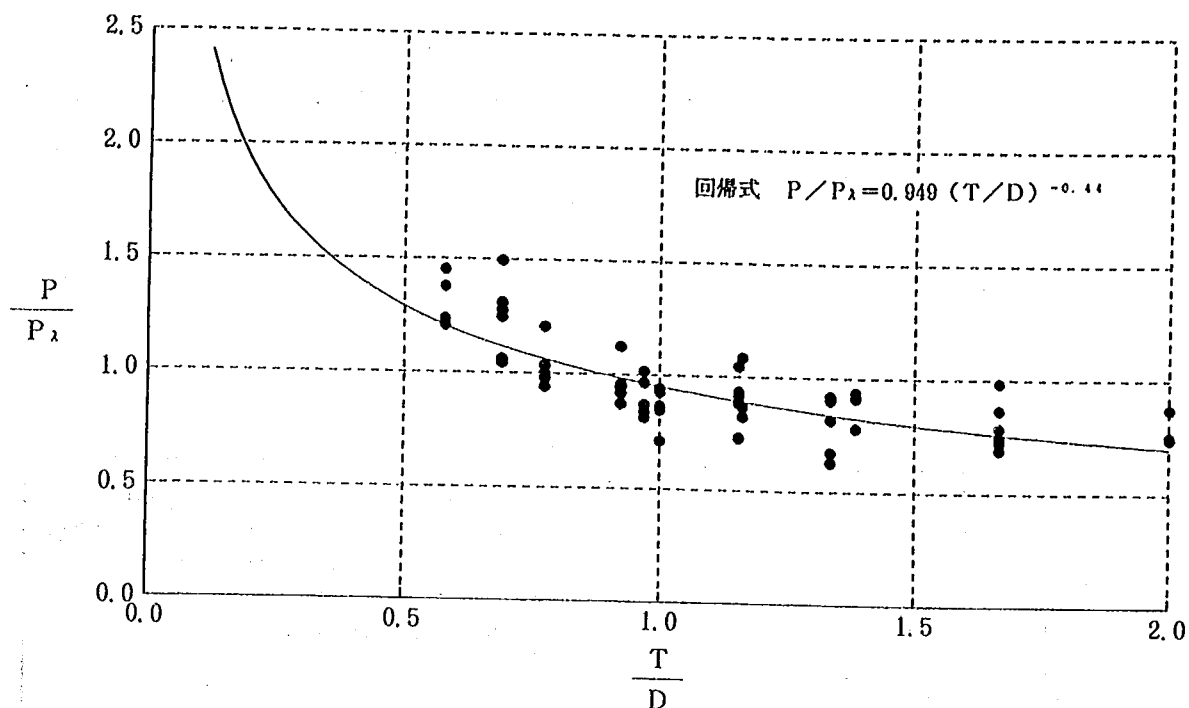


図-5.1(a) 敷砂層厚／重錘直径と重錘衝撃力比の関係（3年度）

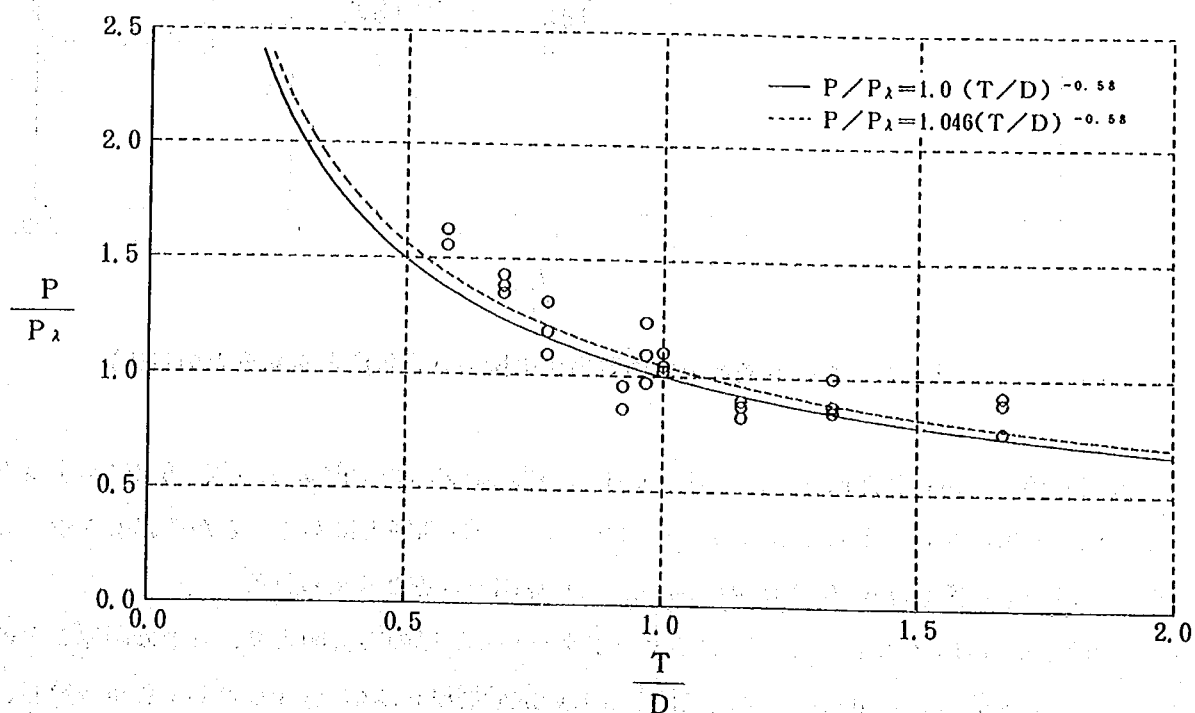


図-5.1(b) 敷砂層厚／重錘直径と重錘衝撃力比の関係（4年度）

この図から、今回の実験範囲（重錘重量5tf、落下高さ30mまで）では、次のようなことが確認できる。

- ・重錘直径と敷砂層厚が等しい場合に重錘衝撃力比がほぼ1.0になる。
- ・敷砂層厚が重錘直径より小さくなると重錘衝撃力は理論値より大きくなる。
- ・敷砂層厚が重錘直径より大きくなると重錘衝撃力は理論値より小さくなるが、敷砂層厚が増加しても緩衝効果は小さい。

次に、3年度と4年度の回帰式を比較してみる。図-5.2に両者の回帰直線をプロットしたものを示す。この図から、4年度の実験において T/D が小さくなると α が3年度より大きくなることがわかるが、実験値のばらつきと T/D が0.5以下の実験値がないことを考えると、ラーメ定数が異なっても両者は同様な傾向を示していると思われる。そこで、3年度と4年度の実験値をあわせて回帰を行った結果を同図に併せて示す。図中の実線は回帰直線を示し、式(5.9)で表される。

$$\alpha = P/P_1 = 0.979 \cdot (T/D)^{-0.49} \quad \text{式 (5.9)}$$

$$\approx 1.0 \cdot (T/D)^{-0.49} \quad \text{式 (5.10)}$$

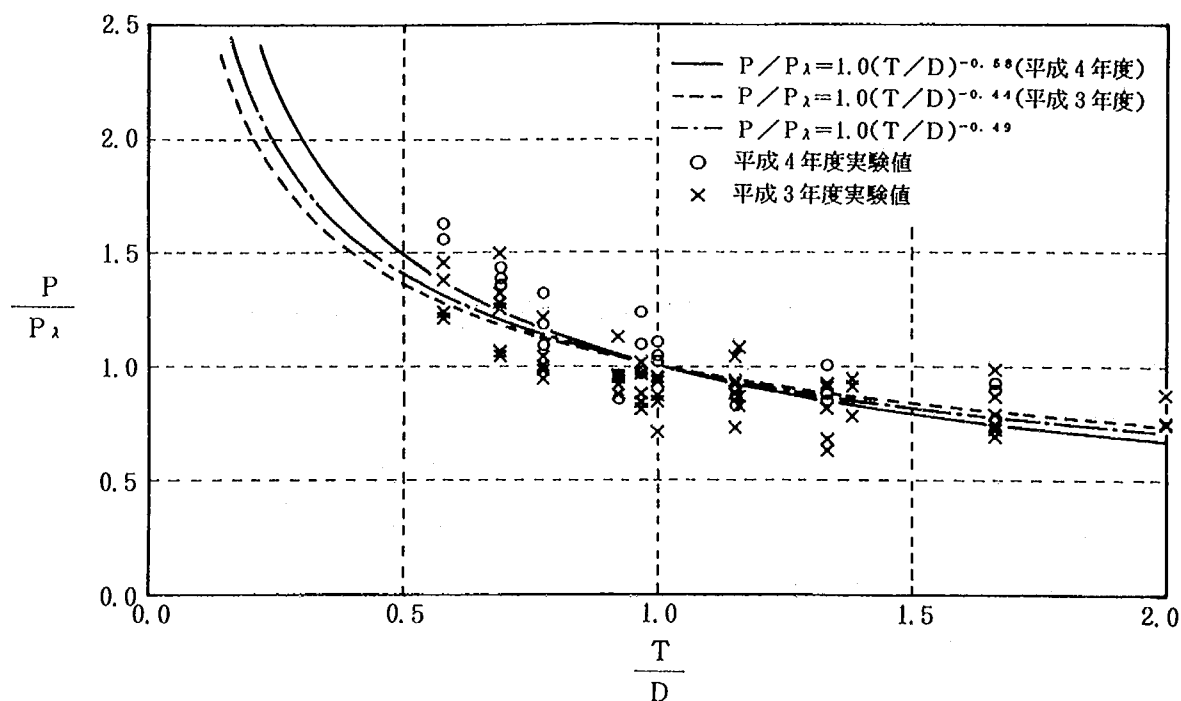


図-5.2 敷砂層厚／重錘直径と重錘衝撃力比の関係（3年度と4年度との対比）

ここで、式(5.10)で得られた曲線上に、表-5.1に示す過去の実験結果³⁾および表-5.2に示す落石対策便覧の割増し係数の値をプロットしたものが図-5.3であり、ほぼ曲線上にあることが確認できる。したがって、敷砂層厚の割増し係数は式(5.10)の回帰式により算出できると考えられる。

なお表-5.2は、落石対策便覧に示されているサンドクッション厚の影響図より、各敷砂層厚ごとの衝撃力比を読みとり、重錘重量0.3、0.5tfの重錘直径と等しい敷砂層厚を基準(1.0)として各重錘重量、敷砂層厚ごとの重錘衝撃力比を算出したものである。

表-5.1 既往の実験結果における敷砂層厚と衝撃力比⁹⁾

重錘タイプ		敷砂 層厚 T(cm)	落下 高さ H(m)	衝撃力比 P/P_{20}	T/D
底面 形状	直径 D(cm)				
球底	40	30	2	1.00	0.75
			4	1.07	
			8	1.19	
		50	2	1.09	1.25
			4	0.98	
			8	0.93	
錘底	40	30	2	0.83	0.75
			4	0.86	
			8	0.98	
		50	2	0.77	1.25
			4	0.84	
			8	0.85	

(注) P_{20} は $\lambda = 20 \text{tf/m}^2$ としたときの理論値である。

表-5.2 落石対策便覧における敷砂層厚と衝撃力比⁹⁾

敷砂 層厚 T(cm)	読取值	重錘重量W0.3tf 重錘直径D60cm		重錘重量W0.5tf 重錘直径D70cm	
		衝撃力比	T/D	衝撃力比	T/D
30	1.70	1.38	0.50	1.52	0.43
50	1.36	1.11	0.83	1.21	0.71
60	1.23	1.00	1.00	——	——
70	1.12	0.91	1.17	1.00	1.00
90	1.00	0.81	1.50	0.89	1.29

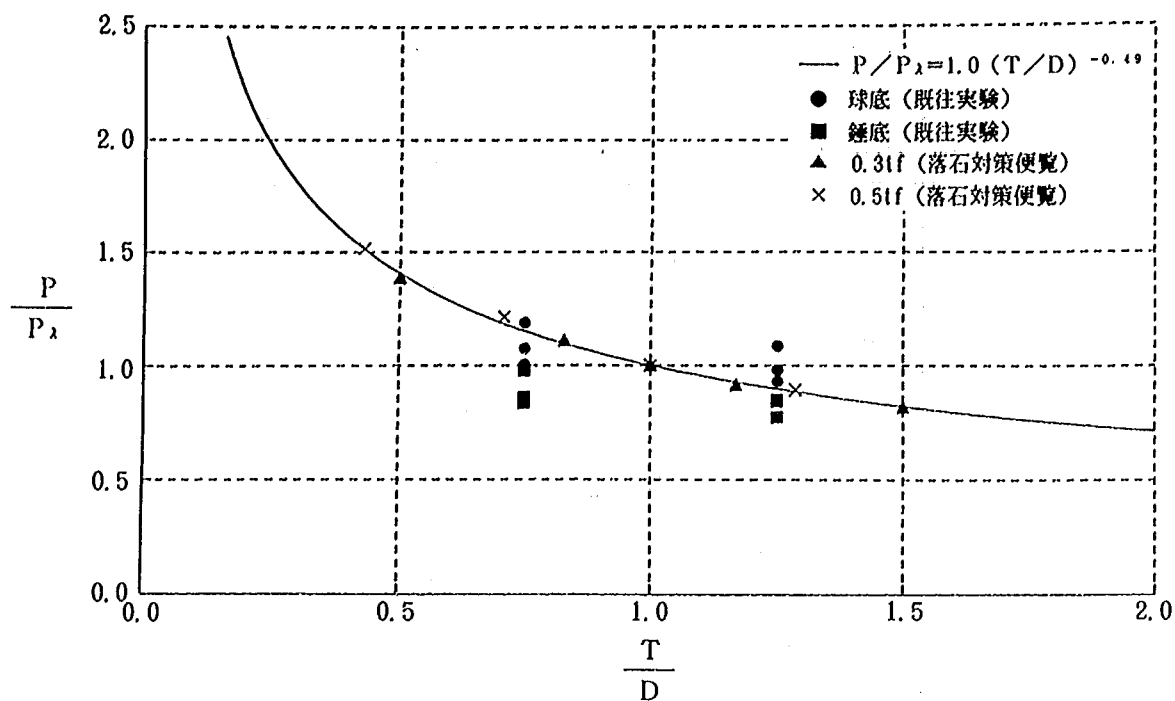


図-5.3 敷砂層厚／重錘直径と重錘衝撃力比の関係

参考に、図-5.4に落下高さごとの回帰曲線、表-5.3に各回帰式の回帰係数と重相関係数を示すが、実験値のばらつきを考えると落下高さの影響度は小さいことがわかる。

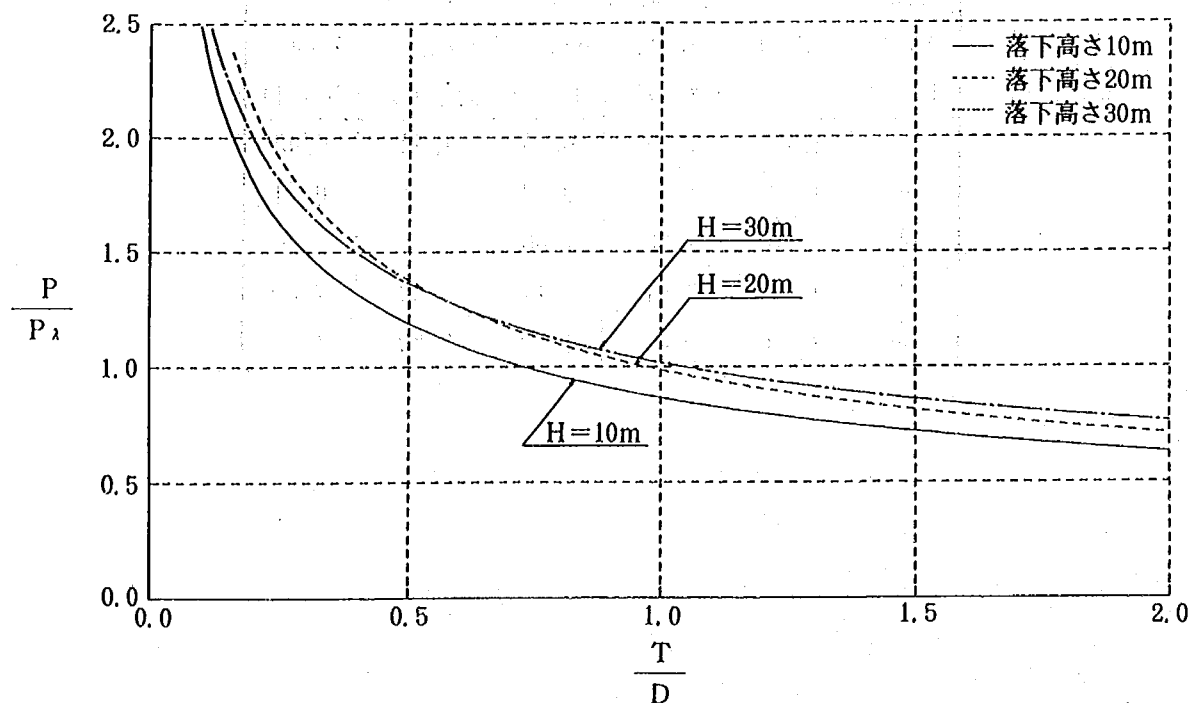


図-5.4(a) 敷砂層厚／重錘直径と重錘衝撃力比の関係（平成3年度）

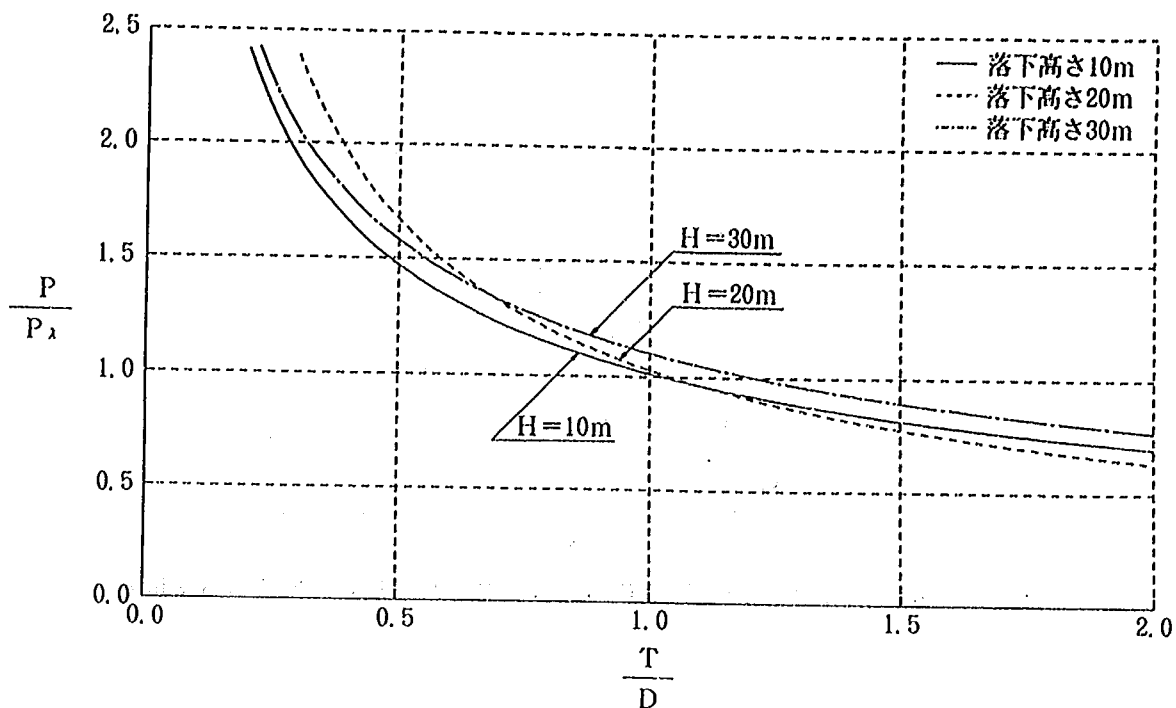


図-5.4 (b) 敷砂層厚／重錘直径と重錘衝撃力比の関係（平成4年度）

表-5.3 回帰式の回帰係数と重相関係数

回帰式 $\alpha = A (T/D)^B$				
		回帰係数 A	回帰係数 B	重相関係数
3 年 度	全実験値	0.948	-0.44	0.75
	落下高さ10m	0.863	-0.46	0.84
	落下高さ20m	0.985	-0.48	0.86
	落下高さ30m	1.017	-0.42	0.74
4 年 度	全実験値	1.046	-0.58	0.85
	落下高さ10m	1.012	-0.54	0.81
	落下高さ20m	1.028	-0.70	0.96
	落下高さ30m	1.102	-0.52	0.83
全実験値		0.979	-0.49	0.77

5. 2 重錘衝撃力と衝撃土圧との関係

図-5.5に3年度および4年度の実験における重錘衝撃力と衝撃土圧合力の関係を示す。この図から土圧合力と衝撃力の比を読み取ると、3年度は1～5、4年度は1～2となっており3年度については非常にばらつきが大きい。表-4.4からもわかるが、3年度では同一条件の実験においても大きな差が出ておりデータの信頼度がより低いと考えられるため、ここでは3年度の衝撃土圧については考慮しないこととする。

以下、4年度の実験結果のうち、元波形による土圧合力にもとづいて検討を進める。

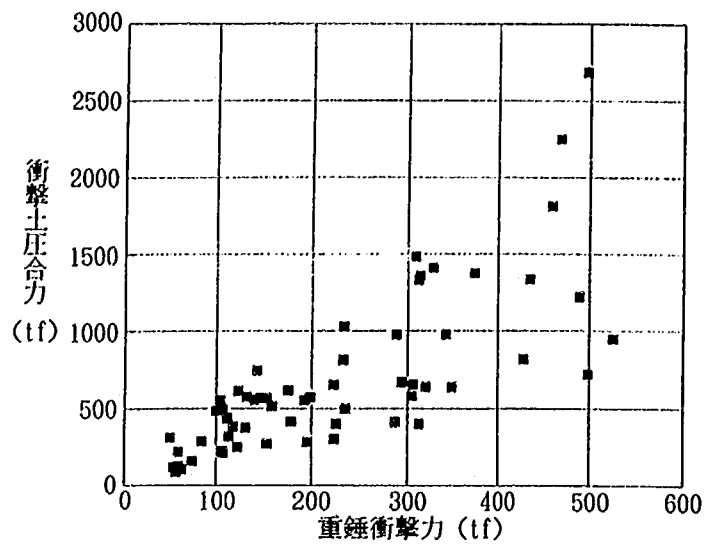


図-5.5 (a) 重錘衝撃力と衝撃土圧合力（フローリッヒ）の関係（3年度）

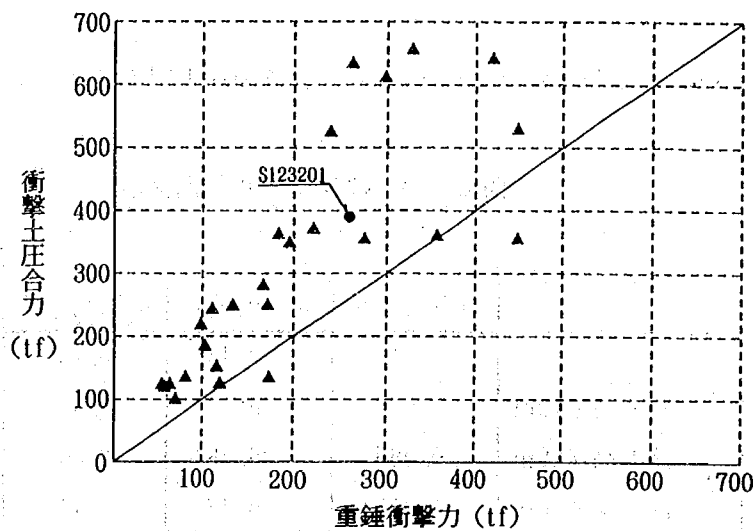


図-5.5 (b) 重錘衝撃力と衝撃土圧合力（フローリッヒ）の関係（4年度）

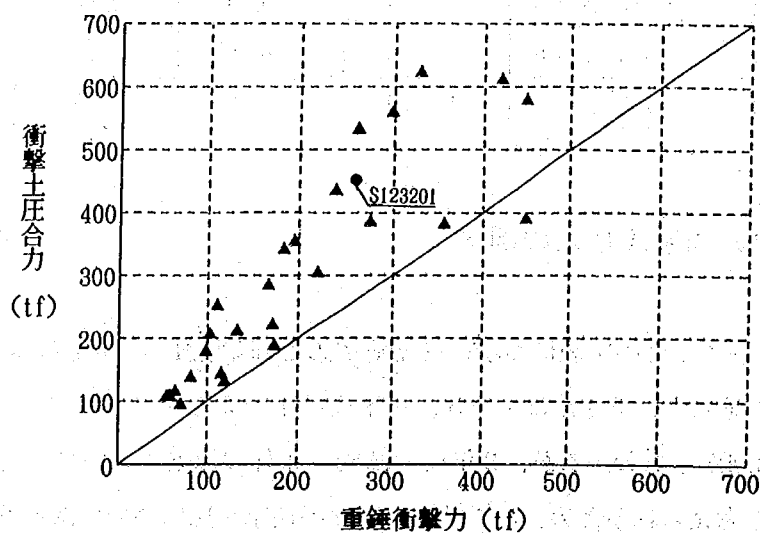


図-5.5 (c) 重錘衝撃力と衝撃土圧合力（元波形）の関係（4年度）

5. 2. 1 重錘衝撃力と衝撃土圧の推定

ここでは、実験結果をもとに重回帰分析を行って重錘衝撃力、衝撃土圧合力および重錘落下位置直下の土圧を推定してみる。表-5.4に実験結果の一覧表を示す。

表-5.4 実験結果一覧表

実験番号	T 敷砂層厚 (cm)	W 重錘重量 (tf)	H 落下高さ (m)	D 重錘直径 (cm)	重 錘 衝撃力 (tf)	土圧合力 (元波形) (tf)	重錘落下位置直 下の土圧最大値 (kgf/cm ²)
B091101	90	1	10	90	59.1	114.5	7.6
B091201	90	1	20	90	97.7	178.7	15.2
B091301	90	1	30	90	131.5	209.9	18.8
B093101	90	3	10	130	177.3	187.9	27.3
B093201	90	3	20	130	262.7	531.2	43.7
B093301	90	3	30	130	355.0	381.2	57.7
B095101	90	5	10	155	281.0	385.2	37.5
B095201	90	5	20	155	444.2	389.6	46.0
B121101	120	1	10	90	54.2	106.8	4.3
B121202	120	1	20	90	79.7	136.9	6.1
B121301	120	1	30	90	119.4	142.1	8.5
B123101	120	3	10	130	109.8	251.3	11.7
B123201	120	3	20	130	185.7	341.1	18.8
B123303	120	3	30	130	237.0	435.0	22.8
B125101	120	5	10	155	196.2	353.8	16.7
B125201	120	5	20	155	324.8	622.6	32.6
B125301	120	5	30	155	458.7	578.4	36.8
B151101	150	1	10	90	57.0	107.9	2.9
B151201	150	1	20	90	71.6	93.7	5.2
B151301	150	1	30	90	106.4	130.1	6.9
B153102	150	3	10	130	105.9	204.8	7.6
B153202	150	3	20	130	169.8	220.2	6.7
B153301	150	3	30	130	222.6	303.3	8.9
B155101	150	5	10	155	175.1	283.2	8.9
B155201	150	5	20	155	298.9	559.2	17.3
B155301	150	5	30	155	429.6	611.0	24.6

(1) 重錘衝撃力の推定

重錘衝撃力を以下に示す三種類の重回帰モデルで求めてみる。各式におけるW、H、(T/D)、Tは説明変数であり、a～dは偏回帰係数である。

$$P_1 = a \cdot W^b \cdot H^c \quad \text{式 (5.11)}$$

$$P_2 = a \cdot W^b \cdot H^d \cdot (T/D)^d \quad \text{式 (5.12)}$$

$$P_3 = a \cdot T^b \cdot W^d \cdot H^d \quad \text{式 (5.13)}$$

ここに、 $P_1 \sim P_3$: 重錘衝撃力 (tf)

W : 重錘重量 (tf)

H : 重錘の落下高さ (m)

T/D : 敷砂層厚/重錘直径

T : 敷砂層厚 (m)

$a \sim d$: 偏回帰係数

重回帰分析によって得られた各偏回帰係数を上式へ代入すると次の式が得られる。

$$P_1 = 12.11 \cdot W^{0.827} \cdot H^{0.656}, \quad (\gamma = 0.963) \quad \text{式 (5.14)}$$

$$P_2 = 13.74 \cdot W^{0.605} \cdot H^{0.675} \cdot (T/D)^{-0.693}, \quad (\gamma = 0.988) \quad \text{式 (5.15)}$$

$$P_3 = 2.472 \cdot T^{-0.577} \cdot W^{0.939} \cdot H^{1.198}, \quad (\gamma = 0.962) \quad \text{式 (5.16)}$$

ここに、 γ : 各重回帰式の重相関係数

以上の三種類の重回帰式の中では、説明変数に T/D を用いている式 (5.15) の重相関係数が最も 1 に近い。一方、落石の衝撃力は落石対策便覧にラーメの定数を 100tf/m^2 とした場合の式が次のように提示されており、両者の各係数は比較的似通っていることがわかった。

$$P = 15.49 \cdot W^{0.667} \cdot H^{0.600} \quad \text{式 (5.17)}$$

(2) 衝撃土圧合力の推定

同様に衝撃土圧合力の重回帰式を求めると、以下の式が得られる。

$$Z_1 = 35.16 \cdot W^{0.782} \cdot H^{0.452}, \quad (\gamma = 0.936) \quad \text{式 (5.18)}$$

$$Z_2 = 38.28 \cdot W^{0.631} \cdot H^{0.465} \cdot (T/D)^{-0.473}, \quad (\gamma = 0.951) \quad \text{式 (5.19)}$$

$$Z_3 = 3.622 \cdot T^{-0.321} \cdot W^{0.928} \cdot H^{1.203}, \quad (\gamma = 0.923) \quad \text{式 (5.20)}$$

ここに、 $Z_1 \sim Z_3$: 元波形による土圧合力 (tf)

W : 重錘重量 (tf)

H : 重錘の落下高さ (m)

T/D : 敷砂層厚/重錘直径

T : 敷砂層厚 (m)

$a \sim d$: 偏回帰係数

γ : 各重回帰式の重相関係数

以上の三種類の重回帰式の中では、(1) と同様に説明変数に T/D を用いている式 (5.19) の重相関係数が最も 1 に近い。

(3) 重錘落下位置直下の土圧の推定

同様に重錘落下位置直下のロードセルによる土圧最大値の重回帰式を求めると、以下の式が得られる。

$$B_1 = 0.113 \cdot W^{0.793} \cdot H^{0.691}, \quad (\gamma = 0.728) \quad \text{式 (5.21)}$$

$$B_2 = 2.056 \cdot W^{-0.014} \cdot H^{0.660} \cdot (T/D)^{-2.624}, \quad (\gamma = 0.975) \quad \text{式 (5.22)}$$

$$B_3 = 1.202 \cdot T^{-2.638} \cdot W^{0.845} \cdot H^{0.747}, \quad (\gamma = 0.923) \quad \text{式 (5.23)}$$

ここに、 $B_1 \sim B_3$: 重錘落下位置直下の土圧 (kgf/cm²)

W : 重錘重量 (tf)

H : 重錘の落下高さ (m)

T/D : 敷砂層厚/重錘直径

T : 敷砂層厚 (m)

$a \sim d$: 偏回帰係数

γ : 各重回帰式の重相関係数

以上の三種類の重回帰式の中では、(1)、(2)と同様に説明変数に T/D を用いている式(5.22)の重相関係数が最も1に近い。

以上のように、重錘衝撃力、衝撃土圧合力および重錘落下位置直下の土圧のいずれの場合においても説明変数に T/D を用いたモデルの重相関係数が最も1に近かったことから、重錘衝撃力、衝撃土圧合力および重錘落下位置直下の土圧の推定においては T/D の要素が不可欠であることがわかる。

5. 2. 2 落下高さと土圧合力—衝撃力比

図-5.6に、重錘重量ごとの落下高さと土圧合力—衝撃力比の関係を示す。この図から、一部逆転することもあるが、落下高さが大きくなるにつれて比が小さくなる傾向があることがわかる。また、図-5.7に落下高さごとの重錘衝撃力と土圧合力の関係を示す。この図の回帰曲線の傾きからも、落下高さが大きくなると比が小さくなることがわかる。ただし、落下高さ20mについては相関係数が0.78と小さく信頼性が低い。

なお、このことは式(5.19)を式(5.15)で割った次の式からも確認できる。

$$Z_2/P_2 = 2.782 \cdot W^{0.026} \cdot H^{-0.210} \cdot (T/D)^{0.220} \quad \text{式 (5.24)}$$

5. 2. 3 敷砂層厚と土圧合力—衝撃力比

図-5.8に、落下高さごとの敷砂層厚と土圧合力—衝撃力比の関係、図-5.9に、敷砂層厚ごとの重錘衝撃力と土圧合力の関係を示す。この図から、敷砂層厚90cmについては相関係数が小さいのでこれを除けば、120cm、150cmの場合にも、明確な差は認められない。

5. 2. 4 重錘重量と土圧合力—衝撃力比

図-5.10に、敷砂層厚ごとの重錘重量と土圧合力—衝撃力比の関係、図-5.11に、重錘重量ごとの重錘衝撃力と土圧合力の関係をそれぞれ示す。この図から、いずれの相関係数も小さく明確な関係は認められない。ちなみに、式(5.24)によれば、が重錘重量にあまり影響されないことが示される。

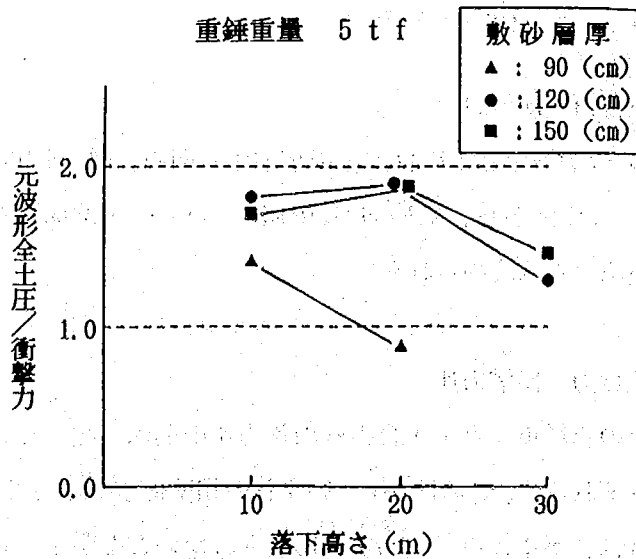
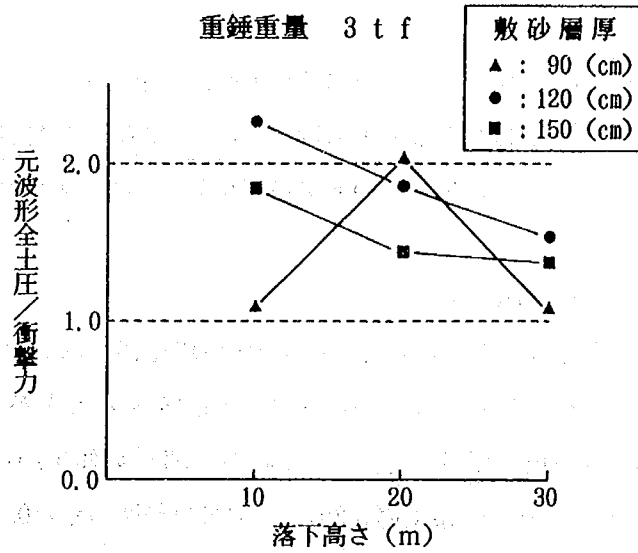
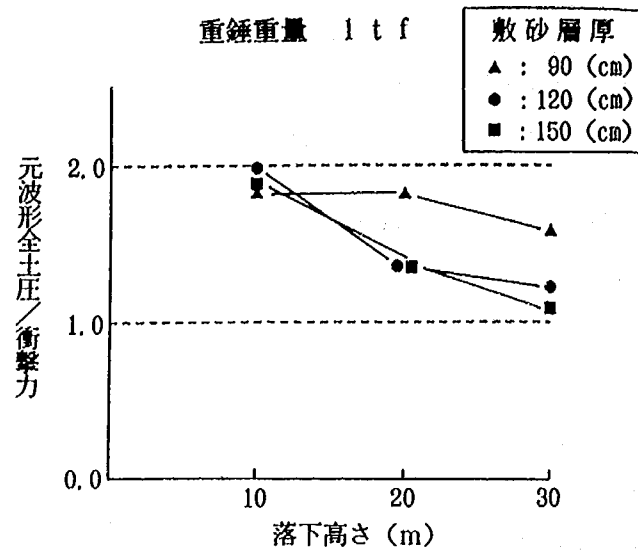


図-5.6 全土圧比と落下高さとの関係

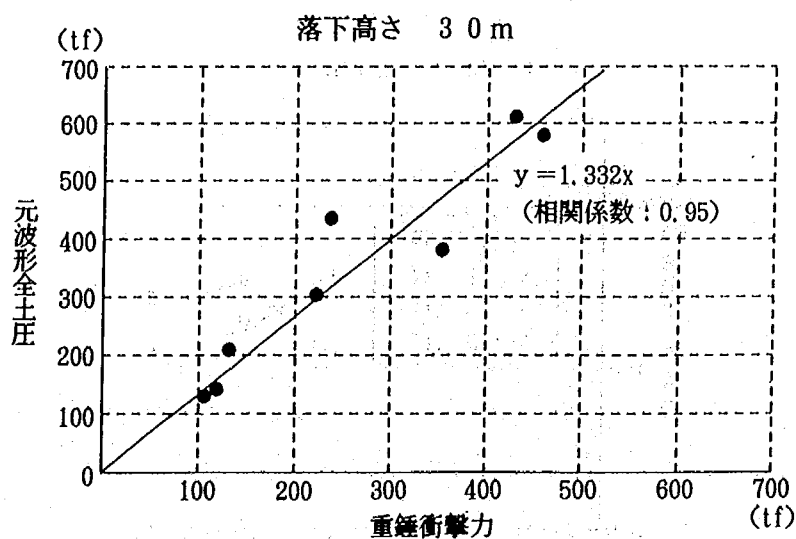
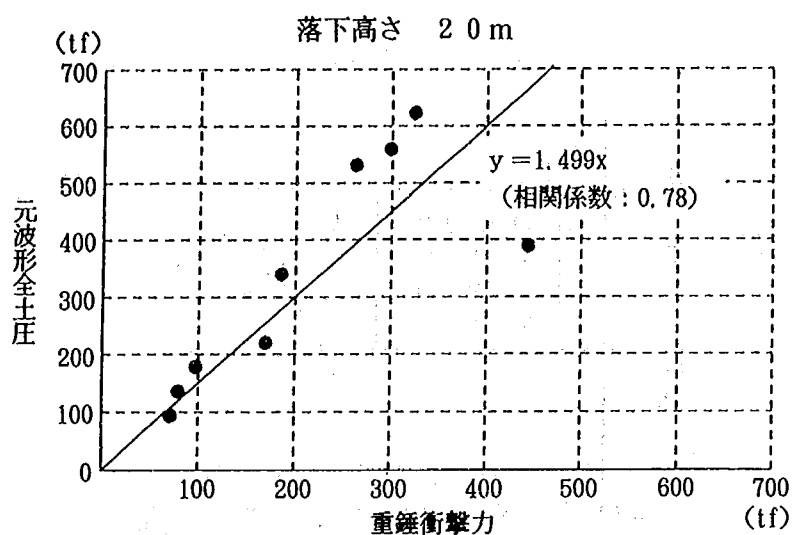
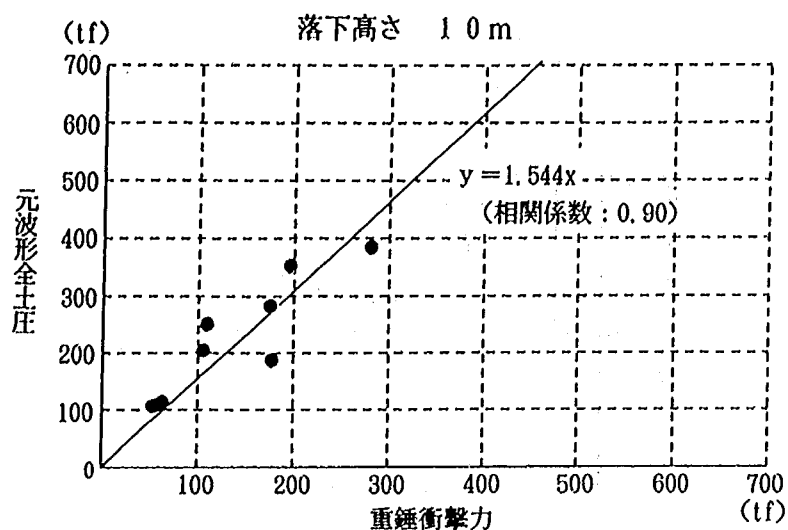
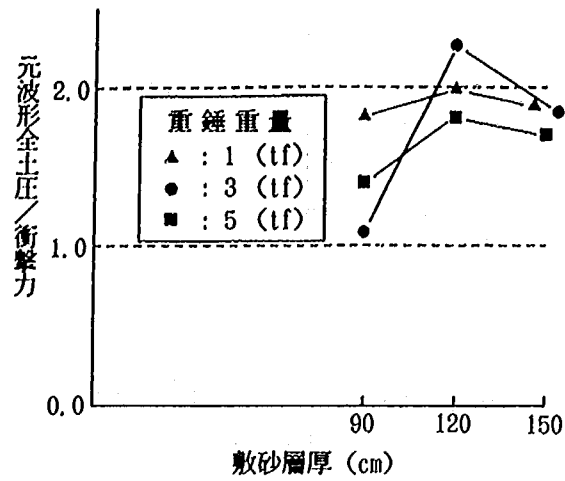
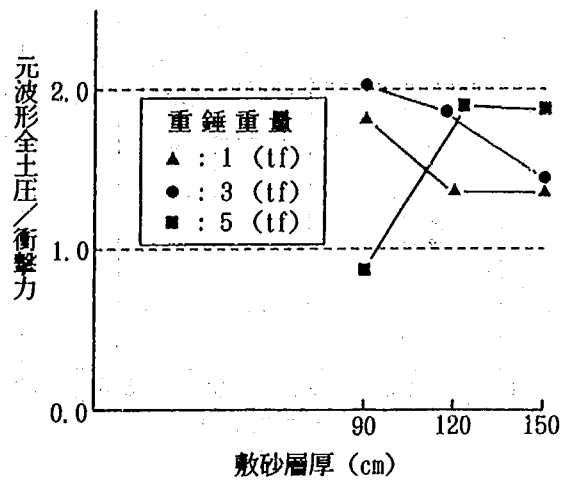


図-5.7 落下高さごとの元波形全土圧と重錘衝撃力との関係

落下高さ 10 m



落下高さ 20 m



落下高さ 30 m

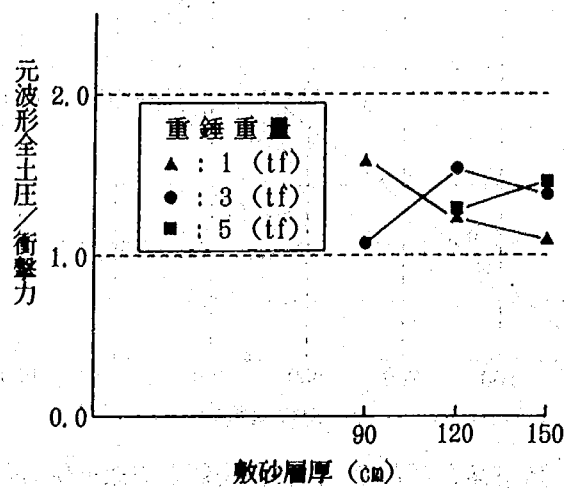


図-5.8 全土圧比と敷砂層厚との関係

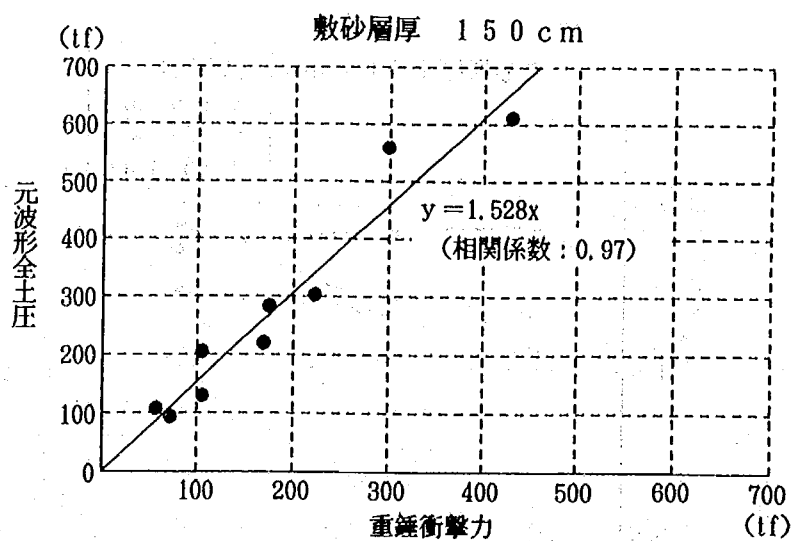
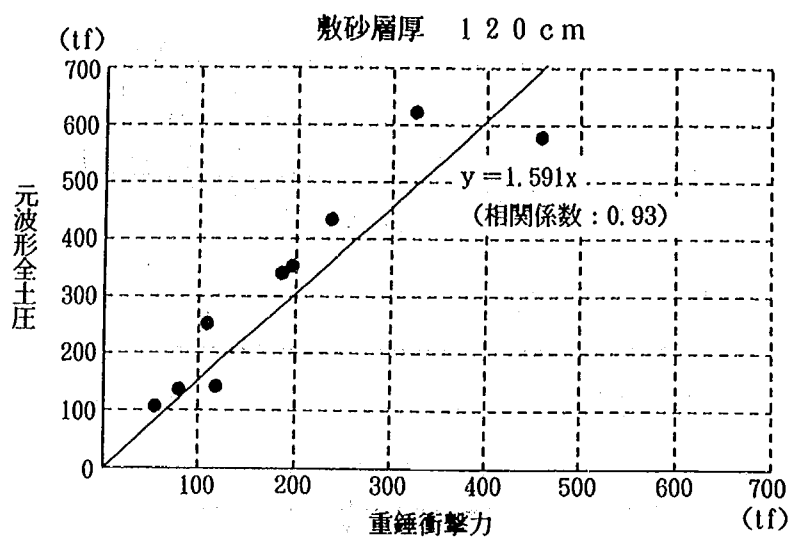
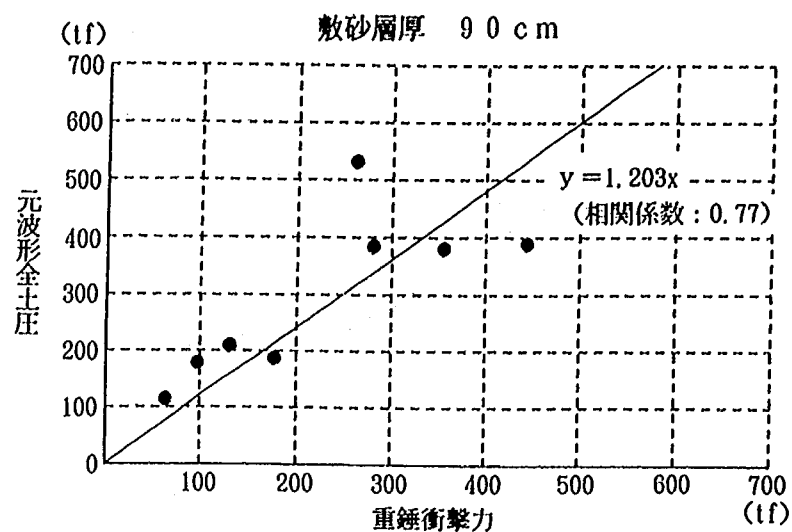


図-5.9 敷砂層厚ごとの元波形全土比と重錘衝撃力との関係

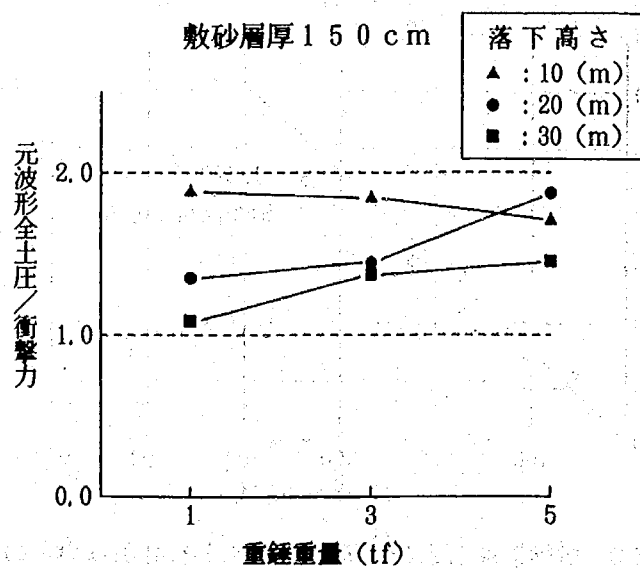
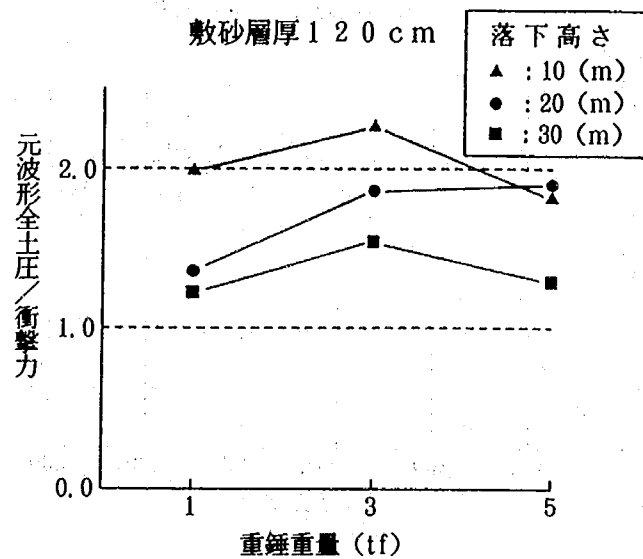
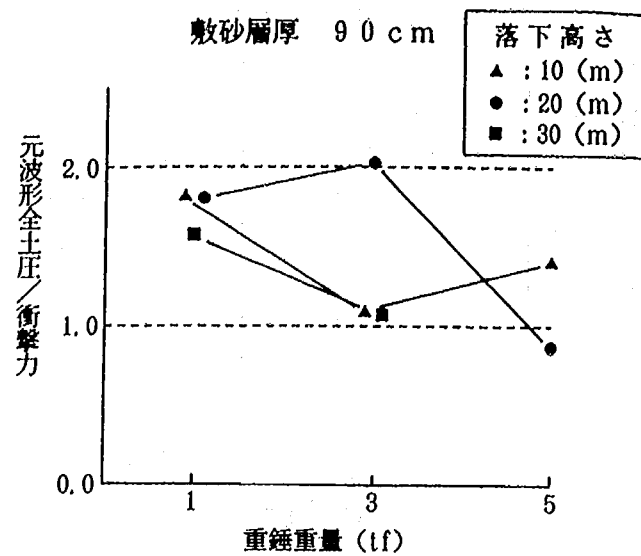


図-5.10 全土圧比と重錘重量との関係

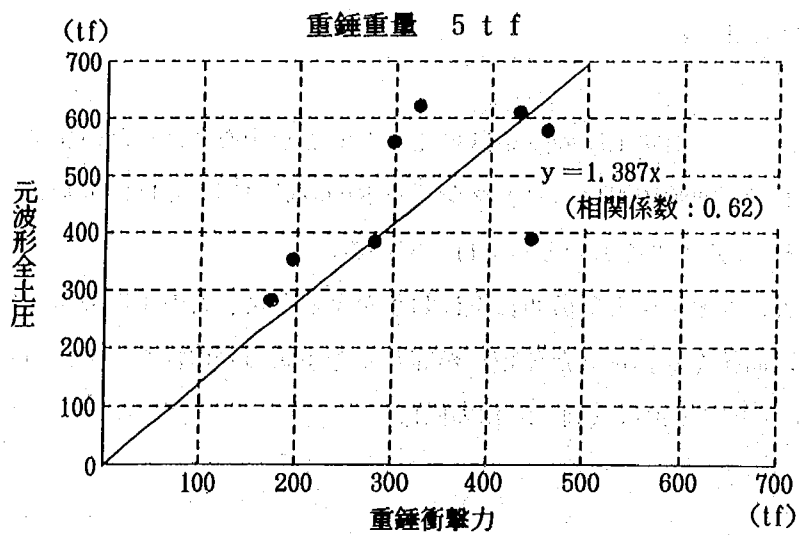
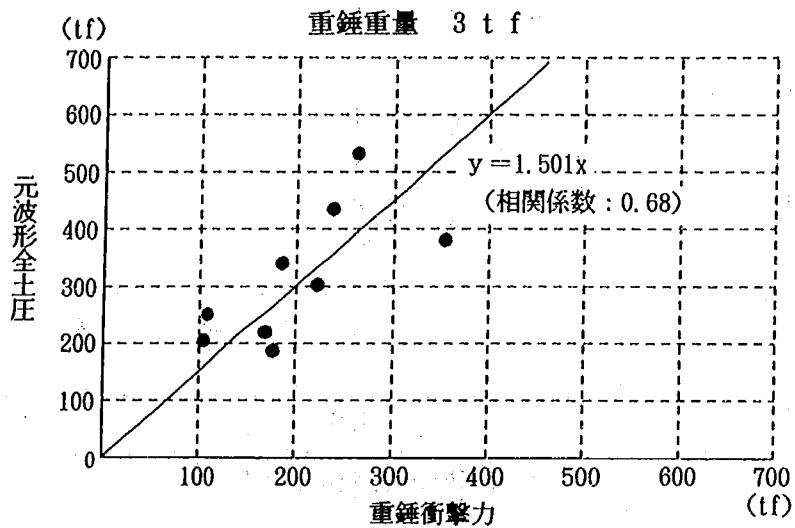
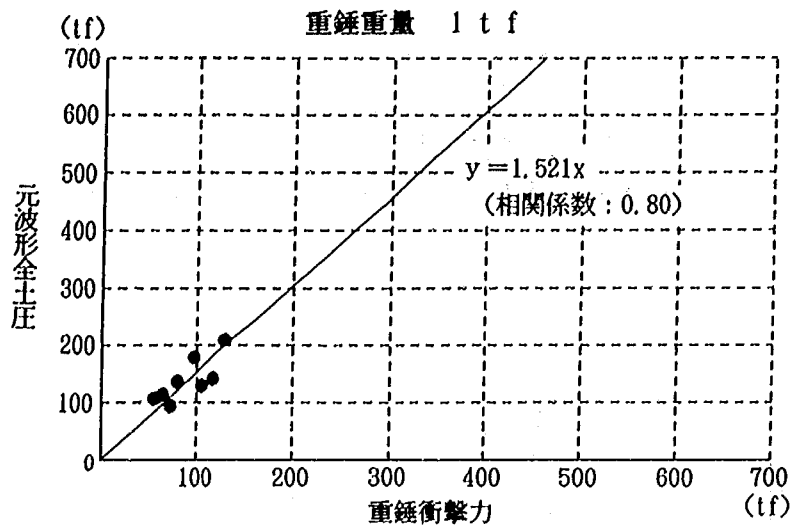


図-5.11 重錘重量ごとの元波形全土圧と重錘衝撃力との関係

5. 2. 5 重錘落下位置直下の土圧

図-5.12に、敷砂層厚（ T ）を重錘直径（ D ）で割った値と重錘落下位置直下の最大土圧との関係を示す。この図から、図-5.2に示した衝撃力割増し係数と T/D の関係と同様な傾向が読み取れるが、より T/D の影響を強く受ける結果となっている。これは、式（5.15）と式（5.22）における T/D の係数を比較することによって確認することができる。

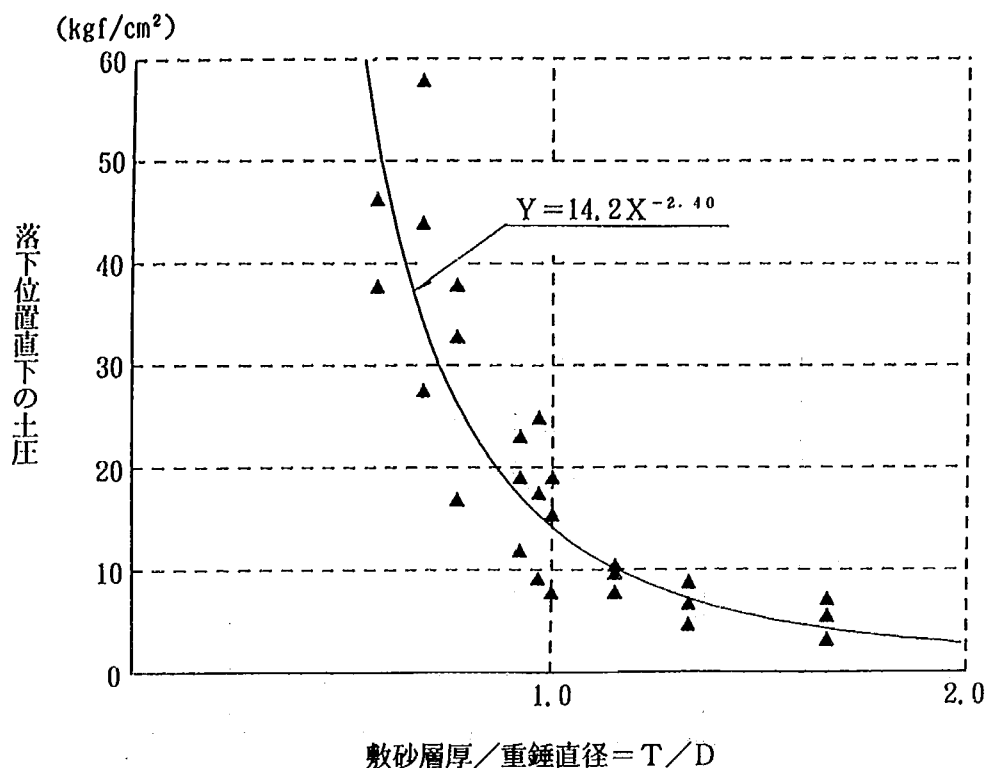


図-5.12 T/D と底面土圧（B1）との関係

5. 3 衝撃土圧の分布幅

図-5.13に示すように、最大衝撃土圧の分布は重錘落下位置を中心軸としたつりがね状に曲線分布していると考えられるが、落石対策便覧におけるロックシェッドの設計は図-5.14に示すように、落石衝撃力が敷砂層厚に対し1:1の範囲に等分布するものとして行っている。

今回の実験で測定された衝撃土圧を等分布荷重におきかえるため、この土圧分布の最大値を変えずに衝撃土圧合力（中心軸回りに曲線を回転させた体積）が等しくなるような円柱を考え、円柱の直径を有効分布幅 B_e 、土圧の分布角度を θ と定義する（図-5.13参照）。

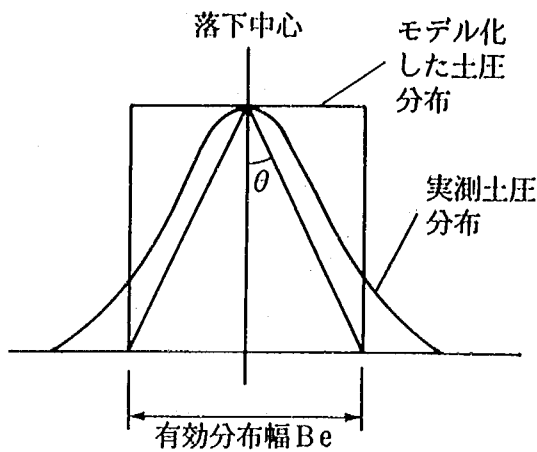


図-5.13 分布角度

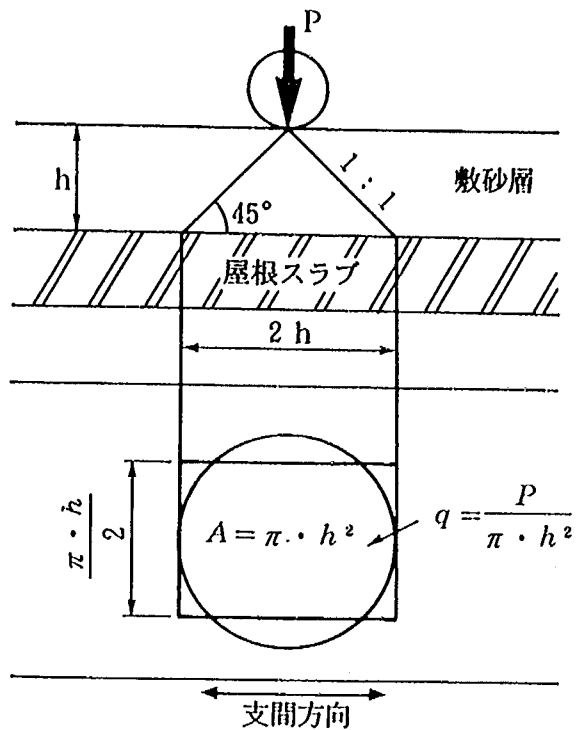


図-5.14 等分布荷重の考え方⁹⁾

5. 3. 1 有効分布幅 Be

表-5.5に、3年度および4年度の実験結果より求めた有効分布幅の一覧表を示す。また、図-5.15に各条件と有効分布幅の関係を示す。この図から、敷砂層厚が大きくなると有効分布幅は増加する傾向が見られるが、落下高さ、重錘重量との明確な関係は認められない。したがってここでは、敷砂層厚と有効分布幅の関係について検討する。

図-5.16に有効分布幅 (Be) を重錘直径 (D) で割った値と敷砂層厚 (T) を重錘直径 (D) で割った値との関係を示す。図中の実線は実験値から求めた回帰直線であり、3年度は式 (5.25)、4年度は式 (5.26) でそれぞれ表される。

$$Be / D = 0.922 \cdot (T / D) + 0.270 \quad \text{式 (5.25)}$$

$$Be / D = 1.347 \cdot (T / D) + 0.010 \quad \text{式 (5.26)}$$

この図から、有効分布幅と敷砂層厚は正比例関係にあることがわかるが、3年度については衝撃土圧合力と同様にばらつきが大きいため、転圧回数による影響に関して定量的な検討は行わない。

5. 3. 2 分布角度 θ

分布角度は以下の式より算出される。

$$\theta = \tan^{-1} (Be / 2 / T) \quad \text{式 (5.27)}$$

3年度の実験結果は非常にばらつきが大きいため、ここでは4年度についてのみ検討を行う。図-5.17に

表-5.5 有効分布幅Be一覧表

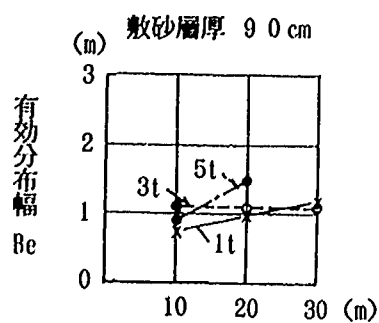
(3年度)

3 年 度	実験番号	重 錘 衝撃力 (tf)	土圧合力 (70-リット) (tf)	有効分布幅 Be(m)
	091101	57.7	87.2	0.70
	091102	75.5	158.4	0.79
	091201	105.3	551.2	1.18
	091202	107.7	223.8	0.81
	091301	147.9	564.4	1.13
	091302	135.3	574.9	1.16
	093101	58.8	618.2	1.35
	093102	61.5	413.5	0.99
	093201	107.9	1408.0	1.44
	093202	108.0	640.2	1.03
	093302	166.2	1221.7	1.24
	093303	145.1	819.8	1.05
	095101	58.9	670.1	1.00
	095102	57.4	412.3	0.82
	095201	99.9	2683.4	1.89
	095202	106.5	948.7	1.13
	121101	55.5	117.2	0.89
	121102	51.8	312.9	1.58
	121201	104.5	481.9	1.57
	121202	115.4	434.8	1.29
	121301	146.8	746.2	1.72
	121302	144.9	554.2	1.45
	123101	53.8	513.4	1.52
	123102	53.5	270.2	1.03
	123201	76.4	652.5	1.24
	123202	95.8	974.5	1.49
	123301	98.2	1482.4	1.75
	123302	99.6	1327.4	1.68
	125101	43.8	301.3	1.04
	125102	45.7	814.0	1.52
	125201	78.2	1372.1	1.67
	125202	91.4	1331.5	1.60
	125301	93.4	1807.4	2.04
	151101	58.9	126.2	1.10
	151102	63.4	105.2	0.93
	151201	84.3	287.1	2.16
	151202	107.5	492.4	1.99
	151301	109.3	317.6	1.56
	151302	152.5	564.3	1.87
	153101	42.0	612.8	1.97
	153102	41.4	249.8	1.22
	153201	75.3	400.2	1.23
	153202	78.0	498.3	1.38
	153301	100.4	579.6	1.30
	153302	109.9	976.2	1.77
	155101	38.7	553.2	1.66
	155102	39.4	573.1	1.60
	155201	61.8	1355.8	2.21
	155202	66.5	638.7	1.50
	155301	91.5	2248.3	2.51
	181101	59.9	217.7	1.99
	181201	103.3	209.1	1.93
	181301	120.4	381.5	1.87
	183101	43.3	374.2	1.92
	183201	77.8	1028.1	2.44
	183301	104.5	653.1	1.66
	185101	41.3	282.2	2.45
	185201	63.0	398.5	2.32
	185301	107.4	720.0	1.72

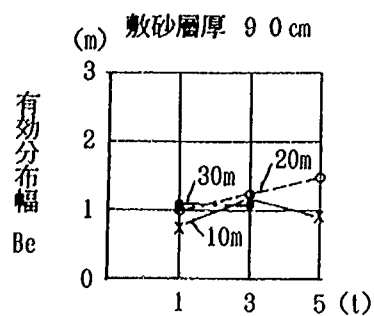
(4年度)

4 年 度	実験番号	重 錘 衝撃力 (tf)	土圧合力 (70-リット) (tf)	有効分布幅 Be(m)
	B091101	59.1	122.5	1.44
	B091201	97.7	217.3	1.33
	B091301	131.5	247.2	1.32
	B093101	177.3	133.0	0.90
	B093201	262.7	632.8	1.39
	B093301	355.0	358.6	0.94
	B095101	281.0	353.4	1.18
	B095201	444.2	353.9	1.01
	B121101	54.2	122.0	1.99
	B121202	79.7	133.8	1.76
	B121301	119.4	150.6	1.64
	B123101	109.8	241.6	1.77
	B123201	185.7	361.4	1.67
	B123303	237.0	524.3	1.88
	B125101	196.2	347.4	1.60
	B125201	324.8	655.9	1.60
	B125301	458.7	528.9	1.39
	B151101	57.0	118.6	2.34
	B151201	71.6	98.9	1.57
	B151301	106.4	123.5	1.63
	B153102	105.9	183.5	1.92
	B153202	169.8	248.2	2.05
	B153301	222.6	369.9	2.28
	B155101	175.1	279.9	1.98
	B155201	298.9	610.5	2.07
	B155301	429.6	641.2	1.84
	S123201	254.1	391.3	1.46

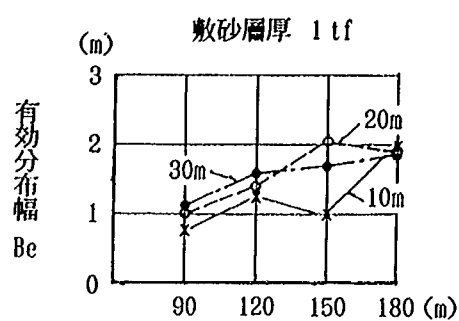
落下高さによる影響



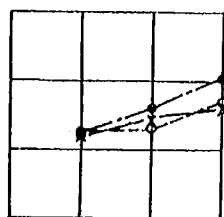
重錘重量による影響



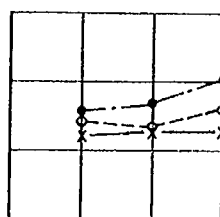
敷砂層厚さによる影響



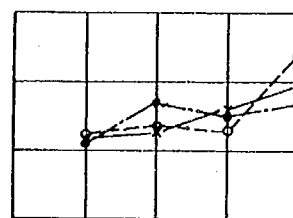
敷砂層厚 120 cm



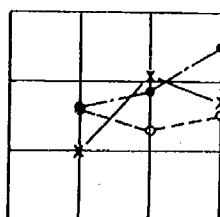
敷砂層厚 120 cm



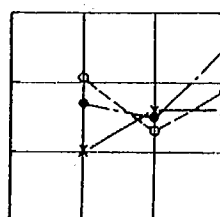
重錘重量 3 tf



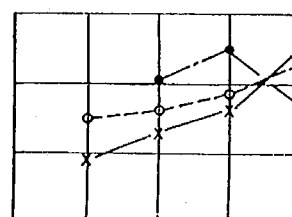
敷砂層厚 150 cm



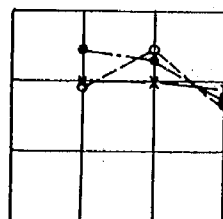
敷砂層厚 150 cm



重錘重量 5 tf



敷砂層厚 180 cm



敷砂層厚 180 cm

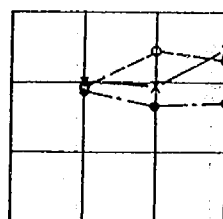


図-5.15 (a) 各条件における有効分布幅 Be (3 年度)

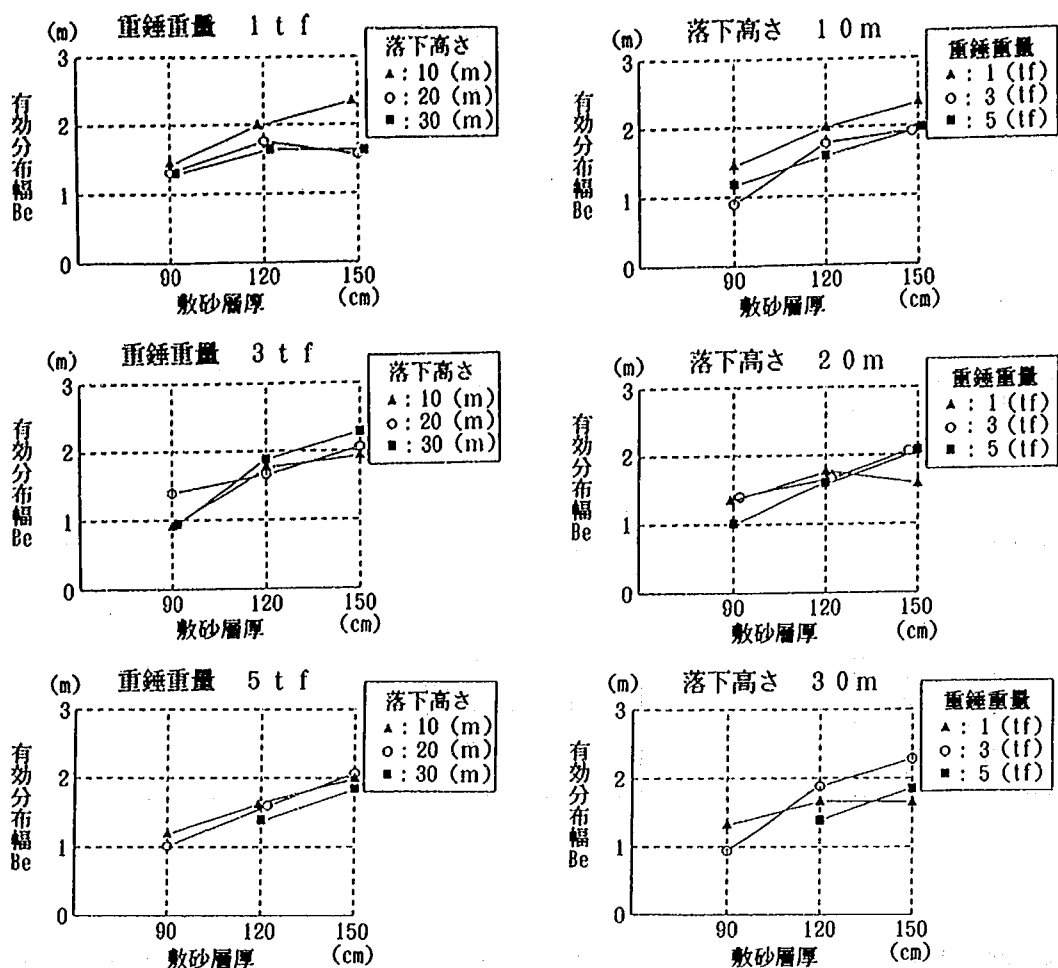


図-5.15 (b) 敷砂層厚と有効分布幅 Be との関係 (4 年度)

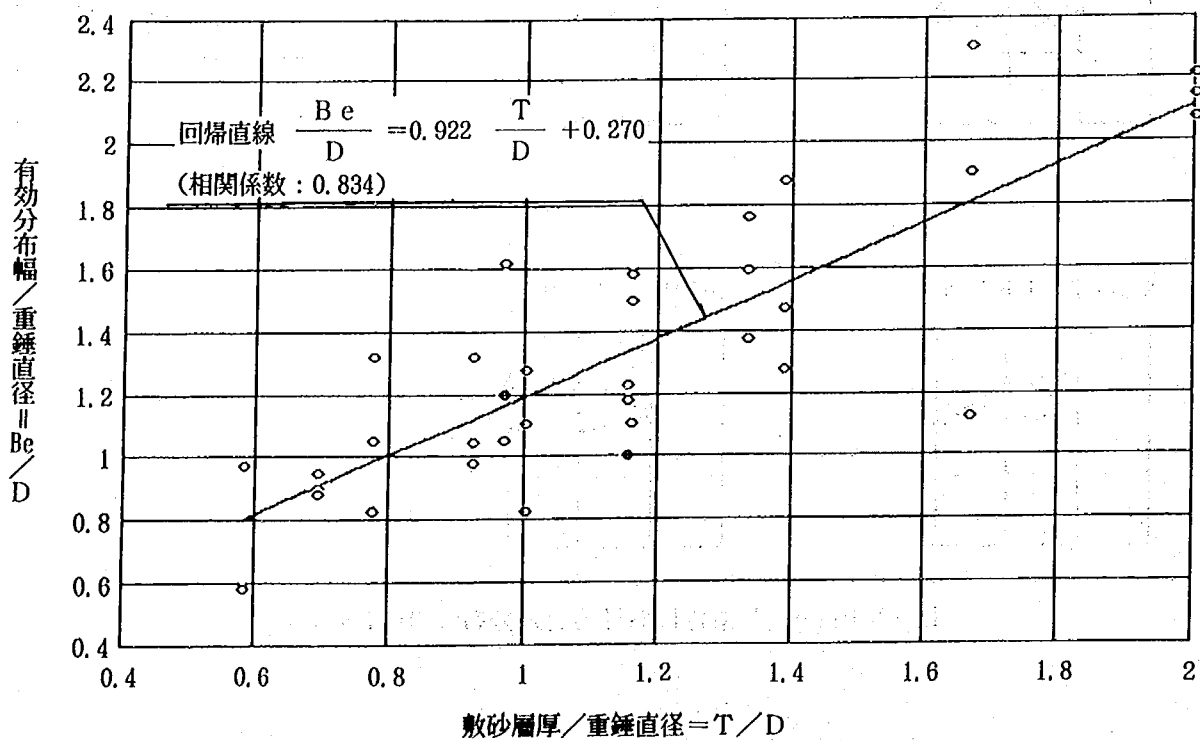


図-5.16 (a) T/D と Be/D との関係 (3 年度)

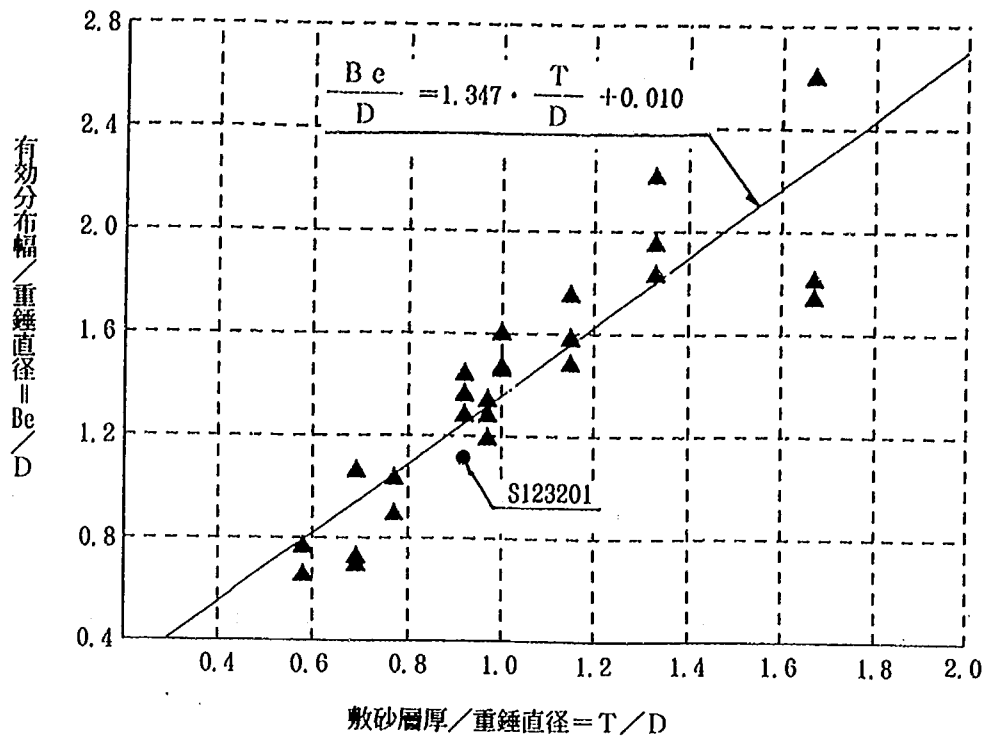


図-5.16 (b) T/D と Be/D との関係 (4年度)

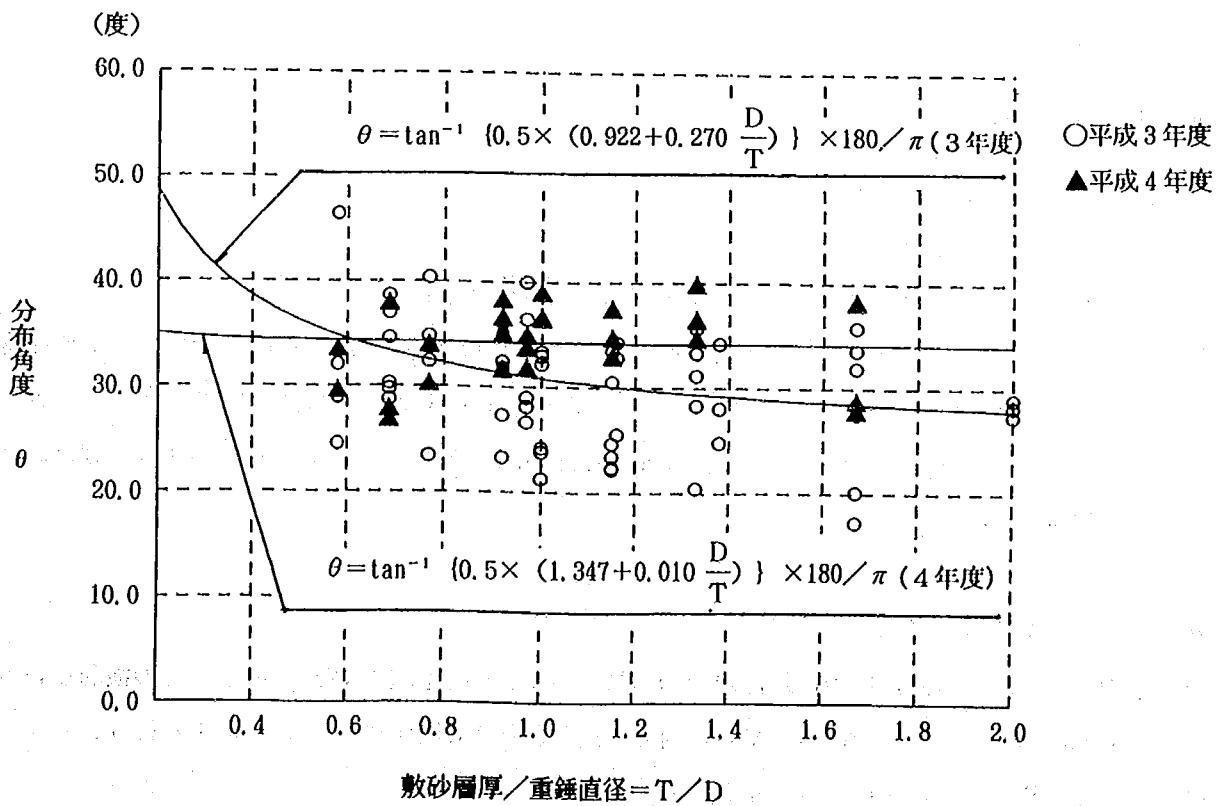


図-5.17 T/D と分布角度との関係

分布角度と敷砂層厚 (T) を重錘直径 (D) で割った値との関係を示す。この図から、 θ は $27^\circ \sim 40^\circ$ となり、これは敷砂層厚に対する勾配になおすと $1:0.5 \sim 1:0.8$ で落石対策便覧の分散勾配 $1:1$ より急勾配となることがわかる。

5. 4 衝撃土圧測定値の信頼性に関する検討

図-5.6~11で示したように、平成4年度に実施した実験によれば、衝撃土圧の大きさは落石重量、敷砂層厚、落下高さ等のパラメータに対して必ずしも一定の傾向を示さなかった。

土圧荷重の測定については平成3年度の実験において良好な結果が得られず、このため4年度の実験では測定精度の向上のための工夫を行ったが、上述の結果が正しい測定値によるものかどうか再吟味する必要があると考えた。

そこで、ここでは平成4年度の実験データを対象に、重錘衝撃力と土圧荷重の測定値の信頼性に関する検討を行った結果を述べる。

5. 4. 1 重錘衝撃力の測定値の信頼性

落石が敷砂層に接触してほぼ静止するまでの時間内において、この間の速度変化と重錘加速度の時間積分値が等しくなるかどうかを調べた。すなわち、

$$v_0 - 0 \approx \int_0^T \alpha(t) dt \quad \text{式 (5.28)}$$

ここに、 v_0 : 入射速度 ($=\sqrt{2gH}$)

$\alpha(t)$: 重錘加速度

T : 落石が敷砂に接触してから停止するまでの時間

計算結果の一例を図-5.18に示す。同図によれば、入射速度は 14.0m/s であったのに対し、重錘加速度を積分して得られた速度変化は 15.2m/s となっている。このような計算を各ケースについて実施し、両者の比をプロットすると図-5.19が得られた。速度比は $0.95 \sim 1.05$ の間にあり、これより衝撃加速度の測定値はほぼ信頼できると判断される。

5. 4. 2 土圧測定値の信頼性

重錘衝撃力 (加速度) の測定値の信頼性が認められたので、つぎに土圧測定値の信頼性の検討を行う。これは、図-5.20に示すように、敷砂層 (V) に対して運動量保存則を適用することにより行う。

このため、まず物理量を以下のように定義する。

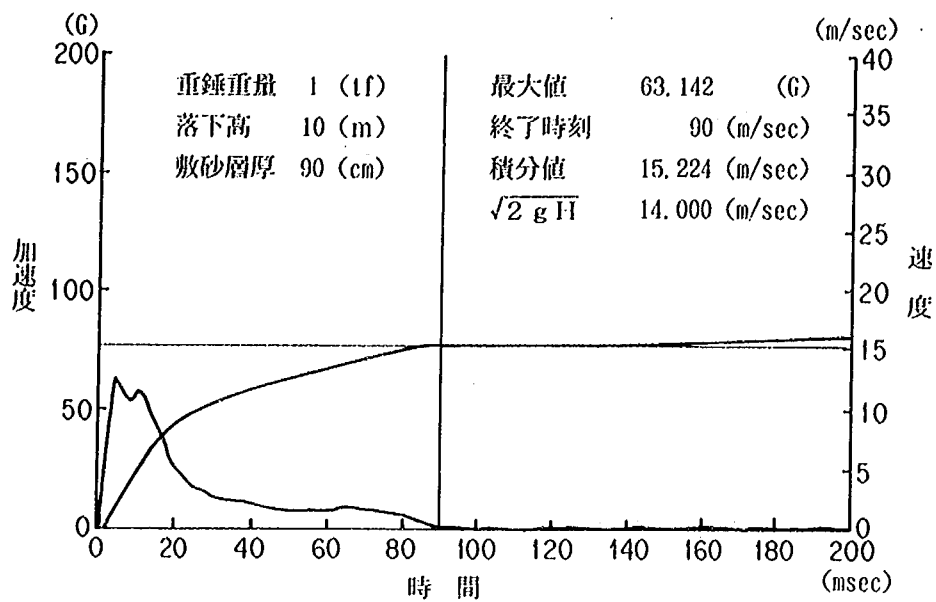


図-5.18 重錘の速度変化の計算結果 (実験番号B091101)

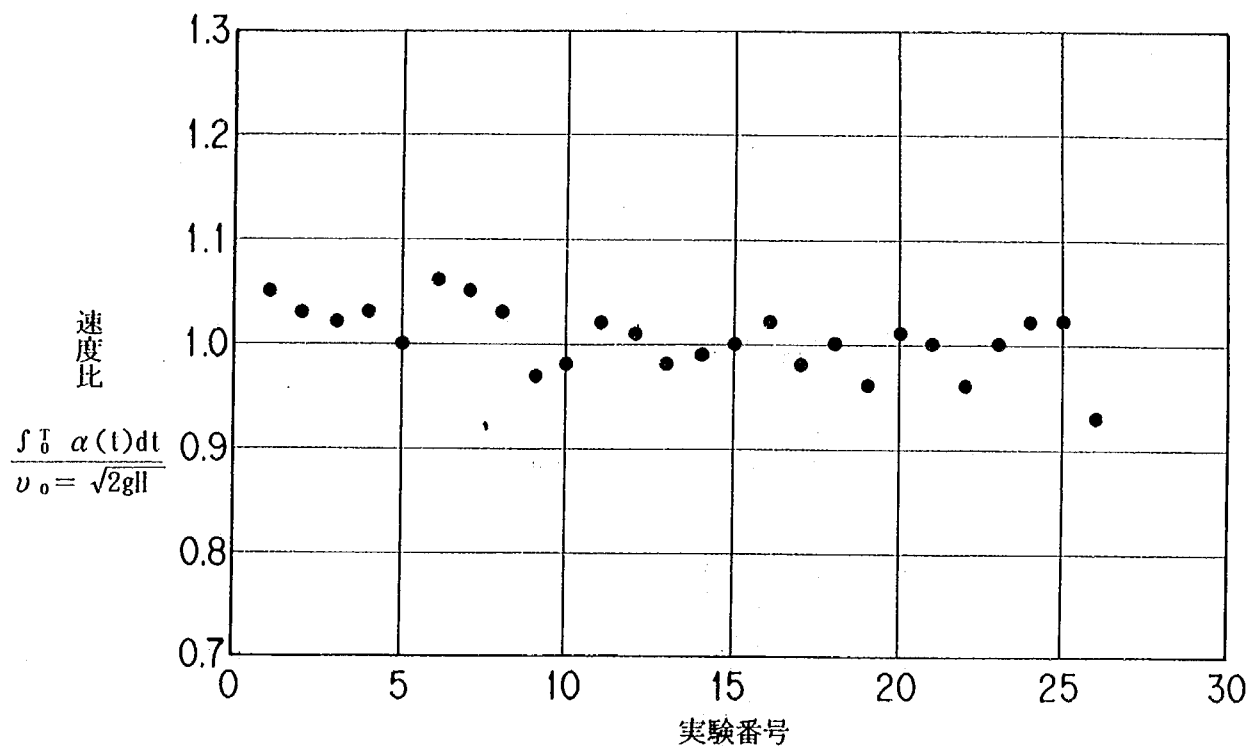


図-5.19 速度比の計算結果

$V(t)$: 敷砂の体積

$\rho(x, y, z; t)$: 敷砂の密度

$u(x, y, z; t)$: 敷砂の x 方向変位

$P(t)$: 重錘より敷砂に作用する力

S : 敷砂の境界

$E(t)$: 境界 S から敷砂に作用する力

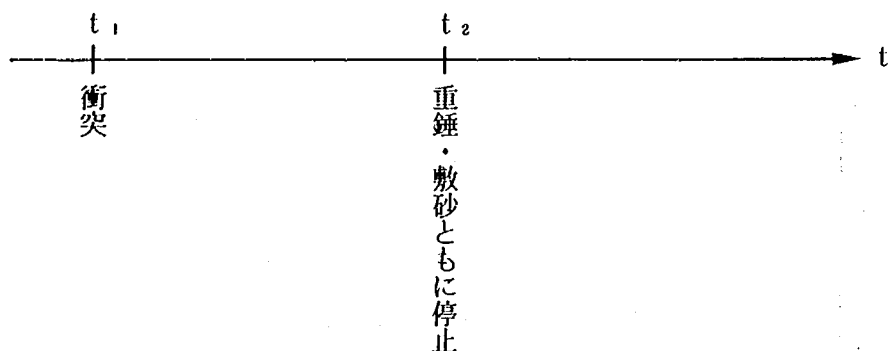
$e(t)$: 敷砂底面での土圧

M : 敷砂の質量

ここに、

$$M = \int_V \rho \, dV, \quad E(t) = \int_S e(t) \, dS$$

また、時間に関して以下のように定義する。



ニュートンの第2法則によれば、「連続体の任意の体積について、運動量の時間変化の割合は、外力の大きさに等しい。」

これを敷砂全体（鉛直方向について）に適用すれば次式が成り立つ。

$$P(t) - \int_S e(t) \, dS + \int_V \rho \, g \, dV = \frac{d}{dt} \int_V \rho \frac{\partial u}{\partial t} \, dV \quad \text{式 (5.29)}$$

よって、

$$P(t) - E(t) + Mg = \frac{d}{dt} \int_V \rho \frac{\partial u}{\partial t} \, dV \quad \text{式 (5.30)}$$

上記を $t_1 \leq t \leq t_2$ に関し積分すれば、

$$\int_{t_1}^{t_2} \{P(t) - E(t) + Mg\} \, dt = \left(\int_V \rho \frac{\partial u}{\partial t} \, dV \right) \Big|_{t_1}^{t_2} \quad \text{式 (5.31)}$$

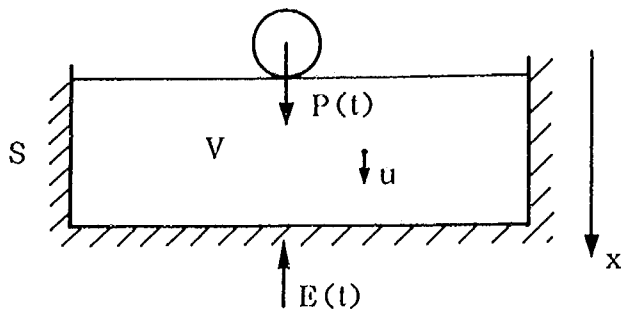


図-5.20

ここに、 $t = t_1, t_2$ において敷砂は停止しているから

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t_1} = \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t_2} = 0$$

よって、(右辺) = 0。

したがって、式 (5.31) は次のようになる。

$$\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} (E(t) - Mg) dt \quad \text{式 (5.32)}$$

$E'(t) = E(t) - Mg$ とおけば、

$$\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} E'(t) dt \quad \text{式 (5.33)}$$

ここに、 $E'(t)$ は $E(t)$ の静止時 (衝突前) からの増分である。

式 (5.33) は、時刻 t_1 から t_2 の間において、落石の衝撃が敷砂に及ぼす力積は、敷砂境界反力の力積に等しいことを示している。

式 (5.33) の計算を26ケースの実験データについて実施した結果をまとめて図-5.21に示す。

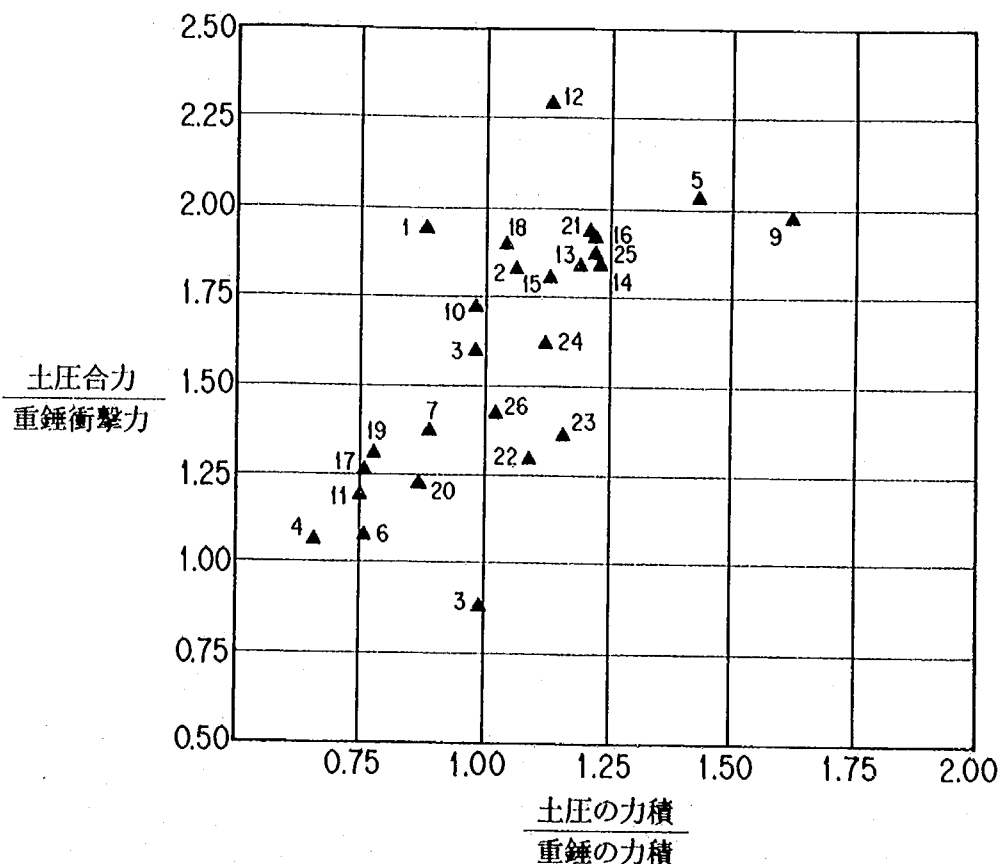


図-5.21 力積の比と土圧合力／重錘衝撃力との関係

同図において、横軸は式 (5.33) の両辺の土圧の力積と重錘の力積の比をとり、縦軸は測定された最大土圧合力と最大重錘衝撃力の比をとっている。

同図より、力積の比は0.66~1.62の間にばらついており、これより土圧の測定値はやや信頼性に欠けるようであることが示唆される。

また、同図において力積の比と最大土圧合力/最大重錘衝撃力の間には正の相関が見られる。

試みに、土圧の測定値が何らかの原因により誤差を含んでいたと仮定し、これに力積の比を乗じて補正した土圧を用いて図-5.21と同様の整理を行ってみたが、明確な傾向を見出すことはできなかった。

現時点では、ロックシェッドに直接作用する土圧合力の最大値は、重錘衝撃力よりも大きい値が実験的に得られているが、その定量的な評価を行うことができるには至っていない。

5. 5 考察のまとめ

5. 1~5. 4の考察は次のようにまとめられる。

- 1) 今回の実験範囲（重錘重量5tf、落下高さ30mまで）において、重錘衝撃力に及ぼす敷砂層厚と重錘直径との比（ T/D ）の影響係数を算出する式を導いた。この式によると敷砂層厚が落石直径より薄い場合には計算値を割り増す必要がある。また、敷砂層の締固め状態により振動便覧式におけるラーメ定数は変化する。
- 2) 衝撃土圧合力と重錘衝撃力との比は1:1~1:0.2と非常にばらつきが大きく、落下高さ、敷砂層厚、重錘重量との明確な関係は認められなかった。また、それぞれの測定値の信頼性を検討した結果、重錘衝撃力の測定値の信頼性は確かめられたが土圧の測定値はやや信頼性に欠けることがわかった。
- 3) 衝撃土圧の敷砂層厚に対する分散勾配は1:0.5~1:0.8であった。これにより、ロックシェッドに作用する衝撃荷重応力は現行設計法（勾配1:1）より大きくなることになる。

第6章 まとめおよび今後の課題

今回の実験およびその考察により次のことが明らかにされた。

- 1) 重錘重量5tf、落下高さ30mと実験規模が大きくなっても敷砂層がそれほど密でない状態では、最大重錘衝撃力は重錘直径と敷砂層厚が等しい場合には振動便覧式においてラーメ定数 $\lambda=100\text{tf/m}^2$ とおいた計算値程度となる。ただし、敷砂層厚の締固め密度が高い場合にはラーメ定数を大きくする必要がある。
- 2) 重錘衝撃力は、落下高さ、敷砂層厚、重錘重量、重錘直径の影響を受ける。特に、敷砂層厚と重錘直径との比の影響は大きく、敷砂層厚と重錘直径との比が1より小さくなると重錘衝撃力は振動便覧式による計算値より大きくなり割増す必要がある。一方、敷砂層厚と重錘直径との比が1より大きくなると衝撃力は計算値より小さくなるが、敷砂層厚が増加しても緩衝効果は小さい。
- 3) 砂の挙動により、衝撃力の緩衝効果を高めるためには、移動性能を有する砂層の存在が重要であることを確認した。
- 4) 衝撃土圧合力と重錘衝撃力との比は1:1~1:0.2と非常にばらつきが大きく、落下高さ、敷砂層厚、重錘重量との明確な関係は認められなかった。また、それぞれの測定値の信頼性を検討した結果、重錘衝撃力の測定値の信頼性は確かめられたが土圧の測定値はやや信頼性に欠けることがわかった。敷砂層を伝播した土圧に関しては今後の検討課題となった。
- 5) 衝撃土圧の敷砂層厚に対する分散勾配は1:0.5~1:0.8であり、ロックシェッドに作用する衝撃荷重応力は現行設計法（勾配1:1）より大きくなることが予想される。

参考文献

- 1) 例えば、南茂夫他：科学計測のための波形データ処理、CQ出版社、1986.
- 2) 土木学会：土木技術者のための振動便覧、pp. 515-517, 1985.
- 3) 建設省土木研究所動土質研究室：敷砂上の落石の衝撃力に関する実験報告書、土木研究所資料第1822号、1982.
- 4) 例えば、河野伊一郎他：土の力学、技報堂出版、1990.
- 5) 日本道路協会：落石対策便覧、1983.

落石衝撃力に関する重錘落下実験
報告書

I S S N 0386-5878
土木研究所資料 第3340号
平成7年3月 (1995)

松尾 修, 堤 達也
近藤 浩市

要 旨 ロックシェッドの屋根には、落石による衝撃力を吸収するために砂が敷かれている。その衝撃力緩衝効果を調べることを目的として、今回は、重錘重量、落下高さ、敷砂層厚等を変化させて大規模な重錘落下実験を行い、重錘の衝撃力、敷砂層を伝達した衝撃土圧等を測定した。また、実験結果を用いて、既往の衝撃力算出式の適用性をより広い範囲で検証し、さらに、伝達衝撃力の分布幅、大きさ、衝撃力緩和のための敷砂層圧の算定法について検討を行った。

キーワード：ロックシェッド, 重錘衝撃力, ラーメ定数, 重錘直径, 敷砂層厚

郵便はがき

郵便切手
は
つ
て
下
さ
い

3050804

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

地震防災部動土質研究室行

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3340号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印