

土 木 研 究 所 資 料

海域制御構造物の波力実験及び実験と現地測定 との対比に関する報告書

平成3年3月

建設省土木研究所
構 造 研 究 室

Copyright © (1991) 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。

海域制御構造物の波力実験及び実験と現地測定 との対比に関する報告書

構造研究室	室長	横山功一
	研究員	井上純三 ^{*1}
	研究員	澤田憲文
		伊関英彦 ^{*2}
		金子学

^{*1} 現在 建設省 土木研究所 企画部 橋梁計画官

^{*2} 現在 建設省 近畿地方建設局 和歌山工事事務所 道路管理課

要旨

スリット型の海域制御構造物について、部材波力に関する波力実験並びに全体波力が受ける海底勾配、天端高の影響を明らかにするための実験を行った。

その結果、部材波力は波高をパラメータとしてとりまとめることができるが、比例係数の値は重複波と碎波で異なったものとなる。碎波領域で水面上にある部材の応答は荷重と比較して小さくなる。また、設計において、合田式による計算波力を低減して求める場合、海底勾配が1/10では巻波碎波が発生し、波力も大きくなるため、急勾配のみの実験結果から低減係数を判断するのは危険であることが明らかとなった。

また、模型実験の妥当性を検討するため、現地測定データと模型実験データとを対比した。その結果、両者は比較的良く一致し、模型実験の妥当性が検証された。

キーワード：海域制御構造物、碎波、全体波力、部材波力、波力、実測値

ま え が き

建設省では、外洋に面した沿岸域の空間を有効かつ多目的に利用することを目的としてMMZ（マリン・マルチ・ゾーン）構想を推進している。この構想のもとに、土木研究所では昭和61年度より総合技術開発プロジェクト「海洋利用空間の創成・保全技術の開発」に取り組んでいる。このプロジェクトの基軸となるのが、波浪、流れ、漂砂を制御する新しいタイプの透過性消波構造物（以下、海域制御構造物と呼ぶ。）の開発である。

構造研究室では、海域制御構造物の外力に関して検討を行ってきており、昭和62年度までに行った全体波力に関する実験については、既に土木研究所資料No2658号「海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(6)」の一部にとりまとめた。本報告は、昭和63年度以降平成2年度までに行った部材波力に関する実験及び昭和62年度の全体波力に関する補足実験並びに駿河海岸に海域制御構造物の試験施工として設置された新型離岸堤より得られた実測値と模型実験との対比の結果についてとりまとめたものである。

目 次

まえがき

1. 概 要	1
2. スリット型海域制御構造物の波力実験	2
2.1 部材波力に関する室内実験	2
2.1.1 実験方法	2
2.1.2 実験結果	6
2.2 海底勾配、天端高の変化に関する波力実験	14
2.2.1 実験方法	14
2.2.2 実験結果	17
3. 波力実験と現地測定との対比	22
3.1 概要	22
3.2 対比条件	24
3.3 現地測定データの補正方法	27
3.4 調査結果	30
4. まとめ	56
謝 辞	57
参考文献	58

1. 概 要

海域制御構造物に類似したものに離岸堤、防波堤等があるが、海域制御構造物の設置水深は、離岸堤よりも深く、透過性を持つという点では防波堤とは異なる。こうしたことから、海域制御構造物が受ける外力、特に、波力やこれに対する構造物の応答性は明らかではない。また、構造が透過性であるために、防波堤などの設計に用いられる既存の波力算定式の適用が難しい。

現在までに種々検討されている海域制御構造物では、スリットによる乱れと反射でエネルギー損失を生じさせる構造物（スリット型海域制御構造物）が多い。このため、構造研究室では、スリット型構造物を対象として海域制御構造物に作用する波力特性、構造物の応答性について検討を行ってきた。既に、スリット型海域制御構造物に作用する全体波力については、次のことが明らかとなっている¹⁾。

- (1) スリット型構造物に作用する水平波力は、防波堤などの不透過な堤体に作用する波力に対して空隙率分以上の低減を示す。
- (2) 重複波の作用する場合、1枚および2枚スリット板模型に作用する波力はほぼ同じであるが、3枚スリット板模型では1枚及び2枚スリット板模型に比べて波力は約30～50%大きくなる。また、砕波の作用する場合、波力は最も沖側のスリット板に集中するためスリット板の枚数に独立となる。
- (3) 重複波が作用する場合の波圧分布は、防波堤など不透過な堤体と同様に空隙率の変化に関わらず静水面付近で最大値を持つ分布形となる。また、砕波の作用する場合には静水面より上で最大値を持つ分布形となるので天端高さが波力に及ぼす影響は大きい。
- (4) スリット型構造物の重複波作用時の波力は、合田式²⁾による計算波力を空隙率分低減させたものをさらに低減して求めることができる。一方、天端が高い構造物に対して砕波が作用する場合には、実験波力は合田式による計算波力より大きくなるため、合田式を砕波形態や天端高さにより補正して用いる必要がある。

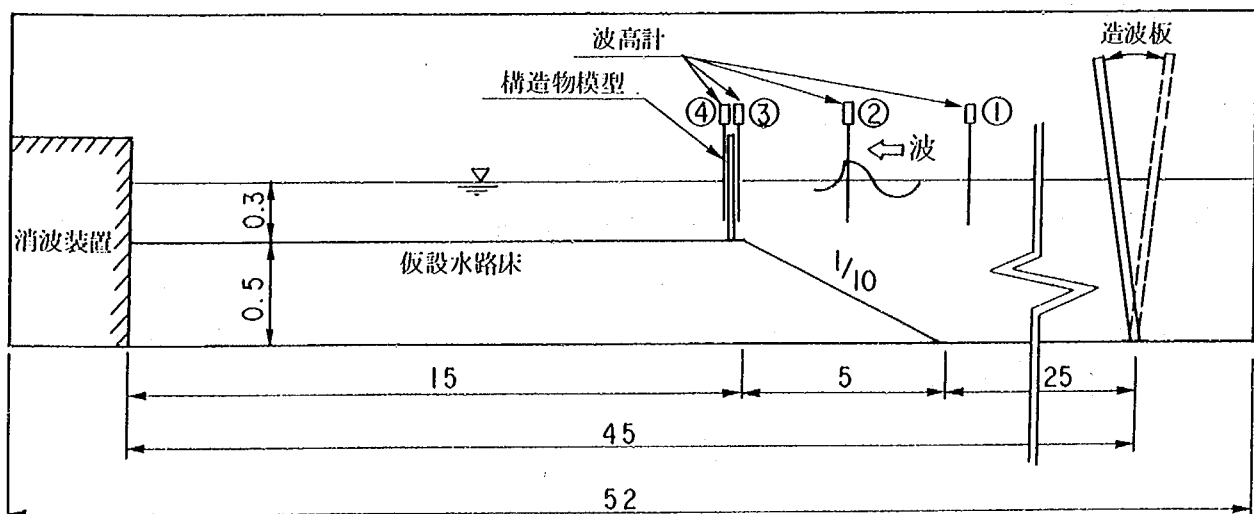
本報告書は、模型実験により、①部材波力と波浪条件の関係および部材に作用する波圧と部材の応答との関係、②これまでに明らかとなっている全体波力に対する補足実験として、海底勾配の違い（1/10と1/50）および天端高の違いに伴う全体波力の変化について検討したものである。さらに、模型実験の妥当性について検討するため、駿河海岸に海域制御構造物の試験施工として設置された新型離岸堤に取り付けられた波圧計より得られた波力の実測データと、新型離岸堤の模型（縮尺1/25）より得られた波力の実験データとの対比を行ったものである。

2. スリット型海域制御構造物の波力実験

2.1 部材波力に関する室内実験

2.1.1 実験方法

実験は、建設省土木研究所水理共同実験棟内の風洞付造波水路 ($L=52\text{m}$, $B=0.6\text{m}$, $h=1.2\text{m}$) を用いて行った (図-2.1.1)。同水路は片面ガラス張りで波の作用状況が観察できるようになっている。仮設水路床は、造波板より25m離れた位置から5mを $1/10$ の一定勾配とし、それより水路端までの15mを水平床とした。水路床の勾配 $1/10$ は各地の海底勾配条件からほぼ上限に近い値を設定したものであり、巻き波砕波が作用する条件となっている。構造物模型は、斜面を上がりきった水平床端部に設置した。模型縮尺は $1/25$ 、相似則はフルード則を基本とした。また、実海域の水深を7.5mと仮定し、模型設置位置の水深を0.3mとした。模型は、図-2.1.2 に示すような1枚スリット模型 (空隙率=0.2) とし、水路全幅 (60cm) に対して2分割し、一方を鋼鉄製、他方をアクリル製とした。鋼鉄製模型では各スリット部材の表裏で波圧を測定し、その差圧を構造物が受ける波圧とした。また、アクリル製模型では各スリット部材の表裏にひずみゲージを取り付け、波力による応答を測定し、波圧のデータと対比した。また使用模型は部材の動的応答特性の影響を調査するため部材厚を5, 10, 15, 20mmの4通りに変化させた。模型の設置状況は、図-2.1.3 に示すように水路床に取り付けたアンカーボルトによりネジ止め固定するとともに、上部を模型固定治具により固定した。



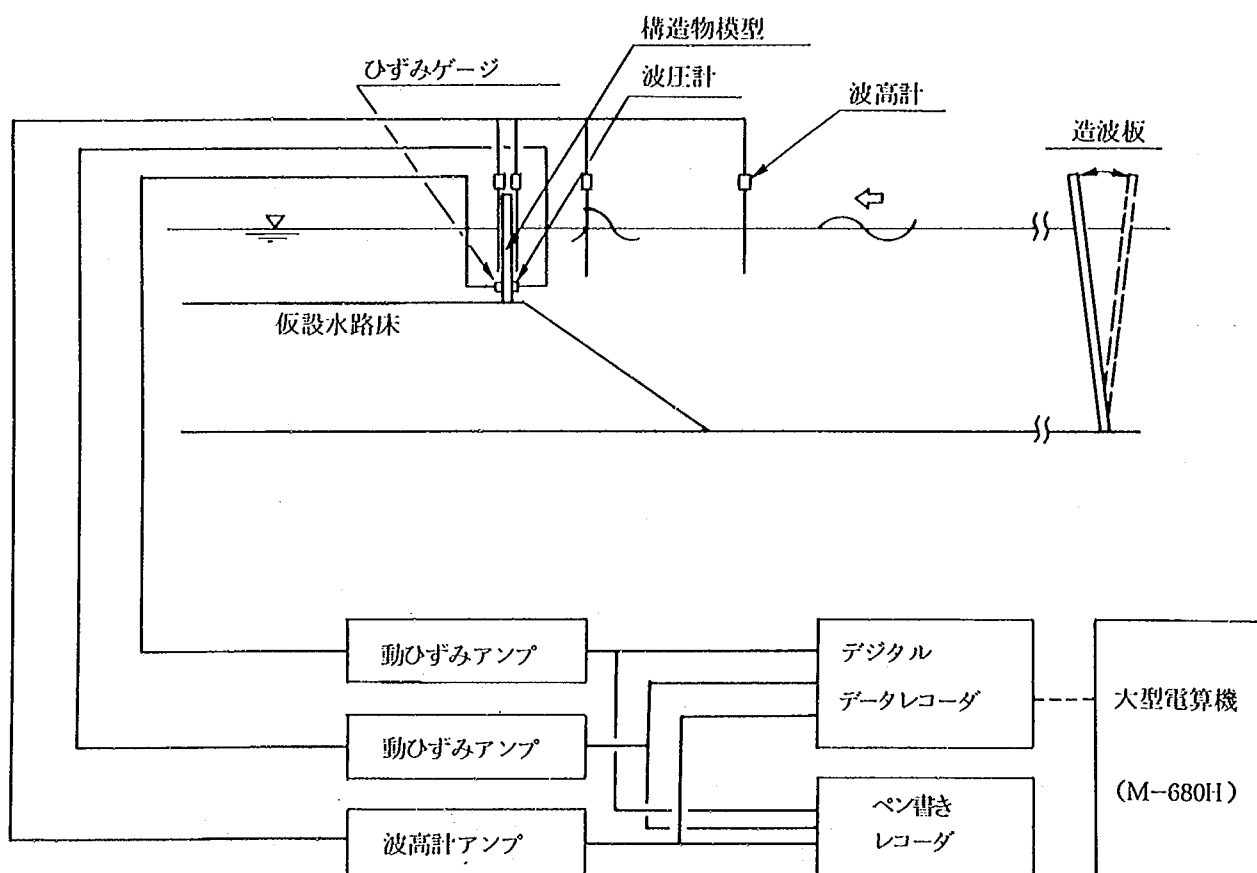
(単位: m)

図-2.1.1 実験装置

波高は、容量式波高計により測定した（図—2.1.1参照）。波高計①で入射波高を波高計②で砕波波高を、波高計③、④により模型直前（沖側）、直後（岸側）の波高を測定した。

測定システムを図—2.1.4に示す。波高計、動ひずみアンプからの出力はデジタルデータレコーダにより収録し、さらに主要な測点についてはペン書きレコーダを用いてリアルタイムで出力させた。

実験フローを図—2.1.5に示す。波力測定は、模型設置位置で安定した波形が得られる時点から始め、約20秒間データを収録した。サンプリング間隔は、データ収録容量の制約上2msとした。解析対象とする波は、データ収録開始時から消波装置の反射波の影響が入らない間に測定された波（有効波）とした。設定周期と有効波の波数の関係を表—2.1.1に示す。



図—2.1.4 測定システム

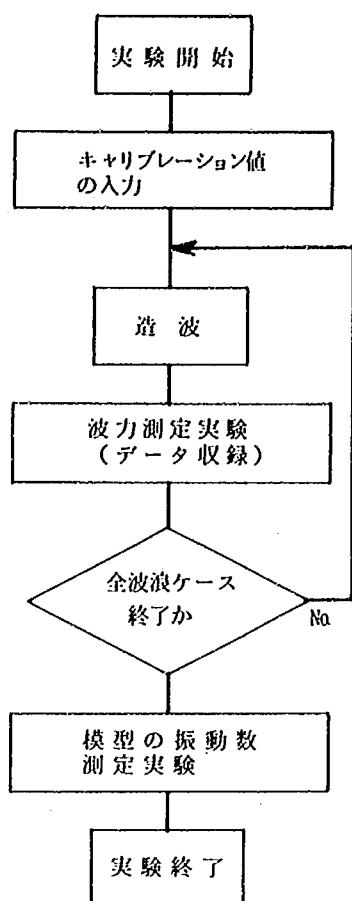


図-2.1.5 実験フロー

本実験に先立ち、模型に作用する波浪の検定を行った。波浪検定結果の1例(周期2.2s)を図-2.1.6に示す。縦軸は模型位置における波高 H 、模型位置から砕波位置までの距離 X_b であり、横軸はストロークの設定値 e である。重複波領域の H は e にほぼ正比例する。しかし、 $e=150$ 付近で砕波が生じ、 $e=180$ 付近で H はピークに達し、それ以上 e が増加しても H はあまり増加せず、さらに e を大きくすると H は減少する。これは、砕波位置 X_b が波高の増加に従って沖へ移動し、砕波後の波が模型位置に到達するからである。また、この時の砕波波高 H_b と e の関係は重複波領域における H と e の関係とほぼ同じである。そこで、実験データの整理にあたっては、砕波以前の波については検定時の波高 H をそのまま用い、砕波後の波については砕波以前の H と e の正比例の関係を外推して求めた仮想通過波高 H' を用いることにする。

波浪条件は全ての模型に対して、1模型につき周期を3通り($T=1.6\text{ s}$, 2.0 s , 2.2 s)、波高を5通り($H'=10\text{ cm}$, 20 cm , 模型位置砕波波高、最大波力発生高、最大波力発生後の波高)設定し実験を行った。表-2.1.2に波浪条件を示す。

波浪条件は全ての模型に対して、1模型につき周期を3通り($T=1.6\text{ s}$, 2.0 s , 2.2 s)、波高を5通り($H'=10\text{ cm}$, 20 cm , 模型位置砕波波高、最大波力発生高、最大波力発生後の波高)設定し実験を行った。表-2.1.2に波浪条件を示す。

表-2.1.1 設定周期と有効波数との関係

設定周期(s)	有効波数
1.6	11
2.0	8
2.2	7

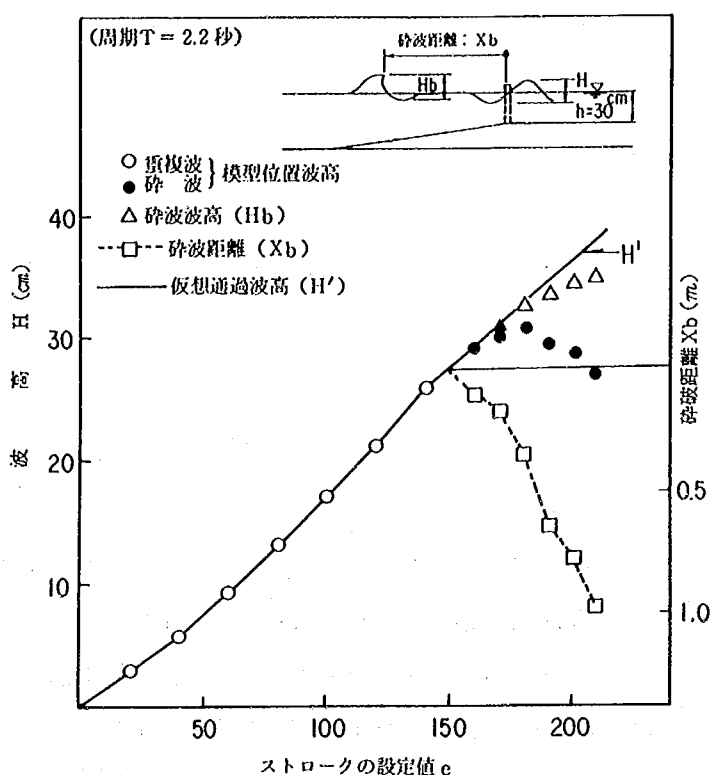


図-2.1.6 波高検定結果

表-2.1.2 波浪条件

周期T (sec)	波高H'(cm)	造波カウントc	備 考
1.6	10.0	46	
	20.0	92	
	27.4	126	模型位置砕波
	30.4	140	最大波力
	35.5	154	最大波力後
2.0	10.0	55	
	20.0	95	
	30.3	134	模型位置砕波
	41.5	178	最大波力
	49.5	209	最大波力後
2.2	10.0	60	
	20.0	112	
	26.3	145	模型位置砕波
	38.3	207	最大波力
	38.7	209	最大波力後

衝撃的な波力は、作用時間が短く、かつ重複波の波力と比較してその力が大きい。そのため、衝撃力の測定は測定系の振動を問題としなければならない。つまり、測定系が外力に対して応答しなかったり、共振を起こしたりすると真の外力を測定することにはならず、この場合データの取り扱いが問題となる。今回の実験では、測定系の固有振動数を十分高いものとし、さらに電算処理時にローパスフィルターを用いて測定系の振動による影響を取り除いた。外力の応答波形の解析において、測定された波形から元の作用外力を精度よく推定可能とするには、模型の固有振動数の約55%以上をカットする必要があることがわかっている³⁾。部材厚さが20mmの模型No.4のスリット部材の固有振動数は約560Hzとなっており、解析では約560Hzの55%以上(約310Hz)をカットする必要がある。しかし、本実験ではデータサンプリング時間間隔 $\Delta t = 0.002$ sであり、分解能 f_N は250Hz($f_N = 1 / 2 \Delta t$)となるため、周波数250Hz以上の成分波をカットすることとした。

2.1.2 実験結果

部材に作用する波圧は、鋼鉄製模型で測定した一波毎の最大差圧の平均値とした。また、部材が受ける応答(ひずみ)については、前もって測定したヤング率と部材ひずみ量から、換算波圧 P' を用いた。この場合、換算波圧の算出については、部材に作用する波圧と同様に一波毎の最大ひずみの平均値とした。

1) 部材波力に及ぼす波浪条件の影響

スリット部材に作用する波圧 P と波高 H' 、周期の関係を図—2.1.7～2.1.10に示す。波圧は、波高が小さい重複波領域では、部材による違いはあまりみられず波高の増加に伴い、比較的ゆるやかに増加する。しかし、波高が大きい砕波領域では、部材によって作用する波圧の傾向が異なる。水面上の部材では、波高の増加に伴って作用する波力は急激に増加するものの、水面下の部材では、静水面より下の位置になるほど急激な増加はみられず、水面下14.0cm（全水深の約1/2地点）および水面下20.5cm（全水深の約2/3地点）では、重複波と同じ増加傾向となり砕波の影響はあまり現れていない。

また、重複波領域では、波圧の周期による差はあまりみられないものの、砕波領域においては、周期による差がみられ、周期が大きくなるほど波力も大きくなっている。この場合、上部にある部材の方がこの傾向が顕著である。

2) 部材に作用する荷重（波圧）と応答（ひずみ）の比較

スリット部材に作用する荷重（波圧）と応答（ひずみ）の関係を図—2.1.11～2.1.14に示す。

静水面より下に位置する部材ほど、荷重と応答は比較的よく対応し、静水面下14cm（全水深の約1/2地点）では1対1の関係を示す。また、静水面上にある部材でも、荷重が小さい場合（重複波領域）では、比較的よい対応を示す。

しかし、水面上の部材において作用する荷重が大きくなると、応答は荷重と比較して小さな値を示した。特に部材厚が小さい程、すなわち部材の剛性が低く振動数が小さい程、応答は小さくなる傾向が見られる。このため、部材に作用する荷重（波圧）をもとに部材設計を行う場合は、部材の剛性の低いものほど安全側の設計になる。なお、部材剛性の違いにより荷重と応答の傾向が異なる理由は、次のように考えられる。換算波圧の算出方法については、1方向（岸沖方向）より測定されたひずみにより算出しているが、厳密な算出方法については、3方向（岸沖方向、汀線方向、鉛直方向）のひずみを測定し、式（2.1）により算出することが望ましく、部材の剛性が低いものほど作用する方向以外の変形が無視できなくなるために、剛性の違いにより荷重と応答が異なるものとなったと思われる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \{ \sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z) \} / E \\ \varepsilon_y &= \{ \sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x) \} / E \\ \varepsilon_z &= \{ \sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y) \} / E \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

ここに、 ε =ひずみ

σ =垂直応力

ν =ポアソン比

E =ヤング率

凡 例

重複波	砕波	周期 (S)
—●—	—○—	1.6
-▲-	-△-	2.0
-■-	-□-	2.2

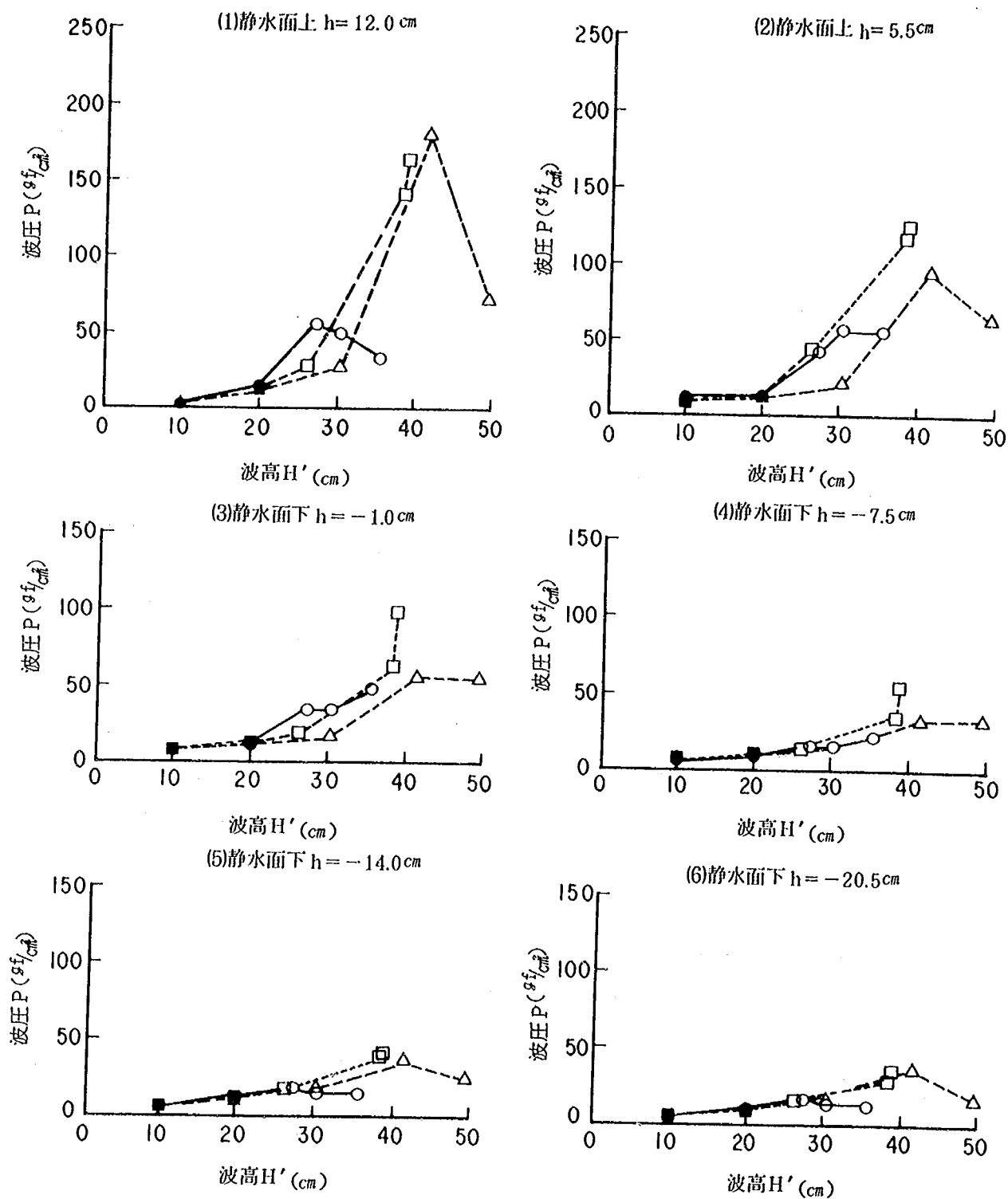


図-2.1.7 波高と波圧の関係 (部材厚 5 mm)

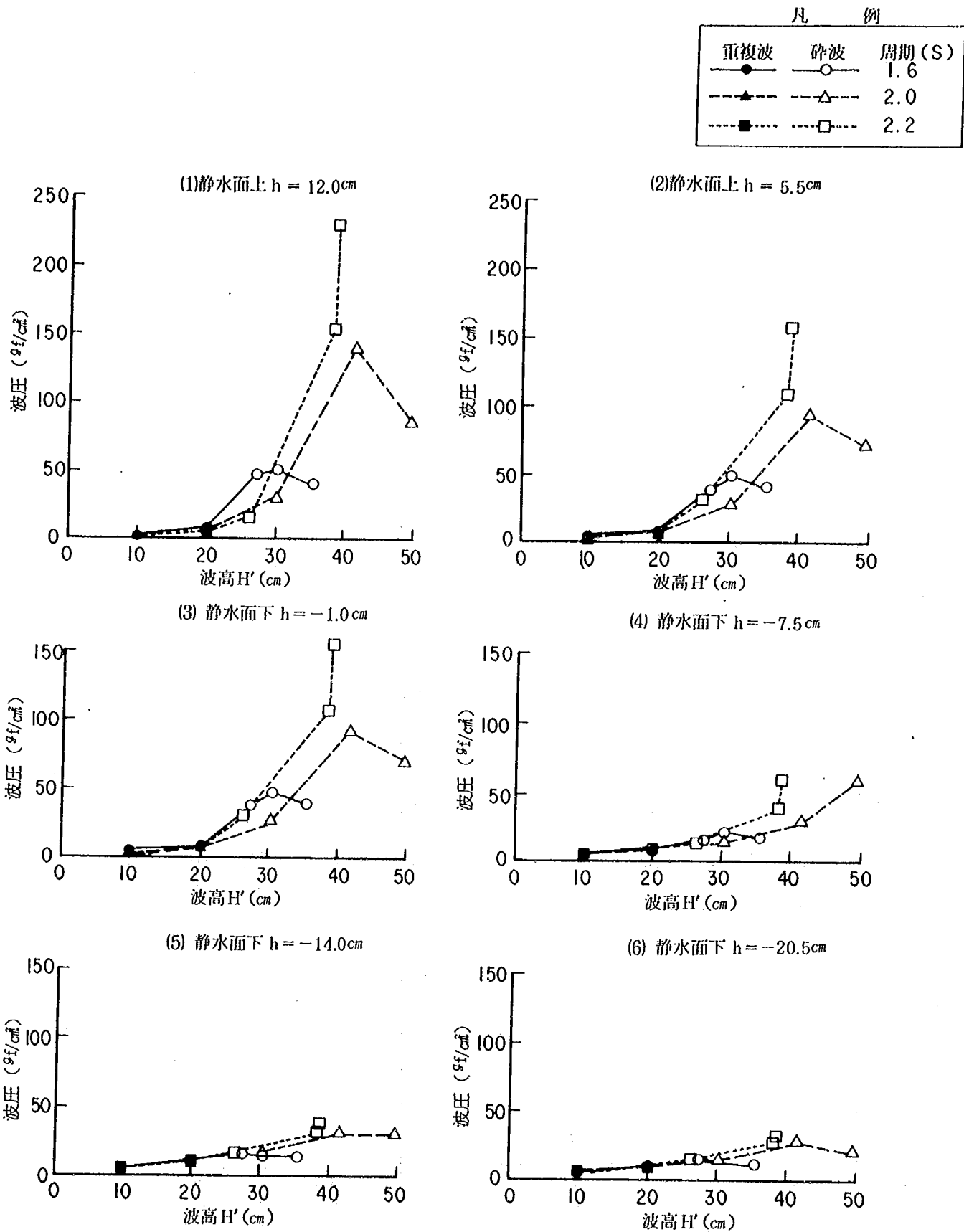


図-2.1.8 波高と波圧の関係 (部材厚10mm)

凡 例

重複波	砕波	周期(S)
●—	○—	1.6
▲---	△---	2.0
■---	□---	2.2

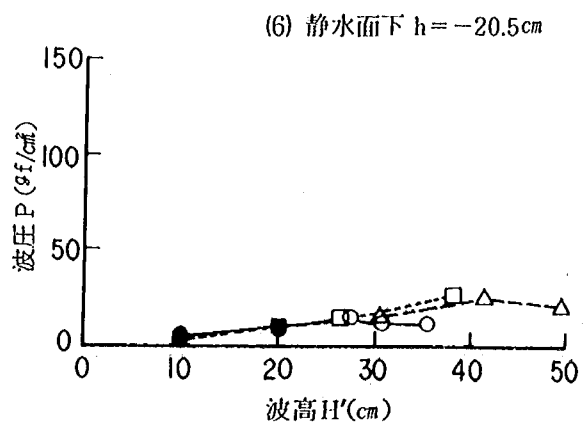
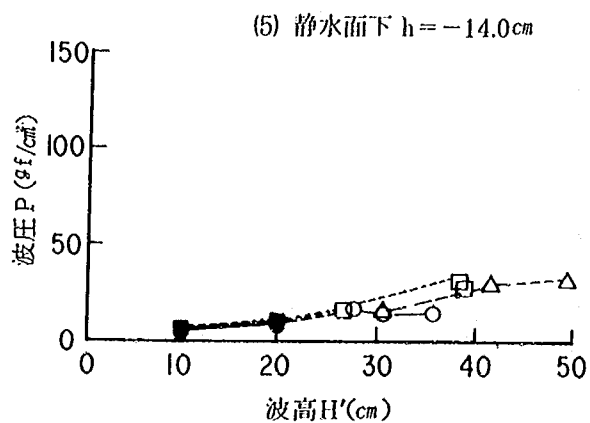
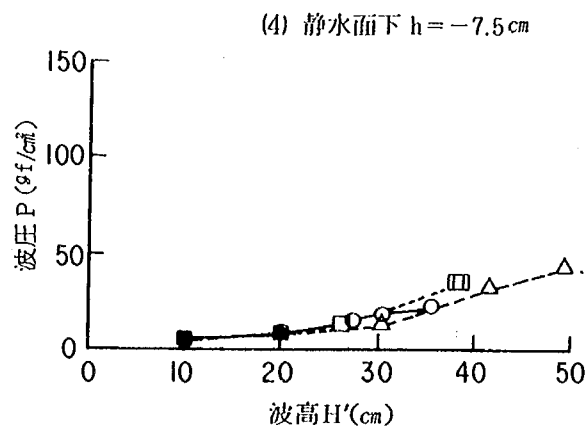
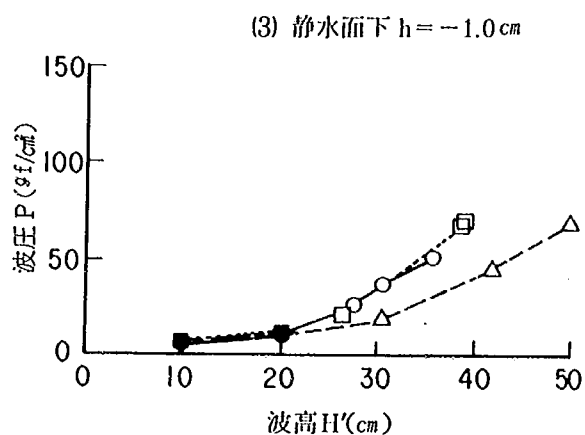
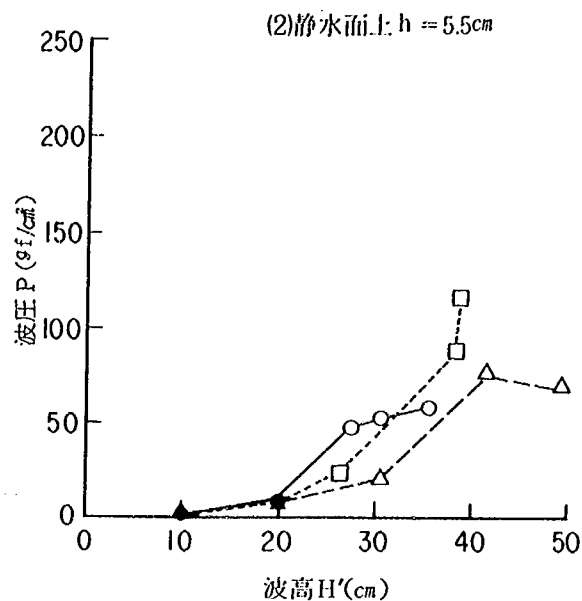
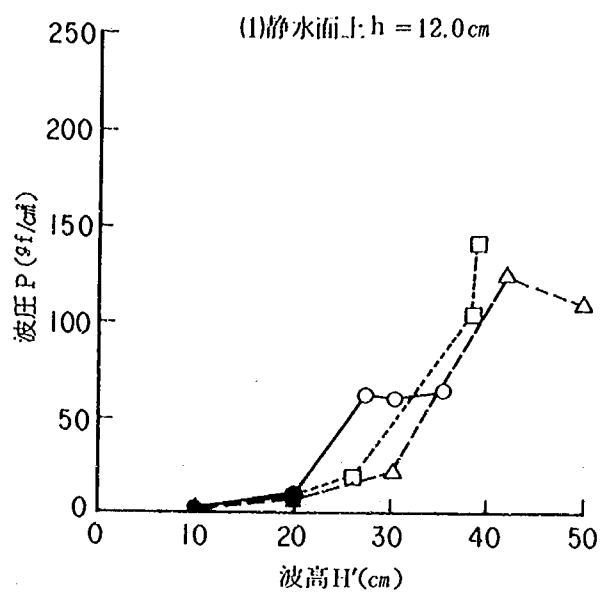


図-2.1.9 波高と波圧の関係 (部材厚15mm)

凡 例

重複波	砕波	周期(S)
●	○	1.6
▲	△	2.0
■	□	2.2

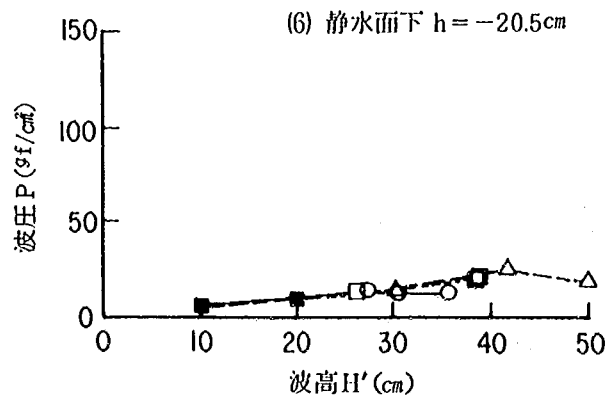
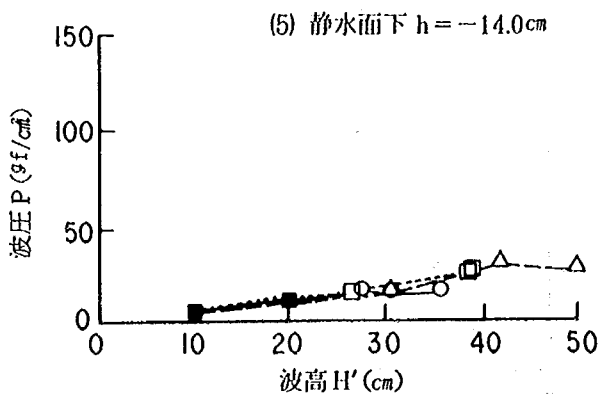
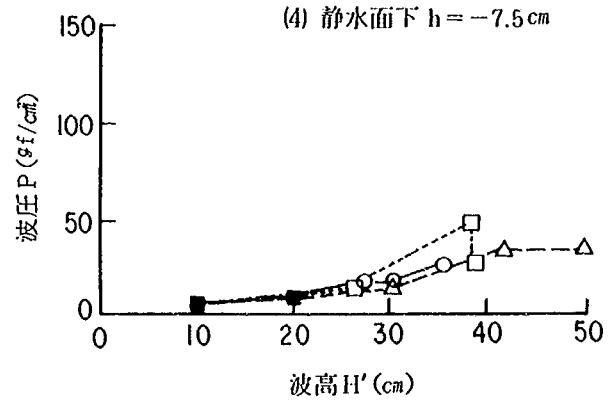
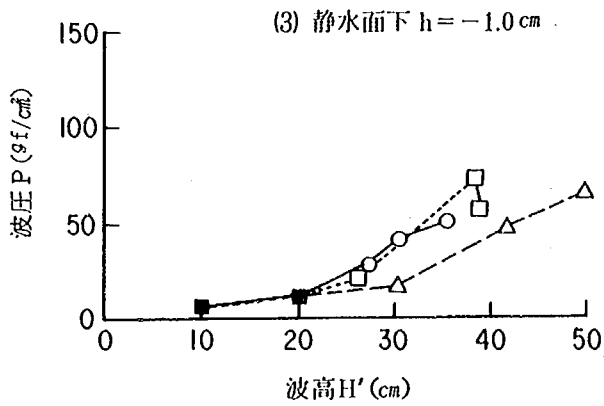
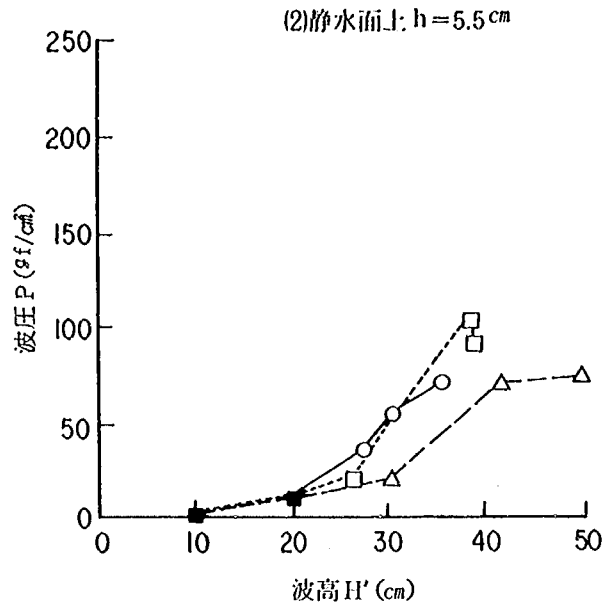
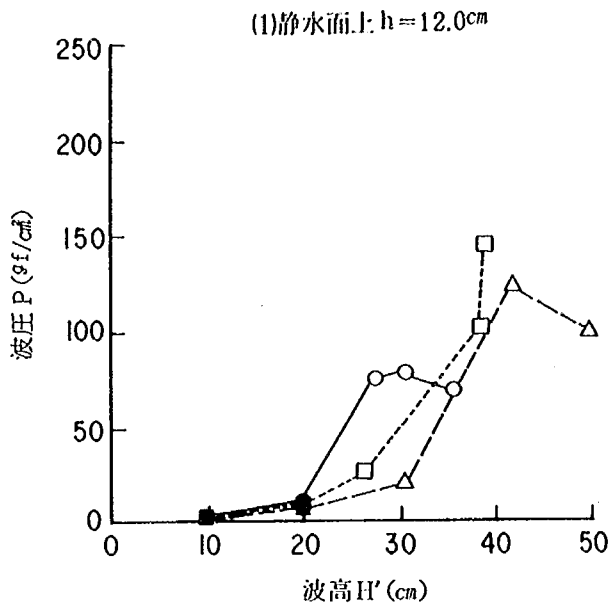


図-2.1.10 波高と波圧の関係 (部材厚20mm)

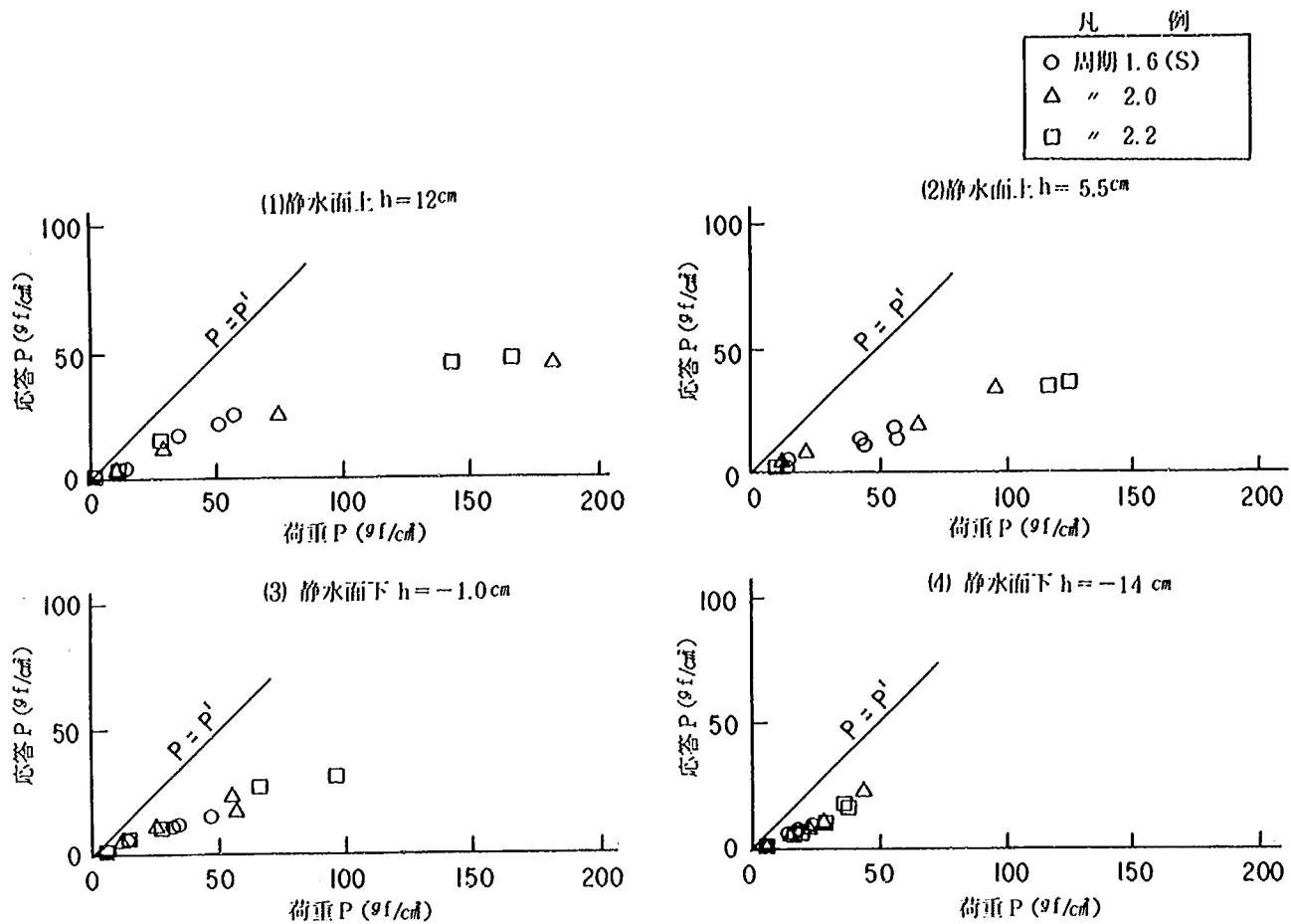


図-2.1.11 荷重 (波圧) と応答 (ひずみ) の関係 (部材厚 5 mm)

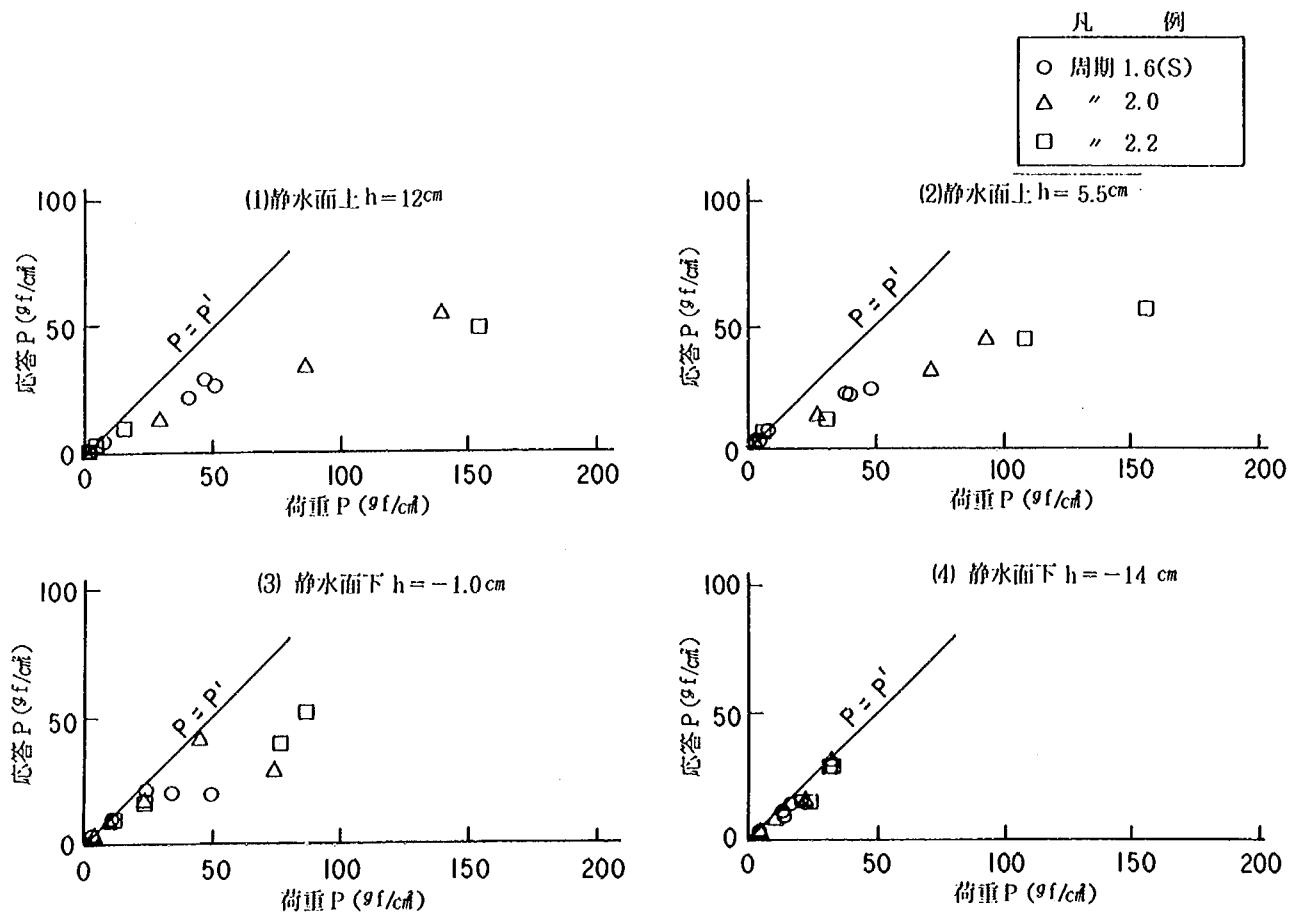


図-2.1.12 荷重 (波圧) と応答 (ひずみ) の関係 (部材厚 10mm)

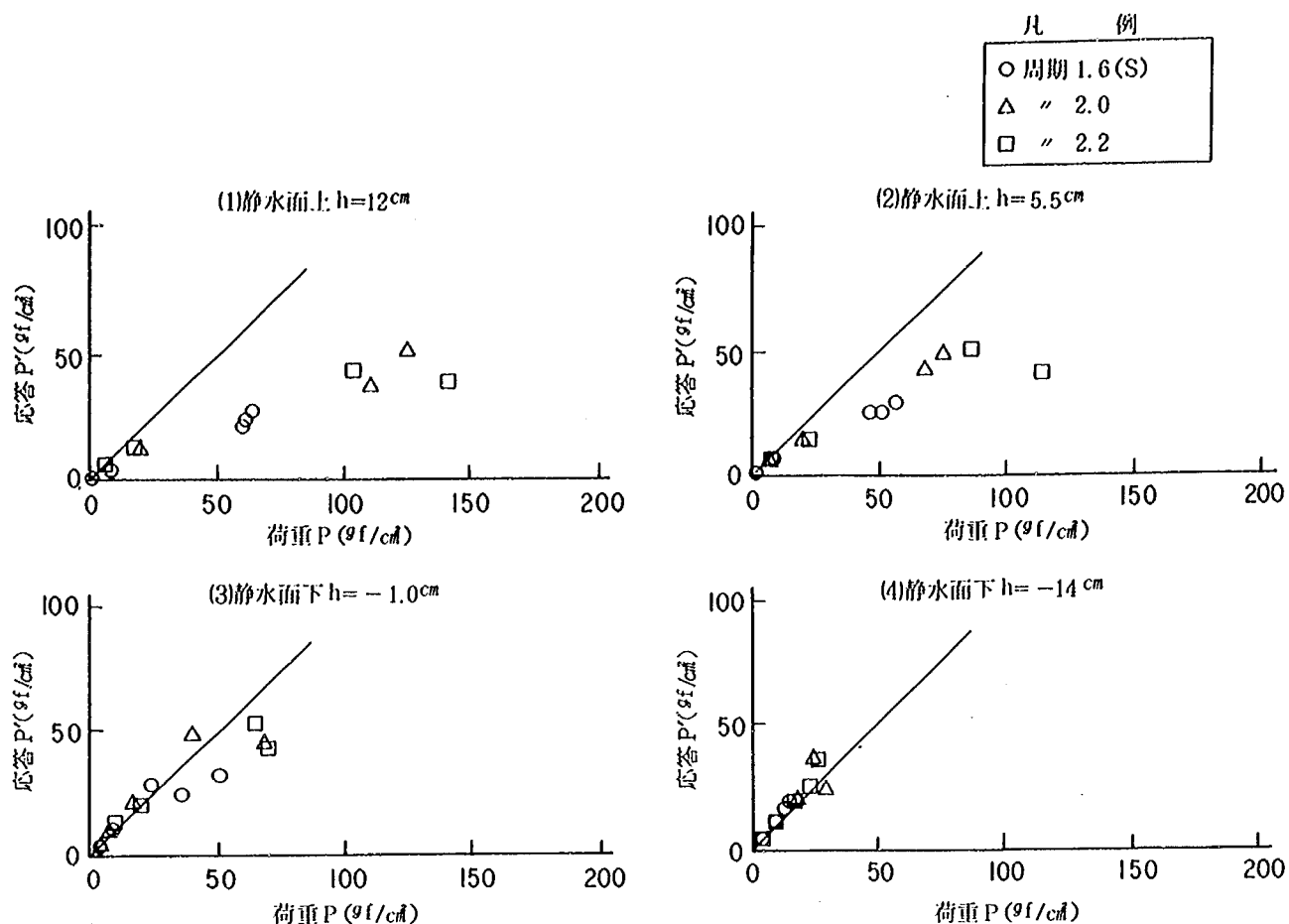


図-2.1.13 荷重 (波圧) と応答 (ひずみ) の関係 (部材厚15mm)

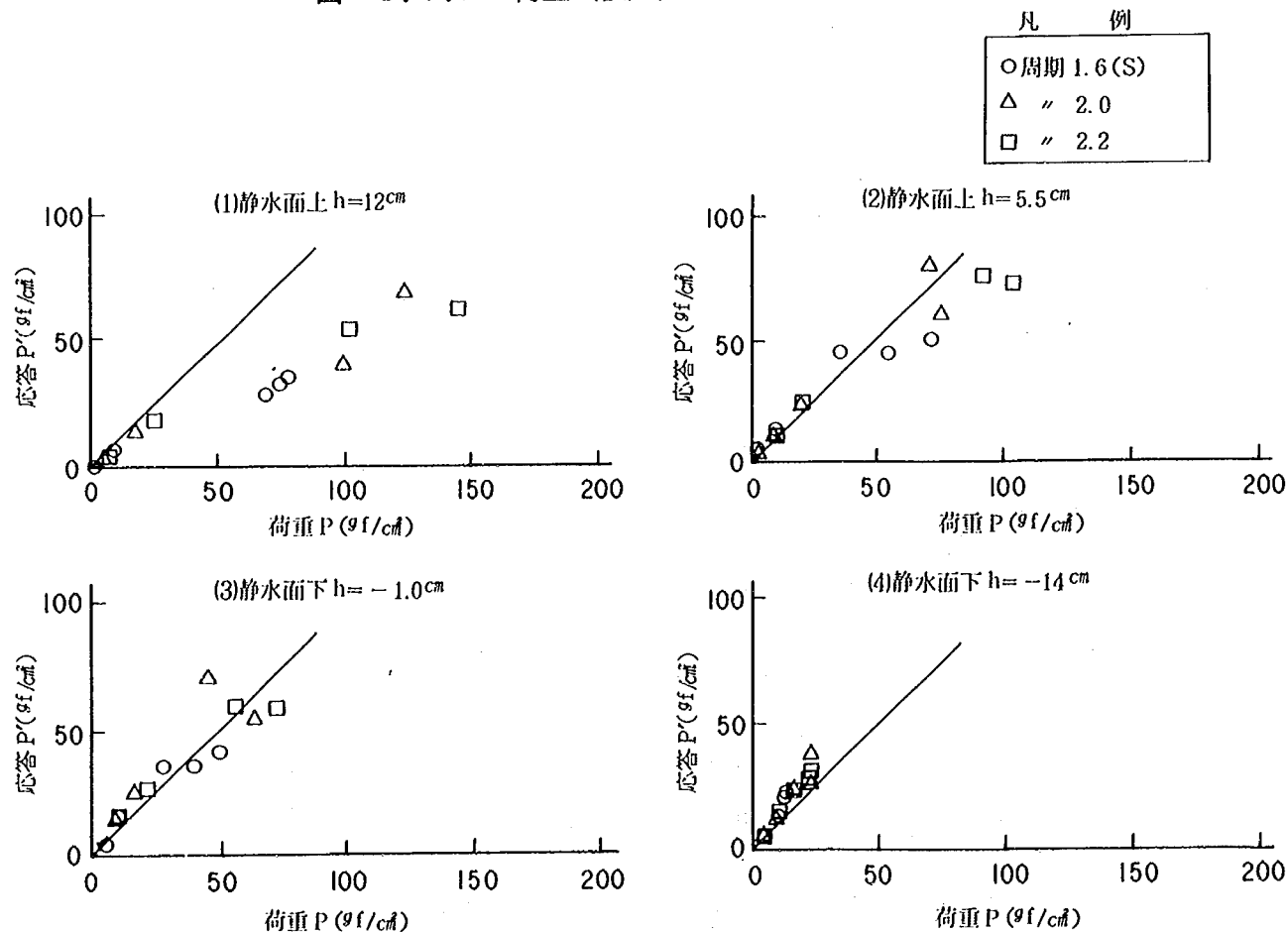
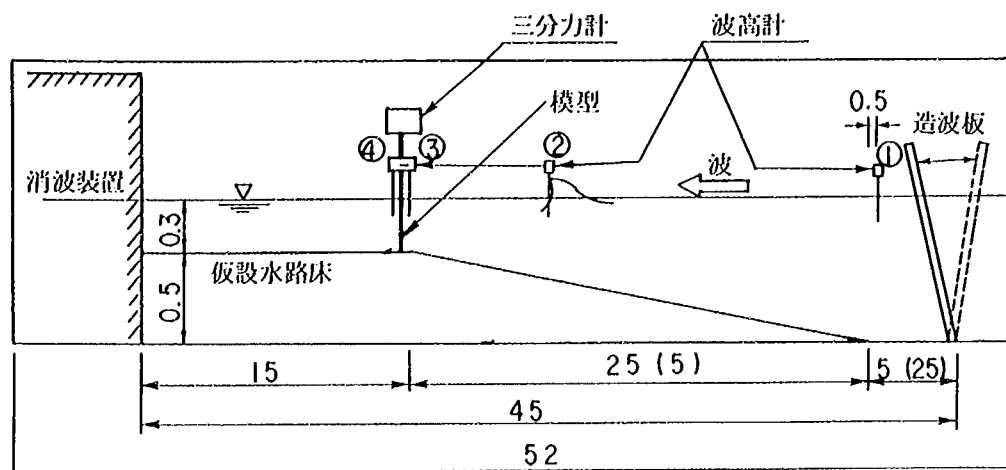


図-2.1.14 荷重 (波圧) と応答 (ひずみ) の関係 (部材厚20mm)

2.2 海底勾配、天端高の変化に関する波力実験

2.2.1 実験方法

実験は、2.1 部材波力に関する室内実験と同様に建設省土木研究所水理共同実験棟内の風洞付造波水路（ $L=52\text{m}$ ， $B=0.6\text{m}$ ， $h=1.2\text{m}$ ）を用いて行った（図-2.2.1）。



注；（ ）は水路勾配1/10の場合

図-2.2.1 実験装置

この風洞付造波水路内に一定の勾配をもつ斜面（ $1/10$ と $1/50$ の2種類）を作り、水深が30cmとなったところで平坦面として、この平坦部に模型を設置した。模型の縮尺は $1/25$ 、相似則はフルード則を基本とした。なお、水路床の勾配 $1/10$ は各地の海底条件からほぼ上限に近い値であり、 $1/50$ は一般的な値である。

実験では、海底勾配、天端高と全体波力の関係を調べた。実験は、表-2.2.1に示す4種類の模型を用いて海底勾配を $1/10$ と $1/50$ の2種類変化させて行った。模型設置状況の概略図を図-2.2.2に示す。全体波力の測定については、三分力計により測定するものの、三分力計の容量（許容荷重50kgf）により模型の幅は制限を受ける。このため、模型No.1～4については、模型を幅20cmで3分割し、中央を測定部、両側をダミー部として使用し、ダミー部については、木ネジ等を用いて水路床に固定した（図-2.2.2）。

表-2.2.1 実験模型一覧

模型 No	スリット 枚 数	空 隙 率	模 型 高 (cm)	模型高-水深 水 深
1	1	0.3	30	0.0
2	1	0.3	33	0.1
3	1	0.3	36	0.2
4	1	0.3	39	0.3



測定システムは2.1と同様に、波高計、動ひずみアンプからの出力はデジタルデータレコーダにより収録し、さらに主要な測点についてはペン書きレコーダを用いてリアルタイムで出力させた。波力測定も2.1と同様に模型設置位置で安定した波形が得られる時点から始め、約20秒間データを収録した。サンプリング間隔は、データ収録容量制約上2msとした。解析対象とする波は、データ収録開始時から消波装置の反射波の影響が入らない間に測定された波（有効波）とした。設定周期と有効波の波数の関係を表2.2.2に示す。

表-2.2.2 設定周期と有効波数との関係

設定周期(s)	有効波数
1.6	11
2.0	8

波浪条件は全ての模型に対して、1 模型につき周期を 2 通り ($T=1.6\text{ s}$, 2.0 s) とし海底勾配 $1/10$ では波高を 5 通り ($H'=10\text{ cm}$, 20 cm , 模型位置砕波波高、模型No.4 での最大波力時波高、模型No.4 での最大波力発生後の波高)、海底勾配 $1/50$ では波高を 4 通り ($H'=10\text{ cm}$, 模型位置砕波波高、模型No.4 での最大波力時波高、模型No.4 での最大波力発生後の波高) 設定し実験を行った。表—2.2.3～2.2.4 に波浪条件を示す。

表—2.2.3 波浪条件 (海底勾配 $1/10$)

周期 T (sec)	波高 H' (cm)	造波カウント e	備 考
1.60	10.0	43	
	15.0	62	
	24.8	100	模型位置砕波
	35.1	139	模型No.4 での最大波力時波高
	45.4	178	模型No.4 での最大波力後波高
2.00	10.0	51	
	15.0	74	
	25.3	122	模型位置砕波
	37.8	180	模型No.4 での最大波力時波高
	44.2	209	模型No.4 での最大波力後波高

表—2.2.4 波浪条件 (海底勾配 $1/50$)

周期 T (sec)	波高 H' (cm)	造波カウント e	備 考
1.60	10.0	62	
	15.2	90	模型位置砕波
	17.9	104	模型No.4 での最大波力時波高
	20.6	119	模型No.4 での最大波力後波高
2.00	10.0	81	
	14.8	118	模型位置砕波
	15.8	126	模型No.4 での最大波力時波高
	17.3	137	模型No.4 での最大波力後波高

実験データの整理は、2.1と同様に砕波以前の波高については検定時の波高 H とし、砕波後の波高については仮想通過波高 H' を用いた。

電算処理におけるローパスフィルターについては、三分力計に設置した模型の水中での固有振動数が10数Hzであったことから20Hzとした。

2.2.2 実験結果

部材に作用する全体波力は、三分力計で測定された一波毎の最大値の平均値を用いて整理した。

1) 全体波力に及ぼす海底勾配及び天端高の影響

全体波力の最大波力時における時刻歴の一例を図-2.2.3に示す。全体的傾向として、海底勾配1/10の場合には同勾配が1/50に比べて大きな衝撃的波力が作用している。海底勾配1/50の場合、模型No.1（模型高30cm）及び模型No.2（模型高33cm）では、あまり衝撃的波力が作用していないものの、模型No.3（模型高36cm）及び模型No.4（模型高39cm）では、衝撃的波力が作用していることがわかる。しかし、海底勾配が1/10になると全ての模型において衝撃的波力が作用しており、特に、模型No.4では他の模型に比べて大きな衝撃的波力が作用している。

天端高の違いによる全体波力の変化を図-2.2.4に示す。海底勾配1/50の場合、全体波力は作用する波高にかかわらず、天端高が高くなることに伴いほぼ一定の増加傾向となっている。しかし、海底勾配1/10の場合は、天端高の増加に伴う全体波力の増加傾向は、作用する波高の違いにより大きく異なる。具体的には、重複波及び模型位置砕波波高の場合には、天端高が高くなるに伴い、全体波力は緩やかな増加傾向を示すが、模型No.4での最大波力時波高および模型No.4での最大波力後波高では、天端高の比 h_1/h （（模型高-水深）/水深）が0から0.2まではあまり変化がみられないものの、0.2から0.3に変化すると全体波力は著しく増加する。また、海底勾配が1/10でかつ模型No.4での最大波力時波高及び模型No.4での最大波力後波高の場合は、他の場合と比較して全体波力が大きくなっている。

これらの現象は、海底勾配1/50の場合には崩れ波砕波が発生するが、同勾配が1/10の場合には巻き波砕波となり作用する波力は崩れ波砕波に比べて大きくなることによるものと考えられる。特に、天端高の比 h_1/h が0.2~0.3になると巻き波砕波の影響が大きい。

また、全体波力と仮想通過波高 H' との関係の一例を図-2.2.5に示す。全体波力は、波高をパラメータとして扱うことができるものの、天端高の比 h_1/h が0.3の場合には、 h_1/h が0.2以下と比べて増加傾向が大きくなっている。このため、海域制御構造物に作用する設計波力（全体波力）を模型実験により求める際、使用する模型の天端高には特に注意する必要がある。

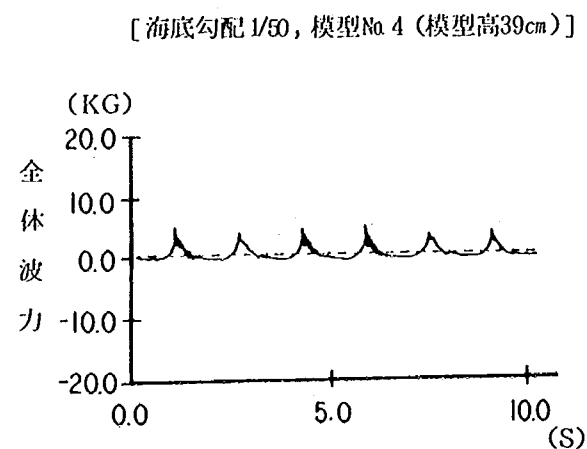
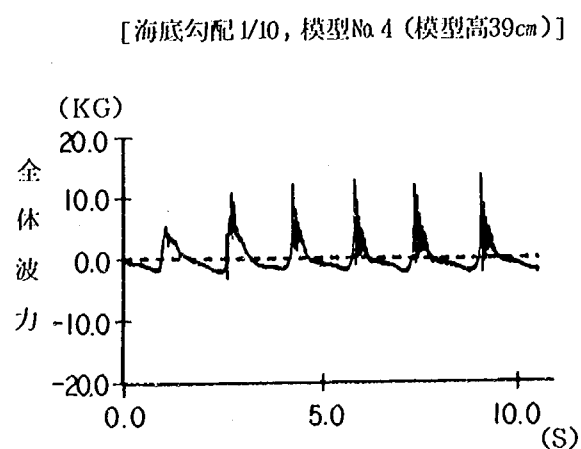
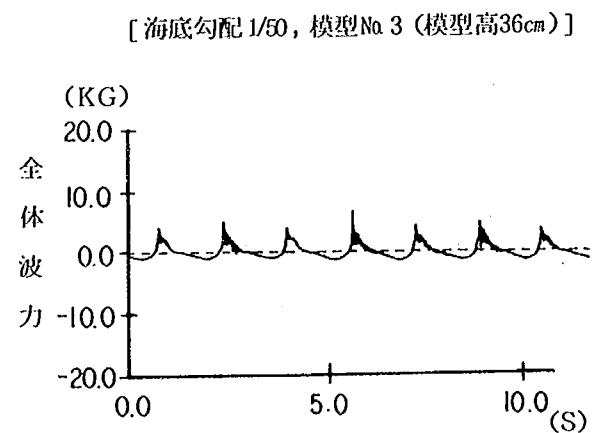
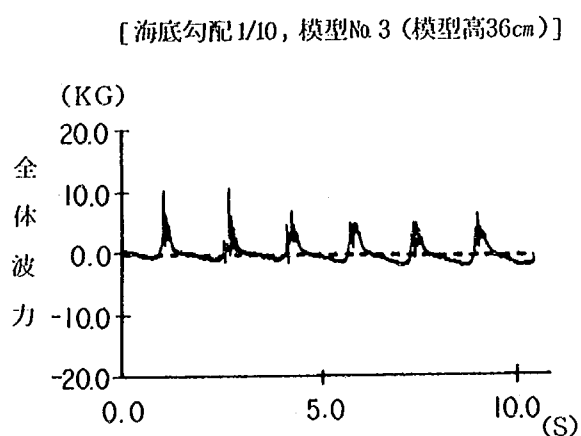
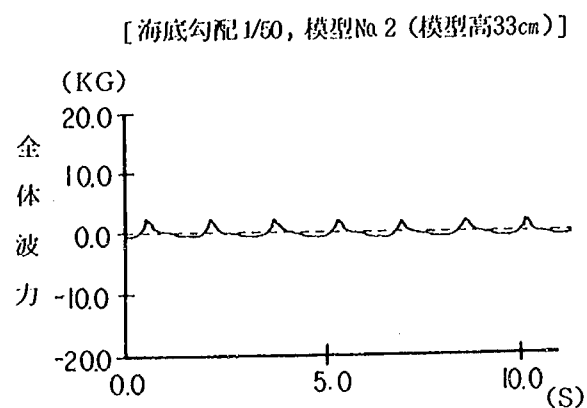
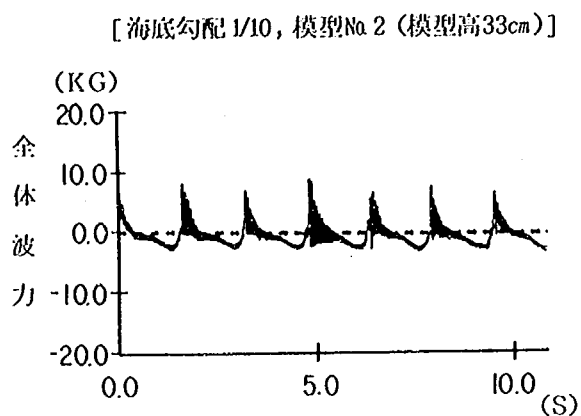
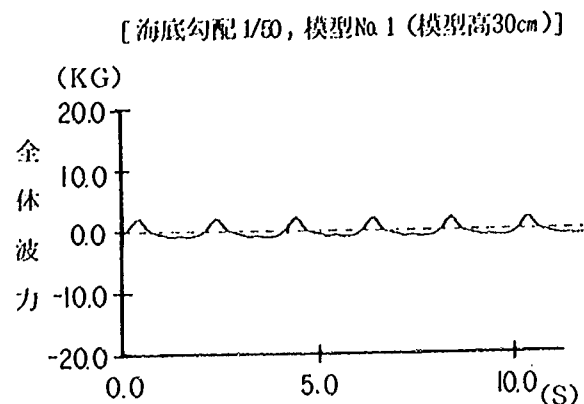
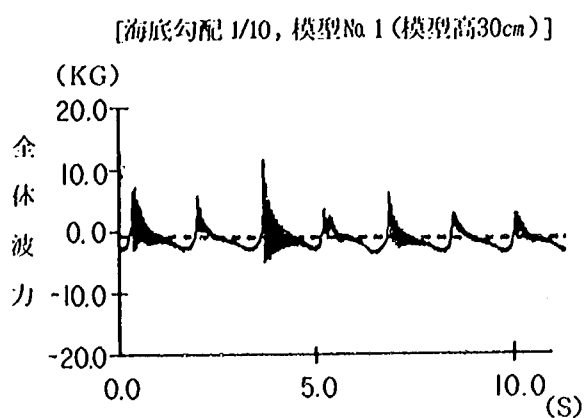


図-2.2.3 全体波力の時刻歴 (周期 $T=1.6$ 秒、最大波力時)

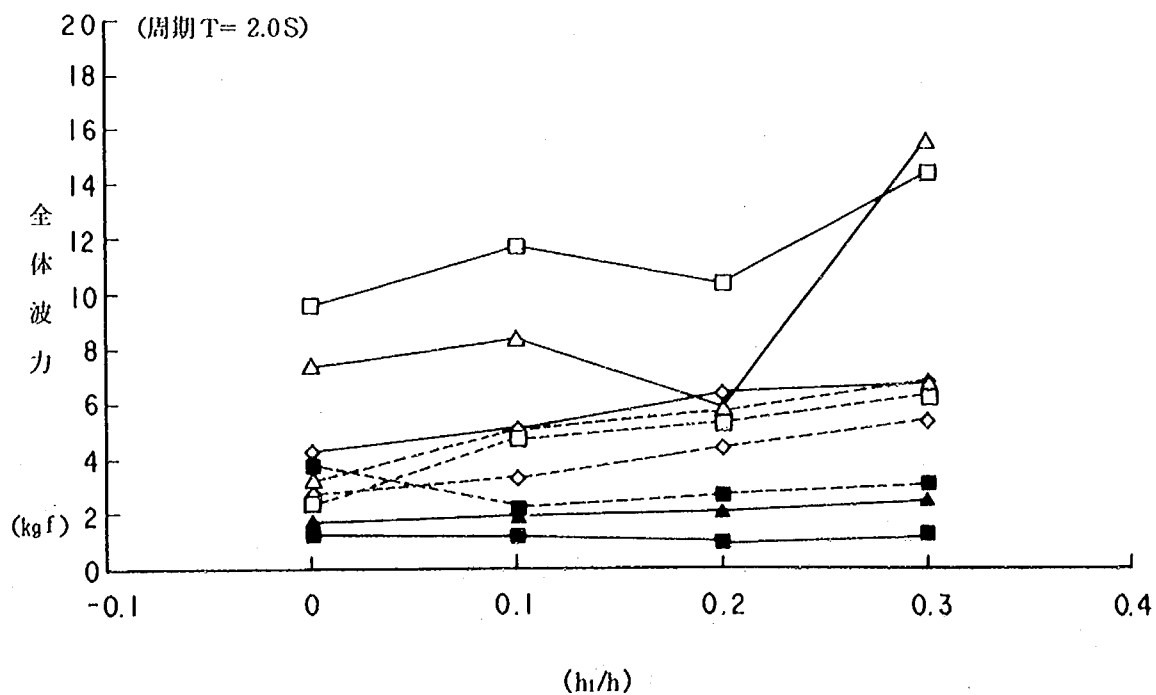
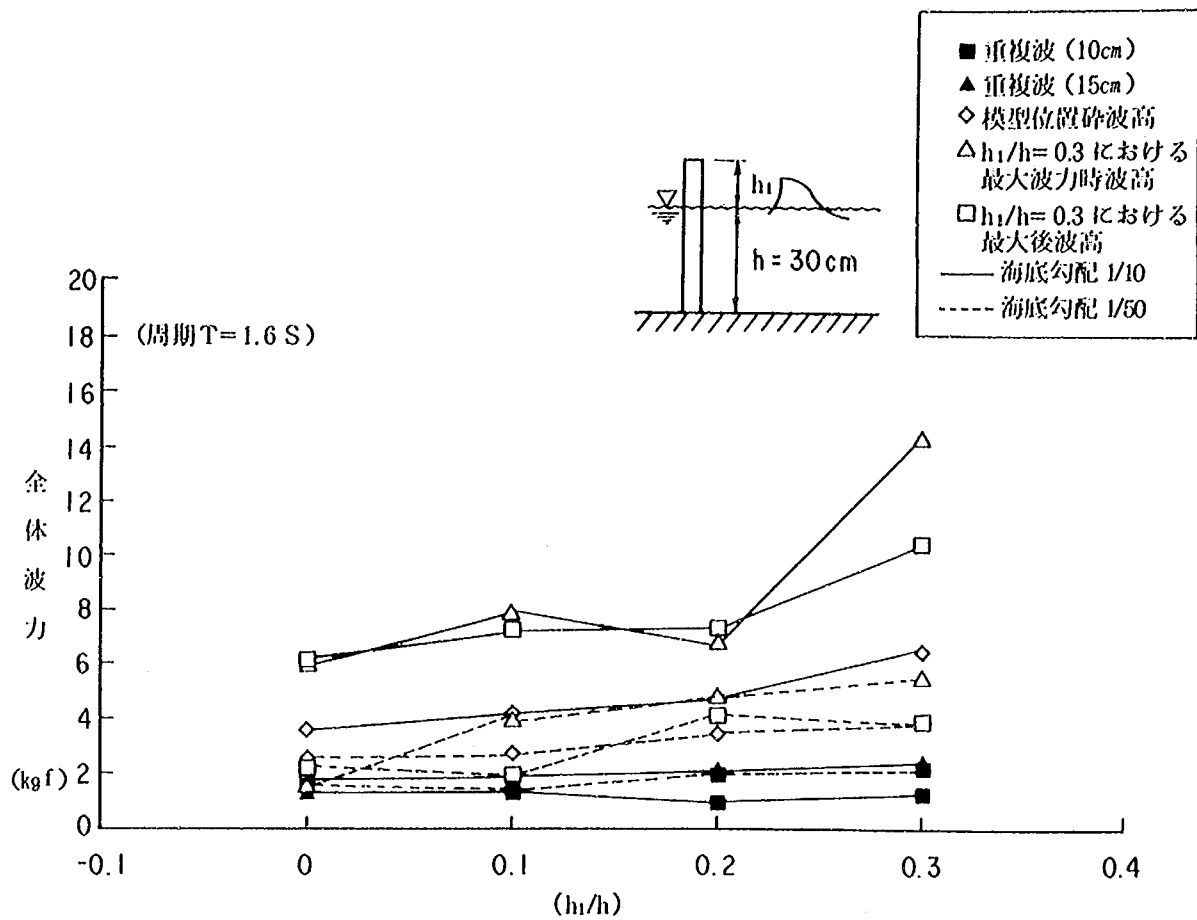


図-2.2.4 天端高の違いによる全体波力の変化

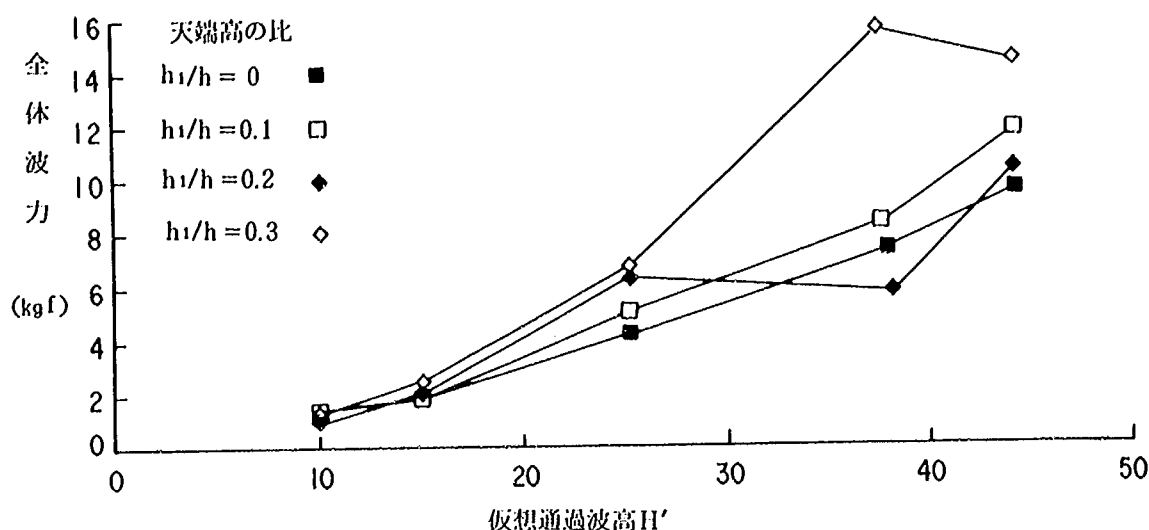


図-2.2.5 全体波力と仮想通過波高との関係 (海底勾配 1/10、周期 2.0 秒)

2) 合田波力との比較

合田式²⁾は、不透過な直立壁や混成堤に作用する波圧の算定式であり、重複波から碎波まで連続的な波力の算定が可能なることから、有脚式の海域制御構造物の中には、設計で用いる全体波力として合田式を準用しているものもある。このため、合田式を準用して算出した合田波力 F_{xc} と実験値 F_x との比較を行うこととした。この場合、スリット壁の作用する合田式による波力算定値 F_{xc} は式 (2.2) より求めた。

$$F_{xc} = \lambda \cdot F_{xc, \text{wall}} \quad (2.2)$$

$F_{xc, \text{wall}}$: 直立壁に作用する合田式による波力算定値

λ : 低減係数 (本検討では、 $\lambda = 0.6$ とした)

低減係数 λ については、スリットの形状 (空隙率 ε 、スリット枚数等) により異なるもののスリット型の構造物に作用する全体波力は、スリットの空隙率分より多少小さいことが確認されている¹⁾。このため本検討においては、模型の空隙率が $\varepsilon = 0.3$ であることを考慮して $\lambda = 0.6$ とした。

F_x / F_{xc} と h_1 / h との関係図-2.2.6 に示す。全体的傾向として、天端高が高くなる (h_1 / h が大きくなる) につれて F_x / F_{xc} が 1.0 に近づく。また、天端高が同じ模型でも海底勾配が 1/10 に比べて同勾配が 1/50 の場合の方が、 F_x / F_{xc} が 1.0 に近い傾向となっている。 F_x / F_{xc} の変化が大きいのは、海底勾配が 1/10 では、 h_1 / h が 0.2~0.3 の範囲であり、同勾配が 1/50 では 0~0.1 の範囲である。海域制御構造物に作用する全体波力について、波力実験をもとに λ を決定する際には、使用する模型の天端高には特に注意する必要があることは勿論のこと、海底勾配が 1/10 では同勾配が 1/50 より λ が小さくなる傾向にあるため、海底勾配 1/10 の実験結果だけで判断するのは危険であると言える。

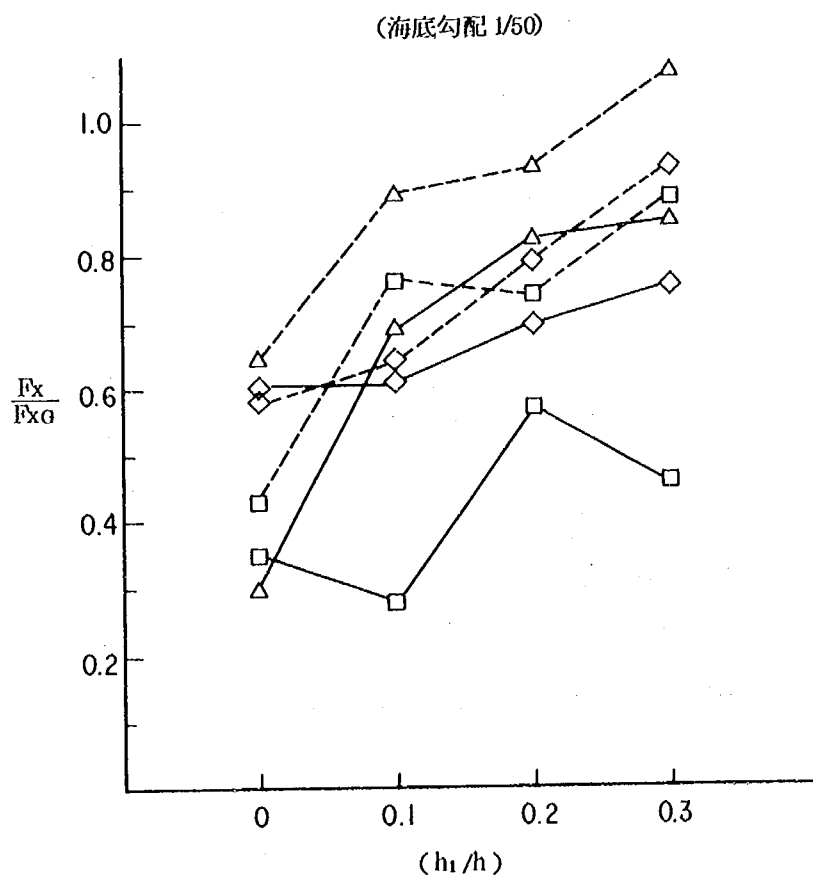
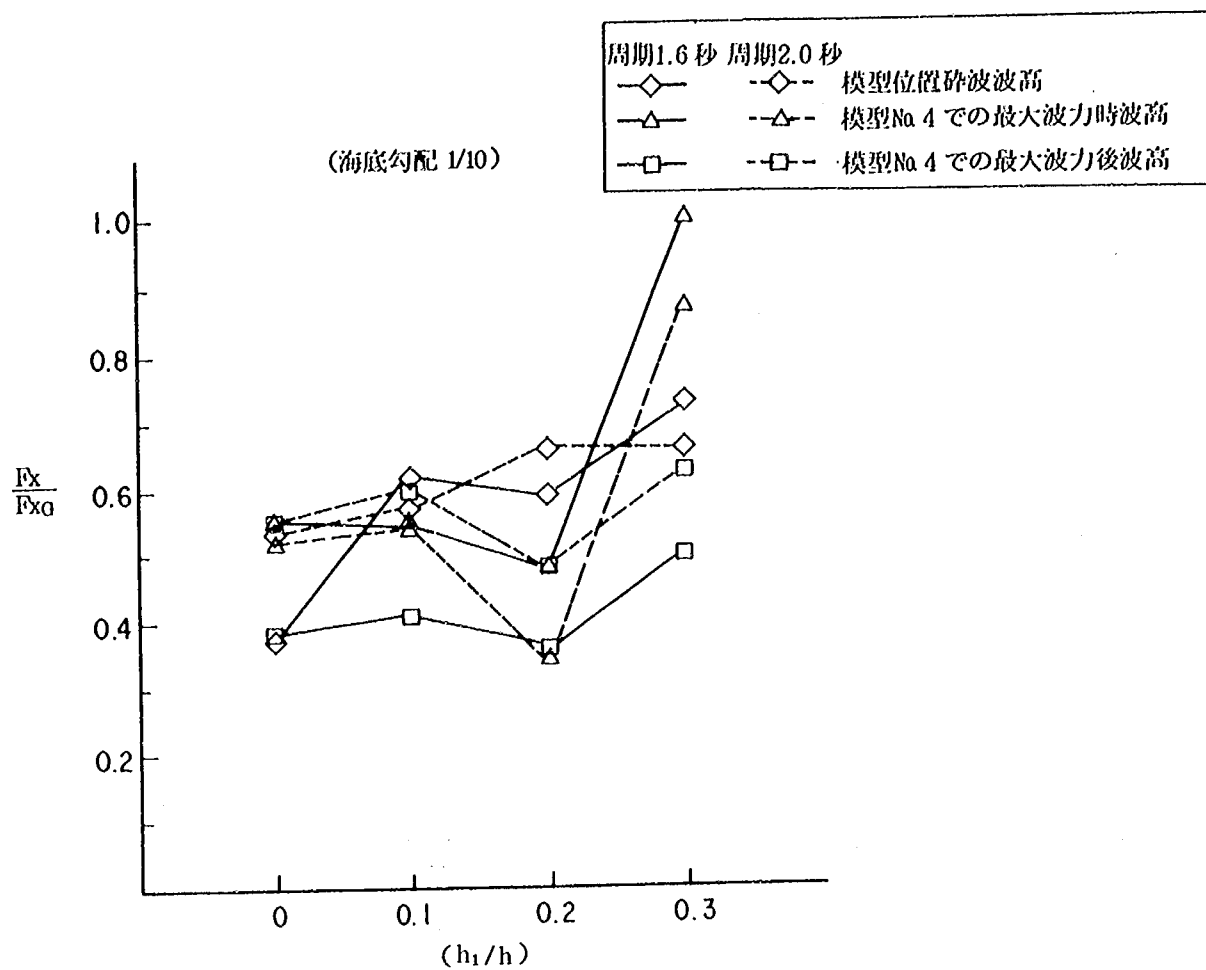


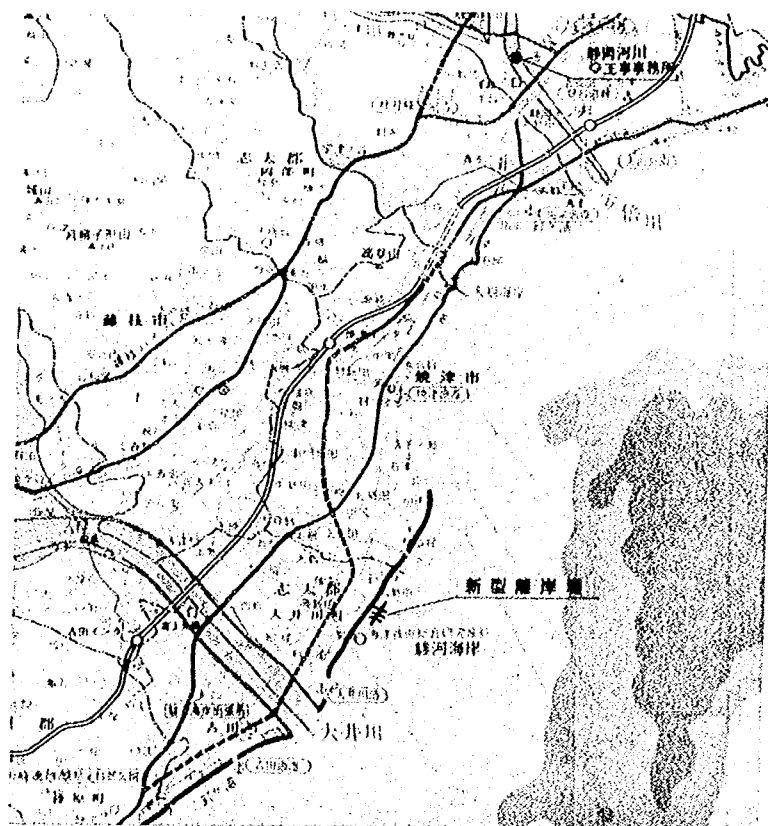
図-2.2.6 F_x/F_{x0} と h_1/h との関係

3. 波力実験と現地測定との対比

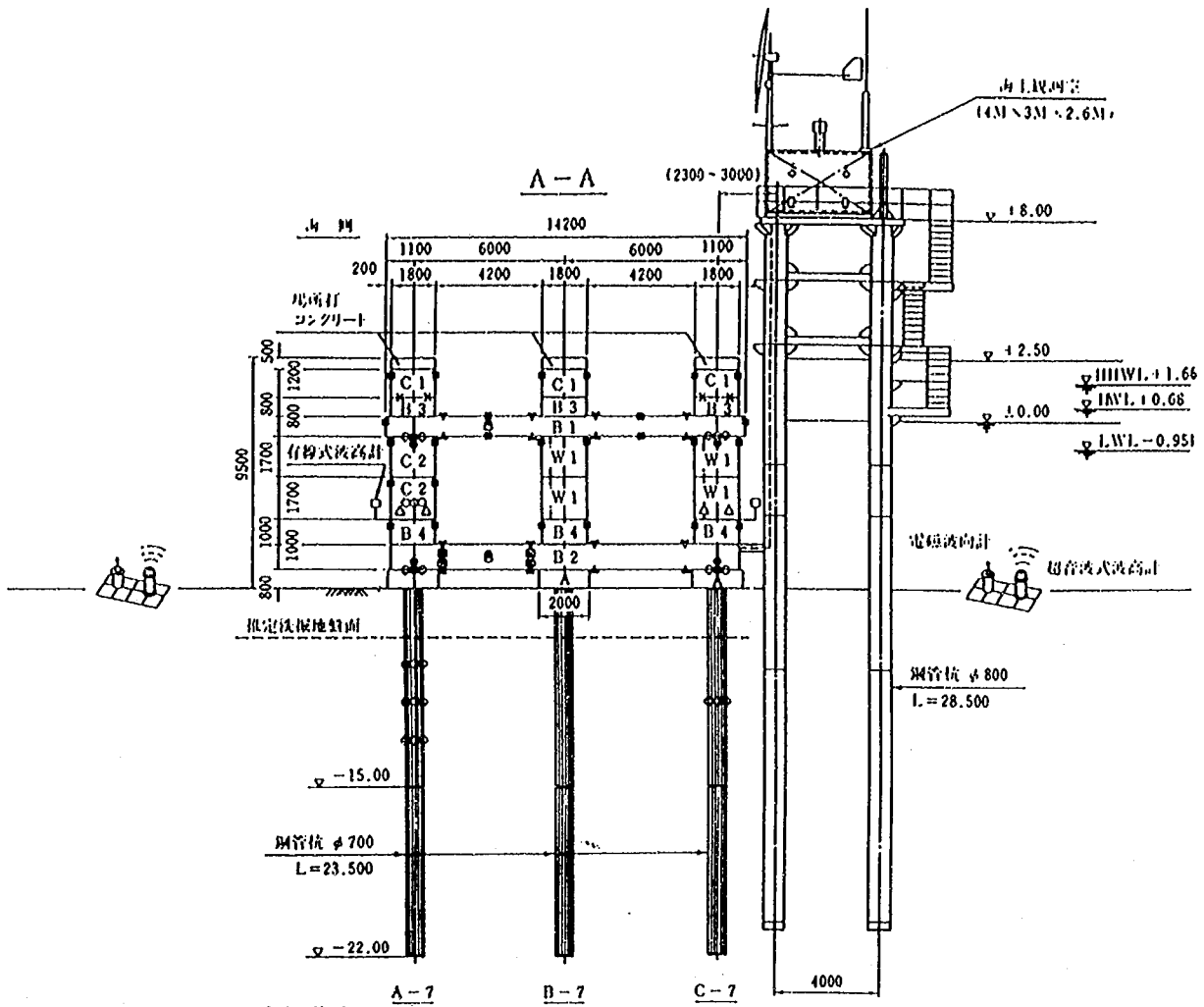
3.1 概要

従来より、各種の海域制御構造物について模型実験により、消波機能や安定性等各種の評価を行ってきたが、この模型実験の妥当性を検証するには海域制御構造物で実際に計測を行い、対比検討を行う必要がある。

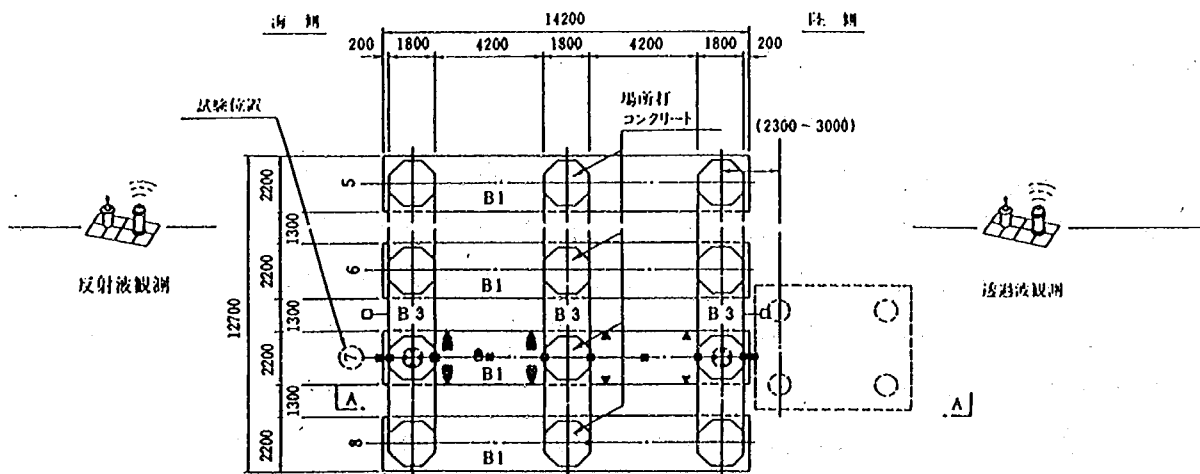
昭和162年に建設省中部地方建設局が駿河海岸に海域制御構造物の試験施工として新型離岸堤の設置を行った。この新型離岸堤は消波形式がスリット式、構造形式が有脚式の海域制御構造物である。新型離岸堤の設置位置について図—3.1.1 位置図に、断面形状等について図—3.1.2 一般図にそれぞれ示す。



図—3.1.1 新型離岸堤位置図



(a) 側面図



(b) 平面図

図-3.1.2 新型離岸堤一般図

新型離岸堤には波圧等についての観測システムが設置されておりまた、これに近接して建設省中部地方建設局の海洋技術総合研究施設が有り、波浪条件についての観測が行われている。建設省中部地方建設局ではこれらの施設を用い、波浪条件と海域制御構造物が受ける波圧との関係について現地調査を行っている。昭和63年度の測定では設計波高 6 m に対し、実測された波高は $1/3$ 有義波高 (以後 $H_{1/3}$ と呼ぶ) で 1 m 程度と低く、設計条件の妥当性を十分に検証することができなかった。このため、平成元年度は高波浪条件下での計測を集中して行う事として、 $H_{1/3}$ で 3 m 程度までのデータを取得することができた。

そこで、新型離岸堤での実測値との対比を行うため、新型離岸堤の模型を用いた波力測定実験を行い、波圧の実測値と模型実験値について対比を行う事とした。

3.2 対比条件

1) 新型離岸堤での現地測定

駿河海岸の新型離岸堤に設置された現地観測システムでは主要な部材に波圧計を設置して計測を行い、これをデータレコーダに収録する。データの収録は波高をトリガーとして自動的に開始し、サンプリングタイム 0.8 秒で 10 分間行うシステムとなっており、平成元年 3 月から 10 月までの期間中に $H_{1/3}$ が 0.5 ～ 3.1 m の波圧データの収録を合計で 329 回行った。

2) 対比実験

昭和63年度に新型離岸堤の模型 (縮尺 $1/25$) を作成し、波圧測定実験を行った。波力測定実験を行った模型の形状寸法及び計測器配置について図—3.2.1 模型一般図に示す。実験に使用した試験装置、計測器、実験方法等については 2. 部材波力に関する実験の場合と同様である。なお、造波水路の水路床勾配は現地に合わせ、 $1/70$ とした。

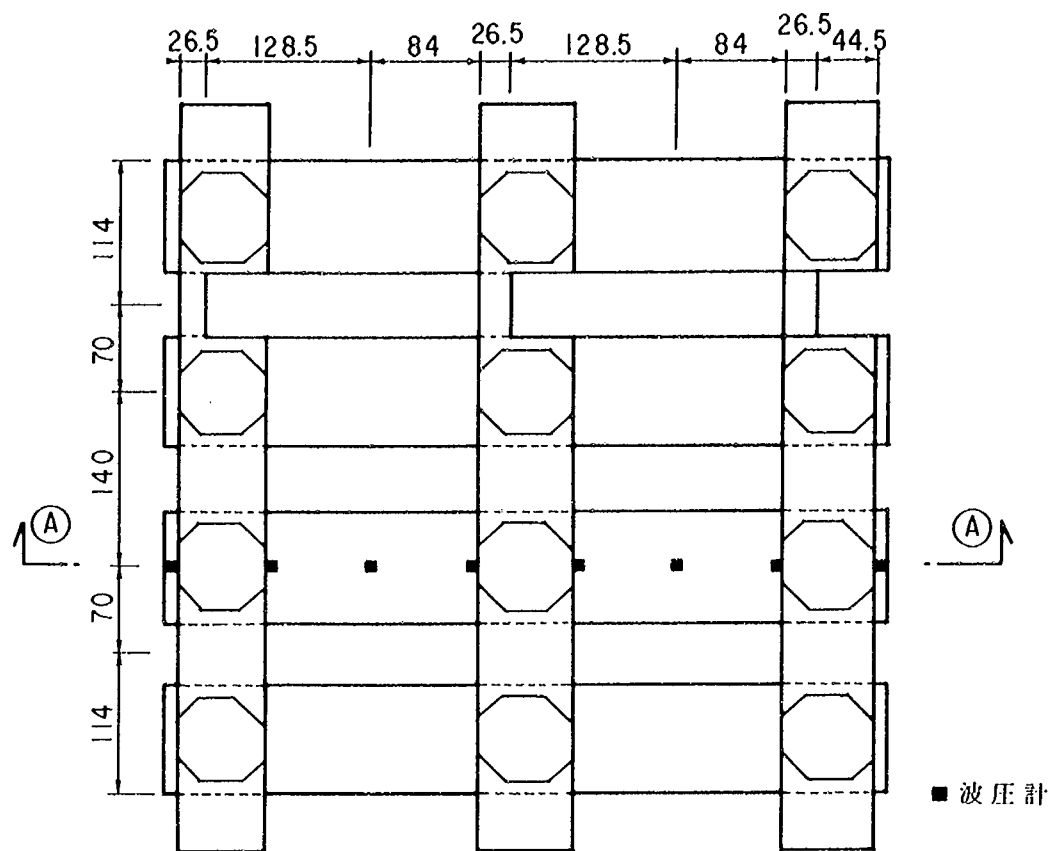
3) 対比条件

模型実験の結果と現地での実測結果の対比を行うためには、水深、波浪周期、波高、計測器位置等の実験条件を一致させる必要がある。

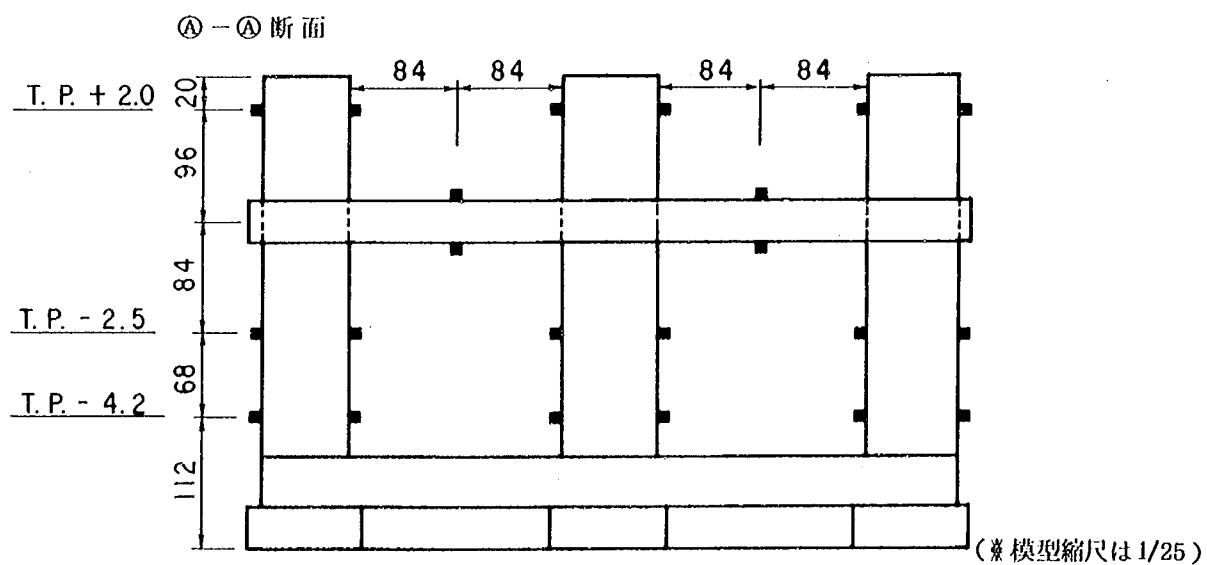
模型実験の実験条件を基準として、実測データの波浪周期を 5 種類に区分し、この中から模型実験の場合と同等な水深となる潮位条件を持ち、波高の大きいケースを選ぶ事とした。

波浪周期については実測データでは $T_{1/3}$ を用い、模型縮尺 $1/25$ の場合の時間縮尺 ($1/5$) より、実測データを実験時の波浪周期 0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.8 秒に対応する 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 14.0 秒の 5 周期に区分した。

また、模型実験時の水深は、波浪周期 0.8 秒～ 2 秒の場合には 34.6 cm の条件で、周期 2.8 秒の場合には 28 cm の条件で行ったが、これは現地ではそれぞれ水深 8.65 m、7 m に相当する。実測時の水深を求めるため、御前崎測候所の潮汐月表から 1 時間単位の潮位を読み取り、模型実験の条件に対してほぼ同等と考えられる (± 50 cm の範囲) 実測データを選び出した。波浪周期と水深の条件について見ると、全 329 回の実測において 123 回が模型実験と同等であったが、この中から比較的波高の大きい 41 ケースを選び、模型実験と対比することとした。選び出したデータについて一覧表 (表—3.2.1) に示す。



(a) 平面図



(b) 側面図

図-3.2.1 模型一般図 (単位: mm)

表-3.2.1 対象ケース一覧表

日 付	No	H max (m)	H 1/3 (m)	T 1/3 (SEC)				
				4	6	8	10	14
3/21	1	0.8	0.5	○				
3/22	8	0.8	0.6	○				
3/29	8	1.1	0.7	○				
3/31	13	1.6	1.2		○			
	14	1.5	1.2		○			
	17	1.9	1.2		○			
	18	1.6	1.2		○			
5/1	20	2.7	1.5		○			
	21	2.2	1.4		○			
	22	2.1	1.6			○		
	23	2.7	1.7			○		
	24	2.2	1.7			○		
	25	2.2	1.6			○		
	26	2.7	1.8			○		
	27	2.4	1.6		○			
	28	2.9	1.7			○		
5/2	15	2.3	1.4			○		
	16	2.1	1.3				○	
	17	2.4	1.3			○		
	18	1.7	1.3			○		
	19	2.1	1.3			○		
	20	1.9	1.4				○	
5/20	3	1.4	1.1		○			
	4	1.8	1.1		○			
	5	1.9	1.1		○			
	6	1.3	1.0		○			
	7	2.1	1.3		○			
	8	1.6	1.2			○		
	9	1.6	1.0		○			
	10	1.7	1.2		○			
	11	1.5	1.1		○			
7/27	8	2.6	2.2				○	
	9	3.7	2.9				○	
	10	3.8	2.8				○	
	11	3.6	2.7				○	
	12	4.4	2.7				○	
	13	4.0	2.8				○	
	14	3.7	3.0				○	
	15	4.9	2.8				○	
10/6	10	3.4	2.6					○
	11	3.2	2.3					○
	12	3.1	2.3					○
	14	3.0	2.4					○
計				3	15	11	10	4

3.3 現地測定データの補正方法

1) 基線補正

模型実験では、静水圧がかかった状態の波圧をゼロとしているが、実測では波圧計自体の経時変化や潮位の変動の影響を受ける事により波圧ゼロの点変動している。このため、実測値のゼロ点の補正を行う必要がある。

ゼロ点の補正を行う方法としては、平均値によるものが一般的であるが、水面上の測定点では波形が片波形となり、平均値はゼロとならない事が考えられるため、ここでは波圧の頻度分布を求め、頻度最大の波圧をゼロとする方法を用いる事とした。なお、頻度分布を求める際の水圧の区分は 1 g/cm^2 毎とした。これより補正を行う前後の波圧の時刻歴図の一例を図—3.3.1に示す。

2) $1/3$ 有義波高に対応する波圧 ($P_{1/3}$)

波圧に対応する波高、周期については新型離岸堤に近接して設置されている建設省の海洋技術総合研究施設にて取得した波浪データを用いる事とした。取得した波浪データは波高については最大波高 (H_{max})、 $1/3$ 有義波高 ($H_{1/3}$) が、波浪周期については $1/3$ 有義波高 ($H_{1/3}$) に対応する波浪周期 ($T_{1/3}$) がそれぞれ波圧の計測と同時刻の値として求められている。

模型実験値との対比に用いる波高としては H_{max} と $H_{1/3}$ が考えられるが、対比に $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の組合せを用いた場合には特に問題は生じないと予測されるものの、 H_{max} と $T_{1/3}$ の組合せを用いる場合には H_{max} は 1 波であるため H_{max} をとった時点での波浪周期が $T_{1/3}$ とは必ずしも一致しない事が考えられる。このため、模型実験値との対比は $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ の組合せと H_{max} と $T_{1/3}$ の組合せについてそれぞれ行い、それぞれの傾向の違いについて見る事とした。

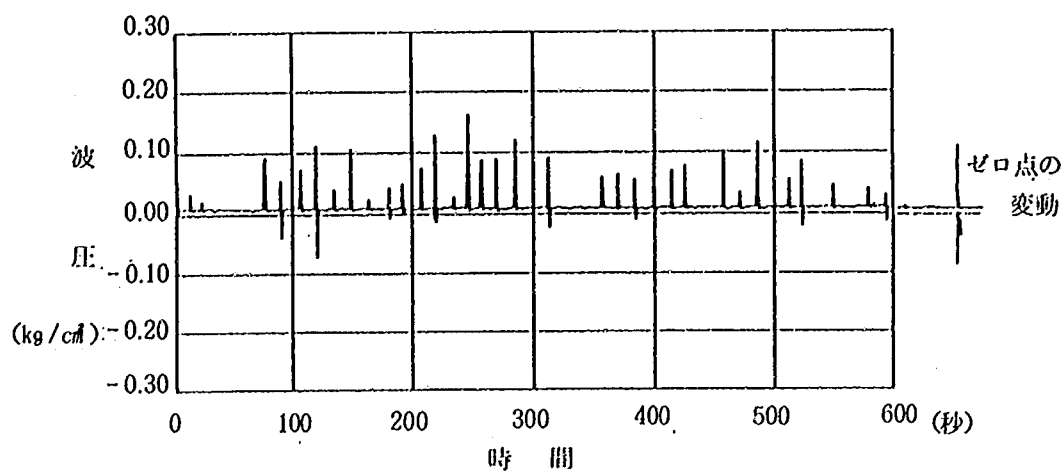
実測の H_{max} に対応する波圧は最大値 (P_{max}) であるが、 $H_{1/3}$ に対応する波圧 ($P_{1/3}$) は波圧の時刻歴データから $H_{1/3}$ と同様に、ゼロアップクロス法により波圧のピーク値を取り出し、大きい方から $1/3$ 個の平均を求める事により算出した (図—3.3.2 参照)。

3) 波圧分布を用いた計測位置の補正

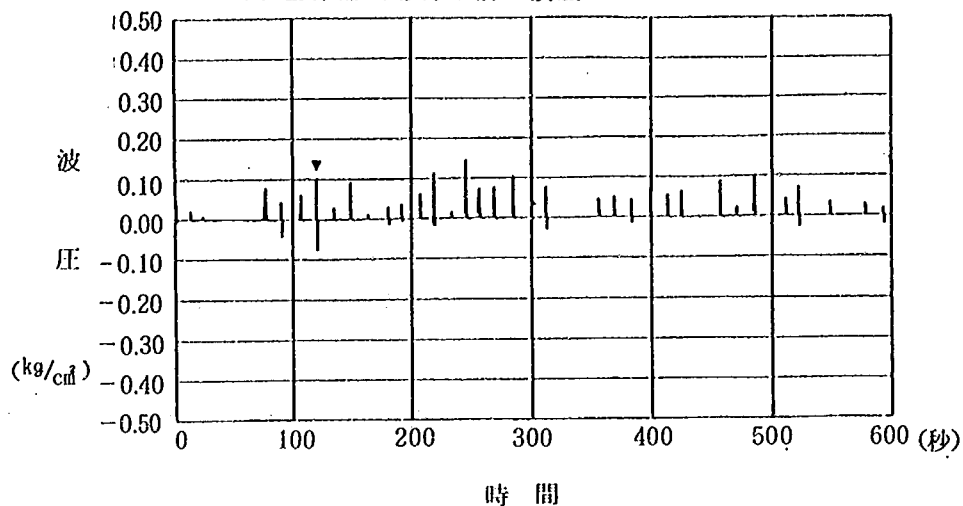
着目点を決めて波圧、差圧の対比を行う場合、実測と模型実験とでは測定位置に若干の違いがあるため、同等の条件で対比を行うには計測位置の違いによる影響を考慮する事が重要である。ここでは、実測データで鉛直方向に 3 点以上の測定点があり波圧分布を求めることのできる部材 (柱 A、柱 C) の測定点については波圧分布より実測値の模型実験での測定点に相当する位置の波圧を推定し、対比に用いる事とした (図—3.3.3)。

4) 対比する着目点

波圧については、柱部材の場合には入射する波浪を直接に受ける前面の計測点の静水面上及び海底付近の各 1 点に、梁部材についても波浪が直接作用する上面の中央部に着目して合計 8 点での対比を行う事とした。差圧については、波圧対比測点の中の主要な点 (5 点) を選び対比を行うこととした。対比着目点について図—3.3.4 に示す。



(a) 基線補正を行う前の波圧



(b) 基線補正後の波圧時刻歴図

図-3.3.1 波圧の時刻歴図の例

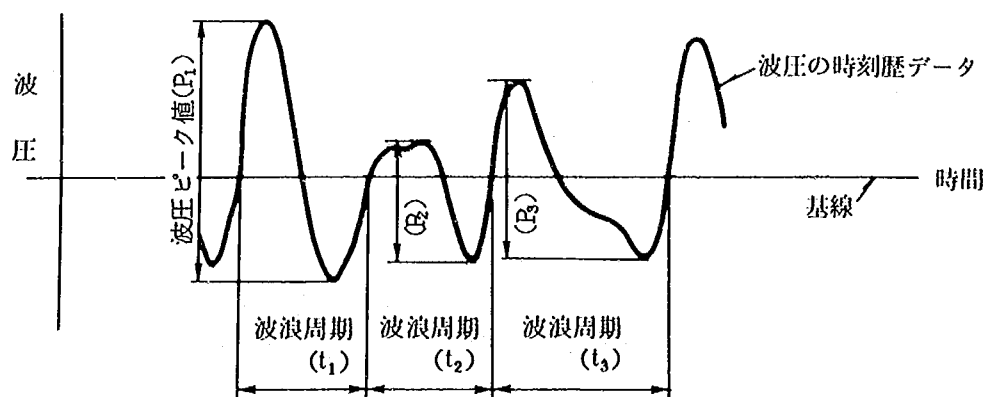


図-3.3.2 ゼロアップクロス法による波圧ピーク値の取出し

波圧測定位置

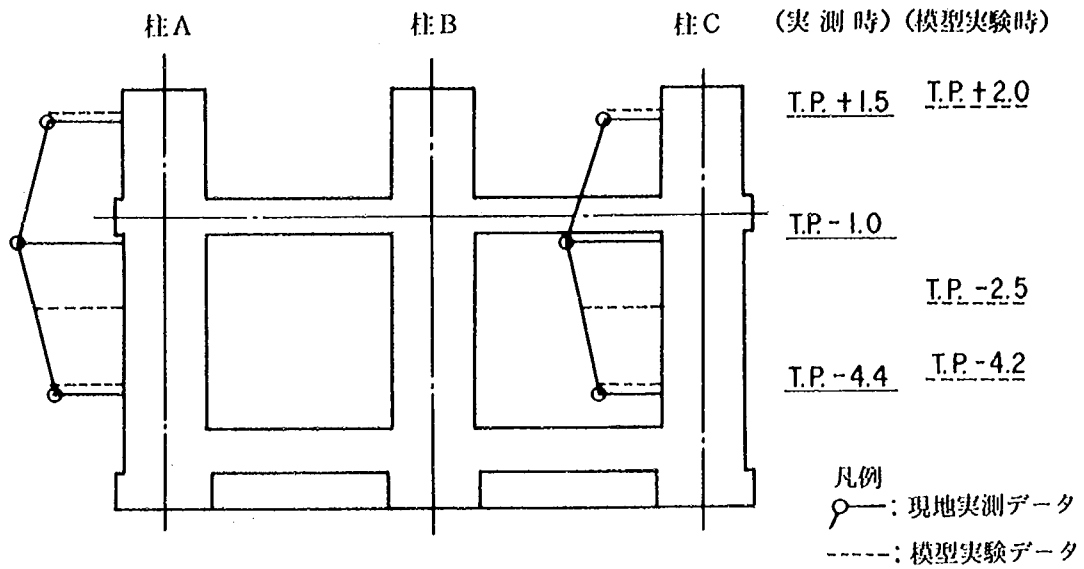


図-3.3.3 波圧分布による計測器位置の補正

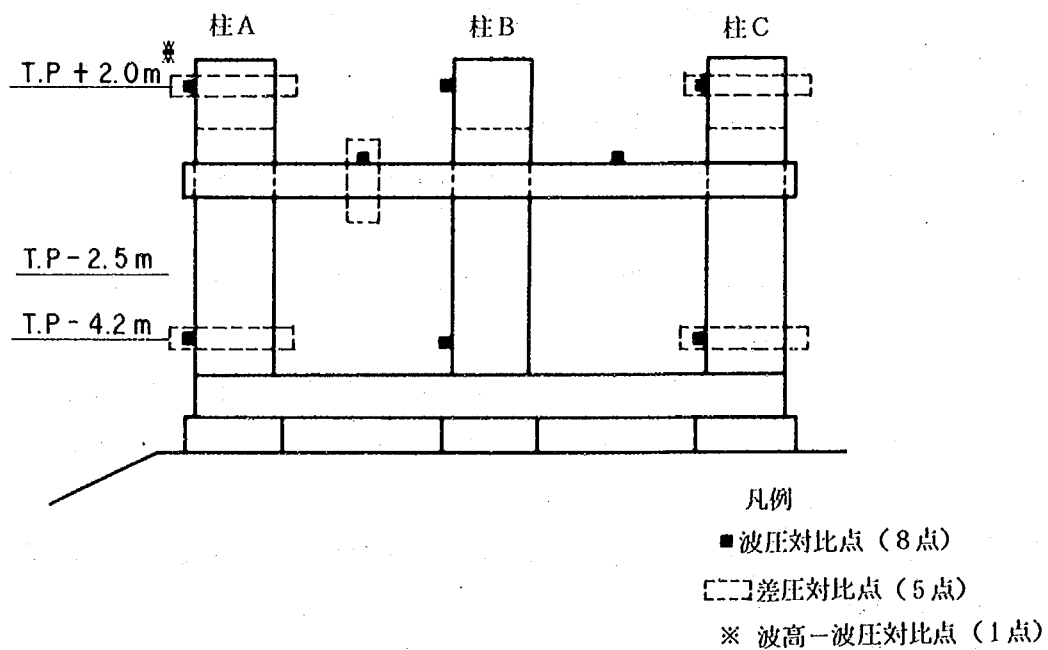


図-3.3.4 対比着目点

3.4 調査結果

1) 波高と波圧の関係

柱Aの最上部の測点(図—3.3.4内※印)に着目し、波高と波圧の関係について実測値(H_{max} と P_{max} 、 $H_{1/3}$ と $P_{1/3}$)及び模型実験値をそれぞれ整理し、図—3.4.1に示す。

模型実験の場合については図—3.4.1(a)に示す通り、波高が15cm程度までは重複波であり波圧の上昇は緩やかで、概ね15cm(実測値換算3.75m)程度より碎波し、波圧が急激に増大する傾向を示した。

実測値で波高、波圧に最大値を用いた場合には図—3.4.1(b)に示すように波高3.5m付近までは波圧の上昇は緩やかであり、以後波圧が急激に上昇する模型実験と同様の傾向が得られた。

実測の $H_{1/3}$ 、 $P_{1/3}$ の場合は図—3.4.1(c)に示すように、 $H_{1/3}$ は一般に H_{max} の1/1.8程度と小さいため、波高3m程度までの対比にとどまった。波高3m程度までの傾向は模型実験値とほぼ整合しているが、波高の高い領域については明らかではない。

これらの事から、波高と波圧の関係については実測の P_{max} 、 $P_{1/3}$ とも大きな違いは見られず、模型実験の結果と概ね良好に一致する事が分かった。

2) 波圧分布

波圧分布形状について、 P_{max} と模型実験値と対比した例を図—3.4.2に、実測の $P_{1/3}$ と模型実験値と対比した例を図—3.4.3に示す。

また、部材に作用する力として波圧を見る場合には、部材の前面と背面の圧力の差(差圧)が用いられる。差圧については、同時刻の部材前面の波圧から背面の波圧を引く事により差圧を求め、波圧の場合と同様に分布図を作成した。実測の P_{max} と模型実験値と対比した例を図—3.4.4に、実測の $P_{1/3}$ と模型実験値と対比した例を図—3.4.5に示す。

なお、対比にあたっては同一の条件となるよう、実測値には実測波高と実験時の波高の比を乗じた値を使用した。

波圧分布及び差圧分布において実測の P_{max} 、 $P_{1/3}$ ともほぼ模型実験値と同様に静水面付近で最大となる波圧分布形状を示した。

実測の P_{max} (図—3.4.2、3.4.4参照)では殆んどの場合、模型実験値よりも大きい波圧を示したが、これは P_{max} が H_{max} を記録した時点とは必ずしも同時刻のものではなく、波浪自体のばらつきも含んだ値であるためと考えられる。

実測の $P_{1/3}$ (図—3.4.3、3.4.5参照)については模型実験の場合とほぼ同様な分布形状を示し、良好な一致が得られた。

波浪周期14秒の場合には柱Aの中央部背面と柱Cの中央部前面及び背面の実測値がほとんど0となっているが、計測器が経時変化により故障したものと考えられる。

3) 各測定点での波圧

実測による波圧と模型実験の波圧とを対比するため、実測値に P_{max} を用いたものを図—3.4.6に、同じく $P_{1/3}$ を用いたものを図—3.4.7に示す。

差圧についても波圧の場合と同様に整理し、実測値に P_{max} を用いた場合について図—3.4.8に、 $P_{1/3}$ を用いた場合について図—3.4.9に示す。

実測より得られたデータから、 P_{max} を用いた場合には波高5 m程度までの、 $P_{1/3}$ を用いた場合には波高3 m程度までの対比を行うことができた。

(1) 波浪周期について

周期10秒の実測 P_{max} は殆どのデータが波高4 m付近に分布しており、波高の大きい部分ではばらつきも大きくなっている。これは1)の模型実験の結果でも波高3.75m程度で砕波している事から、砕波限界波高を超えるため、ばらつきが大きい結果となったものと考えられる。また、 $P_{1/3}$ の場合には砕波限界波高に達しないためばらつきが小さい結果となったものと考えられる。なお、周期14秒のデータが、やや特異な値を示しているが、これらのデータはすべて10月の測定によるものであり、計測器の設置から2年7カ月経過している事から、計測器の劣化が原因であると考えられる。波浪周期による波圧への影響については、周期10秒と14秒以外はすべて重複波であったと考えられるため、どの波浪周期においてもほぼ同じ値となり、明瞭な傾向を示していない。

(2) 対比位置について

静水面より上の測定点では P_{max} , $P_{1/3}$ とも模型実験結果とほぼ良好に一致した。一方、海底付近の測定点では全般に実測の波圧が大きくなっている。これは海底地形の変動が原因と考えられる。参考に9月25日と10月13日に行った海底地形の調査結果を図—3.4.10に示す。洗掘が1.4m程度生じており、このため波圧分布が変化し、海底付近の波圧が大きくなったものと考えられる。

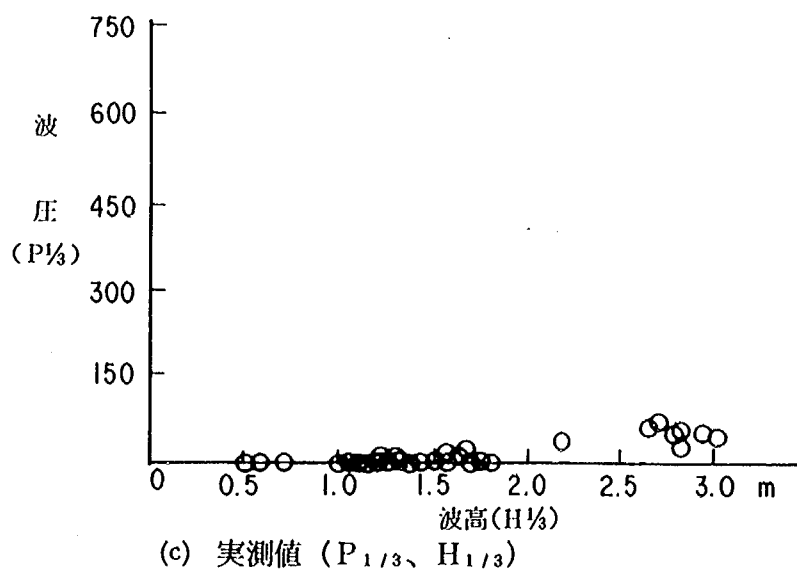
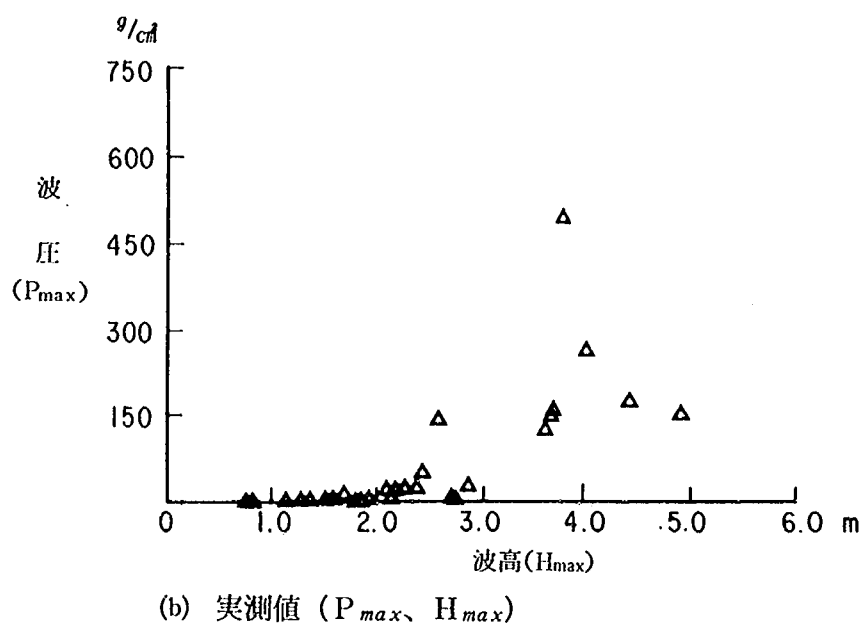
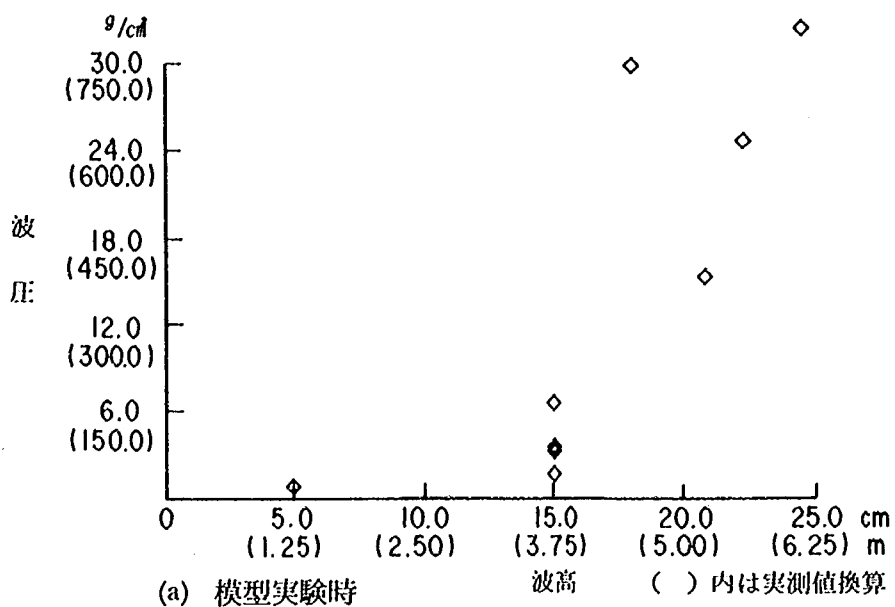
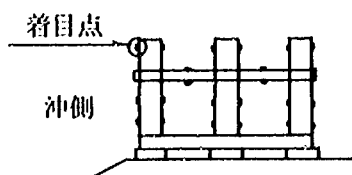


図-3.4.1 波高と波圧の関係

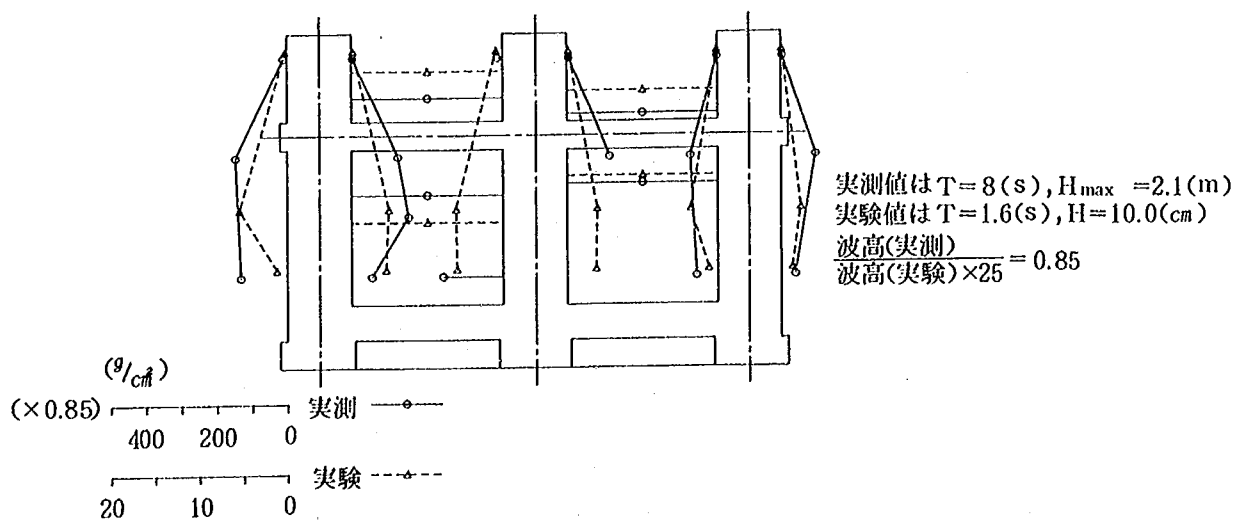
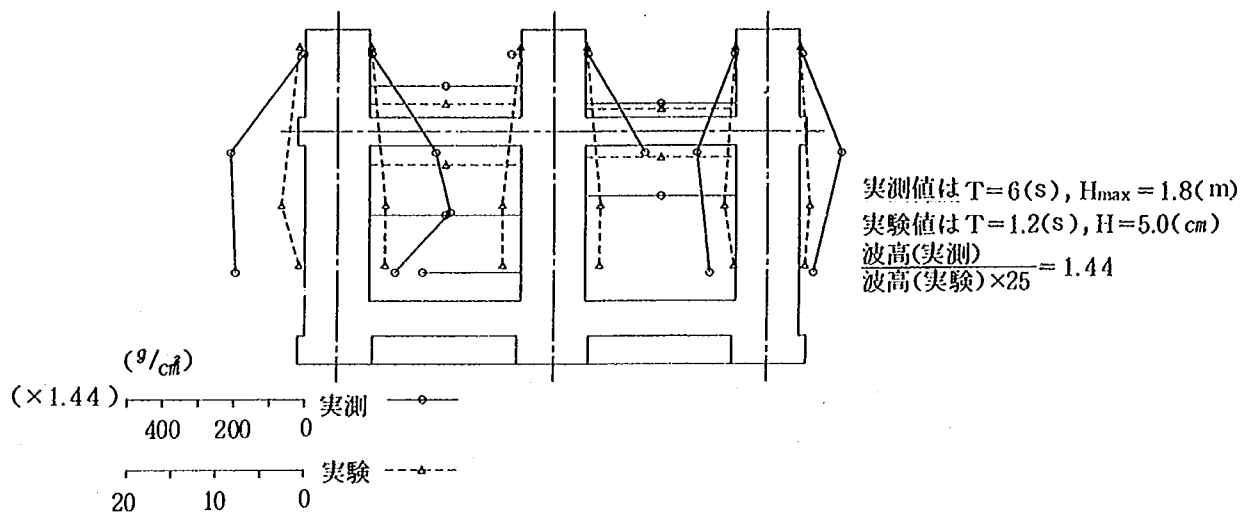
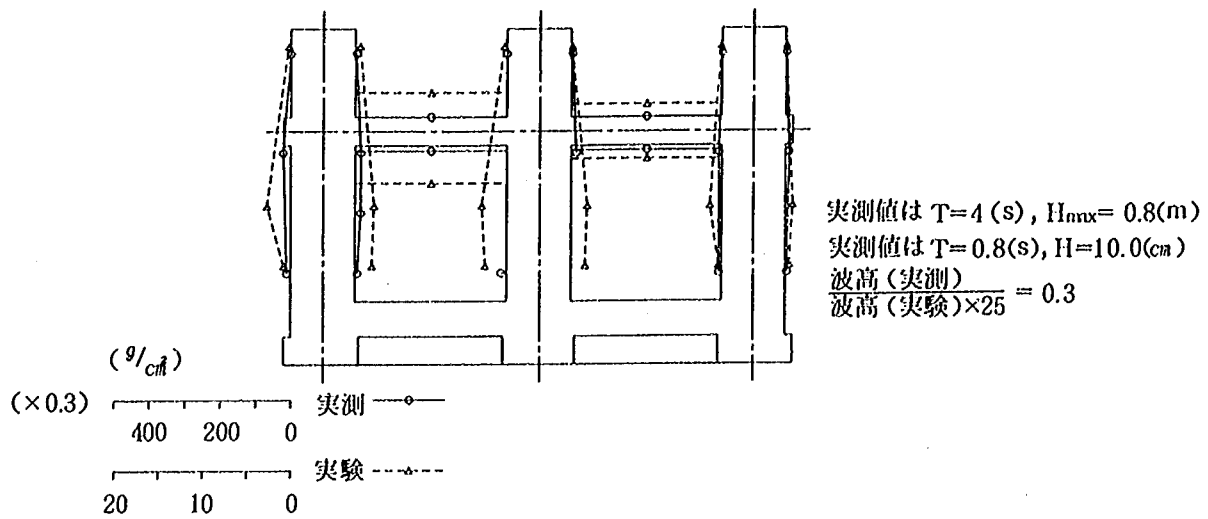
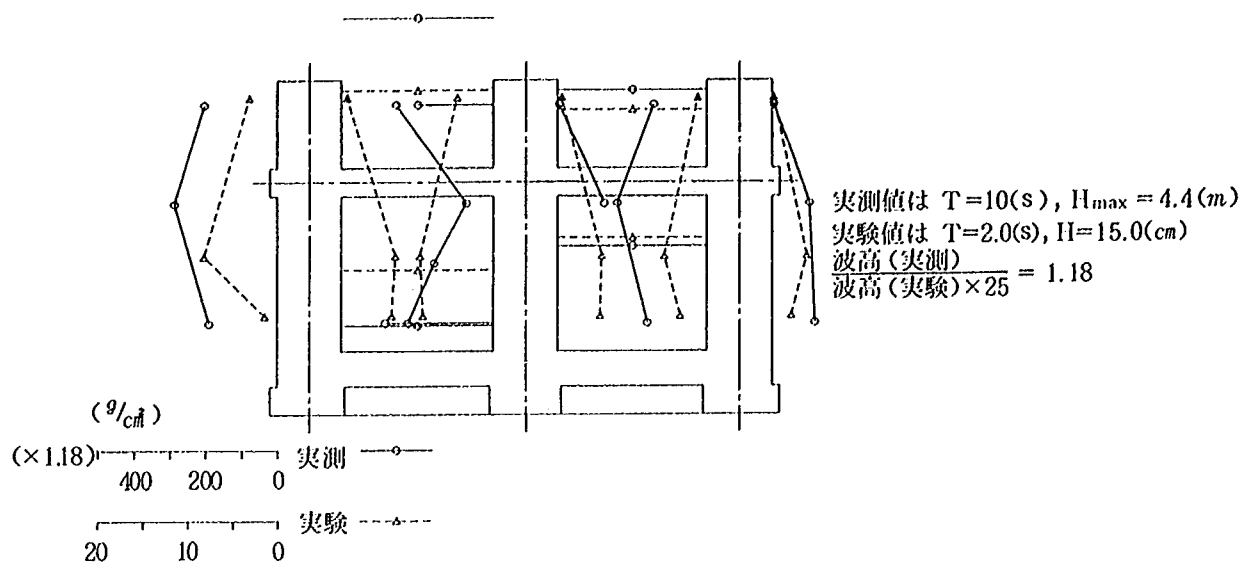
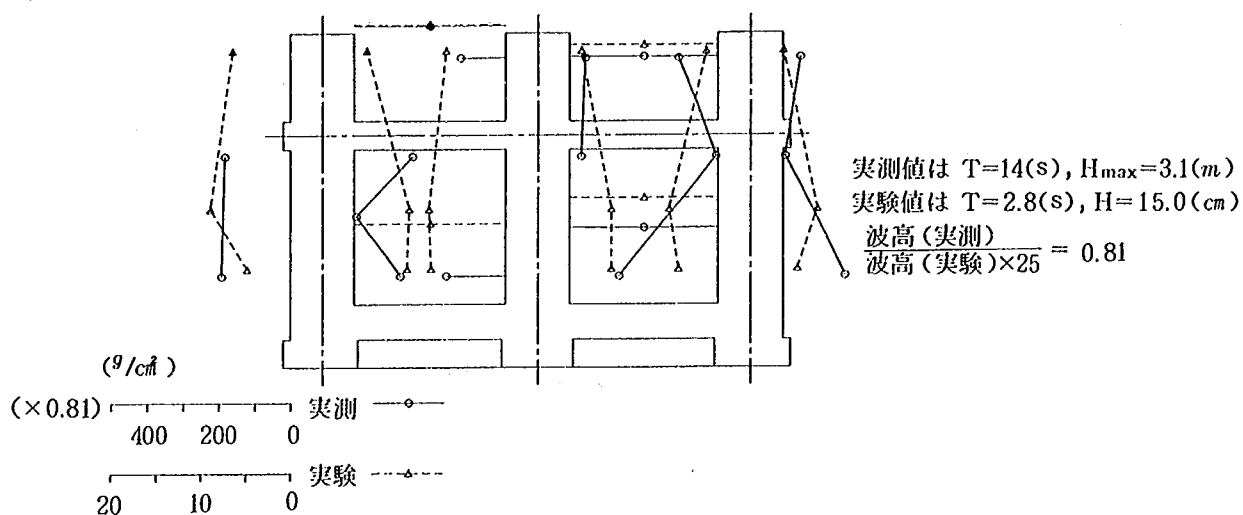


図-3.4.2 (1) 実測 (P_{max}) と模型実験の波圧分布

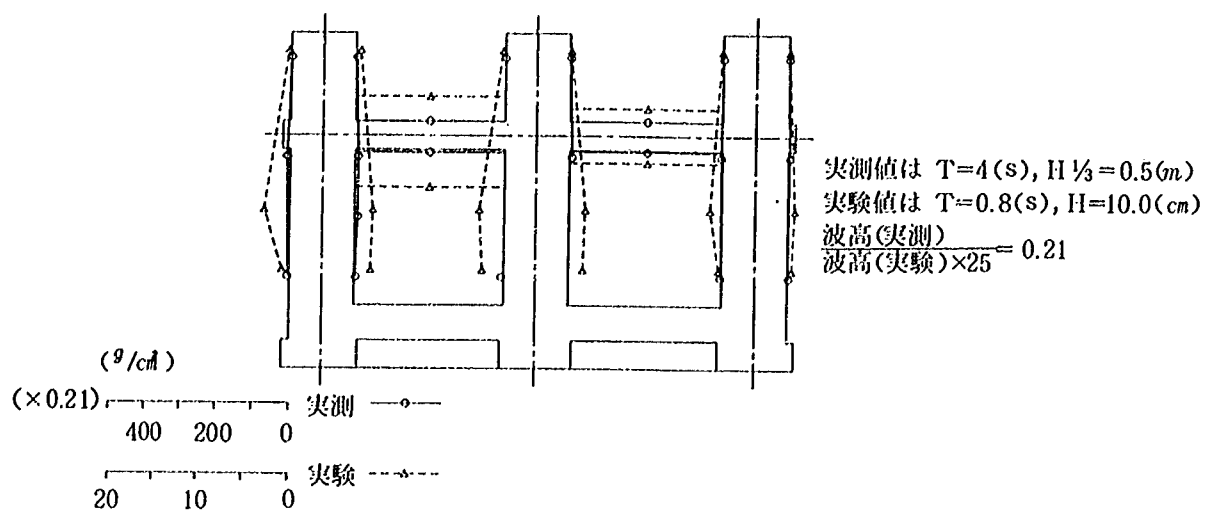


(4) 波浪周期10秒の場合

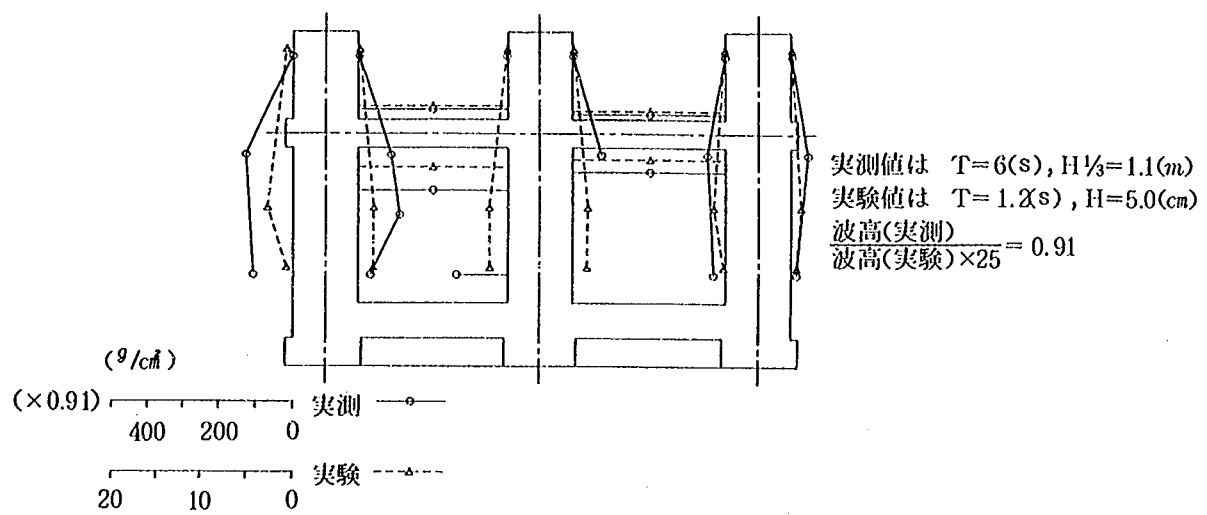


(5) 波浪周期14秒の場合

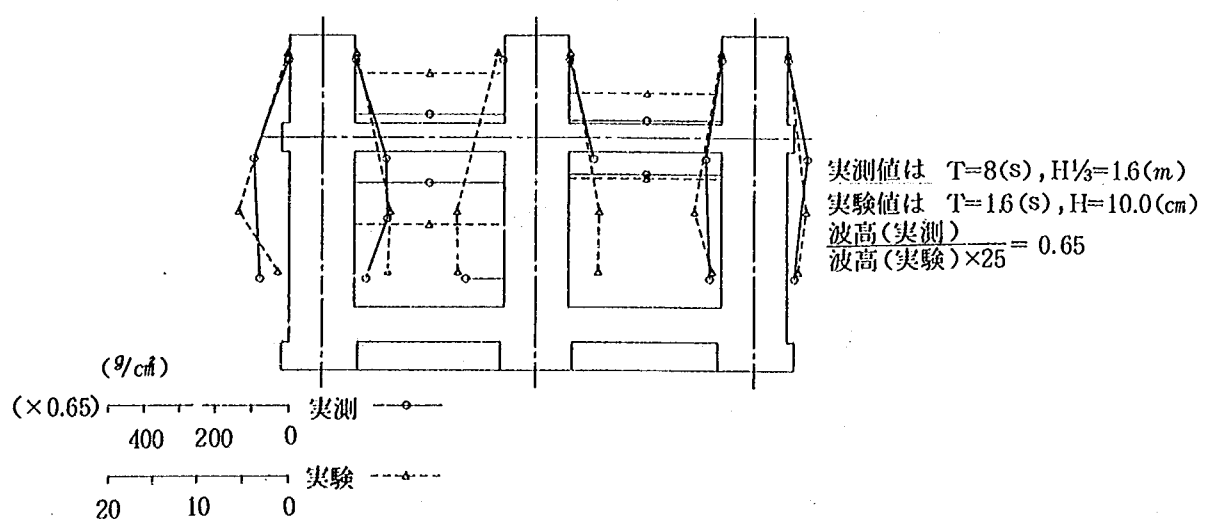
図-3.4.2 (2) 実測 (P_{max}) と模型実験の波圧分布



(1) 波浪周期 4 秒の場合

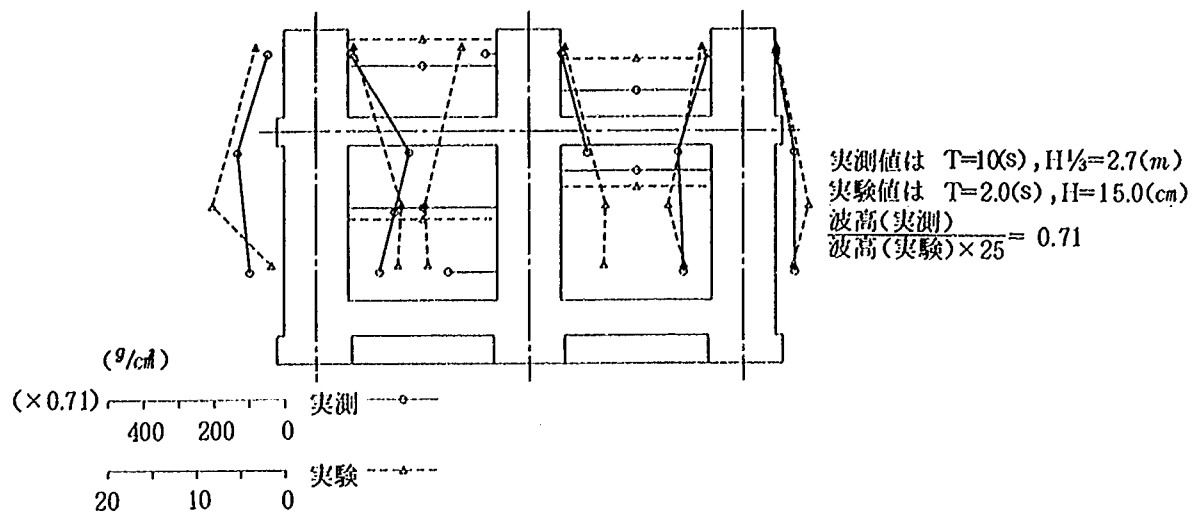


(2) 波浪周期 6 秒の場合

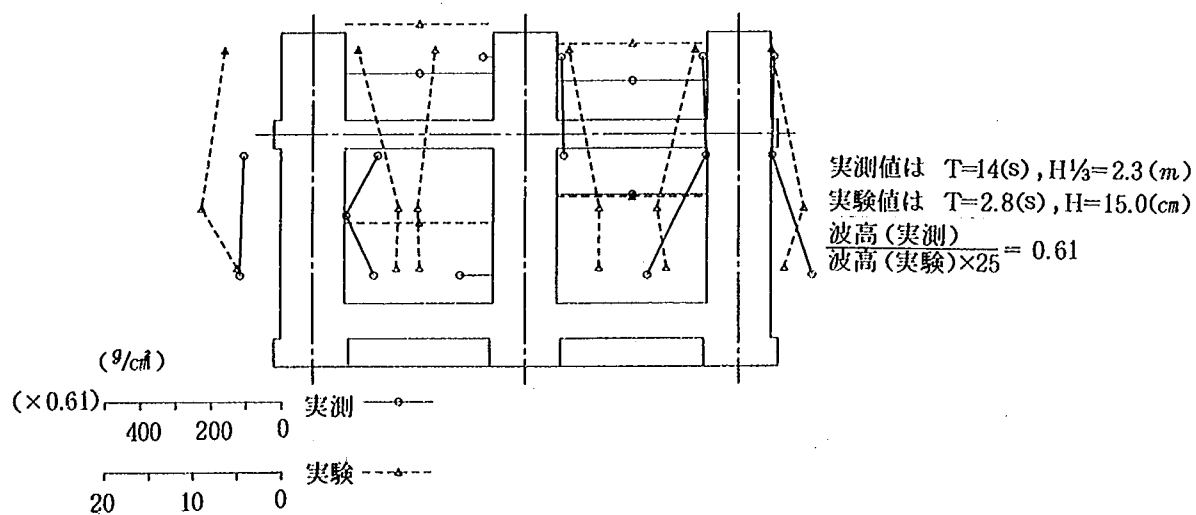


(3) 波浪周期 8 秒の場合

図-3.4.3 (1) 実測 ($P_{1/3}$) と模型実験の波圧分布

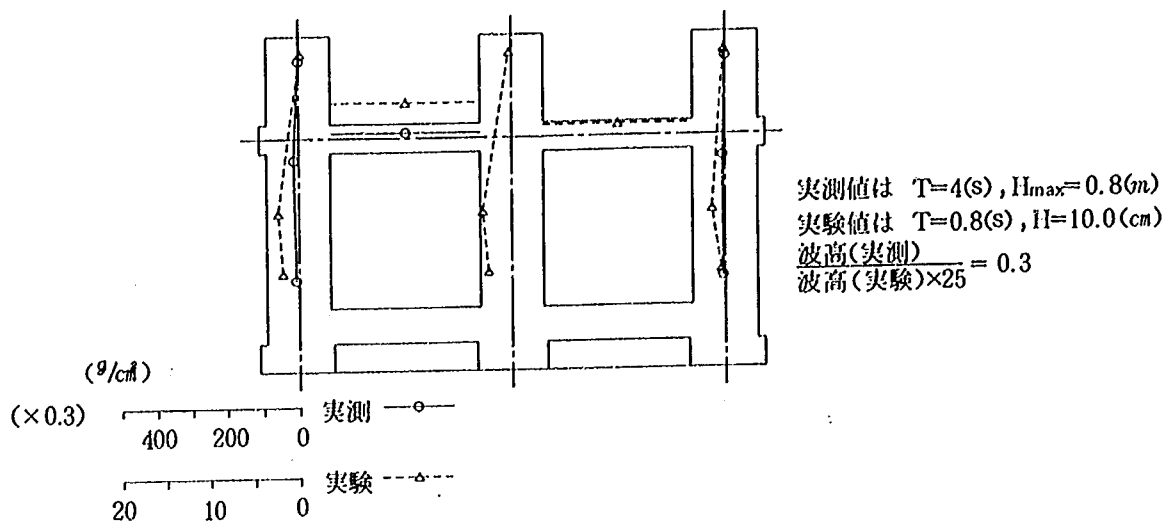


(4) 波浪周期10秒の場合

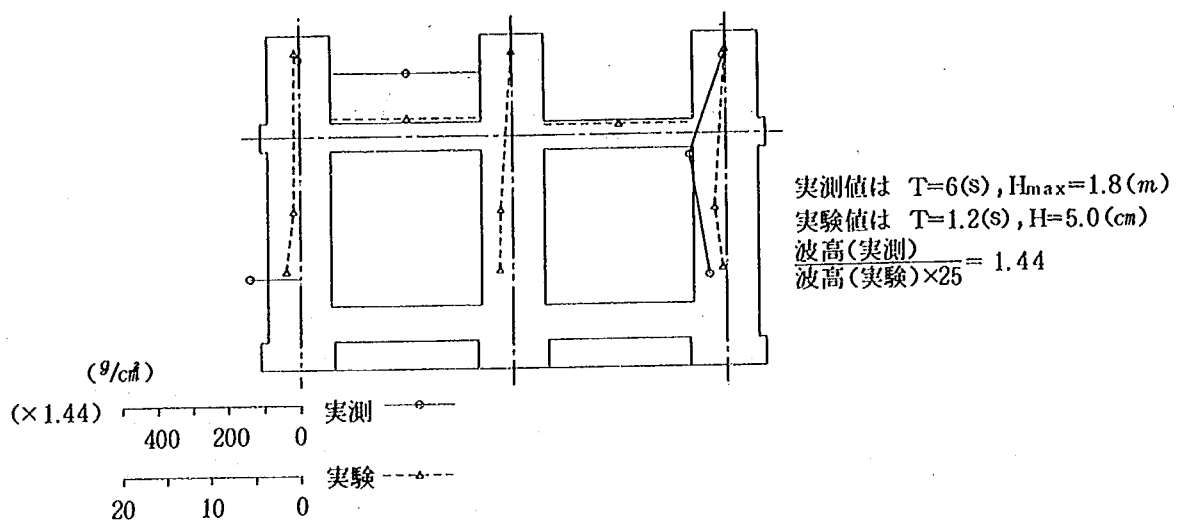


(5) 波浪周期14秒の場合

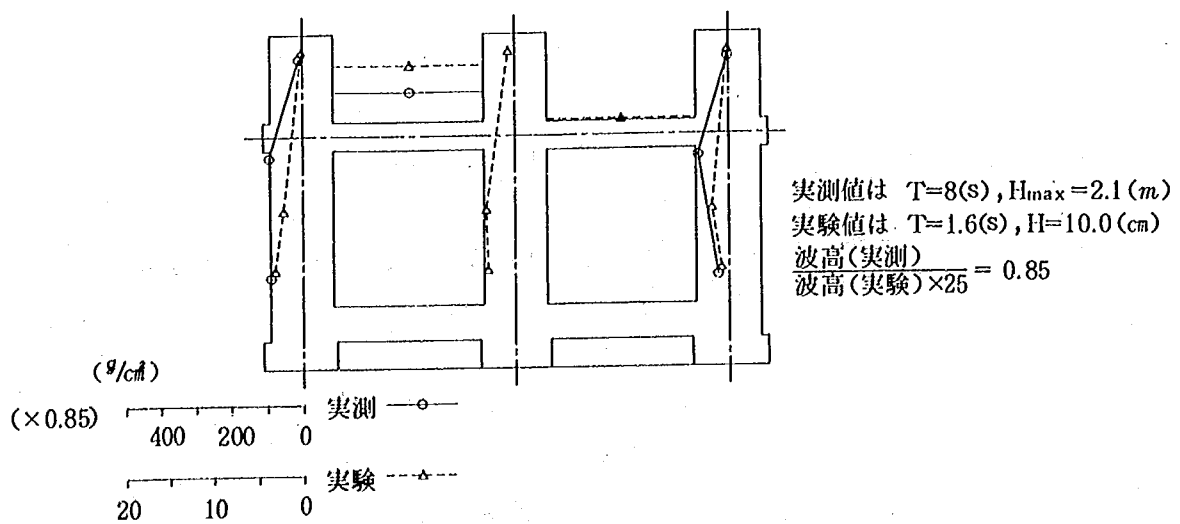
図-3.4.3 (2) 実測 ($P_{1/3}$) と模型実験の波圧分布



(1) 波浪周期 4 秒の場合

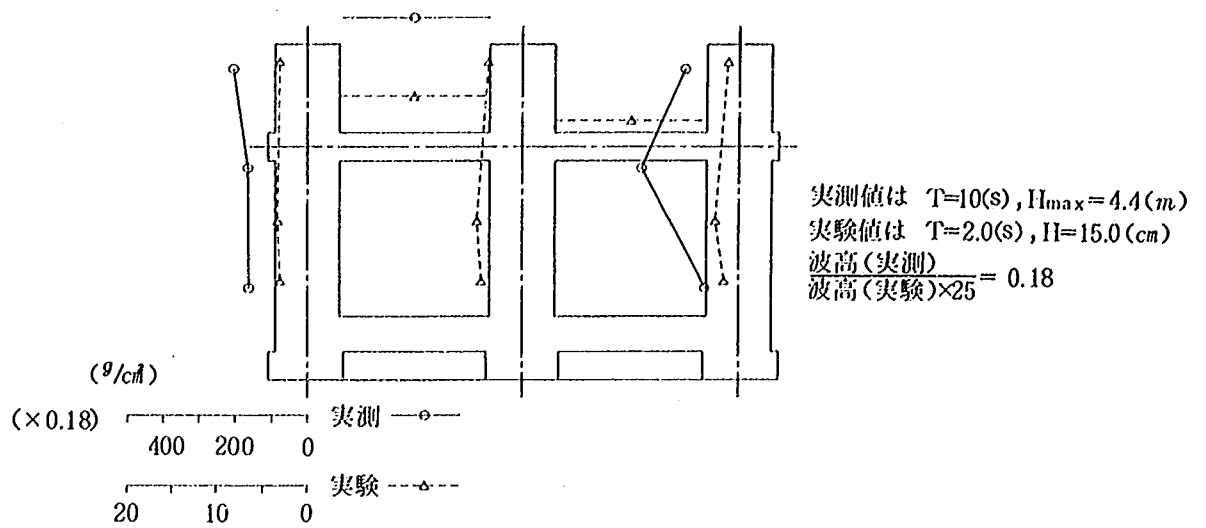


(2) 波浪周期 6 秒の場合

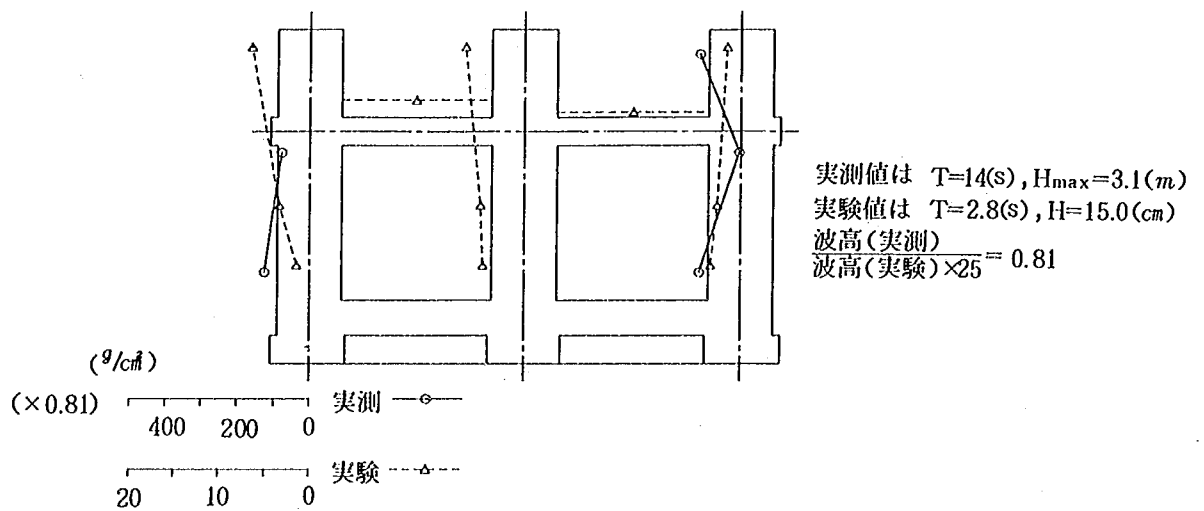


(3) 波浪周期 8 秒の場合

図-3.4.4 (1) 実測 (P_{max}) と模型実験の差圧分布

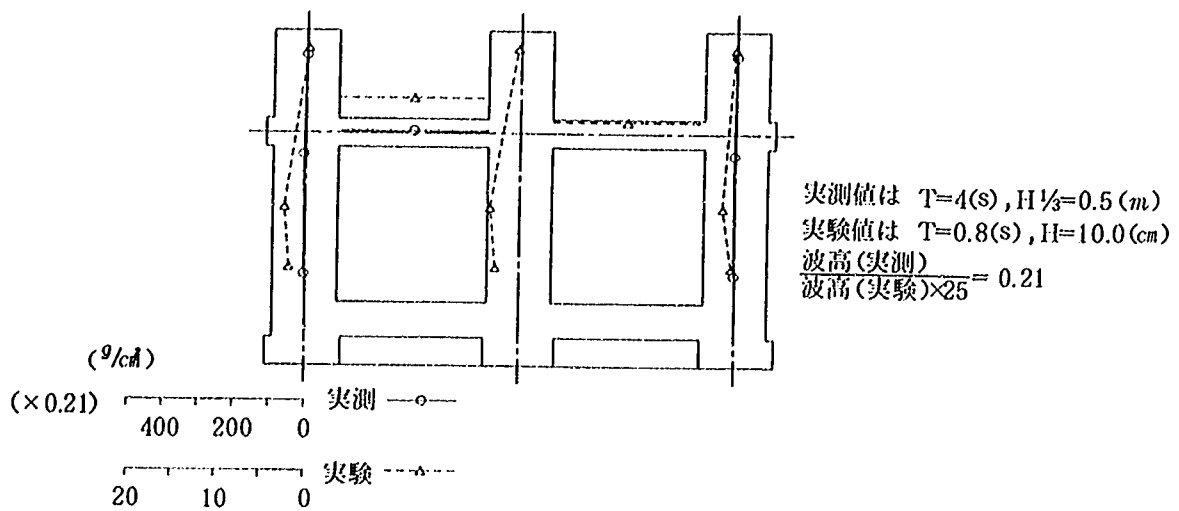


(4) 波浪周期10秒の場合

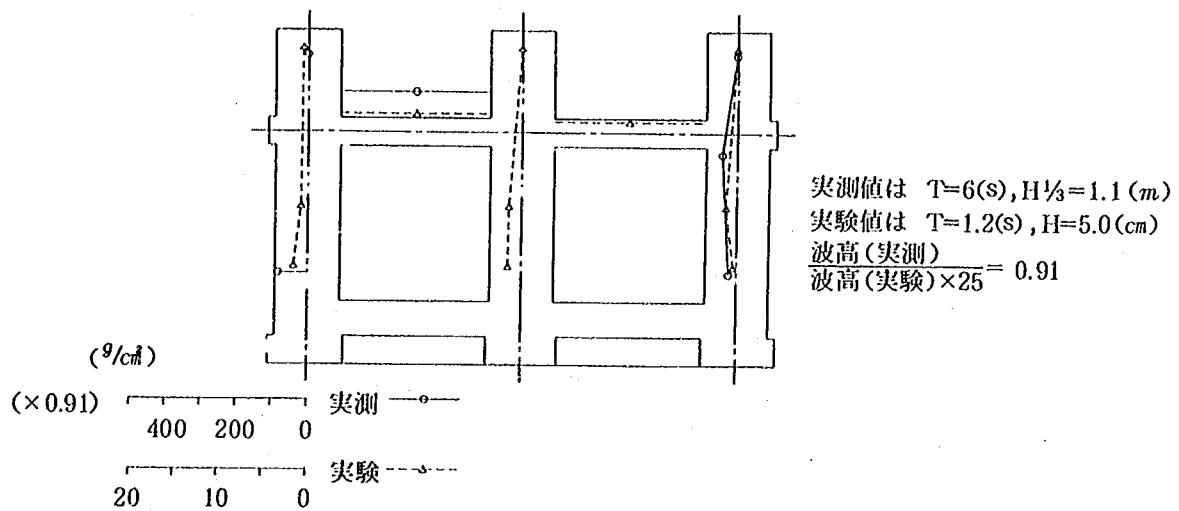


(5) 波浪周期14秒の場合

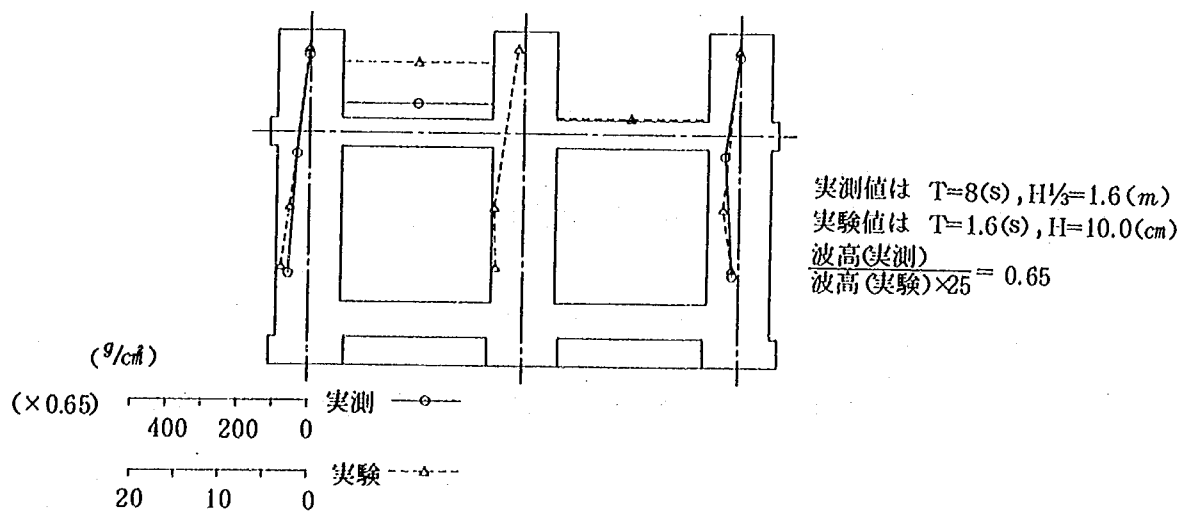
図-3.4.4 (2) 実測 (P_{max}) と模型実験の差圧分布



(1) 波浪周期 4 秒の場合

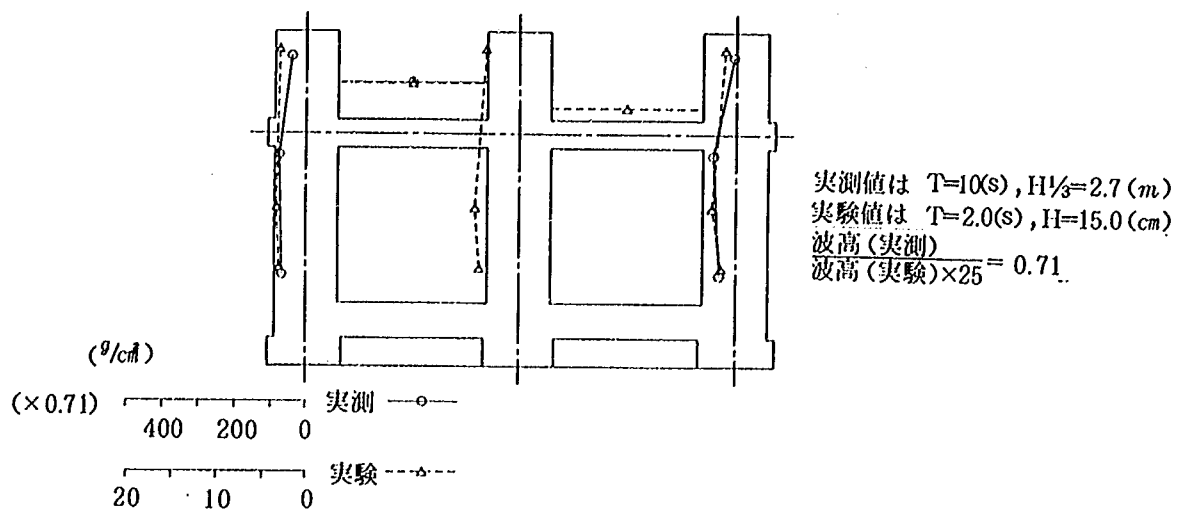


(2) 波浪周期 6 秒の場合

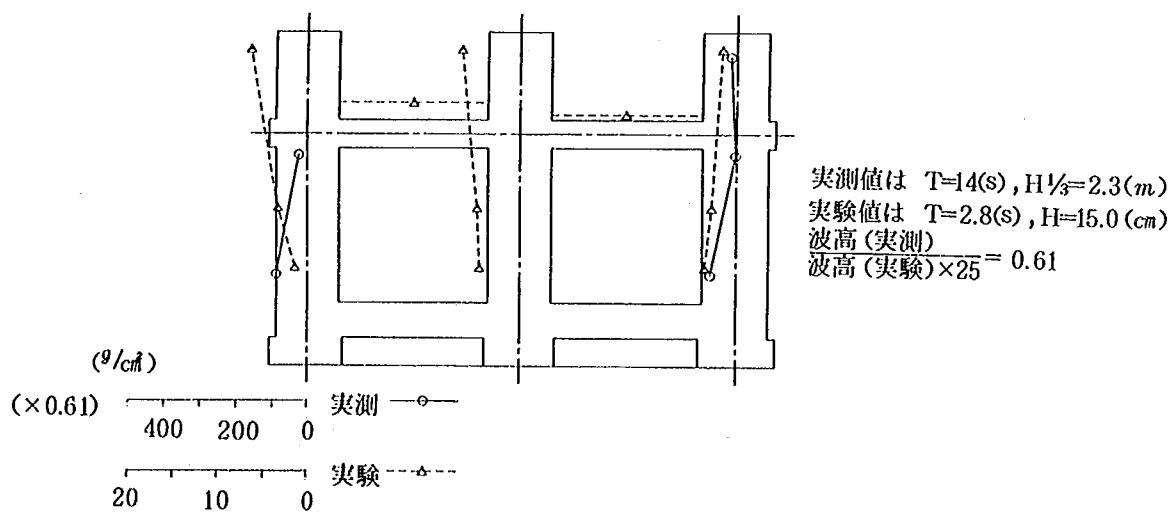


(3) 波浪周期 8 秒の場合

図-3.4.5 (1) 実測 ($P_{1/3}$) は模型実験の差圧分布



(4) 波浪周期10秒の場合



(5) 波浪周期14秒の場合

図-3.4.5 (2) 実測 ($P_{1/3}$) は模型実験の差圧分布

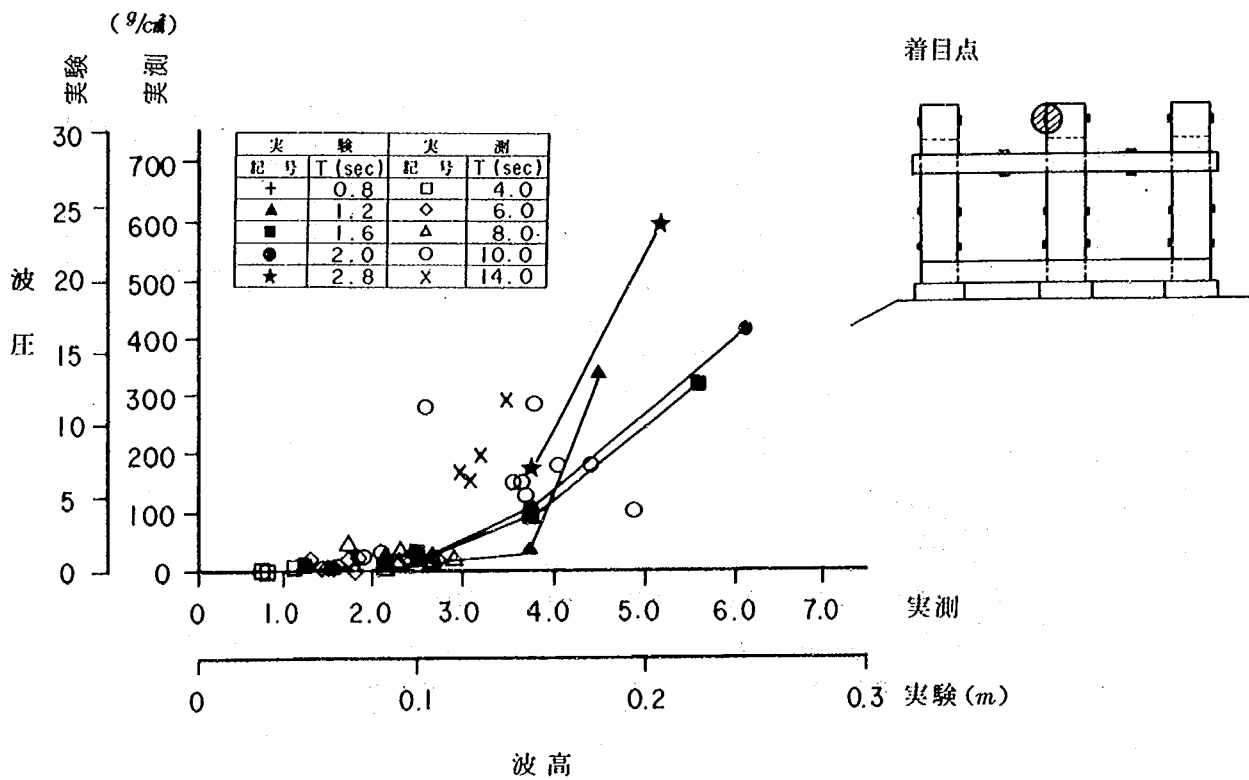
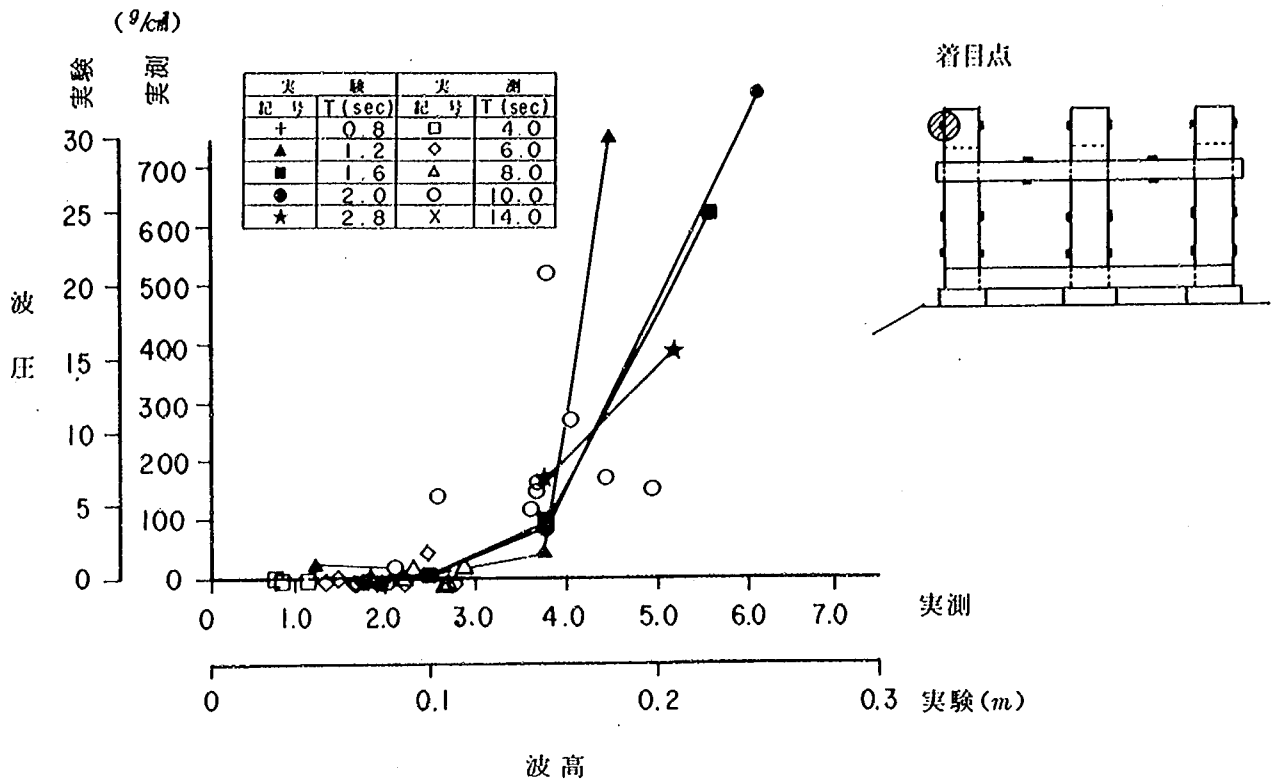
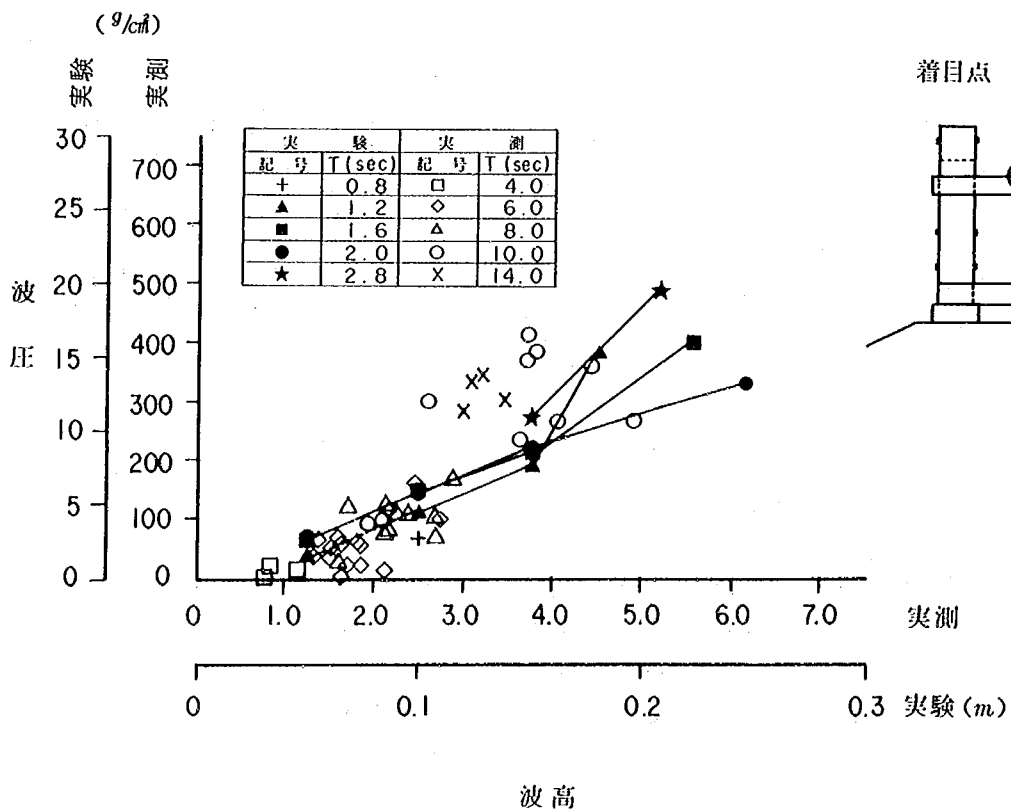
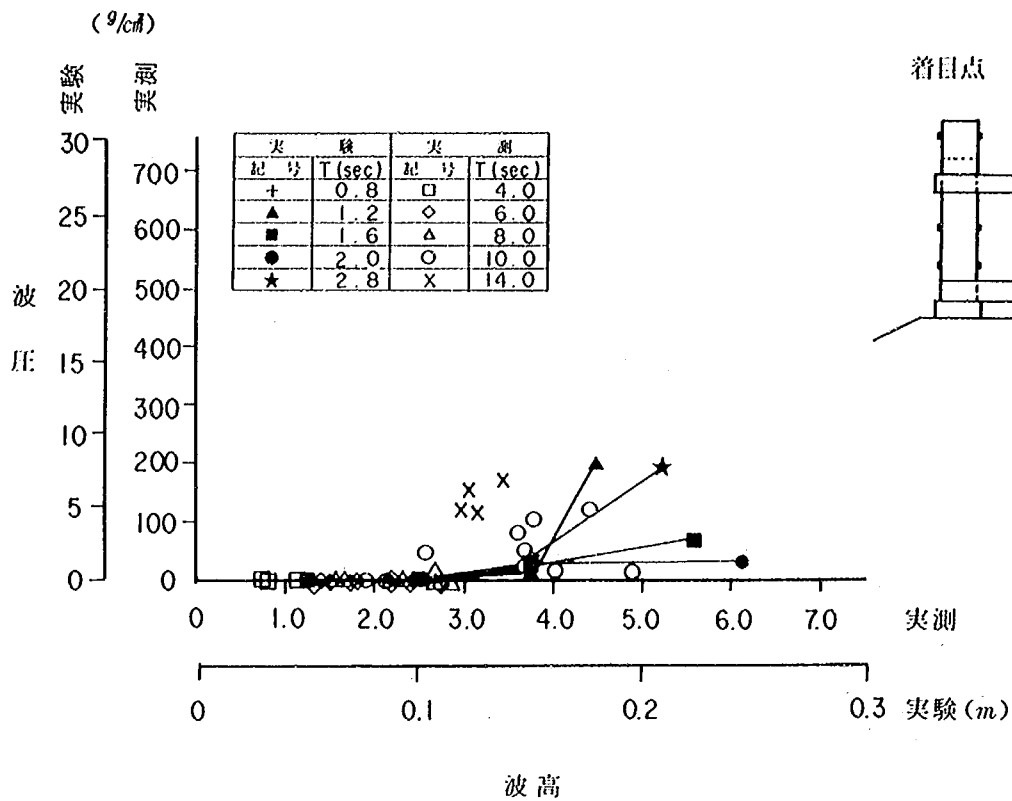


図-3.4.6 (1) 各測定点での波圧 (実測 P_{max})



図一 3.4.6 (2) 各測定点での波圧 (実測 P_{max})

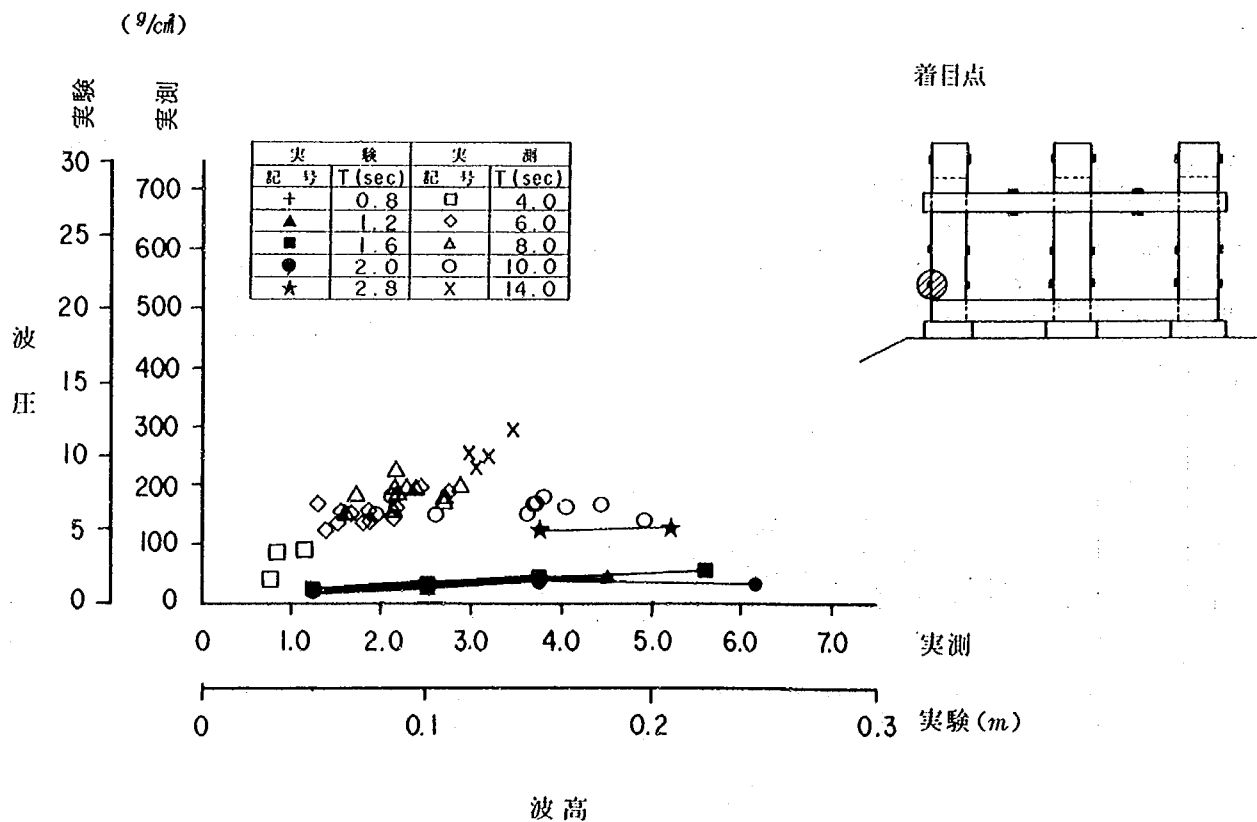
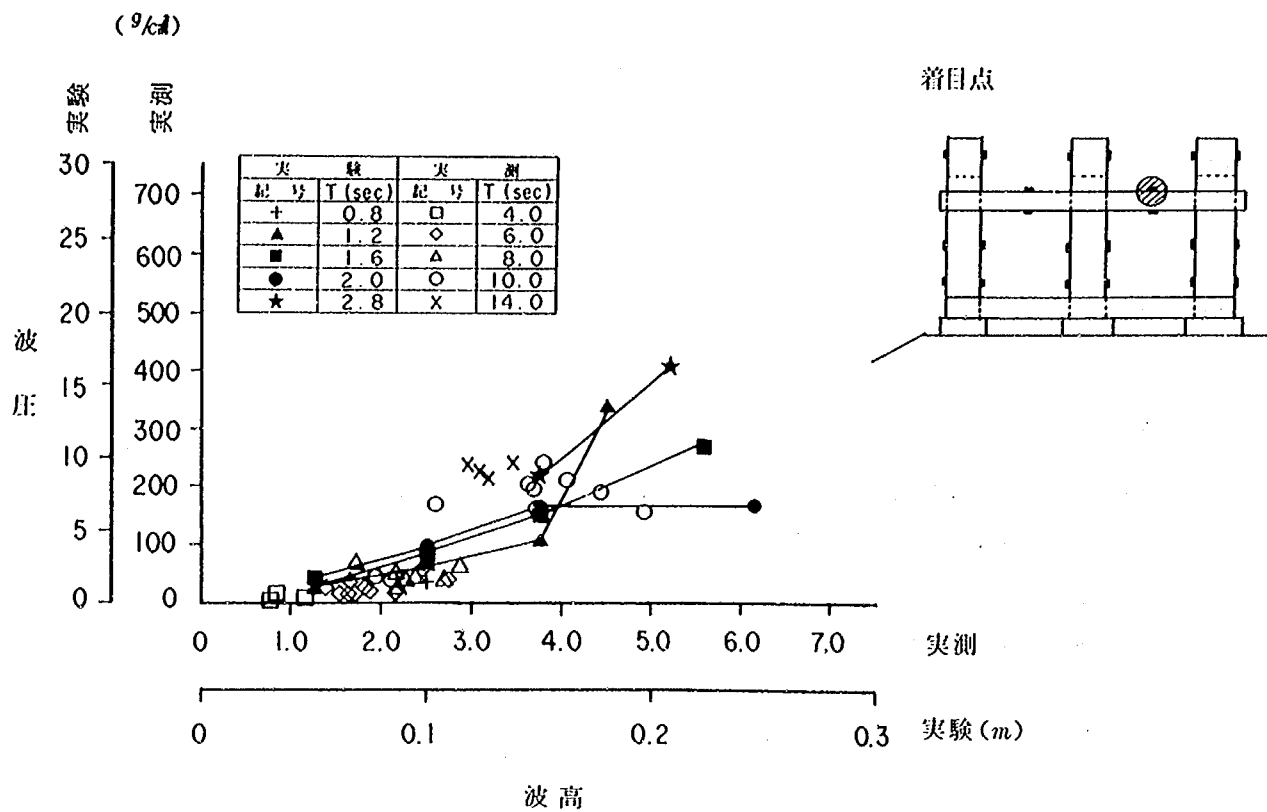


図-3.4.6 (3) 各測定点での波圧 (実測 P_{max})

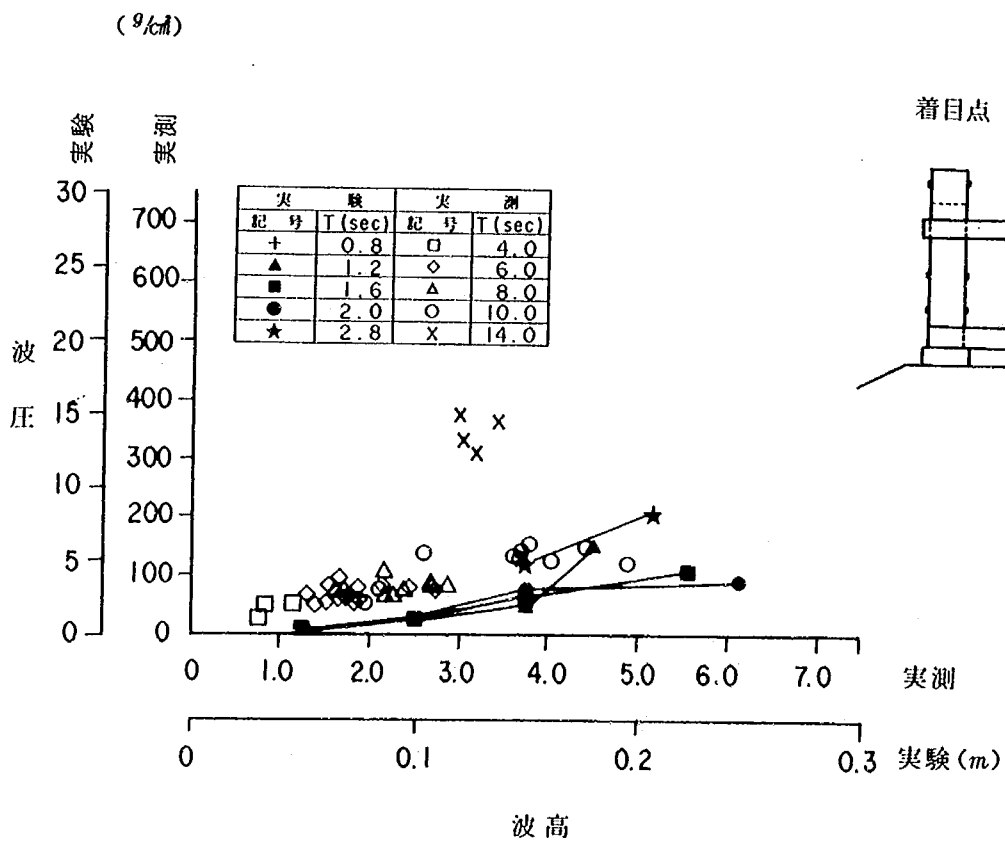
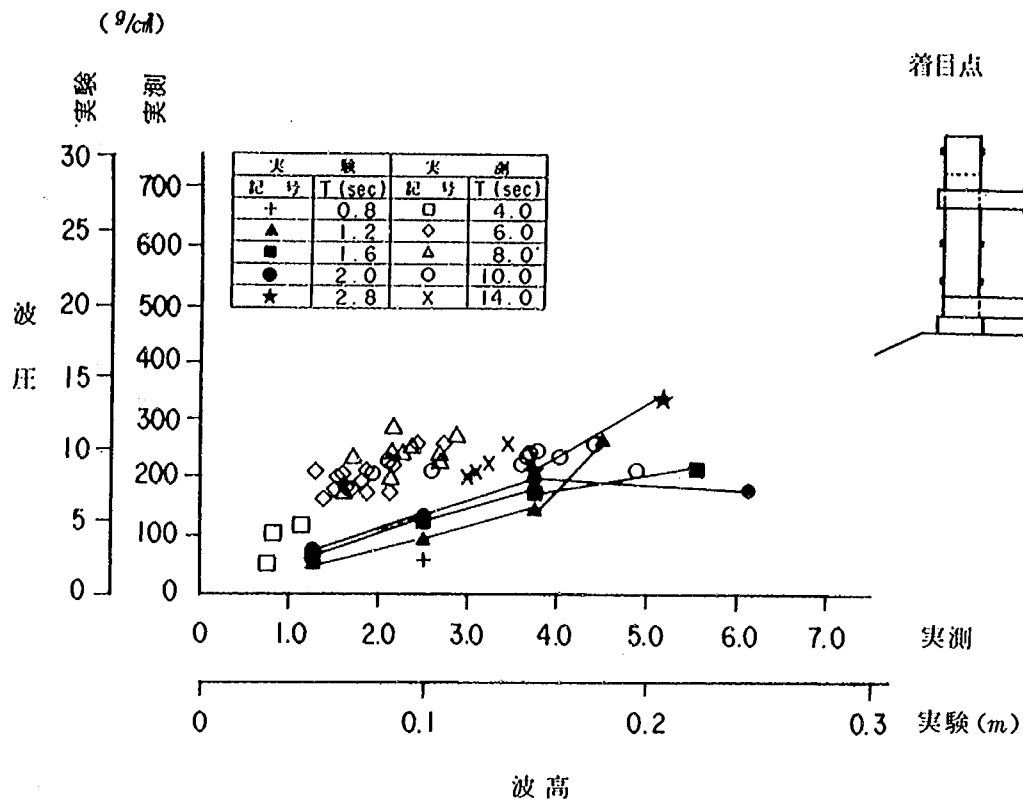


図-3.4.6 (4) 各測定点での波圧 (実測 P_{max})

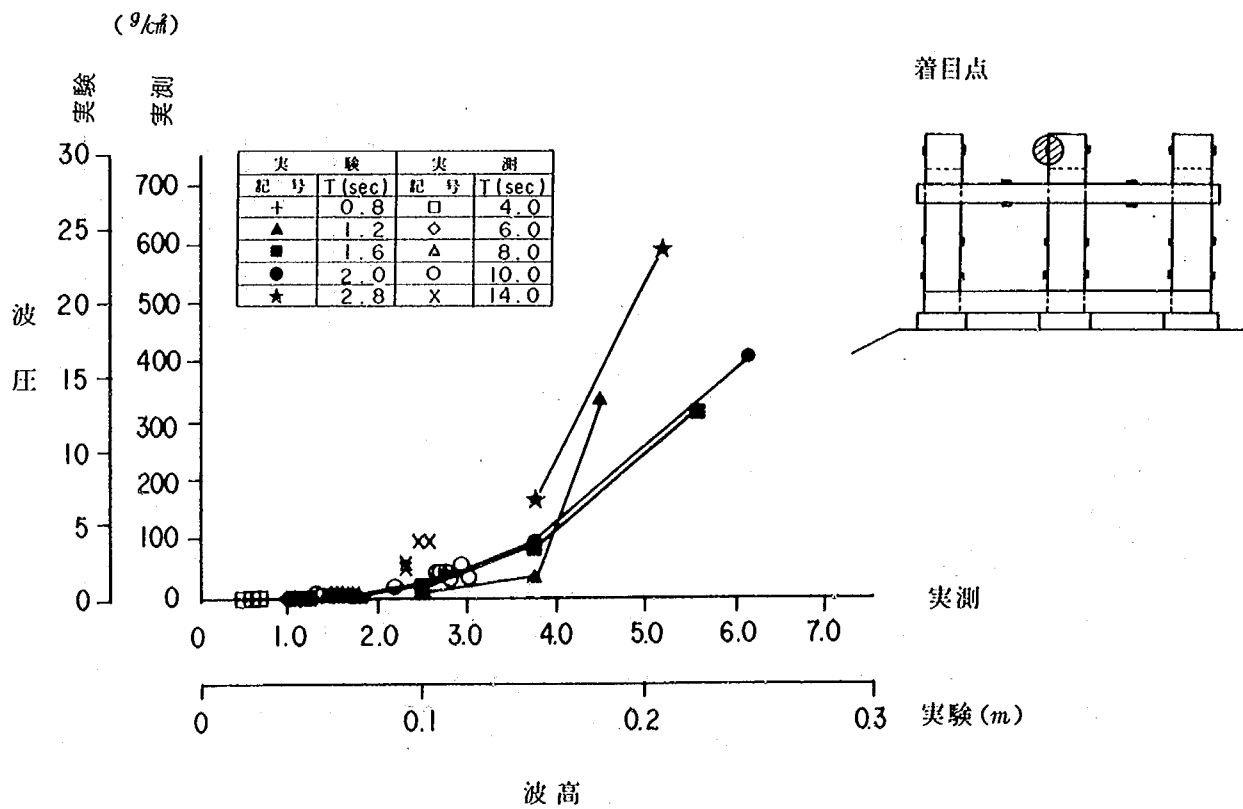
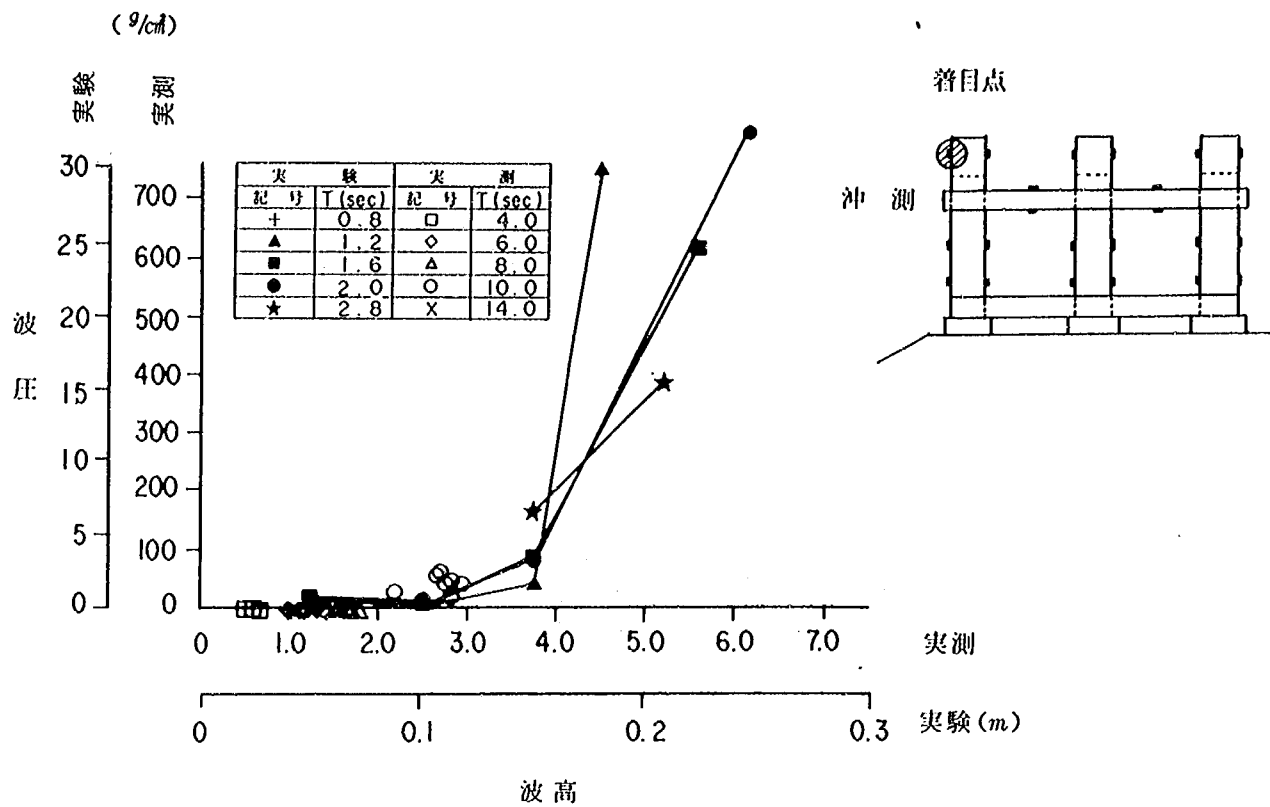


図-3.4.7 (1) 各測定点での波圧 (実測 $P_{1/3}$)

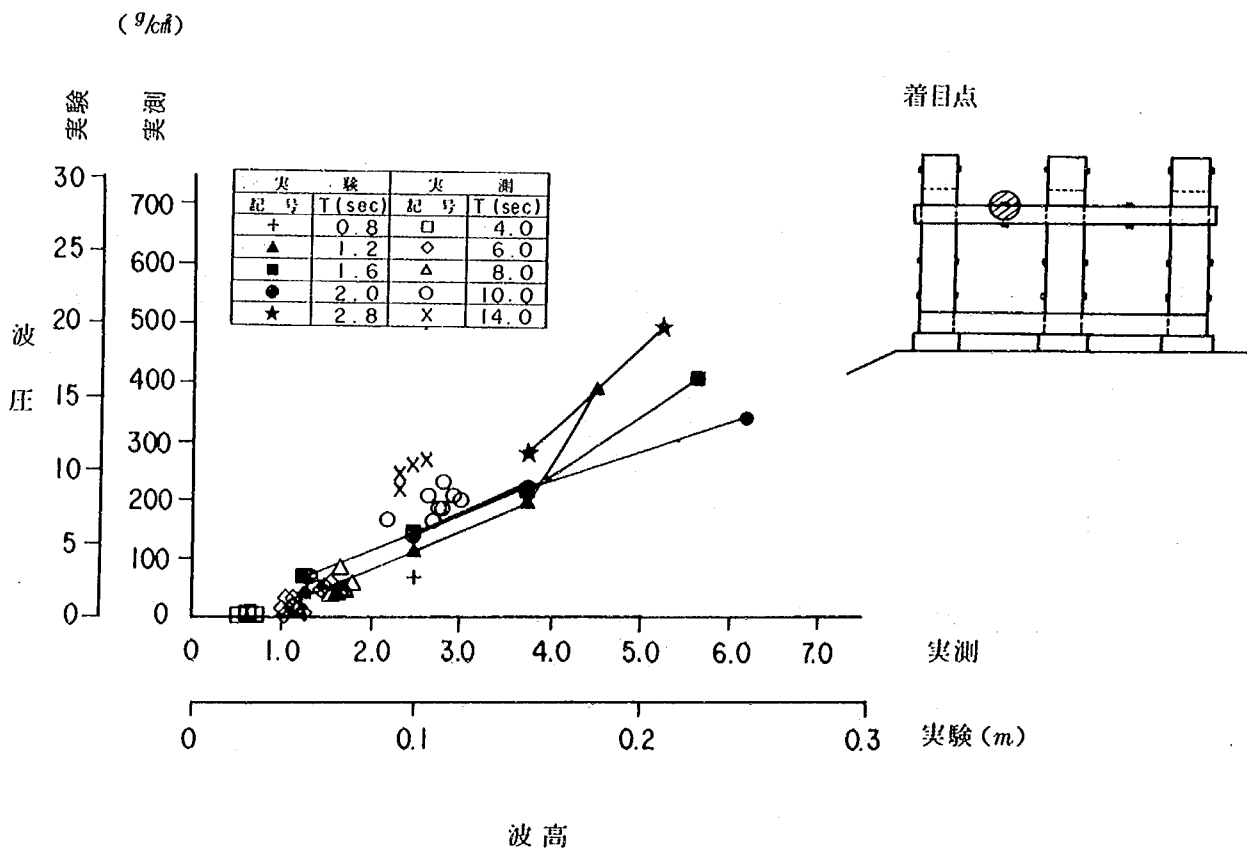
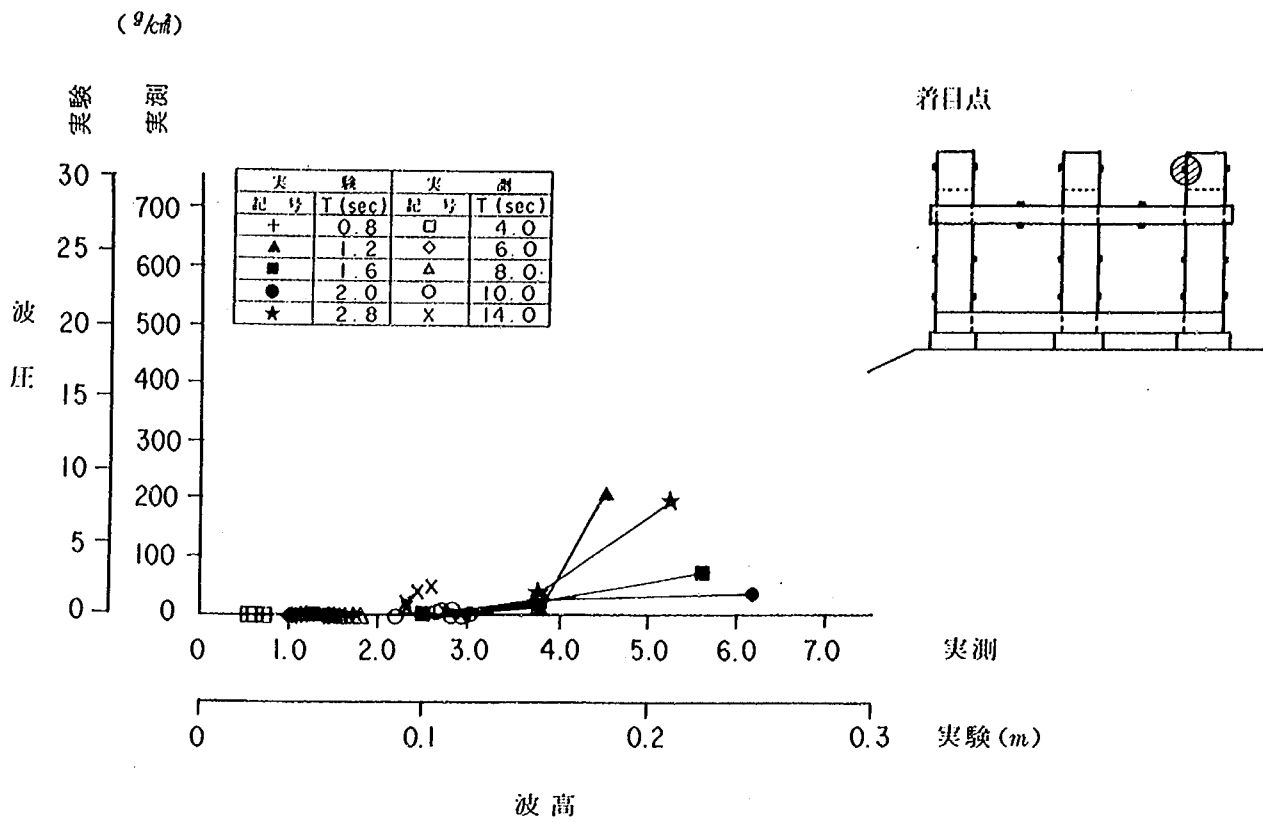


図-3.4.7 (2) 各測定点での波圧 (実測 $P_{1/3}$)

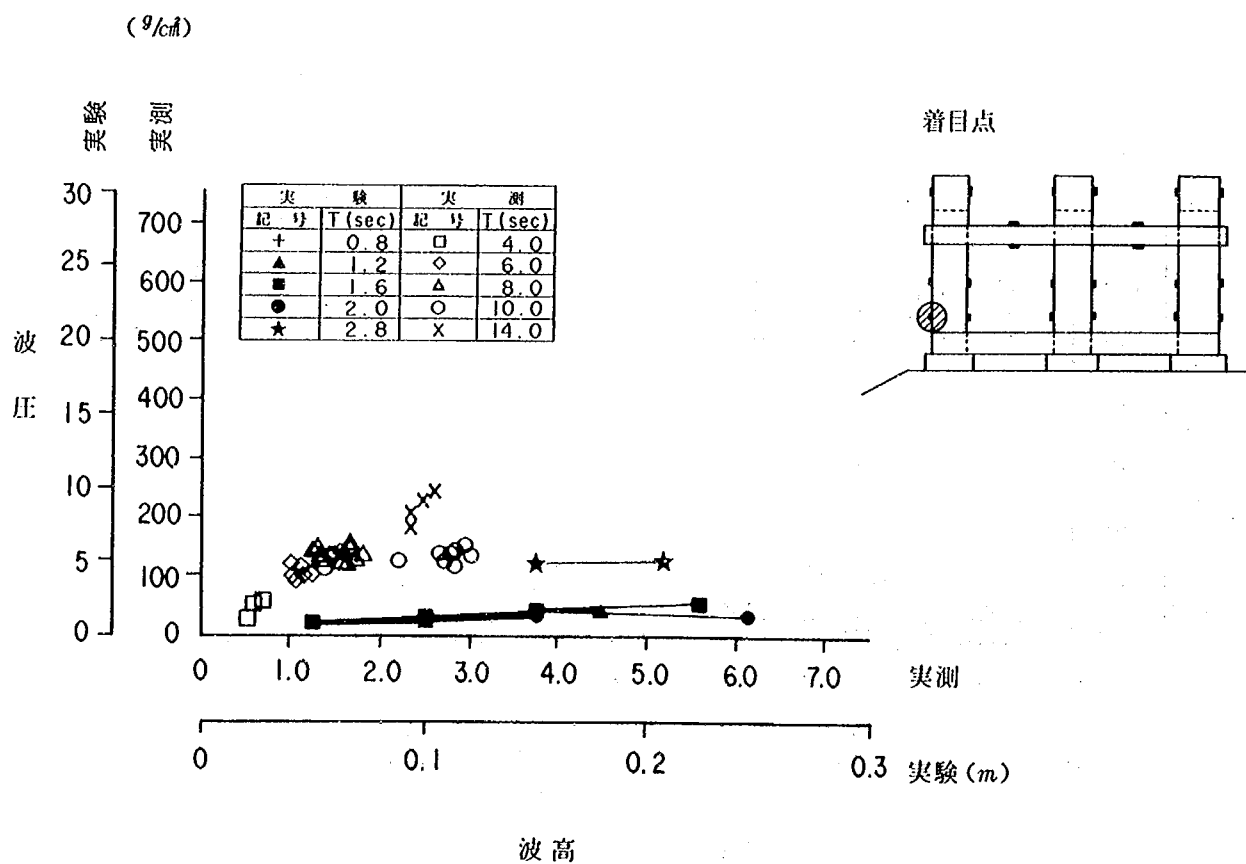
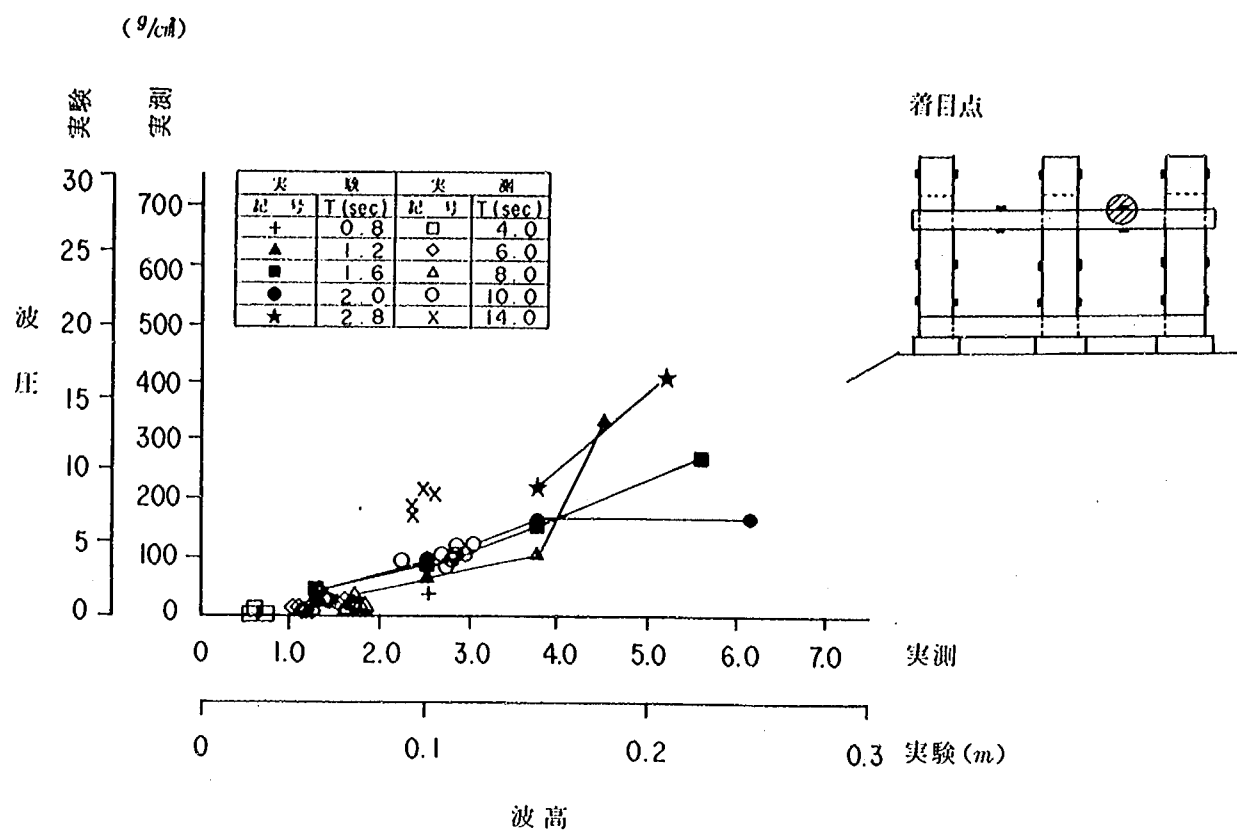


図-3.4.7 (3) 各測定点での波圧 (実測 $P_{1/3}$)

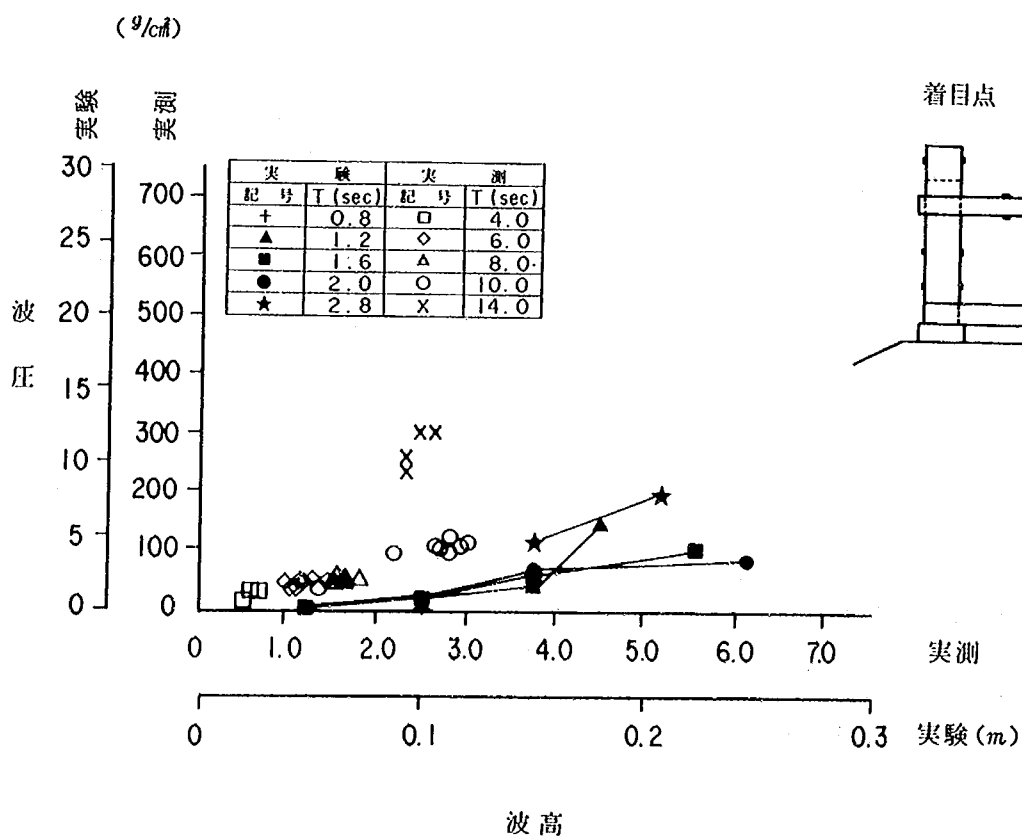
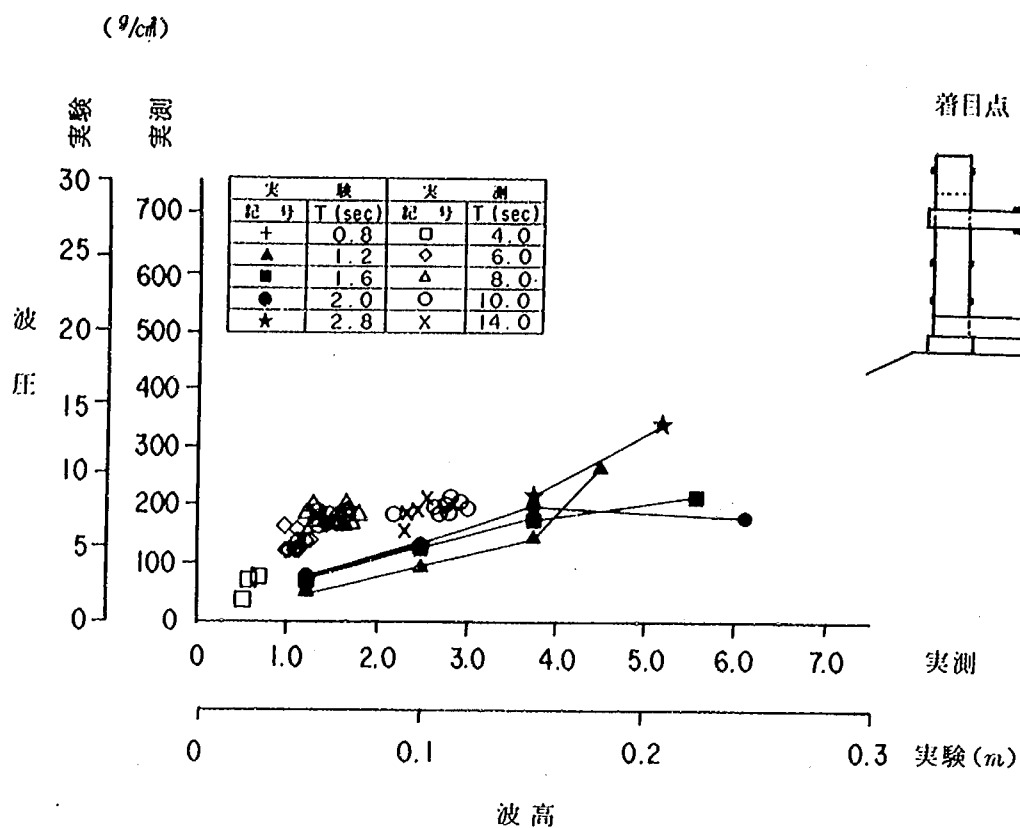


図-3.4.7 (4) 各測定点での波圧 (実測 $P_{1/3}$)

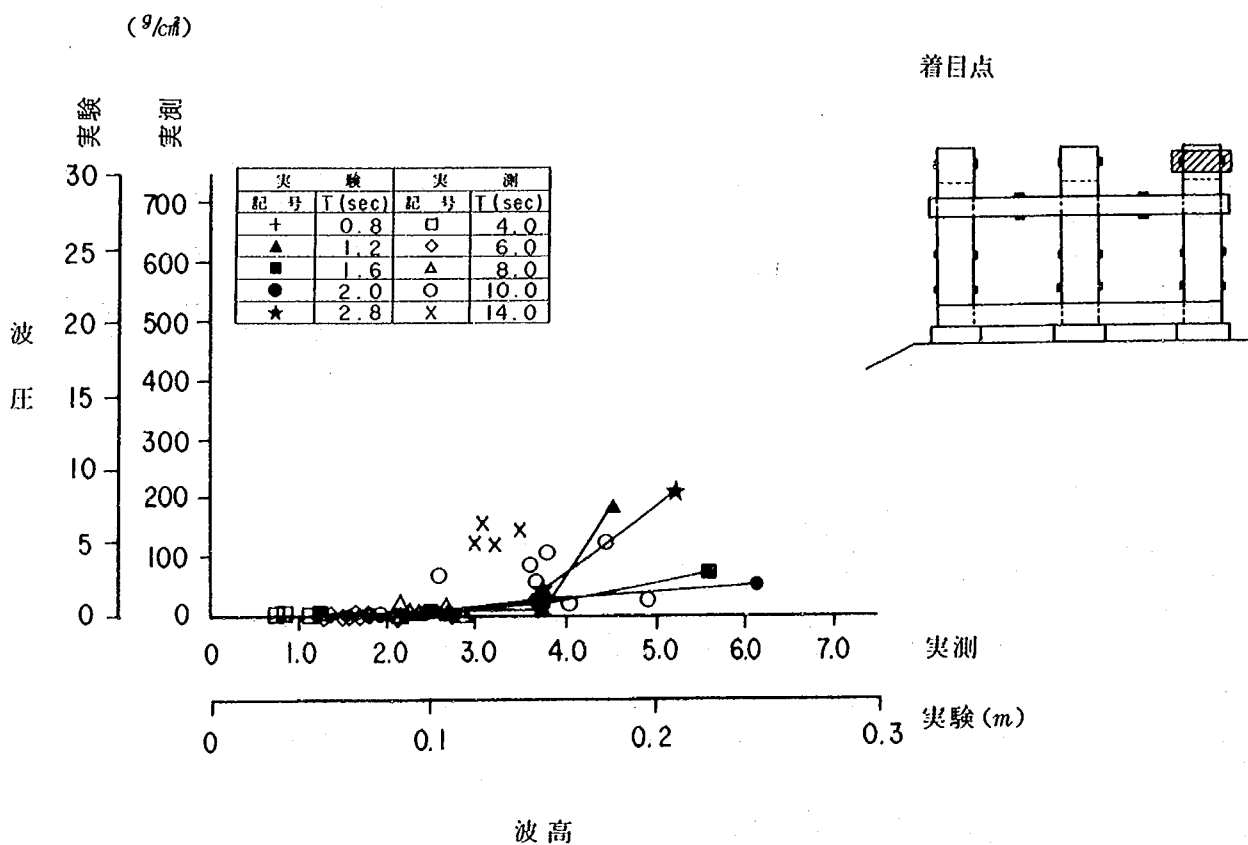
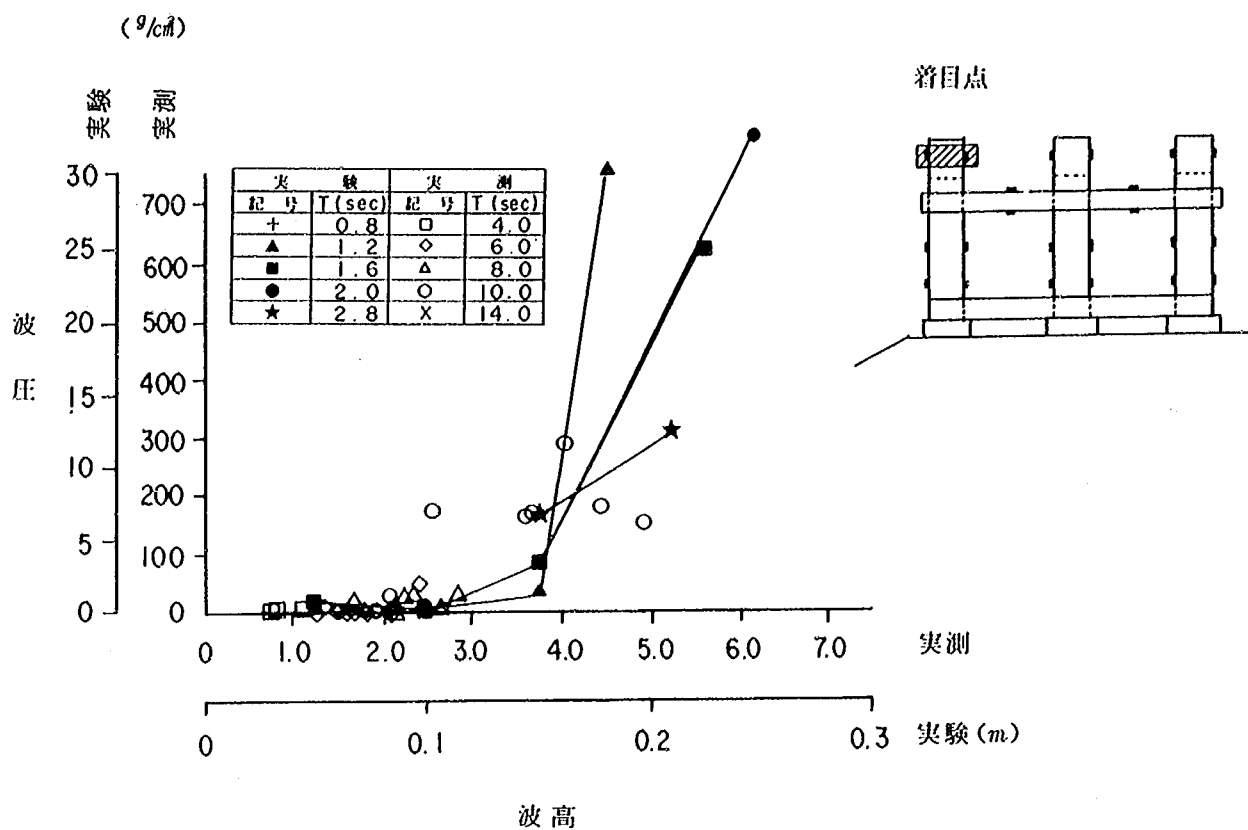


図-3.4.8 (1) 各測定点での差圧 (実測 P_{max})

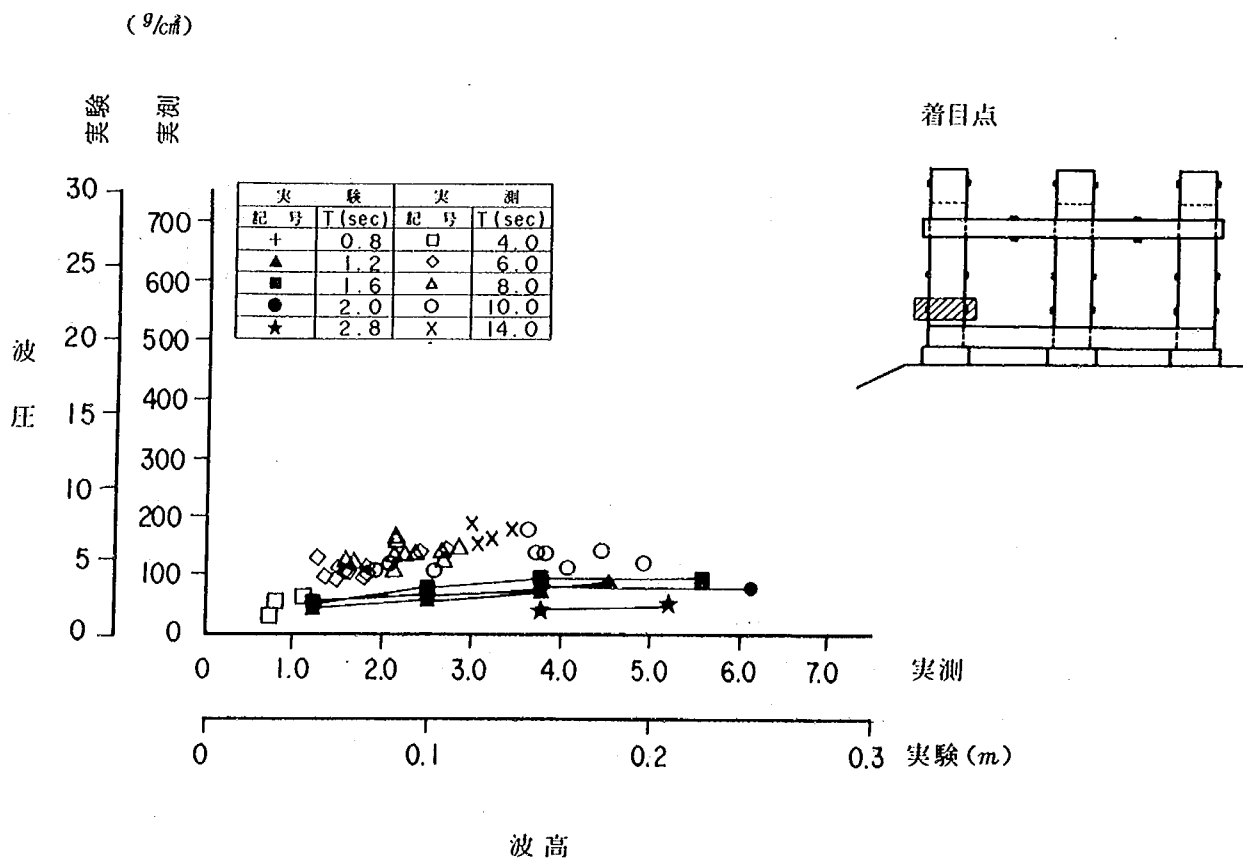
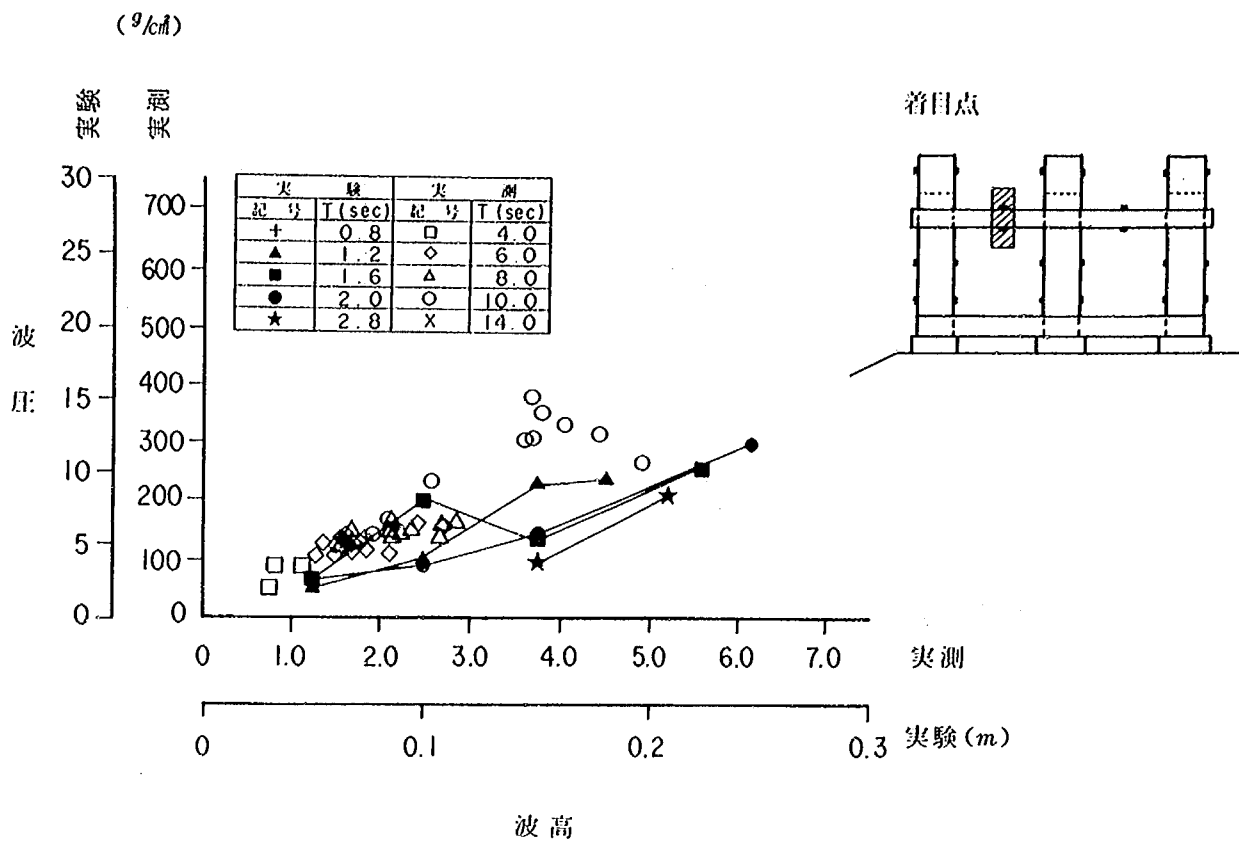


図-3.4.8 (2) 各測定点での差圧 (実測 P_{max})

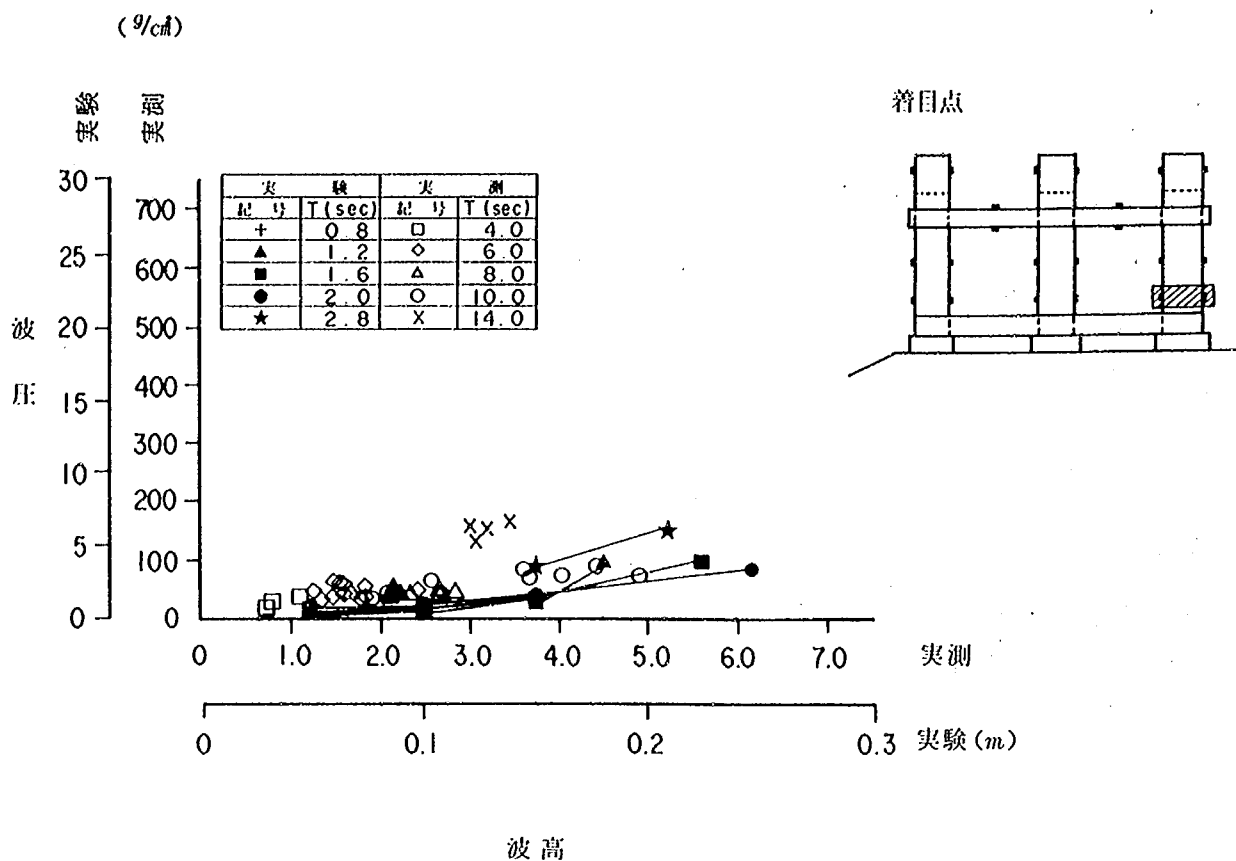


図-3.4.8 (3) 各測定点での差圧 (実測 P_{max})

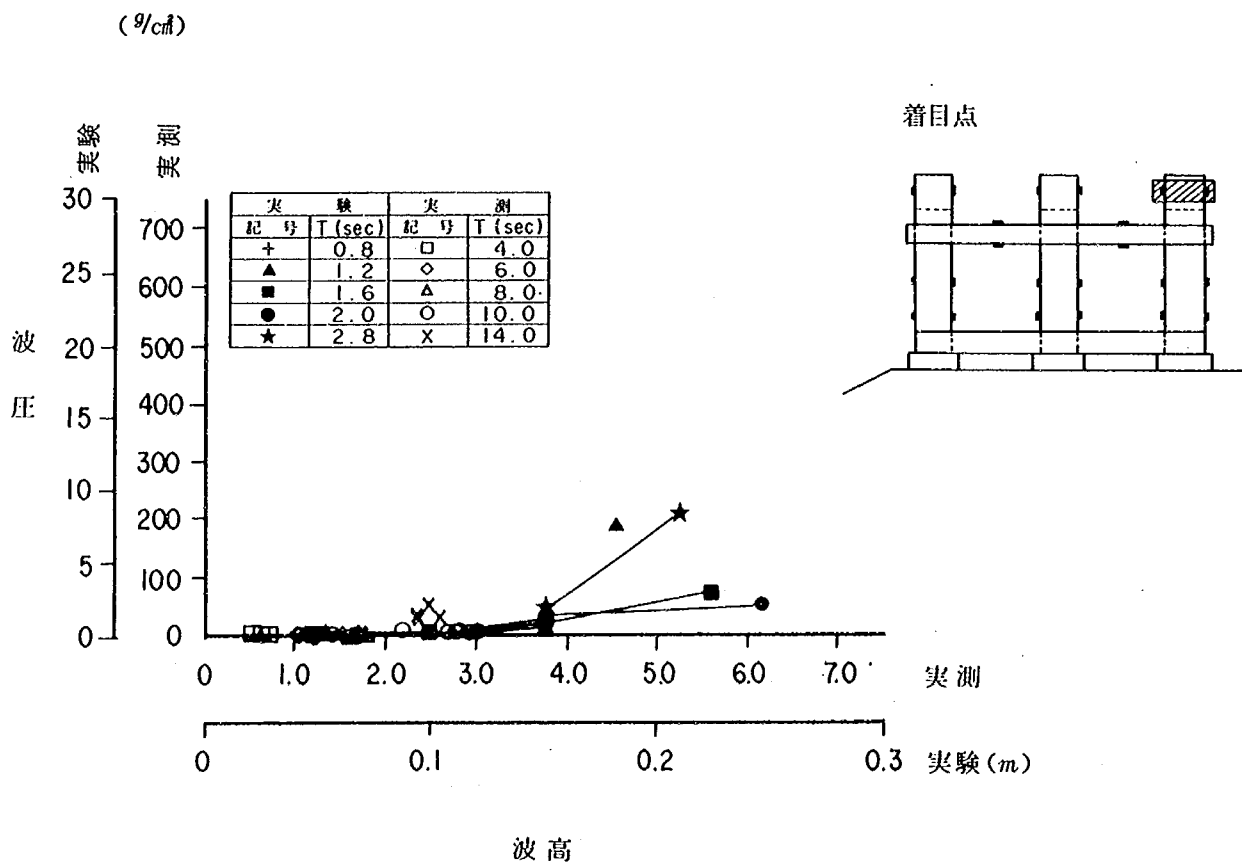
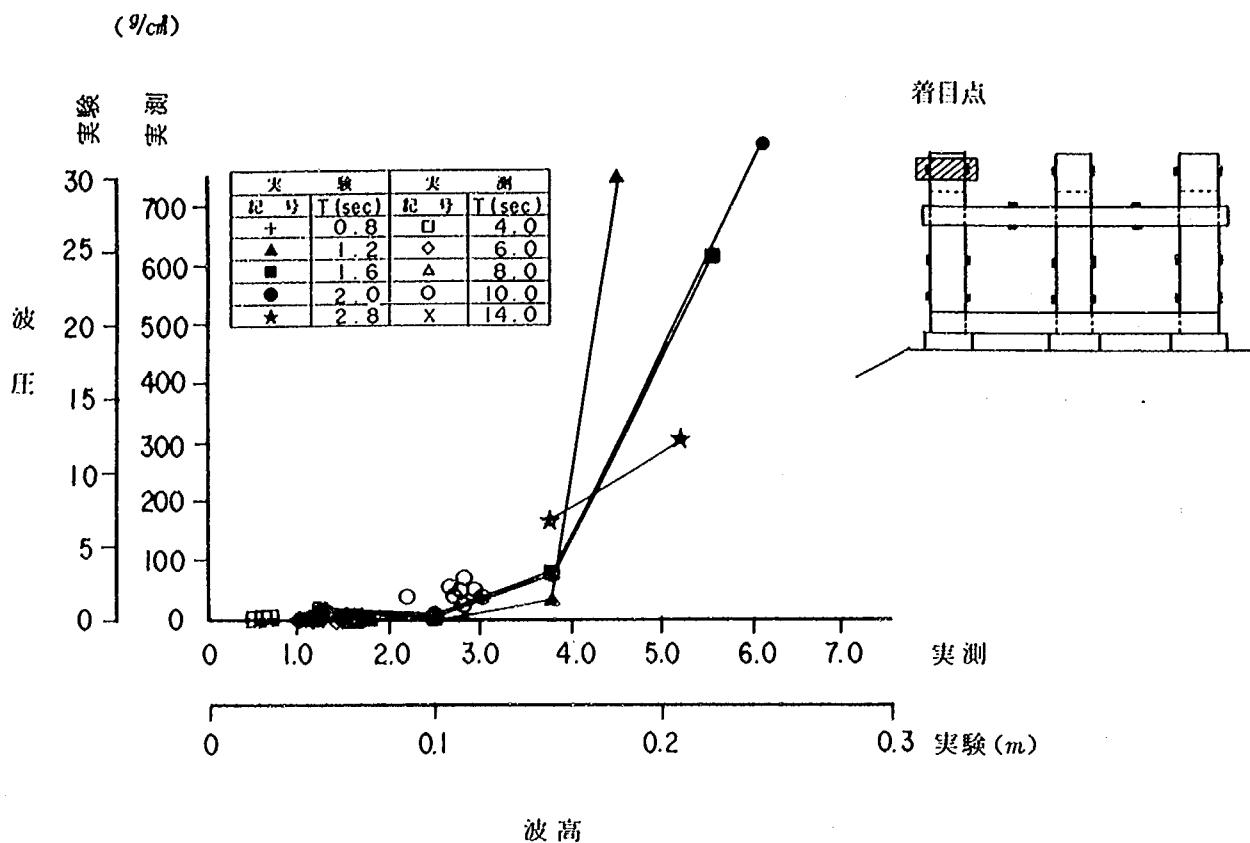


図-3.4.9 (1) 各測定点での差圧 (実測 $P_{1/3}$)

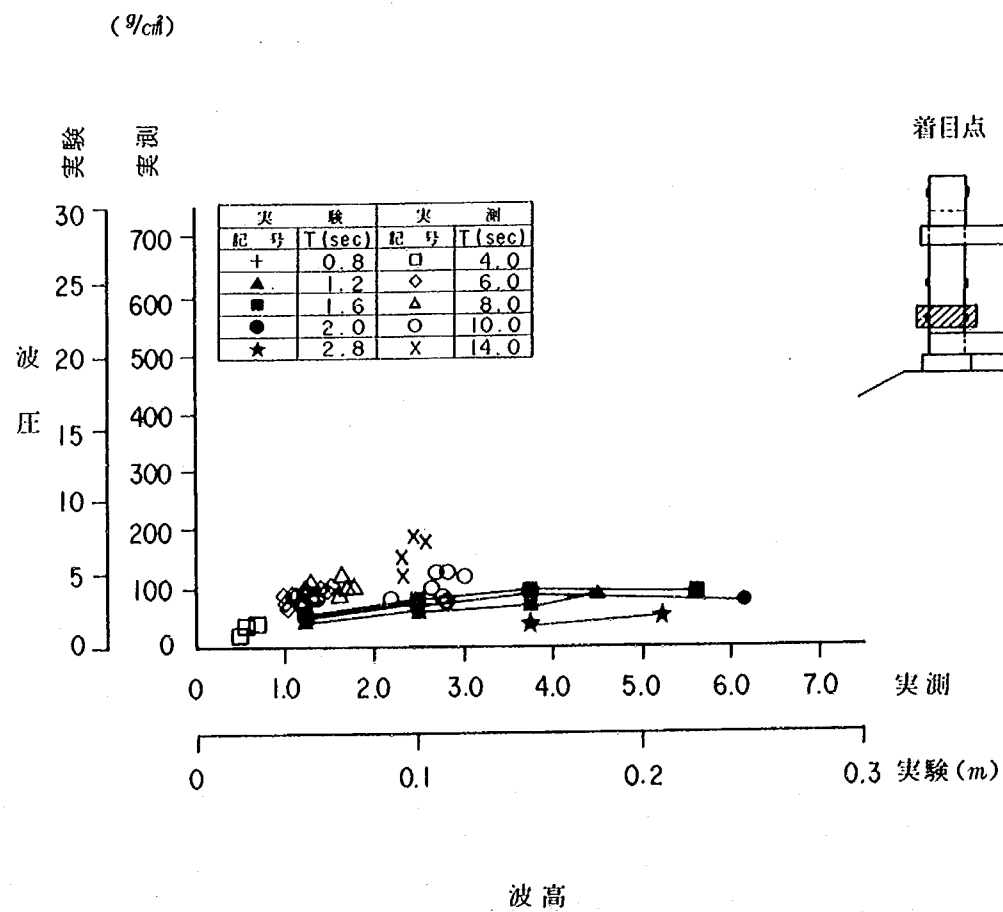
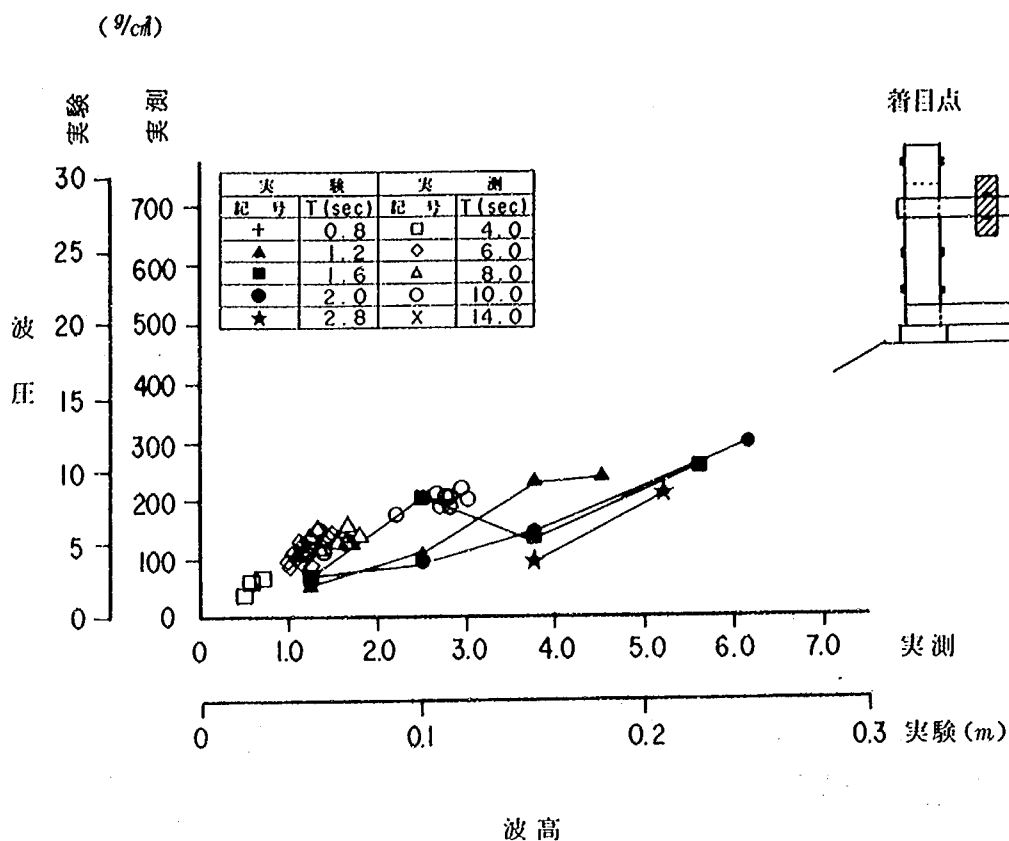


図-3.4.9 (2) 各測定点での差圧 (実測 $P_{1/3}$)

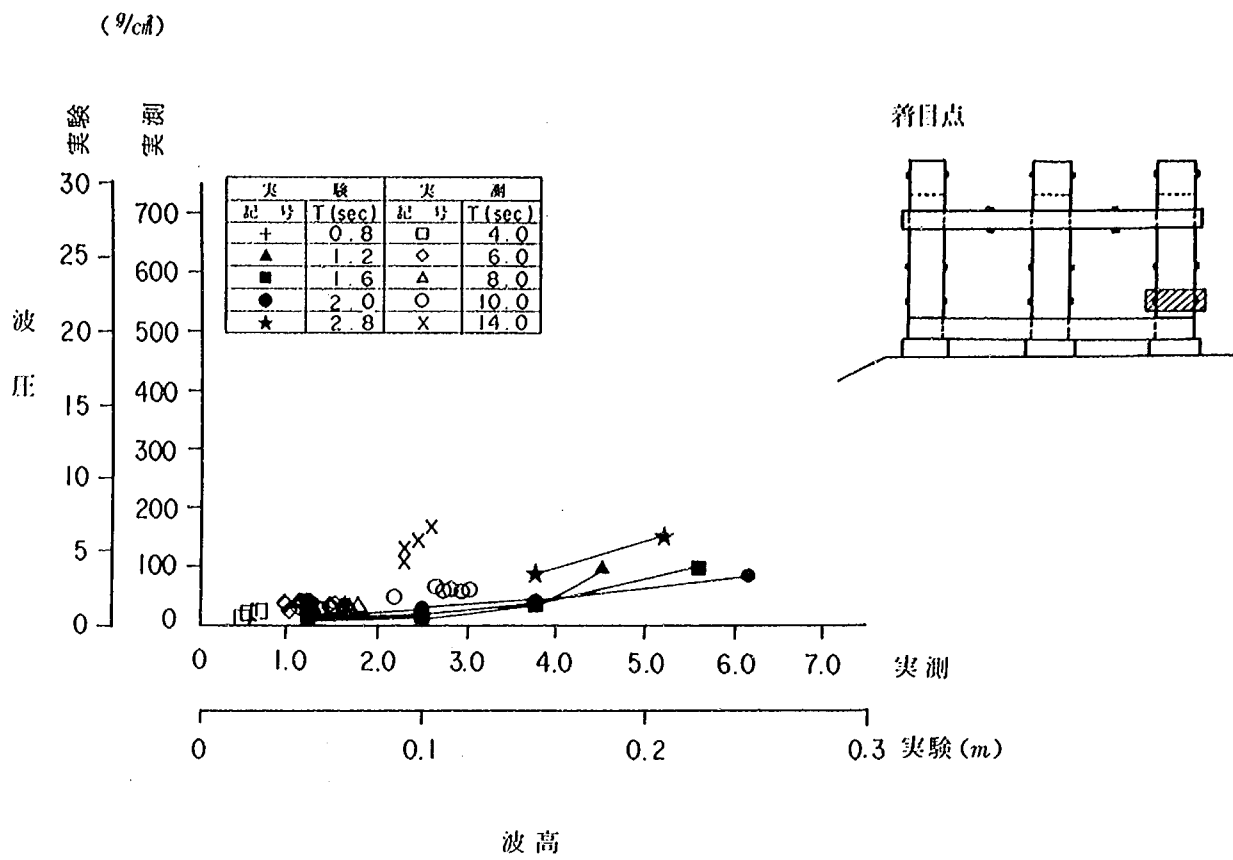
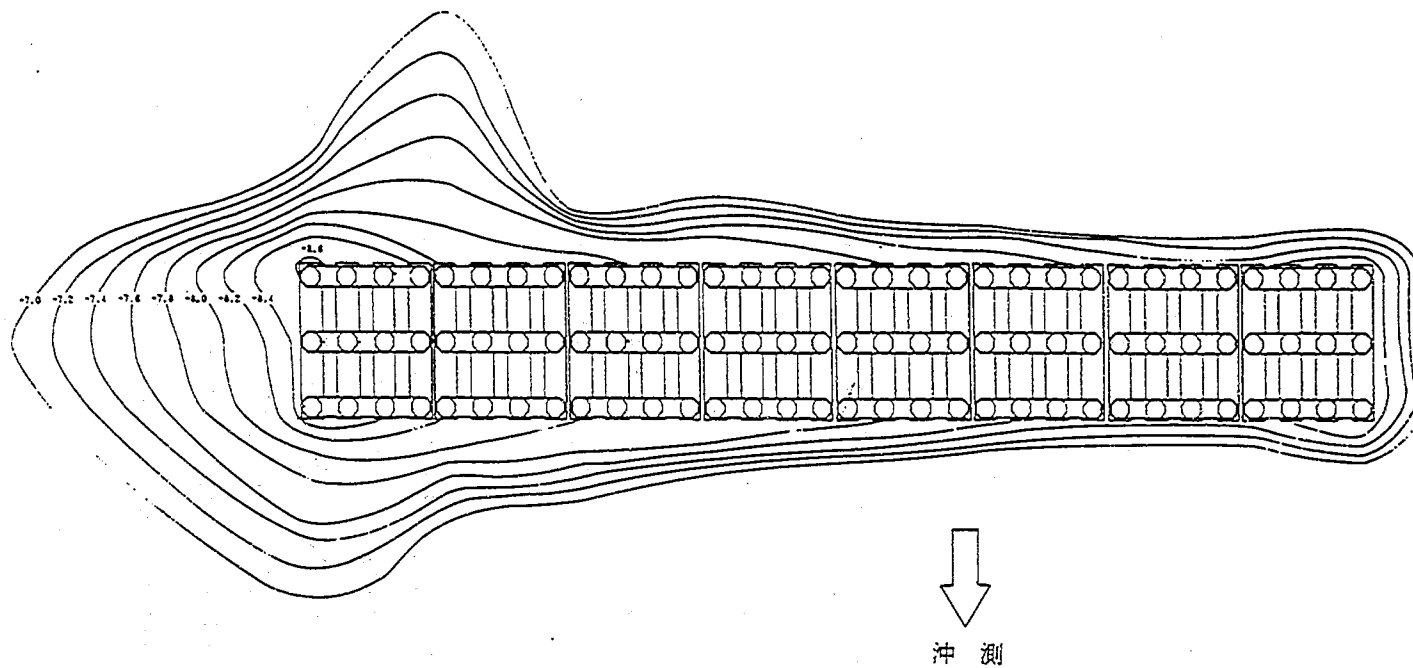
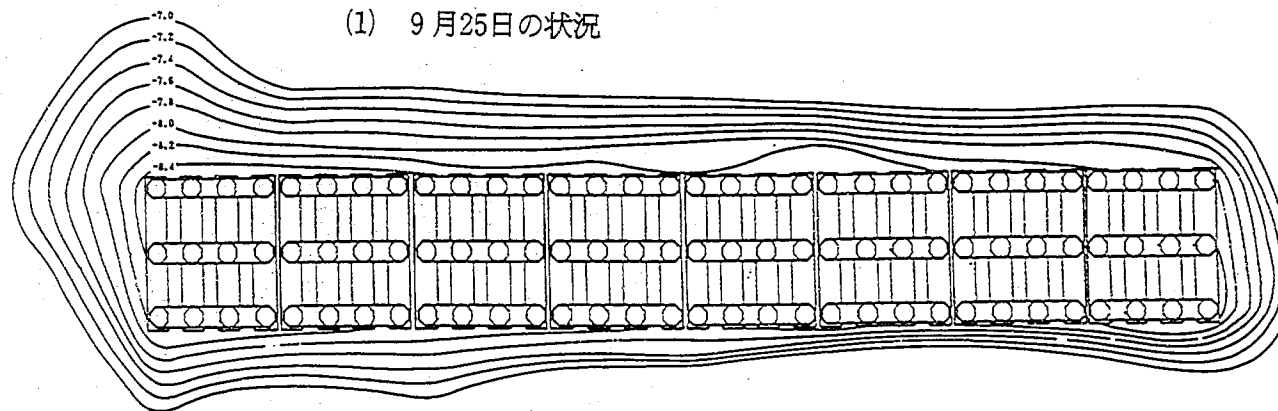


図-3.4.9 (3) 各測定点での差圧 (実測 $P_{1/3}$)



(1) 9月25日の状況



(2) 10月18日の状況

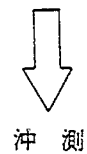


図-3.4.10 海底地形の調査結果 (単位: m)

4. まとめ

スリット型海域制御構造物の波力実験並びに波力実験データと現地測定データとの対比により得られた結果をまとめると以下のとおりである。

1) スリット型海域制御構造物に作用する波力特性

(1) 部材波力に関する特性

- ① 部材波力は波高をパラメータとしてとりまとめることができる。ただし、比例係数の値は重複波と碎波で異なったものとなる。
- ② 波圧計で測定された荷重とひずみゲージで測定された応答は重複波領域ではほぼ一致するが、水面上にある部材において碎波領域では応答は荷重と比較して小さくなり、特に、部材の剛性が小さい部材ほど、この傾向が強い。従って、部材に作用する波圧をもとに部材設計を行う場合は、安全側に評価することとなる。

(2) 全体波力に及ぼす海底勾配、天端高の影響

- ① 海底勾配 $1/10$ の場合は、同勾配が $1/50$ に比べて、巻き波碎波が発生し大きな衝撃的波力が作用する。
- ② 全体波力は、構造物の天端高が高くなるに従い増加する。特に、海底勾配が $1/10$ において天端高の比（（構造物高－水深）／水深）が 0.2 から 0.3 に変化すると、巻き波碎波の影響が大きくなり、構造物が受ける波圧は、著しく増加する。従って、実験に用いる模型の天端高には特に注意する必要がある。
- ③ 設計において、合田式による計算波力を低減して求める場合、低減係数は海底勾配が $1/10$ と比べて $1/50$ の方が小さくなる傾向がある。従って、急勾配のみの実験結果から低減係数を判断するのは危険である。

2) 波力実験と現地測定との対比

- ① 波高と波圧、差圧の関係及び波圧分布、差圧分布の形状は、現地実測と模型実験とではほぼ一致し、波力検討手法としての模型実験の妥当性が検証された。
- ② 現地測定の評価を行う場合、実測データとして P_{max} を使用した場合と $P_{1/3}$ を使用した場合とでは波高、波浪周期に対する波圧、差圧の關係に大きな違いは見られなかった。
- ③ 現地測定の場合、海底付近では実測値が模型実験の場合より大きくなったが、これは構造物周辺の洗掘によるものと考えられる。実際の構造物の設計には洗掘の影響を考慮する必要がある。

謝 辞

本検討を実施するにあたり、建設省中部地方建設局静岡河川工事事務所調査課の関係各位から現地観測データを提供していただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所海岸研究室、構造研究室：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(6)―波力実験報告書―土木研究所資料第2658号、pp. 89～106, 1988年 7 月
- 2) 合田良実：港湾構造物の耐波設計、鹿島出版会、pp. 273, 1975
- 3) 建設省土木研究所海岸研究室、構造研究室：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書(6)―波力実験報告書―土木研究所資料第2658号、pp. 75～80, 1988年 7 月

海域制御構造物の波力実験及び
実験と現地測定との対比に関する報告書

ISSN 0386-5878

土研資料 第2965号

平成3年3月(1991)

構造研究室 室長

横山功一

研究員

井上純三

澤田憲文

伊関英彦

金子 学

要 旨

スリット型の海域制御構造物について、部材波力に関する波力実験並びに全体波力が受ける海底勾配、天端高の影響を明らかにするための実験を行った。その結果、部材波力は波高をパラメータとしてとりまとめることができるが、比例係数の値は重複波と碎波で異なったものとなる。碎波領域で水面上にある部材の応答は荷重と比較して小さくなる。また、股趾において、合田式による計算波力を低減して求める場合、海底勾配が1/10では巻波碎波が発生し、波力も大きくなるため、急勾配のみの実験結果から低減係数を判断するのは危険であることが明らかとなった。

また、模型実験の妥当性を検討するため、現地測定データと模型実験データを対比した。その結果、両者は比較的良く一致し、模型実験の妥当性が検証された。

キーワード: 海域制御構造物、碎波、全体波力、部材波力、波力、実験値

郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十一円切
手をはって
下さい。

建設省土木研究所
構造研究室 行

茨城県つくば市旭一番地

No. 3

No. 3

配布先住所

配布先氏名

○

土木研究所資料 第 2 9 6 5 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印

○