

港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 350 June 1980

鹿島港北海浜直立消波護岸の波圧観測データ解析

谷 本 勝 利
高 橋 重 雄
鈴 村 諭 司

運輸省港湾技術研究所



目 次

	頁
要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 現地観測の概要	4
2.1 観測位置と護岸の構造	4
2.2 観測方法	5
2.3 観測の実施状況	6
3. 護岸に作用する波の特性	7
3.1 海岸における波の変形の推定	7
3.2 観測結果による波の特性	9
3.3 ケーソンに作用する波に対する実験的考察	10
4. 波圧記録の解析結果	11
4.1 波圧記録の解析法	11
4.2 波圧の波形と同時波圧分布	12
4.3 波圧ピーク値のひん度分布	18
4.4 波圧ピーク値と波高との関係	22
5. ま と め	28
6. あ と が き	29
参 考 文 献	29
主 要 記 号 表	30

Analysis of the Field Observed Data of Wave Pressures on a Perforated Caisson Sea Wall at Kashima Port

Katsutoshi TANIMOTO*
Shigeo TAKAHASHI**
Satoshi SUZUMURA**

Synopsis

At port Kashima, located 80 km east of Tokyo, the vertical wall caisson with a perforated wall was adapted as the sea wall of the reclaimed land in the North Coast District. This caisson has a thick front wall with holes and a wave chamber behind the wall. The Second District Port Construction Bureau, Ministry of Transport, conducted the field observation of the wave pressure acting on the caisson using 16 wave pressure gauges of strain type during two years (1977 ~ 1978). This note describes the results of the observed data analysis.

The following results are obtained;

- 1) Usually the wave force acts on the front side of the perforated wall, the back face and the bottom of the wave chamber, and the back face of the perforated wall in this order.
- 2) The possibility of any phase difference between the front face of perforated wall and the wave chamber, however, cannot be denied. For example, if two waves act at very short interval, when the water level in the wave chamber is raising, the water level in front of the wall may be raising also. Nevertheless, the phase difference within the wave chamber is small.
- 3) The number of the wave pressures within a certain time duration at the front face of the perforated wall near the still water level using the zero-up cross method is nearly the same as the number of waves. In the wave chamber and the bottom of the caisson, however, the number is small compared with that number since the wave pressure profile becomes smoother there.
- 4) The frequency distribution of the peak values of wave pressure on the front face of the perforated wall and the bottom of the caisson is close to the Rayleigh distribution. In the wave chamber, however, the distribution is high near the mean value and the range of the distribution is narrow compared with the Rayleigh distribution.
- 5) Sometimes the shock breaking wave which may cause the high pressure over $2 w_0 H$ acts on the front face of the perforated wall. Even in this case, the wave pressure in the wave chamber does not become large. If the wave acts like a standing wave, the value of the wave pressure on the front face of the perforated wall is $0.7 w_0 H$, and similar wave pressure acts in the wave chamber.
- 6) The values of $p_{\max}/w_0 H_{\max}$ scatter widely. Here p_{\max} is maximum wave pressure, w_0 is unit weight of water and H_{\max} is highest wave height. For example, the values of the ratio near still water level at the front face of the perforated wall exist between 0.3 to 1.4. The range of the value is wide near the still water level at the front face of the perforated wall and is narrow in the wave chamber. The value becomes small according to the shorter wave period.

* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Member of the Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

鹿島港北海浜直立消波護岸の波圧観測データ解析

谷 本 勝 利 *
高 橋 重 雄 **
鈴 村 諭 **

要 旨

本資料は運輸省第二港湾建設局が昭和52～53年度に実施した鹿島港北海浜埋立地直立消波護岸の現地波圧観測データを解析したものである。

北海浜埋立地は鹿島港北防波堤に隣接して外側に施工されたものであり、前面護岸延長4,100 mのうち、北側2,034 mが多孔壁構造である。この多孔壁ケーソンの著しい特徴は多孔壁の壁厚が5 mと厚いこと、側壁がなく幅6 mの遊水室が法線方向に連続していることである。護岸のり尻水深は-7.5 m、ケーソンの基面水深は-4.5 mと比較的浅く、遊水室上床版下面が+5.5 mと高い。

現地観測の内容は波高と波圧の同時観測である。波圧観測は北端から41箇目(1箇の長さ10 m)のケーソンの各部に16個の波圧計を埋め込み、その出力を電磁オンログラフに記録する方法(常置観測)によっている。ただし、これとは別に二・三の事例についてはデータ・レコーダで記録をとった。波高観測は超音波式波高計によっており、設置位置は波圧観測対象ケーソンの前方350 m、水深-9 m地点である。波圧データ解析対象時の最大有義波高は3.9 mが得られている。

本資料で検討した内容は以下のとおりである。

- (1) 波高観測地点と護岸位置における波高の変化。これについては特にマウンドによる波の変形について若干の実験を行った。
- (2) 波圧波形の特徴と各部に働く波圧の位相。
- (3) 同時波圧分布と合波力についての事例解析。
- (4) 波圧の波数とピーク値のひん度分布における特性。
- (5) 各測点における波圧と波高の関係。

これにより、多孔壁ケーソンに働く現地不規則波圧の実態がある程度明らかとなった。今回の観測結果に関する限り、著しく巨大な波力は作用しないといえるが、特定の護岸構造についての特定の波浪条件のもとでの結果であることに注意を要する。

1. まえがき

1961年、Jarlan¹⁾が孔あきケーソンを提案したのを契機に、わが国においても各種の直立消波ケーソンが研究開発され、護岸や内湾等における防波堤構造として採用されるようになってきた。

一般に直立消波ケーソンは前面に透過壁、その背後に遊水室を有するところに構造的特徴がある。これによって反射波や越波を軽減するなどの消波機能を具備しており、外海における本格的防波堤としても発展が期待される構造といえる²⁾。そのため、各種構造について種々の調査研究が進められているが、外海における本格的防波堤

構造として採用していくためには、その消波機能ばかりでなく、耐波安定性について十分な検討が必要である。特に、この種の構造は複雑であり、波力の発現機構など未解明な点も多く、水理模型実験による検討とともに現地施工例における調査がのぞまれるところである。

こうした状況にあって、運輸省第二港湾建設局では鹿島港北海浜埋立地の護岸の一部に多孔壁式ケーソンが採用されたのを機会に、直立消波ケーソンの一構造としてこれを取りあげ、現地波圧の観測を昭和52年度、53年度の2か年にわたり実施した。本資料は第二港湾建設局の要請に基づき、その観測データを解析した結果をとりまとめたものである。

* 水工部 防波堤研究室長

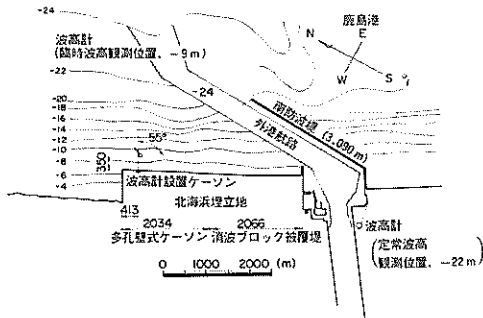
** 水工部 防波堤研究室

2. 現地観測の概要

2.1 観測位置と護岸の構造

(1) 位置

本現地観測はまえがきでも述べたように運輸省第二港湾建設局が実施したものである。まずその概要を述べておくことにする。



図一 波圧計設置位置

図一は鹿島港北海浜埋立地付近の平面図を示したものである。本埋立地の前面護岸の延長は4,100mで、法線は北から西25°の方向である。護岸の構造は両側2,066mが消波ブロック被覆構造、残りの北側2,034mが多孔壁式ケーソン構造である。多孔壁式ケーソンの1函あたりの法線方向の長さは10mであり、観測に供したケーソンは北側から42函目である。その中心は護岸北端から430mの距離にある。この位置は護岸法線に垂直方向を基準として南側に55°以上は南防波堤の幾何学的しゃへい領域となるが、それ以外は直接外海に面した位置にあたる。

護岸前面海域の水深は、-2.4mの外港航路が両側から斜めに伸びているが、これを除いて等深線は護岸法線にはほぼ平行であり、護岸の設置水深は-7m前後である。また-2.0m以浅の海底こう配は約1/100である。なお、鹿島港における潮位はL.W.L.が±0.0m、H.W.L.が+1.4mである。

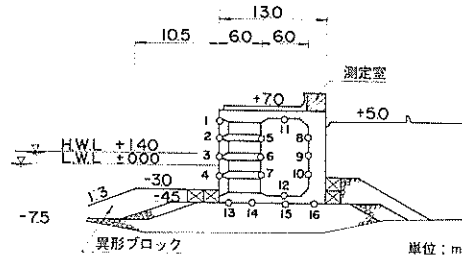
(2) 直立消波護岸の構造

図二は直立消波護岸の標準断面図、図三はそのケーソンの正面図と断面図を示したものである。本護岸における直立消波護岸はこれらの図からわかるように多孔壁型の構造であり、本資料においてはこれを多孔壁式ケーソンと呼んでいる。まず、このケーソンの諸元を述べておく。

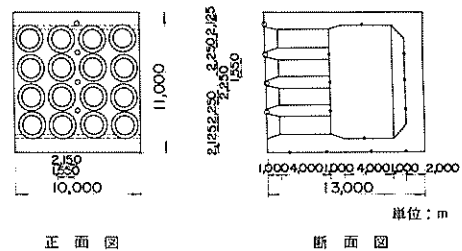
多孔壁の壁厚は5m、遊水室の幅は6mであり、ケー

ソンの全幅は背後の不透過壁の壁厚2mを加えて13mである。円形の孔の直径は1.55mであるが、海側1mの部分は漸次拡大しており、壁面における直径は2.15mとなる。ケーソンの高さは11m、法線方向の1函の長さは10mである。これに高さおよび長さ方向に4個ずつ、総計16個の孔が設けてある。開口率をケーソン前壁の全面積に対する直径1.55mの孔の総面積の比で定義すると0.274となる。このケーソンの著しい特徴は多孔壁の壁厚が大であることのほか、側壁および隔壁がなく、遊水室が法線方向に連続している点である。

さて、護岸の標準断面に戻るが、本護岸の構造は捨石マウンドの上に上述の多孔壁式ケーソンを据付け、さらに厚さ0.5mの上部コンクリートを打設して、後端にパラペットを設けた構造である。マウンドの被覆材として異型コンクリートブロックを用いているが、のり先水深は-7.5m、被覆工天端の水深は-3.0m、ケーソン据付水深は-4.5m、マウンド前肩幅は1.05mである。したがって、 d/h （全水深に対するマウンド被覆工上の水深の比）は潮位によって0.40~0.72であり、かつマウンド前肩幅が適当に広いため、通常のケーソン構造の場合、衝撃碎波力が発生しやすい断面であるといえる³⁾



図二 護岸断面図（波圧計取付位置）



図三 ケーソン正面および断面図

上部コンクリートの天端は+7.0 m, パラペットの天端は+8.5 mであり, ケーソン遊水室の上床版下面の高さは+5.5 mである。したがって, H.W.L.であっても上床版下面は静水面上4.1 mにあり, 相当高くなっている。

ケーソンの諸元等は若干異なるが, 本護岸構造を想定して実施された水理模型実験の報告⁴⁾によると, 波の反射率は周期 $T = 7 \sim 14$ sに対して0.3以下であり, 低反射構造であることが明らかである。ただし, 規則波による実験結果であること, また, 同条件で実施された通常のケーソン構造における実験でも, マウンドによる波のエネルギーの消失と透過があるため0.4~0.7とかなり低い反射率が得られている点に留意すべきである。

なお, 図-2, 3中に波圧計の番号と位置を示したが, これについては後述する。

(3) 海象

鹿島港においては今回の観測とは別に定常波観測が行われている。観測位置は南防波堤の基部から南1 km, 沖へ2.3 kmの水深22 mの位置であり(前掲図-1参照), ここに超音波式波高計とひずみゲージ式の波向計が設置されており, 2時間毎に20分間の測定が実施されている。

表-1はこの観測結果から求めた昭和49年から53年における異常波浪の記録^{5)~9)}である。夏期の台風や低気圧および, 冬期の低気圧によって波高が3 m以上, 周期が9 sから13 sの波浪が毎年來襲することがわかる。なお, 鹿島港南防波堤の設計波は $H_0 = 7.4$ m, $T = 14$ s, 波向ENEである。また, 多孔壁式ケーソン護岸の設計波は $H_{1/3} = 6$ m, $T = 9 \sim 12$ s, 波向NEである。

2.2 観測方法

(1) 波高観測

本観測においては, 波圧計を設置したケーソンの前面350 m, 水深9 mの位置に超音波式高計を設置し, 波圧と同時に波高を測定している。この記録は定常波高観測のシステムと同じで無線により鹿島港内の現地観測所に送られ, 小型計算機により有義波高, 有義波周期等が計算される。

なお, ここで観測された記録には護岸からの反射波も含まれている。しかしながら, 消波護岸からの反射率は低く, 有義波高などに対する影響は小さいと考えられる。

(2) 波圧観測

観測に用いられた波圧計は図-4に示しているように受圧面の直径が12.8 cmのひずみゲージ式波圧計である。この固有振動数は460 Hz, 減衰定数は1.7%であり, 応答性は高いと考えてよい。また, 許容負荷は2 kg f/

cm²であり, 波高4 mで5 w_0H の波圧まで測定可能である。

表-1 鹿島港における異常波浪

年月日	原因	ピーク時		
		日時	$H_{1/3}$	$T_{1/2}$
昭和49年2月5日 ~9日	低気圧	8日12時	4.10	9.7
" 2月11日 ~13日	"	11日2時	約3.3	約13.0
" 3月27日 ~29日	"	28日8時	5.0	10.7
" 8月15日 ~16日	台風14号	15日20時	3.8	12.8
" 8月29日 ~31日	台風16号	30日22時	2.8	12.7
昭和50年2月5日 ~6日	低気圧	5日20時	4.19	9.5
昭和51年7月3日 ~7日	台風7号	4日22時	4.26	10.8
" 9月3日 ~6日	低気圧	4日24時	3.52	8.8
" 9月27日 ~29日	"	29日8時	4.48	11.3
昭和52年8月22日 ~25日	台風8号	22日16時	4.35	8.1
" 9月17日 ~18日	台風11号	17日22時	3.95	8.3
" 10月4日 ~6日	低気圧	6日4時	4.07	11.9
昭和53年3月10日 ~11日	"	10日20時	4.15	9.8
" 3月22日 ~24日	"	23日6時	4.47	10.0
" 4月3日 ~5日	"	3日18時	5.24	10.9
" 11月13日 ~15日	"	14日8時	3.57	7.7
" 12月18日 ~20日	"	20日10時	3.35	10.4
" 12月28日 ~30日	"	29日24時	3.36	7.7

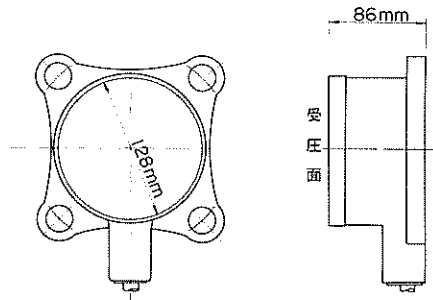


図-4 波圧計受圧部

波圧計の取付け位置は前掲図-2, 3に示したとおりであり、全部で16個を用いている。すなわち、多孔壁にNo. 1, 2, 3, 4の4個、後面にNo. 5, 6, 7の3個、遊水室後壁にNo. 8, 9, 10の3個、遊水室上床版の下面にNo. 11, 遊水室底面にNo. 12の各1個、ケーソン底面にNo. 13, 14, 15, 16の4個である。このうち、No. 2, 5, 8, No. 3, 6, 9, およびNo. 4, 7, 10はそれぞれ同じ高さの位置にあり、No. 3, 6, 9はほぼH.W.L. 付近の位置にあたる。表-2にケーソン前壁面を $x=0$, L.W.L. を $z=0$ としたときのこれらの波圧計中心位置の座標を一括して示しておいた。ただし、波圧計の受圧面は壁面と同一面であることが望ましいが、今回は施工上の理由から2 cm程度壁内に入っている。

波圧は図-5に示したように、波圧計、直流増幅器を経て電磁オシログラフに記録される。この一連の観測を

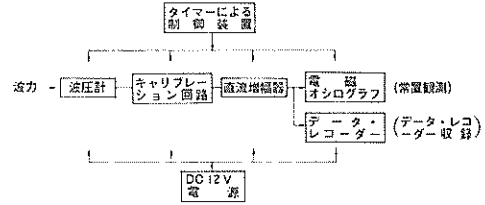


図-5 波圧測定装置

本資料においては常置観測と呼ぶ。このほか、二・三の事例についてはデータ・レコーダーにも記録した。各計測器は任意の時刻に計測可能となるようにタイマーによって制御される。したがって、天気図より計測したい日時を決め、それにタイマーをセットすることにより、自動的に任意の時間間隔で任意の時間ビジグラフの記録紙、あるいはデータ・レコーダーのテープがなくなるまで記録することができる。これらの計測器の電源は12Vのバッテリーであるが、電磁オシログラフ等に対してはDAコンバーターによりDC 12VからAC 100Vに変換している。

なお、すべての計測器は護岸のパラペット内に設けられた幅2.2m、長さ3mの計測室に収められている。内部への海水の侵入はないが、湿度および気温の制御は行われていない。

2.3 観測の実施状況

今回の解析で対象とした常置観測の実施状況は表-3(1)に示したとおりであり、昭和52年10月から53年10月までの計18回である。このうち、昭和52年10月から53年4月8日までの観測は1~2時間間隔で5分ずつ12回の記録をとっている。しかし、不規則現象に対し連続記録時間が5分間というのは短い。そのため、53年4月12日以後は1回の連続記録を10分間とし、1~2時間間隔で6回の記録をとるように改められている。

この常置観測のほか、表-3(2)に示しているように、昭和53年12月から54年2月にかけて計3回データ・レコーダーによる記録をとった。この場合の記録時間は第1回と第2回が9分ずつ2回、第3回は16分ずつ2回である。

表中にケーソン前面での波高観測による波圧観測時の有義波高を示しておいたが、常置観測では0.5~3.9mの範囲である。最も大きい波高が観測されたのは、昭和53年3月9日から10日の間であり、1.6~3.9mの有義波高であった。 $H_{1/3} = 3.9m$ は設計波高に比較すれば小さいが、平均年間最高波高に近い波高である。データ・レコーダー収録の観測に対しては、昭和54年2月23日

表-2 波圧計の位置

No.	取 付 け 位 置			備 考
	壁 面	x 座標	z 座標	
1	前 面	0	+550	
2	"	0	+325	
3	"	0	+100	
4	"	0	-125	
5	後 面	500	+325	
6	"	500	+100	
7	"	500	-125	
8	後 壁	1100	+325	
9	"	1100	+100	故障の場合有
10	"	1100	-125	
11	遊水室 天 井	800	+550	
12	遊水室 底 面	800	-350	
13	ケーソン 底 面	100	-450	
14	"	460	-450	
15	"	870	-450	
16	"	1200	-450	

x : ケーソン前端からの水平距離

z : C.D.L. 上の高さ

表一3(1) 観測ケース (常設観測)

ケース No.	測定日時	測定時間 間隔	測定時間	測定回数	有義波高
A-1	昭和53年 4月12日14時 4月12日24時	2時間	10分間	6回	2.3~3.0 m
A-2	7月31日16時 8月1日02時	2	10	6	2.0~2.6
A-3	9月7日22時 9月8日08時	2	10	6	1.1~2.8
A-4	9月11日10時 9月11日20時	2	10	6	1.4~2.0
A-5	9月14日16時 9月13日15時	1	10	6	2.3~2.9
A-6	9月14日16時 9月15日02時	2	10	6	2.1~2.4
A-7	9月15日18時 9月16日04時	2	10	6	2.3~2.9
A-8	9月20日02時 9月20日12時	2	10	6	1.5~2.2
A-9	10月18日22時 10月19日08時	2	10	6	0.9~1.4
A-10	10月20日14時 10月20日24時	2	10	6	1.2~1.6
A-11	10月21日18時 10月21日10時	2	10	6	1.8~2.3
A-12	昭和52年10月8日18時 10月9日16時	2	5	12	2.8~3.7
A-13	10月20日12時 10月21日10時	2	5	12	2.2~2.8
A-14	11月2日16時 11月3日14時	2	5	12	2.6~3.4
A-15	昭和53年1月9日18時 1月10日16時	2	5	12	0.5~2.9
A-16	1月25日02時 1月25日24時	2	5	12	2.0~2.7
A-17	3月9日20時 3月10日18時	2	5	12	1.6~3.9
A-18	4月7日14時 4月8日1時	1	5	12	1.2~2.4

表一3(2) 観測ケース (データレコーダ収録)

ケース No.	測定日時	測定時間 間隔	測定時間	測定回数	有義波高
B-1	昭和53年12月1日14時 16時	1時間	9分間	2回	1.78~1.92 m
B-2	昭和53年12月5日14時 16時	1	9	2	1.17~1.30
B-3	昭和54年2月23日15時 16時	1	16	2	2.26~2.31

の有義波高2.26~2.31 mが最大であった。波の周期は5.7秒から11.8秒の間にあり、護岸の設計波の周期とはほぼ同じである。また、潮位は0.16~1.4 mの間であった。

3. 護岸に作用する波の特性

3.1 海岸における波の変形の推定

(1) 波の屈折および回折

一般に浅海域にある構造物には屈折、回折、浅水度、碎波などによる変形を受けたあとの波が作用する。今回の波圧観測結果の解析に利用できる波のデータは、2.で述べたように、-2.2 m地点における定常波浪観測結果のほか、-9 m地点における波圧との同時観測結果であり、本解析における波浪データとしては後者の-9 m地点での観測結果を用いる。しかしながら、この-9 m地点での観測結果といえども、護岸位置から350 m離れており、この間において波の変形があればこれを考慮しな

ければならない。そのため、本章においては、鹿島港海岸における波の屈折、回折および浅水変形を算定図などを用いてできる範囲で一般的に検討し、これらの影響の度合を把握するとともに、波高観測結果に基づく若干の解析結果を示す。さらに、ケーソンに作用する波の形態は護岸のマウンドによって著しく影響される。そのため、マウンドによって波がどのように変化するかについて若干の実験を行ってみたので、本章の最後でこれについて述べることにする。

まず波の屈折であるが、これについては直線状平行等深線海岸で近似し、合田ほか¹⁰⁾による方向スペクトルを考慮した算定図表を用いて検討した。図-6は潮位1 mで $S_{max} = 25$, $T_{1/3} = 10$ sの波に対する波向の変化を示すものである。この波は前掲表一1の異常波浪の平均的なものである。横軸は護岸に対する沖波の波向 β_0 であり、縦軸は各水深での屈折後の波向 β である。水深8.5 mは護岸前面であり、1.0 mは今回の波高計位置、水深2.3 mは定常波高観測位置である。また水深7.5 mは潮位が0 mのときの護岸前面に相当する。図中に波向角と方位との関係も示しておいた。たとえば、 $\beta = 0^\circ$ というのはほぼENEの方位であり、N方向は $\beta = -70^\circ$ である。

護岸前面での波向は $|\beta_0|$ が 30° 以下のときは 15° 以下となり、また 60° 以下では 25° 以下となる。鹿島港における沖波の卓越波向はNEからE ($-25^\circ \sim 20^\circ$) であり、護岸への入射角は 12° 以下となり、護岸法線にはほぼ直角に入射する波が多いと考えてよい。また、波高観測位置での波向は護岸前面とほとんどかわりなく、定常波高観測位置では沖波の波向と護岸前面での波向の中間の値となっている。

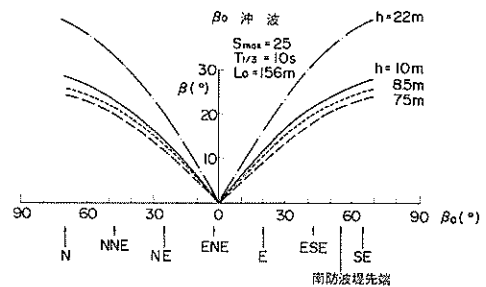
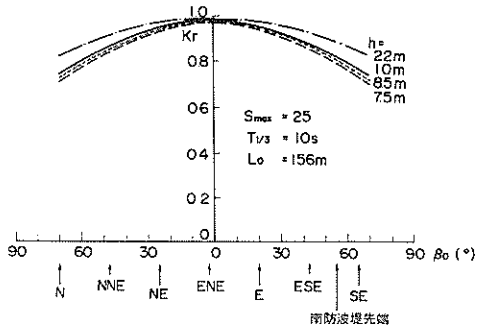
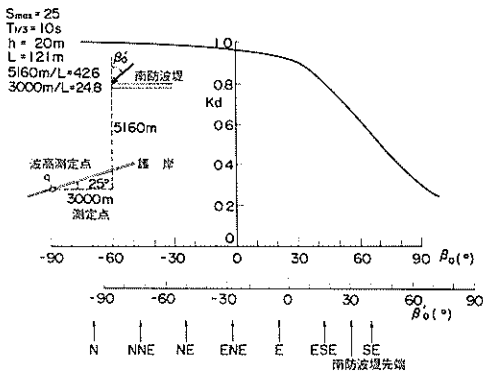


図-6 波の屈折角 β

図-7は不規則波の屈折係数 K_r を示したものである。護岸前面の K_r は $|\beta_0|$ が 60° 以下では0.78以上であり、 $|\beta_0|$ が 30° 以下では0.92以上である。また、波高観測位置(-9 m)と護岸前面での K_r の違いは無視できる。



図一七 波の屈折係数 K_r



図一八 波の回折係数 K_d

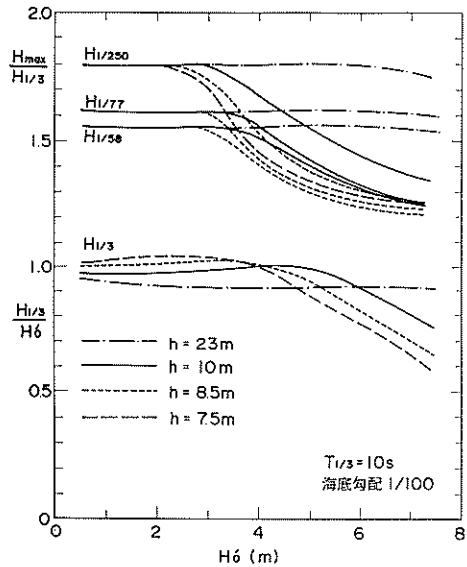
定常波高観測位置(-2.2m)での K_r は沖波と護岸前面との中間程度である。

図一八は合田らによる回折図¹¹⁾から種々の波向に対して護岸前面での回折係数 K_d を求めてプロットしたものである。ただし、 $T_{1/3} = 10$ s、 $S_{max} = 25$ であり、水深を 20 m としている。また、図中 β'_0 は南防波堤に対する波の入射角を表わしているが、沖から南防波堤先端までの間の屈折による波向の変化は無視している。回折係数は β_0 が大きくなるにつれて小さくなっていくが、 $\beta_0 = 25^\circ$ ($\beta'_0 = 0^\circ$) で $K_d = 0.93$ であり、 $\beta_0 = 25^\circ$ までは回折の影響はそれほど受けない。 β_0 が 25° 以上では回折係数が急激に小さくなるが、こうした波向の波は少ない。いずれの波向きであっても波高観測位置と護岸前面との回折係数の違いは非常に小さいと考えてよい。また回折によって護岸に到達する波の波向が変化するが、これが問題となるのは K_d が小さくなるときであり、このとき波向は護岸に直角に近くなるよう変化する。

以上、代表的な波の諸元に対して屈折および回折の影響について検討したが、鹿島港において卓越する波向であれば、護岸にほぼ直角に入射する波となり、護岸前面では回折係数も屈折係数も 0.9 以上である。また波高観測位置(-9 m)での波高や波向と護岸位置でのそれらとの違いは無視できる。

(2) 浅水変形

ここで浅水変形というのは水深変化による浅水度係数の変化と砕波による変形を総称して指しているが、主体となるのは砕波である。



図一九 波の浅水変形

図一九は合田の不規則波の浅水変形計算¹²⁾から求めた H_{max}/H_0 と $H_{1/3}/H_0$ である。 H_{max} については $H_{1/250}$ 、 $H_{1/77}$ 、 $H_{1/58}$ の 3 通りを示している。すなわち、 $H_{1/250}$ は 400 波の波群の最高波高の期待値であり、砕波が含まれない条件では H_{max} が $1.8 H_{1/3}$ となる標準的な場合である。これに対し波高計による測定は通常 16 分間程度の記録を解析しており、平均周期が 8 秒とすると、このときの波数は 120 波となる。したがって、 H_{max} の期待値は $H_{1/77}$ と等しい。また、波圧計による測定は多くの場合 1 回 10 分間であり、同様に考えると H_{max} の期待値は $H_{1/58}$ と等しくなる。 $H_{1/250}$ 、 $H_{1/77}$ および $H_{1/58}$ の大きさを比較すると当然ではあるがこの順となる。ただし、 $H_{1/77}$ と $H_{1/58}$ は比較的近い値となる。ここでは波圧観測時の平均的な波群の浅水変形を考えると、 H_{max} は $H_{1/58}$ についてみることにした。

沖波の有義波高 H_0 が 3 m 以下の波群では有義波高は波高観測位置で沖波より 3% ほど小さく、護岸前面では 2% ほど沖波より大きい。 H_0 が 3 m から 4 m の波群には砕波の影響があらわれ、最高波高の波は砕波となることもある。最高波高は波高観測位置より護岸前面の方が小さく、 $H_0 = 4$ m のとき、波高観測位置で 6.0 m、護岸前面で 5.6 m である。このとき有義波高は両位置とも H_0 にほぼ等しい。 H_0 が 4 m 以上では砕波の影響が大きく、最高波高はもちろん有義波高も水深が浅いほど小さくなる。

なお、定常波高観測位置では沖波の有義波高が 6 m 以下では砕波の影響がなく、有義波高は浅水度係数によって沖波の 9.2% 程度である。したがって、 H_0 が 6 m 以下では波高観測位置 (-9 m) に比較して有義波高は小さい。

3.2 波高観測結果による波の特性

まず、波高観測位置 (-9 m) での波高と沖波に近い定常波高観測位置 (-22 m) での波高とを比べる。図-10(1)は横軸に-9 m地点での有義波高、縦軸に-22 m地点での有義波高をとって両者の相関をみたものである。ただし、ここに用いた波高は波圧測定を実施した日の4時間間隔の観測値である。パラメーターを有義波周期 $T_{1/3}$ と潮位 W.L. にとっているが、これらによる傾向的な差はあらわれておらず、全体的にばらついている。ただし、有義波高が大きくなるにつれて-9 m地点での波高がやや小さくなる傾向にある。-22 m地点と-9 m地点では 3.1 でみたように、屈折、回折、浅水変形の違いがあり、これらの影響でばらついていると思われる。

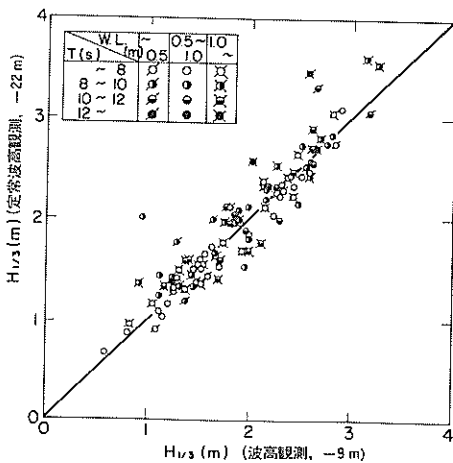


図-10(1) 波高観測位置と定常波高観測位置の波高 ($H_{1/3}$)

る。また、有限な 16 分間のデータの解析結果であり、不規則波特有の変動性によるばらつきであるとも考えられる。合田¹³⁾によると、有義波高はこの場合、その値の 5% 程度の標準偏差でもってばらつく。

図-10(2)は同様に最高波高の相関を示したものである。有義波高の場合に比較してばらつきが大きい。これは、最高波高の方が統計的により不安定であることを反映していると考えられる。平均的にみれば、波高が大きくなるにつれて-9 m地点での波高がより小さくなる傾向にあり、これは砕波の影響と考えられる。

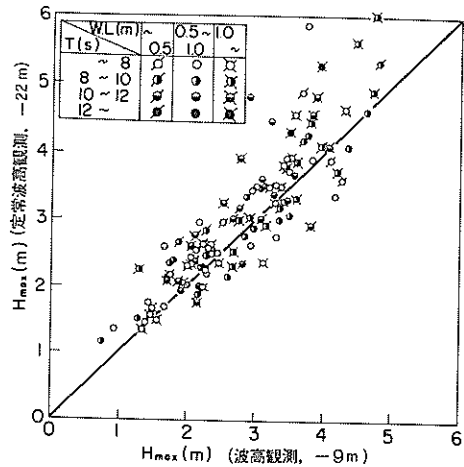


図-10(2) 波高観測位置と定常波高観測位置の波高 (H_{max})

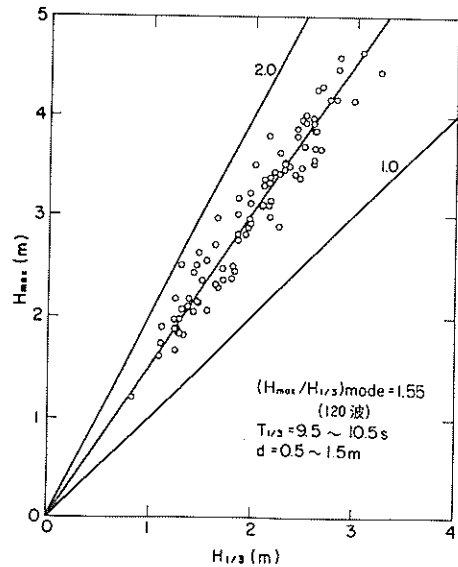


図-11 観測波高の有義波高と最高波高の関係

次に-9m地点での波高観測結果を用いて波の特性を調べてみた。図-11は有義波周期が9.5~10.5秒の波を選定して、有義波高と最高波高の関係をみたものである。平均周期を8秒とすると16分間のデータを解析しているので、レーリー分布による最高波高の最ひん値は有義波高の1.55倍となる。図中にこの関係も示したが、観測値は平均的にこの関係によく一致している。有義波高が大きくなると砕波の影響で観測波高は有義波高の1.55倍より小さくなるはずであるが、この観測値の有義波高はほとんど3m以下であるため、砕波の影響はあらわれていない。

さらに、波圧をデータ・レコーダーに収録した昭和54年2月23日のデータについては、とくにその波高のひん度分布および波高の連なりについて調べてみた。図-12は波高のひん度分布を示したものである。この場合、有義波高は2.26mで砕波の影響はないと考えてよく、レー

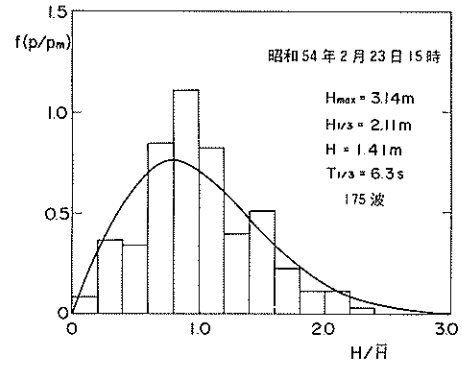


図-12 波高のひん度分布(昭和54年2月23日15時)

リー分布に近い形である。図-13はこのときの175波の波高の連なりを示すもので、大きな波高の波は数波続くことが多いようである。

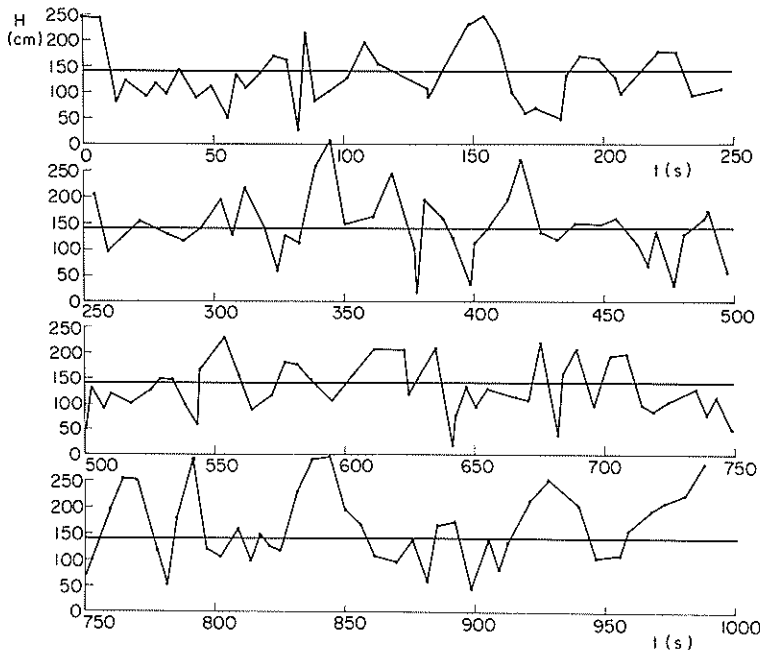


図-13 波高の連なり(昭和54年2月23日15時)

3.3 ケーソンに作用する波に対する実験的考察

護岸前面に到達した波はさらに護岸のマウンドによって変形を受けてケーソンに作用する。潮位が1mのとき護岸前面での水深 h は8.5m、マウンド上の水深 d は4.0mであり、 $d/h = 0.470$ となる。また、マウンド

前肩幅 B_1 は10.5mであり、 $B_1/h = 1.24$ である。このように、マウンドは水深に比べて高かつ広いため、マウンド上で波は砕けやすい。そのため、造波水路において模型縮尺1/16の実験を行って、マウンドによる波の砕波の状況を調べてみた。砕石マウンドを水平水路床

上に設け、マウンド上の砕波の状況を目視観察したものである。護岸前面での水深を8.5mとし、周期が8, 10, 12秒の3種類の規則波を対象とした。

図-14はこの実験結果を示したものである。図中の B_p はマウンド法尻から測った砕波点の距離で、 $B_p = 13.5\text{m}$ の位置がマウンドの天端の前端、 $B_p = 24\text{m}$ がケーソン前面壁に相当する。やはり、マウンドによって比較的小さな波でも砕波しているのがわかる。たとえば、周期10秒の波についてみれば、この場合、波高が3m以上となるとマウンド上で砕波するようになり、3.8m以上となるとケーソンの前面の位置より前方で砕けるようになる。波高が6.1mでは法尻で崩波となり、これ以上の波高では1/100の海底床上で崩波となって砕ける。マウンドの天端上で砕ける波は一般に巻波である。ただし、波高が小さくマウンド上で砕波する限界の波高に近いものは崩波であり、波高が著しく大きい場合には波頂部が崩れながら巻波として砕ける場合もある。こうした巻波は静水面付近から砕け、通常のケーソンの場合には大きな衝撃的な波圧を生じさせる可能性がある。

マウンド上で巻波となって砕け始める点は波高が大きければ大きいほどマウンド法尻に近く、 B_p の値は小さい。しかしながら、波高がある限界よりさらに大きいと海底床上で砕けてしまうので、マウンドに入射する波としては上限が存在する。つまり、マウンドの法尻水深における砕波限界波高以上の波は入射しない。この砕波限界波高の波は崩波となって少し伝播し、マウンド上でさ

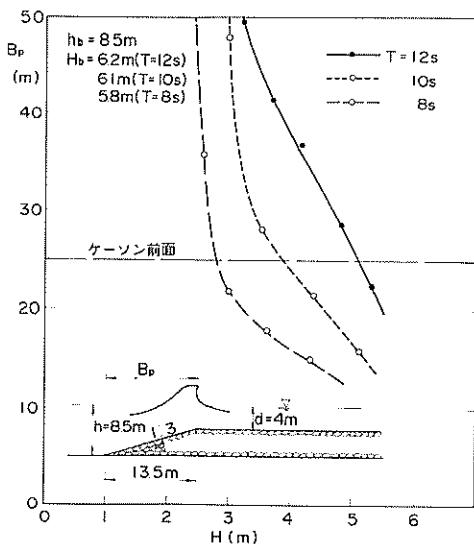


図-14 マウンド上の砕波

らに巻波状で砕波する。このとき、マウンド上で巻波として砕け始める点は法尻でなく、ある程度進行した後であることに注意する必要がある。したがって、マウンドに入射する波の波高に上限があると考え合せば、マウンド上で巻波となって砕け始める点までの距離 B_p には0より大きい下限値があると考えられる。大まかにいえば、ケーソンがこの位置の前にあれば、巻波状砕波が堤体に作用しないことになる。しかしながら、今回の場合はマウンド法尻からケーソン前壁の距離は24mであり、この下限位置より後にあることは明らかで、周期10秒の場合、波高4m以上では巻波状砕波が作用することがあると考えられる。

周期が10秒より短い場合には、より小さな波高から巻波の砕波となり、長い場合にはより大きな波高から巻波となる。したがって、実際の波が不規則波であることを考え合わせると、本護岸のケーソンには波高が3m~6.5mの場合に巻波状砕波が作用することがあるといえる。

4. 波圧記録の解析結果

4.1 波圧記録の解析法

ここでは解析結果を述べる前にその方法について簡単にふれることにする。

常置観測の記録は電磁オシログラフ上に記録されている。この記録から1波1波の波圧の正負のピーク値、周期を読みとった。この作業には、デジタイサーを用いた。これは、アナログ波形からその波形を追うことにより、時刻と大きさを読みとってゆくものである。こうして、正負のピーク値の時刻と大きさなどのデータを磁気テープに収録し、電子計算機により1/3最大波圧などの波圧の代表値を求めた。この1/3最大波圧 $p_{1/3}$ は波圧のピーク値の大きい方から1/3のものの平均値である。計算では正負のピーク値について1/3最大波圧を求めたが、実際に検討を加えたのは正のピーク値についてのみである。

この解析中、波圧のゼロ線がどこになるかという点が問題となった。もし波圧計が波の作用時に空中に出ることがあれば、ゼロ線はその時の潮位を考慮することにより容易に求められる。それゆえ静水面上にある波圧計においては、そのゼロ点は明らかである。これに対し、たとえばケーソン底面の揚圧力の記録はそのゼロ線が明らかでない。波が小さいときの記録があれば、これから推定することも可能であるが、今回はそれはない。したがって、ここでは正負のピーク値のそれぞれの平均値の絶対

値がほぼ等しくなるように、2、3回の試行ののちゼロ線を決めている。ただし、これは便宜的な方法であるので、今後この方法の精度について検討を加える必要がある。

常置観測記録にはこの他2つの問題点がある。1つは電磁オシログラフの紙送り速度が0.8 cm/s であることである。このため、波圧の特性、および各測点間の関係も細部については不明である。さらに、波圧測定点が16点と多いために2台の電磁オシログラフを用いているのでその両者の関係が正確にはわからない。これらの点を補うためにデータ・レコーダーに波圧記録を収録した。このときやはり2台のデータ・レコーダーを用いているため、発振器の信号を両者に同時に入力することによって両者の時間軸の関係づけを行っている。

なお、正の波圧は静水時の水圧からの増分であり、各測点において壁面を押す方向に働く。負の波圧は逆に静

水時の水圧からの減少分を表わし、各壁面を引張る方向に働く波圧である。したがって、多孔壁の前面と後面では同じ正の波圧でも作用する方向が逆である。

4.2 波圧の波形と同時波圧分布

(1) 波圧波形と位相

図-15はデータ・レコーダーに収録した昭和54年2月23日15時からの16分間の記録から求めた多孔壁前面+100 cmでの波圧の正のピーク値の連なりを示したものである。このときの波の条件は $T_{1/3}=6.1$ s, $H_{1/3}=2.26$ m であり、潮位は+0.89 m であった。同時刻の350 m前方における波高の連なりは既に図-13に示したとおりであるが、波の不規則性に応じて波圧のピーク値も不規則に変動している。こうした波圧のピーク値のひん度分布については4.3で述べる。ここでは、代表的な波圧波形を例示してその特徴を述べることにする。

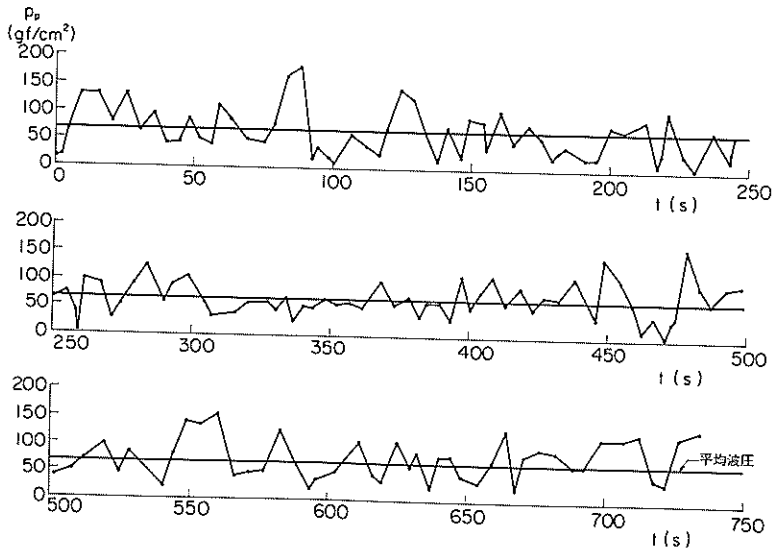
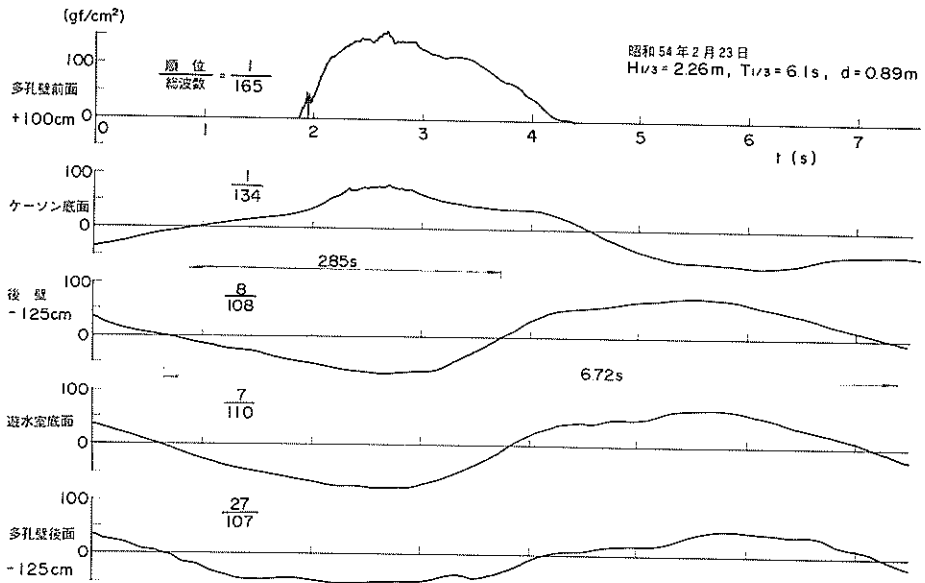


図-15 波圧の連なり

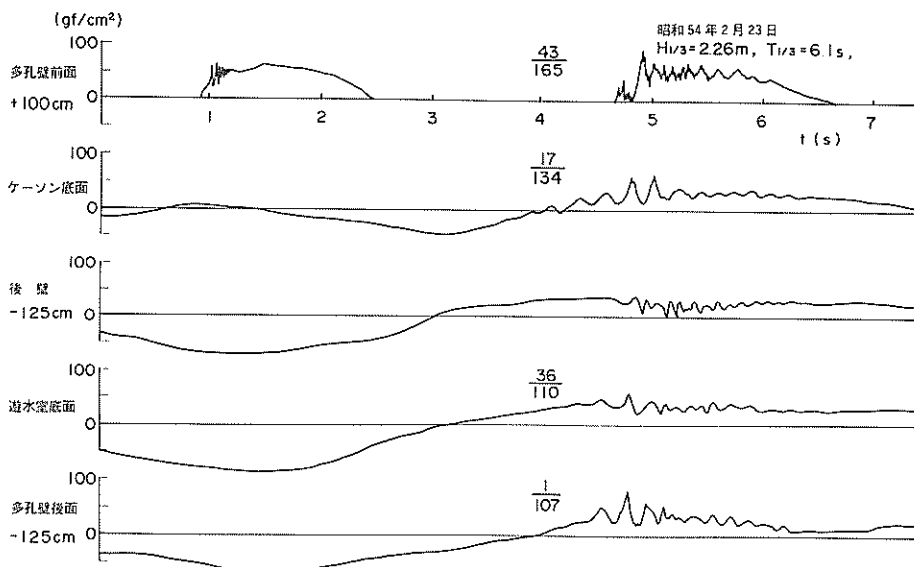
図-16(1)は多孔壁前面+100 cmの波圧が最大を記録した時(図-15中の第21波目)の波形を他の代表的測点での波形と合わせて示したものである。多孔壁前面での波圧は比較的穏やかな時間変化を示している。図中に波圧のピーク値の各測点での総波数とその波圧ピーク値の順位を示しているが、このときケーソン底面でも最大波圧を記録していることがわかる。その波圧波形は多孔壁前面と同様穏やかで、しかも同位相である。これに対し、多孔壁後面、遊水室底面、遊水室後壁など遊水室内における波圧波形は多孔壁前面やケーソン底面など外側の波圧波形に比べると明らかに位相の遅れが認められ

る。たとえば、ケーソン底面と遊水室後壁の波圧波形をゼロアップ点で比較すると、この場合、2.85秒の遅れとなっている。これら遊水室内の測点における波圧の大きさは、16分間の記録中最大ではないが7~27位とかなり大きな方に属している。

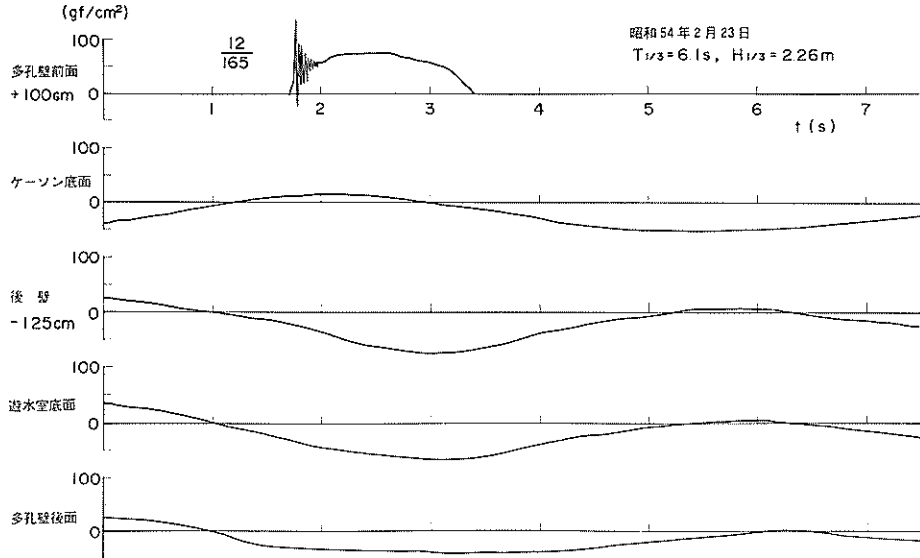
図-16(2)は多孔壁前面と遊水室内部との波圧波形の位相差がほとんどない場合の記録である(図-15中の第73波目)。こうした例は16分間の記録中2回だけあった。これは短い時間間隔で2つの波が来襲したために、遊水室内で水位が上昇しているときに、次の波が多孔壁前面に作用した場合である。このとき、波圧波形に



図一 16 (1) 観測記録の例 (昭和54年 2 月 23 日 15時)

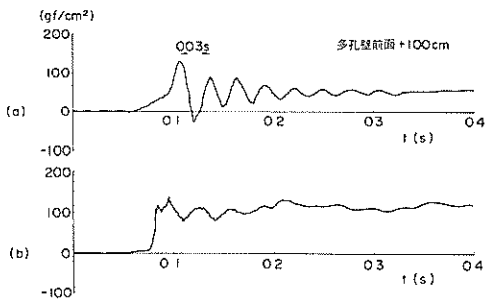


図一 16 (2) 観測記録の例 (昭和54年 2 月 23 日 15時)



図一 16 (3) 観測記録の例 (昭和54年 2月23 日 15時)

振動が認められるが、これは厚さ 5 m の多孔壁内に空気が閉じ込められて、その空気圧縮による振動が現われたものと推定される。

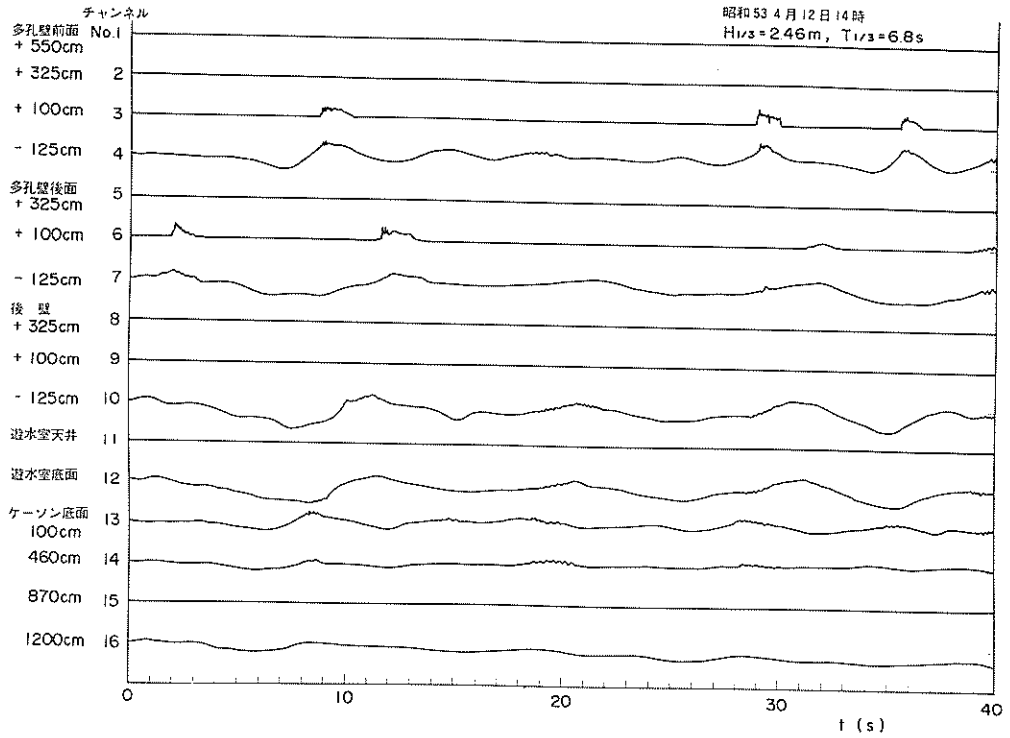


図一 17 波圧記録に現われる短周期振動

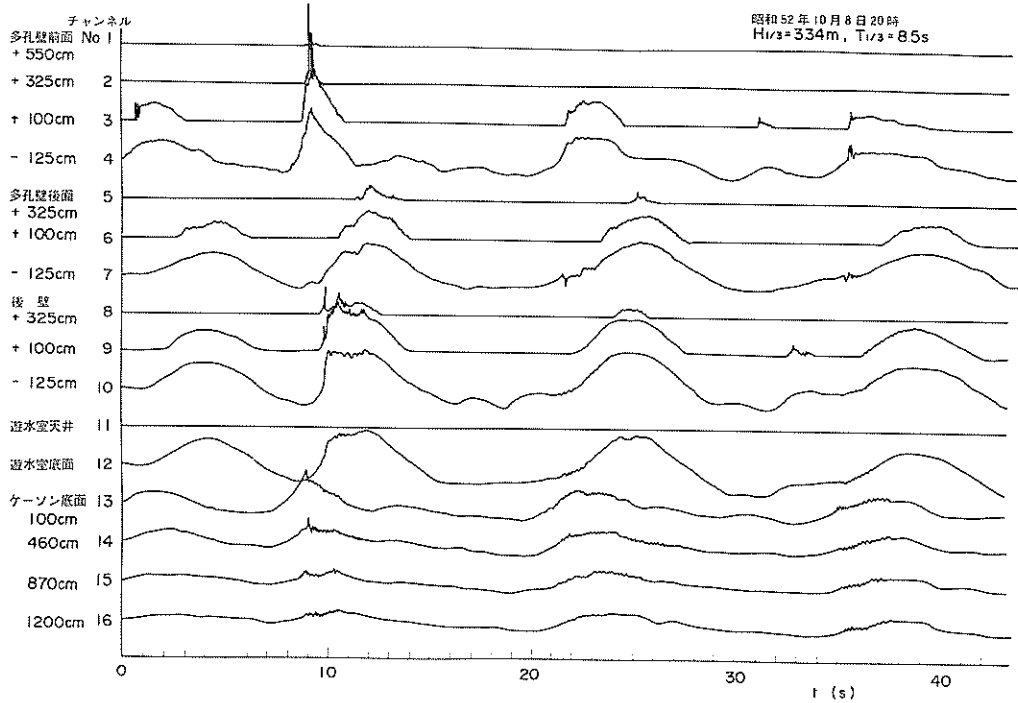
多孔壁前面 + 100 cm の記録では図一 16 (3) に例示したような振動波形をもつ波圧波形が時折みられる。この波形を時間軸を長くして示したのが図一 17 の(a)である。比較的なめらかな 33 Hz の振動であり、通常の衝撃

砕波による圧力とは思われなく、これは波圧計が多孔壁の壁面より 2 cm 引込んでいることに起因すると思われる。すなわち、この振動は何らかの原因でこの凹部に波面が空気を閉じ込め圧縮したために生じていると推定される。この振動のピーク値は、この例においてはこの波圧波形のピーク値でもあるが、一般には波圧波形のピーク値はこの振動のピーク値より大きい。図一 17 の(b)は振動がそれほど顕著でない場合の例で、こうした波形が現われるのは空気の閉じ込めが完全でない場合と考えられる。

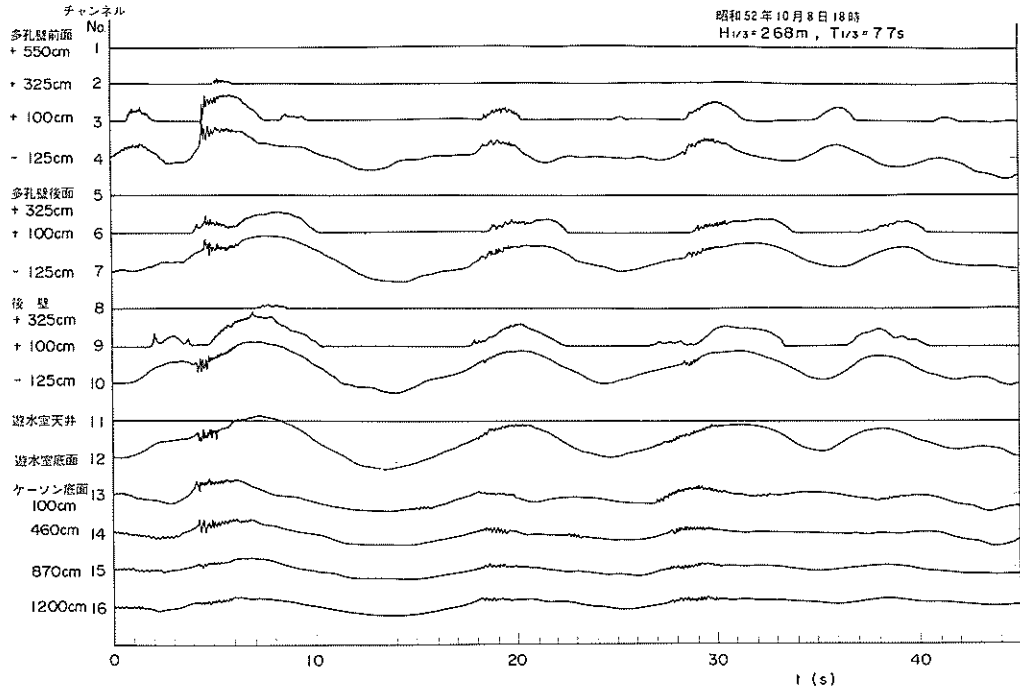
図一 18 (1)(2)(3) は常置観測記録の例である。やはり、図一 16 (1) のように遊水室内においては多孔壁前面より位相が遅れることが多いことがわかる。さらに、細かくみるとたとえば(2)でわかるように、波はまず多孔壁前面に作用し、遊水室後壁下部、後壁上部と遊水室底面、多孔壁後面の順で作用するようである。また、この例では、多孔壁前面にかなり衝撃的な波圧が作用しており、このときケーソン底面でも同時に波圧波形はやや鋭くなっている。



図一 18 (1) 観測記録の例 (昭和53年4月12日14時)



図一 18 (2) 観測記録の例 (昭和52年10月8日20時)

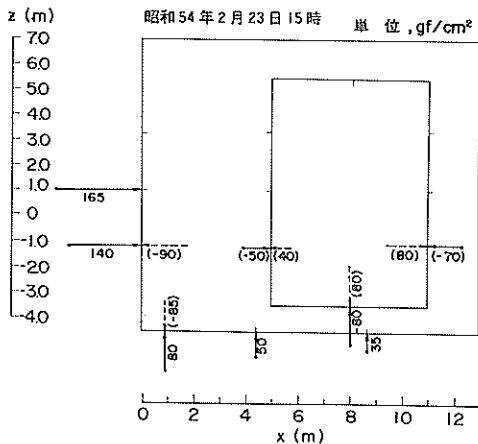


図一 18(3) 観測記録の例 (昭和52年10月8日18時)

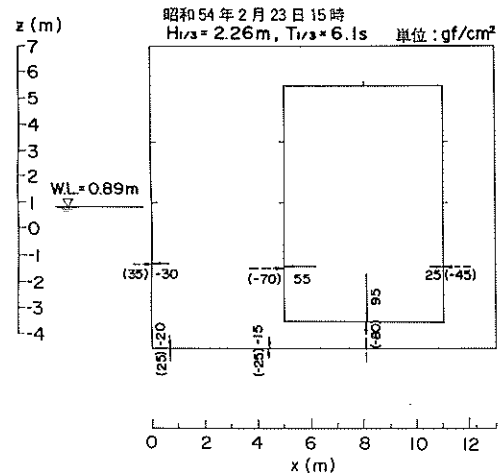
(2) 同時波圧分布

図一 19(1)~(4) はデータ・レコーダ-収録記録から読みとった波圧の同時分布を示したものである。このうち、(1)は前掲図一 15 (1) に示した多孔壁前面での波圧が最大となるときの同時波圧分布であり、(4)は前掲図一 15 (2) の場合の同時分布である。図中、実線で示しているのが多孔壁前面での波圧が正のピーク値となった瞬間の波圧であり、その値を数値で示している。破線で示している

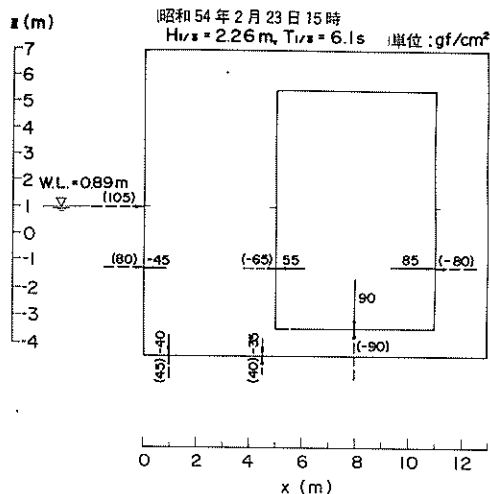
のは、これと同じ波で負のピーク値となった瞬間の波圧であり、このときの値を()内に示している。(2),(3),(4)はそれぞれ遊水室底面、遊水室後壁、および多孔壁後面での最大波圧時の同時波圧分布を(1)と同様に示したものである。ただし、通常正のピーク値が最大となった波で負のピーク値もかなり大きく、(1),(2),(3)では負のピーク値も最大であった。



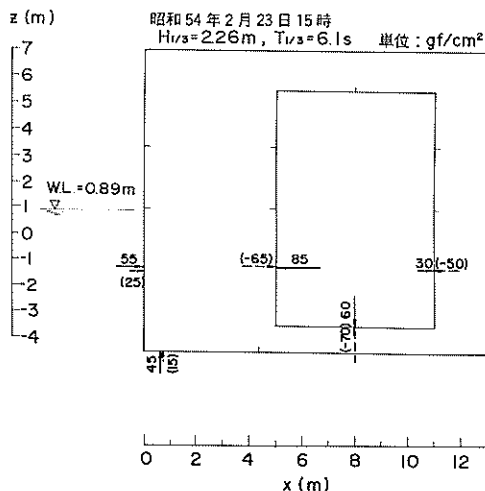
図一 19(1) 同時波圧分布 (多孔壁前面の最大時)



図一 19(2) 同時波圧分布 (遊水室底面の最大時)



図一 19(3) 同時波圧分布 (遊水室後壁の最大時)



図一 19(4) 同時波圧分布 (多孔壁後面の最大時)

(1)の多孔壁前面において正のピーク値を示すときは、峰近くの波が作用していると考えられる。このときケーソン底面には上向きの揚圧力が働いている。遊水室内においてはいずれも負の波圧となっており、このとき静水時より水面が低下していることは明らかである。一方、負のピーク値を示すときは波の谷に対応するときと考えられる。このとき、遊水室内における波圧はいずれも正の値を示しており、水面は静水時より上昇している。

これに対し、(2)、(3)の遊水室内の底面および後面での最大波圧時の分布は、実線と破線が(1)の場合と逆の関係になり、正のピーク値を示すときは多孔壁前面で波の

谷、負のピーク値を示すときは波の峰にそれぞれ近い位相のときである。

また、(4)の多孔壁後面で正のピーク値が最大値を示したときの分布は、前掲図一 16(2)の場合であり、遊水室内で前の波による水位が低下しないうちに、多孔壁前面に次の波が作用している状態である。ただし、これに続く負のピーク値のときは、(2)、(3)の場合と同様に波の峰に近い位相のときである。

同時波圧分布はこのように各瞬間において各部における波圧の作用方向が異なり複雑である。水平波力の合力 F_H と鉛直波力の合力 F_V は各壁面の波圧合力の和としてそれぞれ以下のように表わされる。

$$F_H = (\text{多孔壁前面に働く波圧合力}) + (\text{遊水室後壁に働く波圧合力}) - (\text{多孔壁後面に働く波圧合力})$$

$$F_V = (\text{ケーソン底面に働く波圧合力}) + (\text{遊水室上床版に働く波圧合力}) - (\text{遊水室底面に働く波圧合力})$$

本例においては、このケーソンを防波堤に用いたとき安定性に最も影響の大きいのは、(1)の多孔壁前面での波圧が正の最大値を示したときである。この場合の水平波力 F_H 、鉛直波力 F_V は、

$$F_H = 9.18 \times (1 - 0.274) + (-2.32) - (-1.66) \times (1 - 0.274) = 5.55 \text{ tf/m}^2$$

$$F_V = 5.61 + 0 - (-4.80) = 10.41 \text{ tf/m}^2$$

この最大波力が最高波高 $H_{\max} = 1.55 H_{1/3} = 3.50 \text{ m}$ の波に対応するものとし、平均波力強度および無次元波力係数を求めてみると次のようになる。ただし、水平波力は多孔壁の静水面上 $0.75 H_{\max}$ まで孔を含めた面積全体に一樣に働くとし、その平均波圧強度を \bar{p} で表わす。また鉛直波力はすべてケーソン底面に三角形分布で働くと考え、その前端における強度を p_u で表わす。このとき、

$$\bar{p} = 0.95 \text{ tf/m}^2 \quad \bar{p}/w_0 H_{\max} = 0.20$$

$$p_u = 1.6 \text{ tf/m}^2 \quad p_u/w_0 H_{\max} = 0.33$$

となる。この様に水平波力が小さくなるのは各壁間の相殺効果による。

図一 20 は横軸に $H_{1/3}$ と $1.55 H_{1/3}$ とした H_{\max} をとり、常置観測記録における多孔壁前面の水平波力合力の無次元波力係数 $\bar{p}_r/w_0 H_{\max}$ を示したものである。この値は $0.16 \sim 1.19$ の間、特に $0.4 \sim 0.7$ の間に分布している。この値が 0.7 以上のものは碎波としてこの壁に作

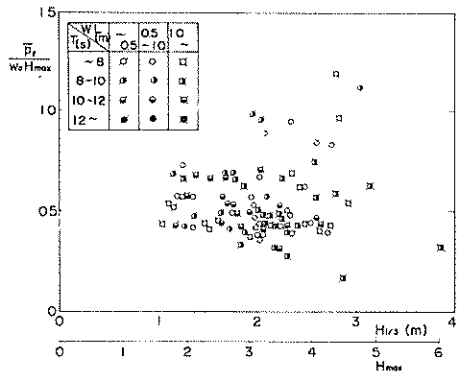


図-20 多孔壁前面の水平波力の無次元波力係数

用しており、値が大きいほど衝撃的な碎波が作用していると推定される。前述した図-18(1)の場合では、この $\bar{p}_r/w_0 H_{max}$ の値が 0.33 とごく小さく、波が重複的に作用し波圧が小さい場合であることに留意する必要がある。

なお、設計に用いる F_H や F_V を求めるときには、遊水室内とケーソン外周ではどのような位相差もありうることを考慮する必要がある。たとえば、図-18(1)で、多孔壁前面の水平波力が最大となった瞬間において、遊水室内の水平波力の合力は負であるが、この瞬間、図-18(2)の破線で示されるように遊水室内において水平波力の合力が負となる場合もありうる。後者の場合、ケーソン全体に働く水平波力の合力を増す方向となるため、前者より危険である。このように設計に用いる F_H 、 F_V を求めるときには、各壁間の波圧の位相差を十分検討しなければならないが、その際、多孔壁前面とケーソン底面では位相差がなく、遊水室内では各壁間の位相差が小さいことも留意しておくべき点であろう。

4.2 波圧ピーク値のひん度分布

ここでは波圧の正のピーク値のひん度分布を調べるが、その前に各測点におけるゼロアップクロス法で求めた波圧波形の波数の関係について述べておく。

図-21 は多孔壁前面-125 cm での波数に対する各測点での波数の比を示したものである。用いたデータは常置観測によるものであり、() 内に 150 個の波数比データの標準偏差を示しておいた。これによると、波圧波形における波数が最大なのは多孔壁前面-125 cm であり、遊水室内においてはその 70% 前後の波数となっている。このように遊水室内において波数が少なくなるのは、多孔壁によって小さな波が整波されるためと考えられる。

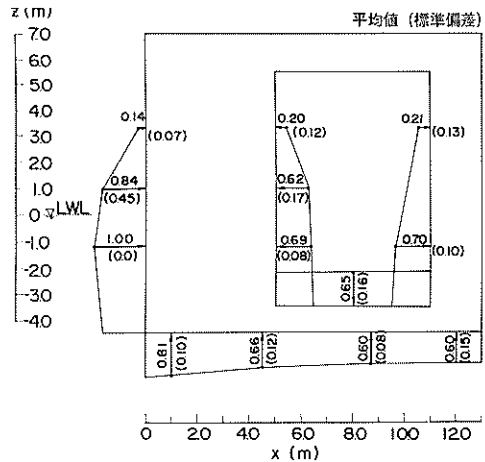


図-21 波圧の波数比

ケーソン底面においても波数が減少しているが、これもマウンドによる整波効果によるものと思われる。静水面上の測点では波高や潮位によって波が作用しない場合があるので、静水面下の測点に比較していずれも波数が少なくなっている。

さて、波圧ピーク値のひん度分布であるが、図-22(1)~(5)はデータ・レコーダー収録の昭和54年2月23日15時から16分間の記録について代表的測点での正のピーク値のひん度分布を示した。ここに p_m は各測点の平均波圧であり、度数は確率密度のかたちで表わしている。多孔壁前面+100 cm やケーソン底面ではレーリー分布に比較的好く一致している。これに対し遊水室内では、いずれの測点においても平均波圧付近の波圧のひん度が高く、大きい波圧のものが少ない分布形となっている。

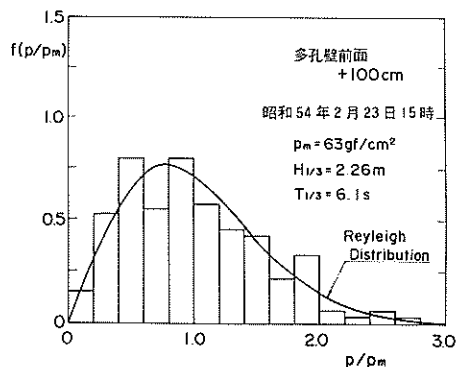
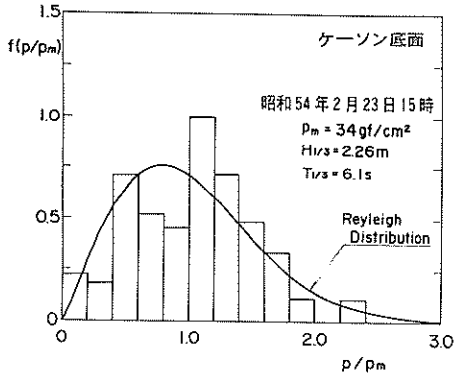
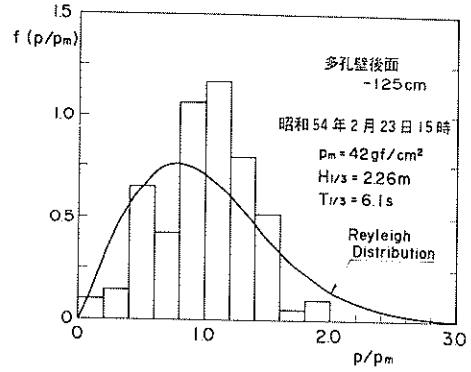


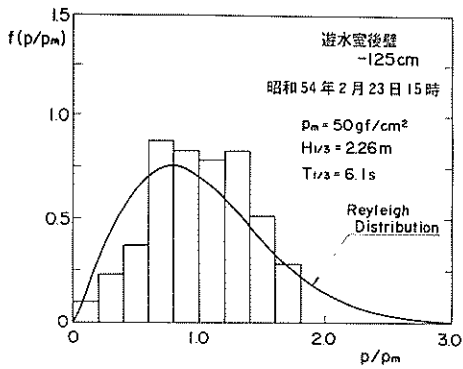
図-22(1) 波圧ピーク値のひん度分布の例 (多孔壁前面+100m)



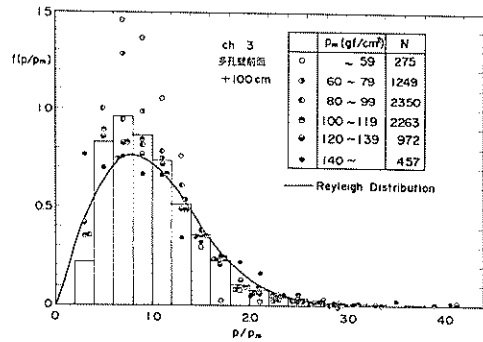
図一 22(2) 波圧ピーク値のひん度分布の例
(ケーソン底面)



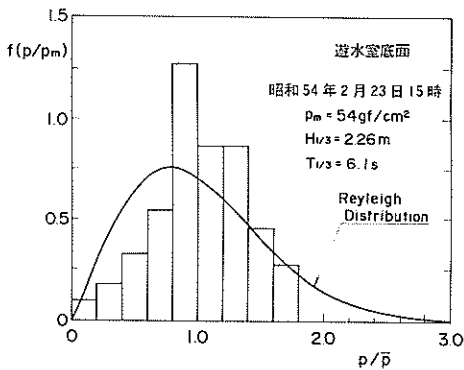
図一 22(5) 波圧ピーク値のひん度分布の例
(多孔壁後面-125m)



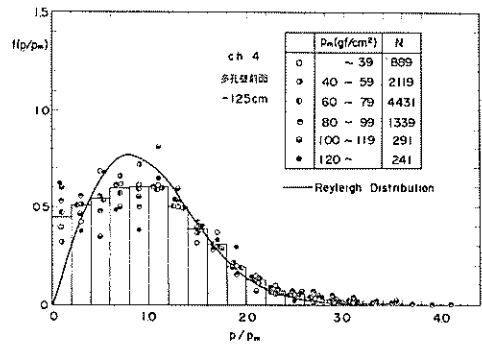
図一 22(3) 波圧ピーク値のひん度分布の例
(遊水室後壁-125m)



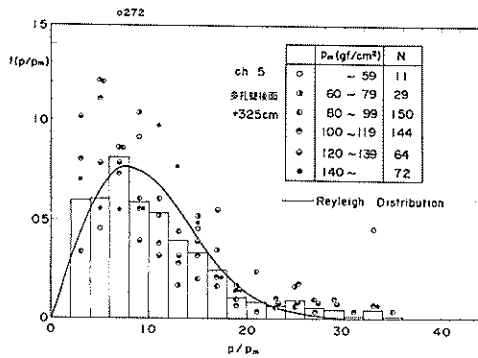
図一 23(1) 波圧ピーク値のひん度分布 (常
置観測, 多孔壁前面+100cm)



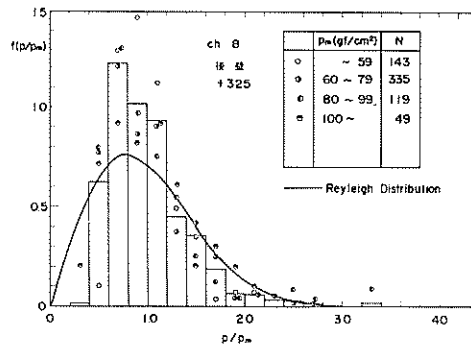
図一 22(4) 波圧ピーク値のひん度分布の例
(遊水室底面)



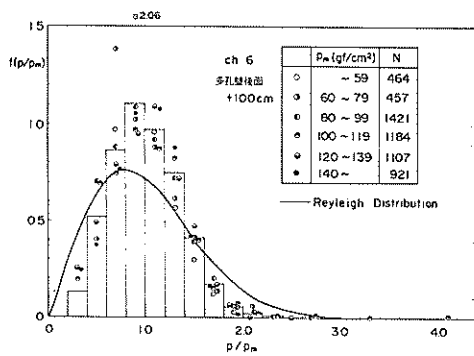
図一 23(2) 波圧ピーク値のひん度分布 (常
置観測, 多孔壁前面-125cm)



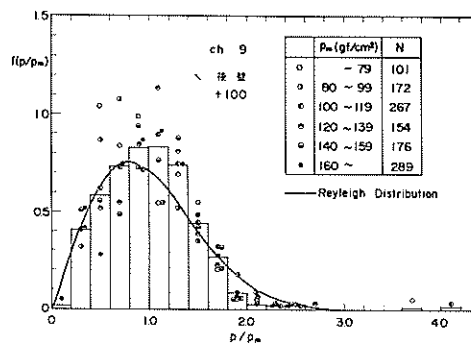
図一 23 (3) 波圧ピーク値のひん度分布 (常置観測, 多孔壁後面 + 325 cm)



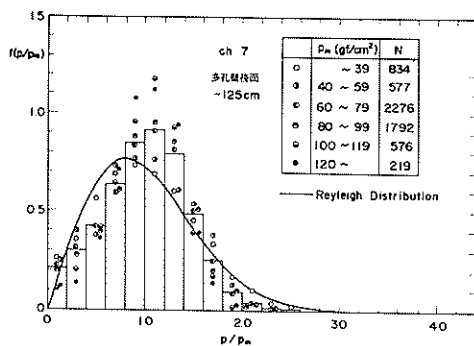
図一 23 (6) 波圧ピーク値のひん度分布 (常置観測, 遊水室後壁 + 325 cm)



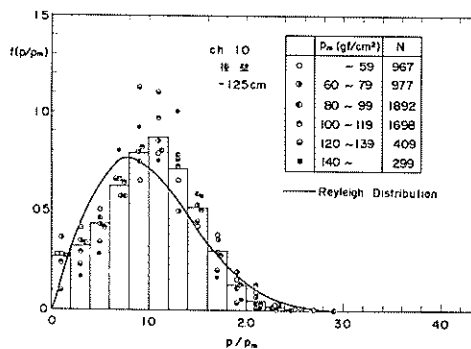
図一 23 (4) 波圧ピーク値のひん度分布 (常置観測, 多孔壁後面 + 100 cm)



図一 23 (7) 波圧ピーク値のひん度分布 (常置観測, 遊水室後壁 + 100 cm)



図一 23 (5) 波圧ピーク値のひん度分布 (常置観測, 多孔壁後面 - 125 cm)



図一 23 (8) 波圧ピーク値のひん度分布 (常置観測, 遊水室後壁 - 125 cm)

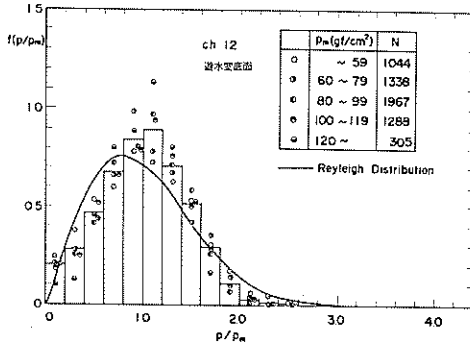


図-23(9) 波圧ピーク値のひん度分布 (常置観測, 遊水室底面中央)

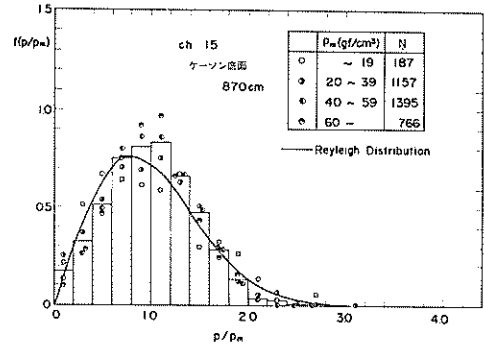


図-23(12) 波圧ピーク値のひん度分布 (常置観測, ケーソン底面 870 cm)

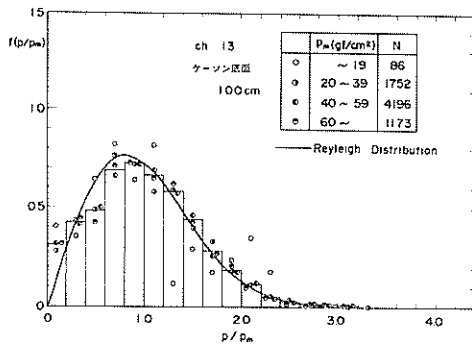


図-23(10) 波圧ピーク値のひん度分布 (常置観測, ケーソン底面 100 cm)

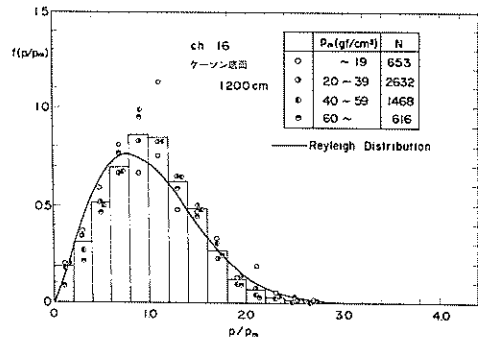


図-23(13) 波圧ピーク値のひん度分布 (常置観測, ケーソン底面 1200 cm)

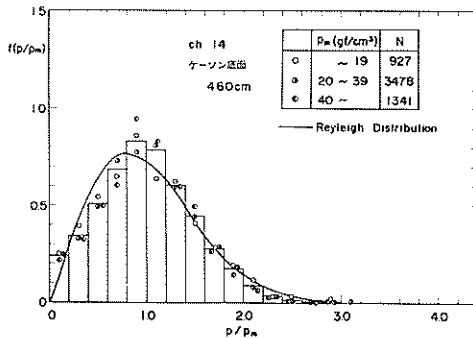


図-23(11) 波圧ピーク値のひん度分布 (常置観測, ケーソン底面 460 cm)

図-23(1)~(13)は常置観測の全データについて各測点での波圧のひん度分布をみたものである。图中、丸で表わした結果は10分間(1部には5分間)の平均波圧 p_m を数クラスに分け、クラスごとのひん度を示したものであり、棒グラフは全データに対するひん度分布を示したものである。また、表中のNは各クラスごとの総波数を表わしている。この結果によるとケーソン底面における波圧のひん度分布はレーリー分布に非常に近いことがわかる。多孔壁前面においても静水面下の測点では比較的レーリー分布に近い。多孔壁前面+100 cmでは平均波圧の3倍以上のものもあり、分布の範囲がやや広がる。また、平均波圧が小さいほどレーリー分布より平均波圧付近のひん度が高いという特徴が認められる。一方、遊水室内の静水面下の測点では平均波圧付近の波

圧のひん度が高く、波圧の範囲が狭くなる傾向にある。しかしながら、遊水室内でも静水面よりかなり上の測点では、平均波圧の3倍を超えるものもあり、幅が広がるようである。ただし、こうした測点では波数が少なくその影響を受けているかもしれない。

以上、波圧ピーク値のひん度分布特性をまとめてみると、次のようにいうことができる。

- i) 一般にケーソンの外周の静水面下に働く波圧はレーリー分布にかなり近い。
- ii) 遊水室内部に働く波圧は平均波圧付近のひん度が高く幅がやや狭くなる。
- iii) 静水面上に働く波圧は非常に大きな波圧が働くことがあり、分布幅がやや広がる。

4.3 波圧ピーク値と波高との関係

(1) 各測点での波圧と波高の関係

図-24(1)~(5)は横軸に有義波高 $H_{1/3}$ をとり、縦軸に $1/3$ 最大波圧 $p_{1/3}$ をとって、常置観測記録のすべてのデータを測点別にプロットしたものである。(2)の多孔壁前面+100cmでは、 $p_{1/3}/H_{1/3}$ が0.5~1.0の間、特に0.5~0.8の間に集中して分布している。どの測点においてもデータはばらついているが、その範囲は静水面の上下でみると、静水面上の測点において大きい。また、遊水室内外でみると、遊水室外で大きい。図中データは水深と周期で記号を別にして示しているが、遊水室内あるいはケーソン底面においては黒い丸に対して白い丸、すなわち、短い周期のものほど小さい値をとる傾向が明らかに認められる。

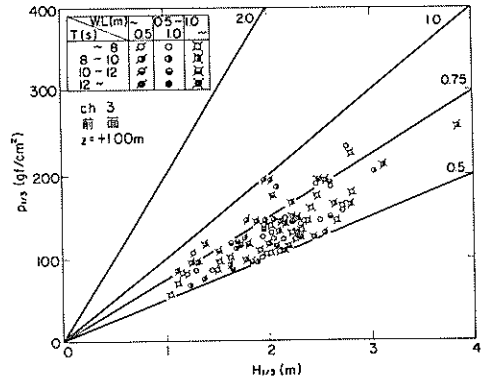


図-24(2) $1/3$ 最大波圧 $p_{1/3}$
(多孔壁前面+100cm)

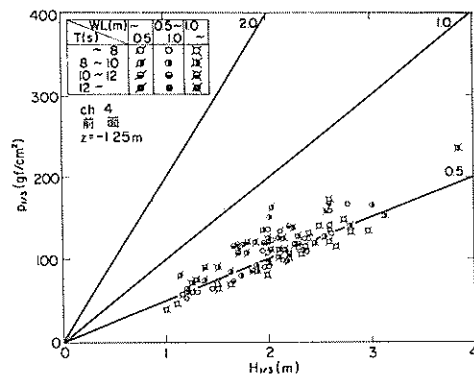


図-24(3) $1/3$ 最大波圧 $p_{1/3}$
(多孔壁前面-125cm)

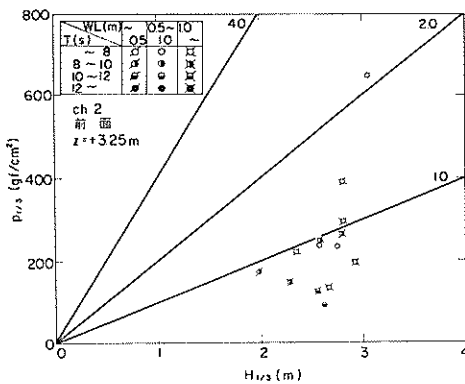


図-24(1) $1/3$ 最大波圧 $p_{1/3}$
(多孔壁前面+325cm)

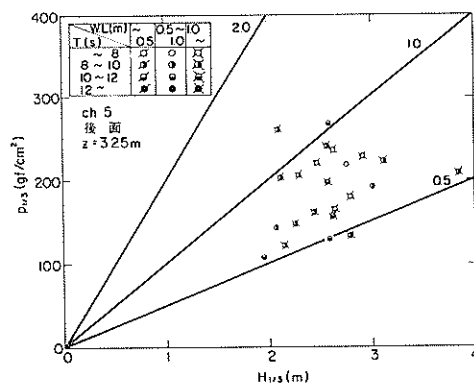
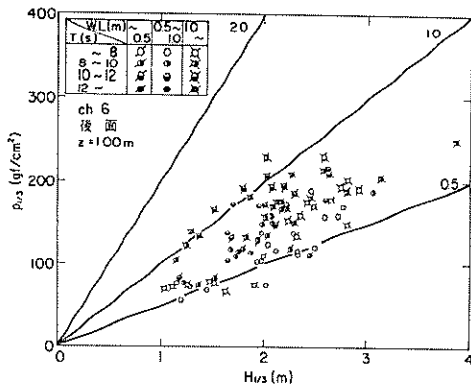
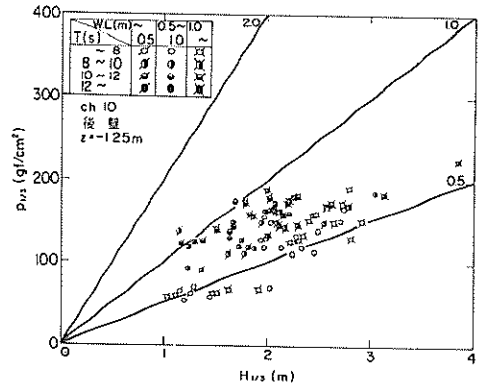


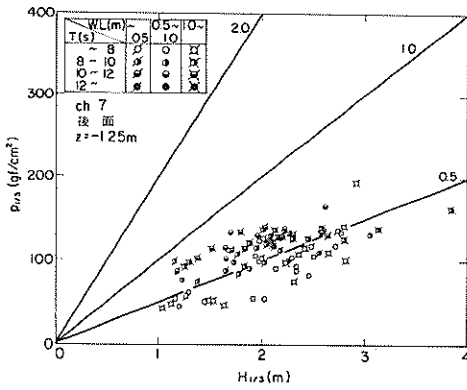
図-24(4) $1/3$ 最大波圧 $p_{1/3}$
(多孔壁後面+325cm)



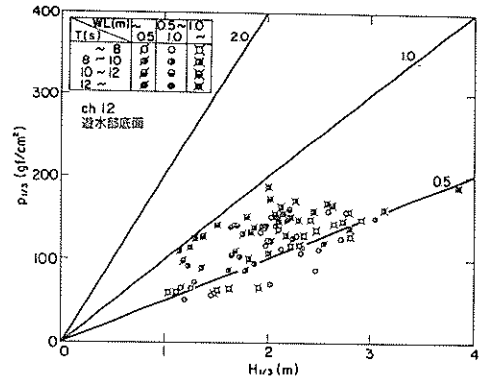
図一 24 (5) 1/3 最大波圧 $p_{1/3}$
(多孔壁後面 + 100 cm)



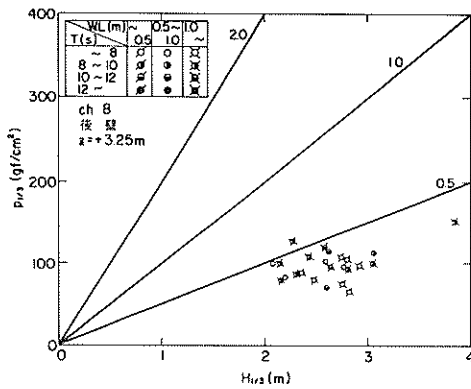
図一 24 (8) 1/3 最大波圧 $p_{1/3}$
(遊水室後壁 - 125 cm)



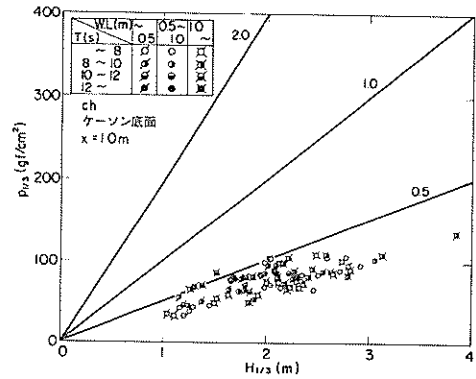
図一 24 (6) 1/3 最大波圧 $p_{1/3}$
(多孔壁後面 - 125 cm)



図一 24 (9) 1/3 最大波圧 $p_{1/3}$
(遊水室底面中央)



図一 24 (7) 1/3 最大波圧 $p_{1/3}$
(遊水室後壁 + 325 cm)



図一 24 (10) 1/3 最大波圧 $p_{1/3}$
(ケーソン底面 100 cm)

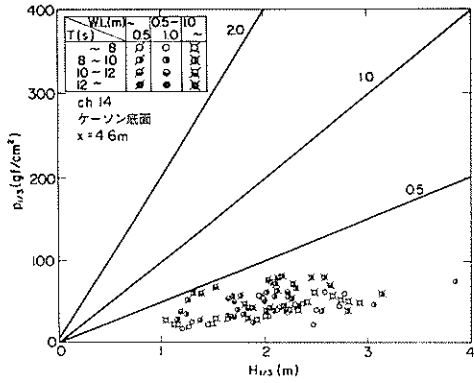


図-24(1) 1/3最大波圧 $p_{1/3}$
(ケーソン底面 460cm)

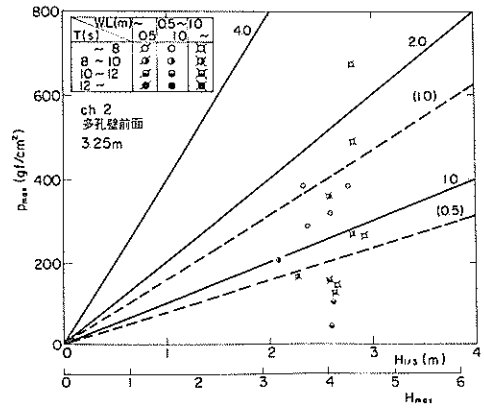


図-25(1) 最大波圧 p_{max}
(多孔壁前面 + 325cm)

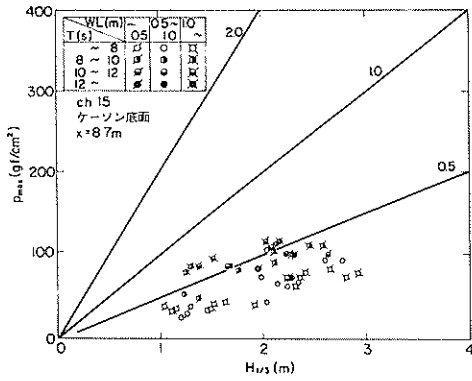


図-24(2) 1/3最大波圧 $p_{1/3}$
(ケーソン底面 870cm)

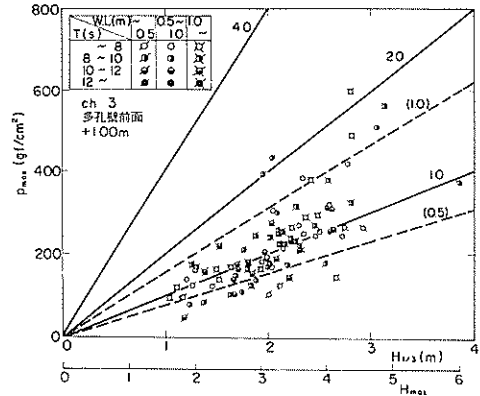


図-25(2) 最大波圧 p_{max}
(多孔壁前面 + 100cm)

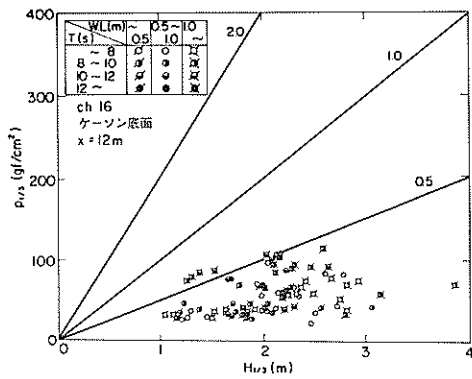


図-24(3) 1/3最大波圧 $p_{1/3}$
(ケーソン底面 1200cm)

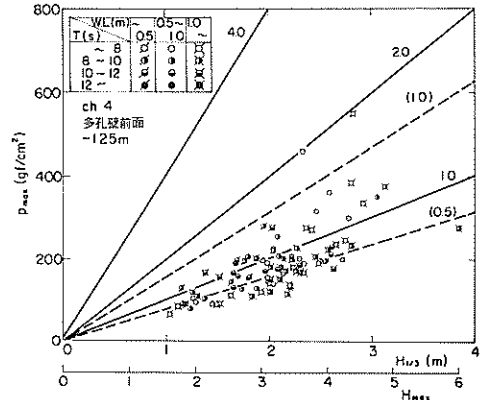


図-25(3) 最大波圧 p_{max}
(多孔壁前面 - 125cm)

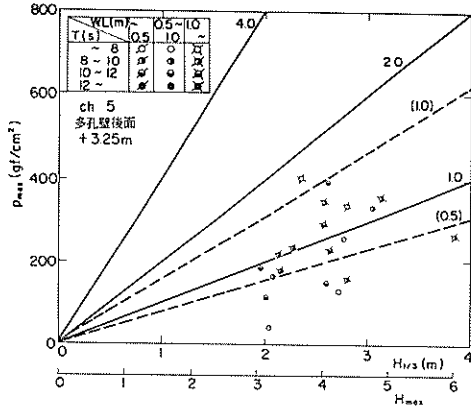


圖-25(4) 最大波圧 p_{max}
(多孔壁後面+3.25cm)

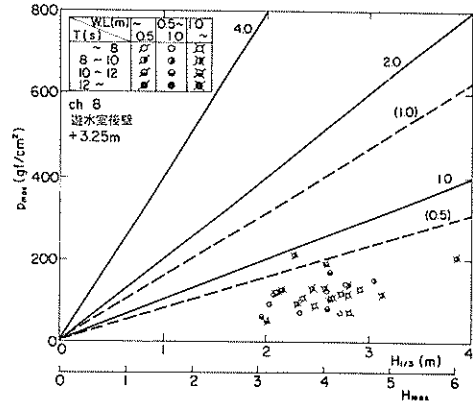


圖-25(7) 最大波圧 p_{max}
(遊水室後壁+3.25cm)

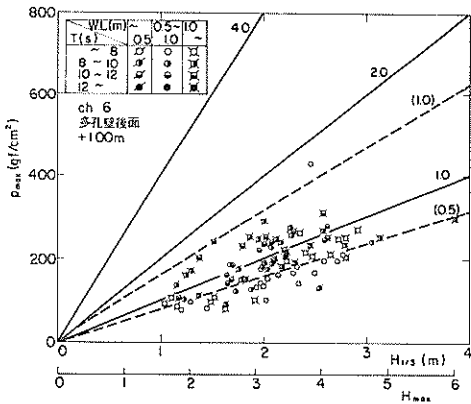


圖-25(5) 最大波圧 p_{max}
(多孔壁後面+100cm)

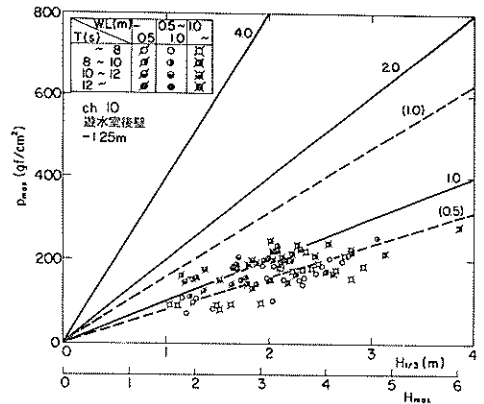


圖-25(8) 最大波圧 p_{max}
(遊水室後壁-1.25cm)

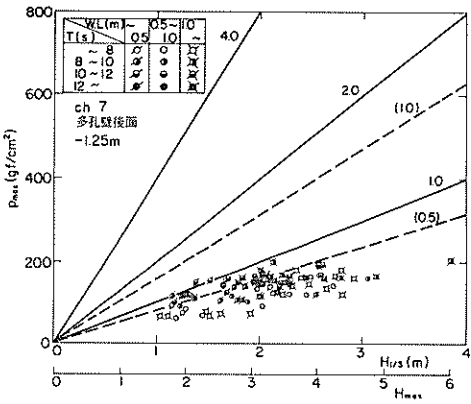


圖-25(6) 最大波圧 p_{max}
(多孔壁後面-1.25cm)

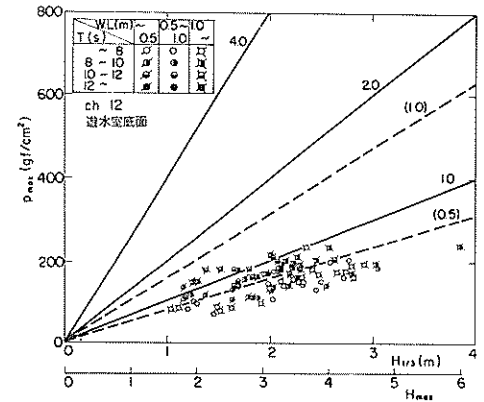


圖-25(9) 最大波圧 p_{max}
(遊水室底面中央)

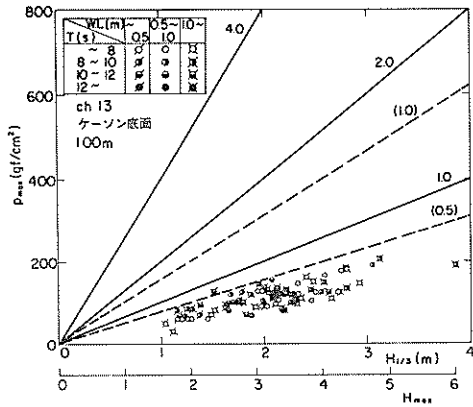


図-25(10) 最大波圧 p_{max}
(ケーンソソ底面 100 cm)

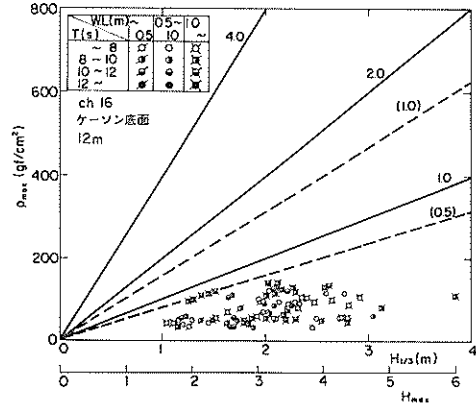


図-25(13) 最大波圧 p_{max}
(ケーンソソ底面 120 cm)

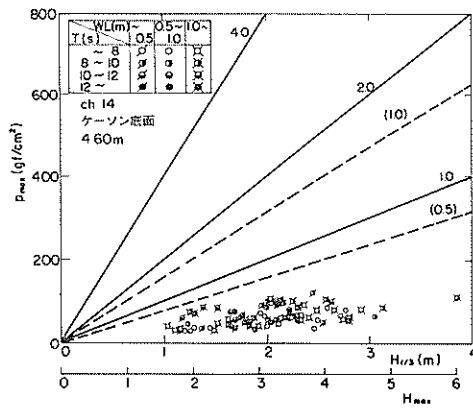


図-25(11) 最大波圧 p_{max}
(ケーンソソ底面 460 cm)

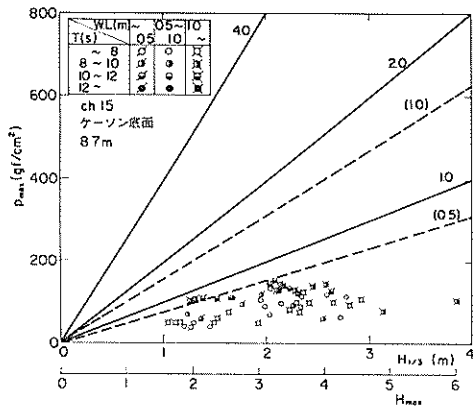
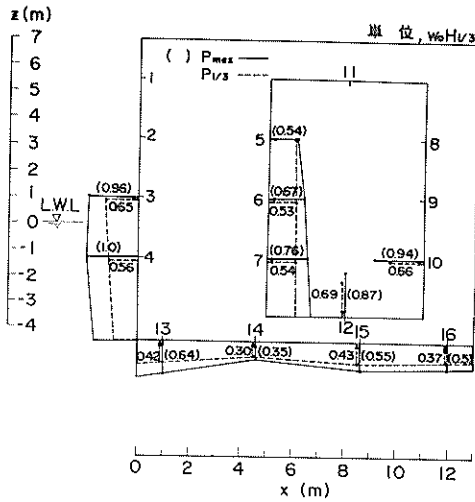


図-25(12) 最大波圧 p_{max}
(ケーンソソ底面 870 cm)

図-25(1)~(13)は同様に横軸に有義波高 $H_{1/3}$ をとって最大波圧 p_{max} を示したものである。横軸には 1.55 $H_{1/3}$ としたときの最高波高 H_{max} も示している。(2)は多孔壁前面+100 cm の場合であり、 p_{max}/H_{max} は 0.3 から 1.4 の間に広くばらつく。平均的には 0.65 であり、1.0 を越すものは H_{max} が 3 m 以上に限って現われることから、マウンドによって砕波した波が作用する場合の値と考えられる。1/3 最大波圧の場合と同じく、多孔壁

表-4 波圧の代表値 (データレコーダ収録)

	総波数	平均波圧 (周期)	1/3 最大波圧 (周期)	1/10 最大波圧 (周期)	最大波圧 (周期)	最大波圧時の波番号
多孔壁 前面+100	164	63 (5.85)	101	130	165 (4.8)	21
ケーンソソ 底面	134	34 (7.16)	52	65	80	20
後壁 -125	108	50 (8.89)	64	82	85	81
遊水室 底面	110	55 (8.73)	78	87	95	86
多孔壁 後面-125	107	42 (8.97)	60	70	85	42
波高	152	1.62 m (5.8)	2.26 (6.1)	2.74 (6.2)	3.14 (5.8)	
備考	昭和54年2月23日, 15時から16分間 単位: gf/cm ² (s)					



図一 26 (1) 波圧ピーク値の分布例 (昭和53年4月12日23時, $H_{1/3}=1.84\text{m}$, $T_{1/3}=8.0\text{s}$)

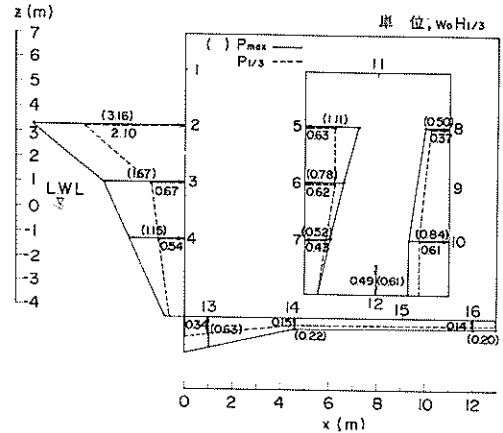
前面に比して遊水室内のしかも静水面下での測点ではばらつきが少ない。また、周期の短いものほど値が小さいようである。

(2) 波圧ピーク値の場所的分布

ここでは、 $H_{1/3}$ と $p_{1/3}$ 、 H_{max} と p_{max} の関係が場所的にどのように分布しているか述べる。

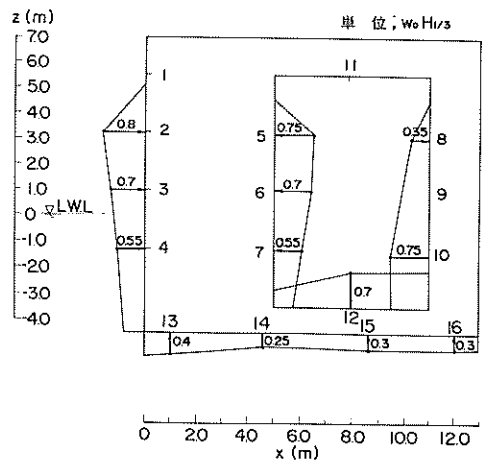
表一4はデータ・レコーダーに収録した昭和54年2月23日15時から16分間の記録における各測点の代表値を示したものである。合わせて同時観測の波高の代表値を示してある。多孔壁前面での1/3最大波圧 $p_{1/3}$ は $0.45 w_0 H_{1/3}$ であり、最大波圧 p_{max} は $0.73 w_0 H_{1/3}$ である。最大波圧が350m前方の最高波高と同じ波高で生じたとすると、最大波圧は $0.53 w_0 H_{max}$ となり、 $H_{max} = 1.55 H_{1/3}$ とすると $0.47 w_0 H_{max}$ となる。ケーソン底面における波圧は多孔壁前面+100cmでの値の半程度であり、遊水室内における波圧も多孔壁前面より小さい値となっている。

図一26(1)(2)は常置観測記録のなかから2例を選んで波圧のピーク値の場所的分布を例示したものである。図中点線は $p_{1/3}/w_0 H_{1/3}$ 、実線は $p_{max}/w_0 H_{1/3}$ の値を表わす。(1)は $H_{1/3} = 1.94\text{m}$ の場合であり、このとき $p_{1/3}/w_0 H_{1/3}$ は多孔壁前面+100cmで0.65、遊水室後壁-125cmで0.66であり、遊水室内と多孔壁前面とでそれほど差がない。しかしながら、最大波圧についてみると、遊水室内での最大波圧が、多孔壁前面よりやや小さくなっている。(2)は $H_{1/3} = 3.05\text{m}$ の場合で、常置

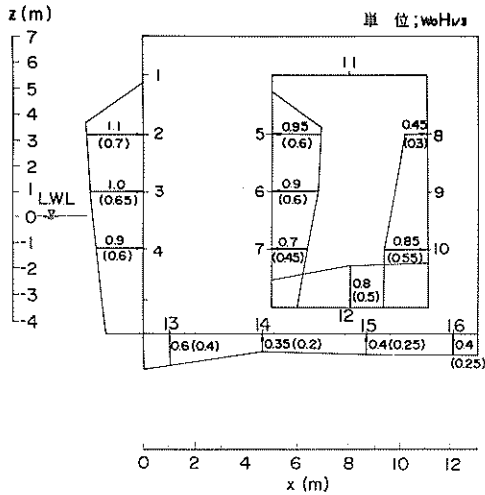


図一 26 (2) 波圧ピーク値の分布例 (昭和53年4月12日23時, $H_{1/3}=1.84\text{m}$, $T_{1/3}=8.4\text{s}$)

観測において多孔壁前面での波圧が最大を記録した場合である。1/3最大波圧は多孔壁前面+325cmで $2.0 w_0 H_{1/3}$ である。また、このときの最大波圧は $3.6 w_0 H_{1/3}$ であり、 H_{max} が $1.55 w_0 H_{1/3}$ であったとすると、 $2 w_0 H_{max}$ と相当大きく、多孔壁前面にかなり衝撃的な波圧が作用したものと推測される。この場合でも遊水室内の波圧は前の例に比べても大差なく、多孔壁前面に衝撃的な波圧が作用しても遊水室内の波圧はそれほど大きくならないようである。



図一 27 (1) 1/3最大波圧 $p_{1/3}$ の平均値 (常置観測)



図一27(2) 最大波圧 $p_{1/3}$ の平均値
(常置観測)

図一27(1)は常置観測の全データのうち $H_{1/3}$ 2~3m の範囲のデータを選んで、それぞれの $p_{1/3}/w_0 H_{1/3}$ の平均値の場所的な分布を示したものである。多孔壁前面の静水面付近でこの値は $0.7 w_0 H_{1/3}$ であり、遊水室内でもその大きさはあまり変わらない。ただし、遊水室後壁の下部で比較的大きいのが特徴的である。ケーソン底面では多孔壁前面下端とほぼ同じであるが、後端で0とはならなかった。

図一27(2)は同じく $p_{max}/w_0 H_{1/3}$ の平均値の分布を示したものである。多孔壁前面+100 cm で $1.0 w_0 H_{1/3}$ であり、遊水室内部では一般的にこれより小さい。()内に示した数値は H_{max} を $1.55 w_0 H_{1/3}$ としたときの $p_{max}/w_0 H_{max}$ の値である。この値と図一26(1)に示した $p_{1/3}/H_{1/3}$ の値と比較すると、多孔壁前面ではほぼ同じ値であるが、遊水室内では小さくなっている。これは、多孔壁前面で大きな波圧となる場合でも遊水室内部ではそれほど大きな波圧とはならないことを意味しており、前項でみた遊水室内の波圧ピーク値の分布範囲が狭いことと一致する。

なお、波を大きくかぶり、遊水室上床版に揚圧力が働く場合には、遊水室内に極めて大きな波圧が働くことがある⁴⁾ので注意を要する。今回の測定では、護岸の設置水深および構造の点から作用波高に制限があり、かつ天端がかなり高いためにそうした状態は生じていない。

5. まとめ

以上、鹿島港北海浜埋立地直立消波護岸の波圧観測データの解析結果を述べたが、これらをまとめるに以下のとおりである。

(1) 沖および波高観測地点から護岸へ至るまでの波の変形特性を屈折、回折および浅水変形の算定図表により調べた。鹿島港における沖波の卓越波向 NE~E に対して、護岸への入射角は 12° 以下となり、護岸法線にはほぼ直角に入射する波が多いと考えてよい。-9mの波高観測地点から護岸までの間の波の変形の主体は浅水変形であるが、有義波高4m以下の波に対しては、護岸位置における有義波高が最大5割程度大きくなるにすぎない。また、最高波高は有義波高が3m程度から砕波によって低下し始めるが、有義波高4m程度でも護岸位置における最高波高は-9m地点での最高波高の90割程度になるにすぎない。

(2) 本護岸構造ではマウンドが比較的広大であり、ケーソンにはマウンドによって著しく変形した波が作用する。そのため、マウンドによる波の変形を規則波実験で調べてみたが、のり尻における波高が3m程度以上になるとケーソンには巻波状の砕波が作用することがある。

(3) 一般に多孔壁式ケーソンの各部に働く波圧には位相差があり、波圧のピーク値はまず多孔壁前面、遊水室後壁および底面、多孔壁後面の順に現われる。ケーソンの外周における波圧と遊水室内における波圧は逆位相の場合が多いが、二つの連続した波が短い間隔で作用したときなど内外ではほぼ同時にピーク値を示すことがあり、各部における波圧の位相は入射する不規則波の波列特性によって著しく複雑に変化する。ただし、遊水室内における位相差は小さい。なお、今回の観測においては遊水室頂部に波圧が働いた例はない。

(4) データ・レコーダーで記録した一事例 ($H_{1/3} = 2.26$ m, $T_{1/3} = 6.1$ s, $W.L. = 0.89$ m) につき各壁面での波圧が最大となる時の同時波圧分布を調べた。水平合力が最大となるのは多孔壁前面における波圧が最大ときであり、多孔壁の見掛け面積に静水面上 $0.75 w_0 H_{max}$ の高さまで一様に働くとした場合の平均波力は $0.20 w_0 H_{max}$ 程度である。また、このときの鉛直力は底面に三角形分布で働くとした場合、前端において $0.33 w_0 H_{max}$ 程度となる。このように水平合力が比較的小さくなるのは、この場合、多孔壁に働く波力と遊水室内の各壁に働く波力の合力の方向が逆であり、一部相殺されることによる。しかし、(3)で述べたようにこうした波力の位相は入射する不規則波の波列特性によって変化し、これが同

方向になることもあり得る。また、この例は周期が短く、波高も比較的小さい場合の例である。ちなみに、常置観測データを用いて多孔壁前面に働く波圧のみについてであるが、平均波力強度を求めてみると(0.2~1.2) $w_0 H_{max}$ に分布しており、波の条件や潮位によっては本事例の結果よりはるかに大きな波力係数となることがあると考えなければならない。

(5) 各測点における波圧波形からゼロアップクロス法により波圧の波数を求めてみたが、波圧の波数は各測点によって異なる。一般に、波圧波数は多孔壁前面の静水面下において最も多く、遊水室内においては多孔壁による整波作用のため70%程度に減少する。静水面上においてはその高さにより波圧が作用したりしなかったりするため、遊水室内外ともに波圧の波数は小さくなる。

(6) 各測点における波圧ピーク値のひん度分布を調べたが、ケーソン外周の静水面下においてはレーリー分布に比較的良好一致する。しかし、遊水室内における波圧のひん度分布は幅が狭くなり、レーリー分布との一致度が悪くなる。

(7) 各測点における波圧の最大値と波高の関係を調べた。多孔壁前面の静水面付近においては $p_{max} = 0.4 \sim 1.5 w_0 H_{max}$ と潮位や波の条件によってばらつきが著しい。遊水室内においては、 p_{max} は $1.0 w_0 H_{max}$ 程度以下であり、ケーソン底面すなわち、揚圧力強度は $0.5 w_0 H_{max}$ 程度以下である。遊水室内では多孔壁前面が大きい場合でもそれほど大きくはならない。

6. あとがき

本資料において鹿島港北海浜埋立地直立消波護岸の波圧観測データの解析結果を示したが、これらは特定の構造を対象とし、水深、波浪など特定の条件のもとでの結果であることに留意されたい。今後、直立消波ケーソンの一般的設計指針を確立していくためには、さらに各種構造に対する水理模型実験結果や現地調査結果を集積し、検討していかなければならないと考えている。

なお、本解析はまえがきでも述べたように運輸省第二港湾建設局の要請を受けて実施したもので、資料の提供等に対し、鹿島港工事事務所および横浜調査設計事務所の協力を得た。これらの各関係各位に厚くお礼を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) Jarlan, G.E.: A perforated vertical breakwater, The Dock and Harbour Authority, Vol XII, No.486, 1961, pp.394~398
- 2) たとえば、谷本勝利:防波堤の耐波設計技術と新構造, 港湾, 第56巻第6号, 1979, pp.47~53
- 3) 谷本勝利:混成防波堤に作用する波力について, 昭和51年度港湾技術研究所講演会講演集, 1976, pp.1~26
- 4) 井島武士:遊水部をもつ護岸(防波堤)の反射率に関する実験(中間報告I), 直立消波工法の研究論文, 三省建設社, pp.43~46
- 5) 高橋智晴・佐々木徹也・金子大二郎・副島 毅:波浪に関する観測年報(昭和49年), 港湾技研資料, No.234, 1976, pp.304
- 6) 高橋智晴・佐々木徹也・広瀬宗一:波浪に関する観測年報(昭和50年), 港湾技研資料, No.258, 1977, pp.577
- 7) 高橋智晴・佐々木徹也・広瀬宗一:波浪に関する観測年報(昭和51年), 港湾技研資料, No.282, 1977, pp.
- 8) 高橋智晴・佐々木徹也・広瀬宗一:波浪に関する観測年報(昭和52年), 港湾技研資料, No.311, 1979, pp.682
- 9) 高橋智晴・広瀬宗一・夷塚葉子・佐々木徹也:波浪に関する観測年報(昭和53年), 港湾技研資料, No.332
- 10) 合田良実・鈴木康正:光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No.230, 1975, pp.45
- 11) 合田良実・鈴木康正・高山知司:不規則波に対する防波堤の回折図について, 第23回海岸工学講演会論文集, 1976年, pp.401~405
- 12) 合田良実:浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻第3号, 1975年, pp.59~106
- 13) Goda, Y.: Numerical experiments on statistical variability of ocean waves, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol.16, No.2, 1977, pp.3~26
- 14) 谷本勝利・高橋重雄・村永 努:直立消波ケーソンの上床版に働く揚圧力, 港湾技術研究所報告, 第19巻第1号, 1980, pp.3~31

主要記号表

d	:	マウンド上の水深
H	:	波高
\bar{H}	:	平均波高
$H_{1/3}$:	有義波高
H_{\max}	:	最高波高
h	:	水深
p	:	波圧, 波圧のピーク値
$p_{1/3}$:	1/3最大波圧
p_{\max}	:	最大波圧
p_n	:	平均波圧
T	:	波の周期
$T_{1/3}$:	有義波周期
W.L.	:	潮位
w_0	:	水の単位体積重量

港湾技研資料 No350

1980・6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 日青工業株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.