

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

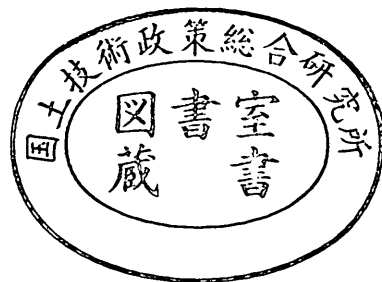
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 23

NO. 3

SEPT. 1984

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第23巻 第3号 (Vol.23, No. 3) 1984年9月 (Sept. 1984)

目 次 (CONTENTS)

1. Multiple Longshore Bars Formed by Long Period Standing Waves
..... Kazumasa KATOH..... 3
(反射定常波による多段沿岸砂州の形成.....加藤 一正)
2. 防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究
.....谷本勝利・高橋重雄・明瀬一行.....47
(Experimental Study of Random Wave Forces on Upright Sections of Breakwaters
..... Katsutoshi TANIMOTO, Shigeo TAKAHASHI and Kazuyuki MYOSE)
3. 共振振動三軸試験装置の開発と混合土の動的変形特性
.....善 功 企・梅原靖文・大根田秀明・樋口嘉章..... 101
(Development of Resonant-cyclic Triaxial Testing Apparatus and Dynamic
Deformation Characteristics of Mixtures
..... Kouki ZEN, Yasufumi UMEHARA, Hideaki OHNEDA and Yoshiaki HIGUCHI)
4. 波の繰り返し载荷を受ける粘性土地盤の安定性に関する実験的研究
.....大根田秀明・梅原靖文・樋口嘉章・入澤一明..... 127
(Experimental Studies on Model Clay Ground Subjected to Cyclic Wave Loading
..... Hideaki OHNEDA, Yasufumi UMEHARA, Yoshiaki HIGUCHI
and Kazuaki IRISAWA)
5. 水中の剛構造物の地震時滑動と動水圧の実験的研究
.....上部達生・檜垣典弘..... 153
(An Experimental Study on Sliding Block in Water during Earthquake
..... Tatsuo UWABE and Norihiro HIGAKI)
6. 座標式工程表による工程計画手法の開発
.....奥山育英・佐藤恒夫..... 187
(Time Space Scheduling Model
..... Yasuhide OKUYAMA and Tsuneo SATO)

7. 港湾経済効果の計測手法（第3報）——利用効果の帰属——
.....稲村 肇..... 235
(Measuring the Economic Benefits of Port Development
.....Hajime INAMURA)
8. 港湾工事の産業連関分析
.....稲村 肇・米澤 朗・高橋 淳弘..... 251
(The Economical Impact Analysis of Port Construction Works by Input-Output
Analysis.....Hajime INAMURA, Akira YONEZAWA and Atsuhiko TAKAHASHI)

2. 防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究

谷本勝利*・高橋重雄**・明瀬一行***

要 旨

防波堤の直立部に働く不規則波力の特性を波圧測定実験により調べた。

実験はシリーズI, II, IIIの三つに大別される。まず、シリーズのIの実験は低マウンド混成堤直立部に働く不規則波力の統計的性質等を、同一スペクトルを目標として作成した20種の波群を作用させて調べたものである。その結果、波力の相対度数分布は、強い砕波が作用しないような条件においては、波高・周期の結合分布に合田式を適用することによってほぼ推定できること、また波高と同様に定義した波力の代表値(最大波力、1/10最大波力、有義波力等)についても、代表波の諸元を用いて合田式によりほぼ推定できること等が明らかとなった。しかし、砕波が作用するような条件においては、特に最大波力の変動性が高く、合田式による計算値よりはるかに大きい波力が生じることがある。

シリーズIIの実験はマウンド高による不規則波力の変化を調べたもので、異常に大きい衝撃砕波力の発生の危険性は規則波より不規則波の作用において高いことが明らかになった。これは不規則波の波形は1波1波種々雑多であって、比較的低マウンドであっても波列によっては強い砕波が生じる可能性があることによると推測される。

シリーズIIIの実験は消波ブロックを被覆したときの直立部に働く不規則波力の特性を調べたもので、この場合は砕波、非砕波にかかわらず、合田式を準用する方法において波圧低減係数を1.0として計算すれば、波力の相対度数分布、代表波力ともにはほぼ推定できることが明らかとなった。

以上は不規則波力のピーク値(1波ごとの最大値)に着目してその特性をとりあえずとりまとめたものである。大きい波力は非常に衝撃的性格を帯びかつ変動性が高い性質を有している。そうした不規則波力をどう一般的に表示するか、さらにはそうした不規則波力を設計においてどう評価するかは今後検討すべき課題である。

* 水工部 防波堤研究室長

** 水工部 主任研究官(防波工担当)

*** 水工部 波エネルギー研究室

2. Experimental Study of Random Wave Forces on Upright Sections of Breakwaters

Katsutoshi TANIMOTO*

Shigeo TAKAHASHI**

Kazuyuki MYOSE***

Synopsis

Random wave forces on the upright sections of breakwaters have been investigated by hydraulic model tests in a wave flume with the aid of pressure transducers.

The tests are classified into three major series. In the first test series, random wave forces on the upright section of a low mound composite breakwater were measured repeatedly under the actions of twenty different trains of random waves, and the statistical properties of the peak intensities of random wave forces were analyzed. These twenty wave trains were generated by the respective control signals of different sequences under the same target wave spectrum. The test results demonstrate that, in case of non-breaking waves, the distribution of the peak intensities can be predicted fairly well by the application of Goda's formula to the joint distribution of wave heights and wave periods, and the representative wave forces (maximum wave force, 1/10 maximum wave force and significant wave force) defined as the same way for the wave heights can also be predicted fairly well by the application of Goda's formula to the corresponding representative wave height and period. In case of breaking waves, however, the variability of the maximum wave force is particularly high and frequently the measured maximum forces far exceed the value predicted by Goda's formula.

In the second test series, the variation of the random wave forces was investigated for the four different thicknesses of the rubble mound foundation. The test results indicate that the wave forces are greatly increased when the crest level of the rubble mound foundation becomes high. This fact suggests that the shock pressures of high intensity are more liable to be caused by the action of random waves than the action of regular waves, even if the rubble mound foundation is relatively low. The enhancement of high pressures may be induced by the situation such that the individual wave shape in the random waves is so changeable that more typical plunging breaking waves are caused in the action of random waves.

In the third test series, the characteristics of random wave forces on the upright section covered with wave dissipating concrete blocks were investigated. According to the test results, the distribution of the peak intensities of representative wave forces can be predicted fairly well by the application of modified Goda's formula, in which the pressure factor α_2 sets equal to zero, for both conditions of non-breaking and breaking waves.

* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

*** Member of Wave Power Laboratory, Hydraulic Engineering Division

目 次

要 旨	47
1. ま え が き	51
2. 実験の方法	51
2.1 実験水路および波高測点	51
2.2 実験の種類および実験条件	52
2.3 波力の測定および解析法	53
3. 不規則実験波の特性	55
3.1 不規則波の発生および解析法	55
3.2 実験波の種類とスペクトル	56
3.3 不規則波の変動性	57
3.4 波高および周期の分布	58
3.5 実験波諸元の決定	64
4. 不規則波力の統計的性質	70
4.1 波圧・波力の時間変化の例	70
4.2 波力の相対度数分布	70
4.3 有義波力の変動と代表波力比の相対度数分布	72
4.4 代表波高と代表波力の関係	73
4.5 同時波圧分布	75
5. マウンド高による不規則波力の変化	76
5.1 波力の時間変化と相対度数分布の例	76
5.2 代表波力	76
5.3 同時波圧分布の例	81
5.4 衝撃砕波力の発生危険範囲との比較	81
6. 消波ブロックを被覆したときの不規則波力	83
6.1 波力の時間変化と相対度数分布の例	83
6.2 代表波力	84
6.3 同時波圧分布	84
6.4 波力低減係数	96
7. む す び	97
参 考 文 献	98
主要記号一覧表	98

1. まえがき

防波堤の直立部に働く設計波力は合田式によって算定するのが標準である。¹⁾ この算定式は規則波実験結果に重複波圧の理論的特性や現地への適用性等を考慮して合田²⁾ によって提案されたものであり、設計計算に用いる波の諸元として最高波の諸元を適用することによって、現地の波の不規則性に対処している。

この合田式を適用することによって、防波堤直立部に働く波力は相当程度合理的に算定できるようになったが、たとえば現行設計法における安全率の評価や耐用期間と遭遇確率の選び方等を定量的に論じようとすれば、さらに不規則波力の統計的性質やその表示法、直立部変形の推定法等を明らかにしなければならない。こうした方向での研究は既に伊藤ほか³⁾ によって試みられたところであるが、不規則波の取り扱いや実験技術が格段に進歩した現在、これを改めて見直すことも必要であると考えられる。

本研究は、以上のような背景にあって、まず防波堤の直立部に働く不規則波力の実験によって明らかにすることを目的として実施したものである。

2. 実験の方法

2.1 実験水路および波高測点

実験に用いた水路は中型平面水槽(30m×20m×1m)の一部を幅5mで仕切った仮設水路で、図-1に示して

いるように、その中にさらに幅50cmの水路が設けてあり、堤体模型はこの内水路の中に設置する。造波機は低慣性直流電動機で駆動する可搬式ピストン型で、入力信号の波形に追従して任意波形の波を造波することができる。造波板の幅はほぼ外水路の幅一杯の4.8mであり、内水路の側壁は造波板の中立位置から6.6m地点に始まる。このように、内水路始点と造波板の間に距離を設けてあるのは、内水路に設置する模型構造物からの反射波を分散させ、造波板からの再反射波の影響を軽減させるためである。

堤体模型設置位置付近の内水路壁片面は長さ約3mにわたり観測用ガラス窓としており、その外側は止水壁で囲んである。水路床は造波板中立位置から7.6~12.6mの5m区間を1/100勾配、つづいて17.6mまでの5m区間を3/100勾配としてあり、残りの部分は水平床である。水路の終端および観測窓囲い壁の前部は碎石を模型消波ブロックで被覆した消波斜面としてある。この消波斜面の平均勾配は1:3程度である。

前出の図-1には堤体設置位置と波高測点もあわせて示してある。模型堤体は直立部前壁が造波板中立位置から18.5m地点となる所に設ける。波高は容量式波高計を用いて、堤体を設置する以前の状態で沖側2点(No.1, No.2)、岸側4点(No.3~No.6)の合計6点で測定した。このうち、沖側のNo.1, No.2は造波板中立位置から10.5m地点を中心として、間隔 Δl だけ離して設けたもので、堤体設置後においても常置し、入・反射波の分離

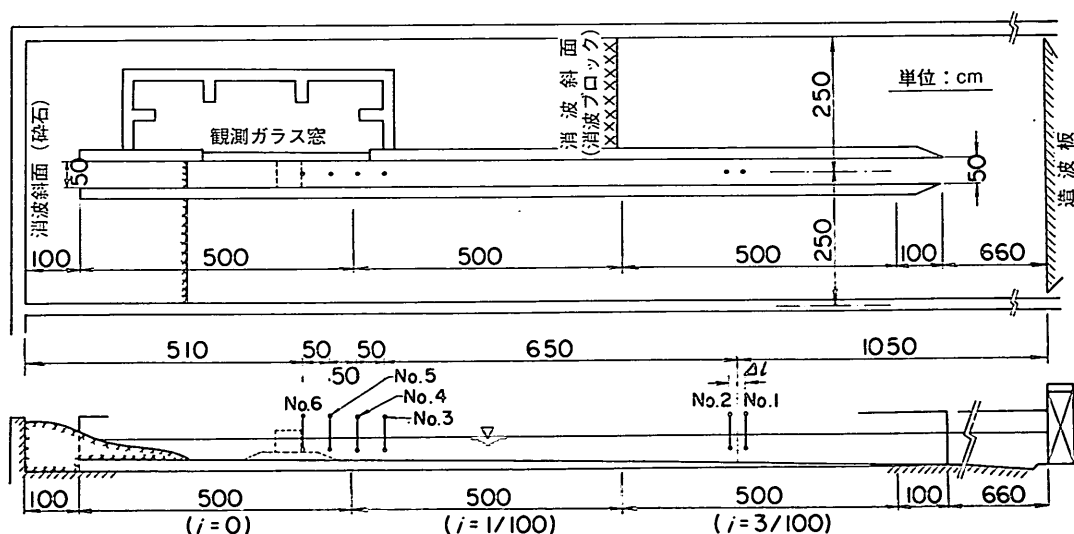


図-1 実験水路および波高測点

表-1 実験の種類と実験条件

実験の種類	構造条件		波 浪 条 件					
	消波ブロック被覆	h'/h	波 種	$h/L_{1/3}$ (平均値)	$H_{1/3}/h$			
シリーズ I	無	0.600	B波 (B1~B20)	0.102	0.233	0.373	0.483	0.520
シリーズ II	無	0.850	A波 (A1~A3)	0.136	0.235 ~0.258	0.355 ~0.385	0.413 ~0.438	0.465 ~0.480
		0.600	B波 (B1~B3)	0.102	0.220 ~0.240	0.363 ~0.390	0.478 ~0.493	0.520
		0.475	C波 (C1~C3)	0.0852	0.228 ~0.248	0.360 ~0.393	0.473 ~0.493	0.535 ~0.540
		0.350						
シリーズ III	有	0.850	A波 (A1~A3)	0.136	0.220	0.345	0.413	0.460
		0.350	B波 (B1~B3)	0.102	0.203	0.348	0.468	0.515
			C波 (C1~C3)	0.0852	0.210	0.360	0.468	0.535

構造条件のうち、 $h=40\text{cm}$ 、 $h_c=11\text{cm}$ は一定

に用いるものである。この設置間隔 Δl は入射波の周期に応じて適当に変化させる。岸側の No.3~No.6 は堤体位置付近での波高を調べるもので、No.6 を直立部前壁予定位置に設け、沖側に 50cm 間隔で配したものである。

2.2 実験の種類および実験条件

今回の実験は、表-1 に総括しているように、シリーズ I, II, III の三つに大別される。このうち、シリーズ I の実験は混成堤直立部に働く不規則波力の統計的性質を、条件を限定して、やや詳細に調べたものである。対象とした堤体断面は図-2 に示した一種で、水深(h)が 40 cm の水路床上に砕石で厚さ(h_M)16cm のマウンドを成形し、その上に幅(B)50cm、高さ(l)45cm のステンレス鋼製の直立部を据付け、基面水深(h')を 24cm、静水面上天端高(h_c)を 11cm としたものである。実際の混成堤では、マウンド被覆工や根固めブロックが施工され、これらの天端上の水深を d と表記し、基面水深と区別するが、ここではマウンドを金網で覆い被覆工を省略している。したがって、 $d=h'$ の条件である。また、マウンド前肩幅(B_M)は 25cm、のり(法)勾配は 1 : 2.5 である。

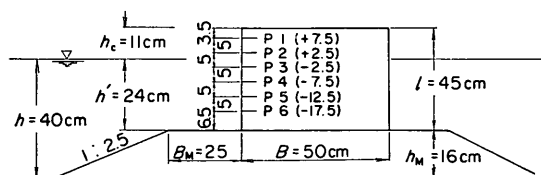


図-2 シリーズ I の堤体断面と波圧計位置

図-2には波圧計の取り付け位置も示してある。波圧計 (P1~P6) は前壁にのみ取り付けられており、() 内の数値は静水面を原点とした取り付け高さを表している。また、表-1には波の条件も示してある。これらについては3.で詳述するが、シリーズ I の実験ではB波のみ対象とし、同一スペクトルを目標として作成した20種の波群 (B1~B20) を作用させた。このB波の相対水深 $h/L_{1/3}$ は波高レベルにより0.0963~0.107の間で変化し、平均は0.102である。また、相対波高 $H_{1/3}/h$ は0.233, 0.373, 0.483, 0.520の4種である。ここに、 $L_{1/3}$ は有義波波長、 $H_{1/3}$ は有義波高を表す。

シリーズ II の実験はマウンド高による不規則波力の変化を調べたもので、 h_M したがって h' のみを $h'/h=0.85, 0.6, 0.475, 0.35$ の4種類になるように変化させた。このうち、 $h'/h=0.6$ の条件はシリーズ I の構造条件と同一で、他の3種の条件の堤体断面と波圧計位置は図-3に示したとおりである。波圧の測定は $h'=34\text{cm}$, 24cm の条件では6点、 $h'=19\text{cm}$ の条件では5点、 $h'=14\text{cm}$ の条件では4点である。波浪条件は前出の表-1に示しているように、A波 ($h/L_{1/3}=0.136$), B波 ($h/L_{1/3}=0.102$), C波 ($h/L_{1/3}=0.0852$) の3種についてそれぞれ3波群ずつを作用させた。また、波高はそれぞれ4種に変化させている。

シリーズ III の実験は前面を消波ブロックで被覆したときの直立壁に働く不規則波力を調べたもので、図-4に示しているように、低マウンド ($h'/h=0.85$) と高マウンド ($h'/h=0.35$) の2種の断面を対象とした。いずれ

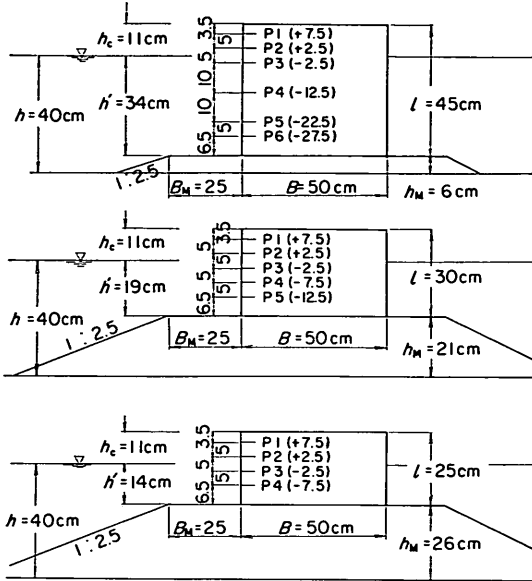


図-3 シリーズIIの堤体断面と波圧計位置。
($h_M = 16\text{cm}$, $h' = 24\text{cm}$ の条件は図-2と同じ)

も、空隙率50%、重量743gfの異型消波コンクリートブロックで乱積み被覆したもので、表層天端幅 (B_B) は16cm、のり勾配は1:4/3である。このシリーズIIIの波浪条件は、表-1に示しているように、シリーズIIと同じであるが、反射率の違いによって水路における造波板からの反射波の影響が若干異なるため、 $H_{1/3}/h$ の値が少し変わっている。

2.3 波力の測定および解析法

本実験においては、既に述べたように、直立部前壁に働く波力を波圧計を用いて測定する手法を採用している。図-5はその測定および解析のハードウェアを示したものである。用いた波圧計は受圧面の内径が2.45cm、定格200gf/cm²、水中での固有振動周期 T_N が1.25ms、

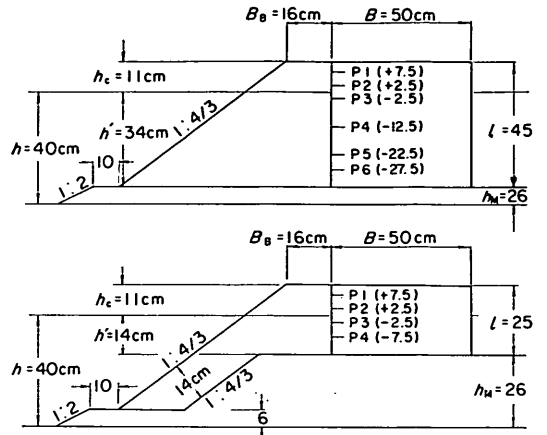


図-4 シリーズIIIの堤体断面と波圧計位置

減衰定数 β が0.008のもの（共和電業社製PG-200GD）である。実験時においては、この波圧計を動わず測定器に接続し、データレコーダに記録する。

今回の実験においては、測得データの解析はオフラインで行っている。波圧データ解析に際しては、データレコーダの出力をローパスフィルターに通し、不規則波実験解析装置 (DS-600) で処理する。衝撃碎波圧が生じる条件に対しては応答-入力変換器⁴⁾を通して解析するのが一般的であるが、今回の結果に対してはピーク値に関する限りこれを通して結果にそれほど違いがないので省略している。ただし、波形を見る際にはピーク後に現れる波圧計の固有振動を除去するため適宜これを用いている。

図-6はDS-600を用いた波圧解析プログラムのフローを示している。これによって、アナログデータをデジタルデータに変換し、ゼロアップクロスによる波別の識別を行い、各波圧および合波力のピーク値の統計解析結

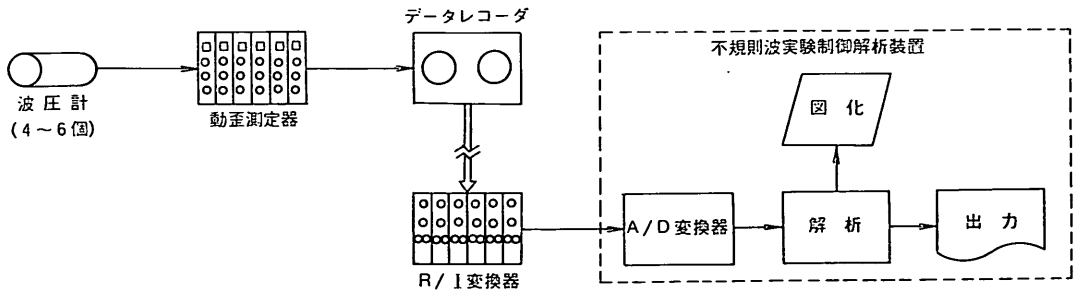


図-5 波圧測定および解析のハードウェア

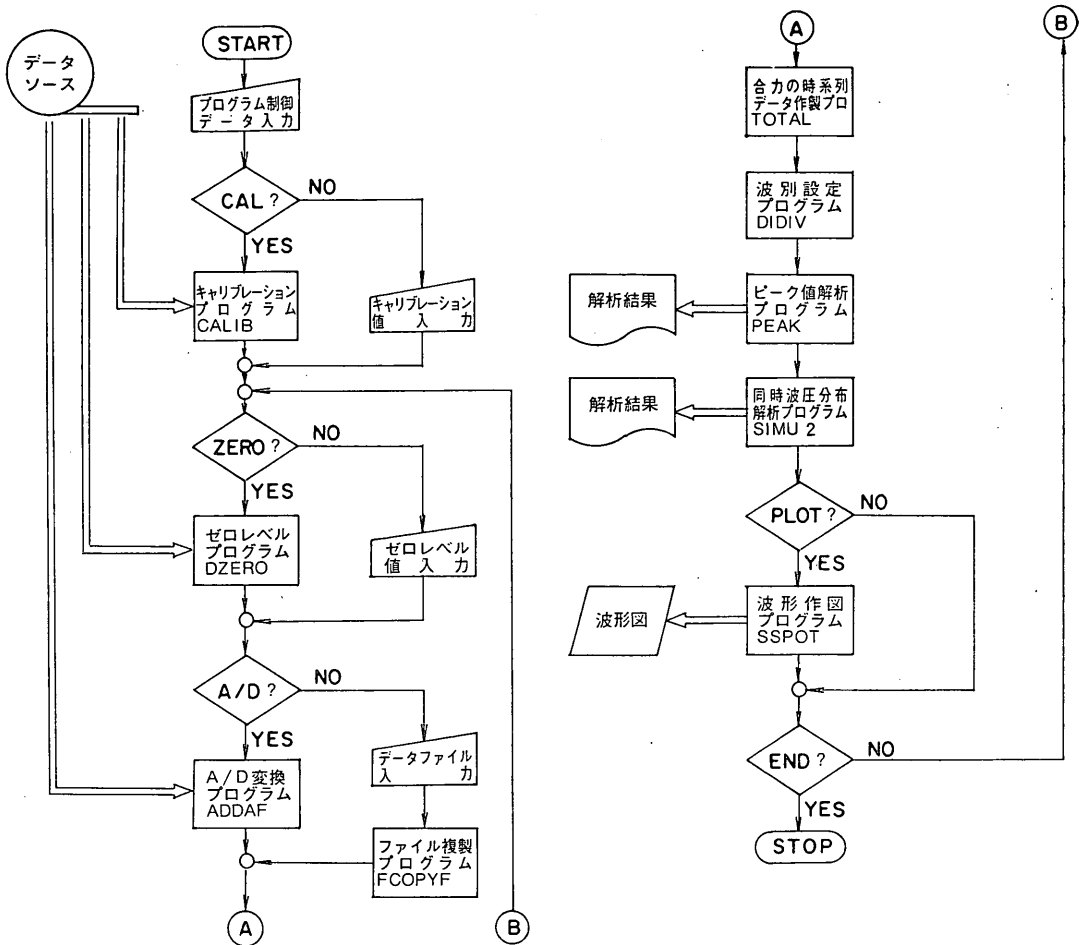


図-6 波圧解析プログラムのフロー

果、同時波圧分布、波圧・波力の時間変化などを得ることができる。ここに、波別の識別は直立壁前面での水位波形を入力して、これによって行うことも可能であるが、今回の解析では合力の波形から識別した。その際、衝撃波圧が作用するときなど、ゼロ線を横切る振動が生じる場合、これを1波と識別しないように適当な最小周期を与えて処理している。また、波力波形の波数は一般に波の波数と異なるので、波力の解析時間を波の平均周期で除して求められる波数を別に入力してこれを基準とした。したがって、波の波数と波力波形における波数の差だけ、大きき0の波力が付加されることになる。これについては後でも述べる。

直立壁に働く波圧の合力は、図-7に示しているように階段状に近似して、次式により求めた。

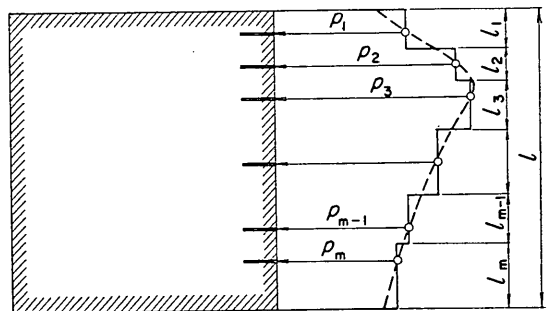


図-7 波圧合力の算定法

表-2 波圧解析上の諸値

実験シリーズ	h'/h	波種	e (V)	f_c (Hz)	Δf (Hz)	データ数	実験シリーズ	h'/h	波種	e (V)	f_c (Hz)	Δf (Hz)	データ数
I, II	0.850	A	0.15	20	120	32,768	I, II	0.475	A	0.15	100	600	172,032
			0.24	100	600	172,032				0.24	100	600	172,032
			0.31	300	1800	548,864				0.31	300	1800	548,864
			0.41	300	1800	565,248				0.41	300	1800	565,248
		B	0.16	20	120	40,960			0.16	20	120	40,960	
			0.26	100	600	221,184			0.26	100	600	221,184	
			0.38	300	1800	688,128			0.38	300	1800	688,128	
			0.50	300	1800	729,088			0.50	300	1800	729,088	
		C	0.21	20	120	49,152			0.21	100	600	262,144	
			0.33	100	600	262,144			0.33	100	600	262,144	
			0.45	300	1800	819,200			0.45	300	1800	819,200	
			0.69	300	1800	925,696			0.69	300	1800	925,696	
	0.600	A	0.15	20	120	32,768		0.350	A	0.15	300	1800	491,520
			0.24	100	600	172,032				0.24	300	1800	516,096
			0.31	300	1800	548,864				0.31	300	1800	548,864
			0.41	300	1800	565,248				0.41	300	1800	565,248
		B	0.16	20	120	40,960			0.16	300	1800	638,976	
			0.26	100	600	221,184			0.26	300	1800	638,976	
			0.38	300	1800	679,936			0.38	300	1800	688,128	
			0.50	300	1800	729,088			0.50	300	1800	729,088	
		C	0.21	20	120	49,152			0.21	300	1800	761,856	
			0.33	100	600	262,144			0.33	300	1800	761,856	
			0.45	300	1800	819,200			0.45	300	1800	819,200	
			0.69	300	1800	925,696			0.69	300	1800	925,696	
III	0.850	A	0.15~0.41	50	300	81,920~90,112							
	0.350	B	0.16~0.50	50	300	106,496~122,880							
		C	0.21~0.69	50	300	131,072~155,648							

$$P = p_1 l_1 + p_2 l_2 + \dots + p_m l_m \quad (1)$$

ここに、 P は合力、 p_1, p_2, \dots, p_m は各測点での波圧強度、 l_1, l_2, \dots, l_m はそれぞれの測点が代表する作用高さである。このように階段状に近似したときの誤差は測点の間隔が密であれば小さい。

波圧解析において実際に用いたローパスフィルターのカットオフ周波数、サンプリング時間間隔等は表-2に示したとおりである。これはノイズの除去や衝撃圧に対するピーク値の変化を考慮して定めたものである。表中、 e は後述する不規則実験波の基準入力電圧、 f_c はローパスフィルターのカットオフ周波数、 Δf はデータのサンプリング周波数である。

3. 不規則実験波の特性

3.1 不規則波の発生および解析法

本実験に用いた不規則波の入力信号は次のように作成した。まず、白色雑音発生器で白色雑音を発生させ、これを所定のかたちとするためあらかじめ計算で得た値を用いて、バンドパスフィルターの目盛りを設定することにより修正し、データレコーダに記録する。その際、同一目盛りで何種類かの波群の信号を作成する。実際の造波機への入力信号は、所定の周期を得るために2台のデータレコーダを用いて、これを速度変換したものである。造波機への入力に際しては、これをカットオフ周波数を20Hzとしたローパスフィルターに通し、波高はこ

のローパスフィルターの増幅度を調整して、入力基準電圧 e を変えることにより変化させた。

発生波の解析は水位記録をデータレコーダに収録し、これをオフラインで 160m 長水路に常置してある不規則波実験制御解析装置 (NOVA 4)⁵⁾ にかけることによって行った。

3.2 実験波の種類とスペクトル

(1) 入力信号のスペクトル

実験波は既に述べたように、3種類の周期を目標としたもので、周期の短い波からA波、B波、C波と呼んでいる。それぞれ 300 波程度の長さの波群を、A波については3種類 (A1~A3)、B波については20種類 (B1~B20)、C波については3種類 (C1~C3) 作成した。これらの波群はそれぞれ目標とするスペクトルは同じで、成分波の位相のみ異なるものである。

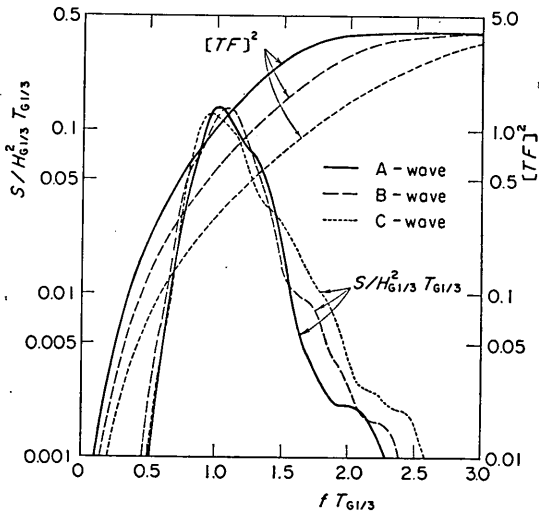


図-8 入力信号のスペクトルと造波特性関数 ($h_G=60\text{cm}$)

図-8は3種の入力信号の平均スペクトルを示したものである。ただし、スペクトル密度、および周波数は入力信号を通常の水位記録と見なしたときのゼロアップクロス解析で得られる見掛けの有義波高 $H_{G1/3}$ 、有義波周期 $T_{G1/3}$ を用いて無次元化してある。図中、参考のために微小振幅造波理論⁶⁾ から得られるピストン型に対する造波特性関数の2乗 (TF^2) の値も示してある。発生波のスペクトルは、理論的には、入力信号のスペクトルにこれと機械特性関数の2乗を乗じたものとなる。

(2) 発生波のスペクトル

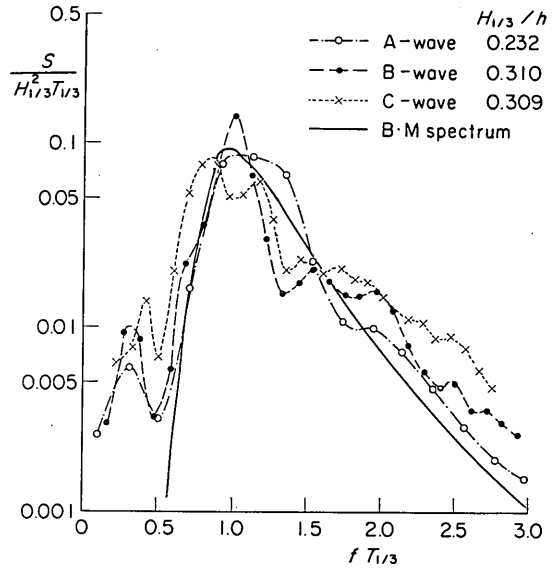


図-9 実験波のスペクトル ($h=51.3\text{cm}$)

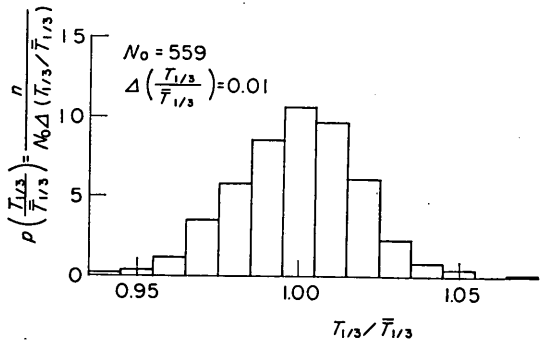
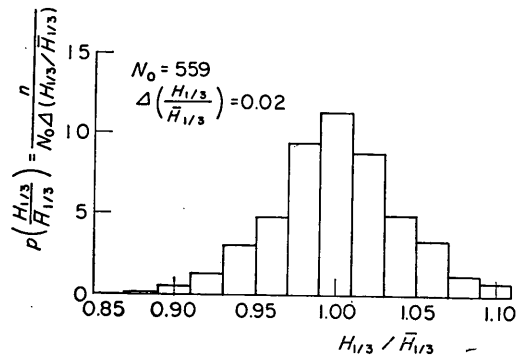


図-10 有義波高および有義波周期の分布 (B1~B20, No. 6, $e=0.1\sim 0.5\text{V}$)

発生波のスペクトルを図-9に示す。これはA波については $H_{1/3}/h=0.232$ 、B波については $H_{1/3}/h=0.310$ 、C波については $H_{1/3}/h=0.309$ の条件での測点 No.1, 2 ($h=51.3\text{cm}$) で得られた各波群のスペクトルを平均したものである。入力信号作成において目標とした Bretschneider・光易型のスペクトルもあわせて示してあるが、実現波のスペクトルは幅がやや広い傾向にあることが知られる。

3.3 不規則波の変動性

(1) 有義波高および有義波周期の変動性

ある長さの記録に対する有義波高や有義波周期は、波の不規則性に起因する統計的性質のため、変動することが知られている。ここでは、B波を対象として、これらがどの程度変動するものであるかを調べておく。

図-10はB1~B20に対し、測点No. 3~No. 6から求めた有義波高と有義波周期の相対度数分布を示したものである。図中、 $\bar{H}_{1/3}$ および $\bar{T}_{1/3}$ は各入力基準電圧 e ごとに、20種の波群に対して4測点で得られた有義波高および有義波周期の平均値である。入力基準電圧 e は0.1~0.5Vの範囲で7種に変化させている。したがって、データ総数 N_0 は $20 \times 4 \times 7 = 560$ 個であるが、1ケースだけトラブルによって解析不能であったので、総数は559となっている。横軸は $\bar{H}_{1/3}$ あるいは $\bar{T}_{1/3}$ で無次元化し、縦軸は相対度数 n/N_0 を分割幅 $\Delta(H_{1/3}/\bar{H}_{1/3})$ あるいは $\Delta(T_{1/3}/\bar{T}_{1/3})$ で割って確率密度のかたちにしてある。これによると、 $H_{1/3}/\bar{H}_{1/3}$ は0.87~1.11、 $T_{1/3}/\bar{T}_{1/3}$ は0.94~1.05の範囲に分布し、標準偏差 σ はそれぞれ0.03および0.020である。

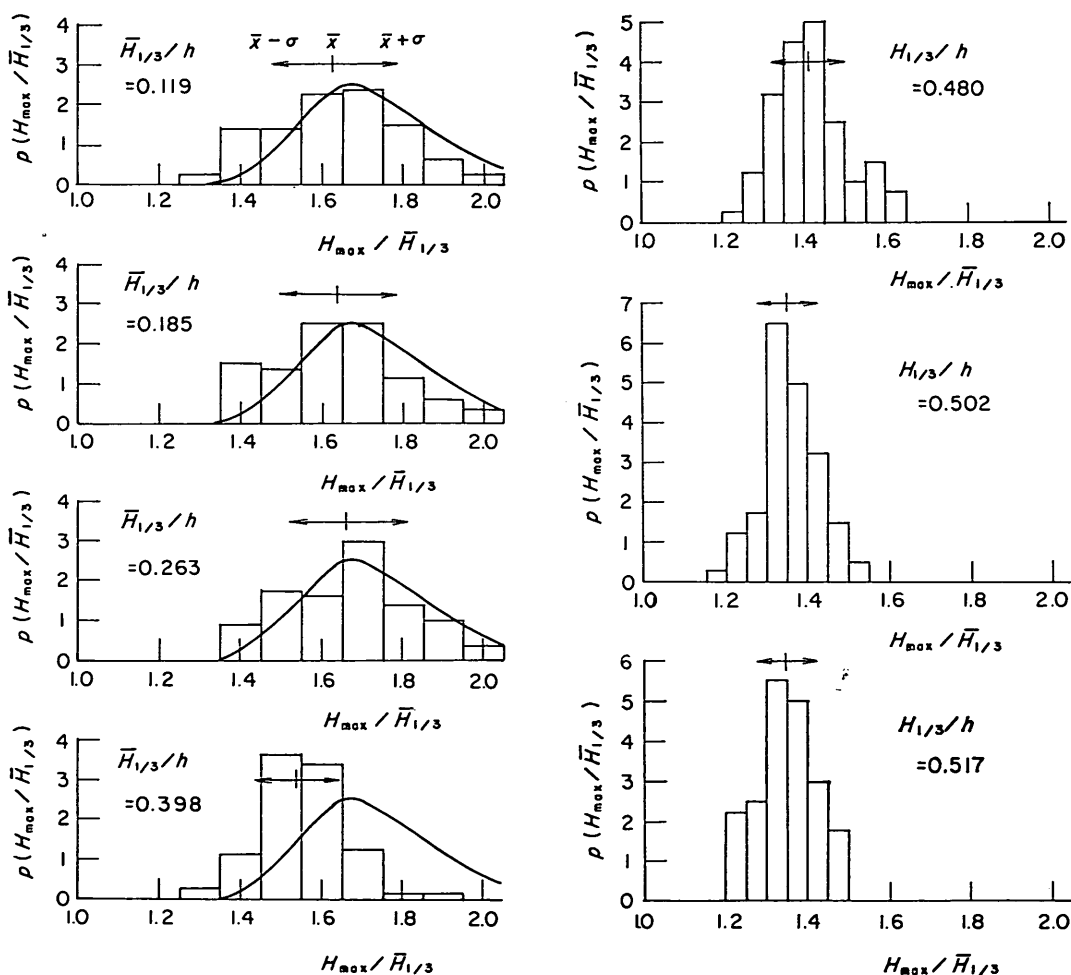


図-11 最高波高の分布 (B1~B20, No. 3~6, $N_0=80$)

こうした波浪の統計的変動特性に関して合田⁷⁾が数値実験によって調べている。今回の実験における1波群の平均波数 N_w は251波であるので、これに対する数値実験による標準偏差を図から外そうして読みとると、 $H_{1/3}/\bar{H}_{1/3}$ に対して0.035、 $T_{1/3}/\bar{T}_{1/3}$ に対して0.022程度であり、今回の実験結果とよく一致している。ただし、数値実験による結果は方向スペクトル波に対するもので、波高がレーリ分布するときの無作為抽出によって求めた $H_{1/3}/\bar{H}_{1/3}$ の標準偏差は0.032となっている。

(2) 最高波高の変動性

最高波高は波群そのものの変動性のほかに、たとえ $H_{1/3}$ が同じであっても、波形記録が違えば H_{max} の値は皆異なるという基本的性質を有している。そのため、不規則波の代表波高の中でも、最高波高は特に変動性が高い。しかも、砕波帯内においては砕波限界波高によって規制されるので、 $H_{1/3}/h$ の値によってもその分布が異なることになる。

図-11 はB波について、各入力基準電圧すなわち $\bar{H}_{1/3}/h$ ごとに、 $H_{max}/\bar{H}_{1/3}$ の相対度数分布を示したものである。図中、 $H_{max}/\bar{H}_{1/3}$ の平均値 (\bar{x}) と平均値±標準偏差 ($\bar{x} \pm \sigma$) も示してあるが、これらの平均値と標準偏差の値は表-3に示したとおりである。また、図中の曲線は波高がレーリ分布であるときの、波数 $N_w=251$ に対する $H_{max}/H_{1/3}$ の確率密度の理論値⁸⁾ である。これらの結果から、 $H_{max}/\bar{H}_{1/3}$ の平均値は $H_{1/3}/h=0.119 \sim 0.263$ では1.626~1.664で大差ないが、 $H_{1/3}/h \geq 0.398$ では $H_{1/3}/h$ の値が大きくなるにつれて小さくなり、また変動の幅も小さくなる傾向にあることが明らかである。これは砕波の影響を受けるためであり、ちなみに合田による不規則波の砕波変形理論⁹⁾ を用いて計算した $H_{max}/H_{1/3}$ の平均値は表-3の最右欄のようになる(海底勾配1/100、波数251)。これと実験による平均値を比較すると、 $H_{1/3}/$

h が大になるにつれて小さくなる傾向は一致しているものの、実験値が理論値の0.92~0.95倍とやや小さいことが知られる。

3.4 波高および周期の分布

(1) 波高の相対度数分布

不規則波の波高分布は、砕波の影響を受けないところでは、レーリ分布にはほぼ一致することが知られているが、ここでは実験波についてその分布を調べてみる。

図-12~14 はA波、B波、C波について、それぞれ4種の波高条件の有義波高を基準とした相対度数分布を示したものである。いずれも3種の波群(A1~A3、B1~B3、C1~C3)による波高測点No.3~No.6での結果を平均したものである。図中、あわせて合田による砕波変形理論⁹⁾ を用いて計算した分布曲線も示してある。 $H_{1/3}/h$ が小さい条件では、この理論分布はレーリ分布を表しているが、実験波の分布はこれとかなり一致している。

$H_{1/3}/h$ の値が大きくなるにつれて、砕波による波高の制限の影響を受けるため、実験値および理論値ともに分布幅が狭くなる傾向にある。しかし、両者を比較すると、この傾向は実験値のほうがより顕著で、たとえば $H_{1/3}/h=0.458 \sim 0.535$ の結果では、 $H/H_{1/3} > 1.2$ の範囲で実験による値が理論値より小さく、 $H/H_{1/3}=0.8 \sim 1.2$ の範囲で大きくなっている。

(2) 周期の相対度数分布

図-15~17 は有義波周期を基準とした周期の相対度数分布である。図中、横軸上矢印で示した位置は $\bar{T}/T_{1/3}$ を表している。Rice等の理論¹⁰⁾によれば、周期の分布はこの位置を中心に対称であるが、測定値による分布は特に $H_{1/3}/h$ が大きくなるにつれて非対称性を増し、また分布幅がやや広がる傾向にある。

(3) 波高・周期の結合分布

表-3 $H_{max}/\bar{H}_{1/3}$ の平均値と標準偏差
(B1~B20, $N_w=251 \pm 15$)

$\bar{H}_{1/3}/h$	No	$H_{max}/\bar{H}_{1/3}$		標準偏差	$H_{max}/\bar{H}_{1/3}$ の理論値
		平均値	標準偏差	平均値	
0.119	80	1.626	0.161	0.099	1.74
0.185	80	1.636	0.151	0.092	1.74
0.263	80	1.664	0.147	0.088	1.74
0.398	79	1.543	0.104	0.067	1.67
0.480	80	1.411	0.084	0.060	1.49
0.502	80	1.352	0.070	0.052	1.44
0.517	80	1.345	0.070	0.052	1.41

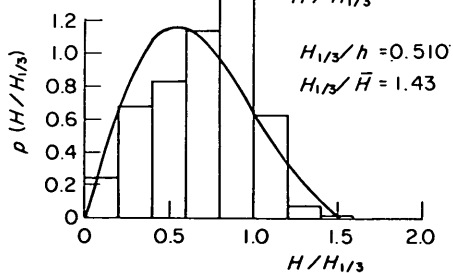
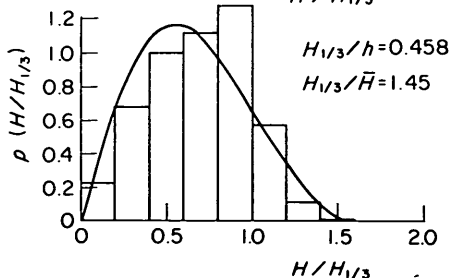
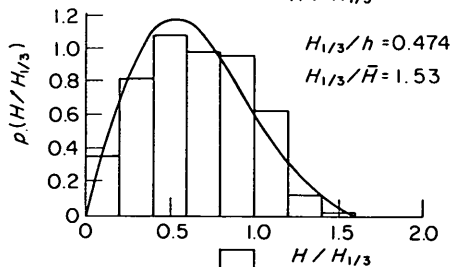
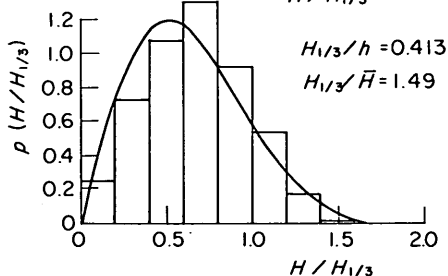
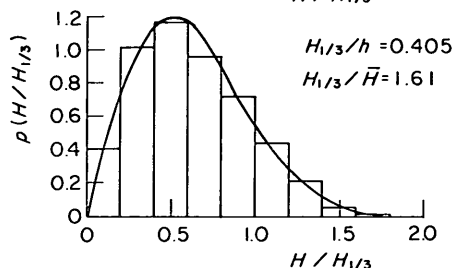
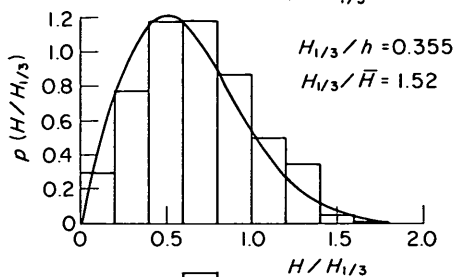
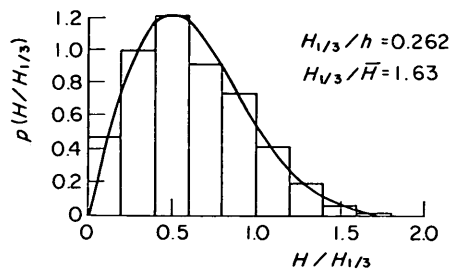
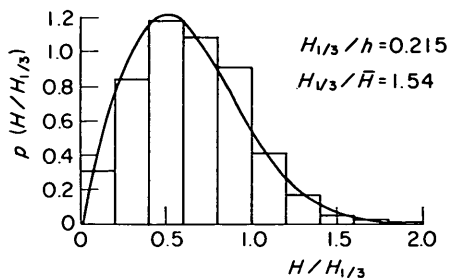


図-12 波高の相対度数分布 (A波)

図-13 波高の相対度数分布 (B波)

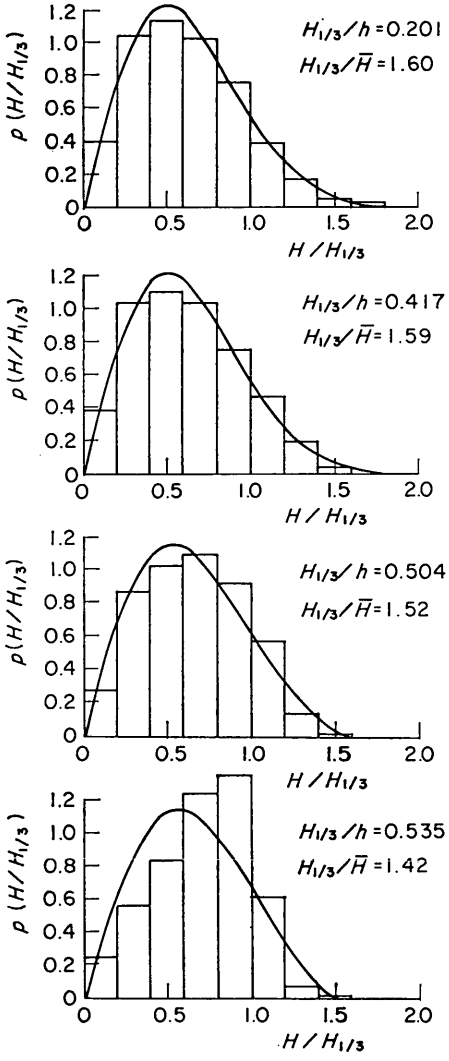


図-14 波高の相対度数分布 (C波)

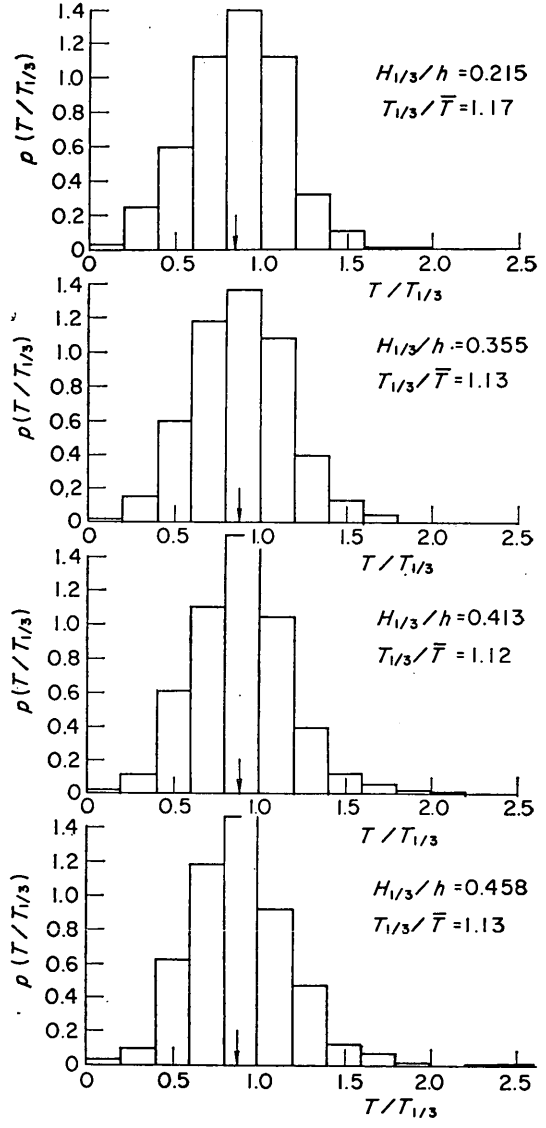


図-15 周期の相対度数分布 (A波)

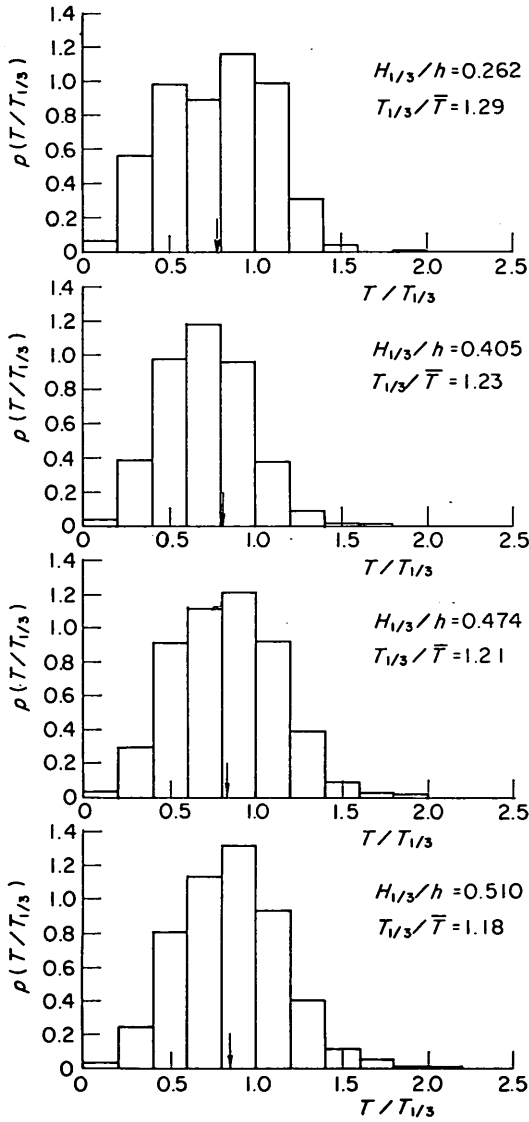


図-16 周期の相対度数分布 (B波)

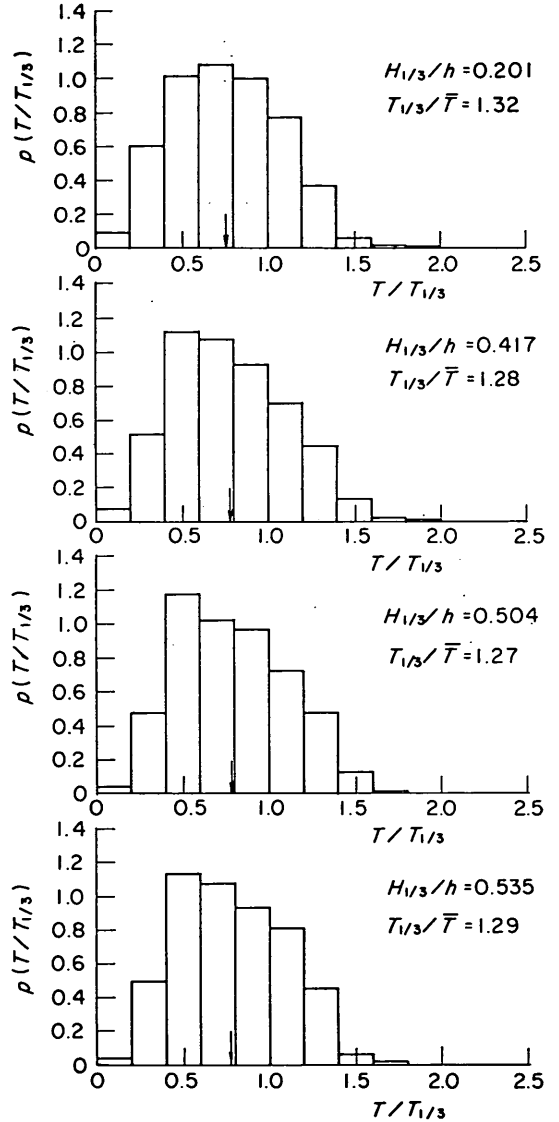


図-17 周期の相対度数分布 (C波)

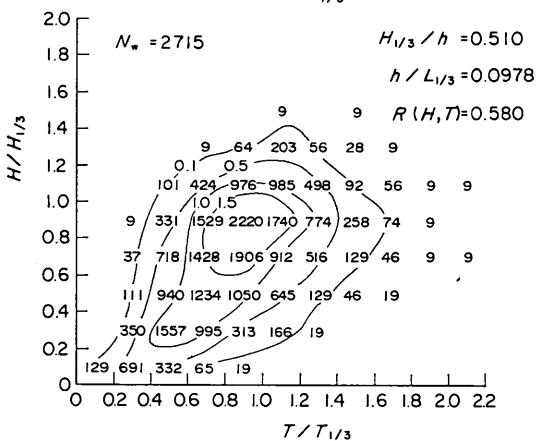
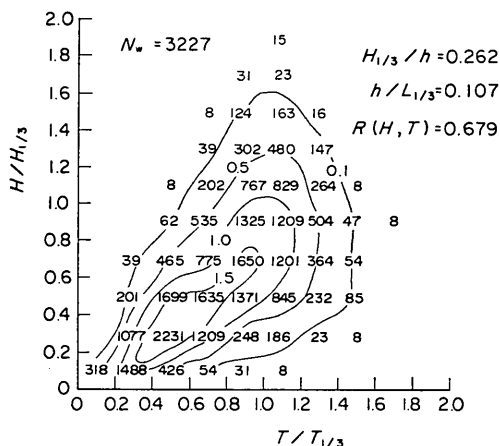


図-18 は波高・周期の結合分布を示したものである。B波の $H_{1/3}/h=0.262$ と 0.510 の例であるが、 $H_{1/3}/h$ が大きい場合周期の分布幅が広がっていることが知られる。

こうした波高・周期の結合分布から、波高クラスごとの平均周期 T_R を求めることができる。図-19はA波、B波、C波についてこれを示したものである。図中、記号説明の $R(H, T)$ は波高・周期の相関係数であり、○記号がA波、●記号がB波、●記号がC波に対応する。データはばらついているけれども、 $H/H_{1/3} < 1.0$ では相関係数が低いほど、また $H/H_{1/3} > 1.0$ では相関係数が高いほど $T_R/T_{1/3}$ が大きい傾向にある。こうした $H/H_{1/3}$ と $T_R/T_{1/3}$ の関係は $R(H, T) = 0$ の場合には $H/H_{1/3}$ の値にかかわらず $T_R/T_{1/3} = T_R/\bar{T} = 1.0$ 、 $R(H, T) = 1.0$ の場合には $T_R/T_{1/3} = H/H_{1/3}$ の直線になるはずであり、これを考慮して定式化すれば両者の関係を次のように表すことができる。

$$T_R/T_{1/3} = (H/H_{1/3})^{f(R, H/H_{1/3})} \quad (2)$$

ここに、

$$f(R, H/H_{1/3}) = R^{2.5 + \tanh 2(H/H_{1/3} - 1)} \quad (3)$$

であり、 R は波高・周期の相関係数の短縮記号である。図中の曲線は $R=0.5, 0.6, 0.7$ に対する式(2)の関係を示したものであり、測定値の傾向をよく表している。

さて、今回用いた実験波の相関係数の値であるが、横

図-18 波高・周期の結合分布の例

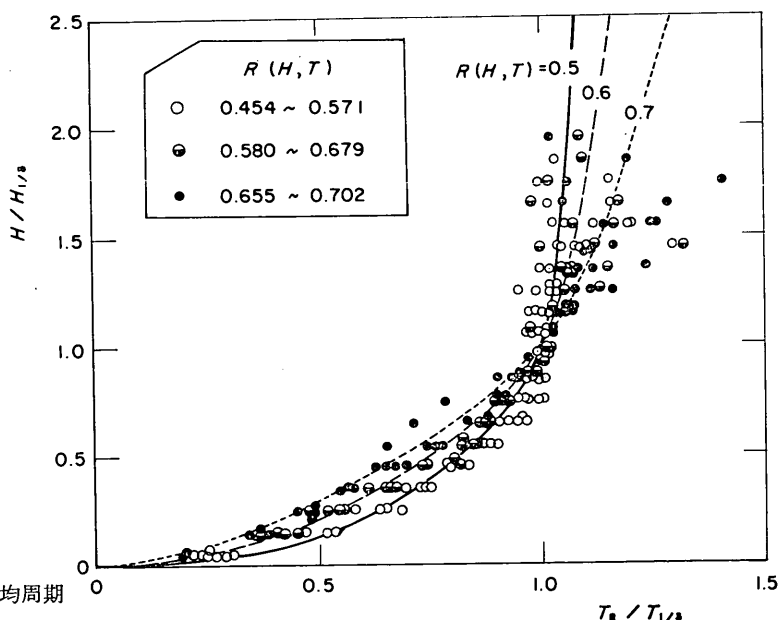


図-19 波高クラスごとの平均周期

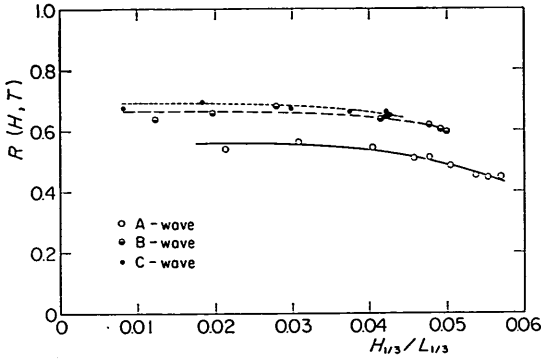


図-20 実験波の波高・周期の相関係数

軸に $H_{1/3}/L_{1/3}$ をとってプロットしてみると 図-20 のようになる。図中の曲線は各波種ごとにデータの傾向を適当に表したもので、相関係数の値は $H_{1/3}/L_{1/3}$ が大きくなるにつれて若干小さくなる傾向にある。こうした変化を無視して各波種ごとの平均値を求めてみると、A波 0.502, B波 0.634, C波 0.663 となり、C波が最も大きく、A波が最も小さい。

(4) 代表波諸元の関係

有義波高と最高波高の関係については既に(1)で一部触れたが、ここではA波(A1~A3), B波(B1~B3), C波(C1~C3)について波高, 周期の代表値の関係をまとめておく。

図-21~23 は有義波高に対する代表波高の関係を、合田の碎波変形理論⁹⁾ による計算値とともに示したものである。実験値のうち H_{max} については3種の波群に対する4測点 (No.3~No.6) での値すべてを、 $H_{1/10}$ と \bar{H} に

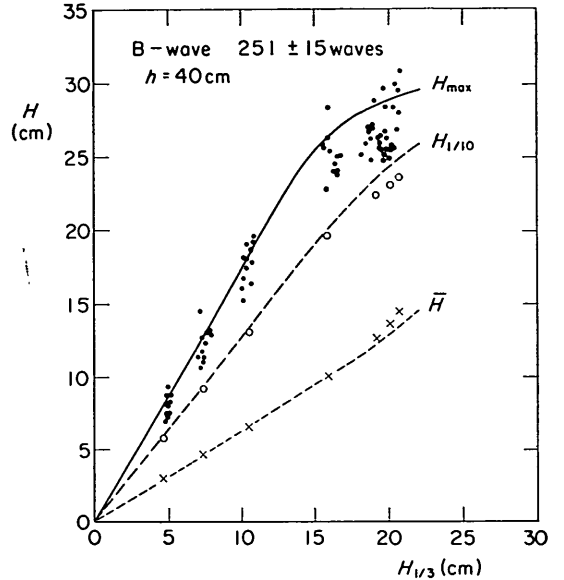


図-22 有義波高に対する代表波高の関係 (B波)

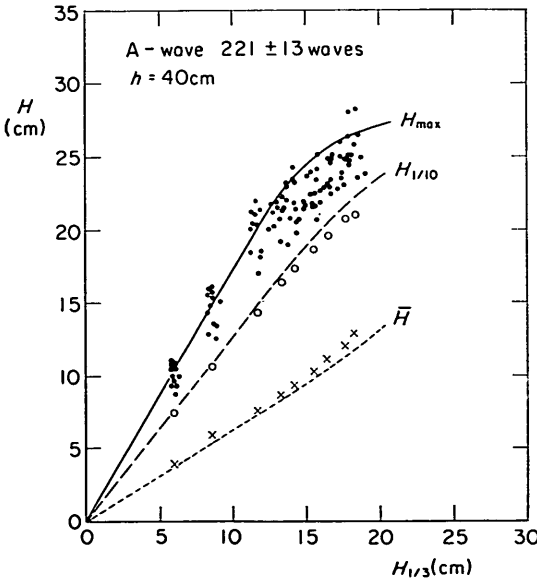


図-21 有義波高に対する代表波高の関係 (A波)

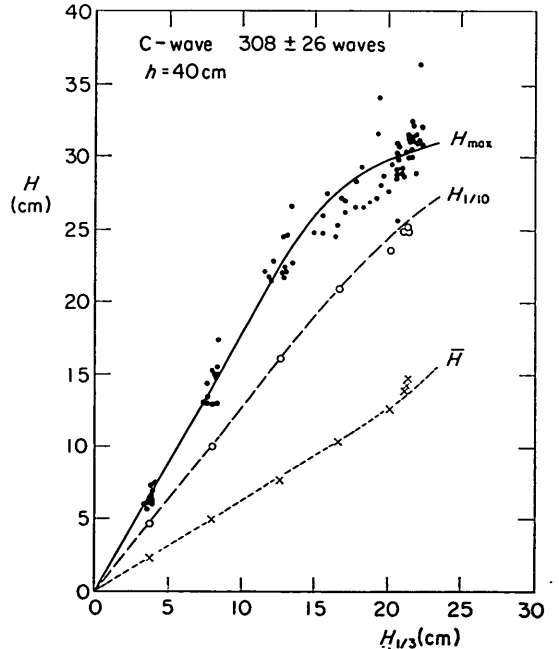


図-23 有義波高に対する代表波高の関係 (C波)

表-4 代表周期間の関係と標準偏差 (データ数48)

波種	$T_{max}/T_{1/3}$		$T_{1/10}/T_{1/3}$		$\bar{T}/T_{1/3}$	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
A1~A3	1.10	0.12	1.01	0.04	0.878	0.029
B1~B3	1.12	0.14	1.04	0.04	0.818	0.033
C1~C3	1.21	0.17	1.08	0.05	0.776	0.024

については12個のデータの平均値をそれぞれプロットしてある。理論値は実験値の関係をよく表しているが、 H_{max} についてはやや大きめの値を与える傾向にある。また、 $H_{1/10}$ については碎波の影響の強い $H_{1/3}$ が大きい条件でやや大きめの値を与え、 \bar{H} については逆にやや小さめの値を与える。しかし、その差は小さく、代表波高間の関係については碎波変形理論により推定して差し支えなさそうである。

次に代表周期間の関係を表-4に示す。これはA~C波についてそれぞれ3波群ずつ4測点での4種の波高条件に対する平均値と標準偏差を示したものである。有義波周期に対する最高波の周期の比 $T_{max}/T_{1/3}$ は1.10~1.21、1/10最大波の周期の比 $T_{1/10}/T_{1/3}$ は1.01~1.08、平均周期の比 $\bar{T}/T_{1/3}$ は0.776~0.878で、波種によって

代表周期比の値は若干変化している。

このうち、 $T_{max}/T_{1/3}$ の平均値は前出の式(2)~(3)および図-20を用いて推定することができる。すなわち、実験波の $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ から図-20により $R(H, T)$ を求めて、これと $H_{max}/H_{1/3}$ の値を用いて式(3)、(2)より $T_{max}/T_{1/3}$ が計算でき、最高波の周期を求めることができる。図-24はこうして計算した $(T_{max})_{CAL}$ と実験値 $(T_{max})_{EXP}$ の相関を示したものである。ここに、 $H_{max}/H_{1/3}$ の値は碎波変形理論による計算値を用いている。データが少ないけれども、この結果によると実験値は計算値の0.9~1.2倍の範囲にあり、やや誤差が大である。

3.5 実験波諸元の決定

(1) 基準入力電圧と有義波高の関係

図-25, 26は基準入力電圧 e と有義波高の関係を示したものである。前者は沖側測点($h=51.3\text{cm}$)、後者は岸側測点($h=40.0\text{cm}$)でのそれぞれ3種(A波、C波)のあるいは20種(B波)の波群に対する平均有義波高 $H_{1/3}^*$ 、 $H_{1/3}$ である。この沖側測点および岸側測点での有義波高の相関関係を示すと図-27のようになり、 $H_{1/3}^*(h=51.3$

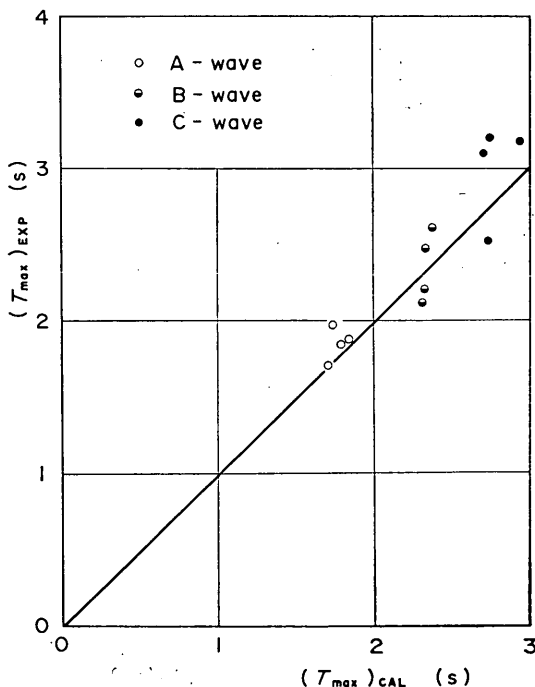


図-24 最高波周期の計算値と実験値の比較

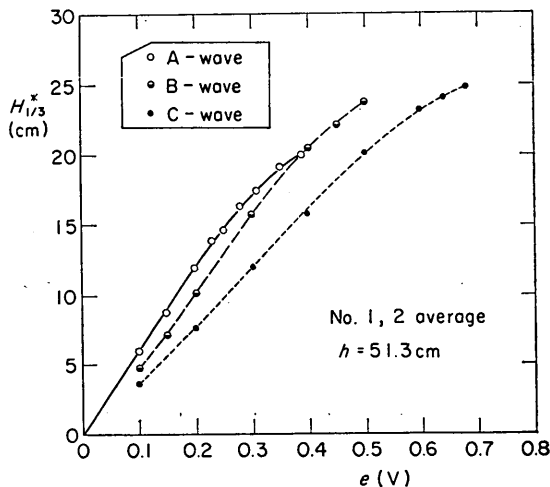


図-25 基準入力電圧と有義波高の関係(No. 1, 2平均)

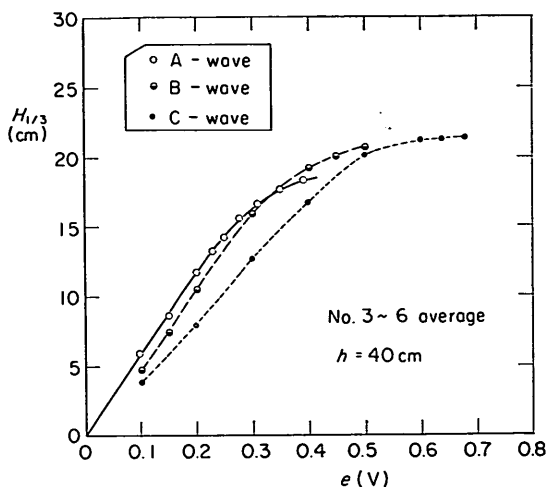


図-26 基準入力電圧と有義波高の関係(No. 3~6平均)

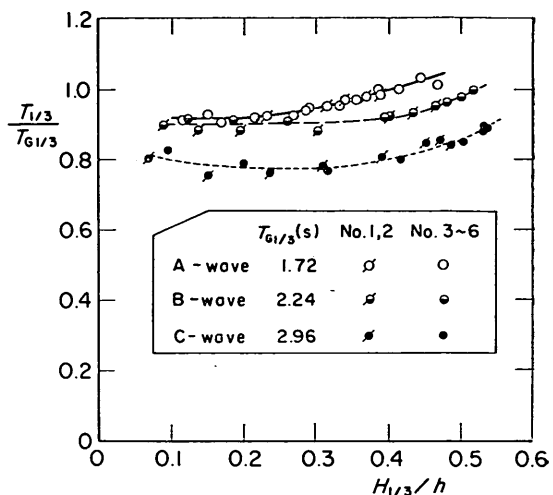


図-28 有義波高と有義波周期の関係

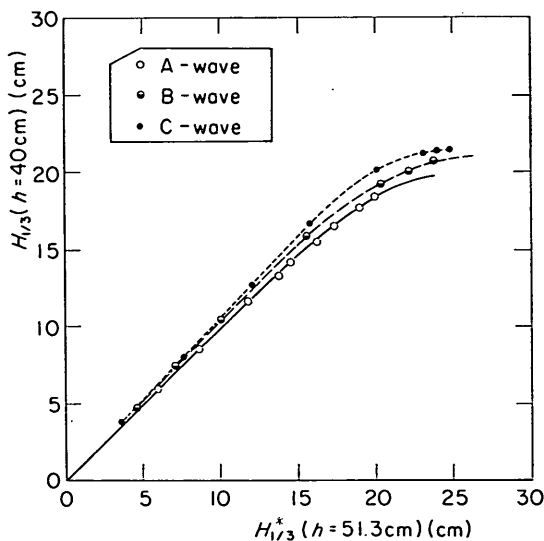


図-27 沖側波高と堤体位置通過波高の相関

cm)が大きくなるにつれて、碎波の影響のため $H_{1/3}(h=40.0\text{cm})$ の増大傾向が鈍化していくことが認められる。

(2) 周期の変化

同じ波形の入力を用いても、入力基準電圧 e によって発生波の周期が若干変化する。図-28 は A~C 波について、有義波高と有義波周期の関係を適当に無次元化して示したもので、有義波高が大きくなると周期がやや長くなることが認められる。周期の無次元化に用いた $T_{G1/3}$ は 3.2 で述べた入力信号の有義波周期である。深水波の

場合には発生波の有義波周期はこの値に等しい ($T_{1/3} = T_{G1/3}$) はずであるが、実際には浅水波であるため小さくなっている。これは浅水波の条件においては造波特性が周期の関数であり、周期が短いほど効率が高いことなどの影響による。

なお、図-28 の測定範囲における No.3~No.6 での有義波周期の平均値は、A 波 1.65s、B 波 2.10s、C 波 2.48s となる。

(3) 反射率と再反射の影響

水路における実験では造波板による再反射の影響を考慮しなければならない。図-29 は今回用いた水路に対して再反射による波高の増大率 ϕ を模型構造物の反射率 K_R に対してプロットしたものである。ここに、波高増大率 ϕ は

$$\phi = \frac{H_{1/3}^*(\text{堤体設置後の分離入射波})}{H_{1/3}^*(\text{堤体設置以前の通過波})} \quad (5)$$

のように、沖側測点 (No. 1, No. 2) における堤体設置以前の状態での通過波の有義波高に対する堤体設置後の分離入射有義波高の比で定義している。また、反射率 K_R は入・反射波の分離計算¹¹⁾によって求めたものである。図-29 には 3 種の波による種々の構造条件での結果を併せて示してあるが、波高増大率 ϕ の値はこれらの条件にかかわらずほぼ反射率 K_R のみの関数となっており、次式で表することができる。

$$\phi = 1.0 + 0.2 \exp[-12(1 - K_R)^2] \quad (6)$$

図中の曲線はこの式(6)の関係を示したものである。こ

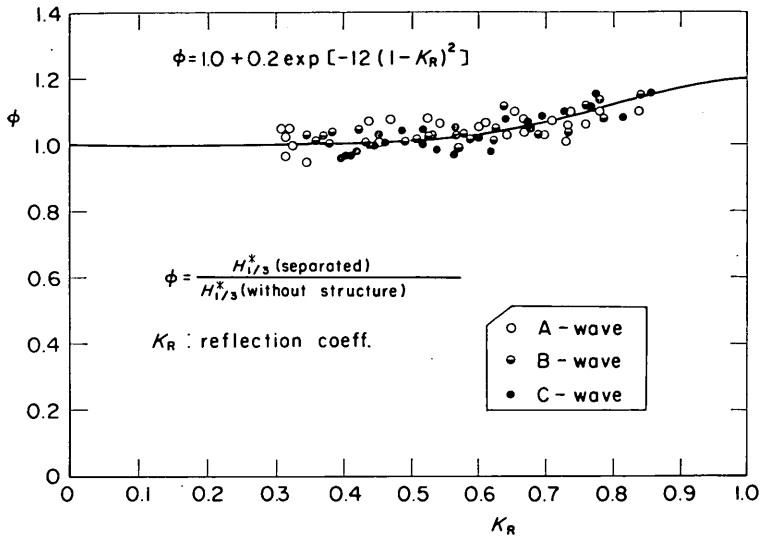


図-29 再反射による波高の増大

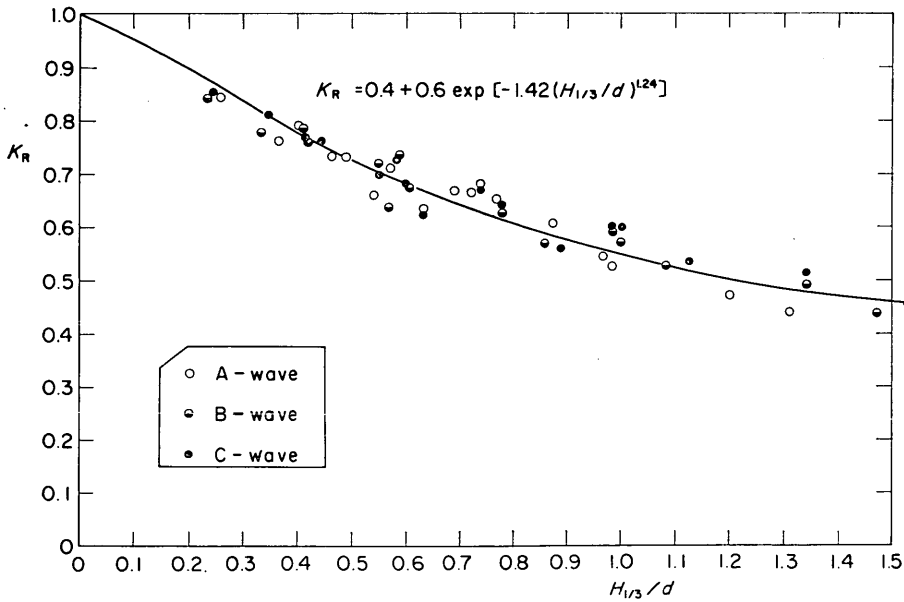


図-30 混成堤の反射率

れによると、 $K_R \leq 0.5$ では $\phi \leq 1.02$ であり、 $K_R = 1.0$ でも $\phi = 1.2$ と造波板による再反射の影響はそれほど大きくない。これは2.1で述べたように、模型構造物からの反射波が内水路から造波板に到達するまでに分散して再反射波が軽減されることによる。ちなみに内水路にお

ける反射波のエネルギーが外水路幅一杯に薄められるものとして造波板の等価再反射率 K_r を単純に計算すると0.32程度となる。ただし、 $K_R = 1.0, K_r = 0.32$ として、多重反射系における波高増大率 ϕ を推定¹²⁾ してみると1.06程度となり、前述の値よりかなり小さい。実際には

造波板の等価反射率が幅の関係だけで単純に求められる値より大きいものと推測される。

さて、構造物からの反射率であるが、混成堤の反射率は波の条件のほかマウンドの高さ、直立部の天端高などにより変化する。そのため種々のパラメータが影響すると考えられるけれども、ここでは簡単のため主要パラメータとして $H_{1/3}/d$ を選んでこれを横軸にとり、 K_R の値をプロットしてみたのが図-30 である。結果は若干ばらついているが、 K_R を $H_{1/3}/d$ のみの関数として次のように表示できそうである。

$$K_R = 0.4 + 0.6 \exp[-1.42(H_{1/3}/d)^{1.24}] \quad (6)$$

図中の曲線はこの関係を表している。これは反射率が $H_{1/3}/d = 0$ での1.0から、 $H_{1/3}/d$ の値が大きくなるにつれて低下し、0.4に漸近するようにしたものである。ただし、この結果を既往のもの¹³⁾と比較すると、 $H_{1/3}/d = 0.3 \sim 0.9$ の範囲で今回の反射率がやや小さい傾向にあり、式(6)の関係はあくまでも今回の実験条件に限り適用できるものと考えらるべきである。

一方、図-31は消波ブロック被覆堤の場合の反射率を、横軸に波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ をとって示したものである。この場合、波の種類によって傾向的に変化が認められるので、これを考慮して実験式を求めてみたのが次式である。

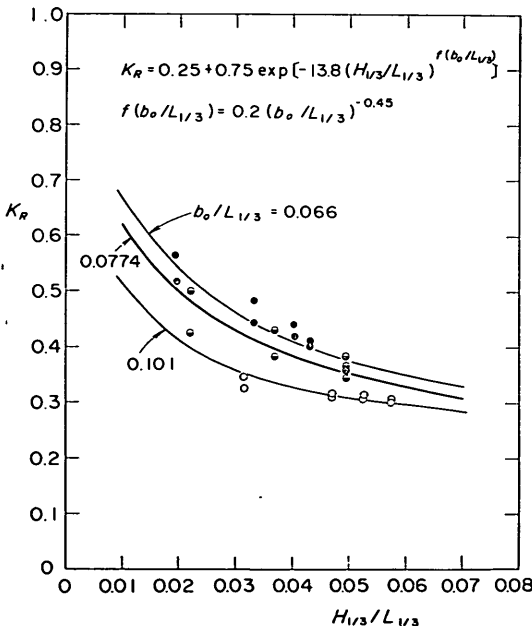


図-31 消波ブロック被覆堤の反射率

$$K_R = 0.25 + 0.75 \exp[-13.8(H_{1/3}/L_{1/3})^{f(b_0/L_{1/3})}] \quad (7)$$

$$f(b_0/L_{1/3}) = 0.2(b_0/L_{1/3})^{-0.45} \quad (8)$$

ここに、 b_0 は静水面での消波ブロックの被覆幅である。式(7)、(8)は $H_{1/3}/L_{1/3}$ や $b_0/L_{1/3}$ が0のとき $K_R = 1.0$ とし、これらが大きくなるにつれて反射率が小さくなるようにしたもので、最小値は0.25にとっている。この式も一般的に適用できるかどうかはまだ検討の余地があり、今回の実験条件での反射率を推定するためのものにすぎない。

(4) 実験波の代表値

波力実験結果の整理に用いる有義波諸元は、(3)で述べた再反射波の影響を考慮して、次の手順で求める。

- ① 堤体設置以前の状態で測定した入力基準電圧 e と波高の関係図-25,26から沖側および岸側での通過有義波高を読みとり、それぞれを $H^*_{1/3}'$ (沖側)、 $H_{1/3}$ (岸側) と表記する。
- ② 有義波高と有義波周期の関係図-28から $H_{1/3}'$ (岸側) / h に対する有義波周期 $T_{1/3}'$ を読みとる。
- ③ $H_{1/3}'$ と $T_{1/3}'$ の値を用いて、対象構造物に対する反射率 K_R を式(6)あるいは(7)、(8)により計算する。
- ④ K_R を用いて、式(5)により波高増幅率 ϕ を求める。
- ⑤ 次式により沖側測点での再反射波の影響を考慮した波高 $H^*_{1/3}$ (沖側) を計算する。

$$H^*_{1/3}(\text{沖側}) = \phi H^*_{1/3}'(\text{沖側}) \quad (9)$$

- ⑥ 沖側波高と岸側波高の関係図-27より、式(9)で求めた $H^*_{1/3}$ (沖側) に対応する $H_{1/3}$ (岸側) を読みとり、これを実験時の堤体位置における入射有義波高とする。
- ⑦ 波高による周期の変化を考慮する場合には、⑥で求めた $H^*_{1/3}/h$ に対し、図-28から $T_{1/3}$ を読みとり、これを有義波周期とする。

上述の手順において、反射率の推定には、厳密に言えば再反射波の影響を補正した堤体位置での入射有義波高を用いる必要がある。そのため、⑥で推定した入射有義波高を用いて、これに対する $T_{1/3}$ 、 K_R を求め、波高増幅率を計算し直す必要がある。しかし、今回の実験ではもともと波高増幅率はそれほど大きなものではなく、したがってこれによる反射率の変化は小さいので、繰り返しを省略したものである。また、有義波周期についても、再反射の影響を考慮した有義波高に対する値を求める必要があるが、これもその変化が小さいので、初期の値そのままを用いる。

表-5 実験波の有義波諸元の決定 (シリーズII)

波種	e (V)	H ^{*1/3} (cm)	H _{1/3} ' (cm)	T _{1/3} (s)	h'=34cm			h'=24cm			h'=19cm			h'=14cm		
					K _R	φ	H _{1/3}	K _R	φ	H _{1/3}	K _R	φ	H _{1/3}	K _R	φ	H _{1/3}
A	0.15	9.0	8.8	1.58	0.86	1.16	10.3	0.80	1.12	10.0	0.75	1.09	9.7	0.67	1.05	9.4
	0.24	14.3	13.8	1.65	0.78	1.11	15.4	0.69	1.07	14.9	0.63	1.04	14.5	0.55	1.02	14.2
	0.31	17.1	16.5	1.74	0.74	1.09	17.5	0.65	1.04	16.9	0.58	1.02	16.5	0.51	1.01	16.5
	0.41	20.3	18.4	1.77	0.71	1.07	19.2	0.62	1.03	18.8	0.55	1.02	18.7	0.48	1.01	18.6
B	0.16	7.9	8.1	2.02	0.87	1.16	9.6	0.82	1.13	9.3	0.77	1.10	9.1	0.69	1.06	8.8
	0.26	13.8	13.9	2.03	0.78	1.11	15.6	0.69	1.06	14.9	0.63	1.04	14.7	0.55	1.02	14.5
	0.38	19.9	18.7	2.13	0.71	1.07	19.7	0.61	1.03	19.3	0.55	1.02	19.2	0.48	1.01	19.1
	0.50	23.8	20.6	2.22	0.68	1.06	20.8	0.59	1.03	20.8	0.53	1.01	20.8	0.46	1.01	20.8
C	0.21	8.1	8.4	2.31	0.87	1.16	9.9	0.81	1.13	9.7	0.76	1.10	9.4	0.68	1.06	9.1
	0.33	13.3	14.4	2.34	0.77	1.11	15.7	0.69	1.06	14.9	0.63	1.04	14.6	0.55	1.02	14.4
	0.45	18.1	18.7	2.46	0.71	1.07	19.7	0.61	1.03	19.2	0.55	1.02	19.0	0.48	1.01	18.9
	0.69	24.8	21.4	2.62	0.67	1.05	21.6	0.58	1.02	21.5	0.52	1.01	21.4	0.45	1.01	21.4

(平均有義波周期: A波1.69s, B波2.10s, C波2.43s)

以上の手順で求めた今回の実験波の有義波諸元を表-5にまとめて示す。シリーズIIに対する値を示しているが、入力基準電圧は各波種ごとに4種を選定し、構造条件が変化しても同じとしている。ただし、表中、B波のd=24cmの条件での諸元は波群B1~B20の平均値を示したもので、シリーズIの実験波の条件に相当する。B1~B3の3種の波群の平均値もこれとほとんど差がないので、シリーズIIに対しても同じ値を用いたものである。また、シリーズIIIの消波ブロック被覆堤について

は、反射率が0.55以下であるので、再反射の影響はほとんどなく、通過波の諸元をそのまま用いる。

なお、波力実験の結果に対し各波群ごとに有義波周期を代表して言う場合には表-4中の各入力基準電圧による変化の平均値、すなわちA波1.69s, B波2.10s, C波2.40sを用いる。2.2で述べた各波種の相対水深はこの平均有義波周期に対応するものである。

有義波の諸元が定まると、不規則実験波の特性からその他の代表値を求めることができる。表-6,7は代表波高

表-6 実験波の代表周期と代表波高 (シリーズIII)

波種 (波数)	e (V)	代表周期(s)				代表波高(cm)			
		T _{max}	T _{11/0}	T _{1/3}	\bar{T}	H _{max}	H _{1/10}	H _{1/3}	\bar{H}
A波 (200)	0.15	1.74	1.60	1.58	1.39	15.1	11.2	8.8	5.5
	0.24	1.82	1.67	1.65	1.45	22.7	17.4	13.8	8.7
	0.31	1.91	1.76	1.74	1.53	25.2	20.5	16.5	10.4
	0.41	1.95	1.79	1.77	1.55	30.0	25.6	18.4	13.7
B波 (220)	0.16	2.26	2.10	2.02	1.65	14.0	10.3	8.1	5.1
	0.26	2.27	2.11	2.03	1.66	23.4	17.6	13.9	8.7
	0.38	2.39	2.22	2.13	1.74	27.8	23.0	18.7	11.9
	0.50	2.49	2.31	2.22	1.82	28.8	24.7	20.6	13.3
C波 (250)	0.21	2.80	2.49	2.31	1.79	13.8	10.1	8.4	5.0
	0.33	2.83	2.53	2.34	1.82	24.7	18.3	14.4	9.0
	0.45	2.98	2.66	2.46	1.91	28.7	23.2	18.7	11.8
	0.69	3.17	2.83	2.62	2.03	30.6	25.9	21.4	13.8

表-7 実験波の代表波高 (シリーズII)

単位: cm

波種 (波数)	e (V)	$h' = 34\text{cm}$				$h' = 24\text{cm}^*$				$h' = 19\text{cm}$				$h' = 14\text{cm}$			
		H_{\max}	$H_{1/10}$	$H_{1/3}$	\bar{H}	H_{\max}	$H_{1/10}$	$H_{1/3}$	\bar{H}	H_{\max}	$H_{1/10}$	$H_{1/3}$	\bar{H}	H_{\max}	$H_{1/10}$	$H_{1/3}$	\bar{H}
A波 (200)	0.15	17.6	13.1	10.3	6.4	17.1	12.7	10.0	6.3	16.6	12.3	9.7	6.1	16.1	11.9	9.4	5.9
	0.24	25.3	19.5	15.4	9.7	24.5	18.8	14.9	9.3	23.8	18.3	14.5	9.1	23.3	17.9	14.2	8.9
	0.31	26.8	21.7	17.5	11.1	25.9	20.9	16.9	10.7	25.2	20.5	16.5	10.4	25.1	20.4	16.5	10.4
	0.41	27.1	23.2	19.2	12.4	26.6	22.7	18.8	12.1	26.4	22.6	18.7	12.0	26.3	22.5	18.6	12.0
B波 (220)	0.16	16.6	12.2	9.6	6.0	16.1	11.8	9.3	5.8	15.7	11.6	9.1	5.7	15.2	11.2	8.8	5.5
	0.26	26.3	19.8	15.6	9.8	25.1	18.9	14.9	9.3	24.8	18.6	14.7	9.2	24.4	18.4	14.5	9.1
	0.38	29.0	24.2	19.7	12.5	28.7	23.7	19.3	12.3	28.6	23.6	19.2	12.2	28.4	23.5	19.1	12.1
	0.50	29.1	24.9	20.8	13.5	29.1	24.9	20.8	13.5	29.1	24.9	20.8	13.5	29.1	24.9	20.8	13.5
C波 (250)	0.21	17.2	12.6	9.9	6.2	16.9	12.3	9.7	6.1	16.4	11.9	9.4	5.9	15.8	11.6	9.1	5.7
	0.33	27.0	19.9	15.7	9.9	25.6	18.9	14.9	9.3	25.1	18.5	14.6	9.1	24.7	18.3	14.4	9.0
	0.45	30.2	24.4	19.7	12.5	29.5	23.8	19.2	12.2	29.2	23.6	19.0	12.0	29.0	23.4	18.9	12.0
	0.69	30.9	26.1	21.6	13.9	30.8	26.0	21.5	13.8	30.6	25.9	21.4	13.8	30.6	25.9	21.4	13.8

* B波はシリーズIと共通

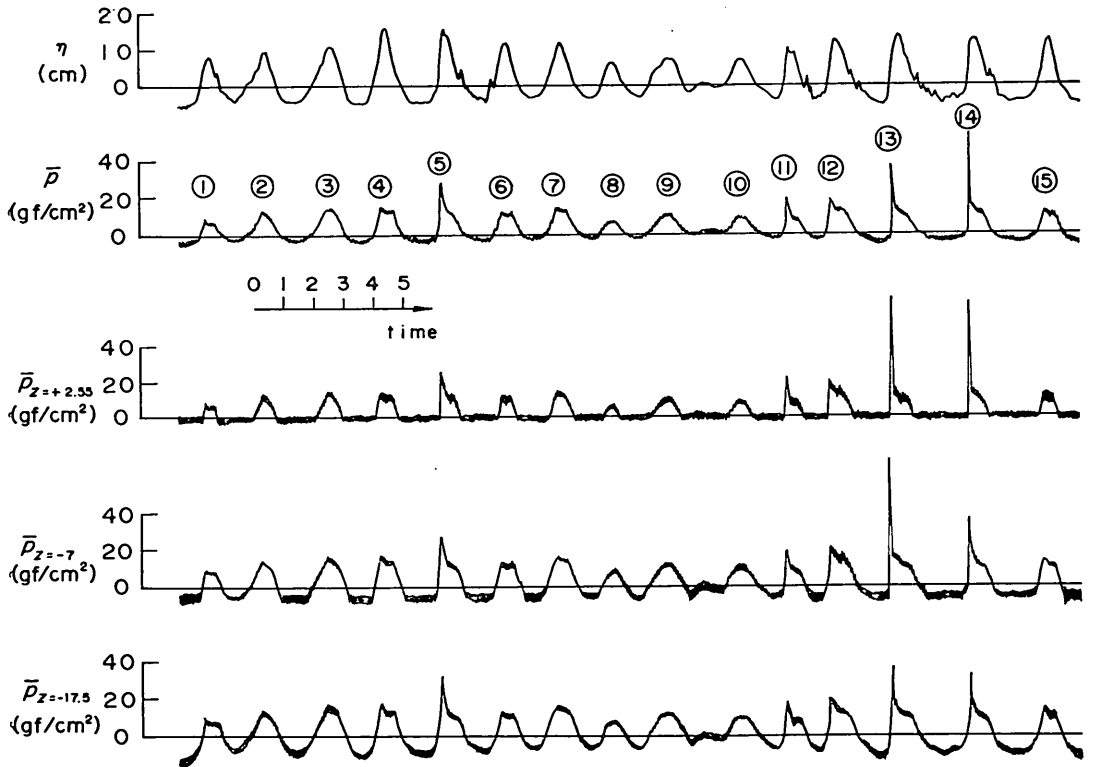


図-32 測定記録および合波力の時間変化の例
(シリーズI, B1, $e = 0.50\text{V}$)

については合田の浅水変形理論⁹⁾による関係、代表周期については実験値に基づく表-4の関係を用いて、前出の実験波に対する波高・周期の代表値をまとめて示したものである。ここに、波数 N_w は後述の波力実験結果の解析に用いた時間に対応するもので、解析時間をそれぞれの平均周期で割った値である。

4. 不規則波力の統計的性質

4.1 波圧・波力の時間変化の例

図-32 はシリーズ I の B 1, $e = 0.50V$ の波浪条件に対する記録の一部で、上から直立壁面での水位 η 、合波力を直立壁の高さに関し平均した波力強度 $\bar{p} (= P/l$, 以下単に波力強度あるいは波力と呼ぶ), および測点 P2 ($z = 2.55\text{cm}$), P4 ($z = -7.5\text{cm}$), P6 ($z = -17.5\text{cm}$) での波圧強度 p を示したものである。波圧波形には細かい振動が認められるが、これはデータレコーダ再生時のノイズと推測される。このノイズはローパスフィルターのカットオフ周波数を小さくすることによって除去できるけれども、これが低すぎると衝撃圧のピーク値を低下させてしまう。そのため、この条件ではカットオフ周波数を 300Hz に選定している。しかし、水位記録に対してはこれを 30Hz としているので、ノイズが消去されている。

図中、 \bar{p} に対しゼロアップクロス法によって判別した波の番号を示しているが、最大波力はこの波力波形の④で生じている。局所的波圧のピーク値はその前の③で大きいようであるけれども、合波力は④のほうが大きい。これは記録に示していない測点での波圧の大きさの違いによるものと考えられる。

図-33 は B 1 波に対する 4 種の e の条件での最大波力時の時間変化を時間軸を長くして示したものである。波高の小さい条件では重複波力が作用するが、波高が大きくなるにつれて碎波の作用により衝撃波力が生じるようになる。以下の節ではこうした波力の時間変化におけるピーク値についての統計解析結果を述べる。ここに、ピーク値というのはゼロアップクロス法で定義した波力波形 1 波中の最大値である。

4.2 波力の相対度数分布

波力の代表値として、波の場合と同様に、一連の不規則波の作用による最大値を最大波力、大きいほうから数えて全体の 1/10 の数の波力のピーク値の平均値を 1/10 最大波力、同じく 1/3 の数の波力ピーク値の平均値を有義波力、全体の波力ピーク値の平均値を平均波力と定義し、直立壁の高さに関し平均した波力強度をそれぞれ \bar{p}_{\max} , $\bar{p}_{1/10}$, $\bar{p}_{1/3}$, \bar{p}_{avg} と表記する。また、不規則波力中の個々のピーク値 (直立壁の高さに関する平均値)

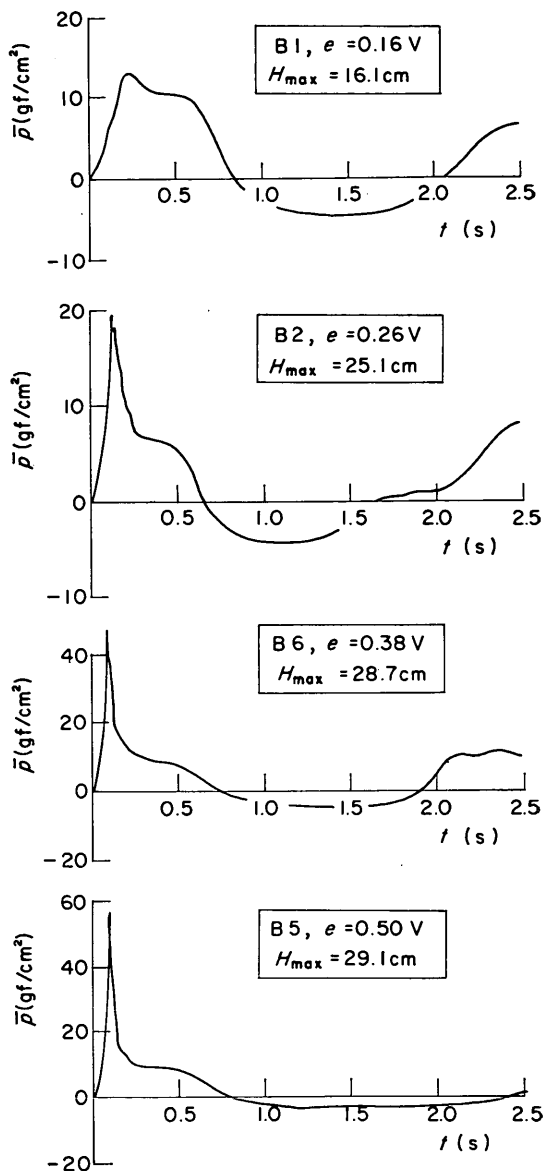


図-33 最大波力波形の例 (シリーズ I)

は単に \bar{p} と表記する。

図-34 は波力 (ピーク値) の相対度数分布を示したもので、波力は有義波力強度 $\bar{p}_{1/3}$ で除して無次元化してある。また、相対度数は次式によって確率密度 $p(\bar{p}/\bar{p}_{1/3})$ のかたちで表示してある。

$$p(\bar{p}/\bar{p}_{1/3}) = \frac{n}{N_w \Delta(\bar{p}/\bar{p}_{1/3})} \quad (10)$$

ここに、 N_w は総度数、 $\Delta(\bar{p}/\bar{p}_{1/3})$ はクラスの分割幅、

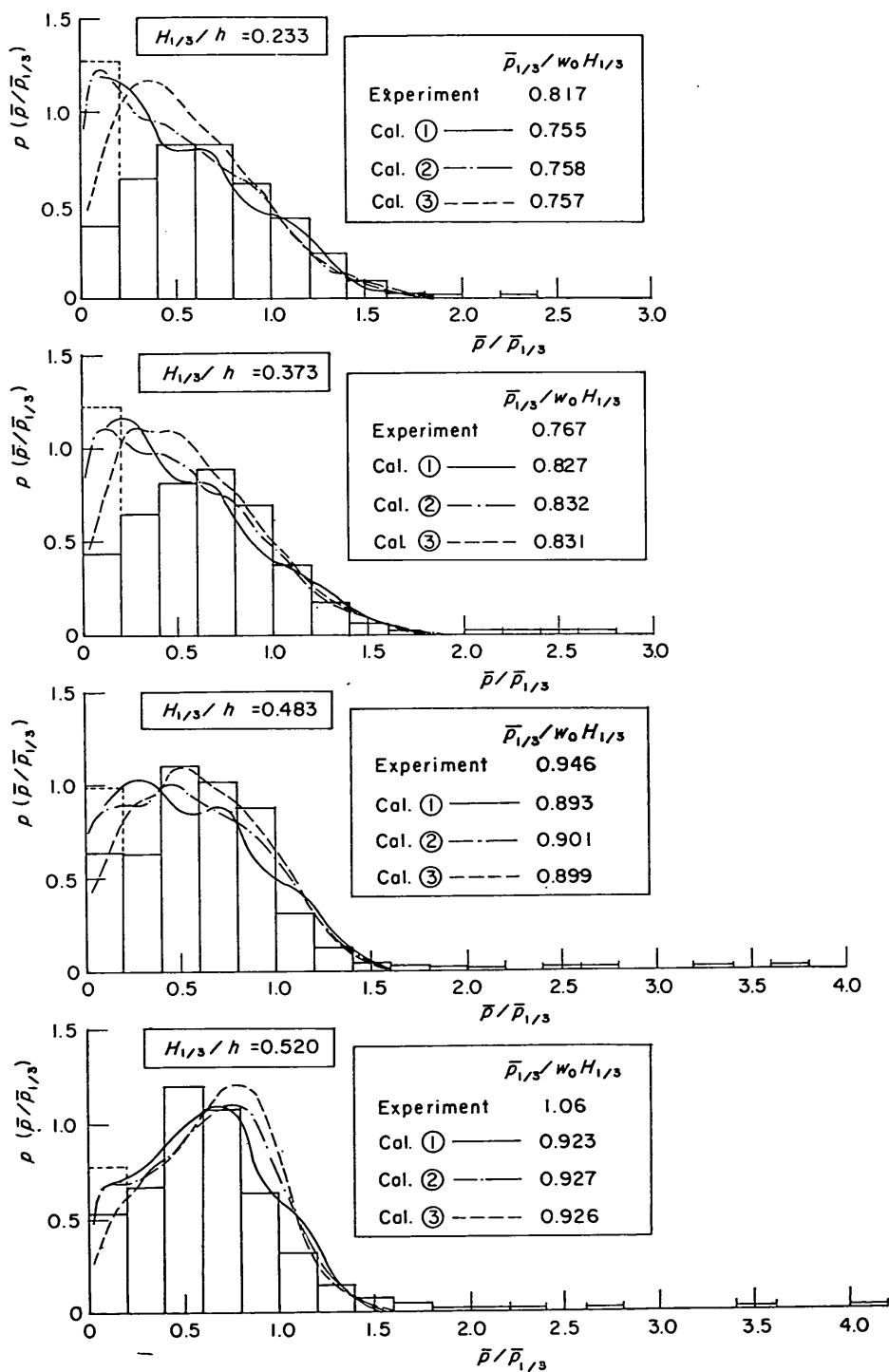


図-34 波力の相対度数分布 (シリーズI, B1~B20)

n は各クラスに含まれる度数である。この場合、総度数は作用した波の総波数をとっている。すなわち20種の波群 (B1~B20) を作用させ、各波群につき220波ずつ解析しているので、 N_w の値は4400である。ただし、既に述べたように波力の度数は波の波数と比べると若干減少する。この減少分の相対度数 (確率密度) は、波力の総度数を N_0 と表記して次式のようになる。

$$p(\bar{P}/\bar{P}_{1/3}) = \frac{N_w - N_0}{N_w \Delta(\bar{P}/\bar{P}_{1/3})} \quad (11)$$

図中、点線の部分はこれに相当する分である。

図-34の結果によると、波力の分布は有義波高が大きくなるにつれて最小クラスを除いた最頻値のクラスがやや低いほうへ移行し、かつ集中度が高くなる傾向を有している。たとえば、 $H_{1/3}/h = 0.373$ で最頻値のクラスが $\bar{P}/\bar{P}_{1/3} = 0.6 \sim 0.8$ で、相対度数が $p(\bar{P}/\bar{P}_{1/3}) = 0.885$ であるのに対し、 $H_{1/3}/h = 0.520$ では、 $\bar{P}/\bar{P}_{1/3} = 0.4 \sim 0.6$ で、 $p(\bar{P}/\bar{P}_{1/3}) = 1.20$ である。しかし、 $\bar{P}/\bar{P}_{1/3}$ の最大値は逆に大きくなり、 $H_{1/3}/h = 0.233$ では $\bar{P}/\bar{P}_{1/3} = 2.2 \sim 2.4$ であったものが、 $H_{1/3}/h = 0.520$ では $\bar{P}/\bar{P}_{1/3} = 4.0 \sim 4.2$ にまで広く分布するようになっている。これは波高が大きく砕波が作用するようになるにつれて、異常に大きい波力が生じることによる。

同図には、波の条件から合田式を用いて計算によって求めた確率分布曲線も示してある。3種の方法による結果であるが、これは次のように周期の与え方を違えたものである。

- ① 実験波の波高・周期の結合分布を与え、波浪条件の2次元確率分布に基づいて波力の分布を計算する。
- ② 波高の確率分布を与え、周期は各波高クラスごとの平均周期 (T_R) で代表させて波力の分布を計算する。
- ③ 波高の確率分布のみを与え、周期はすべて有義波周期を用いて波力の分布を計算する。

以上の方法のいずれに対しても実験波の確率分布を与える必要があるが、厳密に言えば堤体設置後の実験波の条件は造波板からの再反射波の影響によって、堤体設置前の通過波の条件とは若干異なる。しかし、その違いは小さく、特に無次元表示確率分布のかたちでの変化は小さいと考えられるので、ここでは実験条件に最も近い有義波高となる通過波の測定結果を用いている。ただし、無次元表示から有次元表示に変換する際、有義波高、有義波周期の値は堤体設置後の実験条件に合わせている。

計算結果は波浪条件として測定結果をそのまま用いているため、若干脈動している。波高の小さい $H_{1/3}/h = 0.233$ の結果を見ると、①の方法 (図中、Cal. ①) およ

び②の方法 (図中、Cal. ②) はいずれも最頻値のクラスが $\bar{P}/\bar{P}_{1/3} = 0 \sim 0.2$ に生じるのに対し、③の方法 (図中、Cal. ③) では $\bar{P}/\bar{P}_{1/3} = 0.2 \sim 0.4$ に生じ、分布形がやや異なる。これは①、②では波高と周期の相関を考慮して、波高の小さい波に対しては周期も短くなり、そのため波力がますます小さくなるのに対し、③の方法では周期が波高の大小にかかわらず一定であるため、波力の分布が波高の分布に近くなることによる。これに対し、波高の大きい波では波高・周期の相関が低く、有義波周期近くに分布するので、 $\bar{P}/\bar{P}_{1/3}$ が大きい条件の範囲では3種の方法による差が小さい。

$H_{1/3}/h$ の値が大きくなるにつれて砕波の影響のため波高分布がひずんで集中度が高くなる。そのため、いずれの方法による計算結果も最頻値のクラスが大きいほうへ移行する傾向が認められる。たとえば、 $H_{1/3}/h = 0.520$ の条件では計算による最頻値のクラスは $\bar{P}/\bar{P}_{1/3} = 0.6 \sim 0.8$ である。

これらの計算による分布を測定による分布と比較すると、たとえば $H_{1/3}/h = 0.520$ の条件などでは、①、②、③の順でややよい傾向にあると言える。しかし、他の条件では必ずしもそうでないものもあり、特に波力の大きい範囲に限れば差はそれほどない。

なお、図中に示した $\bar{P}_{1/3}/w_0 H_{1/3}$ の値は測定、および計算でのそれぞれの値である。計算によるこの値は方法によってほとんど違いがない。

4.3 有義波力の変動と代表波力比の相対度数分布

シリーズIの実験ではB1~B20の20種の波群を作用させている。これら一つ一つの波群による有義波力や最大波力等の代表波力の値は不規則波特有の性質のため変動する。表-8はそうした有義波力、および有義波力を基準とした他の代表波力の比の、平均値と標準偏差をまと

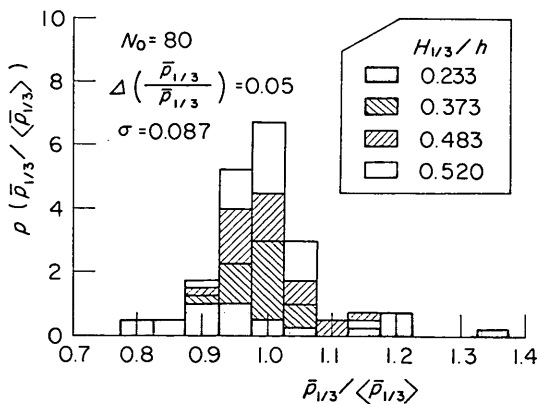


図-35 有義波力の相対度数分布

表-8 有義波力および代表波力比の平均値と標準偏差 (シリーズ I)

$\frac{H_{1/3}}{h}$	$\bar{p}_{1/3}/w_0H_{1/3}$		$\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$		$\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}$		$\bar{p}_{mean}/\bar{p}_{1/3}$	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
0.233	0.812	0.122	1.68	0.18	1.28	0.04	0.541	0.012
0.373	0.767	0.037	2.13	0.46	1.32	0.04	0.544	0.012
0.483	0.946	0.052	2.55	0.55	1.34	0.06	0.586	0.017
0.520	1.06	0.040	2.59	0.67	1.33	0.05	0.605	0.019

めて示したものである。このうち、有義波力の平均値 ($\langle \bar{p}_{1/3} \rangle$ と表記) に対する個々の波群での有義波力の比の相対度数分布を4種の有義波高に対する結果を集計して示したのが図-35である。 $\bar{p}_{1/3}/\langle \bar{p}_{1/3} \rangle$ の値は0.8~1.35程度の範囲に分布し、その標準偏差は0.087、すなわち平均値の8.7%である。各有義波別にみると $H_{1/3}/h=0.233$ の条件では分布幅が広く、標準偏差は表-8に示しているように $0.122w_0H_{1/3}$ で、平均値に対して15.0%とやや大きい。 $H_{1/3}/h=0.373\sim 0.520$ の条件では標準偏差は平均値に対して3.8~5.5%と小さくなっている。こうした有義波力の変動性を有義波高の変動性と比べると、有義波高の平均値に対する標準偏差は3%程度であるので、有義波力の変動性のほうが高いことが知られる。

次に、有義波力を基準とした代表波力のうち、1/10最大波力と最大波力の分布を示したのが図-36(pp.74)である。

$\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}$ の平均値は $H_{1/3}/h$ の値によって1.28~1.34で、1/10最大波力と有義波力の比は特に $H_{1/3}/h$ が大きい条件で対応する波高比 $H_{1/10}/H_{1/3}$ の値より大である。標準偏差はそれぞれの平均値に対して3~4%程度であり、変動は小さい。これに対し、 $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$ の値は特に波高が大きいとき非常に広い範囲に分布する。平均値は $H_{1/3}/h$ が大きくなるにつれて増大する傾向にあり、 $H_{1/3}/h=0.520$ の条件では2.59と同条件の最高波高と有義波高の比1.40と比較して非常に大きい。標準偏差はそれぞれの平均値に対して、 $H_{1/3}/h=0.233$ では11%、 $H_{1/3}/h=0.373\sim 0.520$ では22~26%程度である。

4.4 代表波高と代表波力の関係

図-37は代表波力をそれぞれの代表波高で無次元化して、その平均値および(平均値±標準偏差)の範囲を示したものである。横軸の H/h は最大波力、1/10最大波力、有義波力に対して、それぞれ H_{max}/h , $H_{1/10}/h$,

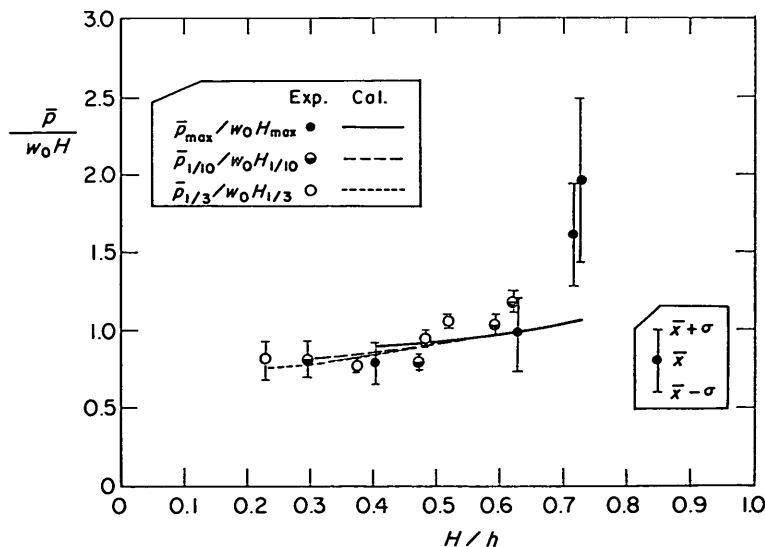


図-37 代表波高と代表波力の関係 (シリーズ I)

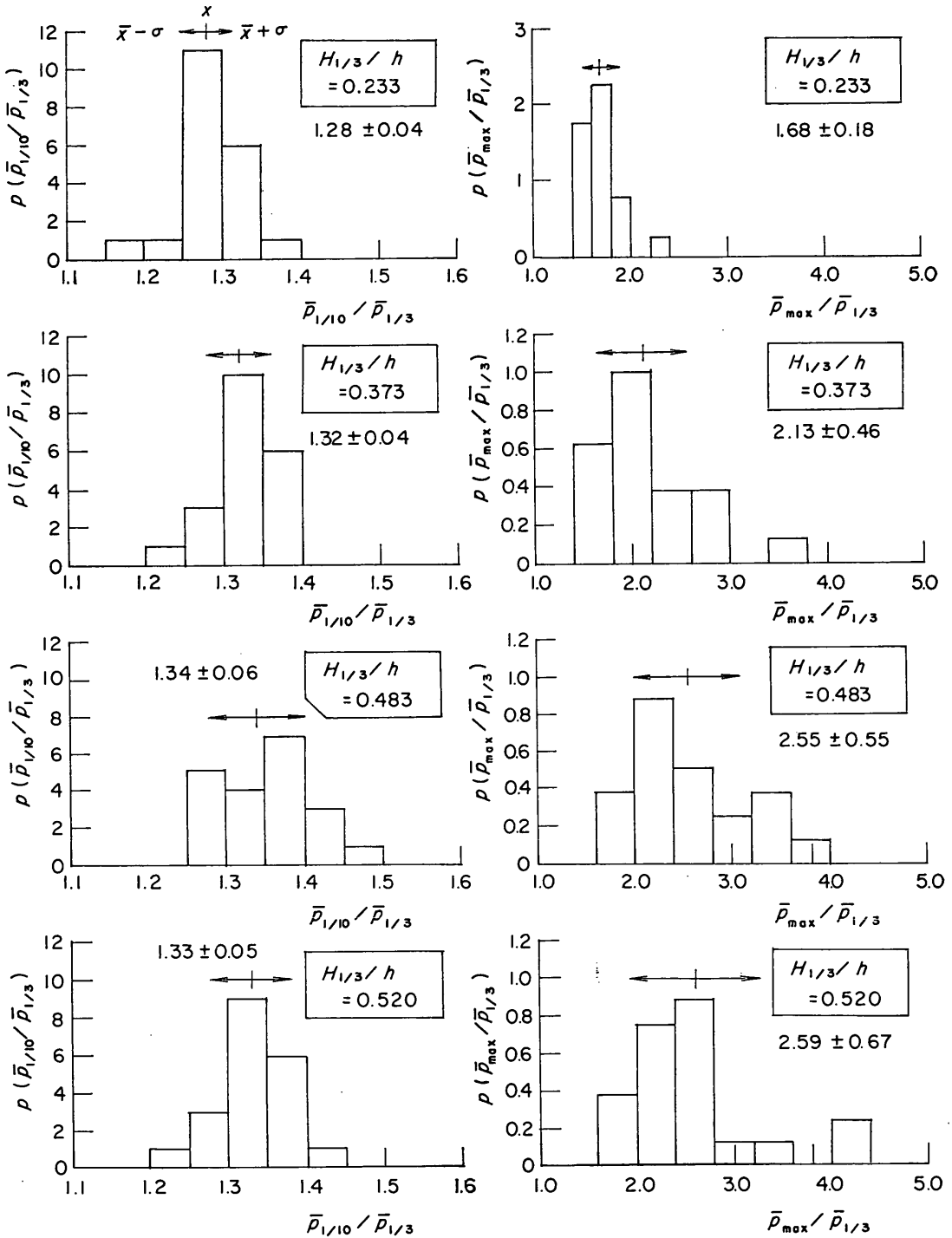


図-36 代表波力比の相対度数分布

$H_{1/3}/h$ を表す。それぞれの代表波諸元を用いた合式式による計算曲線も併せて示してあるが、 $H/h < 0.65$ の範囲に対しては実験値とかなりよく一致している。しかし、 H/h が 0.7 を超すような砕波限界条件近くでの最大波力に対しては実験値が非常に大きく、計算値は（平均値±標準偏差）の範囲よりも小さい。このように砕波が作用するとき、不規則波による最大波力が非常に大きくなるのは、不規則波ではその波形が種々雑多であるため、比較的低マウンドであっても多数の波の中にはたまたま切り立った波面で直立壁に衝突する波がありうることによると推測される。

なお、波高の確率分布に基づいて合式式により計算し

た $p_{1/10}$ 、 $p_{1/3}$ の値と代表波の諸元を用いて計算した値では後者が 5% 以内の範囲でやや小さい程度で、ほとんど差がない。

4.5 同時波圧分布

図-38 に実験および計算による最大波力、 $1/10$ 最大波力、有義波力の同時波圧分布を示す。この同時波圧分布は、波群ごとに各代表波力に最も近い波力の波での同時波圧を求め、それを全波群に対し平均したものである。実験値と計算値を比較すると、 $H_{1/3}/h = 0.233$ の条件では実験値がやや小さい傾向を示しているが、全体的にはかなりよく合っている。 $H_{1/3}/h = 0.373$ の条件では最大波力の静水面上での波圧がやや大きくなり、 $H_{1/3}/h =$

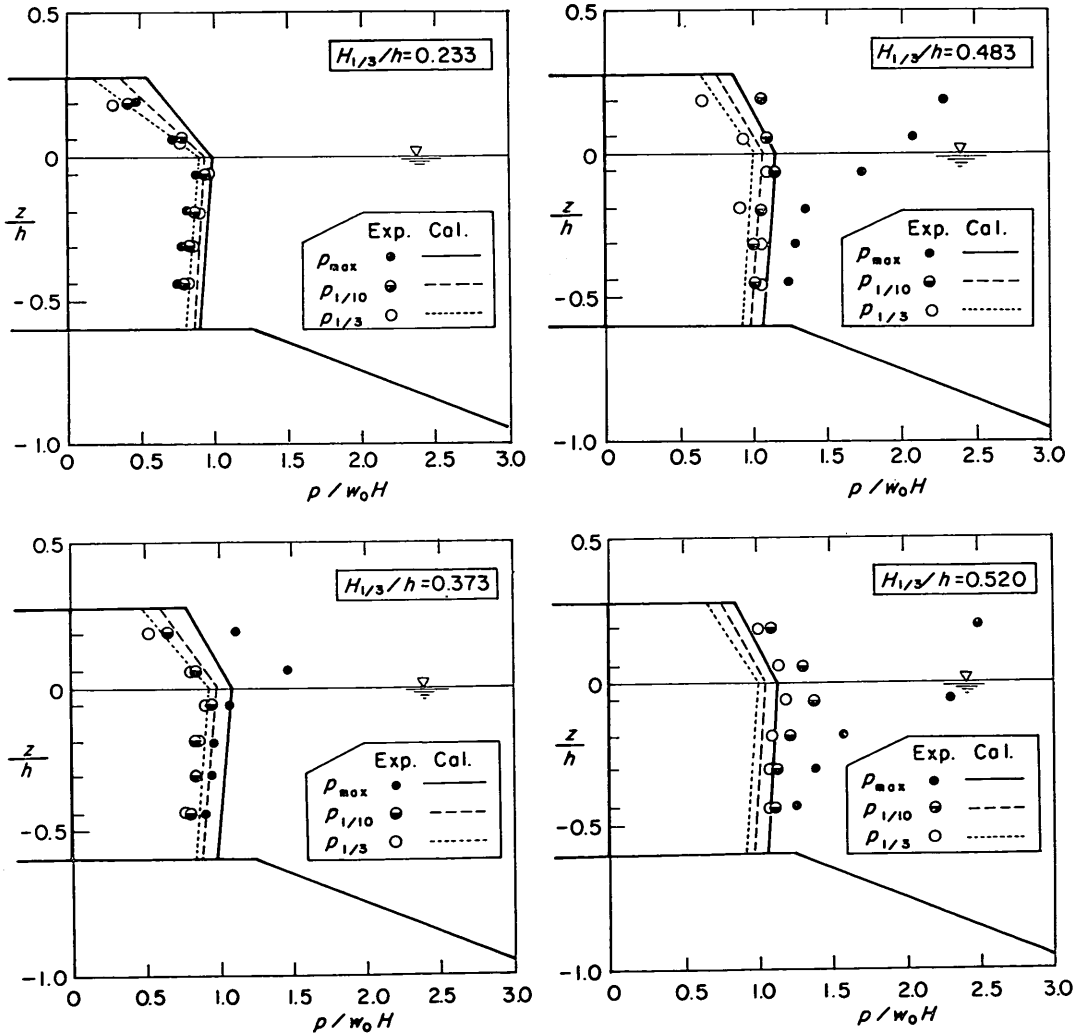


図-38 代表波力の同時波圧分布（シリーズ I, B 1 ~ B 20 平均）

0.483では相当程度大きくなる。しかし、有義波力や1/10最大波力についてはまだ許容できる差異である。これが、 $H_{1/3}/h=0.520$ の条件になると、有義波力や1/10最大波力も実験値が大きくなり、最大波力については特に静水面付近において3倍程度の値となる。

以上は20種の波群による平均値を示したものであるが、 $H_{1/3}/h=0.520$ の条件での最大波力について同時波圧の平均値と(平均値土標準偏差)の範囲を示したのが図-39である。特に、静水面付近の波圧強度の標準偏差の大きいことが知られる。

以上の結果から、既に前出の図-36や37の結果でも明らかのように、不規則波の場合ほぼ同一の有義波諸元を有する波群であっても、特に砕波が作用するような条件での最大波力は波列によって著しく変動するということが指摘できる。

5. マウンド高による不規則波力の変化

5.1 波力の時間変化と相対度数分布の例

混成堤の直立部に働く波力はマウンドの形状によって変化する。特にマウンドが高く、前肩幅が適当に広い場合には強大な衝撃砕波力が作用することがこれまでの規則波実験によってよく知られている。¹⁴⁾ こうしたマウンド形状による波力の変化が不規則波の場合にはどのようなかは非常に興味のあるところであり、本研究では、マウンドの高さのみであるがこれを調べてみた。

図-40はB1波による各マウンド高ごとの最大波力の時間変化(1秒間)の例を示したものである。いずれも $e=0.50V$ の例で、 $H_{1/3}=20.8cm$ 、 $H_{max}=29.1cm$ と同じ波の条件による結果である。この波形出力に際しては、いずれのデータも応答・入力変換器を通し、解析上の諸値はカットオフ周波数300Hz、サンプリング周波数1,800Hz、データ数729,088個と全く同じである。上から順に、 $d/h=0.850$ 、 0.600 、 0.475 、 0.350 の条件での時間変化(縦軸の尺度は違えてある)であるが、最大波力強度 \bar{p}_{max} はそれぞれ $1.12w_0H_{max}$ 、 $1.78w_0H_{max}$ 、 $2.04w_0H_{max}$ 、 $4.55w_0H_{max}$ と同じ波が作用しても非常に異なり、マウンドが高くなるにつれて強大な衝撃砕波力が働くことが知られる。

なお、図-40の $d/h=0.350$ の条件での記録には減衰振動が認められるが、その振動数は200Hz程度であり、波圧計の固有振動数700Hzとは異なる。非常に大きい波圧が作用しているときなので、波面と壁面の間に閉じ込められた薄い空気層の圧縮振動が現れているのかもしれない。

図-41(pp.78)は1波1波の平均波力強度の相対度数

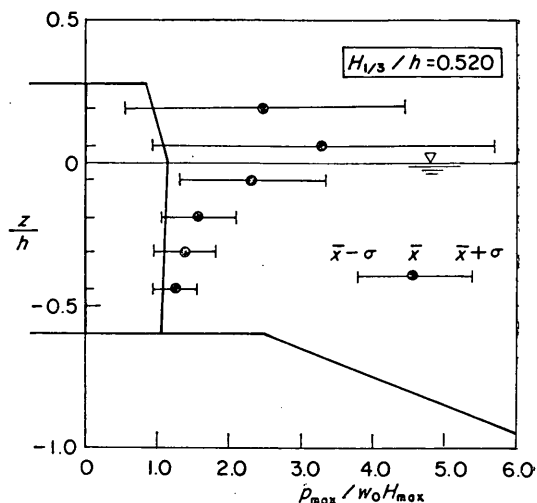


図-39 最大波力の同時分布における変動性

分布を示したもので、B波(B1~B3の平均、 $d/h=0.600$ の条件のみB1~B20の平均)、 $e=0.50V$ の条件での例である。前出の図-34と同様、波の確率分布から合田式を適用して求めた計算曲線(Cal.①, Cal.②, Cal.③)も示してある。実験と計算による分布は $d/h=0.850$ 、 0.600 の低マウンド条件ではある程度一致していると言えるが、 $d/h=0.475$ では違いが目立ち、 $d/h=0.350$ の条件になると非常に異なってくるのが認められる。これは高マウンドの条件では衝撃砕波による異常に大きな波力の発生頻度が高くなり、実験による有義波力が計算による有義波力より著しく大となることによる。こうした傾向は他のA波、B波についてもほぼ同様であり、波の確率分布から合田式を適用して波力の確率分布を求めるのは、全体的傾向を表す概略の推定であっても、低マウンド条件のときのみ有効であるといえる。

5.2 代表波力

表-9,10(pp.79)は有義波力、および有義波力を基準とした他の代表波力の比(3種の波群の平均値)を一括して示したものである。ただし、 $d/h=0.600$ 、 $h/L_{1/3}=0.107 \sim 0.0963$ はシリーズIの結果(表-8)を再掲したもので、20種の波群の平均値である。これによると低マウンドの $d/h=0.850$ 、 0.600 の条件では、 $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}=1.50 \sim 2.78$ 、 $\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}=1.21 \sim 1.43$ 、 $\bar{p}_{mean}/\bar{p}_{1/3}=0.528 \sim 0.677$ であり、 $d/h=0.475$ 、 0.350 の高マウンドの条件では、 $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}=1.66 \sim 4.71$ 、 $\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}=1.19 \sim 1.95$ 、 $\bar{p}_{mean}/\bar{p}_{1/3}=0.474 \sim 0.672$ の範囲にある。特に、 $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$ の値が大きく変化するけれども、極めておおざっぱに言えば、高マウンドで大波高条件であればあるほど $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$

防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究

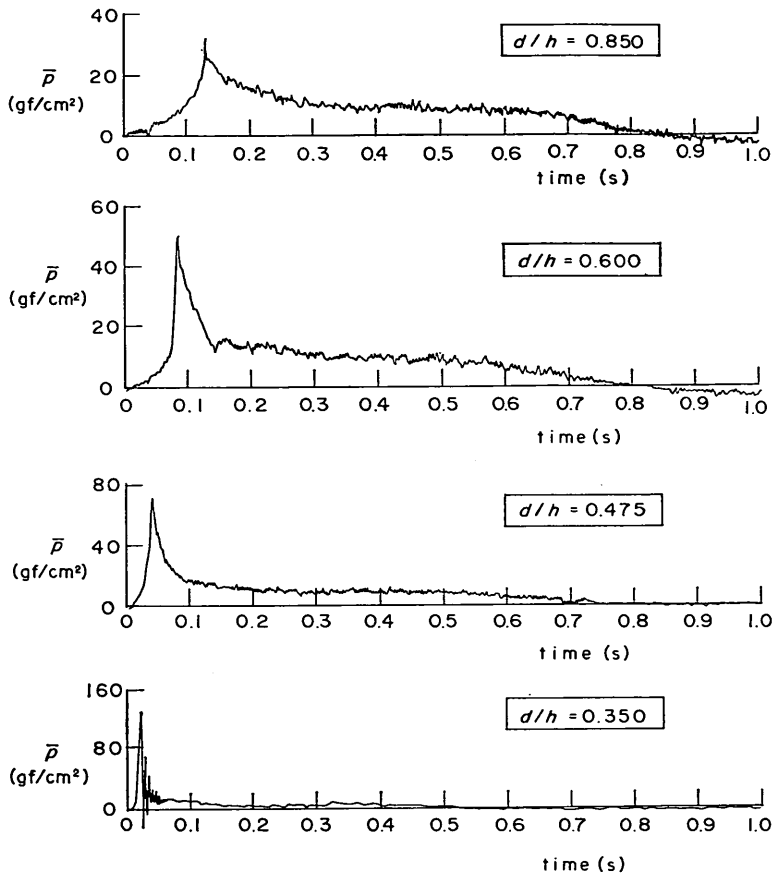


図-40 マウンド高による最大波力波形変化の例
(B1, $e=0.50\text{V}$, $H_{\text{max}}=29.1\text{cm}$)

や $\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}$ の値は大きくなり、 $\bar{p}_{\text{mean}}/\bar{p}_{1/3}$ の値は小さくなる傾向にあるといえる。これは波力の分布幅が広くなることを表している。ただし、もう少し細かく見れば、高マウンド条件では波高がある程度以上大きくなると、特に周期の短い条件において逆の傾向を示すこともある。これは各マウンド高さについて、波力が最も広く分布するような適当な波高条件のあることを表している。

一方、図-42~44(pp.81)は最大波力、1/10最大波力、有義波力の値をそれぞれに対応する代表波高で無次元化してプロットしたものである。横軸の H/d の H もそれぞれに対応する代表波高を表している。データはばらついているけれども、各代表無次元波力の H/d に対する変化の傾向には大差なく、図中の実線はすべての実験値の平均的関係を適当に示したものである。これによると、無次元代表波力の値は H/d によって著しく異なり、特に $H/d=1.0$ 付近から急激に増大する傾向にあることが

知られる。周期による違いを比較すると、 H/d の小さい条件においては周期の長いほうがやや大きく、 H/d の大きい条件では周期の短いほうがやや早く大きくなる傾向が認められる。

図中、合田式による計算曲線、および伊藤式¹⁵⁾による関係も併せて示しておいた。合田式による計算曲線は、 $d/h=0.850$ と 0.350 の二つの条件に対し、 H/d による波力を示したものである。これを実験結果と比較すると、 H/d の小さい条件においてはよく合っているものの、 H/d が大きくなるにつれてその差が大となり、計算値は実験値より非常に小さい値を見積もることになることが知られる。また、伊藤式は波力強度を H/d のみの関数で表したものであるが、 H/d が大きい条件において、合田式よりもさらに波力を過小評価していることがわかる。

ただし、特に伊藤式は不規則波による滑動実験結果か

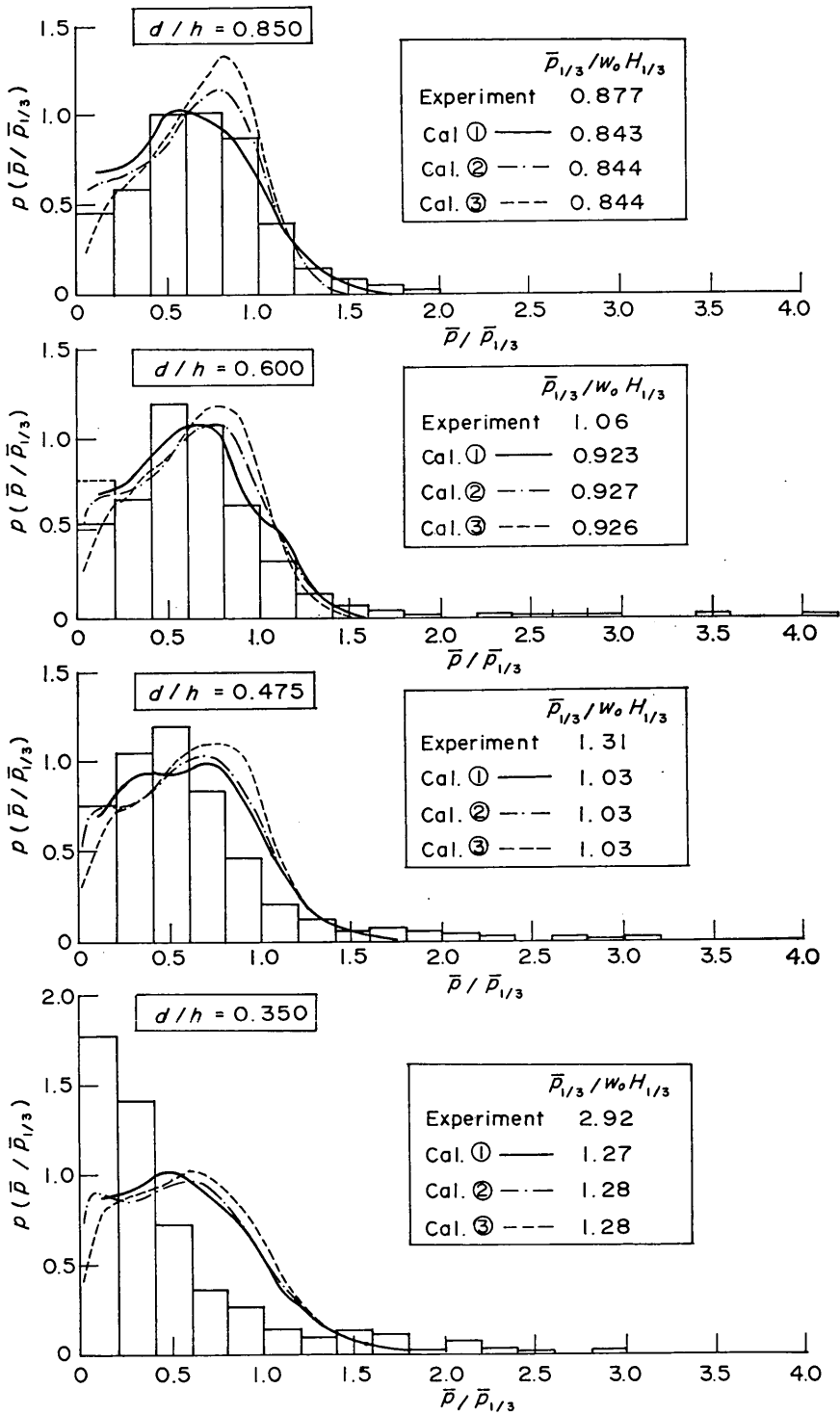


図-41 波力の相対度数分布の例 (シリーズII, B波, $e=0.50V$, $H_{1/3}=20.8\text{cm}$)

防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究

表-9 有義波力と代表波力比 (シリーズII, 低マウンド)

$\frac{h}{L_{1/3}}$	$d/h=0.850$					$d/h=0.600$				
	$\frac{H_{1/3}}{h}$	$\frac{\bar{P}_{1/3}}{\omega_0 H_{1/3}}$	$\frac{\bar{P}_{max}}{\bar{P}_{1/3}}$	$\frac{\bar{P}_{1/10}}{\bar{P}_{1/3}}$	$\frac{\bar{P}_{mean}}{\bar{P}_{1/3}}$	$\frac{H_{1/3}}{h}$	$\frac{\bar{P}_{1/3}}{\omega_0 H_{1/3}}$	$\frac{\bar{P}_{max}}{\bar{P}_{1/3}}$	$\frac{\bar{P}_{1/10}}{\bar{P}_{1/3}}$	$\frac{\bar{P}_{mean}}{\bar{P}_{1/3}}$
0.143	0.258	0.655	1.56	1.21	0.609	0.250	0.624	1.60	1.24	0.610
0.136	0.385	0.765	1.86	1.21	0.677	0.373	0.738	2.21	1.23	0.654
0.127	0.438	0.767	1.92	1.24	0.665	0.423	0.873	2.22	1.35	0.638
0.125	0.480	0.805	1.78	1.24	0.640	0.470	0.963	2.78	1.43	0.599
0.107	0.240	0.753	1.76	1.26	0.550	0.233	0.812	1.68	1.28	0.541
0.106	0.390	0.723	1.66	1.28	0.590	0.373	0.767	2.13	1.32	0.544
0.101	0.493	0.790	1.93	1.26	0.608	0.483	0.946	2.55	1.34	0.586
0.0963	0.520	0.877	1.73	1.26	0.635	0.520	1.06	2.59	1.33	0.605
0.0921	0.248	0.880	1.66	1.26	0.531	0.243	0.856	1.70	1.26	0.528
0.0908	0.393	0.809	1.95	1.24	0.571	0.373	0.885	2.16	1.30	0.561
0.0859	0.493	0.880	2.20	1.29	0.596	0.480	0.957	2.56	1.36	0.579
0.0803	0.540	1.00	2.47	1.27	0.609	0.538	1.20	2.35	1.39	0.578

表-10 有義波力と代表波力比 (シリーズII, 高マウンド)

$\frac{h}{L_{1/3}}$	$d/h=0.475$					$d/h=0.350$				
	$\frac{H_{1/3}}{h}$	$\frac{\bar{P}_{1/3}}{\omega_0 H_{1/3}}$	$\frac{\bar{P}_{max}}{\bar{P}_{1/3}}$	$\frac{\bar{P}_{1/10}}{\bar{P}_{1/3}}$	$\frac{\bar{P}_{mean}}{\bar{P}_{1/3}}$	$\frac{H_{1/3}}{h}$	$\frac{\bar{P}_{1/3}}{\omega_0 H_{1/3}}$	$\frac{\bar{P}_{max}}{\bar{P}_{1/3}}$	$\frac{\bar{P}_{1/10}}{\bar{P}_{1/3}}$	$\frac{\bar{P}_{mean}}{\bar{P}_{1/3}}$
0.143	0.243	0.742	2.04	1.19	0.634	0.235	1.02	3.51	1.40	0.672
0.136	0.363	0.843	3.01	1.38	0.619	0.355	1.99	4.13	1.94	0.499
0.127	0.413	1.08	4.04	1.45	0.601	0.413	2.50	3.44	1.73	0.474
0.125	0.468	1.30	3.31	1.58	0.555	0.465	2.91	2.64	1.79	0.509
0.107	0.228	0.852	1.66	1.25	0.582	0.220	1.02	1.87	1.28	0.623
0.106	0.368	0.892	3.01	1.38	0.584	0.363	1.60	4.00	1.95	0.525
0.101	0.480	1.09	4.18	1.59	0.587	0.478	2.58	3.42	1.74	0.477
0.0963	0.520	1.31	2.61	1.48	0.569	0.520	2.92	2.52	1.66	0.486
0.0921	0.235	1.03	1.77	1.26	0.586	0.228	1.20	1.96	1.26	0.640
0.0908	0.365	0.995	3.11	1.38	0.553	0.360	1.47	4.71	1.67	0.537
0.0859	0.475	1.17	3.14	1.41	0.559	0.473	2.24	3.47	1.64	0.475
0.0803	0.535	1.48	3.68	1.46	0.567	0.535	2.78	3.01	1.64	0.506

ら導かれたもので、その意味で滑動に対する有効波力を表している。³⁾ 作用時間の非常に短い衝撃碎波力が働く場合、そのピーク値がそのまま滑動に寄与するものではなく、マウンド、地盤の変形を考慮した動的応答としてとらえることが必要である。合田¹⁶⁾はそうした動的モデルによる直立部底面のせん断力の計算を行ったが、その結果衝撃力の直立部の滑動に対する静的に等価な平均波力強度は最大の場合でも(2~3) w_0H と推定している。合田式においてもこうした滑動に対する有効波力の限界が考慮されており、混成堤直立部の安定性の検討に用いる設計波力公式としての合田式や伊藤式を、図-42~44の単純な比較から直ちに否定できるものではない。今回の実験はそうした安定性に及ぼす効果は将来の課題として、とりあえず不規則波力のピーク値にのみ着目してその大きさを示したものである。

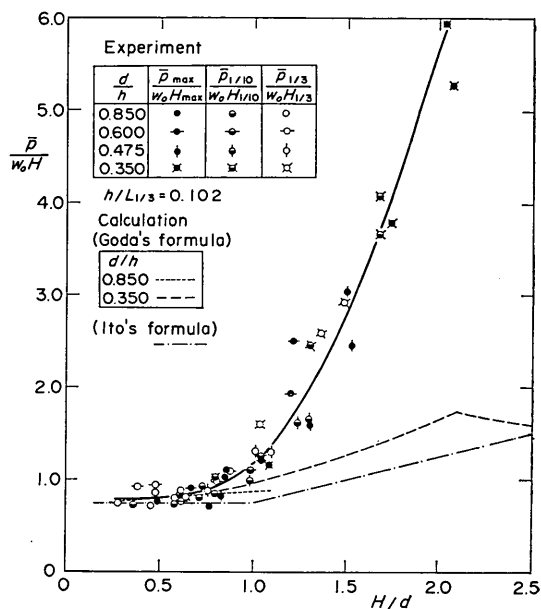


図-43 マウンド高による代表波力の変化 (B波)

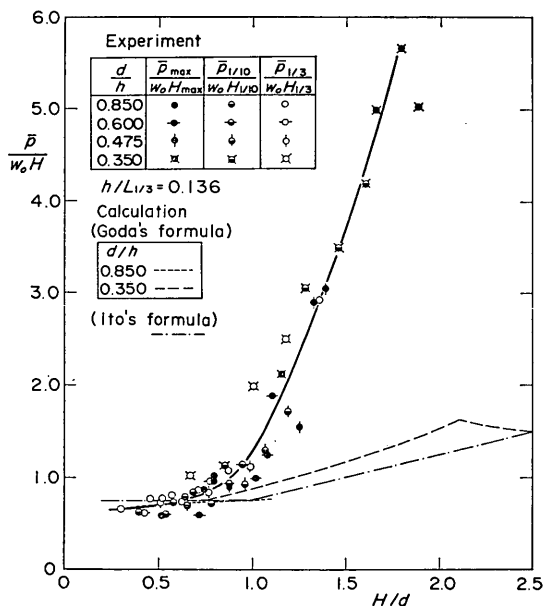


図-42 マウンド高による代表波力の変化 (A波)

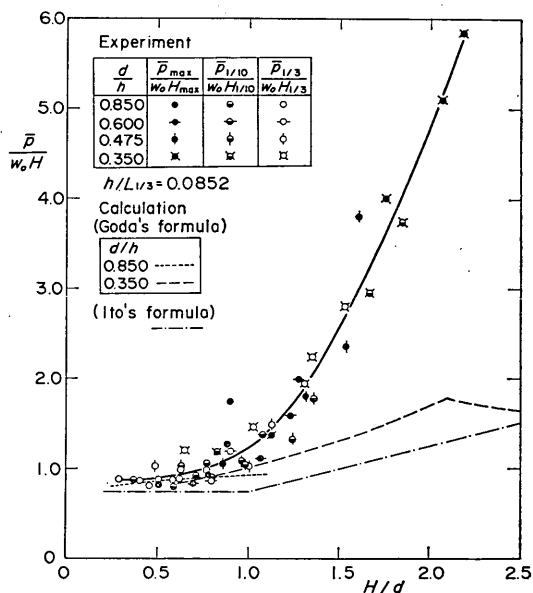


図-44 マウンド高による代表波力の変化 (C波)

5.3 同時波圧分布の例

図-45, 46にB波による $d/h=0.850, 0.350$ の条件での最大波力, 1/10最大波力, 有義波力の同時波圧分布(3種の波群による結果の平均値)を示す。各代表波の諸元に対して, 合田式によって計算した波圧分布も併せて示してある。 $d/h=0.850$ の低マウンド条件で波高が比較的小さいときには, 合田式による波圧分布は実験値によく合っている。 $H_{1/3}/h=0.493, 0.520$ の波高の大きい条件でも, 1/10最大波力や有義波の分布は比較的良好に合っているが, 最大波力については特に静水面より高い所で

実験値が大きい傾向を示している。これは崩れ砕波の波頭部が壁面に局部的に直接衝突するためと推測される。

一方, $d/h=0.350$ の高マウンド条件においても, $H_{1/3}/h=0.220$ のように波高が小さい条件では, 合田式による波圧分布と実験による波圧分布とがよく合っている。しかし, 波高が大きくなって衝撃砕波力が作用するようになると, 実験による波力が非常に大きくなり, 違いが著しい。実験による分布は特に静水面付近で著しく大きい最大値を示す分布となることが認められる。

5.4 衝撃砕波力の発生危険範囲との比較

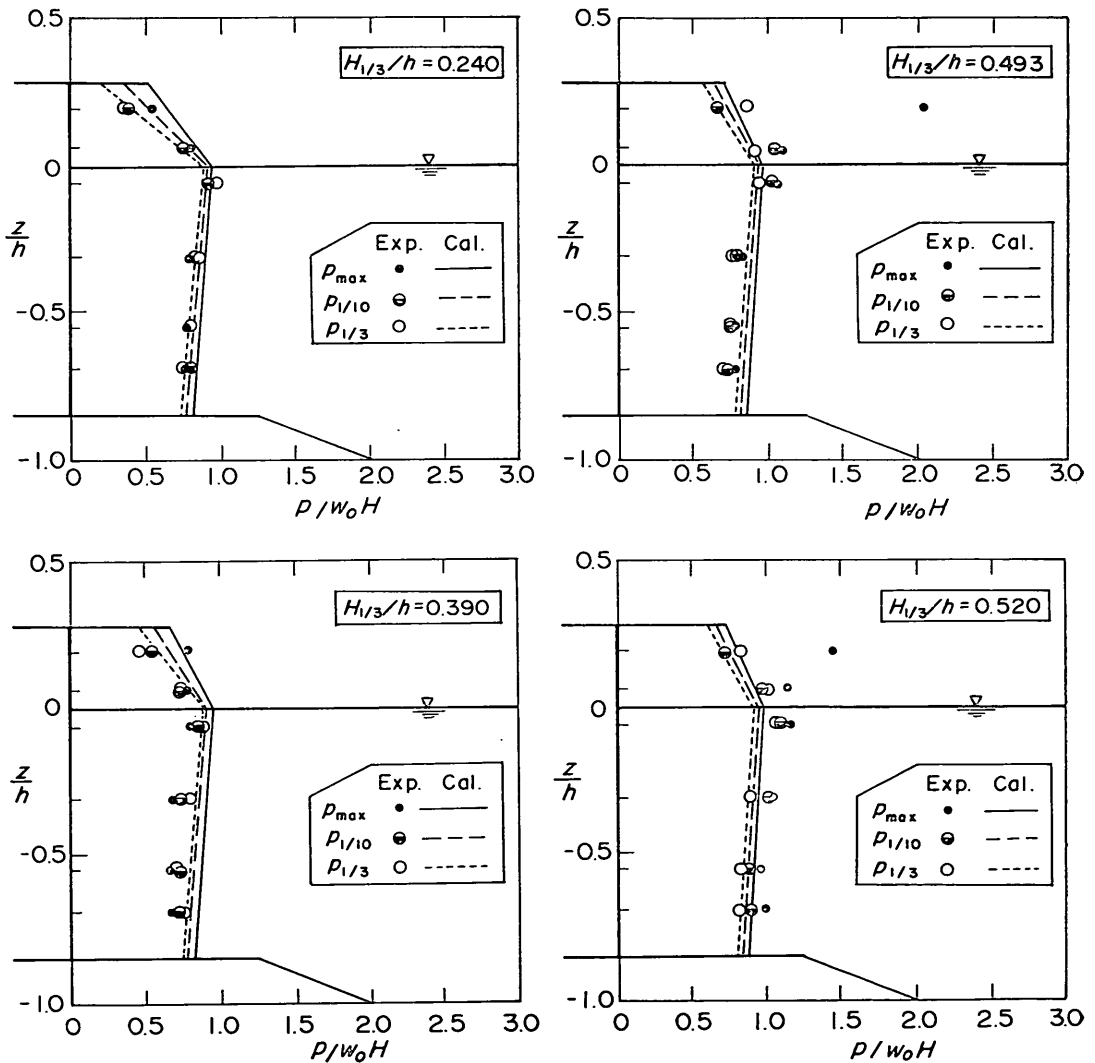


図-45 代表波力の同時波圧分布 (シリーズII, $d/h=0.850$, B1~B3平均)

筆者らは先に各種の規則波実験結果を整理して $H/h-d/h$ 図上に衝撃碎波力の発生危険範囲を提示した。¹⁷⁾ 図-47はその図上に今回の実験による最大波力, 1/10最大波力, 有義波力を適当な平均波力強度ごとにクラス分けしてプロットしたものである。図中, 破線が先に提示した衝撃碎波力の発生危険範囲の限界であり, 各種の実験結果から \bar{p}/w_0H がほぼ2.0以上となる危険性のある限界曲線である。これに対し, 今回の不規則波実験による結果から, $\bar{p}/w_0H=1.0, 1.5, 2.0, 3.0$ となる限界曲線を引いてみたのが図中の実線である。これらの限界は

周期条件などによって入りまじっているけれども, 大勢を代表するように適当に引いたものである。これによると, \bar{p}/w_0H が2.0を越すような衝撃碎波力の発生範囲は先の限界曲線の中に大部分入っているけれども, $H/h=0.7\sim 0.8$ の碎波限界波高に近い条件ではやや下側, すなわち d/h の大きい範囲にまで伸びている。これは, 既に述べたように, 不規則波では波形が種々雑多であり, そうした個々の波の中には, 比較的低マウンドであってもやや強い碎波となって直立壁に衝突する波が存在し得ることによると推測される。事実, ほぼ同じ有義波諸元

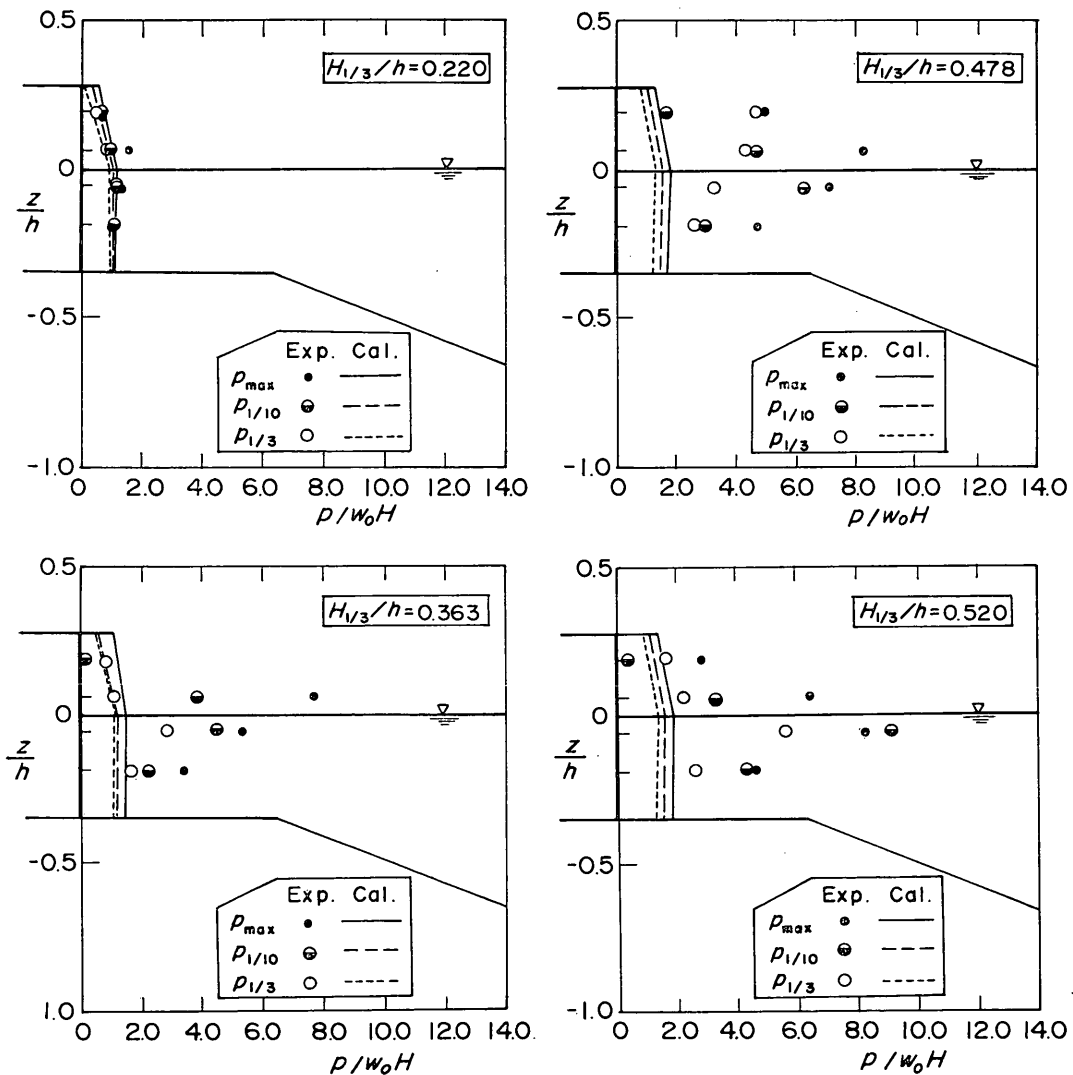


図-46 代表波力の同時波圧分布 (シリーズII, $d/h=0.350$, B1~B3平均)

6.2 代表波力

表-11(pp.88)は有義波力, および有義波力を基準とした他の代表波力の比(3種の波群による結果の平均値)を一括して示したものである。これによると, $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$ は 1.45~2.11, $\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}$ は 1.17~1.35, $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$ は 0.539~0.683の範囲にあり, 消波ブロック被覆なしの結果と比べると, 代表波力比の値が代表波高比に近いことが知られる。

一方, 図-52, 53(pp.89)は最大波力, 1/10最大波力, 有義波力の値をそれぞれに対応する代表波高で無次元化してプロットしたものである。横軸の H'/h の H もそれぞれに対応する代表波高を表している。図中, 波種ごとの全データの平均値と標準偏差を示しているが, 平均値はA波0.660, 0.684, B波0.823, 0.818, C波0.906, 0.918で, 波種すなわち周期によって明らかに違いがあり, 周期が長いほど大きくなる傾向にある。 h'/h の条件によ

ては大差ない。

なお, 図-54(pp.89)は最大波力を有義波高で無次元化してプロットしてみたものである。結果は, 特に $H_{1/3}/h$ の小さい条件で周期による違いが大きく, $\bar{p}_{max}/w_0H_{1/3}$ の値は1.0~1.9の範囲に分布している。しかし, 碎波帯内ではこの違いが小さくなる傾向にあり, $H_{1/3}/h=0.45 \sim 0.55$ 付近では1.2~1.4程度である。

6.3 同時波圧分布

図-55~57 (pp.90~92) は $h'/h=0.850$, 図-58~60 (pp.93~95)は $h'/h=0.350$ の条件での最大波力, 1/10最大波力, 有義波力の同時波圧分布(3種の波群による結果の平均値)を示したものである。合田式を準用する方法($\lambda=1.0$)によって計算した同時波圧分布も併せて示してある。実験値は特に最大波力が静水面付近より上で計算値よりやや大きくなる傾向が認められる。

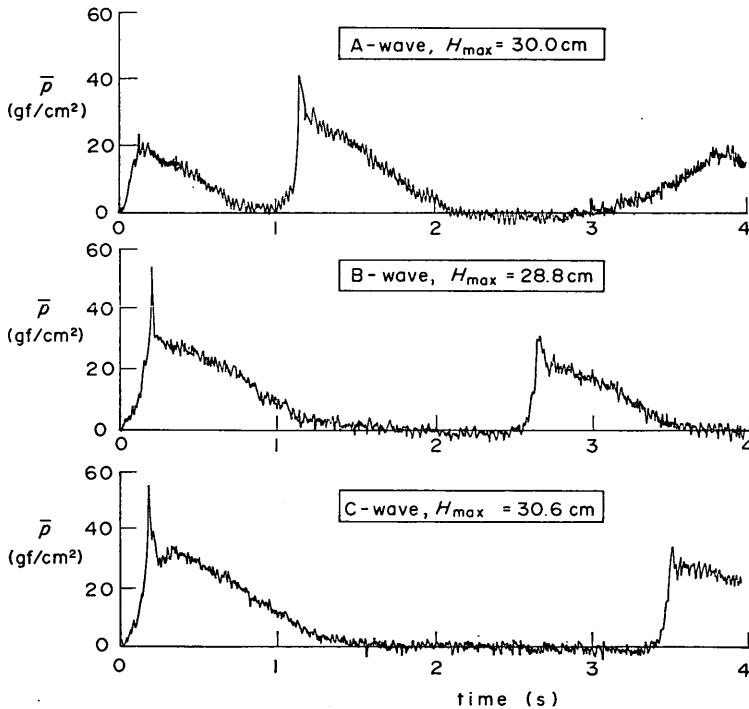


図-48 最大波力波形の例 (シリーズⅢ, $h'/h=0.350$)

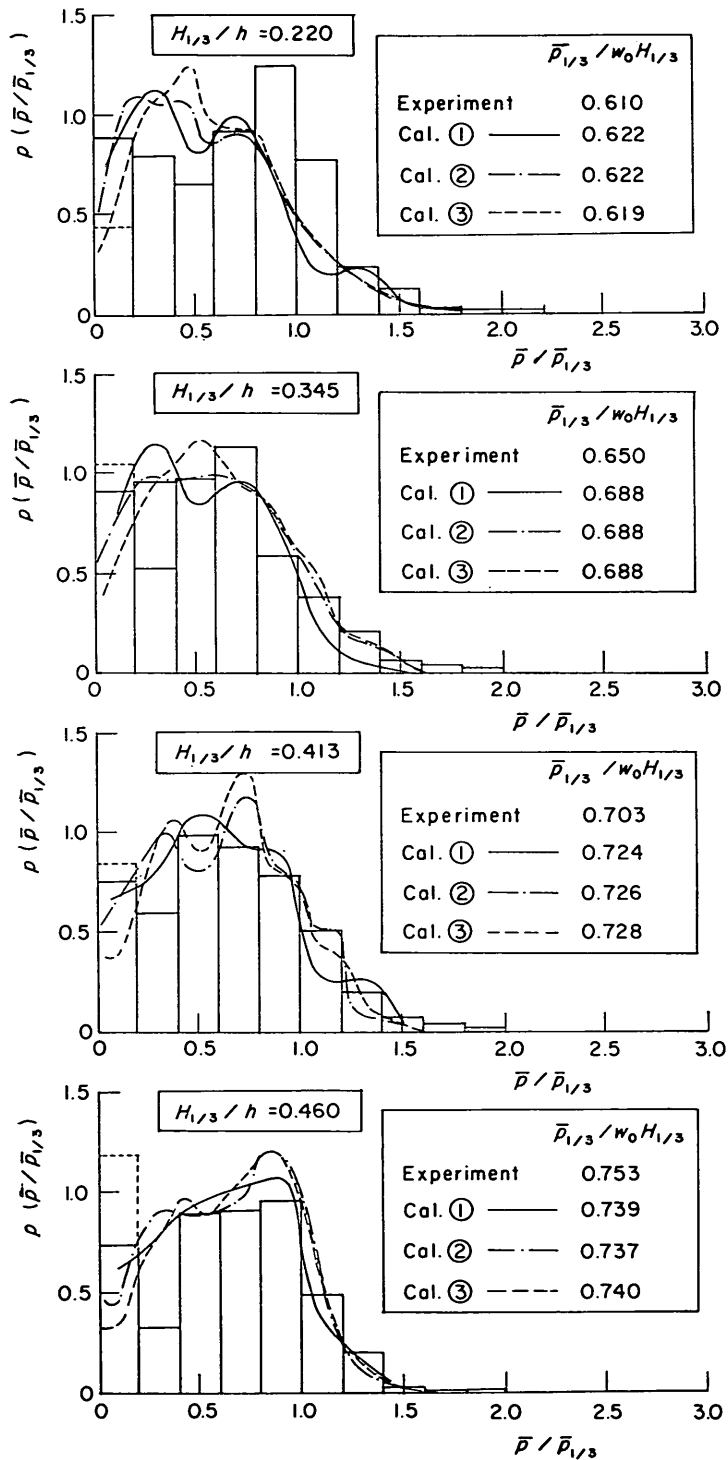


図-49 波力の相対度数分布 (シリーズIII, $h'/h=0.350$, A波)

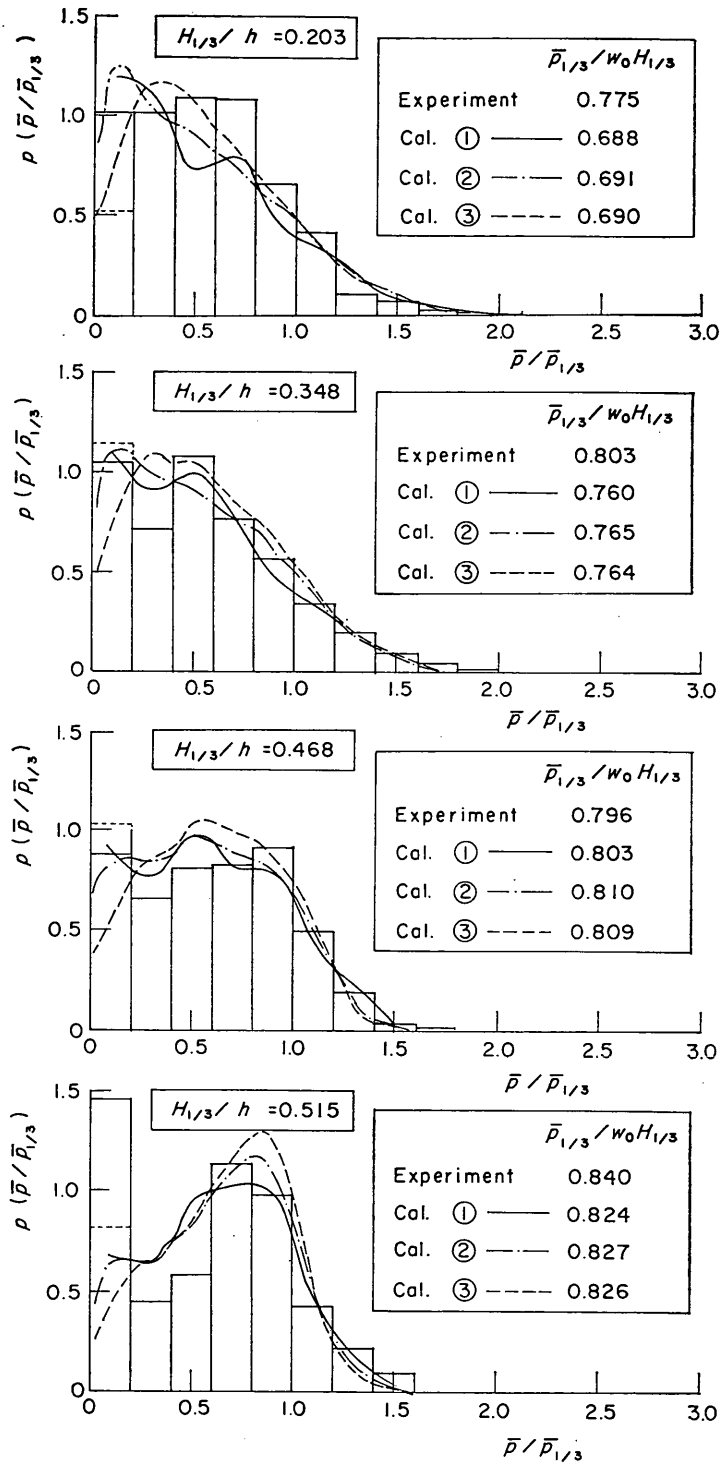


図-50 波力の相対度数分布 (シリーズⅢ, $h'/h=0.350$, B波)

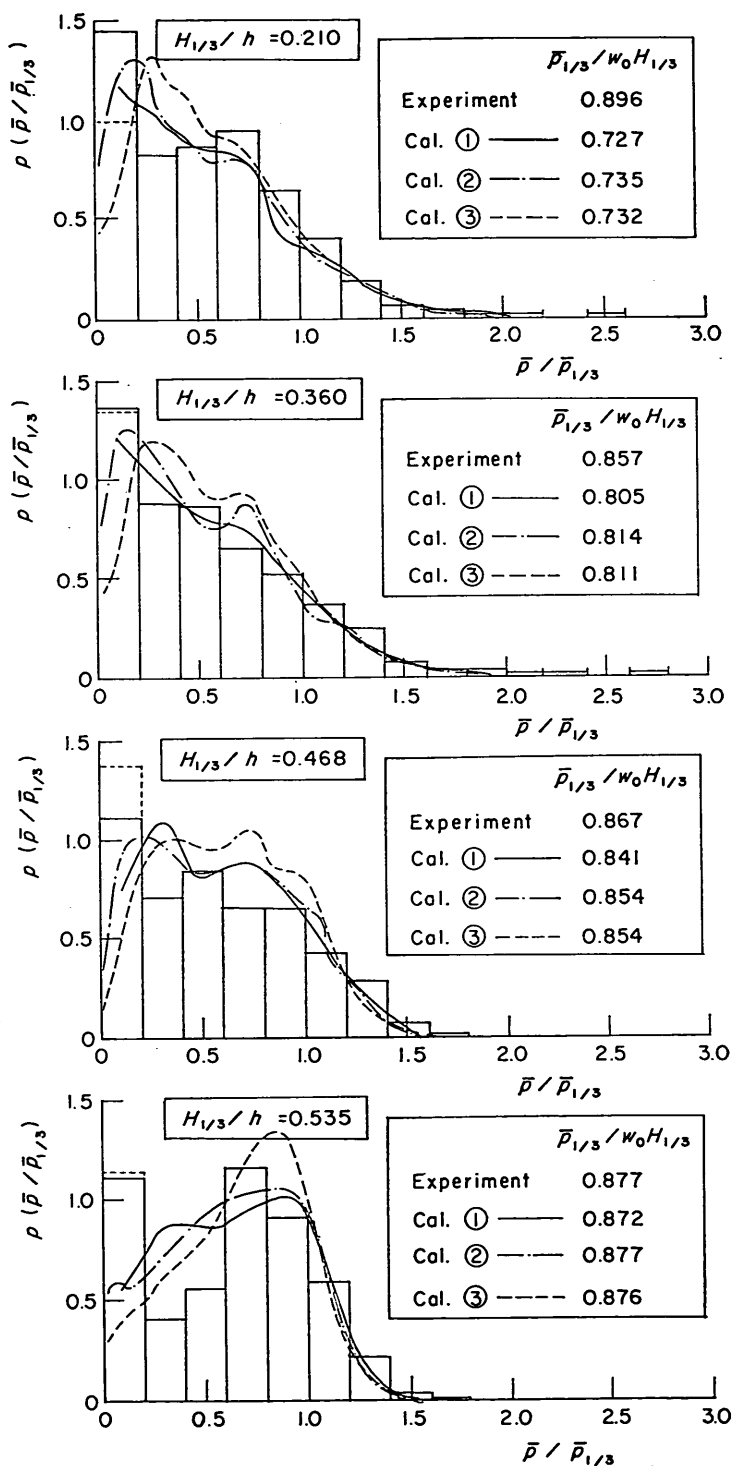


図-51 波力の相対度数分布 (シリーズIII, $h'/h=0.350$, C波)

表-11 有義波力と代表波力比（シリーズⅢ）

波浪条件		$h'/h = 0.850$					$h'/h = 0.350$				
$\frac{h}{L_{1/3}}$	$\frac{H_{1/3}}{h}$	$\frac{\hat{p}_{1/3}}{w_0 H_{1/3}}$	$\frac{\hat{p}_{max}}{\hat{p}_{1/3}}$	$\frac{\hat{p}_{1/10}}{\hat{p}_{1/3}}$	$\frac{\hat{p}_{mean}}{\hat{p}_{1/3}}$	$\frac{\hat{p}_{1/3}}{w_0 H_{1/3}}$	$\frac{\hat{p}_{max}}{\hat{p}_{1/3}}$	$\frac{\hat{p}_{1/10}}{\hat{p}_{1/3}}$	$\frac{\hat{p}_{mean}}{\hat{p}_{1/3}}$		
0.143	0.220	0.590	1.63	1.20	0.624	0.610	1.66	1.20	0.683		
0.136	0.345	0.593	1.77	1.22	0.574	0.650	1.75	1.28	0.595		
0.127	0.413	0.690	1.95	1.25	0.618	0.703	1.65	1.23	0.602		
0.125	0.460	0.733	1.82	1.24	0.591	0.753	1.71	1.20	0.597		
0.107	0.203	0.867	1.65	1.24	0.639	0.775	1.76	1.27	0.659		
0.106	0.348	0.783	1.78	1.27	0.596	0.803	1.79	1.34	0.572		
0.101	0.468	0.763	1.74	1.28	0.598	0.796	1.53	1.19	0.594		
0.0963	0.515	0.803	1.54	1.21	0.606	0.840	1.48	1.22	0.619		
0.0921	0.210	0.950	1.73	1.25	0.583	0.896	2.11	1.29	0.611		
0.0908	0.360	0.843	2.04	1.26	0.553	0.857	2.08	1.35	0.541		
0.0859	0.468	0.827	1.69	1.23	0.561	0.867	1.50	1.25	0.539		
0.0803	0.535	0.873	1.55	1.23	0.603	0.877	1.45	1.17	0.608		

防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究

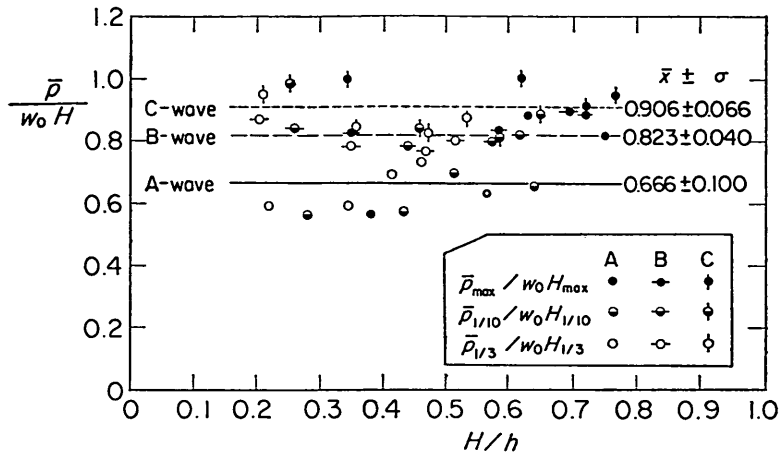


図-52 代表波高と代表波力の関係 (シリーズⅢ, $h'/h=0.850$)

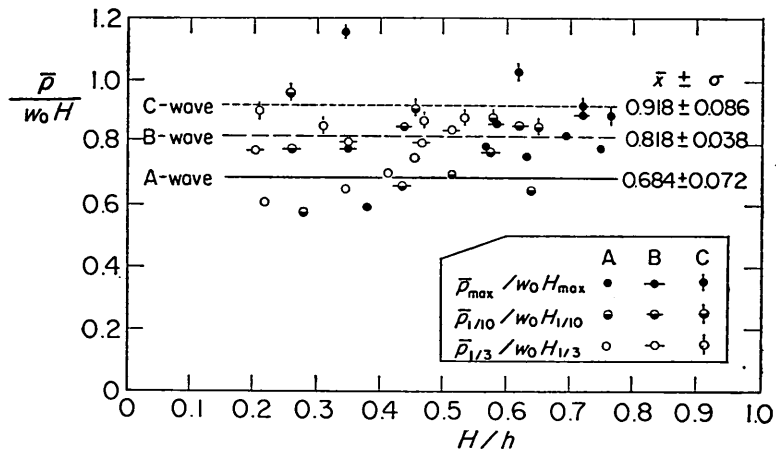


図-53 代表波高と代表波力の関係 (シリーズⅢ, $h'/h=0.350$)

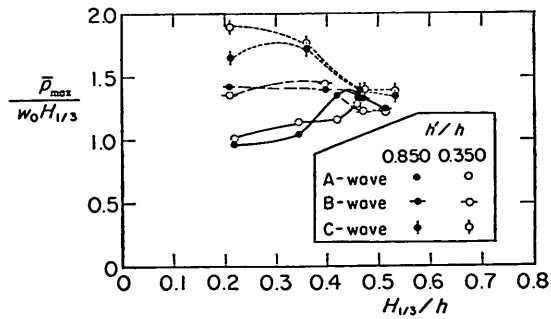


図-54 有義波高で無次元化した最大波力

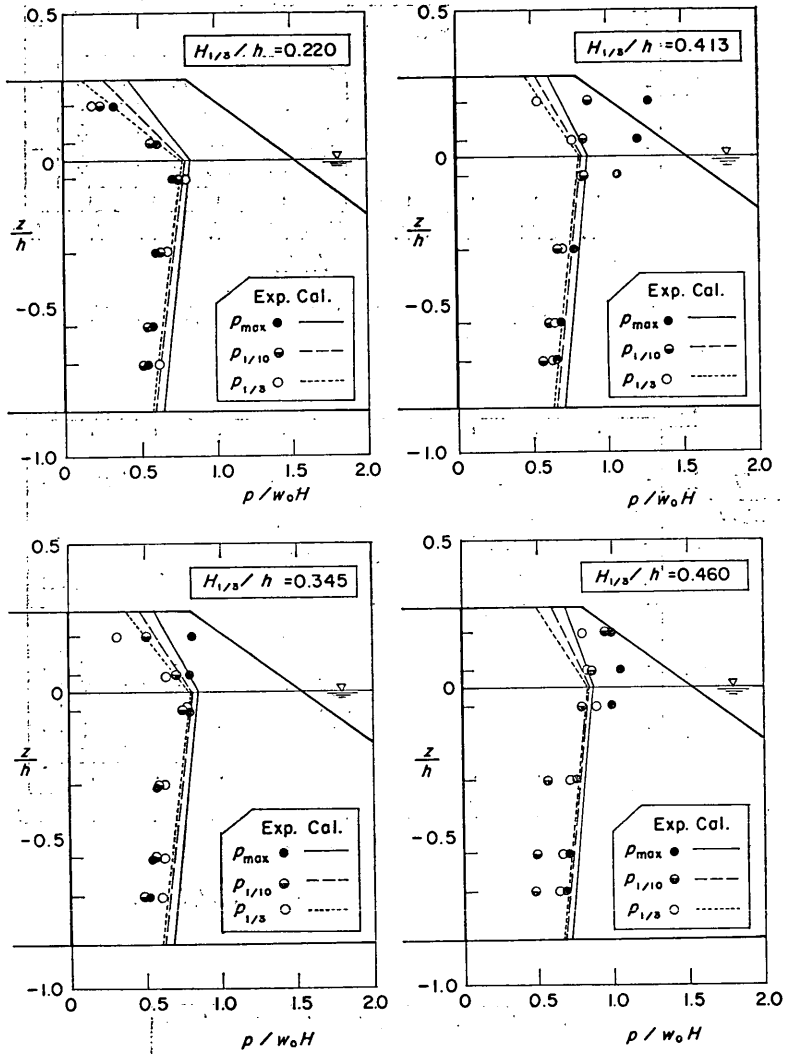


図-55 代表波力の同時波圧分布 (シリーズⅢ, $h'/h=0.850$, A波平均)

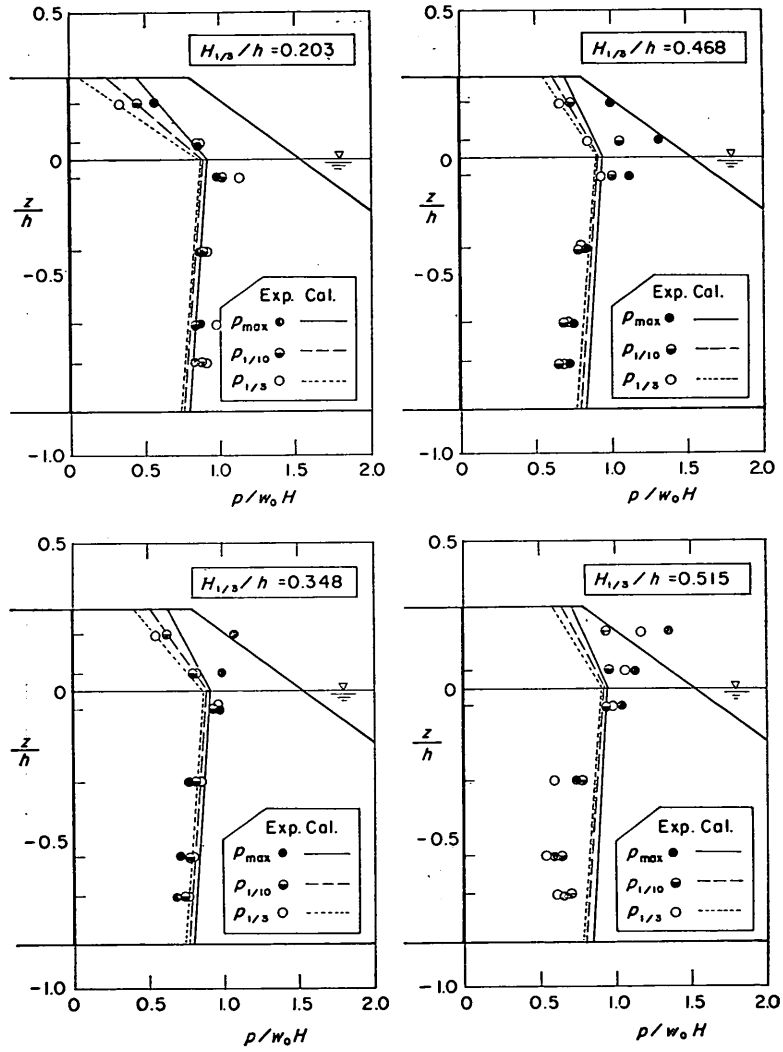


図-56 代表波力の同時波圧分布 (シリーズⅢ, $h'/h=0.850$, B波平均)

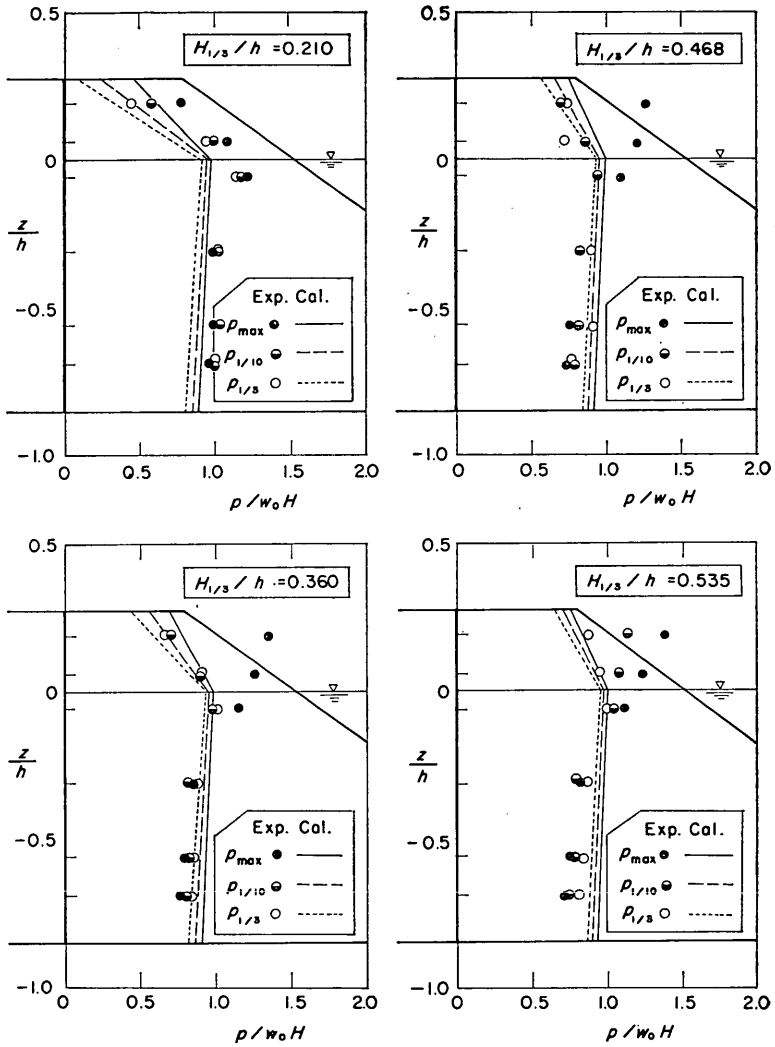


図 57 代表波力の同時波圧分布 (シリーズⅢ, $h'/h=0.850$, C波平均)

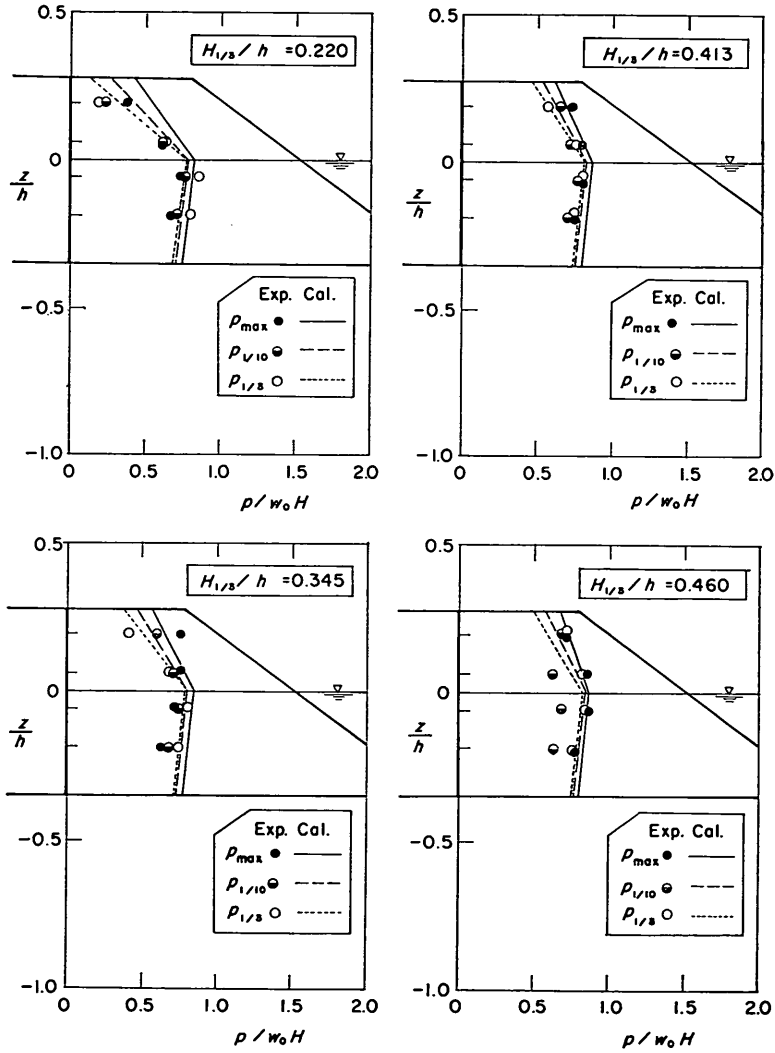


図-58 代表波力の同時波力分布 (シリーズⅢ, $h'/h=0.350$, A波平均)

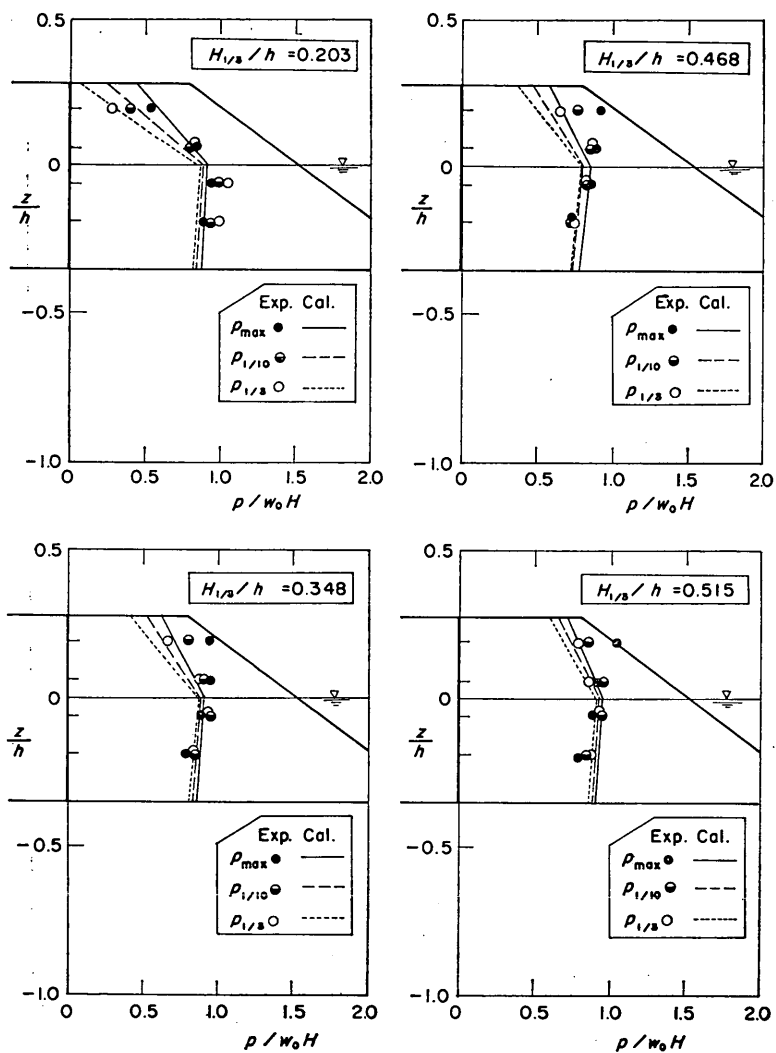


図-59 代表波力の同時波圧分布 (シリーズⅢ, $h'/h=0.350$, B波平均)

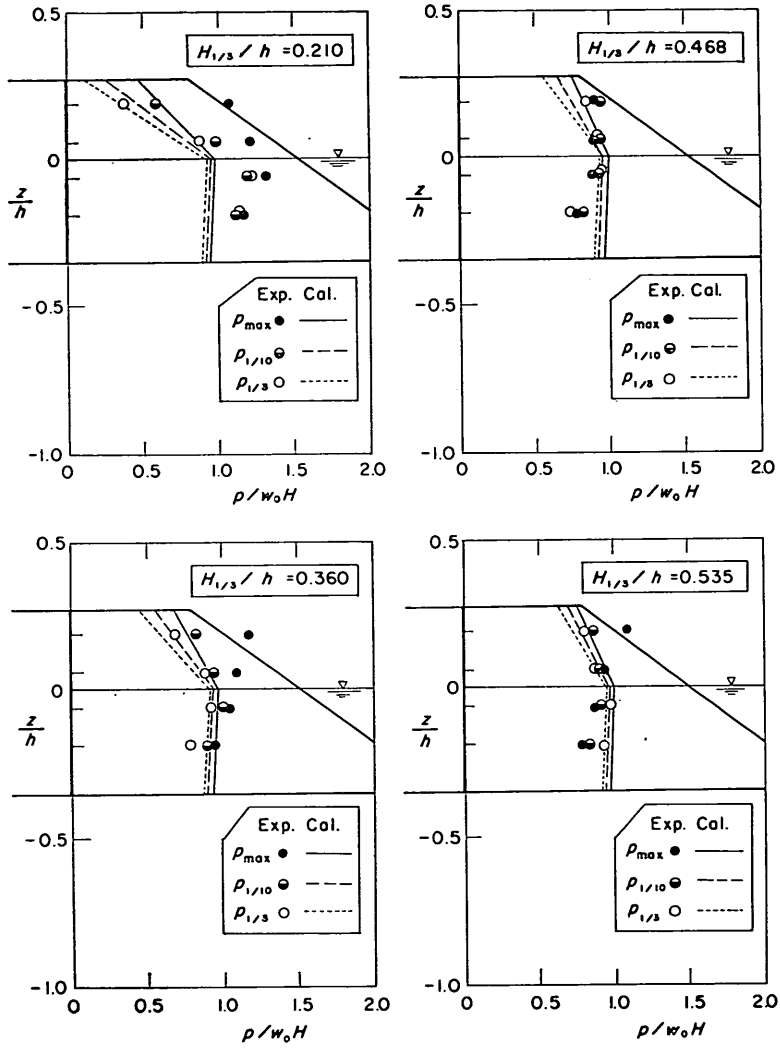


図-60 代表波力の同時波圧分布 (シリーズⅢ, $h'/h=0.350$, C波平均)

6.4 波力低減係数

筆者らは消波ブロックで被覆した直立壁に働く設計波力の算定法として合田式を準用する方法を検討し、波力の低減係数 λ の値を0.8~1.0とするのがよいことを提案している。¹⁸⁾そこで、今回の不規則波力の実験結果に基づいてこれを検討してみる。

波力低減係数の値は実験と計算による合波力が等しくなるように求める。このとき、 λ が作用高さと波圧強度の両方に関係することを考慮して、 λ を求める式が次のように表される。¹⁹⁾

$\eta^* \leq h_c$ のとき、

$$0.75\alpha_1 H \lambda^2 + 0.5\alpha_1(1+\alpha_3)h'\lambda - \bar{p}_E l / (\omega_0 H) = 0 \quad (12)$$

$\eta^* h > c$ のとき、

$$\lambda = \frac{\bar{p}_E l / (\omega_0 H) + \alpha_1 h_c^2 / (3H)}{0.5\alpha_1(1+\alpha_3)h' + \alpha_1 h_c} \quad (13)$$

ここに、

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad (14)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right] \quad (15)$$

$$\eta^* = 1.5\lambda H \quad (16)$$

\bar{p}_E : 実験による平均波力強度

図-61, 62は最大波力, 1/10最大波力および有義波力に対しそれぞれ対応する代表波の諸元を用いて、この λ の値を求め、それぞれの代表波の H/h に対しプロットしたものである。 λ の値は $h'/h=0.850$ の場合0.8~1.2,

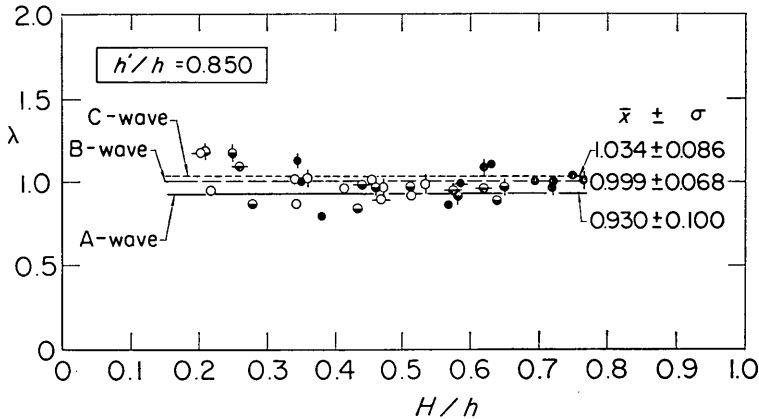


図-61 波力低減係数 ($h'/h=0.850$, 記号は図-52と同じ)

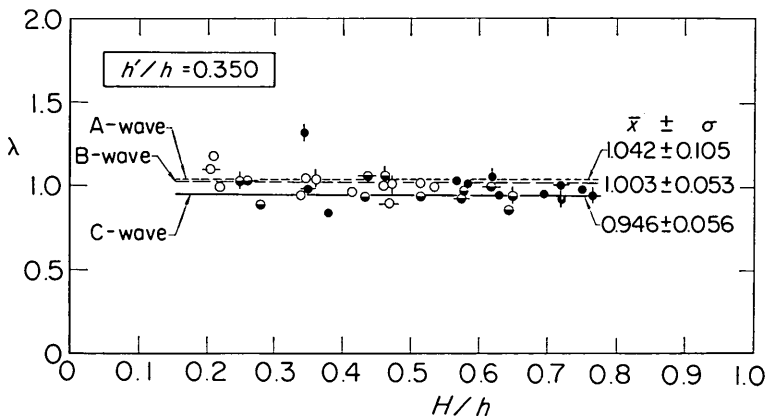


図-62 波力低減係数 ($h'/h=0.350$, 記号は図-53と同じ)

$h'/h=0.350$ の場合0.8~1.3程度の範囲にばらついている。図中、波種ごとに平均値と標準偏差を示しているが、平均値はA波 0.930, 0.946, B波 0.999, 1.003, C波 1.034, 1.042と周期が長くなるにつれてやや大きくなる傾向にある。また、 $h'/h=0.350$ のほうが0.850の条件よりわずかに大きい傾向にあることも認められる。しかし、これらによる違いは小さく、特に実際の設計で対象となることの多い波高の大きい条件では1.0近くに集れんする傾向にあり、 λ の値は1.0と考えてよいようである。

ただし、以上は今回の実験条件の範囲に対するもので、 λ の値は消波ブロックの被覆の程度によって当然変化する。たとえば、先に実施した消波ブロック被覆堤の不規則波による滑動実験の結果では、天端表層2個並びのとき $\lambda=0.7\sim 0.9$ 、3個並びのとき $\lambda=0.7\sim 0.8$ で被覆が広いほど波力がやや低減する傾向が認められている。²⁰⁾

また、同じ表層2個並びでの結果を比較すると、滑動実験による波力低減係数の値が今回の値よりやや小さいことが知られる。これは前出の図-48で認められたように、消波ブロックを被覆した状態といえども、波力波形には作用時間の短い衝撃的波力が現れており、こうした波力が滑動に対する有効波力としては若干減少するのかもしれない。したがって、今回得た波力低減係数 $\lambda=1.0$ というのも、あくまでも直立壁に働く波力のピーク値に対するものであって、滑動に対する有効波力に対する値としては今後さらに検討を要するところである。

7. む す び

本研究によって得た主要な結論をまとめると以下のとおりである。

- 1) 防波堤直立部に働く不規則波力の相対度数分布は、重複波条件の場合や砕波が作用する条件であっても消波ブロック被覆堤の場合(波力低減係数 $\lambda=1.0$)には、波高の確率分布に合田式を適用することによってほぼ推定できる。
- 2) 混成堤の場合には、砕波が作用するようになると、特に波力の大きい範囲で、度数は小さいけれども、広い範囲に分布するようになる。これを除いた分布の主要部分については、低マウンド条件の場合($d/h \geq 0.6$)は合田式による分布とある程度一致する。しかし、高マウンド条件で砕波が作用する場合には著しく違った分布となり、概略の分布を求める場合であっても合田式を適用することはできない。
- 3) 波高と同様に定義した不規則波力の代表値は、波の

不規則性に起因する波高の変動性より高い。たとえば、低マウンド条件($d/h=0.6$)で同一目標スペクトルに対し作成した20波群による有義波高の平均値に対する個々の実現値の相対標準偏差は3%程度であるのに対し、有義波力の相対標準偏差は波高条件によって3.8~8.7%と大きくなる。こうした変動性は最大波力に対して特に著しく、その相対標準偏差は11~26%にもなり、砕波が作用するような波高が大きい条件において顕著である。

- 4) 代表波力間の比は、 $d/h=0.6$ の低マウンドの場合(B波)、1/10最大波力と有義波力の比($\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}$)が波高条件によって1.28~1.34と波高比よりやや大きい程度であるのに対し、最大波力と有義波力の比($\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$)は1.68~2.59と、波高が大きくなるにつれて、波高比の場合とは逆に著しく大となる。こうした $\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}$ や $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$ の値はマウンドが高くなるにつれて大きくなる傾向にあり、高マウンド条件では $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}$ が4を越すこともある。消波ブロック被覆堤の場合には、 $\bar{p}_{1/10}/\bar{p}_{1/3}=1.17\sim 1.35$ 、 $\bar{p}_{max}/\bar{p}_{1/3}=1.45\sim 2.11$ と比較的狭い範囲に分布する。
- 5) 不規則波力の代表値を代表波の諸元に対する合田式による計算波力と比較すると、低マウンド条件($d/h \leq 0.6$)においてはかなりよく一致する。ただし、この条件にあっても砕波が作用する場合の最大波力については定値が相当程度大となることがある。また、高マウンド条件では異常に大きい衝撃砕波が発生するため、計算波力より著しく大きい波力となる。
- 6) 異常に大きい衝撃砕波の発生の危険性は規則波より不規則波の作用において高い。たとえば、 $d/h=0.6$ の条件であっても、砕波が作用するような場合には \bar{p}_{max}/w_0H_{max} が2を超えるようなことがある。これは不規則波の波形は1波1波種々雑多であって、比較的低マウンドであっても波列によっては強い砕波が生じる可能性があることによると推測される。
- 7) 消波ブロック被覆堤の直立部に働く代表波力について、波力低減係数 λ の値を検討した結果、本実験条件の場合 $\lambda=1.0$ 程度であった。

以上、今回の研究においては、不規則波力のピーク値(1波ごとの最大値)にのみ着目してデータを整理し、その結果をとりまとめた。このピーク値の大きい波力は著しく衝撃性を帯びたものであり、これが直立部の安定性にどのように影響するかについては、その時間的変化特性をも明らかにして、動的応答を検討しなければならない。また、不規則波による波力は、特に砕波が作用する場合の最大波力には、波列によって変動性が非常に高

いという性質がある。こうした衝撃的でしかも変動性の高い波力に対して、防波堤をどのように設計していけばよいかという問題は、今後さらに検討していかなければならない課題である。

さらに、防波堤の設計の対象とする波浪条件そのものが非常に確率的なものであり、合理的設計法を追求していけばそうした確率事象を耐用年数との関連でどう考えればよいかということが問題となる。一方、防波堤の機能の面からみれば、極めてまれに生じる事象に対しては機能を損わない範囲で若干の変形を許容するという考え方も生じるし、たとえ被害を受けたとしても、維持・補修まで含めて全体として経済的であれば、それが合理的設計法であるという考え方も生じる。こうした点を定量的に論じるためには、不規則波力の表示法、変形量の推定法、波の発生確率の表示法等と多くの課題を明らかにしていく必要があり、本報告はそうした防波堤の耐波設計法における合理性を追求していくための研究の第1報であると考えている。

なお、本報告における実験は昭和57年度に当時水工部防波堤研究室村永 努技官（現運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所）が主として担当したものである。また、昭和58年度のデータ解析に際しては当所研修員池内章雄氏（三井不動産建設株式会社）の協力を得た。さらに、当所の合田良実水工部長には終始貴重な御教示を頂くとともに、不規則波の砕波変形解析プログラム、波高・周期結合分布解析プログラムを使用させて頂いた。ここに記して、上記各位に深く感謝する次第である。

(1984年6月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1979
- 2) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第12巻第3号，1973，pp.31~69
- 3) 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄：防波堤の安定性に関する研究，港湾技術研究所報告，第5巻第14号，1966，134p.
- 4) 谷本勝利・高橋重雄・吉本靖俊：衝撃応答波形かからの外力推定法について，港湾技研資料，No. 474，1983，24p.
- 5) 富田英治：不規則波実験制御解析システムについて，港湾技研資料，No. 452，1983，34p.
- 6) たとえば，合田良実：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会，1977，pp.145
- 7) Goda, Y. : Numerical experiments on statistical variability of ocean waves, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, Vol. 16, No.2, 1977, pp.3~26
- 8) 前出6)に同じ，pp.170~172

- 9) 合田良実：浅海における波浪の砕波変形，港湾技術研究所報告，第14巻，第3号，1975，pp.59~106
- 10) 前出6)に同じ，pp.179~184
- 11) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No. 248，1976，28p.
- 12) 谷本勝利・富田英治・村永 努：水路における不規則波の再反射波の影響について，港湾技研資料，No. 467，1983，23p.
- 13) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉芳和・鈴木諭司：曲面スリットケーソンの水理特性に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第19巻，第4号，1980，pp.3~55
- 14) 谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄：混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力の発生と対策について，港湾技術研究所報告，第20巻第2号，1981，pp.3~39
- 15) Ito, Y. : Stability of mixed-type breakwater—A method of “Probable sliding distance”—, *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 14, 1971, pp. 53~61
- 16) 合田良実：衝撃砕波圧を受ける混成防波堤の挙動に関する考察，港湾技術研究所報告，第12巻 第3号，1973，pp.3~29
- 17) 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
- 18) 谷本勝利・本 浩司・石塚修次・合田良実：防波堤の設計波力算定式についての検討，第23回海岸工学講演会論文集，1976，pp.11~16
- 19) 谷本勝利・小島朗史：傾斜堤上部工およびブロック式混成堤に働く波力，港湾技研資料，No. 450，1983，32p.
- 20) 谷本勝利・大里睦男・高岡征二郎・内田豊彦・池田辰男：不規則波による消波ブロック被覆堤の安定実験，第26回海岸工学講演会論文集，1979，pp.343~347

主要記号一覧表

- B_B : 消波ブロック被覆堤の天端面表層の被覆幅
 B_M : 混成堤基礎マウンドの前肩幅
 b_0 : 消波ブロック被覆堤の静水面での被覆幅
 d : マウンド被覆工天端面上の水深（本実験の場合， $d=h'$ ）
 e : 造波機入力信号の基準電圧
 f : 成分波の周波数
 f_c : ローパスフィルターのカット周波数
 H : 波高の一般表示
 H_{max} : 最高波高（個々の波群中の最高波高あるいは各種の波群の最高波高の平均値）
 $H_{1/10}$: 1/10最大波高（個々の波群の1/10最大波高あるいは各種の波群の1/10最大波高の平均値）
 $H_{1/3}$: 有義波高（個々の波群の有義波高あるいは各種の波群の有義波高の平均値）
 \bar{H} : 平均波高（個々の波群の平均波高あるいは各

防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究

- 種の波群の平均波高の平均値)
- $H_{1/3}^*$: 沖側測点における有義波高
- $\bar{H}_{1/3}$: 各種の波群の有義波高の平均値 (個々の波群の値と区別を要するときのみ使用)
- $H_{G1/3}$: 入力信号の見掛け上の有義波高
- h : 水深 (一般には堤体設置位置での水深)
- h' : 直立部の基面水深
- h_c : 直立部の静水面上天端高
- h_G : 造波機位置での水深
- h_M : 混成堤基礎マウンドの厚さ
- K_R : 反射率
- L : 波長の一般表示
- $L_{1/3}$: 有義波波長
- l : 直立部の全高 (= $h' + h_c$)
- N_0 : データの総数
- N_w : 波の総数
- n : データのクラス別度数
- P : 直立部全面に働く波圧合力 (波力)
- p : 波圧強度の一般表示 (変動波圧あるいはピーク値)
- p_{\max} : 最大波圧強度 (P のピーク値が最大となるときの各測点での同時波圧強度)
- $p_{1/10}$: 1/10最大波圧強度 (P のピーク値の大きいほうから数えて1/10の平均値に対応する各測点での同時波圧強度)
- $p_{1/3}$: 有義波圧強度 (P のピーク値の大きいほうから数えて1/3の平均値に対応する各測定での同時波圧強度)
- \bar{p} : 波力強度 (P/l , 変動波力強度あるいはピーク値)
- \bar{p}_{\max} : 最大波力強度 (ピーク値, 個々の波群, あるいは各種の波群の平均値)
- $\bar{p}_{1/10}$: 1/10最大波力強度 (ピーク値, 個々の波群, あるいは各種の波群の平均値)
- $\bar{p}_{1/3}$: 有義波力強度 (ピーク値, 個々の波群, あるいは各種の波群の平均値)
- \bar{p}_{mean} : 平均波力強度 (P のピーク値の平均値に対応)
- $\langle \bar{p}_{1/3} \rangle$: 各種の波群の $\bar{p}_{1/3}$ の平均値 (個々の波群の値と区別を要するときのみ使用)
- $R(H, T)$: 波高・周期の相関係数 (R と略記することもある)
- S : スペクトル密度
- T : 波の周期の一般表示
- T_{\max} : 最高波の周期 (個々の波群, あるいは各種の波群の平均値)
- $T_{1/10}$: 1/10最大波の周期 (個々の波群, あるいは各種の波群の平均値)
- $T_{1/3}$: 有義波周期 (個々の波群, あるいは各種の波群の平均値)
- \bar{T} : 平均波の周期 (個々の波群, あるいは各種の波群の平均値)
- $\bar{T}_{1/3}$: 各種の波群の $T_{1/3}$ の平均値 (個々の波群の値と区別を要するときのみ使用)
- $T_{G1/3}$: 入力信号の見掛け上の有義波周期
- T_R : 波高・周期の結合分布における波高クラスごとの平均周期
- w_0 : 流体の単位体積重量
- \bar{x} : 変動量の平均値の一般表示
- z : 静水面を基点とした鉛直軸 (上向きを正)
- Δ : 各クラスの分割幅
- Δf : データのサンプリング周波数
- η : 水位
- λ : 消波ブロック被覆による波圧の低減係数
- σ : 標準偏差の一般表示
- ϕ : 造波板での再反射による波高増大率