

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. 27 NO. 1 MAR. 1988

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第27巻 第1号 (Vol. 27, No. 1), 1988年3月 (Mar. 1988)

目 次 (CONTENTS)

1. 大水深混成堤の耐波安定性に関する研究 (第1報)
—台形型直立部に働く波力および滑動安定性—
.....谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司..... 3
(Study on Stability of Deep Water Breakwaters against Waves
(1st Report)—Wave Forces on Upright Section of Trapezoidal
Shape and its Stability against Sliding—
.....Katsutoshi TANIMOTO, Katsutoshi KIMURA and Keiji MIYAZAKI)
2. 極値統計におけるプロットング公式ならびに推定値の信頼区間に関する数値的検討
.....合田良実.....31
(Numerical Investigations on Plotting Formulas and Confidence
Intervals of Return Values in Extreme Statistics.....Yoshimi GODA)
3. 一軸圧縮強度のばらつきとその要因について
.....土田 孝・小林正樹・山川 匠・平良 聡.....93
(Effect of Fissures on the Undrained Strength of Clay
..... Takashi TSUCHIDA, Masaki KOBAYASHI, Takumi YAMAKAWA
and Satoshi TAIRA)
4. 鉄筋コンクリート被覆による腐食鋼管杭の補修工の耐力特性
.....清宮 理・千葉照男・横井聡之... 125
(Mechanical Properties of Repaired Steel Pipe Pile Covered by Reinforced
Concrete Osamu KIYOMIYA, Teruo CHIBA, and Toshiyuki YOKOI)

1. 大水深混成堤の耐波安定性に関する研究(第1報)

——台形型直立部に働く波力および滑動安定性——

谷本勝利*・木村克俊**・宮崎啓司**

要 旨

水深60mの大水深混成防波堤を対象として、直立部に働く波力および滑動安定性に関する実験(模型縮尺1/40)を行い、その結果を理論計算と対比しつつ考察した。直立部は下部が台形、上部に二重横スリットの消波部を有した変形ケーソンで、底面水深は現地で-27mである。実験ではこのほかケーソンの前後を逆にして波の入射側に消波部のない構造も対象とした。これを反射型と呼び、正規のものを消波型と呼ぶ。

大水深重複波条件の最大の特徴は波の谷のときの負の波力が大きいことである。本報告ではこれを規則波、不規則波実験での測定波圧や有限振幅重複波理論に基づく計算結果で示すとともに、重量を70~80%に減じた条件での滑動実験によってケーソンが前後に揺られるように滑動することを実証した。さらに、剛マウンドを仮定した滑動モデルによる計算を行って、滑動量の定量的評価では波力の時間変化、越波による上部工への打ち込み波力および伝達波による背面での波力等の二次的要素が非常に重要であることを示した。これらを考慮した滑動量の計算結果は実験結果の平均的關係にはば一致した。

キーワード：防波堤，台形ケーソン，波力，重複波，滑動

* 水工部 防波堤研究室長

** 水工部 防波堤研究室

1. Study on Stability of Deep Water Breakwaters against Waves (1st Report) — Wave Forces on Upright Section of Trapezoidal Shape and its Stability against Sliding —

Katsutoshi TANIMOTO*, Katsutoshi KIMURA**, Keizi MIYAZAKI**

Synopsis

The deepest breakwater in the world is under construction at the depth of 60 m in Kamaishi Port. In this study, laboratory experiments of wave forces and the stability against sliding have been carried out for the proposed section with the model scale of 1/40. The upright section of the mixed type breakwater is shaped in a trapezoid at the lower part and is the wave dissipating type of double horizontal slit walls at the upper part. In the experiments, however, another section with the solid vertical wall in its front was tested in order to verify the effectiveness of wave energy dissipating devices.

The most remarkable feature of wave forces due to standing waves in deep water is that the negative peak is larger than the positive peak in the absolute values. In the report, this fact is demonstrated by both results of irregular wave tests and calculations with the fourth order approximate theory of finite standing waves. The results of sliding tests also show that the upright sections are moved in both directions of the shore and the offshore sides. This is very different from the features of shallow water breakwaters which exhibit the sliding accumulated only in the shore side direction.

The theoretical considerations suggest that wave forces on the crown top of the caisson due to the overtopping and the wave forces on the rear face due to waves transmitted behind it are very important to evaluate the sliding distances as well as the time variations of wave forces on the front. The sliding distances calculated with considerations of those factors indicate fairly well the average relations of the measured sliding distances which are considerably scattered.

Key Words: Breakwater, Trapezoidal Caisson, Wave Force, Standing Wave, Sliding

* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division.

** Member of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division.

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	7
2. 実験の方法	7
2.1 実験水路および模型	7
2.2 実験の種類と実験ケース	8
2.3 不規則実験波の特性	9
3. 壁面での水位と重複波圧	11
3.1 水位・波圧の時間変化の例	11
3.2 水位変化の特性	11
3.3 重複波圧の特性	13
4. 消波型ケーソンに働く波力	14
4.1 スリット部材に働く波力	14
4.2 各壁面に働く波力	16
4.3 全体に働く波力	17
5. 滑動安定性	19
5.1 変位記録の例と波別滑動量	19
5.2 累積滑動量および残留滑動量	21
6. 滑動モデルによる考察	22
6.1 滑動モデル	22
6.2 計算結果	23
6.3 波力計算における問題点	24
6.4 波力を修正したときの波別滑動量の計算結果	26
7. む す び	27
参 考 文 献	28
主要記号一覧	28

1. まえがき

わが国の防波堤の主要構造様式は基礎捨石マウンドの上にコンクリートの直立壁体を据付けた混成堤である。これの設計技術については、多年にわたる調査研究と現地における実績によって、実用的にはほぼ確立された段階にある。

一方、近年における防波堤建設の大きな特徴の一つはその大水深化である。その例を挙げると、1966年には最大水深38mの大船渡港湾口津波防波堤が竣工したが、これは当時わが国では他に20mを超える防波堤はなく、異例の大水深防波堤であった。その後、清水港で1975年に最大水深28mの三保防波堤が竣工した。また、新潟東港（西防波堤）、小名浜港（沖防波堤）、長崎港（港口外防波堤）、名瀬港（西および東防波堤）などで最大水深31~40mの防波堤が建設中である。

これらの防波堤の構造はいずれも通常のケーソンを用いた混成堤である。しかし、最近においては、大水深防波堤においても低反射性が要求され、さらに大水深化に伴う工費の高騰を抑ええる新しい構造が求められるようになった。現在、釜石港湾口津波防波堤（最大水深63m）を始めとして、下田港外防波堤（同42m）、柴山港防波堤（同35m）などの大水深防波堤が建設中あるいは計画されているけれども、いずれも低反射等の新たな要請を満足しつつ、大波浪条件下での経済的な建設が課せられている。また、大水深混成堤においては、マウンド部の安定性、特に被覆材をどの深さまで伸ばせばよいかということが問題となり、さらに基本的には非砕波領域での波浪条件の不確実性に対し、いかに合理的に設計するかといった設計上の多くの課題が残されている。そのため、筆者らは大水深に適した構造の開発¹⁾を含めた大水深混成堤の耐波安定性に関する研究を、主として現地計画における具体的な課題解決を通じて推進中である。

そうした研究の一つは現在一部建設が進められつつある釜石港湾口津波防波堤の深部構造案に関する実験的検討であり、1985年にはマウンド被覆材の安定性、1986年には直立部に働く波力および滑動安定性に関する模型実験を行った。これらはいずれも運輸省第二港湾建設局の要請を受けて実施したものである。本報告はそのうち後者の実験結果等に基づき、大水深における直立部に働く波力および滑動安定性上の特性を一般的視点から論じるものである。

2. 実験の方法

2.1 実験水路および模型

(1) 実験水路および通過波の測点

実験は長さ105m、幅3m、深さ2.5mの大型造波水路で行った。当水路は図-1に示しているように、途中から隔壁を設けてあり、堤体模型を設置したのは幅80cmの狭水路側で、造波板から約72mの地点である。堤体位置の前方水底は1/100の勾配をつけてある。造波機は低慣性直流電動機駆動のピストン型で、入力信号に追従して不規則波を造波できる。

堤体設置以前の状態での通過波は堤体設置位置および前方11.4m地点でそれぞれ2台、計4台の容量式波高計を用いて測定した。それぞれの波高計の間隔は50cmである。

(2) 堤体模型

対象とした堤体は、図-2に示しているように、基礎捨石マウンドの上に直立部（以後、上部工を含めて単にケーソンという）を据付けた水深60mにおける混成堤²⁾の縮尺1/40の模型である。基準面水深は150cm（現地換算60m）、ケーソンの基面は-67.5cm（現地換算-27m）の大水深防波堤である。ケーソンは全高が83cm（現地換算33.2m）、下幅87.5cm（現地換算35m）、上幅47.5cm（現地換算19m）の下方が台形で、上方波の入射側

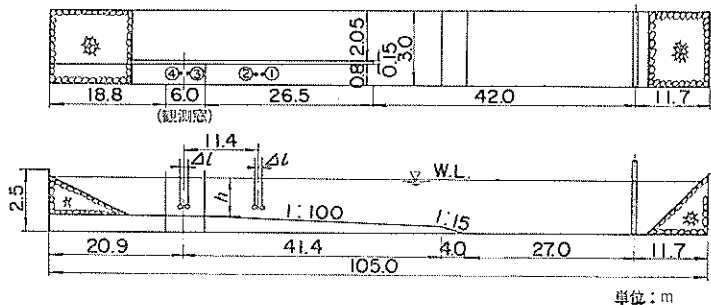


図-1 実験水路

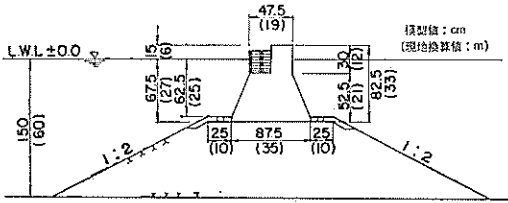


図-2 堤体模型の断面

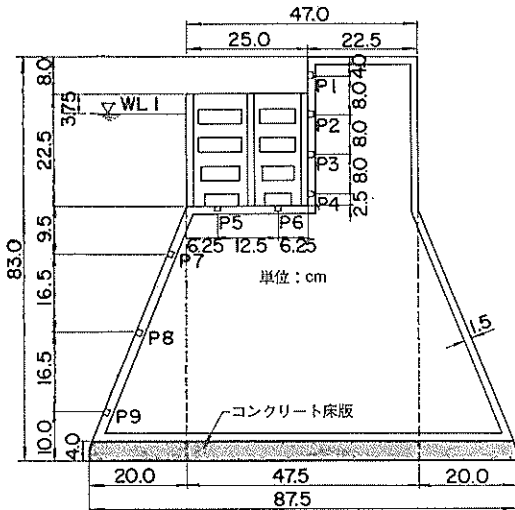


図-3 ケーソン部の断面

には二重横スリットの消波部を有している。ただし、実験では比較のためにケーソンの前後を逆にして波の入射側を不透過な壁とした状態も一部対象としている。そのため、消波部が波の入射側にある正規の状態を消波型、そうでない状態を反射型と呼んで区別する。ケーソン模型の詳細については後述する。

基礎捨石マウンドは重量0.13~11.7gf（現地換算約8~750kgf）の砕石で、天端面付近のみ重量5.3~13.3gf（現地換算約340~850kgf）の選別した砕石で被覆し、さらに高さ5cm×幅7.5cm×長さ7.5cm（現地換算重量30tf）の根固めブロックを波のケーソン前後に2個並びとしている。

(3) ケーソン模型と波圧等の測点

ケーソン模型の側面図および壁面における波圧の測点を図-3に示す。ケーソンの模型はアクリル合成樹脂板で製作したものである。ただし、底は滑動実験を行うため、厚さ4cmのコンクリート版としている。波圧の測点は図にP1~P9で示しているように合計9点で、小型および超小型波圧計を受圧面がそれぞれ壁面に一致するように固定している。

一方、図-4は消波部の平面、正面、側面の3面図を示したもので、これらの部材にもひずみゲージや超小型波圧計を埋め込み、消波部の部材に働く波力を測定できるようにしてある。

2.2 実験の種類と実験ケース

実施した実験は次の2種に大別される。

- ① 規則波による波力実験
- ② 不規則波による滑動実験

規則波による波力実験は消波部スリット部材に働く波

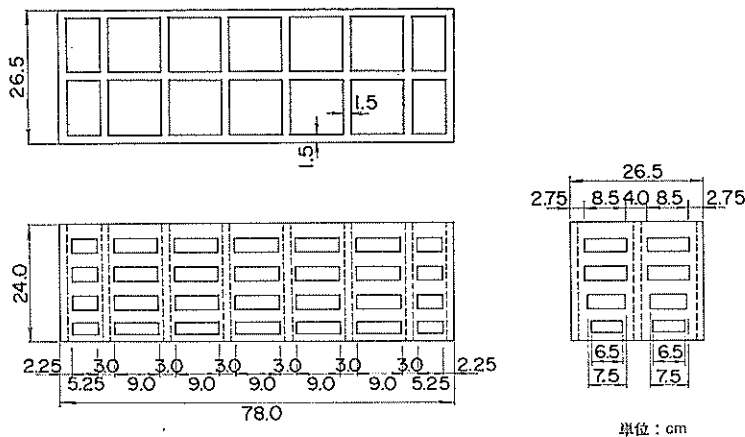


図-4 消波部の模型

表-1 規則波による波力実験

構造型式	潮位 (cm)	周期 (s)	波高 (cm)
消波型	+3.75 (WL1)	1.42 (A波)	12, 16, 20, 24
	±0.00 (WL2)	1.90 (B波)	20, 25, 30, 35, 40
	-5.00 (WL3)	2.21 (C波)	20, 25, 30, 35, 40

力や壁面に働く波圧を測定したもので、消波型のみを対象としている。規則波実験においては波がほぼ定常状態となる9~10波を測定の対象とした。実験ケースの一覧を表-1にまとめているが、潮位は3.75, 0, -5 cm (現地換算1.5, 0, -2 m) の3種類で、それぞれWL1, WL2, WL3と呼ぶ。波浪条件は周期が1.42, 1.90, 2.21 s (現地換算9.0, 12.0, 14.0 s) の3種類で、これをそれぞれA, B, C波と呼ぶ。波高は各周期条件ごとに12~40 cm (現地換算4.8~16.0 m) の4~5種類である。ここに、潮位-5 cmというのは現地における直立部の沈下以前の状態を水位を下げることで対応させたものであり、マイナスの潮位があるという意味ではない。

一方、不規則波による滑動実験は不規則波作用下での滑動量を防水型差動トランス変位計で測定したものである。ただし、変位計はケーソン背後の天端下5 cmに取り付けており、変位にはロッキングや傾斜によるものも含まれる。そのほか、変位と同時に前面台形斜面壁での波圧(2~3点)および底版前端位置での水位を計測している。不規則波の有義波周期は規則波実験のB波に相当する1種である。Bretschneider・光易型スペクトルを目標とした有効波数約200波の波列を3波群用意し、それぞれB1, B2, B3波と呼ぶ。さらに、波高レベルは有義波高が7~24 cmの範囲で4種に変化させており、低いレベルからたとえば、B11, B12, B13, B14というように呼ぶ。ここに、Bのあとの最初の1は1番目の波群、次の1~4は波高レベルを表し、大きいほど有義波高が大きいことを表す。ケーソンの空中重量は現地重量を模型縮尺した約0.7, 0.8, 1.0倍の値の3種に変化させており、これをそれぞれW1, W2, W3と呼んでいる。W3の空中重量は約5.5 kgf/cmである。対象とした構造型式は消波型、反射型の2種で、潮位はWL1を中心とし、一部WL2, WL3でも実験を行っている。

なお、これらの規則波による波圧や不規則波による滑動実験の解析は不規則波実験解析装置(ミニコンDS-600)で行っており、カットオフ周波数は20Hz、データ数は1チャンネルあたり8,192個である。このうち規則波実験の波圧解析は9~10波を対象とし、その平均波形を求めている²⁾。不規則波実験に対するデータサンプリ

ング周波数は24Hzである。

2.3 不規則実験波の特性

(1) スペクトルの形状

通過波高は前出の図-1に示したように4点で測定した。以下、潮位WL1, すなわち堤体位置での水深が153.75 cmの条件について、不規則実験波の諸特性を示す。これらの不規則波の解析はデータサンプリング周波数12Hz、データ数4,096個で不規則波実験制御解析装置(NOVA 4)⁴⁾で行ったものである。

図-5に岸側測点でのスペクトルを示す。3波群の平均的形状で、有義波高 $H_{1/3}=19.7$ cm, 有義波周期 $T_{1/3}=1.95$ sの例である。目標とした Bretschneider・光易型

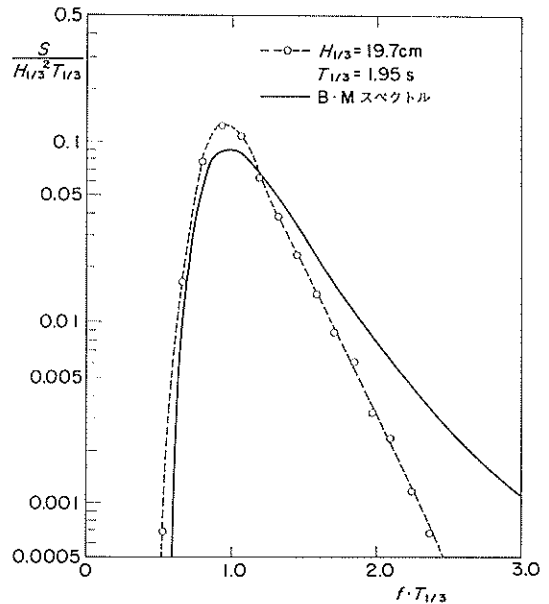


図-5 実験波のスペクトル

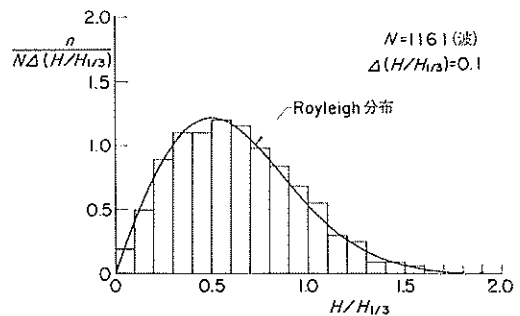


図-6 実験波の波高分布

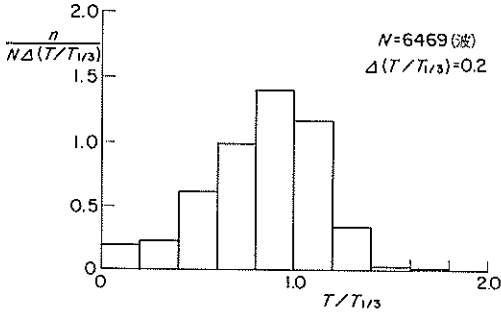


図-7 実験波の周期分布

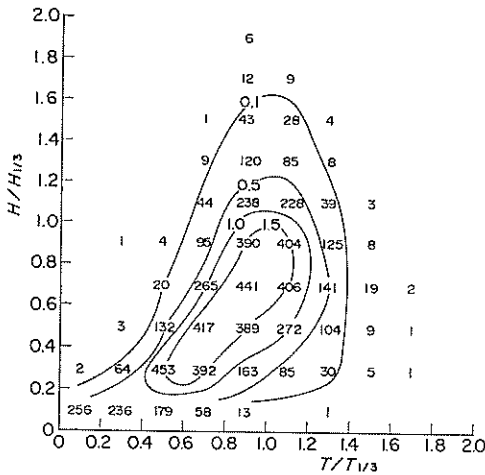


図-8 周期・波高の結合分布

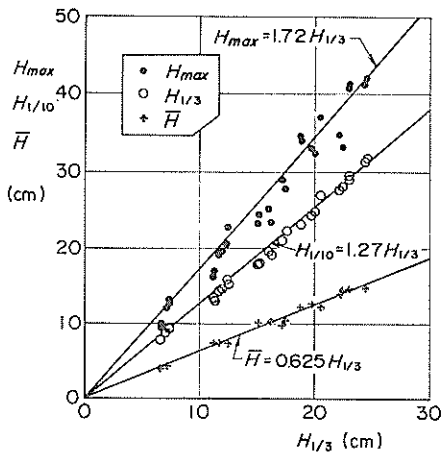


図-9 有義波高と他の代表波高の関係

のスペクトルもあわせて示してあるが、低周波側でやや大きく、高周波側で小さい形状となっている。

(2) 波高・周期の分布

図-6に波高の頻度分布を確率密度の形で示している。B1, B2, B3波の波高3および5レベルの波列ごとの無次元データを集計したもので、総波数は1,161波である。図中、レーリー分布を示してあるが、波高の頻度分布はこれによく一致している。

図-7はB波の周期の頻度分布を示したものである。ただし、全波高レベルのデータを集計しており、総波数は6,469波である。また、図-8は周期と波高の結合分布である。数値はクラス別の度数で、確率密度の等値線も示してあるが、大きい波高の周期は有義波周期のまわりに分布していることが知られる。

(3) 代表波高の関係

図-9は潮位WL1の条件でのB波の有義波高とその他の代表波高（最高波高 H_{max} 、1/10最大波高 $H_{1/10}$ 、平均波高 \bar{H} ）との関係を示したものである。図中、レーリー分布に基づく理論による関係も示してあるが、実験値にほぼあっている。ここに、有義波高と最高波高の関係は平均波数216に対する期待値の関係で、 $H_{max}=1.72H_{1/3}$ である。

(4) 堤体による反射率と多重反射の影響

図-10に潮位WL1の条件での、B波に対する消波型、反射型の反射率 K_R を示している。この反射率は沖側2点で測定した水位記録から入射波の分離計算を行って求めたもので、横軸にはマウンド天端上の水深 d に対する入射波の有義波高の比をとっている。反射型では、波高が大きくなるにつれて反射率がやや小さくなるのに対し、消波型ではほとんど変化がない。全データの平均値は、反射型が0.78、消波型が0.50である。

こうした堤体からの反射波が造波板によって再反射されるので、堤体設置後の入射波は設置前での通過波と異なることがある。そのため、沖側測点での多重反射によ

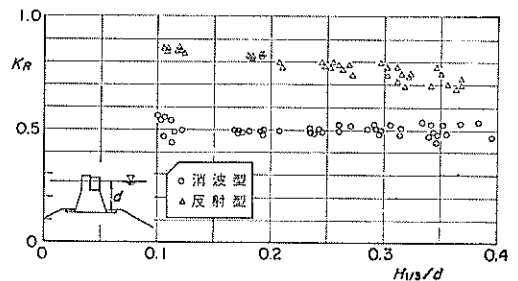


図-10 堤体の反射率 ($h/L_{1/3}=0.275\sim 0.288$)

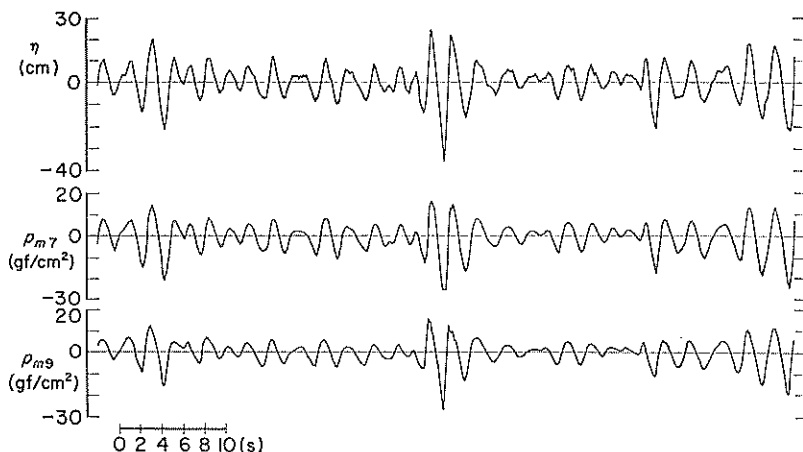


図-11 壁面水位と波圧の記録例

る波高の増大率を求め、通過波の波高にこれに乗じることによって、入射波高を与える手法を用いる⁵⁾。しかし、当水路では反射波を生ぜしめる堤体は全水路幅の27%であるほか、導波板などによるエネルギー消費もあるので、今回の実験での波高増幅は反射型であっても10%未満であった。

3. 壁面での水位と重複波圧

3.1 水位・波圧の時間変化の例

不規則波滑動実験においては、前述したように、前面斜面壁で波圧を測定するとともに、壁直前位置で水位を記録した。波圧の測点は、消波型についてはP7とP9の2点、反射型についてはP8を加えた3点である。重量W3のケースは滑動がほとんどなく、水位・波圧実験と考えることができる。ただし、水位は台形ケーソンの底板前端位置で測定したもので、静水面では壁前方20cmになるけれども、以後これを壁面水位と呼ぶ。

図-11に消波型(W3)の場合のB15波の水位と波圧の記録例を示す。上から壁面水位 η_s 、測点P7、P9での波圧 p_{m7} 、 p_{m9} の記録である。本章では、こうした記録から水位記録のゼロアップクロスを基準とした波別解析結果に基づき、水位や波圧のピーク値の諸特性を述べる。ただし、堤体を設置したときの壁直前での水位のゼロアップクロス法による波数は、堤体設置以前の状態で測定した通過波の波数とは同じ解析時間であっても異なり、一般に設置後の波数が5~15%程度少なくなる傾向にある。以下の統計解析では波数の基準値としてはそれぞれの状態での波数を用いる。

3.2 水位変化の特性

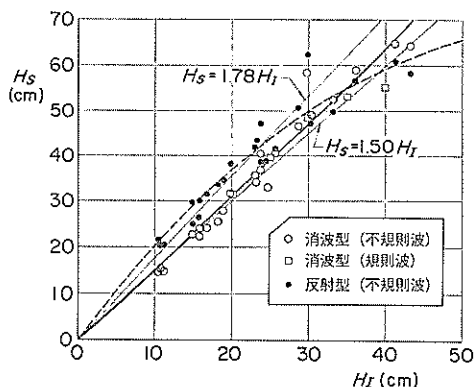


図-12 入射波高と壁面波高の関係

(1) 通過波高と部分重複波高

堤体設置後の壁面水位の波高は反射波の重なった状態でのもので、通過波の波高とは当然異なる。ここでは、設置後の壁直前の波高計位置での波高を単に部分重複波高と呼ぶ。図-12は通過波の代表波高(H_{max} , $H_{1/10}$, $H_{1/3}$, \bar{H})と部分重複波の代表波高の相関を示したものである。いずれも潮位がWL1で、B13, B15, B23, B25, B33, B35 ($T_{1.0} = 1.9$ s)の6種類の波群に対する値をプロットしてある。また、図中消波型、反射型のデータに対し、それぞれ最小自乗法であてはめた2次曲線および次式による直線を示してある。

$$H_s = (1 + K_R) H_I \quad (1)$$

ここに、 H_I , H_s はそれぞれ通過波、部分重複波の波高、 K_R は反射率である。反射率はこの周期に対する平均値を用いており、前述したように消波型が0.50、反射

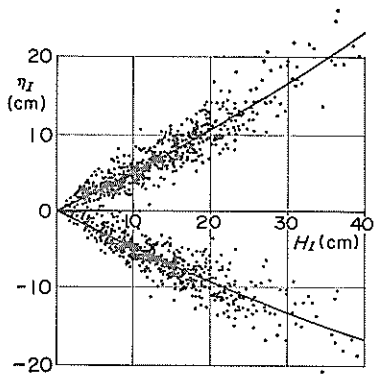


図-13 波高と波の峰および谷の高さ（入射波）

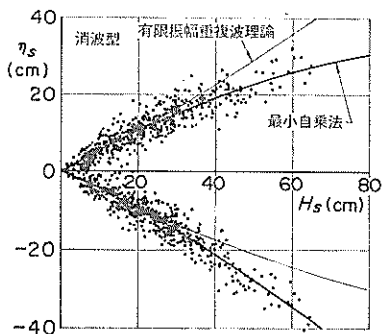


図-14 波高と波の峰および谷の高さ（消波型）

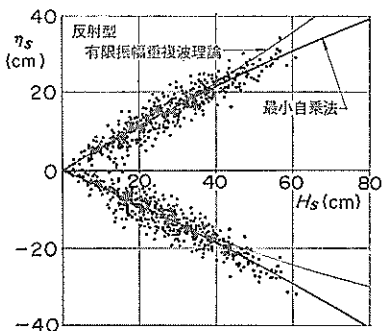


図-15 波高と波の峰および谷の高さ（反射型）

型が0.78である。実験値は波高の小さい領域では式(1)の関係に近い。波高の大きい領域のデータには最高波高が含まれているのでばらつきが大きい。消波型ではやや大きく、反射型では小さくなる傾向にある。これは大きい波高では越波が生じるので小さくなる傾向にあるこ

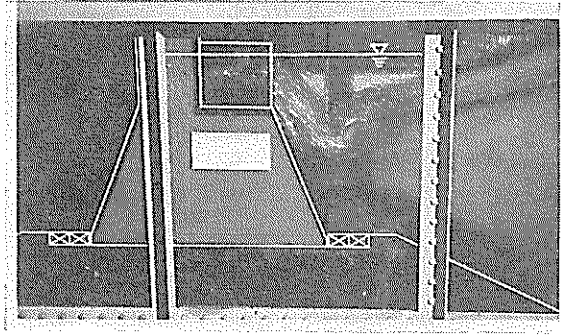


写真-1 波の作用状況

と、消波型では後述するように波の谷のときの水位低下が大きいことが要因といえる。また、消波型については規則波実験の関係もプロットしてある。波高の大きい条件では不規則波の場合よりやや小さい傾向が認められる。

(2) 波高と波の峰および谷の高さ

不規則波の1波ごとの波高と峰および谷の高さの関係を示す。図-13は通過波の関係、図-14、15はそれぞれ消波型、反射型の関係である。いずれも最大波高レベルでの3波群のデータを集計してプロットしたものである。図中、それぞれ最小自乗法による2次曲線と、消波型、反射型については有限振幅重複波第4次近似理論⁶⁾から求めた関係を参考のため示してある。この有限振幅重複波理論の関係というのは、周期を有義波周期とし、直立壁が底面に直接設置されている状態での壁面位置での計算結果によるもので、これに対する横軸の H_S は入射波高の2倍に相当する。

不規則波群中の個々の波高と峰および谷の高さの関係は様々であるからデータはばらついているが、3種の状態で傾向的相違が認められる。すなわち、通過波の状態では、波高が大きくなるにつれて波の峰の高さが大きくなる傾向を示しており、進行波の有限振幅波としての特性が現れている。これに対し、堤体を設置した状態では峰が低く、谷の水位低下が大きい傾向にある。特に、消波型でその傾向が顕著である。これは、写真-1に示しているように、波の谷のとき遊水室からの落下水が打ち込み、その影響によって波面が局所的に低下するところに波高計があることによる。

(3) 入射波高と部分重複波の峰および谷の高さ

図-16、17は潮位がWL1で、B波の全ケースについて、入射波高（通過波高）と部分重複波の峰および谷の高さのそれぞれ代表値（最大、1/10最大平均、1/3最大

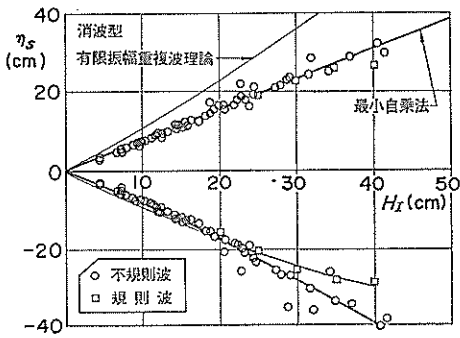


図-16 入射波高と波の峰および谷の高さ (消波型)

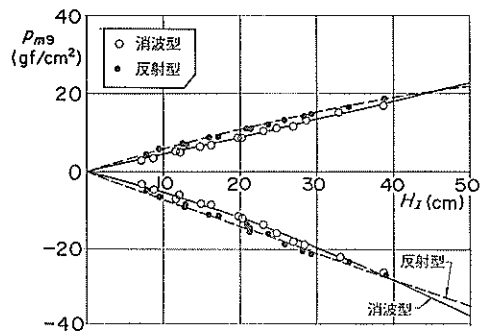


図-18 入射波高と波圧 p_{m0} の代表値の関係

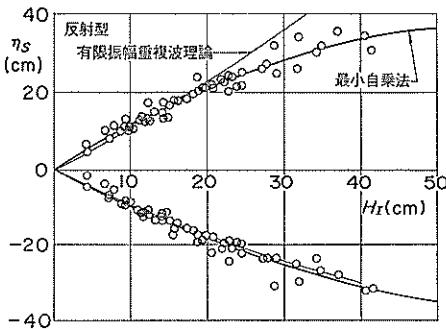


図-17 入射波高と波の峰および谷の高さ (反射型)

平均、全平均) 同志の関係をプロットしたものである。最大値のデータがばらついているけれども、全体的には比較的よくまとまっている。ただし、消波型については規則波のデータもプロットしてあるが、特に谷の低下量が不規則波の場合より小さい傾向にある。

図中の曲線は有限振幅重複波理論による関係と不規則波データに対し最小自乗法によって求めた2次曲線である。データの傾向を有限振幅重複波理論と比べると、消波型では峰の高さが全体に低く、谷の低下量は波高の大きい条件で大きい傾向にある。一方、反射型では谷の低下量は理論計算値とよくあっているが、峰の高さは波高が大きくなるにつれて小さくなる傾向にある。これらは越波や消波の影響、特に消波型の場合は落下水の影響などによっている。

3.3 重複波圧の特性

(1) 入射波高と p_{m0} の代表値の関係

図-18 は通過波高に多重反射による波高増幅率を乗じて求めた入射波の代表波高 (H_{max} , $H_{1/10}$, $H_{1/3}$) とそれに対応する波圧の代表値との関係をプロットしたもの

である。波圧は測点 P 9 での値で、3 波群の結果を平均して示してある。図中の曲線はそれぞれ最小自乗法ではめた2次曲線であるが、適合度は高い。正・負の波圧を比較すると、負の波圧が絶対値で大きくなっている。これは有限振幅重複波の特徴であり、先に報告した大水深における二重円筒ケーソンに働く波圧においてもそうであった⁷⁾。これについては(2)でさらにふれる。消波型と反射型では、反射型が正・負ともに絶対値でやや大きい傾向にあるけれども、波高が40 cm程度に大きくなると違いがなくなるか、逆転する徴候が認められる。

以上は代表値同志の関係であるが、滑動実験時の不規則波の1波ごとの入射波高が推定されると、不規則実験データの波別解析において、入射波高と波圧や滑動量の関係が求められ便利である。その手段として、前出の図-16, 17 に示した入射波高と壁面水位の関係をを用いることも考えられる。しかし、滑動実験時には壁体移動し、波高計と壁面との距離が変化するので、特に消波型のように落下水の影響が局所的に大きいような場合には不適当である。そのため、本研究では、1波ごとの入射波高の推定に図-18の最小自乗法による関係を用いることにする。これらはそれぞれ次式で表される。

消波型:

$$p_{m0}^+ = 0.428H_I + 0.000506H_I^2 \quad (2)$$

$$p_{m0}^- = -0.481H_I - 0.00559H_I^2 \quad (3)$$

反射型:

$$p_{m0}^+ = 0.565H_I - 0.00242H_I^2 \quad (4)$$

$$p_{m0}^- = -0.698H_I - 0.0000899H_I^2 \quad (5)$$

ここに、上付けの+、-はそれぞれ正・負のピーク値であることを表す。

(2) 推定入射波高と波圧の関係

図-19~22は消波型、反射型に対し、式(2)~(5)の関係をを用いて推定した1波ごとの入射波高 H_I' と波圧測

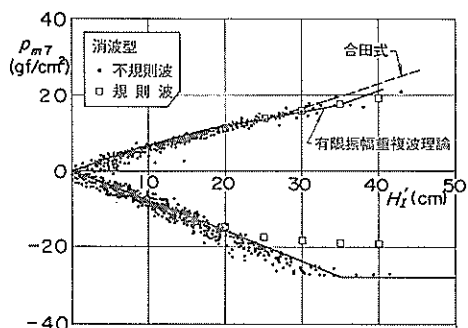


図-19 推定入射波高と波圧 p_{m7} (消波型)

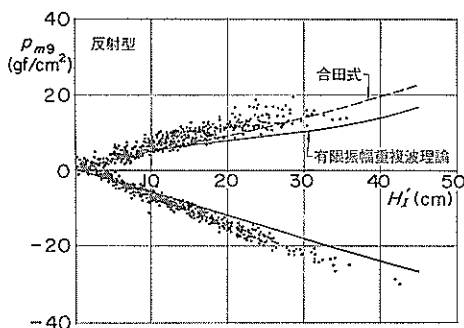


図-22 推定入射波高と波圧 p_{m9} (反射型)

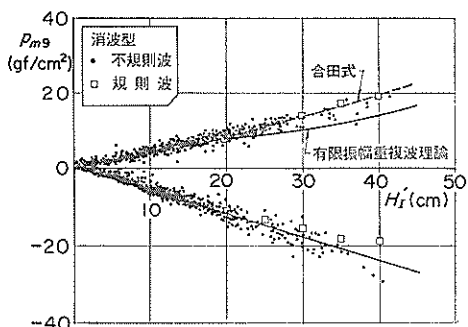


図-20 推定入射波高と波圧 p_{m9} (消波型)

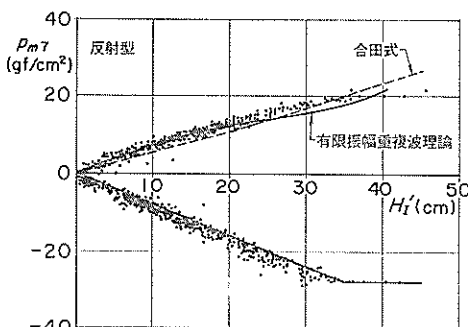


図-21 推定入射波高と波圧 p_{m7} (反射型)

点 P 7 (静水面下 28.25 cm), P 9 (静水面下 61.25 cm) でのピーク値 p_{m7} , p_{m9} の関係を波高レベル 5 の 3 波群を集計して示したものである。図中, 有限振幅重複波理論 (マウンド無視) による波圧強度, および正のピーク値に対しては 合田式⁹⁾ (マウンド考慮) による波圧強度も示してある。ともに, 周期は有義波周期として, 通常

の直立壁があるものとして計算した値で, 同じ高さでの値をそのまま用いている。有限振幅重複波理論と合田式による計算波圧は, 前者が波高の小さい領域でやや大きく, 波高の大きい領域でやや小さい傾向にある。実験値と比べると, 正の波圧は反射型の p_{m9} を除いてほぼ平均的な関係, 負の波圧は消波型の p_{m9} を除いてほぼ上限に近い関係にある。正の波圧と負の波圧を比較すると, 実験, 計算ともに負の波圧の絶対値が大きく, 前述したように大水深での重複波圧の特徴がよく現れている。なお, p_{m7} の波高の大きい条件で負の波圧が一定になるのは波圧計位置が露出するためである。

また, 消波型については, 図中に規則波実験結果もあわせて示してある。正のピーク値は不規則波の傾向に非常によく合っている。しかし, 負のピーク値は波高が大きくなるにつれて絶対値が小さくなる傾向にある。これは前出の写真-1に見られるように, 遊水室からの落下水の打ち込みの反動で, 水面付近の壁面での波圧がそれほど下がらないことによると推測される。不規則波ではその傾向が認められないのは, 前出の図-16の説明で述べたように谷のときの水位低下が不規則波のほうが大きいこと, および不規則波では 1 波 1 波がさまざまであって, 特に落下水の状況が定常でないことなどが理由と考えられる。

4. 消波型ケーソンに働く波力

4.1 スリット部材に働く波力

(1) 波力の測点

今回の実験は釜石港湾口津波防波堤深部構造の消波部の部材設計に用いる波力を調べるのが一つの目的であった。そのため, スリット部材にひずみゲージ, および超小型波圧計を取り付け, 規則波による波力を測定し

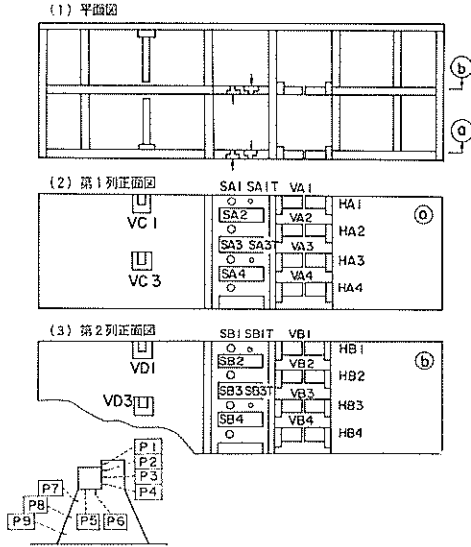


図-23 消波部の波力の測点

た。これらは本報告の論旨からは若干はずれるけれども、どの程度の波力が作用しているかを本節で簡単に述べておく。図-23 はスリット部材の波力、波圧の測点を示したものである。第一列、第二列の合計8本の正面横スリット部材には水平・鉛直のせん断力を測定するひずみゲージを貼付けてあり (VA1, HA1, VB1, HB1等)、さらに超小型波圧計を表側に8箇所 (SA1, SA1T, SA2, SA3, SA3T, SA4等)、裏側に4箇所 (SB1, SB1T, SB2, SB3, SB3T, SB4等) 取り付けてある。また、断面方向スリット部材には鉛直のせん断力を測定するためひずみゲージが貼付けてある (VC1, VD1等)。以下、ひずみゲージによる測定結果に基づき、これらの部材に働く波力について述べる。なお、波圧計による波力はひずみゲージによる波力よりも1.5倍程度大きい傾向にある。これは計測方法の感度の問題のほか、波圧計は局所的な強度を測定することによる。

(2) スリット部材に働く水平波力

図-24, 25 は第一列、第二列の正面横スリット部材に働く正 (岸方向) の波力強度 f を w_0H (w_0 は水の単位体積重量) で割って無次元化して示したものである。ここに、縦軸も静水面を原点とした部材中心軸の高さ z を波高で割って無次元化してある。潮位や波の条件によって波力強度は非常に変動しているが、最大で $0.7w_0H$ 程度である。図中の実線は平均よりやや安全側の値に対応する分布を適当に示したものである。第一列と第二列の分布を比較すると、第一列目が上から静水面付近まで直

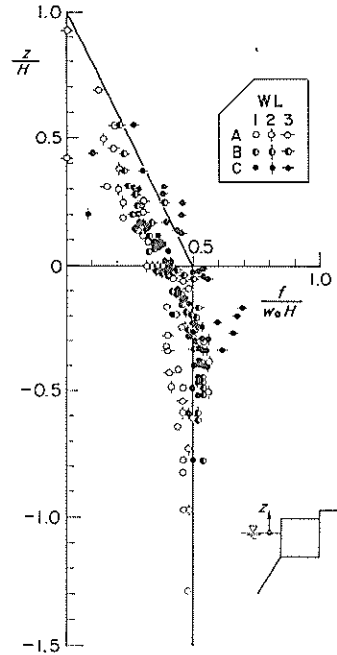


図-24 第一列目のスリット部材に働く正の波力強度

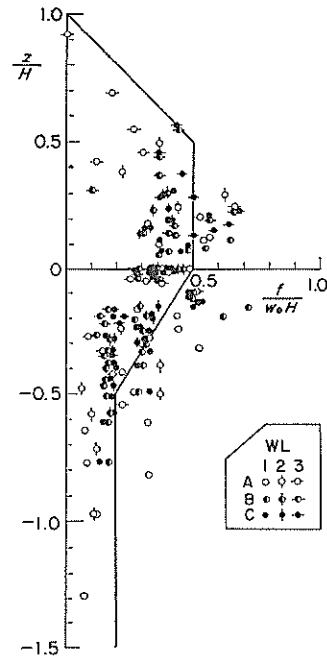


図-25 第二列目のスリット部材に働く正の波力強度

線的に増大し、それより下ではほぼ一定値となる傾向があるのに対し、第二列目では静水面より高いところで大きく、静水面下では小さくなる傾向にある。これは第二列目の上方には第一列で打ち上げられた水塊が条件によって強く衝突することによる。負（冲向き）の波力強度はここには示していないけれども、下の部材ほど大きくなる傾向にある。また、波高が大きくなるにつれてほぼ一定値（頭打ち）になる傾向にあり、 $H=40\text{ cm}$ の条件で最大 $(0.3\sim 0.4) w_0 H$ 程度である。

(3) スリット部材に働く鉛直波力

スリット部材に働く鉛直波力は上のほうの部材ほどやや大きい。正面横スリット部材の上向きの最大値は $0.4 w_0 H$ 程度で、第一列目がやや大きい。下向きの波力は上向きよりも全体に小さく、波高が大きくなるにつれてほぼ一定値となる傾向にある。また、断面方向スリット部材に働く上向きの波力も波高が大きくなるにつれてほぼ一定値になる傾向があり、 $H=40\text{ cm}$ の条件で最大 $0.2 w_0 H$ 程度である。下向きの波力は非常に小さい。

4.2 各壁面に働く波力

(1) 壁面に働く波圧記録の例

図-26は潮位が最も低いWL3で、B波 ($T=1.9\text{ s}$)、 $H=35\text{ cm}$ の条件での壁面波圧の記録例を示したものである。測点P1～P9での波圧をそれぞれ $p_{m1}\sim p_{m9}$ というように表記し、それぞれ静水状態での水圧を0として、水圧増を正と定義している。この場合、遊水室内の壁面（後壁、底版）に働く波圧 $p_{m1}\sim p_{m6}$ には立ち上がりの急な衝撃圧が現れており、波圧はその時同時に最大となっている。これは、第一列のスリット壁で打ち上げられた水塊が後壁の上方に強く衝突するためで、後述するように潮位が低く、適当な波高の条件で顕著に生じる現象である。なお、 p_{m3} にはその前にも衝撃圧が現れているが、これは下から上昇する波面が作用したことによる。

一方、外側の台形壁面に働く波圧 $p_{m7}\sim p_{m9}$ には顕著な衝撃圧は発生しておらず、波圧の最大値は遊水室内壁の場合より明らかに早いタイミングで生じることがわかる。以下、こうした波圧測定結果に基づく各壁面での平均波圧強度のピーク値について述べる。

(2) 遊水室後壁に働く波力

まず、遊水室の後壁に働く平均波圧強度 \bar{p}_H の正・負のピーク値を、横軸に波高をとって図-27に示している。ここにおける最大の特徴は正の波圧のB波、C波において実験波高の範囲で極大値を持つ変化を示し、しかも潮位が低いときにそれが顕著なことである。これは、遊水室後壁に働く波圧は水位が低下している状態から台形斜

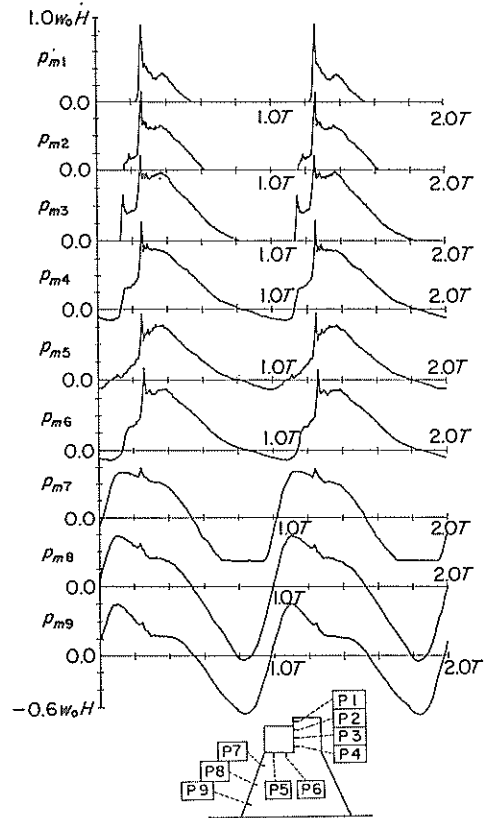


図-26 壁面に働く波圧の記録例（消波型、WL3、 $T=1.9\text{ s}$ 、 $H=35\text{ cm}$ ）

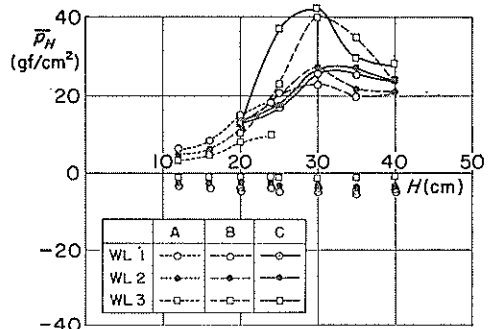


図-27 遊水室後壁に働く平均波圧強度

面に沿って上昇してきた波面が第一列のスリット壁で打ち上げられ、その水塊がどのように衝突するかによって決まり、衝突の仕方が潮位や波の条件によって異なることによるものである。すなわち、波高が適度に大きいと

き第一列めのスリット壁を飛び越えた水塊が遊水室後壁の上方に強く衝突する。しかし、波高が大きすぎると水塊が後壁を飛び越して上部工の上面に打ち込む状況となって、後壁に働く波力が、それほど増大しないか、むしろ減じるのである。また、潮位がある程度低いとき、波の谷で台形斜面が大きく露出するので、その斜面に沿って上昇した水塊が第一列めのスリット壁を勢いよく飛び越えるため、この実験の範囲では潮位が低いほど波圧が大きい結果となっている。

一方、負の波圧強度は潮位が高いほどやや大きい傾向にあるが、その絶対値は小さい。

(3) 遊水室底版に働く波力

図-28は遊水室底版に働く平均波圧強度 \bar{p}_V を同様に示したものである。水塊が遊水室後壁に衝突したときに生じる衝撃圧は底版にも波及する。しかし、水塊が直接衝突するわけではないので、衝撃圧は減じ、潮位の最も低いWL3のB、C波でのみ極大値を持つ変化となっている。

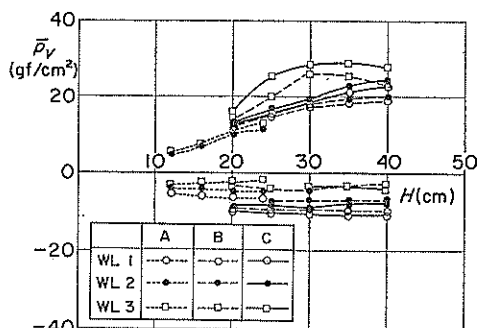


図-28 遊水室底版に働く平均波圧強度

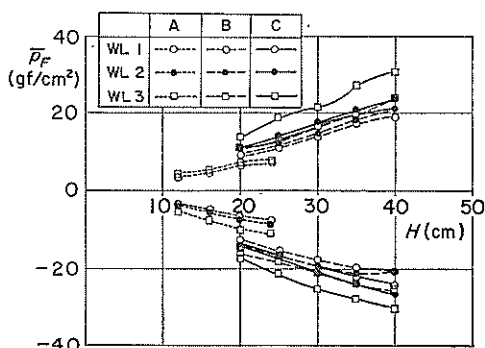


図-29 台形前壁に働く平均波圧強度

一方、底版での負の波圧は遊水室内の水位の低下量に相当すると考えられる。この水位の低下は潮位が高いほど大きく、波高によってはそれほど変化しない傾向にある。たとえば、WL1のB波では、波高20~40cmで遊水室内水位の低下は10~12cm(現地換算で4~5m程度)である。この場合の静水状態での深さは18.75cmであるので、底版は露出しないことが知られる。また、WL2、WL3の静水状態での深さはそれぞれ15.0、10.0cmであり、これらの場合にも遊水室底版が露出することはない。

(4) 台形前壁に働く波力

台形前壁に働く平均波圧強度 \bar{p}_F を図-29に示す。この場合、波圧は正・負ともに潮位が低いほど、周期が長いほど絶対値でやや大きい。また、正・負の波圧の絶対値を比較すると、すべての条件で負のほうがやや大きく、有限振幅重複波の特性が現れている。

4.3 全体に働く波力

(1) 全波力の時間変化

以上は各壁面での波力のピーク値を示したもので、同時の値ではない。ケーソンの安定性の検討では全体に同時に働く波力が重要となる。そのため、本節では壁面での波圧から求めた全水平波力、全鉛直波力、および滑動合成波力⁹⁾について述べる。ただし、全水平波力等は次のような強度のかたちで表す。

$$f_H = F_H/l \quad (6)$$

$$f_V = F_V/B \quad (7)$$

$$f_S = F_S/l \quad (8)$$

$$F_S = F_H \pm \mu F_V \quad (9)$$

ここに、 F_H 、 F_V は単位長さのケーソンに働く全水平および鉛直波力で、それぞれ岸向き、上向きを正と定義する。 l 、 B はケーソンの全高および底面幅、 μ は摩擦係数(=0.6)である。このうち、全鉛直波力は底面に働く揚圧力を含めたもので、この場合の揚圧力はケーソン前面壁の測点P9での波圧と同じ強度の圧力が底版の前端に働き、後端で0の三角形分布を仮定して求める。滑動合成波力 F_S というのは後述するように鉛直波力の滑動に対する効果を含めたもので、土は岸向き、沖向きの滑動に同順である。

図-30はこれらの強度を w_0H で無次元化し、その時間変化を例示したものである。前出の図-26と同条件の例で、潮位はWL3、B波($T=1.9$ s)、 $H=35$ cmである。水平波力には遊水室後壁に水塊が衝突したときの衝撃圧が認められる。また、鉛直波力では負の時間が長い、これは波の峰の時に台形壁面で下向き成分があるほか、遊水室底版に下向きの波力が働き、これらがケー

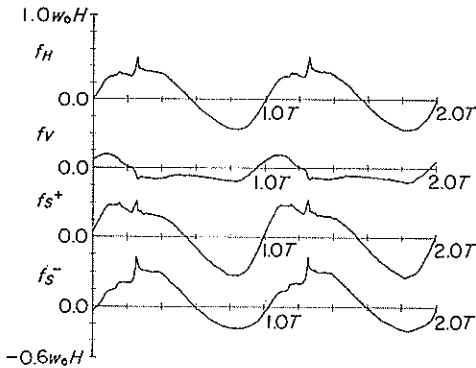


図-30 水平・鉛直および滑動合成波力の時間変化の例 (消波型, WL 3, $T=1.9$ s, $H=35$ cm)

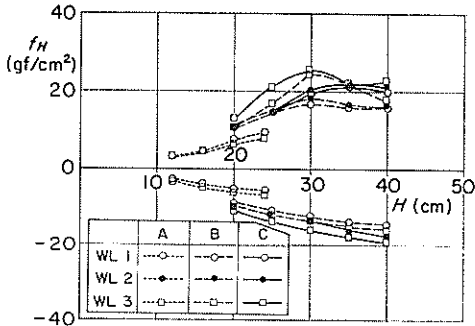


図-31 ケーソンに働く水平波力強度

ソソ底版に上向きに働く揚圧力より卓越するためである。以下、全実験ケースについて波高とこれらの時間変化におけるピーク値の関係を示す。

(2) 水平波力

まず、図-31 は水平平均波力強度 f_H を示したものである。正の波力は波高 30~35 cm で極大となっており、前述した遊水室後壁に働く衝撃波圧の影響が現れている。負の波力は波高にほぼ比例してその絶対値が大きくなっている。このような全水平波力でみると、衝撃波圧の発生による増大の部分を除いても、正の波力がやや卓越していることがわかる。これは壁面の下方では負の波圧が卓越する場合であっても、水面付近では正の波圧が卓越し、かつ静水面上には正の波圧のみしか作用しないので、全水平波力では正の値が負の絶対値よりも大きくなることによる。ただし、合田の有限振幅重複波理論による計算結果では、条件によって全水平波力であっても

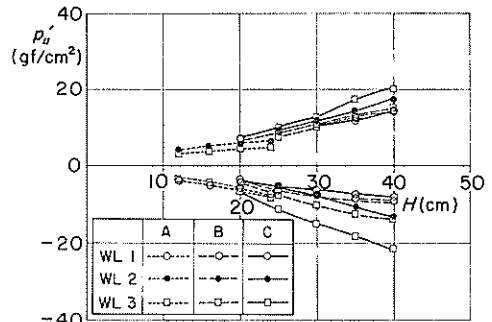


図-32 ケーソンに働く鉛直波力強度

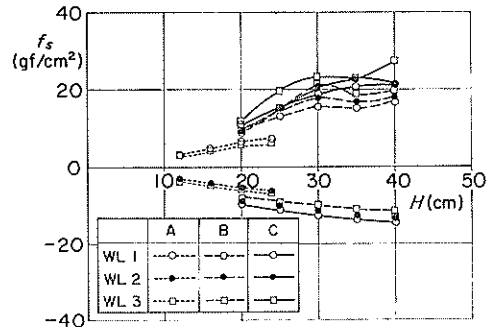


図-33 滑動合成波力強度

負が卓越する場合がある。

(3) 鉛直波力

図-32 は次式による p_u' のかたちで鉛直波力を示したものである。

$$p_u' = 2f_V \tag{10}$$

つまり、 p_u' は鉛直波力を底版に働く三角形分布の揚圧力に置き換えたときの、前端での強度である。正・負の絶対値を比較すると、全般には正の場合がやや大きいけれども、潮位が低くて (WL 3)、遊水室内での衝撃圧が大きい場合 (C波) には負すなわち下向きの波力が卓越している。

(4) 滑動合成波力

図-33 は滑動合成波力強度 f_s を同様にプロットしたものである。ここに、正の値は式 (9) において土の+, 負の値は-の関係に対応している。特に、負の場合、鉛直波力が滑動をしにくくするように下向きに働くので、周期の短い条件を除いて、先の全水平波力の場合以上に正の滑動合成波力が卓越する結果となっている。

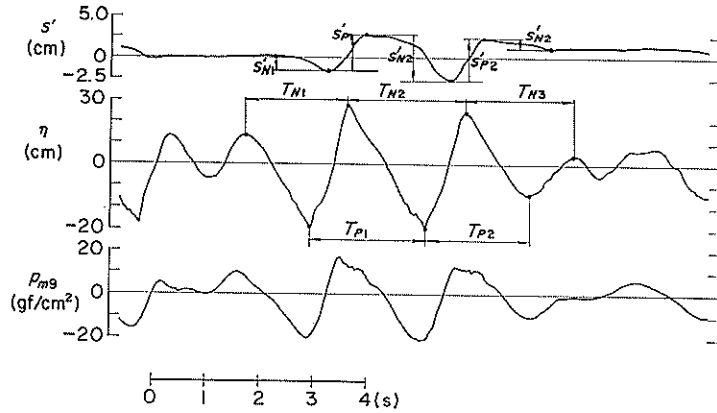


図-34 変位記録の例と波別変位の求め方

なお、以上は消波部のスリット壁に作用する波力を無視したもので、これを考慮すると特に正の値はやや大きくなる。また、すべて規則波実験結果によるもので、特に台形面に働く負の波力は3.で述べたように不規則波実験の結果と異なることがあることに留意する必要がある。

5. 滑動安定性

5.1 変位記録の例と波別滑動量

(1) 変位記録の例と用語の定義

今回の実験では、ケーソンの変位を天端面付近で測定しているため、滑動変位のほかロッキング等の変位の影響も大きい。そのため、測点における測定値そのものについては変位と呼び、それからロッキング等の影響を補正したものを滑動量と呼んで区別する。

図-34に変位 s' と壁面水位 η および測点P9での波圧 p_{m9} の記録の例を示す。潮位がWL1で、消波型の重量がW2のB15の波の一部である。ここに、変位は岸向きの方向を正と定義しているが、ケーソンは正・負両方に変位することがわかる。そのため、1波ごとの正の変位、負の変位を次のように定義する。

正の変位量：水位波形におけるゼロアップクロス波の連続した2波の最小値同志の間（図中の T_{P1} , T_{P2} 等）での変位波形における最大値と最小値の差（図中の s'_{P1} , s'_{P2} 等）

負の変位量：水位波形におけるゼロアップクロス波の連続した2波の最大値同志の間（図中の T_{N1} , T_{N2} 等）での変位波形における最小値と最大値の差（図中の s'_{N1} , s'_{N2} 等）

1波ごとの正・負の滑動量はこれにロッキング等の影

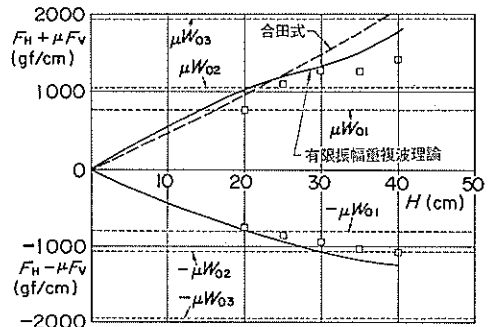


図-35 滑動合成波力の計算値

響を補正したもので、これを波別滑動量と呼ぶ。また、正・負の波別変位量および波別滑動量をそれぞれ集計したものを累積変位量、累積滑動量、さらに正・負の累積変位量および累積滑動量の和を残留変位量、残留滑動量と呼ぶ。なお、波別変位や滑動量に対応する入射波高は、たとえば s'_{P1} については T_{P1} における p_{m9} の最大値、 s'_{N1} については T_{N1} における p_{m9} の最小値に対する波高として求める。

(2) 滑動合成波力の計算値

滑動実験結果について述べる前に、4.3 でふれた滑動合成波力の計算値を示しておく。

図-35は潮位がWL1でB波 ($T=1.9$ s) の場合の反射型に対する滑動合成波力を示したものである。有限振幅重複波理論（マウンド無視）と正に対しては合田式（マウンド考慮）による計算値である。両者を比較すると、波高の小さい条件では有限振幅重複波理論、大きい条件では合田式による計算値がやや大きい。これは有限

振幅重複波理論では波高がある程度大きくなるにつれて、正の波圧に双峰性が現れて伸びが鈍化するのに対し、合田式では波圧係数 α_2 の効果によって伸びが増大することによる。

図中、消波型に対する同条件での規則波による実験値も示してある。正については、消波型では台形斜面部と遊水室後壁での波圧に位相差があること、さらには遊水室底版に下向きの波圧が作用することなどによって、計算値より小さい傾向にある。ただし、4.3でも述べたように、適当な大きさの波高条件で遊水室後壁に衝撃圧が作用するため、この条件では $H=30\text{cm}$ のとき有限振幅重複波理論による値に結果的に近くなっている。ここには示していないけれども、潮位の低い条件では、こうした波高条件で実験値が計算値を上回っている。一方、負については傾向は合っているものの、波高が大きくなるにつれて、絶対値で実験値がやや小さくなる。これは理論と実際の条件の違いにもよるが、3.3でもふれたように波高が大きくなるにつれて遊水室からの落下水の跳ね返りが強くなり、壁面での波圧がそれほど低下しないことによると考えられる。

また、図中に滑動実験で変化させた3種のケーソン重量に対する摩擦抵抗力 $\pm\mu W_0$ (μ は0.6)も示してある。ここに、 W_0 はケーソンの静水中重量で、添字1, 2, 3はそれぞれ重量W1, W2, W3に対応している。これと滑動合成波力の交点が滑動限界であり、滑動合成波力がこれを上回ると計算上滑動することになる。たとえば、合田式による滑動限界波高 H_{cg} は重量W1, W2, W3に対してそれぞれ16.3, 21.5, 38.2cmである。

(3) 波別変位量

図-36~38は前述したように p_{ms} から推定した入射波高に対し、正・負の波別変位量をプロットしたものである。潮位がWL1で、B波の実験結果を集計して示したもので、消波型については重量W2(総波数1,232)のみ、反射型についてはW1(総波数1,427)、W2(総波数1,597)の2重量についての結果である。データの平均的関係を破線で適当に示してあるが、波別変位量は非常にばらついていることがまず指摘できる。また、いずれにおいても、正については合田式、負については有限振幅重複波理論による滑動限界波高を矢印で示してある。これら計算値が正の滑動の卓越を示唆するのに対し、実験結果ではそうした違いは認められず、ケーソンは波によって前後にほぼ同じように揺れることを表している。

さらに、実験結果では波高が小さくても若干の変位があり、データの密集している上下限が波高とともに拡大

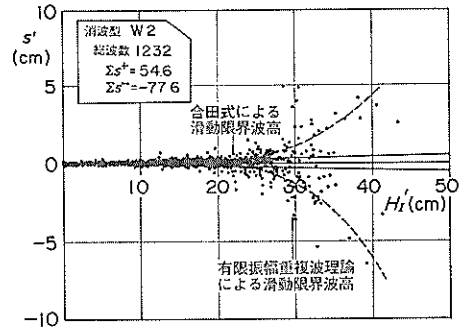


図-36 波別変位量(消波型W2, WL1, $T_{1/3}=1.9\text{s}$)

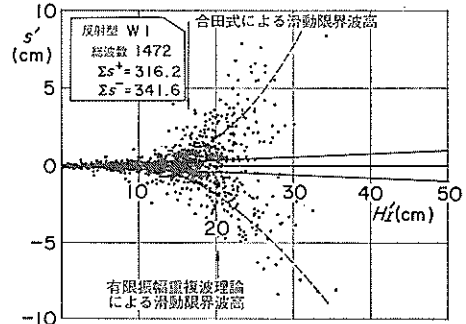


図-37 波別変位量(反射型W1, WL2, $T_{1/3}=1.9\text{s}$)

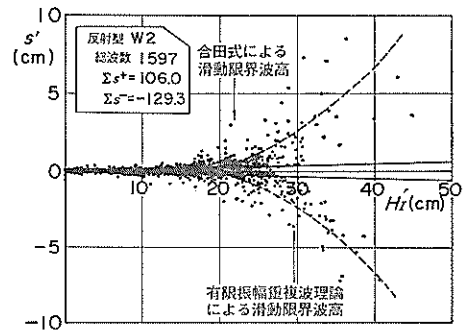


図-38 波別変位量(反射型W2, WL1, $T_{1/3}=1.9\text{s}$)

する変化が見られる。これは、前述したように、変位量にはロッキング等による変位を含んでおり、波高にほぼ比例するその影響を表していると考えられる。滑動量としてはこれを差し引かなければならない。そのため、今回の整理では、変位量が絶対値で1cm以内のデータに対し、最小自乗法で次式の関係をあてはめ、こ

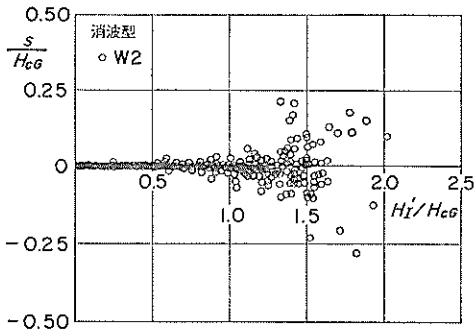


図-39 波別滑動量（消波型，WL1， $T_{1/3}=1.9$ s）

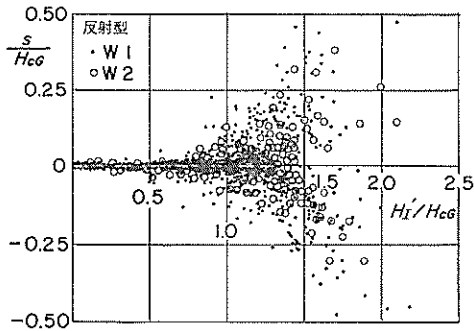


図-40 波別滑動量（反射型，WL1， $T_{1/3}=1.9$ s）

れをロッキング等による変位と見なすことにした。

$$s'_0 = a_0 H \quad (11)$$

この 1 cm 以内のデータを用いることには明確な根拠はなく、試行錯誤で適当と思われるものを選択したにすぎない。図中の実線による直線はこうして求めた関係を表している。また、図中の Σs^2 はこれによって補正した波別滑動量の全データに対する正・負別の集計値である。

(4) 無次元波別滑動量

図-39, 40 は上述のように求めた波別滑動量を、正・負ともに、正の滑動に対する合田式による滑動限界波高 H_{cG} で割って無次元化してプロットし直したものである。ただし、横軸の波高 H も H_{cG} で割って無次元化してある。図-40 の反射型については、二つの重量に対する結果を併せてプロットしてあるが、変位は大きいものの、こうした無次元化によって、両者による傾向の違いは認められない。すなわち、 $H/H_{cG}=1$ が滑動限界を表すかどうかはともかく、このような無次元化によって、一般的な波別滑動量曲線が得られる可能性を示唆してい

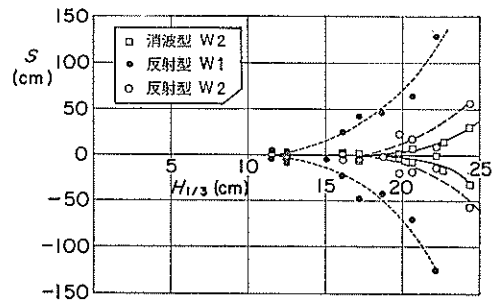


図-41 累積滑動量（WL1， $T_{1/3}=1.9$ s）

る。

また、消波型と反射型を比較すると、特に正の波別滑動量は前者が後者に比べて明らかに小さい。すなわち、同じ重量であっても消波型の滑動安定性が高いということを示している。

5.2 累積滑動量および残留滑動量

(1) 累積滑動量

以上、1波ごとの正・負の波別変位および滑動量を集計して示した。次に、各波群ごとの正・負別の累積滑動量をみてみる。

図-41は5.1で示した波別滑動量と同じ条件での波群ごとの正・負別累積滑動量を、入射波の有義波高に対しプロットしたものである。消波型のW2，反射型のW1，W2の結果をまとめて示してある。ここに、波群ごとの累積滑動量は各波群に対し5.1と同じ方法で式(11)の関係を求め、測定された変位からこれを引いたものを集計したものである。図中、これらの傾向を構造別に適当な曲線で示してある。これと累積滑動量0との交点が滑動限界有義波高を表しているが、正・負で大きな差はなく、消波型W1では18cm，反射型W1では12cm，W2では17cm程度である。これを今回の実験波の有義波高と最高波高の平均的関係 $H_{max}=1.72H_{1/3}$ を用いて滑動限界最高波高に換算すると、それぞれ31，21，29cm程度となる。これを先の図-36～38から推定される滑動限界波高と比較すると、構造別の順序は同じであるが、値は全体にやや大きい傾向にある。累積滑動量においてロッキング等の影響をやや過大に見積もっているのかもしれない。

(2) 残留滑動量

今回の実験における最大の特徴は、砕波帯内でのケーソンの場合には滑動が岸向きに一方的に生じて累積されるのに対し、前後に揺れて残留滑動量が大きくなるということである。図-42はそれを示したもので、それぞ

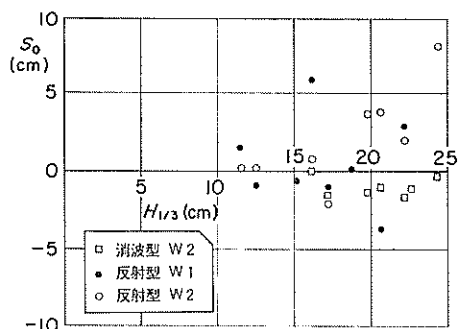


図-42 残留滑動量 (WL1, $T_{1/3}=1.9$ s)

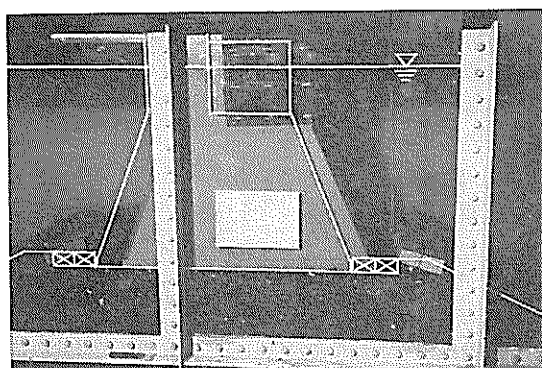


写真-2 波作用後の滑動状況

れ波群ごとの正・負別の累積変位量の和を有義波高に対しプロットしている。ケーソンは前後に滑動するから、この値は実験波の終わりの段階で、正・負の滑動どちらが卓越していたかという偶然性にも支配されるのでばらつきが大きいが、残留滑動量は $-4 \sim 8$ cm 程度の範囲にあり、1波による最大滑動量よりもむしろ小さい。構造別では、反射型の残留滑動は正が多いのに対し、消波型ではわずかに負になる傾向が認められる。写真-2は消波型の波作用後の状況を示したもので、ケーソンは沖側への最大滑動時よりはやや岸に戻った状態となっていることが知られる。

6. 滑動モデルによる考察

6.1 滑動モデル

(1) 運動方程式

5.で滑動実験結果について述べたが、ここでは簡単な滑動モデルを構築し、その計算結果に基づいて若干の考察を行う。

波力を受ける壁体の挙動については、これまで林ほ

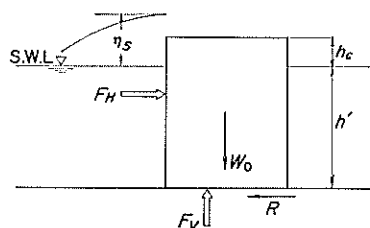


図-43 壁体に働く力の関係

か¹⁰⁾がロッキングを、伊藤ほか¹¹⁾および合田¹²⁾がマウンドのせん断変形を含めた挙動を検討している。しかし、これらはいずれも砕波による衝撃波力を対象としたものである。重複波の作用に対しては、合田¹³⁾が剛基礎を仮定して滑動距離の計算を行っているが、波圧は微小振幅波に基づいたもので、しかも岸方向のみしか扱われていない。そのため、滑動モデルとしては合田と同じ剛マウンドとするけれども、波の有限振幅性を考慮し、岸向きおよび沖向き両方の滑動距離を計算して、実験結果と比較してみる。

図-43は剛基礎上の静止した壁体に働く力の関係を示したものである。図中、 F_H 、 F_V は波力の水平および鉛直成分で、水平波力は岸向き、鉛直波力は上向きをそれぞれ正とする。 W_0 は壁体の静水中重量で、空中重量 W から浮力を引いたものである。 R は壁体とマウンドの間の摩擦抵抗力で静止状態では水平波力 F_H に等しく、滑動限界状態では次式で表される。

$$R = \pm \mu (W_0 - F_V) \quad (\text{限界状態}) \quad (12)$$

ここに、 μ は静止摩擦係数、右辺の±は水平波力 F_H の正負に同順である。つまり、 F_H が絶対値同志でこれを超えると滑動が生じることになる。

滑動開始後の壁体の運動方程式は次のように表される。

$$(W/g + M_a) \ddot{x} = F_H - R_d \quad (13)$$

$$R_d = \pm \mu_d (W_0 - F_V) \quad (14)$$

ここに、 g は重力の加速度、 M_a は水中を加速度運動するときの付加質量であり、 \ddot{x} は壁体の加速度で、水平変位 x は岸向きが正である。また、 μ_d は動摩擦係数であるが、今回のモデルは静止摩擦係数と動摩擦係数を区別するほど精度の高いものではないので、以後静止摩擦係数 μ を用いる。

式(13)、(14)は速度に関する抵抗を無視したものである。付加質量は壁体の両面を考える必要があり、しかも前面では水位が変化することを考慮する必要がある。ここでは、直立壁のピストン運動に対する造波理論の関

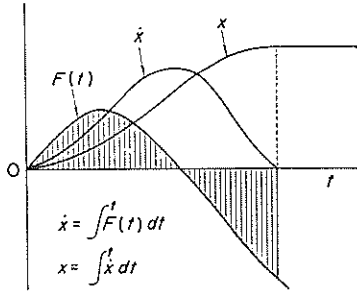


図-44 剛マウンド滑动モデルの解法説明図

係を準用して、次のように与える。

$$M_a = C_m \{ (h' + \eta)^2 + h_c^2 \} W_0 / g \quad (15)$$

$$\eta = \begin{cases} \min \{ \eta_s, h_c \} ; \eta_s \geq 0 \\ \max \{ \eta_s, -h' \} ; \eta_s < 0 \end{cases} \quad (16)$$

ここに、 h' 、 h_c は壁体の静水時での下端水深および先端高、 η_s は壁面水位で時間とともに変化する。また、 C_m は付加質量係数で、微小振幅波理論による値をそのまま用いて0.54とする。なお、 $\min \{ a, b \}$ 、 $\max \{ a, b \}$ は a 、 b のうちそれぞれ小さい値、大きい値をとることを表す。

(2) 解法

式(13)、(14)は次のように書き換えられる。

$$\ddot{x} = F(t) \quad (17)$$

ここに、

$$F(t) = (F_S \mp \mu W_0) / (W/g + M_a) \quad (18)$$

であり、 F_S は式(9)の滑动合成波力である。この場合の干 (F_S の中では±) は速度 \dot{x} の正負に同順である。

今、簡単のため正の滑动を考え、式(12)の滑动限界すなわち

$$F_S = \mu W_0 \quad (19)$$

となった瞬間を時刻 $t = 0$ とする。この初期状態では $\dot{x} = x = 0$ であり、この初期条件のもとに式(17)を数値積分することによって、速度 \dot{x} 、滑动変位 x が求められる。速度が0となる時滑动が終了する。図-44 はこれを模式的に示したもので、 \dot{x} は $F(t)$ の面積の変化であり、 x はまたその \dot{x} の面積の変化に対応している。

実際の計算は正・負の滑动に対する式(18)による2種の時系列を与え、正・負の滑动を別々に計算して、最後にそれを合成する方法が便利である。

6.2 計算結果

(1) 滑动変位等の時間変化

図-45 は実験の反射型ケーソンの条件に対し、有限振幅重複波理論により波力を求めて、滑动変位を計算した

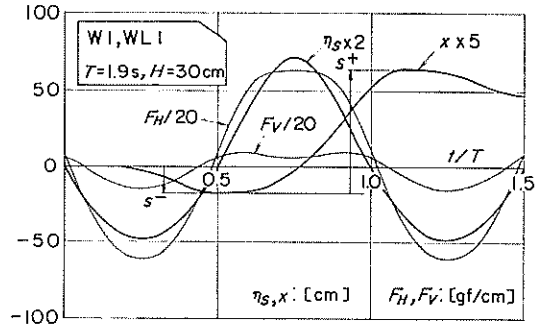


図-45 有限振幅重複波理論による波力と滑动変位の時間変化

例である。ケーソンの重量は $W1$ で、空中重量 W は 5,458 gf/cm、静水中重量 W_0 は 1,308gf/cm (潮位 $WL1$) である。また、波は周期 $T = 1.9$ s、波高 $H = 30$ cm である。図には壁面水位 η_s 、水平波力 F_H 、鉛直波力 F_V 、滑动変位 x の 1.5 周期分の時間変化を示してあるが、縦軸はそれぞれ適当な係数を乗じた値である。この場合、水平波力は負のピーク値が $-1,237$ gf/cm、正のピーク値が $1,273$ gf/cm で正がやや大きいにすぎない。鉛直波力は台形の壁面に働く波力の鉛直成分と底版に働く揚圧力の和であるが、負のピーク値(下向き)は -319 gf/cm、正のピーク値は 187 gf/cm で負が卓越している。ここに、底版に働く揚圧力は前端でケーソン最下端での波圧強度に等しい揚圧力強度を与え、後端で0の三角形分布を仮定したものである。有限振幅重複波の特性として、壁面下方では正の波圧が二山型となるので、鉛直波力にはそれが現れている。これに対し水平波力では、静水面付近の波圧が水位波形に似た変化であるので、二山まですなわピーク付近が平らな変化となっている。

図には示していないけれども、滑动合成波力は負のピーク値が $-1,046$ gf/cm、正のピーク値が $1,340$ gf/cm で正のほうが約 30% 大きい。これは鉛直波力の効果による。いずれも $\mu W_0 = 785$ gf/cm を絶対値で上回るので、正負ともに滑动が生じる。しかし、負の波別滑动量が -3.5 cm であるのに対し、正の波別滑动量は 16.5 cm と大きい。これについては次項でさらにふれる。

(2) 波高と波別滑动量

図-46は潮位 $WL1$ 、 $T = 1.9$ s の条件で、波高を変化させたときの正・負別の波別滑动量の計算値を示したものである。重量 $W1$ 、 $W2$ の結果をまとめたもので、いずれも正の滑动が卓越している。これは(1)でみたように正の滑动合成波力が大きいことのほか、ピーク付近の波

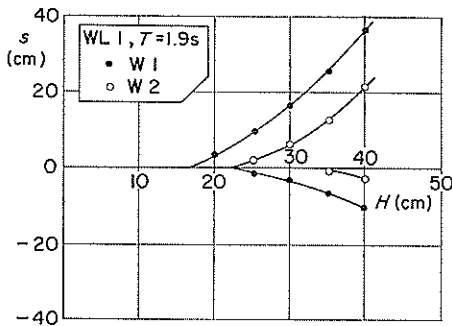


図-46 計算による波別滑動量

力波形の違いによる。すなわち、正の波力はピーク付近で平坦な変化を示し、抵抗力を超える時間が長いことが滑動量を大きくする理由となっている。滑動量の議論では波力のピーク値のみならず、その時間変化も非常に重要である。

(3) 実験結果との比較

この計算の条件は前出の図-37, 38 に対応する。これらの実験結果と比較すると、正の滑動限界波高は実験の平均的関係にはほぼ近い。しかし、滑動量は計算値がはるかに大きくなっている。また、既にふれたところであるが、実験結果では正負の滑動がほぼ同程度であるのに対し、計算では負に対する滑動限界波高が大きく、かつ滑動量も小さいという違いがある。この違いの理由は、計算波力の問題と滑動モデルの問題の二つにわけて考えられる。後者については、

- ① マウンドの変形の影響
- ② 速度に関する抵抗
- ③ 付加質量の扱い

などが指摘されるが、ここでは前者の波力の問題に限って若干の考察を加える。

6.3 波力計算における問題点

(1) 計算と実験における相違点

ここでの計算波力は水底から直接直立壁があるときの有限振幅重複波第4次近似理論を準用して求めたものであり、計算と実験で断面の条件が異なる。そのため、理論の精度自体の問題のほか、違いをもたらすものとして考えられる点を列挙すると次のとおりである。

- ① マウンドの有無の影響
- ② 下方が台形壁であることの影響
- ③ 揚圧力の違いの影響
- ④ 越波による上部工への打ち込み波圧および背後伝達波の影響

⑥ 規則波と不規則波による波力の違いの影響

(2) マウンドの有無の影響

まず、①のマウンドの影響について考察する。マウンドの影響を考慮した波力の算定法としては合田式がある。ただし、正の波力のピーク値に対するものである。これと有限振幅重複波理論との比較については、既に図-35で滑動合成波力の形でみたとおりで、波高が23cm程度より大きくなると、有限振幅重複波理論による値が小さくなる。また、前出の図-20の測点P9での波圧を見ると特に波高の大きい条件で、有限振幅重複波理論による値が実験値より小さい傾向が認められる。したがって、波高が大きくなるにつれてマウンドの影響により波力のピーク値がやや増大する傾向にあるといえる。しかし、これらは有限振幅重複波理論による波力の過小評価を意味するもので、実験結果では正については滑動量が逆に大きくなっているのであるから、マウンドの影響は単にピーク値の問題でなく、むしろ時間変化の問題と考えられる。つまり、図-34の記録に見られるように、波高が大きいときの水位波形はやや前傾しており、波圧の波形も非対称で最初のピーク値が大きい。これは、条件は異なるが、図-26の消波型の規則波による台形壁面での波圧記録 $p_{m1} \sim p_{m3}$ でも同じである。このため、図-45に示した有限振幅重複波理論による水平波力のように、ピーク付近が平らで長く継続することがなければ、滑動量が小さくなる要因となる。一方、負の波力については、図-21や22の不規則波による波圧と比べると、計算値は絶対値でやや小さい傾向にあり、若干過小評価している可能性がある。ただし、これはマウンドの影響というよりも、後述の不規則波による違いかもしれない。

(3) 下方が台形壁であることの影響

②の下方が台形壁であることの影響は、この場合 $d1/L$ の値が0.038であり、別に実施した台形ケーソンに働く波力の実験結果¹⁵⁾からみて、ほとんど影響がないと考えられる。ここに、 $d1$ はケーソン底版の前端と静水面と壁面の交点との間の水平距離、 L は前面水深 h での波長である。

(4) 揚圧力の違いの影響

③の底版に働く揚圧力については、今回の実験では全く測定していない。そのため、前面で下端に最も近い、図-22の p_{m3} でみると、正負ともに計算値が絶対値でやや小さい傾向となっている。これは正については滑動合成力を小さく、負については絶対値で大きくするもので、滑動量の実験結果との違いを説明するうえではむしろ逆の方向である。揚圧力はマウンド内で若干減衰する傾向にあると考えられるので、これの影響は小さいと思

われる。

(5) 上部工への打ち込み波圧の影響

④の越波の影響のうち、上部工への打ち込み波圧はもっぱら正の滑動量に関係する。すなわち、打ち込み波圧は波の峰のとき鉛直下向きに作用するので、滑動量を小さくする効果が考えられる。

ケーソン上部工への打ち込み波圧については藤田ら¹⁰⁾の研究がある。これは図-47に示した分布(最大波圧分布)を考えるもので、波圧強度等は次式で与えられる。

$$p_5 = 1.6p_4 \quad (20)$$

$$p_6 = 0.8p_4 \quad (21)$$

$$p_7 = 0.5p_4 \quad (22)$$

$$b = 2.0\eta_c^* \quad (23)$$

ここに、 p_4 、 η_c^* は合田式による天端での波圧強度および直立部天端面上波圧強度が0となる高さである。図-48の藤田らによる F_{VS} というものは、上部工の幅 B_c を背後の遊水室幅を含めて47.5cmとしたときのこの波力を示したもので、 b が B_c より小さい条件では、前半分の台形分布、あるいは後半分の一様分布の波力のうちいずれか大きいほうの値を同時の波力として用いている。

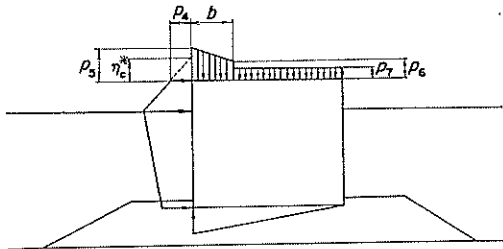


図-47 上部工への打ち込み波圧の分布(藤田ら¹⁰⁾による)

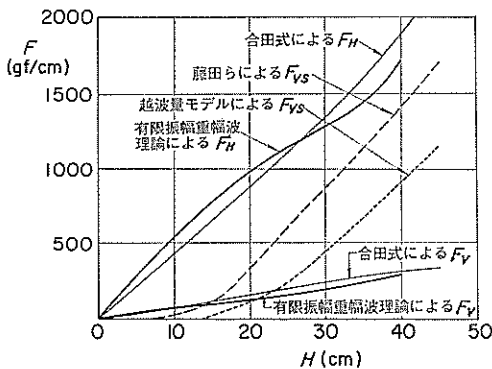


図-48 種々の方法による計算波力

これと、同図に示してある有限振幅重複波理論による鉛直波力(台形壁に働く波力の鉛直成分と底版に働く揚圧力の和)と比較すると、波高30cm程度以上では上部工に働く波力が卓越し、たとえば波高30cmのとき約4.7倍にもなっており、これを無視できないことがわかる。

図にはこのほか、合田式や有限振幅重複波理論による水平波力および鉛直波力の計算値、および越波流量モデルによる上部工に働く波力を示してある。この最後の越波流量モデルによる上部工に働く波力は次のように越波流量に比例する波力が働くものとして計算し、そのピーク値を示したものである。

$$F_{VS} = w_0 Q(t) \quad (24)$$

$$Q(t) = (2/3)(2g)^{1/2} K \int_0^t (\eta_s - h_c)^{3/2} dt \quad (25)$$

$;\eta_s \geq h_c$

ここに、式(25)は越波せぎの流量計算の考え方を越波流量の計算に適用したものである¹⁷⁾。流量係数 K については高田¹⁸⁾がさまざまな検討を行っている。それによると波形に第3次近似有限振幅重複波理論を用いる場合の値は0.15~1.0の範囲に分布しているが、ここでは0.32を適用している。これは相対水深および波形勾配が大きく、相対天端高が小さい条件に対し適当に選んだもので、明確な根拠のある値ではない。この越波流量モデルによる波力と藤田らによる波力を比べると、越波流量モデルによる値が小さく、 $H=30\text{cm}$ では藤田らの方法による値の約50%である。

(6) 越波伝達波の影響

越波の影響のうちもう一つの問題である伝達波の影響については、消波型の場合(潮位WL1)であるが、不規則波実験時にケーソン背後約2mの位置で水位を測定してみた。図-49はその結果から代表波高同志の伝達率

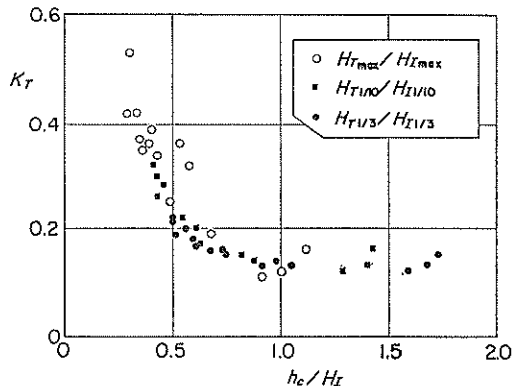


図-49 消波型の波高伝達率

を、それぞれの代表波高に対する相対天端高に対しプロットしたものである。伝達率は最高波高に対し、0.5を超えるものもあり、これの影響が無視できないことを示唆している。しかし、伝達波による波力についてはこれまで研究の例がなく、また今回の実験でもケーソン背面で波圧を測定していないため、どの程度の波力になるかを見積もることができない。

図-50はB15波について、静水面からの水位（サンプリング周波数 24Hz）の頻度分布を例示したものである。この場合の最高波高、1/10最大波高、有義波高の伝達率はそれぞれ0.42, 0.32, 0.22であり、伝達波高はそれぞれ16.9, 9.3, 5.2cmである。水位は-5 cmから14 cmの範囲に分布しているが、5 cmを超えるのは全体の1.7%でしかない。また、この場合の平均値は0.54cmで、越波による背後平均水位の上昇は小さい。

(7) 規則波と不規則波の違いの影響

不規則波は、1波ごとの波高、周期が異なり、しかも波形がさまざまであるので、規則的な変化の規則波による波力とは異なることが十分考えられる。しかし、構造

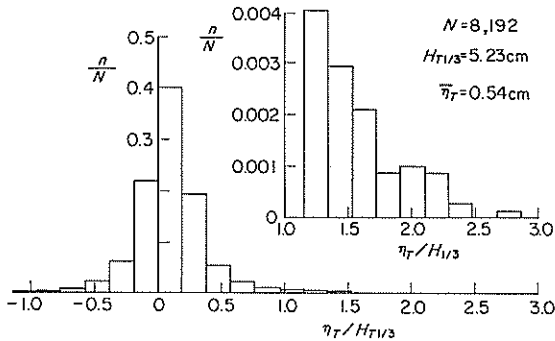


図-50 伝達波水位の頻度分布の例（消波型, WL1, B15）

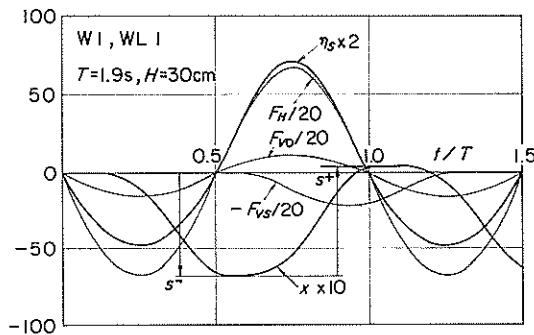


図-51 修正波力と滑動変位の時間変化

は異なるが、二重円筒ケーソンに働く規則波と不規則波による波力の代表値の比較では、両者はよく一致しており、平均的な関係では大きな違いはないと考えてよい。むしろ、不規則波の影響は周期や波形の違いによる変動性に現れるものと考えられる。ただし、波の谷のときの負の波圧については、上部工に打ち上げた水塊の落下水の影響が規則的か、ランダムかによって、局所的に違いが生じる。消波型の例であるが、図-19, 20における規則波と不規則波の違いはこれを表している。

6.4 波力を修正したときの波別滑動量の計算結果

以上の点を考慮して、次のように波力を修正し、滑動量を計算し直してみる。その他の計算条件は6.2と同じである。

- ① 滑動合成波力の時間変化は滑動の正負別に有限振幅重複波理論による壁面水位の時間変化に比例するものとする。
- ② 正の滑動合成波力のピーク値は合田式による値とする。
- ③ 負の滑動合成波力のピーク値は水平波力については有限振幅重複波理論による計算値の1.1倍とし、鉛直波力についてはそのままとする。
- ④ 上部工に働く打ち込み波力は越波量モデルにより計算し、ピークに達したのち対称な時間変化をするものとする。

このうち、④は上部工に働く波力の作用時間が前面水位が天端高を超える時間の2倍になることを意味している。これは特に波高の大きい条件で実際現象と異なるけれども、伝達波による影響も含めてそう仮定したにすぎない。

図-51はこの場合の水平波力 F_H 、鉛直波力 F_{V0} （底版に働く揚圧力と台形前壁に働く波力の鉛直成分の和）、上部工に働く波力 F_{VS} 、滑動変位 x の時間変化を示したもので、先の図-45と同じ条件での結果である。正の滑動計算における鉛直波力 F_V は $F_{V0} - F_{VS}$ で与えており、下向きが卓越することが知られる。また、水平波力は水位波形に相似で、正・負のピーク値はそれぞれ1,347および-1,361gf/cmと絶対値は負のほうがやや大きくなっている。しかし、正負別の波別滑動量はそれぞれ7.1および-6.8cmで、正のほうがやや大きい。

一方、図-52は正の滑動に対する合田式による滑動限界波高で無次元化した正負別の波別滑動量の計算曲線を示したものである。実験結果の図-40に対応したものであるが、6.2の計算結果と比べると、実験値とかなりよく合っており、滑動量の計算においては波力波形および上部工に働く波力が非常に重要であることがわかる。

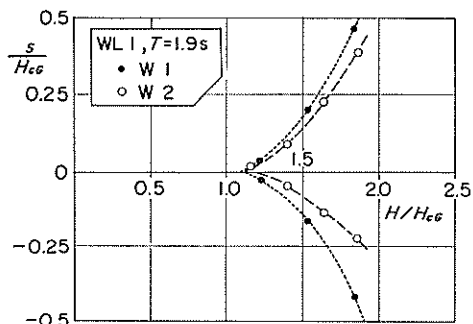


図-52 修正波力による波別滑動量

7. むすび

以上、釜石港湾口津波防波堤を対象として、大水深混成堤の直立部に働く波力および滑動安定性について考察した。その主要な結果をまとめると次のとおりである。

- ① 大水深重複波条件のもとでは、波の峰の時の正の波力のみならず、谷の時の負の波力が非常に重要である。今回の実験でも、下部の台形壁面では負の波圧が卓越している。
- ② この負の波圧はマウンドを無視した有限振幅重複波第4次近似理論によりほぼ推定できるが、不規則波による実験波圧はピーク値の絶対値で10%ほど大きい。これは不規則波では波の谷の時の引きが大きいことによる。
- ③ 消波型に対する規則波による負の波圧の絶対値は波高が大きいとき計算値より逆にやや小さい。これは遊水室からの落下水の跳ね返りが壁面に作用することが主因である。不規則波の場合そうでないのは、引きが大きいことのほか、波の1波1波の非定常性によると推測される。
- ④ これに対し、波の峰の時の台形壁面に働く正の波圧のピーク値は規則波、不規則波の違いがなく、合田式によって精度よく推定できる。有限振幅重複波理論による値は、波高が小さいときには合田式による値よりやや大きく、波高が大きいときにはやや小さい。
- ⑤ 消波型の遊水室に働く波力は台形壁面での波力よりやや遅れてピークに達し、背後壁に岸向きの波力が働くとともに底版に下向きの波力が働く。しかし、その大きさは潮位や波高条件によって複雑で、潮位が適度に低く、波高が適当に大きいとき、大きな波力となる。これは前面の横スリット壁で打ち上

げられた水塊の打ち込み方の違いによる。

- ⑥ 現地条件での設計条件のもとではケーソンの滑動は生じない。ただし、設計空中重量の約80%、および70%に重量を減じた条件での滑動実験結果によると、ケーソンは大きな波の作用によって前後に揺れるように滑動し、砕波の作用を受ける通常の防波堤のように滑動が岸向きに一方向的に累積されるということはない。
- ⑦ 不規則波の1波1波によるこの正負別の滑動量のばらつきは大きい。正の滑動に対し合田式で逆算した滑動限界波高 H_{cg} のたとえば1.5倍の波高の波が作用したときの1波による滑動量は、消波型では正（岸向き）方向に $(0 \sim 0.25) H_{cg}$ 、負（沖向き）方向に $-(0 \sim 0.25) H_{cg}$ 程度である。これに対し、消波部を持たない反射型ではそれぞれ $(0 \sim 0.5) H_{cg}$ 、 $-(0 \sim 0.3) H_{cg}$ 程度で、消波型の滑動量が特に正方向で小さい。これは波の峰のとき台形壁面と遊水室後壁での波力に位相差があり、水平波力がやや小さくなることのほか、遊水室底版に下向きの波力が作用することによる。
- ⑧ 剛マウンドを仮定して構築した滑動モデルで、反射型を対象とした計算滑動量では、有限振幅重複波理論による波力を用いる限り、正の滑動量が卓越し、実験結果のように正負ほぼ同程度の滑動量にはならない。この主因はマウンドの影響等によって波力の時間波形が異なることと、越波による上部工への打ち込み波圧および伝達波による背面での波力を考慮していないことである。ちなみに、正の波力のピーク値を合田式による波力、負の波力のピーク値を有限振幅重複波理論の値の1.1倍で与え、その時間変化が壁面水位の時間変化に比例するものとし、かつ越流モデルによる越波水の重量が上部工に作用するとして計算し直してみると、実験結果の平均的關係に近い結果が得られた。滑動量の計算においては前面での波力のピーク値のみでなく、その時間変化や越波による二次的な波力が非常に重要である。本研究における実験は、まえがきでも述べたように、第二港湾建設局の要請で実施したものであり、ケーソン模型等は横浜調査設計事務所が製作したものである。また、実験計画や実施の段階で多大な協力を得た。ここに、関係各位に感謝の意を表する次第である。さらに、有限振幅重複波第4次近似理論による水位、波圧の計算に用いたプログラムは当所の合田良実所長が作成されたものに一部手を加えたものである。原プログラムリストを提示頂いたことに対し、心からお礼を申し上げる次第

である。

(1987年11月30日 受付)

参 考 文 献

- 1) 谷本勝利：沖合人工島の外郭施設の耐波安定性上の諸問題，第34回海岸工学講演会 沖合人工島建設に関する海岸工学的諸問題に関するシンポジウム，1987，pp.1~8.
- 2) 大畑晃一・小谷 拓・久米秀俊：釜石港湾口津波防波堤の設計に関する技術検討，第10回海洋開発シンポジウム論文集，1985，pp.45~50.
- 3) 谷本勝利・吉本靖俊・岡 幸夫：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究（その3）——波力特性に関する実験——，港湾技研資料，No. 543，1985，61p.
- 4) 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.
- 5) 谷本勝利・高橋重雄・明瀬一行：防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第23巻第3号，1984，pp.47~99.
- 6) 合田良実・柿崎秀作：有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第5巻第10号，1966，57p.
- 7) 谷本勝利・片岡真二・原中祐人・鈴木慎也・下迫健一郎・宮崎啓司：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究——二重円筒ケーソン（海底設置型）の水理特性と試設計——，港湾技研資料，No. 600，1987，pp.1~21.
- 8) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，（社）日本港湾協会，1979，pp.2-106~2-114.
- 9) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和・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.3~53.
- 10) 林 泰造・今井 孝：砕波の圧力と堤体の滑動——堤体の仮想質量および堤体ロッキングの減衰性を考慮しての修正——，第11回海岸工学講演会講演集，1964，pp.184~192.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 合田良実：構造物に働く波力，土木学会水理委員会水工学シリーズ，67-10，1967，pp.10-1~10-34.
- 14) Biesel, F. and F. Suquet: Les appareils générateurs de houle en laboratoire, *Houille Blanche*, Vol. 6, Nos. 2, 4 et 5, 1951 (translated by St. Anthony Falls Hyd. Lab., Univ. Minnesota, Rep. No. 39).
- 15) 谷本勝利・木村克俊：台形ケーソンの水理特性に関する実験的研究，港湾技研資料，No. 528，1985，

27p.

- 16) 藤田秀夫・日下 理・平野秀昭：船体ケーソンに作用する波力，三菱重工技報，Vol. 19, No. 2, 1982，186~195.
- 17) 吉川秀夫・椎貝博美・河野二夫：海岸堤防の越波に関する基礎的研究(1)，第14回海岸工学講演会講演集，pp.118~122，1967.
- 18) 高田 彰：有限振幅重複波の時間波形と越波量の相関特性，土木学会論文報告集，第201号，pp.61~76，1972.

主要記号一覧表

b	: 上部工への打ち込み波圧の作用範囲
B	: ケーソンの底面幅
B_c	: ケーソンの上面幅
C_m	: 付加質量係数
d	: ケーソン前面でのマウンド被覆層天端面の深さ
dt	: 微小時間
f	: 波力強度の一般表示
f_H	: 水平波力強度 ($=F_H/l$)
f_S	: 滑動合成波力強度 ($=F_S/l$)
f_V	: 鉛直波力強度 ($=F_V/B$)
F	: 波力の一般表示 (ケーソンの単位長さあたり)
F_H	: ケーソンに働く水平波力
F_S	: 滑動合成波力 ($=F_H \pm \mu F_V$)
F_V	: ケーソンに働く鉛直波力 (上向きを正，一般には F_{V0} と同じ)
F_{V0}	: 底版に働く揚圧力と台形壁面に働く波力の鉛直成分による鉛直波力 (上向きを正)
F_{VS}	: 上部工への打ち込み波力 (下向きを正)
g	: 重力の加速度
h	: 水深の一般表示，堤体設置位置での水深
h'	: ケーソン底面の深さ
h_c	: ケーソン上部工天端の静水面上の高さ
H	: 波高の一般表示
H_I	: 入射波高
H_I'	: 不規則波群中の個々の入射波としての推定波高
H_S	: 壁面位置での入射波の合成波高，重複波高
H_T	: 伝達波高
H_{ca}	: 合田式により逆算した滑動限界波高
\bar{H}	: 平均波高
$H_{1/3}$: 有義波高
$H_{1/10}$: 1/10最大平均波高
H_{max}	: 最高波高
K	: 流量係数
K_R	: 反射率
K_T	: 伝達率
l	: 上部工を含めたケーソンの高さ
L	: 波長，不規則波の場合には有義波の波長
M_a	: 付加質量
n	: 頻度分布におけるクラス別の頻度
N	: 頻度分布におけるデータの総数
p	: 波圧強度の一般表示，そのピーク値
p_m	: 測定された波圧あるいはそのピーク値，測点に

大水深混成堤の耐波安定性に関する研究（第1報）

	よって $p_{m1} \sim p_{m9}$ のように表す（正負の区別を明示する場合には+あるいは-を上付けする）	T_N	: 負の変位量を定義する1波ごとの周期
p_u'	: 鉛直波力を底版に働く三角形分布の揚圧力に換算したときの前端での強度 ($=2f_T$)	T_P	: 正の変位量を定義する1波ごとの周期
p_F	: 台形前壁面に働く平均波圧強度	w_0	: 水の単位体積重量
p_H	: 遊水室後壁に働く平均波圧強度	W	: ケーソンの空中重量（延長方向単位長さあたり）
p_V	: 遊水室底版に働く平均波圧強度	W_0	: ケーソンの静水中重量
p_A	: 合田式による直立壁上端での波圧強度	x	: 滑動変位
Q	: 越波量	\dot{x}	: 滑動中の速度
R	: 摩擦抵抗力	\ddot{x}	: 滑動中の加速度
R_d	: 滑動時の摩擦抵抗力	z	: 静水面から上向きにとった鉛直座標
s	: 滑動変位, 正負の波別滑動量（正負の区別を明示する場合には+あるいは-を上付けする）	α_0	: ロッキング変位量が波高に比例するとしたときの比例係数
s'	: ロッキング等を含めた測定変位, 正負の波別変位量	Δl	: 合形ケーソンの下端と静水面での壁面位置との間の水平距離
s'_0	: ロッキング等による変位	η	: 水位の一般表示
s'_N	: 1波ごとの負の変位量	η_I	: 入射波の水位, そのピーク値
s'_P	: 1波ごとの正の変位量	η_S	: 壁面位置での入射波の合成水位, そのピーク値
S	: 正負別の累積滑動量	η'	: 付加質量を計算するための壁前面水位
S_0	: 残留滑動量	η_c^*	: 合田式による波圧の直立部天端面上作用限界高
t	: 時間の一般表示	μ	: 摩擦係数
T	: 波の周期	μ_d	: 動摩擦係数
$T_{1/3}$: 有義波周期		