

港 湾 技 研 資 料

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

No. 742 Dec. 1992

二重円筒ケーソンに作用する波力と滑動安定性に関する実験的研究
— 境港現地実証試験に関する再現実験 —

高 橋 重 雄
下 迫 健 一 郎
佐 々 木 均

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 既往の研究成果	4
2. 1 二重円筒ケーソンの構造	4
2. 2 現行の波力算定法	5
3. 現地実証試験の概要	8
3. 1 計測の概要	8
3. 2 ケーソンの滑動状況	9
4. 模型実験の方法	11
4. 1 実験水槽と模型	11
4. 2 実験の種類	12
4. 3 実験波の特性	13
5. 波圧特性	16
5. 1 波圧波形の時間変化	16
5. 2 各測点における波圧	19
5. 3 同時波圧分布	22
5. 4 ケーソン全体に作用する波力	24
6. 滑動安定性	25
6. 1 摩擦係数検定結果	25
6. 2 滑動実験結果	26
7. まとめ	31
参考文献	32
主要記号一覧	32

Experimental Study on Wave Forces and Sliding Stability of Dual Cylindrical Caisson

— Reproducing Experiment of Field Sliding Test in Sakai Port —

Shigeo TAKAHASHI*
Ken'ichirou SHIMOSAKO**
Hitoshi SASAKI***

Synopsis

Waves prevent us from utilizing the seas, especially their vast space. The structure named as a "dual cylindrical caisson" has been developed as one of offshore wave control structures to provide calm sea area economically. The caisson has double cylinders and the wall of the outer cylinder is perforated to dissipate wave energy.

Several series of laboratory experiments have been conducted and have revealed that the wave forces on the structure are small compared with those on a conventional caisson. The wave reflection and wave transmission are also smaller than those of conventional caissons and even of ordinary perforated wall caissons. The calculation method of the wave force was made based on the experiments. A dual cylindrical caisson has been developed as a deep water breakwater originally, but it can be also adopted in shallow water area.

A field experiment of the dual cylindrical caisson has been carried out in Sakai Port since 1989 by the 3rd District Port Construction Bureau. Especially, a sliding test of the caisson by storm waves was successfully made in the experiment. Hydraulic model test was also performed to compare with the results on the field experiment.

The wave forces on dual cylindrical caisson in model experiment agree with those in field experiment. Slidings similar to the field experiment were reproduced in a wave basin by the waves same as the observed wave during the sliding of caisson in the field.

Key Words : Dual Cylindrical Caisson, Breakwater, Wave Force, Field Experiment

* Chief of Maritime Structures Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Member of Maritime Structures Laboratory, Hydraulic Engineering Division

*** Formerly, Member of Maritime Structures Laboratory, Hydraulic Engineering Division
(Sakata Port Construction Office, The 1st District Port Construction Bureau)

二重円筒ケーソンに作用する波力と滑動安定性に関する実験的研究 — 境港現地実証試験に関する再現実験 —

高橋重雄*
下迫健一郎**
佐々木均***

要 旨

大水深の高波浪海域における新しい波浪制御構造物として開発された二重円筒ケーソンは、優れた消波性能や曲線的な景観の美しさなどにより、大水深域以外での通常の防波堤の代わりとしても活用が進められている。鳥取県の境港では、運輸省第三港湾建設局によって実際に二重円筒ケーソンが建設され、現地実証試験が行われた。実証試験は、波圧等の測定を目的とするだけでなく、1年に1回発生するような波に対して滑動するように設計されたケーソンを設置し、世界で初めて実際にケーソンの滑動状況が観測された。

本研究は、境港における現地実証試験で観測されたケーソンの滑動状況を水理模型実験によって再現し、これまで行ってきた水理実験の妥当性を確認するとともに、現行設計法の妥当性を調べたものである。

本研究における主要な結論は以下の通りである。

- ①二重円筒ケーソンの滑動現象は、現地データ、模型実験結果ともに、実測波力から求められる滑動安全率で適切に評価できる。
- ②現地において計測された波圧は、現行設計法における計算値とほぼ一致する。
- ③模型実験における波圧と現地データはほぼ一致しているが、部材によってはやや模型実験結果のほうが大きい場合がある。
- ④円周方向の波圧分布形は、周期が長く波高が小さい場合は等分布に近く、波高が大きく衝撃的な波力が作用する場合は、正面で大きく側面で小さい偏分布となる。
- ⑤マウンドとケーソンの摩擦係数は、マウンドの締固めが十分でないやや小さくなり、現地の滑動函の場合、摩擦係数が0.6よりも小さかった可能性が高い。
- ⑥滑動函の中詰り水の流出を仮定することにより、現地における滑動現象を模型実験によってほぼ再現することができる。
- ⑦ケーソンが3箇しかなく法線方向の長さが短かったため、回折波によりケーソン背後の水位変動がみられた。特に周期が長い場合に、押し波時に背後の水位が低下し、滑動抵抗力が減少した。

キーワード：二重円筒ケーソン、防波堤、波力、現地実験

1. まえがき

海洋空間の有効利用を促進するためには、大水深域における巨大な波浪を制御し、適度に静穏な海域を造成す

る技術が重要である。このための構造物を波浪制御構造物と呼んでおり、従来の防波堤も広い意味での波浪制御構造物と考えることができる。こうした新しい波浪制御

* 水工部 耐波研究室長

** 水工部 耐波研究室

*** 前水工部耐波研究室（第一港湾建設局酒田港工事事務所）

構造物の一つとして、二重円筒ケーソンの開発が推進されてきた。これまでの水理模型実験によって、二重円筒ケーソンの水理特性が明らかにされ、作用する波力についてもその算定法が提案されている。^{1) 2) 3) 4) 5) 6)}

鳥取県の境港では、運輸省第三港湾建設局によって、従来の防波堤の延長線上に3函の二重円筒ケーソンが建設され、平成元年度から現地実証試験が実施された。これは、二重円筒ケーソンに関する現行設計法の妥当性を確認するとともに、平成5年度から予定されている柴山港（最大水深32m）の二重円筒型防波堤の設計および施工における問題点等を検討するために行われたものである。実証試験では、波圧等の測定だけでなく、年1回程度発生する波によって滑動するように設計したケーソンを設置し、世界で初めて、実際にケーソンの滑動状況が観測された。

本研究は、境港における現地実証試験で観測されたケーソンの滑動状況を、水理模型実験によって再現し、これまで行ってきた水理実験の妥当性を確認するとともに、現行設計法の適用性を調べたものである。

なお、二重円筒ケーソンは本来は大水深域を対象として開発されたものであるが、幅広い周期の波に対する優れた消波性能や、円筒型であることによる曲線的な景観上の美しさから、大水深域以外の防波堤としても適用が可能である。三重県の紀伊長島港では、離岸堤として低天端型の二重円筒ケーソンが採用されており、また、和歌山県の親水性防波堤（マリナーシティ）でも、堤頭面に二重円筒ケーソンが用いられることになっている。

2. 既往の研究成果

2.1 二重円筒ケーソンの構造

二重円筒ケーソンは、図-1に示すように、四角形ま

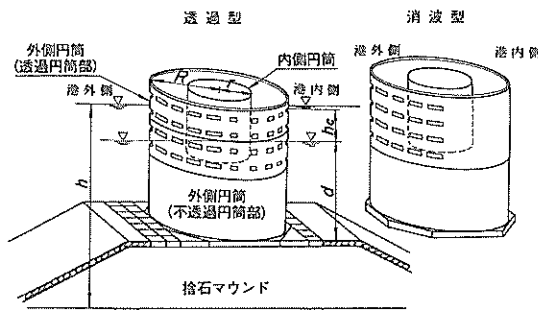


図-1 二重円筒ケーソンの構造

たは八角形状の底版上を二重の円筒構造にしたものである。この外側円筒壁の上方部分に多くの孔をあけて透過性として、外側円筒と不透過な内側円筒との間をドーナ

ツ状の遊水室とした消波ケーソンである。外側円筒のうち孔の開いている上方部分を透過円筒部、孔の開いていない下方部分を不透過円筒部と呼ぶことにする。

透過壁の開口率は、透過円筒部の前半分および後半分について、透過円筒部の面積に対する開口部の面積の比で定義し、それぞれ ϵ_1 、 ϵ_2 で表す。なお、開口部を透過円筒部の前半分と後半分の両方に設けたものを透過型と呼び、前半分のみに設けたものを消波型と呼ぶ。透過型は、消波機能だけでなく海水交換の機能も要求される場合に適しており、一方、消波型は不透過な構造であるため、背後海域の静穏度を高める必要がある場合に適している。

遊水室の上部は、ケーソンの利用条件に応じて、上床版（蓋）を設ける構造と設けない構造とが考えられる。ただし、上床版を設ける場合には、上床版に作用する揚圧力の影響を考慮する必要がある。特に消波型の場合、遊水室後方に穴がないため、条件によっては上床版だけでなく遊水室内全体に、空気圧縮力による衝撃的な波力が作用する危険がある。一方、上床版を設けない構造では、波高に対して天端高が低い低天端型の場合、透過円筒部後半分に内側円筒を越波した水塊による打ち込み波力が作用し、局所的に大きな波力となることがある。

これまでの研究によれば、水理特性および耐波安定性の面から適切と考えられる二重円筒ケーソンの形状は、以下のとおりである。

①内側円筒と外側円筒の半径の比 r/R

0.5を標準とし、最大でも0.65以下とする。ケーソンの重量を確保するためには内側円筒が大きいほうがよいが、あまり大きくなると反射率が高くなる。

②透過円筒部の開口率

前半分の開口率 ϵ_1 を0.2~0.3、後半分の開口率 ϵ_2 を0.2以下とする。反射率は主に ϵ_1 で決まり、 $\epsilon_1=0.2\sim0.3$ で最小となる。 ϵ_1 が大きいと、常時波浪に対する伝達率が大きくなる。

③遊水室深さとマウンド上水深の比 d'/d

$d'/d=0.25\sim0.5$ を標準とする。遊水室深さが十分でないと、消波性能が低下する。逆に、あまり深すぎると、ケーソンの重量確保の面で不利となる。

④天端高 h_c

設計有義波高 $H_{1/3}$ の0.6倍を標準とする。これにより、消波型の場合、通常の混成堤とほぼ同じ伝達率となる。

本研究では、これらの条件を満たすものを標準的構造と呼ぶ。現行の波力算定法は、この標準的構造に対して提案されており、これらの条件から外れる構造について

は、模型実験によって水理特性および波力特性を検討する必要がある。

2.2 現行の波力算定法

(1) 標準的構造における波力算定法

a) 堤体の安定性に対する波力算定法

二重円筒ケーソンに関する現行の波力算定法は、通常の混成堤の設計で用いられている合田式を準用している。二重円筒ケーソンに働く波力は、部材ごとにそのピークとなる位相や大きさが異なる。そこで、設計において考慮すべき位相として、ケーソンの前半分の外側に働く波力が卓越する位相（押し波時Ⅰ）と、遊水室内部に水が満たされ透過円筒部の後半分に大きな波力が作用する位相（押し波時Ⅱ）の2つを考える。そして、各位相、各部材ごとに合田式の波圧に対する補正係数 λ を乗じて波力を修正する方法を用いる。このとき、合田式において衝撃的波力成分を表すパラメータ α_2 は0とする。波圧の作用高さについては、通常の混成堤の0.75倍とする。すなわち、波圧の作用高さ η^* および静水面における波圧 p_1 を次式のように補正する。

$$\begin{aligned} \eta^* &= 0.75 (0.75 (1 + \cos \beta) H_b) \\ &= 0.75 \eta_c^* \end{aligned} \quad (1)$$

$$p_1 = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \alpha_1 \lambda w_0 H_b \quad (2)$$

ここに

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad (3)$$

β : 防波堤法線の垂線と波の主方向から $\pm 15^\circ$ の範囲で最も危険な方向となす角度(度)

η_c^* : 合田式における波圧の作用高さ(m)

H_b : 設計計算に用いる波高(m)

w_0 : 海水の単位体積重量(tf/m³)

なお、円周方向の波圧分布は、実際には、波高が大きくなるにつれて中央で大きく側面で小さい偏分布に変化する。しかしながら、ケーソン全体に作用する合力としては、等分布と考えた波力とほとんど変わらない。したがって、堤体の安定性については、正面も側面も同じ大きさの等分布の波圧を用いるものとする。表-1は、各位相における補正係数 λ の一覧である。また、図-2は、消波型における設計波圧の分布形を示している。なお、透過型の設計波力を用いるのは $\epsilon_r \geq 0.1$ の場合とし、 $\epsilon_r < 0.1$ の場合は、計算上は消波型の設計波力を用いるものとする。斜め入射波に対しては、滑動安定性の検討に用いる波力としては、式(1)、(2)に示すように、通常の合田式と同様に波向きの影響を考慮する。

表-1 波圧補正係数 λ 一覧

波圧低減係数	押し波時Ⅰ	押し波時Ⅱ	
		透過型	消波型
λ_{OF}	0.90	0.80	0.80
λ_{OPP}	0.65	0.35	0.30
λ_{ORP}	0	0.45	0.80
λ_{IF}	0.15	0.60	0.75
λ_{IR}	0	0.60	0.75

引き波時の波力については、有限振幅重複波理論による直立壁に働く波圧が、円周方向に等分布でケーソン前面側に作用するものとする。ただし、水深があまり深くない場合は、便宜的に前面水位が0.5 H_b 低下したときの静水圧の変化を考えてよい。なお、引き波時の遊水室内の水位については、消波型では0.30 H_b 、透過型では0.25 H_b だけ遊水室全体の水位が低下するものとし、これによる遊水室下床版に働く鉛直波力の変化についても考慮する必要がある。

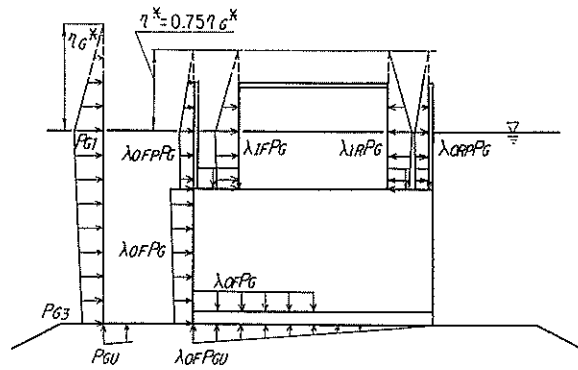
ケーソン全体の安定性は、これらのうち最も厳しい位相について検討する必要がある。通常的设计条件では、滑動安定性は押し波時Ⅰで決まることが多く、引き波時で決まるとはほとんどない。ただし、水深が非常に大きくなると、相対的に引き波時の波力が大きくなり、引き波時で堤体の安定性が決まる場合がある。

b) 部材設計に用いる波力算定法

二重円筒ケーソンに作用する波力は、波高が比較的小さい重複波領域では円周方向には等分布に近い分布となる。しかしながら、前述のように波高が大きく碎波に近い場合には、平面的に見ると正面が大きく側面が小さい偏分布となる。したがって、消波型の部材設計における水平波力については、図-3に示した一部偏分布となる波圧分布を用いるものとする。なお、重複波領域の場合や、透過型($\epsilon_r \geq 0.1$)に対しても、安全側の設計として図-3の偏分布を用いるのが望ましい。

一方、鉛直波力については円周方向の偏分布は考えない。すなわち、中間床版に作用する鉛直波圧は、等分布の場合の内側円筒下端に作用する水平波圧と同じ大きさで等分布と考える。また、揚圧力については、合田式における揚圧力に、等分布の場合の不透過円筒部前面における補正係数 λ_{OF} を乗じた分布とする。

斜め入射波に対する部材設計は、波圧の分布形を直角入射($\beta = 0^\circ$)として計算し、この分布形を波向きに合わせて回転させ、斜め入射波に対する波圧分布とするものとする。実際には、主波向きから左右にそれぞれ



PHASE I

PHASE II

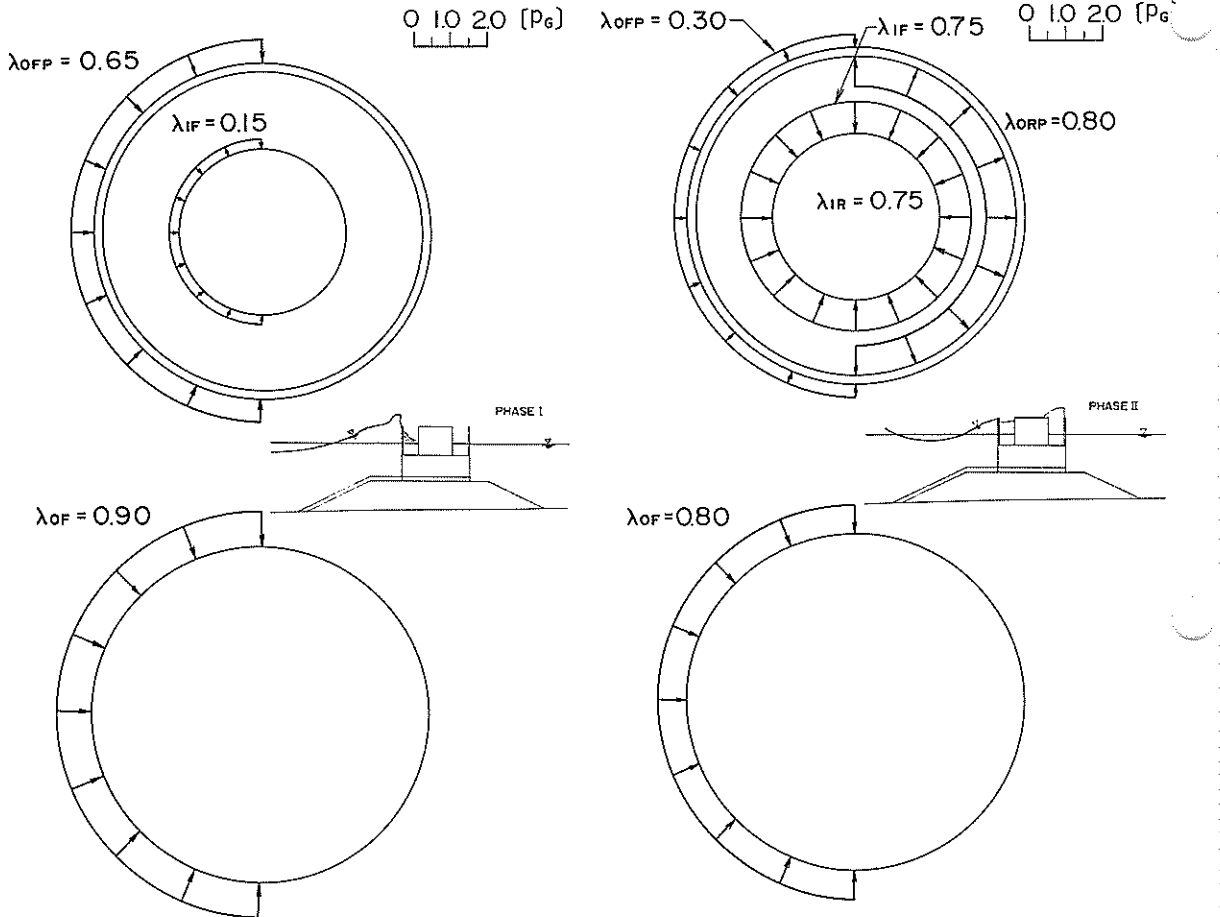
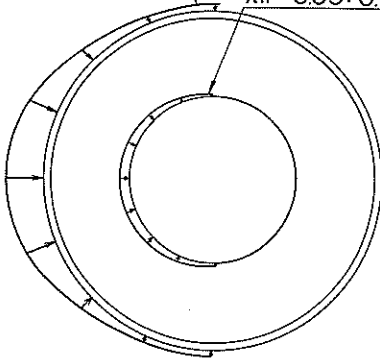


図-2 ケーソン全体の安定性に関する設計波圧分布

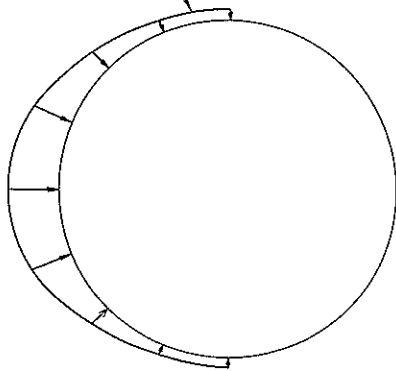
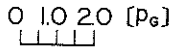
PHASE I

$$\lambda_{oFP} = 0.25 + 0.75 \cos^4 \theta$$

$$\lambda_{IF} = 0.05 + 0.15 \cos^4 \theta$$



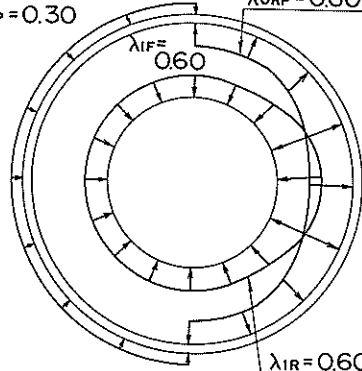
$$\lambda_{oF} = 0.35 + \cos^4 \theta$$



PHASE II

$$\lambda_{oFP} = 0.30$$

$$\lambda_{oRP} = 0.60 (1 + \cos^4 \theta)$$



$$\lambda_{IF} = 0.60$$

$$\lambda_{IR} = 0.60 (1 + \cos^4 \theta)$$

$$\lambda_{oF} = 0.80$$

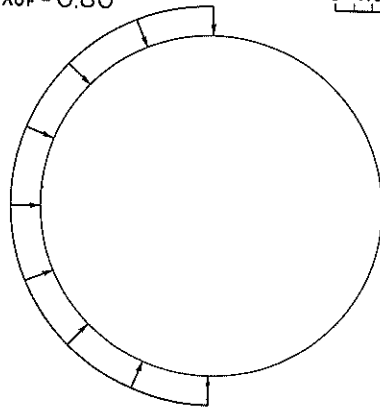
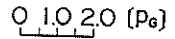


図-3 部材設計に関する設計波圧分布

15°回転させた波向きの範囲で、最も厳しくなる波向きに対して検討する。なお、入射角が大きくなると、ケーソン前面の一部に隣のケーソンによる遮蔽領域ができるが、この影響については特に考慮しない。

(2) 低天端型に対する波力算定法

離岸堤の天端高は、景観上の理由等により通常の防波堤に比べて低くなっている。このようにケーソンの天端高 h_c が低い場合、一般にケーソン全体に作用する波力は、通常の天端高の場合に比べて小さくなる。二重円筒ケーソンについては、 $0.125 \leq h_c / H_b \leq 0.25$ のとき

は、全体の安定性、部材設計ともに、波力補正係数をすべて0.9倍した値を用いてよい。ただし、越波による透過円筒部後壁への打ち込み波力を別途考慮する必要があり、押し波時における λ_{oRP} を以下のように修正する。

$$\lambda_{oRP} = 0.54 (1 + \cos^4 \theta) + 0.30 (H_b / h_c - 4) \cos^4 \theta$$

$$: 0.125 \leq h_c / H_b \leq 0.25 \quad (4)$$

式(4)の第2項が越波による打ち込み波力の成分を表している。

3. 現地実証試験の概要

3.1 計測の概要

現地実証試験は、第三港湾建設局によって鳥取県境港で実施された。ここではその概要を紹介する。図-4は現地実証試験の位置図である。二重円筒ケーソンは、境港既設防波堤の先端から約500m離れた水深-10.6mの地点に設置され、あらかじめ取り付けられている波圧計、鉄筋計、変位計などにより、ケーソンに作用する外力やケーソンの変位量を測定した。また、波高計および波向計を、ケーソンから約250m離れた地点に設置し、波浪観測も実施している。表-2は、計測内容の一覧を示したものである。

計測されたデータは海底ケーブルを通じて陸上観測局へ転送され、データレコーダおよびパソコンに収録している。データレコーダによる収録では、波高計と観測システムとを連動させ、あらかじめ設定した波高以上の波が来襲した場合に自動的にシステムを起動させる方式を採用している。一方、パソコンでの収録は、ケーソンの滑動に備えて約66時間分のデータをハードディスクにアドレスに収録し、必要に応じて磁気テープにコピーする方法である。データのサンプリングはいずれも20 Hzである。

図-5は、平成元年度以降のケーソンの設置状況を示したものである。最初の1年間は、50年確率波で設計されたRC函を1函だけ設置し、孤立函の状態では波圧等の計測を行った。平成2年度には、50年確率波で設計されたPC函と、重量を軽くしたケーソン（滑動函）を設置し、3函並んだ状態で、滑動函における波圧や変位量等の計測を行った。

表-2 計測内容の一覧

調査分類	計測項目	計測部材	計測器	台数
波浪特性	波高		波高計	1
	波向		波向計	2
波圧特性	水平波圧	外円筒、内円筒	波圧計	24
	鉛直波圧	中間床版、蓋コンクリート、護舷	〃	5
	揚圧力	底版	〃	6
部材安定性	鉄筋応力	外円筒	鉄筋計	10
	コンクリート応力	外円筒	ひずみ計	2
構体安定性	水平変位	外円筒上面	ワイヤー式変位計	4
		底版	〃	2
		蓋コンクリート上部	速度計	1
	鉛直変位	外円筒上部	〃	2
	傾斜	蓋コンクリート上部	傾斜計	2

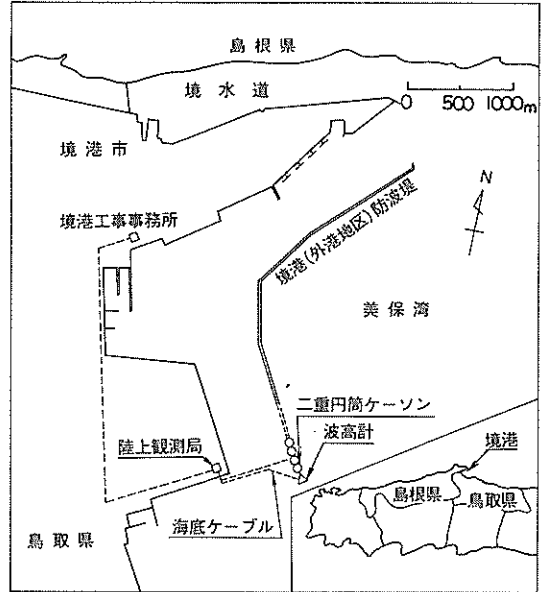


図-4 現地実証試験位置図

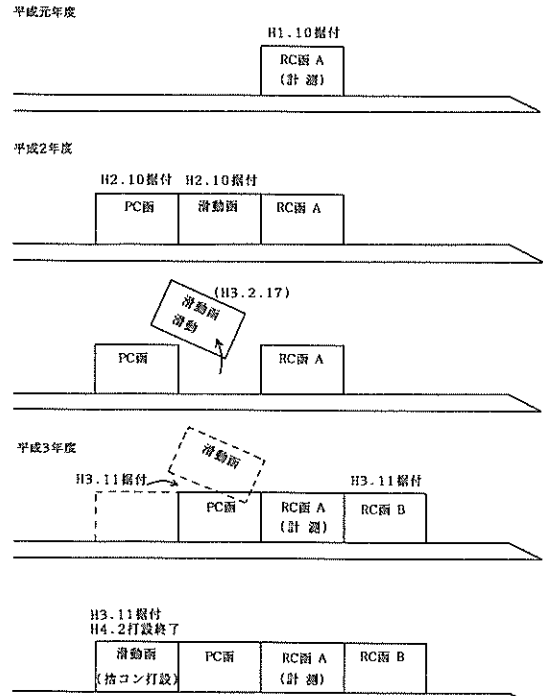


図-5 二重円筒ケーソンの設置状況

図-6は滑動函の断面形状を示したものである。重量を軽くするため、内側円筒内には中詰砂は投入せず、蓋コンクリート下端まですべて水張りとしている。また、外側円筒の部材厚も30cmと薄くして、鉄筋やコンクリートのひずみを生じやすくした。滑動函は1年確率波で設

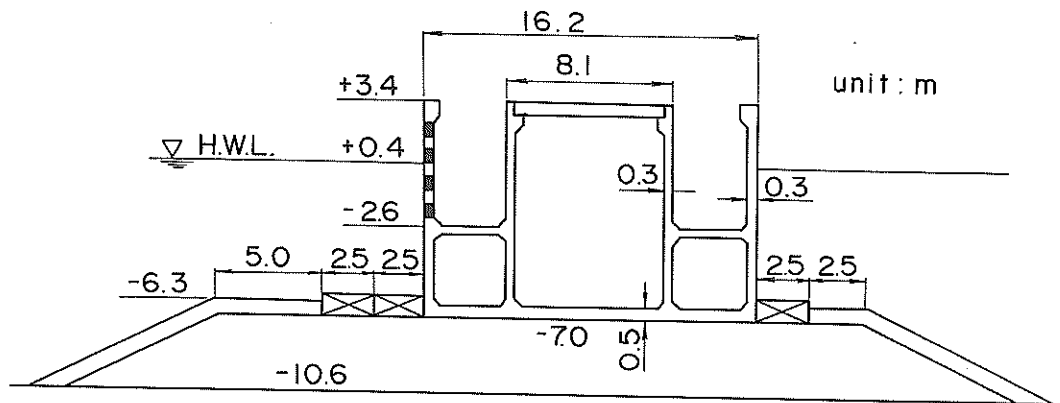


図-6 滑動函の断面形状

表-3 現地データ解析ケース一覧

	計測日時	ケース名	$H_{max}(m)$	$H_M(m)$	$T_M(s)$	滑動量 $\Delta S(m)$	累積滑動量 $S_A(m)$
			()はゼロダウン				
孤立函	H.2.1/31, 9:12	IA	1.96	1.31	4.7		
	H.2.3/1, 20:58	IB	2.78	2.12	6.1		
	H.2.9/19, 16:20	IC	4.47	3.12	8.0		
	H.2.9/19, 19:06	ID	6.30	4.53	9.1		
	H.2.9/19, 19:49	IE	4.96	3.75	9.5		
連続函	H.2.11/29, 17:49	IIA	2.91	1.90	7.1		
	H.2.11/29, 19:14	IIB	3.09	1.67	6.4		
連続函 滑動時	H.3.2/17, 2:45	IIC	2.62 (3.15)	2.05	14.1	1.06	1.06
	H.3.2/17, 3:00	IID	2.50 (2.77)	1.72	13.1	0	1.06
	H.3.2/17, 3:15	IIE	2.61 (3.19)	2.03	12.7	3.26	4.32
	H.3.2/17, 3:30	IIF	2.74 (2.92)	2.05	12.6	0.55	4.87
	H.3.2/17, 3:45	IIG	2.91 (3.17)	2.23	13.4	?	> 5
	設計波 (50年確率波)	IIIA	7.9	5.0	10.5		

計しており、1年確率波に対する滑動安全率は0.98である。

滑動後は、図-5に示すように滑動函のあった位置へPC函を移設し、新たにRC函を1函設置した。さらに、滑動函については遊水室内にコンクリートを打設し、不透過な円筒として再設置した。現在は4函並んだ状態で、平成4年9月まで、引き続き計測を行っている。

平成2年度までに取得した100ケース以上のデータのうち、表-3に示した代表的な12ケースについて波圧等

の解析を行った。後述する模型実験はこれらのケースを対象として行っており、表中のケース名は、模型実験における実験波の名称に対応している。ただし、IA、IBについては、周期が短く実験水槽での造波が不可能であったため、模型実験では対象外とした。

3.2 ケーソンの滑動状況

二重円筒ケーソン（滑動函）の滑動は、設置から約4か月後の1991年2月16日から17日にかけて発生した。滑動時の波浪状況は表-3に示したとおりである。一方、

滑動函の設計に用いた1年確率波は、有義波高 $H_{1/3} = 2.6\text{m}$ (最高波高 $H_{\text{max}} = 4.7\text{m}$)、有義波周期 $T_{1/3} = 8.2\text{s}$ である。すなわち、滑動時の波浪は、設計波に比べて波高はやや小さく、周期はかなり長かったことがわかる。

写真-1は、ケーソンの滑動状況を示したもので、ケーソンがマウンドから滑落していることがわかる。図-7は、滑動時の計測データの例で、上から順に、ケーソンの変位 S 、水位 η 、外側円筒不透透部前面の波圧 WP-3、透過円筒部後面内側の波圧 WP-16を示している。ケーソンの滑動は、小さな変位の累積ではなく、1波で約1m程度の大きな滑動が生じていることがわかる。これは、滑動に寄与する波力の作用時間が長いので、比較的波高の小さい重複波領域における滑動現象の特徴である。波圧波形に衝撃的な切り立ったピークが見られないことから、重複波的な波が作用していたことがわかる。

なお、表-3に示したように、滑動する前の平成2年11月にも、滑動時とほぼ同じ波高の波が来襲しているが、滑動は生じていない。これは、滑動時の波に比べて周期が短く、波力がやや小さかったためである。



写真-1 滑動した二重円筒ケーソン

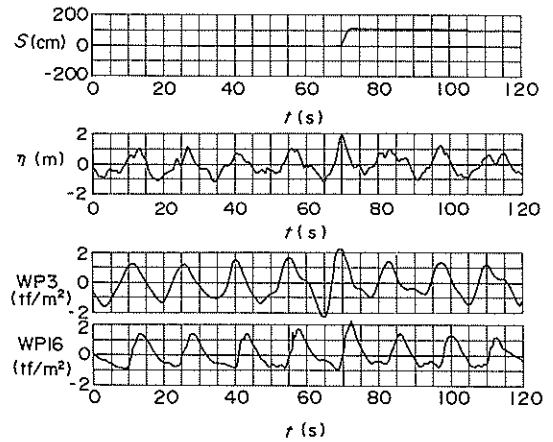


図-7 現地計測データの例

4. 模型実験の方法

4.1 実験水槽と模型

模型実験は、港湾技術研究所の大水深海洋構造物実験水槽の大水深槽で実施した。模型縮尺は現地の1/21で、堤体位置での水深は52.4cmである。図-8は、本実験における堤体の配置を示したものである。実験に使用した

ケーソンは、滑動面の底版のみモルタル製とし、それ以外はすべてアクリル合成樹脂製である。図-9は実験における波圧計の配置を示したもので、現地の波圧計と同じ位置に取り付けている。円周方向および鉛直方向の波圧分布が測定できるように、外側円筒を中心に35点で波圧を測定している。

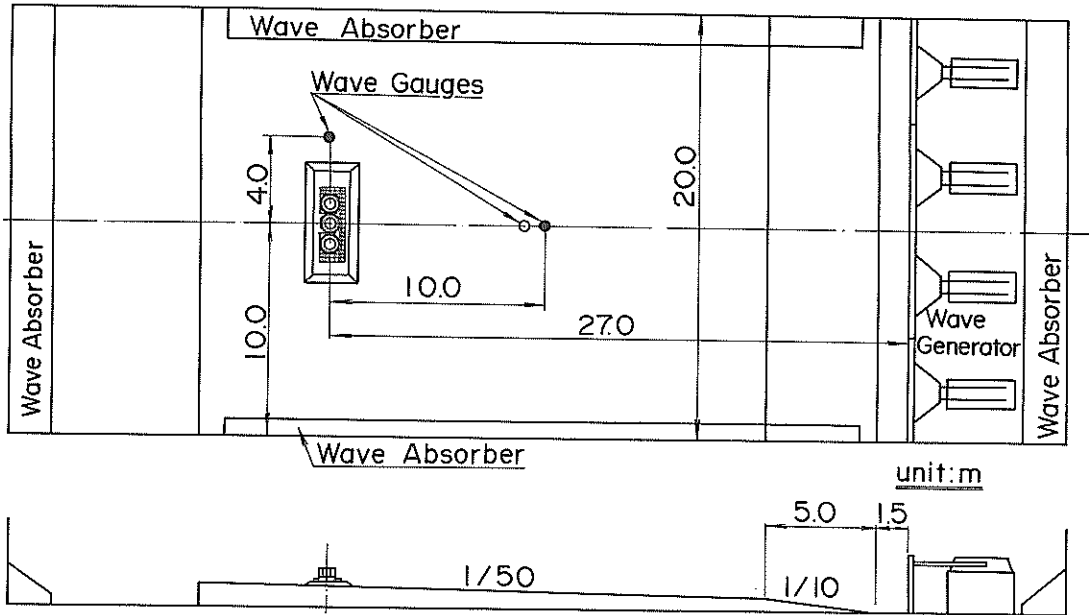


図-8 堤体配置図

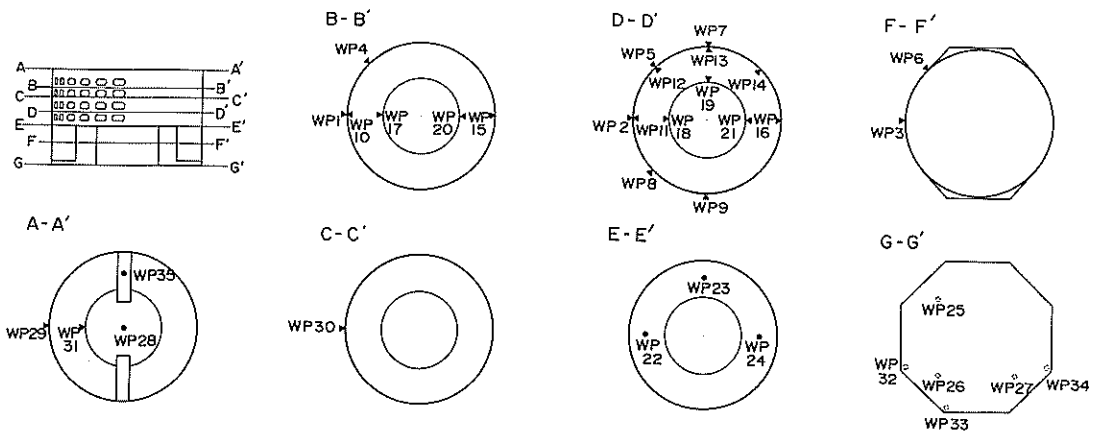


図-9 波圧計配置図

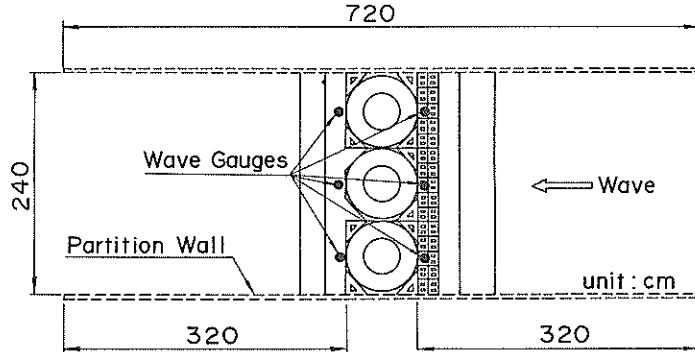


図-10 側壁設置図

4.2 実験の種類

実験は、以下の4つに大別される。

①波圧特性に関する実験

同じ条件における波圧の現地データと模型実験データとの比較を行い、その整合性について検討した。また、模型実験において孤立函、連続函（3函）、連続函（無限）による波圧の違いを検討した。連続函（3函）とは、滑動函設置時の現地の状況を再現したもので、両側からの回折波の影響を受ける。一方、連続函（無限）とは、図-10に示すように、ケーソンの両側に側壁を設置して二次元水路のようにしたものである。この場合、鏡像の原理によりケーソンが無限に連続している状態とほぼ同じ条件になり、回折波の影響は受けない。

②滑動を再現する実験

現地における滑動時とほぼ同じ有義波高の波を作用させ、ケーソンの変位量と波圧を測定した。ケーソンの重量については、1年確率波による設計どおりの重量(W1)と、内側円筒内の中詰水がH.W.L.まで抜けて、設計重量よりもやや軽くなったと仮定した場合の重量(W2)の2種類について実験を行っている。

③ケーソン背後の水位測定実験

現地における滑動時の波では、周期が長いので、押し波時にケーソン背後の水位低下が見られた。このようにケーソン背後の水位が静水面よりも下がると、静水圧の差により抵抗力が減少するため、ケーソンの安定上問題となる。そこで、こうした影響を調べるため、波作用時におけるケーソン前面と後面の水位変動を規則波によって測定した。

④摩擦係数検定実験

今回の滑動函は、通常のケーソンに比べてかなり重

量が軽く、しかも設置後わずか4か月足らずで滑動したため、マウンドの締め固めが十分でなく、摩擦係数がやや小さかった可能性が考えられる。そこで、ケーソンとマウンド間の摩擦係数の検定を行った。特に、マウンドの締め固めの程度と摩擦係数の関係について調べた。

このほかに実験波の検定を兼ねて、波高、周期、スペクトル形状の特性を調べている。これは、現地で観測された波の最高波高と有義波高の比が、レーリー分布に基づく理論値に比べて小さいことなど疑問な点があったからである。表-4は、模型実験の具体的なケースを示したものである。

表-4 実験ケース一覧

実験の種類		実験波
波力測定実験	孤立函	IC~IE (各5波群) III A ()
	連続函 (3函)	IC~IE (各5波群) IIA~IIG () III A ()
	連続函 (無限)	IC~IE (1波群のみ) IIA~IIG () III A ()
滑動実験	連続函 (3函)	II C~II G (各5波群)
	連続函 (無限)	II C~II G (1波群のみ)
波高測定実験 (ケーソン前面 および背面)	連続函 (3函)	規則波 ($T=1.30\sim 3.07s$)
	連続函 (無限)	規則波 ($T=1.30\sim 3.07s$)

4.3 実験波の特性

(1) 実験波の代表値

波圧特性および滑動の再現実験で用いた波は、3章で述べたように、以下の4つに大別できる。

①孤立函の状態で、かなり大きな波が作用したときの3種類の波

(1990年9月19日, $T_{1/3} = 8.0 \sim 9.5s$, $H_{1/3} = 3.12 \sim 4.53m$ [IC~E])

②滑動函を含む3函の設置直後で、比較的大きな波が作用したときの2種類の波

(1990年11月29日, $T_{1/3} = 7.1, 6.4s$, $H_{1/3} = 1.90, 1.67m$ [IIA, IIB])

③滑動時の5種類の波

(1991年2月17日, $T_{1/3} = 12.6 \sim 14.1s$, $H_{1/3} = 1.72 \sim 2.23m$ [IIC~G])

④設計波

(50年確率波, $T_{1/3} = 10.5s$, $H_{1/3} = 5.0m$ [IIIA])

現地における1ケースの波に対して、実験波では同じ有義波高と有義波周期をもつ5波群の不規則波を用意した。表-5は、現地で測定された波と、模型実験で用いた実験波(現地換算値)について、波高および周期の代表値を比較したものである。実験波の最高波高 H_{max} は、波群ごとにばらつきがあり、IIC~Gについては、全体的に実験波のほうが現地よりも大きい。ただし、ゼロダウンクロス解析した波高で比較すると、平均的にみるとほぼ一致している。

表-5 波高および周期の代表値の比較

波名	現 地 デ ー タ			実 験 波 (現 地 換 算 値)		
	$H_{max}(m)$ ()はゼロダウン	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(s)$	$H_{max}(m)$	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(s)$
IC	4.47	3.12	8.0	4.76~5.20	3.07~3.16	8.0~8.1
ID	6.30	4.53	9.1	5.87~7.13	4.51~4.58	9.2~9.3
IE	4.96	3.75	9.5	5.04~7.02	3.69~3.77	9.4~9.5
IIA	2.91	1.90	7.1	2.56~3.02	1.87~1.93	7.0~7.2
IIB	3.09	1.67	6.4	2.47~2.87	1.65~1.68	6.3~6.5
IIC	2.62 (3.15)	2.05	14.1	2.76~3.05	1.99~2.09	14.0~14.2
IID	2.50 (2.77)	1.72	13.1	2.30~2.72	1.69~1.76	13.1~13.3
II E	2.61 (3.19)	2.03	12.7	2.75~2.93	2.03~2.05	12.6~12.7
II F	2.74 (2.92)	2.05	12.6	2.73~3.19	2.02~2.08	12.5~12.6
II G	2.91 (3.17)	2.23	13.4	3.12~3.35	2.18~2.29	13.2~13.3
IIIA	7.9	5.0	10.5	6.39~7.22	4.95~5.01	10.4~10.7

図-11(1)は、ゼロアップクロス解析とゼロダウンクロス解析による H_{max} の違いを示したものである。実験波の場合、ゼロアップのほうが大きいケースとゼロダウンのほうが大きいケースがほぼ均等にばらついている。これに対して、現地データの場合、II C~G のケースはいずれもゼロダウンのほうが大きいことがわかる。ただし、合田の研究⁷⁾によれば、ゼロアップとゼロダウンによる H_{max} の差は統計的変動の範囲内にとどまるとされており、今回の現地データもその範囲内と考えられる。図-11(2), (3)は1/10最大波高 $H_{1/10}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ について同様に示したものであるが、ゼロアップとゼロダウンによる差はほとんど見られない。

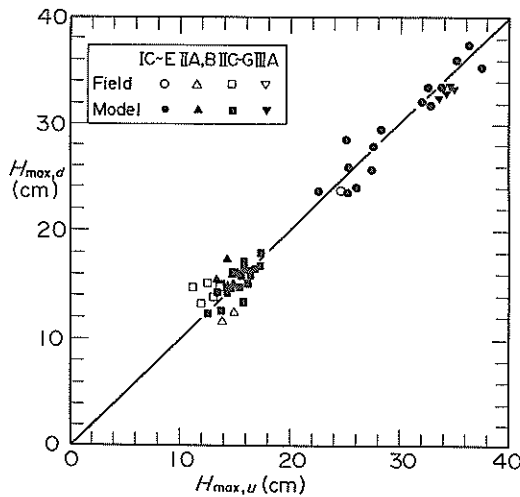


図-11(1) ゼロアップクロス法とゼロダウンクロス法による波高の違い (H_{max})

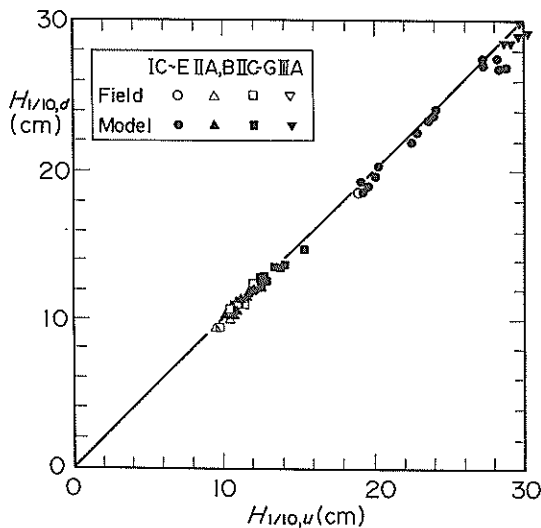


図-11(2) ゼロアップクロス法とゼロダウンクロス法による波高の違い ($H_{1/10}$)

図-12(1), (2)は、実験波における $H_{1/3}$ と、 H_{max} および $H_{1/10}$ の関係を示したものである。データはばらついているが、 $H_{1/10}$ についてはレーリー分布に基づく理論値 ($=1.27 H_{1/3}$) とほぼ一致している。一方、 $H_{max}/H_{1/3}$ の理論値は1波群中の波数によって異なる。図中の $H_{max}(\text{mean})$ は $H_{max}/H_{1/3}$ の値の理論上の平均値を、 $H_{max}(\text{mode})$ は最頻値を表しており、今回の実験波は、平均的に見ると $H_{max}(\text{mode})$ に近い。

(2) 実験波のスペクトル

現地の波のスペクトル形状は、有義波周期 $T_{1/3}$ が10s 以下の場合 (I C~E および II A, B) についてはほぼ修正プレットシュナイダー・光易型のスペクトル (MBM) と一致しているが、滑動時の周期の長い波 (II C~G) については、MBM に比べてピークがやや大きくなる傾向があった。今回の実験では、特に滑動現象の場合は、実験波をできるだけ現地と近づける必要がある。そこで、滑動時の実験波については、JONSWAP 型スペクトルを用い、ピークの鋭さを表すパラメータ γ を変化させ、現地とできるだけ近くなるようにした。

図-13(1)は、孤立函のときに測定されたケースのひとつ (I C) について、MBM スペクトルの計算値と、現地データおよび実験波のスペクトルを例示したものである。現地データ、実験波ともにMBM スペクトルにほぼ一致している。ただし、現地データには、 $fT_{1/3} < 0.4$ の長周期成分がやや含まれているとともに、ピーク周波数の前後でやや小さくなっている。一方、図-13(2)は、最初の滑動時の波 (II C) について、同様に例示したものである。ピーク周波数付近にエネルギーが集中してお

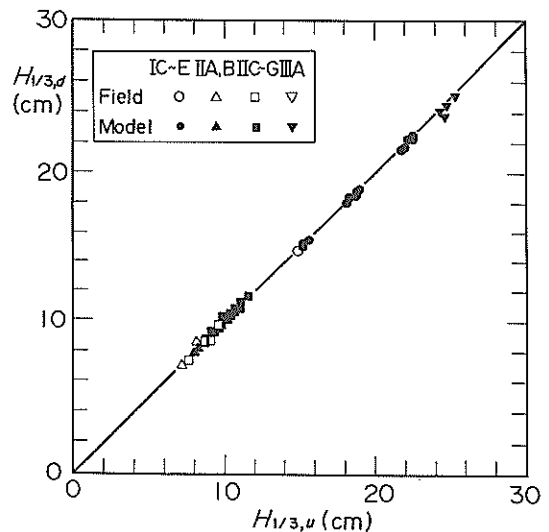


図-11(3) ゼロアップクロス法とゼロダウンクロス法による波高の違い ($H_{1/3}$)

り、図には示していないが、MBM スペクトルの計算値よりもかなり大きくなっている。実験波は現地データとほぼ一致している。

現地における波向きは、波向計および目視による観測の結果、どのケースについても防波堤法線に対してほぼ直角であった。これは境港のある美保湾が、北側の島根

半島の回折波領域に入っており、常に波向きが一定となるためである。したがって、実験においても波向きは直角入射とした。また、滑動時における潮位は+0.31mで、H.W.L.の+0.40mとほとんど差がなかった。そこで、設計がH.W.L.で行われていることも考慮して、実験はH.W.L.で行った。

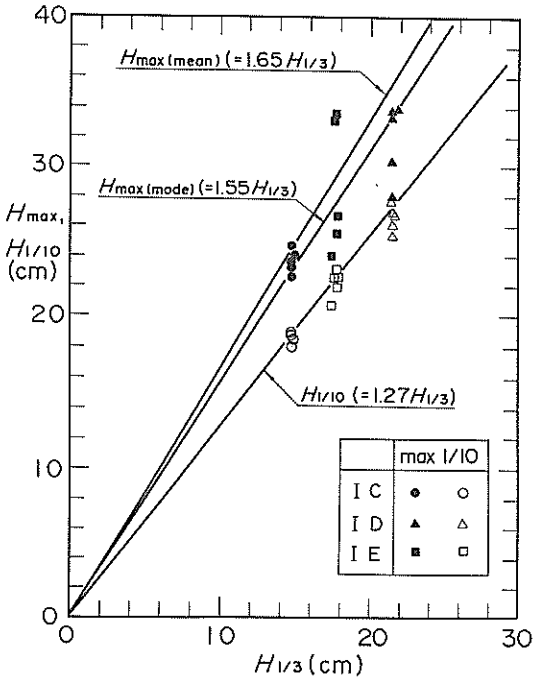


図-12(1) 有義波高と最高波高および1/10最大波高の関係 ($H_{1/3}=7.8\sim 10.9\text{cm}$)

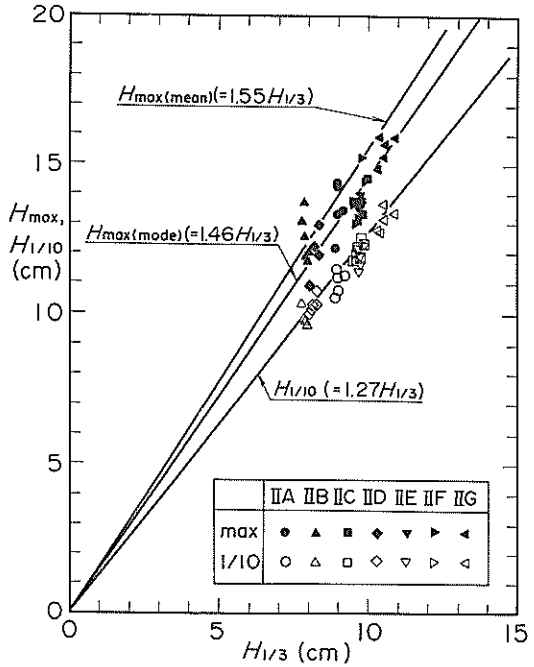


図-12(2) 有義波高と最高波高および1/10最大波高の関係 ($H_{1/3}=14.6\sim 21.8\text{cm}$)

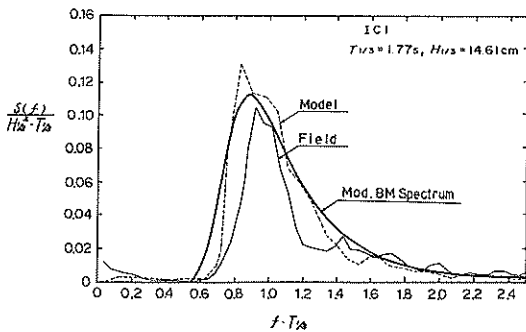


図-13(1) 周波数スペクトルの例 (I C)

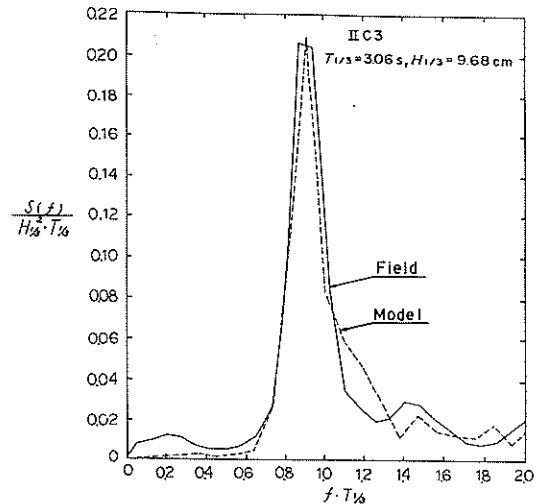


図-13(2) 周波数スペクトルの例 (II C)

5. 波圧特性

5.1 波圧波形の時間変化

(1) 各点の波圧の時間変化

二重円筒ケーソンに作用する波力は、ピークとなる位相が各部材ごとに異なる。図-14(1)~(3)は、代表的な測点における波圧の時間変化の例を示したものである。図-14(1)は、現地において孤立函の状態で観測された比較的波高の大きい波に相当する I C 1 ($T_{1/3} = 1.77s$, $H_{1/3} = 14.61cm$) の波群中の、 H_{max} に相当する波作用時の波圧波形を表したもので、連続函の例である。なお、本章における連続函とは、特にことわりのない限り、現地と同じ連続函 (3 函) を表す。外側円筒透過円筒部前面の WP 2 および WP 5, 外側円筒透過円筒部後面内側の WP 16 において、波形の切り立ったやや衝撃的波圧が作用している。これらはそれぞれ押し波時 I, II の位相に対応している。また、波圧の値としては小さいが、前面側揚圧力 WP 26 にも押し波時 I における切り立った波形が見られる。内側円筒天端面の WP 28 にも波圧が作用しているが、これは透過円筒部後面内側に当たった波が跳ね返り、水塊が後側から天端面に落下して生じるもので、外側円筒内側側面の WP 13 および WP 14 の波形に見られる二つめのピークとほぼ同位相である。

図-14(2)は、図-14(1)と同じく連続函の例で、現地において最初に滑动が生じた波に相当する II C 3 ($T_{1/3} = 3.06s$, $H_{1/3} = 9.68cm$) の波群中の、滑动時前後の波圧波形を表したものである。周期が長く波高が小さい重複波であるため、WP 16 でわずかに波形が切り立っているのみで、衝撃的波力は全く生じていない。なお、揚圧力 (WP 26, WP 27) の波形にみられる激しい振動は、ケーソンの滑动によるものである。

図-14(3)は、図-14(1)と同じ波に対する孤立函の波圧波形を表したものである。連続函に比べて波圧のピーク値が小さく、WP 16 を除いて衝撃的波圧は作用していない。これは、孤立函では波がケーソンの両側へ逃げるためである。ただし、衝撃的ピークの部分以外の波圧については、それほど差はないことがわかる。

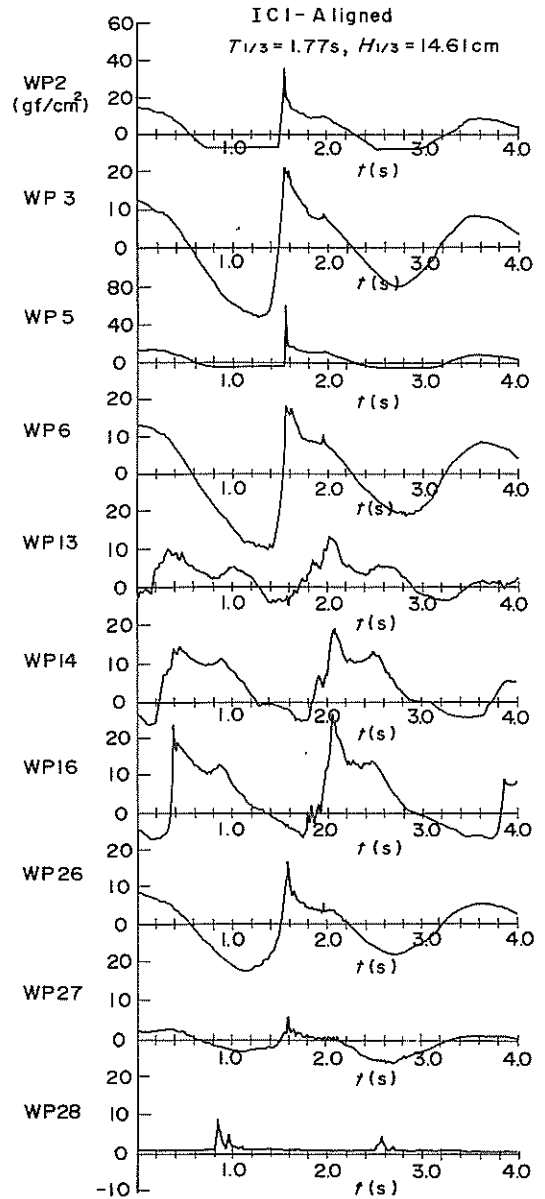


図-14(1) 波圧の時間変化 (I C, 連続函)

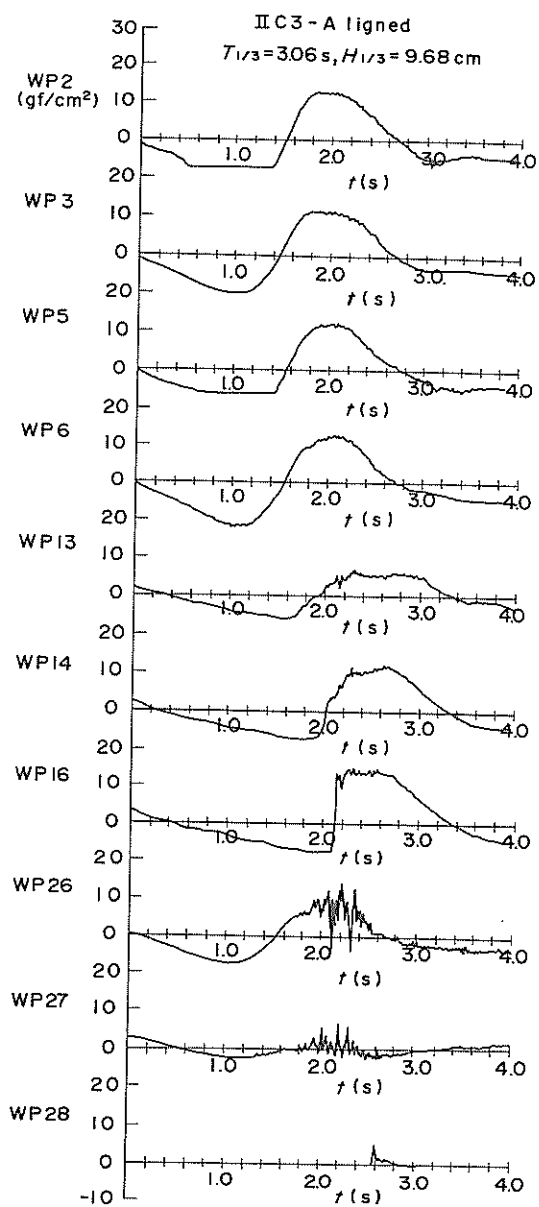


図-14(2) 波圧の時間変化 (II C, 連続函)

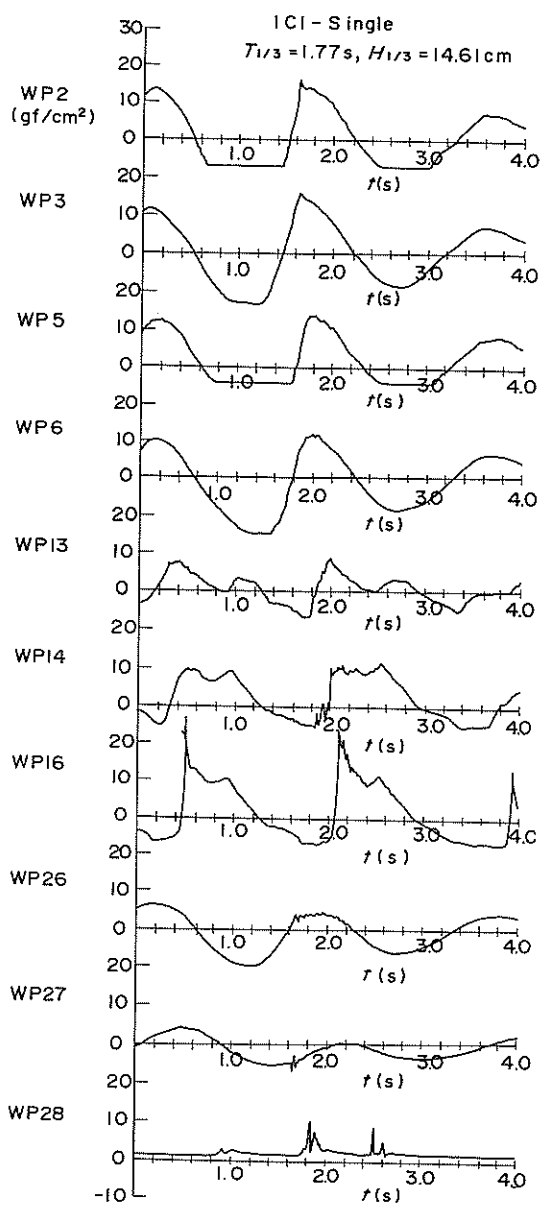
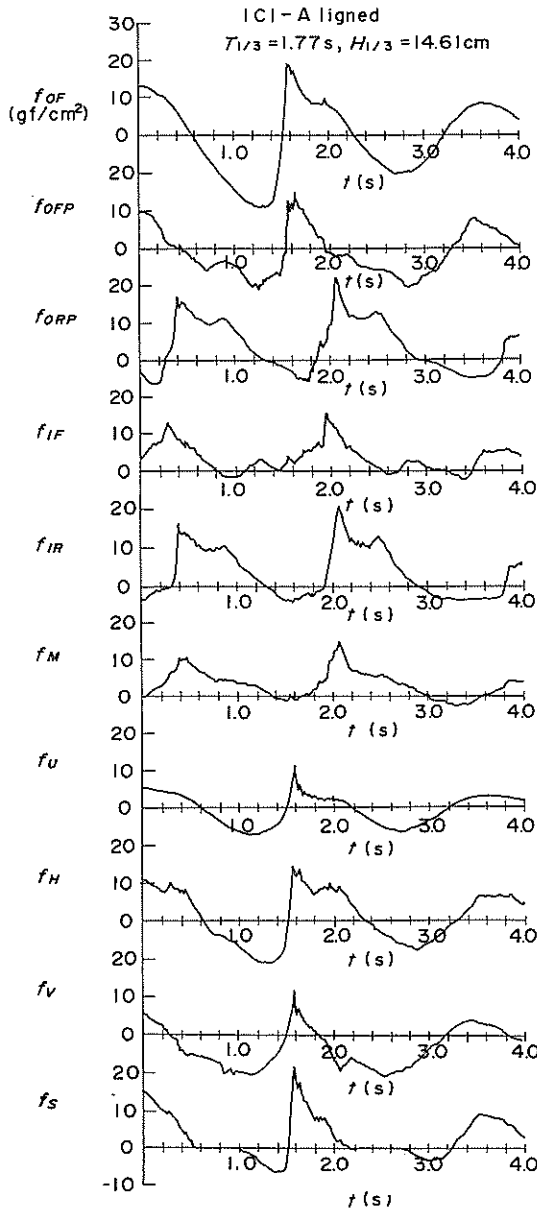


図-14(3) 波圧の時間変化 (IC, 孤立函)

(2) 各部材およびケーソン全体の波力の時間変化



図一15(1) 平均波力強度の時間変化 (I.C, 連続函)

図一15(1)~(3)は、各測点の波圧から計算した各部材ごと、およびケーソン全体に作用する波力の単位面積あたりの平均強度の時間変化の例を、図一14と同様に示したものである。上から順に、外側円筒不透円筒部 f_{OF} 、外側円筒透過円筒部前半 f_{OFP} 、外側円筒透過円筒部後半 f_{ORP} 、内側円筒前半 f_{IF} 、内側円筒後半 f_{IR} 、中間床版 f_M 、揚圧力 f_U 、全水平波力 f_H 、全鉛直波力 f_V 、

滑動合成波力 f_S を表している。原則として水平波力は波の進行方向を正、また、鉛直波力は上向きを正としている。ただし、 f_{IR} は波の進行方向の逆向きを正、また、 f_M は下向きを正としている。

滑動合成波力 F_S は、ケーソン全体の滑動安定性の検討に用いる波力で、次式で定義される。

$$F_S = F_H \pm \mu F_V \quad (5)$$

ここに、 F_H ：ケーソンに作用する全水平波力

F_V ：ケーソンに作用する全鉛直波力

μ ：摩擦係数

である。±は F_H の正負に対応している。摩擦係数 μ については、ここでは通常の設計で用いられている0.6を用いた。ただし、6. で後述する滑動実験結果の整理においては、摩擦検定結果に基づいて0.55を用いている。

全鉛直波力 F_V が負（下向き）の場合、 F_V はケーソンの滑動安定性を高める効果がある。このとき、 $-\mu F_V > |F_H|$ であれば、ケーソンを動かそうとする水平波力と釣り合う以上の鉛直波力が作用することになり、仮にケーソンの水中重量が0であっても、ケーソンは滑動しないことになる。このような場合は $F_S = 0$ としている。図中の滑動合成波力強度 f_S は、 F_S を水平方向の投影面積で割り、単位面積あたりの波力強度で表したものである。

図一15(1)は、図一14(1)と同じく連続函で比較的波高の大きい例である。各部材の波力については f_{OF} 、 f_{OFP} 、 f_U において押し波時Ⅰのピークがはっきり現われており、また、 f_{ORP} 、 f_{IF} 、 f_{IR} 、 f_M においては押し波時Ⅱのピークがはっきり現われている。ケーソン全体の合力で見ると、全水平波力 f_H には、押し波時Ⅰ、Ⅱの二つのピークが見られる。しかしながら、押し波時Ⅱでは、全鉛直波力 f_V は負のピークとなり、ケーソンの安定性を高める向きに作用している。したがって、滑動合成波力 f_S は押し波時Ⅰで最大となっており、押し波時Ⅱにおける値は小さい。また、波形が切り立っているため、ピーク時の波力の作用時間は短い。

一方、図一15(2)は、図一14(2)と同じく連続函で波高の小さい例である。各部材に作用する波力にははっきりしたピークが見られず、ゆるやかに変化する波力が比較的長く作用している。そのため、ケーソン全体の合力で見ると、押し波時Ⅰから押し波時Ⅱにかけてほぼ一定の波力となっている。したがって、滑動限界を少しでも超える波力が作用すると、その作用時間が長い為、一波による滑動量が非常に大きくなる。3. で述べたように、今回の境港における二重円筒ケーソンの滑動は、こうし

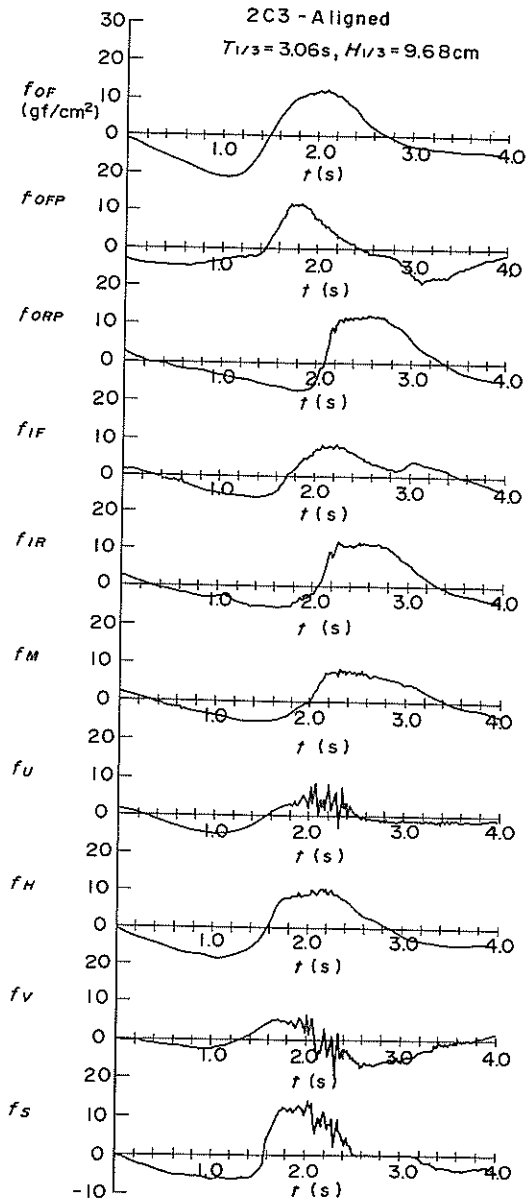


図-15(2) 平均波力強度の時間変化 (II C, 連続関)

た重複波による滑動現象の特徴がよく現われている。

図-15(3)は、図-14(3)と同じく孤立関の例である。各波形について、図-15(1)の連続関の場合とピーク値を比較すると、ほとんどの部材において、孤立関のほうが連続関よりも小さい。これは、前述のように波がケーソンの両側へ逃げることの影響である。なお、不透過円筒部 f_{OF} のほうが透過円筒部前半分 f_{ORP} に比べて連続関と孤立関の波力の差が大きい、これは、透過円筒部の

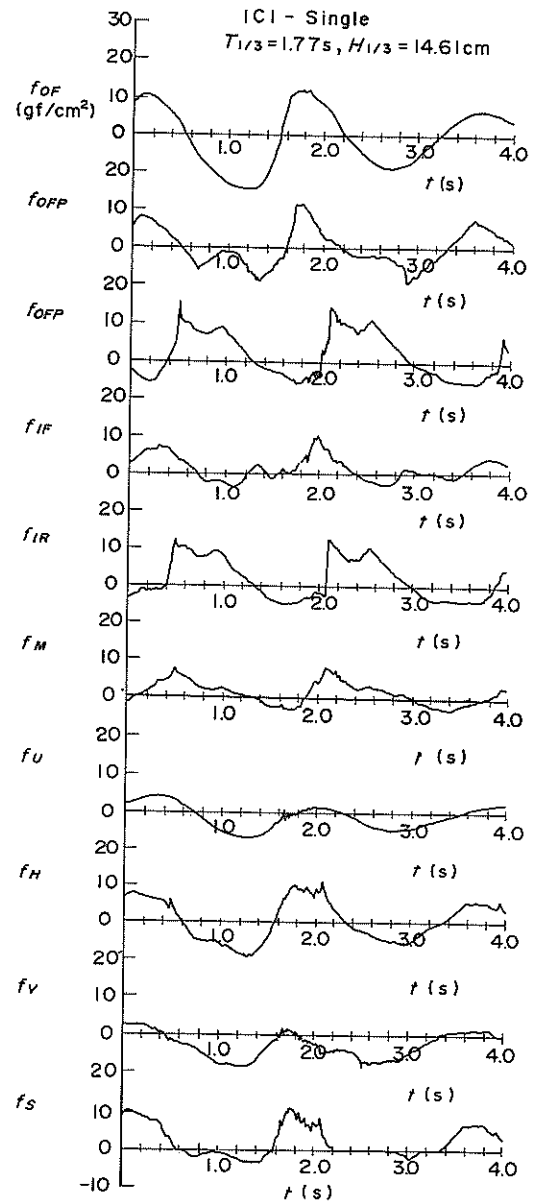


図-15(3) 平均波力強度の時間変化 (I C, 孤立関)

場合、波の一部は遊水室内へ透過するため、不透過円筒部に比べて波が逃げる割合が小さく、波力の低減も小さいと考えられる。

5.2 各測点における波圧

(1) 現地データと模型実験結果の比較

各測点における波圧について、押し波時 I または押し波時 II の波圧の計算値と、現地および模型実験における実測値の比較を行った。ここに、押し波時 I は外側円筒

不透過円筒部の合力がピークとなるときの位相、また、押し波時Ⅱは外側円筒透過円筒部後半分の合力がピークとなるときの位相で定義している。

図-16(1)~(3)は、ケーソン各部の代表的な測点における波圧の値を、現地データと模型実験結果を合わせて示したものである。用いたデータは、現地において連続函の状態で計測されたⅡA~Gの7ケースで、縦軸は実測値を、横軸は偏分布の場合の波力低減係数 λ を用いた計算値を示している。図中の各点は、各波群の最高波高、1/10最大波高、有義波高から求められる波圧の計算値と、実測波圧の最大値、1/10最大値、1/3最大値とをそれぞれ対応させてプロットしている。

図-16(1)は、透過円筒部前面に作用する波力の押し波時Ⅰにおける値を、ケーソン前面の表と裏の波圧の差((WP2)-(WP11))で示したものである。図中には偏分布の計算値($\lambda_{OFF}=1.0$)および等分布の計算値($\lambda_{OFF}=0.65$)を実線で示している。データはばらついてはいるが、現地と模型はかなりよく一致しており、平均的には等分布の場合の計算値に近い。これは、波高が小さい重複波領域であり、しかも比較的周期が長いため、前面に衝撃的な波圧が作用しないためと考えられる。

図-16(2)は、不透過円筒部前面中央の測点(WP3)での、押し波時Ⅰにおける波圧を示したものである。図-16(1)と同様に、偏分布の計算値($\lambda_{OF}=1.35$)および等分布の計算値($\lambda_{OF}=0.90$)も示している。データはややばらついており、現地のほうが模型よりもやや小さい傾向にある。現地データ、模型実験結果ともに、等分布の計算値($\lambda_{OF}=0.90$)に近い。これも、スリット部と同様の理由によるものと考えられる。

図-16(3)は、透過円筒部後面中央の測点(WP16)での、押し波時Ⅱにおける波圧を示したものである。全体的に、模型のほうが現地よりもかなり大きくなっている。これは、模型実験では測点の位置でやや衝撃的波力が作用したのに対して、現地の場合、衝撃的波力が作用しなかったためと考えられる。すなわち、衝撃的波力は局所的に現われるため、現地の場合、一波ごとの波向きが直角入射からややずれることにより、作用位置が測点からずれたのに対して、模型実験では常に直角入射であり、測点において衝撃的波力が作用したと考えられる。

ⅡA, BのほうがⅡC~Gよりも大きくなっているのは、ⅡA, Bのほうが周期が短く、波力が衝撃的になりやすいためである。現地データでみると、偏分布の計算値($\lambda_{ORP}=1.2$)は、周期が長い場合には安全側の値となるが、周期が短い場合にはやや危険側の値となることがある。ただし、衝撃的波力は非常に局所的でしかも作

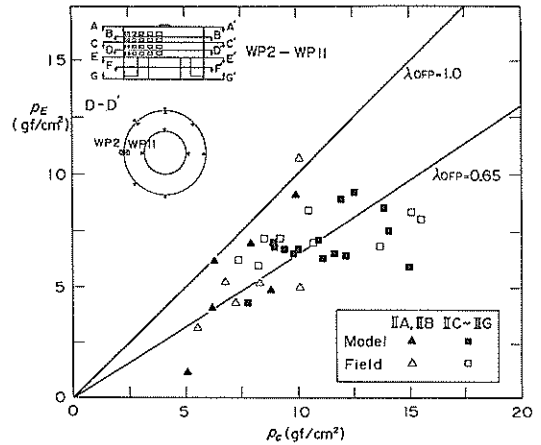


図-16(1) 現地と模型実験における波圧の比較 (透過円筒部前面)

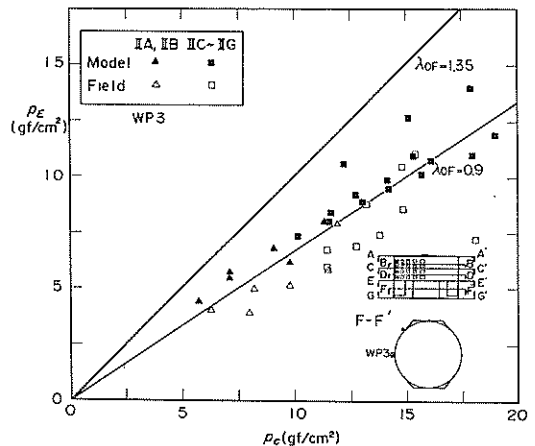


図-16(2) 現地と模型実験における波圧の比較 (不透過円筒部)

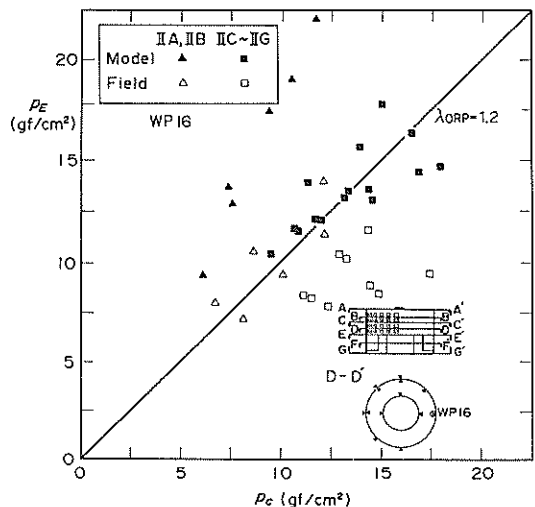


図-16(3) 現地と模型実験における波圧の比較 (透過円筒部後面)

用時間も短いため、位相差の影響も考慮すると、部材全体の波力としてはそれほど大きくならないと考えてよい。

(2) 孤立函と連続函の比較

境港における現地実験では、前述のように最初の一年間は孤立函の状態であった。境港に限らず、最初の段階においては、ほとんどの場合に孤立函の状態が生じる。このような孤立函に作用する波力の特性を調べるため、同じ波を作用させた場合の孤立函と連続函に作用する波力の比較を行った。

図-17(1)~(3)は、孤立函と連続函の波圧を、図-16(1)~(3)と同様に示したものである。ただし、用いたデータは、現地において孤立函の状態で計測されたIC~Eと、50年確率による設計波ⅢAの4ケースで、図-16(1)~(3)の場合に比べて波高がかなり大きい。

図-17(1)は、透過円筒部前面に作用する波圧を示したものである。孤立函に作用する波力は、連続函に作用する波力に比べて全体的にやや小さい。なお、計算値と比較すると、連続函の場合、平均的には偏分布の計算値 ($\lambda_{off} = 1.0$) と一致している。これは、波高が大きいため、やや衝撃的な波力が生じることと、ケーソン前面と遊水室内の水位差が大きく、押し波時Iにおいて、遊水室内の水位上昇による逆向きの波力がほとんど生じないためである。

図-17(2)は、不透過円筒部前面に作用する波圧を示したものである。図-17(1)と同様に、孤立函に作用する波圧は連続函に比べて小さくなっている。計算値と比較すると、孤立函の場合、等分布の計算値 ($\lambda_{off} = 0.90$) とほぼ一致している。一方、連続函の場合、偏分布の計算値 ($\lambda_{off} = 1.35$) と等分布の計算値の中間となり、波高が大きくなるにつれて、衝撃的な波力が作用し、偏分布の計算値に近づく傾向がある。

図-17(3)は、透過円筒部後面に作用する波圧を示したものである。データのばらつきが大きいですが、全体としては、やはり孤立函の波圧のほうが連続函の波圧よりもやや小さい。計算値と比較すると、波高が大きくなるにつれて、偏分布の計算値よりもかなり大きくなっている。ただし、こうした衝撃的な波力は、前述のように非常に局所的なもので、部材全体の波力としてはそれほど大きくならない。

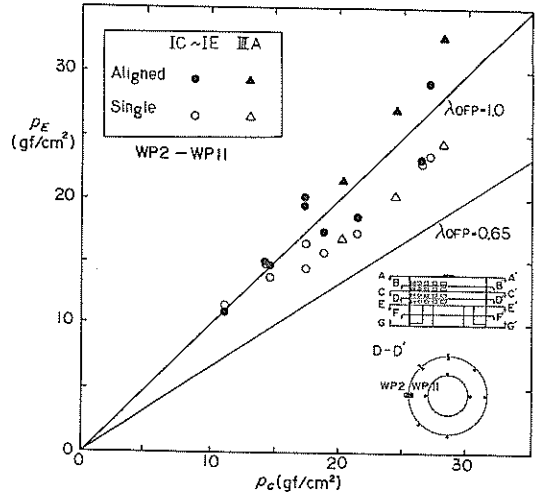


図-17(1) 孤立函と連続函の波圧の比較 (透過円筒部前面)

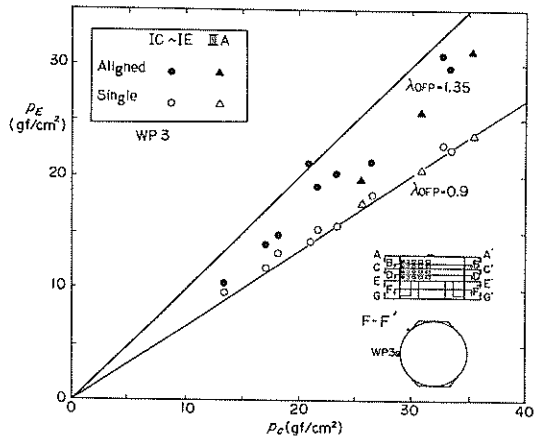


図-17(2) 孤立函と連続函の波圧の比較 (不透過円筒部)

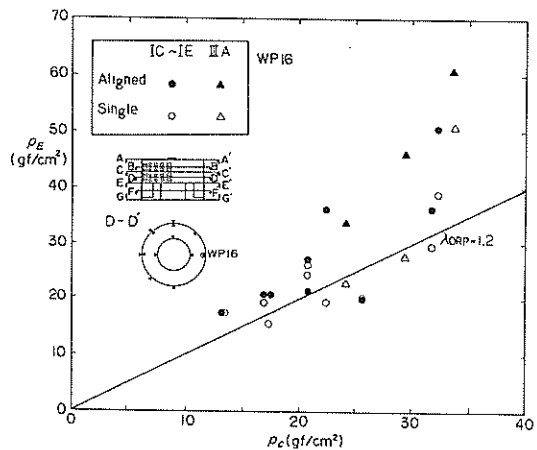


図-17(3) 孤立函と連続函の波圧の比較 (透過円筒部後面)

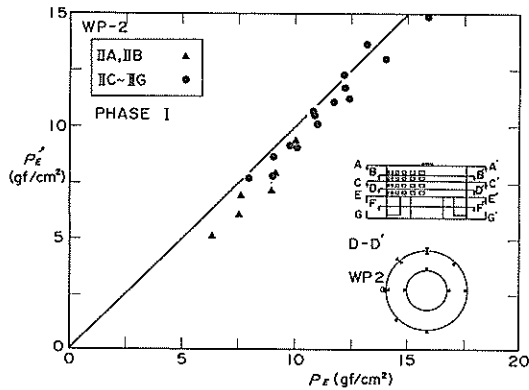


図-18(1) 堤体長の違いによる波圧の比較
(透過円筒部前面)

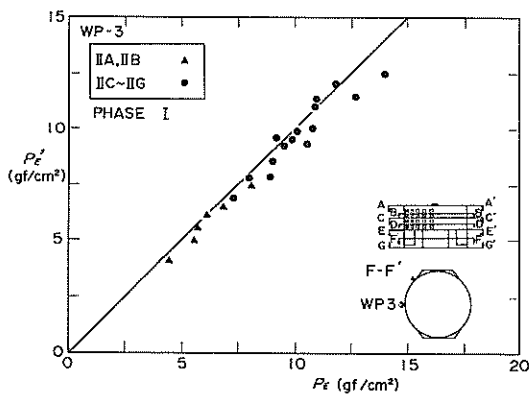


図-18(2) 堤体長の違いによる波圧の比較
(不透過円筒部)

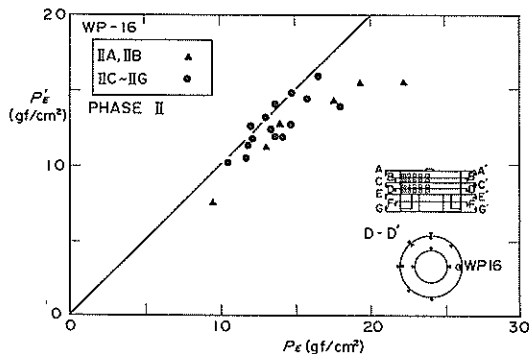


図-18(3) 堤体長の違いによる波圧の比較
(透過円筒部後面)

(3) 堤体長の違いによる波力の比較

図-18(1)~(3)は、両側に側壁を設置した連続函（無限）の場合と、側壁を設置しない連続函（3函）の場合の波力について比較したものである。図-18(1)は透過円筒部前面に作用する波圧 WP 2 を、図-18(2)は不透過円筒部前面の波圧 WP 3 を、図-18(3)は透過円筒部後面の波圧 WP16 をそれぞれ示している。横軸に側壁なしの場合の値、縦軸に側壁有の場合の値をとっている。WP16において、波高が大きい場合に側壁なしのほうがやや大きくなっているが、全体的にはほとんど差はない。ただし、今回のように堤体長が短いと、回折波の影響でケーソン背後の水位が変動する。この場合、押し波時Ⅱにおいて背後の水位が低下すると、透過円筒部後半分に作用する波力は、背後の水位が静水面の場合に比べて水位低下による静水圧の変化分だけ大きくなる。この影響は、後述する滑動安定性についても考慮する必要がある。

5.3 同時波圧分布

図-19は、現地における最初の滑動時の同時波圧分布と、これにほぼ対応する実験波（ⅡC3の H_{max} ）の押し波時Ⅰ（滑動合成波力ピーク時）における同時波圧分布を合わせて示したものである。図中には、等分布の設計波圧も示している。測点によっては模型実験結果のほうがやや大きな波圧となっているところもあるが、前面側の波圧分布は、模型実験、現地ともに等分布に近くなっている。このことから、滑動時の波圧については模型実験は現地の状況をほぼ再現していると考えられる。

図-20(1), (2)は、孤立函と連続函における同時波圧の平面分布を比較した例である。模型実験における設計波（50年確率波）相当の波（ⅢA）について、押し波時Ⅰ, Ⅱのそれぞれの位相での波圧分布を示しており、等分布および偏分布の設計波圧についてもあわせて示している。孤立函の場合、ほとんどの点において連続函における波圧よりも小さくなっていることがわかる。押し波時Ⅰにおける外側円筒不透過円筒部の波圧は、ほぼ偏分布の設計波圧に近くなっている。これに対して、外側円筒透過円筒部前面の波圧は、正面では偏分布の設計波圧とほぼ一致しているが、斜めの位置では設計波圧よりも大きく、スリット部全体としては設計波圧よりもやや大きな波圧となっている。また、押し波時Ⅱにおける外側円筒透過円筒部後面の波圧は、偏分布の設計波圧よりも大きく、衝撃的波力が作用していることがわかる。

II C 3

PHASE I
(SLIDING)

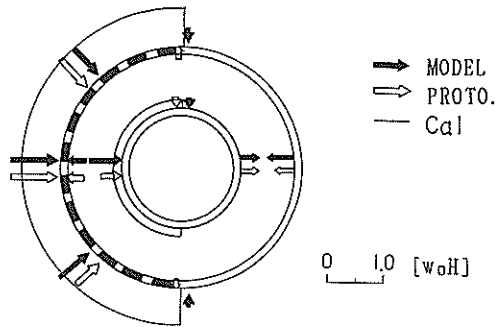
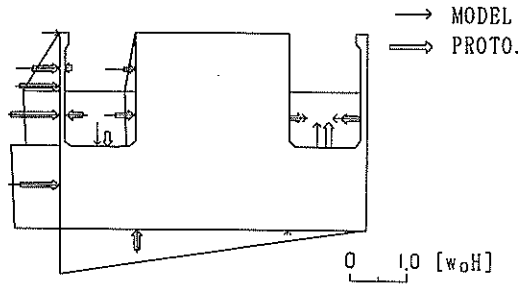


図-19 滑動時における同時波圧分布の例

III A 1
PHASE I

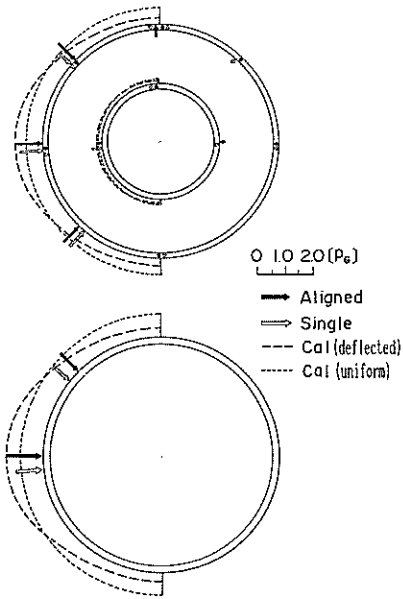


図-20(1) 同時波圧分布の例 (押し波時 I)

PHASE II

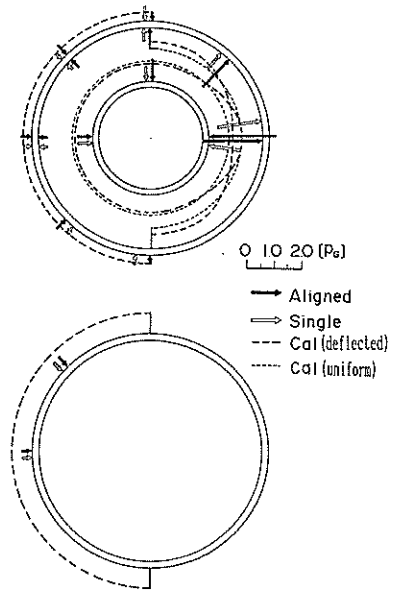


図-20(2) 同時波圧分布の例 (押し波時 II)

5.4 ケーソン全体に作用する波力

各測点における実測波圧を合成して、ケーソン全体に作用する合力についても検討を行った。合力は、各測点の実測波圧に作用面積を乗じてその合計を求めた。ただし、波圧計の分布が均等でないため、すべての測点を用いるのではなく、外側円筒上部および内側円筒については、静水面下の波圧、すなわち、前掲の図-9におけるD-D'断面の波圧のみを用いて合力を計算している。したがって、波高が小さく静水面より上の波圧があまり大きくない場合、水平波力についてはやや過大に評価することになる。しかしながら、後述の滑動実験結果では、実測波圧から求めた合力で計算される滑動限界が、実験結果とほぼ一致しており、合力の算出方法による誤差は、それほど大きくないと考えられる。

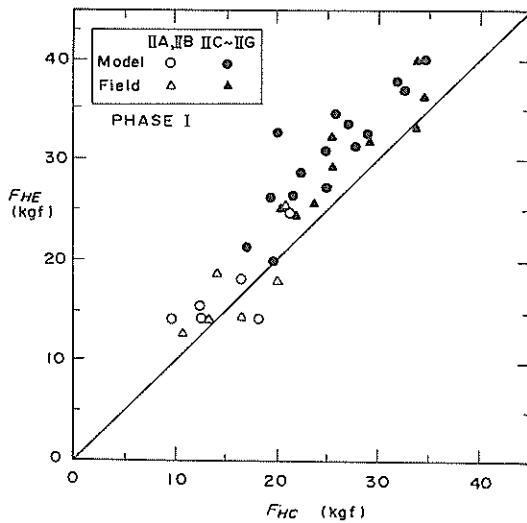


図-21 全平均水平波力強度

図-21は、押し波時Iにおける全水平波力の計算値 F_{Hc} と実測値 F_{He} の関係を示したものである。全水平波力は押し波時IIにおいて最大となることもあるが、押し波時IIでは全鉛直波力が下向きに働くため、滑動合成波力としては押し波時Iのほうが大きくなる。したがって、ここでは押し波時Iの波力について示している。

縦軸にはケーソン1函あたりの水平波力の実測値を、横軸には計算値をとっている。用いたデータは、現地において連続函の状態で計測されたIIA~Gの7ケースで、波高は比較的小さい。図中の各点は、各波群の最高波高、1/10最大波高、有義波高から求められる波力の計算値と、実測波力の最大値、1/10最大値、1/3最大値とをそれぞれ対応させてプロットしている。ただし、現地については、滑動時データは滑動の生じた3波群に

ついでのみプロットしている。模型実験と現地データを比較すると、わずかに模型実験のほうが大きいものの、ほぼ一致しており、いずれも全体的に計算値よりも大きくなっている。

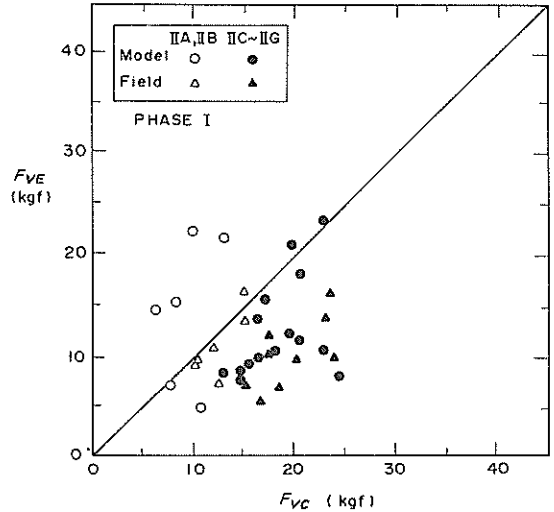


図-22 全鉛直波力強度

図-22は、押し波時Iにおける全鉛直波力の計算値 F_{Vc} と実測値 F_{Ve} の関係を、図-21と同様に示したものである。ここに、鉛直波力は上向きを正としている。データはばらついているが、滑動時のデータについては、全体的に実測値は計算値よりも小さく、特に現地データが小さくなっている。これは、ケーソン底面に働く揚圧力が計算値に比べてかなり小さいためである。すなわち、通常的设计では、ケーソン後趾において圧力が0となる三角形分布を仮定しているが、今回の場合、回折波の影響によりケーソン背後の水位が低下し、後趾における揚圧力が負となるのが主な原因と考えられる。

なお、遊水室内の水位変動により、中間床版にも波力が作用するが、今回の条件では、押し波時Iにおける遊水室内の水位は、前側では静水面よりもやや高く、後側では静水面よりも低下している場合が多い。前後を平均した水位が低下している場合、中間床版に働く波力は、静水時を0とすると上向きであり、全鉛直波力を増大させる向きに作用することになる。

一方、周期の短いIIA, IIBの場合、実測値が計算値よりも大きくなっている。これは、押し波時Iにおいて遊水室内の水位がかなり低下しており、上向きの鉛直波力が増大しているためである。なお、このとき、背後の水位はほとんど低下していないため、揚圧力については計算値とほぼ等しい。

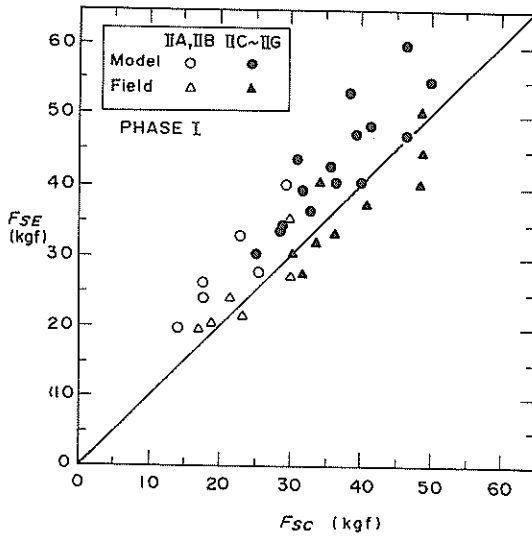


図-23 滑動合成波力強度

図-23は、押し波時Iにおける滑動合成波力の計算値 F_{sc} と、実測値のピーク値 F_{se} の関係を、図-21と同様に示したものである。すなわち、図-21の全水平波力 F_H と図-22の全鉛直波力 F_V を、前述の式(5)に代入したもので、摩擦係数 μ は0.6で計算している。現地データについては、計算値と実測値はほぼ一致している。一方、模型実験結果については、平均すると実測値が計算値よりやや大きくなっている。これは、模型実験においては、下部不透過円筒部の波力が計算値よりもやや大きくなっていることと、現地に比べて鉛直波力の低下の割合がやや小さいことが主な原因である。

なお、ここでは、ケーソン背後の水位低下の影響は揚圧力の減少にのみ現われている。しかしながら、実際には静水圧の変化による滑動抵抗力の低下を、水平波力の増加として考慮する必要がある。これについては、6章において検討する。

6. 滑動安定性

6.1 摩擦係数検定結果

通常の防波堤の設計においては、捨石マウンドとケーソンの摩擦係数 μ の値として0.6が用いられており、既往の模型実験による検定でも、ほぼ0.6前後の値が得られている。しかしながら、第一港湾建設局が実施した陸上における引張実験の結果⁸⁾ ⁹⁾ によれば、マウンド表面のならし精度やマウンドの締め固まりの程度が滑動抵抗力に影響を与え、締め固めが不十分な場合、摩擦係数が低下することが明らかになっている。

今回の滑動函の場合、通常のケーソンに比べて重量が

かなり軽く、接地圧が小さかったと考えられる。また、据付後4か月足らずで滑動したため、あまり大きな波を受けておらず、波浪による繰り返し荷重を受けてのマウンドの締め固まりも不十分であったと考えられる。したがって、滑動抵抗が小さく、摩擦係数が0.6よりも小さかったことが予想される。そこで、滑動実験に先立って、マウンドの締め固まりの違いによる摩擦係数の変化を検討した。

摩擦係数の検定では、捨石マウンド上に設置した二重円筒ケーソンにワイヤーロープをかけ、滑車を利用しておもりによる水平荷重を作用させ、ケーソンが動き出すときの荷重から摩擦係数を求めた。マウンドの表面とケーソンの底面は十分に湿った状態で行った。マウンドの締め固めについては、

- ①マウンド上面に板をおき、その上から荷重を作用させて十分に締め固めた状態
 - ②マウンド上面を板で軽く叩いて締め固めた状態
 - ③マウンド上面を手でならし、締め固めない状態
- の3通りで実施した。

ケーソンの重量は、滑動函の水中重量(模型換算で約93kg)とほぼ同じにするため、87kgと100kgの2種類について行った。ただし、重量の差が小さく、これによる摩擦係数の違いはほとんどなかったため、検定結果については区別せずに整理している。

表-6 摩擦検定結果

マウンドの状態	¹⁾ 摩擦係数 μ () 内は平均値	²⁾ 摩擦係数 μ' () 内は平均値
十分に締め固めた場合	0.57~0.66 (0.61)	0.54~0.63 (0.59)
軽く締め固めた場合	0.51~0.63 (0.57)	0.51~0.56 (0.54)
締め固めない場合	0.47~0.52 (0.50)	0.43~0.51 (0.48)

- ¹⁾完全に滑動したときを滑動限界とみなした場合
²⁾数mm変位したときを滑動限界とみなした場合

表-6は検定結果を締め固めの程度別に示したものである。摩擦係数はマウンドの締め固め状態によって異なり、十分に締め固めた場合にはほぼ $\mu = 0.6$ であるが、締め固めが不十分な場合には摩擦係数がやや小さくなることがわかる。マウンドの設置や締め固めの方法が異なるため、この結果が直ちに現地の摩擦係数を表すものではないが、締め固めの状態として、現地の滑動時にもつ

とも近いのは②と考えられ、摩擦係数が0.6よりも小さかった可能性は高いと思われる。模型実験においては、滑動実験時の締め固め方法は②とし、実験結果の整理は摩擦係数を0.55として行った。

6.2 滑動実験結果

(1) 実験の方法

滑動実験時の実験波は、現地における滑動時の波に相当するⅡC～ⅡGまでの5つについて、それぞれ5波群ずつ用意し、各波群番号ごとにⅡCからⅡGまでの5種類を連続して作用させた。たとえば、ⅡC1、ⅡD1、ⅡE1、ⅡF1、ⅡG1の順で連続して作用させ、これを1シリーズとしている。

1シリーズ終了後は、滑動量が0の場合を除いて、一度ケーソンを設置し直してから次のシリーズを行った。ただし、途中で累積滑動量が5cm以上になった場合は、そこで実験を打ち切り、再設置を行っている。実験におけるケーソンの重量は、前述のように、設計重量(W1, 93.0kg)と、中詰水が静水面まで抜けた場合の重量(W2, 82.7kg)の2通りについて行った。なお、中詰水の流出については、現地において実際に生じたかどうか確認はされていない。しかしながら、内側円筒内の当初の水位が海面よりも約3m高く、圧力差が生じていたこ

とや、内側円筒の部材厚が30cmと通常のケーソンに比べて薄く、波力等によって微小なひび割れが生じやすいことなどから、中詰水が流出していた可能性は高いと考えられる。

(2) 滑動時の波圧波形

図-24(1)、(2)は、模型実験における滑動時の変位量および代表的な測点における波圧の時間変化の例である。現地における最初の滑動時の波に相当するⅡC3の波について、波圧波形が現地の滑動時に近いデータを選んで示している。それぞれの波圧の測点の位置は、図-25に示すとおりである。一方、図-26(1)、(2)は、現地における最初の滑動時の変位量および波圧を模型量に換算し、図-24と同じスケールで示したものである。模型実験結果と現地データを比較すると、ほとんどの測点において、波圧のピーク値だけでなく波形自体もよく一致している。このことから、現地の滑動現象が模型実験によりほぼ再現されることがわかる。ただし、滑動時の1波の波高については、現地のほうが模型実験に比べてやや大きい。これについては後述する。

ケーソンの滑動は、模型実験、現地ともに、WP-2、WP-3がピークとなる押し波時Ⅰで始まり、WP-16がピークとなる押し波時Ⅱでは滑動はほぼ停止

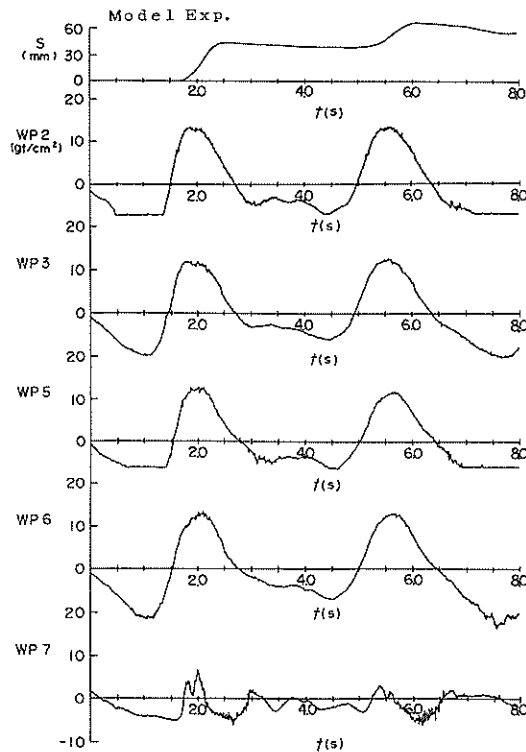


図-24(1) 模型実験における滑動時の変位および波圧波形

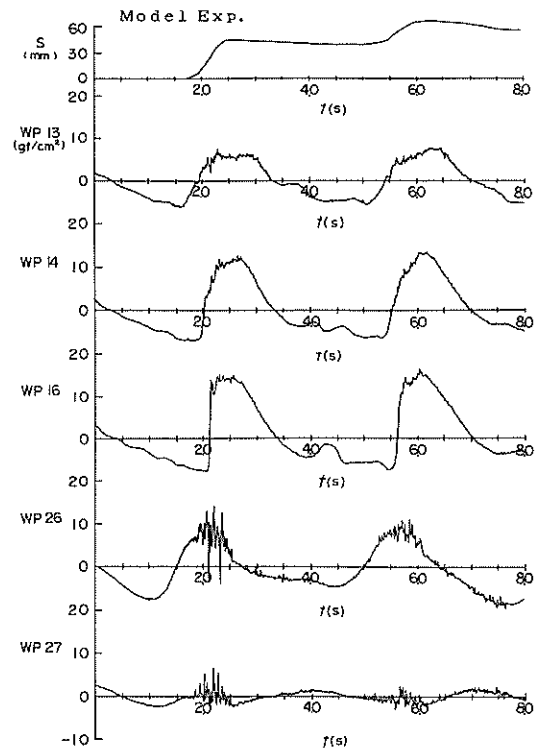


図-24(2) 模型実験における滑動時の変位および波圧波形

している。このことから、ケーソンの滑动安定性には押し波時Ⅰの波力が重要であり、押し波時Ⅱで外側円筒後

壁に作用する波力はケーソンの安定性にはほとんど影響しないと考えられる。

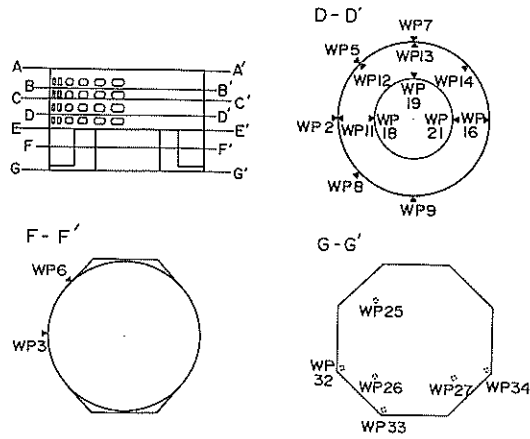


図-25 波圧計配置図

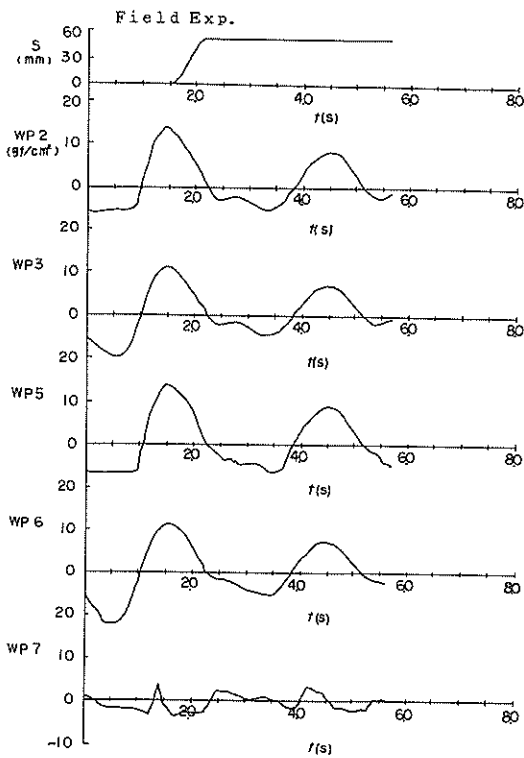


図-26(1) 現地における滑动時の変位および波圧波形

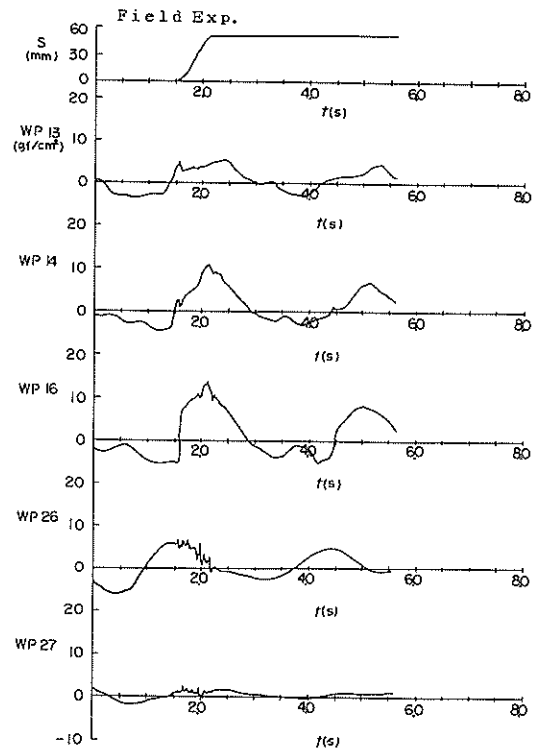


図-26(2) 現地における滑动時の変位および波圧波形

(3) 有義波高と滑動

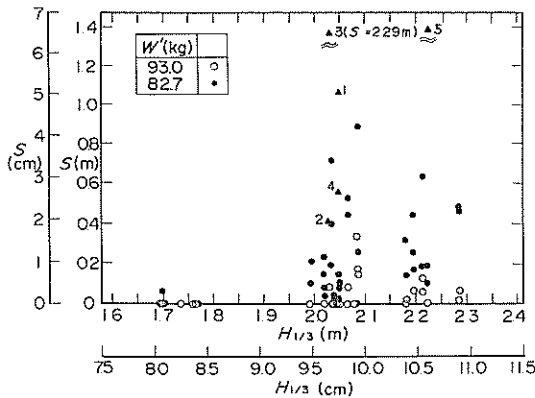


図-27 有義波高と滑動量の関係

図-27は、有義波高と滑動量の関係について示したものである。縦軸および横軸は、いずれも外側が模型量、内側が現地量を表している。▲で示したデータは現地におけるデータで、数字は滑動の順序を表している。模型実験の滑動量については、1波群中で2回以上動いた場合はそのうち最も大きいものをとっている。

現地において第1段階の滑動が生じたのは、有義波高2.05mの波(ⅡC)である。模型実験において、これに相当する波を作用させた場合、中詰水の流出を仮定したW2(82.7kg)の場合には、滑動量にはばらつきがあるものの、ほとんどのケースで滑動が生じている。これに対して、設計重量W1(93.0kg)の場合には、滑動したのは半分以下のケースであり、滑動量自体もかなり小さい。したがって、摩擦係数が現地と模型でほぼ同じであったとすれば、現地のケーソンにおいて中詰水の流出により重量が減少していた可能性が高いと考えられる。

(4) 最高波高と滑動量

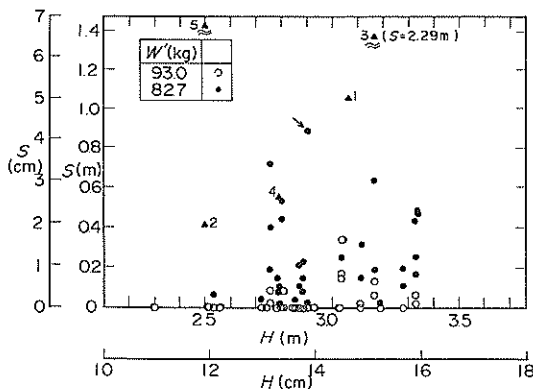


図-28 滑動時の波高と滑動量の関係

図-28は、滑動時の波高と滑動量の関係について示したものである。波高については、模型実験では1波群中の最高波高 H_{max} を用いている。ただし、1波群中に2回以上滑動が生じ、しかも滑動量が最大となった波が H_{max} でない場合には、その滑動時の波高を用いた。また、現地データでは、滑動時の1波の波高を用いている。W2については、 $H_{max} > 2.8m$ ではほとんどのケースで滑動しており、しかもその滑動量が大きく、現地の滑動状況とはほぼ一致している。一方、W1については、 $H_{max} > 2.8m$ でも滑動しないケースがかなりあり、滑動した場合でもその滑動量はW2より小さい。この結果からも、ケーソン重量が減少していた可能性が高いと考えられる。

図中に矢印で示した最も滑動量の大きいデータ ($H = 13.9cm$, $S = 4.2cm$) は、前掲の図-24の波形に対応している。前掲の図-26で波形を示した現地における最初の滑動時のデータ ($H = 3.15m$, $S = 1.06m$) と比較すると、滑動量はほぼ同じであるが波高はやや小さい。このように、波高と滑動量が一致しないのは、波高計の位置の問題を含む入射波高の測定精度の問題や、同じ波高であっても水位波形は必ずしも同じでなく、波力がばらつくことなどが原因と考えられる。

(5) ケーソン背後の水位

今回の場合、実際に設置されたケーソンは3函だけであるため、両側からの回折波の影響が大きく、ケーソン背後の水位が変動する。そこで、この影響について、規則波を用いてケーソン前面および背後の水位変動を測定することにより検討した。

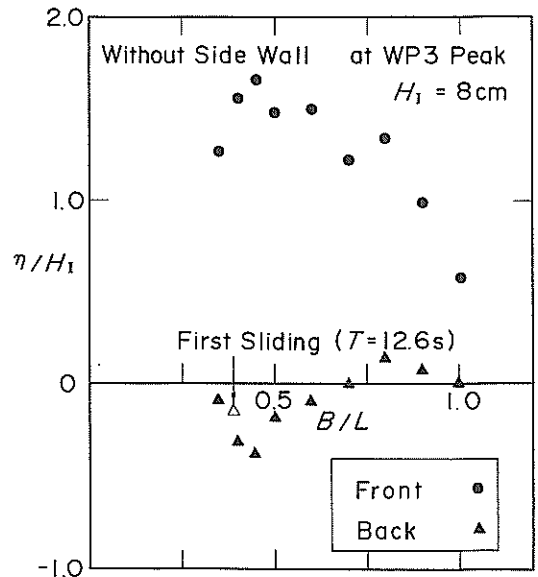


図-29(1) 波作用時のケーソン前面と後面の水位(側壁なし)

図-29(1)は、不透過円筒部前面中央での波圧 (WP-3) のピーク時におけるケーソン前面および背後の水位を示したもので、ケーソン両側に側壁を設置しない場合 (連続函 (3 函)) の結果である。縦軸には、水位を通過波高 H_1 で無次元化した値をとっており、横軸には、ケーソン 3 函分の長さ B を波長 L で無次元化した値をとっている。周期が長い場合には背後の水位が下がっており、 $B/L=0.45$ 付近で最も低下している。このとき、ケーソン前面と背後ではちょうど 180° の位相差があると考えられる。図中の Δ は、現地における最初の滑動時のケーソン背後の水位を、底版後側の揚圧力データから推定した値で、実験結果と同様に水位が低下していたことがわかる。

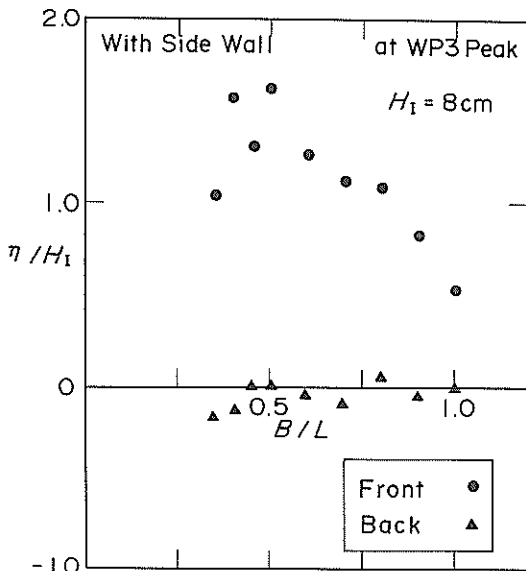
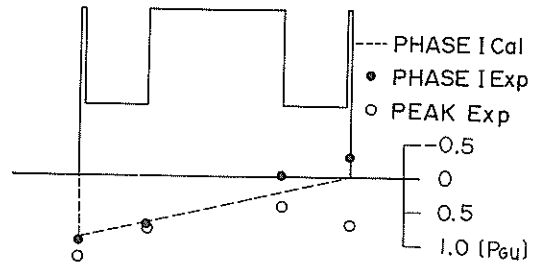


図-29(2) 波作用時のケーソン前面と後面の水位 (側壁あり)

一方、図-29(2)は、側壁を設置して回折波の効果を低減した場合 (連続函 (無限)) の結果を示したものである。背面の水位はあまり変化しておらず、法線方向の延長が十分長ければ、背面の水位変動は考慮する必要はないことがわかる。

背後の水位の変化は、揚圧力の値からも知ることができる。図-30(1)は、滑動時におけるその最も顕著な例である。○は各測点における揚圧力のピーク値を、●は押し波時 I、II それぞれにおける同時分布を、破線は計算値を示している。回折波の影響がなければ 0 であるはずの後側の揚圧力のピーク値が、かなり大きな値となっており、回折波の影響で背後の水位が上昇していることがわかる。また、押し波時 I において、ケーソン後側の

II G I
PHASE I



PHASE II

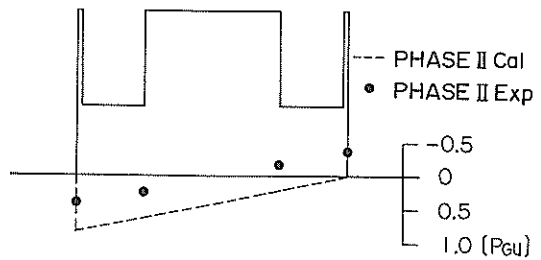
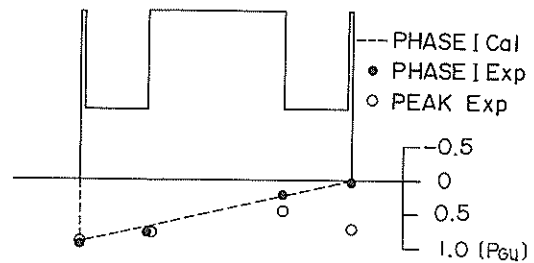


図-30(1) 同時揚圧力分布の例 (背面水位低下あり)

II C I
PHASE I



PHASE II

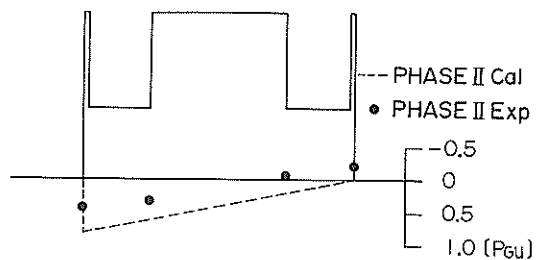


図-30(2) 同時揚圧力分布の例 (背面水位低下なし)

揚圧力が負の値となっており、背後の水位が静水面よりも低下していることがわかる。ただし、不規則波であるため、押し波時Iで必ず背後の水位が低下するとは限らず、図-30(2)のように後側の揚圧力がほぼ0で、計算値とよく一致した分布となる場合もある。

側壁を設置した状態でも、一部の波について滑動実験を実施した。側壁なしにおいて滑動が生じた波のうち、滑動時の背後の水位低下が大きい波の場合は、側壁を設置すると滑動量がかなり小さくなる。例えば側壁なしでは40mm以上の滑動が生じた波でも、6mm程度しか滑動しなかった。これに対して、滑動時の水位低下がない波では、側壁を設置した場合と側壁なしの場合の滑動量はほとんど同じであった。このことから、背後の水位変化が滑動現象に影響を与えることがわかる。

(6) 滑動安全率と滑動量

図-31は、波力算定式を用いて計算した滑動安全率と滑動量の関係を示したものである。図-28と同様に、波

高は波群中の最高波高または滑動量最大時の波高を、滑動量は波群中の1波による滑動量で最も大きいものを用い、摩擦係数は前述のように検定結果に基づいて $\mu = 0.55$ を用いている。また、ケーソン背後の水位の低下による滑動抵抗力の減少を考慮するため、実測データによる水位低下量を用いて補正している。模型実験結果をみると、安全率が1.0より大きい場合でも滑動しており、設計波力が実際に作用した波力よりもやや小さいことになる。これは、5.4で検討したように、模型実験においては、実測波圧から求めた滑動合成波力が波高から計算した滑動合成波力に比べて大きいという結果と一致している。▲で示したデータは、現地における第1段階の滑動時の安全率を、有義波周期と滑動時の波高から計算される設計波力を用い、水位低下を考慮した重量 W_2 、 $\mu = 0.55$ の条件で計算したものである。模型実験における滑動量の大きい場合のデータにはほぼ一致している。

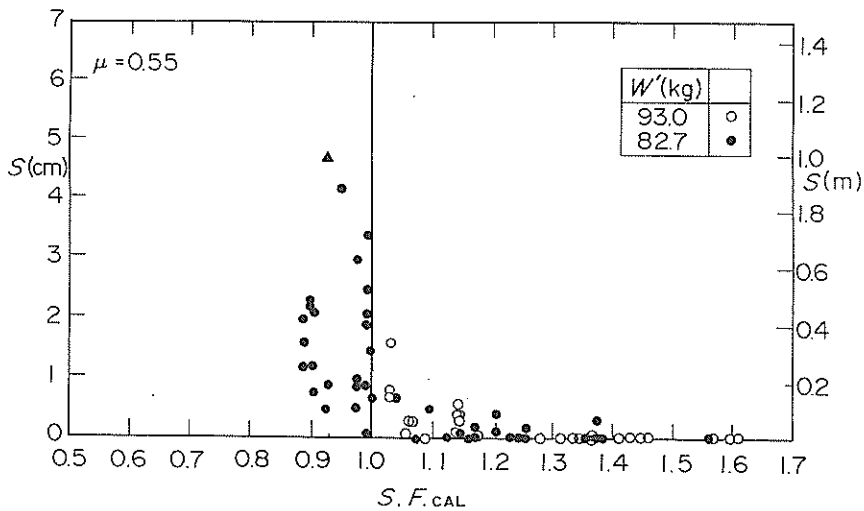


図-31 計算波力による滑動安全率と滑動量

図-32は、実測波力から計算した滑動安全率と滑動量を、図-31と同様に示したものである。この場合も、背後の水位低下の影響を考慮している。模型実験の滑動量はばらつきが大きい、滑動限界としてはほぼ安全率1.0であり、実際の滑動現象を適切に評価していることがわかる。現地のデータについては、安全率が0.93となり、滑動限界を超えた波力が作用している。図中に矢印で示したデータは、図-24で示した波形に対応しており、波圧波形が現地データに近いケースである。現地とほぼ同じ滑動安全率で同程度の滑動が生じており、波力が同

じであれば模型実験によって現地とほぼ同じ現象が再現できることがわかる。

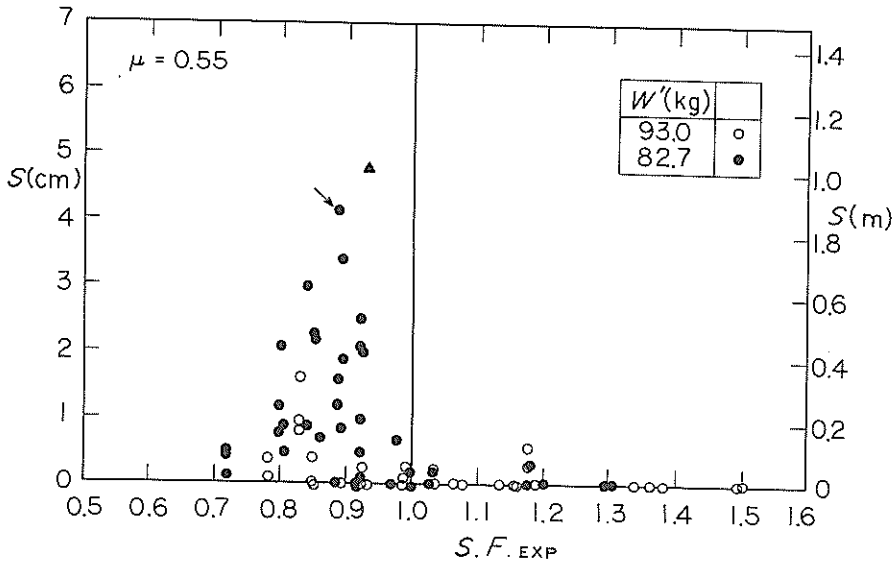


図-32 実測波力による滑動安全率と滑動量

7. まとめ

本研究における主要な結論は以下のとおりである。

- ①二重円筒ケーソンの滑動現象は、現地データ、模型実験結果ともに、実測波力から求められる滑動安全率で適切に評価できる。
- ②現地において計測された波圧は、現行設計法における計算値とほぼ一致する。
- ③模型実験における波圧は、部材によってはやや現地データよりも大きい場合がある。これは、波高が同じでも水位波形が異なることや、データのばらつきによるものと考えられる。
- ④円周方向の波圧分布形は、今回の滑動時のように周期が長く波高が小さい場合には等分布に近い。
- ⑤孤立函の場合はケーソンの両側へ波が逃げるため、連続函の場合に比べて作用する波力が小さく、衝撃的波力が発生しにくい。
- ⑥マウンドとケーソンの摩擦係数は、マウンドの締固めが十分でないとやや小さくなり、現地の滑動函の場合、摩擦係数が0.6よりも小さかった可能性が高い。
- ⑦滑動函の中詰め水の流出を仮定することにより、現地における滑動現象を模型実験によってほぼ再現することができる。
- ⑧ケーソンが3函しかなく法線方向の長さが短かったため、回折波によりケーソン背後の水位変動がみられた。特に周期が長い場合に、押し波時に背後の水位が低下し、滑動抵抗力が減少した。

今回の現地実証試験は、世界初の現地における滑動実験であり、これまで得られたことのない滑動時における波圧等のデータが計測された。ただし、1年確率波による設計であったため、50年確率波による設計条件にくらべて波高が小さかった。しかも滑動時においては周期がかなり長かったため、最高波高に対する波形勾配 $H_{max}/L_{1/3}$ が0.02程度であり、通常的设计対象波に比べて非常に小さかった。したがって、砕波が生じるような大きな波高に対する波力や滑動とは現象が異なり、やや特殊な条件下であったことに注意する必要がある。

模型実験における滑動現象は、かなりばらつきがあるが、そのうちの滑動量の大きいデータについては、ほぼ現地の波圧波形と滑動現象を再現できた。ただし、そのときの波高は現地に比べて模型実験のほうがやや小さく、不規則波における1波の波高と波圧の対応について、ゼロアップクロス法とゼロダウンクロス法の比較など、今後さらに検討を要する。

これまでの研究により、標準的な構造における二重円筒ケーソンの設計法については、ほぼ確立されたと考えてよい。ただし、上床版付きの構造では、上床版に作用する揚圧力および天端面への打ち込み波力について、さらに検討を要する。また、特殊な構造については、必要に応じて模型実験等により検討する必要がある。

境港における現地実証試験は、合田良実横浜国大教授を委員長とする委員会 の指導のもとに、中野勉前第三港湾建設局境港工事事務局長を始めとして、多くの方々の

協力により実施されている。再現実験については、第三港湾建設局神戸調査設計事務所の依頼で実施したものであり、実施に当っては、片岡真二元神戸調設所長、遠藤博前神戸調設所長、小島明史神戸調設所長、黒澤馨前神戸調設工事専門官を始め各位から御指導を得ている。また、谷本勝利埼玉大学教授からは、二重円筒ケーソンに関する研究全般にわたって、貴重な御指導、御助言を得ている。さらに、高山知司港湾技術研究所水工部長にも貴重な御助言を得ている。ここに記して感謝の意を表する。(1992年9月30日受付)

参考文献

- 1) 谷本勝利, 吉本靖俊, 高橋重雄: 大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その1) 透過性構造(海底設置型)の反射および伝達波特性に関する不規則波実験, 港湾技研資料, No.516, 1985, 39p.
- 2) 谷本勝利, 吉本靖俊, 道下 勲: 大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その2) 断続的に構造物を設置する場合の伝達率, 港湾技研資料, No.526, 1985, 42p.
- 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) 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(その4) 二重円筒ケーソン(海底設置型)の水利特性と試設計, 港湾技研資料, No.600, 1987, 55p.
- 5) 谷本勝利, 下迫健一郎: 大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その5) 二重円筒ケーソン(マウンド設置型)の水利特性と設計波力, 港湾技研資料, No.637, 1988, 24p.
- 6) 高橋重雄: 海洋構造物の沖合展開のための開発研究特別講演会論文集, 運輸省, 1991, pp.78-87.
- 7) 合田良実: 波浪の統計的性質に関する二, 三の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第24巻第4号, 1985, pp.65-102.
- 8) 森平倫生, 木原 力, 堀川 洋: 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について, 第25回海岸工学講演会論文集, 1978, pp.337-341.
- 9) 森平倫生, 足立一美: 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について(第2報), 第26回海岸工学講演会論文集, 1979, pp.446-450.

主要記号一覧

d	: マウンド上水深
d'	: 遊水室深さ
f _H	: 単位面積あたりの平均水平波力強度
f _{FR}	: 内側円筒前半分に作用する単位面積あたりの平均波力強度
f _{RR}	: 内側円筒後半分に作用する単位面積あたりの平均波力強度
f _M	: 中間床版に作用する単位面積あたりの平均波力強度
f _{OF}	: 不透過円筒部前半分に作用する単位面積あたりの平均波力強度
f _{OFFP}	: 透過円筒部前半分に作用する単位面積あたりの平均波力強度
f _{ORP}	: 透過円筒部後半分に作用する単位面積あたりの平均波力強度
f _S	: 単位面積あたりの平均滑動合成波力強度
f _U	: 単位面積あたりの平均揚圧力強度
f _V	: 単位面積あたりの平均鉛直波力強度
H _{1/3}	: 有義波高
H _{1/10}	: 1/10最大波高
H _D	: 設計波高
H _{max}	: 最高波高
h	: 直立壁前面における水深
h _b	: 直立壁前面から沖側へ5 H _{1/3} だけ離れた地点での水深
h _c	: 静水面上の天端高
h'	: 直立壁底面の水深
L	: 水深 h における波長
p ₁	: 二重円筒ケーソンの波力算定式における静水面での波圧強度
p _{G1}	: 合田式による静水面での波圧強度
p _{G2}	: 合田式による水底面での波圧強度
p _{G3}	: 合田式によるケーソン下端での波圧強度
p _{G4}	: 合田式によるケーソン前趾での揚圧力強度
R	: 外側円筒の半径
r	: 内側円筒の半径
T _{1/3}	: 有義波周期
w ₀	: 水または海水の単位体積重量
α ₁	: 合田式において静水面の波圧の算定に用いるパラメータ
α ₂	: 合田式で海底勾配やマウンドの影響を表わすパラメータ

- β : 直立壁法線の垂線と波の主方向から $\pm 15^\circ$ の範囲で最も危険な方向とのなす角度
- ε_f : 透過円筒部前半分の開口率
- ε_r : 透過円筒部後半分の開口率
- η^* : 二重円筒ケーソンの波力算定式において静水面上波圧が 0 となる高さ
- η^{G^*} : 合田式において静水面上波圧が 0 となる高さ
- λ_{IF} : 内側円筒前半分の波圧補正係数
- λ_{IR} : 内側円筒後半分の波圧補正係数
- λ_{OF} : 不透過円筒部前半分の波圧補正係数
- λ_{OFF} : 透過円筒部前半分の波圧補正係数
- λ_{ORP} : 透過円筒部後半分の波圧補正係数
- μ : ケーソン底面と捨石マウンドの摩擦係数

港湾技研資料 No.742

1992・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 横浜ハイテクプリンティング株式会社

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

Copyright © (1992) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a
maching language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複
写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。