

港 湾 技 研 資 料

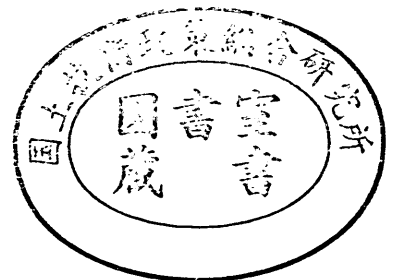
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 528 Sept. 1985

台形ケーソンの水理特性に関する実験的研究

谷 本 勝 利
木 村 克 俊

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 実 験 の 概 要	4
2.1 実験の種類および実験水路	4
2.2 実験模型	4
3. 不規則実験波の特性	5
3.1 不規則実験波の発生法および解析法	5
3.2 発生波のスペクトルと波高・周期分布	5
3.3 発生波の諸元	6
4. 反射および伝達特性	11
4.1 実験方法	11
4.2 反射率	11
4.3 波高伝達率	11
5. 越 波 特 性	15
5.1 実験方法	15
5.2 越波流量	16
6. 波力特性および設計波力の算定法	17
6.1 実験方法	17
6.2 波圧特性	19
6.3 全波力特性	21
6.4 設計波力の算定法	22
7. 滑 動 安 定 性	24
7.1 実験方法および実験条件	24
7.2 滑動安定性	24
8. む す び	26
参 考 文 献	27
主 要 記 号	27

A Hydraulic Experimental Study on Trapezoidal Caisson Breakwaters

Katsutoshi TANIMOTO*
Katsutoshi KIMURA**

Synopsis

Wave forces acting on a sloped wall have a downward component which works for increase of resisting force. Therefore, caisson breakwaters with a sloped wall could require less volume than conventional breakwaters. But the effect of the downward component has never been investigated directly.

A series of model experiments on trapezoidal caisson breakwaters have been carried out in a two-dimensional wave flume under the model condition of slope angle $\theta = 0^\circ \sim 20^\circ$ with the vertical.

In the present note, the effect of the downward component has been investigated by regular wave tests with the aid of pressure transducers and a multi-component loadcell.

Based on the experimental results, following design wave force formula is proposed for trapezoidal caisson breakwaters;

1. Wave pressure intensities on a sloped wall can be calculated by Goda's formula for the same level as those on a vertical wall.
2. Uplift pressure p_u of Goda's formula can be reduced for trapezoidal caisson breakwaters.

The proposed method to calculate the design wave force on trapezoidal caisson is confirmed by stability tests for random waves.

On the other hand, wave reflection, transmission and overtopping have been investigated by experiments due to random waves. According to the test results, transmission coefficients can be estimated for trapezoidal caisson breakwaters. As to wave reflection and overtopping, they can be regarded as the same value as those of conventional caisson breakwaters.

* Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division
** Member of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division

台形ケーソンの水理特性に関する実験的研究

谷 本 勝 利 *

木 村 克 俊 **

要 旨

ケーソン式混成堤の改良の方法として、前面を傾斜壁にすることの有効性は良く知られている。つまり、この形式では斜面上に作用した波力の鉛直成分が下向きに働くため、ケーソンの必要重量を低減できる特長がある。しかし、鉛直分力の効果そのものについては、これまで十分な検討は行われていない。

今回、検討の対象としたのは、鉛直となす角度で定義する前壁面の傾斜角が 20° までの台形ケーソンで、実験はすべて2次元水路で行った。実施した実験項目は、(1)反射・伝達波実験、(2)越波実験、(3)波圧・全波力実験、(4)滑動実験の4種類で、実験波は(3)のみ規則波で、他はすべて不規則波である。

本資料では、これらの実験結果をもとに、斜面上に働く波力の特性を明らかにし、これまで未解明だった鉛直分力の効果を定量的に評価するとともに、現行の合田式を適用した台形ケーソンの設計波力算定法を提案した。また、台形ケーソンの反射・伝達率等の水理特性についても検討した。

主要な結論を列挙すると以下のとおりである。

- (1) 斜面上に働く波力は、合田式による直立壁の値を、斜面直角に作用させることによって算定できる。また、揚圧力は低減係数 λ_u を合田式の揚圧力 p_u に乗じて求めることができる。
- (2) 台形ケーソンの波高伝達率は、傾斜角とともにやや増大する傾向がある。
- (3) 台形ケーソンの反射率および越波量については、傾斜角が 20° 以下ならば、同一条件の直立ケーソンに比べて大差ない。

1. まえがき

港湾の大規模・大水深化にともなう建設費の増大を背景として、港湾施設の整備においてもいっそうの経済性の追求が要請されている。なかでも、港湾全体の建設費に占める割合の高い、防波堤をはじめとする外郭施設に対しては、コストダウンに直結する新技術の開発が重要視され、これまで多くの新しい構造形式が考案されている。

その中で、台形ケーソンのような斜面を有する構造は分類上、特殊防波堤に含まれるが、その着想自体の歴史は古く、古今東西に数多くの施工例が記録されている¹⁾。我が国における最近の例としては、新潟東港地区等で用

いられた上部斜面堤を挙げることができる。

斜面を有する構造の最大の利点は、波力の鉛直成分が重量に加わり滑動抵抗が増大することである。しかし、鉛直成分の効果についての検討は十分なされておらず、これまでは個々の設計断面に対して滑動実験を行い、滑動限界重量から逆算した波力を用いてこれを間接的に評価してきたにすぎない。本資料では、この効果を波圧・全波力実験結果により直接的に評価し、これをもとに台形ケーソンの設計波力算定法を提案する。さらに、その妥当性を不規則波滑動実験で確認するものである。また、台形ケーソンの反射・伝達率などの水理特性についても、不規則波実験により検討する。

なお、台形ケーソンに関する調査・研究は、東京電力

* 水工部 防波堤研究室長

** 水工部 防波堤研究室

(株)の要請で(財)沿岸開発技術研究センターが組織した外郭施設検討委員会により行われているが、本資料で述べる実験はその一環として、受託試験研究により当所で実施したものである。

2. 実験の概要

2.1 実験の種類および実験水路

本研究において実施した実験は以下のとおりである。

- 1) 反射・伝達波実験
- 2) 越波実験
- 3) 波圧・全波力実験
- 4) 滑動実験

実験はすべて以下に述べる不規則波仮設水路で実施した。実験波は、1), 2), 4) は不規則波、3) は規則波である。

実験に使用した水路は中型平面水槽(30m×20m×1m)を1/4に区切った水槽内に設けた幅50cmの仮設水路である。水路の全体図を図-1に示す。造波板の幅は水路幅にはほぼ等しい4.8mであり、水路の側壁は造波板の中立位置から6.6mの地点より始まる。このように側壁の始点と造波板の間に距離を設けているのは、水路内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水路内への影響を軽減させるためである。

堤体模型設置部分の水路壁には、片面にガラス窓が埋め込んであり側方からの観察が可能である。水路床は造波板の中立位置から7.6~12.6mの区間を3/100勾配、その後の17.6mまでの5.0m区間を1/100勾配とし、そ

こから水路終端までは水平床である。水槽の終端部および観測用ピットの前壁は、碎石および消波ブロックで被覆した消波斜面としている。

2.2 実験模型

実験断面を図-2に示す。堤体設置水深 $h = 43\text{cm}$ 、ケーソン基面水深 $d = 33\text{cm}$ は全ケーソンを通じて一定とした。ケーソンの形状は底辺長 $B = 50\text{cm}$ を変えずに、鉛直となす角で定義する傾斜角 θ を変化させた。また、ケーソンの水路直角方向の長さは47cmとし、水路幅(50cm)に対して両側に1.5cmずつの余裕を設けた。

反射・伝達波、越波、滑動実験では鉄筋コンクリート製の堤体模型を使用した。傾斜角 θ は 0° 、 10° 、 15° 、 20° の4種類とし、木製の上部工を取りはずすことにより、天端高 h_c (静水面からの高さ) を5cm、9cm、13cmの3通りに変えることができる。写真-1は $\theta = 20^\circ$ 、 $h_c = 13\text{cm}$ の堤体である。模型は中空とし、滑動実験の際には必要に応じて鉛塊を入れて堤体重量を変えられるようにしている。

一方、波圧・全波力実験ではアクリル製模型を使用した。傾斜角 θ はコンクリート製模型と同様に 0° 、 10° 、 15° 、 20° の4種類に変化させ、天端高 h_c は9cmで一定とした。アクリル製模型の諸元等については6.1で詳述する。

マウンドは実験中の変形を防ぐため、碎石を詰めた鋼製かごを用いて成形し、その上に模型ケーソンを設置した。ただし、滑動実験では碎石のみを用いてマウンドを成形した。なお、マウンドの被覆ブロックおよび根固めブロックは今回の実験では省略した。

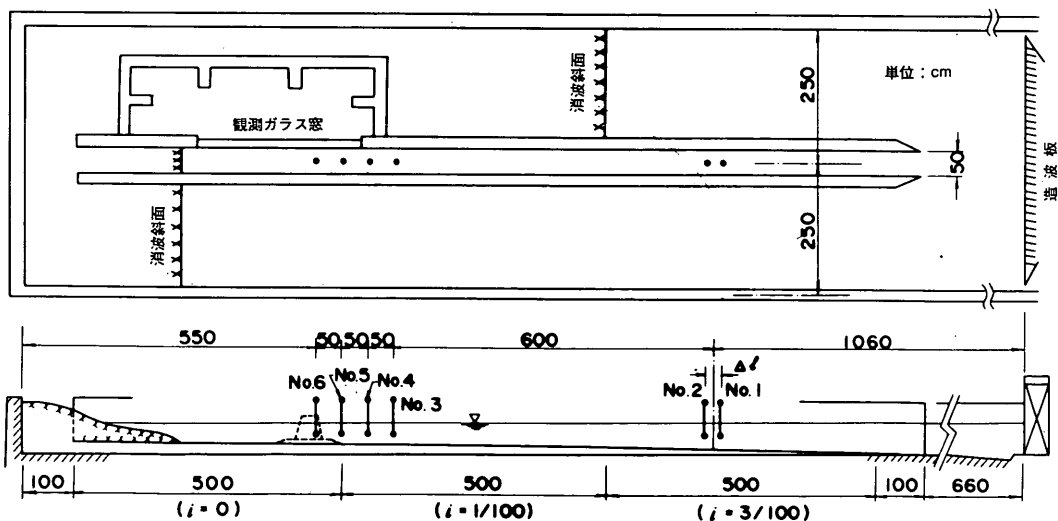


図-1 実験水路全体図

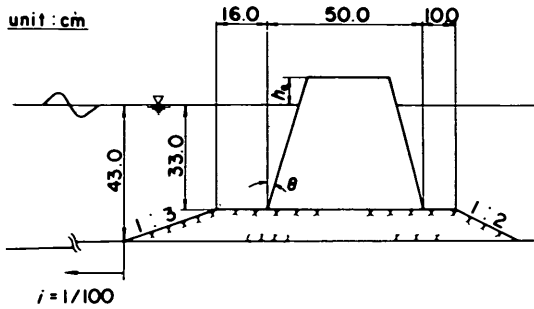


図-2 実験断面

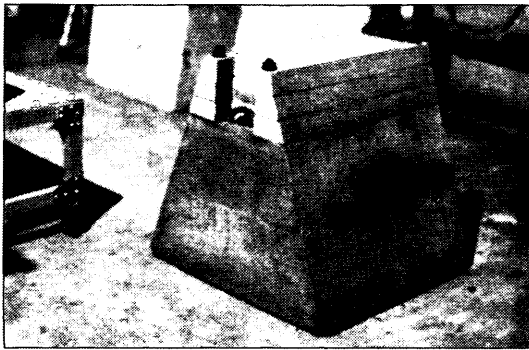


写真-1 コンクリート模型 ($\theta = 20^\circ$, $h_c = 13\text{cm}$)

3. 不規則実験波の特性

3.1 不規則実験波の発生法および解析法

(1) 不規則実験波の発生法

実験に使用した不規則波の造波信号は、当所大型造波水路に常置したデータ処理装置 (DS-600) を用いて、不規則波を構成する成分波を逆フーリエ変換により重ね合わせて作成した。

実験波の目標有義波周期は 1.13s, 1.70s, 2.12s の 3 種類で、以下周期の短いほうから、A 波、B 波、C 波と呼ぶ。造波信号は各波についてそれぞれ 3 波群 (A1 ~ A3, B1 ~ B3, C1 ~ C3) ずつ作成した。これらの波群は目標とするスペクトル形が同じで、成分波の位相のみが異なるものである。なお不規則波の解析有効波数は全実験を通じて 120 波を標準とした。

作成した造波信号はデータレコーダに収録し、造波機への入力に際してはデータレコーダの出力レベルにより入力基準電圧 e (V) を調整して波高を変化させた。

(2) 不規則実験波の解析法

堤体を設置しない状態での発生波を、前出の図-1 に示した沖側 2 点、岸側 4 点で測定した。水位データはいったんデータレコーダに収録し、これを当所 160 m

長水路に常置した不規則波実験処理装置²⁾(NOVA-4) にてオフラインで解析した。この解析プログラムのフローは図-3 に示したとおりである。

なお、沖側の波高計 (No.1 および No.2) については堤体設置後も常置して、実験結果の解析に使用する入射波高諸元の決定のための分離計算に用いた。

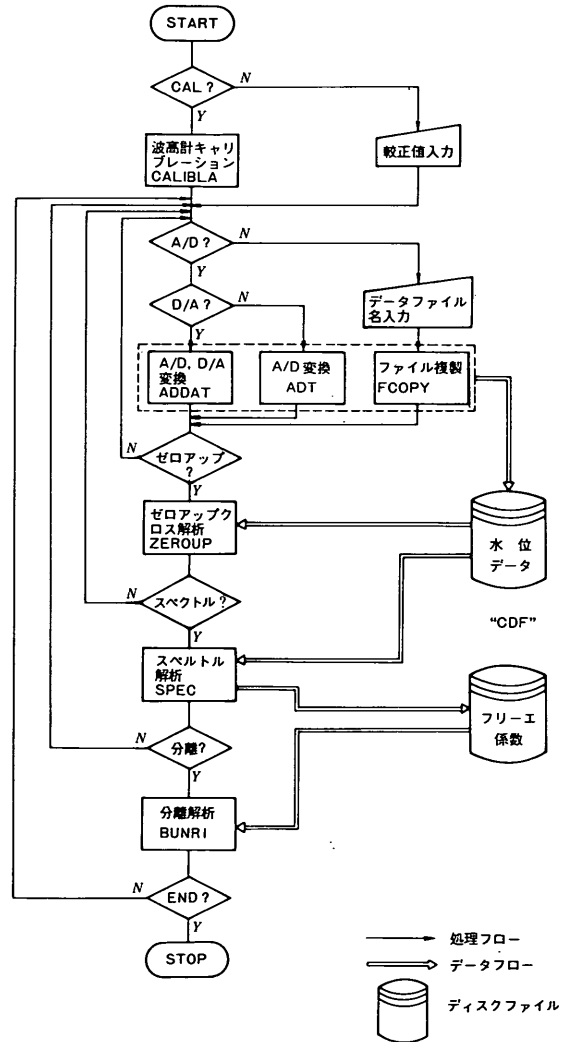


図-3 解析のフロー

3.2 発生波のスペクトルと波高・周期分布

(1) スペクトルの形状

発生波のスペクトル形状の例を図-4 に示す。A 波は入力基準電圧 $e = 0.075\text{V}$ 、B 波と C 波は $e = 0.25\text{V}$ の条件での結果で、それぞれ測点 No.1, No.2 ($h^* = 54\text{cm}$) で得られたスペクトルを 3 波群の値で平均し、さらにそ

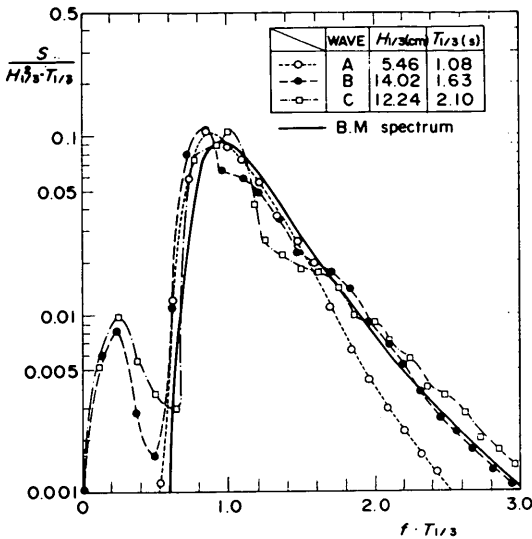


図-4 発生波のスペクトル

れらを $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ の平均値で無次元化したものである。入力信号作成時に目標とした Bretschneider・光易型スペクトルを実線で示しているが、発生波のスペクトルは低周波領域に水路特性と思われる振動が現れている以外は、おおむねこれと一致している。

(2) 波高および周期の分布

図-5は、後出の表-2に示すすべてのケースについて、各波種ごとに平均波高 \bar{H} を基準とした波高の相対度数分布を求めこれを集計したものである。いずれも3種の波群(A1~A3, B1~B3, C1~C3)の結果を平均したものである。図中の実線はRayleigh分布を示しているが、実験値はほぼこれと一致している。

図-6は同様に平均周期 \bar{T} を基準とした周期の相対分布を示しているが、周期が長いほど分布幅がやや広がる傾向がみられる。

3.3 発生波の諸元

(1) 入力基準電圧と有義波高の関係

図-7, 8は入力基準電圧と発生波の有義波高の関係を示している。前者は沖側の2測点(No.1, No.2), 後者は岸側の4測点(No.3~6)における平均値を、それぞれ3波群の値でさらに平均したものである。表-1, 2は代表波諸元をまとめたものである。

図-9は沖側測点での有義波高 $H_{1/3}^*$ と岸側測点での有義波高 $H_{1/3}$ の相関関係を示すものである。ここでは、A波の波高の大きな部分で、 $H_{1/3}^*$ に対する $H_{1/3}$ の増加傾向が鈍化しているが、A波のそれ以外の部分やB波、C波では直線的な変化傾向がみられる。ここで、各波種ご

とに $H_{1/3}/H_{1/3}^*$ の平均値を求めると、A波0.97, B波0.96, C波1.03となる。これに対し、浅水変形を考慮して求めた $H_{1/3}/H_{1/3}^*$ の理論値は、A波0.98, B波1.02, C波1.05となり、B波に若干の差がある以外は、実験値と理論値はよく一致している。

(2) 発生波の有義波周期

同一の造波信号を用いても、入力基準電圧によって発生波の周期は変動する。岸側測点(No.3~6)における有義波周期の変動を、平均値±標準偏差の形式で示すと以下のとおりである。

$$\text{A波 } T_{1/3} = 1.09 \pm 0.03 \quad (\text{s})$$

$$\text{B波 } T_{1/3} = 1.68 \pm 0.07 \quad (\text{s})$$

$$\text{C波 } T_{1/3} = 2.10 \pm 0.07 \quad (\text{s})$$

造波信号作成時の目標周期は、A波1.13s, B波1.70s, C波2.12sであったが、これと比べて発生波の平均値は4%以内の誤差であった。以下、実験波の有義波周期の表示にあたっては目標周期を用いることとする。

(3) 代表波諸元間の関係

図-10, 11, 12はそれぞれA波, B波, C波についての有義波高に対する代表波高の関係を示したものである。 H_{\max} については3種の波群に対する岸側4測点(No.3~6)の値をすべて、 $H_{1/10}$ および \bar{H} については12個の値(3波群×4測点)の平均値をプロットしてある。図中の実線、破線および点線は実験値の傾向を示すものである。 H_{\max} については実験値のばらつきが大きいので、平均的な位置に実線を引いている。また、 $H_{\max}/H_{1/3}$ の平均値を各波種ごとに求めるとA波1.61, B波1.51, C波1.64であり、Rayleigh分布を仮定した場合の波数 $N_w = 120$ に対する $H_{\max}/H_{1/3}$ の期待値1.54に比較的近い値が得られた。

次に代表波の周期間の関係を表-3に示す。これはA波, B波, C波について、それぞれ3波群ずつ岸側4測点での4種の波高条件についてのデータ(3×4×4=48個)の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大波周期の比 $T_{\max}/T_{1/3}$ は1.00~1.05, 1/10最高波周期の比 $T_{1/10}/T_{1/3}$ は1.01~1.02, 平均周期の比 $\bar{T}/T_{1/3}$ は0.81~0.88である。

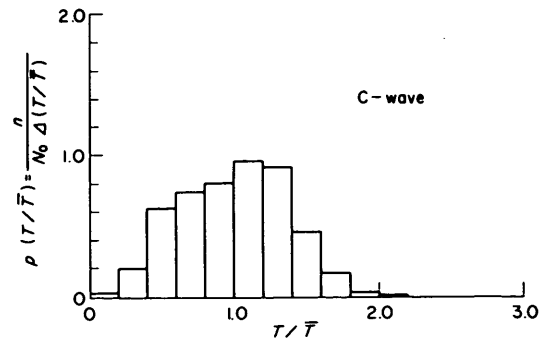
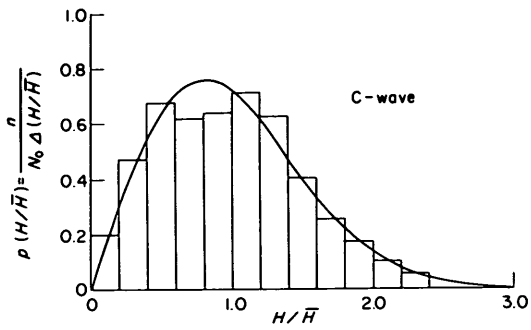
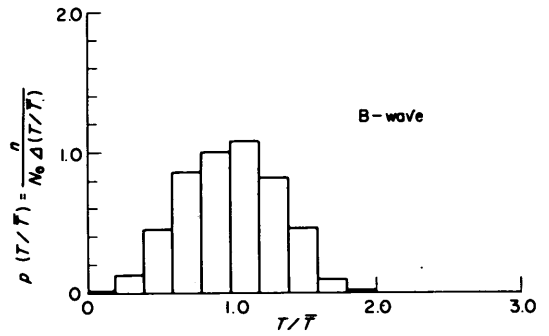
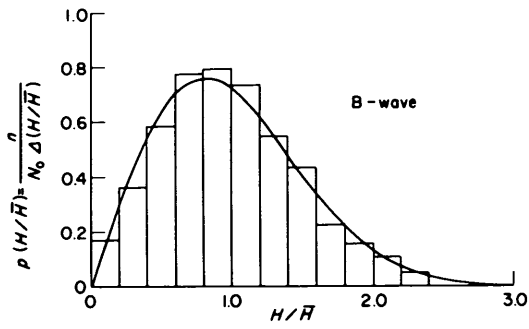
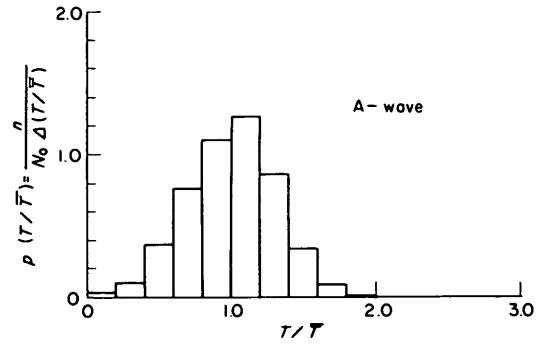
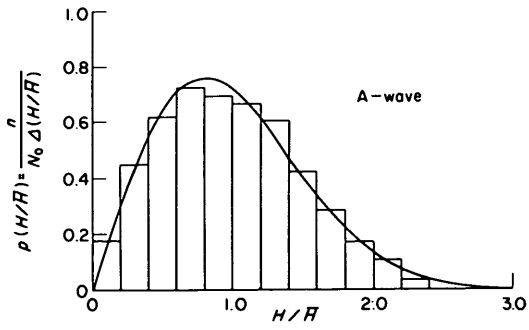


図-5 波高の相対度数分布

図-6 周期の相対度数分布

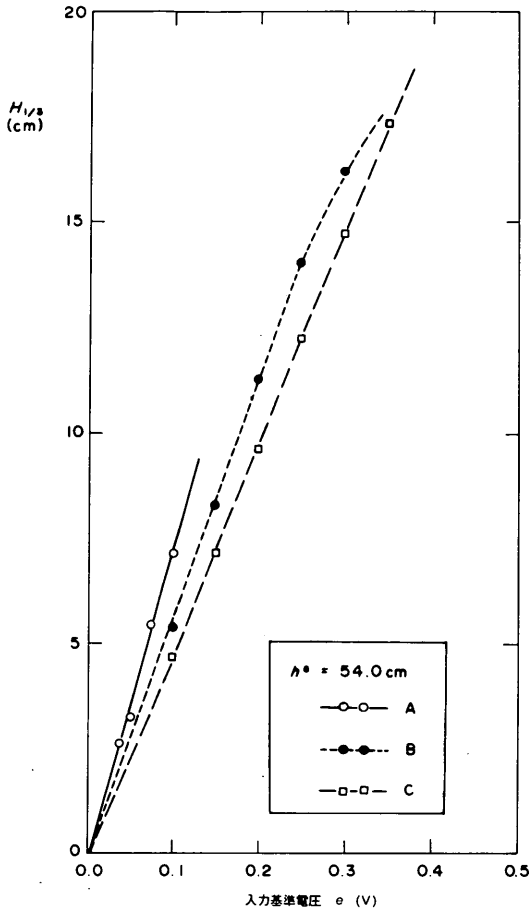


図-7 入力基準電圧と有義波高の関係 (沖側)

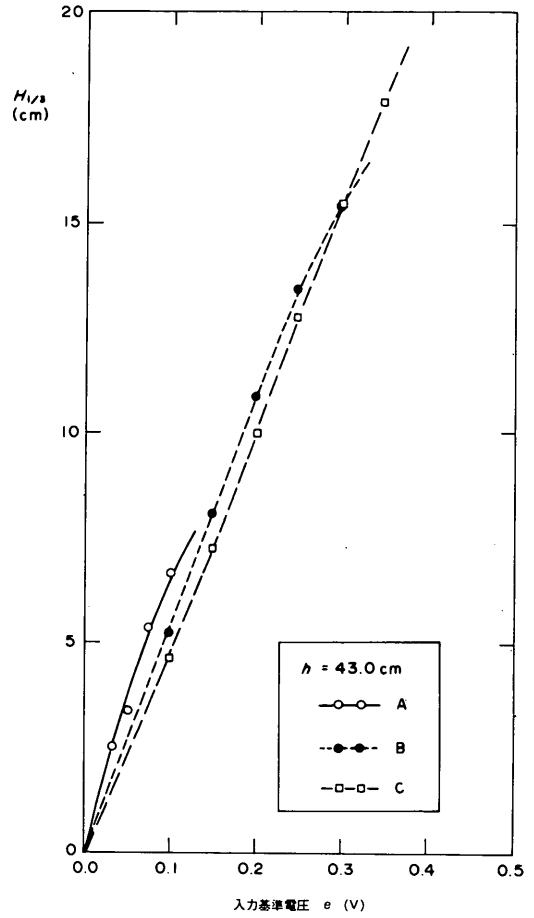


図-8 入力基準電圧と有義波高の関係 (岸側)

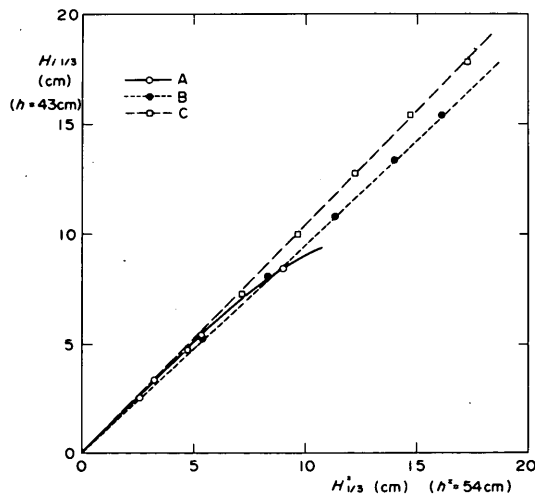


図-9 沖側と岸側の有義波高の相関図

表-1 代表波の諸元（沖側測点）

波種	入力電圧 e (v)	波 高 (cm)				周 期 (s)			
		H_{\max}	$H_{1/10}$	$H_{1/3}$	\bar{H}	T_{\max}	$T_{1/10}$	$T_{1/3}$	\bar{T}
A波	0.038	4.97	3.33	2.68	1.75	1.16	1.10	1.08	0.92
	0.050	6.71	4.34	3.31	1.88	1.08	1.07	1.08	0.88
	0.075	10.40	7.04	5.48	3.27	1.03	1.06	1.08	0.91
	0.100	13.21	9.01	7.14	4.45	1.08	1.08	1.09	0.96
B波	0.10	9.16	6.63	5.30	3.29	1.62	1.61	1.59	1.31
	0.15	14.04	10.24	8.23	5.24	1.72	1.63	1.60	1.34
	0.20	19.70	13.94	11.06	7.23	1.67	1.61	1.59	1.37
	0.25	24.19	17.46	13.92	9.03	1.86	1.63	1.63	1.41
	0.30	26.29	20.13	16.09	10.58	1.83	1.73	1.69	1.45
C波	0.10	8.23	5.90	4.71	3.02	2.00	2.10	2.11	1.75
	0.15	12.91	8.99	7.16	4.59	2.02	2.12	2.12	1.75
	0.20	17.79	12.16	9.63	6.07	2.02	2.12	2.09	1.65
	0.25	22.76	15.40	12.17	7.68	2.05	2.11	2.07	1.62
	0.30	26.82	18.42	14.45	9.17	2.04	2.12	2.08	1.63
	0.35	28.71	21.56	17.01	10.74	2.46	2.12	2.09	1.65

表-2 代表波の諸元（岸側測点）

波種	入力電圧 e (v)	波 高 (cm)				周 期 (s)			
		H_{\max}	$H_{1/10}$	$H_{1/3}$	\bar{H}	T_{\max}	$T_{1/10}$	$T_{1/3}$	\bar{T}
A波	0.038	4.29	3.14	2.55	1.62	1.21	1.08	1.08	0.92
	0.050	5.56	4.25	3.41	2.23	1.10	1.09	1.08	0.92
	0.075	9.05	6.70	5.30	3.38	1.10	1.09	1.08	0.96
	0.100	11.46	8.60	6.77	4.30	1.12	1.10	1.09	1.00
B波	0.10	8.42	6.50	5.16	3.25	1.54	1.63	1.65	1.39
	0.15	12.94	9.96	7.96	5.07	1.53	1.66	1.65	1.38
	0.20	17.64	13.47	10.63	6.82	1.56	1.69	1.67	1.40
	0.25	20.52	16.41	13.13	8.47	1.74	1.74	1.68	1.44
	0.30	22.70	18.57	15.07	9.74	1.84	1.79	1.75	1.49
C波	0.10	8.24	5.98	4.62	2.89	2.02	2.11	2.11	1.75
	0.15	12.44	9.24	7.19	4.54	2.07	2.12	2.10	1.75
	0.20	17.24	12.68	9.85	6.15	2.09	2.09	2.07	1.68
	0.25	22.04	16.24	12.56	7.79	2.08	2.11	2.07	1.65
	0.30	25.05	19.34	15.08	9.40	2.21	2.12	2.08	1.68
	0.35	26.84	21.44	17.29	10.99	2.23	2.18	2.12	1.72

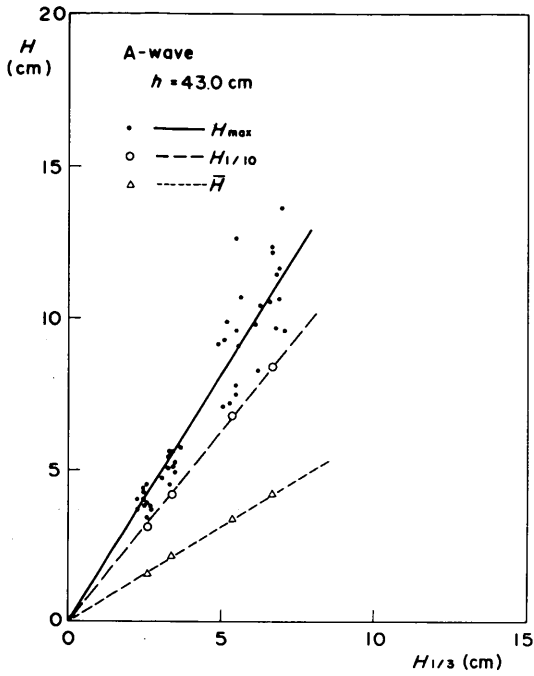


図-10 代表波諸元間の関係 (A波)

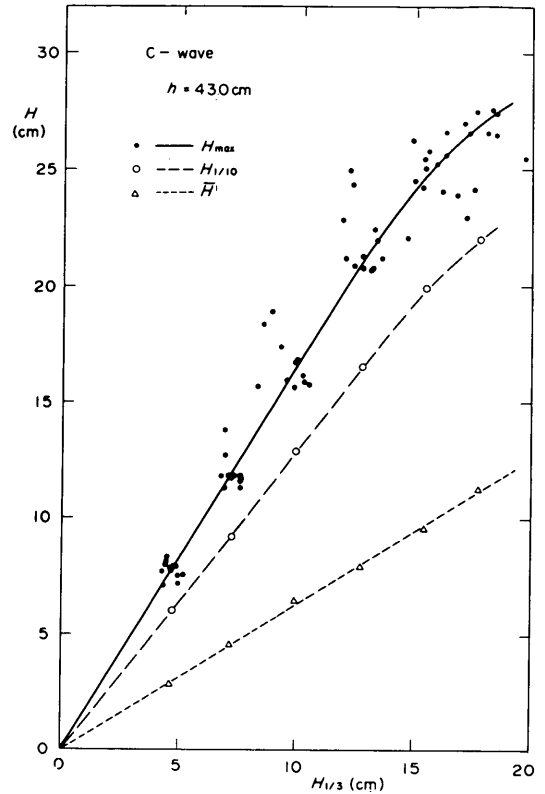


図-12 代表波諸元間の関係 (C波)

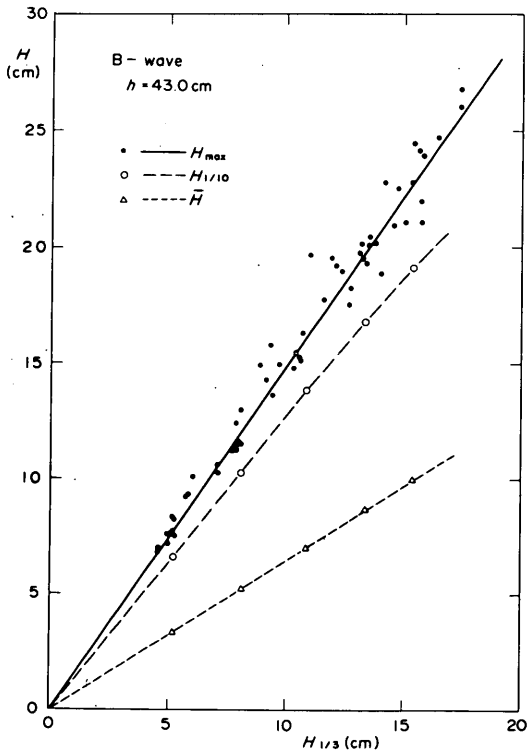


図-11 代表波諸元間の関係 (B波)

表-3 代表周期間の関係と標準偏差 (データ数 48)

	$T_{max}/T_{1/3}$		$T_{1/10}/T_{1/3}$		$\bar{T}/T_{1/3}$	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
A1~A3	1.02	0.07	1.01	0.04	0.88	0.04
B1~B3	1.00	0.13	1.02	0.04	0.86	0.03
C1~C3	1.05	0.10	1.02	0.05	0.81	0.03

4. 反射および伝達特性

4.1 実験方法

(1) 測定方法

反射波は前出図-1のNo.1とNo.2, 伝達波は図-13のNo.7とNo.8のそれぞれ2台の波高計を用いて同時に記録した。反射波測定用の波高計間隔 d は、周期に応じて20~40cmの範囲で変化させた。伝達波測定用の波高計間隔は20cmで一定とし、越波水塊が直接当たらないようケーソン後しから1.0mのところに設置した。また、堤体と水路側壁の間にはベニア板を詰めて、そこからの透過波の影響を防止した。

不規則波実験の場合は、起波開始直後の波は非定常性が強く不安定なため、一定時間待った後にデータの取得を開始する必要がある。この待ち時間のことを定常待ち時間というが³⁾、今回の不規則波実験では、有義波群速度による造波板から堤体までの到達時間の5倍を定常待ち時間とした。

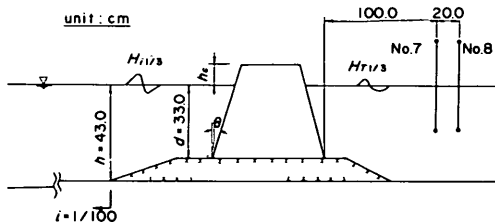


図-13 伝達波実験

(2) 反射率および波高伝達率の定義

合田らの入射波の分離推定法⁴⁾によると、反射率 K_R は入射波および反射波のエネルギーをそれぞれ E_I , E_R として式(1)で定義される。

$$K_R = \sqrt{E_R / E_I} \quad (1)$$

さらに、分離した入射波高と反射波高の2乗和が合成波高の2乗に等しいことから、この関係を有義波高に適用して次式が得られる。

$$H_{i1/3}^* = \frac{1}{\sqrt{1 + K_R^2}} H_{S1/3} \quad (2)$$

ここで、 $H_{i1/3}^*$ は分離入射波の有義波高、 $H_{S1/3}$ は合成波の有義波高である。反射率および伝達率の実験結果の整理に用いる入射波の諸元としては、沖側測点で得られた分離入射波高 ($H_{i1/3}^*$) を、前出の図-9の関係をj用いて堤体入射波高 ($H_{i1/3}$) に換算したものをj用いた。

一方、伝達波高については、得られた波形記録を各測点ごとにゼロアップ解析し、両者の有義波高の平均値を伝達波の有義波高 $H_{T1/3}$ として、波高伝達率 K_T を次式で定義した。

$$K_T = H_{T1/3} / H_{i1/3} \quad (3)$$

(3) 実験ケース

反射・伝達波実験では、(i)同一の天端高で傾斜角を変化させた実験と、(ii)傾斜角 θ を 15° と一定にして天端高 h_c を変化させた実験の2種を実施した。

実験ケースを表-4に一括して示す。反射実験の実験波は各周期ごとに1波群 (A1, B1, C1) に限った。伝達波実験ではA波を省略し、B波とC波のみを用いて、(i)については各波種ごとに1波群ずつ、(ii)については3波群ずつ (B1~B3, C1~C3) として結果を平均した。

また、実験波の波高はA波で3種、B波およびC波では5種とし、前出の図-12により目標の波高に対応する入力基準電圧を決定した。表-4の波高はこの値を示しているが、これは無堤時のものであるため、実際の堤体入射波高 $H_{i1/3}$ は造波板による再反射波等の影響を受けて10%程度増大する傾向がある。

4.2 反射率

図-14は反射率の実験値をまとめて示したものである。ここに、横軸は入射波の有義波高 $H_{i1/3}$ をマウンド天端上の水深 d で除して無次元化してある。実験結果は周期や天端高によって0.1程度の範囲内にばらついているけれども、傾斜角 θ による傾向的变化は認められず、本実験条件の範囲では台形ケーソンの反射率は通常の直立ケーソンの反射率とほぼ同じと考えてよいようである。

なお、図中の曲線は先に提案した式(4)⁵⁾による $H_{i1/3} / d$ と K_R の関係を示したものである。

$$K_R = 0.4 + 0.6 \exp \left[-1.42 (H_{i1/3} / d)^{1.24} \right] \quad (4)$$

今回の実験値と比較すると、波高の小さい条件ではやや大きめの値を与えているが、 $H_{i1/3} / d > 0.3$ の条件では実験値のほぼ平均的な関係を表しており、式(4)は 20° 程度までの台形ケーソンにも概略値を与えるものとして適用可能である。

4.3 波高伝達率

一般に、混成堤の波高伝達率は相対天端高 $h_c / H_{i1/3}$ の関数で表される。図-15は $h_c / h = 0.209$ の条件での波高伝達率を、傾斜角をパラメータとして、 $h_c / H_{i1/3}$ に対してプロットしたものである。縦軸を大きく拡大して示してあるが、これによると傾斜角による K_T の変化に若

表-4 反射・伝達波実験のケース

傾斜角 θ	天端高 h_c (cm)	波種		入力基準 電 圧 e (v)	目標波高 $H_{1/3}$ (cm)	$H_{1/3}/L_{1/3}$	$H_{1/3}/d$		
		反 射 実 験	伝達波 実 験						
0° ・ 10° ・ 20°	9	A1	—	0.04	3.0	0.017	0.091		
				0.07	5.0	0.029	0.152		
				0.09	7.0	0.040	0.212		
		B1	—	0.15	8.0	0.025	0.242		
				0.19	10.0	0.032	0.303		
				0.23	12.0	0.038	0.364		
				0.27	14.0	0.045	0.424		
				0.31	16.0	0.051	0.485		
		C1	—	0.20	10.0	0.025	0.303		
				0.24	12.0	0.029	0.364		
				0.28	14.0	0.034	0.424		
				0.32	16.0	0.039	0.485		
				0.36	18.0	0.044	0.545		
		15°	5 ・ 9 ・ 13	A1	—	0.04	3.0	0.017	0.091
						0.07	5.0	0.029	0.152
0.09	7.0					0.040	0.212		
B1	B1~B3			0.15	8.0	0.025	0.242		
				0.19	10.0	0.032	0.303		
				0.23	12.0	0.038	0.364		
				0.27	14.0	0.045	0.424		
				0.31	16.0	0.051	0.485		
C1	C1~C3			0.20	10.0	0.025	0.303		
				0.24	12.0	0.029	0.364		
				0.28	14.0	0.034	0.424		
				0.32	16.0	0.039	0.485		
				0.36	18.0	0.044	0.545		

干のばらつきが認められるものの、特に相対天端高が比較的小さい範囲 ($h_c/H_{i1/3} < 0.7$) において θ が大きいほど K_T が大きくなる傾向がある。また、図中の曲線は合田の実験式^{6), 7)}による通常の混成堤の波高伝達率であるが、これと今回の $\theta = 0^\circ$ の実験結果を比べると、 $h_c/H_{i1/3}$ が 0.7 まではほぼ一致しているが、 $h_c/H_{i1/3}$ が 0.7 を超える天端が高い場合には今回の実験値が上まわっている。

図-16 は横軸に $\sin \theta$ をとって、 $\theta = 0^\circ$ のときの伝達率 $(K_T)_{\theta=0}$ に対する台形ケーソンの伝達率 $(K_T)_\theta$ の比を、 $h_c/H_{i1/3}$ のクラス別に記号を違えてプロットしたものである。結果は若干ばらついているものの、 $\sin \theta$ が大きいほど、また $h_c/H_{i1/3}$ が小さいほど、 $(K_T)_\theta /$

$(K_T)_{\theta=0}$ の値が大きくなる傾向があり、 $h_c/H_{i1/3} = 0.5 \sim 0.7$ に対するその平均値は、 $\theta = 10^\circ$ で 1.12、 $\theta = 15^\circ$ で 1.18、 $\theta = 20^\circ$ で 1.31 である。

図-17 は、 $\theta = 15^\circ$ の台形ケーソンの天端高をパラメータとして、 $h_c/H_{i1/3}$ と K_T の関係を示したもので、3 波群ずつの結果を平均せずにそのままプロットしたものである。

図中の破線は前述した合田の実験式であり、 $h_c/H_{i1/3} = 0.5 \sim 0.7$ の部分には、これに $\theta = 15^\circ$ の場合の $(K_T)_\theta / (K_T)_{\theta=0}$ の平均値を乗じて得られた台形ケーソンの $h_c/H_{i1/3}$ と K_T の関係が実線で示してある。これらをもとに、同一の K_T に対する両者の $h_c/H_{i1/3}$ の値を比較した結果、 $h_c/H_{i1/3}$ が 0.5 ~ 0.7 の範囲ならば、 $\theta = 15^\circ$

の台形ケーソンでは $\theta = 0^\circ$ の場合の1.2~1.3倍の天端高を確保すれば十分であることが明らかとなった。一方、 $h_c/H_{i1/3}$ が0.7以上を対象とした $h_c/h = 0.302$ の結果では、前出の図-15の $\theta = 0^\circ$ の場合と同じように、比較的高天端の場合でも波高伝達率はおおむね0.1以上

となっている。これに対し、低天端のケースである $h_c/h = 0.116$ の場合は直接比較できる $\theta = 0^\circ$ のデータがないため確認はできないが、 θ による K_T の増大傾向は $0.5 < h_c/H_{i1/3} < 0.7$ のときに比べて鈍化するようである。

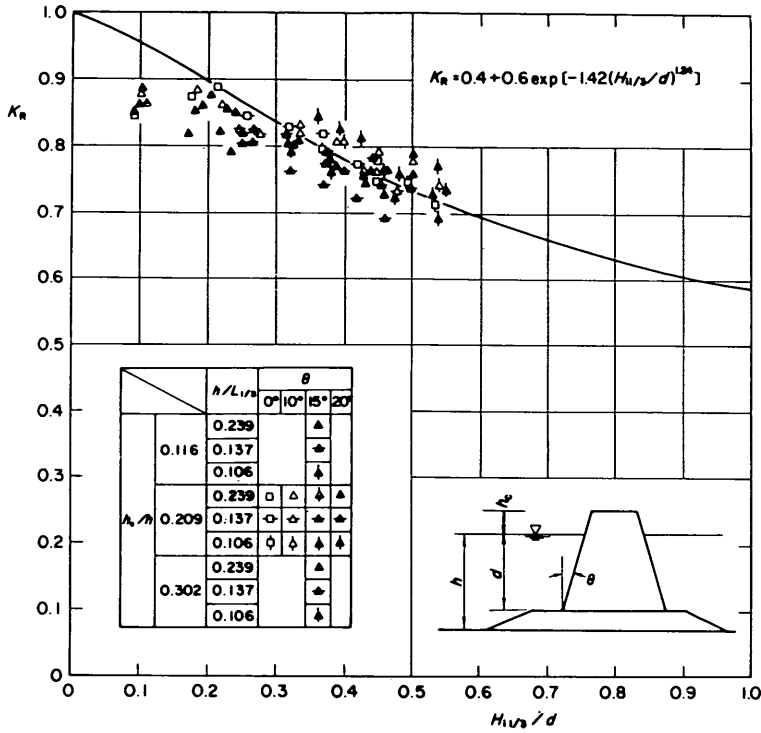


図-14 反射率の測定結果

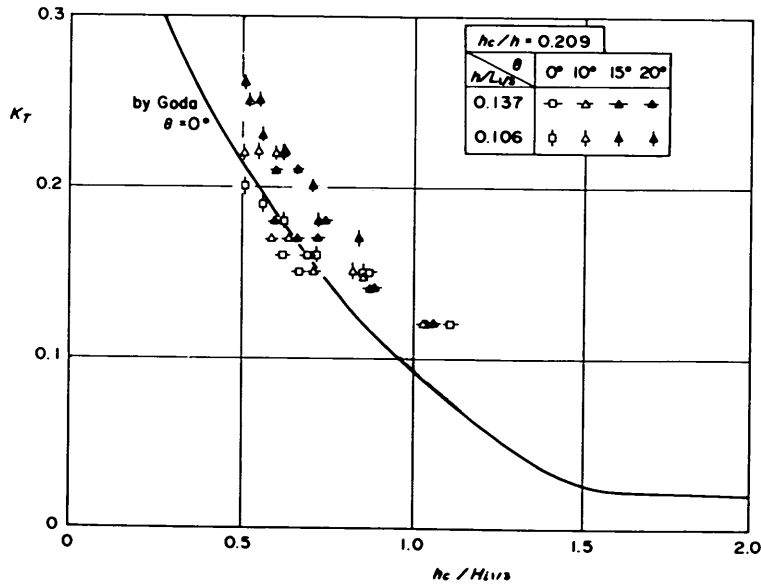


図-15 傾斜角による波高伝達率の相違

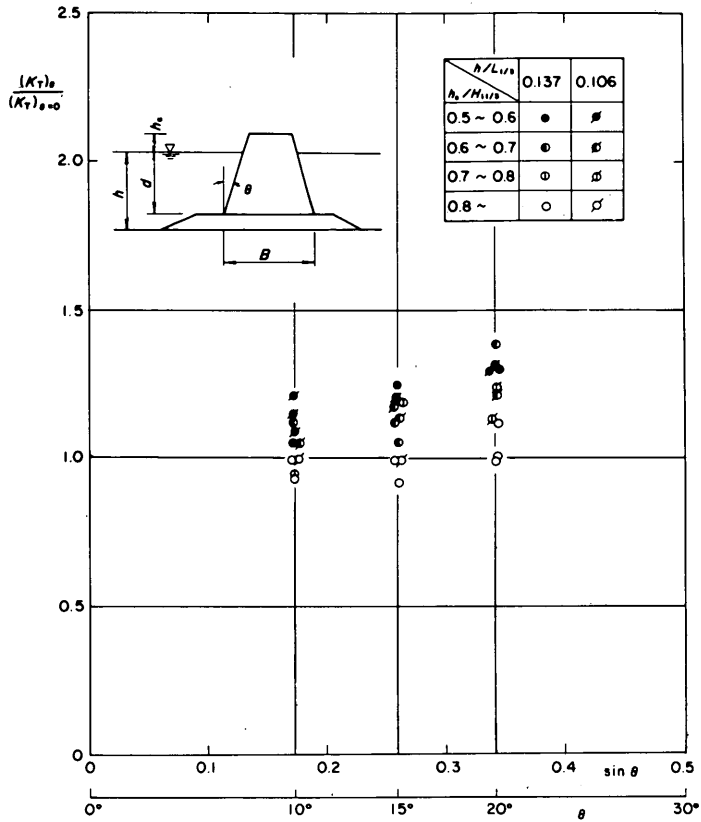


図-16 θ に対する波高伝達率の増大傾向

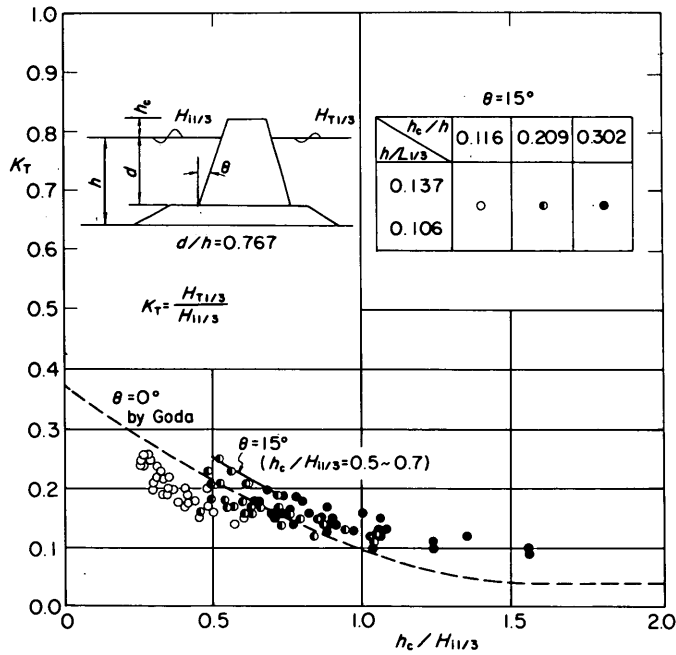


図-17 $\theta = 15^\circ$ の台形ケーソンの波高伝達率

5. 越波特性

5.1 実験方法

(1) 越波量の測定法および表示法

越波量は、図-18 に示しているように、越波水を天端上に固定した導水樋を通じて堤体背後の取水容器に導き、実験前後の取水容器の水位差を測定することによって求めた。導水樋はベニア合板で製作したもので、越波

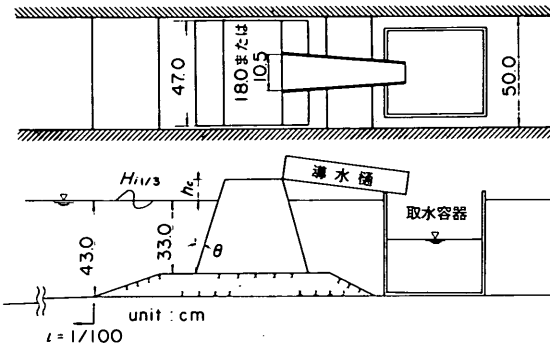


図-18 越波実験

水量の大小に応じて、取水口の幅が 10.5 cm と 18.0 cm のものを使い分けた。越波水を受ける時間は、越波後定常待ち時間を経過した後の 120 波分とし、それ以外の場合は導水口を閉じておいた。また、実験結果の整理に用いる堤体入射波高 $H_{i1/3}$ は、取水時間中に沖側波高測点でモニターした分離入射波高を堤体位置での波高に換算した値である。

越波量は、測定した越波水量を導水樋の幅と取水時間で除した単位幅あたりの平均越波流量 q のかたちに換算したものを、 $\sqrt{2gH_{i1/3}^3}$ で除して無次元表示した。この表示法は、越波を天端上からの溢水と仮定して導かれたものである⁸⁾。

(2) 実験ケース

越波実験では、傾斜角 θ が 15° の台形ケーソンおよび直立ケーソンの 2 種類を対象とした。実験ケースは表-5 に示すように、前者では天端高 3 種類 ($h_c/h = 0.116, 0.209, 0.302$) とし、後者では $h_c/h = 0.209$ の 1 種類とした。また、実験波はいずれについても、B 波および C 波それぞれ 3 波群ずつとした。

表-5 越波実験のケース

傾斜角 θ	天端高 h_c (cm)	波種	入力基準 電圧 e (v)	目標波高 $H_{1/3}$ (cm)	$H_{1/3}/L_{1/3}$	$H_{1/3}/d$
0°	9	B1~B3	0.15	8.0	0.025	0.242
			0.19	10.0	0.032	0.303
			0.23	12.0	0.038	0.364
			0.27	14.0	0.045	0.424
			0.31	16.0	0.051	0.485
		0.20	10.0	0.025	0.303	
	C1~C3	0.24	12.0	0.029	0.364	
		0.28	14.0	0.034	0.424	
		0.32	16.0	0.039	0.485	
		0.36	18.0	0.044	0.545	
15°		5	B1~B3	0.15	8.0	0.025
	0.19			10.0	0.032	0.303
	0.23			12.0	0.038	0.364
	0.27			14.0	0.045	0.424
	0.31			16.0	0.051	0.485
	9	C1~C3	0.20	10.0	0.025	0.303
			0.24	12.0	0.029	0.364
			0.28	14.0	0.034	0.424
			0.32	16.0	0.039	0.485
			0.36	18.0	0.044	0.545
13	C1~C3	0.20	10.0	0.025	0.303	
		0.24	12.0	0.029	0.364	
		0.28	14.0	0.034	0.424	
		0.32	16.0	0.039	0.485	
		0.36	18.0	0.044	0.545	

5.2 越波流量

図-19は、越波実験を行った全ケースの結果をプロットしたものである。まず、 $\theta = 15^\circ$ の台形ケーソンの実験結果をみると、 h_c/h が違っても相対天端高と無次元越波流量の関係は変化しないことがわかる。さらに、直立ケーソンの結果もこれにほぼ一致しており、今回実験を行った範囲では、台形ケーソンと直立ケーソンの越波流量には大差ないものと考えられる。

ところで、越波が主要な因子となる伝達特性では、台形ケーソンのほうが直立ケーソンに比べて波高伝達率が大きくなることは既に4.3で述べたとおりである。こうした無次元越波流量と波高伝達率の差異の理由としては、ひとつには両者の表示法としての精度の違いが挙げられるけれども、現象面においても両者の越波形態の相違を

指摘できる。写真-2, 3は $h_c/H_{1/3} = 0.5$, $h/L = 0.137$ のケースでの直立ケーソンと台形ケーソンの越波状況を示したものであるが、直立ケーソンでは上方に打ち上げられた越波水塊が天端上に落下して分散することが多いのに対し、台形ケーソンでは天端上を越流する傾向がみられる。このため、台形ケーソンの場合のほうが、越波水の打ち込みが強く、越波流量がほぼ同じでも波高伝達率が高くなる傾向にあると考えられる。

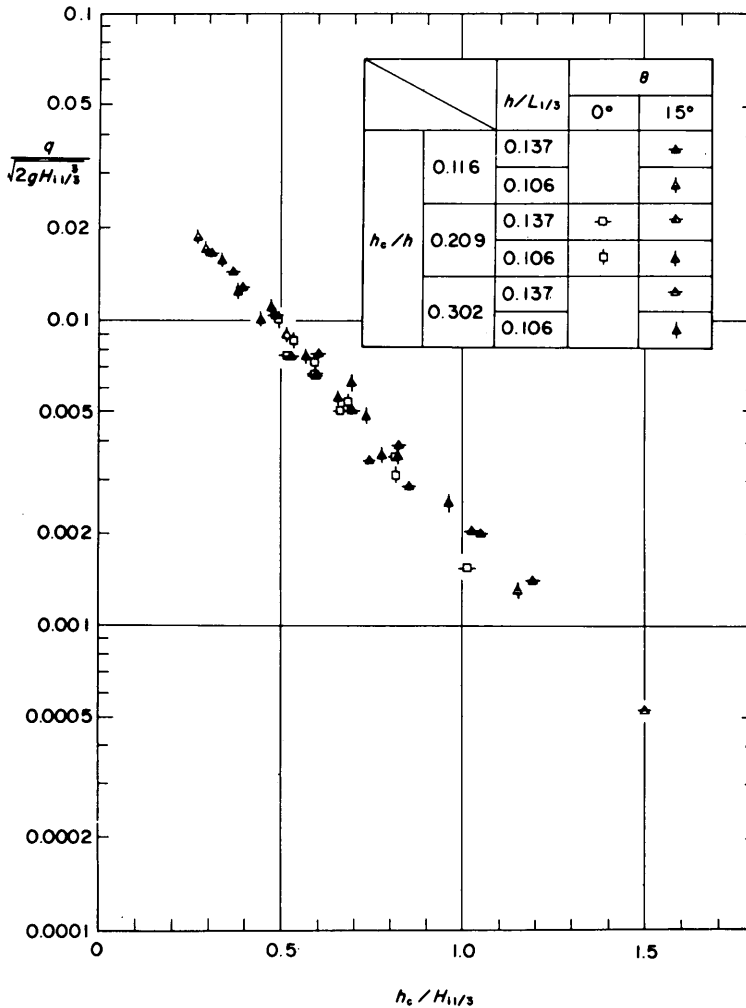


図-19 波高と平均越波流量の関係



写真-2 越波状況 ($\theta = 0^\circ$)

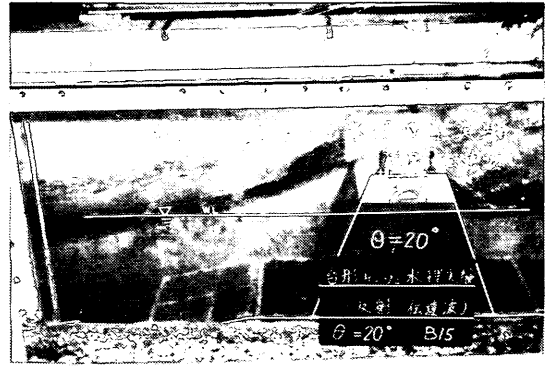


写真-3 越波状況 ($\theta = 20^\circ$)

6. 波力特性および設計波力の算定法

6.1 実験方法

(1) 模型および測定方法

ケーソン前壁面と底面に働く波圧、およびケーソン全体に働く波力に対する傾斜角の影響を検討するため、以下に述べる方法で実験を行った。

堤体の模型は、10mm厚の亚克力板を用いて、傾斜角の異なる4種類 ($\theta = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$)を製作し

た。天端高は $h_c = 9\text{cm}$ ($h_c/h = 0.209$) で一定とした。模型には定格 100gf/cm^2 の波圧計 (写真-4 参照) を前壁面に5個、底面に3個ずつ、各面で等間隔になるように取り付けた。なお、模型の構造は図-20に、その諸元は表-6に示すとおりである。

ケーソン全体は図-21および写真-5に示すように、その背面で三分力検出器を介して架台に固定した。三分力検出器は堤体に働く波力の水平成分 (F_H)、鉛直成分 (F_V)、およびセンサー中心のモーメント (M_0) を、それ

表-6 構造諸元 単位: mm

傾斜角 θ	b_1	b_2	b_3	T_1	T_2	L	l
0°	500	500	0	0	500	420	84
10°	352	355	72	110	390	426	85
15°	275	280	110	110	390	435	87
20°	194	202	149	149	351	447	89

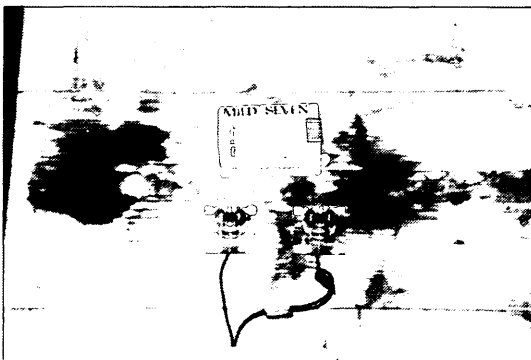


写真-4 波圧計

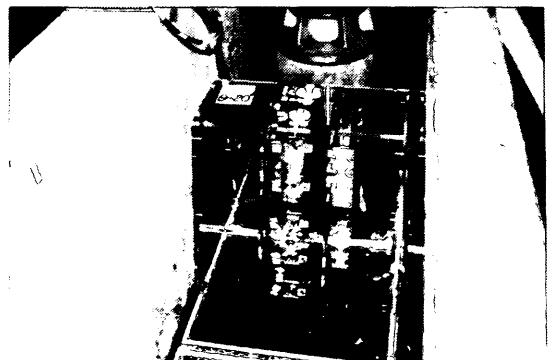


写真-5 ケーソンおよび三分力検出器

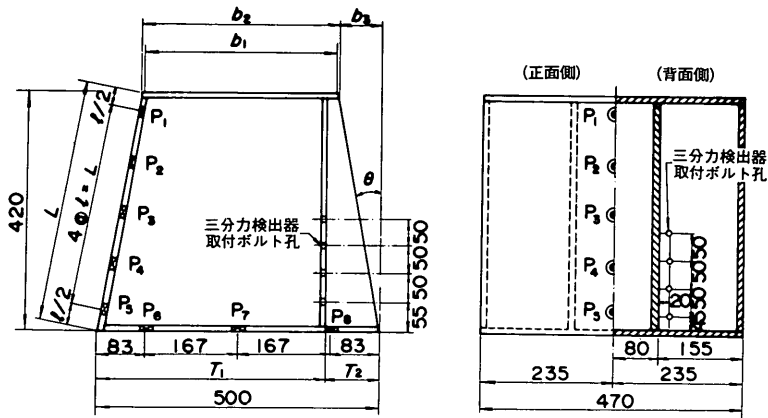


図-20 模型の構造

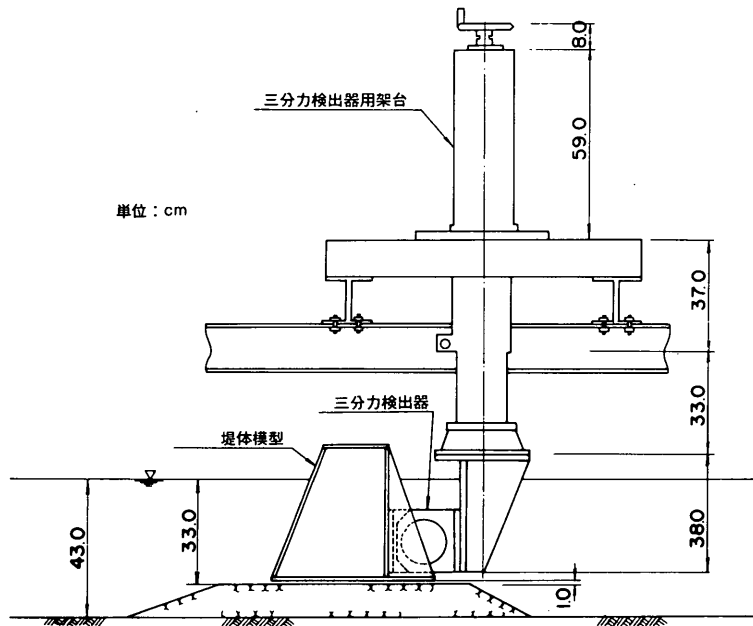


図-21 全波力実験

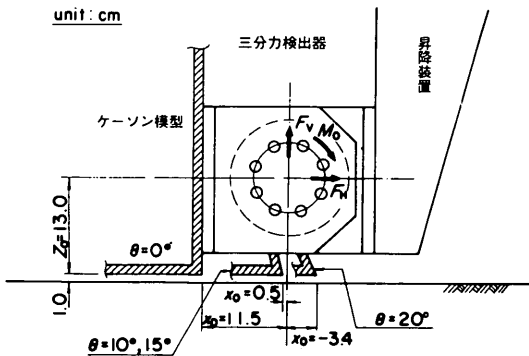


図-22 三分力検出器取り付け部の詳細図

それぞれ独立に測定することができる。各分力の定格は F_H 、 F_V は 100 kgf、 M_0 は 50 kgf m である。また測定系全体としての固有振動数は、水中でケーソン内に水を詰めた状態でおよそ 10 Hz であった。なお、三分力の方向は F_H がケーソンを背後に押す方向、 F_V が持ち上げる方向、 M_0 は後方に倒す方向を正とした。

三分力検出器取り付け部の詳細図(図-22)に示すように、傾斜角ごとに模型の構造が異なるため、堤体後し点と三分力検出器のセンサー中心点の位置関係が変化する。このため、堤体後し点での波力モーメント (M_T) は次式により M_0 を補正して求められる。

表-7 波圧・全波力実験のケース

傾斜角 θ	天端高 h_c (cm)	波種	増幅度 Amp.	波高 H (cm)	H/L	H/d
0° ・ 10° ・ 15° ・ 20°	9	A	4.9	8.0	0.044	0.242
			6.0	10.0	0.056	0.303
			7.3	12.0	0.067	0.364
			8.5	14.0	0.078	0.424
			9.7	16.0	0.089	0.485
			10.3	17.0	0.094	0.515
		B	11.2	12.0	0.038	0.364
			14.4	16.0	0.051	0.485
			17.6	20.0	0.064	0.606
			19.1	22.0	0.070	0.667
			20.8	24.0	0.076	0.727
			21.6	25.0	0.080	0.758
		C	10.7	14.0	0.034	0.424
			13.6	18.0	0.044	0.545
			16.5	22.0	0.054	0.667
			18.6	25.0	0.061	0.758
			20.0	27.0	0.066	0.818

$$M_T = F_H z_0 - F_V x_0 + M_0 \quad (5)$$

ここに、 x_0, z_0 は堤体後し点と三分力検出器のセンサー中心点の水平、鉛直距離である。

(2) 実験条件

波圧・全波力に関する実験はすべて規則波により実施した。実験ケースは表-7のように、周期の異なる3種

類の波に対して入射波高を5~6種に変化させている。規則波の造波信号の発生に使用した発振器の増幅度(Amp.)と発生波高(H)の関係を図-23に示す。A波とB波には砕波による波高の減少がわずかにみられるが、このときの波高としては堤体位置よりやや沖側での砕波限界波高を用いることが妥当である。したがって、砕波後の波に対しては図-23の比例直線をそのまま延長した仮想通過波高を用いて実験結果を整理した。

(3) 解析方法

波圧計と三分力検出器による出力はデータレコーダ(14ch用)に収録し、解析はデータ処理装置(DS-600)によりオフラインで行った。解析プログラムのフローを図-24に示す。図中の左半分は解析パラメータの設定、キャリブレーションおよびアナログデータの取り込みの部分で、右半分が波圧データの合力作成、波別解析、同時解析および波形作図を行う部分である。解析波数はA波10波、B波8波、C波5波とし、実験結果は全部の波の平均値で整理した。

6.2 波圧特性

(1) 波圧パラメータの定義

波圧測点 $P_1 \sim P_8$ で得られた波圧強度を $p_1 \sim p_8$ (gf/cm²) と表示する。1個の波圧計が分担する面積は前壁面および底面でそれぞれ等しいから、図-25に示すように各面に加わる平均波圧強度は単純平均で求められ

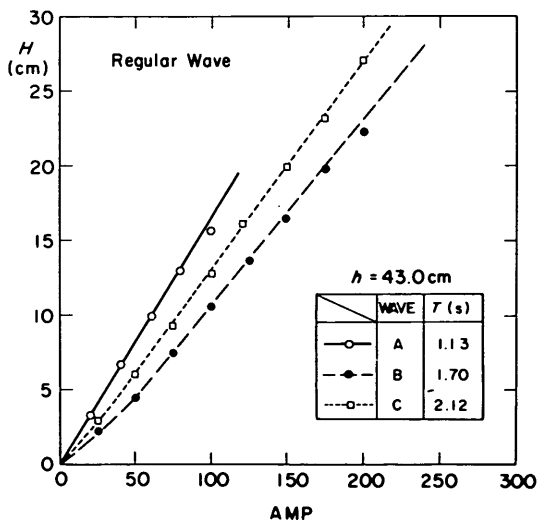


図-23 規則波の波高検定結果

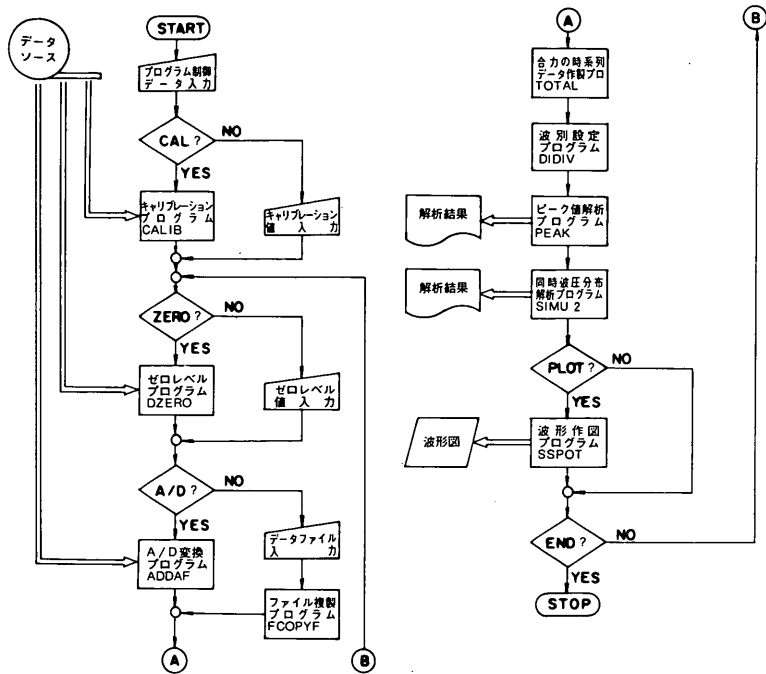


図-24 解析プログラムのフロー

る。すなわち前壁面に働く平均波圧強度 \bar{p} は、

$$\bar{p} = (p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + p_5) / 5 \quad (6)$$

で求められる。一方、底面に働く揚圧力については、その分布を三角形と仮定した場合の前しでの値 p_u として

$$p_u = 2(p_6 + p_7 + p_8) / 3 \quad (7)$$

により求められる。

(2) 前壁面に作用する波圧

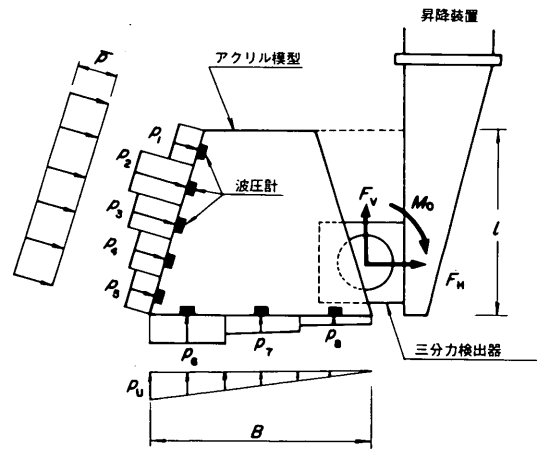


図-25 波圧パラメーター

前壁面に作用する平均波圧強度 (\bar{p}) についての実験結果を示したのが図-26の白丸である。同図の横軸は入射波の波長 (L) に対する静水面下の斜面部分の水平距離 (l) の比で、縦軸は直立ケーソンの平均波圧強度 ($\bar{p})_{\theta=0}$ に対する台形ケーソンの平均波圧強度 ($\bar{p})_{\theta}$ の比である。 \bar{p} には、 l/L が大きいときやや小さくなる傾向があるが、本実験の範囲ではその減少量はごくわずかである。したがって、台形ケーソンに作用する水平波力 F_H は次式で求められると考えてよい (図-27 参照)。

$$F_H = \bar{p} (l / \cos \theta) \cos \theta = \bar{p} l \quad (8)$$

ここに、 l はケーソンの全高である。式(8)は、斜面における波力の減少効果が受圧面 (斜面長) の増加効果で相殺され、結局水平波力 F_H は傾斜角 θ によらず一定となることを意味している。

一方、鉛直方向には図-27に示すような下向きの分力が堤体に作用し、台形ケーソンの安定性を向上させる要因を生み出す。この鉛直分力 ΔF_V は、

$$\Delta F_V = \bar{p} (l / \cos \theta) \sin \theta = \bar{p} l \tan \theta \quad (9)$$

となる。

(3) 底面に作用する揚圧力

前掲の図-26中の三角印は、前面壁に働く平均波圧強

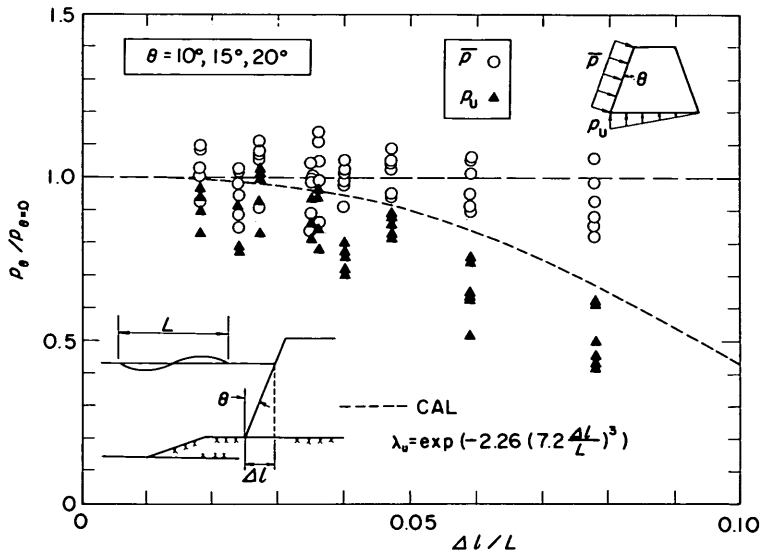


図-26 波圧実験結果

度 \bar{p} が最大のときの揚圧力 p_u を示したもので、 $\Delta l/L$ が大きいほど直立ケーソンに比べて台形ケーソンの揚圧力 p_u が減少する傾向がみられる。

斜面に働く重複波圧に関する服部らの研究⁹⁾によると、斜面壁の水底付近と静水面付近を比較すると、両者の波圧の時間変化に位相差があり、さらに重複波の節が斜面上に存在するような場合 ($\Delta l/L > 0.25$) には、静水面での波圧が最大のとき水底で負圧が生じることを確認し

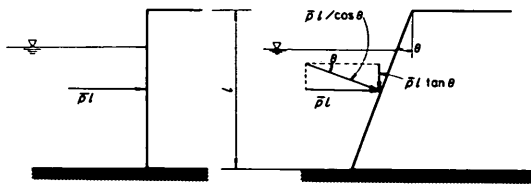


図-27 傾斜角の効果

ている。今回の実験範囲は $\Delta l/L < 0.10$ であるが、揚圧力にこれと同様な傾向がみられる。

今回の実験結果をもとに、台形ケーソンの揚圧力低減係数をやや安全側に設定すると次のようになる。

$$\lambda_u = \exp[-2.26(7.2\Delta l/L)^3] \quad (10)$$

図-26の破線はこの関係を示したものであり、実験値のほぼ上限に対応している。

6.3 全波力特性

図-28は、B波 ($h/L = 0.137$) を例として、最大水

平波力 (上段) およびそのときの鉛直波力 (下段) の値を、入射波高 H に対して示したものである。なお、水平波力はケーソンの全高 l で除した平均水平波圧 \bar{p}_H 、鉛直波力は三角形分布を仮定した場合の前しでの波圧 p_v で与えられている。同図で明らかにわかるように、最大水平波力と入射波高の関係には傾斜角の効果はみられない。

一方、水平波力が最大のときの鉛直波力については、

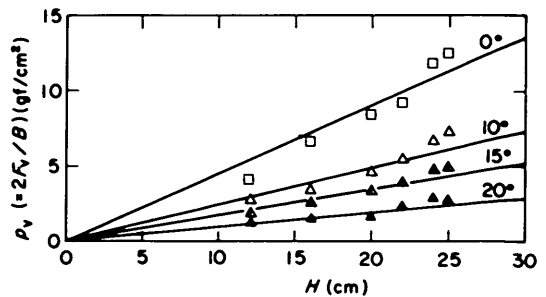
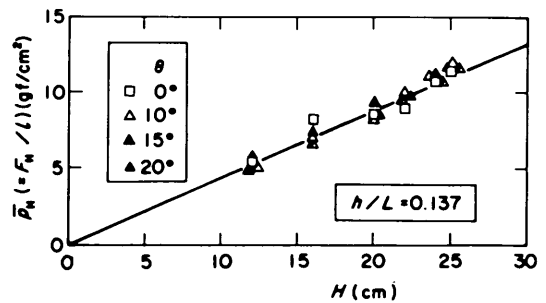


図-28 全波力実験結果 ($h/L = 0.137$)

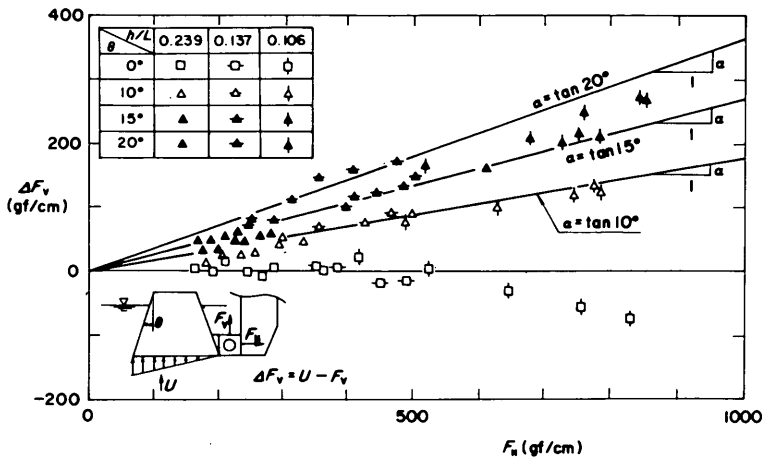


図-29 波力の鉛直成分の効果

傾斜角による減少効果が明瞭であり、これは式(9)の鉛直分力の効果を意味するものと考えられる。しかしながら、6.2で述べたように傾斜角が大きいかほど揚圧力が減少する傾向があるから、 p_v の0°の値からの差をすべて鉛直分力によるとすると、斜面の効果を過大に評価することになる。この点をさらに検討するため、波圧計によって得た揚圧力の合力(U)から、三分力検出器によって得た鉛直波力(F_v)を差し引き、斜面上に作用する波力の鉛直分力(ΔF_v)を求めた。図-29は水平波力 F_H と ΔF_v の関係を示しているが、両者の実験値にはそれぞれの傾斜角 θ について、

$$\Delta F_v = F_H \tan \theta \quad (11)$$

なる関係が成立しており、これは波圧特性によって得られた式(9)と同一の結果である。

6.4 設計波力の算定法

(1) 算定法の提案

6.2および6.3で示した波圧・全波力特性をもとにし

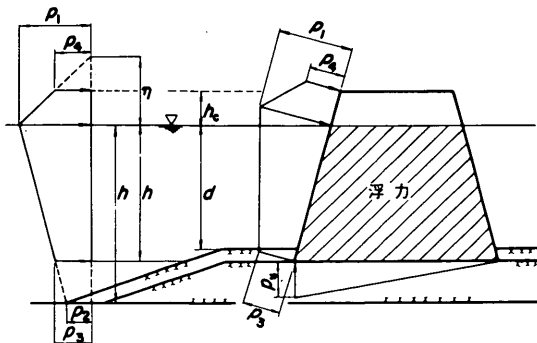


図-30 台形ケーソンの設計波力算定法

て、台形ケーソンの設計波力算定法を次のように提案する。

(i) 台形ケーソンに働く波力は、図-30に示すように全高が等しい直立壁に働く波圧がそのままの大きさで斜面直角に作用するものとして算定する。なお、直立壁の波圧強度等は合田式により求めるものとする。

(ii) 底面に働く揚圧力は合田式で求めた値に、式(10)で得られる低減係数 λ_u を乗じて算定する。

算定式を以下にまとめて示す。

$$p_1 = (\alpha_1 + \alpha_2) w_0 H_{\max} \quad (12)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (13)$$

$$p_4 = \alpha_4 p_1 \quad (14)$$

$$p_u = \lambda_u \alpha_1 \alpha_3 w_0 H_{\max} \quad (15)$$

ここに、

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2 \quad (16)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{\max}}{d} \right)^2, \frac{2d}{H_{\max}} \right\} \quad (17)$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right] \quad (18)$$

$$\alpha_4 = 1 - h_c^* / \eta^* \quad (19)$$

$$\eta^* = 1.5 H_{\max} \quad (20)$$

$$h_c^* = \min(\eta^*, h_c) \quad (21)$$

(2) 滑动合成波力に対する実験値と計算値の比較

ケーソン全体の滑动に対する提案算定法の妥当性を検討する。一般に、滑动限界状態においては次の関係式が成立する。

$$F_H = \mu (W' - F_V) \quad (2)$$

ここに、 F_H 、 F_V は水平、鉛直波力、 μ は摩擦係数、 W' は F_H および F_V が作用しているとき、ケーソンが滑動しないための限界重量（静水中）を示している。式(2)を変形して、

$$\mu W' = F_H + \mu F_V \quad (3)$$

とすると、重量 W' のケーソンの滑動の有無が、式(3)の右辺の値によって決定することを意味する。この値を滑動合成波力と呼ぶ¹⁰⁾。

これに対し提案した波力算定法による滑動合成波力は次の式(4)の右辺で表される。

$$F_{HC} = \mu (W' + F_{HC} \tan \theta - U_C)$$

$$\therefore \mu W' = F_{HC} (1 - \mu \tan \theta) + \mu U_C \quad (4)$$

ここに、 F_{HC} 、 U_C は提案式による水平波力と揚圧力合力である。

図-31は、傾斜角 θ の台形ケーソンの滑動合成波力に対する直立ケーソンのその比を示す κ_s について、実験値（EXP）とこれと同一条件についての計算値（CAL）の比を表したものである。同図で両者の比が1.0以上は危険側、1.0以下は安全側を意味する。得られた結果は0.8～1.2の間に分布しており、提案した算定法は滑動

合成波力の実験値のほぼ平均的な値を与えている。

(3) 転倒モーメントに対する実験値と計算値の比較

ケーソンを転倒させる波力モーメントの実験値 M_T は、式(5)で求められる。これに対し提案した波圧算定法による波力モーメントの計算値 M_{TC} は次式で求められる。

$$\begin{aligned} M_{TC} = & \frac{1}{2} (p_1 + p_4) \left(\frac{h_c}{\cos \theta} \right) \left(\frac{h'}{\cos \theta} - B \sin \theta \right) \\ & + \frac{1}{6} (p_1 + 2p_4) \left(\frac{h_c^2}{\cos^2 \theta} \right) + \frac{1}{6} (2p_1 + p_3) \\ & \times \left(\frac{h'^2}{\cos^2 \theta} \right) - \frac{1}{2} (p_1 + p_3) B h \tan \theta \\ & + \frac{1}{3} p_u B^2 \end{aligned} \quad (5)$$

図-32は傾斜角 θ の台形ケーソンの転倒モーメントに対する直立ケーソンのその比を示す κ_M について、実験値（EXP）とこれと同一条件についての計算値（CAL）の比を表したものである。両者の比は0.8～1.2の間に分布しており、転倒モーメントに対して提案した算定法は実験値のほぼ平均的な値を与えている。

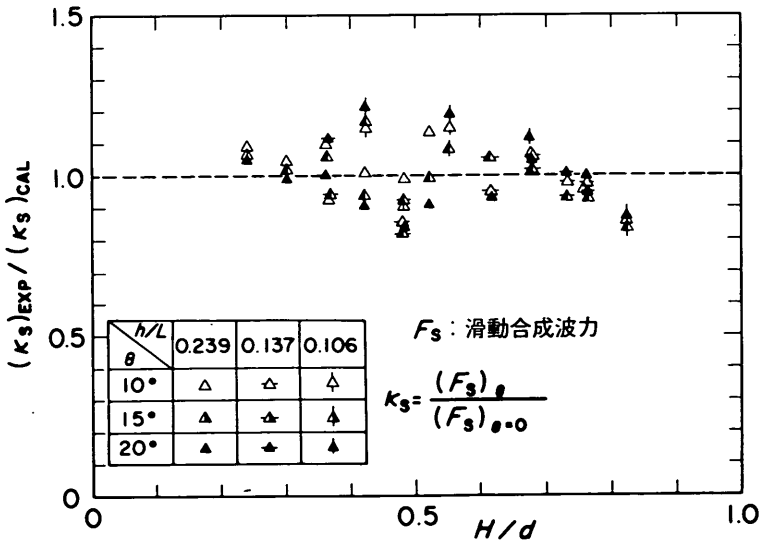


図-31 滑動合成波力に対する計算値と実験値の比較

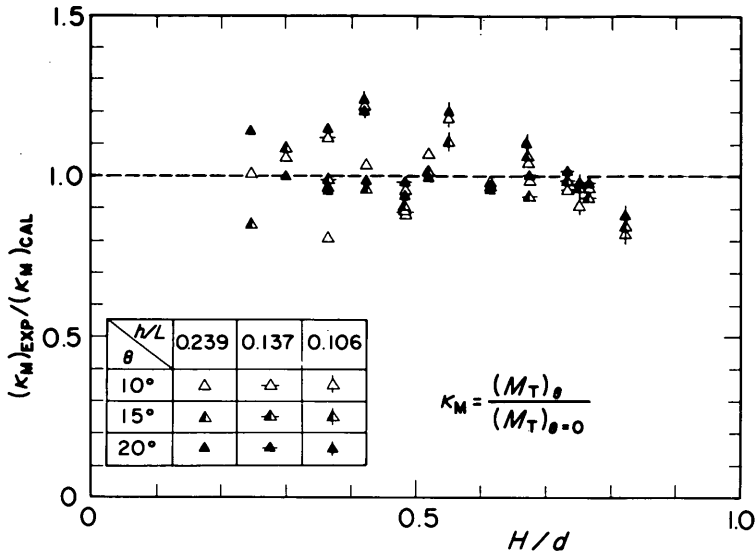


図-32 転倒モーメントに対する計算値と実験値の比較

7. 滑動安定性

7.1 実験方法および実験条件

(1) 実験方法

ここでは不規則波による滑動実験の結果をもとに、提案した波力算定法の妥当性を滑動量の面から検討する。

滑動量は、写真-6に示すような耐水式変位計を堤体の背後に取り付けて測定し、その出力をペン書きオシログラフに記録した。マウンドは碎石で作成し十分締め固め水平にならし、その上にケーソンを設置した。滑動実験に先立ってケーソンとマウンドの間の摩擦係数 μ を測定したが、ケーソン重量3種に対して合計15回の試験を行った結果、 $\mu = 0.57 \pm 0.04$ となった。以下の解析では $\mu = 0.6$ を用いる。

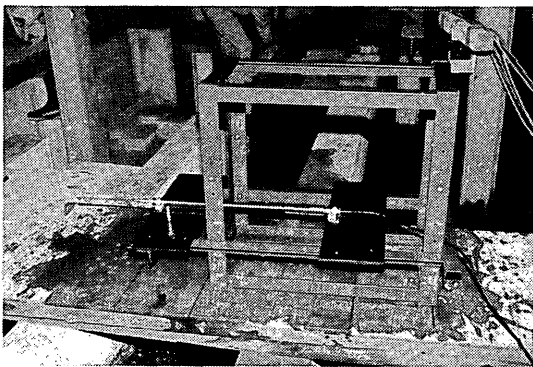


写真-6 変位計および取り付け架台

(2) 実験条件

滑動実験では、表-8に示すように天端高 $h_c = 9$ cm ($h_c/h = 0.209$)について、傾斜角 θ を 0° と 15° の2種に変えている。ケーソン重量は予備実験の結果をもとに、適度な滑動量が得られるような3種類を決定した。実験波はB波とC波の2種類でそれぞれ3波群ずつとし、有義波高の異なる5種類をひとつの波高サイクルとした。

ひとつの波高サイクルでは、波高の小さいほうから連続的に波を作用させていき、滑動量は直前のケース終了時の堤体位置を原点として計測した。マウンドの敷ならしはひとつの波高サイクルが終了するごとに堤体をクレーンで持ち上げて行った。このとき水槽の水は抜かず、碎石面にベニア板を敷き人力でならす方法を用いた。滑動量の測定限界は15cmであり、ひとつの波高サイクルの最終ケース実施前にこの値を超えたとき、あるいはマウンドの変形が顕著となったときは、その波高サイクルの実験を終了させた。

7.2 滑動安定性

図-33は、堤体重量3種類に対して、有義波高の異なる5種類の波を作用させたときの滑動特性を表している。ここに、 S は120波の作用による滑動量で、3種類の波群による平均値である。 H_{max} は120波中の最大波高の期待値で、沖側測点(No.1, No.2)で得られた分離入射波高から推定したものである。 S および H_{max} は、堤体重量から逆算して求めた滑動限界波高 H_{cc} で除して無次元化した。なお、 H_{cc} は提案した算定法により次式で求められる。

表-8 滑動実験のケース

傾斜角 θ	天端高 h_c (cm)	堤体付加重 量 W_c (kg)	波種	入力基準 電圧 e (v)	目標波高 $H_{1/3}$ (cm)	$H_{1/3}/L_{1/3}$	$H_{1/3}/d$		
0°	9	10.20	B1~B3	0.15	8.0	0.025	0.242		
				0.19	10.0	0.032	0.303		
				0.23	12.0	0.038	0.364		
				0.27	14.0	0.045	0.424		
		20.00	C1~C3	0.31	16.0	0.051	0.485		
				0.20	10.0	0.025	0.303		
				0.24	12.0	0.029	0.364		
				0.28	14.0	0.034	0.424		
17.32	C1~C3	0.32	16.0	0.039	0.485				
		0.36	18.0	0.044	0.545				
		15°	9	11.54	B1~B3	0.15	8.0	0.025	0.242
						0.19	10.0	0.032	0.303
0.23	12.0					0.038	0.364		
0.27	14.0					0.045	0.424		
18.42	C1~C3	0.31	16.0	0.051	0.485				
		0.20	10.0	0.025	0.303				
		0.24	12.0	0.029	0.364				
		0.28	14.0	0.034	0.424				
17.43	C1~C3	0.32	16.0	0.039	0.485				
		0.36	18.0	0.044	0.545				
		15°	9	14.49	B1~B3	0.15	8.0	0.025	0.242
						0.19	10.0	0.032	0.303
0.23	12.0					0.038	0.364		
0.27	14.0					0.045	0.424		
20.35	C1~C3	0.31	16.0	0.051	0.485				
		0.20	10.0	0.025	0.303				
		0.24	12.0	0.029	0.364				
		0.28	14.0	0.034	0.424				
17.43	C1~C3	0.32	16.0	0.039	0.485				
		0.36	18.0	0.044	0.545				

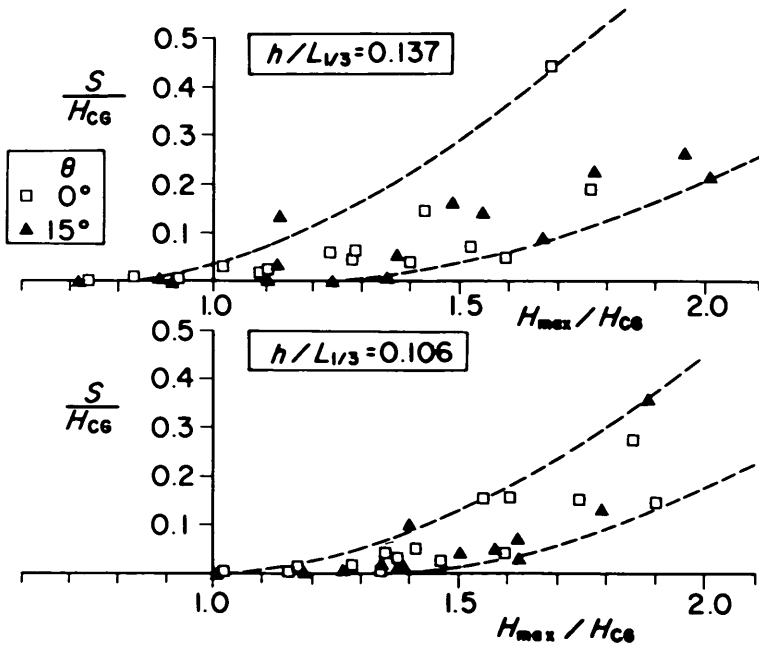


図-33 波高と滑動量の関係

$$H_{cc} = \frac{\mu W/w_0 + h_c^2 (\alpha_1 + \alpha_2) (1 - \mu \tan \theta) / 3}{\{(1 + \alpha_3) h' / 2 + h_c\} (\alpha_1 + \alpha_2) (1 - \mu \tan \theta) + B \alpha_1 \alpha_3 \mu \lambda_u / 2} \quad (26)$$

図中の H_{\max} / H_{cc} が 1.0 を上まわる領域は、設計条件を越える波に対する滑動特性を示しているが、直立ケーソンと台形ケーソンでその傾向に差がなく、ともに破線の範囲内に分布している。

このことは、提案した設計波圧の算定法を用いて台形ケーソンを設計すれば、滑動に関する限りは通常の混成堤と同程度の安全性が確保できることを意味している。つまり、全波力実験によって確認された提案設計法の妥当性が、実際に堤体を滑らせて行ったこの実験によっても確認されたわけである。

8. むすび

鉛直となす角度を定義する傾斜角が 20° までの台形ケーソンの水理特性に関して、本研究により得られた主要な結論をまとめると以下のとおりである。

- 1) 台形ケーソン入射波高に対する反射率の変化には、実験を行った3種類の周期のいずれについても、傾斜角による差異はみられず、反射率 K_R は全体として $0.7 \sim 0.9$ の範囲である。
- 2) 台形ケーソンの波高伝達率は、傾斜角 θ とともに若干増大する。とくにその傾向が顕著となる $h_c/H_{1/3}$ が $0.5 \sim 0.7$ の範囲について、 $\theta = 0^\circ$ のときの伝達率 $(K_T)_{\theta=0}$ に対する台形ケーソンの伝達率 $(K_T)_\theta$ の比を求め、これと傾斜角 θ の関係を示した。その結果、この範囲で、 $\theta = 15^\circ$ の台形ケーソンの伝達率を $\theta = 0^\circ$ の場合と同程度とするためには、その天端高を $1.2 \sim 1.3$ 倍にすれば十分であることが明らかとなった。
- 3) 相対天端高と無次元越波流量の関係には、直立ケーソンと傾斜角 15° の台形ケーソンの間に大きな差はみられない。しかし、直立ケーソンの場合は上方に打ち上げられた越波水塊が天端上に落ちることが多いのに対し、台形ケーソンでは天端上を越流する傾向がある。こうした両者の越波形態の相違が、波高伝達率における差異の原因と考えられる。
- 4) 前壁面に作用する波圧には、傾斜角による差異はみられないが、揚圧力については傾斜角とともに減少する傾向がある。これを定式化して揚圧力低減係数 λ_u を示した。また、斜面に作用する波力の鉛直成分 ΔF_V と水平波力 F_H の間に、 $\Delta F_V = F_H \tan \theta$ なる関係があることを全波力実験で確認した。
- 5) 波圧・全波力実験の結果をもとに、合田式を準用

した台形ケーソンの波力算定法を提案した。この方法は、合田式により求められる直立壁の波圧をそのままの大きさを斜面に直角に作用させ、揚圧力は合田式の λ_u に低減係数 λ_u を乗じて算定するものである。

- 6) 滑動合成波力および転倒モーメントについて、実験値と提案した算定法による計算値を比較した。その結果、両者の差は 20% 以内であり、提案した算定法は実験値のほぼ平均的な関係を与えることが明らかとなった。
- 7) 設計条件を上まわる波を作用させた場合の滑動特性を実験的に検討した。その結果、提案した算定法の精度が、直立ケーソンに対する現行設計法の精度と同一の水準にあることを示した。

以上、台形ケーソンの水理特性に関する実験的な検討を行って、設計波力の算定法を提案した。ただし、今回の実験は比較的低マウンドのケースに限られているため、強力な碎波に対する検討は十分とはいえない。本報告で提案した算定法をこうした条件下に適用する場合には、さらに波力の作用時間や地盤との応答等を考慮した検討が必要である。

一方、台形ケーソンの反射率、波高伝達率等については、波高伝達率が若干大きくなるものの直立ケーソンに比べて大きな差はなく、台形ケーソンの適用にあたっては必要に応じて天端高を変えること等で十分対応できると考えられる。

なお、本実験はまえがきで述べたとおり、東京電力(株)の要請を受けた(財)沿岸開発技術研究センターからの受託試験研究として実施したもので、実験の実施にあたっては、(財)沿岸開発技術研究センターの錦織誠司氏ほかの協力を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

(1985年6月29日受付)

参 考 文 献

- 1) 伊藤喜行：特殊防波堤論，水工学に関する夏期講習会講義集，1968，pp.6-1～31.
- 2) 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年6月，34p.
- 3) 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年9月，23p.
- 4) 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年12月，28p.
- 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年9月，pp.47～99.
- 6) Goda, Y.: Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.8, No.3, 1969, pp.3～18.
- 7) 土木学会編：水理公式集（昭和60年版），第6編，4.波と構造物，1985，pp.535
- 8) 合田良実：防波護岸の越波流量に関する研究，港湾技術研究所報告，第9巻第4号，1977年12月，pp.3～41
- 9) 加藤教吉・服部昌太郎：斜面に働く重複波の波圧，第26回海岸工学講演会論文集，1979，pp.391～395.
- 10) 谷本勝利・原中祐人・富田英治・和泉田芳和：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年12月，pp.3～53.

主要記号表

- B ：ケーソン底版幅
 d ：マウンド上水深
 e ：造波機への入力基準電圧
 F_H ：三分力検出器による水平波力
 F_{HC} ：提案式により計算された水平波力
 F_S ：滑動合成波力
 F_V ：三分力検出器による鉛直波力
 ΔF_V ：斜面に作用した波力の鉛直分力
 f ：波の周波数
 g ：重力加速度
 H ：規則波の入射波高
 H_{max} ：最高波高
 $H_{1/10}$ ：1/10最大波高
 $H_{1/3}$ ：有義波高
 \bar{H} ：平均波高
 $H_{1/3}^*$ ：沖側での分離入射波高
 $H_{i/1/3}$ ：堤体入射波高

- $H_{s/1/3}$ ：入反射波合成波の有義波高
 $H_{T/1/3}$ ：伝達波の有義波高
 H_{CG} ：計算による滑動限界波高
 h ：前面水深
 h' ：ケーソン基面水深
 h_c ：静水面上のケーソン天端高
 h^* ：入反射分離計算用波高測点の水深
 K_R ：反射率
 K_T ：波高伝達率
 l ：ケーソンの全高
 Δl ：波高測点 No.1 と No.2 の間隔または静水面以下の斜面の水平距離
 L ：波長
 $L_{1/3}$ ：有義波の波長
 M_0 ：三分力検出器の中心におけるモーメント
 M_T ：ケーソン後しまわりの波力モーメント
 M_{TC} ：提案式により求めた波力モーメント
 \bar{p} ：前壁面に働く平均波圧強度
 p_1 ：合田式による静水面での波圧強度または測点 P_1 における波圧強度
 p_3 ：合田式によるケーソン下端での波圧強度または測点 P_3 における波圧強度
 \bar{p}_H ：三分力検出器による水平波力 (F_H) から求めた平均波圧強度
 p_u ：ケーソン前しにおける揚圧力強度
 p_v ：三分力検出器による鉛直波力 (F_V) から求めたケーソン前しにおける揚圧力強度
 q ：平均越波流量
 S ：スペクトル密度またはケーソン滑動量
 T ：規則波の周期
 T_{max} ：最高波周期
 $T_{1/10}$ ：1/10最大波周期
 $T_{1/3}$ ：有義波周期
 \bar{T} ：平均波周期
 U ：揚圧力の合力
 U_G ：提案式によって計算された揚圧力の合力
 W' ：ケーソンの水中重量
 w_0 ：水の単位体積重量
 x_0 ：三分力検出器の中心とケーソン後し点の水平距離
 z_0 ：三分力検出器の中心とケーソン後し点の鉛直距離
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ：合田式の波圧係数
 κ_s ：台形ケーソンと直立ケーソンの滑動合成波力の比

κ_M : 台形ケーソンと直立ケーソンの転倒モーメントの比

λ_u : 揚圧力の低減係数

μ : 摩擦係数

θ : 台形ケーソンの傾斜角

港湾技研資料 No.528

1985・9

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 有限会社 つばさ印刷技研

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