

# 大水深域における各種スリット式消波堤の反射、マウンド安定及び波力特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON WAVE REFLECTION, STABILITY OF MOUND ARMOR BLOCKS, AND WAVE FORCE ON UPRIGHT ABSORBING SLIT CAISSON BREAKWATER IN DEEP SEA.

藤井敦<sup>1</sup>・小椋進<sup>2</sup>・竹内泰弘<sup>2</sup>

Atsushi FUJII, Susumu OGURA, Yasuhiro TAKEUCHI

森川高德<sup>3</sup>・西村正<sup>4</sup>

Takanori MORIKAWA, Tadashi NISHIMURA

<sup>1</sup>正会員 工修 国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所 (〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町一丁目57番地の2)

<sup>2</sup>国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所 (〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町一丁目57番地の2)

<sup>3</sup>正会員 玉野総合コンサルタント(株) 設計第一部 (〒464-0076 名古屋市千種区豊年町9番20号)

<sup>4</sup>玉野総合コンサルタント(株) 設計第一部 (〒464-0076 名古屋市千種区豊年町9番20号)

It is difficult to construct breakwater covered with wave-dissipating blocks in deep sea over forty meters, because the breakwater caisson and wave-dissipating blocks should be put on large mound and the construction cost may be very expensive. Three types of upright absorbing slit caisson breakwaters, which require smaller mound than breakwater covered with wave-dissipating blocks, are focused on in this study. Their characteristics of wave reflection, stability of mound armor blocks, and wave force are studied by using hydraulic model tests as fundamental investigation for economic design of breakwaters.

**Key Words:** deep sea, upright absorbing slit caisson breakwaters, wave reflection, stability of mound armor blocks, wave force, hydraulic model tests

## 1. はじめに

水深40mを越える大水深海域に防波堤を建設する場合、通常消波ブロック被覆堤では堤体断面が極めて大規模なものとなるため、建設コスト縮減の観点より、ケーソン前面に消波ブロックを有さず、防波堤断面の縮小化を可能にする「スリット式消波堤」が有効となる。しかし、本防波堤は、構造上の特性として、遊水室後壁に強大な波力が作用する可能性があることから、波力軽減を目的に、スリット壁や後壁を斜面形状にした場合の有効性について探る必要がある。また、本防波堤は、前面に消波ブロックを有さない構造であるため、条件によっては、反射波が増大する可能性があり、常時波浪に対する特性を把握する必要がある。他方、マウンド天端の被覆ブロックは、堤体の安定性の観点より、2列以上

とする例が多いが、マウンド幅縮小の観点より、可能な限り減らすことが求められている。

以上のことより、本研究は、大水深域に建設する防波堤のコスト縮減の観点より、次ページに示す各種スリット式消波堤を対象に、反射波、波力及びマウンド被覆ブロックの安定特性を水理模型実験により把握し、防波堤設計の基礎資料に資することを目的とした。

## 2. 実験内容

### (1) 実験装置

実験は、国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空

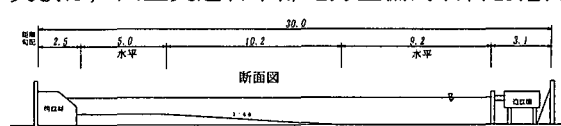


図-1 実験水路

港技術調査事務所伊勢湾水理環境実験センターが所有する長さ30m、幅1m、深さ1.2mからなるピストン型単一方向不規則波造波装置（吸収制御タイプ）が設置された長水路（図-1）において、模型縮尺1/70で実施した。

## (2) 実験条件

実験対象としたスリット式消波堤は、図-2に示すとおりであり、スリット部、遊水室後壁がともに直立式の「通常タイプ」、遊水室後壁の一部が傾斜角60度で斜面形状をなす「後壁斜面タイプ」、スリット部、遊水室後壁の全体がともに60度で斜面形状をなす「上部斜面タイプ」の3種類である。堤体幅は前二者が20m、後者が17mであり、いずれも、開口率30%の縦スリット式、遊水室幅6.8m（後壁斜面タイプはL.W.L基準）、上部工天端高 $h_c=7.5$ m、前面水深 $h=43$ m、マウンド水深 $h'=21$ m、マウンド前面法勾配 $=1:2$ の条件である。

実験波は、反射波実験では、常時波浪として、 $H_{1/3}=0.5$ m, 1.0m, 1.5m,  $T_{1/3}=5.0$ s, 7.0s, 9.0sの不規則波3種類を、マウンド被覆ブロック安定実験では、異常時波浪として、 $H_{1/3}=8.6$ m,  $T_{1/3}=17.4$ sの不規則波1種類を用い、周波数スペクトルは、いずれも、プレットシュナイダー・光易型を目標とした。波力実験では、異常時波浪近傍の最高波として、 $H_{max}=14.4$ m, 15.4m, 16.4m,  $T_{1/3}=17.4$ sの規則波3種類を対象とした。

## (3) 実験及び解析方法

### a) 反射波実験

反射波実験は、3種類のタイプの防波堤を対象に、堤体前面から相当水深波長にして1波長程度離れた位置に2本の波高計を設置して波高を測定し、合田らの方法<sup>1)</sup>で入・反射分離計算することで、各々の反射率を求めた。各ケースの実験作用波数は600波以上、繰り返し回数は3回とし、各測定値の平均をもって実験結果とした。

解析に際しては、得られた反射率を通常の消波ブロック被覆堤のそれと比較、評価することでその特性を把握した。

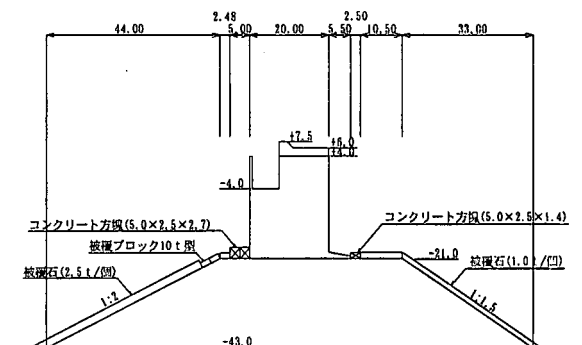
### b) マウンド被覆ブロックの安定実験

マウンド被覆ブロックの安定実験は、通常タイプ及び上部斜面タイプの2種類を対象に行った。実験は、10t型の被覆ブロックを用い、マウンド天端列数2列及び1列の2種類（法肩幅 $BM=9.96$ m, 7.48m）の条件で実施した（図-2中の断面は、天端被覆ブロック列数1列で表示）。実験対象は、水路幅1mの中央50cm幅分の天端及び法面（2列分）の被覆ブロックとした。各ケースの実験作用波数は1000波以上、繰り返し回数は3回とした。

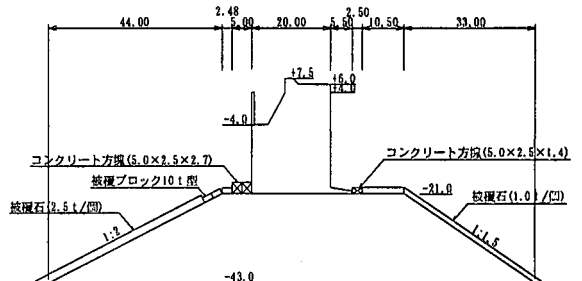
被覆ブロックの被害状況は目視観察により把握し、ブロックほぼ一個分以上の移動があったものを「被害」とみなし、それ以外は「動揺」として「被害」の対象とはしていない。実験では、繰り返し回数3

回の平均被害率が、設定した許容被害率1%未満となる最小の天端ブロック列数を探った。ここに、被害率は、被害個数を50cm幅内の全被覆ブロック個数（母数）で除して算出した。

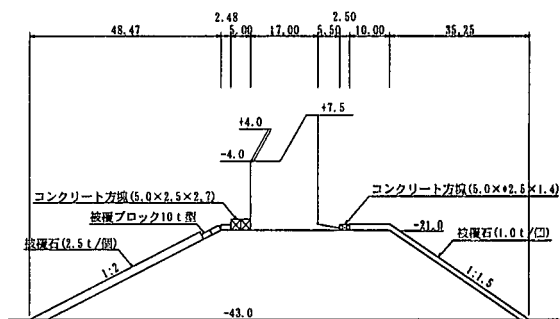
解析では、実験で得られた被害率を基に、各天端ブロック列における安定特性を把握し、安定性を確保できる最小の天端ブロック列数を明らかにした。



(a) 通常タイプ



(b) 後壁斜面タイプ



(c) 上部斜面タイプ

図-2 実験対象防波堤

表-1 実験条件

項目	反射波実験	被覆ブロック安定実験	波力実験
前面水深		43m	
マウンド水深		21m	
潮位	H.W.L.	L.W.L.	H.H.W.L.L.W.L.
波高	0.5, 1.0, 1.5m	8.6m	14.4, 15.4, 16.4m
周期	5.0, 7.0, 9.0s	17.4s	17.4s
スリット開口率		30%	
スリット幅		6.8m	

注：波力実験は規則波，その他は不規則波で実施

### c) 波力実験

波力実験は、3種類のタイプの防波堤を対象に、先のマウンド被覆ブロック安定実験で決定した天端ブロック列数のマウンド条件にて、波圧計及び三分力計を用いて実施した。図-3は、波圧計及び三分力計の設置位置を示したものであり、波圧計はスリット部前面(PSF部材)及びスリット部裏面(PSR部材)に各4点、前面下部(PUF部材)に3点、遊水室後壁(PB部材)に5点、底面部(PU部材)に3点、7-チング上面(PUT部位)に1点、遊水室下床版(PST部材)に1点、上部工天端部(PT部材)に3点(上部斜面タイプは1点)、計24点(上部斜面タイプは22点)に設置した。三分力計(水平波力 $P_H$ 、鉛直波力 $P_V$ )は、その中心がケーソンの重心付近にくるように設置した。

実験繰り返し回数は3回で、各測定値の平均をもって実験結果とし、波圧計測定値より各部材合力と滑動合成波力を、三分力計測定値より滑動合成波力を算出した。

解析では、各防波堤タイプの部材合力及び滑動合成波力を比較することで、その波力特性を把握するとともに、上部斜面タイプについては、実験結果を基に概略の安定性を照査した。

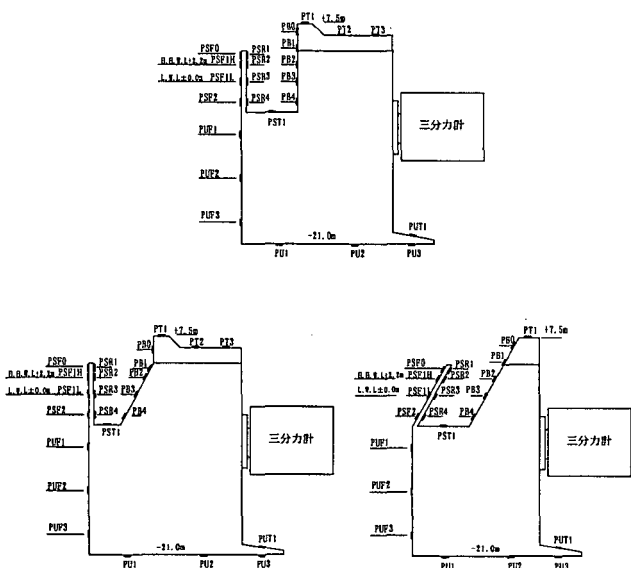


図-3 波圧計・三分力計設置位置

### 3. 反射波特性

ここでは、各タイプの防波堤の反射波特性を明らかにする。図-4は、反射率と相対遊水室幅 $l_2/L_2$ ( $L_2$ :遊水室水深における波長)の関係を各タイプで比較したものである。はじめに、通常タイプと後壁斜面タイプを比較すると、いずれも、 $l_2/L_2=0.15$ 付近(周期7.0s)を極小とした放物線を描いている。既往の研究<sup>2)</sup>によれば、通常タイプの場合、 $l_2/L_2$ に応じてこうした放物型傾向を持つことが知られており、本結果から、後壁斜面タイプにおいて

も同様の反射波傾向を示すことが解った。反射率自体も0.33~0.48の範囲で両者一連の変化傾向を示しており、ほぼ同様な反射波特性を有しているものと判断される。

一方、上部斜面タイプは、通常タイプのような明確な放物型変化はみられず、他のタイプとやや異なる特性を有している。この要因は明らかでないが、スリット部が斜面形状をなすことが何らかの因子となっている可能性もある。反射率自体は $K_R=0.38\sim0.42$ にあり、その変動幅が小さいため、通常タイプに比べ、 $l_2/L_2=0.10, 0.23$ 付近(周期9.0s, 5.0s)の反射率は低く、 $l_2/L_2=0.15$ 付近(周期7.0s)では高くなる結果にあるが、平均的にみれば、ほぼ同様な水準にあるものと言える。

以上のことより、後壁斜面タイプ、上部斜面タイプの反射率は、通常タイプと同程度に評価できるとともに、その水準( $K_R=0.33\sim0.48$ )からみて、常時波浪に対しては、通常の消波ブロック被覆堤(反射率0.3~0.5)<sup>3)</sup>と同程度の消波機能を有するものと判断できる。

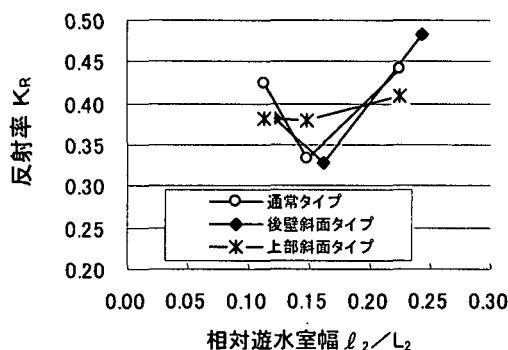


図-4 各種スリット式消波堤の反射率

### 4. マウンド被覆ブロックの安定特性

ここでは、通常タイプ及び上部斜面タイプの防波堤について、マウンドの安定性を確保できる最小のマウンド天端被覆ブロック(10t型)列数を明らかにする。なお、実験に用いた被覆ブロック質量10t(98kN)は、本実験条件(法肩幅BMはケーソン前面を起点とし、ブロック2列分を想定)と混成堤に対するブロック固有の安定数 $N_s$ より算出した所要質量に基づいている。ちなみに、本実験条件では、周期が17.4sと長いため、ブロック列数を1列に減らすことで、法肩位置は、わずかながら「節」から遠ざかることになり、この観点からみると安定側に働くことが期待される。

実験の結果、両タイプの防波堤とも、天端ブロック列数2列、1列のいずれにおいても被害事例はなく、きわめて安定的であることが確認された。

以上のことから、所要質量を満足する被覆ブロックであれば、天端ブロック列数を最小の1列としても、マウンドの安定性に影響はないことが解った。

## 5. 波力特性

ここでは、各防波堤タイプの合力、波力特性を明らかにする。なお、マウンド条件は、先の被覆ブロック安定実験結果を受け天端ブロック1列である。

### (1) 波力の時系列特性

図-5は、各タイプ毎に、ケーソン全体に作用する水平波力、鉛直波力及び滑動合成波力の時系列を示したものである。図中の押し波Ⅰはスリット部の合力が最大となる時刻、押し波Ⅱaは遊水室後壁に衝撃的な合力のピークが現れる時刻、押し波Ⅱbは遊水室後壁に比較的緩やかな合力のピークが現れる時刻を示している<sup>4)</sup>。

はじめに、水平波力についてみると、いずれのタイプも二山型のピークを有する（前者が押し波Ⅱa、後者が押し波Ⅱbに相当）ものの、詳細にみると、ピーク形状は各々異なり、後壁斜面タイプから上部斜面タイプに移るにしたがって、ピークの現れ方が緩やかなものとなっている。この主な要因は、後壁斜面タイプでは後壁の一部が、上部斜面タイプでは後壁全体が斜面形状を有し、衝撃性が緩和されるためと推測される。

鉛直波力についてみると、いずれのタイプも、当初は底面に作用する揚圧力で上向き波力が卓越するが、遊水室内に水塊が突入することで下床版に下向き波力が発生して急激に上向き波力が低下し、その後、上部工天端部に作用する波力も手伝って、下向き波力が卓越する状況となっている。これを詳細にみると、遊水室に水塊が流入して下向き波力が作用し始める状況がタイプによって若干異なり、上部斜面タイプでは、押し波Ⅱa時にかけて一気に低下して下向き波力が勝る状態となり、その後、一度も上向きに転じることなく、下向き波力が恒常的に卓越する状況となっている。この要因は、上部斜面タイプ

プの場合、後壁全体及びスリット部が斜面形状を有することで、遊水室に水塊が流入する付近の時刻に、「下向き波力」が発生するためである。

これらの波力を総括した滑動合成波力についてみると、全体傾向は、各タイプとも、各々の水平波力に近似した形状を示しており、後壁斜面タイプから上部斜面タイプに移るにしたがって、ピークの現れ方が緩やかなものとなっている。また、最大時は、遊水室に水塊が突入して後壁に最初に衝撃的な波力が作用する押し波Ⅱaのタイミングであるが、その時刻の鉛直波力は、上述のごとくタイプによって異なり、上部斜面タイプでは、下向き波力が勝っていることから、当該タイプの滑動合成波力は、水平波力以下にとどまることになる。以上のことから、後壁斜面タイプ及び上部斜面タイプは、滑動合成波力に關し有利に作用し、特に、上部斜面タイプで顕著になるものと思われる。なお、いずれのタイプも、引き波時の波力は押し波時の50%程度にとどまる結果となっている。

### (2) 主要部材の合力特性

表2、図-6～8は、後壁斜面タイプ、上部斜面タイプの各部材最大合力 $f_s$ を、通常タイプの最大合力 $f_N$ に対する比として示したものである。

表-2 通常タイプに対する主要部材合力比

主な部材	後壁斜面タイプ	上部斜面タイプ
スリット部	1.0	0.7
前面下部	1.0	0.9
遊水室後壁	0.85~0.9	0.75~0.85
底面部	0.9~0.95	0.95~1.0
遊水室下床版	0.6~0.65	1.0

はじめに、スリット部（図-6）についてみると、後壁斜面タイプの最大合力は、通常タイプとほぼ同様な水準となっている。よって、後壁斜面形状は、

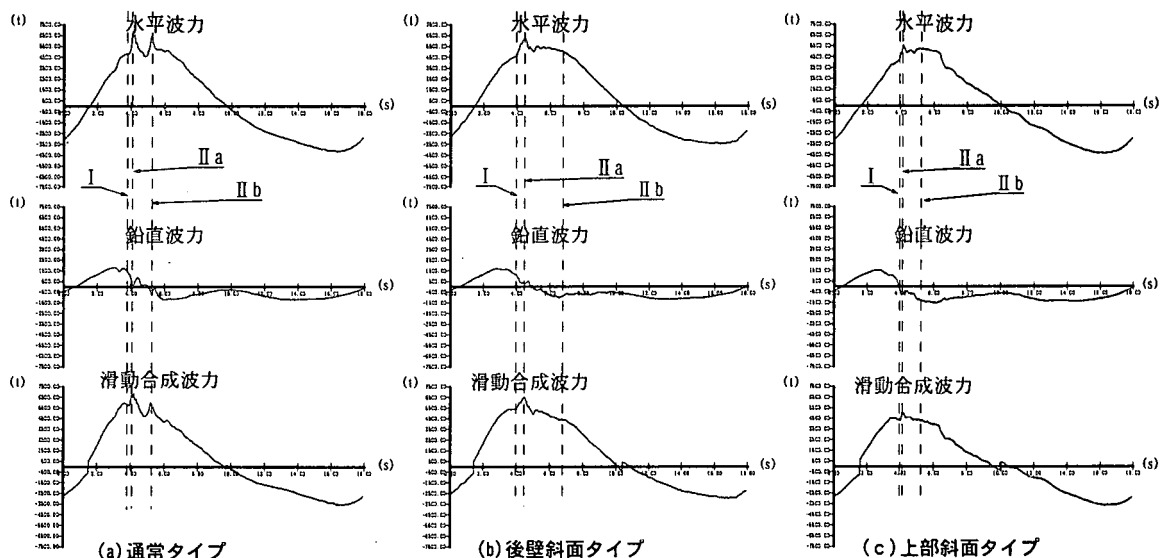


図-5 各種波力の時系列特性

前面のスリット部には影響を与えないことが解る。一方、上部斜面タイプの最大合力は、後壁直立タイプの70%弱にとどまる結果となっている。この主な要因は、スリット部が斜面形状になっていることで、①波圧強度の水平成分が減少する、②衝撃成分が軽減される、③部位個々の波圧ピーク時刻がわずかにズレる、等の効果が働いたためと考えられる。以上のことから、スリット部の合力に関しては、上部斜面タイプが相対的に有利であるものと判断される。

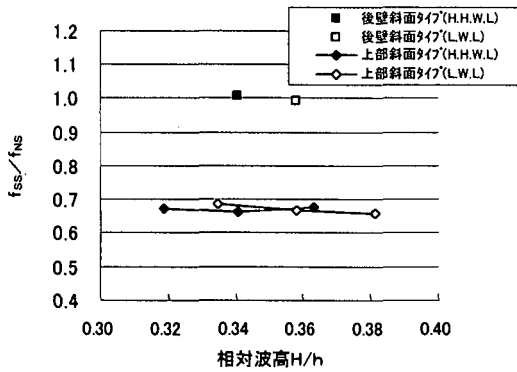


図-6 スリット部の最大合力比

同様な傾向はスリット部直下の前面下部(表-2)についてもみられ、上部斜面タイプは、通常タイプの90%程度にとどまる結果となっている。これは、スリット部が斜面形状をなすことで、前面重複波浪場が相対的に静穏化したためと推測される。

遊水室後壁(図-7)についてみると、その最大合力は、後壁斜面タイプ、上部斜面タイプとも、通常タイプより低く、前者は通常タイプの85~90%程度、後者は80%前後にとどまる結果となっている。この要因は、いずれのタイプも、遊水室後壁が斜面形状になっていることで、先の上部斜面タイプのスリット部と同じ効果が現れたためである。なお、詳細にみると、上部斜面タイプの方が低下率が高くなっているが、これは、後壁全体が斜面形状となっていることに加え、前面のスリット部も斜面形状となっていることで、水塊が斜め上方へ移動しやすくなり、衝撃成分が一層軽減した可能性もある。以上のことから、遊水室後壁の合力に関しては、後壁斜面タイプ、上部斜面タイプともに有利であり、特に、後者が優れているものと判断される。

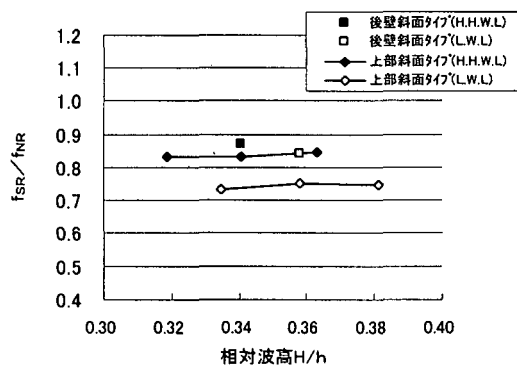


図-7 遊水室後壁の最大合力比

底面部(図-8)についてみると、後壁斜面タイプの最大合力は、通常タイプの90~95%程度とわずかながら低い結果となっている。この一要因は、遊水室後壁が斜面形状になっていることで、前面波浪場が相対的に静穏化したためと考えられる。一方、上部斜面タイプのそれは、通常タイプとほぼ同様な水準となっている。上部斜面タイプの場合、後壁直立タイプより堤体幅が3m狭くなっているにもかかわらず、底面合力が同水準となっている要因は、スリット部及び後壁部が斜面形状となっていることで、越波が促進され、背面に近い部分の波圧強度が急増したためである。このことから、底面部の合力に関しては、後壁斜面タイプが相対的に有利であり、逆に、上部斜面タイプはそれほど有利ではないものと判断される。

以上を総括すると、部材によって異なるものの、大半の部材において、後壁斜面タイプ、上部斜面タイプは、通常タイプより合力が低減できることが解った。

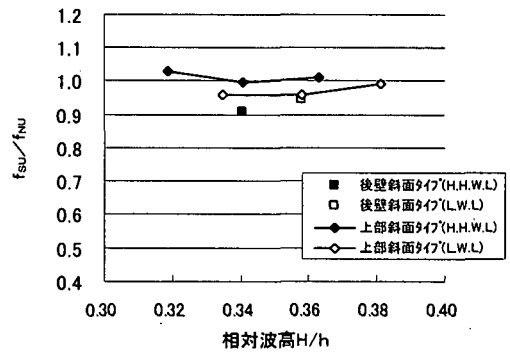


図-8 底面部の最大合力比

### (3) 滑動合成波力特性

図-9は、後壁斜面タイプ、上部斜面タイプの最大滑動合成波力 $F_s$ を、通常タイプのそれ $F_N$ に対する比と示したものである。

これをみると、後壁斜面タイプの最大滑動合成波力は、通常タイプの95%程度と、わずかながら低い結果となっている。これは、遊水室後壁の一部が斜面形状となっていることで、①水平波力が減少する、②鉛直下向き波力が発生する、③衝撃成分が軽減される、④部位個々の波圧ピーク時刻がわずかにズレる、等の効果が現れるためと考えられる。

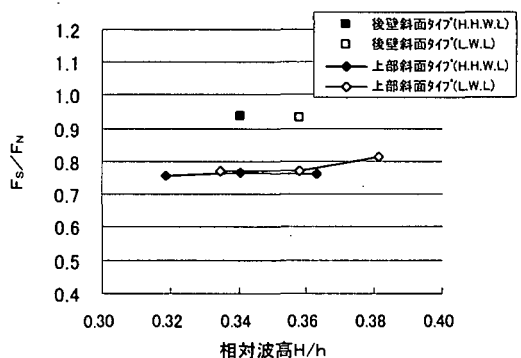


図-9 最大滑動合成波力比

上部斜面タイプのそれは、通常タイプの75～80％程度と、後壁斜面タイプ以上に低い結果となっている。これは、本タイプの場合、スリット部と遊水室後壁のすべてが斜面形状となっていることで、後壁斜面タイプで現れた4つの効果のうち、特に、①、②の効果により顕著に現れたためと考えられる。

以上のことから、滑動合成波力に関しては、後壁斜面タイプ、上部斜面タイプとも有利であり、特に、上部斜面タイプで顕著であるものと判断される。

#### (4) 後壁斜面、上部斜面タイプの設計計算法

ここでは、後壁斜面タイプ、上部斜面タイプの設計計算法について確認しておく。

既往の研究<sup>5)</sup>によれば、上部斜面タイプと同様の防波堤について、通常タイプの設計計算法<sup>4)</sup>をベースに、斜面形状のスリット部、遊水室後壁、スリット部直下の前面下部の部材合力を、上部斜面堤<sup>6)</sup>に見立てて補正することで、実験値に近似した結果を得ている。

これを踏まえ、後壁斜面、上部斜面タイプについて、同様の方針により最大滑動合成波力を算出してみた。図-10は、その計算値 $F_c$ と実験最大値 $F_E$ の比を示したものである。図中には、通常タイプの結果も併記してある。

これをみると、いずれも、0.85～0.90とやや実験値が計算値を下回るものの、両者はほぼ近似した水準にあり、上部斜面堤を考慮した計算値で概ね評価できることが確認された。なお、通常タイプに比べ、相対的に実験値が低い値を示す一要因は、斜面形状の部材が静水面下-4mまであり、上部斜面堤に比べ、前面重複波浪場が静穏化しやすいためと考えられる。

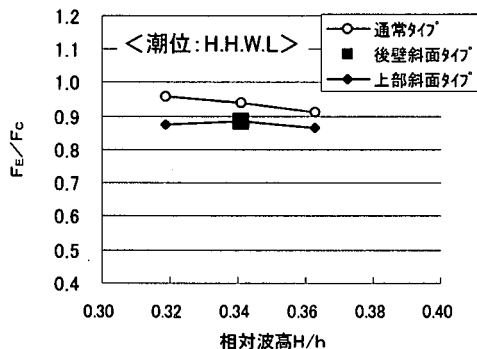


図-10 最大滑動合成波力の実験値と計算値の比較

#### (5) 上部斜面タイプの安定性の照査

前項までの検討の結果、特に、上部斜面タイプの場合、合力・波力の低減効果が高いことが解った。

ただ、本タイプは、他のタイプより堤体断面を狭く想定しており、かつ、重心が後方に偏ることから、安定性に問題が生じやすい。

これを受け、本実験結果を基に、安定性の照査を行った結果、滑動、転倒は安全率1.2以上を確保し、端趾圧では700kN/m<sup>2</sup>未満となることが確認された。

よって、上部斜面タイプは、本実験条件に対し十分安定的であり、通常タイプに比べ、より小断面を

実現できることが解った。

## 6. 主要な結論

本研究は、40mを越える大水深域での防波堤建設コストの縮減を目的に、前面に消波ブロックを有さない各種スリット式消波堤を想定し、その反射、マウンド安定及び波力特性を検討した。その主要な結論は以下のとおりである。

### ①反射波特性

いずれのタイプの防波堤も、常時波浪に対する反射率は、 $K_R=0.33\sim0.48$ の範囲にあり、通常の消波ブロック被覆堤（反射率0.3～0.5）<sup>3)</sup>と同程度の消波機能を有することが解った。

### ②マウンド被覆ブロックの安定特性

通常タイプ及び上部斜面タイプでの実験の結果、異常波浪に対し所要質量を満足する被覆ブロックであれば、天端ブロック列数を最小の1列としても、マウンドの安定性に影響を及ぼさないことが解った。

### ③部材合力・波力特性

- ・後壁斜面タイプの場合、遊水室後壁、底面部の最大合力は通常タイプの85～95％程度に低減することが解った。

- ・上部斜面タイプの場合、スリット部の最大合力は通常タイプの70％、前面下部は90％、遊水室後壁は80％程度に低減し、後壁斜面タイプ以上に有利となることが解った。

- ・後壁斜面タイプの最大滑動合成波力は、通常タイプの95％程度、上部斜面タイプは、75～80％程度に低減する結果となり、特に、上部斜面タイプで有利となることが解った。

- ・上部斜面タイプについて、実験結果をもとに、滑動、転倒、端趾圧について照査した結果、前二者は安全率1.2以上を確保し、後者は700kN/m<sup>2</sup>未満となることが確認され、十分安定的となることが解った。

## 参考文献

- 1) 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・反射の分離推定法，港湾技研資料，No. 248，1976。
- 2) 谷本勝利・吉本靖俊：直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究，港湾技術研究所報告，第21巻，第3号，pp43～77，1982。
- 3) 合田良実：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版，1990。
- 4) 高橋重雄・下迫健一郎：直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法，港湾技研報告，第30巻，第4号，1991。
- 5) 関口信一郎・渥美洋一・中内勲・宮部秀一・福土昌哉・三輪俊彦：斜面スリットケーソンの開発，海洋開発論文集，第16巻，pp487～492，2000。
- 6) 細山田得三・高橋重雄・谷本勝利：離島港湾における上部斜面堤の適用性について，海岸工学論文集，第41巻，pp706～710，1994。