

# 港 湾 技 研 資 料

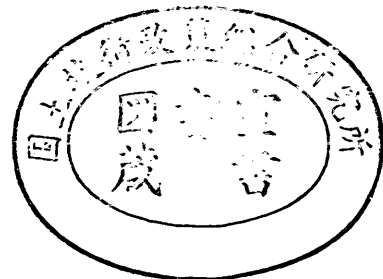
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 312      Mar. 1979

直立消波護岸の水理特性および曝気能実験

細	川	恭	史
三	好	英	一
菊	地		治

運輸省港湾技術研究所



# 目 次

要 旨 .....	3
1. ま え が き .....	3
2. 実 験 条 件 .....	4
2.1 自然条件 .....	4
2.2 護岸構造の条件 .....	4
3. 反 射 率 実 験 .....	6
3.1 目的および実験方法 .....	6
3.2 反射率の実験結果 .....	7
3.3 反射率に関する結論 .....	9
4. 越 波 実 験 .....	9
4.1 目的および実験方法 .....	9
4.2 越波実験結果 .....	10
4.3 越波量に関する結論 .....	11
5. 曝 気 実 験 .....	11
5.1 目的および実験方法 .....	11
5.2 曝気実験結果 .....	13
5.3 曝気実験に関する結論 .....	17
6. ま と め .....	17
参 考 文 献 .....	18
主要記号一欄表 .....	18
付表1～5 実験結果データ表 .....	20

## Experiments on Hydraulic Characteristics and Aeration Capacity of the Slit Caisson Type Seawall

Yasushi HOSOKAWA\*  
Eiichi MIYOSHI\*  
Osamu KIKUCHI\*\*

### Synopsis

A seawall made of a vertical slit caisson is tested for reflection coefficients, overtopping characteristics, and aeration capacity with irregular or regular waves. The model scale of 1/25 is used for the experiments of overtopping characteristics, and that of 1/15 is used for the experiments of the other two. From the results of these tests, the optimum opening ratio and the configuration of the front slit can be chosen. The required crest height of its parapet is also made clear.

From the viewpoint of aeration capacity, this seawall is compared with other three types of seawall including a 1/30 smooth slope. The aeration rate is measured with four dissolved-oxygen meters, and is recognized to be dependant on the rate of energy dissipation in wave breaking. According to this test, both this seawall and the seawall covered with a mound of artificial concrete blocks have larger capacity than an upright seawall has.

---

\* Member of the Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\* Member of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

# 直立消波護岸の水利特性および曝気能実験

細川 恭史\*  
三好 英一\*  
菊地 治\*\*

## 要 旨

埋立地護岸として計画されている直立消波護岸構造について、模型実験により水利特性および曝気能を検討した。対象護岸は、遊水部をもつ縦スリット式消波護岸で、波返しパラペットが取り付けられる。この護岸形式に対し、反射率、越波量、曝気能の各観点から検討を加えた。反射率実験では、スリット部の形状の反射率に与える影響を調べるために、スリット太さ、横さんの有無などの条件を変えた12形状について不規則波を用いて検討した。越波実験では、護岸上部の構造について、波返しパラペットの後退位置・高さ・遊歩階段の有無について条件を変えた12断面について不規則波を用いて検討した。曝気実験では、直立壁護岸、ブロック積消波護岸、1/30 斜面海浜を含めた4断面形式について曝気能を規則波を用いて比較した。

その結果、反射率実験よりスリット部の開口比が25～30%程度の範囲では、所与の波浪条件に対し、おおむね0.4～0.5の反射率が得られ、入射波周期が若干長い場合の方が消波効果が良いことなどが解かった。越波実験からは、各断面の平均越波流量を算定し、波返しパラペット前面に階段を設けると越波流量がかなり増大することがわかった。また、新しい試みである曝気実験からは、ブロック積形式、スリット形式の各消波護岸は直立壁護岸よりも大きな曝気能があることなどがわかった他、問題点および今後の課題を整理した。

## 1. まえがき

護岸の機能として最も重視される点は、内陸域に対する高潮防護であるが、一方、前面海域の環境、景観、海岸線の利用などの面への配慮も要請されるようになってきている。遊水部を有する直立消波護岸構造も、こうした時代の要請の中で注目されてきており、直立壁護岸に比して消波効果がすぐれ、天端高の低減が期待でき、エアレーション効果があるとされている。

遊水部を有する直立消波護岸の消波機構については、種々の検討<sup>1)</sup>がなされている。すなわち、入射波周期に対し最良の消波効果を示す最適遊水部幅が存在し、谷本ら<sup>2)</sup>の模型実験によれば、全遊水幅-波長比が0.15～0.20で反射率が極小値となるとされている。また、縦スリット式ケーソン護岸の前面開口比について、合田ら<sup>3)</sup>は0.2前後で最も消波効果が良く、越波流量も小さいことから最適開口比と判断している。さらに、井島ら<sup>4)</sup>が遊水部をもつ多孔壁護岸について検討した結果では、全

遊水部幅-波長比が0.14、多孔壁空隙率は0.22、孔径を波高と同程度にした時に最も消波効果が良かったとしている。一方、直立消波護岸の越波特性については、合田ら<sup>3)</sup>は、パラペットを後退させることにより所要天端高を通常の消波護岸程度に低減できるとしている。消波護岸のエアレーション効果についての検討例は少なく、消波区間の溶存酸素の復帰を測定しこの復帰濃度を既知量として沖側への拡散を考える手法<sup>5), 6)</sup>、進行波もしくは重複波による水表面からの溶解速度の測定例<sup>7), 8)</sup>などがある程度である。直立消波護岸を対象とした例は現在のところ見当たらない。

本資料は、こうした直立消波護岸の特性について神戸市より委託を受けた実験を基に、更に追補実験を加えてとりまとめたものである。対象とした護岸は、垂水地区で使用が検討されているスリット式直立消波護岸である。この護岸構造案について消波スリット部および上部パラペット構造の設計に資することを目的として、消波効果、越波特性、エアレーション効果の3観点から評価検討を試みた。従って実験は、消波効果を測定する反射率実験、

\* 海洋水利部 海水浄化研究室

\*\* 海洋水利部 波浪研究室

越波量を測定する越波実験，エアレーション効果を比較する曝気実験，の3種類より構成されており，それぞれ実験方法，施設および測定機器を異にする。

反射率実験は，スリット部の形状の影響を調べることを目的として，スリットの太さ，横さんの有無などの条件を変えた12の断面について不規則波を用いて検討した。越波実験では，護岸上部の構造について，波返しパラペットの位置，高さ，遊歩階段の有無の各条件を変えた12の断面について不規則波を用いて検討した。曝気実験では，護岸形式として，直立壁護岸，スリット式消波護岸，異形ブロックを前面に積んだ消波護岸，自然海浜（1/30斜面）の4形式について規則波を用いて比較した。限られた条件の下での実験ではあるが，その中で明らかになったことをまとめた。

## 2. 実験条件

### 2.1 自然条件

神戸市垂水地区は，明石海峡の東側に位置し淡路島を南西に望む位置にある（図-1）。

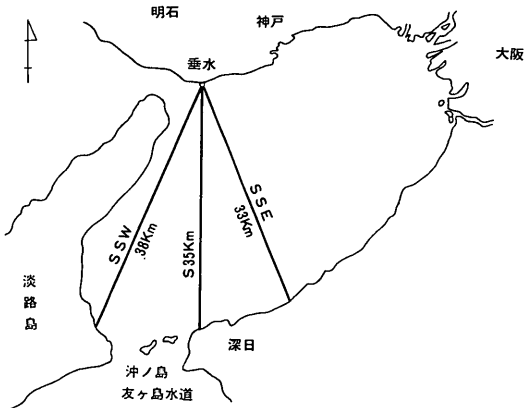


図-1 垂水地区の位置および吹送距離

この地区に対するフェッチは，友ヶ島水道方面からのSSWが最長である。神戸市の資料によれば，通常時化時の波として有義波周期4秒，有義波波高1.2mの値が推算されている。また同資料によれば，極度の暴風気象時の波として有義波周期8秒，有義波波高4.6mとの値が出されている。隣接の神戸港沖での波浪観測記録<sup>9)</sup>によれば，夏期・冬期ともに周期3～4秒，波高0.25～0.5mの波が卓越しており，年間の平均有義波周期3.6秒，平均有義波波高0.38mとされている。

護岸の設置が検討されている地点は，水深T.P.-8～-9.5m程度で，沖合に-5～-6mの浅瀬がある。

設計に際しての潮位諸元は，L.W.L.はT.P.-0.6m，H.W.L.はT.P.+0.6mであり，H.H.W.L.としてT.P.+2.8mの値が用いられている。

### 2.2 護岸構造の条件

護岸断面案として検討したものは，図-2，3のような形状のスリット式消波護岸である。スリット部の幅は1.5mで，その背後に更に3.5m幅の遊水区間がある。スリット間の開口部間隔は0.4mであり，底面からT.P.-3.0mまで脚壁があってその上にT.P.+2.0mまでの5mの高さのスリット部が設けられており，途中に2か所厚さ0.3mの横さんがある。図-3に見られるように，厚さ3mのマウンド上に設置されるケーソン形式の護岸である。波返しパラペットは，ケーソン前面より1.0m後退した位置に天端高T.P.+7.5m程度のものとして置かれ，遊歩階段は1ステップ0.5m高，幅1.5m程度の2ステップ型のもが考えられている。

この案のうち，スリット柱部の太さ，横さんの有無，脚壁の有無，更にパラペットの後退距離，天端高，階段の有無などについて設計諸元値の検討を模型実験により行った。

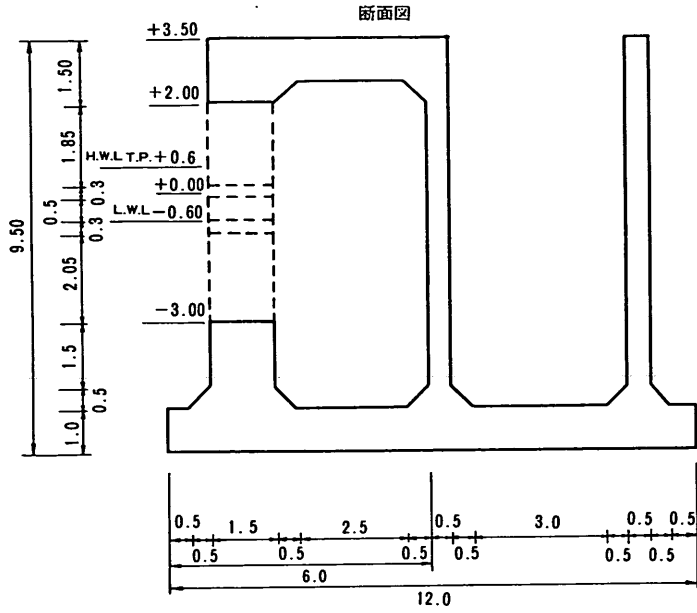


図-2 ケーソン設計案

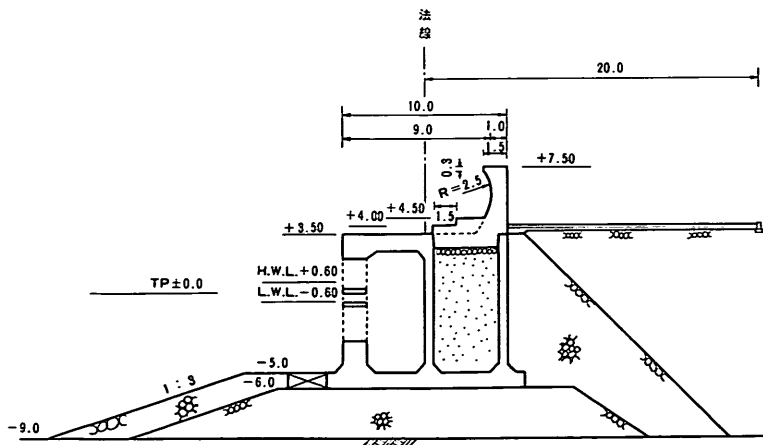


図-3 護岸標準断面案(単位:m)

### 3. 反射率実験

#### 3.1 目的および実験方法

反射率実験では、護岸前面のスリット部形状を変えた時の消波効果を比較検討した。スリット間開口部幅0.4mに対しスリット柱太さ0.8m, 1.0m, 1.2mの3種、脚壁の有無、横さんの有無の計12の形状(図-4)を検討対象とした。図-4のように、スリット柱太さの変化は名目開口比として25%, 29%, 33%に相当する。また脚壁が有る時のスリット長は5m, 無い時には6.5mとなる。

スリット部平面図 (3ケース)

名目開口比 開口部幅: 柱の太さ	スリット部形状
25% (1:3)	
29% (1:2.5)	
33% (1:2)	

スリット部立面図 (4ケース)

脚壁	横さん	無	有
無	無		
有	有		

図-4 スリット部形状12ケース(単位:m)

実験は図-5に示す全長30mのブロック積水路のうち幅60cmに区切った小水路部を使用し、不規則波を用いて実施した。模型縮尺は1/15とし、水平な水路床に砕石マウンドを敷きその上に木製護岸模型を据えた。こ

の護岸模型は、水路幅にあわせた幅60cm,長さ100cmのもので、前面スリット部が木ネジと押え板の組合せで相互に交換できるようになっている。

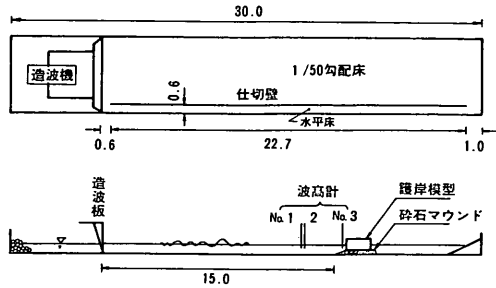


図-5 30m不規則波水路図(単位:m)

潮位は、現地換算でT.P.±0.0m, T.P.-0.6m, T.P.+0.6mの3種類(模型水深で60cm, 56cm, 64cm)についてそれぞれ12ケースのスリット部形状を使用し、反射率を測定した。用いた波は、現地換算値で有義波周期4秒,有義波波高1.2m(模型で1.03秒, 8cm)の不規則波である。またT.P.±0.0mの潮位について、同一波形勾配( $H_{1/3}/L_0$ )で周期のみを3~5秒に変えた時の反射率の変化を、規則波および不規則波を用いて測定した。更に同一周期について波高を変えた時の反射率についても測定した。

実験波は、入力信号波形に追従して運動する低慣性電動機駆動のピストン型造波機により発生させた。入力信号として、規則波は超低周波発振器による正弦波波形を用いた。不規則波は、図-6-aのブロック図の方式で

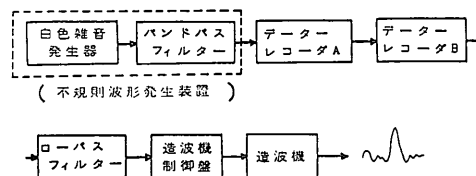


図-6-a 不規則波発生方法ブロック図

発生させた波形を用いた。この方式は、まず白色雑音を発生させ、これを10チャンネルのバンドパスフィルターに通し所与のスペクトル形状となるように修正するもので、この電気信号を一度データレコーダ-Aに記録し、周波数をテープ再生速度の変換により修正し、データレコーダ-Bに記録する。実験に際しては、データレコーダ-Bによりこの記録を再生し、高周波ノイズをカットするローパスフィルターを介して造波機へ入力し、所定の波を造波することになる。

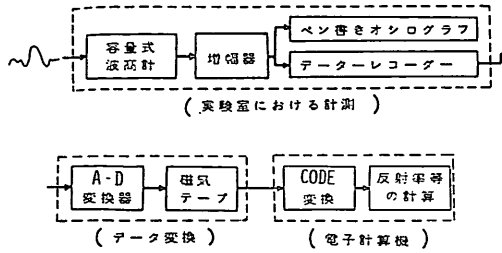


図-6-b 不規則波波形記録・解析ブロック図

入射波高の推定、反射率の算定については、不規則波に対する入・反射波の分離推定法<sup>10)</sup>による。規則波に対してもこの方法により反射率、入・反射波の算定を行った。この方法は、2測点での同時波形記録をフーリエ級数展開し、入射波と反射波のスペクトルを推定する方法である。この推定法を用いるにあたり、ここでは2測点間隔  $d_l$  を 20cm に固定し、周波数  $f$  の有効推定範

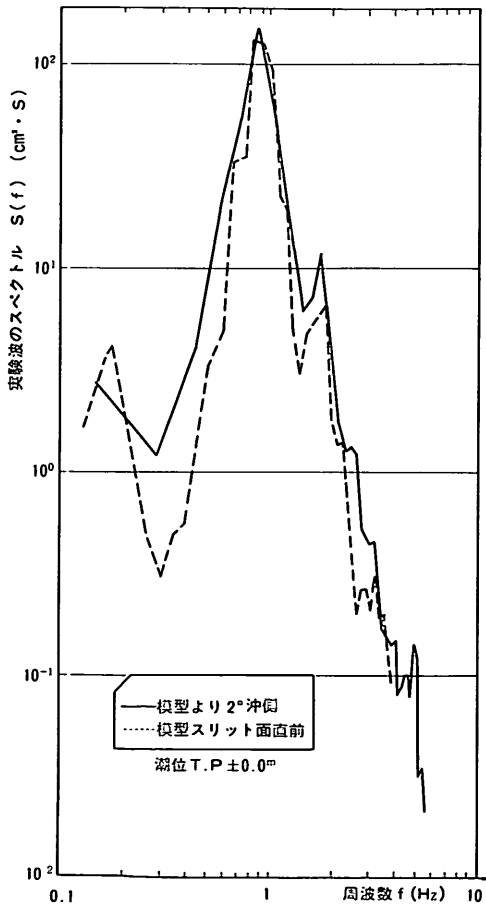


図-7 波形記録のスペクトル例

囲を 0.6~1.7 Hz に設定した。波形測定には容量式波高計を用い、入・反射波分離用の2台を模型マウンド法より 2m 沖の位置に、波のひずみ等のチェック用の1台を模型直前 10cm の位置にそれぞれ設置した。これら3台の波高計の波形記録は、図-6-b のブロック図の方法で解析処理された。

不規則波の実験では、対象波ごとに、3つの相異なる波列の発生波について行った。各波列は約 200 波を含む長さである。1波列の波形記録ごとに波高、周期、反射率等を算定し、3波列分の算定値各3個の平均値をもって対象波に対するデータとして使用した。波高計の波形記録のスペクトル例を、図-7 に示す。

### 3.2 反射率の実験結果

実験の結果はすべて本資料末尾に付表 1~3 としてまとめて記載した。これらのデータのうち、各潮位毎に 12 形状の反射率をプロットしたのが図-8-a~c の3枚の図である。これらは横軸に名目開口比をとり縦軸に反射率をとったもので、各開口比に対し横さんの有無、

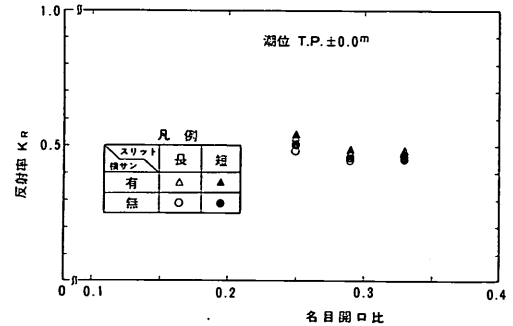


図-8-a 護岸形状と反射率との関係 (T.P. ± 0.0m)

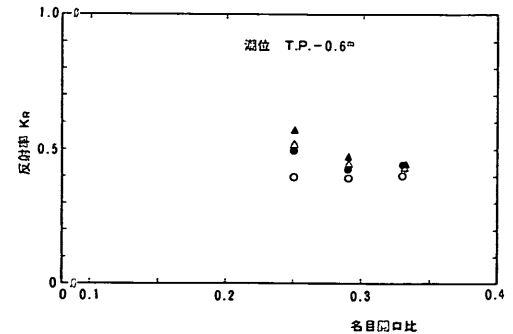
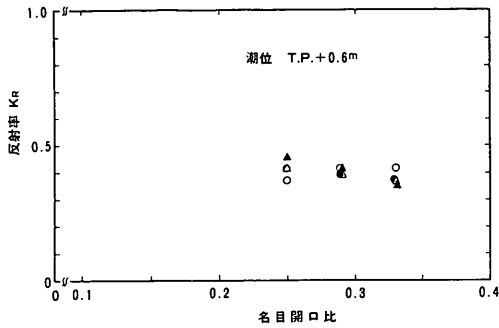


図-8-b 護岸形状と反射率との関係 (T.P. - 0.6m)





図一八-c 護岸形状と反射率との関係  
(T.P. + 0.6 m)

脚壁の有無(スリット長の長短)による4ケースの値がプロットしてある。実験値にややばらつきが見られるが、反射率は0.35~0.57の範囲におさまっている。

横さんが無く、かつ脚壁も無(スリット長・長)い場合のケースを除けば、開口比0.25は他の開口比より消波効果が悪化している。横さんを有する構造では、いずれの潮位でも開口比が大きいほど消波効果が良い傾向がある。

脚壁の有無によってスリット長が変化する事の影響については、潮位の低いT.P. - 0.6 mの場合に明瞭となり、いずれのスリット形状についても、脚壁が有りスリット長が短くなると脚壁での反射の影響で消波効果が悪くなる。

これらの3潮位各12形状計36ケースの反射率を比較したのが表一1である。この表は、12のスリット形状について、各潮位別に反射率が0.4以下であれば二重丸、0.5以下であれば丸を付してまとめたものである。二重丸を有する構造は7形状あり、中でも、開口比0.25、横さんなし、脚壁なしのケースが最も消波効果が良い。横さんを有する断面では開口比0.33で消波効果が良い。

表一1 スリット形状12ケースの反射率比較表

No.	スリット形状			T. P. - 0.6m		T. P. ±0.0m		T. P. + 0.6m	
	横さん	開口比	脚壁	反射率区分		0.4以下	0.5以下	0.4以下	0.5以下
				0.4以下	0.5以下				
1	なし	25%	無	◎	○		○	◎	○
2		25%	有		○				○
3		29%	無	◎	○		○		○
4		29%	有		○		○	◎	○
5		33%	無		○		○		○
6		33%	有		○		○	◎	○
7	あり	25%	無					◎	○
8		25%	有						○
9		29%	無		○		○		○
10		29%	有		○		○		○
11		33%	無		○		○	◎	○
12		33%	有		○		○	◎	○

同一形状での潮位による反射率の変化の傾向は、はっきりしないが、T.P. + 0.6 m, T.P. - 0.6 mに比してT.P. ± 0.0 mでやや高めの値となっている。

次に、この消波護岸断面の周期に対する消波特性を調べた。この際は波形勾配を0.04もしくは0.05とはほぼ一定に保ち、周期3~5秒(模型で0.77~1.29秒)の波を作用させた。このデータから反射率を比較したのが図一9である。不規則波による実験データは、波形勾配の平均が0.043、規則波では同じく0.049であった。潮位はT.P. ± 0.0 m、スリット形状は開口比0.33

横さんあり脚壁ありという形式を用いた。図一9によると、周期の長い波に対しては消波効果が良く、周期が短くなると反射率が高くなる傾向がうかがえる。最小の反射率を与える遊水部幅一波長比は0.15もしくはそれ以下の値であり周期として4.8~5.0秒付近の波に相当する。最小の反射率の値が、他の実験例に見られる値よりもやや大きく不規則波で0.4程度であるが、これは種々の周期成分を含んだ不規則波での実験による影響の他に、比水深(波高に対する水深の比)が大きく波が砕けにくい条件であることなども原因と思われる。

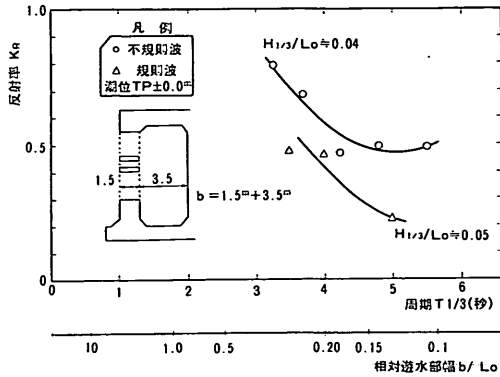


図-9 反射率の周期特性

また、同一周期の波の場合、波高の変化により反射率がどのように変化するか調べたのが図-10である。これは周期4.3秒の不規則波を用い、潮位、スリット形状は図-9と同じものを使って行ったものである。この

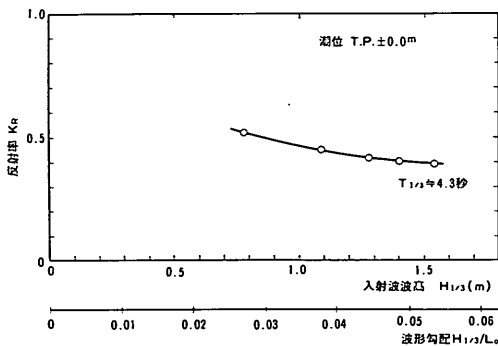


図-10 波高による反射率の変化

図によると、入射波波高が大きくなり波形勾配が大きくなると反射率が下る傾向がみられる。不規則波を用いた実験では解析波列や解析サンプル区間の相異で、同一目標波高に対し有義波波高の測定値が若干ずれる時がある。入射波波高1.2mのまわりで10cmの波高変化に対して、反射率は0.44のまわりに0.02程度(約5%程度)増減していることがわかる。反射率の相互比較の際の誤差範囲の一つの目安となろう。

### 3.3 反射率に関する結論

1). 検討対象のスリット形状案12ケースは、いずれも反射率がおおむね0.4~0.5の範囲の値である。これら形状案の中では、開口比0.25、横さんなし、脚壁なし(スリット長6.5m)、の形式が最も消波効果が良い。なお脚壁は、水位が低下した時に消波効果の悪化をまねく。

2). 同一波形勾配の波では、周期5秒前後の波のとき

に消波効果が良く、同一周期の波に対しては、波高が大きく、波形勾配の大きい波ほど消波効果が良い。

## 4. 越波実験

### 4.1 目的および実験方法

護岸の上部構造について越波流量の観点から比較検討を行ったものである。上部構造のうち、波返しパラペットの後退位置(スリット部前面より8m後退、10m後退の2種類)、同パラペットの天端高(T.P.+7.0m, T.P.+7.5m, T.P.+8.0mの3種類)、およびパラペット前面の遊歩階段(高さ0.5m×2ステップ)の有無、の組合せでできる12ケースの断面を対象とした(図-11)。

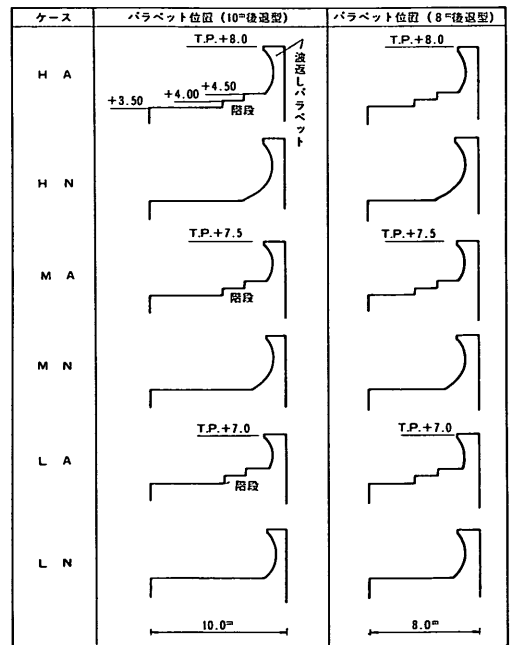


図-11 上部構造断面形状12ケース

実験は、反射率実験と同一の水路において不規則波を用い、縮尺1/25で実施した。

実験に用いた潮位は現地設計潮位H.H.W.L.としてT.P.+2.8mを用い、現地換算で有義波周期9秒、有義波波高4m(模型で1.8秒、16cm)の波を作用させ、対象断面12ケースの越波量を測定した。また一部の断面について、潮位、波浪の条件を変えて越波量の変化を測定した。

実験に用いた不規則波は、反射率実験と同様の方法で作成した。越波量は、図-12のように波返しパラペッ

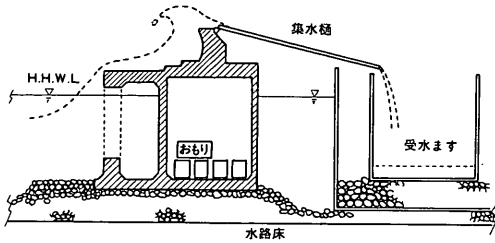


図-12 越波量測定方法

トに集水樋をかけ、パラペット天端を越えた水をすべて集め受水ますに入れ、ここに集まった水量をメスシリンダーにて計量した。同時にストップウォッチで、越波の開始した時刻より造波を終了するまでの時間を測定し、造波機が停止した瞬間に水路幅に合わせたしゃへい板でパラペット上をしゃへいし、それ以後の波による越波を集水樋へ導びかないようにした。越波した水量の計量結果は、その計測時間、模型幅で割り、縮尺の補正を施し、現地換算値として単位時間、単位護岸幅当りの平均越波流量  $q$  ( $m^3/m \cdot s$ ) を算出した。反射率実験と同様に、実験は波形の異なる不規則波3波列の繰り返し測定であ

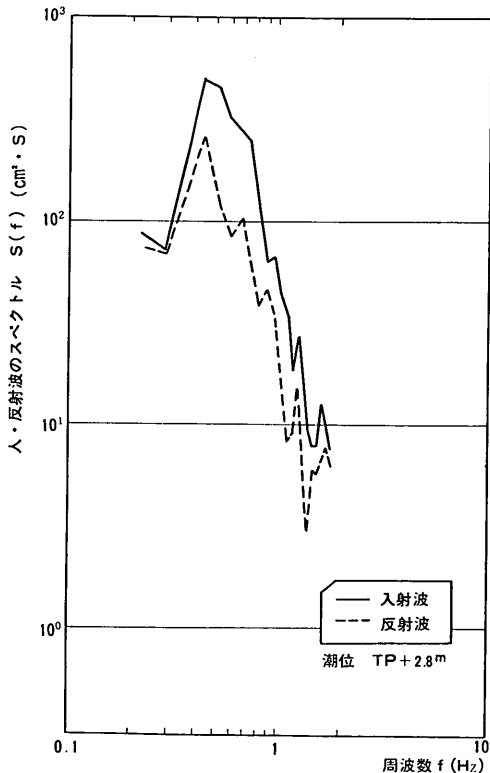


図-13 越波実験 分離入・反射波スペクトル例

り、各測定毎の越波水量の合計を各計測時間の和で割って平均し、これより対象断面に対する越波流量の実験データを算定した。計測時間は、おおむね1波列3分前後であり約250波程度を含んでいるので、実験結果はこの3回分計750波程度に対する平均越波流量であり、現地で約2時間程度の継続時間に対する平均に相当する。越波流量の測定と同時に、入射波波高、反射率についても測定した。波形記録の解析は反射率実験と同様の方法により行った。越波実験に用いた不規則波の入射波スペクトルおよび反射波スペクトルの分離算定例を図-13に示す。

使用した模型(縮尺1/25)は、木ネジと調整板によりパラペット位置、高さを変化させることができ、階段の取り付けができるものである。模型と水路壁、模型と集水樋などのすき間は、反射率実験と同様に必要に応じて油粘土で埋めた。

#### 4.2 越波実験結果

上部構造断面に対する越波流量  $q$  の変化をプロットしたのが図-14である。図-14には、横軸に波返しパラペットの天端高(T.P.+7.0m~+8.0m)をとり、

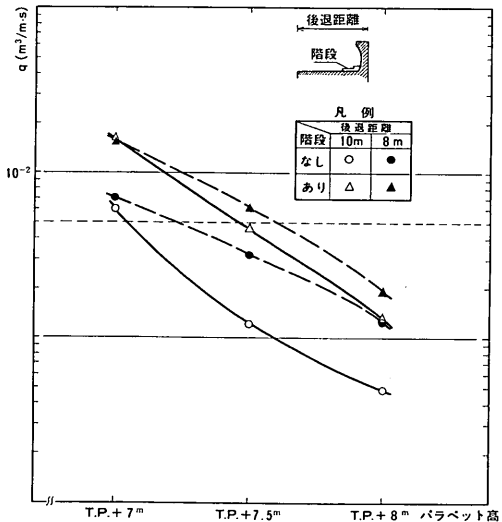


図-14 上部構造断面形状による越波流量の変化

縦軸に平均越波流量  $q$  をとってある。各天端高に対し、パラペット位置、階段の有無について4ケースずつプロットされている。この図を見ると、パラペット天端高が高くなる程越波流量  $q$  は小さくなる。特にパラペット位置が護岸前面より10m後退した階段のない断面で、 $q$  の減少が著しい。天端高が低い時は、パラペット位置を少々後退させても  $q$  があまり減少せず、天端高が高くな

るにつれてパラペット位置による  $q$  の差異が大きくなる。階段を設けると、階段を設けない場合に対して  $q$  が大きく増加する。パラペット位置を 2 m 程度前進させるより、後退位置のパラペットに階段を付設する時の  $q$  の増加の方が大きい。これは、階段部分に波がのり上げ、天端高を見かけ上低下させるためと思われる。

図-14 にプロットされている点は、すべて H.H.W.L. (T.P. + 2.8 m) の潮位時の場合の値である。潮位がこれより低下した時の越波流量  $q$  の変化を図-15 に示す。これは、パラペット位置 10 m 後退型、パラペット天端高 T.P. + 7.0 m、階段ありの上部形状について、T.P. + 2 m、T.P. + 1.2 m と潮位を変えた時の結果

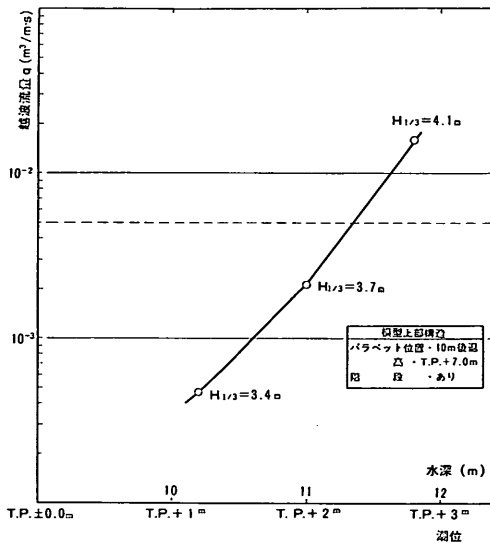


図-15 越波量におよぼす潮位の影響

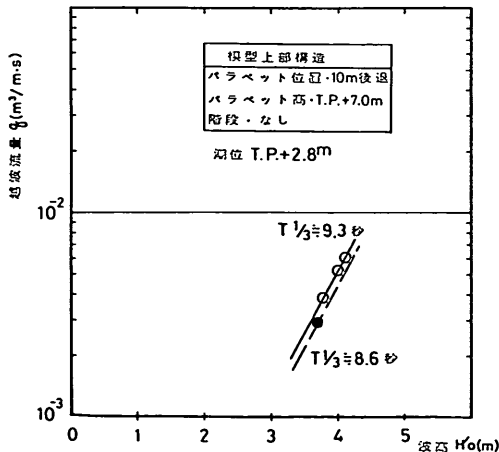


図-16 波高・周期と越波量との関係

である。使用した不規則波入力信号は、H.H.W.L. に用いたのと同じであったため、水深低下により発生入射波が若干低めの値になっている。水位の低下により  $q$  が大きく減少している。

また、周期を 8.6 ~ 9.3 秒に変えた時の越波流量  $q$  の変化を図-16 に示す。これはパラペット位置 10 m 後退型、パラペット天端高 T.P. + 7.0 m、階段なしの上部形状について T.P. + 2.8 m の潮位で行った時の結果である。波高の増大および周期の増大により越波流量が増加することがわかる。

図-14, 15 には、参考のために、 $q = 0.005$  (m³/m.s) の値の位置に破線を引いてある。

#### 4.3 越波量に関する結論

1). 暴風時の波浪を、有義波周期 9 秒、有義波波高 4 m とし、潮位を H.H.W.L. とした時、許容越波流量を  $0.005$  m³/m.s とすれば、護岸上部構造としては、

- a. 階段なしの場合に パラペット天端高を T.P. + 7.2 m 以上
- b. 階段ありの場合に パラペット 10 m 後退位置で天端高を T.P. + 7.5 m 以上  
パラペット 8 m 後退位置で天端高を T.P. + 7.6 m 以上

にする必要があると思われる。

波浪条件が、有義波周期 9 秒以下の場合、有義波波高 4 m 以下の場合、もしくは潮位が H.H.W.L. を下まわる場合には、上記の所要天端高がそれに応じて低減される。

## 5. 曝気実験

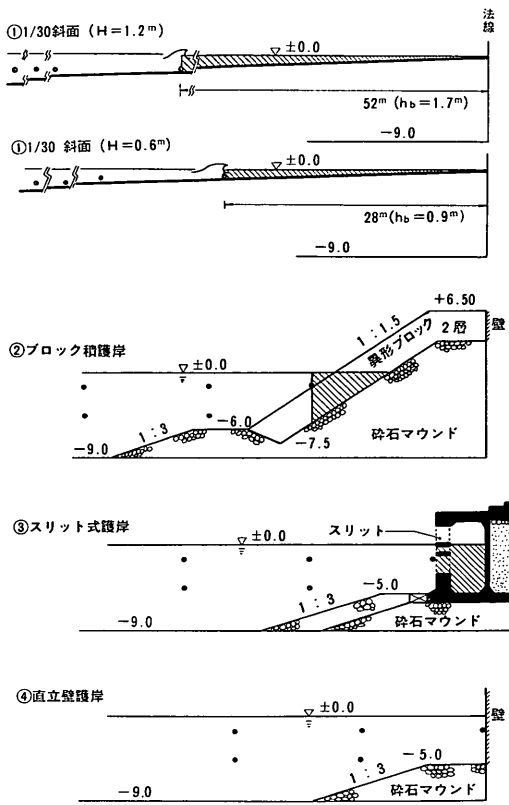
### 5.1 目的および実験方法

検討対象となっているスリット式直立消波護岸が、自然海浜、直立壁護岸、異形ブロックを並べたブロック積消波護岸に比して、どの程度のアエレーション効果を有するのか相対的に検討した。

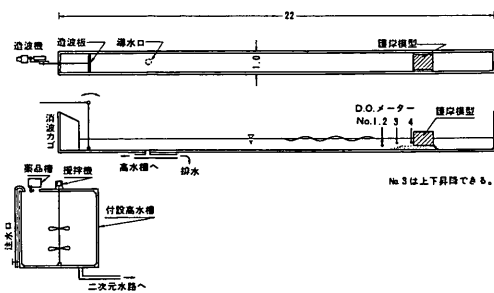
これら比較を行った護岸各断面は、図-17 に示すとおりである。自然海浜としては 1/30 斜面、ブロック積護岸としては 1 : 1.5 のマウンド上に異形ブロックを 2 層積にしたもの、スリット式護岸としては開口比 0.33、横さん付き、脚壁ありのスリット形状のもの、直立壁護岸はスリット式護岸のスリット部を直立壁としたものとした。

実験は図-18 に示す長さ 2.2 m、幅 1 m、高さ 2 m の鈔製一部強化ガラス製の二次元水路にて、規則波を用いて行った。縮尺は 1/15 とし、斜面模型はステンレス

製骨組に耐水ベニヤ板をビス止めし水路側壁との境界をシールしたものをを用いた。ブロック積護岸は、碎石と異形ブロック模型（重量約1.9kgf）を用いて作成した。こ



図一 17 曝気実験 模型断面図(●印 溶存酸素計センサー位置)



図一 18 曝気実験 2.2m規則波水路

のブロックは現地換算で約6.5tfのものに相当する。スリット式護岸は、反射率実験に用いた模型（幅60cm）に、同型の模型（幅40cm）を並べてマウンド上に設置し使用した。直立壁護岸は、スリット式護岸のスリット部にベニヤ板を打ちつけて使用した。いずれの護岸模型

でも、マウンド部は径2cm程度の碎石を用い、マウンド部および護岸側面などより後背部との水の流通が行われないように、ビニールシート、シリコン樹脂等により水密性を保った。

実験に用いた水深は60cmで、これはT.P.±0.0mの潮位の際の水深に相当する。用いた波は、現地換算で周期4秒、波高0.6mおよび1.2m（模型で1.03秒、4cm、8cm）の2種で、フラップ式の造波装置により発生させた。一部の断面では更に周期、波高を変えて行った。造波装置の振幅を決める偏心板偏心量 $e$ は、対象模型設置後に段階的に $e$ を変化させて水路内の波高を測定し、入・反射波の分離手法によって入射波高を各々推定し、この結果から所与の入射波高になる $e$ を内捜により決めた。なお、入・反射波の分離推定は、第3章反射率実験で用いた手法と同一の手法である。

曝気能は、通常、溶存酸素不足水が溶存酸素濃度を回復させる速度として評価される。溶存酸素の回復速度は次式のように書ける。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_2 \cdot (C_s - C) \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $C$ は溶存酸素濃度、 $t$ は時間、 $C_s$ は飽和溶存酸素濃度、 $k_2$ は回復速度を規定する再曝気係数である。更に、溶存酸素濃度回復のための酸素溶解量は、上式の両辺に溶解区間水体积を乗じて以下のように書ける。

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial t} \cdot V = k_2 \cdot V \cdot (C_s - C) \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 $m$ は溶解酸素量、 $V$ は水体积。この両辺を護岸長さで除せば、単位長さあたりの酸素溶解量となる。護岸を用いた曝気実験では、水路内を溶解酸素が沖へ向かって拡散してゆくために、酸素溶解区間においても(1)式が正確にはあてはまらない。また、 $k_2$ の相似律については不明点が多い。しかし、ここでは(1)式の成立を仮定し、(1)式の $k_2$ もしくは(2)式の $k_2 \cdot V$ を測定し、この値を指標として各ケースを比較する。

そこで実験方法としては、まず、二次元水路付設の高水槽にて薬品（無水亜硫酸ナトリウムおよび触媒として塩化コバルト）を用い、溶存酸素不足水を作る。高水槽内で攪拌混合し、均一濃度とした後バルブ操作により二次元水路内に導水し所定の水深とする。波を作用させる前の初期濃度は、溶存酸素濃度が負にならぬように1mg/l前後にすることが望ましい。二次元水路内数地点で初期濃度・水温を測定後、造波装置を駆動させ、消波もしくは砕波による溶存酸素の回復を4台の溶存酸素計

(Y.S.I. 社 57 型)により経時的に測定し、ペン書き記録器にて記録する。4 台のうち 1 台の溶存酸素センサーは、上・中層を上下できる昇降装置にて支持しており、また、他の 2 台のセンサーは同一断面位置に水深を変えて上層、中層に設置してあるため、溶存酸素の測定は図-17 に示すように 3 断面 5 地点で行える。ただし、1/30 斜面では、曝気点即ち砕波点付近での水深が浅いため、溶存酸素濃度の水深方向の分布を測定せず、4 断面 4 地点で測定を行う。同時に 2 台の容量式波高計にて波形記録をとり、入射波波高と反射率とを算定する。また、模型前面での染料の拡散状況を 16mm メモーションカメラで撮影し観察する。1 ケースについて波を作用させる時間は約 2~3 時間であり、1~3 時間(約 7000~10000 波)にわたって溶存酸素濃度を測定する。波の作用終了後水路内の水で溶存酸素飽和水を作成し、飽和溶存酸素濃度を測定する。

## 5.2 曝気実験結果

### 5.2.1 護岸断面形状による曝気能の比較

対象 4 断面について、現地換算周期 4 秒、波高 0.6 m および 1.2 m の波を作用させた時の曝気能を比較する。

1/30 斜面では、進行してきた波が砕波限界水深で空気を巻き込みながら砕波し、非常に乱れた砕波域を形成している。この砕波と、砕波点以浅での水表面の乱れによって酸素の溶解が引き起こされている。水深が浅く水体積が小さいため、深さ方向の混合も良い。ブロック積護岸、スリット式護岸の両断面では、0.6 m、1.2 m の波高では砕波現象は観察されない。前者では異形ブロックに波があたり、空隙を乱れながら水が進入し往復すること、後者ではスリット間隙を強い流れが往復すること、横さんから滝のように落下することなどにより乱れが発生し、酸素の溶解が引き起こされていると思われる。一方、直立壁設置時には、反射による重複波の形成が見られ、腹の部分で水粒子の一部が水表面から跳ね上る現象が見られる。波高の大きい時には、この跳上が著しく、跳上および直立壁部を水が濡らし落下することなどにより、水表面からの酸素溶解が引き起こされると思われる。各断面の実験時の反射率を表-2 に示す。ただし、直立壁護岸では、跳上が著しく、水路内の多重反射により波高が不安定となったため所定の波高が得られていない。

表-2 断面形状別の反射率一覧

護岸構造 波高	直立壁	スリット式 護岸	ブロック積 護岸	1/30 斜面
1.2 m	0.92	0.48	0.17	0.04
0.6 m	0.93	0.57	0.20	0.07

各実験毎の水温は、高水槽での攪拌混合により二次元水路内では一様とみなせ、実験相互間の変動は、17~14 °C の間におさまっている。

溶存酸素回復の速度の相互比較のため、次式により溶存酸素濃度、溶存酸素不足濃度を無次元化する。

$$C^* = \frac{C - C_0}{C_s - C_0} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$D^* = 1 - C^* = \frac{C_s - C}{C_s - C_0} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで  $C^*$ 、 $D^*$  はそれぞれ無次元溶存酸素濃度、無次元溶存酸素不足濃度である。これを既述の(1)式に代入し、

$$-\frac{\partial D^*}{\partial t} = k_2 \cdot D^* \quad \dots\dots\dots(5)$$

となる。これを  $t = 0$  のとき  $D^* = 1$  の初期条件により解けば、

$$-\ln D^* = k_2 \cdot t \quad \dots\dots\dots(6)$$

となり、従って  $-\ln D^*$  を時間に対してプロットした時の直線の傾きより、再曝気係数  $k_2$  を求めることができる。しかし、沖合への拡散が大きいと(1)式は厳密には成立せず、 $t$  に対して  $-\ln D^*$  をプロットしても直線にはならない。この場合(1)式は、拡散項を加え次のように書くべきである。

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = k_2 \cdot (C_s - C(x, t)) + K \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 $x$  は曝気点からの距離、 $K$  は溶存酸素の拡散を表わす拡散係数であり、溶存酸素濃度  $C$  は  $x$  と  $t$  の関数として考える。

ここでは、とりあえず(1)式の成立を前提に 4 断面の比較を行う。曝気点での  $C^*$  の経時変化をプロットしたのが図-19-a、b である。ここで時間軸は、波の周期  $T$  で無次元化した  $t/T$  としてあり、作用した波数値として表わしてある。また  $-\ln D^*$  を時間  $t/T$  に対してプロットしたのが図-20-a、b である。図-19 より、波高 1.2 m、0.6 m のいずれの場合においても、自然海浜に擬した 1/30 斜面での溶存酸素濃度回復の速さがうかがえる。また波高が大きいと、波高の小さい時に比べて回復が速いことがわかる。図-20 での直線の傾きは、直立壁護岸、スリット式護岸、ブロック積護岸の

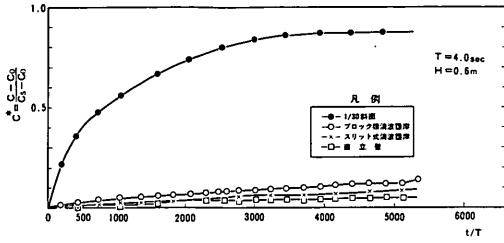


図-19-a 曝気点での溶存酸素の復帰  
 $T = 4$  秒,  $H = 0.6$  mの場合

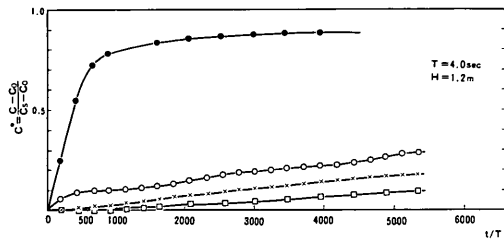


図-19-b 曝気点での溶存酸素の復帰  
 $T = 4$  秒,  $H = 1.2$  mの場合

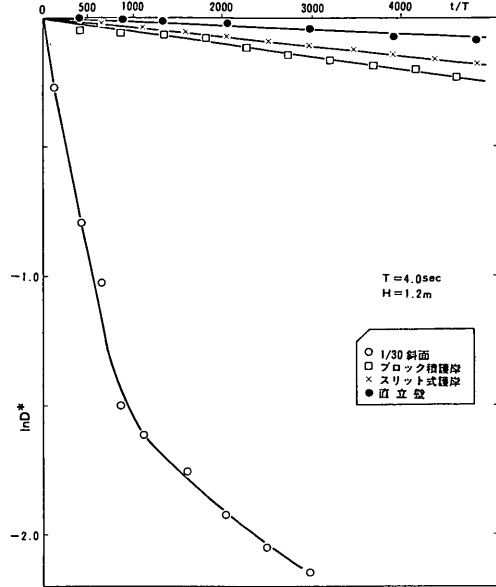


図-20-b 無次元酸素不足量-時間曲線  
 $T = 4$  秒,  $H = 1.2$  mの場合

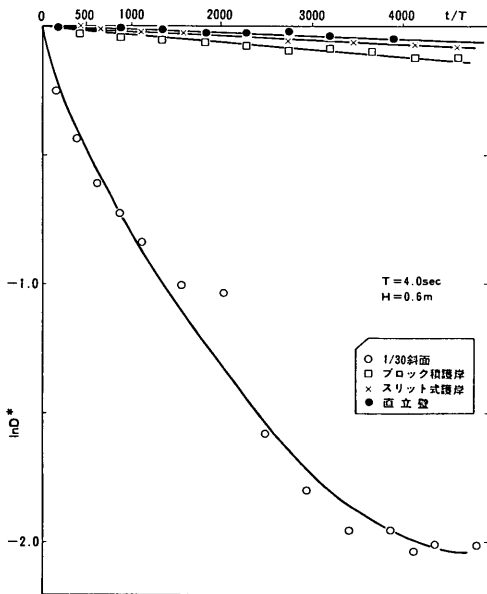


図-20-a 無次元酸素不足量-時間曲線  
 $T = 4$  秒,  $H = 0.6$  mの場合

順に大きくなり、1/30斜面で最も大きい。ここで1/30斜面では $-\ln D^*$ と $t/T$ とが直線にのらなくなってきた。このことは、図-19では、 $C^*$ が1に漸近せずにもっと低い濃度で上昇が頭打ちになっていることと対応

する。図-20-a, bより求めた $k_2$ を4断面についてまとめると表-3のようになる。1/30斜面での値は、 $t/T$ が0から500までの区間での傾きより求めたためやすとしての値である。表-3の値を比較すると、1/30斜面の値に対して直立壁で1%程度、スリット式護岸で2%、ブロック積護岸で3%程度の値となっている。

表-3 断面形状別の再曝気係数一欄  
 (eを底とし、1000波あたりの値)

護岸構造 波高	直立壁	スリット式 護岸	ブロック積 護岸	1/30斜面
1.2 m	0.015	0.037	0.050	1.89
0.6 m	0.014	0.017	0.030	0.946

表-4 断面形状別の曝気区間体積  
 (静水時体積  $m^3/m$ )

護岸構造 波高	直立壁	スリット式 護岸	ブロック積 護岸	1/30斜面
1.2 m	—	25	23	45 ( $h_b = 1.7m$ )
0.6 m	—			13 ( $h_b = 0.9m$ )

酸素溶解のメカニズムの異なる直立壁を除き、他の3断面について曝気区間体積を算定すると表-4のように

なる。ここでは、曝気区間として便宜的に、曝気点溶存酸素濃度を測定した溶存酸素計センサーの設置点以浅の断面積（図-17の斜線部分）として算定した。曝気区間体積は、算定体積を護岸の単位延長で除した $m^3/m$ の単位で表わす。各断面各波高に対して求めた $k_2$ に、この区間体積 $V$ を乗じた値の比を、スリット式護岸波高1.2mの値を基準にして相対的に表わしたものが表-5である。表-5により、酸素溶解量の相対比較ができる。波

表-5 断面形状別の酸素溶解量比

護岸構造 波高	直立壁	スリット式護岸	ブロック積護岸	1/30斜面
1.2 m	—	1	1.2	9.0
0.6 m	—	0.5	0.75	1.3

高が小さいと、どの断面も溶解量が減少する。波高0.6mのとき、1/30斜面はスリット式護岸，ブロック積護

岸に比して20倍前後の溶解量があり、波高が大きくなるとこの比は更に大きくなる。スリット式、ブロック積の両消波護岸を比較すると、この波の条件では約2~5割程度ブロック積護岸の方が大きい。

次に、沖合の溶存酸素濃度の回復も含めて考えてみる。溶存酸素濃度 $C^*$ の沖側への分布状態を比較すると図-21のようになる。ここには、波高0.6mの波の作用開始後4000波目（模型で約70分後）の $C^*$ 分布を示してある。直立壁護岸は、他の2護岸形式に比して著しく曝気能が低く、一方、スリット式護岸では表層を沖へ向かう溶存酸素の強い移送があることがわかる。曝気点付近での染料拡散を16mmフィルムより解析しても同様な水の動きが見られる。図-22には、波高1.2mの波に対して、模型上で10秒毎（現地換算で約38秒毎）の拡散状況を描いたものである。波の位相はそろっていない。これにより、1/30斜面での上下の混合の良さ、スリット式護岸での表層の沖向きの流れなどがわかる。

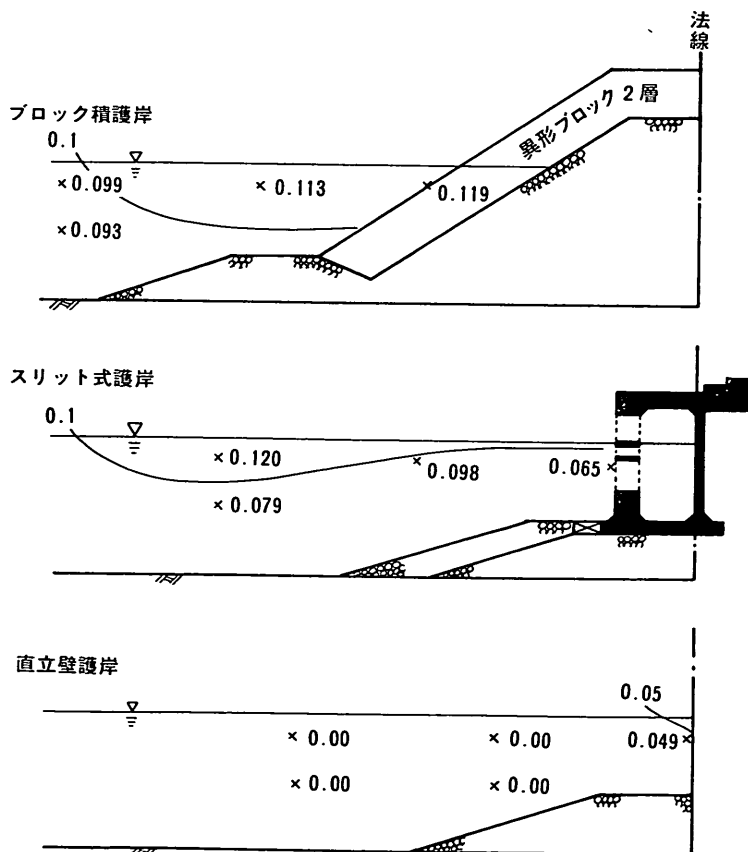


図-21 無次元酸素濃度の断面分布図 ( $H = 0.6 m$   $t/T = 4000$ の場合)



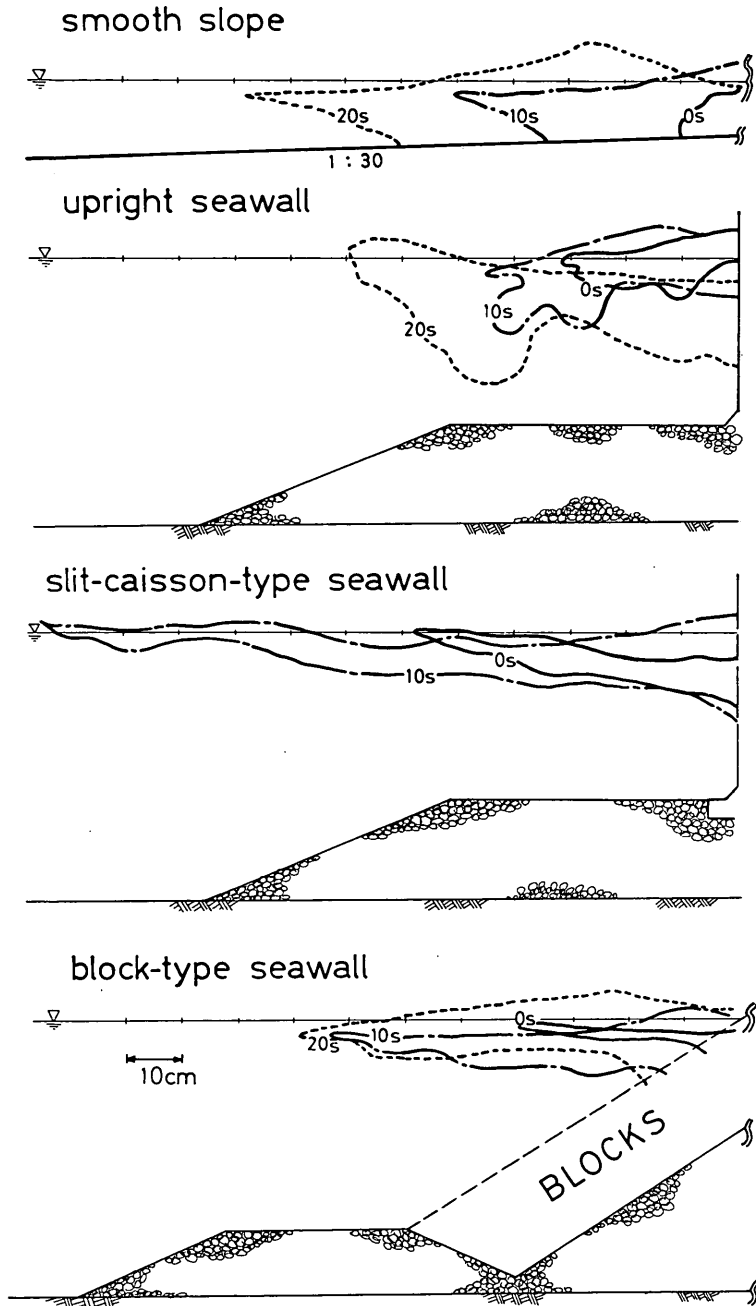


図-22 染料拡散図 ( $H = 1.2\text{ m}$ の場合)

(1)式で省略した拡散項を、 $C^*$ の分布や染料拡散の観察から評価すると、直立壁護岸に対して消波護岸の曝気能は、表-3に見積られた $k_2$ の差以上に大きいものと思われる。

#### 5.2.2 曝気能の特性

(1)式により算定した再曝気係数 $k_2$ は、作用する波の条件とどのような関係にあるのかを調べた。

4断面について $k_2$ をまとめた表-3を見ると、曝気メカニズムを異にする直立壁を除いて、他の3断面では

入射波高が大きいと  $k_2$  が増加することがわかる。また、4断面について、曝気実験時に測定した反射率は表-2の如くであり、これと  $k_2$  値とを比較すると、同一入射波高に対して反射率が小さいほど  $k_2$  が大きくなる傾向がわかる。

更に、ブロック積護岸を対象に波高を変えた場合、スリット式護岸を対象に周期を5秒にし反射率を低くした場合について実験を行った。それぞれの波高、反射率、再曝気係数は、本文末尾の付表-5にまとめてある。

$-\ln D^* - t$  図より求めた  $k_2$  を、前節での実験データも含め入射波高に対しプロットすると、図-23のようになる。波高が大きいと  $k_2$  が増加し、波高の小さい部分

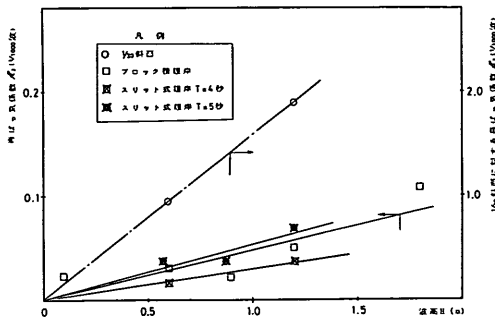


図-23 波高による再曝気係数の変化

では  $k_2$  が 0.015 付近より小さくならない。波高の小さい部分では、水表面付近の波動による乱れに比して、沖側への拡散が小さく、測点付近でのみ酸素濃度の回復がはかられた等の理由が考えられる。

更に、碎波もしくは消波による1波長あたりのエネルギー逸散  $E_d$  を次式で仮定し、この右辺の値と  $k_2$  とをプ

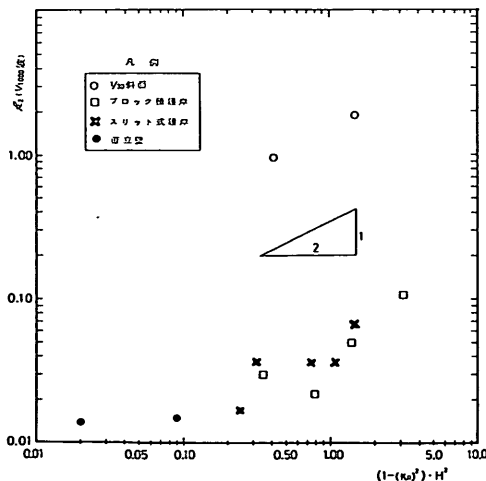


図-24 エネルギー逸散量と再曝気係数との関係

ロットしたのが図-24である。

$$E_d \propto [1 - (K_R)^2] \cdot H^2 \quad \dots\dots\dots(8)$$

この図より、1/30 斜面、両消波護岸では(8)式で仮定したエネルギー逸散量  $E_d$  が大きくなると、再曝気係数  $k_2$  も増大していることがわかる。 $k_2$  は、 $E_d$  の  $1 \sim 1/2$  乗にはほぼ比例し、同一のエネルギー逸散量に対しては、斜面での  $k_2$  が、消波護岸の  $k_2$  に比べて大きく、逸散メカニズムの差と推察されるが、データが少なくはっきりしない。

### 5.3 曝気実験に関する結論

今回対象とした2つの消波護岸(ブロック積護岸・スリット式直立消波護岸)は、1/30 斜面、直立壁護岸と比べ、反射率、曝気能ともにその中間に位置している。両消波護岸は直立壁護岸より大きい1/30 斜面よりはかなり小さい曝気能を有している。

2つの消波護岸を相互比較してみると、マウンドの大きさ、長さ、などのちがひもあり、周期4秒の波に対してはブロック積護岸の方がやや大きな曝気能をもっている。スリット式護岸でも入射波周期が変わり、反射率が低くなると、ブロック積護岸と同程度の曝気能をもつ。

曝気能は、波のエネルギー逸散量と深く関係していると思われる。

## 6. まとめ

縦スリット式直立消波護岸について、限定された条件の下で、消波効果、越波特性、曝気能の観点から模型実験を行った。その結果、対象とした護岸構造に対して以下の事項が明らかになった。

1. 反射率実験より、スリットの検討対象形状では、いずれもほぼ 0.4 ~ 0.5 の範囲の反射率が得られ、4 ~ 5.5 秒の比較的長い周期の波について消波効果が大きい。スリット形状としては、横さんを設けないならば開口比 25%、横さんを設けるならば開口比 33% 程度のものが良い。脚壁を設けスリット長を短くすると、潮位の低い時に反射率が大きくなる。
2. 越波実験は、H・H・W・L. の潮位、周期  $T_{1/3} = 9$  秒、波高  $H_{1/3} = 4.0$  m の条件で行い、許容越波流量を  $0.005 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  と設定すれば、波返しパラペット高を T.P.+7.5m 以上とすれば良い。ただし、遊歩階段を前面に設けるならば、パラペットを護岸前面より 10 m 後退させる必要がある。
3. 曝気実験では、直立壁護岸、斜面海浜を含め 4 断面形状について比較した。ブロック積消波護岸、スリッ

ト式直立消波護岸は、直立壁護岸よりも大きな曝気能がある。曝気能は、入射波高、反射率などに規定されていると思われる。

曝気実験そのものは、新しい試みであり実験方法、解析方法などに改善の余地が残されている。今後、以下の各点について検討する必要があると思われる。

1. (7式)による評価法を確立する。
  2.  $k_2$  と関係する波の条件を明らかにする。特に波の逸散エネルギーとの関係を明らかにする。
  3.  $k_2$  を模型実験で評価することに対する相似律の検討、現場波浪条件に対応する模型での波の諸元の決定方法の検討をすすめる。
  4.  $k_2$  に対する水温、塩分の影響を明らかにする。
- 富栄養化した閉鎖性水域では、夏期成層時に底層部に貧酸素水塊が出現しやすくなる<sup>11)</sup>。こうした海域に対する水質改善の寄与効果を考慮するならば、前面水域底部へ曝気水が流入する構造を検討することも肝要である。海域の自浄能力との結びつきも含めて、曝気能に対する水質上の意味づけや、曝気護岸の活用方法についても今後配慮すべき課題である。

本実験をすすめるにあたり、神戸市開発局より護岸模型の提供を受けた他、現地波浪条件、護岸設計案図面などの資料提供を受けた。関係諸氏に深く感謝いたします。佐藤昭二港湾技術研究所次長には、曝気実験の進め方について助言と御指導をいただいた。合田良実海洋水理部長および高山知司波浪研究室長には、特に不規則波を用いた反射率・越波実験について、堀江毅海水浄化研究室長には実験全般のとりまとめについて、それぞれ親切な指導をいただいた。企画室および波浪研究室各位には、実験を進める上で様々の便宜を計っていただいた。ここに記して深く感謝いたします。なお波形データーのデジタル変換には水理研究室高速データー処理装置を、入・反射波の分離計算には当研究所計算センターの電子計算機(TOSBAC-5600)を用いた。

(1978年11月30日受付)

## 参考文献

- 1) 井島武士ほか：遊水部をもつ直立消波防波堤と護岸、第19回海岸工学講演会論文集、1972年、pp. 185~192。
- 2) 谷本勝利ほか：各種ケーソン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験、港湾技研資料No. 246、1976年9月
- 3) 合田良実・岸良安治：不規則波による低天端型護岸の越波特性実験、港湾技研資料No. 242、1976年9月
- 4) 井島武士・奥蘭英明：遊水部をもつ護岸における透過壁の厚さと空隙率について、九大工学集報、第50巻第4号、昭和52年8月、pp. 397~401。
- 5) 高 隆二・木村 弘・田川昌宏：曝気護岸への予察、第21回海岸工学講演会論文集、1974年、pp. 273~279。
- 6) 日本テトラポッド(株)：東京港中央防波堤沖等の人工海浜調査(その2)報告書、昭和51年3月、pp. 33~55。
- 7) 井本久仁吉・細井正延：溶存酸素量におよぼす波浪の影響および海岸構造物との関連性について、名古屋工業大学学報 第29巻、1977年、pp. 447~453。
- 8) 細井由彦・住友 恒・岩井重久：波動水面からの酸素吸収に関する研究、第13回衛生工学研究討論会、1977年1月、pp. 25~30。
- 9) 高橋智晴・佐々木 徹・広瀬宗一：波浪に関する拠点観測年報(昭和51年)、港湾技研資料No. 282、1977年3月、pp. 205~215。
- 10) 合田良実ほか：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9月
- 11) 堀江 毅・細川恭史・三好英一：海水のA.G.P.試験法とその適用、港湾技術研究所報告、第17巻第2号、1978年6月、pp. 49~80。

## 主要記号一欄表

$b$	: 直立消波護岸の全遊水部幅 (m)
$C$	: 溶存酸素濃度 (mg/l もしくは ml/l, mol/l)
$C_s$	: 飽和溶存酸素濃度 (mg/l もしくは ml/l, mol/l)
$C_0$	: 初期溶存酸素濃度 (mg/l もしくは ml/l, mol/l)
$C^*$	: (3)式で定義される無次元溶存酸素濃度
$D^*$	: (4)式で定義される無次元溶存酸素不足濃度
$e$	: 規則波造波装置の波高調整用偏心板偏心量 (cm)
$E_d$	: 碎波もしくは消波によるエネルギー逸散量 (N·m)
$f$	: 周波数 (Hz)
$H$	: 規則波現地換算波高 (m)
$h$	: 水深(現地換算値) (m)
$H_0'$	: 換算沖波波高(現地換算値) (m)
$H_{1/3}$	: 1/3有義波波高(現地換算値) (m)
$K$	: 溶及酸素の水路内拡散に関する拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)
$K_R$	: 反射率
$k_2$	: $e$ を底とした再曝気係数(1000波あたりの値) (1/1000 t/T)

- $\Delta t$  : 入・反射波分離用の同時波形記録測定間隔  
 ( cm )
- $L_0$  : 沖波波長 (  $g ( T_{1/3} )^2 / 2 \pi$  ) ( m )
- $m$  : 溶解酸素量 ( mg もしくは ml , mol )
- $q$  : 単位護岸幅当りの平均越波流量 (  $m^3/m \cdot s$  )
- $T$  : 規則波現地換算周期 ( s )
- $T_{1/3}$  : 1/3 有義波周期 ( 現地換算値 ) ( s )
- $t$  : 時間 ( s )
- $V$  : 単位護岸幅当りの酸素溶解区間体積 (  $m^3/m$  )
- $x$  : 曝気点からの距離 ( m )

付表一 1 反射率実験結果データ表（スリット形状による反射率の変化）

スリット形状		潮位 T. P. -0.6m					潮位 T. P. ±0.0 m					潮位 T. P. +0.6 m						
		反射率	入射波高	合成波周期	反射率	入射波高	合成波周期	反射率	入射波高	合成波周期	反射率	入射波高	合成波周期	反射率	入射波高	合成波周期		
No.	横さん	脚壁	開口比	$K_R$	$H_{1/10}$ (m)	$H_{1/3}$ (m)	$H_{MN}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$K_R$	$H_{1/10}$ (m)	$H_{1/3}$ (m)	$H_{MN}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$K_R$	$H_{1/10}$ (m)	$H_{1/3}$ (m)	$H_{MN}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)
1		なし	2.5%	0.40	1.55	1.20	0.76	4.3	0.48	1.38	1.12	0.71	4.1	0.38	1.64	1.34	0.86	4.2
2		あり	2.5%	0.50	1.49	1.18	0.75	4.3	0.51	1.39	1.13	0.70	4.1	0.42	1.69	1.36	0.89	4.3
3		なし	2.9%	0.39	1.58	1.22	0.77	4.5	0.45	1.43	1.16	0.75	4.2	0.42	1.65	1.30	0.83	4.3
4		あり	2.9%	0.43	1.55	1.22	0.77	4.3	0.46	1.50	1.22	0.79	4.1	0.40	1.62	1.30	0.84	4.3
5		なし	3.3%	0.41	1.57	1.22	0.78	4.4	0.47	1.44	1.15	0.75	4.3	0.42	1.63	1.29	0.82	4.4
6		あり	3.3%	0.44	1.56	1.22	0.77	3.9	0.46	1.49	1.20	0.78	4.1	0.37	1.65	1.32	0.84	4.3
7		なし	2.5%	0.52	1.69	1.33	0.85	4.3	0.54	1.30	1.04	0.66	4.2	0.42	1.57	1.27	0.81	4.3
8		あり	2.5%	0.57	1.66	1.31	0.84	4.4	0.55	1.40	1.12	0.71	4.2	0.46	1.63	1.30	0.84	4.4
9		なし	2.9%	0.45	1.49	1.19	0.77	4.4	0.48	1.38	1.14	0.73	4.3	0.39	1.65	1.33	0.88	4.3
10		あり	2.9%	0.47	1.53	1.20	0.78	4.3	0.49	1.39	1.11	0.71	4.2	0.40	1.66	1.35	0.88	4.3
11		なし	3.3%	0.43	1.54	1.22	0.78	4.4	0.49	1.37	1.11	0.72	4.3	0.37	1.68	1.34	0.87	4.4
12		あり	3.3%	0.45	1.51	1.20	0.77	4.3	0.47	1.41	1.15	0.73	4.2	0.35	1.70	1.36	0.88	4.4

注) 各反射率, 波高, 周期とも1回に約200波の波列の計3回分(600波分)の測定(3個の測定値)の平均。  
波高, 周期とも現地換算値。

付表-2 反射率実験結果データ表(周期による反射率の変化)

No.	対 象 波				測 得 値			
	用いた波	波形勾配	波 高	周 期	反射率	入射波波高	合成波周期	波形勾配
		$H_{1/3}/L_0$	$H_{1/3}$	$T_{1/3}$				
1	不規則波	0.041	0.68 (m)	3.0 (s)	0.79	0.68 (m)	3.3 (s)	0.041
2			0.92	3.5	0.68	0.78	3.7	0.037
3			1.20	4.0	0.47	1.41	4.2	0.051
4			1.52	4.5	0.49	1.47	4.8	0.041
5			1.87	5.0	0.49	2.03	5.5	0.043
6	規 則 波	0.05	0.96	3.5	0.48	0.88	3.5	0.047
7			1.25	4.0	0.47	1.28	4.0	0.051
8			1.95	5.0	0.22	1.95	5.0	0.050

注1). 潮位はいずれも T. P. ± 0.0 m. スリット形状は付表-1 の No. 12 の形状。

注2). No. 3 の実験値は, 付表-1 T. P. ± 0.0 m での No. 12 の値の再掲。

付表-3 反射率実験結果データ表(波高による反射率の変化)

No.	対 象 波		測 得 値						
	用いた波	周 期	反射率	入 射 波 波 高			合成波周期	波形勾配	
		$T_{1/3}$		$K_R$	$H_{1/10}$	$H_{1/3}$			$H_{MN}$
1	不規則波	4.3	(s)	0.52	0.98 (m)	0.78 (m)	0.50 (m)	4.3 (s)	0.028
2			0.46	1.36	1.09	0.71	4.3	0.048	
3			0.42	1.59	1.28	0.83	4.3	0.055	
4			0.41	1.76	1.40	0.90	4.3	0.062	
5			0.39	1.94	1.54	0.99	4.3	0.067	

注). 潮位はいずれも T. P. ± 0.0 m. スリット形状は, 付表-1 の No. 12 の形状。

付表-4 越波実験結果データ表

No.	上部構造断面			潮位	測 得 値				
	パラペット		階 段 有 無		反射率 $K_R$	越波流量 $q$	入射波波高		合成波周期 $T_{1/3}$
	後退距離	天端高					$H_{1/3}$	$H'_0$	
	(m)			(m)		( $m^3/m \cdot s$ )	(m)	(m)	(s)
1	10	H	N	T. P. +2.8	0.64	0.00048	4.03	4.15	9.2
2	10	H	A		0.67	0.00131	3.90	4.02	9.3
3	10	M	N		0.69	0.00121	3.85	3.97	9.3
4	10	M	A		0.67	0.00459	3.88	4.00	9.3
5	10	L	N		0.65	0.00612	3.99	4.11	9.3
6	10	L	A		0.64	0.0160	4.11	4.24	9.2
7	8	H	N		0.63	0.00126	4.05	4.18	9.5
8	8	H	A		0.64	0.00197	4.03	4.15	9.3
9	8	M	N		0.62	0.00319	4.04	4.16	9.3
10	8	M	A		0.62	0.00606	4.02	4.14	9.3
11	8	L	N		0.64	0.00720	4.05	4.17	9.3
12	8	L	A		0.64	0.0158	4.06	4.18	9.6
13	10	L	A	T. P. +2.0	0.64	0.00211	3.67	3.78	9.2
14	10	L	A	T. P. +1.2	0.64	0.00047	3.39	3.46	9.1
15	10	L	N	T. P. +2.8	0.66	0.00519	3.88	4.00	9.3
16	10	L	N	T. P. +2.8	0.68	0.00379	3.66	3.77	9.3
17	10	L	N	T. P. +2.8	0.66	0.00292	3.59	3.70	8.6

注1). 護岸上部構造断面形状の記号は、本文図-11による。

注2). 各反射率、波高、周期とも、1回約200波の波列3回分の平均、越波流量は、

3回分の越波量合計を3回分の越波測定時間合計にて除した平均。いずれも現地換算値。

付表-5 曝気実験結果データ表

ケース No.	断面形状		入射波		反射率 $K_R$	$(1-(K_R)^2) \times H^2$	再曝気係数 $k_2$ (1/1000波)
	設岸構造	設岸単位幅当り 曝気区間体積 $V$	周期 $T$	波高 $H$			
1	1/30 斜面	( $m^3/m$ ) 13	(s) 4.0	(m) 0.64	0.07	0.41	0.946
2	1/30 斜面	45	4.0	1.22	0.04	1.49	1.890
3	ブロック積設岸	23	4.0	0.60	0.20	0.35	0.030
4	ブロック積設岸	23	4.0	1.20	0.17	1.40	0.050
5	スリット式設岸	25	4.0	0.60	0.57	0.24	0.017
6	スリット式設岸	25	4.0	1.15	0.43	1.08	0.037
7	直立壁	—	4.0	(0.37)*	0.93	0.02	0.014
8	直立壁	—	4.0	(0.80)*	0.93	0.09	0.015
9	ブロック積設岸	23	4.0	0.13	0.99	0.00	0.022
10	ブロック積設岸	23	4.0	0.91	0.18	0.80	0.022
11	ブロック積設岸	23	4.0	1.78	0.13	3.11	0.107
12	スリット式設岸	25	5.0	0.57	0.21	0.31	0.037
13	スリット式設岸	25	5.0	0.88	0.21	0.74	0.037
14	スリット式設岸	25	5.0	1.29	0.32	1.49	0.068

\* 波高が不安定である。



港湾技研資料 No.312

1979・3

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 日青工業株式会社

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