

# 消波工を有する緩傾斜埋立護岸の越波特性に関する実験的研究

The experimental study on characteristics of wave overtopping of gentle slope seawalls which wave dissipating blocks.

片平和夫\*・笹田 彰\*\*・坂村 浩\*\*・森川高德\*\*\*

Kazuo Katahira, Akira Sasada, Hiroshi Sakamura and Takanori Morikawa

The gentle slope seawalls which has 1:3 front grade with wave dissipating blocks is supposed to be constructed at the northwest part of the Ise bay. The experimental study has been carried out to clarify the characteristics of wave overtopping of the seawalls. The experiment clarified the total rates and its horizontal distribution of wave overtopping, comparing to the normal type of wave dissipating seawalls which has 1:4/3 front grade. In addition, the figures assumed the amount of wave overtopping at any height of seawalls are developed. It will be very useful to design the height of seawalls.

Keywords: the gentle slope seawalls, wave overtopping rates, height of seawalls

## 1. はじめに

近年、人工島など埋立地を沖合に建設する事例が多くなり、埋立地は高波浪の来襲を受けやすくなっている。埋立地に高波浪が来襲すると、波が埋立護岸を越えて陸部に進入する「越波」が生じやすくなり、その量の把握や制御が重要な課題となる。越波量は護岸の形状や波の諸元などの条件によって大きく変化し、現状では、限られた条件以外、越波量を推定することができない。

このような背景の中、本研究は、伊勢湾北西部の任意の海域を対象に、消波工を有する1:3勾配の緩傾斜埋立護岸について水理模型実験を行い、一般に施工事例が多い1:4/3勾配の消波護岸に関する実験と比較しながら、その越波流量特性を明らかにした。

## 2. 実験内容

### (1) 実験装置

実験は、運輸省第五港湾建設局伊勢湾水理模型実験場が所有する断面二次元水路で行った。図-1に示す実験水路は、平面実験水槽の一部を仕切った長さ30m、幅1m、深さ1.5mからなっており、水路端部には、ピストン型の単一方向不規則波造波装置が設置されている。

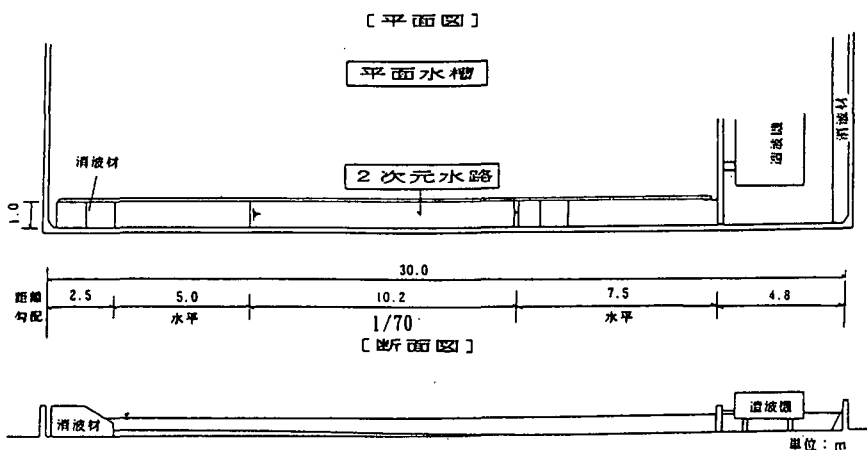


図-1 実験水路

\* 正会員 運輸省第五港湾建設局設計室  
 \*\* 運輸省第五港湾建設局伊勢湾水理模型実験場  
 \*\*\* 玉野総合コンサルタント(株)海洋部

## (2) 実験条件

模型縮尺は、越波量の測定精度を考慮して1/30とし、実験潮位は、対象海域の設計潮位であるH.H.W.L+4.5mで実施した。実験の対象となる護岸の断面は、図-2(a)、(b)に示すとおりであり、1:3勾配、1:4/3勾配とも消波ブロック(5t型)被覆式で天端高+7.5m(設計潮位上からの高さ+3.0m)を基本とした。ただ、1:4/3勾配の隠岸では、天端高を+8.5~+9.5mに変化させた実験も併せて行った。

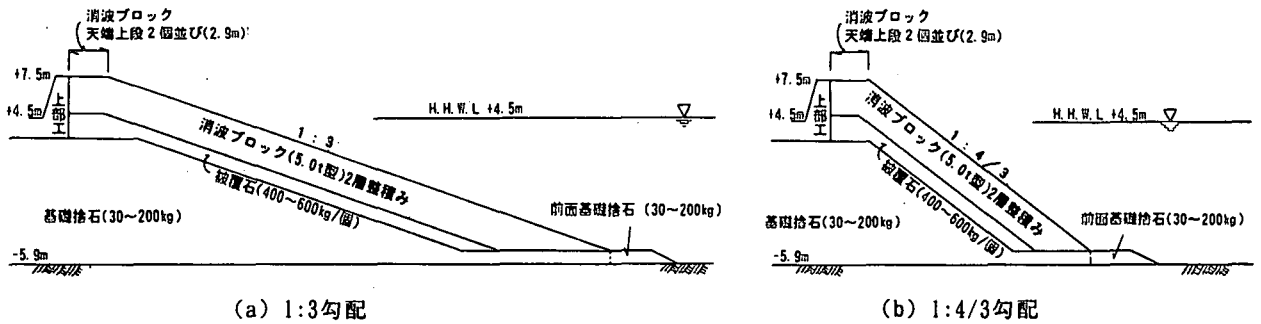


図-2 実験に使用した護岸の基本断面

実験で目標とした波の諸元は、表-1に示すとおりであり、この海域の基準波である $H_{1/3}=4.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=7.2\text{sec}$ (沖波波形勾配0.05程度)と基準波の波形勾配と同じとする基準波高近傍値の $H_{1/3}=3.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=6.2\text{sec}$ 、 $H_{1/3}=4.3\text{m}$ 、 $T_{1/3}=7.5\text{sec}$ 及び波高が基準波と同一で、周期のみを変化させ沖波波形勾配を0.03程度とした $H_{1/3}=4.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=10.0\text{sec}$ の4種類である。

表-1 実験対象波の諸元

| $H_{1/3}$ | $T_{1/3}$ | 沖波波形勾配 | 備考  |
|-----------|-----------|--------|-----|
| 4.0m      | 7.2sec    | 0.05程度 | 基準波 |
| 3.0m      | 6.2sec    |        |     |
| 4.3m      | 7.5sec    |        |     |
| 4.0m      | 10.0sec   | 0.03程度 |     |

なお、周波数スペクトルは、いずれも、修正ブレッドシュナイダー・光易型を目標とした。

## (3) 実験及び解析方法

実験では、図-3に示すように、越波水採水箱を護岸模型の背後に設置し上部工からの越波水を採水した。その採水範囲は、水路幅1mのうち中央30cmとし、上部工背後にかけてどの程度まで越波の影響が及ぶか(越波の水平分布)を検討するため、越波水採水箱内部に図のとおり縦列に独立ユニット6個を配置した。

各ユニットの奥行きは現地スケールで水平方向5m分に相当し、6個で30m分の越波水の水平分布を測定できる。なお、上部工背後から10m分に相当する2ユニットは、越波水の流入量が多くなるものと予想されるため、後方の4ユニットより貯水幅を3倍程度大きくした。また、実験では、護岸に被覆した消波ブロックの安定性も同時に検討した。

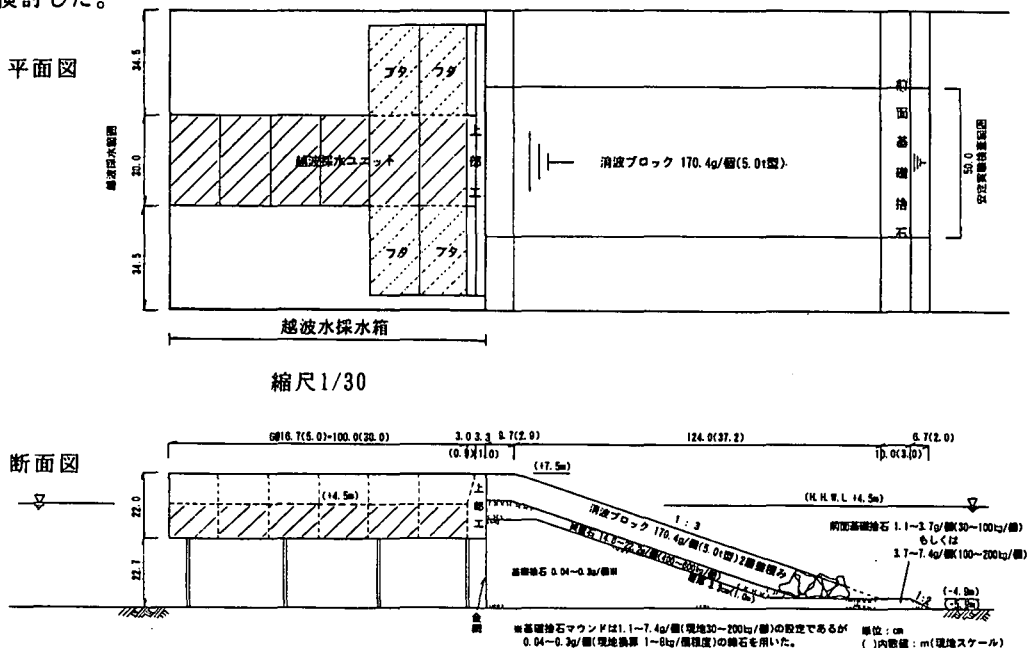


図-3 護岸模型及び越波水採水箱

実験では、波が定常状態となるまでは越波水が採水ユニットに入らないように、ユニット上部に蓋をし、測定開始と同時に蓋を外し、越波水の採水を行った。

越波量の測定は、幅30cmの範囲を越波した水を越波水採水箱内のユニットに集水し、電子秤(6kg/個用)を用いて各ユニットの重量を測定することで行った。なお、作用波数は、基本的に各波浪とも約660波(現地時間にして約60~100分間)とした。ここで、作用波数を660波程度とした理由は、本研究で越波の水平分布を検討することを踏まえ、統計的に当該波数中に発生するといわれている $H_{max}=1.8H_{1/3}$ の関係の波を得るためである。

解析では、測定した越波量を越波流量に換算し、1:4/3勾配の消波護岸実験と比較しながら、総越波流量や波形勾配、水平分布に関する緩傾斜護岸の各種越波特性を求めた。

また、基準波(波高4.0m)については、短時間(約40波=現地時間にして5分程度)に発生する高波高波群を対象とした越波流量の特性も検討した。

さらに、実験データを基に、直立護岸に対する換算天端高係数(越波流量が等しくなる時の実験護岸の天端高と直立護岸とした場合の天端高の比)を利用して、対象海域の任意の波高、任意の天端高における概算の越波流量及び許容越波流量となる天端高を推定できる手法を検討した。

### 3. 緩傾斜埋立護岸の越波特性

#### (1) 護岸勾配別の越波流量特性

##### 1) 全体特性

図-4は、図-2に示した基本断面における護岸勾配別の堤前波高と越波流量の関係を示したものである。

はじめに、1:4/3勾配についてみると、基準波(波高4.0m)の越波流量は $0.1\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ 強となっており、本断面の許容越波流量を $0.02\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ と想定した場合、その5倍以上に達している。

許容越波流量( $0.02\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ )を基準とした場合、波高3.0mを超える波が作用すると、当該流量をオーバーしてしまうことが予想される。

これに対し、1:3勾配では、基準波(波高4.0m)の越波流量は $0.019\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ で許容値内に収まる結果となった。全体的にみても、1:3勾配の流量は1:4/3勾配の3~22%程度となっており、1:3勾配の断面の方が越波低減効果が高いことが判明した。この要因としては、

- ① 1:3勾配護岸は1:4/3勾配に比べ、来襲する波の砕波位置が上部工天端から遠ざかること
- ② 砕波後、波は流れに近い状態となり、その流れが消波ブロックの粗度により低減され易くなること

などが推測される。

##### 2) 水平分布特性

図-5(a)、(b)は、1:3勾配及び1:4/3勾配での越波流量の水平分布を示したものである。

これをみると、越波流量は、両勾配の各波高とも護岸上部工背後から5m遠ざかる毎に概ね1オーダーずつ減少し、さらに、護岸上部工背後より25m以遠では、護岸勾配や波高に関わらず、流量は $10^{-5}\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ 、もしくはそれ以下となり、越波の影響はほとんど及ばなくなることが分かった。

越波流量  $q$  ( $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ )

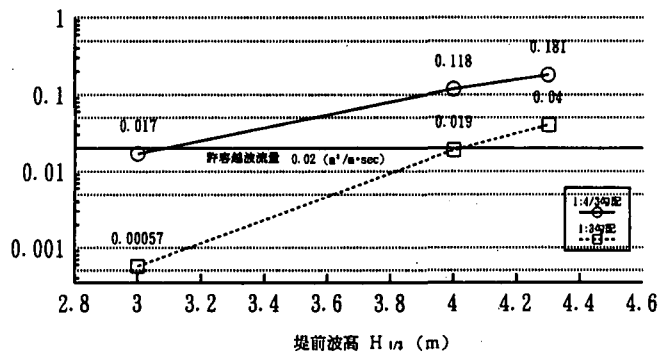


図-4 護岸勾配別の越波流量

越波流量  $q$  ( $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ )

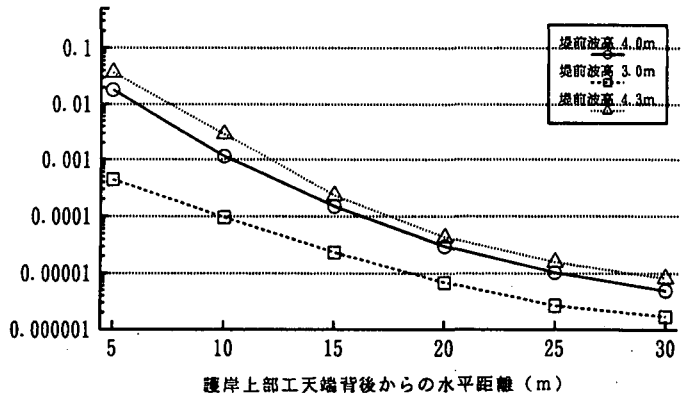


図-5(a) 越波流量の水平分布(1:3勾配)

越波流量  $q$  ( $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ )

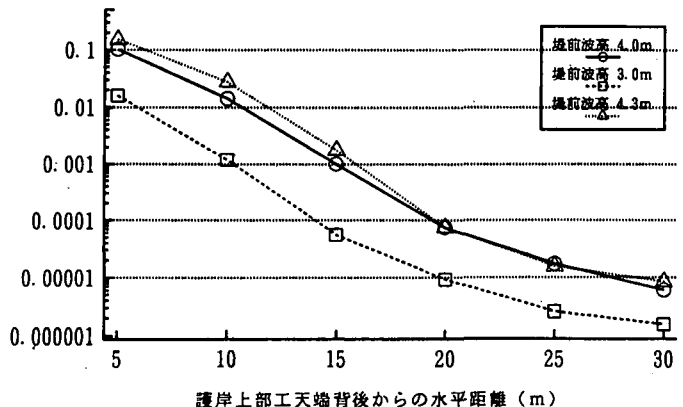


図-5(b) 越波流量の水平分布(1:4/3勾配)

また、図-6は、基準波（波高4.0m）を対象に、1:3勾配と1:4/3勾配での越波流量の水平分布の割合を比較したものである。

はじめに全体傾向をみると、両勾配とも、護岸上部工背後から5mまでの区間で全越波流量のおよそ90%を集水し、さらに、護岸上部工背後10mまでを含めると、全越波流量の99%が当該区間に集水されていることが分かる。

その中で、護岸上部工背後から5m区間では、1:3勾配の越波流量の割合が高く、5～10m区間では、逆に1:4/3勾配が高くなっており、1:3勾配は1:4/3勾配に比べ、越波の影響が遠くまで及ばないことが判明した。

ただし、本実験では、風の影響を考慮していないため、現地の暴風時には、さらに遠くまで越波の影響が及ぶ可能性がある。

## (2) 波形勾配の違いによる越波流量特性

### 1) 全体特性

図-7は、1:3勾配において波形勾配の違い（0.03と0.05）による越波流量の特性を示したものである。

これをみると、波形勾配0.03の波（波高4.0m、周期10.0sec）を作用させた場合の越波流量は、波形勾配0.05の基準波（波高4.0m、周期7.2sec）の作用時のそれを大きく上回っており、その差は5倍強となっている。

同一の波高において、波形勾配が小さいほど越波流量が増大する理由としては、

①消波ブロックの消波効果が低下し、波の勢いが維持されやすくなること

②護岸斜面上での碎波が起きにくく、波高の減少率が低下すること

などが挙げられる。

いずれにせよ、この傾向は合田らの算定図からも明らかにされており、本実験で当該傾向を確認することができた。また、同じ4.0mの波高でも、波形勾配の小さい波（周期の長い波）では、許容越波流量を超えてしまう可能性があることが分かった。

### 2) 水平分布特性

図-8及び図-9は、波形勾配の違いによる越波流量の水平分布特性を流量及びその割合として示したものである。

はじめに、図-8をみると、5～30mのすべての区間で、波形勾配0.03の波の越波流量が多くなっている。特に、10～20m区間では、両者の差は10倍程度に広がっている。

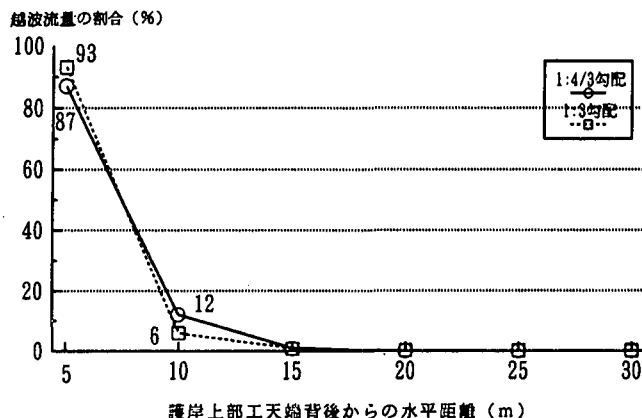


図-6 越波流量の水平分布割合

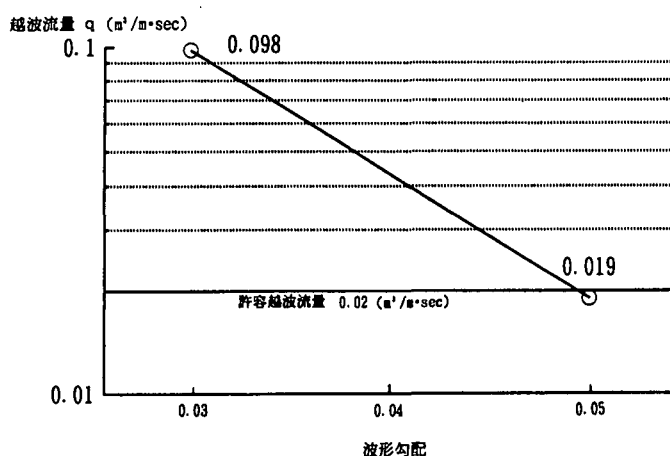


図-7 波形勾配別の越波流量

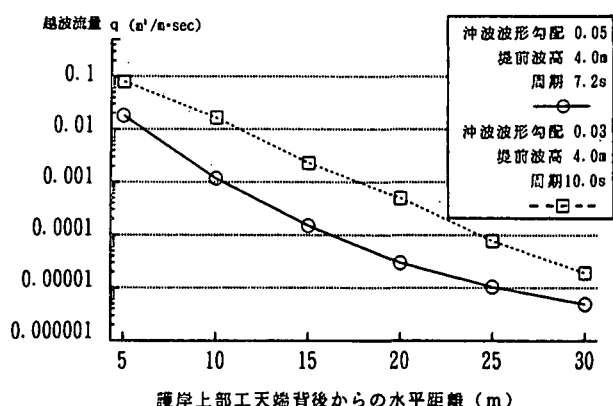


図-8 波形勾配の違いによる越波流量の水平分布

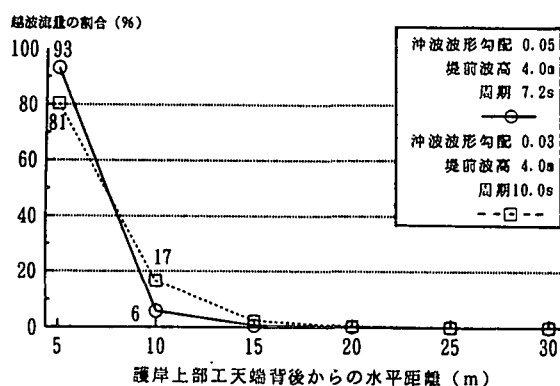


図-9 波形勾配の違いによる越波流量の水平分布割合

このことは、図-9をみると一層明らかであり、波形勾配が低いほど、全体流量の増加のみならず、越波の水平的な影響が大きくなることを示唆している。

ただし、前項同様、本実験では、風の影響を考慮していないことから、現地の暴風時においては、さらに遠くまで越波の影響が及ぶ可能性がある。

### (3) 短時間でみた越波流量特性

前項までの結果は、いずれも、波数にして約660波、現地時間にして約60～100分間の平均的な越波流量である。

これに対し、合田は、数十波程度の短い時間で考えると、はるかに多量の越波が生じる可能性があることを指摘している。これは、不規則な波の中に高波が数波連なって現れることによる。

図-10は、1:3勾配において、基準波（波高4.0m）を約660波（現地時間にして約70分間）作用させた場合と約40波（現地時間にして約5分間）作用させた場合の越波流量を比較したものである。なお、後者については、連続する約660波の中で、比較的高波が含まれていると思われる波群から連続して約40波を捉えたときの越波流量である。

これをみると、短時間内（約40波）の越波流量は、約660波の波を対象とした結果（ $0.019 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ ）の2倍強（ $0.043 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ ）となっており、許容越波流量（ $0.02 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ ）を上回る結果となっている。

このように、短時間中の高波高波群による越波流量は、数百波程度での平均的な越波流量を大きく超える場合があることが確認されたことから、特に、排水計画の策定において処理能力を検討する場合には、十分に留意する必要がある。

### (4) 任意の波高、任意の天端高に対する越波流量算定図

図-11(a)、(b)は、実験結果より、直立護岸に対する換算天端高係数を利用して作成した1:3勾配及び1:4/3勾配の越波流量算定図を示したものである。この図より、任意の波高と任意の天端高に対する越波流量の概算を算定することができる。また、図-12は、図-11より求めた許容越波流量（ $0.02 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ ）となる所要天端高の算定図である。

なお、本算定図は、実験で対象とした天端高+7.5m（水面上+3.0m）からかけ離れるほど、水面から上部工天端までの消波工容量が実験内容と異なる等の要因により、算定精度が低下することを1:4/3勾配に対する実験で確認しており

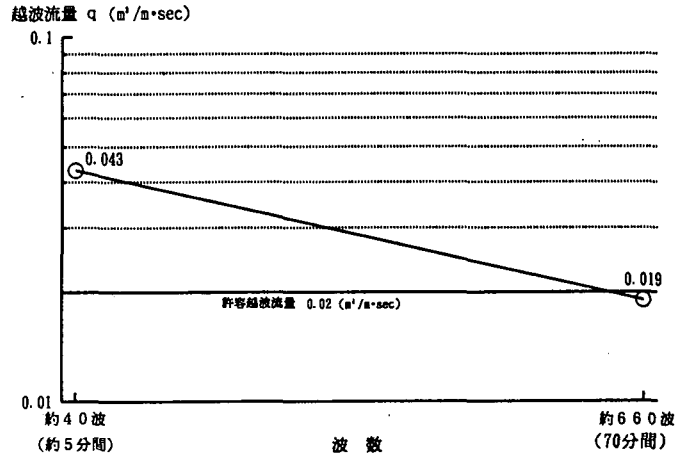


図-10 短時間でみた越波流量特性

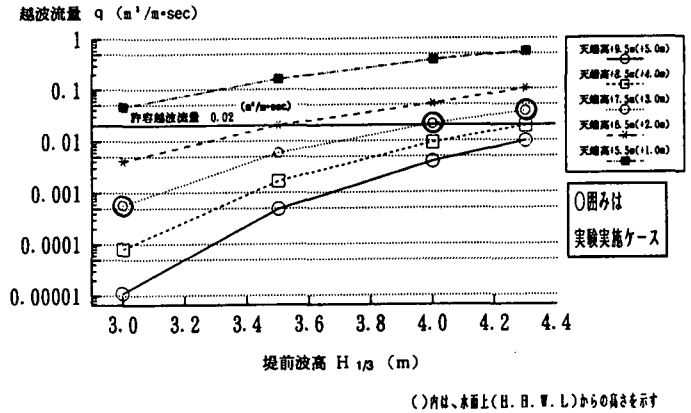


図-11(a) 越波流量算定図 (1:3勾配)

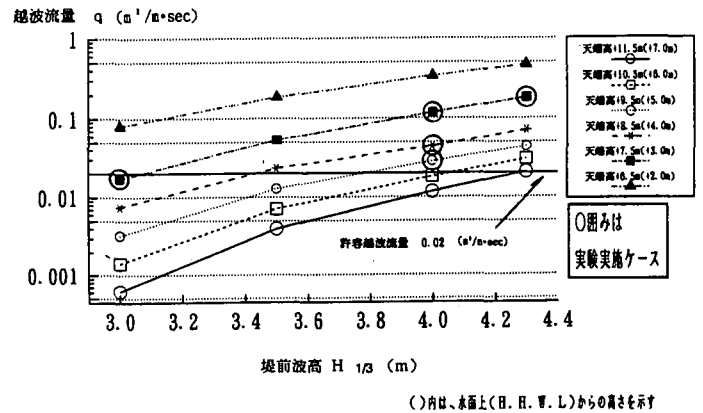


図-11(b) 越波流量算定図 (1:4/3勾配)

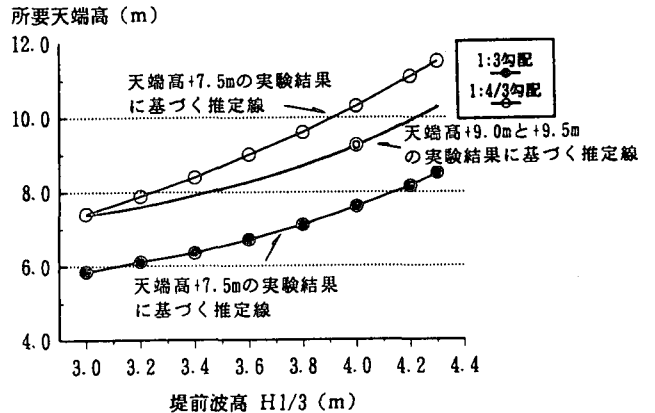


図-12 許容越波流量となる天端高の算定図

(図-12中の◎印)、図-11はあくまでも越波流量の目安の推定に用いるべきと考える。

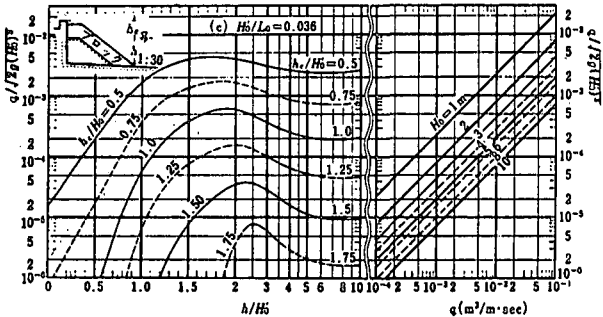
ただ、これらを考慮しても、表-2に示した本実験条件下では、許容越波流量となる1:3勾配の所要天端高は、1:4/3勾配に比べ少なくとも1.5m程度低減できるものと推測される。

また、本算定図と合田らの消波ブロック被覆護岸(1:4/3勾配)に対する越波流量算定図

(図-13)を比べた場合、波形勾配や海底勾配条件の違いにより横並びの比較はできないものの、全体に、本算定図による流量の方が高い値となる。このことは、本実験で対象とした護岸が1:3勾配、1:4/3勾配とも天端上段ブロック(5t型)2列(天端幅2.9m)で、合田らの実験対象護岸(天端上段ブロック(17.8t)3列)に比べて消波ブロック天端幅が狭く、越波流量が増加しやすい条件になっているためであると考えられる。

表-2 主な実験条件

|                   |          |
|-------------------|----------|
| 水深                | 10.4m    |
| 海底勾配              | 1/70     |
| 沖波波形勾配 $H_o'/L_o$ | 0.05 程度  |
| 堤前波高 $H_{1/3}$    | 3.0~4.3m |
| 消波工天端幅            | 2.9m     |



<海底勾配1:30、波形勾配0.036>

図-13 合田らによる消波護岸(1:4/3勾配)の越波流量算定図

4. 主要な結論

本研究では、伊勢湾北西部の任意の海域を対象に、消波工を有する1:3勾配の緩傾斜埋立護岸について、水理模型実験を行い、一般に施工事例が多い1:4/3勾配の消波護岸と比較しながら、総越波流量や波形勾配、水平分布に関する越波流量特性や短時間に発生する高波高波群を対象とした越波流量特性を検討した。

その主要な結論は、以下に示すとおりである。

- ①消波工を有する1:3勾配の緩傾斜護岸(天端高+7.5m)は、その越波流量が、1:4/3勾配の消波護岸の3~22%程度となり、かつ、水平分布をみても、1:4/3勾配の消波護岸に比較して、越波の影響が遠くまで及ばないなど、越波に対する低減特性を有している。
- ②波形勾配別に越波特性をみると、波形勾配の小さい波ほど、越波流量が増大することが確認された。
- ③短時間中(約5分間)の高波高波群によって起きる越波流量は、ある程度長時間(約70分間)を対象とする平均的なそれに比べ、2倍程度増加する場合があることが分かった。
- ④得られた実験データより、直立護岸に対する換算天端高係数を利用して、対象海域の任意の波高、任意の天端高における1:3勾配の消波工を有する緩傾斜護岸及び1:4/3勾配の消波護岸の越波流量と許容越波流量となる天端高の概算を推定できる図を作成した。

なお、本研究に当たり、水理模型実験や解析で種々のアドバイスを頂いた運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室高橋室長、同波浪研究室平石室長に深く感謝する次第である。

(参考文献)

合田良実・岸良安治・神山豊(1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻 第4号, pp. 3~44.  
合田良実・岸良安治(1976): 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, 28p.  
高山知司・永井紀彦・西田一彦(1982): 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第21巻 第2号, pp. 151~205.  
合田良実(1991): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版