

## 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(その2)

The experimental study on characteristics of wave overtopping of gentle slope seawalls which has wave dissipating blocks(part 2).

片平和夫\*・笹田 彰\*\*・中井 章\*\*・森川高德\*\*\*

Kazuo Katahira, Akira Sasada, Akira Nakai and Takanori Morikawa

The experimental study has been carried out to clarify the characteristics of wave overtopping of the gentle slope seawalls which has 1:3 front grade with wave dissipating blocks, considering the change of seawall's crown widths.

The result of the experiment clarified the total flow volume and its horizontal distribution of wave overtopping and comparing to the conventional type of wave dissipating seawalls which has 1:4/3 front grade. in addition, we obtained some useful figures from which the amount of wave overtopping at arbitrary crown width of seawalls can be presumed. They are expected to be utilized to settle crown width of seawalls.

Keywords: the gentle slope seawalls, crown widths, wave overtopping rates

## 1. はじめに

近年、人工島など埋立地を沖合に展開する事例が多くなり、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。

そこで、運輸省第五港湾建設局は、伊勢湾北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関し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結果と比較しながら、緩傾斜護岸における基本的な越波流量特性について前回報告している。

これに引き続き、今回は研究(その2)として、1:3勾配護岸及び1:4/3勾配護岸について、任意の消波工天端上層ブロック列(天端幅)に対する越波流量特性を断面実験により明らかにしたのでここに報告する。

## 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内の長水路で行った。図-1に示す実験水路は、平面実験水槽の一部を仕切ったもので、長さ30m、幅1m、深さ1.5mであり、水路端部に設置したピストン型の単方向不規則波造波装置で造波することができる。

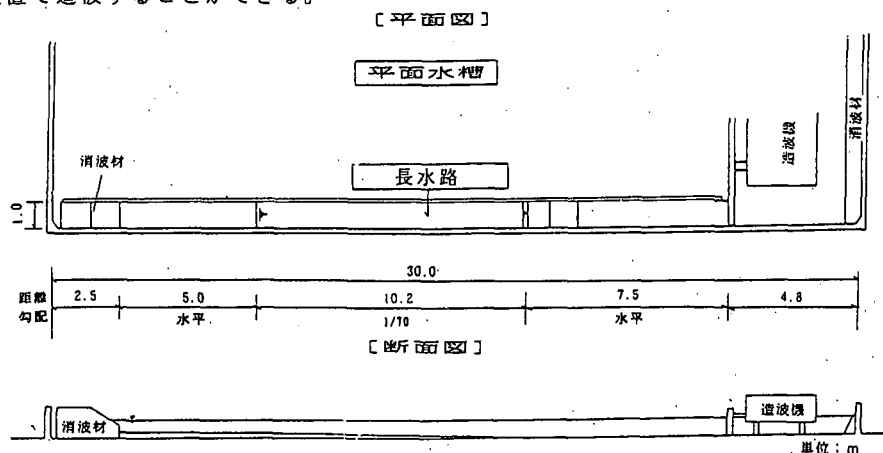


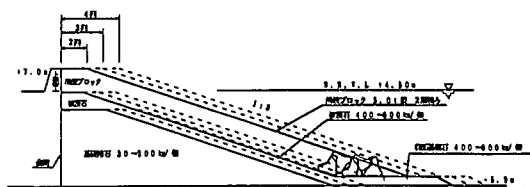
図-1 実験水路

\* 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

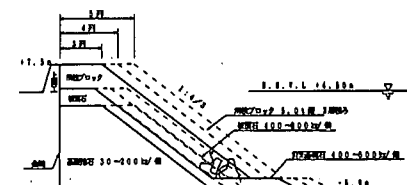
## (2) 実験条件

模型縮尺は1/30、実験潮位はこの海域の設計潮位であるH.H.W.L+4.5mで実施した。図-2は実験の対象とした護岸の断面を示したものであり、1:3勾配護岸については、天端高+7.0m（水面上+2.5m）で、ブロック列（天端幅）を2～4列（2.9～6.5m）に変化させ、1:4/3勾配護岸については、天端高+7.5m（同+3.0m）で、ブロック列（天端幅）を3～5列（2.9～8.3m）に変化させて実験を行った。さらに、1:3勾配護岸については、ブロック4列の条件において、藻場造成等の環境創造にも配慮できるよう、法面中腹に小段を設置した場合の断面（以降、環境協調型断面と呼ぶ）による実験を実施した（後述の図-9(b)参照）。

実験波は、この海域の波浪諸元である $H_{1/3}=4.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=7.2\text{sec}$ （沖波波形勾配0.05程度）を対象とし、周波数スペクトルは修正フレット・シュナイダー・光型型を目標とした。



(a) 天端高+7.0m、消波工天端上層ブロック列2～4列（1:3勾配）



(b) 天端高+7.5m、消波工天端上層ブロック列2～5列（1:4/3勾配）

図-2 実験対象断面

## (3) 実験及び解析方法

実験は、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のうちの中央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ように奥行き方向に独立ユニット6個を配置した。

各ユニットの奥行きは現地スケールで5m分に相当し、6個で30m分の越波水の水平分布が測定できるようにした。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、採水対象範囲外の両側ユニットには蓋を設けた。

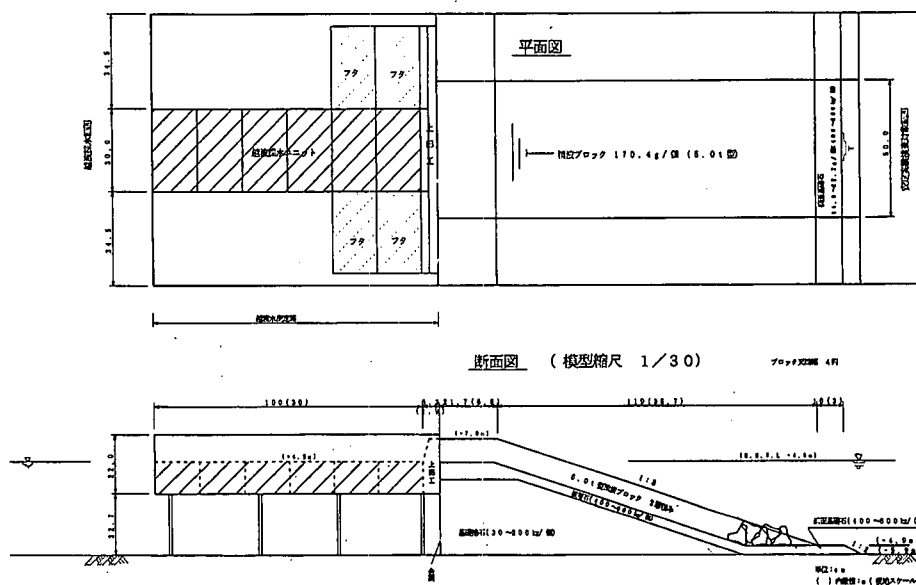


図-3 護岸模型及び越波水採水箱（1:3勾配）

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。幅30cmの範囲で採水箱内のユニットに集水させ、電子秤を用いて各ユニットの重量を測定することで越波量を求めた。

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100分間）とした。ここで、作用波数を660波程度とした理由は、統計的に当該波数中に発生する $H_{\max}=1.8H_{1/3}$ の関係の波を得るためである。

解析では、ケース毎に、測定した越波量を幅1m当たり1秒間に対する越波流量に換算し、消波ブロック列の変化（天端幅の拡幅）に伴う1:3勾配護岸及び1:4/3勾配護岸の総越波流量、水平分布特性を求めた。また、1:3勾配護岸については、天端幅の拡幅に加え、法面中腹に小段を設置した場合の越波流量特性も検討した。

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、1:3勾配護岸及び1:4/3勾配護岸における天端高をパラメータとした任意の天端幅に対する概算越波流量及び任意の天端幅に対して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. 1:3勾配護岸の越波流量特性

#### (1) 前回報告の実験結果

本研究の前段となった前回報告した実験の結果を示す。実験は、図-4に示した1:3勾配護岸及び1:4/3勾配護岸を対象に実施し、天端高はいずれも+7.5m(水面上+3.0m)とした。模型縮尺は1/30、実験潮位はH.H.W.L+4.5m、実験波は表-1に示すように、 $H1/3=4.0\text{m}$ 、 $T1/3=7.2\text{sec}$ (沖波波形勾配0.05程度)を基準波とし、基準波の波形勾配と同じとする基準波高近傍値の $H1/3=3.0\text{m}$ 、 $T1/3=6.2\text{sec}$ 及び $H1/3=4.3\text{m}$ 、 $T1/3=7.5\text{sec}$ の3種類で実験を行い、いずれも、修正フレット・シュナイダー・光易型の周波数スペクトルを有する単一方向不規則波を使用した。

表-1 平成6年度の実験対象波

| H1/3 | T1/3   | 沖波波形勾配 | 備考  |
|------|--------|--------|-----|
| 3.0m | 6.2sec | 0.05程度 | 基準波 |
| 4.0m | 7.2sec |        |     |
| 4.3m | 7.5sec |        |     |

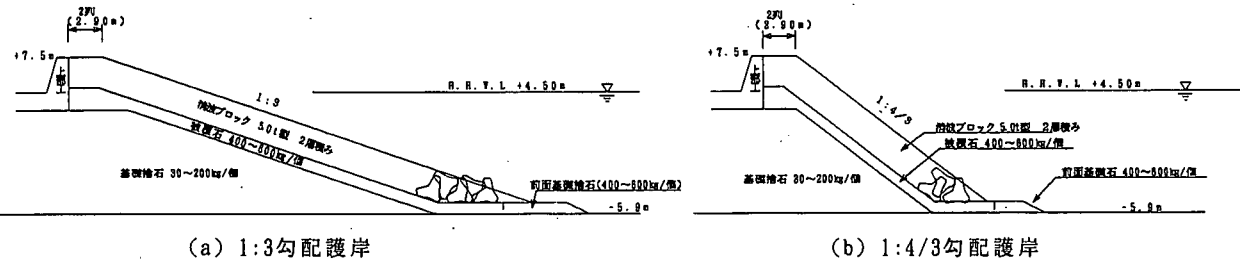


図-4 報告(その1)の実験対象断面

その結果は、図-5に示すとおりであり、基準波(波高4.0m)の越波流量は、1:4/3勾配護岸では $0.1\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ 強と設定した許容越波流量 $0.02\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ の5倍以上に達しているのに対し、1:3勾配護岸では、 $0.019\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ とほぼ許容値内に収まる結果となった。全体的にみても、1:3勾配護岸の越波流量は1:4/3勾配の3~22%程度となっており、1:3勾配護岸は越波低減効果が高いことが判明した。

これに引き続き、本研究では、1:3勾配護岸について、さらなる越波低減効果の向上を念頭におき、消波工天端上層ブロック列(天端幅)の拡幅など護岸構造諸元を変化させた場合の越波流量特性を、1:4/3勾配護岸との比較を含め検討した。

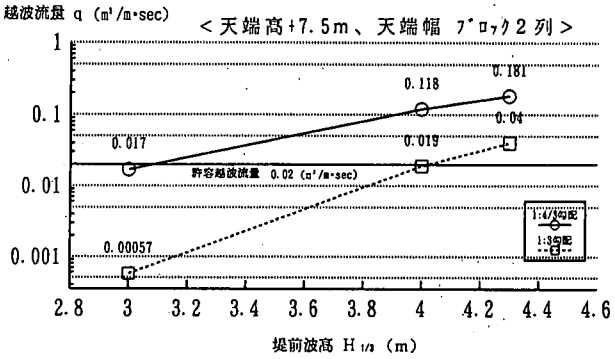


図-5 護岸勾配別の越波流量

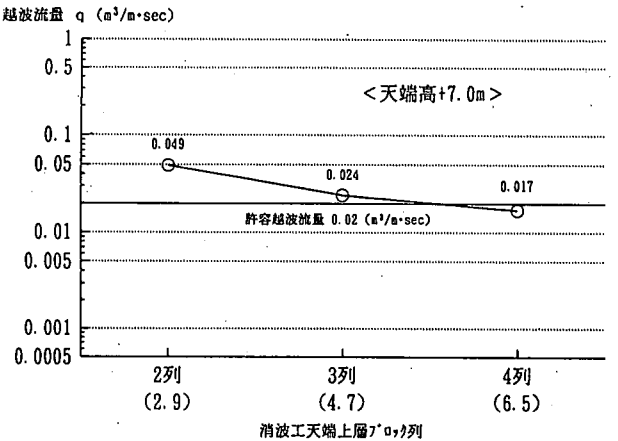
#### (2) 天端幅の拡幅による特性

##### 1) 全体特性

図-6(a)、(b)は、消波工天端上層ブロック列(天端幅)の違いによる設計波(波高4.0m)の越波流量特性を1:3勾配護岸(天端高+7.0m)及び1:4/3勾配護岸(天端高+7.5m)について示したものである。

はじめに、1:3勾配護岸についてみると、越波流量はブロック列が2列から3列になると、ブロック2列時の半分程度の $0.024\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ に減少し、さらに4列になると、図-4、図-5に示す天端高より0.5m低い+7.0mにおいても、越波流量は許容値 $0.02\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ 内( $0.017\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ )に収まる結果となった。

同様に、1:4/3勾配護岸についても、ブロック列が



( )内は消波工天端幅(m)を示す。

図-6(a) 消波工天端幅の違いによる越波流量特性(1:3勾配)

1列増える毎に、越波流量は概ね半分程度に減少する傾向にあり、ブロック列数5列で、越波流量は天端高+7.5mにおいても許容値内(0.019 $\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ )に収まる結果となった。

このように、護岸の消波工天端幅を拡幅することで、両護岸とも越波流量は大きく低減することが本実験でも明らかとなった。ただ、許容越波流量以下となる条件に着目すると、表-2のとおり、1:3勾配護岸の場合、ブロック列(天端幅)を1:4/3勾配護岸より1列少ない4列、天端高を0.5m低い+7.0mにしても条件を満たしており、あらためて1:3勾配護岸の越波低減効果が高いことが確認された。

2) 水平分布特性

図-7は、1:3勾配護岸における消波工天端上層ブロック列(天端幅)の違いによる越波流量の水平分布特性を示したものである。

これをみると、各区間の越波流量はブロック列に比例して低下している。この結果は、1:4/3勾配護岸についてもほぼ同様であり、消波工天端幅の拡幅は、越波の総流量及び水平分布の両観点よりその低減に有効であることが確認された。

3) 天端幅の拡幅による天端高低減効果の検討

図-8は、両勾配の断面について、消波工天端幅の拡幅による越波流量の低下を天端高低減率(所要天端高比)として示したものである。ここで、天端高低減率とは、図-6の越波流量結果より各ブロック列の護岸と同じ機能を持つ直立護岸の天端高を算出して、実験天端高(水面上)との比(これを換算天端高係数と呼ぶ)を求めこれを消波工天端上層ブロック2列時を基準として示したものである。図-8上表は1:3勾配護岸の換算天端高係数(上段)と天端高低減率(下段)であり、例えばブロック2列時の換算天端高係数0.79の意味は、ブロック2列の消波護岸の水面上からの天端高が直立護岸のその8割程度に相当することを示している。

これをみると、両勾配ともブロック列を3、4、5列とすることで、水面からの天端高はブロック2列時に比べかなり低減できることが解る。

なお、実験で対象とした天端高は1:3勾配護岸の場合+7.0m(水面上+2.5m)、1:4/3勾配護岸の場合+7.5m(同+3.0m)であるが、図-8を用いれば、任意の天端高における越波流量の概算を推定することが可能となる。

(3) 環境協調型断面(1:3勾配)の越波流量特性

前項までの結果より、1:3勾配護岸の場合、消波工天端上層ブロックを4列に拡幅することで、天端高+7.0mの条件でも越波流量を許容値内に収めることができた。これは、前回実験で対象とした断面(天端高+7.5m、消波工天端上層ブロック2列)に対し、天端高を0.5m低減したことになる。

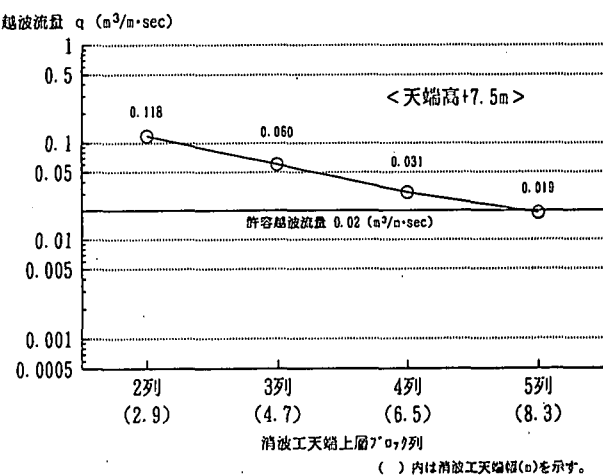


図-6(b) 消波工天端幅の違いによる越波流量特性(1:4/3勾配)

表-2 許容越波流量となる条件

|     | 1:3勾配  | 1:4/3勾配 | 差     |
|-----|--------|---------|-------|
| 天端幅 | ブロック4列 | ブロック5列  | -1列   |
| 天端高 | +7.0m  | +7.5m   | -0.5m |

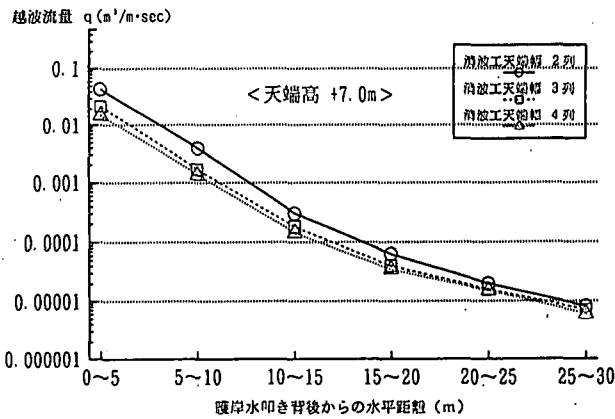


図-7 消波工天端幅の違いによる越波流量の水平分布特性(1:3勾配)

| 1:3勾配 | ブロック列   | 2列   | 3列   | 4列   |
|-------|---------|------|------|------|
|       | 換算天端高係数 | 0.79 | 0.56 | 0.49 |
|       | 天端高低減率  | 1.00 | 0.71 | 0.62 |

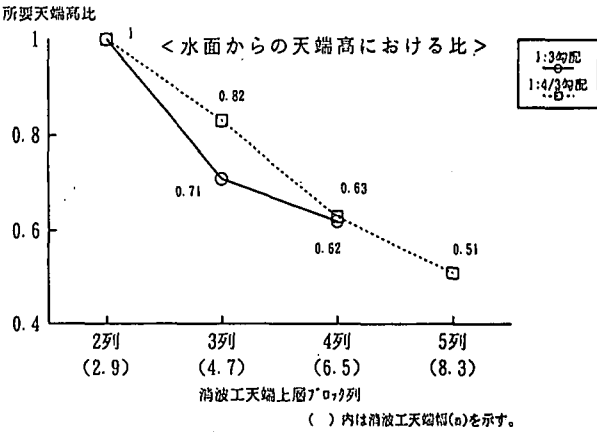


図-8 消波工天端幅と所要天端高比の関係

次に、さらなる天端高低減と環境創造の観点より、当該断面の法面中腹（水深-3.0m付近）に幅10m程度の小段を設け、砕波減衰効果と藻場造成の役割を期待した「環境協調型断面」（図-9(b)参照）に対する越波流量を検討した。

図-10は、小段の有る環境協調型断面と小段の無い断面での、基準波（波高4.0m）に対する越波流量を比較したものである。

これをみると、小段のある環境協調型断面の越波流量は $0.014\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ で、小段の無い断面の越波流量（ $0.017\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ ）を20%程度下回る結果となった。これは、法面中腹の小段により砕波減衰が促進され、かつ、砕波で流れに近い状態となった波が緩斜面上の消波工に阻まれ流勢を失ったためであり、小段と緩傾斜性が相乗的に越波低減効果を高めたといえる。

ただ、小段上での砕波が巻き波状になると、消波工に対する衝撃力も高まることになり、1:4/3勾配護岸の場合、小段があっても越波総流量はほとんど変わらず、むしろ小段を設けると、背後遠くまで越波の影響が及ぶことを確認している。このように、断面形状によっては小段が逆効果を生む可能性があることから、越波の観点からは、小段の設置には十分留意する必要がある。

いずれにせよ、1:3勾配護岸の場合には、小段を設置することで越波流量が低減されることが確認されたと同時に、許容越波流量に対し、天端高（+7.0m）をさらに低下できる可能性を有していることが解った。

#### （4）任意の天端幅、任意の天端高に対する越波流量算定図の提案

図-11(a)、(b)は、図-8上表に示した直立護岸に対する換算天端高係数を利用し、天端高をパラメータとして作成した、基準波（4.0m）に対する1:3勾配護岸及び1:4/3勾配護岸の越波流量算定図を示したものである。この図より、伊勢湾北部海域における任意の天端幅と任意の天端高に対する概算の越波流量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。

ちなみに、図-11(b)中には、合田の消波ブロック被覆護岸（1:4/3勾配）に対する越波流量推定図（図-13参照）を基に求めた天端高+7.5m、天端幅約7.0mの条件における越波流量を示した。ここで、天端幅7.0mの条件とした理由は、合田の推定図が、天端上層ブロックが17.8t/個で3列の実験結果を対象としていることによる。これをみると、両者は10%程度の差で一致していることが解る。

ここで、本算定図の作成に際し、実験で対象とした天端高（1:3勾配護岸+7.0m、1:4/3勾配消波護岸+7.5m）から離れるほど算定精度が低下することを

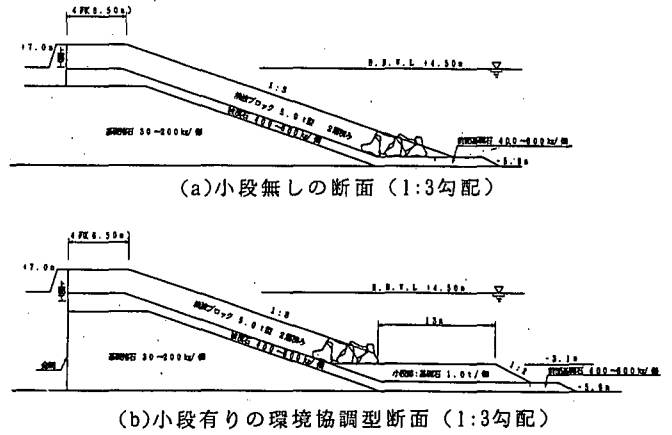


図-9 小段の有無による越波流量の検討断面

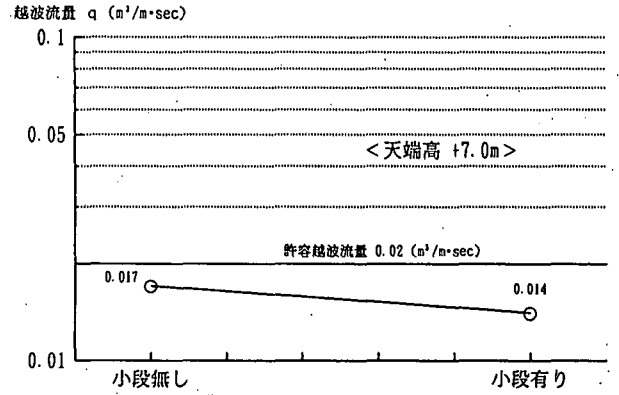


図-10 小段の有無による越波流量特性（1:3勾配）

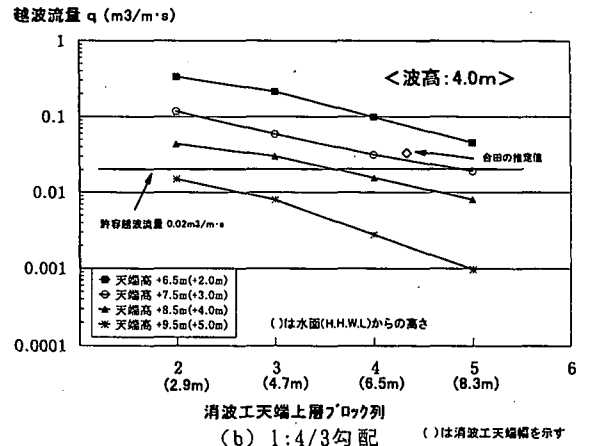
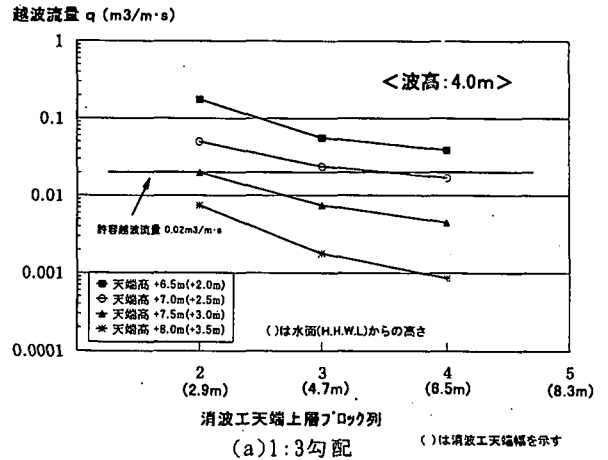


図-11 任意の天端幅、任意の天端高における越波流量算

天端高を変化させた実験により確認している。これは、天端高の変動が大きいと、水面に接する堤体幅や水面上の消波工の斜距離も有意に変化し、あたかも天端幅の変動と同様な効果が現れるためと推測される。よって、図-11は、この天端高を変化させた実験結果を基に、図-8上表の換算天端高係数を補正して作成したものである。

ただ、天端高を変化させた実験のケース数が少ないため、図-11はあくまでも越波流量の目安として用いるべきと考える。

4. 主要な結論

本研究では、伊勢湾北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、消波工天端ブロック列(天端幅)の変化に伴う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 1:3勾配護岸及び1:4/3勾配護岸とも、消波工天端上層ブロック列(天端幅)を拡幅することで越波流量は大きく低減した。
- ② 許容越波流量 $0.02\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ 以下となる条件は、1:3勾配護岸の場合、1:4/3勾配護岸より天端上層ブロック列を1列少ない4列、天端高を0.5 m低い+7.0 mにしても満たされており、1:3勾配護岸の越波低減効果がきわめて高いことが確認された。(表-2)
- ③ 天端幅をブロック2列から4列に拡幅した場合の水面上の天端高低減効果を、許容越波流量となる天端高よりみると、1:3勾配護岸の場合約20%、1:4/3勾配護岸の場合約25%である。(図-12)
- ④ 小段のある環境協調型断面の越波流量は小段の無い断面の越波流量を20%程度下回る結果となり、小段による越波流量低減効果が確認されたと同時に、許容越波流量に対し、天端高(+7.0 m)をさらに低下できる可能性を有していることが解った。(ただし 1:3勾配護岸に限る)
- ⑤ 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、天端高をパラメータとした任意の天端幅に対する1:3勾配護岸及び1:4/3勾配護岸の概算越波流量を推定できる図を作成した。

なお、本研究に当たり、種々の助言を頂いた運輸省港湾技術研究所高橋耐波研究室長、平石波浪研究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  
片平和夫・笹田彰・坂村浩・森川高德(1996): 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, 海洋開発論文集, Vol. 12, pp285-290.

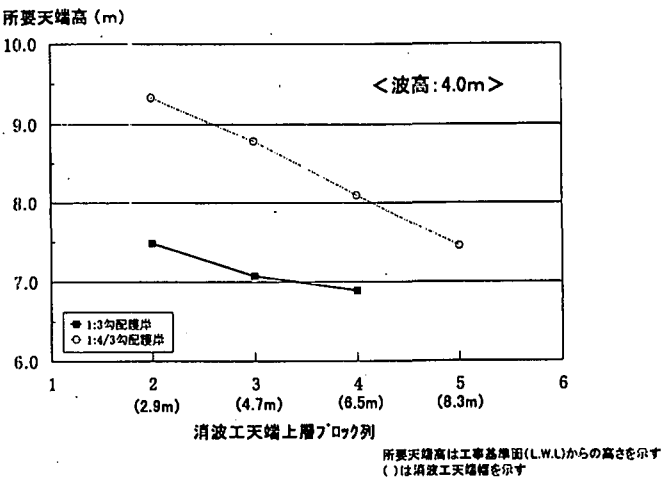


図-12 任意の天端幅に対し許容越波流量となる天端高の算定図

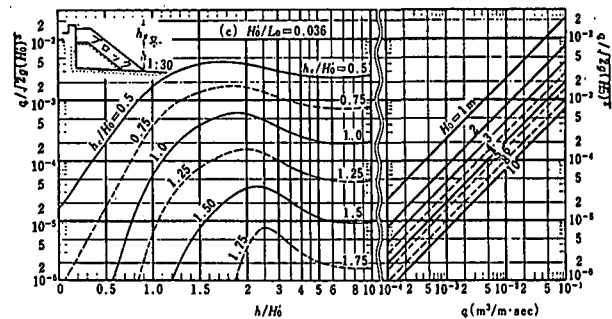


図-13 (参考) 1:4/3勾配消波護岸の越波流量算定図 (海底勾配1/30)