

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3）

The experimental study on characteristics of wave overtopping of gentle slope seawalls which have wave dissipating blocks(part 3).

片平和夫*・杉野輝彦**・中井 章**・森川高德***・金田研一郎***

Kazuo Katahira, Teruhiko Sugino, Akira Nakai, Takanori Morikawa and Kenichiro Kaneta

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

The result of the experiment clarified the total flow volume on a condition of certain wave direction to the seawall and certain crown heights of the seawalls. As the result of the study, we obtained some useful figures from which the amount of wave overtopping flow at arbitrary wave direction to the seawall can be presumed. They are expected to be utilized to settle a crown height of a seawalls.

Keywords: the gentle slope seawalls, wave direction to the seawall, 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実施し、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の比較や消波工天端幅を拡幅した場合の検討を行い、緩傾斜護岸の各種越波流量特性について前回までに報告している。

これに引き続き、今回は研究（その3）として、1:3勾配護岸について、波の入射角に対する越波流量特性を平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平面水槽で行った。図-1に示す実験水槽は、長さ30m、幅20m、深さ1.2mであり、水槽端部に設置した2台のピストン型造波装置で単一方向不規則波を造波することができる。

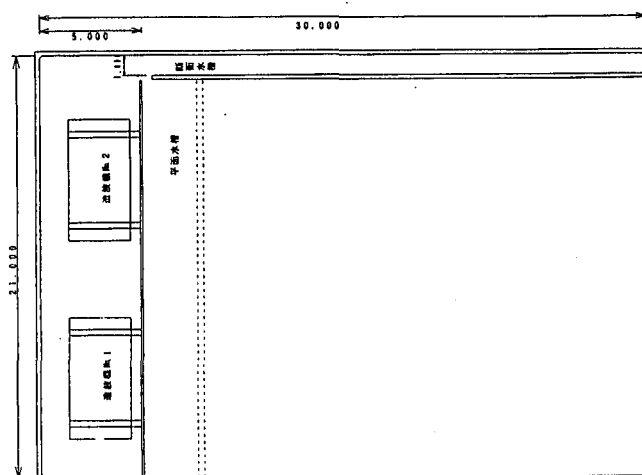


図-1 実験水槽

* 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㈱海洋部

(2) 実験条件

模型縮尺は1/50、実験潮位は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、天端高+6.6m（水面上+2.1m）天端上層ブロック列（天端幅）は2列（2.9m）である。

実験対象波は、表-1に示すとおりで、この海域の基準波である $H_{1/3}=3.6\text{m}$ 、 $T_{1/3}=6.9\text{sec}$ （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 $H_{1/3}=3.2\text{m}$ 、 $T_{1/3}=6.5\text{sec}$ 及び $H_{1/3}=4.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=7.2\text{sec}$ の3種類であり、周波数スペクトルは、いずれも、修正プレットシュナイダー・光易型を目標とした。

実験は、各対象波の入射角を護岸法線直角方向に対し0度、30度、60度に変化させて行い、その越波流量特性を検討した。なお、基準波（波高3.6m）は、その特性を詳細に把握するため、入射角10度、45度の条件も実施した。

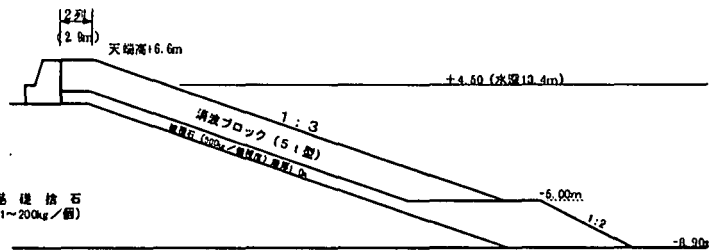


図-2 実験対象断面

表-1 実験対象波の諸元

H _{1/3}	T _{1/3}	沖波波形勾配	備考
3.2m	6.5s	0.05程度	基準波
3.6m	6.9s		
4.0m	7.2s		

(3) 実験及び解析方法

図-3は、実験に使用した護岸模型の平面及び断面を示したものである。護岸模型の延長は3mで、平面水槽の中央やや後方（造波板から15m地点）に設置し、波の入射角は護岸模型を回転させることで変化した。越波の採水は、護岸上手端部の擾乱を回避できる護岸法線方向の任意の位置に幅60cmの採水箱を設置して行った。

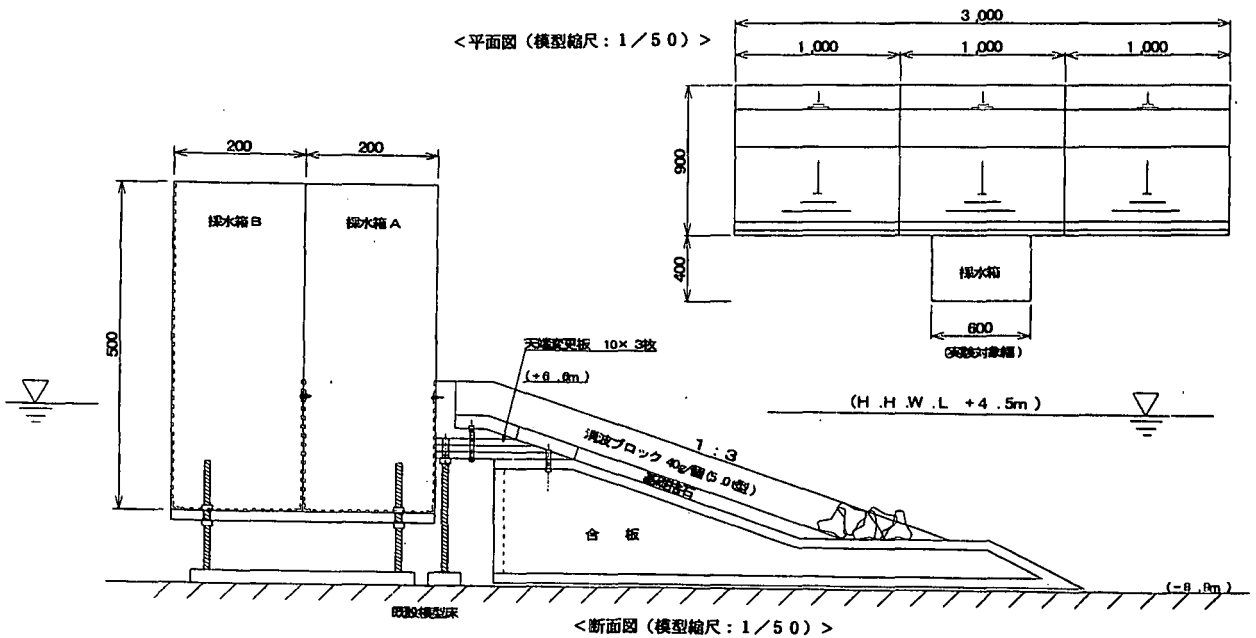


図-3 護岸模型及び越波水採水箱(1:3勾配)

単位: mm

実験では、波が定常状態となるまでは越波水が採水箱に入らないように、採水箱前面を木製板で仕切り、測定開始と同時に板を外して越波水の採水を行った。幅60cmの範囲で採水箱内に集水させ、電子秤(6kg/個用)を用いて採水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70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、波の入射角の変化に伴う1:3勾配護岸の越波流量特性を求めた。

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(実験護岸の天端高と、越波流量が等しくなる直立護岸とした場合の天端高の比)を利用して、1:3勾配護岸における天端高をパラメータとした任意の入射角に対する概算越波流量及び任意の入射角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) 前回までの報告の実験結果

本研究の前段となった前回報告（報告その1, その2）の実験結果を示す。報告（その1）の実験は、図-4に示した1:3勾配護岸及び1:4/3勾配護岸を対象に長水路で実施し、天端高はいずれも+7.5m（水面上+3.0m）とした。なお、消波工天端幅は今回実験と同じ2.9m（5t型消波ブロックを天端上層2列並び）であり、既存の消波護岸越波流量推定図の天端幅（本実験より大型のブロックを天端上層3列並び）の1/2以下とかなり狭い条件である。模型縮尺は1/30、実験潮位はH.H.W.L +4.5m、実験波は表-2に示す3種類の波（基準波H1/3=4.0m、T1/3=7.2sec）を用い、いずれも、修正プレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルを目標とした。

表-2 報告(その1)の実験対象波

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

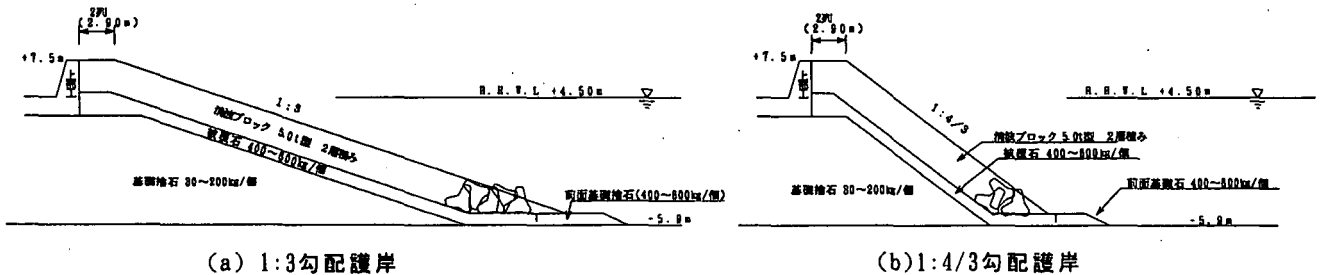


図-4 報告(その1)の実験対象断面

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 $0.1\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ 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勾配護岸の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、報告（その2）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、図-6のように、消波工天端上層ブロック列（天端幅）を2~4列に変化させて、その越波流量特性を検討した。

なお、実験天端高は報告（その1）より0.5m低い+7.0m（水面上+2.5m）とし、模型縮尺は1/30、実験潮位はH.H.W.L +4.5m、実験波は表-2中の基準波（H1/3=4.0m、T1/3=7.2sec）を対象とした。

その結果は、図-7のとおりであり、1:3勾配護岸の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(a)の天端高より0.5m低い条件においても、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。

このように、1:3勾配護岸は、1:4/3勾配護岸に比べて越波低減効果が高く、さらに、消波工天端幅をブロック2列から4列に拡幅することで、越波流量を1/3程度に低減できることが前回までの実験により明らかとなった。

これに引き続き、本研究では、越波流量が「入射波の波向」とも深く関係することに鑑み、波の入射角に対する1:3勾配護岸の越波流量特性を検討した。

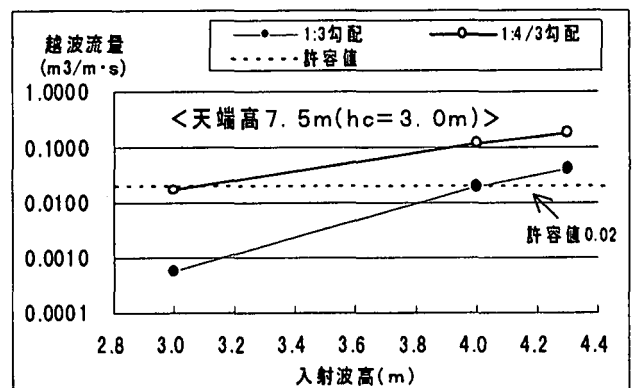


図-5 護岸勾配の違いによる越波流量の関係

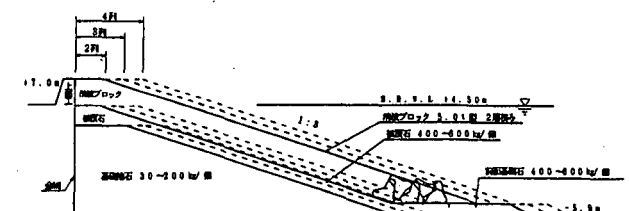


図-6 報告(その2)の実験対象断面

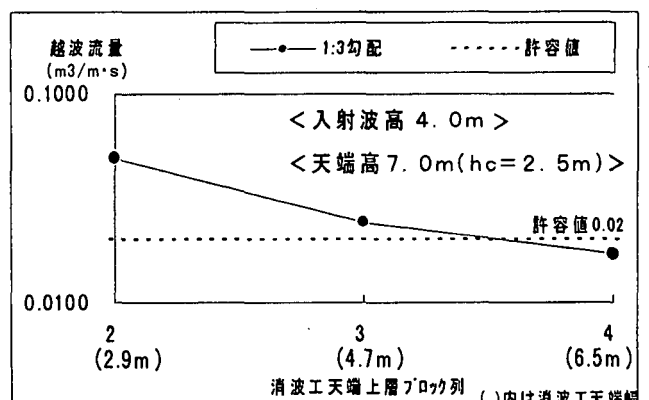


図-7 消波工天端幅の違いによる越波流量特性

(2) 波の入射角による越波流量特性

図-8は、平面実験（天端高+6.6m、消波工天端幅2列）において、各波高における波の入射角と越波流量の関係を示したものである。

はじめに、全体傾向をみると、いずれの波も、入射角が大きくなるにしたがって越波流量は減少する傾向がみられ、基準波である波高3.6mの場合、入射角30度の越波流量は入射角0度（直角入射）の約1/2に減少し、入射角45度になると、設定した許容越波流量 $0.02\text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ を大きく下回り、入射角が60度になると、越波流量は入射角0度（直角入射）の1/100（他の波高を含めると1/50～1/300程度）まで低減している。

これは、入射角が大きくなるにつれて波エネルギーの法線直角方向成分が減少し、逆に法線方向成分が増大するためと考えられる。

ただし、既往の研究によれば、直立護岸の場合、入射角が45度になると越波流量は増大傾向となり、その要因は、入射角が大きいと非線形干渉が生じて波高が増大するためであることが指摘されている。したがって、本実験で得られた図-8の越波特性は、1:3勾配護岸（緩傾斜消波護岸）固有の特性の可能性もある。

なお、本実験結果を詳細にみると、波高3.6mの波の場合、越波流量は直角入射時よりも入射角10度の方がわずかに高い結果となっている。これについて、先の研究でも、直角よりわずかに斜め方向（入射角7.5度）から入射する場合に越波流量は極大を示すことを報告しており、1:3勾配の消波護岸においても本傾向が現れることが確認された（波高3.2m、4.0mについても現れるものと推測）とともに、今後、入射角の条件によっては、直角入射時の越波流量を多少割り増して考える必要があるものと考えられる。

(3) 任意の入射角、任意の天端高に対する越波流量算定図の提案

図-9(a)～(c)は、実験結果を基に、直立護岸に対する換算天端高係数を求め、これより、既存の直立護岸越波流量推定図を利用して作成した天端高をパラメータとする任意の入射角における越波流量算定図である。ここで、換算天端高係数は、図-8の各波高、各入射角に対する越波流量結果より、同じ機能を持つ直立護岸の天端高を逆算し、実験天端高（水面上 h_c ）との比として示したものである。

この図より、伊勢湾北部海域における任意の入射角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。

なお、本算定図の作成に際し、実験で対象とした天端高から離れるほど算定精度が低下することを前回までの天端高の異なる実験結果より確認している。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（すなわち、換算天端高係数の変化）と同様な効果が現

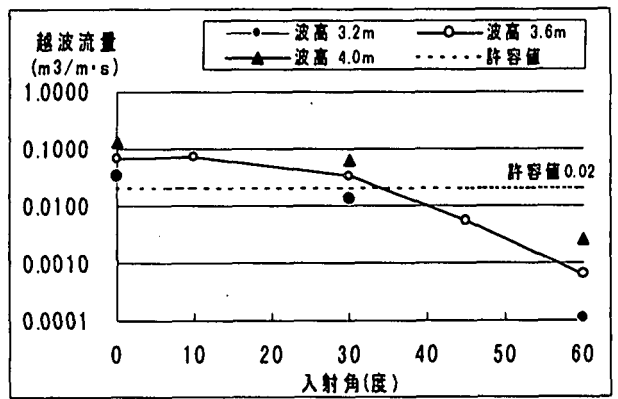
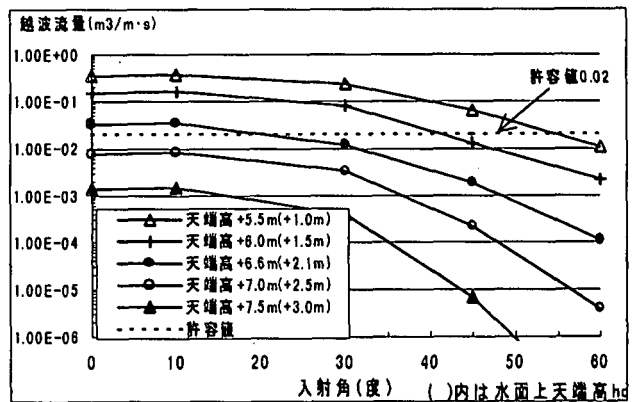
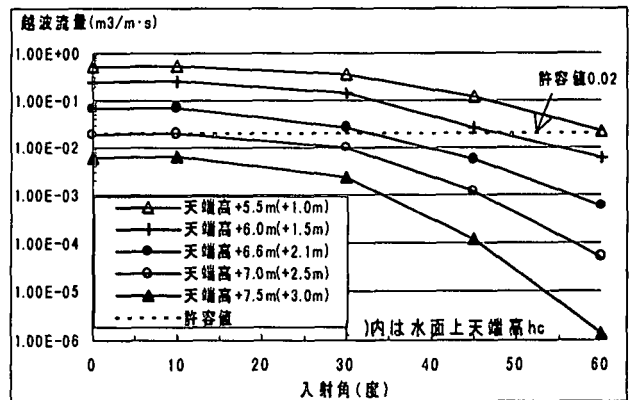


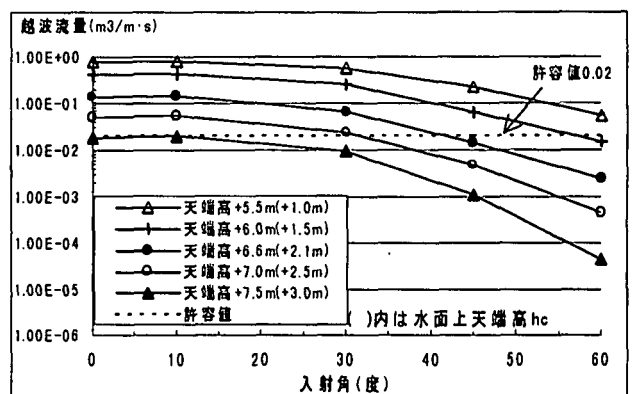
図-8 波の入射角による越波流量特性



(a) 波高3.2m



(b) 波高3.6m



(c) 波高4.0m

図-9 任意の入射角、任意の天端高における越波流量算定図

れるためと推測される。よって、図-9の算定図は、各天端高の変化に応じ、前回まで実験結果を基に、換算天端高係数を補正して作成している。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-9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) 許容越波流量となる所要天端高及び波の入射角による天端高低減率

図-10は、図-9の各波高別の越波流量算定図より求めた、任意の入射角に対し許容越波流量 $0.02\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ となる水面上からの所要天端高 h_c の算定図を示したものである。

これをみると、許容越波流量を満足するための所要天端高 h_c は入射角の増加とともに大きく低減し、基準波(波高 3.6m)の場合、直角入射時には 2.5m の天端高を要するのに対し、 30° では 2.3m 、 45° では 1.7m 、 60° では 1.1m まで低下することがわかる。

ちなみに、本結果を前回報告の天端幅による越波流量特性と比較すると(表-3参照)、同一波高である波高 4.0m の場合、天端上層ブロック列を2列から4列に拡幅することで所要天端高を $+2.5\text{m}$ に低減できるが、入射角が 60° になると、天端ブロック列を2列のままにしても、所要天端高を約 $+1.3\text{m}$ まで低減できることが推測される。

図-11は、この入射角による天端高低減効果を所要天端高比(直角入射時の所要天端高 h_c に対する比)として示したものであり、入射角が $45\sim 60^\circ$ になることで所要天端高比は $0.35\sim 0.65$ と低くなっている。

このように、直角入射時に比べ、天端高をかなり低減できる可能性があり、今後、護岸建設費の削減が期待できるものとする。

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、波の入射角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 天端高 $+6.6\text{m}$ (水面上 $h_c=+2.1\text{m}$)の緩傾斜護岸に波高 $3.2\sim 4.0\text{m}$ (沖波波形勾配約 0.05)の波を作用させた場合、波の入射角が大きくなるにつれて越波流量は顕著に減少し、入射角 30° の越波流量は 0° (直角入射)の約 $1/2$ に、 60° になると $1/50\sim 1/300$ に低減して設定した許容流量 $0.02\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ を大きく下回ることが解った。
- ② ただし、波高 3.6m の場合、入射角 10° 時の越波流量は直角入射時よりわずかに高い結果となっており、この傾向は、直立護岸を対象とした既往の研究でも指摘されていることから、今後、入射角の条件によっては、直角入射時の越波流量を多少割り増して考える必要があるものとする。
- ③ 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に、任意の入射角に対する $1:3$ 勾配護岸の概算越波流量を推定できる図を作成した。
- ④ ③より許容流量 $0.02\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ を満足させる水面上の所要天端高 h_c を求め、入射角 0° 時を基準とした所要天端高比としてみると、波の入射角が $45\sim 60^\circ$ になることで $0.4\sim 0.7$ に低下している。よって、入射角が増大すると天端高をかなり低減できる可能性があり、今後、護岸建設費の削減が期待できるものとする。

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。

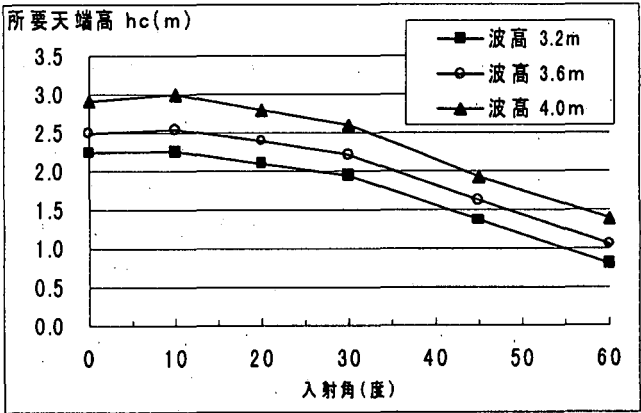


図-10 任意の入射角に対し許容越波流量となる所要天端高 h_c (水面上の天端高)の算定図

表-3 許容越波流量となる条件(波高 4.0m)

天端幅	ブロック2列	ブロック4列	ブロック2列
入射角	0度		60度
天端高	約+3.0m	約+2.5m	約+1.3m

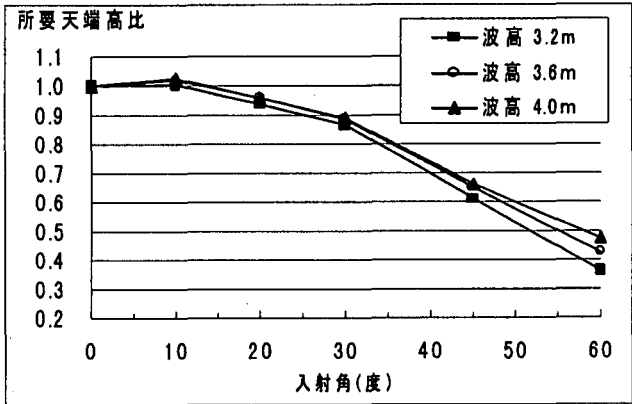


図-11 波の入射角と所要天端高比の関係(許容越波流量時)

(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.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦・関口忠志(1984): 斜め入射不規則波を用いた越波特性実験, 海岸工学論文集, vol. 31, pp. 542~546.
- 合田良実(1991): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版
- 平石哲也・望月徳雄・佐藤一央・丸山晴広・金澤 剛・榎本達也(1996): 護岸越波量における波の多方向性の影響, 港湾技術研究所報告, 第35巻 第1号, pp. 39~64.
- 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, pp. 285-290.
- 片平和夫・笹田彰・中井章・森川高德(1997): 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), 海洋開発論文集, Vol. 13, pp. 555-560.