

## 改良型護岸の越波流量低減効果と CADMAS-SURF の再現性の検証

阿部 洋士\*・高橋 武志\*\*・鈴木 高二朗\*\*\*・中澤 祐飛\*\*\*\*

### 要 旨

従来の直立護岸や消波護岸に加えて、形状を工夫することで越波流量を小さくし、かつ天端高を低く抑えることができる改良型護岸が越波対策として期待されている。代表的なものとして、上部フレア護岸、ダブルパラペット護岸、透水型護岸がある。

改良型護岸は護岸形式毎に研究はされているものの、研究事例はまだ少ない状況である。先行研究は特定の施設の現地条件を対象にしたものが多く、広範な条件を対象として越波流量を定量的に評価したものが少ない。また、複数の護岸形式を統一的に比較して、越波量低減効果を調べた研究もない。

そこで本研究では、水理模型実験により改良型護岸の越波低減性能を評価するとともに、換算天端高係数を算定することを目的とした。また、数値波動水路 CADMAS-SURF/3D の改良型護岸における越波の再現性を調べるとともに、再現性の低下要因を明らかにすることも目的とした。

実験の結果、換算天端高係数は透水型が最も小さかった。また、上部フレア型、ダブルパラペット型は透水型に次いで小さく、越波流量低減に有効な護岸形状であることを確認した。CADMAS-SURF/3D は、砕波減衰が強い条件を除き、直立護岸の越波流量を良好に再現した。一方、改良型護岸の越波流量は直立護岸に比べると再現性が低かった。そこで護岸形式毎に再現性の低下要因を示した。

キーワード：越波，改良型護岸，換算天端高係数，CADMAS-SURF

---

\* 沿岸水工研究領域 耐波研究グループ 依頼研修員（復建調査設計株式会社）  
\*\* 沿岸水工研究領域 耐波研究グループ 依頼研修員（パシフィックコンサルタンツ株式会社）  
\*\*\* 沿岸水工研究領域 領域長  
\*\*\*\* 沿岸水工研究領域 耐波研究グループ 研究員  
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5043 Fax：046-842-7846 e-mail: suzuki\_k@p.mpat.go.jp

## Effectiveness of Improved Seawalls in Reducing Wave Overtopping and Consideration on Reproducibility of Wave Overtopping by CADMAS-SURF

**Hiroshi ABE\***  
**Takeshi TAKAHASHI\*\***  
**Kojiro SUZUKI\*\*\***  
**Yuhi NAKAZAWA\*\*\*\***

### Synopsis

In addition to vertical seawall and seawall covered with wave-dissipating blocks, improved seawalls are expected to provide protection against wave overtopping. Improved seawall can reduce wave overtopping rate and crown height by changing the shape of seawall. For example, upper flare-shaped seawall, double-parapet seawall, double parapet permeable-type seawall.

Although there have been studies on each type of seawall, there are still only a few cases studies. Most of the previous studies were conducted under the local conditions, and there are few studies that quantitatively evaluate the wave overtopping rate under a wide range of conditions. In addition, there are no studies that have compared several types of improved seawalls to investigate their effectiveness in reducing wave overtopping rate.

The purpose of this study is to evaluate the overtopping reduction performance of the improved seawall and calculation of the equivalent crown height coefficient by hydraulic experiment. In addition, the reproducibility of the improved revetment was verified using CADMAS-SURF/3D.

The experimental results showed that the permeable type had the lowest equivalent crown height coefficient. The numerical simulation results showed that wave overtopping rate of vertical seawall was well reproduced, expect for the condition of strong wave breaking attenuation. On the other hand, the reproducibility of the wave overtopping rate of improved seawall was lower than that of vertical seawall.

**Key Words:** Overtopping, improved seawall, equivalent crown height coefficient, CADMAS-SURF

---

\* Research Trainee, Maritime Structures Group, Coastal Hydraulic Engineering Department (Fukken Co., Ltd.)

\*\* Research Trainee, Maritime Structures Group, Coastal Hydraulic Engineering Department (Pacific Consultants, Co., Ltd.)

\*\*\* Director of Coastal Hydraulic Engineering Department

\*\*\*\* Member, Maritime Structures Group, Coastal Hydraulic Engineering Department

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Port and Airport Research Institute

Phone : +81-46-844-5043 Fax : +81-46-842-7846 E-mail : suzuki\_k@p.mpat.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	6
2. 水理模型実験の概要 .....	7
2.1 実験施設 .....	7
2.2 実験模型 .....	9
2.3 実験条件及び実験ケース .....	10
2.4 計測方法及び解析方法 .....	12
3. 水理模型実験の結果 .....	13
3.1 波高検定 .....	13
3.2 直立護岸 .....	15
3.3 消波護岸 .....	19
3.4 上部フレア護岸 .....	20
3.5 ダブルパラペット護岸 .....	21
3.6 透水型護岸 .....	23
3.7 改良型護岸の越波流量低減効果 .....	24
4. 改良型護岸の換算天端高係数 .....	26
4.1 換算天端高係数の算定手法 .....	26
4.2 換算天端高係数の算定結果 .....	31
5. 水理模型実験と数値計算の比較 .....	33
5.1 CADMAS-SURFについて .....	33
5.2 計算条件 .....	35
5.3 計算結果 .....	38
6. 数値計算の再現性の低下要因とその検証 .....	42
6.1 直立護岸 .....	42
6.2 消波護岸 .....	43
6.3 ダブルパラペット護岸 .....	45
6.4 上部フレア護岸 .....	46
6.5 透水型護岸 .....	46
6.6 その他の再現性低下要因 .....	46
7. 結論 .....	47
8. あとがき .....	47
謝辞 .....	47
参考文献 .....	48
記号表 .....	48

## 1. まえがき

将来的に気候変動による海面上昇や台風、高波の強化が予測されており、越波流量低減のための護岸改良が今後必要とされている。一般的な越波対策としては、護岸の嵩上げや消波ブロックの設置などが挙げられるが、景観や海底勾配等の制限からそれらの対策が難しい場合もある。そうした中、従来の直立護岸や消波護岸に加えて、形状を工夫することで越波流量を小さくし、かつ天端高を低く抑えることができる改良型護岸が越波対策として期待されている。代表的なものとして、フレア護岸、上部フレア護岸、ダブルパラペット護岸、透水性護岸がある。

フレア護岸は、護岸前面が円弧形状で沖側に張り出した形状の護岸であり、高い越波低減機能を有することが分かっている<sup>1)</sup>。また、護岸天端上の有効活用が可能であり、利用面でも優れている。

フレア護岸に類似した形状の護岸として、上部フレア護岸がある。上部フレア護岸は、フレア護岸の曲面の上部のみを用いた形状であり、既設護岸を活かした越波対策への適用を目的として開発されたものである<sup>2)</sup>。

ダブルパラペット護岸は、護岸の前面または背面にもう一つのパラペットを有した形状の護岸である。越波低減機能を有することが期待されるが、パラペットの高さや配置などと越波流量の関係性について体系的に整理された研究は限られている。ダブルパラペットの問題点としては、第一パラペットを越波した水塊の打ち込みでパラペット間の床板に波圧がかかる点や、パラペット間に溜まった越波水を排水する必要がある点が挙げられる。

透水性護岸は、越波水の透水・排水のための透水層構造を有した形状であり、ダブルパラペット護岸の排水の問題を透水層により対策した護岸である。長澤ら(2011)<sup>3)</sup>により、透水性二重護岸は、同規模の断面幅を有する消波ブロック被覆護岸と同等以上の越波低減性能を有していることが検証されている。また、一般的な護岸形状の直立護岸や消波護岸と比較して、越波量に影響を与えるパラメータが多いという特徴もある。

越波流量の推定に関して、よく利用されているのが合田の越波流量推定図<sup>4)</sup>である。同推定図は、直立護岸と消波護岸を対象に、各海底勾配(1/10, 1/30)について波形勾配3種類( $H_0/L_0 = 0.012, 0.017, 0.036$ )の条件について示したもので実務設計に利用されている。それに比べて、改良型護岸の越波流量を定量的に評価する手法を提案したものは限られている。フレア護岸には、片岡ら(2005)<sup>4)</sup>が提案している越波流量推定図がある。一方で、下迫ら(2006)<sup>5)</sup>や長澤ら(2011)<sup>3)</sup>はそれぞれダブルパラペット

護岸と透水性護岸について、越波流量を調べたものの、特定の水深と波浪条件に対して検討したものであり、広範な条件を対象とする越波流量推定図の算定には至っていない。

また、越波流量推定図以外にも換算天端高係数(合田ら, 1975; 高山ら, 1982)<sup>4), 6)</sup>を用いた越波流量の推定手法がある。換算天端高係数は、同一の波と海底形状の条件において直立護岸と同一の越波量となる対象護岸の高さと直立護岸の高さの比である<sup>7)</sup>。換算天端高係数が小さい場合には、直立護岸に比較して低い護岸天端であっても同一の越波量となることを表し、その護岸形状が越波量低減に有効であることを示す。しかしながら、ダブルパラペット護岸や透水性護岸については、これまで換算天端高係数が明らかではなかった。

また、いずれの先行研究も、構造形式毎に独立に研究がなされているため、構造形式同士の防護機能を統一的に比較した研究がなされていない。そのため、護岸設計で構造形式を選択する際に、改良型護岸の防護機能を定量的に評価し、複数構造形式を比較するために参考となる資料が不足している。

そこで、本研究では、直立護岸、消波護岸及び改良型護岸(上部フレア型、ダブルパラペット型、透水性を対象)に対して、同一かつ広範な条件の水理模型実験で越波量を測定し、改良型護岸の越波量を定量的に評価した。そして、改良型護岸の換算天端高係数を求めた。

また、合田の越波流量推定図<sup>4)</sup>に代表される既往の設計資料、研究結果を用いる方法の他に、数値波動水槽等の数値計算により越波量を推定する方法を用いることがある。改良型護岸を今後実海域に適用する際に、改良型護岸の性能を規定するための検討項目の多さが課題となる。例えば、ダブルパラペット護岸では、前面・背後パラペットの天端高だけでなく、離隔距離、排水量が異なれば、越波流量が異なる。機能性・経済性を追求する度に検討断面数が膨大となり、水理模型実験のみの検討では限界がある。

そこで、耐波設計にも利用されている数値波動水路の活用可能性を検討すべく、CADMAS-SURF 3D<sup>8)~10)</sup>を用いて直立護岸、消波護岸及び改良型護岸に対して再現計算を行い、数値波動水路による水理模型実験結果の再現性の検証も実施した。

## 2. 水理模型実験の概要

勾配の2種類の模型床に対して水理模型実験を実施した。

### 2.1 実験施設

実験には、図-2.1～図-2.4 に示す港湾空港技術研究所所有の大型水路（105m 堤体実験水路）を使用した。この水路は、長さ 105m、幅 3m、深さ 2.5m の断面水路で、ピストン型造波機が設置された造波水路である。水路は途中で隔壁により、幅 0.8m の主水路と幅 2.5m の副水路に分かれており、本実験は主水路で実施した。水路床は、造波機側から水平勾配、15 分の 1 勾配、100 分の 1 勾配の順で接続しており、模型を設置する観測窓付近では水平となっている。実験では、100 分の 1 勾配～水平勾配の水路床上に海底勾配を模した 10 分の 1 勾配（図-2.1、図-2.2、写真-2.1）及び 30 分の 1 勾配（図-2.3、図-2.4）の2種類の模型床（写真-1）を表層モルタル仕上げで製作した。なお、30 分の 1 勾配模型床の先端部は 10 分の 1 勾配で擦り付けてある。これらの 10 分の 1 勾配及び 30 分の 1



写真-2.1 10分の1勾配模型床

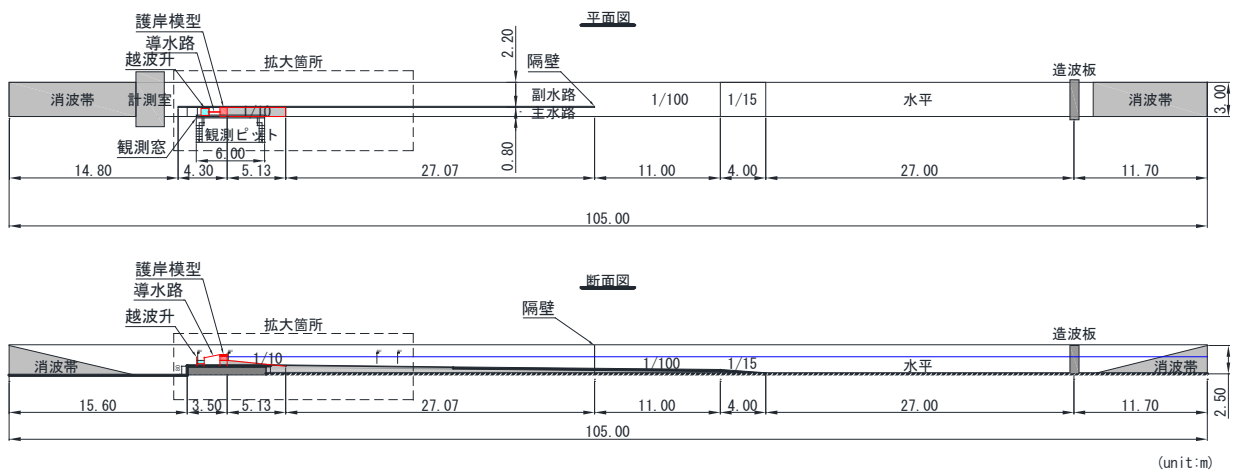


図-2.1 実験水路（全体図、10分の1勾配条件）

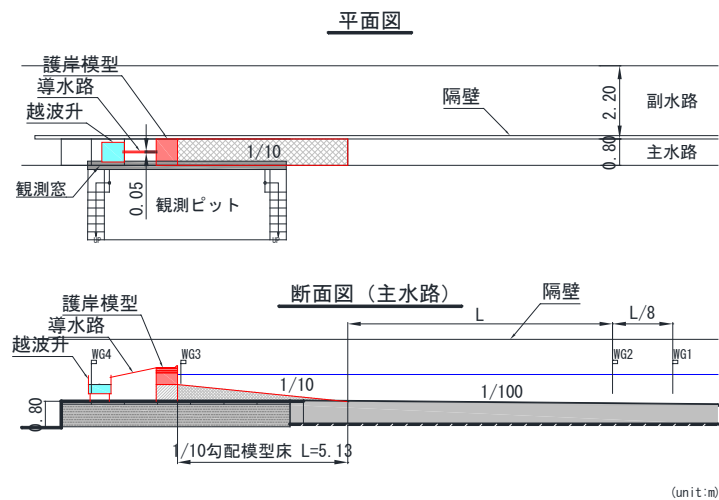


図-2.2 実験水路（堤体設置付近、10分の1勾配条件）

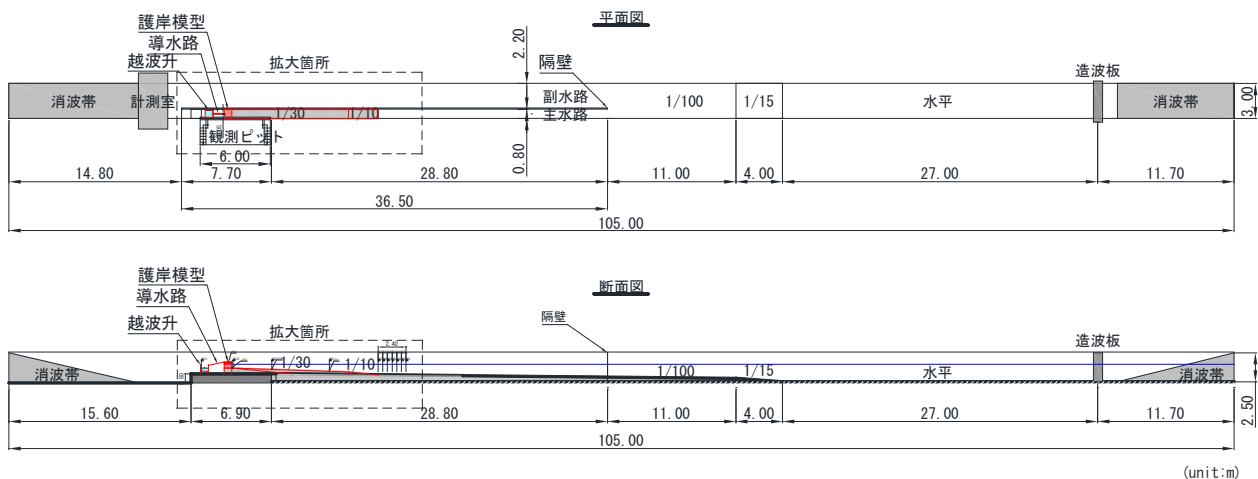


図-2.3 実験水路（全体図，30分の1勾配条件）

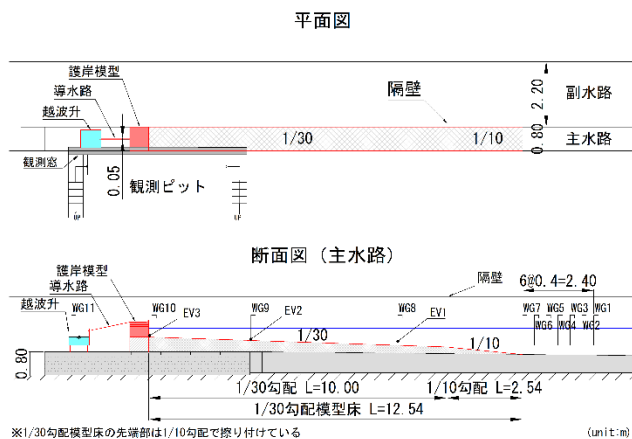


図-2.4 実験水路（堤体設置付近，30分の1勾配条件）

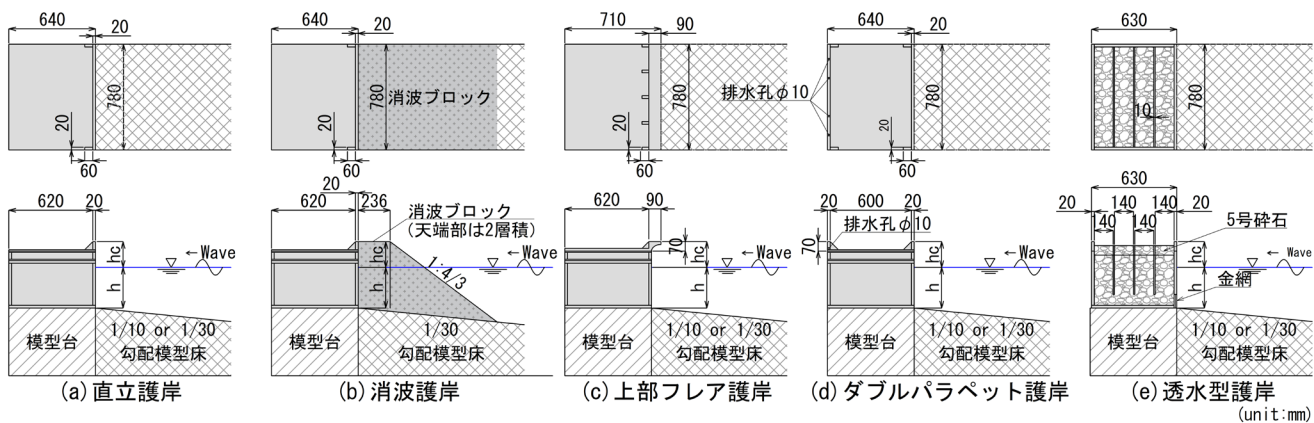


図-2.5 護岸模型（上図：平面図，下図：断面図）

## 2.2 実験模型

実験では、直立護岸、消波護岸、上部フレア護岸、ダブルパラペット護岸、透水性護岸の5種類の護岸形状を対象とした。図-2.5に各護岸模型の平面図と断面図を示す。模型はすべてアクリル材を主材としている。直立護岸、消波護岸、上部フレア護岸、ダブルパラペット護岸の4種類の護岸模型は図-2.6に示すような3つの構成部材「①水深調整用部材」、「②天端高調整部材」、「③パラペット部材」を組み合わせて製作した。

①は堤脚水深、②は天端高を調整するための部材であり、護岸形状によらない共通の部材である。③は対象の護岸形状を再現するための部材である。模型床の背後に護岸模型を固定するための模型台を製作し、模型台の上に③②①の順で模型部材を設置して実験を実施した。堤脚水深と天端高に応じて①②を、護岸形状に応じて③を変更することで対象の護岸及び所定の堤脚水深、天端高を再現した。

直立護岸のパラペット部材はL型としており前面壁の厚さは2cmとし、補強のため両端には三角形の扶壁を設けた。

消波護岸の模型は、直立護岸の模型の前面に乱積み目のテトラポッドを被覆した消波構造とした。消波工の法面勾配は一般的な1:4/3とした。消波工の天端高は直立壁の前面と同じ高さであり、消波工の天端幅は2個並びとした。実験では、消波工の法面の先端に止め木を打ち、消波工が崩れるのを防止した。

上部フレア護岸の模型は、直立護岸のL型のパラペット部材を図-2.7に示すようなフレア形状とした構造とした。補強のため直立護岸と同様に三角形の扶壁を設けている。

ダブルパラペット護岸の模型は、直立護岸に背面パラペットを設けた構造とした。前面及び背後パラペットは高さ6cm、厚さ2cmである。直立護岸と同様に補強のためパラペット部には三角形の扶壁を設けている。背後パラペットには直径1cmの排水孔を4つ設けており、パラペット間の水塊を排水できる構造としている(図-2.8)。

写真-2.2に示すように、排水試験を行い、排水孔の排水量を求めた。排水孔を閉孔してパラペット間を満水にし、静水状態から排水孔を開孔させ、湛水が排水されるまでの時間を計測した。湛水の水位が大きいときの方が排水量が大きいものの、概ね $4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ で排水される。なお、この排水量の大きさは、以下の方針で設定した。まず、本研究のような水理模型実験と実構造物が異なる点は、奥行方向に空間的な拡がりがある点である。パラペット間の湛水は護岸法線方向に流れ、パラペット間で必ずしも湛水し続けず、それに加え、実構造物に排水孔が設計さ

れていれば、さらに排水量は増加する。そのため、奥行き方向を持たない水理模型実験では、排水孔を設けてパラペット間の湛水はある程度排水する必要がある。その一方で、実構造物よりも水理模型実験の排水量が大き過ぎると、水理模型実験における前面パラペットの越波水塊が排水されてしまい、背面パラペットの越波量が過小評価となる可能性がある。本研究は耐波設計で活用できるようなダブルパラペット護岸の換算天端高係数を算出することを目的としており、ダブルパラペット護岸の越波流量を過小評価することは避けることが望ましい。従って、水理模型実験にも排水孔を設けることでパラペット間の湛水を排水するけれども、排水量は前面パラペットの越波量と比べて大き過ぎない値を設定した。結果として、直立護岸の越波流量(すなわち、ダブルパラペット護岸の前面パラペットの越波流量)が $2 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ であるのに対し、排水量が $4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ であるため、多くの条件でダブルパラペット護岸の越波流量を過小評価することは避けられている。

透水性護岸の模型は、前面壁底部に高さ10cmの開口部を設けて、越波水を沖側に逃がす構造とした。つまり、ダブルパラペットの排水の問題を透水層による排水で解決しようとしたものである。透水層は透水層幅を変化できるように仕切壁により4つの遊水室で構成されている。なお、開口部には透水層内の砕石が流出しないよう金網を取り付けている(図-2.10)

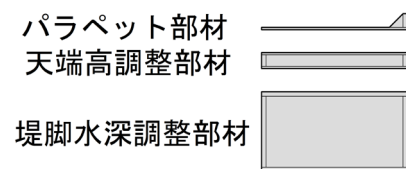


図-2.6 護岸模型の構成部材

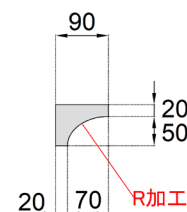


図-2.7 上部フレア護岸のパラペット部材の断面

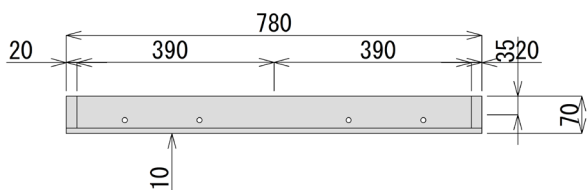


図-2.8 ダブルパラペット護岸のパラペット部背面図

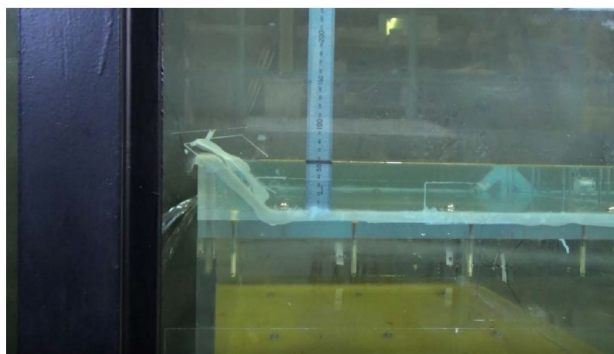


写真-2.2 ダブルパラペット護岸の排水試験の様子

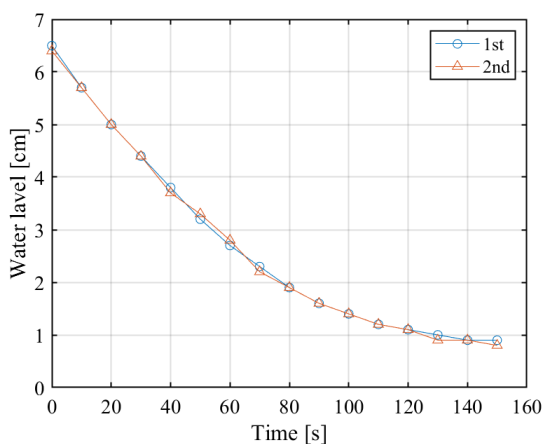


図-2.9 ダブルパラペット護岸の排水試験結果

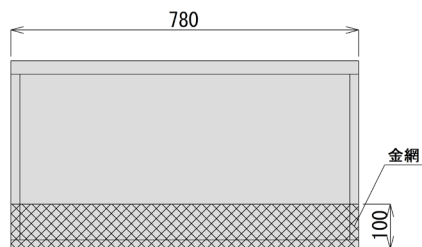


図-2.10 護岸模型

### 2.3 実験条件及び実験ケース

本実験の実験条件を表-2.1に示す。水路勾配は、10分の1と30分の1の2種類である。護岸形式は、水路勾配で異なっており、30分の1勾配の実験では5種類すべてを対象とし、10分の1勾配の実験では、消波護岸を除いた4種類を対象とした。作用波は、10分の1勾配の実験では不規則波、30分の1勾配の実験では不規則波と規則波とした。不規則波の造波信号作成時のスペクトル形状は修正ブレッドシユナイダー・光易型とした。不規則波は1波群300波、規則波は60波を目標とした。不規則波の実験では、波高は1種類であり目標換算沖波波高 $H_{0,i}$ は15cmとした。有義周期 $T_{1/3}$ 及び堤脚水深 $h$ はそれぞれ3種類とし合田の越波流量推定図<sup>4)</sup>を参考に、 $H_{0,i}/L_0=0.012, 0.017, 0.036$ 、 $h/H_{0,i}=0.0, 1.0, 2.0$ となるように目標値を設定した。天端高は各水深に対して最大3種類とした。表-2.2、表-2.3に各護岸の堤前水深と天端高の組み合わせを、表-2.4に実験ケース表を示す。

表-2.1 実験条件

項目	設定値	
水路勾配	1/10	1/30
護岸模型	直立護岸 上部フレア護岸 ダブルパラペット護岸 透水性護岸	直立護岸 消波護岸 上部フレア護岸 ダブルパラペット護岸 透水性護岸
波種別	不規則波	不規則波, 規則波
目標換算 沖波波高	$H_{0,i}=0.15\text{cm}$	
周期	$T_{1/3}=1.63\text{s}, 2.38\text{s}, 2.83\text{s}$ ( $H_{0,i}/L_0=0.036, 0.017, 0.012$ )	
堤脚水深	$h=0\text{m}, 0.15\text{m}, 0.30\text{m}$ ( $h/H_{0,i}=0.0, 1.0, 2.0$ )	
天端高	$h_c=0.12\text{m}, 0.19\text{m}, 0.26\text{m}$ ( $h_c/H_{0,i}=0.80, 1.27, 1.73$ )	



表-2.2 護岸形式毎の堤脚水深と天端高の組み合わせ  
(不規則波)

護岸形式	水路勾配 $\frac{h_c}{h}$ [m]	1/10			1/30		
		0.12	0.19	0.26	0.12	0.19	0.26
直立護岸	0.00	◎	-	○	◎	-	-
	0.15	◎	-	◎	◎	○	◎
	0.30	◎	◎	◎	◎	◎	◎
消波護岸	0.00	-	-	-	○	-	-
	0.15	-	-	-	○	○	○
	0.30	-	-	-	○	○	○
上部フレア護岸	0.00	-	-	-	-	-	-
	0.15	-	-	-	○	○	○
	0.30	◎	-	◎	◎	○	◎
ダブルパラペット護岸	0.00	-	-	-	-	-	-
	0.15	-	-	-	○	○	○
	0.30	◎	◎	◎	◎	◎	◎
透水性護岸	0.00	-	-	-	-	-	-
	0.15	-	-	-	○	○	○
	0.30	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎：10分の1勾配, 30分の1勾配の両ケースで実施  
○：10分の1勾配または30分の1勾配のどちらかのみ実施  
-：未実施

表-2.3 護岸形式毎の堤脚水深と天端高の組み合わせ  
(規則波)

護岸形式	水路勾配 $\frac{h_c}{h}$ [m]	1/10			1/30		
		0.12	0.19	0.26	0.12	0.19	0.26
直立護岸	0.00	-	-	-	○	-	-
	0.15	-	-	-	○	○	○
	0.30	-	-	-	○	○	○
消波護岸	0.00	-	-	-	-	-	-
	0.15	-	-	-	○	-	-
	0.30	-	-	-	○	-	-
上部フレア護岸	0.00	-	-	-	-	-	-
	0.15	-	-	-	○	-	-
	0.30	-	-	-	○	-	-
ダブルパラペット護岸	0.00	-	-	-	-	-	-
	0.15	-	-	-	○	-	-
	0.30	-	-	-	○	-	-
透水性護岸	0.00	-	-	-	-	-	-
	0.15	-	-	-	○	-	-
	0.30	-	-	-	○	-	-

○：10分の1勾配または30分の1勾配のどちらかのみ実施  
-：未実施

表-2.4 実験ケース表

波種別	波群	波数	換算沖波波高 $H_0$ (m)	有義周期 $T_{1/3}$ (s)	堤脚水深 h(m)	天端高 $h_c$ (m)	水路勾配1/10					水路勾配1/30					相対水深 h/H <sub>0</sub> '	相対天端高 $h_c/H_0'$	波形勾配 $H_0'/L_0$	
							直立護岸	消波護岸	フレア型	DP型	透水性	直立護岸	消波護岸	フレア型	DP型	透水性				
不規則波 規則波	1	300	0.15	1.63	0.00	0.12	●	-	-	-	-	●○(3)	-	-	-	-	0.0	0.80	0.036	
						0.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.27		
						0.26	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.73		
						0.15	0.12	●	-	-	-	-	●○(3)	●○(3)	●○(1)	●○(1)	●○(1)	1.0		0.80
							0.19	-	-	-	-	-	●○(3)	●	●	●	●	1.27		
							0.26	●	-	-	-	-	●○(1)	-	●	●	●	1.73		
						0.30	0.12	●	-	-	-	-	●○(11)	●○(10)	●○(1)	●○(1)	●○(1)	2.0		0.80
							0.19	●	-	-	-	-	●○(9)	●	●	●	●	1.27		
							0.26	●	-	-	-	-	●○(9)	●	●	●	●	1.73		
					2.38	0.00	0.12	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.80	0.017
							0.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.27		
							0.26	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.73		
						0.15	0.12	●	-	-	-	-	●○(3)	●○(3)	●○(1)	●○(1)	●○(1)	1.0	0.80	
							0.19	-	-	-	-	-	●○(3)	●	●	●	●	1.27		
							0.26	●	-	-	-	-	●○(3)	-	●	●	●	1.73		
						0.30	0.12	●	-	-	-	-	●○(8)	●○(8)	●○(1)	●○(1)	●○(1)	2.0	0.80	
							0.19	●	-	-	-	-	●○(8)	●	●	●	●	1.27		
							0.26	●	-	-	-	-	●○(8)	●	●	●	●	1.73		
					2.83	0.00	0.12	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.80	0.012
							0.19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.27		
							0.26	●	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.73		
						0.15	0.12	●	-	-	-	-	●○(3)	●○(3)	●○(1)	●○(1)	●○(1)	1.0	0.80	
							0.19	-	-	-	-	-	●○(3)	●	●	●	●	1.27		
							0.26	●	-	-	-	-	●○(3)	-	●	●	●	1.73		
0.30	0.12	●	-	-		-	-	●○(7)	●○(7)	●○(1)	●○(1)	●○(1)	2.0	0.80						
	0.19	●	-	-		-	-	●○(9)	●	●	●	●	1.27							
	0.26	●	-	-		-	-	●○(7)	●	●	●	●	1.73							

※ ●：不規則を実施, ○：規則波を実施 (カッコ内の数値は波高の種類を表す), -：未実施

## 2.4 計測方法及び解析方法

### (1) 波高

波高の測定には、容量式波高計を使用した。10分の1勾配の実験での波高計の設置位置を図-2.2に示す。波高計は10分の1勾配模型床の先端部付近に入・反射波分離用に2台、護岸模型前面に1台、越波升内に越波量測定用に1台の計4台とした。

30分の1勾配の実験での波高計の設置位置を図-2.4に示す。波高計は、30分の1勾配模型床の先端部（10分の1勾配部）付近に入・反射波分離用に7台、30分の1勾配模型床の先端部（10分の1勾配部）付近から護岸模型前面までに3台、越波升内に越波量測定用に1台の計11台とした。

波高計で計測した水位変動データはゼロアップクロスにより波別解析を実施して1波ごとの波高・周期を求め、統計解析により有義波高 $H_{1/3}$ 、有義周期 $T_{1/3}$ などの諸元を算出するとともに、合田ら(1976)<sup>11)</sup>の入・反射波分離解析を実施して反射率 $K_R$ を算出した。入・反射波分離解析結果から求めた反射率を用いて、次式に示す入射有義波高を求めた。

$$H_I = \frac{1}{\sqrt{1+K_R^2}} H_{1/3} \quad (2.1)$$

ここで、 $H_I$ ：入射有義波高、 $K_R$ ：反射率、 $H_{1/3}$ ：有義波高である。入射有義波高及び入射有義波周期の合わせこみは、10分の1勾配の実験ではWG1とWG2を、30分の1勾配の実験ではWG1～6とWG7の内適切な組み合わせを対象とした。そして、入射波高を浅水係数で除することで換算沖波波高 $H_0'$ を算定した。浅水係数は、首藤の理論<sup>12)</sup>に基づいて作成した非線型浅水係数の図表で算出した。

$$H_0' = H_I / K_S \quad (2.2)$$

ここで、 $H_0'$ ：換算沖波波高、 $H_I$ ：入射有義波高、 $K_S$ ：浅水係数である。

### (2) 越波量

越波量の測定には、護岸模型の背後の越波升内に設置した波高計を使用した。越波水は護岸模型の背後にある導水路（幅5cm）を通じて、越波升に流入する構造としている。越波升は、数種類の容量の大きさを用意し、越波量に応じて適切な形状のものを用いた。また、護岸形状や実験条件に応じて護岸模型と越波升の間に越波水が溜まるのを防ぐために、越波升底部と水路床の間には通水部を設けた（写真-2.3）。

越波量 $Q$  [ $\text{m}^3$ ]は、越波升内に設置した波高計から、越波升内の初期水位からの水位上昇量を求めて、越波升の底面積を乗ずることで算定した。越波量 $Q$ を導水路幅（5cm）と計測時間で除することで、単位幅・単位時間当たりの平均越波流量 $q$  [ $\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ ]を算出した。データ整理にあたっては、次式に示す無次元越波流量 $q^*$ で評価した。

$$q^* = q / \sqrt{2gH_0'^3} \quad (2.3)$$

ここで、 $q$ ：平均越波流量、 $g$ ：重力加速度、 $H_0'$ ：換算沖波波高である。



写真-2.3 護岸模型と導水路、越波升の設置状況

## 3. 水理模型実験の結果

## 3.1 波高検定

模型実験に先立ち、護岸模型のない条件で目標とする波高・周期が造波されているか確認するために波高検定を実施した。波高検定の実施ケースを表-3.1に示す。

表-3.2, 表-3.3は、それぞれ10分の1勾配と30分の1勾配において、波高検定より得られた換算沖波波高 $H_0'$ と目標換算沖波波高 $H_{0,i}$ を比較したものである。波高検定で得られた換算沖波波高 $H_0'$ と目標換算沖波波高 $H_{0,i}$ の比 $H_0'/H_{0,i}$ は、10分の1勾配の条件では、0.90~1.08、30分の1勾配の条件では、0.97~1.09となった。

表-3.4, 表-3.5は、それぞれ10分の1勾配と30分の1勾配において、重複波条件における換算沖波波高 $H_0'$ と目標換算沖波波高 $H_{0,i}$ を比較したものである。全護岸形式に対して波高検定を行っており、未実施の条件の場合は「-」で表示している。重複波条件における換算沖波波高 $H_0'$ と目標換算沖波波高 $H_{0,i}$ の比 $H_0'/H_{0,i}$ は、10分の1勾配の条件では、直立護岸0.93~1.17、上部フレア護岸1.08~1.17、ダブ

ルパラペット護岸1.05~1.17、透水型護岸1.05~1.14となった。30分の1勾配の条件では、直立護岸0.98~1.22、消波護岸1.03~1.12、上部フレア護岸1.07~1.22、ダブルパラペット護岸1.23、透水型護岸1.07~1.22となった。

表-3.1 波高検定のケース

Case	$i$	$h$ [m]	$T_{1/3}$ [s]	$H_{0,i}$ [m]
1	1/10, 1/30	0.00	1.63	0.15
2	1/10, 1/30	0.00	2.38	0.15
3	1/10, 1/30	0.00	2.83	0.15
4	1/10, 1/30	0.15	1.63	0.15
5	1/10, 1/30	0.15	2.38	0.15
6	1/10, 1/30	0.15	2.83	0.15
7	1/10, 1/30	0.30	1.63	0.15
8	1/10, 1/30	0.30	2.38	0.15
9	1/10, 1/30	0.30	2.83	0.15

表-3.2 波高検定による換算沖波波高の算出結果（10分の1勾配条件）

Case	$i$	実験条件										波高検定結果							
		Wave	波群	波数	$h$	$H_{0,i}$	$T_{1/3}$	$L_0$	$h/H_{0,i}$	$H_{0,i}/L_0$	$H_{in}$	$T_{in}$	$H_{1/3}$	$K_R$	$H_1$	$K_S$	$H_0'$	$H_0'/H_{0,i}$	
-	-	-	-	-	[m]	[m]	[s]	[m]	-	-	[m]	[s]	[m]	-	[m]	-	[m]	-	
1	1/10	Irregular	1	300	0.00	0.15	1.63	4.14	0.00	0.036	0.155	1.51	0.146	0.118	0.145	0.919	0.158	1.05	
2	1/10	Irregular	1	300	0.00	0.15	2.38	8.84	0.00	0.017	0.140	2.26	0.142	0.119	0.141	1.001	0.141	0.94	
3	1/10	Irregular	1	300	0.00	0.15	2.83	12.49	0.00	0.012	0.140	2.62	0.147	0.136	0.146	1.084	0.134	0.90	
4	1/10	Irregular	1	300	0.15	0.15	1.63	4.14	1.00	0.036	0.155	1.51	0.149	0.144	0.147	0.913	0.161	1.08	
5	1/10	Irregular	1	300	0.15	0.15	2.38	8.84	1.00	0.017	0.140	2.26	0.145	0.178	0.142	0.962	0.148	0.99	
6	1/10	Irregular	1	300	0.15	0.15	2.83	12.49	1.00	0.012	0.140	2.62	0.148	0.198	0.145	1.013	0.143	0.96	
7	1/10	Irregular	1	300	0.30	0.15	1.63	4.14	2.00	0.036	0.155	1.51	0.147	0.180	0.145	0.917	0.158	1.05	
8	1/10	Irregular	1	300	0.30	0.15	2.38	8.84	2.00	0.017	0.140	2.26	0.142	0.229	0.138	0.940	0.147	0.98	
9	1/10	Irregular	1	300	0.30	0.15	2.83	12.49	2.00	0.012	0.140	2.62	0.147	0.261	0.143	0.981	0.145	0.97	

表-3.3 波高検定による換算沖波波高の算出結果（30分の1勾配条件）

Case	$i$	実験条件										波高検定結果							
		Waves	波群	波数	$h$	$H_{0,i}$	$T_{1/3}$	$L_0$	$h/H_{0,i}$	$H_{0,i}/L_0$	$H_{in}$	$T_{in}$	$H_{1/3}$	$K_R$	$H_{1/3}$	$K_S$	$H_0'$	$H_0'/H_{0,i}$	
-	-	-	-	-	[m]	[m]	[s]	[m]	-	-	[m]	[s]	[m]	-	[m]	-	[m]	-	
1	1/30	Irregular	1	300	0.00	0.15	1.63	4.14	0.00	0.036	0.150	1.630	0.144	0.086	0.144	0.914	0.157	1.05	
2	1/30	Irregular	1	300	0.00	0.15	2.38	8.84	0.00	0.017	0.150	2.380	0.152	0.086	0.152	0.978	0.155	1.03	
3	1/30	Irregular	1	300	0.00	0.15	2.83	12.49	0.00	0.012	0.145	2.700	0.155	0.102	0.154	1.063	0.145	0.97	
4	1/30	Irregular	1	300	0.15	0.15	1.63	4.14	1.00	0.036	0.155	1.550	0.147	0.131	0.146	0.914	0.160	1.07	
5	1/30	Irregular	1	300	0.15	0.15	2.38	8.84	1.00	0.017	0.150	2.300	0.151	0.163	0.149	0.950	0.157	1.04	
6	1/30	Irregular	1	300	0.15	0.15	2.83	12.49	1.00	0.012	0.145	2.720	0.147	0.168	0.145	0.996	0.146	0.97	
7	1/30	Irregular	1	300	0.30	0.15	1.63	4.14	2.00	0.036	0.160	1.550	0.153	0.177	0.151	0.922	0.163	1.09	
8	1/30	Irregular	1	300	0.30	0.15	2.38	8.84	2.00	0.017	0.145	2.280	0.151	0.220	0.147	0.932	0.158	1.05	
9	1/30	Irregular	1	300	0.30	0.15	2.83	12.49	2.00	0.012	0.145	2.750	0.149	0.225	0.146	0.969	0.150	1.00	



### 3.2 直立護岸

#### (1) 越波流量の整理

直立護岸の越波量の測定結果を図-3.1～図-3.4に示す。図-3.1は10分の1勾配条件のときの平均越波流量 $q_{\text{exp}(V)}$ 、図-3.2は10分の1勾配条件のときの無次元越波流量 $q^*_{\text{exp}(V)}$ 、図-3.3は30分の1勾配条件のときの平均越波流量 $q_{\text{exp}(V)}$ 、図-3.4は30分の1勾配条件のときの無次元越波流量 $q^*_{\text{exp}(V)}$ であり、実験条件ごとに示している。これらの図から、水深と天端高が同じ条件の場合、波の周期が長いほど越波流量が増える傾向にあることがわかる。なお、30分の1勾配条件の場合の $h=0\text{m}$ 、 $h_c=0.12\text{m}$ 、 $T_{1/3}=1.63\text{s}$ の条件は、越波していない。

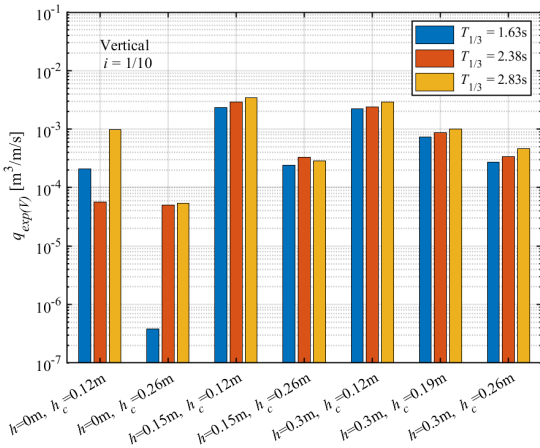


図-3.1 平均越波流量（直立護岸，1/10 勾配）

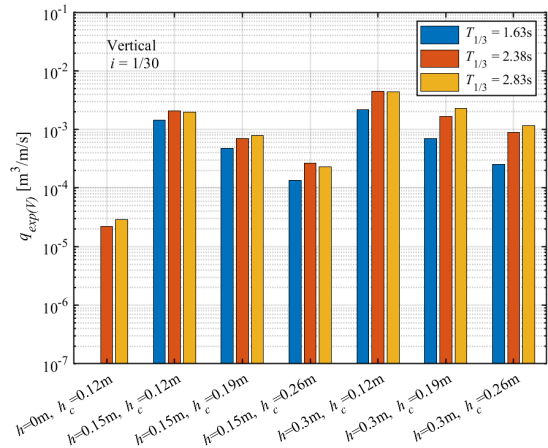


図-3.3 平均越波流量（直立護岸，1/30 勾配）

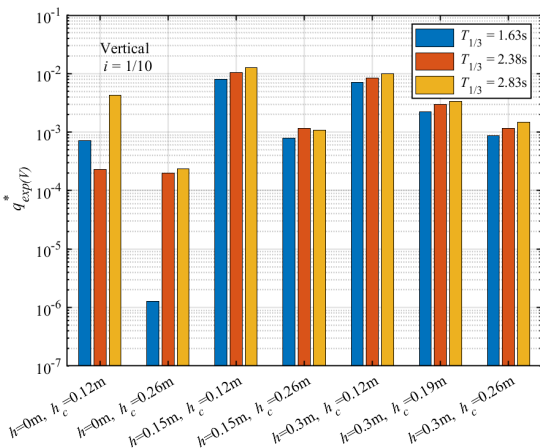


図-3.2 無次元越波流量（直立護岸，1/10 勾配）

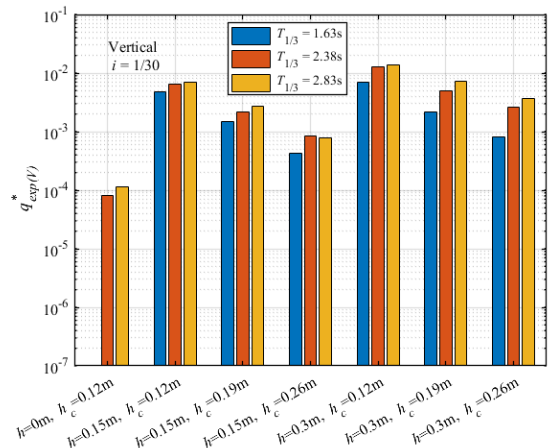


図-3.4 無次元越波流量（直立護岸，1/30 勾配）

図-3.5及び図-3.6に無次元越波流量 $q^*_{\text{exp}(V)}$ と相対天端高 $h_c/H_0'$ の関係を示す。なお、相対天端高 $h_c/H_0'$ の分母とする換算沖波波高は、目標値 $H_{0i}'$ ではなく重複波条件の波高検定で得られた実験値 $H_0'$ を用いている。この図から、相対天端高が小さい方が越波流量が減る傾向にあることがわかる。

図-3.7及び図-3.8に無次元越波流量 $q^*_{\text{exp}(V)}$ と相対水深 $h/H_0'$ の関係を示す。なお、相対水深 $h/H_0'$ の分母とする換算沖波波高も同様、重複波条件の波高検定で得られた実験値 $H_0'$ を用いている。相対水深が大きいほど越波流量が増える傾向にあるが、水路勾配によっては碎波等の影響で減少している。

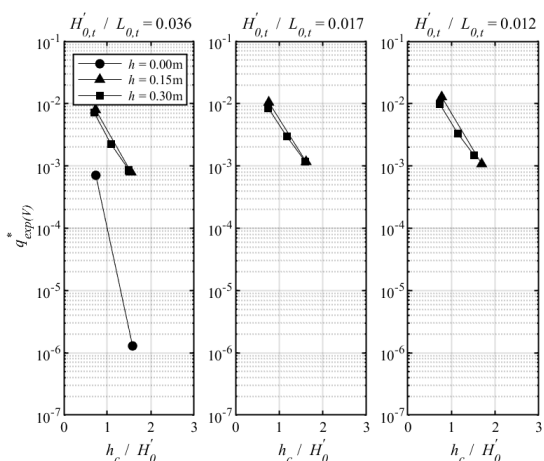


図-3.5 無次元越波流量と相対天端高の関係  
(直立護岸, 1/10 勾配)

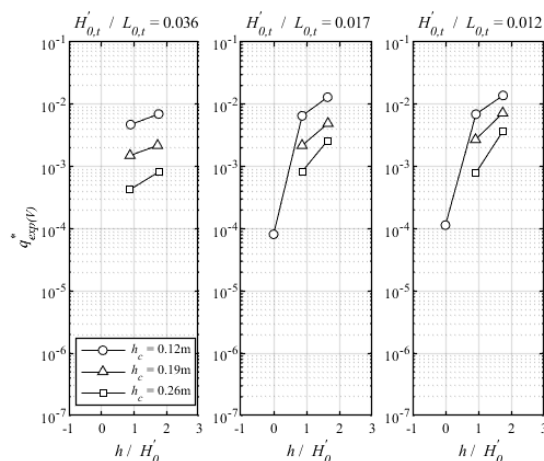


図-3.8 無次元越波流量と相対水深の関係  
(直立護岸, 1/30 勾配)

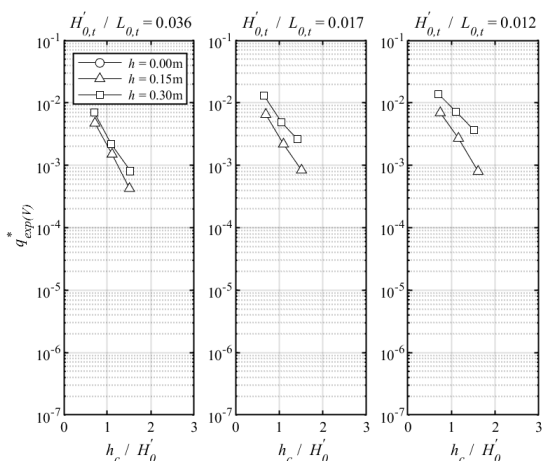


図-3.6 無次元越波流量と相対天端高の関係  
(直立護岸, 1/30 勾配)

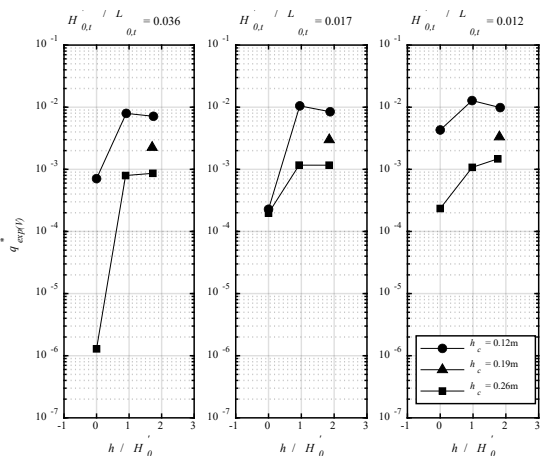


図-3.7 無次元越波流量と相対水深の関係  
(直立護岸, 1/10 勾配)

(2) 合田の越波流量推定図との比較

次に、無次元越波流量の実験値  $q^*_{exp(V)}$  と合田の越波流量推定図<sup>4)</sup>より得られる推定値  $q^*_{est(V)}$  を比較する。推定値  $q^*_{est(V)}$  は、海底勾配  $i$ 、波形勾配  $H_{0,t}/L_0$ 、相対水深  $h/H'_0$ 、相対天端高  $h_c/H'_0$  に基づいて読み取る。但し、読み取りを行う際、以下の二つの補正を行った。

- ① 換算沖波波高  $H'_0$ ：実験値を用いる。
- ② 堤脚水深  $h$ ：平均水位の上昇とサーフビート振幅に応じて補正する。

①は、合田の越波流量推定図を読み取る際に設定する、相対天端高  $h_c/H'_0$  と相対水深  $h/H'_0$  の分母とする換算沖波波高に目標値  $H_{0,t}$  ではなく重複波条件の波高検定で得られた実験値  $H'_0$  を用いることを指す。②は、堤前の平均水位の上昇とサーフビート振幅を現地海岸相当量と比較し、生じた差分を補正することを指す。

②を詳細に説明するために、合田の越波流量推定図が構築された過程を説明したい。まず、合田の越波流量推定図は、基本的に合田ら(1975)が提案している越波流量計算式(合田ら(1975)の式(12)～(14))を尊重して設定されている。越波流量計算式には、計算式で変数となる波高の出現確率密度を推定する過程に、現地海岸を想定したサーフビート振幅と平均水位上昇が考慮されている。詳細は、合田ら(1975)を確認されたい。

しかし、越波流量計算式による越波流量の計算値は、論文内で指摘されているように、実験値と差異が生じた。この差異の要因は、実験水路に固有の特異性(水路内の多重反射など)により、実験で測定したサーフビート振幅と平

均水位上昇が、現地海岸における想定値よりも大きかったためと考察された。

そのため、合田らは実際の堤脚水深ではなく、補正值を含む堤脚水深を基に実験値を整理した。また、越波流量推定図は基本的には計算値を尊重しているものの、水深が浅い条件では補正值を含む堤脚水深で整理した実験値に越波流量推定図の形状を寄せるような表現が確認される。論文内で、「相対水深  $h/H_0 \leq 0.5$  では実験に比べて過大となる傾向にあるので、そのような場合は曲線の形状のみを参考とする」としている。

以上のような合田の越波流量推定図が構築された過程を踏まえると、本研究の結果に対しても、サーフビート振幅と平均水位上昇の測定値に基づいた補正值によって堤脚水深を補正することで、本研究の実験値  $q^*_{exp(V)}$  と推定値  $q^*_{est(V)}$  の比較精度が向上すると考えられる。従って、本研究の堤体前面で測定した時系列水位を解析することで平均海面水位の上昇量  $\bar{\eta}$  と、サーフビート振幅  $\zeta_{rms}$  を算出し、堤脚水深の補正值を設定することとした。

図-3.9 は、時系列水位の測定値と、平均海面水位の上昇量、サーフビート振幅の計算例である。時系列水位は、堤前位置 (WG10, 堤体より 10cm の位置) で測定した値を用いる。  $\bar{\eta}$  は、初期造波時間を除く時間帯の測定値の平均値を求めた。  $\zeta_{rms}$  は、平均海面水位の解析に用いた時系列水位の測定値に対してローパスフィルタを施し、二乗平均平方根を求めた。ローパスフィルタの周波数の閾値は、合田ら (1975) と等しく、S 型で 0.30Hz、L 型で 0.15Hz とする。M 型の周波数の閾値は、S 型と L 型の平均 0.225Hz とする。一つの周期、堤脚水深  $h$  の条件に対して、天端高  $h_c$  の条件は 1~3 つで実験を行っており、全天端高条件で得られた  $\eta$  と  $\zeta_{rms}$  の解析値を平均して代表値とした。

表-3.6 に、  $\eta$  と  $\zeta_{rms}$  を、合田らの論文中に記載された現地海岸の想定量、実験量及び本研究の実験量を併記する。本研究の実験量  $\eta$  と  $\zeta_{rms}$  は、合田らの実験量よりも小さい。本研究で使用した造波装置は、吸収造波機能を実装しており、水路内で多重反射が発達しにくかったためと考えられる。

本研究の実験量  $\eta$  と  $\zeta_{rms}$  より、堤脚水深の補正值を求める。合田らの補正值は、現地海岸の想定量と比較しつつ、実験量から「恣意的」に設定された。合田らの補正值の設定方法は明確ではなく、本研究では以下の方法で補正值を求めた。

- ① 実験量  $\eta$  が現地海岸の想定量の最大値 (最小値) よりも大きい (小さい) 場合、互いの差分を求める。現地海岸の想定量の範囲内であれば、互いの

差はないものとする。

- ② 実験量  $\zeta_{rms}$  についても同様の処理を行い、差分を求める。
- ③ ①と②の差分を足し合わせる。
- ④ ①~③の処理をS型、L型で実施し、M型はS型、L型の平均の差分量とする。
- ⑤ ④の値を0.5cm刻みでラウンドする。

図-3.11は、以上の方法で換算沖波波高  $H'_0$  と堤脚水深  $h$  を補正した上で、合田の越波流量推定図より読み取った推定値  $q^*_{est(V)}$  と実験値  $q^*_{exp(V)}$  を比較したものである。図-3.10は、補正しなかった場合の比較結果である。10分の1勾配条件の結果を黒塗りで、30分の1勾配条件の結果を白塗りでプロットしている。

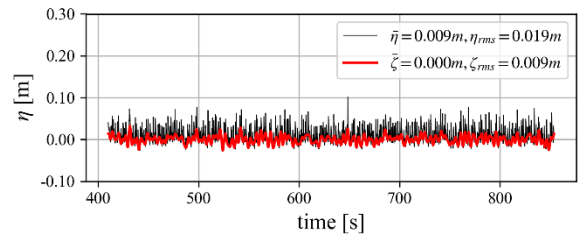


図-3.9 平均海面水位の上昇量とサーフビート振幅の解析例 (S型,  $h=0.0m$ ,  $h_c=0.12m$ )

表-3.6 本実験での堤脚水深の補正量

$T_{1/3}$ [s]	$i$	$h$ [cm]	現地想定量[cm]		合田(1975) [cm]		本研究 [cm]			
			$\bar{\eta}$	$\zeta_{rms}$	$\bar{\eta}$	$\zeta_{rms}$	水深補正量	$\bar{\eta}$	$\zeta_{rms}$	水深補正量
1.63 (S型)	1/10	0	2.5~3.2	0.5~0.8	3.5	1.9	2.0	2.3	1.2	0.0
2.38 (M型)	1/10	0	-	-	-	-	2.0	4.0	1.6	0.0
2.83 (L型)	1/10	0	2.5~3.2	0.9~1.4	5.0	2.2	2.5	3.4	1.4	0.0
1.63 (S型)	1/10	15	1.4~2.1	0.5~0.8	1.2	2.4	1.5	1.2	1.7	0.5
2.38 (M型)	1/10	15	-	-	-	-	1.5	1.7	1.8	0.0
2.83 (L型)	1/10	15	1.4~2.1	0.9~1.4	1.0	2.3	1.5	0.7	1.6	-0.5
1.63 (S型)	1/10	30	1.4~2.1	0.5~0.8	1.3	2.1	1.5	0.7	1.2	-0.5
2.38 (M型)	1/10	30	-	-	-	-	1.5	0.3	1.4	-0.5
2.83 (L型)	1/10	30	1.4~2.1	0.9~1.4	1.3	2.2	1.5	1.3	1.5	0.0
1.63 (S型)	1/30	0	1~1.2	0.5~0.8	1.3	2.4	1.5	0.3	0.9	-1.0
2.38 (M型)	1/30	0	-	-	-	-	1.5	0.6	1.2	-0.5
2.83 (L型)	1/30	0	1~1.2	0.9~1.4	1.7	2.6	1.5	0.6	1.1	-0.5
1.63 (S型)	1/30	15	1~1.2	0.5~0.8	1.5	2.4	1.5	1.1	2.1	1.0
2.38 (M型)	1/30	15	-	-	-	-	1.5	0.6	2.0	1.0
2.83 (L型)	1/30	15	1~1.2	0.9~1.4	1.7	2.8	1.5	1.1	2.0	0.5
1.63 (S型)	1/30	30	1~1.2	0.5~0.8	1.7	2.2	1.5	0.4	1.8	0.0
2.38 (M型)	1/30	30	-	-	-	-	1.5	0.4	2.4	0.0
2.83 (L型)	1/30	30	1~1.2	0.9~1.4	1.6	2.3	1.5	0.6	2.0	0.0

表-3.7 越波流量の推定値に対する真値の想定範囲<sup>4)</sup>

$q^*=q/(2gH_0^3)^{0.5}$	直立護岸	消波護岸
$10^{-2}$	0.7~1.5倍	0.5~2倍
$10^{-3}$	0.4~2倍	0.2~3倍
$10^{-4}$	0.2~3倍	0.1~5倍
$10^{-5}$	0.1~5倍	0.05~10倍

点線は、合田ら (1975) <sup>4)</sup>が提案している無次元越波流

量の推定値に対する真値の想定範囲 (表-3.7) を示す。

推定値  $q_{est}^*(V)$  と比べて実験値  $q_{exp}^*(V)$  は、堤脚水深が浅い条件 ( $h/H_{0,t} = 0.0, 1.0$ ) では大きく、堤脚水深が深い条件 ( $h/H_{0,t} = 2.0$ ) では小さい傾向にある。

両者に差が生じた要因の一つとして、換算沖波波高や堤脚水深の実験誤差が挙げられる。例えば、 $H_{0,t}/L_0=0.012$ ,  $h=0.30\text{m}$ ,  $h_c=0.19\text{m}$  の条件では、実験値  $q_{exp}^*(V)$  は  $3.3 \times 10^{-3}$  [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ]、推定値  $q_{est}^*(V)$  は  $7.9 \times 10^{-3}$  [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ] であり、実験値は想定範囲よりも小さい。この条件において、堤脚水深に  $\pm 1\text{cm}$  の誤差を見込むと、推定値は  $7.0 \sim 8.3 \times 10^{-3}$  [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ] の範囲で変動する。換算沖波波高  $H_0$  (重複波条件で  $0.164\text{m}$ ) に  $\pm 1\text{cm}$  の誤差を見込むと、推定値は  $6.4 \sim 8.3 \times 10^{-3}$  [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ] の範囲で変動する。これらの誤差を見込むと、まだ過小傾向ではあるものの、実験値は想定範囲内に含まれる。換算沖波波高は入反射分離する過程を経て、堤

脚水深は平均海面水位とサーフビート振幅で補正する過程を経て整理しており、 $\pm 1\text{cm}$  の誤差は生じ得る。

また、実験の都合上、300波 $\times$ 1波群しか造波することができなかったことも要因の一つとして挙げられる。一般に、越波流量が小さい条件ほど、越波流量は低頻出波浪の波高や出現頻度に影響を受け、波群が異なれば真値の想定範囲内程度には越波流量は変動する可能性がある。そのため、今回の実験値と推定値に差があるように評価できるものの、波群によっては評価が異なる可能性もある。以上の考察のもと、今回の実験値と推定値の差は、真値の想定範囲内に含まれる程度であるとし、実験の妥当性には問題がないものと判断した。

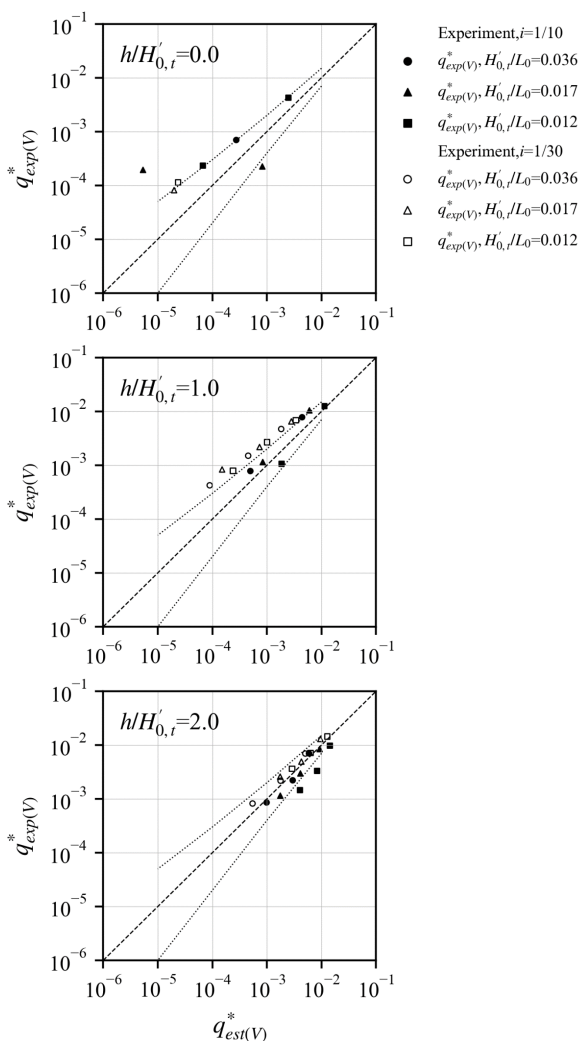


図-3.10 直立護岸の実験値 (補正無し) と合田推定値

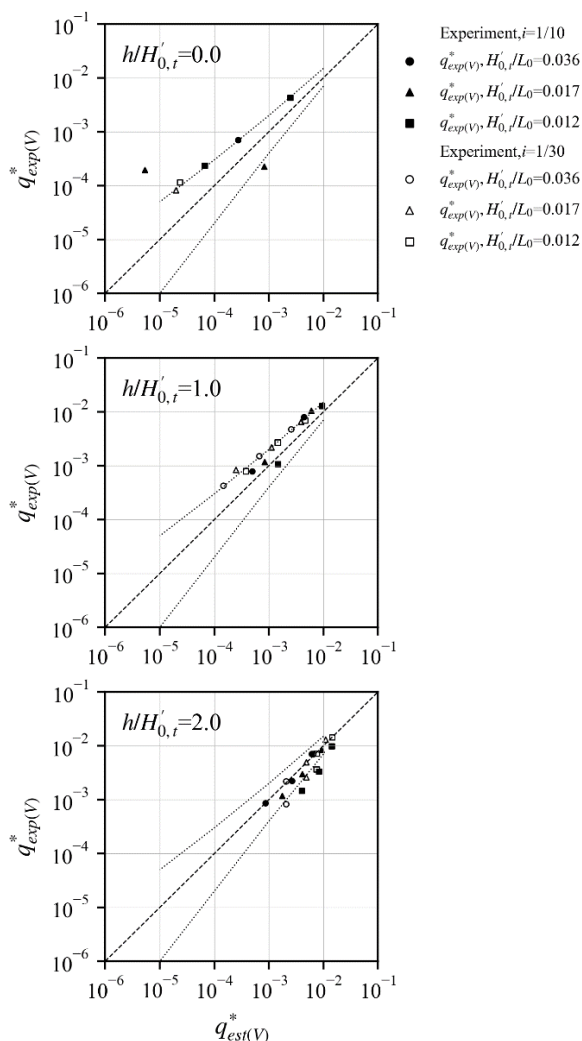


図-3.11 直立護岸の実験値 (補正有り) と合田推定値



### 3.3 消波護岸

消波護岸の越波量の測定結果を図-3.12及び図-3.13に示す。図-3.12は水路勾配30分の1勾配条件のときの平均越波流量  $q_{\text{exp(B)}}$ 、図-3.13は30分の1勾配条件のときの無次元越波流量  $q^*_{\text{exp(B)}}$ であり、実験条件ごとに示している。なお、消波護岸は10分の1勾配条件の実験はしていない。これらの図から、水深と天端高が同じ条件の場合、波の周期が長いほど越波流量が増える傾向にあることがわかる。

図-3.14に無次元越波流量と相対天端高の関係を示す。この図から、相対天端高が小さい方が越波流量が減る傾向にあることがわかる。図-3.15に無次元越波流量と相対水深の関係を示す。相対水深が大きいほど越波流量が増える傾向を示すことがわかる。

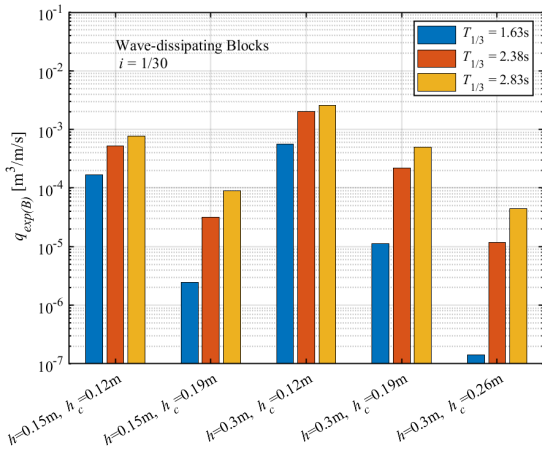


図-3.12 平均越波流量 (消波護岸, 1/30 勾配)

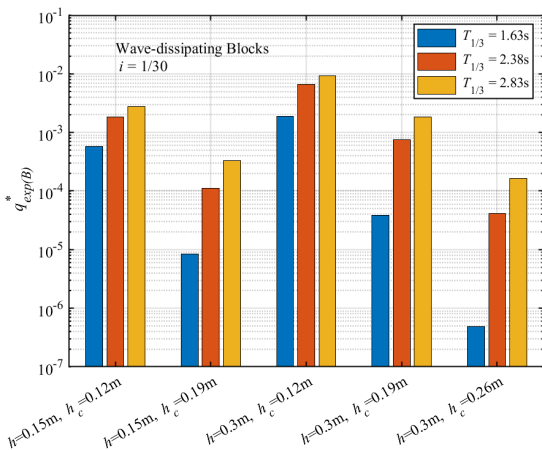


図-3.13 無次元越波流量 (消波護岸, 1/30 勾配)

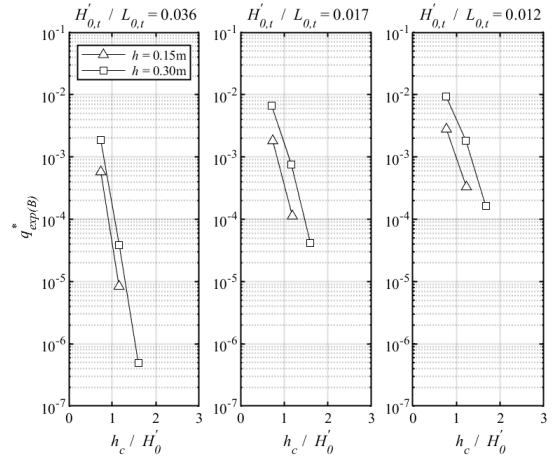


図-3.14 無次元越波流量と相対天端高の関係 (消波護岸, 1/30 勾配)

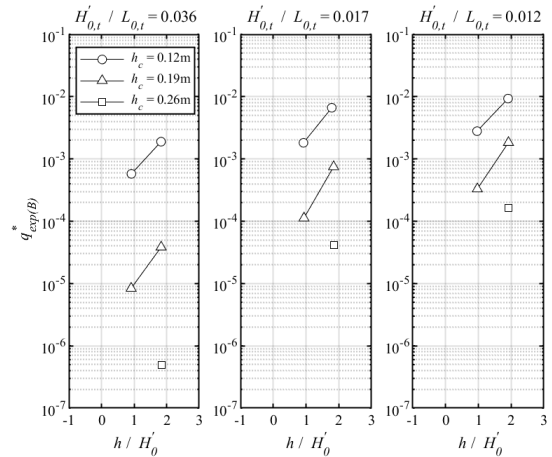


図-3.15 無次元越波流量と相対水深の関係 (消波護岸, 1/30 勾配)

図-3.16は消波護岸の無次元越波流量について、実験値  $q^*_{\text{exp(B)}}$ と合田の越波流量推定図(合田ら, 1975)<sup>4)</sup>より読み取った推定値  $q^*_{\text{est(B)}}$ を比較したものである。点線は、合田ら(1975)<sup>4)</sup>が提案している無次元越波流量の推定値に対する真値の想定範囲(表-3.7)を示す。 $q^*_{\text{exp(B)}}$ と $q^*_{\text{est(B)}}$ を比較すると、 $h/H_0=2.0$ の条件では、合田の推定誤差の範囲内に入っており、良好な再現性が得られた。 $h/H_0=1.0$ では、合田の推定誤差の範囲内に入っているものの、実験値の方が推定値よりもやや大きい傾向にある。合田ら(1975)<sup>4)</sup>での消波護岸は直立壁の前面に碎石をマウンド状に積み、その上にテトラポッドを2層積とした消波工としており、本実験とは厳密には構造形式が異なるものの、推定値と実験値は概ね同程度であり、その構造形式の違いは大きく影響していないと考えられる。

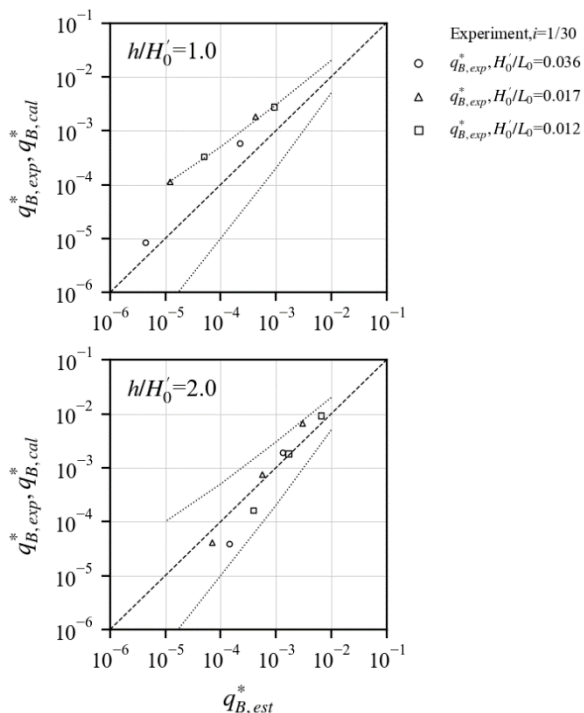


図-3.16 消波護岸の実験値（補正無し）と合田推定値の比較

### 3.4 上部フレア護岸

上部フレア護岸の越波量の測定結果を図-3.17～図-3.20に示す。図-3.17は10分の1勾配条件のときの平均越波流量  $q_{\text{exp}(F)}$ 、図-3.18は10分の1勾配条件のときの無次元越波流量  $q_{\text{exp}(F)}^*$ 、図-3.19は30分の1勾配条件のときの平均越波流量  $q_{\text{exp}(F)}$ 、図-3.20は30分の1勾配条件のときの無次元越波流量  $q_{\text{exp}(F)}^*$ であり、実験条件ごとに示している。なお、水路勾配 1/10、 $h=0.3\text{m}$ 、 $h_c=0.26\text{m}$ のときの  $T_{1/3}=1.63\text{s}$  及び  $T_{1/3}=2.38\text{s}$  の条件は、越波していない。

図-3.21及び図-3.22に無次元越波流量と相対天端高の関係を示す。この図から、相対天端高が小さい方が越波流量が減る傾向にあることがわかる。

図-3.23及び図-3.24に無次元越波流量と相対水深の関係を示す。30分の1勾配の条件において、相対水深が大きいくほど越波流量が増える傾向を示すことがわかる。しかし、相対水深 0.036、0.017の  $h_c=0.26\text{m}$  の条件では、逆の傾向を示す。

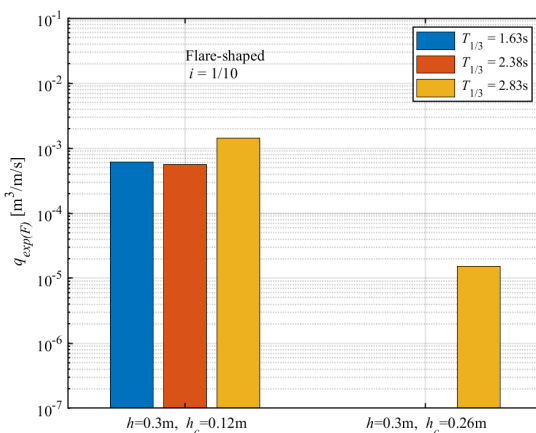


図-3.17 平均越波流量  
(上部フレア護岸, 1/10 勾配)

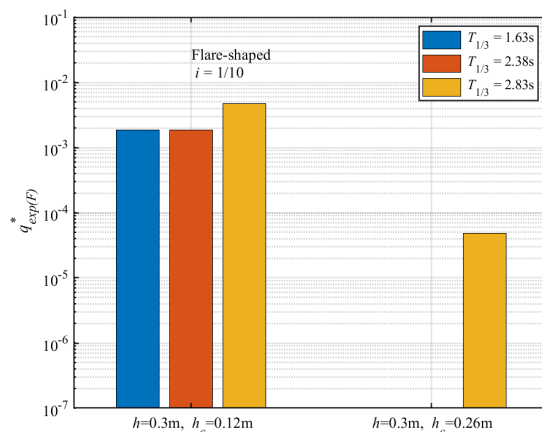


図-3.18 無次元越波流量  
(上部フレア護岸, 1/10 勾配)

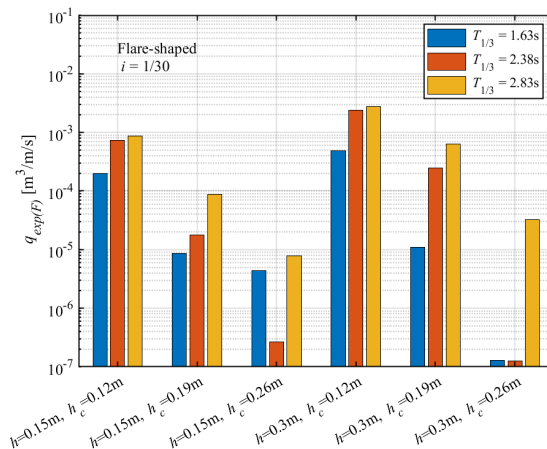


図-3.19 平均越波流量 (上部フレア護岸, 1/30 勾配)

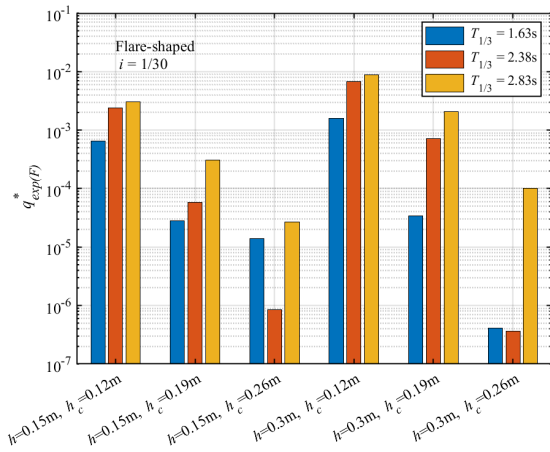


図-3.20 無次元越波流量  
(上部フレア護岸, 1/30 勾配)

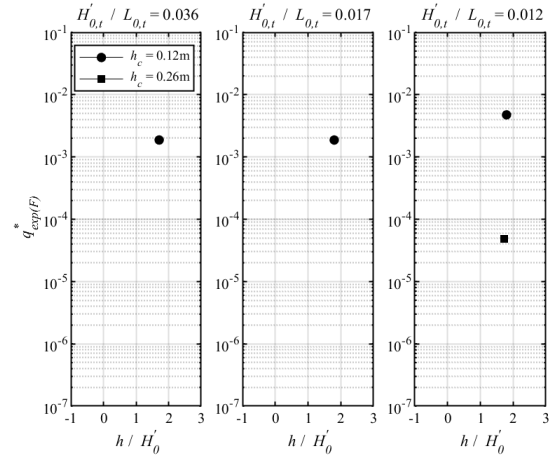


図-3.23 無次元越波流量と相対水深の関係  
(上部フレア護岸, 1/30 勾配)

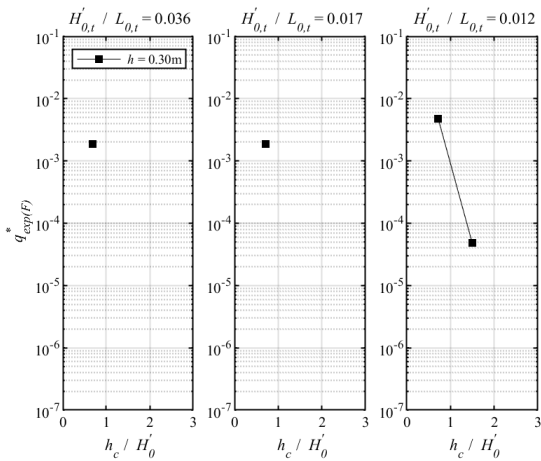


図-3.21 無次元越波流量と相対天端高の関係  
(上部フレア護岸, 1/10 勾配)

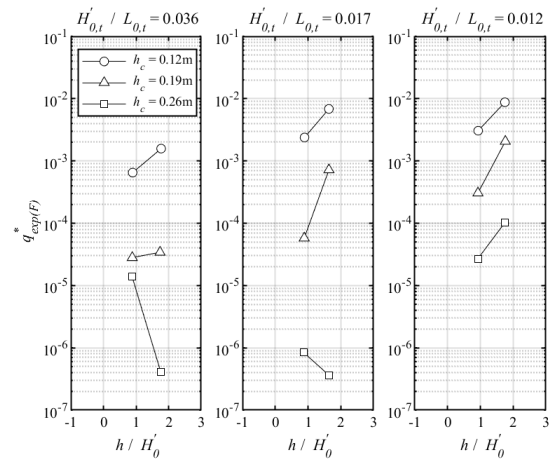


図-3.24 無次元越波流量と相対水深の関係  
(上部フレア護岸, 1/30 勾配)

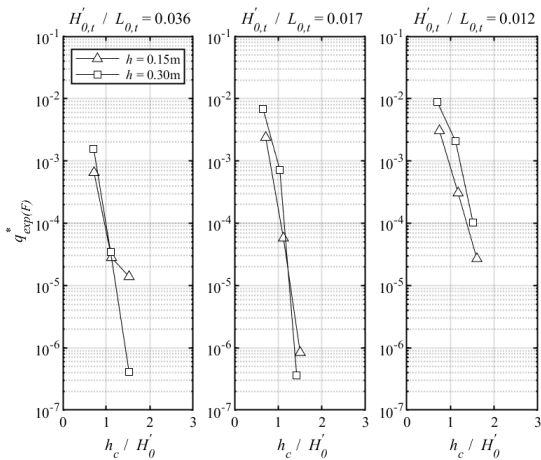


図-3.22 無次元越波流量と相対天端高の関係  
(上部フレア護岸, 1/30 勾配)

### 3.5 ダブルパラペット護岸

ダブルパラペット護岸の越波量の測定結果を図-3.25 ~ 図-3.28 に示す. 図-3.25 は 10 分の 1 勾配条件のときの平均越波流量  $q_{\text{exp(D)}}$ , 図-3.26 は 10 分の 1 勾配条件のときの無次元越波流量  $q^*_{\text{exp(D)}}$ , 図-3.27 は 30 分の 1 勾配条件のときの平均越波流量  $q_{\text{exp(D)}}$ , 図-3.28 は 30 分の 1 勾配条件のときの無次元越波流量  $q^*_{\text{exp(D)}}$  であり, 実験条件ごとに示している.

図-3.29 及び図-3.30 に無次元越波流量と相対天端高の関係を示す. この図から, 相対天端高が小さい方が越波流量が減る傾向にあることがわかる. 図-3.31 及び図-3.32 に無次元越波流量と相対水深の関係を示す. 相対水深が大きいほど越波流量が増える傾向を示すことがわかる.

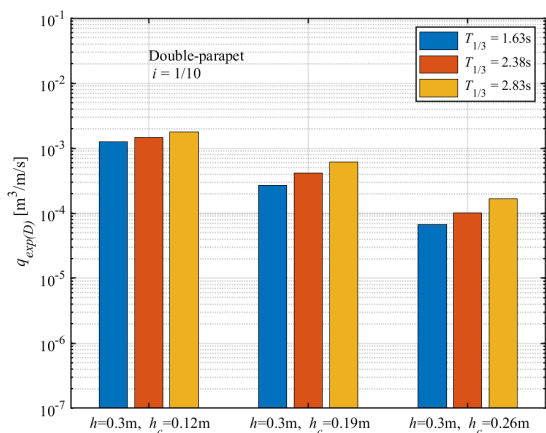


図-3.25 平均越波流量  
(ダブルパラペット護岸, 1/10 勾配)

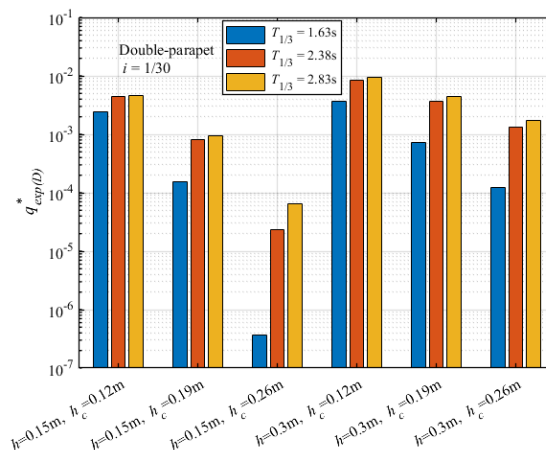


図-3.28 無次元越波流量  
(ダブルパラペット護岸, 1/30 勾配)

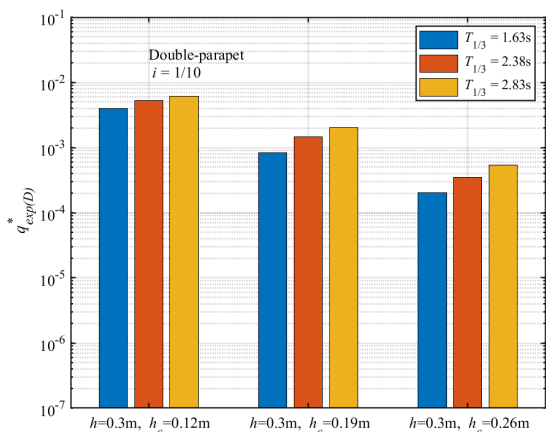


図-3.26 無次元越波流量  
(ダブルパラペット護岸, 1/10 勾配)

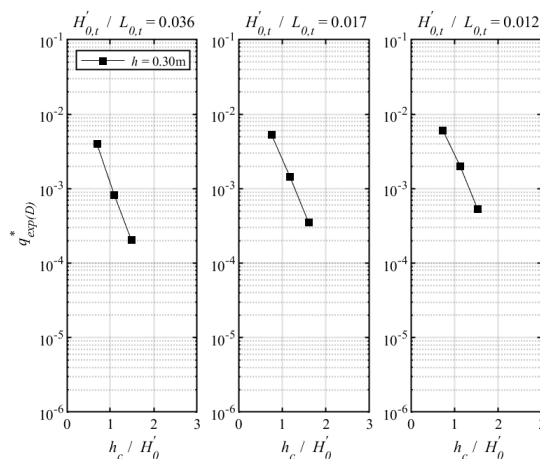


図-3.29 無次元越波流量と相対天端高の関係  
(ダブルパラペット護岸, 1/10 勾配)

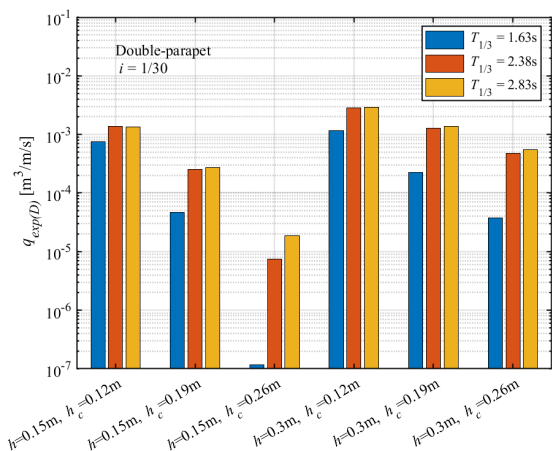


図-3.27 平均越波流量  
(ダブルパラペット護岸, 1/30 勾配)

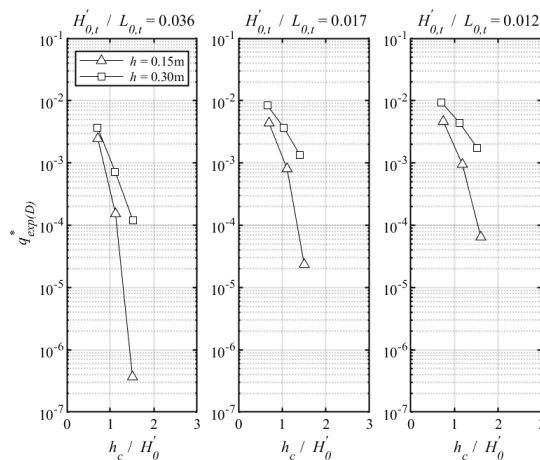


図-3.30 無次元越波流量と相対天端高の関係  
(ダブルパラペット護岸, 1/30 勾配)

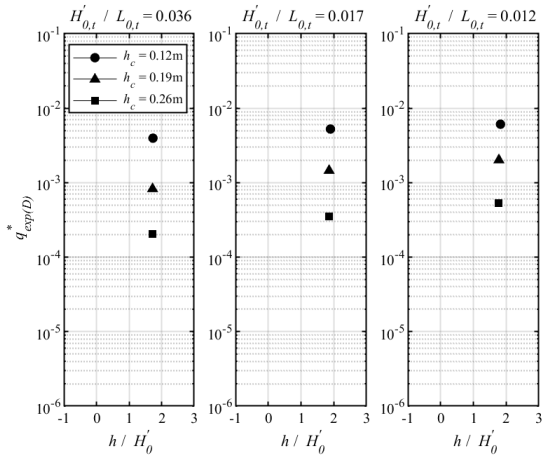


図-3.31 無次元越波流量と相対水深の関係  
(ダブルパラペット護岸, 1/10 勾配)

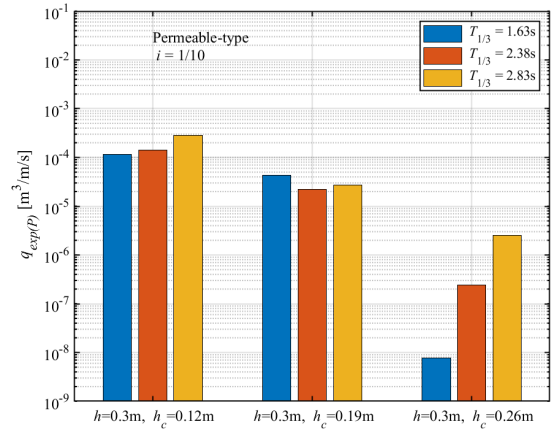


図-3.33 平均越波流量  
(透水型護岸, 1/10 勾配)

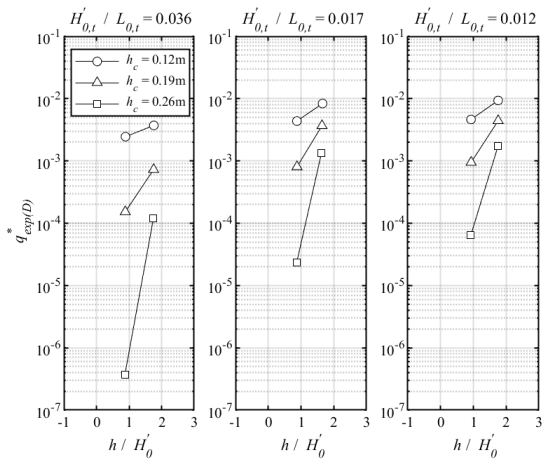


図-3.32 無次元越波流量と相対水深の関係  
(ダブルパラペット護岸, 1/30 勾配)

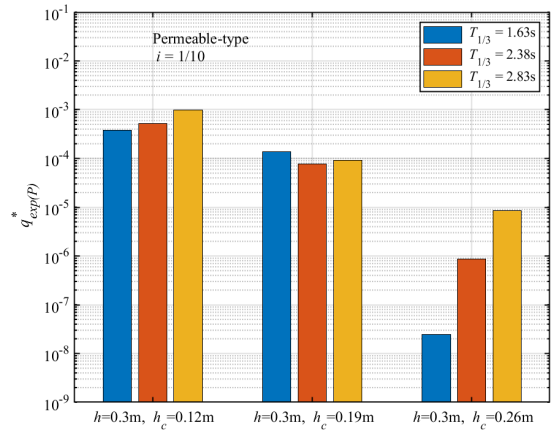


図-3.34 無次元越波流量  
(透水型護岸, 1/10 勾配)

### 3.6 透水型護岸

透水型護岸の越波量の測定結果を図-3.33～図-3.36 に示す。図-3.33 は 10 分の 1 勾配条件のときの平均越波流量  $q_{\text{exp(P)}}$ 、図-3.34 は 10 分の 1 勾配条件のときの無次元越波流量  $q^*_{\text{exp(P)}}$ 、図-3.35 は 30 分の 1 勾配条件のときの平均越波流量  $q_{\text{exp(P)}}$ 、図-3.36 は 30 分の 1 勾配条件のときの無次元越波流量  $q^*_{\text{exp(P)}}$  であり、実験条件ごとに示している。なお、水路勾配 1/30 の場合の  $h=0.3\text{m}$ ,  $h_c=0.26\text{m}$ ,  $T_{1/3}=1.63\text{s}$  の条件は、越波していない。

図-3.37 及び図-3.38 に無次元越波流量と相対天端高の関係を示す。この図から、相対天端高が小さい方が越波流量が減る傾向にあることがわかる。

図-3.31 及び図-3.32 に無次元越波流量と相対水深の関係を示す。相対水深が大きいほど越波流量が増える傾向を示すことがわかる。

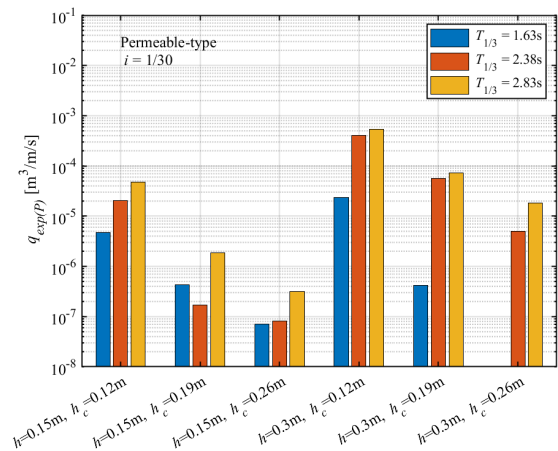


図-3.35 平均越波流量  
(透水型護岸, 1/30 勾配)

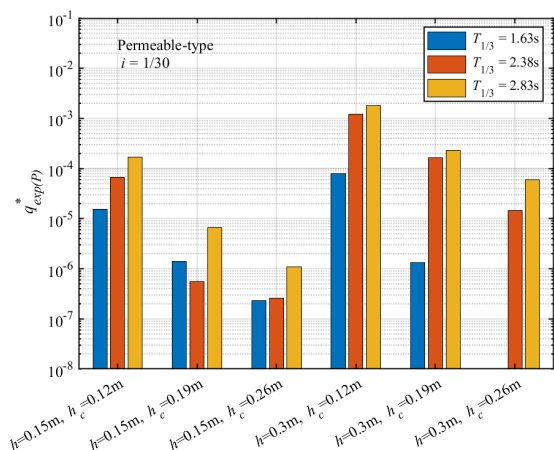


図-3.36 無次元越波流量  
(透水型護岸, 1/30 勾配)

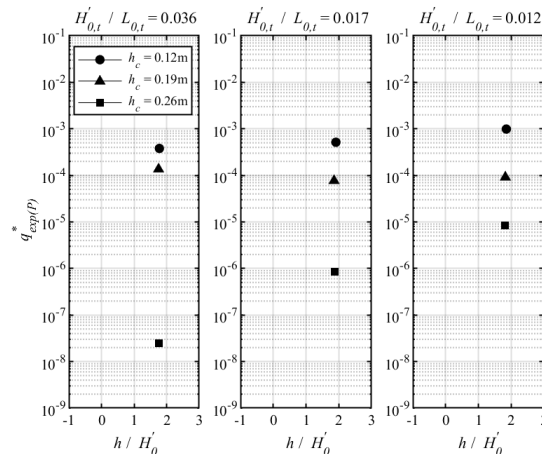


図-3.39 無次元越波流量と相対天端高の関係  
(透水型護岸, 1/10 勾配)

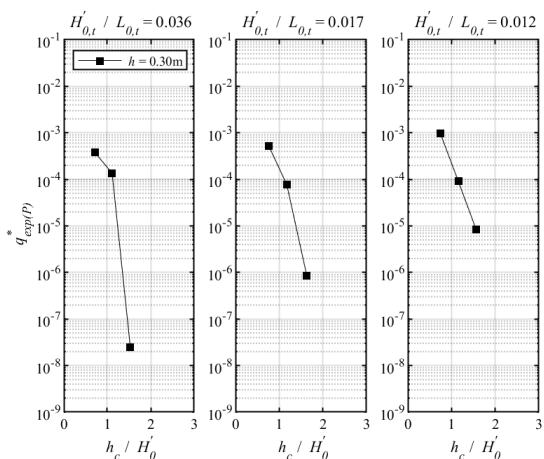


図-3.37 無次元越波流量と相対天端高の関係  
(透水型護岸, 1/10 勾配)

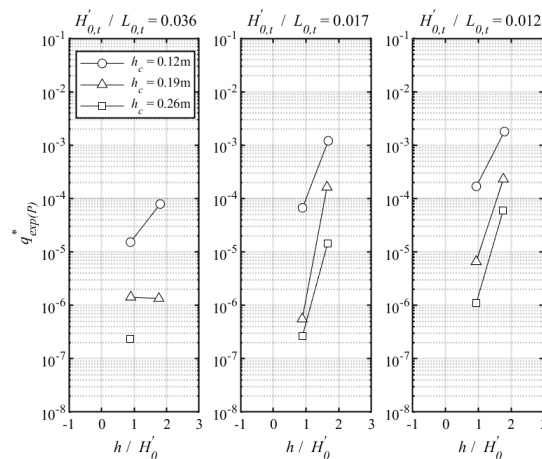


図-3.40 無次元越波流量と相対天端高の関係  
(透水型護岸, 1/30 勾配)

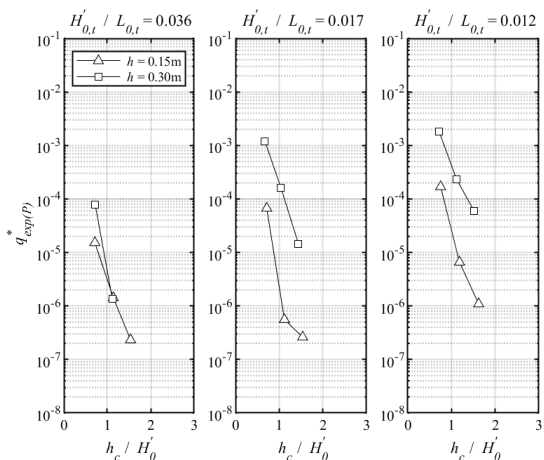


図-3.38 無次元越波流量と相対天端高の関係  
(透水型護岸, 1/30 勾配)

### 3.7 改良型護岸の越波流量低減効果

図-3.41 及び図-3.42 は消波護岸及び上部フレア護岸、ダブルパラペット護岸、透水型護岸の各無次元越波流量  $q^*_{\text{exp(B,F,D,P)}}$  を直立護岸の無次元越波流量  $q^*_{\text{exp(V)}}$  で除した越波流量比  $R_{\text{exp(B,F,D,P)}} = q^*_{\text{exp(B,F,D,P)}} / q^*_{\text{exp(V)}}$  を表したものである。横軸は、直立護岸の無次元越波流量  $q^*_{\text{exp(V)}}$  である。添え字は、B: 消波護岸, F: 上部フレア護岸, D: ダブルパラペット護岸, P: 透水型護岸を表す。

いずれの護岸形式でも、越波流量が小さいほど越波流量比が小さく、越波低減効果が高いことが分かる。一方、越波流量が大きい場合 ( $q^*_{\text{exp(V)}}=10^{-2}$ ) は、透水型を除けば護岸形式による越波量低減効果の違いは見られない。

直立護岸と比較して、ダブルパラペット型では 40~80% 程度、上部フレア型では 50% 以上、透水型では 90% 以上の越波量の低減が確認された。ダブルパラペット型と上

部フレア型は、無次元越波流量が大きいほど、越波流量低減効果が小さくなる。一方、透水型は、無次元越波流量に依らず高い越波量低減効果を示す。

図-3.43 に改良型護岸の越波状況の写真を示す。ダブルパラペット型は、背後パラペットが越波を阻害するよう機能するが、越波量が多くなり排水量を上回るとパラペット間に水塊が溜まり、越波量低減効果が低下する。

上部フレア型は、上部フレア部が水塊の運動方向を堤体内に向けないように機能するが、天端高が低く上部フレア部が水没する条件では前述の機能が發揮されず、低減効果が低下する。

透水型は、水塊が透水層を通して沖側に戻るため越波量に依らず低減効果を發揮する。

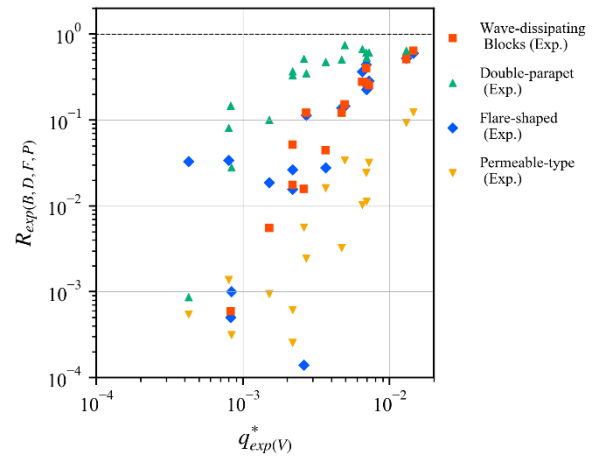


図-3.42 消波護岸と改良型護岸の無次元越波流量比 (30分の1勾配条件)

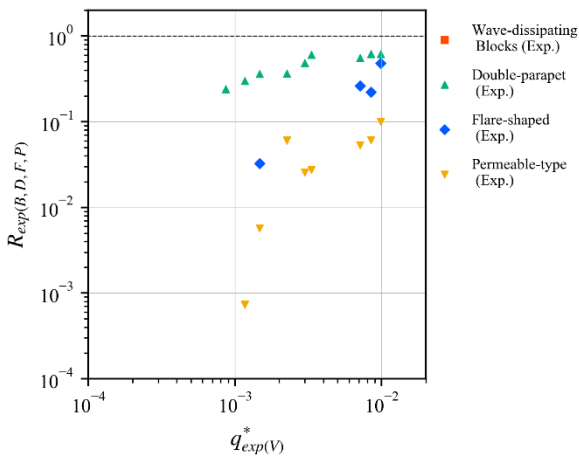


図-3.41 消波護岸と改良型護岸の無次元越波流量比 (10分の1勾配条件)



図-3.43 改良型護岸の越波状況

## 4. 改良型護岸の換算天端高係数

### 4.1 換算天端高係数の算定手法

換算天端高係数 $\beta$ は、港湾基準で「同一の波と海底形状の条件において直立護岸を設置した場合を仮定して、同一の越波量となる時の対象護岸高さ $h$ と直立護岸高さの比」と定義される。換算天端高係数が1より小さい場合には、直立護岸に比較して低い護岸天端であっても同一の越波量となることを表し、その護岸形状が越波量低減に有効であることを示す<sup>7)</sup>。

実験結果から換算天端高係数を算出するためには、直立護岸及び改良型護岸に対して相対天端高と越波流量の関係を整理し、何らかの越波流量を基準として互いの越波流量が等しくなる時の天端高比を求めれば良い。しかし、この基準となる越波流量の選定方法に恣意性がある。

そのため、換算天端高係数 $\beta$ の算出方法として、表-4.1に示す3つの手法が考えられる。算定手法1は「直立護岸の越波流量を基準として、改良型護岸と同じ越波流量となる天端高を求める手法」である。算定手法2は「改良型護岸の越波流量を基準として、直立護岸と同じ越波流量となる天端高を求める手法」である。算定手法3は「改良型護岸の越波流量を基準として、合田の越波流量算定図で推定した直立護岸と同じ越波流量となる天端高を求める手法」であり、改良型護岸の実験値のみで換算天端高係数を算出することが可能である。

まず、1/10勾配条件において、手法1～3の方法を検証し、それぞれの手法による換算天端高係数の算出結果を比較し、手法の差異が換算天端高係数に及ぼす影響を評価する。その後、最適と考えられる手法を用いて、1/30勾配条件における換算天端高係数を算出する。なお、1/10条件の堤脚水深は30cmのみの条件でしか実験を実施していない

ため、目標相対水深 $h/H'_{0i}=2.0$ を対象としている。

手法1の手順(1)、(2)の結果を図-4.1～図-4.3に、手法2の手順(1)、(2)の結果を図-4.4～図-4.10に、手法3の手順(1)～(3)の結果を図-4.11～図-4.17に示す。

図-4.18に、1/10勾配条件において、手法1～3で算出した換算天端高係数を護岸形式ごとに示す。

上部フレア護岸の $\beta$ は、いずれの手法を用いた場合でも値のばらつきが大きく、 $\beta=0.4\sim 0.95$ 程度であった。また、無次元越波流量が大きいほど $\beta$ も大きくなる傾向がある。なお、上部フレア型のみ天端高は2種類の条件で実施しているため、近似曲線 $q^*_F-(h_c/H_0)_F$ の精度の信頼度は他の護岸形式に比べ低いことに注意されたい。

ダブルパラペット護岸の $\beta$ は、手法1及び手法2を用いた場合、 $\beta=0.7\sim 0.8$ 程度となった。手法3を用いた場合、 $\beta=0.55\sim 0.8$ となり、手法1及び手法2に比べて小さく、ばらつきが大きい傾向がある。

透水型護岸は、周期1.63sを除けば越波流量によらず $\beta=0.3\sim 0.6$ 程度となった。透水型護岸の無次元越波流量は、図-3.40に示す通り直立護岸に比べ小さい。そのため、手法1の場合は直立護岸の $(h_c/H_0)_V$ は大きくなる。手法2の場合は、透水型護岸の実験では得られていない範囲の無次元越波流量 $q^*_v$ で、評価していることになる。手法3に関しては、いずれの護岸形式も $\beta$ が小さく、その他の手法に比べてばらつきが大きい。

以上より、手法1は直立護岸の越波流量を基準としているため、手法2に比べ近似曲線の精度の影響が小さいと考えられる。そのため、手法1の算定結果を対象に、各構造形式の換算天端高係数を算出することとした。



表-4.1 換算天端高係数の算定方法

算定手法	算定手順	説明図
手法 1	<p>(1) 直立護岸の無次元越波流量 <math>q^*_{\text{exp}(V)}</math> と相対天端高 <math>(h_c/H_0)_{\text{exp}(V)}</math> の関係より、近似式を推定する。</p> <p>(2) 近似式より、消波護岸及び改良型護岸の無次元越波流量 <math>q^*_{\text{exp}(B, F, D, P)}</math> となるときに直立護岸の相対天端高 <math>(h_c/H_0)_{\text{app}(V)}</math> を算出する。</p> <p>(3) 同一の無次元越波量となるときに消波護岸及び改良型護岸の相対天端高 <math>(h_c/H_0)_{\text{exp}(B, F, D, P)}</math> と直立護岸の相対天端高 <math>(h_c/H_0)_{\text{app}(V)}</math> から換算天端高係数 <math>\beta = (h_c/H_0)_{\text{exp}(B, F, D, P)} / (h_c/H_0)_{\text{app}(V)}</math> を算出。</p>	
手法 2	<p>(1) 消波護岸及び改良型護岸の無次元越波流量 <math>q^*_{\text{exp}(B, F, D, P)}</math> と相対天端高 <math>(h_c/H_0)_{\text{exp}(B, F, D, P)}</math> の関係より、近似式を推定する。</p> <p>(2) 近似式より、直立護岸の無次元越波流量 <math>q^*_{\text{exp}(V)}</math> となるときに消波護岸及び改良型護岸の相対天端高 <math>(h_c/H_0)_{\text{app}(B, F, D, P)}</math> を算出する。</p> <p>(3) 同一の無次元越波量となるときに消波護岸及び改良型護岸の相対天端高 <math>(h_c/H_0)_{\text{app}(B, F, D, P)}</math> と直立護岸の相対天端高 <math>(h_c/H_0)_{\text{exp}(V)}</math> から換算天端高係数 <math>\beta = (h_c/H_0)_{\text{app}(B, F, D, P)} / (h_c/H_0)_{\text{exp}(V)}</math> を算出。</p>	
手法 3	<p>(1) 消波護岸及び改良型護岸の無次元越波流量 <math>q^*_{\text{exp}(B, F, D, P)}</math> と相対天端高 <math>(h_c/H_0)_{\text{exp}(B, F, D, P)}</math> の関係より、近似式を推定する。</p> <p>(2) 合田の越波流量推定図から、消波護岸及び改良型護岸と同じ <math>h/H_0'</math> と条件となるときに直立護岸の無次元越波流量 <math>q^*_{\text{est}(V)}</math> を任意に設定し、直立護岸の <math>(h_c/H_0)_{\text{est}(V)}</math> を推定する。</p> <p>(3) 近似式より、直立護岸の無次元越波流量 <math>q^*_{\text{est}(V)}</math> となるときに消波護岸及び改良型護岸の相対天端高 <math>(h_c/H_0)_{\text{app}(B, F, D, P)}</math> を算出する。</p> <p>(4) 同一の無次元越波量となるときに消波護岸及び改良型護岸の相対天端高 <math>(h_c/H_0)_{\text{app}(B, F, D, P)}</math> と直立護岸の相対天端高 <math>(h_c/H_0)_{\text{est}(V)}</math> から換算天端高係数 <math>\beta = (h_c/H_0)_{\text{app}(B, F, D, P)} / (h_c/H_0)_{\text{est}(V)}</math> を算出。</p>	

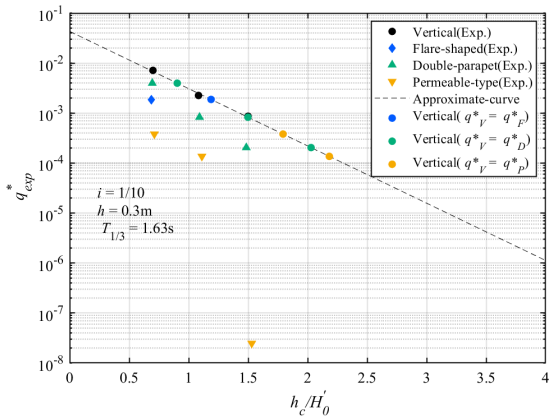


図-4.1 手法1の手順(1), (2)の結果  
( $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=1.63\text{s}$ )

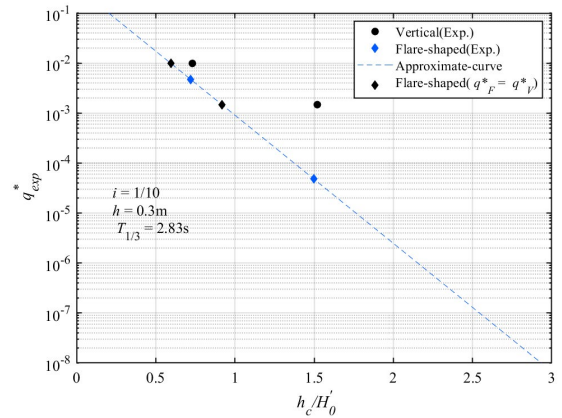


図-4.4 手法2の手順(1), (2)の結果  
(上部フレア護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=2.83\text{s}$ )

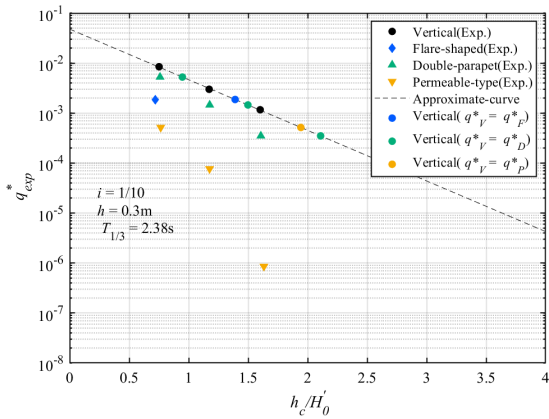


図-4.2 手法1の手順(1), (2)の結果  
( $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=2.38\text{s}$ )

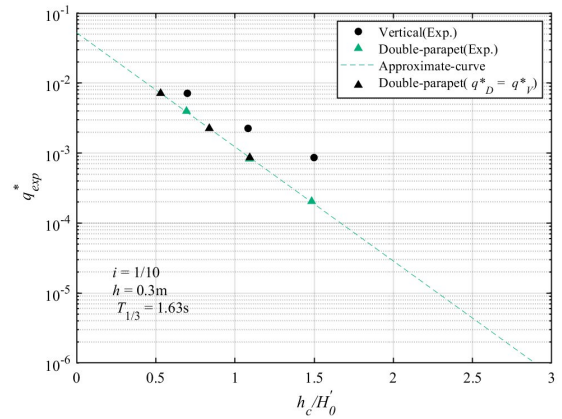


図-4.5 手法2の手順(1), (2)の結果  
(ダブルパラペット護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=1.63\text{s}$ )

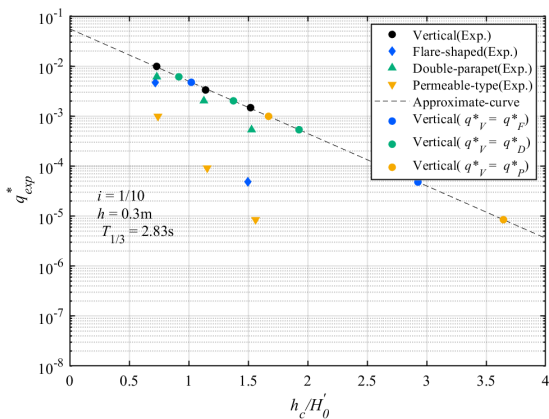


図-4.3 手法1の手順(1), (2)の結果  
( $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=2.83\text{s}$ )

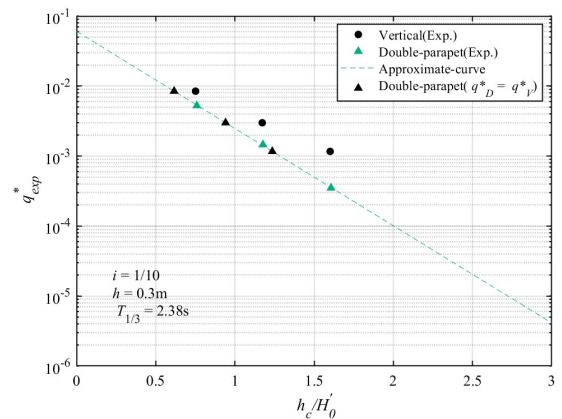


図-4.6 手法2の手順(1), (2)の結果  
(ダブルパラペット護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=2.38\text{s}$ )

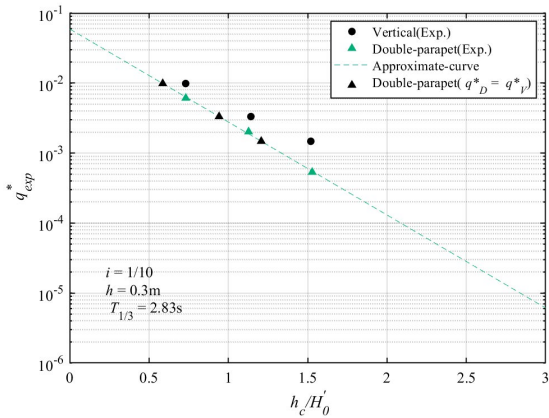


図-4.7 手法2の手順(1), (2)の結果  
(ダブルパラペット護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=2.83\text{s}$ )

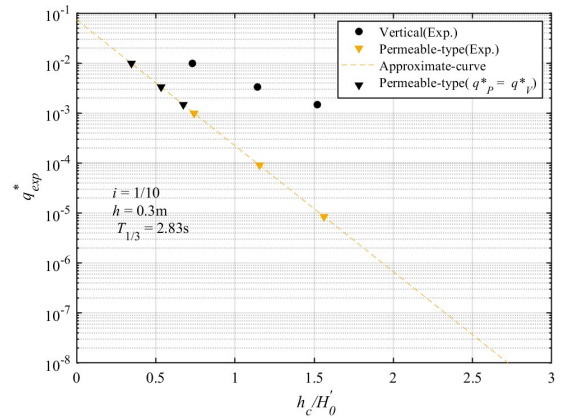


図-4.10 手法2の手順(1), (2)の結果  
(透水型護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=2.83\text{s}$ )

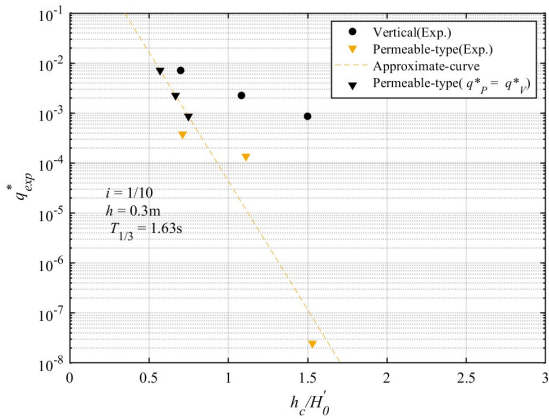


図-4.8 手法2の手順(1), (2)の結果  
(透水型護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=1.63\text{s}$ )

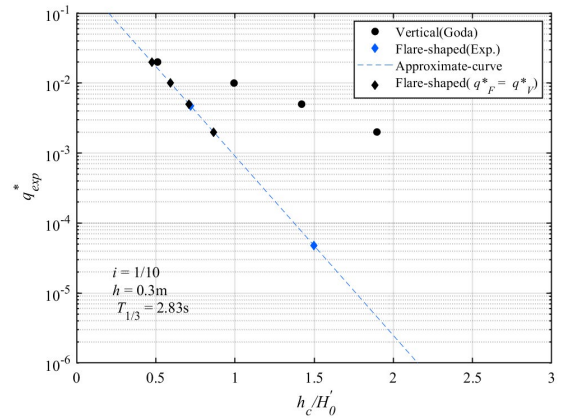


図-4.11 手法3の手順(1)~(3)の結果  
(上部フレア護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=2.83\text{s}$ )

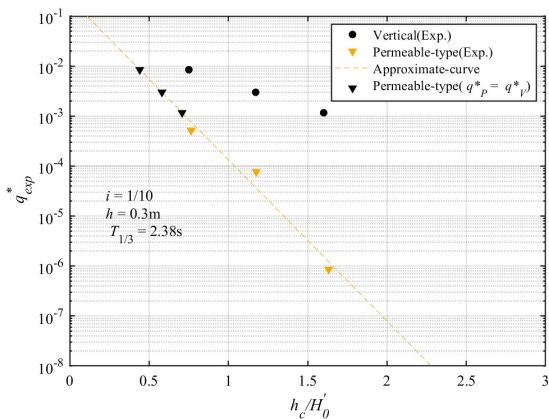


図-4.9 手法2の手順(1), (2)の結果  
(透水型護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=2.38\text{s}$ )

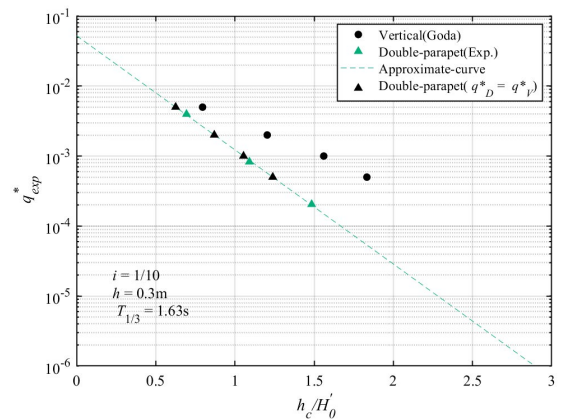


図-4.12 手法3の手順(1)~(3)の結果  
(ダブルパラペット護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=1.63\text{s}$ )

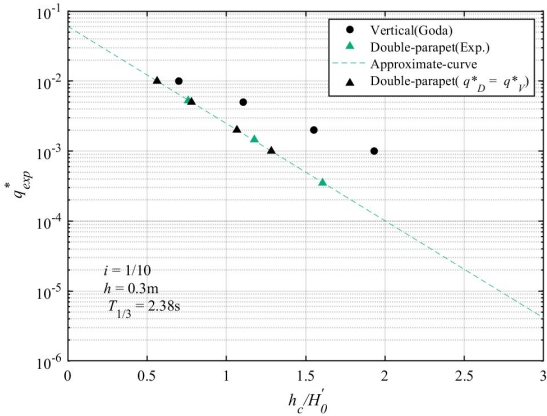


図-4.13 手法3の手順(1)~(3)の結果  
(ダブルパラペット護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=2.38\text{s}$ )

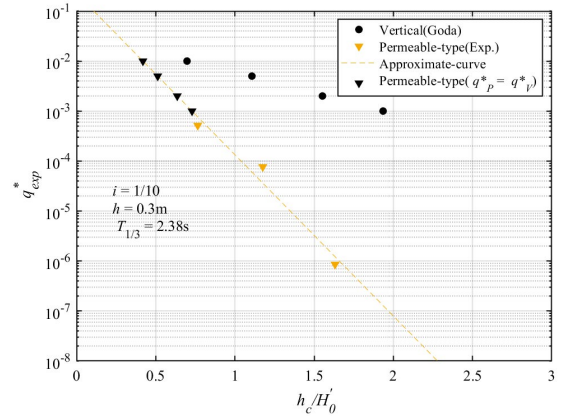


図-4.16 手法3の手順(1)~(3)の結果  
(透水性護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=2.38\text{s}$ )

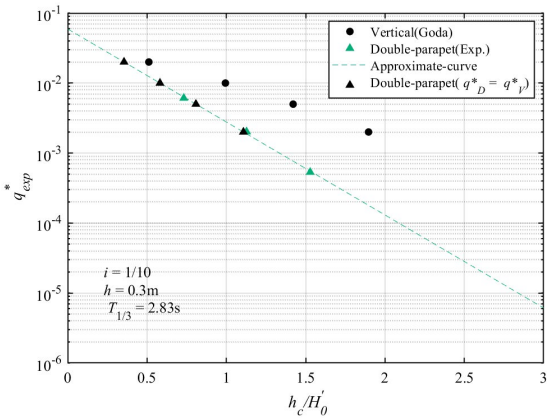


図-4.14 手法3の手順(1)~(3)の結果  
(ダブルパラペット護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=2.83\text{s}$ )

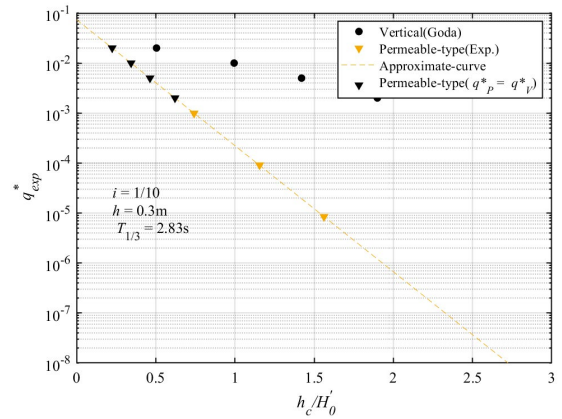


図-4.17 手法3の手順(1)~(3)の結果  
(透水性護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=2.83\text{s}$ )

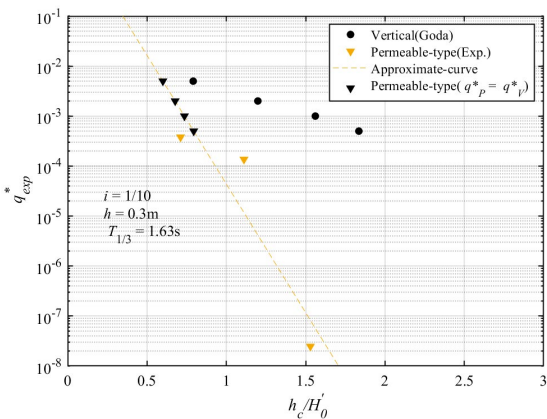


図-4.15 手法3の手順(1)~(3)の結果  
(透水性護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ ,  $T_{1/3}=1.63\text{s}$ )

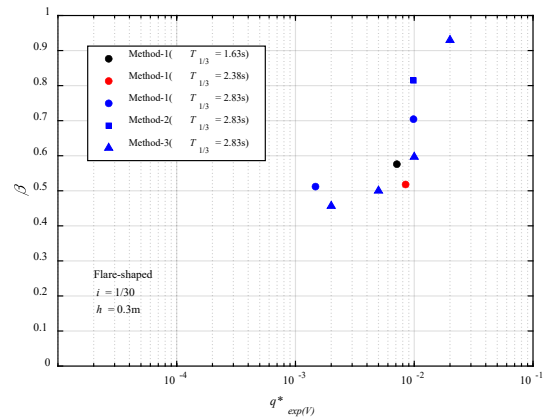


図-4.18 手法1~3による換算天端高係数の算定結果  
(上部フレア護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ )

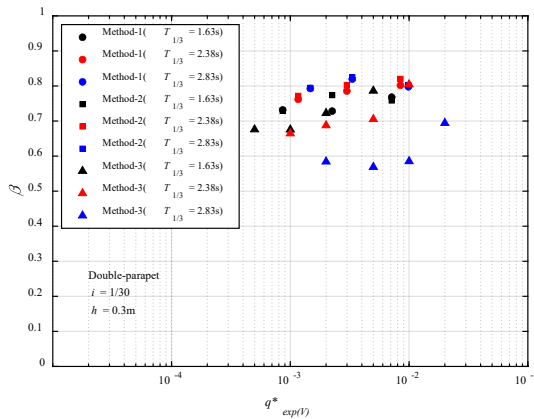


図-4.19 手法1～3による換算天端高係数の算定結果  
(ダブルパラペット護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ )

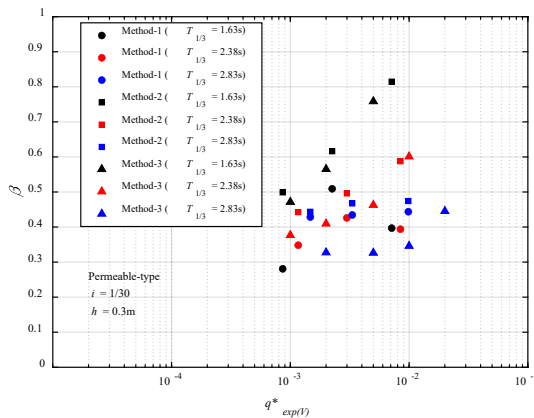


図-4.20 手法1～3による換算天端高係数の算定結果  
(透水性護岸,  $i=1/10$ ,  $h=0.3\text{m}$ )

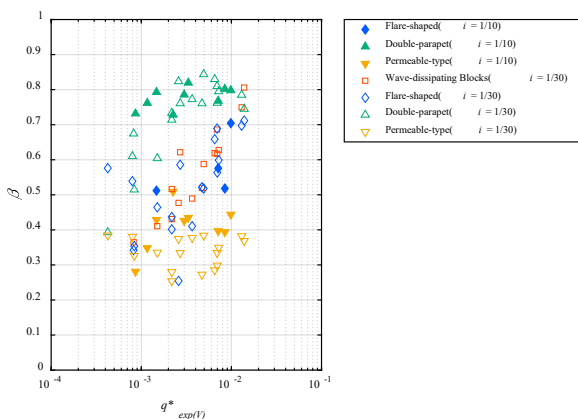


図-4.21 消波護岸及び改良型護岸の換算天端高係数の算定結果

## 4.2 換算天端高係数の算定結果

4.1節の結果より、手法1が最も換算天端高係数のばらつきが小さいと判断し、手法1を用いて30分の1勾配条件における換算天端高係数を算出した。また、4.1節で求めた10分の1勾配条件の換算天端高係数と比較した。

図-4.21に、30分の1勾配条件において、手法1で算出した換算天端高係数を護岸形式ごとに示す。

消波護岸の換算天端高係数は $\beta=0.4\sim 0.8$ 程度となった。周期や水深による傾向の違いは小さく、換算沖波波高と越波流量が比例する。越波流量が小さい条件ほど堤体前面における波浪のエネルギーが小さく、消波ブロックによるエネルギー散逸が効果的に働き、換算天端高係数が小さくなったと考えられる。

上部フレア護岸の $\beta$ は、 $\beta=0.3\sim 0.8$ 程度であった。また、消波護岸と同じく、無次元越波流量が大きいほど $\beta$ も大きくなる傾向がある。但し、消波護岸と異なる点として、水深が深い条件と比較すると、浅い条件の方が換算天端高係数が大きい傾向にあることが挙げられる。

上部フレア護岸の換算天端高係数が水深に依存する要因は、上部フレア部の幅と波浪の歪度の関係にあると考えられる。図-3.43に示すように、堤前水深が深い条件では上部フレア部によって波浪が沖合に吹き戻される様子が確認されるが、浅い条件では吹き戻れず部分的に越波している。

ダブルパラペット護岸の $\beta$ は、 $\beta=0.4\sim 0.85$ 程度となった。周期や水深による傾向の違いは小さく、いずれの条件も越波流量が大きい条件 ( $2\times 10^{-3} < q^*_{\text{exp}(V)}$ ) では換算天端高係数は大きく (0.7~0.8程度)、越波流量が小さい条件 ( $q^*_{\text{exp}(V)} < 2\times 10^{-3}$ ) では換算天端高係数が小さくなる傾向にある。

1/10勾配条件の結果も、30分の1勾配と比較すると換算天端高係数の変化は小さいものの、同様の傾向にある。ダブルパラペット護岸の換算天端高係数の傾向が越波流量に強く影響する原因は、背後パラペットにおける排水量であると考えられる。前面パラペット(すなわち、直立護岸)の越波流量が大きい条件においては、パラペット間の湛水が排水しきらず、前面パラペットの越波に合わせて背後パラペットより湛水が溢れてしまう。一方、前面パラペットの越波流量が小さい条件においては、パラペット間の排水が進み、湛水面上に露出した背後パラペットが越波を阻害する。定量的に説明するため、排水検定の結果と比較する。排水検定の結果より、背後パラペットの排水孔から排水される排水量は、おおよそ $3\times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ である。無次元越波流量の算定方法に合わせ、換算沖波波高 $H_0'=0.15\text{m}$ とした $\sqrt{2gH_0'^3}$ で除して排水量を無次元量に修正すると、無次元排水量は $1\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 程度と

なる。この値は、ダブルパラペット護岸の換算天端高係数の傾向が変化する越波流量の閾値と類似しており、上述の説明を裏付ける。

透水型護岸の $\beta$ は、 $\beta=0.3\sim0.4$ 程度であった。周期、水深に傾向の違いはみられず、いずれの条件でも換算天端高係数は同程度であった。

改良型護岸の換算天端高係数と代表的な護岸形状の換算天端高係数の参考値<sup>7)</sup>の比較を行った。図-4.22にその結果を示す。消波護岸の換算天端高係数は0.7~0.9程度で

あり、従来の消波ブロック積護岸よりも小さい結果である。ダブルパラペット護岸の換算天端高係数は0.4~0.9程度、上部フレア護岸の換算天端高係数は0.3~0.8程度である。透水型護岸の換算天端高係数は0.3~0.5程度であり、その他の護岸形状に比べて換算天端高係数が小さく、越波量低減に有効な護岸形状であることが確認できる。

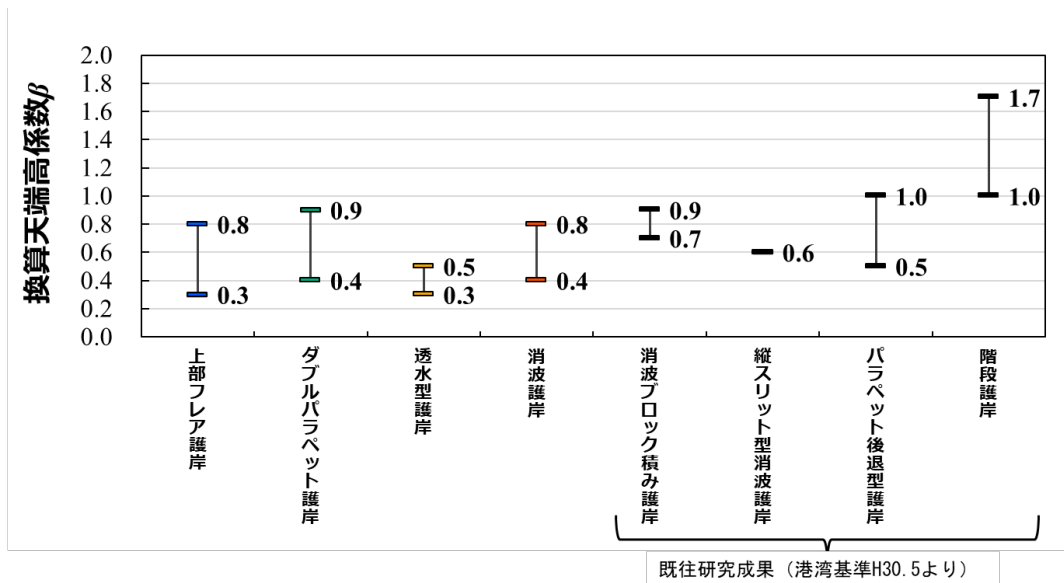


図-4.22 改良型護岸と代表的な護岸形状の換算天端高係数の比較

## 5. 水理模型実験と数値計算の比較

### 5.1 CADMAS-SURF について

#### (1) 概要

CADMAS-SURF (Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure, 以降 CS)<sup>8)~10)</sup>は、流体の物理量をスタッガード格子で配置し、運動方程式を SMAC 法 (Simplified Marker And Cell method) に基づいて離散化して解析する波動シミュレーターである。CS は、自由表面を VOF 法 (Volume Of Fluid method)<sup>13)</sup>によってモデル化している。CS は、規則波・不規則波の両方が造波可能である。また、セルの占有率を考慮したポーラスモデルが実装されている。

#### (2) 基礎方程式

CS の基礎方程式はポーラスモデルを考慮した連続式と Navier-Stokes 方程式である。Navier-Stokes 方程式は、

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = S_p \quad (5.1)$$

$$\lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + A_x(\mathbf{u}) = P_x + V_x(\mathbf{u}) + R_x + D_x(\mathbf{u}) + S_x(\mathbf{u}) \quad (5.2)$$

$$\lambda_v \frac{\partial v}{\partial t} + A_y(\mathbf{u}) = P_y + V_y(\mathbf{u}) + R_y + D_y(\mathbf{u}) + S_y(\mathbf{u}) \quad (5.3)$$

$$\lambda_v \frac{\partial w}{\partial t} + A_z(\mathbf{u}) = P_z + G_z + V_z(\mathbf{u}) + R_z + D_z(\mathbf{u}) + S_z(\mathbf{u}) \quad (5.4)$$

$A_x \dots A_z$ ,  $P_x \dots P_z$ ,  $V_x \dots V_z$ ,  $G_z$ ,  $R_x \dots R_z$ ,  $D_x \dots D_z$ ,  $S_x \dots S_z$  はそれぞれ移流項、圧力勾配項、粘性項、重力項、ポーラス体からの抵抗力項、エネルギー減衰項、造波ソース項である。移流項、圧力勾配項、粘性項を、x 方向について詳細を書き下すと以下の通りである。

$$A_x(\mathbf{u}) = \frac{\partial \lambda_x u u}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y v u}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z w u}{\partial z} \quad (5.5)$$

$$P_x = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (5.6)$$

$$V_x(\mathbf{u}) = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \quad (5.7)$$

ここに、 $t$ : 時間,  $u, v, w$ : 流速の x,y,z 成分,  $\rho$ : 基準密度,  $p$ : 圧力,  $v_e$ : 分子動粘性係数  $\nu$  と渦動粘性係数  $\nu_{et}$  の和,  $\gamma_v$ : 空隙率,  $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ : x,y,z 方向の面積透過率である。

$\lambda_v, \lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  は慣性力係数  $C_M$  を用いて次のとおりに表され、右辺第二項が構造物から受ける慣性力の効果となる。

$$\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v) C_M \quad (5.8)$$

$$\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x) C_M \quad (5.9)$$

$$\lambda_y = \gamma_y + (1 - \gamma_y) C_M \quad (5.10)$$

重力項  $G_z$  は、z 方向のみに与えられる。

$$G_z = -\frac{\gamma_v \rho^* g}{\rho} \quad (5.11)$$

ここで、 $\rho, \rho^*$  は基準密度、浮力を考慮する密度、 $g$  は重力加速度である。

#### (3) 抵抗力項

CS で抵抗力項  $R_x \dots R_z$  の計算方法は2種類存在するが、本研究では Dupuit-Forchheimer 則 (以降、DF 則) を用いる方法を選択する。x 方向について詳細を書き下すと以下の通りである。

$$R_x = -\gamma_v (\gamma_x u) \left\{ \alpha + \beta \sqrt{(\gamma_x u)^2 + (\gamma_y v)^2 + (\gamma_z w)^2} \right\} \quad (5.12)$$

$\alpha, \beta$  は、以下の Englund の表現で与えられる抵抗力係数である。

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1 - \gamma_v)^3}{\gamma_v^2} \frac{\nu}{d^2} \quad (5.13)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{(1 - \gamma_v)}{\gamma_v^3} \frac{1}{d} \quad (5.14)$$

$\alpha_0, \beta_0$  は、材料による係数、 $d$  はポーラス体の代表径である。 $\alpha_0, \beta_0$  は、近藤ら (1983)<sup>14)</sup>が材料毎に整理している値に準拠し、表-5.1 のように設定する。

表-5.1 DF 則パラメータの設定値

種類	$\gamma_v$	$C_M$	$d$ [m]	$\alpha_0$	$\beta_0$
消波ブロック(乱積)	0.50	1.2	0.1	2100	2.2
碎石	0.43	1.2	$1.5 \times 10^{-2}$	1500	3.6

(4) エネルギー減衰項

エネルギー減衰項  $D_x \dots D_z$  は、流速に比例する減衰項として与える。x 方向について詳細を書き下すと以下の通りである。

$$D_x(\mathbf{u}) = -\gamma_v D_x u \quad (5.15)$$

エネルギー減衰帯  $D_x \dots D_z$  のための係数は、Eric ら (1993)<sup>15)</sup> に倣い、次式で表す。

$$D_x = \theta_v \sqrt{\frac{g}{h}} (N+1) \left( \frac{\max(|x-x_0|, |y-y_0|)}{l} \right)^N \quad (5.16)$$

ここに、 $l$  : エネルギー減衰帯の延長、 $x_0, y_0$  : エネルギー減衰帯の開始位置、 $N$  : 分布関数の次数、 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  : 無次元の係数である。本研究では、 $N=2, \theta_x=\theta_z=0.6$  と設定した。

(5) 造波ソース項

造波ソース項  $S_x \dots S_z$  は、造波ソースの座標でのみ、 $x, y, z$  方向にソースを加える。x 方向について詳細を書き下すと以下の通りである。

$$S_x(\mathbf{u}) = \gamma_v S_x u \quad (5.17)$$

不規則波で造波する際は、目標となる水位と鉛直流速分布の時系列の外部データを読み込み、時間方向及び空間方向に補間しながら計算する。規則波で造波する際は、目標となる水位、鉛直流速分布の時系列をストークス波第 5 次近似解<sup>16)</sup>から計算する。

目標となる水位  $\eta_0$  及び流速  $U_0(z, t)$  を用いて造波しようとする、特に造波開始直後に、想定している水位  $\eta_0$  と計算上の水位  $\eta_s$  にずれが生じる。よって、実際の計算に用いる x 方向または y 方向の造波用流速  $U(z, t)$  には、以下のスケーリングを施し、造波位置での流入出量を合わせるようにする。

$$U(z, t) = U_0(z^*, t) \left( \frac{\eta_0 + h}{\eta_s + h} \right) \quad (5.18)$$

$$z^* = \frac{\eta_0 + h}{\eta_s + h} (z + h) - h \quad (5.19)$$

ここに、 $h$  : 初期水深である。

指定したセルの中心位置 ( $x=x_s$ ) に造波のためのソース<sup>17)</sup>を与える。

$$S_p = q(z, t) \quad (5.20)$$

$$S_u = uq(z, t) \quad (5.21)$$

$$S_v = vq(z, t) \quad (5.22)$$

$$S_w = wq(z, t) + \frac{v}{3} \frac{\partial q(z, t)}{\partial z} \quad (5.23)$$

$$S_F = Fq(z, t) \quad (5.24)$$

$$q(z, t) = 2 \frac{U(z, t)}{\Delta x_s} \quad (5.25)$$

ここに、 $\Delta x_s$  : x 座標  $x_s$  における格子間隔である。 $S_p, S_u, S_v, S_w, S_F$  : 造波ソースのためのソース項である。

(6) 自由表面のモデル化

前述のとおり、CS は水表面を VOF 法によって表現している。VOF 関数  $F$  の輸送方程式は次のとおりに表される。

$$\gamma_v \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_x u F}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v F}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w F}{\partial z} = S_F \quad (5.26)$$

水表面セルの方向の決定には NASA-VOF3D<sup>18)</sup>の方法、VOF 関数  $F$  の移流項の離散化には Donor-Acceptor 法<sup>19)</sup>が用いられる。

(7) その他の設定条件

表-5.2 にその他の設定条件の一覧を示す。

表-5.2 その他の設定条件

項目	設定
乱流モデル	使用しない
計算時間刻み	自動調整(CFL 安全率 0.1)
水の密度	1000 kg/m <sup>3</sup>
水の動粘性係数	1.0×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s
移流項の離散化手法	VP-DONOR 0.2
圧力のポアソン方程式の反復計算	M-ILUBCGSTAB 法 ・ A-ERROR : 1.0×10 <sup>-12</sup> ・ R-ERROR : 1.0×10 <sup>-10</sup>
気泡・飛沫の取扱い	Timer-Door 法 (気泡 : 上昇速度 0.2 m/s・ 飛沫 : 自由落下)
自由表面における流速の境界条件	線形外挿
サブグループ	1 回



表-5.3 計算の対象条件の一覧

波種別	波群	波数	換算沖波波高 $H_0$ (m)	有義周期 $T_{1/3}$ (s)	堤前水深 $h$ (m)	天端高 $h_t$ (m)	水路勾配1/10					水路勾配1/30					相対水深 $h/H_0'$	相対天端高 $h_t/H_0'$	波形勾配 $H_0'/L_0$				
							直立護岸	消波護岸	フレア型	DP型	透水型	直立護岸	消波護岸	フレア型	DP型	透水型							
不規則波	1	200	0.15	1.63	0.00	0.12	●	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	0.0	0.80	0.056			
							●	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	1.27					
							●	-	●	●	●	●	-	-	-	-	-	1.73					
						0.15	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		1.0	0.80	
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		1.27		
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		1.73		
						0.30	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		2.0	0.80	
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		1.27		
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		1.73		
					2.38	0.00	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	-	-	-	-	0.0	0.80	0.017
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	-	-	-	-	1.27		
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	-	-	-	-	1.73		
						0.15	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1.0	0.80		
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1.27			
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1.73			
						0.30	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	2.0	0.80		
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1.27			
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1.73			
					2.83	0.00	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	-	-	-	-	0.0	0.80	0.012
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	-	-	-	-	1.27		
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	-	-	-	-	1.73		
						0.15	●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1.0	0.80		
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1.27			
							●	-	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	1.73			
0.30	●	-	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	2.0	0.80							
	●	-	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	1.27								
	●	-	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	1.73								

※ ●: 実験と計算を実施, ●: 計算のみ実施, -: 未実施

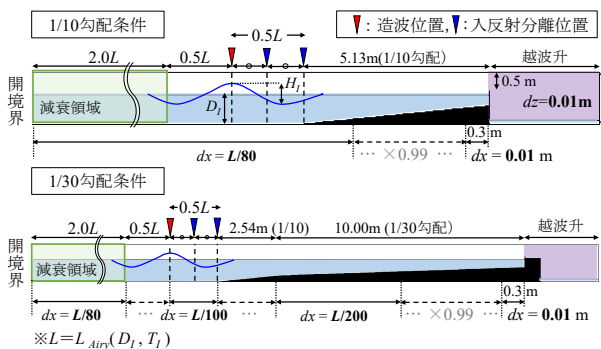


図-5.1 計算領域の概念図

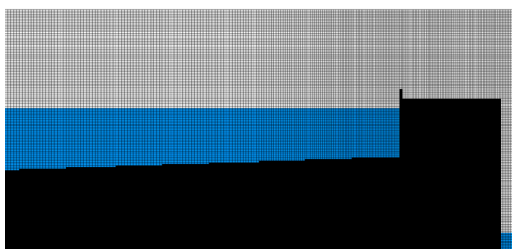


図-5.2 堤体付近に設定した計算格子の様子

## 5.2 計算条件

### (1) 計算ケース

表-5.3にCSで計算したケースの自然条件、構造物条件を示す。水理模型実験と同じ条件とし、実験結果と計算結果を比較することで計算結果の再現性を検証する。計算は、実験していない条件に対しても補間的に実施した。

### (2) 計算領域

図-5.1は、計算領域の設定概念図である。10分の1勾配条件及び30分の1勾配条件では計算領域の斜面部の長さが異なり、それぞれ5.13(m)、12.54(m) (10分の1勾配2.54(m)+30分の1勾配10.0(m))である。斜面部以外に、造波・減衰帯領域と、越波水塊が溢れない十分な広さの越波升領域を設ける。

造波位置は、計算領域の斜面部から0.5L離れた箇所に設ける。なお、このときの波長 $L$ は、微小振幅波理論に基づき造波位置の水深 $D_I$ 、入射有義周期 $T_I$ より算出した値であり( $L=L_{Airy}(D_I, T_I)$ )、各計算ケースの波浪条件に応じて計算している。水理模型実験を行った水路の造波板位置は、堤体位置から100m程度離れている。造波板を含めるような広領域とした計算を行うと、造波位置から波浪が伝播するにつれ数値減衰によって波高が減衰し、堤体位置で十分な波高が出ない可能性がある。また、広領域をとした計算は、計算コストが高い。従って、斜面部から0.5L離れた箇所から造波することとした。

表-5.4に、空間解像度の設定値の一覧を示す。水平解像度及び鉛直解像度は、CS事例集<sup>9)</sup>で推奨される値を参考にして設定した。CS事例集の水平解像度の推奨値は、対象波浪の非線形性が高い場合には $dx=L/80\sim L/100$ とされている。本研究では、造波位置の水平解像度を10分の1勾配条件では $dx=L/80$ 、30分の1勾配条件では $L/100$ とする。勾配条件で水平解像度が異なるのは、30分の1勾配条件で造波位置における水深が大きく、 $L$ が大きくなることで格子比

表-5.4 空間解像度の設定値の一覧

i	h [m]	D <sub>I</sub> [m]	T <sub>I</sub> [s]	L [m]	dx [m]			dz [m]
					L/80	L/100	L/200	
1/10	0.00	0.513	2.83	6.07	0.076	—	—	0.01
1/10	0.00	0.513	2.38	5.01	0.063	—	—	0.01
1/10	0.00	0.513	1.63	3.17	0.040	—	—	0.01
1/10	0.15	0.663	2.83	6.81	0.085	—	—	0.01
1/10	0.15	0.663	2.38	5.59	0.070	—	—	0.01
1/10	0.15	0.663	1.63	3.46	0.043	—	—	0.01
1/10	0.30	0.813	2.83	7.44	0.093	—	—	0.01
1/10	0.30	0.813	2.38	6.07	0.076	—	—	0.01
1/10	0.30	0.813	1.63	3.66	0.046	—	—	0.01
1/30	0.00	0.587	2.83	6.45	—	0.065	0.032	0.01
1/30	0.00	0.587	2.38	5.31	—	0.053	0.027	0.01
1/30	0.00	0.587	1.63	3.33	—	0.033	0.017	0.01
1/30	0.15	0.737	2.83	7.13	—	0.071	0.036	0.01
1/30	0.15	0.737	2.38	5.83	—	0.058	0.029	0.01
1/30	0.15	0.737	1.63	3.57	—	0.036	0.018	0.01
1/30	0.30	0.887	2.83	7.72	—	0.077	0.039	0.01
1/30	0.30	0.887	2.38	6.28	—	0.063	0.031	0.01
1/30	0.30	0.887	1.63	3.74	—	0.037	0.019	0.01

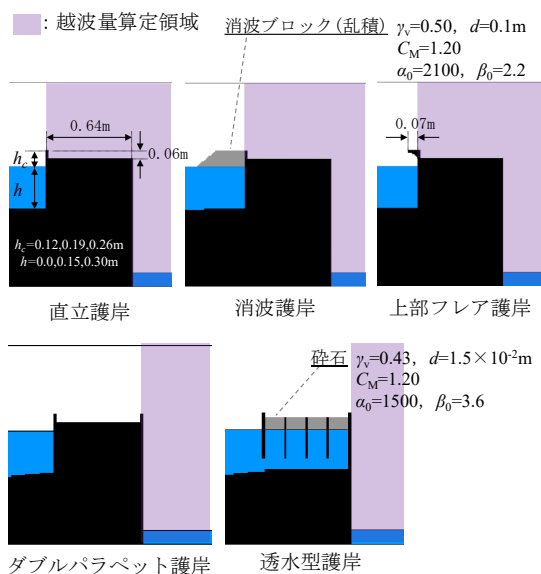


図-5.3 構造形式別の越波量算定領域

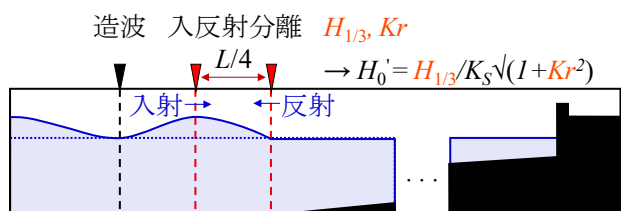


図-5.4 入射波高の算出方法の概念図

率 $dx/dz$ が10を超えないようにするためである。30分の1勾配条件では、30分の1勾配斜面最深部で $dx=L/200$ となるように $dx$ を接続した。いずれの勾配条件でも、堤体に近づくにつれ公比0.99で $dx$ を小さくし、堤体形状を十分に解像できるような堤体位置では $dx=0.01$  (m)とした。

鉛直解像度は、全標高で $dz=0.01$ (m)とした。この鉛直解像度 $dz$ は、造波波高 $H_i$ に対して $H_i/dz>10$ となり、対象波浪の非線形性が高い場合の推奨値を満足している。

斜面部以外に、長さ $3L$ の造波・減衰帯領域と、越波水塊が溢れない十分な広さの越波升領域を設ける。減衰帯は、反射波が生じないように、造波位置より $0.5L$ 後方に $2L$ 分の減衰領域を設定する。また、堤体後方に、越波した水塊を保持する越波升領域を設定する。なお、越波升領域の初期水深を10 (cm)とする。これは、越波水塊の孤立を防ぎ、安定して計算するために設定している。

(3) 越波流量の算定方法

図-5.3は、各護岸形式の越波量の算定領域を示す。単位長さ当たりの越波量 $Q$  [ $m^3/m$ ]は、堤体前面または後面を超えた領域のVOF関数 $F$ 値を積分することで算出する。越波量の算定領域は構造形式毎に異なり、直立護岸、消波護岸、上部フレア護岸は堤体前面を超えた領域、ダブルパラペット護岸、透水型護岸は堤体後面を超えた領域とする。なお、10分の1勾配条件の直立護岸、上部フレア護岸は前面パラペット後方の堤体を地形としていないが、越波量の算定領域の定義は同じであり、越波量の計算に影響はないと考えられる。

水理模型実験は全構造形式において堤体後面に導水路を設置しているため、計算における直立護岸、消波護岸、上部フレア護岸の越波量の算定領域は、厳密には水理模型実験と異なる。しかし、それらの構造形式において、前面パラペットを越波して水叩き部分を通る水塊の運動は水路断面方向に一样に近く、導水路の設置位置の前後で越波量に大きな差異はないと考えられる。また、CSの計算結果を確認すると、水叩き部分に水塊が残留し堤体後面背後に流れないことがある。水塊が残留するのは明らかに実現象とは異なるため、CSにおいては水叩き部分も越波量算定領域に含むこととし、前面パラペットを超えた水塊が越波水塊として計算されるようにした。

越波流量は、実験と同じく、越波量 $Q$  [ $m^3/m$ ]を計算時間で除することで、単位幅・単位時間当たりの平均越波流量 $q$  [ $m^3/m/s$ ]を算出した。また、 $q$  [ $m^3/m/s$ ]に含まれる換算沖波波高 $H_0'$ の誤差を補正するため $H_0'$ で除した無次元越波流量 $q^*=q/(2gH_0')^{0.5}$ を算出した。換算沖波波高 $H_0'$ の誤差については事項に記載する。

## (4) 造波波浪諸元

造波波浪は不規則波とし、スペクトル形式は修正ブレットシュナイダー・光易型とする。造波波浪は、200波数1波群とする。

目標波高は、全条件で換算沖波波高 $H_{0,i}'=0.15$ (m)とする。造波水深は、造波波浪が深海波とみなせるほど深くないため、浅水変形の影響を受ける。そのため、浅水係数算定図<sup>19)</sup>を用いて造波位置の水深とピーク周期から浅水係数 $K_s$ を算定し、造波位置で造波すべき有義波高 $H=K_s H_0'$ を算出した。有義波高 $H$ 相当が得られる水位とそのときの流速を造波ソースに与える。水位と流速の時系列データを外部ファイルで入力した。

図-5.4は、入射有義波高の検定方法の概念図を示す。斜面法先部における2点の時系列（斜面の法先部と沖側0.25L離れた地点）に対して合田ら（1976）<sup>11)</sup>の入・反射波分離解析を行い、入射有義波高を算出する。入射有義波高を算出した後、水深とピーク周期から算出した浅水係数を基に換算沖波波高に変換する。

表-5.5、表-5.6は、それぞれ10分の1勾配と30分の1勾配において、検定より得られた計算換算沖波波高 $H_0'$ と目標換算沖波波高 $H_{0,i}'$ を比較したものである。全護岸形式に対して検定を行った。まず、直立護岸に対する検定により目

標換算沖波波高 $H_{0,i}'$ に対して計算換算沖波波高 $H_0'$ の比 $H_0'/H_{0,i}'$ は0.94~1.07であり、良好な再現性が得られた。全体的に、周期 $T_{1/3}=1.63$ sの条件の $H_0'/H_{0,i}'$ が過小評価傾向にあるのは、周期が短い方が浅水係数が小さいことにより、他の周期条件よりも造波ソースに与える有義波高を小さく設定したためである。また、消波護岸を除く護岸形式においては、周期が短い方が反射率 $K_r$ は大きく、反射率の補正により換算沖波波高が小さくなりやすい。

消波護岸以外の護岸形式の $H_0'/H_{0,i}'$ の傾向は直立護岸と類似している。上部フレア護岸やダブルパラペット護岸において、直立護岸と反射率が同程度でありながらも、 $H_0'/H_{0,i}'$ が1.1よりも大きくなる場合がある。1割程度の誤差であるため、後述するように越波流量を無次元化する過程で補正することとした。

消波護岸の $H_0'/H_{0,i}'$ の傾向は直立護岸と異なる。直立護岸と異なり、周期が長いほど反射率が大きい。そのため、周期が長いほど換算沖波波高が小さくなりやすい。

以上の計算条件、護岸形式による換算沖波波高の誤差を補正するため、水理模型実験と同じく、計算換算沖波波高 $H_0'$ を用いて越波流量を無次元化して整理する。

表-5.5 波高検定による換算沖波波高の算出結果（10分の1勾配条件）

i	計算条件					直立護岸			消波護岸			上部フレア護岸			ダブルパラペット護岸			透水性護岸		
	$H_{0,i}'$ [m]	$T_{1/3}$ [s]	$h$ [m]	$h_c$ [m]	$K_s$	$K_r$	$H_0'$ [m]	$H_0'/H_{0,i}'$	$K_r$	$H_0'$ [m]	$H_0'/H_{0,i}'$	$K_r$	$H_0'$ [m]	$H_0'/H_{0,i}'$	$K_r$	$H_0'$ [m]	$H_0'/H_{0,i}'$	$K_r$	$H_0'$ [m]	$H_0'/H_{0,i}'$
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/10	0.15	2.83	0.00	0.12	1.08	0.32	0.157	1.05	-	-	-	0.33	0.157	1.05	0.32	0.161	1.07	0.31	0.157	1.05
1/10	0.15	2.38	0.00	0.12	1.00	0.30	0.160	1.07	-	-	-	0.31	0.157	1.05	0.31	0.158	1.05	0.28	0.160	1.07
1/10	0.15	1.63	0.00	0.12	0.92	0.28	0.155	1.03	-	-	-	0.29	0.155	1.03	0.30	0.157	1.05	0.27	0.157	1.05
1/10	0.15	2.83	0.00	0.19	1.08	0.35	0.157	1.05	-	-	-	0.34	0.156	1.04	0.34	0.157	1.05	0.30	0.160	1.07
1/10	0.15	2.38	0.00	0.19	1.00	0.32	0.158	1.05	-	-	-	0.38	0.158	1.05	0.31	0.161	1.07	0.29	0.158	1.05
1/10	0.15	1.63	0.00	0.19	0.92	0.30	0.158	1.05	-	-	-	0.29	0.156	1.04	0.30	0.156	1.04	0.27	0.155	1.03
1/10	0.15	2.83	0.00	0.26	1.08	0.35	0.159	1.06	-	-	-	0.35	0.157	1.05	0.35	0.158	1.05	0.31	0.159	1.06
1/10	0.15	2.38	0.00	0.26	1.00	0.32	0.159	1.06	-	-	-	0.31	0.158	1.05	0.33	0.159	1.06	0.30	0.160	1.07
1/10	0.15	1.63	0.00	0.26	0.92	0.29	0.159	1.06	-	-	-	0.30	0.156	1.04	0.30	0.155	1.03	0.28	0.156	1.04
1/10	0.15	2.83	0.15	0.12	1.01	0.53	0.161	1.07	-	-	-	0.54	0.155	1.03	0.54	0.160	1.07	0.50	0.157	1.05
1/10	0.15	2.38	0.15	0.12	0.96	0.55	0.159	1.06	-	-	-	0.55	0.160	1.07	0.57	0.159	1.06	0.52	0.160	1.07
1/10	0.15	1.63	0.15	0.12	0.91	0.67	0.153	1.02	-	-	-	0.63	0.159	1.06	0.68	0.155	1.03	0.60	0.157	1.05
1/10	0.15	2.83	0.15	0.19	1.01	0.57	0.158	1.05	-	-	-	0.56	0.154	1.03	0.57	0.157	1.05	0.53	0.157	1.05
1/10	0.15	2.38	0.15	0.19	0.96	0.60	0.161	1.07	-	-	-	0.60	0.161	1.07	0.60	0.162	1.08	0.55	0.159	1.06
1/10	0.15	1.63	0.15	0.19	0.91	0.73	0.157	1.05	-	-	-	0.67	0.156	1.04	0.71	0.155	1.03	0.64	0.159	1.06
1/10	0.15	2.83	0.15	0.26	1.01	0.59	0.157	1.05	-	-	-	0.57	0.157	1.05	0.59	0.158	1.05	0.58	0.155	1.03
1/10	0.15	2.38	0.15	0.26	0.96	0.62	0.161	1.07	-	-	-	0.61	0.161	1.07	0.63	0.163	1.09	0.58	0.161	1.07
1/10	0.15	1.63	0.15	0.26	0.91	0.73	0.154	1.03	-	-	-	0.71	0.155	1.03	0.72	0.154	1.03	0.65	0.157	1.05
1/10	0.15	2.83	0.30	0.12	0.98	0.83	0.156	1.04	-	-	-	0.83	0.158	1.05	0.84	0.160	1.07	0.79	0.154	1.03
1/10	0.15	2.38	0.30	0.12	0.94	0.82	0.155	1.03	-	-	-	0.81	0.157	1.05	0.84	0.156	1.04	0.78	0.155	1.03
1/10	0.15	1.63	0.30	0.12	0.92	0.88	0.142	0.95	-	-	-	0.86	0.146	0.97	0.89	0.143	0.95	0.83	0.142	0.95
1/10	0.15	2.83	0.30	0.19	0.98	0.88	0.156	1.04	-	-	-	0.87	0.155	1.03	0.88	0.157	1.05	0.84	0.155	1.03
1/10	0.15	2.38	0.30	0.19	0.94	0.88	0.156	1.04	-	-	-	0.86	0.161	1.07	0.88	0.158	1.05	0.83	0.156	1.04
1/10	0.15	1.63	0.30	0.19	0.92	0.94	0.144	0.96	-	-	-	0.91	0.144	0.96	0.94	0.144	0.96	0.87	0.144	0.96
1/10	0.15	2.83	0.30	0.26	0.98	0.91	0.159	1.06	-	-	-	0.88	0.155	1.03	0.90	0.156	1.04	0.86	0.158	1.05
1/10	0.15	2.38	0.30	0.26	0.94	0.91	0.157	1.05	-	-	-	0.87	0.161	1.07	0.89	0.160	1.07	0.84	0.158	1.05
1/10	0.15	1.63	0.30	0.26	0.92	0.96	0.145	0.97	-	-	-	0.95	0.144	0.96	0.96	0.145	0.97	0.89	0.145	0.97

表-5.6 波高検定による換算沖波波高の算出結果 (30分の1勾配条件)

計算条件						直立護岸			消波護岸			上部フレア護岸			ダブルパラペット護岸			透水型護岸		
$i$	$H'_{0i}$ [m]	$T_{1/3}$ [s]	$h$ [m]	$h_c$ [m]	$K_s$	$K_r$	$H'_0$ [m]	$H'_0/H'_{0i}$	$K_r$	$H'_0$ [m]	$H'_0/H'_{0i}$	$K_r$	$H'_0$ [m]	$H'_0/H'_{0i}$	$K_r$	$H'_0$ [m]	$H'_0/H'_{0i}$	$K_r$	$H'_0$ [m]	$H'_0/H'_{0i}$
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/30	0.15	2.83	0.00	0.12	1.04	0.23	0.153	1.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/30	0.15	2.38	0.00	0.12	0.98	0.23	0.154	1.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/30	0.15	1.63	0.00	0.12	0.91	0.24	0.144	0.96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/30	0.15	2.83	0.00	0.19	1.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/30	0.15	2.38	0.00	0.19	0.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/30	0.15	1.63	0.00	0.19	0.91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/30	0.15	2.83	0.00	0.26	1.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/30	0.15	2.38	0.00	0.26	0.98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/30	0.15	1.63	0.00	0.26	0.91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1/30	0.15	2.83	0.15	0.12	1.00	0.41	0.153	1.02	0.38	0.150	1.00	0.42	0.153	1.02	0.41	0.153	1.02	0.40	0.160	1.07
1/30	0.15	2.38	0.15	0.12	0.95	0.50	0.152	1.01	0.43	0.149	0.99	0.50	0.154	1.03	0.49	0.153	1.02	0.47	0.152	1.01
1/30	0.15	1.63	0.15	0.12	0.91	0.57	0.141	0.94	0.38	0.145	0.97	0.56	0.145	0.97	0.58	0.142	0.95	0.53	0.149	0.99
1/30	0.15	2.83	0.15	0.19	1.00	0.46	0.153	1.02	0.38	0.149	0.99	0.45	0.155	1.03	0.46	0.153	1.02	0.42	0.151	1.01
1/30	0.15	2.38	0.15	0.19	0.95	0.55	0.155	1.03	0.40	0.148	0.99	0.53	0.154	1.03	0.55	0.155	1.03	0.50	0.153	1.02
1/30	0.15	1.63	0.15	0.19	0.91	0.62	0.147	0.98	0.34	0.151	1.01	0.59	0.148	0.99	0.62	0.145	0.97	0.54	0.141	0.94
1/30	0.15	2.83	0.15	0.26	1.00	0.45	0.151	1.01	0.34	0.150	1.00	0.46	0.153	1.02	0.48	0.152	1.01	0.43	0.150	1.00
1/30	0.15	2.38	0.15	0.26	0.95	0.56	0.154	1.03	0.33	0.147	0.98	0.54	0.154	1.03	0.56	0.154	1.03	0.52	0.153	1.02
1/30	0.15	1.63	0.15	0.26	0.91	0.61	0.149	0.99	0.31	0.147	0.98	0.60	0.144	0.96	0.63	0.147	0.98	0.57	0.150	1.00
1/30	0.15	2.83	0.30	0.12	0.97	0.69	0.156	1.04	0.61	0.146	0.97	0.72	0.159	1.06	0.66	0.162	1.08	0.67	0.155	1.03
1/30	0.15	2.38	0.30	0.12	0.93	0.77	0.151	1.01	0.60	0.152	1.01	0.79	0.156	1.04	0.79	0.151	1.01	0.74	0.150	1.00
1/30	0.15	1.63	0.30	0.12	0.92	0.86	0.144	0.96	0.49	0.158	1.05	0.84	0.148	0.99	0.87	0.145	0.97	0.82	0.144	0.96
1/30	0.15	2.83	0.30	0.19	0.97	0.77	0.160	1.07	0.60	0.146	0.97	0.76	0.170	1.13	0.75	0.166	1.11	0.72	0.154	1.03
1/30	0.15	2.38	0.30	0.19	0.93	0.84	0.152	1.01	0.56	0.153	1.02	0.83	0.156	1.04	0.83	0.151	1.01	0.74	0.161	1.07
1/30	0.15	1.63	0.30	0.19	0.92	0.90	0.146	0.97	0.42	0.157	1.05	0.89	0.145	0.97	0.90	0.146	0.97	0.85	0.145	0.97
1/30	0.15	2.83	0.30	0.26	0.97	0.83	0.156	1.04	0.54	0.152	1.01	0.78	0.166	1.11	0.82	0.164	1.09	0.77	0.156	1.04
1/30	0.15	2.38	0.30	0.26	0.93	0.88	0.152	1.01	0.54	0.162	1.08	0.86	0.153	1.02	0.87	0.152	1.01	0.82	0.152	1.01
1/30	0.15	1.63	0.30	0.26	0.92	0.91	0.145	0.97	0.38	0.155	1.03	0.91	0.146	0.97	0.91	0.145	0.97	0.86	0.146	0.97

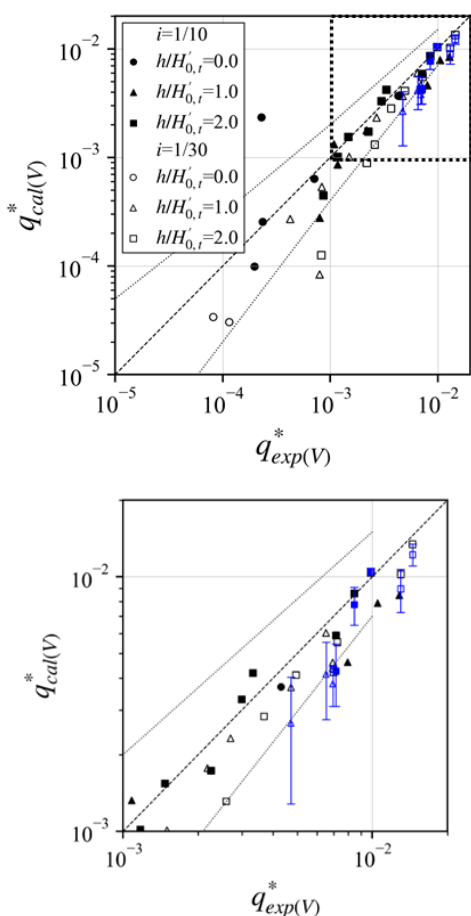


図-5.5 直立護岸の無次元越波流量の比較 (上：全体図，下：拡大図)

### 5.3 計算結果

まず、水理模型実験、数値計算における直立護岸の越波流量  $q^*_{exp(V)}$ 、 $q^*_{cal(V)}$  を比較する。下添え字の  $exp$  は実験値、 $cal$  は計算値を示す。括弧内は護岸形式 (V: 直立護岸, B: 消波護岸, D: ダブルパラペット護岸, F: 上部フレア護岸, P: 透水型護岸) を表す。

図-5.5(上)は、水理模型実験、数値計算における直立護岸の無次元越波流量  $q^*_{exp(V)}$ 、 $q^*_{cal(V)}$  を比較した図である。下添え字の  $exp$  は実験値、 $cal$  は計算値を示す。括弧内は護岸形式 (V: 直立護岸) を表す。マーカーの塗りつぶしが10分の1勾配、白抜きが30分の1勾配条件である。点線は、越波流量の真値の想定範囲である。

10分の1勾配条件では、 $q^*_{cal(V)}$  の再現性は良好である。 $q^*_{exp(V)}$  が  $10^{-3}$  程度以下ではばらつきがあるものの、概ね  $q^*_{cal(V)}$  と  $q^*_{exp(V)}$  は同程度の大きさである。一方で、30分の1勾配条件においても越波流量が多い範囲では  $q^*_{cal(V)}$  と  $q^*_{exp(V)}$  は同程度の大きさであるものの、 $q^*_{exp(V)}$  が  $10^{-3}$  程度では、 $q^*_{cal(V)}$  は  $q^*_{exp(V)}$  よりも過小となる傾向にあった。

$q^*_{cal(V)}$  の過小評価の原因として、まず波群の影響を検証する。計算は実験と波数が異なり、計算安定性の観点から1波群200波としていた。一部の条件(計9条件)に対して、新たに波列を作成した2波群200波の波群で再計算した。

図-5.5(下)の青で示すエラーバーは、計3波群の  $q^*_{cal(V)}$  の平均値と標準偏差を示したものである。波群の違いによる標準偏差を加味しても  $q^*_{cal(V)}$  は  $q^*_{exp(V)}$  よりも小さく、

波群の違いが  $q^*_{cal(V)}$  の過小評価の要因である可能性は低い。

次に、水理模型実験の無次元越波流量  $q^*_{exp(V)}$ ,  $q^*_{cal(V)}$  を、合田の越波流量推定図による読み取り値  $q^*_{est(V)}$  を介して比較する。est は合田推定値を示す。実験値の基準とした合田推定値は、表-3.6 に示す堤脚水深補正量を加味する。

図-5.6 は、10分の1勾配および30分の1勾配条件の全ての直立護岸の実験値  $q^*_{exp(V)}$  と計算値  $q^*_{cal(V)}$  を合田推定値  $q^*_{est(V)}$  を介して比較した図である。 $q^*_{exp(V)}$  と  $q^*_{cal(V)}$  を比較すると、両者とも概ね真値の想定範囲内となる。合田推定値を読み取る際、実験値が過大となる要因（サーフビートや平均水位上昇の影響）を補正したためと考えられる。

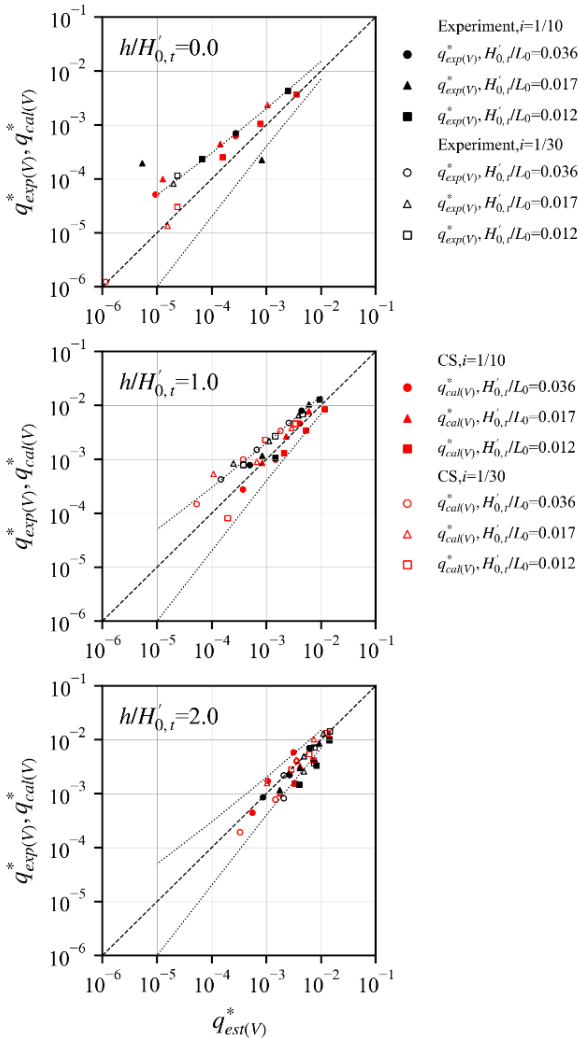


図-5.6 越波流量算定結果（直立護岸）

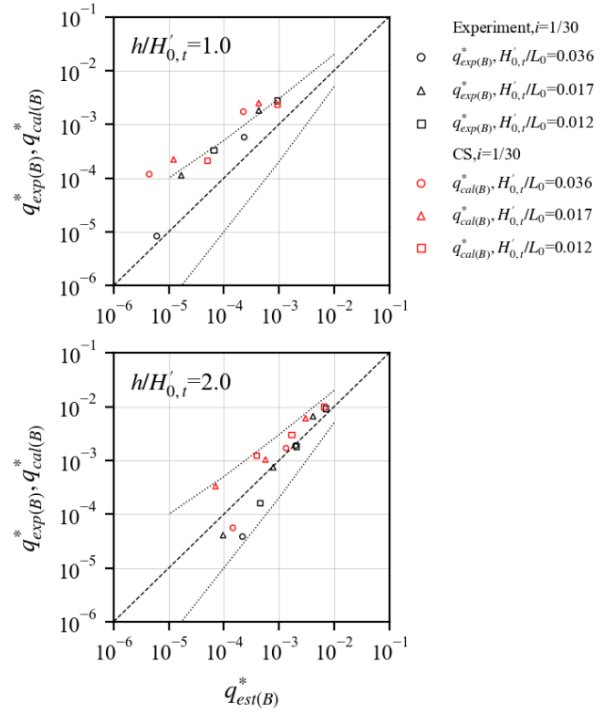


図-5.7 越波流量算定結果（消波護岸）

次に、水理模型実験、数値計算における消波護岸の越波流量を比較する。直立護岸と同じく、水理模型実験、数値計算の消波護岸の無次元越波流量  $q^*_{exp(B)}$ ,  $q^*_{cal(B)}$  を、合田の消波護岸の越波流量推定図による読み取り値  $q^*_{est(B)}$  を介して比較する。

図-5.7 は、30分の1勾配条件におけるの消波護岸の実験値  $q^*_{exp(B)}$  と計算値  $q^*_{cal(B)}$  を比較した図である。 $q^*_{exp(B)}$  と  $q^*_{cal(B)}$  を比較すると、 $q^*_{exp(B)}$  に対して  $q^*_{cal(B)}$  は概ね同程度、あるいは  $q^*_{cal(B)}$  の方が過大である。加えて、直立護岸において  $q^*_{exp(V)}$  よりも  $q^*_{cal(V)}$  の方が小さいことを踏まえると、計算において消波ブロックによる越波低減効果が十分に発揮されていない可能性がある。

最後に、水理模型実験、数値計算における改良型護岸の再現性を検証する。その際、越波流量比  $R_{exp(B,F,D,P)}$ ,  $R_{cal(B,F,D,P)}$  を指標とする。 $R_{exp(B,F,D,P)}$ ,  $R_{cal(B,F,D,P)}$  はそれぞれ、水理模型実験、数値計算の無次元越波流量  $q^*_{exp(B,F,D,P)}$ ,  $q^*_{cal(B,F,D,P)}$  を直立護岸の無次元越波流量  $q^*_{exp(V)}$ ,  $q^*_{cal(V)}$  で除した比であり、以下の式で求める。

$$R_{exp(B,F,D,P)} = q^*_{exp(B,F,D,P)} / q^*_{exp(V)} \quad (5.27)$$

$$R_{cal(B,F,D,P)} = q^*_{cal(B,F,D,P)} / q^*_{cal(V)} \quad (5.28)$$

越波流量の実験値と計算値 $q^*_{\text{exp(B,F,D,P)}}$ ,  $q^*_{\text{cal(B,F,D,P)}}$ を直接比較するのではなく、越波流量比 $R_{\text{exp(B,F,D,P)}}$ ,  $R_{\text{cal(B,F,D,P)}}$ を比較するのは、直立護岸の越波流量の計算値 $q^*_{\text{cal(V)}}$ が実験値 $q^*_{\text{exp(V)}}$ よりも小さい傾向にあるためである。 $q^*_{\text{exp(B,F,D,P)}}$ ,  $q^*_{\text{cal(B,F,D,P)}}$ を直接比較すると、護岸形式特有の越波量低減効果が発揮される以前の、想定される越波量が等しくない条件で、両者を比較する可能性があった。そこで、横軸を $q^*_{\text{exp(V)}}$ ,  $q^*_{\text{cal(V)}}$ として $q^*_{\text{exp(B,F,D,P)}}$ ,  $q^*_{\text{cal(B,F,D,P)}}$ を整理することで、実験と計算を想定される越波量が等しい条件で比較した。

図-5.8～図-5.11に、水理模型実験、数値計算における消波護岸及び改良型護岸の越波流量比を示す。図-5.8は消波護岸、図-5.9は上部フレア護岸、図-5.10はダブルパラペット護岸、図-5.11は透水型護岸である。但し、消波護岸は10分の1勾配条件で実験及び計算を実施していない。横軸は $q^*_{\text{exp(V)}}$ ,  $q^*_{\text{cal(V)}}$ , 縦軸は越波流量比 $R_{\text{exp(B,F,D,P)}}$ ,  $R_{\text{cal(B,F,D,P)}}$ である。いずれの護岸形式においても、実験結果と同じく、直立護岸の越波流量が小さいほど越波流量比が小さい傾向がある。

越波流量比の再現性を評価するため、単回帰分析を行う。越波流量、越波流量比は指数関数的に変動するため、説明変数を $\log_{10}q^*_{\text{exp(V)}}$ ,  $\log_{10}q^*_{\text{cal(V)}}$ , 目的変数を $\log_{10}R_{\text{exp(B,F,D,P)}}$ ,  $\log_{10}R_{\text{cal(B,F,D,P)}}$ として、対数(底10)をとる。表-5.7に、単回帰分析の結果を示す。護岸形式毎を比較すると、透水型護岸は、回帰係数 $A$ , 切片 $B$ の再現性は比較的良好い。上部フレア護岸は、決定係数 $R^2$ が低いものの、回帰係数の再現性は比較的良好い。一方、消波護岸及びダブルパラペット護岸の回帰係数、切片の再現性の再現性は低い。

以上のように、越波流量比の再現性は、護岸形式ごとに異なる傾向がみられた。次章では、(直立護岸を含む)護岸形式ごとに再現性が低下する要因を検証する。

表-5.7 越波流量比の単回帰分析結果

$\log_{10}(R_{(B,F,D,P)})$		A			B			$R^2$		
		exp.	cal.	cal./exp.	exp.	cal.	cal./exp.	exp.	cal.	cal./exp.
消波	B	1.80	1.11	62%	3.49	2.28	65%	0.77	0.66	85%
上部フレア型	F	1.15	0.86	75%	1.76	1.15	66%	0.42	0.26	61%
DP型	D	0.95	0.60	63%	1.96	1.29	66%	0.69	0.35	51%
透水型	P	1.49	1.24	83%	1.69	1.52	90%	0.66	0.70	107%

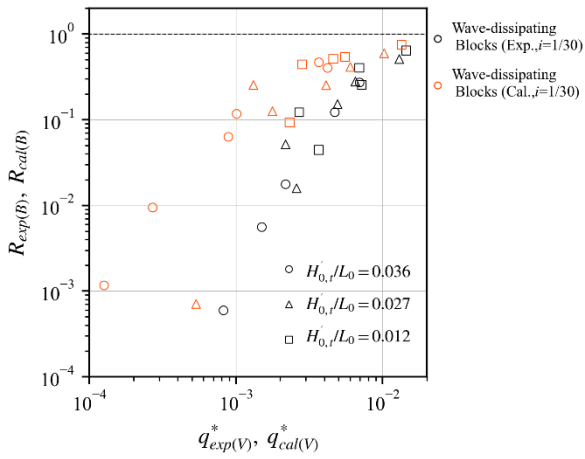


図-5.8 消波護岸の越波流量比

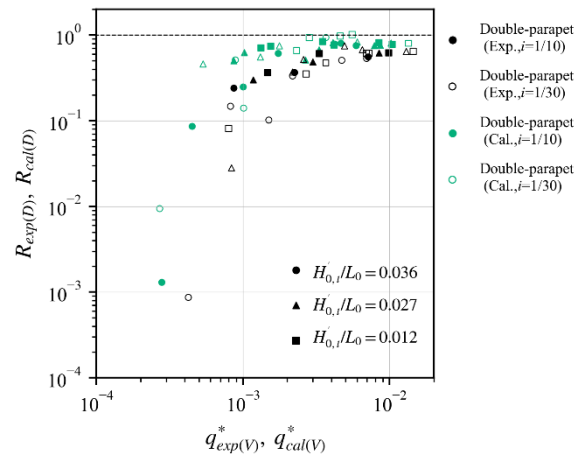


図-5.10 ダブルパラペット護岸の越波流量比

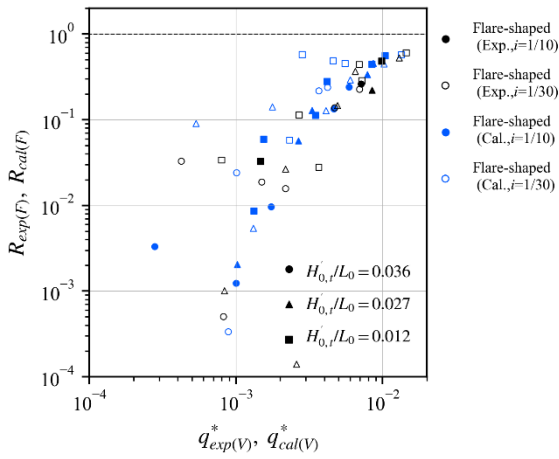


図-5.9 上部フレア護岸の越波流量比

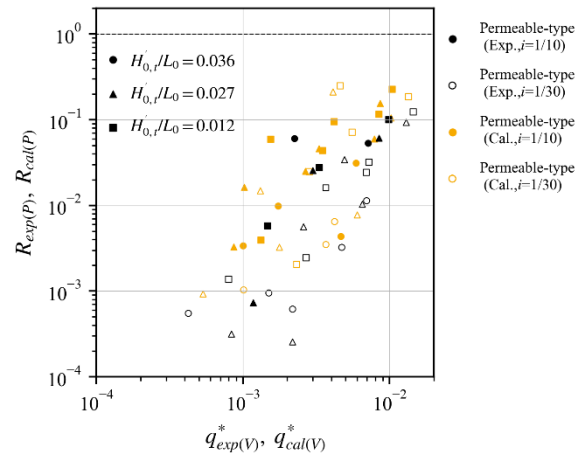


図-5.11 透水型護岸の越波流量比

## 6. 数値計算の再現性の低下要因とその検証

### 6.1 直立護岸

直立護岸の再現性を検証した結果、実験よりも計算の越波流量が過小となる傾向にあった。本節では、再現性の低下要因として、砕波による波高減衰を検証する。

一般的に、実験と計算の越波流量が一致しない原因は、計算において堤体前面における波浪の再現が十分でないことが多い。本研究では、波高検定により波高を調整したのは斜面法先部であり、30分の1勾配条件では堤体前面まで12m程度離れている。計算では、数値粘性などの影響により波高が減衰しやすく、本研究でも波高が減衰していた可能性がある。

従って、現象を簡単にするため、通過波条件で計算における堤体前波高の再現性を検証する。計算領域を図-6.1に示す。堤体部を水平床とし、越波部から領域右端までは領域最底部とする。

図-6.2は、実験値と計算値における有義波高と換算沖波波高の比 $H_{1/3}/H_{0,i}$ を比較したものである。図は堤脚水深条件別とし、横軸は目標換算沖波波高 $H_{0,i}$ に対する堤前に至るまでの水深 $h_x$ の比で統一する。実験値は、波高計位置(WG7~9または10)で計測した水位の時系列から有義波高を算出する。いずれの堤脚水深条件 $h/H_{0,i}$ においても、 $h_x/H_{0,i}$ が大きい位置が堤体部の沖側端に当たる。計算値は、斜面部の各点における水位の時系列から、実験値と同様にゼロアップクロス法によって算出した有義波高の空間分布から間引いて示す。

実験値と計算値を比較すると、いずれの堤脚水深条件においても、沖側の十分に水深が深い位置の値は、実験値と計算値は概ね一致している。しかし、 $h/H_{0,i}=1.0$ の条件の堤体部の直前位置の値は、若干計算値の方が実験値よりも小さい。さらに、 $h/H_{0,i}=0.0$ の条件においては、計算値の方が実験値よりも5~7割程度に小さい。

この計算値の有義波高の過小傾向は、砕波による波高減衰が影響していると考えられる。堤脚水深 $h/H_{0,i}=2.0$ の条件では、砕波点から堤体部までの伝播距離が短く、他の越前水深条件と比較すると砕波減衰を受けにくい。堤脚水深が浅い条件ほど、砕波点が沖側に移り、砕波点からの伝播距離が長くなる。実験と比べて計算の方が砕波による波高減衰が大きく、砕波点からの伝播距離が長いほど両者に差が生じたと考えられる。

計算の砕波による波高減衰が大きくなる原因は、砕波による乱流現象を十分に再現できていないことである可

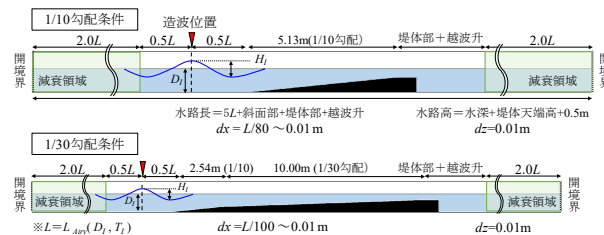


図-6.1 計算領域の概念図

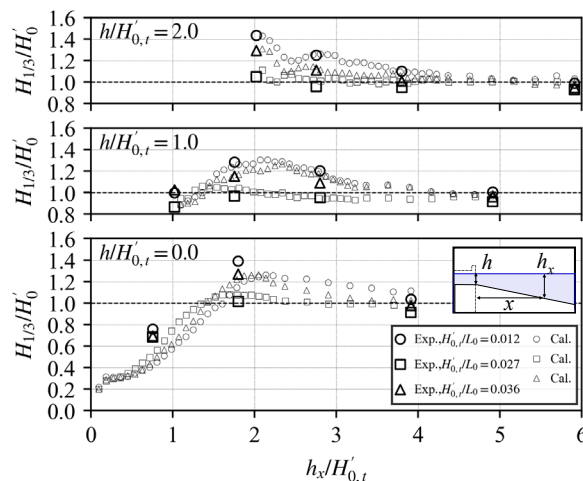


図-6.2 実験と計算の換算沖波波高に対する有義波高の比の比較

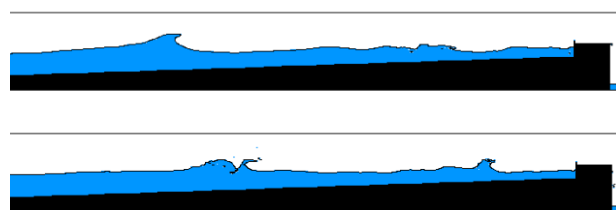


図-6.3 計算のスナップショット

能性がある。図-6.3は、代表的な外力条件（堤脚水深15 (cm)、造波波高24 (cm)、周期2.38 (s))において、簡単のため規則波で造波するよう計算した結果のスナップショットである。斜面途中で巻波砕波が起こっていることが確認できる。実現現象であれば、乱れた波面が乱流となり、より小さいスケールの現象にエネルギーがカスケードする。しかし、図-6.3では、巻波砕波面が突入した水面で、再度巻波がおこり、乱流に現象が遷移していない。過剰に波面が乱れることが、波高減衰に繋がっている可能性がある。



表-6.1 実験・計算条件

種類	$i$	$h$ [m]	$h_c$ [m]	$T$ [s]	$H_{\text{mean}}$ [m]
実験	1/30	0.15	0.12	2.83	0.19
計算	〃	〃	〃	〃	0.12,0.16,0.19,0.22
実験	1/30	0.15	0.12	2.38	0.18
計算	〃	〃	〃	〃	0.11,0.16,0.17,0.21
実験	1/30	0.15	0.12	1.63	0.17
計算	〃	〃	〃	〃	0.12,0.15,0.18,0.21
実験	1/30	0.30	0.12	2.83	0.15,0.17
計算	〃	〃	〃	〃	0.11,0.16,0.17,0.22
実験	1/30	0.30	0.12	2.38	0.14,0.19
計算	〃	〃	〃	〃	0.12,0.16,0.18,0.22
実験	1/30	0.30	0.12	1.63	0.15,0.20
計算	〃	〃	〃	〃	0.12,0.15,0.18,0.20

## 6.2 消波護岸

消波護岸の再現性を検証した結果、実験よりも計算の方が越波流量比が過大となる傾向にあった。本節では、再現性の低下要因として、DF則の抵抗力係数の設定方法を検証する。

計算における消波ブロックによる越波量低減作用は、消波護岸の抵抗力係数で調整される。本研究では、消波ブロックの抵抗力をDF則（式-5.13～14）で算出するように設定しており、抵抗力の大きさは経験定数 $\alpha_0$ 、 $\beta_0$ を用いて調整する。経験定数 $\alpha_0$ 、 $\beta_0$ は、近藤ら<sup>14)</sup>が提案した値（表-5.1）を採用している。この提案値は、CS事例集<sup>9)</sup>に記載されるなど、様々な実務や研究で採用されている。

しかし、従来の研究によると、近藤らの提案値を用いた場合に、適切な消波機能を再現できないことがある。例えば、菊崎ら<sup>20)</sup>は、CADMAS-SURFによる消波ブロック離岸堤の反射率、透過率の再現性を検証したが、近藤らの提案値を用いると水理模型実験結果の再現性が低いケースがみられるとしている。

CSで採用されている抵抗力の計算方法は、必ずしも他のCFDと同じではない。例えば、OpenFOAMで採用されている抵抗力は、Van Gent (1995)<sup>21)</sup>のForchheimer則の表現を採用している。Van Gentの表現は以下の通りである。

$$\begin{aligned}
 a &= \alpha \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{v}{D_{n50}^2} \\
 b &= \beta_c \left( 1 + \frac{7.5}{KC} \right) \frac{1-n}{n^3} \frac{1}{D_{n50}} \quad \text{with } KC = \frac{\hat{U}T}{nD_{n50}} \quad (6.1) \\
 c &= \frac{1 + \frac{1-n}{n} \gamma}{n} \quad \text{with } \gamma = 0.85 - \frac{0.015}{A_c}, A_c = \frac{\hat{U}}{ngT}
 \end{aligned}$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta_c$ は材料別の係数、 $n$ は空隙率、 $D_{50}$ は中央粒径である。 $KC$ は $KC$ 数であり、バルク速度 $\hat{U}$ 、周期 $T$ によって求められる。 $a$ は定常流で卓越し、 $b$ は非定常流で卓越する抵抗力項である。 $c$ は慣性項である。 $\gamma$ は加速係数 $A_c$ に依存するが、簡単のため、一定の値 ( $\gamma=0.34$ ) が用いられることが多い。前述の菊崎らでは、CSで採用されているDF則と、Van Gentの表現の抵抗力係数の値を比較し、両者が一致する結果は得られなかったとしている。

CSのDF則による抵抗力係数は、Van Gentの表現と異なり、外力に依らず一定である。外力によっては、近藤らの提案値を用いても抵抗力を適切に計算できない可能性がある。抵抗力を適切に計算できなければ、消波護岸の越波低減機能も適切に表現できない。

そこで、本節では、まず近藤らの提案値を用いて、様々な外力条件の下で消波護岸の越波流量を計算し、再現性が低下しやすい外力条件を評価する。次に、再現性が低下した外力条件で、抵抗力係数の感度分析を行い、再現性が向上する係数を評価する。

表-6.1は、直立護岸及び消波護岸の越波流量を計測した実験及び計算条件である。現象理解を単純にするため、規則波を対象とする。実験及び計算の波高条件は、斜面法先の平均波高によって調整した。実験の波高条件は、斜面法先部における平均波高 $H_{\text{mean}}$ が、およそ不規則波の $H_{1/3}$ または $H_{1/10}$ 程度となるようにする。この平均波高 $H_{\text{mean}}$ は、ゼロアップクロス法を用いた波別解析によって求めた平均波高を、合田の入・反射波分離法<sup>10)</sup>で求めた反射率によって除した入射波高である。計算の波高条件も、実験と同じ方法で斜面法先部の平均波高で調整する。但し、直立護岸の再現性低下要因で考察したように、実験と計算で斜面法先部の波高が一致しても、堤体部で一致しない可能性があるため、実験と同程度の波高条件に加えて、その前後の波高も加えて計算することとした。

実験と計算における直立護岸、消波護岸の越波流量から、不規則波と同じく越波流量比を求め、越波流量比の再現性を評価する。越波流量比の定義は、不規則波と同じであり、 $R_{\text{cal(B)}}=q_{\text{cal(B)}}^*/q_{\text{cal(V)}}^*$ 、 $R_{\text{exp(B)}}=q_{\text{exp(B)}}^*/q_{\text{exp(V)}}^*$ である（直立護岸に対する消波護岸の無次元越波流量の比）。

図-6.4は、実験と計算の規則波による消波護岸の越波流量比を比較したものである。黒が実験、赤が計算の結果であり、塗りつぶしは堤脚水深が0.30m、白抜きは0.15mの条件の結果を示している。マーカーの形状は周期の違いを示す。直立護岸の越波流量 $q_{\text{exp(V)}}^*$ 、 $q_{\text{cal(V)}}^*$ が大きい条件では、越波流量比 $R_{\text{exp(B)}}$ 、 $R_{\text{cal(B)}}$ は概ね同程度である。一方、 $q_{\text{exp(V)}}^*$ 、 $q_{\text{cal(V)}}^*$ が小さい条件では、周期によって傾向が異なり、周期が長い条件では $R_{\text{exp(B)}}$ 、 $R_{\text{cal(B)}}$ は類似するものの、

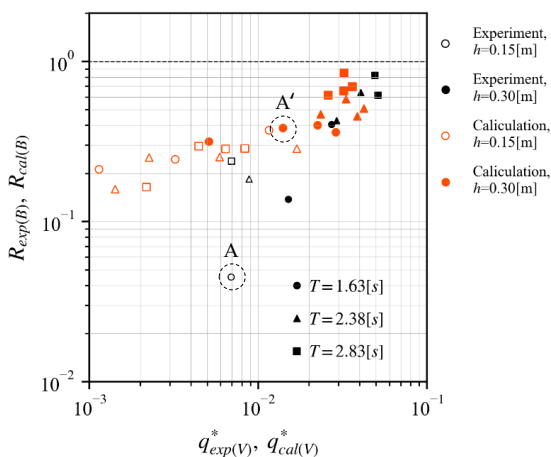


図-6.4 消波護岸の越波流量比の比較

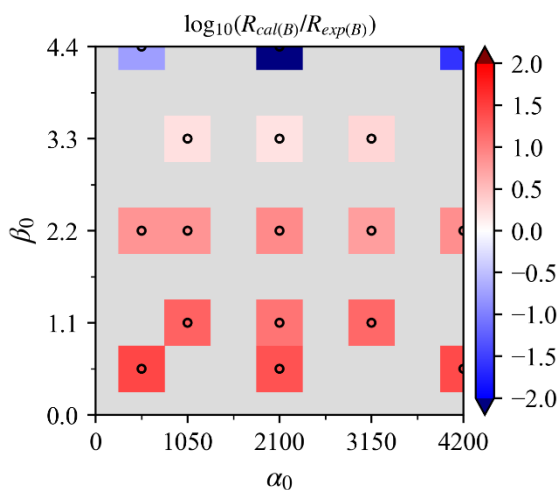


図-6.5 規則波による消波護岸の越波流量比の比較

周期が短い条件では  $R_{cal(B)}$  の方が  $R_{exp(B)}$  よりも大きい。この傾向は水深が浅い方がより顕著である。周期が短く、水深が浅い条件で、計算の方が越波流量比が大きい。すなわち、消波ブロックによる越波低減効果が発現しにくい結果が得られた。この周期、水深による傾向の違いは、式-6.1の例にみられるような、抵抗力係数の外力依存性が影響した可能性がある。式-6.1に従えば、周期が短く水深が浅いほど、 $KC$  数は小さく  $b$  は大きくなる。つまり消波ブロックの抵抗力は大きくなり、越波低減効果が強くなることが予想される。

次に、計算の方が越波流量比が大きい条件で、抵抗力係数の感度分析を行う。図-6.4にA, A'に示す条件は、実験と計算の水深と周期条件が等しく直立護岸の越波流量が類似しているものの、越波流量比は約10倍の差がある。従って、計算値A'に対して、抵抗力係数  $\alpha_0, \beta_0$  を推奨値か

ら1/4~2倍に変化させることで、越波流量比の感度分析を行う。

図-6.5は、抵抗力係数の感度分析を行い、実験と計算の越波流量比を比較したものである。近藤の提案値  $\alpha_0=2100, \beta_0=2.2$  のとき、計算の越波流量比  $R_{cal(B)}$  (図-6.4のA')と実験の越波流量比  $R_{exp(B)}$  (図-6.4のA)を比較すると約10倍の差があり、 $\log_{10}(R_{cal(B)}/R_{exp(B)})=1$  となる。図-6.5に青~白~赤で示す  $\alpha_0, \beta_0$  で計算を実施し、様々な  $\alpha_0, \beta_0$  変更したときの  $\log_{10}(R_{cal(B)}/R_{exp(B)})$  の変化が確認できる。 $\log_{10}(R_{cal(B)}/R_{exp(B)})=0$  となる条件が、実験と計算の越波流量比が一致し、計算の再現性が高いと言える。図-6.5より、 $\alpha_0$  を変化させてもあまり越波流量比は変わらないことが確認できる。その一方、 $\beta_0$  を変化させると越波流量比は大きく変わる。計算数が多くないため、正確な値は分からないが、この条件では  $\beta_0=3.3\sim 4.4$  (近藤の提案値は2.2)とした場合に再現性が向上する。

図-6.5は一例であるものの、水深が小さく、周期が短い条件では、抵抗力係数  $\beta$  を従来よりも大きく設定する方が再現性が向上する可能性がある。この傾向は、Van Gentの表現が内包する抵抗力係数の外力依存性の傾向と一致している。

以上の検証から示唆されることは、消波護岸の越波流量の再現性を向上させるためには、従来通り抵抗力係数を材料固有の一定の値とするのではなく、外力に応じて最適な値を検証することが求められるということである。越波流量が大きい場合には、抵抗力係数は越波流量に強く影響しないけれども、特に水深が浅く、周期が短い条件では、抵抗力係数の影響が大きくなるため、注意が必要である。実務において、CSを用いて消波護岸の越波流量を算出する際には、水理模型実験結果などとの比較を通して、抵抗力係数の妥当性を検証することが望ましい。

今後の課題として、CSにVan Gentの表現のような外力に依存する抵抗力係数を実装することが挙げられる。抵抗力係数の材料固有の部分の値が事前に把握され、対象とする外力条件に応じてCSの内部で抵抗力係数が調整されれば、抵抗力係数を不適切な値として設定する事例は減るであろう。

### 6.3 ダブルパラペット護岸

ダブルパラペット護岸の再現性を検証した結果、実験よりも計算値の方が越波流量比が過大となる傾向にあった。本節では、再現性の低下要因として、排水機能の有無を検証する。

実験ではパラペット間の湛水を背後パラペットの排水孔から排水した。2章に記載したとおり、排水孔は4つあり、その排水量は $4 \times 10^{-4}$  (m<sup>3</sup>/s/m)程度である。

その一方、計算では排水を考慮していない。その理由は二つある。まず一つ目は、CSでも背後パラペットに空間的に排水孔を設けることは可能であるものの、背後パラペットに排水孔を設けたとすると、排水孔を通して越波領域に侵入した水塊と背後パラペットを越波して侵入した水塊を区別することができなくなることが挙げられる。二つ目は、断面積の小さい孔に流れが集約すると、孔内の流速が大きくなり、計算が不安化しやすくなることである。

そこで、本節では、上記二つの問題を回避する方法で排水を考慮し、ダブルパラペット護岸の越波流量比の再現性を再検証することとした。その方法とは、構造物面の境界条件で一定流速を与える方法である。

CSでは、任意の構造物面において境界条件として一定流速を指定することができる。構造物面の法線流速の境界条件において、流速の向きを構造物内部方向とすると、設定した流速で当該セルの液相が減少する。

図-6.6のように、背後パラペットの法線流速の境界条件 $u_{B.C}$ を、背後パラペット方向とする。 $u_{B.C}$ の大きさは、実験の排水検定より得られた排水量と同程度となるように、 $u_{B.C}=4$  (cm/s)とする。この設定により、パラペット間の湛水を減少させることができる。

現象を単純化するため、規則波を対象として、実験及び計算を行った。表-6.2は、実験・計算条件の一覧を示している。実験は堤脚水深2種類、堤体天端高1種類、波高1,2種類、周期2,3種類の計5条件を対象としている。表-6.2の条件で、直立護岸及びダブルパラペット護岸の越波流量を計測した。計算も、同一条件を対象とし、直立護岸及びダブルパラペット護岸の越波流量の計算を行う。波高の条件は、消波護岸と同じく、斜面法先部で調整する。

実験と計算における直立護岸、ダブルパラペット護岸の越波流量から、不規則波と同じく越波流量比を求め、越波流量比の再現性を評価する。越波流量比の定義は、不規則波と同じであり、 $R_{cal(D)}=q^*_{cal(D)}/q^*_{cal(V)}$ 、 $R_{exp(D)}=q^*_{exp(D)}/q^*_{exp(V)}$ である(直立護岸に対するダブルパラペット護岸の無次元越波流量の比)。

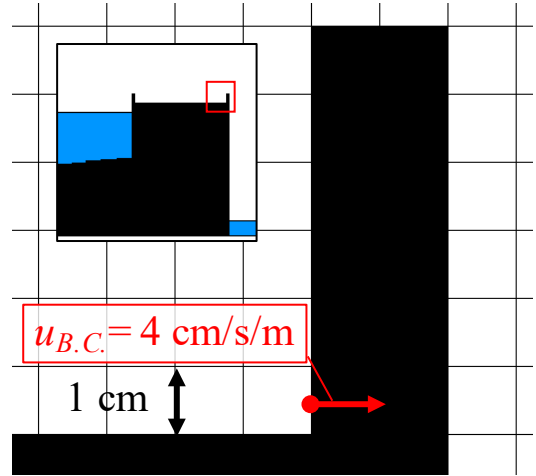


図-6.6 排水の設定方法

表-6.2 ダブルパラペット護岸の規則波の

実験・計算条件

種類	$i$	$T$ [s]	$h$ [m]	$h_c$ [m]	$H_{mean}$ [m]
実験	1/30	2.38	0.15	0.12	0.17
計算	〃	〃	〃	〃	0.16
実験	1/30	1.63	0.15	0.12	0.16
計算	〃	〃	〃	〃	0.15
実験	1/30	2.83	0.30	0.12	0.17
計算	〃	〃	〃	〃	0.16,0.18
実験	1/30	2.38	0.30	0.12	0.21
計算	〃	〃	〃	〃	0.13,0.16
実験	1/30	1.63	0.30	0.12	0.17
計算	〃	〃	〃	〃	0.13,0.18

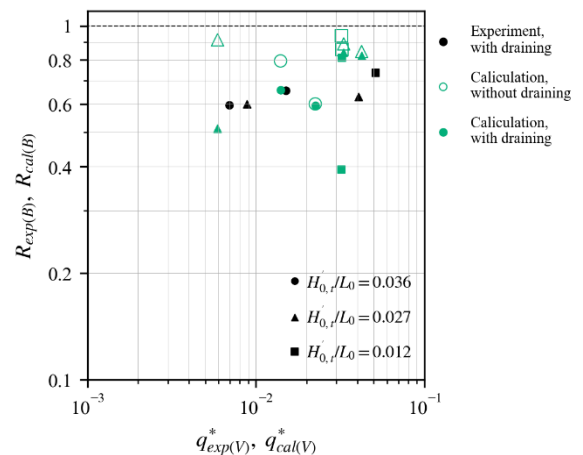


図-6.7 ダブルパラペット護岸の越波流量比の比較

図-6.7 は、実験と計算のダブルパラペット護岸の越波流量比を比較したものである。黒が実験、緑が計算の結果であり、塗りつぶしは排水有りの条件、白抜きは排水無しの条件の結果を示している。マーカーの形状は周期の違いを示す。まず、排水無し（緑・白抜き）の結果をみると、いずれの条件でも実験の越波流量比  $R_{exp(D)}$  よりも計算  $R_{cal(D)}$  の方が大きい傾向にある。この傾向は、不規則波条件と同様である。次に、排水有り（緑・塗りつぶし）の結果をみると、排水無しの結果よりも越波流量比が低下することが分かる。

排水を加えたことによる越波流量比の減少量は条件によって異なり、例外はあるものの、越波流量が多い条件では減少量が小さく、小さい条件では減少量が多い傾向にある。越波流量が多い程、排水が追い付かずにパラペット間が湛水してしまい、越波流量が下がらないと理解できる。

排水を加えることで、 $R_{cal(D)}$  が  $R_{exp(D)}$  よりも小さくなりすぎるものもあるが、かなり再現性が向上するものもある。今回採用した流速の境界条件による排水は、排水流速が一定であるなど、現実の排水現象を精確に再現するものではない。しかしながら、簡易的かつ計算安定性の高い方法で考慮した排水によって、ダブルパラペット護岸の再現性が向上する可能性が示唆されたことに意義がある。

今後の検討課題には、今回のような簡易的な排水方法が有益に働く条件を検証することが挙げられる。実務で排水を考慮して計算する必要がある場面で、空間的に排水孔を設定して排水現象を精確に再現する方法も当然考えられるものの、相応の解像度が求められ、計算コストや不安定性が高くなりやすい。実務への適用性を考えれば、今回のような簡易的な方法を用いる方が馴染みやすい。但し、今回の方法はあくまで排水を模しているだけであるので、適用できる外力条件、構造形状などについて、今後も検討していくことが望ましい。

#### 6.4 上部フレア護岸

上部フレア護岸の越波流量の再現性は、他の構造形式と比較して良好である。フレア護岸の越波流量比は、計算  $R_{cal(F)}$  と実験  $R_{exp(F)}$  で同程度である。

フレア部の解像度が越波流量に与える影響については、今後の検討課題である。一般に、フレア部の空間解像度が高いほど、フレア部の形状や流体の吹き戻し運動を再現することができるだろう。ただし、本研究では、フレア部の張り出し幅7 (cm)×高さ5 (cm)に対し、空間解像度  $dx, dz=1$  (cm)程度の解像度で計算しており、曲面を精確に再現するほど解像度が高くないとしても、一定の越波流

量の再現性を得ることができると考えられる。

フレア部の解像度の影響を十分に評価できていない理由は、現在のCSの解像度の設定方法にも一因がある。CSの計算格子は構造格子であるため、上部フレア護岸のような曲面を再現するためには相応の解像度が求められる点には注意が必要である。また、現在のCSのバージョンでは、空間解像度をフレア部付近だけ細かく（又は粗く）することは困難である。フレア部の特に鉛直解像度を調整することは、領域全体の鉛直解像度を調整することでもあり、堤体に至るまでの波浪にも影響を与える。

#### 6.5 透水性護岸

透水性護岸の再現性を検証した結果、実験よりも計算値の方が越波流量比がやや大きい、または同程度となる傾向にあった。

透水性護岸の再現性の低下要因は二つあり、まず1つは透水性護岸の越波流量が絶対値として非常に小さく、誤差が含まれやすい点である。透水性護岸の越波低減性能は、全構造形式で最も高い。越波流量が小さい場合ほど、再現性が低下しやすい。

もう1つは、透水性護岸は、消波護岸と同じく、砕石などの透水性構造物を含むことである。透水性構造物の諸元は、粒径、空隙率、DF則の経験定数などのパラメータが多く、最適化が難しい点である。消波護岸と同じく、外力に応じて、最適な抵抗力係数が変わる可能性もある。

#### 6.6 その他の再現性低下要因

再現性が低下する要因の1つとして、流況の3次元性が及ぼす影響も考えられる。実験では、狭い水路幅の中でも流況が3次元的であり、厳密には断面一様ではない。一方、計算は全て鉛直2次元条件で行っており、流況の3次元性が越波流量や越波流量比に及ぼす影響については考察できていない。流況の3次元性が及ぼす影響については、今後の検討課題である。

ただし、CSが用いられる設計実務の場面において、計算コストの高さから、3次元条件で計算することはまだ多くなく、今後もしばらくは2次元条件で計算されることであろう。本研究は、そのような実務場面と類似した条件で計算を行っている。本研究で検証した再現性の低下要因は、実務場面でも生じ得るものとして、参考となるだろう。

## 7. 結論

本研究では、直立護岸及び消波護岸、改良型護岸（上部フレア型、ダブルパラペット型、透水型）を対象に同一かつ広範な条件の水理模型実験により、改良型護岸の越波流量低減特性を評価するとともに換算天端高係数の算定を行った。また、数値波動水路を用いて改良型護岸の越波低減特性の再現性を検証し、各護岸形式毎に再現性の低下要因を考察した。本研究から得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 直立護岸について、相対水深  $h/H_0=2.0$  が大きい条件では、合田の推定誤差範囲内に入るが、相対水深が小さい条件程、合田の推定誤差範囲外となる傾向を示す。合田ら (1975) <sup>4)</sup> にならぬ水深と天端高を補正することで、実験値と推定値が同程度の値に近づくことを確認した。
- 2) 改良型護岸の越波流量低減効果について、改良型護岸と直立護岸の越波流量比で評価した。消波護岸、上部フレア護岸、ダブルパラペット護岸について、直立護岸の越波流量が大きい条件 ( $q^*_{\text{exp}(V)} > 10^{-2}$ ) では、越波流量比は同程度である。 $q^*_{\text{exp}(V)} < 10^{-2}$  の条件では、護岸形式毎に違いが見られ、消波護岸、上部フレア護岸、ダブルパラペット護岸の順で越波流量比が小さくなる。透水型護岸については、直立護岸の越波流量によらず越波流量比が小さくなり、本研究の護岸形式の中で最も越波流量比が小さくなる。
- 3) 本実験条件の範囲で換算天端高係数を算定した結果、透水型護岸の換算天端高係数は 0.3~0.5 であり、改良型護岸の中でも最も越波低減に有効な護岸形状となった。また、その他の護岸形式の換算天端高係数は、消波護岸 0.4~0.8、上部フレア護岸 0.3~0.8、ダブルパラペット護岸 0.4~0.9 となり、いずれの護岸形式も越波低減に有効な護岸形状であることが確認できた。なお、ダブルパラペット護岸及び透水型護岸のパラペット間の距離や透水型護岸の碎石の粒径が与える影響について、本研究では詳細に検討できていないことに留意頂きたい。
- 4) CS の再現性は、砕波減衰が強い条件を除き、直立護岸の越波流量を良好に再現した。一方で、改良型護岸の越波流量は、直立護岸に比べると再現性が低下した。
- 5) 消波護岸及び改良型護岸の越波量低減効果の再現性を無次元越波流量比で評価した。上部フレア護岸や透水型護岸に比べて、消波護岸とダブルパラペット護岸の無次元越波流量比の再現性が低かった。

- 6) 消波護岸の越波流量の再現性を向上させるためには、従来通り抵抗力係数を材料固有の一定の値とするのではなく、外力に応じて最適な値を検証することが求められる。本研究では、水深が小さく、周期が短い条件では、抵抗力係数  $\beta$  を従来よりも大きく設定の方が再現性が向上する可能性があることを示した。
- 7) 上部フレア護岸の越波流量の再現性は、他の構造形式と比較して良好であった。一般に、フレア部の空間解像度が高いほど、フレア部の形状や流体の吹き戻し運動を再現することができると考えられる。構造格子で計算する曲面の運動に対して、空間解像度が与える影響については今後の検討課題である。
- 8) ダブルパラペット護岸は、今回採用した流速の境界条件による排水方法は、排水流速が一定であるなど、現実の排水現象を精確に再現するものではない。しかしながら、簡易的かつ計算安定性の高い方法で考慮した排水によって、ダブルパラペット護岸の再現性が向上する可能性が示唆された。
- 9) 透水型護岸の再現性低下要因として、越波流量が絶対値として非常に小さく、誤差が含まれやすい点、消波護岸と同様に透水性構造物の諸元は、粒径、空隙率、DF 則の経験定数などのパラメータが多く、最適化が難しい点が挙げられる。

## 8. あとがき

改良型護岸の越波流量や天端高は水理模型実験により算定する機会が多いと考えられるが、本研究の換算天端高係数を目安とすることができる。また、CSを用いる場合は、本研究が提示する再現性低下要因が参考となる。

改良型護岸は、直立護岸に比べて越波流量に影響を与えるパラメータが多い。例えば、ダブルパラペット護岸の場合は、前面背後パラペット高さに加えて、パラペット間の距離や排水量などであり、透水型護岸の場合は、透水層内の碎石の粒径や透水層の幅などである。本研究では、それら改良型護岸特有のパラメータをすべてを網羅しているわけではないため、本研究資料を実務で使用する際は留意が必要である。

(2023年2月6日受付)

## 謝辞

本研究の実験にあたっては、(株) エコー及び (株) プライア・コンサルタントに実験補助を実施いただいた。ま

た、本研究のとりまとめにあたっては、(財)港湾空港総合技術センターの高橋重雄氏、下迫健一郎氏、津田宗男氏、原信彦氏、東亜建設工業(株)の武田将英氏のご助言を参考にさせていただいた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 片岡 保人, 市川 生, 榊原 健男, 竹鼻 直人, 埴 洋二, 入江 功: フレア型護岸の不規則波による水理特性の検討, 海洋開発論文集, 17 巻, 2001 年, p. 61-66.
- 2) 萩野 啓, 安藤 圭, 竹鼻 直人: 上部フレアによる既設護岸改良の提案, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.69, 2014 年, p. II-019
- 3) 長澤 大次郎, 岸良 安治, 高山 知司, 梅崎 康浩, 久米 英輝: 透水性二重護岸の越波特性の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 67 巻, 2 号, 2011 年, p. I\_691-I\_695.
- 4) 合田 良美, 岸良 安治, 神山 豊: 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, Vol.14, No.4, 1975 年
- 5) 下迫 健一郎, 大寄 菜々子, 高波浪海域における防波護岸に作用する波力および越波特性に関する実験的検討, 海洋開発論文集, 2006, 22 巻, p. 307-312.
- 6) 高山 知司, 永井 紀彦, 西田 一彦: 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, Vol.21, No.2, 1982 年.
- 7) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 2018 年, p.174.
- 8) 沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路(CADMAS-SURF)の研究・開発—数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書—, 沿岸開発技術ライブラリーNo. 12, 2001 年.
- 9) 沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF 実務計算事例集—数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書—, 沿岸技術ライブラリーNo. 30, 2008 年.
- 10) 沿岸技術研究センター: CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究開発, 沿岸技術ライブラリーNo. 39, 2010 年.
- 11) 合田 良美, 鈴木 康正, 岸良 安治, 菊池 治, 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技術研究所資料, No.248, 1976 年.
- 12) 首藤伸夫: 非線形長波の変形—水路幅, 水深の変化する場合—, 第 21 回海講論文集, pp. 57-64, 1974 年.
- 13) Hirt, C.W. and Nichols, B.D.: Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, 1981, pp. 201-225.
- 14) 近藤 俊郎, 竹田 英章: 消波構造物, 森北出版, 1983 年
- 15) Eric Cruz, 横木 裕宗, 磯部 雅彦, 渡辺 晃: 非線形波動方程式に対する無反射境界条件について, 海岸工学論文集, 第 40 巻, 1993 年, pp. 46-50.
- 16) 磯部雅彦: 有限振幅波の諸理論と適用範囲, 水工学シリーズ 85-B1, 1985 年, pp. 1-25.
- 17) 岩田好一郎, 川崎浩司, 金度三: 水中構造物による碎波の数値解析, 海岸工学論文集, 第 42 巻, 1995 年, pp. 781-785.
- 18) 有川太郎, 山野貴司, 秋山 実: 数値波動水槽における碎波変形計算の高度化, 海岸工学論文集, 第 54 巻
- 19) 合田良美 (1975): 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 59-106
- 20) 菊崎郁人, 荒木進歩, 久保田真一, 三井順: 消波ブロック傾斜堤の性能評価における Dupuit-Forchheimer 則の適用, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 77 巻, 2 号, 2021 年, p. I\_739-I\_744
- 21) Van Gent, M. R. A., Töjnjnes, P., Petit, H. A. H., & Van den Bosch, P.: Wave action on and in permeable structures., *Coastal Engineering 1994*, 1995. pp. 1739-1753

## 記号表

$C_M$	: 慣性力係数
$d$	: ポーラス体の代表径 (m)
$dx$	: 水平解像度 (m)
$dz$	: 鉛直解像度 (m)
$g$	: 重力加速度 ( $m/s^2$ )
$H_0'$	: 換算沖波波高 (m)
$H_{0,i}'$	: 目標換算沖波波高 (m)
$H_{0,i}'/L_0$	: 目標波形勾配
$H_{1/3}$	: 波の有義波波高 (m)
$h$	: 堤脚水深 (m)
$h/H_{0,i}'$	: 目標相対水深
$h_c$	: 静水面から測った天端高 (m)
$h_c/H_{0,i}'$	: 目標相対天端高
$i$	: 水路勾配
$KC$	: KC数
$K_R$	: 反射率
$K_S$	: 浅水係数
$L$	: 波の波長 (m)
$L_0$	: 沖波波長 (m)
$Q$	: 越波量 ( $m^3$ )
$q$	: 平均越波流量 ( $m^3/m/s$ )
$q^*$	: 無次元越波流量
$q^{*cal(B)}$	: 消波護岸の無次元越波流量の計算値
$q^{*cal(D)}$	: ダブルパラペット護岸の無次元越波流量の計算値
$q^{*cal(F)}$	: 上部フレア護岸の無次元越波流量の計算値
$q^{*cal(P)}$	: 透水型護岸の無次元越波流量の計算値
$q^{*cal(V)}$	: 直立護岸の無次元越波流量の計算値

- $q^*_{\text{est(B)}}$  : 消波護岸の無次元越波流量の合田推定値  
 $q^*_{\text{est(V)}}$  : 直立護岸の無次元越波流量の合田推定値  
 $q^*_{\text{exp(B)}}$  : 消波護岸の無次元越波流量の実験値  
 $q^*_{\text{exp(D)}}$  : ダブルパラペット護岸の無次元越波流量の実験値  
 $q^*_{\text{exp(F)}}$  : 上部フレア護岸の無次元越波流量の実験値  
 $q^*_{\text{exp(P)}}$  : 透水型護岸の無次元越波流量の実験値  
 $q^*_{\text{exp(V)}}$  : 直立護岸の無次元越波流量の実験値  
 $R_{\text{cal(B)}}$  : 消波護岸の無次元越波流量比の計算値  
 $R_{\text{cal(D)}}$  : ダブルパラペット護岸の無次元越波流量比の計算値  
 $R_{\text{cal(F)}}$  : 上部フレア護岸の無次元越波流量比の計算値  
 $R_{\text{cal(P)}}$  : 透水型護岸の無次元越波流量比の計算値  
 $R_{\text{exp(B)}}$  : 消波護岸の無次元越波流量比の実験値  
 $R_{\text{exp(D)}}$  : ダブルパラペット護岸の無次元越波流量比の実験値  
 $R_{\text{exp(F)}}$  : 上部フレア護岸の無次元越波流量比の実験値  
 $R_{\text{exp(P)}}$  : 透水型護岸の無次元越波流量比の実験値  
 $t$  : 時間 (s)  
 $T_{1/3}$  : 波の有義波周期 (s)  
 $\alpha_0$  : 材料による係数  
 $\beta$  : 換算天端高係数  
 $\beta_0$  : 材料による係数  
 $\gamma_v$  : 空隙率