

図-2 実験模型断面

## 2. 検討方法

### (1) 水理模型実験

水理模型実験には水産技術研究所に備わる幅1.0m, 長さ100m, 深さ2.0mの不規則波造波装置のある断面二次元水路を用いた。潜堤付き防波堤の模型は1/30の一樣勾配上に設置した。潜堤の中詰材は樹脂材で固定した砂利(6号砕石, 空隙率40%(実測値))で, 捨石表面には60×60×22mmの突起や孔のない直方体のコンクリート製被覆ブロックをクリアランス5%で設置した。なお, 本研究では被覆ブロックの安定性には着目しないためブロックは4mm格子の樹脂製網に接着したうえで捨石上に設置した。防波堤は基礎捨石マウンド部分も含めて全て不透過なベニヤ板で製作した。これら模型の設置状況の例としてcase-1, 2の実験模型断面図を図-2に示す。

水位変動の測定には容量式波高計(ケネック社)を用いてAD変換によりデータを収集し, 波高や平均水位, 反射率・伝達率を算定した。越波流量は防波堤本體工背後に集水枴を設けて枴内部に貯留した水量から算定した。本論文において使用する各記号の定義を図-1に示す。

### (2) 実験(計算)条件

実験条件を表-1に示す。本研究では不規則波(修正B-Mスペクトル)として周期 $T$ を4種類, 周期ごとに換算沖波波高 $H'$ を4種類程度を作用させた。構造としては潜堤の天端上水深 $hc$ を2種類( $hc/h=0, 0.5$ ,  $h$ :マウンド厚を含む防波堤前面水深)と潜堤天端幅 $Bs$ を2種類を組み合わせた。岸側の潜堤法先位置を固定したため, 潜堤天端幅を変更すると潜堤沖側法肩と直立堤前面の距離で定義する“離岸距離 $l'$ ”が付随して変化する。静水面から直立堤天端までの天端高 $R$ はすべて5cmに固定した。延べ実験ケース数は周期4種類×波高4ランク程度×構造条件4種類の合計48ケースと程度なる。なお, 特に断りのない限り波高と周期は有義波成分( $H_{1/3}, T_{1/3}$ )を表す。

### (3) 数値計算

水理模型実験とほぼ同じ条件となるように設定して

表-1 実験条件

$hc/h$	$l'$ (cm)	$T$ (s) / $H'_0$ (cm)			
		1.2s	1.33	2.00	2.67
		4.88cm~ 9.05cm	4.17~ 12.73	4.17~ 16.67	2.78~ 16.67
0.0 (case-1)	76.4 ( $Bs=25cm$ )	$l'/L=0.55$	$l'/L=0.49$	$l'/L=0.31$	$l'/L=0.23$
0.5 (case-2)	76.4 ( $Bs=25cm$ )	$l'/L=0.42$	$l'/L=0.37$	$l'/L=0.23$	$l'/L=0.17$
0.0 (case-1')	101.6 ( $Bs=50cm$ )	$l'/L=0.73$	$l'/L=0.65$	$l'/L=0.42$	$l'/L=0.31$
0.5 (case-2')	101.6 ( $Bs=50cm$ )	$l'/L=0.56$	$l'/L=0.49$	$l'/L=0.30$	$l'/L=0.22$

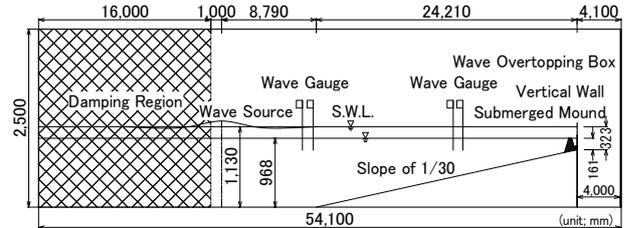


図-3 計算領域

表-2 計算条件

計算法	VOF法(CADMAS-SURF Ver.5.1)
水路	長さ(x-)54.1m, 高さ(z-)2.5m
格子	x方向(3,285格子): $\Delta x=4.0cm(x=0.0\sim 15.0m)$ , $\Delta x=2.0cm(x=15.0\sim 35.0m)$ , $\Delta x=1.0cm(x=35.0\sim 54.1m)$ z方向(250格子): $\Delta z=1.0cm$
構造物	潜堤(case-1, 2, 無堤), 直立壁(前壁 $x=50.0m$ , 1格子) 不透過マウンド, 1/30勾配斜面, 集水枴
作用波	不規則波(修正Bretschneider・光易型スペクトル) 造波位置: $x=17.0m$ (造波ソース) 造波水深: $h_0=0.968m(hc/h=0)$ , $1.130m(hc/h=0.5)$ 造波目標: 有義波高 $H_{1/3}=5.6, 11.1, 16.7cm$ 有義周期 $T_{1/3}=1.67, 2.67s$ 等エネルギー分割1,000成分波より構成(波群2種)
移流項	風上差分と中心差分の組合せ: 0.2
時間制御	自動, 時間刻み幅の安全率: 0.5
境界条件	エネルギー減衰帯: 16.0m(左端) Sommerfeldの放射条件(左端) VOF関数 $F$ : フリー, 流速・圧力: スリップ 総水量の自動補正: $3T_{1/3}$ ごと
物性値	潜堤: 慣性力係数 $C_M=1.2$ , 抵抗係数 $C_D=1.0$ , 空隙率 5, 40, 50% 気泡上昇速度: 0.2m/s, 水滴落下速度: 自由落下 重力加速度: 9.8m/s <sup>2</sup> , 水の密度: $1.0 \times 10^3 kg/m^3$ 分子動粘性係数: $1.0 \times 10^{-6} m^2/s$ , 渦動粘性: 非考慮
解析時間	造波開始後: 50.0~500.0s, 時間間隔: 50Hz
個別波	zero-up-cross法, 水位は直線変化で補正
反射率	水平床上 $x=24.5, 25.5m$ , 1/30勾配斜面上 $x=38.5, 39.4m$ の各水位変動に入射波分離推定法を適用

CADMAS-SURF(Ver. 5.1)<sup>34)</sup>による数値計算を行った。計算領域および計算条件を図-3, 表-2に示す。越波流量は直立壁背後の集水枴の貯水量から算定した。潜堤形状はcase-1, 2を対象とし, 潜堤がなく直立壁のみについても

計算対象とした。ここでは実験模型と消波ブロックを参考に潜堤の空隙率を5, 40, 50%に設定して波浪制御に及ぼす影響を検討した。

### 3. 水理模型実験の結果と考察

#### (1) 平均水位

##### a) 平均水位の空間分布

図4(a), (b)に $hc/h=0, 0.5$ の場合の防波堤前面から潜堤沖側法先までの範囲の平均水位の実験結果を示す。図の縦軸は各計測地点 $x$ での平均水位 $\eta_x$ を防波堤前面における平均水位上昇量 $\eta_4$ で除した無次元量とした。横軸は防波堤前面からの距離 $x$ を防波堤前面から潜堤沖側法先までの距離 $l''$ で除している。ここで $\eta_3, \eta_4$ は各波条件の結果の平均値を用いた。

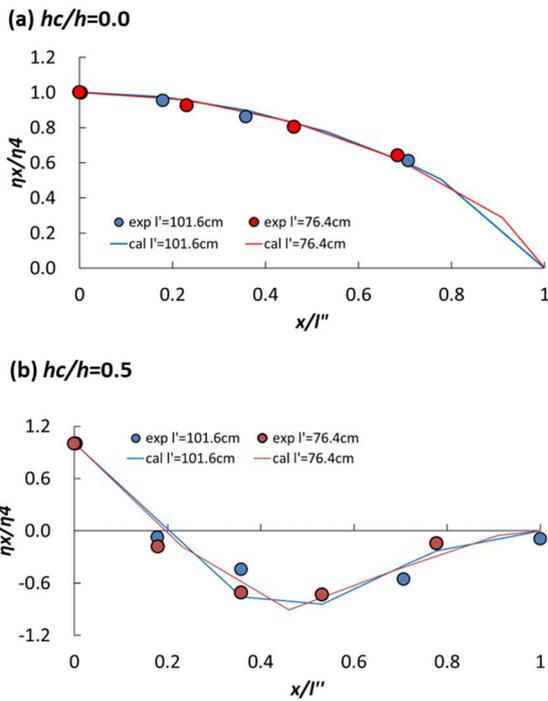


図4 平均水位の実験値

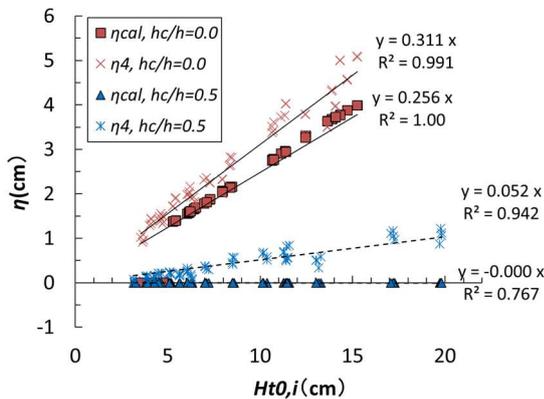


図5 潜堤通過後の水位上昇量の推定値と実験値

防波堤前面において碎波に起因するウェーブセットアップ量が大きいことがわかる。 $hc/h=0$ の場合の水位上昇量は防波堤前面が最も高く、沖側に向けて様に減少する傾向となった。一方、 $hc/h=0.5$ の場合は防波堤前面付近を除いて有意な水位上昇はなく、マイナスの水位も見られる。ウェーブセットダウン量は $l''/2$ 付近で最も大きいことが判明した。

##### b) 水位上昇量の推定手法

図4には実験結果に基づく近似線を併せて示しており、それらの近似式は(a) $hc/h=0.0$ の場合が式(1), (b) $hc/h=0.5$ の場合が式(2)となる。式(1)(2)より、防波堤前面での水位上昇量 $\eta_4$ が与えられれば式から任意地点の平均水位を推定することができる。防波堤前面の水位上昇量については中村<sup>5)</sup>による離岸潜堤前後の波のラディエーションストレスの変化から水位上昇量を算定する手法が適用できる。

$$\frac{\eta_x}{\eta_4} = \cos\left(2\pi n \cdot \frac{x}{l''}\right)^{0.638} \quad \text{for } n = 1/4 \quad (1)$$

$$\frac{\eta_x}{\eta_4} = \left(1 - \frac{x}{l''}\right) \left(\cos\left(2\pi n \cdot \frac{x}{l''}\right) - 1.54 \frac{x}{l''}\right) \quad \text{for } n = 1.0 \quad (2)$$

図5は中村の方法で推定した潜堤通過後の水位上昇量 $\eta_{cal}$ と本実験で測定した防波堤前面の水位上昇量 $\eta_4$ を示したものである。ここでは $\eta_{cal}$ の算定にあたって必要となる背後に直立堤がない場合の潜堤通過後の波高は中山<sup>6)</sup>による実験式を用いた。また、潜堤沖側法先における入射波高 $H_{t0,i}$ は換算沖波波高 $H_0'$ から合田<sup>7)</sup>の波高変化図により算定した。

水位上昇量 $\eta_4$ と入射波高 $H_{t0,i}$ は線形関係が見られ、静水面と潜堤天端が一致する時には実験値で入射波高の約3割に相当する大きな水位上昇量が生じることがわかる。 $\eta_{cal}$ と $\eta_4$ を比較すると潜堤付き防波堤のほうが反射波がある分だけ水位上昇量は増加している。両者は切片が近い一次関数で近似されるため、式(3)(4)に示すように $hc/h$ を変数として $\alpha$ を加算することで $\eta_{cal}$ から $\eta_4$ を推定できる。

ただし、式(4)は実験値に基づく補正のため本実験条件の範囲外での適用には留意する必要がある。

$$\eta_4/H_{t0,i} = \eta_{cal}/H_{t0,i} + \alpha \quad (3)$$

$$\alpha = -6.0 \times 10^{-3} \times hc/h + 6.0 \times 10^{-2} \quad (4)$$

#### (2) 伝達率

図6(a), (b)は $l''=76.4\text{cm}$ の $hc/h=0, 0.5$ の伝達率 $C_t$ を防波堤天端高 $R$ と無堤時の防波堤前面位置での進行波としての波高 $Ht$ の比で示したものである。潜堤天端幅 $B_0$ を拡張して $l''$ を増大した場合については伝達率に対する影響は軽微であったためここでは省略する。伝達波は防波堤の天端を越える水塊の打ち込みによって2次波が生じて波形

が大きく乱れる。このため、伝達率 $C_t$ は伝達波計測位置の水位変動の2乗平均平方根値を無堤時の防波堤前面位置での進行波 $H_i$ に対応する2乗平均平方根値で除して定義した。図中では、合田ら<sup>9)</sup>による“直立堤の伝達率”や近藤ら<sup>9)</sup>による“消波ブロック被覆堤の伝達率”を併せて示している。

潜堤付き防波堤の実験値はこれら類似構造の伝達率の特徴と同様に $R/H_i$ の増大に伴って $C_t$ は減少傾向となる。実験値は直立堤の伝達率の上限と下限のあいだに入っ

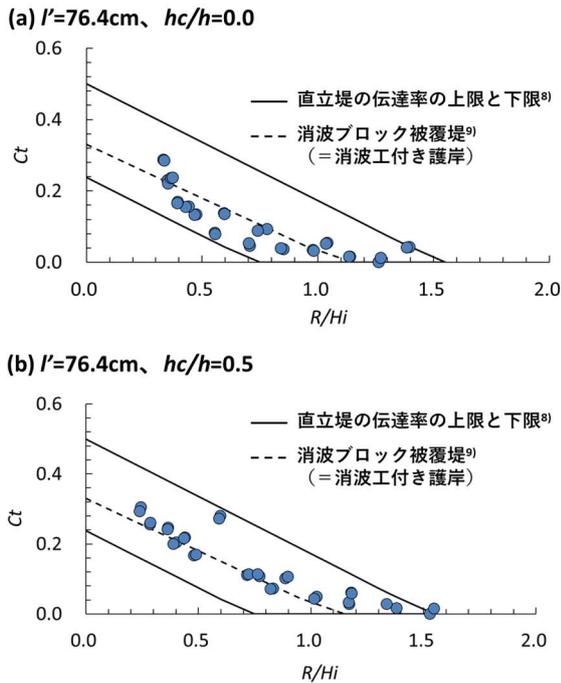


図-6 伝達率 $C_t$

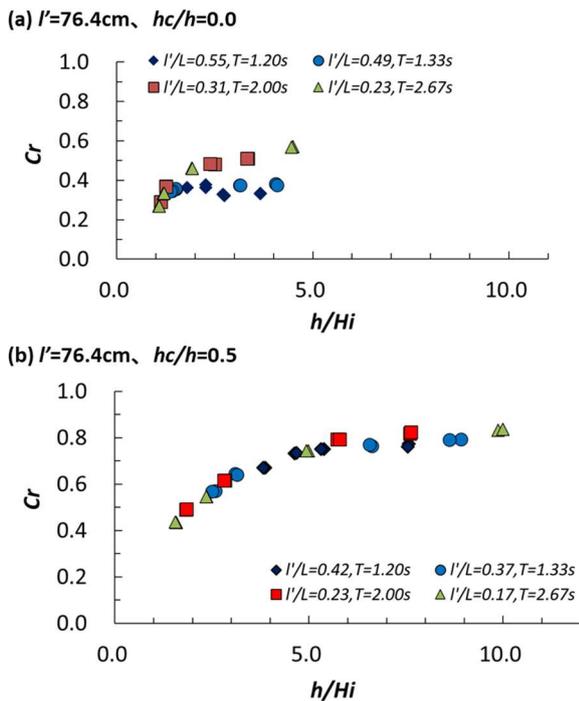


図-7 反射率 $C_r$

ている。また、消波ブロック被覆堤の伝達率と概ね似た値となることを見てとれる。漁港の防波堤で一般的に設定される天端高 $R/H_i=1.0$ の時、潜堤付き防波堤の伝達率は1割未満となることがわかった。

(3) 反射率

図-7(a), (b)には $l'=76.4\text{cm}$ の $hc/h=0, 0.5$ の反射率 $C_r$ の実験値を示す。 $l'$ の違いによる影響は軽微であったためここでは省略する。反射率は沖の波高測定位置での水位変動から合田ら<sup>10)</sup>の入射分離推定法により推定した。反射率は相対水深 $h/H_i$ で整理した。

反射率 $C_r$ は $h/H_i$ が増すにつれて増大する傾向が見られる。これは入射波高 $H_i$ が増大するにつれて反射率が低下することを意味しており、潜堤付き防波堤が消波施設として有効な対策工法であることが明らかとなった。潜堤天端上水深が小さい $hc/h=0$ の場合には波周期の影響が見られ、短周期条件で反射率が低下する傾向が認められる。また、反射率は概ね5割以下の消波性能であることがわかる。

(4) 越波流量

a) 無次元越波流量

図-8(a), (b)は $l'=76.4\text{cm}$ の $hc/h=0, 0.5$ の越波流量の実験値を示す。 $l'$ の違いによる影響はほとんど見られなかった

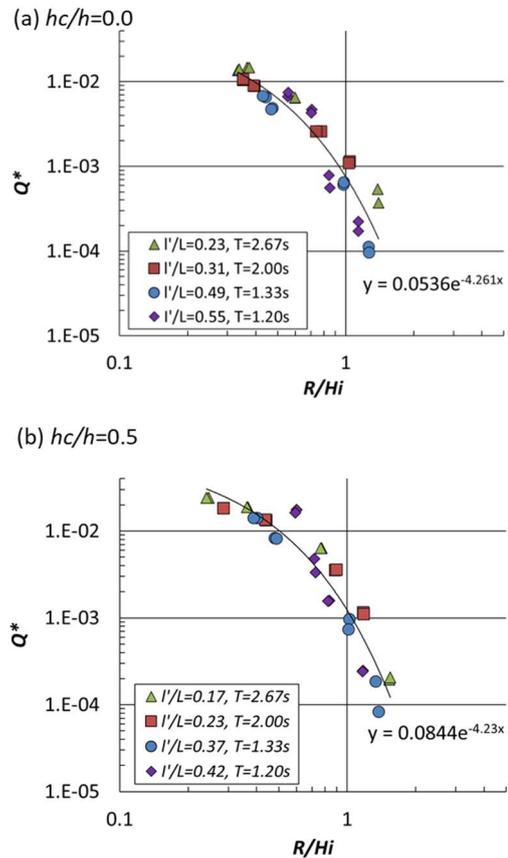


図-8 越波流量の実験値

ため省略する. 図の縦軸は越波枠で測定した越波流量から換算した無次元越波流量 $Q^* = q/\sqrt{2gH_0'^3}$ とし, 横軸は相対天端高 $R/H_i$ とした ( $q$ : 平均越波流量,  $g$ : 重力加速度). 図より越波流量は相対天端高が小さくなるにつれて増大する. 図中では実験値に対応した近似線を記載しているが, 離岸距離と波長の比 $l'/L$ による無次元越波流量には大きな違いは見られない. 漁港の防波堤で一般的に設定される天端高 $R/H_i=1.0$ の時, 潜堤付き防波堤の無次元越波流量は $1.0 \times 10^{-3}$ 程度となることがわかった.

b) 類似構造との比較

図-9(a), (b)は $hc/h=0$ の時の無次元越波流量の実験値 $Q^*_{exp}$ と合田ら<sup>11)</sup>による消波工付き護岸および直立護岸の無次元越波流量 $Q^*_{cal}$ の比較を示している. 図より実験結果にばらつきはあるものの, 類似構造形式と概ね同程度の越波流量となることがわかる. 潜堤付き防波堤は遊水部および潜堤で比較的大きな水位上昇量が生じるものの, 越波流量の増大といったデメリットがないことも確認できた.

ただし, 潜堤付き防波堤の越波流量は, 波高が小さく越波流量が少ない範囲では直立護岸よりも少なく消波工付き護岸と同程度であることがわかる. 一方で波高が大きく越波流量が多い範囲では直立護岸と同程度であり消波工付き護岸よりも増加する傾向が見られる.

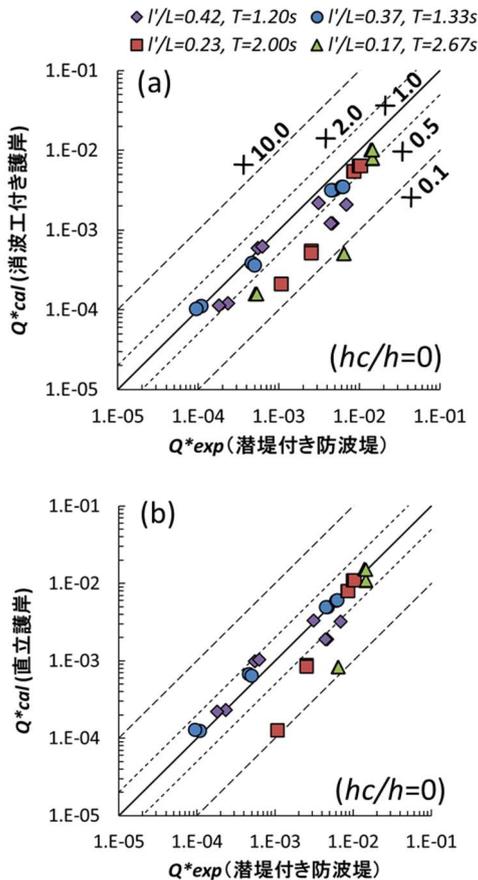


図-9 越波流量 類似構造形式との比較

4. 数値計算による再現性

図-10には $l'/L=0.23$  ( $T=2.67s$ ),  $hc/h=0$ の遊水部中央の平均水位上昇量 $\eta_3$ の実験値と計算値を示す. 平均水位上昇量の再現性のほか, 潜堤の空隙率 $\phi$ の設定の違いによる計算結果の違いにも着目した. 水理模型実験においては2(1)で上述したとおり, 潜堤の中詰材には空隙率40%の砕石を, 潜堤表面にはクリアランス5%で敷設したコンクリート製の被覆ブロックを用いている. 図-10の結果をみると空隙率 $\phi$ を5%と設定した数値計算結果が最も実験結果と近くなった. これは本実験条件で用いた潜堤では水位上昇量を含む波変形に及ぼす潜堤中詰材の空隙率の影響は小さく, 表面の被覆材のクリアランスの影響が支配的であることを示唆する. なお, 数値計算では

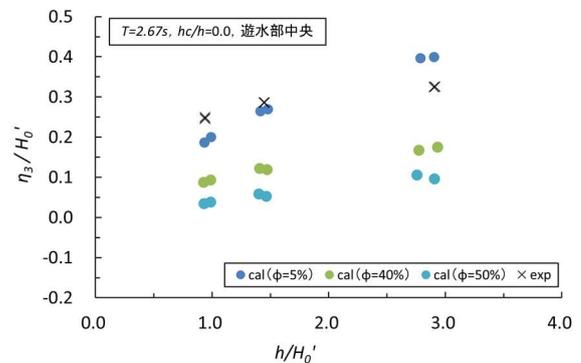


図-10 数値計算結果と実験値の比較 (平均水位上昇量)

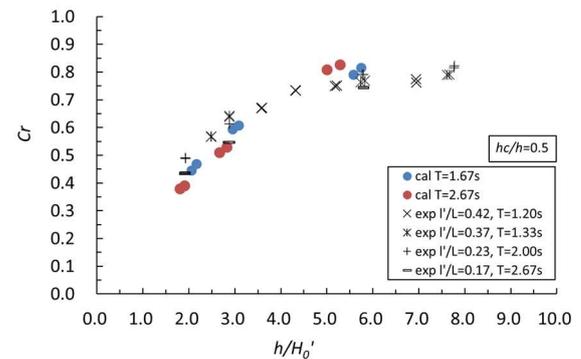


図-11 数値計算結果と実験値の比較 (反射率)

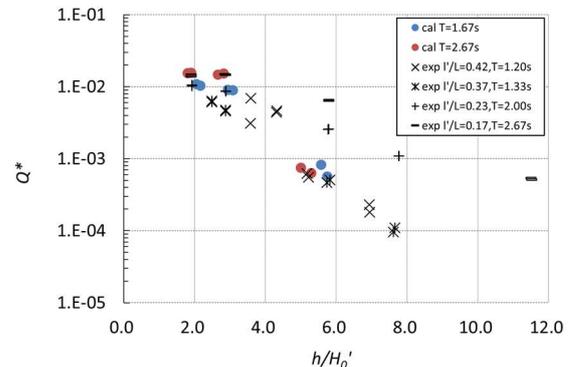


図-12 数値計算結果と実験値の比較 (越波流量)

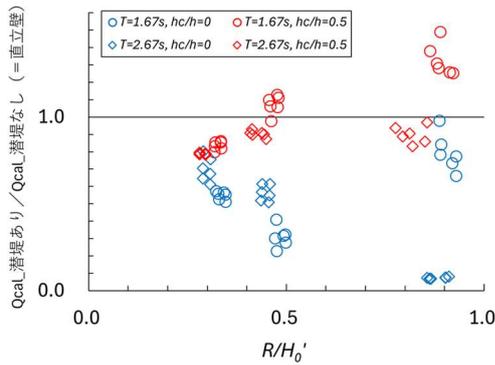


図-13 潜堤有無による越波流量の比率の数値計算結果

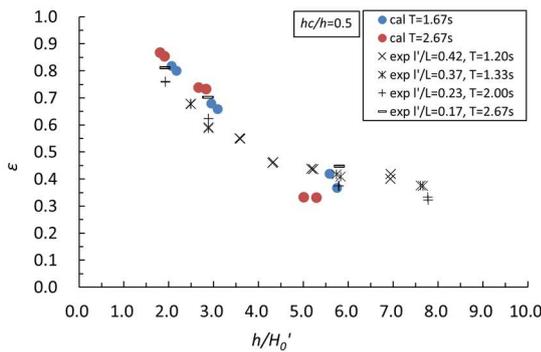


図-14 エネルギー逸散率ε

$T=1.67s$ も併せて行っているが同様の結果であった。また、 $hc/h=0$ の条件を $hc/h=0.5$ とした場合も同様の結果である。

図-11, 12は反射率 $C_r$ と無次元越波流量 $Q^*$ の実験値と計算値を示したものである。実験値は $hc/h=0.5$ ,  $l/L=0.17\sim 0.42$  ( $T=2.67\sim 1.20s$ )を、計算値は潜堤の空隙率 $\phi=5\%$ ,  $T=1.67s$ ,  $2.67s$ の結果を示している。図より反射率については幅広い $h/H_0'$ の範囲で数値計算は実験結果をよく再現していることがわかる。越波流量については $T=1.67s$ の計算値は $T=1.33s$ の実験値と幅広い $h/H_0'$ の範囲で一致度は高いが、 $h/H_0'$ が大きく無次元越波流量が小さい範囲では乖離が見られる。越波流量が少ない範囲ではほとんど越波がない(0~数十リットル程度)状態であるため測定・計算でバラツキが生じやすく、この影響をうけて両者に乖離があるものと考えられる。また、計算格子間隔や差分スキーム等の計算設定の影響もあると考えられる。一方、越波量大きい範囲では両者の結果はよく一致していることから、数値計算は越波流量をよく再現しているといえる。

図-10~12より、CADMAS-SURFによる数値計算結果は実験結果をよく再現することがわかった。構造条件・波条件の違いに対する系統的なパラメータスタディや任意地点の流速値を参照するなどによる消波メカニズムの解明に活用できることが示唆された。

数値計算を活用した構造条件の変化に対するパラメータスタディの例として、潜堤の有無に対する直立壁の越

波流量比を図-13に示す。潜堤がない場合の越波流量は図-9で示したとおり合田らの既往の知見があるが、同知見では“推定越波流量には越波流量の範囲に応じて最大で0.1~10倍程度の差が含まれる”と注釈されている。そこで潜堤の有無に対する計算結果から潜堤の効果がより明確に理解できると考えた。図-13の結果からは防波堤前面に潜堤を設置した場合に有意に越波流量が低減するが、一部条件( $T=1.67s$ ,  $hc/h=0.5$ ,  $R/H_0'\approx 0.9$ 付近)では潜堤がない場合よりも越波流量が増大する傾向となる。この一部条件では潜堤上での浅水変形の影響が大きく、波の非線形性が顕著になることによっても推察される。ただし、この範囲は越波流量そのものが非常に少ないことに留意を要する。

図-14には図-11で示した反射率に基づくエネルギー逸散率( $\epsilon = 1 - C_r^2$ )を示す。図より潜堤付き防波堤は相対水深 $h/H_0'$ が小さくなるにつれて大きなエネルギー逸散性能を有することがわかる。従来の消波構造物である異形消波ブロックなどと同等の性能を有することが確認できた。

## 5. まとめ

以下に本研究の主要な結論を示す。

- 潜堤付き防波堤の波浪制御機能を検証するために水理模型実験を実施した。その結果、潜堤付き防波堤は従来の消波構造物である異形消波ブロックなどと同等の消波性能を有することが確認できた。
- 潜堤付き防波堤の波浪制御機能のうち、水位上昇量・伝達率・反射率・越波流量について、任意の構造・波条件から性能値を推定するための手法を提示した。
- CADMAS-SURFにより水理模型実験の再現計算を行い、その有用性を確認した。このとき、中詰め材(砂利)と被覆ブロックで構成される潜堤については数値計算上では被覆ブロックのクリアランスと同等の $\phi=5\%$ の空隙率で設定すると実験結果と一致する。

謝辞：本研究は水産基盤整備調査委託事業と水産研究・教育機構運営交付金研究の成果を取りまとめたものである。研究の実施や本稿執筆において、事業実施メンバー、水産庁担当者、検討委員会委員の皆様から有益な意見を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

## REFERENCES

- 1) 山本正昭, 中泉昌光, 間辺本文: 潜堤付防波堤による海水交流工法の開発, 第34回海岸工学講演会論文

- 集, pp.675-679, 1987. [Yamamoto, M., Nakaizumi, M. and Manabe, M.: Development of the breakwater with remote submerged rubble mound for the purpose of interchanging sea water, *Proceedings of the 34th Japanese Conference on Coastal Engineering, JSCE*, pp.675-679, 1987.]
- 2) 藻場造成型漁港構造物調査・設計ガイドライン, 全国漁港漁場協会, 2003. [Mobazouseigata-Gyokoukouzoubutu Tyousa-sekkei Guideline, National Association of Fisheries Infrastructure, 2003]
  - 3) 沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路の研究・開発 (CADMAS-SURF), 沿岸開発技術ライブラリー, No.12, 2001. [Coastal Development Institute of Technology: Research and Development of CADMAS-SURF (SUPER Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure), Technical Library of Coastal Development, No.12, 2001.]
  - 4) 沿岸開発技術研究センター: CADMAS-SURF 実務計算事例集, 沿岸開発技術ライブラリー, No.30, 2008. [Coastal Development Institute of Technology: Calculation Example of CADMAS-SURF for Practical Work, Technical Library of Coastal Development, No.20, 2008.]
  - 5) 中村充: 改訂水産土木学, pp.308-313, 工業時事通信社, 1991. [Nakamura, M.: *Kaitei Suisan Dobokugaku*, pp.308-313, kougyoujijituusinsha, 1991.]
  - 6) 中山哲厳: 人工リーフの水理特性及び被覆材の安定に関する実験的研究 (その2), 水産工学研究所技報, 水産土木, 第16号, pp.35-45, 1994. [Nakayama, A.: An experimental study on hydraulic characteristics and stability of artificial barrier reef(2), *Technical Report of National Research Institute of Fisheries Engineering Aquaculture and Fishing Port Engineering*, No.16, pp.35-45, 1994.]
  - 7) 合田良実: 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp.59-106, 1975. [Goda, Y.: Deformation of irregular waves due to depth-controlled wave breaking, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.14, No.3, pp.59-106, 1975.]
  - 8) Goda, Y.: Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, *Report of the Port and Harbor Research Institute*, vol.8, No.3, 13p, 1969.
  - 9) 近藤二郎, 佐藤功: 防波堤天端高に関する研究, 北海道開発局土木試験所月報, 117号, pp.1-15, 1963. [Kondo, H., Sato, I.: Study on crown height of breakwater, *Monthly report of the Civil Engineering Research Institute*, No.117, pp.1-14, 1963.]
  - 10) 合田良実, 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, 港湾技研資料, No.248, 24p, 1976. [Goda, Y., Suzuki, Y., Kishira, Y. and Kikuchi, O.: Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No.248, 24p, 1976]
  - 11) 合田良実, 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, 第14巻, 第4号, pp.3-41, 1975. [Goda, Y., Kishira, Y. and Kamiyama, Y.: Laboratory investigation on the overtopping rate of seawalls by irregular waves, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.14, No.4, pp.3-41, 1975.]

(Received March 14, 2024)

(Accepted July 18, 2024)

## STUDY ON HYDRAULIC PHENOMENON OF BREAKWATER WITH SUBMERGED MOUND

Kuniai OI, Yoshihiro OHMURA and Manabu KOBAYASHI

Breakwater with submerged mound was developed to secure a place for seaweed to grow, but it would be effective as a method of improving existing facilities in response to climate change. In this study, we aimed to clarify the effect of this structure on reducing wave energy (Reflectance, Transmittance, Overtopping flow rate, Water level rise). Verification was performed using hydraulic model experiments and numerical simulations. As a result, we summarized the knowledge to estimate the effect of wave control from structural and wave conditions.