

小港湾における防波堤の改良方策に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 25

担当チーム：寒冷沿岸域チーム

研究担当者：山本泰司、本山賢司、上久保勝美

【要旨】

防波堤は港湾および漁港の主要施設であるが、今後、設計供用期間を超える施設が増加するため、これらの施設を適切に維持管理、更新していく必要がある。本研究では、主に小型の船舶や漁船が利用する地方港湾及び漁港などの小港湾における防波堤に多く採用されている消波ブロック被覆堤を対象にして、既設堤体の拡幅改良ができないときに、波力低減により堤体の安定性を確保する改良方策を水理模型実験により検討した。その結果、改良方策のひとつとして、消波工前面小段構造および消波工拡幅構造が有効であることが明らかとなった。

キーワード：消波ブロック被覆堤、波力、前面小段、後部パラペット、水理模型実験

1. はじめに

港湾および漁港の防波堤は、港内への波の侵入を防ぎ、岸壁前面や泊地の静穏を確保する重要な施設である。我が国は、設計供用期間を超える施設の割合が増加するため、既存ストックの維持管理更新が大きな社会問題となっており、港湾・漁港における防波堤も同様である。設計供用期間を経過した防波堤では、コンクリートの劣化、上部工の欠損、消波ブロックの沈下などが見受けられる。このような老朽化による堤体重量の減少に、水位上昇や設計波浪の増大等による波力増大が生じると、防波堤の安定性が低下することが懸念される。現在、設計外力が大きくなったときに既設防波堤を改良する場合は、上部工の重量増加や堤体の拡幅で安定性を確保しているが、堤体が著しく老朽化すると既設堤体と拡幅部をアンカーで一体化できないために、既設堤体を撤去して新たな防波堤を建設する事例もある。このように防波堤を全面的に更新する改良方法では、費用が膨大なだけでなく、工事期間が長期にわたるため、港の利用に対する影響も無視できない。

そこで、本研究では、主に小型の船舶や漁船が利用する地方港湾及び漁港などの小港湾における防波堤に多く採用されている、消波ブロック被覆堤を対象にして、既設堤体の拡幅改良ができないときに、波力低減により堤体の安定性を確保する改良方策について、主として水理模型実験により検討するものである。改良方策としては、後部パラペット構造、消波工前面小段構造、消波工拡幅構造を検討対象とする。

2. 後部パラペット構造の検討

2. 1 実験方法

後部パラペット構造は、防波堤パラペットを後退させて設置することにより、前壁とパラペットに作用する波力の位相差により堤体の耐波安定性を向上させる方法である。既にいくつかの港湾において採用されているが（例えば文献1）、ここでは、比較的水深の浅い消波ブロック被覆堤への適用性を検討する。

2. 1. 1 波圧測定実験

実験は、図-1 に示す不規則波発生装置を備えた 2 次元造波水路（長さ 22.0m、幅 0.8m、深さ 2.0m）で行い、実験縮尺は 1/30 とした。水路内に海底勾配 $i=1/30$ の斜面を設け、造波機から 12.9m の斜面上に、図-2、図-3 に示す模型を設置し、不規則波を作用させて、サンプリング周波数 1000Hz で波圧を計測した。

実験条件を表-1 に示す。波圧計測 1 回あたりの作用波数は 150 波とした。パラペットの設置位置は図に示すように段階的に後退させた。

また、波圧計測と同時に水路の沖側に設置した 2 本の波高計により水位変動を計測した。

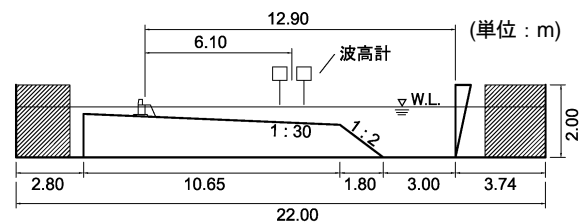


図-1 実験水路

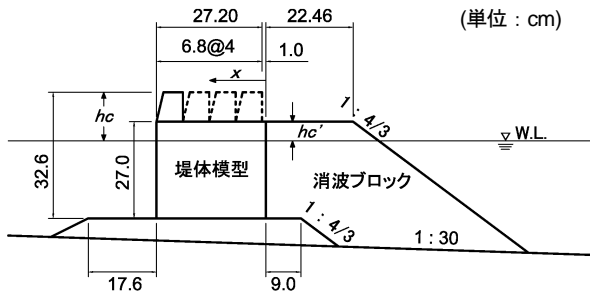


図-2 波圧測定実験の堤体模型

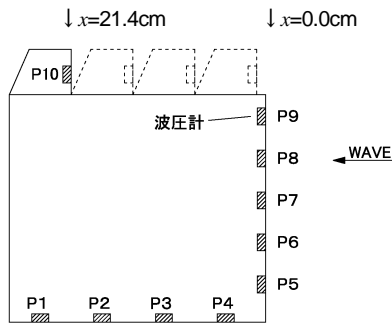


図-3 波圧計設置箇所

表-1 実験条件

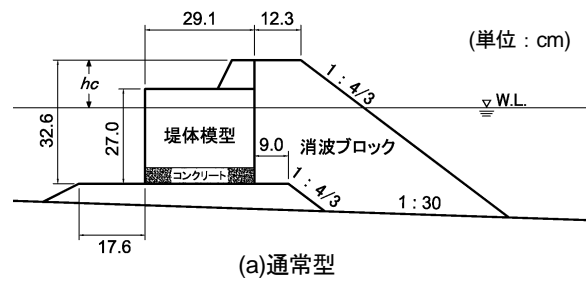
波浪周期 $T_{1/3}$ (sec)	1.83	2.19	2.56
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	13.3		
堤体水深 h (cm)	26.7		
パラベット天端高 hc (cm)	12.6		
消波工天端高 hc' (cm)	7.2		
パラベット後退距離 x (cm)	1.0	7.8	14.6

2. 1. 2 滑動実験

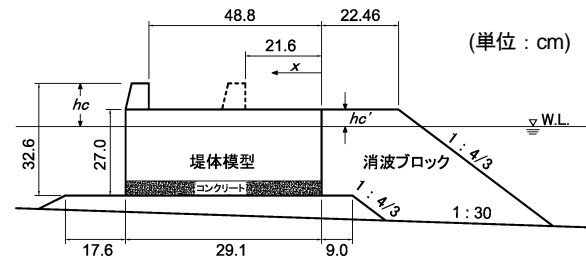
滑動実験に使用した堤体模型は、通常型(図-4(a))、後部パラベット型(図-4(b))の2種類であり、本体の底面には厚さ30mmのコンクリート版を取り付けてある。実験前に測定した底面のコンクリート版と基礎マウンドの摩擦係数 μ は、通常型、後部パラベット型いずれも $\mu=0.56$ であった。

実験波は、有義波高 $H_{1/3}=13.3$ cm、周期 $T_{1/3}=2.19$ sの不規則波1種類であり、実験1回あたり150波作用させ、堤体模型の背後に設置した変位計により堤体滑動量を計測し、造波中の最大変位を滑動量として整理した。

堤体水中重量を33.0kgfに調整して実験を開始し、模型重量の調整、造波・変位計測を1サイクルとし、1サイクルごとに堤体重量を約1.5kg減らして、滑動量の累積値が10cm程度になるまで実験を繰り返した。



(a)通常型



(b)後部パラベット型

図-4 滑動実験の堤体模型

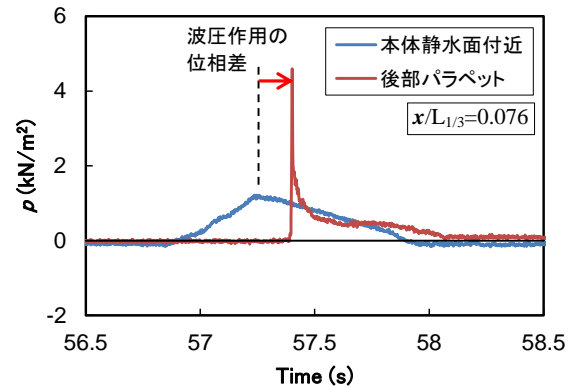


図-5 波圧作用の位相差

2. 2 後部パラベット構造の波力特性

2. 2. 1 波圧測定実験の結果

図-5は、パラベット後退位置が $x=21.4$ cmのときの、本体静水面付近における波圧とパラベットに作用する波圧の時系列変化の例である。両者の波圧ピーク時刻には明らかな位相差がみられる。また、パラベット部には作用時間がきわめて短い衝撃的な波圧が作用していることがわかる。

図-6は、パラベットの相対後退距離とパラベットに作用する無次元最大波圧の関係である。 $x=0$ に白抜きでプロットされている値は、通常の消波ブロック被覆堤の状態で計測した値であるが、これに比較して後部パラベットに作用する最大波圧は非常に大きいことがわかる。これは、前述したように、パラベットには衝撃的な波力が作用するためと考えられる。

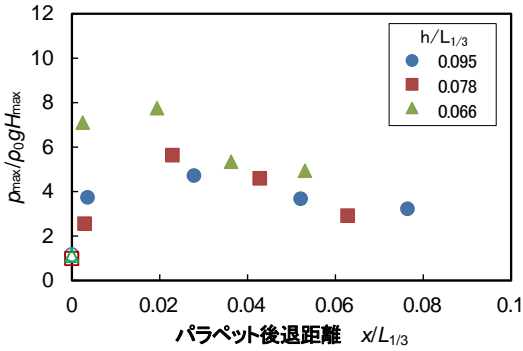


図-6 パラペット後退距離とパラペットに作用する無次元最大波圧の関係

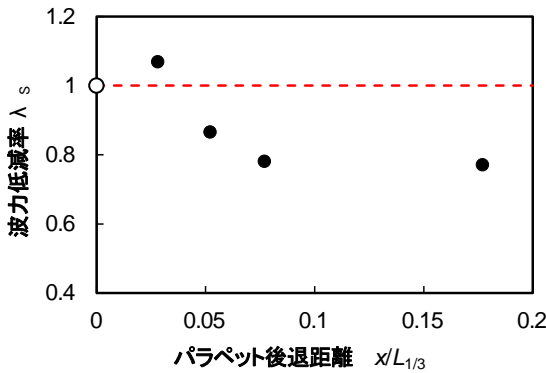


図-7 パラペット後退距離と波力低減率の関係

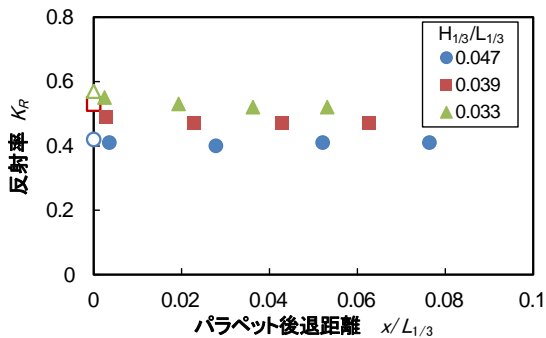


図-8 パラペット後退距離と反射率の関係

2. 2. 2 滑動実験の結果

滑動実験結果は、限界滑動量を 1mm に設定し、限界滑動量に対応する堤体水中重量 W を内挿により求め、捨石マウンドと堤体との摩擦係数 μ を乗じた滑動抵抗力で整理した。そして、後部パラペット構造の滑動抵抗力を消波ブロック被覆堤の滑動抵抗力で除したものを波力低減率 λ_s と定義した。図-7 は、パラペットの相対後退距離 $x/L_{1/3}$ ($L_{1/3}$ は有義波の波長) と波力低減率 λ_s の関係である。 $x/L_{1/3}$ が小さいと波力が增大しているが、 $x/L_{1/3}$ が 0.05 程度以上であれば λ_s が 1 以下となり通常の消波ブロック被覆堤に比較して波力低減効果が現れている。 $x/L_{1/3}$ が 0.08 程度以上であれば、波力低減率が 0.75~0.8 程度

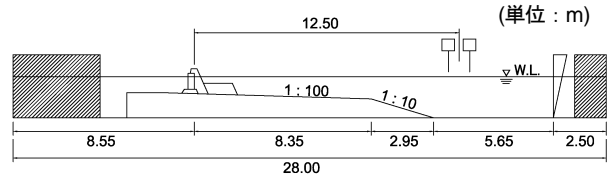


図-9 実験水路

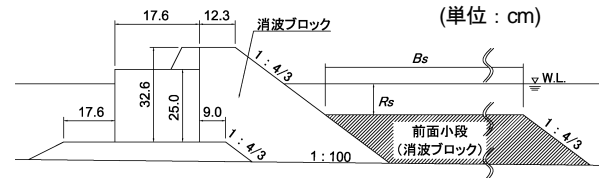


図-10 前面小段付消波ブロック被覆堤の堤体模型

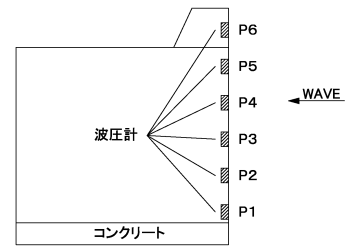


図-11 堤体模型に配置した波圧計

で横ばいになっている。このような位相差による効果が一定となる条件で、滑動抵抗力と前壁に作用する合田準用式による計算波力を比較したところ、両者はほぼ等しかった。

2. 3 後部パラペット構造の反射特性

波浪反射率は、水路の沖側で取得した波高系のデータから入反射分離推定法により求めた。

図-8 は、パラペットの相対後退距離 $x/L_{1/3}$ と反射率 K_R の関係を示している。後退距離 $x=0$ の白抜きのプロットは、通常の消波ブロック被覆堤の反射率である。いずれの条件でも後部パラペット堤は消波ブロック被覆堤の反射率と同等か若干小さい。また、反射率は後退距離によらず、ほぼ一定であることがわかる。

3. 消波工前面小段構造の検討

3. 1 実験方法

3. 1. 1 波圧測定実験

実験は、図-9 に示す不規則波発生装置を備えた 2 次元造波水路 (長さ 28.0m, 幅 0.8m, 深さ 1.0m) で行い、実験縮尺は 1/30 とした。水路内には、海底勾配 $i=1/100$ の一様斜面を設け、造波板から 16.95m 離れた斜面上に、図-10 に示す模型を設置して、不

表-2 実験条件

波浪周期 $T_{1/3}$ (sec)	1.83	2.19	2.58
有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	6.7	10.0	13.3
堤体水深 h (cm)	26.7		
パラペット天端高 hc (cm)	12.6		
前面小段水深 R_S (cm)	11.0	16.0	
前面小段天端長 B_S (cm)	34.1*	68.2	136.4

(* は滑動実験のみ)

規則波を作用させた。図-11 に波圧計の取付け状況を示す。波圧はサンプリング周波数 200Hz で計測した。実験は同一条件で3回繰り返し、各計測の最大合成波圧の平均値を P_{MAX} として整理した。

実験条件を表-2に示す。波圧計測1回あたりの作用波数は150波とした。消波ブロック前面小段は、ブロック2層厚のときの小段天端水深が $R_S=16.0\text{cm}$ 、3層厚のときが $R_S=11.0\text{cm}$ である。前面小段長は $B_S=68.2\text{cm}$ および 136.4cm の2種類とした。また、波圧計測と同時に水路の沖側に設置した2本の波高計により水位変動を計測した。

なお、上記の前面小段による波力低減効果を評価するために、通常の混成堤および消波ブロック被覆堤の波圧の計測も実施した。

3. 1. 2 滑動実験

実験には、有義波高 $H_{1/3}=13.3\text{cm}$ 、周期 $T_{1/3}=2.19$ の不規則波を用いた。堤体模型の底面には厚さ30mmのコンクリート版を取り付け、実験前に底面のコンクリート版と基礎マウンドの摩擦係数 μ を測定した。実験方法は2.1.2)で前述した後部パラペット構造の滑動実験と同様である。

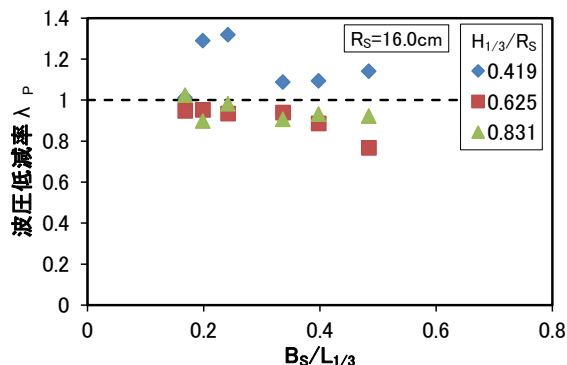
3. 1. 3 水理特性に関する実験

水理特性に関しては、越波量および反射率の計測を行った。実験条件は、前出の表-2と同様である。波浪の作用波数は150波とし、越波量はパラペット中央に置いた幅10cmの樋を通過した水を堤体背後においた容器で受け、実験終了後に容器に溜まった水量を計測した。また、反射率は、沖側の2本の波高計データから入射分離法により求めた。

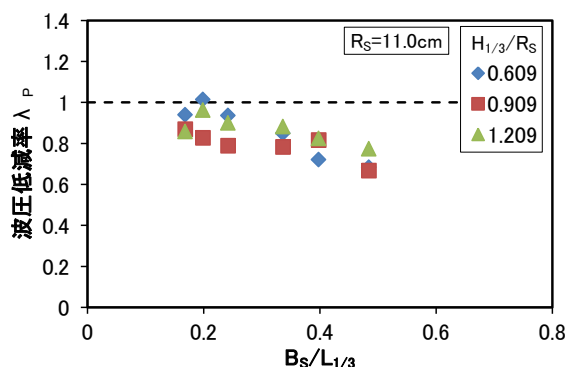
3. 2 消波工前面小段構造の波力特性

3. 2. 1 波圧測定実験の結果

通常の消波ブロック被覆堤に前面小段を付加することによる波圧低減効果を、 $\lambda_p = P_{MAX}(\text{小段あり}) / P_{MAX}(\text{小段なし})$ で定義される波圧低減率で表すこととする。図-12は、小段天端水深が $R_S=16\text{cm}$ と $R_S=11\text{cm}$ の場合における、相対小段長 $B_S/L_{1/3}$ ($L_{1/3}$



(a) 小段水深 $R_S=16\text{cm}$ の場合



(b) 小段水深 $R_S=11\text{cm}$ の場合

図-12 相対小段長と波圧低減率の関係

は有義波の波長) と波圧低減率 λ_p の関係である。 $B_S/L_{1/3}$ が大きくなるほど波圧低減率が小さくなり、波圧低減効果が大きくなっていることがわかる。図(a)と(b)を比較すると、小段水深が浅い $R_S=11\text{cm}$ (図(b))の方が、波圧低減率がより小さくなっている。これは、小段水深が浅いと小段上での碎波が促進されるため、作用波圧が小さくなったものと考えられる。 $R_S=16\text{cm}$ (図(a))中の $H_{1/3}/R_S=0.419$ の場合のみ、波力低減率 λ_p が1.0を上回っている。これは、小段水深に比べて入射波が小さいことにより、小段上で碎波が進まず、反対に高マウンド効果により波圧が大きくなったものと考えられる。以上より、波圧の低減効果を得るためには、 $H_{1/3}/R_S > 0.6$ 、 $B_S/L_{1/3} > 0.2$ を満たす必要があると考えられる。

ちなみに、小段部のブロック量が近い条件として、 $R_S=16\text{cm}$ 、 $0.4L_{1/3}$ と $R_S=11\text{cm}$ 、 $0.2L_{1/3}$ の波圧低減率を比較すると、前者は0.87、後者は0.88となり、波圧低減効果がほぼ変わらないことがわかる。

3. 2. 2 滑動実験の結果

滑動実験結果は、限界滑動量を1mmに設定して、前述の後部パラペット構造の滑動実験と同様に、小段を付加することによる波力低減率 λ_s で整理した。

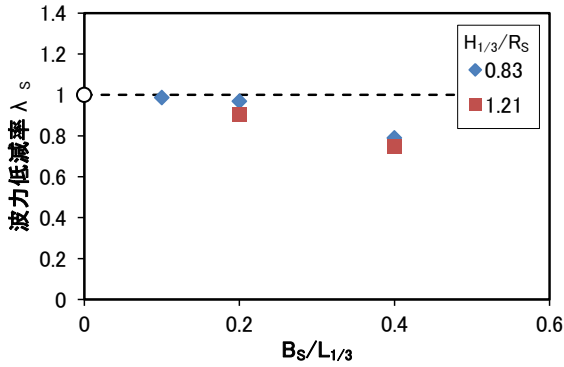


図-13 前面小段長と波力低減率の関係

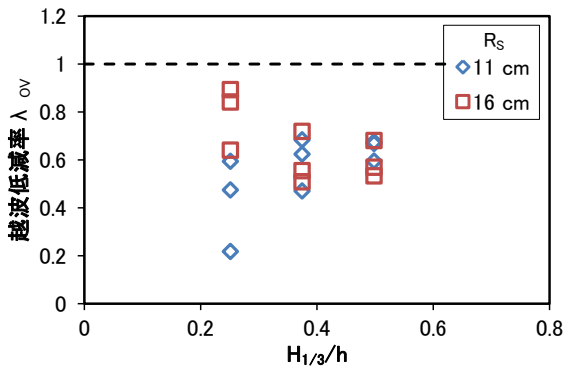


図-14 前面小段による越波量低減率

図-13は、相対小段長 $B_s/L_{1/3}$ と波力低減率 λ_s の関係である。波圧測定実験の結果と同様に、 $B_s/L_{1/3}$ が大きくなるほど波力低減率が小さくなり、波圧低減効果が大きくなっていることがわかる。また、小段上の水深が浅いほうが波力低減率はやや小さい。

3. 2. 3 水理特性に関する実験の結果

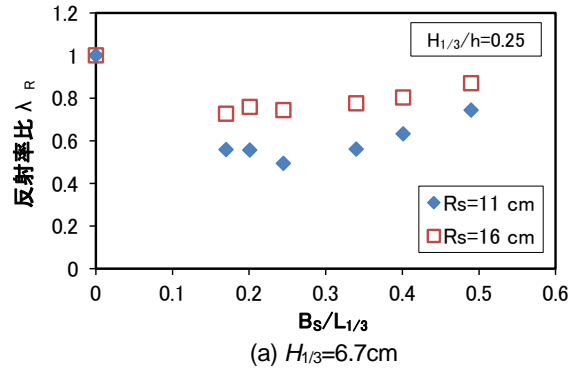
図-14は、前面小段構造の越波量を消波ブロック被覆堤の越波量で除した越波低減率 λ_{ov} を示している。低減率 λ_{ov} は 0.2~0.9 の範囲でばらつきが大きいものの、小段による越波低減効果が表れている。

図-15(a)~(c)は、前面小段のない通常の消波ブロック被覆堤の反射率と前面小段構造の反射率比 λ_R を示している。波力特性とは異なり、相対小段長 $B_s/L_{1/3}$ に対して反射率比 λ_R は概ね一定値となっている。また、小段水深が小さい方が、反射率も小さくなっている。

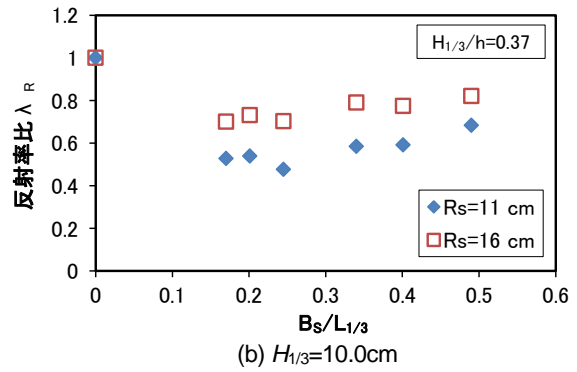
4. 消波工拡幅構造の検討

4. 1 実験方法

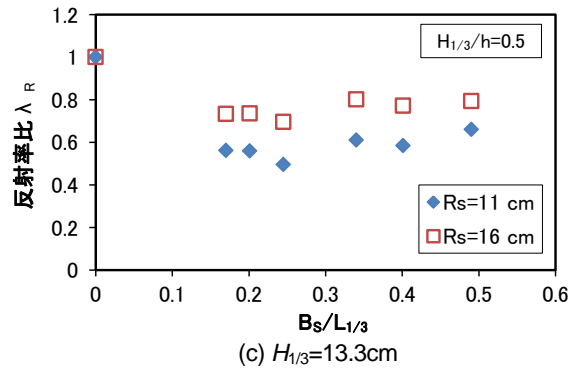
実験は、3.1 節で述べた前面小段構造の波圧測定実験と同様に行った。実験条件も同様であるが、波浪周期は $T_{1/3} = 2.19s$ の 1 種類のみとした。波圧は堤体前面と底面に取付けた波圧計により計測した。実



(a) $H_{1/3}/h=6.7cm$



(b) $H_{1/3}/h=10.0cm$



(c) $H_{1/3}/h=13.3cm$

図-15 前面小段長と反射率比の関係

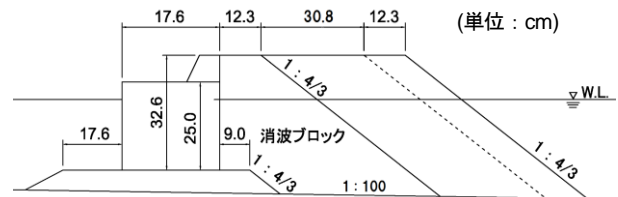


図-16 消波工拡幅構造の堤体模型

験は同じ条件で 3 回繰り返した。堤体模型を図-16 に示す。

消波工拡幅の幅は、消波工小段構造における $R_s=16cm$ 、 $B_s=136.4cm$ の条件と $R_s=11cm$ 、 $B_s=68.2cm$ の条件で使用する小段部の消波ブロック数量を参考として、消波工天端幅はブロック 7 個並び相当の 43.1cm と 9 個並び相当の 55.4cm とした。

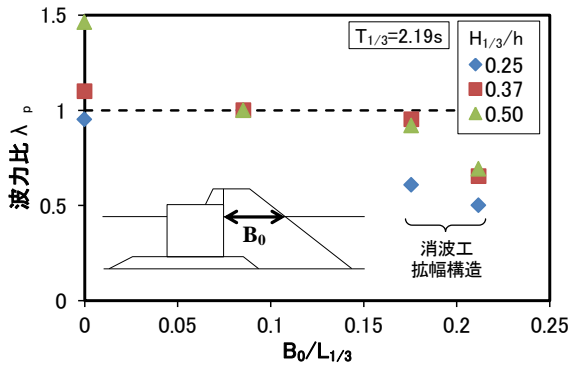


図-17 消波工拡幅構造の波力比

4. 2 消波工拡幅構造の波力特性

実験結果は、消波工を拡幅したときの最大滑動合成波力 W_{MAX} (拡幅)と拡幅しない消波ブロック被覆堤の最大滑動合成波力 W_{MAX} (通常)の比 $\lambda_p = W_{MAX}$ (拡幅) / W_{MAX} (通常)で表すこととする。

図-17は、消波工拡幅による波力比を示している。横軸の B_0 は静水面における消波工の被覆幅であり、 $B_0=0$ のプロットは、消波工を設置しない混成堤の波力比を示している。

比較的波高の大きい $H_{1/3}/h=0.37$ との 0.5 条件では波力比がほぼ等しく、その値は、7 個並び相当のとき $\lambda_p=0.90$ 、9 個並び相当では $\lambda_p=0.65$ となった。

5. 改良方策の考察

後部パラペット構造は、波力低減効果は高いものの、パラペット部に作用する衝撃波圧対策が必要である。また、堤体の安定性を向上させるためにはパラペット後退距離 $x/L_{1/3}$ を 0.05 程度以上確保する必要があるが、小型の防波堤では堤体幅が狭いため後退距離を十分確保することができない可能性が高く、堤体を拡幅できない場合には適用が困難である。

前面小段構造は、天端水深を浅くし ($H_{1/3}/R_s > 0.6$)、小段長を長くする ($B_s/L_{1/3} > 0.2$) ことで波力低減効果が得られる。また、消波工拡幅構造では、消波ブロックの天端並び個数を多くすることで波力低減率が小さくなった。以上から、消波ブロックを一定以上

追加することで、波力低減効果が得られると言え、防波堤の改良工事などで余剰消波ブロック発生した場合の有効利用策の一つと考えられる。また、前面小段は海藻類の着生による藻場機能も期待できる構造である。

6. まとめ

本研究の主要な結論を、以下にまとめる。

- 1) 後部パラペット構造による改良は、波力低効果は高いものの、小型の防波堤では波力を低減するための後退距離が十分確保できない可能性が高い。
- 2) 消波工前面小段構造は、小段水深が浅く、小段長が大きいほど波力低減効果が高くなる。
- 3) 消波工拡幅構造では、拡幅幅を十分とると波力低減効果が得られる。

本検討では、消波ブロック所要質量は、防波堤設置地点の波高から算出した。今後は、前面小段構造や消波工拡幅構造の消波ブロック安定質量に関する検討を追加することで、消波ブロックの入れ換えや処分数量を減らすことが可能になり、より経済的な改良方策を提案することができると考えられる。

参考文献

- 1) 泉田裕・尾山康弘・長井一平：新構造（後部パラペット型防波堤）の開発、平成 23 年度北陸地方整備局管内事業研究会、2011。
- 2) 本山賢司、上久保勝美：消波ブロック被覆堤に配置した前面小段の波力低減効果について、第 67 回土木学会年次学術講演会、2012。
- 3) 本山賢司、上久保勝美、山本泰司：水深の浅い消波ブロック被覆防波堤における法先被害とその対策について、北海道開発技術研究発表会、第 57 回、2013。
- 4) 本山賢司、上久保勝美、山本泰司：消波ブロック被覆防波堤の後部パラペット構造による改良について、北海道開発技術研究発表会、第 56 回、2012。

STUDY ON AN IMPROVEMENT METHOD FOR BREAKWATERS AT SMALL PORTS

Budgeted: Grants for operating expenses
General account

Research Period: FY2011-2013

Research Team: Cold-Region Hydraulic and Aquatic
Environment Engineering Research
Group (Port and Coast)

Author: YAMAMOTO Yasuji, MOTOYAMA Kenji,
KAMIKUBO Katsumi

Abstract: Breakwaters are main facilities at ports and fishery harbors, and they need to be maintained and renovated appropriately. This is because many of such facilities are reaching the end of their design service life. This study addressed breakwaters covered with wave-dissipating blocks which are often used at small ports, such as local ports and fishery harbors, where small vessels and fishing boats call. A method of improving breakwaters by securing stability through wave force reduction was investigated in hydraulic model experiments on breakwaters that could not be widened. It was found that there are two installations that achieve improvement: 1) that of a step attached to the front of the wave-dissipating blocks and 2) that in which wave-dissipating blocks are increased in number.

Key words: *breakwater with wave-dissipating blocks, wave force, front side step, backward parapet, hydraulic model test*