

北海道森港における消波型高基混成堤の設計と施工

山本 泰司* ・ 木村 克俊** ・ 田 端 恵 士***
北 原 繁 志**** ・ 二ノ宮清志***** ・ 佐 藤 典 之*****

消波型高基混成堤を対象に、堤体形状が波浪反射率と越波流量に与える影響を水理模型実験により検討した。マウンド水深 h' が小さいと、反射率 K_R は直立部遊水室幅 B によらず一定値となるが、 h' が大きくなるに従って、波長に対する遊水室幅 $B/L_{1/3}$ が 0.13 付近で極小値を持つようになる。このような反射特性は、VOF 法を用いた数値計算によっても比較的良好に再現することができる。 $B/L_{1/3}$ が 0.06 程度より小さいと平均越波流量は大きくなる。また、一般的な消波ブロック被覆型護岸に比べ所要天端高は 3 割程度低減できることが明らかとなった。本構造は現地の防護護岸へ適用されたが、施工性は良好であり、建設コストの縮減も図ることができた。

1. はじめに

我が国においては、マウンドの比較的低い低基混成堤が主流であるが、マウンドの高い高基混成堤は現地の波浪条件や水深条件等によっては、建設コスト面や環境面において有利な場合がある。図-1 に示す消波型高基混成堤は、高マウンドによって生じる衝撃砕波力の発生を防ぐために、直立部に消波機能を付加した新しい構造形式である。また、比較的に広く、浅いマウンドが藻場として機能することも期待できる。著者らは、これまでに水理特性や波力に関する実験的な研究を進めており、その特性がある程度明らかにされてきた(下迫ら 1997, 木村ら 1999)。しかし、マウンド水深や直立部の形状が水理特性に及ぼす影響については、十分に解明されていない。本研究では、堤体形状が水理特性に及ぼす影響を二次元水理模型実験により明らかにする。

北海道の内浦湾に面する地方港湾である森港では、係

留施設の不足を解消するために埋立を伴う拡張が進められている。防護護岸には、小型船舶への反射波の影響を極力小さくするとともに、環境面への配慮が求められ、検討の結果、消波型高基混成堤が全国で初めて採用された。本報では構造諸元の決定過程と、現地施工状況についても報告する。

2. 堤体形状が水理特性に及ぼす影響

(1) 検討方法

a) 水理模型実験

実験は、長さ 27 m、高さ 1.2 m、幅 0.6 m の反射波吸収式不規則波造波装置を備えた二次元造波水路で行った。海底勾配 1/30 の水路床の上に、図-2, 3 に示す消波型高基混成堤模型を設置し、不規則波を作用させたときの反射率および越波量を測定した。堤体水深は $h=40.8$ cm で一定とし、堤体形状の影響を把握するため、マウンド天端水深 h' を 2.1~16.1 cm の範囲で 4 段階に変えた。さらに、遊水室幅を $B=15\sim70$ cm、直立部天端高さを $h_c=1.9\sim27.9$ cm、マウンド前肩幅を $B_M=14\sim95$ cm の範囲で変化させた。不規則波は、ブレットシュナイダー・光型型スペクトルを目標に作成し、波高を $H_{1/3}=3.4\sim20$ cm、周期を $T_{1/3}=1.41\sim2.75$ s の範囲で変化させた。また、比較のため、消波ブロック被覆堤についても実験を行った。

反射率は、堤体沖に設置した 2 本の容量式波高計を用いて入反射波分離推定法(合田ら, 1976)により求めた。越波量は、堤体天端上に幅 10 cm の導水路を設置し堤体背後の集水枡に越波水を取得して、その体積を計測して求めた。

b) VOF 法による数値計算

前述の模型実験を、VOF 法を用いた数値計算(数値波動水路)(沿岸開発技術研究センター, 2001)によって再現した。円柱構造の消波部は、同等の空隙率を有する多孔質透過壁として扱った。波浪は規則波を用い、堤体前面の 2 箇所の水位変動から反射率を算出した。計算条件を表-1 に示す。

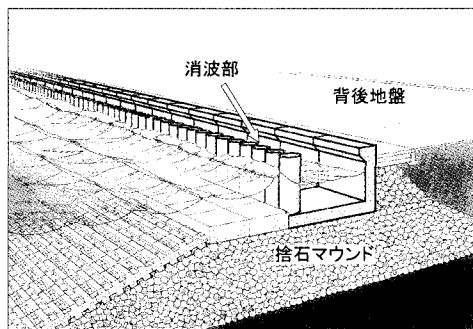


図-1 消波型高基混成堤

* 正 会 員 工 修 (独法)北海道開発土木研究所港湾研究室副室長

** 正 会 員 博(工) 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科

*** 学生会員 室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻

**** 正 会 員 北海道開発局函館開発建設部築港課長

***** (前)北海道開発局函館港湾建設事務所

***** 正 会 員 工 修 北日本港湾コンサルタント(株) 技術部企画解析室長

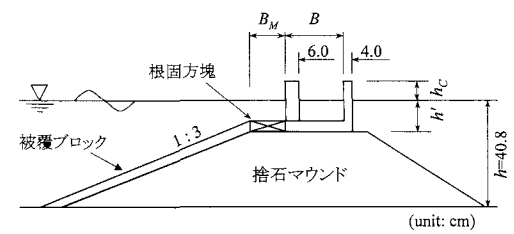


図-2 実験模型の断面形状

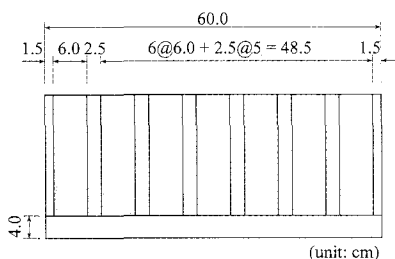


図-3 直立部の形状 (正面図)

表-1 VOF 法による計算条件

計算領域	28×1.4 m
計算格子間隔	$\Delta x=0.04$ m, $\Delta z=0.02$ m
造波モデル	流れ関数
差分スキーム	DONOR (0.2)
境界条件	スリップ
直立部透過壁	空隙率 $\varepsilon=0.46$ 慣性力係数 $C_M=1.0$ 抗力係数 $C_D=1.2$
捨石マウンド	$\varepsilon=0.5$, $C_M=1.0$, $C_D=1.2$

(2) 反射特性

消波型高基混成堤は、高いマウンド上で碎波を促進するため反射率 K_R は小さく、既往の研究 (下迫ら, 1997) では $K_R=0.1\sim0.3$ 程度と報告されている。

図-4 は、波浪条件を一定としたときのマウンド水深 h と遊水室幅 B の影響をみたものである。マウンド比水深の小さい $h/h=0.05$ の条件では、相対遊水室幅 $B/L_{1/3}$ によらず K_R はほぼ一定となる。これは、反射率が斜面上の碎波状況や透過壁による擾乱によって支配されるため、遊水室の効果が現れにくくなっていると考えられる。しかし、マウンド水深が大きくなるに従って、直立消波ケーソンと同様の反射特性が現れてくる。すなわち、 $B/L_{1/3}$ に対して K_R は極小値を持つようになり、 $B/L_{1/3}=0.13$ 前後で極小となる。

図には、VOF 法による数値計算によって得られた K_R もあわせて示してあるが、上記の特性がよく再現されている。計算は規則波を用いており、また、円柱スリット部は多孔質透過壁として単純にモデル化しているもの

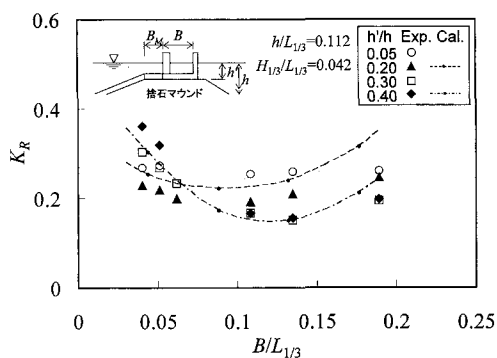
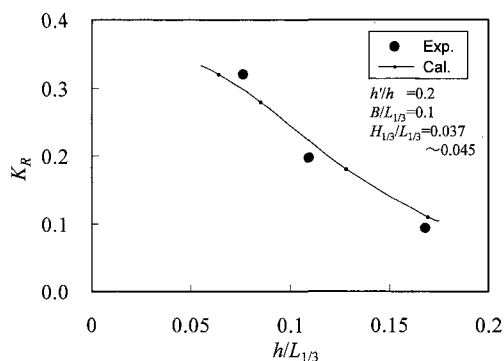


図-4 反射率に及ぼすマウンド水深の影響

図-5 反射率に及ぼす周期の影響 ($h/h=0.2$)

の、結果的に反射現象を比較的良好に表現することができるものと考えられる。

図-5 は、マウンドが比較的高い $h/h=0.2$ の場合に、相対遊水室幅 $B/L_{1/3}=0.1$ で一定としたときの周期の影響をみたものであり、横軸は波長に対する相対水深 $h/L_{1/3}$ をとっている。 $h/L_{1/3}$ が大きくなるに従って K_R は小さくなる。これは、短周期の波浪ほど斜面上で碎波が促進されるため反射率が小さくなるためである。図中には数値計算によって得られた K_R もあわせて示してあるが、周期の影響 (碎波形態の違い) についても比較的良好に再現されている。

同図には示していないが、周期の長い条件ではマウンド前肩幅 B_M を大きくすると碎波が促進されるため K_R の低減が可能である。また、マウンドが低い条件では $h/L_{1/3}$ の影響はほとんど現れなくなる。

(3) 越波特性

図-6 は、波高 $H_{1/3}$ 、堤体天端高 h_c を一定とし、マウンド比水深 $h/h=0.3$ の場合の、越波流量に与える遊水室幅の影響をみたものである。相対遊水室幅 $B/L_{1/3}$ が小さいと無次元平均越波流量 $q^*=q/(gH_{1/3}^3)^{0.5}$ は大きくなるが、 $B/L_{1/3}=0.06$ 程度以上であれば q^* はほぼ一定値

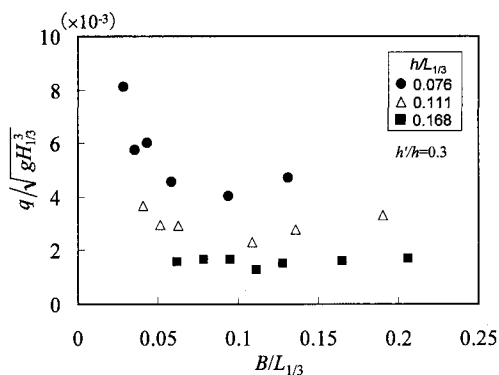


図-6 相対遊水室幅と無次元越波流量の関係

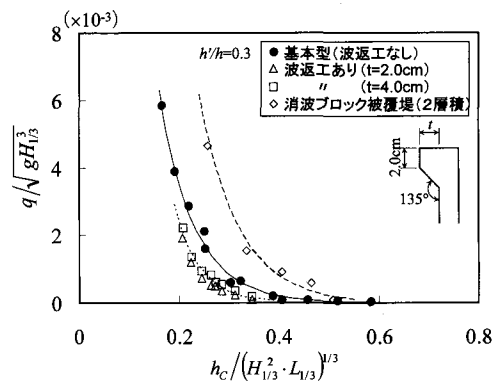


図-8 波返工の効果および消波ブロック被覆堤との比較

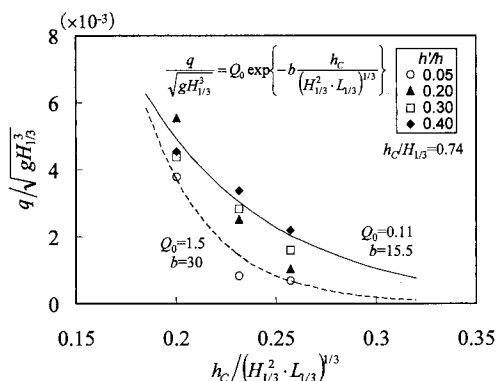


図-7 越波流量に及ぼすマウンド水深の影響

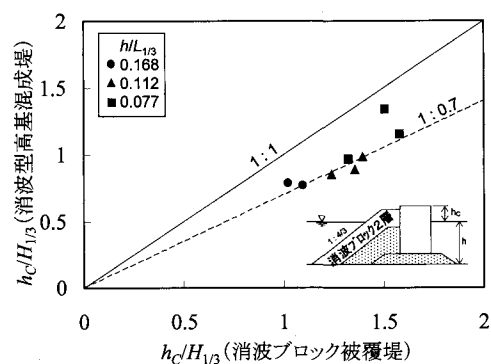


図-9 消波ブロック被覆堤との所要天端高の比較

となる。また、 $B/L_{1/3}$ によらず $h/L_{1/3}$ が小さい方が q^* は大きい傾向がある。

木村ら(1999)は、大型の水理模型実験を行って、 q^* を無次元天端高 $h_c^* = h_c / (H_{1/3}^2 \cdot L_{1/3})^{1/3}$ を用いて次式で表した。

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = Q_0 \exp \left\{ -b \left(\frac{h_c}{(H_{1/3}^2 \cdot L_{1/3})^{1/3}} \right) \right\} \quad (1)$$

$Q_0=0.11, \quad b=11.5 \dots\dots\dots$

ここで、式中の Q_0, b は係数である。この実験のマウンド比水深条件は $h/h=0.15 \sim 0.39$ であった。図-7は、越波流量に及ぼすマウンド水深の影響をみたものであり、縦軸に q^* 、横軸に h_c^* をとって示してある。マウンド比水深が $h/h=0.2 \sim 0.4$ の範囲では、式(1)で表される曲線によく一致している。しかし、マウンド水深の小さい $h/h=0.05$ のケースでは、マウンド上の碎波の影響で q^* が小さくなり、式(1)の係数は $Q_0=1.5, b=30$ となる。

図-8は、遊水室後壁頂部に波返工を設けたときの越波流量低減効果をみたものである。波返工のない基本型と比較すると、波返工を設けることにより越波流量が低減していることが分かる。ただし、波返工の張り出し長

さ t による違いはあまりみられない。後述するように、現地への適用にあたっては、護岸天端高をできるだけ抑えるために波返工を採用している。同図には一般的な消波護岸構造である2層積の消波ブロック被覆堤の越波流量についても示してある。消波型高基混成堤は消波ブロック被覆堤と比較すると越波流量が小さいことが分かる。

図-9は、越波流量の許容値 ($q=2 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m/s}$) に対応する所要天端高 h_c について、消波ブロック被覆堤と比較したものである。消波型高基混成堤は消波ブロック被覆堤と比較して3割程度 h_c を小さくすることが可能なことが明らかとなった。

3. 現地への適用

(1) 森港の概要

図-10に、森港新川地区の施設配置を示す。同地区は係留施設の不足を解消するために、1998年から整備が進められており、主としてホタテ養殖漁業の基地としての役割を担う。消波型高基混成堤の適用が検討された護岸は航路に面しており、航行する小型漁船への反射波の影響を極力小さくすること、環境面への配慮が求められ

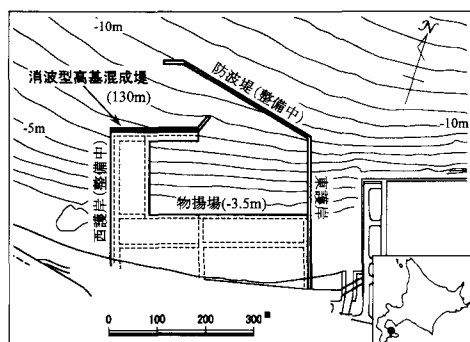


図-10 森港（新川地区）の施設設置

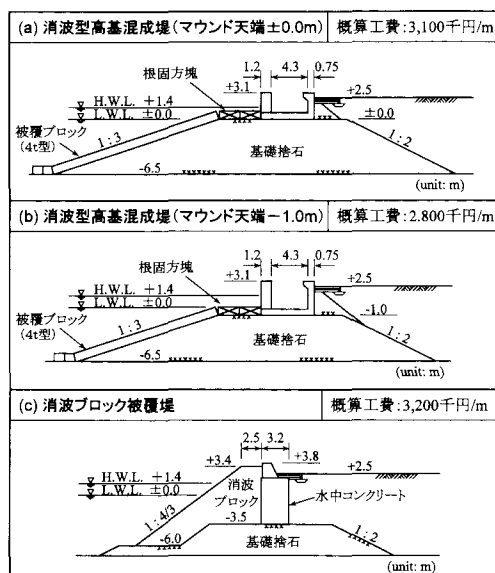


図-11 概算工費の比較

た。

(2) 最適断面形状の決定

護岸整備地点の水深は $-6.4 \sim -7.6$ m, 設計潮位は $+1.4$ m, 設計波 (50年確率) は有義波周期 $T_{1/3}=7.0$ s, 有義波高 $H_{1/3}=2.8$ m である。反射率および越波流量を低減するためには, マウンド水深 h' をある程度小さくする必要があるが, マウンドに係る建設コストが増大する。このため, 設計潮位時のマウンド比水深 $h'/h=0.3$ を基本に考え, h' が更に小さいケースとのコスト比較を行うこととした。図-11 は, コスト比較を行った断面形状であり, $h'=-1.0$ m のケースが概算工費が最も小さく, 従来型の消波ブロック被覆堤と比較すると 12.5% の建設コスト縮減を図ることができる。上部工の遊水室幅 B は, 越波流量低減の観点からみると, 無次元遊水室幅 $B/L_{1/3} > 0.06$, 反射率低減の観点からは $B/L_{1/3} > 0.1$ とす

工種	細目	4月	5月	6月	7月	8月
基礎工	捨石投入					
	捨石均し					
本体工	型枠・足場組立					
	鉄筋加工組立・コンクリート打設	2面×4サイクル		2面×4サイクル		
	ブロック据付					
被覆根固工	ブロック製作					
	ブロック据付					

図-12 2003年度施工計画 (施工延長 80 m, 16 函)

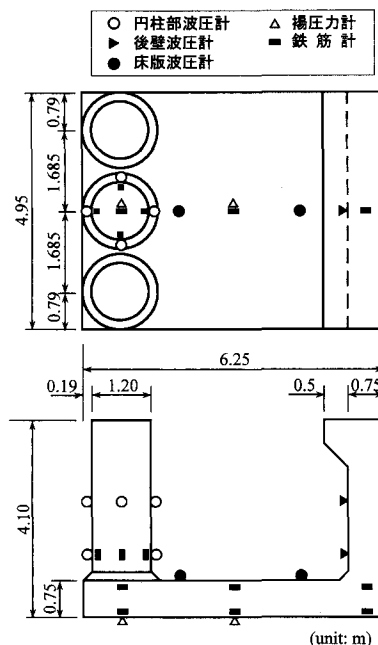


図-13 直立部の形状と計測器の配置

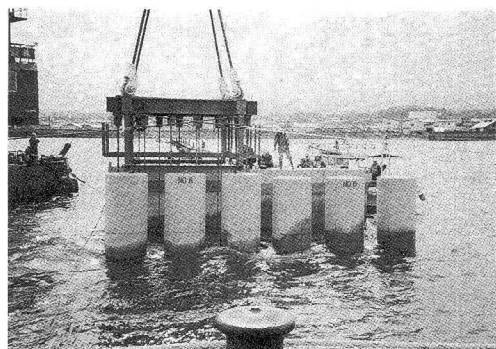
る必要がある。現地の設計条件では $L_{1/3}=54.9$ m であるので B は 5.5 m に設定した。また, 直立部後壁には張り出し幅 0.5 m の波返工を設けて低末端化を図った。

(3) 耐波設計

消波型高基混成堤では, 直立部前面のスリット柱や後壁に碎波が作用するため, 比較的衝撃的な波力が生じることがある。下迫ら (1997) は, 配筋計算等に用いる, いわゆる部材波力については, 波圧の衝撃性を考慮すれば, 実験波圧をそのまま静的荷重として設計することは過大設計となることを指摘している。しかしながら, 衝撃的な波力の扱いが明確になっていないことから, ここでは現地条件に対応した水理模型実験を行って部材波力を求めた。

部材波力の算定法については, 十分解明されていないことから, 後述するように波圧等の現地観測を行い, 今後検討を進める予定である。

マウンド被覆材の耐波安定性に関しては, 森ら (2001)



写真一 起重機船による直立部ブロックの現地据付



写真二 現地に設置された消波型高基混成堤（整備中）

が所要質量の算定法を提案しており、これに従ってブロック質量を決定した。

(4) 現地施工

護岸延長 130 m のうち、2002 年度は 30 m、2003 年度は 80 m 区間の整備を行い、2004 年度の完成を目指している。図一 12 は、2003 年度の施工計画である。直立部のブロックは 2 組の型枠を用いて、森港港内の作業ヤードで計 16 函製作された。図一 13 に示すように、作業性を考慮してブロック 1 スパンは約 5 m とし、3 本のスリット柱が一体となっており、重量は約 120 t である。このため、陸上における施工においては特別な施工機械は必要ない。また、海上におけるブロックの運搬、据え付け作業も、写真一 1 に示すように旋回式の起重機船により行うことが可能となった。一般的なケーソン工法や水中コンクリート工法に比較して、工程は複雑にはならない。写真二 2 は、延長 110 m まで据付が終了した時点のものであるが、景観的にも従来の防波護岸に比べて、洗練された印象を受ける。

なお、作用波圧の現地検証を行うために、前出の図一 13 に示したように、ブロックのひとつには波圧計が 12 箇所、鉄筋計が 10 箇所埋め込まれており、今後現地観測を行う予定である。

4. ま と め

本研究により、消波型高基混成堤の反射、越波特性に関して以下のことが明らかとなった。

- 1) マウンド水深 h が小さいと、反射率 K_R は直立部遊水室幅 B によらず一定値となるが、周期の影響が現れ、長周期ほど K_R は大きくなる。 h が大きくなるに従って、 B に対して K_R は極小値を持つようになり、 $B/L_{1/3}=0.13$ 前後で極小となる。
- 2) VOF 法を用いた数値計算によっても、上記の反射

特性はよく再現することができる。

- 3) 波長に対する遊水室幅 $B/L_{1/3}$ が 0.06 程度より小さいと平均越波流量 q は大きくなるが、これより B を大きくすると q はほぼ一定となる。また、 h が小さいと q は小さくなる。
- 4) 一般的な消波ブロック被覆堤と比較すると、所要天端高は 3 割程度低減することが可能である。

以上により、現場条件に最適な断面形状を決定できるようになった。また、現地の防波護岸へ適用されたが、施工性は良好であり、建設コストの縮減も図ることができた。

謝辞：森港への消波型高基混成堤の適用にあたっては、北海道大学大学院佐伯浩教授を委員長とする森港新形式護岸構造検討委員会（主催：社団法人寒地港湾技術研究センター）において技術的な検討が行われ、独立行政法人港湾空港技術研究所耐波研究室下迫健一郎室長を始めとする委員各位から多くのご指導を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 沿岸開発技術研究センター (2001): 数値波動水路の研究・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一, 296 p.
- 木村克俊・早川哲也・高橋重雄・下迫健一郎・H. Oumeraci (1999): 消波型高基混成堤の越波特性に関する大型模型実験, 海工論文集, 第 46 巻, pp. 756-760.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治 (1976): 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.
- 下迫健一郎・高橋重雄・斉藤祐一・M. Muttray・H. Oumeraci・細川泰廣 (1997): 高基混成堤の水理特性および耐波安定性に関する大型模型実験, 海工論文集, 第 44 巻, pp. 826-830.
- 森 昌也・梅沢信敏・早川哲也・木村克俊・菊池博明・遠藤 強 (2001): 消波型高基混成堤のマウンド被覆材の耐波安定性, 海工論文集, 第 48 巻, pp. 906-910.