

防波堤構造形式と越水特性に関する研究

笹島隆彦*・菊地聡一**・水野雄三***・佐伯 浩****

1. はじめに

近年、流水の来襲する北海道のオホーツク海沿岸においては、流水が波浪とともに防波堤等を越える（以下越水と呼ぶ）ことにより背後の施設に被害が生じている。水野ら（1992）は越水量と波高、天端高、水の厚さの関係、消波ブロック被覆堤の越水軽減効果等を明らかにした。また、佐伯ら（1993）は水の大きさと越水量の関係を実験的に検討することにより、越水量予測手法を明らかにするとともに、実海域における氷盤の大きさの分布調査に基づき実海域での予測手法の適用が可能であることを示した。笹島ら（1993a）、菊地ら（1994）は、流水来襲期においては消波ブロックが着水等によりその空隙や粗度が極端に低下する現象と、さらにこのことが、消波ブロック被覆堤における越水軽減効果を低下させかえって直立堤よりも越水量が増加することを現地調査及び模型実験により明らかにした。

現在、網走港や紋別港では親水性防波堤が建設されており、防波堤の利用という観点からも、防波堤設計時の越水対策の検討が必要となっている。また、地球温暖化等により近年は流水の密接度が小さく、流水来襲期の波浪が大きくなる傾向にあるため、越水現象が生じ易くなっている。さらに海面上昇なども考慮すると、既設の防波堤の改良による越水対策も重要となる。以上のことから、本研究では、越水対策を目的として、現在の防波堤の主要な4種類の構造形式毎の越水特性を水理模型実験で把握するとともに、宇登呂漁港の親水性防波堤で施工された二重堤に関して現地観測を行い、これらの結果も合わせて越水対策として有効な構造形式および既存防波堤の改良手法を検討した。

2. 実験及び現地観測方法

2.1 実験装置及び実験条件

実験は長さ27.0m、深さ1.2m、幅0.6mの造波水路を用いた。海底地形は1:50の勾配とし、模型防波堤はこ

れに続く水平床上に設置した。なお、越波による模型防波堤前面の水位低下を小さくするために、海底地形模型の中に塩ビ管を設置し、模型防波堤背後と造波機側の通水性を確保した。

実験に用いた防波堤の構造は図-1に示すように混成堤、消波ブロック被覆堤、スリット堤（直立消波堤）、二重堤の4種類の構造を用いた。なお、消波ブロック被覆堤については、流水来襲期には消波ブロックは着水や空隙への流水の混入等により水面上の空隙と粗度を低下するという笹島ら（1993）、菊地ら（1994）の調査に基づき、これらの状況を再現するために、消波ブロックの着水状

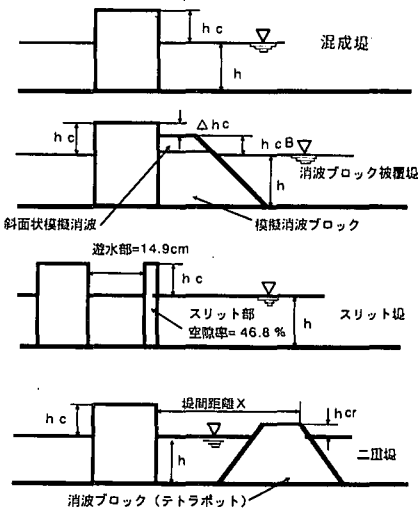


図-1 模型防波堤の諸元

表-1 実験ケース

単位: cm

構造種類	混成堤	スリット堤	消波ブロック被覆堤	二重堤				
天端高 h_c	10.0, 14.0	10.0, 14.0	10.0, 14.0, 17.1	10.0				
		17.1						
			消波ブロック天端高 h_{cB}	岸堤天端高 h_{cr}	-3.0 +5.0	-3.0, 0 +2.0, +5.0	-3.0, 0 +5.0	-3.0, 0 +5.0
		10.0, 14.0	17.1, 14.0, 10.0	堤間距離 X	60.0	120.0	185.0	300.0

* 正会員 北海道開発局 開発土木研究所 港湾研究室室長
** 正会員 北海道開発局 根室港湾建設事業所
*** 正会員 工博 北海道開発局 開発土木研究所 環境水工部部長
**** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部 土木工学科

況を模擬化できる模型を使用した。この模型は角材を利用しており、空隙や表面粗度を自由に変更できるものである。今回は最も機能が低下した状況として空隙や粗度が無い斜面状とした。水面下は空隙や粗度を消波ブロックと同程度とした。一方、スリット堤の着水については低温実験室において寒冷条件下(気温 -20°C 、水温 -1.8°C 、塩分濃度 32.5%, モルタル製スリット堤模型)のもと、2次元水路で規則波による着水実験を行った。この結果から、波による着水は消波ブロック被覆堤に較べて著しく小さかった。また、網走港におけるスリット堤の冬期間の観測結果(1994年12月～1995年3月観測)からもほとんど着水していなかったことから、本実験においても、消波ブロックとは異なり空隙等の低下は考慮しなかった。

構造毎の実験ケースを表-1に示す。実験波はブレードシュナイダー・光易型の不規則波で、周期 $T_{1/3}$ は 1.30, 1.50, 1.94 sec. の3種類とし、波高を5～19 cmの間で5種類作用させた。模擬水の模型は海水の比重とほぼ等しい比重 0.9 のポリプロピレン製で、大きさは $5 \times 5 \times 2 \text{ cm}$ の1種類とした。縮尺はフルードの相似則を用い $1/50$ としたので、実規模の水盤として $2.5 \times 2.5 \times 1.0 \text{ m}$ 相当となる。この模擬水の大きさは、佐伯ら(1993)の現地調査の結果により、オホーツク沿岸部での水盤の大きさは2～5 mが全体の75%を占めていること、および、1992年の冬におけるオホーツク沿岸域での現地調査からも、比較的小さい水盤が越水していることから決めた。

2.2 越水量および越波量の測定方法

実験は、模擬水による堤体前面の波高の著しい減衰を防止するために、実験開始時には防波堤の沖側5波長程度の位置で、1波長分の範囲に水面の被覆率が100%となるように模擬水を配置した。越水量の測定は、波が定常状態に達するまで模擬水が移動しないように金網で押さえ、定常状態に達してから金網を取り、波により模擬水を移動させ約3分間(100～160波)の間に防波堤背後に越えたか防波堤上に残存した模擬水の数量を求めた。この数量から模擬水の体積を求め、単位幅・時間当りに換算し、これを越水量 Q_i ($\text{cm}^3/\text{cm}/\text{sec.}$) とした。また、同時に防波堤を越波した水を導水板により内箱の中に集水し、同様に単位幅・時間当りに換算しこれを越波量 Q ($\text{cm}^3/\text{cm}/\text{sec.}$) とした。導水板の口付近に溜まる模擬水が越波量及び越水量に影響しないように、常にこれを防波堤背後に排除した。なお、実験誤差を少なくするために同一条件で2回づつ実験を行い平均値を求めた。

2.3 現地観測方法

現地観測は流水来襲期(1994年12月～1995年4月)において図-2に示す宇登呂漁港の二重堤構造(北防波堤

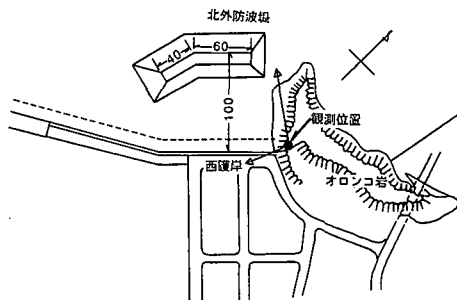


図-2 二重堤構造観測位置(宇登呂漁港)

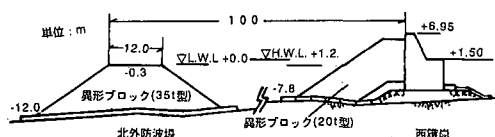


図-3 標準断面図(宇登呂漁港西護岸-北防波堤)

と西護岸)について斜め上方の点から写真撮影による定点観測を行った。標準断面図を図-3に示す。同時に北海道開発局による宇登呂漁港沖合の水深-31 mに設置された波高計による波浪観測データ、および網走地方気象台による海水情報を収集整理した。

写真の整理は、二重堤構造の潜堤部(北防波堤)より外海の前面および潜堤部と西護岸の間の遊水部における水盤の密接度(%)を求めた。

3. 実験・観測結果と考察

3.1 各構造形式と越水量

図-4は、パラメーターとして泉山ら(1982)による模擬水の波浪への追従性を示すパラメーター $l/L_0 = 0.013$ (l : 模擬水の代表長, L_0 : 沖合波長)における各構造形式毎の $(h_c + t)/H_0$ (h_c : 天端高, t : 氷厚, H_0 : 沖波有義波高)と無次元越水量 $Q_i/\sqrt{2gh^3}$ (h : 堤脚水深)の関係を示したものである。着水した消波ブロック被覆堤が最も越水量が大きく、混成堤が次に大きい。スリット堤、二重堤は越水対策にも効果があり、特に二重堤は越水量を著しく低減させることができる。

3.2 越波量と越水量

図-5は各構造形式毎に、無次元越波量と無次元越水量の関係を示したものである。いずれの構造形式でも越水量は越波量と相関が高いことがわかる。なかでも、混成堤が最も相関が高く、越水量は越波量のほぼ $1/10$ であり、相関係数は 0.967 であった。スリット堤は、越波量に比べて越水量が著しく小さい場合があった。二重堤は混成堤とほぼ同様の傾向を示す。消波ブロック被覆堤は他の構造に比べて越波量に対して越水量は低い傾向にあ

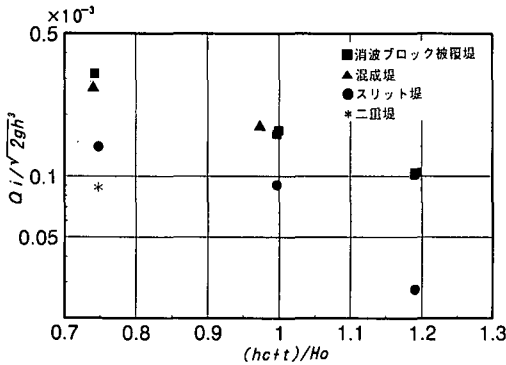


図-4 各構造形式と越水量

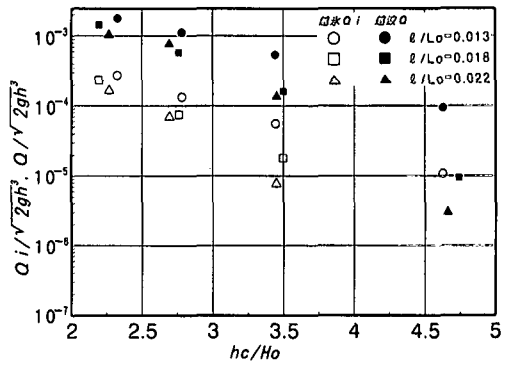


図-6 混成堤における越水量と相対天端高

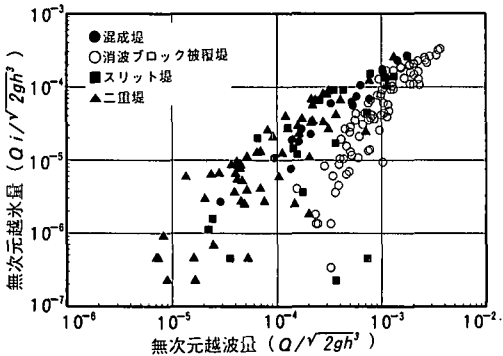


図-5 越波量と越水量

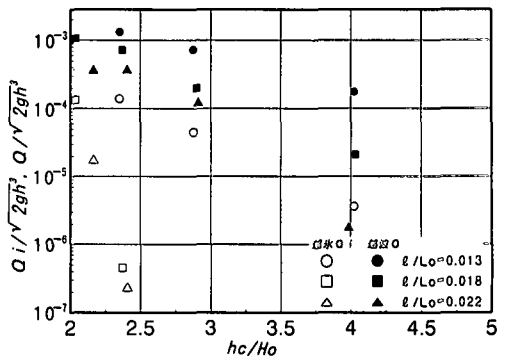


図-7 スリット堤における越水量と相対天端高

る。特に無次元越波量が 10^{-3} 以下においてその傾向は次第に顕著となり、 10^{-4} 程度となると全く越水しなかった。これは、越波量が小さいと消波部を遡上するように越波する水塊の深さも浅く、これに混入している模擬水も消波部の表面と接する確率が高くなることによるものと考えられる。岩垣ら (1966) によると孤立波の斜面への遡上については摩擦を無視できないと述べている。また、笹島ら (1993a) によると消波ブロックの表面の粗度が越水量に大きな影響を及ぼすことを示している。これより、消波ブロック被覆堤の模擬水と消波部の摩擦も越水量に影響し、特に越波量が少ないほどその影響は大きくなり越水しにくくなるものと考えられる。

3.3 混成堤およびスリット堤の越水特性

図-6, 7 はそれぞれ天端高さ $h_c = 10.0$ cm の混成堤及びスリット堤について、無次元越波量および無次元越水量と h_c/H_0 との関係を周期別にそれぞれ示したものである。いずれの構造形式も、周期が長いほど、また波高が大きいほど越波量及び越水量は大きくなる。また、その増加傾向は越波量、越水量とも比較的一致している。しかしながら、周期が短い場合には、その傾向は異なり、特にスリット堤は越波量に比べて越水量は著しく小さく

なっている。越水状態を観察してみると、混成堤は、沖合にある模擬水は波の質量輸送により徐々に防波堤に接近し、密度度が大きくなり、防波堤前面におしつけられた状態となる。防波堤前面で碎波するような大きな波では、模擬水は数層に重なり、その表層を構成する模擬水が越波とともに防波堤を乗り越え越水することになる。一方、スリット堤の場合には、波の質量輸送により模擬水は徐々に防波堤に接近するものの、スリット堤に近づくにしたがって、スリット部の遊水部から反射波に伴う位相差をもった逆方向の流れの影響を受けて、模擬水は堤体から離される方向に周期的に移動する。この現象は、周期が短いほど、また波高が小さいほど顕著で、模擬水の先端は堤体からより遠くの位置で往復運動している。このため、堤体前面での模擬水の密度度は小さく、防波堤前面におしつけられた状態とはならないため、越波時に含まれる模擬水の数が少なくと考えられる。

3.4 消波ブロック被覆堤の構造と越水特性

消波ブロック被覆堤の本体の天端高 (h_c) と消波ブロックの天端高 (h_{cB}) と越水量の関係を調べるため、図-8 に本体天端高と消波ブロック天端高の差 (Δh_c) を考慮した相対天端高 $(h_c + \Delta h_c + t)/H_0$ と無次元越水量との関係

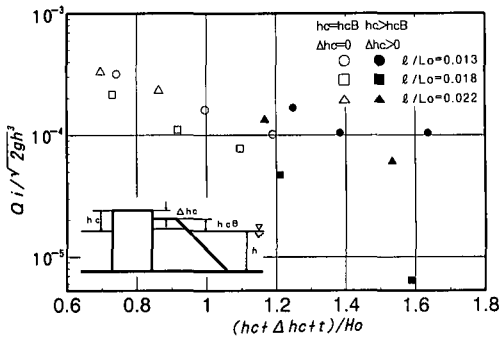


図-8 消波ブロック被覆堤の天端高と越水量

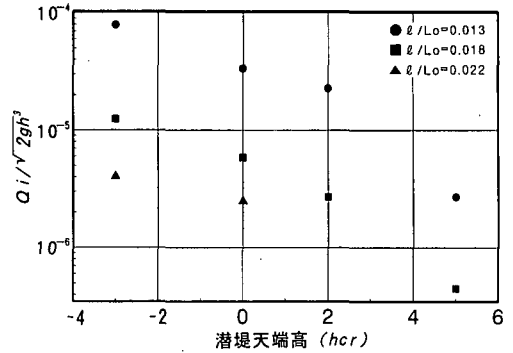


図-9 潜堤天端高と越水量

を、パラメーター h/L_0 で示した。いずれの周期の場合にも、相対天端高が大きくなればなるほど越水量は低下することがわかる。図中の白抜き記号は $h_c = h_c B$ で本体の天端と消波ブロックの天端が一致した一般的な構造であり、黒抜き記号は本体の天端高のみを高くしたパラペット突出型である。同一周期毎にみると、この天端差を考慮した相対天端高を用いることにより、無次元越水量との関係を両天端高さの違いに係わりなく一様な連続した傾向で表されることがわかる。これはパラペットを消波工より突出させたことで、天端高を Δh_c 分嵩上げた一般的な構造と同じ越水量まで低減できることを示している。通常、越波を低減させるために行う消波ブロック被覆堤の改良は本体の天端高を上げると共に、消波ブロックの天端高さもほぼ同一となるようにする。港湾等では越波に関する基準はあっても越水に関する基準はない。しかし、親水性防波堤等では、消波ブロックの天端が本体の天端と同一な構造は、視野の確保という点から港外側の景観を悪化させる場合もある。さらに、越水現象は非常に限られた期間の現象であり、経済的な越水対策が求められている。本実験により、防波堤本体工天端のみをかさ上げすることは、経済的にかつ景観に配慮した改良方法であると考えられる。

3.5 二重堤の越水特性

二重堤の模擬水の移動現象は、沖合にある模擬水はまず潜堤付近で密接度を増し、潜堤天端が高いほど潜堤付近での密接度は高くなる傾向にある。また、潜堤天端が海面より高い場合で比較的小さな波浪の場合、潜堤上での模擬水の堆積が生じることが確認された。大きな波浪に対しては潜堤を通過する波浪とともに模擬水は遊水部に入る。遊水部内では潜堤を通過した伝達波により徐々に本体堤体に接近し、密接度が大きくなり、防波堤前面に押しつけられた状態となる。その後の越水の状況は混成堤と同じである。

a) 潜堤天端高の影響

図-9 は二重堤の潜堤の天端高の影響をみたものであ

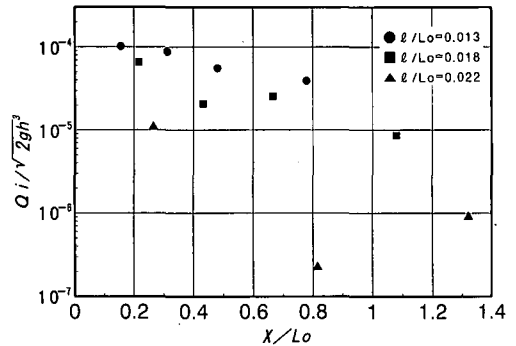


図-10 遊水部長と越水量

る。長周期になるほど越水量は大きい。また各周期とも、多少、海面下での天端 ($h_{cr} < 0$) における高さの影響は海面以上でのそれよりも小さい傾向にあるが、天端高が高くなるほどほぼ一様に越水量は少なくなる。笹島ら (1993b) による、二重堤の越波実験結果とほぼ同一の結果となった。小さな波浪に対して、潜堤上の模擬水の堆積が目視で確認されたが、大きな波浪に対しては確認できなかった。しかし、実際の海域では、沿岸部でのこうした堆積は各氷盤が結氷等により一体化することが多く、越水量に影響を及ぼすものと推測される。

b) 遊水部長と越水

図-10 は二重堤の遊水部長の影響をみたものである。遊水部長が長いほど越水量は小さくなる傾向にある。これは、潜堤を通過して一旦遊水部に入った模擬水は潜堤より沖の方には移動しにくく、遊水部で模型氷は数層に重なりあうため、そこでの波浪減衰が非常に大きくなることによると考えられる。しかし、遊水部長の最も小さい 60 cm の場合には堤体と潜堤部の間に模型氷が透き間なく埋まり、堤体前面は模型氷の堆積によりスロープ状になることと、遊水部長による波高の減衰が少ないので、その表層を構成する模擬水が防波堤を越える現象が生じ、越水量が多い傾向となる。

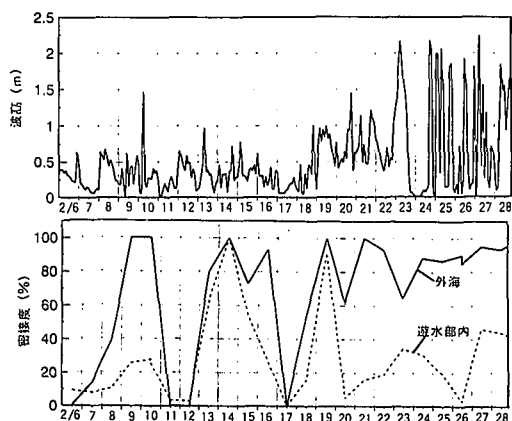


図-11 遊水部と外海の流水の密度度

c) 現地観測結果

図-11に宇登呂漁港の二重堤構造における沖合波高と遊水部内および潜堤部沖側の外海の海水の密度度の推移を示す。流水は1月末に宇登呂漁港沖合に來襲し、2月6日に潜堤部の北防波堤に接した、流水は数m程度の大きさが多く、期間中に流水の本体が接したことはなかった。2月12～18日頃までは波高1～0.5m以下と小さく、氷盤の密度度も遊水部と施設外の外海ではほぼ同程度であった。しかし、19日以降は波高が0.5～2mと比較的大きくなると外海が60～80%以上の密度度があるのに対して、遊水部内の密度度は半分以下と小さかった。この二重堤構造の潜堤部は常に海水面以下であり、非常に波高が小さく、流水の移動が風や潮流に支配される場合には潜堤の影響はないものの、波浪に混入した流水の移動に対しては室内実験に見られたように、潜堤が影響を及ぼしたものと考えられる。

4. 結 論

(1) 混成堤、消波ブロック被覆堤、スリット堤、二重堤について構造形式と越水特性を比較した結果、二重堤が最も越水量が小さい。

(2) 混成堤、二重堤は越水量と越波量とは相関関係があり、越波量が増加すると越水量は増加する。特に混成堤は相関関係が高い。

(3) 消波ブロック被覆堤も越水量と越波量に相関があるが、無次元越波量が小さいほど消波部の影響が顕著で、越水量は小さく、越波量が 10^{-4} 程度以下になると全

く越水しない。

(4) スリット堤は、遊水部からの反射波により模擬氷が堤体から離れるようになり、越波水に含まれる模擬氷が少ないため越水量が越波量に比べて小さくなる傾向がある。

(5) 消波ブロック被覆堤は天端高を高くするほど越水量を低減できる。パラペットの天端を消波ブロックの天端より高くしたパラペット突出型は、その天端の差を嵩上げた構造と同じ越水量であり、経済性、景観性等方面から有効である。

(6) 二重堤の潜堤部の天端高が高いほど越水量は少ない。潜堤天端に模擬氷が堆積する現象が確認され、実海域では越水量をより少なくすることが考えられる。

(7) 二重堤の遊水部が波長に対して長いほど越水量は小さい。

(8) 宇登呂漁港における二重堤構造の現地観測では、実験と同様、潜堤部が波浪に混入した流水の移動に対し影響を与えていることが確認された。

5. あとがき

本研究の実施にあたっては、北海道開発局網走港湾建設事務所の協力を得て現地調査を実施したものである。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 泉山 耕, 佐伯 浩, 尾崎 晃 (1982): 波浪による氷盤の運動に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第38号, pp. 135-140.
- 岩垣雄一, 井上雅夫, 大堀晃一 (1966): のり面の波の翹上機構に関する実験的研究, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 198-205.
- 菊地聡一, 笹島隆彦, 桑原幸司 (1994): 消波ブロックの着氷等による越水軽減効果の低下について(その2), 土木学会第49回年次学術講演概要集2, pp. 830-831.
- 佐伯 浩, 山下俊彦, 秋原真哉 (1993): 波浪による防波堤の越水に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 716-720.
- 笹島隆彦, 水野雄三, 菊地聡一, 千葉昭宏 (1993a): 消波ブロックの着氷等による越水軽減効果の低下について, 土木学会第48回年次学術講演概要集2, pp. 868-869.
- 笹島隆彦, 山中浩次, 木村克俊, 水野雄三, 菊地聡一 (1993b): 2重堤の水理特性について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 645-649.
- 水野雄三, 笹島隆彦, 神田尚樹, 佐伯 浩, 秋原真哉 (1992): 波浪による防波堤の越水に関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 591-595.