

# スリット式直立消波護岸におけるうねり性波浪の越波対策とその水理特性

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム ○酒井 和彦  
北海道開発局 室蘭開発建設部 室蘭港湾事務所 佐藤 朱美  
北海道開発局 農業水産部 水産課 長谷 一矢

気候変動に伴う波高増大やうねり性波浪の頻度増加及び海面上昇が懸念されている。このため、設計波の見直しに伴い、スリット式直立消波護岸の胸壁を高天端に嵩上げし、かつ、波返工付断面に改良することが考えられる。そこで、風波による波浪及びうねり性波浪を対象として、スリット壁天端高 $h_{cs}$ を固定し、胸壁天端高 $h_c$ を変化させて水理模型実験を行った。その結果、上記対策の越波流量低減効果とともに、うねり性波浪来襲時の越波流量は風波によるものの約10倍であることを明らかにした。また、胸壁及びスリット壁天端高比 $h_c/h_{cs}$ が1.9を超える場合には、胸壁に作用する水平波力が現行の設計手法による計算値の2.8倍であることを明らかにした。

キーワード：スリット式直立消波護岸，うねり性波浪，越波，波力

## 1. はじめに

直立消波護岸の一つであるスリット式直立消波護岸は図-1に示すようにスリット壁及び遊水室を有していることから、直立構造でありながら、反射率を軽減するという特徴を有している。

一方で、地球温暖化に伴う将来の気候変動による海面上昇及び波浪の増大がIPCC第5次評価報告書によって予測されており、設計値を超える越波量を伴う波浪が来襲することが考えられる。また、近年では地球温暖化の影響によると思われる設計波高を超える高波や、設計周期より長い周期を持つうねり性波浪による護岸の越波被害が、国内において発生している。

その対策として、既設スリット式直立消波構造物の胸壁天端高の嵩上げや波返工の設置が考えられるが、遊水室幅及びスリット壁の開口率を改良することは非常に難しいと考えられる。このことから、対策を実施する場合には、遊水室及びスリット壁は改良せずに胸壁のみを嵩上げするなどして改良することが考えられる。改良に際しては胸壁の嵩上げだけでなく、波返工を設置することで、天端高を低くしてコストを低く抑えることも考えられる。スリット式直立消波構造物に波返工を設置した場合の越波低減効果及び波返工に作用する波力特性を木村ら(2002)<sup>1)</sup>が明らかにしているが、胸壁天端高 $h_c$ 及びスリット壁天端高 $h_{cs}$ の比が $h_c/h_{cs}=3.0$ のみを対象としている。一方で、スリット式直立消波護岸の改良においてスリット壁天端高 $h_{cs}$ を変化させずに胸壁天端高 $h_c$ を高天端に嵩上げする場合には、胸壁及びスリット壁の天端高比

$h_c/h_{cs}$ が変化する。胸壁が高天端の場合において、天端高比  $h_c/h_{cs}$ を変化させた場合の越波特性は明らかにされていない。また、波力特性については高橋(1997)<sup>2)</sup>が遊水室後壁(胸壁天端)を高くするときに発生する打ち込み波力が大きくなる可能性があることを指摘しているが、波圧分布等の波力の作用機構などは明らかにされていない。

そこで、越波対策としてスリット式直立消波護岸の胸壁のみを嵩上げしたとき、すなわち、胸壁及びスリット壁の天端高比  $h_c/h_{cs}$ を変化させたときの越波特性を明らかにするとともに波返工の効果を検証した。また、波返工付きの胸壁天端を高くするときに発生する打ち込み波力の波圧分布を明らかにしたので、報告するものである。

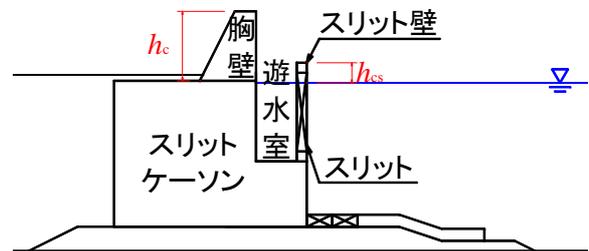


図-1 スリット式直立消波護岸の構造

## 2. 実験方法

### 2.1 実験条件

図-2に示す不規則波発生装置を備えた二次元造波水路（長さ22.0m、幅0.8m、深さ2.0m）を使用して、模型縮尺を1/35として実験を行った。以下、本報告における実験条件及び実験結果は全て現地スケールで表記する。想

定した現地条件は海底勾配 $i=1/50$ ，護岸設置水深 $h=14.9\text{m}$ である．潮位は $+1.8\text{m}$ 及び $+2.4\text{m}$ である．波浪は換算沖波高 $H'_0$ は $H'_0=4.0\text{m}, 5.0\text{m}$ 及び $6.0\text{m}$ の3種類とし，通常風波からうねり性波浪を想定して有義波周期 $T_{1/3}$ は $T_{1/3}=9.0\text{s}, 11.0\text{s}, 13.0$ 及び $15.0\text{s}$ の4種類とした．修正Bretschneider—光易型の周波数スペクトルを有する不規則波を用いた．**図-3**に示すように護岸のスリット壁天端高は $h_c=DL+3.8$ で固定し，胸壁天端高は実験項目により異なるが， $h_c=DL+5.6, +8.9\text{m}, +11.0\text{m}, 14.0\text{m}$ 及び $19.0\text{m}$ の5種類とした．それぞれの胸壁及びスリット壁の天端高比 $h_c/h_s$ は $1.9\sim 8.6$ である．波返工の形状は**図-4**に示すように幅は $b=1.5\text{m}, 3.0\text{m}$ 及び $5.0\text{m}$ ，垂直部の高さは $0.5\text{m}$ ，波返工の角度は $45^\circ$ とした．なお，実験項目毎に波浪条件や護岸天端高等の組合せが異なるため，越波実験条件を**表-1**，波力実験条件を**表-2**に示す．また，潮位 $+1.8\text{m}$ の場合の堤前の有義波高 $H_{1/3}$ を**表-3-1-1**，最大波高 $H_{\text{max}}$ を**表-3-1-2**，潮位 $+2.4\text{m}$ の場合の堤前の有義波高 $H_{1/3}$ を**表-3-2-1**，最大波高 $H_{\text{max}}$ を**表-3-2-2**に示す．

## 2.2 測定方法

### 2.2.1 越波流量の測定方法

実験では造波開始後に実験水路内での反射波が安定す



図-2 二次元造波水路の概要

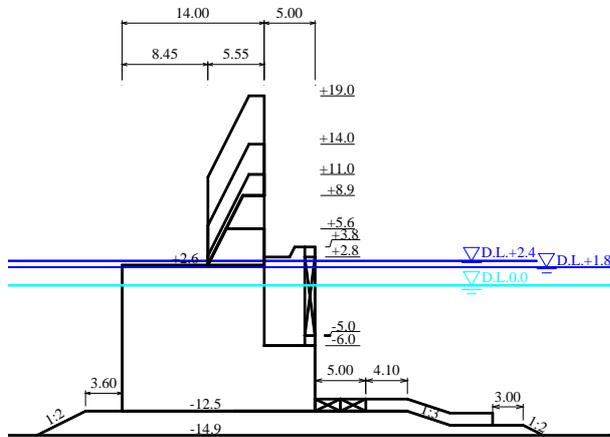


図-3 堤体断面図

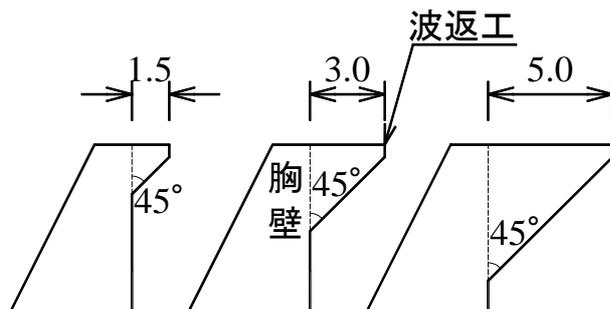


図-4 波返工の構造

るまでの1分間の待ち時間後に，約150波分の計測を行った．計測項目は越波流量及び波圧である．越波流量が $10^4\text{m}^3/\text{sec}$ 以上の場合には**図-5**に示すようにモルタルブロックの上に設置した越波柵内に容量式波高計を設置し，越波した水塊が樋を伝って越波柵内に落下するようにして，その際の水位変化を計測することで越波流量を求めた．計測した水位の時間変化から累計単位越波量の時系列変化を測定した．波高計のサンプリング周波数 $20\text{Hz}$ とした．なお，越波流量が $10^4\text{m}^3/\text{sec}$ 以下の場合には波高計を設置せずに越波柵内の水量を秤で計測することにより越波流量を求めた．これは，越波流量が $10^4\text{m}^3/\text{sec}$ 以下の場合には飛沫のみが越波し，波高計での越波柵内の水位変化を観測ができないためである．

### 2.2.2 波力の測定方法

波力実験での波圧計及び分力計の設置例を**図-6**に示す．スリットケーソン後壁には波圧計を3カ所，胸壁には約 $2.8\text{m}$ ピッチで3カ所，波返工には斜面部中央に1カ所設置した．また，分力計を胸壁下部に設置した．波力計測時のサンプリング周波数は波圧計，分力計ともに $200\text{Hz}$ とした．

表-1 越波実験条件

	現地(m)	実験(cm)
潮位	+1.8,+2.4	+5.1,+6.9
沖波波高 $H'_0$	4.0,5.0,6.0	11.4,14.3,17.1
有義波周期 $T_{1/3}$	9.0,11.0,13.0,15.0(s)	1.52,1.86,2.20,2.54(s)
水深 $h$	14.9	42.63
マウンド上水深 $d$	12.5	35.7
天端高 $h_c$	+8.9,+11.0,+14.0,+19.0	+25.4,+31.4,+40.0,+54.3
波返工幅 $b$	0.0,1.5,3.0,5.0	0.0,4.3,8.6,14.3
海底勾配 $i$	1/50	1/50

表-2 波力実験条件

	現地(m)	実験(cm)
潮位	+1.8	+5.1
沖波波高 $H'_0$	6.0	17.1
有義波周期 $T_{1/3}$	11.0(s)	1.86(s)
水深 $h$	14.9	42.63
マウンド上水深 $d$	12.5	35.7
天端高 $h_c$	+5.6,+14.0	+16.0,+40.0
波返工幅 $b$	0.0,1.5	0.0,4.3
海底勾配 $i$	1/50	1/50

表-3 堤前波高一覧

表-3-1-1 有義波高

		$H_{1/3}$ (潮位+1.8m)		
$T_{1/3} \setminus H'_0$		4.0m	5.0m	6.0m
9.0s		3.7m	4.6m	5.5m
11.0s		3.8m	4.7m	5.5m
13.0s		4.0m	4.9m	6.0m
15.0s		-	5.2m	6.3m

表-3-1-2 最大波高

		$H_{\text{max}}$ (潮位+1.8m)		
$T_{1/3} \setminus H'_0$		4.0m	5.0m	6.0m
9.0s		6.1m	7.8m	8.9m
11.0s		5.5m	6.9m	7.9m
13.0s		6.1m	7.4m	9.2m
15.0s		-	8.3m	9.9m

表-3-2-1 有義波高

		$H_{1/3}$ (潮位+2.4m)		
$T_{1/3} \setminus H'_0$		4.0m	5.0m	6.0m
9.0s		3.7m	4.6m	5.6m
11.0s		3.8m	4.7m	5.6m
13.0s		3.9m	4.9m	5.9m
15.0s		4.1m	5.2m	6.3m

表-3-2-2 最大波高

		$H_{\text{max}}$ (潮位+2.4m)		
$T_{1/3} \setminus H'_0$		4.0m	5.0m	6.0m
9.0s		6.1m	7.8m	9.5m
11.0s		5.3m	6.7m	8.2m
13.0s		6.0m	7.4m	9.0m
15.0s		6.4m	8.2m	10.1m

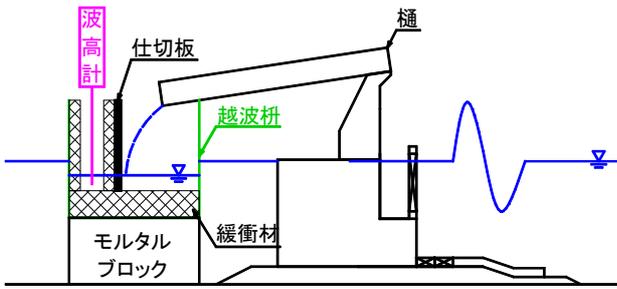


図-5 波高計による越波流量の測定方法

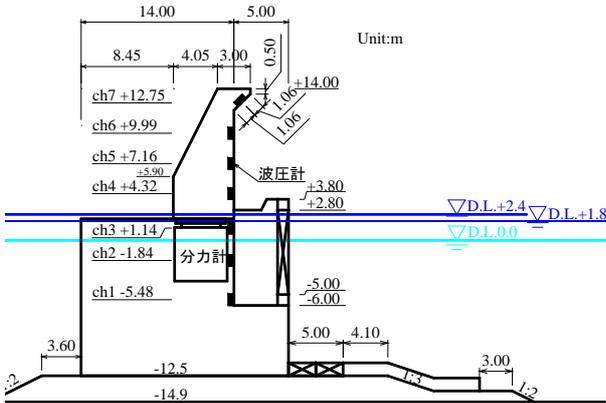


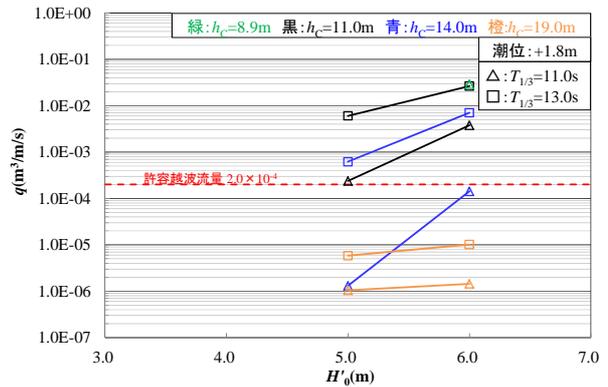
図-6 波圧計及び分力計の設置例

### 3. 越波実験結果

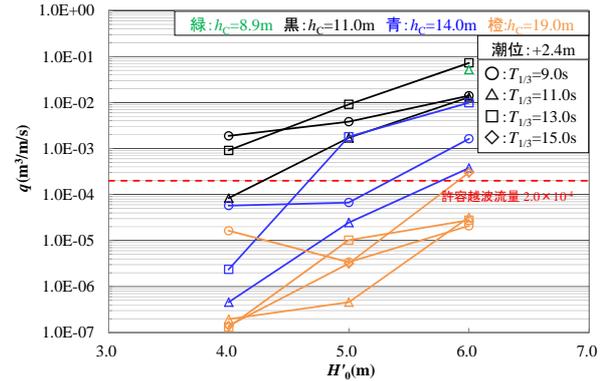
#### 3.1 越波流量に与える換算沖波波高 $H_0$ の影響

越波流量に与える換算沖波波高 $H_0$ の影響を潮位+1.8mの場合を図-7(a)、潮位+2.4mの場合を図-7(b)に示す。横軸が換算沖波波高 $H_0$ 、縦軸が越波流量 $q$ である。図中の緑のプロットが胸壁天端高 $h_c=+8.9m$ 、黒プロットが $h_c=+11.0m$ 、青プロットが $h_c=+14.0m$ 、オレンジプロットが $h_c=+19.0m$ である。スリット壁天端高 $h_s=+3.8m$ で固定している。○印が有義波周期 $T_{1/3}=9.0s$ 、△印が $T_{1/3}=11.0s$ 、□印が $T_{1/3}=13.0s$ 、◇印が $T_{1/3}=15.0s$ である。また、図中の赤点線は護岸背後が道路と仮定した場合の許容越波流量 $2.0 \times 10^{-4} m^3/m/sec$ を示す。なお、潮位+1.8mにおいては実験期間の制約上、 $H_0=4.0m$ の条件では実験を行わなかった。また、 $h_c=+8.9m$ の条件では $H_0=6.0m$ 、 $T_{1/3}=11.0s$ の条件のみ実施した。

潮位にかかわらず換算沖波波高 $H_0$ が高くなるほど越波流量 $q$ が増加した。なお、潮位+1.8m、 $h_c=+19.0m$ の条件においては、他の胸壁天端高と異なり、換算沖波波高 $H_0$ が高くなっても越波流量 $q$ がほとんど変わらない。これは写真-1に潮位+1.8m、換算沖波波高 $H_0=6.0m$ 、有義波周期 $T_{1/3}=11.0s$ の条件における胸壁天端高毎の越波状況を示すように、堤前最大波高 $H_{max}$ と比較して胸壁天端高 $h_c$ が十分に高く、飛沫のみの越波であったためと考えられる。胸壁天端高 $h_c$ が低く、水塊が越波する条件である胸壁天端高 $h_c=11.0m$ 、換算沖波波高 $H_0=6.0m$ 、有義波周期 $T_{1/3}=11.0s$ における累計越波量の時系列変化を図-8に示す。図-8より1波毎の越波流量の最大値は約 $0.2 m^3/m/sec$ で

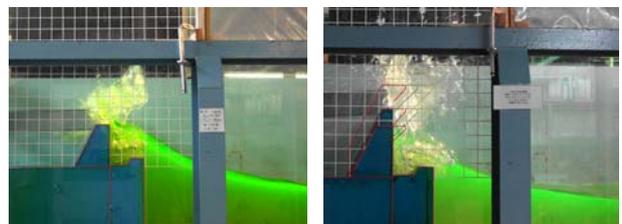


(a) 潮位+1.8m



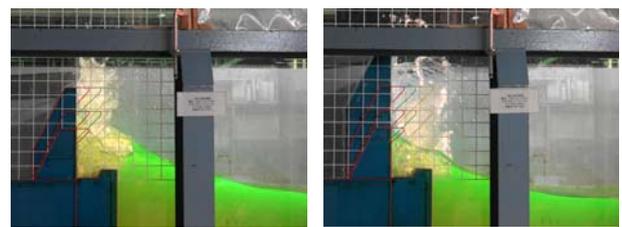
(b) 潮位+2.4m

図-7 換算沖波波高 $H_0$ と越波流量 $q$ の関係



(a)  $h_c=+8.9m$

(b)  $h_c=+11.0m$



(c)  $h_c=+14.0m$

(d)  $h_c=+19.0m$

写真-1 胸壁天端高 $h_c$ 毎の越波状況

(潮位+1.8m,  $H_0=6.0m$ ,  $T_{1/3}=11.0s$ )

あり、平均越波流量 $q=1.4 \times 10^{-2} m^3/m/sec$ の約14倍であった。このことは、水塊の越波が生じる条件の波浪が来襲する際には、1回の越波で平均越波流量を大きく上回る大量の海水が護岸内に流れ込むことを示唆している。なお、本実験における越波形態が飛沫から水塊の越波に変化する境界は堤前最大波高 $H_{max}$ との比である $h_c/H_{max}$ が約1.3(本研究では、胸壁天端高 $h_c$ が11.0m、換算沖波波高 $H_0=5.0m$ が $h_c/H_{max}=1.3$ に相当する)であり、この比よりも低くなる

と水塊が越波するが、この比よりも大きくなると飛沫が超えるのみであった。

図-9に胸壁及びスリット壁の天端高比 $h_c/h_{cs}$ と越波流量 $q$ の関係を示す。 $h_c/h_{cs}$ が大きくなるほど越波流量 $q$ が減少した。したがって、胸壁の嵩上げが越波対策として有効である。

### 3.2 越波流量に与える有義波周期 $T_{1/3}$ の影響

越波流量に与える有義波周期 $T_{1/3}$ の影響を潮位+1.8mの場合を図-10(a)、潮位+2.4mの場合を図-10(b)に示す。横軸が有義波周期 $T_{1/3}$ 、縦軸が越波流量 $q$ である。図中の緑のプロットが胸壁天端高 $h_c=+8.9m$ 、黒プロットが $h_c=+11.0m$ 、青プロットが $h_c=+14.0m$ 、オレンジプロットが $h_c=+19.0m$ である。スリット壁天端高 $h_{cs}=+3.8m$ で固定している。○印が換算沖波波高 $H_0=4.0m$ 、△印が $H_0=5.0m$ 、□印が $H_0=6.0m$ である。また、図中の赤点線は護岸背後が道路と仮定した場合の許容越波流量 $2.0 \times 10^4 m^3/m/sec$ を示す。

潮位にかかわらず有義波周期 $T_{1/3}$ が長くなるほど越波流量 $q$ が概ね増加傾向にあり、胸壁天端高 $h_c$ が高くなるほど越波流量 $q$ は減少した。特にうねり性波浪も対象とした $h_c=+19.0m$ 、 $H_0=6.0m$ 、 $T_{1/3}=15.0s$ の条件では、通常の風波を対象とした $T_{1/3}=9.0\sim 13.0s$ の越波流量と比較して約10倍に増加した。また、 $h_c=+19.0m$ 、 $H_0=4.0m$ の条件においては、換算沖波波高 $H_0$ と比較して胸壁天端高 $h_c$ が十分

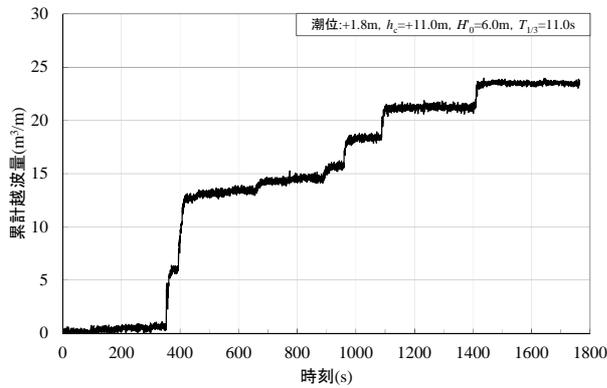


図-8 累計越波量の時系列変化

(潮位+1.8m,  $h_c=+11.0m$ ,  $H_0=6.0m$ ,  $T_{1/3}=11.0s$ )

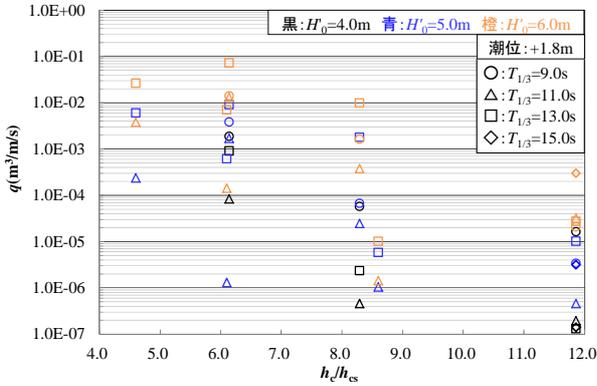


図-9 スリット壁及び胸壁天端高比 $h_c/h_{cs}$ と越波流量 $q$ の関係

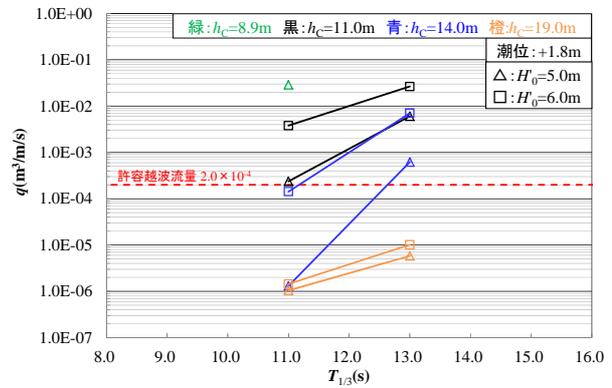
に高いため、越波流量 $q$ に対する有義波周期 $T_{1/3}$ の影響がほとんど見られなかった。

### 3.3 波返工による越波流量の低減効果

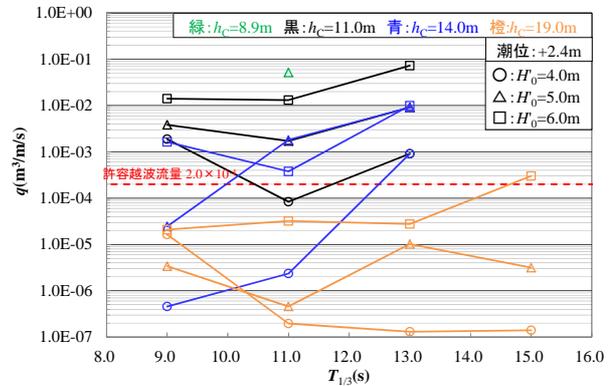
波返工による越波流量 $q$ の低減効果を明らかにするために、潮位+1.8m及び+2.4m、換算沖波波高 $H_0=6.0m$ 、有義波周期 $T_{1/3}=11.0s$ 、胸壁天端高 $h_c=+11.0m$ 及び+14.0mの条件において、波返工幅 $b$ を0.0m, 1.5m, 3.0m及び5.0mに変化させて実験を行った。

波返工による越波流量 $q$ の低減効果を図-11に示す。横軸が波返工幅 $b$ 、縦軸が越波流量 $q$ である。図中の黒プロットが潮位+1.8m、青プロットが潮位+2.4mである。○印が胸壁天端高 $h_c=11.0m$ 、△印が $h_c=14.0m$ である。また、図中の赤点線は護岸背後が道路と仮定した場合の許容越波流量 $2.0 \times 10^4 m^3/m/sec$ である。

$h_c=11.0m$ と $14.0m$ の波返工による越波流量 $q$ を比較すると、同じ波返工幅 $b$ での条件では $h_c=+11.0m$ の方が越波流量が多い。この要因は、写真-2(a)に示すように胸壁に衝突した後の波の先端部(以下、水脈と言う)の厚さが下方ほど厚く、胸壁天端高 $h_c$ が低い場合には波返工幅 $b$ を広くする必要があるためである。このことは、写真-2(a)に潮位+2.4m、波返工幅 $b=1.5m$ の条件における胸壁天端高 $h_c=+11.0m$ の波の作用状況を示すように、 $b=1.5m$ では水脈厚に対して波返工幅 $b$ が狭いため、十分に波を沖側に返せず水脈が鉛直に打ち上がり、その一部が護



(a) 潮位+1.8m



(b) 潮位+2.4m

図-9 換算沖波波高 $H_0$ と越波流量 $q$ の関係

岸内に流れ込む一方で、写真-2(b)に潮位+2.4m, 波返工幅 $b=1.5\text{m}$ の条件における胸壁天端高 $h_c=+14.0\text{m}$ の波の作用状況を示すように、この場合には同じ波返工幅 $b=1.5\text{m}$ でも水脈厚に対して波返工幅 $b$ が水脈厚に対して十分な幅を有することから、波を沖側に返していることから明らかである。

以上より、波返工幅 $b$ を設定する際には水脈厚が重要な要素であり、胸壁天端高 $h_c$ が高いほど波返工幅 $b$ を狭くできると言える。なお、本研究では実験的に波返工の効果を確認したにとどまるため、水脈厚及び所要波返工幅 $b$ の算定式の提案に至っていないことから、波返工幅 $b$ は水理模型実験により設定することが望ましいと考える。

波返工を設置した際の越波流量 $q$ に対する有義波周期 $T_{1/3}$ の影響を図-12に示す。波返工を設置しない場合を示した図-9と同様に $T_{1/3}$ が長くなるほど越波流量 $q$ が多くなり、うねり性波浪を対象とした $T_{1/3}=15.0\text{s}$ の条件では、通常の風波を対象とした $T_{1/3}=9.0\text{s}$ の越波流量と比較して10倍に増加したことが明らかとなった。したがって、うねり性波浪の影響を考慮する必要がある。

#### 4. 波力実験結果

胸壁天端高を変化させたときに作用する波力を明らかにするために、潮位+1.8m, 換算沖波波高 $H_0=6.0\text{m}$ , 有義波周期 $T_{1/3}=11.0\text{s}$ , 胸壁天端高 $h_c=5.6\text{m}$ 及び $14.0\text{m}$ の条件

において波圧実験を行った。なお、 $h_c=14.0\text{m}$ の条件では幅 $1.5\text{m}$ の波返工を設置した

#### 4.1 波圧の時系列変化

潮位+1.8m, 換算沖波波高 $H_0=6.0\text{m}$ , 有義波周期 $T_{1/3}=11.0\text{s}$ , 胸壁天端高 $h_c=+5.6\text{m}$ 及び $+14.0\text{m}$ の条件において胸壁に作用する合成波力が最大となる瞬間の波の作用状況を写真-3に示す。

写真-3に示すように、堤体に入射した波は最初にスリット壁に衝突して碎波が生じる。その後、 $h_c=+5.6\text{m}$ では越波するが $h_c=+14.0\text{m}$ では越波せずに胸壁中央部に打ち込む。この瞬間において、胸壁に作用する合成波力は最大となる。このタイミングにおける分力計により計測した水平波力の時系列変化を図-13に示す。水平波力の時系列変化、すなわち、波力波形に着目すると、波形の立ち上がりが急であり、振動しながら減衰していることから、Wagner型波形とBagnold型波形の両方が現れている。写真-3を再度見ると、防波護岸に波が入射する際にスリット壁に波が衝突して、波の一部が碎波して胸壁に衝突する。このとき、波頭の波面は空気を巻き込まず、かつ、波面と胸壁壁面のなす角が小さいことから、波力は急に立ち上がる(Wagner型)。次に波頭と遊水室内の水面に挟まれている空気層が遊水室内の水面の上昇により圧縮されたことから、波力は振動しながら減衰する(Bagnold型)。この水平波力の波力波形の形態は衝撃碎波力の発生機構について研究を行った光易(1965)<sup>3)</sup>と同様の

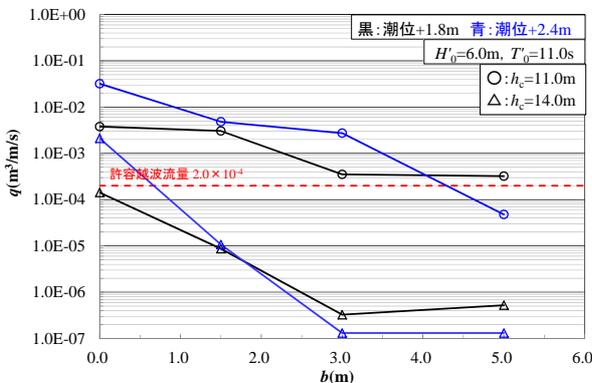


図-11 波返工幅 $b$ と越波流量の関係  
(潮位+1.8m,  $h_c=+11.0\text{m}$ ,  $H_0=6.0\text{m}$ ,  $T_{1/3}=11.0\text{s}$ )

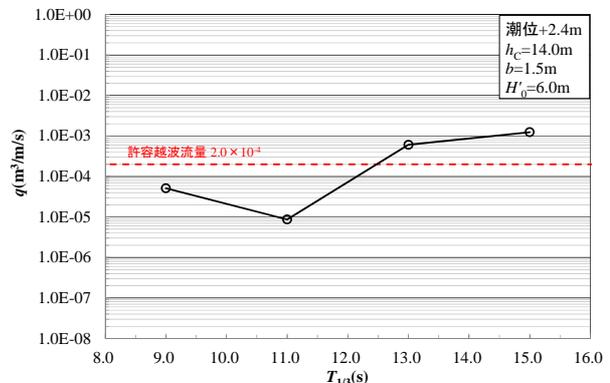


図-12 有義波周期 $T_{1/3}$ と越波流量の関係  
(潮位+2.4m,  $H_0=6.0\text{m}$ ,  $h_c=+11.0\text{m}$ ,  $b=1.5\text{m}$ )

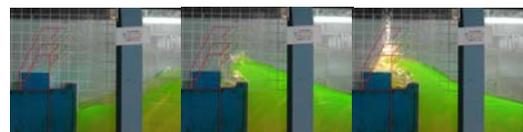


(a)  $h_c=+11.0\text{m}$



(b)  $h_c=+14.0\text{m}$

写真-2 波返工設置時における波の作用状況  
(潮位+2.4m,  $H_0=6.0\text{m}$ ,  $T_{1/3}=11.0\text{s}$ ,  $b=1.5\text{m}$ )



(a)  $h_c=+5.6\text{m}$



(b)  $h_c=+14.0\text{m}$

写真-3 波力測定時における波の作用状況  
(潮位+1.8m,  $H_0=6.0\text{m}$ ,  $T_{1/3}=11.0\text{s}$ ,  $h_c=+14.0\text{m}$ ,  $b=1.5\text{m}$ )

挙動を示していることを確認した。

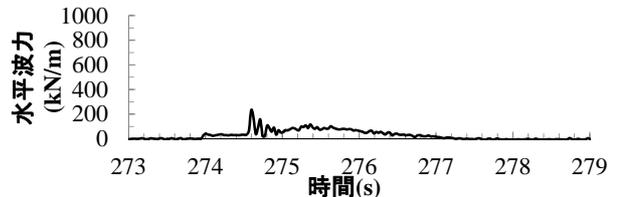
#### 4.2 波圧分布

胸壁に作用する合成波力が最大となる瞬間の波圧分布を図-14に示す。横軸が波圧、縦軸が波圧計の高さを示す。また、図中の黒線は高橋ら(1991)<sup>4</sup>が提案したスリットケーソンの波圧算定式による計算値、青点線は静水面を示す。なお、波圧計で計測した値は分力計で計測した値よりも大きかったこと及び高橋ら(1991)は分力計を用いた実験結果から算定式を提案していることから、各chの波圧の実験値は分力計を用いた実験結果により補正した。胸壁天端高  $h_c=+5.6\text{m}$  ( $h_c/h_{cs}=1.9$ ,  $h_c/H_{1/3}=0.7$ ,  $h_{cs}/H_{1/3}=0.18$ ) の場合は計算値とほぼ一致するが、 $h_c=+14.0\text{m}$  ( $h_c/h_{cs}=5.0$ ,  $h_c/H_{1/3}=2.2$ ,  $h_{cs}/H_{1/3}=0.18$ ) の場合はch1~5の波圧の実験値は計算値を上回っており、特に波の衝突箇所であるch5では実験値は計算値の2.8倍となった。これは、高橋ら(1991)の実験条件が  $h_c/h_{cs}=0\sim 1.75$ ,  $h_c/H_{1/3}=0.2\sim 2.2$ ,  $h_{cs}/H_{1/3}=0.0\sim 1.6$  に対して本研究においては  $h_c/h_{cs}=5.0$ ,  $h_c/H_{1/3}=2.2$ ,  $h_{cs}/H_{1/3}=0.18$  であり、 $h_c/H_{1/3}$  は高橋ら(1991)の実験条件範囲内であるが、 $h_{cs}/H_{1/3}$  が小さく、 $h_c/h_{cs}$  が大きいことが要因であると考えられる。すなわち、 $h_c/h_{cs}=1.9$ ,  $h_c/H_{1/3}=0.7$ ,  $h_{cs}/H_{1/3}=0.18$  までは前節で述べたようなスリット壁に波が衝突して砕波が生じて、越波が生じて波が胸壁に衝撃的に衝突することはない。しかし、 $h_c/h_{cs}$  が1.9より大きく、 $h_c/H_{1/3}$  が2.2よりも大きくなる、言い換えると、スリット壁天端高  $h_{cs}$  に対して胸壁天端高  $h_c$  が高く、かつ、高天端であると、スリット壁において砕波した波が越波せずに胸壁に衝撃的に衝突すること及び越波が生じないことにより波のエネルギーの逃げ場がなくなり、波圧が大きくなる考えられる。なお、 $h_c/h_{cs}=5.0$  の場合においてch6及びch7では波圧がほとんど  $0\text{kN/m}^2$  である。これは、両者が波の衝突範囲から外れているためである。したがって、スリット式直立消波護岸の胸壁を嵩上げ改良する際に高天端の場合において、 $h_c/h_{cs}$  が1.9より大きくなることによって上記のような現象が生じ、高橋ら(1991)が提案した算定式による計算値と比較して、非常に大きな波力が作用する。したがって、高天端かつ  $h_c/h_{cs}>1.9$  の条件では水理模型実験により、波力を確認する必要がある。

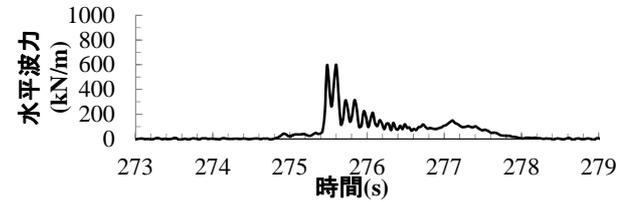
#### 5. まとめ

本研究における主要な結論は以下の通りである。

- 1) 設計波の見直しによるスリット式直立消波護岸の越波対策として胸壁の嵩上げ及び波返工の設置が有効である。なお、波返工幅  $b$  は水脈厚により決まる。水脈厚の算定式の提案まで至っていないため、波返工幅  $b$  の設計に当たっては水理模型実験を行う必要がある。
- 2) 波返工の有無に関わらず、うねり性波浪来襲時の越波流量は風波による波浪の場合の約10倍であるため、



(a)  $h_c=+5.6\text{m}$



(b)  $h_c=+14.0\text{m}$

図-13 水平波力の時系列変化  
(潮位+1.8m,  $H_0=6.0\text{m}$ ,  $T_{1/3}=11.0\text{s}$ )

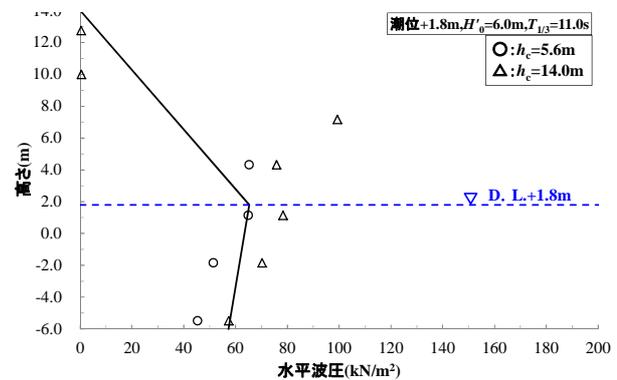


図-14 水平波力の時系列変化  
(潮位+1.8m,  $H_0=6.0\text{m}$ ,  $T_{1/3}=11.0\text{s}$ )

うねり性波浪の影響を考慮する必要がある。

- 3) 高天端の条件で天端高比  $h_c/h_{cs}=5.0$  の場合には、胸壁に打ち込み波力が作用し、水平波力は高橋ら(1991)が提案した算定手法による計算値の2.8倍となることから、高天端、かつ、 $h_c/h_{cs}>1.9$  の条件では水理模型実験により、波力を確認する必要がある。

本研究では、胸壁天端高  $h_c$  のみを変化させたため、今後はスリット天端高  $h_{cs}$  も変化させた場合も検討することで、スリット式直立消波護岸のスリット壁の嵩上げが越波及び波力の低減に寄与するかを明らかにしたい。

#### 参考文献

- 1) 木村克俊, 浜口正志, 山本泰司, 前田宗文, 三船修司: 跳区立消波ケーソン式護岸における越波飛沫打ち上げ特性とその対策に関する検討, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.646-650, 2002
- 2) 高橋重雄: 新構造防波堤とその設計, 水工学に関する夏期研修会講義集, 第33回, pp. B-5-1-20, 1997
- 3) 光易 恒: 砕波による衝撃的波圧(1), 海岸工学講演会講演集, 第12巻, pp.106-113, 1965
- 4) 高橋重雄, 下迫健一郎, 佐々木均: 直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第4号, pp.3-34, 1991