

# スリット消波構造を有するフレア型護岸の波圧 と防波特性について

HYDRAULIC CHARACTERS OF THE FLARING SHAPED SEAWALL WITH  
SLIT TYPE WAVE ABSORBING WORKS

村上啓介<sup>1</sup>・清水健太<sup>2</sup>・小川寿樹<sup>2</sup>・坂本晃久<sup>2</sup>・上久保祐志<sup>3</sup>・片岡保人<sup>4</sup>

Keisuke MURAKAMI, Kenta SHIMIZU, Hisaki OGAWA, Akihisa SAKAMOTO,

Yuji KAMIKUBO and Yasuto KATAOKA

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 宮崎大学 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

<sup>2</sup>学生員 宮崎大学 大学院工学研究科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

<sup>3</sup>正会員 博士(工学) 八代工業高等専門学校 土木建築工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

<sup>4</sup>正会員 博士(工学) (株) 神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)

Hydraulic characters of a Flaring Shaped Seawall (FSS) with a slit type wave absorbing structure installed on a mound are investigated through experiments with a two-dimensional wave tank. A row of circular columns is arranged in front of the seawall in order to reduce breaking wave pressure without disturbing an excellent checking effect of a wave overtopping. A critical wave height, which is defined as a maximum wave height on which no wave overtopping occurs at all, was measured on different incident wave conditions as well as mound shapes. The wave pressure distributions on the seawall, the wave reflection coefficient, and wave-overtopping rate were also measured. The reduction effect of the breaking wave pressure by the slit type wave absorbing structure is discussed under various incident wave conditions. And then, influences of the slit type wave absorbing on the wave reflection coefficient and wave-overtopping rate are also discussed in this study.

**Key Words :** *Flaring Shaped Seawall, wave absorbing works, breaking wave pressure, wave reflection, wave-overtopping rate*

## 1. はじめに

深い円弧状の断面を持つフレア型護岸は、護岸曲面部での強い波返し効果によって高い越波阻止機能を発揮する<sup>1)</sup>。筆者らは、フレア型護岸の越波阻止機能や作用波圧の特性を検討するとともに、耐波安定性に優れた護岸断面への改良を進めてきた<sup>2)</sup>。また、護岸設置水深や海底地形の条件によっては基礎マウンドが必要となる場合があり、フレア型護岸の越波阻止機能や耐波安定性に対するマウンド諸元(マウンド高、設置水深、マウンド肩幅など)の影響について検討してきた<sup>3)</sup>。基礎マウンド上にフレア型護岸を設置する場合、来襲する波がマウンド肩先で大きく前傾して護岸直前で碎波する条件では、フレア型護岸の断面が深い円弧形状であることから非常に大きな衝撃波圧が発生し易く、その低減策を講じることが課題となる。

衝撃波圧の低減対策としては、護岸前面に消波構造を適用することが考えられる。片岡ら<sup>4)</sup>は、フレア型護岸の越波阻止機能を損なわずに衝撃波圧を低減する目的で、フレア型護岸のふところ内にスリット状の柱列を設け、かつ護岸沖側の少し離れた位置に消波ブロックを静水面高さまで積層する形式を提案している。この形式の消波工によって衝撃波圧は許容可能な程度までに低減されたが、マウンドを有するフレア型護岸の場合には、護岸沖側の少し離れた位置に消波ブロックを設置することが困難な場合がある。また、低天端に積層された消波ブロックの飛散による堤体破損や断面の複雑化による建設コストの上昇等も危惧されることから、マウンド上に設置可能で比較的単純な構造形式の消波工の適用が必要と考えられる。

本研究では、消波型高基混成堤に適用事例がある円筒型前面スリット壁<sup>5) 6) 7)</sup>を、フレア型護岸前面の消波

構造として適用することを考え、スリット型の消波工による衝撃波圧の低減効果を検討する。また、円筒型前面スリット壁を設置することによるフレア型護岸の防波特性の変化について、越波阻止機能、護岸反射率、および越波量特性の観点から検討する。

## 2. 実験の方法

### (1) 実験装置の概略

反射吸収式の2次元造波水路（長さ15m×高さ0.6m×幅0.4m）を用いて実験をおこなった。図-1に示すように、水路の沖側水深を $h_0=45\text{cm}$ とし、水路の他端には海底勾配が1/20の不透過傾斜面を設け、斜面上にマウンドを有するフレア型護岸を設置した。

模型縮尺は1/30程度を想定し、上久保<sup>2)</sup>が提案した護岸曲面形状を参考に、フレア型護岸の高さ $B$ は11.5cm、奥行き深さ $D$ は5.5cmとした。マウンド天端の肩先部には円筒型スリット壁を設置した。円筒の直径と設置間隔は消波型高基混成堤の事例を参考に、図-2に示すように模型寸法で直径が4.8cmの柱体を5列配置した。

マウンド高さは、設置水深が比較的浅い場合を想定した $h_M=5\text{cm}$ のケースと、設置水深が深い場合を想定した $h_M=10\text{cm}$ のケースの2通りとした。マウンドの法先水深は、マウンド上にフレア型護岸を設置した時に静水面が護岸円弧の最奥部に一致する（フレア型護岸の護岸天端高さが $h_c=6\text{cm}$ 、護岸前面水深が $d=5.5\text{cm}$ となる）ように $h=10.5\text{cm}$ と $15.5\text{cm}$ の2通りである。マウンド肩幅は、作用波圧および護岸反射率の計測では $W_M=5, 10, 15\text{cm}$ の3通りとし、越波流量の計測では $W_M=7.5, 15\text{cm}$ の2通りを設定した。

### (2) 実験ケースと水理諸量の計測

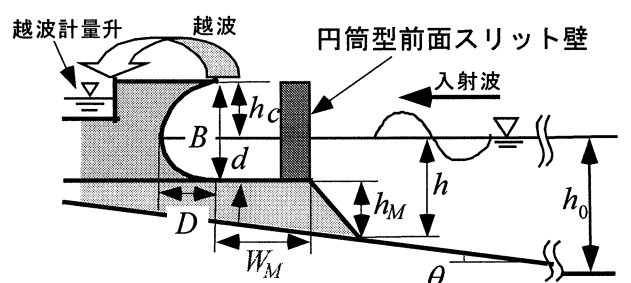


図-1 実験模型の概略

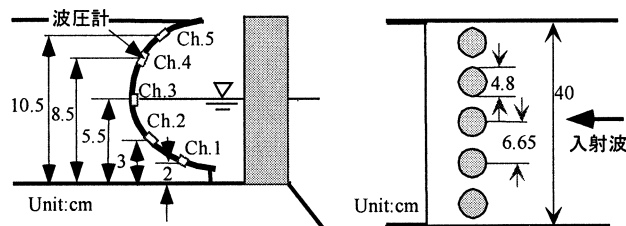


図-2 波圧計取付位置と円筒型スリット壁の諸元

フレア型護岸は、同程度の護岸天端高さを有する直立消波護岸に比べて越波が生じ難い護岸形式である。そこで、入射波周期が $T=1.0\sim 2.0$ 秒の範囲で規則波を造波し、前述した各実験条件について護岸上で越波が生じない最大の入射波高（ $H_c$ ：以下、越波限界波高と呼ぶ）を測定した。波周期は上記の範囲について0.2秒間隔で変え、越波の有無は目視で判断した。

次に、受圧面の直径が1cmの波圧計を図-2に示す5個所に埋め込み、越波限界波高の規則波が護岸に作用する際の波圧分布を測定した。波圧信号はサンプリング周波数500Hzでデータレコーダに記録し、10波程度の波圧波形のピーク値を平均して計測点での波圧とした。また、越波限界波高の波が護岸に作用する際の護岸反射率を分離推定法によって測定した。さらに、入射波高を越波限界波高から約1cmづつ大きくして越波流量を計測した。越波流量は、護岸を越流する数波分の水量を護岸背後に設けた越波計量升到集水して計測した。

## 3. 円筒型前面スリット壁を有するフレア型護岸の防波性能と作用波圧について

### (1) 限界天端高さの特性

フレア型護岸前面に円筒型スリット壁を設置することによる防波性能の変化を把握する目的で、円筒型前面スリット壁の設置の有無による限界天端高さの相違を検討した。ここで、限界天端高さは、護岸上で越波が生じない最大の入射波高 $H_c$ （越波限界波高）に対する護岸天端高さ $h_c$ の相対的な比として定義している。

図-3は、肩幅が $W_M=5\text{cm}$ のマウンド上に設置したフレア型護岸の限界天端高さ $h_c/H_c$ の特性を、マウンド法先での波長 $L_h$ による入射波の波形勾配 $H_c/L_h$ に対して示したものである。また、図-4と図-5は、マウンド肩幅が $W_M=10\text{cm}$ と $15\text{cm}$ の場合について同様に示したものである。図中の各プロットは、円筒型前面スリット壁の設置の有無とともに、護岸設置水深の違い（マウンド高さが $h_M=5\text{cm}$ と $10\text{cm}$ の場合）を表している。

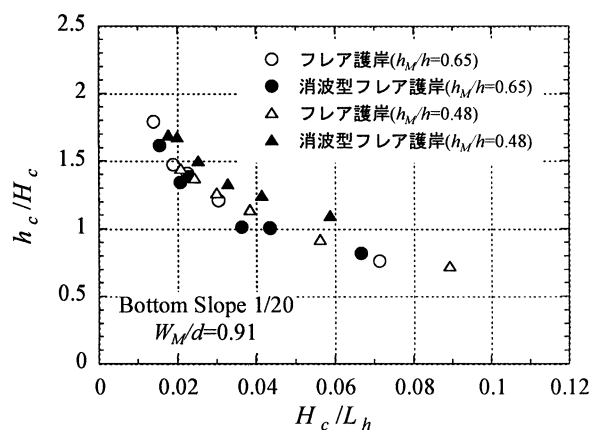


図-3 円筒型前面スリット壁を有するフレア型護岸の限界天端高さ（ $W_M/d=0.91$ ）

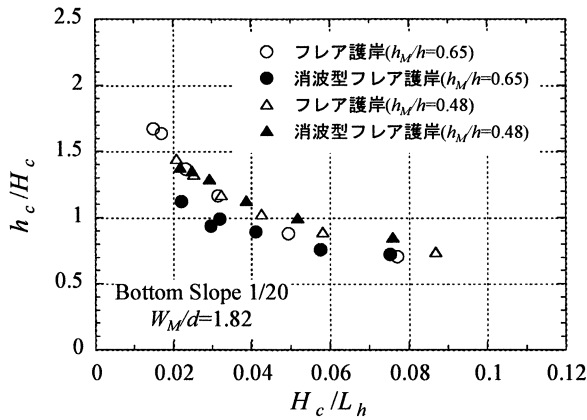


図-4 円筒型前面スリット壁を有するフレア型護岸の限界天端高さ ( $W_M/d=1.82$ )

フレア型護岸の限界天端高さは、図-3に示すように入射波の波形勾配に依存し、波形勾配の増加に伴い低減する特性を示す<sup>3)</sup>。この特性は、円筒型前面スリット壁を設置した場合も同様である。

図-3において、護岸設置水深が深い場合を想定した  $h_M=10\text{cm}$  のケースでは、円筒型前面スリット壁の設置の有無によらず護岸前面では重複波的な波運動が見られた。このような運動は、マウンド肩幅が広い図-4や図-5に示す条件になると、引き波時にマウンド肩先のやや沖側で波面を巻き込んでマウンド上面に打ち込むような運動へと変化するが、スリット壁前面での顕著な波の打上げ現象は見られず、護岸前面での流況は円筒型前面スリット壁を設置しない場合と類似したものであった。

一方、護岸設置水深が浅い場合を想定した  $h_M=5\text{cm}$  では、波はマウンド肩先で波面を大きく前傾させてマウンド上を伝播する運動を呈し、この流況はマウンド肩幅が広くなると波頭に碎波を伴った運動へと変化する。今回の実験で用いた円筒型前面スリット壁の諸元においては、 $h_M=10\text{cm}$  の場合と同様にスリット壁前面での顕著な波の打上げ現象は見られず、護岸前面での流況は円筒型前面スリット壁を設置しない場合と類似したものであった。そのため、図-3, 4, 5に示すように、円筒型前面スリット壁の設置による限界天端高さの相違は非常に小

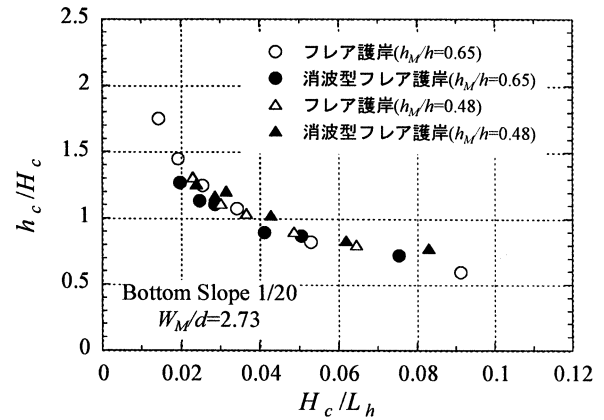


図-5 円筒型前面スリット壁を有するフレア型護岸の限界天端高さ ( $W_M/d=2.73$ )

さいく、円筒型スリット壁はフレア型護岸の波返し機能を損なわない構造であることが確認できる。

## (2) 作用波圧の特性

フレア型護岸の断面が深い円弧形状であるので、マウンド肩先で波面を大きく前傾させて波が護岸に直接作用する条件では衝撃波圧が発生しやすい<sup>3)</sup>。衝撃波圧の発生は、護岸設置水深が浅い場合を想定した  $h_M=5\text{cm}$  のケースに多く見られ、マウンド肩幅が広くなるに従い波圧値の増大は顕著になる。そこで、護岸前面に円筒型スリット壁を設置することによる波圧の低減効果を検討した。

図-6は、高さが  $h_M=5\text{cm}$  で肩幅が  $W_M=10\text{cm}$  のマウンド上に設置したフレア型護岸に越波限界波高の規則波が作用した際の波圧分布を入射波の波高相当の静水圧で無次元化した値 ( $P/\rho g H_c$ ) で示したもので、Z軸は静水面を原点として鉛直上向きを正としている。各図は入射波の周期がそれぞれ異なる場合に相当し、図中のプロットは円筒型前面スリット壁の設置による作用波圧の変化を示している。

図-6において、円筒型前面スリット壁を設置しない場合にはマウンド肩先で波面を大きく前傾させた波がフレア型護岸に直接作用するため、護岸面と波面との成

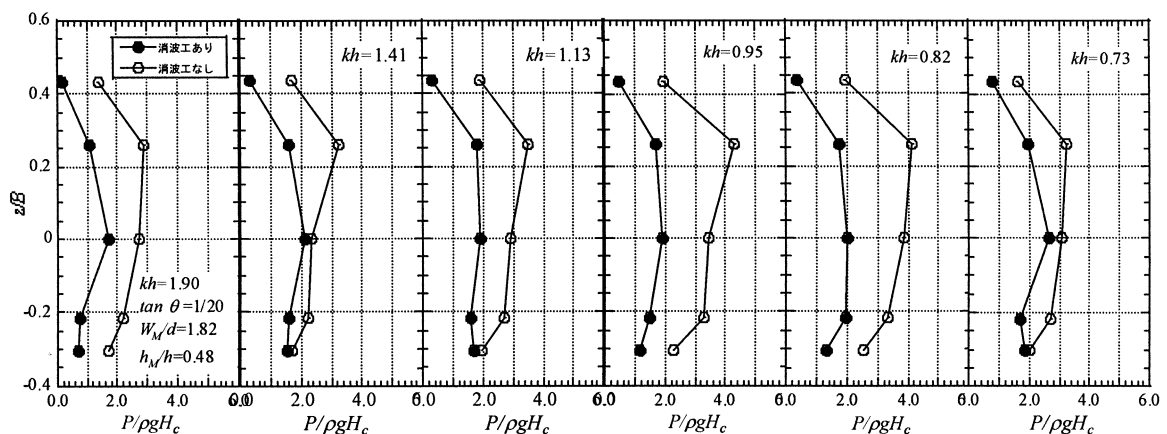


図-6 円筒型前面スリット壁による作用波圧の低減特性 ( $W_M/d=1.82, h_M/h=0.48$ )

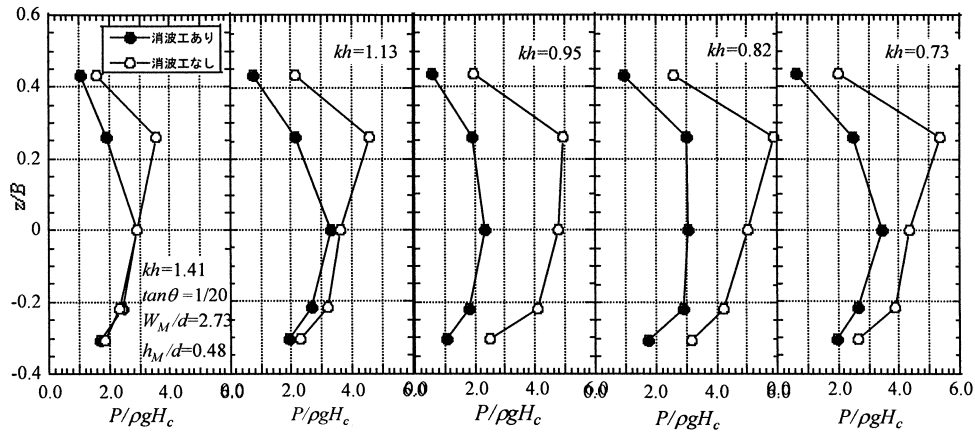


図-7 円筒型前面スリット壁による作用波圧の低減特性 ( $W_M/d=2.73$ ,  $h_M/h=0.48$ )

す角度が非常に小さくなり衝撃波圧特有の時間波形を呈して作用波圧は増大する。この場合、波圧分布の最大値は静水面 ( $z/B=0$ ) と護岸天端の中間付近で生じる特徴がある。一方、円筒型スリット壁を護岸前面に設置した場合は、入射波周期によらず各測点の波圧値は低減される傾向にある。また、スリット壁によって波頭部の水塊が持つ運動量が減じられ、静水面と護岸天端の中間付近で生じる波圧分布の最大値が効果的に低減されている。

このような波圧の低減効果は、マウンド肩幅が広くなるとより明確になる。図-7は、高さが  $h_M=5\text{cm}$  で肩幅が  $W_M=15\text{cm}$  のマウンド上にフレア型護岸を設置した場合の波圧分布を示したものである。図-6と同様に、円筒型スリット壁を護岸前面に設置することによって作用波圧は効果的に低減されている。マウンド肩幅が広い場合には、波圧分布の最大値は入射波の周期によって大きく変動するが、円筒型前面スリット壁を設置することにより、図-6と同様に波圧分布特性が変化するとともに、波圧分布の最大値は入射波高相当の静水压の2~3倍程度に低減され、入射波の周期に対する最大波圧値の変動も小さくなっている。

円筒型前面スリット壁の設置による波圧分布特性の変化は、フレア型護岸の耐波安定性の確保に寄与するものと考えられる。すなわち、フレア型護岸が深い円弧状の断面を有することから、静水面 ( $z/B=0$ ) よりも上部で生じる波圧は揚圧力として作用するが、波圧分布特性が図-6, 7に示したように変化することによって、揚圧力成分が軽減され護岸接地圧の確保が期待される。

### (3) 護岸反射率の特性

マウンドを有するフレア型護岸の反射率は直立消波構造物の反射率と同程度であることを確認している<sup>3)</sup>。ここでは、円筒型前面スリット壁の設置による護岸反射率の特性変化を検討する。

図-8は、肩幅が  $W_M=5\text{cm}$  のマウンド上に設置したフレア型護岸の反射率  $K_r$  の特性を、マウンド法先での波長  $L_h$  による波形勾配  $H_c/L_h$  に対して示したものである。また、図-9と図-10は、マウンド肩幅が  $W_M=10\text{cm}$  と  $15\text{cm}$  の場合について同様に示したものである。図中の

プロットは、円筒型前面スリット壁の設置の有無とともに、護岸設置水深の違いを (マウンド高さが  $h_M=5\text{cm}$  と  $10\text{cm}$  の場合) を表している。

図-8に見られるように、フレア型護岸の反射率は入射波の波形勾配に依存し、波形勾配の増加に伴い護岸反射率は低減する特性を示す<sup>3)</sup>。この特性は、円筒型前面スリット壁を設置した場合についても同様である。

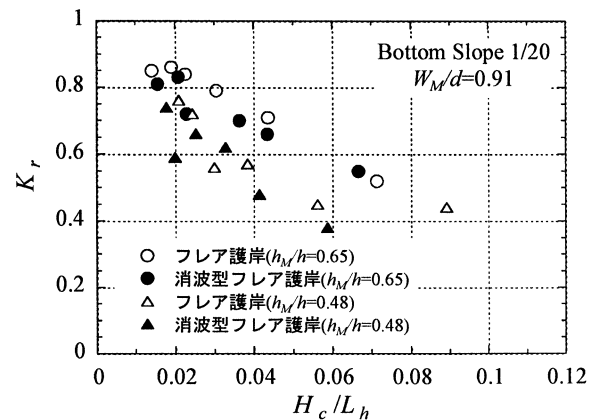


図-8 円筒型前面スリット壁を有するフレア型護岸の反射率 ( $W_M/d=0.91$ )

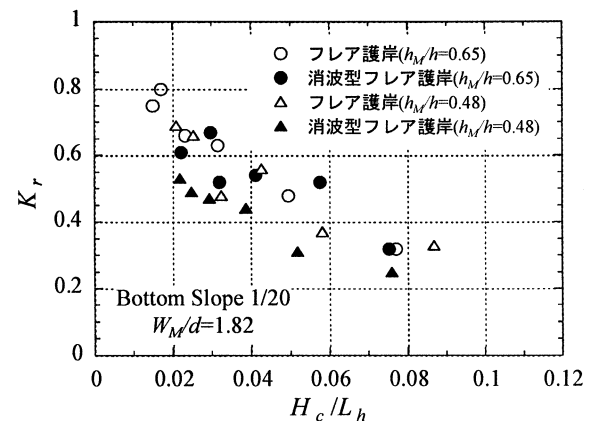


図-9 円筒型前面スリット壁を有するフレア型護岸の反射率 ( $W_M/d=1.82$ )

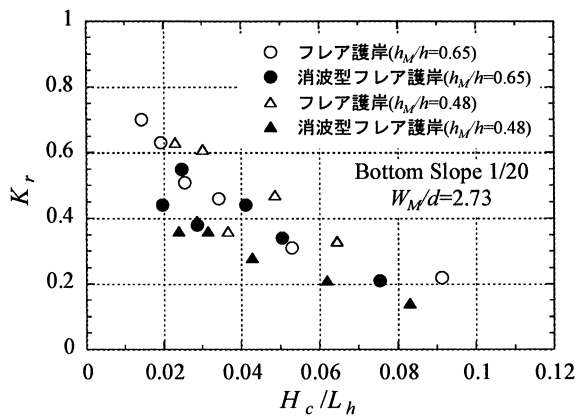


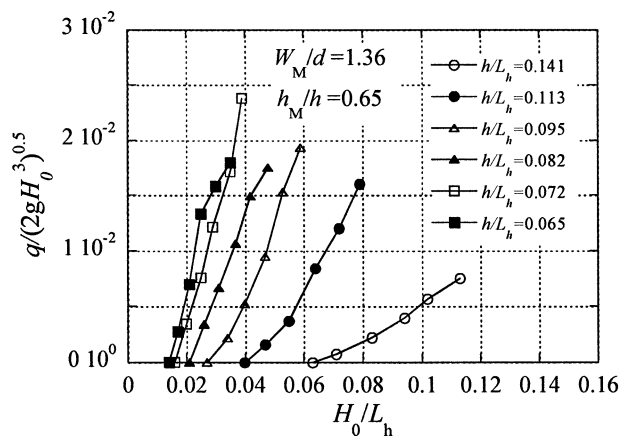
図-10 円筒型前面スリット壁を有するフレア型護岸の反射率 ( $W_M/d=2.73$ )

マウンドの肩幅が最も狭い図-8では、設置水深が深い  $h_M=10\text{cm}$  の場合、円筒型前面スリット壁の設置の有無によらず護岸前面では重複波的な波運動が見られた。一方、設置水深が浅い場合を想定した  $h_M=5\text{cm}$  のケースでは、波はマウンド肩先で波面を前傾させてマウンド上を伝播する運動を呈していた。このような波運動の違い

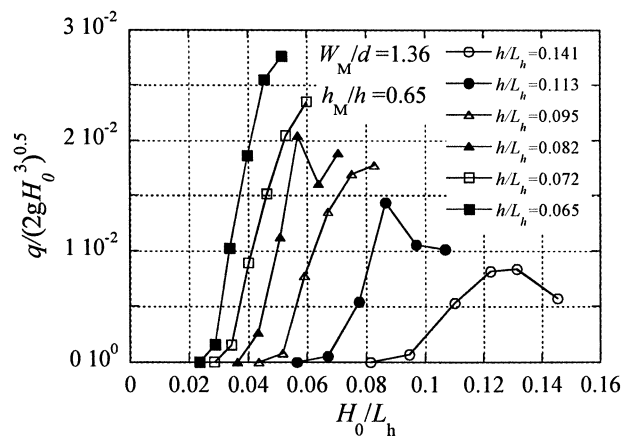
によるマウンド周辺での乱れや海底摩擦の効果の影響により、設置水深が浅い場合を想定した  $h_M=5\text{cm}$  のケースの反射率は  $h_M=10\text{cm}$  の場合に比べて低くなったと考えられる。また、円筒型前面スリット壁の設置による護岸前面での流況は、波形勾配が小さい範囲では類似しており反射率に明確な違いは見られないが、波形勾配が大きくなるに従い反射率が若干低くなる傾向が見られる。

マウンド肩幅が広い図-9や図-10に示す条件になると、設置水深が深い  $h_M=10\text{cm}$  の場合においてもマウンド肩先で碎波が生じる流況へと変化するが、スリット壁前面での顕著な波の打上げ現象は見られず、護岸前面での流況は円筒型スリット壁を設置しない場合と類似したものであった。そのため、マウンド肩幅が広くなるに従い、円筒型前面スリット壁の設置の有無によらず護岸反射率は相対的に低減する傾向が見られるが、スリット壁の設置による反射率の低減は明確ではない。

一方、護岸設置水深が浅い場合を想定した  $h_M=5\text{cm}$  では、マウンド肩幅が広くなるに従い波形勾配が小さい範囲においても波頭が碎波した状況でマウンド上を波が伝播するようになる。そのため、入射波の波形勾配の広い範囲において円筒型前面スリット壁を設置することに

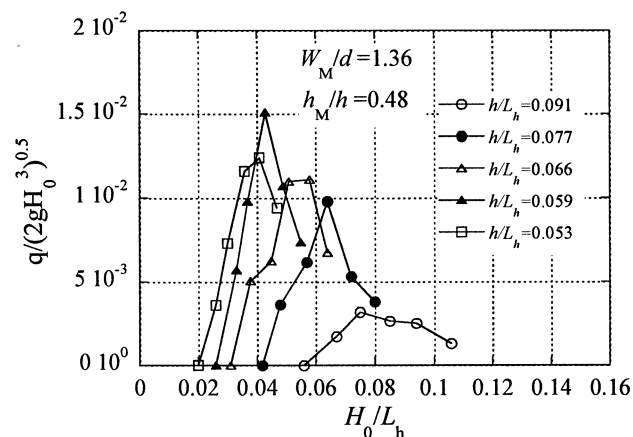


(a) 円筒型前面スリット壁なし

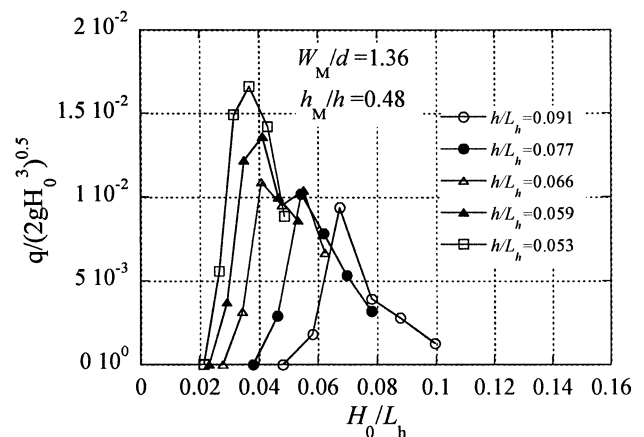


(b) 円筒型前面スリット壁あり

図-11 フレア型護岸の越波流量特性 ( $h_M/h=0.65$ )



(a) 円筒型前面スリット壁なし



(b) 円筒型前面スリット壁あり

図-12 フレア型護岸の越波流量特性 ( $h_M/h=0.48$ )

より護岸反射率が若干低減する傾向が見られる。

#### (4) 越波流量特性

図-11は、高さが $h_M=10\text{cm}$ で肩幅が $W_M=7.5\text{cm}$ のマウンド上に設置したフレア型護岸の越波流量特性を示したもので、図中の各プロットは入射波周期の違いを表している。越波流量は、入射波高 $H_0$ を越波限界波高から約 $1\text{cm}$ づつ5段階大きくして計測している。

図-11(a)に示すように、円筒型前面スリット壁がない場合の越波流量は、波高の増大に伴い単調に増加する傾向を示し、増加の割合は長周期の波ほど大きい。一方、図-11(b)に示すスリット壁を設置した場合は、越波流量の増加傾向は(a)の場合と類似しているが、波高の増加に伴い越波流量が減少傾向に転じる場合が見られる。これは、前面スリット壁の設置によって護岸の反射特性が若干変化し、波高の増大に伴いマウンド肩先付近で砕波が発生し始め、砕波による波高減衰効果によって越波流量が減少したものと考えられる。図-11(a)、(b)の比較より、入射波の周期によって若干のばらつきは見られるが、両者の越波流量はほぼ同等であり、円筒型前面スリット壁の設置による越波流量の変化は小さいものと考えられる。

図-12は、高さが $h_M=5\text{cm}$ で肩幅が $W_M=7.5\text{cm}$ のマウンド上に設置したフレア型護岸の越波流量特性を同様に示したものである。円筒型前面スリット壁の設置の有無によらず越波流量は入射波の波高に伴い単調に増加するが、マウンド肩先付近で砕波が発生する状況になると、波高減衰効果によって越波流量は減少傾向に転じる。入射波の周期によるばらつきはあるが、図-11に示した結果と同様に円筒型前面スリット壁を設置した場合の越波流量は、設置しない場合の越波流量とほぼ同等であり、円筒型前面スリット壁の設置はフレア型護岸の防波機能を損なわないと考えられる。

#### 4. まとめ

フレア護岸に作用する衝撃波圧の低減を目的に、円筒型前面スリット壁を消波構造として適用し、その波圧低減効果を水理模型実験で検討した。フレア型護岸前

面に円筒型スリット壁を設置することにより護岸に作用する最大波圧は入射波高相当の静水圧の2~3倍程度に低減されることを確認した。また、円筒型前面スリット壁を設置することによるフレア型護岸の防波特性の変化について、越波阻止機能、護岸反射率、および越波量特性の観点から検討し、円筒型スリット構造はフレア型護岸が持つ高い防波機能を損なわないことを確認した。

作用波圧の低減効果や防波特性は、円筒型前面スリット壁の開口率や柱体直径によって変化することが考えられる。今後は、フレア型護岸に適用するための最適なスリット壁諸元とスリット壁への作用波力について検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 村上啓介, 入江功, 上久保祐志: 非越波型防波護岸の護岸天端高さ と作用波圧について, 海岸工学論文集第43巻, pp. 776-780, 1996.
- 2) 上久保祐志: 非越波型護岸断面に関する基礎的研究, 九州大学学位論文, 2002.
- 3) 村上啓介, 宮崎晃太, 清水健太, 上久保祐志, 他: マウンドを有するフレア型護岸の護岸天端高と作用波圧, 海洋開発論文集, Vol. 21, pp. 563-568, 2005.
- 4) 片岡保人, 市川靖生, 大谷修, 他: 非越波型護岸の高波浪域への適用における消波形式の基礎的研究, 海洋開発論文集, Vol. 15, pp. 725-730, 1999.
- 5) 高橋重雄, 鈴木高二郎, 三浦祐信, 斎藤裕一: 堤天端型防波護岸の越波に関する一考察, 海洋開発論文集, Vol. 11, pp. 193-198, 1995.
- 6) 下迫健一郎, 高橋重雄, 斎藤裕一, 他: 消波型直立部を用いた高基混成堤の開発, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 851-855, 1996.
- 7) 下迫健一郎, 高橋重雄, 斎藤裕一, 他: 消波型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, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 826-830, 1997.