

マウンドを有するフレア型護岸の越波流量と波圧について

村上啓介*・清水健太**・上久保祐志***・片岡保人****

マウンド上に構造物がある場合、構造物に作用する波はマウンド高さや肩幅、あるいはマウンド上の水深等に応じて変化する。作用波圧や越波流量の特性はマウンドの諸元に強く影響される。このことはフレア型護岸においても同様で、マウンドの設置による衝撃砕波圧の発生や護岸越波流量の増大は実務上の問題となる。本研究は、マウンド上に設置したフレア型護岸に作用する波圧と越波流量の特性を把握することを目的に実施した。具体的には、作用波圧および越波流量に対するマウンド法先水深や肩幅の影響を明らかにするとともに、直立堤の波圧算定式から得られる波圧に対する計測波圧の比(割増係数)を検討した。

1. はじめに

筆者らは、深い円弧状の断面を持つフレア型護岸を提案し(村上ら, 1996)、そ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(上久保, 2002)。これらの検討は、主に基礎マウンドがない場合についておこなってきたが、設置水深や海底地盤等によってはマウンドが必要になる場合がある。

マウンド上に構造物がある場合、マウンド形状によっては異常に大きな衝撃波圧が発生する場合がある。深い円弧断面を有するフレア型護岸においても、マウンドの設置による衝撃砕波圧の発生は実務上の問題となる。また、マウンドを設置することによって越波阻止機能が低下することも危惧される。

マウンド上に設置したフレア型護岸の水理特性については、特定の波形勾配の波を対象に幾つかの検討をおこなってきた(市川ら, 2002; 勝田ら, 2004)。本研究では、それらの結果を踏まえて、マウンド形状と波浪条件を様々変えた条件のもとで波圧特性に対するマウンド諸元の影響を明らかにする。また、護岸断面を設計する際の目安として直立堤の設計波圧(合田波圧)に対する計測波圧の比(割増係数)を検討する。さらに、フレア型護岸の越波流量の特性に対するマウンド諸元の影響を明らかにするとともに、許容越波流量とフレア型護岸天端高さとの関係を整理する。

2. 実験の方法

(1) 実験装置と実験条件

図-1に示す反射吸収式の二次元造波水路(長さ15m×高さ0.6m×幅0.4m)を用いて実験をおこなった。水路の沖側水深は $h_0=45$ cmとし、水路の他端には勾配

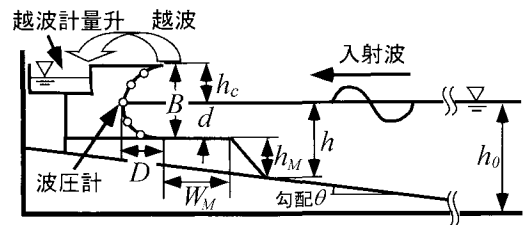


図-1 水理実験装置の概略

が一様な不透過の傾斜面を設け、傾斜面上にマウンドを有するフレア型護岸を設置した。

1/30程度の模型縮尺を想定し、上久保(2002)が提案した護岸断面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。マウンド高さは、設置水深が比較的浅い場合を想定した $h_M=5$ cmの場合と、深い場合を想定した $h_M=10$ cmの場合の2通りとした。したがって、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(護岸天端高さが $h_c=6$ cm、護岸前面水深が $d=5.5$ cmとなる)ようにすると $h=10.5$ cmと15.5cmになる。

作用波圧に関する実験では、市川ら(2002)の実験を参考にマウンド肩幅は $W_M=0, 5, 10, 15$ cmの4通りとした。また、越波流量に関する実験では、 $W_M=0, 7.5, 15$ cmの3通りとした。海底勾配は、マウンドの法先水深が10.5cmの場合は1/8, 1/10, 1/20の3通りとし、法先水深が15.5cmの場合は1/20とした。

(2) 波圧および越波流量の計測

入射波周期が $T=0.8\sim 2.0$ 秒の範囲で規則波を造波し、前述の各実験条件に対し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。入射波の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。

一例として、海底勾配が1/20の斜面上に法先水深が $h=15.5$ cmのマウンドを有するフレア型護岸を設置した場合の限界天端高さの特性を図-2に示す。横軸はマウンド法先での波形勾配 H_c/L_h (L_h はマウンド法先での

* 正会員 工博 宮崎大学工学部土木環境工学科

** 学生会員 宮崎大学大学院工学研究科

*** 正会員 工博 八代工業高等専門学校土木建築工学科

**** 正会員 工博 (株)神戸製鋼所 機械研究所

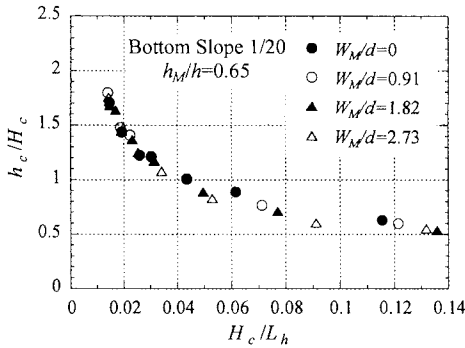


図-2 限界天端高さの特性 ($\tan \theta = 1/20$, $h_M/h = 0.65$)

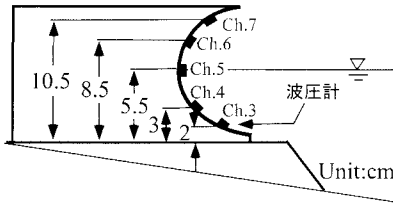


図-3 波圧計の取り付け位置

波長)を表し、縦軸は限界天端高さ h_c/H_c (越波限界波高に対する護岸天端高さの比)を表している。また、図中の各プロットはマウンド肩幅 W_M/d の違いを表している。限界天端高さは、マウンド法先での波形勾配の増加にともない低減する特性を示している。また、マウンド肩幅が広くなるに従い限界天端高さは若干低くなる傾向にあるがその程度は非常に小さい。このような限界天端高さの特性は、マウンド法先水深が浅い場合や、海底勾配が異なる場合についても同様である。

次に、受圧面の直径が1 cmの波圧計を図-3に示す五個所に埋め込み、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500 Hzで数波分をデータレコーダに記録し、波圧のピーク値の平均を計測点での最大波圧とした。

また、入射波高 H_0 を越波限界波高から約1 cmずつ大きくしてゆき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に集水して求めた。

3. 波圧および越波流量に対するマウンド諸元の影響

(1) 作用波圧に対するマウンド諸元の影響

1/20の傾斜海底面上に法先水深が $h = 15.5$ cmのマウンドを有するフレア型護岸を設置した場合の波圧分布を図-4(a)~(d)に示す。(a)~(d)はマウンド肩幅が異なる4ケース(それぞれ $W_M/d = 0, 0.91, 1.82, 2.73$)の結果で、図中の各プロットはマウンド法先での波形勾配の違い($H_c/L_h = 0.014 \sim 0.053$)を表している。横軸は入射波の波高相当の静水圧で無次元化した波圧 $p/\rho g H_c$ を表し、縦軸は静水面を原点とした測定位置である。

図-4に示すマウンド法先の水深が相対的に深い場合では、マウンド肩先のやや沖側で引き波から押し波に変わる位相で波面が巻き波状に巻き込む運動が生じる。この運動はマウンド肩幅がない場合を除く各ケースで見られ、巻き込んだ後の水塊はマウンド上を伝播して護岸曲面部で波返えされる。一方、 $W_M/d = 0$ の場合は、護岸前面で重複的な運動をともなった波返しが生じる。このような波運動の下では、護岸に作用する最大波圧は入射波高相当の静水圧の1.5~2倍程度を示した。

マウンド肩幅が狭い場合は、マウンド法先での波形勾配に対する波圧分布の違いは非常に小さい。一方、マウンド肩幅が広くなると、波形勾配が相対的に大きい波に対して静水面上方の(例えばCh.6)の波圧が徐々に増大する傾向を示している。

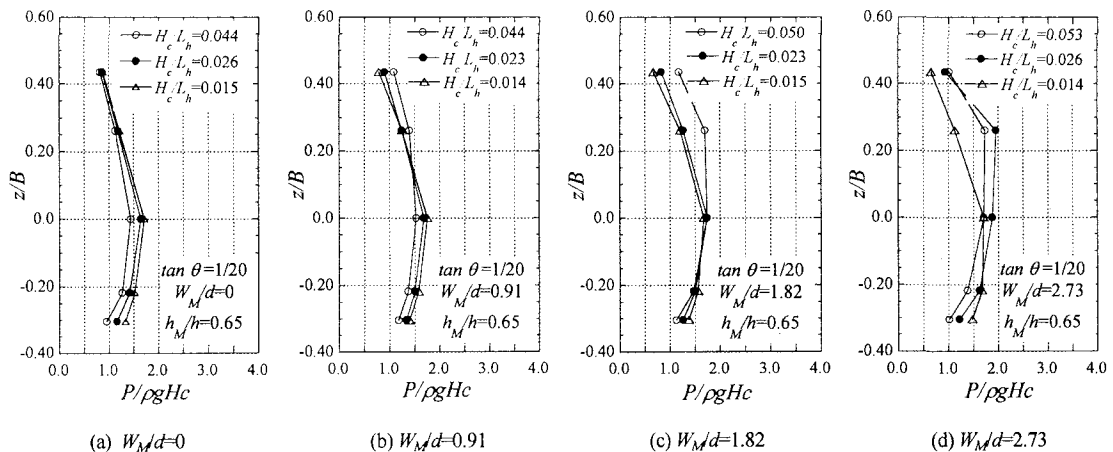


図-4 波圧分布の特性 ($\tan \theta = 1/20$, $h_M/h = 0.65$)

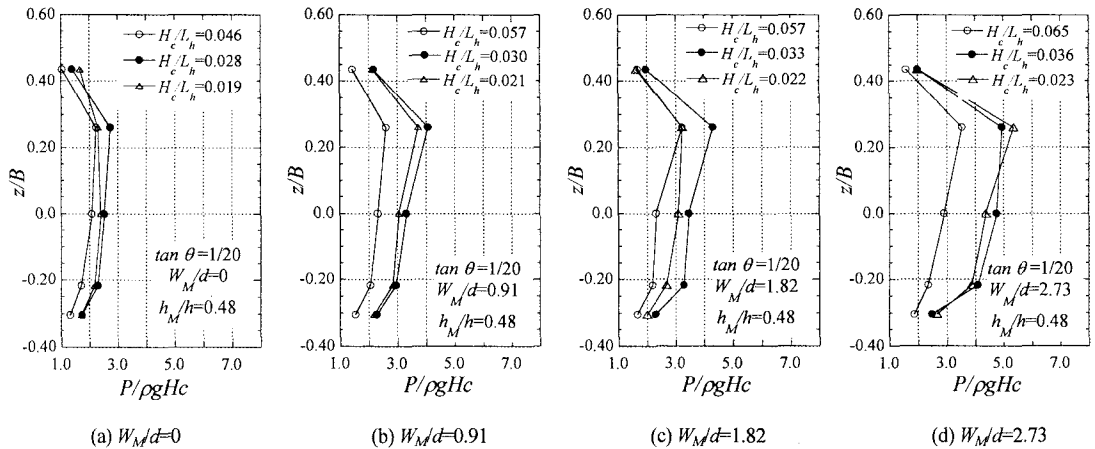
図-5 波圧分布の特性 ($\tan \theta = 1/20$, $h_M/h = 0.48$)

図-5(a)～(d)は、法先水深が $h = 10.5$ cm の場合の波圧分布を示している。マウンド法先水深が浅い場合には、浅水効果とマウンドによる急激な水深変化によって、入射波はマウンド肩先のやや沖側で前傾し、その波面形状を持って護岸に作用する。そのため、入射波の条件とマウンド肩幅によっては、波面と護岸面との成す角度が非常に小さくなり衝撃波圧が発生し易くなる。波面の前傾はマウンド肩幅が広くなるに従って徐々に深くなり、図-5(d)に示すように静水面付近を中心に作用波圧は増大する。その際の波圧波形は典型的な Wagner 型を呈している（高橋ら，1983）。マウンド肩幅にともなう作用波圧の増大特性はマウンド法先での波形勾配によって若干異なるが、波形勾配が相対的に小さい波が作用する場合に波圧が増大する傾向にある。

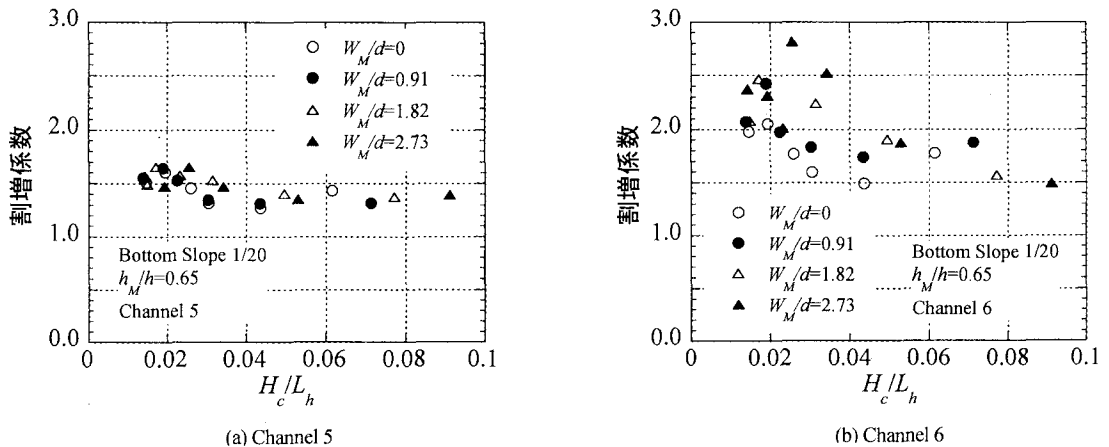
また、マウンド法先水深が浅い場合は、フレア型護岸に作用する最大波圧は静水面と護岸天端の中間付近に生じる特徴があり、直立堤の波圧算定式で仮定される波圧

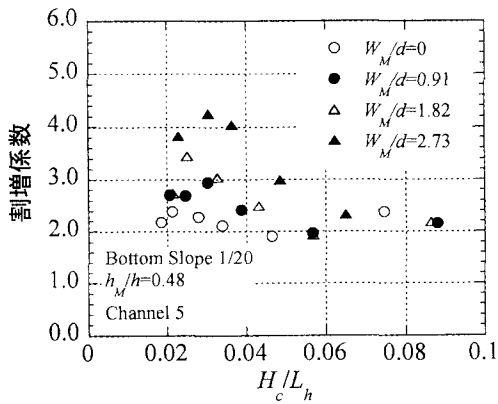
分布（合田，1990）とは異なる分布形を示している。

(2) 直立堤に作用する波圧に対する割増係数の特性

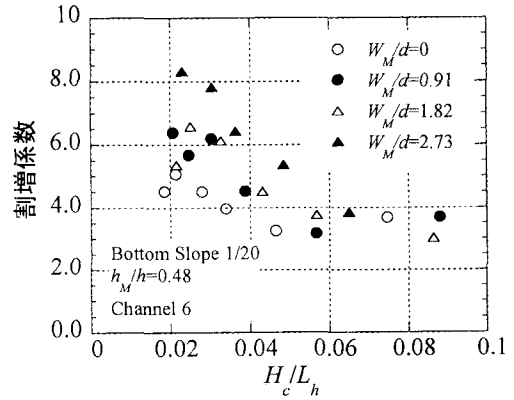
本実験では、非越波条件を満足する最大の波高（越波限界波高）の規則波が入射する場合の波圧特性を検討している。一方、直立堤の波圧算定式では、護岸前方における最大波高 H_{max} を用いて波圧を算定するので、便宜的に越波限界波高を護岸前方での H_{max} と考えて波圧算定式から波圧分布を計算した（土木学会，2000）。そして、計測した波圧 p_m と波圧算定式で求めた波圧 p_c との比 p_m/p_c を割増係数と定義した。

図-6(a)，(b)は、法先水深が $h = 15.5$ cm のマウンドを有するフレア型護岸を設置した場合について、静水面とその上方の測点（Ch. 5と Ch. 6）における割増係数の特性をマウンド法先での波形勾配に対して示したものである。図中の各プロットはマウンド肩幅 W_M/d の違いを示している。図-4の波圧分布で述べたように、静水面位置における波圧に関しては、波形勾配やマウンド肩幅

図-6 波圧算定式から求めた波圧に対する割増係数 ($h_M/h = 0.65$)



(a) Channel 5



(b) Channel 6

図-7 波圧算定式から求めた波圧に対する割増係数 ($h_M/h=0.48$)

による変動は小さい。そのため、図-6(a)に示す割増係数は、波形勾配が小さい範囲で若干増加する傾向はあるがマウンド肩幅によらず1.3~1.7の値を示している。一方、静水面上方のCh.6の測点では、波形勾配の減少とともに割増係数は増大する傾向を示し、 $H_c/L_h = 0.02 \sim 0.025$ 付近で極大値を取る。波形勾配に対する変動はマウンド肩幅が広いほど大きく、マウンドによる波変形の影響が波圧の増大として表れている。

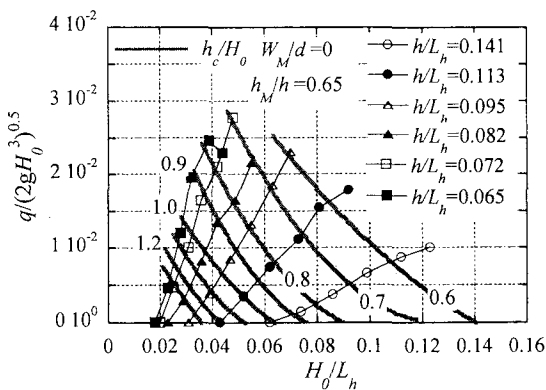
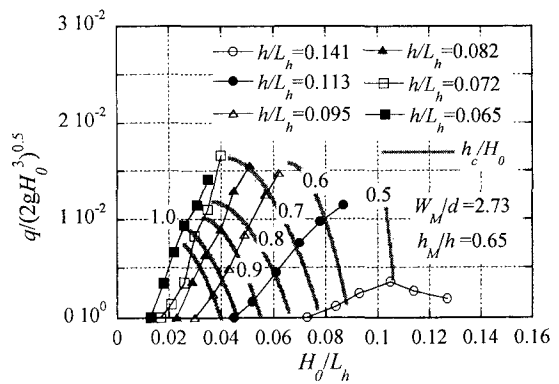
図-7(a), (b)は、法先水深が $h = 10.5$ cm の場合について同様に示したものである。図-5の波圧分布で示したように、マウンド法先の水深が浅い場合は、マウンド肩幅が広く、かつマウンド法先での波形勾配が相対的に小さい条件で静水面位置やその上方で非常に大きな衝撃波圧が発生する。そのため、図-7(a)に示す静水面位置のCh.5の測点では、割増係数は波形勾配の減少とともに増大し、 $H_c/L_h = 0.025 \sim 0.03$ 付近で極大値を取った後に減少する傾向を示している。割増係数の極大値はマウンド肩幅によって異なり、マウンド肩幅が広い場合

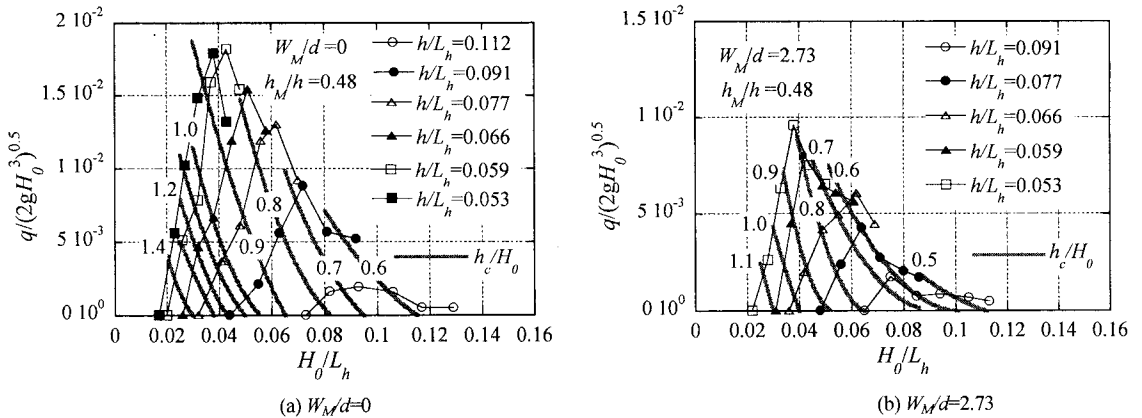
ど計測した波圧と波圧算定式で求めた波圧の差は大きくなる。

このような特徴は、図-7(b)に示す静水面上方のCh.6の測点で顕著となる。波圧算定式では、最大波圧は静水面位置で生じる波圧分布を仮定している。一方、マウンド法先の水深が浅い場合は、図-5で示したように静水面と護岸天端の中間付近で最大波圧が生じる特徴がある。マウンド法先の水深が浅い場合は、フレア型護岸に作用する波圧の増大とともに、波圧分布形の違いが割増係数の増大として現れている。

(3) 越波流量に対するマウンド諸元の影響

1/20の傾斜海底面上に法先水深が $h = 15.5$ cm のマウンドを有するフレア型護岸を設置した場合の越波流量の特性を図-8(a), (b)に示す。図-8(a)はマウンド肩幅が $W_M/d = 0$ の場合、(b)は $W_M/d = 2.73$ の場合の結果であり、図中の各プロットはマウンド法先における相対水深 h/L_h の違いを表している。越波流量は、入射波高 H_0 とともに増加し、相対水深が小さい場合ほど増加割合は

(a) $W_M/d=0$ (b) $W_M/d=2.73$ 図-8 マウンドを有するフレア型護岸の越波流量算定図 ($h_M/h=0.65$)

図-9 マウンドを有するフレア型護岸の越波流量算定図 ($h_M/h=0.48$)

大きい。この特性はマウンド肩幅によらない。一方、肩幅が広い $W_M/d=2.73$ の場合はマウンド肩先において引き波時に巻き込んだ波はマウンド上を伝播して護岸曲面部で波返えされるのに対して、 $W_M/d=0$ の場合は護岸曲面部に直接作用する。このような護岸前面での波運動の違いから、マウンド肩幅によって越波流量に大きな差が生じている。

図-9 (a), (b) は、マウンドの法先水深が浅い $h=10.5$ cm の場合の越波流量特性を示している。越波流量は入射波高とともに増加するが、波高の増大にともないマウンド肩先で碎波が徐々に発生するため、図-8 に示した法先水深が相対的に深い場合に比べて越波流量は減少している。また、マウンド沖側で碎波した波が護岸に到達する状況になると、波高の増大にともない越波流量は減少しはじめる。このような特性はマウンドの肩幅によらないが、マウンド肩幅が広い $W_M/d=2.73$ の場合は、マウンド上での碎波減衰効果も働くことから、越波流量は $W_M/d=0$ の場合に比べてさらに減少する。

フレア型護岸の越波流量は、マウンド形状とともにマウンド法先での波浪特性によっても大きく異なる。そこで、マウンド法先での波形勾配を考慮に入れて護岸天端高さを見積もることを目的に、入射波高に対する天端高さの比 h_c/H_0 を図-8, 9 に太線で示した。太線は、図中の各プロットにおける相対天端高さ h_c/H_0 の等値線を二次曲線で近似したものである。図-8, 9 に示す形式の越波流量算定図により、マウンド法先での波浪特性を考慮に入れて許容越波流量からフレア型護岸の天端高さを見積もることができる。

4. ま と め

マウンドを有するフレア型護岸に作用する波圧特性、直立堤の設計波圧に対する割増係数、および越波流量について、マウンド法先水深およびマウンド肩幅の影響を

検討した。

マウンド法先水深が浅い場合には、入射波の条件とマウンド肩幅によっては、波面と護岸面との成す角度が非常に小さくなり衝撃波圧が発生し易くなる。特に、肩幅が広いマウンドに波形勾配が相対的に小さい波が作用する場合に波圧は増大する。その際の最大波圧は、静水面と護岸天端の中間付近に生じる特徴があり、割増係数も高い値を示す。

マウンド上に設置したフレア型護岸の越波流量は、マウンド形状とマウンド法先での波浪特性によって大きく異なる。マウンド法先水深が浅くマウンド肩幅が広がると、マウンド肩先およびマウンド上での碎波に伴う波高減衰によって、越波流量は法先水深が相対的に深い場合に比べて減少する。また、マウンド法先での波浪特性を考慮に入れたフレア型護岸の天端高さを見積もるための越波流量算定図を、マウンドが異なるいくつかのケースについて提示して許容越波流量とフレア型護岸天端高さとの関係を示した。

参 考 文 献

- 市川靖生・片岡保人・竹鼻直人・榊原健男・入江功・村上啓介 (2002)：フレア護岸の水利特性におよぼすマウンドの影響，海洋開発論文集，Vol.18，pp. 725-730.
- 勝田貴志・片岡保人・嶋洋二・濱崎義弘・竹鼻直人・村上啓介 (2004)：マウンド上に設置されたフレア型護岸の水利特性に関する実験と数値解析，海洋開発論文集，Vol.20，pp. 713-718.
- 上久保祐志 (2002)：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。
- 合田良實 (1990)：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会。
- 高橋重雄・谷本勝利・鈴木諭司 (1983)：直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察，港湾技術研究所報告，第22巻，第4号，pp. 3-32.
- 土木学会 (2000)：海岸施設設計便覧，pp. 582.
- 村上啓介・入江功・上久保祐志 (1996)：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.