

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

CHARACTERISTICS OF CROWN HEIGHT AND WAVE PRESSURE ON THE FLARING SHAPED SEAWALL INSTALLED ON THE MOUND

村上啓介¹・宮崎晃太²・清水健太³・上久保祐志⁴・片岡保人⁵・竹鼻直人⁶

Keisuke MURAKAMI, Kouta MIYAZAKI, Kenta SHIMIZU, Yuji KAMIKUBO

Yasuto KATAOKA and Naoto TAKEHANA

¹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)

²正会員 修士(工学) (株)九州工営 (〒880-0015 宮崎市大工2丁目117番)

³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)

⁴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)

⁵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)

⁶正会員 工修(株)神戸製鋼所 機械エンジニアリングカンパニー 構造技術部 (〒657-0845 神戸市灘区岩屋中町4-4-8)

Hydraulic characters of a non-wave overtopping type seawall installed on a mound are investigated through experiments with a two-dimensional wave tank. 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 configurations. The wave reflection coefficient and wave pressure distributions on the seawall were also measured when the waves with the critical wave height act on the seawall. In this study, the characteristics of the critical wave height and wave reflection coefficient are discussed under various incident wave conditions as well as mound configurations. And then, characteristics of wave pressure distributions are also discussed with comparing the design wave pressure act on the vertical seawall.

Key Words : Flaring Shaped Seawall , mound, wave overtopping , wave reflection, breaking wave pressure

1. はじめに

筆者らは、深い円弧状の断面を持つ非越波型防波護岸(写真-1:以下、フレア型護岸と呼ぶ)を提案するとともに¹⁾、その越波阻止機能や作用波圧の特性を水理模型実験と数値計算を通じて検討し²⁾、フレア型護岸断面の設計に必用な指標を示してきた。これらの検討は、主に基礎マウンドがない条件でおこなってきた。一方、護岸の設置水深や海底地盤等によっては基礎マウンドが必要になる場合がある。マウンド法先は海底地形の急変点となるので、マウンド高さや肩幅によってはフレア型護岸の越波阻止機能の低下や衝撃砕波圧の発生等が危惧される。これらの課題に対応するためには、マウンド諸元がフレア型護岸の越波阻止機能や作用波圧の特性にお

よぼす影響を明らかにしておく必要がある。

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既に幾つかの検討例がある。市川ら³⁾は捨石マ

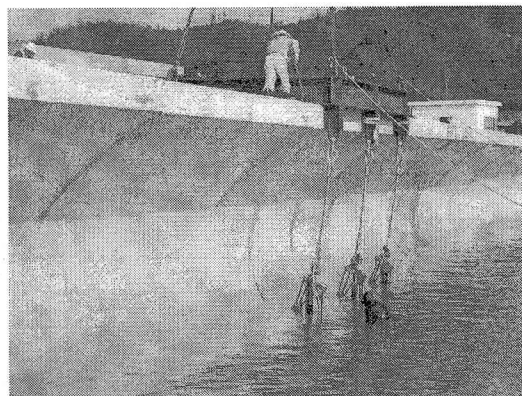


写真-1 フレア型護岸の施工例

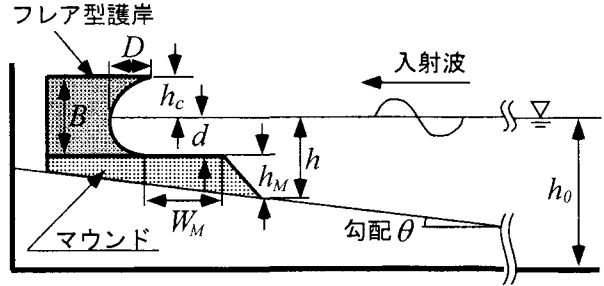
マウンドがフレア型護岸の越波流量や反射率におよぼす影響について検討している。また、勝田ら⁴⁾は護岸に作用する波圧特性を数値解析によって検討している。これらの検討は限られた波形勾配の波を対象にしているが、マウンドによる波浪変形の特性は入射波の周期によっても異なるため、対象とする波浪条件を広げた水理特性の検討が必要となる。

本研究では、マウンドを有するフレア型護岸について、マウンドの諸元が護岸の越波阻止機能におよぼす影響を検討し、設計波に対して護岸天端高さを設定する際の考え方を示すとともに、マウンドの諸元が作用波圧の特性に及ぼす影響を明らかにする。

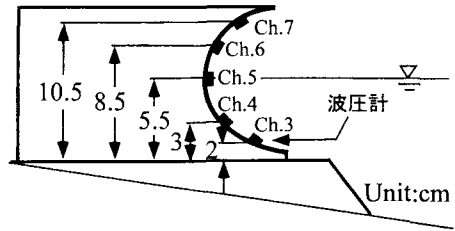
2. 実験条件と実験方法

実験は、反射吸収式の二次元造波水路（長さ15m×高さ0.6m×幅0.4m）の一端に、図－1に示す勾配が一樣な傾斜海浜を設け、傾斜海浜上にマウンドを有するフレア型護岸を設置して実施した。傾斜海浜の沖側の水深は $h_0=45\text{cm}$ とした。

模型縮尺は1/30程度を想定し、フレア型護岸高さは $B=11.5\text{cm}$ とした。また、上久保²⁾が提案した護岸断面形状を参考に奥行き深さは $D=5.5\text{cm}$ とした。マウンド高さは、護岸設置水深が比較的浅い場合を想定した $h_M=5\text{cm}$ の場合と、深い場合を想定した $h_M=10\text{cm}$ の場合



図－1 水理実験装置の概略



図－2 波圧計の取り付け位置

表－1 実験条件

	$h_M=5\text{cm}$	$h_M=10\text{cm}$
海底勾配	1/20	1/8, 1/20, 1/20
護岸天端高さ (h_c)	6cm	6cm
護岸前面水深 (d)	5.5cm	5.5cm
マウンド肩幅 (W_M)	0, 5, 10, 15cm	0, 5, 10, 15cm
入射波周期 (T)	0.8～2sec.	0.8～2sec.

の2通りとした。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）ようにマウンドの設置位置を決めた。マウンド肩幅は市川ら³⁾の実験を参考に、 $W_M=0, 5, 10, 15\text{cm}$ の4通りとした。海底勾配は、マウンド高さが10cmの場合については、1/8, 1/10, 1/20の3通りとし、マウンド高さが5cmの場合には1/20とした。上記の実験ケースをまとめたものを表－1に示す。

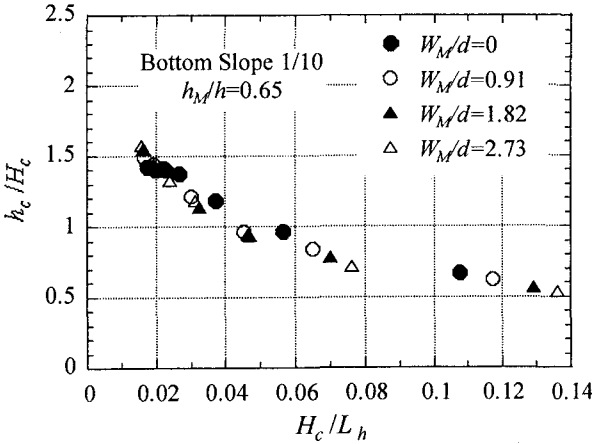
入射波の周期を $T=0.8\sim2.0$ 秒の範囲について0.2秒間隔で設定し、規則波を造波して実験をおこなった。まず、各実験ケースについて越波が生じない最大の入射波高 H_C （以下、越波限界波高と呼ぶ）を測定した。その際、越波の有無は目視で判断した。次に、越波限界波高の波が護岸に作用する場合の護岸反射率をヒーラーの方法で計測した。さらに、護岸表面に受圧面の直径が1cmの波圧計を図－2に示す5個所に埋め込み、越波限界波高の規則波が作用する際の波圧分布を測定した。波圧信号はサンプリング周波数500Hzで数波分をデータレコーダに記録し、波圧のピーク値の平均を計測位置での最大波圧とした。

3. マウンド上に設置したフレア型護岸の限界天端高さと護岸反射率の特性

(1) 限界天端高さの特性

本研究では、越波限界波高に対する護岸天端高さの相対的な比 h_c/H_C を限界天端高さとして定義し、その特性について検討した。

図－3は、海底勾配が1/10の斜面上にマウンド高さ $h_M=10\text{cm}$ を有するフレア型護岸を設置した場合の限界天端高さを、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。図中の各プロットはマウンド肩幅の違いを表している。上久保²⁾は、フレア型護岸の基本的な特性として、限界天端高さは入射波の波形勾配に依存することを示している。本実験において



図－3 限界天端高さの特性
($\tan \theta=1/10$, $h_M/h=0.65$)

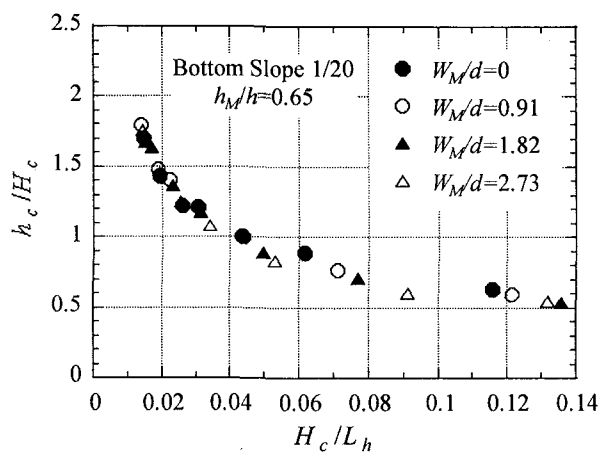


図-4 限界天端高さの特性
($\tan \theta=1/20$, $h_M/h=0.65$)

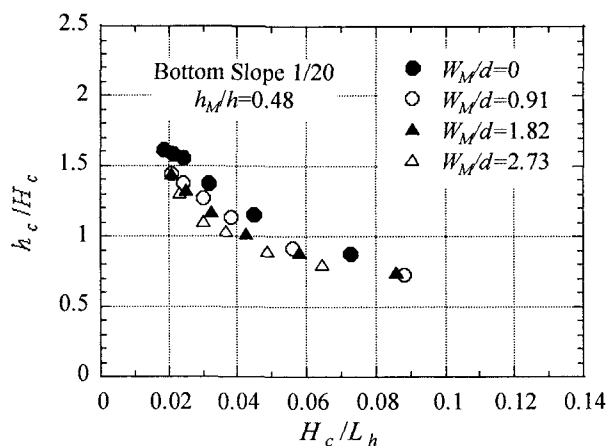


図-5 限界天端高さの特性
($\tan \theta=1/20$, $h_M/h=0.48$)

もフレア型護岸の限界天端高さは波形勾配に依存し、波形勾配の増加に伴い1.5～0.5の範囲で低減する傾向を示している。各マウンド肩幅のプロットに対して近似曲線を描くと、マウンド肩幅が広くなると限界天端高さは若干低減する傾向が見られるが、その差は非常に小さく、護岸設置水深が深い場合には限界天端高さに対するマウンド肩幅の影響は極めて小さい。

図-4は、海底勾配が1/20の斜面上にマウンド高さが $h_M=10\text{cm}$ のフレア型護岸を設置した場合の限界天端高さを示したものである。限界天端高さの特性は図-3に示した海底勾配が1/10の場合と同様である。また、海底勾配が1/8の場合についても限界天端高さの特性はほぼ同じであり、限界天端高さに対する海底勾配の影響は非常に小さいことを確認した。

図-5は、海底勾配が1/20の斜面上にマウンド高さが $h_M=5\text{cm}$ のフレア型護岸を設置した場合の限界天端高さを示したものである。波形勾配に対して限界天端高さが低減する特性は図-3、4と同様であるが、マウンド肩幅によって低減特性が若干異なる。護岸設置水深が浅い $h_M=5\text{cm}$ の場合は、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で流れに近い運動を呈する。このよ

うな流況はマウンド肩幅が広くなるに従って顕著になり、波動運動が流れに近い運動に変化することで護岸前面での波返しの効果が若干高まったためと考えられる。ただし、限界天端高さの値は図-4に示した結果とほぼ一致しており、護岸設置水深の違いにおいて有意な差はないと思われる。

以上より、マウンドを有するフレア型護岸の限界天端高さはマウンド法先での波形勾配で決まるので、設計波の波高、周期および護岸設置水深からフレア型護岸の天端高が与えられる。さらに、護岸の曲面形状から護岸前面水深が決まり²⁾、護岸の設置水深と前面水深の差からマウンド高さが与えられる。

(2) 護岸反射率の特性

構造物によって波が反射されると、その前面水域の静穏度が悪化するため、構造物による波の反射はできるだけ低減させることが望ましい。そこで、マウンド上に設置したフレア型護岸に越波限界波高の波が作用する際の反射特性を検討した。

図-6は、海底勾配が1/20の斜面上にマウンド高さが $h_M=10\text{cm}$ のフレア型護岸を設置した場合の反射率 K_r を、マウンド法先での波形勾配 H_c/L_h に対して示したものである。波形勾配が小さい範囲では重複波動的な運動が形成される。その時の護岸反射率は0.4～0.5の値を取りマウンド肩幅の違いは小さい。一方、波形勾配が大きくなるに従い $W_M/d=0$ の場合を除いてマウンド肩幅に応じた特性で反射率は低減する。設置水深が深い $h_M=10\text{cm}$ の場合は、 $W_M/d=0$ を除くほぼ全てのケースにおいて引き波時にマウンド肩先のやや沖側で波面が巻き込み、巻き波砕波に近い状況でマウンド上面に打ち込む運動が生じる。この運動はマウンド肩幅が広く、かつ波形勾配が大きい場合ほど顕著になり、護岸前面で激しい乱れを伴った運動が形成されて反射率が低減したと考えられる。

図-7は、海底勾配が1/20の斜面上にマウンド高さが $h_M=5\text{cm}$ のフレア型護岸を設置した場合の反射率を示したものである。若干のばらつきはあるが、波形勾配が

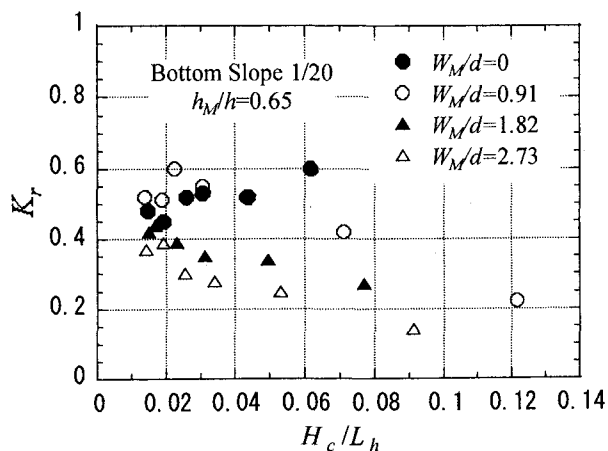


図-6 護岸反射率の特性
($\tan \theta=1/20$, $h_M/h=0.65$)

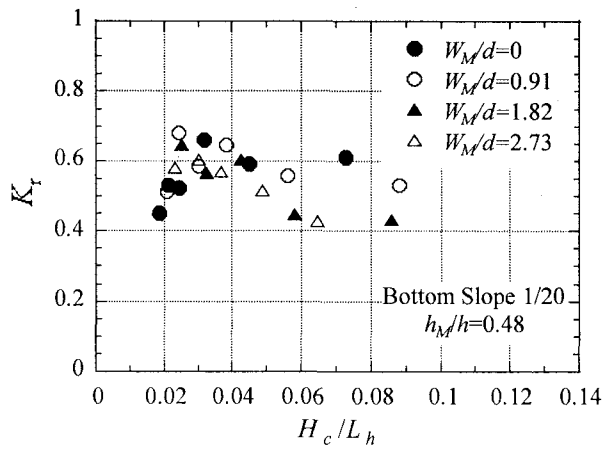


図-7 護岸反射率の特性
($\tan \theta = 1/20$, $h_M/h = 0.48$)

小さい範囲では図-6と同様に反射率は0.45～0.65の値を示している。ただし、波形勾配の増加に伴う反射率の低減割合は図-6に比べて小さく、マウンド肩幅の影響も明確ではない。設置水深が浅い $h_M=5\text{cm}$ の場合は、マウンド肩先のやや沖側で波面が巻き込む運動は設置水深が深い場合に比べて弱く、それに伴うエネルギー減衰が小さいためと考えられる。図-6, 7の結果より、本研究で対象とした形状の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⁵⁾とほぼ同程度であることが確認できる。

4. マウンドを有するフレア型護岸の作用波圧特性

(1) 作用波圧の分布特性

直立堤に作用する波圧は、波高以外に波の周期や海底勾配あるいはマウンドの形状などによって変化することが知られており、それらを考慮した波圧計算式が示されている⁵⁾。ここでは、それらを参考にマウンドを有するフレア型護岸の波圧特性を検討した。

図-8は、海底勾配が1/20の斜面上にマウンド高さが $h_M=10\text{cm}$ のフレア型護岸を設置した場合に、越波限界波高の規則波が作用した際の波圧分布を示したもので、それぞれ波周期が $T=1.0, 1.4, 2.0$ 秒の結果である。横軸は入射波の波高相当の静水圧で無次元化した波圧を表し、縦軸は静水面を原点とした波圧測定位置を示している。図-9は、マウンド高さが $h_M=5\text{cm}$ の場合について同様に示したものである。

図-8に示す設置水深が深い $h_M=10\text{cm}$ の場合は、 $W_M/d=0$ を除くほぼ全てのケースにおいて引き波時にマウンド肩先のやや沖側で波面が巻き込み、巻き波砕波に近い状況でマウンド上面に打ち込む運動が生じ、マウンド上を伝播した水塊はフレア型護岸の曲面に沿って波返される。そのため、フレア型護岸本体に作用する最大波圧は、入射波の波高相当の静水圧に対して2倍程度の値

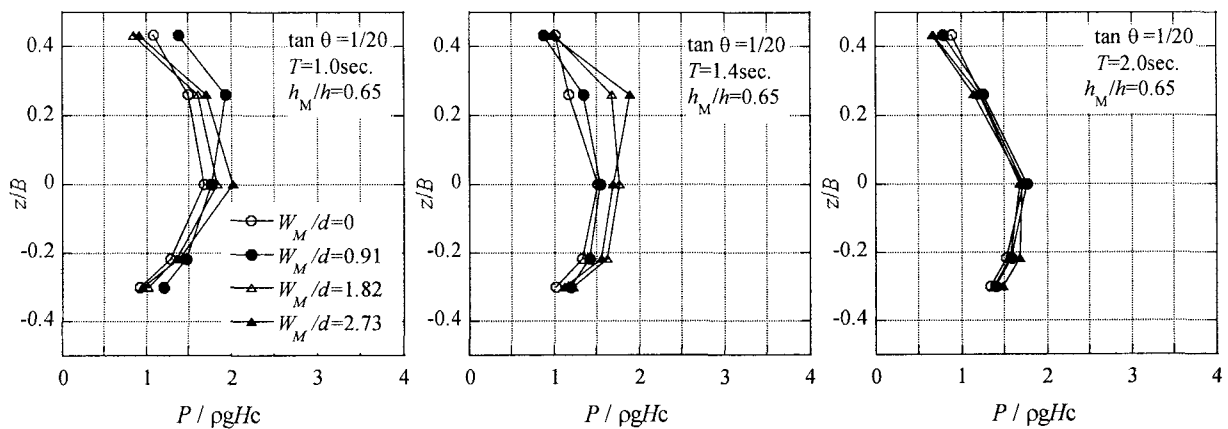


図-8 波圧分布の特性 ($\tan \theta = 1/20$, $h_M/h = 0.65$)

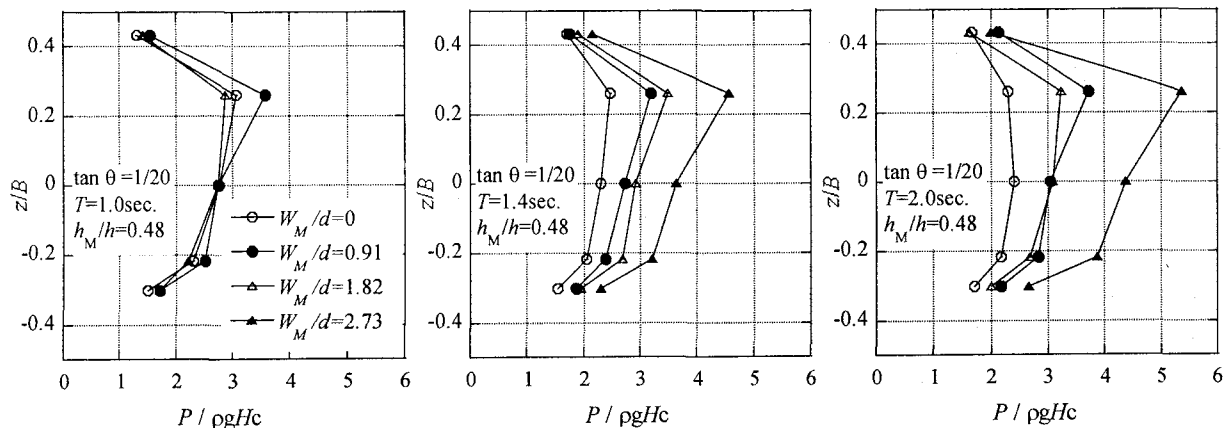


図-9 波圧分布の特性 ($\tan \theta = 1/20$, $h_M/h = 0.48$)

を示している。 $T=1.0$ 秒や 1.4 秒の場合は、マウンド肩先での波面の巻き込みと突っ込みの現象はマウンド肩幅が広くなるに従い僅かに強くなるため波圧値は若干増大している。一方、入射波周期が $T=2.0$ 秒の場合は、波面の巻き込みは弱く、マウンド肩幅によらず重複波的な運動が形成されるため波圧は似通った分布形を示している。

一方、図-9に示す設置水深が浅い $h_M=5\text{cm}$ の場合は、マウンド肩先での波面の巻き込みは弱い、波はマウンド肩先で前傾した波面形状を持って護岸に作用する。そのため、入射波の条件によっては護岸曲面と波面との成す角度が非常に小さくなる場合があり衝撃波圧が発生する。マウンド肩幅がない $W_M/d=0$ の場合は、波面の前傾は十分ではなく、最大波圧値は入射波の波高相当の静水圧に対して2~3倍程度を示している。一方、マウンド肩幅が広がるとマウンド上で波面の前傾度が増加し、護岸面と成す角度が徐々に小さくなり、ほとんどのケースにおいて各測点の波圧はWagner型の時間波形を呈し⁶⁾、図-9に示すように波圧値は増大する。特に、 $T=2.0$ 秒の波圧分布に見られるように、肩幅が広いマウンド上に比較的長波長の波が入射する場合は、先端が切り立った波面形状の水塊がマウンド上を伝播して護岸に激しく衝突

するため、衝撃波圧が発生して波圧値は著しく増大する傾向にある。

このような衝撃波圧が生じる場合は、図-9の分布に見られるように最大波圧は静水面と護岸天端の中間付近で生じる特徴があり、直立堤の波圧算定式で仮定される波圧分布⁵⁾とは異なる分布形を示す。

(2) 最大作用波圧

マウンド上に設置したフレア型護岸に作用する最大波圧値 $P_{\max}/\rho g H_c$ を、マウンド法先での波形勾配 H_c/L_h に対して整理した。

図-10は、マウンド高さが $h_M=10\text{cm}$ の場合における最大波圧の変動を示したものである。図-8で述べたように、マウンド肩先での波面の巻き込みと突っ込みの現象は、マウンド肩幅が広くなるに従い強くなるため最大波圧値は若干増大する。波面の巻き込みの規模はマウンド肩幅や波形勾配によって異なるが、波がマウンド上面に打ち込んだ後に護岸曲面で波返される運動は類似しているため、波形勾配に対する最大波圧値の変動は見られず、マウンド肩幅によらず1.5~2.0の範囲の値を取る。

図-11は、マウンド高さが $h_M=5\text{cm}$ の場合について示したものである。設置水深が浅い場合は、波はマウンド肩先で前傾し、その波面形状を持って護岸に作用するため、図-9で述べたように衝撃波圧が発生しやすい。特に、マウンド肩幅が広い場合にはマウンド上で波面の前傾度が増加して波圧値は増大する傾向にある。図-11に示すように、マウンド肩幅が $W_M/d=0$ を除く各ケースにおいて、マウンド法先での波形勾配が0.03前後で最大波圧は極大値を取り、その後は波形勾配の増加にともない減少する傾向を示している。

(3) 合田波圧との比較

直立堤の波圧算定式⁵⁾から得られる最大波圧と、フレア型護岸に作用する最大波圧の比を最大波圧に関する割増係数と定義し、その特性を検討した。直立堤の波圧算定式では、波群中の最大波高 $H_{\max}$ を用いて波圧を計

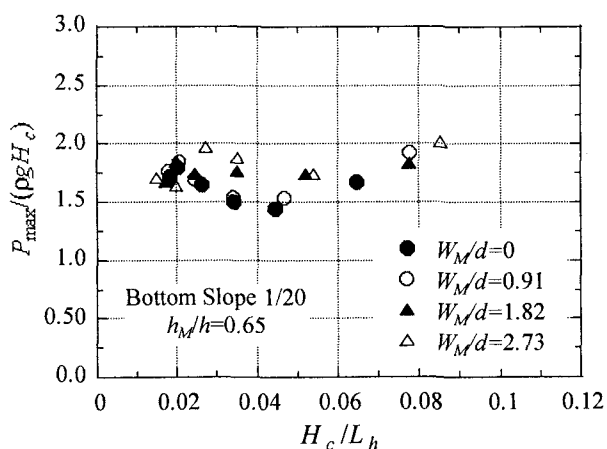


図-10 最大波圧の変動
($\tan \theta=1/20$, $h_M/h=0.65$)

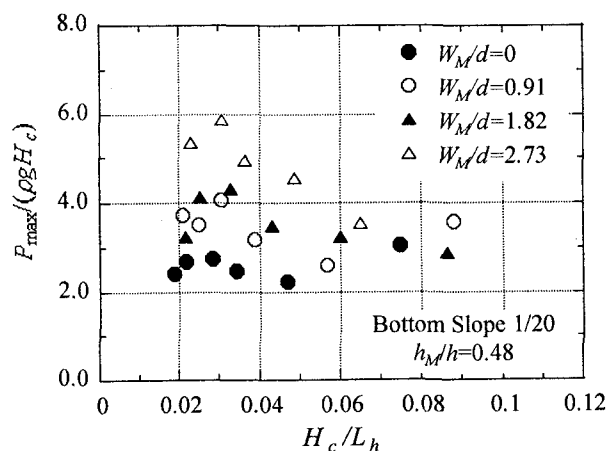


図-11 最大波圧の変動
($\tan \theta=1/20$, $h_M/h=0.48$)

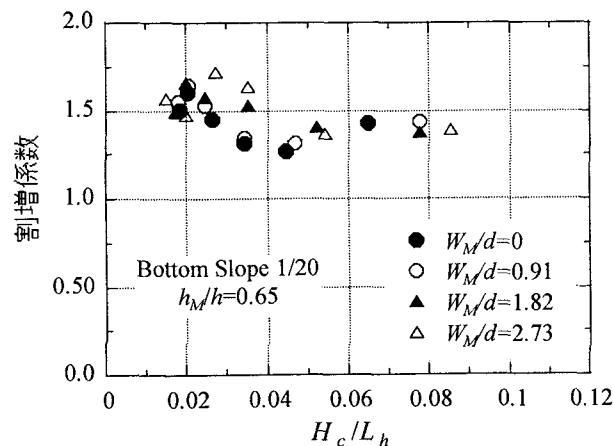


図-12 最大波圧に関する合田波圧との比較
($\tan \theta=1/20$, $h_M/h=0.65$)

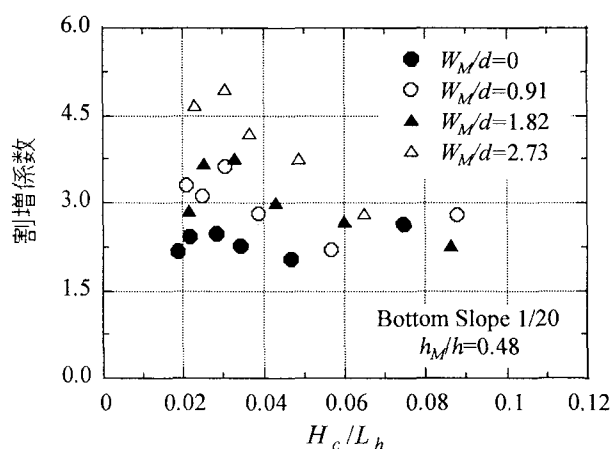


図-13 最大波圧に関する合田波圧との比較
($\tan \theta=1/20$, $h_M/h=0.48$)

算する。一方、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）の規則波が護岸に入射する場合を対象としているので、便宜的に越波限界波高を護岸前面での H_{max} と考えて波圧算定式より最大波圧を求めた。

図-12は、マウンド高さが $h_M=10\text{cm}$ の場合の割増係数を、マウンド法先での波形勾配 H_c/L_h で整理したものである。割増係数は波形勾配の増大にともない若干低減する傾向にあるが、その変動は小さい。また、マウンド肩幅の違いは特に明確ではなく、割増係数はおおそ 1.3～1.6 の値を取る。

図-13は、マウンド高さが $h_M=5\text{cm}$ の場合の割増係数を示したものである。図-12と同様に、割増係数は最大波圧と類似した特性を示す。マウンド設置水深が浅い場合は、図-9で述べたように衝撃波圧が発生しやすい状況にあり、マウンド肩幅が広くなるに従い割増係数は増加する。また、波形勾配の増大にともない最大波圧は減少するので割増係数も低くなる。このように、設置水深が浅い場合は、割増係数の値はマウンド肩幅や波形勾配によって大きく変動することから、波圧算定式から求めた波圧を参考にフレア型護岸に作用波圧を推定するこ

とは難しく、波浪条件とマウンド諸元に応じて波圧特性を検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では、マウンド上に設置したフレア型護岸に関して、護岸の越波阻止機能、護岸反射率および作用波圧に対するマウンド法先水深とマウンド肩幅の影響を水理模型実験により検討した。限界天端高さに対するマウンド諸元の影響は小さく、護岸天端高さは入射波の波高、周期および設置水深から決めることができる。一方、護岸反射率と作用波圧はマウンド法先水深やマウンド肩幅に大きく影響される。特に、護岸の設置水深が浅い場合には、マウンド法先での波形勾配やマウンド肩幅によっては衝撃波圧が発生しやすい条件となるので、マウンド上の水深やマウンド肩幅を適切に設定して波圧の低減を図る必要がある。

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) 市川靖生, 片岡保人, 竹鼻直人, 榊原健男, 入江功, 村上啓介: フレア護岸の水理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, 2002.
- 4) 勝田貴志, 片岡保人, 埴 洋二, 濱崎義弘, 竹鼻直人, 村上啓介: マウンド上に設置されたフレア型護岸の水理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, 2004.
- 5) 合田良實: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 1990.
- 6) 高橋重雄, 谷本勝利, 鈴木諭司: 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, 1983.