

のり面に粗度を有する緩傾斜護岸の越波特性 Wave Overtopping over a Gentle Slope and Roughened Seawall

井上雅夫*・島田広昭*・安田誠宏**

Masao Inoue, Hiroaki Shimada and Tomohiro Yasuda

Abstract

The purpose of this study is to improve the effect of gentle slope-type seawall on prevention of wave overtopping. With this in view, the experiments on irregular wave overtopping are carried out for a gentle slope and roughened seawall. In these experiments, artificial wave furrows are used as a roughness. Consequently, the effective arrangement and shape of artificial wave furrows are clarified to prevent wave overtopping. In addition, the Weibull distribution can be applied to approximately the frequency distribution of wave overtopping rate over a gentle slope and roughened seawall.

Keywords: gentle slope-type seawall, wave overtopping, artificial roughness

1. 緒言

近年、国民の海岸に対するニーズは、安全の確保に加えて、親水性の向上や良好な景観の創造、生物との共生など多様化、高度化してきており、海岸護岸の建設に際しても、緩傾斜護岸などに代表されるような天端の低いものが多く採用されるようになってきた。一方、最近における海岸の生態調査の結果¹⁾では、波食溝など、地形に凹凸のある箇所では生息動物の多様性も高いことがわかってきた。

この研究では、こうした地形の凹凸を護岸ののり面にも取り入れて、その越波防止効果を高めることを試みた。従来、緩傾斜護岸の越波特性については、井上ら^{2)~4)}によりある程度の研究がなされている。すなわち、のり面勾配が緩やかなほど、その越波防止効果は大きく、風の影響も小さいことが明らかにされている。しかし、護岸ののり面をあまり緩やかにし過ぎると、潮位の上昇に対して、越波防止機能が著しく低下する⁵⁾。そこで、緩傾斜護岸ののり面に粗度として人工波食溝を設置した場合の越波特性を、設置しない場合のものと比較しながら実験的に検討して、のり面勾配が非常に緩やかな傾斜護岸の越波防止機能の向上を図ろうとした。

2. 実験概要

実験は、二次元不規則波造波水槽（長さ25.0m、幅0.5m、深さ0.6m）内に、図-1(a)に示すようなのり面勾配が1/20の緩傾斜護岸を設け、そののり面上に粗度として図-1(b)に示した人工波食溝の模型を設置して行った。まず、緩傾斜護岸を越波する水量を護岸背後で測定し越波流量を求めた。さらに、不規則波群の1波ごとの越波量も詳細に測定して、越波率や代表波法と同様な定義による1波ごとの代表越波流量や越波流量の出現頻度分布を求めた。

人工波食溝の設置位置は種々変化させ、越波防止の立場から、その最適な設置位置を検討した。また、波食溝を一つだけ単独で設置した場合や複数個を連続して設置した場合についても検討を行った。さらに、波食溝の前面の傾斜角 θ を図-1(b)に示したように60°、90°、120°および135°の4種類に変化させ、越波量の低減効果が最も

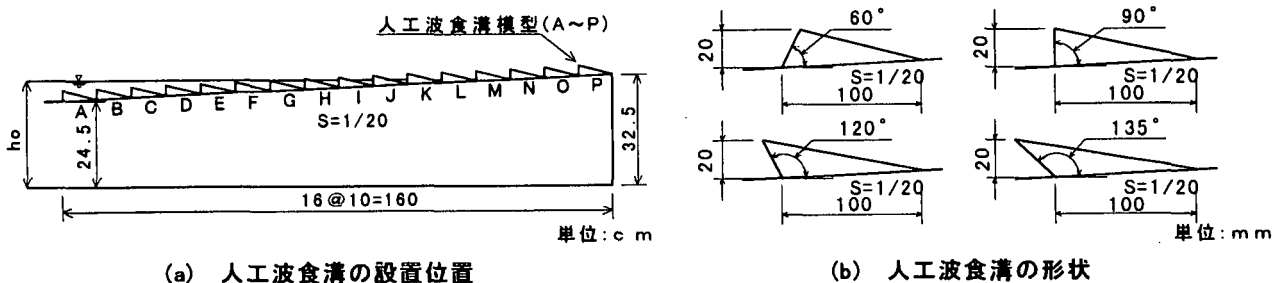


図-1 実験装置

* 正会員 関西大学工学部土木工学科 (564-8680 吹田市山手町3-3-35)

** 学生会員 関西大学大学院工学研究科

大きい形状についても検討した。実験に用いた不規則波の期待スペクトルは、有義波周期 T が1.0sのBretschneider・光易型であり、有義波形勾配 H/L を0.03~0.06の範囲内で変化させた。また、一様水深・波高比 h_0/H を4.97で一定にした場合には、有義波周期 T を0.8sと1.2sに変化させた。

3. 実験結果とその考察

3.1 人工波食溝の設置位置

まず、緩傾斜護岸ののり面上に人工波食溝を一つだけ単独で設置して、その最適な設置位置を検討した。図-2および3には、波食溝を砕波帯より沖側のA点からdry bed上のP点まで、それぞれ1個ずつ設置した場合の越波率 r_o および無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH^3}$ と波食溝の設置位置との関係を、波食溝の形状ごとに示した。なお、図中の破線Zは波食溝を設置しない場合のものであり、 h_s は波食溝の前面水深である。

波食溝を砕波帯あるいは砕波帯より沖側に設置した場合には、越波率も越波流量も設置しない場合のものとほとんど変化はなく、波食溝の越波防止効果はまったくみられない。これは、波食溝が潜堤として機能し、砕波を促進するが、逆に砕波に伴って波食溝背後の平均水面が上昇するためである。また、波食溝を汀線より少し沖側に設置した場合には、越波率も越波流量も設置しない場合のものよりも大きく、越波がかえって助長される。これは、波食溝背後にタイドプールが形成され、静水面が天端付近まで上昇することにより、波高の比較的小さな波が進入しても越波するうえに、タイドプールで生じた波も絶えず越波するためである。しかし、波食溝をdry bed上に設置した場合には、越波率も越波流量も設置しない場合のものよりもかなり小さく、越波防止効果は極めて大きい。これは、護岸のり面で砕波した波の遡上を波食溝が妨げるうえに、波食溝前面における戻り流れの影響も大きいためである。したがって、波食溝を一つだけ単独で設置する場合には、dry bed上に設置することが、越波防止の立場からは、最も好ましく、このことは、いずれの形状の波食溝についてもいえる。

3.2 単独波食溝と連続波食溝の比較

複数個の人工波食溝を連続して設置した場合の越波防止効果を単独波食溝の場合と比較した。図-4および5には、越波率および越波流量と連続波食溝の設置個数との関係を示した。なお、連続波食溝の設置起点は、砕波帯より沖側のA点、砕波帯のE点および汀線よりやや沖側のI点であり、最大設置個数は8個とした。

波食溝をA点から設置した場合には、その設置個数が増えても、越波率も越波流量も設置しない場合のものとほぼ同じ程度か、あるいはそれよりも大きく、越波防止効果はまったくみられない。これは、波食溝を数多く設置しても、そのすべてが水没しているためである。E点から設置した場合には、設置個数が5個までは、A点から設置した場合と同様の傾向がみられるが、6個以上になると越波防止効果は大きくなり、越波率も越波流量も設置しない場合のものよりも小さくなる。これは、設置個数が6個以上になると、波食溝前面が水面より現れるため、粗度の効果が大きくなるものと考えられる。また、最も岸側にある波食溝の位置は汀線よりやや沖側であり、連続波食溝の背後にタイドプールが形成される

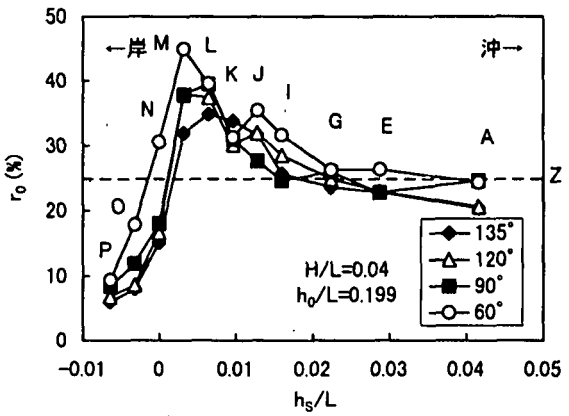


図-2 越波率と波食溝の設置位置との関係

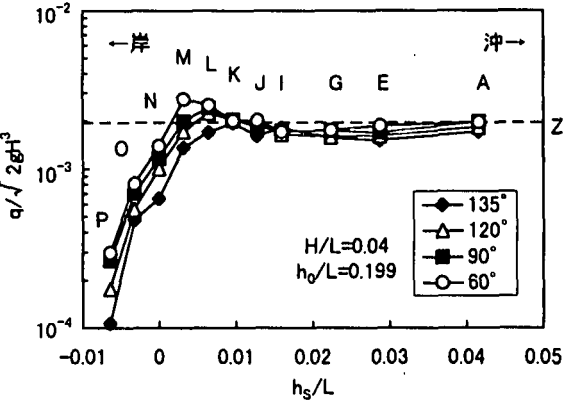


図-3 越波流量と波食溝の設置位置との関係

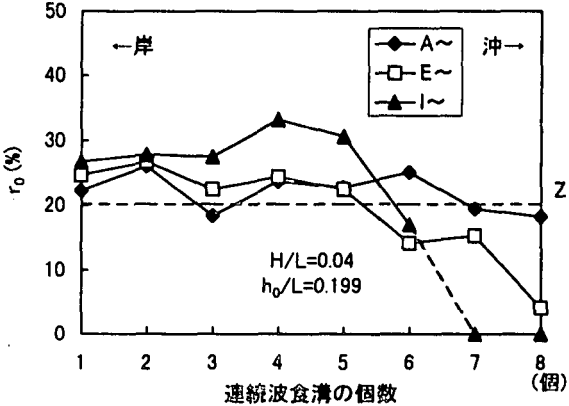


図-4 越波率と連続波食溝の設置個数との関係

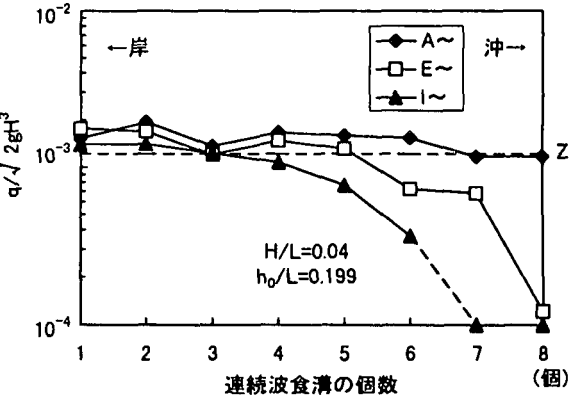


図-5 越波流量と連続波食溝の設置個数との関係

が、遡上波は連続波食溝の存在によってかなり減衰されるため、単独で設置した場合のように、タイドプールの影響で越波が助長されるようなことはない。I点から設置した場合には、設置個数が5個以下のときの越波率が設置しない場合のものよりも大きい、6個以上になると急激に小さくなる。これは、設置個数が4および5個のときには、連続波食溝による遡上波の減衰が小さく、タイドプールの影響が現れるためと考えられる。また、越波流量については、設置個数が4個以上になると、設置しない場合のものよりも小さくなり、さらに、7個以上設置した場合にはまったく越波せず、越波防止効果は極めて大きい。これは、ほとんどの波食溝が水面から現れ、遡上波の減衰が非常に大きくなるためである。したがって、複数の波食溝を連続して設置する場合には、汀線をはさんで設置することが望ましい。

3.3 人工波食溝の前面形状

人工波食溝の前面の傾斜角を図-1(b)に示すように変えて、越波量の低減効果が最も大きい波食溝の形状について検討した。図-6(a)および(b)には、それぞれdry bed上のP点と汀線付近のM点に、人工波食溝を1個ずつ設置した場合の越波流量と波食溝前面の角度 θ との関係を示した。

これらによると、波食溝をP点に設置した場合の越波流量は、波食溝前面の角度が大きいものほど小さく、波食溝の前面形状の影響がみられる。特に、波形勾配が小さい場合、前面がover hungしたものをを用いれば、まったく越波しなくなり、越波低減効果は極めて大きい。また、前面の傾斜角が 60° のものは、鉛直のものよりも常に大きく、防災上は好ましくない。M点に設置した場合にも、ほぼ同様の傾向がみられ、波形勾配が小さいほど前面形状の影響は大きい。しかし、波形勾配が大きいと、前面形状の影響はほとんどみられない。したがって、波食溝の形状としては、前面がover hungし、その傾斜角が大きいものほど効果的である。また、粗度の効果は、波高との相対的な大きさによって非常に異なるため、波食溝の規模の決定に際しては、計画波高との関係において、十分な検討が必要である。

3.4 各代表越波流量

図-7には、越波した波だけを対象とした場合の平均越波流量 q_m と波形勾配との関係を示した。

波食溝を汀線付近のM点に設置した場合の $q_m T/H^2$ は、設置しない場合よりも若干小さいが、ほぼ同じ傾向を示している。また、dry bed上のP点に設置した場合の $q_m T/H^2$ は、 H/L が大きくなるにつれて増大するが、いずれの H/L においても設置しない場合のものよりもかなり小さい。なお、1/3最大および1/10最大越波流量についても、図示はしていないが、いずれも平均越波流量の場合とほぼ同様の傾向がみられる。

図-8には、越波した波だけを対象とした場合の最大越波流量 q_{max} と波形勾配との関係を示した。

波食溝を設置した場合には、他の代表越波流量の場合とほぼ同じ傾向を示している。しかし、設置しない場合の $q_{max} T/H^2$ は、 H/L が0.05になるとかなり大きいが、設置した場合にはそれほど大きくはならない。これは、粗度の効果によるものである。

図-9には、越波した波だけを対象とした場合の平均越波流量 q_m と周期との関係を示した。

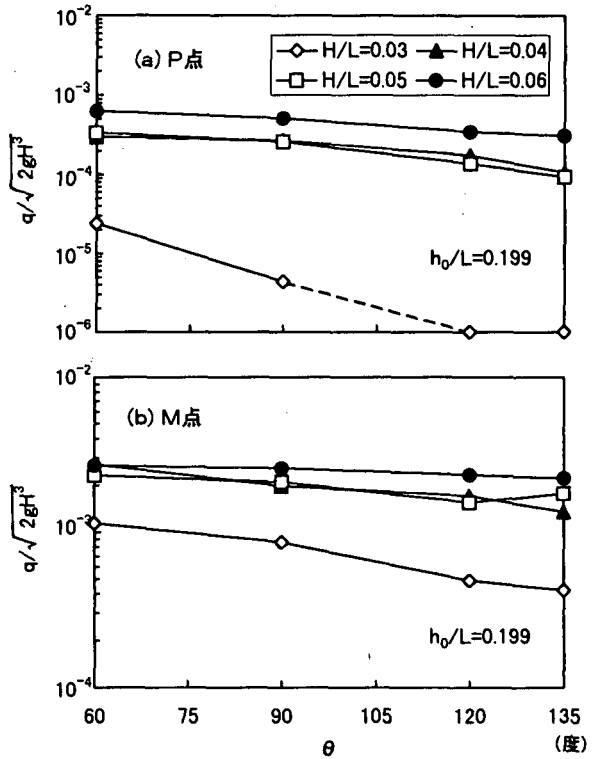


図-6 越波流量と波食溝前面の角度との関係

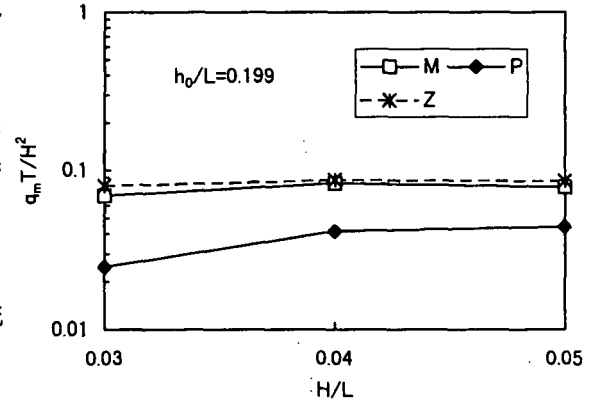


図-7 平均越波流量と波形勾配との関係
(越波した波だけを対象とした場合)

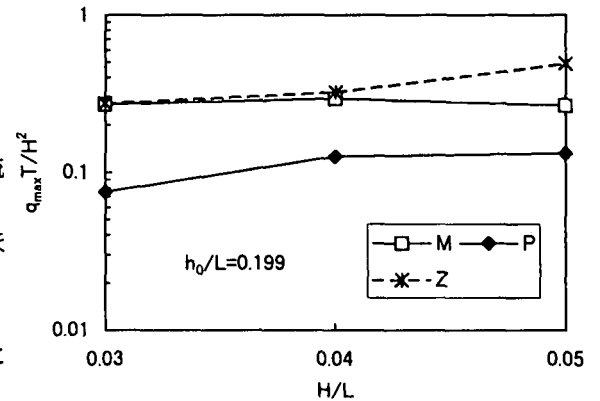


図-8 最大越波流量と波形勾配との関係
(越波した波だけを対象とした場合)

波食溝を汀線付近のM点に設置した場合の $q_m T/H^2$ は、周期が長くなるにつれて増大し、1.2sになると設置しない場合のものよりも大きくなる。一方、dry bed上のP点に設置した場合の $q_m T/H^2$ も、周期が長くなるにつれて増大するが、いずれの周期においても最も小さい。なお、1/3最大、1/10最大および最大越波流量についても、図示はしていないが、いずれも平均越波流量の場合とほぼ同様の傾向がみられる。

以上のように、波食溝をdry bed上に設置した場合の各代表越波流量は、いずれの波形勾配や周期においても最も小さく、粗度の効果は非常に大きい。しかし、周期が長くなるとその効果は相対的に小さくなる。一方、汀線付近に設置した場合には、周期が短いときには、若干の越波低減効果が期待できるが、周期が長くなると、越波が助長される。また、最大越波流量については、 H/L が大きいときに粗度の効果が期待できる。しかし、波食溝の背後にできるタイドプールの影響によって、設置しない場合に比べると越波流量は大きくなるため、波食溝の設置に際しては、その位置や形状などに工夫が必要である。

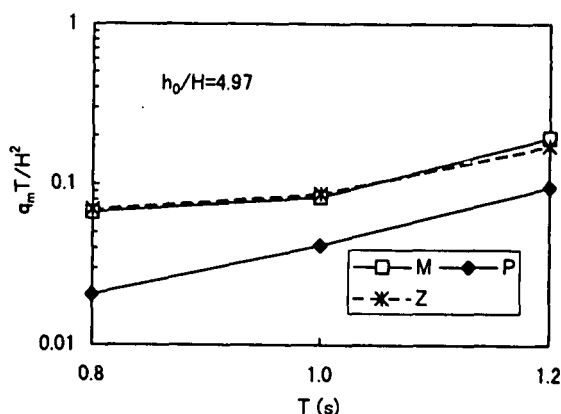


図-9 平均越波流量と周期との関係
(越波した波だけを対象とした場合)

3.5 越波量の出現頻度分布

図-10、11および12には、越波した波だけを対象とした場合の越波量の出現頻度分布を、波食溝の設置位置ごとに示した。いずれも縦軸は1波ごとの越波流量 q の出現確率 $P(q/q_m)$ 、横軸は1波ごとの越波流量と平均越波流量との比 q/q_m である。

図-10に示した $T=1.0s$ 、 $H/L=0.04$ の場合、 $P(q/q_m)$ の最大値は、設置しない場合とM点に設置した場合には q/q_m が0.2~0.4、P点では0~0.2の範囲で出現する。また、最大越波流量と平均越波流量との比は、設置しない場合が3.6、M点では3.4、P点では3.0であり、それほど差はみられない。なお、平均越波流量よりも大きなものの出現確率 $P(q/q_m \geq 1)$ は、設置しない場合が35.6%、M点では38.3%、P点では29.4%であり、M点に設置した場合がやや大きい。

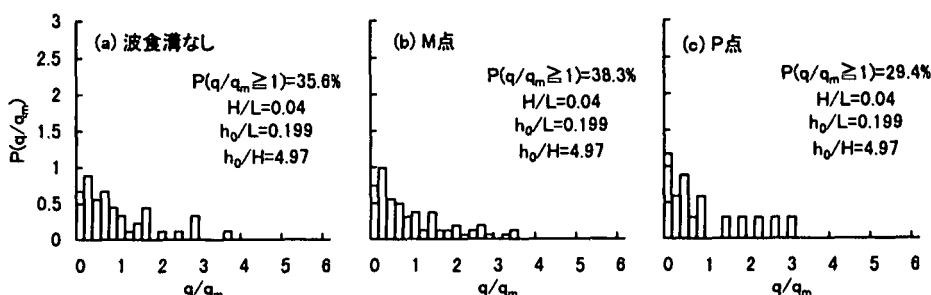


図-10 越波流量の出現頻度分布
(越波した波だけを対象とした場合、 $T=1.0s$ 、 $H/L=0.04$)

図-11に示した $T=1.0s$ 、 $H/L=0.05$ の場合、 $P(q/q_m)$ の最大値は、設置しない場合とP点に設置した場合には q/q_m が0.2~0.4、M点では0.6~0.8の範囲で出現する。また、最大越波流量と平均越波流量との比は、設置しない場合が5.6、M点では3.2、P点では2.8であり、設置しない場合には、平均越波流量に比べて最大越波流量はかなり大きくなる。なお、 $P(q/q_m \geq 1)$ は、設置しない場合が40.9%、

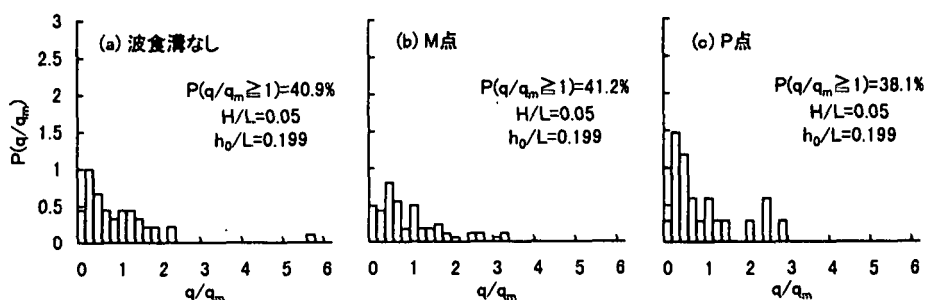


図-11 越波流量の出現頻度分布
(越波した波だけを対象とした場合、 $T=1.0s$ 、 $H/L=0.05$)

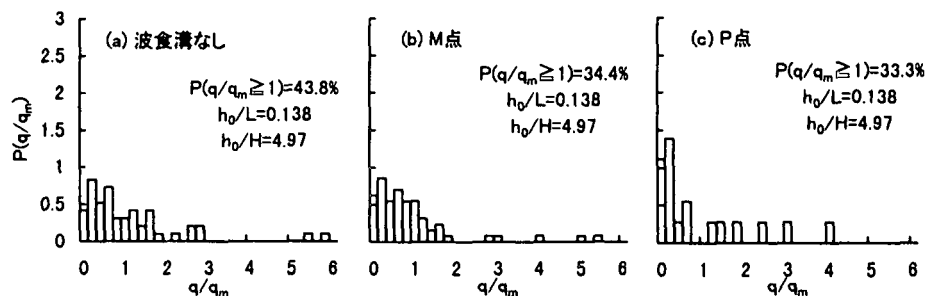


図-12 越波流量の出現頻度分布
(越波した波だけを対象とした場合、 $T=1.2s$)

M点では41.2%、P点では38.1%であり、図-10の場合と同様に、M点に設置した場合がやや大きい。

図-12に示した $T=1.2s$ の場合、 $P(q/q_m)$ の最大値は、いずれの場合も q/q_m が0.2~0.4の範囲で出現する。また、最大越波流量と平均越波流量との比は、設置しない場合が6.0、M点では5.6、P点では4.2であり、M点に設置した場合と設置しない場合には、平均越波流量に比べて最大越波流量はかなり大きなものになることがわかる。なお、 $P(q/q_m \geq 1)$ は、設置しない場合が43.8%、M点では34.4%、P点では33.3%であり、いずれの位置に設置した場合も、設置しない場合のものよりも小さい。

以上のように、いずれの場合にも、波食溝をdry bed上に設置した場合には、最大越波流量と平均越波流量との比は小さく、平均越波流量よりも大きなものの出現確率も、設置しない場合のものよりも小さい。したがって、dry bedに人工波食溝を設置すると、その粗度としての効果は極めて大きく、護岸の越波防止機能は向上する。

3. 6 越波量分布とWeibull分布との適合性

図-13、14および15には、越波した波だけを対象とした場合の越波流量の超過発生確率 $P(q/q_m)$ を、波食溝の設置位置ごとに示した。

図-13の $T=1.0s$ 、 $H/L=0.04$ の場合、(a)および(b)図では、全体的に実験値が理論値よりも若干大きい、Weibull分布との適合性は良い。(c)図では、実験値は理論値よりも大きく、ばらつきもみられ、Weibull分布との適合性はやや劣ってくる。

図-14の $T=1.0s$ 、 $H/L=0.05$ の場合、(a)図では、Weibull分布との適合性は良いが、 q/q_m が大きいときに実験値が理論値よりもかなり大きい。(b)図では、Weibull分布との適合性は良いが、 q/q_m が小さいときに実験値が理論値よりも大きい。(c)図では、実験値にばらつきがみられ、Weibull分布との適合性はあまり良くない。

図-15の $T=1.2s$ の場合、設置の有無や設置位置に関係なく、 q/q_m が大きいときに実験値が理論値よりも大きく、Weibull分布との適合性はあまり良くない。

以上のように、波食溝を設置しない場合と汀線付近のM点に設置した場合の越波流量の超過発生確率は、いずれの H/L でも、実験値が理論値よりも若干大きい、Weibull分布との適合性は良い。また、dry bed上のP点に設置した場合には、 H/L の大小にかかわらず、ばらつきがみられ、Weibull分布との適

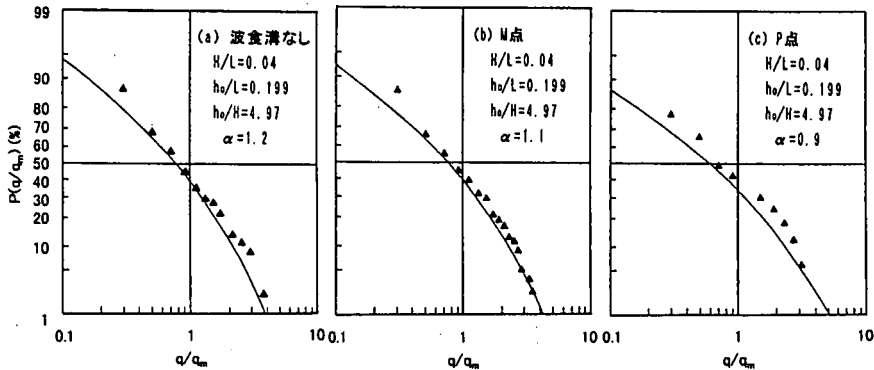


図-13 越波流量の超過発生確率
(越波した波だけを対象とした場合、 $T=1.0s$ 、 $H/L=0.04$)

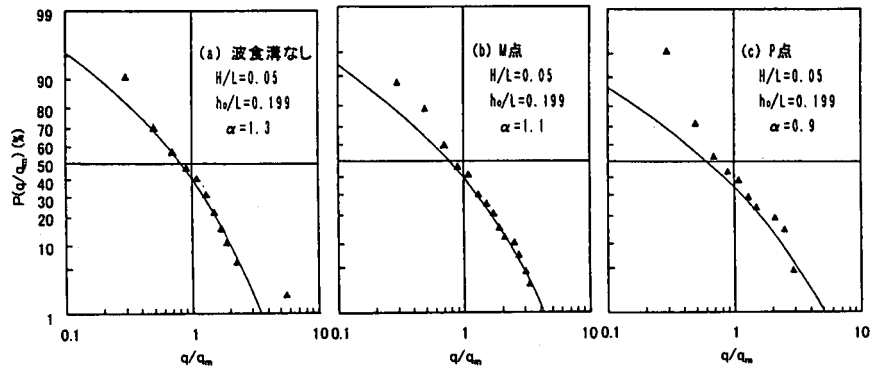


図-14 越波流量の超過発生確率
(越波した波だけを対象とした場合、 $T=1.0s$ 、 $H/L=0.05$)

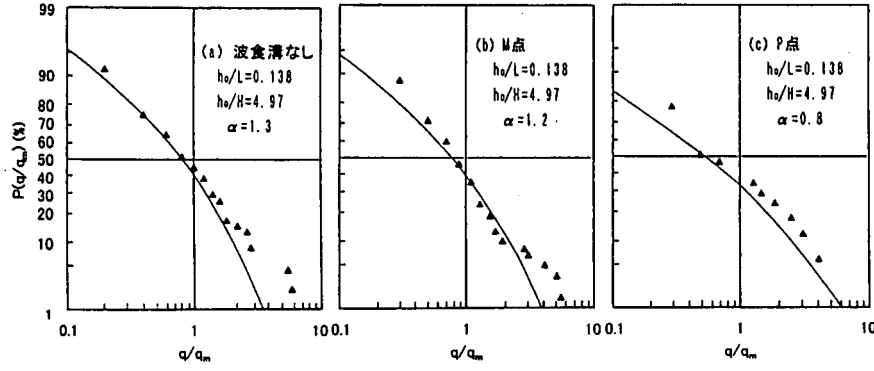


図-15 越波流量の超過発生確率
(越波した波だけを対象とした場合、 $T=1.2s$)

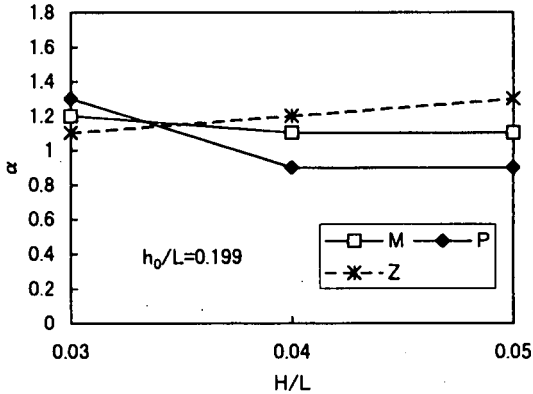


図-16 形状母数と波形勾配との関係
(越波した波だけを対象とした場合)

合性も劣ってくる。なお、 $T=1.2s$ の場合は、波食溝の設置位置にかかわらず、最大越波流量の実験値が理論値よりも大きいため、Weibull分布で最大越波流量を推算すると危険である。

図-16には、これらのWeibull分布の形状母数 α と波形勾配との関係を示した。これによると、M点に設置した場合には、ほぼ一定値を示し、 H/L が大きくなると、設置しない場合よりも小さくなる。さらに、P点に設置した場合には、 H/L が0.04以上になると形状母数は、設置しない場合に比べて小さくなり、このことは、防災上は好ましい特性ではない。

図-17には、Weibull分布の形状母数 α と周期との関係を示した。これによると、図-16と同様の傾向がみられ、M点に設置した場合には、ほぼ一定値を示し、周期が長くなると、設置しない場合のものよりも小さくなる。しかし、P点に設置した場合には、周期が1.0sより長いと形状母数は、設置しない場合に比べてかなり小さくなる。

したがって、入射波の波形勾配が大きい場合や周期が長い場合に、波食溝をdry bed上に設置すると、平均越波流量よりも越波流量の大きなものの出現確率が大きくなるため、護岸の機能設計に際しては、注意が必要である。

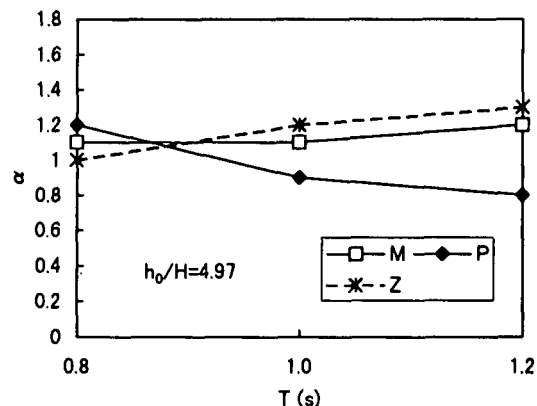


図-17 形状母数と周期との関係
(越波した波だけを対象とした場合)

4. 結 語

緩傾斜護岸の越波防止機能を向上させるため、のり面上に粗度として人工波食溝を設置し、二、三の実験的な検討を行ってきた。その結果、以下のようなことが明らかになった。

1) 人工波食溝を砕波帯あるいは砕波帯より沖側に設置した場合には、その越波防止効果はまったくない。また、人工波食溝を汀線よりやや沖側に設置した場合には、その背後に形成されるタイドプールの影響によって、越波がかえって助長される。さらに、dry bed上に設置した場合には、波食溝が波の遡上を妨げるため、越波防止効果は極めて大きい。

2) 複数の人工波食溝を連続して設置しても、それらの位置が砕波帯あるいは砕波帯より沖側にある場合には、越波防止効果は期待できない。しかし、汀線をはさむように設置した場合には、設置個数の増加とともに、越波防止効果は大きくなる。

3) 人工波食溝の前面形状がover hungし、その傾斜角が大きいものほど、越波防止効果は大きい。また、この傾向は、波食溝をdry bed上に設置し、入射波の波形勾配が小さい場合に著しい。

4) 越波した波だけを対象とした場合の各代表越波流量は、人工波食溝をdry bed上に設置した場合には、設置しない場合のものよりも常に小さく、越波防止効果が期待できる。また、汀線よりやや沖側に設置し、入射波周期が長くなると越波が助長されるが、最大越波流量については、波形勾配が大きいときに、粗度の効果がみられる。

5) 越波した波だけを対象とした場合の不規則波群の1波ごとの越波流量の出現頻度分布は、人工波食溝を汀線より沖側に設置した場合と設置しない場合には、Weibull分布にほぼ適合する。しかし、dry bed上に設置した場合には、Weibull分布との適合性はやや劣り、入射波の波形勾配が大きい場合や周期が長い場合には、その形状母数も小さくなるため、護岸の機能設計に際しては、注意しなければならない。

最後に、本研究に際し実験や資料整理など、熱心に助力してくれた現在、大阪府の山岡 豊君、広島市の山本恭裕君、藤沢市の青木克彦君、姫路市の伊藤辰徳君、日本構研情報(株)の中瀬裕貴君および(株)鴻池組の山田哲司君ら、当時の学生諸君に感謝の意を表する。なお、この研究は関西大学学術研究助成基金による研究の一部であることを明記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 井上雅夫・鉄川 精・島田広昭・柄谷友香：生物との共生をめざした人工磯の地形とその造成素材について，海岸工学論文集，第43巻，pp.1166～1170，1996.
- 2) 井上雅夫・島田広昭・殿最浩司：不規則波による緩傾斜護岸の越波特性，海岸工学論文集，第37巻，pp.514～518，1990.
- 3) 井上雅夫・島田広昭・円間弘起：緩傾斜護岸の越波特性に及ぼす風の影響，海岸工学論文集，第39巻，pp.586～590，1992.
- 4) 井上雅夫・島田広昭・坂本佳弘：親水性護岸の越波防止機能，海岸工学論文集，第40巻，pp.701～705，1993.
- 5) 井上雅夫・島田広昭・坂本佳弘：海面上昇に伴う海岸護岸の越波防止機能低下について，海岸工学論文集，第41巻，pp.676～680，1994.