

波返し付き傾斜護岸の越波流量特性 に関する実験的研究

Experimental Study on Wave Overtopping Quantity Characteristic
of Sloping Revetment with Recurved Parapets

宮島正悟¹・小椋進²・大橋幸彦²・森川高德³・奥田純生⁴

Shogo MIYAJIMA, Susumu OGURA, Yukihiro OOHASHI, Takanori MORIKAWA and Sumio OKUDA

¹正会員 工修 国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所 (〒457-0833 名古屋市南区
東又兵衛町一丁目57番地の2)

²国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所 (〒457-0833 名古屋市南区
東又兵衛町一丁目57番地の2)

³正会員 玉野総合コンサルタント(株) 営業推進室 (〒453-0016 名古屋市中村区竹橋町4番5号)

⁴玉野総合コンサルタント(株) 環境防災部 (〒461-0005 名古屋市東区東桜2丁目17番43号)

A revetment parapet has the capability of reducing the volume of overtopping wave, and it is also known that its effectiveness largely depends on its own characteristics, such as curvature radius, installation angle, and inclination of slope face. Regrettably, the relationship between the capability and the characteristics is not yet quantitatively known, constituting a bottleneck in constructing such a revetment. In view of the fact below, this study reveals the volume of overtopping wave that could occur at a given beach of the Ise Bay. The data collected there is based on experimentally changed wave conditions, depth of the revetment foot in water, and parapet specifications, and a hydraulic model is used in the test. By using an upright revetment equivalent crown height coefficient, a diagram of estimated overtopping wave volume is prepared in relation to a given wave height, revetment foot depth in water, and crown height from one shape of the parapet to another.

Key Words: Wave overtopping quantity, Sloping revetment with recurved parapets,
Reduction rate of crown height, Diagram of estimated overtopping wave volume, Hydraulic model test

1. はじめに

護岸に設けられる「波返し」は、越波低減機能を有し、かつ、その効果は、波返しの各種諸元(曲率半径 R 、角度 θ 、法面勾配 i : 図-1参照)の影響を強く受けることが知られている。しかし、両者の関係は定量的に把握されておらず、波返し付き傾斜護岸(以降、波返し護岸と呼ぶ)を計画する上での隘路となっている。

以上を踏まえ、本研究は、伊勢湾内の任意の海岸を対象に、波浪条件、堤脚水深、波返し形状を各種変化させた場合の越波流量特性を水理模型実験により明らかにするとともに、直立護岸に対する換算天端高係数を利用して、各種波返し護岸に対する概算越波流量の

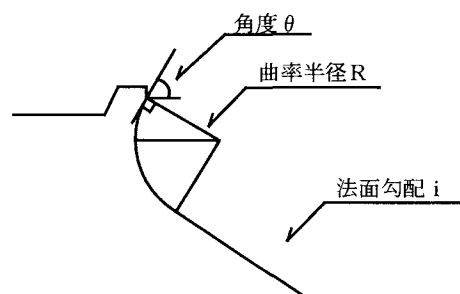


図-1 波返しの諸元

推定手法を検討し、適切な護岸設計を行うための基礎資料を得ることを目的とした。

2. 実験内容

(1) 実験装置

実験は、国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所伊勢湾水理環境実験センターが所有する長さ 30m、幅 1m、深さ 1.2m からなるピストン型単一方向不規則波造波装置（吸収制御タイプ）が設置された断面二次元水路において実施した（図-2 参照）。

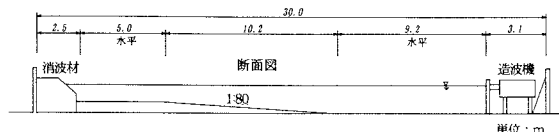


図-2 実験水路

(2) 実験条件

実験縮尺は 1/30、実験潮位は当海域の設計潮位である H.H.W.L+2.9m で実施した。

実験に用いた波の諸元は、 $H_o' = 3.69\text{m}, 4.19\text{m}, 4.69\text{m}$ の 3 種類、波形勾配 $H_o'/L_o = 0.036, 0.056, 0.061$ の 3 種類を組み合わせた計 9 種類の不規則波であり、周波数スペクトルは、いずれも、プレートシュナイダー・光易型を目標とした。

地形条件は、海底勾配 1/80、堤脚水深（H.H.W.L+護岸法尻水深）は $h = 1.6\text{m}$ （現況）、 2.6m （洗掘深 1.0m）、 3.6m （洗掘深 2.0m）の 3 種類とした。

実験に用いた護岸は、図-3 に示すとおりで、波返し曲率半径 $R = 1.0\text{m}, 1.5\text{m}$ 、角度 $\theta = 45^\circ, 60^\circ$ 、法勾配 $i = 1:1.0, 1:1.5$ を組み合わせた計 8 種類を対象とし、天端高は +6.0m（ $h_c = 3.1\text{m}$ ）で統一した。

(3) 実験方法及び解析方法

実験では、護岸模型（合板製）の背後に越波水採水箱（プラスチック製）を設置し、波返し工からの越波水を採水した。その採水範囲は、水路幅 1m のうちの中央 60cm である。

また、現況地形を含む 3 種類の堤脚水深にて実験を実施することから、図-4 に示すように、護岸前面の海底床を分離可能な構造とし、水深を深くする毎に、海底床を取り外し、護岸模型を順次前出しする形で対応した。

すなわち、洗掘深 0m のケース（水深 1.6m）は造波板から 22.7m 地点、洗掘深 1m のケース（水深 2.6m）は造波板から 20.1m 地点、洗掘深 2m のケース（水深 2.6m）は造波板から 17.4m 地点に護岸模型及び越波水採水箱を移動させた。

なお、海底勾配が 1/80 と緩いことから、合板を用いて、既設水路を 8cm（現地 2.4m 分）底上げし、造波板前面水深を確保した。

実験の作用波数は、基本的に各波浪とも約 660 波とした。ここに、660 波程度とした理由は、統計的に当該波数中に発生する $H_{\max} = 1.8H_1/3$ の関係の波を得るためである¹⁾。実験では、波が定常状態になるまで越波水が採水箱に入らないように蓋をし、測定開始と同時に蓋を外し、越波水の採水を行った。そして、幅 60cm の範囲で採水箱内に集水させ、逐次、電子秤（6kg/個用）を用いて採水重量を測定することで越波量を求めた。

解析では、ケース毎に、測定した越波量を幅 1m 当たり、1 秒間当たりに対する越波流量に換算し、各種波形勾配、堤脚水深、波返し形状に対する越波流量特性を検討した。

さらに、実験データを基に、直立護岸に対する換算天端高係数 β （越波流量が等しくなる実験護岸の天端高と直立護岸とした場合の天端高の比）を利用して、各種波返し護岸毎に、任意の波高、堤脚水深、天端高に対する概算越波流量ならびに任意の波高、堤脚水深に対し許容越波流量（ $0.02\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ ）となる天端高を推定できる手法を検討した。

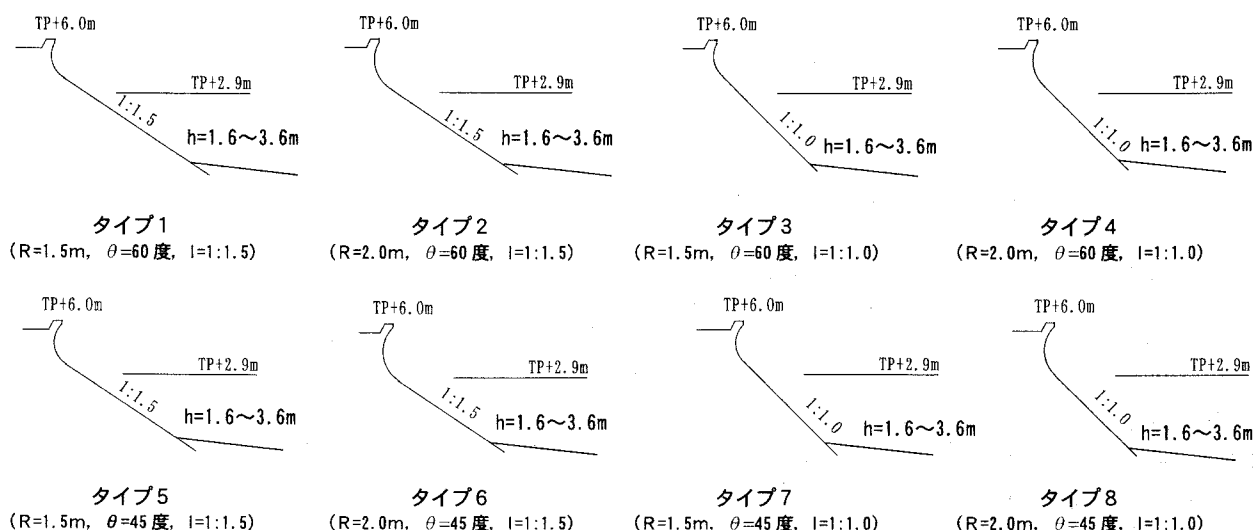


図-3 実験で対象とした 8 種類の波返し護岸

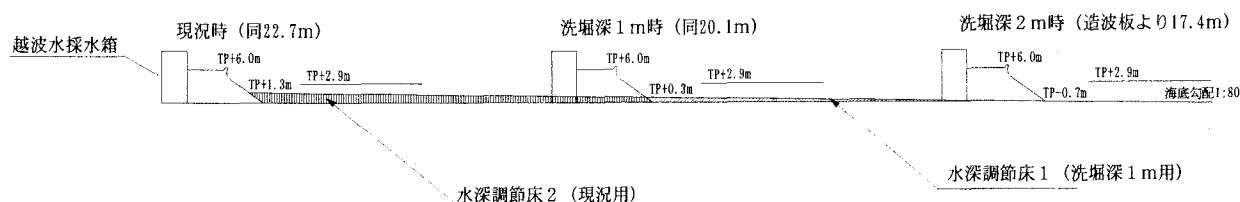


図-4 護岸模型の設置状況

3. 実験結果及び考察

(1) 堤脚水深、波形勾配と越波流量の関係

図-5は、タイプ1（曲率半径1.5m、角度60度、勾配1:1.5）の護岸について、 $H_o' = 4.19\text{m}$ を対象に、各波形勾配（ $H_o'/L_o = 0.036 \sim 0.061$ ）における堤脚水深と越波流量の関係を示したものである。

これをみると、越波流量は、堤脚水深が深くなるほど、また、波形勾配が小さいほど、増加する状況となり、水深3.6m、波形勾配0.036の条件では、許容値を越える越波流量となっている。

この要因は、本実験条件（ $h/H_o' = 0.34 \sim 0.98$ ）のような碎波帯内においては、水深が深いほど、また、波形勾配が小さいほど、護岸前面での波高が高くなるためである。

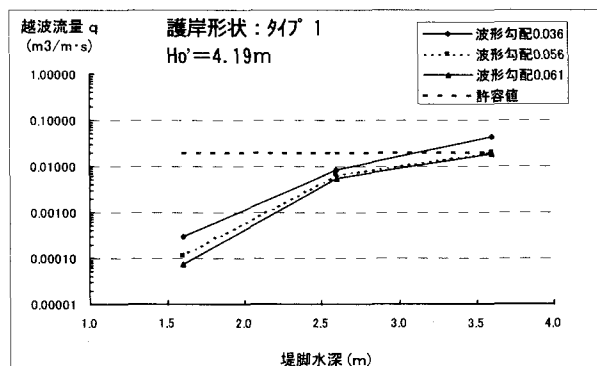


図-5 堤脚水深、波形勾配と越波流量の関係

(2) 波返し護岸の越波流量低減効果

a) 越波流量からの視点

図-6は、タイプ1（曲率半径1.5m、角度60度、勾配1:1.5）の護岸について、実験で得られた越波流量と、同じ波浪条件において高山らの方法²⁾により推定した「直立護岸とした時の越波流量」を比較したものである。

これをみると、堤脚水深が最も深い3.6mの条件で、わずかに直立護岸とした時の越波流量を越えるケースもみられるが、堤脚水深2.6m以下では、いずれのケースも直立護岸のそれを下回り、その傾向は水深が浅くなるほど強くなっている。

既往の研究²⁾によれば、本実験の基本形状である「傾

斜護岸（波返し無し）」は、越波水塊の乗り上げ効果により、直立護岸に比べて越波流量が増大することが知られている。

こうした中、ほとんどのケースで、直立護岸の越波流量を下回る結果となったことから、タイプ1の波返し護岸は、非常に優れた越波低減効果を有し、その機能は、浅い水深ほど、高い効果を発揮することが確認された。

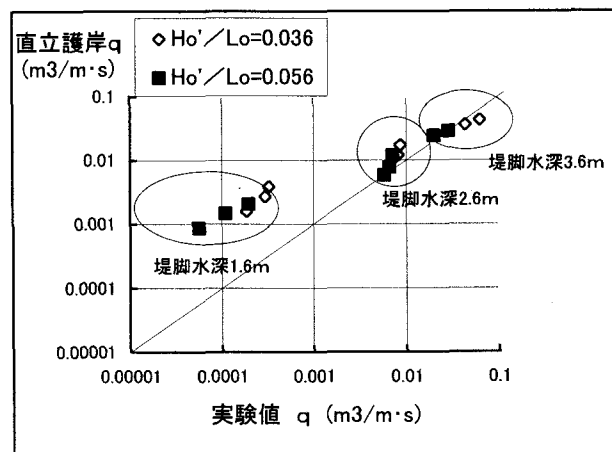


図-6 波返し護岸と直立護岸の越波流量比較

b) 天端高からの視点

図-7は、先の護岸タイプ1（曲率半径1.5m、角度60度、勾配1:1.5）に対して得られた実験越波流量を基に、当該値と同じ越波流量となる直立護岸としたときの天端高 h_{cv} を高山らの方法²⁾により求め、実験で使った天端高 $h_c (= 3.1\text{m})$ に対する比（ h_c/h_{cv} ：すなわち、換算天端高係数 β ）として示したものである。よって、換算天端高係数 $\beta < 1$ の場合、同じ越波流量を直立護岸より低い天端高でも実現できることを意味し、越波流量低減効果が高いことを示している。

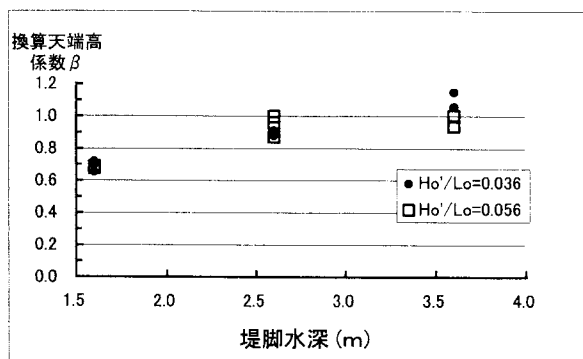
これをみると、堤脚水深が最も深い3.6mの条件で、換算天端高係数 $\beta > 1$ （1.06～1.15）となっているが、その他の多くのケースでは、 β は1未満（0.68～0.95）に収まっている。

先に述べたように、本来、傾斜護岸は直立護岸より越波流量が高まる傾向にあり、 $\beta = 1.2$ として評価する必要があることが示されている²⁾。

この指標に照らすと、堤脚水深3.6mの条件でも、

β は1.2以下に収まり、水深2.6m以浅では、 $\beta < 1.0$ と、傾斜護岸の指標値1.2を大きく下回る結果となっている。

以上のことから、タイプ1の「波返し」を有する護岸は、非常に優れた越波低減効果を有し、浅い水深では、直立護岸より天端高を5～30%程度低減できる機能を有しているものと判断できる。



図－7 直立護岸に対する換算天端高係数 β の特性

(3) 波返し形状による越波流量特性

a) 波返し形状と越波流量の関係

図－8は、 $Ho'=4.19m$ 、堤脚水深3.6m時を対象に、8種類の波返し形状に対する越波流量特性を示したものである。

これをみると、越波流量は、護岸形状の影響によって、明確に違いが現れている。その傾向を詳細にみると、まず、角度45度（図中白印系）の方が、角度60度（図中黒印系）に比べ、越波流量が少なくなっている。

また、同じ角度同士でみると、法面勾配1:1.5（図中丸・四角印系）の方が、法面勾配1:1（図中三角・菱形印系）より越波流量が少なくなっている。同様に、曲率半径2.0m（図中四角・菱形印系）の方が、曲率半径1.5m（図中丸・三角印系）よりも越波流量が少ない傾向にある。

3つの諸元（曲率半径、角度、法面勾配）で、越波流量に対する影響度を比較すると、角度による影響が最も強く現れており、曲率半径と法面勾配は、ほぼ同程度の影響度であることがうかがえる。

この結果、タイプ3（曲率半径1.5m、角度60度、法面勾配1:1）が最も越波流量が多く、逆に、タイプ6（曲率半径2.0m、角度45度、法面勾配1:1.5）が最も低い越波流量となっている。

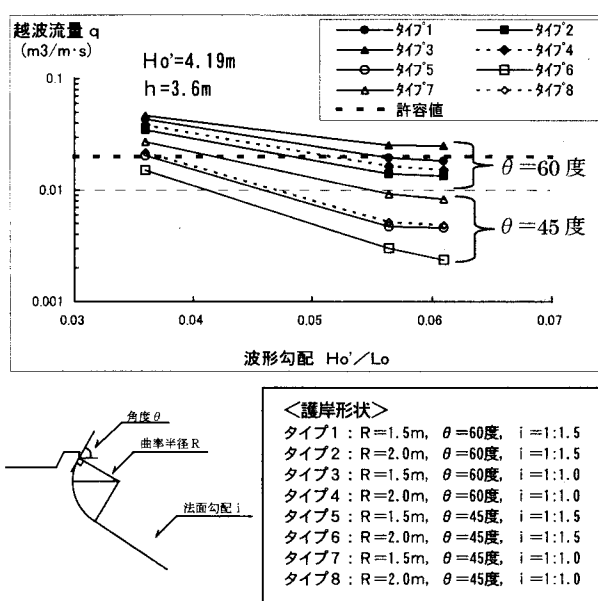
波形勾配0.056に対する越波流量で比較すると、最も越波流量が多くなるタイプ3（曲率半径1.5m、角度60度、法面勾配1:1）では $0.026m^3/m \cdot s$ と許容値 $0.02m^3/m \cdot s$ を越えるものが、タイプ6（曲率半径2.0m、角度45度、法面勾配1:1.5）になると、約1/9に相当する $0.003m^3/m \cdot s$ まで低下している。

曲率半径が大きいほど、また、角度が小さいほど、断面を小さくすることで、かつ、天端高の低減も可能となる。

一方、法面勾配が大きいほど、越波流量は増加するけれども断面は小さくできる。

施工性の観点からは、曲率半径が小さく、角度が大きいほど良いことが推測される。

このことから、本実験結果を利用することで、越波流量を制御しつつ、コスト縮減や低天端による景観創造、施工性など、目的に応じた最適な護岸形状の検討が可能であるものとする。



図－8 波返し形状と越波流量の関係

b) 換算天端高係数 β による評価

図－9は、先に示した $Ho'=4.19m$ 、堤脚水深3.6m時の実験結果を基に、8種類の波返し形状に対する換算天端高係数 β を示したものである。

先に示したように、 $\beta < 1$ の場合、同じ越波流量を直立護岸より低い天端高でも実現できることを意味し、越波流量低減効果が高いことを表している。

はじめに全体傾向をみると、いずれのタイプも、波返しの無い傾斜護岸の場合の換算天端高係数 $\beta=1.2$ を下回っており、波返しの効果が十分に発揮されていることを示している。

これを詳細にみると、越波流量が多くなる傾向にある角度60度のグループ（タイプ1～4：図中黒印系）では、波形勾配0.036時に、 β が1.0付近もしくはそれ以上となっているが、波形勾配0.056、0.061では、タイプ3を除き、いずれも、 β が1.0未満（0.85～0.95）に収まっており、直立護岸に比べ低い越波流量となることを示している。

越波流量が少ない傾向となる角度45度のグループ（タイプ5～8：図中白印系）では、いずれのケース

も $\beta < 1$ (0.61~0.91) となり、直立護岸に比べ、低い越波流量に収まることを示している。

特に、波形勾配 0.056, 0.061 の条件では、 $\beta = 0.6 \sim 0.8$ 程度まで下がっており、このことは、同じ越波流量に対して、直立護岸に比べ、20~40%程度、天端高を下げる事が可能となることを示している。

以上を総括すると、いずれのタイプも、通常の傾斜護岸に比べ越波流量は低減し、そのうち、角度 60 度のタイプでは、波形勾配 0.036 の条件を除くほとんどのタイプで、角度 45 度の条件では、すべてのタイプで、直立護岸を下回る越波流量となることが判明し、特に、後者では、直立護岸に比べ 10~40%程度、天端高を低減できることが分かった。

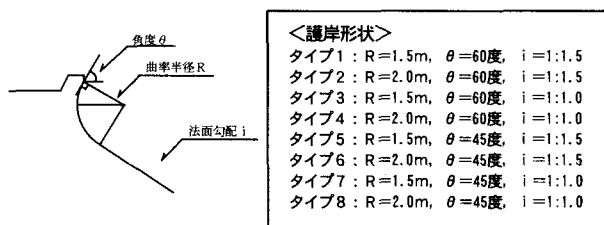
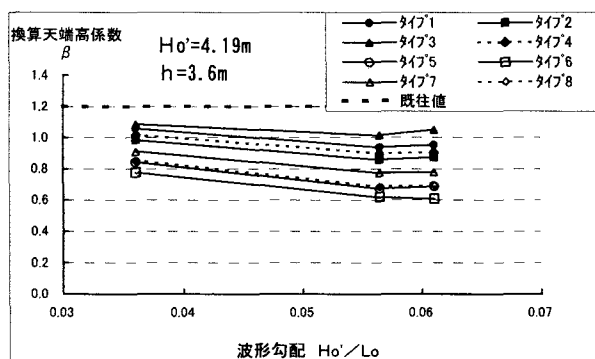


図-9 波返し形状と換算天端高係数 β の関係

(4) 任意の波高、堤脚水深、天端高に対する波返し護岸の越波流量推定図の提案

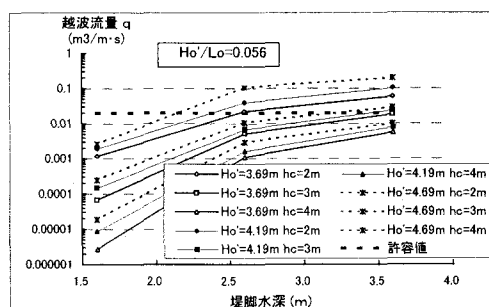
図-10は、実験結果を基に、直立護岸に対する換算天端高係数 β を求め、高山らの直立護岸越波流量算定式²⁾を用いて作成した波高、天端高をパラメータとする任意の堤脚水深における各種波返し護岸の越波流量推定図である(図例: 波形勾配 0.056)。

この図より、任意の波高、堤脚水深、天端高に対する波返し護岸の概算越波流量を推定することができる。

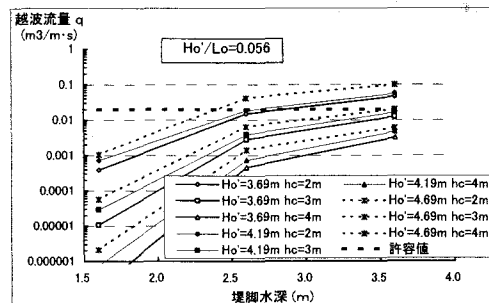
なお、本図の適用範囲は、実験を実施した条件内として、表-1のとおりとする。

表-1 越波流量推定図の適用条件

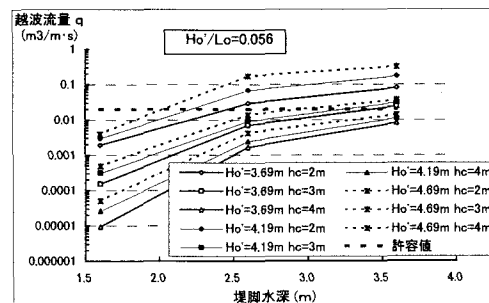
波の種類	換算沖波条件		地形条件		波返し形状		
	波高 H_o (m)	海底勾配 I	堤脚水深 h (m)	曲率半径 R (m)	角度 θ (度)	勾配 i	
不規則波	3.69~4.69	1/80程度	1.6~3.6	1.5, 2.0	45, 60	1:1.0, 1:1.5	



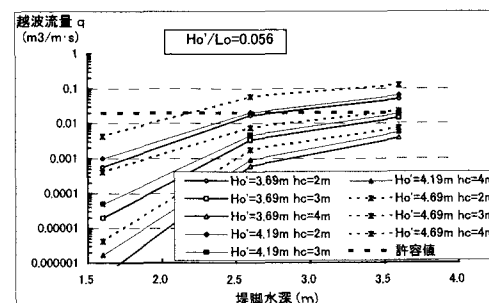
(1) タイプ1: $R=1.5m$, $\theta=60^\circ$, $i=1:1.5$



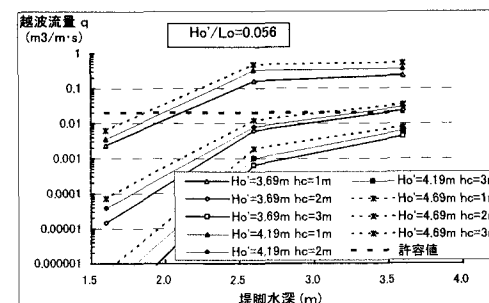
(2) タイプ2: $R=2.0m$, $\theta=60^\circ$, $i=1:1.5$



(3) タイプ3: $R=1.5m$, $\theta=60^\circ$, $i=1:1.0$

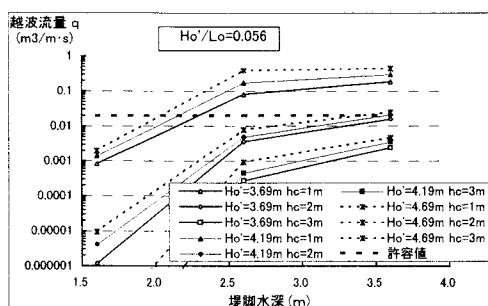


(4) タイプ4: $R=2.0m$, $\theta=60^\circ$, $i=1:1.0$

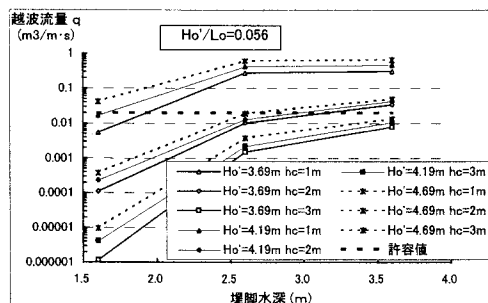


(5) タイプ5: $R=1.5m$, $\theta=45^\circ$, $i=1:1.5$

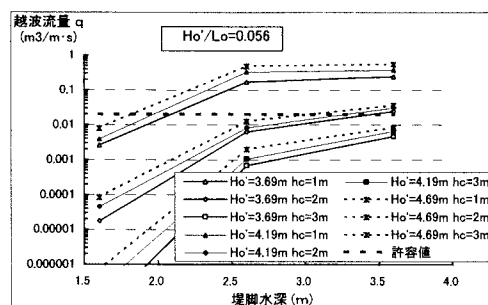
図-10 (1) 波返し護岸タイプ1~5の越波流量推定図 ($H_o'/L_o=0.056$)



(1)タイプ6: $R=2.0\text{m}$, $\theta=45^\circ$, $i=1:1.5$



(2)タイプ7: $R=1.5\text{m}$, $\theta=45^\circ$, $i=1:1.0$



(3)タイプ8: $R=2.0\text{m}$, $\theta=45^\circ$, $i=1:1.0$

図-10 (2) 波返し護岸タイプ6~8の
越波流量推定図 ($H_o'/L_o=0.056$)

また、図-11は、先の越波流量推定図を利用して作成した波高をパラメータとする任意の堤脚水深における各種波返し護岸の許容天端高推定図である (図例: 波形勾配0.056)。

この図より、任意の波高、堤脚水深に対し、許容越波流量 ($0.02\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$) となる波返し護岸の概算天端高を推定することが可能となる。

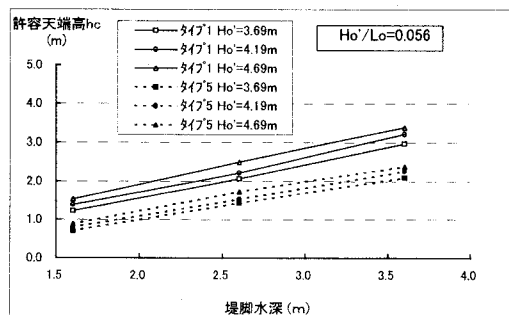
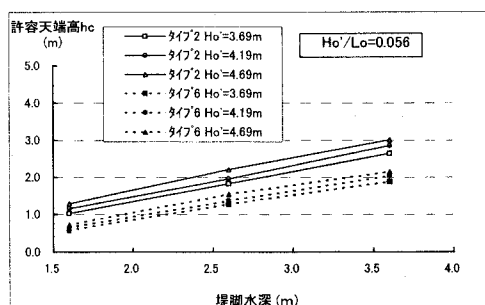
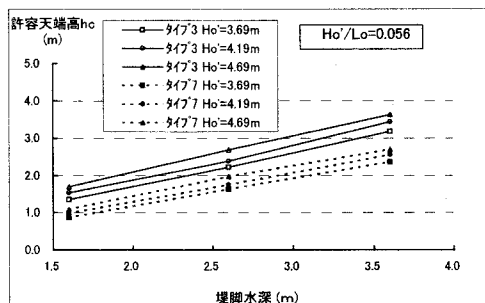


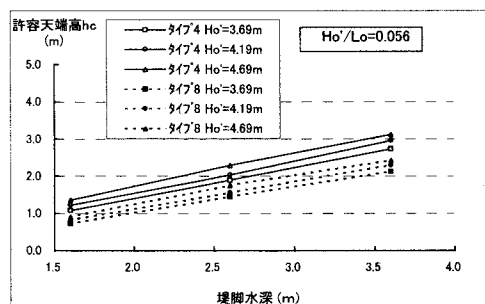
図-11 (1) 波返し護岸タイプ1, 5の
許容天端高推定図 ($H_o'/L_o=0.056$)



(1)タイプ2, 6



(2)タイプ3, 7



(3)タイプ4, 8

図-11 (2) 波返し護岸タイプ2~4, 6~8の
許容天端高推定図 ($H_o'/L_o=0.056$)

4. 主要な結論

本研究で対象とした「波返し護岸の越波流量特性」に関する主要な結論は、以下のとおりである。

- ① 波返し護岸は、堤脚水深が浅いほど越波低減効果が強く発揮され、護岸タイプ1でみると、水深2.6m以下では、直立護岸に比べ天端高を5~30%程度低下できる可能性を有することが確認された。
- ② 波返し護岸の越波流量は、本実験範囲では、曲率半径が大きいほど ($R=1.5\text{m}<2.0\text{m}$)、角度が小さいほど ($\theta=45^\circ>60^\circ$)、法面勾配が小さいほど ($i=1:1.0<1:1.5$)、減少することがわかった。
- ③ 直立護岸に対する換算天端高係数 β を利用し、波返し護岸タイプ毎の概算越波流量推定図ならびに許容越波流量となる天端高推定図を作成した。

参考文献

- 1) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版, 1990.
- 2) 高山司可・永井紀彦・西田一彦(1982): 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技研報告, 第21巻 第2号, pp151~204.