

新潟西海岸潜堤形状検討実験について

EXPERIMENTS FOR OPTIMIZATION OF SUBMERGED BREAKWATER CONFIGURATION OFF WEST COAST OF NIIGATA

白石哲也¹・土市進²・近川喜代志²・千葉明裕²・小森俊英²

Tetsuya SHIRAIISHI, Susumu DOICHI, Kiyoshi CHIKAGAWA, Akihiro CHIBA
and Toshihide KOMORI

¹正会員 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所 (〒951-8011新潟市入船町四丁目3778)

² 国土交通省北陸地方整備局新潟港湾空港技術調査事務所 (〒951-8011新潟市入船町四丁目3778)

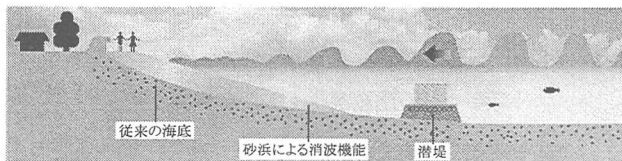
The new concept of integrated and extensive shore defense system combining submerged breakwaters, jetties and beach nourishment has been studied for the erosion-prone west coast of Niigata Prefecture to replace the conventional shore protection system consisting primarily of offshore breakwaters in shallow waters for wave interception.

This paper deals with two-dimensional experiments conducted on the multi-row submerged breakwaters proposed for construction off the west coast of Niigata Prefecture to analyze their crown width, crown depth, installation spacing, and other relevant design parameters so as to select an optimum breakwater configuration which meets wave heights that will not disturb sediments inside the submerged breakwaters.

Key Words : two-dimensional experiments, multi-row submerged breakwaters, extensive shore defense system, west coast of Niigata, transmission coefficient, reflection coefficient

1. はじめに

新潟西海岸は日本有数の侵食海岸であり、明治中頃から今日まで150m~350mもの汀線後退が起こっている。この間の侵食対策は離岸堤、突堤などの防護方式であった。しかし、依然として海底面の洗掘が進んでおり、将来的には離岸堤の崩壊にも繋がりがかねない状況にある。このため、新たな海岸侵食対策として潜堤、突堤、養浜を総合的に組み合わせた「面的防護工法」を導入し、新潟西海岸の復活を目指すこととなった。



—新しい侵食対策の模式図— 潜堤, 突堤, 砂浜の総合的な組み合わせで海岸を守る面的防護工法

図-1 新潟西海岸の侵食対策の模式図

新潟西海岸における「面的防護工法」は、沖合約500mの潜堤及び海岸から直角に延びる突堤等の構造物を複合的に配置し、さらに潜堤背後に砂浜を造成する工法で、沖合の潜堤及び砂浜等により、波のエネルギーを減衰させる方式である。

この工法によって、潜堤前面の海底面を含め、海岸地形を安定的に維持することが可能となることから、侵食の著しい新潟西海岸に砂浜の復活、造成した砂浜で多様な親水性空間としての利用等の幅の広い効果が期待できるものとされている。

しかし、養浜工の経過と併せて実施している調査で、養浜砂が何らかの影響で洗掘を受けている実態が判明した。洗掘の原因については、「着工から完成時迄期間を有するための暫定的な構造による影響」、「潜堤構造による影響」および「潜堤~汀線内での水位上昇により発生する横向きの海岸流が大きく影響しているのではないか。」との推定もなされている。

このように潜堤内の洗掘の原因は様々考えられるが、潜堤背後の水位上昇をより抑制できるとされている「複列型(二山型)潜堤構造」を新たに新潟西海岸に設置することを視野に入れ、検討することとなった。しかし、本構造は潜堤の天端高、天端幅の組み合わせや複列の間隔を現地の条件に合わせてどのように決めるべきかなど、細部の技術が整っている段階にはない。

本実験は、今までの現地調査や二次元^{1), 2)}、平面水槽による実験的な検討結果より得られた潜堤背後の底質砂が安定となる波高を満足する最良な二山型潜堤形状を、二次元的に検証することを目的に実施したものである。

2. 実験方法

(1) 実験装置

実験水槽は、新潟港湾空港技術調査事務所水理実験場所有の平面水槽A（長さ56.5m、幅6.1m）の中に、幅1.4mの二次元水路を設け実施した。潜堤法線区間迄を1/100勾配とし、潜堤背後より汀線付近までを1/50勾配、汀線から陸上部を1/15勾配で固定床により再現し、フルードの相似則による50分の1縮尺で行った。

(2) 実験波浪

実験波は、修正ブレットシュナイダー・光易型のスペクトルを目標とする不規則波を用いた。

実験波浪は、新潟西海岸のエネルギーピーク波の $H_o' = 3\text{m}$, $T_{1/3} = 8\text{s}$ を基準に、 $H_o' = 4\text{m}$, $T_{1/3} = 9\text{s}$ についても一部のケースで行った。1波群の作用波数は200波相当とした。（表-1）

表-1 実験波浪及び潮位

波の種類	実験波浪			潜堤設置水深 h (m)	実験潮位
	波高 H_o' (m)	波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)		
不規則波	3.0	2.76	8.0	-9.5	H.W.L. +0.5m
	4.0	3.68	9.0		

・ $H_{1/3}$; 合田の碎波理論により求まる潜堤法線位置の波高
・ H_o' ; 換算沖波波高

(3) 本実験方法

模型断面構造は、捨石で形成されたマウンド上に消波ブロックを設置し、潜堤構造別に二山型（A, B, Cタイプ）、単一型（Eタイプ）とした。（図-2）

伝達波実験(1)では、二山型潜堤の天端幅（ B_1 , B_3 ）、遊水部幅（ B_2 ）、天端高（ d_1 , d_2 ）を表-2に示す範囲で変化させ、図-3に示す場所に波高計をセットし、伝達率、反射率を測定した。

消波ブロックの据付け方法は、「整積法」とした。

構造	タイプ	断面
二山型	A ($d_1 = d_2$)	
	B ($d_1 < d_2$)	
	C ($d_1 > d_2$)	
単一型	E	

図-2 潜堤構造のタイプ

表-2 二山型潜堤の組み合わせ

B (m)	潜堤タイプ	d_1 (m)	d_2 (m)	B_1 (m)	B_2 (m)	B_3 (m)
40	A-1	-1.5	-1.5	8.7~17.1	14.2~19.8	8.7~17.1
	A-2	-2.0	-2.0	〃	〃	〃
	B-1	-2.5	-1.5	〃	〃	〃
	B-2	-3.0	-2.0	〃	〃	〃
	C-1	-1.5	-2.5	〃	〃	〃
	C-2	-2.0	-3.0	〃	〃	〃
50	A-3	-1.5	-1.5	11.5~19.9	18.6~24.2	11.5~19.9
	A-4	-2.0	-2.0	〃	〃	〃
	B-3	-2.5	-1.5	〃	〃	〃
	B-4	-3.0	-2.0	〃	〃	〃
	C-3	-1.5	-2.5	〃	〃	〃
	C-4	-2.0	-3.0	〃	〃	〃

伝達波実験(2)では、選択したケースについて、図-4に示すように潜堤周辺の波高を詳細に測定した。消波ブロックの据付方法は、従来の実験方法と合わせた「乱積法」とした。

図-5に、解析に用いた記号を示す。

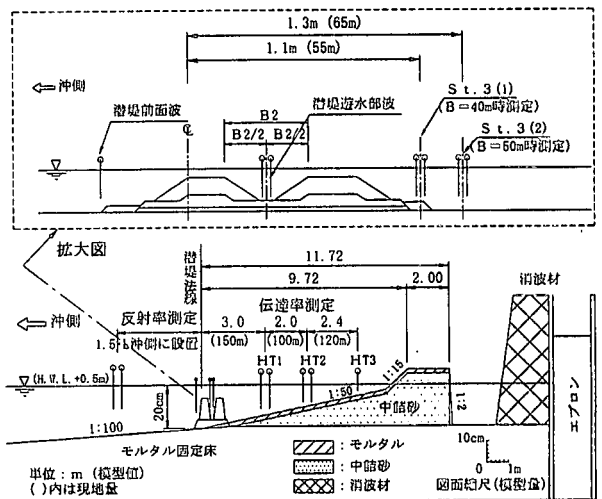


図-3 伝達波実験(1)の波高測定点

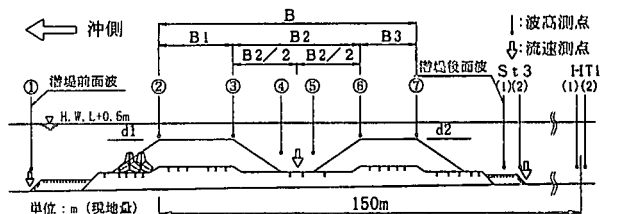
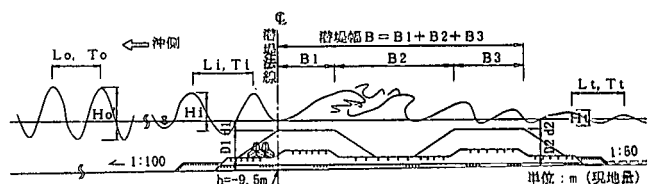


図-4 伝達波実験(2)の波高測定点



h	静水面	H_o', L_o, T_o	沖波の波高, 波長, 周期
d	潜堤上静水深	H_i, L_i, T_i	入射波の波高, 波長, 周期
D	潜堤高	H_t, L_t, T_t	潜堤通過後の波高, 波長, 周期
B	潜堤幅		

図-5 解析に用いた記号

3. 伝達波実験(1)結果

$H_0'=3\text{m}$ ($H_{1/3}=2.76\text{m}$), $T_{1/3}=8\text{s}$ の実験結果を主体に、記述する。

(1) 二山型潜堤の碎波状況

二山型潜堤上で発生する碎波状況について、ビデオカメラ、目視により調べた。

写真-1に潜堤に生じる碎波状況を示す。碎波発生箇所は、潜堤法線の0mより岸側25m間でほとんど生じ、 $H_0'=3\text{m}$, $T_{1/3}=8\text{s}$ の作用下では、何れのタイプともSpilling型碎波³⁾を、 $H_0'=4\text{m}$, $T_{1/3}=9\text{s}$ ではS-P型碎波が卓越し、入射波が大きい程増加する。

$B=40\text{m}$ の碎波数は、潜堤天端高の浅い $d=-1.5\text{m}$ グループの方がやや多く、特にA-1とC-1が多い傾向を示す。 $B=50\text{m}$ でも同じ傾向を示し、全般に碎波数は $B=40\text{m}$ より増加する。

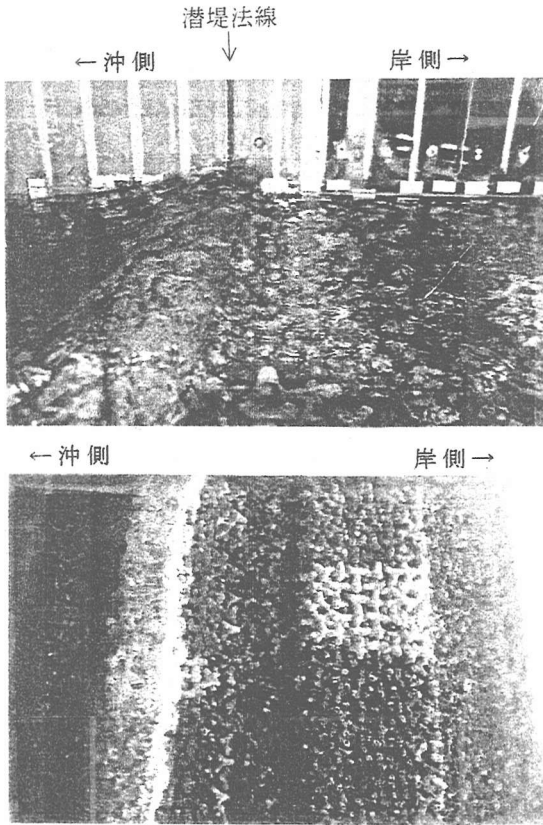


写真-1 潜堤付近の碎波状況 ($H_{1/3}=2.76\text{m}$, $T_{1/3}=8\text{s}$)
(A-1タイプ, $B=8.7\text{m}+19.8\text{m}+11.5\text{m}$, $d_1=d_2=-1.5\text{m}$)

(2) 伝達率

一般的に潜堤における伝達率は、 $H_{1/3}$, $L_{1/3}$ を入射波の諸元として、以下の式で表される。

$$K_T = \phi\left(\frac{d}{H_{1/3}}, \frac{B}{L_{1/3}}\right) \quad (1)$$

二山型潜堤では、天端幅諸元として B_1 , B_2 , B_3 , 天端高諸元として d_1 , d_2 等があり、これらを無次元とする関数が考えられる。

a) 潜堤天端高の影響

図-6は、沖側潜堤幅(B_1)と岸側潜堤幅(B_3)の組み合わせが同じケースについて、 H_{T1} 点の伝達率(K_{T1})と相対天端高(沖側 $d_1/H_{1/3}$, 岸側 $d_2/H_{1/3}$)の関係をタイプ別に比較したものである。

同図は $B=40\text{m}$ の結果であるが、 $d_1/H_{1/3}$ および $d_2/H_{1/3}$ が小さい組み合わせのもの程、および d_1 と d_2 が同じ組み合わせでは、明らかに $B_1 > B_3$ の方が K_{T1} は小さくなる。またパラツキはあるものの $d_1/H_{1/3} < d_2/H_{1/3}$ の関係の方が小さくなる傾向をみせる。

図-7は、同様に $B=50\text{m}$ の例を示すが、傾向は $B=40\text{m}$ とほぼ同様である。

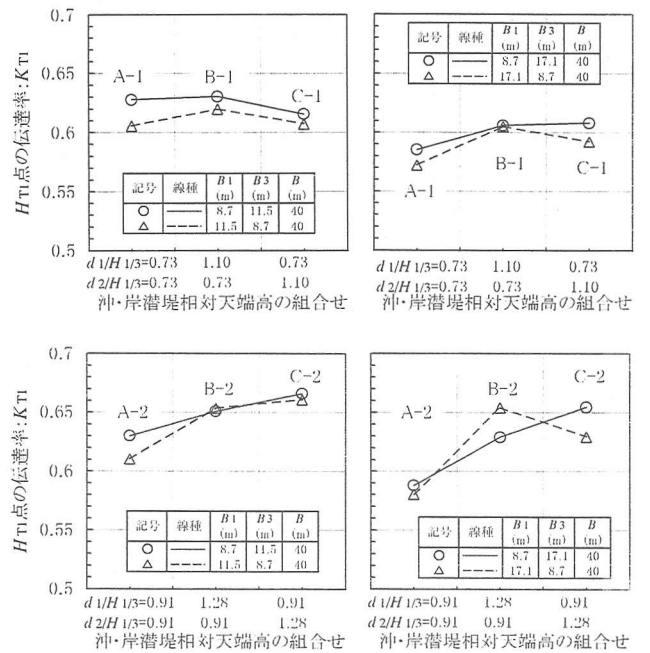


図-6 伝達率と相対天端高の関係 ($B=40\text{m}$)

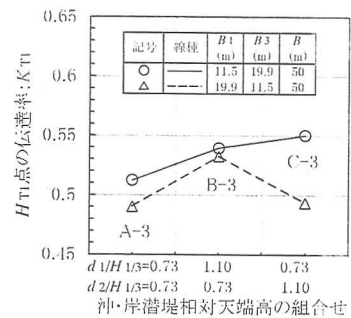


図-7 伝達率と相対天端高の関係 ($B=50\text{m}$)

b) 潜堤天端幅の影響

図-8~図-10は、 K_{T1} が比較的小さいタイプについて、横軸に $B=40\text{m}$ および 50m の結果を含めて有効天端幅 $(B_1+B_3)/L_{1/3}$ で表し、 $B_1 > B_3$, $B_1 < B_3$ 別にプロットしたものである。

図-8は、 $B_1 > B_3$ 条件下で行った $B=40\text{m}$ のA-1タイプ(図中○印)と、同じく $B=50\text{m}$ のA-3タイプ(同●印)をプロットした結果である。

$(B_1+B_3)/L_{1/3}=0.36$ 付近の同じ有効天端幅で行った $B=40\text{m}$ と 50m では、 $B=40\text{m}$ の方が K_{T1} 値は 0.05 ポイント程高くなっており、この傾向は図-9 および図-10 も同様である。

$B=40\text{m}$, 50m の測定値以外行っていないため確かなことは言えないが、入射波長に対して有効な遊水部幅 ($B_2/L_{1/3}$) が存在する可能性を示唆している。

図-11 は全てのデータでの K_{T1} と $(B_1+B_3)/L_{1/3}$ の関係を示す。図中の線は最小二乗法で求めた一次式の結果を示す。 $d_1/H_{1/3}=d_2/H_{1/3}=0.91$ のタイプは相関係数 $R=0.53$ となり、他は $R=0.78\sim 0.91$ の範囲となった。相対天端幅が大きい程、かつ相対天端高が小さい程、 K_{T1} は減少するのが確認できる。

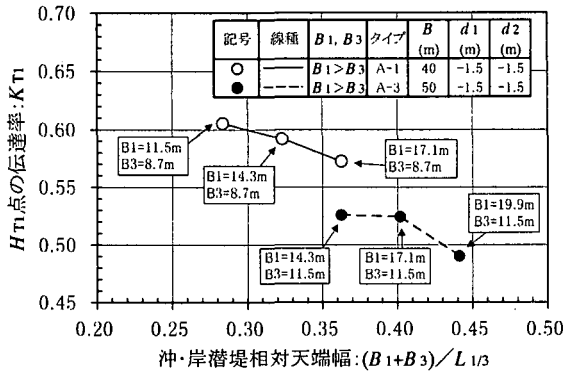


図-8 K_{T1} と有効天端幅 $(B_1+B_3)/L_{1/3}$ の関係 ($B_1 > B_3$, A-1, A-3タイプ)

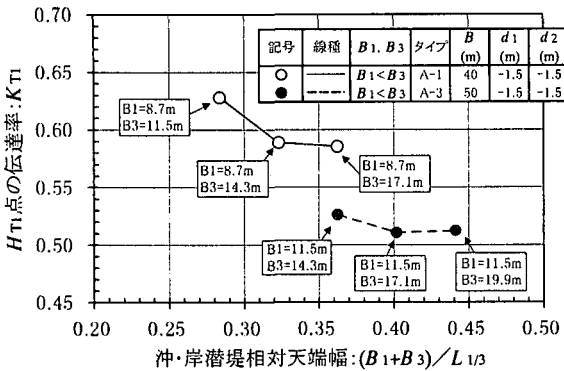


図-9 K_{T1} と有効天端幅 $(B_1+B_3)/L_{1/3}$ の関係 ($B_1 < B_3$, A-1, A-3タイプ)

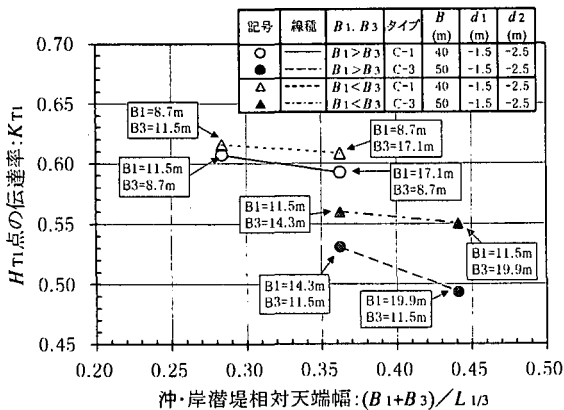


図-10 K_{T1} と有効天端幅 $(B_1+B_3)/L_{1/3}$ の関係 (C-1, C-3タイプ)

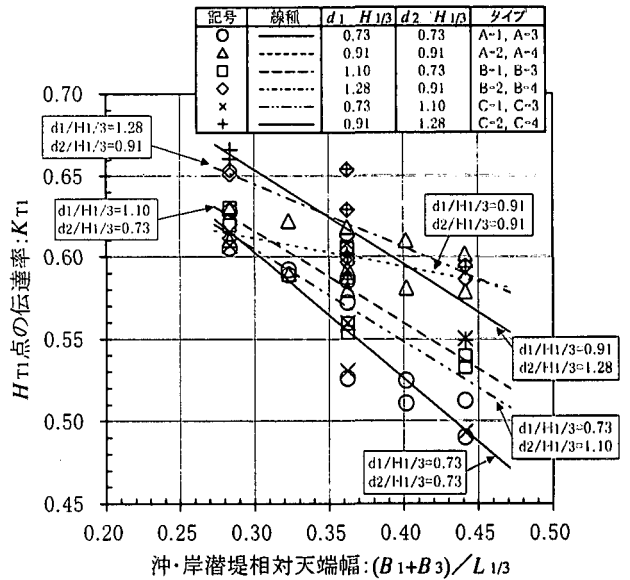


図-11 K_{T1} と有効天端幅 $(B_1+B_3)/L_{1/3}$ の関係 (全ケース対象)

複列潜堤を対象とした既往の研究結果⁴⁾によると、「潜堤の設置間隔を入射波の半波長に取った場合、反射による防波効果が著しく高まる」という知見が得られている。本実験の場合、 $B_2/L_{1/3}=0.20\sim 0.34$ と狭い状態の結果であり、上記の関係は見い出せない。

(3) 反射率

図-12 は、反射率 (K_r) と $(B_1+B_3)/L_{1/3}$ の関係をタイプ別に示したものである。なお、反射率は潜堤法線より $1.5L_{1/3}$ 沖側で測定した結果である。

各タイプとも有効天端幅 $(B_1+B_3)/L_{1/3}$ が大きくなる程 K_r は小さく、相対天端高の影響では、概ね沖側の $d_1/H_{1/3}$ が小さいと K_r は小さくなる傾向を示す。 B_1 と B_3 の関係や d_1 と d_2 の関係は不明瞭であるが、本実験条件の範囲では $K_r=0.16\sim 0.24$ と、反射率は小さな結果に収まり、大きな要因とはならない。

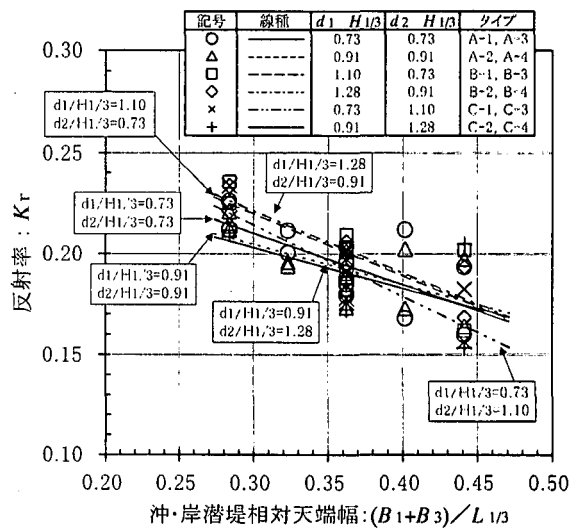


図-12 反射率(K_r) と有効天端幅 $(B_1+B_3)/L_{1/3}$ の関係 (全ケース対象)

(4) エネルギー消費率

潜堤背後で測定した伝達率 K_{T1} と反射率 K_r を使い、式(2)よりエネルギー消費率を求めた。

$$(K_L)^2 = 1 - K_r^2 - K_{T1}^2 \quad (2)$$

この結果、二山型潜堤のエネルギー消費率は、図-13 となる。図中の線は、図-11と同じ方法で求めたもので相関係数は1例を除き $R=0.81\sim 0.92$ となった。

$(B_1+B_3)/L_{1/3}$ が大きい程、また $d_1/H_{1/3}$ が小さく、 $d_2/H_{1/3}$ も小さい組み合わせ程、エネルギー消費率は高くなっており、構造物としての波高減衰効果は大きい。

エネルギー消費率が高くなったタイプについて、 $B_1 > B_3$, $B_1 < B_3$ 別に調べた結果、伝達率結果と同様に同じ天端高・幅の場合、 $B_1 > B_3$ の方がエネルギー消費率は高くなった。

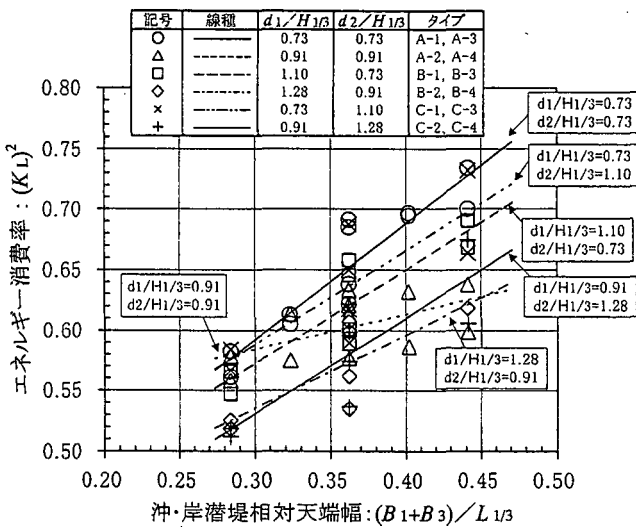


図-13 エネルギー消費率と $(B_1+B_3)/L_{1/3}$ の関係 (全ケース対象)

(5) 二山型潜堤の実験式

重回帰分析により、二山型潜堤の伝達率、反射率の実験式を求めた。

二山型潜堤における主要無次元量としては、

$$K_T, K_r = \phi \left(\frac{d_1}{H_i}, \frac{d_2}{H_i}, \frac{B_1}{L_i}, \frac{B_2}{L_i}, \frac{B_3}{L_i}, \frac{H_i}{L_i}, \frac{h}{L_i} \right) \quad (3)$$

等が考えられる。

H_{T1} 点における伝達率および潜堤前面の反射率の実験式を求めると、式(4)、式(5)となる。同実験式は、 $H_o'=4m$, $T_{1/3}=9s$ で行った結果も全て取り込んで算出したもので、表-3 には、その適用範囲を示している。

式(4)、(5)から求めた計算値とそれぞれの実測値とを比較したのが図-14、図-15 である。

伝達率の重相関係数は、 $R=0.93$ であり、反射率は $R=0.90$ となり、比較的一致した結果となる。

表-3 伝達率、反射率実験式の適用範囲

諸元	B_1/L	B_2/L	B_3/L	d_1/H	d_2/H	H/L
適用範囲	0.10 ~ 0.28	0.17 ~ 0.34	0.10 ~ 0.28	0.54 ~ 1.28	0.54 ~ 1.28	0.038 ~ 0.044

入射波諸元からの伝達率実験式

$$K_{T1} = -0.547 \left(\frac{B_1}{L_{1/3}} \right) - 0.243 \left(\frac{B_2}{L_{1/3}} \right) - 0.419 \left(\frac{B_3}{L_{1/3}} \right) + 0.104 \left(\frac{d_1}{H_{1/3}} \right) + 0.085 \left(\frac{d_2}{H_{1/3}} \right) - 13.403 \left(\frac{H_{1/3}}{L_{1/3}} \right) + 1.169 \quad (4)$$

入射波諸元からの反射率実験式

$$K_r = -0.360 \left(\frac{B_1}{L_{1/3}} \right) + 0.063 \left(\frac{B_2}{L_{1/3}} \right) - 0.144 \left(\frac{B_3}{L_{1/3}} \right) + 0.014 \left(\frac{d_1}{H_{1/3}} \right) - 0.012 \left(\frac{d_2}{H_{1/3}} \right) + 3.630 \left(\frac{H_{1/3}}{L_{1/3}} \right) + 0.128 \quad (5)$$

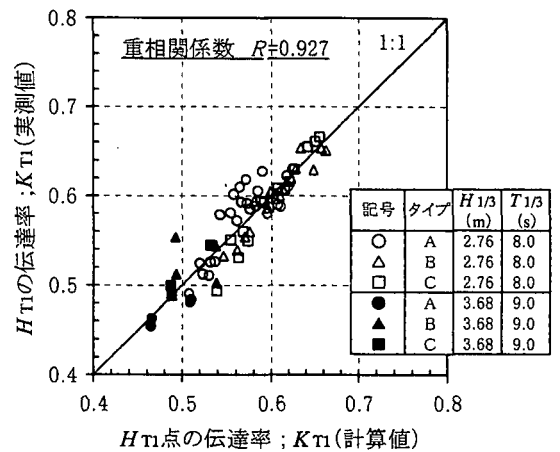


図-14 伝達率の実測値と計算値との比較

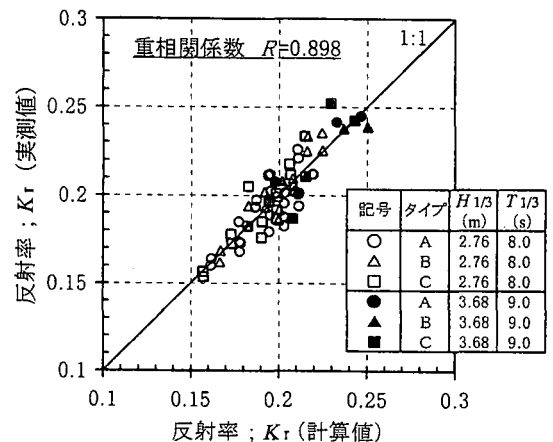


図-15 反射率の実測値と計算値との比較

4. 伝達波実験(2)結果

伝達波実験(1)の結果より、波浪制御効果の大きいタイプを数種類選択し、これらの潜堤周辺の波高を再度詳細に測定し、単一型潜堤(Eタイプ)との比較を試みた。単一型は $B=40\text{m}$, $d=-1.5\text{m}$ とした。

図-16に単一型と二山型Aタイプの比較を示し、図-17は二山型Cタイプとの比較を示す。

単一型の伝達率は、潜堤上を進むに従い、指数的な減少傾向を示すのに対し、二山型は何れのタイプも遊水部で一次的な減少を見せ、岸側潜堤上で再び上昇し、潜堤通過後、また減少する分布形となる。

潜堤背後の K_{T1} は、A、Cタイプとも単一型と漸近するが、この中でもA-1タイプ(図中△印)は同等となる。

整積で行った伝達波実験(1)の結果と比べ、特に $B=40\text{m}$ のA-1、C-1タイプの K_{T1} 値は0.07~0.1ポイント小さくなり、同じ有効天端幅の $B=50\text{m}$ との較差は微小となり、遊水部幅($B_2/L_{1/3}$)の影響は見られなくなる。

乱積の場合、ブロック投入数は整積より1.06~1.1倍多く設置されること、および整積の潜堤表面は凹凸が規則正しく配置されるのに対し、乱積ではブロックの配列や脚部の方向性がなく、粗度は整積より荒く、表面付近の通水性も小さくなるなどの要因が考えられる。

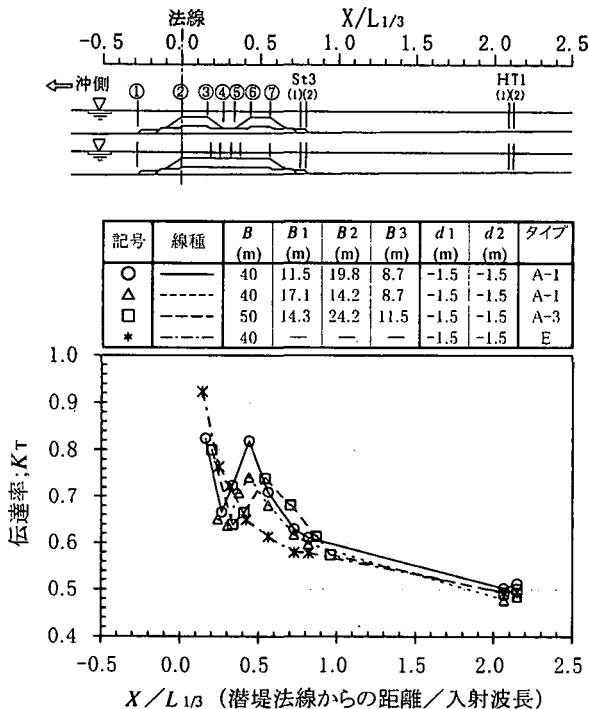


図-16 単一型と二山型の潜堤周辺伝達率の比較(Aタイプ)

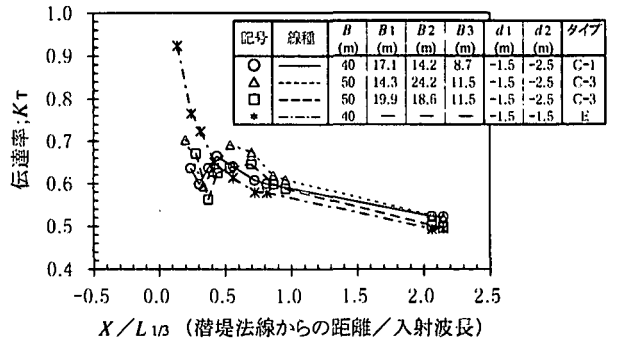


図-17 単一型と二山型の潜堤周辺伝達率の比較(Cタイプ)

5. まとめ

設置水深 $h=-9.5\text{m}$ に遊水部を有する二山型潜堤の形状について、 $H_{1/3}/h=0.28\sim 0.37$, $B/L_{1/3}=0.48\sim 0.70$ の条件において水理特性を検討した。その結果、主要な結論は以下の通りである。

①二山型潜堤の沖・岸側相対天端幅 $B_1/L_{1/3}$, $B_3/L_{1/3}$, 沖・岸側相対天端高 $d_1/H_{1/3}$, $d_2/H_{1/3}$, 相対遊水部幅 $B_2/L_{1/3}$, 波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ を考慮した波高伝達率 K_{T1} と反射率 K_r の算定式を提案した。

② $B/L_{1/3}=0.56$, $d/H_{1/3}=0.73$ を同一条件として、全てブロックで覆った単一型と二山型 $B_1/L_{1/3}=0.24$, $B_2/L_{1/3}=0.20$, $B_3/L_{1/3}=0.12$ の K_{T1} は同じとなる。適切な沖・岸側潜堤形状を配置することにより、単一型と同等な波浪制御が期待できることが判明した。

③入射波長に対して、防波面で有効な遊水部幅($B_2/L_{1/3}$)が存在する可能性が認められるが、 $B_2/L_{1/3}=0.20\sim 0.34$ の範囲であり、今後のデータ蓄積が必要である。

潜堤背後の水位上昇量は、断面決定に際し重要な要素の一つである。本実験では、水位上昇量も測定したが、平面的に狭い範囲での結果であり、敢えて本文の考察には入れていない。

二山型潜堤の三次元的要素を考えると、遊水部に水位落差が生じ、同部に沿岸方向の流れが発生すると思われる。この流れが沖側からの波浪流や入射波自体を抑制することも考えられる。平面実験などで確認し、最終的な潜堤断面を判断する必要がある。

参考文献

- 1) 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所：昭和58年度 防波堤建設による周辺海浜への影響に関する予備実験報告書，1984。
- 2) 運輸省第一港湾建設局 新潟調査設計事務所：昭和61年度 新潟海岸潜堤形状の検討実験報告書，1986。
- 3) 岩田好一郎・川崎浩司・亀崎大輔：碎波に伴う潜堤周辺の波・水粒子速度場の細部構造に関する実験的研究，海岸工学講演会論文集，第43巻，pp56~60，1996。
- 4) 山城賢：不規則波と構造物との非線形干渉解析法と潜堤背後の波動場特性に関する研究，九州大学卒業論文，2000。