

後壁を有する消波ブロック被覆上部斜面堤の 伝達波特性について

THE TRANSMITTED WAVE CHARACTERISTIC ABOUT SLOPING TOP CAISSON
BREAKWATER WITH UPRIGHT-WALL IN THE REAR AND COVERED
WITH WAVE-DISSIPATING BLOCKS

西村大司¹・河合尚男²・堀井義一³・森川高德⁴・奥田純生⁵

Daiji NISHIMURA, Takao KAWAI, Yoshikazu HORII, Takanori MORIKAWA and Sumio OKUDA

¹正会員 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1-57-3)

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1-57-3)

³中部国際空港株式会社 (〒479-0881 愛知県常滑市セントレア1-1)

⁴正会員 玉野総合コンサルタント(株)建設技術部 (〒461-0005 名古屋市東区東桜2-17-14)

⁵玉野総合コンサルタント(株)建設技術部 (〒461-0005 名古屋市東区東桜2-17-14)

In recent years, there have been an increasing number of projects that adopt "sloping top caisson breakwater" to reduce construction cost. It is however known that this type of structure tends to increase transmission coefficient of wave. Accordingly, this study was conducted to elucidate transmitted wave characteristic about "sloping top caisson breakwater with upright-wall in the rear" of hydraulic model tests. The basic data obtained is expected to be greatly helpful in future breakwater design.

Key Words. *Sloping top caisson breakwater, upright-wall in the rear, transmitted wave, hydraulic model tests.*

1. はじめに

近年, 外洋に面した港湾における防波堤の建設コスト削減の観点より, 滑動抵抗力に優れた「消波ブロック被覆上部斜面堤」の採用事例が多くなっている。しかし, 上部斜面堤はその斜面構造に起因して波高伝達率が通常の消波堤に比べ高くなることが知られており, その対策として, 斜面部にスリットを設けたり, 上部工背後に直立壁を備えた新型の上部斜面堤も計画されている。

これを受け, 本研究は, 比較的水深の深い海域を対象として, 斜面部に開口率50%のスリット, 背後に直立壁を有する消波ブロック被覆上部斜面堤(以降, 後壁付き上部斜面堤と呼ぶ)の伝達波特性を水理模型実験により把握し, 今後の防波堤設計の基礎資料に資す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が所有する長さ30m, 幅1m, 深さ1.2mからなるピストン型単方向不規則波造波装置(吸収制御タイプ)が設置された長水路において実施した(図-1参照)。

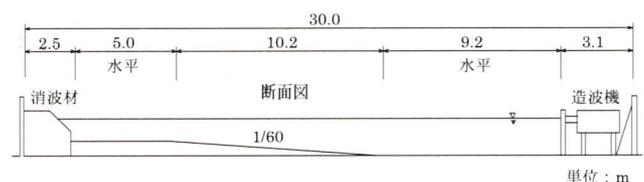


図-1 実験水路

(2) 実験条件

実験縮尺は1/70で行った。

実験に用いた後壁付き上部斜面堤は、表-1、図-2に示す4断面であり、大きく分けて、後壁幅 $b=2.0\text{m}$ (以降、幅狭型と呼ぶ) と 5.6m (以降、幅広型と呼ぶ) の2種類である。

ここに、ケーソンの全体幅 B は幅狭型が 19.7m 、幅広型が 21.5m で、斜面部には、いずれも、開口率50%のスリットが設けてある。

消波工天端高は一律 $+2.5\text{m}$ 、消波工幅は、幅狭型が 7.6m (80t型ブロック)、幅広型が 7.3m (64t型ブロック) で後者がわずかに短い。マウンド水深 d は一律 -13.5m 、前面水深 h は幅狭型が $-22.4\sim 25.5\text{m}$ ($d/h=0.57\sim 0.64$)、幅広型が $-31.4\sim 36.1\text{m}$ ($d/h=0.41\sim 0.47$) の条件とした。

実験潮位は $\text{H.H.W.}+2.2\text{m}$ 、実験波はいずれも不規則波で、周波数スペクトルは、ブレットシュナイダー・光易型を目標とした。波高は $H_{1/3}=6.6\sim 10.0\text{m}$ の範囲の6種類(周期 $T_{1/3}=17.4\text{s}$ で一律、 $H_o'/L_o=0.013\sim 0.020$) を使い、各断面に応じて表-1のように設定した。

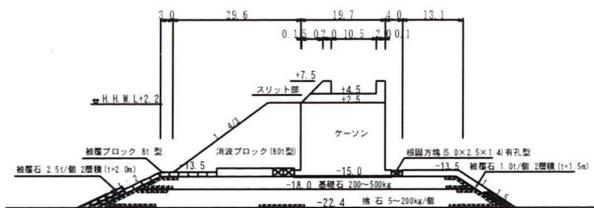
実験では、上部工天端高(斜面部、後壁部)を $+5.0\sim 7.5\text{m}$ の範囲で変化させ、各種波浪、断面条件に対する伝達波特性を探った。なお、参考として、通常の消波ブロック被覆堤(以降、消波堤と呼ぶ)に対する伝達波特性も把握した。

(3) 実験方法

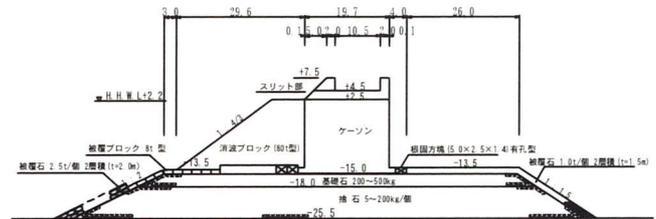
伝達波高は、ケーソン前面を基準として、現地スケールで、ケーソン背後 100m 、 140m 、 180m 、 200m 、

表-1 実験条件 (実験波・断面)

断面種類	断面No	潮位 (m)	実験波			ケーソン等諸元				マウンド諸元		
			波高 $H_{1/3}$ (m)	周期 $T_{1/3}$ (s)	H_o'/L_o	幅			天端高 (m)	前面水深 h (m)	マウンド水深 d (m)	相対水深 d/h
						ケーソンB (m)	後壁b (m)	消波工 (m)				
後壁幅狭型	1	2.2	10.0	17.4	0.019	19.7	2.0	7.6	$+5.0\sim +7.5$	-22.4	-13.5	0.64
			6.6		0.013							
	2		9.4		0.019					-25.5		0.57
			6.9		0.014							
後壁幅広型	3	2.2	9.4	17.4	0.020	21.5	5.6	7.3	$+5.0\sim +7.5$	-31.4	-13.5	0.47
			6.9		0.015							
	4		8.9		0.019					-36.1		0.41
			6.7		0.014							

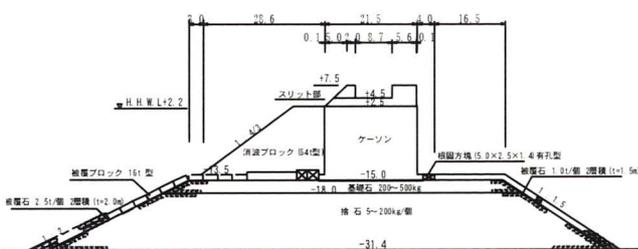


(ケーソン幅 $B=19.7\text{m}$ 前面水深 $h=-22.4\text{m}$)

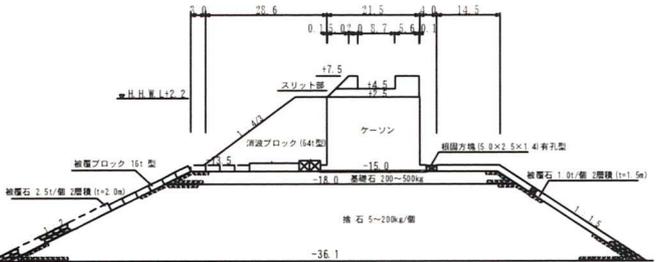


(ケーソン幅 $B=19.7\text{m}$ 前面水深 $h=-25.5\text{m}$)

<後壁幅狭型 : $b=2.0\text{m}$ >



(ケーソン幅 $B=21.5\text{m}$ 前面水深 $h=-31.4\text{m}$)



(ケーソン幅 $B=21.5\text{m}$ 前面水深 $h=-36.1\text{m}$)

<後壁幅広型 : $b=5.6\text{m}$ >

図-2 実験対象とした後壁付き上部斜面堤

220m, 265m の計 6 地点に設置した波高計 (いずれも水路中央部) を用いて測定した。

作用波数は 660 波程度, 繰り返し回数は 3 回とし, 各地点とも, 3 回の平均を代表値とした。

(4) 解析方法

各ケース毎に得られた 6 地点の伝達波高は, 各々, 表-1 に示した入射波高で除し, 伝達率 k_t として整理した。解析では, まず, 伝達率の水平分布特性を把握し, 伝達率としての代表値を決定した。その上で, 消波堤の実験結果や消波工の無い混成堤 (以降, 混成堤と呼ぶ) の理論値と比較しながら, 後壁付き上部斜面堤の伝達波特性を明らかにした。

3. 実験結果及び考察

(1) 伝達率の水平分布特性

図-3 は, 対象とした 4 つの後壁付き上部斜面堤におけるケーソン背後の伝達率分布を示したものである。ここに, 上段が天端高+7.5m 時 ($hc=5.3m$), 下段が同+5.0m 時 ($hc=2.8m$) である。

はじめに, 天端高+7.5m についてみると, 伝達率は相当水深波長 L によってバラツキがみられ, L が短い条件では 140m 地点付近, 長い条件では 180m 地点付近で相対的に高い傾向にあり, いずれも, ピーク地点以遠では急激に低下している。

天端高+5.0m でも分布傾向は同様だが, 地点間の差はやや緩やかなものとなっている。これは, 天端高が下がることで, 斜面による乗り上げ効果や後述する後壁での跳ね上がり効果が軽減し, 越波が水平的になるためである。

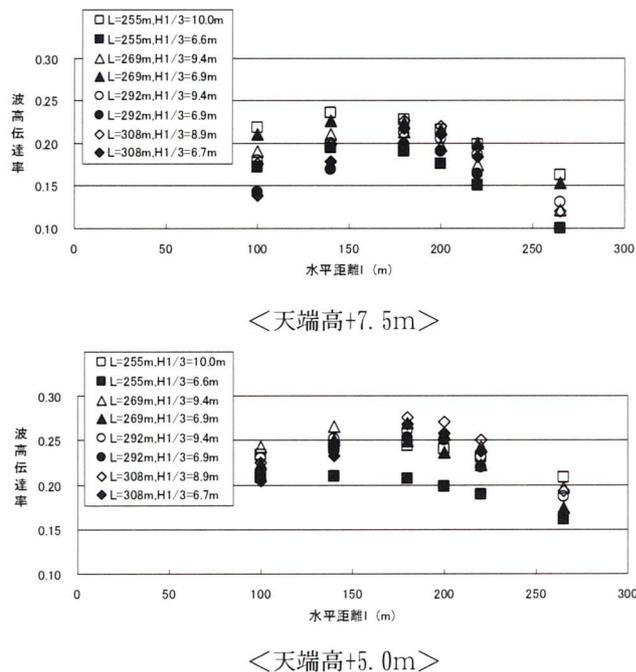


図-3 ケーソン背後の位置と伝達率の関係

次いで, 図-4 は, 先の水平距離 l を相対水深波長 L で除した「相対水平距離 (l/L)」と伝達率の関係を示したものである。

これをみると, バラツキはあるものの, 両天端高とも, 概ね 0.5~0.7L の範囲に伝達率のピーク水準が現れている。

このことは, 伝達率の水平分布が入射波長の影響を強く受け, 短い波長では前部で, 長い波長では奥部でピーク水準を迎えることを意味している。

なお, 目視観察によれば, 伝達波高は, 越波水塊の打ち込み位置近傍ではそれほど高くなく, その後, 徐々に発達することが確認されており, 必ずしも, 越波地点周辺が高いわけではないことがわかった。

以上のことから, 以降の考察では, 相当水深波長 L を指標に, 0.5L, 0.6L, 0.7L 地点の平均伝達率を対象とする。

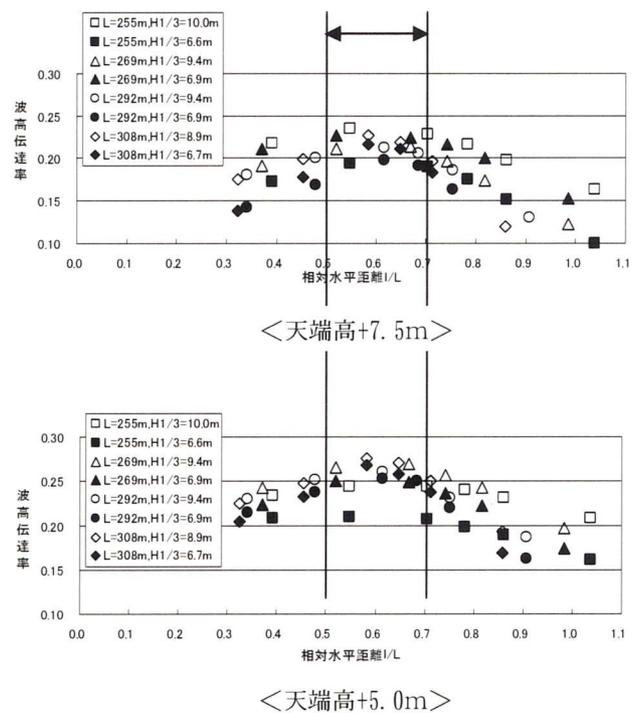


図-4 ケーソン背後の相対水平距離 (l/L) と伝達率の関係

(2) 相対天端高と伝達率の関係

本項では, 0.5L~0.7L 地点の伝達率を対象に, 後壁付き上部斜面堤の伝達波特性を明らかにする。

図-5 は, 後壁付き上部斜面堤の相対天端高と伝達率の関係を示したものである。

ここに, 後壁幅狭型 ($b/L=0.007\sim0.008$, $d/h=0.57\sim0.64$) は■, ▲印, 後壁幅広型 ($b/L=0.018\sim0.019$, $d/h=0.41\sim0.47$) は○, ◇印で示したものである。

なお, 図中の実線・点・破線は, 谷本の図から求めた各 d/h に対応する混成堤の伝達率を示している。また, 実験から求めた消波堤の伝達率も併記してある。

はじめに, 全体傾向をみると, 後壁付き上部斜面

堤の伝達率は、いずれの断面も、消波堤のそれを上回っている。これは、消波堤の場合、越波が水平的となるのに対し（写真-1 参照）、後壁付き上部斜面堤では、後述のとおり斜面や後壁の影響で越波が高く跳ね上がって激しく背後水域に打ち込むためであり、本タイプは伝達率が高まりやすい特性を有することが実験でも確認された。

これを、混成堤の理論値と比較すると、幅狭型の場合、 $hc/H_{1/3} > 0.7$ 以上では混成堤（点・破線： $d/h=0.57\sim 0.64$ ）の伝達率を大きく上回るのに対し、幅広型ではすべての天端高で、概ね、混成堤（実線： $d/h=0.41\sim 0.47$ ）以下の伝達率に収まる結果となっている。ちなみに、相対ケーソン幅 B/L は両者同程度あるいは幅広型が狭く、消波工幅も幅広型が狭い条件であることから、伝達率に対しては、後壁幅 b の影響がより強く現れることがわかった。

目視観察によれば、幅広型の場合、斜面を乗り上がったったり、スリットを通過した水塊は、すぐに後壁に衝突するため、跳ね上がった水塊の一部は沖側に戻り、一部はケーソン端部に一旦バウンドしてから背後へ落ち込む。（写真-2 参照）

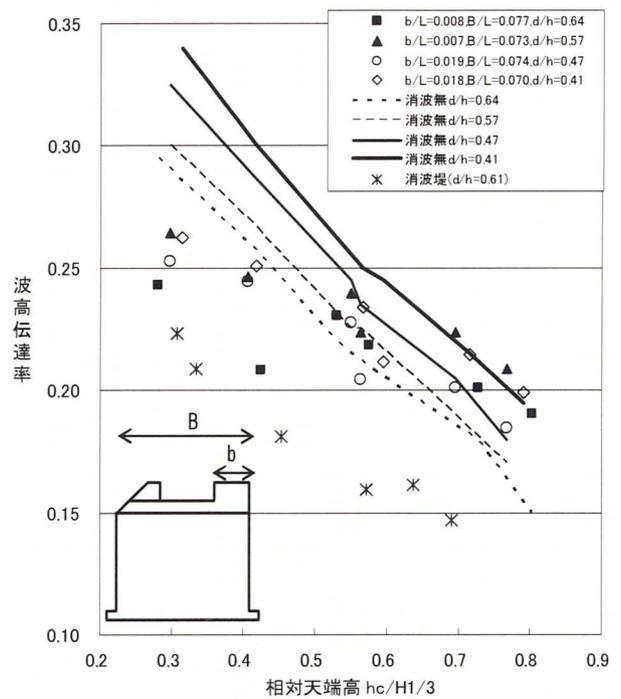


図-5 相対天端高と伝達率の関係

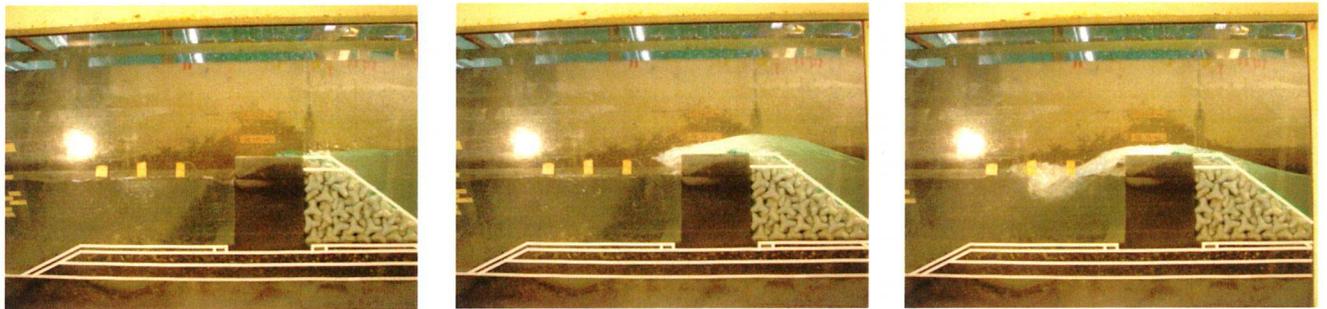


写真-1 消波堤の越波状況



写真-2 後壁付き上部斜面堤（幅広型）の越波状況

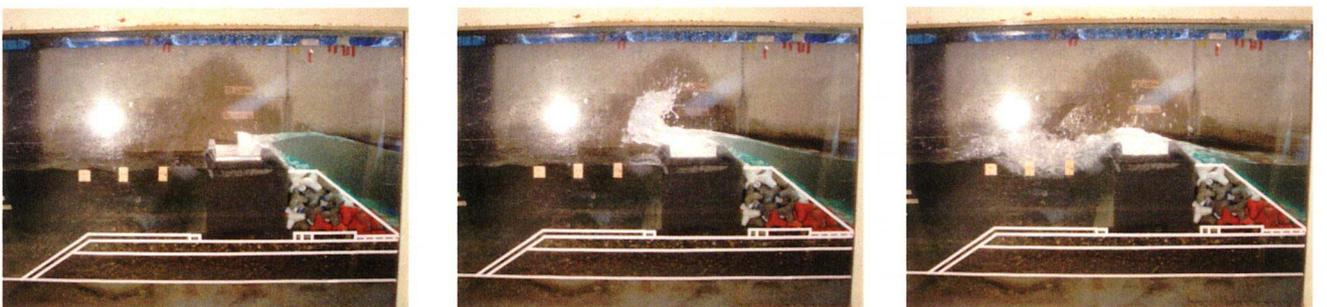


写真-3 後壁付き上部斜面堤（幅狭型）の越波状況

一方、幅狭型の場合、スリットを通過した水塊は天端上で勢いを付けながら後壁に衝突するため、水塊の跳ね上がり方が高く、かつ、そのほとんどが直接、背後の水塊に飛び込む（写真-3 参照）。

後壁幅の違いによるこうした越波特性が、伝達率の増減に大きく影響を及ぼし、結果、幅広型は、伝達波を抑制する効果が高いことが確認された。

なお、天端高の低い条件では、バラツキはあるものの、断面形状による差が小さくなっている。これは、斜面部や後壁の高さが下がることで、両者の形状が、通常の消波堤に近似するためと考えられる。

(3) 後壁幅が天端高へ及ぼす影響

ここでは、前項までに示した伝達率に及ぼす後壁幅の影響を、天端高の観点から評価する。

図-6 は、先の各断面について、伝達率が同じとなる混成堤の天端高 hc_v を谷本らの図より求め、実験天端高 hc との比 hc/hc_v (以降、天端高比 β と呼ぶ) として表したものである。

すなわち、 $\beta > 1.0$ であれば、混成堤を上回る天端高が必要となり、 $\beta < 1.0$ であれば、混成堤より低い天端高でもよいことがわかる。

なお、ここでは、 d/h に応じた β を算出していることから、 d/h による影響は無視できる。

これをみると、両タイプとも天端高に応じて β が高くなっており、斜面による水塊の乗り上げや後壁による水塊の跳ね上がりは、消波ブロックによる伝達率抑制効果を低下させることを示している。

このうち、幅狭型は、 $\beta = 0.7 \sim 1.3$ 程度の範囲にあり、 $hc/H_{1/3} > 0.5$ の条件では混成堤より 10~30% 程度高い天端高が必要となることがわかる。

一方、幅広型は $\beta = 0.6 \sim 1.1$ 程度であり、概ね、混成堤と同程度あるいはそれ以下の天端高でも同様の伝達率に抑える効果があることを示している。

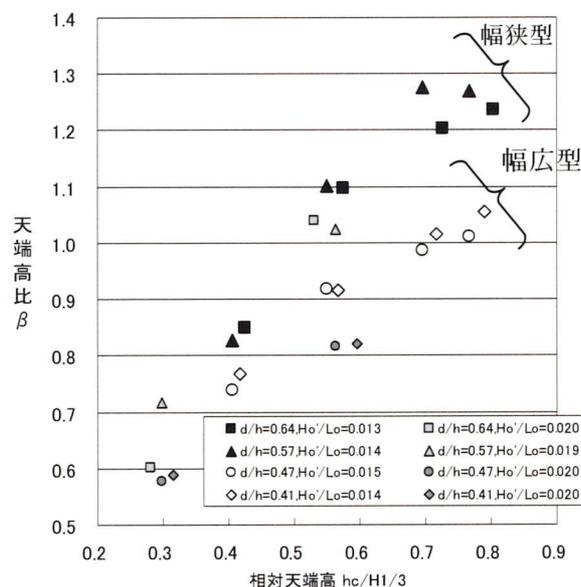


図-6 後壁幅が天端高に与える影響

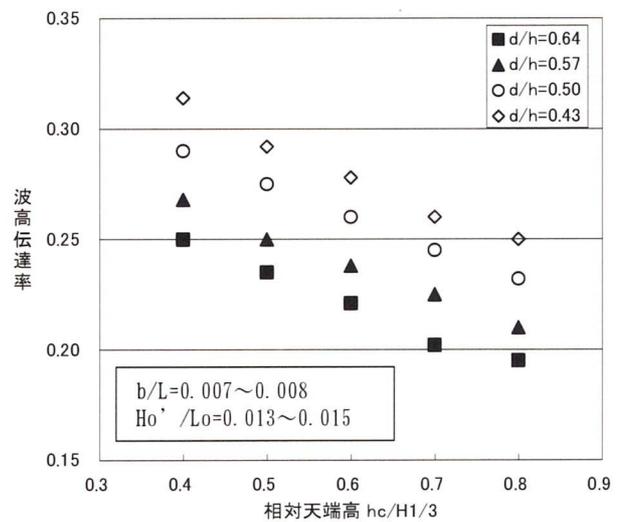
なお、図-6では、波形勾配による違いも示している。すなわち、図中のグレーマークは、波形勾配 $Ho'/Lo = 0.019 \sim 0.020$ 、白黒マークは $Ho'/Lo = 0.013 \sim 0.015$ である。

これをみると、バラツキはあるものの波形勾配が小さいほど β が高まる (=伝達率が高まる) 傾向がみられる。この要因は、波形勾配が小さいことで、消波効果が相対的に低下し、伝達波を引き起こす越波量が高まるためと推測される。

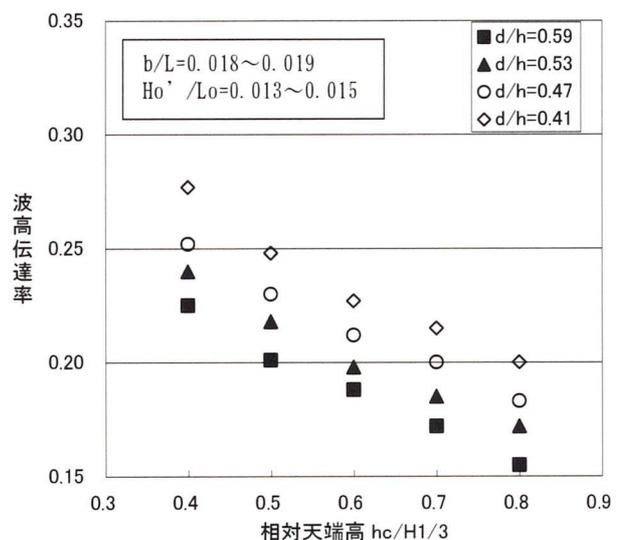
(4) 汎用化の試み

図-7 は、先の図-6 より d/h 毎に $hc/H_{1/3}$ と β の関係を求め、任意の後壁付き上部斜面堤天端高 hc を混成堤の天端高に換算し、谷本らの図を利用して作成した幅狭型、幅広型の概算伝達率推定図である。

ここに、波形勾配は $Ho'/Lo = 0.013 \sim 0.015$ の波浪条件である。



<後壁幅狭型>



<後壁幅広型>

図-7 後壁付き上部斜面堤の概算伝達率推定図

本図より、後壁付き上部斜面堤(幅広型: $b/L=0.019$ 程度, 幅狭型: $b/L=0.008$ 程度)の任意の天端高, 任意の d/h における概算の伝達率を推定することが可能となる。

4. 主要な結論

本研究で対象とした後壁付き上部斜面堤の伝達波特性に関する主要な結論は、以下のとおりである。

(1) 伝達波の水平分布特性

伝達波高の水平分布は、入射波長 L の影響を強く受け、短い波長ではケーソン背後水域の前部で、長い波長では奥部で伝達率が高まる。

その結果、バラツキはあるものの、いずれの断面も、概ね $0.5\sim 0.7L$ の範囲に伝達率のピーク水準が現れることがわかった。

(2) 後壁幅と伝達率の関係

後壁付き上部斜面堤のうち、後壁幅狭型($d/L=0.007\sim 0.008$)の伝達率は、 $hc/H_{1/3}>0.7$ 以上では混成堤を上回るのに対し、幅広型($d/L=0.018\sim 0.019$)では、すべての天端高で、ほぼ混成堤以下の水準に収まる。

目視観察によれば、幅広型の場合、斜面を乗り上がった水塊は、すぐに後壁に衝突するため、跳ね上がった水塊の一部は沖側に戻り、一部はケーソン端部に一旦バウンドしてから背後へ落ち込むことが確

認されている。こうしたエネルギー逸散が伝達率を抑制するものと推測され、幅広型は伝達波に対し有利な構造となることがわかった。

(3) 後壁幅が天端高へ及ぼす影響

後壁幅狭型、幅広型について、伝達率の観点から混成堤に対する天端高比 β を求めたところ、幅狭型の場合、 $0.8>hc/H_{1/3}>0.5$ の条件では混成堤より10~30%程度高い天端高が必要となることがわかった。これに対し、幅広型は、 $0.8>hc/H_{1/3}$ の条件では、概ね、混成堤と同程度あるいはそれ以下の天端高でも同様の伝達率に抑える効果があることがわかった。

(4) 汎用化の試み

混成堤に対する天端高比 β を活用することで、後壁付き上部斜面堤(幅狭型、幅広型)の概算伝達率推定図を作成した。

参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 869p, 2007. 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 869p, 2007.
- 2) 合田良実：港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版, 1990
- 3) 伊藤喜行・谷本勝利：混成防波堤の蛇行災害, 港湾技研資料, No112号, 20p, 1971.
- 4) 小沢大造, 岩淵哲治 他：消波ブロック被覆式上部斜面堤の天端高の設定と波力の算定法に関する実験的考察, 海岸工学論文集, 第47巻, pp811-815, 2000.