

大水深域における上部斜面型直立消波堤の伝達波特性に関する実験的研究

Experimental Study on Transmitted Wave Characteristic about Wave Absorbing Slit Caisson Breakwater with Sloping Top Wall in Deep Sea

西村大司¹・河合尚男²・堀井義一³・森川高德⁴・吉田 要⁵

Daiji NISHIMURA, Takao KAWAI, Yoshikazu HORII, Takanori MORIKAWA and Kaname YOSHIDA

In recent years, there have been an increasing number of projects that adopt “wave absorbing slit caisson breakwater” to reduce construction cost in deep sea. This type of structure tends to receive strong wave force at upright wall. On account of this, there is a case study that replace upright wall with sloping wall, but it has quickened transmitted wave. Accordingly, this study was conducted to elucidate transmitted wave characteristic about “wave absorbing slit caisson breakwater with sloping top wall” of hydraulic model tests. The basic data obtained is expected to be greatly helpful in future breakwater design.

1. はじめに

近年, 大水深域における防波堤の建設コスト縮減の観点より, ケーソン前面に消波ブロックを有さず, 遊水室によって反射波を抑える「直立消波堤」の採用事例がみられる。直立構造の場合, 強大な波力が遊水室前・後壁に作用することから, 水平波力の軽減を目的に, 当該壁を斜面構造としたタイプも検討されているが(関口ら, 2000; 藤井ら, 2002), この場合, 波高伝達率が一層高くなる懸念される。

これを受け, 本研究は, 水深30m以上の大水深海域を対象として, 遊水室前壁, 後壁が75度の斜面構造をなす上部斜面型直立消波堤(以降, 上部斜面消波堤と呼ぶ)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)。

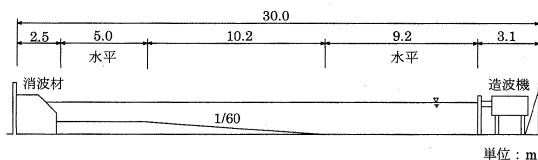


図-1 実験水路

(2) 実験条件

実験縮尺は1/70で行った。

実験に用いた上部斜面消波堤は, 表-1, 図-2に示す3断面であり, ケーソン幅 $B=17.1\sim18.5\text{m}$, 遊水室幅 $b=6.8\text{m}$, 遊水室深さ $h'=8.0\text{m}$ で, 遊水室前壁には開口率30%のスリットを有している。前面水深 $h=31.4\sim43.0\text{m}$, マウンド水深 $d=13.2\sim19.1\text{m}$ ($d/h=0.46\sim0.47$: 潮位考慮)であり, 相当水深波長 L が290~330mの範囲で変化する条件である。

実験潮位はH.H.W.L+2.2m, 実験波はいずれも不規則波で, 周波数スペクトルは, プレットシュナイダー・光易型を目標とした。

波高は $H_{1/3}=6.8\sim8.9\text{m}$ の範囲の3種類(周期 $T_{1/3}=17.4\text{s}$ で一律, $Ho'/Lo=0.015\sim0.020$)を用い, 各断面に応じて表-1のように設定した。

実験では, 上部工天端高を+5.0~7.5mの範囲で変化させ, 各種波浪, 断面条件($h/H_{1/3}$, B/L , b/L 等)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)に対する実験も行い, その伝達波特性を把握した。

- | | | |
|---------|-----|--------------------------------|
| 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 所長 |
| 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 設計室 |
| 3 | | 中部国際空港(株) 空港施設部 |
| 4 正 会 員 | | 玉野総合コンサルタント(株)建設技術部 |
| 5 | | 玉野総合コンサルタント(株)建設技術部 |

表-1 実験条件(実験波・断面)

断面 No	潮位 (m)	実験波			ケーソン等諸元				マウンド諸元				
		波高	周期	H_o/L_o	幅		天端高	遊水室深さ h' (m)	前面水深	マウンド水深	相対水深 d/h		
		$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)		ケーソン B (m)	遊水室 b (m)	(m)		h (m)	d (m)			
1	+2.2	8.9	17.4	0.019	18.5	6.8	+5.0 ~+7.5	8.0	-31.4	-13.2	0.46		
		6.8		0.015									
2		8.9		0.019	17.1						-36.1	-15.7	0.47
		6.8		0.015									
3		8.9		0.020	18.5						-43.0	-19.1	0.47
		6.9		0.016									

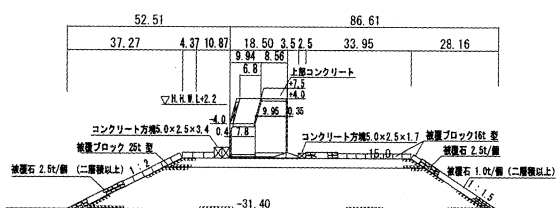
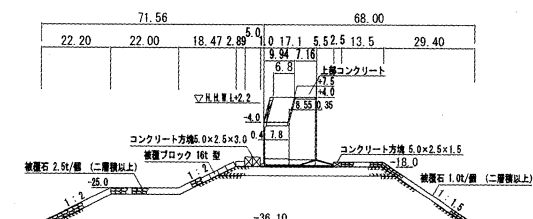
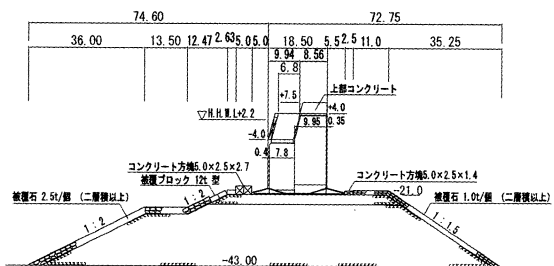
(a)断面1: $h=31.4$ m, $B=18.5$ m(b)断面2: $h=36.1$ m, $B=17.1$ m(c)断面3: $h=43.0$ m, $B=18.5$ m

図-2 実験で対象とした上部斜面消波堤

(3) 実験方法

伝達波高は、ケーソン前法線を基準として、背後100m, 140m, 180m, 200m, 220m, 265m 地点の計6箇所に設置した波高計(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(合田, 1991)、繰返し回数は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 Goda, Y. (1971) による消波工の無い混成堤(以降、混成堤と呼ぶ)の推定値及び関口ら(2000)が行った「遊水室前壁、後壁の傾斜角が60度の上部斜面消波堤」の実験結果(以降、既往結果と呼ぶ)と比較しながら、上部斜面消波堤の伝達波特性を明らかにした。

3. 実験結果および考察

(1) 伝達波の水平分布特性

図-3は、対象とした3つの上部斜面消波堤におけるケーソン背後の伝達率の水平分布を示したもので、上段が天端高+7.5m時($hc=5.3$ m)、下段が同+5.0m時($hc=2.8$ m)である。なお、横軸は、水平距離 l を相当水深波長 L で除した「相対水平距離(l/L)」として示した。

これをみると、バラツキはあるものの、両天端高とも、概ね0.5~0.7 L の範囲に伝達率のピーク水準が現れている。このことは、伝達率は入射波長 L 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示唆している。

これを詳細にみると、天端高+5.0m時でも+7.5m時と同様、地点間で伝達率に明瞭な差がみられる。これは、後述のとおり遊水室や後壁の存在により、天端高に関係なく水塊の跳ね上がりが発生するためと推測される。

なお、伝達波は、越波水塊が背後水面に打ち込んだ後、

その反動で水面が盛り上がり、それが奥部へ伝播する現象だが、目視観察によれば、伝達波高は水塊の打ち込み位置近傍ではそれほど高くなく、その後、徐々に発達してゆくことが確認されており、これが $0.5 \sim 0.7L$ 付近でピーク水準を迎える要因と考えられる。

以上より、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。

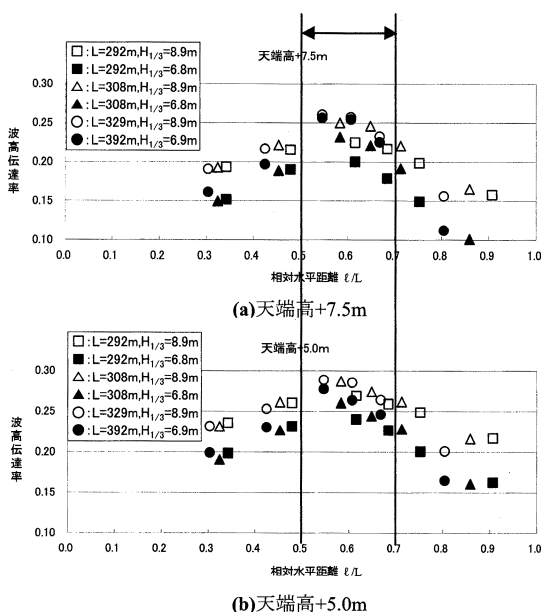


図-3 ケーソン背後の相対水平距離と伝達率の関係

(2) 相対天端高と伝達率の関係

図-4は、上部斜面消波堤の相対天端高と伝達率の関係を、 B/L , b/L をパラメータとして示したものである。

図中の実線は、Goda, Y. (1969)の推定図から求めた $d/h=0.47$ に対応する混成堤の伝達率を示している。また、今回実験から得た消波堤(*印)の伝達率及び関口ら(2000)が行った既往結果(◇印:傾斜角60度の上部斜面消波堤の実験結果)も併記してある。

これをみると、上部斜面消波堤の伝達率は、いずれの断面も、消波堤のそれを大きく上回っている。これは、消波堤の場合、越波が水平的となる(写真-1)のに対し、上部斜面消波堤では、波が斜面形状を成す後壁に衝突することで、越波水塊が高く、かつ、遠くへ跳ね上がり、背後水域に激しく打ち込むためである(写真-2)。ただ、目視観察によれば、本タイプの場合、波の先端が遊水室内に進入した直後に波本体が遊水室上を覆い被さるため、遊水室内の気泡が逃げ場を失って上方にはじけ、水塊が岸沖両方向に高く飛び散ることが確認されている(写真-2)。これは越波エネルギーを逸散させる効果につながると考えられ、上部斜面消波堤の利点の1つといえる。

なお、相対天端高が低くなるにしたがい、両者の差は縮まる傾向にある。これは、越波水塊の飛び方が徐々に水平的となり、越波量の割りに背後水面の擾乱が小さいためと考えられる。

断面形状による特性をみると、相対ケーソン幅 B/L 及び相対遊水室幅 b/L が大きいほど伝達率は低下する傾向が表れている。また、その際の反射率をみても、伝達率と同様、 B/L や b/L が大きいほど低いことが確認されている。この要因は、波長 L が短いほど越波水塊がケーソンの影響を受けやすくなることに加え、遊水室によるエネルギー逸散効果(=消波効果)が高まるため考えられる。

詳細にみると、断面2と断面3では、相対ケーソン幅 B/L は前者の方がわずかに小さく($0.055 < 0.056$)、相対遊水室幅 b/L は、逆に後者が小さい($0.022 > 0.021$)。こうした中、特に天端高が高い条件では、伝達率は明かに前者が低くなっている。このことから、伝達率には相対遊水室幅 b/L の効果がより強く表れると考えられる。ただ、天端高が低下するにしたがい、遊水室を通過した水塊の後壁による乗り上げ効果が低下するため、相対遊水室幅 b/L による差は小さくなるようである(図-4、写真-3)。

なお、図-4中の○囲みは $H_{1/3}=8.9\text{m}$ ($H_{1/3}/h'=1.11$)の条件であり、全体に伝達率が高い傾向にある。このことは、遊水室深さに対し、波高が大きいほど遊水室によるエネルギー逸散効果が低下することを示している。

本結果と既往結果を比較すると、伝達率は後者がかなり低い。これは、後者の場合、 d/h が大きい($0.47 \sim 0.48 < 0.77$)ことに加え、相対遊水室幅 b/L が大きい($0.021 \sim 0.023 < 0.047$)ためと考えられる。ただ、後者は前壁・後壁の傾斜角が緩い分($75^\circ > 60^\circ$)、相対的に伝達率が押し上げられているものと推測される。

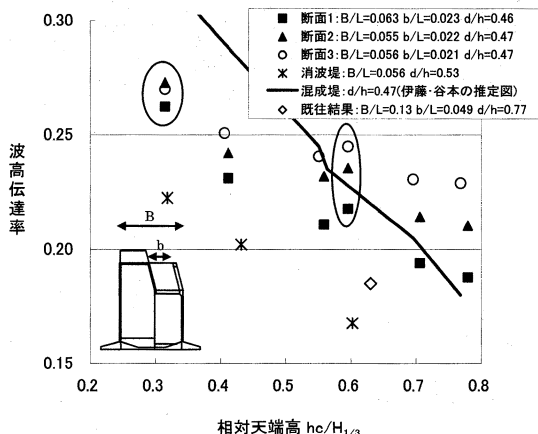


図-4 相対天端高と伝達率の関係

(3) 相対遊水室幅 b/L の違いによる天端高への影響

ここでは、先の相対遊水室幅 b/L が天端高に及ぼす影響を検討する。図-5は、実験結果と同じ伝達率となる混成堤の天端高 h_{cv} をGoda, Y. (1969)の推定図より求め、実験天端高 hc に対する比(以降、天端高比 β と呼ぶ)として示したものである。図中には、関口ら(2000)の既往結果(◇印)も併記してある。

これをみると、 $b/L=0.021$ (遊水室幅狭型)は、 $\beta=0.65\sim 1.3$ 程度、 $b/L=0.023$ (同幅広型)は $0.6\sim 1.0$ 程度の範囲にある。以上のことより、特に、高天端条件($hc/H_{1/3}>0.7$)では、幅狭型の場合、混成堤より20~30%程度高い天端高が必要となるのに対し、幅広型は、混成堤と同程度か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明らかとなった。

なお、本結果と既往結果を比較すると、後者は相対遊水室幅 b/L が大きい($0.021<0.049$)にもかかわらず、 β は同程度の水準にある。この要因は、後者の場合、傾斜角が緩い分($75^\circ>60^\circ$)、越波量がかなり増加したた

めと推測され、傾斜角の違いが伝達率に大きく影響を及ぼすことが再確認された。

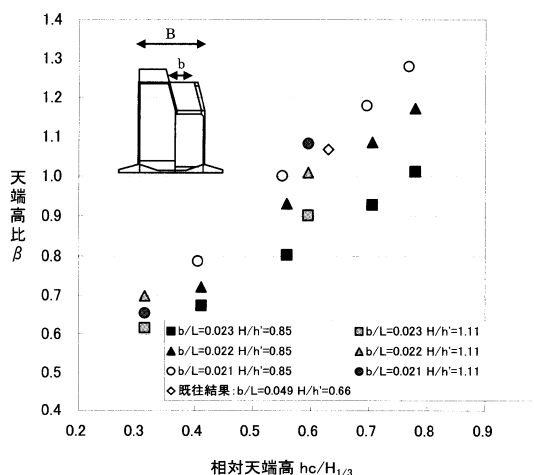


図-5 遊水室が天端高に及ぼす影響

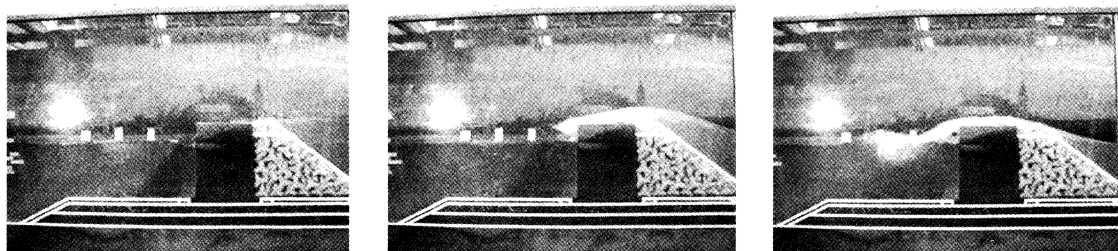


写真-1 消波堤の越波状況 ($H_{1/3}=8.8\text{m}$, 天端高+7.5m)

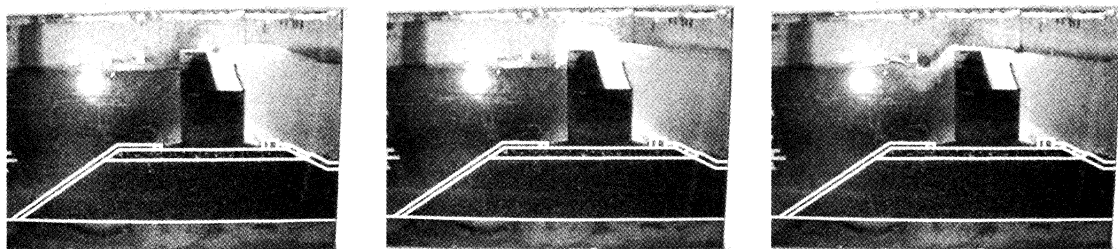


写真-2 上部斜面消波堤の越波状況 ($H_{1/3}=6.9\text{m}$, 天端高+7.5m)

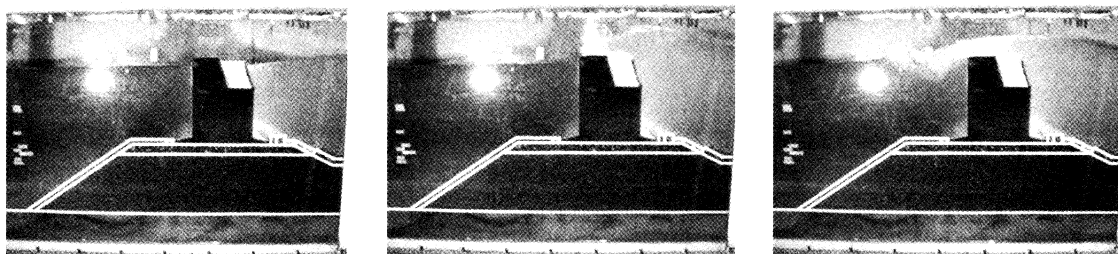


写真-3 上部斜面消波堤の越波状況 ($H_{1/3}=6.9\text{m}$, 天端高+5.0m)

(4) 天端高比 β を利用した概算伝達率の推定

図-6は、先の図-5より、 $H_{1/3}=6.8\sim 6.9\text{m}$ ($H_{1/3}/h'=0.85\sim 0.86$)の波について、 b/L 毎に $hc/H_{1/3}$ と β の関係を求め、任意の上部斜面消波堤天端高 hc を混成堤の天端高に換算し、Goda,Y. (1969)の推定図を利用して作成した概算伝達率推定図である。

これより、傾斜角75度、 $B/L=0.06$ 、 $d/h=0.47$ 、 $H_{1/3}/h'=0.85$ 程度の条件のもと、任意の遊水室幅、任意の天端高における上部斜面消波堤の概算伝達率を推定することが可能となる。

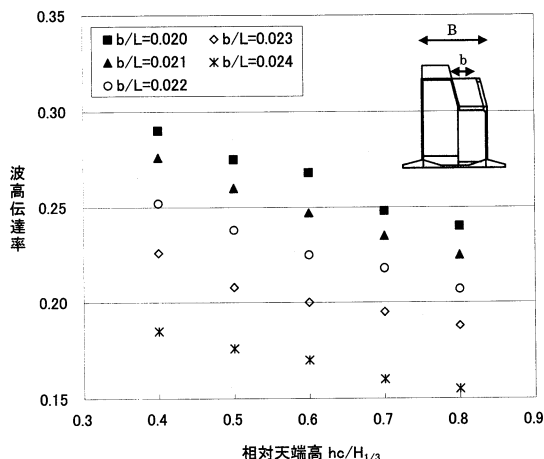


図-6 上部斜面消波堤の概算伝達率推定図

4. 主要な結論

本研究で対象とした上部斜面消波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、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断面形状による特性をみると、伝達率は、相対ケーソン幅 B/L や相対遊水室幅 b/L が大きいほど低下する。これを詳細にみると、 B/L よりも b/L の方が、伝達率低減に寄与することが確認された。
- ③遊水室幅による伝達率低減効果を、混成堤に対する天端高比 β の観点から検討した結果、高天端条件($hc/H_{1/3}>0.7$)では、幅狭型($b/L=0.021$)の場合、混成堤より20~30%程度高い天端高が必要となるのに対し、幅広型($b/L=0.023$)は、混成堤と同程度かそれ以下の天端高でも同様の伝達率に収まる可能性があることがわかった。
- ④ただし、既往結果を引用すると、遊水室前壁・後壁の角度が緩くなる(75度 $\rightarrow$ 60度)ことで、越波が促進され、遊水室の効果は大きく低減してしまうことが推測された。
- ⑤混成堤に対する天端高比 β を活用することで、任意の遊水室幅、任意の天端高における上部斜面消波堤の概算伝達率推定図を作成した。

参 考 文 献

- Goda,Y. (1969) : Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwater, Rept. port and Harbour Res. Inst., Vol.8, No.3, pp.3-18
- 合田良実(1990) : 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版, 333p.
- 関口信一郎・渥美洋一・中内勲・宮部秀一・福土昌哉・三輪俊彦(2000) : 斜面スリットケーソンの開発, 海洋開発論文集第16巻pp.487-492.
- 藤井敦・小椋進・竹内泰弘・森川高德・西村正(2002) : 大水深域における各種スリット式消波堤の反射・マウンド安定及び波力特性に関する実験的研究, 海洋開発論文集第18巻pp.413-418.