

防波堤伝達波の平面分布特性

高垣 泰雄*・清水 二六**・河原 進***

1. ま え が き

防波堤から港内に侵入する波として、主に防波堤を越波する伝達波および港口部からの回折波がある。このうち回折波については理論と実験から回折計算が確立している。しかし、伝達波については二次元実験により防波堤直後の伝達波の特性はかなり明らかになっており、その計算式も一部報告されているものの、一旦越波した波が平面的にどのように港内に伝達するかを実験した例はほとんどみられない。

今回は平面実験により防波堤伝達波の港内における分布特性を検討するとともに、従来から便宜的に実施されている防波堤越波部分を開口部とみなして計算した回折係数に、防波堤直後の伝達率を乗じて算出する簡略計算方法の検証を試みたものである。

表-1 実験内容

実験 ケース	堤体設置条件	実験波	備考
	天端R 水深h	$\frac{R}{H_i}$ $\frac{h}{L}$	波高H _i 周期T ₀
1	+1.7 -22.0	0.17 0.11	10.0 1.4
2	〃 〃	0.20 〃	8.3 〃
3	〃 〃	0.25 〃	6.7 〃
4	+3.3 〃	0.33 〃	10.0 〃
5	〃 〃	0.40 〃	8.3 〃
6	+5.0 〃	0.50 〃	10.0 〃
7	〃 〃	0.60 〃	8.3 〃
8	〃 〃	0.75 〃	6.7 〃
9	±0 -25.0	±0.00 0.12	10.0 〃
10	-3.3 -28.0	-0.33 0.13	10.0 〃

2. 実験条件および実験方法

(1) 実験水槽および模型

実験に用いた水槽は長さ 56.5m, 幅 48m, 深さ 1m で、水槽の長さ方向のほぼ中央で波向と直角方向に、長さ約 40m, 直立壁天端幅 0.25m の堤体模型を配置し、そのうち中央部 10m 間は天端を低くして越波を許せる構造とし、両サイド 30m 間は天端を高くし、中央の伝

達部以外からは港内に波が侵入しないようにした。堤体模型は図-1に示すようなコンクリート製の直立壁とし、直立壁前面には造波板との間の多重反射を少なくするため、碎石を敷設した上に二層厚相当の空隙率 50% の模型消波ブロックを 1:1.5 の勾配に積んだ。また、港内側についても 1:5 の斜面勾配で碎石を敷設した上面に、厚さ 10cm のステラシートを張り付け、水槽壁からの多重反射の防止に努めた。

伝達部の直立壁の天端高は高さの異なる 2 種類の直立壁の交換と水位を調整することで変化させた。消波工の天端高は一定としたため直立壁天端と一致しない場合があり、その差は最大 1.7cm となった。模型床は造波板から 10m の間は水平床とし、その先 8m 間を 1/25~1/100 の斜面で立上げ、それ以降の模型床終端の港奥部までを一般的な水平床のモルタル仕上げとし、水深は 22~28cm に変化させた。

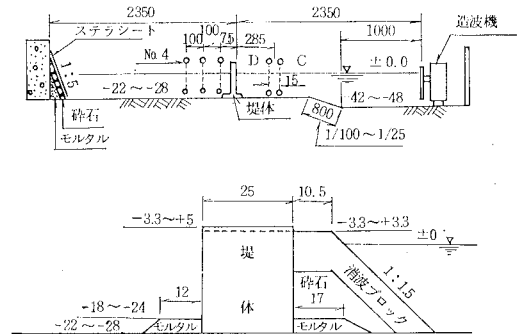


図-1 堤体模型: cm

(2) 入射波および伝達波の測定

入射波は堤体模型を設置する以前の状態で、堤体設置予定箇所の中央部に 15cm 間隔に設置した 2 本の容量式波高計で、入・反射波の分離計算¹⁾により表-1に示す目標とする実験波を求めた。同時にその港外側の図-1, 2 に示す直立壁から 2.85m の C, D 地点での 2 本の波高計で測定した波との相関を調べておき、堤体設置後も同じ波が来襲するものとして、実験中は C, D 地点の波記録から入・反射波の分離計算により入射波を求めた。また、直立壁前面 2.85m の F 地点、造波板前面

* 正会員 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所次長

** 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所建設専門官

*** 運輸省第一港湾建設局工務課第三核算係長

(前新潟調査設計事務所)

8m の A, B, E にも波高計を設置しておき実験中の波変化を監視した。水槽の反射の影響を調べるために入・反射波分離計算により求めた反射率は模型設置以前の状態で、造波板前、堤体設置地点、港奥部消波工前面で、すべて 16% 以下である。模型設置後では堤体前面で 43% 以下である。伝達波の測定は図-1, 2 に示すように、直立壁前面より 75 cm 離れた堤体直後から港奥部まで No. 1~35 の 35 地点を設置した。各地点の設置間隔は波の直進域である No. 3, 4, 5 列の間が 1m 間隔の他はすべて 2m 間隔に設置してある。各地点には・印に示すように 1m ピッチに 9 か所の測点を設け、各地点の伝達波の測定は、測定台車に 1m ピッチに 9 本の容量式波高計を取り付け、9 本同時測定を行い連続造波しながら順次測点の移動を行った。測定台車は制御室からの指令により自動的に測点に移動することができる。

入射波高は C, D 地点で伝達波と同時に測定し、No. 1, 18, 35 地点の伝達波測定時に C, D 地点の入射波波形から入・反射波分離計算により求めた 3 回の反射率を平均し、次式により各地点に対する入射波高とした。

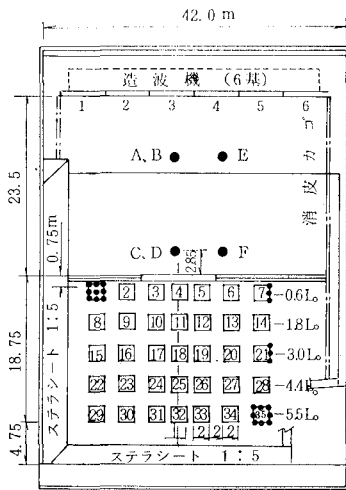


図-2 波の測定点: m

$$Hi = \frac{1}{\sqrt{1+K_R}} \cdot H_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 Hi : 入射波高、 K_R : 反射率、 H_s : 2本の波高計による波高の平均。

なお、模型を設置した状態の分離入射波高は模型設置以前の測定波高とはほぼ一致している。また、測定データは A/D 変換して直接電算処理システムに送信し、ゼロアップクロス法により統計処理した。

(3) 実験波

実験波はすべて不規則波を用いた。不規則波の入力信号は Bretschneider 型のスペクトルを目標とした。造波

装置はピストン型であり、白色雑音発生装置によって発生された雑音信号をローパスフィルターを通して所要のスペクトルを有する不規則波信号を発生させ造波する。実験波は 10Hz 以上の周波数をカットし、入・反射波分離計算により表-1の波が得られるように調整し、各実験波に対し3回のくり返しの平均波形から、不規則波発生装置の入力条件を決定した。データのサンプリング間隔は有義波周期の 1/20 で、初期の非定常性の強い波を除いて、データ数は 6000 個とした。このようにして求めた実験波高は目標波高に対し 3.6% の範囲に収まっている。目標周期に対して 0.9~4.5% の差となっている。図-3に $R/Hi_{1/3}=0.5$ 時の入射波と $R/Hi_{1/3}=0.5$ の伝達波のスペクトルを示す。入射波は、有義波周期の付近にスペクトルのピークがあるが他に $f=0.2\text{Hz}$ 付近にもエネルギーのピークが認められる。なお、図中 -1 は 10^{-1} の単位を示す。

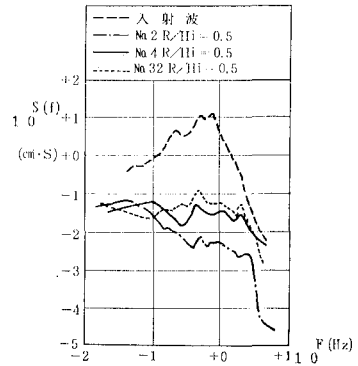


図-3 入射波および伝達波のスペクトル

実験水路の定常振動の固有周波数は、合田²⁾により次のように算定される

$$f_m = \frac{m\sqrt{gh_0}}{2(l_0+l')} : (m=1, 2, 3, \dots) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$l' = 2l_1 \left[1 - \sqrt{\frac{h_2}{h_0}} \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

図-3 の入射波は、 $l_0=10\text{m}$ 、 $l_1=36.1\text{m}$ 、 $h_0=0.42\text{m}$ 、 $h_2=0.22\text{m}$ の状態で測定されたもので、固有周波数は、 $f_{m1}=0.33, \dots, f_{m5}=0.169, 0.203, \dots$ (Hz) となる。図-3 のピークは、この $m=5, 6$ 付近の固有周期に対応している。

3. 実験結果

(1) 相対天端高と有義波高の伝達率

越波による防波堤背後への波高伝達率は、静水面上の天端高 R と入射高 Hi との比 R/Hi によってほぼ一義的に定まるといわれている。図-4, 5は $R/Hi_{1/3}$ と有義波高の伝達率 $K_{1/3}$ の関係を示したもので、図中 Y/L_0 は直立壁前面を 0 とし港奥側への距離を無次元表示した

もので、波長は実験ケースにより水深変化があるため、便宜上深海波の波長 L_0 を用いた。測点は図-2 に示したように No. 4 の中央で左右対称であるので、 Y/L_0 ごとに中央線の左右の相対する測点の波高比を各々平均してプロットしてある。図-4 は越波部背後の波の直進域における $K_{t1/3}$ であり、例えば $Y/L_0=0.6$ では No. 3, 4, 5 の対応する測点の $K_{t1/3}$ を平均した5点をプロットしてある。鎖線は谷本・大里³⁾の不規則波実験の結果であるが、今回の実験の $K_{t1/3}$ が小さくなっているもののよく似た傾向を示している。また、 Y/L_0 が大きくなるにつれ $K_{t1/3}$ が小さくなる。

図-5 は堤体背後の波の遮蔽域における $K_{t1/3}$ であり、例えば、 $Y/L_0=0.6$ では、No. 1 と 7, 2 と 6 の対応する測点の $K_{t1/3}$ を平均した6点をプロットしたものである。直進域に比べ $K_{t1/3}$ は小さくなっているが、 Y/L_0 が大きくなるのにつれ直進域とは逆に $K_{t1/3}$ が大きくなる傾向があり、後述するように波の回り込みによる回折波の現象に似た傾向を示す。

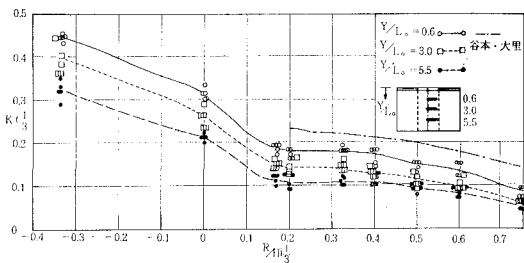


図-4 有義波高の伝達率(波の直進域)

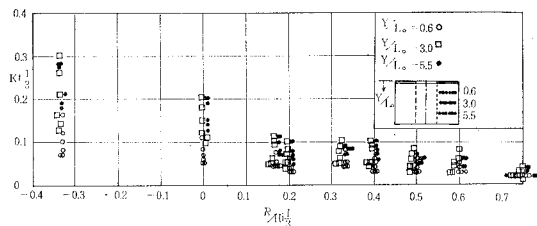


図-5 有義波高の伝達率(遮蔽域)

(2) 伝達波の代表波高比

図-6 は伝達波の有義波高に対する比を有義波高の伝達率 $K_{t1/3}$ に対して示したものである。谷本が指摘するように、特に最高波高 H_{tmax} の比がばらついており、越波直後の No. 4 の 9 測点から求めた $H_{tmax}/H_{t1/3}$ は 1.5~4.8 と通常のレーリー分布に比べて広い範囲で分布している。分布の傾向は $K_{t1/3}$ が大きくなると H_{tmax} の比は小さくなる。これに対し、1/10 最大波高 $H_{t1/10}$ の比は 1.2~1.6、平均波高 $\bar{H}_t$ の比は 0.5~0.7 でばらつきが小さい。一方、港奥部の No. 32 では、 H_{tmax} は 1.5~2.4、 $H_{t1/10}$ は 1.2~1.4、 $\bar{H}_t$ は 0.6~0.7 となり、No. 4 に比べ特に H_{tmax} が小さくなっており、

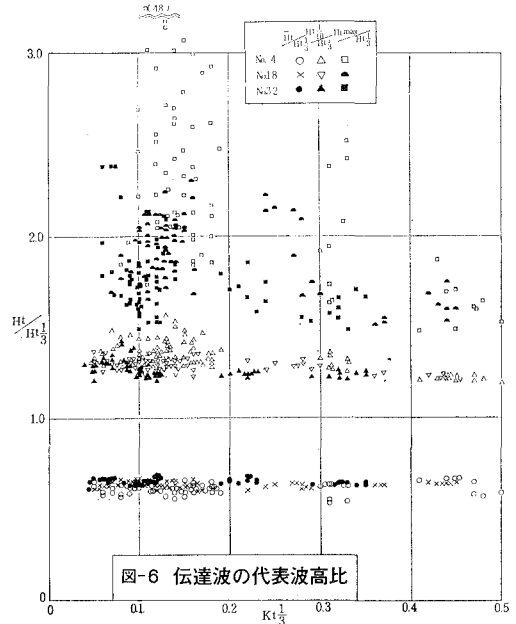


図-6 伝達波の代表波高比

越波により攪乱された小さい成分波は港奥部に伝わりにくいといえる。

(3) 相対天端高と各代表波高の伝達波高比

図-7, 8 は各代表波高同志の伝達波高比を求めたものである。図には最高波高の波高比 $K_{tmax}=H_{tmax}/H_{i max}$ 、1/10 最大波高の波高比 $K_{t1/10}=H_{t1/10}/H_{i1/10}$ 、平均波高の波高比 $K_t=\bar{H}_t/\bar{H}_i$ について示してある。添字の t は伝達波、 i は入射を意味する。図-7 は越波直後の No. 4 の 9 測点から各代表波高同志の伝達波高比を示したものである。実線は (1) で述べた $Y/L_0=0.6$ の有義波の伝達波高比であり、有義波高に比べ最高波高の伝達波高比は大きくなっている。図-8 は港奥部の No. 32 における伝達波高比を示したものである。No. 4 と同じように最高波高の伝達波高比が大きくなっているが、No. 4 に比べバラツキが小さくなっており、特に $R/H_{t1/3}$ が大き

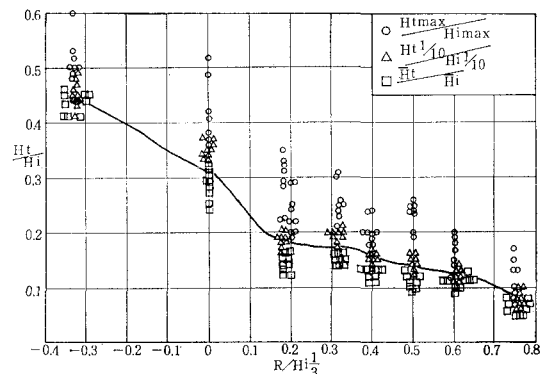


図-7 各代表波高の伝達波高比 (No. 4)

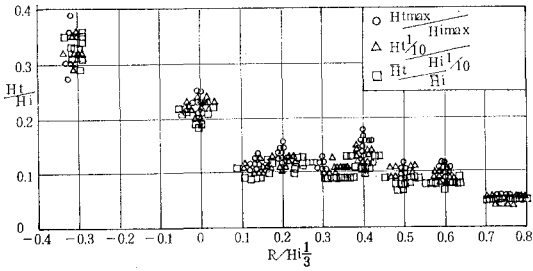


図-8 各代表波高の伝達波高比 (No. 32)

い領域では各代表波高同志の伝達波高比の差は小さくなり、越波により攪乱された波高の小さい波は減衰され港奥部に伝わりにくいことを示している。

(4) 入射波と伝達波の周期の比

図-9 および 図-10 は相対天端高 $R/H_{i/3}$ と入射波の有義波周期 T_i に対する伝達波の有義波周期 T_t の比を示したものである。図-9 は波の直進域の周期比 T_t/T_i を示したもので、越波直後の $Y/L_0=0.6$ では破線に示す谷本・大里の実験結果とよく一致している。また図-10 は波の遮蔽域における伝達周期 T_t/T_i を示したものである。両図からいえることは、波の直進域では、越波直後の $Y/L_0=0.6$ で、入射波周期よりも伝達波周期は小さいが港奥に進むにつれて、 T_t/T_i の値は大きくなって行く。一方、遮蔽域の $Y/L_0=0.6$ では T_t/T_i は $0.5 \sim 1.4$ とばらつきが大きく長周期波が遮蔽域に回り込み入射波より大きくなる傾向があるが、波が遮蔽域の港奥部に進むにつれて T_t/T_i は小さくなる。

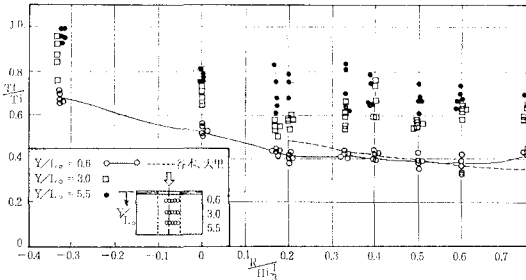


図-9 入射波と伝達波の周期の比 (波の直進域)

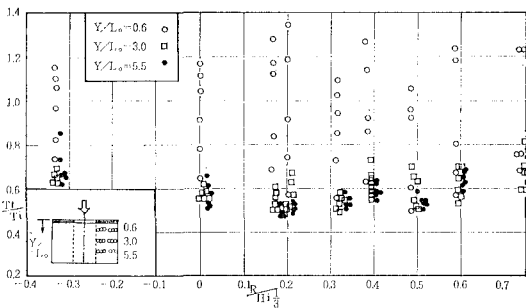


図-10 入射波と伝達波の周期の比 (遮蔽域)

(5) 伝達波の平面分布

図-11 は入射波の有義波に対する伝達波の有義波周期比 $T_t/T_{i/3}$ および有義波波高比 $H_t/H_{i/3}$ の分布の例を示したものである。越波によって堤体背面へ伝達される波は一般に高周波成分が強まり、周期が短くなることが合田⁹⁾により指摘されている。越波した波のうち長周期の成分波が遮蔽域に回り込むとともに、波の直進域では伝わり易い長周期成分波が港奥に伝播される様子が示され、回折波に似た傾向を示している。

高山⁵⁾は実験と理論計算から回折係数 K_d は遮蔽域では $0.9 < K_d < 1.2$ となり、長周期波が入り易くなると指摘している。

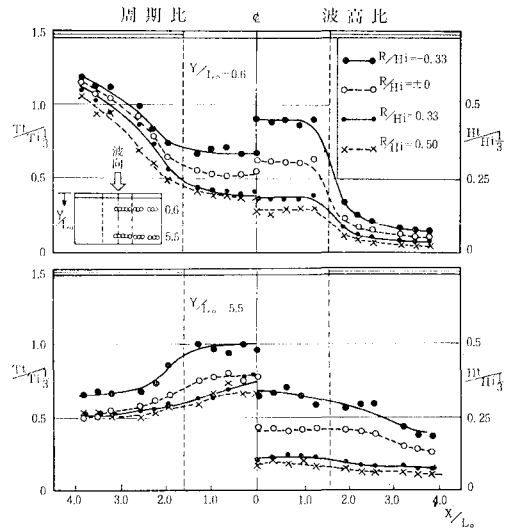
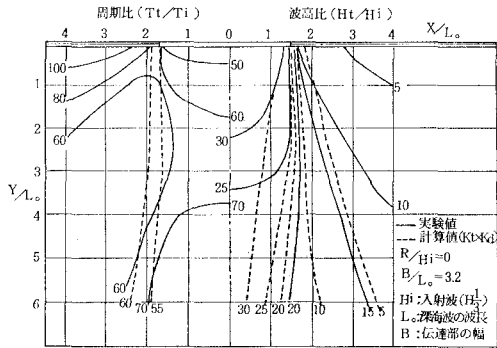


図-11 有義波の伝達分布

先の図-3 に示した伝達波のスペクトルによると入射波のスペクトルに比べ、いちぢるしくピーク値が減衰し、ピークが低周波側から高周波側に複数に分裂して現われており、低周波側にも顕著なエネルギー増大が認められる。遮蔽域の No. 2 では高周波側の成分波が急激に減衰しており、長周期成分波が回り込んでいるのがうかがえる。伝達波の波数は入射波に比べていちぢるしく多く、越波直後では直進域の波数が遮蔽域の波数より多い。なお、実験中の入射波の顕著な変化は認められなかった。

図-12 は越波直後の No. 3, 4, 5 から求まる伝達率を平均した K_t と Bretschneider 光易型のスペクトルを用いた単一波向の回折計算から求まる回折係数 K_d を乗じて求めた簡略計算値と実験値を比較したもので、 $R/H_{i/3}=0$ の例を示したものである。計算で得られた伝達波は単一方向ゆえに直進方向にあるが、一旦越波した波が遮蔽域にも回り込む傾向がみられ、あたかも方向分散を有する波の回折に近い現象を示している。その結果

伝達波は直進域で計算値より小さく、一方、遮蔽域では逆に大きくなっている。周期についても同様なことがいえ、実験で周期の長い成分波が遮蔽域に回り込み全体の周期分布は方向分散を有する回折波の周期分布とよく似ている。従って伝達波の平面分布を計算によって近似する場合は伝達波の周期および方向分散係数を修正すべきであることがわかった。



図—12 伝達波の平面分布

5. まとめ

波向が防波堤に直角に入射する場合の伝達波の平面分布特性について平面実験により検討した。

防波堤直背後の波高伝達特性は既往の消波ブロック被覆堤の2次元実験結果とよく一致した。一方、伝達波の平面分布特性は波高および周期とも方向分散を有する波の回折に近い現象を示し、長周期成分波が遮蔽域に回り込む傾向があり、平面分布特性を防波堤直後の伝達率と波の回折係数から計算で求める場合には伝達波の周期および方向分散係数を修正すべきことがわかった。実際の防波堤では波が斜めから入射するのが一般的であり、今後は斜め入射の伝達波の平面分布特性の検討が望まれる。今回の実験にあたり港湾技術研究所防波堤研究室谷本室長、波浪研究室高山室長の御助言と御指導をいただき感謝する次第である。

参考文献

- 1) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治: 不規則波実験による入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 1976.
- 2) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, Vol. 14, No. 3, pp. 87~88, 1975.
- 3) 谷本勝利・大里睦男: 消波ブロック被覆堤の不規則伝達波について, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 309~313, 1979.
- 4) 合田良実・竹田英章: 越波による防波堤背後への波高伝達率, 第13回海岸工学講演会論文集, pp. 87~92, 1966.
- 5) 高山知司: 波の回折と港内波高分布に関する研究, 港湾技研資料, No. 367, pp. 119~136, 1981.