

越波直後の伝達波の方向スペクトルを考慮した港内波の算定法

平口 博丸*・池野 正明*・井上 素行**
柏木 洋之***・阿部 光信****

1. はじめに

通常の波浪時の港湾内においては、防波堤を越波した波により発生する伝達波に比べ、港口からの回折波の影響が卓越する。しかし、高波の来襲や異常潮位の場合には、伝達波の影響が無視できなくなる。防波堤越波後の波が平面的に広がりながら港内を伝播する特性を検討した研究例は少なく、高垣ら（1985）の研究がある程度である。それによると、越波した波が単一方方向の不規則波であっても、伝達波は方向分散性を有している可能性があることが指摘されている。

そこで本研究は、防波堤越波直後の伝達波の方向スペクトルを適切に算定することに主眼を置き、伝達波の方向分散性を実験的に評価すると共に、方向分散性を考慮した越波伝達波による港内波計算手法について検討したものである。

2. 水理模型実験

防波堤を越波した波（伝達波）の方向スペクトルおよび港内側への伝播特性を検討するために、長さ 50 m、幅 22.4 m、高さ 1.5 m の平面造波水槽を用いて平面実験を実施した。対象とした防波堤は、図-1 に示すような消波ブロック被覆ケーソン堤である。模型縮尺は、平口ら（1991）が実施した断面 2 次元実験と同様に 1/100 とし、天端高 hc のみを 3 種類（ $hc=2.5, 3.5, 4.5$ cm）に変化させた。図-2 は防波堤の平面配置の一例であり、水槽中央部の 4 m 区間が防波堤越波部分、その他の部分は防波堤後端部に波返し工を有する非越波部とした。非越波部分からの反射波を低減させるために、非越波部のケーソン部内に遊水室を設け、消波ブロック被覆部を越波した遊水室内に飛び込んだ水をポンプアップした。実験時の水深 h は 21.5 cm の一様水深とし、港内側の水槽側壁は碎石により消波した。図-2 の防波堤配置は、防波堤の並ぶ方向と入射波とのなす角 θ_i が 90°

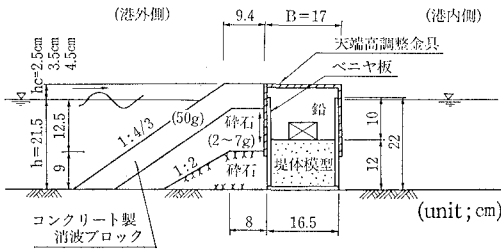


図-1 越波部ケーソン模型の断面図

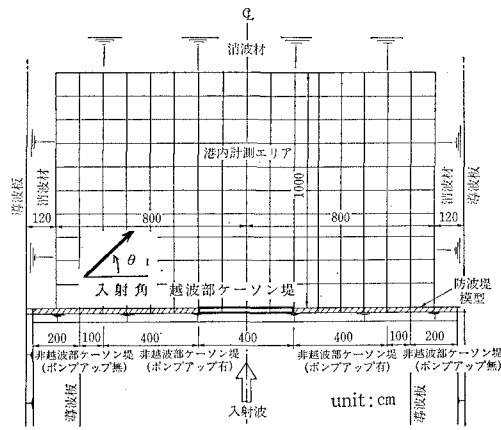


図-2 防波堤模型の平面配置と伝達波の測定範囲

の場合であるが、その他に、越波部分を中心にして防波堤を回転させて配置して斜め入射（ $\theta_i=105, 120^\circ$ ）の実験も行った。

実験に用いた波は、Bretschneider—光易型周波数スペクトルを有する 2 種類の不規則波である。それらの有義波高 $H_{1/3}$ および周期 $T_{1/3}$ は 7 cm、1.5 s および 6.5 cm、1.4 s である。

越波後の波の波高分布は、8 本の容量式波高計を用い、港内側の 10 m×16 m の範囲を 50 cm 間隔で測定した。伝達波の方向スペクトルは、電磁流速計と容量式波高計を組み合わせた 3 成分アレーを用い、港内側を 1 m 間隔で測定した。これらの測定時間は約 160 sec 間

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部
** 正会員 工修 東京電力(株) 工務部 工務土木課
*** 工修 東京電力(株) 建設部 土木調査課
**** 正会員 東電設計(株) 第二土木本部 火力土木部

とし、100波以上を計測した。なお、方向スペクトルの解析には EMLM (磯部ら, 1984) を用いた。

3. 実験結果とその考察

(1) 伝達波の平面分布特性

1) 直角入射

ゼロアップクロス法により波を定義し、伝達波と入射波の波高・周期比 (伝達率) を求めると共に、FFT 法により周波数スペクトルを計算した。図-3(a), (b) は、天端高 2.5 cm ($h_c/H_{1/3}=0.36$) の防波堤に不規則波 ($H_{1/3}=7$ cm, $T_{1/3}=1.5$ s) が直角に入射 ($\theta_I=$

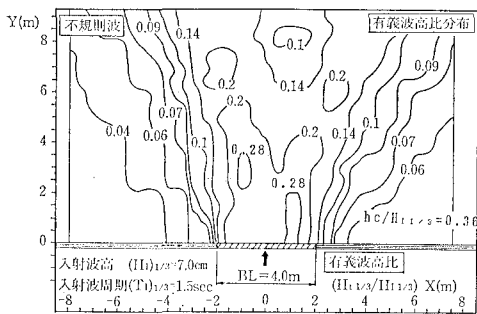
90°) した場合を対象とし、有義波高・周期伝達率の平面分布を示したものである。越波後の波は、防波堤から湾奥へと伝播するに従い遮蔽域へ波が回折して行く。このため、越波部背後の伝達波直進域では波高が減衰し、非越波部背後の遮蔽域では湾奥に行くに従い波高が大きくなる傾向にある。図(a)の波高比 0.2 のコンターに着目すると、このコンターは伝達波直進域で左右に分かれ、Y字型の波高分布形となっており、直進域の湾奥部では波高比が 0.14 以下と小さくなっている。また、この直進域の湾奥部での周期は周囲に比べて長くなっている。

図-3(c) は、伝達波の周波数スペクトルの場所的な変化を示したものである。越波直後の伝達波の周波数スペクトルには、入射波のピーク周波数 f_{PI} (0.635 Hz) およびその 2 倍, 3 倍周波数付近にスペクトル極大値が見られ、断面実験結果と同じ傾向を示す (平らら, 1991)。 f_{PI} 付近の周波数成分は、湾奥へ伝播するに従い防波堤遮蔽域へと回折している。一方、湾奥部での $2f_{PI}$ 以上の周波数成分は、伝達波の直進域よりも防波堤遮蔽域の方が大きくなっている。このように高周波成分の挙動は、図(a), (b) で述べたように、直進域の湾奥部での波高の低下および周期の増大に対応したものである。これと同様の結果は、天端高や入射波の異なる他の実験ケース、あるいは規則波の実験ケースにも見られた。このような高周波成分の伝播特性は、回折現象だけでは説明できないように思われる。

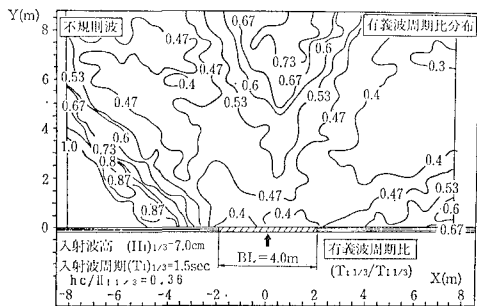
なお、谷本・大里 (1979) や平らら (1991) の断面実験では、0.2 Hz 以下の低周波領域にエネルギーの大きな領域が存在することが報告されているが、本実験では図-3(c) に示すようにそれほど顕著ではない。また、越波直後の周期伝達率は約 0.45 であり、断面実験結果と一致する。一方、越波直後の波高伝達率は 0.26 程度で、断面実験および高垣ら (1985) の平面実験結果に比べると、伝達率にして 0.02~0.08 大きい。

2) 斜め入射

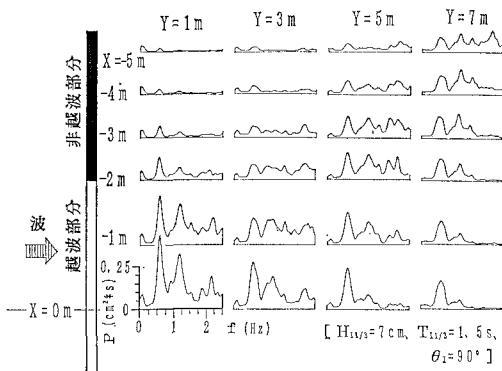
図-4 は、 $\theta_I=120^\circ$ の場合について波高・周期の伝達率を示したものである。越波直後の波高伝達率は、直角入射時とほとんど変わらない。斜め入射の場合、波高比 0.2 あるいは 0.14 というコンターが、入射波の波向に比べて若干右側にずれている。この原因として、以下のことが考えられる。防波堤を斜めに越えて打ち込まれた伝達波の基本周波数成分は、入射波と同じ波速であるため、入射波向と同じ方向へ伝播するが、越波により生ずる倍周波数成分の波速は入射波の波速よりも遅いため、伝播方向が右側へ屈折し、入射波向と若干異なることになる。この結果、倍周波数成分が伝播して行く右側 ($0 < x$) の領域では、左側の領域に比べて波高の高い領域が広がり、周期が短くなるものと推察される。なお、伝



(a) 有義波高伝達率

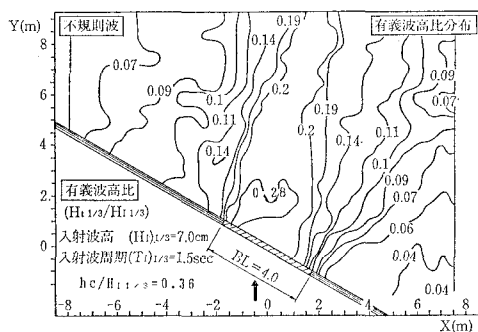


(b) 有義波周期伝達率

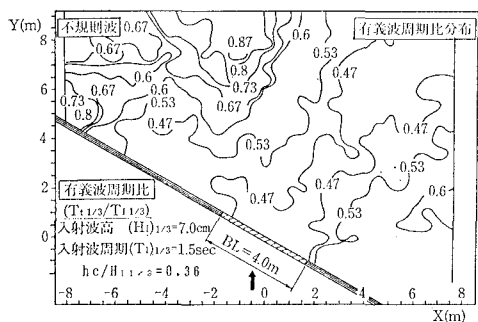


(c) 計測地点の異なる周波数スペクトルの比較

図-3 直角入射 ($\theta_I=90^\circ$) の場合の伝達波の平面分布



(a) 有義波高伝達率



(b) 有義波周期伝達率

図-4 斜め入射 ($\theta_I = 120^\circ$) の場合の伝達波の平面分布

達波直進域の湾奥部で周期が長くなる傾向は直角入射時と同様である。

(2) 伝達波の方向分散性

図-5 は、 $\theta_I = 90^\circ$ の場合の越波直後の $(x, y) = (-1\text{m}, 2\text{m})$ における伝達波の方向関数を示したものである。伝達波の方向関数は、単一方向からの越波にもかかわらず方向分散性が強く、入射波の f_{p1} (0.635 Hz) およびその倍周波数付近で方向集中度が高くなっている。

伝達波の各周波数毎の方向分散性を把握するため、伝達波の方向スペクトルから周波数毎の long-crestedness パラメータ γ を求め、次式 (磯部・泉宮ら, 1988)

$$S = \left(\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{2} \right) + \sqrt{\frac{1}{\gamma^4} - \frac{3}{4}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

により、光易型方向関数の方向集中度 S を計算した。図-6 に示す下段の図中の細線は、上段の図に示す越波部背後代表6地点の方向集中度 S を重ね書きしたものである。 S の分布形は測定場所や実験ケースにより変動しているが、 S が極大値を示す周波数には共通点がある。即ち、0.635 Hz ($f/f_{p1} = 1.0$) と 1.2 Hz ($f/f_{p1} = 1.85$) の2つの周波数付近で S は極値を取り、その値は各々の周波数で $S = 14 \sim 16$, $S = 17 \sim 19$ となっている。

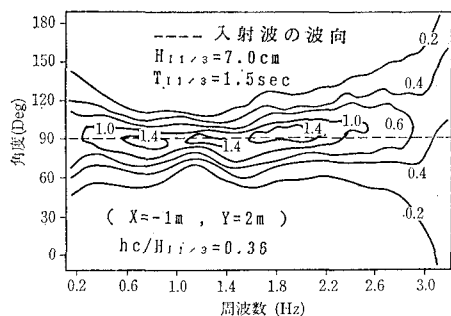


図-5 伝達波の方向関数のコンター図の一例

伝達波の方向関数は周波数に対して2山型の分布形状を示すと言う上記の実験結果を踏まえ、伝達波の方向関数 $G_t(f, \theta)$ を次式のようにモデル化した。

$$\left. \begin{aligned} G_t(f, \theta) &= G_0 \cos^{2S} \{ (\theta - \theta_I) / 2 \} \\ S &= \max \{ S_1, S_2 \} \\ S_1 &= \begin{cases} S_{\max 1} (f/f_{p1})^{2.5} : f \leq f_{p1} \\ S_{\max 1} (f/f_{p1})^{-2.5} : f > f_{p1} \end{cases} \\ S_2 &= \begin{cases} S_{\max 2} (f/f_{p2})^{2.5} : f \leq f_{p2} \\ S_{\max 2} (f/f_{p2})^{-2.5} : f > f_{p2} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 θ_I は入射波向、 G_0 は G_t の積分値を1とするための係数、 f_{p1} と f_{p2} は第1および第2のピーク周波数、 $S_{\max 1}$ と $S_{\max 2}$ は f_{p1} と f_{p2} における S の最大値である。図-6 に示した実験結果を用いて式(2)中の f_{p1} や $S_{\max 1}$ 等を最小自により決定した結果、

$$\left. \begin{aligned} S_{\max 1} &= 15, \quad S_{\max 2} = 18, \\ f_{p1}/f_{p1} &= 1.0, \quad f_{p2}/f_{p1} = 1.85 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

が得られた。式(2)および(3)による S の算定結果を図-6 下段図の太線で示す。越波直後の伝達波の方向集中度 S の分布特性は、式(2)によりほぼ表わすことができる。

4. 伝達波による港内波の計算

(1) 港内波の計算方法

伝達波による港内波の計算法としては、越波部分の防波堤を仮定の港口として回折計算により求める方法がある。従来の簡易計算法では、仮想港口に入射する波は、防波堤に作用する波と同じ単峰形の周波数・方向スペクトル形状を仮定し、周波数スペクトルの大きさは波高伝達率を基にして決定していた。

一方、本研究では、仮想港口から入射させる伝達波の方向スペクトル形状は方向分散性を考慮した式(2)および(3)で表わすことにする。また周波数スペクトルは f_{p1} およびその倍周波数成分が顕著となる事を考慮し、Cauchy-Poisson 波の理論解 (倉田ら, 1980, 1981) を不規則波に応用した池野ら (1991) の方法を用いて設

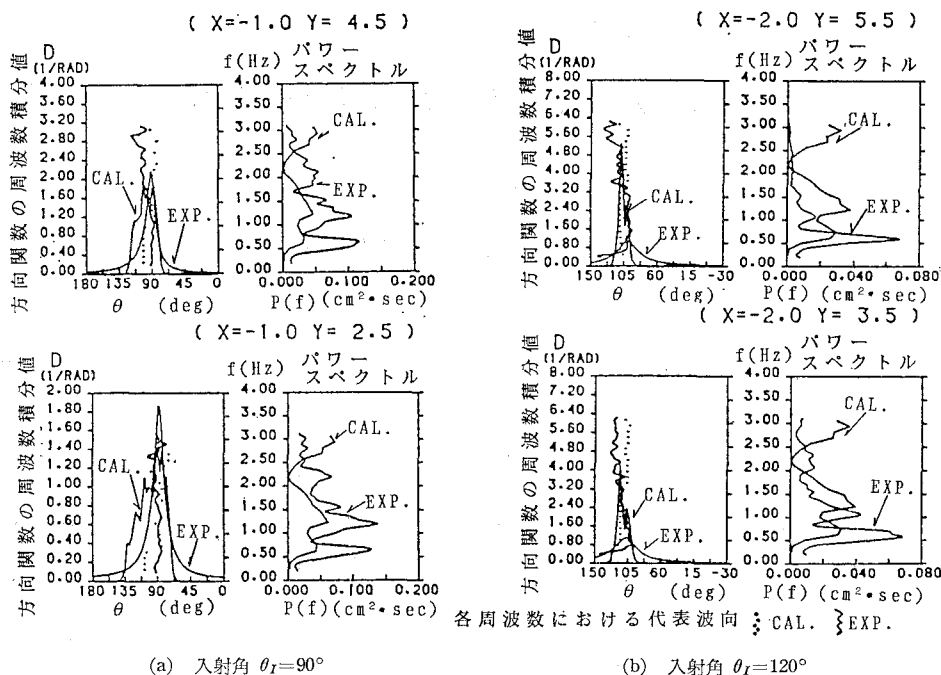


図-8 本手法による伝達波の方向関数(周波数積分値)と周波数スペクトルの計算結果と実験結果の比較
(代表地点の座標は図-6 上段図参照)

ルの計算結果を実験結果と比較した一例である。計算結果をスペクトルのレベルで一致させるのは難しいが、伝達波の周波数特性および方向分散性は比較的良好に表わされている。

5. おわりに

伝達波の周波数スペクトルは、入射波のピーク周波数およびその倍周波数付近にスペクトル極大値があり、断面実験と同じ傾向を示した。また、越波直後の伝達波の方向関数は、周波数スペクトルが極値を示す周波数で方向集中度が大きくなるため、方向集中度パラメータ S は周波数に対して双峰形の分布を示した。また、伝達波による港内波高を計算する際には、以上のような伝達波の周波数・方向スペクトル特性を考慮した方がよいことを示した。

本実験の方向スペクトルは、3成分アレーによるデータを最尤法を用いて解析したが、アレーの配置や解析法の種類によっては方向集中度 S の値が異なる可能性がある。しかしながら、 S の周波数分布形状が双峰型になると言う定性的な特性は、適切に評価されているものと考えられる。

最後に、本研究を行うにあたり、西松建設株式会社の

金子範彦氏(当時電力中央研究所研修生)、(株)開発計算センターの定森良夫氏、秋葉徹氏の協力を得たことを付記して謝意を表する。

参考文献

- 池野正明・平口博丸・井上素行・柏木洋之・樋口豊久(1991): 応答関数を用いた不規則波による越波伝達波の算定法, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 526-530.
- 磯部雅彦・泉宮尊司・堀川清司・清水琢三・大下哲則・関本恒浩(1988): 屈折・回折領域における波浪場の現地観測, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 108-112.
- 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司(1984): 方向スペクトルの推定における MLM の拡張, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 173-177.
- 倉田克彦(1981): 越波による伝達波高, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 339-342.
- 高垣泰雄・清水二六・河原 進(1985): 防波堤伝達波の平面分布特性, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 579-583.
- 谷本勝利・大里睦男(1979): 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.
- 平口博丸・池野正明・大橋裕寿・柏木洋之・樋口豊久(1991): 防波堤越波後の波の波高・周期・スペクトル特性, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 506-510.
- 松井政博・倉田克彦・萩野英樹・鈴木 功(1980): 越波による伝達波特性(Cauchy-Poisson 波によるモデル化), 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 410-413.
- 丸山康樹他(1982): 港内波高計算手法の提案—各成分波の位相折返しを考慮した多重反射域の波高計算法—, 電中研究報告 381035, 38 p.