

# 現地観測に基づく越流型モデルを用いた伝達波計算法の検証

阿部光信\*・貝沼憲男\*\*・興野俊也\*\*・定森良夫\*\*\*

## 1. はじめに

外洋・大水深海域に建設する防波堤は、高波浪時にある程度の越波を許容することによって、防波堤の天端高を低くし、断面の合理化が図れると考えられる。防波堤の天端高を低くすると、防波堤を越波した伝達波により港内波高が増大し、港内静穏度の低下や港湾構造物への影響が予想される。このため、低天端型の防波堤の適用にあたっては、伝達波の影響を考慮して港内波を評価する必要がある。

防波堤を越波した伝達波による港内波算定方法に関しては、平口ら (1991)、平石 (1994) などの研究がある。これらの研究での伝達波の計算方法は、防波堤越波部を仮定の港口部として、ここから越波直後の伝達波が入射するものとして回折波計算法を準用する方法が用いられている。しかし、この計算方法は、防波堤開口部からの港口進入波と防波堤からの越波による伝達波とを同時には計算できない。また、防波堤からの越波が防波堤の延長方向に断続的に生じる現象も再現できない。

本研究では、伝達波を考慮した港内波算定手法として、越波による伝達波の物理機構を再現した越流型モデルを平面波浪場に適用できるように改良を加え、新たな伝達波計算方法を提案した。さらに、太平洋岸において実施した伝達波に関する現地波浪観測データを用いて、提案した港内波算定手法の実海域での適用性を明らかにした。

## 2. 越流型モデルを用いた伝達波の計算方法の提案

### (1) 越流型モデルによる伝達波の計算方法

本研究では、防波堤開口部からの港口進入波と防波堤からの越波による伝達波が混在した平面波浪場の数値計算法として、有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式 (石井ら, 1994) を用いた波浪変形解析手法に、伝達波の評価方法として越流型モデルを組み合わせた手法を

検討した。有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式は次式で与えられる。

$$\nabla^2 \bar{\phi} - i a_1 \nabla^2 \left( \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} \right) + (b_0 + i c_0) \bar{\phi} + i (b_1 + i c_1) \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} - b_2 \frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\phi}$  と Radder 変換した複素水面変動振幅  $\bar{\phi}$  との関係は式 (2) のとおりで、添え字 over は伝達波成分を表す。複素水面変動  $\bar{\eta}$  およびこれの代表波からの変分  $\bar{\eta}$  との関係は式 (3) のとおりである。

$$\bar{\phi} = \bar{\phi} e^{-i \omega' t} + \bar{\phi}_{\text{over}} e^{-i \bar{\omega} t}, \quad \omega' = \omega - \bar{\omega} \quad (2)$$

$$\bar{\eta} = d_0 + i d_1 \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t} - d_2 \frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial t^2}, \quad \bar{\eta} = \frac{1}{\sqrt{c c_g}} \bar{\phi} \quad (3)$$

ただし、 $\bar{\omega}$  は代表角周波数、 $\omega$  は成分波の角周波数、 $c$  は波速、 $c_g$  は群速度で、 $d_0, d_1, d_2$  は Radder 変換の近似式の係数である。

防波堤の越波による伝達波は、防波堤の港外側での波による水位変動量が防波堤の天端高よりも高くなった場合に越波が生じ、越流した水塊が港内に飛び込むとその越流量に応じて防波堤背後の水面が上昇して水面変動を引き起こすという現象である。越流型モデルは、これらの一連の物理的な機構を再現するもので、防波堤を越波する波の防波堤天端高に応じた越流量を計算するモデルと、越流量に応じた伝達波の発生・伝播を計算するモデルの 2 つのサブモデルで構成される。

防波堤天端高に応じた越流量を計算するモデルは、森屋・水口 (1996) を参考に、緩勾配不規則波動方程式によって求まる防波堤前面の時々刻々の水位変動  $\eta_a(t)$  から式 (4) を用いて各時刻ごとに独立した越流量  $Q_e(t)$  を求めることとした。

$$Q_e(t) = \frac{2\sqrt{2g}}{3} m_1 (\eta_a(t) - h_c)^{3/2} \quad \eta_a(t) \geq h_c$$

$$Q_e(t) = 0 \quad \eta_a(t) < h_c$$

$$\dots (4)$$

ここで、 $m_1$  は越流量の無次元パラメータ (越流パラメータ)、 $g$  は重力加速度、 $h_c$  は防波堤天端高である。

伝達波の発生・伝播を計算するモデルにおいては、緩勾配不規則波動方程式では未知数が水位変動  $\eta(t)$  であるため、越流量  $Q_e(t)$  を伝達波水位変動  $\eta_{\text{over}}(t)$  へ変換す

\* 正会員 東電設計 (株) 第二土木本部火力土木部  
\*\* 正会員 東京電力 (株) 電力技術研究所土木グループ  
\*\*\* 正会員 (株) 開発計算センター 科学システム事業部

必要がある。越波によって励起される波が微小振幅進行波であると仮定すると、伝達波による防波堤背後の水位変動として式(5)を導くことができる。

$$\eta_{\text{over}}(t) = m_2 Q_e(t) / c \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $m_2$ は造波に係る無次元パラメータ(造波パラメータ)、 $c$ は波速である。このうち、波速 $c$ については、伝達波の周期が入射波周期の50~80%となるとの実験報告(合田ら, 1974)に基づいて、平均周期 $\bar{T}$ の60%に対する波速を用いることとした。

## (2) 伝達波計算における無次元パラメータの検討

本研究で提案した越流型モデルによる伝達波計算法では、式(4)、(5)に二種類のパラメータ $m_1, m_2$ を用いており、実海域への適用にあたっては、これらのパラメータを適切に設定する必要がある。本研究では、図-1および表-1に示す実規模の防波堤をモデル化した条件で試算を行い、既往の水理模型実験に基づく推定値と比較検討し、これらのパラメータを設定した。

越流パラメータ $m_1$ の設定にあたっては、式(4)による各時刻ごとの越流量から時間平均越波流量 $q$ を求め、これと合田ら(1975)が護岸を対象とした不規則波実験により求めた越波流量算定図と比較した。

図-2に比較検討結果を示す。このとき、越流パラメータは $m_1=1.0$ である。これによれば、式(4)を用いて求めた時間平均越波流量は、防波堤の相対天端高が高いケース( $h_c/H_{I/3}=1.0$ )においては越波流量算定図との差異が見られるものの、低天端防波堤に相当するケース

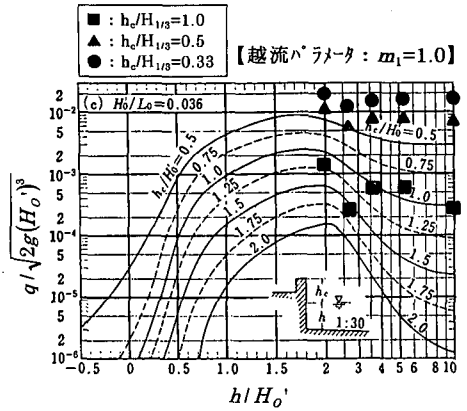


図-2 越流量の計算値と越波流量算定図の比較

( $h_c/H_{I/3}=0.5, 0.33$ )では越波流量算定図と同じオーダーを示した。越波流量算定図には2~5倍の推定誤差があることを考慮すれば、式(4)は越流パラメータを $m_1=1.0$ とした場合にほぼ妥当な越流量を与えるものと判断された。

造波パラメータ $m_2$ の設定にあたっては、式(5)により防波堤越波背後の波高伝達率を求め、これと式(6)に示す合田ら(1974)の不規則波実験による波高伝達率推定式と比較した。

$$K_T = \sqrt{0.25 \left[ 1 - \sin \left\{ \frac{\pi}{2\alpha} \left( \frac{h_c}{H_I} + \beta \right) \right\}^2 + 0.01 \left( 1 - \frac{d}{h} \right)^2 \right]} \quad ; \quad \beta - \alpha < h_c/H_I < \alpha - \beta$$

$$K_T = 0.1 \left( 1 - \frac{d}{h} \right) \quad ; \quad h_c/H_I \geq \alpha - \beta$$

..... (6)

ここで、 $K_T (= H_T/H_I)$ は波高伝達率、 $H_T$ は伝達波高、 $H_I$ は入射波高、 $d$ はマウンド天端上の水深、 $h$ は堤体設置水深、 $h_c$ は防波堤天端高である。また、 $\alpha, \beta$ は波高伝達率に係るパラメータである。

図-3は式(5)で求められる波高伝達率と式(6)による波高伝達率の推定値を比較したものである。ここで、

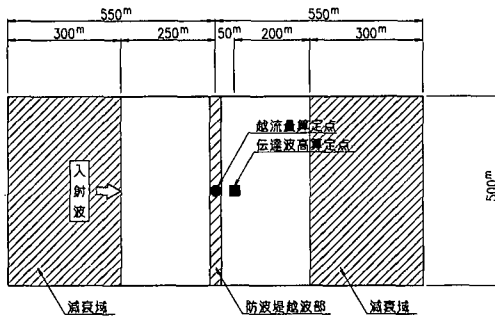


図-1 無次元パラメータの検討モデル

表-1 無次元パラメータの検討条件

| 項目                           | 検 討 条 件                                          |       |       |       |       |       |       |  |
|------------------------------|--------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| 水 深: $h$ (m)                 | 20.0                                             |       |       |       |       |       |       |  |
| 入射波高: $H_{I/3}$ (m)          | 2.0                                              | 3.33  | 5.0   | 6.66  | 8.0   | 9.0   | 10.0  |  |
| 入射波周期: $T_{I/3}$ (s)         | 6.0                                              | 7.7   | 9.4   | 10.9  | 11.9  | 12.7  | 13.3  |  |
| 相対水深: $h/H_{I/3}$            | 10.0                                             | 6.0   | 4.0   | 3.0   | 2.5   | 2.22  | 2.0   |  |
| 波形勾配: $H_{I/3}/L$            | 0.036                                            | 0.040 | 0.045 | 0.049 | 0.053 | 0.055 | 0.058 |  |
| 相対天端高: $h_c/H_{I/3}$         | 1.0, 0.5, 0.33                                   |       |       |       |       |       |       |  |
| 方向集中度パラメータ: $S_{\max}$       | 25.0                                             |       |       |       |       |       |       |  |
| 無次元パラメータ: $m_1, m_2$         | $m_1=1.0, m_2=2.0$                               |       |       |       |       |       |       |  |
| 計算時間間隔: $\Delta t, \Delta x$ | $\Delta x=6.0\text{ m}, \Delta t=0.1\text{ sec}$ |       |       |       |       |       |       |  |

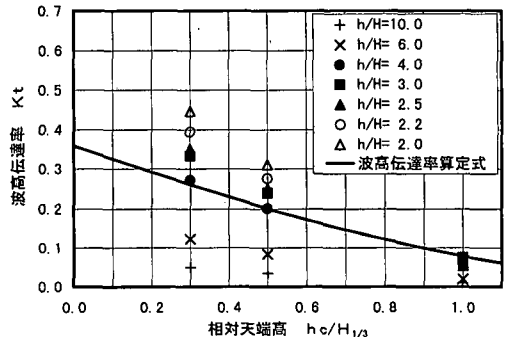


図-3 波高伝達率の計算結果と合田らの推定式の比較

波高伝達率に係るパラメータは $\alpha=2.2$ ,  $\beta=0.4$ , 越流パラメータは $m_1=1.0$ , 造波パラメータは $m_2=2.0$ とした。これによれば, 式(5)で求められる波高伝達率は相対水深だけでなく相対水深によっても変化し, 相対水深が小さくなるにつれて波高伝達率が高くなる傾向を示した。このことは, 式(5)で求められる波高伝達率を式(6)と一致させるためには, 造波パラメータ $m_2$ を相対水深を含む関数として設定する必要があることを示している。

そこで, 本研究では, 式(5)で求められる波高伝達率を波高伝達率推定式と一致させるための造波パラメータ $m_2$ を逆算し, これを波の非線形性を表すパラメータであるアーセル数 $HL^2/h^3$ を用いて整理した。その結果を図-4に示す。ここで, ●は越波の影響が少ないアーセル数 $HL^2/h^3=5$ 以下および $h_c/H_{1/3}=1.0$ のケースを除いたデータで, これを用いて越流パラメータ $m_2$ とアーセル数 $HL^2/h^3$ の線形関係式を求めると, 式(7)のとおりとなる。

$$m_2 = -0.022(HL^2/h^3) + 2.0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(7)によって求めた造波パラメータ $m_2$ を用いた場合の波高伝達率を図-5に示す。これによれば, 式(7)を

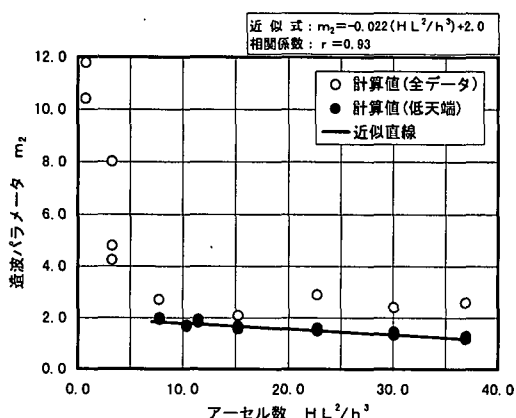


図-4 造波パラメータとアーセル数の関係

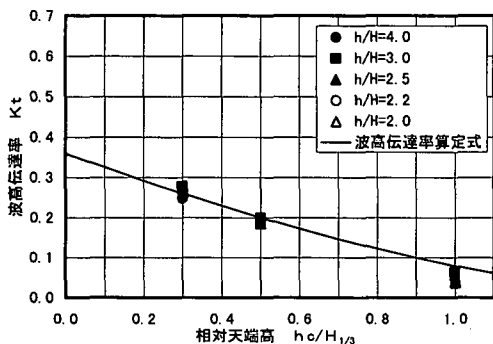


図-5 修正した波高伝達率の計算結果と推定式の比較

用いて推定した波高伝達率は, ほぼ式(6)と一致している。したがって, ここでは式(5)に含まれる造波パラメータ $m_2$ を式(7)によって推定することとした。

### 3. 伝達波計算法の現地適用性の検討

本研究で提案した越流型モデルを用いた伝達波計算法と有理化近似に基づく緩勾配不規則波動方程式とを組み合わせた港内波算定手法を用いて, 実海域で実施した伝達波に関する波浪観測の観測結果と計算値とを比較し, 現地適用性について検討した。

#### (1) 伝達波に関する現地波浪観測

伝達波に関する現地波浪観測は, 茨城県ひたちなか市に建設中の東京電力(株)常陸那珂火力発電所東護岸背後海域で, 1995年9月15日～10月10日(25日間)と1997年3月10日～3月31日(20日間)の2回, 埋立護岸が完全に締め切られる前と後とで実施した。東護岸の設置水深は18.5m, 天端高は朔望平均満潮位上1.5m, 設計有義波高との比は約0.23で, 大水深・低天端の状況にある。図-6に波浪観測地点と周辺外郭施設の施工状況を示す。なお, 観測データの解析方法および波浪観測結果の詳細は青野ら(1996), 興野ら(1998)による。

#### (2) 観測地点における有義波高・周期の比較

2回の現地波浪観測期間において, 高波浪が来襲して比較的越波量が多かった9ケースを選定し, 本研究で提案した伝達波を考慮した港内波算定手法を用いて有義波高分布の再現計算を行った。計算では, 東防波堤100m沖の造波境界に観測結果から得られた波浪諸元を与えた。計算領域は岸沖方向2000m, 沿岸方向3800m, 計算格子間隔は6m, 計算時間間隔は入射波周期の1/50, 計算継続時間は入射波周期の100倍とした。

図-7は, 提案した伝達波を考慮した港内波算定手法による港内の波高分布の代表例を示したもので, (a)は埋立護岸が完全に締め切られる前の1995年9月17日12時, (b)は埋立護岸が完全に締め切られた後の1997年3月16日6時である。

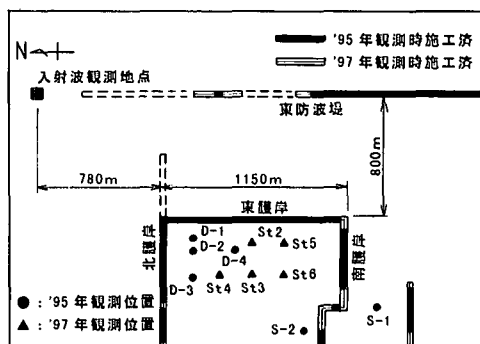
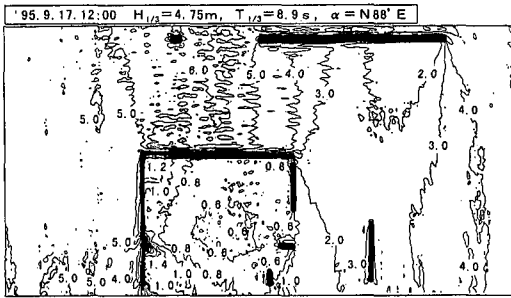
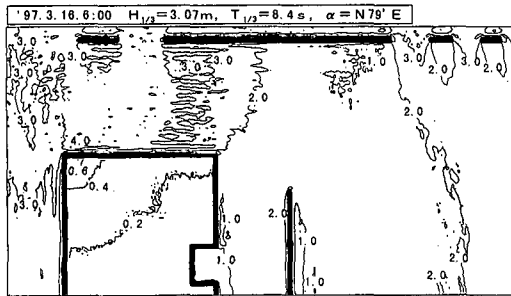


図-6 現地波浪観測の概要

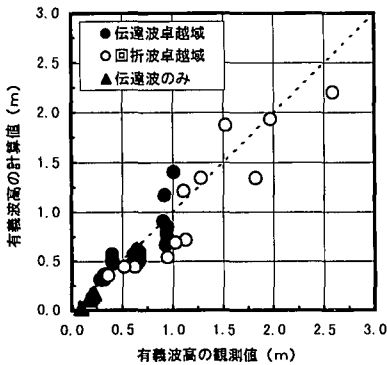


(a) 1995年9月17日12時

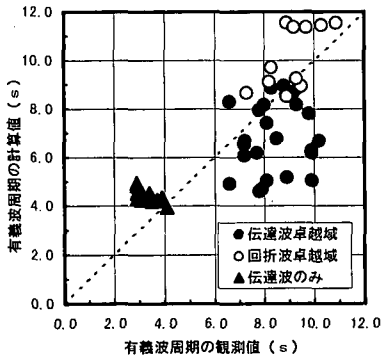


(b) 1997年3月16日6時

図-7 提案した計算法による港内波高分布の計算結果



(a) 有義波高  $H_{1/3}$



(b) 有義波周期  $T_{1/3}$

図-8 有義波高・周期の観測値と計算結果の比較

埋立護岸背後での波高分布では、東護岸と北護岸とで形成する隅角部で波高が高くなり、護岸から離れるに従って波高が小さくなる傾向が見られる。このような港内波高分布は、計算結果に伝達波の影響が考慮されていることを示しており、港内での伝達波の平面伝播特性を再現しているものと考えられる。また、1995年9月のケースでは、埋立護岸の開口部からの回折波の進入も認められ、伝達波と回折波とが同時に考慮されている。

次に、再現計算を行った全9ケースの計算結果について、波浪観測位置に相当する計算点での有義波高、有義波周期を求め、同時刻の観測データと比較した。その結果を図-8に示す。ここで●は埋立護岸が締め切られる前の伝達波と回折波が共存するケースでの伝達波卓越地点(D-1~D-4)、○は回折波卓越地点(S-1~S-2)、▲が埋立護岸が締め切られた後の伝達波のみのケース(St2~St6)である。

これによれば、各波浪観測地点での有義波高は、本研究で提案した港内波算定手法による計算値は観測データとおおむね一致している。一方、有義波周期については、伝達波のみのケースでは計算値と観測データがおおむね一致しているが、伝達波と回折波が共存するケースのうち伝達波が卓越する領域での計算値に若干ばらつきが見られる。観測データとの差が見られる地点は東護岸に比較的近い観測点であることから、波の非線形性の影響が生じているものと考えられる。

以上のように、本研究で提案した港内波算定手法による計算結果は有義波高、有義波周期については観測データとよく一致している。

### (3) 観測地点における方向スペクトル特性の比較

現地波浪観測の代表ケースに対する港内波算定結果を用いて、波浪観測地点における方向スペクトルを拡張最大エントロピー原理法(EMEP法、橋本ら、1993)によって求めた。ここで、方向スペクトルの算定には、有理化近似に基づく緩勾配不規則波動方程式では計算格子点の水位変動のみが求まることから、各波浪観測地点ごとに波高計アレイに相当する観測地点とその周辺地点の5点の水位変動時系列データを用いた。

図-9および図-10は、波浪観測期間中に最大波高を記録した1995年9月17日12時の東護岸背後2地点と南護岸南側1地点(D-1, D-3, S-1)の代表3地点における周波数スペクトルおよび方向関数を示したもので、図中の破線が観測データ、実線が計算値である。周波数スペクトルの計算値は、回折波が卓越するS-1点では入射波周期に対応した周波数が卓越した単峰型スペクトルを示している。これに対して、伝達波の影響が顕著である東護岸背後のD-1点やD-3点では、入射波周期に対応した0.1 Hz付近の周波数のほかにその倍周波

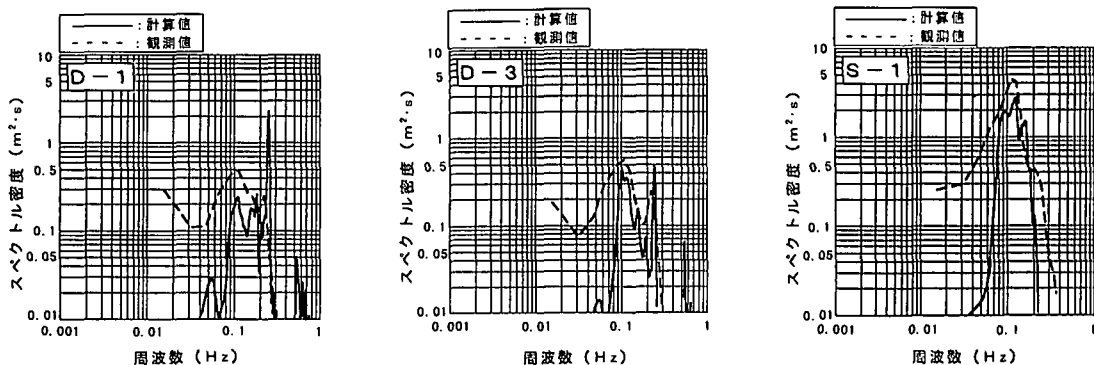


図-9 波浪観測地点での周波数スペクトルの観測値と計算結果の比較

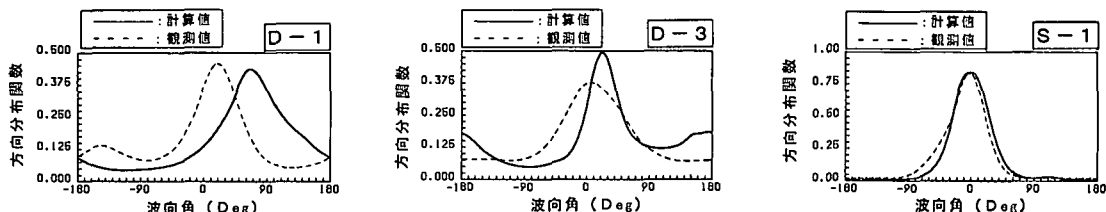


図-10 波浪観測地点での方向関数の観測値と計算結果との比較

数付近でもピークが見られる二山型スペクトルを示している。このような傾向は現地波浪観測データでも見られ、伝達波の一般的特性とされている。

また、方向関数については、東護岸直背後のD-1点では伝達波の方向関数のピーク値は観測値と計算結果とで若干の相違が見られる。しかし、東護岸からやや離れたD-3点では、計算結果の方向集中度は観測値に比べてやや高くなる傾向が見られるものの、ピーク値の方向はほぼ一致している。

以上のように、本研究で提案した港内波算定手法による計算結果は観測データとおおむね一致し、伝達波の平面伝播特性についてスペクトルレベルでの再現性を有しているものと考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、伝達波を考慮した港内波算定の新たな手法として、有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式に越流型モデルによる伝達波計算法を組み合わせた手法を開発した。開発した手法は、防波堤背後の回折・反射波と伝達波が同時に計算でき、防波堤に沿った断続的な越波も再現できるものである。この手法を用いた現地波浪観測結果との比較検討では、越波部背後の伝達波による有義波高、有義波周期の計算結果は観測データとほぼ一致し、また方向スペクトルも伝達波の特徴をおおむね再現できた。

今後は、提案した港内波算定手法の実務への適用を図る予定である。なお、長周期波成分の伝達波に及ぼす影響、ならびに波の非線形性の強い砕波帯付近での適用性については今後の課題点である。

#### 参考文献

- 平口博丸・池野正明・井上素行・柏木洋之・阿部光信 (1991): 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, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 531-535.
- 平石哲也 (1994): 多方向不規則波を用いた港内波高分布に関する模型実験手法の検討, 港研資料, No. 788, pp. 1-32.
- 石井敏雅・磯部雅彦・渡辺 晃 (1994): 有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式を用いた平面2次元波浪場計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 6-10.
- 森屋陽一・水口 優 (1996): 回折散乱波を考慮した越波問題, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 711-715.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治 (1974): 不規則波浪実験とその特性について, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 237-242.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975): 不規則波による防波堤岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp. 3-44.
- 菅野利夫・貝沼憲男・興野俊也・金澤 剛 (1996): 低天端ケーソン堤の越波による伝達波について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 731-735.
- 興野俊也・貝沼憲男・菅野利夫 (1998): 外洋における防波堤越波・マウンド透過波に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 696-700.
- 橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一見・久高将信・小野修平 (1993): 方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法の拡張, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 136-140.