

構造物が存在する場合の不規則波に伴う 海浜流の数値モデル

山口正隆*・西岡賢嗣**・田中浩二***

1. 緒 言

不規則波を対象とした実用的な波浪変形・海浜流の数値モデルは山口ら（1986）および清水ら（1989）により提案されているにすぎず、しかも前者のモデルは構造物の存在を、一方、後者は構造物による回折、反射および波と流れの干渉効果を考慮していない。これらのモデルは wave action 波数スペクトルの保存則あるいはエネルギー平衡方程式に基づいて波浪場の変化を記述しているため、構造物が存在する場合には原理的に適用できないが、各成分波のエネルギー合成という近似的な意味では、回折、反射現象を考慮できよう。もちろん、回折の影響に限定すれば、緩勾配方程式の放物型近似に基づく磯部（1986）のモデルが適用可能であろうが、これを波と流れの交互計算を必要とする海浜流モデルに組み込むことは計算時間の制約により困難であると考えられる。

そこで、本研究は著者ら（1986）の不規則波による波浪変形・海浜流の数値モデルを構造物が存在する場合にも適用しうるように拡張しようとするものである。そのため、まず波浪変形モデルにおける砕波減衰評価法および回折・反射計算法と、数値計算法を説明したのち、一様勾配地形や精門浅瀬上での波浪変形の実験結果に対する波浪変形モデルの適用性や、構造物が存在する場合の海浜流特性を数値計算に基づいて考察する。

2. 波浪変形・海浜流の数値モデル

(1) 波浪変形モデル

2次元流れ（ U, V ）および海底地形変化が存在する場合、不規則波の浅海における変形を支配する方程式は wave action 波数スペクトルの保存則であるが、これを周波数・方向空間（ f, θ ）における表示式に変換し、かつ流れおよび水深の非定常変化の影響を無視すれば次式になる。

$$\frac{\partial \phi(f, \theta)}{\partial t} + (dx/dt) \frac{\partial \phi(f, \theta)}{\partial x} + (dy/dt) \frac{\partial \phi(f, \theta)}{\partial y} + (d\theta/dt) \frac{\partial \phi(f, \theta)}{\partial \theta} = 0 \dots (1)$$

$$\phi(f, \theta) = (c_g + U \cos \theta + V \sin \theta) E(f, \theta) / (2\pi k \sigma_m) \dots (2)$$

$$dx/dt = c_g \cos \theta + U, \quad dy/dt = c_g \sin \theta + V \dots (3)$$

$$\begin{aligned} d\theta/dt = & \partial\theta/\partial t + (c_g \cos \theta + U)(\partial\theta/\partial x) + (c_g \sin \theta \\ & + V)(\partial\theta/\partial y) = -(1/k)(\partial\sigma_m/\partial D)(\partial D/\partial n) \\ & - \cos \theta(\partial U/\partial n) - \sin \theta(\partial V/\partial n) \dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 c_g は群速度、 k は波数、 $E(f, \theta)$ は方向スペクトル、 D は全水深、 $\partial/\partial n$ は波峰線方向の微分演算子、 $\partial\theta/\partial n = -\sin \theta(\partial\theta/\partial x) + \cos \theta(\partial\theta/\partial y) \dots (5)$

を表す。また、 σ_m は流れに相対的な角振動数であり、絶対角振動数 σ との関係は周知のドップラーの関係式で与えられる。

$$\sigma = \sigma_m + kU \cos \theta + kV \sin \theta \dots (6)$$

式（1）は式（3）、式（4）、式（6）で定義される波向線上で、 $\phi(f, \theta) = \text{const.}$ を意味するので、これから格子点における方向スペクトル $E(f, \theta)$ の時空間変化が計算される。しかし、式（1）は流れおよび水深変化に伴う成分波の shoaling および屈折を計算するにすぎないので、これら以外の変形要因として回折、砕波および反射の影響を別の方法で考慮する。

まず、回折の効果は wave action 波数スペクトルの空間勾配により波向が変化するという形で取り込まれると仮定し、波向計算のための基礎方程式を次のように修正する。

$$\begin{aligned} d\theta/dt = & -(1/k)(\partial\sigma_m/\partial D)(\partial D/\partial n) - \cos \theta(\partial U/\partial n) \\ & - \sin \theta(\partial V/\partial n) + \beta c_g \{\partial \phi(f, \theta)/\partial n\} / \phi(f, \theta), \\ \beta = & 0.02 \dots (7) \end{aligned}$$

上式は波向変化が、波峰線方向の水深および流れの勾配のみならず、成分波のエネルギー勾配に比例することを意味し、第4項が擬似回折項に相当する。また、式（4）では波向は wave action スペクトルに独立であるが、式（7）では wave action スペクトルに依存するので、各タイムステップごとに wave action スペクトルの更新値に対応する波向線の計算が必要になる。

ついで、波浪変形に及ぼす砕波の影響を Battjes ら（1978）の段波モデルにより評価する。これによれば、砕波によるエネルギー減衰量は次式で与えられる。

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科
** 学生会員 愛媛大学大学院工学研究科
*** 正会員 愛媛県伊予土木事務所

$$G = (\alpha/4) Q_b \bar{f} \rho g H_{\max}^2, (1 - Q_b) / \ln Q_b \\ = -(H_{\text{rms}}/H_{\max})^2 \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $\alpha (=1.1)$: 定数、 $\bar{f}$: スペクトルの1次モーメントで定義される平均周波数、 $H_{\max}$: 最高波高、 H_{rms} : 2乗平均波高、である。最高波高 $H_{\max}$ は、不規則波が規則波の碎波高より低い波高で碎けるという実験結果を考慮し、海底勾配 i を含む次式で評価する。

$$H_{\max}/D = 0.85(0.7 + 5i) \dots \dots \dots (9)$$

また、式(8)は平均エネルギー逸散率であるから、方向スペクトルの変形を計算する本モデルに適合させるため、方向スペクトルの減衰に及ぼす碎波の影響を次式により考慮する。

$$E_{\text{new}}(f, \theta) = E_{\text{old}}(f, \theta)(1 - G\Delta t_w/\varepsilon_{\text{old}}) \dots \dots (10)$$

ここに、 $E_{\text{old}}(f, \theta)$ および ε_{old} : 碎波減衰考慮前の方向スペクトルおよび全エネルギー、 $E_{\text{new}}(f, \theta)$: 碎波減衰考慮後の方向スペクトル、 Δt_w : 波浪変形計算の時間間隔、である。

さらに、反射波は反射壁前面での入射波に対する幾何学的な折り返しとして算出され、これが wave action 波数スペクトルの保存則に従って入射波と反対方向に伝播するものと仮定する。

波浪変形計算は各タイムステップごとに、①全周波数・方向および全格子点において式(3)、式(4)および式(6)から1タイムステップ Δt_w だけ移動する波向線の先端位置とそこでの波特性を評価する波向線(逆屈折)計算の過程と、②波特性および入力場の条件を用いた wave action スペクトルの計算から式(2)により方向スペクトルを算出し、さらに碎波減衰項を考慮する過程、より構成され、それぞれにおいて ① piecewise ray method の適用と、② wave action スペクトルの空間および方向に関する内挿と碎波減衰の評価、が行われる。この計算過程は空間補間に2次元4点補間式を使用する点を除き、山口ら(1985)のモデルと同じである。ただし、汀線近傍で段波モデルによるエネルギー減衰量が過大となって、結果的に波高0という状態が生じる場合

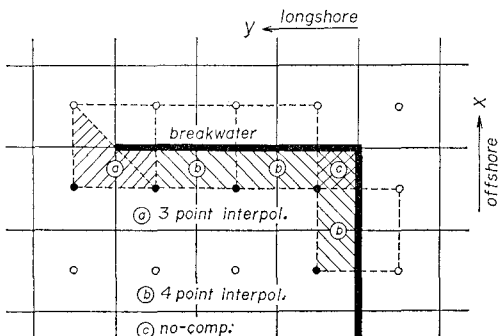


図-1 伝播計算における防波堤の取り扱い

には、 $H_{\text{rms}}^b = 0.42 D_b$ という碎波指標モデルにより碎波後の減衰を評価する。ここに、添字 'b' は碎波を意味する。

さて、防波堤背後への波の伝播計算では防波堤沖合の影響を受けないように若干の工夫を必要とする。図-1は防波堤背面の格子点における伝播計算法に関する各種パターンを模式的に示したものである。まず、防波堤背面端部では、逆屈折計算による波向線の先端が④の斜線領域に到達する場合にのみ沖側から波が伝播するとし、波向線先端での $\phi(f, \theta)$ (ただし、防波堤をはさむ格子点での $\phi(f, \theta)$ を一時的に0とする) を3点1次補間式により内挿する。ついで、⑤の斜線領域に波向線先端が到達する場合には、防波堤をはさむ反対側の格子点の影響が含まれないようにするため、防波堤反対側の格子点での $\phi(f, \theta)$ を一時的に0として、2次元4点補間式の適用から $\phi(f, \theta)$ を算出する。さらに、防波堤隅角部の格子点に到達する波浪成分のうち、⑥に示す領域からの到達は計算できないので、無視される。

沖側境界の流入方向には、沖波有義波高 $H_{1\%}^{(0)}$ および沖波有義波周期 $T_{1\%}^{(0)}$ をスペクトルパラメータとする光易II型スペクトルと水深の影響を表す補正項 ($\tanh^2 kD$) を組み合わせた浅海周波数スペクトル、および $\cos^4 \theta$ 型方向分布関数の積から計算される方向スペクトル(山口ら, 1986)を与える。一方、沖側境界の流出方向では、2次元4点補間式で wave action スペクトルが計算される。また、側方境界では周期性条件を使用する。

(2) 海浜流モデル

海浜流計算に用いる基礎方程式は鉛直方向に積分した運動方程式および連続方程式であり、次式で表される。

$$\begin{aligned} \partial U / \partial t + U(\partial U / \partial x) + V(\partial U / \partial y) = -g(\partial \eta / \partial x) \\ - (\partial S_{xx} / \partial x + \partial S_{xy} / \partial y + \tau_{bx}) / \rho D + [\partial \{ \mu_0 D \\ \cdot (\partial U / \partial x) \} / \partial x + \partial \{ \mu_0 D (\partial U / \partial y) \} / \partial y] / D \\ \partial V / \partial t + U(\partial V / \partial x) + V(\partial V / \partial y) = -g(\partial \eta / \partial y) \\ - (\partial S_{yx} / \partial x + \partial S_{yy} / \partial y + \tau_{by}) / \rho D + [\partial \{ \mu_0 D \\ \cdot (\partial V / \partial x) \} / \partial x + \partial \{ \mu_0 D (\partial V / \partial y) \} / \partial y] / D \\ \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

$$\partial \eta / \partial t + \partial (UD) / \partial x + \partial (VD) / \partial y = 0 \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 η : 平均水位変動量、 τ_{bx}, τ_{by} : 底面せん断力の x, y 成分、 μ : 水平混合係数、である。

radiation stress $S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \rho g \{ n \cos^2 \theta + (n-1/2) \} E(f, \theta) d\theta df \\ S_{xy} &= S_{yx} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \rho g n \cos \theta \sin \theta E(f, \theta) d\theta df \\ S_{yy} &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \rho g \{ n \sin^2 \theta + (n-1/2) \} E(f, \theta) d\theta df \\ \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

ここに, $n=c_g/c$, c は成分波の波速である. μ_e は Longuet-Higgins の表示式 (定数 $N_e=0.01$) を使用するが, これに含まれる水平距離を汀線あるいは防波堤から計算格子点までの距離とする. また, 底面せん断力は, 波高を H_{rms} , 周期をスペクトルの 1 次モーメントで定義される平均周期 T_{mol} により評価した場合の規則波に対する西村 (1982) の近似式を援用し, 底面摩擦係数を $C_f=0.01$ とする.

式 (11) および式 (12) に対して用いる差分式はスタガードメッシュにおいて空間に関する中央差分, 時間に関する前進差分であり, η と U, V の時点を $\Delta t/2$ (Δt : 時間間隔) ずらす. 境界条件は, 固定境界となる沖側境界では,

$$U=V=0 \quad \dots\dots\dots (14)$$

防波堤では, 水平防波堤, 垂直防波堤および防波堤隅角部に対してそれぞれ,

$$U=0, V=0, U=V=0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

を, また set-up に伴って移動境界となる岸側汀線では, 格子点と汀線の関係に応じて,

$$U=0, \text{あるいは} V=0, \text{あるいは} U=V=0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

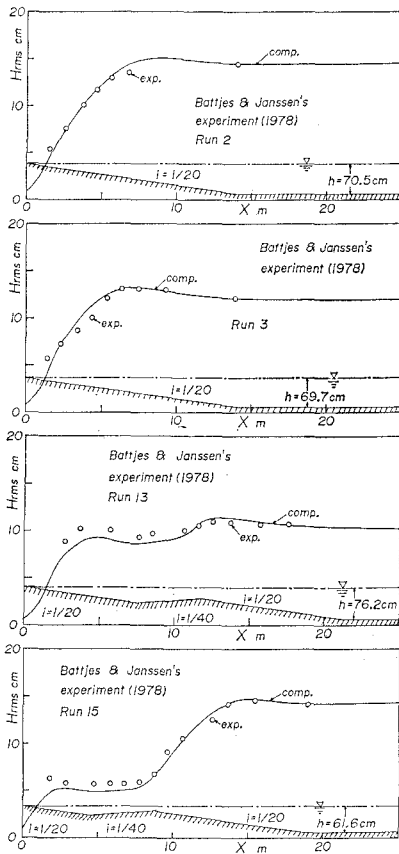


図-2 波高変化の計算結果と実験結果との比較

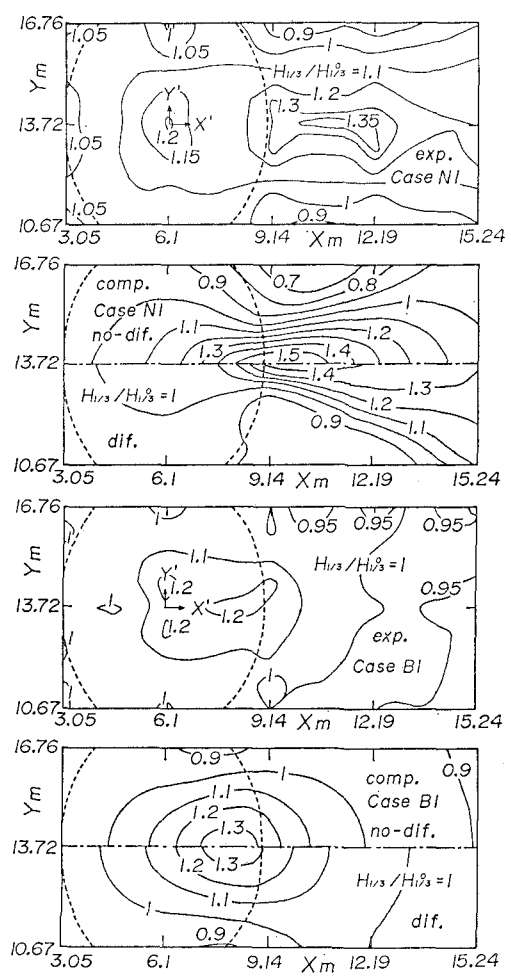


図-3 波高分布の計算結果と実験結果との比較

を課す. 一方, 側方境界では, 周期性条件を用いる.

波浪変形・海浜流モデルは, 逆屈折計算および伝播・碎波変形計算よりなる波浪変形計算と, radiation stress を driving force とする差分法に基づく海浜流計算とを波浪および海浜流がほとんど変化しなくなるまで交互に繰り返して継続する. しかし, 計算時間を節約するため, 逆屈折計算 1 回に対し, 伝播計算を 6 回, 海浜流計算を 48 回実施し, 定常解を得るまでに海浜流に対する 1824 回の反復計算を $\Delta t_{tw}=1.6s$ および $\Delta t=0.8s$ で行う.

3. 波浪変形モデルの妥当性の検討

図-2 は段波モデルに基づく碎波減衰評価法の妥当性を検討するため, Battjes ら (1978) が行った一様勾配地形および bar 型地形上での波高変化の実験結果と, 波浪変形モデルによる計算結果との比較を示す. 計算領域は 45×4 ($\Delta x=1m$) であり, 山口ら (1986) の計算で得られた平均水位変動量 η を静水深 h に加えるこ

とにより全水深 D を与えた以外、計算条件は山口ら (1986) と同じとした。図によると、いずれの地形に対する計算も実験結果の変化傾向をよく再現することから、段波モデルの高適合性が確認される。

一方、Vincent ら (1989) は方向スペクトル発生装置付造波水槽に設けた楕円浅瀬 (水深は一定水深部で 45.72 cm, 浅瀬頂部で 15.24 cm) 上での多方向不規則波の変形実験を行っている。彼らの実験結果と本モデルによる計算結果との比較を試みる。実験で使われた入射波の方向スペクトルは TMA スペクトルと wrapped normal 型の方向分布関数の積で与えられる。造波に用いた周波数範囲は 0.5~1.5 Hz であり、スペクトル特性を変えた規則波を含む 17 ケースの実験が行われた。

計算は $\Delta x = \Delta y = 0.3$ m で 101×53 に分割した領域において、周波数個数 14 (0.5~1.5 Hz), 方向個数 31 (方向幅パラメータ $\sigma_s = 30^\circ$ の場合 $\Delta\theta = 6^\circ$ で $0 \sim 180^\circ$ の範囲, $\sigma_s = 10^\circ$ の場合 $\Delta\theta = 2.80^\circ$ で $48 \sim 132^\circ$ の範囲) の条件のもとに、wave action スペクトルの空間内挿に 2 次元 3 次 Lagrange 式を使用して行った。図-3 は $\sigma_s = 10^\circ$ の場合 (N1 ケース) および $\sigma_s = 30^\circ$ の場合 (B1 ケース) における無次元波高の等値線分布を、実験結果と擬似回折項を無視した場合および考慮した場合について示したものである。回折項は高波高部を減少させ、低波高部を増大させる。その結果、方向分布幅の狭い N1 ケースをみると、浅瀬および浅瀬のすぐ背後における水槽横断方向の等値線の広がり狭くなるのに対し、浅瀬からある程度離れた背面では等波高線が扇状に広がる。また、実験結果と計算結果は定性的対応を示すが、計算は浅瀬中心部での高波高の出現を説明せず、波高比の最大値もやや大きい。

一方、方向分布幅の広い B1 ケースでは、水深変化による波高の増減幅効果が減少し、波高の空間変化が緩やかになる。擬似回折項の影響は N1 ケースと同様であるが、回折効果を考慮するとき、最大波高部の値を固定したまま低波高部の値を増加させたような等値線形状を示す。また、計算は浅瀬中心近くに出現する最大波高部の

出現を説明するが、計算における最大波高の値が大きく、波高の空間変化も実験結果よりやや急である。

図-4 は造波水槽内の楕円浅瀬頂部より 6.1 m 後方に位置する断面における横断方向波高分布の実験結果 (N1, B1 ケース) と両計算結果とを比較したものである。これによると、回折効果を考慮した計算結果は実験結果と比較的よく一致するが、回折効果を考慮しない計算は方向分布幅が狭い N1 ケース ($\sigma_s = 10^\circ$) の場合に両端部の波高を過小評価する。

4. 海浜流の特性

(1) 計算条件

数値計算は海底勾配 $i = 0.04$ の平行等深線地形 (最大静水深 $h_{\max} = 4$ m, $\Delta x = 10$ m, 15×54) 上の水深 $h_d = 2.2$ m 地点に種々の構造物を配置した場合について、周波数個数および範囲を 14, 0.13~0.8 Hz, 方向個数および範囲を 19, $0 \sim 360^\circ$ ($\Delta\theta = 20^\circ$) として $H_{1/3}^{(0)} = 1$ m, $T_{1/3}^{(0)} = 4.2$ s, 波向 $\alpha_M (= \pi - \theta_M) = 0^\circ$ および $\pm 15^\circ$, 反射率 $C_r = 0.5$ の入力条件のもとに行われた。ここに、添字 'M' は沖側境界を意味する。

(2) 計算結果の考察

図-5 は離岸堤および L 型突堤による波高分布を示したものである。前者の場合、離岸堤背後ではその遮蔽効

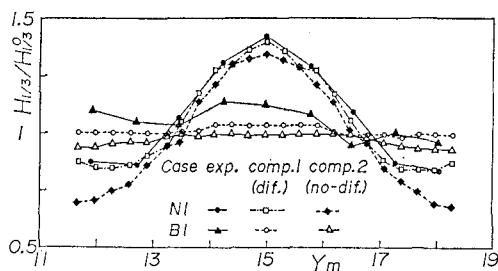


図-4 横断方向波高分布の計算結果と実験結果との比較

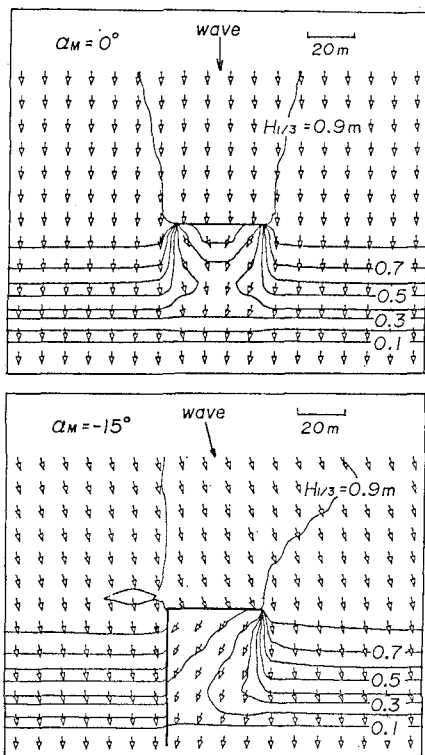
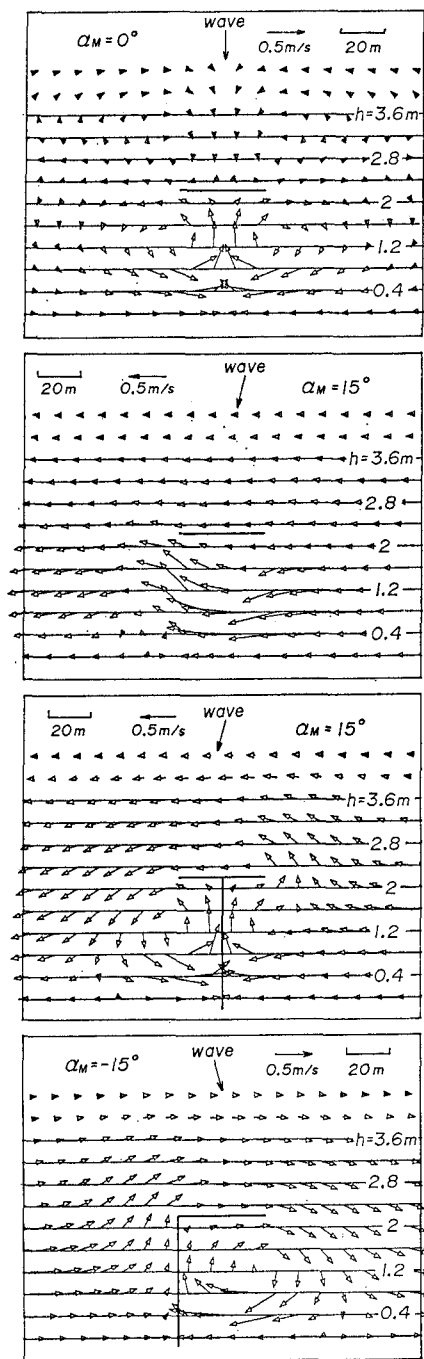


図-5 離岸堤および突堤による波高の平面分布



図—6 離岸堤および突堤による海浜流の平面分布

果により低波高部が形成されるとともに、離岸堤前面では反射波の存在により、波高がやや高い。L型突堤の場合、波はL型突堤の離岸堤部および突堤部のいずれにおいても反射されるので、離岸堤部の沖合には入射波高より波高の大きい領域が形成されるのに対して、突堤部では、反射波は岸方向に向かうことから、反射波の状況は

明確でない。

図—6 は離岸堤および各種突堤による海浜流分布図である。まず、離岸堤に波が直角入射する場合、離岸堤背後に一对の循環流が形成され、離岸堤中心線上では離岸堤に向かう離岸流となる。また、離岸堤沖合にも岸側の循環流と回転方向を異にするごく弱い循環流が形成される。一方、斜め入射波の場合には、離岸堤背後で大きく蛇行する沿岸流が卓越する流況となるが、入射波の下手側汀線付近にきわめて弱い循環流が残る。

ついで、T型突堤に波が斜め入射する場合、波高分布そのものは離岸堤の場合とそれほど異ならない。しかし、T型突堤の離岸堤部背後における沿岸流が突堤部により遮断されることから、流況は一変する。すなわち、波の上手側では沿岸流が突堤部および離岸堤部を迂回し、沖側に向かう流れとなるのに対し、波の下手側の離岸堤背後では、そのまま沿岸流となって下手側に流下する流れとT型突堤で循環流を形成する流れに分岐する。また、L型突堤の場合の流況をみると、L型突堤を大きくまわり込む蛇行流とL型突堤内の循環流が顕著である。

5. 結 語

本研究で得られた結果はつぎのように要約される。

①段波モデルにより碎波減衰項を評価する波浪変形モデルは碎波変形に関する実験結果をよく再現する。

②擬似回折項は波浪の空間分布を平滑化する役割を果たすことから、槽門浅瀬上での波浪変形の実験結果に対する数値モデルの再現性を向上させる。

③種々の構造物配置のもとで、波浪は構造物による影響を強く受けるとともに、流れが構造物そのものにより遮断されることから、構造物配置特有の沿岸蛇行流や循環流が形成される。

参 考 文 献

- 磯部雅彦(1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・碎波変形の計算法, 第33回海岸工学論文集, pp. 134~138.
- 清水琢三ほか(1989): 海浜変形予測手法の現地適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 404~408.
- 西村仁嗣(1982): 海浜循環流の数値シミュレーション, 第29回海岸工学論文集, pp. 333~337.
- 山口正隆ほか(1985): 流れおよび海底地形による波浪の変形計算, 土木学会論文集, 第357号/II-3, pp. 187~195.
- 山口正隆ほか(1986): 波の不規則性を考慮した海浜流の数値モデル, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp. 251~259.
- Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen(1978): Energy loss and setup due to breaking of random waves, Proc. 16th ICCE, Vol. I, pp. 559~589.
- Vincent, C.L. and M.J. Briggs(1989): Refraction-diffraction of irregular waves over a mound, J. WPCOE, ASCE, Vol. 115, No. 2, pp. 269~284.