

多方向不規則波による各種海岸構造物周辺の 海浜変形の数値モデル

小林 博*・渡辺 晃**・磯部 雅彦***
佐藤 慎司**・石井 雅敏****

1. はじめに

近年, 従来の線形規則波の仮定に基づくモデルに代わる波の非線形性・不規則性を考慮した海浜変形モデルが提案されているが, それらの適用性に関する検討は十分とは言えない。

一方, 汎用モデルの開発には様々な条件に対する検証が不可欠であるが, 多方向不規則波による移動床実験データが少ないために多くのモデルが規則波および特定の構造物を対象とした実験データのみにより検証されている点で汎用性が十分に確かめられていない。

そこで, 本研究では多方向不規則波を対象とした三次元海浜変形数値モデルを構築するとともに, 新たに行った多様な実験データによりモデル検証を行うことを目的とした。

数値モデルは波の非線形性・不規則性を十分考慮できるサブモデルを組み上げるとともに, 実用性を考えた上で碎波・漂砂量の計算法に改良・工夫を加えた。

実験では多方向不規則波を用いた上で 4 種類の海岸構造物を対象とした。計算値と実験値を比較することにより, 構築したモデルの波・流れ・地形変化について検証を行った。

2. 数値モデル

(1) 波・流れモデル

波・流れの計算には次式で表される修正 Boussinesq (Nwogu, 1993) に碎波による運動量減衰項と底面摩擦項を付加したモデルを用いた。

$$\eta_t + \nabla \cdot [(h + \eta)u] + \nabla \cdot \left\{ \left(\frac{z_a}{2} - \frac{h^2}{6} \right) h \nabla (\nabla \cdot u) \right. \\ \left. + \left(z_a + \frac{h}{2} \right) h \nabla [\nabla \cdot (hu)] \right\} = 0 \quad (1)$$

$$u_t + g \nabla \eta + (u \cdot \nabla)u + z_a \left\{ \frac{z_a}{2} \nabla (\nabla \cdot u_t) + \nabla [\nabla \cdot (hu_t)] \right\} \\ + F + S + M_D = 0 \quad (2)$$

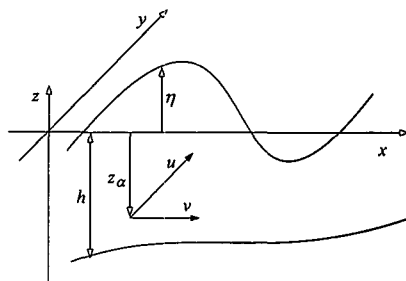


図-1 波・流れモデルにおける変数の定義

ここに, η : 水位, h : 静水深, $u(=u, v): z=z_a (= -0.53h)$ における水平流速(図-1), $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$, g : 重力加速度である。 F は底面摩擦項, S はスポンジレイヤーにおけるエネルギー減衰項であり次式で表される。

$$F = \frac{f_w}{h + \eta} |u|u, \quad S = \varepsilon u \quad (3)$$

ここに, f_w : 底面摩擦係数, ε : エネルギー減衰係数(Ericら, 1993)である。また, M_D は碎波に伴う運動量減衰項であり, 後述する。

数値計算には高精度の差分スキーム(鄭ら, 1999)を用いるとともに, 線境界入射法(石井ら, 1993)により入射境界における波の再反射を防いだ。

a) 碎波に伴う運動量減衰項

ここでは, 佐藤ら(1993)にならい拡散型の運動量減衰項により碎波をモデル化した。本モデルでは基礎方程式に水平流速を用いるので, はじめに単純に Type 1 のような拡散項を考えたが, 碎波帯内の計算精度に問題が見られたため, 次に Type 2 の形を考えた。

$$\text{Type 1: } M_D = \nu_e \nabla^2 u \quad (4)$$

$$\text{Type 2: } M_D = \frac{1}{h + \eta} \nabla \cdot [\nu_e \nabla \{u(h + \eta)\}] \quad (5)$$

ここに ν_e は渦動粘性係数であり, Dibajnia・渡辺(1987)の碎波減衰係数 f_D と角周波数 σ を用いて次式で表される。

$$\nu_e = \frac{gh}{\sigma^2} f_D \quad (6)$$

なお, 碎波指標には水表面水粒子速度(u_s)と波速(c)

* 正会員 東電設計(株)第二土木本部
** 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻
*** フェロー 工博 東京大学教授 新領域創成科学研究科環境学専攻
**** 正会員 工博 東京電力(株)電力技術研究所土木グループ

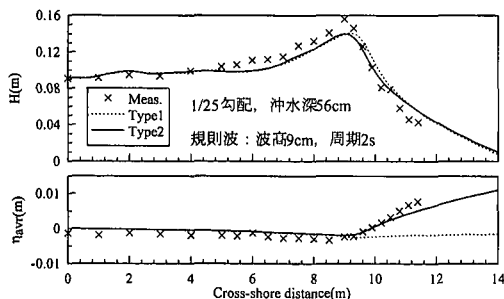


図-2 砕波拡散項による波高・平均水位の比較

の比 ($\gamma_0=0.5$) を用いた。ここで, u_s は次式 (Nwogu, 1993) により算定した。

$$u_s = u + \left(\frac{z_a^2}{2} - \frac{\eta^2}{2} \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + (z_a - \eta) \nabla [\nabla \cdot (\mathbf{h}\mathbf{u})] \quad \dots\dots\dots (7)$$

図-2 は Nwogu (1996) の砕波実験の結果と計算結果を比較したものである。Type 1 では砕波後のセットアップが計算できないのに対して, Type 2 では波高・平均水位ともに妥当な結果が得られた。これは Type 1 では 1 周期の運動量が保存されないためである。

不規則波に対しては, 片山ら (1993) と同様に波別解析法により ν_e の分布を計算するが, その分布が時間的に急激に変化すると安定した解が得られない。そこで, 砕波の時間発展を考慮するために以下の方法で ν_e を評価した。今, ν_e^n を 1 ステップ前の値, ν_e^{n+1*} を波別解析法により求めた仮の値として, ν_e^{n+1} は次の式ように表せるものとした。

$$\nu_e^{n+1} = w \cdot \nu_e^{n+1*} + (1-w) \cdot \nu_e^n \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに $w(0 < w < 1)$ は重みであり, 波の周期と計算時間間隔に応じてこの値を調整することにより過去の数周期間に生じた砕波の影響が考慮されながらも時間変動する ν_e の分布を得ることができる。この方法を用いれば入射波条件を問わず統一的に砕波計算を行うことが可能である。

b) 底面摩擦項

沿岸流速 V_i は radiation stress および底面摩擦応力とバランスする。したがって精度良く沿岸流を見積もるには正しく底面摩擦項を評価する必要がある。ここでは摩擦係数を①一定とした場合 ($f_w=0.02$) と②田中 (1990) による波・流れ共存場の摩擦係数 (f_{cw}) とした場合について実験値と比較した。実験では, 一様勾配 1/20 の斜面に多方向不規則波 (有義波高: 4.0 cm, 周期: 1.0 s, 波向: 汀線直角から 30°) を入射し, 水位・流速の岸沖分布を計測した。

図-3 は, 平均水位と沿岸流の実験値と計算値の比較を示しており, 平均水位については両者に顕著な違いは

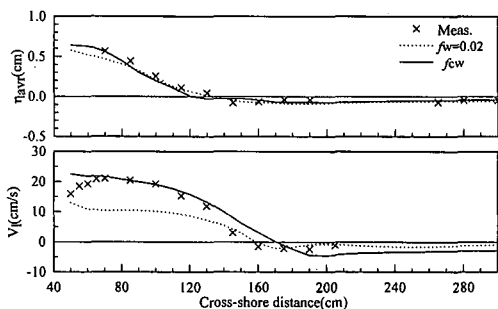


図-3 摩擦係数による平均水位・沿岸流速の比較

見られないが, 沿岸流速については②の方が実験値に近い結果が得られており, 波・流れ共存場の摩擦係数を用いることの有効性が示された。これは従来の海浜流計算に対して清水ら (1995) が行った検討結果と整合する。

(2) 地形変化モデル

漂砂量算定式については, 広い条件に適用可能な Dibanja・Watanabe (1996) のモデルがあるが, このモデルは次元振動流実験に基づき提案されたためそのままでは平面場に適用できない。

そこで本研究では Boussinesq 方程式から求まる波・流れを含む底面流速を直接用いて漂砂量を求めることとし, 底面流速が描く軌道の長軸方向を漂砂方向とすることにより, 平面的な波・流れ場に適用可能にした。

実際の計算では, 漂砂の向き θ_p は水平流速の振幅が最大になるよう (9) 式を用いて求め, $u(t)$, $v(t)$ をこの方向に回転して漂砂方向の振動流の時系列波形を定義した。このように求めた時系列波形を漂砂量式の振動流波形として用いた。

$$\theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\overline{uv}}{u^2 - v^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

この方法を用いることにより, 漂砂の向きは波動流速に対して海浜流が小さい場では波向に近づき, 逆に海浜流が大きい場では海浜流の向きに近づくため, 波・流れ共存場の漂砂量を合理的に算定することが可能となった。

なお, 不規則波に対する正味の漂砂量は, ゼロアップクロス法により波を分割し, 上述の方法によりそれぞれの波の漂砂量を算定後, それらの総和をとることにより求めるものとした (Dibanja ら, 1997)。

3. 数値モデルの妥当性

(1) 縦断実験の再現計算

はじめに一方向不規則波に対する底面流速および地形変化の計算精度を確認するために, 断面実験の再現計算を行った。実験は造波水路に 1/30 の斜面を設置し, その上に中央粒径 0.18 mm の相馬砂を 10 cm 厚で敷き均

し、そこへ有義波高 12 cm、周期 1.5 s で Bretschneider-光易型スペクトルを持つ不規則波を入射させた。入射位置の水深は 40 cm である。1 時間毎の砂面高とともに水位・流速を計測した。平均的砕波位置は静水汀線から 5 m 沖側の水深 16.7 cm となる点であった。

図-4 は砕波点付近と砕波帯内の 3 点における底面流速時系列波形の実験値と計算値の比較を示す。計算値は砕波点付近のシャープな流速波形ならびに砕波後の前傾化した流速波形を概ね捉えている。また図-5 は実験開始から 4 時間後の縦断地形の実験値と計算値の比較を示す。実験では不規則波であるために砕波点が変動し、比較的緩やかなバーが形成されたが、計算でもこれを良好に再現できていることがわかる。以上のように本モデルの縦断地形変化へ適用性が確認された。

(2) 平面実験の再現計算

次に本モデルの多方向不規則波浪場における妥当性を確認するために、4 種類の海岸構造物（離岸堤・突堤・ヘッドランド・人工リーフ）に対する平面実験の再現計算を行った。検証実験には精密多方向不規則波造波水槽（横 11 m、縦 6.5 m、深さ 0.3 m）を用いた。入射波は有義波高 4 cm、周期 1 s で Bretschneider-光易型スペクトル・光易型方向関数に基づく多方向不規則波とした。入

射位置の水深は 23 cm である。波向は、離岸堤・人工リーフが汀線直角、突堤・ヘッドランドが汀線直角から 30° とした。

はじめに固定床実験を行い上記の 4 種類の模型をそれぞれ設置したケースで構造物周辺の水位・流速を計測した。次に移動床実験ではそれぞれのケースについて地形変化を計測した。

移動床実験ではまず中央粒径 0.18 mm の相馬砂を一樣勾配斜面 (1/20) となるように 4 cm 厚で敷き均し、そこに波浪を作用させ平衡断面地形を作成した。その後、各種海岸構造物模型を設置して再び造波を行い、1 時間後の地形変化を計測した。

以下に実験結果と本モデルによる計算結果を比較し、各構造物に対するモデルの適用性について検討した。

a) 離岸堤

図-6、図-7 は離岸堤のケースに対する海浜流と地形変化を比較したものである。図-6 では離岸堤背後の左右対称な循環流が計算と実験でほぼ一致している。図-7 に示すように、本モデルは循環流に伴う離岸堤背後の堆積をやや過大評価しているが、左右の侵食を含めて実験結果を妥当に計算できている。

b) 突堤

図-8、図-9 は突堤のケースで同様に比較したものである。計算結果は斜め入射波に伴う沿岸流が突堤を迂回する様子と突堤右側で反流が発生する様子をよく再現できている。またこの流れにより生じる突堤の上手側の堆積と下手側の侵食の再現性は良好だが、計算では上手側の堆積位置が突堤より少し離れている。また、突堤先端の沖側に堆積が生じている。これらは実験では局所洗掘を防ぐために構造物に消波材を施したのに対して、計算では完全反射条件としているために、構造物際で局所的に大きな流速が生じてしまうのが原因と考えられる。

c) ヘッドランド

図-11、図-12 に示すヘッドランドについては、突堤での現象に加えてヘッド部の遮蔽効果による波の回折により背後の循環流が発達するが、海浜流の計算結果はこの様子をよく捉えている。地形変化についても同様なことが言える。ただし、ヘッドランド下手側の循環流が若干大きく評価されているために、そこでの堆積・侵食量が過大評価されている。これはヘッド部で回折した波が反射するという複雑な外力場での砕波の評価が難しいためであり、今後さらに検討する必要がある。

d) 人工リーフ

図-12、図-13 に人工リーフに対する結果を示す。実験ではリーフ上とリーフ間での波高の勾配によりリーフ背後に微弱な循環流が発生するが、計算でもこれに整合する結果が見られる。この循環流に伴いリーフ背後での

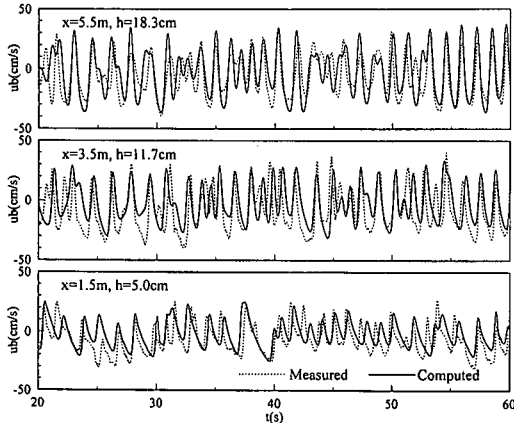


図-4 底面流速時系列波形の比較

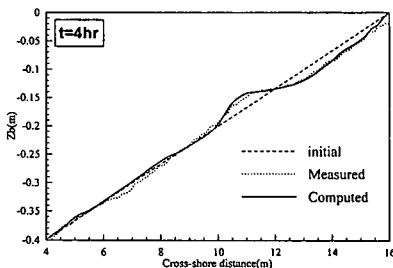


図-5 縦断地形の比較

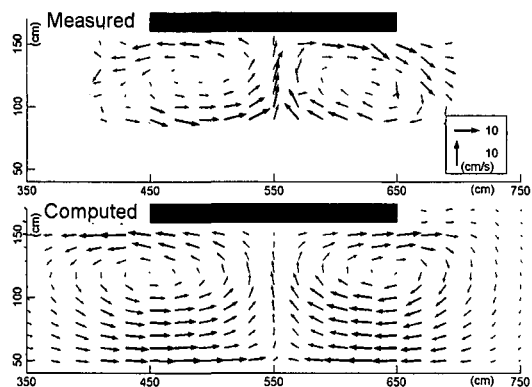


図-6 離岸堤堤周辺の海浜流の比較

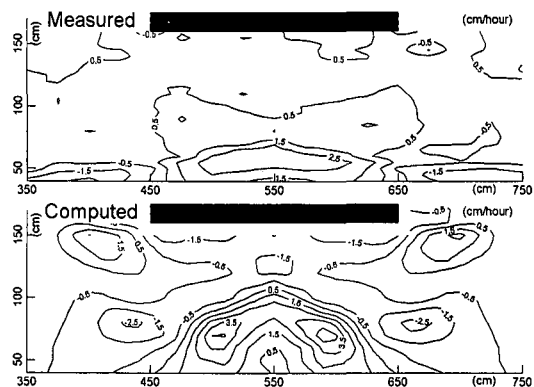


図-7 離岸堤堤周辺の地形変化の比較

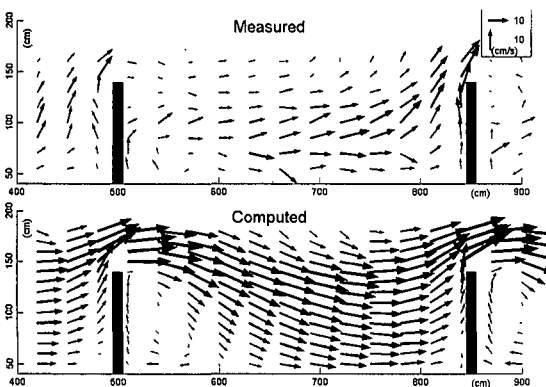


図-8 突堤周辺の海浜流の比較

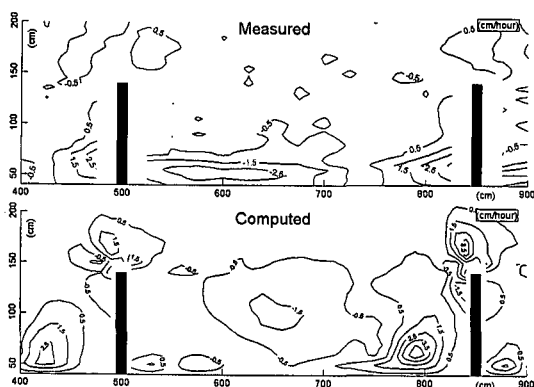


図-9 突堤周辺の地形変化の比較

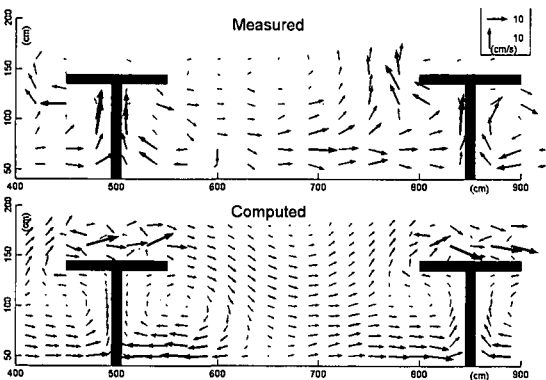


図-10 ヘッドランド周辺の海浜流の比較

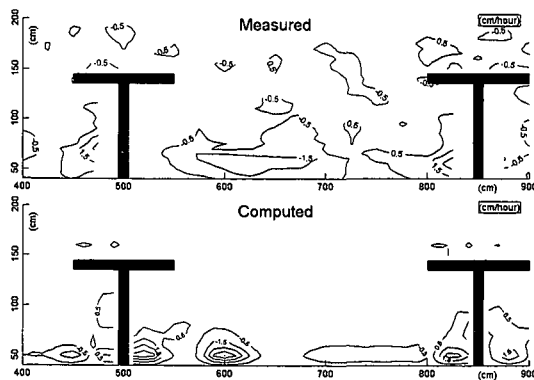


図-11 ヘッドランド周辺の地形変化の比較

堆積とその左右に侵食が生じるが、計算ではこの変化をやや過大評価しながらも概ね再現できていると言える。また、リーフ間では比較的強い離岸流が発生し侵食が生じるが、計算でも同様の結果が得られた。

4. おわりに

以上のように波の非線形性と多方向不規則性を考慮した三次元海浜変形数値モデルを構築し、実験値との比較により現実に施工されている様々な形状の海岸構造物に

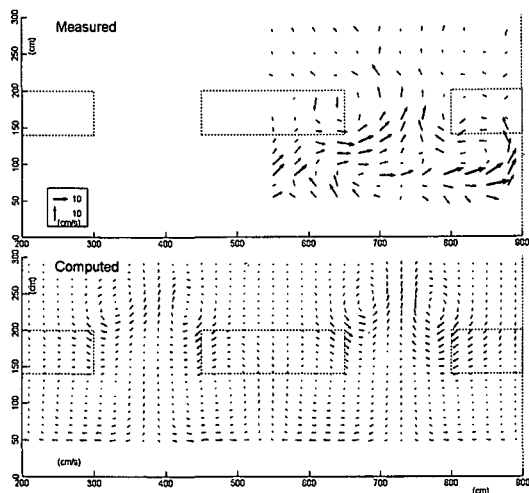


図-12 人工リーフ周辺の海浜流の比較

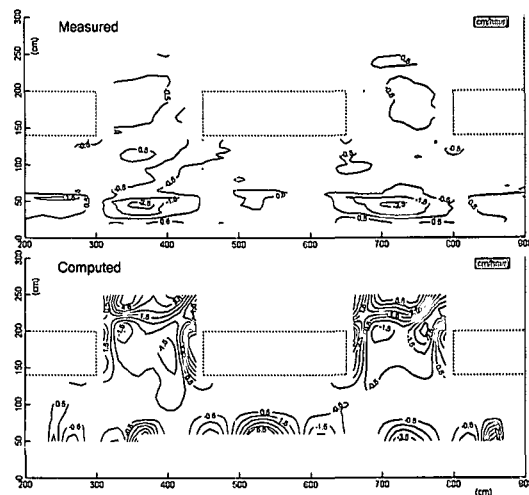


図-13 人工リーフ周辺の海浜流の比較

対して、外力場および地形変化を精度良く計算できることが確かめられた。

参考文献

- 石井敏雅・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 非定常緩勾配不規則波動方程式における境界条件の改良と実用化の試み, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 31-35.
- Eric Cruz・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 非線形波動方程式に対する無反射境界条件について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 46-50.
- 片山裕之・佐藤慎司 (1993): Boussinesq 方程式を用いた不規則波の浅水・碎波変形の計算法, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 16-20.
- 佐藤慎司・Michael Kabiling (1993): Boussinesq 方程式を用いた波浪・海浜流・海浜変形の数値計算: 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 386-390.
- 清水琢三・山田晶子・内山一郎・渡辺 晃 (1995): 汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデルの現地適用性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 606-610.
- 鄭 培喜・余 錫平・磯部雅彦 (1998): Boussinesq 方程式に対

する高次数値計算モデルの開発, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 21-25.

- 田中 仁 (1990): 波・流れ共存場における底面摩擦係数の陽形式近似式, 土木学会論文集, 第417号/II-13, pp. 285-288.
- Mohammad Dibajnia・渡辺 晃 (1994): シートフロー漂砂量式の波・流れ交差場への拡張と沿岸漂砂量の検討, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 366-370.
- Mohammad Dibajnia・渡辺 晃 (1987): 波浪場と海浜縦断地形変化の数値計算, 海岸工学論文集, 第34巻, pp. 63-67.
- Dibajnia M. and A. Watanabe (1997): Sheet flow sand transport under non-linear asymmetric irregular waves, Proc. Prof Pacific Coasts and Ports '97, pp. 107-112.
- Nwogu, O. (1993): Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation, J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean. Eng., ASCE, Vol. 119, No 6, pp. 618-638.
- Nwogu, O. (1996): Numerical prediction of breaking waves and currents with a Boussinesq, Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, pp. 4807-4819.