

# Boussinesq モデルを用いた沖合の構造物による 波浪・海浜流の数値計算の適用性

申 承 鎬\*・高畑 栄 治\*\*・入 江 功\*\*\*・吉田 明 徳\*\*\*\*

## 1. はじめに

最近, 海浜変形シミュレーションにおいて, 底面流速波形の非対称性や前傾度の評価が重要と考えられる事から非線形分散波動モデルによる波・流れ場の計算の試みが進んでおり, 砕波帯近傍に設置された構造物によるモデルの適用性については確認されつつある(佐藤ら, 1993; 佐藤ら, 1994; 池野ら, 1998). しかし, 近年, 海上構造物は巨大化および沖合化の傾向が高まり(例えば, 海上空港), 砕波帯外の沖合構造物に対するモデルの妥当性も検討しなければならない. そこで, 本研究では, 沖合の構造物に対する Boussinesq モデルの波・流れ計算の妥当性を検討するため, 平面水槽実験をおこなって波・流れの平面的な分布を詳細に測定し, Boussinesq モデルによる計算結果との定量的な検討をおこなった.

## 2. 沖合の構造物に対する波浪・海浜流の数値計算

### 2.1 基礎方程式

本研究で用いる Boussinesq モデルは, 深海域と浅海域の線形分散性が統一された修正 Boussinesq 方程式(Madsen ら, 1992)をもとに砕波による水平運動量混合項, 底面摩擦項を加えたもので, 次のような連続方程式(1),  $x$  方向および  $y$  方向の運動方程式(2), (3)で表される.

$$\eta_t + p_x + q_y \dots\dots\dots (1)$$

$$p_t + \left(\frac{p^2}{D}\right)_x + \left(\frac{pq}{D}\right)_y + gD\eta_x - M_1 + F_1 + \varepsilon p = \psi_1 \dots\dots\dots (2)$$

$$q_t + \left(\frac{q^2}{D}\right)_y + \left(\frac{pq}{D}\right)_x + gD\eta_y - M_2 + F_2 + \varepsilon q = \psi_2 \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} \psi_1 = & \left(B + \frac{1}{3}\right)k^2(p_{xxt} + q_{xyt}) + Bgh^3(\eta_{xxx} + \eta_{xyy}) \\ & + hh_x\left(\frac{1}{3}p_{xt} + \frac{1}{6}q_{yt} + 2Bgh\eta_{xx} + Bgh\eta_{yy}\right) \\ & + hh_y\left(\frac{1}{6}q_{xt} + Bgh\eta_{xy}\right) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_2 = & \left(B + \frac{1}{3}\right)k^2(q_{yyt} + p_{xyt}) + Bgh^3(\eta_{yyy} + \eta_{xxy}) \\ & + hh_y\left(\frac{1}{3}q_{yt} + \frac{1}{6}p_{xt} + 2Bgh\eta_{yy} + Bgh\eta_{xx}\right) \\ & + hh_x\left(\frac{1}{6}p_{yt} + Bgh\eta_{xy}\right) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで,  $p, q$ :  $x, y$  方向の線流量,  $h$ : 水深,  $\eta$ : 水面変動量,  $g$ : 重力加速度,  $D = \eta + h$  である.  $F$  は底面摩擦項, 式(4), (5)は分散項を表しており,  $\varepsilon$  は境界処理のため設置したスポンジ境界内での波エネルギー吸収係数,  $B$  は分散項の補正係数で 1/15 を用いた. また,  $M$  は砕波による運動量混合項として, 佐藤ら(1993)にならぬ水表面での水粒子の速度と波速の比が 0.6 になる点で砕波が生じると判定し, 砕波によるエネルギー逸散を与えた.

数値計算は Madsen ら(1992)の ADI 法にならって数値積分し, 砕波帯近傍の離岸堤に対する再現性は佐藤ら(1993)の結果との比較を通じて確認した.

### 2.2 計算の条件

Madsen ら(1992)は数値計算において空間格子の解像度に対しては波長( $L_0$ )の 1/8-1/10, 数値粘性(numerical damping)を避けられる time step ( $\Delta t$ )に対しては周期( $T$ )の 1/25 で十分であると提案した. 本研究で用いた実験水槽スケールでの計算の場合, 空間格子を  $L_0/30, L_0/15$  で比較したところ, 計算の精度はあまり変わらない反面,  $\Delta t$  は Madsen ら(1992)の提案より 1 オーダ小さい  $\Delta t$  で安定した解を, また, 同一  $\Delta t$  の場合は粗い空間格子のほうが発散しない結果を得た. 本計算では波高 0.05 m, 周期 1.0 s の入射波に対して, 空間格子間隔  $\Delta x = \Delta y = 0.1$  m, time step  $\Delta t = 0.5 \times 10^{-2}$  s として計算した.

境界条件においては, 離岸堤, 直立壁などの完全反射境界, 波が反射することなく完全に透過するスポンジ境界(Cruz ら, 1993)および境界線入射法(石井ら, 1993)

\* 学生会員 工修 九州大学大学院工学研究科海洋システム工学専攻  
 \*\* 学生会員 九州大学大学院工学研究科海洋システム工学専攻  
 \*\*\* 正会員 工博 九州大学教授 工学研究科海洋システム工学専攻  
 \*\*\*\* 正会員 工博 九州大学助教授 工学研究科海洋システム工学専攻

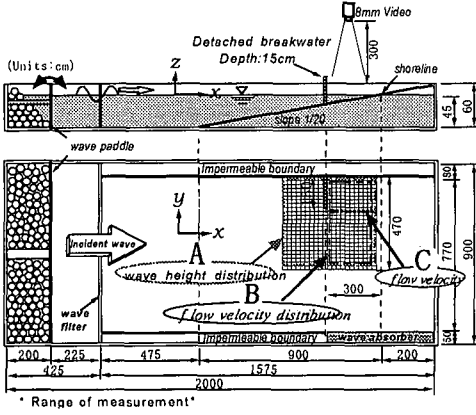


図-1 実験水槽の概略と座標系

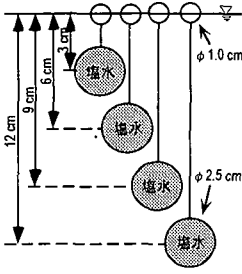


図-2 フロートの概略図

を用いて入射境界の処理をおこなった。

### 3. 平面水槽実験および計算の再現性の評価

#### 3.1 平面水槽実験

詳細な実験方法は申ら(1999)により述べてあるので、ここでは概略だけを述べる。実験は図-1に示すように、勾配1/20、長さ20m、幅9m、深さ0.6mの平面波動水槽を用いた。沖合の構造物を想定した離岸堤は汀線から3m離れた砕波帯外(水深15cm)に設置し、側面の固定境界からの長さを1.5m(長さ3mの離岸堤相当)とした。水深45cmでの入射波は波形勾配0.032(波高5cm, 周期1.0s)の規則波である。

波高分布は離岸堤の先端を中心に水深4.5cmから24.5cmの4m×4.6mの範囲を20cm間隔の総数462点で測定した(区域A)。定常流は水深平均流速を求めため、図-2のように離岸堤背後の水深14.5cmから岸側の水深3.5cmまで(区域B)水深別に作製したフロートによる追跡(水面下3, 6, 9, 12cm)および電磁流速計(区域C)を用いて時間・水深平均流の測定をおこなった。後述する実験と数値計算結果との比較はおのおのの測定範囲だけに限る。

#### 3.2 計算結果の定量的な検討

##### a) 波高分布の検討

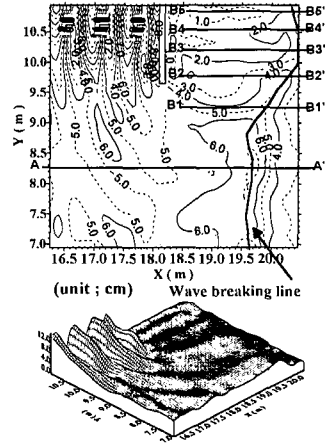


図-3 実験による離岸堤近傍の波高分布

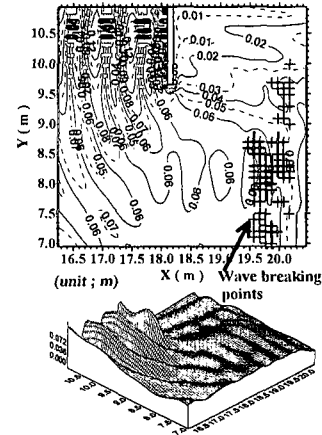


図-4 計算による離岸堤近傍の波高分布

図-3は実験による離岸堤近傍の波高分布を示したもので、離岸堤による遮蔽の影響を受けていない範囲での砕波は水深7.5cm前後で生じているが、離岸堤の先端から80cm以内では砕波線が岸のほうに移動し、砕波した波は急激に減少している様子が分かる。離岸堤の前面は完全重複波が生じ、30cm間隔で重複波の腹・節が交互に現れ、最大波高は13cmになっている。反面、離岸堤の背後は先端から離岸堤の内部へ進行するほど徐々に波高が減少しているが、岸へ近づくと再び若干高くなっている。

図-4は計算結果の一例で、離岸堤近傍の波高分布を2次元および3次元で示したものである。

図-3の実験による離岸堤近傍の平面的な波高分布と砕波位置の定性的な比較は非常に良好であるが、砕波後の波高減少量は実験値より小さくなっており、モデルの中の渦動粘性による波エネルギー減衰係数の検討が必要と考えられる。

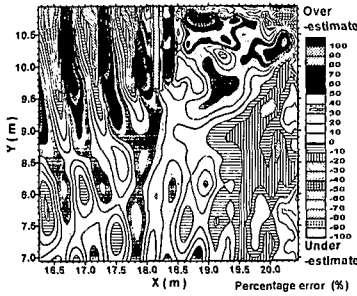


図-5 実験に対する計算値の百分率相対誤差 (波高)

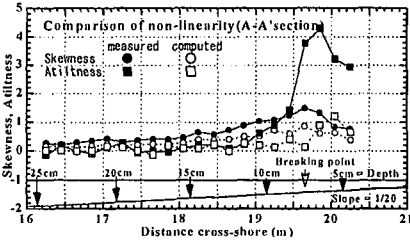


図-6 一様勾配での非線形性 (断面 A-A')

図-5 は計算結果と実験結果の定量的な比較として、実験値に対する計算値の百分率相対誤差で表したもので、実験値に対しての過大 (+)・過小 (-) 量を示した。全体として7%から70%程の誤差の分布があり、離岸堤の前面と背後の波高分布が相対的に高い。また、碎波帯では過小評価の傾向があり、他は過大評価の傾向がある。

b) 非線形性の再現性

非線形性の再現性の評価は非線形性に対する指標として水面波形の上下非対称度 (skewness) ・前傾度 (atiltness) を用いて算定した。

図-6 は図-3 の断面 A-A' における skewness, atiltness の算定結果を示す。Skewness は丸 (●, ○), atiltness は四角 (■, □) で、また、実験値は黒 (●, ■), 計算値は白 (○, □) で表した。断面 A-A' では離岸堤の影響を受けなく、一様勾配での波の非線形特性がよく現れている。実験、計算ともに水深が浅くなるにつれて徐々に非線形性が強まっていく様子は確認できるが、碎波帯近傍からは実験に比べ計算の非線形に対する再現性が弱いこと、特に、碎波帯の atiltness の場合は実際の 1/4 しか表現できていないことが分かる。

図-7 は離岸堤背後の断面 (B1-B1', B2-B2', ...) における非線形性の評価の比較である。非線形性が比較的弱い離岸堤背後 (B3-B3', B4-B4', B5-B5') では良く一致し、さらに、skewness, atiltness の符号が反転する位置は精度良く再現されている (特に、B3-B3')。しかし、碎波が生じる B1-B1', B2-B2' の碎波帯内では過小評価となり、全体的に Boussinesq モデルによる非線

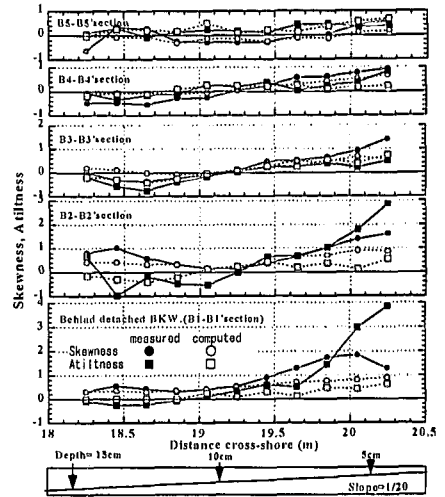


図-7 離岸堤背後での非線形性 (上よりそれぞれ、B5-B5', B4-B4', B3-B3', B2-B2', B1-B1')

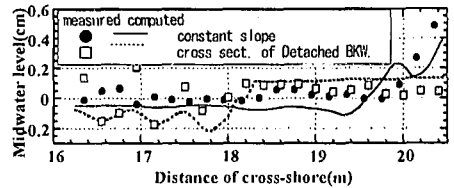


図-8 平均水面の比較 (図-3 において  $y=7.3\text{ m}$  (●),  $10.3\text{ m}$  (□))

形性の再現の度合いは skewness, atiltness 共に  $\pm 1$  程度であることが分かった。

c) 平均水位の検討

平均水位の比較は離岸堤の影響が及ばない一様斜面上と離岸堤を通過する断面 (図-3 の  $y$  方向  $7.3\text{ m}$  と  $10.3\text{ m}$ ) においておこない、図-8 に示した。

全体的に波高の減少および碎波に伴う平均水位の変動の傾向は良く再現しているが、一様斜面の場合、碎波後の水位上昇に若干の変動が見られる。

d) 平均流分布の検討

図-9(a) はフロート追跡および電磁流速計による離岸堤背後の時間・水深平均流速、また、電磁流速計で測定した位置の水深 (単位: cm) を示した。

フロート追跡による流れのパターンは、離岸堤による影響がある範囲が明確に見られる。循環流の中心は離岸堤の先端から背後  $1.3\text{ m}$ 、内部  $30\text{ cm}$  ( $x=19.4\text{ m}$ ,  $y=10.0\text{ m}$ ) ぐらいに存在した。循環の内部は約  $2\text{ cm/s}$ 、外部は約  $4\text{ cm/s}$  の流速であるが、水深  $5\text{ cm}$  以下では約  $10\text{ cm/s}$  から  $33\text{ cm/s}$  の流速が現れた。

一方、離岸堤から約  $1\text{ m}$  離れたところは  $2\text{--}3\text{ cm/s}$  ほどの岸向きの平均流が現れるものの、水深  $5.5\text{ cm}$  から  $7$

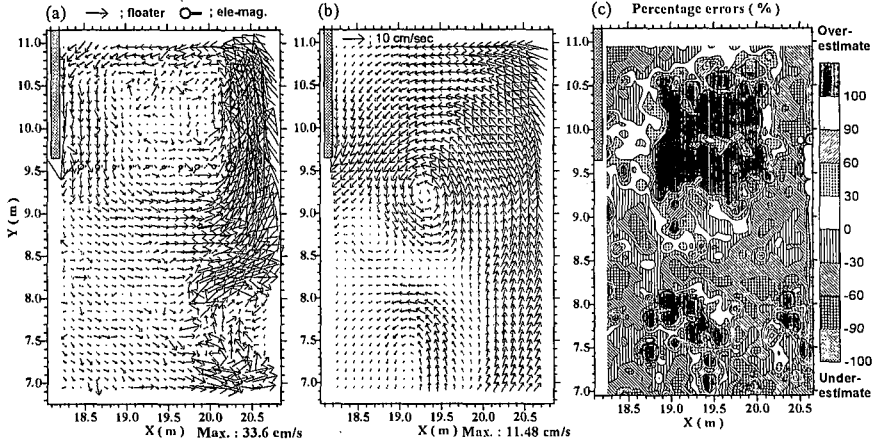


図-9 平均流の比較 (a: 実験, b: 計算, c: 百分率相対誤差)

cm/s前後のやや沖向きの流れが見られ、戻り流れが存在することが分かった。

電磁流速計の測定結果は水深11 cm以上の地点では大きさ・方向ともにフロート追跡結果とよく一致しているが、波の非線形性が目立つ8 cm以下の地点からは一致の程度が良くない。

図-9(b)には計算で求めた離岸堤背後の定常流を示した。離岸堤背後の典型的な循環流は形成されているが、実験結果との比較によると、循環流の中心は実験での位置と異なっていることが分かる。また、実験の場合、離岸堤背後の岸側の流速は33 cm/sに達している反面、計算では11 cm/s程度で全体的に流れは弱めになっており、実験結果で現れた砕波帯の戻り流れも再現できてないことが分かった。

図-9(c)は定常流速の強さに対する百分率相対誤差を示したもので、黒い部分は相対誤差が100%を超えている範囲である。摩擦係数等の諸係数の調整によって、多少改善の余地はあるものの、離岸堤背後における流速計算値の不一致が顕著である。

3.3 Boussinesqモデルの平均流計算パターン

一般的な海浜流モデルでは、波高と波向によって決められるradiation stressの勾配によって定常流が計算されるのに対して、Boussinesqモデルでの平均流計算は、波の進行による水粒子の往復運動の周期平均によって計算されることから、構造物の遮蔽効果や砕波による波高減少に伴う平均水位の上昇だけでなく、波運動の非線形性による有限振幅効果や底面摩擦などの影響も含まれている。本研究で検討した沖合の離岸堤の場合、波高は実用上、精度良く計算されたが、海浜流場において、流れの強さおよび循環中心の不一致が現れ、Boussinesqモデルの平均流の計算において、諸量がかなり敏感に作用することが分かった。

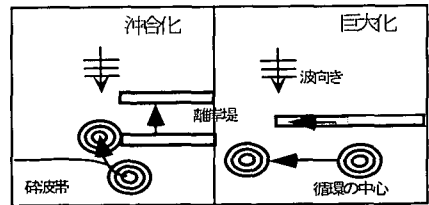


図-10 モデルの循環流計算パターン

海上構造物の沖合化および巨大化に対する Boussinesqモデルの平均流計算パターン(特に、循環の中心)について検討するため、汀線との離岸距離(1.5, 2.0, 2.5, 3.0 m)と離岸堤の長さ(1.5, 3.0 m)をそれぞれ組み合わせ、1/20 斜面で計算した結果、砕波帯近傍で離岸堤が設置された場合は佐藤ら(1993)と同様の循環流の中心位置を再現したが、沖合化・巨大化するにつれて離岸堤の先端を離れ、外側へ移動する傾向があった(図-10)。

4. 海浜流モデルによる平均流の計算

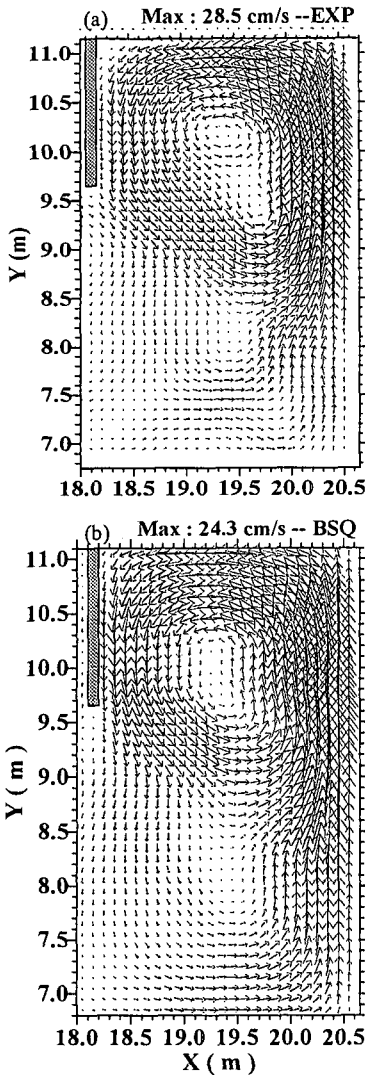
ここでは、実験で求めた平均流の再確認と共に、より適切な海浜流の計算方法を検討するため、海浜流モデルでの計算を試みた。モデルの連続式(6)および運動方程式(7)、(8)は次のようである。

$$\eta_t + U\{U(h+\eta)\}_x + V\{V(h+\eta)\}_y = 0 \dots\dots (6)$$

$$U_t + UU_x + VU_y + g(\bar{\eta})_x = (vU_x)_x + (vU_y)_y - F_1 - R_1 \dots\dots (7)$$

$$V_t + UV_x + VV_y + g(\bar{\eta})_y = (vV_x)_x + (vV_y)_y - F_2 - R_2 \dots\dots (8)$$

ここで、 $U, V$ は平均流速の $x, y$ の成分、 $R$ はradiation stress項、 $F$ は西村(1982)の底面摩擦項、 $v$ は渦動粘性係数である。 $v$ の算定にはLonguet-Higgins(1970)の評価式を適用するが、回折域などの波高の小さい領域で過



図—11 海浜流モデルの計算結果

大評価の傾向があるため、波高に応じて変化するように改良した次式を用いた。

$$v = Nl\sqrt{ghH/0.4h} \dots\dots\dots (1)$$

海浜流モデルでの外力である radiation stress は本研究の実験から測定した波高・波向と Boussinesq モデルから求めた波高・波向の2ケースを用いてそれぞれ算定した。

図—11 は海浜流モデルで計算したもので、(a) は実験

値の波高・波向から、(b) は Boussinesq モデルの波高・波向の計算結果から得た radiation stress 勾配を用いて定常流を求めた結果である。

図から見られるように、(a)、(b)ともに循環流の中心は良く再現できている。本モデルでは戻り流れの効果を考慮しなかったため、碎波帯の再現性が良くないものの、定性的な流速の強さも実験結果に比べ、ほぼ一致していると考えられる。

5. おわりに

以上、沖合の構造物に対する Boussinesq モデルの適用性について検討したところ、波浪や非線形性などの再現性は優れた結果を得たが、海浜流の予測はまだ様々な問題が残されていることが分かった。

実用上、沖合の構造物に対する隣接海岸の海浜変形を精度良く予測するためには、海浜流モデルとの組合せによる方法も考えられる。

本研究を進めるにあたり、運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室の「浅海域非線形波浪モデルの実務への適用性に関する検討会」を通じて平石哲也室長より始終ご指導を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

池野正明・清水隆夫・久保道仁・定森良夫 (1998): 波の多方向不規則波と浮遊漂砂を考慮した3次元海浜変形数値予測モデルの開発と検証, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 531-535.  
 石井敏雅・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 非定常緩勾配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.  
 佐藤慎司・M. 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.  
 佐藤慎司・M. Kabiling (1994): 波打ち帯を含む三次元海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 401-405.  
 申 承鶴・高畑栄治・入江 功・村上啓介 (1999): 非線形分散波浪モデルの予測精度評価と線形波浪モデルとの接続, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 345-351.  
 西村仁嗣 (1982): 海浜循環流の数値シミュレーション, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 333-336.  
 Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore current generated by obliquely incident sea waves, 1, 2, J. Geophys. Res. Vol. 75, pp. 6778-6801  
 Madsen, P. A. and O. R. Sørensen (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics Part 2., Coastal Eng., Vol. 18, pp. 183-204.