

構造物周辺における汀線変化を考慮した 3次元海浜変形予測に関する研究

PREDICTION OF 3D BEACH EVOLUTION WITH SHORELINE CHANGE
AROUND COASTAL STRUCTURES USING Q-3D NEARSHORE CURRENT
MODEL

口石孝幸¹・黒岩正光²・加藤憲一³・松原雄平⁴・野田英明⁵

Takayuki KUCHIISHI, Masamitsu KUROIWA, Kenichi KATO,
Yuhei MATSUBARA and Hideaki NODA

¹正会員 工修 日本建設コンサルタント㈱ (〒105-0004 東京都港区新橋 6-17-19 新御成門ビル)

²正会員 工博 鳥取大学助手 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

³正会員 工修 日本建設コンサルタント㈱ (〒105-0004 東京都港区新橋 6-17-19 新御成門ビル)

⁴正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

⁵正会員 工博 鳥取環境大学教授 環境デザイン学科 (〒689-1111 鳥取市青葉台北1-1-1)

The purpose of this study is to develop a prediction model of beach evolution using a quasi-3D current model that can predict the shoreline changes. In this study, the 3D morphodynamic model with shoreline changes proposed by Kuroiwa *et al.* (2004) ¹⁾ were modified. The modified model was applied to several model tests of the beach evolution around detached breakwaters in order to examine the performance of the 3D morphodynamic model. Furthermore, the application to beach evolution around a groin and pocket beach was carried out and then the applicability of the modified model was discussed.

Key Words : Morphodynamic model, Shoreline change, Q-3D Nearshore current model

1. はじめに

海浜変形予測は、縦断地形変化予測（短期）、3次元海浜変形予測（中期）および汀線変化予測（長期）の3つのタイプに大別される。この中で、3次元海浜変形予測は、波、流れによる漂砂の移動メカニズムを考慮でき、構造物設置に伴う周辺の海底地形変化や港湾埋没などの地形変化予測に対して有効とされている。ただし、汀線変化が予測できないこと、流れの3次元性がほとんど考慮されていないこと等の検討の余地が残されている。

本研究の目的は汀線変化を考慮した新たな3次元海浜変形予測モデルの開発である。Kuroiwa¹⁾らは、流れの3次元性と汀線変化を考慮した3次元海浜変形モデルを提案し現地への適用を試みているが、漂砂量の与え方や計算の安定性などに問題があり検討の余地が残されている。そこで、既に提案している3次元海浜変形モデルに修正を加え、流れの3次元性と汀線変化を考慮した新たな3次元海浜変形予測

モデルを構築し、離岸堤や突堤などの構造物周辺における地形変化計算に対する妥当性を数値実験的に検討する。

2. 数値モデルの概要

本モデルは、①波浪場、②海浜流場、③漂砂量および④地形変化計算の4つのモデルから構成される。モデルで用いる座標系を図-1に示す。

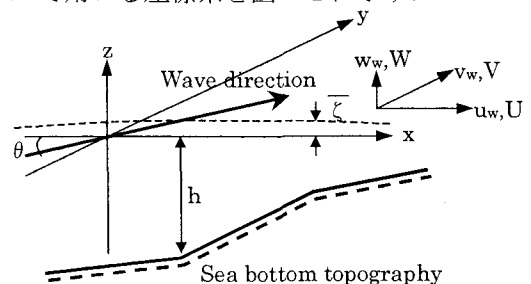


図-1 モデルの座標系

ここに、 x は沖から岸向きに、 y は沿岸方向に取った座標を表す。 θ は波向を表し、 x 軸から反時計回りを正に取ったものである。

(1) 波浪場

長期海浜変形予測を行う場合、計算負荷を低減させることが可能で、なおかつ実際の現象に適応したモデルが要求される。そこで、波浪場は、間瀬ら²⁾によって開発された多方向不規則波を構造物による回折波が考慮できるエネルギー平衡方程式を用いて算定する。基礎式は、

$$\frac{\partial(Sv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Sv_y)}{\partial y} + \frac{\partial(Sv_\theta)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\omega} \left\{ (CC_g S_y \cos^2 \theta)_y - \frac{1}{2} CC_g S_{yy} \cos^2 \theta \right\} - D_b \quad (1)$$

で表される。 S はエネルギースペクトル、 v_x 、 v_y および v_θ はそれぞれ波のエネルギー輸送速度、右辺第1項目は回折効果を表すもので、 κ は影響係数で2.5～3程度である。第2項は碎波によるエネルギー減衰項で、高山ら³⁾の手法に基づいている入射波の周波数エネルギースペクトルは、JONSWAP型、波の方向関数として光易型を用いた。

(2) 海浜流場

海浜流場は黒岩ら⁴⁾の多方向不規則波浪下における準3次元モデルを適用する。Radiation stress、水平および鉛直方向の渦動粘性係数、底面摩擦などの諸量は、Rayleigh分布に基づく有義波高と自乗平均平方根波高との関係($H_{1/3} = 1.416 H_{rms}$)から得られる H_{rms} と、波浪エネルギーの周波数スペクトルにおけるピーク周期 T_p を用いて計算する。

碎波帯内における戻り流れを精度よく再現するためには、碎波の影響をうまく取り入れる必要がある。本研究では、黒岩ら⁴⁾と同様に水面での境界条件に碎波による波のエネルギーの逸散率の関数で表されるせん断応力で与える。 x 方向および y 方向におけるせん断応力は、

$$\left\{ \begin{aligned} \rho v_v \frac{\partial U}{\partial z} = \tau_{sx} &= A_s \rho^{1/3} D_{bc}^{2/3} \left(\frac{h}{L_p} \right) \cos \theta \\ \rho v_v \frac{\partial V}{\partial z} = \tau_{sy} &= A_s \rho^{1/3} D_{bc}^{2/3} \left(\frac{h}{L_p} \right) \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

で表される。ここに、 A_s は無次元係数、 L_p は波のエネルギーの周波数スペクトルのピーク周期から算定される線形理論に基づく波長である。 D_{bc} は碎波による波のエネルギー逸散率であるが、式(1)から得られる D_{bc} を直接用いず、Dallyら⁵⁾の式

$$D_{bc} = \frac{Kc}{h} C_g \frac{1}{8} \rho g \{ H_{rms}^2 - (\Gamma_c h)^2 \} \quad (3)$$

を用いて算定する。ここに、 H_{rms} は、二乗平均平方根波高(Root Mean Square wave height)、 Kc および Γ_c は無次元係数である。

基礎式、計算方法等については、黒岩ら⁶⁾を参照されたい。

(3) 漂砂量

前モデル¹⁾では、Briandら⁷⁾の浮遊砂モデルに基づいており、全漂砂量も浮遊砂のみで評価していた。本研究では、掃流砂の影響も考慮するため、全漂砂量は黒岩ら⁸⁾を参考に、以下の式で定義する。

$$\left\{ \begin{aligned} q_x &= q_{wx} + q_{cx} + q_{sx} \\ q_y &= q_{wy} + q_{cy} + q_{sy} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 q_{wx} と q_{wy} は波による掃流漂砂量、 q_{cx} と q_{cy} は海浜流の底面流速による掃流漂砂量であり、渡辺ら⁹⁾により提案された次の式により表される。

$$\left\{ \begin{aligned} q_{wx} &= A_w \left(u_*^2 - u_{*c}^2 \right) \hat{u}_w / g \\ q_{wy} &= A_w \left(u_*^2 - u_{*c}^2 \right) \hat{v}_w / g \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} q_{cx} &= A_c \left(u_*^2 - u_{*c}^2 \right) U_b / g \\ q_{cy} &= A_c \left(u_*^2 - u_{*c}^2 \right) V_b / g \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 A_w および A_c は無次元係数であり、 u_* は波と流れ共存場における底面摩擦速度、 u_{*c} は限界摩擦速度である。 $\hat{u}_w$ および $\hat{v}_w$ は底面における波の水粒子速度である。 U_b 、 V_b はそれぞれ岸沖および沿岸方向における底面定常流速である。

q_{sx} および q_{sy} は浮遊漂砂量で、鉛直一次元拡散方程式から算定される浮遊砂濃度の鉛直分布と定常流速のそれとの積を底面から平均水位面まで積分して算定する。すなわち、

$$\left\{ \begin{aligned} q_{sx} &= \int_h^{\bar{\eta}} c(z) U(x, y, z) dz \\ q_{sy} &= \int_h^{\bar{\eta}} c(z) V(x, y, z) dz \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

で表される。ここに、 $\bar{\eta}$ および h はそれぞれ平均水位および水深である。 U および V は岸沖方向および沿岸方向の定常流速である。 $c(z)$ は、次式で表現される浮遊砂濃度である。

$$c(z) = c_b \exp \left(- \frac{w_f}{v_s} z \right) \quad (8)$$

ここに、 c_b は浮遊砂濃度、 w_f は砂の沈降速度、 v_s は砂の拡散係数である。 c_b は次式で表される。

$$c_b = c_s \frac{10(\varphi - 0.05)v}{3b\sqrt{sgd}} + \frac{A_{K1}v_s}{hw_f} \quad (9)$$

ここに、右辺第1項は柴山ら¹⁰⁾の式による底面濃度であり、 c_s および A_{K1} は無次元の係数であり、 φ はシールズ数、 v は動粘性係数である。底面基準点 b は、中央粒径の100倍で表される。第2項は乱れによる拡散の影響を考慮したもので、 v_s は以下のよう定める。

$$v_s = E_{k1}u_*h + E_{k2} \frac{P_b H^2 g T}{h} \quad (10)$$

ここに、 E_{k1} および E_{k2} は無次元係数、 P_b は碎波確率で波浪場の計算から得られる。

一方、汀線変化計算のため、波の遡上域における漂砂量を設定する。

現在のQ-3Dモデルは、汀線近傍の極めて浅い領域で計算が不安定となる場合があるため、波の遡上域での漂砂量の計算は困難である。そこで本研究では、以下のように遡上域の漂砂量を決定することとした。

図-2(a)に示すように、岸沖漂砂量 q_{xr} は、Larsonら¹¹⁾のSBEACHモデルに基づいて、遡上域の漂砂を汀線付近の漂砂量を外挿して以下の式で算出する。

$$q_{xr} = q_{xs} \left(\frac{x_r - x}{x_r - x_s} \right)^\alpha \quad (11)$$

ここに、 q_{xs} は汀線近くの基準点 x_s での漂砂量である。 x_r は、最大遡上高の位置である。 α は一定値0.3である。 x_r および α は試行錯誤により決定した。なお、最大遡上高さ R はLarsonら¹¹⁾に基づいて設定した。

$$\frac{R}{H_o} = 1.46 \left(\frac{\tan \beta}{\sqrt{H_o/L_o}} \right)^{0.79} \quad (12)$$

ここに、 H_o は沖波波高、 $\tan \beta$ は海底勾配、 L_o は波長である。本研究では、 H_o の代わりに碎波波高 H_b を用いている。

一方、沿岸方向の漂砂量分布は、図-2(b)に示すとおり一定とする。

(4) 地形変化

地形変化計算は、渡辺ら⁸⁾の漂砂の連続式を用いて行う。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(q_x - E_s |q_x| \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y - E_s |q_y| \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right\} \quad (13)$$

ここに、 E_s は無次元定数であり、 λ は砂の空隙率である。汀線は、移動境界として設定した。以上の計算により、得られた海底地形は、次ステップの初期地形として計算を進める。

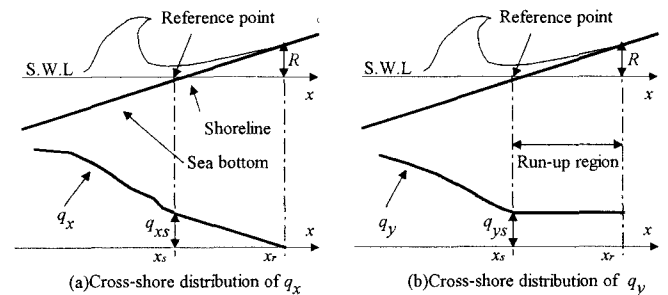


図-2 遡上域の漂砂量分布の算定方法

3. 各種構造物を対象とした解析結果

(1) 離岸堤周辺の地形変化

まず、離岸堤を対象に離岸距離 L_B および堤長 B を変化させた場合の地形変化の計算結果を示す。計算領域は、岸沖方向 $x=600\text{m}$ 、沿岸方向 $y=800\text{m}$ とし、海底勾配は1:50とする。計算格子は $\Delta x = \Delta y = 10\text{m}$ の矩形メッシュである。図-3に初期地形コンターと計算領域を示す。計算では、波向は汀線に対して直角に入射させ、有義波波高 $H_{1/3}$ は1.2m、周期 $T_{1/3}$ は7.0secとし、沖側境界（水深10m）に一樣に与えた。波の方向集中度パラメーター S_{max} を10とし、中央粒径0.25mmの様の底質材料を想定している。その他、計算に用いた各係数を表-1に示す。なお、本計算では、海浜流が地形変化に大きく寄与するものとし、波による漂砂量係数 A_w は0として計算を行う。

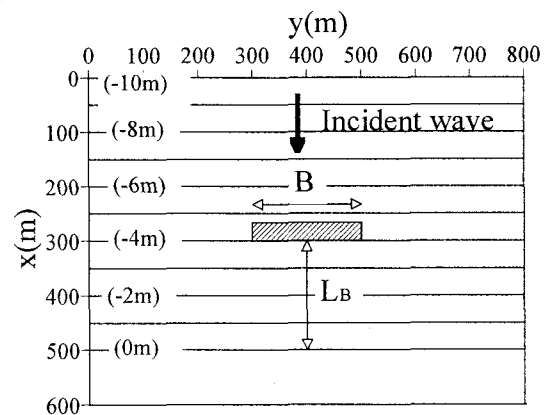


図-3 離岸堤を対象とした計算領域

図-4に L_B と B を変化させた計算における9日後の計算地形を示す。計算では、波・流れおよび地形変化の繰り返し計算を3回行った。図から、離岸距離と堤長の諸元の違いにより、背後に発生する舌状砂州が2つの山を持つ場合と1つ山となる場合があることがわかる。計算結果から、舌状砂州の形状は

$B/L_B < 1.0$ の場合に1つ山となり、 $B/L_B > 1.0$ において2つ山の舌状砂州となる関係があるようである。

図-5に $B/L_B=0.5$ と $B/L_B=1.5$ の場合における波高分布、底面流速および漂砂量分布を示す。図から、 $B/L_B=0.5$ と $B/L_B=1.5$ では離岸堤背後の漂砂量ベクトル明らかに異なることがわかる。2つ山の舌状砂州が発生する $B/L_B=1.5$ では、Katayamaら¹²⁾で示されているように、長大な離岸堤の場合その背後で漂砂量ベクトルが小さくなることに起因すると考えられる。

表-1 海浜流および漂砂の連続式の無次元係数

Current module			Sediment module	
Eq. (2)	Eq. (3)		Eq. (5)	Eq. (6)
A_s	K_c	Γ_c	A_w	A_c
0.5	0.15	0.4	0.0	0.2
Sediment and beach evolution module				
Eq.(9)		Eq. (10)		Eq. (13)
C_s	A_{kl}	E_{kl}	E_{k2}	E_s
0.01	0.00001	1.0	0.05	4.0

次に、モデルの安定性を調査するため、60日後の地形変化計算を実施した。計算ケースは $B/L_B < 1.0$ とし、すなわち、堤長 B は160m、離岸距離 L_B は200mとした。波浪条件は前述のものと同じである。図-6に30日後の計算結果(a)と、60日後の計算結

果(b)を示す。図から、離岸堤背後の舌状砂州が30日後よりも60日後の方が発達しているのがわかる。

図-7には、沿岸方向距離 $y=100$ m地点と400m地点の計算断面の変化状況を示す。

$y=100$ mでは、戻り流れの影響により沖側へ土砂が運搬され、落ち込んだ断面地形となっている。 $y=400$ mでは、沿岸方向の流れにより離岸堤背後に運ばれた砂が堆積しているのがわかる。なお、60日後の地形は45日後の断面形状とあまり相異が無く、ほぼ平衡状態に達していると考えられる。以上のことから、構築したモデルは、波高が小さく、弱い戻り流れが発生する条件下において平衡状態にほぼ達すると考えられる。

(2) 突堤周辺の地形変化

続いて、突堤を対象とした計算を実施した。図-8に結果を示す。突堤は堤長150m、波向は汀線に直角方向から左側に30°傾けた方向とし、波浪条件は波高 $H=2.0$ m、周期 $T=7.0$ sec、海底勾配は1:50とする。ここでは、地形変化の結果のみを示す。図中の(a)は30日後の地形変化であり、(b)は60日後の地形変化である。突堤左側で堆積し、突堤右側で侵食となっており、漂砂の移動方向(左側→右側)に即した地形変化の傾向を示していることがわかる。

(3) ポケットビーチの地形変化

最後に、計算領域に2つのL型突堤を配置したポ

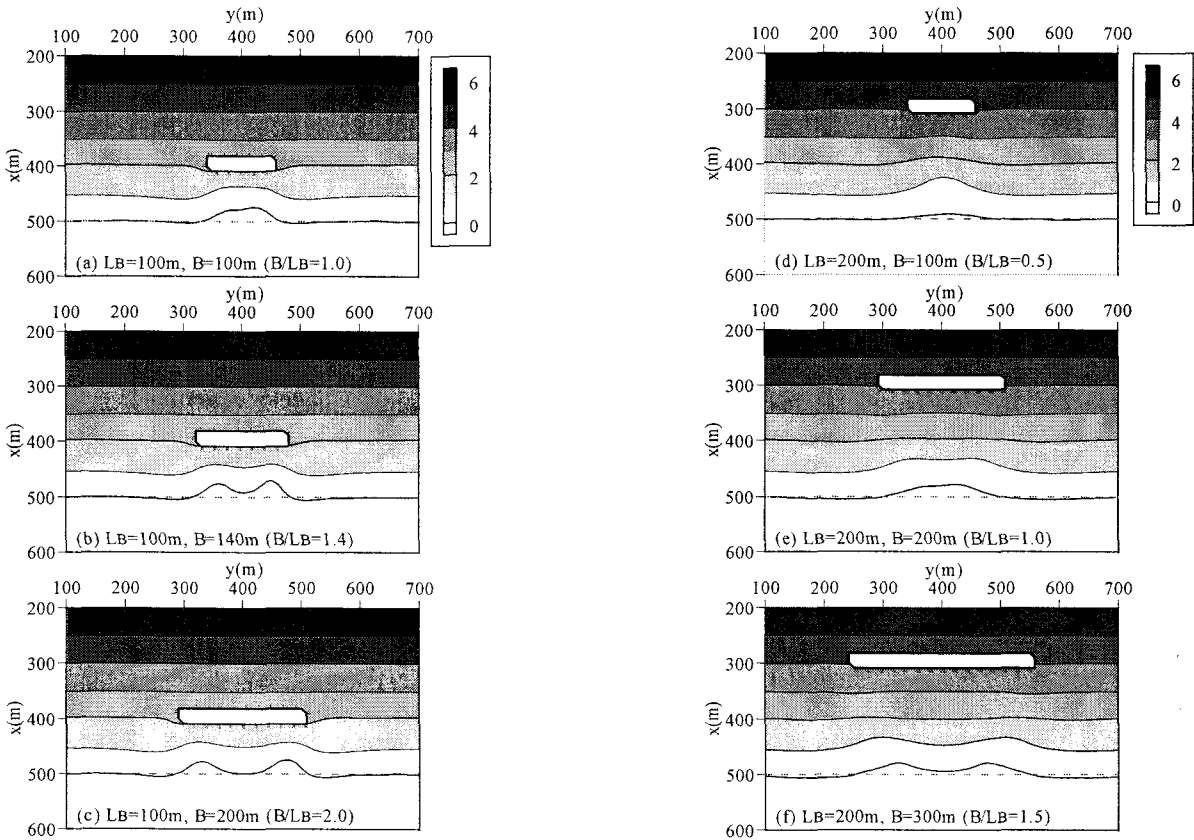


図-4 離岸堤の堤長と離岸距離の影響

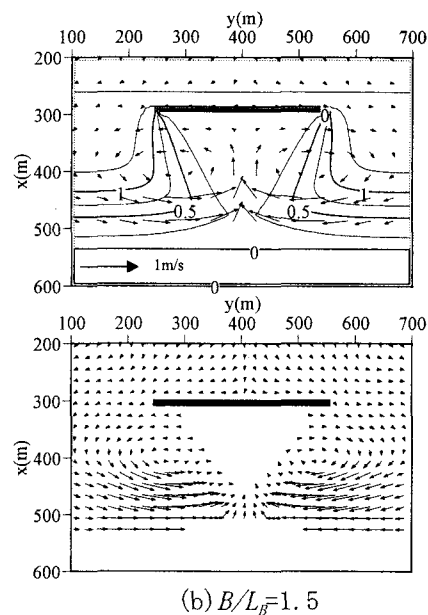
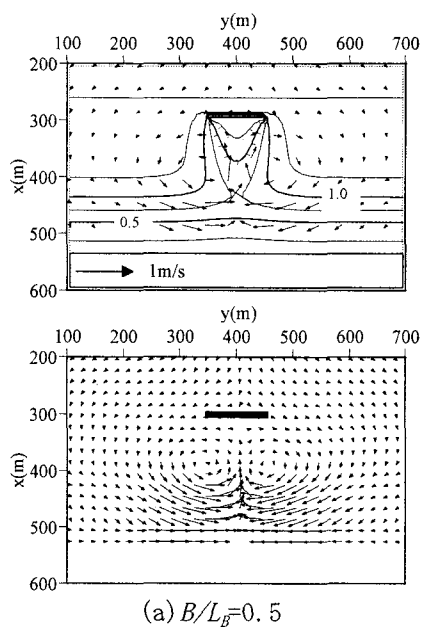


図-5 $B/L_B=0.5$ と $B/L_B=1.5$ の場合における波高分布、底面流速および漂砂量の比較
(上段：波高分布と底面海浜流速ベクトル図、下段：漂砂量ベクトル図)

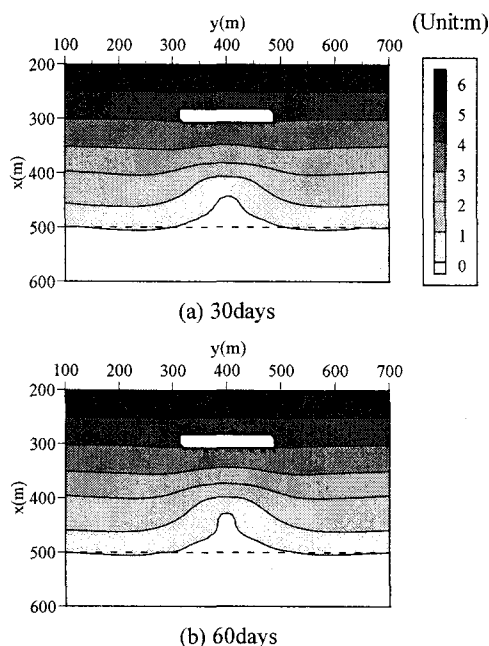


図-6 30, 60日後の地形変化

ケットビーチを対象とした計算結果を図-9に示す。図中の(a)は30日後の地形変化であり、(b)は60日後の地形変化である。図から、中央付近で侵食し、両端で堆積しているのが確認できる。

本研究では、現地観測データや模型実験などとの比較は行っていないが、種々の構造物を対象とした計算結果から、波高の小さい場合の戻り流れ条件の下では、汀線変化も考慮した3次元海浜変形予測が可能であることが確認された。したがって、これらの条件の下では本モデルは適用可能であると考えられる。ただし、離岸堤のケースでも明らかのように、

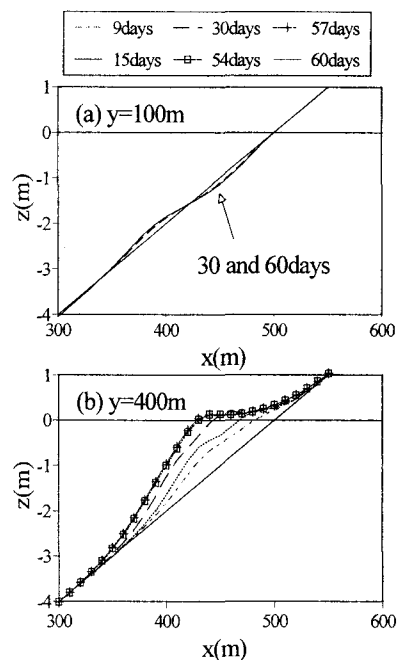


図-7 $y=100m$, $400m$ 地点の縦断面地形変化状況

施設背後において両端と中央付近の冲向きの流れの差が大きい場合、2つ山の地形が形成され、施設規模によるモデルの安定性に検討の余地が残された。このことは今後さらに検討を進める必要があると考えられる。

4. おわりに

本研究では、構造物周辺における汀線変化を考慮した3次元海浜変形予測モデルを構築し、離岸堤お

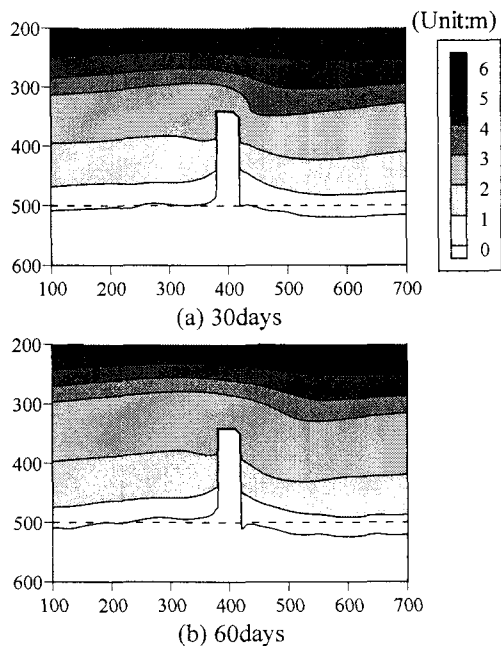


図-8 突堤施設における30, 60日後の地形変化

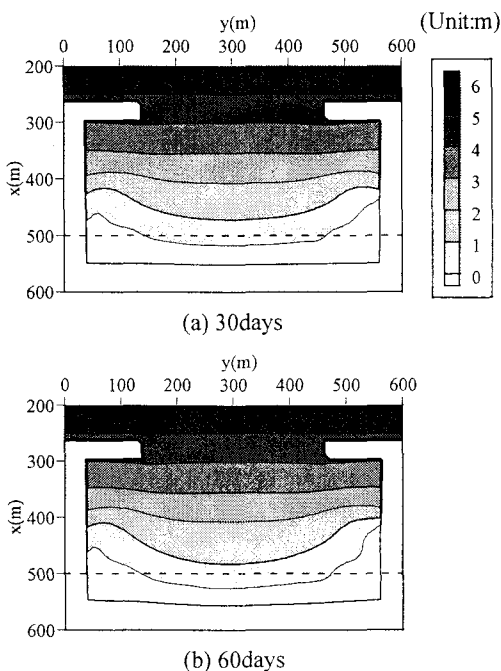


図-9 ポケットビーチにおける30, 60日後の地形変化

よび突堤などの施設を配した場合の地形変化を数値実験的に検討した。検討結果を以下に示す。

- 1) 本モデルを用いることにより、汀線変化を考慮した構造物周辺の地形変化の計算が可能である。
- 2) 離岸堤の場合、堤長と離岸距離の関係によっては、その背後に2つの舌状砂州が形成される場合があるが、波高が小さく、戻り流れが弱い海浜流の場合、平衡状態への地形解析が可能である。

3) 突堤とポケットビーチの計算結果から、汀線変化量は小さいが地形変化の傾向はよく表すことができる。

今後、検証可能な現地海岸のデータを用いて、本モデルの妥当性を検討するとともに、波浪の履歴の効果などについても本モデルでの検討を進める予定である。

謝辞：波浪場の計算に際して、間瀬²⁾を参考にさせていただいた。ここに、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Kuroiwa, M.J.W., Kamphuis, Kuchiishi, T, and Matsubara, Y : A 3D morphodynamic model with shoreline change based on quasi-3D nearshore current model, *Proc. of the 2nd Asian and Pacific Coastal Eng. Conf.*, CD-ROM, 2004.
- 2) 間瀬 肇, 高山知司, 国富将嗣, 三島豊秋: 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第628号, II -48, pp.177-187, 1999.
- 3) 高山知司, 池田直太, 平石哲也: 碎波および反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第1号, pp.21-67, 1991.
- 4) 黒岩正光, 口石孝幸, 加藤憲一, 松原雄平, 野田英明: 多方向不規則波浪場における準3次元海浜流および海浜変形予測に関する研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.491-495, 2002.
- 5) Dally, W. R., R.G..Dean and R.A.Dalrymple: A Model for Breaker Decay on Beaches, *Proc. 19th ICCE*, pp.82-97, 1984
- 6) 黒岩正光, 野田英明, 芳地康征: 準3次元海浜流場の数値シミュレーションに関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.151-155, 1997.
- 7) Briand, M.-H.G. and J. W. Kamphuis: Sediment transport rate in the surf zone: a quasi-3D numerical model, *Coastal Engineering*, Vol.20, pp.135-156, 1993.
- 8) 黒岩正光, 野田英明, 加藤憲一, 谷口 丞, 孫 彰培: 準3次元海浜流モデルを用いた構造物周辺の3次元海浜変形予測, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.616-620, 1999.
- 9) 渡辺 晃, 丸山康樹, 清水隆夫, 柳山 勉: 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.406-410, 1984.
- 10) 柴山知也, Winyu Rattanapitikon, 岡安章夫: 碎波帯内の浮遊砂量の算定モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.431-435, 1984.
- 11) Larson, M, Kraus, N.C. : SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change, Report 1, Empirical foundation and model development, *Technical Report CERC-89-9*, US Army Engineer Waterways Experiment Station, CERC, 1989.
- 12) Katayama, H, Goda, Y. : 2DH Beach Changes due to suspended sediment picked-up by random breaking waves, The proceedings of the 28th Inter. Conference on Coastal Eng., Vol.3, pp.2767-2779, 2002.