

波と流れの相互干渉を考慮した3次元海浜変形予測モデル

3D Morphodynamic Model for Considering Wave-current Interaction

黒岩正光¹・Ahmed KHALED SEIF²・松原雄平³・間瀬 肇⁴・Jinhai ZHENG⁵

Masamitsu KUROIWA, Ahmed KHALED SEIF, Yuhei MATSUBARA, Hajime MASE and Jinhai ZHENG

This study is concerned with the development of a 3D morphodynamic model for considering wave-current interaction. The wave action conservation equation for waves and the quasi-3 D nearshore current model with the surface roller model were employed. Firstly, in order to investigate the influence of the interaction into the morphodynamics, three model tests associated with a detached breakwater, submerged breakwater and sand bars with rip-channel were carried out. Secondly, the presented model was applied to the beach evolution after offshore nourishment, so called “shoreface nourishment”, conducted at the Egmond coast in the Netherland. From the model tests and the comparison with the field measurement, the validity of the presented model was founded.

1. はじめに

これまで多くの3次元海浜変形予測モデルが提案されているが、いまだ、あらゆる場に適用できるモデルはない。特に、人工リーフ開口部や沿岸砂州の切れ目などの強い離岸流が発生する場、あるいは河川からの流出がある河口付近などは、波は河川流や海浜流の影響を受けて変化し、さらに海浜流はその波浪場の影響を受けるので、より精度良い海浜変形予測には、波と流れの相互干渉を考慮し、漂砂の外力である流体場を求める必要がある。本研究では、間瀬ら (2004) の流れとの相互干渉を考慮した波浪場モデルをリンクさせた準3次元海浜流モデルに基づく3次元海浜変形予測モデルを開発し、離岸堤、潜堤周辺の地形変化や沿岸砂州のように砂堆のある地形にこのモデルを適用し、提案するモデルの妥当性を検討し、その有用性を示すものである。

2. 数値モデル

本モデルは、図-1に示すように、波浪場、海浜流場、漂砂量および地形変化計算の4つのサブモデルから構成されている。波と流れの相互干渉を考慮するため、波浪場と海浜流場の計算は、両者の結果がほぼ定常になるまで繰り返し計算を行うようになっている。波浪場は、間瀬ら (2004) の波作用量平衡式を用い、海浜流場は、黒岩ら (2002) の準3次元海浜流モデルをベースとした、著者らの一人Khaled Seifら (2010) の波と流れ共存場における準3次元海浜流モデルを用いた。

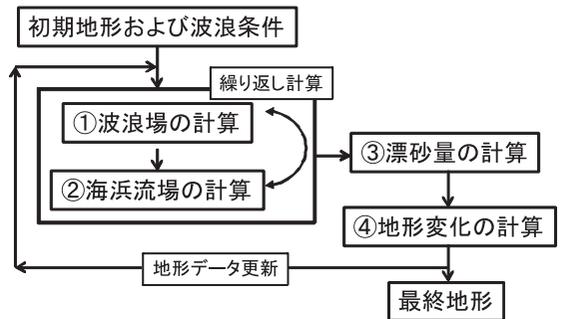


図-1 計算のフローチャート

波浪場計算の支配方程式は

$$\frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\sigma} \left\{ (CC_g \cos^2 N_y)_y - \frac{1}{2} CC_g \cos^2 \theta N_{yy} \right\} - \varepsilon_b N \dots (1)$$

を用いた。ここに、 N は波作用量、 C は波速、 C_g は群速度、 C_x 、 C_y および C_θ は流れと波向きに関する特性速度である。 σ は流れに相対的な角周波数である、右辺第2項の係数 ε_b は碎波減衰係数で、Zhengら (2008) を参考に、Chawlaら (2002) のモデルを採用した。

海浜流場は以下に示す運動方程式と連続式を用いて計算される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = & -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} \\ & + \frac{\partial(u_w^2 - w_w^2 + R_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u_w v_w + R_{xy})}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial U}{\partial z} \right) \dots \dots (2) \end{aligned}$$

1 正会員 博(工) 鳥取大学大学院准教授 工学研究科
2 修(工) 鳥取大学大学院工学研究科博士後期課程
3 正会員 工博 鳥取大学大学院教授 工学研究科
4 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
5 Ph.D Hohai University, Professor

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + \frac{\partial(\overline{u_w v_w} + R_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{v_w^2} - \overline{w_w^2} + R_{yy})}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial V}{\partial z} \right) \dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{V}(\eta+h)}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{V}(\eta+h)}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 U, V, W は定常流速、 u_w および v_w は、波の水粒子速度の岸沖および沿岸方向成分、 w_w は鉛直成分である。 R_{xx}, R_{yy}, R_{yx} および R_{yy} はSurface rollerによる運動量成分である (Namら, 2009)。 v_h および v_v はそれぞれ水平および鉛直方向の渦動粘性係数である。海浜流モデルの妥当性については、Khaled Seifら (2010) によって検討されているので、それを参照されたい。

(2) 漂砂量および水深変化

全漂砂量は、波による掃流砂 (q_{wx}, q_{wy})、底面定常流速 (海浜流) による掃流砂 (q_{cx}, q_{cy})、波と流れによる浮遊漂砂 (q_{sx}, q_{sy}) の総和として定義する (黒岩ら, 1999)。掃流漂砂は渡辺ら (1984) のモデルをベースとして、

$$q_{wx} = A_w Q \hat{u}_{wx}, \quad q_{wy} = A_w Q \hat{u}_{wy} \dots\dots\dots (6)$$

$$q_{cx} = A_c Q U_{bx}, \quad q_{cy} = A_c Q U_{by} \dots\dots\dots (7)$$

$$Q = \left\{ (u_s)^2 - (u_{sc})^2 \right\} / g \dots\dots\dots (8)$$

で評価する。 A_w および A_c は漂砂量係数で、次式で評価される (清水ら, 1996)。

$$B_w = C_w (\sqrt{d50} / w_f)^3 \dots\dots\dots (9)$$

$$A_w / B_w = w_f \sqrt{0.5 f_{cw}} / \left\{ (1 - \lambda) s \sqrt{sgd} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 w_f は沈降速度、 C_w は無次元係数である。流れによる掃流漂砂量係数 A_c は A_w の定数倍 ($A_c = \beta A_w$) として表され、清水ら (1996) によると $\beta=10$ とされている。 f_{cw} は底面摩擦係数である。浮遊漂砂は次式で計算される。

$$q_{sx} = \int_{-h}^{\eta} c U dz, \quad q_{sy} = \int_{-h}^{\eta} c V dz \dots\dots\dots (11)$$

浮遊砂濃度 c の鉛直分布は、

$$c = c_b \exp \left\{ - \frac{w_f (h+z)}{v_s} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

で表す。 v_s は砂の拡散係数、 c_b は底面濃度であり、シールズ数の関数で、

$$c_b = C_s \frac{(\phi - 0.05) \nu}{b \sqrt{sgd_{50}}} \dots\dots\dots (13)$$

で算定する。ここに、 C_s は無次元係数、 ϕ はシールズ数、 ν は動粘性係数、 b は中央粒径 d_{50} の100倍で表される。

遡上域における漂砂量は、汀線付近の漂砂量を最大遡上高さまで外挿して算定し、渡辺ら (1984) の漂砂の連続式を用いて、汀線変化も計算した。

3. モデル計算

ここでは、波と流れの相互干渉が地形変化に与える影響を調べるため、海浜流が顕著に発生するような典型的な場、すなわち、離岸堤、潜堤およびリップチャネルが存在する沿岸砂州地形周辺の地形変化計算を行った。

(1) 離岸堤

離岸堤背後においては、トンボロあるいは舌状砂州 (salient) が形成される。しかしながら、例えば、片山ら (2002) や Johnsonら (1994) が示しているように、数値計算上双状の salient (doubled-salient) となる場合がある。図-2は波と流れの相互干渉を考慮しない場合の波浪場、海浜流場および地形変化の計算結果の一例で、離岸堤背後の汀線は前進しているが、双状の舌状砂州が形成されている。なお、波浪条件は、有義波高1.5m、周期7.0sである。

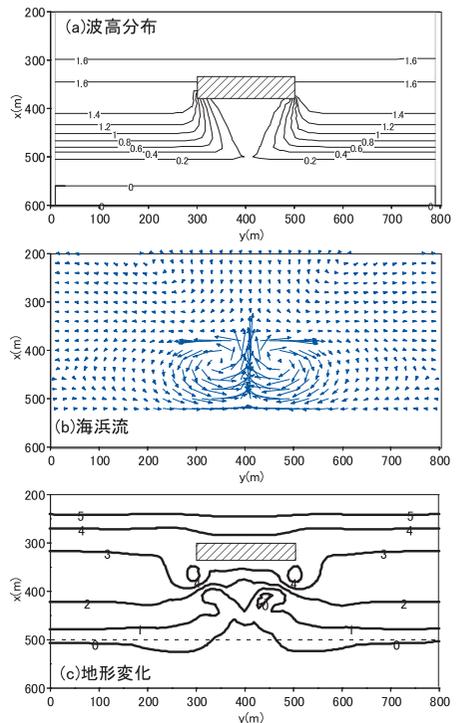


図-2 波と流れの相互干渉無しの計算結果 (離岸堤)

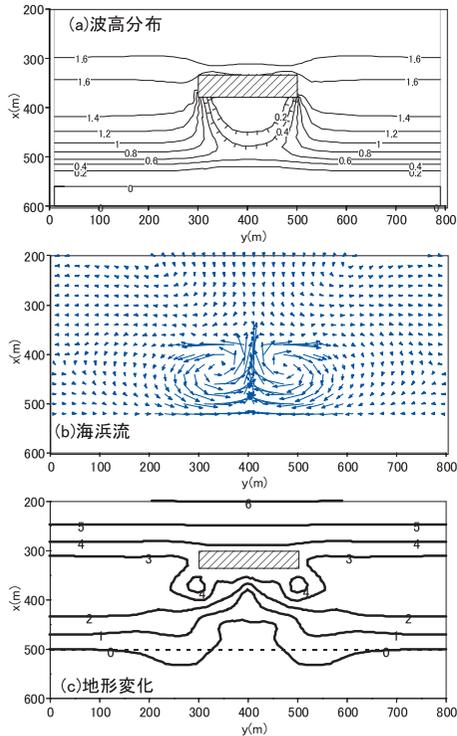


図-3 波と流れの相互干渉有りの計算結果（離岸堤）

図-3は、波と流れの相互干渉を考慮した場合の同様の計算結果であり、離岸堤背後の循環流は、図-3の結果と非常に良く似た流速分布であるが、波高分布が異なることがわかる。波高分布が異なることから、相互干渉を考慮した場合、離岸堤背後の砂州の形状は考慮しない場合のそれとは異なり、双状の舌状砂州が改善されていることがわかる。なお、Johnsonら（1994）が示しているように、離岸堤の設置距離と長さ、波浪条件によって舌状砂州の形状が異なることを付記しておく。

(2) 潜堤

図-4に示す2つの潜堤（天端水深1.5m）が存在する海浜における波と流れ、および地形変化を計算した。図-5は、波と流れの相互干渉を考慮せずに計算した結果を示したものである。図-6は相互干渉を考慮した場合の計算結果である。各図の(a)、(b)および(c)はそれぞれ波高分布、海浜流の底面定常流速および地形変化の計算結果である。波浪条件は、離岸堤の場合と同じである。図-5から、リーフ前面では、水深の急変による波高の増大が見られ、リーフ上では、強い岸向の流れが計算されている。開口部では、離岸流が発生しているのがわかる。一方、図-6の計算結果から、リーフ上に発生する岸向の流れによって波高は小さくなり、砂州の開口部では、離岸流によって波高が増大していることが再現され、それ

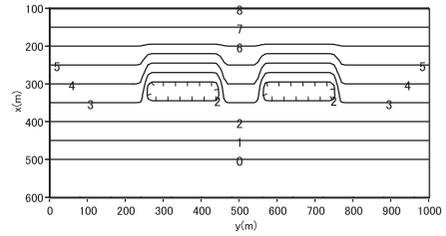


図-4 潜堤周辺の初期地形

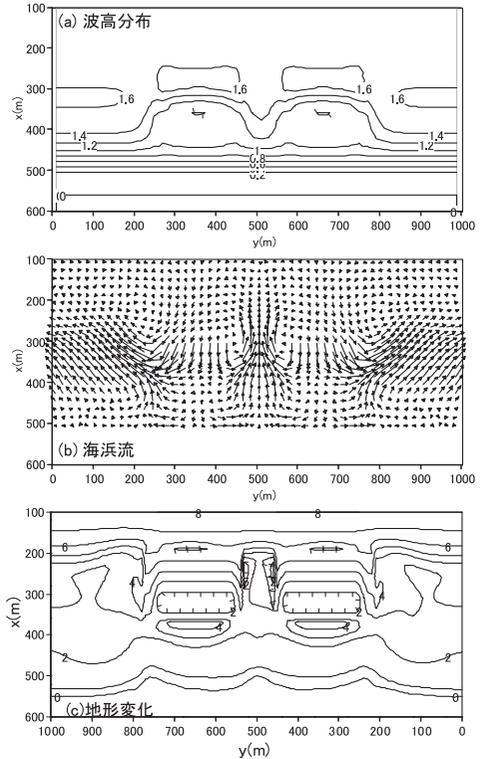


図-5 波・流相互干渉無しの計算結果

に伴い、開口部における離岸流の大きさが変化し流速分布が相互干渉を考慮しない場合と異なることわかる。また、リーフ背後の汀線付近においても、流速の方向と大きさが異なることがわかる。地形変化については、リーフ背後の等深浅に大きな違いが見られ、特に、波と流れの相互干渉を考慮した場合、汀線の変化が小さい。一方、相互干渉を考慮しない場合は、侵食傾向が顕著に表れている。潜堤の設置水深や設置離岸距離にもよるが、潜堤が背後の砂浜を安定化させる機能を持つという観点から、相互干渉を考慮した方が、実際の地形変化を再現しているものと考えられる。

(3) 砂州地形

図-5に示した潜堤を移動床、すなわち沿岸砂州とした場合の波と流れおよび地形変化を計算した。砂州頂部の

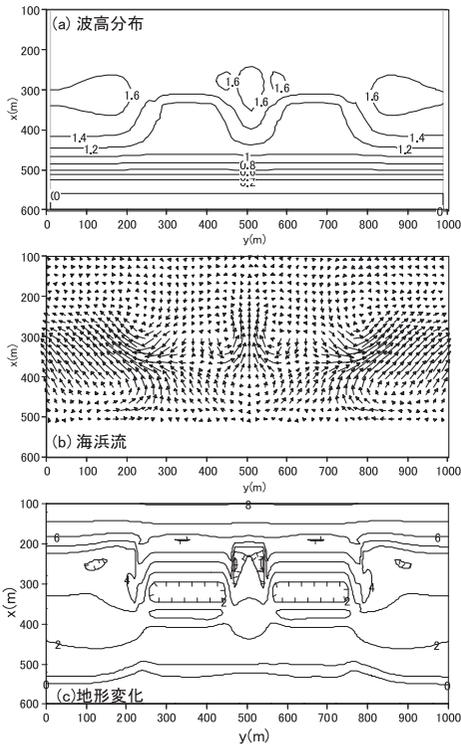


図-6 波と流れの相互干渉有りの計算結果 (潜堤)

水深は1.5mである。波浪条件は潜堤の場合と同じ条件である。図-7および図-8はそれぞれ波と流れの相互干渉を考慮しない場合とした場合の地形変化の計算結果である。海浜変形の計算結果に相違が見られ、定性的ではあるが、相互干渉を考慮した計算結果では、汀線近傍の変動が小さく、なおかつ砂碓背後の等深線の前進が見られ、砂堆が潜堤の役割を果たしていることが再現されている。

4. 現地における沖合土砂養浜に対する適用性

最後に、オランダのEgmond aan zee海岸 (以下Egmond海岸) で実施された沖合土砂養浜前後の深淺測量結果 (van Duinら, 2004) を用いて、現地海浜に対する適用性を検討した。Egmond海岸では、1999年6月から9月にか

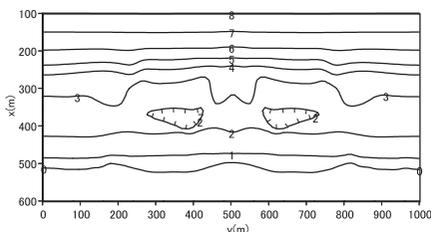


図-7 波と流れの相互干渉無の地形変化 (沿岸砂州)

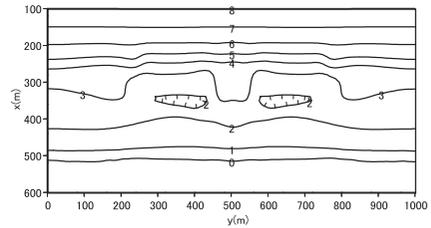


図-8 波・流れの相互干渉有りの地形変化 (沿岸砂州)

表-1 波浪条件および漂砂量係数

	$H_{1/3}$ (s)	$T_{1/3}$ (s)	波向*	日数	C_w	β	C_s
1	2.75	8.3	-11	4	19.55	3	0.03
2	2.25	7.8		6			
3	2.75	8.5		4			
4	2.75	9.5		3			
5	2.25	8.7		3			

*波向は、x軸に対する角度

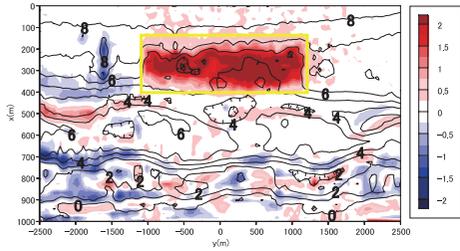
けて約900,000m³の土砂が投入され、その後の地形変化が追跡されている。Van Duinら (2004) によれば養浜後の砂堆が潜堤と同じような役割を果たし、汀線の安定化を図ることができるものとされている。

(1) 初期地形および波浪条件

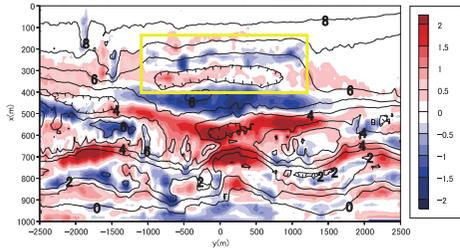
図-9 (a) および (b) は1999年9月 (土砂投入終了時) および2000年5月に実施された深淺測量の結果である。図中に示す枠は養浜された領域を示す。1999年9月の測量結果を初期地形とし、8か月後の測量結果を検証データとした。波浪条件については、van Duin (2002) がDELFT3D-MORモデルの検証のために設定した波浪条件を参考にしたが、現地では1m~2mの潮位差があること、また、波浪条件の設定方法が不明であることなどから、本研究では、潮位差を考慮せずに計算を試みた。予備計算の段階において、1m程度の波浪では、沖側の土砂の移動は見られなかったため、高波時、すなわち波高2m以上のものが地形変化に大きく寄与するものと仮定して、表-1に示す条件で計算を行った。

(2) 計算結果

図-10は地形変化の計算結果で、図-11は養浜位置を含む中央における岸沖方向の断面地形について、測量結果と計算結果を比較したものである。図-10より、侵食量と堆積量の定量的な違いはあるが、概ね侵食と堆積域のパターンは類似していることがわかる。図-11からも、複雑な地形変化は再現されないが、概ね養浜後の地形変化の傾向を捉えることがわかる。なお、この計算では、波と流れの漂砂量係数の比 β を試行錯誤計算により、通常 $\beta=10$ より小さめの値 ($\beta=5$) に設定している。



(a)1999年9月(1999年6月との比較による侵食堆積図)



(b)2000年5月(1999年9月との比較による侵食堆積図)

図-9 Egmond海岸における深浅測量結果 (van Duinら, 2004)

5. おわりに

本研究では、波と流れの相互干渉を考慮した3次元海浜変形予測モデルを提案し、離岸堤、潜堤および沿岸砂州のモデル地形に対して計算した。波流れの相互干渉の有無により地形変化に顕著な違いがあることが確認され、相互干渉を考慮することで離岸堤の舌状砂州の形成や、潜堤や沿岸砂州背後の地形変化がより良く計算できることがわかった。さらに、Egmond海岸で実施された沖合養浜後の地形変化の再現計算を試みた結果、定性的ではあるが、実測値を概ね再現できることが確認された。

本モデルの現地適用性を検討するにあたり、早く現地データを提供していただいた、オランダデルフト水理研究所のD.J.R.Walstra氏に感謝の意を表する。

参考文献

片山裕之・合田良實 (2002) : 碎波巻き上げによる浮遊砂の輸送・沈降過程に着目した地形変化の計算, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.486-490.
 黒岩正光・野田英明・加藤憲一・谷口 丞・孫 彰培 (1999) : 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.
 黒岩正光・口石孝幸・加藤憲一・松原雄平・野田英明 (2002) : 多方向不規則波浪場における準3次元海浜流場と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.

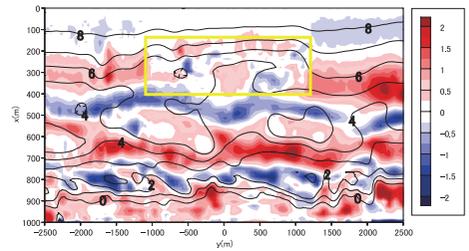


図-10 Egmond海岸における計算結果

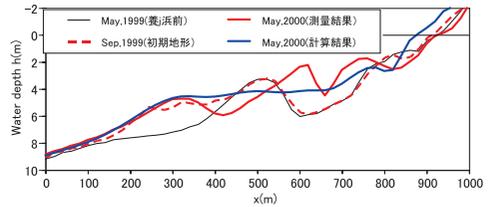


図-11 養浜部中央における断面地形との比較 (測量結果: van Duinら, 2004)

清水琢三・山田晶子・渡辺 晃 (1996) : 沿岸漂砂量の岸沖分布と漂砂量係数, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.571-575.
 間瀬 肇・由比政年・雨森洋司・高山知司 (2004) : 波・流れ共存場における碎波および回折効果を考慮した位相平均波浪変形予測モデルの構築, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.6-10.
 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉 (1984) : 構造物設置に伴う3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.
 Chawla, A., and J.T.Kirby (2002): Monochromatic and random wave breaking at blocking points, Journal of Geophysical Research, 107, No. C7.
 Johnson, H., I. Broker and J.A. Zyserman (1994): Identification of some relevant processes in coastal morphological modelling, Proceedings of the 24th International Conference on Coastal Engineering, pp.2871-2885.
 Nam, P.T., M. Larson, H. Hanson and L. X. Hoan (2009): A numerical model of nearshore waves, currents, and sediment transport, Coastal Engineering, 56, pp.1084-1096.
 Khaled Seif, M., M. Kuroiwa, M. Hajime, Y. Matsubara and M. Abualyayef (2010): A quasi-3D nearshore current model in wave-current coexisting field, Annual Journal of Civil Engineering in the Ocean, JSCE, Vol.26, pp.297-302.
 Zheng, J., H. Mase, Z. Demirebilek, and Lin, Li (2008): Implementation and evaluation of alternative wave breaking formula in a coastal spectral wave model, Ocean Engineering, 35, pp.1090-1101.
 Van Duin, M.J.P. (2002): Evaluation of the Egmond shoreface nourishment, Part 3, Validation morphological modeling DEFT3D-MOR, WL/Delft Hydraulics Report Z3054/Z3148
 Van Duin, M.J.P., N.R. Wiersma, D.J.R. Walstra, L.C. van Rijn and M.J.F. Stive (2004): Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands, Coastal Engineering, 51, pp.813-837.