

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

黒岩正光* ・野田英明** ・加藤 憲一***
 谷口 丞*** ・孫 彰培****

1. はじめに

従来, 3 次元海浜変形予測における海浜流場の算定には平面 2 次元モデル (2DH モデル) が用いられているが, 実際には断面平均された海浜流の流向および流速値は底面における流れのそれらと異なる場合があり, 2DH モデルでは底質移動を詳細に把握し海浜変形を精度良く予測するのは困難であると考えられる。近年, 海浜流の 3 次元性が重要視されいくつかの準 3 次元モデル (Q-3D モデル) が提案されている。さらに Q-3D モデルを用いた海浜変形予測モデルもいくつか提案されている。例えば, Rakha ら (1997) は, 平行等深線上に設置された海岸堤防付近の海浜変形予測を行っている。また, 原田ら (1997) は実験室レベルの離岸堤周辺における海浜変形計算を行っている。しかしながら実務レベルまでには至っていないのが現状である。本研究は, 黒岩ら (1997, 1998) が提案した Q-3D モデルを用いた新たな 3 次元海浜変形予測モデルを提案し, 構造物周辺の海浜変形に対する適用性について模型実験および現地観測結果と比較し検討しようとするものである。

2. 海浜変形予測モデル

2.1 波浪場および海浜流場

波浪場は流れとの相互干渉を考慮せずに渡辺ら (1984) の碎波減衰項を付加した西村ら (1983) の非定常緩勾配方程式を用いて算定する。海浜流場は, 黒岩ら (1997, 1998) の準 3 次元海浜流数値モデルを適用して算定する。

2.2 漂砂量と地形変化

海浜流場の 3 次元性を考慮した場合, 正味の漂砂量の算定方法は明確ではなくモデルによって異なる。本研究では, 以下のように正味の漂砂量を算定し, 地形変化の計算を試みる。

岸沖方向における正味の漂砂量を q_x , 沿岸方向におけるそれを q_y とし, 各方向における正味の漂砂量を以下のように表す。すなわち,

$$q_x = q_{wx} + q_{cbx} + q_{sx} \dots\dots\dots (1)$$

$$q_y = q_{wy} + q_{cbv} + q_{sy} \dots\dots\dots (2)$$

ここに, q_{wx} および q_{wy} は波による掃流漂砂量, q_{cbx} および q_{cbv} は流れによる掃流漂砂量 (Q-3D モデルから算定される底面定常流速を用いた漂砂量), q_{sx} および q_{sy} は波と流れによる浮遊漂砂量である。波および流れによる掃流漂砂量は渡辺ら (1984) のモデルに基づいて算定する。すなわち, 波による掃流漂砂量は,

$$q_{wx} = F_d A_w (u_*^2 - u_{*c}) u_w / g \dots\dots\dots (3)$$

$$q_{wy} = F_d A_w (u_*^2 - u_{*c}) v_w / g \dots\dots\dots (4)$$

ここに, A_w は無次元定数, u_* は波と流れ共存場における底面摩擦速度 (田中, 1990), u_{*c} は限界摩擦速度, F_d は清水ら (1996) による漂砂の移動形態を考慮した方向関数である。 u_w および v_w は底面における波の水粒子速度である。流れによる掃流漂砂量 q_{cb} は,

$$q_{cx} = A_c (u_*^2 - u_{*c}) U_b / g \dots\dots\dots (5)$$

$$q_{cy} = A_c (u_*^2 - u_{*c}) V_b / g \dots\dots\dots (6)$$

ここに, A_c は無次元定数, U_b および V_b は岸沖および沿岸方向における底面定常流速である。浮遊漂砂量 q_s は, 鉛直 1 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,

$$q_{sx} = \int_{-h}^{\bar{\eta}} C(z) U(x, y, z) dz \dots\dots\dots (7)$$

$$q_{sy} = \int_{-h}^{\bar{\eta}} C(z) V(x, y, z) dz \dots\dots\dots (8)$$

$\bar{\eta}$ および h はそれぞれ平均水位および水深, 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。 $C(z)$ は浮遊砂濃度であり, 柴山ら (1994) のモデルを参考に次式で表す。

$$C(z) = C_s \frac{10}{3} \frac{(\psi - 0.05)\nu}{\sqrt{sgd_{50}b}} \exp(-w_f z / \epsilon_0) \dots\dots (9)$$

ここに, C_s は無次元定数, ψ はシールズ数, b は中央粒径の 100 倍である。 w_f は砂の沈降速度でルベイの式で算定する。 ϵ_0 は砂の拡散係数で, 簡単のため鉛直方向に一

* 正会員 博(工) 鳥取大学助手 工学部土木工学科
 ** フェロー 工 博 鳥取大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工 修 日本建設コンサルタント(株)
 **** 正会員 博(工) 韓国海洋大校講師

定と仮定して柴山ら(1994)の式を参考に次式で与える。

$$\varepsilon_v = (k_1 u_* + k_2 D_b^{1/3}) h \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 D_b はエネルギー逸散率、 k_1 および k_2 は無次元の定数である。浮遊砂濃度を算定する場合、厳密には原田ら(1987)のように境界層厚を評価して掃流砂と浮遊砂を分ける必要があるが、境界層厚の評価法や掃流砂と浮遊砂の寄与率は明確でないため、本研究では基準点濃度に無次元係数 C_s を導入した。

各漂砂量を計算する場合、それぞれの漂砂量式(3)~(9)に含まれる係数は、各漂砂量と実測されたそれらを比較し決定する必要があるが、ここでは簡単のため、海浜変形を実際に計算し、実測値と最も適合する係数を与えることにする。

地形変化は渡辺ら(1984)の底勾配の影響を考慮した漂砂の連続式を用いて計算する。なお、波と流れ計算へのフィードバックは行わず漂砂の連続式のみ時間ステップを進めるいわゆる定常的手法(清水, 1996)を用いて地形変化を計算する。

3. 離岸堤背後における海浜変形(実験レベル)

3.1 計算条件

ここでは、平面水槽内で実施された離岸堤模型周辺の実験結果(渡辺ら, 1984)を用いて再現計算を試みる。計算の対象とする地形は造波開始2時間37分後の測定結果を利用し、波浪条件は沖波波高 $H_o=4.9$ cm, 周期 $T=0.87$ s, 底質の中央粒径が0.02 cmで初期地形の海底勾配は1/20である。計算における差分の格子間隔は岸沖および沿岸方向とも波浪場では5 cm, 海浜流場および地形変化の計算では10 cmとする。

3.2 計算結果

図-1および2は離岸堤周辺における断面平均定常流速および底面定常流速の計算結果を示したものである。図中に示す実線は碎波点を表す。これらの図から、開口部における底面定常流速は沖向きで戻り流れが発生していること、 $x=300\sim370$ cm, $y=100\sim150$ cmの領域における断面平均定常流速と底面流速は流向が異なり、断面平均定常流速は岸向きであるのに対し、底面では江線に沿って離岸堤に向かう流れとなっていることがわかる。図-3は渡辺ら(1984)の実験結果と同程度の傾向が得られるように、各漂砂量係数を種々変化させて試行錯誤的に計算して得られた造波開始2時間37分後の海底地形および堆積領域を示したものである。なお、漂砂量係数は $A_c=0.075$, $A_w=0.05$ および $C_s=4.0$ とした。この図から、開口部では碎波点付近に堆砂が生じバー地形が再現されている。離岸堤背後ではトンボロ地形の発達による堆砂が生じていることがわかる。

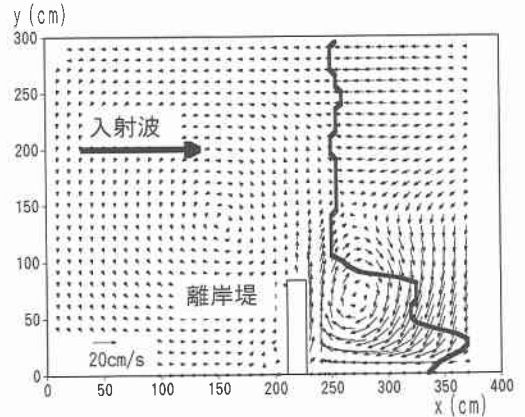


図-2 離岸堤周辺における底面定常流速

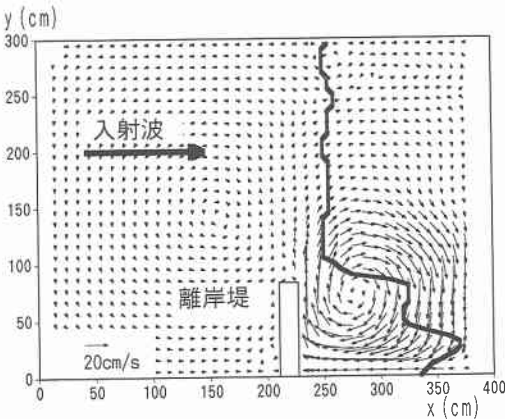


図-1 離岸堤周辺における断面平均定常流速

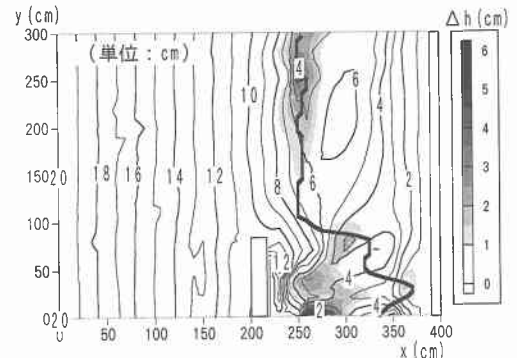


図-3 2時間37分後の海底地形の計算結果 ($A_w=0.05$, $A_c=0.075$, $C_s=4.0$)

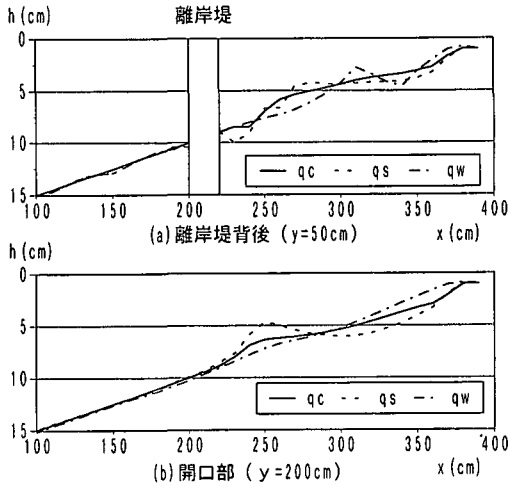


図-4 各漂砂量による岸沖方向の縦断面地形の比較

つぎに、各漂砂量が地形変化に及ぼす影響を検討する。図-4は、波による漂砂量 q_w のみ、底面における定常流速による漂砂量 q_{cb} のみおよび浮遊漂砂量 q_s のみで計算した2時間37分後の離岸堤背後($y=50$ cm)および開口部($y=200$ cm)における縦断面地形を示したものである。図(a)から、 q_s と q_w による結果を比較すると、離岸堤背後の堆砂量はほぼ同程度であるが、断面地形に若干相違が見られる。波による漂砂量も汀線付近の地形に多大な影響を及ぼしていることがわかる。一方、図(b)の結果から、開口部では q_w および q_c による変化は小さく、 q_s が地形変化に大きく影響を及ぼしており、浮遊砂がバーの形成に寄与している。図-5は離岸堤背後の縦断面地形の計算結果と実験結果(図から読み取ったもの)を比較した一例である。比較のため渡辺ら(1984)の計算手法に基づき断面平均流速を用いて計算した結果も同時に示してある。なお、実線が本モデル、破線が断面平均流速を用いた場合の計算結果であり、○印が実験値を表す。この図から、Q-3Dモデルの方が実験値と良く一致し、断面平均流速を用いた場合より、離岸堤背後のトンボロ地形を良く再現することがわかる。

以上の結果から戻り流れも同時に計算でき、開口部におけるバー地形やトンボロ地形を容易に計算できることがわかった。特に、離岸堤背後のトンボロ地形については、従来の2DHモデルを用いた場合に比較して再現性が良いことがわかった。

4. 現地海浜に対する適用性

4.1 赤碕港の概要と現地観測結果

赤碕港の改修事業に伴う周辺の波浪、海浜流および漂砂の動向を把握するために1997年12月26日～翌年4

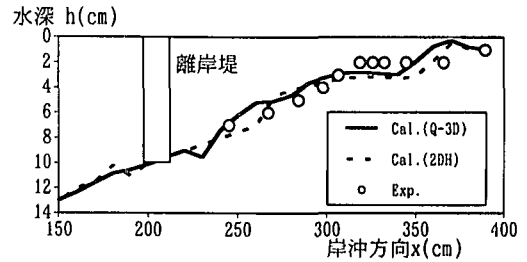


図-5 離岸堤背後の断面地形の計算結果と実験結果との比較

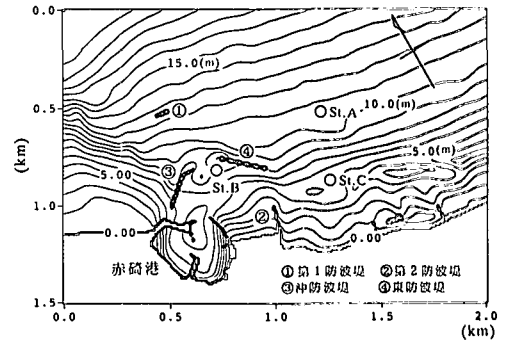


図-6 赤碕港の概要とその周辺の海底地形

月3日までの約3ヶ月間実施された現地調査結果を用いて本モデルの現地適用性について検討する。

赤碕港は鳥取県中部に位置する地方港湾である。図-6は赤碕港の概要と周辺の海底地形を示したもので、図中に示す○印は観測点を示し、各点において波浪および海浜流の観測が行われた。なお、St.Cでは波と流れ観測に加えて光学式砂面計による海底地盤高の変動調査も行われた。図-7(a)～(c)は1月10日～30日までの各測点における波、流れおよび海底地盤高変化の測定結果の一例を示したものである。これらの図から、1月15日に4 mを超える波が来襲し(St.A)、St.Bでは最大48 cm/s、St.Cでは約86 cm/sの海浜流が発生している。St.Cではわずか1日で海底面が約90 cm上昇し堆砂が生じた。その後、波浪が2～3 mであっても地形変化に大きな変動はない。このような短期(暴浪時)に発生する海底の変動を精度良く予測することは長期の海浜変形予測を行う上で重要であると考えられ、本研究では、この暴浪時(1月15日)に対して再現計算を試みる。

4.2 計算条件

計算領域は図-6に示した範囲、すなわち岸沖方向に1.5 km、沿岸方向に2.0 kmを取り、格子間隔は波浪場では5 m、海浜流および地形変化の計算では10 mとした。波浪条件は、1月15日0時～16日0時までの間にSt.A

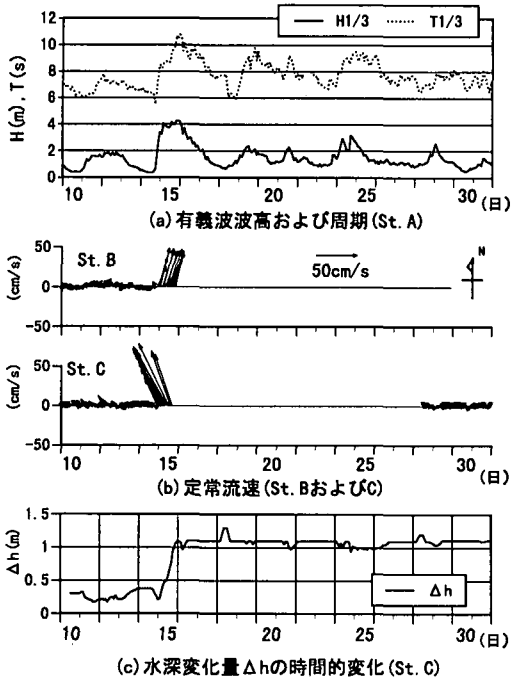


図-7 現地観測結果の一例 (1998年1月10日～1月30日)

表-1 波浪条件

	波高(m)	周期(s)	波向
St.A	3.9	9.3	26.0
沖波	4.13	9.3	24.4

で2時間毎に観測された有義波の平均値を沖波に換算し再現計算における入射条件とした。計算に用いた波浪条件は表-1に示すとおりで、沖波の平均有義波波高 $H_{1/3}$ は4.13 m、周期 $T_{1/3}$ は9.3 sであった。波向も同様に St. Aにおいて観測された卓越波向から沖波の波向に換算し、磁北から24.4度(NNE)で、実際の計算では x 軸に対し5.6度で入射させた。

比較のため断面平均定常流速を用いた渡辺ら(1984)の手法に従って再現計算も試みるが、現地の場合は漂砂量係数や波による漂砂の方向関数の設定が実験室レベルと異なるため、本研究では丸山(1987)の手法に従って再現計算を試みた。

4.3 計算結果

図-8および9は2DHモデルによる断面平均定常流速およびQ-3Dモデルによる底面定常流速の計算結果を示したものである。図中の・印は砕波点、太い矢印は観測結果を模式的に示したもので、St. Bでは46 cm/s、St. Cでは80 cm/sである。St. B周辺における両モデルを用いた計算による海浜流の流向は観測値のそれとは異なる

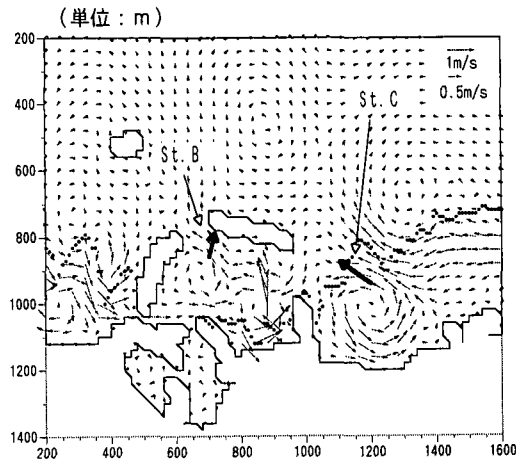


図-8 2DHモデルを用いた暴浪時における断面平均定常流速の計算結果

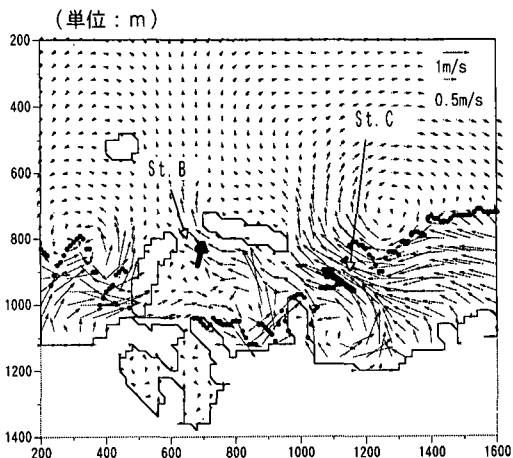


図-9 Q-3Dモデルを用いた暴浪時における底面定常流速の計算結果

が、2DHモデルの流速値は50 cm/s程度でほぼ実測値に近い値を示す。一方、Q-3Dモデルのそれは約60 cm/sで過大評価し、構造物近傍では再現性があまり良くないことがわかる。St. C周辺では、2DHモデルを用いた場合、定常流速は40~60 cm/sとやや過小評価する。一方、Q-3Dモデルの場合、1 m/sを超える流れが計算され過大評価するが、流向は2DHモデルの結果と比較して観測値と良く一致する。また図-9の結果から、汀線付近では、冲向きの戻り流れが計算されており、図-8の2DHモデルによる計算結果と異なることが明らかである。

最後に、暴浪時における海底地形変化の計算結果を示す。図-10は断面平均流速を用いて丸山(1986)の手法に基づいて計算した暴浪時の地形変化の計算結果で、初

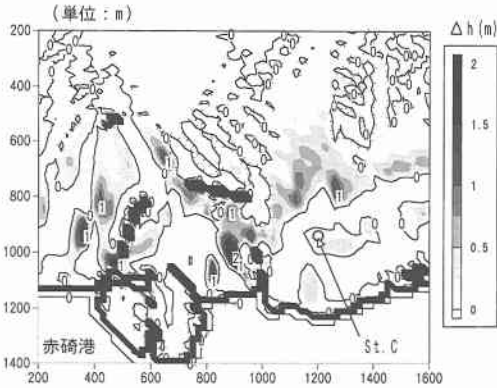


図-10 2DH モデルを用いた暴浪時の海底地形変化の計算結果

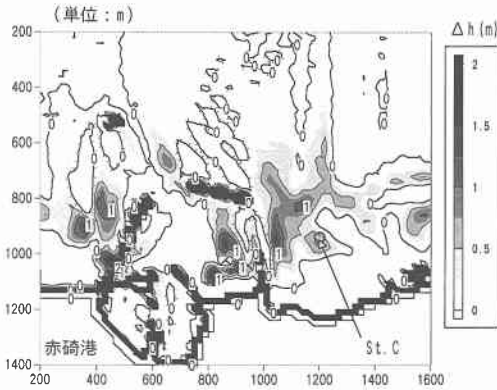


図-11 Q-3D モデルを用いた暴浪時の海底地形変化の計算結果

期地形との差を取って表した堆積領域を示したものである。図-11はQ-3Dモデルを用いて計算した同様の結果を示したものである。図中に示す○印が海底地盤高測定点(St.C)である。図-10の結果から、断面平均流速を用いた場合、St.Cの周辺は堆積領域であるが、その地盤の変動量は観測値に比較して小さく、約10~30cm程度の上昇量である。一方、図-11から本モデルを用いた場合、断面平均流速を用いた場合に比較してSt.C周辺の堆積範囲は広く堆積量も多い。St.C周辺の地盤高の上昇量は約60~80cmで、観測値に近い値であり、本モデルを用いた方が従来のモデルより再現性が良いと言える。以上の結果から、暴浪時における地形変化の予測を行う場合、流れの3次元性を考慮する必要があることがわかる。

5. おわりに

本研究では、準3次元海浜流モデルを用いた3次元海浜変形予測モデルを提案し、構造物周辺における海浜変形を計算し、モデルの適用性について検討した。得られた結果は以下に示すとおりである。

1) 実験室レベルにおける離岸堤背後の海底地形変化の再現計算を試みた結果、従来の2DH海浜流モデルを用いた場合より、離岸堤背後のトンボロ地形が精度良く再現できた。

2) 黒岩ら(1998)の準3次元海浜流モデルを暴浪時の現地に適用した結果、赤碕港周辺の海浜流場を概ね再現できたが、港口付近、すなわち構造物近傍の流れの再現性がやや劣り、再検討する必要がある。

3) Q-3Dモデルを用いて赤碕港における暴浪時の海底地形変化を再現した結果、従来の2DHモデルを用いた場合より再現性が良く、流れの3次元性を考慮した3次元海浜変形予測の必要性を確認した。

最後に、数値計算するに当たり惜しまなく協力して戴いた公成建設㈱の星山修一氏(当時大学院2年生)に感謝の意を表する。

参考文献

黒岩正光・野田英明・芳地康征(1997): 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.
 黒岩正光・野田英明・中島孝昌(1998): 構造物周辺における準3次元海浜流モデルの適用性に関する研究, 第45巻(1), pp. 196-200.
 清水琢三(1996): 海浜変形シミュレーション, 1996年度(第32回)水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, 土木学会, pp. B-5-1~B-5-26.
 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.
 柴山知也・Winyu Rattanapitikon・岡安章夫(1994): 砕波帯内の浮遊砂量算定モデル, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 431-435.
 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.
 西村仁嗣・丸山康樹・平口博丸(1983): 直接数値積分による波の場の解析, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 123-127.
 原田智弘・柴山知也・栗原明夫(1997): 浮遊砂を考慮した準3次元海浜変形過程モデルの提案, 土木学会第52回年講概要集第2部, pp. 146-147.
 丸山康樹(1987): 海底地形変化予測モデルの現地適用性, 電力中央研究所報告, No. U87012, 35 p.
 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榎山 勉(1984): 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.
 Rakha, K. A. and J. W. Kamphuis(1997): A morphology model for an eroding beach backed by seawall, Coastal Engineering, Vol. 30, pp. 53-75.