

Hybrid-type 3次元海浜変形モデルの構築とその適用

申 承鎬^{*}・山口 洋^{**}・入江 功^{***}・一田 剛^{****}

1. はじめに

北部九州沿岸は、「筑前八松原」とも呼ばれる白砂青松の海岸が連なっている。現在の空港は容量が近い将来満杯になることから、海上空港の建設が検討されつつあるが、このような大規模な沖合構造物は、比較的水深が深い10m～20m前後の沖合に建設されるため、構造物の背後には広域の遮蔽域が発生することになる。このような広域にわたる波高及び波向分布の変化は、構造物背後の新しい沿岸漂砂と相俟って、沖浜帯にも大規模な循環流による漂砂を発生させることから、汀線付近から沖合までの広域な海浜変形に留意する必要がある。

本研究では、沖合構造物の建設による背後の海浜変形を精度よく予測するため、詳細な3次元移動床実験および蛍光砂実験により明らかになった漂砂移動機構を踏まえて、沖浜帯と碎波帯、波打ち帯の海浜変形が計算可能な hybrid-type の3次元海浜変形予測モデルを構築し、3次元移動床実験結果と比較検証した。また、大規模人工島の建設に伴い、海浜変形問題が実際に起こっている現地海岸に適用し、その妥当性を検証した。

2. 沖合構造物背後の漂砂の移動パターン

2.1 3次元移動床実験の概略

詳細な実験内容は申ら(2000, 2001)により述べてあるので、ここでは概略だけを述べる。実験には長さ20m、幅9m、深さ60cmの平面水槽を用いた。まず、初期断面として中央粒径0.16mmの砂で一様勾配斜面(1/20)をつくらせて直角入射の波(波高:5.0cm, 周期:1.0s, 規則波)を作用させ、自然海浜に近い地形を形成させた上で汀線に平行な沖合構造物を設置した。また、著しい侵食域であった二箇所(図-1のCおよびD域)に蛍光砂を色分けして投入し、再び造波して移動を追跡した。追跡は、時間ごとの撮影(ブラック・ライト使用)およびサンプリングによる蛍光砂の粒数計測により行った。

実験によれば、図-1に示したように、汀線付近と遡上

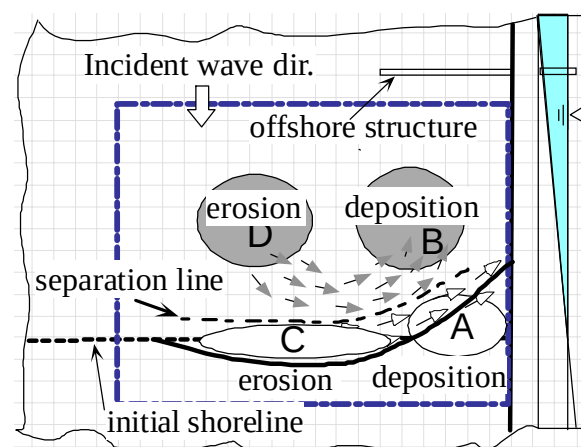


図-1 沖合構造物背後の漂砂移動パターンの模式図

帯に置かれた赤の蛍光砂(C域)は、汀線付近の激しい波の運動(遡上帯のジグザグ運動および汀線付近の強い流れ)により比較的速い速度で移動し、構造物背後の汀線形状が波の入射方向とほぼ直角になった所で着した(造波再開後4時間)。しかし、この赤色蛍光砂の移動は、汀線から限られた距離内に拘束されており、移動方向は主に沿岸方向となっていることが分かった。一方、沖浜帯の侵食域(D域)に置かれた緑色蛍光砂の運動パターンは、主に波の運動に応じた岸沖方向の往復運動が基本になっているが、平均的には沖合構造物背後の海浜循環流により徐々に移動し、循環パターンの中心付近(B域)まで移動して停滞した。また、緑色蛍光砂の移動は、汀線側の赤色蛍光砂の移動に比べ遅く、汀線付近の形状がある程度整った後(2時間後以降)、本格的な移動が起こったように見えた。

2.2 沖合構造物背後の漂砂移動機構

本研究における沖合構造物背後の海浜変形に対する一連の実験によれば、沖合構造物背後における漂砂の移動パターンは；①汀線側と水深域の海浜変形の機構が相互に独立しており、②遡上帯を含む汀線側は等深線に対する波の入射方向に支配された漂砂移動が卓越し、③沖合の水深域では波の往復運動による掃流・浮遊砂が海浜流に乗って移動し、④これらの二つの移動パターンがある境界を基準に分離されている。⑤また、汀線側と沖側での地形変化速度においても差があり、汀線側の変形が先行し、沖側の地形変化は汀線側の変形の後を追って生じ

^{*} 正会員 工博 九州大学大学院 研究員 工学研究院

^{**} 正会員 工修 若築建設(株)技術本部技術研究所

^{***} 正会員 工博 九州大学大学院 教授 工学研究院

^{****} 学生会員 九州大学大学院 工学府

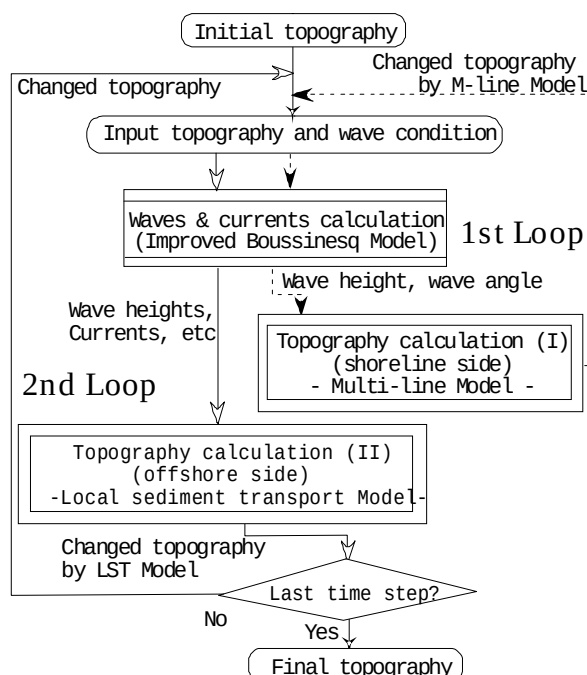


図-3 Hybrid-type3次元海浜変形予測モデルの計算フロー

た地形に対する波浪・流れ場を再び計算し、更新された波・流れを外力として沖合の水深域の海浜変形を計算する(図-3の2nd loop)。この方法によれば、入射波の条件が一定であったとしても、海浜地形の変化に伴って波浪や海浜流の場も時々刻々と変化するはずである。このような影響を取り込むためには、図-3の波浪・流れ場や地形変化の計算全体(1st & 2nd loop)を、短い時間間隔で繰り返さなければならないことになる。しかしながら、実際にはそれぞれの計算量がかなり大きなものになるので、loop計算を頻繁に行うのは必ずしも容易ではない。実用上は、最終的に目標とする海浜変形の予測精度と計算所要時間などをにらみ合わせて、loop計算の回数及び間隔を設定する必要がある。

4. 移動床実験結果との比較によるモデルの検証

4.1 計算条件

a) 漂砂移動の外力場モデルの計算条件

漂砂移動の外力である波浪・海浜流の計算は、修正 Boussinesq モデルを用いて行い、モデル検証のために計算に用いた地形は、移動床実験から得られた自然海浜に近い地形(離岸距離 3m)であり、全ての計算条件を実験条件と同一に設定した。計算に当たって、空間格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 0.1\text{m}$ とし、時間間隔は $\Delta t = 0.5 \times 10^{-2}\text{s}$ で入射波の周期の 1/200 である。

b) 地形変化モデルの計算条件

前述のように、hybrid-type の 3 次元海浜変形計算においては、2 つの漂砂移動パターン別の計算領域に分離するための境界を設定しなければならない。2.1 節で行った蛍光砂の移動実験結果では、静水面からの水深が約 2cm で分離が現れたことから、本計算では水深が 2cm に

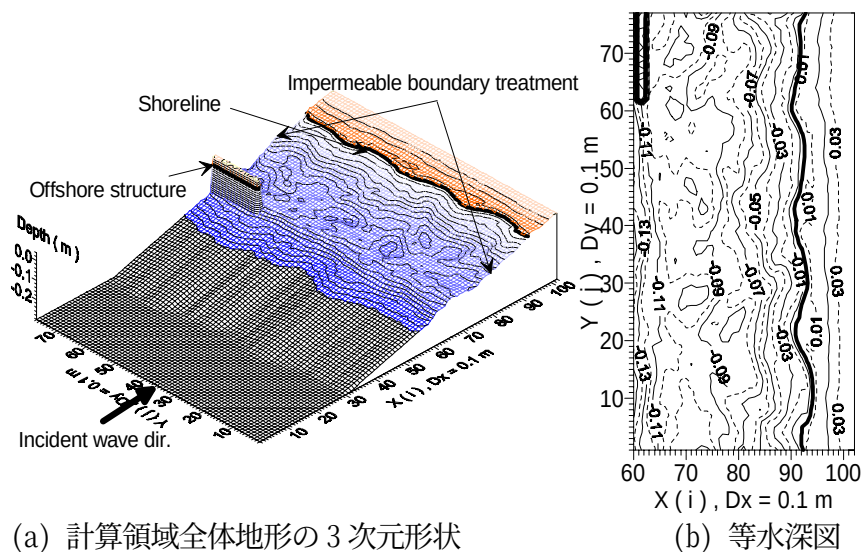


図-4 3次元海浜変形計算の初期入力地形(離岸距離 3m, $t = 4:00$)
(図 b は移動床実験における地形測定範囲のみ)

なる所に分離境界を設けた。すなわち、水深 2cm 以上の領域は水深モデルで、以浅の領域は multi-line モデルで計算することになる(申, 2000)。

水深モデルによる水深 2cm 以上の領域の計算においては、波および流れの漂砂量係数 A_w , A_t は、それぞれ 0.04, 0.4 を設定し、海底勾配影響係数 E_s は、1.0 とした。

一方、Multi-line モデルにおいては、汀線側の計算のために 4 本の line を設定し、実験結果から得られた波の遡上高を第一番目の line(-2cm)、また二番目を汀線(0.0cm)、三番目を水面下 1cm、そして四番目を漂砂移動境界である 2cm と設定した。沿岸漂砂量算定においては、小笹・Brampton の式を用いており、漂砂量係数は試行錯誤計算により最終的に $K_1 = 0.4$, $K_2 = 1.8K_1$ とした。

前章で述べたように、図-3 に示した hybrid 計算においては、波・流れといった漂砂移動の外力の計算を頻繁に行うことは容易ではない。そこで、本計算では、3 次元移動床の実験過程についての考察から、30 分程度の時間が経過すれば地形は波および流れ場に対して顕著な変化をもたらすと判断し、30 分間隔で外力場の計算を更新することにした。具体的な計算の流れを図-3 に従って述べると、まず、初期勾配 1/20 の一様斜面から 4 時間造波して作用させた自然海浜の地形(準平衡状態、沖合構造物設置直後、図-4)を計算における初期地形として入力し、波・流れ場を求めた。次に、multi-line モデルを用いて 30 分間の汀線側の地形変化を計算する(1st loop)。汀線側の 30 分間の変化地形に対する領域全体の波・流れ場を再び計算した後、水深モデルを用いて 30 分間の沖合の地形変化を計算すると(2nd loop)、領域全体の 30 分間の海浜変形が得られる。今回の検証においては、計算上の初期地形から 2 時間後の計算結果を対象としているので、上記の計算プロセスが 4 回繰り返されることになり Boussinesq モデルは 8 回、水深モデルおよび multi-line

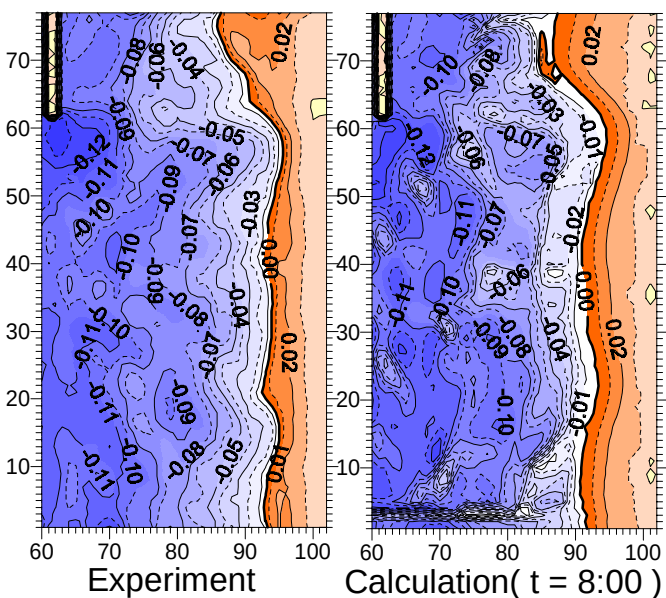
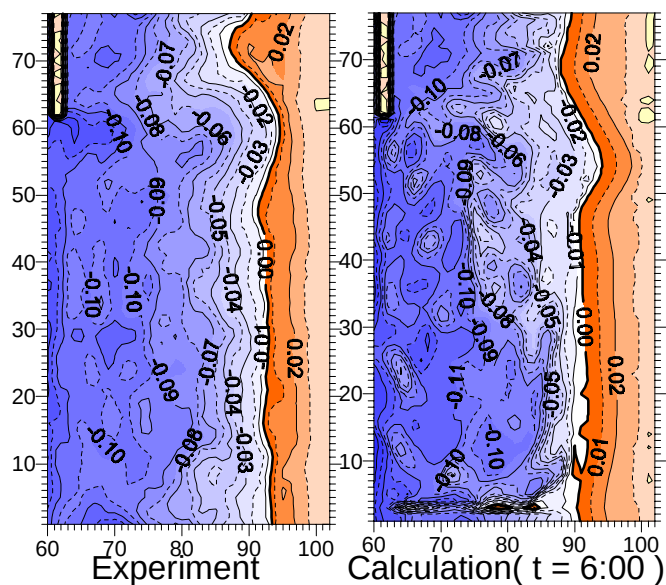


図-5 沖合構造物背後の地形変化(上：6時間、下：8時間)

モデルがそれぞれ合計4回ずつ計算されることになる。

4.2 計算結果の分析

図-4に示すように、実験から得られた自然海浜は、階段状の断面勾配を持ってかなり安定しており、沖合に構造物を設置しない限り若干の変化はあるものの、そのままこの形状を保つものと期待される。本計算では、まず、この条件を計算上の初期断面として入力し、沖合構造物の設置に伴う地形の変化を計算した。なお、計算結果の分析などは地形の測定範囲内だけを取り出して行う。

本研究の hybrid-type モデルを用いた4時間目および6時間目の波浪・海浜流場の計算結果の特徴を述べると、4時間目の地形(図-4)における波浪・海浜流の計算結果は、実験地形を用いているので、複雑な波浪・海浜流場が現れるが、沖合構造物背後での循環流は確実に形成されていた。また、6時間目の地形における計算結果と4時間目のそれを比較すると、海底地形の変化に伴い、背後での碎波点の位置や循環流の中心の変動などが目立ち、汀線側における4時間目の0.16m/sの最大流れが6時間目においては0.13m/s程度に弱まっていた。

地形変化の計算結果は図-5に示されている。図-5の6

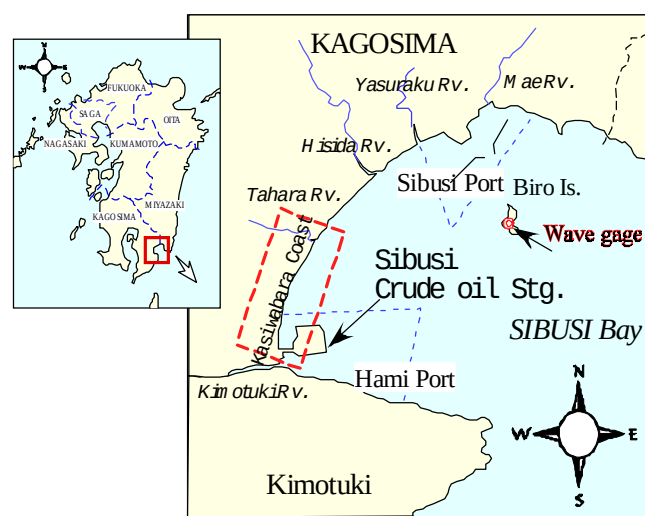


図-6 対象海岸の位置

時間目の計算は、準平衡海浜(図-4)を初期地形として入力し、30分ごとの外力更新をしながら6時間目の地形を計算したものであり、図-5の8時間目の地形計算結果は、6時間目の実験地形に対して同様の計算をした結果である。

各々の同時刻の実験結果と比較すると、トンボロの形状や侵食・堆積の位置などは完璧には一致していないものの、沖合構造物背後のトンボロの再現や沖側の水面下で食み出ている堆積域はもちろん構造物外側の侵食・堆積域がかなり高い精度で再現されていることが分かる。

特に、6時間後の双峰型のトンボロの再現はもちろん、8時間後の地形の特徴である単峰型のトンボロへの遷移までよく再現できていることは興味深い。

5. 現地への適用性の検討

ここでは、前章までに構築した hybrid-type 3次元海浜変形予測モデルを現地に適用し、どの程度の再現性が得られるかについて調べる。対象とした海岸は、図-6に示したような鹿児島県志布志湾に面する海岸として、沖合500m地点に人工島式の石油備蓄基地が1984年度末に着工され、1987年6月には196ha規模の外郭護岸が完成し、1993年12月から全面操業を開始したところである。

対象海岸地区では基本的には、土砂が季節的な波浪条件の違いにより沿岸方向の南北に移動しており、比較的安定していたと考えられる。しかしながら、人工島建設により波の遮蔽域が形成され、その遮蔽域へ流入した土砂が継続して堆積し、遮蔽域から外側には流出しないことが主な地形変化の原因になり、図-7の沿岸方向3.5km付近の侵食が激しくなったと推定される(申, 2000)。ここでは現地での再現性を検討するため、外郭護岸が完成された1987年6月の地形から3年後(1990年)までの地形変化(図-7)の再現計算について述べる。

5.1 計算条件

海岸において海浜変形特性の分析(申, 2000)により、

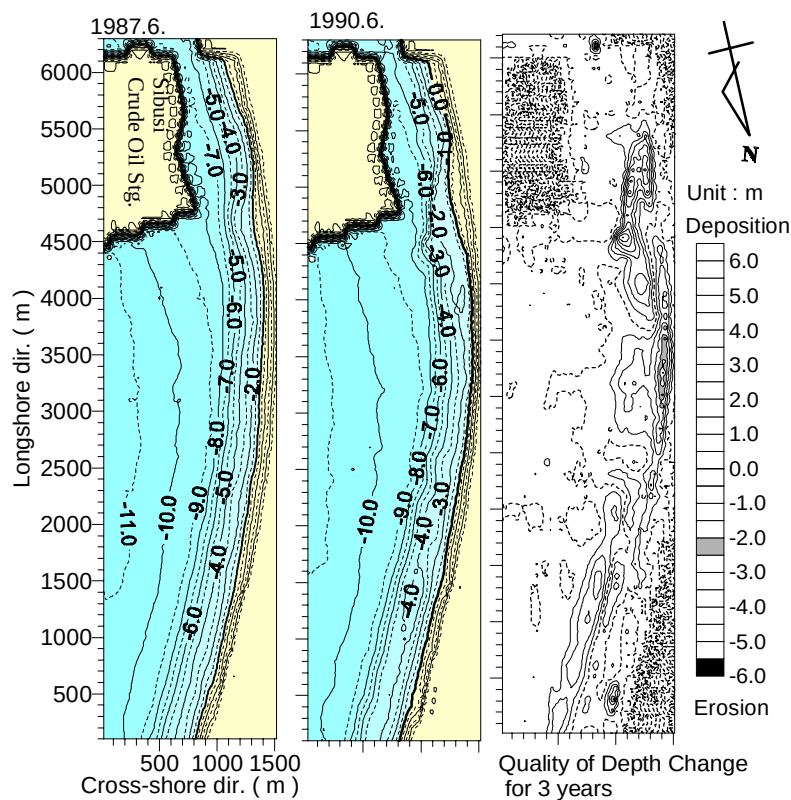


図-7 対象海岸の等水深図と地形変化(外郭護岸完成後3年)

対象海岸の海浜変形の主な原因は高波浪と考えられることから、再現期間3年の間には波高3m以上の高波浪時が9回であったのを参考にして毎回の高波浪の持続日数を4日間と仮定し、合計36日分の高波浪($H=3.0\text{m}$, $T=10.0\text{s}$)を入射波として与え、海岸地形の変化を計算することにした。波向きについては、昭和58年から昭和60年までを対象として実施された波浪推算結果を参考にESE系を主波向とし、計算格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 5\text{m}$ で設定した。

本来ならば、本研究で提案する hybrid-type 海浜変形計算は、図-3の計算フローにしたがい、一回の loop 計算に当たって、multi-line および水深モデルの計算をするたびに毎回波浪場を計算し、その結果を踏まえて次の loop 計算をするべきであるが、対象領域が広大なことから計算時間の負担が大きいため、1987年6月の地形に応じた波浪場の計算を行い、予測期間である3年まで波浪場は変わらないと仮定して multi-line および水深モデルの計算だけの9回の loop 計算で海浜変形を計算した。

5.2 計算結果の分析

図-8は、1987年6月の地形を初期地形とし、3年後の地形変化を計算した結果であり、左図は海浜流、中央の図は3年後の地形を、右図はその水深変化量の計算結果を表している。図-8の全体を見てみると、沖合構造物による波の遮蔽域形成に伴う典型的な変化である周辺域の侵食や背後の堆積がよく再現されており、現地への適用性が確認されたといえる。特に、その結果は汀線だけでなく、現地測量結果(図-7の右)に見られる沖側の侵食・堆積まで再現されており、本モデルの長所である汀線から沖合までの海浜変形予測における有効性を確かめること

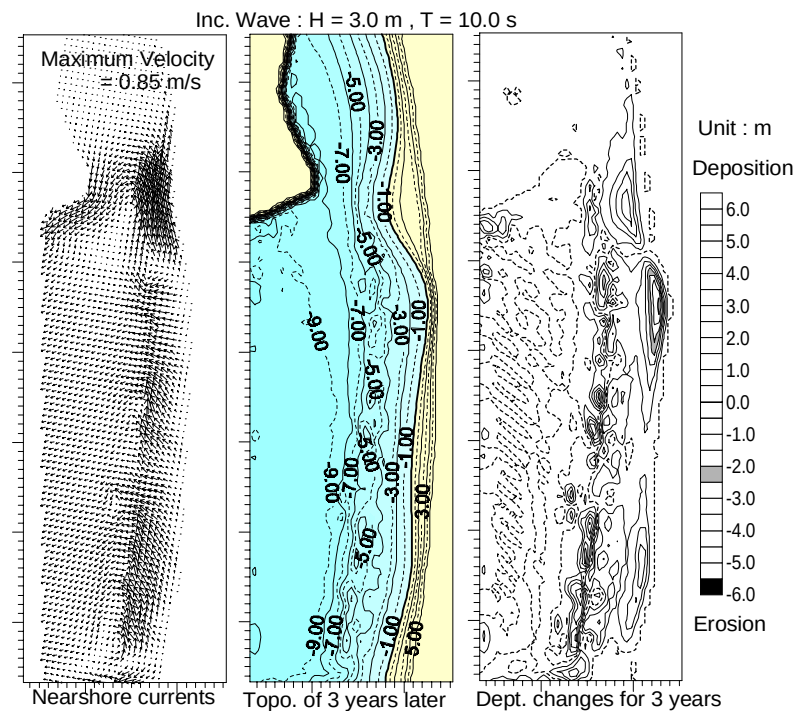


図-8 Hybrid-type 海浜変形モデルによる計算結果

ができる。このような沖側での変形の傾向は、図-8の左図に示した高波浪時の海浜流の計算パターンと傾向が一致しており、広域の地形変化を取り扱う場合には、当該海域における海浜流のパターンまで考慮することが望ましいことが分かる。また、このような広域にわたる海浜循環流は主に高波浪時に起こることを考慮すると、海浜変形計算をする際には平均エネルギー代表波だけで計算する従来の入射波選定方針では不十分と思われる、対象領域が広域になればなるほど当該海岸の変形に大きく拘わる入射波の選定には格別な注意を払う必要があると考えられる。

6. おわりに

本研究では、移動床実験による漂砂移動パターンの分析を踏まえて、hybrid-type の新たな3次元海浜変形予測モデルを構築した。さらに3次元移動床実験との比較を行ってモデルの再現性を検討し、沖合構造物背後のトンボロの再現や沖側での水面下堆積域、構造物外側の侵食・堆積域がかなり高い精度で再現されていることを確認した。また、大規模人工島の建設に伴い、海浜変形問題が実際に起こっている現地海岸の海浜変形予測計算に適用し、現地への適用性を検証した。

参考文献

- 石橋正穂, 宇多高明, 岸田正人, 清水生一(1983): 皆生海岸における海浜地形変化の解析, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 234-238.
- 宇多高明, 河野茂樹(1996): 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No.539/II-35, pp. 121-139.
- 窪 泰浩, 小竹康夫, 磯部雅彦, 渡辺 晃(1991): 非定常緩勾配不規則波動方程式について, 海岸工学論文集, 第38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.

- 申 承鎬(2000): 沖合構造物背後の海浜変形機構とそのモデル化に関する研究, 九州大学大学院学位論文, 190 p.
- 申 承鎬・入江 功・一田 剛(2000): 沖合人工島の設置位置による海浜変形の相違について, 海洋開発論文集, 第 16 巻, pp.303-308.
- 申 承鎬・山口 洋・入江 功(2001): 沖合構造物背後の海浜変形機構に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第 17 巻, pp.547-552.
- 渡辺 晃, 丸山康樹(1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値モデル, 海岸工学論文集, 第 31 巻, pp. 406-410.
- 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.