

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 10 m~20 m 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 20 m, 幅 9 m, 深さ 60 cm の平面水槽を用いた。まず、初期断面として中央粒径 0.16 mm の砂で一様勾配斜面 (1/20) をつくって直角入射の波 (波高: 5.0 cm, 周期: 1.0 s, 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

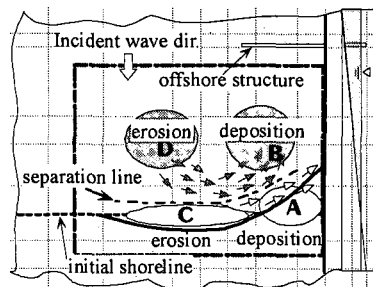


図-1 沖合構造物背後の漂砂移動パターンの模式図

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落した (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ていることがわかった。

* 正 会 員 工博 九州大学大学院 研究員 工学研究所
** 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 工学研究所
**** 学生会員 九州大学大学院 工学府

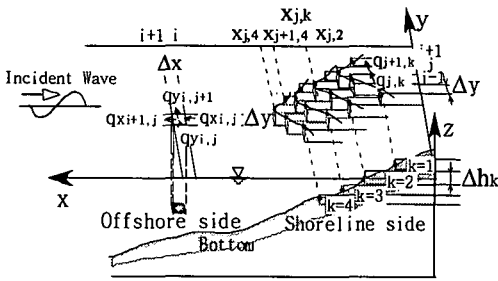


図-2 Hybrid-type 地形変化モデルの概要

これらの分析から、沖合構造物背後における、沖側水深域と極浅水領域とは現象が異なることから両現象の支配領域別に計算することが精度向上につながると考えられる。そこで、本研究では、沖合の場合、波・流れによる局所漂砂量計算に基づいた水深モデルを、遡上帯を含む汀線付近の場合は、砕波点での波向きや波高に依存する沿岸漂砂量計算の岸沖分布に基づく multi-line モデルをそれぞれ用いる、いわゆる hybrid-type 計算モデルを提案する。

3. Hybrid-type 3次元海浜変形予測モデルの構築

3.1 漂砂移動の支配領域別の計算モデル

本研究の3次元海浜変形モデルの構築において、波浪・流れ場の計算には、修正ブシネスク方程式 (Madsen ら, 1992) を用い、底面摩擦項と片山・佐藤 (1993) により提案された波別砕波による運動量拡散項を付加し、砕波判定には波別解析法 (窪ら, 1991) を用いた。

地形変化計算モデルは、前章までに明らかにした2つの漂砂移動パターン別に領域を分離して計算するため、図-2に示すように、岸側は沿岸漂砂量とその岸沖方向の分布を考慮した multi-line モデルで、移動パターン分離境界から沖側は波・流れによる浮遊・掃流漂砂量に基づいた局所漂砂量モデルで構築した。

a) 水深モデル

本研究での水深モデルは、まず、底面せん断応力が限界掃流力を超えた時、移動状態になった砂が平均流あるいは波によってそれぞれの方向に運ばれるとして、流れによる漂砂量フラックスと波による漂砂量フラックスにわけて定式化されたものである局所漂砂量モデル (渡辺ら, 1984) を選定することにした。

b) Multi-line モデル

宇多・河野 (1996) は、等深線の沖向き距離の時間的・空間的变化を調べる方法 (石橋ら, 1983) で、全国各地を調査し、現地海浜において沿岸漂砂の場所的不均衡により生じた海浜変形では、浅海部より前浜のバーム頂付近までの等深線が汀線の動きと対応し時・空間的にほぼ

同一モードで移動する例が非常に多いことを示し、砂の移動限界水深までの等深線の動きを汀線の動きに結び付ける等深線モデルを提案した。しかし、前章の移動床実験などから明らかになったように、沖合構造物背後の海浜変形においては、汀線付近と沖側域での漂砂移動機構が互いに独立していることから、本研究における汀線付近の海浜変形計算では、波の遡上位置から漂砂移動の分離境界までの範囲においては沿岸漂砂量算定式を基にした multi-line モデルで計算することにした。

図-2の汀線側における各 line の漂砂の連続式は次式で表される。

$$\frac{\partial x_k}{\partial t} + \frac{1}{D_{nk}} \frac{\partial q_{sk}}{\partial y} = 0, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

ここに、 x_k : k 番目線の位置、 D_{nk} : k 番目線の漂砂移動層の厚さ、 q_{sk} : k 番目線の沿岸漂砂量、 k : line 番号、 n : line の本数である。

沿岸漂砂量は、構造物による波の回折や遮蔽域の形成などを考慮して、 y 方向の各セル j における砕波点での波高 H_{bj} と波向き α_{bj} 、また、汀線角 α_{sl} などを用いた小笹・Brampton の式をベースにして算定し、その各 line 別の岸沖分布量は、宇多・河野 (1996) にない同様の分布関数で分配することにした。また、数値計算上発生しうる個別 line 間の急勾配防止のためには、宇多・河野 (1996) と類似した方法で隣り合う line 間での砂の移動を考慮することにした。すなわち、毎 time step において、隣り合う line 間 ($k+1, k$) の勾配が line ごとに定められた平衡勾配 ($\tan \delta_k$) より急勾配 ($\tan \delta_k$) になった場合には、再び平衡勾配に戻るよう、line 補正値を求め、隣り合う line に対して補正を行う。本計算における line ごとの平衡勾配は、移動床実験において、初期 1/20 の一様斜面から 4 時間造波後の準平衡断面における line ごとの勾配を平衡勾配とした。この場合、汀線を基準にして、遡上帯の勾配は約 0.15、水面下は 0.17 前後であった。

3.2 Hybrid 計算法

前章で述べたように、汀線付近と沖合の水深域での地形変化速度には差があり、汀線側の変化が先行することから、領域分けの hybrid 計算ではそれを反映させ、図-3に示す計算フローに従って進める。すなわち、まず、初期の地形データと入射波のもとに、Boussinesq モデルを用いて波浪・流れ場を計算する。次に計算された波の諸元の中で、砕波点での波高、波向きなどを外力として汀線側の multi-line の移動を計算する (図-3の 1st loop)。この計算により汀線付近の地形が変化するので、変化し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

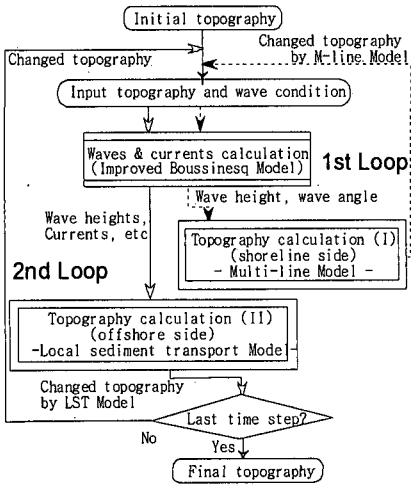


図-3 Hybrid-type 3次元海浜変形予測モデルの計算フロー

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

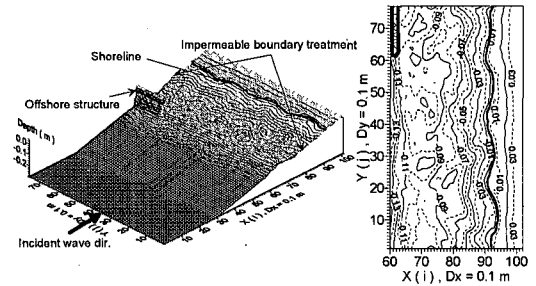
4.1 計算条件

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 3 m) 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 2 cm で分離が現れたことから、本計算では水深が 2 cm になる所に分離境界を設けた。すなわち、水深 2 cm 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)。



(a) 計算領域全体地形の 3次元形状 (b) 等水深図

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

水深モデルによる水深 2 cm 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_c 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 (-2 cm)、また二番目を汀線 (0.0 cm)、三番目を水面下 1 cm、そして四番目を漂砂移動境界である 2 cm 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 $K_1 = 0.4$, $K_2 = 1.8 K_1$ 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 モデルがそれぞれ合計 4回づ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

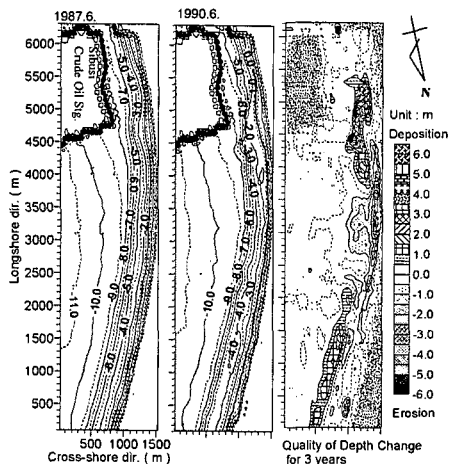


図-7 対象海岸の等水深図と地形変化（外郭護岸完成後3年）

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、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

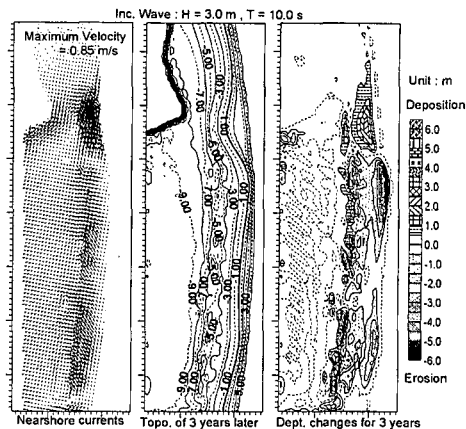


図-8 Hybrid-type 海浜変形モデルによる計算結果

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, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Madsen, P. A. and O. R. Sorensen (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics Part 2, *Coastal Eng.*, Vol. 18, pp. 183-204.