

港内埋没対策技術と地形変化予測モデルの開発

中山哲巖¹・牧野弘幸²・新井雅之¹・大村智宏³
小林 学⁴・田村 仁⁵・灘岡和夫⁶・佐藤勝弘⁷

港内埋没の原因とされる浮遊砂輸送ならびにその主たる外力であるサーフビートを考慮できる地形変化予測モデルを開発した。開発した非線形分散波方程式モデルを用いた浮遊砂輸送モデルについて、模型実験との比較により波高やサーフビート等の水理特性の妥当性を検証した。このモデルでは波浪、海浜流による浮遊砂の巻き上げが考慮されるため、サーフビートのみを考慮した場合とは異なる箇所で侵食堆積が現れ、波浪や海浜流を考慮することの重要性を示した。現地適用性等の課題は残されているが、港内埋没対策工法として海水導入工および港内の T 型突堤の効果について検討し、海水導入工が効果的であることを示した。

1. はじめに

砂浜に位置する漁港では、漂砂移動により航路や泊地が埋没するなど、漁港機能に支障をきたす例が非常に多い。漁港は比較的浅海域に存在するため、激浪時には漁港周辺が全て碎波帯内に含まれることとなる。このため、漂砂移動が激しく、航路や泊地において堆砂を生じさせ、周辺地形にも影響を与えることが問題とされてきた。

港内埋没は、主として高濃度の浮遊砂が港内へ輸送されることにより生じるものと考えられる。松本ら (1993)、中山ら (1994) は、千葉県飯岡漁港において現地調査を行い、サーフビートによって港口部周辺で発生した水平大規模渦に浮遊砂がトラップされ、この渦が港内へと輸送されることにより港内埋没が生じることを指摘している。また、中山ら (2005) は水理模型実験により、港内に投入したビーズは主としてサーフビートに伴う流れや渦により移動することを示している。このようなことから、港内埋没を評価するためには高濃度浮遊砂の港内への移流・拡散・沈降過程を適切に捉えることが重要である。

従来の 3 次元海浜変形解析では、まず定常な波浪場、海浜流場を計算するが、港内の波浪は回折等により小さくなる結果、港内への流入や港内での流れは小さくなる。このため、港内での漂砂移動は殆ど算出されない。これは、漁港内では相対的に影響度が大きくなるサーフビート等の長周期の現象が考慮できないためである。構造物端等に発生する渦による浮遊砂輸送や浮遊砂の非平衡性を考慮することが港内埋没のメカニズムを明らかにする上で重要であると考えられる。

中山ら (2005) は以上を考慮してサーフビートのみを考慮した浮遊砂輸送計算を行った。その結果、港内航路への堆積が見られたが、対策として検討した海水導入工による港内への導水量が増加するに従い、堆積量も増加する結果となった。しかし、実際は航路部では回折波が大きく浮遊砂は巻き上がると考えられ、港外へ輸送される可能性がある。

本研究では、浮遊砂の港内への侵入を抑制する工法を開発するとともに、浮遊砂移動、港内埋没過程を適切に評価できる浮遊砂輸送モデルを開発することを目的とし、これまでのサーフビートのみを考慮したモデルを改良し、加えて波浪および海浜流も考慮したモデルを作成した。

2. 浮遊砂輸送モデルの概要

(1) サーフビート計算モデル

サーフビートのみを対象とした地形変化計算については、これまで著者が浮遊砂輸送計算に用いてきた非線形長波方程式モデルについて遡上を考慮できるモデルに改良し、浮遊砂輸送モデルとカップリングした。

(2) 非線形分散波方程式モデル

波浪、海浜流、サーフビートを考慮したモデルとして、本研究では非線形分散波方程式モデルを用いた。非線形分散波方程式モデルには、修正ブシネスク方程式モデルを適用し、浮遊砂輸送モデルとカップリングした (以降、波浪計算モデルは「非線形分散波モデル」、地形変化計算モデルは「非線形分散波浮遊砂モデル」として区別する)。

修正ブシネスク方程式モデルは、平山ら (1998) による非線形波浪モデル (NOWT-PARI ver4.6c3) をベースとし、計算の安定性、精度向上のために、移流項に 2 次精度の風上差分 (Donnar-Cell 法) を用いた。さらに、碎波による拡散項には、差分近似の際に現れる項の一部のみを次の時刻の値 (未知数) とし、それにより発生する流量の不整合を後から補正する SSI (Symmetrical Semi-Implicit) 法を適用した。また、移動境界を適用し、波の遡上や干出にも対応している。移動境界につい

1 正会員 工修 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所

2 工修 (財)漁港漁場漁村技術研究所

3 正会員 (独法)水産総合研究センター水産工学研究所

4 正会員 国際気象海洋(株)

5 正会員 工博 (独法)海洋研究開発機構

6 フェロー 工博 東京工業大学大学院情報理工学研究所情報環境学専攻

7 正会員 工修 (財)漁港漁場漁村技術研究所

ては、平山ら（2004）に倣い、越流公式を用いた処理を行っている。

（3）浮遊砂輸送モデル

浮遊砂輸送モデルは、（1）サーフピートのみを考慮したモデル、（2）非線形分散波浮遊砂モデルともに田村ら（2004）の非平衡性を考慮した準3次元浮遊砂輸送モデルを用いた。浮遊砂濃度の成分数は、田村ら（2004）と同じ3成分とした。中山ら（2005）と同様に沈降速度はRubey式とし、pick-up rateはNielsen（1992）が用いた実験式を適用した。なお、鈴木ら（2004）は実験との比較により、Rubey式、Nielsenの実験式を用いた方法では浮遊砂濃度が実験値よりも1.5倍程度大きく計算されることを示している。本モデルでも浮遊砂濃度は過大となっている可能性があり、今後現地に適用するにあたり検証が必要である。

両モデルとも浮遊砂の計算は瞬時の底面せん断力で決定され、地形変化は流動場の計算に逐次考慮される。なお、浮遊砂輸送モデルでは、水平拡散係数として、サーフピートのみを考慮したモデルでは領域一様に $0.05\text{ m}^2/\text{s}$ を、非線形分散波浮遊砂モデルでは碎波領域に関しては波浪場計算の際に算定される拡散係数を0.03倍したものを、その他の領域に関しては $0.05\text{ m}^2/\text{s}$ を一様に与えた。なお、ともに鉛直拡散係数は $0.01\text{ m}^2/\text{s}$ とした。

3. 非線形分散波モデルの波浪流況場計算の妥当性

非線形分散波モデルの妥当性を評価するため、短周期波高、長周期振幅、水位上昇量、平均流ベクトルおよび内港、外港2地点の水位のスペクトルについて、水理模型実験（中山ら、2005）と比較した。対象としたモデル漁港は図-1のとおりであり、波高3.6m（水深20m）、周期10sの1方向不規則波を作用させた。数値計算における構造物の反射率は、消波工を想定した主防波堤前面が0.6、その他は直立壁を想定し1.0としている。数

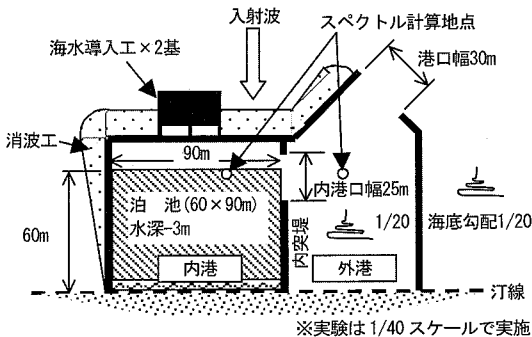


図-1 モデル漁港

値計算における空間分解能は2m、時間間隔は0.05sとした。なお、実験は1/40スケールで実施されている。

実験結果ならびに計算結果を図-2～図-6に示す。短周期波高、長周期振幅ならびに水位上昇量については入射地点での換算沖波波高で無次元化している。平均流は実験値を現地スケールに換算している。また、両者の水位のスペクトルは、図-1に示す内港、外港2地点で比較した。なお、実験で得られた水位は現地スケールに換算している。比較の結果、以下のことが言える。

①短周期波高、長周期振幅および水位上昇量は実験結果よりもやや小さめに算出されたが、いずれも港内分布の傾向は似ている（図-2、図-3、図-4参照）。

②平均流ベクトル（図-5）は、実験と同様の傾向を示している。実験の空間分解能が計算より大きい（50cm間隔）ものの流れのパターンは概ね合っている。計算では構造物周辺で発生する渦の影響が現れているが、実験では空間分解能が大きいため現れていない可能性がある。

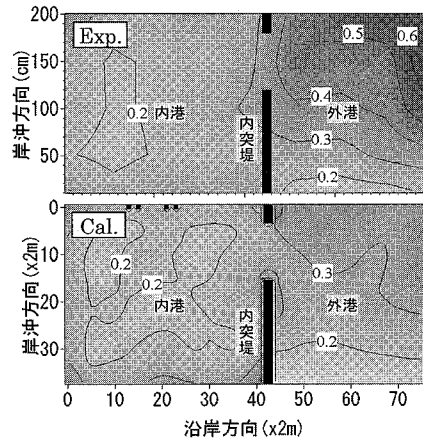


図-2 短周期波高分布 ($H_{1/3}/H_o'$)

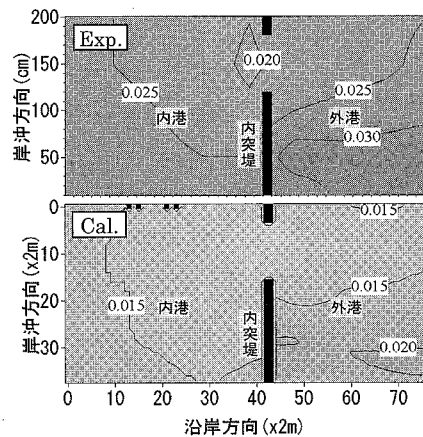


図-3 長周期振幅分布 (ζ_{rms}/H_o')

数値計算結果は実験結果よりも小さく算出されている。

③スペクトル(図-6)は、外港、内港のいずれも全周波数帯で計算値の方が小さいが、ピークの現れる周波数はほぼ一致し、 $f > 10^{-2}$ ではスペクトル形状が概ね合致している。低周波側では実験との差が大きい。これは水路振動の影響が現れたものと考えられる。

以上より、非線形分散波モデルは波浪やサーフビート、

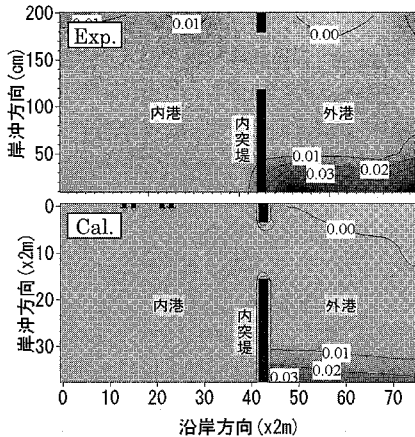


図-4 水位上昇量分布 (η_{avg}/H_o')

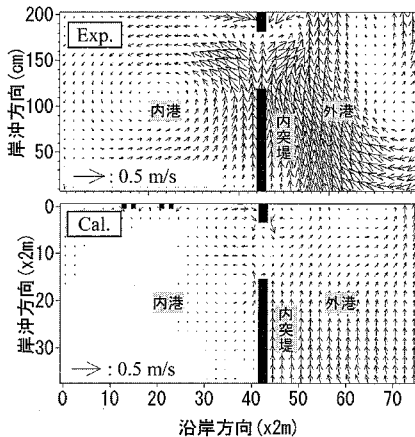


図-5 平均流ベクトル

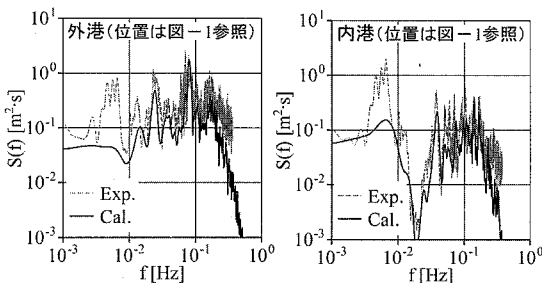


図-6 水位のスペクトル (実験は現地スケールに換算)

それに伴う流れを全体的にやや小さめに計算している。しかし、いずれの結果も模型実験と同様の傾向を示しており、浮遊砂輸送計算に適用できるものと判断した。

4. 地形変化予測計算

①サーフビートのみを考慮したモデルと、②非線形分散波浮遊砂モデルの両モデルにより地形変化予測計算を実施した。高波浪の継続時間を考慮して、ここでは2時間後の地形変化を計算した。底質は一様粒径0.2 mm、比重2.65 t/m³とした。検討港形は図-1のとおりである。

(1) サーフビートのみを考慮した場合の地形変化

サーフビートのみを対象として地形変化計算を実施した。波浪条件は中山ら(2005)と同様に模型実験で得られたサーフビートの振幅約0.1 m・周期約75 s(水深20 m)を入射させた。

計算結果を図-7に示す。サーフビートのみによる港内の地形変化の特徴は以下のとおりである。

- ・内突堤先端周辺で洗掘が生じる。
- ・内港口を挟んでその両側で堆積傾向となる。

港内において浮遊砂の巻き上がりが生じるのは概ね構造物近傍であり、外港航路での堆積は内突堤周辺で巻き上げられた浮遊砂が輸送されて沈降したのと考えられる。なお、この対策として、内突堤周辺の流れを制御することが有効と考えられた。そこで、内突堤をT型にして計算を行った結果、航路における堆積量が減少した。T型突堤により内突堤近傍に形成される渦が分割され、浮遊砂輸送に対して効果的となる結果が得られた。また、中山ら(2005)が検討した海水導入口(詳細は後述)については、堆積位置は変わるものの、浮遊砂は港外まで輸送されず航路に堆積する結果となった。

(2) 非線形分散波浮遊砂モデルによる地形変化

非線形分散波浮遊砂モデルを用いて、サーフビートだけでなく波浪、海浜流も考慮して地形変化予測計算を実施した。波浪条件は3.と同様である。また、浮遊砂計算の時間間隔は0.1 sとした。ただし、非線形分散波浮遊砂モデルでは、浮遊砂輸送計算の安定性から汀線を固定境界とし、かつ最小水深を2 mと設定して計算を実施している。

計算結果を図-8に示す。このモデルにおける地形変化の特徴は以下のとおりである。

- ・構造物端(主防波堤、副防波堤、内突堤)で大きな洗掘が生じる。
- ・内港口の図中左側で堆積傾向となる。
- ・航路は概ね侵食傾向となる。
- ・副防波堤の屈曲部背後で堆積傾向となる。

サーフビートのみを考慮する場合の計算と比較すると、以下の特徴が見られる。

①いずれのモデルも内突堤周辺において侵食傾向、内港泊地で堆積傾向となっており、特に内港側で似た地形変化を示している。

②航路部については、サーフビートのみの計算では内港口近くで広く堆積するが、非線形分散波ではこれが見られない。これは、波浪を考慮することにより航路でも巻き上がりが生じるため、サーフビートのみの場合に比べて堆積しにくかったものと考えられる。

③副防波堤の屈曲部ではサーフビートのみの場合は堆積しないが、波浪・海浜流を考慮すると堆積する。これは、構造物端（主防波堤、副防波堤）で巻き上げられた浮遊砂が比較的静穏な副防波堤屈曲部で沈降・堆積したのと考えられる。

以上の結果から、港内においては両モデルで似た地形変化傾向を示すものの、堆積位置が異なる等の相違点も見られる。港内では、浮遊砂の輸送外力となる波浪、海浜流、サーフビートの相対的な大きさが大きく変化する。港口部では波浪、サーフビート、海浜流ともに大きい。港奥に向かって、波浪、海浜流の影響が低減し、サーフビートが卓越する。

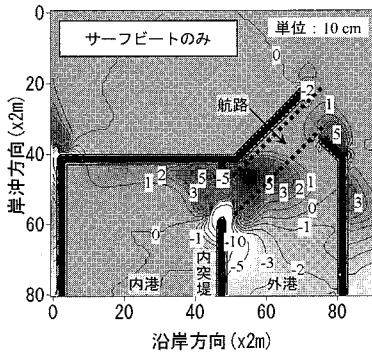


図-7 サーフビートのみ考慮した地形変化計算結果

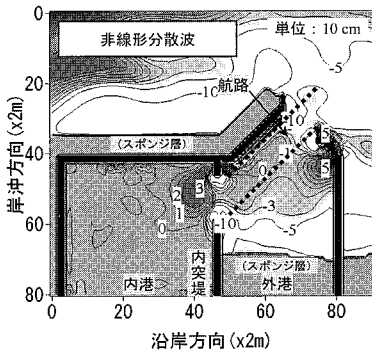


図-8 波浪・海浜流を考慮した地形変化計算結果

5. 港内埋没対策工法の効果

非線形分散波浮遊砂モデルを用いて港内埋没対策工法の効果を評価する。

(1) 検討工法の選定

港内埋没対策工法として以下の工法を検討する。

a) 海水導入工

中山ら (2005) により港内埋没対策として有効だと示されている。サーフビートのみの計算では航路で堆積する結果となり、その有効性を明確に示すことができなかった。しかし、波浪により港内で浮遊砂が巻き上がり、海水導入により強化された港外への流れにより浮遊砂が港外へ輸送されることが期待できる。

海水導入工は浮遊砂が導入工から侵入しないような処理を施した潜堤式海水導入工を想定し、計算においては導水工を通過する浮遊砂フラックスはないものとした。港内への導水量は模型実験結果から得られた導水量 (1基当たり 500 cm³/s, 模型縮尺 1/40) を現地スケール換算し、港内外の各 1 格子において導水量分だけ水位を加減した。

b) T型突堤

サーフビートのみによる計算において、内港口周辺の水深維持に効果的であった。波浪や海浜流を考慮した計算においても内突堤近傍が洗掘を受けていることから、サーフビートのみの場合と同様に渦を分割および縮小させ、浮遊砂輸送の抑制効果を期待した。

(2) 各工法の効果

計算ケースは①導水工 1 基, ②導水工 2 基, ③ T型突堤, ④導水工 2 基 + T型突堤の 4 ケースとした。波浪条件や底質条件等の計算条件は 4. と同様である。

図-9 に②導水工 2 基 (通常突堤), 図-10 に③ T型突堤 (導水工無し) のケースについて、それぞれ地形変化計算結果を示す。また、図-11 に各ケースの内港堆積箇所および航路における堆積量を示す。

a) 海水導入工

導水工 1 基の場合は浮遊砂を外港へ移動させる外力が小さく、港内埋没に対する効果も小さい。導水工 2 基の場合は港外へ向けての流れが強くなり、内港、航路とも堆積箇所はほとんど見られない (図-9)。海水導入がない場合は内突堤端部において形成される渦が数十秒継続するが、導水することにより渦の規模が小さくなる、あるいは発生しなくなった。導水しない場合に堆積していた図-11 の領域 A, 航路領域 B ともに堆積せず、港内埋没対策として効果的であると推察される。

b) T型突堤

外港側については、内突堤直近を除いて、地形変化は通常の場合とほとんど変わらない。内港側では堆

積が見られるものの堆積量は減少しており、T型突堤の効果認められる。ただし、波浪や海浜流等の作用により、サーフビートのみの計算で現れた程の効果は算出されなかった。

海水導入工2基を併せて設置すると図-11の領域A、Bともに侵食する結果となる。特に領域Aの堆積量は通常突堤・導水工2基の場合よりも少なく、内港側の埋没対策として効果的であると考えられる。

6. ま と め

以上、まとめると以下のとおりである。

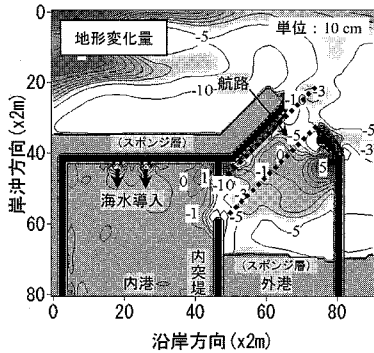


図-9 導水工2基の効果

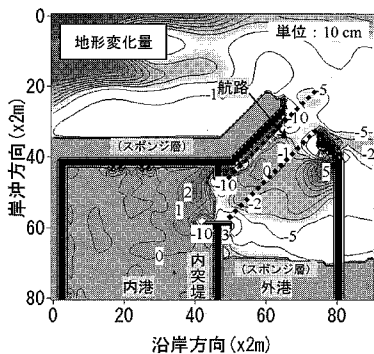


図-10 T型突堤の効果

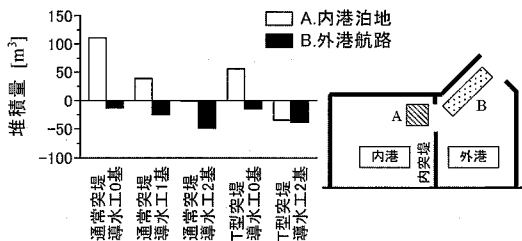


図-11 港内の堆積量

①非線形分散波モデルを用いた波浪流況の計算結果は、水理模型実験と同様の傾向を示し、波高や水位上昇、サーフビート等の妥当性を示した。

②サーフビートのみを考慮した浮遊砂輸送計算と波浪・海浜流も考慮した浮遊砂輸送計算では、港内においては類似の地形変化傾向を示すものの、堆積位置が異なる等の相違点が現れた。波浪や海浜流の考慮により浮遊砂の移動形態が異なることを示唆している。

③海水導入工を設置すると港内から港外へ向かう流れが卓越し、浮遊砂の港内への侵入を抑制するとともに港内で巻き上げられた浮遊砂を港外へ輸送する働きがあるため、航路の水深維持に効果的であると考えられる。

④サーフビートのみの計算で港内埋没に対して有効とされたT型突堤は、浮遊砂を内港へ輸送する渦を分割もしくは小さくするため、効果は認められるが、サーフビートのみの計算に比べて効果は小さい。

⑤今後の課題としては、遡上を考慮した浮遊砂輸送計算モデルの開発、現地適用性の検証、砂を含まない海水導入を行うための技術の開発等が挙げられる。

なお、本研究は、水産基盤整備委託事業費(課題名:海水導入工を利用した港内埋没防止技術の開発)により行ったことを付記する。

参 考 文 献

鈴木宗之・岡安章夫・柴山知也(2004): 砕波による時空間的浮遊砂濃度変動の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 381-385.

中山哲殿・新井雅之・大村智宏・小林 学・田村 仁・灘岡和夫・半沢 稔(2005): 海水導入工による港内埋没対策に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 481-485.

中山哲殿・山本 潤・松岡道男・池田正徳・竹内聖一・灘岡和夫・八木 宏(1994): 中小港湾湾口部に発生する水平大規模渦についての現地観測, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 321-325.

灘岡和夫・田村 仁・飯塚広泰(2004): 中小港湾湾口部に発生する水平大規模渦による浮遊砂流入特性に関する数値解析-浮遊砂流入から見たハーバーパラドックス-, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 451-455.

平山克也・上原 功・永松宏一・平石哲也(1998): 珊瑚礁リーフにおける波と流れの計算法の適用性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 161-165.

平山克也・平石哲也(2004): プシネスクモデルによる砕波・遡上計算法とその適用性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 11-15.

松本 朗・松岡道男・中山哲殿・山本 潤・灘岡和夫・八木 宏(1993): 中小港湾埋没機構解明に向けての長期連続現地観測の試み, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 491-495.

山本正昭・中泉昌光・間辺本文(1987): 潜堤付防波堤による海水交流工法の開発, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 675-679.

Nielsen, P.(1992): Coastal bottom boundary layers and sediment transport, World Scientific, River Edge, N.J., p.324.