

常陸那珂港作業基地航路埋没対策について

Countermeasures against sedimentation at the entrance in a small port

片山忠*・守屋義一**・上濱輝男***・宮崎和行****・南将人*****

Tadasi.Katayama, Yosikazu.Moriya, Teruo.Uehama, Kazuyuki.Miyazaki and Masato.Minami

In order to investigate the countermeasures, the sea bottom changes are predicted using a three dimensional mathematical model; in the model the current velocities near the bottom which are obtained in laboratory experiments are utilized and the deposition process due to the convective movement of suspended materials is taken into account. The construction of a Jetty or a detached breakwater at the updrift side of the port is effective against the sedimentation since it shifts the accumulation area away from the entrance.

Keywords: sedimentation in port, mathematical model, laboratory experiment

1. はじめに

常陸那珂港は、東京都心から北東約110kmに位置し、北関東の流通拠点港やエネルギー港湾として開発を進めている(図-1)。現在、8000tf級の大型ケーソンの製作のための作業基地を整備すべく、第一船溜予定地に防波堤や護岸の建設を進めている。同図に示すように、完成時形状に対し北突堤と南突堤が完成し、南側の屈曲部から沖側の防波堤の工事を進めている状況である。当該海岸は、延長約10kmに亘り、沿岸漂砂の卓越した砂浜である。そのため、突堤の建設によって岸沖方向の漂砂移動を生じ港口部付近の埋没が懸念される。埋没が起こるとケーソンの引出し時に支障をきたす恐れがある。このため、現地調査及び水理模型実験を実施し、その成果を用い、底質の移流沈降過程を考慮に入れた数値計算による予測手法を用いて埋没対策工について検討した。

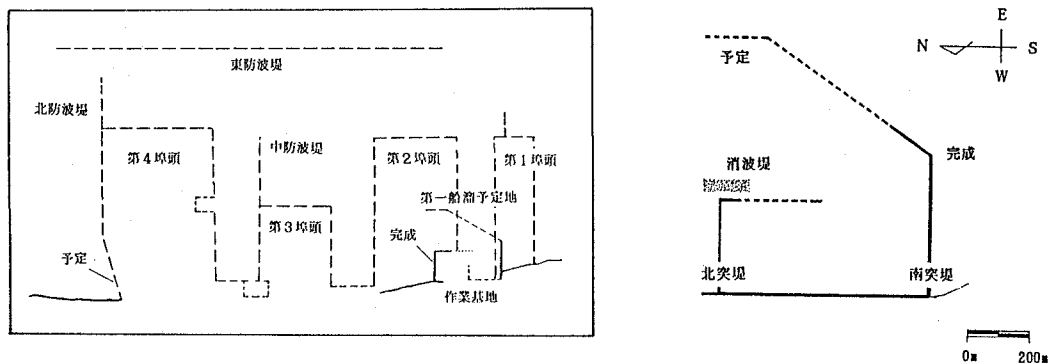


図-1 作業基地の位置と形状

2. 調査方法および内容

埋没対策工について検討するためには、将来の地形変化量を推定する必要がある。地形変化量の推定には、移動床模型実験や数値シミュレーションによる海浜変形予測等がある。数値計算では、汀線の長期的変化を対象とした一次元海浜変形モデル、海浜または構造物周辺の空間的な地形変化を予測する三次元変形シミュレーション等が実施されている。本調査では、入江らの方法¹⁾に習い、波による底層流を固定床による水理模型実験(物理モデル)により求め、浮遊モデルと組合せ、底質の移流沈降過程を入れた海底地形変化に関する数値シミュレーション(数理モデル)を行って、海底地形変化量を算出し、対策工について検討した。

対策工としては、北突堤の沖側に設置している消波ブロックを転用することを想定し、その利用方法として、北突堤の北側に離岸堤、防砂堤を設置した場合について検討した。

* 正会員 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所所長

** 正会員 運輸省第二港湾建設局工務二課補佐官(〒220 横浜市高島1-2-5)

*** 正会員 運輸省第二港湾建設局鹿島港工事事務所所長

**** 正会員 (株)エコー 第一技術部

3. 予測条件

水理実験および計算に先立ち波浪観測記録、現地調査結果により、予測条件等を設定した。

波浪観測データは、常陸那珂港沖合（水深25m）で、1980年から1989年までの結果を用いた。波向出現率をみると、E,ESE方向の波向が最も出現頻度が高く、次いで、SE,ENEとなっている。

(1) 波高、周期

波高および周期は、出現頻度表を用い、移動限界水深を考慮したエネルギー平均波高周期を算定した。その際、限界シールズ数は、浮遊状態とシートフローの遷移領域を示す $\Psi=0.5$ 、移動限界水深は昭和59年7月と平成元年9月の深浅測量結果から水深帯別水深変化量を求めた結果、変化が小さくなる水深10mを用いた。その結果、波高2.26m、周期9.16sが得られた。

(2) 波向

波向は、上記のエネルギー平均波を用いて沿岸方向のエネルギーフラックスを保存する方法で求めた。算定に当たっては、港口部への影響を考慮し、作業基地周辺で汀線がやや北西から南東に傾いていることより、作業基地地点において、南向の漂砂を生じさせるN,NNE,NE,ENEの4波向の観測結果を用いた。その結果、代表波向としてE22.5°Nが得られた。

(3) 潮位、底質粒径

実験及び計算に用いる潮位は、長期的な変化を検討するために、平均潮位(D.L.+0.87m)とした。

また、地形変化の計算の際、底質の沈降速度が必要である。沈降速度の算定に必要な底質の粒径は、昭和59年9月と昭和60年3月に実施された底質の調査結果より、 $d_{50}=0.16\text{mm}$ が得られた。この値を用い、Rubeyの沈降速度公式を使用して算定した結果、沈降速度 $\omega_s=0.016\text{m/s}$ が得られた。

(4) 埋没対策工

図-2.1～2.4に検討対象とした対策工の形状を示す。

図-2.1は、基本計画の形状を示す。作業基地の建設中に北突堤の沖側に設置した消波堤は、建設作業用の静穏を確保するために設置したものである。これは、完成時には撤去する予定であり、暫定的な構造物である。

図-2.2は、北突堤の沖側に、200mの突堤を延長した対策案1を示したものである。延長した突堤の背後の水面を作業用に利用するために静穏を確保することも目的としている。

図-2.3は、対策案1に、防砂堤を設置した対策案2を示したものである。港口部の埋没は、作業基地の南側から回り込んで来る浮遊砂も存在するが、主に、北突堤の北側から南に移動する漂砂を抑えることを目的とした。本調査では、1個のみを設置してその効果がどの程度であるかを検討した。設置位置は、作業基地の北突堤より、北側に200m離れた位置である。沖側の位置については、通常、汀線から碎波帯までの距離の40～60%が目安とされている。この地点では、図中のP点（水深3.5m）にステップ型に堆積していることより、この付近が碎波帯と想定される。今回は、この位置まで延長することにより、防砂堤の効果を高めた。

図-2.4は、対策案1に離岸堤を設置した対策案3を示したものである。作業基地の北突堤から北側に100m離し、汀線と平行に長さ200mの消波堤を設置した形状である。

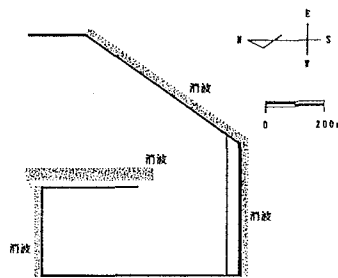


図-2.1 作業基地の形状（基本計画）

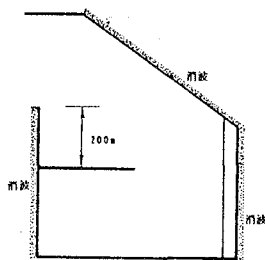


図-2.2 作業基地の形状
（対策案1：北突堤延長）

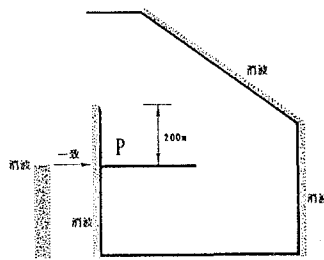


図-2.3 作業基地の形状
（対策案2：防砂堤）

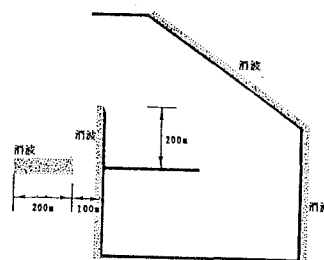


図-2.4 作業基地の形状
（対策案3：離岸堤）

4. 水理実験

漂砂量の計算に必要な外力条件（波高、底層流速）を模型実験により求めた。

模型実験は、運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所水理実験場で実施した。使用した平面水槽の諸元は、長さ46m×幅35m×高さ1mである。この水槽に平成元年10月に実施された深浅測量結果を用いて、現地海底地形を製作した。波高および底層流速の測定は、容量式波高計(13台)と電磁流速計(4台)を用いた。測定間隔は、模型1m（現地200m）格子を原則とし、港口部及び対策工付近では、適宜測定間隔を狭くした。測定と同時にパソコンを用いてA/D変換し（サンプリング間隔25Hz、サンプリング個数8192、約400波程度）、波高はゼロアップクロス法により、底層流は、X,Yの2方向の平均流を算定した。なお、電磁流速計は、測定中のドリフトの影響をなるべく抑えるために、約20点の観測前後にセンサーのゼロ点を測定し、ドリフト量を補正した。また、測定と同時に冷却した染料（メチレンブルー）を底層付近に流し、その移動方向を目視で観察した。

図-3.1～3.4に固定床実験の測定結果の一例を示す。図-3.1、3.2は波高の測定結果で、それぞれ基本計画、北突堤を延長した場合（対策案1）を示している。図は測定結果を格子補間し、平滑化の処理を施し、沖波との波高比を計算した結果である。現計画案の場合では、北突堤の北側の港口部で波高が高くなり、その分布は帯状となっている。北突堤を延長した場合は、港口部付近での波高比はほぼ同程度であり、延長した突堤の背後で波が減衰し、静穏域が確保されている。しかし、作業基地内の波高比分布をみると、基本計画より波高比が大きくなっているが、これは、用いた波向がほぼEに近く、図-3.2に示すa点とb点付近の反射波が作業基地内に進入するためである。

図-3.3,3.4は流速の測定結果である。それぞれ基本計画、突堤の延長（対策案1）の場合である。基本計画の形状では、汀線付近では南向の流れが生じており、北突堤から北側の汀線での様子はほぼ同じようである。作業基地周辺では、北突堤付け根付近から沖に向かう流れが生じ、汀線付近で速く、港口部付近でやや遅くなっている。北突堤を延長した場合は、作業基地より北側では、基本計画案とほぼ同様であるが、北突堤の付け根付近での岸沖方向の流れは、基本計画と比較して方向が一樣になっている。また、汀線と平行な沖の防波堤付近では、かなり速い流れが生じている。流れの向きを染料による目視観察の結果と比較すると、染料の移動方向と矢印はほぼ一致していた。この流速測定結果を平成3年1月28日から2月16日に実測された現地調査と比較してみると、この

観測期間において、北突堤の沖側では、来襲波高が1.0m以下であり、その時の底層流速（海底面上1.6m）はほぼ10cm/s程度であり、この値は、波高の増大とともに大きくなる傾向が見られている。また、この地点の流向は、南東に向いた沖出し流れであり、実験結果との流向はほぼ一致している。

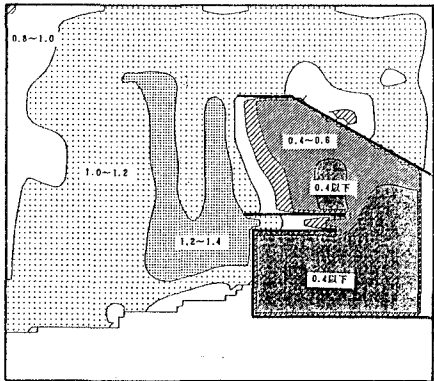


図-3.1 実験結果（波高比分布図：基本計画）

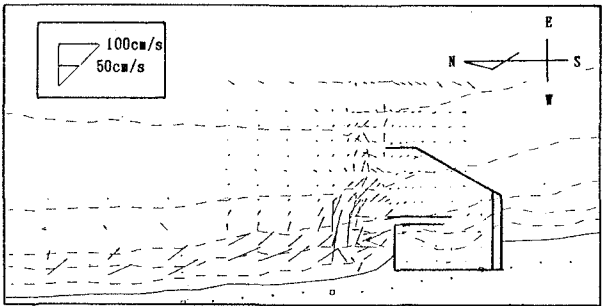


図-3.3 実験結果（底層流速：基本計画）

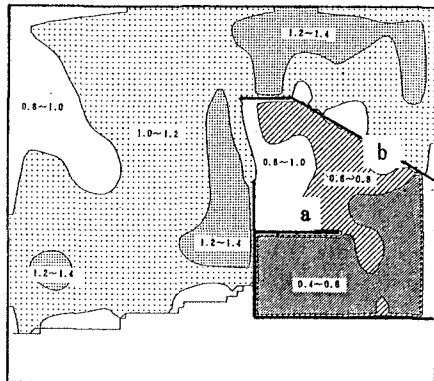


図-3.2 実験結果（波高比分布図：対策案1）

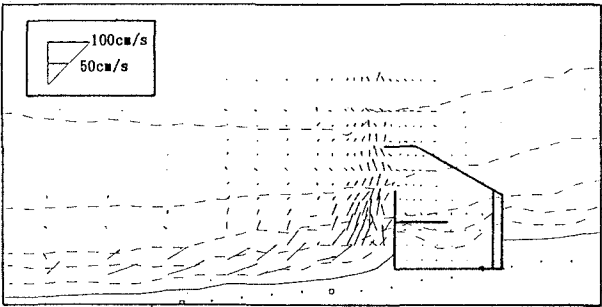


図-3.4 実験結果（底層流速：対策案1）

漂砂量の計算は、3層に分割し、式-1に示す浮遊砂の移流拡散式を用いて浮遊砂濃度の計算を行い、濃度が定常になった後に最下層の浮遊砂を対象として、式-2に示す底質の浮遊沈降による地形変化を計算した。浮遊砂濃度の移流拡散計算を行う場合の基本となる浮遊砂濃度の算定は、波と流れが共存する場合にも適応可能なBijkerの経験式²⁾を用いた。Bijkerによれば、浮遊砂濃度の鉛直分布は通常の対数分布をなすとしている。Bijker公式の経験常数Bは現地での底質粒径や埋没した時の締め固め状態等により様々な値を示すが、通常10以下であることより同公式の値(B=5)をそのまま使用して地形変化計算を行った。

ここに、添字のkは分割した層の番号を表し、c：浮遊砂濃度、D：厚さ、u, v, w：それぞれx, y, z方向の流速成分、K：水平方向拡散係数($K_x = K_y = 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$)、 γ ：内部境界面交換係数、 ω_s ：砂の沈降速度($=0.016 \text{ m/s}$)を表す。

ここに、 ε ：鉛直境界面交換係数、 c_b ：海底面において定義される浮遊砂濃度を表す。

上式の数値計算については、参考文献1)に詳しく説明されており、以下に計算の手順を示す(図-4)。

分割した3層の記号を図-5に示す。まず始めに固定床実験で得られた外力をより密な格子データにするためにスプライン法により補間した。測定は現地間隔200mであるので、補間は40m間隔で行った。次に、測定のパラツキを少なくするために、平滑化の操作を施した。その際、突堤等の地形条件を考慮し、対象点を中心に前後左右の計5点の重み付き平均とした。その回数は、前述の資料と同様に5回とした。次に底質の移流拡散の計算に必要な流体の連続性を確保するために流れの微調整を行った。調整は、流速の測定結果より鉛直流速を求め、これを固定し、水平流速を修正することによって行った。この操作を底層から上層に向かって順次行い、各層での水平および鉛直流速を求めた。表層においては、6時間の間に、出入りする水の体積が各セルの体積の10%以下になるように繰り返し計算を行った。次に底面付近での浮遊砂濃度の計算を行い、Bijkerの浮遊砂濃度公式を用いて算定される鉛直方向の濃度分布を初期値として式-1の移流拡散式を入力された流況に対し、各層の浮遊砂濃度が定常化するまで計算を行った。その際、境界上の濃度は、1格子内側の計算濃度に等しいとし、境界での濃度勾配はゼロとした。数値計算は、ADI法を用いて実施した。最後に各層の浮遊砂濃度が定常化した後、式-2により、海底地形の変化量の計算を行い、一年間分の移動量に外挿した。外挿は、流量の微調整を6時間で行っているため、得られた結果を1460倍することにより算定した。計算は、検討対象とする防砂対策工の形状に対応して全4ケース実施した。計算範囲は、水理模型実験の結果から、北突堤の北側の範囲では似たような流況であったために、北は設置した対策工を含む範囲、南は作業基地南突堤の範囲とし、格子間隔40m、81×71格子で計算を実施した。



6. 埋没対策案の検討

図-6.1～6.4に地形変化量のコンター図を示す。図-7.1～7.4は、地形変化量が1年間に30cm以上の地点を示したものである。

図-6.1および図-7.1は、基本計画の形状の計算結果である。図-6.1は、地形変化量が30cm以上生じている地点を50cm, 100cmごとの地形変化量のコンターを示したものである。図より、港口部付近で帯状に、そして、北突堤の消波工の北側で堆積し、それらの岸側で侵食している。図-7.1 (7.2～7.4も同様) は、30cm以上変化した地点のみを抜きだした結果である。図中の凸部は堆積して水深が浅くなり、凹部は侵食して深くなることを示している。計算の結果、堆積量が最も多いのは消波工の北東で1年間に最大120cm、港口部付近の平均地形変化量(図中の破線枠内)は約50cm程度であった。式-1の移流拡散式を用いると、外力の大きさに応じて、海底の砂が舞い上がり、流速によって運ばれるために、流れが遅くなる位置で、砂が沈降して堆積を生じるものと予想される。図-3.3の底層流速の測定結果と比較すると、ほぼこのような現象が生じており、流れが速い汀線付近や北突堤の消波工付近または、沖側の防波堤の岸側で侵食され、流れが遅くなった港口部付近や沖側防波堤の端部の岸側付近で堆積している。また、作業基地内部のように、流れがない場所では、港外から運び込まれる量がほとんどないことより、地形変化がみられない。

図-6.2は、ケーソン仮置きのために北突堤を延長した結果(対策案1)である。基本計画と比較して港口部の帯状の堆積域は見られないものの、北突堤の付け根付近での侵食が顕著であり、また、港口部の両端部で堆積が生じ港口を塞いでいる。その量は、沖側で20～60cm程度、岸側で30～90cm程度の堆積量となっている。基本計画に比べ、地形が変化している場所の範囲が狭く、港口部付近の地形変化量も小さくなっているもののかなりの堆積がみられる。

図-6.3は、防砂堤案(対策案2)の計算結果である。防砂堤の設置により、北から南に向かう流れが岸沖方向に変わる位置が、現計画案より北側にずれたために港口部付近での堆積位置は北側にずれているのが分かる。また、防砂堤と北突堤の間では、汀線が侵食その沖側で堆積する、岸沖方向の漂砂が生じている。基本計画と比較して港口部付近の平均地形変化量はほぼ0であるが、その北側(防砂堤の沖側:a点)では約30cm程度の堆積域が生じている。防砂堤の長さや突堤との間隔は、今後の検討項目であるけれども、底層流速の測定結果と合わせると、港口部でみられていた帯状の堆積域が、防砂堤の位置の分だけ北側にずれたものと考えられる。

図-6.4は、離岸底案(対策案3)の計算結果である。離岸堤と作業基地の間では、流れが速く侵食域となり、その沖側端部では堆積域となっている。港口部付近の平均地形変化量は数cm程度であるが、離岸堤の北側では迂回した流れにより、堆積位置が北側にずれ、港口部から離れた位置に30cm以上の堆積域が生じている。対策案1に見られるような港口部を塞ぐ堆積は見られないものの、離岸堤の北東の堆積域(b点)の存在により、ケーソン引出し時には、迂回する必要が生じるものと予想される。離岸堤の沖側での地形変化量が少なくなっているが、端部では大きな堆積域となる特徴が見られており、離岸堤の位置、長さ等については防砂堤と同様に今後の検討項目であり、現地

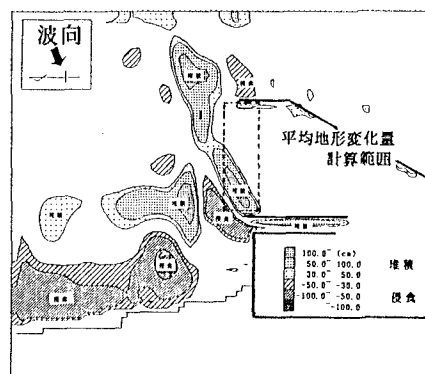


図-6.1 地形変化計算結果(基本計画)

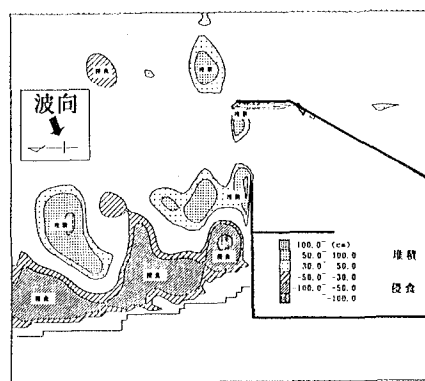


図-6.2 地形変化計算結果(対策案1)

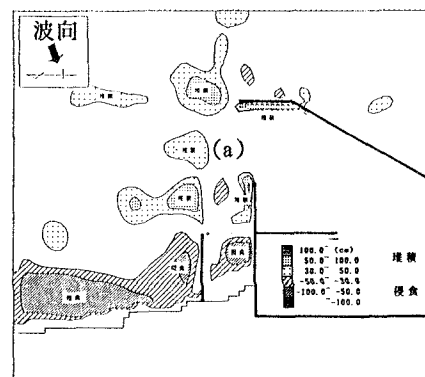


図-6.3 地形変化計算結果(対策案2)

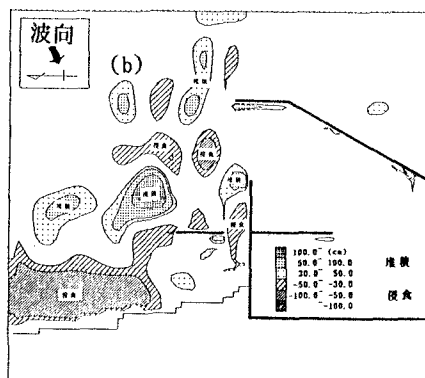


図-6.4 地形変化計算結果(対策案3)

の地形変化や工事の進捗状況等を考慮して決定する必要がある。

以上、基本計画を含め全4ケースについて模型実験と数値計算を実施して、航路埋没対策について検討した結果、防砂堤および離岸堤の設置により、港口部付近の堆積量の低減効果が期待される。それぞれに、堆積および侵食域に特徴がみられたが、実際に適用するに当たっては、設置位置や長さ等の検討が必要である。

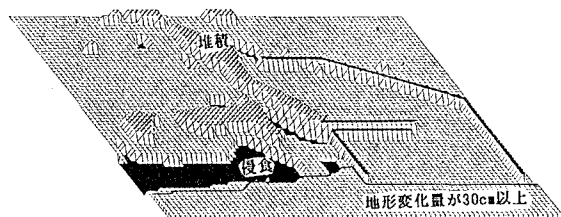


図-7.1 侵食および堆積位置（基本計画）

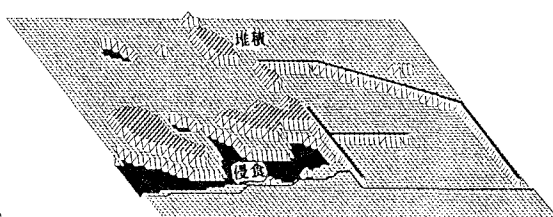


図-7.2 侵食および堆積位置（対策案1）

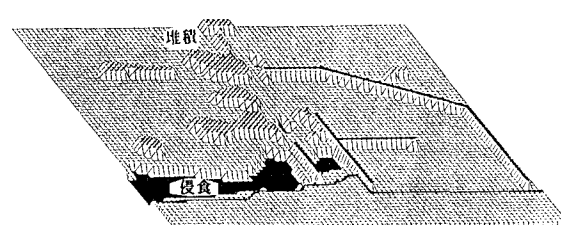


図-7.3 侵食および堆積位置（対策案2）

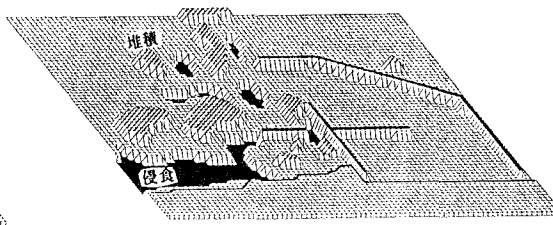


図-7.4 侵食および堆積位置（対策案3）

7. まとめ

固定床模型実験と浮遊モデルの組合せによる地形変化量の計算手法を用いて、常陸那珂港作業基地の埋没対策について検討した。その結果を以下に記す。

- (1) 基本計画による形状では、港口部に帯状に堆積域が生じる（図-7.1）。
- (2) 突堤を延長した場合は、港口部の堆積域は量的には小さくなるものの、かなり存在する（図-7.2）。
- (3) 防砂堤を設置した場合は、基本計画でみられた堆積は、防砂堤の設置した位置にずれる。港口部の中央での地形変化量は小さくなり、港口部の沖側に堆積が生じる（図-7.3）。
- (4) 離岸堤を設置した場合は、両端付近で侵食し、その沖側で堆積する。（図-7.4）。

以上、防砂堤や離岸堤の設置により、港口部付近の堆積量の低減効果が見られたが、設置位置や長さ等については今後の検討課題である。

最後に、本調査を実施するにあたり、終始御指導を頂ました港湾技術研究所水工部漂砂研究室加藤室長に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 入江功、栗山善昭：底質の移流沈降過程を入れた航路・港内埋没の予測
港湾技術研究所報告、第24巻、第2号、1985、6
- 2) Bijker: Littoral drift as function of waves and current,
Proc.11th Coastal Eng.Conf., ASCE, pp.415-435