

簡便な底質浮遊モデルを用いた海浜変形予測法の検討

平沢 充成*・水野 雄三*・柳瀬 知之*

1. ま え が き

微細な粒径の底質で形成されている海底地形上に防波堤などの港湾構造物を建設する場合、漂砂に伴う地形変化により建設中の施工性、建設後の維持管理上の経済性、船舶航行上の安全性などの面に悪影響を与える可能性がある。白老港は昭和57年度に新規着工された北海道で最も新しい地方港湾であるが、図-1に示すように広大な砂浜海岸である胆振海岸のほぼ中央に位置し、底質の中央粒径が0.14mmと非常に細かく防波堤の整備に伴い周辺地形に変化が生じていることから、上記の影響が懸念されている。3次元海浜変形予測に関しては、最近、底層流を水理模型実験により求め波浪時の海浜流の鉛直分布を推定し、数値計算により底質の移流・沈降過程をシミュレートして地形変化を求める予測法(入江ら, 1985)が開発され、良い再現性が得られた。ただしこの方法によれば、多層間の流れの連続性を満たすために実験により求めた底層流の修正が必要となり、また流れの多層化により計算も複雑化することから改良点もあると思われる。そこで簡便で底層流の修正を要しない数値モデルとして、底層流が鉛直方向に一様分布すると仮定した1層レベルの海浜流モデルと底質の浮遊モデルを組合せた1層流拡散モデルを開発し、白老港周辺の海底地形変化予測を試みた。

本報では白老港周辺の流れに関する現地調査と水理模型実験を行い、1層流拡散モデルにより防波堤の建設に

伴う1987年2月から1988年2月までの1年間の海底地形変化を予測し再現性を検討した。

2. 1層流拡散モデル

(1) 海底地形変化計算の基礎式

漂砂移動の大部分が浮遊砂により支配される海域において、浮遊砂濃度は底質の1)移流量、2)拡散量、3)沈降量、4)舞上がり量により変化すると考えられる。そこで本研究では、入江ら(1985)と同様に水質汚染問題の土砂拡散解析に用いられる式(1)を基本式として、計算式を導いた。

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uc) - \frac{\partial}{\partial y}(vc) - \frac{\partial}{\partial z}(wc) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial c}{\partial y}\right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial c}{\partial z}\right) - w_o \frac{\partial c}{\partial z} \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 c : 浮遊濃度、 u, v, w : x, y, z 方向の流速成分、 K_x, K_y, K_z : x, y, z 方向の拡散係数、 w_o : 浮遊砂の沈降速度である。移流作用により浮遊砂が移動する場合、底層流がその支配的要因になると考えられることから、

海浜流の水平流速成分は鉛直方向に一様分布し、その大きさは底層流速に等しい。 (仮定1)

浮遊砂濃度は鉛直方向に指数分布する (仮定2)

と考える。図-2に浮遊砂濃度の鉛直分布形を示す。図中の c_0 は底面近傍の浮遊砂濃度であり、Bijker(1980)の式による値が常に成り立つとする。また浮遊砂濃度 c は式(2)で示され、初期状態においてBijkerの式と一致すると考える。

$$c = c_0' \exp(-w_o z/\varepsilon) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 c_0' : 計算層下部の浮遊砂濃度、 ε : z 方向の浮遊砂の拡散係数である。以上より、式(1)は式(3)のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \alpha c_0' = & -\frac{\partial}{\partial x} u \alpha c_0' - \frac{\partial}{\partial y} v \alpha c_0' \\ & + \frac{\partial^2}{\partial x^2} K_x \alpha c_0' + \frac{\partial^2}{\partial y^2} K_y \alpha c_0' \\ & + \delta c_0' + c' \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

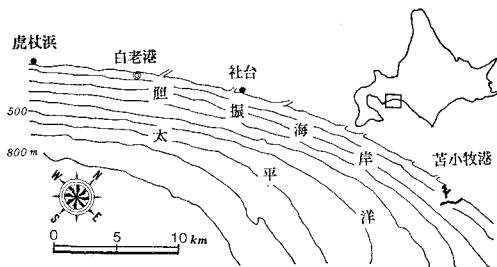


図-1 白老港位置図

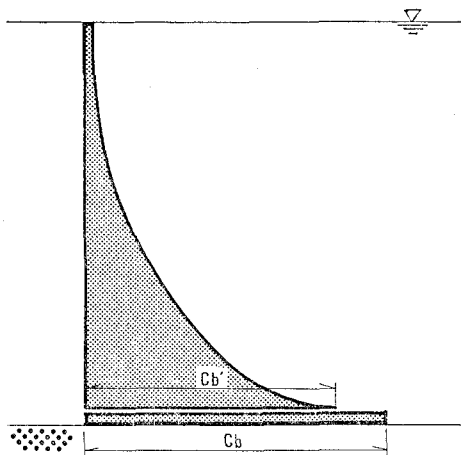


図-2 浮遊砂濃度の鉛直分布

ここに、 $\alpha C_b' = \int_{-h}^{\zeta} c dz$, ζ : 平均水位上昇量, h : 水深, $\delta = -2\varepsilon/(h+\zeta) - w_0$, $c' = \{2\varepsilon/(h+\zeta)\} C_b$ である。浮遊砂濃度は式 (3) により計算した。定常化した浮遊砂濃度分布を計算した後、地形変化量は式 (4) により計算した。

$$\frac{\Delta z}{\Delta t} = w_0 C_b' - \varepsilon \frac{2}{h+\zeta} (C_b - C_b') \dots\dots\dots (4)$$

(2) 浮遊砂濃度の補正法

(1) において、海浜流の水平流速成分が鉛直方向に一樣分布すると仮定した場合の浮遊砂濃度計算法を示したが、水理模型実験で求めた底層流速を入力すると、実際の水理現象としては鉛直流が存在するため、水平成分だけでは流れの連続性が満たされない。不連続な流れの影響は計算単位領域への水塊の過大流入出として現れ、浮遊砂の移流量が正しく評価されないことから、結果的に浮遊砂濃度の過大、過小評価につながると考えられる。そこで、この影響を以下の方法により補正した。

図-3 に示す 1 方向流れ場において、水平方向の流れの連続性が満たされている場合、移流により Δt 間に変化する単位領域の浮遊砂変化量 ΔS は式 (5) で示される。

$$\Delta S = -u_x \frac{2h}{2h+\Delta h} \Delta \bar{c} \cdot h \Delta l \Delta t \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $\Delta u_{x+\Delta x} = 0$ とする。次に水平方向の流れの連続性が満たされない場合、浮遊砂変化量 $\Delta S'$ は

$$\Delta S' = -\left(u_x \frac{2h}{2h+\Delta h} \Delta \bar{c} + \Delta u_{x+\Delta x} \bar{c}\right) h \Delta l \Delta t \dots\dots\dots (6)$$

と示される。ただし、 $\Delta u_{x+\Delta x} \neq 0$ とする。式 (5), (6) より、

$$\Delta S' = \Delta S - \Delta u_{x+\Delta x} \bar{c} h \Delta l \Delta t \dots\dots\dots (7)$$

と表されるから、 Δt 毎に $-\Delta u_{x+\Delta x} \bar{c} h \Delta l \Delta t$ の浮遊砂量を

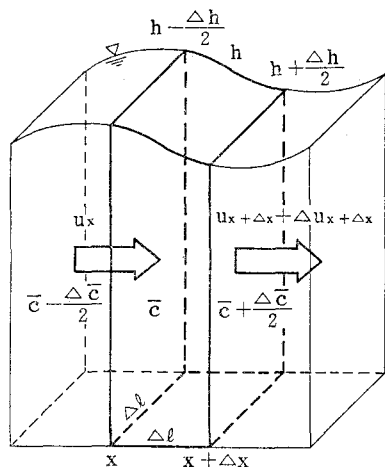


図-3 浮遊砂移流の概念図

u_x , $u_{x+\Delta x}$, $\Delta u_{x+\Delta x}$: 流入, 流出境界上の流速
 $\bar{c} - \frac{\Delta \bar{c}}{2}$, $\bar{c} + \frac{\Delta \bar{c}}{2}$: 流入, 流出境界上の平均濃度
 $h - \frac{\Delta h}{2}$, $h + \frac{\Delta h}{2}$: 流入, 流出境界上の水深
 $\bar{c}$, h : 境界内の平均濃度, 平均水深
 $\Delta x = \Delta y = \Delta l$

補正することが必要となる。ここで、単位領域内の総浮遊砂量が $\bar{c} h \Delta l^2$ で与えられると考えると次の補正式が求められる。

$$\bar{c} h \Delta l^2 \rightarrow \bar{c} h \Delta l^2 + \bar{c} h \Delta u \Delta l \Delta t \dots\dots\dots (8)$$

実際の計算においては、 $\bar{c} \propto C_b'$ の関係と 2 方向流れを考慮し、式 (9) により補正を行った。

$$C_b' \rightarrow C_b' + \frac{C_b' (\Delta u + \Delta v) \Delta t}{\Delta l} \dots\dots\dots (9)$$

3. 現地調査

波浪時における白老港周辺の底層流を水理模型実験で精度良く再現することを目的として、1988年夏季、秋季および1989年冬季の3季において流況観測を実施した。ここでは流況に関する一連の現地調査結果について記す。

(1) 観測方法

a) 波浪観測

1982年4月より社台沖の水深 50.7 m 地点に超音波式波高計を設置し、波浪観測を実施している。また1984年4月より虎杖浜において、目視により波向観測を実施している。

b) 流況観測

1988年7月22日～8月25日、1988年10月17日～11月17日、1989年1月7日～2月10日の3期間、図-4 に示す3地点で底層流の観測を実施した。また、各期間内に1度、漂流桿による表層の流況観測もあわせて実施した。

観測条件を表-1 に示す。

(2) 観測結果

白老港に襲来する波浪は、SE と SSE 波向で全波浪の約 90% を占め、SE 波向で高波浪の生じる確率が高い。流況観測期間内に有義波高が 1.5m を超える波浪は 5 回観測されたが、波向はいずれも SE あるいは SE～SSE 波向であった。また波浪時の周期は 6～15 s であった。図-5 は 1988 年 8 月 10 日～11 日、1988 年 11 月 1 日～3 日、1989 年 1 月 26 日～27 日にかけて発生した波浪の最盛期における典型的な底層流を示したものである。ST.1 および ST.2 の底層流について潮流の調和解析を行った結果、潮流流速は夏季において 1～3 cm/s、秋季 1～6 cm/s、冬季 1～3 cm/s 程度と推定されることから、波浪時に観測された底層流は波浪に伴い発生した流れを示し、潮流の影響は小さいと判断される。観測の結果、ST.1 では防波堤に沿って S～W へ、ST.2 では S～NW へ向う流れが発生するが、ST.3 では 1 波浪中においても常に流向が変動することが分かった。

図-6 は 1988 年 10 月 17 日に実施した、漂流桿による表層の流況観測結果である。A、B、C 点に投入した漂流桿はほぼ同様の軌跡を描き、最終的に S 方向に向かう。

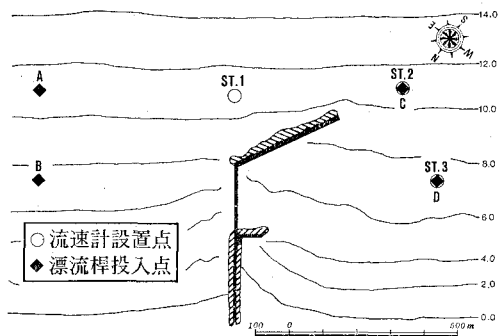


図-4 流況観測点位置図

ST.3 近傍の D 点に投入した漂流桿だけが他と異なる動きを示し、投入点を中心とする楕円状の軌跡を描いている。これより、ST.3 付近には循環流が発生していることが分かる。観測時の波浪諸元は有義波高 0.3m、有義波周期 7.2s であり波高は大きくないが、有義波高 1.5m 以上の高波浪時に ST.3 の底層流速ベクトルの流向が常に変動したことも循環流の影響によるものと推定される。夏季および冬季に実施した観測においても、D 点に投入した漂流桿は他と異なる動きを示し、循環流の存在を示唆させた。

4. 底層流に関する水理模型実験

(1) 実験施設および実験方法

底層流に関する水理模型実験は、28m×23m×1m の平面水槽に 1987 年 2 月の深浅測量図に基づく縮尺 1/150 の海底地形をモルタルにより再現して行った。実験波は波高 3.5m、周期 9.0s とし、規則波により行った。この波浪条件は、白老港周辺で顕著な地形変化が生じる限界と考えられる水深 10m において、底質が完全移動限界となる波浪条件よりも大きな波浪データをエネルギー平均したものである。実験波向は高波浪の出現頻度が高い SE とした。また、模型形状は 1988 年 2 月の構造物条件とした。

底層流は、直径 3mm、比重 1.08 の樹脂製のトレーサーを測定点に投入し、ビデオ撮影により追跡し、画像処理装置により流速および流向を求めた。測定間隔は現地スケールで 50～200m である。

表-1 底層流観測条件

測定地点	水深(m)	観測水深(m)	使用機器
ST. 1	10.5	9.5	NC-II型長期巻自記流速計
ST. 2	10.0	9.0	NC-II型長期巻自記流速計
ST. 3	6.8	5.8	磁気記録式電磁流速計

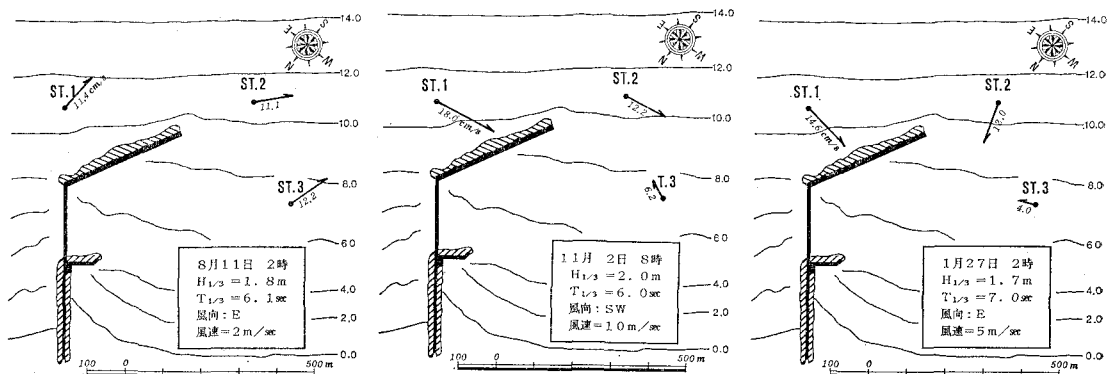


図-5 季別波浪時の底層流分布

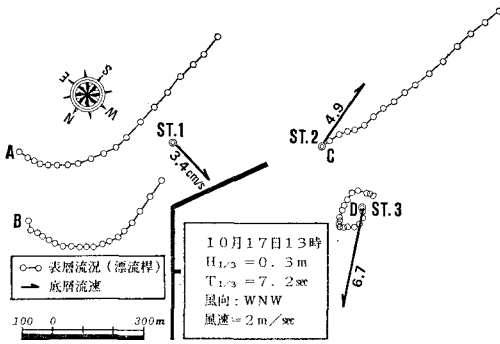


図-6 現地観測による表層流況分布

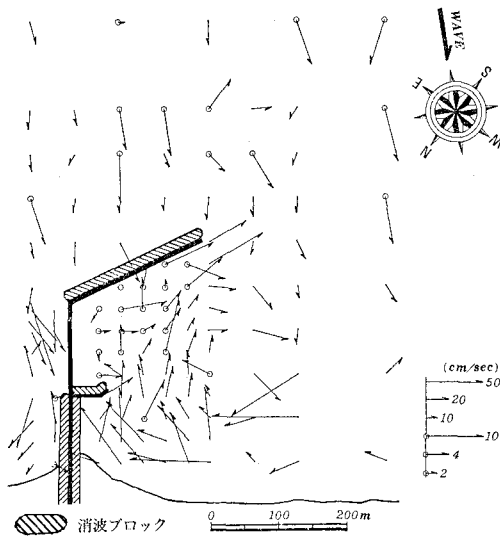


図-7 水理模型実験における底層流況

(2) 実験結果

図-7 は底層流の測定結果である。流速値は、現地スケールに換算して表示している。図-5 に示した現地調査結果と比較すると、全体的に傾向が一致しており、特に観測時の周期が実験周期に最も近い冬季の観測結果は、ST.1 および ST.2 の流向、ST.3 における循環流の発生など現地観測結果と良く一致した。以上の検討より、水理模型実験は現地の底層流を良く再現すると考えた。

5. 海底地形変化の計算

(1) 1層流拡散モデルの入力データ

1層流拡散モデルにより海底地形変化を計算するため、模型実験により求めた底層流を現地スケールで25m間隔のメッシュ上に補間し、スムージング処理を10回行った。また波高分布は斜め入射波を考慮して、非定常緩

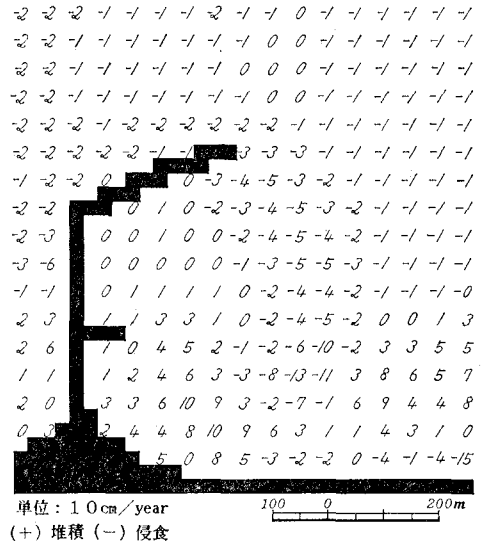


図-8 1層流拡散モデルによる計算結果

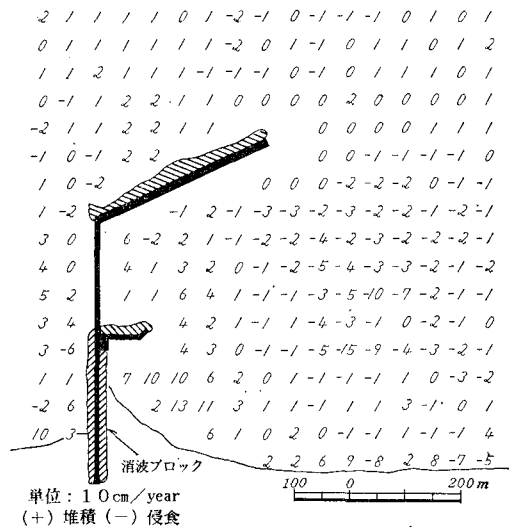


図-9 海底地形年間変化実績

勾配方程式 (渡辺ら, 1984) により求めた。波高分布計算および海底地形変化計算の地形条件は、1987年2月の海底地形とした。

(2) 海底地形変化の計算結果

図-8 は、1987年2月から1988年2月までの1年間に生じる白老港周辺の地形変化量を計算した結果である。また図-9 は、1987年2月と1988年2月の深浅測量図より、1年間の海底地形変化の実績を求めたものである。平成2年度の白老港供用開始時において港内部に相当する領域の地形変化に着目すると、特徴別に図-10に示す4ブロックに分割できる。

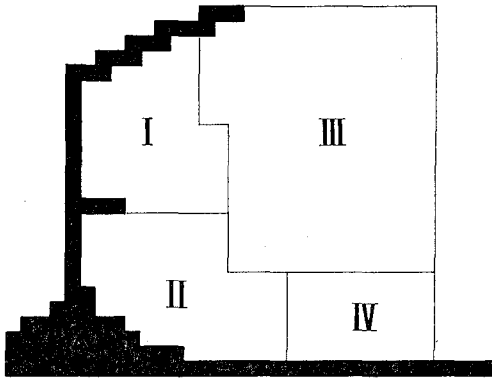


図-10 地形変化特性別ブロック図

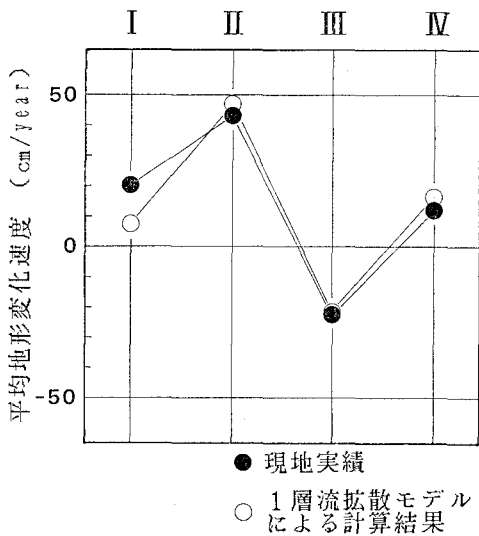


図-11 ブロック別平均海底地形変化速度

I 堆積傾向を示す領域

II 強い堆積傾向を示す領域

III 強い侵食傾向を示す領域

IV 堆積と侵食が混在する領域

計算結果と比較すると、Iブロックに対応する防波堤遮

蔽域の堆積傾向、IIブロックに対応する防波堤基部の強い堆積傾向、IIIブロックに対応する領域の侵食傾向が良く再現されていることが分かる。

次に4ブロック毎の現地実績および計算結果の平均海底地形変化速度を比較し、1層流拡散モデルによる海底地形変化速度の再現精度を評価する。図-11に比較結果を示す。同図によると、全ブロックで現地実績と計算結果の堆積・侵食傾向が一致し、海底地形変化速度も良く一致している。これより、1層流拡散モデルによれば地形変化の特徴別に分割した領域毎の平均地形変化速度は良く再現されると考えられる。

6. ま と め

(1) 3次元海浜変形予測を行うための簡便な数値モデルとして、底層流が鉛直方向に一樣分布すると仮定した海浜流モデルと底質の浮遊モデルを組合せた1層流拡散モデルを開発した。

(2) 白老港の防波堤建設に伴う海底地形変化を再現するため、1層流拡散モデルに入力する底層流を水理模型実験により求め、流れの再現性を現地調査により確認した。

(3) 1層流拡散モデルにより海底地形変化が良く再現できると考えられた。

最後に、本研究については運輸省港湾技術研究所漂砂研究室長加藤一正氏より貴重なご助言とご指導を頂き、また北海道開発局室蘭港湾建設事務所の皆様より貴重な資料を頂いた。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 入江 功・栗山善昭・田川昌宏 (1985): 物理モデルと数値モデルの組み合わせによる海底地形予測, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 345~349.
- 渡辺 晃・丸山康樹 (1984): 屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 103~107.
- Bijker, E. W. (1980): Sedimentation in channels and trenches, Proc. of 17th Conf. on Coastl Eng., pp. 1708~1718.