

離岸堤群および突堤群による 3 次元海底地形変動の数値計算法

山口 正 隆*・西 岡 洋 一**

1. 緒 言

近年、海岸構造物の築造に伴う海浜変形の予測法として 1 次元モデルが実用に供されつつあるが、たとえば、岸沖方向の漂砂を無視していることや海浜断面の平行移動を仮定していることなど、実際問題への適用上種々の制約がある。従って、これらの問題点を解決するためには、砂移動の原因となる海岸付近の波および流れの場や砂移動機構を考慮したより合理的モデルを作成しなければならない。

著者らはこうした立場から、任意の海底地形をもつ海浜に非定常な波浪が作用する場合の海浜流および海底地形変動の数値計算モデルを開発した¹⁾。また著者らは引き続き、海底地形や海岸構造物による波浪変形モデル、海浜流モデル、漂砂量算定モデルおよび海底地形変動モデルを結合して、定常な波の作用下における一基の離岸堤あるいは突堤による海底地形変動の数値計算法を提案したが^{2),3)}、計算例は少数に限られていた。そこで、本研究では数多くのケースに対する計算からこのモデルに基づく海底地形変動特性を考察するとともに、二基の離岸堤あるいは突堤を設置した場合の海底地形変動計算が可能のようにこのモデルを拡張して、その計算結果についても考察するものである。

2. 海底地形変動の数値モデル

一基の離岸堤あるいは突堤の場合による海底地形変動の数値計算法はすでに参考文献 3) に述べられており、紙数の制約もあるので、ここではその概要を略述することにする。

(1) 波浪変形モデル

入射波および離岸堤端あるいは突堤端からの回折波の変形計算に対し波向線方程式および波向線間隔方程式が用いられ、浅水変形、屈折、海底摩擦、回折および砕波の影響が近似的に考慮された。とくに、回折波の影響は任意反射率を有する半無限堤に対する回折解を重ね合わせた近似解を適用して導入された。そして最終的に合田

の砕波条件から推定された砕波高より波高は大きくならないという条件のもとに線型内挿およびエネルギー合成によって正方形格子点上での波向および波高と進行波としての radiation stress が評価された。つまり、二基の離岸堤および突堤の場合にはそれぞれ 4 つおよび 2 つの回折波の影響が考慮されていることになる。ただし、以上の計算過程において波と流れの干渉効果は考慮されていない。

(2) 海浜流モデル

海浜流計算に用いられた式は水深方向に積分された連続方程式および運動量方程式であり、後者は局所的加速度項、非線型移流項、静水圧項、水平混合項、非線型底面摩擦力項および radiation stress の勾配項から成り立っている。さて、前回の研究では運動量方程式中の底面摩擦力表示式として Longuet-Higgins による線型近似式および一般的定義式の数値積分結果を用いたが、前者の場合精度の点で、後者の場合計算時間の点で問題があるので、ここでは渡辺⁴⁾による矩形近似式を用いた。渡辺による表示式は微小振幅波理論を使用するかぎり、底面摩擦力の一般的定義式を適切に近似するので、計算精度を損うことなく計算時間を節約することができる。また水平混合項中の渦動粘性係数は Longuet-Higgins による提案式をそのまま用い、そこに含まれる定数を 0.01 とした。

(3) 海底地形変動モデル

海底地形の空間的・時間的変化は漂砂の連続式を積分することにより計算される。その際必要とされる局所的な漂砂量は、沿岸流のみが存在する場合の沿岸漂砂量の評価のために提案された土屋らの方法を、平面的な海浜流の場に拡張して適用することにより算出された。計算に用いた定数は、波による底質の平均濃度として 0.02、底質の比重として 2.65、砂粒の粒径として 0.1 cm、底面摩擦係数として 0.01 であり、さらに底質の移動限界流速の評価は堀川らの滑面乱流状態における表示式によった。

(4) 数値計算法

海浜流の基礎方程式および漂砂の連続式は中央差分法により差分化された。数値計算にあたっては、沖方向に

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科

** 正会員 工修 大阪府土木部

$i=1\sim M$, 沿岸方向に $j=3\sim N$ に分割した領域に対して沖側での波特性を与えるとともに, 海浜流計算における境界条件として側方での周期性条件, 沖側での閉境界条件および岸側での移動境界上における閉境界条件を課したし, さらに構造物ではこれを横切る流れはないものとし, 線境界処理も行った. 実際の計算では格子間隔をそれぞれ $\Delta x=\Delta y=10\text{ m}$, 最大水深 $h_{\max}=4\text{ m}$ および時間間隔を $\Delta t=1\text{ s}$ として set-up による水深変化を考慮しながら, 波浪変形計算 1 回につき海浜流計算を 60~200 回行って 1260 回程度の繰り返しで海浜流の定常解を得たのち, 海底地形変動計算を開始した. その際, 海浜流計算の収束を速めるため, 4 回で所定の波高になるように沖波波高を step 状に増大させた. そして海底地形変化および set-up による水深変化を考慮して, 海浜流計算および海底地形変動計算を繰り返すとともに, 225 回のこれらの計算に対して 1 回波浪変形計算も実施した.

3. 離岸堤群による海底地形変動の計算結果

(1) 海浜流に関する実験結果との比較

まず, 海浜流計算の妥当性を検討するため, 海浜流の計算結果を磯部による実験結果⁵⁾と比較する. 磯部の実験は水深 25.8 cm で一様水深となる海底勾配 $i=0.05$ の平行等深線地形上水深 5.5 cm の地点に鉄板の離岸堤(長さ 90 cm)を汀線平行方向に一基設置し, 入射角 $\alpha_M=90^\circ$ (α_M は汀線方向と波の進行方向のなす角), 入射波高 $H_M=4.3\text{ cm}$ および周期 $T=1\text{ s}$ の波を作用させて行われている. そこで, $\Delta x=\Delta y=20\text{ cm}$, $\Delta t=0.06\text{ s}$, 反射率 $c_r=1$ および底面摩擦係数 0.01 の条件のもとに数値計算を行い, 両者の海浜流分布を比較したのが図-1 である. ただし, 離岸堤先端が水深格子に設置されなければならないというプログラムの制約上, 計算における離岸堤長は $B=100\text{ cm}$ とした. さて, この図によると, 離岸堤背後に回転方向を異にする 2 つの循環流が形成されるという基本的流況は定性的に再現されている. また離岸堤沖側領域では, 計算結果に離岸堤背後と回転方向を逆にする一対の循環流が見出されるのに対し

て, 実験結果では詳細は不明であるが, 流況がやや異なるようである.

(2) 一基の離岸堤による海底地形変動の特性

ここでは, 海底勾配 $i=0.04$ の平行等深線地形に長さ $B=40\text{ m}$, 反射率 $c_r=0$ の離岸堤を $h_d=2.2\text{ m}$ 地点に設置し, $T=3.5\text{ s}$, $H_M=1\text{ m}$ および $\alpha_M=80^\circ$ の波を 1 時間作用させた場合の計算結果を基本ケースとして, 波の入射角, 離岸堤長および波の作用時間を変化させた場合の海底地形変動特性を考察する. 図-2 は基本ケースに対する等深線変化および海浜流ベクトルの平面分布を示したものである. この図のうち, まず海浜流についてみると, 波の入射方向に対して離岸堤下手側にあたる右端背後に時計まわりの大きな循環流が見出されるが, 海底地形変動計算前に左端背後に形成されていた反時計まわりの小さな循環流は消滅している. このように, 海底地形変化の進行に伴って海浜流況が局所的に変化する地点も見出されるが, 基本的な流況はそれほど変化しない. 一方, 海底地形については離岸堤上手側で等深線が前進し, 堆積傾向を示すのに対し, 下手側の離岸堤右端付近で著しい侵食領域を生じている. しかし, 汀線ではやや等深線が前進するものの, ほとんど変化が見出されないことから, より現実に近い等深線変化を得るためには汀線変化に大きく寄与すると言われる浜漂砂の影響を考慮する必要があるよう.

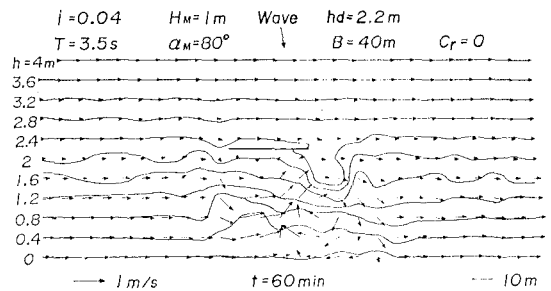


図-2 一基の離岸堤による海底地形変動

図-3 は波の入射角の影響を検討するため, $\alpha_M=70^\circ$ に対する計算結果を示したものである. 図-2 と比較すると, 当然沿岸流成分がより卓越し, 循環流の中心がより下手側に移動するとともに, その規模も小さくなる. また等深線変化は離岸堤上手側での堆積傾向および右端付近での侵食傾向をより顕著に示している. 図-4 は離岸堤長 $B=30\text{ m}$ に対する計算結果である. この図において海浜流分布や等深線変化における基本的パターンの相違はあまり見出されないものの, 離岸堤長が短くなれば, 回旋領域が狭くなるので, より狭い領域で等深線の前進後退や循環流形成が行われる. そのため, 等深線や海浜流の変化がより著しいように見え, 循環流は岸沖方向に長軸をもつ楕円状になる.

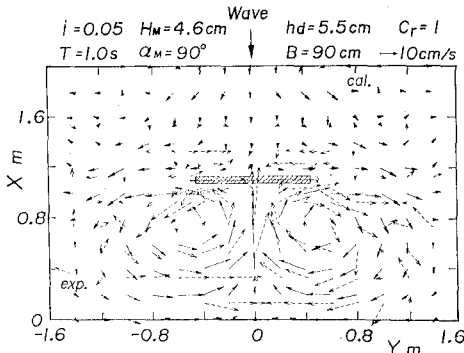


図-1 海浜流の計算結果と実験結果との比較

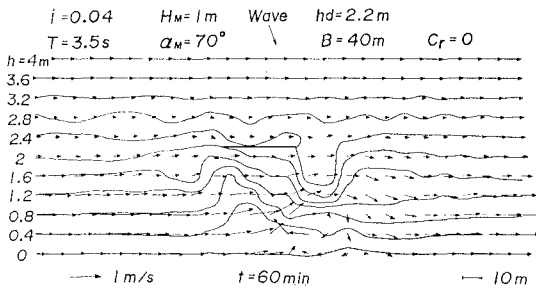


図-3 入射角の影響 (一基の離岸堤)

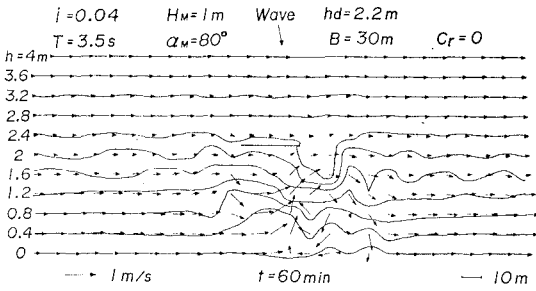


図-4 離岸堤長の影響 (一基の離岸堤)

最後に、海底地形変動に及ぼす波の作用時間の影響を検討するため、計算開始後3時間経過した時点での計算結果を示したのが図-5である。これによると、 $t=180$ minにおいても $t=60$ min時点で見出された離岸堤上手側での等深線の前進、右端付近での侵食および汀線近傍での堆積という等深線変化の基本的特徴は明らかであるが、当然侵食・堆積傾向はそれぞれ進行している。また計算開始後90分から見出される右端領域での侵食孔は当然時間の経過とともに拡大するが、150分後にはその進行が止まるとともに、計算領域全体における等深線変化も小さくなり、海底地形変化の平衡化傾向が出現する。しかも、この平衡化傾向は離岸堤右側領域でより顕著である。なお、離岸堤の反射率は現在の計算条件の場合、計算結果にあまり影響しないこと、海底勾配が小さくなると循環流や海底地形変動の規模が大きくなるが、等深線の絶対値と比較すると海底勾配による相違が小さいことおよび設置水深を小さくすると循環流が汀線近く

に閉じこめられるので、海底地形変動の著しい領域も狭くなることがわかった。

(3) 二基の離岸堤による海底地形変動の特性

本研究のプログラムによれば、二基の離岸堤が沿岸方向座標軸と平行でかつ一直線上にある場合の海底地形変動計算を行うことができる。そこで、(2)の基本ケースと同じ条件のもとに、離岸堤間隔 D_d を変えた場合の計算結果を述べる。図-6は $D_d=40$ m の場合の海底地形変動の計算結果である。これによると、まず入射波向に対し、それぞれの離岸堤下手側に時計まわりの大きな循環流が存在している。また海底地形変動計算開始時では若干異っていたそれぞれの離岸堤背後の流況特性は、海底地形変動後互に似かよってきている。次に、等深線は左右いずれの離岸堤でも右端付近で後退して侵食傾向を、左端付近で前進して堆積傾向を示しており、その特性は一基の離岸堤の場合と同様である。しかし、堆積傾向を示す0.8 m等深線の前進は左側離岸堤による方がかなり大きいし、離岸堤右端での侵食傾向も左側離岸堤においてより顕著に現われている。こうした離岸堤相互の干渉効果は離岸堤間隔を $D_d=20$ m とした図-7により明瞭に見出される。すなわち、まず海浜流分布について見ると、左側離岸堤に伴う循環流の規模は沿岸流成分の発達によって小さくなり、その出現場所も汀線側に移動するが、右側離岸堤に伴う循環流特性はそれほど変化しない。そして海浜流分布の変化に伴い、海底地形の変動特性も $D_d=40$ m の場合とかなり異なり、離岸堤間領域での等深線変化が増大している。つまり、離岸堤間隔を小さくすると、それぞれの離岸堤による回折波浪が互

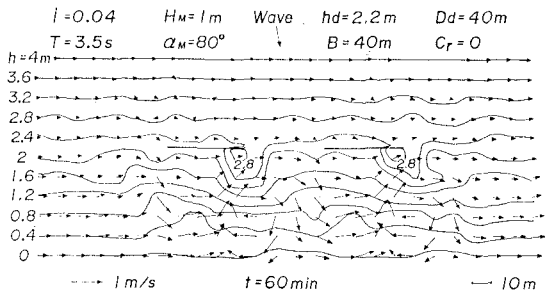


図-6 二基の離岸堤による海底地形変動

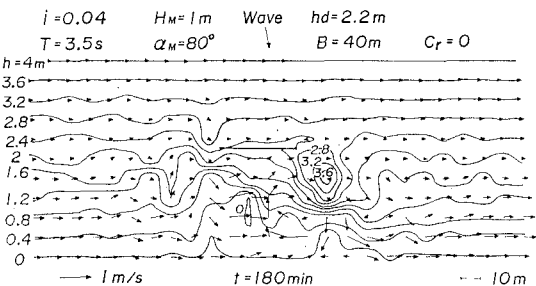


図-5 波の作用時間の影響 (一基の離岸堤)

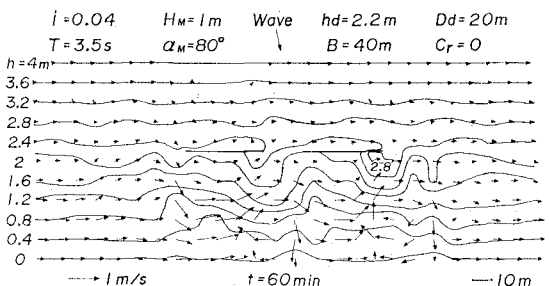


図-7 離岸堤間隔の影響

に影響を及ぼしあって海浜流分布の対称性を減少させるとともに、それぞれの離岸堤の堆砂特性が一基の離岸堤のそれと異なってくるという相互干渉効果がより顕著になる。

4. 突堤群による海底地形変動の計算結果

(1) 一基の突堤による海底地形変動の特性

離岸堤の場合と同様、海底勾配 $i=0.04$ の平行等深線地形上に法先水深 $h_0=1.8\text{ m}$ の突堤 (反射率 $c_r=0.0$) を一基設置し、 $T=3.5\text{ s}$ 、 $H_M=1\text{ m}$ および $\alpha_M=70^\circ$ の波を1時間作用させて得られる海底地形変動の計算結果を突堤の場合の基本ケースとする。そして、この結果と波の入射角、反射率、海底勾配、法先水深および波の作用時間を変えた計算結果とを比較する。図-8は基本ケースを示したものである。まず、海浜流分布図において突堤を回る支配的な流れのほか、突堤のしゃへい効果によって突堤の右側に形成された時計まわりのかなり強い循環流や左側の汀線近くに形成された時計まわりの弱い循環流が見出される。とくに突堤左側領域の循環流は計算開始前にはわずかに存在していたにすぎず、海底地形変動の結果顕在化したものである。また、海底地形変動の特性は突堤の左右領域および個々の等深線でかなり異なるので、一括して述べることはできないが、突堤左側ではおおむね堆積傾向にあると言えよう。一方、突堤右側での水深が 0.8 m より浅い領域では、突堤ごく近傍の侵食および突堤右側 15 m 付近での堆積傾向が顕著であり、反対に水深が 1.2 m より大きい領域では逆の傾向を示している。しかし等深線の移動距離を比較すればやや後退量が大きいので、突堤右側では侵食傾向にあると言えるであろう。

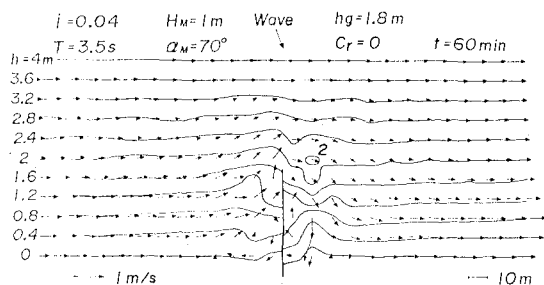


図-8 一基の突堤による海底地形変動

つぎに、図-9は入射角の影響を検討するため、 $\alpha_M=80^\circ$ に対する計算結果を示したものであり、当然流速の絶対値は $\alpha_M=70^\circ$ の場合に比べてかなり小さいけれども、突堤右側の循環流内の流速がほぼ同じであるのは興味深い。そしてその結果、突堤左側領域および右側領域沖側での等深線変化は $\alpha_M=70^\circ$ の場合より小さいが、右側の循環流領域では同様の変化を示している。また図-10は基本ケースにおいて波の作用時間を2時間と

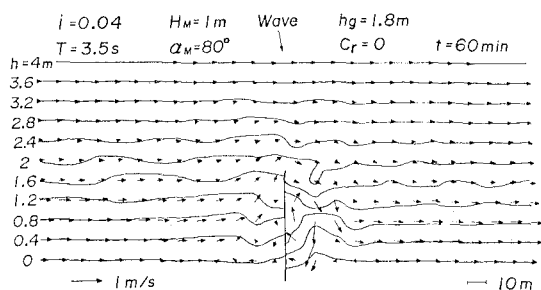


図-9 入射角の影響 (一基の突堤)

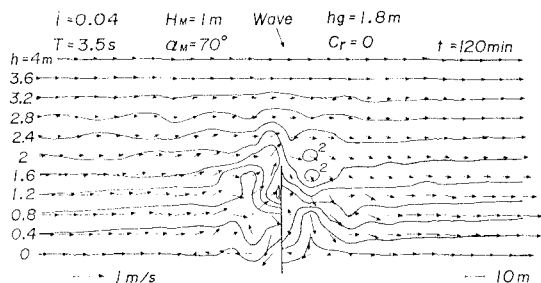


図-10 波の作用時間の影響 (一基の突堤)

した場合の計算結果である。基本ケースと比べると、海底地形変化がかなり進行しており、突堤左側付近および右側岸領域では等深線の著しい前進が見出される。さらに海底地形変動の経時変化を見ると、突堤右側領域では等深線変化が小さくなって、海底地形は安定化しつつあるが、左側領域では依然として地形変化の度合いが大きいことがわかる。一方、こうした海底地形変動を海浜流の変化特性から考えると、突堤左側に形成されていた小さな循環流は時間経過とともにその規模および流速を増大させているし、右側領域での大規模な循環流は時間的経過に伴ってその規模をあまり変化させないものの、その流速は向岸流の増大および離岸流の減少という形で変化する。なお、突堤の反射率、海底勾配および突堤の法先水深の相違が海底地形変動に及ぼす影響は離岸堤の場合と類似している。

(2) 二基の突堤による海底地形変動の特性

図-11は基本ケースと同じ条件のもとに二基の突堤の間隔を $D_g=50\text{ m}$ とした場合の計算結果である。まず

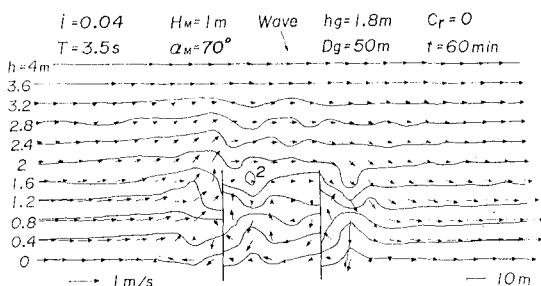


図-11 二基の突堤による海底地形変動

海浜流分布を見ると、二基の突堤を越える支配的な流れのほかに、左右両突堤の両側に合計4個の時計まわりの循環流が存在しており、しかも相互干渉効果のために左側突堤右側の循環流と右側突堤右側の循環流というようにそれぞれ対応すべき循環流の規模や流速が相互に異っている。この4つの循環流のうち、両突堤左側の循環流は海底地形変化に伴って発達したものである。次に、海底地形変動についてみると、左側突堤左側領域および右側突堤右側領域での等深線形状は一基の突堤による場合ときわめて類似しているが、両突堤間領域のうち、とくに右側突堤左側領域においてその特性が異なっている。

5. 結 語

以上、本研究では波浪変形モデル、海浜流モデルおよび海底地形変動モデルを結合することにより、離岸堤群および突堤群の設置に伴う海底地形変動の数値計算法を提案するとともに、計算結果の検討から海底地形変動の特性を考察した。その結果、本モデルが構造物に伴う海底地形変動の基本特性を近似的に再現することや海底地形変動は時間経過とともに安定化する傾向があること、さらに複数の構造物による海底地形変動の計算結果には相互干渉効果が現われることなどが明らかになった。なお、紙数の都合上波高・波向分布や set-up の平面分布など大部分の図を割愛したので、これらについては別の

機会に述べたい。また、本モデルは多くの仮定の上に立脚するものであるので、今後数値モデルの中でとくに碎波変形機構、漂砂量式および浜漂砂などに関して改良を加える必要がある。

最後に、資料の整理や図の作成に助力願った愛媛大学工学部海洋工学科大福 学技官に謝意を表するとともに、本研究は文部省科学研究費による研究成果の一部であることを付記する。本研究の計算は九州大学大型計算機センターの Facom M-200 および愛媛大学情報処理センターの Facom M-180 II AD によった。

参 考 文 献

- 1) 山口正隆・大津正司・西岡洋一：非定常波浪による2次元海浜変形の数値計算，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 290～294，1981。
- 2) 山口正隆・西岡洋一・大津正司：離岸堤による2次元海浜変形の数値計算，土木学会第36回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp. 849～850，1981。
- 3) 山口正隆・西岡洋一・大津正司：海岸構造物設置に伴う海底地形変動の数値計算，愛媛大学工学部紀要，10巻2号，pp. 275～283，1983。
- 4) 渡辺 晃：海浜流と海浜変形の数値シミュレーション，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 285～289，1981。
- 5) 磯部雅彦：碎波帯のダイナミクスに関する共同研究（その2，自然海岸および防波堤海岸），4.2 構造物のある場合の固定床実験，海岸環境工学研究センター，Report 10，pp. 130～145，1980。