

離岸堤による波浪海浜流場の変化と海浜変形

三村 信男*・清水 琢三**・渡辺 晃***

1. 緒 言

構造物の建設等による海浜変形をより正確に予測するために、近年数値シミュレーション手法の開発に力が注がれている。海岸線変化モデルにせよ3次元モデルにせよ、海浜変形に関連する諸過程の影響を合理的にとり入れた予測手法を開発するためには、これらの諸過程を含めて実測データによるモデルの検証が不可欠である。とくに3次元モデルにおいては、波浪、海浜流場および漂砂量の分布を計算するステップをへて海浜地形の変化を求めるという手順がとられているので、最終的な地形変化だけでなくこれらの各中間ステップにおいても計算結果の妥当性が検討されなければならない。

本研究は、このような要請に応じて離岸堤設置海浜を対象にして平面移動床実験を行ない、波と流れ、漂砂移動と地形変化を総合的に測定したものである。さらに検証の第一歩として実験結果と海岸線変化モデルによる計算結果とを比較検討した結果を報告する。

2. 実験の概要

2.1 実験の手順

今回の実験では、まず自然海浜を想定した場合の実験を行ない（ケース 1）、その結果生じた地形の上に離岸堤を設置してその影響を調べた（ケース 2）。測定した項目は、波高および砕波線、汀線の位置、流速と流況、漂砂の移動方向、それに地形（砂面の高さ）である。これらの測定が一巡するのに約6時間を要したが、各ケース毎におのおの連続2サイクルの測定を行なった。こうした実験の手順を図-1に示す。

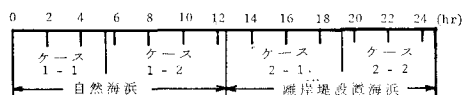


図-1 実験の手順

2.2 実験装置と測定方法

実験には、図-2に示すように長さ14m、幅13m、

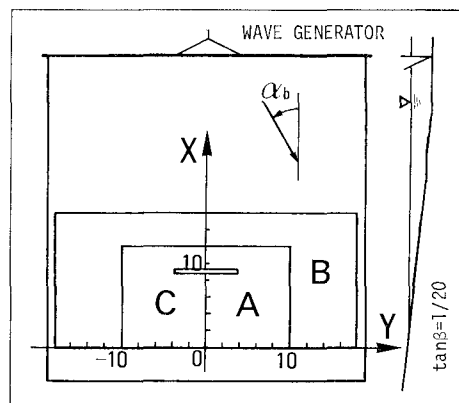


図-2 実験水槽と測定領域

深さ42cmの平面造波水槽を幅7.5mの区間に仕切って用いた。この内部に中央粒径0.2mm、比重2.65の砂を厚さ約10cmに敷きならし、初期砂面として1/20勾配の一樣勾配斜面をつくって直角入射の条件で波を作用させた。実験を通して、一樣水深部の水深は25cm、入射波の換算沖波波高は5.7cm、周期は0.9秒という一定の条件に固定した。測定領域に対して図-2に示すように、汀線に直角に測線軸Xを、平行に測線軸Yを設定した。測線軸Yはほぼ初期汀線の位置である。

離岸堤の模型としては、幅150cm、高さ50cmの鉄板を用いた。前面に消波工としてフィルム屑をつめたかごをとりつけ、ケース1の終了後極力地形を乱さないように注意して自然海浜の場合における砕波線に相当するX=9（初期汀線より180cm）の測線上に設置した。

実験では、計測の同時性を著しく損わないように測定の対象を実験領域の右半分（ $0 \leq Y \leq 18$ ）にしぼり、所要時間の短縮をはかった。すなわち、図-2に示した領域Aでは平面的に配置された測定点に従って詳細に、領域B、Cでは必要に応じた密度で測定することにしたが、それでも1サイクルの測定に6時間を要したのが実情である。

つぎに、各項目の測定方法について述べる。

- ① 波高：容量式波高計を用いて測定し、波高分布図を描いた。

* 正会員 工博 東京大学講師 工学部土木工学科

** 学生会員 東京大学大学院 土木工学専門課程

*** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

- ② 砕波線と汀線：水槽の上方から写真撮影した。この写真から各点における波向もよみとった。
- ③ 流速：小型で軽量のセンサーをもつプロベラ流速計（篠塚製作所製、プロベラは 3 mm ϕ , 2 mg）を、周波数応答性がよい、浮遊砂があっても破損しないという 2 点を考慮して採用した。実地の測定では方向特性を改善するためにセンサーにフードを取りつけ、プロベラを X, Y 2 方向に交互に向けて固定し、流速の 2 成分を測定した。この記録から、各点における波の軌道流速および定常流速を算出した。
- ④ 流況：重さを調節したポリスチレン球（直径 2 cm, 3 cm）とウォーターブルー溶液とをトレーサーとして投入し、その軌跡を上方から写真撮影して求めた。
- ⑤ 漂砂の移動方向：蓄光塗料（主成分 ZnS）を砂に塗布し蓄光砂という新しいトレーサーを作った。これを所定の地点に投入し蓄光砂雲の移動状況を写真撮影することにより、各点での漂砂の移動方向を求めることを試みた。
- ⑥ 地形：水槽上を移動する台車に連続式砂面計を載せ、所定の測線上を動かすことによって砂面の高さを測定した。得られたデータには砂漣をはじめ種々の変動が含まれているので、ローパスフィルタによって砂漣の規模以下（波長 10 cm 以下）の凹凸を除いて平均の砂面高さを求め、それに基づいて地形図を描いた。さらに、2 つの地形図における砂面高さの差をとって土砂の移動量を計算した。

3. 実験結果

3.1 ケース 1——自然海浜の場合——

まず、自然海浜の場合の実験結果として、図-3 にケース 1-1 の波高と流速の分布を、図-4 にケース 1-2 の地形図を示す。これらの図において右半面の現象が複雑に現われているのは前に述べた測定の密度のちがいによるものであり、この事情は以下に示す図においても同様である。

さて、形成された海浜形状は汀線の近傍を除いて大局的には沿岸方向に一樣であった。事実、土砂の収支図を調べると汀線に平行に帯状の侵食領域があり、持ち去られた砂はその沖側に同じく帯状に堆積していて、自然海浜の場合、今回の条件下では 2 次元的な岸沖方向の地形変化が卓越していることがわかった。

このような 2 次元的な地形変化をひき起こす主要な外力は波と考えられるが、波高分布にもこのケースでは沿岸方向に大きな変化はみられない。ただし砕波帯（砕波線はおおむね $X=9$ ）では、波高が沿岸方向に規則的に変動して微弱ながら海浜循環流が形成されており、地形の上にも rip channel や cusp といった沿岸方向のリズミックな地形変化が認められる。

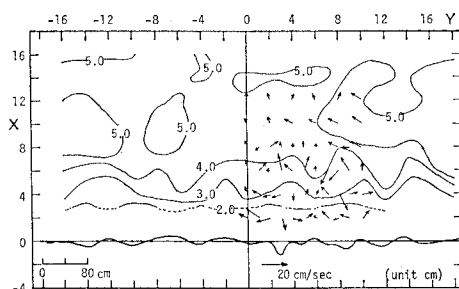


図-3 波高と流速の平面分布（ケース 1-1）

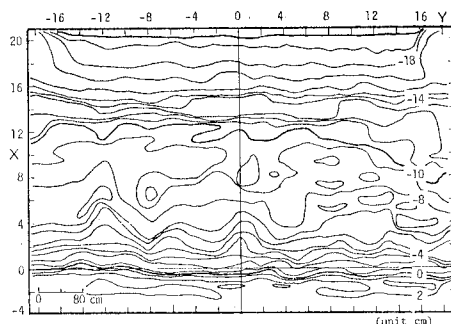


図-4 地形（ケース 1-2）

ケース 1 では合計 12 時間 36 分波を作用させたが、実験の後半においても汀線は後退しておりいわゆる平衡地形には到達していなかった。

3.2 ケース 2——離岸堤設置海浜の場合——

ケース 2 の実験結果を図-5 から図-8 に示す。

図-5 をみると離岸堤を設置した場合、前面では重複波が発生して波高が大きくなる一方、背後では遮へい効果によって波高が小さくなっている。離岸堤背後で沿岸方向に波高分布が生じることによって、汀線に平行に離岸堤に向かい円弧を描いて沖方向に流出する流れが発生している。流況の観測によってもこの流れはとらえられているが、それによると離岸堤の設置直後に形成される流れは循環型で流速が最も大きく、やがて沖向きに流出する一過型の流れとなり流速も減少する。

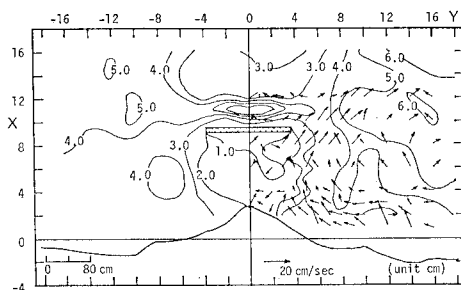
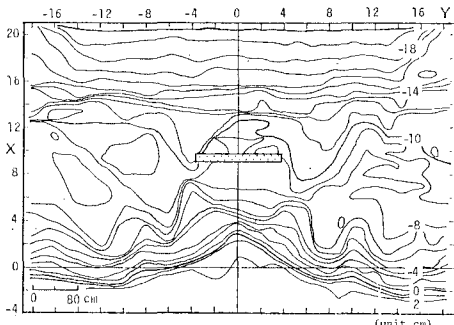
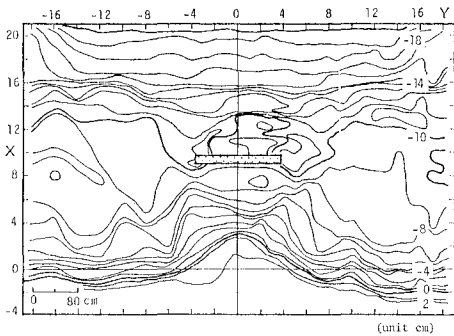


図-5 波高と流速の平面分布（ケース 2-1）

離岸堤の設置は波浪と流れの場にこのように著しい変化をもたらすが、それに伴って海浜地形にも大きな変化が生じる。図-6 にみられるように、離岸堤背後にはト

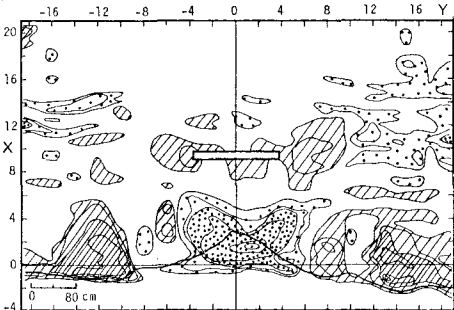


(a) ケース 2-1

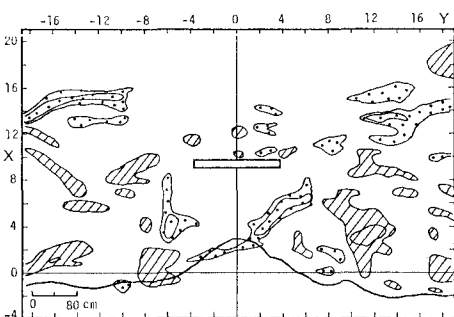


(b) ケース 2-2

図-6 地 形



(a) ケース 1-2～ケース 2-1



(b) ケース 2-1～ケース 2-2



図-7 土砂の移動量

ンボロ地形が発達し、離岸堤背後から離れた地点では汀線付近に侵食が生じている。土砂の移動量(図-7)を調べると離岸堤設置後最初の1サイクル(ケース 2-1)にははなはだしい土砂の移動が生じている。

このとき、砂は離岸堤背後に生じた流れによって両側から離岸堤背後に運ばれており、また離岸堤の両脇では侵食されて離岸堤から遠ざかる方向に運ばれていると思われる。

測定間隔の細かい右半面に着目すると、土砂の移動量はよく収支がとれており、また図-8に示した漂砂の移動方向の観測結果をみても汀線付近ではそのことを裏づける傾向が現われている。

離岸堤設置後時間が経過するとこうした傾向は急速に穏かになる。ケース 2-2 における土砂の移動量はケース 2-1 の約 1/5 に減じていることから離岸堤設置後の地形は急速に平衡地形に近づくといえる。

つぎに計測法の問題に簡単に触れたい。

今回の実験では、流速の測定に小型プロペラ流速計を用い 図-3 および 図-5 に示すような定常流速の分布図を得たことから、浮遊砂が存在しても低濃度であれば流速が計測できることがわかった。しかし、流速計の応答特性に対して更に検討を加える一方、新たな測定機器の採用も考える必要があろう。また、地形の測定には連続式砂面計を用い出力を変換して計算機で処理する方式をとったが、土砂の移動量の収支がよくとれており、精度の高いデータが得られた。今回開発した著光砂は水深の小さい汀線付近では有効であったが砕波点や沖浜帯では充分追跡できず、漂砂に対する観測の難しさを改めて感じさせた。

4. 海岸線変化モデルによる計算

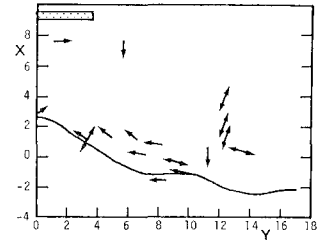
4.1 計算方法

つぎに、今回の実験結果と海浜変形予測モデルによる計算結果との比較検討を試みた。ここでは検討の第一歩として従来実績のある海岸線変化モデル(1-line モデル)^{1),2)}を用いて、離岸堤設置海浜に対して汀線変化および土砂の移動量を求め、実験結果との対応を調べた。

図-2の測線軸 X, Y と同様に座標軸 x, y をとると、汀線位置 x_s の変化は式(1)で与えられる。

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} + \frac{1}{D} \left(\frac{\partial Q}{\partial y} - q \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 D : 沿岸漂砂の移動が生じる高さ、 Q : 沿岸漂砂量、 q : 岸および沖側の境界を通過して出入する土砂量

図-8 漂砂の移動方向
(ケース 2-1)

である。

沿岸漂砂量式としては、沿岸方向の波高変化によって生じる流れの効果を考慮した小笹・Brampton の式³⁾を用いた。

$$Q = \frac{H_b^3 C_{gb}}{16(\rho_s/\rho - 1)(1 - \lambda)} \times \left(K_1' \sin 2\alpha_{bs} - 2K_2' \frac{\partial H_b}{\partial y} \cot \beta \cos \alpha_{bs} \right) \quad (2)$$

ここで、 H_b : 砕波波高、 $\tan \beta$: 斜面勾配、 λ : 砂の空隙率、 ρ_s, ρ : 砂および水の密度であり、砕波点での群速度 C_{gb} と汀線に対する砕波角 α_{bs} は各々式 (3) および式 (4) で表わされる。

$$C_{gb} \approx \sqrt{gH_b/\gamma} \quad (3)$$

$$\alpha_{bs} = \alpha_b - \tan^{-1}(\partial x_s/\partial y) \quad (4)$$

ここで、 g : 重力加速度、 α_b : y 軸に対する波峰線の角度である。

これらの式を式 (1) に代入し、適当な境界条件の下で数値計算を行なうことによって汀線の位置の時間変化が求められる。

つぎに、実際の計算をすすめる上での条件を示す。

- ① 砕波波高 H_b および波峰線の角度 α_b は実測結果に基づいてきめたが、それを図-9に示す。

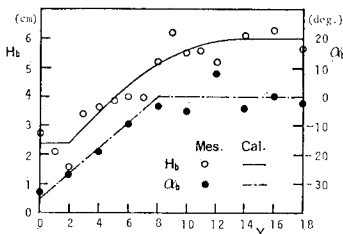


図-9 砕波波高と砕波角

- ② 移動高さ D については実験における地形変動から 10 cm 程度と観察された。さらに Hallermeier⁴⁾ による次の式

$$D = 2.28H_s - 68.5(H_s^2/gT_s^2) \quad (5)$$

(H_s, T_s は各々沖波の有義波高と有義周期)

によっても 10.2 cm という値を得たので、 $D=10$ cm として計算を進めた。

- ③ 係数 K_1', K_2' については Kraus⁵⁾ らに従ってデータによって調節すべきものと考え、ここではまず K_1' には水理模型実験によく適合するとされている 0.36 を与え、 K_2' は試算の後 $K_2'=0.5K_1'$ とした。また、 K_2' の乗ぜられる項が砕波波高の沿岸方向の分布による漂砂移動を示しているの、その寄与を調べるために $K_2'=0$ の場合も計算した。
- ④ 岸あるいは沖側からの土砂の出入りはないものとし $q=0$ とおいた。

- ⑤ 初期条件としては離岸堤の設置時に実測された汀線の位置を与え、また境界条件としては現象が離岸堤の左右で対称であるとして離岸堤背後中央で $Q=0$ を仮定した。

- ⑥ 計算格子間隔は $\Delta y=20$ cm, 時間間隔は $\Delta t=10$ 秒である。

4.2 計算結果と実測値との比較

離岸堤を設置して7時間後(ケース 2-1)の汀線の位置に対する計算結果と実験結果とを図-10に示す。

1時間後の計算結果も図中に示したが、この図から汀線の位置は離岸堤設置直後に大きく変化し、時間の経過とともに収束に向かいやがて平衡状態に達するという実測された傾向を計算結果がよく表わしていることがわかる。実験結果と比較して波高変化を考慮した方がより妥当な結果を与えているが、これからも離岸堤背後における漂砂移動に対して波の回折による沿岸方向の波高変化によって生じる流れの寄与が大きいと考えられる。回折領域から離れた領域($Y \geq 12$)では計算結果と実験結果の開きが大きい。この領域では離岸堤の影響が小さく、いわば自然海岸の場合の延長として波による岸沖漂砂があったにもかかわらず、この効果は無視したことによると考えられる。

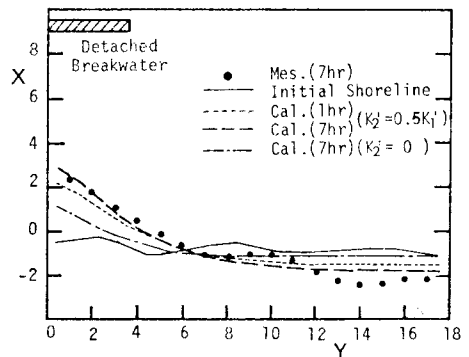


図-10 汀線の位置の変化

土砂の移動量について同じくケース 2-1 に対して実験値と計算値とを比較したのが図-11である。ここで、実験値としては、計算において仮定した $D=10$ cm に対応させて、土砂移動の認められるもっとも岸側の点から測線 $X=8$ までの土砂移動量を積分して求めた。波高変化を考慮した計算では傾向はよく一致しているものの、離岸堤背後($Y \leq 4$)と離岸堤から離れた領域($Y \geq 12$)ではかい離が大きい。これも、波による岸沖方向の漂砂移動や離岸堤の側方の流れによる砂移動などいわゆる沿岸漂砂以外の漂砂現象が存在するにもかかわらず、モデルでは考慮されていないこと、漂砂の移動高さ D を一定にしたことによると考えられる。移動高さ D は、今回のように波や流れの場が一樣でない場合、沿岸方向に

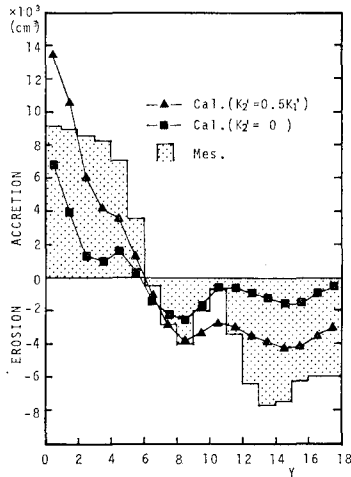


図-11 土砂の移動量

一定ではないと思われるので、これを合理的に評価しモデルに組み込むことが必要であろう。

また、今回の計算の結果、離岸堤背後のように2つの波が重なり合う領域において、波と流れの場をどのように評価するかという問題が残されていることがわかった。すなわち、モデル中では単一の波が仮定されているため他端からの回折波による漂砂移動が無視されており、離岸堤中央部での漂砂量を過大評価することになっている。2つの回折波を分離して、漂砂移動に対するそれぞれの波の寄与を評価できればより正確な予測が可能であろう。

今回の計算では、さらに地形変化によって波と流れの場が変化することによるフィードバック効果を検討した。離岸堤設置後時間が経過して平衡状態に達した計算結果に対して、ケース 2-2 で観測された波の場を与えて12時間後までの汀線の位置を計算したところ、汀線

の位置は再び移動し始めやがて新たな平衡状態に達した。その結果得られた汀線の位置とケース 2-2 の実験結果との一致も良好であった。

5. 結 語

離岸堤設置海浜を対象にして詳細な移動床実験を行ない、波、海浜流および地形変化に対する離岸堤の影響の特徴を示した。さらに、実験結果に基づいて海岸線変化モデルによる計算結果の問題点を検討した。

しかし、本研究における検討課題には多くのものが残されていると考えている。すなわち、今回の実験は海浜変形の予測手法の高度化に対応して海浜変形の素過程をできるだけ詳細に測定するよう計画されており、例えば各測定点における波の軌道流速のデータも得られている。今後、これらのデータを用いて波浪場に基づく海浜流の計算や局所的な漂砂量の評価と地形変化の検討をもすすめたいと考えている。

最後に、本研究を進めるにあたり終始御指導戴いた東京大学堀川清司教授、実験に協力していただいた広木謙三君に深甚なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 橋本 宏: 離岸堤による隣接海岸への影響予測モデル, 第21回海講論文集, pp. 181~185, 1974.
- 2) Perlin, M.: Predicting beach planforms in the lee of a breakwater, Proc. Coastal Structures '79, ASCE, pp. 792~808, 1979.
- 3) 小笹博昭・A. H. Brampton: 護岸のある汀線変化数値計算, 港湾技術研究所報告, 第18回, 第4号, pp. 77~104, 1979.
- 4) Hallermeier, R. J.: Uses for a calculated limit depth to beach erosion, Proc. 16th ICCE, pp. 1493~1512, 1978.
- 5) Kraus, N. C.・針貝聰一・久保田 進: 大洗海岸における汀線変化シミュレーション, 第28回海講論文集, pp. 295~299, 1981.