

河口内の矩形砂州の変形実験とその変形予測

Prediction of planform change of a rectangular spit in a river mouth

建設省土木研究所海岸研究室 正会員 宇多高明

1. ま え が き

河口における砂州の発達は、しばしば河口閉塞をもたらすことによって、洪水防御や舟運維持の面において重要な障害となっている。このような河口部における砂州の形成とその変形の問題は、その外力として波と河川流による作用の両者が考えられるため、非常に複雑な問題である。

しかしながら、洪水流のような場合を除き、河川流が弱い場合には、河口砂州の変形の主たる外力は波による作用と考えることができる。筆者はこのような問題に関して、新しい海浜変形モデルを提案し、河口内の円形砂州の変形予測を行い、実験値との比較を試みた¹⁾。この結果、当モデルによって実験で得られた砂州の変形が良く説明されることが明らかとなり、また河口閉塞のモデル化も可能となった。ただし砂州の変形に伴う砂州の周りの波高や流れの分布の時間的变化などについては十分明らかにすることはできず、また砂州形状も最も単純な半円形砂州のみが対象とされた。

本論文ではこれらの問題点を明らかにするため、新たに矩形状の砂州をモデルとして取り上げ、その時間的变化や流れの場を実験的に詳しく調べた。また同時に数値モデルを用いてその変形予測を行った。この結果、この場合も予測値は実験値と良く対応することが明らかになった。筆者の提案したモデルは、河口砂州の変形予測に止まらず、砂でできた人工島の変形予測にも適用されることが明らかにされており、本論文で明らかにされる矩形砂州の変形予測の問題と考え合わせると、当モデルは砂州や砂嘴などのように直線的でない海岸線の変形予測に有効であることがわかる。

2. 河口砂州の変形に関する水理模型実験

水理模型実験は幅30m、長さ約20mの平面水槽を用い、その中央部に幅3m、長さ5mの河口模型を作って行った。砂州形状としては図-1に示されるように、長さ3m、幅15mの矩形状砂州を初期条件として与えた。砂州高さは平均水面より約3cmとした。海底勾配は砕波帯幅が砂州の半径に比較して十分小さくなるようにできるだけ急勾配とし、代表的に $\frac{1}{2}$ という値を選択した。用いた材料は中央粒径が約0.25mmの砂である。なお砂州以外はコンクリート製の固定床であり、その海底勾配は $\frac{1}{60}$ である。ただし河道内の $-3m \leq y \leq 15m$ の範囲内では一定水深(2.5cm)を保った。また図-1に示された2本の導流堤は、幅10cmのブロック製で不透透であり、さらにその周りには4号碎石を1対1の勾配で敷き、反射波が生じないようにした。また河川流量は零とした。

実験では導流堤より2m沖合地点の入射波高を約15cm、周期を0.9秒とし、この波を10時間作用させ、この間1時間おきに海浜断面形状を測定するとともに、0, 4.5, 6, 9.5時間後の4回、容量式波高計によって砂州の周りの砕波波高および砕波点位置を測定した。また同時にフロートを投入し、その移動状況をクレーンに吊るしたモータードライブカメラによって写真撮影して流況を求めた。海浜断面形状の測定は、図-1のように測線を放射状に配置して行った。

図-2は砂州形状の変化を示している。図の横軸は沿岸方向距離、縦軸は岸沖方向距離を示し、また図中

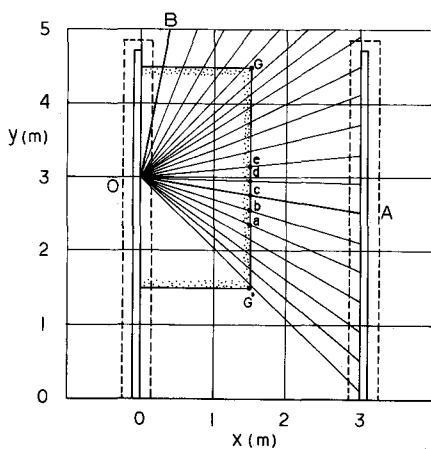


図-1 砂州の模型と測線配置

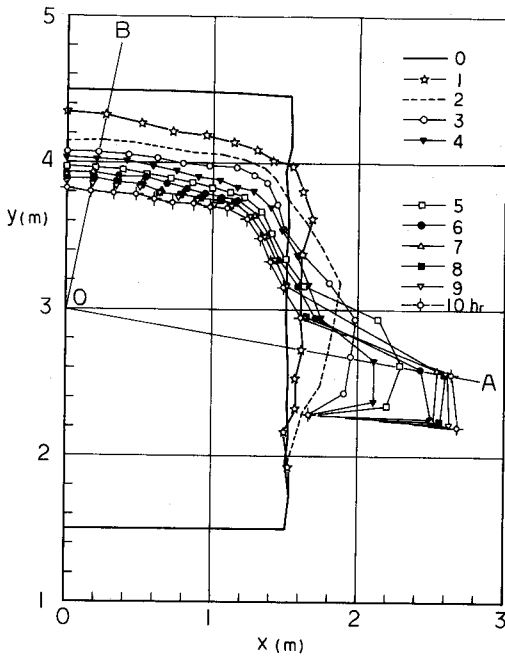


図-2 砂州形状の経時変化

の数字は波の作用時間を表わしている。初期値として与えた矩形状の砂州は次第に変形し、砂州前面（海側）で侵食された土砂は上流方向へ運ばれ、側面において砂嘴を形成した。

図-3, 4は海浜断面形状の変化を示している。図-3は、砂嘴が最も発達する付近の代表的堆積断面の経時変化を示したものであり、横軸は図-1および図-2のOA方向の距離、縦軸は静水面からの高さを表わす。また図中の数字は経過時間を示している。図-4は断面OBで示された代表的侵食断面における変化である。これらによると、いずれの断面においても海浜断面はほぼ平行移動に近い形で変形していることがわかる。この点は、海浜断面積の変化が、単一のパラメータによって表示しうる可能性を示しており、事実、断面積の変化量と汀線位置の変化量との間には、次に述べるように良好な相関関係が成り立つ。図-5は各断面における初期形状からの断面積の変化量 (ΔA (cm²))と、汀線位置の変化量 (Δr (cm))の関係を示している。測定値は、平均的には破線で示されるように、式(1)の関係を満足する。

$$\Delta A = 6.0 \Delta r \quad (1)$$

式(1)の関係は、ほぼ同一の実験条件で行った円形砂州の変形実験の際得られたものと同じ関係式である¹⁾。しかしながら図-5のデータを細かく調べると、系統的な傾向が存在する。図-5においては、特に図-1でOaよりOeで示された測線に沿って得られたデータについては他との区別がなされているが、これらによると河口より上流方向へ次第に直線の勾配が減少していることがわかる。この直線の勾配は地形変化の代表高さを示しているから、これは地形変化の代表高さが上流方向に次第に小さくなることを意味している。この理由は次のように考えられる。すなわち、砂

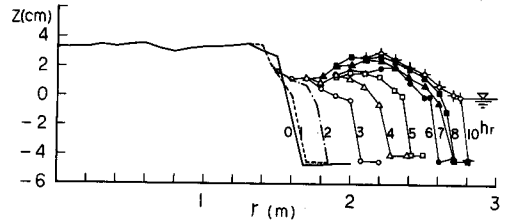


図-3 OAに沿う海浜断面形状

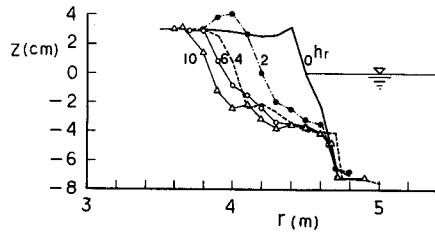


図-4 OBに沿う海浜断面形状

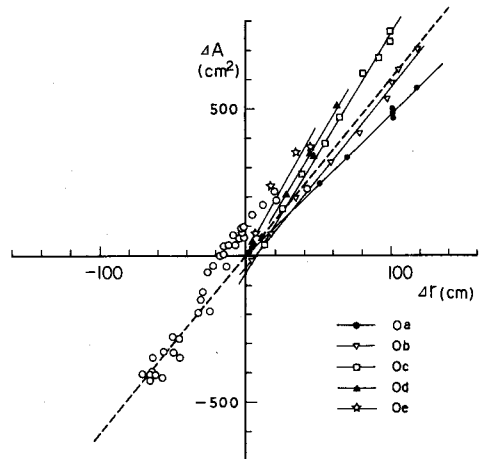


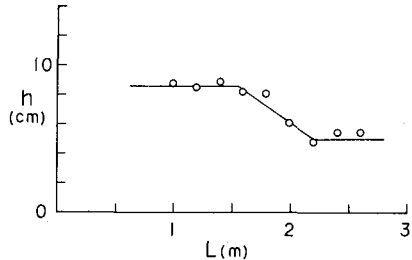
図-5 断面積の変化量 (ΔA) と汀線位置の変化量 (Δr) の関係

州の前面の侵食領域では波の作用によってほぼ一定の深さまで侵食されるが、初期砂州形状の側面（図－１のGG'区間）の堆積領域では上流方向に次第に水深が小さくなるにしたがい、堆積高さが減少したためである。このため、図－５の各測線ごとに直線の勾配を求めて地形変化の代表高さを定め、また測定断面数が少ない所では断面形状より直接平均的代表高さを読みとり、これらの場所的分布を調べた。図－６はこの結果を示したものであり、図の横軸は図－１のG点より上流方向に測った距離（L）、縦軸は地形変化の代表高さ（h）である。両者の関係はほぼ次式のようにまとめられる。

$$h = 8.6 \qquad L \leq 1.55 \text{ m} \qquad (2)$$

$$h = 17.2 - 5.56 L \qquad 1.55 \text{ m} \leq L \leq 2.2 \text{ m} \qquad (3)$$

$$h = 5.0 \qquad 2.2 \text{ m} \leq L \qquad (4)$$

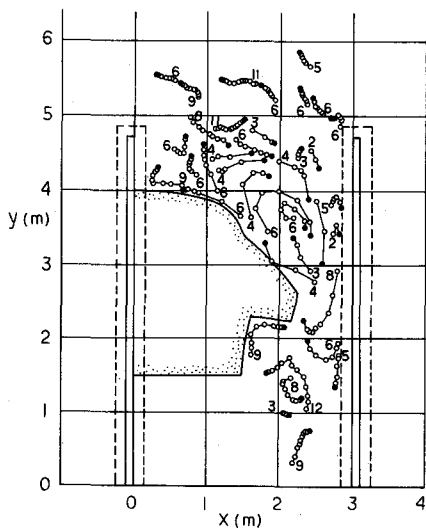


図－６ 地形変化の代表高さの場所的变化

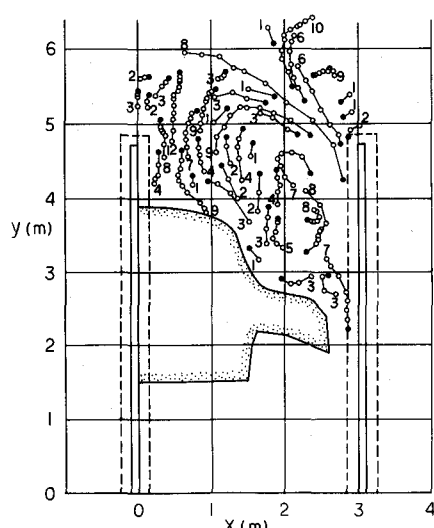
ここに h，L の単位は cm と m である。これらの関係は、土砂が堆積する場合にのみ有効であり、したがって砂州前面の侵食域では地形変化の代表高さは常に 6.0 cm と与えられる。

次に、砂州の周りの流況と波高分布について明らかにしよう。まず図－７は 4.5 時間における流況図を示している。流況はモータードライブカメラをクレーンに吊り下げて模型上へセットし、4 波（3.6 秒）ごとのフロートの移動状況を撮影したものである。図中の黒丸印はフロートの投入点、また図中の数字は測定回数を示している。砂州形状には大きな変化が見られ、砂州前面が 0.5 m 以上侵食されるとともに、側面に大きな砂嘴が形成された。これらの地形変化に対応して、砂州前面および側面においては、反時計回りの強い循環流が生じた。この流れは、砂州に沿って波が砕波する際に生ずる radiation stress の変化に起因するものと考えられる。図－８は 9.5 時間における流況を示している。これは、河口が完全に閉塞する直前の砂州形態である。反時計回りの循環流がさらに発達している。

砂州の周りの波高分布に関しては、流況測定と同時に測定が行われている。図－９は測定結果の一部を示す。図の(a)は 0 時間、(b)は 4.5 時間後の砕波波高分布を示している。図の構成は多少複雑なので図－９の(a)で説明しよう。図にはその時刻の砂州形状が示されているが、これに対応する砕波点位置（すなわち測定地点）が図中○印で示されている。(a)の場合、砕波点位置はほぼ初期汀線に平行である。次にこの○印で測



図－７ 砂州の周りの流況図（4.5 時間）



図－８ 砂州の周りの流況図（9.5 時間）

定された砕波波高より砂州にはほぼ法線となるように線を引き、その方向に波高の大きさをベクトルとして表示した。ただしその場合のスケールは y 軸上に H_b として定めてある。初期状態では砂州前面はほぼ一定波高を保ち、また河の上流方向へ波高は単調に減少している。この主たる原因は、砂州側面に沿う砕波によって波のエネルギーが減少したことによると考えられる。また、(b)では砂嘴が発達したため、砂嘴の背後にはほとんど波は到達していない。

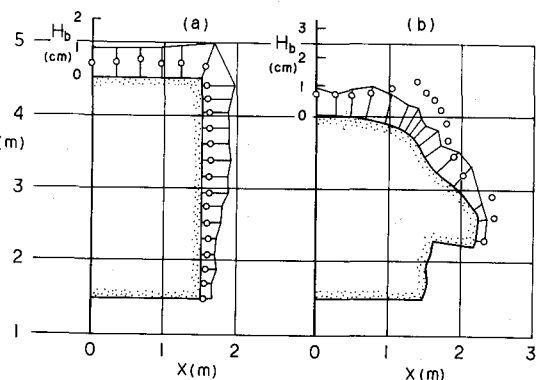


図-9 砂州の周りの砕波波高分布 (a: 0時間, (b: 4.5時間))

3. 一般化された汀線変化モデル

一般化された汀線変化モデルについては、前報で明らかにしたので、ここではその概要のみ述べることにする。まず最初に図-10に示すように固定した直角座標 (x, y) を定める。次に汀線上の任意の点Pにおいて接線方向に x^* 軸、これと直交する方向に y^* 軸をとる。このとき接線方向の漂砂量を q 、また y^* 方向に測った汀線位置の変化量を y_s^* とすれば、局所的な漂砂量の連続式は式(5)のように書ける。

$$\frac{\partial q}{\partial x^*} + h \frac{\partial y_s^*}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

ここに h は地形変化の代表高さとする。また、汀線の傾きは、汀線の座標を (x_s, y_s) とすれば、

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)_s \quad (6)$$

と表わされる。さらに、波向(θ)は図-10に示されたように y 軸からの角度として定義し、また角 β および角 θ は共に反時計回りを正とする。

漂砂量公式は、砕波点における入射角を α_b とすれば、式(7)のように与えられる。

$$q = F \sin \alpha_b \cdot \cos \alpha_b \quad (7)$$

ここに係数 F は次式のように表わされる。

$$F = f \frac{w}{8} (H^2 C_e)_b \quad (8)$$

ただし、 f : Savage 係数、 w : 水の単位体積重量、 $(H^2 C_e)_b$: 砕波点におけるエネルギーフラックスである。また、式(7)の入射角 α_b は浅海長波近似を用いれば Snell の法則により、

$$\sin \alpha_b = \left(\frac{h_b}{h_0} \right)^{\frac{1}{2}} \sin (\theta - \beta) \quad (9)$$

によって θ , β と関係付けることができる。ただし h_b は砕波水深、 h_0 は沖合の波向が与えられる地点の水深とする。式(5)の基準座標は (x^*, y^*) であり、一方式(6)~(9)の座標は (x, y) なので、閉じた方程式系とするためには両者の関係を定義しなければならない。このため座標点Pが接線と直角方向に Δy_s^* だけ移動した場合を考える。このとき固定座標系から見た変化量 $(\Delta x_s, \Delta y_s)$ は次式によって与えられる。

$$\Delta x_s = \Delta y_s^* \cos \left(\frac{\pi}{2} + \beta \right), \quad \Delta y_s = \Delta y_s^* \sin \left(\frac{\pi}{2} + \beta \right) \quad (10)$$

したがって移動後の点Pの位置は $(x_s + \Delta x_s, y_s + \Delta y_s)$ と定まる。

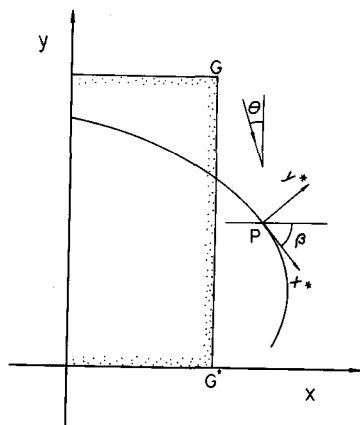


図-10 座標系

数値計算は陽形式差分法を用いて行う。まず初期汀線に沿って汀線をN組の微小区間に分割し、座標 (x_s, y_s) と漂砂量 q を与える点を交互に配置する。また角 β は漂砂量 q と同一点で定義する。次に与えられた初期汀線形状より角 β を計算する。ただし角 β の決定法については前報¹⁾に詳しいのでここでは省略する。角 β が求まれば、これと既知の入射角 θ を用いて式(9)より角 α_n が求まり、さらに各点の漂砂量 q を式(7)によって算出する。

漂砂量が求まれば、汀線位置の変化量は次の方法によって決定される。すなわち式(5)を差分化すると、

$$\Delta y_{s,n}^* = -\frac{\Delta t}{h} (q_{n+1} - q_n) \frac{1}{\Delta x_n^*} \quad (11)$$

が得られる。ただし添字 n は n 点における量を示し、また Δx_n^* は次式のように表わされる。

$$\Delta x_n^* = \sqrt{(x_{s,n+1} - x_{s,n})^2 + (y_{s,n+1} - y_{s,n})^2} \quad (12)$$

漂砂量 q_n が各点で与えられていたとすれば、 $\Delta y_{s,n}^*$ は式(11)より求まるから、式(10)によって $\Delta x_{s,n}, \Delta y_{s,n}$ の計算が可能である。この結果、移動後の新座標は次式によって定められる。

$$x_{s,n} = x_{s,n} + \Delta x_{s,n}, \quad y_{s,n} = y_{s,n} + \Delta y_{s,n} \quad (13)$$

新しい座標が求まれば再び式(6)を用いて角 β を求める。以降計算は同様なステップが繰り返して行われることになる。なお問題の種類によっては、座標点の移動に伴う累積誤差を完全に除去することができない場合もある。このような場合には、座標点に関して平滑化を行う¹⁾。

4. 計算値と実験値との比較

計算を行うには、刻々と変化する砂州の周りの波高分布を定めなければならない。測定された波高分布は図-9に1例が示されているが、相当複雑な分布形となっている。しかし基本的には砂州前面ではほぼ一定の波高であり、一方砂州側面では上流方向に単調に減少する傾向がある。このため4組の測定値(0, 4.5, 6, 9.5時間の測定値)より砂州前面を代表する7点の平均砕波波高を求めた。この平均値は $\bar{H}_b = 1.05 \text{ m}$ であった。次にこの値を用いて各点の測定値を無次元化した。また砕波波高を測定した点に対応する汀線位置(図-9の各垂線との交点)の点G(図-10参照)から河の上流方向へ測った距離(y')を求め、無次元化された砕波波高と、この距離との関係を図-11のように整理した。測定値は大きなばらつきを有するが、以下に述べる計算においては図中の実線および式(14), (15)

で示されるような平均的関係が成立すると仮定する。ただし y' と y の間には $y' = 3 - y$ の関係が成り立つ。

$$0 \text{ m} \leq y' \leq 0.66 \text{ m}$$

$$H_b / \bar{H}_b = 1.0 \quad (14)$$

$$0.66 \text{ m} \leq y' \leq 3.0 \text{ m}$$

$$H_b / \bar{H}_b = 1.19 - 0.29 y' \quad (15)$$

計算においては係数 F を定める必要があるが、係数 F は波高比の $5/2$ 乗に比例するので、 F の関数系を次のようにおき、 F_0 のみを変えて計算することにした。

$$0 \text{ m} \leq y' \leq 0.66 \text{ m}$$

$$F = F_0 \quad (16)$$

$$0.66 \text{ m} \leq y' \leq 3.0 \text{ m}$$

$$F = F_0 (1.19 - 0.29 y')^{5/2} \quad (17)$$

すなわち、入射波高を変化させたとしても、式(16)で与えられた波高比は変化しないと仮定した。 F_0 としては、

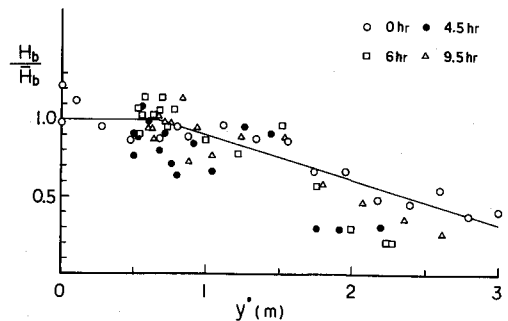


図-11 無次元砕波波高の岸冲分布

式(8)において $H_0 = 0.01 \text{ m}$, $C_s = 0.37 \text{ m/s}$, $\alpha = 0.217 \text{ m}^3/\text{t}$ とおくと $F_0 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{t}$ となるが、この値を用いた場合地形変化は測定値に対して小さ過ぎる結果となった。このため計算では測定値と良好な対応を示す値として $F_0 = 9.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ を選定した。計算は全体で2ケース行った。ケース①は地形変化の代表高さを一定値とするものであり、式(5)の h として平均値 $\bar{h} = 6.0 \text{ cm}$ を用いる。また式(9)の $(h_v/h_0)^{1/2}$ を 0.71 と仮定する。これは接線方向より波が入射するとき $\alpha_s = \pi/4$ を与える。ケース②は他の条件をケース①と同一として地形変化の代表高さの場所的变化を考慮し、 h として式(2)~(4)を用いるものである。

この種の計算では土量の保存則が厳密には成立せず、土量の欠損が生ずる。このため各ステップごとに全侵食土砂量 V_1 と堆積土量 V_2 を求め、その差の絶対値 $\Delta V = |V_1 - V_2|$ の V_1 に対する比を累積誤差の指標として用いることにした。さらにこのような累積誤差は時間とともに増大するので、その誤差の目安として10%を選び、誤差が10%となった時点で計算を打ち切ることとした。まず、ケース①について明らかにしよう。この場合汀線を約6cm間隔で91点に分割し、両端における漂砂量を0とし、また計算時間間隔は $\Delta t = 0.4$ 分、入射角は $\theta = 0^\circ$ とおき、座標点の平滑化は30ステップごとに行った。図-12はケース①の計算結果であり、1時間おきの汀線形状が示されている。図-2の実験値と比較すると、基本的特徴は良く一致している。すなわち砂州前面では侵食され、この土砂は砂州側面に堆積した。ただし計算では砂嘴の位置が海側に寄り過ぎている傾向がある。また計算値よりも実験値の方が砂嘴の幅が狭い。ただし図-2の実験値では侵食部分の面積よりも堆積部分の面積が小さく、平面的には均衡は保たれていない。これは既に述べたように、地形変化の代表高さが場所的に変化したためであり、この点はケース②の計算によって明らかにされよう。なお、計算において、砂嘴の最も突出した部分より上流側においては、

$$\theta - \beta = \pi/2$$

(18)

とおき、またこの部分においても依然として式(17)が成立すると仮定して計算を行った。

図-13はケース②の結果である。基本的特徴はケース①と同様であるが、地形変化の代表高さを変化させたために、堆積部分の面積は侵食部より小さく、また砂嘴はケース①よりも上流側に発達している。これらの点は図-2の実験値の特徴と一致し、地形変化の代表高さの変化が計算値に相当大きな影響を及ぼすことがわかる。

以上2ケースの計算値の累積誤差は表-1のようにまとめられる。このような誤差の原因としては種々のものが考えられるが、その主たるものとして計算に伴って座標点間隔が広くなり過ぎる点が考えられる。したがって誤差を小さくするには適当な時間ごとに座標点の再配置を行う必要がある。このため以上の計算ではまず450ステップ($t = 3$ 時間)まで計算を行い、この時点で座標点の再配置を行って最終結果を求めた。

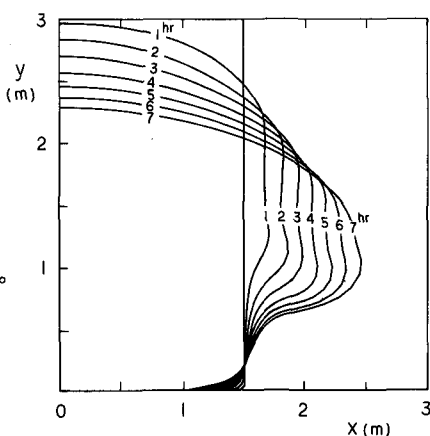


図-12 砂州の変形予測 (ケース①)

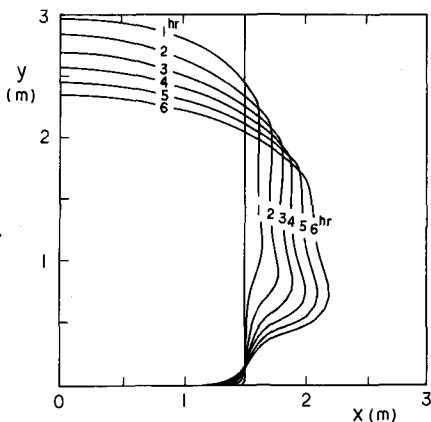


図-13 砂州の変形予測 (ケース②)

5. あ と が き

本論文では、矩形砂州の変形実験の結果を明らかにするとともに、一般化された汀線変化モデルを用いた砂州の変形予測を行い、両者の比較を行った。この結果、地形変化の代表高さの場所的变化を考慮したとき、計算値は実験値と相当良好に対応することが明らかになった。また、実験においては砂州変形に伴う砂州の周りの流れの状況について明らかにすることができた。今後は、現地の河口砂州の変形予測に当モデルを利用して行きたいと考えている。

表-1 累積誤差 $\Delta V/V_i$

時 間	ケース①	ケース②
1	1.1 %	2.2 %
2	2.9	0.4
3	3.2	3.7
4	3.4	7.1
5	5.0	9.3
6	9.2	9.2
7	10.0	—

参 考 文 献

- 1) 宇多高明：新しい海浜変形モデルによる河口砂州の変形予測，土木学会論文報告集、第322号、pp. 77~88、1982.
- 2) 宇多高明：砂でできた人工島の変形予測、第29回海岸工学講演会論文集，pp. 289~293，1982.