

河口流出砂の堆積形状に関する数値予測モデルと 堆積形状に及ぼす河口処理工の影響

榎 木 亨*・ 出口 一郎**・ 片上 貴文***

1. ま え が き

従来の河口処理工は、河口閉塞を防止し、河川流の疎通能力を高め、さらには河道内への波浪、塩水の進入を防止するといった主として河川防災上の観点から計画・施工されてきた。その代表例は、高い沿岸漂砂捕捉機能をもつ一対の突堤を利用した導流堤工法である。しかし、導流堤が建設されると、河口周辺の沿岸漂砂の汀線方向分布に大きな不連続が生じ、周辺海浜に強い impact が加えられる。さらに近年社会問題となっている海岸侵食の一因として河道改修あるいはダム建設に伴う河川流出土砂の減少があげられている。したがって、河口処理計画を行なうにあたっては、先に述べた河川側から要求される機能に加え、周辺海浜に与える impact が小さく、かつ流下土砂を効率よく周辺海浜に供給するという、海岸防災上からの要求も満たすような処理工を考えなければならぬ。

本研究は、上述した意味での最適な河口処理工を立案するにあたっての基礎資料を得るために、まず河口流出土砂の海域における堆積形状に対する数値予測モデルを構築し、同時に河口流出流及び流出土砂の海域での挙動に及ぼす各種河口処理工の影響について実験的な検討を加え、その結果に基づいて予測モデルの妥当性の検証を行うことを目的としている。

2. 流出土砂の河口における堆積形状予測モデルについて

海岸で生ずる水深変化に関する数値予測法については、すでにいくつかのモデルが提案され、現地スケールの実用的な数値予測も行なわれている。著者らもさきに河口周辺の地形変動予測モデルを提案している¹⁾が、そこでは河口流出土砂の海浜変形に対する寄与は考慮していない。そこで、本研究においては河口流出土砂のみに着目し、それが海域でいかなる堆積形状を示すかということに対する予測モデルを構築した。

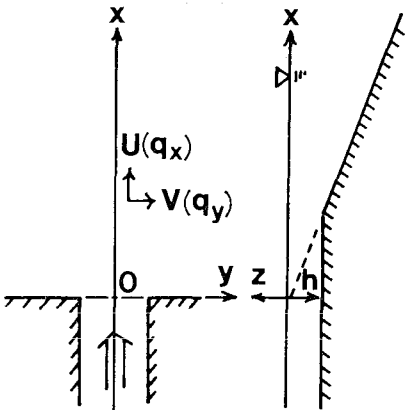


図-1 座 標 系

図-1 に示す座標系において、任意の地点 (x, y) における水深 h の時間変化は次式で表わされる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} c u_s dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} c v_s dz + \Delta Q_s \right) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 η は平均水位変動量、 c は漂砂濃度、 u_s, v_s は漂砂移動速度で $-$ は数波にわたる時間平均を表わし、 ΔQ_s は wash load 状態で流出した土砂の沈降量 flux を表わす。漂砂濃度がほぼ平衡状態に達している場合を考えると、(1) 式右边第一、第二項の局所漂砂量 flux に対しては平衡状態での流砂（漂砂）量公式が適用され、したがって海域での浮上、沈降量 flux の差、すなわち水深変化は流砂量の空間的勾配と wash load の沈降によって生ずる。

ここでは局所漂砂量 flux $q_x = \int_{-h}^{\eta} c u_s dz$ 及び $q_y = \int_{-h}^{\eta} c v_s dz$ に対して定常流場において flux model に基づいて定量化されている Rijn²⁾ の式を用いる。一方、 ΔQ_s に対してはすでにさまざまな型の表現が提案されているが³⁾、本モデルにおいては先に述べたように河道内で浮上させられた wash load の移流・拡散後の沈降量 flux のみを表わすため次式で表現する。

$$\Delta Q_s = -w_f \bar{c} \dots\dots\dots (2)$$

ここに w_f は流出土砂の沈降速度、 $\bar{c}$ は wash load の

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科
*** 正会員 工修 大成建設株式会社

時間平均濃度で次の移流拡散方程式の解として求められる。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + U \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + V \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = K_x \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} + \Delta Q_s \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに (U, V) 及び (K_x, K_y) はそれぞれ x 及び y 軸方向の平均流速と拡散係数で、境界条件は河道内計算領域の上流端での浮遊砂濃度 COR で与えられるものとする。

流出土砂の堆積形状は (1) 式を差分化し、数値的に計算することによって予測することができる。本研究で行った実験結果に対する具体的な適用法については後述する。

3. 河口流出流及び流出土砂の挙動に及ぼす河口処理工の影響に関する平面実験

ついで、河口処理工が河口流出流及び流出土砂の海域での挙動に及ぼす影響を及ぼすかということについて実験的な検討を加えた。実験に用いた水槽は長さ 15m、幅 5m、高さ 0.6m の小型平面水槽で、水槽中に 図-2 に示す一様勾配 1/10 の模型海浜と、幅 0.5m の河道模型をモルタルで作成した。河床勾配は 1/100 で、図中に示す河口原点 ($x=0$) における水深 h_0 はほぼ 6.5cm とした。河口流出土砂は、図-2 に示す深さ 10cm、長さ 1m の給砂槽中の砂量が一定になるように供給し、2 時間通水後の海域における堆積地形の測定を行った。また、河道内及び河口周辺海域の平均流速及び水位の精測を流出土砂がない状態で行い、同時に投入したトレーサを 16mm シネカメラで撮影することによって流況の測定も行った。河川流量 Q は一定 (11.7 l/sec) とし、模型底質には中央粒径 $d_{50}=0.15\text{mm}$ 及び 0.35mm の比較的均一な川砂を用いたが、前者の場合は顕著な浮遊が生じ、後者の場合はほとんど浮遊は生じなかった。また河口処理工としては、1. で述べた観点から導流堤及び離岸堤を対象としたが、それぞれの設置位置は 図-2 に示すとおりである。

このような実験における流出土砂の供給方法としては種々の方法がとられている。しかし本来一つの流れとそれによる特定の底質の流砂量は一対一に対応すべきである。従って、本実験においては多量の底質を給砂し、海域における堆積速度を速めるようなことはせず、模型においてより自然な状態での流出及び堆積が生ずるように、図-2 に示すような給砂槽からの流出土砂の供給方法を採用した。供砂量は $d_{50}=0.15\text{mm}$ の場合は $0.4\sim 0.5\text{l/min}$ 、 $d_{50}=0.35\text{mm}$ の場合は $0.3\sim 0.4\text{l/min}$ であった。

また、上記実験において形成された堆積地形に水槽水

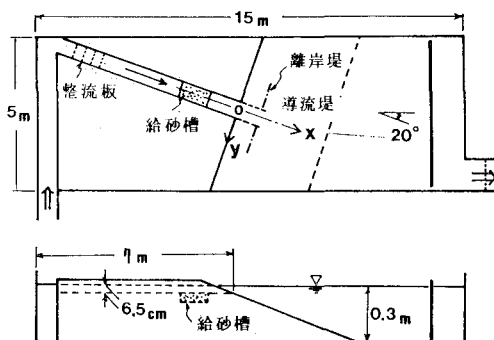


図-2 実験水槽と河口模型

平床部 ($h=30\text{cm}$) における波高 $H=4\text{cm}$ 、周期 $T=0.8$ 秒の波を汀線に対して 20° の角度で入射させ、波作用による堆積地形の変形に及ぼす処理工の影響について検討を加えた。なお、処理工として実験に用いた導流堤の堤長 l_f は 0.45m 及び 1m 、離岸堤の堤長 l_o は 0.8m 及び 1.2m のそれぞれ 2 種類とした。実験ケース数は、これらの処理工を設置した 8 ケースと処理工を設置していない 2 ケースの計 10 ケースである。

4. 河口流出流及び流出土砂の堆積形状に及ぼす河口処理工の影響

図-3 は堤長の短い導流堤及び離岸堤を設置した場合の河口中央測線 ($y=0$) 上の平均流速 (中層の) U 及び平均水位変動量 $\bar{\eta}$ を、処理工がない場合と比較して示したものである。導流堤を設置した場合の U 、 $\bar{\eta}$ は、 $x \leq 1.75\text{m}$ の領域、特に河道内 ($x \leq 0$) では処理工がない場合のそれらとほとんど一致する。

また、離岸堤を設置した場合は、河道内で若干水位上昇が生ずるもののそれに伴う流速の低下はみられない。

一方、 $x \leq 2\text{m}$ の沖測領域においては、処理工を施工した場合には処理工がない場合に比べて流出流速が減少

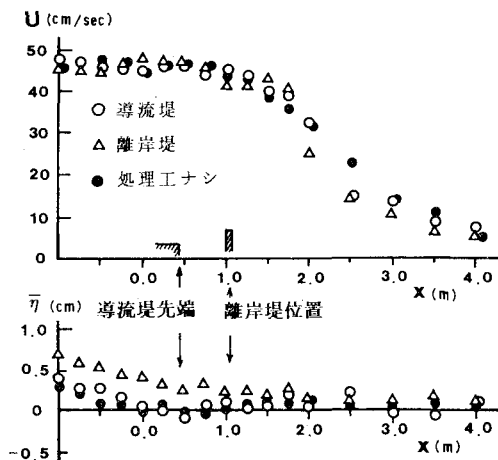


図-3 流出流速、水位に及ぼす処理工の影響

しているが、 $x \sim 4\text{m}$ 付近では再び両者は同程度の値を示すようになる。他の処理工を設置した場合も図-3に示した2ケースと同様の流出流速の低減を示した。

図-4~6は処理工の有無によって流出土砂の堆積形状がどのように変化するかということをも $d_{50}=0.35\text{mm}$ の掃流砂が卓越する場合について示したものである。それぞれの図(a)は流出開始2時間に生じた堆積地形の堆

積量の等しい地点を結んで等高線表示したものである。図(a)より、処理工の有無にかかわらず最大の堆積はほぼ河道中央線上 $x=1.5\text{m}$ 付近で生じ、堆積量も 8cm 強の値となっている。堤長の異なる他の処理工を設置した場合も、図-5あるいは6と同様の堆積形状を示す。離岸堤を設置した場合には、例えば図-6に示されるように堤体背後に若干の流下土砂が捕捉されるものの河道中央測線に沿う堆積形状は処理工の有無にかかわらずほぼ一致した。

従って本実験に用いた処理工は流出土砂の堆積形状には有意な影響を及ぼさないことが明らかになった。一方 $d_{50}=0.15\text{mm}$ の底質を使用した浮遊砂が卓越する場合においても同様の結果が得られた。

須賀ら⁴⁾は洪水による土砂流出を測定し、多量の底質を強制的に流出させた実験を行い、掃流状態での流出が卓越する場合の流出土砂は、海域で顕著な広がりをもせず舌状の堆積が生ずることを示している。本実験で行った浮遊砂が卓越する場合の堆積形状も図-4~6に示す掃流砂が卓越する場合同様水平方向に大きな広がりは見なかった(後述図-10参照)。また、須賀らの実験によると、導流堤長が変化すると生じる堆積形状も変化する。上述したように、本実験においては、処理工の有無による堆積地形の顕著な差異は生じなかったが、両者の実験結果の差異の原因については、実験条件、実験方法の差異あるいは堆積過程に関する時間スケール等今後検討すべき問題が数多く残されている。

一方、図-4~6の(b)は図(a)に示す堆積地形に所定の波浪を一時間造波した後の地形を示したものである。図(a)及び図(b)を比較して明らかなように、波作用後の堆積地形は全体的に平滑化され、図-4に示す処理工を設置しない場合は碎波線(図中破線で示す)より若干岸側の $x=0.5\text{m}$ 付近を中心に沿岸流下手側に流下土砂が輸送されている。これは短い導流堤を設置した場合も同様である。しかし長い導流堤を設置した場合はこのような汀線方向の輸送は生じず、図-5に示されるようにもっぱら向岸方向に輸送された流下土砂が導流堤内に堆積し、河川流の流水断面積を大きく減少させている。図-6に示す離岸堤の場合も顕著な汀線方向の輸送は認められないが、河川流によって開口部を通過し堤体沖側に堆積した土砂が波作用により逆に開口部から離岸堤背後に輸送され、そこに堆積するが、河川流の流水断面積を減少させるほどの堆積は生じていない。

浮遊砂が卓越する $d_{50}=0.15\text{mm}$ の場合には、波作用によって堆積地形はさらに平滑化され、長い導流堤を設置した場合も河川流水断面積は波作用前後で変化は生じなかった。

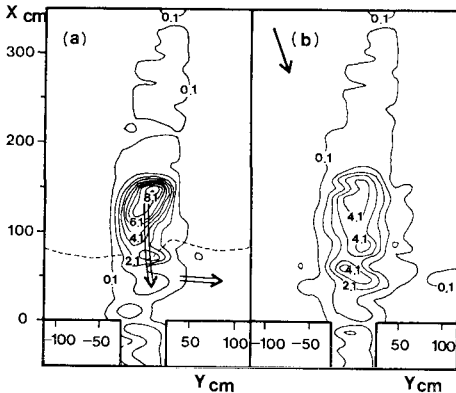


図-4 波による堆積地形の変形(処理工なし)

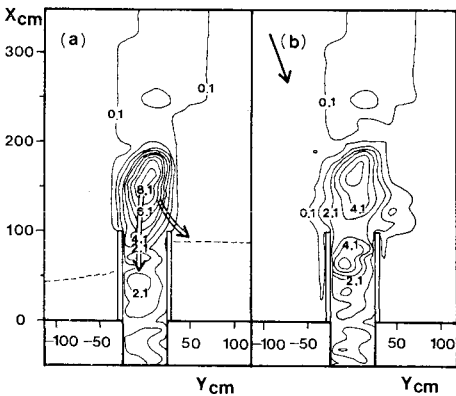


図-5 波による堆積地形の変形(導流堤)

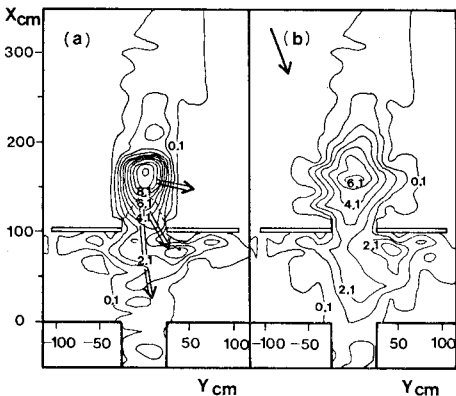


図-6 波による堆積地形の変形(離岸堤)

6. 河口流出土砂の堆積形状に関する数値予測モデルの適用性について

最後に 2. で述べた堆積形状予測モデルの適用性について前述の実験結果に基づいて検討する。

水深変化の計算は (1) 式を差分化して行いが、その際、河川流出流速、 x, y 方向の局所流砂量、wash load 等を与える必要がある。本計算においては、これらの量を以下のように与えた。まず流れ場の計算には従来の海浜流予測モデルを用いる。次に、局所流砂量に対しては、Rijin によって提案されている flux モデルに基づく掃流及び浮遊砂量式を用いる。この時、底面勾配の影響については、底質の移動限界摩擦速度において砂粒に作用する重力効果として考慮する。また wash load の計算は、水槽における給砂槽最下端（計算領域の上流端とする）における浮遊砂濃度を Rijin の浮遊砂量公式から求め、それを境界条件として (3) 式からその濃度を計算する。

なお、本実験においては、流出土砂のみによる堆積形状を抽出するため、海域を固定床とした。このような状況における流出土砂の堆積に対して次のようなモデルを考えた。ただし wash load の source は計算領域外にあるので特別の考慮をする必要がない。

簡単のため x 方向一次元の現象として考える。そして図-7 に示すように計算点が配置されるように連続方程式を差分化して考える。

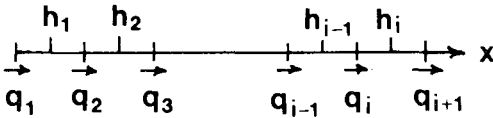


図-7 堆積モデルの計算点配置

時間 $t_s=0 \sim \Delta T$ の間には $x=0$ からの流入 q_1 しかなく、 $t_s=\Delta t \sim 2\Delta T$ の間には $x=0$ 及び $x=\Delta x$ においてのみ流砂量 q_1, q_2 が生ずる。このように考えると、 $t_s=(n-1) \times \Delta T \sim n\Delta T$ の間においては、 $x \leq (n-1)\Delta x$ の領域においてのみ流砂量が生じ、 $x=i \cdot \Delta x$ における水深変化量 Δh_i は

$$\Delta h_i = \{ (n-1)q_{i+1} - (n-i+1)q_i \} (\Delta T / \Delta x) / (1-\lambda) \dots\dots\dots (4)$$

となる。

計算における局所流砂量による水深変化に対しては、 x, y 方向に対して (4) 式に基づいて差分化して行った。次にまず流れ場の再現性について述べておく。

図-8 は河口処理工を設置していない場合において計算された河道中心線上の流出流速 U 及び平均水位変動量 $\bar{\eta}$ と実測結果の比較を示したものである。図より明らかに $x \geq 1.5 \text{ m}$ の領域における計算流速は実測よ

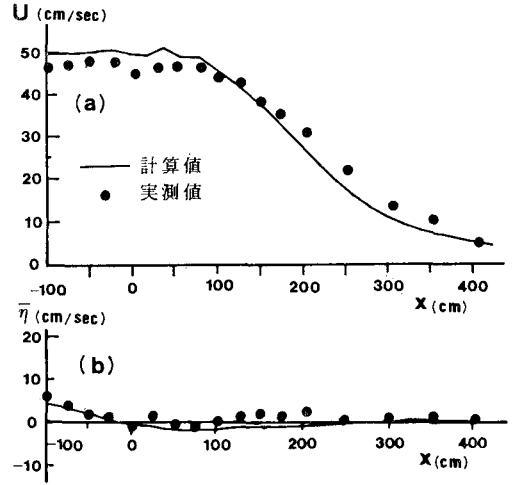


図-8 流況の再現性（処理工なし）

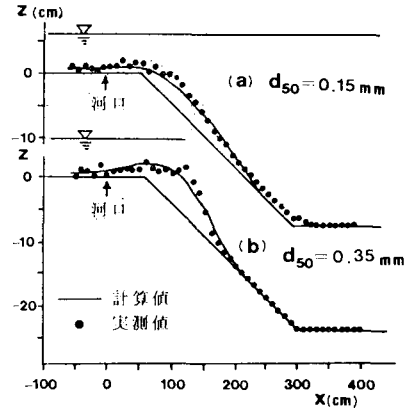


図-9 流出土砂の堆積形状

りも若干早く低減する傾向はあるものの、ほぼ妥当な再現性が得られている。

図-9 はこのような流況において先に述べた方法において計算された河道中央測線上の堆積形状を実測値と比較したものであり、(a) は $d_{50}=0.15 \text{ mm}$ 、(b) は $d_{50}=0.35 \text{ mm}$ の場合を示す。ただしいずれの場合も処理工は設置していないケースで $\Delta x=\Delta y=20 \text{ cm}$ 、 $\Delta t=0.15 \text{ 秒}$ で計算した。

図-9 より掃流砂が卓越する場合も浮遊砂が卓越する場合も少なくとも河道中央測線上の堆積地形は (2)~(4) 式に基づいて十分な精度で予測可能なことがわかる。

最後に浮遊状態の流砂移動が卓越する場合の流出土砂推移パターンにおいて、掃流・浮遊及び wash load による水深変化がそれぞれの程度の割合をしめるかということについて考察しておく。

図-10 (a) は 図-9 (a) に対応する浮遊流砂が卓越する場合に実測された水深変化量を示したものである。一方図 (b) は本予測モデルによって予測された水深変化量

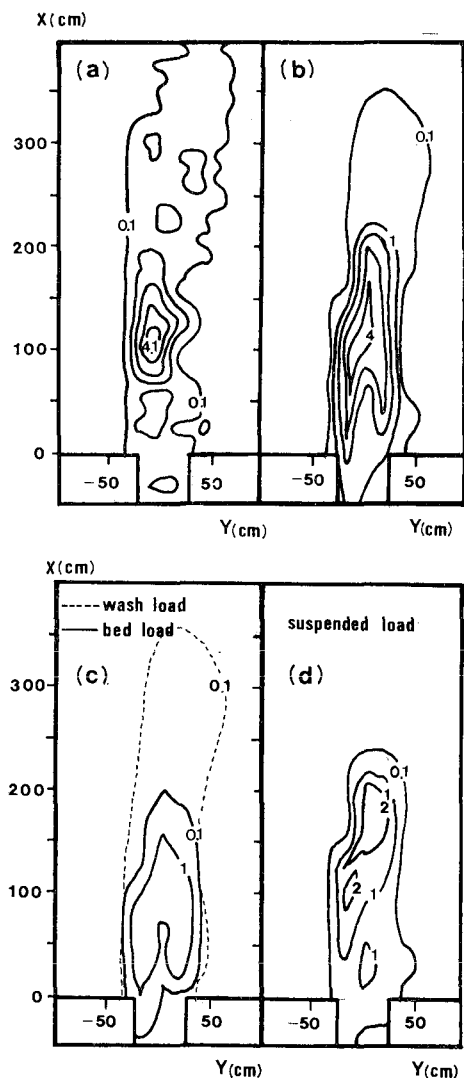


図-10 流出土砂の堆積パターン。

を、図(c)はその中の掃流流砂及び wash load による地形変化を、また図(d)は浮遊流砂による水深変化量を示したものである。これらの図から明らかなように、まず

本数値モデルによって予測される平面的な堆積形状も、定性的及び定量的に、ほぼ実験結果を再現していると判断してもさしつかえない。(図(a)と図(b))。また、掃流流砂による水深変化は $x \leq 1.5 \text{ m}$ の領域、浮遊流砂による水深変化は $0.5 \text{ m} \leq x \leq 1.75 \text{ m}$ の領域で顕著であり、wash load による水深変化は $x \geq 3.5 \text{ m}$ にも及ぶが、全水深変化に示める変化量は微弱であることもわかる。

なお、河口処理工として導流堤を設置した場合の堆積形状については底質粒径の大小にかかわらず 図-10 に示す結果と同程度の精度の再現性が得られたが、離岸堤を設置した場合は河口流出流の流れ場が計算によって十分再現されなかった。従って、このような場合の流れ場の計算手法についてはさらに詳細な検当が必要であると思われる。

7. あとがき

本研究においては、河口流出土砂の海域での堆積形状予測モデルを作成し、実験結果に基づいてその妥協性を検証すると同時に、流出土砂の堆積形状に及ぼす河口処理工の影響に対して実験的な検証を加えた。今後さらに種々の条件下における流出土砂の挙動に対して実験を行い、本予測モデルを refine すると共に、現地海岸への適用性について検証していくつもりである。

最後に実験・数値計算を行うにあたって手伝っていた植田彰 君(現在大学院生)に謝意を表する。

参考文献

- 1) 植木 亨・李 宗燮・出口一郎: 河口周辺の海浜流及び地形変動モデルに関する研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 411~415, 1984.
- 2) Rijn, L. C.: Sediment transport, delft hydraulic laboratory, Publ. no, 334, 1985.
- 3) 例えば, 細川恭史・田中則男・久高将信: トレンチ内に堆積する浮泥量の予測方法と現地への適用性, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 312~316, 1986.
- 4) 須賀堯三: 河口砂州の河道侵入に対する対策工法に関する研究, 自然災害特別研究(1)研究成果報告書, 昭和61年3月.