

河口導流堤近傍の地形変化に関する実験的研究

田 中 仁*・ 鈴 木 康 之**・ 須 賀 堯 三***

1. 序 論

河口閉塞対策工法の代表的なもののひとつとして、河口導流堤がある。しかし、導流堤の諸元（長さ、方向、開口幅）の決定に関して現在のところ明確な指針は存在せず、経験的な判断に委ねられているのが実状である。

従来、河口閉塞に関する研究は洪水水位の低減対策や航路維持の問題等に関連して行われて来た。しかし、その多くは最狭部の河口断面積に関する研究であり、河口部の局所的な地形変化にのみ着目している。

本研究では、河口部の地形変化を空間的により大きなスケールで把えることを試み、河川流や導流堤の存在が河口部や周辺の海浜地形に対して与える影響について検討を行う。まず、導流堤近傍の流れの場を定量的に把握するために、導流堤を有する河口部の地形を表現する写像関数を導出した。さらに、その写像関数をもとに、導流堤近傍の地形変化の程度を表現するパラメータを得、実験結果との対応を調べた。また、地形変化の特性についてより詳細な検討を行うために、Empirical Eigenfunction^D による解析を行った。

2. 実験方法

実験には幅 350 cm、長さ 540 cm、深さ 60 cm の平面水槽を用いた。その概要を図-1に示す。実験に用いた底質は比重 2.65、中央粒径 0.48 mm の砂である。沖波の入射方向に対して、初期汀線を 15° 傾けた。また、初期海浜勾配は 1/10 である。海浜の中央部に幅 30 cm の河道を設け、汀線から 15 cm 沖まで 2 本の導流堤を設置した。河道部の水深は 5 cm である。

実験は 3 ケース行われた。実験条件を表 1 に示す。河川流量のみを変化させており、他の水理条件は各ケースの間ではほぼ同一である。表 1 最下段には堀川・砂村ら²⁾により提案された C 値を示した。

地形測定には水陸両用連続式砂面計を用いた。沿岸方向の測線間隔を 10 cm とし、合計で 26 本の測線を設け

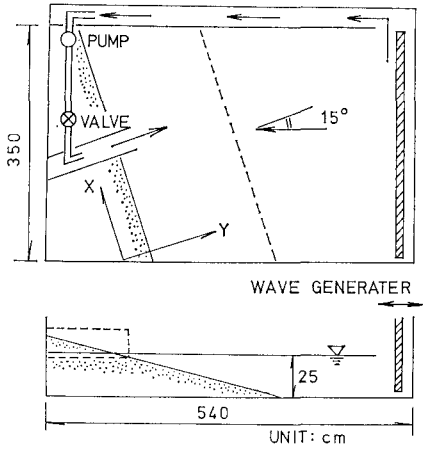


図-1 実験装置

た。

3. 導流堤を有する河口の写像関数

河口導流堤近傍の流れ・地形変化に関しては、従来、定量的評価がほとんど成されていない。その原因のひとつとして、河口においては多くの外力が非線型に重合しており、現象が極めて複雑であるという点が挙げられる。そこで、本節では現象を単純化して、河口部の流れとして河川流と沿岸流のみを考慮し、それらによる砂移動現象を対象とした解析を行う。比較的長い時間スケール(年オーダー)で現象を把えたとすれば、波による岸沖漂砂の影響は無視できるものと考えられ、上記の取扱いが可能となる。

(1) 写像関数の導出

導流堤は右岸・左岸で長さが等しいものとし、汀線に

表-1 実験条件

ケース	1	2	3
H_0 (cm)	3.18	3.05	3.34
T (sec)	1.09	1.09	1.09
Q (l/s)	0	2.0	3.0
C	2.55	2.44	2.67

* 正会員 工博 宇都宮大学助手 工学部土木工学科
** 正会員 大日本土木株式会社
*** 正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部土木工学科

対して直角に伸びているものとする。物理平面(z 平面)と写像平面(t 平面)との対応を図-2に定める。この時、Schwarz-Christoffel 変換により次式を得る。

$$\frac{dz}{dt} = c_1(t+c)^{-1/2}(t+1)t^{-1}(t-1)(t-c)^{-1/2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 c_1 , c は定数である。式(1)を積分して、

$$z = c_1 \left(\sqrt{t^2 - c^2} + \frac{1}{c} \operatorname{cosec}^{-1} \frac{t}{c} \right) + c_2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

を得る。ただし、 c_2 は積分定数である。

B 点と F 点について、 z 平面と t 平面との対応を考えることにより、定数 c_1 , c_2 が定まり、次式が得られる。

$$z = \frac{ac}{\pi} \left(\sqrt{t^2 - c^2} + \frac{1}{c} \operatorname{cosec}^{-1} \frac{t}{c} \right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

同様な対応関係を C 点、 E 点について考えると、定数 c が導流堤長 l の関数として表わされる。

$$l = \frac{ac}{\pi} \left\{ \sqrt{c^2 - 1} + \frac{1}{c} \ln(c - \sqrt{c^2 - 1}) \right\} \quad \text{(ただし } c \geq 1) \quad \dots\dots\dots(4)$$

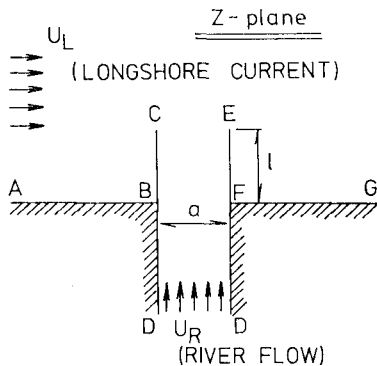


図-2 物理平面と写像平面との対応

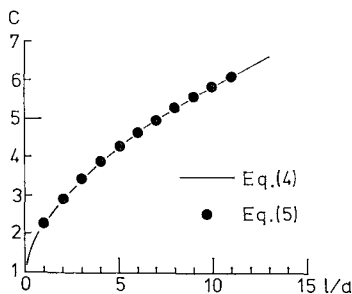


図-3 無次元導流堤長 l/a と定数 c との関係

式(4)より求まる無次元導流堤長 l/a と c との関係を図-3に示した。ただし、通常は導流堤長 l がまず与えられ、それに対する c を算出する場合が多いので、 c について陰的な表示式である式(4)は実用的とは言えない。そこで、 c を陽的に表示する近似式について検討した結果、次式を得た。

$$c = 1.0 + \exp \left\{ 15.969 - 15.734 \left(\frac{l}{a} \right)^{-0.03886} \right\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式(5)による算定値を図-3に示した。近似式の精度は十分であると判定される。

物理平面に河川流 U_R と沿岸流 U_L が存在する流れを考える時には、 t 平面に湧き出しと一樣流を配置すれば良い。この時、複素速度ポテンシャル $W(t)$ は次式で与えられる。

$$W(t) = \frac{a}{\pi} (c U_L t + U_R \ln t) \quad \dots\dots\dots(6)$$

式(3), (6)を用いることにより、2本の導流堤を有する河口部の流れを計算することができる。

(2) 地形変化(堆積・侵食)を判別するパラメータ

河川における流砂量公式をもとに、河川流・沿岸流による砂移動量は流速の n 乗に比例するものとする。この時、砂の連続式より次式で定義されるパラメータ H の正・負はそれぞれ局所的な堆積・侵食に対応するものと考えられる。

$$H(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} (\sqrt{u^2 + v^2})^n \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} (\sqrt{u^2 + v^2})^n \right\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに (u, v) は (x, y) における流速値である。式(7)の右辺に式(3), (6)より求まる速度を代入すれば、導流堤近傍の H の分布が得られる。本研究では実験に使用した底質の粒径が比較的粗く、掃流状態での砂移動が卓越するので、土研公式をもとに $n=3$ とした。

4. 実験結果

図-4, 5, 6はそれぞれケース1, 2, 3について波を作用し始めてから30分後の地形を三次元的に図示したものである。なお、前述の様に導流堤は初期汀線より15cm沖まで伸びているが、図中には示していない。

汀線付近の地形変化は各ケースの間ではほぼ差違はない。すなわち、右岸から左岸に向かう沿岸漂砂が右岸堤流堤及び水路側壁で遮断され、汀線は波向に対して直角となる方向へ推移している。

ケース2, 3では河口前面に砂の堆積が認められる。河川流量の多いケースほど堆砂位置は沖側となっている。第6節に示す経験的固有関数展開を用いた解析によれば、河口前面の堆積土砂は導流堤の右岸側から輸送さ

れて来た沿岸漂砂に起因するものであることが判明した。

河川流量が 0 l/sec であるケース 1 では導流堤を回り込んで来た沿岸漂砂はフラッシュされず、徐々に河直内に侵入して河口閉塞が生じる。

30 今後の地形から初期地形を差し引いて変化量を求めた結果を図-7, 8, 9 に示した。沿岸漂砂の移動に対する河川流の効果が明瞭に現われている。

5. 写像関数と用いて得られるパラメータ H と実測地形変化量との対応

式 (7) で定義される H の空間分布を求めるために必要な沿岸流速 U_L については実測を行っておらず、ここでは Longuet-Higgins³⁾ の解を岸沖方向に積分して得られる平均流速式、

$$U_L = \frac{85}{196} \frac{5\pi}{8} \frac{\alpha}{c} (gh_B)^{1/2} s \sin \theta_B \quad \dots\dots\dots (8)$$

を用いた。ここに、 α : 定数 (=0.4), c : 摩擦係数 (=0.01), h_B : 碎波水深, s : 海底勾配, θ_B : 碎波角である。式 (8) は水平混合の相対強度を示す係数 $P = (\pi/2) (sN/\alpha c)$ を 0.4 とした時の解である。碎波水深 h_B は合田の碎波指標⁴⁾を用いて算出した。

図-10, 11, 12 は各ケースについて $H(x, y)$ のコンター・マップを図示したものである。ただし、 H は次元を有し、単位は cm^2/s^3 である。砂の連続式より $H < 0$ および $H < 0$ の領域ではそれぞれ堆積及び侵食が生じる

ものと考えられる。一方、実験で得られた地形変化量は図-7, 8, 9 に示した。しかし、図示された実測地形変化量の中には第 3 節の解析で考慮されていない岸沖漂砂の影響も既に包含されているものと考えられる。従って、図-7, 8, 9 を図-10, 11, 12 と直接比較することは適切でない。そこで次節に述べる経験的固有関数展開を用い、地形変動量を沿岸漂砂に対応する成分と岸沖漂砂に対応する成分とに分離し、前者だけを取り出した結果を図-13, 14, 15 に示した。

計算により得られた $H(x, y)$ の分布と実測された地形変化量を比べると、導流堤を回り込む砂の動きについては対応が見られるが、全体的な対応関係は良好とは言えない。その原因としては、流れを二次元的と考えて、水深変化の効果を考慮していない点、本来沿岸流は岸沖方向に分布を持つにもかかわらず、その点を考慮していない点、河川流の流砂量公式を準用している事などが挙げられる。

6. 経験的固有関数展開を用いた解析結果

本節では河口部の地形変化についてより詳細な検討を行うために Empirical Eigenfunction¹⁾を用いた解析を行う。橋本・宇多⁵⁾と同様に初期地形からの変化量 Δh を次式の様に展開する。

$$\Delta h(x, y, t) = \sum_{i=1}^n e_i(y, t) c_i(x, t) \quad \dots\dots\dots (9)$$

座標 (x, y) の定義を図-1 に示した。以下では特に

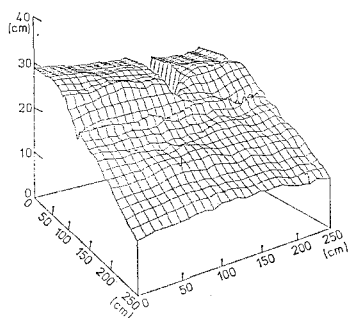


図-4 地形変化 (ケース 1)

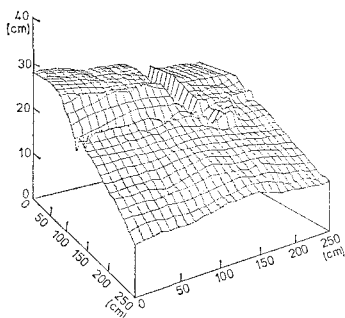


図-5 地形変化 (ケース 2)

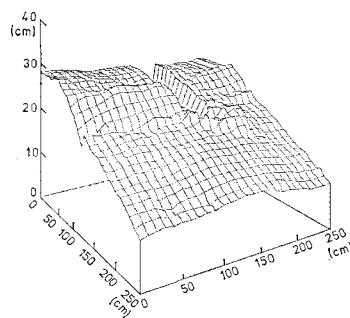


図-6 地形変化 (ケース 3)

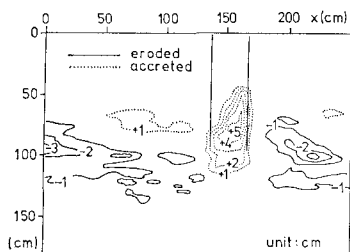


図-7 地形変化量 (ケース 1)

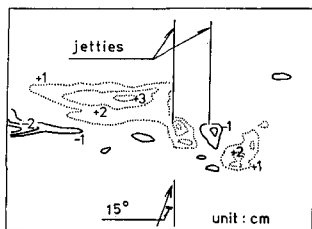


図-8 地形変化量 (ケース 2)

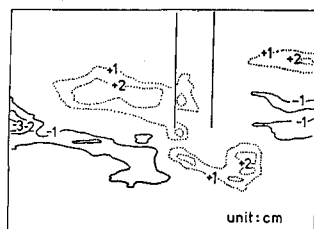


図-9 地形変化量 (ケース 3)

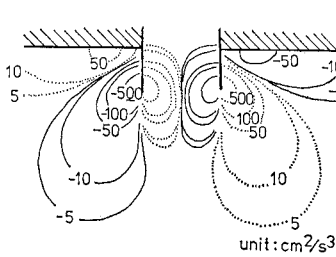
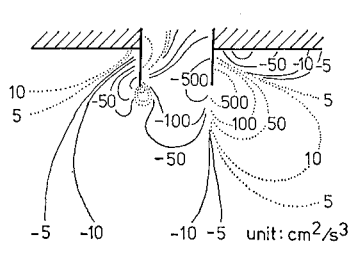
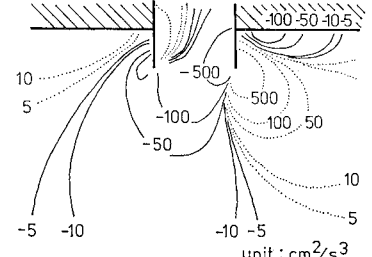
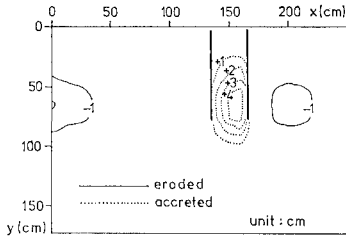
図-10 $H(x, y)$ の分布 (ケース 1)図-11 $H(x, y)$ の分布 (ケース 2)図-12 $H(x, y)$ の分布 (ケース 3)

図-13 地形変化量 (ケース 1)

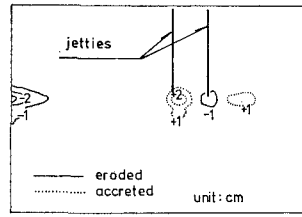


図-14 地形変化量 (ケース 2)

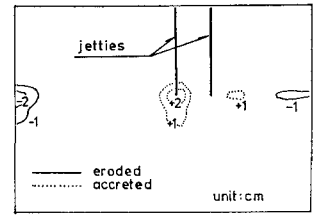


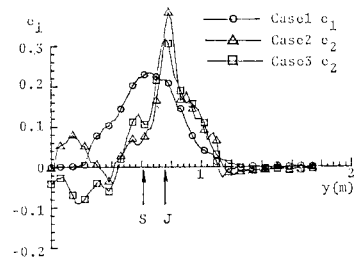
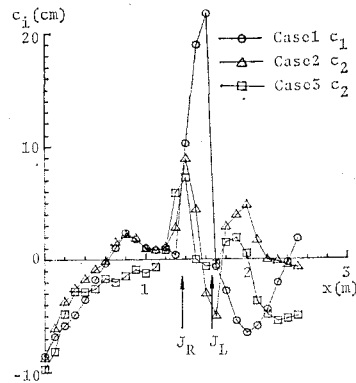
図-15 地形変化量 (ケース 3)

断らない限り $t=30$ 分におけるデータの解析結果を示す。

従来の研究によれば、式(9)の形に展開した時、第1、第2成分はそれぞれ沿岸漂砂、岸沖漂砂に起因する地形変化に対応すると言われているが、本研究の解析結果のうちでこの対応があてはまるのはケース1のみであり、他はこの対応関係が逆転していた。沿岸漂砂に対応するモードの e 関数、 c 関数を図-16、17に示した。図-16で矢印は初期汀線の位置(S)と導流堤の先端位置(J)を表わし、また図-17の J_R, J_L はそれぞれ右岸・左岸の導流堤の位置を示している。 e 関数は岸沖方向の全域にわたって正値を有するので、沿岸方向の砂移動に対応すると考えられる。

河川流量がないケース1では沿岸漂砂が河道内に入り込んで来るので、 e 関数が他のケースに比べて左寄りとなっている。一方、ケース2、3については e_i の形がほぼ同一であり、また図には示していないが、時間的にもほぼ不変であった。このことは、従来の報告⁵⁾と一致している。

次に岸沖漂砂に対応するモードを図-18、19に示した。 e 関数は岸から沖に向って、符号が正から負に変化し、また、正値・負値の積分値がほぼ等しいことから、岸沖漂砂に対応するモードと判断された。図-16と同様に e_i は河川流量・時間に依存せず、ほぼ一定の形である。一方 c 関数について見ると、河川流量ゼロのケース1では沿岸方向に変化が少なくほぼ一定な正値を有することから、沿岸方向にはほぼ一様に岸向きの砂移動が生じていることがわかる。河川流量の影響は河口導流堤よ

図-16 沿岸漂砂に対応する e_i 関数図-17 沿岸漂砂に対応する c_i 関数

り左岸側に顕著に現われている。流量の増加に伴い、岸向きの漂砂が抑制されていることがわかる。

なお、図-17、19に示した c_i の分布より、図-5、6で認められた河口前面の堆積土砂は主に沿岸漂砂に起因

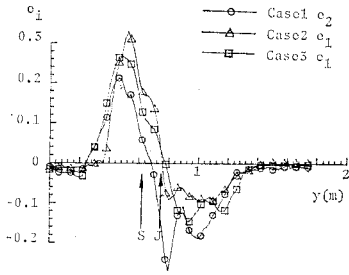
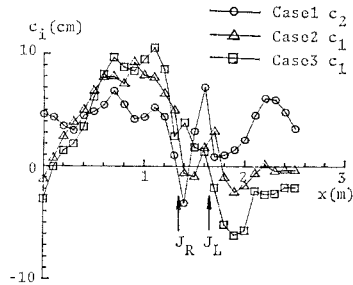

図-18 岸沖漂砂に対応する e_i 関数

図-19 岸沖漂砂に対応する c_i 関数

表-2 固有値の寄与率

ケース	$\lambda_1 / \sum \lambda_i$	$\lambda_2 / \sum \lambda_i$	$(\lambda_1 + \lambda_2) / \sum \lambda_i$
1	0.627	0.247	0.874
2	0.482	0.286	0.768
3	0.469	0.254	0.723

するものであることがわかる。

最後に、表2に第1、第2モードの寄与率を各ケース

について示した。

6. 結 語

本論文では、導流堤を有する河口近傍の地形変化について検討を行った。その結果、次の点が明らかとなった。①等角写像を用いて河口部の地形変化を推定するパラメータを導出したが、実験値との対応は良好ではなかった。②経験的固有関数展開による解析を行った結果、岸沖方向の固有ベクトル e_i は河川流量、時間によらないことが示された。③河川流の増加につれて、河口前面での岸向き漂砂の抑制が顕著であった。

今後、導流堤長が河口近傍の砂移動現象に与える影響を検討し、最適導流堤長の決定手法及びその物理的根拠を明確にしたいと考えている。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費（自然災害特別研究、研究代表 宇都宮大学教授 須賀亮三）の補助を受けて行われたことを付記する。

参 考 文 献

- Winant, C. D., D. L. Inman and C. E. Nordstrom: Description of seasonal beach changes using empirical eigen functions, J.G.R., Vol. 80, No. 15, pp. 1979~1986, 1975.
- 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋: 波による二次元汀線変化に関する一考察, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 329~334, 1975.
- Longuet-Higgins, M. S.: Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 2, J.G.R., Vol. 75, No. 33, pp. 6790~6801, 1970.
- 合田良実: 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集, 第180号, pp. 39~49, 1970.
- 橋本 宏・宇田高明: 経験的海浜変形モデルの移動床実験への適用, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 250~254, 1980.