

導流堤による潮流制御について

中村 充*・乃万俊文**・萩野静也***・吉沢 裕****・浅沼譲二*****

1. はじめに

海域の汚染による水産被害は大きく、その対策は急がれている。汚染負荷の軽減は必要であるが、その内容が生活、産業、農業排水および水産養殖自体と多様化しているので、その実現はきわめて困難である。このような現状で内湾の水質浄化を図るには、積極的に外海との海水交換が必要である。

ここでは、潮汐流がありながら、これが往復潮流で海水交換に寄与していないとき、この運動エネルギーを導流堤で制御して恒流成分を増大し海水交換を図る方法について報告する。

2. 導流堤による潮流制御理論

図—1 に示すような導流堤配置において流量 Q は、
 $Q=CA\sqrt{2g\Delta h}$ (1)

$$C=C_aC_v\text{.....(2)}$$

ここに、 $C_a=a/A=C/C_v$ 、 $C_v=v/\sqrt{2g\Delta h}$ 、 a 、 v ：縮流部の流積、流速、 A ：開口部断面積、 Δh ：導流堤上下流水位差、である。導流堤形状は式 (3) のような交角

60° の漸近線をもつ双曲線形とする。

$$\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}=1, a=\frac{B}{2}, b=\frac{B}{2\sqrt{3}}\text{.....(3)}$$

縮流係数 C_a を式 (3) の導流堤形状について運動量理論を用いて解析する。この場合、開口部より上流側は渦なしとして、下流側は噴流として考える。図—1 において図の上から下に流れる流れを順流とし、逆の場合を逆流と呼ぶことにする。

(1) 順流の場合

検査面を 図—2 のように上流の一樣流速部、導流堤の側壁部、下流縮流部にとる。図中 F は静水圧、 h は水深、 v は流速であり、添字 1,2,3,4,5 はそれぞれ上流、下流縮流部、導流堤上流側側壁、導流堤はく離後から縮流部までの流線沿いの各検査面部、下流部の各量であり、添字なしは開口部の量であることを示す。

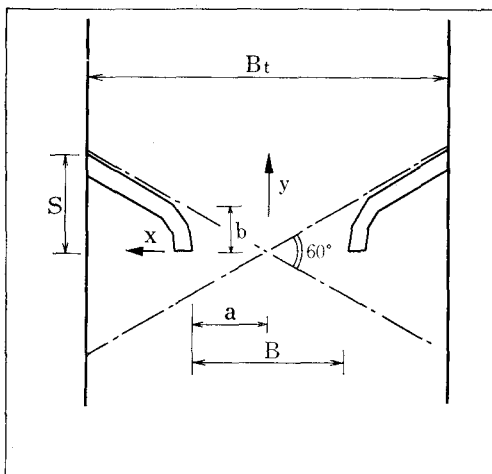
検査面内の水に働く平均流方向の力 F は次式となる。

$$F=F_1-F_2-2F_3-2F_4\text{.....(4)}$$

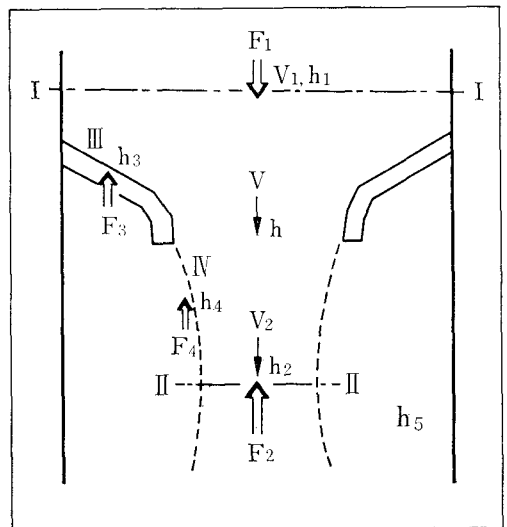
$$F_1=\frac{wh_1^2}{2}B_1\text{.....(5)}$$

$$F_2=\frac{wh_2^2}{2}C_aB\text{.....(6)}$$

$$F_3=\int_{B/2}^{B_1/2}\frac{wh_3^2}{2}dx=\int_0^S\frac{wh_3^2}{2}\frac{a^2y}{b^2x}dy\text{.....(7)}$$



図—1 導流堤配置形状



図—2 検査面模式図

* 正会員 農博 農林省農業土木試験場水産土木部
 ** 正会員 農林省農業土木試験場水産土木部
 *** 農林省農業土木試験場水産土木部
 **** 正会員 (株)漁港浅海開発コンサルタント
 ***** 東海大学海洋学部

$$F_1 = \frac{wh_1^2}{4}(1-C_a)B \dots\dots\dots (8)$$

ここに, w : 水の単位体積重量

S は式 (3) から

$$S = b\sqrt{\frac{B_1^2}{4a^2} - 1} \dots\dots\dots (9)$$

式 (6)~(8) における各部の水深について調べておく。上流側の流れはポテンシャル関数を用いて解くことができる。この解は双曲線型導流堤側壁の摩擦抵抗を無視し, $x=0$ 線上で $\phi=0$, 導流堤沿いで $\phi=1$, $y=0$ 線上で $\phi=0$ として式 (10) を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{B^2}{3} \frac{x^2}{\cosh^2 \frac{\pi\phi}{6}} + \frac{B^2}{3} \frac{y^2}{\sinh^2 \frac{\pi\phi}{6}} &= 1 \\ \frac{B^2}{3} \frac{x^2}{\cos^2 \frac{\pi\phi}{6}} - \frac{B^2}{3} \frac{y^2}{\sin^2 \frac{\pi\phi}{6}} &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

式 (10) による上流側の水位は 図-3 のようになる。いま簡単のために 図-3 の水面形を 2 次曲線近似で与える。 $y=S$ で $h_3=h_1$, $y=0$ で $h_3=h$, また $y=S$ で $dh_3/dy=0$ であるから

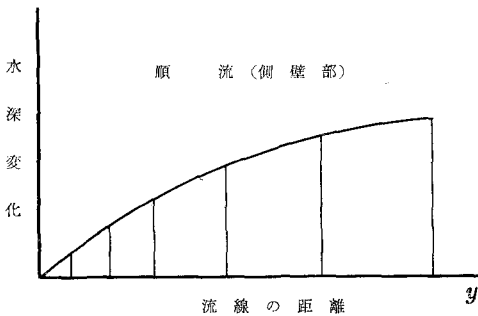


図-3 上流側水深変化

$$h_3 = -\frac{(h_1-h)}{S^2} y^2 + \frac{2(h_1-h)}{S} y + h \dots\dots\dots (11)$$

ここに開口部水位は

$$h = h_1 - \frac{v^2 - v_1^2}{2g}, \quad v = \frac{B_1 h_1}{Bh} v_1$$

から,

$$h^3 - \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) h^2 + \left(\frac{B_1 h_1}{B} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

の解として得られる。

また h_2 , h_4 は上下流水圧差を問題とする運動量方程式においては $\Delta h = h_1 - h_5$ に比し下流側水位にほぼ等しいと置いて,

$$h_2 = h_4 = h_3 \dots\dots\dots (13)$$

よって式 (6), (8) は

$$F_2 = \frac{wh_5^2}{2} C_a B \dots\dots\dots (14)$$

$$F_4 = \frac{wh_5^2}{4} (1-C_a) B \dots\dots\dots (15)$$

式 (7) は式 (11) を用いて

$$F_3 = \int_0^S \frac{wa^2}{2b^2} \frac{y}{x} \left\{ -\frac{h_1-h}{S^2} y^2 + \frac{2(h_1-h)}{S} y + h \right\}^2 dy$$

ここで $h_1-h \neq 0$ であるから, この 2 次の項は省略し, 積分すると

$$\begin{aligned} F_3 = & \frac{wah^2}{2b} (\sqrt{S^2+b^2}-b) + \frac{2wa(h_1-h)h}{bS} \\ & \times \left(\frac{S}{2} \sqrt{S^2+b^2} - \frac{b^2}{2} \ln \frac{S+\sqrt{S^2+b^2}}{b} \right) \\ & - \frac{wah^2}{3bS^2} \left(\frac{h_1}{h} - 1 \right) \{ (S^2-2b^2) \sqrt{S^2+b^2} + 2b^3 \} \end{aligned} \dots\dots\dots (16)$$

式 (4), (5), (14), (15), (16) から要素体に働く外力 F が求まる。

$$\begin{aligned} F = & \frac{wh_1^2}{2} B_1 - \frac{wh_5^2}{2} B - \frac{wah^2}{b} \left[\sqrt{S^2+b^2}-b \right. \\ & + \frac{2}{S} \left(\frac{h_1}{h} - 1 \right) \left\{ S \sqrt{S^2+b^2} - b^2 \ln \frac{S+\sqrt{S^2+b^2}}{b} \right\} \\ & \left. - \frac{2}{3S^2} \left(\frac{h_1}{h} - 1 \right) \{ (S^2-2b^2) \sqrt{S^2+b^2} + 2b^3 \} \right] \end{aligned} \dots\dots\dots (17)$$

ここで要素体の運動量の変化 M は,

$$M = \frac{w}{g} h_2 C_a B v_2^2 - \frac{w}{g} h_1 B_1 v_1^2$$

ここで連続条件から, $B_1 h_1 v_1 = C_a B h_2 v_2$ であるから,

$$v_2 = \frac{1}{C_a} \frac{B_1}{B} \frac{h_1}{h_2} v_1 \dots\dots\dots (18)$$

よって

$$M = \frac{wh_1 B_1 v_1^2}{g} \left(\frac{B_1 h_1}{C_a B h_2} - 1 \right) \dots\dots\dots (19)$$

$M=F$ であるから

$$C_a = \frac{B_1 h_1}{B h_2} \left\{ \frac{Fg}{wh_1 B_1 v_1^2} + 1 \right\}^{-1} \dots\dots\dots (20)$$

として計算される。

(2) 逆流の場合

逆流の場合にも同様に考える。

$$F_1 = \frac{wh_1^2}{2} B_1 \dots\dots\dots (21)$$

$$F_2 = \frac{wh_2^2}{2} C_a B \dots\dots\dots (22)$$

$$F_3 = \frac{wh_3^2}{4} (B_1 - B) \dots\dots\dots (23)$$

$$F_4 = \frac{wh_4^2}{4}(1-C_a)B \dots\dots\dots (24)$$

逆流の場合、導流堤上流側は先端部の局所を除き、よみ点となるので、

$$h_3 = h_1$$

また、下流側については順流と同様、 $h_2 = h_4 = h_5$
式(21)～(24)を式(4)に代入し、この値を式(20)に用いて

$$C_a = \frac{B_1 h_1}{B h_2 \left\{ \frac{g B (h_1^2 - h_2^2)}{2 h_1 B_1 v_1^2} + 1 \right\}} \dots\dots\dots (25)$$

となる。

逆流の場合式(25)を用いて C_a を求めることができる。

3. 実験装置と実験方法

使用した平面水槽は長さ 11.5m、幅 4.8m、深さ 50cm のコンクリートパネル仕上げの水槽である。導流堤は木製ブロックを図—1 に示す形状およびこれを反転した形状に配置し、水深は下流端越流堰により変化させる。流量 Q および下流水深 h_5 は表—1 に示す 30 Case を与えた。観測項目は水位、流速、流量、縮流幅、流線追跡で水位はポイントゲージを用い、導流堤上流側、下流側を、流速は CM-1 型流速計を用い縮流部で測定した。流量は上流側計量水路における量水堰を用いて測定した。縮流部幅はフローレセセンナトリウムにより滞流部を着色し、可視化することによって目測にて測定した。流線は浮子を流し目視観測した。



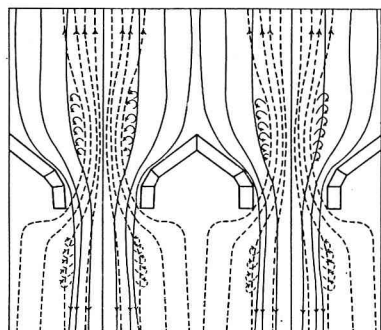
写真—1 逆流における縮流状態

4. 実験結果

図—4 にみられるように上流側は Potential 流に近い状態で流れ、導流堤先端に近づくに従って急速に加速流となり、開口部を流過した後は噴流となって開口部通水断面の実幅より小さい幅に縮流する。この部では主流と滞流域との境界に渦が生じる。縮流係数は可視的に順流

と逆流とでその差は明確である。実験結果を表—1 に示す。

表中 h_0 : 計量堰水位、 Q : 流量、 h_1 : 上流側平均水深、 h_2 : 縮流部の水深、 h_5 : 下流側平均水深、 $B_2 (=C_a B)$: 縮流部の平均幅、 v_1 : 上流側流速、 v_2 : 縮流部流速、 h_f : 摩擦損失水頭、 C 実: 流量係数実験値、 C_v 実: 速度係数実験値、 C_a : 縮流係数実験値である。



——— 順 流
----- 逆 流

図—4 順・逆流流線

(1) 流 線

30 Case の実験より流線を描くと図—4 のようになる。これからわかることは順流、逆流では縮流幅の相違であり、縮流係数にその影響があらわれている。上流側の等ポテンシャル線を描くと図—5 となる。図—4 と図—5 を比較すると、上流側はポテンシャル流となることがわかる。

(2) 速度係数 C_v

速度係数 C_v は上流側の流速を加え次式によって得られる。

$$C_v = \frac{v_2}{\sqrt{v_1^2 + 2g(h_1 - h_2)}} \dots\dots\dots (26)$$

表—1 に示すように本実験条件の範囲では、 $C_v \approx 1$ である。

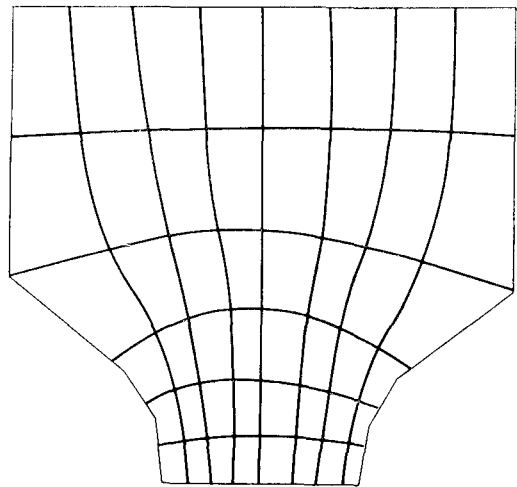
開口部から縮流部までの噴流区間の摩擦による損失水頭を式(27)で見積ると

$$h_f = \frac{n^2 (v_1 + v_2)^2}{4 \left(\frac{h_1 + h}{2} \right)^{4/3}} \dots\dots\dots (27)$$

表—1 中の h_f に見られるように $h_f \approx 0$ である。これからも本実験範囲内では $C_v = 1$ とあつかい得ることがわかる。Tracy と Carter の実験したところによると、縮流部における粗度が背水に影響をおよぼす限界は Manning の n で 0.050 といわれている。実験範囲の n は 0.009～0.021 である。

表一 実験結果

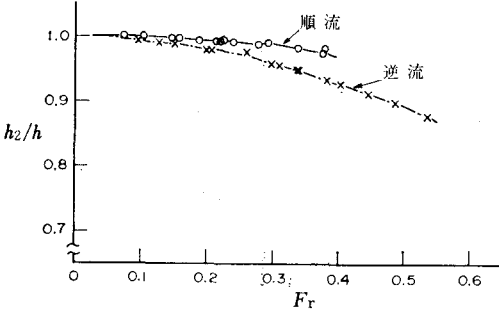
No.	形状	h ₀ (cm)	Q ₁ ×10 ⁻² (m ³ /sec)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	h ₃ (cm)	B ₂ (cm)	V ₁ (cm/sec)	V ₂ (cm/sec)	h _f	C 実	C _v 実	C _a
1	順	10.25	5.872	13.30	13.01	12.96	96.00	9.20	25.49	0.0003	0.9807	0.9974	0.9833
2	順	10.26	5.881	11.47	11.05	11.07	96.00	10.69	30.41	0.0007	0.9566	0.9932	0.9631
3	順	10.21	5.839	9.78	9.19	9.10	96.00	12.44	35.97	0.0011	0.9554	0.9934	0.9617
4	逆	11.10	6.602	11.32	9.95	9.83	62.50	12.16	53.10	0.0014	0.5862	0.9976	0.6446
5	逆	11.18	6.673	13.10	12.16	12.13	58.75	10.61	44.18	0.0008	0.6181	0.9992	0.6481
6	逆	11.16	6.655	14.41	13.68	13.67	58.00	9.62	39.12	0.0005	0.6359	1.0023	0.6561
7	逆	9.77	5.473	13.72	13.16	13.15	60.75	8.31	34.02	0.0004	0.6271	0.9960	0.6335
8	逆	9.81	5.505	12.08	11.29	11.25	63.75	9.50	40.25	0.0007	0.6032	0.9943	0.6193
9	逆	9.85	5.539	10.49	9.43	9.33	61.75	11.00	46.82	0.0012	0.6034	0.9985	0.6527
10	順	9.88	5.572	10.03	9.43	9.41	92.50	11.57	36.08	0.0011	0.8742	0.9969	0.8769
11	順	9.91	5.588	11.81	11.42	11.34	92.50	9.86	29.40	0.0006	0.9106	1.0015	0.9092
12	順	9.61	5.341	13.57	13.29	13.06	88.75	8.20	24.50	0.0003	0.8862	0.9879	0.8970
13	順	8.30	4.307	12.54	12.34	12.19	88.00	7.16	20.80	0.0003	0.9130	0.9879	0.9242
14	順	8.28	4.292	10.68	10.42	10.41	88.75	8.37	24.33	0.0005	0.9431	1.0063	0.9372
15	順	8.32	4.322	8.83	8.40	8.36	89.75	10.20	30.68	0.0010	0.9058	0.9971	0.9084
16	逆	8.32	4.322	9.16	8.37	8.36	54.00	9.84	40.34	0.0010	0.6245	0.9945	0.6738
17	逆	8.32	4.322	10.92	10.37	10.36	50.75	8.25	33.81	0.0006	0.6278	0.9987	0.6440
18	逆	8.36	4.353	12.66	12.36	12.30	52.75	7.11	28.64	0.0003	0.7385	1.1333	0.7763
19	逆	5.35	2.265	11.53	11.40	11.48	50.00	4.10	16.06	0.0001	0.6410	0.9745	0.6298
20	逆	5.33	2.253	9.56	9.38	9.36	49.25	4.91	19.20	0.0002	0.6535	0.9890	0.6534
21	逆	5.31	2.241	7.63	7.30	7.38	54.25	6.12	26.15	0.0005	0.6015	0.9997	0.5967
22	順	5.32	2.247	7.50	7.33	7.38	89.25	6.26	18.83	0.0004	0.8664	0.9758	0.8878
23	順	5.31	2.241	9.50	9.41	9.47	88.75	4.91	14.24	0.0002	0.9309	1.0056	0.9257
24	順	5.32	2.247	11.44	11.39	11.41	85.25	4.09	11.14	0.0001	1.0370	1.0400	0.9971
25	順	3.92	1.441	10.88	10.85	10.83	80.75	2.76	7.69	0.0000	0.9021	0.9436	0.9560
26	順	3.90	1.431	8.93	8.88	8.84	84.75	3.34	9.72	0.0001	0.8459	0.9303	0.9892
27	順	3.89	1.425	6.88	6.80	6.79	87.50	4.32	12.93	0.0002	0.8678	0.9761	0.8890
28	逆	3.82	1.388	6.91	6.77	6.74	50.40	4.19	16.81	0.0003	0.6316	0.9838	0.6233
29	逆	3.76	1.357	8.87	8.80	8.79	56.50	3.19	11.92	0.0001	0.6803	0.9819	0.6836
30	逆	3.75	1.352	10.82	10.77	10.76	52.50	2.60	9.92	0.0000	0.6574	0.9692	0.6452



図一五 流線および等ポテンシャル線

(3) 背水効果

順流, 逆流における噴流部の低下背水と縮流部の Froude 数との関係を 図一六 に示す。それによると Froude 数が大なるほど順流, 逆流における差は大きくなる。したがって潮流制御効果は F_r の大なるほど有効



図一六 順逆流背水差

である。また堰上げ水位については, Tracy と Carter の実験と一致する。

(4) 縮流係数 C_a

式 (20), (25) による理論値を実験条件のもとで計算すると表一 に示す値となる。実験値を $C_a=C/C_0$ として実験値と理論値を比較したのが 図一七 である。順流, 逆流の 2 グループに分かれるが, 理論値はよく実験値と一致していることがわかる。

(5) 流量係数 C

本実験では $C_a \approx 1.0$ であるので 図一七 は C の図と見ることができる。

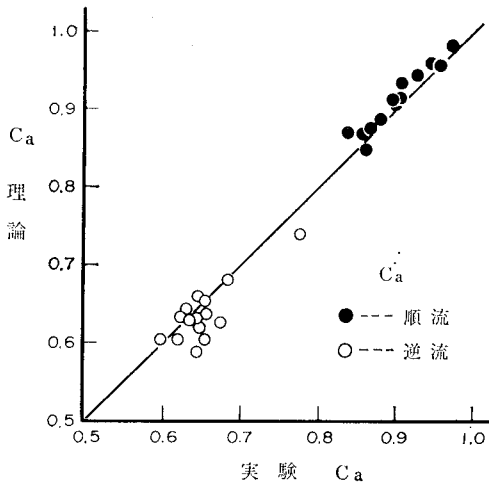


図-7 縮流係数

5. 結 果

以上式(3)による双曲線形導流堤における順逆流の縮流係数(極端に浅い場合を除き流量係数に一致する)が式(20), (25)で求めることができる。これにより往復潮流を制御する場合の効果を計算することが可能となる。この実験条件下では順流 0.9, 逆流 0.6 程度で, その差 0.3 程度が存在するので本工法が潮流制御工として有効な工法であり, 現地条件によっては実用に供し得るものであることがわかる。

参 考 文 献

Ven Te Chow.: Open-Channel Hydraulics.