

東北工業大学工学部 正員 阿部至雄 西沢 勝 今野 弘

1. まえがき

水理構造物周辺の流れについては、従来にもいろいろの研究がなされている。特に、流れが密度差を有する場合、その背後に生じるカルマン渦とか Lee Wave といったタービュレンスによって、密度混合が生じ、混合層が形成される。このような河口水理の変化は、乱れとともに、浮遊物質の沈殿堆積とか水理構造物の振動といった問題にも影響を及ぼす。本報告は、そのための 1 ステップであって、まず静的に安定な密度差をもつ流水中に薄い barrier を設置した場合、特にその背後に生じる内部波に着目し、実験によって、その波高、周期、波速を求め、主に波形勾配の評価を試みることにし、内部境界面の変化を考察したものである。

2. 実験装置および実験方法

実験水路は長さ 18 m、幅 1.0 m、高さ 0.8 m の中央 14 m 両面からス張り可動二次元水路で、その水路上流側にセキ高 0.3 m 長さ 4 m の広頂セキが据えてある。この水路の勾配は水平で、高さ 0.4 m、幅 1.0 m の barrier はジェットの影響が及ばない広頂セキ下流 3.0 m の位置に設置した。(図-1)。淡塩水層は、それぞれ平均 16.0℃、16.3℃であり、淡塩水深はともに 0.3 m、密度差 0.019 g/cc とし、下層静止、上層流動の場合について、流量を 5.64 l/sec ~ 7.66 l/sec の間で実験を行なった。内部波の測定には、抵抗線式波高計を用い(図-2,3)、断面 I, II における同時測定を B-ZONE (後述) 内で約 10 分間行なった。また、流速は液滴の流下速度を測定することによって求めた。なお、barrier 付近で上層にまき上げられる塩水は小さなサイフォンによって排水し、実験中でできるだけ成層状態を保つようにした。

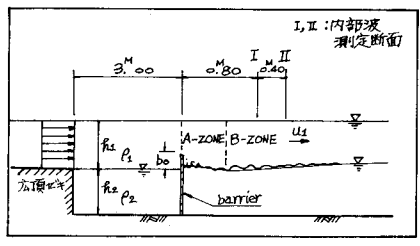


図-1

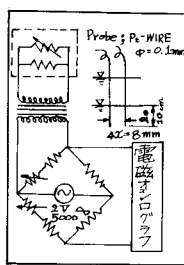


図-2 内部波測定のための BLOCK-DIAGRAM

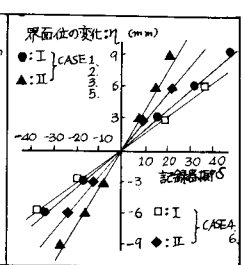


図-3 キャリブレーション

3. 実験結果および考察

図-1 に模式的に示したように、塩水楔は物体直後において順勾配で、拡散混合の顕著な A-ZONE と、その直後に逆勾配で、不規則ではあるが、安定な内部波の発生する B-ZONE とに大別された。この A-ZONE の長さは相対速度差の増大とともに延びる。内部波の測定断面におけるレイノルズ数 $Re_1 (=U_1 h_1 / \nu_1)$ 、およびクーラン数 $@$ は、各実験ケースに対し、それぞれ $Re_1 \geq 1800$ 、 $@ \geq 0.178$ であるので、安定な場合に属する。

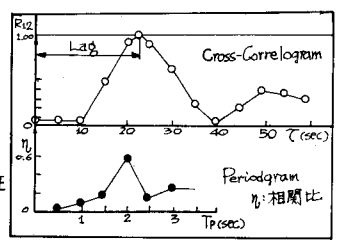


図-4 相互相関と Periodogram

周期、波速、波長：内部波の記録約 6 分間を 0.5 秒間隔で読み取り、それから図-4 に示すようなピリオドグラムを求め、その卓越周期をもって、周期 T_p とし、また、波速 C_e は図-4 に示す相互相関の lag time から求め、波長 λ_p を $T = T_p$ として、

$$\lambda_p = C_e \cdot T$$

----- (1)

より算出し、平均振中 $\bar{a}$ (linear trend 含む) 及び最大振中 a_{max} とともに表-1 に示した。次に、Steepness ratio (a/λ) を算定し、示したものが図-5 である。流況観測及び④の値から限界状態に近いと思われるときの $(a/\lambda)_{max}$ の値は高々0.08程度である。

この値は、純粋な造波抵抗に関する既往の研究結果から逆算した値 $0.391 \sim 0.6$ 前後、及び岡崎の実験結果 0.323 に比べかなり小さい。この原因の一つは分解能の悪さに依る周期 T の過大評価によるためと思われる。そこで、 $k_1, k_2 \approx \infty$ 、及び $u_2 = 0$ の場合、内部波の波速 C は

$$C = \frac{\rho_1 u_1}{\rho_1 + \rho_2} + \left\{ \frac{g\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} - \frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} u_1^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \equiv u_i + C_a \quad \text{--- (2)}$$

で示される⁵⁾。ここに、 $u_i = \rho_1 u_1 / (\rho_1 + \rho_2)$ は二流体間の平均速度、

$C_a = \{ \}^{\frac{1}{2}}$ は、 u_i に相対的な波速、(2)式で $C = C_e$ とし、これに

$$\lambda_e = \frac{2\pi}{\epsilon g} \{ C_e^2 (1 + \rho_1/\rho_2) - u_i (2C_e - u_i) \} \quad \text{--- (3)}$$

これより算出した $(a/\lambda_e)_{max}$ の値は、0.212となる。

このとき、周期 T を $\lambda_p = \lambda_e$ として(4)式より逆算すると約1秒前後となり、記録上の最小周期とほぼ一致するので、この $(a/\lambda_e)_{max}$ の値はほぼ妥当なところであろう。

次に、岡崎氏の実験結果と比較するために、(2)式で $u_2 = 0$ とし、

$$C_0 = (\epsilon g T / 2\pi) \cdot (1 / (1 + \rho_1/\rho_2)) \quad , \quad (T = \lambda_e / C_e) \quad \text{--- (4)}$$

この波速 C_0 に対する波長 λ_0 から $(a/\lambda_0)_{max}$ の値は、0.339となりかなり近い結果を得る。次に、限界時における波速 C_c は

$$C_c = K \cdot u_i \quad (K = \frac{1}{2} \sim \frac{1}{4}) \quad \text{--- (5)}$$

であって、本実験では、④ $\approx$ ④ $_c$ 及び $C_c \approx C_0$ とした場合、 K の値は $\frac{1}{2.4}$ 程度と思われる。また、図-6は限界時の波長 λ_{min} を、

$$\lambda_{min} = 2\pi k_1 F r_1^2 \frac{\rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \quad , \quad \text{at } F = \frac{u_i}{C_c} \quad \text{--- (6)}$$

によって算出し、(1)式及び(3)式より求めた λ とともに $F r_1 = u_i / \sqrt{\epsilon g h_1}$ との関係において示したものである。 λ_e に対する結果から考えると、(6)式によって λ_{min} を推算することも可能と思われる。また、相対波速 C_a の変化を単純に(2)式より求めてみると、流速の増加とともに減少することがわかる。波形勾配を算定するにあたっては、トレンドを行ない、界面における流速及び波速のヒストグラムを明確にすべきである。純粋な造波抵抗による場合とは多少条件を異にするが、 $(a/\lambda)_{max}$ の値は0.212程度と思われる。本実験においては、barrierの高さは一定であったが、今後、その高さ、形状及び流程を変え、タービュレンスの規定も試み、さらに発展させてゆきたい。最後に、この報告を作成するにあたっては、東北大学教授岡崎敏夫先生にいろいろと御指導を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献 2) Shi-igai ; Trans. of JSCE, NR123 Nov. (1965) p.27~31
3) Iwasaki ; COASTAL ENGINEERING (1964) p.880~892

4) 岡崎 ; 理化学研究所報告第38巻第6号 (1962) p.597~610
5) Lamb ; Hydrodynamics, 6th ed., (1932), P.370~375
6) 浜田 ; 計算流体力学のシンポジウム (1969) p.1~9

表-1 周期、波速、波長

	CASE 1	2	3	4	5	6
流量 Q (cc)	5.64	6.46	6.86	7.24	7.44	7.66
周期 T_p (SEC)	2.0	2.0	3.5	2.5	2.5	2.5
T	0.68	0.76	0.81	0.87	0.90	0.94
波速 C_e (cm/sec)	1.78	1.78	1.90	2.00	2.00	2.22
C_a	1.00	1.12	1.19	1.28	1.32	1.38
波長 λ_p (cm)	3.56	3.56	6.65	5.00	5.00	5.55
λ_e	1.21	1.36	1.53	1.73	1.79	2.09
λ_0	0.68	0.85	0.96	1.11	1.19	1.30
振幅 a_{max} (cm)	0.19	0.20	0.35	0.26	0.34	0.30
$\bar{a}$	0.16	0.27	0.23	0.21	0.21	0.44
$\bar{a}$	0.08	0.10	0.11	0.12	0.14	0.14
$\bar{a}$	0.09	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14
流速 u_i (cm/sec)	2.39	2.67	2.83	3.03	3.11	3.31
$F r_1$ (④)	0.252	0.225	0.212	0.199	0.193	0.182

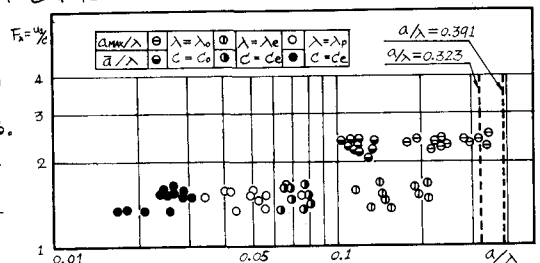


図-5 内部フルド数 $F r_1$ と波形勾配 a/λ の関係

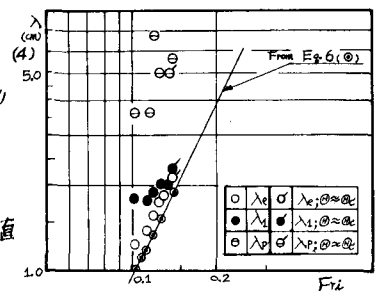


図-6 波長 λ と $F r_1$ との関係