

京都大学 工学部 正員 林津家久
 京都大学 工学部 正員 中川博次
 京都大学 大学院 学生員 天野邦彦

1. まえがき

段落ち流れは、堰や水門周辺あるいは波床波の形成に伴って発生する局所流であり、水工学の分野で古くから研究されて来たが、段落ち頂部から発生する剝離流のため強いせん断層が形成され、また逆流域を伴うから乱流計測がきわめて困難であり、単に流れの一次元解析にとどまり、その内部機構には不明な点が多い。近年のレーザ流速計の開発で、このような逆流域を伴う剝離流の計測が可能となり、研究が本格化して来た。本研究は、レーザ流速計を用いて開水路段落ち流れを高精度に計測し、その乱流構造を運動方程式に基づいて解析したものである。

2. 実験装置及び方法 長さ8m、幅30cmの直線水路に上流端から6.8m下流の位置に落差高 $H_s=2$ cmの段落ちを設けた。剝離流の基本的特性を得るために、自由水面の変化が小さい常流を対象とし、 Re 数及び Fr 数を系統的に変化させた(表・1参照)。水路中央軸に沿って、流下方向 X/H_s に16断面、鉛直方向 Y/H_s に20~27点トランスし、2成分レーザ流速計で (u, v) の流速成分を詳細に計測した。また、可視化実験で流況を観測した。

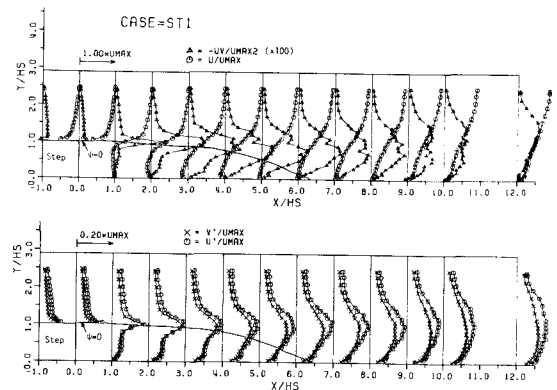
3. 実験結果及び考察 (1) 平均流速及び乱れ特性 図・1は、ケースST-1を例にヒリ、平均流速 U 、乱れ強度 u' 、 v' 及びレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ と初期断面 $X=0$ での最大流速 U_{max} で無次元表示したものであり、他のケースでも同様なパターンが得られた。 U は $X=0$ まで対数則に従うが、再付着点 X_R までは各断面の最大・最小流速で規格化するとガウス分布によく一致し、混合層の特性を

もつことが判明した。 $X > X_R$ では内部境界層が発達し、壁面近傍で壁法則が成立し、次第に混合層の特性が緩和される。図・2は、流線 $\psi = \int_0^Y U dy$ の等値線であり、逆流域が明瞭にわかる。乱れ

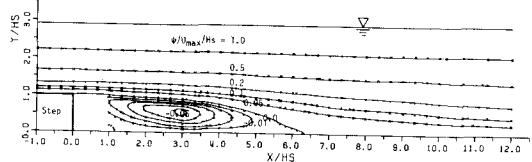
強度 u', v' は $Y/H_s=1$ に沿って約1.5倍まで増大するが、一方 $-\overline{uv}$ は剝離流線 $\psi=0$ に沿って約5倍にも増大し、ここで強いせん断層が形成され、乱れが発生すると考えられる。また、逆流域では $u \approx v'$ となり、等方化指向が強い。 $\psi=0$ が底面に再付着する地点 X_R を各ケースで求め、図・3に示した。図には、可視化から求められた値及び他の研究者の値も併示した。 Re 数が増加すると X_R/H_s は漸減してほぼ5に

Case	h (cm)	U_{max} (cm/s)	U_m (cm/s)	Re	Fr	X_R/H_s
ST-1	5.8	24.3	14.2	8200	0.19	6.3
ST-2	7.9	26.7	17.9	14000	0.20	5.8
ST-3	10.6	29.2	22.1	23400	0.22	5.2
ST-4	7.8	42.5	29.3	22900	0.33	6.4
ST-5	8.1	15.5	10.4	8400	0.12	5.5

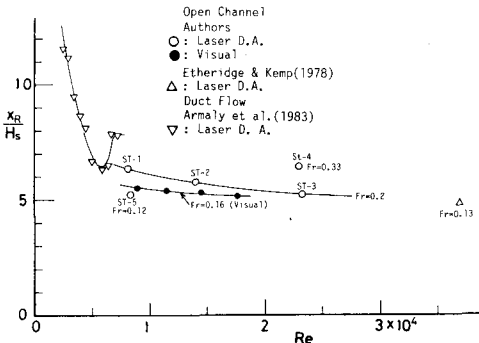
表・1 水理条件



図・1 平均流速、乱れ強度、レイノルズ応力の変化特性



図・2 流線 ψ のコンタ (ケースST-1)



図・3 再付着点 X_R の Re 数に対する変化

収束するようである。Armalyらは、ダクト流の x_R を流速分布から求めたが²⁾ $Re (< 10^4)$ の減少で x_R は急増し注目される。一方、Fr数が増加すると x_R も増加する傾向が見られ、水面効果とともに今後詳細に検討を要する課題である。

(2) 圧力分布 運動方程式から圧力 P は式(1)で求められる。 P は静水圧分布、 ΔP は流速変化による動圧分布を示す。

$$\frac{P}{\rho} = \underbrace{g \cos \theta (h-y)}_S + \underbrace{\int_y^h \frac{\partial (UV+UV)}{\partial x} dy}_{\Delta P} + \underbrace{[V^2+U^2]}_{M_2} \quad (1)$$

実験値から ΔP を計算し、このコンタを図4に示した。なお、流線 ψ から求められる鉛直速度成分 V (最大で U_{max} の5%程度) は実験値とよく一致し、実験精度は良好だった。 ΔP は剩餘流線上で最大の負圧を示し、再付着点付近で正圧となる。

この圧力分布のために逆流域が形成され、また x_R 付近から上昇流が発生される素因があると推測される。図5に、底面圧力係数 $C_p = 2(P-P_0)/\rho U_{max}^2$ の分布を示す。 P_0 は初期断面での値であり、 $C_p = 2(g \cos \theta \Delta h + \Delta P)$ となる。図示したように、 $\Delta h = 0.5 \text{ mm}$ のごく微小な水面変化でも C_p の大部分を占めるから長時間平均の水面勾配 $d\eta/dx$ を高精度に計算する必要がある。本研究では後述するように $-U$ の実験値からエネルギー勾配 I_e を評価し、 Δh を求めた。本実験値は境界層と同程度であるが、境界層では $\Delta h = 0$ であり、 C_p が動圧 ΔP の結果生じるのに対し、用水路では水面の微妙な変化でこれが補償される。

(3) せん断力分布 せん断力 $\tau = -\rho U \frac{\partial U}{\partial y}$ は式(2)で求められるが、 I_e の正確な値が必要である。本研究では式(2)の計算値が実験値と一致するように最小2乗法で I_e を求め、この結果の一例を図6に示す。式(2)の PU 項は他に比べて小さく、重力項 G と運動量項 M_1, M_2 とのバランスで決定される。しかし、 PU を無視して得られる式(3)から壁面せん断力 τ を評価することは非常に困難であることが図6からわかる。図7は U の壁法則から τ を評価したものであり、式(4)の公式でよく表現される。以上のように、用水路段落ち流れは圧力変化が水面勾配の形で効き、境界層流に比べてより複雑な機構をもつといえる。

参考文献 1) Etheridge S (1978), JFM, 86. 2) Armaly S (1983), JFM, 127. 3) 中川 S (1985), 土木学会論文報告集

参考文献 1) Etheridge S (1978), JFM, 86. 2) Armaly S (1983), JFM, 127. 3) 中川 S (1985), 土木学会論文報告集

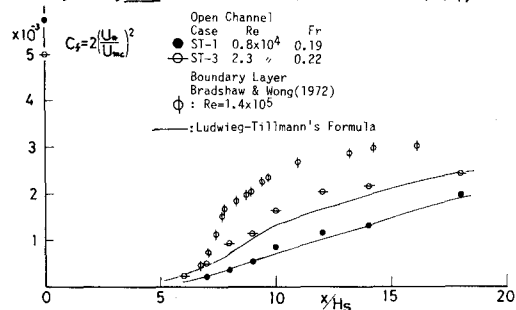


図7 壁面摩擦係数 C_f の変化

$$\frac{\tau}{\rho} = \underbrace{g I_e (h-y)}_G - \underbrace{\int_y^h \frac{\partial U^2}{\partial x} dy}_{M_1} - \underbrace{[UV]}_{M_2} - \underbrace{\int_y^h \frac{\partial}{\partial x} (\frac{\Delta P}{\rho} + U^2) dy}_{PU} \quad (2)$$

$$C_{f/2} = \frac{\tau}{\rho U_{max}^2} = \frac{1}{U_{max}} (g I_e h - \frac{d}{dx} \int_0^h U^2 dy) \quad (3)$$

$$C_f = 0.256 \times 10^{-0.678H} \times R_0^{-0.268} \quad (4)$$

ここで、 $I_e = S \sin \theta - \cos \theta \frac{dh}{dx}$, $H = \frac{b}{2}$, $R_0 = \frac{U_{max} b}{\nu}$
 θ = 水深勾配, b = 排水路幅, θ_2 = 運動量厚, U_{max} = 各断面の U_{max}

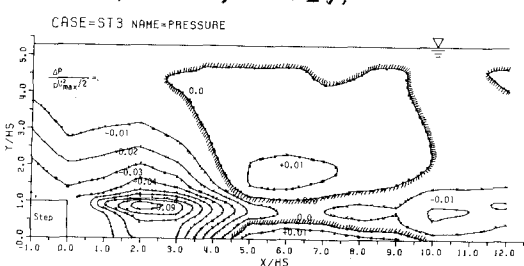


図4 動圧 ΔP のコンタ(ケースT-3)

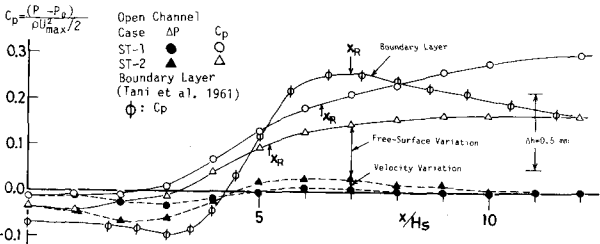


図5 壁面圧力係数 C_p の変化

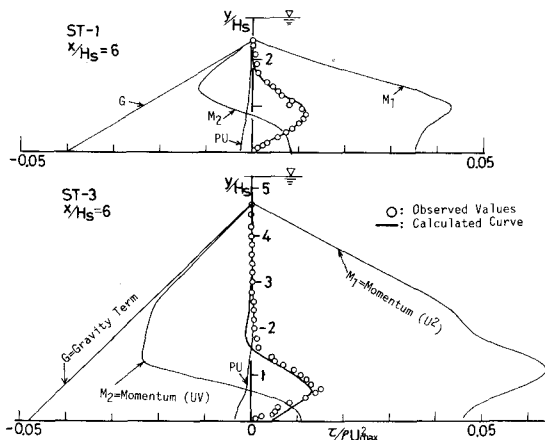


図6 せん断力 τ の実験値と計算値との比較