

II -110

開水路常流中の平板に沿う境界層の発達

日大・理工 学 高橋 正行

日大・理工 正 安田 陽一

日大・理工 正 大津 岩夫

はじめに

常流中において平板または段上がり部が設置された場合、その上流端から乱流境界層が発達し水面に達する。また、その下流側では乱流境界層が十分に発達した流れとなる。最近、境界層の発達状態と水面形の変化との関係については、実験的な検討がなされた¹⁾が不明な点が多い。著者らは、先に水平水路における射流の流速特性、および乱流境界層の発達状態、水面形状について、実験的、解析的に検討を行い明らかにした²⁾。ここでは、流れを2次元的に取り扱える場合の乱流境界層の発達状態、および水面形状について明らかにした。また、境界層方程式を用いて乱流境界層の発達状態と水面形状との関係を再現し、その適用範囲を示した。

実験方法

実験は長さ17m、幅40cm、高さ40cmの滑面長方形断面水平水路を用いて行った。実験水路においては、境界層が十分に発達した流れとなっていることから、図1に示されるように、真鍮製の平板(長さ4m、幅39.5cm)を水路底面から4cm上方に設置し、平板先端(x=0)から境界層を再発達させることによって境界層の発達状態および境界層内の流速特性を調べた(図1参照)。また、段上がり部の実験は、平板の最上流側を塞いで行った。流速は1次元L.D.V.(レーザー流速計)³⁾を用いて測定した(採取間隔40ms、採取時間164s)。また、水深はポイントゲージを用いて測定した。なお、実験条件は $F_0=0.1\sim 0.6$ 、 $Re=3300\sim 12000$ 、 $B/h_0=10$ 、 $h_0/s=1.0[F_0=U_0/\sqrt{gh_0}]$ 、 $Re=q/\nu$ 、 $U_0=q/h_0$ である。

境界層内の流速特性

Developing flow(乱流境界層が発達中の流れ)における時間平均された流下方向(x方向)の流速($\bar{u}$)および乱れ強さ($\sqrt{u'^2}$)の実験値を(1)、(2)の関係で整理した一例を図2(a)、(b)に示す。また、Fully Developed flow(乱流境界層が十分に発達した流れ)における $\bar{u}$ および $\sqrt{u'^2}$ の実験値を(3)、(4)の関係で整理した一例を図3(a)、(b)に示す。

$$\frac{\bar{u}}{U} = f\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (1) \quad \frac{\sqrt{u'^2}}{U} = f\left(\frac{y}{\delta}\right) \quad (2)$$

$$\frac{\bar{u}}{U} = f\left(\frac{y}{h}\right) \quad (3) \quad \frac{\sqrt{u'^2}}{U} = f\left(\frac{y}{h}\right) \quad (4)$$

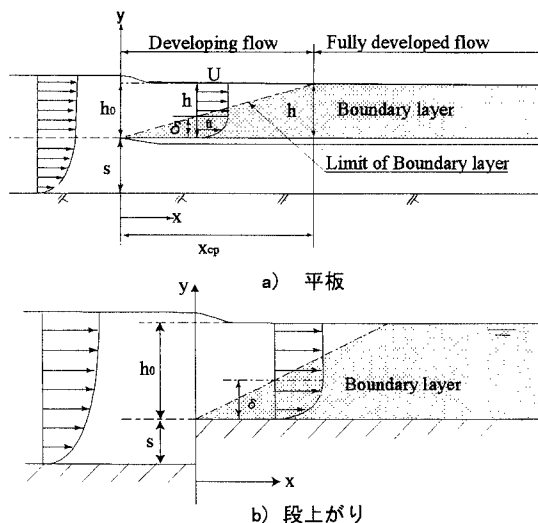


図1 定義図

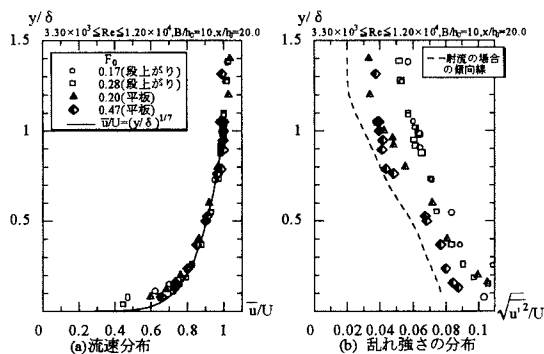


図2 Developing flowの水路中央部における流速特性

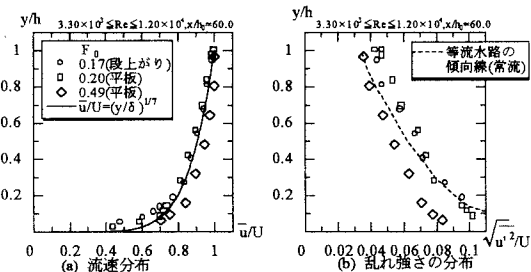


図3 Fully developed flowの水路中央部における流速特性

キーワード：開水路流、乱流境界層、流水抵抗

〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8 TEL.03-3259-0668 FAX.03-3259-0409

ここに、 U は境界層外縁の流速、 y は水路床に垂直な方向の高さ、 h は水深、 δ は水路中央部における境界層厚さであり、乱れ強さが鉛直方向に変化しなくなり、時系列データにおいて乱れの間欠性(intermittency)が認められなくなった y の値として決めた。

図 2(a)に示されるように常流の場合、境界層内の流速分布 $\bar{u}/U$ は射流の場合²⁾と同様に $1/7$ 乗則で近似される。また、図 2-(b)に示されるように $\sqrt{u'^2}/U$ については相似な分布が得られ、射流の場合²⁾と同様な傾向となる。なお、図 2-(b)において $y/\delta > 1.0$ で $\sqrt{u'^2}/U$ の値が得られているのは、境界層が十分に発達した開水路中に平板を設置したためと考えられる。なお、Fully Developed flow の場合においては、開水路等流の流速分布および乱れ強さ分布³⁾(図中実線および破線)に近似することが確かめられた(図 3)。

常流中の水面形状と乱流境界層の発達状態

常流中の水面形状および乱流境界層の発達状態を(5)、(6)の関係で整理した結果を図 4 に示す。ここで、実線や破線はベルヌーイの定理と連続の式と境界層方程式を用いることによって得られた境界層の発達状態と水面形状²⁾を示している。

$$\frac{h}{h_0} = f\left[\frac{x}{h_0}, F_0, Re\right] \quad (5) \quad \frac{\delta}{h_0} = f\left[\frac{x}{h_0}, F_0, Re\right] \quad (6)$$

水面形状および境界層の発達状態について、図 4 に示される

ように、計算値は実験値をほぼ満足している。なお、図 1 に示されるように、平板先端付近($x/h_0=0\sim6$)において、水路中に平板を設置したことによって流積が減少し、流れが加速するため、水深が流下方向に対し局所的に小さくなる。このことから、Developing flow の領域における水面形の測定値をもとに水面形が直線近似できるものとして h_0 を定めた。以上のようにして、常流中における Developing flow の領域においては、境界層方程式を用いることによって水面形状と境界層の発達状態を求めることができる。また、平板上では $F_0 \geq 0.5$ 、段上り部では $F_0 \geq 0.28$ で実験値と計算値とが一致しない。それは、 F_0 が大きくなると波状水面を伴う流況が形成され、境界層外側の流れを potential flow と仮定したことが成立しなくなるためである。したがって、(5)、(6)の関係から解析的に δ 、 h を求めるためには、水面において波状を呈していないことが必要である。

まとめ

$0.1 \leq F_0 \leq 0.6$ 、 $3300 \leq Re \leq 12000$ 、 $B/h_0=10.0$ 、 $h_0/s=1.0$ の範囲で実験的、解析的な検討を行い、境界層内の流速分布が $1/7$ 乗則で近似できることを示した。また、流下方向の乱れ強さは相似な分布が得られ、射流中の境界層内の分布と同様な傾向が得られた。常流中の水面形状と乱流境界層の発達状態との関係について、境界層方程式を用いることによって再現する結果が得られ、その適用範囲が平板の場合 $F_0 \leq 0.5$ 、段上り部の場合 $F_0 \leq 0.28$ であることを示した。

記号説明

$\bar{u}$: 時間平均された流下方向の流速、 u' : 変動流速、 $\sqrt{u'^2}$: 流下方向の乱れ強さ、 U_0 : 平板先端部での平均流速(q/h_0 ; q : 単位幅流量)、 U : 境界層外縁の流速、 x : 平板先端部から流下方向への水平距離、 h_0 : 平板先端部での水深、 h : $x=x$ での常流水深、 y : 水路床に垂直な方向の高さ、 δ : 境界層厚さ、 x_p : 境界層が水面に達したときの x 、 Re : レイノルズ数($Re=q/\nu$; ν : 動粘性係数)、 f : 壁面摩擦抵抗係数、 F_0 : 平板先端部でのフルード数($F_0=U_0/\sqrt{gh_0}$)

参考文献

1. M. Salih Kirkgoz and Mehmet Ardiclioglu (1997), "Velocity profiles of developing and developed open channel flow." J. Hydr. Engrg., ASCE, 123(12), pp. 1099-1105.
2. Ohtsu, I. and Yasuda, Y. (1994), "Characteristics of supercritical flow below sluice gate.", J. Hydr. Engrg., ASCE, 120(3), pp. 332-346
3. Tominaga, A. and Nezu, I. (1992) "Velocity profiles in steep open channel." J. Hydr., ASCE, 118(1), 73-90.

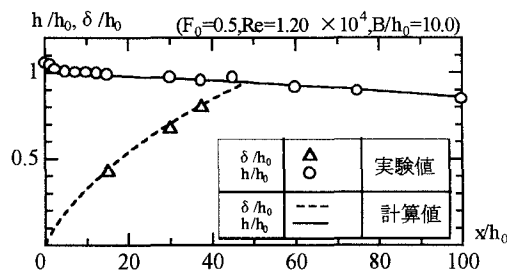


図4(a) 水面形状と乱流境界層の発達状態 (平板)

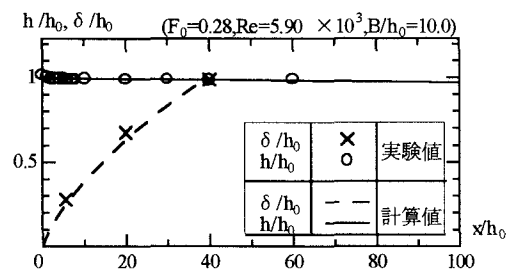


図4(b) 水面形状と乱流境界層の発達状態 (段上り部)