

日大院・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

常流において水平に平板を設置した場合、平板先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。従来、常流中の水面追跡の方法として漸変流の基礎方程式が用いられているが、境界層の発達状態と水面形の変化との関係については明らかにされていない。また、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ている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次的に取り扱う場合の常流中の流速特性、および乱流境界層の発達状態と水面形状との関係について検討を行い、射流の場合と同様な解析方法²⁾を用いることによって、乱流境界層の発達状態と水面形状との関係が再現可能であることを明らかにした。

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)。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 $F_0=0.1\sim0.6$ 、 $Re=5500\sim12000$ 、 $B/h_0=10[F_0=U_0/\sqrt{gh_0}]$ 、 $Re=q/\nu$ 、 $U_0=q/h_0$ 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。

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

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

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

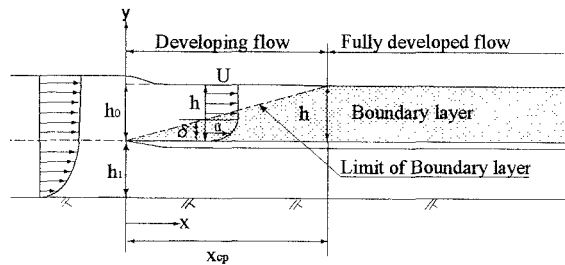


図1 定義図

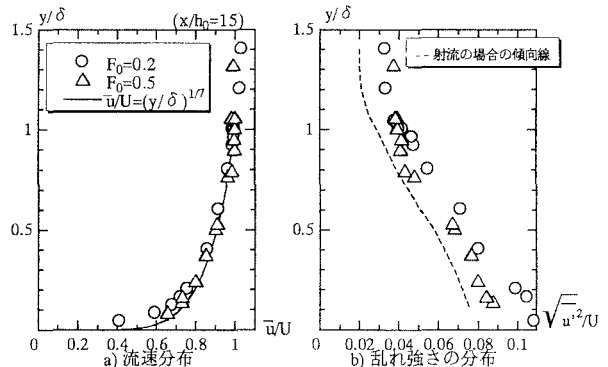


図2 Developing flow

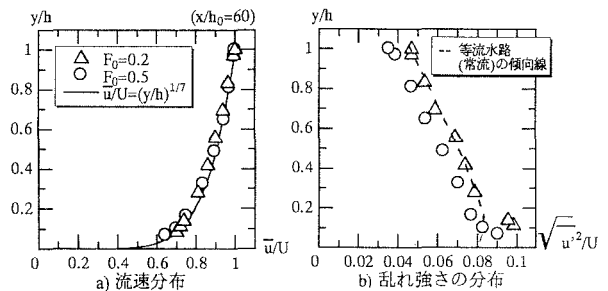


図3 Fully Developed flow

キーワード：乱流境界層、開水路流、常流、段上がり、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

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、実線と破線など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 の領域の水

面形の測定値をもとに水面形状値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、乱流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。

平板先端部から境界層が水面に達した断面までの流下方向の距離 x_{cp} (図 1 参照)を解析的に求めて整理した一例を図 5 に示す。図 5 に示されるように、 $F_0 \leq 0.4 \sim 0.5$ の範囲では x_{cp} に対する自由水面の影響(F_0 の影響)が小さく、 Re の影響が大きい。なお、 $F_0 \geq 0.5$ の場合の x_{cp}/h_0 を示していないのは、実験値と計算値とが一致しないためである。それは、 $F_0 \geq 0.5$ の場合、平板上で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

$0.1 \leq F_0 \leq 0.6$ 、 $5500 \leq Re \leq 12000$ 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となることを示した。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、射流の場合に提案されている解析方法¹⁾を用いることによって、計算値が実験値をほぼ満足し、再現する結果が得られ、その適用範囲が $F_0 \leq 0.5$ であることを明らかにした。さらに、境界層の発達状態に対する F_0 、 Re の影響を示した。

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_{cp} : 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 Kırkgoz and Mehmet Ardiçlıoğlu (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.

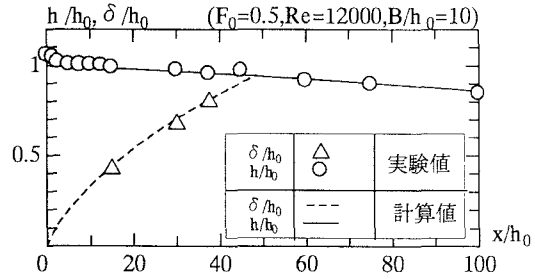


図4 常流中の水面形状と乱流境界層の発達状態

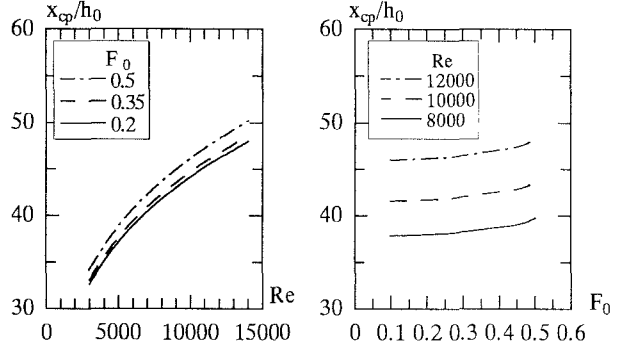


図5 F_0 、 Re に対する限界点 x_{cp} の変化