

壁面噴流の乱れ計測結果について

山口大学 正員 斎藤 隆
徳山高専 正員 ○大 成 博 文
天理教管轄部 西 浦 邦 男

今日、土木構造物周辺の流れにおいて多くの壁面噴流を見出すことができ、その流れの構造の解明は、依然として重要であるといえる。著者らは、二次元乱流壁面噴流についてこれまで一連の研究を行ない、いくつかの特性を明らかにしてきたが、本報告は、その延長上にあるものであり、これまであまり明らかにされていなかった比較的大きな粗面を持つ壁面噴流の乱れ構造の計測結果を示したものであり、同時に、これまでに示してきた理論式と得られた乱れ特性量との整合性を比較検討しようとしたものである。

実験に用いた水路は、幅18 cm、深さ70 cm、長さ7 mであり、噴流厚を1 cm、壁面粗度には、平均粒径0.44 cmの砂をペンキで均一に糊塗して用いた。Fig.1は粗壁面をもつ壁面噴流の二次元モデルを示したものであり、各記号の説明は図中に示したとうりである。流速測定には、平均流速については、ピトー管(内径1.9 mm、先端厚0.2 mm、先端径4 mm)を用い、乱れ速度については、熱線流速計を用いた。

Fig.2に横断方向の平均流速分布を示す。Fig.1に示したモデルは二次元性が成立していることが当然の前提であり、諸特性を検討する以前に当然確認されておかねばならない。この図から、水路中心まで流下距離の大小にかかわらず側壁効果によるアレバランスはみられず、示された範囲内において二次元的考察を進めてもさしつかえないといえる。

著者らは、壁面噴流のような急激な速度勾配をもつ流れにおいては、主流部の乱れが境界層内にまでかなりの影響を与えるという観点から、その影響を受ける領域を内層とし、壁面の状態が規定される領域を粘性底層および乱流底層としてそれぞれの領域での流速分布式を導き、それからかなりの精度で実験値と一致することを示してきた。そのうち、内層における流速分布式は、Ⅲ式で表わされる。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{K} \left[R_* \eta_1 + \frac{R_* (\eta_1 - \eta_2)}{1 + R_* (\eta_1 - \eta_2) - E (\eta_1 - \eta_2)} \right] + \frac{1}{2E} \left[\ln \frac{ER_* (\eta_1 - \eta_2)^2 - R_* (\eta_1 - \eta_2) - 1}{ER_* (\eta_1 - \eta_2) - R_* (\eta_1 - \eta_2) - 1} \right] + \frac{B_* (1 - 2E)}{\sqrt{R_*^2 + 4ER_*}} \ln \left\{ \frac{2ER_* (\eta_1 - \eta_2) - (R_* + \sqrt{R_*^2 + 4ER_*})}{2ER_* (\eta_1 - \eta_2) - (R_* - \sqrt{R_*^2 + 4ER_*})} \right\} \quad \text{-----(1)}$$

Ⅲ式は、境界層内の渦動粘性係数分布を仮定した式、運動方程式に境界層近似を適用して得られる式、粘性底層の速度分布式(Ⅱ式)、境界層内のせん断応力分布を直線と仮定した式等を用いて得られ、 η_1 、 η_2 はそれぞれ粘性底層、乱流底層の境界面高さであり、乱流底層境界面で内層の渦動粘性係数に一致しなければならないこと、および各層での境界面での流速を連続的に接続することが境界条件として存在している。

$$E = K U_* \delta_B \eta_1 (1 - \eta_1), E = 1 - \frac{\alpha U_m \delta_0}{K U_* \delta_B} \quad \text{-----(2)} \quad (\because \alpha = 0.045)$$

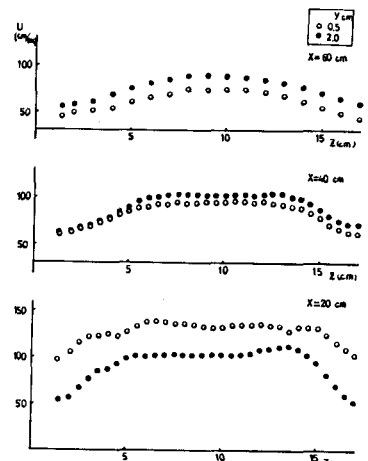
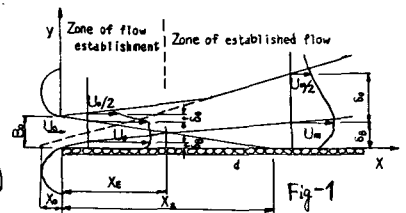


Fig.2 横断方向平均流速分布.

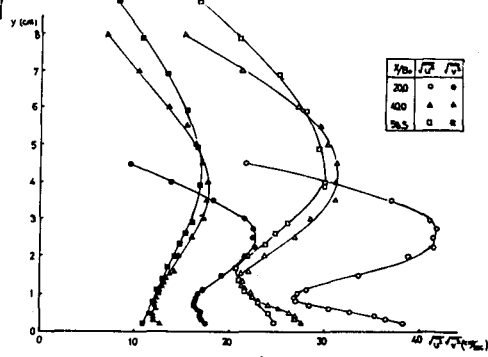


Fig.3 乱れ強度分布.

$$\frac{\tau}{\rho} = \nu \frac{du}{dy} - u'v' = (\nu + \varepsilon) \frac{du}{dy} \quad \dots (3)$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{U_{\infty}}{\nu} = \frac{1}{K} R_* \eta, \quad R_* = K \frac{U_{\infty}}{\nu} \quad \dots (4)$$

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{\varepsilon}{\rho} (1 - \eta) = u_*^2 (1 - \eta), \quad \eta = y/\delta_B \quad \dots (5)$$

乱流底層については、乱れエネルギーの生成と散逸とが、ほぼ平衡状態にあると仮定し、栗原による式で与えられる。また、粗領域における粘性底層内の流速分布は、 $E=1$ (通常の乱流境界層) と置き、 R_* が十分大きく、 η が比較的大きい所を考慮して式を簡略化して別式のように求める。粗領域については、有名な Nikuradse の実験結果があり、別式で与えられる。 $K=0.4$ として、別式、別式から別式が求まる。

$$\eta_2 - \eta_1 = \frac{R_*}{\delta_B} [1 - \exp\{1 - 0.055(\frac{U_{\infty} R_*}{\nu} - 3.3)\}] \quad \dots (6)$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{K} \ln \frac{u}{u_*} + A_1, \quad A_1 = 8.5 + 0.744 \left(\frac{U_{\infty} R_*}{\nu} - 3.3 \right) \exp\{-0.071(\frac{U_{\infty} R_*}{\nu} - 3.3)\} \quad \dots (8)$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{K} [R_* \eta_1 + \frac{R_* (\eta_2 - \eta_1)}{1 + R_* (\eta_2 - \eta_1) - R_* (\eta_2 - \eta_1)^2} + \ln \frac{\eta}{\eta_2 - \eta_1}] \quad \dots (7)$$

$$\frac{U_{\infty} \eta_1}{\nu} = A_1 + \frac{1}{K} \left\{ \ln \left(\frac{R_*}{\eta_2 - \eta_1} \right) - \frac{R_* (\eta_2 - \eta_1)}{1 + R_* (\eta_2 - \eta_1) - R_* (\eta_2 - \eta_1)^2} \right\} \quad \dots (9)$$

しかし、別式～別式において依然として明らかでない物理量として ν の値が存在する。 ν は、通常直接計測によって得るのが効果的であるといえるが、現段階では装置が完成しておらず、 U_* を仮定し、(6)、(4)、(6)、(7)、(9) 式を用いて別式に代入し、求めた u と最初に仮定した u が一致をみるまで計算を行なって求めることができる。

Fig. 3 は、 u' , v' についての乱れ強度分布を示したものである。この図から、壁面近傍では、 u' , v' の粗度に起因した強度の大きい値を示し、主流部と境界層部との境界面でそれぞれ最小値を示し、主流部では速度勾配が最も急激な U_{∞}/δ_0 を示す地点でピークを示している。流下距離の増大とともに主流部と境界層部の乱れ強度の差はなくなり、主流部の乱れが境界層内になじり境界層がさらに発達してゆく様子がこのことからもわかると言えよう。

Fig. 4, Fig. 5 は、平均流速分布、レイノルズ応力分布、渦動粘性係数分布のそれぞれを縦向に表わしたものである。せん断応力分布については、理論式で求めた傾向と定性的に全体的に一致しているといえるが、流下距離が増えると若干で、 ν の値が小さくなる傾向を示している。これは、 δ_0 の値によってかなりの変化がみられる値であり、 δ_0 の値が側壁の影響をかなり受けていること、逆に δ_0 が壁面の影響を受けていると思われることから、今後応答水路での精密な計測が行なわれる必要があるといえる。しかし、これらの厳密性に欠ける点と考慮しても ν の値はほぼ計算値と一致しているといつてよい範囲内にある値と思われる。

また、渦動粘性係数の分布については、傾向的には、理論曲線と同様の傾向を示しているが、実験値とのずれを差示している。これは、渦動粘性係数 ε が速度勾配とせん断力より求められることから、誤差と思われる。今後、詳細な実験によって計測上の精度をあげることを課題とするとともに、その他の乱れ特性量についての検討や可視化法による空間的構造の解明等を行なってゆくつもりである。

(参考文献)

栗原道徳：粗滑遷移領域における管流の抵抗則について、九州大学流研報集，Vol. VIII, No. 4, 1951.

斎藤隆：二次元乱流壁面境界層に関する研究，土木学会論文集，オ64号，1977.

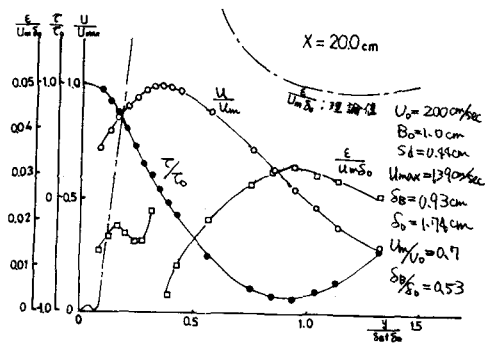


Fig. 4

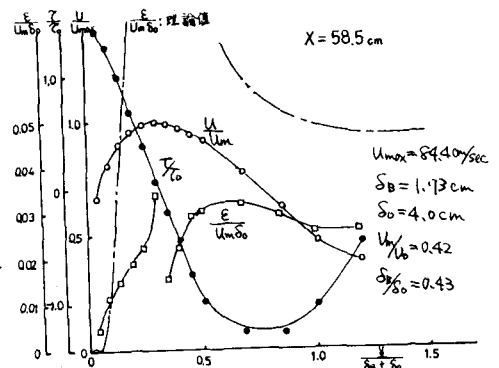


Fig. 5