

京都大学大学院 学生員 西尾 誠  
 京都大学防災研究所 正員 今本博徳  
 竹中土木(株) 正員 藤井義文

水理構造物周辺における開水路流れの局所機構に関しては従来より多く研究がなされているが、乱れ特性も含めた流れの内部構造については不明点が多い。本報告は、ホットフィルム流速計を用いて開水路段上り部下流側の流れの内部構造について詳細な実験的検討を行なったものであって、実験水路として長さ13m、幅40cmの長方形断面直線水路内に高さ3.19cm、長さ4mの段上り部を設置されたものが用いられている。なお、本実験での水理条件は、流量 $Q=3.043 \text{ l/sec}$ 、路床勾配 $I=1/800$  であって、上・下流側水深はそれぞれ $h_1=6.90 \text{ cm}$ 、 $h_2=3.60 \text{ cm}$  とされている。

### 1. 平均速度および乱れ速度の分布

図-1は、段上り部下流側における流下方向平均速度 $U$ の鉛直分布を断面平均速度 $U_m$ を用いて無次元化表示したものであって、 $x/h_2=0$ の流入部での $U/U_m$ は全水深にわたりほぼ一様であるが、 $x/h_2=1.11$ では水面近傍での急激な加速と路床付近での減速が著しいことが知られる。 $x/h_2 \geq 1.67$ では水面付近の $U/U_m$ は $x/h_2$ に関係なくほぼ一定値を示すが、路床付近の $U/U_m$ は $x/h_2$ の増加とともに大きくなり、全体として2次元開水路の速度分布形状に漸近してゆくことが知られる。また、図-2は無次元化された乱れ速度 $\sqrt{q^2}/U_m$  ( $\sqrt{q^2}=\sqrt{u'^2+v'^2+w'^2}$ ) の鉛直分布を示したものであるが、 $\sqrt{q^2}/U_m$ の最大値は $z/h_2=0.1 \sim 0.2$ 付近にあり、段上り部直下に形成される剥離域より乱れエネルギーが多くが供給されていることが知られる。

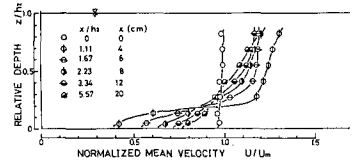


図-1

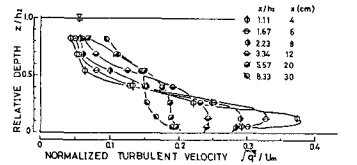


図-2

この現象は $x/h_2=5.57$ 付近まで見られ、流下とともに最大値は減少し、乱れの大きな領域が水面方向へ広がっていき、 $x/h_2 \geq 5.57$ では2次元開水路流れの場合に近づいていく。

### 2. 乱れエネルギー収支

以上のように、段上り部下流側では剥離域で生成された乱れエネルギーが下流側に輸送され、消散していくが、この機構を明らかにするため乱れエネルギー収支の検討を行う。

乱れエネルギー方程式において、1次微少量を無視すれば、次式が得られる。

$$\frac{1}{2} \left( U \frac{\partial \bar{q}^2}{\partial x} + W \frac{\partial \bar{q}^2}{\partial z} \right) - \left( -\overline{u'w'} \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \epsilon + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ w' \left( \frac{q^2}{2} + \frac{p'}{\rho} \right) \right\} = 0$$

上式に従い移流量(第1項)、生成量(第2項)、消散量(第3項)を計測結果より算定すると、計測が困難な拡散量(第4項)は他の3量の残差として求められる。なお、消散量はエネルギースペクトルに慣性領域の相似則を適用し、スペクトル定数 $S_e=0.47$ を用いて求められ、移流量の $(W/2)(\partial \bar{q}^2 / \partial z)$ の項は、本実験では $W$ が $U$ に比し十分小さいため無視されている。

図-3は得られた各量の鉛直分布を示したものであるが、 $x/h_2=2.23$ では積分された消散量と生成量はほぼ等しいが、 $x/h_2=5.01$ では消散量がかなり大きくなり、流下に伴う減少の割合は生成量の方が大きいことが知られる。また、両断面において、消散量は路床付近で、生成量はそれより若干水面側で最大値をとる。移流量は、

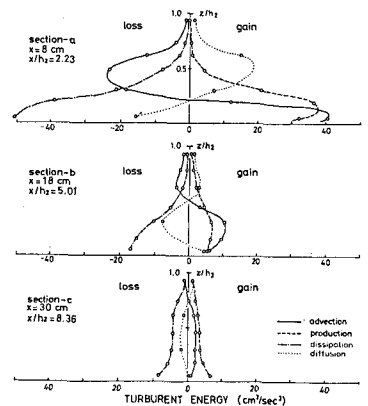


図-3

$x/h_2 = 2.23, 5.01$ では水面側で損失、路床側で獲得となるが、0となる位置は流下とともに上昇し、 $x/h_2 = 8.36$ では大部分が獲得となり、各断面において拡散量と対称的な分布形を示している。以上より、段上り部下流側では路床付近の乱れエネルギーが遠散されながら水面方向に拡散されるとともに下流側へと移流、遠散されていくことが知られる。なお、 $x/h_2 = 5.01$ における各量の分布形は、Townsend<sup>1)</sup>による気流における2次元後流の結果とよく似ている。

### 3. 後流特性との比較

速度分布特性より、段上り部下流側では後流的な挙動を示す領域が存在することが明らかにされた。この領域を混合領域とし、次式で表わされる2次元円柱後流との比較を行った。

$$b/2 \propto x^{1/2}, \quad \Delta U_{max} \propto x^{-1/2} \quad (1)$$

$$\Delta U / \Delta U_{max} = \exp \{ (-\ln 2) \eta^2 \} \quad (2)$$

ここに、 $b/2$ :半値半幅、 $\Delta U_{max}$ :最大欠損速度、 $\Delta U$ :欠損速度、 $\eta = z/b/2$ である。これらを段上り部に適用するにあたり、図-4に示される記号を用いたが、ポテンシャル・コア領域と混合領域との境界 $h_{20}$ は $U$ の変化が小さいため流入部での乱れレベル $\sqrt{v}/U = 0.06$ となる位置とし、そこでの速度を $U_{20}$ とした。さらに(2)式に従い、図-5に示されるように、欠損速度 $(U_{20}-U)$ とその位置 $z$ の関係を対数・自乗表示を用いてプロットし、外挿法により $z=0$ での最大欠損速度 $(U_{20}-U_{22})$ を推定し、 $(U_{20}-U) = (U_{20}-U_{22})/2$ となる $z$ の位置より半値半幅 $h_{21}$ を得た。なお、混合領域と底面境界層との境界 $h_{22}$ については、欠損速度分布が(2)式に近似し得なくなる位置として求められている。

図-6は、このようにして求められる最大欠損速度と乱れ速度およびレイノルズ応力の最大値を $U_{20}$ で無次元化表示したものの流下方向特性を示したものであるが、これらはいずれも $x$ の $1/2$ 乗に比例して減少している。また、図-7は $h_{20}, h_{21}$ および $h_{22}$ を水深 $h_2$ で無次元化表示したものの流下方向分布を示したものであるが、 $h_{20}$ および $h_{21}$ は $x$ の $1/2$ 乗に比例して増加しており、混合領域における種々の特性量が(1)式と同じ特性を示していることが知られる。なお、 $h_{22}$ も流下とともに増加する傾向を示し、底面境界層が流下とともに発達されることが知られる。

図-8および9は、混合領域における平均および乱れ速度の鉛直分布を各断面での最大欠損速度と半値半幅を用いて検討したものであるが、図-8より $(U_{20}-U)/(U_{20}-U_{22})$ は図中に実線で示される(2)式とかなりよく一致することが知られる。また、図-9においても、 $\sqrt{v}/(U_{20}-U_{22})$ は、実線で示されるTownsendが気流において得た2次元円柱後流の結果と比較すると、その値は若干大きいものの、非常によく似た分布形となっている。

以上のように本実験においては、開水路段上り部下流側に2次元円柱後流と類似した特性を持つ領域が存在することが明らかにされた。その普遍性およびその他の領域の特性については段上り高さなどをパラメータとした詳細な検討が必要であると考えられる。

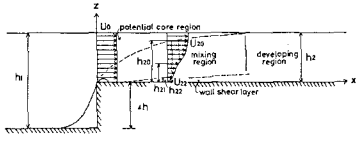


図-4

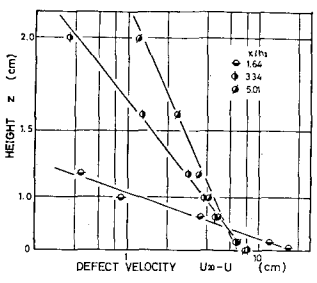


図-5

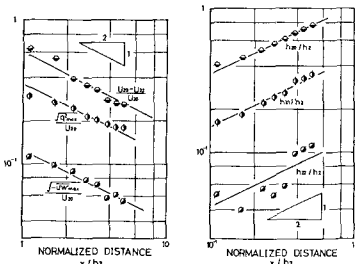


図-6

図-7

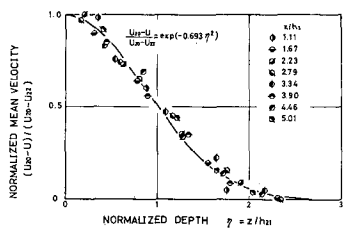


図-8

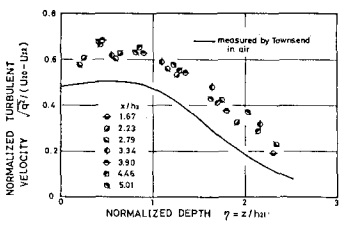


図-9

参考文献, 1) Townsend, A.A.; The Structure of Turbulent Shear Flow, Cambridge University Press, 1965.