

東北大学大学院 学生員 小暮和史
東北大学工学部 正 員 首藤伸夫

1. まえがき

従来、開水路において底面に働くせん断力を求める方法としては、径深と水面勾配により求める方法、底面付近の流速分布として対数則を仮定して、摩擦速度から求める方法などが考えられる。しかし実際の河川においてその他の方法によるせん断力の測定例は少ないようである。そこで著者は、実際の河川において、電磁流速計を用いて乱れの測定を行ない、流速変動からレイノルズ応力を直接求めて、せん断力を算定し、従来の方法との比較を行なったのでここに報告する。

2. 測定方法

測定は、幅が約100m、最大水深2.3mの実際の河川で行なった。まず乱れの測定に先がけて、流心部があると予想される左岸付近の主流方向の流速を横断方向、鉛直方向各々数点で測定したところ、図-1に示すように左岸から約10mの地点が流心部と考えられるのでこの地点で乱れの測定を行なうことにした。そこで図-2の略図に示すようにボートを横断方向に張ったロープの測定地点に固定し、ボート上で支柱を組み立て、流速計のセンサー部を正確に固定したセンサー固定具を支柱に取り付け、所定の水深までロープでセンサーを降ろし測定を開始し、その記録を陸上に設置したペン書きレクタグラフにより、連続的に記録した。乱れの測定には、X-Y型電磁流速計を用い、鉛直方向に5点ないし4点で、主流方向流速 U 、水深方向流速 V を同時に1分間前後測定し、記録紙の連続記録を時間間隔0.05 sec で読みとり離散的な量に変換して、平均速度 $\bar{U}$ 、 $\bar{V}$ や変動速度 U' 、 V' などを計算した。

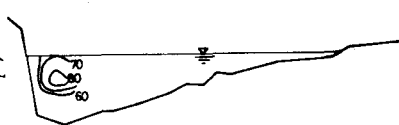


図-1 測定地点の断面

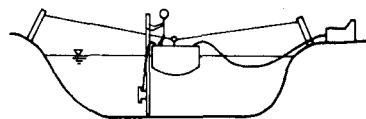


図-2 測定方法

PT.	1	2	3	4	5
Z(m)	1.8	1.3	0.8	0.3	0.1
Z/H	0.78	0.57	0.35	0.13	0.04
$\bar{U}$ (cm/s)	62.7	55.2	45.4	38.7	28.1
$\bar{V}$ (cm/s)	1.2	-5.0	-2.1	-1.3	-5.4
$-\overline{U'V'}$	2.5	3.5	8.9	18.6	8.5
$\overline{U^2}$	19.4	18.4	58.9	72.8	33.3
$\overline{V^2}$	18.5	15.0	39.9	43.2	24.8

表-1 CASE-1

3. 結果および考察

乱れの測定は流速計の測定レンジを変えて2度行なった。右の表は各点の $\bar{U}$ 、 $\bar{V}$ その他の計算結果をまとめたものである。

ここで CASE-1, 2 は各々、流速計の測定レンジが 0~3 m/sec, 0~1 m/sec である。測定時刻の違いもあるが測定レンジの違いで、平均速度その他の結果がかなり異なるようである。特に CASE-2 の PT. 3 の $\overline{U'V'}$ は正となっておりレイノルズ応力の算定は不可能のようである。

各点のせん断力は(1)式のように変動速度の積の形として算定することができる。

$$\tau = -\rho \overline{U'V'} \quad (1) \quad \rho: \text{流体の密度}$$

一般に対数流速分布を次のように表わすことができる。

$$\frac{U(Z)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln Z + C \quad (2) \quad \kappa: \text{カルマン定数} \\ C: \text{定数}$$

PT.	1	2	3	4
Z(m)	1.8	1.3	0.8	0.3
$\bar{U}$ (cm/s)	82.6	81.8	73.3	66.7
$\bar{V}$ (cm/s)	-2.6	-1.2	2.2	7.2
$-\overline{U'V'}$	3.6	9.2	-0.7	6.9
$\overline{U^2}$	39.5	47.4	102.5	49.5
$\overline{V^2}$	41.9	65.3	53.7	19.2

表-2 CASE-2

図-3は CASE-1, 2 の各々について、縦軸に水深 Z を対数目盛でとり、横軸に主流方向の平均速度 $\bar{u}$ を普通目盛でとり、鉛直方向の流速分布を表わしたものである。

CASE-1 について考えてみると、水面に近い PT. 1, 2 の実測値は別として、底面付近の3点、PT. 3~5 つまり底面から 0.8 m までは、ほぼ直線上にのり、この付近の流速分布は対数分布としてもよいようである。(2)式からわかるように、この3点を直線近似するとその直線の傾きから、摩擦速度 u_* が求められ、さらに次式により底面に働くせん断力 τ_0 を求めると 11.5 dyne/cm^2 となった。

$$\tau_0 = \rho u_*^2 \quad (3)$$

ここで求められた τ_0 と断面平均流速 U_m を用いて次の(4),(5)式によりマニングの粗度係数 n を求めてみると $n=0.030$ と妥当な値となった。

$$\tau_0 = \frac{f'}{2} \rho U_m^2 \quad (4) \quad f': \text{抵抗係数}$$

$$f' = \frac{28 n^2}{H^3} \quad (5) \quad H: \text{水深}$$

図-4は(1)式より求めたレイノルズ応力 τ と(3)式より求めた τ_0 を用いて、通常の開水路の等流に対する次式のように直線近似した τ とを比較したものである。

$$\tau = \tau_0 (1 - Z/H) \quad (6)$$

(1)式より求めた τ は、PT. 3, 4 特に PT. 4 では大きいようであるが、現地では厳密な意味での等流状態は成立していないこと、現地での乱れの測定の問題などとも考慮に入れると、全体的には良く合っていると思う。

図-5は縦軸に乱れ強さを主流方向の平均速度で無次元化した $\sqrt{u'}/\bar{u}$, $\sqrt{v'}/\bar{u}$ を、横軸に相対水深 Z/H をとったものである。底面のごく近くである PT. 5 は乱れ強さが大きくてもやむをえないとしても PT. 3, 4 の乱れ強さが主流方向、水深方向共に大きいようである。

これは図-4において PT. 3 および 4 の実測値が理論値より大きいことと対応していると思う。ここで実際に PT. 3, 4 の乱れ強さが大きいと推定するよりも、何らかの原因、たとえば支柱の振動などにより、PT. 3, 4 の測定値の変動が大きくなり計算上、乱れ強さが大きくなり、それに伴ない、せん断力の値も大きくなり理論値と合わなくなると考える方が無理がないと思う。CASE-2 については、前述したように PT. 3 ではせん断力を求められないが、図-3の PT. 2~4 に対数則を仮定し、 τ_0 を求めると 17.6 dyne/cm^2 となり、他の点の τ_0 ではオーダー的には合っている。

4. 結 語

実際の河川におけるせん断力の測定方法として、底面付近の流速分布から求める方法と、流速変動から求める方法とを行なったが、両方とも同程度の値を得た。しかし現在の測定方法では支柱の振動などが測定値に影響するようなので、今後、この点について検討が必要だと思われる。

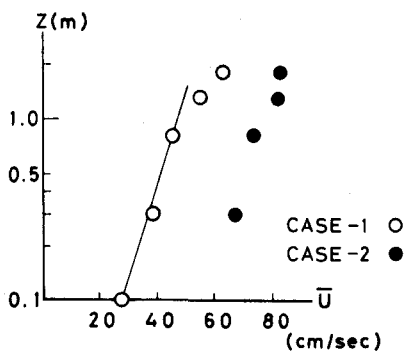


図-3 流速分布

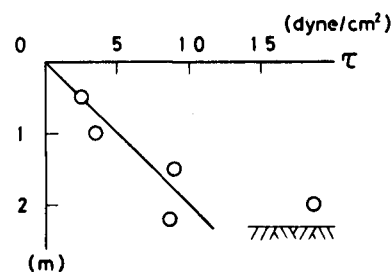


図-4 セン断力の比較

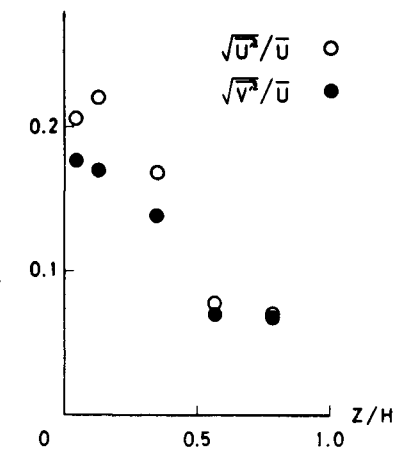


図-5 乱れ強さの分布