

開水路流れのせん断応力に関する実験的研究

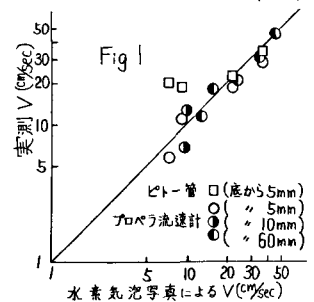
東北大学工学部 学生員 〇 伴 一彦

同 上 正 員 首 藤 伸 夫

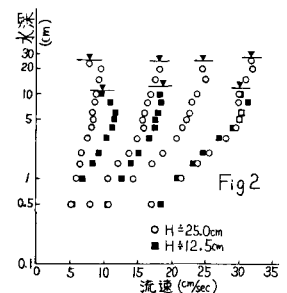
同 上 学 生 員 金 子 範 彦

1). まえがき 開水路において、潤辺に平均的に作用するせん断応力は掃流カ公式で $\tau = \rho g R I$ で与えられる。しかし実験室の小水路を用いて洗掘問題等を取扱う場合、側壁の影響を考えれば上記の掃流カ公式では底面に働くせん断応力を正當に評価し得ないことが予想できる。本報告では、底面中比水深水の大きな水路（側壁による影響が大きいと考えられる水路）における流速分布の実測値から、底面及び側壁に働くせん断応力を算定し、掃流カ公式及び足立¹⁾、木村²⁾の方法から算定したせん断応力との比較を行なっている。又、せん断応力計を用いて行なったせん断応力の直接測定結果も参考までに記している。

2). 実験概要 水路の大きさは、 $500 \times 100 \times 600 \text{ mm}$ である。水路下流端は鉛直軸まわりに回転するゲートとし、流線に著しい乱れが生じないように配慮した。側壁はガラスで滑面、底面は鉄板で $Re_* = U_* K_s / \nu$ (U_* : 摩擦速度 K_s : 相当粗度 ν : 動粘性係数) が $60 \sim 95$ であり粗面と考えられる。せん断応力計は受カ板を水路底面の高さに合わせ、水平になるように設置した。受カ板の寸法は、 $4 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ で表面は滑面になっている。せん断応力計の空気中でのキャリブレーションでは、測定誤差 5% 以下であった。流速分布の測定は、当初ピトー管と小型プロベラ流計の2方法で行なったが、測定値に大きな差を生じる為、水素気泡写真による判定の結果 (Fig 1) 小型プロベラ流計の値を採用することにした。測点は、せん断応力計中心部上断面において横断方向7点 (左側壁より 1.0 cm 2.0 cm 3.5 cm 5.0 cm 6.5 cm 8.0 cm 9.0 cm) 鉛直方向12点 (底面より 0.5 cm 1.0 cm 1.5 cm 2.0 cm 3.0 cm 4.0 cm 5.0 cm 6.0 cm 8.0 cm 10.0 cm 15.0 cm 20.0 cm) の計84点である。又水面勾配の測定には、マノメーターを用いた。実験条件は水深を $H_1/B \div 2.5$ $H_2/B \div 1.25$ の2通りに変化させ、そのうち H_1 に対しては $Q = 1.95 \text{ l/sec} \sim 8.10 \text{ l/sec}$ で6種類、 H_2 に対しては $Q = 100 \text{ l/sec} \sim 4.00 \text{ l/sec}$ で4通りに Q を変化させた。



3). せん断応力の算定 流速の実測結果から鉛直方向の流速分布は、底面から 3 cm 程度までは横断方向の位置、平均流速、水深の変化にかかわらず対数則が成立する。(Fig 2参照) (1) 式で $K = 0.4$ と仮定し、 $U(z)$ と Z の実測値より摩擦速度 $U_{*B} = \sqrt{\tau_B / \rho}$ を求め、間接的に τ_B を算定する。

$$\frac{U(z)}{U_{*B}} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad (1)$$


ここで Z 底面からの高さ $U(z)$: Z における流速 K : カルマン定数 Z_0 : 水路底面の粗滑状態に支配される積分定数 τ_B : 底面に働くせん断応力

τ_B の横断方向の分布を求めると、ほぼ水路中央部で最大値をとるような凸型分布になっている。(2) 式より求めた τ_B と τ_{Bmax} との関係を示したのが Fig 3 である。 $\tau_{Bmax} / \tau_B = 1.5 \sim 2.0$ となっており、両者の間に良い相関のあることがわかる。

$$\tau_B = \frac{1}{B} \int_0^B \tau_B dy \quad (2)$$

ここで B : 水路巾 τ_B : 底面に働く平均的せん断応力

側壁に働くせん断応力値及び分布についても底面と同様の手順により算定することができる。計算では、側壁から 3.5 cm までの $U(y)$ の実測値を用いて τ_s を求めた。 τ_s の分布型は、 τ_B 程顕著な特徴を見い出せなかった。なお τ_s の算定には (3) (4) (5) 式を用いた。

$$\frac{U(y)}{U_{*s}} = \frac{1}{K} \ln \left(\frac{y}{y_0} \right) \quad (3) \quad U_{*s} = \sqrt{\tau_s / \rho} \quad (4) \quad \tau_s = \frac{1}{H} \int_0^H \tau_s dz \quad (5)$$

ここで y : 側壁からの距離 $u(y)$: y における流速 η : 側壁の粗滑状態に支配される積分定数 $\bar{\tau}_s$: 側壁に働く平均的せん断応力 H : 水深
4). 掃流カ公式及び足立、木材の方法との比較 ある水路の単位長さ当りの掃流力の総和 X_1 は力の平衡条件より (6) 式であらわされる。一方 (2)(5) 式より求めた $\bar{\tau}_b$, $\bar{\tau}_s$ を用いて同様に掃流力の総和 X_2 を求めると (7) 式であらわされる。理想的には、(6) = (7) になるはずである。

$$X_1 = w A I \quad (6) \quad X_2 = 2 H \bar{\tau}_s + B \bar{\tau}_b \quad (7)$$

ここで w : 水の単位重量 A : 流水断面積 I : 動水勾配

Fig4は、(6)(7)式より求めた X_1 , X_2 の相関関係を示したものである。図の中の I_m は実測値、 I_c は $I = v^2 n^2 / R^3$ において v, R の実測値と $n = 0.013$ を用いて求めた値である。 $X_2/X_1 \div 1.0 \sim 1.3$ であるが、流水断面での Total な力の釣り合いを考えるならば、実測流速から求めた $\bar{\tau}_b$, $\bar{\tau}_s$ は おおむね妥当な値であると言える。Fig5は、掃流カ公式から求めた $\bar{\tau}$ と $\bar{\tau}_b$, $\bar{\tau}_s$ の相関を求めたものである。 $\bar{\tau}_b/\bar{\tau} \div 1.2 \sim 1.5$, $\bar{\tau}_s/\bar{\tau} \div 0.6 \sim 1.0$ であり本実験では側壁の影響がかなり受けていると言える。この結果と Fig3 の結果を考え合わせれば、底面に働く τ_{bmax} は掃流カ公式から求めた $\bar{\tau}$ の実に 2 倍に達する事になる。次に長方形水路の側壁効果の算定方法として、流水断面分割法の一つである足立の方法と水平、鉛直の 2 方向の 2 次元流れの組み合わせを考えた木村の方法を選び、実験値との比較を行なったのが Fig6 である。両者とも実験値と良い対応を示しており、中に比べて水深の大きな水路においても両者を適用できることがわかる。

5). せん断応力計による実測 今回の実験では流速分布によるせん断応力の間接的測定に並行して、せん断応力計による直接測定も試みた。Fig7 が結果であり、相関は良いものの実測値 τ_{bm} が τ_{bmax} に比べて $1/3 \sim 1/5$ とかなり小さい値になっている。原因は、受力板が滑面であり水路底面との粗滑状態が不連続になっていることによると考えられる。したがって、受力板に適当な粗度をつけて今後再実験する必要がある。

6). 結論 ① H/B の大きな水路で側壁及び底面の速度分布に対数則を適用して算定した $\bar{\tau}_b$, $\bar{\tau}_s$ が、流水断面での Total な力の釣り合いを考えるなら掃流カ公式とよく一致する。② $H/B = 2.5 \sim 12.5$ の条件で $\bar{\tau} = 19.8 R I$ とすると、 $\bar{\tau}_b/\bar{\tau} = 1.2 \sim 1.5$ $\tau_{bmax}/\bar{\tau} = 2 \sim 3$ となり底面に働くせん断応力は、掃流カ公式で与えられる値より大巾に大きな値となる。③ H/B の大きな水路においても足立、木村の方法により算出した $\bar{\tau}_b$, $\bar{\tau}_s$ の値が実測値と一致する。したがって、水路の K_s と Manning の n がわかっていれば、等流状態で Q , H , B の実測値より $\bar{\tau}_b$, $\bar{\tau}_s$ の算出が可能である。しかし側壁、底面のそれぞれの平均的なせん断応力としてしか表現し得ず 局所的な値の算定はむずかしい。④ 洗掘開始条件を決めるのは、 $\bar{\tau}_b$ でなく τ_{bmax} であろうから、この水路でしかもここでの実験条件下では、 $\tau_{bmax} = 1.774 \bar{\tau}_b^{0.961}$ で計算するのが良い。

< 参考文献 > 1) 足立昭平: 土木学会論文集 B18号 1962 P17~24 2) 木村喜代治: 土木学会論文集 251号 1976 P45~56

