II－226　複断面直線開水路流れの接合部鉛直分割面における平均剪断応力の検討

長岡技術科学大学建設系　正会員　河原能久
東京大学工学部土木工学科　正会員　玉井信行

1．はじめに　本報告は複断面直線河道における流れの抵抗則を見直し合理的な抵抗則を得ようとするものである．断面分割法で必要となる接合部鉛直分割面に作用する平均剪断応力の表現を低水路内と高水敷上の流れの相互干渉及び低水路側壁の存在を考慮した解析より求めた．また，その剪断応力の評価式を他の実験式等と比較検討した．

2．水深方向に平均された流れ場の解析　解析対象と座標系を図－1に示す．水深方向に平均された等流状態の流れの基礎方程式は以下のようである．

$$d(H\tau)/dz+\rho g H S_o-\tau_b=0 \qquad (1)$$

$\tau=\rho\,\nu_e\,dU/dz$　(2)　$\nu_e=c'HU_*=cHU$　(3)　$\tau_b=\rho g n^2 U^2/H^{1/3}$　(4)　$c=c'g^{1/2}\,n\,H^{-1/6}$　(5)

ここで，Hは水深であり低水路ではd_c高水敷ではd_p，c'は0.4とする．また，境界条件は次のようである．

$$z=0\ ;\ dU/dz=0 \quad (6) \qquad z=b_c\ ;\ U=U_j \quad (7)$$

$$z=b_c\ ;\ d_c\tau\,|_{b_c-0}=d_p\tau\,|_{b_c+0}-h\rho g\,n_c^2U_j^2/((d_c+d_p)/2)^{1/3} \quad (8)$$

式 (8) の右辺第2項は低水路側壁から受ける剪断力を表す．従来の研究では低水路側壁の影響を十分には考慮しておらず，この解析の特徴である．

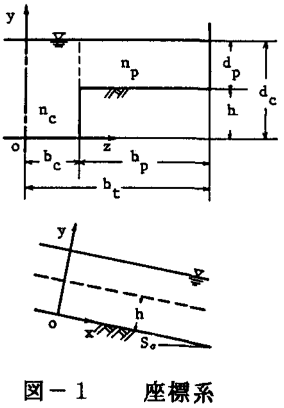
低水路と高水敷との接合部鉛直分割面に作用する平均剪断応力(τ j)は次式のように求められる．

$$\tau_j=\rho\,\alpha_p c_p\{\alpha_c c_c d_c \sinh(A_c)\,[\,U_{co}^2\cosh(A_p)+U_{po}^2(1-\cosh(A_p))\,]$$
$$+h\,f_j\,\cosh(A_c)(1-\cosh(A_p))U_{po}^2\}/2\{\alpha_c c_c d_c \sinh(A_c)\sinh(A_p)$$
$$+\alpha_p c_p d_p \cosh(A_c)\cosh(A_p)+h\,f_j\cosh(A_c)(1-\cosh(A_p))U_{po}^2\} \quad (9)$$

ただし，

$$U_{co}=d_c^{2/3}S_o^{1/2}/n_c,\qquad U_{po}=d_p^{2/3}S_o^{1/2}/n_p \quad (10)$$

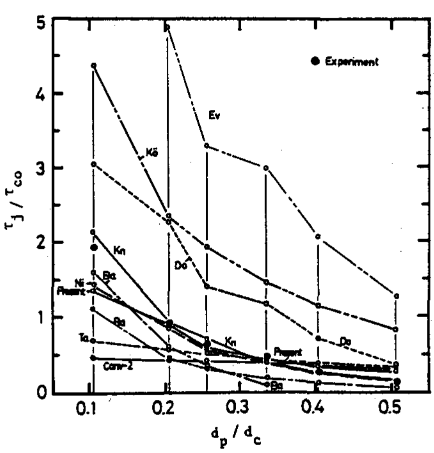
$$\alpha_c=(2n_c/c')^{1/2}g^{1/4}d_c^{-1/12},\quad \alpha_p=(2n_p/c')^{1/2}g^{1/4}d_p^{-1/12} \quad (11)$$



図－1　座標系

表－1　鉛直分割面に作用する平均剪断応力の評価式

Proposer	Formulas	Abbreviation
Köneman	$\tau_j=c_k\,\tau_t\,h/d_p$, $c_k=2$	Kö
Evers	$\tau_j=2c_e\rho\,(Uco-Upo)^2$, $c_e=0.01$	Ev
Nicollet	$\tau_j=\frac{\rho g\,Ac\,So}{d_p}(1-f)$, $r=Rp/Rc$ $f=\begin{cases}\omega_c=0.81\,(n_c/n_p)^{1/3}, & r\ge 0.3\\ \frac{1-\omega_c}{2}\cos(\frac{\pi r}{0.3})+\frac{1+\omega_c}{2}, & 0\le r<0.3\end{cases}$	Ni
Rajaratnam	$\tau_j=c_r\rho g\,d_p\,So\,((d_c/d_p)-1)^2$, $c_r=0.15$	Ra
土木研究所	$\tau_j=c_{do}\,\rho\,(Uc-Up)^2$, $c_{do}=0.04$	Do
Baird	$\tau_j=\rho g\,d_p\,So\,[(d_c/d_p)-\phi]^{1.5}(b_c/h)^{0.5}\,[0.5+0.3\ln(b_p/h)]$ $\phi=1+1.5\,(h/b_c)^{1.25}$	Ba
Knight	$\tau_j=\frac{2\rho g\,At\,So}{d_p}\left[\frac{0.5}{(\alpha-1)\beta+1}-\frac{1-r}{2}\right]$ $r=0.48\,(\alpha-0.8)^{0.289}(2\beta)^{1/m}(1+0.443\beta^{1/2}\ln\gamma)$ $m=0.75\,e^{0.38\alpha}$, $\alpha=b_t/b_c$, $\beta=d_p/d_c$, $\gamma=n_p/n_c$	Kn
高橋　保	$\tau_j=\frac{\rho\,\alpha_c c_c\alpha_p c_p\sinh Ac\,[\,Upo^2+(Uco^2-Upo^2)\cosh Ap\,]}{2\,(\alpha_c c_c\sinh Ac\sinh Ap+\alpha_p c_p\cosh Ac\cosh Ap)}$	Ta
従来法－1	$\tau_j=0$	Conv-1
従来法－2	$\tau_j=\rho g\,Ac\,So/(b_c+d_c)$	Conv-2



図－2　Knight等の実験値との比較

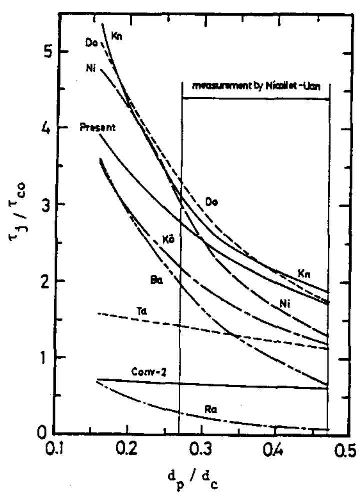
$c_c = c' g^{1/2} n_c d_c^{-1/6}$,　　$c_p = c' g^{1/2} n_p d_p^{-1/6}$　　(12)

$A_c = \alpha_c b_c / d_c$,　$A_p = \alpha_p b_p / d_p$　(13),　$f_j = 2 n_c^2 g / ((d_c + d_p)/2)^{1/3}$　(14)

３．鉛直分割面に作用する平均剪断応力の比較　最近，鉛直分割面に作用する平均剪断応力（τ_j）の評価式が提案されてきている．本報告で比較の対象とする剪断応力の評価式を表－２に示す．以降の計算では表中に示した定数値を変化させないこととする．ここでは評価式を３ケースの流況に適用しそれらの妥当性を検討する．なお，剪断応力（τ_j）は２次元流れの時の低水路底面応力（$\tau_c = \rho g d_c S_o$）で無次元化される．

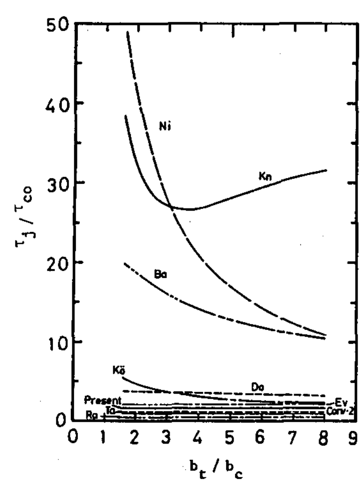
図－２は，Knight-Demetriouによる剪断応力の実験値と諸式による計算結果とを比較したものである．図中の黒丸印が実験値を示す．Evers，Köneman，土研の式は実測値より大きな値を算出するが，水深の増加に伴う無次元の剪断応力の減少傾向については表現している．Baird，Rajaratnamの式は実験値より小さめの値を与える．Bairdの式は水深比が0.335までしか計算できない．高橋の式では水深変化に対する剪断応力の変化を再現しない．低水路側壁の効果を取り入れた本研究の方法は水深変化に伴う変化をかなり良く表現できるものとなっている．Nicolletの式は，水深がある値以上では実験値をよく説明する．

次ぎに，Nicolletの式と他の評価式とを比較してみる．Nicollet等の実験範囲内の水理条件（低水路幅50m，高水敷幅75m，高水敷高さ8m，低水路と高水敷の粗度係数はそれぞれ0.021，0.043，河床勾配1/1000）に対して計算したものが図－３である．但し，横軸の水深比0.27～0.47が測定範囲である．本研究の式，Baird，Knight，土研の式がほぼ妥当な値を与えている．Könemanの式は剪断応力の水深に対する減少傾向を表現しているものの計算値は小さい．一方，高橋，従来法－２，Rajaratnamの式は，剪断応力の大きさも水深変化に伴う傾向をも表せていない．なお，Eversの式は不合理な程大きな値を算出するため削除されている．



図－３　Nicolletの評価式との比較

前述の実験ではいずれも河幅・水深比が小さくその値も同程度である．そこで次ぎに，低水路幅と高水敷幅とがともに大きい場合を考えることとする．この場合，低水路幅や高水敷幅を変化させても剪断応力は殆ど変化しないと考えられる．高水敷幅300m，高水敷高さ4m，低水路の粗度係数0.03，高水敷の粗度係数0.04，河床勾配1/3000と一定にし，低水路幅のみ変化させた場合の結果を図-4に示す．Nicollet，Knight，Bairdの式による剪断応力は過大な値を与えるとともに，低水路幅の変化に伴い大きく変動する．従って，これらの式を河幅の広い河川に適用することはできない．Köneman，土研の式も低水路幅が増すにつれやや減少する傾向を有している．他の式には変化がない．



図－４　河幅の大きい河道での比較

４．結論　断面分割法による複断面開水路流れの流量算出に必要な接合部鉛直分割面の剪断応力の評価法について検討した．広範囲の水理条件に対して適用可能な評価式は本研究の式と土研の式である．ただし，本研究の式は高水敷上の水深が小さい範囲では剪断応力を小さめに，水深が大きいと大きめに評価する傾向をもつ．一方，土研の式は水理条件によっては大きめな値を出す．

なお，本研究で得られる流速分布の結果を数値積分すれば，等価粗度係数やエネルギー補正係数，運動量補正係数あるいは横断方向の運動量輸送の影響範囲等を求めることができる．また，解析的手法には適用範囲に限界があるので，乱流モデルを用いた数値解析により流れ場の詳細を検討する必要がある．