

群馬大学工学部 正員 富永晃宏  
 群馬大学工学部 正員 江崎一博

1. まえがき

複断面開水路の流量算定法については従来多くの研究があり、最も一般的方法は低水路と高水敷の接合面を流量計算の分割面とし、この面に働く見かけのせん断応力の評価式を与えるものである。この接合面に働くせん断応力を他の水理量で記述する実験式が数多く提案されているが<sup>1)</sup>、複断面開水路の流れは断面形状を支配する因子が多いため、実験式の適用範囲が限られてくる。さらに、複断面開水路の接合部エッジから斜め上昇流が発生し、低水路側と高水敷側に一对の二次流(縦渦)が存在することが実験的に明らかにされており<sup>2), 3)</sup>、この二次流は運動量および浮遊砂輸送に大きな影響を及ぼしていると考えられる。しかし、複断面流れの二次元解析では二次流の効果を取り入れることは困難である。そこで本研究は、横断方向の運動量輸送に果たす二次流の役割を明らかにしようとしたものである。

2. 基礎式

複断面流れの横断方向の運動量輸送を検討するのに水深平均された運動方程式を用いる。

$$\frac{\tau(z)}{\rho} = ghI_0 + \frac{d}{dz}(h \cdot T) - \frac{d}{dz}(h \cdot J), \quad T = \frac{1}{h} \int_0^h (-\bar{u}w) dy, \quad J = \frac{1}{h} \int_0^h (UW) dy \quad (1)$$

ここで、右辺第2項  $(h \cdot T)$  が任意の  $x-y$  平面に働く平均の乱れによるせん断応力(乱れによる運動量輸送によって生じる力)を意味し、第3項  $(h \cdot J)$  がこの面を通過して横断方向流速  $W$  によって輸送される  $x$  方向の運動量を意味する。したがって  $(T - J)$  は任意の  $x-y$  平面に働く見かけのせん断応力を表わしていることになり、この横断方向の勾配がせん断応力の重力項からのずれを示している。複断面の典型的な二次流構造と流れの模式図および記号の説明を図1に示す。

3. 実験的考察

実験は対称及び非対称な複断面開水路において、それぞれホットフィルム及びファイバー・レーザ流速計を用いて行われた。実験条件を表1に示すが、この詳細については文献2)、3)を参照されたい。底面せん断応力分布の1例を図2に示す。高水敷上の底面せん断応力はその水深のわりには大きな値となり接合部に近づくにつれて増大しており、低水路からの運動量の輸送が大きいことを示している。実験値から  $-\bar{u}w$ 、 $U$ 、 $W$  の  $y$  方向の積分を行い求めた  $T$ 、 $J$  および  $(T - J)$  の横断分布を図3に示す。  $D/H \leq 0.5$  では、 $J$  すなわち二次流による移流輸送量の方がレイノルズ応力に比べて卓越している。 $J$  の値は接合部近傍でピークをとりその両側の広い範囲で正の値をとる。一方、 $T$  は接合部より低水路側で負の大きな値をとり、接合部から高水敷にかけて急に増大し正の値となる。 $D/H$  が大きくなると  $J$  はあまり変化しないが、 $T$  の

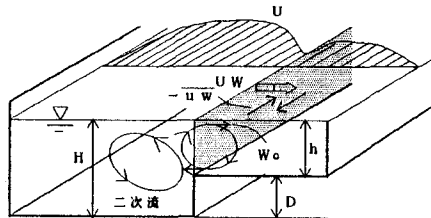


図1 複断面流れの模式図

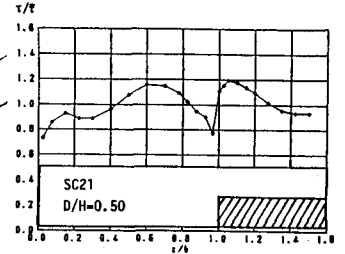


表1 実験条件及び係数値

CASE	水深 H (cm)	高水敷 高さ D(cm)	D/H	水路幅 B(cm)	低水路 幅 b(cm)	平均流速 $U_x$ (cm/s)	摩擦速度 $U_*$ (cm/s)	二次流速 $W_x$ (cm/s)	渦動粘性係数		
									$E_{vz}/U_*^2$	$E_{vz}/U_*^2/b$	
CH01	10.03	5.01	0.50	39.0	8.7	34.35	1.71	1.0	0.36	0.042	対称断面
CH02	7.63	5.01	0.66	39.0	8.7	32.54	1.72	1.0	0.22	0.025	
CH03	6.58	5.01	0.76	39.0	8.7	31.39	1.66	1.0	0.27	0.031	
CH11	10.01	5.01	0.50	39.0	18.8	31.56	1.52	1.5	0.43	0.023	非対称断面
CH12	7.62	5.01	0.66	39.0	18.8	27.32	1.35	0.9	0.43	0.023	
CH13	6.61	5.01	0.76	39.0	18.8	31.99	1.58	1.0	0.47	0.025	
SC11	8.03	2.00	0.25	40.0	20.0	36.8	1.64	0.8	0.60	0.030	非対称断面
SC12	5.98	2.00	0.33	40.0	20.0	31.9	1.51	0.7	0.53	0.027	
SC21	8.00	4.00	0.50	40.0	20.0	34.9	1.64	1.1	0.64	0.032	
SC22	6.06	4.00	0.66	40.0	20.0	28.8	1.37	0.7	---	---	
SC21	8.05	6.00	0.75	40.0	20.0	27.7	1.41	0.7	---	---	
SC31	8.05	6.00	0.75	40.0	20.0	27.7	1.41	0.7	---	---	

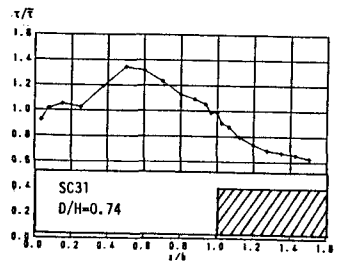


図2 底面せん断応力分布

負のピークが増大し、高水敷側ではTの負の値が現われなくなる。D/Hが大きくなるほど、接合部の見かけのせん断応力に占めるレイノルズ応力の寄与が大きくなるものの、高水敷上では依然として二次流が重要な役割を果たしている。接合部近傍のJのピークの値はU<sub>x</sub><sup>2</sup>の次元で2.5~3程度であり、二次流の輸送の寄与は、ほぼ U<sub>x</sub><sup>2</sup> (=τ<sub>0</sub>/ρ) 程度であることがわかる。

ここで高水敷上のJについて若干の考察を行う。まず二次流Wは高水敷上ではほぼ直線的な分布と仮定する<sup>3)</sup>。すなわち、 $W=W_0(2y/h-1)$  と与えられ、W<sub>0</sub>は底面または水面でのWの最大値である。主流速Uの鉛直分布は対数則に従うと仮定すると<sup>3)</sup>、 $J = \frac{1}{h} \int_0^h (UW) dy = \frac{1}{h} \int_0^h \{W_0(2y/h-1) \left( \frac{U_x}{\kappa} \ln \frac{U_x y}{\nu} + AU_x \right)\} dy = 1.25W_0 U_x$  (2) となる。W<sub>0</sub>については実験値から読みとったおよその値を表1に示す。これからW<sub>0</sub>は約 0.5~0.8U<sub>x</sub> 程度であるから、左辺は0.6~1.0U<sub>x</sub>となり、二次流による移流項Jはほぼ底面せん断応力程度であることが示された。また、時計回りに回転する二次流では運動量はzの正の方向に輸送され、反時計回りの回転ではzの負の方向に輸送されることがわかる。

次にレイノルズ応力については、 $-\overline{uw}$ は $\partial U/\partial z$ と渦動粘性係数によって結びつけられると考えられ、これを水深平均された値にも適用すると、Tは水深平均された主流速U<sub>m</sub>を用いて次のように表わされる。

$$T = (1/h) \int_0^h (-\overline{uw}) dy = E_{xz} (dU_m/dz) \quad (3)$$

ここに、E<sub>xz</sub>は横断方向の平均渦動粘性係数である。U<sub>m</sub>の横断分布から計算したdU<sub>m</sub>/dzに適当な E<sub>xz</sub>を乗じた値の横断分布をTとともに示したのが図4である。これからTとdU<sub>m</sub>/dzはほとんど同形の分布を示し、(3)式が妥当であることが明らかであり、係数 E<sub>xz</sub>はほぼ一定値と考えてよいことがわかる。各ケースの平均の E<sub>xz</sub>をU<sub>x</sub>で割った値を表1に示す。同一の幾何条件では同程度の値となるが、低水路幅の違いによって異なる値を示している。これをさらに低水路幅 bで割り無次元化した値も表に示したが、これらはほぼ近い値となりE<sub>xz</sub>=0.028U<sub>x</sub>b程度となる。

4. あとがき  
ここでは横断方向の運動量輸送に果たす二次流の役割を明らかにしたが、一般的には、二次流の効果とレイノルズ応力の効果を一まとめにしてdU<sub>m</sub>/dzに結びつける解析がなされている。D/Hが大きい場合、Tと(-J)は常に同符号となるためこのような解析がある程度許される。この場合は、二次流の移流効果を含んだ形で、接合部近傍から高水敷上にかけて大きな渦動粘性係数を与えなければならない。D/Hが小さい場合は、二次流の効果ははるかに大きく、Tと(-J)の符号の逆転も生じるためこのような解析は困難である。

<参考文献>(1)河原、玉井(1986):第41回年講など、(2)Tomimaga, A. & Ezaki, K(1988):Proc. 6th Cong. Apd IAHR, Kyoto, (3)富永、江崎、森上(1989):第33回水理講演会論文集

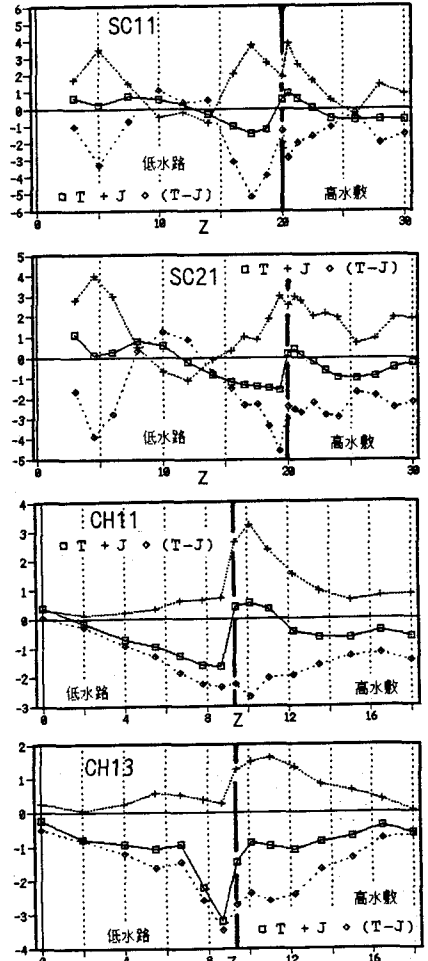


図3 見かけのせん断応力の横断分布

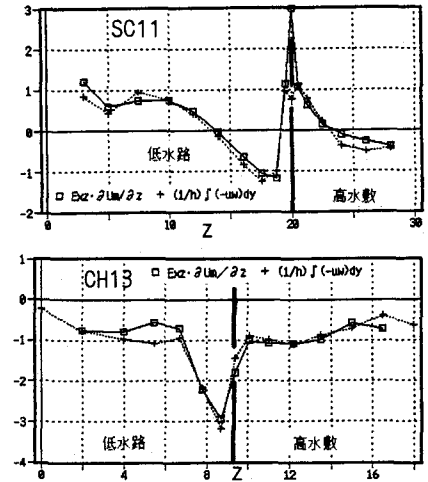


図4 平均流速の横断勾配とレイノルズ応力