

## 複断面水路流れの乱流構造に及ぼす高水敷粗度の効果

Influence of Flood-Plain Roughness on Turbulent Structure  
in Open Compound Channel Flows

富永晃宏\*

By Akihiro TOMINAGA

Turbulent structures are investigated experimentally in compound open channel flows with roughness on the flood plain. The main-channel velocity is significantly decelerated and the secondary currents in the main channel are developed due to the roughness on the flood-plain. An increased velocity gradient results in a remarkable increase of the bed shear stress near the flood-plain edge. The apparent shear stress on the junction interface and the turbulence intensity in the main channel. These features are well predicted by the numerical calculation of the depth-averaged momentum equation.

Keywords: compound channel, roughness, turbulent structure

### 1. まえがき

滑面の複断面開水路流れの場合、低水路の高速流れと高水敷の低速流れとの相互作用による見かけのせん断応力は高水敷水深  $h$  の全水深  $H$  に対する比がかなり小さいときに特に大きくなり、この水深比がある程度大きい場合はしだいに小さくなり、むしろ2次流の影響が卓越するようになるが、全体として横断方向の運動量輸送効果は減少していく<sup>1)</sup>。しかし、河川の高水敷は一般に植生等により粗度がかなり大きいと考えられる。この場合、福岡・藤田<sup>2)</sup>が述べているように、粗度による減速効果により水深比がある程度大きい場合でも大きな流速勾配が維持され、洪水時に  $h/H$  が0.5以上となるようなときでも大きな見かけのせん断応力が働くものと推測される。しかしながら、高水敷に粗度を設置した流れ構造の実験的研究は以外に少ない。室田ら<sup>3)</sup>は、高水敷に棧粗度を設置し、高水敷と低水路の水深比・水路幅比を広範に変化させて、主流速、壁面せん断応力及び乱れ強度の分布構造の滑面の場合との比較を行い、高水敷粗度の影響が大きいことを示した。一方、高水敷の樹木を想定した実験がいくつか見られるが<sup>4), 5)</sup>、樹木群内では流水断面積が減少して流速の減少が著しく、鉛直方向のせん断がほとんどないなど、単なる河床粗度と異なり別途検討する必要がある。

本研究では、室田らの研究と同様に高水敷に棧粗度を設置し粗面として乱流計測を行い、同一の幾何条件における滑面の複断面開水路の乱流計測結果と比較し、2次流も含めた複断面流れの混合機構に及ぼす高水敷粗度の効果を明らかにしたものである。また、底面せん断応力分布の横断分布特性を検討するために水深平均された運動方程式を数值的に解析し、高水敷粗度の影響を検討した。

---

\* 正会員 工博 名古屋工業大学助教授 社会開発工学科  
(〒466 名古屋市昭和区御器所町)

## 2. 実験装置および実験条件

実験水路は、長さ12.5m、幅

40cmで、水路の片側に幅20cmの塩化ビニル製の高水敷を設置し、非対称複断面とした。これは文献1)のものと同じである。高水敷粗度として、一辺の長さ $k=5\text{mm}$ 、長さ20cmの正方形断面の角柱粗度を間隔

表-1 実験条件

CASE	Flow depth of main channel $H$ (cm)	Flow depth of flood plain $h$ (cm)	Depth ratio $h/H$	Roughness spacing $L/k$	Friction velocity $U_{*}$ (cm/s)	Mean bulk velocity $U_m$ (cm/s)	Reynolds number $Re(x10^4)$ ( $4U_m R/\nu$ )
HR11	7.97	5.97	0.75	8	1.67	16.9	3.43
HR21	8.21	4.21	0.51	8	1.37	14.3	2.63
HR31	7.96	1.96	0.25	8	1.08	13.1	1.89
HR12	8.08	6.08	0.75	4	1.14	12.6	2.47
HR22	8.04	4.04	0.50	4	1.15	11.8	2.04
HR32	8.00	2.00	0.25	4	1.13	9.8	1.41

Lで設置した。この粗度の特性については、文献5)ですでに実験的検討が行われている。ここで粗度の大きさを $L/k=4$ と8の2種類設定することにより変化させ、それぞれについて、高水敷高さ $d$ を2cm、4cm、6cmの4種類変化させた。 $d=0\text{cm}$ の高水敷高さがゼロで粗度のみの影響を検討した結果は文献6)に発表されている。この粗度の大きさは、文献5)の2次元流れの結果から相当砂粒粗度 $k_s$ に換算すると、 $L/k=8$ のときが $k_s/k \neq 9$ 、 $L/k=4$ のときが $k_s/k \neq 4$ であった。また、マンギングの粗度係数では $L/k=8$ が $n \neq 0.028$ 、 $L/k=4$ が $n \neq 0.02$ 程度であり、滑面は $n=0.009$ であるから、高水敷粗度は低水路粗度の約3倍および約2倍となっている。実験条件を表-1に示す。流速は、ファイバー・レーザ・ドップラー流速計によって計測した。これも滑面のケースである文献1)と全く同じシステムを用いた。

## 3. 主な実験結果

3.1 平均主流速  $L/k=8$ の場合の平均主流速 $U$ のコンターを図-1に示す。高水敷粗面の場合には、高水敷上で非常に低速となり、この影響で低水路内の流れが著しく減速されている。等値線は低水路の接合部側で鉛直に立ち、横断方向のせん断が支配的であることを物語っている。この結果、最大流速位置は明らかに低水路中央から低水路側壁側に移動し、接合部の混合の影響領域は対岸側壁の影響領域よりずっと大きいこ

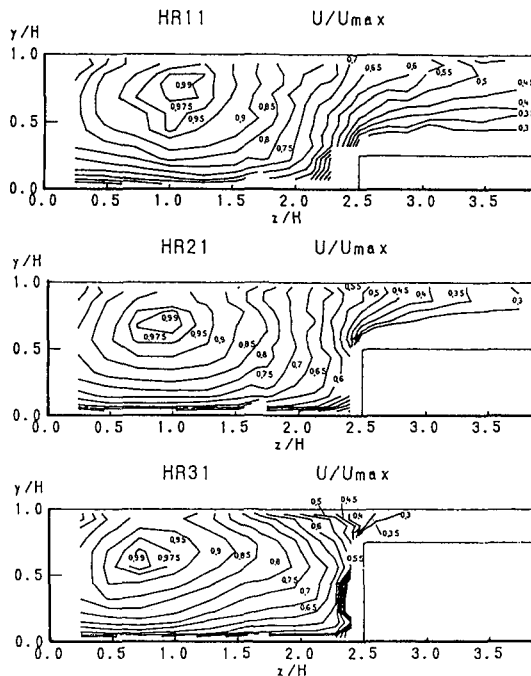
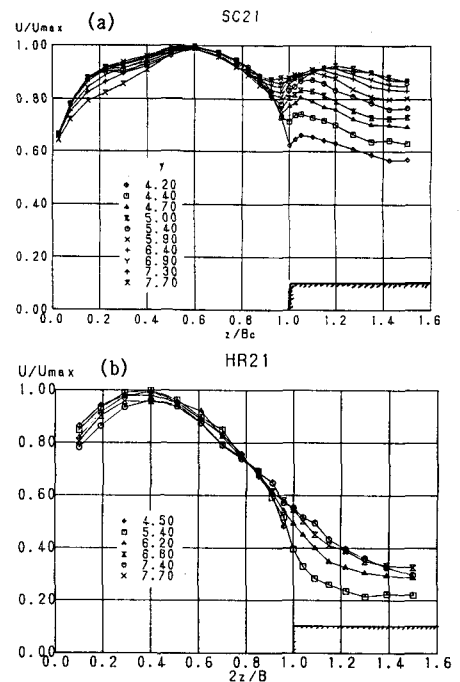


図-1 等流速線 ( $L/K=8$ )



とを示している。本実験では水路幅の制限からこの高水敷粗面の影響がどこまで及ぶかについては不明である。また、滑面の場合に顕著であった2次流の影響による等値線の歪みは形の上では明かではない。次に、図-2に $h/H=0.5$ の場合の $U$ の横断分布を滑面のケースとともに示す。滑面の場合、2次流の斜め上昇流による極小値が現れ高水敷上で極大値をとる点の特徴である。高水敷粗面の場合と同じ水深比にもかかわらず、低水路と高水敷の流速差が非常に大きくなり、低水路内の接合部側の流速 $U$ の横断勾配が著しく増大しており、これは壁面近傍の乱流域の勾配に匹敵する。粗面の場合には後に述べるように滑面同様の2次流があるにもかかわらず、この極小値はほとんど認められない。

**3.2 2次流構造** 本実験では、比較的大きな高水敷粗度の影響により水面変動が生じ、流速をかなり抑えても水面からの横断方向流速成分の計測が困難であった。その結果、2次流に関しては十分な精度が得られなかったが、 $h/H=0.5$ の場合のみについて2次流ベクトル図を図-3に示す。富永らは<sup>1)</sup>、比較的小さな高水敷粗度について2次流構造がほとんど変化しないことを示している。本実験でも2次流の基本的構造は滑面の場合と同じであり、高水敷高さがゼロの場合は粗面と滑面の境界部で逆に下降流が生じること<sup>6)</sup>と照らし合わせると、2次流の発生は複断面の形状の効果が支配的であることがわかる。ただし、斜め上昇流の上昇角度はより小さくなり、高水敷から低水路へ流れ出すような流れとなっている。低水路渦は滑面の場合に比べて横断方向に発達し対岸側壁側へ及んでおり、最大流速位置の移動と相関がある。このような2次流構造の変化は、高水敷粗度により乱れの非等方性の効果が変化したためと考えられる。

**3.3 壁面せん断応力分布** 壁面せん断応力は、対数則法によって求めた。槽粗度上の乱流においても対数則が成立すること及び原点補正距離については長方形断面についてすでに検討されており<sup>7)</sup>、高水敷上でも同様の結果であった。得られたせん断応力分布を滑面の結果とともに図-4に示す。特徴的なことは高水敷上の接合部近くで鋭いピークをとることである。このピークの値は平均せん断応力の2から2.5倍程度にまで達し、高水敷粗面の場合滑面の場合に比べて低水路からの運動量輸送効果が大きいことがわかる。この分布形状は水深比によらずほぼ同様である。 $h/H$ が大きくなるほど低水路の平均せん断応力に対するピークの値は大きくなる。このことは高水敷の肩付近では通常予想される平均的な値より非常に大きなせん断応力が働くことを意味し、河道安定上注意を要する。

**3.4 乱れ特性** 図-5(a)-(b)に乱れ強度 $u'$ 、 $v'$ 及びレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ 、 $-\overline{uw}$ のコンターを示す。 $u'$ に

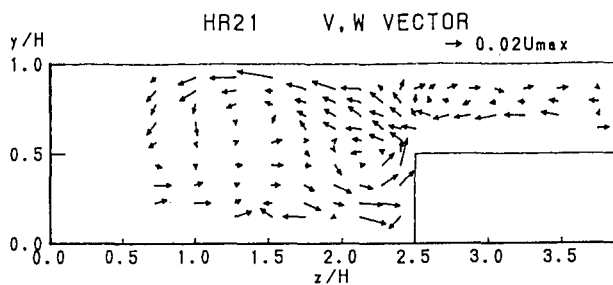


図-3 2次流ベクトル図 ( $L/K=8$ ,  $h/H=0.5$ )

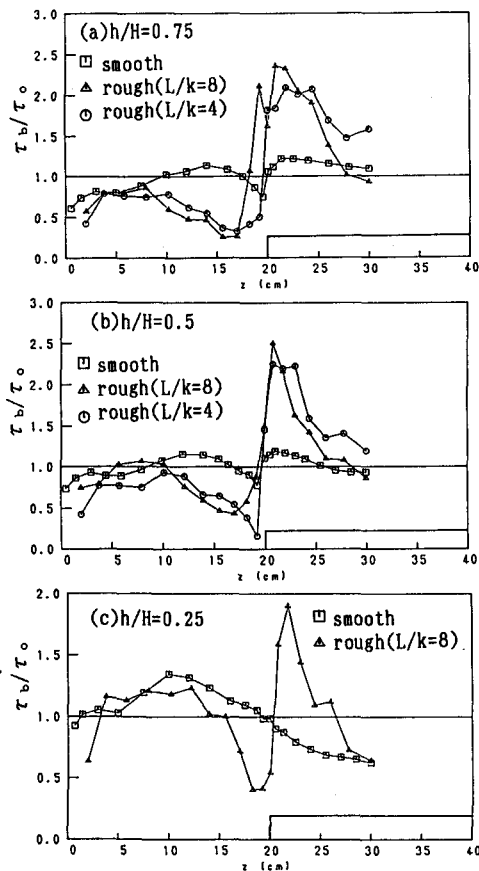


図-4 底面せん断応力分布

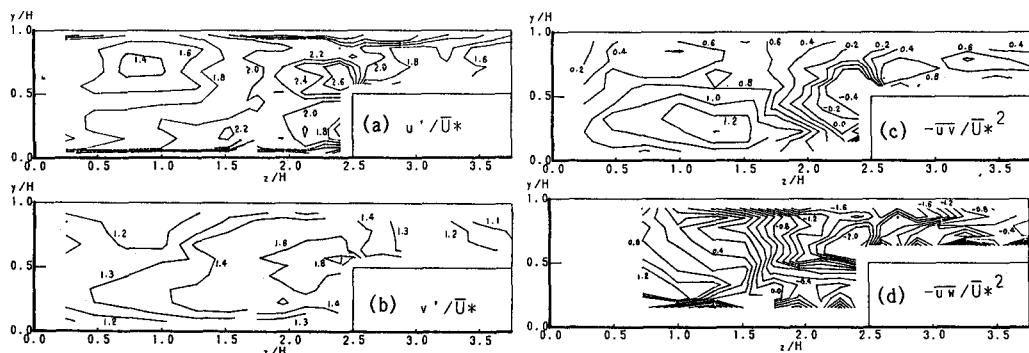


図-5 乱れ強度およびレイノルズ応力コンター

については壁面近傍の乱れ強度のピーク値と同等の大きさの乱れが接合部近傍の広い領域に存在し、特に水面近くが大きく、全体として低水路のかなり奥まで乱れの増大が認められる。 $v'$ は全体に鉛直方向の変化が小さく、接合部近傍でピークをとり低水路側に向かって減衰するという横断方向せん断に支配された構造を示す。 $-\overline{uv}$ は接合部近傍で減少する領域が滑面の場合より拡大している。 $-\overline{uw}$ は接合部で負のピークをとり、等値線間隔が非常に密であり急な勾配を呈している。このピーク値は(c)の $-\overline{uv}$ の2倍程度に達する。以上より低水路と高水敷の流速勾配の増大に伴い、接合部に強いせん断層が形成され、これに支配された乱れ場が低水路内の横断方向に伸び、低水路全体の乱れを増大させ、鉛直方向に一様化させていると考えられる。横断方向のせん断応力 $-\overline{uw}$ の絶対値が大きくなったことから、低水路内の乱れ発生率の増大がもたらされたものと見ることができる。高水敷粗度が比較的大きい場合は、 $h/H$ が比較的大きい場合でも強い見かけのせん断応力が働き、この抵抗が無視できないようになるといえる。

#### 4. 高水敷粗度の平均流に及ぼす影響に関する数値計算

**4.1 基礎式とその数値計算法** 複断面水路の流量予測を行う方法としては、福岡・藤田<sup>2)</sup>のように流れを低水路と高水敷に分けてその境界面に働くせん断応力を考慮する方法が提案されているが、これでは高水敷の肩付近でのせん断応力の増加という重要な特性を再現できない。そこで、広範な境界条件に対しても流れの横断構造が予測できる水深平均された運動方程式の解析が有効な方法と考えられる。河原、玉井<sup>3)</sup>は解析的に解いているが、ここでは2次流の影響、渦動粘性係数の変化および複雑な幾何条件にも容易に対応できるように、数値的な解析を行った。定常な等流の流れ方向のレイノルズ方程式は次のようである。

$$\rho \frac{\partial UV}{\partial y} + \rho \frac{\partial UW}{\partial z} = \rho g l e + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad \dots \dots \dots (1)$$

これをy方向に底面 $y_B$ から水面Hまで積分すると、次式となる。

$$\rho [UV]_{y_B}^H + \rho \frac{d}{dz} \int_{y_B}^H UW dy = \rho g h l e + [\tau_{xy}]_{y_B}^H + \frac{d}{dz} \int_{y_B}^H \tau_{xz} dy + \tau_{xz} \Big|_{y=y_B} \frac{dy_B}{dz} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $UV|_{y=y_B} = 0$ 、 $UV|_{y=H} = 0$ 、 $\tau_{xy}|_{y=H} = 0$ 、 $\tau_{xy}|_{y=y_B} = \rho U_x^2$ であり、また、

$$\frac{1}{\rho h} \int_{y_B}^H \tau_{xz} dy = \overline{\tau_{xz}} = E_{xz} \frac{d\bar{U}}{dz} \quad \bar{U} = \frac{1}{h} \int_{y_B}^H U dy \quad \dots \dots \dots (3)$$

と定義する。ここに $E_{xz}$ は水深平均の渦動粘性係数、 $h=H-y_B$ である。また、 $\tau_{xz}|_{y=y_B} = 0$ と仮定し、二次流による移流輸送項である右辺第2項を $A_w$ とおくと、式(2)は次のようになる。

$$\frac{d}{dz} \left( E_{xz} h \frac{d\bar{U}}{dz} \right) + g h l e - U_x^2 - A_w \quad \dots \dots \dots (4)$$

全水深にわたって対数則が成立すると仮定すると摩擦速度は水深平均流速と次のように関係づけられる。

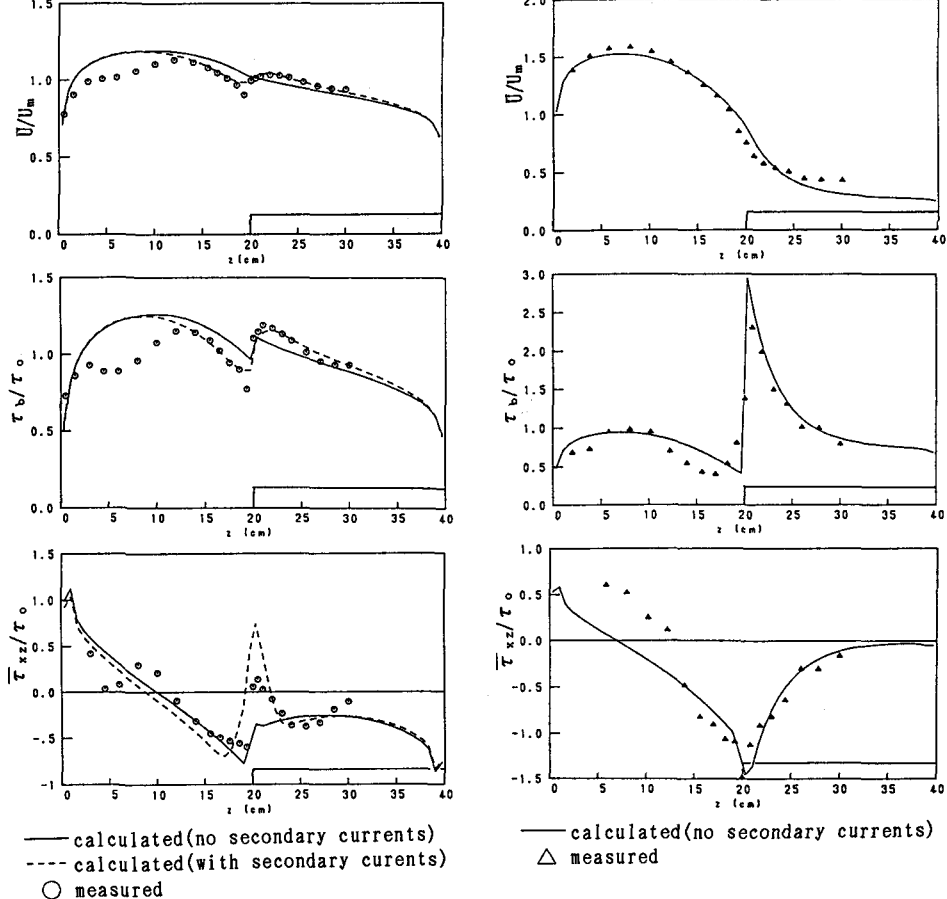
$$U_x = \frac{\bar{U}}{\frac{1}{\kappa} \left( \ln \left( \frac{U_x h}{\nu} \right) - 1 \right) + A_s - \frac{\Delta U}{U_x}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $\kappa$ はカルマン定数で $\kappa=0.41$ 、 $As$ は積分定数で $As=5.3$ である。 $\Delta U/U_*$ は粗度関数で、棧粗度の実験との比較のためこれを用いたが、実際の応用では相当砂粒粗度あるいはマンニングの粗度係数を用いた表現を行えばよい。これを $\bar{U}$ についてコントロールボリューム法によって離散化し数値計算を行った。ここでは接合部の構造のみならず、全体の流れに対して側壁の効果が比較的大きい場合にも適用可能とするために、両側壁の境界条件を与えた。長方形断面の開水路では側壁に対してもある程度の距離までは対数則が成立することから、側壁に最も近い格子点で対数則にマッチングさせ、これより側壁の摩擦速度 $U_{*w}$ を計算し、この点の流速 $U_w$ を与える。長方形の複断面では低水路側壁のせん断応力も考慮する。横断方向渦動粘性係数 $E_{xz}$ は、横断方向に一定と仮定されるが、その値自体は代表長さスケール及び代表速度スケールに依存し、この決定は難しい面がある。一般には底面摩擦速度と水深がとられるが、ここでは水路幅が狭く水路幅の影響が支配的となっているため、平均の摩擦速度と水路半幅を用いた。

$$E_{xz} = E_* U_* / (B/2) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $E_*$ は定数で、実験から0.06が採用された。代表長さスケールについては幅水深比との関係について今後検討する必要がある。一方、側壁近傍においては、側壁であるために乱れの長さスケールは減少すると考えられ、この影響を放物分布によって表現した。

次に、二次流の効果について検討する。高水敷渦の場合、 $W$ は鉛直方向に直線分布と仮定でき<sup>1)</sup>、



(a) 高水敷滑面、 $h/H=0.5$  (b) 高水敷粗面、 $h/H=0.5$

図-6 複断面流れの計算値と実験値の比較

$$W = W_m (1 - 2y/h) \dots\dots\dots (7)$$

$$W_m = W_{m0} \cdot f(z)$$

と表す。主流速の鉛直分布は対数則に従うとすれば、

$$\int_0^h U W dy = \frac{W_m \cdot U_* \cdot h}{2\pi} \dots\dots\dots (8)$$

となる。二次流渦の横断方向のスケールと向きに応じて  $W_m$  の横断方向分布  $f(z)$  を与えれば、 $A_w$  が計算できる。複断面のせん断層においては高水数渦の役割が重要と考え、これのみを次のように与えてみた。

$$f(z) = \{1 + \cos(\pi(z-B/2)/h)\}^2/4 \quad (-h < z-B/2 < h)$$

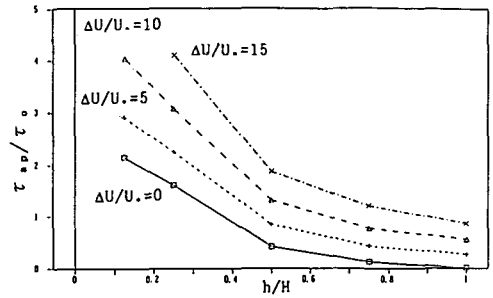


図-7 接合面のせん断応力の変化

#### 4.2 実験値との比較及び高水数粗度の影響

図-6の(a)は滑面の場合、(b)は高水数粗面の場合の  $h/H=0.5$  の水深平均流速  $\bar{U}$ 、底面せん断応力  $\tau_{xz}$  及び水深平均の横断方向せん断応力  $\bar{\tau}_{xz}$  の横断分布である。滑面の場合は粗度関数は低水路高水数ともゼロとし、高水数粗面の場合は低水路で  $\Delta U/U_* = 4$ 、高水数上で  $\Delta U/U_* = 14$  とした。この場合、低水路の流速分布は高水数の影響を受けて滑面の分布とは対数則の積分定数が減少しているが、低水路幅の影響等今後さらに検討する必要がある。滑面の場合、2次流の影響を考慮しないと接合部付近でずれが大きいが、単純に高水数渦のみを考慮すると分布の傾向を説明できる。低水路側壁近くでの  $\bar{U}$  および  $\tau_{xz}$  のズレはここでは考慮していない側壁の2次流によるものと考えられる。高水数粗面の場合では  $\bar{\tau}_{xz}$  が低水路側壁付近で大きくずれるのを除き、いずれの値もかなり一致しており、側壁の影響も含めて再現性がよい。実験では2次流が存在したが、2次流を考慮しない計算とほぼ一致することから、高水数粗面の場合、このような横断分布特性には2次流の影響は見かけ上あまり大きく現れないことがわかる。さて、高水数粗面の場合と滑面の場合の特性を比較すると平均主流速の流速差が大きくなることはもちろん、高水数の底面せん断応力の接合部近くでの急激な増大や横断方向せん断応力の接合部での増大が明らかに認められる。特に  $\bar{\tau}_{xz}$  に関しては、高水数粗面の場合、接合部の値は対岸の低水路側壁の値の2倍強にまで達して、見かけのせん断応力が増大していることがわかる。この  $\tau_{xz}$  の接合部での値を  $\tau_{x0}$  とし、高水数粗度関数の値をパラメータとして  $h/H$  に対してプロットしたのが図-7である。水深比  $h/H$  の減少および高水数粗度の増大とともに  $\tau_{x0}$  は増大し、これは従来<sup>9)</sup>の結果<sup>9)</sup>と  $h/H$  に対してはほぼ同様の特性を示している。ここでは本実験条件の範囲内での比較にとどめているが、これより高水数粗度の効果を見積もることができる。

#### 5. あとがき

本研究では、高水数に比較的大きな粗度を与え、滑面の結果と比較しながら、その乱流構造や抵抗則に及ぼす影響を検討した。高水数の粗度により低水路の減速が顕著となり、2次流の低水路渦は発達した。特に、高水数肩部分のせん断応力の増大が著しい。また、低水路内全体の乱れがかなり増大し、接合面のせん断応力が増大する。このような特性は水深平均された運動方程式の数値計算によって的確に予測することができる。今回の実験では水深に比して低水路幅が十分ではなく、高水数粗度の影響がどこまで及ぶかの検討はできなかった。今後は他の広範な条件に対して数値シミュレーションを行い、その影響を検討したい。

#### <参考文献>

- 1) 冨永、江崎、小葉竹：土木学会論文集、第417号／II-13、1990、2) 福岡、藤田：土木学会論文集、第411号／II-12、1989、3) 室田、福原、勢田：水工学論文集、第34巻、1990、4) 佐野、野崎、濱谷、中井、管：水工学論文集、第35巻、pp.483-488、1991、5) Pasche, E. and Rouve, G.: J. of Hydraulic Eng., ASCE, vol.111, No.9, 1985、6) 冨永：水工学論文集、第36巻、1992、7) Tomonaga, A. and Nezu, I.: Environmental Hydraulics, Balkema, 1991、8) 河原、玉井：土木学会年講、第41回、1986