

複断面粗面開水路流れの水理学的特性に関する実験的研究
Hydraulic Characteristics of Compound Channel Flows with Rough Floodplains

大阪大学工学部 室 田 明 Akira MUROTA
福井大学工学部 福 原 輝 幸 Teruyuki FUKUHARA
建 設 省 勢 田 昌 功 Masanori SETA

A series of experiments are performed to measure the mean velocity, turbulence intensity and boundary shear stress distributions in compound channels with rough floodplains. Three different floodplain widths, main channel widths, and heights are used to understand the effects of varying channel geometry, size, the ratio of flow depth to the main channel depth and roughness elements. From these results the strong relation is observed between the mean velocity structure, turbulence structure and shear distribution. It is found, especially, that the roughness element on the floodplains strongly effects the flow structure in compound channel.
Keywords : open channel flow, compound channel, turbulence, wall shear stress

1. 緒 論

複断面開水路内の複雑な流動は水路が高水敷と低水路から成る複雑な幾何形状を有すること、および高水敷と低水路の粗度係数が異なることに起因する。従って基本的ではあるが、断面形状の変化や粗度の非一様性により断面内にわたる平均流、乱れ構造および壁面せん断応力がどのように変化するかを知ることは重要である。複断面流れの研究目的はあくまで抵抗の予測にあるから、適切な流れ構造の性質を明らかにすることが先ずもって重要である。そして複断面流れの抵抗予測や数値シミュレーションに関する研究と結び付かなければならない。この意味で以下の研究は貴重なデータを提供している。(1)Rajaratnamらによる相対水深と高水敷高さを变化させた場合の流速分布の相似性に関する研究¹⁾、(2)今本・久下による相対水深と高水敷幅を变化させて流速分布と乱れエネルギー分布の違いを検討した研究²⁾、(3)Prionsらによる粗度係数の違いによる乱れ強度分布やレイノルズ応力分布の変化を調べた研究³⁾、(4)Yen・Overtonによる粗度係数比を変えたときの断面内等流速線の変化を示した研究⁴⁾、(5)Gosh・Jenaによって相対水深の変化に伴う壁面せん断応力分布の違いを調べた研究⁵⁾等。しかし残念ながら、断面形状を系統的に変化させたり、高水敷と低水路の粗度係数を変えた実験的研究は少なく、複断面粗面開水路流れには不明な部分が多い。

以上の点から、本研究では複断面流れを支配する高水敷幅(低水路幅)と高水敷高さおよび粗度係数を系統的に変化させて平均流速、乱れ強度および壁面せん断応力の各分布を求める。しかる後、これらの流れの支配要素が高水敷と低水路との間の相互作用や平均流・乱流・壁面せん断応力構造に及ぼす影響を明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

実験に用いた水路は長さ20m、幅0.7m、高さ0.25mのアクリル樹脂製可変勾配水路である。粗度要素には5mmx5mmの正方形断面のアクリル棒を用い、流下方向粗度間隔を2cmとする横型棧粗度とした。粗度要素の配置は通常の河川では概ね高水敷粗度係数が低水路のそれの2~3倍になることを参考に決定された。水深の基点は粗面乱流の対数則に適合するように決定され、粗度頂上から1mm下(基準面は4mmの底上げ)となった。流速測定には直径3mmのカペラ流速計(篠塚製作所)が、乱れ強度と壁面せん断応力の測定には一方向用ワイヤルム(カマックス)がそれぞれ使用された。高水敷の粗度係数を n_f 、低水路粗度係数を n_m と定義し、粗度係数比は n_f/n_m (Type-R)と $n_f=n_m$ (Type-S)の2種類を選んだ。高水敷幅 B_f 、低水路幅 B_m 、全水路幅 B および高水敷高さ D の断面形状の大きさは表-1に示す通りである。水深 H と流量 Q は

表-1 実験ケースと実験条件

C A S E	B_f (m)	B_m (m)	D (m)	$H_{m,0.1}$ (m)	$H_{f,0.1}$ (m)	$Q_{m,0.1}$ (cc/s)	$Q_{f,0.1}$ (cc/s)	n_f	n_m
R-15-40-3	0.146	0.4	0.029	0.0745	0.0348	10700	2930	0.023	0.01
R-20-30-3	0.198	0.3	0.029	0.0698	0.0341	9230	1850	0.023	0.01
R-25-20-3	0.246	0.2	0.029	0.0718	0.0380	5690	1550	0.023	0.01
R-15-40-5	0.146	0.4	0.049	0.0905	0.0588	15700	5990	0.023	0.01
R-20-30-5	0.198	0.3	0.049	0.0689	0.0584	12500	4180	0.023	0.01
R-25-20-5	0.246	0.2	0.049	0.0623	0.0590	7170	2510	0.023	0.01
R-15-40-7	0.146	0.4	0.070	0.1316	0.0839	21190	9440	0.023	0.01
R-20-30-7	0.198	0.3	0.070	0.1283	0.0840	12070	4060	0.023	0.01
R-25-20-7	0.246	0.2	0.070	0.1278	0.0847	16220	7170	0.023	0.01
S-15-40-5	0.150	0.4	0.047	0.0687	0.0572	18000	6900	0.010	0.01
S-20-30-5	0.200	0.3	0.047	0.0647	0.0571	15550	4880	0.010	0.01
S-25-20-5	0.250	0.2	0.047	0.0637	0.0568	12030	3280	0.010	0.01

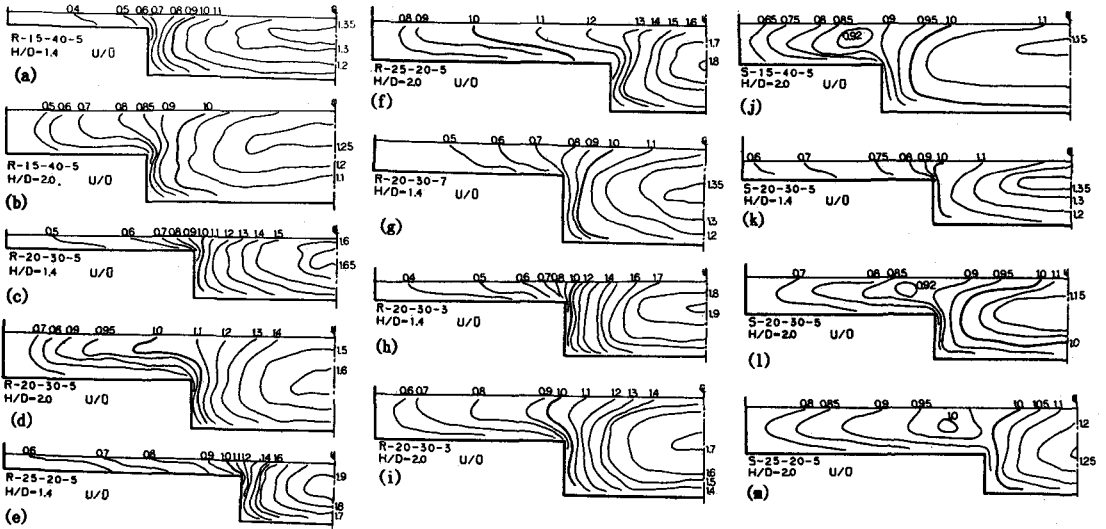


図-1 断面内等流速線図

各断面毎に5~8段階に変えており、表中には各断面毎の水深・流量の最大値と最小値、 H_{max} , H_{min} , Q_{max} , Q_{min} の値を示している。水路勾配は全ケースを通じて 6×10^{-4} に統一された。壁面せん断応力は対数則法により算出した。流速の精度は全断面にわたり積分して得られる流量と実測値の比較により、壁面せん断応力の精度は全潤辺にわたり積分したせん断力と水路勾配から決定されるそれとの比較により、それぞれ検討された。その結果、誤差は全ケースとも $\pm 5\%$ 以内に収まった。

3. 平均流速分布特性

3.1. 断面内等流速線

3.1.1. 一般的特性 図-1は流下方向流速Uの断面内等流速線図である。 H/D , B_f/B , B_m/B の大小およびType-R, Type-Sに関係なく、低水路内の最大流速は水路中央の高水数高さD付近に現れる。また等流速線は高水数と低水路の接合部付近で最も密になる。

3.1.2 諸因子の影響

(A) 相対水深の影響 1) 高水数上に注目するとType-RやType-Sに無関係に、最大流速は H/D の増大と共に水面から下方の位置に現れる。2) Type-Sでは H/D の増大と共に高水数上の接合部に近いところに、高流速域が認められるようになる。明らかに接合部に近い高水数上の流れは、低水路の流れに単純に引きずられ、加速するような流れではない。

(B) 高水数粗度の影響 1) H/D が大きいてもType-Sで観察されるような高流速域はType-Rでは現れない。2) Type-Rの低水路接合部付近では、等流速線は高水数高さ付近に限らず水面近くから底面付近まで縦に密に並ぶ。

(C) 高水数幅および高水数高さの影響

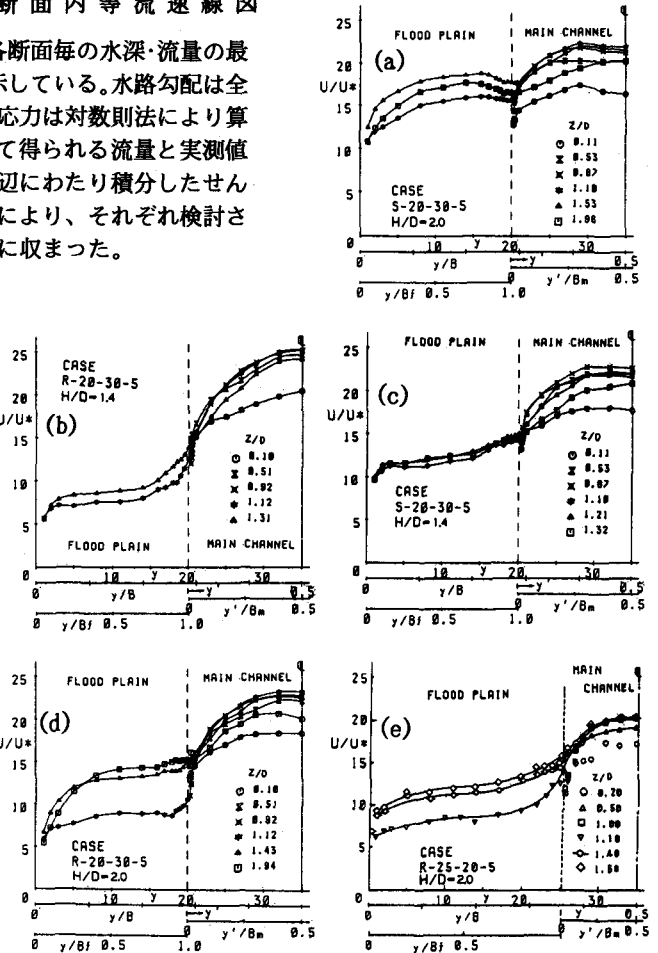


図-2 流速Uの横方向分布

1) H/D に関係なく、等流速線の構造に及ぼす B_f/B の影響は明確でない。2) 断面平均流速 $\bar{U}$ で無次元化された $U/\bar{U}$ に注目すると、 B_f/B の増大(B_m/B の減少)と共に低水路内の $U/\bar{U}$ は減少し、逆に高水敷のそれは増大する。特に、この傾向はType-Rで顕著となる。3) 高水敷高さが違っても同一 B_f/B 、 B_m/B の場合、 H/D で無次元化する限り等流速線の構造に変化はない。ただし同一 H/D の場合、低水路内の $U/\bar{U}$ は D が小さくなるにつれて増大する。以上より、高水敷と低水路の流量分担率は断面形状、 H/D のみならず高水敷粗度より支配されることが知れる。

3.2 流下方向流速 U の横方向分布

3.2.1 一般的特性 図-2に種々の測定高さ、 z で得られた一連の流速 U の横方向分布を示す。図-5から、実験条件に関係なく認められる点を挙げる。

1) 高水敷上の流速はいずれの高さ z/D においても、高水敷側壁から接合部に向かうにつれて増大するが、底面に近いほどこの増加傾向は著しい。2) 低水路側では高水敷高さ ($z/D=1.0$) 付近で低水路中央に向かっての流速の増大、すなわち速度勾配が最も大きい。また z/D が1.0から大きくなるにつれ、この流速の増大は不明瞭となり、速度勾配は減少する。

3.2.2 諸因子の影響

(A) 相対水深の影響 1) H/D の影響はType-Sで現れやすい。Type-Sでは H/D が大きいとき、高水敷上に存在する高

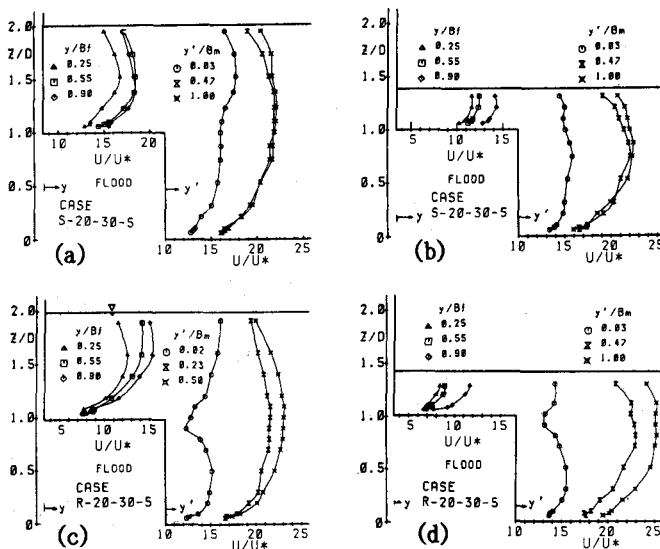


図-3 流速 U の鉛直方向分布

流速域のために、高水敷の流速は側壁から接合部に向かうにつれ増大し、接合部手前で最大となった後、再び減少する。しかしながら H/D が小さいと、その様な傾向はなく、 $U/\bar{U}$ は接合部に向かって増大する。

(B) 高水敷粗度の影響 同一断面形状でも接合部付近の流速の加速傾向はType-Rで著しい。この原因は高水敷粗度による流れの遅滞効果のためにType-Rの高水敷流速がType-Sのそれに比べて減少し、それによって低水路流速が相対的にType-Rの方で増大するためと考えられる。

3.3 流下方向流速の鉛直方向分布

今まで述べたように流速分布に与える影響は主に相対水深と高水敷粗度であるから、以下ではこの2つの因子と流速分布との関係に絞って、その特性を述べることにする。

(A) 相対水深の影響 1) 低水路内の接合部付近では H/D が大きいとき、図-3のごとく局所的な流速の減少(流速の落ち込み、速度欠損)領域が観察されるが、水路中央に向かうにつれ消失する。2) 高水敷上の流速分布に関しては H/D が大きいとき、最大流速は水面より下方に現れるが、 H/D が小さいときは水面付近となる。

(B) 高水敷粗度の影響 1) 接合部付近の流速の落ち込みはType-SよりもType-Rの方で明瞭に現れる。2) 高水敷で最大流速が水面より下方に現れるという現象は、Type-Sの方で観察されやすい。3) 高水敷では底面付近の速度勾配のは接合部に近づくにつれ増大するが、この変化傾向はType-Rの方がType-Sに比べて明確である。

4. 乱れ強度分布特性

4.1 断面内等乱れ強度線

図-4は断面内等乱れ強度線図であり、一見して接合部付近と低水路底面から乱れエネルギーが発生・発達している様子が認められる。以下、因子ごとに整理して考察する。

(A) 相対水深の影響 1) 接合部付近から発生する高乱れ強度域の拡がり、ある上昇角をもって低水路内に入り込む様な形態をとるが、 H/D の減少とともにこの上昇角も減少する。特に、CASE R-25-20-5(図(e))の H/D が小さいとき、高乱れ強度域が低水路下方へと拡がることもある。2) H/D の減少とともに、接合部付近の高乱れ強度の横への拡がりも低水路内のみならず高水敷上でも抑制される。

(B) 高水敷粗度の影響 1) 同一断面でもType-R((a)~(i))の方がType-S((j)~(m))よりも接合部付近の乱れ

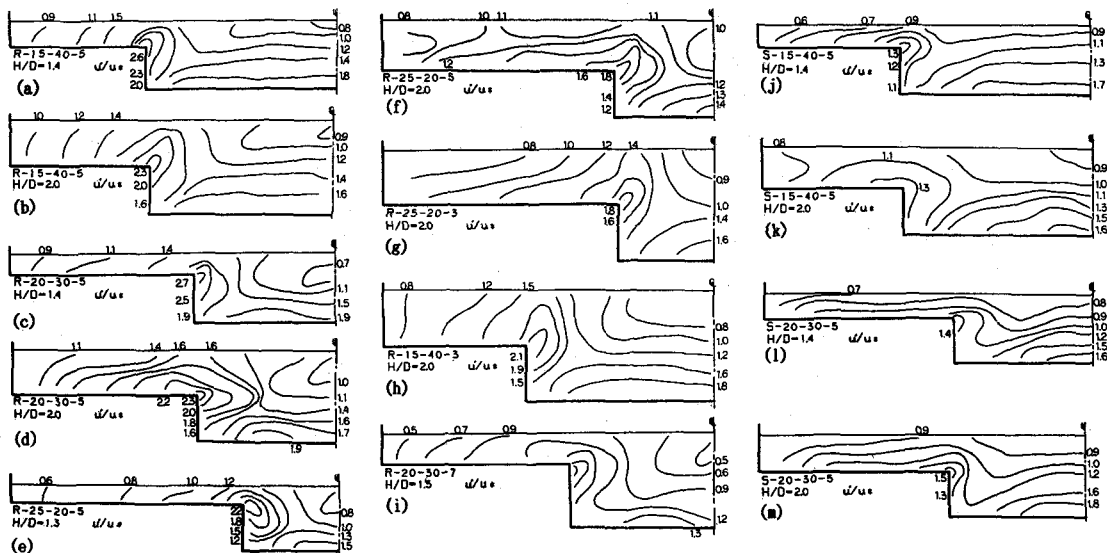


図-4 断面内等乱れ強度線図

強度 u'/u_s の値は大きい。2) Type-Sにおいて低水路底面から発生する乱れ強度と接合部から発生するそれとを比較すると、両者はほぼ等しいか、前者の方が少し大きい。Type-Rでは接合部という幾何形状の急変に加えて粗度により励起される乱れのために、逆に後者の方が前者よりも大きくなる。3) 接合部から発生する乱れの拡がりは一断面形状、 H/D でも、相対的にType-Rの方で大きい。

(C) 高水敷幅および高水敷高さの影響

1) H/D に関係なく B_f/B が大きい場合、高水敷上の等乱れ強度線は、高水敷側壁に向かうにつれて鉛直から水平へと移行する。逆に B_f/B が小さいと、等乱れ強度線は側壁近くまで立つようになる。2) 低水路内では B_m/B が大きいと底面から発生する乱れにより、等乱れ強度線は水平的な拡がり呈する。3) 高水敷高さの影響は明確に現れてこない。

以上、接合部から発生する乱れは接合部から離れるに従って弱まり、代って壁面乱流が卓越するようになる。

4.2 乱れ強度の横方向分布

4.2.1 一般的特性 図-5に乱れ強度 u' の横方向分布を示す。高水敷の粗度、高水敷幅、相対水深に関係なく、次のことが言える。1) 低水路内の底面に近い高さ ($z/D=0.2$) では、 u' は基本的には側壁から中央に向かうにつれ、大きくなるのに対して、 $z/D>1$ では側壁から離れるに従って u' は小さくなる。2) 高水敷では、側壁から接合部に向かって u' は増大するが、底面に近いほどこの性質は明瞭となる。

4.2.2 諸因子の影響

(A) 相対水深の影響 1) $z/D=1.1$ 付近の u' は

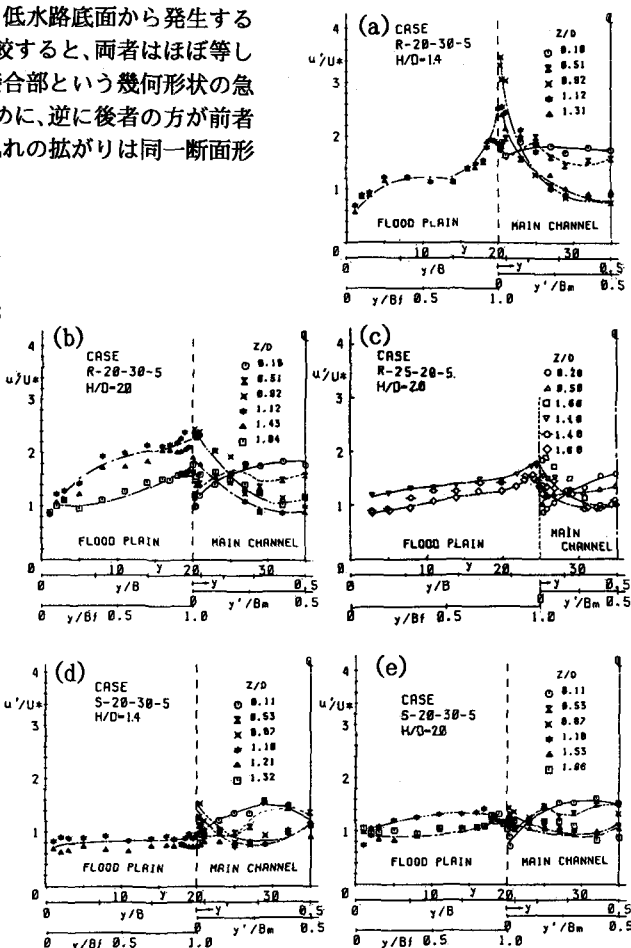


図-5 乱れ強度の横方向分布

H/Dの増大と共に減少する。この結果は既に述べたように、接合部付近の速度勾配がH/Dの減少と共に増大することからも予想できる。2) H/Dが小さい場合、高水敷の u'/u_* は高水敷・低水路とも接合部に近づくにつれ、急激に増大するが、H/Dが大きくなると、接合部付近での u'/u_* の増大は緩慢となる。

(B) 高水敷粗度の影響 高水敷上の u'/u_* は同じ流水断面でもType-Rの方で一般的に1.5~1.7倍程度大きくなる。ただし、この u'/u_* の増大率はType-Sと同様に、高水敷の接合部付近で最も大きい。

(C) 高水敷幅・高水敷高さの影響

1) 同一H/D(ただし、Dは同値)において B_f/B_m (B_m/B)の違いによる u'/u_* の分布形

の変化は図-5(b)と(c)の比較で判るように目立った違いはない。ただし最も B_f の大きな(最も B_m 小さな)CASE R-25-20-5($B_f/B=0.71$)の接合部の u'/u_* は、幾分他のType-Rのケースに比べて小さい。

4.3 乱れ強度の鉛直方向分布

図-6に乱れ強度 u' の鉛直分布を示す。最初に基本的な特性として低水路から説明する。1) 側壁近傍では高水敷高さ付近に u' の最大値が現われ、 z/D を境界として水面方向および底面方向に漸減する。底面付近になると壁面の乱れにより再び u' が増大するケースがある。しかも図-3と比較から明確のように u' の最大となる位置はUの落込み部分に見事に対応しており、互いの分布は負の相関関係にある。2) 中央部では逆に u' は底面付近で最大となり高水敷高さ付近まで減少するが、 $z/D \geq 1$ での u' の減少は極めて小さく、水面に近いところでは逆に少し増大するケースもある。特に1)の現象に注目すれば、接合部付近の低流速で高乱れ強度を有する高水敷上の流体塊が低水路内に入り込んでいると解釈できる。高水敷については目立った傾向がなく、乱れ強度は底面から水面に向かって減少するが、この傾向は接合部($y/B_f=1$)に近いほど明瞭になる。

次に諸因子の影響であるが、低水路では高水敷高さを境として水面および底面に向っての u' の減少が、高水敷では底面から水面に向っての u' の減少が、Type-SよりもType-Rの方で顕著となる。すなわち相互作用は接合部から離れるに従い、急激に減衰する。しかしながら相対水深や高水敷幅・低水路幅の影響は小さい。

5. 壁面せん断応力特性

5.1 壁面せん断応力分布

図-7に壁面せん断応力 τ_w の分布を示す。同図には、同一断面形状、H/DにおけるType-RとType-Sの分布を併示している。図中の $\bar{\tau}_w$ は平均壁面せん断応力を表わす。各諸因子の τ_w 分布に及ぼす影響は次のようである。

(A) 相対水深の影響 1) 図-7(a)と(b)の比較より高水敷上の τ_w 分布はH/Dにより変化することが知れる。すなわち、H/Dが小さいとき、側壁から接合部へ向かっての τ_w の増加は接合部付近で最も著しい。逆にH/Dが大きい場合、 τ_w は側壁から接合部に向かって急激に増大し、その後 τ_w の増大は鈍化する。2) Type-Sにおける低水路側壁上の τ_w 分布は、H/Dが小さいとき最大値が $z/D/2$ 付近に現れるのに対して、H/Dが大きいと τ_w は底面から離れるに従って増大し、 z/D 付近で最大となる((a)と(b)を参照)。3) 高水敷側壁部の分布形そのものはH/Dにより変化しないが、 $\tau_w/\bar{\tau}_w$ はH/Dの増大につれて大きくなる。4) Type-SのH/Dが大きい場合、高水敷上の τ_w の最大値は接合部よりも少し側壁側に現れてくる。この現象は高水敷上に高流速域が存在する場合にのみ観察されることから、流れ構造と壁面せん断応力分布は密接に関係していると理解できる。

(B) 高水敷粗度の影響 1) 高水敷上の $\tau_w/\bar{\tau}_w$ を観るとType-Rの方がType-Sに比べて大きいものに対して、低水路の $\tau_w/\bar{\tau}_w$ は逆にType-Sの方が相対的に大きくなる。2) H/Dが大きい時、高水敷上の τ_w の最大値はType-Rでは接合部付近に現れるのに対し、Type-Sでは上述のように接合部よりも高水敷側となる。3) 高水敷および低水路側壁上の $\tau_w/\bar{\tau}_w$ はType-Sの方がType-Rよりも大きい。またH/Dが大きいときに限り、低水路側壁の τ_w は

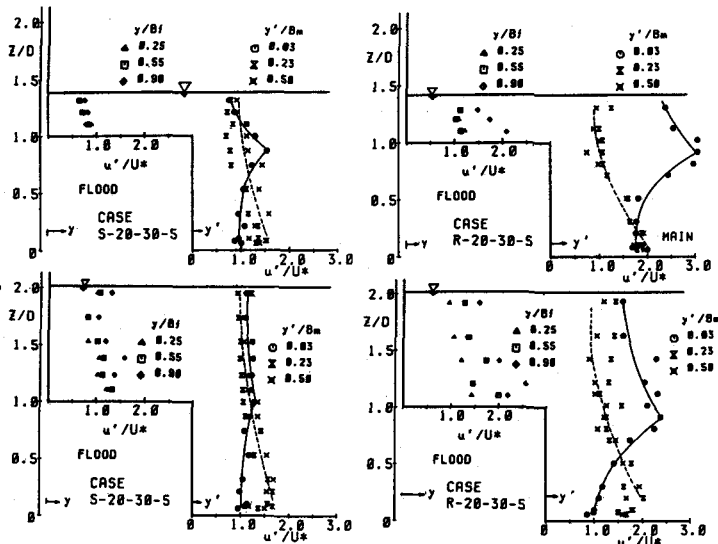


図-6 乱れ強度の鉛直方向分布

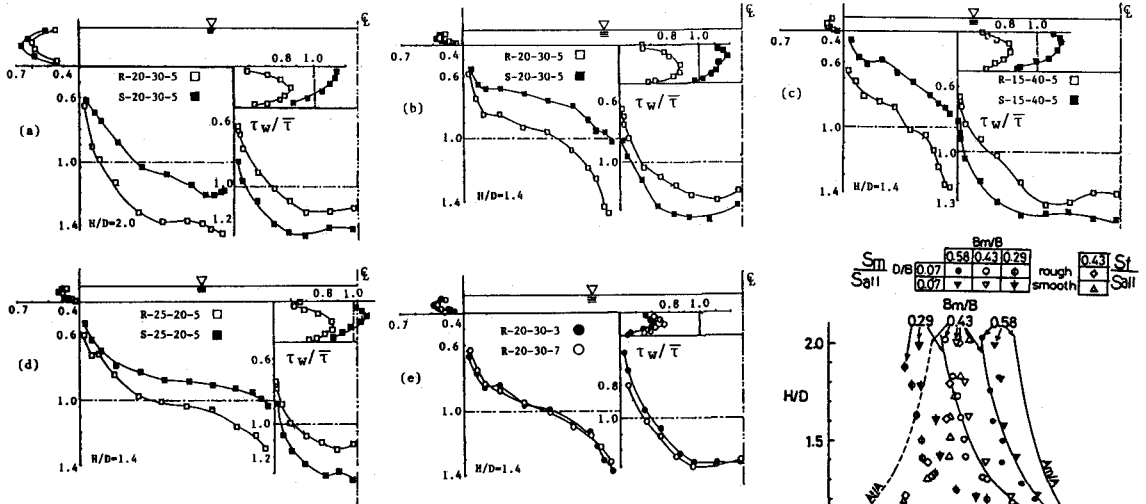


図-7 壁面せん断応力分布(Type-RとType-Sの比較)

図-8

Type-Rでは $z=D/2$ 、またType-Sでは $z=D$ でそれぞれ最大となる。高水数と低水路の壁面せん断力の分担率(C) 高水数幅および高水数高さの影響 1) B_r/B が大きくなるほど高水数の τ_w の変化(側壁から接合部に向かうにつれての τ_w の増大)は緩慢になる。2) 逆に低水路では B_m/B が小さいほど、側壁から離れるにつれて τ_w/τ_w は急激に増大する。3) τ_w 分布形に及ぼす高水数高さの影響は本実験の範囲内では小さい。

5.2 見かけのせん断力

全せん断力に対する低水路と高水数のせん断力の分担率と H/D の関係を図-8に示す。図中には低水路と高水数の面積比 A_m/A 、 A_r/A と H/D の関係も示している。低水路での力の釣り合いから、 A_m/A と S_m/S_{all} の差が接合部の鉛直仮想境界面に働く見かけせん断力 $A_{s,r}$ となる。ここに S_m は低水路のせん断力を、 S_{all} は全せん断力を表す。同図より $A_{s,r}$ は低水路の流れを減速させ、高水数では流れを加速させるように作用することが判る。同一断面でも $A_{s,r}$ はType-Rの方で大きく、また H/D に比例しても大きくなる。これより断面分割法は粗面高水数の場合に精度が悪くなること、および抵抗に関しては H/D の大きい時が問題となることが理解できる。

6. 結論

本研究により流れを支配する4つの因子、相対水深、高水数粗度要素、高水数幅・低水路幅そして高水数高さによって、平均流速や乱れ強度の断面内分布・横方向分布・鉛直方向分布および壁面せん断応力分布がどのように変化するかを70%的に捉えることができた。その結果、4つの因子とも各水理量の分布および値の変化に影響を及ぼすが、中でも相対水深と高水数粗度は強い影響力を持つことが判った。また以下の結果 ((i)接合部からの高乱れ強度域の発達の様子と流速の落込み減少のスケールの大小関係、(ii)高水数粗度の有無による接合部付近の乱れ強度の値の変化さらに流速分布、速度勾配および壁面せん断力分布)より、滑面よりも粗面高水数の方が複断面流れにおける平均流・乱流・壁面せん断応力の間の密接な関係を抽出しやすいことも判った。

参考文献

- (1)Rajaratnum, N. and Ahmadi, R. M. : Interaction between main channel and floodplain flows, J. Hydr., ASCE, Vol. 105, HY5, pp. 573-588, 1978
- (2)今本博健・久下俊夫 : 複断面流れの水理特性に関する基礎的研究、京都大学防災研究所年報、第17号B, pp. 665-679, 1974
- (3)Prions, P., Townsend, R. and Tavoularies. : Structure of turbulence in compound channel flows, J. Hydr., ASCE, Vol. 111, HY9, pp. 1246-1261, 1985
- (4)Yen, C. L. and Overton, D. E. : Shape effects on resistance in flood-plain channel, J. Hydr., ASCE, Vol. 99, HY1, pp. 219-238, 1973
- (5)Gosh, S. N. and Jena, S. B. : Boundary shear distribution in open channel compound, Proc. Inst. of Civil Eng. London, England, pp. 417-430, 1971