

台形断面開水路湾曲部の2次流構造

SECONDARY FLOW STRUCTURES IN BENDS OF TRAPEZOIDAL OPEN CHANNELS

富永晃宏¹・長尾正志²・大沼保仁³

Akihiro TOMINAGA, Masashi NAGAO and Yasuhito Ohnuma

¹正会員 工博 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

²正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

³学生会員 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (同上)

The flow structures in bends of narrow open channels are considered to be affected by the configuration of cross section. This study aims to clarify the secondary flow structures in curved open channels with trapezoidal cross section experimentally, for three types of side slope. The obtained structures of secondary flow, primary velocity and bed shear stress were almost similar to those in the rectangular curved open channels. However, a counter-rotating vortex near the outer bank was diminished with a decrease of the side slope. The developing process of the secondary flow strength was not so much changed from the rectangular case. The structure of the primary mean velocity and the bed shear stress were distorted according to the structural change of secondary flow.

Key Words : curved open channel, secondary flow, trapezoidal cross section, three-dimensional flow structures

1. 序論

河道の湾曲部の流れは遠心力に起因する2次流の発生と、これによる湾曲部外岸側の洗掘および内岸側の堆積という河床変動によって特徴づけられる。河道の安定に対して湾曲部流れの構造は最も重要な現象であり、多くの研究が行われてきた。自然河川の湾曲部では上述のような流れの特性から外岸が深く内岸が浅い横断面形状が形成され¹⁾、主流は最深部に沿って流れる。長方形断面開水路の湾曲部の流れ構造に関しては、村本らの180°湾曲流の実験²⁾、吉川・池田らの270°湾曲流の実験³⁾、今本・石垣らによる複断面開水路における実験⁴⁾等がある。また、最近では著者らが幅水深比の小さい長方形断面開水路湾曲部で実験を行い、外岸側に湾曲部の遠心力に起因する2次流とは逆向きの2次流構造を確認している⁵⁾。このような2重渦構造については、著者らの用水路湾曲部における計測⁶⁾およびBathurst et al.⁷⁾やVriend⁸⁾による野外計測によっても指摘されており、また、今本・石垣らの実験⁴⁾によっても示唆されていたものである。長方形断面のこのような湾曲部2次流構造を基本構

造とすると、側岸の形状が2次流および主流にどのような影響を与えるかが興味を持たれる。台形断面開水路の湾曲流についてはIppen & Drinkerの計測⁹⁾があるが、底面せん断応力分布の検討が中心で2次流は計測されていない。また、福岡ら¹⁰⁾は外岸の緩傾斜化による流れ構造の変化について実験および数値計算によって検討している。しかしながら、断面形状の変化に対する湾曲部流れ構造の応答に関しては系統的な実験が行われておらず、十分理解されているとは言い難い。特に中小河川のような比較的幅水深比の小さな場合の各種断面の湾曲部においてはこのような側岸の形態が流れ構造に大きな影響を及ぼすものと考えられる。このような流れ場では、主に幅水深比の小さな流れを対象とした従来の知見では十分に対応できない。さらに乱流では乱れに起因するPrandtlの第2種2次流もそれぞれの断面で特有の構造を有しており、これと湾曲部2次流との相互関係も解明すべき重要な問題と考えられる。そこで、本研究は、3種の側壁傾斜角を有する台形断面開水路の湾曲部の2次流構造および3次元流速分布を実験的に明らかにし、基本となる長方形断面の流れ構造と比較検討したものである。

2. 実験装置および実験方法

実験水路は水路幅 $B=90\text{cm}$ 、深さ 30cm の長方形断面開水路において、湾曲区間の上、下流にそれぞれ 10.8m 、 3.6m の直線部を設け、その中間部に中心曲率半径 $R=2.7\text{m}$ の湾曲角 60° の湾曲水路を挿入した。直線部は木製とし、湾曲部の鉄製の内角 30° ユニット構造とをフランジによって連結した。実験水路平面図を図-1に示す。台形断面における傾斜側壁は、図-2に示すような側壁勾配 $m=0.5, 1.0, 2.0$ の3通りとした。これらの側壁構造は湾曲部を鉄製、直線部を木製とし、接合部を充填材によってなめらかにした後、全表面にペンキ塗装を施した。

流量は電磁流量計とインバータモータを用いたコンピュータ制御により供給される。水路の上流部には整流槽を設けている。湾曲部下流の直線部に十分な長さをとれなかったため、下流端において堰上げを行い、湾曲入口上流 90cm において水深 $h=15\text{cm}$ となるように設定した。実験条件表を比較のための同一湾曲条件における長方形断面のケース(R-5)とともに表-1に示す。表中の平均流速は湾曲入口上流 90cm における値である。

流速計測にはセンサー部の直径 5mm 、長さ 16mm の2成分電磁流速計(東京計測社製)を用いた。本実験では同一計測点においてL型電磁流速計で主流速成分(u)と鉛直流速成分(w)を、I型電磁流速計で主流速成分と横断流速成分(v)をそれぞれ計測し、合成して3成分とした。座標系は水路中央線に沿う方向を x 軸、これに直角な水平方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とした。計測断面位置は、直線部では湾曲入口($x=0$)、湾曲入口より上流 90cm 、湾曲出口、湾曲出口より下流 45cm 、 90cm 、 135cm にとり、湾曲部では湾曲偏角 $\phi=15^\circ$ ごとにとった。電磁流速計の出力電圧はコンピュータによりAD変換されZIPディスクに直接記録され解析された。サンプリング周波数は 100Hz で、1点につき 4100 個のデータを統計処理した。水深は流速計測断面においてデジタルポイントゲージによって計測した。

3. 2次流構造

流下方向の代表位置における長方形断面(R-5)の2次流ベクトル図を図-3に、台形断面の3ケースの2次流ベクトル図を図-4(a)~(c)に示す。2次流成分は実測値から断面平均値を差し引いた偏差で表している。長方形断面の2次流構造を基本構造として、台形断面の断面形状による変化や特徴的構造について述べることにする。

(1) 基本となる長方形断面の2次流構造

$\phi=15^\circ$ 付近から水面で外岸へ向かい底面で内岸へ向かう湾曲特有の2次流が発生し始めるが、外

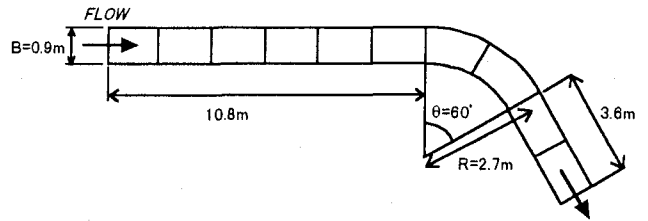


図-1 実験水路平面図

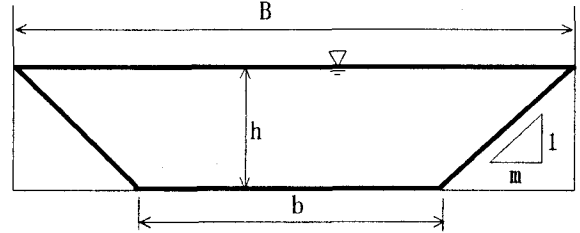


図-2 実験水路断面図(台形断面)

表-1 実験条件表

CASE	Side slope m	Discharge Q m^3/s	Mean Velocity U_m m/s	Water Depth h m	Energy Gradient le $\times 10^4$	Reynolds Number $Re(\times 10^4)$ $U_m h/\nu$	Froude Number Fr U_m/\sqrt{gh}
T-1	0.5	0.0420	0.361	0.15	2.33	4.93	0.298
T-2	1.0	0.0361	0.321	0.15	1.98	4.38	0.265
T-3	2.0	0.0306	0.340	0.15	2.71	4.64	0.280
R-5	0.0	0.0415	0.299	0.15	1.53	4.19	0.244

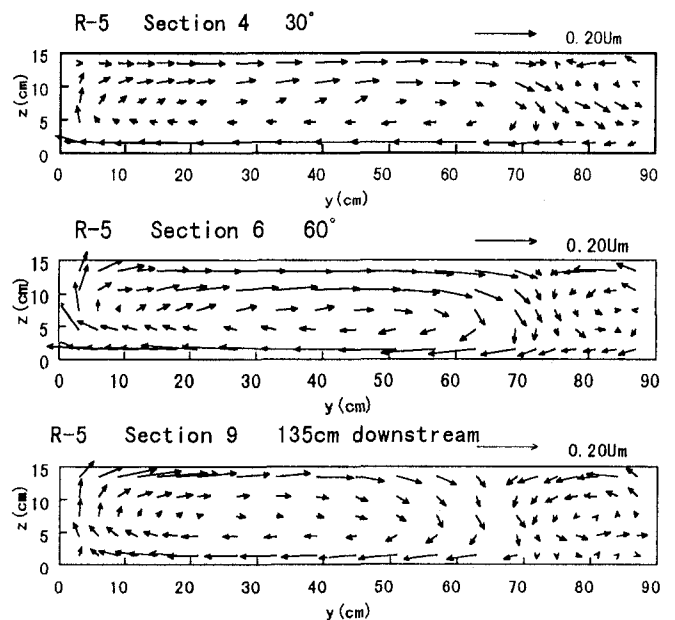


図-3 2次流ベクトル図(長方形断面)

岸の水面側には湾曲による2次流とは逆回転の2次流が存在する。ここで湾曲特有の渦構造を湾曲渦、外岸の逆回転の渦を外岸渦と呼ぶことにする。 $\phi=30^\circ$ から $\phi=45^\circ$ までは、同一の構造を保ちながら速度が増大し、湾曲渦、外岸渦ともに明確になる。 $\phi=60^\circ$ で2次流は最大となり、外岸渦が底面付近にまで達し水深規模の渦となるのに伴い、湾

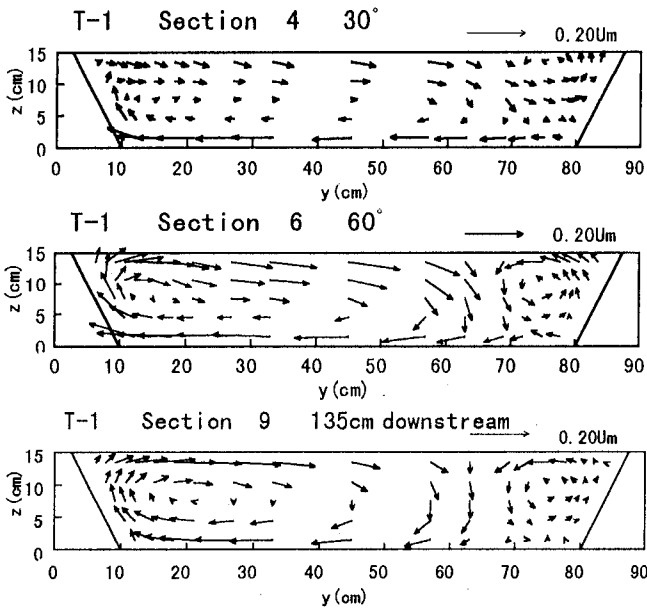


図-4(a) 2次流ベクトル図(台形断面:側壁傾斜 $m=0.5$)

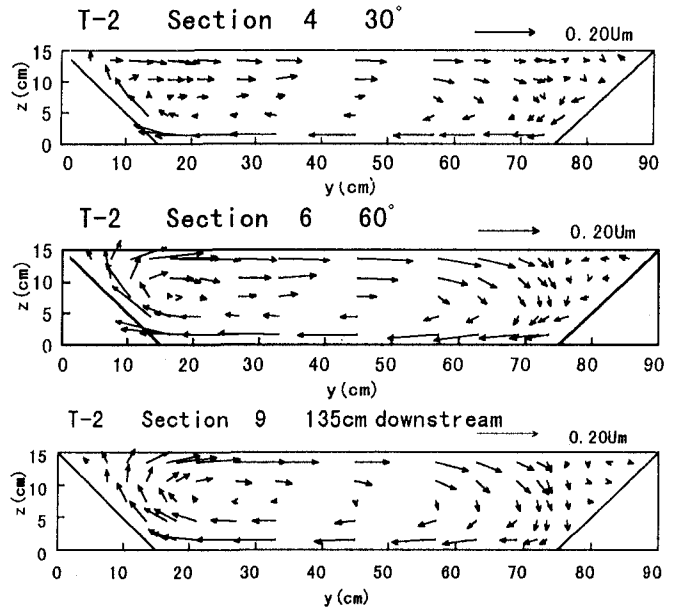


図-4(b) 2次流ベクトル図(台形断面:側壁傾斜 $m=1.0$)

曲渦は $y/B=0.7$ 付近を中心として下降する水路幅の約7割の幅を持つ渦となる。下流直線部においても、ゆっくり減衰しながら同一の渦構造を保持している。

(2) 台形断面の2次流構造

a) 側壁傾斜 $m=0.5$ の場合 (ケースT-1)

この側壁傾斜角では、基本的に長方形断面と同様の2次流構造を示している。すなわち、湾曲渦および外岸渦の一对の渦構造を示し、 $y/B=0.7$ 付近で下降流が生じている。結果として2次流構造は側壁の傾斜による流水断面の減少分だけそれぞれの渦の幅が小さくなったものと解釈できる。

b) 側壁傾斜 $m=1.0$ の場合 (ケースT-2)

このケースでは側壁の傾斜角の減少に伴い外岸渦が明確に形成されず、傾斜側岸上の狭い範囲に限られた小規模の弱い渦構造が残るだけである。その結果、外岸の側壁コーナー付近で下降する渦が単独で存在するようになり、側壁傾斜2:1の場合よりも湾曲渦下降位置が外岸へ移動する。

c) 側壁傾斜 $m=2.0$ の場合 (ケースT-3)

このケースでは外岸渦が全く見られなくなり、湾曲渦が全断面をカバーする単一渦構造となる。ただし、内岸コーナー付近を中心とする強い回転成分を持つセルの存在が認められる。このセルを包み込むような形で外岸にまで達する同回転の渦構造が存在している。特に $\phi=60^\circ$ の湾曲出口付近では内岸側壁に沿う上昇流および外岸に沿う下降流が顕著である。このような縦渦の2重構造性は2次流の時間的・空間的な変動を意味しているものと考えられるが、この点はさらに検討を要する。

以上のように側壁傾斜が大きくなるとともに、外岸渦は減衰していき、 $m=2.0$ では完全に消滅す

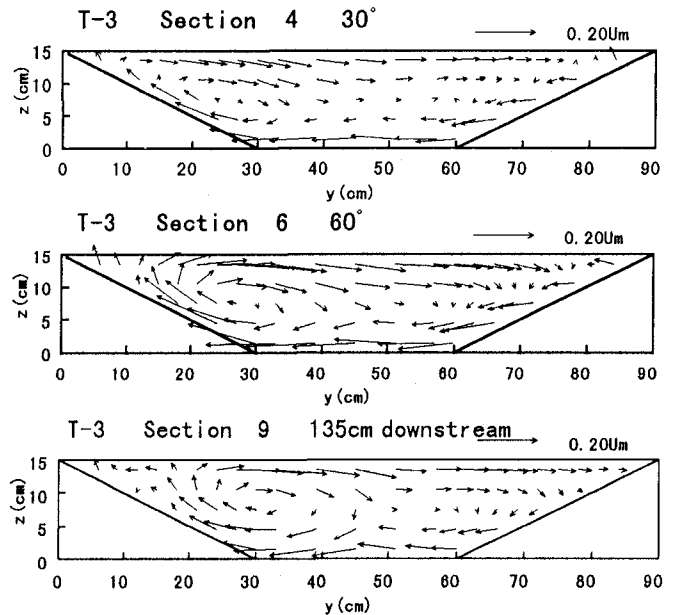


図-4(c) 2次流ベクトル図(台形断面:側壁傾斜 $m=2.0$)

る。このことは、直線開水路で見られたPrandtlの第2種2次流の特性と関係づけられる。直線開水路においては、長方形断面の側壁近傍の水面側に存在する2次流渦構造が、側壁傾斜の増大とともに減衰し、これと逆向きの渦が発生することが示されている¹¹⁾。この側壁領域の2次流構造の変化が湾曲部のPrandtlの第1種2次流の構造にも影響を及ぼしたものと考えられる。

(3) 2次流の強度および発達過程

2次流の強度を表すのに、流れ関数の最大値や渦度、2次流速の運動エネルギー等が考えられるが、ここではより実用性を考慮して直接的に2次流速の最大値を採用する。すなわち底面最近点と水面最近点の流速差の1/2で定義される横断方向流速偏差 V_v を指標とする。2次流速の断面内の最大値は、

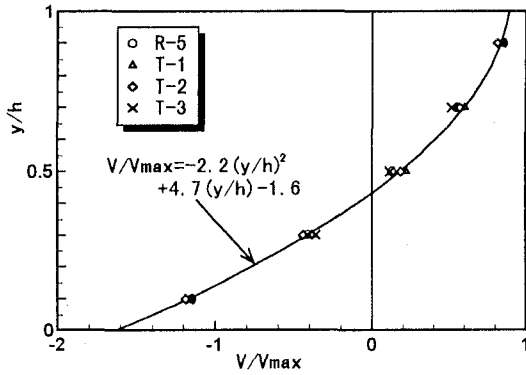


図-5 横断方向流速Vの鉛直分布

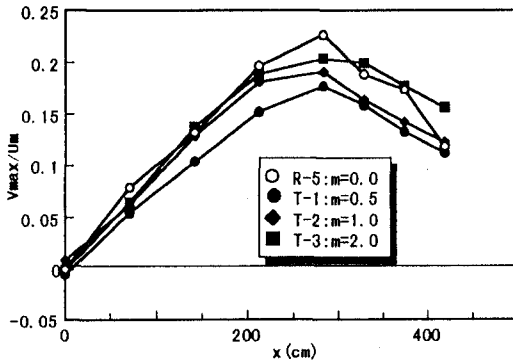


図-6 2次流強度の流下方向変化

ほぼ水路中央からやや内岸よりの位置に現れ、この V_x の横断方向最大値を V_{max} と定義する。2次流が最大となる $\phi = 60^\circ$ 断面の横断方向流速最大位置での V の鉛直分布を V_{max} で規格化したのが図-5である。図中の実線は長方形断面の数ケースにおいて得られた2次回帰曲線であり、次式で表される。

$$\frac{V}{V_{max}} = -2.2\left(\frac{z}{h}\right)^2 + 4.7\left(\frac{z}{h}\right) - 1.6 \quad (1)$$

長方形断面の場合と同様に台形断面においてもほぼ相似な分布形状を示すことが明らかであり、 V の鉛直分布形は、底面近傍が狭い範囲で高速となる、半水深に対して非対称な分布となっている。次に、この最大横断方向流速偏差 V_{max} の流下方向変化について示したのが図-6である。いずれも $\phi = 45^\circ$ 付近まで直線的に増加し $\phi = 60^\circ$ でピークを取った後減少する傾向を示す¹²⁾。増加過程においては、ケースT-1以外はほとんど同一の変化を示す。T-1で2次流強度が小さくなったのは、内岸側の2次流の幅の減少が原因しているものと推測される。

4. 主流速の構造

長方形断面のケースR-5の主流速コンターを図-7に示す。長方形断面の主流速分布の変化過程の特徴は以下のようなものである。まず、湾曲入口上流ですでに高速域が内岸に寄り非対称分布となる。

湾曲入口ではさらにこの傾向が進み、いわゆる自由渦型分布は湾曲角度 $\phi = 15^\circ$ 付近で最大となる。これより下流に向かって自由渦型の横断分布傾向は弱まり、内岸近傍水面近くの流速が低下し始め、流下に伴いだいに低速域が拡大する。この2次流による運動量輸送の効果は湾曲出口下流の直線部でも続き、内岸では低速域が拡大し水面側が低速、底面側が高速な流速分布となり、一方外岸側では鉛直方向に流速の一樣化が進み、最大流速は2次流の下降部にあたる $y/h = 0.7$ 付近に現れる。これらの結果として湾曲出口より下流で内岸が遅く外岸が速い、いわゆる強制渦型の流速分布を示すようになる。

図-8(a)~(c)は台形断面の3ケースの $\phi = 30^\circ$ 、 60° 、湾曲下流135cmにおける主流速コンターを示す。 $\phi = 30^\circ$ ではいずれのケースも長方形断面と同様に内岸が速く外岸が遅い自由渦型分布を示し、ケースT-1およびT-2では $y = 20 \sim 25$ cm付近に最大流速が現れる。T-3では傾斜が緩いため最大主流速は内岸のコーナー付近に現れる。湾曲出口の $\phi = 60^\circ$ では同様に内岸の水面近くの減速が現れ、水路中央付近では流速の横断分布が再び一樣化している。長方形断面では外岸近傍に低速域が残っているが、側壁傾斜角の減少とともにこの低速域がなくなり、外岸近傍まで高速域が現れる点が異なる。さらに湾曲下流直線部では2次流による運動量輸送が進展し、水面の減速域が内岸から約40cm程度の領域まで及ぶ。したがって、水路中央から内岸にかけての主流速コンターはいずれのケースも水面側より底面側が高速となる流速分布の逆転現象が起こっている。台形断面では側壁の傾斜によって平均の水路幅が減少した分、高速域が外岸側へ追いやられることになる。さらに側壁傾斜角が小さくなると外岸の逆回転の渦

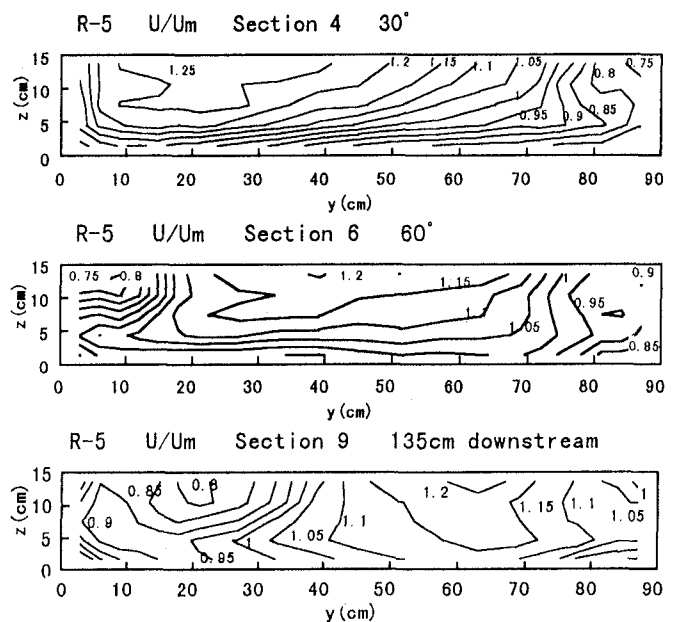


図-7 主流速コンターの流下方向変化 (R-5)

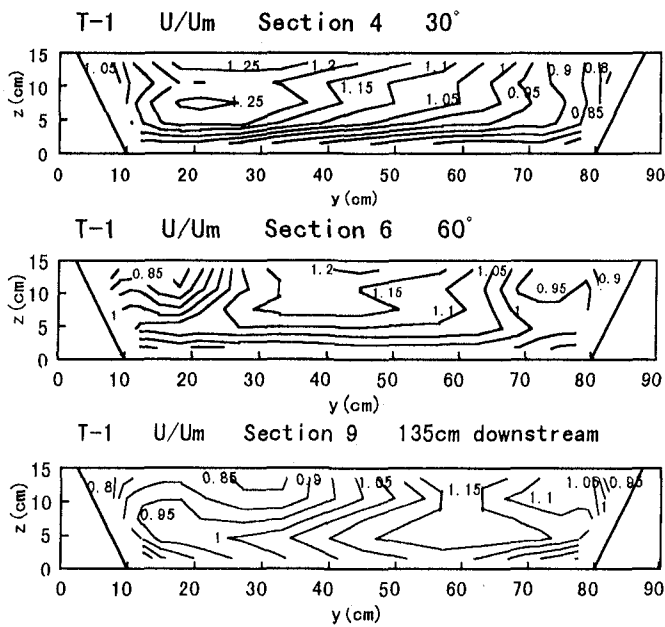


図-8 (a) 主流速コンターの流下方向変化 (T-1)

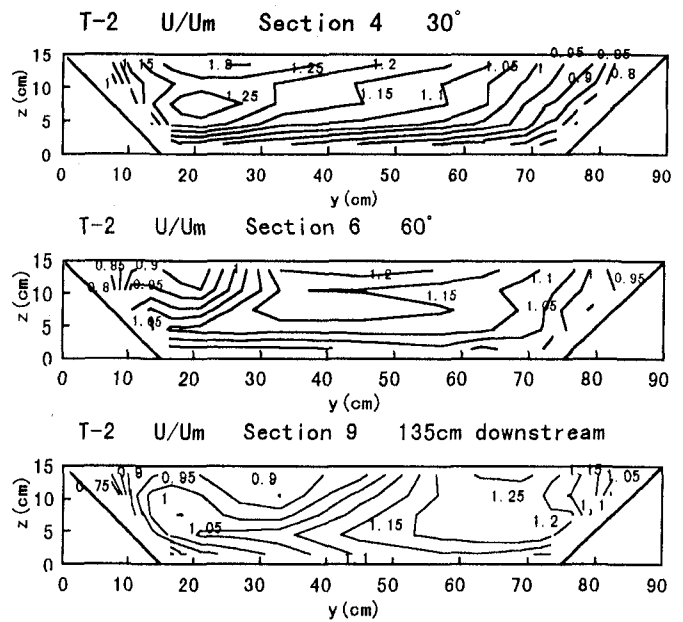


図-8 (b) 主流速コンターの流下方向変化 (T-2)

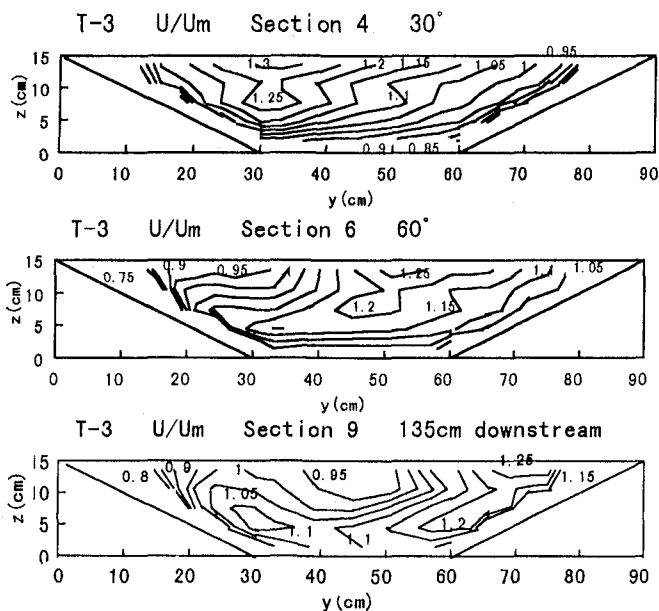


図-8 (c) 主流速コンターの流下方向変化 (T-3)

が消滅するため、外岸側壁近傍が高速化する。特に側壁傾斜 $m=2.0$ では外岸の斜面上が最も高速となる。これはあくまで側岸が滑面の場合の結果であり、側岸の粗度条件によって影響は変化するものと考えられるが、護岸の設計上注意すべき点である。図-9にケースT-3の水面近傍の水平面の流速ベクトル図を示す。湾曲入り口からの内岸の加速が、角度 45° 付近から中央へ移動し、湾曲出口からは外岸の加速が進み、外岸斜面上を高速流が流れているのがわかる。

5. 底面せん断応力分布

今回の実験では電磁流速計を用いたため底面近傍

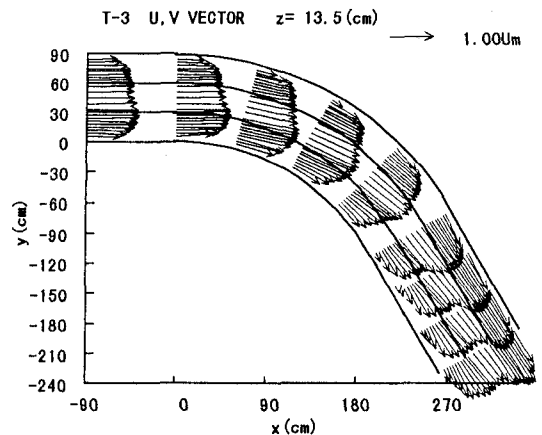


図-9 平面流速ベクトル図 (T-3)

の流速が計測できず、底面に最も近い計測点の高さは 1.5cm で、 $y/h=0.1$ であった。大まかに底面せん断応力の平面分布構造を把握する目的で、底面最近点の流速が滑面の対数則に従うとして摩擦速度を算定し、これから底面せん断応力を求めた。長方形および台形断面3ケースの底面せん断応力横断分布の流下方向変化過程を図-10に示す。ここに τ_0 は湾曲上流 90cm における横断方向平均値である。長方形断面では、側壁近傍を除く中央領域ではほぼ直線的な分布を示し、 $\phi=15^\circ$ で内岸が最も大きくなり、 $\phi=60^\circ$ でほぼ水平になった後、下流に向かって外岸側の $y=60\sim 70\text{cm}$ 付近をピークとして外岸側が高くなる様子が明らかである。特に外岸におけるせん断応力の増加は著しい。台形断面でもこの基本的性質はほとんど同様である。ただし、側壁傾斜角の減少とともに湾曲下流の外岸側の値が大きくなり、特にT-3では側壁傾斜面上も底面と同程度のせん断応力を示す。湾曲入り口内岸のピーク値は $\tau/\tau_0=1.6$ を示し、外岸のピーク値も $\tau/\tau_0=1.6\sim 1.7$ 程度になる。こ

の底面せん断応力の分布傾向は台形断面開水路の湾曲流実験を行ったIppen & Drinker (1962)の結果⁹⁾と基本的には同様である。Ippen & DrinkerはR/B=1.25から3.45の範囲で実験しており、R/Bが3以上では1.6程度と本実験と同程度の値を示している。

6. 結論

幅水深比が小さい台形断面開水路の湾曲部の流れ構造について実験的に検討し、側壁傾斜角度が2次流構造を中心とした流れ構造に及ぼす影響を明らかにした。圧力勾配による湾曲2次流の発生・発達・減衰過程は、長方形断面の場合とほぼ同様であるが、外岸に存在する逆回転の2次流構造が側壁傾斜角の減少にしたがって減衰・消滅することにより、横断方向スケールが変化する。主流速は長方形断面と同様に湾曲角が15°付近で内岸側が速く外岸側が遅い自由渦型分布が最も顕著となり、その後2次流による横断方向の運動量輸送効果と水面勾配の増大により急速に外岸側が高速な強制渦型分布へと移行する。しかし、側壁傾斜角が小さくなるほど外岸の逆回転の2次流構造が消滅することにより、外岸への運動量輸送が長方形断面の場合より大きくなり、外岸斜面上が高速化する。これに伴い底面せん断応力も湾曲出口下流で外岸よりにピークが現れる。

以上、幅水深比の限られた範囲ではあるが、側壁傾斜角の湾曲部流れに及ぼす影響を明らかにした。

参考文献

- 1) Rozovskii, I.L.: Flow of water in bends of open channels, Academy of science of U.S.S.R., Kiev, U.S.S.R., 1957.
- 2) 村本嘉雄, 井上喬之: 開水路湾曲流の内部機構, 京都大学防災研究所年報, 第8号, pp.415-427, 1965.
- 3) 吉川秀夫, 池田駿介, 北川明: 湾曲水路の河床変化について, 土木学会論文報告集, 第251号, pp.65-75, 1976.
- 4) 今本博健, 石垣泰輔, 藤沢寛: 複断面湾曲開水路流れの水理特性について(1), 京都大学防災研究所年報, 第25号B-2, pp.529-543, 1982.
- 5) 千葉茂樹・富永晃宏: 開水路湾曲部の流れ構造に関する基礎的研究, 土木学会大51回年次学術講演会講演概要集, 第2部, pp.340-341.
- 6) 富永晃宏: 幅の狭い用水路湾曲部における二次流構造の変形に関する現地計測, 第24回乱流シンポジウム講演論文集, pp.253-257, 1992.
- 7) Bathurst, J.C., Throne, C.R. and Hey, R.D.: Secondary flow and shear stress at river bends, J. Hydraulics Div., ASCE, vol.105, No. HY10, pp.1277-1295, 1979.
- 8) Vriend, H.J. and Geldof, H.J.: Main flow velocity in short river bends, J. Hydraulic Engineering, ASCE, vol.109, No.7, pp.991-1011, 1983.
- 9) Ippen, A.T. & Drinker, P.A.: Boundary shear stresses in curved trapezoidal channels, J. Hydraulics Div., ASCE, vol.88, No. HY5, pp.143-179, 1962.
- 10) 福岡捷二・西村達也・三宮武・藤原剛: 緩傾斜護岸を

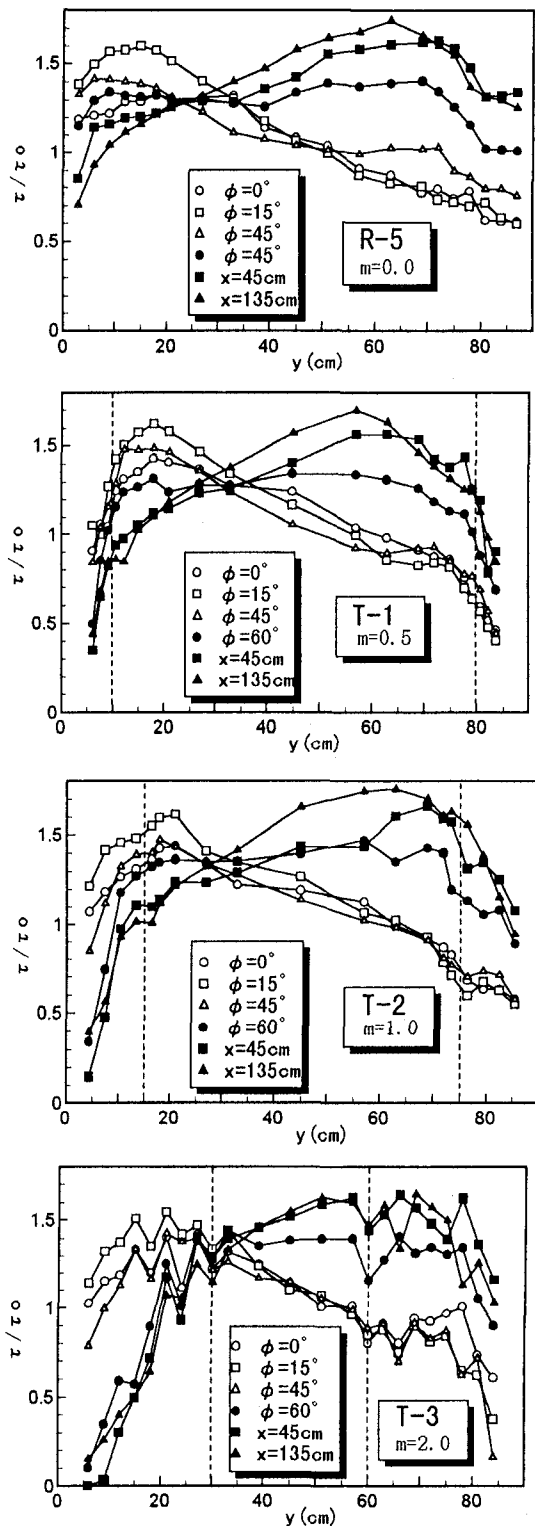


図-10 底面せん断応力の横断分布の変化過程

- 設置した河道湾曲部の流れと河床形状, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.155-167.
- 11) 富永晃宏・江崎一博: 台形断面開水路流の三次元乱流構造に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.381/II-7, pp.55-63, 1987.
 - 12) 石川忠晴・金舞範: 湾曲部の2次流に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.375/II-6, pp.143-149, 1986.
- (1997. 9. 30受付)