

複断面開水路高水敷に設けられた凹部の流れ構造

FLOW STRUCTURES IN CONCAVITY ZONES ARRANGED IN A FLOOD PLAIN OF COMPOUND OPEN CHANNELS

富永 晃宏¹・鄭 載勲²・阪巻 実佳³

Akihiro TOMINAGA, Jaehun JONG and Mika SAKAMAKI

¹正会員 工博 名古屋工業大学院教授 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²学生会員 名古屋工業大学大学院博士前期課程 社会工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³正会員 工修 常滑市役所 (〒479-8610 愛知県常滑市新開町4-1)

The excavation of the flood plain sometimes makes three-stage flow, which is composed of a main channel, a flood plain and a mid-level concavity land. In order to maintain this type of concavity in the flood plain, it is necessary to understand the flow structures. In this study, three-dimensional flow structures in concavity zones in compound open channels were investigated experimentally. The time-averaged flow structures in concavity zones were revealed by using PIV method. The shape of concavity and the relative level of the concavity bed was changed and investigated their effects on the flow structures in the concavity zones. Furthermore, sediment deposition tests was conducted in the same laboratory flume and the relation of flow structures to sediment transport process was investigated. In rectangular concavity case, the longitudinal scale of the transverse vortex becomes larger relative to the vertical vortex with an increase of the depth of the concavity. In trapezoidal concavity, a skew step produces inclined transverse vortex and generates different flow patterns from the normal step case. The bed level difference provides dissimilar flow structures and sediment deposition rate in the concavity zones.

Key Words : compound open channel, concavity, 3-D flow structure, sediment, PIV

1. 序論

近年、頻発する水害を受けて河道疎通能力増大のための河道掘削が各地で行われている。複断面河道では高水敷の一部を掘削して河積の拡大を図っているが、同時に生態環境に配慮して冠水頻度の高い河原やわんどの造成を行うことが試みられている。このような方法は、複断面河道の高水敷と低水路の間にさらに中水敷と呼ばれる構造を発生させていることになる。この場合は低水護岸を施さないことが多く、最終的に高水敷を保護するためには、何らかの中水敷維持対策が必要となる場合がある。揖斐川では高水敷の掘削により大正時代に設置されたケレップ水制が出現し、これを残した形でわんど環境が復元された¹⁾。わんど内は流速が小さいため多様な生物にとって格好の生息、繁殖、避難場所となっている一方、人工わんどには洪水時に土砂堆積によって埋没する可能性もある。そこで、わんどを長期的に維持するためには、高水時の土砂輸送に留意し、わんどおよびその周辺の河床の変化を予測

することが必要である。

一方、複断面河道の流れに関する研究は数多く、2次流構造や大規模平面渦構造などの3次元流れ構造が明らかにされている^{2,3)}。また、開水路側岸に凹部を設けてわんど流れの構造を検討した研究も多く見られるが^{4,5)}、これらのほとんどはわんど域を越流する流れのない2次元的な流れ場を対象としている。河原らは複断面開水路の高水敷部分に凹部を設けて凹部を越流する流れ構造の研究を行っているが^{6,7)}、3次元流れ構造の詳細にはまだ不明の点が多い。またこうした凹部を越流する流れの例として、越流型水制の水制域の流れ構造がある。著者らは越流型水制において水制高さ、水制設置角度、水制間隔をパラメータとしてPIV計測による実験的検討をしてきた。越流型水制では、水制域内流体と主流域の流れおよび水制上部の流れとのせん断による渦構造が存在し、両者の相互作用により複雑な3次元流れ構造を示すことが示された⁸⁾。また、越流型水制では水制間の領域における逆流が相対水制高の増大とともに強くなることを示した⁹⁾。

本研究は、掛斐川において行われた高水敷掘削工事によって形成された高水敷凹部の土砂堆積を予測する上で必要となる流れ構造を解明することを念頭に置いている。そこで、複断面流れにおいて高水敷に設けられた凹部上に洪水流が流れる場合の流れ構造を実験的に明らかにし、凹部への土砂堆積機構を検討することを目的としたものである。また、掘削の仕方により凹部の底面が低水路底面より高く設定されたケースについても着目したものである。また、凹部の平面形状として長方形と台形の2種類について検討した。

2. 実験方法

実験としては可視化 PIV 法による流速ベクトル計測と、砂堆積実験を行った。実験水路は、長さ4m、幅30cm、勾配1/500の亚克力製長方形断面水路を用いた。水路右岸に幅10cmの塩基板を設置し高さ4cmの高水敷を作り、一部区間を低くしたわんどを設けた。わんどの形状は図-1に示す通りであり、長方形形状をケースA、台形形状をケースCとし、凹部の底面高さが2cmの場合がシリーズ1、0cmの場合がシリーズ2とし、ケース名の後にこの番号を付けている。実験条件を表-1に示す。長方形では凹部の流下方向長さは15cmと凹部横断方向長さの1.5倍としている。これは越流のないケースにおいて凹部内に形成される循環渦が1つ安定に存在する条件としたものである¹⁰⁾。台形の場合は、段落ち段上がり部を角度45°とし、凹部の面積が長方形のケースと同じになるようにした。座標系は流下方向に x、横断方向に y、鉛直上向きに z としている。流量は0.0038m³/s とし、水深は低水路で6cm となるように設定した。

PIV 計測の流れの可視化には、比重1.02、粒径50micronのナイロン樹脂粒子を用い、厚さ約3mmのシート状にした500mW アルゴンレーザー光(Ion Laser Technology)を開水路鉛直縦断面(x-z 平面)と水平断面(x-y 平面)に照射した。レーザーシートの鉛直縦断面の照射位置は6断面(y=5,25,50,75,95,105mm)、水平断面

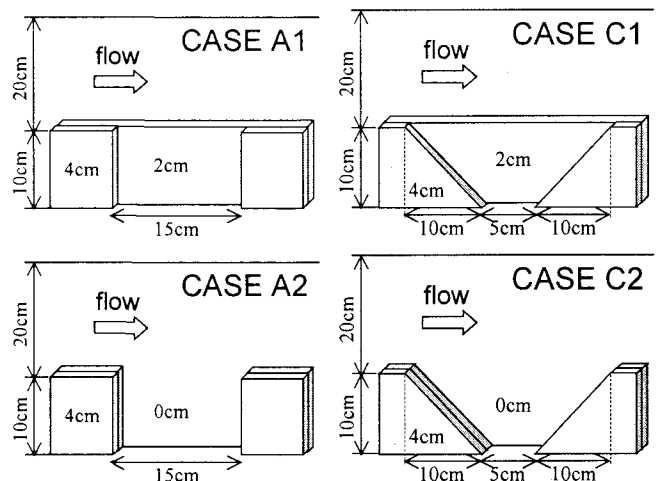


図-1 高水敷凹部の形状と高さ

の照射位置は6断面(z=5,15,25,35,45,55mm)を設定した。この可視化画像は高速ビデオカメラを用いて1/120フレーム/秒で撮影され、高速ビデオカメラのメモリーに録画された後、ハードディスクに640×240画素のTIFF ファイルとして記録された。画像計測にはVISIFLOW (AEA Technology) PIVシステムを用い、相互相関法により画像解析した。相関法では検査エリアを32×32画素、オーバーラップは75%とし、高速ビデオカメラで連続撮影可能な計1963枚、約16秒間平均値の流速ベクトルデータを得た後、統計処理した。

砂堆積実験は、固定床において平均粒径0.135mmの珪砂を用い、貯水槽に0.250m³の水と3kgの砂を入れ攪拌した状態でポンプにより循環させた。この実験は、掛斐川においてケレップ水制背後の土砂堆積が進行していることから、高水敷を掘削したわんどが土砂堆積によって埋没する可能性を検討しようとしたものである。実験条件は、砂をトレーサーとして循環させて局所的堆積状況を調べ、流れとの関係を検討しようとしたもので、平衡な流砂輸送を対象としたものではない。PIV 実験と同じ開水路を用いているが、高水敷上で流砂を発生させるために、流量を0.0065m³/s とした。この砂堆積実験はケース名の後に S を付して表-1に示している。これにより低水路及び高水敷上に河床波を伴

表-1 実験条件

Case	Height of concavity bed d(m)	Main-channel Flow depth H(m)	Flood-plain Flow depth h(m)	Discharge Q(m ³ /s)	Mean velocity U _m (m/s)	Reynolds Number Re(=U _m H/ν)
A1, C1	0.02	0.06	0.02	0.0038	0.27	1.62 × 10 ⁴
A2, C2	0.0					
A1S, C1S	0.02	0.06	0.02	0.0065	0.46	2.76 × 10 ⁴
A2S, C2S	0.0					

う掃流砂と浮遊砂が発生しているが、粒径が浮遊砂とするには相対的に大きかったため浮遊砂濃度はきわめて小さく計測できなかった。低水路にトラップを設け低水路掃流砂量を計測するとともに、凹部開口部を遮蔽して砂の凹部堆積量から高水敷掃流砂量を計測した。高水敷掃流砂量は低水路掃流砂量 ($=0.0167\text{cm}^2/\text{s}$) の約10.4%であった。また、凹部の砂堆積速度は、30分後に凹部の砂堆積量を測定して計測した。砂堆積が平衡状態に達した後、2成分I型電磁流速計（東京計測製）を用いて主流方向流速 u と横断方向流速 v を計測した。サンプリング周波数100Hzで20秒間計測したデータについて解析した。

3. 実験結果および考察

3. 1 砂堆積実験と平均流速分布

図-2に30分後の凹部内の砂堆積状況の写真を示す。写真には堆積域の外縁を破線で囲って示している。高水敷上の掃流砂が主に堆積するため、凹部の上流部から堆積が始まり、時間とともに下流側へ伸びていく。長方形では、低水路から少し凹部に入ったところが下流側へ長く伸びている。凹部が深いケース A2の場合、堆積量は多くなり、下流側へより堆積域が広がっている。低水路側の非堆積領域が広がり凹部下流側の非堆積域が縮小している。台形の場合は凹部高さによって傾向が異なり、ケース C1では凹部の低水路側の広い範囲で堆積が見られず、側壁側に堆積している。ケース C2では長方形のケース A2と似た傾向を示し、台形形状に沿った堆積形状を示している。この堆積速度について、単位幅の堆積速度を高水敷掃流砂量で除した値を、

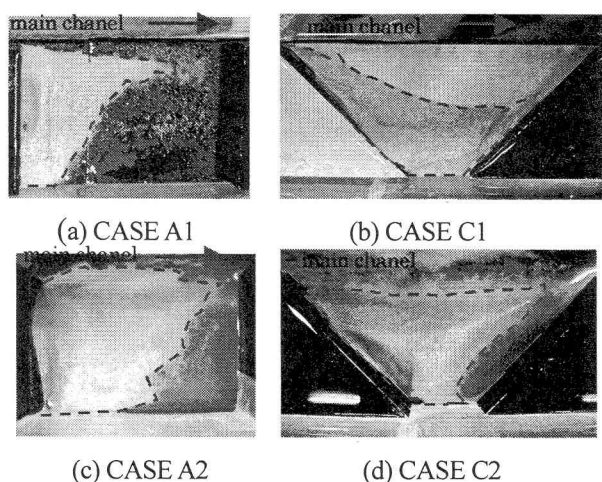


図-2 凹部内の砂堆積状況

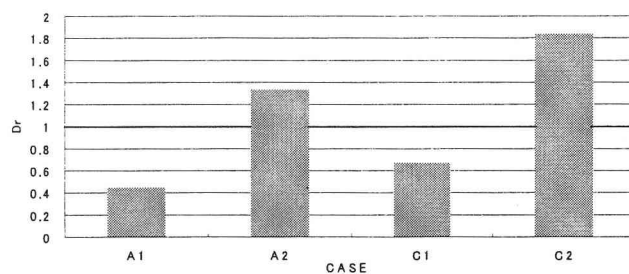


図-3 堆積率の比較

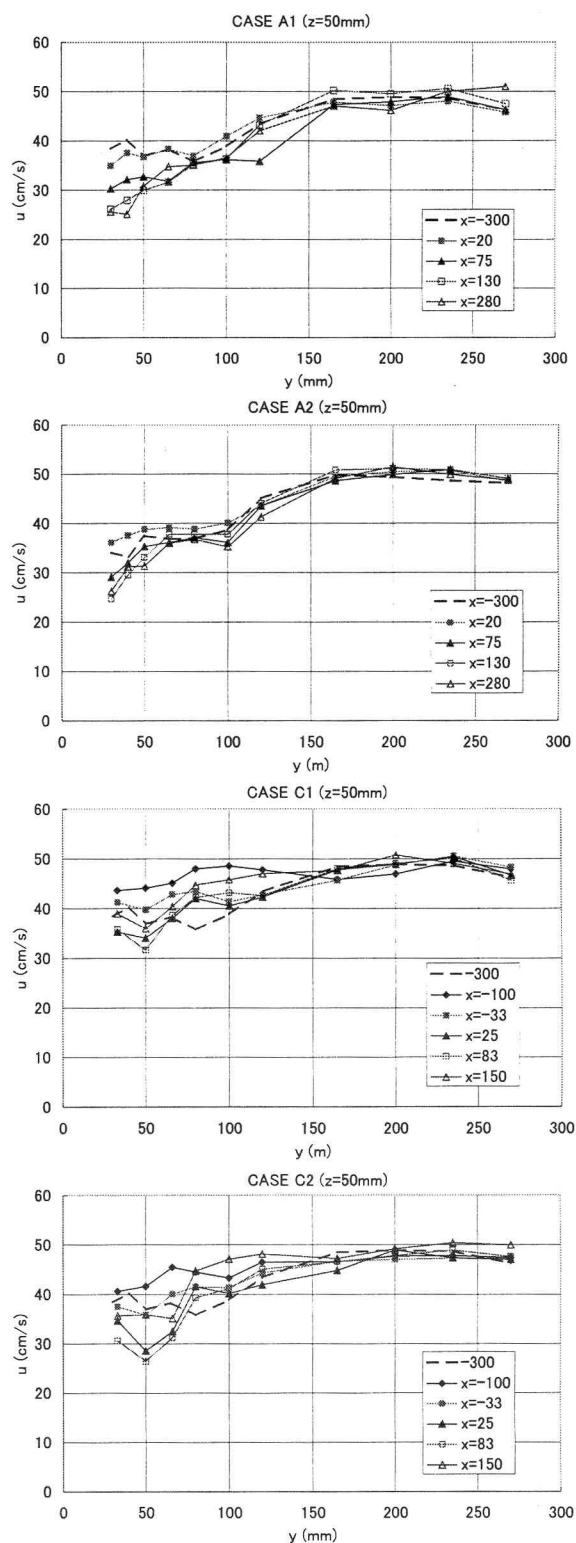


図-4 主流速横断分布の比較 ($z=50\text{mm}$)

堆積率 Dr として計算した。これを図-3に示す。凹部底面が低水路より高いケース（シリーズ1）では、この値が1以下となる。すなわちこれは、高水敷掃流砂よりも堆積量が少ないことを示し、砂は凹部から低水路へ持ち去られていることを意味している。凹部底面が低水路と同じケース（シリーズ2）では、これが1より大きく、高水敷掃流砂量よりも堆積量が大きくなる。これは低水路から凹部内に砂が運び込まれていることを意味する。また、台形の凹部の方が長方形より堆積率が大きいことが分かる。

次に電磁流速計で計測した、高水敷高さより10mm上の高さ $z=50\text{mm}$ における平均主流速の横断分布を流下方向位置別に示したのが図-4である。長方形では凹部上流端を $x=0$ としているが、台形では凹部側壁における上流端を $x=0$ としている。長方形と台形で凹部上の流速分布の傾向が大きく異なることが見て取れる。凹部の深さによる違いはあまり顕著ではない。凹部上から境界部にかけて、長方形では上流部の複断面領域の分布から減少するのに対し、台形では凹部の上流端部および下流端部でむしろ増大している。台形ではまた、凹部の横断方向中間位置 ($y=50\text{mm}$) の段落ち部 ($x=25\text{mm}$) および段上がり部 ($x=83\text{mm}$) 付近において流速の減少が見られる。凹部深さの違いでは、長方形では凹部の低水路側の流速が水深の大きい A2の方が

大きく、台形では C2の方が凹部中間部の減速が大きい。全体として、長方形では低水路と凹部の境界の横断方向流速勾配が大きいのに対し、台形ではそれが小さく、低水路内が一様な流速分布になっている。

3. 2 PIV 計測による流れの3次元構造

長方形凹部のケース A1 の時間平均流れ構造について、図-5に水平面における流速ベクトルを、図-6に鉛直面における流速ベクトルを示す。流れは3次元性が強いが、ここでは典型的な断面における流れ構造のパターンを示し考察する。 $z=25\text{mm}$ の凹部底面付近では、鉛直方向の軸を持つ鉛直渦が上流側に存在し、凹部上流側壁側の領域で逆流が見られる。凹部開口部の下流側から主流が湾曲して入り込み、下流側より大きく低水路側に曲げられながら流出する。凹部下流側では目立った流速分布が見られない。 $z=35\text{mm}$ の高水敷高さより5mm下の水平面では、凹部上流先端から下流根元を結ぶ対角線より下流側で順流がみられ、凹部下流壁面付近で側壁側に曲げられている。この対角線より上流側では流速が小さい。

鉛直断面を見ると、 $y=5\text{mm}$ および $y=50\text{mm}$ において、横断方向の軸を持つ横断渦が上流側半分に見られる。この段落ち流れに発生するはく離渦の再付着点は凹部深さの4~5倍程度である。この横断渦が底面近くで見

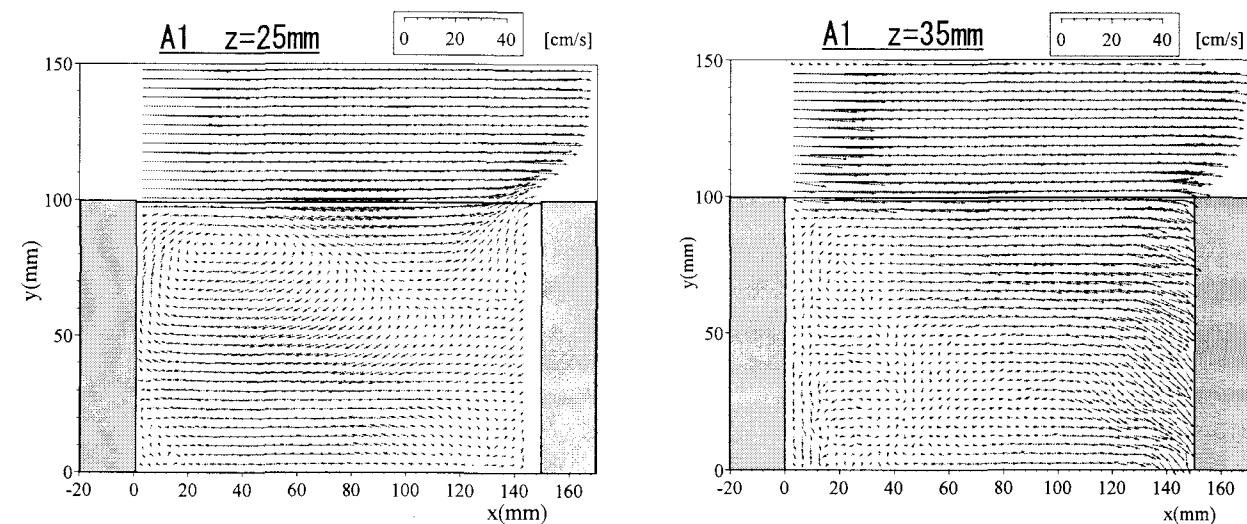


図-5 長方形凹部の水平面流速ベクトル (ケース A1 $z=25\text{mm}$, 35mm)

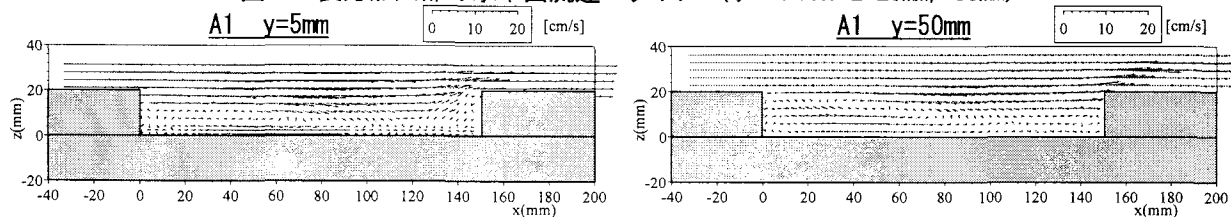


図-6 長方形凹部の鉛直面流速ベクトル (ケース A1 $y=5\text{mm}$, 50mm)

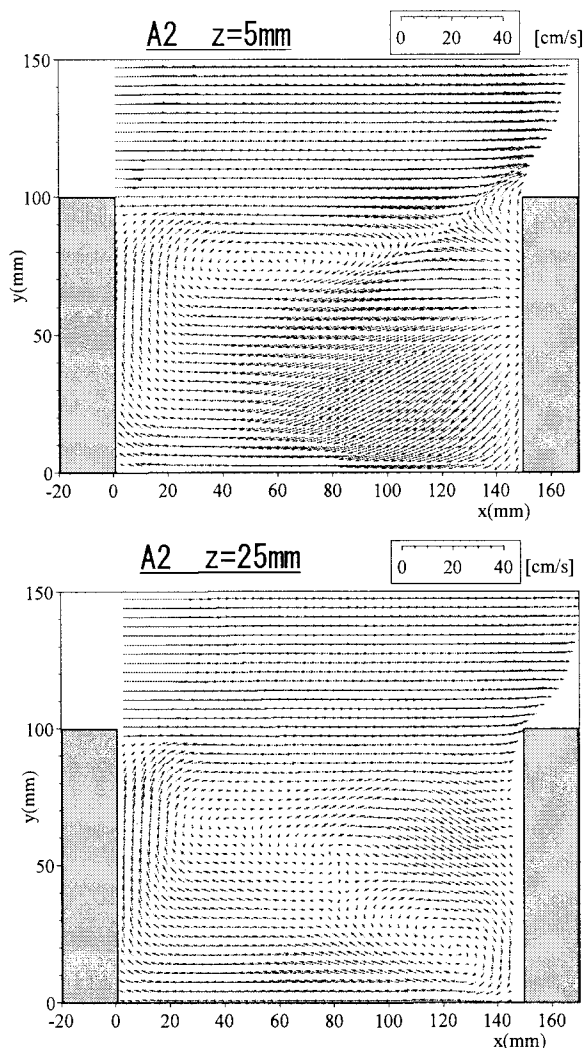


図-7 長方形凹部の水平面流速ベクトル
(ケース A2 $z=5\text{mm}$, $z=25\text{mm}$, 35mm)

られた逆流を形成している。また、下流側段上がり部で上昇流が発生しているのが認められる。

このように、このケースでは凹部上流域で鉛直渦が比較的小さく、横断渦が側壁側で支配的となっているといえる。凹部下流側では明確な渦構造はみられない。

次に、ケース A2 の水平面ベクトルを図-7 に、鉛直面ベクトルを図-8 に示す。 $z=5\text{mm}$ の底面近傍では、ケース A1 と比べて、鉛直渦が流下方向に大きく発達し、低水路側からの主流の入り込みが少なくなる。凹部の上流側壁側と下流先端部を結ぶ対角線より下流側においての広い範囲で逆流が見られ、 $y<50\text{mm}$ では側壁に向かう成分が大きくなっている。下流の段上がり先端付近では逆流から大きく主流側に偏向して流出している。 $z=25\text{mm}$ では、凹部の下流コーナーに新たに鉛直渦構造が現れ、凹部全体に及ぶ大きな鉛直渦構造の形成がみられる。 $z=35\text{mm}$ では、凹部上流先端から下流

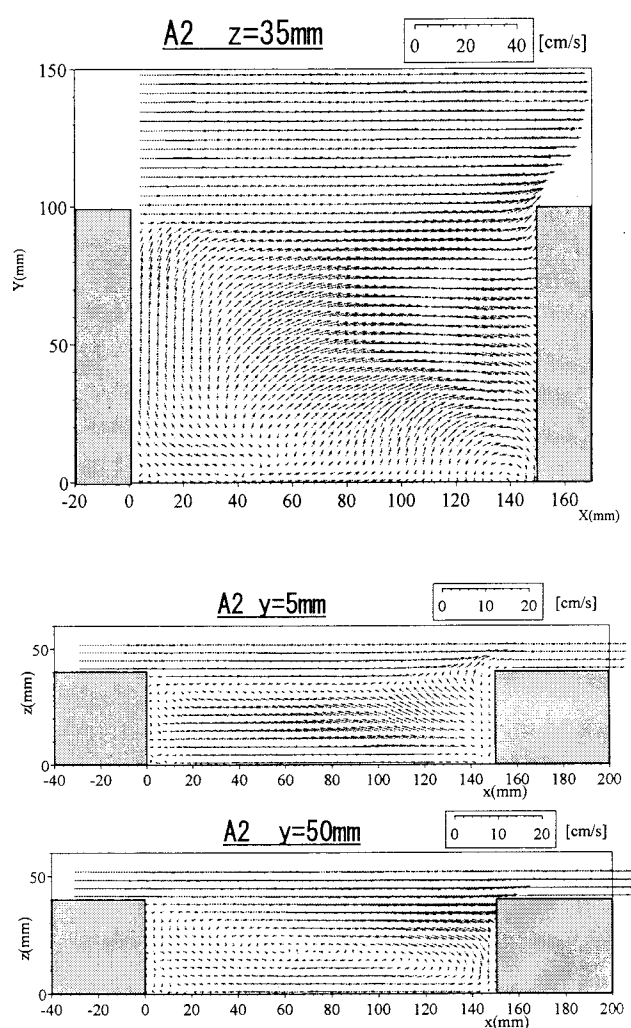


図-8 長方形凹部の鉛直面流速ベクトル
(ケース A2 $y=5\text{mm}$, 50mm , 75mm)

根元を結ぶ対角線より下流側で順流がみられ、これより上流側では低水路側へ向かう横断方向流れが対角線に沿って主流方向に曲げられている。

鉛直面ベクトルの $y=5\text{mm}$ では、全体に逆流が現れており、下流側では上昇流が卓越している。これは凹部全体に及ぶ鉛直渦構造の現れと考えられる。 $y=50\text{mm}$ では、凹部全体に及ぶ横断渦構造が認められる。底面では $z=5\text{mm}$ の水平面でみられた逆流と対応する。下流側では順流が凹部領域内に入り込み、下流側の壁に沿って下降流が発生している。

このことは、段落ち流れに発生するはく離渦の再付着点が凹部深さの 4~5 倍であることを考慮すると、凹部全体が横断渦に支配されることを示している。しかし、底面近傍では凹部上流側に鉛直渦が同時に発生しており、横断渦構造の流速が小さくなる中間高さ付近の平面構造は大きな鉛直渦構造を呈する。このように横断渦のスケールの増大が全体の 3 次元流れ構造を変

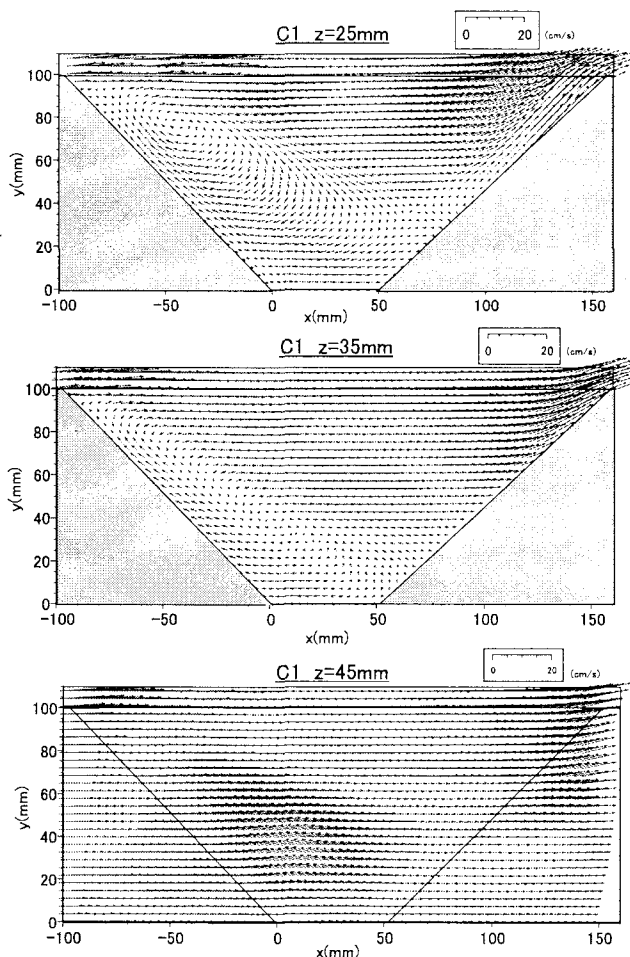


図-9 台形凹部の水平面流速ベクトル
(ケース C1 $z=25\text{mm}$, 35mm , 45mm)

化させているといえる。一方、凹部底面高さの違いの効果としては、横断方向の流速勾配が異なる点がある程度影響しているものと考えられる。しかし、凹部領域が低水路を含む複断面形状であることの3次元効果については顕著な差異が認められなかった。図-2に示した砂堆積形状との関係では、横断渦の大きさが堆積形状に関係していると推測される。凹部底面高さが高い場合には低水路からの掃流砂の流入がなく、凹部内の渦構造と境界部の主流の湾曲が砂をむしろ凹部内から低水路内へ輸送したのと考えられる。凹部底面が低水路と同一の場合、低水路からの掃流砂の輸送が大きくなったものと考えられる。

次に、台形断面凹部のケースについて検討する。ケース C1 の水平断面流速ベクトルを図-9 に鉛直断面流速ベクトルを図-10 に示す。凹部底面近傍の $z=25\text{mm}$ においても、凹部の奥深くまで主流成分が卓越しており、この流れが下流側の斜め段上がり部にぶつかり、これに沿って低水路側への強い流れを引き起こしている。一方、上流側の斜め段落ち部に沿うように鉛直渦

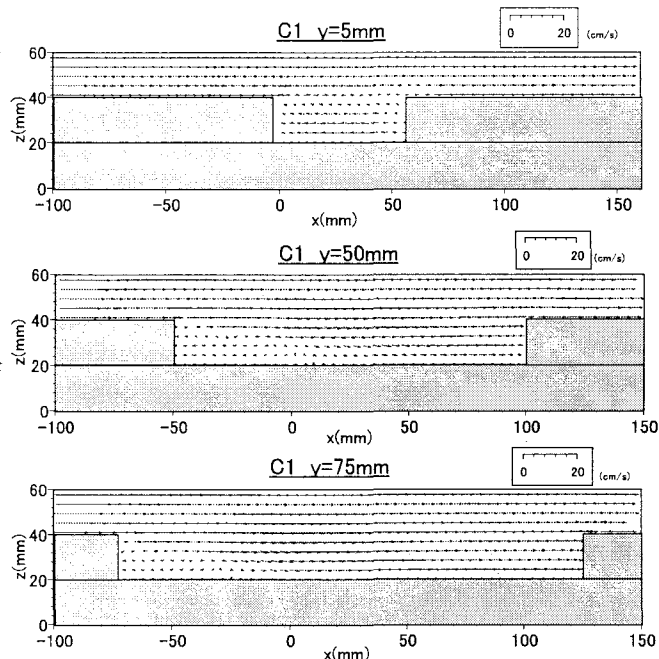


図-10 台形凹部の鉛直面流速ベクトル
(ケース C1 $y=5\text{mm}$, 50mm , 75mm)

が形成されている。凹部の側壁から上流側にかけて側壁に沿う逆流が発生している。 $z=35\text{mm}$ では、上流側段落ち部に沿って低水路側へ向かう流れが存在し、この斜めエッジより $3\sim 4\text{cm}$ 離れた位置から主流方向の順流が発生している。この流れは下流側段上がり先端付近で低水路側へ曲げられる。高水敷高さより 5mm 上の $z=45\text{mm}$ 断面では、長方形の場合ほとんど横断方向成分が現れなかったが、台形では凹部の上流側先端の低水路側、上流斜め段落ち部から少し下流の $15\text{mm} < y < 70\text{mm}$ の範囲および下流側段上がりの低水路側と $y > 50\text{mm}$ の段上がり部の少し下流で低水路側への横断方向流れが現れている。

次に鉛直断面では、 $y=5\text{mm}$ の側壁付近では全体に逆流が見られ、 $y=50\text{mm}$ では、再付着点距離が約 70mm と凹部深さの $3\sim 4$ 倍程度となり、長方形の場合に比べて短くなっている。これより下流では順流が現れ、下流端においても上昇流は見られない。 $y=75\text{mm}$ においても再付着点距離はほとんど変化せず、大部分で順流となっている。

このように台形凹部では上流の斜め段落ちに沿う斜め横断渦の形成が支配的で、この渦より下流の底面付近では低水路からの入り込みが大きく、上層部では低水路へ向かう偏流が現れている。これは斜め段落ちによる縦渦構造の形成を示唆しているものと考えられる。また、このケースでは横断渦の流下方向スケールすなわち凹部段落ちによる再付着点距離が直角に比べて短

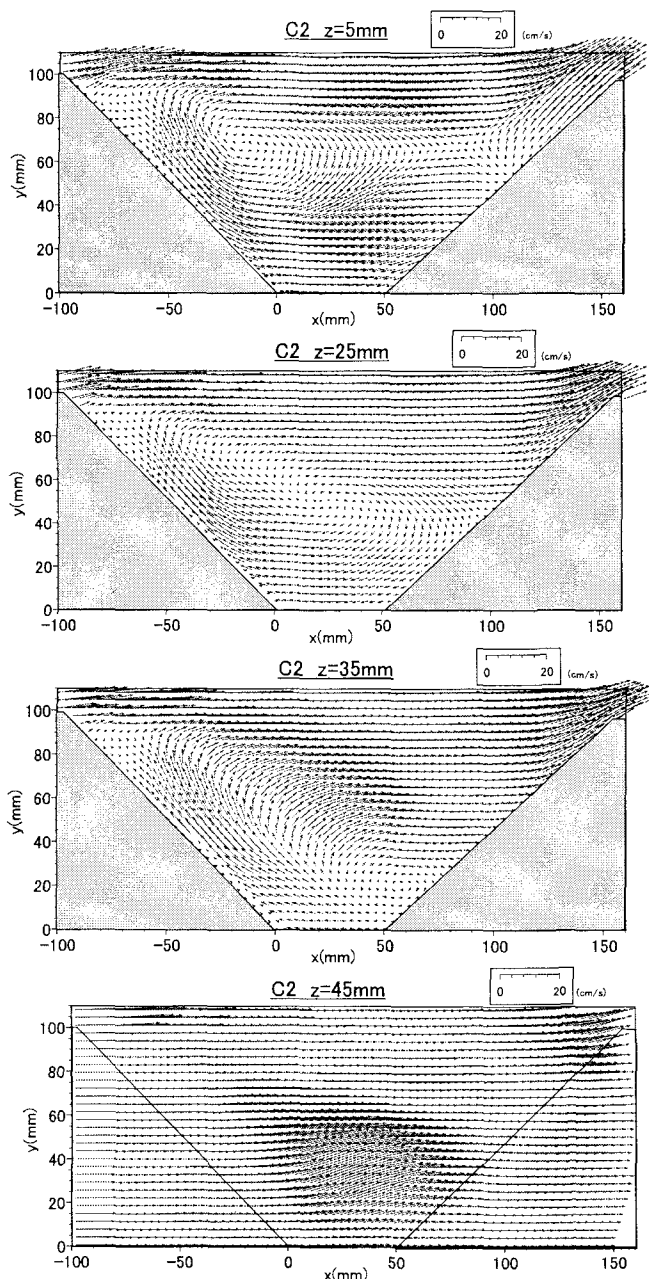


図-11 台形凹部の水平面流速ベクトル
(ケース C2 $z=5\text{mm}$, 25mm , 35mm , 45mm)

なることがわかった。

図-11 にケース C2 の水平断面流速ベクトル、図-12 に鉛直断面流速ベクトルを示す。このケースでは底面付近の $z=5\text{mm}$ において、明確な鉛直渦が認められる。長方形のケース A2 と比べると、凹部内への主流の入り込みが大きく渦中心は凹部内側に現れる。逆流域は $y<50\text{mm}$ の側壁側に現れ、これより低水路側では斜め方向の低水路側へ向かう順流となる。凹部内に入り込んだ主流方向の流れは、この下流側段上がり部に沿う流れによって強く低水路側へ押し出される。また、上流側の段落ち部に沿って強い斜め方向の逆流が現れて

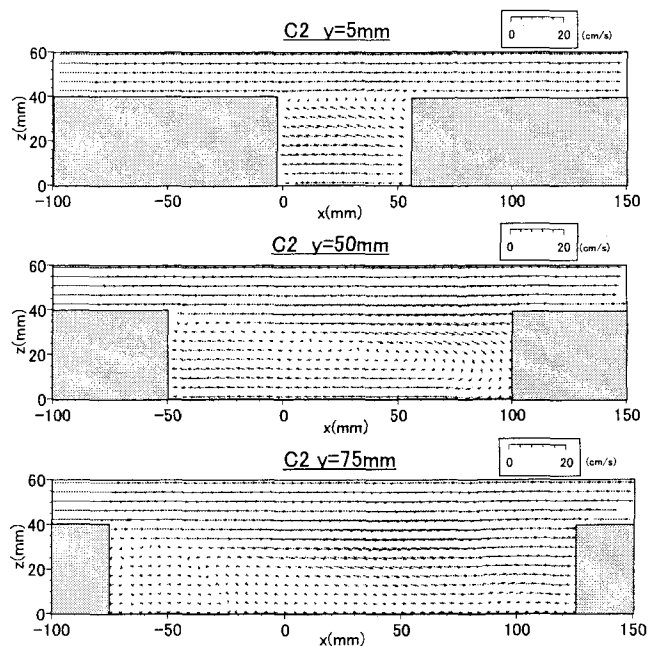


図-12 台形凹部の鉛直面流速ベクトル
(ケース C2 $y=5\text{mm}$, 50mm , 75mm)

いる。上流部の低水路境界部において低水路側へ向かう偏流が発生しており、凹部上流壁に沿う流れは上流端まで達せず手前で直角に低水路向きとなっている。 $z=25\text{mm}$ では、底面で見られた逆流域が縮小し、主流の入り込みが凹部下流にまで達し、凹部全体に及ぶ鉛直渦が形成されている。 $z=35\text{mm}$ では、上流段落ち部に沿って斜め逆流が存在しており、ここから $6\sim 7\text{cm}$ 下流から主流方向成分が卓越する。 $z=45\text{mm}$ では、ケース C1 と同様、横断方向成分の大きい領域が認められる。凹部開口部の上流端及び下流端付近は同様であるが、凹部側壁側ではこの領域が下流へ移動し面積は拡大している。

鉛直断面を見ると、 $y=5\text{mm}$ の側壁近傍では斜め後方に向かって上昇流を伴う逆流が支配的である。 $y=50\text{mm}$ では、凹部内全体に及ぶ横断渦が発生している。このケースでは、再付着点距離が直角の場合に比べて短くなっているものの、この位置ではほぼ下流端に達する距離である。したがって、下流段上がり部の壁に沿って下降流が見られる。 $y=75\text{mm}$ では、やはり再付着点位置が $x=120\text{mm}$ 付近にあり、凹部深さの $3\sim 4$ 倍程度であることがわかる。この点と上流側エッジを結ぶ線より下流側は順流となっている。

このように台形凹部についても、凹部深さが深くなることにより、斜め段落ちに沿う斜め横断渦構造の流下方向スケールが増大しているが、その再付着点距離が短いために、長方形のように凹部全体を占めるまでには至らない。このことが、凹部内部まで主流域が入

り込む結果をもたらし、逆流域を狭めている。しかし、底面近傍から半水深付近までは鉛直渦構造が明確に認められる。特に上流側段落ち部に沿う逆流はケース C1 に比べて大きくなっている。

台形凹部においては、斜め段落ちに沿って斜め方向の横断渦が発生する点と、下流側の段上がりに沿って低水路側へ流出する流れが発生する点が全体の構造を長方形と異なるものになっている。また、凹部開口部の上下流端や凹部奥において高水敷より上の流れに対しても影響を及ぼしている。一方、凹部底面高さの違いの効果としては、長方形と同様、明確な差異を抽出することができなかった。図-2 に示した砂堆積形状との関係をみると、ケース C1 では明らかに、 $z=25\text{mm}$ における流速ベクトルとの関係が認められる。すなわち、低水路からの主流の入り込みと下流側からの流出によって、凹部低水路側の砂が低水路側へ流出しており、堆積は上流から側壁側に押しやられている。ケース C2 についても、 $z=5\text{mm}$ の流速ベクトルとの対応関係が明白に見て取れる。低水路側でやや主流の入り込みが大きく、下流側の側壁側に逆流域があり、壁に沿って逆流が発生している。したがって、砂の堆積域を取り囲むように流れが存在していることが分かる。

最後に、流速の各方向成分の代表的な位置における分布について、各ケース間の比較を行う。図-13 に凹部中間断面における底面近傍の主流速 U の横断分布を示す。凹部底面から 5mm の高さであるため低水路内では高さが異なる。凹部底面高さの違いについては、底面が低いケースの方が凹部内の流速は遅くなっており、逆流の範囲も大きい。形状については、凹部内の流速は台形の方が長方形より大きく、横断方向流速勾配は小さい。次に図-14 は、凹部開口部付近の底面近傍における横断方向流速 V の縦断分布である。凹部内外の質量輸送に関する指標となる値である。まず、台形の方が下流側の正の値が著しく大きいことがわかる。台形は長方形の 2 倍以上の大きさであり、形状が同じであれば底面高さによる違いはほとんどない。また、台形では上流側においても若干大きな値を示す。凹部底面高さの違いを見ると、底面が低い場合に負の領域が下流側へ移動し、同時に正の領域も下流の狭い範囲になる。台形では特に底面が高いケース C1 では、下流側の広い範囲で正の値をとっている。図-15 は、凹部の横断方向の中間断面のちょうど高水敷高さを超えた位置における鉛直方向流速 W の縦断分布である。鉛直方向流速は横断方向流速に比べてかなり小さい。

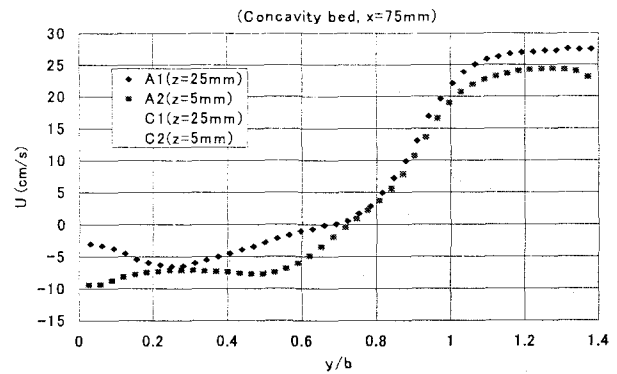


図-13 底面近傍の主流速横断分布（凹部中間断面）

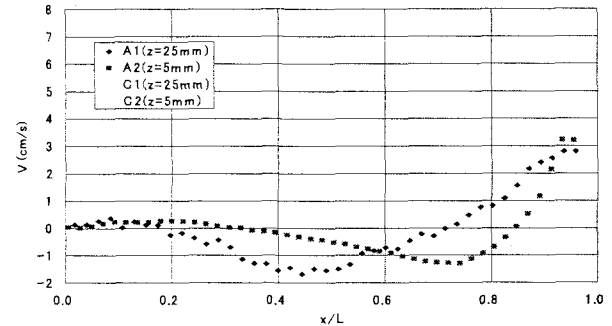


図-14 開口部における横断方向流速縦断分布（底面）

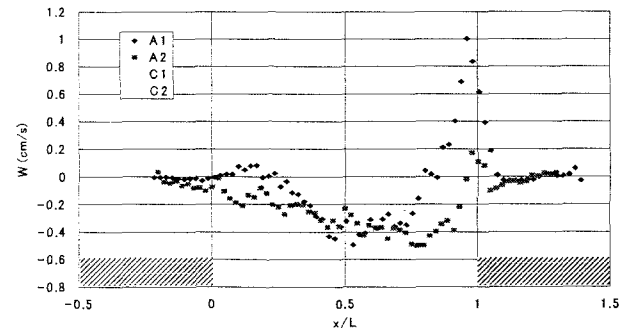


図-15 高水敷高さにおける鉛直方向流速縦断分布（凹部中間断面）

長方形では、凹部中央付近で負の値、下流端付近で正の値を取る。特にケース A1 では大きな正の値をとる。底面高さは低いケースの方が負の領域が下流側へ拡大している。台形では下流端で正の値はほとんど見られない。このような流速分布は前述の流速ベクトルから得られた流れ構造の特徴をより定量的に示している。

4. 結論

複断面河道の高水敷を掘削して作られる凹部内の流れ構造と砂堆積について、凹部形状と底面比高に着目して実験的に検討した。凹部を越流する流れによって凹部内にはく離に伴う横断渦が形成される。一方、低水路流れによって、凹部開口部付近に鉛直渦が発生す

る。これら2つの渦構造は越流型水制の水制域の流れと同様に相互作用し合って3次元的な流れ場を形成している。横断渦は凹部深さの増大によって流下方向スケールが増大する。このことが凹部全体の3次元構造に変化をもたらす。台形の場合は、斜め方向の横断渦が発生し、またこのスケールは長方形の場合よりも小さいこと、下流の斜めの壁によって低水路方向の流出が誘発されることなどから長方形とは異なる構造を示す。これらの結果、凹部内への砂堆積形状の違いがある程度説明できることがわかった。

参考文献

- 1) 篠田藍子・阪巻実佳・富永晃宏：高水敷掘削型わんどにおける土砂堆積機構について，土木学会中部支部平成16年度研究発表会講演概要集，II-22，pp.161-162，2005.
- 2) 池田駿介，村山，空閑：複断面開水路水平渦の安定性とその3次元構造，土木学会論文集，No.509/II-30，pp.131-142，1995.
- 3) Tominaga, A. and Nezu, I., "Turbulent structure in compound open channel flows", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 117(1), pp.21-41, 1991.
- 4) 榑津家久，鬼束幸樹，池谷和哉，高橋俊介：わんど形状が河川に及ぼす影響に関する水理学的研究，応用力学論文集，Vol.3，pp.813-820，2000.
- 5) 富永晃宏，谷川幸男，久田陽久：人工わんどの水交換機構とその制御に関する研究，水工学論文集，46，pp.571-576，2002.
- 6) 河原能久，佐藤研一郎：高水時における人工わんど周辺の流れの3次元特性，第3回環境流体シンポジウム講演論文集，pp.321-322，1998.
- 7) 中川研造，河原能久，玉井信行：ワンド内流れの水理特性に関する実験的研究，水工学論文集，39，pp.595-600，1995.
- 8) 富永晃宏，中野義郎，藤田享良：越流型水制域内の流れ構造の可視化解析，水工学論文集，44，pp.1041-1046，2000.
- 9) 富永晃宏・中野義郎・井嶋康二・長坂剛：越流型水制域内の流れ構造に及ぼす相対水制高の影響，応用力学論文集，vol.3，pp.805-812，2000.
- 10) 富永晃宏・谷川幸男・久田陽久：人工わんどの水交換機構とその制御に関する研究，水工学論文集，46，pp.571-576，2002.

(2005年4月15日 受付)