捷水路が設置された湾曲河道区間の水理特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE FLOW CHARACTERISTICS IN A BENDING RIVER SECTION WITH A CUT-OFF CHANNEL

市山 誠¹・石川忠晴²

Makoto ICHIYAMA, Tadaharu ISHIKAWA

¹正会員 工修 東京工業大学 総理工環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

²フェロー会員 工博 東京工業大学 総理工環境理工学創造専攻 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

This study investigated the basic hydraulic characteristics of a bending river section with a cut-off channel by flume experiment. Contents of measurements included the longitudinal profile of water surface, flow velocity in cross sections by an electromagnetic current meter, and the surface flow velocity by using PIV methods. In addition, tendency of bed sediment motion was observed by bottom tracer experiment. Installation of cut-off channel resulted in a wide dead water area at the side of divergence in the main stream and low-velocity area at the center of the confluence. The point of surface flow which attacked the bank moved upstream in the main stream of distribution. Then the secondary flow became stronger, and the direction of bottom flow was strongly skewed in a transverse direction. Moreover, the bottom tracers moved and accumulated rapidly from the outer bank towards the inner bank at the curve of distributaries downstream. It suggested the occurrence of scour and sedimentation.

Key Words : cut-off channel, particle image velocimetry, hydraulic experiment, secondary flow, observation of the bottom tracer

1. はじめに

洪水疎通能力が不足する河道屈曲部において、地形条件等の影響で河積拡大が困難な場合、屈曲部の上下流をつなぐ捷水路を建設して洪水の一部をバイパスすることがある。その場合、急角度の分流と合流が接近して存在する。このような治水施設は、全国に比較的多く分布している¹⁾。

捷水路の建設にあたっては、分流量、水位低下量および流況を把握するために、計画段階で模型実験が行われていることが多い^{2), 3), 4)}。また事後評価としては、山口、品川らが石狩川捷水路による捷水路工事の経緯と洪水ハイドログラフの変化を検討した例^{5), 6)}がある。筆者らは、川内川押込分水路の実施設案の検討に対して使用された大型実験模型により、流れの非定常性を調べている⁷⁾。

しかし、これらはいずれも個々の地形条件における検討であるため、その流況には各河川の固有条件がもたら

す効果と、分合流の基本的性質が複合して現れていると考えられる。例えば模型実験によって把握される水衝りの特性には、捷水路設置による平面形状変化と、分合流付近の河道の縦断形状と横断形状の効果が複合して現れていると考えられる。このような点を明確にしていくには、単純な断面形状において分合流の基本的性質を把握することが有効であると考えられる。しかし、これまで単独の分流や合流に関する研究^{8), 9)}は行われているが、分合流がセットとして存在する捷水路を有する河道湾曲部の基礎的な研究は行われていない。

そこで本研究では、矩形断面の湾曲水路に捷水路を設置して分合流水路を形成し、捷水路設置前との流況の比較を行った。検討の焦点は、死水域の形成と河岸水衝り部の変化、およびそれらに伴う横断方向土砂輸送の変化である。そのため、電磁流速計による断面内流速測定のために、PIV解析による水面流況測定およびビデオ撮影による底面トレーサの移動軌跡の計測を行い、それらを総合的に考察した。

図-1 実験水路の概要

1表-1 実験条件

	水路条件	流量 (ℓ/s)	下流端	
			水深(cm)	フルード数
Case-1	本川+捷水路	19.5	11.3	0.33
Case-2	本川のみ	19.5	11.3	0.33
Case-3	本川のみ	11.0	10.5	0.21

2. 実験の概要

(1) 実験水路の概要

実験水路の平面形と代表断面形を図-1に示す。左側が上流である。主水路は上流側と下流側に各5.0m、3.0mの直線区間があり、その間に曲率半径1.0mの円弧を組み合わせた約6.0mの湾曲区間がある。断面形はどちらも矩形であり、水路床は全て水平である。水路幅は直線部で0.5m、湾曲部で0.35mである。つまり湾曲部の疎通能力は直線部に比較して小さい。捷水路は長さ4.0m、水路幅0.3mの矩形断面とし、水路中心軸は本川直線部と共通している。

なお水路底面は合板床で、側壁はベニヤ製の直立壁である。どちらも黒色でペンキ塗装されている。流量は上流端のバルブで調整され、三角堰で計測される。また下流端水深は起伏堰で調整される。

(2) 実験条件

実験条件を表-1に示す。Case-1は捷水路を設置した場合、Case-2とCase-3は本川のみの場合である。前述した計測を有効に行うために、予備実験を行い、水面の揺動と流速範囲を調べ、Case-1とCase-2では流量を19.5 ℓ/s 、下流端水深を11.3cmとした。Case-3の流量は、Case-1での流速計測から推定した本川湾曲部流量と等しい値(11.0 ℓ/s)とした。また下流端水深は、Case-1で推定された粗度係数($n=0.017$)と流量比から設定した。なお表-1のフルード数は下流端水深に対して計算したもので、流れは全区間で常流である。

現実の状況に対比させて言えば、“現河道(捷水路建設前)”の河道疎通能力が11.0 ℓ/s であり、新たな計画河道疎通能力19.5 ℓ/s を確保するために捷水路を建設するという設定である。以下、捷水路なしのCase-2、Case-3を便宜的に現河道、捷水路設置後のCase-1を新河道と

図-2 断面流速計測測線

図-3 断面内の流速計測位置

いい、11.0 ℓ/s を現状流量、19.5 ℓ/s を計画流量という。

(3) 計測手法

(a) 水面の縦断形計測

予備実験において、サーボ式水位計を用いて数点の時系列計測を行ったところ、水位の変動はほとんど認められなかった。そこでポイントゲージを用いることとした。計測位置は、図-1に●で示すように水路軸線上に置き、本川で1.0m間隔、捷水路で0.5mの間隔とした。

(b) 断面内流速分布の計測

図-2に示す23断面において、主流速(u_x)および横断方向流速(u_y)の断面内分布を計測した。計測には2元電磁流速計(KENEC社製室内実験用I型：以下、流速計)を用いた。センサー部は直径が約4.0mm、長さ約10mmの円筒形である。側壁や水路床の影響を考慮し、図-3に示す位置で計測した。

横断方向には5側線とし、左右端測線は側壁から5cmの位置としてその内側を4等分した。なお主水路直線部と湾曲部および捷水路で水路幅 b は異なっている。鉛直方向には、水路床から1.0cm、5.0cm、10.0cmの3層を標準とした。ただしCase-3では最上端の計測位置が水面に接近しセンサー周辺に気泡が発生したため、水路床から9cmの位置とした。サンプリング間隔は10Hzとし、1計測あたり30秒間のデータを収集した。

図-4 PIV解析格子の配置状況

(c) 水面流速分布の計測

水面流速分布の計測にはPIV解析を用いた。トレーサには、5mmと15mm目のふるいの間に残ったおが屑を使用した。当初は計測対象領域の上流から投入したが、後述するように、流れの収束部にトレーサが集中して付着する傾向が見られたので、投入位置は複数箇所とした。

図-1に◆印で示した場所の床から5mの位置にデジタルビデオカメラ(SONY製 HDR-CX720VX3)を設置し撮影した。有効画素数は1440×1080ピクセル、撮影時間間隔は1/30秒である。画像は斜め画像であるため、画角内に設置した標定版(90cm×90cm)を基準として正射影に変換し、二値化処理によりトレーサを明確化した後にPIV解析を行った。正射影後の分流部のPIV解析格子を図-4に示す。解析格子サイズは2.5cm×2.5cmである。

3. 分流に伴う流れの変化

(1) 水位縦断面形

各ケースの水位縦断面形を図-5に示す。横軸は本川に沿った縦断距離で、矢印(a)は分流点、矢印(b)は合流点を示し、その間が湾曲部となっている。また図中の赤いスケールは捷水路に沿った距離(Case-1のみ)である。

まずCase-3(現河道+現状流量；緑)についてみる。流れが常流であるため、水路幅の狭い湾曲部で水位が低下する。しかし、上流部と下流部の直線区間における水面形は同一線上にある。一方Case-2(現河道+計画流量；ピンク)においては、湾曲部での水位低下が大きくなっている。したがって流速は増大するので水頭損失が大きくなるため、上流側の堰上げが著しくなる。

Case1(新河道+計画流量)については、本川水位を黒、捷水路水位を赤で示しているが、どちらの水位も滑らかに変化している。また分流点(a)から合流点(b)までは水面がわずかに上昇しているが、これは本川と捷水路の合

図-5 本川及び捷水路の水位縦断面図

図-6 水面近傍の平面流速分布

計幅が上下流の直線部より広がっているからである。

(2) 電磁流速計による表層流況

電磁流速計によって計測された水面近傍の流速ベクトルを図-6(a)～(c)に示す。色が流速の絶対値を示し、水路外の数列は断面番号を示している。以下の傾向が全ケースにみられる。すなわち、直線部から湾曲部に入ると主流が右岸から左岸に移行し、そのまま湾曲部内岸(左岸)に沿って流れ、湾曲部出口に近い変曲点から右岸に移行する。

しかし、その程度は捷水路のあるCase-1において特に顕著である。①の矢印で示す領域で死水域が形成され、主流は急角度で左岸に向かい、断面-5付近に水衝部が生

図-7 捷水路の有無による流速差ベクトル
水面付近の流速 (Case1-Case3)

図-8 水面の流況 (Case1)

じている。これに対してCase-2とCase-3では水衝り角度は比較的小さい。またCase-1では②で示す位置でも死水域が形成され、主流が右岸寄りになる傾向が強い。Case-2とCase-3は流量の違いにより流速絶対値に差が出ているが、流れのパターンは類似している。そこで以下では、Case-1とCase-3をさらに詳細に比較する。

捷水路のあるCase-1と捷水路のないCase-3を比較するために、図-6の(a)から(c)の流速を引いた差のベクトルを求めた。流量が両者で同じである湾曲部での差ベクトルの結果を図-7に示す。断面5～断面7で特に顕著な差がみえる。これは前述の死水域の形成による。同様に断面15～断面17でも差がみられるが、こちらは比較的小さい。

(3) PIV解析による水面流況

水路の上流断面の全幅でトレーサを連続投入した後の全体画像を図-8に示す。分流点から下流の本川右岸側にはトレーサが殆ど流下していない。また合流直前の左岸側から合流後の水路中央部にトレーサのない領域が存在する。しかし図-6(a)に示した流速ベクトル図によれば、図-8でトレーサのない領域でも、かなりの流速が生じている。このことは、死水域で湧昇流が生じていることを示唆している。

図-8の画像からPIV法により流速ベクトルを求めると、分流点以降の左岸では側壁沿いの流れが卓越し、図-6(a)に示したような水衝りが見られない。これは水衝部で水流が潜り込んでいることを示唆している。つまり沈

図-9 分流部の流速と流線(PIV解析)

図-10 合流部の流速と流線(PIV解析)

降できないトレーサ(おが屑)が壁沿いに集積してしまうからである。そこで図-9に■で示す場所からトレーサを連続投入し、岸沿いに集積しない範囲でPIV解析した。色で流速絶対値、線で流線を示している。Case-1では、Case-3に比較して水衝りが顕著になることがわかる。

同様の解析結果を合流部について図-10に示す。ここでは断面15の手前においてトレーサを3箇所から投入している。図左岸側での死水域の形成および右岸側への流れの集中はCase-1(すなわち捷水路後)において顕著であることがわかる。図-8においてトレーサのない領域が水路中央に生じていたことを考え合わせれば、この右岸側への流線の集中は水路中央での湧昇流によっていると考えられる。

4. 土砂移動に関わる流況変化

(1) 二次流による底面付近の流れの偏倚

図-11は、図-7で示した流速ベクトルの差が顕著であった断面5と断面7及び断面17について、電磁流速計により計測された横断方向流速を描いたものである。断面5と断面7では、表層において右岸から左岸、底層において左岸から右岸への流れが生じているが、Case-1(捷水路あり)の方が大きな流速となっている。また、側壁付近に比較して水路中央部で大きな流速が発生していることから、左岸では沈み込みが生じ、右岸では湧き上がりが生じていると考えられる。このことは、図-9に示したPIV解析の結果と合致している。

図-12の(a)、(b)では、電磁流速計で得られた水面付近の流速(赤)と底面付近の流速(黒)を一緒に示している。これから、断面-5から断面-7にかけて、両者の流向が著

図-11 横断方向流速の鉛直分布，上段；断面 5，中段；断面 7，下段；断面 7

図-12 水面と底面の平面流速分布

しく異なることがわかる。すなわち水面付近では左岸向きの流れが卓越するのにに対し，底面近傍では右岸向きの流れが卓越し，その傾向はCase-1において特に顕著である。これは，流速が大きく直進性の強い表層流が捷水路により多く流れ込む様になり，それを補償するために底層流が湾曲水路に多く流入するためと考えられる。一方，

図-13 分流部の底面トレーサの移動軌跡

合流点付近(断面18)では，水路中央部において底面付近の流速(黒)が収束し，水面付近の流速(赤)が発散していることがわかる。すなわち水路中央で湧昇流が発生していると考えられる。これは，湾曲部(断面16)において表層流よりも流速が大きく直進性強い底層流が，合流点付近に収束するためと考えられる。

図-14 合流部の底面トレーサの移動軌跡

(2) 水路底面の流況

粒径3mm, 比重1.8の球形粒子を投入し, 底面での移動状況を調べた。この粒子はプラスチック樹脂の表面を石膏でコーティングしたもので, 流れと全く同じには移動しないが, 砂よりは容易に転動するので, 水理模型実験での流況把握によく用いられている。少数の粒子を投入し, 水面流況の場合と同じ方法でビデオ撮影して, 0.5秒ごとの画像から各粒子の移動軌跡を肉眼で計測した。

図-13は, 粒子位置を10秒間(21画像)追跡した結果を重ね描きしたもので, 図(a)がCase-1(捷水路あり), 図(b)がCase-3(捷水路なし)である。また上段は断面2の直上流右岸側で粒子を投入した場合, 下段は断面5の直上流左岸側から投入した場合である。Case-3に比べてCase-1では, トレーサ軌跡の水路軸に対する角度が, 分流点直下流で著しく大きくなるのがわかる。また図ではわかりにくい, 断面5~6の右岸側壁沿いに集積し, 移動が緩慢になった。このことは, 捷水路設置後(Case-1)には分派点直後で二次流強度が増加し, 右岸壁沿いで強い上昇流が生じてことを示唆している。また, その部分で堆積が生じ, 固定砂州が発達するものと推察される。

合流点付近での同様の実験の結果を図-14に示す。ここでは図中に◆で示す位置からトレーサを連続投入し, 0.5秒毎の画像を41枚重ねた。画像中に見える小さな白い点が粒子であり, 白い点線は目視で描いた包絡線である。Case-1では断面17付近で包絡線の幅が広がっているが, この辺りで粒子の移動が緩慢になり運動を停止する粒子も多かった。その後は水路直線部では包絡線の間が狭くなっていく。このことは水路床上の流線が収束し, 上昇流が生じていることを示唆している。一方, Case-3では, 一旦左岸側寄った粒子が断面19以降で水路中央に戻り, 包絡線の間隔はやや広がっている。ただし停止する粒子はなかった。この原因は, 湾曲の反転による二次流の変化と, 直線部で水路幅が上昇していることによると考えられる。以上から, 捷水路設置に伴う河床変動が以下のように推察される。すなわち旧河道(Case-3)では湾曲部(狭窄部)から直線部に入り河積が増加した地点で堆積が生じやすいが, 新河道(Case-1)では捷水路合流直前において堆積が促進される。

5. まとめ

本研究は, 単純な断面の捷水路を有する河道湾曲部に現れる流況や物質移動の基本的な性質を検討した。主要な結論を以下に列挙する。

- ① 捷水路設置により, 流速が大きく直進性の強い表層流が捷水路に流れ込む様になり, それを補償するために底層流が湾曲水路に多く流入する。このため捷水路分派直後に水衝部が形成され, 対岸には広い死水域ができる。また水衝部では沈降流, 死水域では湧昇流が発生している。このような流れの作用により, 土砂が捷水路分派点对岸に急角度で輸送され, 固定砂州の発達が予想される。
- ② 一方, 捷水路合流部では, 上流側の湾曲部において表層流よりも流速が大きく直進性が強い底層流が, 合流点付近に収束によって合流点側の本川河岸に死水域が形成され, その部分に湧昇流が発生する。湧昇流の領域は, 合流後は水路中央に移動する。そのため主流は捷水路合流の対岸部に収束する。このような流れの作用に, 捷水路合流側の本川河岸沿いに土砂が集積して固定砂州の発達する可能性がある。

以上のような捷水路設置による流況の変化は, 分派点直下流の水衝部移動に伴う護岸・根固めに関する検討, その対岸での砂州発達に伴う河積減少の検討, 合流点直上流の砂州形成に伴う河積の減少, および捷水路合流対岸への主流接近に対する水制工等の検討などの必要性を示している。

参考文献

- 1) 岩屋 隆夫：放水路の地域特性：河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, Vol4, pp.19-24, 1998.
- 2) 竹本 成行, 村崎 弘：砂川捷水路水理模型実験(第3報), 北海道開発局土木試験所月報, 第178号, pp1-19, 1967.
- 3) 最上川大淀地区の河道計画に関する検討〔I〕(1/2), 土木研究所資料, 3326号, 1995
- 4) 川内川激甚災害対策特別緊急事業【椎込分水路水理模型公開実験】, 九州技報, 第44号, 2009.
- 5) 山口 甲, 品川 守 等：石狩川捷水路工事の工学的評価：土木史研究, Vol: 13巻, pp.461-470, 1994.
- 6) 品川 守, 館谷 清 等：捷水路による洪水氾濫と洪水流の変化：水工学論文集, Vol: 36巻, pp.305-310, 1992.
- 7) 市山 誠, 石川 忠晴：野外大型水理模型実験における変動成分の計測と解析に関わる実際の技法の開発：水工学論文集, 第56巻, pp.339-344, 2012.
- 8) 堀田哲夫等：準三次元数値解析手法の河川分流への適用：河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集：pp.9-16：1997.
- 9) 福岡捷二：河川合流部の洪水流と河床変動の非定常三次元解析：水工学論文集第39巻：pp435-440：1995.

(2013. 9. 30受付)