

蛇行低水路を有する複断面流路における流れの特性と河床変動機構

芦田 和男・江頭 進治・劉 炳義・滝口 将志

FLOW CHARACTERISTICS AND BED VARIATIONS IN A MEANDERING CHANNEL WITH FLOOD PLAINS

By Kazuo ASHIDA, Shinji EGASHIRA, Bingyi LIU and Masayuki TAKIGUCHI

Synopsis

The experimental studies are described for the characteristics of flows over a flat rigid and an equilibrium rigid bed as well as for the bed variations in a meandering channel with flood plains, which are conducted under the conditions of three stages; under-bankfull, bankfull and over-bankfull flows. A lot of significant results are obtained from the investigations. Some of these are summarized as follows:

Velocity distributions of the over-bankfull meandering flow show that the flow in overbank tends to meander and, on the contrary, the meandering of the flow in inbank becomes flatter than that of under-bankfull flow and its phase is shifted downstream. Three outstanding features are found in the equilibrium bed configuration of over-bankfull flow. Those are the phase shift downstream of deep scouring position, the decrease of scouring depth and the expansion of scouring range. The reasons for these phenomena are also discussed in the present paper.

1. 緒 言

河川の開発・利用および保全に対する社会の要請が高まる中で、洪水時の河岸水衝部の位置、低水路における最大洗掘深および高水敷上の浮遊土砂の堆積などの挙動を明らかにすることはきわめて重要な問題となっている。

多くの河川は低水路と高水敷から構成されており、平面形状は直線か蛇行か、あるいはこれらの組合せの形態を呈している。その中で複断面直線流路が一番簡単な形である。これについては、従来から多くの研究がなされ、たとえば、その流速分布の特性¹⁾、三次元的な乱流構造²⁾、高水敷上における浮遊砂の輸送と堆積の機構³⁾などがかなり明らかにされてきた。

一方、Fig. 1に示すような低水路が蛇行している場合の複断面流では、蛇行流の特性と複断面流の特性とが混在して、流れは三次元性を強く帯び、その構造も一層複雑となる。それに伴い低水路の河床変動も単断面の場合と違う様相を呈する。それらの特性を究明することは非常に重要であるが、蛇行低水路を有する複断面流に関する研究はまだ数少ない。Toebes and Sooky⁴⁾は水路実験で、複断面蛇行流の流速分布の特性を調べた。彼らは複断面蛇行流のエネルギー損失が単断面の場合よりも大きく、それが曲率半径とFroude数に関係していることを見出した。Pang⁵⁾は直線低水路と弯曲低水路において、流れおよびその抵抗の特性について検討を行なった。今本・石垣⁶⁾は複断面弯曲水路を用いて、路床付近および自由表面付近の流況を可視化法により検討し、複断面開水路流れ特有の斜昇流と弯曲開水路流れ特有のらせ

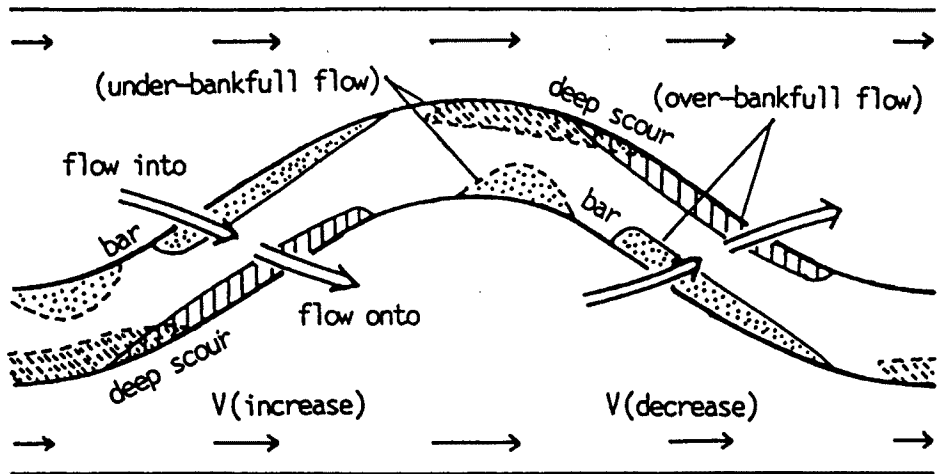


Fig. 1. Schematization of hydraulic aspects and bed configuration in a meandering channel with flood plains.

ん流が共存していることを確認した。

低水路に限らず、高水敷も蛇行している場合については、木下⁷⁾の研究がある。木下は、実河川の洪水流の観測から高水敷の蛇行と低水路の蛇行の間の位相の関係により、流れと河床形状が大いに異なることを見出した。さらに、河川改修の観点から、低水路と高水敷流路の平面形を適正に組み合わせることによって、洪水時における流れの相互干渉効果を、有利に利用することができると考え、治水安全度の最も高い“適正複断面河道”を提案した。森・岸⁸⁾は高水敷流を含む三次元蛇行流の数値解析法を開発し、石狩川下流部の計算および木下の実験の再現計算を基に、複断面流の構造と河床形の関係調べて高水敷流の影響を明らかにした。たとえば、石狩川の計算例においては、低速の高水敷流の流入により低水路の二次流の向きが逆転し、弯曲部の河岸洗掘が抑えられることを説明した。また、木下が提案した“適正複断面河道”を数値計算でも確かめた。これらの研究は実際河川の複断面流れとそれに関連する低水路の河床変動の機構を究明することに大いに貢献した。

以上、複断面蛇行・弯曲流に関するいくつかの研究について概説したが、これらは研究の緒についたところであって、低水路における二次流やせん流の発生・発達・減衰・消滅といったプロセスが単断面の場合のそれとどう異なるか、またそれに応じて河床形状がどう変化するかなど、未解明な問題点が多く残されている。

本論文は、複断面蛇行流と単断面蛇行流の相違点に着目し、流れと河床変動の特性について論ずるものである。まず、複断面蛇行水路において、under-bankfull flow, bankfull flow および over-bankfull flow の三ケースについて、平坦床および平衡河床上の流速および流向について詳細な測定を行なう。これらの実験データに基づいて、複断面蛇行流の主流速分布、二次流速分布およびせん流分布の特性について、これらを比較しながら検討する。ついで、上述の三ケースについて、平衡河床形状あるいは、それに至る過程について検討するとともに単断面流と複断面流の河床変動の比較を行ない、その特性の相違を流れとの関連において考察する。

2. 実験の概要および物理量の定義

2.1 装置・条件・方法

実験は、水路幅 100 cm、水路長 10 m の直線水路 (Fig. 2) に、蛇行低水路を有する複断面水路 (Fig. 3) を用いて行なった。蛇行低水路の流路中心線は式 (1) に示す sine-generated-curve に従っている。

$$\theta = \theta_{max} \sin(2\pi S / L)$$

ここに、 θ は x 軸との偏角、 θ_{max} は θ の最大値、 L は蛇行長、 S は蛇行流路中心曲線に沿って計った距離である。蛇行低水路幅 $B = 20$ cm、 $L = 220$ cm、 $\theta_{max} = 35^\circ$ とし、蛇行低水路は 4 波長半配置した。測定は、上流から 3 波長めの 1 波長で行なった。

実験は、低水路が平坦固定床および平衡固定床のときの流れに関するものと、低水路の河床変動に関するものであって、それぞれ 3 段階の流量について行なっている。高水敷底面と低水路側壁は平均粒径 1.3 mm の砂をペイントで固定した粗面である。低水路の平坦固定床は、高水敷の高さが 3 cm となるように、同様の砂を敷き詰めて作られた。また、平衡固定床は、同じ砂を給砂して、河床が平衡

になっている状態で固定したものである。ただし、case 3 では河床波が発生しており、流れの測定は、河床波が 30° 、 90° および 180° 付近に存在するときに行なっている。実験条件は Table 1 に示しているとおりである。ここに、 B' は高水敷の幅、 h_b は高水敷の高さ、 Q は流量、 Q_s は給砂量、 d_m は平均粒径、 i は水路勾配である。case 1、case 2 は単断面蛇行流の実験であって、それぞれ under-bankfull flow、bankfull flow および case 3 は over-bankfull flow である。

case 1 と case 2 については、平坦河床から平衡河床への遷移過程も調べた。給砂量は、最終平衡時の平均河床勾配が初期平坦河床勾配と等しくなるように、予備実験で決定したものを与えた。

河床位、水位の測定はポイントゲージにポテンシメータを接続して出力するような方法で行ない、台車の位置もポテンシメータを用いて出力した。 x 方向流速と流向の測定には、それぞれ直径 3 mm のプロペラ流速計と流向計を用いた。以上のデータは、いずれも AD 変換器を通して、パソコンに収録した。

流速、流向の計測断面は、単断面流れである case 1、case 2 については n 方向にとった (Fig. 4 (b) I-I' 断面)。複断面流れである case 3 については、 y 方向に水路全幅にわたってとり (Fig. 4 (c) II-

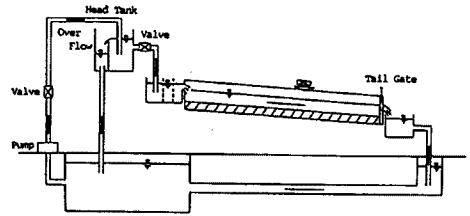


Fig. 2. Experimental channel.

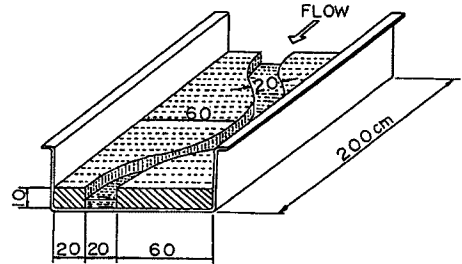
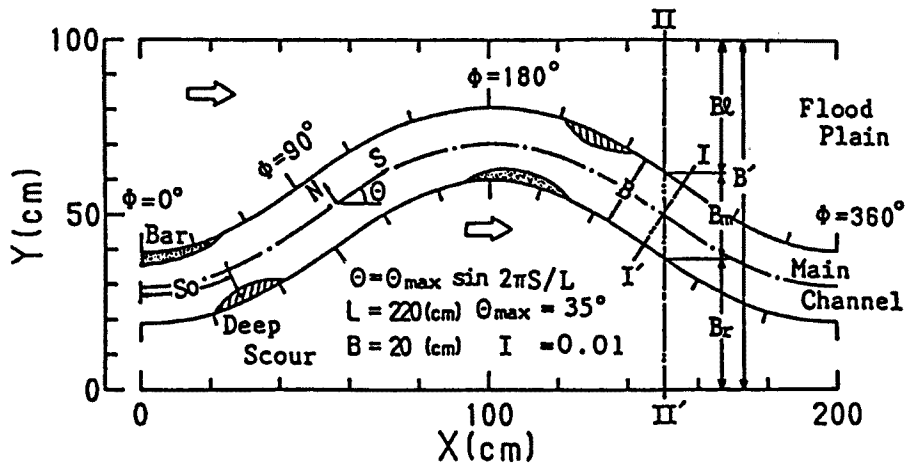


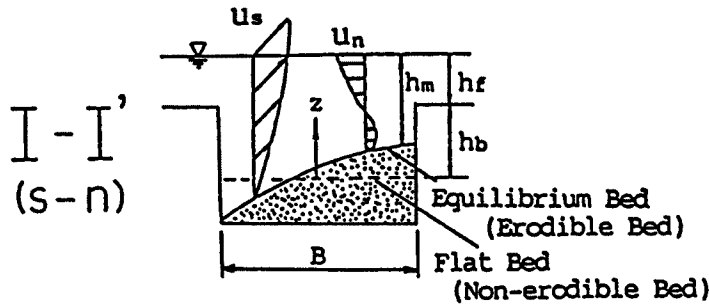
Fig. 3. Meandering channel with flood plains.

Table 1. Experimental conditions

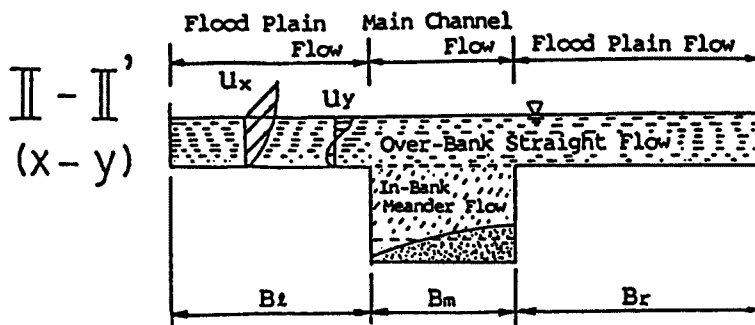
| CASE | Bed Condition | B' (cm) | B (cm) | L (cm) | θ_{max} | h_b (cm) | Q (l/s) | Q_s (g/s) | d_m (mm) | I | |
|------|---------------------------|---------|--------|--------|----------------|------------|---------|-------------|------------|------|---------------------|
| 1 | (a) Flat rigid bed | 100 | 20 | 220 | 35° | ~ | 0.87 | 0 | ~ | 0.01 | Under-bankfull flow |
| | (b) Equilibrium rigid bed | 100 | 20 | 220 | 35° | ~ | 0.87 | 0 | ~ | 0.01 | |
| | (c) Movable bed | 100 | 20 | 220 | 35° | ~ | 0.87 | 0.97 | 1.30 | 0.01 | |
| 2 | (a) Flat rigid bed | 100 | 20 | 220 | 35° | ~ | 2.15 | 0 | ~ | 0.01 | Bankfull flow |
| | (b) Equilibrium rigid bed | 100 | 20 | 220 | 35° | ~ | 2.15 | 0 | ~ | 0.01 | |
| | (c) Movable bed | 100 | 20 | 220 | 35° | ~ | 2.15 | 5.7 | 1.30 | 0.01 | |
| 3 | (a) Flat rigid bed | 100 | 20 | 220 | 35° | 3 | 7.15 | 0 | ~ | 0.01 | Over-bankfull flow |
| | (b) Equilibrium rigid bed | 100 | 20 | 220 | 35° | 3 | 7.15 | 0 | ~ | 0.01 | |
| | (c) Movable bed | 100 | 20 | 220 | 35° | 3 | 7.15 | 6.2 | 1.30 | 0.01 | |



(a) Plane View



(b) I-I' Sectional View



(c) II-II' Sectional View

Fig. 4. Definition sketch of meandering channel with flood plains.

II'断面), さらに単断面の場合と比較するために, 低水路内とその近傍についてn方向にもとった。それぞれの計測断面は, 低水路中心線の蛇行位相30°ごとにとっている。測定間隔は, 鉛直方向に0.3cm~1cm, 横断方向に2cm~10cmとし, 低水路と高水敷の境界付近は流速の変化が大きいため, 密にした。

2.2 座標系および符号の定義

座標系については、蛇行低水路には s-n 座標系と高水敷上を合わせた水路全体には x-y 座標系の二つのシステムが用いられている。Fig. 4 (a) に示すように、低水路中心線に沿って流下方向に s 軸、それと直交するように n 軸をとる。s 軸方向には彎曲頂部を 0°, 180°, 360° とする位相表示を用い、n 軸は低水路中心を原点とし、左岸方向を正とする。流下方向に x 軸、右岸より左岸方向に y 軸、鉛直上方向に z 軸をとる。

本論文に使用されている諸符号の意味は Fig. 4 に図示しているとおりであるが、特に以下の項目について説明を加える。

低水路流 (in-bank flow) と高水敷流 (over-bank flow)：高水敷高さ以上浅の流れを高水敷流とし、高水敷高さ以下深の流れを低水路流とする。

主流速 (primary flow velocity) と二次流速 (secondary flow velocity)：複断面蛇行流では、低水路流と高水敷流の境界形状が異なるため、それに応じて主流および二次流の定義にも 2 通りがある。低水路流においては、s 方向の流速 (u_s) を主流速とし、n 方向の流速 (u_n) を二次流速とする。高水敷流においては、x 方向の流速 (u_x) を主流速とし、y 方向の流速 (u_y) を二次流速とする。

低水路流のらせん流 (in-bank helical flow)：低水路の水深方向の平均流速ベクトルを基準として見た流れを低水路流のらせん流とする。

3. 流れに関する考察

3.1 主流の諸特性

(1) 水面形状

Fig. 5 (a), (b), (c) には、それぞれ case 1, case 2 および case 3 について、平坦床の場合の等水位線図が示されている。これらの図から、次のようなことがわかる。

(a) 複断面低水路の凹岸における水位の上昇量は、単断面流のものより小さい。これは、低水路主流の曲率が、高水敷流との interaction によって小さくなるからである。

(b) 複断面蛇行流の水面形に着目すると、 $\phi = 30^\circ \sim 180^\circ$ の左岸高水敷および $\phi = 210^\circ \sim 360^\circ$ の右岸高水敷において、水面勾配は緩くなっている。これは、高水敷上の流れが低水路の蛇行流によって、凹岸側において堰上げられるからである。これは、また、後述するように、高水敷流の蛇行現象と対応するものである。

(2) 流れのパターン

Fig. 6 は、case 1, case 2, case 3 の平坦河床の場合と平衡河床の場合のそれぞれの鉛直平均流速ベクトルである。複断面流 (Fig. 6 (e), (f)) において、実線は高水敷高さ以上浅の領域 (over-bank), 破線は高水敷高さ以下深の部分 (in-bank) のものである。

まず、単断面蛇行流の平坦床と平衡河床におけるものについて見ると、両者には、明瞭な違いが認められる。すなわち、平衡河床上の流れにおいては、 $\phi = 0^\circ$ の下流右岸

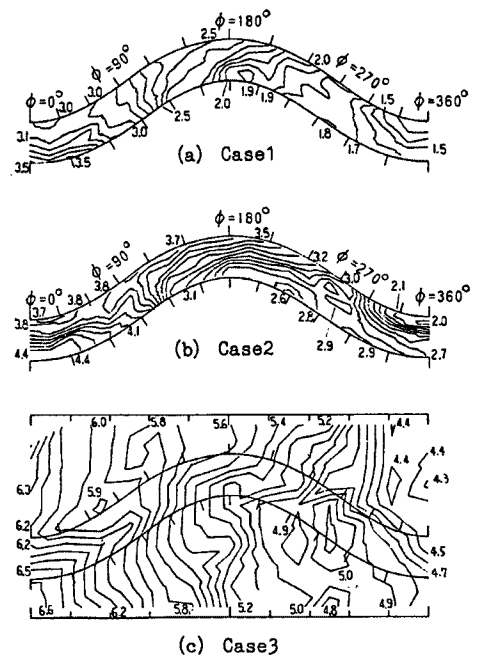


Fig. 5. Free surface topographies (Flat Bed).

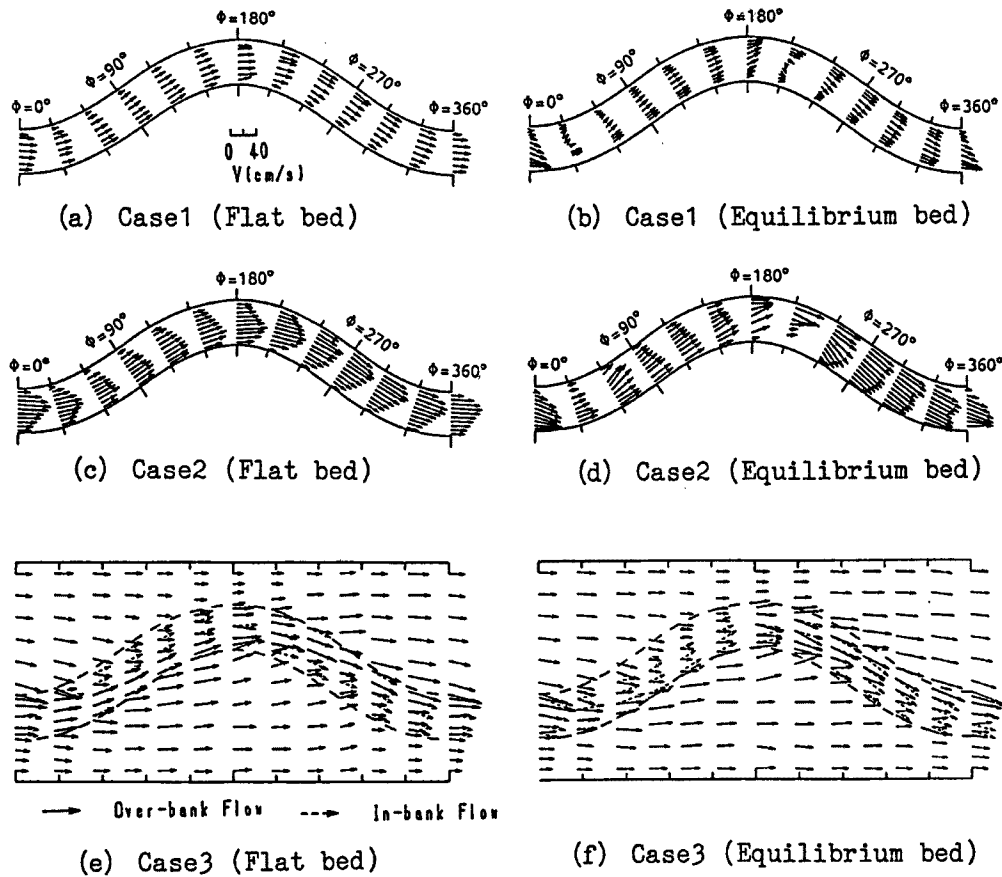


Fig. 6. Velocity vectors of the depth-averaged flow.

や $\phi = 180^\circ$ の下流左岸への流れの集中がみられるのに対し、平坦床においては、これらの領域より少し上流側の対岸側に流れの集中がみられる。両者のこのような違いは、従来から認められているように、河床形状の相違によるものである。平坦床の最大流速は、case 2 においては側壁から離れたところに生じているのに対し、case 1 においてはこの傾向が小さい。これは、case 2 の水深が case 1 よりも大きく、そのために側壁の影響範囲が大きいことによるものと思われる。なお、平衡河床において、ベクトルが非常に小さい領域があるが、これは砂州の形成によるものと思われる。

複断面流 (Fig. 6 (e), (f)) における高水敷上の流れを見ると、 $\phi = 0^\circ, 360^\circ$ の右岸近傍および $\phi = 180^\circ$ 左岸付近に流速の遅い領域が形成されている。これは、前述したように、低水路の蛇行による“堰あげ”の効果に起因するものである。また、低水路と高水敷における流れの相互作用によって、高水敷上の流れも蛇行していることが明瞭に現われている。

Fig. 7 は、流れの集中・発散を見るため、等流量線図 (広義の流線図) を示している。ここで、case 1, case 2 においては、全流量を 10 等分して求められ、case 3 のものは 20 等分して求められている。

図示のように、流れの集中・発散は平坦床と平衡河床において非常に異なっている。まず、case 1 と case 2 についてみると、平衡河床においては $\phi = 30^\circ$ の右岸および $\phi = 210^\circ$ の左岸に流れの強い集中が見られる。これに対し、平坦床においては $\phi = 60^\circ \sim 120^\circ$ の右岸寄りと $\phi = 240^\circ \sim 300^\circ$ の左岸側に若干高速領域が形成されているが、あまり明瞭ではない。

複断面の case 3 についてみると、平坦床と平衡河床における流れの違いは、特に低水路において見られる。すなわち、平衡河床においては、 $\phi = 60^\circ \sim 120^\circ$ の右岸および $\phi = 240^\circ \sim 300^\circ$ の左岸近傍に高速領域が形成されているのに対し、平坦床においては、特にこのような傾向は見られない。

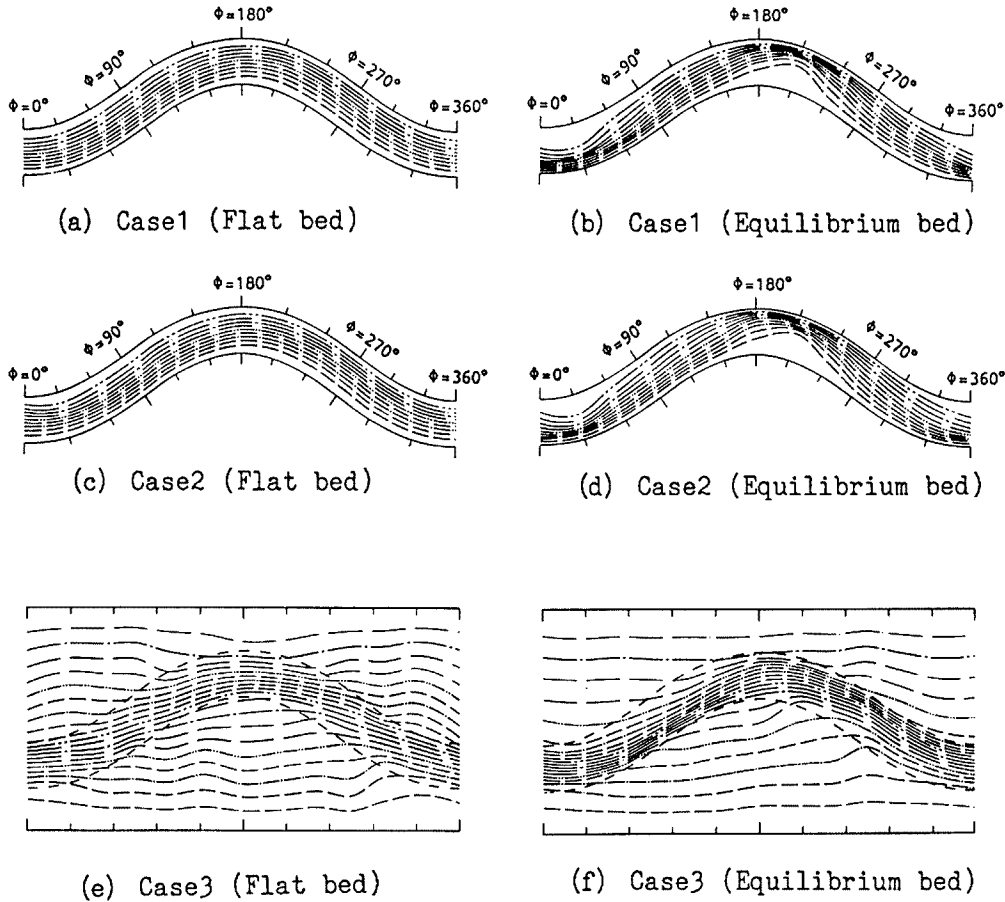


Fig. 7. Stream lines of the depth-averaged flow.

case 1, case 2, case 3における平衡河床における流れを比較すると、case 3の低水路においては、単断面流のものほど流れの集中や蛇曲は強く現われず、流れの集中域も下流側へシフトしているのが分かる。また、case 3においては、高水敷から低水路への流れ込みおよび低水路から高水敷への乗り上げが明瞭であって、しかも高水敷上の流れは蛇行しているのが分かる。これらは、いずれも低水路と高水敷における流れの interaction によるものである。

(3) over-bank flow における主流速の横断分布

Fig. 8は、case 3の平坦床の場合について、 $\phi = 30^\circ$ と $\phi = 120^\circ$ の水面近傍 ($Z=Z_s$)、高水敷底面付近 ($Z=Z_f+0.5(\text{cm})$) およびその中間の高さ ($Z=(Z_s+Z_f)/2$) における流速の横断分布を示している。流速の極値がいくつか形成されているが、これらは、上述の相互作用以外に複断面直線水路にも見られる低水路と高水敷の境界付近に生じる強い渦に支配されているものと推察される。

$\phi = 120^\circ$ の高水敷における流速は、右岸側においてかなり大きくなっているのが特徴的である。これは、Fig. 5

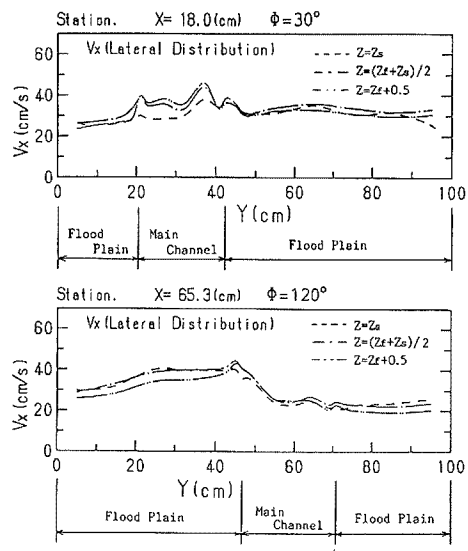


Fig. 8. Lateral distributions of velocity in x direction for overbank flow (case 3).

の水面形や Fig. 7 の流線図にも現われており、流れの蛇行に関連するものであって、高水敷においても、流れの加速・減速が顕著に起こっていることを示すものである。

(4) 各領域の流量の縦断分布

Fig. 9 は、case 3 の平坦床の流れにおいて、それぞれの領域の流量がどう変化しているかを示している。ここに、 Q は全断面を通過する流量、 Q_{mi} は低水路内の流量、 Q_{mo} は低水路上の高水敷流量、 Q_{fr} は右岸高水敷の流量、 Q_{fl} は左岸高水敷の流量である。まず、低水路内の流量について見ると、流水断面積が一定値であるにもかかわらず、流量は周期的に変化している。とくに、 $\phi = 150^\circ \sim 210^\circ$ の領域において流量の顕著な増加がみられる。一方、高水敷上においては、低水路の上の流量 (Q_{mo}) はほとんど変化していないのに対して、左右それぞれの流量 (Q_{fl} と Q_{fr}) は蛇行波長 (200 cm) に対応して周期的に変化し、高水敷幅が最大となる近傍において最大値をとることがわかる。

(5) 等流速線

Fig. 10 (a), (b), Fig. 11 (a), (b) には、それぞれ平坦床上と平衡河床上的流れの等流速線が示されている (図の右側が左岸である)。

まず、Fig. 10 (a), (b) の平坦床単断面蛇行流、case 1 と case 2 における最大流速域と流路位相とについてみる。最大流速域は、最大曲率の位置 $\phi = 0^\circ, 180^\circ$ より下流の $\phi = 30^\circ$ と 210° において、いずれも流路中心軸近傍にある。最大流速域は、流下に伴いこれらの点より下流の $\phi = 90^\circ$ の右岸側および $\phi = 270^\circ$ の左岸側に移動し、 $\phi = 0^\circ$ および 180° においても、なお凸岸側に位置している。平坦床においては、Fig. 7 にも示されるように、流れの集中が起こりにくいためにらせん流が流路形状に対応して十分に発達しないからである。

ついで、case 3 の複断面のものについてみると、最大流速域の s 軸に沿うパターンは、case 1, 2 の場合よりも約 30° 程度下流側へシフトしている。これは、高水敷で浅の流れによる shear effect によるものと思われる。さらに、単断面流には見られない次のような特徴がある。すなわち、最大流速域は単断面の場合よりもさらに低水路河岸近くに形成され、等流速線の密度は非常に高くなっている。これは、高水敷と低水路との間の質量や運度量の輸送によるものである。すなわち、Fig. 7 および Fig. 8 を参考にすれば、 $\phi = 60^\circ \sim 150^\circ$ の左岸は、流速の小さい高水敷の水体が低水路へ流入する領域になっており、低水路右岸は、高水敷へ流出する領域になっているからである。

Fig. 11 (a), (b) の平衡河床における等流速線についてみると、平面形状の影響に加えて、流路横断形状の影響によって、流れの集中・発散がさらに顕著になっている。これは 2 次流やらせん流による平均流の輸送の影響が強く現われるからである。ちなみに、case 1, 2 のデータについてみると、平坦床では最大流速域は流路曲率の転向点 ($\phi = 90^\circ, 270^\circ$) 付近で最も河岸寄りに形成されたが、平衡河床では $\phi = 30^\circ$ の右岸および $\phi = 210^\circ$ の左岸近傍になっている。さらに、最大流速域は、河床近くまで伸びている。

ついで、case 3 のデータについてみると、case 2 のものが変形を受けたようなパターンになっている。これは、平坦床の場合にも見られるように、低水路流と高水敷流との interaction によって、主流、二次流、らせん流が変化する結果である。すなわち、低流速域が最も流入する $\phi = 30^\circ \sim 120^\circ$ の左岸付近に低速域が形成され、 $\phi = 30^\circ \sim 120^\circ$ の右岸部では、Fig. 7 にも示されるように流れが集中して高速域が形成され、しかも、この領域では高水敷への流出があるため、高速域の等流速線は高水敷の方への伸びられるようなパターンになっている。

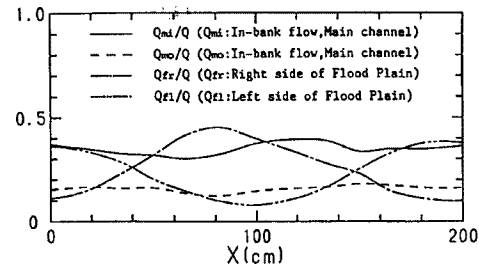


Fig. 9. Distributions of flow discharge in each part of the cross section of the over bankfull flow (Flat bed, case 3).

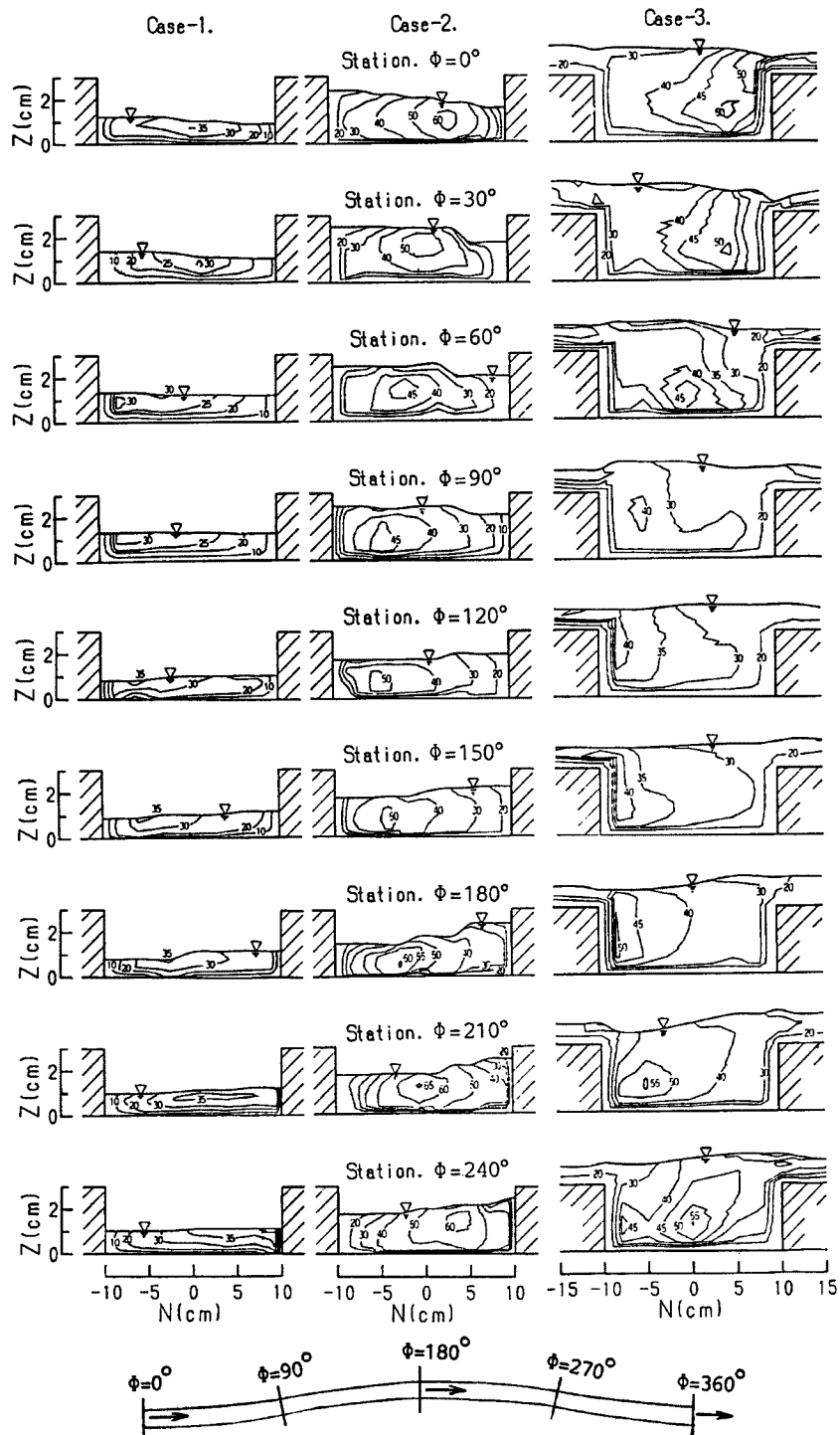


Fig. 10(a). Velocity contours (Flat bed, case 1, case 2, case 3, $\phi = 0^\circ \sim 240^\circ$).

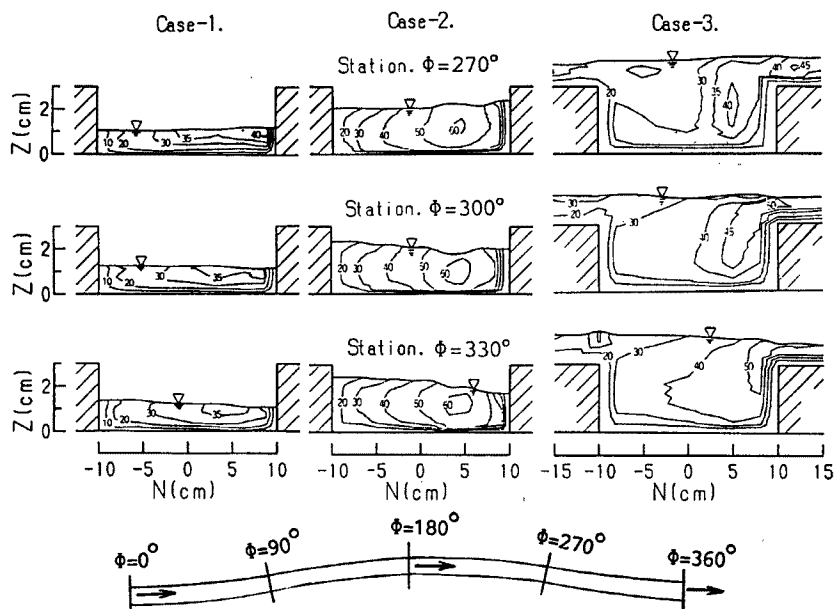


Fig. 10 (b). Velocity contours (Flat bed, case 1, case 2, case 3, $\Phi = 270^\circ \sim 330^\circ$).

3.2 低水路流の二次流およびらせん流の分布

(1) 二次流

平坦河床における低水路上の二次流 (u_n) の分布を Fig. 12 (a), (b) に示す。Fig. 6, 7 および Fig. 10 の結果を念頭に置いて、まず、case 1, 2 の結果を見ると、次のような特性が分かる。 $\Phi = 330^\circ, 0^\circ, 30^\circ$ においては、概して表層付近の水は、凹岸方向の速度成分を持つ。この領域においては、凹岸へ向かって顕著な水位上昇が見られる。さらに下流の $\Phi = 60^\circ, 90^\circ$ の領域になると、表層近傍の水は依然として右岸方向の速度成分を持つが、底層の水塊は、これとは逆方向、すなわち左岸向きの成分をもつようになり、この領域においてはらせん流が発達していることが推察される。流路蛇行の転向点より下流の $\Phi = 120^\circ, 150^\circ$ 付近において u_n 成分は小さくなり、 $\Phi = 150^\circ$ から 180° にかけて、2 次流は表層や中層の水塊が凹岸方向へ移動するような速度成分を持ち、横断面勾配も顕著になる。さらに、 $\Phi = 240^\circ, 270^\circ$ 近傍で表層は左岸へ、下層は右岸へ向かうような二次流が発達する。

ついで、複断面流の case 3 についてみると、二次流全体が、高水敷と低水路との水の流入・流出に大きく依存するような分布形を持っているのが特徴である。単断面流において、二次流が最も発達する $\Phi = 60^\circ, 90^\circ$ および $240^\circ, 270^\circ$ の断面についてみると、流路中心軸上における二次流の成分は、単断面のものとはむしろ逆向きになっている。これは、前にも述べたように、低水路の蛇行流としての特性が単断面の場合よりも弱められるからである。

平衡河床の二次流の分布を Fig. 13 (a), (b) に示す。まず、Fig. 12 (a), (b) の結果を念頭に置いて、単断面のものについてみると、平坦床のものよりも二次流の発達が顕著であり、平坦床のもの 3~4 倍にもなっているところもある。これは、河床形状と主流との interaction によって、Fig. 7 に示すように凹岸部への流れの集中が促進されるからである。さらに、上・下層逆向きの二次流が最も発達する断面は、平坦床では蛇行曲率の転向点の少し上流側にあったものが、平衡河床ではさらに上流側へシフトし、 $\Phi = 30^\circ$ および 210° の近傍にある。

$\Phi = 0^\circ, 180^\circ$ の断面においては、流路の横断形状に対応していないような二次流成分も見受けられる。これらの断面においては流れの集中、すなわち、 $\partial q / \partial s$ がきわめて大きな値になっているからである。

ついで、case 3 についてみると、これも二次流の発達が顕著であるが、高水敷上の流れや河床波による

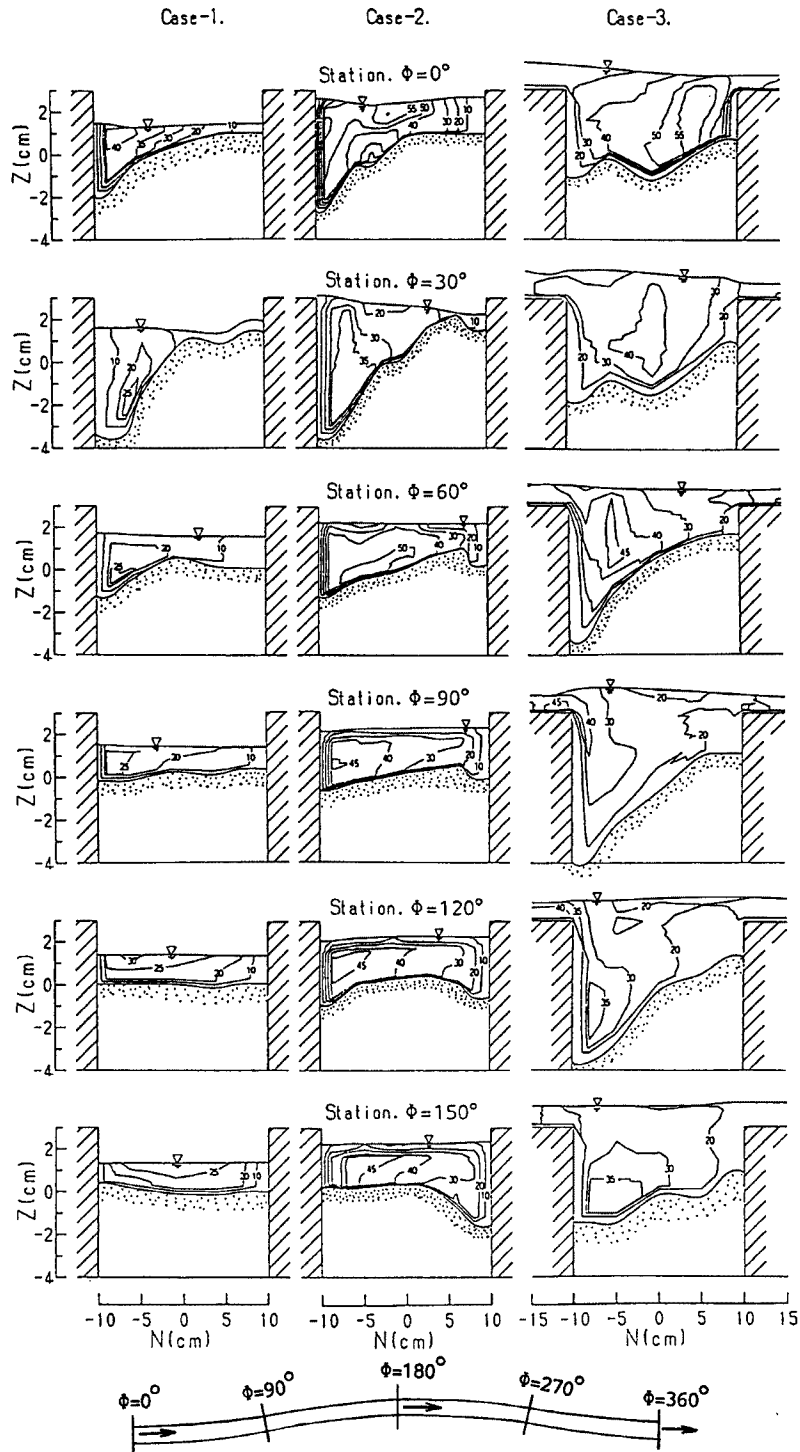


Fig. 11 (a). Velocity contours (Equilibrium bed, case 1, case 2, case 3, $\Phi = 0^\circ \sim 150^\circ$).

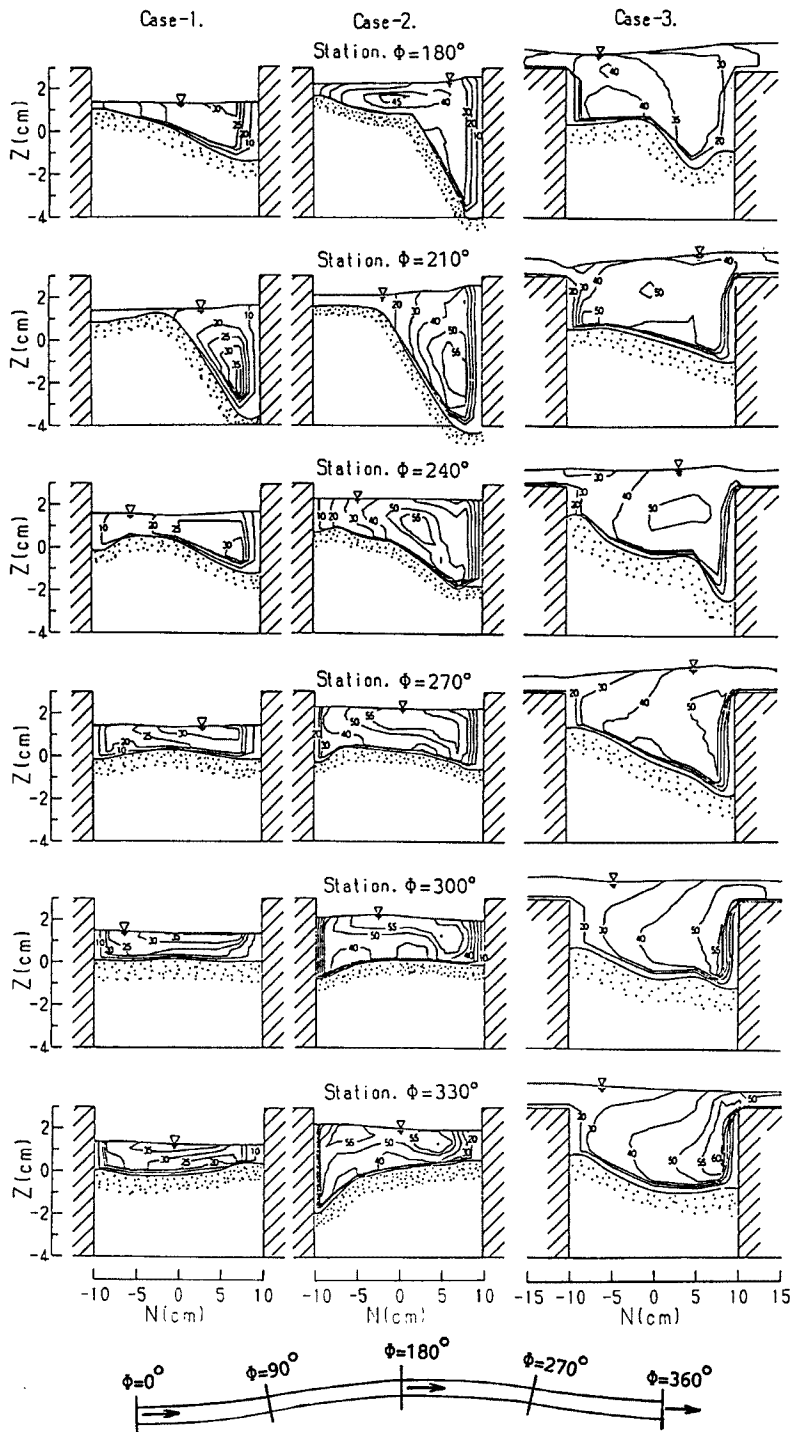


Fig. 11 (b). Velocity contours (Equilibrium bed, case 1, case 2, case 3, $\Phi = 180^\circ \sim 330^\circ$).

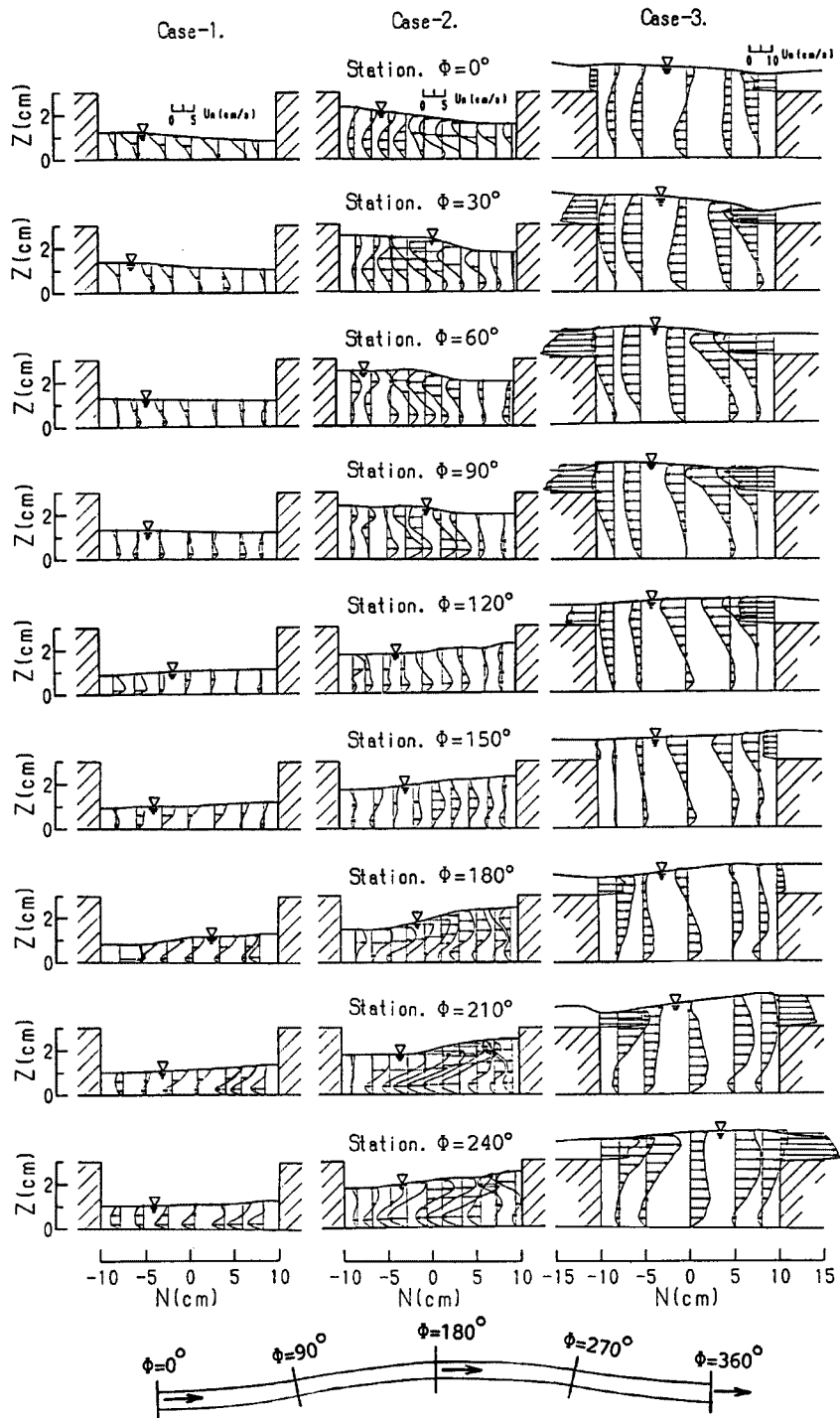


Fig. 12(a). Secondary flow distributions (Flat bed, case 1, case 2, case 3, $\Phi = 0^\circ \sim 240^\circ$).

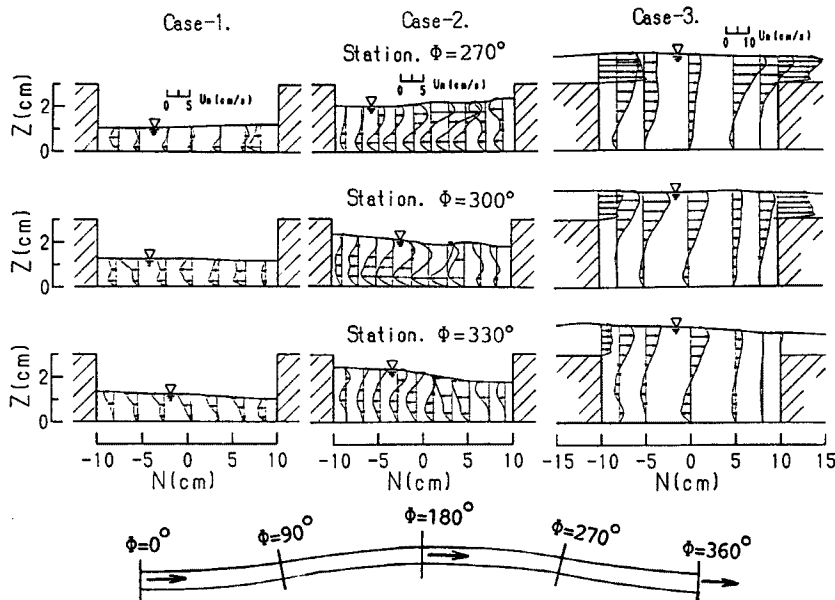


Fig. 12(b). Secondary flow distributions (Flat bed, case 1, case 2, case 3, $\Phi = 270^\circ \sim 330^\circ$).

局所的な流れの影響を受けて、二次流速分布は、かなり複雑になっている。

上述のような二次流の発達・減衰過程や主流と二次流との interaction, さらには、二次流と平衡河床との関係を見るためには、らせん流の構造を調べると都合である。たとえば、低水路における底面流砂の平均移動跡線を s' 軸とし、それと直交する方向を n' 軸とする。この直交曲線座標系において、流砂が平衡状態にあれば、 $q'_{bn} = 0$ である。流砂量は流速に依存するため、断面流速分布の流下方向の変化がそれほど激しくない場合には、低水路平均流の跡線と s' ほぼ一致するものと考えられる。したがって、平均流からみたらせん流は $\partial z / \partial n'$ と対応すると推論することができる。また $\partial z / \partial n'$ と $\partial z / \partial n$ とは同じ傾向を持つため、このらせん流と $\partial z / \partial n$ も対応する。

(2) らせん流

Fig. 14 (a), (b) と Fig. 15 (a), (b) は、それぞれ平坦河床および平衡河床上の低水路流の鉛直平均流の流向を基準としてみたらせん流の分布である。まず、平坦河床上のらせん流の分布について考察すると、次のような特徴が見られる。

単断面蛇行流の case 1, case 2 においては、 s 軸に沿って、時計回りの成分 (+ s 成分) と半時計回りの成分 (- s 成分) をもつ強度の異なる一対のらせん流が見られる。これらは、有限場において形成される補償流 (counter flow) の関係にあるものと推察される。case 2 のものをみると、+ s の渦は、 $\phi = 0^\circ$ においても支配的であるが、下流に向かってさらに発達し、 $\phi = 30^\circ$ あるいは 60° 付近で最も発達している。その下流域で規模、強度とも減衰する。- s 軸の成分は、 $\phi = 0^\circ \sim 120^\circ$ の区間では規模・強度ともに小さいが、 $\phi = 150^\circ$ において、強度は小さいものの水路全幅に渡るような規模になり、下流へ向かって発達し、蛇行頂点を過ぎた $\phi = 210^\circ$ から 240° 付近で最も発達する。case 1 のらせん流についてもほぼ同様のパターンが見られるが、らせん流の発達・減衰域は、case 2 のものより、少し上流側にシフトしているようである。

複断面蛇行流の case 3 におけるらせん流の分布は、case 2 のらせん流分布に高水敷流 (over-bank flow) の影響が加わり、複雑な様相を呈している。高水敷流が低水路らせん流の分布に及ぼす影響には二つある。一つは、低水路への流れ込み、および高水敷への乗り上げによって生じる側壁近傍における主流のねじれである。もう一つは、低流速体と低水路流体の混合作用による流れの曲率および流速の鉛直分

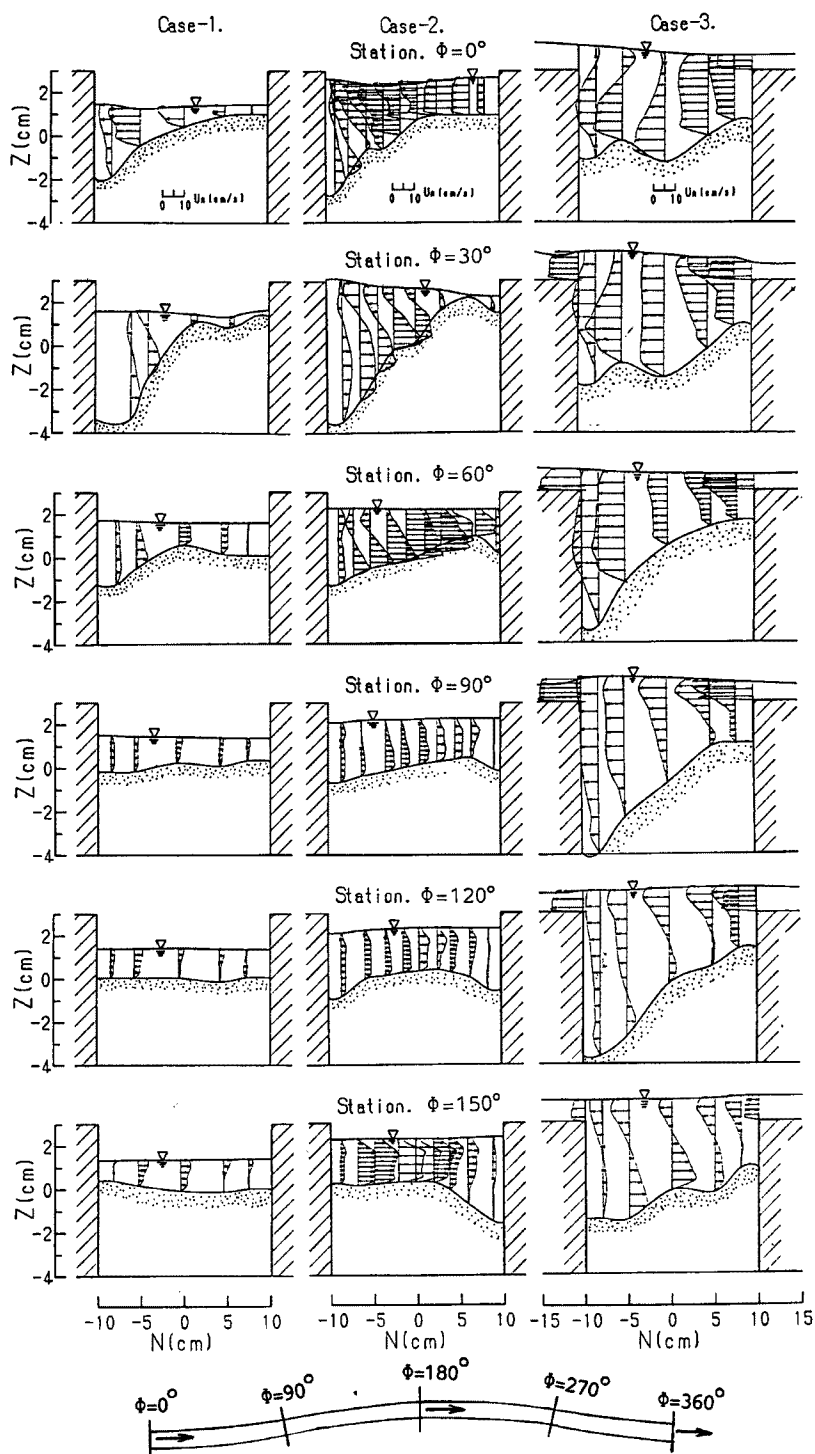


Fig. 13(a). Secondary flow distributions (Equilibrium bed, case 1, case 2, case 3, $\Phi = 0^\circ \sim 150^\circ$).

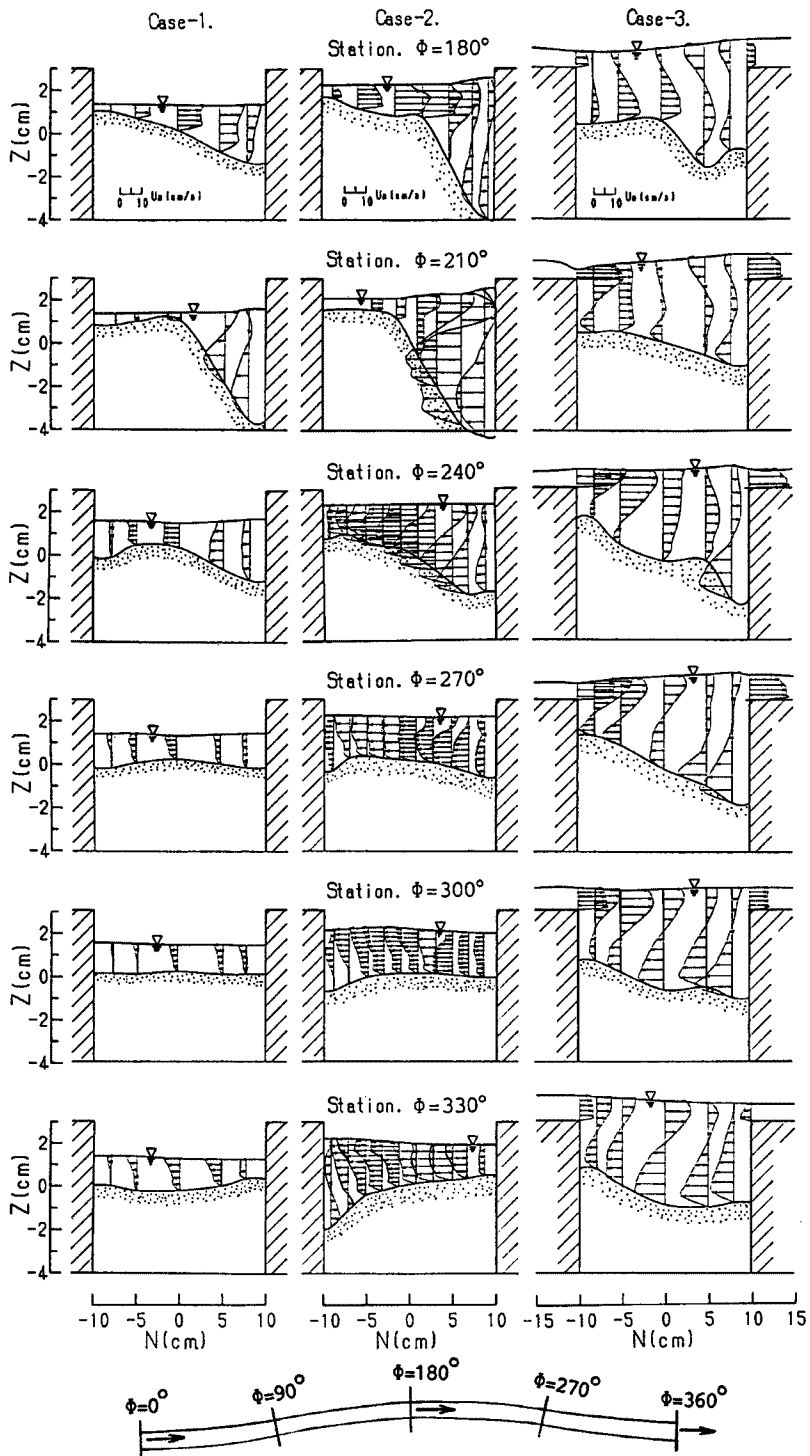


Fig. 13(b). Secondary flow distributions (Equilibrium bed, case 1, case 2, case 3, $\Phi = 180^\circ \sim 330^\circ$).

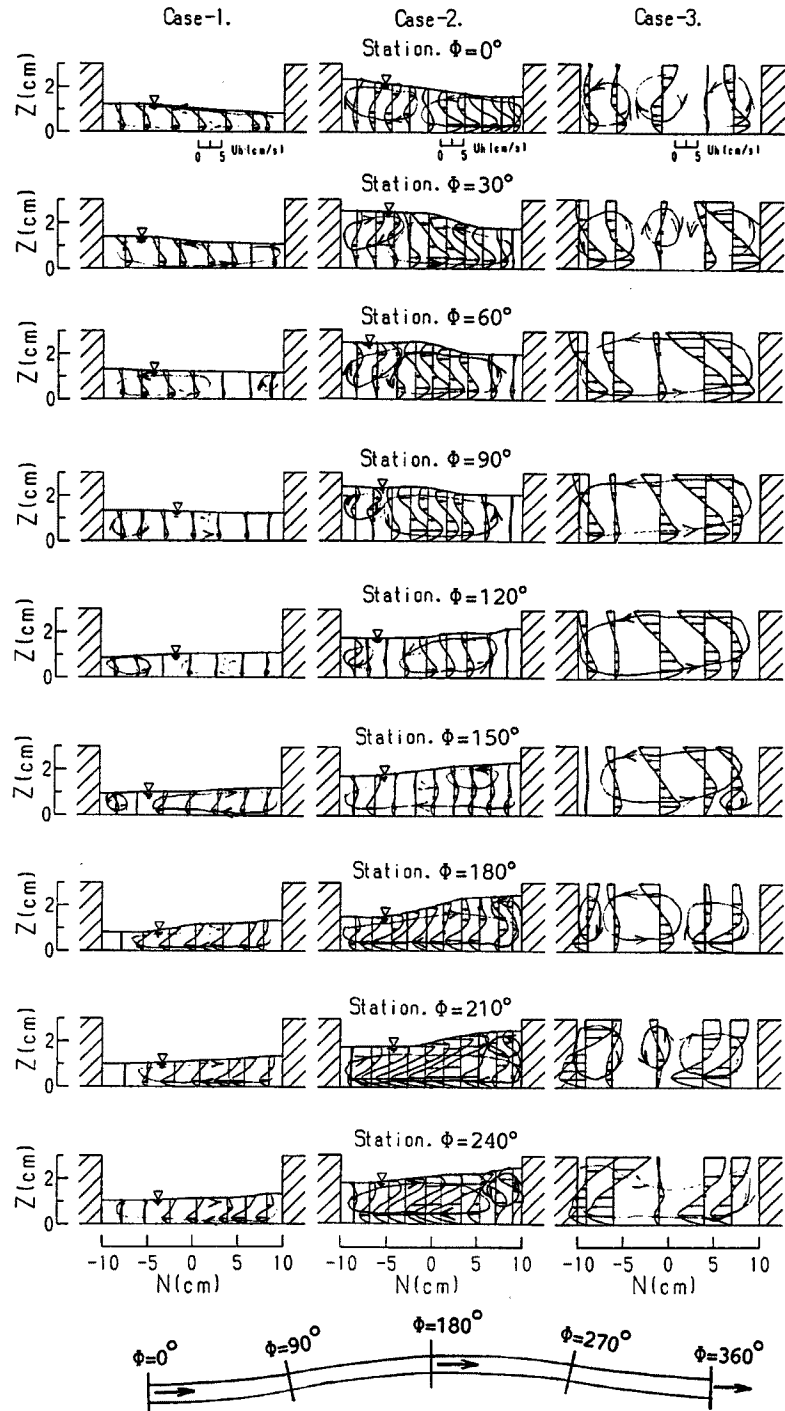


Fig. 14 (a). Helical flow distributions (Flat bed, case 1, case 2, case 3, $\Phi = 0^\circ \sim 240^\circ$).

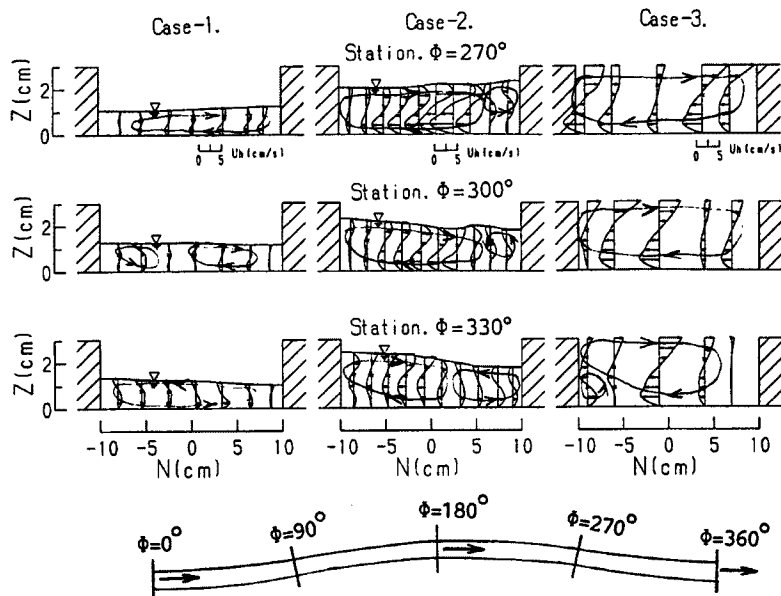


Fig. 14 (b). Helical flow distributions (Flat bed, case 1, case 2, case 3, $\Phi = 270^\circ \sim 330^\circ$).

布への影響である。

図示のように、case 3においては一つの断面に三つの渦を形成している領域があるが、左右岸に形成されているものが上述の第一の要因によるものであって、流路中心軸上のものが、第二の要因によって支配されており、これは、単断面のらせん流に相当するものと考えられる。

これらの渦は、横流入・流出強度のs方向の分布や主流の流線形状に応じて、合体・分離および発達・減衰を繰り返している。たとえば、 $\Phi = 0^\circ, 30^\circ$ においては、三つのらせん流（左岸より+s, -s, +sの成分をもつ渦）が形成されており、中央部の-s成分の渦は減衰・消滅過程にあり、兩岸の渦は横流入・流出量の増加に伴い発達過程にある。 $\Phi = 60^\circ$ になると、これらの渦は合体して、単断面における支配的な渦と同様な+s成分をもつ一つの渦になり、 $\Phi = 90^\circ \sim 120^\circ$ の領域において発達する。その下流で減衰し、 $\Phi = 180^\circ \sim 10^\circ$ においては再び三つの渦に分裂している。

いま、流路中心軸上の渦度に着目すれば、これが最も大きくなるのは $\Phi = 120^\circ \sim 150^\circ$ (+s成分) および $\Phi = 300^\circ \sim 330^\circ$ (-s成分)の領域であって、これらの領域は単断面の発達領域よりも、位相差において約 60° 下流に位置している。

Fig. 15 (a), (b) に示す平衡河床上におけるらせん流についてみると、次のような特性が分かる。平衡河床においては、平坦床の単断面において見られるような一對の渦や複断面における三つの渦の存在はそれほど明瞭ではない。これは、河床形状の影響が顕著なためであろう。

まず、単断面のcase 1,2のものについてみると、河床横断形状に対応したらせん流の形成がみられ、凹岸部の侵食深の大きい $\Phi = 30^\circ$ や $\Phi = 210^\circ$ を中心としてらせん流の強度は最も強く、平坦床のもの2倍以上になっている。さらに、その位相は、平坦床のものよりも位相にして約 30° ばかり上流に位置している。流路の転向点 $\Phi = 90^\circ$ 付近において殆ど減衰し、 $\Phi = 150^\circ$ 付近になると、-s成分をもつらせん流が形成され、下流へ向かって発達している。なお、らせん流の減衰・発達域においては、平坦床において見られる一對のらせん流らしきものが形成されている。

ついで、複断面のものについてみると、平坦床の場合より、らせん流は、さらに複雑な構造になっている。とくに、河床部の侵食があまり顕著でない領域において複雑である。これは、河床波が形成されていることにも一因がある。しかしながら、 $\Phi = 90^\circ, 120^\circ$ および $\Phi = 270^\circ$ とその上・下流においては、単断

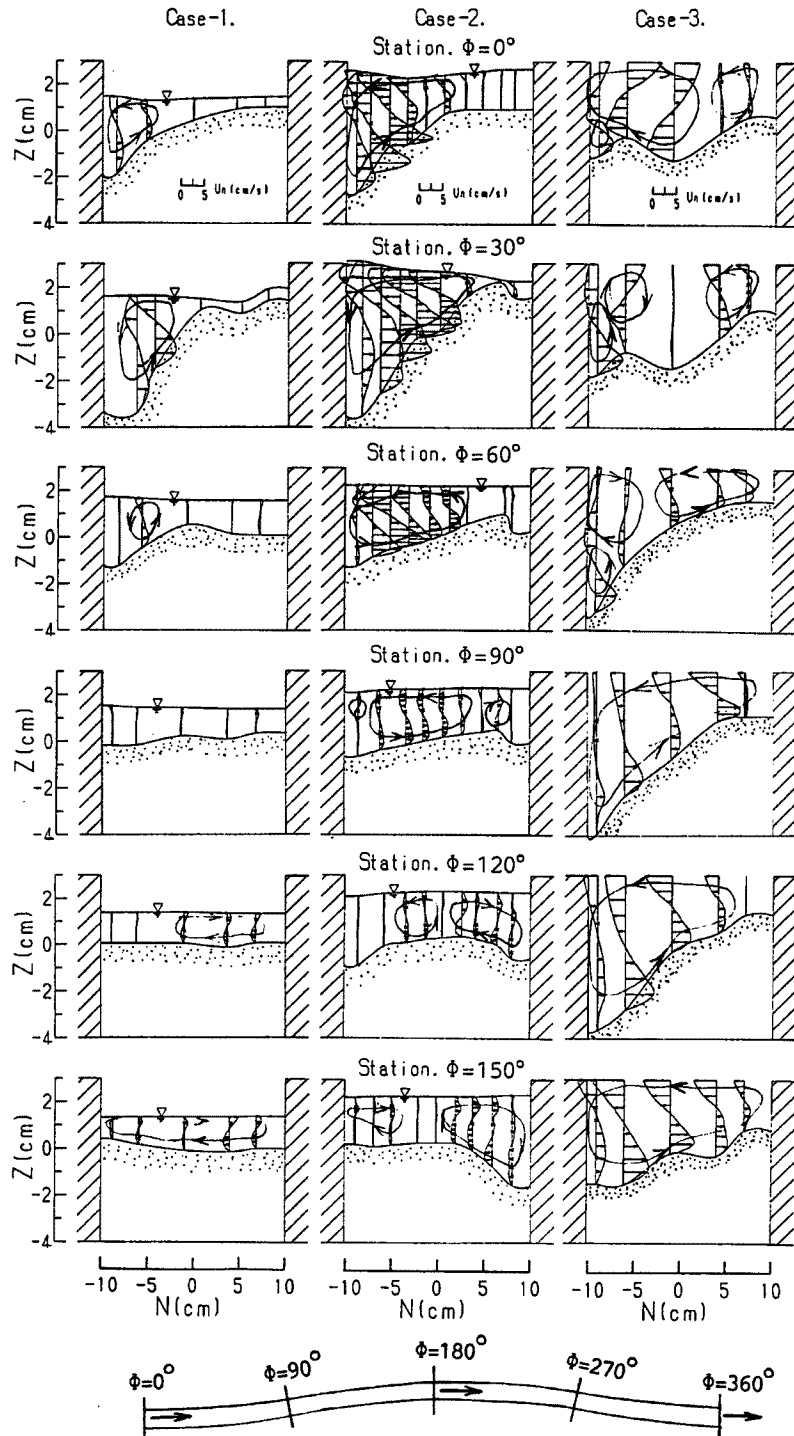


Fig. 15 (a). Helical flow distributions (Equilibrium bed, case 1, case 2, case 3, $\Phi = 0^\circ \sim 240^\circ$).

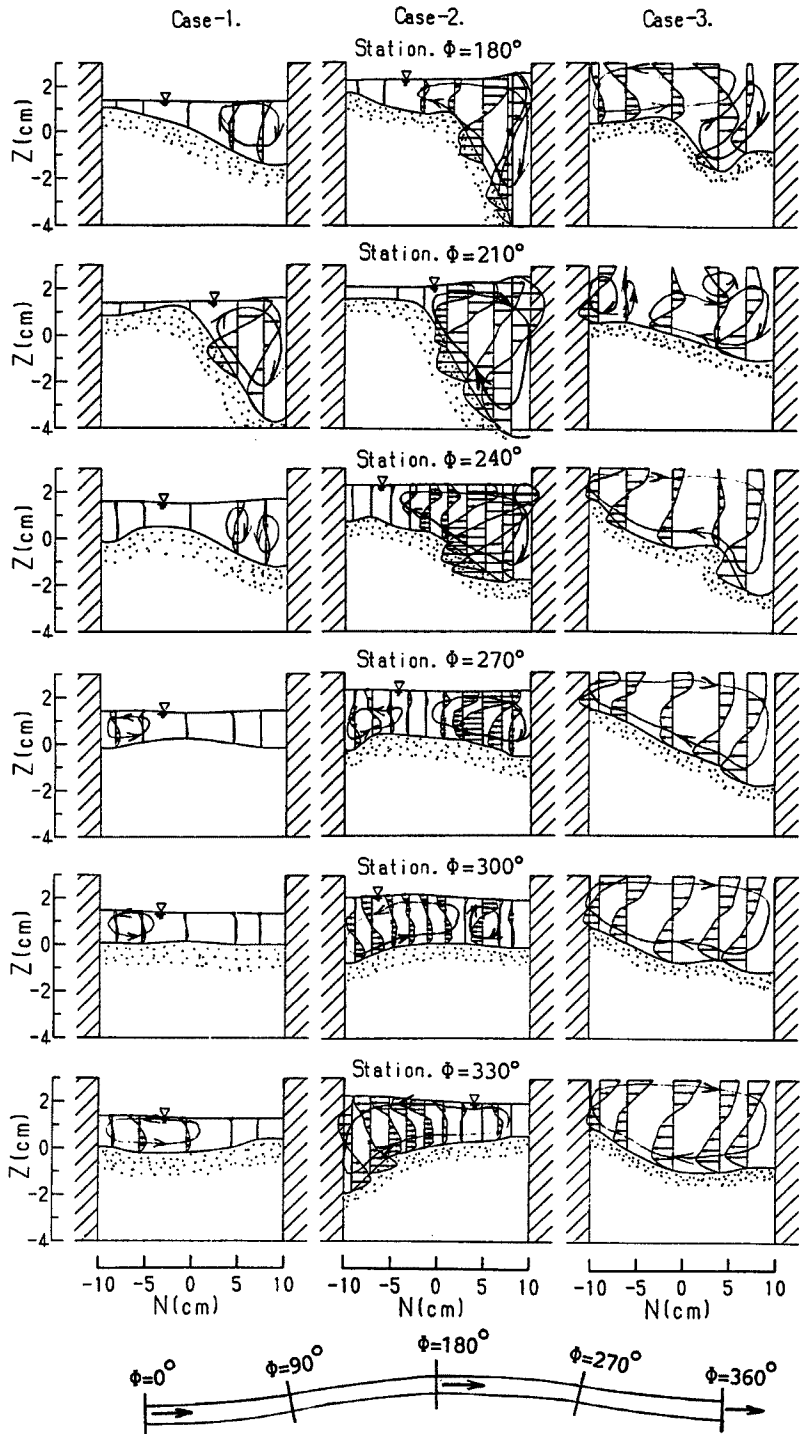


Fig. 15 (b). Helical flow distributions (Equilibrium bed, case 1, case 2, case 3, $\Phi=180^\circ \sim 330^\circ$).

面の場合に見られるように、流路の横断形状に対応して全断面にわたるようならせん流が形成されている。これらの領域は、横流入・流出の最も強く現われる流路の転向点付近にあり、単断面のものよりも約 60° ばかり下流側にシフトしている。

4. 河床変動に関する考察

4.1 単断面蛇行流路の河床変動の特性

(1) 平坦河床から平衡河床への遷移過程

平坦河床から平衡河床への遷移過程を調べるために、通水開始からいろいろな時点での河床形状を測定した。Fig. 16 には、case 1 について、通水後 6, 12, 18 および 24 分における河床形状の測定結果を示している。河床変動の初期段階 ($t=6$ min) では、流れ場は平坦河床のものと同様であるため、洗掘位置も Fig. 6 に示す流速ベクトル図に対応している。すなわち、洗掘は凸岸の上流側 ($\phi=90^\circ$ の右岸付近) か

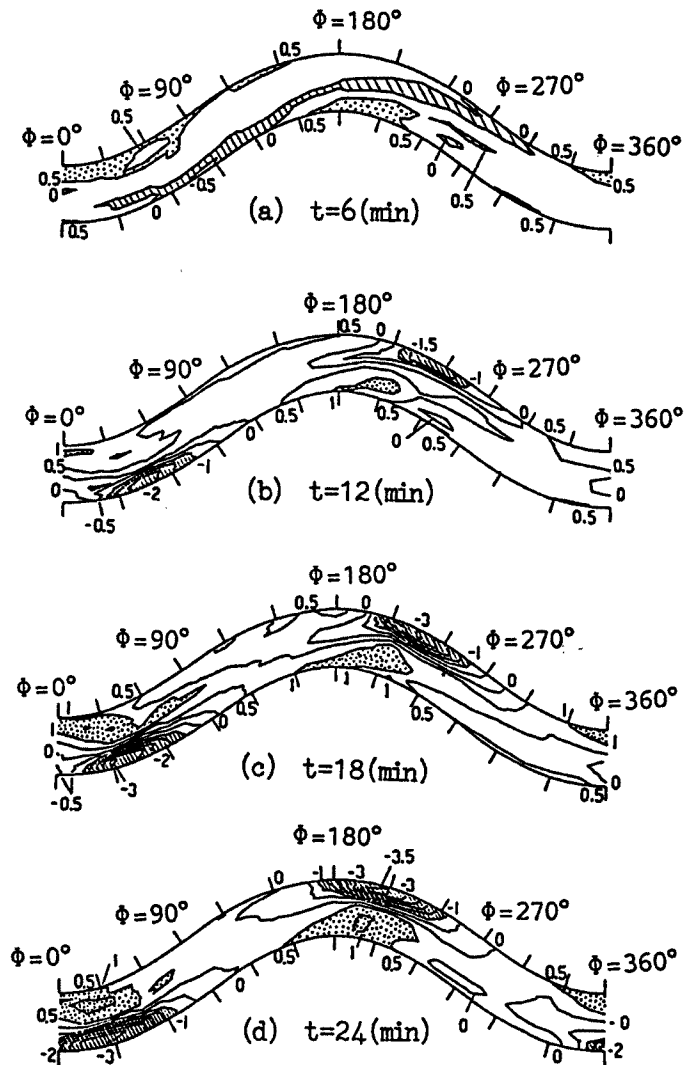


Fig. 16. Bed contour lines of the meandering channel bed variation (case 1).

Table 2. Experimental data for bed variations in meandering channel

| case | B (cm) | L (cm) | θ_{max} | Rc (cm) | i | q (1/s*cm) | H (cm) | dm (mm) |
|------|-------------------|-----------|----------------|------------|------|---------------|-----------|------------|
| 1 | 20 | 220 | 35° | 57.3 | 0.01 | 0.043 | 1.5 | 1.3 |
| 2 | 20 | 220 | 35° | 57.3 | 0.01 | 0.107 | 2.6 | 1.3 |
| 3 | 15 | 120 | 20° | 54.7 | 0.01 | 0.041 | 1.6 | 1.3 |
| 4 | 15 | 120 | 20° | 54.7 | 0.01 | 0.050 | | 1.3 |
| 5 | 15 | 120 | 20° | 54.7 | 0.01 | 0.061 | | 1.3 |
| 6 | 15 | 120 | 20° | 54.7 | 0.01 | 0.107 | 2.7 | 1.3 |
| case | q_s (g/s*cm) | Rc/B | Rc/H | H/B | H/L | D_{max}/H | ϕ' | T (min) |
| 1 | 0.048 | 2.86 | 38.2 | 0.07 | .007 | 2.33 | 20°~35° | 25 |
| 2 | 0.285 | 2.86 | 22.0 | 0.13 | .012 | 1.35 | 12°~35° | 5 |
| 3 | 0.048 | 3.65 | 34.2 | 0.11 | .013 | 1.87 | 15°~45° | 150 |
| 4 | 0.100 | 3.65 | | | | | 20°~60° | 40 |
| 5 | 0.186 | 3.65 | | | | | 30°~55° | 15 |
| 6 | 0.283 | 3.65 | 20.3 | 0.18 | .023 | 1.11 | 38°~70° | |

ら凹岸の下流側 ($\phi = 270^\circ$ の左岸付近) にわたる一帯の領域で起こり始める。時間とともに、洗掘による流水の集中と発散によりらせん流が発達して、それがさらに深掘れを促進し、その位置も上流へ移動して行く。その後、洗掘と堆積とが平衡して動的な平衡河床形状が形成される。

(2) 平衡河床形状に関する考察

Table 2 には単断面蛇行水路における平坦床から平衡河床への遷移時間、平衡河床における深掘れの位置および深さなど、一連の実験結果が示されている (case 3, 4, 5, 6 は参考文献 (9) によるもの)。ここに、 R_c : 最小曲率半径, H : 断面平均水深, q_s : 単位幅流砂量, D_{max} : 最大洗掘深, ϕ' : 深掘れの位相差, T : 平坦床から平衡河床への遷移時間である。これらの結果によれば、次のようなことが分かる。

- 流路の平面曲がり係数 R_c/B と勾配が一定のとき、 R_c/H が小さいほど、位相遅れは大きい。これは慣性係数 R_c/H が小さいほど流れの慣性効果が大きいためである。
- 慣性係数 R_c/H がほぼ同じである場合、平面曲がり係数 R_c/B が大きくなるほど、相対洗掘深 D_{max}/H が小さくなる。これは平面曲がり係数大きくなると、らせん流が弱められるからである。
- 水路形状と河床材料が同じ場合、単位幅流量の増加に従って、 D_{max}/H は小さくなることが見られる。
- 遷移時間は、流量の大きい方がはるかに短い。また流下方向の流砂量がほぼ同じである時には、 R_c/B および R_c/H が小さいほど、すなわち二次流が大きいほど、横断方向の流砂が活発であるので、平衡に達する時間は短い。

4.2 複断面蛇行流路の河床変動の特性

Fig. 17 (a), (b), (c), (d) は 3 ケースの平衡河床形状を示している。(a), (b) は、それぞれ under bankfull flow (case 1) および bankfull flow (case 2) である。(c), (d) は、overbankfull flow (case 3) のものであり、この実験では河床波が形成されていたことをつけ加えておく。河床波が形成される状態では、河床波の移動に伴って、流れや河床形状も時間的に変化するが、この変動はあくまでも平衡河床を中心とした変動であり、平衡河床形状が平均的な現象を支配することに変わりはない。

Fig. 17 に示すように、複断面蛇行低水路の平衡河床形状はかなり複雑な様相を呈している。単断面の

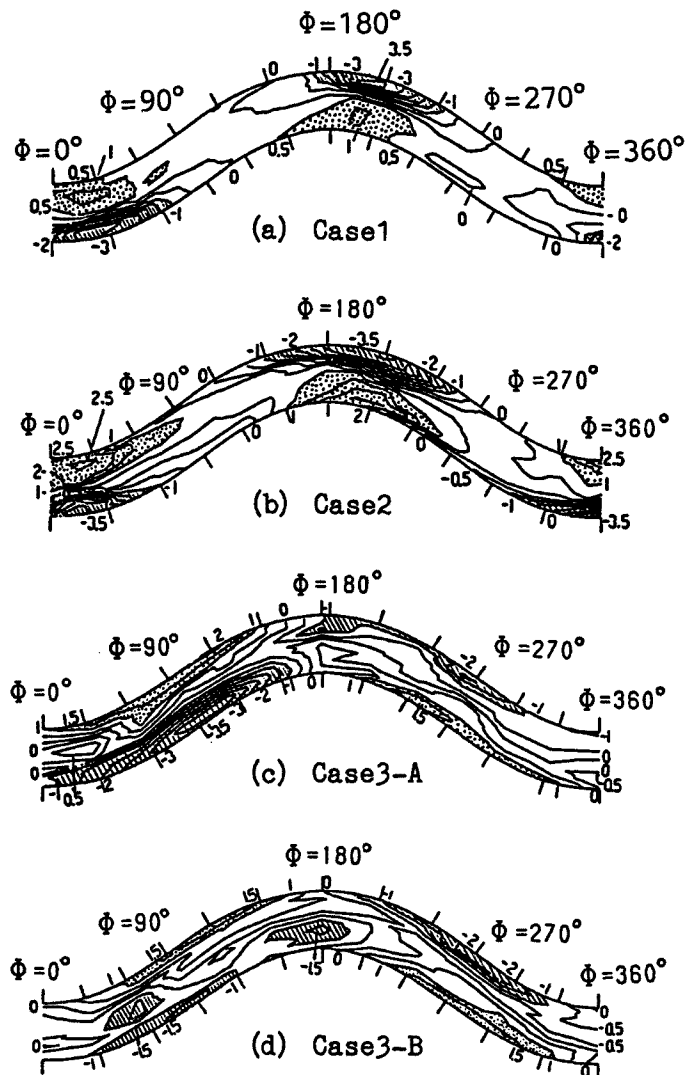


Fig. 17. Comparison of equilibrium bed contour lines. (case 1, case 2, case 3).

場合と比べてみると、(A) 深掘れの位相がより下流へシフトしていること、(B) 洗掘深がやや小さくなっていること、および (C) 洗掘範囲が広くなり、平坦に近い遷移河床の領域が非常に短いことなどの特徴が認められる。これらについては、次のように解釈される。(A)、(B)については、次のように考えられる。Fig. 18には、鉛直平均の最大流速を連ねた流跡線を示しているが、この図はFig. 7に示すように、高水敷流の流れ込みおよび低水路から高水敷への乗り上げというような相互作用によって、in-bank flowの垂直平均の最大流速線の位相が、単断面の場合より下流へシフトするとともに、流跡線の最大曲率

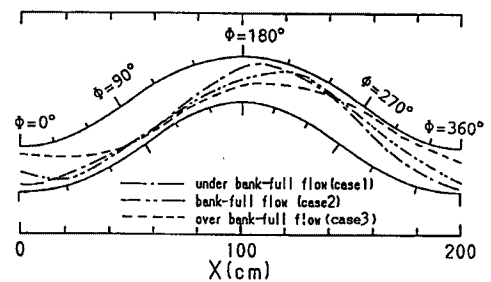


Fig. 18. Comparison of locus of depth-averaged high flow. (Equilibrium Bed).

も単断面のものより小さくなっている。もう一つの要因は流速の鉛直分布にもある。すなわち、3.2(2)に指摘したように、複断面の場合、場所によっては高水敷流と低水路流の混合作用で、低水路上の流速が平均化され、遠心力によるらせん流は単断面の場合よりも弱められる。これらのために、遠心力によるらせん流の発生・発達域が下流へシフトし、その強度も弱められている。(C)については、明らかに高水敷流の横断によって形成される側壁近傍のらせん流に起因したものと考えられる。

このような低水路流と高水敷流の相互作用による最大洗掘深の減少、深掘れ場所のシフト、および洗掘範囲の拡大は複断面蛇行低水路の河床変動におけるきわめて顕著な現象である。

5. 結 語

蛇行低水路を有する複断面流路の流れは、高水敷流と低水路流との相互作用や境界形状の影響を強く受ける。そのため、in-bank および over-bank の主流、二次流およびらせん流は、複断面直線流路や単断面蛇行流路のそれらとは非常に異なった特性を示す。それに関連して複断面蛇行低水路の河床変動も単断面の場合と違う様相を呈する。これらに関して、水路実験データに基づいて検討を行った。以下、本研究によって得られた主要な結果を要約する。

流れに関しては、次のような特性が明らかにされた。

- (1) 低水路の蛇行による水位上昇の影響によって、凹岸側の高水敷上に流速の遅い領域が形成される。
 - (2) 高水敷流 (over-bank flow) との相互作用のため、“高水敷流の蛇行化”と“低水路流の直線化”が顕著に現われる。
 - (3) 複断面蛇行流における高水敷流の蛇行特性は、様々の水理条件に支配される。本実験においては、最大流跡線の位相は低水路中心線の位相より $60^\circ \sim 90^\circ$ 程度遅れている。また、低水路流の最大流跡線の位相は単断面蛇行流のものよりかなり下流へシフトしており、またその曲率は小さくなっている。
 - (4) 高水敷流が低水路らせん流の分布に及ぼす影響は二つあると思われる。一つは低水路への流れ込み領域及び高水敷への乗り上がり領域に生じる流速ベクトルのねじれによる影響である。もう一つは低流速流体の流入に伴う混合作用によって流れの曲率および流速の鉛直分布が影響を受けることである。
 - (5) 単断面蛇行流においては、ある断面で一對の弱いらせん流が形成され、流下に伴い流線の曲率に対応した成分をもつらせん流が卓越するようである。
 - (6) 複断面蛇行流におけるらせん流の特徴は、一つのある断面に三つのらせん流が形成され、これらが流下に伴い合体・分裂、あるいは発達・消滅を繰り返していることである。また、このらせん流は、低水路の平衡横断形状と必ず対応している。
- 河床変動に関しては、次のようなことが明らかにされた。
- (7) 単断面蛇行流路における河床変動の初期段階では、洗掘は流路の転向点 $\phi = 90^\circ$ の右岸付近から $\phi = 270^\circ$ の左岸付近にわたる一帯の領域で起こり始める。時間とともに、洗掘による流水の集中と発散によりらせん流が発達して、それがさらに深掘れを促進し、その位置も上流へ移動して行くというプロセスが示されている。
 - (8) 平面曲がり係数 (R_c/B) および慣性係数 (R_c/H) は流路の平衡河床形状を支配する主要なパラメータである。平面曲がり係数 (R_c/B) が大きくなるほど、相対洗掘深が小さくなることや、慣性係数 (R_c/H) が小さいほど、深掘れの位相は大きいことなどを確認した。
 - (9) 複断面の平衡河床形状において、単断面の場合と比較して、(A) 深掘れの位相がより下流へシフトしていること、(B) 洗掘深がやや小さくなっていること、および (C) 洗掘範囲が広くなり、平坦河床に近いような遷移領域が非常に狭いこと、などの特徴が見られる。これらの現象について、流れの構造から解釈した。

以上、複断面蛇行流路の流れおよび河床変動と単断面の場合との相違がかなり明らかにされた。今後、これらの実験データに基づいて、二次元、三次元的な複断面蛇行河道の流れと河床変動シミュレーションモデルの開発に努めたい。

参考文献

- 1) Rajaratnam, N. and R.M. Ahmadi: Hydraulics of Channel with Flood Plains, Journal of Hydraulics Research, vol. 19, 1981, pp. 43-60.
- 2) 玉井信行（代表者）：複断面水路の組織渦と流れの抵抗に及ぼす効果，昭和60，61年度文部省科学研究成果報告書，1986.
- 3) 芦田和男・藤田正治・劉炳義：複断面直線水路における浮遊砂の輸送・堆積機構，京都大学防災研究所年報，第31号B-2，1988，pp. 461-475.
- 4) Toebes, G.H. and A.A. Sooky: Hydraulics of Meandering Rivers with Flood Plains, Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 93, No. WW 2, Proc. Paper 5240, May, 1967, pp. 213-236.
- 5) Pang Bingdong: Experimental Study on the Overbank Flow and Its Energy Loss, Collected Research Papers of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research Institute, China, Vol. XI Sedimentation, 1983, pp. 192-213. (in Chinese)
- 6) 今本博健・石垣泰輔：複断面弯曲開水路流れの水理特性に関する実験的研究，第27回水理講演会論文集，1983，pp. 67-72.
- 7) 木下良作：洪水時の沖積作用調査と適正複断面河道に関する実験的研究，文部省科学研究費自然災害特別研究（1），「沖積河川における洪水流の制御と治水安全度の向上に関する研究」（代表者岸力），1986，pp. 55-68.
- 8) 森明巨・岸力：昭和56年石狩川洪水で観測された弯曲部河床変動の特性，第30回水理講演会論文集，1986，pp. 493-498.
- 9) 芦田和男・江頭進治・足立幸郎：蛇行水路における河床変動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第31号B-2，1988，pp. 443-459.