

早稲田大学理工学部 正会員 鮎川 登

同 学生会員 O三村 隆

同 学生会員 半沢武志 山崎隆雄

1. まえがき 河床に砂礫堆(交互砂洲)が形成される河川では、砂礫堆が移動することにより種々の障害を生じる場合があるが、河道を適当な曲率で蛇行させることにより砂礫堆の移動を停止させることができ、治水及び利水上都合が良いことが指摘されている。本研究では、このような河道計画の観点から、砂礫堆の移動を停止させるような曲率及び弯曲角の小さい弯曲が連続する緩蛇行水路内の流れに関する実験を行ない、弯曲部における流れの特性について検討したものである。

2. 実験装置及び実験条件 実験に用いた蛇行水路は、全長 5.6^m 、幅 20^cm 、曲率半径 1.625^m 、波長 1.6^m 、振幅 5^cm のもの及び全長 5.6^m 、幅 10^cm 、曲率半径 0.813^m 、波長 0.8^m 、振幅 2.5^cm の二種類の鋼製水路であり、抵抗の比較のために全長 8.0^m 、幅 20^cm の鋼製直線水路も用いた。河床材料には平均粒径 0.18^mm 、 0.67^mm 、 0.82^mm 及び 2.3^mm の四種類の砂を用いて、それぞれ移動床及び平坦な固定床の状態で実験を行ない、水面形状と河床形状を測定した。また、移動床実験で形成された河床形状とそのまの形に固定し、河床形状が形成されている場合の流速分布を測定した。固定床の作製には合成ニス及びセメントを用いた。移動床の場合には、水路上流端で砂を補給しながら河床形状がほぼ安定したと思われるまで通水を続け、通水時間は $30\sim60$ 分であった。水路勾配は $1/75$ 、 $1/150$ 、 $1/300$ 、流量は粒径、水路勾配及び水路幅の組合わせで異なるが、全体としては $0.21\sim5.00^l/sec$ の範囲で変化させた。水面及び河床形状の測定にはポイントゲージ及びレベルを、流速分布の測定にはピトー管及びアロペラ式流速計を、流線方向の測定には先端に短い糸をつけたピトー管を用いた。

3. 水面形 同一条件下における平坦な固定床及び移動床上の流れの、左岸沿いの水位の縦断変化の一例を図-1に示す。平坦な固定床上では

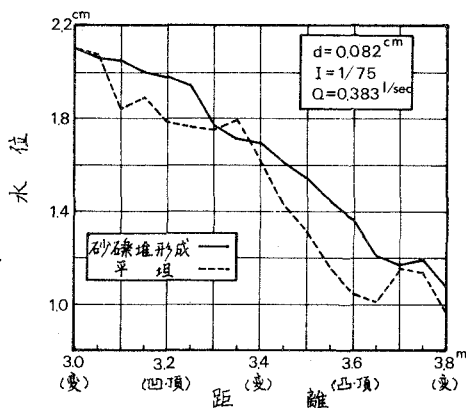
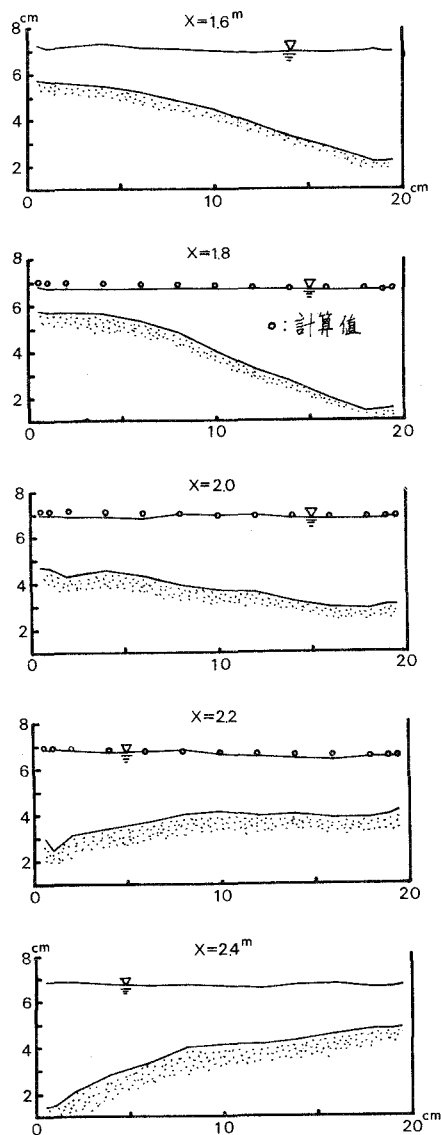


図-1 左岸水位の縦断変化

図-2 移動床の場合の水面の横断形状
 $d=0.82^mm$, $I=1/150$, $Q=3.0^l/sec$

水路壁に沿った水面勾配は、凹岸部頂点(3.2^m)と次の変曲点(3.4^m)との中間付近から凸岸部頂点(3.6^m)付近にかけて急勾配となり、凸岸部頂点(3.6^m)付近から次の凹岸部頂点(4.0^m)とその次の変曲点(4.2^m)との中間付近にかけて緩勾配となる。移動床の場合は、凹岸部頂点(3.2^m)付近から凸岸部頂点(3.6^m)付近にかけて急勾配となり、凸岸部頂点(3.6^m)付近から次の凹岸部頂点(4.0^m)付近にかけて緩勾配となり、平坦な固定床の場合と比較して水面勾配は一樣になる。これは、移動床の場合には河床が流れに則するように変化するためであると考えられる。

移動床実験の場合の、水面形の横断形状の一例を図-2に示す。この場合の左右岸の水位差は2.9~3.8^{mm}程度である。なお、流速分布の測定結果を用いて左右岸の水位差を

$$\Delta H = \int_{r_{in}}^{r_{ext}} \frac{u^2}{gr} dr$$

により計算した結果によると、平坦な固定床の場合も移動床の場合も実験値とほぼ一致した。ここに u は曲率半径 r における水流方向に平均した流速、 g は重力加速度、 r_{in} 及び r_{ext} は凸岸及び凹岸の曲率半径である。

各流線 同一条件下における平坦な固定床及び固定された河床形状上の流れの、水面及び河床に

おける流線の方向を図-3及び図-4に示す。図中の矢印の向きは流線の方向を表すものではなく、水路壁に平行な方向に対する流線の向きを表示している。平坦な固定床の場合には、河床の流線は凹岸から凸岸に向かう成分があり、二次流が存在していることを示している。しかし、水面と河床の流線のずれの角度は大部分の点で3°以下であり、二次流の強さは非常に弱いものと思われる。蛇行形状と河床面の流線との対応は、慣性のため1/8波長程度ずれている。主流線は凸岸部の上流側の水路壁にあたり、凸岸部頂点までは凸岸に沿い、そこから対岸の凸岸部の上流側に向かう。移動床の場合は、水面と河床の流線の向きは大部分の点で一致しているが、掘掘れ部では河床の流線は水路の中央部に向かっており、掘掘れ部ではらせん流が発生していることを示している。主流線は凹岸部頂点をかすめるようにほぼ直線的になる。

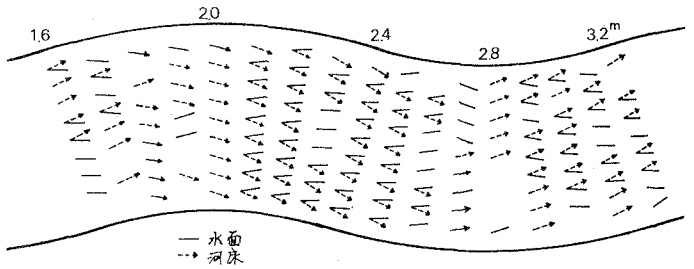


図-3 平坦な固定床における流線方向

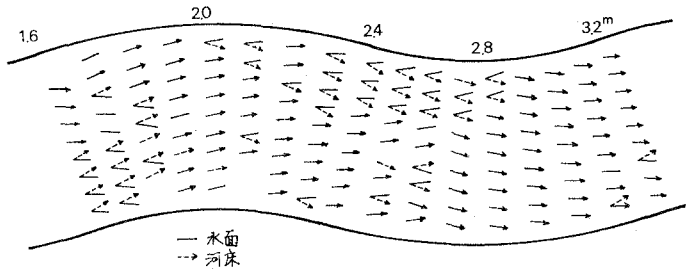


図-4 固定された河床形状における流線方向

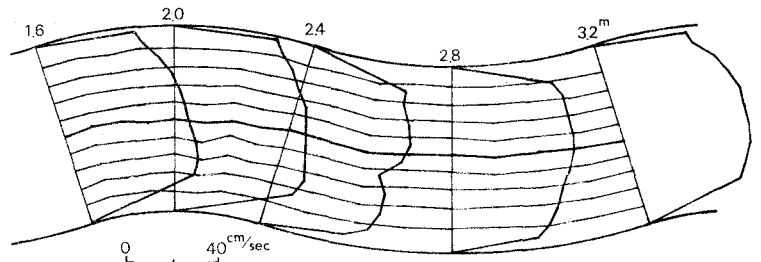


図-5 平坦な固定床における流速分布及び等流量線図

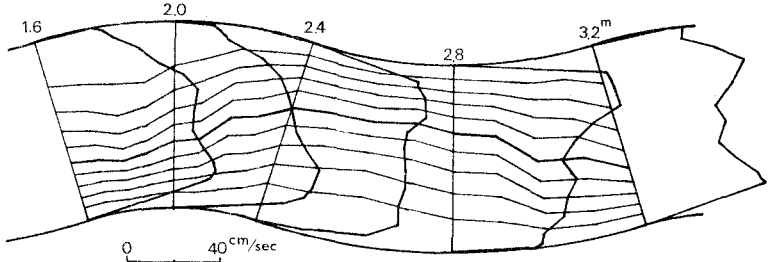


図-6 固定された河床形状における流速分布及び等流量線図

5.流速分布 平坦な固定床及び河床形状が形成された固定床上の流れの、水深方向に平均した流速分布の測定結果と等流量線図を図5及び図6に示す。平坦な固定床においては、流速分布は凹岸側より凸岸側のものが大きい自由渦型に近い分布をしており、等流量線の偏りはほとんどなく、流れは水路壁にほぼ平行になっていることがわかる。一方、河床形状が形成された固定床においては、流速分布は平坦な固定床の場合と同様に凸岸部の流速が凹岸部より大きくなっており、その傾向は一層顕著になっている。また、流れは深掘れ部に集中し、主流線が直線的になっていることがわかる。

6.流れの抵抗 直線水路と蛇行水路の底面に砂をはりつけ同じ条件で行なった実験により、蛇行による抵抗の増加について考察する。実験のレイノルズ数 $Re = u_m R / \nu$ (u_m : 平均流速, R : 半径, ν : 水の動粘性係数) の範囲は 2000~17000, 砂粒レイノルズ数 $u_* d / \nu$ (u_* : 摩擦速度, d : 粒径) の範囲は 4~102 である。したがって流れは滑面と粗面の中間領域の乱流であり、抵抗係数はレイノルズ数と相対粗度の関数として表示されるものと考えられる。滑面及び粗面の直線水路の抵抗則は次のように与えられる。

滑面 : $\frac{u_m}{u_*} = 3.0 + 5.75 \log \frac{u_* R}{\nu}$ あるいは $\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.51 + 4.07 \log (Re \sqrt{f})$ (1)

粗面 : $\frac{u_m}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log \frac{R}{k_s}$ あるいは $\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.24 + 4.07 \log \frac{R}{k_s}$ (2)

本実験の場合は滑面と粗面の中間領域の条件であるので、上式を適用することができない。ここでは、滑面と粗面の中間領域に対する抵抗則として、 $Re \rightarrow \infty$ のときに(2)式に、 $k_s \rightarrow 0$ のときに(1)式に漸近する次のような式を用いて実験データを解析した。

滑面と粗面との中間領域 : $\frac{u_m}{u_*} = 6.0 - 5.75 \log \frac{k_s}{R} \left(1 + \frac{3.32}{\frac{u_* k_s}{\nu}} \right)$
 あるいは $\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.24 - 4.07 \log \left(\frac{k_s}{R} + \frac{4.69}{Re \sqrt{f}} \right)$ (3)

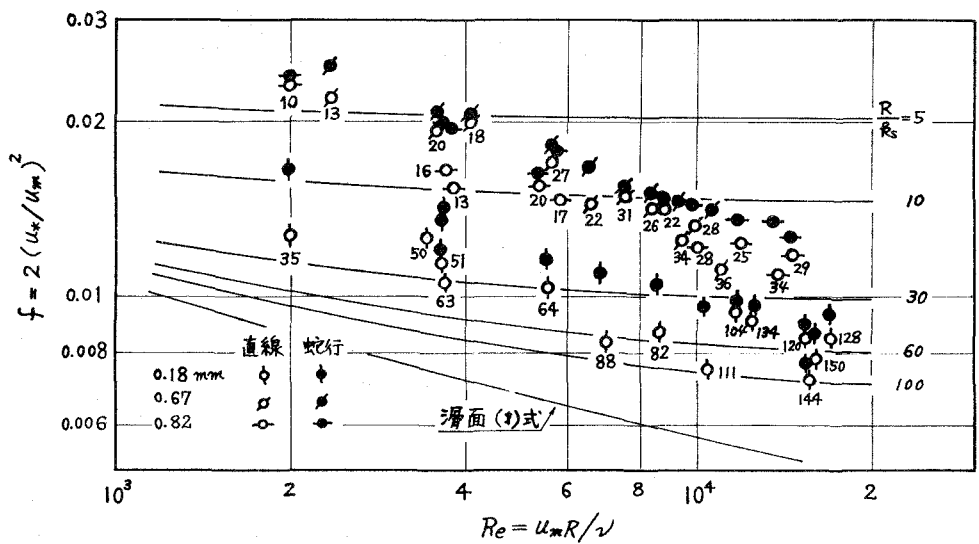


図7 直線水路と蛇行水路における流れの抵抗係数とレイノルズ数および相対粗度の関係 (図中の数値は R/d の値を表わす)

ここで、 k_s は相当粗度、 f は抵抗係数で、 $f = 2(U_*'/U_m)^2$ である。

実験値を用いて抵抗係数 f とレイノルズ数 Re の関係を示すと、図-7のようになる。図中の数値は R/d の値を示し、曲線は(3)式の関係を表わしているが、直線水路の実験値は $k_s=2d$ とすると、(3)式によってほぼ整理されることがわかる。実験値を用いて(3)式による k_s/d の値を求めると、直線水路の場合は1.2~3.7の範囲にあり、その平均値は2.25となり、蛇行水路の場合は2.0~5.0の範囲にあり、その平均値は3.3となる。図-7によると、蛇行水路の抵抗係数は直線水路の場合より2~30%（平均13%）増加し、流速係数 $\varphi = U_m/U_*' = \sqrt{2/f}$ は1~12%（平均6.0%）減少することがわかる。これは、蛇行水路では直線水路に比較して平均流速が0.5~9%（平均4.0%）減少し、平均水深が0.5~9%（平均4.4%）増加することに相当している。次に、 $6.0+5.75 \log(R/k_s) - U_m/U_*'$ と $U_*'k_s/\nu$ の関係を $k_s=2d$ としてプロットすると、図-8のようになる。実験値はかなりばらついているが、直線開水路の滑面と粗面の中間領域の抵抗は(3)式の関係により表示されることが認められる。

図-7によると、本実験の場合は抵抗におよぼすレイノルズ数の影響は小さいので、流速係数 U_m/U_*' と相対粗度 R/d の関係によって実験値を整理すると図-9のようになる。図中の、直線水路の実験値に対する直線（実線）は(2)式で $k_s=(2\sim3)d$ としたことに対応し、蛇行水路の実験値に対する直線（破線）は $k_s=(2.5\sim4.5)d$ としたことに対応することになり、(2)式の型で整理した場合より実験値に対する適合性が良かった。 U_m/U_*' と R/d の関係をManning-Strickler型の式、 $U_m/U_*' = 7.66(R/k_s)^{1/6}$ の型に整理すると、図中の直線水路の場合の関係は $k_s=2d$ としたことになり、蛇行水路の場合は $k_s=3.02d$ としたことになる。

なお、蛇行水路の場合について平坦な固定床と移動床の場合について抵抗を比較した実験の結果によると、移動床の場合の抵抗係数は平坦な固定床の場合に比較して小さくなり、直線水路における平坦な固定床の場合の抵抗係数とほぼ等しくなっていることがわかる。

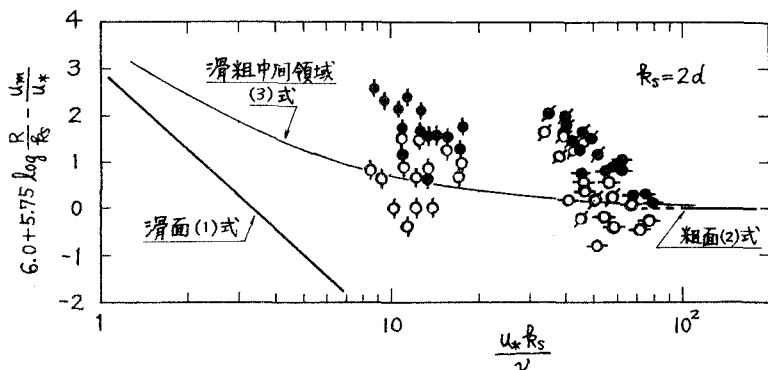


図8 滑面と粗面の中間領域の抵抗則

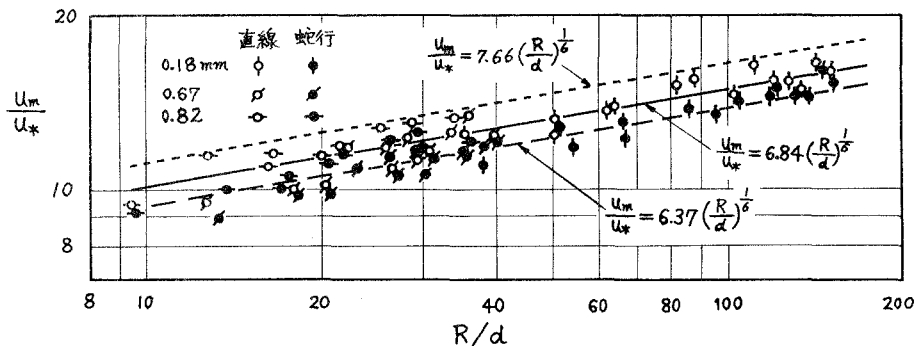


図9 直線水路と蛇行水路における流速係数と相対粗度の関係