

緩蛇行水路内の流れと彎曲部洗掘深

早稲田大学理工学部 正 会 員 鮎川 登

同 上 学生会員○三村 隆

1. ま え が き

河床に砂礫堆（交互砂洲）が形成される直線河道では、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と、砂礫堆の移動を停止させることができ、治水上および利水上都合が良いことが指摘されている。¹⁾ 本研究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および彎曲角の小さい彎曲が連続する緩蛇行水路内の流れと河床変動に関する実験に基づいて彎曲部における流れと洗掘深の特性について検討したものである。

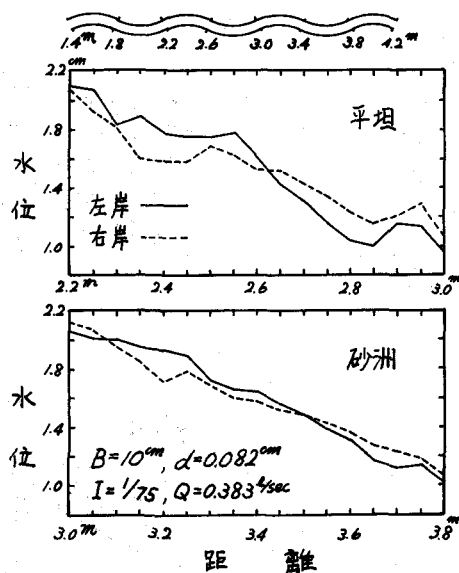
2. 実験装置および実験条件

実験には、長さ5.6 m、幅20 cm、曲率半径1.625 m、波長1.6 m、振幅5 cm、および長さ5.6 m、幅10 cm、曲率半径0.813 m、波長0.8 m、振幅2.5 cmの二種類の鋼製蛇行水路を使用した。移動床材料としては平均粒径0.18、0.67、0.82および2.3 mmのほぼ均一な四種類の砂を用いた。実験は移動床および砂を平坦にはりつけた固定床の状態で行ない、水面形状と河床形状を測定した。また、代表的な場合について移動床実験で形成された砂洲をそのままの形に固定し、砂洲上の流れの流速分布と流向を測定した。固定床の作製には合成ニスとセメントを用いた。移動床の実験の場合には、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が続けた（通水時間は10～60分であつた）。水路勾配は1/75、1/150および1/300、流量は0.21～5.00 ℓ /Sの範囲で変化させた。フルード数は0.51～1.56の範囲である。水面および河床形状の測定にはポイントゲージとレベルを、流速分布の測定にはビトー管を使用した。流向はビトー管の先端に短い糸をつけて測定した。

3. 緩蛇行水路内の流れ

蛇行水路内の流れの水位の測定結果の一例を図1に示す。図1には同一条件下における平坦な固定床および砂洲上の流れの左岸沿いと右岸沿いの水位の縦断変化が示されている。この図によると、蛇行水路内の流れの水路壁に沿う水面勾配は凹岸部の頂点から凸岸部の頂点にかけて急になり、凸岸部の頂点から凹岸部の頂点にかけては緩く、あるいは逆勾配になり、階段状を呈するが、砂洲上の流れの場合の方が平坦な固定床の場合より水面勾配は一様に近くなることがわかる。これは移動床の場合には水路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。また、図1によると、平坦な固定床の場合も砂洲上の流れの場合も凹岸部の水位は凸岸部の水位より大きくなるのがわかるが、これは遠心力の影響によると考えられる。

同一条件下における平坦な固定床および砂洲上の流れの水面と水路床における流向の観測結果を図2および図3に示す。図中の矢印および短かい実線は流線の実際の方角と大きさを表わすものではなく、水路壁に平行な方向に対す



図一 1. 水位の縦断変化

る流線の向きを表わしているだけであり、矢印や短かい実線が描かれていない点は流れが水路壁に平行であることを示している。また、図中の点線は主流部の範囲を示している。図2によると、平坦な固定床の場合には、水路床の流れに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が認められる。ただし、水路の蛇行形状と水路床の流向との対応は慣性のために1/8波長程度ずれている。水面と水路床の流線のずれの角度は水衝部となる凸岸の上流側の部分で8~17度であるが、他の大部分の点では3度以下である。主流は凸岸部の上流面の水路壁にあたり、凸岸部頂点までは凸岸に沿い、凸岸部頂点から対岸の凸岸部の上流面に向かい、緩やかに蛇行する。砂洲上の流れ(図3)の場合には、水面と水路床の流線の向きは大部分の点で一致しているが、深掘れ部では水路床の流線は水路中央部に向かっており、深掘れ部ではらせん流が発生していることが推定される。主流は凸岸部の上流面にあたり、凸岸頂部をまわって変曲点付近で水路壁から離れ、同じ岸の下流の凸岸上流面にあたるようになる。

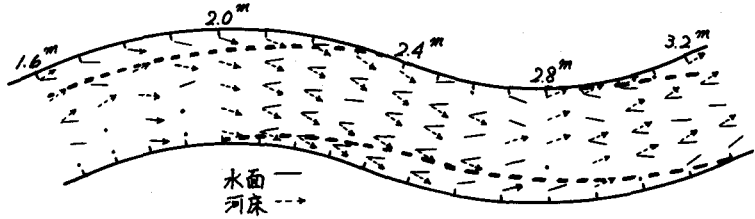


図-2 平坦固定床上の流れの流向

平坦な固定床および固定された砂洲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4および図5に示す。これらの図によると、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方が大きい自由渦型の分布をしており、流量の偏りはほとんどないが、固定された砂洲上の流れの場合は流れが深掘れ部に集中し、凸岸部の流速が凹岸部より大きくなる傾向が一層顕著になっていることがわかる。

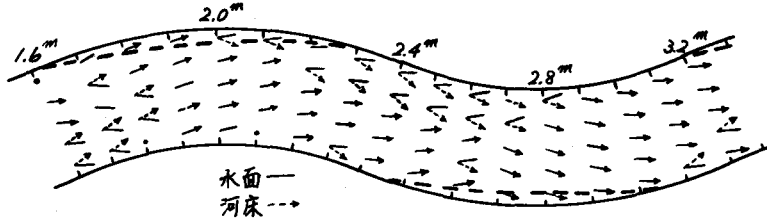


図-3 砂洲上の流れの流向

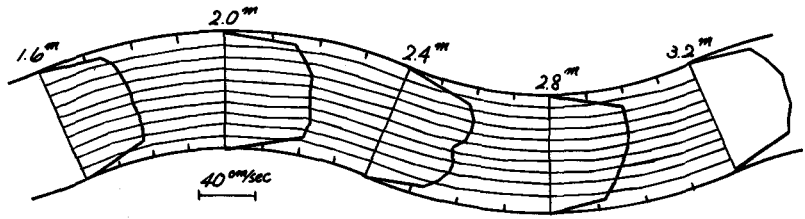


図-4 平坦固定床上の流れの流速分布と等流量線図

つぎに、幅20cmの直線水路と蛇行水路の底面に砂を平坦にはりつけ、同一の条件で行なった実験の結果に基づいて水路の蛇行による抵抗の増加について考察する。実験のレイ

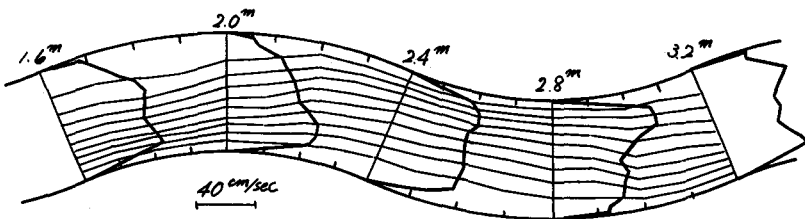


図-5 砂洲上の流れの流速分布と等流量線図

ノルズ数 $Re = U_m R / \nu$ (U_m : 平均流速, R : 径深, ν : 水の動粘性係数) の範囲は 2,000 ~ 17,000, 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。滑面および粗面の直線開水路の抵抗則はつぎのように与えられている。

$$\text{滑面: } U_m / U_* = 3.0 + 5.75 \log (U_* R / \nu), \quad 1 / \sqrt{f} = 1.51 + 4.07 \log (Re \sqrt{f}) \quad (1)$$

$$\text{粗面: } U_m / U_* = 6.0 + 5.75 \log (R / K_s), \quad 1 / \sqrt{f} = 4.24 + 4.07 \log (R / K_s) \quad (2)$$

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はできないと思われる。ここでは, 滑面と粗面の中間領域に対する抵抗則として, $K_s \rightarrow 0$ のとき(1)式に, $Re \rightarrow \infty$ のとき(2)式に漸近するつぎのような式を用いて実験データを解析した。

$$U_m / U_* = 6.0 - 5.75 \log [(K_s / R) (1 + 3.32 / U_* K_s / \nu)] \quad (3)$$

$$1 / \sqrt{f} = 4.24 - 4.07 \log [(K_s / R) + 4.69 / Re \sqrt{f}]$$

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 R/d をパラメータとして抵抗係数とレイノルズ数の関係をプロットすると図 6 のようになる。図中の曲線は(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。実験データを用いて(3)式により 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 6 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%) 増加し, 流速係数 U_m / U_* は 1 ~ 12% (平均 6.0%) 減少することに相当している。つぎに, $6.0 + 5.75 \log (R / K_s) - U_m / U_*$ と $U_* K_s / \nu$ の関係を $K_s = 2d$ としてプロットすると図 7 のようになる。実験値はかなりばらついてはいるが, 直線開水路の滑面と粗面の中間領域の抵抗は(3)式により表示されることが認められる。

図 6 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, 流速係数と相対粗度の関係によって実験値を整理すると図 8 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)および蛇行水路の実験値に対する直線(破線)はそれぞれつぎのような式になる。

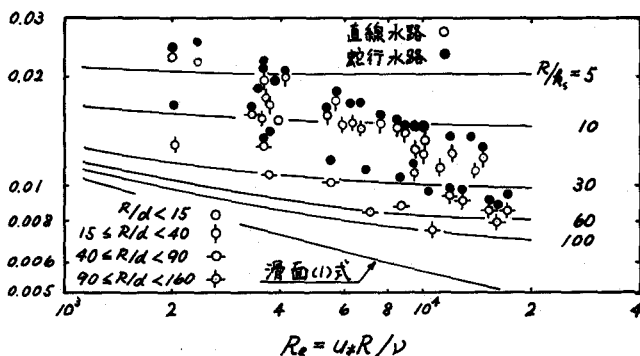


図-6 直線水路と蛇行水路の抵抗係数

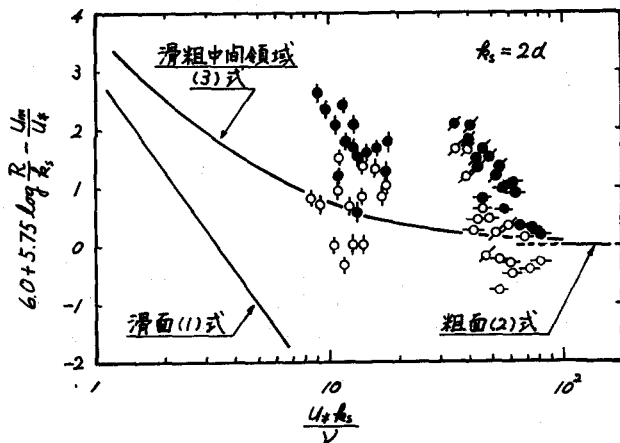


図-7 開水路の滑面・粗面の中間領域の抵抗則

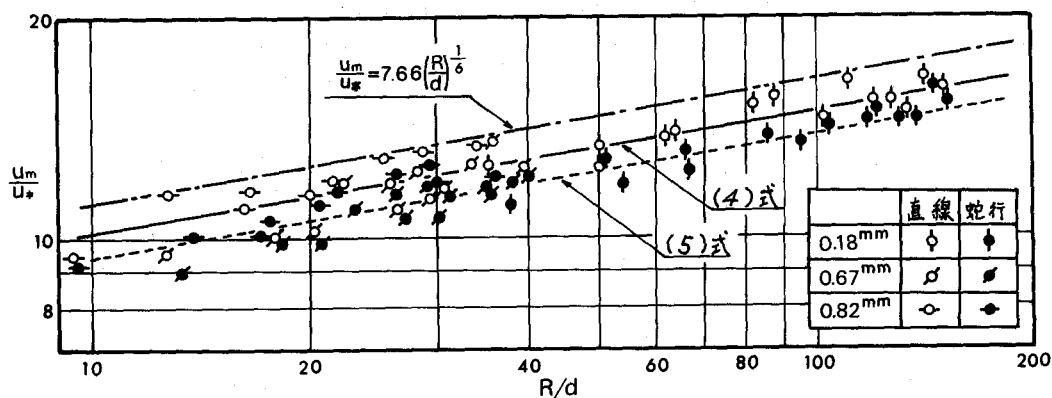


図-8 直線水路と蛇行水路の流れの U_m/U_* と R/d の関係

$$\text{直線水路: } U_m/U_* = 6.84 (R/d)^{1/6} = 7.66 (R/2d)^{1/6} \quad (4)$$

$$\text{蛇行水路: } U_m/U_* = 6.37 (R/d)^{1/6} = 7.66 (R/3d)^{1/6} \quad (5)$$

(4)式は(2)式で $Ks = (2 \sim 3)d$ としたことに対応し、(5)式は $Ks = (2.5 \sim 4.5)d$ としたことに対応するが、(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。

水路の蛇行による抵抗の増加をもたらす一因として水路壁に沿う水深の縦断変化が考えられる。水深の縦断変化によって一波長内の流水が受ける抵抗力を F とし、潤辺を S 、波長を λ 、水の密度を ρ とすると、 F による抵抗係数の増加高 Δf は次式によって計算される。

$$F/S\lambda = \Delta f (\rho U_m^2 / 2) \quad (6)$$

水路壁に沿う水深の測定値を用いて F を求め、上式から Δf を計算したところ、蛇行による抵抗係数の増加高の2～5割程度の値が得られた。

なお、蛇行水路の場合について平坦な固定床と移動床の抵抗を比較した5ケースの実験結果によると、移動床の場合の抵抗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とほぼ等しくなることが認められた。

4. 彎曲部洗掘深

蛇行水路内の河床変動の特性を調べるために、流量、勾配および砂の粒径を種々に変化させて実験を行なった。実験結果の一例を図9に示す。本実験の範囲内では、蛇行水路内の河床変動の定性的な傾向はどの実験条件の場合も同じようであった。すなわち、凹岸頂部のやや下流から凸岸沿いに凸岸頂部の下流まで洗掘され、洗掘された砂は水路に沿って流送され、同じ岸の凸岸下流から凹岸頂部にかけて堆積する。最大洗掘部は凹岸から凸岸への変曲点付近に生じる。洗掘および堆積が生ずる場所と最大洗掘深の生ずる場所は実験

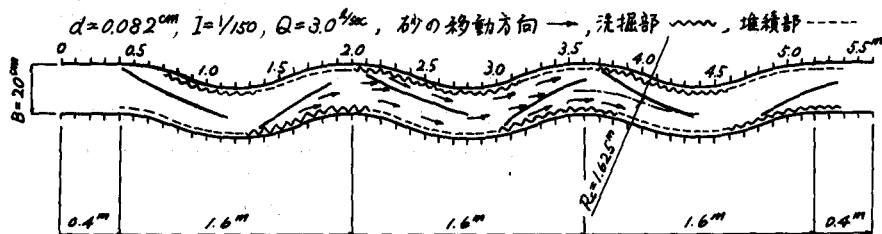


図-9 蛇行水路内の河床変動図

条件によって殆んど変化しないが、洗掘部の幅および最大洗掘深は流量が増加するにつれて大きくなる傾向が認められた。以下では洗掘深の特性について考察する。

同一横断面内の最高点と最低点の高さの差のうち、蛇行水路の半波長の区間における最大値をその区間の洗掘深とし、横断測量の結果から各区間における洗掘深を求め、それらの平均値をその実験条件に対する洗掘深 ΔZ とした。実験によると、水面勾配が急で、流速が加速される凹岸から凸岸にかけて水路床が洗掘され、水面勾配が最も急になる凹岸から凸岸への変曲点付近で最大洗掘が生じ、凸岸から凹岸にかけての水面勾配が緩く、あるいは逆勾配になるところで堆積が生ずること、および彎曲による流量分布の偏りは殆んどなく、砂粒子も水路にほぼ平行に移動することなどから本研究で対象にしたような緩蛇行水路における洗掘現象は水路が蛇行していることにより生ずる流れ方向の水面勾配の変化に関係するものと考えられる。水路が蛇行していることにより生ずる流れ方向の凹岸と凸岸の水位差 ΔH は横断面内の凹岸と凸岸の水位差とほぼ等しいと考え、 ΔH は近似的に次式で与えられるものとする。

$$\Delta H = (U_m^2 / g r_c) B \tag{7}$$

そうすると、水面勾配は

$$\Delta I = \Delta H / L = (U_m^2 / g r_c) (B / L) \tag{8}$$

だけ増加し、無次元掃流力は

$$\begin{aligned} \Delta U_*^2 / (\sigma / \rho - 1) g d &= g R \Delta I / (\sigma / \rho - 1) g d = (B / L) (R / r_c) \\ &\times U_m^2 / (\sigma / \rho - 1) g d = (B / r_c) (R / L I) Fr^2 \tau_* \end{aligned} \tag{9}$$

だけ増加することになる。ここで、 B は水路幅、 r_c は水路中心線の曲率半径、 L は水路蛇行の半波長、 I

は水路勾配、 R は径深、 $Fr = U_m / \sqrt{g R}$ は流れのフルード数、 g は重力の加速度、

$\tau_* = U_*^2 / (\sigma / \rho - 1) g d$ は無次元掃流力、 σ は砂の密度、

ρ は流水の密度である。この掃流力の増加によって局所洗掘が生じるものとする。洗掘深 ΔZ に関する無次元量としては $\Delta Z / h$ 、 $\Delta Z / d$ あるいは $\Delta Z / L I$ などが考えられる。これらの無次元量と(9)式で与えられる無次元掃流力の増加量との関係を実験値を用いて検討したが、良い結果は得られなかった。つぎに、洗掘深に関する無次元量として $(\Delta Z / d) (\Delta Z / L I)^n$ をとり、(9)式の無次元量との関係を検討したところ勾配をパラメータとして実験値はかなりよく整理されることが認められた。そこで、洗掘深に関する無次元量として $(\Delta Z / d)$

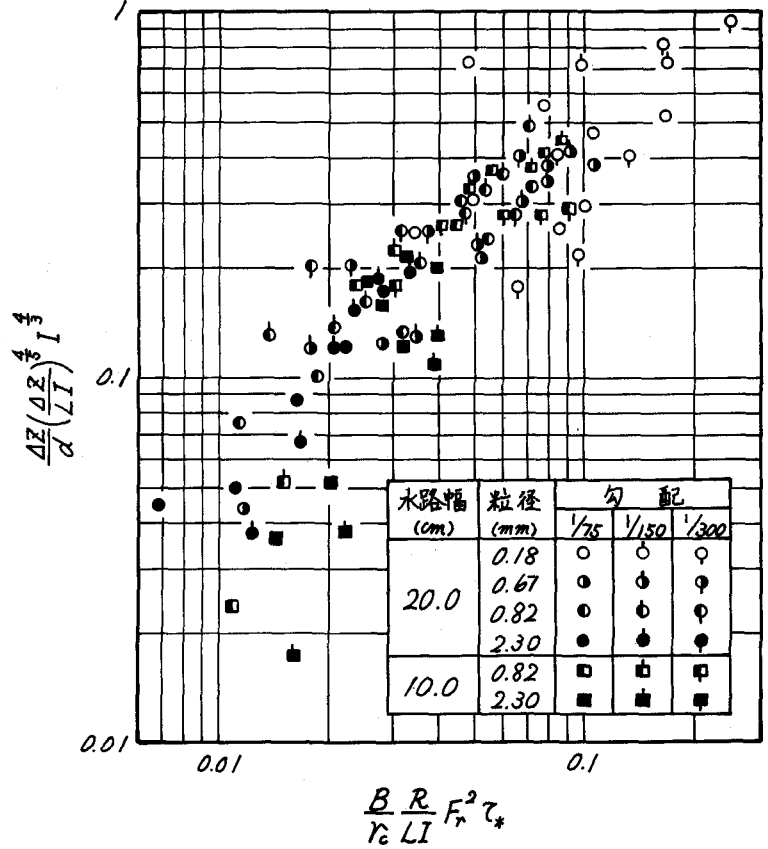


図-10 緩蛇行水路内の彎曲部洗掘深

$(\Delta Z/LI)^n I^m$ を採用し、実験値を用いてこの無次元量と(9)式の無次元量との関係を n および m の値をいろいろに変えて検討した。その結果、本実験の範囲内では、 $n = 4/5$ 、 $m = 4/3$ とすると、実験値のプロットのばらつきが小さくなることがわかった(図10)。

緩蛇行水路内の彎曲部洗掘深は水路の形状(蛇行の曲率、波長、振幅、水路幅)、勾配、水深、砂の比重、粒径など多くの要因に関係すると考えられる。本実験に使用した蛇行水路は二種類だけであり、また規模も非常に小さいために、実験条件の範囲が限られているので、彎曲部洗掘深に関しては今後さらに実験的な検討を加える必要があるが、本実験の場合に対しては図10がこれらの間の関係を示すものである。すなわち、緩蛇行水路内の彎曲部洗掘深は水深、流速あるいはフルード数、掃流力、水路幅が大きくなると大きくなり、勾配、曲率半径が大きくなると小さくなる傾向があることがわかる。

最後に、実験と資料整理に尽力された吉清孝、半沢武志、山崎隆雄の各氏に謝意を表する。また、本研究は文部省科学研究費・総合研究(A)(研究代表者 北海道大学工学部 岸力教授)の補助を受けた。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 木下良作：河道平面計画試論，1972年度水工学に関する夏期研修会講義集，Aコース，土木学会水理委員会，1972年7月。