

II-63

堤防と低水路の位相差が複断面蛇行水路における河床変動に与える影響

北海道大学大学院 ○学生会員 松山 洋平
 北海道大学大学院 ◻️学生会員 黒木 幹男
 北海道大学大学院 ◻️学生会員 板倉 忠興

1.はじめに

複断面蛇行水路における流れは、単断面における流れと異なり、高水敷に乗り上げる流れや低水路に落ち込む流れが生じる。河床もそのような流れの影響を受けるため、単断面とは異なった変動を示す。複断面水路における流れや河床変動を特徴付けるインデックスとして、高水敷と低水路の粗度比や、高水敷水深と低水路水深の比で表される相対水深などがあるが、本研究では複断面蛇行水路における堤防と低水路の位相差が砂州の挙動に及ぼす影響を数値実験的に比較する。

2.数値解析の基礎式

本研究では、以下の2次元浅水方程式を用いて、差分法により流れの場の解析を行った。

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + \frac{uv}{r} = -g \frac{\partial H}{\partial s} + 2 \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right) - \frac{\tau_s}{\rho h} \quad (1)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} - \frac{u^2}{r} = -g \frac{\partial H}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial n} \left(\epsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right) - \frac{\tau_n}{\rho h} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rvh)}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

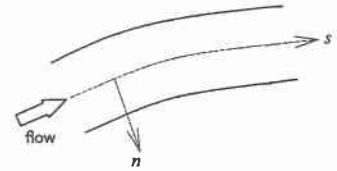


図-1 座標系の定義

ここで、 s 、 n は流下方向および横断方向軸、 u 、 v はそれぞれ s 軸方向、 n 軸方向の流速成分、 H は水位、 h は水深、 r は流路の曲率半径、 ρ は水の密度、 ϵ は渦動粘性係数、 g は重力加速度、 τ_s 、 τ_n はそれぞれ s 軸方向および n 軸方向の河床せん断力である。 τ_s 、 τ_n はManning則を用いて次式より計算する。

$$\frac{\tau_s}{\rho} = \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \frac{\tau_n}{\rho} = \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)$$

ここで、 n はManningの粗度係数である。流下方向および横断方向の流砂量 q_{Bs} 、 q_{Bn} は、次のMeyer-Peter-Müllerの式(5)および長谷川の式(6)により求める。

$$\frac{q_{Bs}}{\sqrt{Sgd^3}} = 8 \left(\tau_s' - \tau_{*c} \right)^{1.5} \quad (5)$$

$$q_{Bn} = q_{Bs} \left(\frac{v}{u} - N \cdot \frac{h}{r} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_K \tau_s}} \frac{\partial z}{\partial n} \right) \quad (6)$$

ただし、 S は河床材料の水中比重、 d は河床材料の粒径、 τ_{*c} 、 τ_s' はそれぞれ無次元限界せん断力、無次元有効せん断力、 μ_s および μ_K はそれぞれ河床材料の静止および動摩擦係数、 z は河床高である。無次元限界せん断力 τ_{*c} は岩垣式で、無次元有効せん断力 τ_s' は岸・黒木による式で求める。また、河床高は流砂の連続式(7)により求める。

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bs}}{\partial s} + \frac{\partial q_{Bn}}{\partial n} \right) = 0 \quad (7)$$

Effects of the phase shift in composed cross section meandering channels to the bed deformation
 by Youhei MATSUYAMA, Mikio KUROKI and Tadaoki ITAKURA

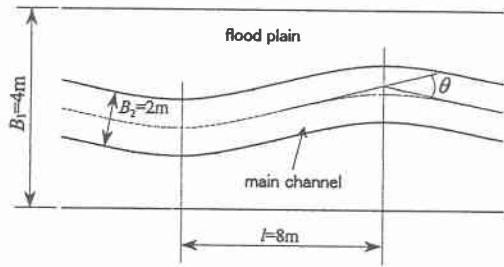
ここに、 t は時間、 λ は河床材料の空隙率である。以上の式を用いて、SOR 法により陰的に流速・水位および河床変動量を求める。

3. 低水路の蛇行角の違いによる砂州の挙動

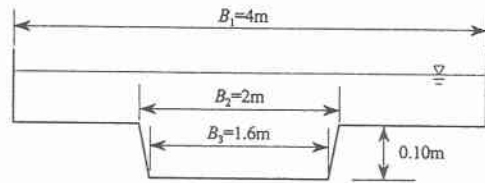
(1) 計算条件

ここでは、堤防が直線で低水路のみ蛇行している水路を想定し、低水路の蛇行角を変化させたときの砂州の挙動を比較する。

低水路の線形は波長 $2\lambda=16\text{m}$ の sine-generated curve で、水路幅 $B_1=4\text{m}$ 、低水路幅 $B_2=2\text{m}$ とする。上下流端は水理条件が等しくなるように設定し、水路が無限に続いているものとする。低水路の曲がり角度を、木下・三輪¹⁾ にならって図-2(a)のように定義し、 θ を $0^\circ \sim 25^\circ$ まで 5° 刻みで変化させる。その他の水理条件はすべてのケースで同一とし、流量は $0.115\text{m}^3/\text{sec}$ 、Manning の粗度係数は 0.026 、河床勾配は $1/1000$ 、河床材料の粒径は 0.9mm としている。



(a) 水路平面図



(b) 水路標準断面図

図-2 水路形状

(2) 計算結果および考察

図-3は横軸に時間、縦軸に低水路左岸側および右岸側における crest の上流端からの距離をとったものである。図中●は左岸側、●は右岸側の値であり、一点鎖線は計算区間の中心(上流端から 8m)の位置を表

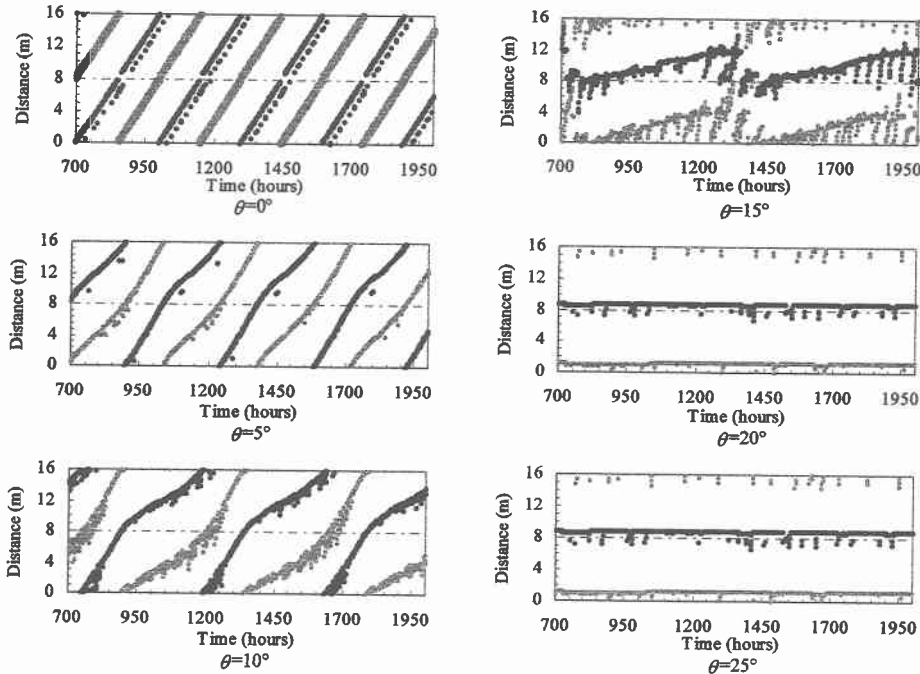


図-3 crest の位置の時間変化

している。 θ が大きくなるにつれ、砂州の移動速度が遅くなり、 $\theta=20^\circ$ では砂州はまったく移動しなくなる。また $\theta=15^\circ$ においては、砂州は若干上下流方向に移動するが、ほぼ一定の位置にとどまる。これは $\theta=15^\circ$ 付近が砂州の停止限界であり、遷移領域にあることを示しているものと思われる。図-4に砂州の停止限界を示す。図中の○は、本解析に用いた水路の値である。ただし、 B は図-2(b)における B_3 を用いている。この図からも、 θ が約 15° で砂州の移動が停止することが確認できる。

$\theta=5^\circ$ および $\theta=10^\circ$ においては、蛇行の外岸側で砂州の移動速度が遅くなり、内岸側では遅くなっている。これは、一般に湾曲部内岸側では堆積が卓越するため、内岸側を砂州が通過するときには移動速度は遅くなり、逆に外岸側では洗掘が卓越するために移動速度が速くなると考えられる。

図-5にcrestの位置と砂州の波高の関係を、 $\theta=10^\circ$ および $\theta=20^\circ$ について示す。図-3と同様に、●は左岸側、●は右岸側の値である。 $\theta=10^\circ$ については、砂州が湾曲外岸側を通過した直後には波高は低くなり、内岸側を通過した直後には波高が高くなっている。これも前述のように、砂州が通過する場所において、洗掘と堆積のどちらが卓越しているかに依存しているものと思われる。しかし、単断面蛇行水路における河床変動計算と比較しても、明確な相違は見られなかった。これは複断面水路における流れと河床変動は、高水数と低水路の粗度比や複断面水路における流れの3次元性の強さに依存する部分があり²⁾、2次元浅水流モデルを用いて低水路と高水数の粗度を等しいとした本解析では、複断面水路の流れの特性を十分に再現できていないものとも考えられる。したがって、高水数と低水路の粗度比や水路幅と低水路幅の比を変え、あるいは流れの3次元性を考慮したモデルを用いて計算を行い、さらに詳細な検討を行う必要があるものと思われる。

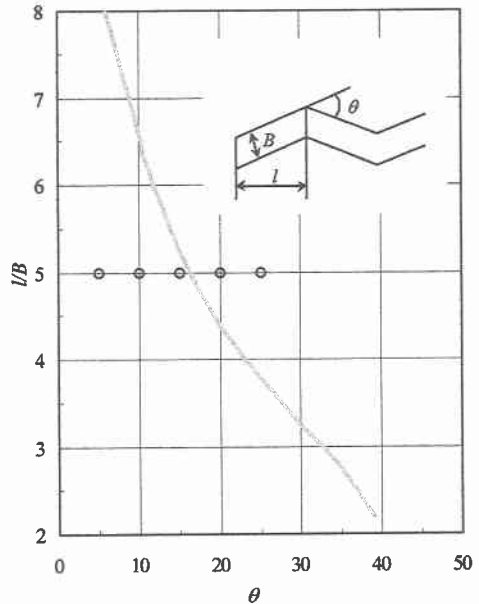


図-4 蛇曲水路における砂州の停止限界¹⁾

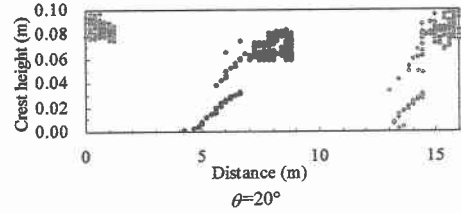
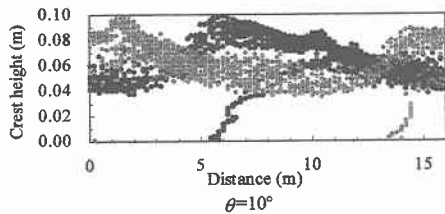


図-5 crestの位置と砂州の波高の関係

4.堤防と低水路の位相差が砂州の挙動に及ぼす影響

(1)計算条件

次に、堤防と低水路が共に蛇行しており、位相差がある場合の河床変動について考察を行う。ここでは表-1、図-6および図-7に示すような水路を想定して、砂州が移動する条件で計算を行った。水路横断形状は図-2(b)と同様で、 $B_1=4m$ 、 $B_2=1.6m$ 、 $B_3=1.4m$ とした。また、流量は $0.115m^3/sec$ 、Manning

表-1 計算ケース

Case	Phase shift
P-1	0
P-2	$\pi/2$
P-3	π
P-4	$3\pi/2$

の粗度係数は 0.03、河床勾配は 1/1000、河床材料の粒径は 0.9mm、堤防および低水路の波長は共に 9m とした。

(2) 計算結果および考察

前節と同様に、図-8 に crest の位置の時間変化を、図-9 に crest の位置と砂州の波高の関係を示す。さらに高水敷に乗り上げる、あるいは低水路に落ち込む流量を調べるため、図-10 に高水敷を流れる流量の変動を示す。変動流量は、左岸あるいは右岸側の高水敷を流れる流量の時間平均値からの変動量とし、次式により求める。

$$Q_f = \frac{Q_p - Q_m}{Q_m} \quad (8)$$

ここに、 Q_f は変動流量、 Q_p は左岸または右岸側の高水敷を流れる流量、 Q_m は高水敷上の流量の時間平均値である。図-10 に示される流量は、上流端から 4.5m の位置における流量から算出したものである。●は左岸側、●は右岸側を表している。

左岸側に発生する砂州に着目すると、図-8 および図-10 より、Case P-1 は上流端から約 6m の位置において砂州の波高が最大になり、約 2m の位置で最小になっていることがわかる。P-2 では約 8m の位置で波高が最大、4m の位置で最小となり、P-3 では 0.5m 付近で最大、3m 付近で最小、P-4 では 2.5m 付近で最大、上流端 (= 下流端) 付近で最小となる。このように、砂州は水路内を移動しながら波高が変化している。これらに共通し

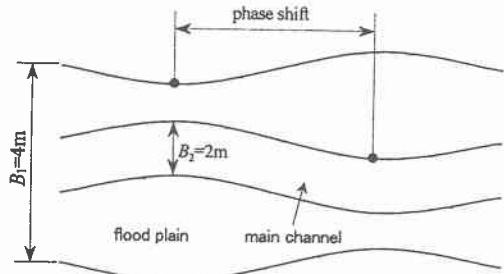


図-6 水路平面図

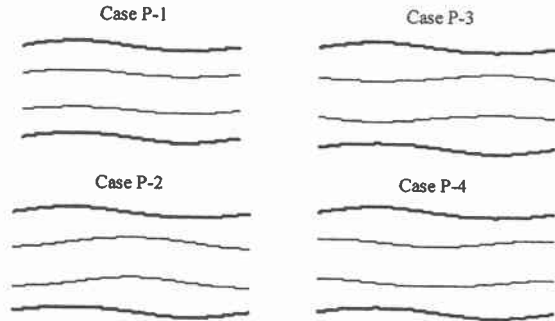


図-7 各ケースの水路の概略図

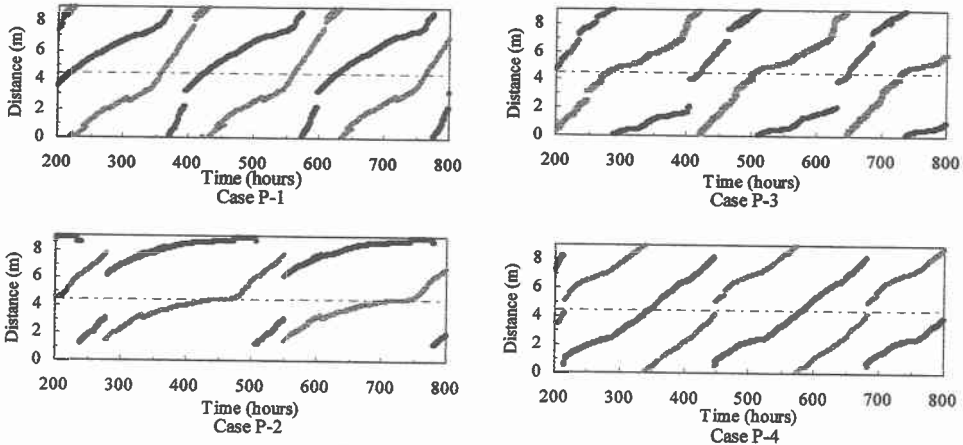


図-8 crest の位置の時間変化

ていることは、砂州の波高が最大になる位置は、砂州が湾曲の内岸を通りすぎる直前であり、逆に波高が最小になるのは、砂州が湾曲の外岸付近を通るときであることである。右岸側に発生する砂州についても同様のことが言える。これは、低水路内の流れと高水敷上の流れとの間に強いせん断力が働き、単断面水路とは逆向きの2次流が発生するためであると考えられる²⁾。また図-8より、Case P-1、P-2 および P-3 は、低水路の外岸付近において砂州の速度が速くなり、内岸付近で遅くなる傾向がある。ただし、P-4 については砂州の速度にそれほど変化はない。さらに図-10 より、砂州の波高の変化も小さいことがわかる。

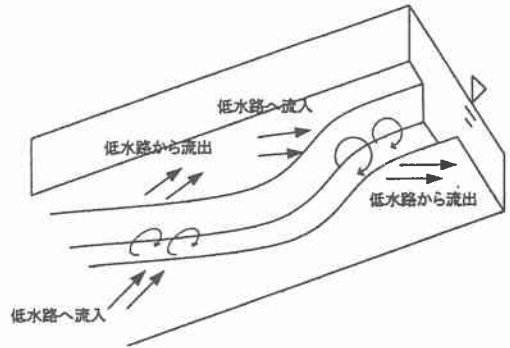


図-9 低水路に発生するらせん流

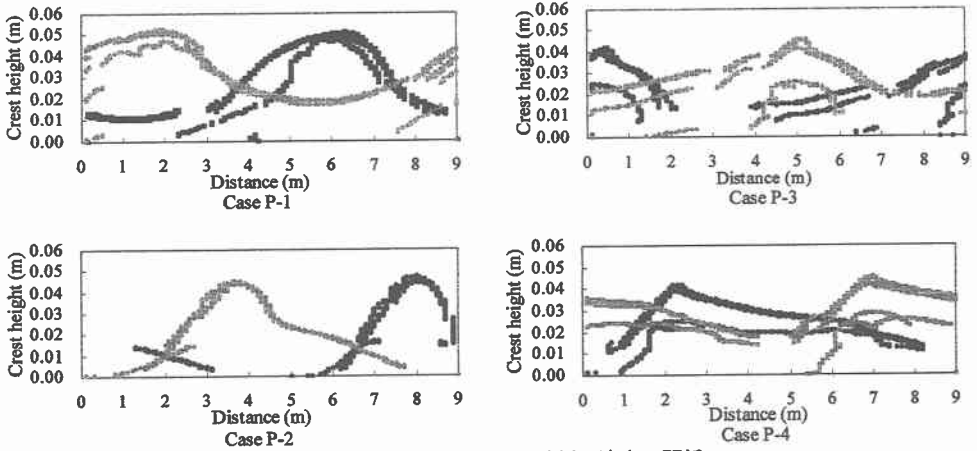


図-10 crest の位置と砂州の波高の関係

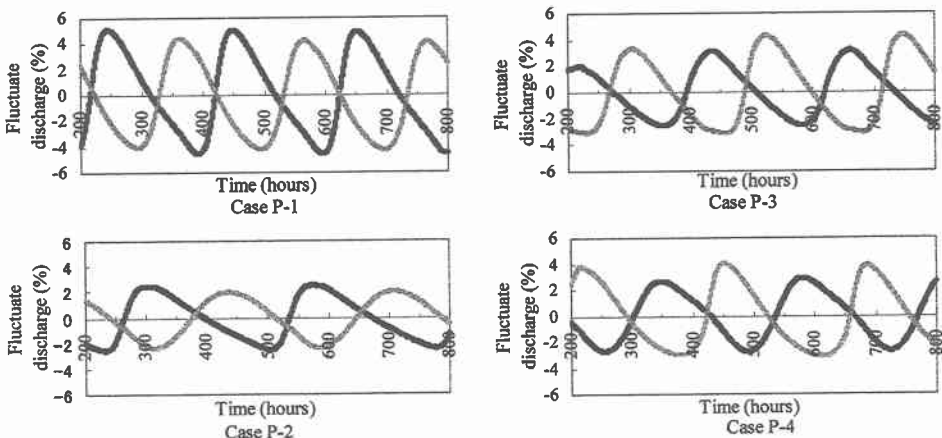


図-11 高水敷を流れる流量比

次に高水敷上を流れる流量に着目すると、P-1 が最も低水路と高水敷の水の交換が激しく、P-2 が最も水の出入りが少ない。図-10 と比較すると、砂州の平均波高が高いほど高水敷流量の変動も大きいことがわかる。ある断面における高水敷の流れは、その断面を砂州が通過するときに低水路からの乗り上げが生じ、遠ざかるにつれて低水路に落ち込む流れに変わっていく様子が、図-8 および図-11 からわかる。また、図-8 を参照すると、P-2 は砂州の移動速度が他に比べて遅く、そのため流量の変化の周期も長くなっている。P-1 の高水敷流量の変動が大きく、変動の周期が短いことは、高水敷上の流れが低水路内に発生する2次流の発達を促進する方向に働いているため、河床の変動量が大きくなった結果と思われる。

図-11 に示される流量は、計算上の上流端から4.5mの断面における流量であるが、高水敷上への流入出の強さは縦断方向に異なり、図-11 のみでは一般的な議論をするにはさらに高水敷上の流量あるいは低水路内流量の縦断方向の変化を知る必要がある。

5.おわりに

本解析によって、複断面蛇行水路においても砂州の移動限界となる曲がり角度が、単断面蛇曲水路と同様に与えられることが確かめられた。ただし、複断面水路の流れの構造は複雑で、蛇行角は砂州の停止限界を示す指標の一つではあるが、蛇行角のみで砂州の移動限界を評価することは難しいと思われる。

また、蛇行角が同じでも堤防と低水路の位相差が異なることにより、流れや河床変動の性質が変わることがわかった。本研究では蛇行角が小さく、あまり顕著な差異は見られなかったが、蛇行角が大きくなれば、その差はさらにはっきりと現れるものと思われる。

複断面水路においては、低水路内に単断面水路とは逆向きのらせん流が発生し、単断面とは異なった河床変動をもたらすことが考えられるが、河床面が大きくなると単断面的な河床形状が現れやすく、高水敷粗度が小さくなると流れと河床形状は複断面的な特性に近づく²⁾。本研究では高水敷と低水路の粗度を等しくしており、河床面も比較的大きいため、複断面的な流れと河床変動の特性をおおまかに把握することはできても、詳細に表現できていない可能性がある。また、複断面水路においては水圧も非静水圧分布となり、2次元浅水流モデルではその特性を詳細に把握するには不十分であると思われる。複断面水路においては2次流などの流れの構造を知ることが非常に重要であるため、流れの3次元性をとらえることのできる3次元数値モデルなどを用いて解析することが望ましい。したがって、今後の課題となるのは、本研究のモデルを用いてさらに多くのパターンの計算を行い基礎的なデータを蓄積するとともに、より精度の高い数値計算モデルを用いて流れの構造をとらえ、実験データなどと比較しながらより詳細な検討をしていくことである。

参考文献

- 1) 木下 良作,三輪 式;砂レキ堆の位置が安定化する流路形状,新砂防, No.94, 1974.
- 2) 渡邊 明英,福岡 捷二;高水敷と低水路の粗度比が複断面蛇行水路における流れと河床変動に及ぼす影響,土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, pp.346-347, 1999.