

河岸高さが砂州による河岸浸食に与える影響

渡邊 康玄¹・山口 里実²・金 暢大³

¹正会員 博(工) 北見工業大学教授 社会環境工学領域 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)
E-mail: y-watanb@mail.kitami-it.ac.jp

²正会員 博(工) 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3-1-34)
E-mail: kawamura-s@ceri.go.jp

³岩手県 南広域振興局 土木部 (〒023-0053 岩手県奥州市水沢区大手町 1-2)
E-mail: nobuhiro-kon@pref.iwate.jp

一部を拡幅させ河岸浸食が生じるよう浸食域を設けた直線水路を用いて、交互砂州による河岸浸食に関する水理実験を実施した。実験条件は、浸食域の河岸の高さを変えて3ケース設定し、交互砂州を十分に発達させたのちに河岸浸食を許す場合と平坦河床から河岸浸食を許す条件で砂州を形成させた場合の2通り、計6ケースである。その結果、河岸の高さと砂州の発達状況の組み合わせにより、現象が大きく異なることが明らかとなった。河岸が低いほど横断方向への浸食が進む傾向を示すものの、砂州と浸食箇所の位置関係は大きく変化しない。また、河岸高が高い実験では、砂州を発達させたのちに河岸浸食を許す場合は河岸浸食が進行するものの、平坦河床から河岸浸食を許す場合には砂州が発達した後も河岸の浸食は生ぜず砂州は下流への進行を続けた。

Key Words: bank erosion, alternate bar, bank height, bar formation, hydraulic experiment

1. はじめに

河岸浸食は、短期的に見た場合河道災害に直結するとともに浸食が堤防箇所まで進む場合は大規模な外水氾濫を招く現象であり、長期的に見た場合河道変動の一要素となることから、治水上きわめて重要な現象である。このため、従来より数多くの研究が行われてきている。河道の平面形状の長期的変化に関しては、従来から河岸近傍の偏倚流速と結び付けられて説明されてきた¹⁾。一方で、河岸浸食の機構として、河岸に働く水流による直接的作用、横断形状に伴う河岸の土質力学的不安定による崩落と崩落した土砂の流掃によるものが考えられている²⁾。この現象を支配する要素としては、水理量のみならず、河道・河床形態³⁾、河岸高⁴⁾、河岸の形状⁵⁾、河岸の土質⁶⁾、浸透流⁷⁾、河岸近傍の植生⁸⁾等多種多様なものが存在することが指摘され、それぞれの要素に対する研究が進められてきている。これらの成果により、非常に複雑な現象であるにもかかわらず現状では、ある程度の精度で現象を再現・予測できるまでになっている⁹⁾。しかしながら、対策を考える場合には、その要因を特定し要因に適合した対策を実施する必要があることから、さらなる現象の理解が必要となっている。

2011年9月、十勝川支川の音更川で低水路満杯規模程度の出水により、高水敷や堤防の一部が流失する現象が発生した。図-1は、2011年9月の出水における堤防浸食状況の航空写真である。その5年後の2016年8

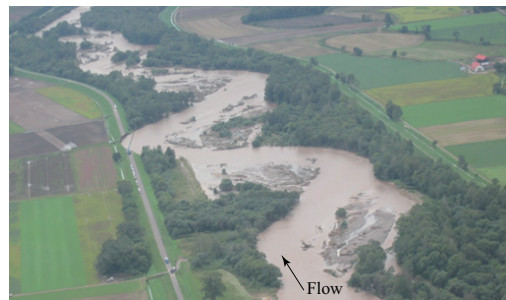


図-1 音更川における2011年出水時の河岸浸食による堤防浸食（北海道開発局提供）



図-2 音更川における2016年出水時の河岸浸食による堤防浸食

月にも同河川では、箇所は違うものの、図-2にみられる同様の現象が生じた。2011年9月の現象の原因として、出水の継続時間が非常に長く、交互砂州が十分に発達し、流れが横断方向に偏倚したものであると推察された¹⁰⁾。また、2016年8月の現象について、山口ら¹¹⁾は現地調査結果および水理模型実験結果をもとに、河岸浸食による河道内への土砂の供給に伴う砂州の発達が堤防域の浸食を招き河道変化に大きく寄与していることを指摘している。このように、交互砂州は河岸浸食に大きく影響している。しかしながら、交互砂州の発達と河岸浸食の関係は両者が時間的に進行する現象で

表-1 水理実験条件

Case	仕切	水路幅 (cm)	河岸高 (cm)	河床 勾配	粒径 (mm)	水深 (mm)	流量 (L/s)	無次元 掃流力	無次元限界 掃流力	砂州形成 時間 (min.)	河岸浸食 時間 (min.)
1-1	有り	20	2	1/100	0.765	7	0.394	0.055	0.034	40	40
1-2	無し		55								
2-1	有り		3							40	40
2-2	無し		70								
3-1	有り		4							40	75
3-2	無し									70	

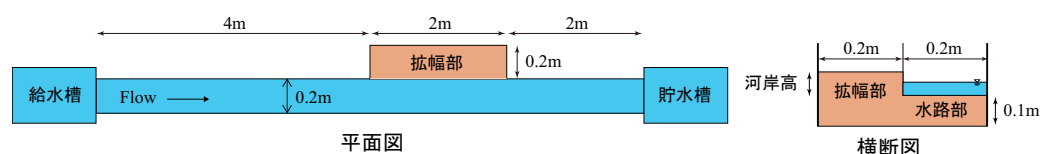


図-3 水理模型実験水路の平面および横断面図

あることと、図-2に明瞭に表れているように、交互砂州の位置に対応した河岸浸食が縦断的に左右岸交互に生じ、流路が蛇行するため蛇行による影響も付加することとなり、非常に複雑な現象となる。このため、両者の関係は十分明らかにされていない。河上ら¹²⁾は、川幅水深比と河岸浸食を許すタイミングを変化させた水理模型実験を行い、交互砂州の発達の程度により河岸浸食の進展が大きく異なること、交互砂州の下流への移動の速度と河岸浸食が密接に関係していることなどを明らかにしている。ここでは、河上らと同様に、あえて河岸の一部のみ河岸浸食を許す部分を設けて流路蛇行の影響を極力排除した水理模型実験を行い、河岸高さが交互砂州の形成と河岸浸食の関係にどのように影響しているのかを見ることとした。

2. 水理模型実験手法

(1) 実験水路

水理実験は、水路幅 20cm、長さ 8m の水路に上流から 4m~6m の位置の左岸側に幅 20cm の拡幅部を設けた直線水路が用いられた。実験水路の模式平面図を図-3に示す。水路には珪砂 4 号 (平均粒径 0.765mm) が 10cm の高さで敷き詰められた移動床としている。拡幅部には、浸食域として直線水路部の移動床面から後述する水没しない高さで珪砂 4 号が敷き詰められている。なお、水路勾配は拡幅部も含め 1/100 に設定されている。

(2) 実験条件

実験は、拡幅部の河岸高を変えて 3 ケース (Case1-*, Case2-*, Case3-*)、河岸浸食を許すタイミングを変えて 2 ケース (Case*-1, Case*-2) 設定し、計 6 ケース行われた。なお、すべてのケースで水深 7mm とし、直線水路に交互砂州が発生する条件で実験が行われている。ま

た、すべてのケースで通水中に上流端部の河床が低下しないように河床材料と同じ珪砂 4 号を給砂している。Case1-*では浸食域の高さを河床から 2cm、Case2-*で 3cm、Case3-*で 4cm 高く設定している。また、Case*-1 は交互砂州が十分発達した段階で河岸浸食を許し、Case*-2 では通水開始と同時に河岸浸食を許している。すなわち、Case*-1 は 2 段階で実験を行っている。第 1 段階は直線水路部と拡幅部の境界に仕切りを設け通水を行い、直線水路部に交互砂州が十分に発達した後、拡幅部区間に交互砂州の洗掘部が形成された時点で一旦通水を停止し、第 2 段階として、仕切りを取り外した後、拡幅部の河岸が浸食される状態で通水を再開した。一方、Case*-2 は直線水路部と拡幅部の境界に仕切りを設けず、平坦河床の状態から拡幅部の河岸が浸食される状態で通水を行った。実験条件を表-1 に示す。

(3) 計測

通水中に拡幅部の水路上方に設置したデジタルカメラにより、直線水路部と拡幅部区間における交互砂州形状と河岸浸食状況の観察を行った。また、砂州波高に関しては、拡幅部の河岸浸食による影響を把握するため、拡幅部に位置する右岸付きの砂州を対象とした。なお、通水中であることから簡易的に、水路右岸の透明のアクリル製の側壁越しに縦断的に連続した河床の最高点と最低点の差として 5 分毎に記録した。通水後には、河床高の測定をレーザー砂面形により縦断方向に 5cm、横断方向に 5mm 間隔で行った。

3. 実験結果

各ケースの河岸浸食開始からの河岸の位置と砂州前縁の位置の変遷を、図-4 に示す。また、Case*-1 については第一段階および第二段階通水後の、Case*-2 につ

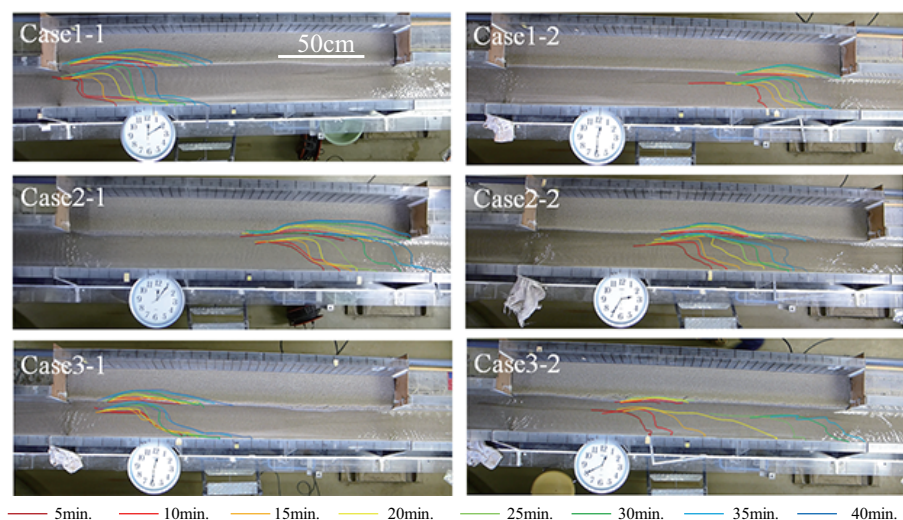


図-4 河岸浸食開始からの河岸の位置と砂州前縁の位置の変遷

いては通水後の、浸食域を含む河床コンターを図-5に示す。

(1) 砂州が十分発達した場合の河岸浸食

第一段階として拡幅部と直線水路部の境界に仕切りを設けて砂州を形成させ、その後第二段階として仕切りを取り除いて河岸浸食が生じるようにした実験である Case*-1 について、第一段階での砂州の発達および第二段階での砂州と河岸浸食状況について記述する。

河岸高 2cm の Case1-1 では、通水開始から 15 分で明確な交互砂州が形成された。通水開始から 40 分で簡易的に測定していた波高が大きく変化しなくなったため通水を一旦停止した。拡幅部に位置する砂州の波高は、2.2cm であった。第 2 段階として、河岸浸食を許すため仕切りを取り除いた後に、通水を再開した。通水再開 7 分後から河岸浸食が生じ始めた。10 分経過時には河岸浸食および砂州の頂点は縦横断方向のどちらにも進行し、縦断方向に 53cm 横断方向に 2cm の範囲が浸食された。通水再開 20 分後からは横断方向への浸食が卓越し横断方向 10cm 程度まで浸食が進んだ。この時の砂州の下流への移動速度は低下する傾向であった。33 分後からは、ほぼ停止していた砂州が縦断方向へ移動するようになるとともに横断方向への浸食速度が低下して浸食の頂点は縦断方向へ進行し始めた。通水再開から 40 分で通水を停止した。

河岸高 3cm の Case2-1 における第一段階では、通水開始から 14 分経過後に交互砂州が形成された。その後、砂州の発達を確認して、通水開始後 40 分に通水を停止した。拡幅部に位置する砂州の波高は、2.2cm であった。第 2 段階では、通水再開 5 分程度で横断方向に 2cm の浸食が発生し、10 分後までに縦断方向 60cm 程度の範囲に浸食が広がった。その後、通水再開 15 分後まで河

岸浸食を伴いながら砂州の頂点は横断方向へ移動し、横断方向の浸食は 4.5cm となった。それ以降、浸食の頂点位置は変化しなくなるとともに砂州は再び縦断方向へ移動し始めた。なお、浸食は縦断方向にのみ進行し、縦断方向の浸食幅が大きくなっていった。通水再開から 40 分で浸食が拡幅部下部に到達したため、通水を停止した。

河岸高 4cm の Case3-1 における第一段階は、通水開始から 13 分後に交互砂州が形成され、通水開始から 40 分が経過した時点で、通水を一旦停止した。拡幅部に位置する砂州の波高は、2.1cm であった。第 2 段階として仕切りを取り除いて再度通水した際、拡幅部に接する位置に存在する砂州の洗掘箇所において、河岸が少し崩れる現象がみられた。この箇所は、河岸が崩れたことで洗掘部分が埋められたため、それ以降大きな浸食はみられず、この砂州はそのまま拡幅部下流へ移動していった。通水再開 30 分後に、次に先ほどと同じ向きの砂州が拡幅部まで移動してきた際に、河岸浸食が生じ始めた。河岸浸食が始まると、砂州は縦断方向にはほとんど移動せず横断方向に成長しはじめた。時間の経過とともに浸食頂点の位置が少しずつ縦断方向へ移動しながら浸食が進行し、縦横断方向にそれぞれ 60cm および 6cm の範囲まで及んだ。通水再開から 60 分程度から横断方向への浸食は収まる傾向がみられ、通水再開から 70 分経過すると浸食は縦横断方向にそれぞれ 65cm および 8cm 程度の範囲まで進んだ。しかしこの時点では砂州頂点位置の移動はみられず、通水開始から 70 分の時点で通水を停止した。

(2) 砂州の発達段階における河岸浸食

河岸高 2cm の Case1-2 では、通水開始から 12 分で交互砂州が形成され始めたが、この時点では河岸浸食が

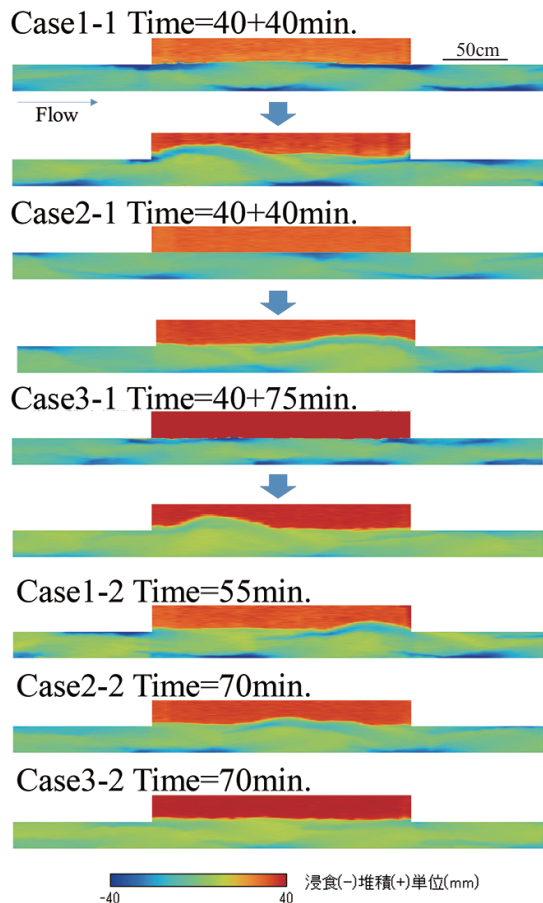


図-5 通水後の氾濫域を含む河床コンター

生じておらず、砂州は縦断方向へ移動していた。通水開始から 25 分程度で河岸浸食が生じ始めた。河岸浸食が始まると砂州の移動速度は低下した。通水開始から 30 分後には浸食頂点の位置は約 20cm 下流に移動し、縦横断方向の浸食幅はそれぞれ 35cm および 1.5cm 程度となり、通水開始から 35 分後には、それぞれ 50cm および 3cm 程度と拡大した。通水開始 40 分後から砂州の頂点が横断方向へ成長し始めると同時に河岸浸食も横断方向に大きくなり始め、通水開始 45 分後には横断方向への浸食が 6cm 程度まで進行した。その後、横断方向への浸食は収束し、縦断方向へ浸食域が移動していった。なお、砂州の縦断方向への移動速度は河岸浸食開始後は大きく変化しなかった。通水開始から 55 分後に浸食が拡幅部下流端に到達したため、通水を停止した。

河岸高 3cm の Case2-2 では、交互砂州の形成は通水開始 12 分後から始まった。通水開始から 30 分後に河岸浸食が生じ始めた。通水開始から 35 分後の時点で河岸浸食は縦横断方向にそれぞれ 40cm および 1.5cm の範囲まで進行した。通水開始 40 分後から砂州頂点は横断方向に成長し始め、砂州の縦断方向への移動速度は低下した。また、横断方向への河岸の浸食速度が上昇し始めた。通水開始から 50 分後には、縦横断方向にそれぞれ 60cm および 5cm 程度の範囲まで浸食されたが、

その後それ以上の横断方向への浸食はみられなかった。また、それと同時に砂州頂点が再び縦断方向へ移動し始め、通水開始から 55 分後からは河岸浸食も砂州の移動に伴い縦断方向に大きく移動し始めた。Case2-2 は横断方向への浸食は他のケースよりも小さかったが、縦断方向への浸食幅に関しては他のケースよりも大きい浸食がみられた。通水開始から 70 分後に通水を停止した。

河岸高 4cm の Case3-2 における交互砂州の形成は、通水開始から 14 分経過してからであった。砂州は、形成され始めてから同程度の速度で移動していたが、通水開始 40 分後から河岸浸食が始まると、砂州の移動速度は低下した。通水開始 45 分後の時点で浸食頂点が約 20cm 下流に移動し、それに対応するように、縦横断方向にそれぞれ 30cm および 2cm の範囲で河岸浸食が生じた。しかし、その後の浸食の継続はみられることはなく、通水開始 50 分後に砂州は再び縦断方向への移動速度を高めた。その後、河岸浸食はほとんどみられず、砂州が縦断方向へ移動していくのみであった。また、通水開始 65 分後から拡幅部下流端の位置で河岸が洗掘され始めたが、浸食部下流端であったことから、通水開始 70 分後に通水を停止した。

4. 河岸浸食に伴う砂州形状の変化及び河岸浸食位置

(1) 砂州波高の変化

砂州波高 Z_b の時間変化を図-6 に示す。Case *-1 は砂州が形成されてから 1 回目の通水停止までの時間変化と浸食開始からの時間変化を示し、Case *-2 は浸食開始からの時間変化を示している。なお、横軸の原点は、Case*-1 については 1 回目の通水停止時刻、Case*-2 は河岸浸食が生じ始めた時刻としている。

Case *-1 は 3 ケースとも 1 回目の通水停止まで水路と拡幅部の間に仕切りを設置しているため、同じ条件の実験となっている。1 回目の通水停止までほぼ同様の砂州の成長に伴う波高の上昇が認められる。浸食を許してからは河岸高が異なるため、河岸高の影響が表れることになるが、3 ケースともほぼ同じように波高が低下している。詳細にみると、河岸高の低いケースの方が低下の速度が速い傾向が認められるものの、今回の通水時間内ではどのケースもほぼ一定の波高 (1.5~1.6cm) まで低下している。

一方、Case *-2 の砂州の形成は、通水開始から河岸高の違いによる影響を受けているが、浸食が始まって以降ケースによって波高の変化がやや異なるものの、通水停止時における波高の違いは認められず、一定の波高 (1.6~1.7cm) に収束している。

河岸浸食の進展は、河岸からの供給土砂の下流への

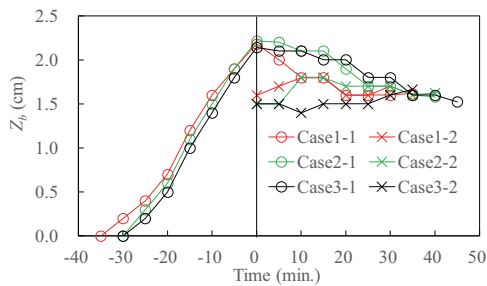


図-6 砂州波高の変化

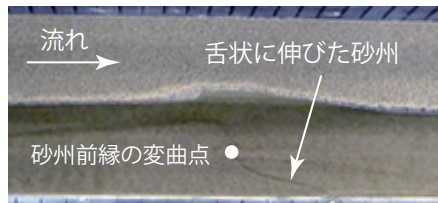


図-7 砂州前縁線の変曲点位置

流掃が不可欠である。初期水理条件は同一ではあるものの、砂州の発達状況や河岸の高さの違いにもかかわらず砂州波高がほぼ同ような波高に変化していることから、河岸からの供給土砂量と下流への掃流量が釣り合うように砂州による洗掘部を堆積させながら、河岸の浸食が進行しているものと考えられる。

(2) 砂州の移動

砂州の移動については、河岸部における砂州の前縁線の位置の移動を見ることが一般的である。しかしながら、図-7に示されるような砂州の前縁に付加する形で舌状の堆積域が河岸付近に形成され、それが砂州の本体よりも速い速度で伸びていったことから、砂州本体の移動として砂州前縁線が下流に凸の形状から凹の形状に変化する図-7の「変曲点」の移動で砂州の移動を見ることがとした。

河岸浸食開始後における砂州前縁線の変曲点位置に関して縦断方向位置の時間変化を示したものが、図-8である。Case1-1, Case1-2, Case2-1, Case2-2に関しては明瞭な違いは認められず毎分1~1.5cm程度の速度で下流に移動しているが、Case3-1はほとんど位置が変化しておらず、Case3-2では下流に大きく移動している。

砂州の変曲点の下流への移動に関しては、河岸浸食の進行等による影響も加わることが考えられるため、河岸の高さや浸食のタイミングの違いのみで議論することは困難である。

(3) 河岸浸食位置

河岸が横断方向に最も浸食した位置の5分毎の変化を、浸食開始地点からの水路縦断方向の距離 X_e 及び横断方向の距離 Y_e で表したものが図-9である。同一河

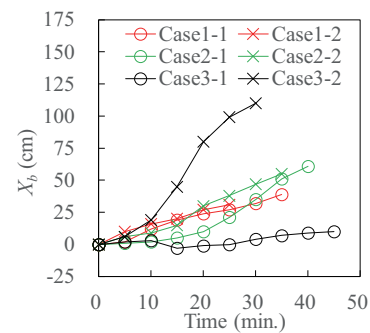


図-8 砂州前縁線の変曲点位置の縦断方向位置の変化

岸高の実験毎に比較すると、Case*-1すなわち砂州を発達させてから河岸浸食を許した場合の方が横断方向に浸食が進んでいる。また、Case*-1, Case*-2とも、河岸高が高くなると下流への移動が少ない傾向を示している。

河岸が浸食された土砂は直下流河岸近傍に堆積するように供給される。河岸の高さが高い場合、一度に供給される土砂が多くなりその土砂を掃流するするには相対的に時間がかかることとなる。初期水理条件を同一として浸食初期を対象としている今回の実験の範囲では、浸食位置の下流への移動は、河岸高が高くなると少なくなるものと考えられる。

5. 河岸浸食位置と砂州の位置の関係

砂州の移動に関して、河岸の高さや浸食のタイミングの違いのみで議論することはできず、河岸浸食の進行等による影響も加わると想定されることから、砂州と河岸浸食の関係について、その縦断位置の関係で考えることとする。河岸浸食の頂点位置に対する相対的な砂州変曲点の縦断方向の位置を見たものが図-10である。河岸高が4cmであるCase3-*を除き、同じ河岸高では河岸浸食を許すタイミングによる違いは、大きくない。河岸高2cmのケースでは、砂州の変曲点の位置近傍で河岸浸食がく進んでいくのに対し、河岸高3cmのケースでは、砂州の変曲点位置と浸食位置が時間とともにずれていき浸食位置に対して砂州が相対的に下流に移動する傾向を示している。一方、河岸高が4cmのCase3-*では、砂州を発達させた後に河岸浸食を許したCase3-1の場合砂州の変曲点の位置で河岸浸食が生じているのに対して、通水開始と同時に河岸浸食を許しているCase3-2は、砂州の変曲点位置と浸食位置が時間とともにずれていき浸食位置に対して砂州が相対的に下流に移動している。このCase3-2は、砂州の形成とともに河岸が浸食し始めたが浸食は継続せず、砂州はそのまま下流へ移動を続けたケースである。

河岸が低い場合には、河岸からの供給土砂量が少な

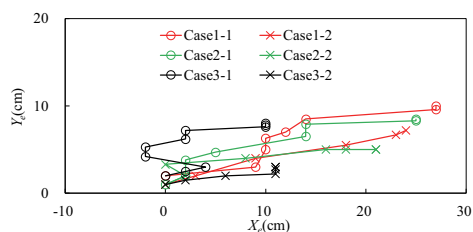


図-9 河岸浸食位置の変化

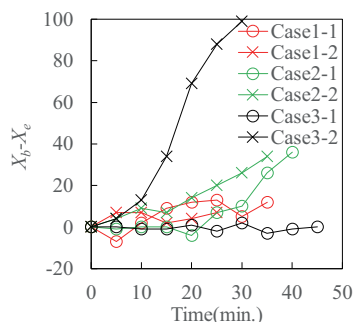


図-10 河岸浸食位置に対する砂州の相対的な位置

いため堆積した土砂を相対的に短時間で流掃できるため、砂州の移動とともに浸食箇所が移動でき、河岸が高い場合には、河岸からの供給土砂量が多いため土砂を流掃するのに時間を要することとなり、その間に砂州が下流へと移動してしまうことが考えられる。しかし、Case3-*のように、河岸からの供給土砂量がある閾値を超えた場合には、砂州の発達状況が現象に大きく影響を及ぼすものと考えられる。なお、この閾値と閾値を超えた場合の現象については、今後の課題である。

6. おわりに

河岸の高さを変化させて交互砂州による河岸浸食の発生状況の違いについて水理実験を実施した。その結果、蛇行の影響を極力排除した場合においても、河岸浸食による供給土砂の違いにより河岸浸食の進行が遅くなるという従来の知見⁴⁾が確認された。また、河岸が低い場合には砂州の発達状況による河岸浸食の進行

にはそれほど違いはないものの、河岸高が高い場合には砂州の発達状況により河岸浸食現象が大きく異なることが明らかとなった。交互砂州の下流への移動と河岸浸食の進行速度との関係により現象が支配されていることを示すものとも考えられる。流路の変動を考える場合にはこの点についても考慮する必要がある。砂州に伴う流れの偏倚の変化等本論文で扱わなかった影響も含めて今後解明される必要がある。

謝辞: 本研究は、科研費「節腹連続河道の形成機構の解明（代表：渡邊康玄）」の助成を受けて行われた。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) 長谷川和義, 伊藤仁: 蛇行流路の経年変動に関する電算機シミュレーション, 土木学会北海道支部論文報告集 昭和 52 年度, pp.197-202, 1978.
- 2) 清水康行, 平野道夫, 渡邊康玄: 河岸侵食と自由蛇行の数値計算, 水工学論文集第 40 巻, pp.921-926, 1996.)
- 3) 芦田和夫, 村本嘉雄, 奈良井修二, 塩入淑史: 河道の変動に関する研究 (1), 京大防災研究所年報第 13 号 B, pp.243-444, 1970.
- 4) 藤田裕一郎, 村本嘉雄: 蛇行流路の形成過程に関する実験的研究, 京大防災研究所年報第 18 号 B, pp.551-564, 1975.
- 5) 長谷川和義: 非平衡性を考慮した側岸浸食量式に関する研究, 土木学会論文報告集第 316 号, pp.37-50, 1981.
- 6) 藤田裕一郎, 村本嘉雄, 宮坂裕文: 河川における側岸侵食, 京大防災研究所年報第 26 号 B-2, pp.427-444, 1983.
- 7) 川口広司, 福留康智, 末次忠司: 非常洪水流に伴う砂州移動と浸透流に着目した河岸侵食の研究, 土木学会第 60 回年次学術講演会, 2-085, 2005.
- 8) 福岡捷二, 渡辺明英, 新井田浩, 佐藤健二: オギ・ヨシ等の植生の河岸保護機能の評価, 土木学会論文集 No-503/II-29, pp.59-68, 1994.
- 9) 清水康行: 河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について, 水工論文集 第 47 巻, pp.643-648, 2003.
- 10) 永多朋紀, 渡邊康玄, 安田浩保, 伊藤丹: 砂州地形に誘発された蛇行発達, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol. 69, No. 4, p. I.1099-1104, 2013.
- 11) 山口里実, 久加朋子, 清水康行, 泉典洋, 渡邊康玄, 岩崎理樹: 河道内の土砂動態と流路変動の関係, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol. 73 No. 4 投稿中.
- 12) 河上将尊, 渡邊康玄: 河岸浸食に及ぼす交互砂州の影響に関する水理実験, 土木学会論文集 A2 (応用力学) Vol. 72, No. 2 p.I.593-600, 2016.

(2017. 9. 29 受付)

Experimental study on influence of bank height to bank erosion by bar formation

Yasuharu WATANABE, Satomi YAMAGUCHI and Nobuhiro KON

The hydraulic experiments on the bank erosion due to development of alternate bars were conducted using a straight channel. The three cases of erodible bank height and the two timing of allowing bank erosion were set. The first case of the timing which allows bank erosion is after alternate bars are fully formed. The 2nd case is before alternate bars are formed. It becomes clear by the experiments that a phenomenon changes greatly with the combination of the development situation of alternate bars and the height of a riverbank.