

移動床流れにおける側岸の水理的役割—特に、交互砂州の発生・伝播との関連について—

Hydraulic Roles of Side Banks in Alluvial Streams

東京工業大学 正 員 福岡 捷 二
北海道開発局 正 員 中 村 徹 立
東京工業大学 学生員○安 陪 和 雄
東京工業大学 学生員 五十嵐 崇 博

1. 序

移動床流れは、固定床流れと異なり流れが河床を構成する砂を移動させ、河床形状を変化させる。河床形状の変化は逆に流れの構造を変化させ、両者は相互に影響しあいながら流れに応じた流砂量と河床の形状をとる。交互砂州は沖積地河川で一般的にみられる中規模河床形態の基本形態である。交互砂州が発生し安定して存在し続けるためには、流砂が存在し、水路幅と水深の比がある範囲の値をとり、側岸が存在することが必要である。交互砂州が存在していることは、側岸の影響が、側岸付近はもとより流砂運動の活発な水路中央部にまでおよんで河床形状および流れを支配していることを示している。従来、移動床流れの問題と関連して水路幅の效果に着目し検討した例は多いが、^{1),2)}側岸がそこに存在することがどれほど重要なのかに注目した研究はないようである。極言すれば、側岸の役割は水路内に水を流すための役割と付加的な流水抵抗をもたらす役割と二次流を発生させる役割に限定され则认为しており、これでは移動床上の流れの側岸の役割と固定床上の流れの側岸の役割を同一視しているように見える。移動床流れの側岸の役割を明確にしない限り、移動床の問題の本質的な解明は無理と思われる。

著者らは、^{4),5)}流路を横断して粒径程度の高さをもつ交互砂州が発生し伝播するときの交互砂州とその上の流れの特徴を調べ、次のような事実を明らかにした。

- (1) 砂州が出現するときの流れの掃流力は、河床を構成する砂粒子の限界掃流力の2～3倍程度である。したがって掃流力の僅かな変化が河床砂の洗掘と堆積のバランスを崩し砂州の発生を促す。
- (2) 交互砂州は水路の側岸から側岸へ、斜め直線状に横断し形成される。交互砂州の発生時には砂州の上の水面上に砂州と同じ角度をもつ定常で有限な不連続波面が形成され、両者は相互に強め合い伝播する。
- (3) 一つの交互砂州が現われると、その下流にはほぼ同じ大きさの交互砂州が伝播する。この速度は多くの場合、河床の砂粒子の移動速度より大きく、側岸で反射しながら伝播する不連続波面の伝播速度に匹敵する大きさである。

以上の特徴から交互砂州の発生と伝播には次の要因が密接に関係していることがわかる。

- (1) 流路側岸の存在
- (2) 不連続波面の発生と伝播
- (3) 河床の凹凸
- (4) 側岸と側岸の間隔、すなわち流路の幅の影響

⁴⁾前報では、三次元流下反砂堆の形成・規模にはたす上記4項目の役割を明らかにした。本研究では第一に、交互砂州の発生・伝播と砂州形態の決定機構にはたす上記4項目の相互の役割を更に詳細に検討する；第二に、移動床流れにおける側岸の水理的役割を調べる手段として交互砂州の発生と伝播の機構より側岸の役割を明らかにする。

2. 実験装置と方法

実験には水路幅が0.3 mまで自由に変わることができる長さ1.2 m、高さ0.2 mの可変勾配アクリル製循環水路を用いた。砂の平均粒径は0.77 mmである。平坦床から発生する砂州の初期波高は粒径程度と小さくその上の水深および水面の変化も小さい。そこで水路の側面よりスリット光線を水平に照射し、水面と河床の凹凸にともなう陰影より水面と河床面の変化を同時に観測し3.5 mmカメラとVTRに記録し解析した。

3. 河床の凹凸による不連続波面の形成と伝播

最初に交互砂州の発生と伝播に係る不連続波面について調べる。水底の凹凸上を砂州の現われるような小さい水深で水が流れるときには常流，射流を問わず河床の凹凸の影響が水面に現われ定常で有限な波高をもつ水面波を形成する。これを不連続波面と呼ぶ。写真1のa～cは流れが常流と射流の場合，突起物（直径約2 cm，高さ約0.5 cm）を水底に置いたときにみられる不連続波面を示す。この不連続波面は，水流中に置かれた突起物上流では圧力が高まり水面が上昇し，突起物下流側では圧力が低下し水面が降下することにより生じる水面の凹凸が擾乱源となって突起物の上流側と下流側より現われる。写真1のdは常流中に複数の突起物があるとき，それぞれから発生した不連続波面が影響しあい強い不連続波面を形成することを示す。図1と図2は，水路側岸沿いに単一または複数の突起物を置いたときの不連続波面と水面形を示す。側岸での不連続波面の反射・伝播と上下流の水深の変化の様子をみることができる。重要なことは不連続波面が河床の凹凸より常流でも現われることである。射流での不連続波面はよく知られている衝撃波である。

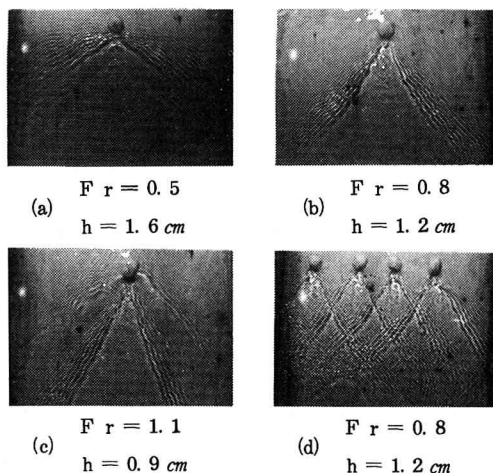


写真1 不連続波面

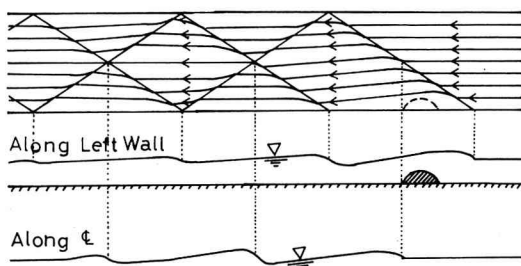


図1 水底側壁付近に単一の突起物を置いた場合の流況

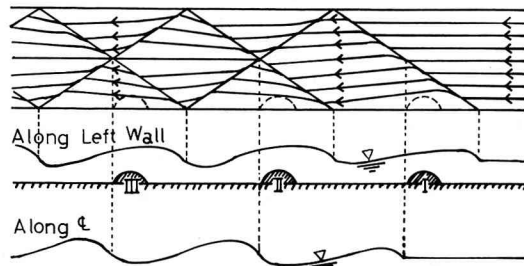


図2 水底側壁付近に複数の突起物を流下方向に並べた場合の流況

4. 交互砂州の発生・伝播にはたす河床の凹凸，不連続波面，側岸の役割

河床の凹凸とそれにより生ずる不連続波面，そしてその波面を反射させる側岸のそれぞれの役割を明確にするため，河床に単一のくぼみをつくり，このくぼみとくぼみから生ずる不連続波面との相互作用で交互砂州が発生し，側岸の存在により下流に伝播する過程を調べる。

幅20 cmの水路で小さな円柱を上流が河床面と一致するように埋め込み河床を平坦に整形後小さな水深（ $h = 1.6 \text{ cm}$ ）で水を流す。流量が定常となった後円柱を静かに取り除き一定の大きさのくぼみをつくる。図3-aのように側岸に接してくぼみをつくった場合，3.に述べた理由によりくぼみの上の水面から水路斜め方向に不連続波面が現われる。この波面を境に水深が増大し掃流力が減ずるためくぼみの直上流側に流砂が堆積する。一方，くぼみの下流側へは砂の供給は少なくなり下流側は洗掘し始めくぼみは流下する（図3-b）。くぼみが流下するにつれて不連続波面に直線状に堆積した砂は水路中央部にのびていく。この堆積のため不連続波面は次第に強まる（図3-c）。くぼみは有限な大きさのため近接して複数の不連続波面が形成されるがやがてこれらが重畳して一本の強い不連続波面を形成する。堆積した砂が対岸まで達し，直線状砂州前縁を形成するに要する時間は強い不連続波面が現われる時間とほぼ一致する。直線状砂州前縁が形

成されると強い不連続波面は側岸の存在により対岸で反射しながら下流に伝播する（図3-d）。ほぼ同時に交互砂州も下流に伝播する（図3-e）。

5. 砂州形態の決定機構にはたす河床の凹凸、

不連続波面、側岸の役割

河床につくった単一のくぼみから交互砂州が発生する過程はすでに4.で述べた。もし複数のくぼみが河床に存在すれば同じメカニズムで複数の交互砂州が重なり合って生ずるのであろうか？そこで河床に二個のくぼみをつくり、河床の凹凸、不連続波面、側岸がどのように影響しあい、最終的にどのような砂州形態をとるかを調べるための実験を行った。

まず、図4-aに示すように水路片岸に4.で述べたと同様な方法で二個のくぼみを流下方向に並べてつくる。両方のくぼみから不連続波面が発生し二組の直線状砂州前縁が出現する（図4-b）。二組の砂州前縁は近接しているため下流側の砂州前縁には流砂は少なくなる。このため下流側直線状砂州前縁の発達および流下速度は遅くなる（図4-c）。発達しながら流下する上流側の砂州は下流側の砂州を合体し吸収する（図4-e）。このため始めは無関係な二条の直線状砂州前縁があったにもかかわらず最終的には単一の交互砂州になる。

写真2のa～eは二条の交互砂州前縁が単一の交互砂州に変化していく過程を示す。

次に同じ幅の水路の兩岸に図5-aに示すように直線状交互砂州の半波長より近づけてくぼみを二箇所つくった場合の交互砂州の発生・発達過程を調べる。最初図5-bに示すように二条の不連続波面が発生する。下流側のくぼみから発生した不連続波面は側岸で反射しながら下流に伝播する（図5-c）。上流側のくぼみから発生した不連続波面は下流側の不連続波面をつきぬけることができるが下流側の砂州の直下流では流砂の供給が少ないため上流側の砂州は下流側の砂州をつきぬけることができない（図5-e）。このため上流側のくぼみが埋め戻されない間は不連続波面が引き続きみられ上流側の砂州も存在し得るが、上

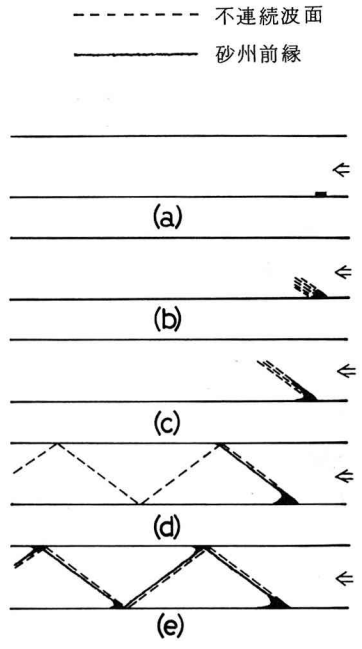


図3 水路片岸の単一のくぼみから発生、伝播する交互砂州

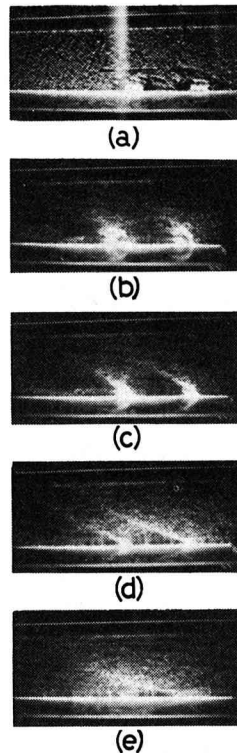


写真2 砂州前縁の形成

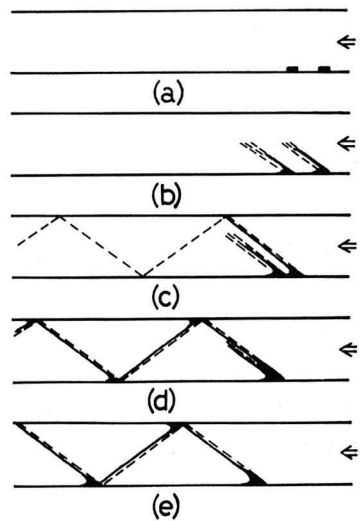


図4 水路片岸の二つのくぼみより発生する交互砂州

流側のくぼみが埋まり不連続波面が弱まるとやがて上流側の砂州は消滅する(図5-d)。このように直線状砂州前縁が交差する場合には上流側の砂州は下流に伝播することができず消滅し、下流側の砂州が交互砂州を形成する。

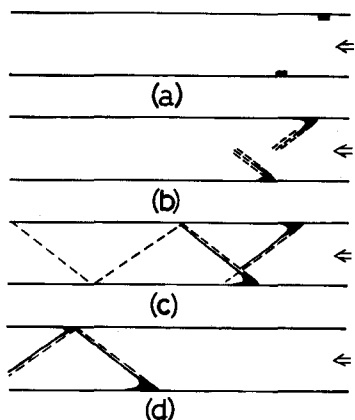


図5 水路両岸に直線状交互砂州の半波長より近づけてくぼみを二箇所つくった場合の交互砂州

第三に、水路片岸と水路中央部にくぼみを並べて二箇所つくった場合の交互砂州の発生

、発達過程を調べる。水路側岸付近に比べ水路中央部の流砂量が多いため、水路中央部のくぼみから発生した直線状砂州はより速く流下する(図6-c)。側岸付近では流砂の非平衡性が顕著となるため側岸付近のくぼみから発生した砂州前縁は発達しゆっくり流下する(図6-c)。やがて水路中央部から発生した砂州が側岸からの砂州前縁に追いつき合体して単一の交互砂州を形成する(図6-e)。

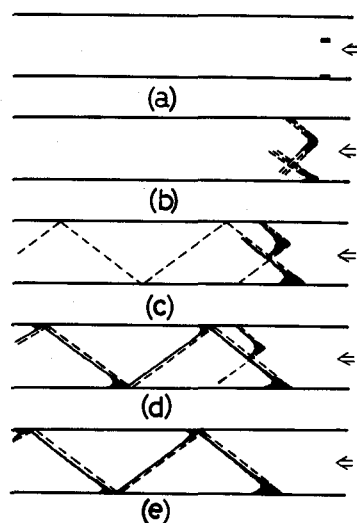


図6 水路片岸と水路中央部にくぼみを並べて二箇所つくった場合の交互砂州

第四に、同じ幅の水路の両岸に図7-aに示すようにくぼみを二箇所並べた場合の交互砂州の発生・発達過程を調べる。最初図7-cに示すように二条の不連続波面が発生する。その結果二列砂州前縁が発生する(図7-d)。水路幅が一定のため単列砂州に比べて二列砂州の波長がほぼ半分となりこの区間より持ち出される流砂量が少ないうえに上流側の砂州前縁で流砂が堆積してしまうため下流側砂州前縁部に供給される流砂量は少ない。このため側岸のくぼみが埋め戻されない間は二条の不連続波面が引き続きみられ二列砂州が存在し得るが、くぼみが埋まり不連続波面が弱まるとまもなく二列砂州も消滅する。その後河床形状は平坦となり(図7-e)、やがてこの幅一水深比に対応した単列の砂州が生ずる(図7-f)。水深-水路幅比が小さくなり、かつ複列砂州が出現する条件を満たす流れであれば、複列砂州をみることができる。複列砂州は単列砂州の組み合わせにより構成されており、その発生機構は単列砂州と同様と考えられる。二列砂州が現われる時には、側岸から伝播した不連続波面が交わる場所では波高が高まりその高まり

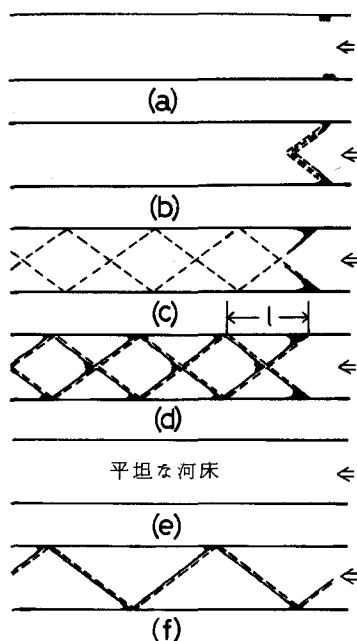


図7 水路両岸のくぼみより発生する交互砂州

は流下方向に一直線に並ぶ（図7-d）。この高まりのラインはその位置に側岸があることと同じ役割をはたしこのラインをはさんで対称に単列砂州が並ぶことにより二列砂州が発生する。

6. 側岸の役割をより詳細に検討する実験

交互砂州の発生・伝播においてみられた側岸のもつ機能を列挙する。

- (1) 側岸では入射してくる不連続波面を反射させる。
- (2) 側岸では流砂はつきぬけず側岸に沿って流れる。
- (3) 側岸では摩擦抵抗により側岸付近の流速が弱まり掃流力が減少する。
- (4) 側岸では水流はつきぬけない。

側岸の役割をさらに詳細に調べるため、あえて不完全な機能をもつ側岸を用い交互砂州の発生・伝播の実験を行った。

④ 幅30cmの水路の中心線上に水路側壁と同じ粗度をもつ薄板を、水面と薄板上面の間が流下方向に一樣な深さをもつように設置した。このとき深さ Δh は水深 h に対して十分小さく保たれている（図8-a）。この隔壁（薄板）は(1)の側岸の機能を完全に失っているが(2)の機能を完全に保ち(3)と(4)の機能をできるだけ保持しているような構造をもつ。

⑤ 水路の中心線上に水路側壁と同じ粗度をもつ薄板を、河床面と薄板下面の間が開度 Δh は水深 h に比べて十分小さい（図8-b）。この隔壁は(1)の機能を完全に保っているが(2)の機能を完全に失ない(3)と(4)の機能をできるだけ保持しているような構造をもつ。

両水路の幅は等しく上流端での流入条件は同じであるように隔壁で仕切られているので両水路の流速、水深は同じである。

左側水路の左岸に接して4.で述べたものと同じ円柱を埋め込み、同一の水力条件で両水路に水を流した。流れが定常になった後円柱を取り除き河床にくぼみをつくる（図9-a, 図10-a）。4.で述べたようにくぼみから直線状の粒径程度の段差とその上に一条の強い不連続波面が生じ、互いに強め合いながら斜め方向に伝播していく（図9-b, 図10-b）。左側水路の砂州前縁と不連続波面が不完全な機能をもつ側岸を境に反射するか、もしくは右岸水路にまで伝播するかを検討する。

6-a 側岸の機能の中で“不連続波面を反射させる”機能だけを失なわせた隔壁を用いた場合（図8-a, $\Delta h = 0.4\text{ cm}$, $h = 1.6\text{ cm}$ ）

一条の強い不連続波面は、水面に側岸が存在しないため隔壁上面を通過する。不連続波面下の直線状の微小な段差は隔壁に到達し、左側水路では直線状砂州前縁となる（図9-c）。完全な側岸では直線状砂州前縁は反射し伝播するが（図3-e），図8-aの構造をもつ側岸では砂州前縁は反射しない。いま隔壁に欠けている側岸の機能は，“不連続波面を反射させる”機能だけである。したがってこの実験より交互砂州が側岸で反射し下流に伝播するためには“側岸が不連続波面を反射させる”ことが必要条件であると言える。強い不連続波面は

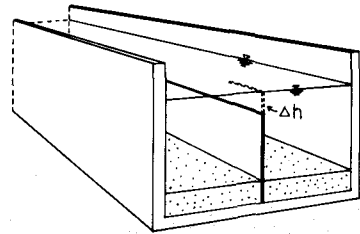


図8-a 水面と隔壁上面の間に Δh の水深を設けた場合の実験水路の概略

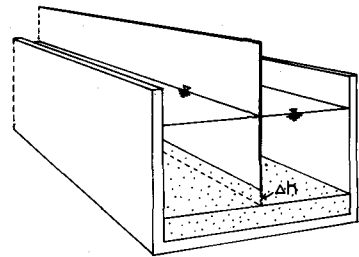


図8-b 河床面と隔壁下面の間に開度 Δh を設けた場合の実験水路の概略

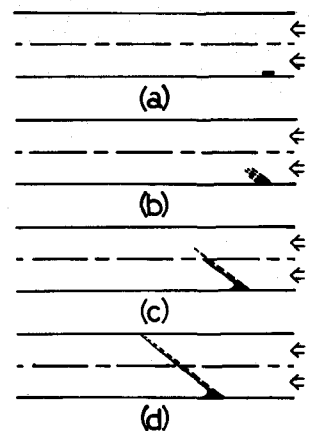


図9 図8-aの実験水路の片岸のくぼみから発生する交互砂州

右側の水路にまで伝播しているためにその直下では掃流力が減少し流砂の堆積が生じ粒径程度の直線状の弱い段差が現われる。この弱い段差とその上の不連続波面は強め合いながら右岸に向かう（図9-d）。

写真3と4は図8-④の装置で測定区間の上流側から伝播してきた砂州（くぼみより人為的に発生させた砂州ではない）とその上の不連続波面を示す。流砂は両水路の間で完全に隔絶され、また水面付近を除いた大部分の水流も分離されているにもかかわらず二つの水路幅の和に相当する波長の砂州が現われている。これは砂州前縁直上の不連続波面が両水路の流砂運動を関係づけていることにほかならない。写真5は隔壁によって両水路の流れを全水深にわたって完全に分離したときの砂州形態である。両水路の流砂運動はまったく独立に起こるため、両水路の交互砂州は無関係な配列状態にある。このように不連続波面は交互砂州の発生と一度砂州が発生するとその砂州の特性を持続させるうえで重要な役割をはたすことがわかる。

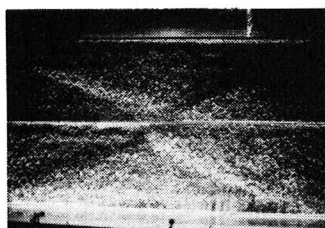


写真3 図8-④の実験水路で現れる交互砂州

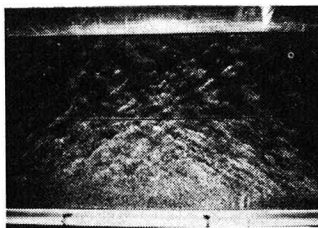


写真4 写真3の水面の不連続波面

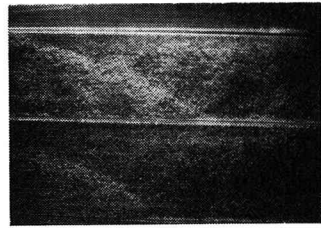


写真5 隔壁で完全に分流したときに現れる交互砂州

さらに、同一の水理条件で左側水路と右岸水路の幅の比を2:1と1:2に変えて同様な実験を行なったが砂州と不連続波面の挙動は水路幅比が1:1の場合と同じであった。上記3つの実験の図9-dの段階に相当する砂州前縁を写真6~8に示す。つぎに不連続波面が反対側の水路に伝播することを完全に絶ち、一方、流砂は反対側の水路につきぬけることができる隔壁を用いて側岸の役割を考察する。

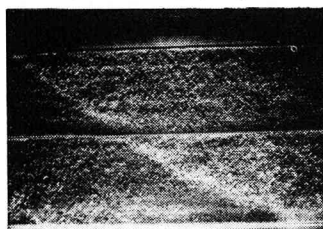


写真6 水路幅の比が1:1のときの砂州前縁

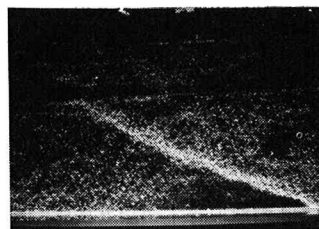


写真7 水路幅の比が2:1のときの砂州前縁

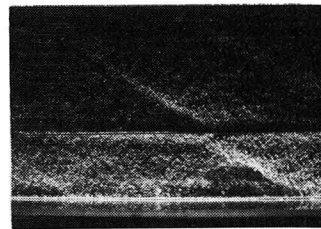


写真8 水路幅の比が1:2のときの砂州前縁

6-⑤ 側岸の機能の中で“流砂をつきぬけさせない”機能だけを失なわせた隔壁を用いた場合（図8-⑤, $\Delta h = 0.4 \text{ cm}$, $h = 1.6 \text{ cm}$ ）

直線状の粒径程度の段差とその上の不連続波面は互いに強め合いながら水路中心線上の隔壁に向かう（図10-b）。隔壁面で不連続波面の高まり（波高）は直下の砂州前縁の段差が増すにしたがい大きくなる。水面の高まりは不連続波面の波源となるため、隔壁を境に反射波が発生する（図10-c）。

河床面と隔壁下面の間にすき間 Δh が存在するので水深は両水路とも同じになる。このため側岸によって水流が完全に遮断される場合に比べ水面の高まりは小さくなり、隔壁を境とする反射波も弱くなる。さらに隔壁下面下では、水流は完全な側岸ほど壁面抵抗を受けないので砂の移動は認められる。そのため反射波の直下ではそれ以上砂は堆積できず、弱い反射波が存在しても直線状砂州前縁は反射しない。このように、“側岸

が水流を遮断する”ことは砂州前縁の反射をもたらす不連続波面の反射を強めるために必要であり、また、“水流に作用する側岸の抵抗”は不連続波面の反射波の直下で砂の堆積を容易にするので砂州前縁の反射に寄与すると言える。

一方、隔壁下面下では流砂の通過は自由であり砂州前縁は隔壁下を通過し右側水路に現われる(図10-d)。この砂州前縁は不連続波面がつきぬけないために左側水路の砂州より波高が小さくなる。砂州が伸びるとその影響で右側水路に新たな弱い不連続波面が発生し(図10-e)、弱い不連続波面とその直下の砂州前縁は対岸に伝播して行く(図10-f)。右側水路では、砂州と不連続波面の反射は極めて弱くもはやほとんど感知できないほどである。

同一の水理条件で左側水路幅と右側水路幅の比を2:1と1:2に変えて実験を行なったが、現象は同じであった。上記3つの実験の図10-e-fの段階に対応する河床を写真9~11に示す。

7. 側岸が傾きをもつときの不連続波面の伝播と交互砂州の安定形状

まず、左岸が直立壁、右岸が傾斜壁(45°)である固定床水路を用い、河床面と傾斜壁の交わる位置および水路中央部の二箇所の水面に波源(細い棒)を置いて不連続波面を発生させ、その伝播状況を調べた。図11が示すように、傾斜壁面上の不連続波面は波源付近ではほぼ直線的であるが岸に接近するにしたがい水深が減るため明確な反射は認められない。一方、直立壁付近の不連続波面は前述のようにほぼ直線的に伝播し反射する。

次に、同じ水路に砂を敷きつめ、交互砂州を形成させてその安定形状を調べた。河床面と傾斜壁の交わる位置での流砂運動の程度は水路中央部の流砂運動とほとんど変わらず活発である(写真13~14)。このため傾斜壁側の流砂運動が横断方向にほぼ一様となり、

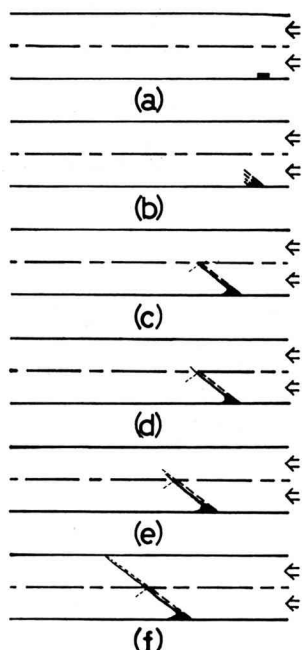


図10 図8-bの実験水路の片岸のくぼみから発生する交互砂州

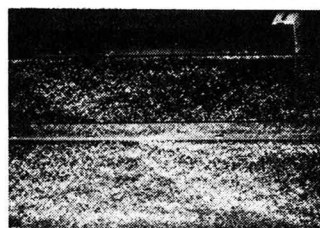


写真9 水路幅の比が1:1のときの砂州前縁

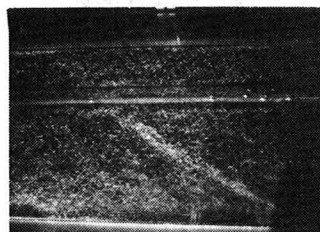


写真10 水路幅の比が2:1のときの砂州前縁

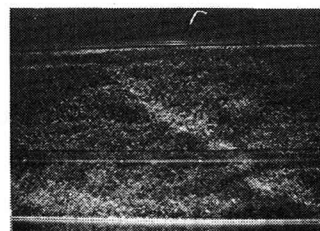


写真11 水路幅の比が1:2のときの砂州前縁

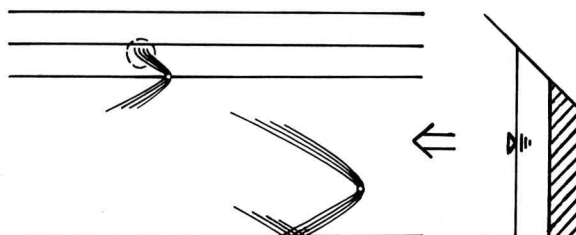


図11 片側傾斜壁での不連続波面

傾斜壁側の砂州前縁部は安定形状に移行した後も発生始めと同様に直線形状を保つ(写真12)。一方、直立壁の近傍では流砂の運動がほとんど認められない(写真15)ため、直立壁近傍の砂州前縁形状は丸みを帯びる。⁶⁾このような傾斜壁の砂州形状の特性は木下の論文の図5・16-3でも認められる。

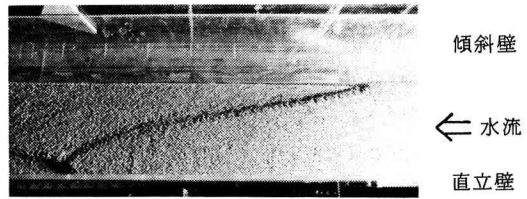


写真12 片側傾斜壁での交互砂州

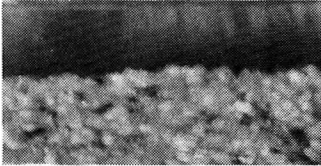


写真13 傾斜壁
付近の流砂運動

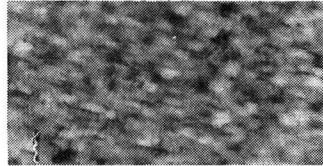


写真14 水路中
中央部の流砂運動

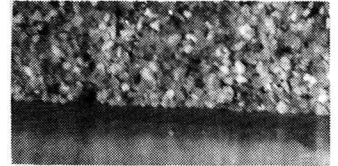


写真15 直立壁
付近の流砂運動

シャッタースピード 1/4 秒

単位幅流量 $q = 40 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$

河床面の水路幅 $B = 20 \text{ cm}$

8. 結 論

本研究では第一に、交互砂州の発生と伝播、砂州形態の決定機構にはたす側岸、不連続波面、河床の凹凸、水路幅の相互の役割を明らかにした。第二に、交互砂州の発生を調べることににより側岸の水理的役割をさらに詳細に検討した。第三に、傾斜壁付近と直立壁付近の不連続波面の伝播状況、交互砂州の平面形状を調べ、側岸の傾きが流れと流砂におよぼす影響を調べた。主要な結論は次の通りである。

- 1) 有限の大きさのくぼみ(河床の凹凸)から発生する直線状の粒径程度の段差は、その上に現われる不連続波面との相互作用により砂州前縁となって対岸に到達し、側岸の存在より反射して下流に伝播する。
- 2) 砂州前縁とその上の不連続波面は砂州前縁で流砂を堆積させるため、砂州前縁直下流の流砂量は減少する。このため単列砂州だけが出現する水理条件で複列砂州を人為的に発生させても最終的に単列砂州が形成される。
- 3) 側岸には水路斜めに横断する不連続波面を反射させる機能があるが、この側岸の機能は交互砂州を反射、伝播させるための必要条件である。
- 4) 傾斜壁付近でみられる安定した砂州形状は直立壁付近の丸みを帯びた砂州形状と異なり直線的である。

本研究は昭和56年、57年度文部省科学研究費、特定研究I(代表者 東京工業大学 日野幹雄教授)の補助を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 水理委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度，土木学会論文報告集，第210号，1973
- 2) 鈴木幸一，道上正規，岩垣孝一：河床形態に及ぼす水路幅の影響について，第25回水理講演会論文集，1981
- 3) 足立昭平：長方形断面水路の側壁効果に関する研究，土木学会論文報告集，第81号，1962
- 4) 福岡捷二，中村徹立，高島英二郎，安陪和雄：流下反砂堆と交互砂礫堆におよぼす衝撃波，水路幅，および側壁の影響，第26回水理講演会論文集，1982
- 5) 福岡捷二，中村徹立，安陪和雄：沖積地河川の交互砂州の発生機構，第14回，乱流シンポジウム，1982
- 6) 木下良作：石狩川河道変遷調査，参考編，科学技術庁資源局資料第36号，1962