

湾曲水路の交互砂州に関する実験的研究
Experimental Study on Alternating Bars in a Curved Channel

東京工業大学 正 員 福岡捷二 北海道開発局 正 員 原 俊哉
東京工業大学 学生員 〇山坂昌成 東京工業大学 学生員 清水義彦
鹿 島 建 設 正 員 竹内 聡 東京工業大学 学生員 宮内茂行

1. 序

直線流路における交互砂州の研究は数多く、砂州の形状とその上の流れ及び砂移動の関係については理論的、実験的にかなり解明されてきた。しかし、河道湾曲部での交互砂州とその上の流れについては直線流路の場合ほど理解されているとはいえない。この点に鑑み本研究では、湾曲流路における発達した交互砂州の基本的理解を得ることを目的とし、側岸固定の一樣湾曲水路を用いて、水路幅と曲率半径、水路幅と水深の比および流れの条件を種々かえて実験を行なった。このために、最初にどのような水理条件、流路条件で交互砂州が形成されるかを検討し、砂州の形成領域を明らかにする。次に湾曲流路で形成される単列砂州の形状とその上の流れの構造を調べ、局所洗掘とのかかわりを検討し、実河川の局所洗掘問題解明の手がかりを得る。

2. 実験方法

用いた水路は中心曲率半径4.5 m、水路幅1 m、湾曲角30°、水路長24 mの循環式開水路である。水路内にアクリル製の隔壁を水路全長に渡って設け、水路幅Bを20、40、60、80、100 cmと変えることにより水深-幅比、幅-曲率半径比を広く変化させ実験を行った。用いた砂の平均粒径は0.67 mmで、給砂は行っていない。河床形状は一定時間ごとに通水をとめて超音波式河床形状測定器を用いて計測した。実験条件と実験結果をまとめて表-1に示す。

表-1 実験条件

3. 湾曲流路での砂州形成領域

池田は、水路および実河川での砂礫堆の形成条件を図-1に示す U^*/U_*c と BI/h の関係を用いて調べ、砂礫堆が形成されるものからされないものまでの4つのタイプに分類した。ここでは湾曲流路での単列砂州の形成条件を池田の領域区分図を用いて検討する。実験データは20例あり、それぞれの砂州の特性を表-1に記す。湾曲流路では流れの遠心力の効果が大きく、交互砂州は直線流路の砂州のように波長が一定で規則正しい配列をとるとは限らない。一般に交互砂州の特徴は、砂州先端下流に深掘れをもつことであり、このために深掘れから対岸の深掘れへ向かう砂州上の流れが生じることである。この点に注目し、平面形状が規則正しい配列をしなくとも、河床形状が左右岸交互に深掘れをもち、その深掘れが水流を規定しているときには、この河床形状を交互砂州と判断する。

BI/h の小さい側に位置するRun 1、14、15は図-2に示すように左右岸交互の深掘れをもたない河床形状となり、単列砂州と呼ぶことはできないものである。Run 4、16は大局的に単列砂州の平面構造を

Run	初期 勾配1	流量 $Q(l/sec)$	水深 $h(cm)$	水路幅 $B(cm)$	中心曲率 半径 $R_c(cm)$	河床 形状	外岸砂州		内岸砂州		BI/h $\times 10^{-2}$
							波長 ^{a)} (cm)	前縁長 ^{b)} (cm)	波長 ^{a)} (cm)	前縁長 ^{b)} (cm)	
1	1/180	1.1	1.4	20	410	E	—	—	93	47	4.30
2	1/90	0.6	1.1	20	410	A	163	95	163	68	1.33
3	1/90	0.4	0.8	20	410	A	200	120	200	80	0.702
4	1/90	1.1	1.6	20	410	C	—	—	167	—	2.81
5	1/90	1.2	0.8	40	420	A	348	255	348	93	0.343
6	1/90	1.8	1.4	40	420	A	352	246	352	106	1.05
7	1/100	1.8	0.8	60	470	B	228	134	—	100	0.227
8	1/100	2.7	1.6	60	470	A	416	302	416	114	0.908
9	1/200	4.4	1.4	80	460	B	390	445	640	190	1.07
10	1/100	2.4	1.0	80	460	B	481	397	—	—	0.272
11	1/100	1.6	0.8	80	460	D	—	—	—	—	0.174
12	1/100	4.4	1.3	80	460	A	585	334	—	—	0.459
13	1/200	8.0	2.0	100	450	A	420	271	533	272	1.78
14	1/400	8.0	2.5	100	450	E	—	—	—	—	5.56
15	1/300	8.0	2.3	100	450	E	—	—	—	—	3.53
16	1/300	6.0	2.0	100	450	C	—	—	—	—	2.67
17	1/150	4.0	1.3	100	450	B	444	336	494	158	0.563
18	1/200	5.5	1.4	100	450	B	404	236	333	158	0.871
19	1/200	5.5	1.7	100	450	B	440	320	488	185	1.28
20	1/150	4.0	1.3	100	450	B	480	—	450	120	0.563

a)、b) 砂州の波長及び前縁長の定義は図-3に示す。
河床形状の分類 { A...単列砂州、B...波列から単列砂州へ移行
C...不明瞭な単列砂州、D...波列砂州、E...内岸の砂州

示すが、内岸砂州に比べ外岸砂州の発達には弱いものである。一方、 BI/h の大きい側に位置するRun 11は単列ではなく二列砂州形態をとり、Run 10は二列から時間の経過とともに次第に単列砂州へ移行したが、完全な単列型とはなっていない。他の実験例は、 $1.8 < B/h < 7.7$ 、 $4.5 < Re/B < 20.5$ の範囲で変化して

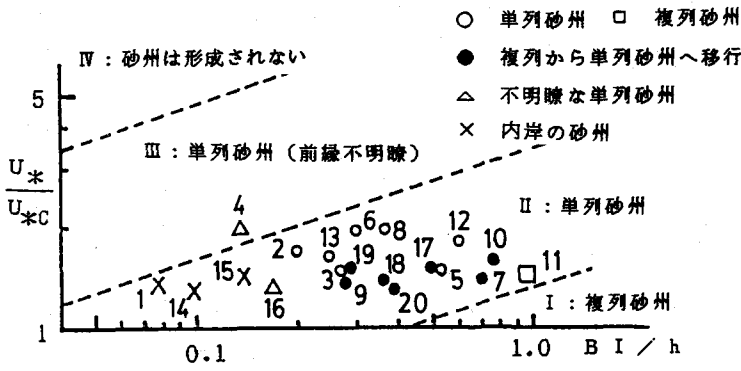


図 - 1 砂州形成領域区分図

いるがいずれも単列砂州と呼べるものである。

以上より、湾曲流路で明瞭な単列砂州を形成するものは、池田が単列砂州として示した領域に含まれる。しかし、単列砂州領域で、 BI/h の大きいところと小さいところにはあいまいさが残り、湾曲流路では明瞭な単列砂州の形成領域は直線流路に比して狭くなるようである。

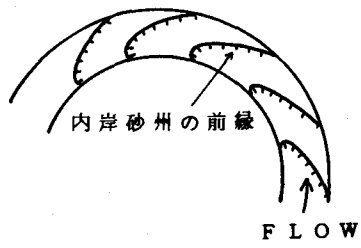


図 - 2 Run 1, 14, 15 の平面形状

そこで、限られたデータではあるがこれらを用いて明瞭な単列砂州と不明瞭な単列砂州の形成限界の試算を行なう。本実験で発生した不明瞭な単列砂州は、外岸から内岸に向かう前縁線をもつ河床形態（河床波の一種）である。この河床形態の形成には湾曲部の断面内二次流が強い影響を及ぼす。主流に対する二次流の大きさは大略 h/Re で評価できるので二次流の強さを h/Re で代表する。池田の領域区分図で BI/h は流水の蛇行強度を表わす無次元量と考えると、 BI/h が小さいほど、また、 h/Re が大きいほど明瞭な単列砂州は発生しにくくなる。そこで両者の比をとると $h^2/(BIRe)$ が大きい場合ほど砂州が形成されにくいと予想される。表 - 1 にそれぞれの実験条件における $h^2/(BIRe)$ の大きさを示してある。これらの値と河床形態との関係を比較検討すると本実験の範囲内で、 $h^2/(BIRe) \geq 2 \times 10^{-2}$ では明瞭な単列砂州は形成されない。

4. 単列砂州の形状特性

次に異なる水路幅をもつ流路で形成された明瞭な単列砂州の形状特性について考察する。図 - 3 の模式図に示すように、外岸から発した砂によって構成される砂州を外岸砂州、内岸から発した砂によって構成される砂州を内岸砂州と定義する。湾曲流路では、遠心力の影響を受けて、砂州の平面形状は直線流路のそれに比して強い非対称性を示す。この非対称性を反映させるために内岸砂州、外岸砂州のそれぞれについて波長及び前縁長を次のように定義する。波長は砂州先端位置から直上流の同岸の砂州先端位置の流路中心線への正射影長とする。砂州先端位置と対岸の砂州前縁線の始点が一致しない場合も含めて、便宜上、前縁長は、砂州先端位置から直上流の対岸の砂州先端位置の流路中心線への正射影長とする。この定義による内岸砂州、外岸砂州の波長および前縁長を表 - 1 に示す。波長等が記述されていないものは、砂州の平面形状が不規則で定量化が困難なためである。規則的な平面形状

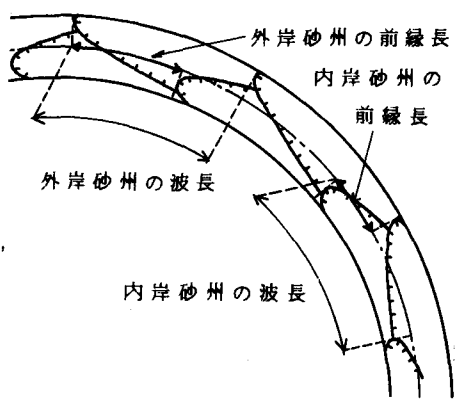


図 - 3 砂州の波長と前縁長の定義

をもつ単列砂州では、内岸砂州と外岸砂州の波長はほぼ等しくなる。

図-4, 5, 6はそれぞれ40, 60, 100 cmの水路幅の実験で形成された明瞭な単列砂州の平面形状と横断面形状である。外岸砂州と内岸砂州の平面形状の非対称性は次のように特徴づけられる。各Runにより程度の差はあるが、外岸砂州は前縁が長く伸び、内岸砂州は前縁が中央に丸く張り出し、外岸砂州の影響を受けて長い深掘れ部と短い砂州前縁をもつ。外岸砂州の前縁が長く伸びるのは、流れの遠心力のため外岸沿いの流速が増し、砂移動が活発化するためであり、内岸砂州が中央に張り出すのは、曲がりの影響によって内岸深掘れから外岸へ向かう流れが強められ、砂を内岸から外岸に運び出すためである。

横断面形状をみると、 $B = 40\text{ cm}$, 60 cm のRun 6とRun 8では左右交互に明確な深掘れが存在する。外岸砂州前縁が長くなり内岸方向に張り出すと、外岸砂州上を流れてきた水流が外岸砂州前縁と内岸の間に集中し、外岸深掘れに匹敵する長さとも深さをもつ内岸の深掘れが生じてくる。一方、 $B = 100\text{ cm}$ のRun 19では、外岸沿いの流速が大きいために外岸側の深掘れは内岸側に比べて大きく、内岸側の深掘れ部は溝のような形状で外岸の深掘れ部へ連なっている(図-6)。このような河床上では内岸から外岸へ向かう斜めの溝沿いの流れが生じ、みお筋となっている。みお筋が生じた原因は次のように考えられる。 B/h が十分大きなRun 19では流れの自由度が大きいので、図-7に示すように最初、二列を基調とする砂州が生じる。最終的に単列に至るが、二列砂州の前縁が消えず、流れの遠心力の影響でそこが水みちとなりみお筋が生じたものと思われる。このみお筋は広い幅をもつ流路の交互砂州上で一般にみられるものでRun 6とRun 8ではみられない現象である。^{*}

5. 砂州上の流れと砂移動

小さな発泡スチロール片をトレーサーとして水表面の移動軌跡を写真撮影し、水流の方向を調べると、側壁の付近の深掘れ部を除いて水面の流れ方向は砂の移動方向とほぼ一致する。これは流れの方向が全水深にわたってほぼ一定で二次流は大きくないことを意味する。砂州を形成するような浅い水深の流れでは、砂州の形状がその上の流れと砂移動を規定しており、このことは砂州を伴う流れの重要な特徴である。図4, 5, 6の矢印は砂の移動方向を示す。各Runとも深掘れ部の直下流で洗掘された砂が放射状に砂州上を移動する。このうち、内岸から外岸へ向う砂の軌跡は、砂粒子に作用する遠心力の影響で直線的な放射状をなす。

Run 19では水路幅が広くみお筋ができるなど他のRunの流れと異なるので詳述する。図-6の表面流線は、外岸の深掘れに集まった水が放射状に流れ出し斜めのみお筋でそれらが

^{*} 本実験条件では幅の狭い水路ではみお筋の形成はみられなかった。

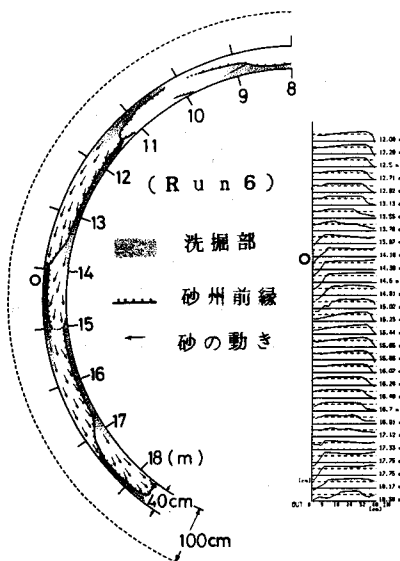


図-4 平面および横断面形状

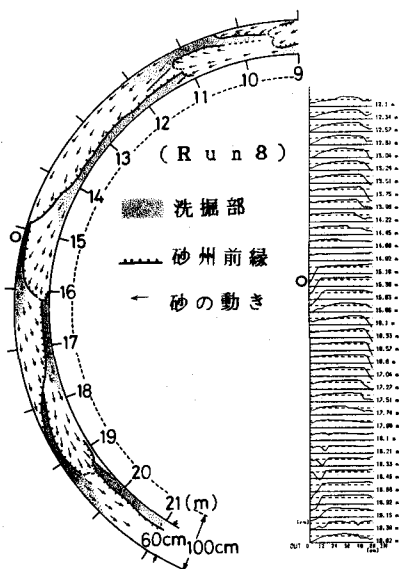


図-5 平面および横断面形状

集められ再び外岸の深掘れ部へ向う様子を示す。これに対し内岸ではみお筋付近を流れてきた水は中央に張り出した内岸砂州前縁を通過した後、再びみお筋付近に集まる。このようにみお筋が形成されると、交互砂州上の水流はみお筋を境として、外岸側の洗掘・堆積を伴う大規模な分合流と、内岸側の小規模な分合流とに明確に区別される。ここで外岸の大規模な分合流をくり返す領域を外岸支配領域、内岸の小規模な分合流をくり返す領域を内岸支配領域と呼ぶことにする。

6. 平均横断面形状

直線流路における交互砂州の発達には左右岸付近で洗掘された砂が流路中央部に堆積するためであり、縦断方向に数波長平均された横断河床高さは、ほぼ対称なかまぼこ型形状をなすことが知られている。¹⁾²⁾ 湾曲流路では曲がりの影響により、内岸向きの流れと外岸向きの流れの性質が異なるため、縦断方向に数波長平均された河床高さも左右非対称の形をとることが予想される。そこで水路幅の異なる流路で形成された明瞭な単列砂州について、平均横断面形状の比較を行なう。図-8, 9, 10はそれぞれ, Run 6, Run 8, Run19の砂州の河床高さを縦断方向に2波長間に渡って平均した横断面形状である。水路幅の狭いRun 6では、直線流路の場合に近いほぼ対称の形状をもつが、洗掘領域、洗掘深さも外岸側の方がやや大きくなる。Run 6より水路幅のやや広いRun 8では、非対称性が増している。さらに注目すべき点は、Run 8の方が非対称のかまぼこ型平均横断面形状の発達に要する時間が長いことである。Run 6とRun 8とでは水路幅を除いて他の水理条件がほぼ同一であることを考慮するとこれは水路幅が広いほど側岸付近の洗掘砂を流路中央部まで輸送するのに時間を要するためであると考えられる。さらに水路幅の広いRun 19では、非対称性が強く、もはや、かまぼこ型とは言えない形となり交互砂州の構造が直線流路のものと著しく異なることがわかる。すなわち、外岸域は常に洗掘され、洗掘深は時間的に増大し、この洗掘された砂は中央部に堆積する。一方、内岸ではほとんど洗掘されず、河床高は時間的にはほぼ一定である。

このようにほぼ同一の曲率をもつ流路においても水路幅により交互砂州形状におよぼす曲がりの影響が異なる。特に、水路幅の広い場合(Run 19)には内岸近くから外岸へ向かうみお筋の存在が内岸方向への砂移動と外岸方向への砂移動に大きな差を与え、平均横断面形状に違いを引き起こす。このことをRun 19を例にとり以下に議論する。Run 19の外岸支配領域では、

外岸向きの流れはみお筋に集中し、内岸向きの流れは水深の浅い広がった流れになる。このとき内岸向きと外岸向きの横断方向への流量は同一となるが、流砂量は単位幅流量に比例しないため、外岸向きに運ばれた砂の総量が内岸向きに運ばれた砂の総量と異なる。集中した流れでは単位幅で考えた流砂量は増大するが、水面付近の流水は砂移動に寄与しないため、単位幅流量の増大にみ合っただけの流砂量の増大がない。このため内岸へ向う浅く広がる流れが輸送する砂の総量の方が大きくなり、平均的な外岸部の洗掘が大きくなる

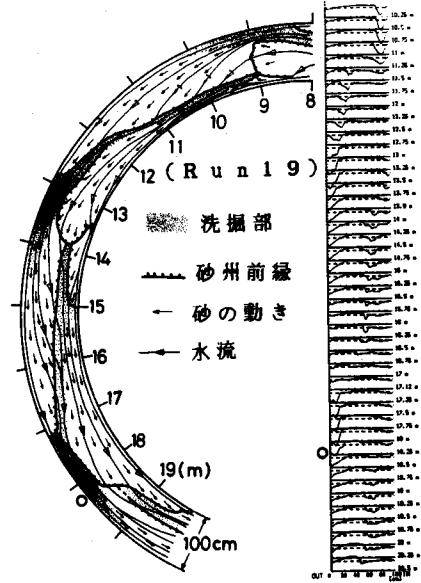


図-6 平面および横断面形状

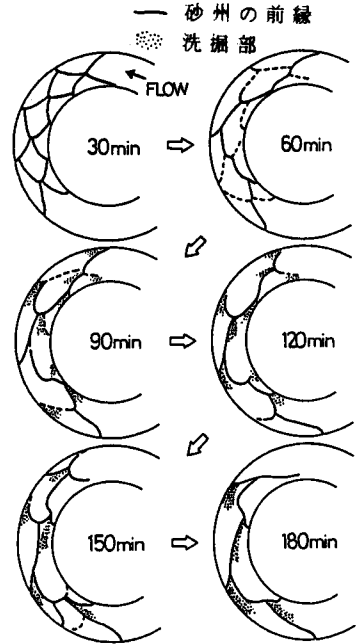


図-7 単列砂州へ移行過程

と考えられる。Run 19で外岸で洗掘された砂が中央部へ堆積する領域は、外岸から約6割までの区間であり、これが前述の水流の外岸支配領域に対応することからも上述の考え方が妥当であると言える。

Run 8で平均横断面形状が非対称となるのはみお筋が存在しなくとも速心力の影響で、外岸方向への流れが集中して存在することによると考えられる。

7. 縦断面形状

図-11, 図-12は、それぞれRun 8, Run 19における内岸付近, 外岸付近の河床縦断面形状の時間変化を示す。Run 8では、図-9に示した平均横断面形状に対応して、通水時間60分で外岸の深掘れは平衡し、その後は深掘れの位置のみが時間的に変化し、下流に移動する。直線流路の場合と同様に、砂州波高の増大にもなって移動速度は減少し、波長は増大する。外岸の河床高の流下方向変化は、河床高の高い所では平坦で、深掘れ部では狭く、V字型をなす。河床高の最高点は元河床の高さと同程度であり、直線流路の側岸部の洗掘量に比し、湾曲流路の外岸部の洗掘量の方が大きいことがわかる。この場合の単列砂州は、かなり規則正しい配列をなしているが、内岸と外岸との位相は、平面形状の非対称性を反映して、きれいな逆位相とはならない。すなわち、位相のとりやすい深掘れ部に注目すると、内岸の深掘れ位置（例えば $X=16.7\text{ m}$ ）は外岸の周期的な2つの深掘れ位置（ $X=15.5\text{ m}$ と 18.8 m ）の中間地点に位置せず、これよりやや上流に位置する。Run 19では、初期に発生した二列基調の交互砂州の名残りで、通水時間90分では、内岸の河床高と、外岸の河床高の流下方向変化はほぼ同位相となっているが、単列型に至った後の通水時間210分では、内岸と外岸は逆位相に近づいている。内岸側では、元河床からの河床高変化は、堆積域と洗掘域ではほぼ同量であり、その結果、図-10に示したように縦断方向に平均した河床高は元河床から変化していない。これに対して、外岸側ではRun 8と同様に堆積域がほとんどなく、全体的に洗掘傾向にあるが、通水時間210分に至っては、外岸部の河床高の最高点でさえ、その高さは元河床の高さを大きく下回る。また外岸の最大洗掘深は常に増大している。このよう

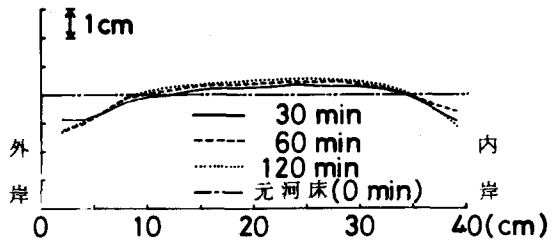


図-8 平均横断面形状 (Run 6)

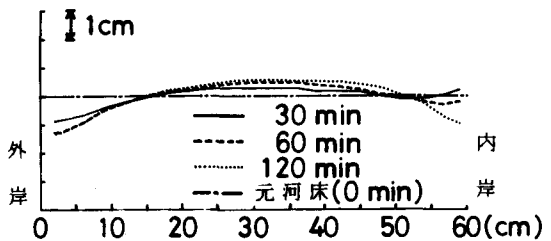


図-9 平均横断面形状 (Run 8)

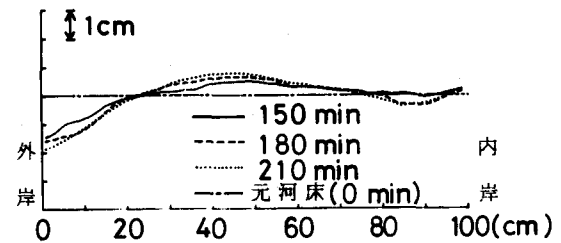


図-10 平均横断面形状 (Run 19)

や上流に位置する。Run 19では、初期に発生した二列基調の交互砂州の名残りで、通水時間90分では、内岸の河床高と、外岸の河床高の流下方向変化はほぼ同位相となっているが、単列型に至った後の通水時間210分では、内岸と外岸は逆位相に近づいている。内岸側では、元河床からの河床高変化は、堆積域と洗掘域ではほぼ同量であり、その結果、図-10に示したように縦断方向に平均した河床高は元河床から変化していない。これに対して、外岸側ではRun 8と同様に堆積域がほとんどなく、全体的に洗掘傾向にあるが、通水時間210分に至っては、外岸部の河床高の最高点でさえ、その高さは元河床の高さを大きく下回る。また外岸の最大洗掘深は常に増大している。このよう

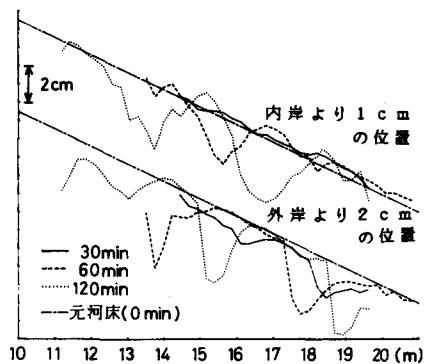


図-11 縦断面形状 (Run 8)

な外岸域と内岸域の河床変動の差は外岸の洗掘が中央部から外岸へ向かうみお筋上を流れてきた水の集中によって起こるのに対して、内岸の洗掘は内岸自身の小規模な分合流によって起こることによる。外岸の最大洗掘深の位置は、図-6の○印で示したようにみお筋を流れてきた水流が外岸にぶつかる位置のすぐ下流で生じる。従って、みお筋が固定化されてしまうと、同じ場所が洗掘され続け、この洗掘された砂が中央に堆積するため、最大洗掘深は増大を続ける。

以上のように、湾曲流路においては、流れと河床形態の相互作用により直線流路の場合と異なり、内、外岸で非対称な河床形態をとる。この非対称性は、単列の砂州を形成する範囲内において、 B/Rc が大きいほど顕著となる。極端な場合には中央部から外岸部に向かうみお筋が形成され、これが砂州形態を支配し、外岸の局所洗掘を著しくする。

8. 結 論

本研究では、湾曲部における単列砂州の形状特性と流れの特性に注目し、水路幅と曲率半径比、水路幅と水深比を変化させた一様湾曲水路での移動床実験により、次の点を明らかにした。

- 1) 湾曲水路における明瞭な単列砂州の形成領域は、池田の単列砂州の発生領域に含まれるがこの領域内であっても $h^2/(BIRc) \geq 2 \times 10^{-2}$ では流水の平面的な蛇行に比し、断面内の二次流が卓越するため、明瞭な単列砂州は形成されない。
- 2) 単列砂州の平面形状は、直線流路のものと異なり外岸と内岸で非対称の形状となる。外岸砂州前縁は、遠心力の効果で外岸沿いの水流が増すため細長く伸びた形状をとり、内岸砂州前縁は外岸へ向かう流れが強められるため中央に丸く張り出した形状をとる。
- 3) 単列砂州を形成する水深の浅い流れでは、深掘れ部を除いて、全水深にわたって流れの方向がほぼ一定となり、河床の縦・横断勾配が著しく急でない限り、砂の移動方向は表面流向にはほぼ一致する。湾曲流路の交互砂州上の流れは、直線流路の場合と異なり、内岸から外岸に向かう流れは集中して存在するのに対して、外岸から内岸に向かう流れは浅く広がった流れとなる。単列砂州を形成する条件の範囲では B/Rc が大きいほどこの傾向は顕著となる。このような流れの状態では、内岸付近から外岸へ向うみお筋が形成され、みお筋を境として流れは内岸支配領域と外岸支配領域に明確に区別される。
- 4) 上記(3)の流れに対応して縦断的に1波長に渡って平均した河床の横断面形状は、相対的に外岸側に深く、広い洗掘域をもつ非対称のかまぼこ型をなす。みお筋が形成されると B/Rc の大きな流れでは、外岸の局所洗掘は、自らみお筋を固定化することになり、最大洗掘深は増大し続ける。この局所洗掘とみお筋の固定化は近年多くの河川で生じている現象と類似のものである。

謝辞：本研究を進めるにあたり、山口寛之君（当時、本学4年生、現在五洋建設）に多大な協力を得た。ここに記して、深甚なる謝意を表します。

〔参考文献〕 1) 藤田裕一郎：沖積河川の流路変動に関する基礎的研究，京大学位論文1980。 2) 福岡・内島・山坂・早川：交互砂州上の流砂量分布，第27回水講1983。 3) 福岡・山坂：直線流路の交互砂州，第27回水講1983。 4) 永納・福岡・山坂・竹内：湾曲流路の交互砂州，第37回水講1982。 5) 原・福岡・山坂・竹内：側岸固定の湾曲水路における交互砂州の形状特性と局所洗掘，第38回水講1983。 6) 池田宏：実験水路における砂礫堆とその形成条件，地理学評論46，1973。 7) 池田宏：砂礫堆からみた河床形態のタイプと形成条件，地理学評論48，1975。 8) 吉川秀夫・池田駿介・北川明：湾曲水路の河床変化について，土木学会論文報告集第251号，1976。

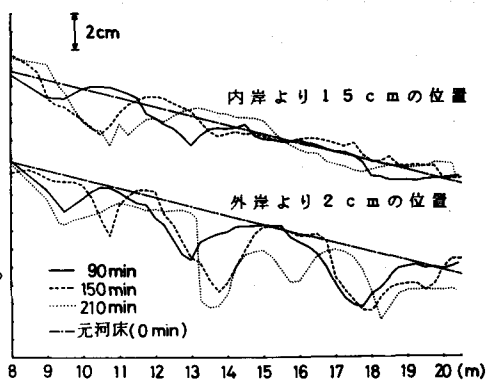


図-12 縦断面形状 (Run 19)