

流量変化に伴う交互砂州の発達・変形過程

DEVELOPMENT AND TRANSFORMATION OF ALTERNATE BARS UNDER UNSTEADY FLOW CONDITIONS

三輪 浩¹・大同淳之²・横川 純³
Hiroshi MIWA, Atsuyuki DAIDO and Jun YOKOGAWA

¹正会員 工博 舞鶴工業高等専門学校助教授 建設システム工学科 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234)

²正会員 工博 東アジア技術事務所 (〒613-0905 京都市伏見区淀下津町129)

³学生会員 舞鶴工業高等専門学校専攻科 建設・生産システム工学専攻 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234)

Development and transformation process of alternate bars and variations in flow depth and sediment transport rate due to periodic change of water discharge are investigated on the basis of flume tests using the uniform and the graded sediment. Experimental results show that an effect of the change rate of discharge on the development and transformation is large in case of the short wave period, whereas it is relatively small in case of the long wave period. The wave height of an individual alternate bar in the graded sediment bed is lower than that in the uniform one during the flood period. This reason is that the erosion of bed in its pool is restrained by sediment coarsening caused by grain sorting. Response-lags of the wavelength and height, flow depth and sediment transport rate to discharge change are small when the wave period is long, whereas they are large when the wave period is short. Response-lag of alternate bars to discharge change in the graded sediment bed is smaller than that in the uniform one.

Key Words : *alternate bars, unsteady flow, wave period, transformation process, graded sediment, grain sorting, response-lag*

1. 緒 言

交互砂州を有する河道では、洪水時の流水の蛇行による水衝部の発生や局所洗掘の進行が河川災害を引き起こす原因となる。このため、河道計画や砂防計画の策定上の要請から、形成領域区分、発生・発達機構、形状・移動特性、流砂量変動特性など、種々の観点から研究が行われてきた。しかし、これらの研究は定常流下での現象を対象としたものが主であり、洪水流のような流量が時間的に変化する場を対象とした研究はあまり行われていない。非定常流下で交互砂州がどのように発達・変形するかを明らかにすることは、とくに集中豪雨による洪水時の砂州の挙動を予測する上で重要であるといえる。

福岡ら¹⁾は非定常流下での交互砂州の変形機構を明らかにするための第1段階として、安定な交互砂州の間に流れに適合しない一連の交互砂州を人為的に挿入し、定常流量を通水して、挿入した交互砂州の変形過程を追跡した。彼らはこの結果に基づいて、砂州の変形を消滅、合体および分裂の3つの素過程に分類し、これらの機構について詳細に検討している。福岡ら²⁾はその後、非定常流下での交互砂州の変形過程に関する実験を行い、流量が交互砂州の形成範囲内で変化する場合は、砂州形状

に及ぼす流量変化の影響は顕著ではないことを報告している。一方、著者ら³⁾は連続的に変化する流量条件の下では流量と交互砂州形状の間に時間的な遅れが生じることを示し、流れの非定常性を考慮することの重要性を指摘している。しかし、これらの研究では流量の変動周期や変化速度が交互砂州の変形に及ぼす影響については明確に示されていない。また、Tubino⁴⁾は非定常流下における砂州の形成過程を形成限界領域での非線形解析によって明らかにすることを試みている。さらに、渡邊ら⁵⁾は実河川における洪水波形を模した水位変化の下での砂州の形成過程に関する実験を行うとともに、非定常流における線形安定解析を適用し、洪水時の砂州の挙動をある程度説明できることを示している。

このように、非定常流れ場における交互砂州の形成過程や変形過程に関する知見は必ずしも多くはなく、さらに種々の観点から検討を深める必要がある。とくに、流量変化に対する交互砂州の波長、波高および水深の応答性については非定常流れ場を扱う際の重要な要素であるといえる。また、従来の研究はそのほとんどが河床砂は一樣砂として扱われ、混合砂の効果を検討したものは少ない。著者ら⁶⁾は定常流下の平衡状態の交互砂州に関して、混合砂河床の場合は砂粒子の分級の影響によって波

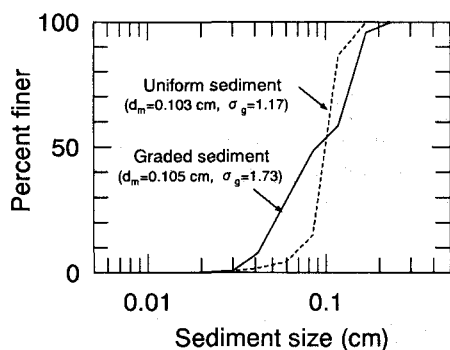


図-1 使用砂の粒度分布

高が低く抑えられることを明らかにしている。また、竹林⁷⁾は数値シミュレーションによってこの現象の再現を試みている。このことから、非定常流下でも同様の現象は発現するものと推測され、これに関する検討も重要であると考えられる。

以上の点に鑑み、本研究では一様砂河床と混合砂河床を対象として、正弦波状流量変化の下での交互砂州の発達・変形過程に関する実験を行い、流量変化に対する波長、波高、水深および流砂量の応答特性に関する検討を行う。研究の主眼はこれらの応答に及ぼす流量の変動周期と河床砂の相違の影響を明らかにすることにある。

2. 実験の概要

実験は自動流量制御装置を有する長さ9m、幅0.2m、深さ0.3mの亚克力製可変勾配水路を用いて行った。本研究は流れの非定常性が交互砂州の発達・変形に及ぼす影響を検討することに重点を置いているが、砂粒子の分級がこれに及ぼす影響も検討するため、実験にはほぼ同一の平均粒径を有する一様砂と混合砂を用いた。実験に使用した砂の粒度分布を図-1に示す。一様砂は平均粒径 $d_m = 0.103\text{cm}$ 、幾何標準偏差 $\sigma_g = 1.17$ を有し、混合砂は $d_m = 0.105\text{cm}$ 、 $\sigma_g = 1.73$ を有する。なお、砂の比重はいずれも2.65である。

実験に用いた流量波形は図-2に示すような正弦波状のもので、次式で表される。

$$q_w = q_1 + q_2 \sin \left\{ 2\pi \left(\frac{t}{T_f} - \frac{1}{4} \right) \right\} \quad (1)$$

ただし、

$$q_1 = \frac{1}{2}(q_{\max} + q_{\min}), \quad q_2 = \frac{1}{2}(q_{\max} - q_{\min}) \quad (2)$$

ここに、 $q_{\max}$ は最大単位幅流量、 $q_{\min}$ は最小単位幅流量で、それぞれ $60\text{cm}^2/\text{sec}$ 、 $30\text{cm}^2/\text{sec}$ とした。また、 T_f は流量の変動周期で、60分および120分とし、それぞれ2周期通水した。以下、各変動周期の実験をCase S1およびCase S2と呼ぶ。

実験は河床を平坦に敷き均し、河床勾配を1/100に設定した後通水を開始し、所定の時刻にサーボ式水位計を

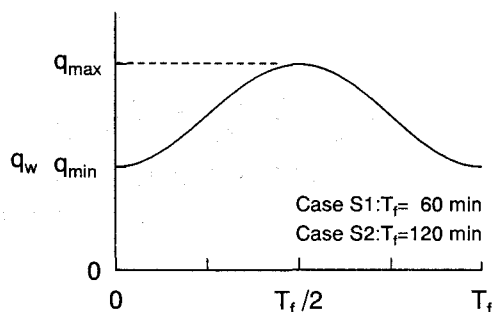


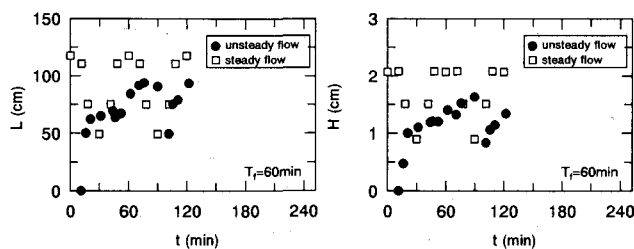
図-2 実験での流量波形

用いて水路中心線に沿って水面の縦断形状を測定、その直後に停水して連続式砂面計を用いて水路横断方向1cmごとに河床面の縦断形状を測定した。なお、水路下流端から5.3mの位置を測定の原点とし、そこから下流側4.7mの区間を測定対象とした。河床面の測定終了後は再度平坦河床から通水を行い、停水時刻を変えて上記の測定を行った。また、上記の通水の内、2周期連続通水する実験では、水路下流端から流出する砂を10分ごとに約1分間採取して流砂量を測定した。通水中は平均河床高が変化しないように予備実験で得られた流砂量の時系列データを基に水路上流端で給砂を行った。また、流れは射流となるよう設定しており、水路下流端でのゲート操作は行っていない。ただ、実際には減水期の後半において常流となる場合があった。なお、通水中は等流に近い状態を保つことによって不等流効果を除去し、流量変化のみによる交互砂州の応答遅れを単独に抽出することとした。

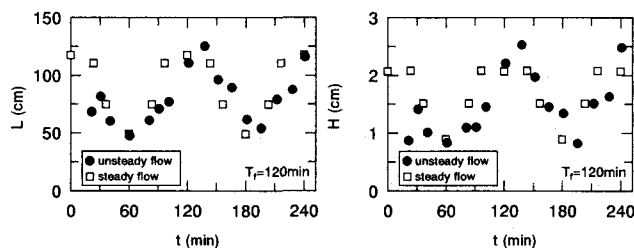
本研究では交互砂州の形状を波長と波高で代表させており、波長は一砂州長として求め、波高は一つの砂州内での最深河床を含む横断面における最大河床高と最深河床の差として求めた。なお、本文での波長、波高は測定区間における平均値を表している。また、水深は水面の縦断形状と河床面の横断平均の縦断形状の差として求めた。さらに、定常流量を通水した実験も行い、平衡状態の交互砂州形状を測定した。流量は $q_w = 30, 40, 50$ および $60\text{cm}^2/\text{sec}$ の4種類であり、30と $60\text{cm}^2/\text{sec}$ はそれぞれ正弦波状流量波形の最小単位幅流量と最大単位幅流量に対応している。なお、定常流実験での波長、波高の発達時間の測定は行っていないが、上記各通水流量に対する通水時間はそれぞれ120、100、70および75分程度である。

3. 交互砂州の発達・変形性状と形状特性

図-3、図-4はそれぞれ一様砂河床および混合砂河床におけるCase S1とCase S2での交互砂州の波長、波高の時間変化を示したものである。また、後述するように、通水中に発生した反砂堆によって交互砂州が消滅した場合があり、これに対しては、反砂堆の波長、波高の平均値を◎記号で示している。なお、図中には定常流量実験で得られた平衡状態の交互砂州の波長と波高を、正弦波流量において当該定常流量に一致する時刻に□記号で描点

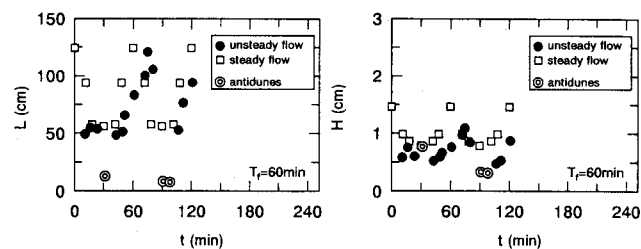


(a) Case S1

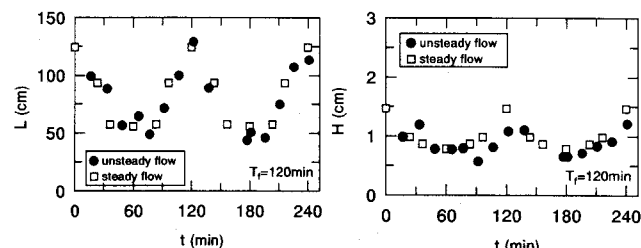


(b) Case S2

図-3 波長、波高の時間変化（一様砂河床）



(a) Case S1



(b) Case S2

図-4 波長、波高の時間変化（混合砂河床）

している。

まず、一様砂河床について見ると、Case S1の場合は通水開始後、波長、波高とも流量の増加に伴って増加し、最大流量（ $t=30$ 分）付近では定常流量の平衡状態の波長、波高に近い値を示している。その後、流量の減少に伴ってこれらはさらに増加し、第2周期目の増水期に入ってもその増加傾向は維持されていることがわかる。しかし、次の最大流量（ $t=90$ 分）付近を過ぎると波長、波高は一旦減少する。しかし、その後は流量の減少に伴ってこれらは再び増加し、交互砂州は成長する。定常流量を通水した場合は流量が大きいほど波長、波高とも小さくなっているが、上述の第2周期目の増水期で見られたように、連続した流量変化の場合は増水によっても砂州は減衰せず、むしろ成長する傾向にある。また、波長、波高とも定常流量下での平衡状態の値までは増加していないことがわかる。一方、Case S2の場合は、通水開始後30分以降は波長、波高とも流量の増加に伴って減少、流量の減少に伴って増加する傾向を示し、おおむね定常流量下での平衡状態と同様の値を示すことがわかる。ただし、全体の変化傾向としては平衡状態の値に比べて増水期は大きい値、減水期は小さい値となっており、流量の増減に対して時間的な応答の遅れが現れることを示している。この遅れは、変動周期が短いCase S1の方が大きい傾向にあるといえるが、応答遅れの特性については水深や流砂量をも含めて、次節において詳しく検討することとする。なお、Case S2ではCase S1の場合に見られた第2周期目の増水期における波長、波高の増加傾向は認められない。

つぎに、混合砂河床について見ると、Case S1の場合は全体的には一様砂河床と同様の变化傾向を示すが、第1周期目、第2周期目とも最大流量付近（ $t=30$ 分、 90 分）では反砂堆が形成され、これによって交互砂州は消滅した。しかし、混合砂河床では一様砂河床よりも交互

砂州は短時間で発達する傾向にあるため、波長については一様砂河床の場合と同程度まで回復していることがわかる。なお、波高については同様の回復は見られない。一方、Case S2の場合は波長、波高とも一様砂河床と同様の变化傾向を示しているが、定常流下での平衡状態の値との差はより小さくなっており、一様砂河床の場合よりも時間的な応答の遅れは小さいといえる。なお、この場合もCase S1の場合に見られた第2周期目の増水期の波長および波高の増加傾向は認められない。また、反砂堆の発生による交互砂州の消滅も見られなかった。ところで、一様砂河床と混合砂河床における交互砂州の形状特性の相違は波高に顕著に現れており、混合砂河床の方が低く抑えられていることがわかる。この理由については河床表層の砂粒子の粒度分布特性が関係するので、後述する。

以上のように、交互砂州の発達・変形過程は流量の変動周期によってかなり異なったものとなることがわかる。これは流量の変化速度と交互砂州の発達速度の関係に起因していると考えられる。すなわち、流量の変化速度が大きい場合は交互砂州の変形が流量の変化に追従できないために波長、波高の変化（増減）は抑えられ、流量変化に対する時間的な遅れは大きくなる。一方、変化速度が小さくなると交互砂州の変形が流量の変化に追従しやすくなり、変形に要する時間が確保されるために流量に見合った交互砂州が形成されることになると考えられる。したがって、流量の変動周期が短い場合は、交互砂州は流量の変化速度の影響を顕著に受けるが、変動周期が長い場合は変形に及ぼす流量の変化速度の影響は相対的に小さいといえる。なお、Watanabeら⁸⁾は水位の変動速度と交互砂州の発達速度の比で定義されるパラメータを提案し、これによって流量変化に対する交互砂州の応答性が評価できることを示している。

さて、一様砂河床と混合砂河床の相違は交互砂州の波

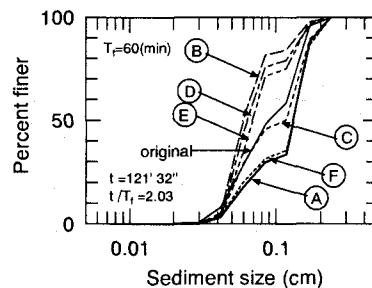
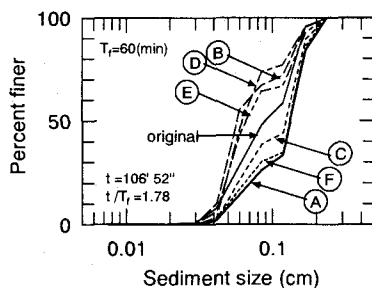
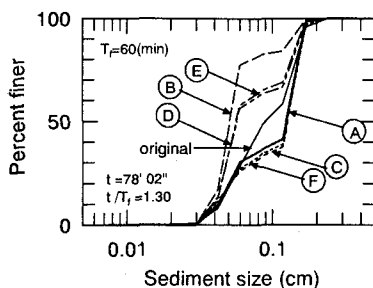


図-5 河床表層の粒度分布 (Case S1)

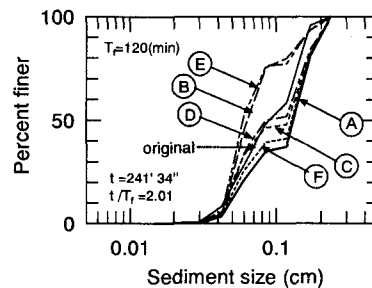
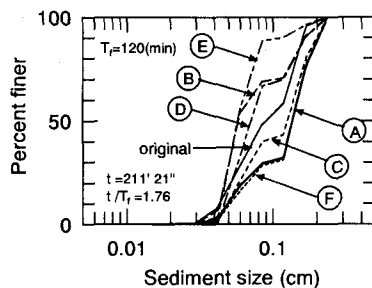
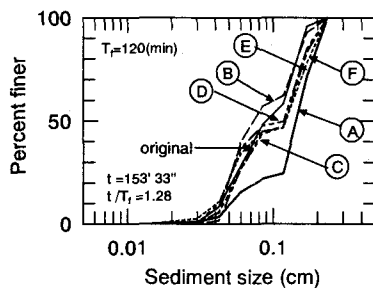


図-6 河床表層の粒度分布 (Case S2)



図-7 河床砂の採取位置

高に顕著に現れることが示されたが、この原因について若干検討する。図-5、図-6はそれぞれ図-7に示す位置での、Case S1およびCase S2の第2周期目における増水期、減水期および通水終了時点の河床表層砂の粒度分布を示したものである。これらの図より、いずれの時刻においても深掘れ部（図-7中(A)）では粗粒化し、砂州前縁部上流側（図-7中(B)）で細粒化していることがわかる。これは砂州の瀬では池田・伊勢屋⁹⁾が示した露出効果と減摩効果によって粗砂は細砂よりも移動性に富むことに起因している。すなわち、瀬を流送してきた粗砂が前縁斜面に堆積することによってこの部分が粗粒化し、これに付随して前縁部の上流側が細粒化することになる。深掘れ部の粗粒化はこれによってもたらされたものであり、この粗粒化によって洗掘が抑制されるため、結果として混合砂河床の波高が一樣砂河床のそれよりも低く抑えられたと考えられる。著者ら¹⁰⁾は交互砂州の変形に伴う砂州一波長内での最深河床を有する横断面内の最大堆積高と最大洗掘深の時間変化を一樣砂河床と混合砂河床と比較し、最大堆積高は両河床でほとんど変化は認められないが、最大洗掘深は混合砂河床の方が小さく抑えられており、これが波高の差に現れていることを示している。これと同様のことが本実験でも現れていると考えられる。なお、ここに示した以外の位相においても深掘れ部の粗粒化は確認されている。ただし、河床表層粒度の時間変化と交互砂州の変形過程の関係については明らかではなく、今後さらに検討する必要がある。

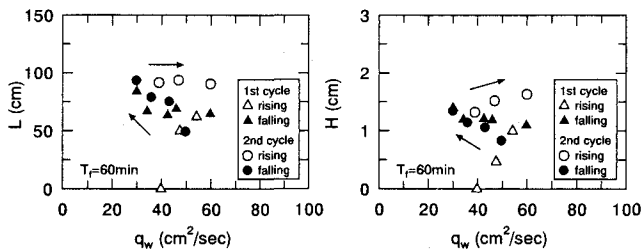
4. 流量変化に対する移動床系の応答特性

流量が増減する場では交互砂州は流量変化に対して応答遅れをもって追従するため、同一の流量に対する移動床系要素は増水期と減水期では異なったものとなる。ここでは、移動床系要素として波長、波高、水深および洗砂量を対象として流量変化に対するこれらの応答特性について検討する。

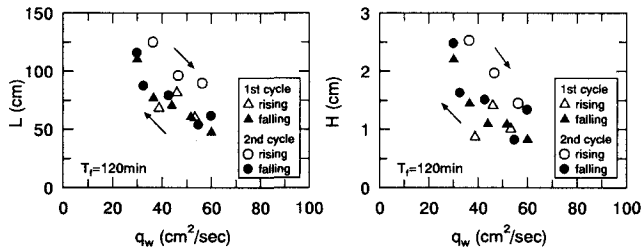
(1) 波長、波高の応答特性

図-8、図-9はそれぞれ一樣砂河床および混合砂河床におけるCase S1とCase S2での流量変化に対する波長および波高の応答を示したものである。まず、一樣砂河床についてみると、Case S1の場合は、平坦河床からの交互砂州の発達過程である第1周期目の増水期を除けば、波長、波高は減水期よりも増水期の方が大きい値を示し、時計回りのループを描く傾向にある。しかし、図-3(a)に示したように、第2周期目の最大流量付近までは増加を続けてきた波長、波高は、これを過ぎると一旦減少したため、これらのループは必ずしも閉じた形になっていない。また、第2周期目に着目すると、増水期における波長、波高の変化は減水期における変化よりも緩慢であることがわかる。これは、流量の変動周期が短い場合は砂州の変形が流量の変化に追従しにくいことに起因しており、これが増水期における波長、波高の応答に顕著に現れている。なお、減衰期では波長、波高とも増加傾向にあり、流量変化に対する追従性は増水期よりも高いといえる。一方、Case S2の場合もCase S1の場合と同様、波長、波高は時計回りのループを示しているが、この場合は第2周期目の増水期では波長、波高とも漸減するのでこれらのループは右下がりとなっている。

つぎに、混合砂河床についてみると、Case S1では最

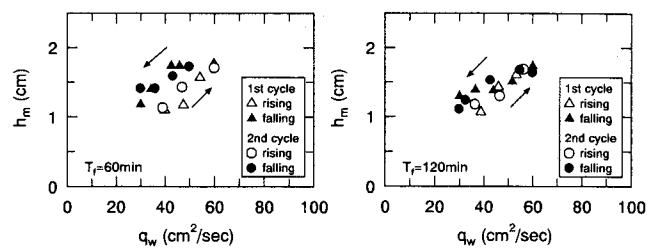


(a) Case S1



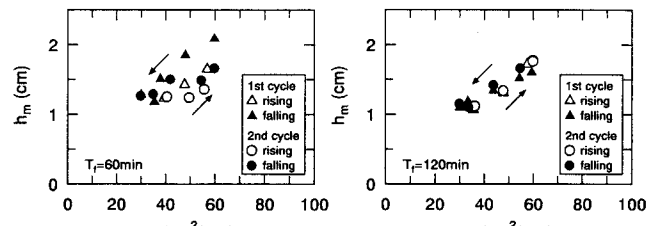
(b) Case S2

図-8 流量変化に対する波長、波高の応答 (一様砂河床)



Case S1

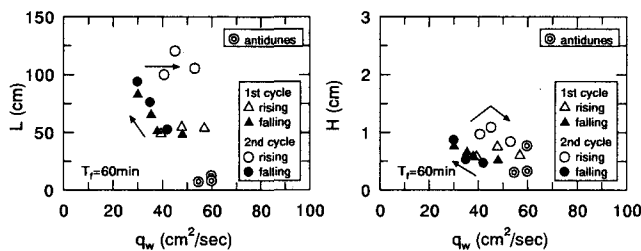
(a) 一様砂河床



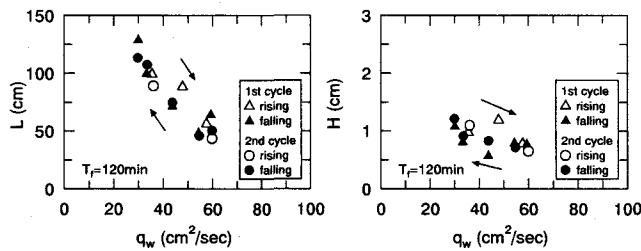
Case S1

(b) 混合砂河床

図-10 流量変化に対する水深の応答

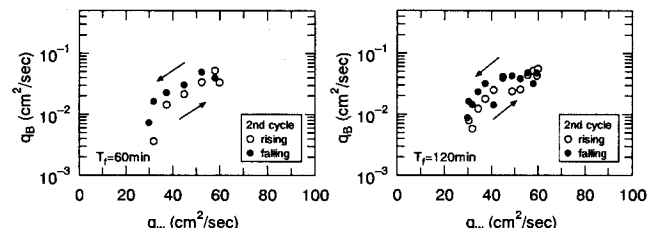


(a) Case S1



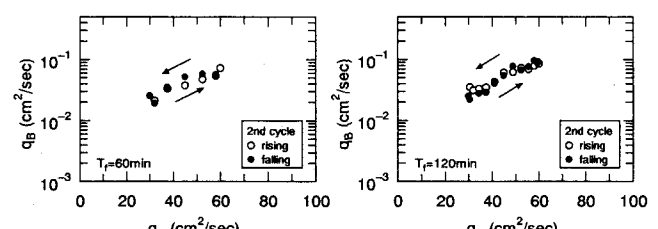
(b) Case S2

図-9 流量変化に対する波長、波高の応答 (混合砂河床)



Case S1

(a) 一様砂河床



Case S1

(b) 混合砂河床

図-11 流量変化に対する水路下流端流量の応答

大流量付近での反砂堆の形成に伴って交互砂州が一旦消滅したため、波長、波高とも閉じたループとはなっていない。一方、Case S2の場合は交互砂州の消滅は見られなかったため波長、波高のループは閉じているが、同一流量に対する増水期と減衰期の差が小さいため、ループの形成は必ずしも明確ではない。

流量と各諸量間で形成されるループの幅は流量変化に対する応答遅れの程度、すなわち流れ場の変化への追従性を表す。一様砂河床の結果から、流量の変動周期が長い方がループの幅は小さく、流れの変化に対して追従しやすいことがわかる。また、Case S2の結果から、混合砂河床のループの幅は極めて小さく、増水期と減衰期の差はほとんどないことがわかる。したがって、混合砂河床における交互砂州の方が一様砂河床におけるそれより

も流れの変化に対して追従しやすいといえる。

(2) 水深、流砂量の応答特性

図-10は流量変化に対する平均水深の応答を示したものである。同図より、いずれの実験においても水深は増水期よりも減水期の方が大きい傾向が認められ、反時計回りのループを示している。一方、図-8、図-9に示したように、第1周期目の増水期を除けば波高は増水期の方が減衰期よりも大きく、また、波形勾配を調べると、第2周期目では増水期は減衰期と同程度か若干大きい傾向を示していた。このことから、水深の応答と波長、波高の応答を直接対応づけることはできない。しかし、Case

S1における第1周期目の減衰期の波形勾配は第2周期目の増水期よりも大きくなっており、水深への影響も考えられる。いずれにしても、現段階では水深の応答機構は明確になっておらず、さらに検討する必要がある。なお、水路上流端の貯水槽での貯留効果が設定流量と水位変動に位相差を生じさせる場合があるため、これに関する検討も必要である。また、ループの幅については、波長、波高と同様、同一の変動周期では混合砂河床の方が一様砂河床よりも小さい傾向が認められ、流量変化に対する応答の遅れは小さいといえる。また、変動周期の長い方が応答の遅れは小さい。

図-11は流量変化に対する水路下流端で測定された流砂量の応答を示したものである。ただし、第2周期目の結果のみを描点している。同図より、流量変化に対して流砂量は水深と同様、反時計回りのループを示し、増水期よりも減水期の方が大きな流砂量を示すことがわかる。本実験では通水中は等流に近い状態が保たれている。したがって、河床せん断力の変化はおおむね水深の変化に依存することになるため、流砂量のループは水深と同じ傾向を示している。また、ループの幅の傾向から、先の波長、波高および水深と同様に、流量の変動周期が長い方が、また、一様砂河床よりも混合砂河床の方が、流量変化に対する応答遅れは小さく、流れ場の変化に追従しやすいといえる。

5. 結 言

本研究では、非定常流下での交互砂州の挙動とこれに及ぼす混合砂の効果을明らかにすることを目的として、一様砂河床と混合砂河床に対して、正弦波状流量変化による交互砂州の発達・変形過程に関する実験を行い、流量変化に対する波長、波高、水深および流砂量の応答に及ぼす流量の変動周期と河床砂の相違の影響に着目して検討した。本研究によって得られた結果を以下に要約する。

(1) 交互砂州の発達・変形過程は流量の変動周期によってかなり異なる。これは流量の変化速度と交互砂州の発達速度の関係に起因している。すなわち、流量の変化速度が大きい場合は交互砂州の変形が流量の変化に追従しきれないために波長、波高の変化(増減)は抑えられ、流量変化に対する時間的な遅れは大きくなる。一方、変化速度が小さくなると交互砂州の変形が流量の変化に追従しやすくなり、変形に要する時間が確保されるために流量に見合った交互砂州が形成されることになる。したがって、流量の変動周期が短い場合は、交互砂州は流量の変化速度の影響を顕著に受けるが、変動周期が長い場合は変形に及ぼすこの影響は相対的に小さい。

(2) 交互砂州の発達・変形過程を通じて混合砂河床の波高は一様砂河床よりも低く抑えられる。これは深掘れ部が砂粒子の分級によって粗粒化し、そこでの洗掘が抑制

されるためである。

(3) 交互砂州の波長、波高は減水期より増水期の方が大きい値を示し、流量の増減に対して時計回りのループを描く傾向にある。一方、水深と流砂量は増水期より減水期の方が大きい値を示し、反時計回りのループを描く。

(4) 流量変化に対する交互砂州の波長、波高および水深、流砂量の応答遅れは、流量の変動周期が長いほど小さく、また、一様砂河床よりも混合砂河床の方が小さい。このことは流れ場の変化に追従しやすいことを示している。

以上のように、本研究では流量変化に伴う交互砂州の発達・変形過程に関して、主として流量の変動周期および一様砂河床と混合砂河床の相違に着目して検討した。ただし、流量周期が短い場合の増水期における交互砂州の変形特性については定性的な記述に止まっている。また、交互砂州の波長、波高は水理条件によって水深に比例する場合も反比例する場合もあり¹¹⁾、上記(3)の結果は必ずしも一般性を有していない。これらの点に関する検討については今後の課題である。

謝辞：本研究は文部省科学研究費(奨励研究(A)：課題番号10750393)の補助を受けて行われた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 安陪和雄, 五十嵐崇博: 交互砂州の変形過程に関する実験的研究, 第28回水理講演会論文集, pp.763-768, 1984.
- 2) 福岡捷二, 五十嵐崇博, 久米正浩: 非定常流れにおける河床形状の変化過程に関する研究, 第29回水理講演会論文集, pp.479-484, 1985.
- 3) 三輪 浩, 池田香織, 谷 和憲: 正弦波状流量変化による交互砂州の発達・変形過程, 第55回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第II部門, pp.540-541, 2000.
- 4) Tubino, M.: Growth of alternate bars in unsteady flow, *Water Resources Research*, Vol.27, No.1, pp.37-52, 1991.
- 5) 渡邊康玄, 佐藤耕治, 大山史晃: 非定常流下での砂州形成実験, 水工学論文集, 第46巻, pp.725-730, 2002.
- 6) 三輪 浩, 大同淳之: 混合砂河床における交互砂州の形状特性と河床砂の分級性状, 平成7年度土木学会関西支部年次学術講演会, II-59, 1995.
- 7) 竹林洋史: 直線河道の砂州に関する土砂水理学的研究, 立命館大学学位論文, 第2章, 1999.
- 8) Watanabe, Y., Sato, K., Hoshi, K and Oyama, F.: Experimental study on bar formation under unsteady flow conditions, *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2002*, Vol.2, pp.813-823, 2002.
- 9) 池田 宏, 伊勢屋ふじこ: 混合砂礫の流送に伴う縦断的分級, 第30回水理講演会論文集, pp.217-222, 1986.
- 10) 三輪 浩, 櫻井美奈子, 谷口佳織, 田中健之: 流量変化による交互砂州河床の変動と形状特性, 第54回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第II部門, pp.340-341, 1999.
- 11) 村本嘉雄, 藤田裕一郎: 中規模河床形態の分類と形成条件, 第22回水理講演会論文集, pp.275-282, 1978.

(2002. 9. 30受付)