

混合砂河床における砂州の動態

DYNAMIC STATE OF SAND BAR FORMED ON NON-UNIFORM SEDIMENT BED

竹林 洋史¹・江頭 進治²

Hiroshi TAKEBAYASHI and Shinji EGASHIRA

¹正会員 博士(工学) 徳島大学助手 工学部建設工学科(〒770-8502 徳島市南常三島 2-1)

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Longitudinal and transverse sediment sorting and the formative mechanism of bars on non-uniform sediment bed in a straight open channel are studied in terms of flume tests, numerical analysis and theoretical analysis. The results support that the sediment sorting is formed on bars; finer sediment deposits around crests of bars and coarser sediment is left in troughs. Furthermore, it is found that the sediment sorting produces the difference of geometric and migration characteristics of bars between non-uniform and uniform sediment beds. Wave height, wavelength and migration velocity of sand bars on non-uniform sediment bed become smaller, shorter and faster, respectively, than those of bars formed on uniform sediment.

Key words: non-uniform sediment, sediment sorting, sand bar, geometric characteristics, migration velocity

1. はじめに

河川環境に対する関心の高まりとともに、河道の治水機能を保持し、さらに多様な生態系を保存・創生する河川整備が必要となっている。

生態系の多様性を保存・創生するには、動植物の生息空間の多様性も保存・創生することが重要である。河道内の動植物の生息空間を決定する重要な要素に河床材料の粒度と砂州の動態がある。全ての河床材料は粒度に分布を有している。植生の着脱や魚類の産卵などには、河床材料の粒度に一定の条件が必要であることが明らかにされており^{1),2)}、河床材料の粒度の空間的な分布を把握することが河道内の生態系の保存と創生を考える上で必要となる。また、同一の平均粒径を有していても粒度が異なると、形成される河床形状が大きく異なる条件が存在する³⁾。そのため、砂州の動態を定量的に評価するためには、粒度が河床形状に与える影響を明らかにする必要がある。

砂州の動態に関する従来の研究は、その多くが河床材料を一様砂として取り扱っている。これは、河床材料を混合砂として取り扱うのが非常に困難で

あるとともに、粒度の違いにより、砂州の形状特性値と伝播特性値が影響を受けることが、それほど認識されていないためと考えられる。

粒度の違いによる砂州の各特性値の違いは、混合砂特有の現象である砂礫の分級現象が重要な役割を果たしていると考えられる。これは、砂礫の分級現象は、砂州上の流砂量分布に強く影響を与え、その結果、河床形態の形状特性値と伝播特性値に影響を与えると考えられるためである。

このような観点に基づき、本論文では、砂州の中でも現象を取り扱いやすい直線河道の交互砂州を対象として、混合砂河床における砂州の動態を明らかにする。まず、砂州上の砂礫の分級現象を水路実験、数値解析及び理論解析により明らかにする。次に、砂州の形状特性値と伝播特性値が河床材料の粒度により、どのように影響を受けるかを水路実験と数値解析により示す。最後に、河床材料の粒度の違いが砂州の各特性値を変化させる機構について理論解析により明らかにする。ここで、竹林・江頭⁴⁾により、混合砂河床では、砂州の消滅や合体が発生する条件の存在が明らかにされているが、本論文では、そのような条件は対象としない。また、河床形状を連続関数で取り扱える範囲内で検討を行う。

2. 実験方法と解析方法

(1) 実験方法

実験に用いた水路は、長さ 15 m、幅 30cm の直線矩形水路である。河床に用いた砂は、図 1 に示すような異なる粒度分布を有する 2 種類である。河床材料 A の粒度分布の標準偏差は小さく、本論文では、便宜上一様砂と呼ぶ。実験の水理条件は、表 1 に示す 4 ケースである。Case 1 と 2 は、河床材料が異なるが、流れの条件は同一である。Case 3 と 4 についても同様の関係である。Case 1 と 2 の流れの条件と Case 3 と 4 のそれとの大きな違いは、無次元掃流力であり、川幅/水深をほぼ等しくしている。Case 1～Case 4 の水理条件は、黒木・岸⁵⁾の砂州の形成領域区分図によると、交互砂州の形成水理条件にある。

実験では、まず、10 cm 厚さで砂を敷き詰め、河床表面を敷きならして平坦河床としている。給水は、水路上流端から一定流量を与える。給砂は、上流域の河床位を初期河床位に保つように行い、水路下流端からの流出土砂を与える。通水中の測定は、伝播速度のみであり、砂州がほぼ平衡状態に到達しているのを確認してから測定を行う。停水後、河床位をポイントゲージで測定し、その後、河床表層の河床材料を採取した。河床材料は、河床表層を最大粒径程度の厚さで採取した。

(2) 数値解析法

流れの計算は、水深平均された平面二次元流れの支配方程式を用いる。河床近傍の流速は、水深平均流速の流線の曲率より予測し、係数値は Engelund⁶⁾と同様の 7.0 を用いている。流砂量は芦田・道上式⁷⁾により算出し、芦田・江頭・劉⁸⁾と同様に、河床の局所的な勾配が流砂ベクトルに及ぼす影響を考慮している。粒度分布の計算は、交換層の概念による平野の方法⁹⁾を発展させ、交換層の下に遷移層を導入した芦田・江頭・劉⁸⁾による方法を用いた。交換層の厚さは最大粒径と等しくしている。

計算領域は、水路実験と同様に、固定側岸を有した直線矩形断面水路を想定したものである。初期河床形状は平坦床であり、上流域右岸側に、直方体型の擾乱を与えている。給水は、上流境界から一定流量を与える。上流境界における流砂量は、境界における水理量をもとに、芦田・道上式⁷⁾により算出されたものを与えている。

数値解析に用いた水理条件は、表 1 に示すものであり、水路実験と同一である。

(3) 理論解析法

直線河道を想定した物理空間における河床面の

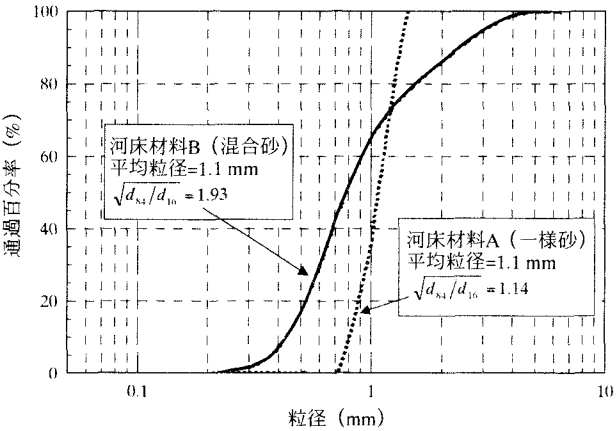


図1 水路実験および数値解析に用いた河床材料の粒度分布

表 1 水路実験および数値解析に用いた水理条件

	河床材料	川幅/水深	河床勾配	無次元掃流力
Case 1	一様砂	25.0	1/71	0.100
Case 2	混合砂	25.0	1/71	0.100
Case 3	一様砂	25.4	1/50	0.143
Case 4	混合砂	25.4	1/50	0.143

線形不安定解析を行う。解析に用いた基礎方程式は、数値解析に用いたものと同一である。ただし、粒度分布の計算において、河床上昇時にのみに適用されるべき式(1)を、交換層より下層の粒径階 i の含有率 f_{oi} を交換層内の含有率 f_i と等しいと仮定して、河床低下時にも適用する。

$$E_m \frac{\partial f_i}{\partial t} + f_i \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{hxi}}{\partial x} + \frac{\partial q_{hyi}}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

ここに、 E_m は交換層の厚さ、 z_b は河床位、 q_{hxi} 、 q_{hyi} は、それぞれ縦断方向と横断方向の粒径階 i の流砂量、 λ は砂の空隙率である。線形化及び無次元化の方法は、小山・黒木・板倉¹⁰⁾と同様である。

3. 河床表層の砂礫の分級現象

図 2 (a) に水路実験により得られた河床表層における平均粒径の平面分布を河床形状とともに示す。図中に砂州の前縁線下部が点線で示されている。図より、河床位の高い瀬 (矢印 1) で細粒化、淵から水衝部にかけて (矢印 2) 粗粒化している。これは、水衝部における河床の洗掘過程において、細砂が多く流出し、その細砂がクレストに堆積するためと考えられる。

図 2 (b) に同一水理条件による数値解析の結果を示す。水路実験で観察された河床位の高い瀬で細粒化、淵から水衝部にかけて粗粒化する傾向は再現されている。しかし、平均粒径の分布幅が水路実験の結果より狭くなっている。これは、河床形状の再現性がそれほど良くないことと交換層厚の評価が適

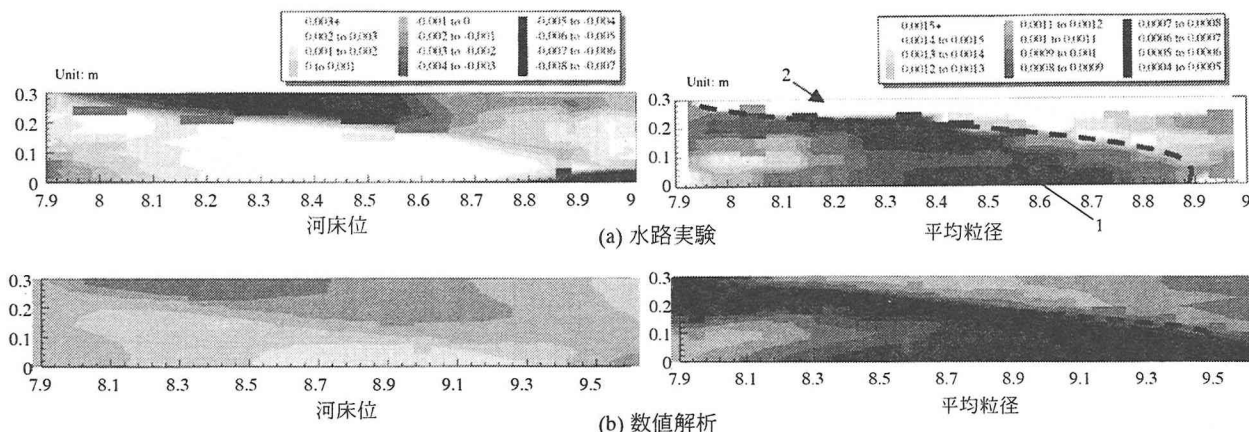


図2 河床位と河床材料の平均粒径の平面分布 (Case 1)

切でないことによるものと考えられる。これらの点については、今後さらに検討していく必要がある。

図3に理論解析により得られた平均粒径の平面分布の位相差を示す。位相差は $\pi/2 < \theta < \pi$, $-\pi < \theta < -\pi/2$ の範囲にあり、河床位の高い領域で細粒化、低い領域で粗粒化する結果となっており、実験および数値解析結果と同様の傾向を示している。

4. 形状特性値と伝播特性値

表2に、水路実験および数値解析により得られた、混合砂河床の砂州の波高、波長および伝播速度を一樣砂のそれにより除した値を示している。水路実験と数値解析ともに両水理条件で、波高と波長については1以下の値、伝播速度については1以上の値となっており、混合砂河床による交互砂州の方が一樣砂河床のそれよりも、波高が低く、波長が短く、伝播速度が速いことがわかる。また、無次元掃流力が大きくなるにつれ、その傾向がますます強くなるようである。以下に、一樣砂河床と混合砂河床の砂州の特性の違いについて特性値ごとに検討する。

(1) 波高

混合砂河床による交互砂州の波高が、一樣砂のそれよりも低くなる原因の一つは、砂礫の分級現象により、交互砂州河床上の流砂量分布が平滑化し、クレストで堆積、淵で浸食が抑制されるためと考えられる。そこで、線形場を対象とした理論解析により、混合砂河床の砂州の波高の決定機構について検討する。ただし、線形場を対象としているため、平衡波高を直接議論することはできない。そこで、砂礫の分級現象が河床擾乱の振幅の初期増幅率に与え

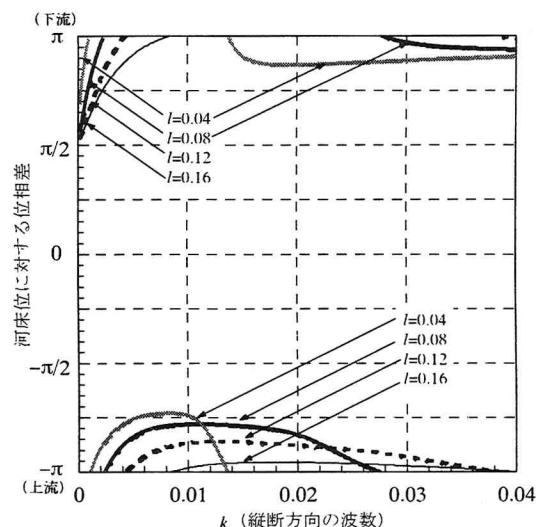


図3 河床位に対する平均粒径の位相差 (河床勾配=1/50, 無次元掃流力=0.143, k : 横断方向の波数)

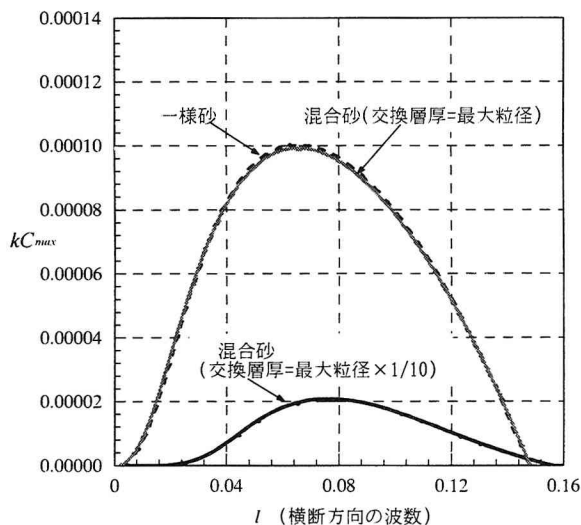


図4 河床擾乱の振幅の初期増幅率を最大にする波数 k に沿った振幅の初期増幅率 (河床勾配=1/50, 無次元掃流力=0.143)

表2 一樣砂河床の交互砂州の形状特性値と伝播特性値に対する混合砂河床のそれらとの比

	波高比 (混合砂/一樣砂)		波長比 (混合砂/一樣砂)		伝播速度比 (混合砂/一樣砂)	
	水路実験	数値解析	水路実験	数値解析	水路実験	数値解析
Case 1 & Case 2	0.94	0.71	0.97	0.77	1.31	1.22
Case 3 & Case 4	0.59	0.55	0.82	0.68	1.24	1.27

る影響を調べることで、波高と砂礫の分級現象との関係を考える。図4は、一様砂、混合砂および交換層厚を最大粒径の1/10にしたときの河床擾乱の振幅の初期増幅率を示している。初期増幅率は、交換層厚を最大粒径にした場合には、両者の差は非常に小さい。これは、平均粒径の時間変化が河床形状の時間変化に対して緩やかであるためと考えられる。ここで、交換層厚を1/10にして砂礫の分級現象の発達を速めた結果をみると、砂礫の分級現象が発達することにより、初期増幅率は小さくなるのがわかる。以下の解析においては、砂礫の分級現象が各特性値に与える機構を明らかにするため、交換層厚を最大粒径の1/10にして検討を行う。

河床擾乱の振幅の初期増幅率は、混合砂河床の場合次のように表現される。

$$kc_l = -\sum_{i=1}^n f_{i0} A_{si} \left[|q_{bypi}| k \sin(k\theta_{qypi}) + |f_i| k \sin(k\theta_{fi}) + |q_{bypi}| l \cos(k\theta_{qypi}) \right] \quad (1)$$

ここに、 $k(=\pi H_0/L)$ と $l(=\pi H_0/B)$ は、それぞれ、縦断方向と横断方向の波数、 H は水深、 L は砂州の半波長、 B は水路幅、 c_l は砂州の無次元伝播速度の虚部、 n は粒径階の階数、 $A_{si}=q_{bypi}/[(1-\lambda)U_0H_0]$ 、 $q_{bypi}=\sqrt{sgd_i^3\Phi_i}$ は粒径階 i の流砂量 ($q_{bi}=\sqrt{sgd_i^3\Phi_i}f_i$) より交換層内の粒径階 i の含有率を除いたもの、 s は砂の水中比重、 g は重力加速度、 d_i は粒径階 i の粒径、 Φ_i は粒径階 i の流砂関数、 U は流速、 $k\theta$ は河床位に対する位相差、 $| |$ は河床位の単位変動に対する擾乱の振幅、添え字0は等流場における値を示す。式(1)において、 $n=1$ とすると一様砂となる。

式(1)によると、 q_{bypi} と f_i は $0 < k\theta < \pi$ 、 q_{bypi} は $-\pi/2 < k\theta < \pi/2$ で河床擾乱が安定となることがわかる。図5に河床位に対する位相差を示している。これによると、 $k\theta_{qp}$ は $-\pi < k\theta_{qp} < 0$ の領域にあり、振幅の発達に寄与していることがわかる。また、 $k\theta_{qp}$ は $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ の領域にあり、振幅の発達を抑制することがわかる。このような傾向は、一様砂と同一である⁵⁾。次に、 $k\theta_f$ について細粒分と粗粒分に分けて考えると、粗粒分は $-\pi < k\theta_f < 0$ の領域にあり、振幅の発達に寄与し、細粒分は $0 < k\theta_f < \pi$ の領域にあり、振幅の発達を抑制することがわかる。つまり、混合砂河床の砂州の波高の抑制は細粒分の存在によるものと予想される。

図6に、式(1)の右辺第1項と第2項の総和 $q_{bxall}(=\sum_{i=1}^n f_{i0} A_{si} |q_{bypi}| k \sin(k\theta_{qypi})) + f_{all}$ 、右辺第3項の総和 q_{byall} について、一様砂と混合砂の値を示す。これらの総和が0に近いと、クレストにおいて流砂量分布が平滑化していると考えられる。縦断方向の流砂量は、 q_{bxall} と f_{all} の和として表される。縦断方向の流砂量は、混合砂の方が小さくなっており、流

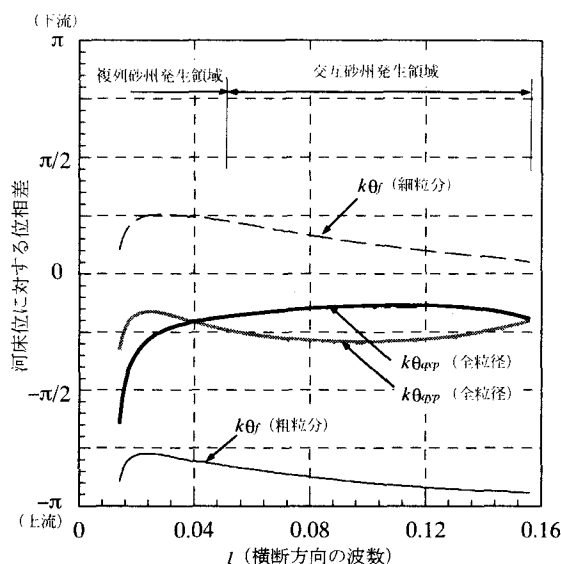


図5 初期増幅率の決定に直接寄与する擾乱の河床位に対する位相差(河床勾配=1/50, 無次元掃流力=0.143)

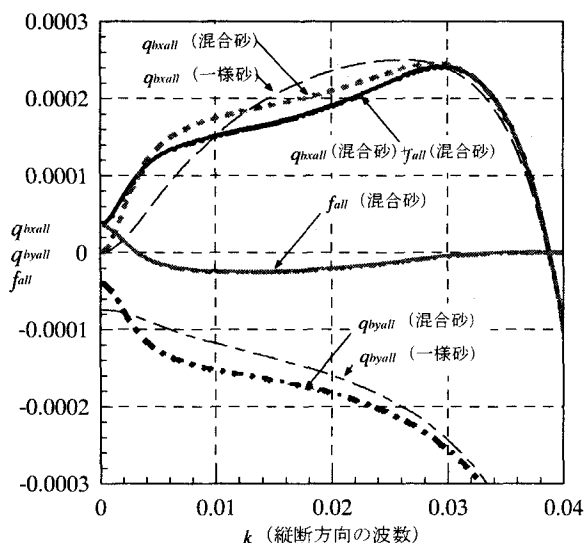


図6 河床擾乱の振幅の初期増幅率に及ぼす砂礫の分級の影響(河床勾配=1/50, 無次元掃流力=0.143)

砂量分布が平滑化している。 q_{byall} は、逆に流砂量の分布幅が大きくなっているが、負の値であるため、やはり増幅率を小さくすることがわかる。ここで、一様砂と混合砂の差は、平均粒径が空間的に分布することによる流れ場の相違と各粒径階の含有率が空間的に異なることによるものであり、両現象とも砂礫の分級現象によるものである。また、 f_{all} は負の値となっており、河床材料が粒度分布を持つことにより流砂量に細粒分が増え、振幅の発達を抑制することがわかる。

(2) 波長

混合砂河床において砂州の平衡波長が短くなる現象を波高の場合と同様に理論解析を用いて検討する。理論解析では、平衡波長は「河床擾乱の振幅の初期増幅率を最大にする波長」としている。

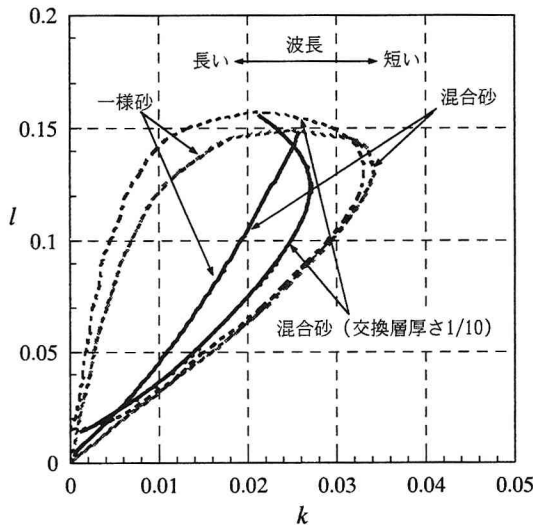


図 7 一様砂河床と混合砂河床の波長の違い (河床勾配=1/50, 無次元掃流力=0.143)

図 7 は, 一様砂, 混合砂および交換層厚を 1/10 にしたときの河床擾乱の安定・不安定境界線および各横断方向の波数 (l) に対して河床擾乱の初期増幅率を最大にする縦断方向の波数 (k) の値を連ねた線を示したものである。これによれば, 交換層厚を 1/10 にした結果において, 振幅の初期増幅率を最大にする k の値が大きくなり, 波長が短くなることがわかる。

図 8 は, 図 6 より得られたもので, 式(1)の右辺各項の総和について, 一様砂と混合砂の値の差を抽出したものである。平衡波長を「河床擾乱の振幅の初期増幅率を最大にする波長」として決定していることと, 砂礫の分級現象により初期増幅率が小さくなることを考えると, 振幅の初期増幅率の抑制効果が小さい条件に波長は変化すると考えられる。図に示すように, 砂礫の分級現象による増幅率の抑制効果は, k に対して一様ではなく, $k=0.018$ 付近で最大値を取る。また, 増幅率の抑制効果の最大値と一様砂の卓越波数 ($k=0.0192$) が異なるため, 混合砂河床の砂州の波長と一様砂河床のそれとに違いが生じ, 本条件では波長が短くなることがわかる。

(3) 伝播速度

理論解析においても混合砂の伝播速度が一様砂のそれより速くなることが示される。図 9 は, 一様砂, 混合砂, そして交換層厚を 1/10 にしたときの平衡伝播速度を示している。前節と同様, 交換層厚を 1/10 にし, 砂礫の分級現象が発達した状態では, 平衡伝播速度は速くなることがわかる。

ここで, 混合砂河床において砂州の伝播速度が速くなる現象を理論解析を用いて検討する。線形解析において砂州の伝播速度は, 混合砂河床の場合, 以下のように表現される。

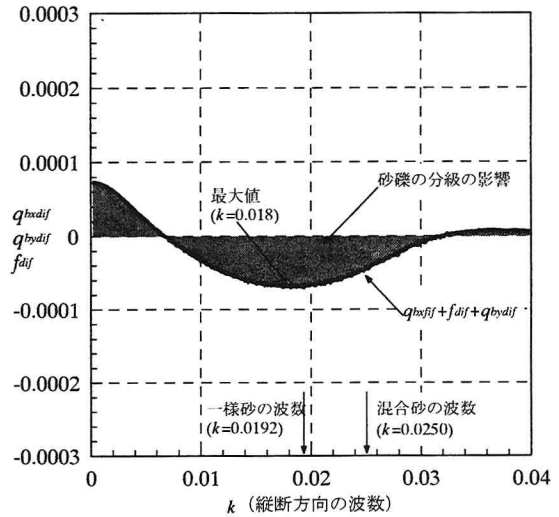


図 8 河床擾乱の振幅の初期増幅率に及ぼす砂礫の分級の影響 (河床勾配=1/50, 無次元掃流力=0.143)

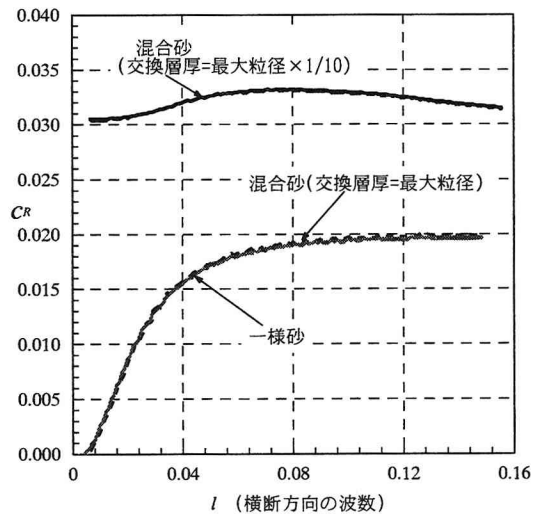


図 9 河床擾乱の振幅の初期増幅率を最大にする波数 k に沿った無次元伝播速度 (河床勾配=1/50, 無次元掃流力=0.143)

$$c_R = \sum_{i=1}^n f_{i0} A_{si} \left[|q_{bxpi}| \cos(k\theta_{axpi}) + |f_i| \cos(k\theta_{fi}) - |q_{bypi}| \frac{l}{k} \sin(k\theta_{qypi}) \right] \quad (3)$$

式(3)によると, q_{bxpi} と f_i は $-\pi/2 < k\theta < \pi/2$, q_{bypi} は $-\pi < k\theta < 0$ で下流への砂州の伝播を速めていることがわかる。図 5 を再度見ると, $k\theta_{qp}$ は $-\pi/2 < k\theta < \pi/2$ の領域にあり, 下流への砂州の伝播を速めていることがわかる。また, $k\theta_{qp}$ は $-\pi < k\theta < 0$ の領域にあり, これも下流への砂州の伝播を速めている。次に, $k\theta_f$ について, 細粒分と粗粒分に分けて考えると, 粗粒分は $-\pi < k\theta < -\pi/2$, $\pi/2 < k\theta < \pi$ の領域にあり, 下流への砂州の伝播を遅くしていることがわかる。また, 細粒分は $-\pi/2 < k\theta < \pi/2$ の領域にあり, 下流への砂州の伝播を速めている。砂州の下流への伝播は, 砂州前縁部における砂の堆積によるが, 堆積する砂が細粒分を多く含むことを示している。

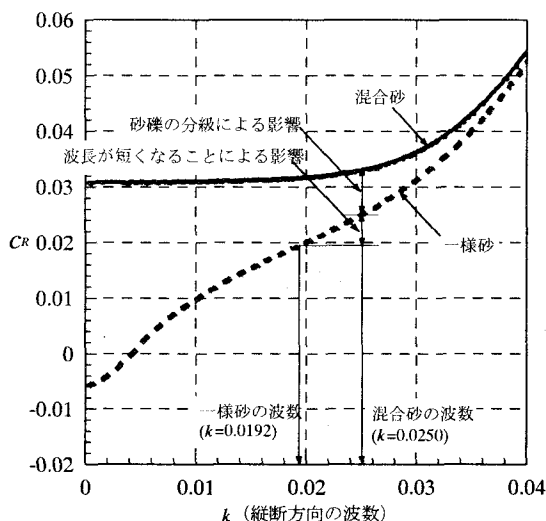


図 10 混合砂河床と一樣砂河床の砂州の伝播速度 (c_R) の違い (河床勾配=1/50, 無次元掃流力=0.143)

既存の研究により、波長の短い砂州の方が長い砂州よりも伝播速度が速いことがわかっている¹¹⁾。前節での検討により、混合砂河床における砂州の波長は一樣砂のそれより短くなる。つまり、波長が短くなるために伝播速度が速くなると考えることができる。また、これまでの研究により¹²⁾、混合砂河床では、波高が低いにも関わらず、砂礫の分級により砂州前縁部に堆積する砂の量が一樣砂と変わらないため、伝播速度が速くなることがわかっている。つまり、混合砂河床の砂州の伝播速度が一樣砂のそれよりも速くなる原因として、「波長が短い」と「砂礫の分級現象」の二つが考えられる。「波長が短い」も間接的には砂礫の分級現象によるものであるが、ここでは伝播速度が速くなる機構を明確にするために区別しておく。図 10 は、平衡伝播速度について、一樣砂と混合砂の値を示している。図に示すように、一樣砂と混合砂ともに、波数の増加 (波長の減少) とともに伝播速度は早くなることがわかる。また、一樣砂と混合砂の値の差が「砂礫の分級現象」の影響であることを考えると、図に示すような二つの効果により伝播速度が速くなっていることがわかる。

5. 結論

直線河道の交互砂州を対象として、混合砂河床における砂州の動態について検討した。本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 混合砂河床の交互砂州では、河床表層で砂礫の分級現象が発生し、河床位の高い領域で細粒化、低い領域で粗粒化する。
- (2) 混合砂河床の交互砂州の平衡波高は、一樣砂のそれよりも低くなる。これは、砂礫の分級現象により、クレストにおいて縦断方向の流砂量勾配が緩やかになるとともに、横断方向のそれが

急になるためである。

- (3) 混合砂河床の交互砂州の平衡波長は、一樣砂のそれよりも短くなる。これは、波長の短い砂州よりも長い砂州の方が砂礫の分級現象により、河床擾乱の振幅の初期増幅率の発達が抑制されるためである。
- (4) 混合砂河床の交互砂州の平衡伝播速度は、一樣砂のそれよりも速くなる。これは、砂礫の分級現象と砂州の平衡波長が短くなることによるものである。

謝辞：本研究を進めるにあたり、実験及び資料解析において、立命館大学大学院の長谷川氏と立命館大学の赤畠氏 (現：大成機工 (株)) にご助力頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鎌田磨人, 郡麻里, 三原敏, 岡部健士: 吉野川の砂州上におけるヤナギ群落およびアキグミ群落の分布と立地特性, 環境システム研究, Vol. 27, pp.331-337, 1999.
- 2) 玉井信行, 水野信彦, 中村俊六 編: 河川生態環境工学, 東京大学出版会, pp. 89-95, 1993.
- 3) 高橋史峰, 江頭進治, 吉栖雅人: 砂州の形状特性値に及ぼす混合砂の影響, 平成 7 年関西支部年次学術講演概要, II-68, 1995.
- 4) 竹林洋史, 江頭進治: 砂礫の分級による砂州平衡形状の不安定化, 第 55 回年次学術講演会講演概要集, II-268, 2000.
- 5) 黒木幹男, 岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文集, 第342号, pp. 87-96, 1984.
- 6) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bends, Jour. of Hy. Div. ASCE, Vol. 100, No. HY11, 1974.
- 7) 芦田和男, 道上正規: 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 206 号, pp. 59-69, 1972.
- 8) 芦田和男, 江頭進治, 劉炳義: 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, 第 35 巻, pp.383-390, 1991.
- 9) 平野宗夫: Armoring をともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第 195 号, pp. 55-65, 1971.
- 10) 小山真一郎, 黒木幹男, 板倉忠興: 粒度組成を考慮した砂州の発生条件に関する理論的研究, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要集第 2 部, pp. 450-451, 1998.
- 11) 長田信寿, 村本嘉雄, 内倉嘉彦, 細田尚, 矢部昌之, 高田保彦, 岩田通明: 各種河道条件下における交互砂州の挙動について, 水工学論文集 第 43 巻, pp.743-748, 1999.
- 12) Takebayashi H., Egashira S. and Jin H. S.: Numerical simulation of alternate bar formation, Proc. of 7th ISRS, pp.733-738, 1998.

(2000.10.2 受付)