

交互砂州形成における混合粒径砂の影響に関する実験と理論

FLUME EXPERIMENTS AND LINEAR STABILITY ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF NON-UNIFORM SEDIMENTS ON THE ALTERNATE BAR FORMATION

矢野雅昭¹・渡邊康玄²・山口里実³・平井康幸⁴

Masaaki YANO, Yasuharu WATANABE, Satomi YAMAGUCHI and Yasuyuki HIRAI

¹正会員 寒地土木研究所 水環境保全チーム(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

²正会員 工博 北見工業大学教授 工学部社会環境工学科(〒090-8507 北見市公園町165)

³正会員 工(博) 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丁目1番34号)

⁴正会員 工(博) 寒地土木研究所 水環境保全チーム(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

To elucidate alternate bar profiles and bar formation under the non-uniform sediments condition, flume experiments and linear stability analyses were conducted. The experiments results show that alternate bars profiles were disturbed in the case that discharge was reduced by 30% from the case that alternate bar were formed. Those bar profiles disturbance assumed to be caused by forming fix bars covered by coarse sediments. The experiments results also show that bar formation was not formed in some cases. Linear stability analyses results show that prominent instability at 1m bar wave length, that is one third of proper alternate bar wave length, was conformed in one of the case that alternate bar was not formed. Thereby, it was assumed that the peculiar instability restrained bar formation.

Key Words : *alternate bar, non-uniform sediment, flume experiment, stability analysis*

1. はじめに

中規模河床形態は、治水や河川環境と密接に結びついていることから、従来から数多く研究が進められてきている。これらの多くは、河床材料を均一の粒径として取り扱ってきた。そのような中、様々な粒径が混在する混合粒径の河床を対象とした研究も進められ、河川中・上流域等の河床材料の粒径分布が広い場の河床変動を検討する際には、混合粒径であることを考慮する必要が指摘されてきている¹⁾。

混合粒径の砂州を対象としたこれまでの研究では、竹林・江頭¹⁾により、混合粒径による砂州は単一粒径のものとは比べ、波高が小さく、波長が短いことが指摘されている。さらに、竹林・江頭²⁾は、河床材料の粒度分布の影響を数値計算、線形安定解析で検討し、正規分布とタルボット分布では大局的には大きな違いがないことや、2粒径型の河床材料の線形安定解析への適用の限界について述べ、交換層の取り扱いにより結果が異なることについても述べている。また、長谷川ら³⁾は、河床勾配が1/10の急勾配条件での砂礫堆の形成について、水理実験と線形安定解析を行い、混合粒径では単一粒径条件とは

異なる波長で発達する増幅率があり、砂礫堆の形成に影響を及ぼすことを示している。このように混合粒径の河床変動特性については、非常に複雑なものとなっている。

近年河川の中・上流域において、露岩河床の覆礫が行われる河川もあるが⁴⁾、このような箇所においても、覆礫後の砂州形成や粒度分布が、覆礫の維持や環境上きわめて重要になる。

本研究は、混合粒径条件での交互砂州の形成の有無や形成される場合の形状について、水理条件や粒度構成が異なる条件での水理実験を行い、現象の違いについて把握を行った。さらに、粒度分布を考慮した交互砂州発生に関する線形安定解析を実施して、その原因について考察したものである。

2. 水理実験

(1) 実験水路

水理実験には、延長は20.0m、幅0.45mの可変勾配の水路を用いた。河床材料厚は、河床変動による最深洗掘深に対して、十分な厚さの8cmとした。なお、右岸側の水路側壁の材質が透明なガラスであることから、右岸縦断面が確認できる状態となっている。

(2) 水理実験

実験ケースの諸元を表-1に示す。これらの実験ケースは、平均粒径で粒径を評価した場合、図-1に示すとおり岸・黒木の領域区分図⁹⁾上では、全て交互砂州の発生条件となる。なお、ケースAとBの違いは後述する河床形状計測の有無である。

ケースA1, A2は、平均粒径がそれぞれ0.16, 0.77, 1.6mmの7, 4, 2号硅砂を15 : 70 : 15で混合した河床材料（混合粒径Ⅰ 平均粒径 ; 0.49mm）を用いているが、ケースA1の方がケースA2よりも流量が多い条件である。

ケースB1は、ケースAと同様の河床材料を用いているが、河床勾配が1/150であり、ケースAよりも河床勾配が緩やかな条件である。ケースB2は、河床勾配および河床材料の平均粒径はケースB1と同様であるが、河床材料の分布として、前述した7, 4, 2号硅砂を30 : 55 : 15で混合したもの（混合粒径Ⅱ 平均粒径 ; 0.44mm）を用いている。ケースB3は河床勾配が1/200と最も緩く、河床材料の粒度分布として、前述した7, 4, 2号硅砂を1 : 1 : 1で混合したもの（混合粒径Ⅲ 平均粒径 ; 0.61mm）を用いている。

各実験では、通水中に水路上流端の河床高が維持されるように、水路上流から初期河床と同じ配合の給砂を連続的に行った。図-2に混合粒径Ⅰ~Ⅲの粒度分布と、芦田・道上によるEgiazaroffの修正式⁹⁾により遮蔽効果を考慮した無次元限界掃流力および各実験ケースの等流時の無次元掃流力を示すが、実験ケースの無次元掃流力が無次元限界掃流力を上回っていることが確認される。なお、本実験で用いた、粒径の大きい2号硅砂は、黒っぽい色をしており、最も小さい7号硅砂は4号硅砂と比べより白い色となっているため、通水中の分級状況が目視である程度把握できる。なお、本実験が1/100スケールとすると、川幅が45m、平均粒径が4~6cm程度の条件となる。

(3) 計測

a) 波長・波高計測

通水中に30分間隔で、水路下流端から10m上流までに発生した砂州の先端位置と波高の計測を行った。また、隣り合う砂州先端の縦断方向位置の差から半波長も算出した。波高計測は、通水中は迅速に行う必要があるため、ここでは計測を簡易化し、波高の定義を砂州先端付近の砂州頂部と淵の高低差として計測した。このため例えば、同一砂州における横断面の高低差の最大値と定義されている波高より、やや小さな値を示す。

b) 上空、側方からのビデオ撮影

通水中は水路下流端から4~8m上流の範囲を上空からビデオ撮影した。また、水路下流端から4.5, 6.5m上流の位置において、右岸側のガラス水路壁越しに河床縦断面の撮影を行った。撮影位置のガラス水路壁には目盛を設け、映像から15分間隔で、初期河床高からの変動量を判読し、時間変化を整理した。

表-1 実験ケース

ケース	勾配	河床材料	流量 (m ³ /s)	移動床時 通水時間	通水直後ビデオ読取り水深 (cm) ※()内は Manning 粗度0.014を用いた場合の計算値
A1	1/100	混合粒径Ⅰ	0.00340	5.45	1.75 (1.65)
A2	1/100	混合粒径Ⅰ	0.00260	7.00	1.50 (1.40)
B1	1/150	混合粒径Ⅰ	0.00360	6.48	1.80 (1.90)
B2	1/150	混合粒径Ⅱ	0.00360	8.00	1.95 (1.90)
B3	1/200	混合粒径Ⅲ	0.00264	0:00~4:40	1.70 (1.75)

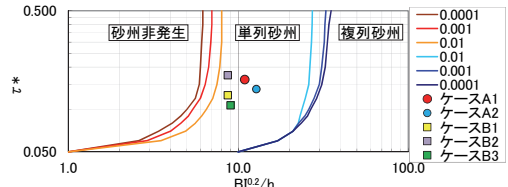
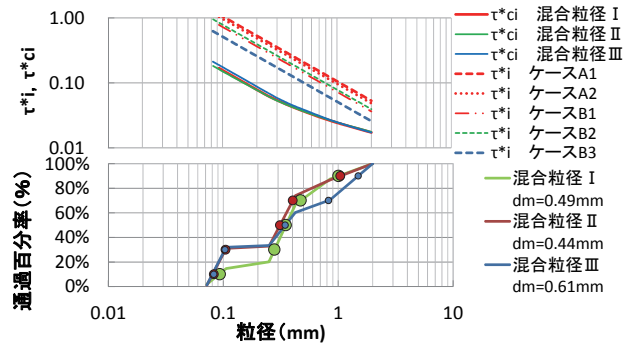


図-1 各実験ケースの交互砂州の発生区分⁵⁾



※下図中の丸印は安定解析に用いたD₁₀, D₃₀, D₅₀, D₇₀, D₉₀を表す。

図-2 河床材料の粒度分布とその無次元限界掃流力及び各ケースの無次元掃流力

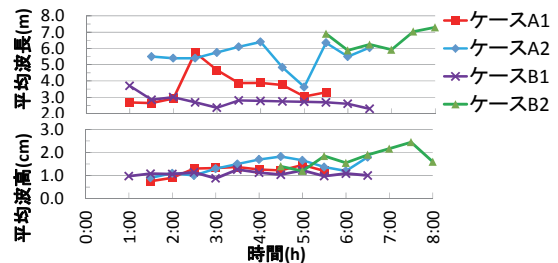


図-3 波長・波高の時間変

c) 河床形状計測

ケースA1およびA2の通水終了後に、水路下流端から2~10m上流の範囲に発生した砂州地形を、レーザー砂面計により計測した。計測は、縦断間隔10cmで設けた横断測線上を、横断間隔5mmで計測した。

(4) 水理実験結果

a) 波長・波高の時間変化と砂州形成の有無

波長・波高の平均値の時系列変化を図-3に示す。なお、後述する線形安定解析結果と比較しやすいよう、算出した平均半波長を2倍して、交互砂州1対の波長として示している。ケースA1, A2およびケースB1の通水終了時の平均波長は、それぞれ3.3, 6.05, 2.28mであり、平均波高はケースA1, A2およびB1で、それぞれ1.2, 1.8, 1.0cmであった。ケースB2は、通水開始から4時間30分後

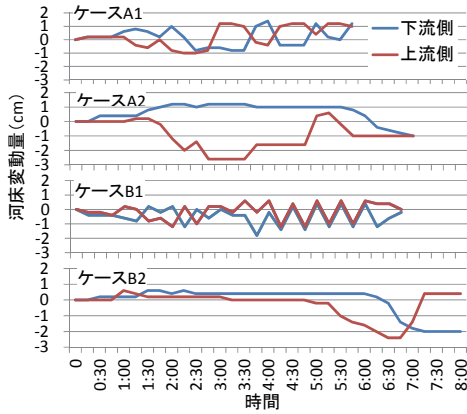


図-4 右岸側ガラス側壁越しからのビデオ撮影により判読した河床変動量の時間変化

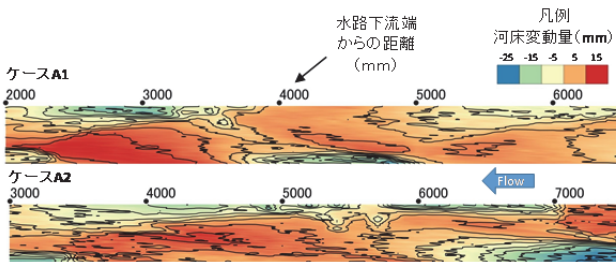


図-5 河床変動量 (ケースA1, A2)

まで波長、波高が確認されず、その後に交互砂州状の地形が形成され、通水終了時の平均半波長・波高はそれぞれ7.3m, 1.6cmであった。ケースB3は、4時間40分通水したが交互砂州は形成されなかった。

右岸側方のビデオ画像から得た河床変動量の変化を図-4に示す。ケースA1は、上・下流側の撮影地点で、ともに通水開始後3時間以降から周期が1時間程度、振幅が1.5~2cm程度の変動が確認され、交互砂州が移動している様子が確認される。ケースA2は、下流側の撮影位置で、通水初期から河床が上昇し、通水後半に低下している。上流側ではこれと逆の変動をしている。この変動からは交互砂州の変動ともとれるが、移動速度がケースA1の場合に比べ極めて遅くなっている。ケースB1は通水開始直後から河床に上下変動が確認され、通水開始後4時間頃から周期が0.5時間、振幅が1.5cm程度の一定の変動が確認される。ケースB2は通水開始後5時間頃まで大きな河床変動は確認されないが、上流側で徐々に河床が低下し、通水開始後5時間頃に2cmを超える大きな洗掘が生じている。

b) 河床高計測結果

レーザー砂面形による計測結果を内挿補間して作成した、ケースA1, A2の河床変動量の平面分布を図-5に示す。ケースA1は交互砂州が形成されていることが明確に確認される。ケースA2は波長の長い(6m程度)交互砂州状の河床になっているものの、右岸に水路下流端からの距離で3~5.5m, 5.7~7mの範囲に連続して深掘れ部が形成され、長い波長の交互砂州状の河床に、波長3m程度の周期を持つ交互砂州状の地形が存在するような形状

を示している。

3. 線形安定解析

水理実験において、条件により交互砂州の発生の有無や形状の違いが生じたことから、河床材料の粒径分布を考慮した線形安定解析を実施し、その現象に考察を加えることとした。なお、従来の均一砂における線形安定解析との違いを明確にするため、ここでは、Colombini *et al.*^{6,7)}の線形安定解析と同一手法を用い、これに混合粒径の考え方を導入することとした。

(1) 解析方法

a) 基礎式

混合粒径を考慮した線形安定解析のx方向, y方向の運動方程式、連続の式には式(1)~(3)を用いた。流砂の連続式には、式(4)を用い、さらに、平均粒径、交換層内の各粒径の含有率については式(5), (6)を用いた。

$$\tilde{u} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{y}} = -\frac{\tilde{\tau}_x}{\tilde{\rho} \tilde{h}} - \tilde{g} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial \tilde{x}} \quad (1)$$

$$\tilde{u} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{x}} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{y}} = -\frac{\tilde{\tau}_y}{\tilde{\rho} \tilde{h}} - \tilde{g} \frac{\partial \tilde{H}}{\partial \tilde{y}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\tilde{u}\tilde{h})}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial(\tilde{v}\tilde{h})}{\partial \tilde{y}} = 0 \quad (3)$$

$$\tilde{\Delta} \frac{\partial P_i}{\partial \tilde{t}} + P_i \frac{\partial(\tilde{H}-\tilde{h})}{\partial \tilde{t}} + \frac{1}{1-k} \left(\frac{\partial \tilde{q}_{xi}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{q}_{yi}}{\partial \tilde{y}} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\sum P_i = 1 \quad (5)$$

$$\sum \tilde{d}_i P_i = \tilde{d}_m \quad (6)$$

ここで、 \tilde{t} ; 時間、 \tilde{u} および \tilde{v} ; それぞれ \tilde{x} 軸方向および \tilde{y} 軸方向の流速、 \tilde{H} ; 水位、 \tilde{h} ; 水深、 $\tilde{H}-\tilde{h}$; 河床高、 $\tilde{\Delta}$; 交換層厚であり、厚さによる結果の違いについて指摘されているが²⁾、ここでは最大粒径とした。 P_i ; i 粒径階の交換層内の含有率、 \tilde{q}_{xi} および \tilde{q}_{yi} ; それぞれ、 i 粒径階の \tilde{x} 軸方向および \tilde{y} 軸方向の掃流砂量、 \tilde{g} ; 重力加速度、 k ; 河床の空隙率、 \tilde{d}_i ; i 粒径階の粒径、 \tilde{d}_m ; 平均粒径である。また、 $\tilde{\tau}_x$ および $\tilde{\tau}_y$ は、それぞれ \tilde{x} 軸方向および \tilde{y} 軸方向のせん断力であり、式(7)で表される。なお、各記号に付されている \sim は次元を有していることを表す記号である。

$$\tilde{\tau}_x = \tilde{\rho} c \tilde{u} \sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2}, \quad \tilde{\tau}_y = \tilde{\rho} c \tilde{v} \sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2} \quad (7)$$

ここで、 c は河床摩擦係数であり、式(8)を用いた。

$$\frac{1}{\sqrt{c}} = 6 + 2.5 \ln \frac{\tilde{h}}{2.5 \tilde{d}_m} \quad (8)$$

掃流砂量式は、式(9)に示すMeyer Peter-Müller式⁵⁾を用いた。 \tilde{x} 軸方向および \tilde{y} 軸方向の掃流砂量は式(10)のとおりである。

$$\tilde{q}_i = 8(\tau_{*i} - \tau_{*ci})^{3/2} \sqrt{s \tilde{g} \tilde{d}_i^3} P_i \quad (9)$$

$$\tilde{q}_{xi} = \tilde{q}_i \cos \delta, \quad \tilde{q}_{yi} = \tilde{q}_i \sin \delta \quad (10)$$

ここに、 \tilde{q}_i ; i 粒径階の主流方向の掃流砂量、 s ; 砂粒子

の水中比重, \tilde{g} ; 重力加速度, δ ; 主流方向に対する掃流砂流下方向の角度, τ_{*i} ; i 粒径階の無次元掃流力, τ_{*ci} ; i 粒径階の無次元限界掃流力である。

b) 無次元

無次元化は, $\tilde{t} = \tilde{B}t/\tilde{u}_0$, $(\tilde{x}, \tilde{y}) = \tilde{B}(x, y)$, $(\tilde{u}, \tilde{v}) = \tilde{u}_0(u, v)$, $(\tilde{h}, \tilde{H}, \tilde{\Delta}) = \tilde{h}_0(h, F_0^2 H, \Delta)$, $(\tilde{\tau}_x, \tilde{\tau}_y) = \tilde{\rho}\tilde{u}_0(\tau_x, \tau_y)$, $(\tilde{d}_i, \tilde{d}_m) = \tilde{d}_{m0}(d_i, d_m)$, $(\tilde{q}_x, \tilde{q}_y) = (s\tilde{g}\tilde{d}_i^3)^{1/2}(q_x, q_y)$ の関係を用いて行った。

ここで, F_0 はフルード数であり, $_0$ を付している文字は初期状態の等流時の値を示す。また, $P_i = P_{i0}P_{ni}$ であり, P_i についても初期状態からの変化を考慮している。式(10)中の $\sin \delta$ は, 無次元化した値で表された式(11)を用いる。

$$\sin \delta = \frac{v}{\sqrt{u^2+v^2}} - \frac{r}{\beta\tau_{*i}^{1/2}} \frac{\partial(F_0^2 H - h)}{\partial y} \quad (11)$$

c) 線形化

無次元化された基礎式を, 初期等流時の値とそれからの摂動量に分けて, $h = 1 + Ah_1$, $H = H_0 + AH_1$, $\tau_x = \tau_{x0} + A\tau_{x1}$, $\tau_y = A\tau_{y1}$, $q_{xi} = q_{xi0} + Aq_{xi1}$, $q_{yi} = q_{yi0} + Aq_{yi1}$, $P_{ni} = 1 + AP_{ni1}$, $d_m = 1 + Ad_{m1}$ のように表す。ただし, A は時間に関する振幅を示し, 微小攪乱開始時点においては微小値である。これらを, 基礎式(1)~(6)を無次元化したものに代入すると, A^1 次のオーダーについて, (12)~(17)式が得られる。

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial H_1}{\partial x} + \beta\{\tau_{x1} - h_1\tau_{x0}\} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial H_1}{\partial y} + \beta\tau_{y1} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial h_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

$$\Delta \frac{\partial P_{ni1}}{\partial t} + F_0^2 \frac{\partial H_1}{\partial t} - \frac{\partial h_1}{\partial t} + Q_{i0} \left(\frac{\partial q_{xi1}}{\partial x} + \frac{\partial q_{yi1}}{\partial y} \right) = 0 \quad (15)$$

$$-d_{m1} + \sum d_i P_{i0} P_{ni1} = 0 \quad (16)$$

$$\sum P_{i0} P_{ni1} = 0 \quad (17)$$

ここに, $Q_{i0} = 1/((1-k)(F_0 P_{i0})) \sqrt{s \left(\frac{\tilde{d}_i}{\tilde{h}_0} \right)^3}$, $\beta = \frac{\tilde{B}}{\tilde{h}_0}$ である。ここで, 添え字の $_1$ を付したものは1次オーダーの成分であることを表す。せん断力 $\tilde{\tau}_x$, $\tilde{\tau}_y$ と, 流砂量 \tilde{q}_x , \tilde{q}_y を無次元化して, A^0 次および A^1 次のオーダーの摂動量を算出した。それら基礎式を式(18)~(22)に示す。

$$\tau_{x0} = c_0 \quad (18)$$

$$\tau_{x1} = c_0(s_1 u_1 + s_2 h_1 + s_3 d_{m1}) \quad (19)$$

$$\tau_{y1} = c_0 v_1 \quad (20)$$

$$q_{xi1} = q_{i0}(f_{1i} u_1 + f_{2i} h_1 + f_{3i} d_{m1} + f_{4i} P_{ni1}) \quad (21)$$

$$q_{yi1} = q_{i0} \left\{ v_1 - \frac{r}{\beta} \sqrt{\frac{1}{\tau_{*i0}}} \left(\frac{\partial F_0^2 H_1}{\partial y} - \frac{\partial h_1}{\partial y} \right) \right\} \quad (22)$$

ここで, $f_{1i} = s_1 Q_{Ti}$, $f_{2i} = s_2 Q_{Ti} + Q_{hi}$,

$$f_{3i} = (s_3 Q_{Ti} + Q_{dm})d_{m1}, f_{4i} = Q_{Pi}, s_1 = \frac{2}{1-C_T},$$

$$s_2 = \frac{C_h}{1-C_T}, s_3 = \frac{C_{dm}}{1-C_T}, C_T = \frac{\tau_{*0} \frac{\partial c_0}{\partial \tau_{*i}}}{c_0} \Big|_{\tau_{*i}=\tau_{*i0}}, C_h = \frac{1}{c_0} \frac{\partial c_0}{\partial h} \Big|_{h=h_0},$$

$$C_{dm} = \frac{1}{c_0} \frac{\partial c_0}{\partial d_m} \Big|_{d_m=d_{m0}}, Q_{Ti} = \frac{\tau_{*i0} \frac{\partial q_i}{\partial \tau_{*i}}}{q_{i0}} \Big|_{\tau_{*i}=\tau_{*i0}}, Q_{hi} = \frac{1}{q_{i0}} \frac{\partial q_i}{\partial h} \Big|_{h=h_0},$$

$$Q_{dm} = \frac{1}{q_{i0}} \frac{\partial q_i}{\partial d_m} \Big|_{d_m=d_{m0}}, Q_{Pi} = \frac{1}{q_{i0}} \frac{\partial q_i}{\partial P_{ni}} \Big|_{P_{ni}=P_{ni0}} \text{ であり,}$$

r は0.3を用いた。粒径別の無次元限界掃流力 τ_{*ci} は, 芦田・道上によるEgiazaroffの修正式⁵⁾の式(23)を用いた。

$$\tau_{*ci} = \begin{cases} \tau_{*cm} \left(\frac{\log 19}{\log \left(\frac{19 d_i}{d_m} \right)} \right)^2 & \left(\frac{\tilde{d}_{i0}}{\tilde{d}_{m0}} \geq 0.4 \right) \\ 0.85 \tau_{*cm} \left(\frac{d_m}{d_i} \right) & \left(\frac{\tilde{d}_{i0}}{\tilde{d}_{m0}} \leq 0.4 \right) \end{cases} \quad (23)$$

ここで, τ_{*cm} は平均粒径の無次元限界掃流力であり, 岩垣の式⁵⁾から算出した。本実験で該当する粒径の式を式(24), (25)に示す。なお, これらの式の単位はcmである。

$$0.0565 \leq \tilde{d}_{m0} \leq 0.1180; \tau_{*cm} = \frac{55.0}{s\tilde{g}} \quad (24)$$

$$0.0065 \leq \tilde{d}_{m0} \leq 0.0565; \tau_{*cm} = \frac{8.41(\tilde{d}_{m0} d_m)^{11/32}}{s\tilde{g}\tilde{d}_{m0} d_m} \quad (25)$$

本解析では, 式(23)~(25)により, 平均粒径の変化に伴い, 粒径別の無次元限界掃流力が変化することとなる。

d) 微小攪乱の時間増幅率の導出

無次元摂動量を式(26), (27)により与え, 式(12)~(17)に代入し, これらの式の行列式の係数マトリックスをゼロと置くことにより, 時間増幅率 Ω が求められる。

$$\begin{aligned} & \{u_1, H_1, h_1, d_{m1}, P_{ni(i=1)1}, \dots, P_{ni(i=k)1}\} \\ & = \exp(\Omega t) \{ \widehat{u}_1, \widehat{H}_1, \widehat{h}_1, \widehat{d}_{m1}, \widehat{P}_{ni(i=1)1}, \dots, \widehat{P}_{ni(i=k)1} \} \sin \left(\frac{1}{2} \pi y \right) \\ & \exp\{i(\lambda x - \omega t)\} + c.c \quad (26) \end{aligned}$$

$$v_1 = \exp(\Omega t) \widehat{v}_1 \cos \left(\frac{1}{2} \pi y \right) \exp\{i(\lambda x - \omega t)\} + c.c \quad (27)$$

Ω は摂動量の時間増幅率, i は虚数単位, λ は x (流下) 方向の波数, ω は角速度, $c.c$ は共役複素数である。文字の上に $\widehat{\quad}$ が付されているものは, 無次元振幅を表す。

解析に用いた水深は, 表-1に示す右岸側方からのビデオ撮影画像から得られた値を用いた。また粒径には図-2に示す D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{70} , D_{90} の5粒径階を用いた。

(2) 解析結果

a) 線形安定解析による波長と増幅率

今回実施した水理実験の条件で, 混合粒径の線形安定解析を行った。波長と増幅率の関係を表したものを図-6に示す。なお, 本解析では5階級の粒径を用いているため, 増幅率の値が5つ存在し, これらを図-6内で色分けして示している。

ケースA1, A2およびB1では, 増幅率の最大値が波長3m付近にあり, さらに1m付近に小さな増幅率のピークが確認される。波長3m付近の増幅率のピークはケースA2が最も大きく, 続いてケースA1となっている。ケースA1, B1の増幅率の卓越波長は, 実測の波長と近い値

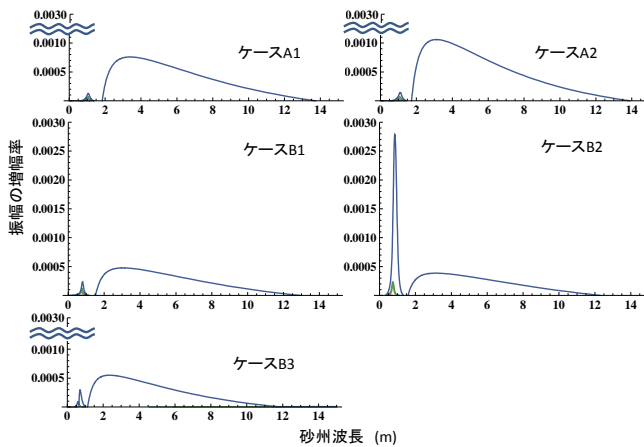


図-6 混合粒径を考慮した各実験ケースの線形安定解析結果

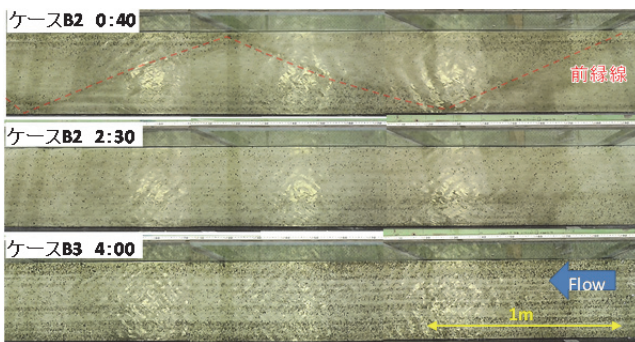


図-7 ケースB2, B3ビデオキャプチャー画像による河床状態

を示している。一方で、ケースA2の解析結果は、実測（6m程度）の波長の半分程度（3m程度）となった。なお、ケースA1, B1の実測波長は、それぞれ川幅の7.1倍、5.1倍と、やや短い¹⁾が、混合粒径条件では単一粒径条件よりも、波長が短くなる¹⁾ことが影響したと考えられる。

砂州が通水5時間程度まで形成されなかったケースB2では、ケースA1, A2およびB1と同様に波長3m付近に増幅率のピークがあるが、これよりもかなり大きい増幅率のピークが波長1m付近に確認される。砂州が全く形成されなかったケースB3では、他のケースの波長3m付近の増幅率と同様のピークが2.3m付近にあるが、波長1m付近の増幅率もケースB2ほどではないが、ケースB1よりやや大きい結果を得た。

4. 考察

(1) 流量の違いによる交互砂州形状の乱れについて

ケースA1では実験により通水中も含め、明確な交互砂州が確認されたのに対し、流量がそれよりも少ないケースA2では交互砂州の移動が確認されず、形状が乱れていた（図-4, 5）。これは、ケースA2の実験時に確認された粗粒材の2号珪砂が浮き州状に堆積したことが影響したと考えられる。流量の少ないケースA2では、砂州が形成されると、砂州頂部の水深が浅くなり、掃流力が低下し、粗粒材が堆積し、動きづらい浮き州が形成される。それに伴い、流れが対岸側に偏るため、対岸側が深掘れして水深が増加する。このような砂州の2極化

により形成される砂州は、ほとんど移動せず、波長が長く、波高も高いものとなる。線形安定解析では、等流時からの変化を想定しており、このような現象は扱えないため実験と解析で波長が一致しなかったと考えられる。ただし、図-6に示されるように、ケースA2の方がケースA1よりも線形安定解析の結果では増幅率が大きくなっている。なお、線形安定解析では、浮州やその要因となる波高を議論することはできない。今後、この点について非線形解析等を実施する必要がある。

(2) 砂州の形成抑制の要因について

ケースB2では、図-3, 4に見られるように通水開始後4.5時間頃に砂州形成がされたが、等流時に近い通水初期に着目すれば、砂州は形成されなかった。ケースB3においても実験では砂州形成が確認されなかった。これらのケースの上空からのビデオ撮影画像をキャプチャーしたものを図-7に示す。ケースB2では通水開始後40分に波長2m弱の砂州が薄く形成されたことが確認されるが、その後消え、2時間30分後には一部に第2種2次流による縦筋が確認される。ケースB3では通水開始から終了まで、図-7の通水開始後4時間のような第2種2次流による明確な縦筋が確認された。

線形安定解析から砂州形成が抑制された原因を考察する。図-6に示すようケースB2の線形安定解析の結果では、砂州が形成されたケースA1と同様に波長3m付近に増幅率のピークがある。図-7に示とおりケースB2の通水開始後40分には、波長が2m弱の薄い砂州が表れている。この薄い砂州が十分発達したのではないことを踏まえると、この波長と近い、線形安定解析で確認された波長3m付近の増幅率が影響して発生したと考えられる。しかし、ケースB2では波長1m付近に突出して大きい増幅率のピークがあり、この波が砂州形成の抑制に作用した可能性が考えられる。長谷川ら⁴⁾は、水理実験と線形安定解析により、混合粒径条件で、急流河川の砂礫堆の発達を検討し、単一粒径で確認される波長付近の増幅率と近いものを河床不安定、単一粒径では現れない波長での増幅率を分級不安定として、検討を行っている。そこでは、分級不安定が河床不安定と拮抗もしくは上回る条件では、砂礫堆は形成されず、大礫が交互に溜まる状況であったことが述べられている。本実験のケースB2では、粗粒材の交互の堆積は確認されていないが、混合粒径の条件で、形状不安定が弱まり、砂州が明確に形成されない点で、長谷川ら⁴⁾が確認した現象と共通している。砂州が形成されず、明確な縦筋が特徴的なケースB3では、図-6に示す線形安定解析による波長1m付近の増幅率のピークは、ケースA1, A2およびB1と比べ大きい、ケースB2ほど大きくなく、ケースB3の波長2.3m付近にあるピークより小さい。このため、ケースB2と同様の砂州形成抑制の要因が作用したかは断定できない。ケースB3の混合粒径IIIは、混合粒径I, IIと比べ、黒色の粗

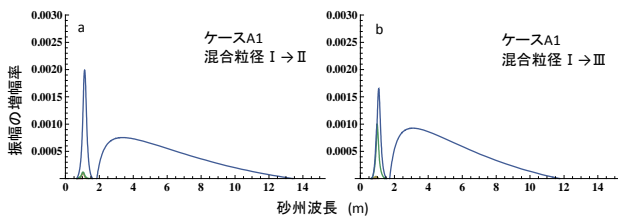


図-8 実験ケースの条件を一部変更した線形安定解析結果

粒な2号硅砂の含有率が多く、縦筋がその粗粒材で構成されていることが図-7からも判断できる。ケースB3で用いた混合粒径Ⅲの90%粒径(1.5mm)と最大粒径(2.0mm)を、単一粒径とした場合の無次元限界掃流力は、それぞれ0.038, 0.040である。この無次元限界掃流力は、ケースB3の等流時の粒径1.5, 2.0mmの無次元掃流力である0.034, 0.026を上回る。そのため、ケースB3では、等流に近い条件で粒径1.5mmや2.0mmの河床材料が局所的に集中し、単一粒径に近い条件になった場合は、それらは移動しないこととなる。縦筋は横断面的な流れの影響で形成されるため、線形安定解析では取り扱えないが、このような等流状態で移動しづらい粗粒材で構成された縦筋が、砂州形成の抑制に影響した可能性も考えられる。

(3) 砂州の形成を抑制する波の発生要因

先述したように、ケースB2における交互砂州形成の有無は、線形安定解析結果における波長1m程度の箇所での尖鋭化した増幅率のピークが存在に大きく影響を受けたものと考えられる。交互砂州が形成されたケースB1と形成されなかったB2では、使用した河床材料以外の条件は、ほぼ同一であった。そこで、混合砂の違いが砂州形成に影響を与えるかを詳しく見ることにする。

実験において交互砂州が明瞭に形成され、線形安定解析の結果においても波長1m程度での尖鋭化した増幅率のピークが大きいケースA1(混合粒径Ⅰ)を取り上げて検討した。水理条件はA1と同じとし、河床材料を混合粒径Ⅰから混合粒径ⅡおよびⅢに変更して線形安定解析を実施した結果、図-8aおよびbを得た。どちらも波長1m程度の箇所での尖鋭化した増幅率のピークが、交互砂州の形成が見られなかったケースB2と同様に大きな値となっている。このように、混合砂の割合を少し変化させることで交互砂州の波長よりも短い波長の波が卓越する結果となった。この条件での水理実験は実施しておらず明確に結論付けることはできないが、他のケースにおける水理実験結果と線形安定解析結果を考慮すると、どちらも交互砂州は発生しないものと推察される。

竹林・江頭¹⁾は、混合粒径の粗粒材は砂州の振幅の発達に寄与し、細粒材は振幅の抑制に寄与するとともに、粗粒材は砂州伝播を遅らせ、細粒材は砂州の伝播を速めることを指摘している。しかしながら、本研究における混合粒径Ⅱは混合粒径Ⅰと比較し、中間粒径の4号硅砂の割合が少なく、細粒分の7号硅砂の割合が多い。また、

混合粒径Ⅲは混合粒径Ⅰと比較し、中間粒径の4号硅砂の割合が少なく、粗粒分の2号硅砂の割合が多い。すなわち、粗粒分が増えても細粒分が増えても交互砂州の発達が抑制される結果となった。今後は、この短い波長の増幅率の挙動並びにその特性について検討していく必要がある。

5. まとめ

単一粒径での砂州発生条件で混合粒径を用いた水理実験と線形安定解析を行い、以下のことが確認された。

- ① 同じ交互砂州の発生条件の水理条件でも、流量が少ない条件では、交互砂州形状が乱れて、砂州波長、波高が大きな形状となった。この原因として、流量が少ない条件では、砂州が形成されると、頂部側の水深が薄くなり、粗粒材が堆積しやすくなり浮き州化し、さらにその影響で、対岸側に流水が集中したことが考えられる。
- ② 砂州形成がなかったケースの1つでは、実験での砂州波長3mよりも短い、波長1m付近の増幅率が突出して大きくなった。この通常形成される波長と異なる波長の増幅率の卓越が、砂州形成を抑制したことが考えられた。
- ③ 砂州形成がなかった他のケースでは、波長1m付近の突出した増幅率は顕著でないが、通水中に粗粒材で構成された縦筋が存在していた。粗粒材成分を単一粒径として限界掃流力を評価すると、等流条件では移動しない条件であった。そのため、この粗粒材で構成された縦筋が、砂州形成の抑制に影響したことも考えられた。
- ④ 砂州形成の抑制に寄与したと考えられる、通常形成される波長と大きく異なる波長の増幅率が卓越した原因として、粗粒材や細粒材の量が多いことが影響したことが想定されたが、その詳細な機構については明らかではなく、今後の課題である。

参考文献

- 1) 竹林洋史, 江頭進治: 混合砂河床における砂州の動態, 水工学論文集, 第45巻, pp727-732, 2001,2.
- 2) 竹林洋史, 江頭進治: 混合砂河床における交互砂州の変動特性, 水工学論文集, 第51巻, pp1033-1038, 2007,2.
- 3) 長谷川和義, 藤田豊彦, 目黒嗣樹, 竜沢宏昌: 河床不安定および分級不安定をともなう急勾配混合砂礫河床の形態, 水工学論文集, 第44巻, pp659-664, 2000,2
- 4) 牛山智夫, 旭一岳, 米元光明, 井上卓也: 大型模型実験による岩盤床を含む河床低下対策に関する一考察, 河川技術論文集, Vol.20, pp289-294, 2014,6.
- 5) 土木学会 水理公式集. 社団法人 土木学会,1999.
- 6) Colombini, M., Seminara, G. and Tubino, M.: Finite-amplitude alternate bars, *J. Fluid Mech.* Vol. 181, 1987.
- 7) 渡邊康玄: わかりやすい理論解析入門(その1) —交互砂州の安定解析を例として—, 開発土木研究所月報, No.458, 1991,7.

(2015. 9. 30受付)