

河床不安定および分級不安定をともしう 急勾配混合砂礫河床の形態

BED FORMS IN STEEP CHANNELS WITH HETEROGENEOUS BED MATERIALS INDUCED BY BOTTOM ELEVATION INSTABILITY AND SORTING INSTABILITY

長谷川和義¹・藤田豊彦²・目黒嗣樹³・竜澤宏昌⁴

Kazuyoshi HASEGAWA, Toyohiko FUJITA, Hideki MEGURO and Hiromasa TATUZAWA

1 正会員 工博 北海道大学大学院助手 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13西8)
2 学生会員 北海道大学大学院工学研究科修士課程 (同上) 3 北海道大学工学部土木工学科 (同上)
4 正会員 水資源開発公団試験研究所水工研究室主任研究員 (〒338 埼玉県浦和市大字神田936)

Linear stability analyses for steep channel flows with movable bed of heterogeneous materials following a Talbot grain size distribution were performed in order to investigate peculiar characteristics of the bed forms. It was found that two kind of instability exist in the system such that one would be a bottom elevation instability and the other would be a sorting wave instability. Test experiments exhibited the formation of alternating gravel bars on the bed when the maximum growth rate of the bottom perturbation was greater than that of the sorting wave perturbation, and exhibited the formation of longitudinally and laterally alternating coarse sediment fractions when the condition was reverse.

Key words: mountain river, alternating bars, grain sorting, linear stability analysis, movable bed experiment

1. はじめに

山地河川—急勾配・混合砂礫河道—の流路・河床形態に関する研究は数が少なく、中規模や大規模の形態に関する研究は始まったばかりの状態にある。著者ら¹⁾²⁾³⁾⁴⁾は、山地河川を模擬した急勾配・混合砂礫実験水路において沖積河川の交互砂州に類似する中規模河床波(砂礫堆)の発生を確認するとともに、それらに礫列・礫段などの小規模河床波が共存し、現実の山地河川の河床形態によく似た形態が生ずることを報告してきた。特徴的な事柄は次の通りである。(1)急勾配・混合砂礫水路の砂礫堆は、沖積砂州の発生領域と同一の領域で発生する。(2)初期波長は沖積砂州波長と変わらないものの、平衡時波長は沖積砂州波長のおよそ3倍になる。すなわち、統合作用が顕著に認められる。(3)平衡時波高もまた沖積砂州波高に比して大きく、2倍程度になる。(4)中小規模波の共存は、中規模波の水みに沿って河床表層砂礫の分級が起こり小規模波が重なる場合と、両者が同時に形成される場合とがある。波長の3倍化が起こるのは後者に多い。(5)これらは河床材料の粒度分布の違いによっており、タルボット型(片対数で表示した粒径過積曲線が、下に凸になる分布)の場合には後者の、非タルボット型の場合には前者の形

態が現れやすい。(6)砂礫堆発生水理量で通水をおこなっても、表層砂礫のアーミングによってほとんど平坦床の状態で平衡するケースがある⁵⁾。以上のように、急勾配・混合砂礫水路の現象は、沖積砂州形成と同一のメカニズムによると考えられる河床不安定と、混合砂礫の有する独自の作用—分級に基づく不安定が重複した現象と考えられ、初期河床材料の粒度分布の違いや水理量次第で様々な興味深い形態が現れる。

近年、砂礫の分級に基づく不安定現象が注目され興味深い研究が発表されている。池田・伊勢屋⁶⁾、Kuhnle・Southard⁷⁾は、水路縦断方向に表層砂礫の粗い部分と細かい部分が交互に並びこれが下流に進行する交互分級現象を見いだした。辻本⁸⁾は、この現象に対して非平衡流砂量式を用いた線形不安定解析を試み、せん断力の位相ずれをともしなわれない分級波の成長を説明している。これに対し Seminara・Colombini・Parker⁹⁾は、鉛直2次元のせん断流に独自の粒径別流砂量式を組み合わせ、“概ね”純粋な分級波の発生を論じ、この種の不安定が相対粗度とフルード数をパラメータとしてある波数の範囲で生ずることを示した。彼らは、この波が砂堆などの小規模波と簡単に区別できない場合があることを指摘している。また、鈴木ら¹⁰⁾は、交互分級の生じている流れ場の流砂量が鉛直分級をともしう状

態の違いによって著しく異なることを実験的に示した。しかし、これらの現象は横断方向に様な2次元的なものとされており、交互砂州と同様に横断方向にも変化する分級波については触れられていない。本研究は、急勾配・混合砂礫床水路に発生する種々の河床形態が、砂礫堆形成に至る河床不安定と混合砂礫の縦横断分級に基づく3次元的不安定の重複によって生じているとの考えに立ち、はじめに浅水流モデルと粒径別流砂量式による線形不安定解析の結果を示し、この結果を手がかりに実施した実験における河床形態について考察するものである

2. タルボット型粒度分布を有する混合砂礫床流れの線形不安定解析

本章では線形不安定解析の方法と結果を簡単に述べると共に、後述する実験結果等を用いてそれぞれの基礎式の適応性を確かめる。

(1) 粒度分布

礫列・礫段に覆われた山地河川の表層砂礫は、締め固まり密度の高い $P = (d/d_{max})^{1/2}$ (P = 粒径 d の砂礫の通過重量比率、 d_{max} = 最大粒径)のタルボット型粒度分布を示すことが多い。アマリリングの結果である。今、べき数がこれほど大きくない1/4程度の混合砂礫を考えると(図-1)、礫列・礫段の発生が容易に起こる条件にあるものの分級は途中の状態にあり、分級波の成長進行を考慮する上で都合がよい。実際、この粒度分布をもつ砂礫(以下B砂礫)による実験では様々な河床状態が観測された。以下、B砂礫の流れに対する線形不安定解析を試みる。

(2) 基礎式

中規模河床形態を想定して浅水流方程式を用いることにすれば、

$$(x \text{ 方向}) \quad u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = gI_0 - \frac{\tau_x}{\rho h} - g \frac{\partial}{\partial x}(h + \eta) \quad (1)$$

$$(y \text{ 方向}) \quad u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\tau_y}{\rho h} - g \frac{\partial}{\partial y}(h + \eta) \quad (2)$$

$$(\text{連続式}) \quad \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = 0 \quad (3)$$

ただし、 x, y : 縦断、横断方向距離 h : 水深 η : 河床高 u, v : 縦断、横断方向の水深平均流速 I_0 : 初期河床勾配 τ_x, τ_y : 縦断、横断方向の河床せん断力である。また、 τ_x, τ_y に関しては以下の式を用いた。

$$\tau_x = \rho C_f (u^2 + v^2) \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (4)$$

$$\tau_y = \rho C_f (u^2 + v^2) \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (5)$$

ここに、 C_f : 抵抗係数。図-2は水深に関して調べた

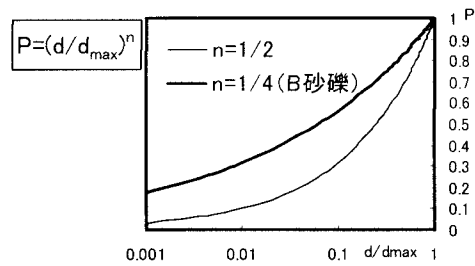


図-1 タルボット分布

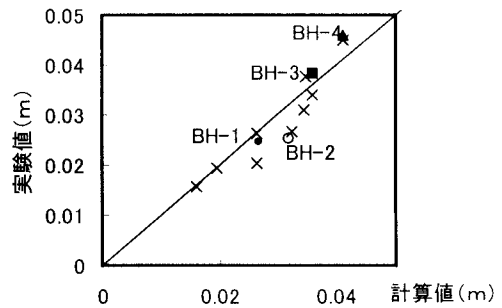


図-2 Hey 式の適合性

Hey式(6)の成立性の検討結果である。良好な一致が認められる。なお、実験値には3章に示す実験結果および著者らのこれまでに実施した実験結果を用いた。

$$(\text{Hey 式}) \quad \frac{U_0}{U_0^*} = 5.75 \text{Log} \left(\frac{aH_0}{3.5d_{84}} \right) \quad (a = 11.16) \quad (6)$$

ただし、 U_0^* : 初期摩擦速度 U_0 : 初期断面平均流速 H_0 : 初期断面平均水深 d_{84} : 84%フルイ粒径。

最も問題になるのが粒径別の縦横断方向流砂量式と限界掃流方式であるが、ここではそれぞれ芦田・道上式(7)、長谷川式(8)、平野によるEgiazaroff式修正式(9)を採用する。ただし、式(7)はKovacs・Parker¹¹⁾による縦断方向勾配の補正を入れている。

$$q_{xi} = \frac{17}{\cos \theta} \tau_{*i}^{\frac{3}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) \times \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ci} \cos \theta}{2\tau_{*i}}} + 2 \left(\tan \theta - \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \right) \sqrt{sgd_i^3} P_i \quad (7)$$

$$q_{yi} = \left(\frac{v}{u} - \sqrt{\frac{2\tau_{*ci} \cos \theta}{\tau_{*i}}} \sqrt{\frac{\partial \eta}{\partial y}} \right) q_{xi} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \tau_{*ci} = \left[\frac{\text{Log}(19)}{\text{Log}(19d_i/d_m)} \right]^2 \tau_{*cm} & (d_i/d_m > 0.4) \\ \tau_{*ci} = 0.85 \frac{d_m}{d_i} \tau_{*cm} & (d_i/d_m < 0.4) \end{cases} \quad (9)$$

ここに、 τ_{*i} : 無次元掃流力 τ_{*c} : 無次元限界掃流力 P_i : 粒径 d_i 粒子の体積存在割合 s : 砂礫の水中比重 q_x, q_y : 縦断、横断方向の単位幅単位時間流砂量 d_m : 平均粒径

図-3は、式(9)を式(7)に入れて計算した縦断方

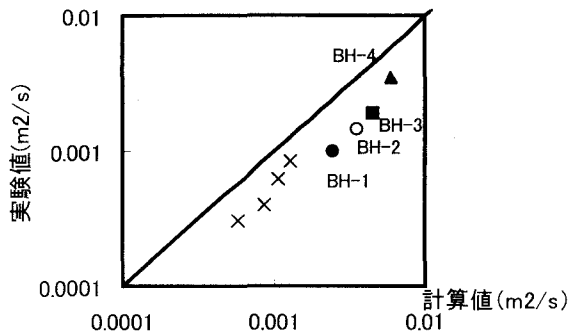


図-3 芦田・道上式の適合性

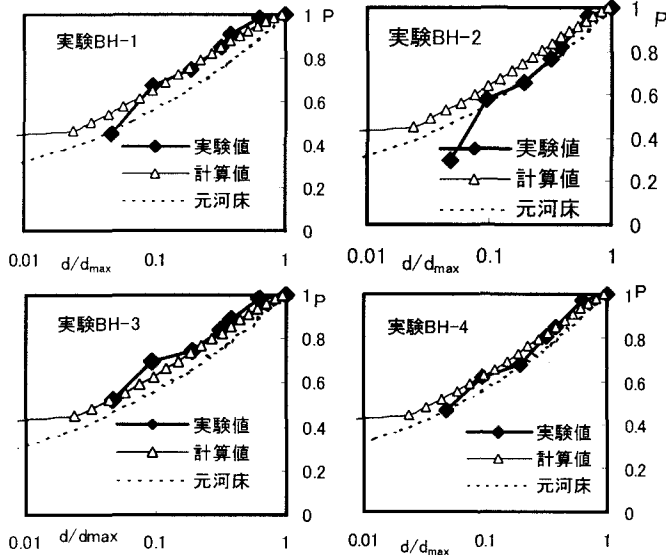


図-4 粒径別流砂量式式の適合性

向流砂量の実験値との比較である。実験値は、後述する河床形態計測実験の通水1分後に水路末端で採取したものである。適合性はよいものといえる。また、図-4は粒度分布について計算値と実験値を比較したものであり、大体の一致を見ている。混合粒径砂の流砂量や限界掃流力については近年様々な再検討がなされ、上式の扱いに疑問が出されているが、今の場合そのまま使用して問題がないであろう。

次に、粒径別流砂連続式は次式であたえられる。

$$\Delta \frac{\partial P_i}{\partial t} + p_i \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{xi}}{\partial x} + \frac{\partial q_{yi}}{\partial y} \right) = 0 \quad (10)$$

ここに、 Δ :移動層厚であり本研究では $\Delta = d_{\max}$ とし、また図-1の粒度分布を10分割して平均粒径が変わらないようにそれぞれの代表粒径を決定し、各粒径砂礫が式(10)を満たすものとした。

次に基礎式を適切な形に無次元化し、無次元化された未知変数に対して1次の微小擾乱をあたえ、諸式の線形化方程式を求めるとともに、河床高の擾乱を、

$$\tilde{\eta} = \hat{\eta} \cos(\hat{y}^*) \exp[ik(x^* - ct^*)] \quad (11)$$

と仮定することで、その他の擾乱量は、

$$\begin{pmatrix} \tilde{h}, \tilde{u}, \tilde{\tau}_x, \tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{h}, \hat{u}, \hat{\tau}_x, \hat{p}_1, \hat{p}_2, \dots, \hat{p}_{10} \end{pmatrix} \cos(\hat{y}^*) \exp[ik(x^* - ct^*)] \quad (12)$$

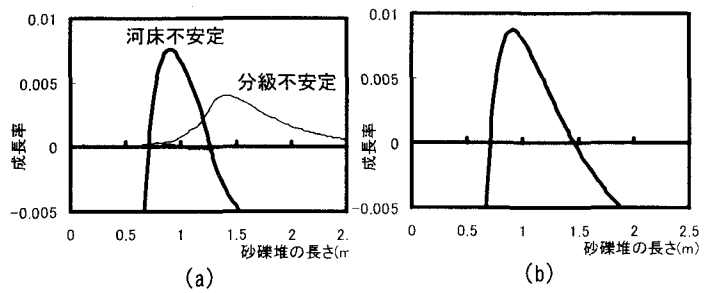


図-5 実験BH-2の解析結果

$$(\tilde{v}, \tilde{\tau}_y) = (\hat{v}, \hat{\tau}_y) \sin(\hat{y}^*) \exp[ik(x^* - ct^*)] \quad (13)$$

と仮定できる。ただし、 $x^* = x/H_0$, $y^* = y/H_0$, $t^* = tU_0/H_0$ であり、 $c = c_i + c_r$ は無次元複素速度である。 $\sim$ を付した諸量は無次元化擾乱を意味し、 $\wedge$ を付した諸量は未知係数である。また k, l は擾乱の無次元波数であり、 $k = \pi H_0/L$, $l = \pi H_0/B$ で表される。ここに、 L :砂礫堆の長さ。式(11)、(12)、(13)を線形微分方程式に代入することにより未知係数からなる代数方程式を得る。これらの未知数が有意な値を持つ条件として係数マトリックスの行列式をゼロとおくことにより、擾乱の成長率 kc_i を求めることが出来る。紙面の都合上、成長率に関する結果のみを記すことにする。なお、これらの計算に当たっては数式処理ソフトを利用して数値的に処理した。

(3) 不安定解析の結果

図-5(a)に実験BH-2に対するの解析結果を示した。ただし、横軸に有次元波長を、縦軸に無次元擾乱成長率をとって表している。この図から成長率が極大となる点が2つ存在することが分かる。一方、図-5(b)に分級効果の影響を無視した場合の結果を示す。これは、流砂連続式(式(10))を個々の粒径が満たすのではなく、全砂礫量の連続性のみを満たすことを条件に分級機構を排除することによって求めたものである。一樣砂の移動床における河床不安定と同様な結果が得られている。

ところで図-5(b)と図-5(a)の左側の不安定が形、位置に関して非常に類似していることから、図-5(a)の左側の不安定は従来の河床不安定に対応すると考えることができる。一方、図-5(a)の右側の不安定は、図-5(b)に分級効果を加えることによって生じることから、分級に基づく不安定(分級不安定)であると解釈することができる。すなわち縦横断方向の分級波の存在の可能性を示している。

次に図-6はB砂礫を用い、勾配を1/10に固定して流量を少しずつ変化させた場合の計算結果を示すものである。これらの図において河床不安定に対応する曲線のピークは水理量の違いに応じてさまざまに変化している。しかし、分級不安定に対応する曲線のピークはほぼ同じ位置にほぼ同じ大きさで存在し続ける。また、流量が7.7(1/s)以上、もしくは3(1/s)以下の場合には分級不安定の方が河床不安定よりも大きくなり、交互砂州と同様に横断方向にも変化する分級波の発生

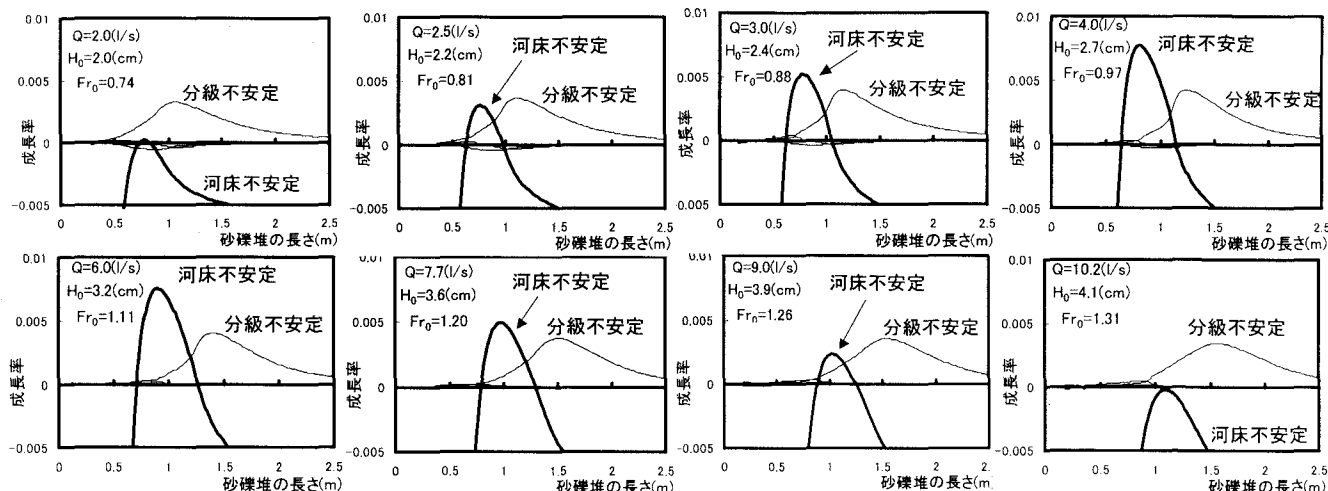


図-6 流量を変化させたときの不安定の変化

表-1 実験条件と実験結果の概略

実験名	実験条件									実験結果						
	I	B (m)	Q (l/s)	H ₀ (m)	U ₀ (m/s)	Fr ₀	τ_{*0}		q ₀ (m ² /s)	通水時間 (分)	H ₀ (m)	q ₀ (m ² /s)	中規模河床波			小規模河床 波の有無
							d _m	d _{max}					有無	波長(m)	波高(m)	
BH-1	0.1	0.3	4.0	0.027	0.50	0.97	0.162	0.032	0.0024	8+18	0.025	0.0010	○	0.74	0.090	○
BH-2	0.1	0.3	6.0	0.032	0.62	1.11	0.193	0.039	0.0035	9	0.026	0.0014	○	0.82	0.076	×
BH-3	0.1	0.3	7.7	0.036	0.71	1.20	0.217	0.043	0.0045	3.5	0.038	0.0019	△	1.32	-	×
BH-4	0.1	0.3	10.2	0.041	0.83	1.31	0.249	0.050	0.0059	3.3	0.046	0.0035	△	1.62	-	×

する可能性が考えられる。また、10.2(l/s)以上、もしくは2(l/s)以下の条件では分級不安定の成長率のみが正の値になることになる。

3. 河床形態の観測実験

本章では縦横断分級波が実際に発生するかどうかを確かめるために行った実験について述べる。

(1) 実験方法

実験は、長さ11(m)、幅30(cm)、勾配1/10の水路に上述のB砂礫を20(cm)の厚さに敷き詰めて行われた。なお、通水は実験終了と同時に遮断した。実験条件は上述の線形不安定理論による解析結果(図-6)をもとに、①河床不安定が分級不安定より卓越する条件、②両者がほぼ拮抗する条件、③分級不安定が河床不安定より卓越する条件のそれぞれにおいて表-1の様に設定した。ここにI:水路勾配、B:水路幅、Fr₀:初期フルード数、q₀:初期流砂量、 τ_{*0} :初期の無次元掃流力であり、 τ_{*} については平均粒径(d_m)と最大粒径(d_{max})について示した。またH₀はHey式、q₀は芦田・道上式によって求めたものである。

(2) 実験結果の概略

実験結果の概略を表-1に示した。ここに、中規模河床波の有無に関して、○は波高の大きい砂礫堆が交互に形成されたこと、△は縦横断交互分級と見られるものが形成されたことを示す。波長に関しては砂礫堆1つの長さを示し、斜字は3倍に統合される前の波長を示す。波高は左右岸端の最も高い位置から低い位置の

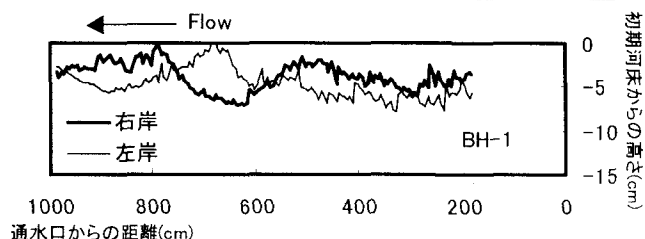


図-7 実験 BH-1 の右岸側・左岸側の河床高(8分後)
(平均勾配差し引き)

差をとって示した。また、q₀は通水開始1分後に計測したものである。以下に結果の詳細を述べる。

(3) 実験結果

a) 実験 BH-1

この実験の条件は理論上河床不安定が卓越する場合のものである。通水開始からまもなく流水が非常に長い波長で蛇行を始め、そして非常に高い波高(9.0cm)の砂礫堆が交互に形成された。その後、上流部から粗粒化が始まり8分後には小規模河床波(礫段)が形成され始めた。このときの右岸、左岸から各々3, 6, 9(cm)の地点の河床高の平均を図-7に示した。この図より約2.2(m)の砂礫堆が形成されていることが分かる。この値の1/3(統合される前の波長)は河床不安定の理論卓越波長にほぼ一致する。さらに26分後には水路全面に小規模河床波が形成された。またこのとき(分級がほぼ終了したとき)、砂礫堆の一部が分裂して理論卓越波長に一致するようになった。これは分級作用が波長3倍化に関与している可能性を示唆する。

b) 実験 BH-2

この実験も理論上河床不安定が卓越するケースである。通水開始からまもなく流水が非常に長い波長(理

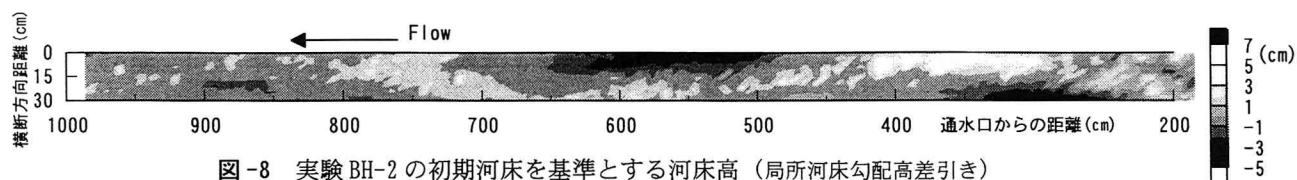


図-8 実験 BH-2 の初期河床を基準とする河床高 (局所河床勾配高差引き)

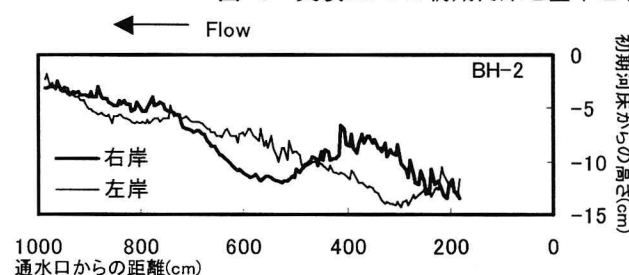


図-9 実験 BH-2 の右岸側・左岸側の河床高 (平均勾配差し引き)

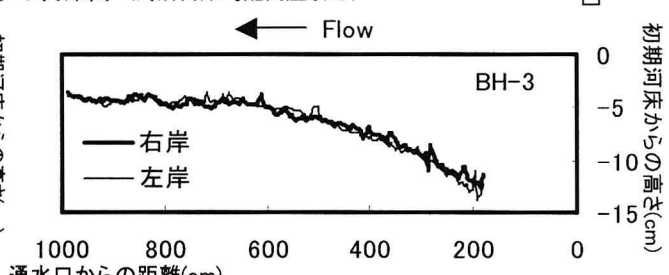


図-10 実験 BH-3 の右岸側・左岸側の河床高 (平均勾配差し引き)

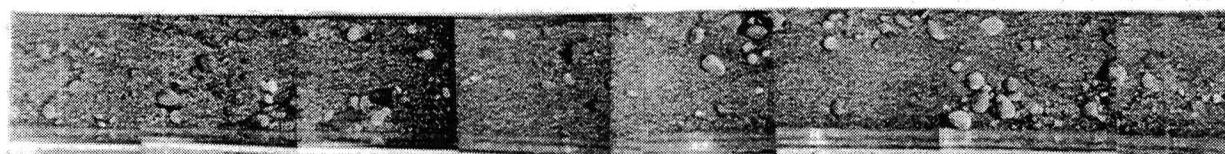


写真-1 実験 BH-3 の実験後の河床

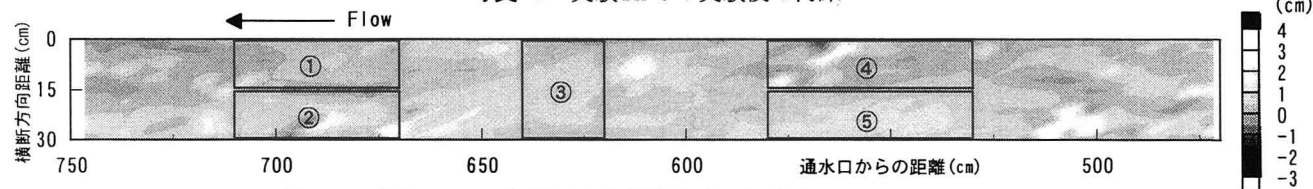


図-11 実験 BH-3 の初期河床を基準とする河床高 (局所河床勾配高差引き)

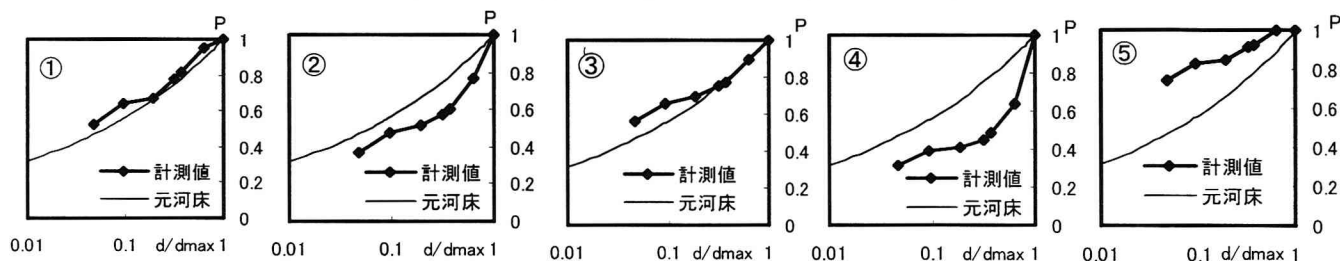


図-12 実験 BH-3 の河床表層砂礫の粒度分布

論卓越波長の3倍程度)で蛇行を始め、非常に高い波高(7.6cm)の砂礫堆が交互に形成された。また砂礫堆上と転向部には大きな礫が堆積した。しかし水みち部は掃流力が大きいために粗粒化されず、小規模河床波が形成されることは無かった。図-8に通水9分後の河床の河床高(局所河床勾配高差し引き)を示した。この図より非常に長い砂礫堆がはっきりと形成されていることが分かる。図-9に右岸、左岸から各々3, 6, 9 (cm)の地点の河床高の平均を示した。この図より砂礫堆の波高が高く、長さが約2.5 (m)であることが分かる。この波長の1/3は河床不安定の理論卓越波長にほぼ一致する。

c) 実験 BH-3

この実験の条件は理論上河床不安定と分級不安定の最大成長率がほぼ拮抗する場合のものである。この実験では砂礫堆が形成されること無く、砂礫は通水を止

めるまで流れ続けた。しかし通水を止めた後の河床の表層において大礫が流路に沿って交互に寄り集まっている現象が見られた。図-10は右岸、左岸から各々3, 6, 9 (cm)の地点の河床高の平均を示している。この図から波高が非常に小さいものの交互に交差していることが分かる。これは礫が集まった場所が相対的に他の場所より高くなっているためである。また実験BH-2の結果(図-9)と比べて現象が劇的に変化していることが分かる。写真-1と図-11はそれぞれ通水口からの距離が470~750 (cm)の範囲の河床状態とその河床高(局所河床勾配高差し引き)を示している。写真-1より大礫が交互に寄り集まっている様子を見ることができる。また図-11では大礫が集まっている部分が相対的に若干高くなっているのが分かる。しかしこの波高は集まっている礫の径程度しかなく、礫がその部分に集まっているだけで河床高自体の波高はほとんど無いと考えられる。図-12は図-11の番号を付した部分の河床表層砂礫の粒度分布を示した(採取層厚は3~5 cm)。

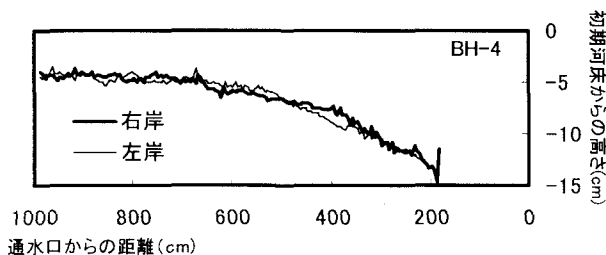


図-13 実験BH-4の右岸側・左岸側の河床高
(平均勾配差し引き)

これらの図より、大礫が集まっている部分は元河床と比べて大きい礫が多いこと、その対岸は砂分が多いこと、転向部の粒度分布はほぼ元河床のそれに等しいことがわかる。またこれらの繰り返し波長は1.3(m)程度であり、分級不安定の理論卓越波長にほぼ一致する。

d) 実験 BH-4

この実験条件も理論上分級不安定が卓越する。通水の結果は、砂礫堆が形成されること無く、砂礫が通水を止めるまで流れ続けた。しかし、停水後、実験BH-3ほどはっきりしないものの河床の表層において大礫が流路に沿って交互に寄り集まっている現象が見られた。図-13に右岸、左岸から各々3, 6, 9(cm)の地点の河床高の平均を示した。この実験でも集まっている礫程度の波高で交互に高低差が生じていることが分かり、実験BH-3と同様の現象が生じている。また、波長が1.6(m)程度であり、理論卓越波長にほぼ一致する。

(4) 考察

以上の実験で2種類の縦横断方向に変化する河床形態が認められた。一つは、波長が流路幅の7~8倍程度の非常に長く、かつ波高の高い従来の砂礫堆(BH-1, BH-2)であり、他方は波長が流路幅の4~5倍程度で波高がほとんど無い大礫の集まりによって形成される形態(BH-3, BH-4)である。後者に関しては波長が分級不安定の理論卓越波長にほぼ一致すること、縦断方向の分級波に非常に似ていること(波高が礫1個分程度)、そして河床不安定と分級不安定が逆転する条件付近で現象が劇的に変化したことから、これが分級不安定に基づく縦横断方向の分級波である可能性が高い。

線形不安定解析の結果では、両者とも河床不安定と分級不安定の作用を受けているものと判断されるが、実験を見る限り擾乱の最大成長率の大きいほうによって形態が決定されるようである。しかし、他の一方の作用が働かない訳ではなく、砂礫堆形成のケースでは分級不安定の作用が波長の3倍化に寄与しているものと考えられる。また、交互分級が形成されるケースでは河床不安定の作用が横断方向の分級化に寄与しているものと推察される。

4. まとめ

急勾配混合砂礫河床には優位な不安定が2つ存在すると言う線形不安定理論を用いて得られた結果を基にして、いかなる河床形態が生ずるかを実験的に調べた。

その結果、2種類の縦横断変化を伴う河床波を発生させることができた。このうち一つは今までに報告の無いものであり、波高がほとんど無く、礫が左右岸に交互に集まることによって形成されるものであった。これは縦横断方向に変化する分級波である可能性が高い。しかし、解析で得られた2つの解は連立関係にあり、分級に基づく不安定と見られる解が純粋に分級作用によるものなのかということなど多くの問題が残っている。また、この不安定解が卓越する条件では砂礫堆が発生せず、流砂が流れ続け、その粒度分布が縦横断方向に沿って交互に変化するという事実は実際問題にとって重要であり、今後明確な区分パラメータを見出したい。

謝辞：本研究は平成11年度文部省科学研究費補助金(基盤研究(C)(一般))の助成を受けて行われた。関係の方々には謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 長谷川和義・藤田豊彦・林日出喜・竜澤宏昌・森高信：山地河川に見られる中規模・小規模共存河床形態の実験的検証，水工学論文集，第43巻，pp. 749-754, 1999.
- 2) 竜澤宏昌・林日出喜・森高信・長谷川和義・藤田豊彦：広水理条件下における小規模河床波(礫列・礫段)の形成と形状特性，水工学論文集，第43巻，pp. 731-736, 1999.
- 3) 藤田豊彦・長谷川和義・竜澤宏昌・林日出喜：山地河川の砂礫堆の発生条件と形状特性，土木学会北海道支部論文報告集，第55号(B)，pp. 302-307, 1999.
- 4) Fujita, T., H. Tatzawa and K. Hasegawa: Experimental reproduction and analyses of medium-scale bedforms in mountain rivers, IAHR Symposium on RIVER, COASTAL AND ESTUARINE MORPHODYNAMICS, Proceedings - Volume 1, pp. 273-282, 1999.
- 5) 森高信・藤田豊彦・長谷川和義・竜澤宏昌・林日出喜：混合砂礫を用いた勾配1/40移動床水路における河床形態と流砂量について，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，第2部，pp. 432-433, 1999.
- 6) 池田宏・伊勢屋ふじこ：混合砂礫の流送に伴う縦断分級第33回水理講演会論文集，pp. 217-222, 1986.
- 7) Kuhnle, R.A. and J. B. Southard: Bed load transport fluctuations in a gravel bed laboratory channel, Water Resources Research, Vol. 24, No.2, pp. 247-260, 1988.
- 8) 辻本哲朗：河床表層粒度構成の不安定現象としての縦断交互分級の形成機構，土木学会論文集，第411号，pp. 143-150, 1989.
- 9) Seminara, G., M. Colombini and G. Parker: Nearly pure sorting and formation of bedload sheets, J. Fluid Mechanics, Vol. 312, pp. 253-278, 1996.
- 10) 鈴木幸一・山本裕規・藤岡貴之：礫集合部の形成と破壊による混合砂礫河床の流砂量変動，水工学論文集，第41巻，pp. 801-806, 1997.
- 11) Kovacs, A. and G. Parker: A new vectorial bedload formulation and its application to the time evolution of straight river channels, J. Fluid Mechanics, Vol. 267, pp. 153-183, 1994.

(1999. 9. 30受付)