

交互砂州河床上の流砂と砂礫の分級

Sediment transportation and sediment sorting on alternate bars

竹林洋史*・江頭進治**・金 海生***

By Hiroshi TAKEBAYASHI, Shinji EGASHIRA and Haisheng JIN

The wave height of alternate bars formed on non-uniform sediment bed is smaller than that on uniform sediment bed. Longitudinal and transverse sediment sortings are responsible for such a difference. Hydraulic jump forms at downstream area of bar crest depending on hydraulic conditions, and may govern bed shear stress distribution. Coarser grains tend to deposit at very downstream of bar crest and are devoted to the wave migration. Finer grains are transported from the crests to downstream area and tend to deposit in the troughs where the bed shear stress is smaller. Such sediment sortings are supposed to suppress the wave height of alternate bars.

Key words: sediment transportation, sediment sorting, alternate bar, hydraulic jump, depth-integrated flows

1. 緒言

交互砂州は、河川蛇行の主要因と考えられ、その特性を明らかにすることは治水面上において重要であるばかりでなく、瀬と淵、ならびに浮州など、河川環境形成の重要な構成要素の一つとなっている。これまでの交互砂州に関するの平衡波高の予測については、福岡ら¹⁾、黒木ら²⁾による非線形解析や清水ら³⁾の数値解析による研究があり、これらによって河床の横断勾配による影響が波高の安定化に寄与していることが明らかになっている。これらの研究は一樣砂を対象としたものであるが、最近、混合砂を対象とした研究も行われるようになってきた⁴⁾。

ところで、交互砂州の形状特性に関し、河床材料として混合砂を用いた場合と一樣砂を用いたものとを比較すると、前者において波高は小さくなり、しかも形状がぼやけ易いことが水路実験により確認されている⁵⁾。その主たる原因は砂礫の分級現象にあると推察される。また、砂州前縁には不連続水面である跳水や流れの剥離などが生じていることもある⁶⁾。このうち跳水は、砂州前縁において掃流力の分布に影響を及ぼし、砂礫の輸送と分級を大きく支配していることが推定される。本研究では、まず一樣砂を用いて得られた交互砂州河床を固定床とし、河床上の流れを検討する。次に、河床と平均粒径の等しい一樣砂と混合砂を上流端より供給し、その輸送過程を実験と二次元浅水方程式を用いた数値解析を通して検討する。さらに、これらの結果に基づいて砂州波高に及ぼす砂礫の分級現象の影響を明らかにすることを試みる。

* 学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科環境社会工学専攻 (〒525-27 滋賀県草津市野路町 1916)

** 正会員 工博 立命館大学教授 理工学部土木工学科 (〒525-27 滋賀県草津市野路町 1916)

*** 正会員 Ph.D 立命館大学助手 理工学部土木工学科 (〒525-27 滋賀県草津市野路町 1916)

2. 流れと砂礫の輸送過程に関する解析法

2.1 支配方程式

流れの連続式、運動方程式、河床位方程式、流砂量式はそれぞれ次のようである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu_i)}{\partial t} + \frac{\partial(hu_i u_j)}{\partial x_j} = -gh \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} + \frac{\partial(h\tau_{ij})}{\partial x_j} - \frac{\tau_{bi}}{\rho}, \quad (i, j = 1, 2) \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad \nu_t = \alpha h u_*, \quad \tau_{bi} = \rho C_f u_i \sqrt{u_1^2 + u_2^2}, \quad C_f = 1 / \left(6 + \frac{1}{\kappa} \ln \frac{h}{k_s} \right)^2, \quad (\alpha = 0.2, \kappa = 0.4, k_s = 2.5 d_m)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_{bi}}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$q_b = \sum_{k=1}^n q_{bk} = \sum_{k=1}^n F(\tau_*, \tau_{*e}, \tau_{*c}, d_k, d_m) r \quad (4)$$

$$q_{bi} = q_b u_{bi} / \sqrt{u_{b1}^2 + u_{b2}^2} \quad (n = 10, i = 1, 2, \lambda = 0.4) \quad (5)$$

$$u_{b1} = 8.5 u_*, \quad u_{b2} = u_2 + u_{b2}', \quad u_{b2}' = -N_* \frac{h}{R} u_{b1}, \quad (N_* = 7.0)^{7)}$$

ここに、 t は時間、 h は水深、 u_i は水深平均流速の i 成分、 g は重力加速度、 ζ は水位、 u_* は摩擦速度、 ρ は水の密度、 z_b は堆積厚を考慮した河床位、 $F(\tau_*, \tau_{*e}, \tau_{*c}, d_k, d_m)$ ⁸⁾ は流砂量式で、芦田・道上式を適用する。 r は輸送砂礫による河床の被覆率であり、 $r = \Delta z_b / d_{max}$ で定義している。 Δz_b は給砂した砂礫の堆積厚、 d_{max} は最大粒径、 τ_* は無次元掃流力、 τ_{*e} は有効無次元掃流力、 τ_{*c} は限界無次元掃流力、 d_k は粒径階 k の砂礫の粒径、 d_m は平均粒径、 u_{bi} は河床面の流速の i 成分、 R は水深平均流速の流線の曲率。なお、式 (3) は給砂した砂礫による堆積量を計算するためのもので、ここでは砂州の変形などの河床変動は考慮していない。

2.2 解析方法

Fig. 1 に示す一様砂を用い、Table 1 の条件のもとに、長さ 8m、幅 0.2m の直線水路において交互砂州を形成させた。河床位のデータを以下に示す二重 Fourier 級数で近似し、これを固定床として実験と同一の水力条件のもとで流れと流砂の輸送過程を解析する。

$$z_b(x, y) = \sum_{m, n=0}^{\infty} (a_m \cos mx + b_m \sin mx)(c_n \cos ny + d_n \sin ny) \quad (m, n \text{ は整数}) \quad (6)$$

河床形状の表示には上式において $m=n=20$ 、すなわち 20 項まで用いたが、係数 $a_0 c_2$ 、 $a_1 c_1$ および、 $b_1 c_1$ 、 $b_1 c_3$ 以外の項は微小である。このとき波高を実際の河床の 85% のものを使用した。実際の河床を使用した計算では水深が $h/\bar{H} = 0.05 \sim 0.1$ ($\bar{H}$ は平均水深) という極めての浅い部分が現れる。その近傍に跳水が発生しており、跳水の大きい水位差の影響が水深の浅い部分に及び、数値振動がおこしている。そのため有用な結果が得られなかった。しかし、大まかな傾向を知るためには 85% の河床で十分であると判断した。計算区間は、4 波長分の長さ 8.00m の区間を対象とした。まず、固定床上に定常流量を供給し、流れが定常状態に達してから砂礫の供給を開始した。供給した砂礫は Fig. 1 に示す一様砂と混合砂であり、混合砂は粒径を 10 の階級に分けた。河床は固定床であるので、初期条件として被覆率 $r = 0.0$ を全ての点に与えた。給砂に伴う河床変動の影響を最小限にするため、給砂は上流端において $r = 0.1$ で行った。計算結果が $r \geq 0.1$ のときは $r = 0.1$ とする。なお、供給した砂礫による流れへの影響は考慮していない。支配方程式は、常射混在流れを表現するために MacCormack scheme で差分し、staggered grid を使用する。河床上の流速は、各グリッドにおける流れ関数の値を求め、流線の曲率から予測する。計算時間は堆

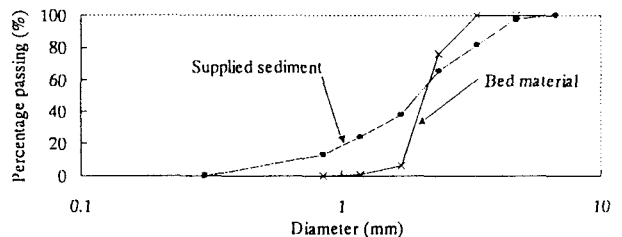


Fig. 1 Bed material and supplied sediment

Table 1 Hydraulic parameters

	i_b	d_m (mm)	Q (l/s)	h (cm)	u (cm/s)	τ_*	F_r	l_b (m)	H_b (cm)
Experiment	0.03	2.16	1.23	1.45	46.14	0.117	1.22	2.00	3.4
Simulation	0.03	2.16	1.23	1.43	45.93	0.112	1.23	2.00	2.9

i_b : Bed slope d_m : Mean diameter of sediment, Q : Water discharge,
 h : Mean water depth, u : Mean water velocity, F_r : Froude number,
 τ_* : Non-dimensional shear stress, l_b : Wave length, H_b : Wave height.

積土砂の平均粒径の分布がほぼ安定する
 1000 秒まで行った。

3. 水路実験と数値解析による検討

一様砂を用いて交互砂州を発生させ、
 スプレー状のペンキと糊で河床を固定
 した。実験に使用した砂州は、波長が
 安定している水路下流端から 5m の区
 間のものである。上流端から平衡流砂
 量の 10%($r=0.1$)を定常的に給砂し、砂
 礫の堆積が流れに大きく影響を与えな
 い範囲で実験を行った。流速は直径
 3mm のプロペラ流速計を用いて測定し

た。水位、河床位はポイントゲージで、縦断方向に 5cm、横断方向には 2cm 間隔で測定した。砂礫の被覆率
 r (堆積量)はポイントゲージで測定した。そのため、測定したのは砂州前縁部の比較的堆積量の多いところの
 みであり、堆積量の小さいところは誤差が大きいと判断して測定していない。

Fig. 2 に流線の計算値、実験値を示す。砂州前縁の下流部(Simulation, $x = 3.2 \sim 3.5m$, $y = 3.0 \sim 10.0cm$)で実
 験値よりも右岸側に偏っている。これは、砂州の波高を実際よりも小さくしたために、左岸から右岸にかけ
 て勾配が小さくなり、右岸側に流れが集中したためである。

Fig. 3 に無次元掃流力の分布に関する実験値と計算値を示す。実験値、計算値ともに $u_* = [C_f(u^2 + v^2)]^{1/2}$ より
 摩擦速度を求め、平均粒径より無次元掃流力を求めた。計算における無次元掃流力は、実験結果よりも分布
 の幅が小さくなっている。これも一つの原因として、砂州の波高を小さくしたためであると考えられる。し
 かし、砂州のクレストの部分で掃流力が大きくなり、トラフでは小さくなるという特徴的な分布形状は表現
 されている。

Fig. 4 には $y = 0.0cm$ の水面の縦断形状が描かれている。これらの図からも明らかなように実験値および計
 算結果ともに、砂州前縁部において波状跳水が起こっており、流れが射流から常流に変化している。そのた
 め掃流力は、Fig. 3 に示すようにトラフの部分で小さくなる。

Fig. 5 には平均粒径の分布を示している。粒径の大きい砂礫は砂州クレストから砂州前縁部に広がっており
 ($x = 3.3 \sim 4.0m$, $y = 10.0 \sim 20.0cm$)、粒径の小さい砂礫はトラフに堆積している($x = 4.0 \sim 4.8m$,
 $y = 12.0 \sim 20.0cm$)。これは掃流力の大きいクレスト部分を輸送されてきた粒径の大きい砂礫が砂州前縁部で
 堆積し、その下流部には粒径の小さい砂礫しか流れ込まないためである。

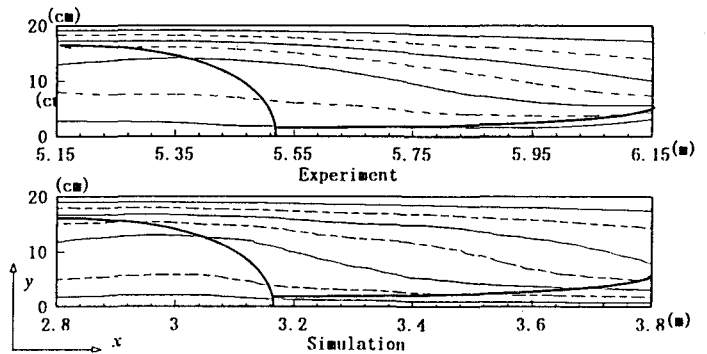


Fig. 2 Stream lines

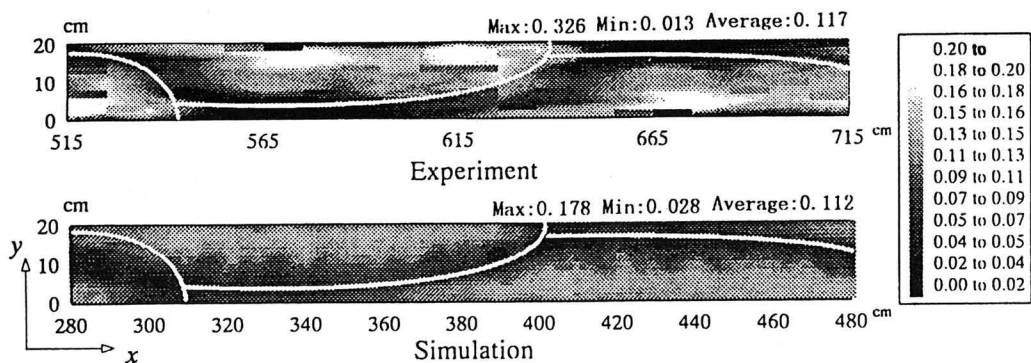


Fig. 3 Distribution of non-dimensional shear stress defined by mean size of supplied sediment

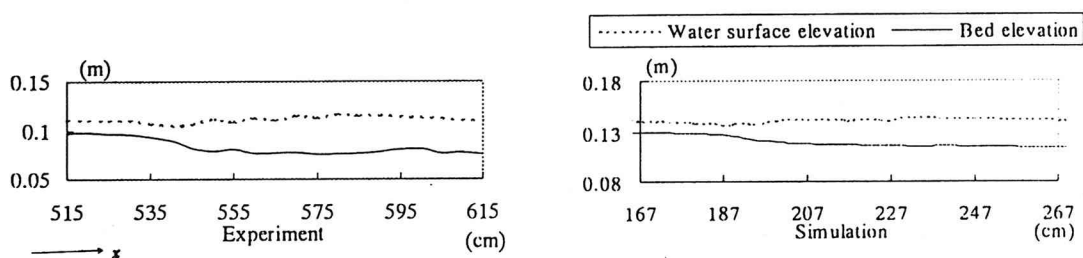


Fig. 4 Longitudinal profiles of bed elevation and water surface elevation

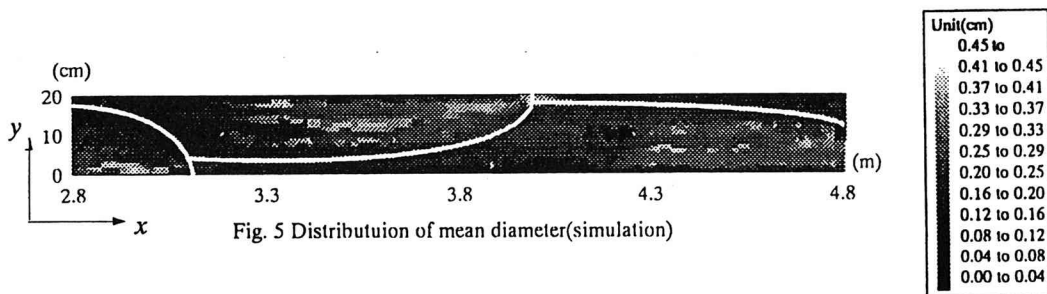


Fig. 5 Distribution of mean diameter(simulation)

Table 2 Mean diameter of deposited sediment (mm)

	Pt.1	Pt.2	Pt.3
Experiment	3.13	2.93	1.55
Simulation	3.25	2.21	1.44

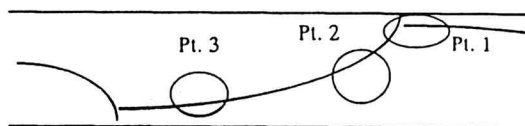


Fig. 6 Sampling points of deposited sediment

Table 2 に Fig. 6 に示す 3 地点で測定した堆積砂（混合砂）の平均粒径の実測値と計算値を示している。これより、ほぼ両者は一致しており、計算によって分級現象がある程度表現できていることが推察される。

Fig. 7 には被覆率 r の分布を示している。混合砂、一様砂ともに砂州前縁部において著しい堆積が見られ、これらの砂礫は砂州の前進に寄与するものである。さらに、この結果と Fig. 5 の結果とを総合すると、混合砂の場合には粒径の大きい砂礫が砂州の前進に寄与していることが分かる。このような砂州前縁部への砂礫の堆積は、跳水によって掃流力が急減するためである。混合砂と一様砂の堆積量の違いに着目すると、一様砂の方が砂州前縁での堆積が多くなっている。これは一様砂の場合、この部分に流れ込むと、殆ど全ての砂

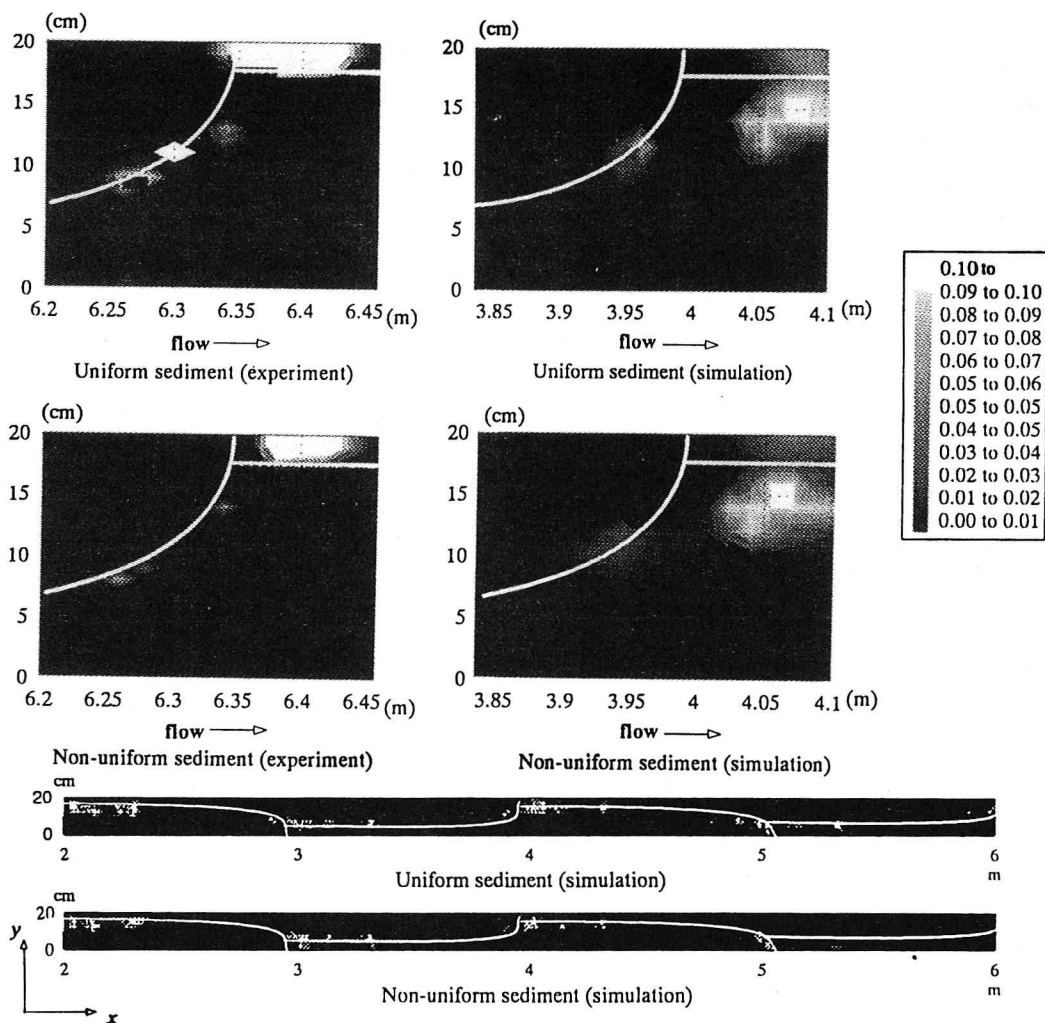


Fig.7 Distribution of cover rate

礫が砂州前縁に堆積するためである。しかし混合砂の場合には先にも述べたように、この部分で分級が起っており、流れ込んできた砂礫の一部が下流に輸送されている。なお、実験では見られないが、計算においては $x = 3.99m$ 、 $y = 15cm$ の辺りで堆積が見られる。この部分は実験では水深、流速ともに小さく、殆ど砂礫が流れ込まない領域である。しかし計算においては波高を小さくしたため、水深、流速ともに実際よりも大きくなり、その結果、砂礫の輸送能力が大きくなり、砂礫が輸送されてきたものと考えられる。

Fig. 8は左岸沿い($y = 19.5cm$)の被覆率の分布を示したものである。一様砂、混合砂ともに、クレスト周辺($x = 3.5 \sim 3.9m$)では堆積は認められないが、トラフの部分($x = 4.0 \sim 4.4m$)においては顕著な堆積が見られる。しかし、混合砂の堆積量は一様砂のそれより大きいものとなっており、砂州前縁部における分級の影響が示されている。また、この部分に流れ込む砂礫は小さい粒径の砂礫であり、砂州の波高を低くする役割を果たしている。なお、一様砂のトラフでの堆積は砂州の波高を小さく見積もったことと、砂州前縁部での流れの

剥離が表現できていないため、十分に掃流力が落ち込まなかったためと考えられる。

4. 結語

水路実験および数値シミュレーションの結果に基づいて交互砂州河床上の砂礫の輸送過程を検討した。本研究によって得られた主要な結果は次のようである。

(1) 砂州前縁部において波状跳水が起り、それにより砂州前縁部で掃流力が小さくなっている。

(2) 粒径の大きい砂礫は砂州前縁部に堆積し、砂州の前進に寄与している。粒径の小さい砂礫はトラフに流れ込み、そこに堆積することによって砂州の波高を減少させる。

以上、今後解決すべき課題は多いものの、本研究によって、砂礫の分級現象は砂州の波高を小さくする要因となる可能性が示された。

本研究は一部（財）砂防地すべり技術センター、日本建設コンサルタント、および Newjcc からの援助により推進しているものである。また、実験や資料の整理にあたって、立命館大学 4 回生小山慎一郎君にご協力いただいた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 福岡捷二・山坂昌成：河床形状・流れ・流砂量の非線形関係を考慮した交互砂州の平衡波高の理論，土木学会論文集，357 号，pp.45-54，1985.
- 2) 黒木幹男・石井千万太郎・板倉忠興：砂州波高に関する理論的研究，水工学論文集第 36 巻，1992，pp.1-6.
- 3) 清水康行・渡辺康玄・鳥谷部寿人：直線および蛇行河川の安定形状に関する研究，土木学会論文集，第 509 号，pp.67-78，1995.
- 4) Kusuhaara, K., Kuroki, M. and Itakura, T. : Distribution of sediment size on Bars in River Channels, Proceedings of The First Korea-Japan Bilateral Seminar on Water Resources and Environment Research, pp.133-140, 1996.
- 5) 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，関西支部年次学術講演会，II -68，1995.
- 6) 竹林洋史・江頭進治・金 海生：交互砂州河床上の流れと砂礫の分級について（2），年次学術講演会，II -323，1996.
- 7) Engelund, F. : Flow and Bed Topography in Channel Bends, Jour. of Hy. Div. ASCE, Vol. 100, No. HY11, 1974-11.
- 8) 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
- 9) 畠田徳彦・清水康行：河川構造物周辺の流れと河床変動計算について，都市域急流河川の流れと河床変動の数値解析に関するシンポジウム，pp.47-51，1994.
- 10) Fredsøe, J. : Meandering and braiding of rivers, J. Fluids Mech., vol.84, part4, pp.609-624, 1978.

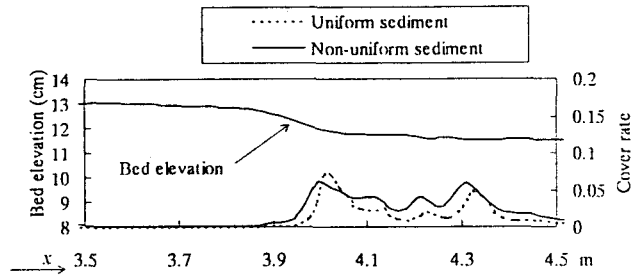


Fig. 8 Longitudinal profiles of cover rate (simulation)