

部分的に砂礫が被覆した軟岩河床における河床形状に関する線形安定解析

藺森啓悟¹・渡邊康玄²

¹学生会員 北見工業大学大学院 社会環境工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

²正会員 北見工業大学大学院 教授 社会環境工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

近年、軟岩洗掘について多くの研究が進められているが、軟岩洗掘時に現れる河床の形状については十分に明らかにされていない。本研究では、部分的に軟岩が露出した河床を対象として軟岩洗掘時の河床の形状の特性を把握することを目的に検討を行った。被覆率 C を用いて河床を覆う堆積物の分布を表現して線形安定解析を行った結果、被覆率が小さくなるにつれ、中規模河床波の要因である攪乱の波長が大きくなることを、理論的に明らかにした。

Key Words: Soft rock, bed configuration, Stability analysis

1. はじめに

近年、全国的に河床低下が問題となっている河川が多く見られている。砂礫層の下に流砂の衝突に対して極めて浸食されやすい軟岩層が存在する場合、河床低下の進行により河床を覆っていた砂礫が一掃されると、急激に河床が低下し、護岸の浮き上がりや橋脚の根入れ不足が深刻な問題となっている。図-1 は、表層の砂礫層が喪失し、軟岩の浸食により基礎が露出した橋梁の例である。軟岩はある程度の固結度を持っているが流砂などの衝突に対しては弱く、一度浸食を受けると流水や流砂が集中し、局所的な深掘れを形成しやすい特徴を有している。このため、洪水発生時には、更なる局所洗掘が進行する可能性がある。また、河床を覆う砂礫層の消失は、魚類等の産卵環境や生息環境の悪化を招く。

このようなことから、軟岩の浸食機構の解明は喫緊の課題となっている。軟岩河床等の侵食に関連して、固定床上の流砂に関する研究¹⁾²⁾ や岩盤河床等の侵食機構に関する研究³⁾⁴⁾⁵⁾ が行われている。

泉ら⁶⁾ は露岩化した河川における周期的に形成されるステップ地形に着目し、その成因について安定解析手法により1次元的に検討を行っている。また、L. Zhang ら⁷⁾ は Sklar and Dietrich による研究⁸⁾ を発展させ、覆礫による洗掘現象の抑制効果を平衡給砂量に対する給砂量の割合を用いて表現し、軟岩の凹凸による影響をモデルに取り込んだ検討を1次元的に試みている。このように、岩河床の洗掘現象を1次元的に表現した研究は多く行われつつあるが、平面的特性については、井上ら⁹⁾ が数値解析を用いて実施しているものの未だ十分



図-1 軟岩の浸食により橋脚の基礎が露出した例

に明らかにされていない。そこで、本研究では軟岩河床上に形成される平面的な形状特性を把握することを目的として、軟岩河床が部分的に覆礫されている場合を想定し、安定解析手法を用いて行うこととした。Nelson and Seminara の研究¹⁰⁾ を参考に、被覆率 C と平均覆礫層厚 e を用いて河床を覆う堆積物の分布を表現し、部分的に被覆した軟岩河床でどのような洗掘形状が現れるのかを検討することとした。なお、解析を容易にするため、軟岩を覆う礫の層は一層のみと仮定するとともに、平坦床からの微少な洗掘現象を対象としている。

2. 安定解析

(1) 被覆率 C 、平均覆礫層厚 \bar{e}

Nelson and Seminara の研究¹⁰⁾ の覆礫の考え方を参考に、以下のように取り扱うこととする。なお、Seminara らの研究では、掃流砂層厚により地形の変化を表現しているが、ここでは、軟岩の浸食による地形を扱っているため、そのままの考え方を利用することができない。ここでは、上流からの流砂量が平衡流砂量より

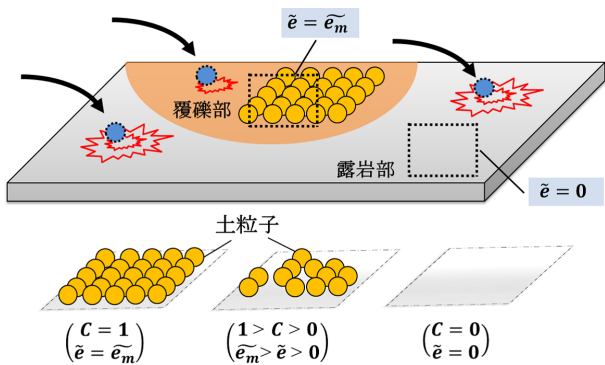


図-2 被覆率 C と平均被覆層厚 \bar{e}

も少なく、砂礫が鉛直方向に重なって流掃されない状況を考えることは同じであるが、被覆率 C および空間平均の堆積層厚 \bar{e} の概念を取り入れて、部分的に軟岩が露出した河床を扱うこととする。

河床が完全に覆われた場合の平均被覆層厚を \bar{e}_m とおくと、平均被覆層厚 \bar{e} は 0.0 から \bar{e}_m の間で変化し、被覆率 C は 0 から 1 の間で変化する。上流から流掃され堆積する土砂を均一粒径 \tilde{d}_s の球形と仮定すると、一層のみを考える場合 $\bar{e}_m = C\tilde{d}_s\pi/6$ となる。また、各項上の \sim は次元を有していることを示している。

無次元被覆層厚 e は、完全に被覆した場合 ($\bar{e}=\bar{e}_m$) との比で表現し、これは被覆率 C に等しい。

$$e = \bar{e}/\bar{e}_m = C \quad (1)$$

これにより、完全に露岩化した場合 ($C=0$)、部分的に露岩化した場合 ($0 < C < 1$) または岩河床表面に堆積砂が完全に覆う場合 ($C=1$) に分類できる。図-2 にその模式図を示す。

(2) 流砂の衝突による洗掘

損傷量は衝突エネルギーに比例するという石橋の研究¹¹⁾ より損傷量 \tilde{W}_s は式 (2) で表現される。

$$\tilde{W}_s = \tilde{\gamma}\Sigma \left(\tilde{W} \frac{\tilde{v}_p^2}{2\tilde{g}} \right) \quad (2)$$

ここで、 \tilde{W}_s ; 損傷量, $\tilde{\gamma}$; 損傷係数, \tilde{W} ; 砂礫の総荷重, \tilde{v}_p ; 砂礫の衝突速度, \tilde{g} ; 重力加速度である。

また、損傷量 \tilde{W}_s は洗掘深 \tilde{D} , 水路長 \tilde{L} , 水路幅 \tilde{B} を用いて以下の形で表せる。

$$\tilde{W}_s = \tilde{D}\tilde{L}\tilde{B} \quad (3)$$

したがって、式 (2)～(3) より以下のように整理される。

$$\tilde{D} = \tilde{\gamma}\Sigma \left(\tilde{W} \frac{\tilde{v}_p^2}{2\tilde{g}} \right) \frac{1}{\tilde{L}\tilde{B}} \quad (4)$$

さらに、水路長 \tilde{L} の間に一個の土砂が衝突する回数 T_s は、流砂の跳躍距離を L_s とすると、式 (5) で表される。

$$T_s = \frac{\tilde{L}}{L_s} \quad (5)$$

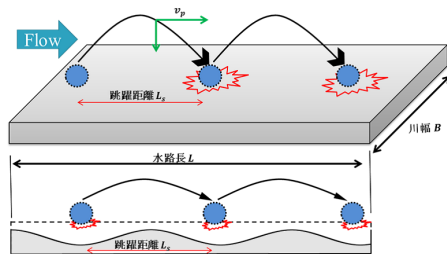


図-3 流砂の衝突イメージ

流砂個数 \tilde{N} は、砂礫を球体と仮定し、単位幅流砂量 \tilde{q}_b , 通水時間 \tilde{T} , 粒径 \tilde{d}_s を用いて、以下のようにして表すことができる。

$$\tilde{N} = \frac{\tilde{q}_b\tilde{T}\tilde{B}}{\tilde{d}_s^3\pi/6} \quad (6)$$

式 (5)～(6) より、流砂全体の衝突回数は、

$$\Sigma\tilde{T}_s = \frac{\tilde{q}_b\tilde{T}\tilde{B}}{\tilde{d}_s^3\pi/6} \frac{\tilde{L}}{\tilde{L}_s} \quad (7)$$

これより、砂礫一個当たりの荷重 \tilde{w} を用いて、砂礫の総荷重 \tilde{W} 求めることができる。

$$\tilde{W} = \frac{\tilde{q}_b\tilde{T}\tilde{B}}{\tilde{d}_s^3\pi/6} \frac{\tilde{L}}{\tilde{L}_s} \tilde{w} \quad (8)$$

式 (4),(8) より、洗掘深 \tilde{D} は式 (9) で表現できる。

$$\tilde{D} = \tilde{\gamma}\Sigma \left(\frac{\tilde{q}_b\tilde{T}\tilde{w}}{\tilde{d}_s^3\pi/6\tilde{L}_s} \frac{\tilde{v}_p^2}{2\tilde{g}} \right) \quad (9)$$

河床高 $\tilde{\eta}$ の変化は軟岩の洗掘によって生じると仮定し、式 (9) を用いて、式 (10) のように表現する。

$$\frac{\partial\tilde{\eta}}{\partial\tilde{t}} + (1-C)\tilde{\gamma}\frac{s\tilde{\rho}}{2}\frac{\tilde{q}_b\tilde{v}_p^2}{\tilde{L}_s} = 0 \quad (10)$$

ここで、 $\tilde{\eta}$; 河床高, \tilde{t} ; 時間, C ; 被覆率, $\tilde{\gamma}$; 損傷係数, s ; 砂礫の水中比重 (=1.65), $\tilde{\rho}$; 水の密度, \tilde{q}_b ; 単位幅流砂量, \tilde{v}_p ; 砂礫の衝突速度, \tilde{L}_s ; 流砂の跳躍距離である。

(3) 部分的に被覆した軟岩の洗掘モデル

Colombini ら¹²⁾ が行った解析の考え方を基に、部分的に被覆した軟岩における洗掘現象のモデル化をおこなう。川幅一定の直線水路における拡散項を省略した 2 次元浅水流式と連続の式および流砂の連続式は、式 (11)～(14) で表される。各座標系を図-4 に示す。

$$\frac{\partial\tilde{u}}{\partial\tilde{t}} + \tilde{u}\frac{\partial\tilde{u}}{\partial\tilde{x}} + \tilde{v}\frac{\partial\tilde{u}}{\partial\tilde{y}} + \tilde{g}\frac{\partial\tilde{H}}{\partial\tilde{x}} + \frac{\tilde{\tau}_x}{\tilde{\rho}\tilde{D}} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial\tilde{v}}{\partial\tilde{t}} + \tilde{u}\frac{\partial\tilde{v}}{\partial\tilde{x}} + \tilde{v}\frac{\partial\tilde{v}}{\partial\tilde{y}} + \tilde{g}\frac{\partial\tilde{H}}{\partial\tilde{y}} + \frac{\tilde{\tau}_y}{\tilde{\rho}\tilde{D}} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial\tilde{D}}{\partial\tilde{t}} + \frac{\partial(\tilde{u}\tilde{D})}{\partial\tilde{x}} + \frac{\partial(\tilde{v}\tilde{D})}{\partial\tilde{y}} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial\tilde{e}}{\partial\tilde{t}} + \left(\frac{\partial\tilde{q}_{bx}}{\partial\tilde{x}} + \frac{\partial\tilde{q}_{by}}{\partial\tilde{y}} \right) = 0 \quad (14)$$

ここで、 \tilde{t} ; 時間, \tilde{x}, \tilde{y} ; それぞれ縦断方向および横断方向座標軸, \tilde{u}, \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{D} ; 水深, $\tilde{\tau}_x, \tilde{\tau}_y$; それぞれ \tilde{x} 軸方向および \tilde{y} 軸

方向の掃流力, $\widetilde{q}_{bx}, \widetilde{q}_{by}$; それぞれ \widetilde{x} 軸方向および \widetilde{y} 軸方向の掃流砂量, \widetilde{e} ; 平均覆礫層厚, F_r ; フルード数, s ; 流砂の水中比重, $\widetilde{\eta}$; 河床高 ($=H-D$) である. また, 添え字の 0 は等流時の値を示し, 各項上の \sim は次元を有していることを示す.

各水理量について, 以下の関係を用いて無次元化を行った. 今回用いる無次元化式は以下の通りである.

$$(x, y) = (\widetilde{x}, \widetilde{y}) / \widetilde{D}_0, (u, v) = (\widetilde{u}, \widetilde{v}) / \widetilde{u}_0, D = \widetilde{D} / \widetilde{D}_0$$

$$H = \widetilde{H} / (F_{r0}^2 \widetilde{D}_0), \eta = \widetilde{\eta} / \widetilde{D}_0, \gamma = \widetilde{\gamma} \widetilde{\alpha}_0, t = \widetilde{t} \widetilde{u}_0 / \widetilde{B}$$

$$F_{r0} = \widetilde{u}_0 / (\widetilde{g} \widetilde{D}_0)^{1/2}, (q_{bx}, q_{by}) = (\widetilde{q}_{bx}, \widetilde{q}_{by}) / \left(s \widetilde{g} \widetilde{d}_s^3 \right)^{1/2}$$

$$(\tau_x, \tau_y) = (\widetilde{\tau}_x, \widetilde{\tau}_y) / (\widetilde{\rho} \widetilde{u}_0^2), v_p = \widetilde{v}_p / \widetilde{u}_0, L_s = \widetilde{L}_s / \widetilde{D}_0$$

ここで, \widetilde{v}_p : 砂粒の速度, \widetilde{L}_s : 砂粒の跳躍距離である.

以上の式を用いて式 (11)~(14), および式 (10) の無次元化を行うと, 式 (15)~(19) が得られる.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial x} + \beta \frac{\tau_x}{D} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial y} + \beta \frac{\tau_y}{D} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial u D}{\partial x} + \frac{\partial v D}{\partial y} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\pi}{6} \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\beta \sqrt{s d_s}}{F_{r0}} \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} \right) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (1 - C) \frac{\gamma R}{F_{r0}} (s d_s)^{3/2} \frac{q_b v_p^2}{L_s} = 0 \quad (19)$$

ここで, β ; 川幅水深比 ($=\widetilde{B} / \widetilde{D}_0$), 式 (19) 中の $R (= \widetilde{u}_0 \widetilde{\rho} / (2 \widetilde{\alpha}_0))$ は流水の運動エネルギーと軟岩の一軸圧縮強度の比で表される無次元のパラメータであり, $\widetilde{\alpha}_0$ は軟岩の一軸圧縮強度である.

(u, v, H, D, C) を摂動パラメータ ε を用いて, 式 (20) で示される等流時の値と摂動量とに分ける.

$$(u, v, H, D, C) = (1, 0, H_0, 1, C_0) + \varepsilon (u_1, v_1, h_1, d_1, C_1) \quad (20)$$

摂動量については河床形状が交互砂州の形状を想定しており, (u, v, H, D, C) の微少攪乱項に対して縦断方向に \cos 波, 横断方向に \sin 波を与えている. ただし, 横断方向の流速 v に関しては, 兩岸において横断流速は生じないとして, 微少攪乱項に対して横断方向に \cos 波を与えている.

$$(u_1, v_1, h_1, d_1, C_1) = (S_{y1} \widehat{u}_1, C_{y1} \widehat{v}_1, S_{y1} \widehat{h}_1, S_{y1} \widehat{d}_1, S_{y1} \widehat{C}_1) E_1 \quad (21)$$

ここで, $E_1 = \exp[i(\lambda_r x - \omega t)]$, $S_{y1} = \sin(ny\pi/2)$, $C_{y1} = \cos(ny\pi/2)$ である. ω は複素数であり, 実数部 ω_r および虚数部 ω_i はそれぞれ摂動量の角周波数および時間増幅率である. ω_i が正の値を持つとき現象は増幅し, 負の値を持つとき現象は減衰する. λ_r は流下方

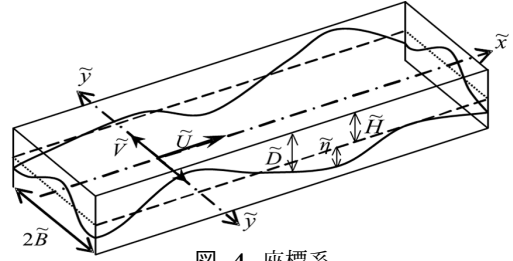


図-4 座標系

向の微少攪乱の波数であり, $\lambda_r = 2\pi \widetilde{B} / \widetilde{L}_s$ で表される. 式 (15)~(18) に式 (20), 及び式 (21) を代入し整理すると, ε の 1 次のオーダーに関して式 (22) が得られる.

$$\begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} & f_{15} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} & f_{25} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} & f_{35} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} & f_{45} \\ f_{51} & f_{52} & f_{53} & f_{54} & f_{55} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \widehat{u}_1 \\ \widehat{v}_1 \\ \widehat{h}_1 \\ \widehat{d}_1 \\ \widehat{C}_1 \end{pmatrix} = 0 \quad (22)$$

ここで, $f_{11} \sim f_{44}$ については以下の通りである.

$$f_{11} = i\lambda_r + \frac{2\beta C_{f0}}{1 - C_T}, f_{12} = 0, f_{13} = i\lambda_r$$

$$f_{14} = \beta C_{f0} \left(\frac{C_H}{1 - C_T} - 1 \right), f_{15} = \frac{C_C}{1 - C_T} \beta C_{f0}$$

$$f_{21} = 0, f_{22} = i\lambda_r + \beta C_{f0}, f_{23} = \frac{1}{2} \pi n, f_{24} = 0, f_{25} = 0$$

$$f_{31} = i\lambda_r, f_{32} = -\frac{1}{2} \pi n, f_{33} = 0, f_{34} = i\lambda_r, f_{35} = 0$$

$$f_{41} = 2R_2 \beta q_0 \frac{C_0(1 - C_0)}{1 - C_T} \left(F_T + \frac{0.1\tau_0}{\tau_0 - \tau_{cr}} \right)$$

$$f_{42} = 0, f_{43} = -i\omega F_{r0}^2$$

$$f_{44} = i\omega + R_2 \beta q_0 C_0(1 - C_0) \left(F_H + \frac{C_H}{1 - C_T} \left(F_T + \frac{0.1\tau_0}{\tau_0 - \tau_{cr}} \right) \right)$$

$$f_{45} = R_2 \beta q_0(1 - 2C_0) + R_2 \beta q_0 C_0(1 - C_0) \left(\frac{C_C}{1 - C_T} \left(F_T + \frac{0.1\tau_0}{\tau_0 - \tau_{cr}} \right) - \frac{1 - k_r}{2k_{t0}} \right)$$

$$f_{51} = 2iF_{rs} C_0 \lambda_r q_0 \frac{F_T}{1 - C_T}$$

$$f_{52} = -\frac{\pi}{2} n F_{rs} C_0 q_0, f_{53} = \frac{\pi^2}{4} \frac{F_{rs} r C_0 q_0 F_{r0}^2}{\beta \sqrt{\tau_0}}$$

$$f_{54} = iF_{rs} C_0 \lambda_r q_0 \left(F_H + \frac{C_H F_T}{1 - C_T} \right) - \frac{\pi^2}{4} n^2 \frac{F_{rs} r C_0 q_0}{\beta \sqrt{\tau_0}}$$

$$f_{55} = \frac{\pi}{6} i\omega + iF_{rs} \lambda_r q_0 \left(1 + \frac{C_C F_T}{1 - C_T} C_0 \right)$$

ただし,

$$C_T = 0, C_H = \frac{1}{C_{f0}} \frac{\partial C_f}{\partial H} \Big|_{H=H_0}, C_C = \frac{1}{C_{f0}} \frac{\partial C_f}{\partial C} \Big|_{C=C_0}$$

$$F_T = \frac{\tau_0}{q_0} \frac{\partial q_b}{\partial \tau_*} \Big|_{\tau_*=\tau_0}, F_H = 0, F_C = \frac{1}{q_0} \frac{\partial q_b}{\partial C} \Big|_{C=C_0}$$

$(\widehat{u}_1, \widehat{v}_1, \widehat{h}_1, \widehat{d}_1)$ が 0 以外の解を持つには, 式 (23) が条件となる.

$$\begin{vmatrix} f_{11} & \cdots & f_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{51} & \cdots & f_{55} \end{vmatrix} = F(\omega, \lambda_r, \beta, \tau_*, d_s) = 0 \quad (23)$$

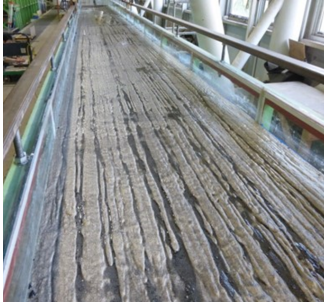


図-5 通水終了後の水路¹³⁾

表-1 水理条件

条件	実験条件
水路幅 B	0.9[m]
実験流量 Q	10.0[l/s]
水深 h	3.0[cm]
粒径 d_s	1.18[mm]
河床勾配 I	1/300
無次元掃流力 τ_*	0.051
河床形態	交互砂州

d_s および τ_* が与えられたとき、微少攪乱の発達を示す ω_i は川幅と水深の比 β によって決定される。これより、 β と縦断方向の河床波形の波数 λ_r による時間増幅率 ω_i の値の変化を見ることによって、河床に現れる形状について検討を行うことができる。

3. 検討条件

(1) 軟岩洗掘の再現実験

サムナー¹³⁾ が実施した軟岩洗掘実験における水理条件を表-1 に示す。軟岩モルタル床には、時間の経過とともに複数の縦筋状の溝が発達したことが報告されている¹³⁾。図-5 は、通水後の河床形状を撮影したものである。本研究では、この水理条件を基準にして検討を行うこととした。

(2) 諸量の設定

掃流砂量 q_b は Mayer-Petter, Müller の式より、

$$q_b = 8(\tau_* - \tau_{cr})^{3/2} \quad (24)$$

また、縦横断成分に分解し、以下の形で用いる。

$$q_{bx} = q_0 + q_0 \left(\frac{\tau_1}{\tau_0} F_T + F_H d_1 \right) \varepsilon$$

$$q_{by} = q_0 \left(v_1 - \frac{rr}{\beta} \sqrt{\frac{1}{\tau_0}} \frac{\partial}{\partial y} (F_{r0}^2 h_1 - d_1) \right) \varepsilon$$

河床摩擦係数には、式 (25) を用いた。

$$C_f = (6 + 2.5 \ln(\tilde{D}/\tilde{k}_t))^{-2} \quad (25)$$

Sklar and Dietrich⁸⁾ が行った研究より v_p , L_s について、以下の関係を用いる。

$$\tilde{v}_p / \sqrt{sg\tilde{d}_s} = \alpha_1 \left(\tilde{d}_s / \tilde{k}_t \right)^{1/4} (\tau_* - \tau_{cr})^{0.5} \quad (26)$$

$$\tilde{L}_s / \tilde{d}_s = \alpha_2 (\tau_* - \tau_{cr})^{0.9} \quad (27)$$

ここで、 α_1, α_2 は係数でありそれぞれ、 $\alpha_1=10$, $\alpha_2=8$ とされている。 \tilde{k}_t は水理学的粗度であり、粗面における粗度を \tilde{k}_s , 滑面における粗度を \tilde{k}_r とおいて、式 (28) の形で用いることとする。

$$\tilde{k}_t = C\tilde{k}_s + (1 - C)\tilde{k}_r \quad (28)$$

ただし、砂礫河床モデルでは $\tilde{k}_t = \tilde{k}_s$ として扱う。

\tilde{q}_b は水路に十分な給砂が存在するときの給砂量を \tilde{q}_{bc} とおくと、被覆率 C を用いて、以下の形で表現する。

$$\tilde{q}_b = C\tilde{q}_{bc} \quad (29)$$

限界掃流力 τ_{cr} については、井上³⁾ によって導かれた、以下の式を用いた。

$$\tau_{cr} = \frac{\alpha_1}{\frac{1}{\kappa} \ln(30.1 \frac{\alpha_* d_s}{k_s})} \quad (30)$$

ただし、

$$\alpha_1 = \frac{2A_3}{0.4A_2} \frac{(\mu_f - \tan \theta) \cos \theta}{(\mu_f + (1/0.85)) 0.85}$$

ここで、 θ ; 河床勾配, μ_f ; 静止摩擦係数, α_* ; 砂礫の着目高さであり、 $\kappa=0.4$, $A_2=\pi/4$, $A_3=\pi/6$, $\alpha_*=0.65$ とし、静止摩擦係数には一般的な値である 0.85 を用いる。

軟岩の一軸圧縮強度 α_0 , および損傷係数 γ について、大澤¹⁴⁾ が行った、モルタルで擬似した軟岩を用いた実験より $\alpha_0=76[\text{kN}]$, $\gamma=7.256[\text{kgf}]$ を用いることとした。

4. 解析結果

(1) 砂礫河床における洗掘

軟岩河床形状の検討に先立ち、比較のために砂礫床の場合における安定解析を表-1 の水理条件を基に実施した。求められた ω_i のコンター図を図-6 に示す。

ω_i が正の値を持つときに交互砂州が発達することから、与えられた水理条件においては川幅水深比 β が 8 以下の水路では交互砂州が発生しないと予測される。

また、今回使用した条件では λ_r が 1.0 付近のときに ω_i は最も発達していることがわかる。このことから、交互砂州が発生する場合、 $\lambda_r = 2\pi\tilde{B}/\tilde{L}_s$ であることから、およそ 2.8m の波長をもった交互砂州が発生することが予測される。

(2) 完全に露岩化した軟岩河床の洗掘¹⁵⁾

砂礫河床のケースと同様に、サムナー¹³⁾ の実験と同一の条件である完全に露岩化した河床状態を想定したケースについても解析を行った。なお、計算条件は、実験の条件である $d_s=0.04$, $\tau_0=0.05$ とした。求められた ω_i のコンター図を図-7 に示す。

図-7 より、 ω_i が最も発達する λ_r の位置が 0.0 にあることが見てとれる。 $\lambda_r = 2\pi\tilde{B}/\tilde{L}_s$ であることから、中規模河床波の要因である攪乱の波長 L_s は ∞ をとることになる。つまり、縦断的に一様な洗掘形状を形成すると考えられる。軟岩が完全に露出している場合には、図-5 に見られるような縦筋状の洗掘跡が形成された要因の一つとして、波長が無限大すなわち洗掘の縦断方向の変化が抑制される機構の存在も考えられる。

(3) 部分的に被覆された軟岩河床の洗掘

式 (23) より求められた ω_i のコンター図を図-8 に示す。なお、計算条件は、サムナー¹³⁾ の実験と同一の条件を使用し、 C_0 については 0.1 として計算を行った。

図-8 より、 ω_i が最大となる λ_r の位置が、およそ 0.6 付近にあることが見てとれる。 $\lambda_r = 2\pi\tilde{B}/\tilde{L}_s$ であることから、部分的に被覆が河床に存在する場合、今

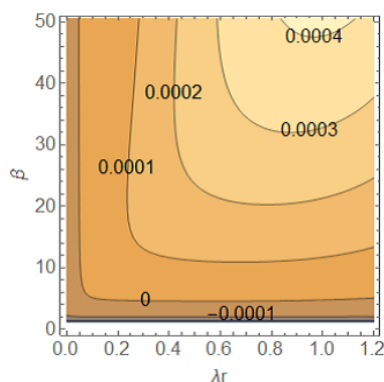


図-6 砂礫河床モデルの解析結果

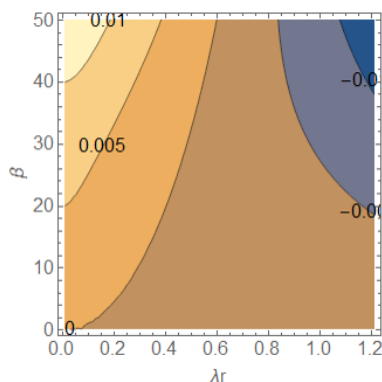


図-7 軟岩河床モデルの解析結果

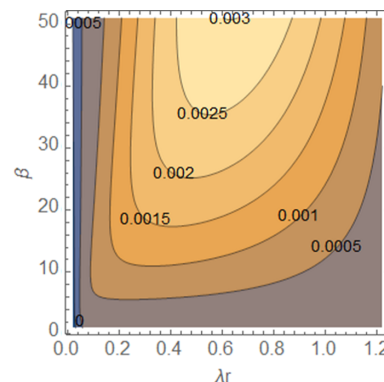


図-8 部分被覆モデルの解析結果

回の条件下では波長がおおよそ $\widetilde{L}_s=4.2\text{m}$ の河床形状が発達することになる。

著者らの研究¹⁵⁾より、完全に露岩した河床においては横断波数 n が変化した場合にも、 ω_i が最も発達する λ_r の位置に変化はなく、横断方向の波数によらず河床の形状は縦断的に一樣な形状をとることを確認している。図-7と図-8を比較してわかるように、河床の洗掘が縦断的に一定の波を持つには、岩河床上にある程度の被覆状態が必要であることが予想される。

(4) 水理条件による比較

解析の際に与えた水理条件を一部変更することによって、各水理量が計算に与える影響を検討することとする。

a) C_0 を変化させた結果

等流時の被覆率 C_0 を 0.01, 0.50, 1.00 と変化させたケースを図-9～11に示す。なお、他の条件は(3)部分的に被覆された軟岩河床の洗掘で使用したものを用いている。

β を固定し C_0 を小さくしていくと ω_i が最大となる λ_r が小さくなる方向に移動する。これは、被覆率が小さくなると波長が長くなる、という矢野ら¹⁶⁾が行った覆礫を与えた岩河床の洗掘実験で得られた知見と一致する。また、 C_0 を小さくしていくと ω_i の最大の値は小さくなる傾向が見られるが、これは被覆率 C_0 が小さくなるということは本解析の場合、流砂量が少なくなることを意味しており、その分現象が減衰するためであると考えられる。

$C_0=1.00$ のケースでは十分な覆礫があるにもかかわらず図-6と一致する結果にならなかった。これは本解析においては河床高の変化を流砂の衝突による洗掘によって生じることとしているため、砂礫河床のように流砂の堆積・侵食によって形成される河床形状と一致しなかったためであると考えられる。

b) d_s, τ_0 を変化させた結果

流砂の粒径 d_s を 0.02, 0.04, 0.06 と変化させたケースを図-12～14に、等流時の無次元掃流力 τ_0 を 0.03, 0.05, 0.07 と変化させたケースを図-15～17に示す。なお、他の条件は(3)部分的に被覆された軟岩河床の洗掘で使用したものを用いている。

d_s および τ_0 が大きくなると ω_i が最大となる λ_r が小さくなる方向に移動するとともに、 ω_i の値そのものが

大きくなる傾向を示す。

5. おわりに

今回、河床を覆う堆積物の分布を考慮したモデルによる解析を行い、サムナーら¹³⁾が実施した軟岩洗掘実験の水理条件を基に、河床形状の形成要因の解明を試みた。その結果、被覆率が小さくなると、中規模河床波の要因である攪乱の波長が大きくなることが明らかになった。このことは、矢野ら¹⁶⁾が行った覆礫を与えた岩河床の洗掘実験で報告された傾向と一致する。

しかし、本解析では河床高さの変化は軟岩の洗掘によってのみ生じると設定しており、河床の回復については考慮していない。今後は流砂による堆積・侵食が、河床形状にどの程度影響を及ぼすかの検討が必要である。

参考文献

- 1) 江頭進治, 吉栖雅人, 伊藤隆郭: 固定床開水路における砂礫の輸送形態と輸送能力, 水工学論文集 40 巻, pp.971-976, 1996.
- 2) 久加朋子, 竹林洋史, 藤田正治: 固定床と移動床が混在する場合における動的平衡河床の不可逆性, 土木学会論文集, 第 71 号, 2015.
- 3) 井上卓也, 泉典洋, 米元光明, 旭一岳: 軟岩上の限界掃流力と軟岩の洗掘速度に関する実験, 河川技術論文集, 第 17 巻, 20011 年 7 月.
- 4) 小松祐輔, 渡辺康玄, 泉典洋, 竹林洋史: モルタルで疑似した軟岩の流砂の衝突による洗掘, 河川技術論文集, 第 17 巻, 2011.
- 5) 井上卓也, 村上泰啓, 伊藤丹, 数馬田貢: 流砂による軟岩侵食と岩の物性値の関係, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, 2013.
- 6) 泉典洋, 横川美和, Gary PARKER: 基盤岩上に形成される周期的ステップ地形, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, 2012.
- 7) L.Zhang, G.Parker, C.P.Stark, T.Inoue, E.Viparelli, X.Fu, N.Izumi: Macro-roughness model of bedrock-alluvial river morphodynamics, Earth Surface Dynamics, 3(1), 113, 2015.
- 8) Leonard S. Sklar, William E. Dietrich: A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, Water Resources Research, Vol.40, 2004.
- 9) 井上卓也, 清水康行, Gary PARKER, 山口里実, 伊藤丹: 給砂量と岩床侵食地形の関係, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, 2014.
- 10) Peter A.Nelson and Giovanni Seminara: A theoretical framework for the morphodynamics of bedrock channel, Geophysical Research Letters, Vol.39, 2012.
- 11) 石橋毅: ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究, 土木学会論文報告集, 第 334 号, 1983.
- 12) Colombini, M., G. Seminara and M. Tubino: Finite

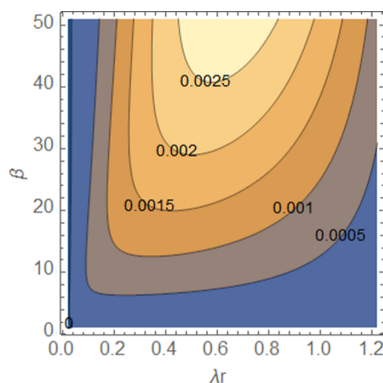


図-9 ω_i のコンター図 ($C_0=0.01$)

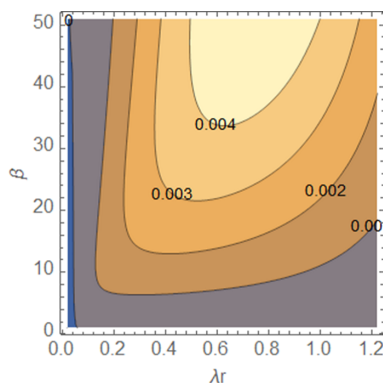


図-10 ω_i のコンター図 ($C_0=0.50$)

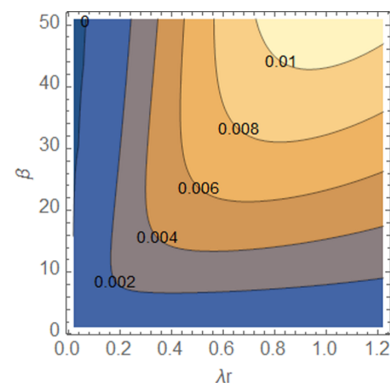


図-11 ω_i のコンター図 ($C_0=1.00$)

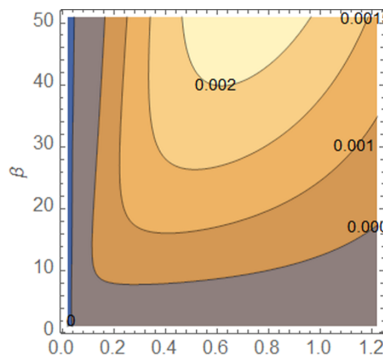


図-12 ω_i のコンター図 ($d_s=0.02$)

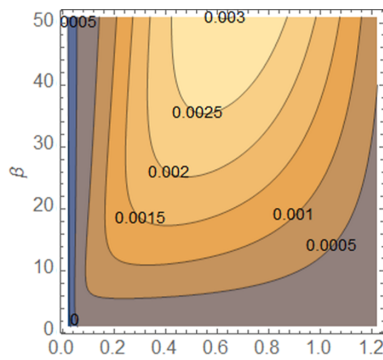


図-13 ω_i のコンター図 ($d_s=0.04$)

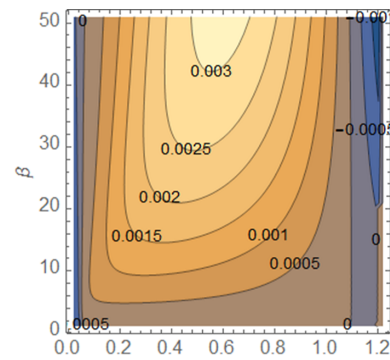


図-14 ω_i のコンター図 ($d_s=0.06$)

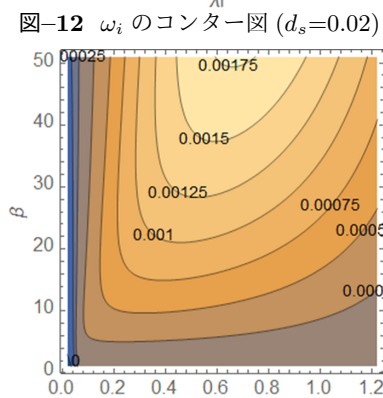


図-15 ω_i のコンター図 ($\tau_0=0.03$)

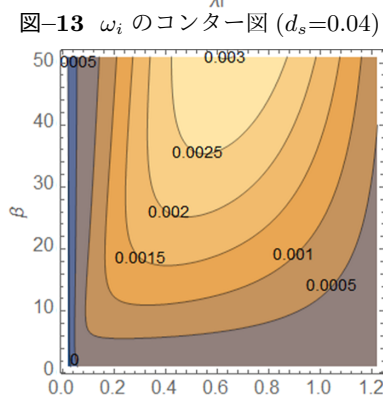


図-16 ω_i のコンター図 ($\tau_0=0.05$)

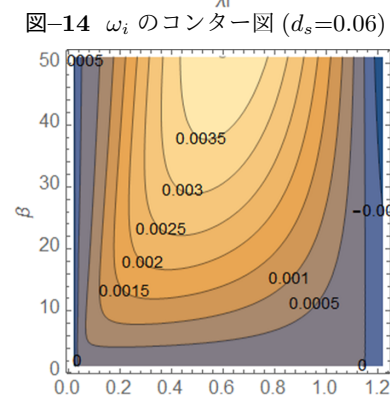


図-17 ω_i のコンター図 ($\tau_0=0.07$)

amplitude alternate bars, Journal of Fluid Mechanics, Vol.181, pp213-232, 1987.

- 13) サムナー圭希, 井上卓也, 清水康行: 岩盤底上の砂州形成に伴う侵食地形, 水工学論文集, 第 72 号, 2016.
- 14) 大澤亮介, 渡邊康玄, 吉川泰弘: 流砂の衝突と転動による軟岩の洗掘, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 70 号, 2013.

15) 藺森啓悟, 渡邊康玄: 軟岩で構成された河床に現れる形状の検討, 応用力学シンポジウム, 2016.

- 16) 矢野雅昭, 渡邊康玄, 井上卓也, 山口里実, 渡邊和好, 吉井康幸: 岩河床河川における覆礫厚が自由砂州形状に及ぼす影響, 水工学論文集, 第 59 巻, 2015 年 2 月.

(2016.9.30 受付)

LINEAR STABILITY ANALYSIS ON BED CONFIGURATION OF SOFT ROCK PARTIALLY COVERED WITH SEDIMENT

Keigo IMORI and Yasuharu WATANABE

When the layer of soft rock which exists under a gravel bed is exposed at river beds, the degradation speed of bed becomes very high. In recent years, river structures have been become unstable due to erosion of soft rock bed. A linear stability analysis is conducted for understanding the bed shape of soft rock rivers. The stability analysis in this paper reproduced the bed configuration of soft rock partially covered with sediment. It is found that the wavelength of the bed configuration of soft rock partially covered with sediment becomes long compared with the wavelength of an alternate bar.