

積雪寒冷地域における土丹河床の侵食過程と河川構造物等の影響に関する研究

研究予算：運営費交付金(一般勘定)

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地河川チーム、寒地技術推進室

研究担当者：伊藤丹、井上卓也、川村里実、阿部孝章、数馬田貢

【要旨】

本研究は、積雪寒冷地における土丹(軟らかい岩床)の風化・侵食メカニズムの解明、軟岩河床上の河川構造物の影響把握を最終目標としている。本報告では、岩床侵食と砂礫移動の両方を考慮した平面2次元河床変動計算手法の開発を行い、石狩川の露岩区間を対象にモデルの検証を行った。検証の結果、本モデルによって、岩床侵食に伴う滯筋形成が再現できること、岩床が露出しやすい箇所とその度合いを予測できることが確認された。このことから、本モデルが、岩床河川の将来予測及び対策効果検討を行う有効なツールであることが示された。

キーワード：土丹河床、侵食、数値計算モデルの開発

1.はじめに

石狩川上流など北海道内の複数河川において、土丹河床上(軟らかい岩床)の砂礫が流出し、急激に河床低下が進行している。これにより、橋脚などの構造物への影響や治水安全度の低下が懸念されている。

近年、岩床の侵食メカニズムに関する研究¹⁾²⁾³⁾⁴⁾は着実な進歩を遂げ、流砂量が侵食速度に対し、相反する2つの効果を持つことが明らかにされている。1つは、流砂量の増加に伴い、岩床に衝突する粒子の個数が増え、侵食速度の増大に繋がる tools effect(侵食効果)。もう1つは、流砂量の増加に伴い、岩床を覆う砂礫面積が増え、侵食速度の減少に繋がる cover effect(被覆効果)である¹⁾。

岩床河川の多くは、露岩箇所と砂礫床箇所が混在しており、岩床河川の地形変化を予測するためには、岩床侵食と砂礫移動の両方を考慮する必要がある。そこで、本研究では、岩床河川の地形変化を再現できる新たな平面2次元河床変動モデルの開発を行った。

2. モデル開発

2.1 流れの基礎式

平面2次元流況計算は、Shimizu and Itakura⁵⁾が提案した数値解析モデルをベースとする。流れの基礎式には、円筒座標系・定常流れ場における運動方程式および連続式を用いる。

$$\frac{r_0}{r_0+n} U_s \frac{\partial U_s}{\partial s} + U_n \frac{\partial U_s}{\partial n} + \frac{U_s U_n}{r_0+n} = -\frac{r_0}{r_0+n} g \frac{\partial H}{\partial s} - \frac{\tau_s}{\rho D} + 2 \frac{\partial}{\partial s} \left(\varepsilon \frac{\partial U_s}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\varepsilon \frac{\partial U_s}{\partial n} \right) \quad (1)$$

$$\frac{r_0}{r_0+n} U_s \frac{\partial U_n}{\partial s} + U_n \frac{\partial U_n}{\partial n} - \frac{U_s^2}{r_0+n} = -g \frac{\partial H}{\partial s} - \frac{\tau_n}{\rho D} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\varepsilon \frac{\partial U_n}{\partial s} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial n} \left(\varepsilon \frac{\partial U_n}{\partial n} \right) \quad (2)$$

$$\frac{r_0}{r_0+n} \frac{\partial (U_s D)}{\partial s} + \frac{U_n D}{r_0+n} + \frac{\partial (U_n D)}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

ここで、 s は流線方向の座標軸、 n は横断方向の座標軸、 U_s と U_n は水深平均流速、 D は水深、 H は水位、 r_0 は河道中心線の曲率、 τ_s と τ_n は河床せん断力、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 ε は渦動粘性係数($=\kappa u_* D/6$)、 κ はカルマン定数、 u_* は摩擦速度である。

河床せん断力 τ_s 、 τ_n と摩擦速度 u_* は以下の式で表される。

$$\tau_s = \frac{\rho g n_m^2}{D^{1/3}} U_s \sqrt{U_s^2 + U_n^2} \quad (4)$$

$$\tau_n = \frac{\rho g n_m^2}{D^{1/3}} U_n \sqrt{U_s^2 + U_n^2} \quad (5)$$

$$u_* = \frac{\sqrt{\tau_s^2 + \tau_n^2}}{\rho} \quad (6)$$

ここで、 n_m はマンニングの粗度係数であり、以下のマンニング-ストリックラー式より導かれる。

$$n_m = \frac{k_s^{1/6}}{7.66\sqrt{g}} \quad (7)$$

ここで、 k_s は等価粗度高さである。

2.1 砂礫の変動

流砂の連続式は、Luu ら⁶⁾が粘着性河床の研究で提案した以下の式を岩床河川に応用して用いる。

$$\frac{\partial V_b}{\partial t} + (1-\lambda) \frac{\partial \eta_a}{\partial t} + \left(\frac{\partial q_{b,s}}{\partial s} + \frac{\partial q_{b,n}}{\partial n} \right) = 0 \quad (8)$$

ここで、 V_b は単位面積あたりの掃流砂の堆積、 η_a は砂礫層の厚さ、 $q_{b,s}$ と $q_{b,n}$ は単位幅流砂量のベクトルである。

図-1 は完全な岩床河道、砂礫床-岩床の混在河道、完全な砂礫床河道の概念図である。流砂量 q_b は、岩床表面からある高さにおける掃流砂濃度 C_b とサルテーション速度 u_s の積の積分で表される⁷⁾。

$$q_b = \int_0^{h_s} C_b u_s = \bar{C}_b h_s \bar{u}_s = V_b \bar{u}_s \quad (9)$$

ここで、 h_s はサルテーション高さ、 \bar{C}_b は平均的な掃流砂濃度、 \bar{u}_s は砂礫粒子の平均的な跳躍速度である。 V_b は \bar{C}_b と h_s の積として定義され、長さの次元を持つ変数である。なお、 \bar{C}_b が飽和濃度 \bar{C}_{bc} になると、 V_b も飽和体積 V_{bc} になる。

砂礫層が十分にある場合、砂礫層から掃流層へ流砂が絶えず供給されるため、流砂量は常に飽和流砂量と等しい。しかし、岩床河川においては、砂礫層厚が存在せず、流砂量が飽和流砂量を下回る場合がある。そこで、岩床上の掃流砂体積 V_b と十分に砂礫層がある状態(飽和状態)の掃流砂体積 V_{bc} の比を用いて飽和流砂量を補正する。

$$(q_{b,s}, q_{b,n}) = \begin{cases} \frac{V_b}{V_{bc}} (q_{bc,s}, q_{bc,n}) & \text{for } 0 \leq \frac{V_b}{V_{bc}} < 1 \\ (q_{bc,s}, q_{bc,n}) & \text{for } \frac{V_b}{V_{bc}} = 1 \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 $q_{bc,s}$ と $q_{bc,n}$ は飽和流砂量のベクトルである。

砂礫層厚 η_a が 0 の場合、(8)式における砂礫層厚の時間微分項 $\partial \eta_a / \partial t$ は 0 である。このとき、 V_b は 0 から V_{bc} の間で時間的に変化する。

V_b が V_{bc} 以上になった瞬間、河床の状態は完全な岩床から砂礫床と岩床の混在場に遷移する。砂礫層厚 η_a がある場合、礫は砂礫層と掃流層の間で交換されたため、 V_b は常に V_{bc} と等しい。したがって、(8)式における掃流砂体積の時間微分項 $\partial V_b / \partial t$ は 0 となる。このとき、

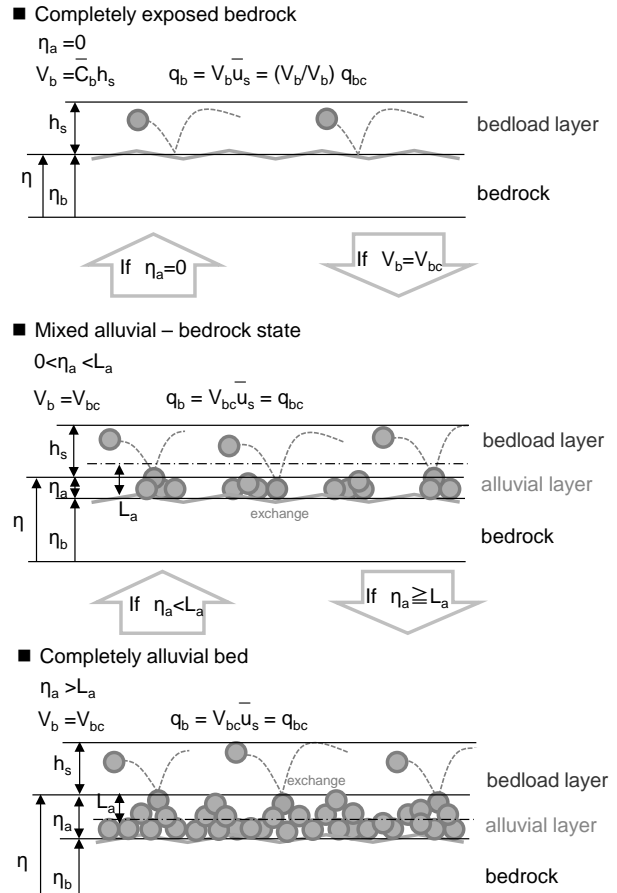


図-1 完全な岩床河道、砂礫床-岩床の混在河道、完全な砂礫床河道の概念図

砂礫層厚 η_a が時間的に変化する。

再び砂礫層厚 η_a が 0 になれば河床は完全な岩床へ遷移し、砂礫層厚 η_a が L より大きくなれば完全な砂礫床へ遷移する。なお、 L とは完全な砂礫床になる砂礫層厚(岩床が侵食されなくなる砂礫層厚)である(図-1)。

流線方向の飽和流砂量(平衡流砂量とも呼ばれる)は以下の式で表される。

$$q_{bc,s} = \alpha_b (\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{R_b g d^3} \quad (11)$$

ここで、 α_b は掃流砂量式の係数、 τ_* は無次元掃流力 ($= u_*^2 / R_b g d$)、 τ_{*c} は無次元限界掃流力、 R_b は砂礫の水中比重(1.65)である。

α_b については、これまでに様々な値が提案されている。Meyer-Peter Müller⁸⁾によれば $\alpha_b = 8$ 、Fernandez Luque and van Beek⁹⁾によれば $\alpha_b = 5.7$ 、Wong and Parker¹⁰⁾によれば $\alpha_b = 3.97$ である。本モデルでは、岩床侵食の研究で Sklar and Dietrich が使用した 5.7 を用いる。

横断方向(n 軸方向)の単位幅飽和流砂量は、長谷川¹¹⁾や Mosselman¹²⁾によって提案された以下の式で算

出される。

$$q_{bc,n} = q_{bc,s} \left(\frac{u_{b,n}}{u_{b,s}} - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_c \tau_*} \frac{\partial \eta}{\partial n}} \right) \quad (12)$$

$$\frac{u_{b,n}}{u_{b,s}} = N_* \left(\frac{D}{r_s} \right) \quad (13)$$

ここで、 $u_{b,s}$ と $u_{b,n}$ は河床近傍流速のベクトル成分、 N_* は二次流強度、 μ_s および μ_b は静止摩擦係数および動摩擦係数、 r_s は流線の曲率、 $\partial \eta / \partial n$ は横断方向の局所河床勾配である。Engelund¹³⁾によれば N_* は約 7.0。

Hasegawa¹¹⁾によれば、 μ_s は 1、 μ_b は 0.5 である。

V_{bc} は、飽和流砂量の絶対値を、砂礫粒子のサルテーション速度で除した値と等しくなる。

$$V_{bc} = \frac{\sqrt{q_{bc,s}^2 + q_{bc,n}^2}}{\bar{u}_s} \quad (14)$$

ここで、 \bar{u}_s は砂礫粒子のサルテーション速度であり、Sklar and Dietrich¹⁾がサルテーション運動に関する既往の実験データを収集し導いた経験式を用いて算出する。

$$\frac{\bar{u}_s}{\sqrt{R_b g d}} = 1.56(\tau_* / \tau_{*c} - 1)^{0.56} \quad (15)$$

Egashira and Ashida¹⁴⁾によると、飽和状態における掃流層厚と掃流砂濃度の積(すなわち V_{bc})は、河床せん断力の 1 乗に比例する。本研究の V_{bc} も概ね河床せん断力の 1 乗に依存する形となるため、彼らの研究と類似している。

2.3 岩床侵食

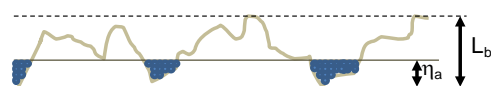
岩床は主に流砂の衝突によって侵食されると考えられている。これまでに、いくつかの岩床侵食式が提案されているが、本研究では最もシンプルな Chatanantavet and Parker²⁾の式を用いる。

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial t} = -E = -\beta \sqrt{q_{b,s}^2 + q_{b,n}^2} (1 - P_c) \quad (16)$$

ここで、 η_b は岩床の標高、 E は侵食速度、 β は岩床の摩耗係数、 P_c は岩床の砂礫による被覆面積率である。

Johnson and Whipple³⁾は岩床侵食実験によって、摩耗係数 β は河床せん断力に依存しないことを明らかにしている。また、著者らは給砂粒径と摩耗係数の関係に着目し、摩耗係数が給砂粒径の 1/2 乗に依存し⁴⁾、岩床強度の-2 乗に比例¹⁵⁾¹⁶⁾することを示している。そこで、本モデルでは、既往研究を踏まえ、摩耗係数 β を以下の式で表す。

a) Rough bedrock ($L_a \ll L_b$)



b) Smooth bedrock ($L_a \gg L_b$)

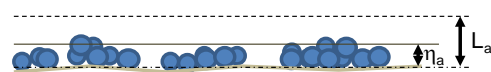


図-2 被覆率と砂礫層厚の概念図

$$\beta = \beta_c \sigma^{-2} d^{0.5} \quad (17)$$

ここで、 σ は岩床の一軸圧縮強度(MPa)、 d は岩床上を通過する砂礫の粒径(m)、 β_c は定数であり、石狩川の現地実験¹⁵⁾を基に逆算すると、0.007 である

2.3 砂礫の被覆率

被覆率に関する最も簡単なモデルは、Sklar and Dietrich¹⁾によって提案された線形モデルである。彼らのモデルにおいて、被覆率 P_c は、その場の流砂量と飽和流砂量の比 q_b / q_{bc} で表される。ただし、Sklar and Dietrich¹⁾のモデルは、あくまでも最終的な平衡状態を表すものであり、被覆率が非定常的に変化する場合は適用できない。非定常的に変化する被覆率は、流砂量と飽和流砂量の比だけでなく、それまでに堆積した砂礫層厚にも支配されるはずである。

この様な背景から、Parker ら¹⁷⁾および田中ら¹⁸⁾は、被覆率を砂礫層厚の関数で表す、新たな被覆率モデルを提案している(図-2)。

$$P_c = \begin{cases} \frac{\eta_a}{L} & \text{for } 0 \leq \frac{\eta_a}{L} < 1 \\ 1 & \text{for } \frac{\eta_a}{L} \geq 1 \end{cases} \quad (18)$$

ここで、 η_a は砂礫層の厚さ、 L は岩床が侵食されなくなる砂礫層厚である。

Parker ら¹⁷⁾は、粗い岩床河川を対象に L は岩床の巨視的な凹凸高さ L_b に等しいと定義している。一方、田中ら¹⁸⁾は、滑らかな岩床河川を対象に L は砂礫床の凹凸高さ $L_a (=2.5d)$ と等しいと定義している。本モデルでは、滑らかな岩床と粗い岩床の両方に対応できるように、 $L = L_b + L_a$ と定義する。

2.4 岩床粗度と砂礫床粗度

ここでは、式(7)で用いられた等価粗度高さについて説明を加える。

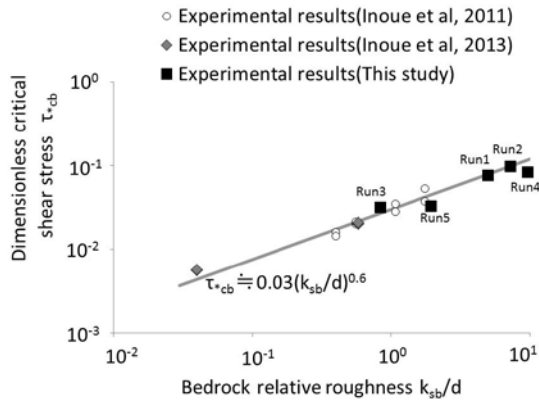


図-3 岩床等価粗度と無次元限界掃流力の関係

砂礫床の等価粗度高さは、一般的に粒径の 1～4 倍程度¹⁹⁾である。一方、岩床の等価粗度高さは、岩床表面の凹凸高さや、凹凸の配置に依存するため、砂礫床の等価粗度高さより高い場合も低い場合もある²⁰⁾²¹⁾。

そこで、本モデルでは、Nelson and Seminara²²⁾や田中ら¹⁸⁾研究を基に、等価粗度高さを以下の式より与える。

$$k_s = P_c k_a + (1 - P_c) k_b \quad (19)$$

ここで、 k_s はある計算格子における合成粗度高さ、 P_c はその格子における被覆率、 k_{sa} は砂礫床の等価粗度高さ、 k_{sb} は岩床の等価粗度高さである。

また、無次元限界掃流力も砂礫床と岩床では異なることが指摘されている¹⁵⁾²¹⁾。そこで、本モデルでは、等価粗度高さと同様に、無次元限界掃流力を以下の式で与える。

$$\tau_{*c} = P_c \tau_{*ca} + (1 - P_c) \tau_{*cb} \quad (20)$$

ここで、 τ_{*ca} は砂礫床上の無次元掃流力(単一粒径の場合 0.05 程度²³⁾)、 τ_{*cb} は岩床上の無次元掃流力である。著者らの実験¹⁵⁾²⁴⁾によると、岩床上の無次元限界掃流力は以下の式で表される(図-3)。

$$\tau_{*c} = 0.03(k_{sb}/d)^{0.6} \quad (21)$$

3. モデルの検証

3.1 初期地形と初期被覆率

石狩川上流の露岩区間(KP160～KP163)を対象にモデルの検証を行った。初期河床は平成 13 年横断測量、初期岩床高は平成 20 年に行われた縦断的なボーリング測量より設定した。初期被覆率は、初期砂礫層厚(初期河床高と初期岩床層高の差)を用いて(18)式より設定した。



図-4 岩床の強度および凹凸高さの計測状況

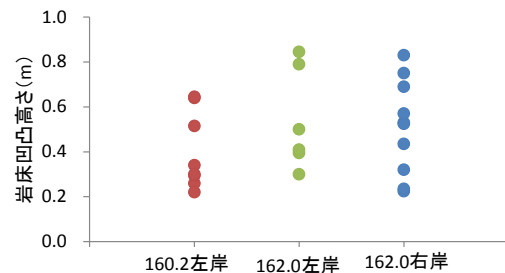


図-5 岩床凹凸高さの計測結果

3.2 粒径と粗度

粒径は平成 8 年度河床材料調査結果を基に、代表粒径程度の 50mm の単一粒径で与えた。砂礫床の等価粗度高さ k_{sa} は粒径の 2.5 倍(1～4 倍¹⁹⁾の中央値)、岩床の等価粗度高さ k_{sb} は、石狩川で行われた岩床侵食の現地実験を基に、30mm とした¹⁵⁾。

3.2 岩床の強度と凹凸高さ

軟岩ペネトロ計(丸東製作所 SH-70)を用いて、石狩川露岩区間の一軸圧縮強度を調査したところ、平均 1.2MPa であった(図-4)。

石狩川露岩区間において、岩床の凹凸高さ L_b の計測を行った。計測方法は、2本のアルミスタッフを直角に交差させ、岩床凹凸の最も低い箇所と最も高い箇所の差を計測した。計測箇所と地点数は、河口から 160.2km 左岸水際で 8 地点、河口から 162.0km 左岸水際で 6 地点、河口から 162.0km 右岸水際で 10 地点である(図-4)。この結果、計測した岩床凹凸の最小値は 22cm、最大値 84.5cm、平均値は 48.2cm であった(図-5)。

岩床の凹凸高さ L_b は、計測結果の平均値程度 50cm(=10d) とし、岩床が侵食されなくなる砂礫層厚 L は、 L_b に砂礫床の凹凸高さ L_a (=2.5d¹⁸⁾)を加えた 12.5d とした。

3.4 計算流量

平面 2 次元計算の場合、流砂が移動しないような低流量時まで含めて計算を行うと、計算時間が膨大になる。そこで、あらかじめ流量 100m³/s、200 m³/s、400m³/s の流れ場のみを計算し、その結果を基に無次元掃流力

と無次元限界掃流力を算出し、どの流量から流砂が移動し始める(無次元掃流力>無次元限界掃流力)か確認した。

図-6によると、200 m³/s 以下の場合、流砂移動箇所は、縦断方向に断続的である。岩床からは砂礫は発生しないため、KP163 上流の礫床区間から給砂される砂礫が、岩床上を縦断方向に連続的に移動しないと、軟岩はほとんど侵食されない。そこで、本研究では、永山流量観測所(KP164)で観測された、平成 13 年から平成 18 年までの時刻流量のうち流砂が連続的に移動する 400m³/s 以上の流量を対象とした。

3.5 その他計算条件

助走区間は上下流に3kmずつ設定し、助走区間下流端において等流起算とする。また、研究区間の上流区間(河口から164km~166km)は露岩しておらず、砂礫層厚は10m以上あり、近年変動は少ないため、助走区間上流端において動的平衡状態を仮定する。

4. 検証結果

図-7a)b)は、観測結果と計算結果のトータルの河床変動高の比較である。ここで、観測結果は平成 13 年横断測量結果と平成 18 年横断測量結果の差である。観測結果によると、河床は流下方向に筋状に低下し、細い滞筋が形成されている。計算結果においても、滞筋が形成され、その侵食深も概ね一致している。このことから、本モデルによって、岩床侵食に伴う滞筋形成を再現可能なことが確認された。

図-7c)に、被覆率の計算結果を示す、これによると、みお筋に沿って被覆率の低い箇所が連続している。このように、岩床が露出しやすい区間とその割合を予測できる点が、本研究モデルのメリットである。

5. 考察

5.1 被覆率と岩床侵食

被覆率 P_c を考慮したことにより、砂礫の移動限界 τ_{*c} [(20)式]、飽和流砂量 q_{bc} [(11) (12)式]、流砂量 q_b [(10)式]、侵食速度 E [(16)式]も、格子における砂礫体積 (すなわち、 $v_b + (1-\lambda)\eta_a$) によって変化する。図-8 は、無次元掃流力を一定とした場合の、砂礫体積に対する被覆率、移動限界、流砂量、侵食速度を示している。

格子における砂礫体積が掃流層の飽和体積 V_{bc} を超えるまで、被覆率 P_c はゼロ(完全な岩床)である。このため、移動限界 τ_{*c} は岩床上の移動限界 τ_{*cb} となり、飽

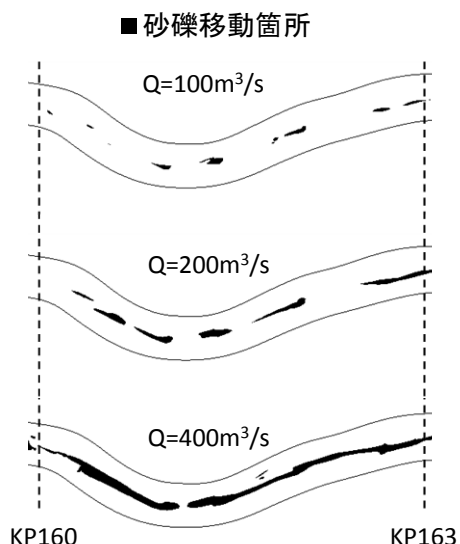


図-6 流量毎の砂礫移動箇所

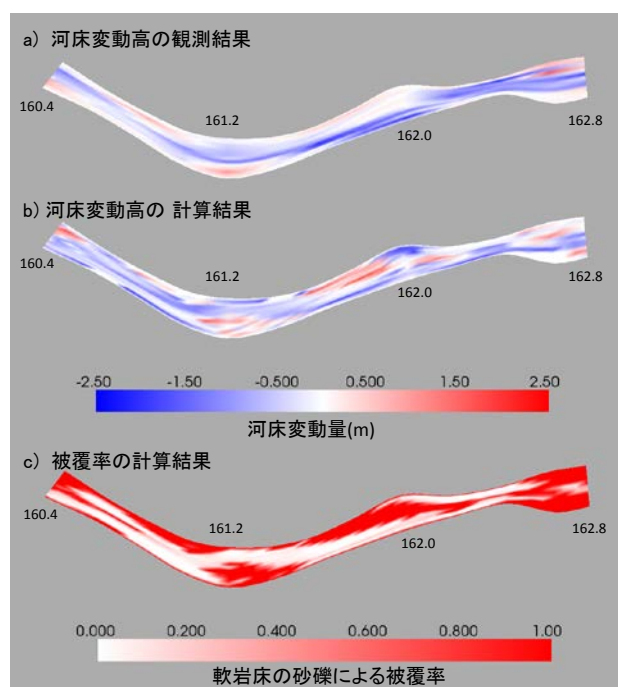


図-7 観測結果と計算結果の比較(低水路のみ表示)

和流砂量も岩床上の飽和流砂量 q_{bc} [(11) (12)式の τ_{*c} に τ_{*cb} を代入した場合の値]となる。流砂量 q_b は(10)式に示したように、掃流層の砂礫体積 V_b の増加に伴い線形的に増加し、 V_b が V_{bc} に至ると岩床の飽和流砂量 q_{bc} と等しくなる。侵食速度 E は $q_b(1-P_c)$ に比例するため、格子における砂礫体積が V_{bc} に至るまで、線形的に増加する。

格子における砂礫体積が掃流層の飽和体積 V_{bc} を超えると、軟岩床上に砂礫が堆積し、軟岩床と砂礫床の混在河床となる。このとき、掃流層の砂礫体積 V_b は常に V_{bc} に保たれ、被覆率 P_c は砂礫層厚 η_a の増加に伴い

線形的に増加する。被覆率の変化に伴い、移動限界 τ_{*c} は軟岩床上の移動限界 τ_{*cb} から砂礫床上の移動限界 τ_{*ca} に線形的に変化する[(20)式]。この結果、飽和流砂量 q_{bc} も軟岩床上の飽和流砂量 q_{bcb} から砂礫床上の飽和流砂量 q_{bca} に変化する。(10)式より $V_b = V_{bc}$ の場合 $q_b = q_{bc}$ のため、流砂量 q_b も飽和流砂量 q_{bc} と同じ変化をする。流砂量の減少と被覆率の増加に伴い、侵食速度 E は減少し、格子における砂礫体積が $(1-\lambda)L$ に至る(つまり $\eta_a = L$)とゼロになる。

格子における砂礫体積が $(1-\lambda)L$ を超えると、軟岩床は完全に砂礫によって被覆される。このとき、移動限界 τ_{*c} は砂礫床上の移動限界 τ_{*ca} 、流砂量 q_b は砂礫床上の飽和流砂量 q_{bca} 、侵食速度 E はゼロとなり、通常の砂礫床の河床変動計算が行われる。

図-8のように被覆率によって、岩床の侵食速度がピークを持つ形で変化することは、Sklar and Dietrich¹⁾の実験によって明らかにされている(図-9)。しかし、既往の岩床侵食を考慮した平面2次元モデル^{26,27)}は、被覆率の概念が含まれていない。本研究の数値計算モデルは、岩床侵食に対する砂礫被覆の影響を含んでいる点に新規性を有する。

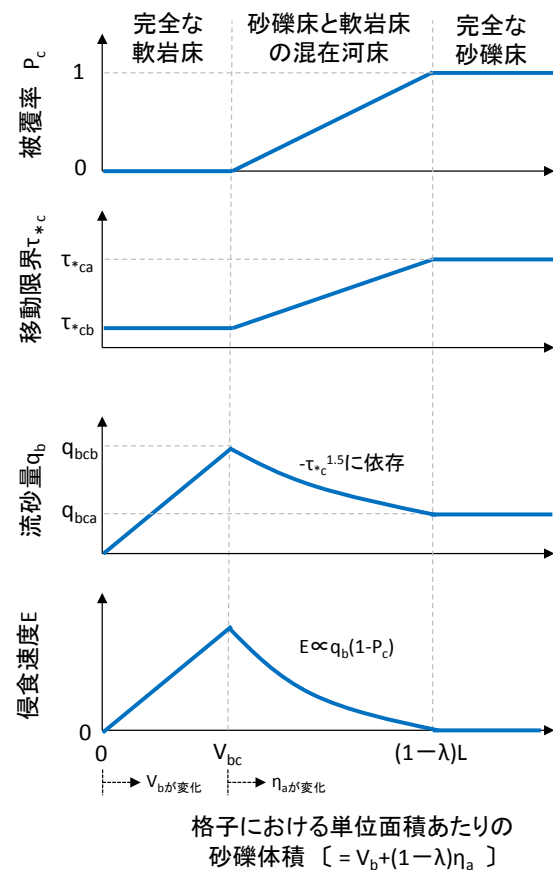


図-8 格子における砂礫量に対する被覆率、移動限界、流砂量、侵食速度の概念図 (τ_{*} 一定の場合)

5.2 本モデルの汎用性と適用限界

これまで、Chatanantavet and Parker²⁾の岩床侵食式[(16)式]では、摩耗係数 β を感度分析的に求めるしか無かったが、本モデルでは、この摩耗係数 β を衝突する粒径と岩床強度の関数として与えている[(17)式]。この結果、本モデルは、粒径や岩床強度の異なる様々な岩床河川に適用可能となっている。ただし、[(17)式]の定数 β_c の値(0.007)は、石狩川の現地実験のみから得られた値であり、今後実験サンプル数を増やして信頼性向上を図る必要がある。

本モデルは、流砂の衝突に伴う岩床侵食のみを対象としており、流水のせん断力や、浮遊砂の衝突による岩床摩耗は考慮されていない。多くの場合、流水や浮遊砂による侵食は、掃流砂による侵食よりもかなり小さいが、岩質がとても弱い岩床河川では、流水や浮遊砂の作用を無視できない場合もあるので、注意が必要である。

また、節理の多い凝結溶解岩などで見られるプラグキング(節理に沿った岩床剥離)や、石灰などの岩で見られる水との化学的反応による溶食など、特殊な侵食現象が支配的な河川もある。さらに、岩盤の強度は、乾湿や凍結融解の繰り返しによって低下することが知られている。今後は、これらの風化・侵食現象も踏まえたモデル開発が求められる。

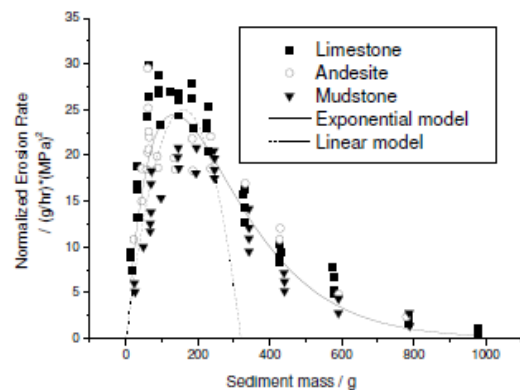


図-9 砂礫量に対する侵食速度の実験結果¹⁾ (Turowski²⁵⁾の論文より抜粋)

6. まとめ

本研究では、岩床侵食と砂礫被覆を考慮した河床変動計算モデルを構築し、石狩川上流の露岩区間を対象に、モデルの妥当性の検証を行った。この結果、岩床侵食に伴う溝筋形成と露岩箇所を精度良く再現可能な

ことが確認された。

本モデルは、粒径や岩床強度の異なる様々な岩床河川に適用できる高い汎用性も有しており、既に石狩川と無加川の露岩区間の将来予測と対策検討に用いられた実績があり、岩床河川の維持管理を検討する上で、有用性の高いツールと考えられる。

参考文献

- 1) Sklar, L. S., and Dietrich, W. E. : A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, *Water Resour. Res.*, 40, W06301, 2004.
- 2) Chatanantavet, P., and Parker, G. : Physically based modeling of bedrock incision by abrasion, plucking, and macroabrasion, *J. Geophys. Res.*, 114, F04018, 2009.
- 3) Johnson, J. P. L., and Whipple, K. X. : Evaluating the controls of shear stress, sediment supply, alluvial cover, and channel morphology on experimental bedrock incision rate, *J. Geophys. Res.*, 115, F02018, 2010.
- 4) 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, pp.77-82, 2011.
- 5) Shimizu, Y. and Itakura, T. : Calculation of bed variation in alluvial channels, *J. Hydraul. Eng.*, 115, 367-384, 1989.
- 6) Luu, L. X., Egashira, S., and Takebayashi, H. : Investigation of Tan Chau reach in lower Mekong using field data and numerical simulation, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol.48, 1057-1062, 2004.
- 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, 59-69, 1972.
- 8) Meyer-Peter, E. and Müller, R. : Formulas for bed-load transport, *Proc. 2nd Congress IAHR, Stockholm, Sweden*, 1948.
- 9) Fernandez Luque, R., and van Beek, R. : Erosion and transport of bed-load sediment, *J. Hydraul. Res.*, 14, 127-144, 1976.
- 10) Wong, M. and Parker G. : Re-analysis and correction of bedload relation of Meyer Peter and Müller using their own database. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 132, pp. 1159-1168, 2006.
- 11) Hasegawa, K. : Universal bank erosion coefficient for meandering rivers, *J. Hydraul. Eng.*, 115(6), 744-765, 1989.
- 12) Mosselman, E., and Crosato, A.: Discussion of “Universal Bank Erosion Coefficient for Meandering Rivers” by Kazuyoshi Hasegawa (June, 1989, Vol. 115, No. 6), *J. Hydraul. Eng.*, 117(7), 942-943, 1991.
- 13) Englund, F.: Flow and Bed Topography in Cannel Bends, *Jour. of Hydraulic Div., ASCE*, Vol.100, HY11, 1631-1648, 1974.
- 14) Egashira, S., and Ashida, K. : “Unified View of the Mechanics of Debris Flow and Bed Load,” *Advances in Micromechanics of Granular Materials* (Shen H. H. et al. Eds), Elsevier, 391-400, 1992.
- 15) 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, I_1039-I_1044, 2013.
- 16) 軟岩河川の侵食特性調査マニュアル(案), 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム, 2013.
- 17) Parker, G, Fernández, R., Viparelli, E., Stark, C. P., Zhang, L., Fu, X., Inoue, T., Izumi, N., and Shimizu, Y.: Interaction between waves of alluviation and incision in mixed bedrock-slluvial rivers, *Advances in River Sediment Research, Proc. of 12th International Symposium on River Sedimentation, ISRS*, 615-622, 2013..
- 18) 田中岳, 泉典洋 : 部分的に覆礫した岩盤河床における掃流砂量と流れの抵抗則, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol. 69, No. 4, I_1033-I_1038, 2013.
- 19) Kamphuis, J. W.: Determination of sand roughness for fixed beds, *J. Hydraul. Res.*, 12, 193-203, 1974.
- 20) Chatanantavet, P. and Parker, G: Physically based modeling of bedrock incision by abrasion, plucking, and macroabrasion, *J. Geophys. Res.*, 114, F04018, 2009.
- 21) Chatanantavet, P., Whipple, K. X., Adams, M., and Lamb, M. P.: Experimental study on coarse grain saltation dynamics in bedrock channels, *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 118, 2013.
- 22) Nelson, P. A., and Seminara, G: A theoretical framework for the morphodynamics of bedrock channels, *Geophys. Res. Lett.*, 2012.
- 23) 岩垣雄一 : 限界掃流力の流体力学的研究, *土木学会論文集*, 第 41 号, 1-21, 1956.
- 24) 井上卓也, 伊藤丹 : 軟岩河床における粗度, 無次元限界掃流力と飽和流砂量の関係, 第 68 回土木学会年次講演会報告集, II-072, 2013.
- 25) Turowski, J. M. : Stochastic modeling of the cover effect and bedrock erosion, *Water Resour. Res.*, 45, W03422, 2009.
- 26) 井上卓也, 渡邊康玄, 齋藤大作, 根本深, 松本勝治, 江崎國夫, 濱木道大 : 軟岩の洗掘を考慮した河床変動計算手法の開発, *河川技術論文集*, 第 15 巻, 321-326, 2009.
- 27) 及川森, 岩崎理樹, 山口里実, 清水康行, 井上卓也 : 河床における岩盤上の流砂の集中度合に関する実験的検討と数値シミュレーション, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.68, No.4, I_949-I_954, 2012.

STUDY CONCERNING PROCESS OF THE EROSION OF BEDROCK AND THE EFFECT OF RIVER STRUCTURERS

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : River Engineering Research Team

Author : ITO Akashi

INOUE Takuya

KAWAMURA Satomi

ABE Takaaki

KAZUMZTZ Mitsugu

Abstract : Many bedrock channels are composed partly of alluvium and partly of bare rock, and abrasion from the influence of bed load is known to be a ubiquitous and principal mechanism of fluvial bedrock incision. The results of recent investigations have suggested that the bedrock incision rate depends on sediment supply, grain size and rock strength. In this study, we developed a new numerical model for predicting temporal and spatial variations in bedrock channel morphology in consideration of these effects. Then we compared the data observed in the field with the results simulated by our models. The comparisons illustrate that our model can predict the bedrock erosional morphology and the areal fraction of bedrock exposure.

Keywords: bedrock, abrasion, numerical modeling