

軟岩河床における滯筋部の流砂移動を考慮した河床変動解析手法について

Numerical modeling of bedrock erosion by saltating grains in a bedrock inner-channel

水工事業本部 水工第1部 清家 拓哉
水工事業本部 水工第1部 濱木 道大

近年、河床低下の進行により河床砂礫が流出し、低固結の基盤岩(軟岩)が露出する河川が増加している。その河川の多くは、砂礫層と軟岩層により河床が構成されていることから、河床変動を再現するためには、砂礫床の変動と軟岩床の侵食の両方を考慮する必要がある。

本論文は、軟岩床形状の時間的、空間的な変化を精度よく再現するために、滯筋部の局所的な軟岩侵食現象に着目し、軟岩侵食に対する流砂移動形態の影響および軟岩強度の影響を考慮した河床変動解析手法について記述するものである。

1 はじめに

石狩川上流部の旭川市街地を貫流する区間(KP157~KP166)では、写真1.1のように河床に軟岩層が露出する区間が拡大しており、橋脚の根入れ不足、既設護岸の安定性低下、魚類生息産卵環境の劣化を引き起こす主要因となっている。

上記の区間では、平成20年と平成21年に現地実験が行われており、この結果を基に、軟岩侵食メカニズムに関する様々な研究が行われている。各研究成果によると、軟岩の侵食は主に流砂の衝突頻度に依存すること¹⁾、侵食速度は流砂量に比例すること²⁾、衝突粒径が大きいほど侵食速度も大きくなること³⁾、侵食速度は岩盤強度の-2乗に依存すること⁴⁾などが明らかにされている。

軟岩床の侵食現象は、砂礫床の変動現象と大きく異なるため、砂礫床を対象とした一般的な河床変動解析では、軟岩床の形状変化を予測することは出来ない。なお、既往研究²⁾では、軟岩侵食を考慮することにより、石狩川の露岩区間における再現性が向上したことが報告されている。

ただし、既往研究²⁾では、衝突する粒径や軟岩強度の違いによる侵食速度の変化を考慮可能なモデルを構築するまでには至っていない。

また、既往研究²⁾は、対象区間の無次元掃流力の断面平均値が砂礫の移動限界を上回る $500\text{m}^3/\text{s}$ 以上の流量を再現計算の対象としているが、石狩川の露岩区間は、軟岩侵食によって滯筋が発達していることから、滯筋部に流れが集中すると、



写真 1.1 現地の状況 (KP162 付近)

$500\text{m}^3/\text{s}$ 以下の流量時においても局所的に流砂が移動する可能性が高い。

本研究では、滯筋部の軟岩侵食形状の再現性向上を目的に、滯筋部の流砂移動を考慮した流量設定方法の検討と、既往研究²⁾に含まれていない軟岩侵食現象のモデル化を行った。

2 軟岩強度調査(針貫入試験)

既往研究²⁾で用いられている侵食速度式の係数は、現地実験水路に露出した軟岩の強度に依存している。しかし、石狩川本川では、岩種や風化度合により、平面的に軟岩強度がバラつきを持っている可能性があると考えられる。このため、現地に露岩している軟岩を対象に、軟岩ペネトロ計を用いた強度計測を行った。



写真 2.1 針貫入試験の実施状況

表 2.1 軟岩強度試験結果

計測箇所	岩種	針貫入勾配 (N/m)		換算一軸 圧縮強度		物性値 $\sigma^2_{n_0}$
		範囲	平均値	範囲	平均値	
実験水路 河口から 160.2m地点	シルト岩	1.5~2.7	2.2	0.6~1.1	1.0	285.6
	砂岩	1.5	1.5	0.6	0.6	836.6
本川 河口から 160km-163km地点	シルト岩	1.2~4.3	2.7	0.5~1.8	1.1	175.6
	砂岩	1.2~5.5	3.2	0.5~2.2	1.3	107.8

(1)計測箇所

露岩が顕著である区間(KP160~KP163)について、約 1km 毎の左右岸に調査箇所を設定した。計測地点は、調査箇所 1 箇所につき、岩種や冠水頻度を考慮して 4 地点設定した。

(2)計測方法

軟岩の表層をロックハンマー等で 10cm 程度剥離し、10cm 四方程度新鮮部を露出させ、軟岩ペネトロ計を用いて計測地点毎に 3 回貫入量を計測し(写真 2.1)、3 回の平均値をその地点の貫入量とした。

なお、新鮮部の判定は、軟岩の色や状態によって目視で判断した(当該区間の軟岩は、風化により緑灰色から褐色に変化している)。

(3)計測結果

表 2.1 に試験結果より得られた換算一軸圧縮強度を示す。調査の結果、本川の露岩区間に分布する軟岩は、シルト岩が最も多いことを確認した。また、軟岩強度は、試験地点毎に多少のバラつきがあり、平面的に強度の高い岩層と低い岩層が混在しているものの、現地計測区間の平均的な強度は、実験水路よりも高いことを確認した。

3 既往モデルの修正

(1) 既往モデル

井上ら²⁾は、石狩川露岩区間において平成 20 年

に実施された現地実験結果を基に、岩盤侵食を考慮した平面 2 次元河床変動モデルを構築している。モデルの概要を以下に示す。

流れの基礎方程式は、平面 2 次元の Reynolds 方程式および連続式である⁵⁾。砂礫層厚の変化は、粒径別の流砂連続式と粒度分布の連続式を用いて算出される⁶⁾。流下方向の掃流砂量 q_{bsk} は、芦田・道上の式⁷⁾より算定され、横断方向の掃流砂量 q_{bnk} は、長谷川の式⁸⁾より算定される。粒径別の無次元限界掃流力は、岩垣の式⁹⁾を用いて求められる。

井上ら²⁾は、岩盤の侵食は跳躍する砂礫粒子の衝突によって生じ、その侵食速度は衝突する砂礫粒子の運動量に比例すると仮定し、以下の(1)式を導いている。

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial t} = -D = -\sum \beta \cdot q_{bk} \cdot V \cdot (1 - P_c) \quad (1)$$

ここで、 η_b は岩盤層の高さ、 t は時間、 D は軟岩侵食速度、 β は比例係数、 V は流速の絶対値、 q_{bk} は第 k クラスの粒径に対する単位幅掃流砂量の絶対値、 P_c は砂礫層の有無である。

$$P_c = \begin{cases} 0 & \text{for } \eta_a \leq a \\ 1 & \text{for } \eta_a > a \end{cases} \quad (2)$$

なお、井上ら²⁾は交換層厚 a を最大粒径程度と仮定している。また、石狩川の岩盤床の無次元限界掃流力は、砂礫床上のそれより小さいことが確認されているため³⁾、 P_c が 0 の場合(露岩状態)、無次元限界掃流力は、通常の 60%としている。

砂礫層厚の変動と岩盤層高の変動を合算したものが、河床高の変動となる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \eta_s}{\partial t} + \frac{\partial \eta_b}{\partial t} \quad (3)$$

ここで、 η は河床高、 η_s は砂礫層の高さである。

(2) 粒径の影響を考慮した侵食速度式

平成 21 年に、給砂する粒径の違いによる軟岩侵食量の違いを把握する目的で、給砂粒径が異なる 9 ケースの追加実験が行われている。この結果、軟岩の侵食速度は、給砂砂礫の単位幅流砂量 q_b と平均流速 V の積に比例するが、粒径毎に比例係数 β が異なることが確認された³⁾。

図 3.1 に、平成 21 年の実験結果³⁾を基にした比例定数 β と粒径 d_k の関係について示す。これにより、比例定数 β は粒径 d_k の 0.4 乗に依存することが確認された(図 3.1 黒線)。

また、軟岩侵食は流砂の衝突によって生じることから、流砂が浮遊する場合、軟岩への衝突頻度が減り、侵食速度は減少すると考えられる。このため、

本研究モデルでは、掃流・浮遊の判定を行い、浮遊が卓越すると判定された小粒径については、軟岩侵食に寄与しないものと仮定した。

したがって、既往モデルの式(1)は、粒径の影響と浮遊の影響を考慮した以下の式に置き換えられる。

$$\frac{\partial \eta_b}{\partial t} = -D = - \sum_{k=k_b}^{k_{max}} \beta \cdot q_{bk} \cdot V \cdot (1 - P_c) \quad (4)$$

$$\beta = 0.0016d_k^{0.4} \quad (5)$$

ここで、 k_b は浮遊しない最小粒径のクラス、 k_{max} は最大粒径のクラスである。

(3) 軟岩強度を考慮した侵食速度式

比例係数 β は、衝突する砂礫の粒径だけではなく、衝突される軟岩の物性値によっても変化する。既往研究⁴⁾によると、比例係数 β と軟岩の物性値は式(6)のような関係にある。

$$\beta \propto \sigma^{-2} n_e \quad (6)$$

ここで、 σ は一軸圧縮強度(MN/m²=MPa)、 n_e は有効空隙率(%)である。また、物性値 $\sigma^{-2} n_e$ は、軟岩ペネトロ計の針貫入勾配 x (N/mm)を用いて、(7)式で近似される⁴⁾。

$$\sigma^{-2} n_e = 2500x^{-2.7} \quad (7)$$

本研究で計測した本川および実験水路の針貫入勾配 x を用いて、物性値 $\sigma^{-2} n_e$ を推定した結果を表2.1に示す。本川の露岩区間および実験水路で最も多く分布しているシルト岩の物性値 $\sigma^{-2} n_e$ をみると、本川露岩区間の露岩区間の物性値は、実験水路と比べ、60%程度小さい結果となった。

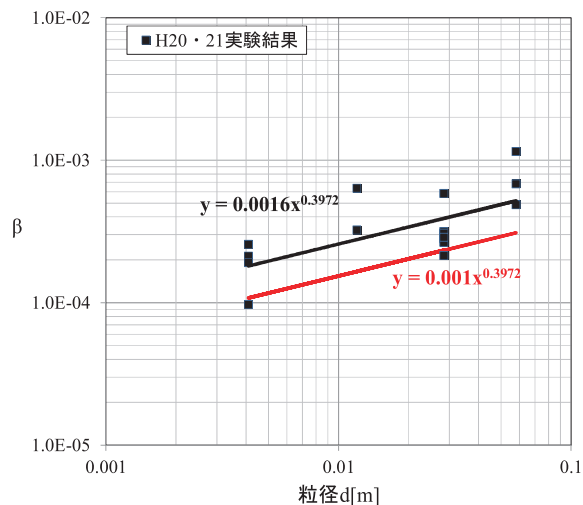


図 3.1 比例定数 β と粒径 d の関係

このため、本川と実験水路の軟岩強度の違いを考慮し、(5)式の β を 60%とした(図 3.1 赤線)。

$$\beta = 0.0010d_k^{0.4} \quad (8)$$

4 平面 2 次元河床変動計算による再現検証

粒径の影響と軟岩強度を考慮した侵食速度式の妥当性を検証するために、露岩が顕著である区間(KP160~KP163)を対象に平成 13 年から平成 18 年までの期間について再現計算を行った。

なお、本研究では、井上らの研究²⁾で用いられていた 500m³/s 以上の流量を再現対象とする設定について再検討を行い、流砂移動が縦断方向に連続的となる 300m³/s 以上の流量を再現対象とした。

(1) 計算条件

計算流量は、永山観測所における平成 13 年から平成 18 年までの実績時刻流量とし、初期河床形状と樹木群は、平成 13 年調査時のデータを用いた。河床材料は混合粒径として与え、平成 8 年度河床材料調査結果を基に設定した。マンニングの粗度係数は低水路で 0.031、高水敷で 0.045 とした。上下流条件は、下流端において等流起算とし、上流端において動的平衡状態を仮定し、流入土砂量を与えた。

(2) 計算ケース

計算ケースは 2 ケースを設定し、Case1 は、粒径の影響および軟岩強度の影響を考慮しておらず、井上²⁾の既往モデル(式(1)を利用)と概ね同じとした。Case2 は、粒径と軟岩強度の影響を考慮した修正モデル(式(4)と式(8)を利用)とした。

(3) 計算結果

計算結果について、図 4.1 に最深河床高縦断図を、図 4.2 に平均河床高縦断図を、図 4.3、図 4.4 に横断図を示す。

最深河床高縦断図を見ると、Case1 は、測量値に比べて軟岩侵食量が過大な結果となった。一方、Case2 は、流砂に含まれる粒径の変化および本川露岩区間と実験水路との軟岩強度の差を考慮したことで、Case1 に比べて再現性が向上し、測量値に近い結果となった。また、平均河床高縦断図を見ても、Case2 の方が KP161 付近より下流の再現性が向上する結果となった。

さらに、横断図を見ると、Case2 は、図 4.3 において局所侵食位置および侵食深を良好に再現できており、図 4.4 においては、局所侵食位置が若干ずれるものの、侵食深は概ね一致する結果となった。

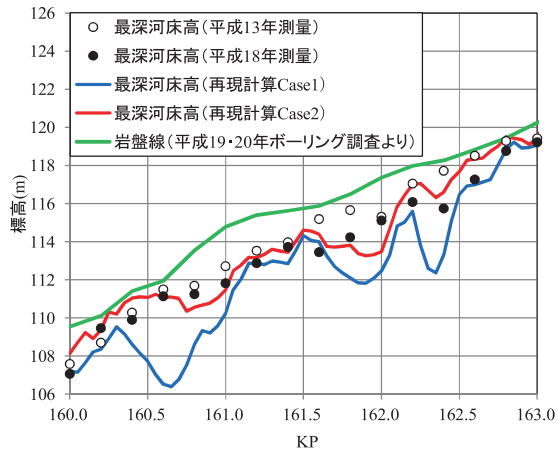


図 4.1 計算結果 最深河床高縦断面図

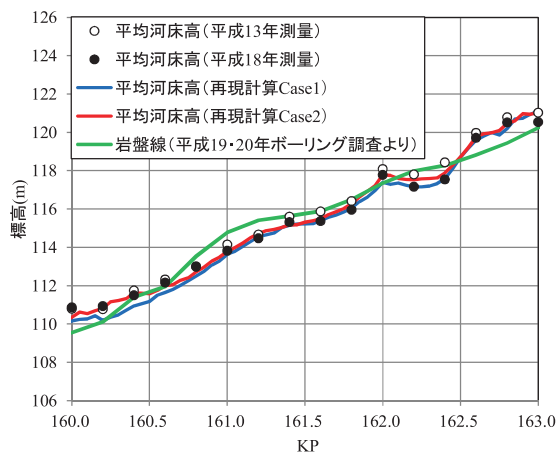


図 4.2 計算結果 平均河床高縦断面図

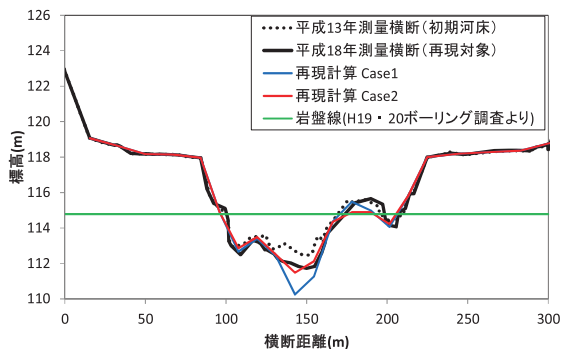


図 4.3 計算結果 横断面図 (KP161.0)

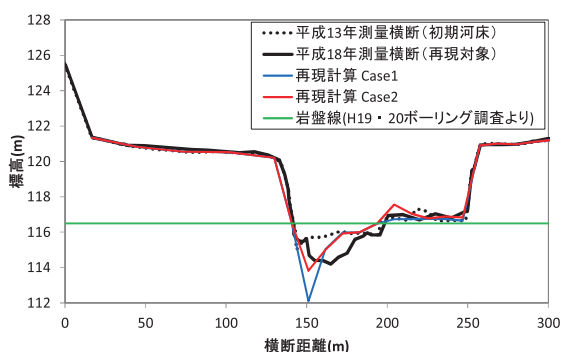


図 4.4 計算結果 横断面図 (KP161.8)

5 おわりに

本研究では、流量設定の見直し、粒径の違いによる侵食速度の変化、本川露岩区間と実験水路との軟岩強度の差を考慮した侵食速度式を導入したことで、滞筋部の侵食形状をより精度よく再現することが可能となった。

このことから、軟岩侵食地形を予測するためには、①滞筋部の流砂移動を踏まえた流量設定、②粒径の違いによる侵食速度の変化および浮遊限界を踏まえた侵食に寄与する粒径の考慮、③対象河川の軟岩強度分布の調査に基づく、侵食速度式の係数設定が重要であることが明らかになった。

近年、北海道では、河床砂礫の流出に伴う軟岩の露出によって著しい河床低下が生じる河川が増加している。今後は、本検討で構築した石狩川上流モデルの他河川への適応性、予測精度のさらなる向上について検討を進め、全道の軟岩河川を対象とした河床低下対策の検討に役立てていきたいと考えている。

[参考文献]

- 1) 清家拓哉, 渡邊康玄, 井上卓也: 軟岩河床における洗掘機構に関する実験的検討, 河川技術論文集, 第 16 巻, 137-143, 2010.
- 2) 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.
- 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, 77-82, 2011.
- 4) 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
- 5) Shimizu, Y. and Itakura, T. : Calculation of bed variation in alluvial channels, J. Hydraul. Eng., 115, 367-384, 1989.
- 6) 芦田和男, 江頭進治, Liu, B. : 蛇行流路における流砂の分級および河床変動に関する数値解析, 水工学論文集, 第 35 巻, 383-390, 1991.
- 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) Hasegawa, K. : Universal bank erosion coefficient for meandering rivers, J. Hydraul. Eng., 115(6), 744-765, 1989.
- 9) 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.