

大型模型実験による岩盤床を含む 河床低下対策に関する一考察

A STUDY ON THE RIVERBED LOWERING MEASURES
, INCLUDING THE BEDROCK FLOOR USING A LARGE MODEL EXPERIMENT

牛山 智夫¹・旭 一岳²・米元 光明³・井上 卓也⁴

Tomoo USHIYAMA, Kazutake ASAHI, Mitsuki YONEMOTO and Takuya INOUE

¹正会員 株式会社 水工リサーチ (〒062-0933 北海道札幌市豊平区平岸3条3丁目2番7号)

²正会員 工修 一般財団法人 北海道河川財団 (〒060-0807 北海道札幌市北区北7条西4丁目5-1)

³正会員 国土交通省 北海道開発局 旭川開発建設部 (〒078-8513 北海道旭川市宮前通東4155番31)

⁴正会員 工博 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

In the Ishikari River, riverbed degradation has been caused by bedrock erosion. Local bedrock erosion leads to insufficient embedded depth of bridge piers and the damage of revetments. Bedrock that is completely covered by alluvium cannot undergo erosion. So, we are planning to be covered the bedrock by gravel in order to suppress the riverbed degradation in the Ishikari River. However, gravel bars formed on the alluvial bed often cause partial bedrock exposure. The purpose of this work is to understand the mechanisms underlying the bedrock re-exposure by a large-scale flume experiment. The results suggest that; 1) bedrock of river banks neighborhood is re-exposed continuously in the longitudinal direction; 2) gravel bars are formed, and the bar height affects partial bedrock exposure; 3) in the straight channel zone, bedload moves over the exposed bedrock patches; 4) in the meandering zone, secondary flow prevents the intrusion of bedload into the exposed bedrock patches.

Key Words : riverbed degradation, bedrock erosion, alluvial cover, bedrock exposure, a large-scale flume experiment

1. はじめに

旭川市を貫流する石狩川KP157～KP166区間では、岩盤侵食を伴う河床低下が進行し、既設護岸の機能喪失や橋脚の安定性低下が懸念されている。当該区間の岩盤は流砂の衝突によって侵食されやすいため¹⁾、岩盤床の侵食抑制を目的とした覆礫と、掃流力低下を目的とした低水路拡幅が計画されている。

既往の実験的研究によると、流砂の衝突による岩盤侵食速度は、流砂量に比例し¹⁾、砂礫被覆の増加にともない減少する²⁾。また、砂礫被覆の面積は、給砂量の減少に伴い線形的に増加する傾向にあるが³⁾⁴⁾、岩盤床上に交互砂州や固定砂州が形成される場合は、その水理特性や土砂移動特性に応じて、現象がより複雑化することが知られている³⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

当該区間においても、岩盤床上に交互砂州や固定砂州が形成されており、岩盤床を砂礫で覆った際の対策効果



図-1 石狩川における岩盤侵食 (KP161.5km付近)

や、対策実施後に生じる現象の予測が難しい状況にある。

そこで、本研究では、岩盤床を砂礫で被覆した際の再露出現象と水理特性の関係を明らかにするために、当該区間の1/50の大型水理模型を用いた実験を行い、その結果の考察を行った。

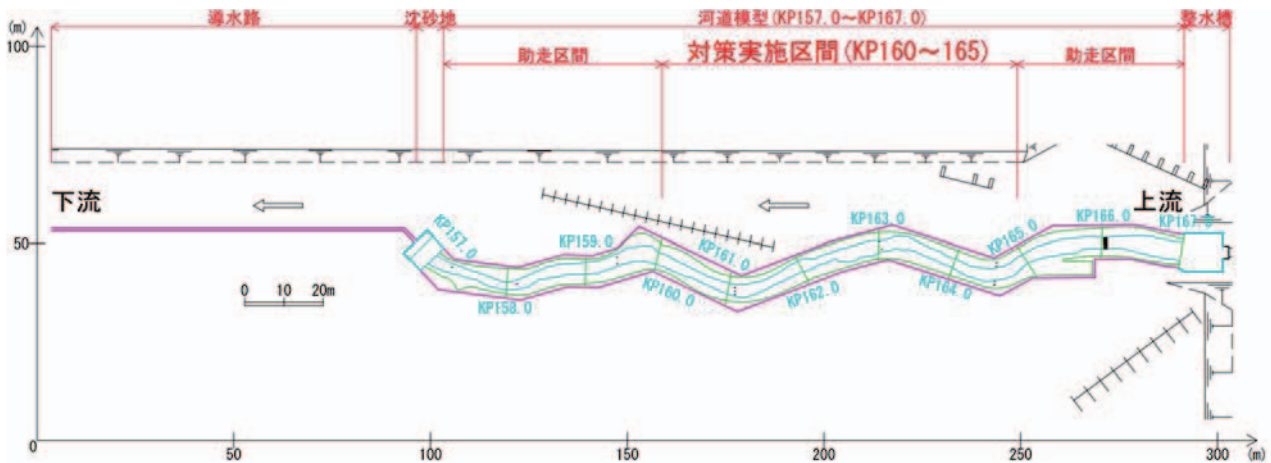


図-2 実験模型平面図

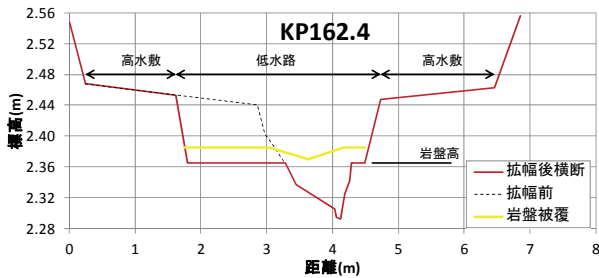


図-3 初期横断形

2. 大型水理模型実験

本研究で用いられた実験水路は、当該区間の縮尺1/50の大型模型である(図-2)。これまでに、1ケースの現況再現実験と4ケースの対策効果予測実験を行っている。本稿では、対策効果予測実験の中の「低水路拡幅+岩盤被覆2cm(現地縮尺:1m)」のケースについて記述する。

(1) 河床低下対策案

現在検討されている河床低下対策は、低水路拡幅と覆礫である(図-3)。

低水路拡幅は、掃流力を低下させ砂礫の流出を抑制することを目的としている。拡幅後の低水路幅は、平均年最大流量下における無次元掃流力を河床低下区間(KP160~165)の上下流区間と同程度とするために必要な約3.2m(現地縮尺:160m)である。

覆礫は、露岩箇所を減少させ岩盤侵食を防ぐことを目的としている。覆礫厚は、低水路拡幅および砂州掘削により発生する砂礫量を最大限利用し、且つ現況平均河床高程度とするために必要な約2cm(現地縮尺:1m)である。

(2) 実験条件

図-3に初期横断形を示す。図中の破線は現況河道(平成23年測量)、図中の黒線で示した高さは縦断的なボーリング調査より判明した岩盤層の高さ、赤線は拡幅後河道、黄色線が覆礫後河道(実験の初期河道)である。

拡幅後横断は、岩盤層より高い砂礫層部を掘削した後

表-1 実験条件

条件	値	備考
流量Q (ℓ/s)	35.6	平均年最大流量
平均河床勾配I	1/299	平成23年9月洪水後
河床材料粒径d (mm)	1.18	60%粒径
無次元掃流力 τ_*	0.046	KP165.05~KP167平均
単位時間給砂量 (ℓ/10分)	3.5	芦田・道上式
マンニングの粗度係数n	0.0151	
通水時間 (hr)	30	

の形状であるため、拡幅後の低水路部は岩盤床である。当該区間と同じ侵食速度の岩盤床を作成することは困難なため、本実験では岩盤床をモルタル性の固定床とした。また、高水敷も芝やアスファルトが張られており、殆ど河床変動しないため固定床とした。したがって、赤線で示した拡幅後横断は全て固定床である。

覆礫後横断は、覆礫厚が2cm以上となるように設定した。小流量時の水深を確保するために、現況滞筋部がV字になるように被覆している。また、低水路拡幅および砂州掘削により発生する土量と覆礫土量が概ね等しくなるように設定されているため、現況河道の平均河床高と覆礫後の平均河床高は概ね等しい。

河床材料は、平成8年および平成23年の河床材料調査結果を基に実験区間であるKP160.0~165.0区間の平均的な粒径分布の1/50に縮尺し与えた。

実験流量は、旭橋水位流量観測所の過去30年間(昭和53年から平成19年)の平均年最大流量 $Q=35.6\ell/s$ (現地縮尺:630m³/s)を定常流で与えた。

上流端給砂量は、芦田・道上の掃流砂量式⁸⁾より求めた飽和流砂量(平衡流砂量)を計量カップで計量し上流端(KP167.0)の固定床区間(延長2m)より人力で給砂した。

(3) 観測方法

通水前後の河床高変化を把握するため、KP159.0~KP165.0区間で縦断方向100m間隔、横断方向5mm間隔でレーザー砂面計((株)ジャコム製)を用いて測定した。

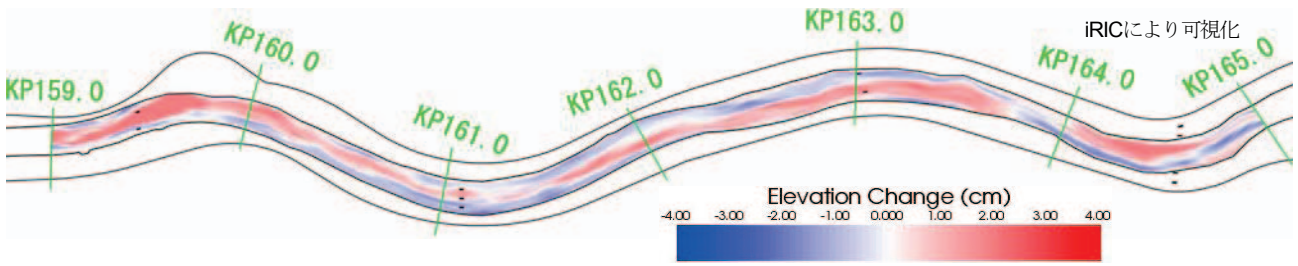


図-4 初期河床からの変化量コンター図

通水前後の露岩面積の変化を把握するため、KP159.0～KP165.0区間でトータルステーションを用いて露岩範囲の座標を測定した。

通水中の表面流況および河床の流砂状況を把握するため、ビデオ撮影を行った。

3. 実験結果

(1) 対策後の河床形態

図-4に示すように、実験通水後の河床は低水路中心部で堆積傾向、河岸際で低下傾向が見られる。形成された砂州の波長は最低16m、最大32m、平均28m程度、波高は最低3cm、最大8.4cm、平均6cm程度であった。通水中の水位および通水後の河床高から中規模河床形態の領域区分⁹⁾を整理すると、図-5に示すように単列砂州から複列砂州の領域に区分され、河床低下区間の上下流の礫床区間と同様の河床形態である。

(2) 河床高変化

図-6に示すように、初期河床からの河床変化高をみると平均河床高は変化量が小さく概ね安定傾向である。また、実験後の最深河床高は現況最深部までは低下しなかった。これらのことから、低水路拡幅によって覆礫土砂が維持され、河床低下を抑制できることが確認された。

(3) 岩盤露出

覆礫土砂は維持されるものの、砂州の発達により岩盤床(モルタル床)の露出する箇所が確認された。図-7、図-8に示すように覆礫厚が砂州波高より薄い河岸際が露出する傾向であった。通水から15時間程度までは、パッチ状であった露岩が、徐々に広がり縦断的に連続した。ただし、露岩面積は図-9に示すように対策前(現況河道)に比べ対策後(実験後)方が5割以上減少する結果となった。

(4) 露岩箇所の流砂有無

露岩箇所においては、図-10に示すように、流砂がある箇所、流砂がほとんどない箇所が確認された。そこで、露岩箇所における流砂の有無を分析した。流砂の有無は、通水中に2時間毎に撮影した流況ビデオから判読した。図-11に示すように、湾曲部外岸や初期被覆

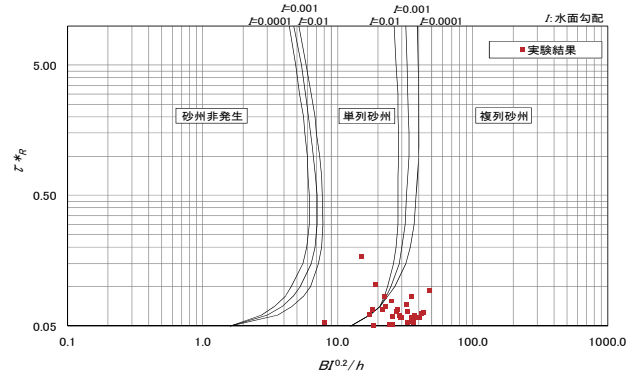


図-5 交互砂州の形成領域区分

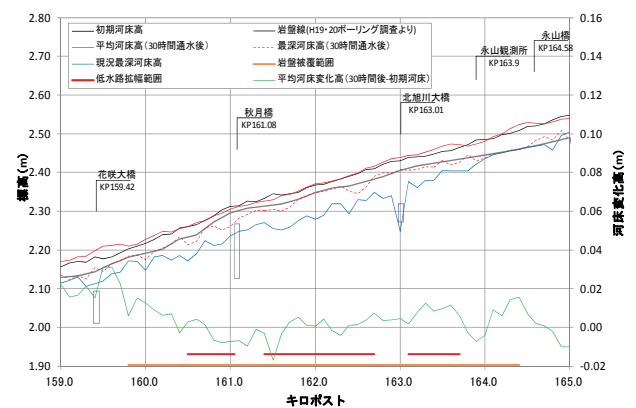


図-6 河床縦断面図



図-7 露岩状況 (KP162.0付近)

厚が薄い低水路拡幅箇所でも露岩している。露岩箇所でも流砂がある箇所は直線部に多く、流砂がほとんどない箇所は湾曲部外岸に多かった。実験中、露岩している湾曲部外岸で実験砂を散布してみると、河道内岸へ流れるのが確認された。

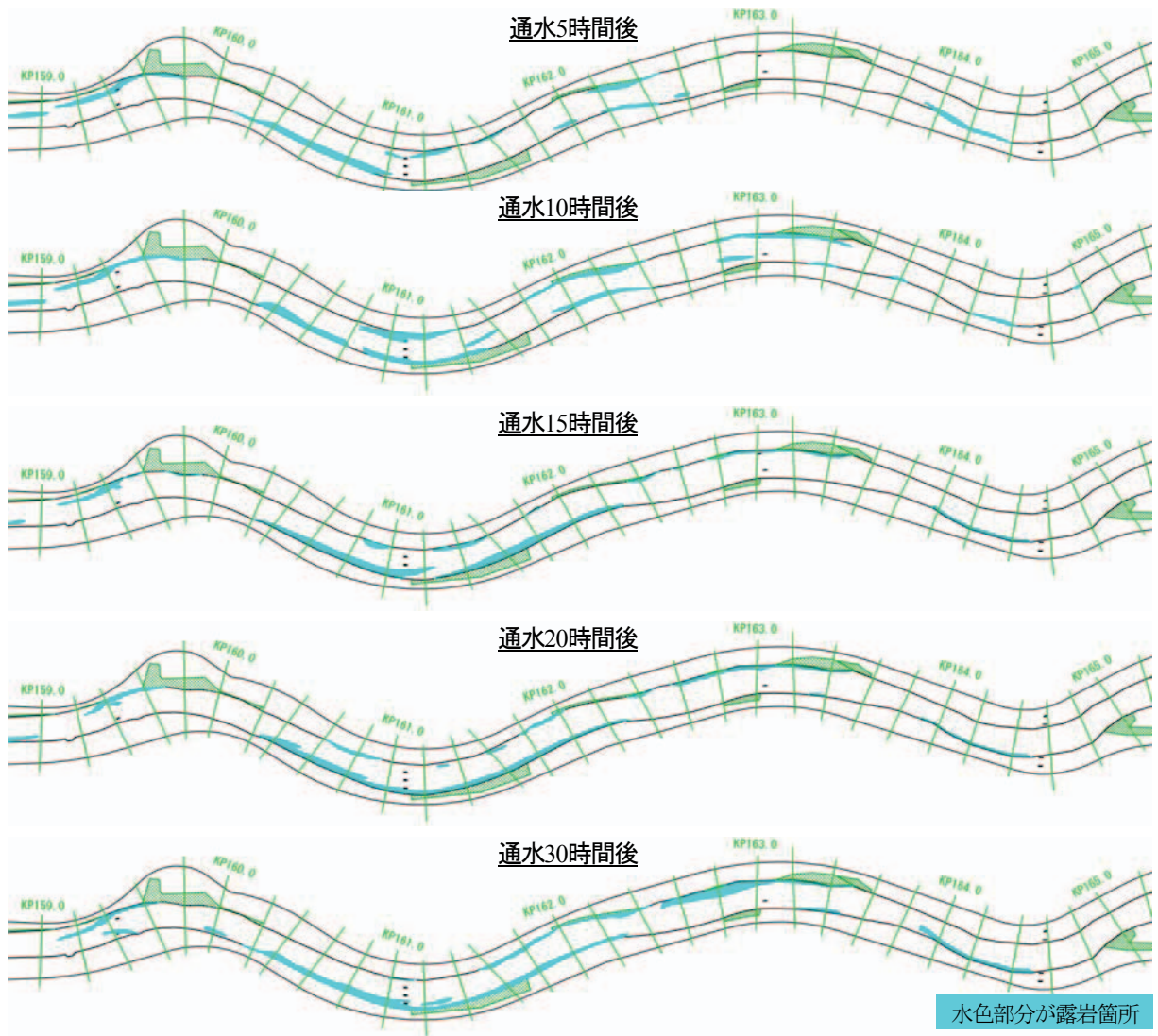


図-8 目視で確認した露岩状況時系列変化

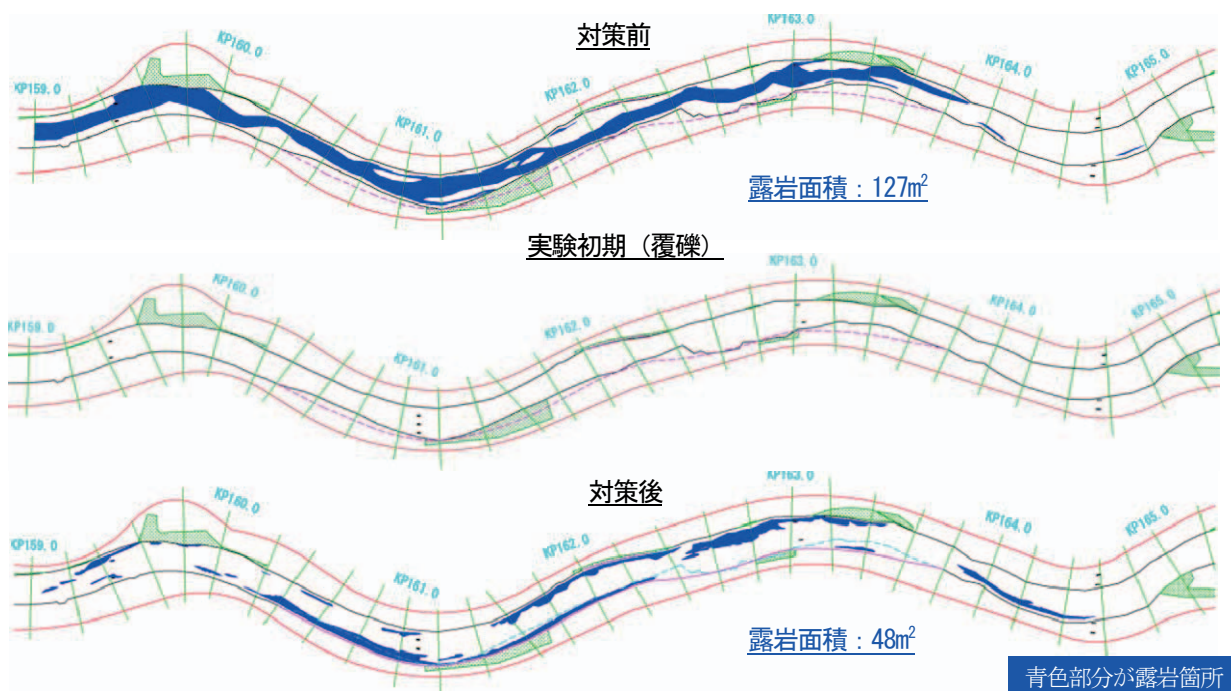
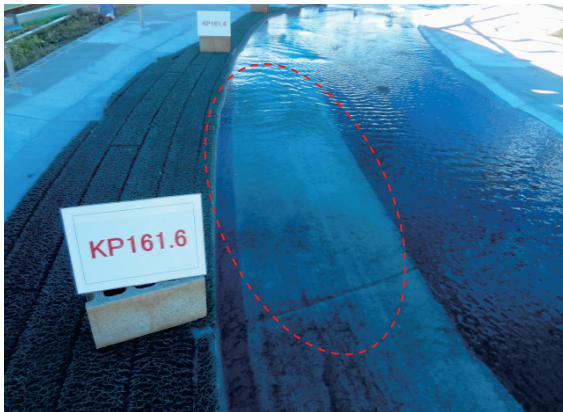


図-9 岩盤露出箇所平面図

直線部：流砂が縦断的に連なって流れている



湾曲部下流：ほとんど流砂が流れていない

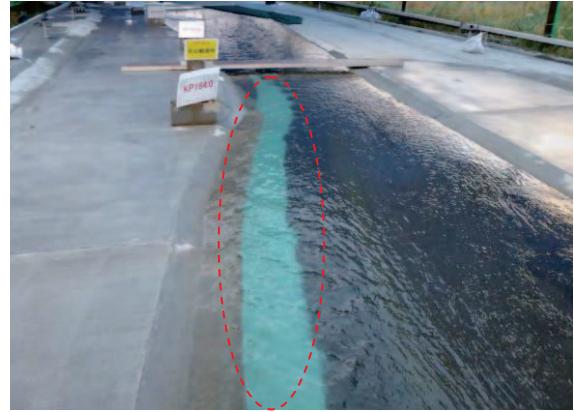


図-10 岩盤上の流砂の有無

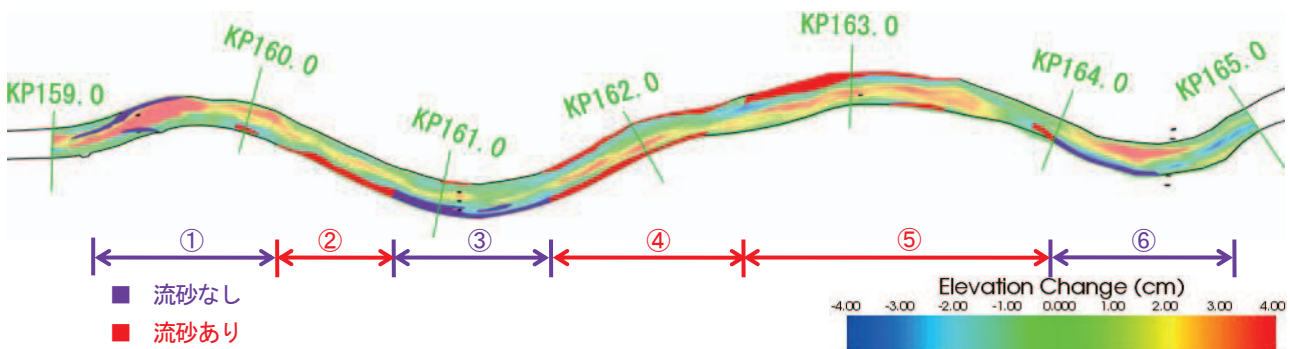


図-11 露岩箇所判定結果（通水30時間後）

4. 考察

(1) 岩盤床上に形成される自由砂州と露岩箇所

岩盤上に形成される自由砂州については、これまでにいくつかの研究が行われており、川幅水深比が大きく、給砂量が飽和流砂量(その河道が流しうる流砂量)に近く、河床勾配が緩い場合、岩盤上にも砂州が発生することが実験により確認されている³⁾(図-5)。また、給砂量と飽和流砂量の比が小さくなると、砂州の波長が長くなる⁹⁾ことが理論的研究⁹⁾および数値解析的研究⁶⁾によって指摘されている。

本実験の川幅水深比は29～156程度あり、黒木・岸の中規模河床形態の領域区分図⁹⁾によれば、交互砂州発生領域と複列砂州発生領域の間に位置する。このため、実験の初期段階(全面砂礫床状態)において、砂州が発生した。その後、砂州波高の発達に伴い、パッチ状の露岩箇所が覆礫厚の薄い左右岸に現れた。本実験では、飽和流砂量と等しい給砂量を上流端に与えていたため、実験開始前の定性的な予測では、砂州波長は伸びず、パッチ状の露岩箇所が、砂州の移動に伴い、下流に移動していくと考えていた。しかし、実際には時間の経過に伴い、砂州波長が延伸し、露岩パッチが繋がり、縦断的に連続した露岩箇所を形成した。

給砂量が飽和流砂量に等しいにも関わらず、露岩箇所

が縦断的に連続した要因として考えられるのは岩盤床と砂礫床の粗度の違いである。石狩川の露岩区間において、岩盤床の粗度は砂礫床の粗度より低い¹⁾ため、本研究で用いたモルタル床の粗度も砂礫床の粗度より低く設定していた。このため、露岩パッチが出来ると、水路の合成粗度は低下する。粗度が低下すると限界掃流力は低下し¹⁾、結果的に水路全体の飽和流砂量は増加する¹⁰⁾。上流端では砂礫床を想定した飽和流砂量を給砂量として与えていたため、露岩の増加に伴い飽和流砂量が増加すると、給砂量-飽和流砂量の比は低下し、結果的に長い波長の砂州が発達し露岩箇所が連続したと推測される。

石狩川のように、岩盤床の粗度が砂礫床の粗度より低い岩盤河川は多い。このような岩盤河川では、覆礫をしても、一度岩盤が露出すると、砂州波長が伸び、露岩面積が増大する可能性が高い。このような岩盤河川に覆礫を行う場合は、岩盤が露出しないように、砂州高以上の覆礫厚を確保することが重要と考えられる。

(2) 露岩箇所と流砂の有無

多くの岩盤河川において、岩盤床は主に流砂の衝突によって侵食される。Chatanantavet and Parker¹¹⁾によれば流砂の衝突による侵食速度は、以下の式で表される。

$$E = \beta q_b F_e \quad (1)$$

ここで、 E は侵食速度、 β は摩耗係数、 q_b は流砂量、 F_e は

表-2 露岩箇所(の)曲率半径 (低水路センター)

区間	判定	曲率半径m(現地縮尺)
①KPI59.2~160.1	流砂なし	16.2 (810)
②KPI160.1~160.8	流砂あり	109.6 (5,480)
③KPI160.8~161.5	流砂なし	16.6 (830)
④KPI161.5~162.5	流砂あり	34.6 (1,730)
⑤KPI162.5~164.0	流砂あり	48.6 (2,430)
⑥KPI164.0~164.8	流砂なし	16.4 (820)

露岩面積率(完全な露岩床の場合1, 完全な砂礫床の場合0)である。つまり、完全に露岩していても流砂がない箇所では、流砂による侵食は発生しないと考えられる。

図-11によると、露岩しており流砂がある箇所は、河道が直線に近い区間に多く、露岩しているが流砂が無い箇所は、河道が湾曲している区間の外岸に多い。図-11に示した赤パッチ区間と紫パッチ区間の河道の曲率半径を算出すると(表-2)、曲率半径が20m(現地縮尺:1000m)以下の露岩部には流砂があるが、曲率半径が20m(現地縮尺:1000m)以上の露岩部には流砂が無いことが確認された。

湾曲部外岸では、二次流の影響によって、河床近傍に外岸から内岸に向かう流れが生じる。通常の砂礫河床の場合、この流れによって、外岸の砂礫が内岸へ移動し、外岸側の深い掘れが形成される。岩盤床の場合、一度岩盤が露出すると、そこから流砂は生じない。また、上流から流れ込む砂礫は、外岸側の露岩区間に到達する前に内岸に寄せられる。これらの結果、湾曲部外岸に流砂の無い露岩区間が生じたと推測される。

(3) 本研究の限定

本研究では、非侵食性のモルタル床を用いて実験を行っている。また、実験流量も一定である。実際の岩盤河川の場合、岩盤侵食や流量の変動によって流況が変化し、露岩箇所や砂州形状が変化する可能性がある。この影響については、今後、直線水路を用いた基礎的な実験により確認していく予定である。

5. まとめ

本研究では、岩盤床の侵食を伴う河床低下を抑制するための対策方法を検討するために、石狩川露岩区間の縮尺1/50の大型模型水路を用いて実験を行った。この結果、低水路幅および覆礫により、河床低下を抑制できることが確認された。さらに、覆礫後に生じる現象として以下が確認された。

- 1) 岩盤を覆礫したとしても、河岸際が縦断的に露岩する傾向にある
- 2) 対策後の河道には砂州が形成され、その波高と河岸際の露岩には関係がある

- 3) 河道直線部の露岩箇所では筋状になって流砂が流れる
- 4) 一方、湾曲部外岸の露岩箇所は二次流の影響により流砂が流れてこない

既往研究¹⁾から現地の岩盤は流砂により洗掘されることが確認されている。覆礫したとしても河岸際が露岩することは、河岸際に滞筋が形成される可能性を示すものである。一方、露岩部で流砂が少ないことは、岩盤洗掘が進行しづらいことを示す結果でもある。また、露岩箇所(流砂の無し)は、二次流と関連の深い河道曲率によって推定できることが示唆された。

今後、本研究で得られた知見を踏まえ、より効果的な河床低下対策工について検討を行っていきたい。

謝辞：本研究にあたって、北海道大学の泉典洋先生、清水康行先生、北見工業大学の渡邊康玄先生、NPO法人環境防災総合政策研究機構の黒木幹男先生、国土技術政策総合研究所の服部敦室長をはじめたくさんの方にご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)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.
- 2)Sklar, L. S., and W. E. Dietrich: A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, *Water Resour. Res.*, 40, W06301, 2004.
- 3)Chatanantavet, P., and Parker, G.: Experimental study of bedrock channel alluviation under varied sediment supply and hydraulic conditions, *Water Resour. Res.*, 44, W12446, 2008.
- 4)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.
- 5) Nelson, P. A., and Seminara, G.: A theoretical framework for the morphodynamics of bedrock channels, *Geophys. Res. Lett.*, 2012.
- 6)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, I_1039-I_1044, 2014.
- 7)早川 博: 屈折蛇曲する岩床河川における砂レキ堆の移動停止条件, 北海道河川財団 研究所紀要(XXI), 2010.
- 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)黒木幹男, 岸力: 中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, 第 342号, 87-96, 1984.
- 10)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.
- 11)Chatanantavet, P., and Parker, G.: Physically based modeling of bedrock incision by abrasion, plucking, and macroabrasion, *J. Geophys. Res.*, 114, F04018, 2009.

(2014. 4. 3受付)