

水理模型実験と現地試験施工を踏まえた 軟岩露出河川に対する河床低下対策工の検討

LABORATORY AND FIELD EXPERIMENTS ON EROSION CONTROL MEASURES FOR A SOFT BEDROCK RIVER

濱木道大¹・戸村翔²・渡邊康玄³・井上卓也⁴・安田裕一⁵・古溝幸永⁵
Michihiro HAMAKI, Sho TOMURA, Yasuharu WATANABE, Takuya INOUE,
Yuuichi YASUDA and Yukinaga KOMIZO

¹正会員 株式会社 開発工営社 (〒060-0004 北海道札幌市中央区北4条西5丁目1番地)

²非会員 株式会社 開発工営社 (〒060-0004 北海道札幌市中央区北4条西5丁目1番地)

³正会員 工博 北見工業大学 社会環境工学科 教授 (〒090-8507 北海道北見市公園町165番地)

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1-34)

⁵非会員 国土交通省 北海道開発局 網走開発建設部 (〒093-8544 北海道網走市新町2丁目6番1号)

In the Muka River, significant sediment loss from the river bed has led to the exposure of highly erodible layers such as volcanic ash and weak sedimentary rocks, resulting in rapid riverbed degradation. We need an effective erosion control measure to protect revetments from bedrock erosion. Commonly used ground sill is insufficient in preventing bedrock erosion at some specific locations (e.g., the downstream of the structures). In fact, in some cases ground sill is found to escalate riverbed degradation.

In this paper, we conducted laboratory and field experiments to develop an effective and efficient erosion control measure in a mixed bedrock-alluvial river.

Key Words : soft bedrock river, riverbed degradation, bedrock erosion, laboratory, field experiments

1. はじめに

高度成長期以降、治山・砂防事業、治水事業、水資源開発事業等による上流域からの土砂供給量の減少、河道掘削や砂利採取による直接的な改変により、全国的に河床低下傾向となっている河川が増加している¹⁾。

北海道においても、河床低下に伴い表層の砂礫が流失、上流から流送される砂礫の衝突等に対して侵食抵抗の小さい火山灰や軟岩が露出し、急激な河床低下を招いている河川が増加している²⁾。一度軟岩が露出すると、砂礫の移動限界が低下し砂礫が流出しやすくなるため、再び砂礫床化することが難しくなる。このため、さらなる河床低下を助長することになる。

河床低下には、流下能力の向上という利点はあるものの、治水安全度低下(低水護岸の機能喪失等)や河川環境への悪影響(産卵床の減少、魚類移動性阻害等)等が顕在化し、早急な対策が求められている。

このような軟岩露出河川に対し、従来の河川工学に基

づき床止工や帯工等を設置しても、構造物下流側で軟岩の局所洗掘を助長し、河床低下を悪化させる場合がある。

これらの問題に対応するためには、低水路を拡幅し再度河床砂礫で埋戻す覆礫工³⁾⁴⁾が有効と考えられるが、覆礫土砂・河川用地の確保が支障となる場合や、河道拡幅と一体となって実施しなければ再度河床低下する場合がある。また、ダム堆積土砂の下流河川への土砂還元(置き土)等も試験的に施工されている⁵⁾が、最適な土砂還元量の設定や土砂還元の効果検証に課題が残っている。その他、現地発生材を用いた河床面の被覆⁶⁾、巨石やコンクリートブロックの千鳥配置⁷⁾や水制工⁸⁾・ネット工法⁹⁾等による河床砂礫の捕捉等の対策工が試みられているが、いずれも現地実証段階で、今後も継続的な検証や改善が必要とされている。常呂川水系無加川においても、現況河床高維持を目的とした帯工群+巨礫配置による河床低下対策工が計画されているが、上記の事例同様、現地適用性の検証が不十分であった。

本研究では、無加川における河床低下対策の事業化にあたり、軟岩露出河川における現地適用性の検証を目的

として、軟岩侵食を考慮した水理模型実験、対策工の現地試験施工を実施し、軟岩露出河川に対する効果的・効果的な河床低下対策工の検討を行った。

2. 無加川における河床低下の現状³⁾

(1) 無加川の概要

無加川は、北海道東部を流れる常呂川に北見市街地で合流する、流域面積536.1km²、幹川流路延長74.6kmの常呂川の支川である。直轄管理区間は、常呂川合流点より7.2kmの区間であり、同区間の河床勾配は1/230～1/300と急勾配で、セグメント区分1に分類される。

(2) 無加川の河道状況

無加川の直轄管理区間では、1960年代から多くの箇所、護岸工事とそれに伴う河道整正が行われ、複断面河道となっている。また、常呂川合流点から3.0kmよりも上流側では、写真-1のように1970年代から1980年代にかけて、高水敷造成によって低水路幅を縮小している。低水路幅を縮小したこの区間では、図-1に示すように1989年以降河床低下が進行し、1979年から2016年までに最深河床高が最大5.0m程度低下している。この結果、写真-2のように低水護岸や根固めブロックが倒壊しているほか、橋脚のフーチング付近まで河床低下が進行し、洪水に対する安全性が損なわれている。これらは、写真-3のような軟岩（火山灰層・シルト岩・礫岩の互層）の露出によるものであり、上流から輸送される砂礫の衝突等に対して侵食抵抗が小さいため、一度河床表面に露出すると急速に河床低下を助長させている。

上流の北海道管理区間においても1960年代から河道掘削と併せて多くの横断工作物（帯工・落差工）が設置されたことにより、その下流で河床低下が進行し、軟岩の露出範囲が拡大している。

また、2016年8月の度重なる台風被害により、全川の河床低下が進行し、護岸の被災、橋脚のフーチング露出、横断工作物下流の洗掘や露岩範囲のさらなる拡大等、大きな被害が発生している¹⁰⁾。

(3) 河床低下対策工の検討

無加川の直轄管理区間では高水敷幅が狭く低水路が堤防に接近しているため、出水により堤防が被災する危険性があり、左右岸に北見市街地に隣接することからも早急な河床低下対策の実施が求められている。

通常の河床変動解析では、軟岩が露出した河川の将来的な河床低下量や河床低下対策実施後の対策効果を精度良く予測することができない。このため、筆者らは軟岩侵食を考慮した平面2次元河床変動解析モデルを構築¹¹⁾し、既往洪水の再現検証を行った¹²⁾。このモデルにより、無加川における河床低下対策工の配置検討を行い、帯工



写真-1 無加川斜め写真

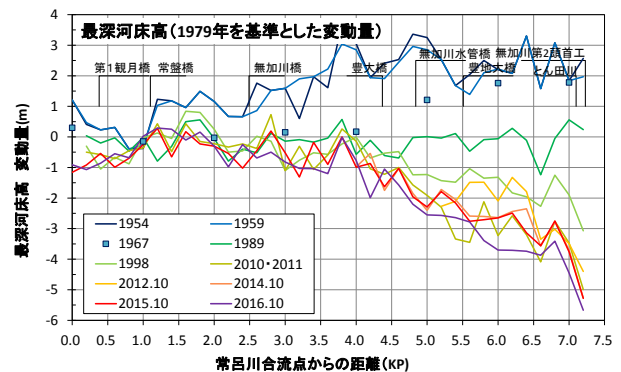


図-1 最深河床高の経年変化



写真-2 護岸の被災と露出した軟岩（シルト岩層、KP5.8付近）



写真-3 河岸に露出した軟岩（火山灰層・礫岩層、KP5.5付近）

群（7基）+巨礫による現況河床高維持を目的とした河床低下対策を予定（2017年度事業化）している。ただし、平面2次元河床変動解析だけでは、構造物周辺の局所的な洗掘・軟岩侵食や現地での効果検証が不足しているため、

水理模型実験及び現地試験施工を行い、特に横断構造物下流の局所洗掘防止に有効な対策工の構造検討を行った。

3. 対策工の水理模型実験

(1) 実験条件

軟岩上での土砂扞止、河床低下抑制を目的とした横断構造物(袋型根固めによる帯工)について、2015年～2016年の2カ年に渡り軟岩侵食を考慮した移動床水理模型実験を行った。模型縮尺は1/50(水路幅1m, 延長25m, 勾配1/230)とし、軟岩侵食は現地の平均的な軟岩強度を考慮した貧配合モルタル(以下、軟岩モルタル)として、現地の不均質な状況を簡易的に再現した。軟岩モルタルの配合比は、石狩川上流の現地軟岩強度に基づいて実施された既往検討⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を参考に1:150(セメント:砂)に設定しており、水流では侵食しないが、流砂により侵食する強度となっている。

実験ケースは、軟岩モルタル床上に設置した帯工下流側の侵食防止に着目し、下流すり付け部への巨礫配置、帯工高の変更、落差や斜路構造等とした場合の軟岩侵食状況を比較検討した。表-1に実験スケール一覧を、表-2に実験ケース一覧を、図-2に実験水路概要図を示す。

対象流量は、いずれのケースも平均年最大流量相等($Q=0.0128\text{m}^3/\text{s}$)を基本とし、上流から河床材料の代表粒径相等($d=0.77\text{mm}$)の流砂を給砂した。

給砂量は、検討区間より上流側の河床勾配($I=1/280$)を考慮した平衡流砂量であり、各ケースとも通水約3時間で平均年最大流量ハイドロ3回分程度の給砂量とほぼ同程度となる。なお、Case2のみ平均年最大流量→整備計画流量相等に流量増加させたケースとしている。

(2) 実験結果

Case1では帯工下流側へ巨礫を配置した場合の効果、Case2では減勢工を配置した場合の効果、Case3, 4では何も設置しなかった場合の帯工高の違いを比較した。

Case1では、上流からの砂礫到達とともに帯工直下流の巨礫が流出し、軟岩モルタルの侵食が発生した。

Case2では、減勢工の効果を発揮するにはやや落差不足であったことに加え、減勢工下流でも落差が拡大し軟岩モルタルの侵食が発生した。また、整備計画流量流下時には巨礫はすべて流出した。

Case3では、帯工直下流で著しい軟岩モルタルの侵食が発生し、Case4でも、範囲はCase3より狭いもののCase3と同様の著しい軟岩モルタルの侵食が発生した。

上記の結果を踏まえ、以下の知見を得た。

- ① 帯工下流の巨礫は、洪水時には下流すり付け部から流出するが、帯工直下流の軟岩侵食防止効果はある
- ② 帯工高は、低い方が帯工下流の侵食範囲を狭くすることができる

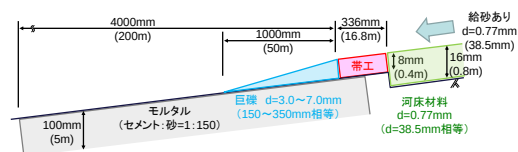
表-1 実験スケール一覧

項目	実験	現地	備考
河幅 B(m)	1.0	50.0	KP4.0～7.2の平均低水路幅
水路勾配 I	1/230	1/230	KP4.0～7.2の平均河床勾配
流量 Q(m^3/s)	0.0128	227.0	平均年最大流量(北光社観測所)
水深 h(m)	0.029	1.45	相対水深 $h/d_1=37.7$
流速 V(m/s)	0.44	3.13	
フルード数 Fr	0.83	0.83	軟岩箇所はFr = 0.96
粒径 d_1 (mm)	0.77	38.50	河床の代表粒径程度, $\tau_{c1}=0.094^*$
巨礫 d_2 (mm)	3.0～7.0	150～350	河床の最大粒径程度, $\tau_{c2}=0.028^*$
給砂量 Q_b (m^3/h)	0.025	181	KP8付近($I=1/280$)の平衡流砂量

※水中比重は1.65とし算出, τ_{c2} は d_2 =実験3.0mm・現地150mmに対応

表-2 実験ケース一覧

ケース	帯工高	帯工下流巨礫	帯工下流の侵食対策
Case1	H=16mm	d=3.0～7.0mm	巨礫を配置
Case2	H=16mm	d=3.0～7.0mm	巨礫区間下層に減勢工を配置
Case3	H=16mm	なし	なし
Case4	H=8mm	なし	なし
Case5	H=8mm	d=3.0～7.0mm	巨礫を配置
Case6	H=8mm	d=3.0～7.0mm	巨礫下流端を帯工で扞止
Case7	H=8mm	d=3.0～7.0mm	落差構造, 下流端巨礫増厚
Case8	H=8mm	d=3.0～7.0mm	斜路構造, 下流端巨礫増厚



※()内は現地スケールの換算値

図-2 実験水路概要(Case5の例)

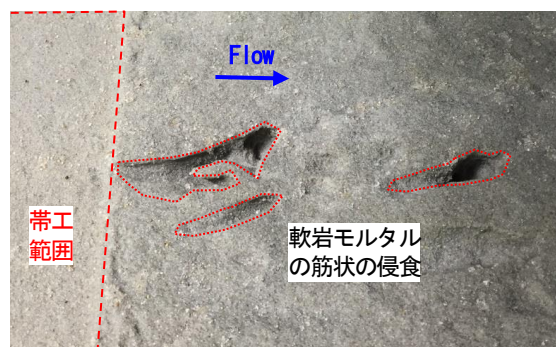


写真-4 帯工直下流の局所的な軟岩モルタルの侵食

Case1からCase4までの結果を踏まえ、Case5以降は帯工下流の軟岩侵食防止に着目し、帯工下流側の巨礫のすり付け方法や帯工の構造を変化させた。また、軟岩モルタルの施工厚を12mmから100mmに増厚した。

Case5(図-3)では、Case1よりも巨礫の施工厚が薄く、軟岩侵食防止効果は小さかった。また、帯工直下流で写真-4のような筋状の局所的な軟岩モルタルの侵食(最大

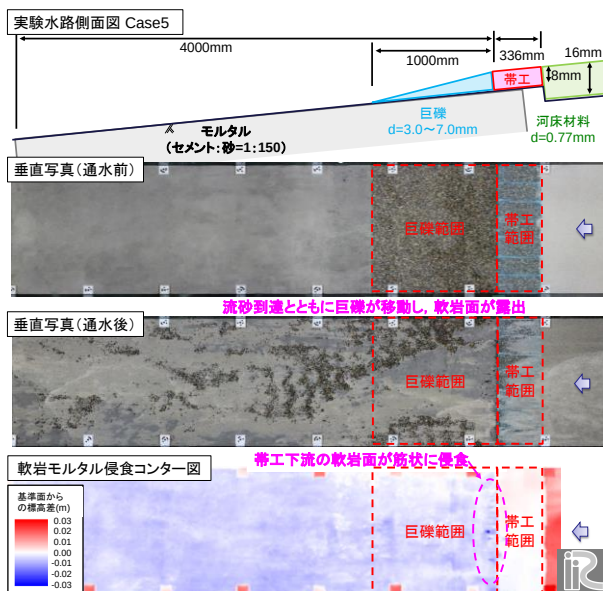


図-3 実験結果概要(Case5)

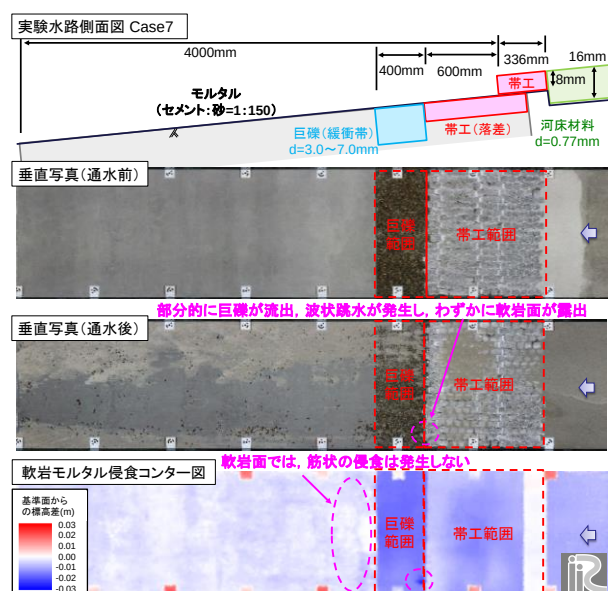


図-5 実験結果概要(Case7)

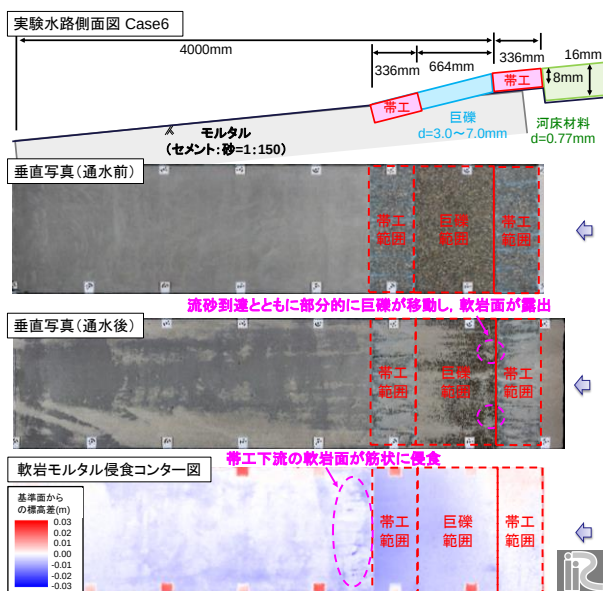


図-4 実験結果概要(Case6)

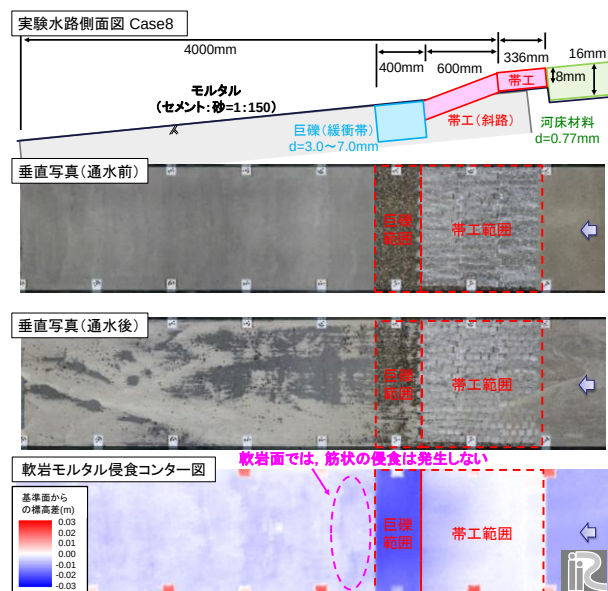


図-6 実験結果概要(Case8)

侵食深28mm, 現地スケールで1.5m程度)が拡大した。

Case6(図-4)では、帯工下流の巨礫下流端へさらに帯工を配置することによって、巨礫流出を抑制することができたが、下流側帯工の下流では局所的な軟岩モルタルの侵食が発生した。

Case5, Case6の実験結果から、局所的な軟岩モルタルの侵食過程において、以下の特徴があると推定した。

- ③ 軟岩モルタルが流砂により侵食されることで、帯工と軟岩モルタルの境界での落差が拡大、流速も増加するため局所的な軟岩侵食を助長する

このため、Case7とCase8では、帯工(固定床)と軟岩モルタル(移動床)との間に緩衝帯として巨礫を8mmから16mmに厚く配置し、急激な落差拡大につながらないような構造とした。

Case7(図-5)では、この緩衝帯に加え帯工下流を落差構造とし水流の力を減勢する構造とした。その結果、局所的な軟岩侵食をある程度抑制できたが、落差部分で生じた波状跳水が安定せず巨礫流出につながった。

Case8(図-6)では、緩衝帯に加え帯工下流を斜路構造とすることで、波状跳水の発生を抑制する構造とした。その結果、巨礫の流出、局所的な軟岩モルタルの侵食を抑制することができる効果的な帯工構造を確認することができた。

上記を踏まえ、帯工下流の局所的な侵食防止に有効な構造は以下であると結論づけた。

- ④ 帯工下流を斜路構造とし、下流端に緩衝帯として巨礫を厚く配置することで、構造物下流の局所的な軟岩侵食を防止する構造



図-7 試験施工箇所周辺の河道変化

4. 対策工の現地試験施工

(1) 試験施工の概要

対策工の現地適用性を検証するため、7箇所設置予定の帯工+巨礫のうち、1箇所を対象として現地試験施工を2016年2月に実施した。帯工は経済性で有利、かつ、屈撓性の高い袋型根固めによる構造とした。この時点で終了していたCase4までの水理模型実験結果を踏まえ、過度な落差とならないように帯工の敷高は平均河床高とし、砂州を切下げ横断流用することで滞筋を覆礫する河道整正も同時に行った。また、帯工の下流には巨礫(現地河床材料の最大粒径程度)を配置した。なお、施工箇所は近年最深河床部が火山灰層に到達し、今後急激な河床低下が予想される常呂川合流点から5.0kmの地点とした。

(2) 融雪出水後の変化

2016年の融雪出水後である図-7の2016年7月の航空写真をみると、帯工が流出することなく、帯工上流で軟岩を覆うように砂礫が堆積し、帯工を乗り越えるように砂州が形成されている。また、小流量時でも帯工全体が水没し下流側に落差は生じなかった。このため、今回の現地試験施工が、融雪出水程度に対し、土砂移動の連続性を過度に抑制することなく、ほどよい土砂堆積を促す効果的な対策であったと判断した。

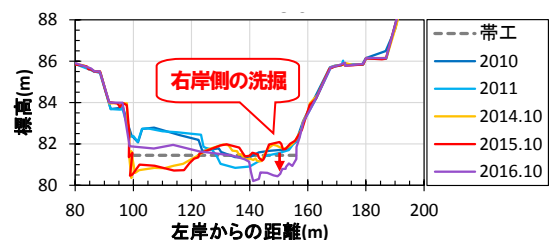


図-8 試験施工箇所の横断変化

(3) 2016年8月出水後の変化

Case8までの水理模型実験結果を踏まえ、帯工下流側の巨礫敷設範囲を延長する工事の施工中であった2016年8月に、度重なる台風被害に見舞われた。

本川の常呂川では計画高水位を超える洪水となり、越水や破堤被害が発生しており、常呂川の支川である無加川においても、既往第2位の流量となった。無加川では河床低下により流下能力が向上していることもあり、高水敷への冠水は少なかったが、逆に大流量が低水路に集中することになり、低水路に大きなインパクトを与えたものと考えられる。

現地試験施工箇所周辺では、図-7の2016年9月の航空写真のように左岸側に砂州が大きく発達し、河畔林が流出するなど河道状況が大きく変化した。袋型根固めによる帯工には、図-7の写真②や図-8のように右岸側で袋材の摩耗・破損、一部流出が発生した。ただし、図-9に示す平均河床高の変動量を見ると、施工済み試験施工直上

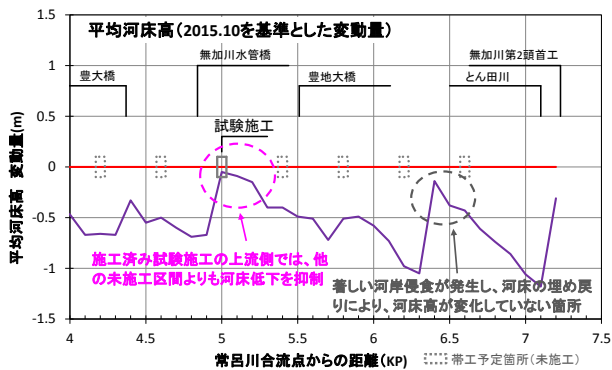


図-9 2016年8月出水前後の平均河床高の変動量

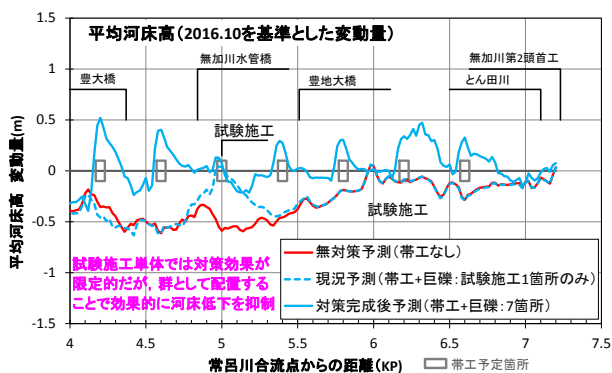


図-10 河床変動予測結果(20年後)

流では、他の未施工区間よりも河床低下を抑制する効果があった。図-9のうち、KP6.4付近では著しい河岸侵食が発生し、河床の埋め戻りにより河床低下はしていないが河床変動が顕著な箇所であった。

被災箇所に対しては、被災状況を踏まえ、素材の強度向上やロープ連結方向等を見直し、応急復旧を行った。

また、前述の軟岩侵食を考慮した河床変動解析モデル¹²⁾を用い、2016年8月出水後の河道形状に対し、実績流量による20年後の将来予測を行った(図-10)。この結果から、現況の試験施工1箇所のみでは対策箇所付近でしか河床高を維持できないが、残りの対策工を早期に完成させ、群として対策効果を発揮させることで、より効果的に河床低下を抑制可能であることを確認した。

5. まとめ

本研究では、水理模型実験により軟岩上に帯工等横断工作物を設置する場合の課題と対応策を明らかにした。また、現地試験施工により対策効果や現地適用性を検証し、出水時の被災要因を踏まえたより安定性の高い構造を検討した。以下に本研究で得られた知見を列記する。

- ① 軟岩モルタルが流砂により侵食されることで、帯工との境界での落差が拡大、流速も増加するため局所的な軟岩侵食を助長する
- ② 帯工下流を斜路構造とし、下流端に緩衝帯として巨

礫を厚く配置することで、構造物下流の局所的な軟岩侵食を防止できる

- ③ 袋型根固めによる帯工は、融雪出水程度に対し、土砂移動の連続性を過度に抑制することなく、ほどよい土砂堆積を促す効果的な対策となる
- ④ 対策工は単体でも効果はあるが、影響範囲が狭い
- ⑤ 群として対策工を配置することで、より効果的に広範囲の河床低下を抑制する

今後も、試験施工箇所のモニタリングを継続するとともに、改善案を踏まえた施工を行い、順応的管理による効果的・効率的な河川管理を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) (財) 河川環境管理財団 河川環境総合研究所：河道特性に及ぼす粘性土・軟岩の影響と河川技術：河川環境総合研究所資料、第29号、2010.11
- 2) 北海道開発局、寒地土木研究所：岩盤河床における河床低下危険度評価の手引き(案)、2017.2
- 3) 高橋紳吾、木下誠一、鈴木利幸、小泉和久、渡邊康玄、中村哲：常呂川水系無加川における軟岩河床の低下対策に関する試験施工とその有効性、河川技術論文集、第20巻、pp229-234、2014.6
- 4) 旭川開発建設部：石狩川上流 河道管理ワーキング資料、http://www.as.hkd.mlit.go.jp/chisui04/ishikari_taisaku/index.html
- 5) 国土交通省 河川局 河川環境課：下流河川土砂還元マニュアル(案)第2版、2011.3
- 6) 松田龍明、倉光宏一、木原恒二、柳田公司、服部敦、笠瀬明日香、倉吉一盛、伊藤寛之、岩谷栄林、長谷川清史：脆弱な地層が分布する法線是正区間における河床低下抑制のための現地発生材使用による対策工法の提案、河川技術論文集、第22巻、pp211-216、2016.6
- 7) 遠山和広、米沢拓繁、福岡捷二：多摩川水系浅川における河床高回復現地実験による効果の検証、河川技術論文集、第22巻、pp205-210、2016.6
- 8) 伴熊公子、前野詩朗、瀬島美香、山村明：手取川における水制群設置による礫河床再生効果の検討、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.68, No.4, I_1165-I_1170、2012
- 9) 六浦和明、井上卓也、清水康行：ネットによる軟岩侵食抑制工法の開発と実河川における効果検証、河川技術論文集、第21巻、pp165-170、2015.6
- 10) 渡邊康玄、早川博、川口貴之、川尻峻三、宮森保紀：2016年8月常呂川洪水における構造物等被災概況報告、平成28年度土木学会北海道支部論文報告集、73, B-20、2017.2
- 11) 井上卓也、船木淳悟：岩床と砂礫床が混在した河川における河床変動計算手法の構築、寒地土木研究所月報、No.737、2014
- 12) 濱木道大、清家拓哉、木下誠一、渡邊康玄、井上卓也：常呂川水系無加川における軟岩侵食を考慮した河床変動計算、土木学会第70回年次学術講演会、CS6-005, p9-10、2014.9
- 13) サムナー圭希、井上卓也、清水康行：岩盤床上の砂州形成に伴う侵食地形、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.72, I_817-I_822、2016.
- 14) 山口昌志、柿沼孝治、井上卓也、清家拓哉、加藤一夫：軟岩洗掘を考慮した大型模型実験を用いた河床低下対策手法の評価について、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.73, No.4, I_853-I_858、2017

(2017. 4. 3受付)