

河床低下が進行した碓氷川における 軟岩河床の河道特性に関する検討

STUDY ON CHANNEL CHARACTERISTICS OF SOFT ROCKS RIVERBED IN
THE USUI RIVER THAT RIVERBED DEGRADATION HAS PROGRESSED

吉武央気¹・徐冰潔²・浜口憲一郎¹・吉川武志³・平山大輔⁴・関谷幸広³

Hiroki YOSHITAKE, Bingjie XU, Kenichiro HAMAGUCHI,
Takeshi YOSHIKAWA, Daisuke HIRAYAMA and Yukihiko SEKIYA

¹正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ(株) 国土基盤事業本部 河川部 つくば技術研究センター
(〒300-4204 茨城県つくば市作谷642-1)

²非会員 工修 パシフィックコンサルタンツ(株) 国土基盤事業本部 河川部
(〒101-8462 東京都千代田区神田錦町3丁目22番地)

³非会員 工修 群馬県 県土整備部 河川課 (〒371-8570 群馬県前橋市大手町1丁目1-1)

⁴正会員 工修 群馬県 県土整備部 河川課 (同上)

In this study, we aimed to clarify the channel characteristics of the soft rocks riverbed by carrying out various field survey in the Usui River where the riverbed has progressed. We surveyed the physical conditions such as erosion rate, strength, deterioration status, and discharge condition of the weir on the soft rock bed. In addition, Fish and benthic surveys were also conducted. As the result of the survey about deterioration situation, soft rock caused slaking two days after draining the water in the river channel. Therefore, it was found that the wet and dry condition associated with the water level change is one of the causes of the riverbed degradation. Further, it was clarified from the results of the biological surveys that habitat species and density is influenced by exposure rate. From the above survey results, it was possible to grasp the channel characteristics of the soft rock riverbed in the Usui River.

Key Words : riverbed degradation, soft rocks, field measurement, slacking characteristics,
channel characteristics

1. はじめに

わが国の多くの河川では、治山・治水事業として実施してきたダム建設や砂防工事、植林活動などによる土砂供給量の減少、河道改修等による土砂掃流能力の増加など、複合的な要因により土砂収支のバランスが崩れ、河道内の河床低下が進行している^{1) 2)}。

群馬県を流れる碓氷川(県管理河川)においても、河床低下の進行が著しい。昭和20年代の航空写真を確認すると、河道内で礫河原が形成されていたが、現在では軟岩河床が拡がり、河道内から砂礫が減少している状況である。河床低下により、護岸防護工の流出や護岸の洗掘、農業用水等の取水障害、魚類や底生動物の生息環境の悪化などが課題となっているため、河床低下対策の実施が求められている。著者らは、効果的な河床低下対策を実施するために、碓氷川における軟岩河床の河道特性を十分に把握することが重要であると考えた。

軟岩河床の河道特性についての先行研究としては以下が挙げられる。忠津ら³⁾は、多摩川の河床縦断形より、一度土丹面(軟岩河床)が露出すると、砂礫が留まり難くなるとともに、経年的に河床が低下するという問題点を挙げている。井上ら⁴⁾は、石狩川における現地実験により、次の2点を定量的に明らかにした。1点目として、軟岩河床の洗掘は、砂礫粒子の衝突による磨耗現象と考え、粒径に応じた無次元掃流力と侵食速度の関係を定式化した。2点目として、軟岩河床上では砂礫河床より限界無次元掃流力が低下すること、その値は粒径が大きいほど低下し、実験で適用した最大粒径75mmに対して、限界無次元掃流力が0.015程度まで減少することが示された。

本研究では、以上の研究を踏まえつつ、碓氷川における軟岩河床の河道特性を明らかにすることを目的とした。そのために、軟岩の侵食量、軟岩河床の強度、軟岩の劣化状況、軟岩河床上の礫流出状況を調査した。また、軟岩河床における魚類及び底生動物の定量調査を実施した。

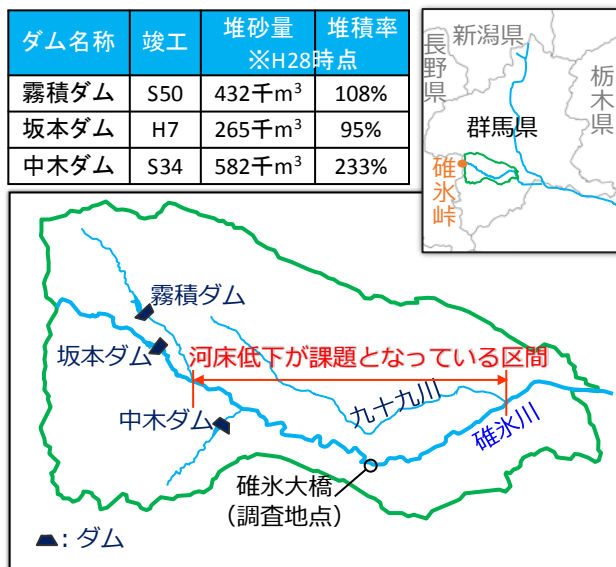


図-1 碓氷川流域図及びダム諸元

以上の調査結果を踏まえ、既往研究の成果との比較検討を実施し、軟岩河床が多く露出している碓氷川の河道特性を考察した。

2. 碓氷川の軟岩河床の状況

(1) 碓氷川の概要

碓氷川は利根川水系烏川の支川であり、流域面積 291 km²、延長 36.8 km の一級河川である。碓氷川流域図及びダム諸元等を図-1 に示す。

流域の地形について、上流部は群馬県と長野県の境に位置する碓氷峠などの山地であり、中流部から烏川合流部にかけて丘陵地や河岸段丘となっている。流域の地質は、上流部には火山砕屑岩（凝灰角礫岩、凝灰岩）を主体とする秋間層群及び富岡層群が分布し、中下流部には堆積岩（礫岩、砂岩、泥岩）を主体とする板鼻層群及び富岡層群が分布している。

碓氷川上流域には、霧積ダム、坂本ダム、中木ダムの他、52 基の砂防施設が整備されている。霧積ダム及び中木ダムでは、計画堆砂量以上に土砂が堆積していることがダム管理上の課題となっている。なお、仮に、ダム堆積土砂量を碓氷川の河床低下が進行している区間の河道に全て敷き均すとしたら、0.9 m 程度の厚さとなる。

碓氷川流域の土地利用変化は、昭和 50 年代以降、荒地、田・畑・果樹園の面積が減少し、建物用地、道路等の面積が増加している。よって、流域から河川への土砂流入量が減少していると考えられる。

(2) 河床低下区間の概要

河床低下が顕著な区間は、ダムから碓氷川支川である九十九川が合流するまでの 20 km 程度の区間である。本区間の河床勾配は 1/50～1/200 程度である。砂礫が存

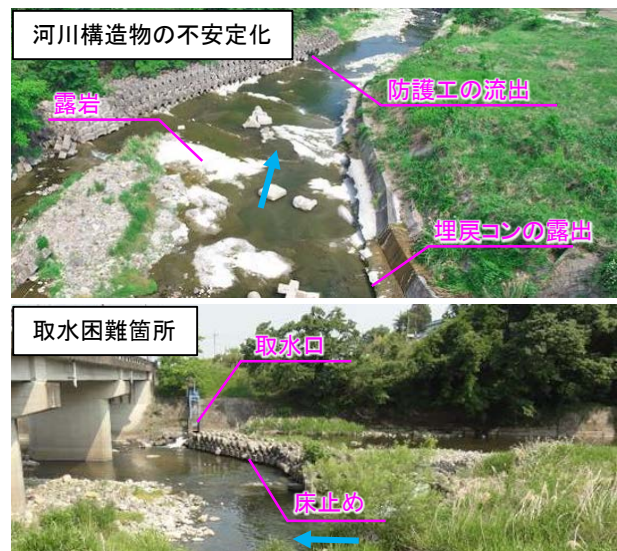


図-2 河床低下による治水・利水などに生じた課題



図-3 軟岩河床の状況

在する箇所の平均代表粒径は 70 mm 程度である。

河床低下により、図-2 に示すような護岸防護工の流出や護岸の洗掘、農業用水の取水障害などの課題が生じている。

(3) 軟岩河床の概要

碓氷川の河床において露出している基盤岩である泥岩やシルト岩は、図-3 に示すとおり、スレーキング特性を有している。そのため、乾湿の繰り返しによる風化作用で軟岩が層状に剥離しやすく、粒径が数 cm 程度の土砂となり、下流へ流出している。このことが、碓氷川における河床低下を促進している要因の一つと推察される。よって、軟岩河床のメカニズムや河道特性を十分に把握することが、効果的な河床低下対策を実施するためには不可欠であると考えられる。

なお、平成 30 年 3 月に UAV による空撮写真を基に河道内の露岩範囲を確認した結果、碓氷川の流路部の約 24% が露岩河床であることが判明した。

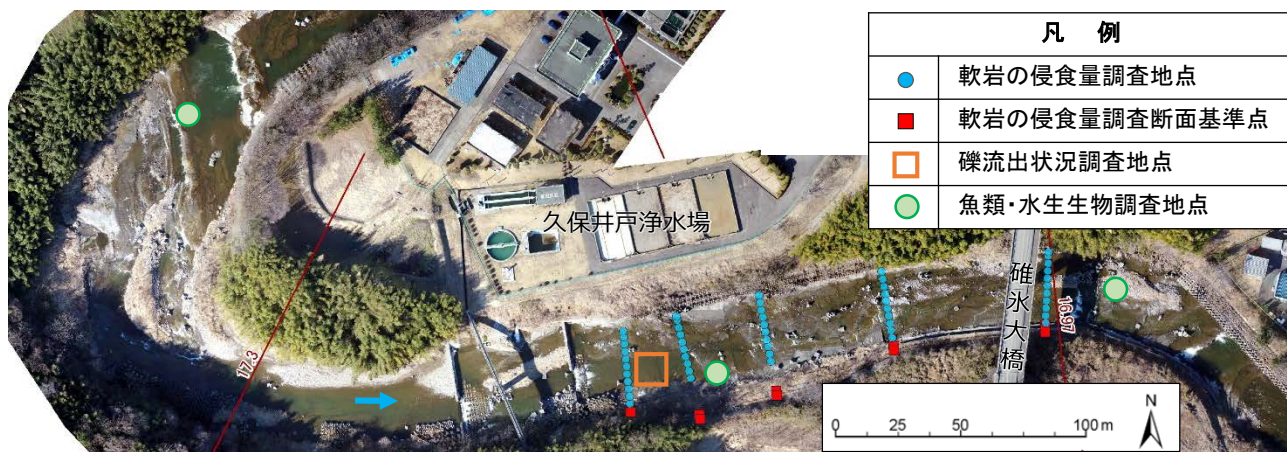


図-4 各種調査地点

表-1 調査一覧

項目	調査内容	地点	時期
軟岩の侵食量	定点における河床高変化	5 測線 計 40 点程度	H30.6.7 H30.10.11
	針貫入試験機による簡易耐力試験	5 測線 計 40 点程度	H30.6.7 H30.10.11 H31.1.11
軟岩劣化状況	水を抜いた後の軟岩風化状況	碓氷大橋から上流より 200 m 範囲	H31.1.11
礫流出状況	出水に応じた流下状況	碓氷大橋上流より 200 m の 1 箇所	H30.6.7 ~8.24
魚類	定量調査	3 箇所 16.96k (下流：砂礫)	H30.10.1 ~10.3
底生動物	定量調査	17.12k (中流：露岩) 17.42k (下流：露岩)	

3. 軟岩河床における各調査結果

軟岩河床における河道特性を解明するため、軟岩の侵食量、軟岩河床の強度、軟岩の劣化状況、軟岩河床上の礫流出状況を調査した。また、軟岩河床における魚類及び底生動物の定量調査を実施した。調査一覧を表-1 に示す。

調査地点は、図-1 に示すとおり、碓氷川 17 k 付近に位置する久保井戸浄水場・碓氷大橋付近の区間とした。本区間は、河道全体が露岩している状況である。

(1) 軟岩の侵食量

軟岩の侵食量を把握するため、定点において河床高を計測した。調査地点は、図-4 に示す 5 測線 40 点程度とした。調査方法を以下に示す。なお、本調査による測量誤差は、1 cm 程度と考える。

- ・右岸に固定点をアンカーで 2 点設置し、2 点の固定点を結ぶように左岸方向に巻尺を張る。

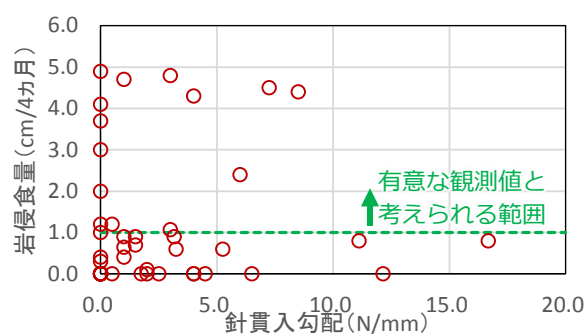


図-5 岩侵食量の調査結果

- ・河道側の固定点より 3 m 間隔の位置を計測点と定め、河床高を計測した。計測には、レベル計測器とスタッフを用いた。
- ・複数回、河床高の計測を実施した。
- ・複数回計測した定点における河床高を差分することで、軟岩の侵食量を算出した。
- ・河床高の計測位置にて、針貫入試験機を用いて針貫入勾配（軟岩河床の耐力）を計測した。ただし、水没箇所では針貫入勾配の計測ができないため、非水没箇所において計測した。

河床高の調査は、平成 30 年 6 月 7 日及び同年 10 月 11 日に 2 回実施した。各回における河床高の調査結果より軟岩の侵食量を算出した。なお、調査期間内に生じた出水の最大流量は 120 m³/s 程度であった。本出水は、碓氷川の平均年最大流量（安中水位流量観測所、国土交通省管理）約 300 m³/s と比較すると、流量規模は小さい。

図-5 に岩侵食量の調査結果を示す。軟岩の侵食量は、最大 4.9 cm/4ヶ月、平均 1.2 cm/4ヶ月であった。なお、既往研究⁹⁾では、針貫入勾配を計測することで、針貫入勾配と相関のある岩侵食量を算出する方法が提案されているが、碓氷川では有意な相関関係は見られなかった。今後、様々な出水規模に対して調査を継続実施し、針貫入勾配と岩侵食量の関係性を確認する予定である。

次に、平面二次元流況解析モデルにより、岩侵食量の

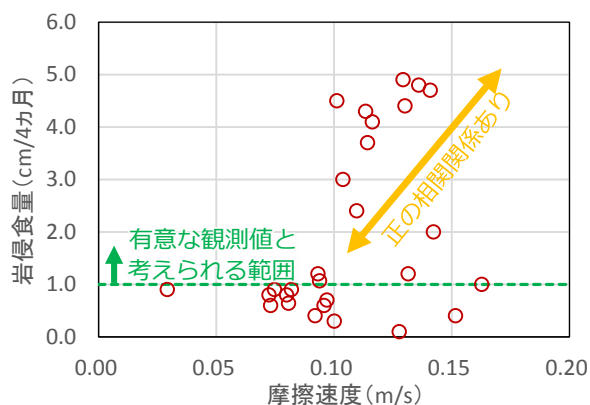


図-6 岩侵食量と摩擦速度の関係

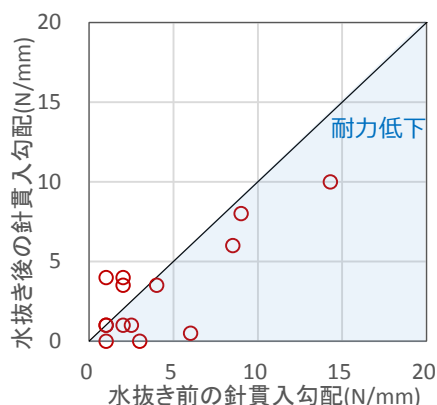


図-8 水抜き前後の軟岩耐力の変化

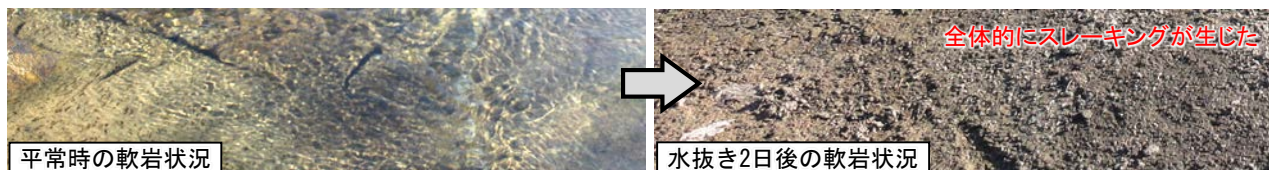


図-7 水抜き前後の軟岩状況



図-9 礫の設置と流出状況

計測位置において、 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ の出水が生じた際の摩擦速度を算定し、摩擦速度と岩侵食量の関係を確認した。解析モデルは、フリーソフトウェア iRIC の Nays2DH v3⁶⁾ を用いた。上流端に出水流量 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ を与え、下流端には等流時の水位を与えた。粗度係数は、当該出水時に調査区間で計測した水位を再現する値として、0.035 を与えた。岩侵食量と摩擦速度の関係を図-6 に示す。有意な調査結果と考えられる岩侵食量が $1 \text{ cm}/4\text{ヶ月}$ 以上の範囲では、摩擦速度が大きいほど侵食量が大きくなる傾向が確認できた。

(2) 軟岩の劣化状況

軟岩の劣化状況調査では、河道内において試験的に水を抜いた直後に軟岩がどう変化したかを観察した。観察は、河道内の水を抜いた 2 日後の平成 31 年 1 月 11 日に実施した。水抜き前後の軟岩状況を図-7 に示す。

水抜き 2 日後には、軟岩河床がスレーキングを起し細粒化し、風化が生じていた。また、現地では、所々で水分を吸収し、膨張している軟岩河床も散見された。これらの現象を踏まると、スレーキングが河床低下要因の一つであり、日レベルの水位変化によってもたらされる

軟岩河床の乾湿状態の繰り返しが、河床低下を急速に招く可能性があることが示唆された。

次に、定点において計測した水抜き前後の針貫入勾配の変化を図-8 に示す。水抜き後、半分以上の計測点において、軟岩河床の耐力が低下していた。その度合いは、平均的に 1 割程度低下していた。

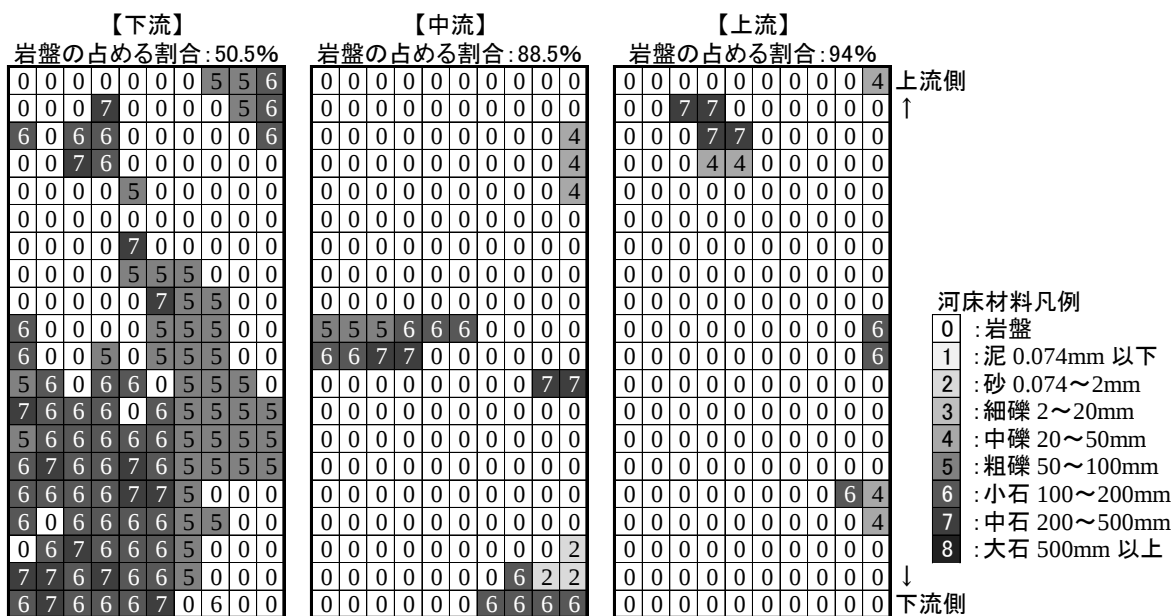
(3) 礫流出状況

礫流出状況調査では、洪水における河床材料の移動状況を把握するため、軟岩河床上に 50 個の礫を設置し、出水に応じた流下状況を確認した。

設置した礫の状況を図-9 に示す。設置した礫の粒径はそれぞれ 100 mm 相当（ピンク 30 個：玉石）、200 mm 相当（緑 10 個：現地礫）、300 mm 相当（水色 10 個：現地礫）とした。

礫は、平成 30 年 6 月 7 日に設置した。同年 8 月 24 日に流出状況を確認した結果、設置した最大粒径 300 mm の礫が流出していた。設置時点から流出状況を確認した時点までに発生した最大流量は、同年 7 月 29 日に生じた出水であり、ピーク流量は $90 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。

調査結果より、調査地点の軟岩河床における限界無次



元掃流力は、最大粒径 300 mm に対して 0.02 程度であった。露岩河床では、砂礫河床より限界無次元掃流力が小さく、土砂が流出しやすいことが確認できた。なお、本調査では、設置した最大粒径が流出していることから、同規模の出水が生じた場合、300 mm よりも大きい河床材料が流出していた可能性が示唆される。以上より、既往検討⁴⁾ 同様に碓氷川においても、軟岩河床は砂礫河床より土砂が流出しやすいことが確認できた。

(4) 魚類・底生動物

で 3 種であった。推定個体数密度は、下流で 3.3 個体数/m²、中流で 2.3 個体数/m²、上流で 1.4 個体数/m²であった。岩盤河床が占める割合が多いほど、種数及び推定個体数密度が少なくなった。

種に着目すると、全地点において、砂礫河床を好む底生魚であるカワヨシノボリが優占しており、砂礫河床と岩盤河床において生息種の違いが明確に見られなかった。調査した 3 地点の河床状況は異なるが、本調査区間の縦断距離では、カワヨシノボリが遊泳可能な範囲であり、生息が全地点で確認できたのではないかと推察する。

c) 底生動物

底生動物の調査結果として、種数及び個体数密度を図-12 に示す。種数は、下流で 42 種、中流で 15 種、上流で 17 種であった。個体数密度は、下流で 1,237 個体数/m²、中流及び上流で 816 個体数/m² であった。魚類同様、岩盤河床の占める割合が高いほど、底生動物の



図-13 河床低下要因の考察

種数及び個体数密度が少なくなった。ただし、露岩率が80%以上である中流及び上流では、差がなかった。

種に着目すると、下流では砂礫河床を好んで生息するナミコガタシマトビケラやモンカゲロウ等が確認された。一方、中流及び上流では、ナミコガタシマトビケラ等の砂礫河床に生息する種は見られなかった。底生動物は、魚類と異なり生息範囲が狭く、河床状況の影響を受けやすい。そのため、河床状況に応じた種の違いが確認できたと考えられる。

4. 軟岩河床の河道特性

調査区間の河床状況や調査時の出水規模等の条件下における本調査では、以下を確認した。

- ・軟岩の侵食量と軟岩強度に相関は確認できなかった。
- ・一方、軟岩の侵食量と摩擦速度に相関は確認できた。
- ・砂礫粒径 300 mm 程度に対しての限界無次元掃流力は 0.02 程度であった。また、調査時に設置した最大粒径が流出していたことより、限界無次元掃流力は 0.02 より小さい可能性が示唆された。
- ・河道内の水を抜いたところ、軟岩のスレーキングが2日程度で生じていた。また、水抜き後では、水抜き前と比較して軟岩強度が1割程度低下していた。

以上の調査結果より、碓氷川における軟岩の河床低下要因として、次の2点があると考えられる。

- ・水位変化に伴う乾湿状態の繰り返しにより、スレーキングが生じ、風化によって河床が低下する。
- ・出水等により岩が磨耗し、河床が低下する。

本調査の対象箇所にある軟岩は、数日のうちにスレーキングが生じるといった特徴がある。そのため、針貫入勾配の大小よりも、スレーキングの生じやすさによって、岩の侵食量が左右される可能性が示唆される。

碓氷川の河道を観察すると、図-13に示すようなU字型河道とV字型河道の2種類に分類できる。劣化状

況の調査区間である碓氷大橋付近では、日レベルの水位変化により軟岩の乾湿状態が繰り返され、短期間のうちにスレーキングを引き起こすため、横断方向に起伏が生じにくいU字型の河道となっている可能性が考えられる。一方、碓氷川の下流区間では、河道中央部の岩が侵食したV字型の河道となっている。この区間にある軟岩河床は、スレーキングが生じていない。出水時に流下する砂礫による磨耗が軟岩河床の主な低下要因であると考えられる。碓氷川では経年的に河床高の計測が実施されていないため、両河道における河床低下速度は不明であるが、岩質やスレーキング特性の有無によって、河床低下速度が異なると考えられる。

5. おわりに

本検討では、碓氷川における軟岩河床の河道特性の調査及び考察を実施した。同一河川、同一軟岩河床であっても、スレーキング特性の有無や岩質によって、河床低下の状況は異なると想定されるため、河床低下対策を検討するには当該区間における軟岩河床の特性を十分に加味する必要があると考える。なお、出水に応じた経年的な河道変化や岩侵食状況を把握するため、今後、3年程度モニタリングを継続予定である。今後実施する調査結果を踏まえ、軟岩河床に対して有効な対策を必要箇所に実施する予定である。

謝辞：

本研究は、碓氷川河床低下対策検討部会（部会長：群馬大学清水義彦教授）において貴重な御意見を頂いた成果であり、ここに記して謝辞を申し上げる。

参考文献

- 1) 海野修司，辰野剛志，山本晃一，渡口正史，本多信二：相模川水系の土砂管理と河川環境の関連性に関する研究，河川技術論文集，第10巻，pp.185-190，2004。
- 2) 辻本哲郎：ダムが河川の物理環境に与える影響—河川工学及び水理学的視点から—，応用生態工学2(2)，pp.103-112，1999。
- 3) 忠津哲也，鈴木研司，内田龍彦，福岡捷二：洪水流による土丹河床高さの経年変化と堰周辺の砂州変形に伴う洗掘深の増大について，河川技術論文集，第15巻，pp.249-254，2009。
- 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) 北海道開発局，国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：岩盤河床における河床低下危険度評価の手引き（案），2017。
- 6) NAYS2DH, <http://i-ric.org/ja/software/18>。

(2019. 4. 2受付)