

軟岩河床における洗掘機構に関する 実験的検討

AN EXPERIMENTAL STUDY ON SCOUR MECHANISM OF SOFT ROCKS RIVERBED

清家 拓哉¹・渡邊 康玄²・井上 卓也³

Takuya SEIKE, Yasuharu WATANABE and Takuya INOUE

¹ 正会員 (株) 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 正会員 博(工) 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒 090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

³ 正会員 (株) 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)

There are many rivers which the degradation of river bed is caused and soft rock under gravel layer has exposed in these rivers. Combination of soft rock is weak and it is scoured easily. The stability of the bridge pier and the revetment which is constructed on the soft rocks is decreased when these structures are constructed on the soft rocks when the soft rock bed is exposed. Therefore it is necessary to clarify the scouring mechanism in the soft rock riverbed. The expose of soft rock is caused at the upstream of the Ishikari River. In the research in 2008, the cause of the scouring was examined by the assumption which of impact of gravel. However, the results of hydraulic experiments in 2009 were not able to be explained by the assumption. In addition to the collision of gravels, friction with gravels and soft rock was taken into consideration as a cause of scouring. This friction effect is focused in this paper. It became clear from the result of hydraulics experiments that the collision of gravels and friction of gravels have influenced scouring of soft rock bed.

Key Words : soft rocks, The Ishikari River, hydraulic experiment, scour mechanism

1. はじめに

近年、全国的に上流から河口までの土砂動態の変化により河床低下の進行する河川が多く見られている。旭川市街部を流れる石狩川においても、図-1 に示す区間において河床低下が進行し、河床を覆っていた砂礫が一掃され、低固結の軟岩が露出する区間が増加している。この地区の露岩状況は図-2、図-3 の様になっており、様々な河川管理上の問題が生じている。ここで、軟岩とは、ある程度の固結度を有しているが強い流れに対しては脆く、一度浸食を受けると流水や流砂が集中し、局所的な深掘れを形成しやすい特徴を有している。そのため、局所的な深掘れによる護岸の浮き上がり(図-4)や橋脚の根入れ不足(図-5)などの問題が生じている。したがって、早急に岩河床の洗掘機構を解明し、それに基づいた対策を講じる必要がある。このことから、岩河床の洗掘機構の把握のために、H20 年に実施された現地実験をもとに研究が行われ、岩盤の洗掘は流砂による影響が大きいことが確認されている¹⁾²⁾。しかし、実験条件が限定的であり、普偏性のある結論であるかは不明であった。この研究では、洗掘は砂礫の衝突に



図-1 露岩区間

起因するとともに砂礫の速度が流速に比例するという仮定の下に結果が整理されている。しかしながら、実際に砂礫がどのように岩盤を洗掘しているのかは、十分に明らかにされていない。

そこで、H20 年の研究を参考にし、H21 年に旭川開発建設部によって新たに実施された同様の現地実験の結果をもとに、軟岩河床における洗掘のメカニズムを解明することを目的として、洗掘と砂礫の移動機構に着目して新たに検討を行った。また、H20 年では仮定であった砂礫の速度と流速の関係の確認も、平行して行った。



図-2 露岩状況



図-3 露岩状況



図-4 護岸の浮き上がり



図-5 橋脚の根入れ不足

2. 実験水路概要

石狩川の河口から160km上流(KP160.4)付近の低水路左岸側に掘削された仮設水路を使用して岩盤の洗掘に関する水理実験が行われた。水路は取水水路(155m)、実験水路(45m)、排水水路(100m)の全長300mからなる。実験水路の上流部のうち上流から5mを給砂区間、その下流5mを助走区間、15mを計測区間とした。また、計測区間は幅1.0m、深さ0.5~1.0m、水路勾配

表-1 砂礫の移動速度 実験条件

ケース	No.	流量 Q (m ³ /s)	水深 H (m)	水路幅 B (m)	水面勾配 i	平均流速 V (m/s)	平均粒径 d (mm)	
1	1	0.027	0.04	0.8	1/20	0.8	75	
	2	0.036	0.05	0.8	1/20	1.0	75	
	3	0.047	0.06	0.8	1/20	1.0	75	
	1	0.023	0.04	0.8	1/21	0.8	75	
	2	0.027	0.05	0.8	1/21	0.7	75	
	3	0.036	0.05	0.8	1/21	0.9	75	
2	1	0.020	0.04	0.8	1/22	0.6	54	
	2	0.027	0.05	0.8	1/22	0.7	54	
	1	0.020	0.04	0.8	1/22	0.7	54	
	2	0.027	0.05	0.8	1/22	0.7	54	
	3	0.037	0.05	0.8	1/22	0.9	54	
	3	1	0.009	0.03	0.8	1/23	0.4	28
2		0.011	0.03	0.8	1/23	0.4	28	
3		0.013	0.03	0.8	1/23	0.5	28	
4		0.016	0.04	0.8	1/23	0.5	28	
5		0.020	0.04	0.8	1/23	0.6	28	
1		0.011	0.01	0.8	1/21	1.3	28	
2		0.016	0.02	0.8	1/21	1.3	28	
3		0.020	0.02	0.8	1/21	1.3	28	
4		0.027	0.03	0.8	1/21	1.3	28	
4		1	0.011	0.03	0.8	1/28	0.4	17
		2	0.013	0.03	0.8	1/28	0.6	17
		3	0.016	0.03	0.8	1/28	0.6	17
	4	0.020	0.04	0.8	1/28	0.6	17	
	1	0.011	0.03	0.8	1/28	0.4	17	
	2	0.016	0.04	0.8	1/28	0.5	17	
	3	0.023	0.04	0.8	1/28	0.7	17	

1/30 となっており、水路底面の岩盤は主に未固結のシルト岩である。

3. 砂礫の移動速度の把握

H20年の検討において設けられた仮定の確認のために、砂礫の移動速度を算出し流速との関係について把握した。使用する砂礫は、実験水路周辺に堆積している砂礫を4つの粒径区分にふるい分けして用いられた。区分された砂礫の平均粒径はそれぞれ75mm、54mm、28mm、17mmである。これらを粒径ごとに整理したものを、粒径が大きい順にCase1~Case4として横断方向に3個ずつ配置し、流量を変化させながら複数回行うことで、礫の動き出しや移動距離の把握を行った。実験条件を表-1に示す。撮影した映像から、砂礫の移動速度を算出するとともに礫の動き出しの確認を行った。

4. 流速と砂礫の速度との関係

算出した砂礫の移動速度と平均流速の関係を図-6に示す。プロットした範囲は狭いが、この図からは砂礫の速度と平均流速は比例関係にあることがうかがえる。さらに広い範囲での確認が必要であるが、H20年の仮定は概ね妥当であるといえる。

粒径ごとに砂礫の速度と平均流速の比例定数 α_0 を式(1)から算出した。

$$V_0 = \alpha_0 V \quad (1)$$

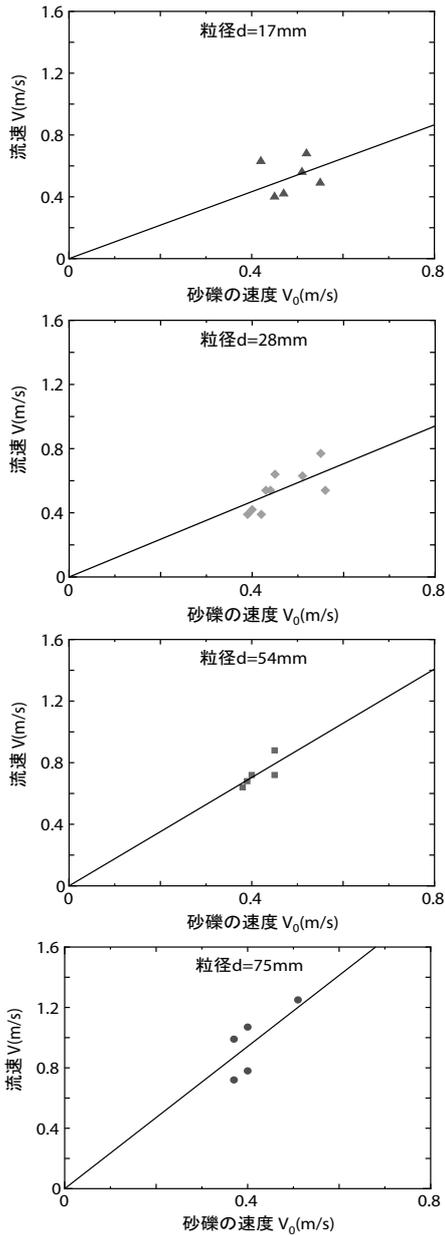


図-6 礫の速度と流速の関係

ここで、 V_0 は砂礫の移動速度であり、 V は平均流速である。比例定数 α_0 と砂礫の粒径の関係を図-7 に示す。両者には負の相関関係が存在していることが分かる。

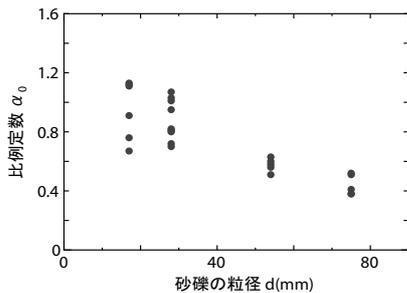


図-7 比例定数 α_0 と粒径 d (mm) の関係

表-2 河床洗掘 実験条件

ケース	水路 勾配 i	相対 係数 n	目標水深 H (m)	水路幅 B (m)	平均流速 V (m/s)	目標流量 Q (m ³ /s)	通水時間 t (hr)	最大粒径 d (mm)	単位時間当 たりの総砂量 (m ³ /hr)	平均洗掘深 D (m)
A-1	30	0.035	0.1	1	1	0.1	4	0.004	1.8	0.005
A-2	30	0.035	0.1	1	1	0.1	3	0.004	3.6	0.005
A-3	30	0.035	0.2	1	1.4	0.3	3	0.004	4.5	0.013
A-4	30	0.035	0.3	1	1.7	0.5	3	0.006	5.0	0.006
B-1	30	0.035	0.3	1	1.7	0.5	4	0.042	0.6	0.018
B-2	30	0.035	0.3	1	1.7	0.5	3	0.060	1.0	0.008
B-3	30	0.035	0.3	1	1.7	0.5	3	0.054	1.5	0.015
C-1	30	0.035	0.3	1	1.7	0.5	3	0.028	5.0	0.011
C-2	30	0.035	0.3	1	1.7	0.5	3	0.028	6.0	0.009

5. 河床洗掘

次に、砂礫を上流から投入し、砂礫による衝突や摩擦による岩盤河床への浸食を把握することとした。実験は粒径、給砂条件および流量条件を変化させ計 9 ケース行われた。なお、この実験では大量に砂礫が必要だったため、使用した砂礫は土木工事に使用される骨材が用いられた。また、各ケース毎に河床が洗掘されることとなり、各実験後には平坦河床ではなくなる。このため、河床を整形せず続けて次のケースを行った場合、河床の凹凸の影響が出る恐れがある。しかしながら、その影響は少ないものとして、作業効率から河床の整形は行われなかった。実験条件と実験結果を整理したものを表-2 に示す。

また、図-8 に各ケース毎の通水後河床高コンター図を示す。なお、実験はケース A-2、A-1、A-3、B-1、B-2、B-3、A-4、C-1、C-2 の順で行われた。H20 年における検討¹⁾²⁾では、既往の文献³⁾を参考に、以下の 2 つの仮定を設けている。

1. 岩盤の洗掘は、主として水流中の砂礫の衝突による
2. 岩盤の洗掘量は、岩盤面に衝突する砂礫の運動量に比例する

これら 2 つの仮定から、H20 年における検討では、洗掘速度 V_d (m/h) を式 (2) で表し、洗掘速度 V_d と $q_b \cdot V$ の関係について、正の相関関係となることが報告されている。

$$\begin{aligned}
 V_d &= \frac{D}{T} \\
 &= \alpha_1 \cdot N \cdot m \cdot V_0 \\
 &= \alpha \cdot q_b \cdot V
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

ここで、 D は洗掘深 (m)、 T は通水時間 (h)、 α_1 と α は比例定数、 N は単位時間幅当たりの洗掘現象に関与する砂礫の数 (個/h/m)、 m は流砂一個当たりの質量 (g)、 V_0 は流砂の速度 (m/h)、 q_b は単位幅給砂量 (m²/h)、 V は流速 (m/h) である。なお、 α は、 α_0 、 α_1 、砂礫が衝突する確率 p 及び砂の密度 ρ_s (g/m³) の積である。H21 年

通水前



ケースA-1(流量=0.1m³/s、給砂量=1.8m³/hr、平均粒径=0.004m、通水時間=4hr)



ケースA-2(流量=0.1m³/s、給砂量=3.6m³/hr、平均粒径=0.004m、通水時間=3hr)



ケースA-3(流量=0.3m³/s、給砂量=4.5m³/hr、平均粒径=0.004m、通水時間=3hr)



ケースA-4(流量=0.5m³/s、給砂量=5.0m³/hr、平均粒径=0.006m、通水時間=3hr)



ケースB-1(流量=0.5m³/s、給砂量=0.6m³/hr、平均粒径=0.042m、通水時間=4hr)



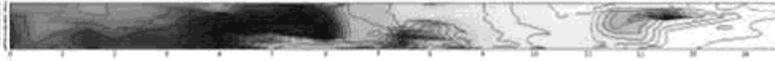
ケースB-2(流量=0.5m³/s、給砂量=1.0m³/hr、平均粒径=0.060m、通水時間=3hr)



ケースB-3(流量=0.5m³/s、給砂量=1.5m³/hr、平均粒径=0.054m、通水時間=3hr)



ケースC-1(流量=0.5m³/s、給砂量=5.0m³/hr、平均粒径=0.028m、通水時間=3hr)



ケースC-2(流量=0.5m³/s、給砂量=6.0m³/hr、平均粒径=0.028m、通水時間=3hr)



図-8 各ケース毎通水後の河床高コンター図

の現地実験結果に関しても H20 年と同様の整理を行ったが、図-9 の様にならりのばらつきが生じた。これは、H20 年に使用された砂礫の粒径が 25mm、40mm の 2 区分に対して、H21 年は 10mm、40mm、65mm と粒径の幅を大きくしたため、H20 年の実験とは異なる洗掘機構が生じ、仮定が成り立たなくなったことが理由としてあげられる。

このことから、岩盤の洗掘を砂礫の衝突だけでは整理することが出来ないと考え、新たに摩擦による洗掘

が生じているとの仮定を設け、検討を行うこととした。

6. 砂礫の移動機構

衝突による洗掘機構と摩擦による洗掘機構との区別を行うために、砂礫の移動機構を検討することとした。流水による掃流砂の移動を跳動による輸送と考える *saltation* モデルを参考として、砂礫の跳躍距離に着目し、衝突と摩擦による洗掘に区分することを考える。静

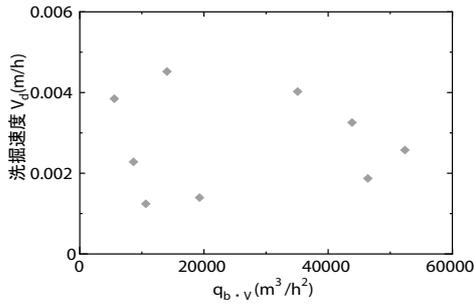


図-9 洗掘速度と $q_b \cdot V$

表-3 跳躍距離 L_s (m)

ケース	平均粒径 d (m)	流量 Q (m ³ /s)	単位時間当たりの給砂量 (m ³ /hr)	跳躍距離 L_s (m)	移動倍率 (%)
A-1	0.004	0.11	1.8	0.121	3432
A-2	0.004	0.10	3.6	0.106	3031
A-3	0.004	0.28	4.5	0.145	4145
A-4	0.006	0.55	5.0	0.129	2259
B-1	0.042	0.46	0.6	0.021	48
B-2	0.060	0.44	1.0	0.001	0.8
B-3	0.054	0.52	1.5	0.006	11
C-1	0.028	0.51	5.0	0.028	99
C-2	0.028	0.47	6.0	0.032	111

止状態から跳動して移動する砂粒は、突出した河床砂粒に衝突して跳動運動に入り、放物体軌跡を描いて底面に衝突して跳動し、流砂では4~5回跳動すると定常跳躍に達するとして土屋ら⁴⁾によって導かれた式(3)を用いて跳躍距離 L_s ⁵⁾を算出した。

$$L_s = \frac{1}{2} \left(s + \frac{3}{2} \right) \lambda_s A_r^2 \tau_* \times \left[(1+e) - \sqrt{(1-e)^2 + \frac{2(1-e)}{(3/4)\lambda_s C_D A_r^2 \tau_*}} \right]^2 d \quad (3)$$

ここで、 s :砂礫の水中比重、 C_D :抗力係数、 e :砂礫の反発係数、 $\lambda_s: 4H_s / L_s$ 、 H_s :跳躍高(m)、 $A_r: u_b / u_*$ 、 d :粒径(m)である。なお、既往の研究結果から、 $e=0.55$ 、 $s=1.65$ 、 $A_r=8.5$ 、 $C_D=0.4$ 、 $\lambda_s=0.4$ を使用した⁵⁾。結果を、表-3に示した。

表-3から砂礫の跳躍距離と粒径を比較し、跳躍距離の方が大きければ跳躍、小さければ転動、滑動と考え、砂礫の移動機構の判別を行った。A-1~A-4に関しては跳躍距離 > 粒径となったため、これらの洗掘は主に砂礫が跳躍を繰り返しながらの移動による河床への衝突が支配的であると考えられる。また、B-1~B-3に関しては、跳躍距離 < 粒径となったため、これらの洗掘に関しては主に河床上における転動および滑動による摩擦が支配的であると考えられる。一方、跳躍距離 粒径となったC-1とC-2に関しては、後で考察を加える

こととする。

7. 摩擦による洗掘における礫の挙動

摩擦による洗掘は、転動によって起こる場合と滑動によって起こる場合が考えられる。河床洗掘を把握する実験に関しては、流水が濁って映像解析が困難だったことから、砂礫の移動速度を測定する実験における、砂礫の動きを、映像から確認することとした。確認を行ったのは前節「6. 砂礫の移動機構」の結果から、28mmが衝突による洗掘と摩擦による洗掘との境界と考えられるため、粒径28mmより大きい砂礫を対象とした。

結果は転動が過半数以上を占めた。このことから、今回の摩擦による洗掘機構は、砂礫の転動によるものを扱っていることとなる。なお、三辺のうち一辺が他の二辺と比べ、およそ半分以下の場合に滑動となる場合が多いことを確認した。

8. 軟岩の摩耗係数

衝突と摩擦の区別の結果から、昨年度の検討では考慮されていない摩擦が支配的な洗掘に着目することとする。摩耗に関する理論的、実験的検討は多く行われているが、今回は摩耗量は摩擦距離と荷重に比例し、金属の硬さに反比例するというHolmの法則を参考にすることとした。この法則は、既往の研究⁶⁾では主にコンクリートや金属に適用されているが、本研究の軟岩河床の洗掘にも適用できるものと考えた。

この考えを基に、軟岩がどの程度摩耗しやすいのかを把握するために、材料の特性によって定まる摩耗係数 C (m²/kgf)を逆算する。摩耗係数を逆算する式は以下のように表される。まず、 W_c :摩耗量(m³)は、 D :洗掘深(m)、 L :水路移動距離(m)、 B :水路幅(m)とすると式(4)で表わされる。

$$W_c = DLB \quad (4)$$

一方、既往の研究⁶⁾では式(5)で表わされている。

$$W_c = C \mu_s PL \quad (5)$$

ただし、 P :砂礫の総荷重(kgf)とする。式(4)及び式(5)より式(6)が得られる。砂礫の総荷重 P は、砂礫を球体と仮定し、単位幅給砂量を q_b (m²/h)、通水時間を T (h)、粒径を d (m)、砂礫一個当たりの荷重を w (kgf)とすると、式(7)で表すことができる。

$$DLB = C \mu_s PL \quad (6)$$

$$P = \frac{q_b T}{d^3 / 6\pi} w \quad (7)$$

表-4 軟岩の摩耗係数 $C(m^2/kgf)$

ケース	平均粒径 d (m)	洗掘深 D (m)	移動距離 L (m)	総荷重 P (kgf)	摩耗係数 C (m^2/kgf)
B-1	0.042	0.018	15	6194	3.90E-06
B-2	0.060	0.008	13	7743	1.42E-06
B-3	0.054	0.015	15	11614	1.77E-06
平均値					2.36E-06
備考	B-2の洗掘深および移動距離は礫堆積部を除いた値である				

表-5 コンクリートおよび鋼材の摩耗係数 $C(m^2/kgf)$

材質	摩耗係数 C (m^2/kgf)
コンクリート	1.14E-08
Steel (SM41)	6.59E-11
Steel (HT.80)	4.78E-11
SUS 304	3.25E-11
SCMnH 11	1.33E-11

表-6 軟岩の摩耗係数 (衝突) $C(m^2/kgf)$

ケース	平均粒径 d (m)	洗掘深 D (m)	移動距離 L (m)	総荷重 P (kgf)	摩耗係数 C (m^2/kgf)
A-1	0.004	0.005	10	18583	3.63E-07
A-2	0.004	0.005	9	27874	2.26E-07
A-3	0.004	0.013	15	34843	5.28E-07
A-4	0.006	0.006	15	38714	2.13E-07
C-1	0.028	0.011	15	99921	3.75E-07
C-2	0.028	0.009	13	119905	2.72E-07
平均値					3.30E-07
備考	A-1, A-2, C-2の洗掘深および移動距離は礫堆積部を除いた値である				

以上より、 C は式 (8) で算出できることになる。

$$D = C \mu_s \frac{q_b T}{d^3 / 6\pi} w \quad (8)$$

表 2 の洗掘深をもとに軟岩の摩耗係数 $C(m^2/kgf)$ を逆算した結果を表-4 に示す。また、参考のため既往の研究結果⁶⁾よりコンクリートおよび鋼材の摩耗係数⁶⁾を表-5 に示す。

表-4 と表-5 を比較すると、軟岩の摩耗係数はコンクリートとはオーダーが 2 つ、鋼材とはオーダーが 5 つ大きい結果となった。したがって、コンクリートや鋼材に比べ、軟岩は非常に摩耗しやすいことが分かる。

ここで、跳躍距離 粒径の場合である C-1、C-2 においても衝突が支配的な洗掘である A-1 ~ A-4 と同オーダーの摩耗係数となったため衝突が支配的な洗掘と考えられることが示された。

また、この Holm の法則を参考にした摩耗係数を逆算する式は、摩擦による洗掘にのみ適用されるはずであるが、本来適用できないもう一つの、衝突が支配的な洗掘においても適用を試みた。その結果を表-6 に示す。摩擦が支配的な洗掘における摩耗係数と比べ、オーダーが 1 つ異なる結果となった。同じ軟岩という岩質にも関わらず異なる結果となった。

9. 結論

H20 年の研究における砂礫の速度は平均流速に比例するという仮定の確認を行い、その仮定がほぼ正しいことを確認した。また、砂礫の速度と平均流速の比例定数 α と粒径は負の相関関係になることが判明した。

次に、H21 年の現地実験結果から軟岩の洗掘は衝突だけではなく摩擦による洗掘の可能性も考慮し、砂礫の跳躍距離から衝突が支配的な洗掘と摩擦が支配的な洗掘に区別した。本研究では、摩擦が支配的な洗掘に着目し、軟岩の摩耗係数を逆算するとともに、本来は摩擦に適用される式を衝突が支配的な洗掘においても適用した結果とを比較して、オーダーが 1 つ異なる結果を得た。すなわち、間接的ではあるが、衝突と摩擦とでは洗掘機構が異なることを示すとともに、軟岩河床の洗掘は両者の考慮が必要であることを明らかにした。

しかし、今回は実際の砂礫の移動機構の解析が困難だったため、過去の研究を参考にして計算から砂礫の跳躍距離を算出し、粒径と比較することで砂礫の移動機構を判別し、衝突と摩擦に区別した。そのため、摩擦に関しては映像を確認した結果、転動が大半を占めているように見られたが、今回の方法では転動・滑動を明確に区別することはできていない。したがって、砂礫の実際の挙動を解析することがより明確な洗掘機構の解明のために必要だと考えられる。

また、本研究における軟岩とは、旭川市街部を流れる石狩川に仮設した現地実験水路河床に露出したシルト岩を主に示している。しかし、他の河川において露出している軟岩の岩質が同様であるとは限らないため、移動機構に着目するだけではなく、今後は河床材料である軟岩にも着目していくことが必要である。

謝辞:本研究は、平成 19 年科学研究費補助基本研究 (A)(代表:清水康行、課題番号:19206052) 及び平成 21 年度河川整備基金 (代表:渡邊康玄、課題番号:21-1212-001) の助成を受けて行われた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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: 軟岩河床の洗掘を考慮した河床変動計算の開発, 河川技術論文集, 第 15 巻, 2009
- 2) 旭川開発建設部 治水課 松本勝治, 田代隆志, 根本深: 石狩川上流における河床低下について, 北海道開発局技術研究発表会, 2009
- 3) 大野善雄, 林栄港: コンクリート河川構造物の摩耗予測の一手法, 電力土木, No211, 1987
- 4) 土屋義人, 青山俊樹: 水流による砂れき saltation の機構 (2), 京都大学防災研究所年報, 第 13 号 B, pp.199-216, 1970
- 5) 河村三郎: 土砂水理学 1, 森北出版, pp.256 ~ 258, 1982
- 6) 石橋毅: ダム排砂設備の流下砂礫による摩耗・損傷に関する水理学的研究, 土木学会論文報告集, 第 334 号, 1983

(2010. 4. 8 受付)