河床における岩盤上の流砂の集中度合に関する 実験的検討と数値シミュレーション

AN EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL SIMULATION ABOUT DEGREE OF BEDLOAD CONCENTRATION ON BEDROCK

及川 森¹・岩崎 理樹²・山口 里実³・清水 康行⁴・井上 卓也⁵

Shin OIKAWA, Toshiki IWASAKI, Satomi YAMAGUCHI, Yasuyuki SHIMIZU, Takuya INOUE

¹学生会員 北海道大学大学院工学院環境フィールド工学専攻 (〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目)

²学生会員 工修 北海道大学大学院工学院 (〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 工博 北海道大学工学研究院准教授 (〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴正会員 工博 北海道大学工学研究院教授 (〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目)

⁵正会員 工修 ㈱開発工営社 (〒060-0004 札幌市中央区北4条西5丁目1番地)

This paper presents the fundamental studies on the bed degradation process of bedrock induced by the bedload transport over the bedrock. We performed the laboratory experiments focusing on the dependency of the grain size and the strength of bedrock for the erosion velocity of bedrocks. The experimental results show that the grain size and strength of bedrock can affect to the erosion velocity equation of bedrocks. In addition, the movement of the sediment particles over bedrock which has constant side inclining bed was measured to understand the direction of sediment over the bed. We also carried out the numerical simulation of bedrock erosion process by the sediment transport over bedrock to understand the performance of the model proposed by us. The comparison between laboratory experiment and numerical simulation shows that the proposed model overestimates the effect of local slope for sediment transport direction over the bedrocks.

Key Words : *bedrock degradation, bedload, slurry-erosion , The Ishikari River, The Toyohira River*

1. はじめに

1. 1 背景と目的

岩床河川では、河床における岩の露出が原因で、局所的に急激な洗掘が生じることが示唆されている。石狩川上流部や豊平川花魁淵付近(写真-1)でも、河床を覆っていた砂礫が一掃され、岩盤が露出している区間が増加しており、河川管理面からも岩盤河床の著しい洗掘を予測することは重要な課題の一つであり、近年注目されてきている。

筆者による既往の研究¹⁾(以下“及川ら¹⁾”と表す)では、現地実験の代替、補助となる室内実験手法を提案し、室内実験スケールで岩盤の侵食速度式の推定を行い、岩の摩耗も考慮した河床変動計算モデルを開発した。特に現地実験水路の再現計算では、現地実験水路²⁾に酷似した岩盤上の滞筋パターンが確認され、モデルによってある程度岩盤侵食過程を再現できることが確かめられた。流砂が十分に存在しないような岩盤上の流砂量に関しては、竹林らの掃流層モデル³⁾を用いた手法で補正を行った。

しかしながら、及川¹⁾らの実験では岩盤強度の違いや岩盤上を流れる砂礫の粒径の違いによって侵食速度がどのように異なるのかを示していない。また、河床変動計算では、岩盤上の流砂量として砂礫河床を想定して導出された平衡流砂量式を用いているため、岩盤上の流砂運動を適切に推定しているか定か

ではない。岩盤の侵食量は岩盤上の流砂量に大きく依存するため、流れに対する横断方向への流砂の集中度合を把握することは重要な課題の一つである。

そこで、本文では、実河川の岩盤侵食を予測するために、侵食量の岩盤強度依存及び粒径依存に関する実験を行い、岩盤の侵食速度式の再考察を行う。また、岩盤上の流砂の挙動に関する実験を行い、流砂運動と侵食量の関係を調べ、従来の数値シミュレーションと比較し、滞筋部の深掘れにどの程度流砂運動が寄与しているか考察する。

写真-1 豊平川花魁淵の滞筋と堆積した礫

1. 2 研究手法

まず、侵食量の岩盤強度依存及び粒径依存を確認するために、及川ら¹⁾の実験に倣って、回転水槽と石膏を用いて実験を行った。岩盤強度依存性は、異なる強度を持つ石狩川上流部と豊平川花魁淵の河床岩質を石膏で再現し、それぞれの侵食速度を比較することで確認した。なお今回、岩質の違いは、予め一軸針貫入強度と水石膏比との関係を調べ、井上らによる実河川の河床岩盤の一軸圧縮強度データ⁴⁾を用いることで再現した。一方、粒径依存性は、給砂する砂礫粒径に5mmと10mmの2パターン用い、それぞれの侵食速度を比較することで確認した。

次に、横断方向にも勾配をつけた直線水路を用いて、岩盤上の砂礫の動きを縦方向と横方向に分けて画像解析を行い、縦断方向掃流砂量と横断方向掃流砂量の比を調べた。その際同時に洗掘量を測定した。

最後に、及川ら¹⁾が提案したモデルに上述の流砂量比を反映させて数値計算を行い、洗掘量や流砂の集中度をそれぞれ室内実験と比較し考察した。

図-1 平均貫入力量と水石膏比の関係

図-2 回転水槽模式図(上:天板, 下:水槽)

図-3 有効幅を示す河床変動量図(case2-3)

2. 侵食量の粒径依存及び岩盤強度依存に関する実験

2. 1 一軸針貫入強度試験

実験水路の河床は、現地にある岩の代わりに石膏を用いている。石膏の水和反応によって硬化する性質を利用しており、水と石膏の重量率を変えることで、その強度をある程度変化させることができる。

水石膏比 G を変えた8個の供試体に対して針貫入試験⁴⁾を複数回行い、平均貫入力量 N (N/mm)をそれぞれプロットしたものを図-1に示す。これより $G=73\%$ 以上の割合で水に石膏を溶かした場合、 N と G の間に(1)式のような関係を得た。また、水石膏比を大きくするとワーカビリティが著しく低下することから、 $G \geq 100\%$ では連続的な貫入試験は行なわなかった。

$$N = 0.0994G - 5.7212 \quad \cdots(1)$$

また、一軸圧縮強度 f と N の関係は(2)式で表されることが知られている⁴⁾。

$$\log_{10} f = 0.978 \log_{10} N + 2.621 \quad \cdots(2)$$

一方、現地河川の岩盤の実測値 N は、石狩川上流部で $N_f=2.3$ (N/mm)、豊平川花魁淵で $N_f=24.2$ (N/mm)であり、式(1)から逆算すればそれぞれ $G_f=80.7\%$ 、 $G_f=301.0\%$ の割合で石膏を溶かせばよいと考えられる。実際に養生した石膏河床で針貫入試験を行えば、それらの平均貫入力量はそれぞれ $N_f=2.2 \sim 2.4$ 、 $N_f=24 \sim 25$ (N/mm)となり、実河川における N 実測値をよく再現した。従って、(1)式から推定した水石膏比 G は妥当であると判断し、このとき式(2)よりそれぞれ $f_f=944$ (kN/m²)、 $f_f=9427$ (kN/m²)であることが分かる。このようにして石膏河床を定量的に扱った。

2. 2 実験概要

岩盤の侵食速度式を得るために、図-2のような実験装置を用いて、流速 V と流砂量 q_b を与え、石膏河床の侵食速度 D を測定する実験を行った。実験装置は、中央の動力を伝える回転棒(図-2中a)を天板の穴(図-2中b)に挿入することで、水面に密着したアクリル板が回り、摩擦力によって水流を発生させる仕組みになっている。また、河床は水平である。

実験条件について、河床岩質及び投入砂の粒径をcase1(石狩川上流部, 5mm)、case2(石狩川上流部, 10mm)、case3(豊平川花魁淵, 5mm)と設定して実験を行い、流下方向に対して垂直な断面を測線として洗掘量を測定した。流砂量及び平均流速の測定法に関しては、及川ら¹⁾の実験と同様の方法を用いた。また図中の測線を「CS」と表す。

また実験中に、内岸側で堆積が起きたり、外岸側で流砂が通過しなかったりするような点は、実験後も洗掘は見られない。このような点を除外した水路の幅を有効幅(図-3)とし、有効幅の範囲内で流砂量や侵食速度の算出を行った。これを考慮することによって、case毎の特徴が大きく顕在化する。後述する及川ら¹⁾の実験データにも同様の操作を施すことで、両者の比較ができるようになっている。

表-1 回転水槽実験の全条件とその結果

河床岩質	case1-1	case1-2	case1-3	case1-4	case2-1	case2-2	case2-3	case3-1	case3-2	case3-3
一軸圧縮強度 f (kN/m ²)	944				944				9427	
粒径(m)	0.005				0.01				0.005	
有効水路幅(m)	0.08	0.07	0.05	0.05	0.07	0.07	0.07	0.07	0.04	0.03
流砂量 q_b (m ³ /h)	2.83	2.84	3.85	4.75	3.36	2.59	3.45	3.00	6.27	3.43
流速 V (m/h)	1872	2736	3168	3456	2016	1584	1440	1800	2160	2520
$q_b \cdot V$ (m ³ /h ²)	5293	7760	12182	16407	6783	4095	4963	5395	13552	8646
実験時間(h)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	1.50	1.63	1.78
洗掘量(mm)	0.819	0.879	0.980	1.133	0.557	0.371	0.414	0.136	0.244	0.167
洗掘速度 D (mm/h)	1.082	1.171	1.307	1.511	0.743	0.495	0.552	0.090	0.149	0.093

図-4 case1,2,3毎の $q_b \cdot V$ - D 図

2. 3 実験結果と考察

実験条件及び実験結果を表-1に示す。また、これらのデータから横軸に q_b と V の積、縦軸に D をcase毎にプロットしたものを図-4に示す。

case1とcase2を比較したとき、粒径を大きくすれば侵食速度式の傾きは大きくなることが分かる。このことは井上ら²⁾によっても示唆されており、侵食速度式の粒径依存性が窺える。今回の実験の範囲では、粒径の大きいcaseで侵食速度が小さくなっている。図-4の侵食速度の傾きが一定値をとれば $q_b \cdot V$ が大きい領域では、逆に粒径の大きいcaseで侵食速度が大きくなる可能性がある。今回は大きい $q_b \cdot V$ での実験を試みたが、これを明らかにするためには $q_b \cdot V$ がさらに大きい領域での実験が今後の課題である。

一方、case1とcase3を比較したとき、岩盤強度を大きくすれば侵食速度式の傾きは小さくなり全体的に掘れにくくなることが分かる。ただし、case3では他caseよりも侵食速度のオーダーが小さく、今回の測定方法では侵食速度の差は測定誤差である可能性が否めないため、侵食速度式の傾きについては検討の余地を残す。今後はより精度の高い計測機器を用いるか実験時間より長くとも必要があると考え。

及川ら¹⁾の実験では石狩川上流部を再現する石膏として $G=78\%$ のものを採用して実験を行い、粒径5mmの実験結果は式(3)のような侵食速度式となった。

$$D = 1.0 \times 10^{-7} q_b \cdot V + 0.0003 \quad \cdots(3)$$

一方、今回のcase1で使用している $G=80.7\%$ の石膏の方が幾分か固くなっており、同じく粒径5mmのcase1の結果は式(4)のような侵食速度式となった。

$$D = 4.0 \times 10^{-8} q_b \cdot V + 0.0009 \quad \cdots(4)$$

式(3)と式(4)を考察すれば、式(4)の方が全体の侵食速度が大きいのにに対して、式(3)の方が傾きが大きい。さらに、及川ら¹⁾の実験による横軸の定義域は $q_b \cdot V=300 \sim 2300(\text{m}^3/\text{h}^2)$ 程度だったのに対して、本研究では $q_b \cdot V=4000 \sim 17000(\text{m}^3/\text{h}^2)$ で定義され、互いに補完し合う関係である。従って、一概にどちらが適切な侵食速度式であるとは言えない。

図-5 直線水路鳥瞰図

図-6 流砂量の縦横断比を測定する方法の模式図

3. 流砂運動と侵食量に関する実験

3. 1 実験概要

a) 侵食量

岩盤上を流れる流砂量の、縦断方向と横断方向との割合を調べるために、図-5のような水路を作成した。河床は横断方向にも、水路両岸から水路中央に向かって30°の勾配が設けてあり、水路中央が一番低くなっている。一方、水路縦断勾配は1/30となっている。また、河床は石狩川上流部を想定した石膏($G=80.7\%$)となっており、流砂量の縦横断比を測定すると同時に、河床の洗掘量も測定できるようにになっている。投入する砂礫は粒径が5mmのものを使用した。図-5の上流部には給砂地点として、均一に砂礫が流れるように平坦床を用意している。給砂の際は、堆積が生じない範囲でできるだけ多くの砂礫が流れるように、絶え間無く同じ量を供給し続けるように注意した。また、その際の砂の供給時間と供給量を測定して、流砂量を算出している。

b) 流砂運動

砂礫が図-5の石膏区間に差し掛かると、横断勾配の影響で水路中央に集約し始める。流下中の砂礫は、水路中央を除いてはほぼ一樣な角度で流れることが観察された。一方、一度水路中央に集約した砂礫は、一貫して水路中央を流下する傾向にあった。

そこで、まずこれらの様子を水路上方から撮影し、粒子とほぼ同じ大きさの正方形のグリッドによって河床を縦断方向及び横断方向に区切り、砂礫を無作為に抽出した。次にその粒子が縦横それぞれ何マスずつ進んだか合計してゆく作業を、図-6の要領で繰り返すことによって、粒子が水路流下方向に対して何度の方向に転がりやすいか、すなわち流砂量の縦横断比はどのような割合になっているのかを調べた。

3. 2 実験結果と考察

この結果を各case, 測線毎の物理量と併せて表-2にまとめた. 表-2中で黄塗りになっているcaseでは, 十分な水深が確保されていないことを意味する. この場合流路が三角形断面になっているため, 有効な水路幅を再定義する必要がある, それに伴って流速 V , 流砂量 q_b , 侵食速度 D をそれぞれ補正している.

ここで, 図-7として各case後の河床断面図を測線毎に示す. 図中の測線aでは水路断面全体で均一に洗掘される傾向にあるが, 測線b,c,dでは下流の測線になるほど, 次第に流砂が水路中央に集中する影響で中央の洗掘が卓越し, 兩岸付近では流砂が存在せず洗掘も起こりにくくなっているのが見て取れる.

次に, 各測点で計測した洗掘深を, それぞれのcaseの最大洗掘深で除すことで無次元化し, case毎に図-8に示す. 流量の多いcase4-1では, 砂礫は水流から受ける抗力の影響が卓越するのでcase4-2,3よりも縦断方向に流されやすく, 他のcaseと同様に下流の測線ほど幾分か流砂の集中度合が大きくなっているが, 水路全体としての流砂の集中度合は他のcaseより低い. 一方, 流量が少ないcase4-2,3では, 砂礫は重力の影響が卓越するので, 横断方向に流されやすく, 流砂の集中も著しくなっており, 表-2の流砂の移動角度からもそれが分かる.

このことは, 横断方向掃流砂量の縦断方向掃流砂量に対する比を表す長谷川式(5)でも確かめることができる.

$$\frac{q_{by}}{q_{bx}} = \frac{v_b}{u_b} + \sqrt{\frac{\tau_c^*}{\mu_s \mu_k \tau^*}} \tan \omega \quad \cdots (5)$$

ここに q_{bx}, q_{by} :縦断方向及び横断方向掃流砂量, u_b, v_b :底面付近の縦断方向及び横断方向流速, μ_s, μ_k :最大静止及び動摩擦係数, τ_c^*, τ^* :限界無次元掃流力, 限界掃流力, ω :横断勾配である. 流量が増加すれば τ^* も増加し, 式(5)の値は小さくなる. すなわち q_{bx} に対して q_{by} が小さくなるので, 流砂に対する勾配の影響は小さくなり, 流砂の集中も相対的に小さくなる. 逆に流量が減少すれば τ^* も減少し, 式(5)の値は大きくなる. すなわち q_{bx} に対して q_{by} が大きくなるので, 流砂に対する勾配の影響は大きくなり, 流砂の集中も相対的に大きくなる.

なお, 実験中の水面が僅かに振動して石膏河床上で水の満ち干きが起こることによって, 実際は水による石膏の洗掘も生じているが, 図-8中case4-2,3で兩岸の値が0になっている箇所があるのは, 有効幅を定義したことにより, 砂礫による洗掘は起きていないとして, 切り捨てて考えているからである.

また, 水路測定区間の上流には平坦床で給砂区間を設けていることは前述の通りであるが, それらの境界は段落ちになっている. 流量が少なくなればその影響が卓越し水面が振動することで, case4-3などでは下流側に位置する測線cであっても局所洗掘が起こっていないと考えられる.

表-2 直線水路実験の全条件とその結果

実験時間(h)	case4-1				case4-2				case4-3			
流量(l/s)	0.30				0.45				1.00			
投入砂量(kg/s)	10				6				2			
投入砂量(kg/s)	0.113				0.072				0.016			
流砂の移動角度(°)	13				16				21			
測線	CS 1	CS 2	CS 3	CS 4	CS 1	CS 2	CS 3	CS 4	CS 1	CS 2	CS 3	CS 4
水深(cm)	6.19	7.05	6.08	6.69	4.70	6.51	5.06	5.90	3.21	3.47	3.97	4.02
有効水路幅(m)	0.205	0.205	0.205	0.205	0.163	0.205	0.175	0.205	0.111	0.120	0.138	0.139
流速V(m/s)	1.50	1.18	1.55	1.30	1.57	0.82	1.35	0.99	1.12	0.96	0.73	0.71
流砂量 q_b (m ² /h)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.60	0.48	0.56	0.48	0.20	0.19	0.16	0.16
洗掘速度D(mm/h)	79.3	65.8	66.8	46.4	59.1	40.7	31.2	27.5	9.7	9.3	6.0	8.9

図-7 各測線における各case後の河床断面図

図-8 実験case毎の各測線無次元化河床変動図

4. 計算モデルによる岩盤侵食モデルの検討

4. 1 数値計算概要

直線水路における実験から、岩盤上の掃流砂の集中により岩盤が侵食される様子が確認され、流砂の集中度合は流れの強さと河床勾配のバランスに影響されることが示唆された。ここでは本実験結果を基に、及川ら¹⁾により提案されている岩盤河床を含む平面二次元河床変動モデルの流砂モデルに関する検討を行う。

ここで用いる計算モデルでは、岩盤上の掃流砂運動を主流方向は平衡流砂量式である芦田・道上式⁵⁾、横断方向は流砂への横断方向の勾配の影響を考慮した長谷川の式により表現している。これらの流砂モデルは河川の河床変動解析では一般的なスキームであり、砂州の移動や湾曲部の河床変動などの現象を再現できることが既往の研究⁶⁾で示されている。著者らはこれらを岩盤河床上の流砂モデルとして拡張することで、流砂集中に伴う岩盤の洗堀を表現できることを示した。しかしこの流砂モデルは砂礫河床を対象として導出されているため、岩盤河床上の流砂運動を適切に再現できるかは不明瞭である。ここでは、実験と同様の数値実験を行い、実験で得られた侵食パターンをこの計算モデルでどの程度把握可能かについての検討を行う。モデルの詳細については及川ら¹⁾の論文を参照されたい。

掃流砂の移動方向は、河床近傍の流速ベクトルと河床勾配に大きく影響を受ける。本計算モデルではこれらの影響を前述の長谷川式(5)により考慮しているが、ここでは流速ベクトルの影響については議論せず、横断勾配の影響について検討する。横断勾配の影響度合については、横断勾配 ω を一定とすれば、土粒子と河床の摩擦係数 μ_s, μ_k 、限界掃流力 τ_c^* 及び掃流力 τ^* に依存する。特に岩盤河床上では、岩盤-砂粒子の摩擦が砂礫河床上とは異なることが予想され、 τ_c^* も砂礫河床の場合と異なることが井上ら²⁾によって提唱されている。そこで、本実験のcase4-1を対象として計算を行い、同様の断面での比較を行う。

なお、岩盤河床上に掃流可能な流砂量は砂礫河川の平衡流砂量より多いことが知られているが、本モデルはその影響を考慮することができず、過大な流砂の集中は礫の堆積を引き起こし、純粋に河床洗堀の影響を検討できない。そのため給砂量については堆積が生じないように実験よりも少なめとしている。

4. 2 数値計算結果と考察

a) 物理的な条件を仮定した場合

最初に、河床と粒子の摩擦を表す係数を一般の河床変動計算と同様の $\mu_s \mu_k = 0.5$ とし、限界掃流力を岩垣の式から算出したものをRUN1とする。図-9から分かるように、洗堀量の集中が実験よりも上流断面で起きており、実験で測定された最上流断面以外では同様の侵食量を示している。これは流砂の集中を過大評価していることを意味している。なお、流砂

が集中しない箇所においても毎時刻洗堀が起きている。これは侵食速度式の切片が水流による洗堀の意味合いを持った項であり、計算時間を長くとるほど流砂量に関わらずその効果が結果に反映されたためである。次に、岩盤河床-砂粒子の摩擦を大きくとり $\mu_s \mu_k = 1$ とし、同様の計算を試みたものをRUN2とする。図-9より、流砂の集中が幾分緩和されている様子が分かる。同様に、RUN3では長谷川式重力項に影響のある限界掃流力 τ_c^* を3割減じることで、岩盤上における限界掃流力を低下させる効果を考慮した。図-9より、流砂の集中具合は幾分弱まるが、河床の摩擦係数を変更した方が効果が幾分大きいことが分かる。最後に、これらの影響を同時に加えたものをRUN4とする。図-9より、上流側の断面で水路中央部以外の侵食量がほかのケースより大きくなっており、幾分実験ケースに近づいている。またいずれのRUNでも流砂の移動角度は表-2の 13° より大きくなった。

数値計算では河床に接する砂礫に対して、重力の効果、言い換えれば横断勾配の影響が利き過ぎており、いずれも実験値よりも流砂が一極集中する傾向が強く表れ、計算結果河床断面(図-9)よりその傾向が窺えた。このように、横断方向の流砂量の見積もりが岩盤河床の洗堀に影響を及ぼすことが示唆され、これらの影響、すなわち岩盤河床上の流砂運動を適切に表現することで、モデル精度の向上が期待できる。本研究では、重力項を調節することで一定の効果を上げたが、岩盤河床上の流砂運動をより一般的な形で定式化することが、岩盤河床の河床変動計算モデルを構築する上で重要であるといえる。

図-9 数値計算RUN毎の各測線無次元化河床変動図a)

図-10 数値計算RUN毎の各測線無次元化河床変動図b)

b) 実験から計算条件を逆算した場合

流砂の集中度の観点で、使用したモデルがどの程度物理現象を再現するのか、a)に対して物理的な有意性とは無関係に、仮想的に極端な条件を仮定して計算を行った。

長谷川式重力項を無視することで、流砂が横断勾配から受ける影響は無いものとし、底面流速から受ける影響によってのみ移動するような条件をRUN5とする。図-10より、このとき流砂量は局所的に集中すること無く分布し、滞筋は発達せず、次第に拡幅していった。

次に、前述の長谷川式(5)を用いて実験結果から作為的に係数を決定する。第4章の表-2中case4-1から、このとき流砂の移動角度は水路流下方向に対して 13° であるので流砂量縦横断比は $q_{by}/q_{bx} = \tan 13^\circ$ であり、限界掃流力は数値計算結果の最大値を用いて $\tau^* = 0.3$ とし、横断勾配は一樣に $\omega = 30^\circ$ とする。いま、 $v_b \ll u_b$ より式(5)の第一項を無視すれば、

$$\sqrt{\frac{\tau^*}{\mu_s \mu_k}} = \frac{q_{by}/q_{bx}}{\tan \omega} \sqrt{\tau^*} = \frac{\tan 13^\circ}{\tan 30^\circ} \sqrt{0.3} \approx 0.219 \quad \cdots (6)$$

となる。(6)を満たすように τ^*_c 及び $\mu_s \mu_k$ を決定したものをRUN6とする。図-10から分かるように、RUN1,2,3,4よりも流砂の集中する度合いが抑制され、滞筋の掘れ具合や拡幅も他のRUNと比較して実験結果を良く再現していることが分かる。

b)のような手法は他の条件における適応性については今後の課題ではあるが、少なくとも本計算ケースでは、実験による流砂の横断方向と縦断方向の比をとり、長谷川式の定数部を便宜的に逆算する方法で、重力項の影響を一番適切に調整し流砂の集中度合いを表現することができた。従って、横断勾配の流砂運動への影響を実験条件と合わせることができれば、本計算モデルで流砂集中による岩盤侵食過程を再現できる可能性があると言える。つまり、掃流砂量の縦断方向と横断方向の比がどのような要因で決定されるのか、実験によってのみならず理論的にも定式化できれば、数値シミュレーションの際に汎用的に用いることが可能となるので、今後更なる解析が必要である。

5. 結論

本研究で得られた成果を整理し以下に列挙する。

- 1) 回転水槽を用いて、侵食速度式の粒径依存性及び岩盤強度依存性を示した。
- 2) 直線水路を用いて、掃流砂量の縦横断比を調べ、掃流力 τ^* が流砂の集中具合に寄与する影響を考察した。
- 3) 一般的な河床変動計算を用いて、従来のモデルでは岩盤上の流砂運動が再現しきれず、流砂の過剰な集中を示した。
- 4) 2)と3)を組み合わせることで、岩盤上の流砂運動を再現できる可能性を提唱した。

参考文献

- 1) 及川森, 岩崎理樹, 山口里実, 清水康行, 木村一郎: 流砂の摩耗作用による岩盤侵食に関する実験的検討と数値シミュレーション, 水工学論文集, 第55巻, pp.751-756, 2011.
- 2) Inoue, T., N. Izumi, Y. Shimizu and M. Hamaki: A riverbed evolution calculation method that considers variation in riverbed erosion of soft rock, Proceedings of 7th International symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM2011, pp.1902-1916, 2011.
- 3) 竹林洋史, 中元達也, 藤田正治: 粘着性・非粘着性河床材料混在場における土砂輸送特性—トンレサップ川を対象として—, 京都大学防災研究所年報, 第52号B, pp.637-645, 2009.
- 4) 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, pp.321-326, 2009.
- 5) 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208号, pp.59-69, 1972.
- 6) 清水康行, 藤田睦博, 平野道夫: 連続床止め工を有する複断面河道における流れと河床変動の計算, 水工学論文集, 第43巻, pp.683-688, 1999.
- 7) Egashira, S. and Ashida, K. United view of the mechanics of debris flow and bed-load, Advances in Micromechanics of Granular Materials, (Edited by H.H.Shen et al.) Elsevier, pp.391-400, 1992.

(2011.9.30 受付)