

モルタルで擬似した軟岩の 流砂の衝突による洗掘

SCOURING OF SOFT ROCK IMITATED WITH MORTAR
BY THE COLLISION OF GRAVEL

小松 佑輔¹・渡邊 康玄²・泉 典洋³・竹林 洋史⁴

Yuusuke KOMATSU, Yasuharu WATANABE, Norihiro IZUMI and Hiroshi TAKEBAYASHI

¹ 正会員 釧路市役所 (〒 085-0018 北海道釧路市黒金町 7 丁目 5 番地)

² 正会員 博 (工) 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)

³ 正会員 北海道大学大学院 工学研究院 (〒 060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

⁴ 正会員 京都大学 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

In order to design the measure against scouring of soft rock, it is necessary to clarify the scouring mechanism of soft rocks. In this research, in order to clarify the scouring mechanism of soft rocks in detail, the hydraulic experiments are conducted at a laboratory. Since it was impossible to install the soft rocks in a flume without disturbing in the flume, the poor mixing mortar was used instead of the soft rock. The pebble whose particle diameter is 4.36 mm as a gravel leading to scouring was used. In order to grasp the mechanism of the scouring, three cases to which the supplying amount of the gravel from upstream end of the flume was changed were performed. In this experiment, it became clear that scouring of mortar arose by the collision of gravel rather than that is caused by friction of gravel. Then, to formulize scouring by the collision of gravels was tried. It was assumed that total of the collision energy to the mortar of a gravel is proportional to the amount of scouring of mortar. The proportionality constant in this formula was obtained by the experiment which made the glass ball collide with this mortar directly. The computed scouring depth using the hydraulic conditions and the proportionality constant is reproducing the result of hydraulics experiment with sufficient accuracy, although there is a tendency of an underestimate a little. From the above result, it becomes clear that there are two kinds of scouring mechanisms of soft rocks. One is abrasion by friction of gravels and another is damage by the collision of gravels. Furthermore, it becomes clear that the scouring mechanism changes with saltation length of a gravel. That is, the scouring factor is the collision of a gravel when the saltation length is larger than the diameter of a gravel, and the factor is the friction of a gravel when the saltation length is smaller than the diameter.

Key Words: soft rocks, collision, scouring, sediment transport, hydraulic experiment

1. はじめに

近年, 全国的に源流から河口までの土砂動態の変化による河床低下が問題となってい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は, 河床低下の進行によって河床を覆っていた砂礫が一掃され, 図-1 のように軟岩が露出する区間が増加している。軟岩とは, ある程度の固結度を持っているが, 強い流れに対しては脆弱であり, 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。このため, 局所的な深掘れによる橋脚などの根入れ不足, 護岸の浮き上がり等が問題となっている。石狩川の河口から 160km 上流に位置する旭川市街近郊において, 軟岩の浸食機構を解明するため, 2008 年度から現地実験が行われている。既往の研究¹⁾²⁾³⁾により軟岩河床の洗掘は流水による影響よりも流砂による影響が大きいことが

確認された。それらの研究では, 軟岩の洗掘が砂礫との摩擦によって生じるものとして解析が行われ, その結果として, 洗掘の要因として摩擦による洗掘と衝突による洗掘があることが指摘されている。しかしながら, 砂礫の衝突による洗掘に関しては具体的な検討は行われていない。

本研究では, 砂礫の摩擦による洗掘と衝突による洗掘についてより詳細に水理量との関係を把握するため, 室内における水路実験を行った。なお, 室内の水理実験にあたり, 現地の軟岩を不攪乱で水路に設置することが困難であることから, 図-2 のように貧配合のモルタルを使用して, 軟岩を再現することにした。また, 砂礫の移動形態の区分に用いる跳躍距離 (L_s) にも注目し, 室内実験水路にて, ビデオ撮影を行い, 砂礫の詳細な挙動の検討も行った。

表-1 換算一軸圧縮結果 (kN/m²)

材料	換算一軸圧縮強度 (KN/m ²)
W/C=50	52,482
W/C=100	34,407
W/C=200	10,044
(実験で使用)	3,192
シルト岩(石狩川)	1



図-1 露岩状況

2. モルタルによる軟岩の再現

貧配合のモルタルによって軟岩を擬似的に再現し、洗掘機構の変化を確認することとした。軟岩は、一軸圧縮強度が 20MPa=20000kN/m² 以下と定義されている⁴⁾ことから、使用するモルタルと同一配合の供試体を針貫入試験器(軟岩ペネトロ計)によって、換算一軸圧縮強度(kN/m²)を算出することにした。実験に用いるモルタルを作成するに当たり、水セメント比(以後 W/C とする)を 50%, 100%, 200%の3ケースを作成し、各ケースごとに針貫入試験器での一軸圧縮試験を行った。石狩川における軟岩及び供試体の換算一軸圧縮試験結果を表-1に示す。W/C=200 %のモルタルは、一軸圧縮強度については軟岩の定義を満足するが、石狩川における軟岩の換算一軸圧縮強度よりも大きく、現地の軟岩を模擬するためには更なる貧配合のモルタルの使用を検討すべきである。しかし、作成したモルタルを破損させずに水路に設置することを考えた場合、更なる水セメント比の増加は不可能であると判断された。このため、本研究では、W/C=200 %の配合を使用して、水中での養生を実施せず強度の出現を抑制したものを使用することとした。この場合の換算一軸圧縮試験強度結果を表-1にあわせて示す。

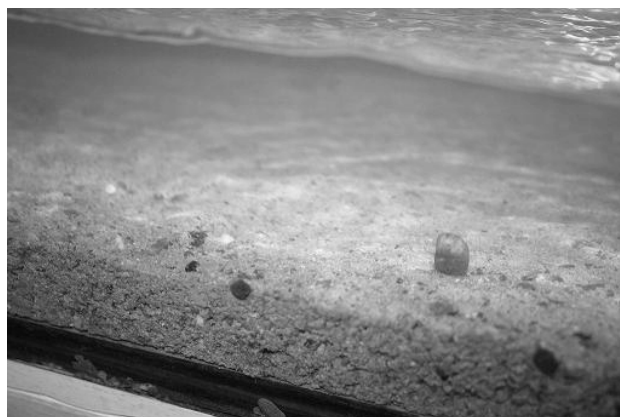


図-2 モルタルで作成した河床

3. 室内実験概要

(1) 室内実験水路

モルタルの洗掘に関する水理実験に用いた水路は、幅 $B=0.2\text{m}$ 、深さ $h=0.2\text{m}$ 、河床勾配 $i=1/76$ 、水路長 9m である。水路の下流端から 5.5m~3.5m の実験水路底面には W/C=200 %のモルタルを敷いて計測区間とした。計測区間以外は、水路床の段差を解消するためベニヤ板を設置している。流量は石狩川の平均年最大流量時(613m³/s)の低水路平均摩擦速度 0.265m/s と同程度の摩擦速度が得られることを目標とした。予備実験の結果、

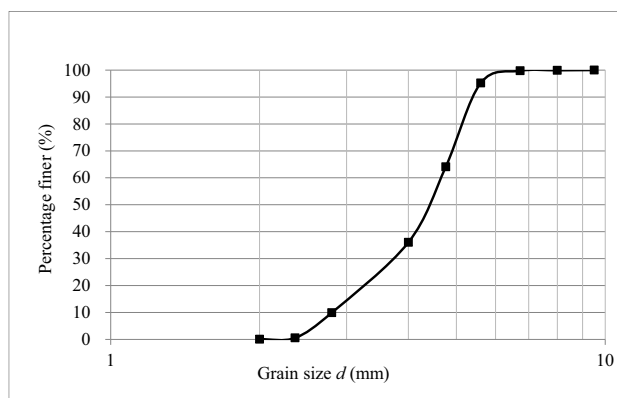


図-3 粒度分布図

水深の比較からベニヤ板区間とモルタル区間での粗度の違いは認められなかった。軟岩に見立てたモルタルを洗掘させるための上流から供給する砂礫の粒度分布は図-3に示されるとおりであり、平均粒径は 4.36mm である。

(2) 実験

単位時間当たりの給砂量 (m^3/h_r) を変化させて、3 ケースの実験を行った。給砂量が少ない順に Case1, Case2, Case3 である。また、同一条件であるが浸食の時間変化を把握するために、通水を一時中断して各ケース複数回モルタルの高さを測定した。なお、同一条件で何回目の測定かを示すために各ケース名の後ろに数字を記して区別を行っている。モルタルの高さの測定は、通水終了後に、縦横断方向それぞれ 10cm および 2cm の間隔で測定した。また、砂礫の詳細な挙動を把握するために、通水中にビデオ撮影を行った。なお、砂礫の移動速度もこのビデオの映像から読み取った。

各ケース毎に河床が洗掘されることにより、各実験終了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うと、河床の凹凸の影響が生じる恐れがある。しかし、各ケースの洗掘深は約 0.1~0.7mm であり、砂礫径の 16% 以下であることから、その影響は少ないものと判断した。

4. 実験結果

河床洗掘実験における各ケース毎の実験条件と実験結果を整理したものを表-2 に示す。Case1 および Case2 の通水中は、上流から供給された砂礫はそのほとんどが水路にとどまることなく下流端へと掃流されていたが、Case3 のみ通水中に砂礫が一時的にモルタル上に堆積していることが確認された。実験での計測結果を図-4 に示す。なお、洗掘深は各横断測線の平均値としているが、砂礫が堆積している場合には、礫堆積箇所を除いた平均値で算出した。測定区間の両端で洗掘が生じていない記述となっているが、これは、ベニヤの高さを測定しているためである。洗掘深に縦断的な差が若干あるものの概ね一様に浸食されている。

本実験における単位時間当たりの給砂量 (m^3/h_r) と洗掘速度 (m/h_r) の関係を図-5 に示す。Case3-2,3-3 を除くと、単位時間当たりの給砂量が増加すると、単位時間当たりの洗掘深も増加する傾向がみられる。Case3-2,3-3 で洗掘深が小さくなった理由として、次の 2 つが考えられる。すなわち、

(a) 河床上に上流から給砂された砂礫が間欠的に移動を停止して堆積し、モルタル表面を覆ったことにより、砂礫が直接モルタル表面に衝突しなかったことによるもの。

(b) 供給された砂礫同士が掃流中に衝突し、モルタル表面への衝突エネルギーが減少したことによるもの。しかし、これらの現象は Case3-1 でも生じており、今後さらに検討を要する。

表-2 本実験の条件と結果

Case	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	3-1	3-2	3-3
流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	0.01							
水深 $H(\text{cm})$	4.49	4.51	4.65	4.95	5.00	6.27	6.30	6.35
流速 $V(\text{m/s})$	1.118	1.115	1.081	1.015	1.005	0.802	0.798	0.791
砂礫の粒径 $d(\text{mm})$	4.36							
流砂量 $Q_s(\text{m}^3/\text{hr})$	0.0071	0.0090	0.0078	0.0394	0.0407	0.0841	0.0832	0.0850
通水時間 $T(\text{hr})$	2	2	4	0.85	0.83	0.41	0.42	0.41
平均洗掘深 $D(\text{mm})$	0.46	0.27	0.66	0.54	0.68	0.50	0.12	0.33

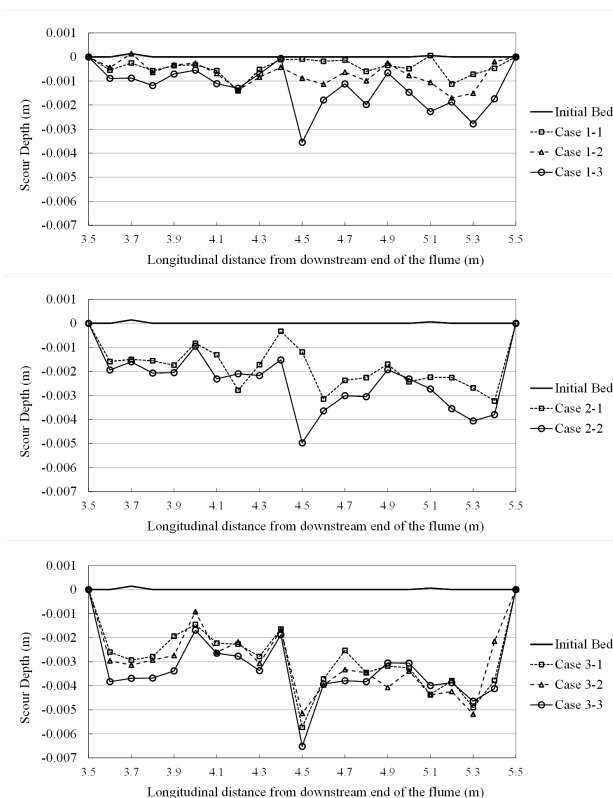


図-4 各 Case の洗掘深 (m)

5. 砂礫の移動機構と洗掘の判定

(1) saltation モデルの適合性

saltation モデルとは流水による掃流砂粒の移動を跳動による輸送と考え、saltation 機構の解明から流砂量式を誘導するモデルである。土屋ら⁵⁾は静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する、流砂では 4~5 回跳動すると定常跳躍に達するとしている。式 (1) で表されるこのモデルの跳動距離 L_s ⁶⁾ に

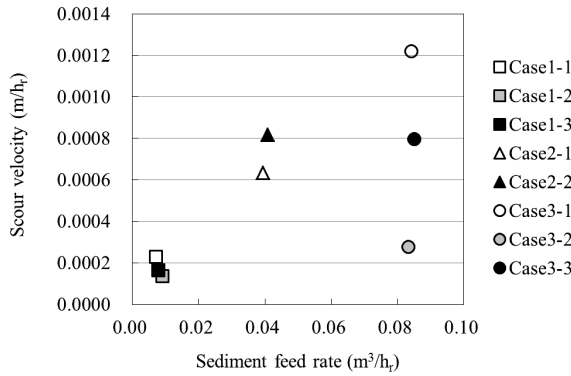


図-5 単位時間当たりの給砂量 (m³/hr) と洗掘速度 (m/hr)

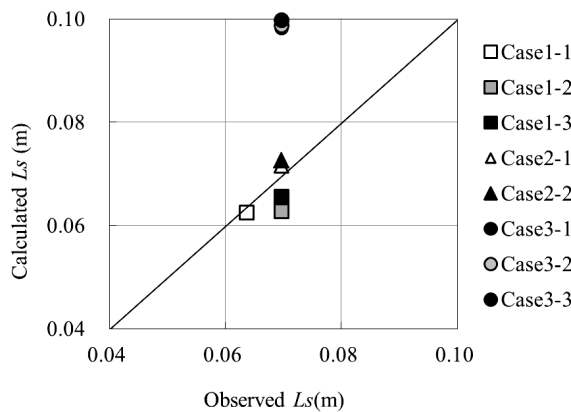


図-6 各 Case の跳躍距離の計算値と実測値 (m)

ついて、各ケースでの適合性を確かめることとした。

$$L_s = \frac{1}{2} \left(s + \frac{3}{2} \right) \lambda_s A_r^2 \tau_*$$

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

ただし、 s :砂礫の水中比重、 C_D :抗力係数、 $e:V_1/V_0$: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)、 v_1 :砂礫が河床に衝突した後の速度、 v_0 :砂礫が河床に衝突する前の速度、 u_b :河床面の流速、 u_* :摩擦速度である。

今回の動画による解析の結果である、 $e=0.7$ 、 $s=1.65$ 、 $A_r=8.5$ 、 $C_D=0.4$ 、 $\lambda_s=1.27$ を使用し、各ケースの跳動距離を算出した。算出結果と動画により直接計測を行った跳躍距離とを比較したものが図-6 である。Case3-1,3-2,3-3 を除くと算出された跳躍距離は、計測された値をほぼ表現しており、跳躍高さ H_s と砂礫の速度を別途知ることができる場合、式 (1) で跳躍距離を正確に見積もることが可能であると判断される。Case3-1,3-2,3-3 で計算値が計測値を大きく上回った理由は、洗掘深が小

表-3 跳躍距離 L_s (m)

Case	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	3-1	3-2	3-3
砂礫の粒径 d (mm)	4.36							
砂礫の跳躍距離 L_s (mm)	62.55	62.81	65.62	71.58	72.60	98.23	98.85	99.87
移動倍率	14.35	14.41	15.05	16.42	16.65	22.53	22.67	22.91

表-4 磨耗係数の比較

Case	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	3-1	3-2	3-3	average
砂礫の粒径 d (mm)	4.36								-
平均洗掘深 D (mm)	0.46	0.27	0.66	0.54	0.68	0.50	0.12	0.33	-
砂礫の通過距離 L (m)	2.00								-
砂礫の総荷重 P (kgf)	1145	1334	2316	2483	2502	2572	2582	2576	-
磨耗係数 C_1 (m²/kgf) × 10⁶	4.23	1.97	2.75	2.08	2.59	1.88	4.31	1.21	2.14

さくなった理由と同じく、砂礫どうしの衝突によるものとも考えられ、今後さらに検討を行う必要がある。

(2) 砂礫の移動機構の判別

既往の研究¹⁾では、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・滑動として、砂礫の移動機構の判別を行っている。本研究も、この関係を利用して洗掘機構の判定に用いることとする。その結果を、表-3 に示す。今回の実験ではすべてのケースにおいて、跳躍と判断された。すなわち、今回の実験における洗掘は砂礫の衝突による割合が極めて大きいことと判断される。

6. 衝撃を考慮した洗掘の推測

(1) 磨耗係数の比較

a) 水路実験による磨耗係数

前年度の研究¹⁾と同様に、「磨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 の法則から得られた、式 (2) を用いての洗掘量 W_c (m³) から、磨耗係数⁷⁾ C_1 (m²/kgf) を逆算した。

$$C_1 = \frac{W_c}{\mu_s \frac{q_b T}{d^3/6\pi} w L} \quad (2)$$

ここで、 μ_s :動摩擦係数、 q_b :単位幅給砂量 (m²/h)、 T :通水時間 (h)、 d :粒径を (m)、 w :砂礫一個当たりの荷重 w (kgf)、 L :砂礫の移動距離 (m) である。今回の水路実験結果から算出した磨耗係数を表-4 に示す。値はある程度ばらついているものの、オーダーとしては 10^{-6} で概ね一致している。

b) 磨耗試験による磨耗係数

前項で得られた磨耗係数が妥当なものであるかを確かめるため、磨耗試験を行い直接磨耗係数を求め、比較することとする。磨耗試験では、固着および自由粒子押し付け法、円盤回転法など種々の試験法が用いられているが、これらの試験結果に基づく磨耗現象は、「巨視的にはいずれの場合も動摩擦係数 μ_s を導入し、仕事量に比例される」という既往の研究⁷⁾から直径 24cm の回転円盤を利用し、試験を行った。なお、 μ_s はバネばかりを使って水平力 (N) と垂直荷重 (N) から求めている。また、荷重と回転回数による磨耗量の変化を確かめるため、垂直荷重を 2kgf, 5kgf, 10kgf と回転数を 1000 回, 2000 回, 3000 回での各ケースを行い、平均値を求めた。その結果、 $C_1 = 3.38 \times 10^{-8} (\text{m}^2/\text{kgf})$ の値を得た。

c) 磨耗係数の比較

式 (2) から算定された磨耗係数と磨耗試験による磨耗係数のオーダーが異なる結果となった。これは、今回のモルタルの洗掘が、摩擦により生じたと判断することができないことを表している。このことから、今回の水理実験における河床洗掘を「衝突による衝撃」による洗掘として整理する必要があると考え、新たに衝撃による洗掘について、検討を行うこととした。

(2) 衝撃を考慮した洗掘

ここでは今回実施したモルタルの洗掘実験において、洗掘が「砂礫の衝突による影響のみである」との仮定を設け、検討を行う。

a) 水路実験による損傷係数

「損傷量は衝突のエネルギー損失に比例する」という既往の研究⁷⁾より損傷量 (W_s) は式 (3) で表されている。この考えを基に、材料の特性によって定まる損傷係数 $C_2 (\text{m}^2/\text{kgf})$ を逆算することとした。

$$W_s = C_2 \sum (W \frac{v_0^2}{2g}) \quad (3)$$

ここで W : 砂礫の総荷重 (kgf), v_0 : 砂礫の河床衝突速度 (m/s), g : 重力加速度 (m/s^2) である。

一方、損傷量 W_s は洗掘深 D と検討対象区間距離 L および水路幅の積であらわされる。したがって、次式が得られる。

$$D = C_2 \sum (W \frac{v_0^2}{2g}) \frac{1}{LB} \quad (4)$$

さらに、水路縦断方向距離 L の間に 1 個の砂礫が河床に衝突する回数 T_s は

$$T_s = \frac{L}{L_s} \quad (5)$$

である。このことを考慮し、既往の研究²⁾と同様に式 (6) を用いると、式 (7) が算出され、損傷係数 $C_2 (\text{m}^2/\text{kgf})$ を求めることが出来る。

$$W = \frac{q_b T B L}{d^3 / 6 \pi L_s} w \quad (6)$$

表-5 軟岩の損傷係数 $C_2 (\text{m}^2/\text{kgf})$

Case	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	3-1	3-2	3-3	average
砂礫の粒径 $d(\text{mm})$	4.36								-
平均洗掘深 $D(\text{mm})$	0.46	0.27	0.66	0.54	0.68	0.50	0.12	0.33	-
砂礫の衝突速度 $v_0(\text{m/s})$	0.559	0.5575	0.540	0.508	0.502	0.401	0.399	0.396	-
砂礫の総荷重 $P(\text{kgf})$	1145	1334	2316	2483	2502	2572	2582	2576	-
損傷係数 $C_2 (\text{m}^2/\text{kgf}) * 10^6$	10.11	5.194	7.707	6.617	8.414	9.569	2.221	6.333	7.021

$$D = C_2 \sum (\frac{q_b T w}{d^3 L_s} \frac{v_0^2}{2g}) \quad (7)$$

損傷係数を算出した結果を表-5 に示す。Case3-2 を除き、概ね値が一致しており、今回のモルタルの洗掘実験の洗掘機構を、損傷係数を導入する手法で説明がある程度可能と考えられる。

b) 衝突試験による損傷係数

前節で得られた磨耗係数が妥当なものであるかを確かめるため衝突実験を行い、直接損傷係数を求め、比較することとする。衝突実験では、水路でのモルタル洗掘実験と同一のモルタルにガラス玉を落下衝突させ、損傷量と落下速度の関数と損傷係数を求めた。なお、モルタルとガラス玉の衝突による損傷量の変化を確かめるため、落下高さを 0.2m, 0.5, 1.0m での各ケースを行い、平均値を求めている。衝突試験による磨耗係数の結果、 $C_2 = 4.057 \times 10^{-6}$ を得た。

c) 損傷係数の比較

水路実験の洗掘量から求めた損傷係数と直接衝突実験から求めた損傷係数とがほぼ一致する結果となった。このことは、今回のモルタルの洗掘が、流砂の衝突により生じたと判断することができることを表している。すなわち、今回の水理実験における河床洗掘を「衝突による衝撃」による洗掘として整理することができると考えられる。

(3) 損傷係数からの洗掘深の推定

衝突実験による損傷係数を用いて算出された洗掘深と実際の洗掘深 (mm) をオーダーで比較し、対数表示したものを図-7 に示す。また、通常のグラフで比較したものを図-8 に示す。図-7 から、やや過小評価の傾向はあるもののオーダーは一致しており本手法により、軟岩の砂礫の衝突による洗掘がある程度評価できるものと考えられる。しかし、今回の水路実験データが少ないため、今後も様々な実験条件から同様の実験を行い検討していく必要がある。

7. おわりに

本研究による結論は以下の通りである。

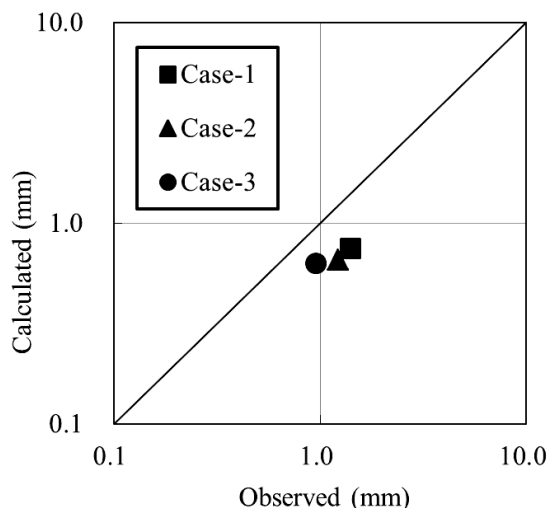


図-7 洗掘深 (m) の比較 (対数表示)

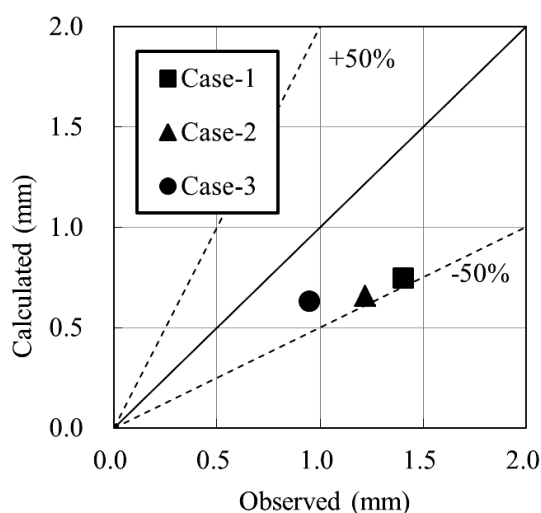


図-8 洗掘深 (m) の比較

跳躍距離 L_s は無次元掃流力 τ_* に比例し単位時間での給砂量に影響される。また今回の河床洗掘は跳躍距離 L_s により衝撃力が支配的になることを、動画による目測と理論式によって示した。また、昨年度の研究¹⁾で

示された、磨耗係数の算出法をもとに算出した結果と、磨耗試験による磨耗係数を比較した結果、オーダーが異なることが明らかとなり、今回のモルタルの洗掘が、摩擦によるものではないことが示された。そこで、摩擦による磨耗係数以外に、砂礫の衝突による「損傷係数」に着目し、衝突による洗掘の考え方を導入し、間接的ではあるが、昨年度の研究での「衝突と摩擦とでは洗掘機構が異なる」ことを具体的に明らかにした。この結果から、軟岩の洗掘を支配する砂流掃砂礫は均一なものではなく、粒度分布を持っていることから「摩擦による洗掘」と「衝突による洗掘」の両者の状態を考慮し、式を適用していく必要があると考えられる。

なお、今回使用したモルタルは、一軸圧縮試験結果では軟岩の定義に入るものの、現地の軟岩よりは、かなり強度が大きく、今後はさらに強度の低いものの検討が必要である。さらに、モルタルの損傷係数を算出したが、この妥当性についての検討が残されている。

謝辞: 京都大学防災研究所短期滞在型共同研究の助成を受けた。記して謝意を表わす。

参考文献

- 1) 清家拓哉, 渡邊康玄, 井上卓也: 軟岩河床における洗掘機構に関する実験的検討, 河川技術論文集, 第 16 巻, pp.137-142, 2010.
- 2) 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, pp.321-326, 2009.
- 3) 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, 国土交通省国土技術研究会報告 2009 年度, pp.131-136, 2009.
- 4) 日本材料学会編: 岩の力学 基礎から応用まで, 丸善株式会社, pp.495, 1995.
- 5) 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.
- 6) 河村三郎: 土砂水理学 1, 森北出版, pp.256-258, 1982.
- 7) 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, pp.103-112, 1983.

(2011.5.19 受付)