

## 流砂の衝突と転動による軟岩の洗掘

Scouring of Soft rock by collision and rolling of gravels

北見工業大学 ○学生員 大澤亮介 (Ryosuke Osawa)  
 北見工業大学 正員 渡邊康玄 (Yasuharu Watanabe)  
 北見工業大学 正員 吉川泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)

## 1. はじめに

全国的に、河床低下による護岸の浮き上がりや橋脚の根入れ不足などが問題となっている河川が多く見られている。北見市内を流れる無加川や常呂川でも、軟岩が露出し、河床が流砂により洗掘され、河床低下が進行している。軟岩とはある程度固結度を有しているが、一度浸食を受けると局所的な深掘れを形成しやすい特徴を有している。

既往の研究<sup>1)2)</sup>では、河床に存在する軟岩層は、上流から掃流される砂礫の跳躍や転動によって、損傷や摩耗により洗掘されるとして、砂礫の転動による洗掘深、砂礫の跳躍に伴う衝突による洗掘深をそれぞれ定式化している。

大澤ら<sup>3)</sup>は、上流から掃流される砂礫の移動において、すべての礫が跳躍する場合、粒径のオーダーが異ならない範囲で混合されている礫による軟岩の洗掘深は、礫の平均粒径から算出することが可能であることを示した。また、粒径が大きく、単位時間当たりの給砂量が多いほど、洗掘深が大きくなる結果を得ている。しかしながら、実河川では、オーダーが大きく異なる粒径分布を持ち、この結果をそのまま適用することはできない。

本研究では、大澤ら<sup>3)</sup>の研究を発展させ、オーダーが異なる混合粒径で、転動と跳躍が混在する場合、洗掘に対して流砂がどのように影響するのかを、実験的に明らかにすることを目的としている。水理実験を実施するにあたって、現地の軟岩を水路に設置することは困難であるため、大澤ら<sup>3)</sup>と同様に貧配合のモルタルを使用して軟岩を再現することとした。

## 2. 実験に使用するモルタルの物理特性

## (1)モルタルの組成

本研究において、軟岩を模した河床として使用するモルタルは、大澤ら<sup>3)</sup>と同様の配合比(W/C=700%)のものである。骨材は平均粒径が2.204(mm)の砂を使用した。このモルタルの一軸圧縮強度は76(KN/m<sup>2</sup>)であり、一軸圧縮強度が20Mpa(20,000KN/m<sup>2</sup>)以下と定義されている軟岩の条件を強度の面において、満たしている。

## (2)衝突実験による損傷係数の算出

モルタルの損傷係数を把握するため、衝突実験を実施した。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、式(1)を用いて損傷係数を求めた。

$$W_s = C_2 \sum (w \frac{v_0}{2g}) \quad (1)$$

ここで、 $W_s$ : 損傷量(m<sup>3</sup>)、 $w$ : 砂礫の総荷重(kgf)、 $v_0$ : 砂礫の衝突速度(m/s)、 $g$ : 重力加速度(m/s<sup>2</sup>)である。損傷実験の結果、損傷係数 $C_2=7.26 \times 10^3$ (m<sup>3</sup>/kgf)を得た。

## (3)摩耗実験による摩耗係数の算出

モルタルの摩耗係数を把握するため、摩耗実験を実施した。摩耗実験では、水路でのモルタル洗掘実験と同一のモルタルの摩耗係数を、直径24cmの回転円盤を利用し、式(2)を用いて求めた。摩耗実験の結果、摩耗係数 $C_1=5.53 \times 10^{-4}$ (m<sup>2</sup>/kgf)を得た。

$$W_c = C_1 \mu_s PL \quad (2)$$

ここで、 $W_c$ : 摩耗量(m<sup>3</sup>)、 $\mu_s$ : 動摩擦係数、 $P$ : 荷重(kgf)、 $L: 2\pi rT$ ( $r$ : 中心から供試体までの半径、 $T$ : 回転数)である。動摩擦係数 $\mu_s$ はバネばかりを使って水平力求め、水平力を質量で割って求めた。

## 3.水路実験

モルタルの洗掘に関する水理実験に用いた水路は、幅 $B=0.2$ m、河床勾配 $i=1/40$ 、水路長8mである。水路の下流端から5.8m~4mの実験水路底面には、W/C=700%のモルタル板を設置して、計測区間としている。作成したモルタルは、幅0.2m、高さ0.03m、長さが1.8mである。さらに、その上下流にはベニヤ板を用いて固定床としている。モルタルによる河床表面とベニヤ板による河床表面は、段差なく設置されている。

## (1)給砂条件の設定

流量に関しては、給砂した砂礫に跳躍と転動が混在し、堆積せずに流れること、跳躍するための水深を得ることを条件として、 $3.625 \times 10^{-3}$ (m<sup>3</sup>/s)とした。

井上ら<sup>4)</sup>の研究より、軟岩床上の無次元限界掃流力算定式(3)から、無次元限界掃流力を算出した。

$$\tau_{*c} = \alpha_1 \sqrt{\left[ \frac{1}{k} \ln \frac{30.1 \alpha_* d}{k_s} \right]^2} \quad (3)$$

$$\alpha_1 = \frac{2A_3}{0.4A_2} \frac{(\mu_f - \tan\theta) \cos\theta}{\{\mu_f + (1/0.85)\} 0.85}$$

ここで、 $k$ : カルマン定数(0.4)、 $\alpha_*$ : 砂礫粒子の着目高さ(0.65)、 $k_s$ : 等価粗度、 $A_2: \pi/4$ 、 $A_3: \pi/6$ 、 $\mu_f$ : 静止摩擦係数(0.65)、 $\tan\theta$ : 河床勾配である。

式(3)で必要となる等価粗度 $k_s$ を求めるために、式(4)

で表されるマンシングの粗度係数  $n_m$  と等価粗度の関係を用いることとした。なお、マンシングの粗度係数は、式(5)から算出した。

$$n_m = k_s^{1/6} / 8.1\sqrt{g} \quad (4)$$

ここで、 $g$  : 重力加速度である。

$$n_m = R^{2/3} I_w^{1/2} / V \quad (5)$$

ここで、 $R$ : 径深、 $I_w$ : 均水面勾配、 $V$ : 平均流速である。

以上の各値を使用して、給砂量を決定するための平衡流砂量を式(6)より求めた。

$$\tilde{q}b = \sqrt{sgd^3} \times 8(\tau_* - \tau_{*c})^{3/2} \quad (6)$$

ここで、 $s$ : 礫の水中比重、 $g$ : 力加速度、 $\tau_*$ : 掃流力、 $\tau_{*c}$ : 無次元掃流力である。

(2)実験ケースの設定

流量と混合粒径を固定し、上流から給砂する砂礫の給砂量を変化させて 3 ケース実験を行った。混合粒径は  $2.25 \times 10^{-3}m$  と  $7.135 \times 10^{-3}m$  のオーダーが異なる粒径を同一の割合で混合している。なお、洗掘深がどのケースも同程度になるように通水したため、通水時間はケースにより異なっている。なお、上流から砂礫を供給しない通水のみでの洗掘は見られなかった。表-1 に各ケースの条件を示している。大澤ら<sup>3)</sup>の混合粒径による実験条件も、比較のため表-1 に併記している。大澤ら<sup>3)</sup>が跳躍のみを対象とした実験での給砂量は、平衡流砂量に対して約 4%であった。この実験と同じ割合で給砂するケースとして、Case1 を設定した。Case2 は Case1 の給砂量を半分にしたものである。Case3 は更に給砂量を半分、すなわち、Case1 の給砂量の 1/4 の条件にして実験を行っている。

さらに比較実験として、Case2 と同じ給砂量で、跳躍して移動する粒径のもののみを砂礫として使用した Case4 および、転動して移動する粒径のもののみを砂礫として使用した Case5 を実施した。

砂礫の摩擦と衝突を判定するために、小松ら<sup>1)</sup>と同様に式(7)から算出される跳躍距離と粒径とを比較し、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。

$$L_s = \frac{1}{2} \left( s + \frac{3}{2} \right) \lambda_s A_r^2 \tau_* \times \left[ (1+e) - \sqrt{(1-e)^2 - \frac{2(1-e)}{(3/4)\lambda_s C_D A_r^2 \tau_*}} \right]^2 \cdot d \quad (7)$$

ここで、 $s$ : 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。 $S=1.65$ 、 $C_D=0.4$ 、 $A_r=8.5$

表-1 実験条件の比較

	大澤らの跳躍のみを対象とした実験	本研究における実験
河床勾配 $i$	1/40	1/40
水路長 $L$ (m)	8	8
水路幅 $B$ (m)	0.3	0.2
平均流量 $Q$ ( $m^3/s$ )	$10.6 \times 10^{-3}$	$3.63 \times 10^{-3}$
平均水深 $H$ (m)	0.03	0.022
混合粒径 $d$ (m)	$0.009875 \cdot 0.007135 \cdot 0.003375$	$0.0225 \cdot 0.007135$
掃流力 $\tau_*$	$6.69 \times 10^{-2}$	$2.25 \times 10^{-2}$
無次元限界掃流力 $\tau_{*c}$	$8.8 \times 10^{-3}$	$1.89 \times 10^{-2}$
等価粗度 $K_s$	$6.08 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-3}$
単位時間給砂量 $Q_b$ ( $m^2/s$ )	$3.21 \times 10^{-5}$	$4.28 \times 10^{-6}$
平衡流砂量 ( $m^3/s$ )	$8.13 \times 10^{-4}$	$1.06 \times 10^{-4}$
平衡流砂量に対する給砂量の割合(%)	3.95	4.04

表-2 洗掘機構の判定

Case	粒径(m)	$\lambda_s$	$e$	$L_s$ (m)	$L_s$ /粒径	判定
Case1	0.007135	1.52	0.9	0.03189	4.46918	跳躍
	0.022	0.2	0.55	0.00516	0.23475	転動
Case2	0.007135	1.46	0.9	0.03037	4.25605	跳躍
	0.022	0.21	0.55	0.00492	0.22358	転動
Case3	0.007135	1.54	0.9	0.03246	4.54996	跳躍
	0.022	0.23	0.55	0.00446	0.20281	転動
Case4	0.007135	1.44	0.9	0.02960	4.14802	跳躍
Case5	0.022	0.21	0.55	0.00492	0.22358	転動

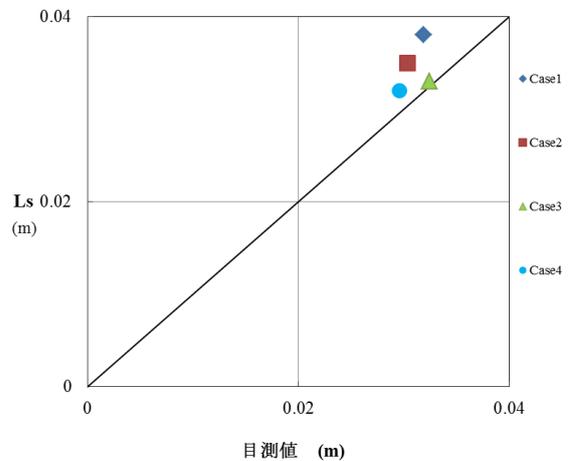


図-1 跳躍距離の目測値と計算値の比較

とし、 $ls$ と $e$ は実験映像から判読した値を用いることとした。これらの値を用いて式(7)より算出した跳躍距離と判定結果を表-2に示す。

礫の詳細な挙動を確認するために、アクリル製の水路側壁を通してビデオ撮影もあわせて行っている。この結果を利用して、確認のため算出された跳躍距離( $L_s$ )と実験映像により直接測定を行った跳躍距離と比較したものを図-1に示す。算出された跳躍距離は、測定された値をほぼ表現していた。

表-3に各ケースの実験条件を示す。

モルタルを設置するにあたって、各ケースごと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ため、各ケースの終了の都度モルタルを入れ替えて実験を実施している。

(3)実験結果

実験結果を表-3に示すとともに、各ケースのモルタルの平均洗掘深を図-2に示す。大澤ら<sup>3)</sup>と同様に、今回の実験の範囲では、給砂量が多いほど洗掘深が大きくなる傾向がみられた。

給砂量が同じであるCase2、Case4、Case5を比較すると、Case4の跳躍のみでの洗掘が、Case2の跳躍と転動が混在する混合砂礫による洗掘に比べ、平均洗掘深が大きいことがわかる。Case5の転動のみの洗掘がCase2とCase4に比べ小さいことから、同じ給砂量であれば、転動よりも衝突による洗掘が大きいことがわかる。

(4)洗掘量の推定

軟岩の洗掘深を、砂礫の粒径、流砂量、摩耗係数、損傷係数等を用いて算定することが可能であるかを、実験値を再現することにより検討を行うこととする。小松ら<sup>1)</sup>と同様に、跳躍による洗掘は式(8)を用いて、転動による洗掘は式(9)を用いてそれぞれ算出する。

$$D = C_2 \sum \left( \frac{q_b T w}{\pi d^3 L_s} \frac{v_0^2}{2g} \right) \quad (8)$$

ここで、 $D$ : 洗掘深(m)、 $q_b$ : 単位幅流砂量( $m^2/h$ )、 $T$ : 通水時間(h)、 $w$ : 砂礫1個当たりの荷重、 $d$ : 粒径(m)、 $L_s$ : 跳躍距離、 $g$ : 重力加速度( $m/s^2$ )、 $v_0$ : 砂礫の衝突速度である。

$$D = \frac{W_c}{LB} \quad (9)$$

また、 $W_c$ : 摩耗量( $m^3$ )、 $L$ : 水路移動距離(m)、 $B$ : 水路幅(m)である。

まず、衝突のみ及び転動のみでの洗掘深の推定制度を確認するため、Case4及びCase5についてそれぞれ、式(8)、式(9)を用いた洗掘深の算定を行った。その実験結果を表-5にまとめて示す。

衝突実験から求めた損傷係数と、摩耗実験から求めた摩耗係数を用いて、洗掘深を算出した場合、実際の洗掘深と比較的近い値となった。よって、洗掘実験に使用したモルタルの損傷係数と摩耗係数は妥当なものであると

表-3 各ケースの実験条件と結果

Case	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
平均流量 $Q(m^3/s)$	0.003625				
平均水深 $H(m)$	0.0223	0.0219	0.022	0.0231	0.0221
平均粒径 $d(m)$	0.007135, 0.0225			0.007135	0.0225
通水時間 $T(sec)$	150	300	300	300	300
単位幅給砂量 $q_b(m^2/s)$	$2.14 \times 10^{-5}$	$1.07 \times 10^{-5}$	$5.35 \times 10^{-6}$	$1.07 \times 10^{-5}$	$1.07 \times 10^{-5}$
平衡流砂量に対する 給砂量の割合(%)	4.067	2.018	1.009	2.018	2.018
平均洗掘深 (m)	$3.55 \times 10^{-3}$	$3.24 \times 10^{-3}$	$1.72 \times 10^{-3}$	$8.58 \times 10^{-3}$	$7.04 \times 10^{-4}$
洗掘速度 ( $m/h$ )	$8.53 \times 10^{-2}$	$3.90 \times 10^{-2}$	$2.06 \times 10^{-2}$	$1.03 \times 10^{-1}$	$8.45 \times 10^{-3}$

表-4 洗掘実験での損傷係数と摩耗係数

Case	case4(跳躍のみ)	case5(転動のみ)
平均粒径 $d(m)$	0.007135	0.0225
単位幅給砂量 $q_b(m^2/s)$	0.0000106932	
平均洗掘深(m)	0.0085794444	0.0007044873
損傷係数 $C_2$	0.000531468	-
摩耗係数 $C_1$	-	0.0003939713

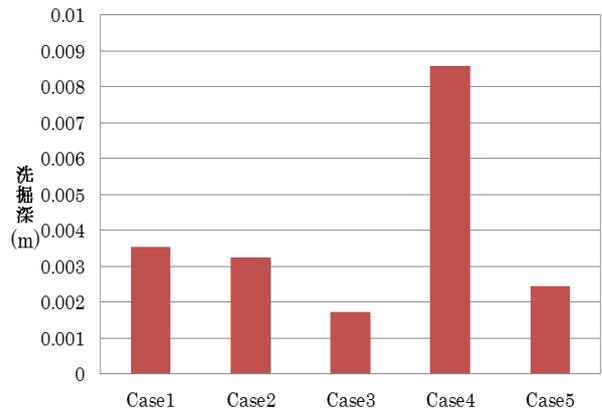


図-2 平均洗掘深

判断し、混合粒径での洗掘深の算出に用いることとした。Case1からCase3までの混合粒径は均一の割合で混合しているため、それぞれの粒径で給砂量を1/2ずつにし

たときの洗掘深を損傷係数と摩耗係数から式(8)及び式(9)を用いて算出した。詳細を表-5に示す。

混合粒径である Case1、Case2 及び Case3 までは、損傷による洗掘深と摩耗による洗掘深の計算値を合計した値と実験結果の洗掘深、Case4 と Case5 はそれぞれ洗掘深を算出した値と実験結果の洗掘深を比較したものを図-3に示す。

すべてのケースにおいて、やや計算値が課題となる傾向はあるものの、計算値と実験値でほぼ同程度の値となった。

4.おわりに

洗掘深は、大澤ら<sup>3)</sup>と同様に、今秋の実験条件の範囲では、単位時間当たりの給砂量が多いほど洗掘深が大きく、洗掘速度も速くなる結果を得た。洗掘深、洗掘速度から見ても、跳躍が洗掘に対して大きく影響していることがわかる。

また、跳躍距離、損傷係数、摩耗係数は、既往の研究と同様の式から算出可能な結果を得た。

跳躍と転動が混在する混合粒径による洗掘深は、両者を均一な割合で混合した場合、転動と衝突それぞれの流砂量により推定した洗掘深の和と実際の洗掘深が比較的近い値となった。洗掘深の計算結果からは、洗掘深の合計値の約70%が跳躍、30%が転動となり、跳躍が大きく影響していることがわかる。

今後は混合粒径の割合を変えて検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 小松佑輔, 渡邊康玄, 泉典洋, 竹林洋史: モルタルで擬似した軟岩の流砂の衝突による洗掘, 河川技術論文集, 第17巻, 2011
- 2) 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, 2010
- 3) 大澤亮介, 渡邊康玄, 鯉目淑範: 混合砂礫の衝突による軟岩の洗掘機構: 土木学会北海道支部論文報告集, 第68号, 2012
- 4) 井上卓也, 伊藤丹: 軟岩河床における粗度, 無次元限界掃流力と飽和流砂量の関係, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第68巻, 2013
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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

Case	case1	case2	case3
平均粒径 $d$ (m)	0.007135, 0.0225		
単位幅給砂量 $(1/2)qb$ ( $m^2/s$ )	$1.07 \times 10^{-5}$	$5.35 \times 10^{-6}$	$2.67 \times 10^{-6}$
損傷係数 $C_2$	0.0007256		
摩耗係数 $C_1$	0.000553		
損傷による洗掘深の計算値(m)	0.00358	0.00358	0.00179
摩耗による洗掘深の計算値(m)	0.00172	0.00172	0.00086
洗掘深の合計値	0.00529	0.00529	0.00265
洗掘実験による洗掘深	0.00355	0.00325	0.00017

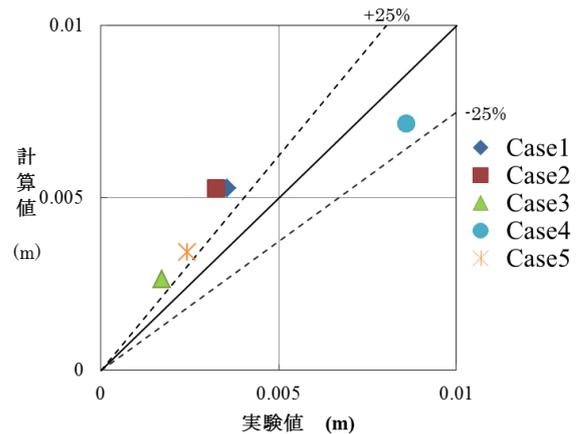


図-3 洗掘深(m)の比較

表-5 給砂量を 1/2 した場合の洗掘深