

混合砂礫の衝突による軟岩の洗掘機構

Scouring mechanism of soft rocks in consideration collision of mixed grit

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 非会員 鰐目 淑範 (yosinori yonome)

1. はじめに

近年、全国的に河床低下が問題となっている河川が多く見られている。旭川市街地付近の石狩川本川においては、河床低下の進行により河床を覆っていた砂礫が一扫され、軟岩が露出する区間(図-1.1)が増加している。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。

清家ら²⁾は、軟岩の洗掘が砂礫の転動により生じるとして、実験により洗掘深を定式化した。一方小松ら¹⁾は、軟岩上を移動する砂礫が跳躍して軟岩を損傷させることに着目し、実験的に砂礫の衝突による軟岩の洗掘深を定式化している。

本研究では、小松ら¹⁾の研究を発展させ、混合粒径の砂礫による軟岩の洗掘機構に着目し、砂礫が混合粒径の場合に均一粒径で得られた知見がどの程度異なるかを、実験的に明らかにすることを目的としている。実験するにあたって、現地の軟岩を水路に設置することは困難なため、小松ら¹⁾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. モルタルによる軟岩の再現

軟岩は一軸圧縮強度 (KN/m²) が 20MPa=(20,000KN/m²)以下と定義されていることから、使用するモルタルの配合比を決定するため、水理模型実験に先立ち、W/Cを種々変更して供試体を作成し、一軸圧縮強度を測定した。

前年度は W/C=200(%)のモルタルを使用した が、今回は更に、石狩川上流部で実際に軟岩の洗掘が問題となっている箇所の軟岩の強度に近づけるため、W/Cを300,400,500,600,700,800 (%)の6ケースを作成することとした。各ケースごとに一軸圧縮試験を行い換算一軸圧縮強度 (KN/m²)を算出することにした。なお、既往の研究³⁾では石狩川でのシルト岩は、平均1 (KN/m²)と示されている。なお、W/C=800(%)の供試体は、強度不足により水路への設置が困難であったため、検討対象から除外した。表-1 に示す換算一軸圧縮強度 (KN/m²)の試験結果より、使用するモルタルを W/C=700(%)とした。

供試体の骨材は、全て図-1 に示す粒度分布をもつ砂を使用している。さらに、全ての供試体は強度を安定させるため、28 日間の養生を施している。

3. 実験概要

(1)室内実験水路

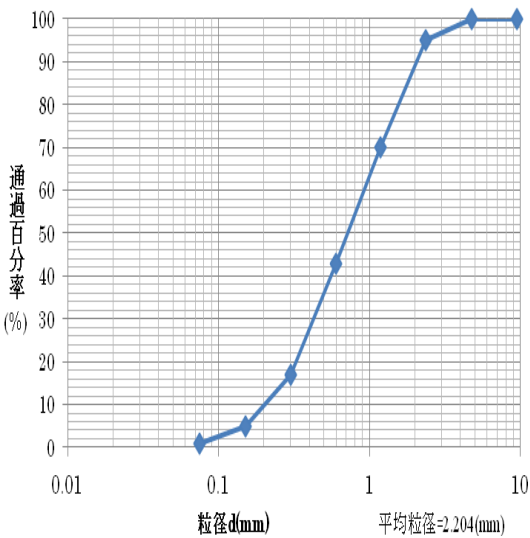


図-1 粒度分布

表-1 換算一軸圧縮強度試験結果

モルタル	換算一軸圧縮強度 (KN/m ²)
W/C=300	509
W/C=400	228
W/C=500	127
W/C=600	123
W/C=700	76
シルト岩	1

モルタルの洗掘に関する水理実験に用いた水路は、幅 B=0.3m、河床勾配 i=1/40、水路長8mである。流量に関しては、跳躍するための水深を得ることと、給砂した砂礫が堆積せずに流れることを条件として、0.0106 (m³/s)とした。水路の下流端から6m~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0.3m、高さ5cm、長さが1mであるため、2つのモルタル板を2つ縦断方向に並べている。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。

(2)実験

流量と通水時間は全ての Case で一定とし、粒径と給砂量を変化させ、実験を行った。予備実験として通水のみで2時間様子を見たが、通水のみでの洗掘はなかった

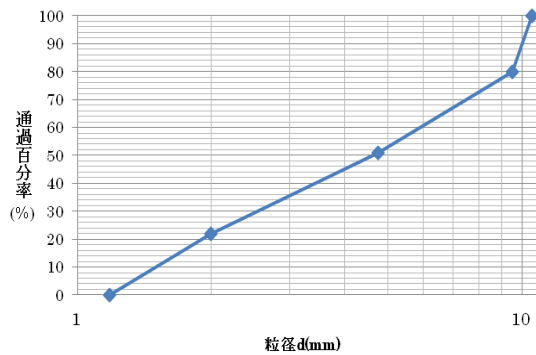


図-2 砂礫の粒径加積曲線

表-2 実験条件

Case	Case1-2	Case1-3	Case2-1	Case2-2	Case2-3	Case3-1	Case3-2	Case4-2
平均流量Q(m ³ /s)	0.0106							
平均水深H(m)	0.0303	0.0295	0.0268	0.0256	0.0261	0.0252	0.0284	0.0288
平均流速V(m/s)	1.1657	1.1965	1.3179	1.3797	1.3522	1.0045	1.2463	1.226
摩擦速度(m/s)	0.0786	0.0777	0.0746	0.0732	0.0738	0.0727	0.0765	0.0769
平均粒径d(m)	0.009875		0.007135			0.003375		0.0068
単位時間給砂量Qb(m ³ /hr)	0.0058	0.0014	0.0231	0.0058	0.0014	0.0231	0.0058	0.0058
合計通水時間(hr)	0.034375							

表-3 砂礫の条件

平均粒径(m)	単位時間給砂量(m ³ /h)	0.0231	0.0058	0.0014
0.009875	—	Case1-2	Case1-3	
0.007135	Case2-1	Case2-2	Case2-3	
0.003375	Case3-1	Case3-2	—	
混合粒径(0.0068)	—	Case4-2	—	

ことを確認している。また、砂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た。実験条件の詳細を表-2に示す。

軟岩の洗掘をもたらす砂礫の粒径を、大、中、小として、それぞれCase1, Case2, Case3として、平均粒径はd=9.875mm, d=7.135mm, d=3.375mmの砂礫を用いた。それぞれの粒径加積曲線を図-2に示す。また、Case4は3種の粒径をそれぞれ同一の割合で混合させた混合粒径の実験である。各Caseでは、給砂量を変化させて実験を行っている。表-3に上流から給砂した砂礫の条件をまとめて示す。

モルタルを設置するにあたって、各Case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、その都度モルタルを入れ替えることとした。

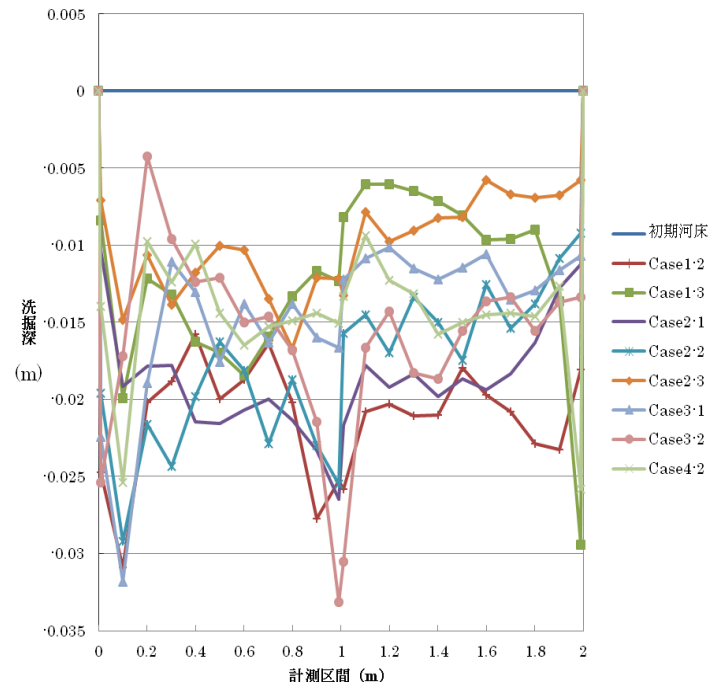


図-3 各Caseの洗掘深

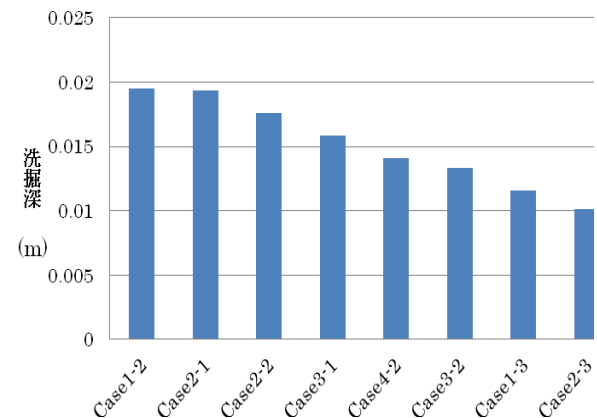


図-4 平均洗掘深

4. 実験結果

各Caseの洗掘深と計測区間の関係を、図-3に示す。図-3からは、全てのCaseにおいて、モルタル区間の両端と1mずつ作成したモルタルの連結部分が他の箇所に比較して大きく洗掘を受けている。この理由として、モルタル区間両端とベニヤ板との1mm程度の隙間、およびモルタルの継ぎ目部分の隙間に砂礫が衝突し、削れ易くなったと考えられる。

このことから、モルタルの上下流端15cmずつとモルタルの継ぎ目をはさんで30cmを検討対象から除外することとし、各Caseの平均洗掘深を算出することとした。その結果を大きい順に並べたものが図-4である。

本実験において、粒径が大きく、なおかつ、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傾向がみられる。これは、小松ら¹⁾の研究と同じ結果となった。

が、本研究では、モルタルの強度が小さいため、洗掘深はより大きくなるとともに、洗掘速度も速くなり、洗掘現象がより明確に把握可能な結果を得た。

混合粒径に関しては給砂量が同じ場合の Case1-2, Case2-2, Case3-2 の洗掘深を平均した値と同程度の値となった。

5. 砂礫の移動機構と洗掘の判定

砂礫の摩擦と衝突を判定するために、前年と同様に跳躍距離を算出する式を用いる。

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

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、 λ_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。

$S=1.65$ 、 $C_D=0.4$ 、 $A_r=8.5$ とし、 λ_s と e は実験映像から判読した値を用いることとした。その結果を表-4に示す。これらの値を用いて式(1)より算出した跳躍距離も合わせて示す。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-5 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おり、正確な跳躍高(H_s)と砂礫の速度を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。

既往の研究では、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、洗掘機構の判定を行った。その結果を表-5 に示し、全ての Case において、跳躍と判断された。

6. 衝撃を考慮した洗掘

今回の実験結果から、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。実験結果から式(2)を用いて軟岩の損傷係数 C_2 (m^2/kgf)を逆算することとした。

$$D = C_2 \sum \left(\frac{q_b T w}{6 d^3 L_s} \frac{v_0^2}{2g} \right) \quad (2)$$

ここで、 D =洗掘深、 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 =砂礫の衝突速度とする。

式(2)を用いて洗掘深(D)から各 Case での損傷係数 C_2 (m^2/kgf)を算出した結果を表-6 に示す。また、Case4-2の混合粒径の洗掘深と比較するため、Case1-2, Case2-2, Case3-2 の損傷係数を平均した数値を共に示した。

表-4 跳躍距離の算出結果

Case	λ_s	e	L_s (m)
Case1-2	1.07	0.7	0.01981
Case1-3	1.07	0.7	0.01889
Case2-1	1.2	0.75	0.04231
Case2-2	1.2	0.75	0.03951
Case2-3	1.2	0.75	0.04067
Case3-1	0.8	0.85	0.09197
Case3-2	0.8	0.85	0.1067
Case4-2	1.2	0.76	0.05252

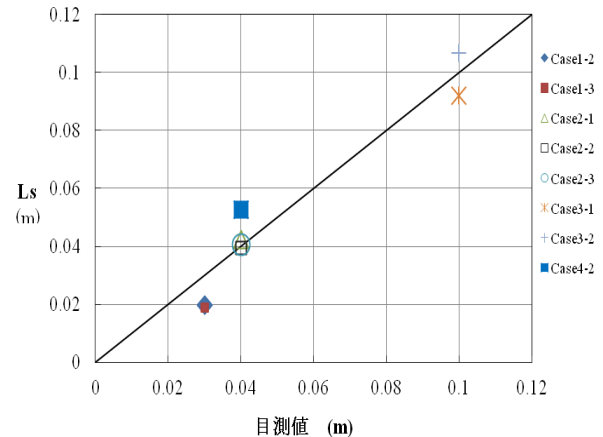


図-5 各 Case の跳躍距離と実測値

表-5 跳躍距離 L_s (m)

Case	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 (%)
Case1-2	0.009875	0.0106	0.00580	0.01981	201
Case1-3	0.009875	0.0106	0.00140	0.01889	191
Case2-1	0.007135	0.0106	0.02310	0.04231	593
Case2-2	0.007135	0.0106	0.00580	0.03951	554
Case2-3	0.007135	0.0106	0.00140	0.04067	570
Case3-1	0.003375	0.0106	0.02310	0.09197	2725
Case3-2	0.003375	0.0106	0.00580	0.10670	3161
Case4-2	0.0068	0.0106	0.00580	0.05252	772

表-6 損傷係数 C_2 (m^2/kgf)

Case	平均粒径 d (m)	洗掘深 D (m)	砂礫の衝突速度 V_0 (m/s)	総衝突荷重 P_s (kgf)	損傷係数 C_2 (m^2/kgf)
case1-2	0.009875	0.0195422	0.58285	0.494649591	6.704E-03
case1-3		0.0193362	0.59825	0.125213229	2.487E-02
case2-1	0.007135	0.0175685	0.65895	1.499145372	1.556E-03
case2-2		0.0158635	0.68985	0.403084184	4.767E-03
case2-3		0.0140744	0.67610	0.094521076	1.878E-02
case3-1	0.003375	0.0133479	0.50225	0.693223592	4.400E-03
case3-2		0.0115852	0.62315	0.150027584	1.146E-02
case4-2	0.0068	0.0100949	0.39571	0.320233726	1.161E-02
1-2,2-2,3-2の平均値					1.529E-02

この結果から、表-6 で得られた損傷係数が妥当なものであるかどう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、式(3)を用いて損傷係数を求めた。衝突試験による損傷係数の結果、 $C_2=7.256 \times 10^{-3}(\text{m}^2/\text{kgf})$ を得た。

$$W_s = C_2 \sum \left(w \frac{v_0}{2g} \right) \quad (3)$$

ここで、 W_s =損傷量(m^3)、 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^2)である。

衝突実験による損傷係数を用いて算出された洗掘深(m)と実際の洗掘深(m)を比較したものを図-6 に示した。その結果、比較的近い値であるので、表-6 に示した損傷係数は妥当なものであると判断できる。混合粒径においても、同じ給砂量の損傷係数の平均値から算出した洗掘深とはほぼ一致し、こちらも妥当なものであると判断できる。

7.結論

洗掘深は、粒径が大きく、単位時間当たりの給砂量が多い条件で大きくなる結果となった。前年に比べモルタル強度が小さいため、洗掘深と洗掘速度は大きくなり、洗掘深がより明確に把握できた。混合粒径の洗掘深に関しては、各 Case の粒径を平均した粒径を用いて算出し、損傷係数の平均値を用いて洗掘深を算出した場合と、同程度の結果となった。このことから、すべての礫が跳躍して移動する場合は、混合粒径の洗掘深は平均から算出すること可能であるという結果を得た。本研究では、混合砂礫での実験を 1 ケースしか行わなかったが、今後は様々な混合砂礫でさらに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) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 河村三郎: 土砂水理学 1, 森北出版, pp.256~258, 1982
- 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

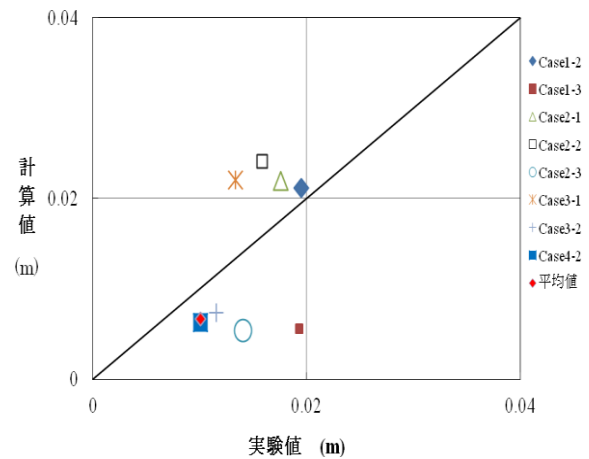


図-6 洗掘深(m)の比較