

軟岩河床の洗掘機構の解明

Study on scouring mechanism of the river bed which consisted of
soft rock

北見工業大学工学部土木開発工学科
北見工業大学工学部社会環境工学科
(財)北海道河川防災センター

○学生員 清家拓哉 (Takuya Seike)
正会員 渡邊康玄 (Yasuharu Watanabe)
正会員 井上卓也 (Takuya Inoue)

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から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扫され、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。

前年度実施された現地実験¹⁾²⁾において、軟岩河床の洗掘は流水による影響より流砂による影響が大きいことが確認されている。そこで、今年度実施された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に、洗掘と流砂の關係に着目して本研究を行った。なお、本研究では実際に河床洗掘実験に使用された砂礫の体積が不明なため、粒径分布の幅や平均粒径などが多少は異なるが粒径ごとに現地からサンプリングした30個の粒径(3辺)から算出した平均体積を用いた。

2. 現地実験概要

石狩川 KP160.4 付近の低水路左岸側に掘削された仮設水路を用いて、岩盤の洗掘に関する水理実験が行われた。水路は排水水路(100m)、実験水路(45m)、取水水路(155m)の全長300mからなる。実験水路は幅 $B=1.0\text{m}$ 、深さ $h=1.0\text{m}$ 程度、河床勾配 $i=1/30$ とし、本川の平均年最大流量時の($613\text{m}^3/\text{s}$)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。また、実験水路底面の岩質は主にシルト岩であった。

(1) 砂礫の移動速度実験

この実験に使用する砂礫は、実験水路周辺に堆積している砂礫を4つの粒径区分(10mm、25mm、40mm、65mm)にふるい分けし、粒径ごと30個ずつに整理したものが用いられた。65mmから粒径順にCase1-1～Case1-4として横断方向に3個ずつ配置し、複数回行うことで礫の動き出しや、移動速度を把握するためにビデオ撮影を行った。

(2) 河床洗掘実験

この実験は岩盤の浸食を把握するために大小の粒径で6ケース(Case2-1～Case2-6)、 $q_b \cdot V$ (q_b :単位幅当たりの給砂量 m^2/s)、 V :流速 m/s) が大きい場合の4ケース(Case3-1～Case3-3)合わせて計9ケースが給砂条件と流量条件を変化させて行われた。これらの実験においても礫の速度を把握するためにビデオ撮影を行った。なお、各実験ケース毎に水路河床面の整形は行われていない。



図-1 露岩状況

3. 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は表1に示す。平均洗掘深は各測線の礫堆積箇所を除いた平均値で算出した。また、2つの実験で設置したビデオの映像から砂礫の移動速度を算出し、砂礫の移動速度と流速の關係を図2に示す。図2より礫の速度と流速は比例關係にあることが考えられる。上記の結果から砂礫の速度 $V_0(\text{m/s})$ が流速 $V(\text{m/s})$ に比例するとして、以下の式で表した。

$$V_0 = \alpha V$$

$$\alpha = \frac{V_0}{V}$$

ただし、 α :比例定数とする。ここで、図2を見てみると粒径ごとに比例定数が異なるということが考えられる。そこで、 α と粒径の關係をを図3に示すと、 α は粒径に反比例であることがわかる。つまり、砂礫の粒径が増加するにつれて流速と礫の速度との差が大き

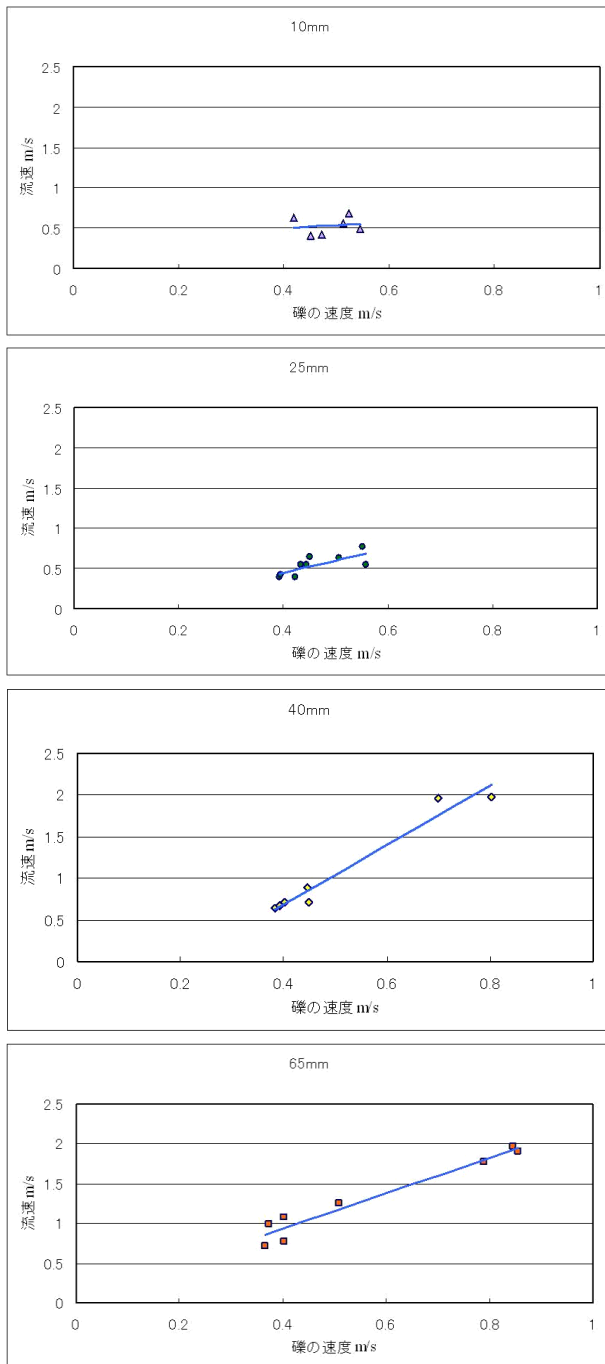


図-2 石の速度と流速の関係

なることがいえる。また、実験終了後の水路には昨年と同様に図-5の様「みずみち」が形成された。

4. 砂礫の移動機構と洗掘の関係

(1) saltation モデル

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³⁾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

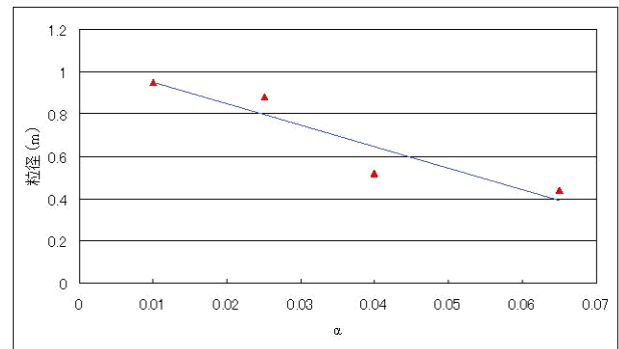
図-3 α と粒径の関係

図-4 実験水路

表-1 本実験の条件と結果

ケース	Case2-1	Case2-2	Case2-3	Case2-4	Case2-5	Case2-6	Case3-1	Case3-2	Case3-3
平均流量	$Q=(\text{m}^3/\text{s})$	0.11	0.10	0.28	0.46	0.44	0.52	0.55	0.51
平均水深	$H=(\text{m})$	0.12	0.11	0.21	0.28	0.29	0.32	0.34	0.31
平均流速	$V=(\text{m/s})$	1.35	1.23	1.78	2.12	1.98	2.14	2.12	2.01
粒径	$d=(\text{mm})$	10			65		10	40	
給砂量	$Q_b=(\text{m}^3/\text{h})$	1.80	3.60	4.50	0.60	1.00	1.50	5.00	5.00
通水時間	$T=(\text{h})$	4	3	3	4	3	3	3	3
平均洗掘深	$D=(\text{m})$	0.005	0.005	0.013	0.018	0.008	0.015	0.006	0.011
測線	15測線(0.5mピッチ)								
備考	平均洗掘深は各測線の礫体積箇所を除いた平均値								

するとしている。

このモデルを考慮して本実験における各ケース毎の跳動距離 $L_s(\text{m})$ を以下の式より求めた。

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



図-5 みずみち

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

ただし、 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) とする。

既往の研究結果⁴⁾から、 $e=0.55$ 、 $s=1.65$ 、 $A_r=8.5$ 、 $C_D=0.4$ 、 $\lambda_s=0.4$ を使用し、跳動距離を算出した結果を表2に示した。

表-2 各ケース毎の跳動距離

ケース	目標粒径 (m)	実際の平均粒径 d (m)	跳動距離 L_s (m)	移動倍率 (%)
Case2-1	0.01	0.004	0.028477	806.569
Case2-2		0.004	0.023658	675.293
Case2-3		0.004	0.035797	1019.949
Case2-4	0.065	0.042	0.001208	2.849
Case2-5		0.060	0.000003	0.005
Case2-6		0.054	0.000862	1.584
Case3-1	0.01	0.006	0.000024	0.430
Case3-2	0.04	0.028	0.000026	0.090
Case3-3		0.028	0.000001	0.004

この結果から Case2-1～Case2-3 の跳動距離は粒径の約 800 % から 1000 % と算出された。しかし、Case2-4～Case3-3 に関しては跳動距離が粒径の約 0.004 % ～ 2.8 % と非常に小さいため跳動ではなく河床を転動していることが考えられる。よって、Case 2-1～Case2-3 は主に衝撃力、Case2-4～Case3-3 は主に摩擦力によって洗掘がなされていると考えられる。

(2) 摩擦の考慮

摩擦力によって洗掘がなされていると考えられる Case2-4～Case3-3 に関しては、既往の研究⁵⁾を参考に、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 の法則を河床の摩耗現象の解明に適用できるものとする。摩耗試験の結果に基づく摩耗現象は、巨視的には動摩擦係数 μ_s を導入し、仕事量に比例させることで統一的に説明できる。そこで、摩擦力による摩耗量 $W(\text{m}^3)$ は砂礫の仕事量に比例する

ものと考えて以下の式を用いることとした。

$$W = C\mu_s PL \quad (1)$$

ただし、 C :軟岩河床の摩耗係数 (m^2/kgf)、 P :砂礫の総荷重 (kgf)、 L :砂礫の移動距離 (m)

本実験の結果より、 W 、 P および L に観測地を用いて摩耗係数を逆算した結果を表3に示した。この際、動摩擦係数 μ_s としては 0.6 を用いた。

表-3 軟岩河床の摩耗係数

ケース	摩耗量 (m^3)	移動距離 L (m)	総荷重 P (kgf)	摩耗係数 C (m^2/kgf)
case2-4	0.218	15	6194	3.904E-06
case2-5	0.086	13	7743	1.417E-06
case2-6	0.185	15	11614	1.771E-06
case3-1	0.074	15	99921	8.240E-08
case3-2	0.131	15	99921	1.452E-07
case3-3	0.099	13	119905	1.055E-07
平均値				1.238E-06
備考	case2-5,3-3の摩耗量及び移動距離は礫堆積部を除いた値である			

表-4 軟岩河床の摩耗係数 (跳動する砂礫を転動と仮定)

ケース	摩耗量 (m^3)	移動距離 L (m)	総荷重 P (kgf)	摩耗係数 C (m^2/kgf)
Case2-1	0.040494409	10	18582.93333	3.63186E-07
Case2-2	0.034035133	9	27874.4	2.26114E-07
Case2-3	0.16556576	15	34843	5.27974E-07
平均値				3.72425E-07
備考	Case2-1,2-3の摩耗量及び移動距離は礫堆積部を除いた値である			

表-5 コンクリート及び鋼材の摩耗係数

材料	摩耗係数 C (m^2/kgf)
Concrete	1.135E-08
Steel (SM.41)	6.59E-11
Steel (HT.80)	4.78E-11
SUS 304	3.25E-11
SCMnH 11	1.33E-11

ここで、Case2-1～Case2-3 は跳動しているため岩盤の洗掘は衝突によるものであると考えられるが、Case2-4～Case3-3 と同様に河床上を転動していると仮定して上記の式から摩耗係数を算出し、表-4に示した。また、表-5に比較のためコンクリート及び鋼材の摩耗係数⁵⁾を示した。表-3、表-4と表-5を比較すると摩耗係数が小さ

いほど摩耗はしにくい。表-3と表-4を比較すると、先ほど衝突による洗掘を摩擦によるものと仮定した Case2-1～Case2-3の摩耗係数の平均値は、洗掘は摩擦によるものであると考えられる Case2-4～Case3-1の摩耗係数の平均値よりも小さく算定されている。つまり、摩耗しにくいということが分かった。このことから、摩耗をしにくい原因は Case2-1～Case2-3が跳動をしているため河床への接触する回数が少なかったためと考えられる。

5. 結論

本研究による結論は以下の通りになった。

砂礫の速度は流速に比例する。また、粒径によって比例定数が異なる。

軟岩河床の洗掘機構は衝撃力、摩擦力の両方を考慮しなければならない。

軟岩河床の洗掘は砂礫の衝突によるものよりも、摩擦によるもののほうが起こりやすいということが考えられる。

6. おわりに

今回の研究では実際に実験で使用された砂礫の体積が不明だったため粒径分布の幅や平均粒径などが多少異なる現地の30個サンプルから体積を求め使用したため、砂礫の総荷重の値が多少異なる。また、今回は跳動距離を計算から算出したが実際に礫の動きを解析することで河床の洗掘機構をより解明することができると考えられる。

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。また、実験データは旭川開発建設部より提供いただいた。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
- 3) 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
- 4) 河村三郎: 土砂水理学 1, 森北出版, pp.256～258, 1982
- 5) 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