

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

独)寒地土木研究所 寒地河川チーム 正会員 ○井上 卓也
 独)寒地土木研究所 寒地河川チーム 正会員 伊藤 丹

1. 目的

北海道内の複数の河川において，軟岩床が露出し，急激な河床低下・河岸侵食が進行している．これにより，護岸や橋脚の安定性が低下し，それに伴う治水安全度の低下が懸念されている．既往研究¹⁾によつて，軟岩床には2つの特徴があることが明らかにされている．一つは，流砂の衝突により侵食されやすいこと．もう一つは，砂礫床に比べ限界掃流力が小さいため，砂礫が捕捉されにくいことである．

本研究の目的は，軟岩床の砂礫床への復元を検討するために重要となる，軟岩床の粗度，限界掃流力，砂礫床の復元に必要な流砂量(飽和流砂量)の関係について，水理実験によつて明らかにすることである．

2. 水理実験

実験は寒地土木研究所の高速循環実験水路を用いて行われた．水路幅1m，水路長25m(計測区間は，上流端から8m地点～18m地点の10m区間)，水路勾配0.003である．水路床には，軟岩河床を模した非侵食性のモルタル床を用いた．水路は同じ寸法で2回作成し，1回目と2回目でモルタル表面の仕上げ方を変化させた．1回目(以下，水路1と呼ぶ)は金ゴテを用いて滑らかに仕上げ，2回目(以下，水路2と呼ぶ)は木ゴテで仕上げた後，プラスチック製のハウキを用いて横断方向に筋をつけた．

(1) 水路の粗度の計測

水路1と水路2において，水深0.10m，0.15m，0.20mのときの平均水面勾配 I_w ，断面平均流速 V を計測した．実験結果を基に，マンニングの粗度係数 n_m をマンニングの平均流速公式($n_m = R^{2/3} I_w^{1/2} / V$)を用いて算出し，等価粗度 k_s をマンニング・ストリクラーの式($n_m = k_s^{1/6} / 8.1 \sqrt{g}$)²⁾を用いて逆算した．なお， R は径深， g は重力加速度である．この結果，水路1のマンニングの粗度係数は $0.0099 \pm 0.0003 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ，等価粗度は $0.00025 \pm 0.00004 \text{ m}$ であり，水路2のマンニングの粗度係数は， $0.0149 \pm 0.0004 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ，等価粗度は

$0.0029 \pm 0.0004 \text{ m}$ であった．

(2) 無次元限界掃流力の計測

井上ら¹⁾は，水路床の等価粗度 k_s が一定のもと粒径 d を変化させ，軟岩床上の無次元限界掃流力と相対粗度(d/k_s)の関係を調査し，軟岩床上の無次元限界掃流力算定式を導いている．しかし，等価粗度 k_s が変化した場合については確認していない．本研究では，粒径 d を一定(5mm;ろ過砂利)のもと等価粗度 k_s を変化させ(水路1と水路2の2パターン)，無次元限界掃流力と相対粗度(d/k_s)の関係を調査した．

実験方法は以下のとおりである．①30個の砂礫粒子を遮蔽の影響が無いように3個ずつ投下して移動有無を観測する，②全粒子が移動するまで流量を少しずつ増加させる，③流量ごとの水深と水面勾配を計測し無次元掃流力($\tau_* = RI_w / sd$ ， s は砂礫の水中比重)を算出する，④流下した粒子数による無次元掃流力の重み付き平均値を無次元限界掃流力 τ_{*c} とする．なお，上述の作業を水路ごとに2回(計4回)実施した．実験は水路の上端から14m地点で行い，砂礫粒子が1m以上流下した場合を「移動」と判断した．

実験結果を表-1に，実験より算定した無次元限界掃流力と相当粗度の関係を図-1にそれぞれ示す．図-1には，井上ら(2011)¹⁾の実験結果と，軟岩床上の無次元限界掃流力算定式も併せてプロットした．算定式を以下のとおりである．

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

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

ここで， κ はカルマン定数(0.4)， α_* は砂礫粒子の着目高さ(0.65³⁾)， A_2 は $\pi/4$ ， A_3 は $\pi/6$ ， μ_f は静止摩擦係数(岩盤の一般的な値0.65-0.85，本研究では0.85を採用)， $\tan \theta$ は河床勾配である．井上ら¹⁾の

キーワード 軟岩，粗度，無次元限界掃流力，流砂量，砂礫，被覆

連絡先 〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34 TEL 011-841-1639

表-1 無次元限界掃流力に関する実験条件と実験結果

ケース名	等価粗度 k_s (m)	粒径 d (m)	無次元限界掃流力 τ_{*c}
水路 1 1 回目	T1-1	0.00025	0.005
水路 1 2 回目	T1-2	0.00025	0.005
水路 2 1 回目	T2-1	0.0029	0.005
水路 2 2 回目	T2-2	0.0029	0.005

表-2 飽和流砂量に関する実験条件と実験結果

ケース名	通水時間 (h)	水深 (m)	無次元掃流力	給砂量 (m^2/s)	実験結果
Q1-1	1	0.10	0.037	1.08×10^{-5}	▲ 部分被覆
Q1-2	1	0.10	0.037	2.17×10^{-5}	▲ 部分被覆
Q1-3	1	0.10	0.037	4.33×10^{-5}	● 全面被覆
Q2-1	1	0.15	0.055	3.79×10^{-5}	▲ 部分被覆
Q2-2	1	0.15	0.055	6.50×10^{-5}	▲ 部分被覆
Q2-3	1	0.15	0.055	8.67×10^{-5}	● 全面被覆
Q3-1	1	0.20	0.073	4.33×10^{-5}	× 被覆なし
Q3-2	1	0.20	0.073	6.50×10^{-5}	▲ 部分被覆
Q3-3	1	0.20	0.073	9.75×10^{-5}	▲ 部分被覆
Q3-4	1	0.20	0.073	1.30×10^{-4}	● 全面被覆

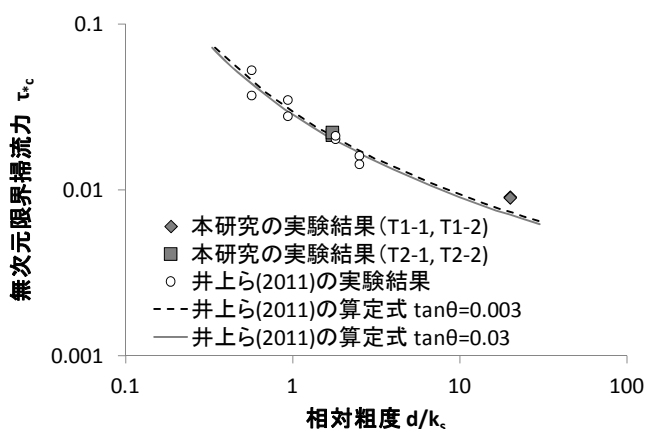


図-1 無次元限界掃流力と相対粗度の関係

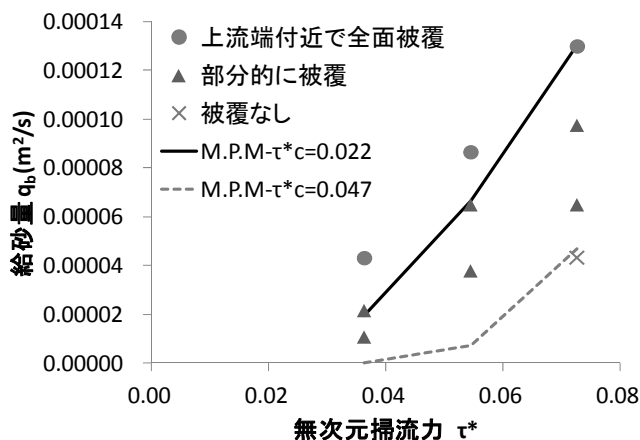


図-2 無次元掃流力，給砂量，砂礫被覆の関係

実験は河床勾配 0.03, 本研究の実験は河床勾配 0.003 のため, 図-1 中に 2 本の算定式をプロットした. この結果, (1) 式によって, 本実験水路の無次元限界掃流力も概ね評価できることが確認された.

(3) 砂礫床の復元に必要な流砂量の計測

水路 2 において, 給砂量を変化させ, 上流端付近が砂礫によって完全に被覆される流砂量(飽和流砂量)を計測した. 実験条件と実験結果を表-2 に示す. ×は被覆が殆ど無く流砂が通過した結果, ▲は部分的に砂礫によって被覆された結果, ●は上流端付近において全面的に砂礫によって被覆された結果をそれぞれ表している. なお, 本研究では通水時間が 1 時間と短かったため水路全体が完全に被覆されるには至らなかった. 砂礫の被覆は上流から下流へ徐々に進行することから, 上流端付近(8m 地点の横断)が完全に被覆された場合を全面被覆, それ以外を部分被覆と定義した. 図-2 に, 無次元掃流力, 給砂量, 砂礫による被覆の関係を示す. 図-2 には Meyer / Peter-Muller 式 ($q_b = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{sgd^3}$) による理論

流砂量も併せて示している. $\tau_{*c} = 0.047$ は砂礫床上一般的な値を利用した場合, $\tau_{*c} = 0.022$ は(1)式から算出した値を利用した場合である. この結果, 飽和流砂量は, Meyer / Peter-Muller 式に含まれる無次元限界掃流力に, (1)式から算出した値を利用することで, 概ね再現可能であることが確認された.

3. まとめ

本研究では, 軟岩の粗度, 限界掃流力, 砂礫床の復元に必要な流砂量(飽和流砂量)の関係について, 水路実験を用いて明らかにした. この結果, 軟岩河床の砂礫河床への復元について, 定量的な検討を行うために重要となる基礎的知見を得ることができた.

参考文献

- 1) 井上, 泉, 米元, 旭: 軟岩上の限界掃流力と軟岩の洗掘速度に関する実験, 河川技術論文集, 17, pp.77-82, 2011.
- 2) Chatanantavet and Parker: Experimental study of bedrock channel alleviation under varied sediment supply and hydraulic conditions, *Water Resour. Res.*, 44, 2008.
- 3) Egiazaroff: Calculation of nonuniform sediment concentrations, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 91.