

河川の岩盤侵食に対する「ネット」の効果

Effects of net cover on bedrock erosion

北海道大学工学部 環境社会工学科社会基盤学コース
寒地土木研究所 寒地河川チーム 研究員
北海道大学大学院 工学研究院環境フィールド工学部門 教授
北海道大学大学院 工学研究院環境フィールド工学部門 助教

○学生員 松元一馬 (Kazuma Matsumoto)
正会員 井上卓也 (Takuya Inoue)
正会員 清水康行 (Yasuyuki Shimizu)
正会員 田中 岳 (Gaku Tanaka)

1. はじめに

現在、北海道の河川において、岩盤が露出する区間が増加している。軟質な岩盤が露出した場合、岩盤侵食によって河床低下が起こり、護岸や橋脚の安定性が損なわれるなど、河川構造物に悪影響を及ぼしている(図-1)。岩盤が露出した要因としては、上流部に建設されたダムなどの河川横断工作物による土砂供給の減少、当該区間における川幅縮小や直線化による掃流力の増加、昭和50年代まで行われた砂利採取などが挙げられている。一方、岩盤の侵食要因としては、流砂の衝突、流水による剥離、乾湿繰り返しによる風化などが挙げられている。特に、流砂の衝突による侵食は、多くの岩盤河川において、最も影響が大きい侵食要因と考えられている¹⁾。

流砂による侵食は、跳躍する砂礫粒子が岩盤に衝突することによって引き起こされる¹⁾。このため、露出した岩盤は侵食されるが、砂礫が堆積し被覆状態にある岩盤は、流砂の衝突から保護されるため、侵食が抑制されることが実験により明らかとなっている²⁾。また、既往研究によって、岩盤の侵食速度に影響を与える要素として、上流からの給砂量、粒径の大きさ、砂礫による被覆率などが挙げられている¹⁾³⁾⁴⁾。

しかしながら、現実の河川において、給砂量や粒径の大きさを人為的に調整することは、技術的にもコスト的にも、極めて困難である。このため、これまでに行われた岩盤侵食対策の多くは、いかに砂礫による被覆率を増加させるかに着目している。例えば真駒内川では、斜路工や帯工を作り、流速を落として礫をトラップさせる対策が行われている⁵⁾。石狩川では、川幅を広げることで、掃流力を低下させ、砂礫の流出を抑制する計画が検討されている⁶⁾。ただし、帯工は下流側の河床低下を助長する恐れがあり、川幅を広げる対策は、土地利用の制約上適用できない場合がある。

そこで、本研究では、ネットを用いた岩盤侵食の防止対策を提案することを将来的な目標とし、基礎的な実験を行った。本研究で、ネットを採用した意図は二つある。一つは、ネット自体のカバー効果によって、流砂の衝突する面積を減少させ、岩盤侵食を抑制することである。もう一つは、ネットの凹凸によって、粗度を上げることによって、砂礫のトラップを促し、被覆率を増加させることである。なお、粗度や砂礫の移動限界が被覆率と密接な関係にあることは、井上ら⁴⁾、田中ら⁷⁾の研究で示唆されている。今回は、これらの既往研究を活用し、ネットによる粗度上昇効果と被覆率増加効果について調査した。



図-1 岩盤侵食された河川の様子
(左：久著呂川 右：居辺川)



図-2 実験で使用した水路

2. 実験概要

2. 1 実験水路について

実験には、水路の長さ 22m、水路幅 0.5m、勾配 1/100 の水路を使用した(図-2)。計測区間は、低下背水の影響を避けるため、水路の下流端から 10m から 15m の 5m 範囲とした。また、ネットによる被覆効果を確認するために、ネットの有無を含めた 4 種類の水路床を作成した。

図-3 に実験で使用した水路床の写真を示す。ケース 1 では、平均粒径 5mm の砂利をモルタルに埋め込んだ水路床を使用した。ケース 3 では、31.5mm の篩いを通過し、26.5mm の篩いに留まった礫をモルタルに埋め込んだ水路床を用いた。ケース 2 では、10×10mm メッシュのトリカルネット(タキロン株式会社製 N23)を 30×30mm メッシュに加工して、ケース 1 の水路床に敷設した。なお、ネット高さ(厚み)は 2mm 程度である。ケース 4 では、ケース 1 の水路床に 34×34mm メッシュのトリカルネット(タキロン株式会社製 NR34)を敷設した。ネットの高さ(厚み)は 4mm 程度である。

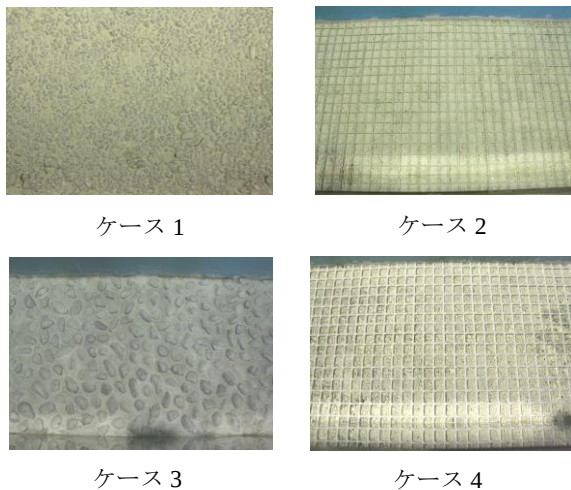


図-3 ケース毎の河床の写真

2. 2 実験の方法

(1) 初期水路床の粗度計測

砂礫を給砂する前の粗度を確認するために、20ℓ/s、30ℓ/s、40ℓ/s の 3 つの流量を流下させ、その際の水位を 1m 間隔で計測した。観測した水位から径深と水面勾配を求め、以下に示すマンニングの等流公式を用いて、マンニングの粗度係数 n を算定した。

$$n = \frac{R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (1)$$

ここで、 R は径深(= $Bh/(B+2h)$)、 I は水面勾配、 V は平均流速(= $Q/(Bh)$)、 B は水路幅、 h は水深、 Q はポンプ流量である。次に、算出したマンニングの粗度係数から、マンニング・ストリックラーの式により、等価粗度高 k_s を算定した。

$$k_s = (7.66 \times n \times \sqrt{g}) \quad (2)$$

ここで、 g は重力加速度である。等価粗度高を算定した理由は、一般的な砂礫床の等価粗度高(粒径の 2.5 倍程度⁷⁾)と比較するためである。

実験をもとに導出した初期粗度高を表-1 に示した。ケース 1 とケース 2 の初期粗度高は、砂礫床の粗度高より小さく、ケース 3 とケース 4 の初期粗度高は、砂礫床の粗度高より大きい。今回粒径 5mm の砂礫を使用しており、砂礫が完全に堆積された状態(砂礫床)の粗度高さを $k_s=0.0125$ としている。

(2) 初期水路床の無次元限界掃流力の計測

予備実験の際において、徐々に水位を階段状に増加し、水路床に設置した礫(30 個)が移動する個数と、その時の無次元掃流力(水位と勾配)を計測した。各流量における移動個数を用いた無次元掃流力の重み付き平均値を、無次元限界掃流力とした。

(3) 被覆率の計測

被覆率の実験は、粒径が 5mm の砂礫、流量が 30ℓ/s で一定となる条件のもと行われた。実験開始後、一定の

表-1 各ケースの実験条件

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
初期粗度高さ (k_s)	0.0038	0.0097	0.048	0.0363
給砂量 (ℓ/分)	1.6, 2.4, 3.2, 4	1.6, 2, 2.4	0.4, 0.8, 1.2, 1.6	0.4, 0.8, 1.2, 1.6
ネットの使用	×	○	×	○
初期限界掃流力 (τ_{*c})	0.0326	0.0332	0.0838	0.0975

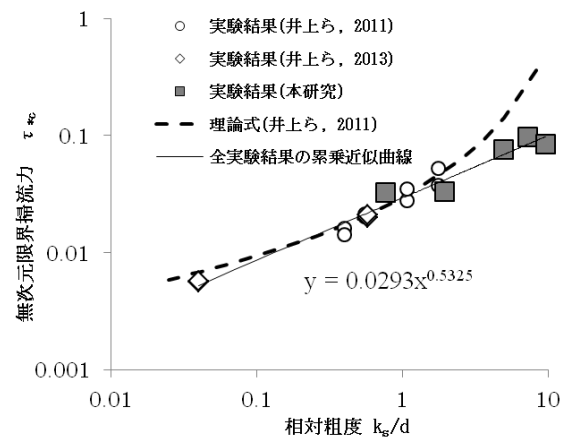


図-4 相対粗度と無次元限界掃流力の関係

給砂量を上流端に与え続け、30 分毎に水路床を真上から撮影し(変化の大きい始めの 1 時間は 15 分毎)、1 時間毎に水位を計測した。給砂は概ね被覆率が安定するまで実施し、ケース 1 では、平均 3 時間、ケース 2、3、4 では平均 4 時間の給砂を行った。実験終了後は、上からの河床写真に加えて、レーザー砂面計を用い、横断面の地形データを計測した。

本実験では、水路床ごとに 3~4 種類の給砂量を与えた(表-1)。また、実験終了後に水路床に堆積していた砂礫は除去し、常に砂礫の堆積が無い状態から実験を開始した。

水路床は白く塗られており、給砂した砂礫は黒茶色であったため、撮影した画像を Photoshop で白と黒の 2 階調に処理し、その黒色部分(被覆部分)の面積割合を被覆率と定義した。

3. 実験結果

3. 1 相対粗度と限界掃流力の関係性

相対粗度(初期粗度高と給砂粒径の比)と無次元限界掃流力の関係について、今回の実験結果、過去の実験結果⁴⁾⁸⁾、理論式⁴⁾および累乗近似曲線を図-4 に示した。理論式は、2011 年の井上らの提案式を用いている。

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

ここで、 $\alpha_1=1.62$ 、 $\kappa=0.40$ 、 $\alpha_s=0.65$ である。

給砂量=1.6 ℓ/分 (通水時間: 2 時間)



給砂量=2.4 ℓ/分 (通水時間: 2 時間)



給砂量=3.2 ℓ/分 (通水時間: 4 時間)



給砂量=4 ℓ/分 (通水時間: 4 時間)



図-5 ケース 1 における通水後の水路床写真

給砂量=0.4 ℓ/分 (通水時間: 4 時間)



給砂量=0.8 ℓ/分 (通水時間: 4 時間)



給砂量=1.2 ℓ/分 (通水時間: 5 時間)



給砂量=1.6 ℓ/分 (通水時間: 5 時間)



図-6 ケース 4 における通水後の水路床写真

図-4 をみると、相対粗度が大きいとき、理論式と本研究の実験値に多少の違いが見られる。これは、理論式では砂礫の動き始めを滑動と想定しているが、実験で粗度が大きい場合、砂礫の動き始めが転動の状態になるためと考えられる。

3. 2 粗度高さと被覆率の関係性

ケース 1 における通水後の水路床写真を図-5 に、ケース 4 における通水後の水路床写真を図-6 にそれぞれ示した。この様な写真をもとに、被覆率と給砂量の関係を整理したのが図-7 である。なお、被覆率が 0 のとき、水路床は完全に露出した状態であり、被覆率が 1 のとき、水路床は砂礫によって完全に被覆された状態である。

図-7 によると、同じ給砂量の場合、粗度の高いケースの方が粗度の低いケースより、被覆率が高くなる。このことから、粗度の増加に伴い被覆率も増加することが確認された。

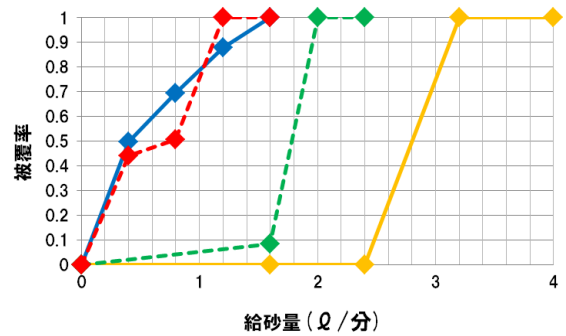


図-7 被覆率と給砂量の関係

ケース 1: 黄線 ケース 2: 緑線(ネット有り)
ケース 3: 青線 ケース 4: 赤線(ネット有り)

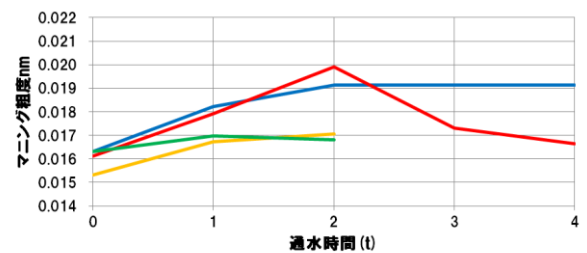


図-8 マニング粗度の時間変化(ケース 1)

給砂量 4ℓ/分: 青線 給砂量 3.2ℓ/分: 赤線
給砂量 2.4ℓ/分: 黄線 給砂量 1.6ℓ/分: 緑線

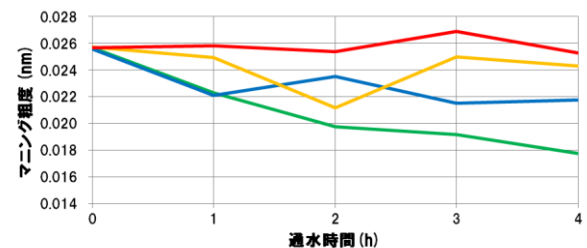


図-9 マニング粗度の時間変化(ケース 3)

給砂量 1.6ℓ/分: 緑線 給砂量 1.2ℓ/分: 青線
給砂量 0.8ℓ/分: 黄線 給砂量 0.4ℓ/分: 赤線

また、粗度が砂礫床の粗度より低い、ケース 1 とケース 2 では、給砂量を増加させても、しばらくは被覆率がゼロ近くを推移し、ある給砂量を超えると急激に被覆率が上昇した。一方、粗度が砂礫床の粗度より高いケース 2 とケース 4 では、給砂量を増やすと被覆率も徐々に上がる傾向がみられた。このことから、水路床の初期粗度高さが、砂礫床の粗度高さより、高いか、低いかによって、被覆率の変化傾向が大きく異なることが確認された。

3. 3 粗度の時間変化

ケース 1 とケース 3 における Manning 粗度の時間変化を図-8 と図-9 にそれぞれ示した。初期 Manning 粗度が 0.016 であるケース 1 では、被覆が進むにつれて(例えば、緑線、完全な砂礫床になったパターン)、完全な砂礫床

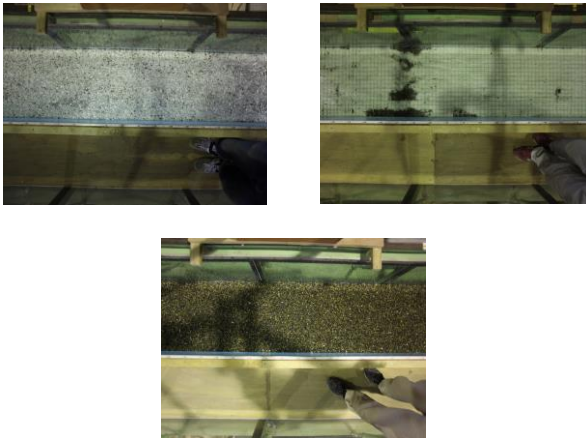


図-10 給砂量=8 0/5min 時における
 通水後の水路床写真 (12m~13m 地点)
 左: ケース 1 右: ケース 2 (ネット有り)
 中央下: ケース 4(ネット有り)

の粗度(約 0.020)に近づくように粗度が増加していく結果が得られた(図-8)。一方で、初期マニング粗度が 0.025 であるケース 3 では、時間が経過し、被覆が進むにつれて(例えば、青線、完全な砂礫床になったパターン)、完全な砂礫床の粗度(約 0.020)に近づき、粗度が減少する結果が得られた(図-9)。また、被覆があまり進まなかった図-8の緑線や図-9の赤線では、粗度は初期から大きく変化しなかった。

以上のことから、粗度は被覆率に影響を与えるが(図-7)、その粗度自体が被覆率によって変化する(図-8 および図-9)ことが確認された。

3. 4 ネットの効果

上記の写真(図-10)は、同じ給砂量時におけるケース 1 とケース 4 の通水後の写真である。ケース 1 の河床の上にネットをおいたのがケース 4 であり、ネットをつける前後で、被覆率が大幅に増加するという結果が得られた。

一方、ケース 4 よりネットの高さが小さかったケース 2 をみると、ケース 2 でも、ネットが無い状態(ケース 1)より、被覆が進んだものの(図-7 参照)、ケース 4 と比較すると被覆率の増加は小さい結果となった。このことから、ネットによる被覆効果を期待するためには、砂礫床の粗度高を超えるように、ネットの高さ(厚さ)を調整する必要があると考えられる。

4. 考察とまとめ

今回の実験では、得られた成果を以下に整理する。

- ・ 粗度の増加に伴い、被覆率は増加した。
- ・ 完全な露岩状態の粗度(初期粗度)が、完全な砂

礫床の粗度より小さい場合、給砂量を増加させても、被覆率はしばらく増加せず、ある給砂量を超えると急激に増加した。

- ・ 一方、完全な露岩状態の粗度が、完全な砂礫床の粗度より大きい場合、給砂量の増加に伴い被覆率も徐々に増加した。
- ・ 粗度によって被覆率は変化し、被覆率の変化に伴い粗度は変化することから、被覆率と粗度には相互関係があることが確認された。
- ・ ネットを設置することにより、粗度と被覆率を増加させられることが確認できた。
- ・ ネットの厚さによって、粗度と被覆率に大きな違いが生じた。このことから、ネット設置後の粗度が、砂礫床の粗度高を超えるように設定することが、被覆率を増加させる上では重要と考えられる。

今後はネットをいかに実際の河川へ応用できるかを検討していく必要がある。設置方法や出水時の安定性などが、現地に設置する際の課題になると考えられる。またネットに使用する素材や厚さも考慮していく必要があるだろう。まずは、比較的小さな河川で実際にネットを設置し、効果をモニタリングしていきたい。

参考文献

- 1) Sklar, L. S., and Dietrich, W. E. : A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, *Water Resour. Res.*, 40, W06301, 2004.
- 2) Sklar, L. S., and W. E. Dietrich : Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock, *Geology*, 29, 1087- 1090, 2001.
- 3) Chatanantavet, P., and G. Parker : Physically based modeling of bedrock incision by abrasion, plucking, and macroabrasion, *J. Geophys. Res.*, 114, F04018, 2009.
- 4) 井上卓也, 泉典洋, 米元光明, 旭一岳: 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*, 第 17 巻, 2011.
- 5) 高橋浩揮, 丸岡昇, 竹内亀代司, 渡辺 恵三: 真駒内川における礫河床の復元に関する実験的研究について (中間報告), *リバーフロント研究所報告 第 18 号*, 2007.
- 6) 石狩川上流 河道管理ワーキング資料より
- 7) 田中岳, 泉典洋: 部分的に覆礫した岩盤河床における掃流砂量と流れの抵抗則, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol. 69, No. 4, I_1033-I_1038, 2013.
- 8) 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*, 68th, ROMBUNNO II -072, 2013.