実河川と再現計算による岩盤浸食対策用ネットの効果の検証

Verification of "net cover effects" by numerical model and field experiment

北海道大学工学部 環境社会工学科	
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専門	教授

○学生員	六浦和明	(Kazuaki Mutsuura)
正会員	井上卓也	(Takuya Inoue)
正会員	清水康行	(Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

現在、北海道の河川では、河床の岩盤が露出する区間 が増加している。露出した岩盤の浸食に伴う河床低下に よって、構造物の安定性の低下や、サケなどの産卵場所 の減少による生態系への悪影響などが問題視されている (図-1)。

岩盤が露出する要因として挙げられるのが、河道の直線化や川幅の減少による掃流力の増加、ダム建設による 土砂供給量の減少などである。一方、岩盤浸食の要因と しては、流砂の衝突が、最も影響が大きい浸食要因であ ると言われている¹⁾。流砂による浸食は、砂礫粒子が 岩盤に衝突する事で引き起こされる¹⁾。故に、岩盤上 に砂礫が堆積すると、岩盤と流砂の衝突は抑制され、結 果的に岩盤浸食も抑制される¹⁾。

岩盤浸食の対策として、川幅を広げて掃流力を減少さ せる方法や、帯工を設置して流速を低下させる方法など、 砂礫の再被覆に着目したもの挙げられる。ただし、前者 は土地利用の都合上、困難な場合が多く、後者は下流部 の河床低下を誘発してしまう恐れがある。

そこで、本研究で着目したのが、河床に岩盤浸食対策 用のネットを設置し、ネット自体のカバー効果(ネット により流砂の岩盤への衝突を減少させる)と、凹凸によ る砂礫のトラップを促す方法である。

ネットによる被覆率増加効果は、松元らの既往実験に より確認されている²⁾。本研究は、松元らの既往実験 を数値計算で再現する事を試み、さらに実河川(南の沢 川)にネットを設置した場合の砂礫被覆効果について調 査した。



図-1 岩盤浸食の様子(左:石狩川、右:豊平川)

2. 松元らの実験の再現計算

1 再現計算の方法

本研究モデルは、Inoue.et.al³⁾の岩盤浸食モデルを参考 に、iRIC Nays2DH()を改良する事で構築した。Nays2DH は一般座標系を用いた平面2次元流れと河床変動計算モ デルである。本論文では、主に Nays 2DH モデルからの 改良点について記述する。 Nays2DH モデルは、流れの基礎方程式に平面 2 次元 の浅水流方程式と連続式を用いている。流れの抵抗は以 下の式を用いて算出されている。河床せん断係数 C_fは 以下の式で導かれている。

$$C_f = \frac{gn_m^2}{h^{\frac{1}{3}}} = \frac{g}{h^{\frac{1}{3}}} \left(\frac{k_s^{1/6}}{7.66\sqrt{g}}\right)^2 \tag{1}$$

ここで、g は重力加速度、h は水深、k_sは等価(水理学 的)粗度高さである。岩床と砂礫床が混在している場合、 平均的な粗度高さは、岩床と砂礫床の面積比率に依存す ると考えられている³⁾⁴⁾。本モデルはk_sを以下の式から 算出する。

$$k_{s} = p_{c}k_{a} + (1 - p_{c})k_{b}$$
⁽²⁾

ここで、 p_c はある計算格子内での砂礫が岩床を被覆している面積割合、 k_{sa} は砂礫床の粗度高さ、 k_{sb} は岩床の粗度高さである。 P_c の算定には、既往研究³⁾で提案されている、以下のモデルを用いる。

$$P_{c} = \begin{cases} \frac{\eta_{a}}{L} & \text{for } 0 \le \frac{\eta_{a}}{L} < 1\\ 1 & \text{for } \frac{\eta_{a}}{L} \ge 1 \end{cases}$$
(3)

ここで、 η_a は砂礫層の厚さ、Lは岩床の物理的な凹凸高 さと砂礫床の物理的な凹凸高さの和である。

流砂の連続式として、掃流層内の流砂体積を考慮した、 以下の式を用いる³⁾⁵⁾。

$$\frac{\partial V_b}{\partial t} + (1 - \lambda) \frac{\partial \eta_a}{\partial t} + \left(\frac{\partial q_{b,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{b,y}}{\partial y} \right) = 0$$
(4)

ここで、 V_b は単位面積あたりの掃流砂の体積、 λ は河 床に堆積した砂礫の空隙率 $q_{b,x}$ と $q_{b,y}$ は単位幅あたりの 流砂量である。

$$(q_{b,x}, q_{b,y}) = \begin{cases} \frac{V_b}{V_{bc}} (q_{bc,x}, q_{bc,y}) & for & 0 \le \frac{V_b}{V_{bc}} < 1\\ (q_{bc,x}, q_{bc,y}) & for & \frac{V_b}{V_{bc}} = 1 \end{cases}$$
(5)

ここで、 V_{bc} は単位面積あたりの飽和体積、 $q_{bc,x} \ge q_{bc,y}$ は単位幅あたりの飽和流砂量である。 $q_{bc,x} \ge q_{bc,y}$ は、 Wang and Parker⁶平衡流砂量式を、重力と二次流の効果⁷⁾を踏まえて、それぞれの成分に分配した値である。また、平衡流砂量で用いられる無次元限界掃流力は、以下の実験式を用いる²⁾³⁾。

$$\tau_{*c} = 0.03 (k_s/d)^{0.6} \tag{6}$$

ここで d は砂礫の粒径である。

本研究では、これらの関係式を用い、実験の調査区間 と同じ区間において、再現計算を試み、実験結果との比 較を行う。

2.2 計算条件

計算条件は、松元らの実験²⁾と同じである。松元らの 実験は、水路長さ 22m 路幅 0.5m、水路勾配 1/100、流 量 0.03m³/s、粒径 5mm という一定条件のもと、様々な 岩床(固定床)、様々な給砂量を用いて行われた(図-2)。 また、松元らの実験で計測された、各ケースの給砂量毎 の水理学的粗度高さks、被覆率Pcの値は、実験水路の 下流部の低下背水の影響を避けるため、実験水路の上流 端から7~12mの区間の砂礫被覆面積率の平均値となっ ている。各岩床の水理学的粗度 k,と地形的な凹凸 Lの 関係を図-3に示す。Run1~3では、モルタル床に異なる 粒径の礫が埋め込まれており、その粒径は Run1 で 30 mm、Run2で50mm、Run3で5mmである。また、Run 4、Run5には、異なる厚さのネットをモルタル床に設置 している。ネットの厚さは Run4 で 4mm、Run5 で 2mm である。なお、図-3の凹凸高さは、観測された河床高 から水路勾配を引いた値の標準偏差である。



図-2 各ケースの水路床の様子



図-3 各ケースにおける地形的粗度高さと水理学的粗度 高さ(縦軸:水理学的粗度高さ、横軸:地形的粗度高 さ)

2.3 計算結果、実験結果の比較

松元らの実験結果と本研究での計算結果の比較を図-4 に示す。これによると、本研究の計算結果は実験結果を 良好に再現できている。 ただし、Run2 では実験結果と計算結果に若干の違い が生じた。この要因として、図-3 に示すように、Run2 は他のケースに比べ、水路床の凹凸の面的なばらつきが 大きかったことが挙げられる。

実験結果は凹凸のバラツキの影響を受けているが、本計算モデルでは平均的な水理学的粗度高 k_sを用いるため、凹凸のばらつきを考慮できていない。この結果、 Run2 において実験結果と計算結果に差が生じたと推測される。

Inoue et al.³は粗度の違いによる被覆率の変化につい て分析を行い以下のことを指摘している。①岩盤(水路 床)の粗度が砂礫床の粗度よりも低い場合、ある給砂量 を超えるまで、砂礫は殆ど岩盤上に堆積せず通過し、あ る給砂量を超えると急激に砂礫が堆積し被覆率が1に至 る。②岩盤(水路床)の粗度が砂礫床の粗度よりも高い場 合、被覆率は給砂量の増加に伴い徐々に増加する。

松元らの実験において、Run3、Run5 の水路床粗度は 砂礫床粗度より低く、その他のケースの水路床粗度は砂 礫床粗度よりも高い。本研究で提案した計算モデルは、 上述の粗度と被覆率の関係を概ね再現できている。



図-4 実験結果と計算結果での被覆率の比較 (実線が計算結果、点線が実験結果)

3. 実河川(南の沢川)での現地調査

3.1 調査項目

南の沢川は豊平川の支流であり、豊平川との合流部に おいて、岩盤が剥き出しになった河床が多く見られたた め、その周辺の約 40m を調査区間とし、ネットを設置 した(図-5)。

ネットの設置は、2014 年 8 月下旬に、北海道開発局 札幌河川事務所の協力によって行われた。その後、2014 年 9 月 11 日の大雨によって、南の沢川に出水(図-6) が起きたため、出水前後における河床変化を計測し、そ れを比較することでネットの効果を確かめた。

河床高の計測は、縦断方向3 側線(50cm 間隔)、横 断方向20 側線(河床変化点毎)に行われた。計測時期 は、ネット施工前、ネット施工後(出水前)、出水後の 3 回とした。堆積砂礫の粒度分布の測定は、調査区間の 上流端から3m 地点、9m 地点、21m 地点で出水前後の 2 回行った。



図-5 調査区間の様子(河床の岩盤は剥き出しの状態)



図-6 南の沢川の水位変化(下南の沢観測所)

3.2 調査に使用したネット

本研究で用いたネットは、「セルデム」と呼ばれ、 本来は切り土の擁壁や法面保護に用いる素材⁹⁾である (図-7)。セルデムを採用した理由は、素材は軽量で耐 久性にも優れているためである。ネットのサイズは1枚 あたり8m×2.5m、厚さは10cm、1マスあたりの大きさ は22.4cm×25.9cmである。

このネットを調査区間の河床に4枚設置し、そのうち 下流側2枚は事前に覆礫を行った(図-7)。上流側の覆 礫をしていない2枚のネットで砂礫の捕捉効果を確認し、 下流側の覆礫した2枚のネットで覆礫砂礫の流失抑制効 果を確認することを目的としている(図-7)。



図-7 実際に使用したネットと調査区間の概略図

3.3 縦断測量の結果

縦断測量の結果を図-8 に示す。ここでは縦断方向3 側線の平均値を示している。覆礫していないネットを設 置した区間では、出水前後で河床標高が上昇しており、 ネットによって砂礫を捕捉したことが分かる。次に、覆 礫区間の観測標高をみると、最下流部(上流端から29 ~33m)を除いて、出水前後で大きな違いは見られなか った。このことから、ネットによって覆礫土砂の流出が 抑制されていると考えられる。一方、ネットを設置して いない区間(35mより下流)をみると、出水前後で標 高に大きな変化がなかった。このことから、砂礫の捕捉 および覆礫土砂の流出抑制は、ネットの効果によるもの と考えられる。



図-8 河床縦断測量結果









3.4横断測量の結果

図-9は、覆礫していないネットを設置した場所

(調査区間の上流端から 8m 下流)の横断測量結果であ り、ネットによる砂礫捕捉効果が確認できる。図-10 は、 覆礫区間内(調査区間の上流端から 22m 下流)の横断 測量結果であり、ネットによる覆礫土砂の流出抑制効果 が確認できる。



図-11 上流端から 3m 地点における粒度分布







粒度分布(上流端から**21**m 地点)

図-13 上流端から 21m 地点における粒度分布

3.5堆積砂礫の粒度分布

各地点における粒度分布の算定結果を図-11~13 に示 す。ネット設置区間(覆礫あり)における、出水前の代 表粒径(60%通過粒径)は39mmであったが、出水後の 代表粒径は54mmと、若干粗粒化した。これは、南の 沢川の高水敷から持ってきた覆礫土砂に含まれる細粒分 が流出したためと考えられる。一方、ネット設置区間 (覆礫なし)の出水後の代表粒径は39mmであり、南 の沢川の高水敷に堆積している土砂と同程度の粒径であった。

4. 考察とまとめ

今回の再現計算と現地調査の結果を以下に整理する。

- ・給砂量と粗度を与えれば、本研究の計算手法により、実験結果を良好に再現できることが確認された。
- ・水理学的粗度高さが小さいと、給砂量を増加させて も被覆率はしばらく増加せず、ある一定量を超える と急激に増加する現象を、本研究の計算手法により 再現できることが確認された。
- ・実河川に岩盤浸食対策用ネットを設置し、その効果 を調査した結果、ネットによる砂礫の捕捉効果と流 出抑制効果の両方が確認された。
- 河床に設置するネットは、その厚さ以下の粒径の砂 礫であれば、砂礫の捕捉が可能であるという事が、 粒度分布の算定から分かった。

今後は、本件研究を活かし、実河川におけるネットの 効果を、数値計算で再現できるかを検証する予定である。 その際は、凹凸のバラツキによる影響をどのように考慮 するかが課題となる。また、実河川に設置したネットは、 一部浮き上がっている箇所もあったため、より安定性の あるネットの素材、設置方法を今後開発する予定である。

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) 松元一馬,井上卓也,清水康行,田中岳:河川の岩盤 浸食に対するネットの効果,土木学会北海道支部論文, 2013
- 3) 井上卓也,船木淳悟:岩床と砂礫床が混在した河川に おける河床変動計算手法の構築,寒地土木研究所月報 No.737,2014.10
- 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)井上卓也,松元一馬,清水康行,泉典洋,Gary Parker, 伊藤丹:岩床粗度と砂礫被覆に関する実験的研究,応 用力学論文,2014
- 6)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,ROMBUNNOⅡ-072,2013.
- 7)Luu, L. X., Egashira, S., and Takebayashi, H. : Investigation of Tan Chaureach in lower Mekong using field data and numerical simulation, Annual Journal of HydraulicEngineering, JSCE, Vol.48,1057-1062, 2004.
- 8)国土交通省 水文水理データベースより9)(株)前田工繊維 ホームページより
 - http://www.maedakosen.jp/mdk/product/hokyou/use_hokyo u/b-13-2.html