

ネットによる軟岩侵食抑制工法の開発と実河川 における効果検証

Suppression method of soft rock erosion by using "net cover effect"
and verification in real river

六浦 和明¹・井上 卓也²・清水 康行³
Kazuaki Mitsuura, Takuya Inoue, Yasuyuki Shimizu

¹正会員 工学 北海道大学工学部 (〒060-0813 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

²正会員 工博 (独) 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)

³正会員 工博 北海道大学大学院 工学研究院 教授 (〒060-0813 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

One of the main causes of bedrock erosion is saltating bedload on the bare bedrock. On the other hand, if bedrock is covered by gravel, bedrock erosion is restrained by decreased collision frequency of bedload particles against bedrock. We focus on use of "net" as counter measure for bedrock erosion. "Net" has two favorable effects in solving bedrock erosion. One is a cover effect of net itself, and other is an effect of capturing bedload particles and increasing the extent of alluvial cover. We have already confirmed the above effects by flume experiments in our previous study. However, method of predicting suitable thickness of "net" for real river has not been developed. And little is known about the effects on "net" for real river. In this study, we predicted suitable thickness to validate thickness of "net" used in MinaminosawaRiver by using constructed model. In addition, we observed changes of the extent of alluvial cover before and after setting net on bedrock in MinaminosawaRiver.

Key Words : bedrock river, bedrock erosion, alluvial cover ratio, net cover, bedrock roughness

1. はじめに

北海道の複数河川において、露出した軟岩河床（以下、岩床と呼ぶ）の局所侵食によって、河川構造物の安定性が低下するケースが増加している。岩床は流砂の衝突によって侵食されるため、岩床に砂礫が堆積すると、岩床と流砂の衝突頻度は減少し岩床侵食も減少する¹⁾。

岩床上の砂礫被覆については、これまでいくつかの研究が行われており、給砂量が多いほど砂礫被覆の面積割合（以降、被覆率と呼ぶ）は大きくなることや¹⁾²⁾、岩床の粗度が大きいほど砂礫被覆面積は大きくなる³⁾⁴⁾ことが明らかになっている。

特に、岩床が滑らかな場合、岩床の一部が露出すると露出面積が急激に増加したちまち完全な露岩床へ至ることや²⁾³⁾⁴⁾、完全に露岩化した後、再度砂礫が堆積し始めるために平衡流砂量をはるかに上回る土砂供給を要すること³⁾⁴⁾⁵⁾が報告されている。

そこで、本研究で着目したのが、構造物周辺の軟岩侵食を抑制するために露岩床にネットを設置する工法であ

る。この工法は、①ネット自体により流砂の岩盤への衝突を減少と、②ネットの凹凸によって砂礫の補足の2つの侵食抑制効果が期待できる。また、この工法は、床止め工や帯工の軟岩侵食抑制工法に比べ、施工にかかるコストも少ない。本研究では、実河川（南の沢川）にネットを設置し、その効果について現地調査を行った。

2. 調査・分析方法

(1) 現地調査箇所

現地調査箇所は、豊平川の支川である南の沢川である。南の沢川は、川幅5m程度の小河川であり、豊平川合流部付近において滑らかな岩床が露出している。

調査区間は、図-1に示す40m区間である。川底は露岩しており、殆ど砂礫が残っていないが、高水敷にはかつての洪水で堆積したと考えられる砂礫が堆積しており、その代表粒径はおおよそ40mmである。また、当該区間の河床勾配はおおよそ0.02ある。

南の沢川の流域では、昭和50年代に土砂災害が発生し

たため、上流域には砂防施設が設置されている。

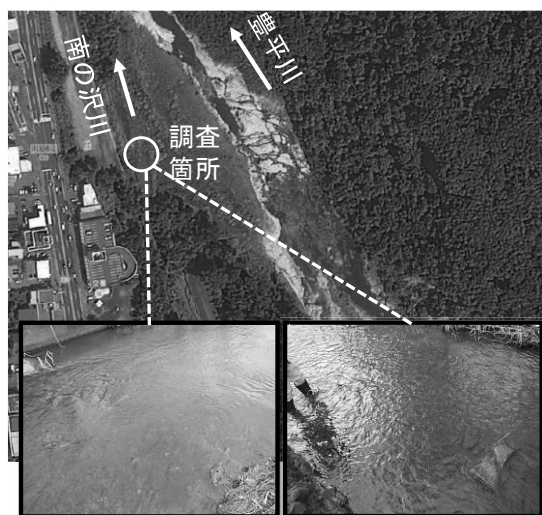


図-1 現地調査箇所（南の沢川）の写真

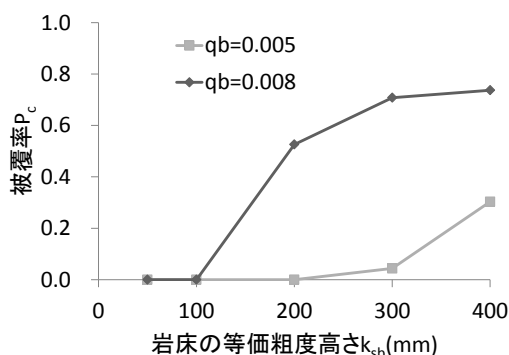


図-2 数値解析結果（被覆率と等価粗度高さの関係）

(2) ネットの選定

a) 砂礫被覆が期待できる岩床の等価粗度高さを数値計算モデルにより算出した後、b) その等価粗度高さが期待できるネットの厚さを、既往実験結果を用いて推定し、c) そのネット厚さを持つ市販のネットを選定した。

a) 岩床の等価粗度高さの算定

数値計算モデルは、井上・船木が提案した岩床の粗度を考慮した平面2次元計算モデル⁶⁾を採用した。このモデルでネット設置した岩床の被覆率を再現できることは既に検証されている⁷⁾。

計算は南の沢川を模した幅5m、水路勾配0.02、水路延長40mの仮想水路で行われた。流量は低水路満杯流量の7.8m³/sとし、給砂量はこの時の平衡流砂量である0.008m²/sと、その半分程度の0.005m²/sの2パターンとした。給砂量を2パターン設定した理由は、南の沢川上流には砂防ダムが設置されており、土砂供給が少ない可能性があったためである。砂礫の粒径 d は現地観測より40mmとし、岩床の等価粗度高さ k_{sb} は、感度分析的に50, 100, 200, 300, 400mmの5パターンとした。計算時間は被覆率が平衡状態になるまでとした。

図-2は計算結果の被覆率と岩床の等価粗度高さの関係である。これによると、給砂量が平衡流砂量の場合、砂

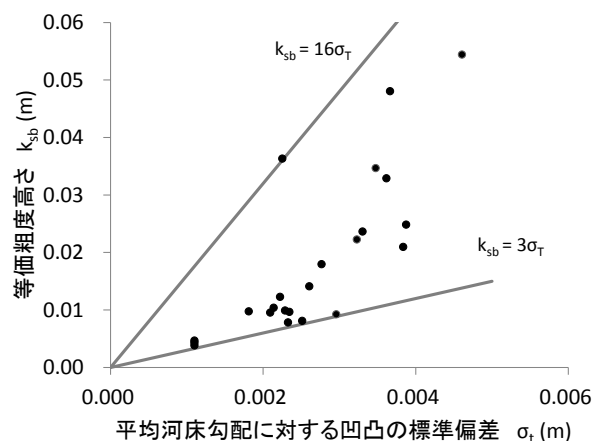


図-3 等価粗度高さと凹凸の標準偏差の関係⁴⁾

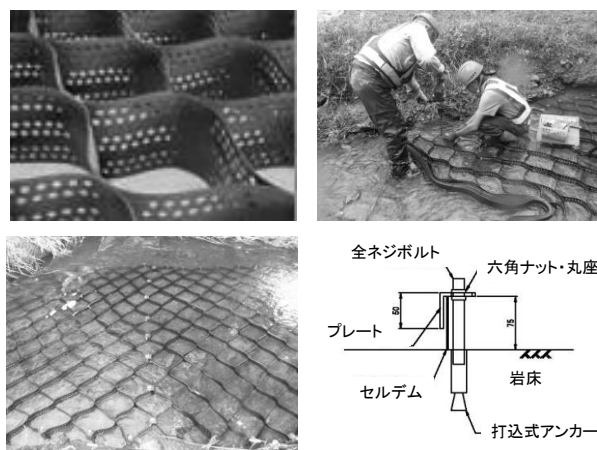


図-4 左上：セルデム（前田工織HPより），右上：設置状況，
左下：設置後状況，右下：設置方法

礫が堆積するためには k_{sb} が100mm以上必要で有り、給砂量が平衡流砂量の半分程度の場合、砂礫が堆積するためには k_{sb} が300mm以上必要なが分かった。以上のことから、 k_{sb} が300mm程度となるネットを設置することにした。

b) ネット厚の推定

既往水路実験⁴⁾によると、平均河床勾配に対する凹凸の標準偏差 σ_T は、その河床の等価粗度高さ k_{sb} の0.06倍～0.33倍の範囲にある（図-3）。 σ_T は平均河床勾配からの標準偏差（凹凸高さの半分）なので、実際のネット厚 T_n は $2\sigma_T$ 程度と考えられる。よって、 $T_n \approx 0.12 \sim 0.66 k_{sb}$ となる。 σ_T と k_{sb} との関係には、ばらつきがあるが、比較的中間値に多くの結果が集まっている事を踏まえ、 $T_n = 0.39 k_{sb}$ を用いた。その結果、 k_{sb} が300mm程度になるためには、 T_n が120mm程度必要なが分かった。また、本研究では、ネットの凹凸が、粗度変化の影響として最も大きな要素と考え、ネットの厚さに着目して選定を行った。

c) 市販ネットの選定

市販されているネットを検索した結果、厚さ120mm以上のネットは無く、一定の耐久性を見込んだで、最も近いのが厚さ100mmのセルデム（前田工織）⁸⁾であった。

（図-4）。セルデムは盛土補強や軟弱地盤補強に用いら

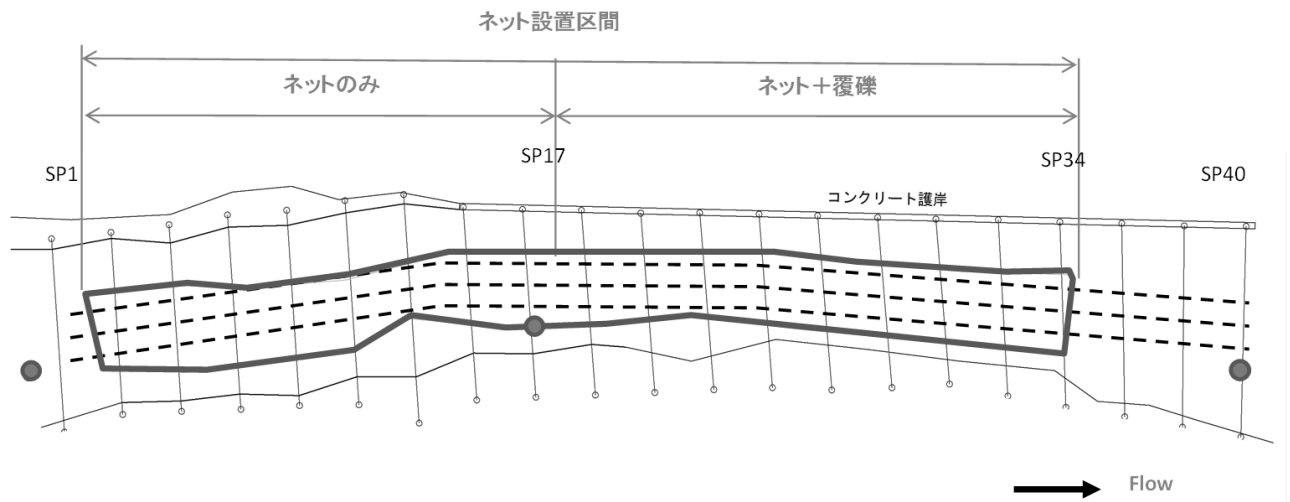


図-5 ネット設置範囲および測量線の平面図

太い線：ネット設置範囲，細い横断線：横断測量位置（縦断方向に2m間隔），点線：縦断測量位置，●：水位観測位置

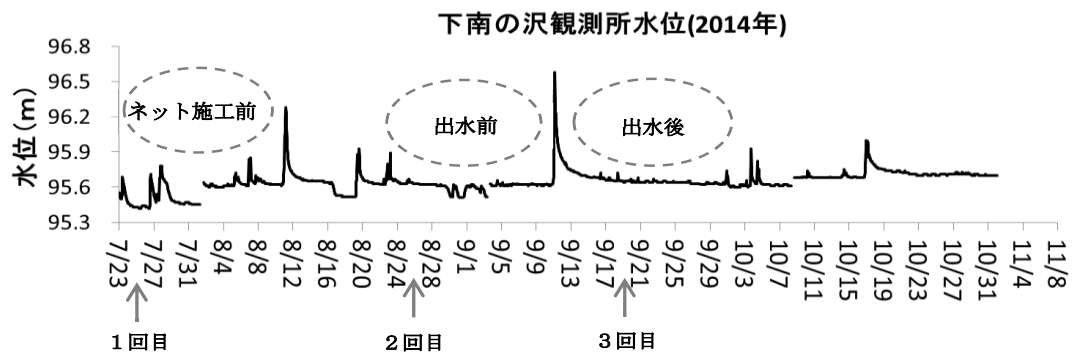


図-6 下南の沢観測所水位と観測のタイミング

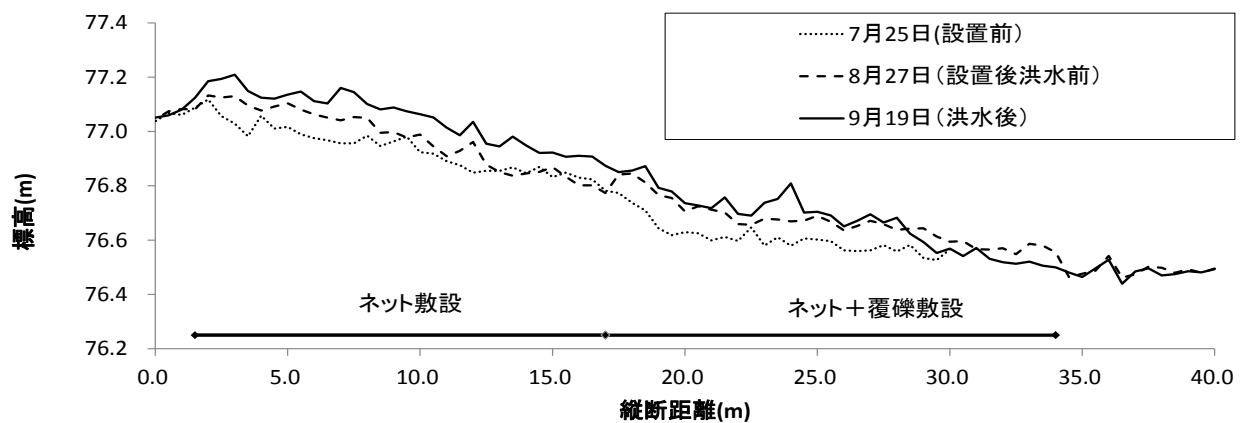


図-7 河床高縦断図

れる高密度ポリエチレン製のネットであり，本来河床に設置することを想定してない製品である．しかし，他に十分な厚さのあるネットが無かったため，これを採用した．なお，ネット1マスのサイズは約25cm×25cmである．

(3) 設置方法

セルデムの設置は，北海道開発局札幌河川事務所の協

力のもと行われた．施工手順は以下のとおりである．① 削孔用ドリル（φ22mm）を使用し，アンカーを設置するための孔をあける．② 孔に本体打込み式アンカーを打ち込む．③ 全ネジボルトをアンカーに差し込む．④ セルデム固定用のプレートに六角ナットで全ネジボルトに固定する．⑤ プレートと全ネジボルトの間にセルデムを設置する．

図-5はネット設置範囲の平面図である。既製品ネットを使ったため、川幅とネット幅が合わず、左右岸付近には隙間がある。岩床の侵食の促進と抑制には、流砂の衝突と堆積が関わっているため、その両方の側面を確認するため、上流側のSP1m～SP17m区間のネットは空のままにし、ネットによる流砂補足効果の検証にあてた。下流側SP17m～SP34mの区間はあらかじめ礫でネットを覆い、ネットによる礫の流失防止効果の検証にあてた。最下流のSP34m～SP40m区間はネットを設置せず、ネットが無い場合の砂礫被覆の確認区間とした。

(4) 調査項目と調査期間

調査項目は河床高の縦横断測量、水位の連続観測、河床材料および露岩状況調査である。河床高の縦横断測量はレベルを用い、40m区間で横断21測線（2m間隔、20cm毎）、縦断3測線（0.5m間隔、50cm毎）を計測した。また、水位は水圧式水位計KADEC-MIZU21（販売元：ノースワン株式会社）を使用し10分間隔で連続観測を実施した。そして、河床材料調査は調査対象河道のセンターから表層砂礫を採取し、篩分け試験を行った。採取した箇所は、SP21m（覆礫したネット上）、SP9m、SP3m（覆礫していないネット上）の3箇所である。また、露岩状況調査は、目視によるスケッチと写真撮影により、実施された。

図-6は調査区間の約1km上流にある下南の沢水位観測所の水位である。ネットの設置工事は8月上旬に行われ、ネット設置後の2014年9月11日に低気圧による豪雨が北海道を襲い（南の沢近隣の支笏湖では観測史上1位の雨量を記録）、南の沢川でも大規模な出水が発生した。このため、河床形状や露岩状況の調査は、ネット施工前（7月25日）、出水前（8月27日）、出水後（9月19日）の合計3回行われた。

3. 調査結果

(1) 河床縦断形状

縦断測量の結果を図-7に示す。ここでは縦断測量3測線の平均値を示している。ネットのみ設置した区間（SP1m～SP17m）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が捕捉されたことが分かる。なお、7月25日（設置前）の河床高よりも8月27日（設置後出水前）の河床高が少し高いのは、ネット設置工事中の8月12日に中規模の出水があり（図-6参照）、このとき既に設置されていた上流側のネットに砂礫が堆積したためである。

次に、ネットと覆礫を併用した区間（SP17m～SP34m）の河床高をみると、SP29～34m区間を除いて、出水前後

で大きな変化は見られなかった。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。なお、SP29～34m区間で河床が低下した要因については、次章で説明する。

ネットを設置していない区間（34mより下流）をみると、出水前後で河床高は大きく変化していない。

(2) 河床横断形状

横断測量の結果を図-8に示す。SP8はネットのみを設置した区間である。ネット設置範囲では、出水前後で河床が約20cm上昇していた。また、この地点の右岸が出水前後で河岸侵食が発生していた。これは、観測史上最大の降雨により、高水敷を超える流量が発生し、コンクリート護岸でない右岸を削った事が原因として挙げられる。また、調査区間以外においても、河岸侵食が発生している場所が見られたため、設置したネットとの関係性は、見られなかった。

SP24は、ネットと覆礫を併用した区間の上流側である。出水前後でネット設置範囲の河床高はほとんど変わらず、覆礫土砂が維持されていた（出水前後で河床材料の入れ替わりはあったと思われる）。こちらの地点においてもSP8と同様の河岸侵食が見られた。

SP32はネットと覆礫を併用した区間の下流側である。この断面では、ネット設置区間の河床が20cm低下しており、覆礫土砂が流出した。この要因として、左岸側の滞筋に流砂が集中し、右岸側ネット部への土砂供給が少なかったことが考えられる。その証拠として、左岸滞筋の軟岩が流砂の衝突により、著しく侵食されている。

SP38はネットを設置していない区間である。流砂が集中した左岸側で20cm、右岸側で3cmの軟岩侵食が観測された。

(3) 河床状況および河床材料

図-9は出水前後の河床状況の写真である。図-9aに示したネットのみ区間では、空のネットの間に砂礫が堆積し、河床が砂礫で覆われている。堆積した砂礫は1mm～100mm程度の幅を持っており、ネットが特定の粒径だけを捕捉せず、幅広い粒径を捕捉することが確認された。

図-9bに示したネット+覆礫区間では、出水後もネットの間に砂礫が堆積した。代表粒径は、出水前に40mmだったが、出水後は54mmと若干粗粒化していた。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。

図-9cに示したネットなし区間では、出水前後ともに露岩河床であった。また、河道中央部にあった1m近い巨石も流出していた。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。

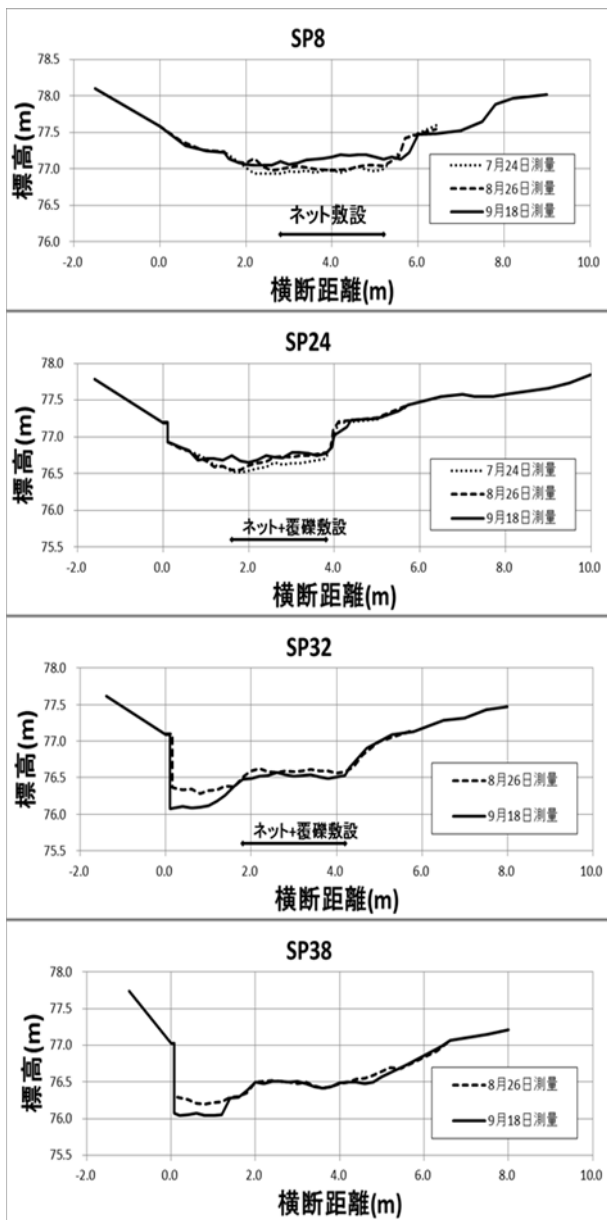


図-8 河床高横断面図

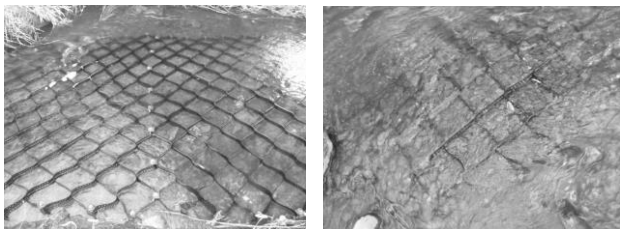


図-9a 出水前後の河床状況（ネットのみ区間）
左：出水前，右：出水後，空のネットに礫が堆積



図-9b 出水前後の河床状況（ネット+覆礫区間）
左：出水前，右：出水後，覆礫土砂が維持



図-9c 出水前後の河床状況（ネットなし区間）

左：出水前，右：出水後，岩床が露出したまま
【SP20m付近】 【SP34m付近】

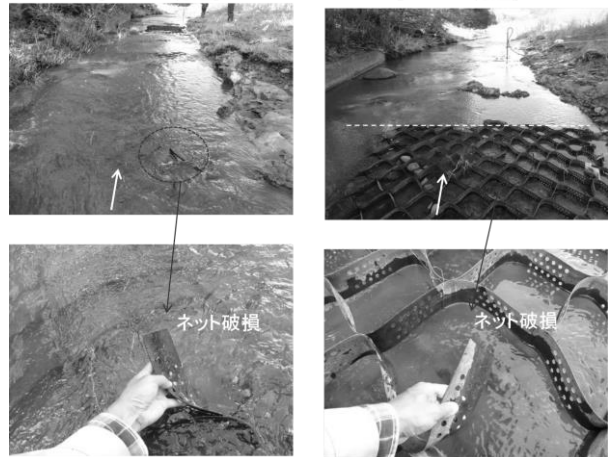


図-10 ネットの破損（一部区間のみ）



図-11 ネット設置区間において出水後にみられた波状地形

(4) 出水後のネットの状況

観測された出水時の水深（約1.1m），観測された河床勾配（約0.02），粒径見合いのマニング粗度（0.028，ほとんどのネット区間が砂礫で覆われていたため）を用いてマニング公式から流速を逆算したところ，出水ピーク時の流速は約5.6m/sと大きかった．しかし，アンカーなどが外れネットがめくれ上がることは無かった．

図-10は出水前後のネットの写真である．SP20あたりで1箇所，SP34付近で2箇所ネットがちぎれ破損していた．設置したネットは，河床に張ることを想定していない製品だった割に，破損箇所が少なかった印象である．破損がみられたのは，砂礫が流出し，ネットが剥き出しになっている部分であったことから，ネットが土砂で覆われていると，破損しにくい可能性がある．

4. 考察

(1) 縦断起伏とステップ&プール

ネット設置箇所の出水後河床には、図-11に示すような、水深の変化に一定の周期性を持つ波状の土砂堆積が見られた。これは、山地礫床河川でしばしみられるステップ&プール地形の可能性があるので、波状起伏の波長について検討を行った。

はじめに、縦断測量結果から現地で観測された縦断起伏の波長を算出すると4~8mであった。

次に、長谷川⁹⁾によると、ステップ&プールの理論波長は以下の式で表される。

$$\lambda = 3.36 \sqrt{6.48 \sqrt{I} - \frac{1}{3}} I^{-\frac{1}{6}} h_c \quad (1)$$

ここで、 λ はステップ&プールの波長 (m) , I は河床勾配, h_c は限界水深 (m) であり、以下の式で表される。

$$h_c = \left(\frac{q^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

ここで、 q は単位幅流量 (m²/s) , g は重力加速度 (m/s²) である。

ピーク水深1.1m, 河床勾配0.02, マニングの粗度を0.028とすると、ピーク時の単位幅流量は5.92m²/sである。これを(1)(2)式に代入すると、理論波長は7.5mとなる。

理論波長7.5mは、測量から算出した波長4~8mの範囲内にあることから、現地施工区間で観測された縦断起伏はステップ&プール地形である可能性が高い。

(2) 今後の課題・改善点

今回の調査により、幾つかの改善点が判明した。一つは、ネットの設置範囲である。今回、既製品のネットを使用したため、ネット幅が川幅より小さく、河岸付近に隙間（ネットが無く露岩した状態）が残ってしまった。この結果、滑らかな両岸露岩部付近に流砂が集中し、局所的な岩床侵食が発生した。ネットを設置する際は、横断的な弱部を作らないように、川幅全体にネットを張った方が良くと考えられる。

岩床を平坦であれば一定長のボルトで対応できるが、今回のように現況河床に合わせて設置する場合、留め具や全ネジボルトの長さを、地形に合わせて調整する必要があり、その作業に時間を要した。より迅速かつ効率の良い設置方法の開発が望まれる。

5. まとめ

本研究では、ネットによる岩床侵食抑制工法の確立を目標に、実河川（南の沢川）に市販ネットを設置した場合の砂礫堆積効果を調査した。以下に今回の調査で得られた知見を列挙する。

- ① 実河川（南の沢川）にネットを設置する場合のネット厚さの推定方法を提案した。

- ② 南の沢川にセルデムを設置し、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。
- ③ 一方、ネットを設置していない区間では、出水前後で岩盤が侵食されていた。
- ④ 観測された水位と河床勾配から推測した出水時の最大流速は5m/s以上と高かったが、ネットは流出することなく、目立った破損も見られなかった。
- ⑤ ネット設置箇所において、出水後に山地礫床河川でよく見られるステップ&プール地形が現れており、ネットが自然礫床河川への復元にも貢献できる可能性を示した。
- ⑥ 本工法は、護床ブロックより安価であることから、軟岩河川の構造物保護対策として今後普及する可能性がある。

今後は、より安定性があり効率的なネット材料、ネット設置方法を開発するとともに、北海道の厳しい冬に対する耐久性、融雪出水のような継続時間の長い出水に対する安全性を調査していく予定である。

謝辞：本研究の現地実験にあたっては、北海道開発局札幌河川事務所、北海道札幌建設管理部、株式会社水工リサーチ、株式会社ハブ、前田工織株式会社のご協力を頂きました。ここに期して謝意を表します。

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) Chatanantavet, P. and Parker, G. : Experimental study of bedrock channel alluviation under varied sediment supply and hydraulic conditions, Water Resour. Res., 44, W12446, 2008.
- 3) Inoue, T., Izumi, N., Shimizu, Y., and Parker, G. : Interaction among alluvial cover, bed roughness, and incision rate in purely bedrock and alluvial-bedrock channel, J. Geophys. Res. Earth Surf., 119, 2014.
- 4) 井上卓也, 松元一馬, 清水康行, 泉典洋, Parker Gary, 伊藤丹 : 岩床粗度と砂礫被覆に関する実験的研究, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol. 70, No. 2, I_727-I_734, 2015.
- 5) 久加朋子, 竹林洋史, 藤田正治 : 固定床と移動床が混在する場合における動的平衡河床の不可逆性, 土木学会論文集B2 (水工学), Vol. 70, No. 2, I_727-I_734, 2015.
- 6) 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.
- 7) 六浦和明, 井上卓也, 清水康行 : 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, 77-82, 2011.
- 8) 前田工織株式会社HP, 盛土補強・軟弱地盤安定材セルデム, http://www.maedakosen.jp/mdk/product/hokyou/use_hokyou/b-13-2.html
- 9) 長谷川和義 : 河川上流域の河道地形, ながれ 24, 15-26, 2005.

(2015. 4. 3受付)