

軟岩河川における侵食耐性の簡易調査手法

井上 卓也¹・村上 泰啓²・数馬田 貢³

¹ (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1-3-1-34)

² 旭川開発建設部 名寄河川事務所 計画課 (〒096-0016 北海道名寄市西6条南9丁目)

³ (独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地技術推進室 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1-3-1-34)

近年顕在化した軟岩河床の侵食に伴い、治水安全度の低下が懸念されている。そこで、これまで未解明な部分が多かった、軟岩河床の侵食耐性と岩質の関係を、簡易的に調査する手法について検討を実施した。調査及び実験の結果、軟岩の侵食耐性は一軸圧縮強度に依存することが確認された。また、侵食耐性は土壤硬度計を用いた簡易的な現地観測により把握できることが確認された。

キーワード 軟岩, 河床低下, 侵食耐性, 岩質, 簡易調査手法

1. はじめに

北海道では、河床砂礫の流出に伴い、軟岩河床が露出する河川が増加している。一般的な岩盤河川の侵食速度は遅いため、河川計画において岩盤河床は固定床として扱われることが多い。しかし、軟岩河床は、流砂の衝突による侵食(摩耗)に対して脆弱であり、その侵食速度は驚くほど速い。このため、軟岩河床の侵食により、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。

軟岩河床の侵食は、岩床上の流砂運動と岩の強度の2つに支配される。流砂運動と侵食速度の関係は、Sklar and Dietrich¹⁾、Chatanantavet and Parker³⁾、井上ら⁴⁾、及川ら⁵⁾、小松ら⁶⁾、大澤ら⁷⁾により研究が行われている。この結果、侵食速度は、軟岩を摩耗させる流砂の衝突頻度に強く依存することが明らかにされている。一方、軟岩の強度と侵食速度の関係については、未解明な部分が多い。

そこで、本研究は、軟岩の侵食速度と軟岩の強度の関係に着目し、7河川の軟岩を対象に侵食速度実験および一軸圧縮強度試験を行った。また、侵食速度と軟岩の強度の関係を簡易的に調査する手法について検討した。

2. 侵食速度と岩強度の関係

(1) 実験概要¹⁾

本研究では、Chatanantavet and Parker³⁾の研究を基に、軟

岩の侵食速度は以下の式で表されると仮定する。

$$E = C_b q_b F_e \quad (1)$$

ここで、 C_b は岩の侵食耐性を表す係数(m^{-1})、 q_b は軟岩上を通過する単位幅流砂量(m^2/s)、 F_e は露出した岩床の面積割合を表している(河床が完全に露岩している場合 F_e は1。河床が完全に砂礫で覆われる場合 F_e はゼロ)。本実験では、流砂量 q_b 、露岩率 F_e が一定の条件の基、様々な岩床の侵食速度を計測し、岩の侵食耐性 C_b と岩の強度の関係について検討を行う。

岩床の侵食速度は、Sklar and Dietrich¹⁾と同様の方法を用いて計測する。Sklar and Dietrichの実験方法は、外径22cmの円筒形水槽に、岩床から切り出した直径20cm、厚さ5cmの岩盤ディスクを装置底に固定し、粒径6mmの砂礫150gと水を投入後、プロペラを一定速度で回転(回転数:1,000rpm)させ、その後岩盤ディスクの侵食量を計測する。プロペラの位置は岩盤ディスクの150mm上方であり(プロペラは岩盤ディスクや砂礫に直接当たらない)、水面は岩盤ディスクの400mm上方である(プロペラにより回転流が生じ、回転流によって砂礫が移動し、岩盤ディスクを侵食させる)。

岩盤ディスクは、真駒内川、夕張川、石狩川、歴舟川、野田追川、久著呂川、網走川の7河川より切り出す。この内、真駒内川と久著呂川の岩床は凝灰岩であり、その他の河川の岩床は堆積岩である。実験における平均侵食速度は以下の方法で算出する。実験前後の質量を電子天秤で計測し、それを実験時間で除し単位時間あたりの侵食質量とする。単位時間あたりの侵食質量を飽和密度で除し単位時間あたりの侵食体積に変換する。単位時間あたりの侵食体積を岩盤ディスクの面積(半径×半径×円周率)で除し平均侵食速度とする。なお、今回の実験で

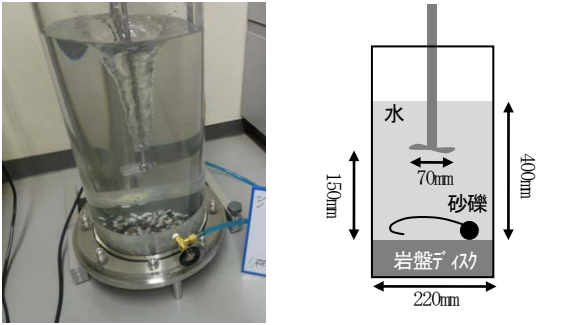


図-1 侵食速度の実験状況¹⁰⁾

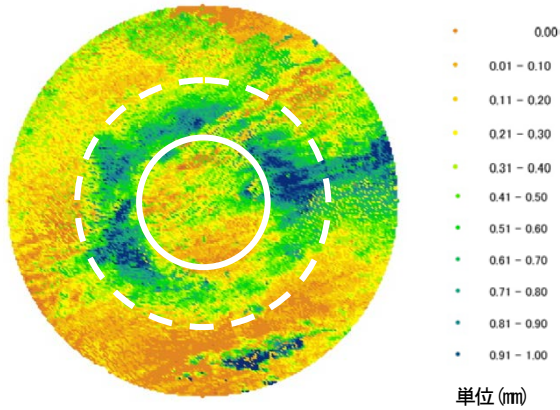


図-2 岩盤ディスクの侵食深(真駒内川)¹⁰⁾

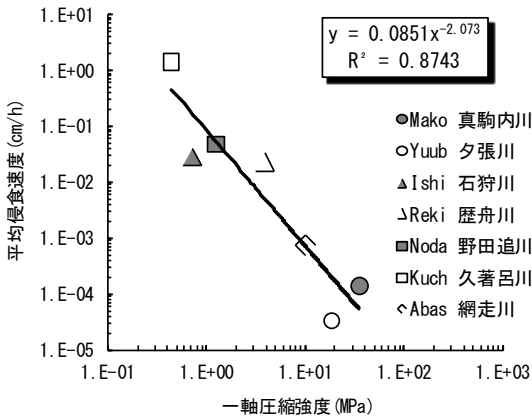


図-3 侵食速度と一軸圧縮強度の関係¹⁰⁾

は、粒径・投入砂礫量およびプロペラの回転速度を一定としているため、流砂量 q_b 、露岩率 F_e も一定である。したがって、実験結果における平均侵食速度 E' は、(1)式の侵食耐性 C_b に比例すると考えられる。

岩の一軸圧縮試験は、JGS2521-2009 (地盤工学会基準)に則り測定する。試験方法の概要を以下のとおりである。円柱状に整形した岩石供試体を長軸方向に圧縮し、軸方向応力-軸ひずみ曲線を求める試験である。得られた曲線より、軸方向応力の最大値を一軸圧縮強度とする。

(2) 実験結果¹⁰⁾

図-2は真駒内川で採取した岩盤ディスクの実験前後の侵食深(レーザースキャナにより計測)である。岩盤ディスクはリング状に侵食した(他河川のサンプルも同じくリング状に侵食)。これは、円筒水槽内に強い2次流が発



図-4 石狩川上流の現地実験水路(実験終了後の水路床)⁵⁾

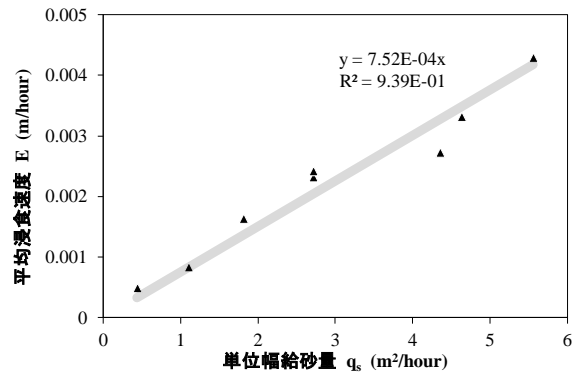


図-5 侵食速度と給砂量の関係(既往研究結果⁵⁾を基に作成)

生し、砂礫の一部が中心部(図-2の白実線の円)に堆積し、流砂の衝突による侵食を妨げたためと考えられる。また、白点線の外側は、2次流の影響で砂礫がほとんど通過せず侵食も少なかった。なお、この現象は全てのサンプルに共通して現れた。

一軸圧縮強度と平均侵食速度の関係を図-3に示す。これによると、平均侵食速度は一軸圧縮強度の概ね2乗に依存することが判明した。

(3) 実験結果の侵食式への反映

図-3で示した平均侵食速度と一軸圧縮強度の関係式は、ある流砂量、ある被覆率のときの相対的な関係であり、流砂量や被覆率が異なった場合は適用できない。

そこで、本研究の実験結果と既往実験結果⁵⁾を用いて、岩盤強度、流砂量、被覆率を考慮した軟岩侵食式を提案する。既往実験に用いるのは、2008年に石狩川上流(河口から160.2km左岸付近)の低水路内の露岩箇所を掘削して行われた現地実験である(図-4)。

図-5は石狩川上流で行われた既往実験の結果である。これによると、軟岩の侵食速度は給砂量(流砂量)に比例している。既往実験は軟岩上にほとんど砂礫が堆積しない条件で行われている。また、実験結果を整理する段階で、堆積した部分を除いて侵食速度を算出している。このため、式(1)の露岩率 F_e は1と考えられる。したがっ

表 - 1 各機器の現地における計測値

調査箇所	土壌硬度測定	針貫入試験	シュミットロックハンマー 反発度測定
	貫入量 (mm)	針貫入勾配 (N/mm)	反発度
真駒内川	39	100	45
夕張川	39	47	27
石狩川	36	5	10
歴舟川	34	9	29
野田追川	34	4	17
久著呂川	33	3	13
網走川	37	17	30

て、図-5の比例定数 (7.52×10^4) は式(1)の C_b と考えられる。

本研究の実験において、 C_b は一軸圧縮強度の -2 乗に比例することが確認された。そこで、式(1)に示した浸食速度を以下の式に変換する。

$$E = C_b q_b F_e = C_c \sigma^2 q_b F_e \quad (2)$$

ここで、 σ は一軸圧縮強度 (Mpa)、 C_c は係数 ($m^{-1} Mpa^2$) である。既往実験結果の比例定数 C_b ($=7.52 \times 10^4 m^{-1}$) と石狩川上流の軟岩強度 σ ($=0.72 Mpa$) を用いて C_c を逆算すると、 C_c の値は $3.90 \times 10^4 m^{-1} Mpa^2$ 程度である。ただし、 C_c の値は石狩川上流の1サンプルから求めた値であるため、今後サンプル数を増やして信頼性を向上させていく必要がある。

3. 簡易的な軟岩侵食速度の推定方法

軟岩は乾湿の繰り返しにより風化しやすいため、岩盤ディスクを採取・輸送し、侵食速度試験や一軸圧縮強度試験を行うことは手間とコストのかかる作業である。そこで、軟岩の侵食速度を現地で簡易的に把握する方法について検討する。

軟岩の強度や硬度を現地で調査する機器として、土壌硬度計 (藤原製作所・山中式)、軟岩ペネトロ計 (丸東製作所・SH-70)、シュミットロックハンマー (プロセク・KS型) の3つがあげられる。以下に3つの機器の概要を記載する。土壌硬度計とは、できるだけ平滑な岩盤面に対し、突き当てツバが当たるまで垂直に圧入し、そのまま硬度計を抜き取り、針が示している目盛り (土壌硬度) を読み取る機器である。軟岩ペネトロ計は、できるだけ平滑な岩盤面に、試験装置に固定した針を偏心しないように一定の早さで貫入させ、貫入量が10mmに達したときの貫入力 (貫入勾配が小の場合)、あるいは貫入力が100kNに達したときの貫入量 (貫入勾配が大の場合) を読み取り、両者の比から針貫入勾配 (kN/mm) を求める機器である。シュミットロックハンマーは、本体を岩盤測定面にプランジャーが垂直になるように静かに力を入れながら押しつけ、ハンマーの自動打撃により反発度を計測する機器である。

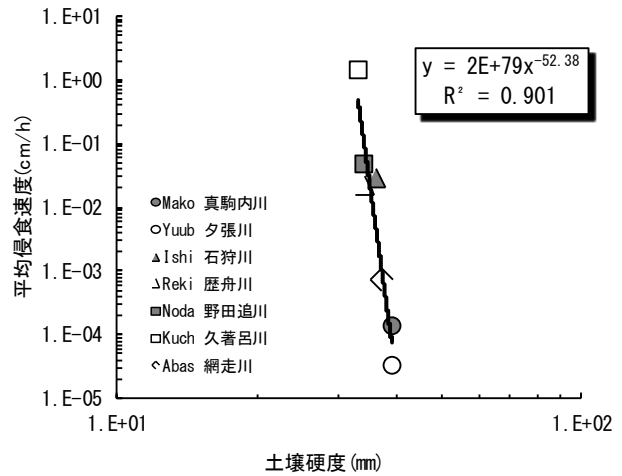


図-6(a) 侵食速度と土壌硬度の関係

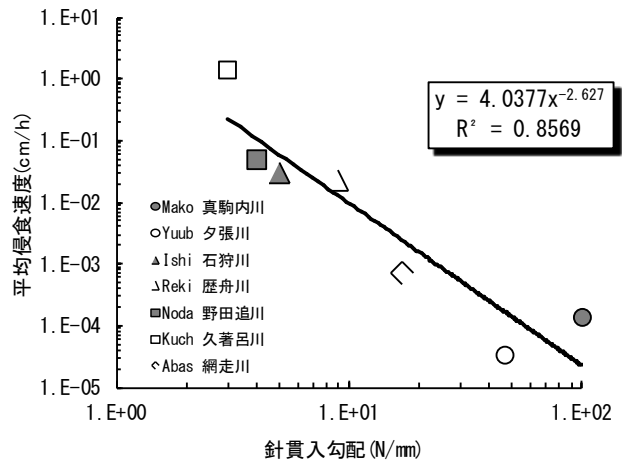


図-6(b) 侵食速度と針貫入勾配の関係

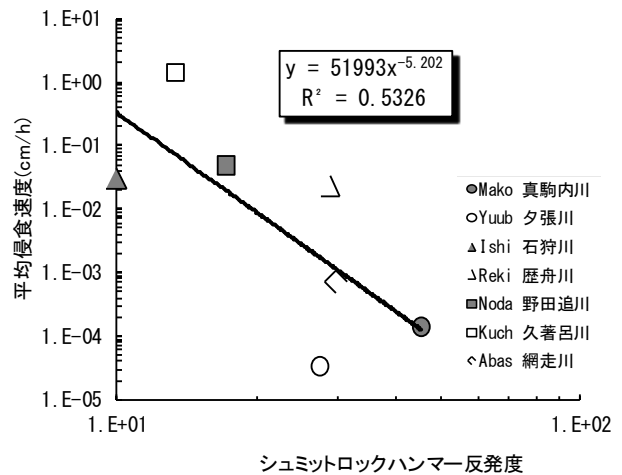


図-6(c) 侵食速度とシュミットハンマー反発度の関係

表-1に岩盤ディスクを採取する際に、現地河川で計測した各機器の計測値を示す。なお、表-1に示している値は、岩盤ディスクを採取した位置付近の5か所の平均値である。

(1) 各機器の計測値と侵食速度の関係

はじめに、各機器の値と軟岩侵食速度の関係 (図-6) を整理する。これによると、軟岩侵食速度と相関が良

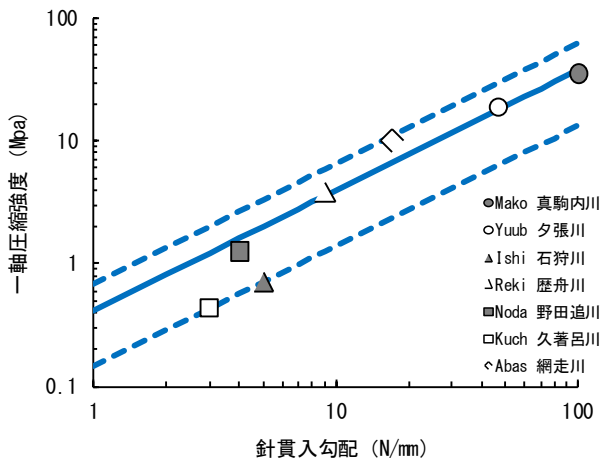


図-7 一軸圧縮強度と土壌硬度の関係

(図中の青実線は式(3)、青点線は式(3)の±65%ライン)

かった機器は、土壌硬度計と軟岩ペネトロ計である。ただし、土壌硬度計の計測値は33mmから39mmと幅が狭く、近似式の指数が大きい。つまり、わずかな計測誤差によって侵食速度の推定値が大きく変わる可能性がある。したがって、本研究では現地における簡易的な軟岩の侵食速度計測方法として、軟岩ペネトロ計を推奨する。

(2) 軟岩ペネトロ計の計測値と一軸圧縮強度の関係

図-6(b)で示した平均侵食速度と針貫入勾配の関係式は、ある流砂量、ある被覆率のときの相対的な関係であり、流砂量や被覆率が異なった場合は適用できない。実河川の侵食速度を把握するためには、針貫入勾配から一軸圧縮強度を推定し、式(2)の軟岩侵食速度式に代入する必要がある。

軟岩ペネトロ計には、針貫入勾配 x から一軸圧縮強度 σ を推定するための以下の経験式が用意されている。

$$\log(\sigma) = 0.978 \log(x) + 2.621 \quad (3)$$

図-7に室内試験で計測した一軸圧縮強度、針貫入勾配、上述の経験式(図中の青実線)、経験式の±65%のライン(図中の青点線)を示す。これによると、針貫入勾配と一軸圧縮強度の相関性は高く、式(3)で一軸圧縮強度を概ね推定可能である。

6. まとめ

本研究で得られた成果を以下に整理する。

- 軟岩の侵食速度と一軸圧縮強度の関係を把握するために、給砂量、露岩率、砂礫粒径が一定の条件下において、強度の異なる7種類の軟岩の侵食速度を計測した。この結果、軟岩の侵食速度は一軸圧縮強度の概ね2乗に依存することを確認した。
- 既往の実験結果⁹⁾と本研究の実験結果を分析した結果、軟岩の侵食速度は「 $E = C_c \sigma^2 q_b F_e$ 」(ここで、

E は侵食速度、 C_c は比例定数、 σ は一軸圧縮強度、 q_b は流砂量、 F_e は露岩率)で表され、比例定数 C_c は $3.90 \times 10^4 (\text{m}^1 \text{Mpa}^{-2})$ 程度であることを確認した。

- 軟岩の侵食速度を現地で簡易的に計測する手法を把握するために、土壌硬度計、軟岩ペネトロ計、シュミットロックハンマーの3つの機器の計測値と実験結果の侵食速度の関係を整理した。この結果、軟岩ペネトロ計の針貫入勾配と実験結果の侵食速度は高い相関性があることを確認した。
- 軟岩の侵食速度「 $E = C_c \sigma^2 q_b F_e$ 」を利用するために、軟岩ペネトロ計の針貫入勾配と一軸圧縮強度の関係を整理した。この結果、軟岩ペネトロ計に記載されている経験式で、一軸圧縮強度を概ね推定できることを確認した。

謝辞： 現地調査に際しては、北海道建設部、北海道開発局のご協力を頂きました。また、伊藤丹様、日下部祐基様、萩野克彦様をはじめ多くの方にご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Sklar, L. S., and W. E. Dietrich : Sediment and rock strength controls on river incision into bedrock, *Geology*, 29, 1087- 1090, 2001.
- 2) Sklar, L. S., and W. E. Dietrich : A mechanistic model for river incision into bedrock by saltating bed load, *Water Resour. Res.*, 40, W06301, 2004.
- 3) Chatanantavet, P., and G. Parker : Physically based modeling of bedrock incision by abrasion, plucking, and macroabrasion, *J. Geophys. Res.*, 114, F04018, 2009.
- 4) Johnson, J. P. L., and K. X. Whipple : Evaluating the controls of shear stress, sediment supply, alluvial cover, and channel morphology on experimental bedrock incision rate, *J. Geophys. Res.*, 115, F02018, 2010.
- 5) 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 : 軟岩の洗掘を考慮した河床変動計算手法の開発, *河川技術論文集*, 第 15 巻, pp.321-326, 2009.
- 6) 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, pp.77-82, 2011.
- 7) 及川森, 岩崎理樹, 山口市実, 清水康行, 木村一郎 : 流砂の摩耗作用による岩盤侵食に関する実験的検討と数値シミュレーション, *水工学論文集*, 第 55 巻, pp.751-756, 2011.
- 8) 及川森, 岩崎理樹, 山口市実, 清水康行, 井上卓也 : 河床における岩盤上の流砂の集中度合に関する実験的検討と数値シミュレーション, *土木学会論文集 B1(水工学)* Vol.68, No.4, I_949-I_954, 2012.
- 9) 小松祐輔, 渡邊康玄, 泉典洋, 竹林洋史 : モルタルで擬似した軟岩の流砂の衝突による洗掘, *河川技術論文集*, 第 17 巻, pp.167-172, 2011.
- 10) 井上卓也, 村上泰啓, 伊藤丹, 数馬田貢 : 流砂による軟岩侵食と岩の物性値の関係, *土木学会論文集 B1(水工学)*, 2013. (掲載予定)

