

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：82114

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760387

研究課題名(和文) 岩盤河床における異常侵食現象の解明

研究課題名(英文) A study on rapid erosion into bedrock observed in river channels

研究代表者

川村 里実(山口里実)(KAWAMURA, Satomi)

独立行政法人土木研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：70399583

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、岩盤河床の異常侵食現象を解明するために、侵食メカニズムの解明および流砂による岩床河床侵食モデルの構築を目的とする。岩盤が露出している実河川でサンプリングした岩床コアを用いて、流水および流砂による侵食量に関する室内実験を実施した結果、流砂による侵食量は流水のみによる侵食量に比べてはるかに大きい(100～1000倍程度の)ことや流砂量に対する依存性を確認した。本実験で計測した流砂による侵食量を従来の模擬河床実験等の研究成果と比較・検討を行い、流砂量と粒径と岩床の物性値によって侵食量をモデル化した。

研究成果の概要(英文)：The purposes of this study are to make clear the bedrock erosion mechanism and the erosion rate to reveal the riverbed degradation due to bedrock erosion which has been going on rapidly. I performed experiments on the bedrock erosion rate by using bedrock samples picking from actual rivers where bedrock was exposed. As the results of the experiments, I found that the erosion rate in the case with sediment supply was much larger than that only with flowing water and the erosion rate showed dependence on the amount of sediment supply. I also reviewed results of other experiments performed before to make a formula of the bedrock erosion rate which consists of the amount of sediment supply, particle size and bedrock properties.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：水工水理学

1. 研究開始当初の背景

侵食性の河床材料で構成されるような岩盤河床の侵食現象に関しては、古くから河川工学の分野で盛んに研究が行われてきた。そのほとんど全てが流水による侵食を対象としたものであり、流水に起因した侵食のメカニズムについては多くの課題が解明されている。しかしながら、近年、流水だけでなく流砂による岩盤河床の侵食現象が問題視されるようになってきた。近年顕在化してきた河床低下に伴い、多くの河川において河道の一部で砂層下の岩盤が露出し始めている。一度岩盤が露出するとその上を流送する土砂によって岩盤は著しい侵食を受け続け河床低下に歯止めが利かなくなっている河川も多い。一般に、流水による岩盤侵食の時間スケールは非常に遅いため、従来岩盤河床においては河床低下はほとんど生じないと考えられていた。これに対して、近年新たに露出し始めた岩盤は侵食に対して非常に脆弱であり、その侵食の時間スケールは驚くほど異常に速い^{1), 2)}。岩盤の露出で河床低下が止まるどころか、流砂の侵食作用によって河床低下の進行が加速することが非常に深刻な問題となっている。この流砂による侵食量は流水によるもの比べて遥かに大きいにもかかわらず、流砂による侵食現象に関する知見は数少ない。

2. 研究の目的

本研究では、岩盤河床の異常侵食現象を解明するために、侵食メカニズムの解明と流水および流砂による岩床河床侵食モデルの構築を目的とする。特に、流砂による岩河床侵食モデルを実河川へ適用するためには実河川の岩床における侵食量を把握する必要がある。岩盤河床の侵食量に関する実験は従来行われているが、その多くが模擬河床における実験であり^{1), 3), 4), 5)}、実河川の岩盤河床の侵食量を計測した例はほとんどない。本研究は実河川の岩床における侵食量を計測することによって、岩盤河床侵食モデルを構築することが目的である。

3. 研究の方法

(1) 研究内容の概要

本研究では、岩盤が露出している実河川で岩床コアをサンプリングし、流水および流砂による侵食量を計測する室内実験を実施した。模擬河床を用いた従来の実験結果では、岩床の侵食量は主に給砂量と砂礫粒径に依存し、河床せん断力にはあまり依存しないことが示されている^{1), 2)}。また、岩の物性値としては、引張強度（または一軸圧縮強度）が侵食量に対して支配的であることが示されている^{2), 6)}。本研究で実施した実験結果と従来の模擬河床による実験結果を併せて、給砂量、砂礫粒径および岩の一軸圧縮強度で整理することによって、岩盤侵食モデルの構築を試みた。

(2) 実河川における岩床コアサンプリング

本研究で実施した実験では、北海道東部に位置する一級水系十勝川とその支川である然別川の2箇所において岩床コアのサンプリングを実施した。写真-1はサンプリングを実施した十勝川の KP85.2 付近で河道を撮影（2013年11月6日）したものであり、露岩した表面の写真も併せて示している。十勝川では、KP82~87で露岩箇所が見られ、濬筋の深掘れが近年徐々に進行している。また、もう一つのサンプリング箇所である然別川では、写真-2に見られるように岩河床の侵食によって著しい河床低下が生じている。岩床コアのサンプリングは、万年頭首工より 2.5km 程度下流の写真-3の箇所で行った。十勝川および然別川の両サンプリングともに、約 40cm×40cm×40cm の立方体コアを手掘りにより採取した。



写真-1 十勝川 KP85.2 付近 (2013年11月6日撮影)



写真-2 然別川 万年頭首工より1km程度下流付近 (2013年6月26日撮影)



写真-3 然別川 万年頭首工より2.5km程度下流付近 (2013年10月22日撮影)

(3) 侵食量に関する室内実験

実験は寒地土木研究所所有の延長 2.5m、幅 0.15m の実験水路を用いて実施した。実験

では、図-1のように岩床コアサンプルによる試験区間を設け、それ以外の区間はモルタルによる固定床を設置した。通水中の給砂は図に示すように固定床上の2箇所で行った。給砂には5mm粒径の礫を用いた。河床勾配は1/100とした。

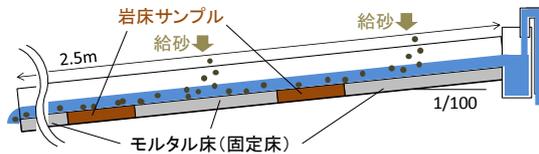


図-1 実験水路概要

岩床コアのサンプルを試験区間に設置するために、外寸で縦23cm、幅15cm、高さ6.5cm（内寸縦20cm、幅12cm、高さ5cm）の木枠を作成し、サンプリングした岩床コアを整形して（写真-4）その木枠にはめ込むことで写真-5に示すような実験用岩床コアサンプルを作成した。作成したコアサンプルの一軸圧縮強度を軟岩ペネトロ計（針貫入試験器）で計測した結果、十勝川の岩床サンプルは1.82Mpa、然別川の岩床サンプルは0.40Mpaであった。



写真-4 岩床コア整形作業（十勝川（左）、然別川（右））

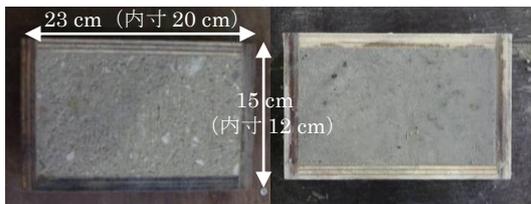


写真-5 作成した実験用岩床コアサンプル
（十勝川（左）、然別川（右））

岩床サンプルの侵食量は、通水前後で木枠ごとの湿潤状態の重量を計測し、重量の変化量を密度により平均侵食量（単位時間あたりの平均侵食深(m)）に換算して求めた。また、実験用岩床コアサンプルの侵食状況を把握するために、然別川のコアサンプルを用いて予備実験を実施し、侵食後のコアサンプルの形状を測定した。この予備実験では単位幅流砂量 $0.072\text{m}^2/\text{s}$ を給砂した。通水開始後7分を過ぎた時点でサンプルの下流側から礫が堆積し始めたため、7分15秒で止水し、堆積した礫をサンプルを乱さないように除去した後に形状を計測した。計測はArtec社のハンディ3Dスキャナー（Artec Studio、計測用センサはKinectを使用）を用いて実施した。図-2に通水前後の変化量を示す。図を見

ると、下流側に最深部が現れている。通水中の礫の堆積がこの最深箇所辺りから生じていたことから、ある程度侵食が進行すると深い箇所には流砂が集中し、局所的な侵食が進行しやすいのではないかと考えられる⁴⁾。本実験では、流砂または流水による平均的な侵食量の計測を目的としているため、予備実験に見られたような局所的な洗掘が生じない程度の通水時間を各ケースで設定した。また、覆礫の影響を排除するために、各ケースにおいて礫が堆積し始めた時点で止水し、それまでを通水時間とした。また、この予備実験では、形状計測による河床の平均変化量が -2.3mm 、重量変化量を密度換算して求めた河床の平均変化量が -2.1mm であり、重量変化量からある程度正確な平均侵食深が求められることが確認できた。

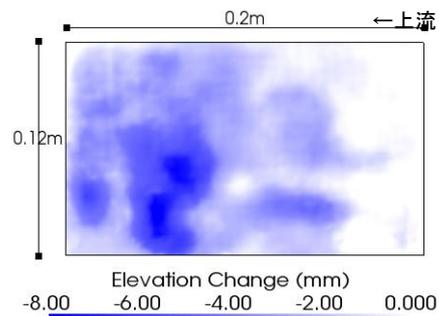


図-2 予備実験における岩床コアサンプルの変化量
（然別川岩床コア）

表-1に実験条件および実験より求めた侵食速度を示す。コア欄のTは十勝川の岩床サンプル、Sは然別川の岩床サンプルを示す。各ケースの上段および下段はそれぞれ実験水路の上流および下流側に設置したコアサンプルの値を示す。Run1～Run3およびRun0はそれぞれ同一のコアサンプルを使って実験を実施したシリーズを示しており、各シリーズにおいて実施した順に番号を付している。Run0-0の下段（下流側コアサンプル）は前述の予備実験である。予備実験では流量を正確に調整しなかったため参考値として示している。Run0-1～Run0-7は、この予備実験後に同一のコアサンプルで流水のみによる侵食量を計測した結果を示す。Run1およびRun2は下流側のコアサンプルの上流（上流のコアサンプルの下流）からのみ給砂を行い、下流側のコアサンプルで給砂有り、上流側のコアサンプルで流水による侵食状況を観測した。写真-6にRun1-3実施後、写真-7にRun2-3実施後のコアサンプルを示す（それぞれ左が下流側（給砂有り）、右が上流側（流水のみ））。比較的短い通水時間で下流側のコアサンプルに有意な量の侵食が生じたのに対して、この間、上流側のコアサンプルには有意な変化は見られなかった。Run2-4については、下流側のコアサンプルがRun2-1～Run2-3の実験によって大きく侵食したため、同サンプルを用いてこれ以上の計測は難し

表-1 実験条件および実験結果

Run	コア	流量 (l/s)	通水時間	流砂量 (m ³ /s)	侵食速度 (mm/hr)
1-1	T	1.8	90分	無	-
				0.0036	1.4
1-2	T	2.8	90分	無	-
				0.0036	0.82
1-3	T	3.8	90分	無	-
				0.0036	0.37
2-1	S	1.8	30分	無	-
				0.0036	3.8
2-2	S	2.8	30分	無	-
				0.0036	4.0
2-3	S	3.8	30分	無	-
				0.0036	5.9
2-4	S	4.8	30分	0.0036	5.0
				-	-
3-1	S	1.8	2分	0.0072	14.7
				0.0108	24.0
3-2	S	2.8	2分	0.0072	17.2
				0.0108	33.8
3-3	S	3.8	2.5分	0.0072	26.0
				0.0108	37.3
3-4	S	4.8	3分	0.0072	29.8
				0.0108	39.3
0-0	S	-	(7.25分)	(0.0072)	(-)
				(0.0108)	(-)
0-1	S	4.8	60分	無	0.26
				無	0.42
0-2	S	1.8	420分	無	0.015
				無	0.011
0-3	S	1.8	420分	無	0.012
				無	0.011
0-4	S	2.8	420分	無	0.012
				無	0.0064
0-5	S	3.8	420分	無	0.0048
				無	0.0026
0-6	S	5.8	60分	無	0.023
				無	0.013
0-7	S	5.8	420分	無	0.018
				無	0.023



写真-6 Run1-3 実施後のコアサンプル (十勝川岩床)
(左が下流側 (給砂有), 右が上流側 (流水のみ))

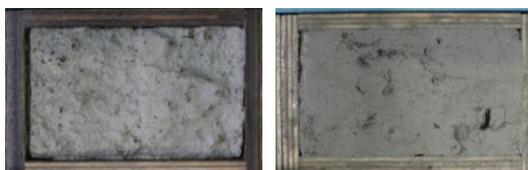


写真-7 Run2-3 実施後のコアサンプル (然別川岩床)
(左が下流側 (給砂有), 右が上流側 (流水のみ))

いと判断し、ほとんど侵食していない上流側のコアサンプルを用いて給砂有りの実験を実施した。

(4) 従来の侵食量に関する実験結果

従来実施された流砂による岩床の侵食量に関する実験概要を整理して表-2 に示す。本研究で実施した実験と 2012 年に寒地土木研究所で実施された実験⁷⁾以外はいずれも低強度モルタルまたは低強度石膏を用いた模擬河床における実験^{1), 3), 5)}である。模擬河床による実験は、実験室内での施工性に利点があり、水理条件や給砂条件の比較的広範囲において実施されている。本研究で実施した実験結果とこれら従来の実験結果併せて整理することで流砂による岩床侵食モデルの構築を試みる。

表-2 従来実施された実験概要^{1), 3), 5), 7)}

著者 (発表年)	侵食実験河床材	一軸圧縮強度 (Mpa)	粒径 (mm)
Johnson & Whipple ¹⁾ (2010)	低強度モルタル	3.60	5.5
及川ら ³⁾ (2011)	低強度石膏	0.944	5.0
小松ら ⁵⁾ (2011)	低強度モルタル	3.19	4.36
寒地土木研究所 ⁷⁾ (2013)	実河川 (礫船川)	3.88	5.0
本研究	実河川 (十勝川)	1.82	5.0
本研究	実河川 (然別川)	0.40	5.0

4. 研究成果

(1) 本研究で実施した実験結果

本研究で実施した実験結果を摩擦速度で整理したものを図-3 に示す。本実験に用いた水路のマニングの粗度係数が 0.013 であることを確認しており、等流状態における摩擦速度を算出して図-3 に示している。然別川の岩床における流水のみの実験は同一の流量 (同一の摩擦速度) の下で複数のケースを実施したが、図-3 にはそれらの平均値を示す。十勝川の岩床については、流水のみによる侵食量は計測出来ていない。

図-3 より、然別川の岩床は流水のみによる侵食速度に対して、給砂した場合は概ね 100 ~1000 倍以上の速度で侵食が進行することがわかる。また、図-3 においてグレーのマーカで示したケースは、流水のみ (流砂なし) の条件で実施した実験の中でも、直前に実施した流砂有りの予備実験後に同一のコアサンプルを使用して実施したケースである。流水のみのその他のケースは、直前に実施したケースも流水のみで給砂はしていない。流水のみ (流砂なし) のケースの中でも、グレーのマーカで示したケースだけ侵食速度が著しく大きくなっているのは、直前の実験における流砂の衝突によってサンプル河床が侵食されやすい状態にあったと考えられる。

また、然別川の岩床では単位幅流砂量が 2 倍、3 倍になると、それに応じて侵食速度も増大することが図-3 からわかる。これに対して、摩擦速度による侵食速度の大きな変化は本実験の範囲では見られなかった。ただし、摩擦速度の増加とともに侵食速度が若干ではあるが増大する傾向がみられる。これは、流砂による岩床侵食の過程には、流砂の衝突によって直接削られる作用の他に、前述のように流砂の衝突で河床が侵食されやすい状態になった後に流水によって侵食される作用もあるとすれば、この後者の作用によって摩擦速度に応じた若干の侵食速度の増大がみられたのではないかと考えられる。

これに対して十勝川の岩床では、摩擦速度の増加とともに侵食速度が減少するという反対の傾向が図-3 より確認できる。これは、写真 5~7 をみてもわかるように、然別川の岩床が比較的均一な材質で構成されているのに対して、十勝川の岩床は粒の大きい白い礫が点在しているのがわかる。これらの礫自体は比較的固く、前述の一軸圧縮強度試験は、これらの礫が存在している箇所を出来るだけ避けて実施した結果である。また、本実験の通水時間内では、これらの白い礫の侵食やサンプル床からの剥離はみられなかった。このことから、侵食しやすい材質から先に流亡したため、先に実験を実施した摩擦速度の小さいケースの方が侵食速度が大きくなったと考えられる。

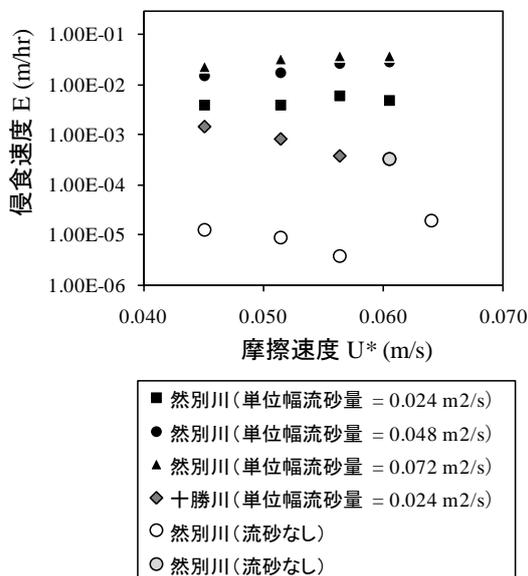


図-3 本実験で得られた岩床の侵食速度

(2) 岩床侵食モデル

従来の研究より、岩床の侵食量は流砂量に比例することが明らかになっている^{1), 2)}が、その他の要素として岩の物性⁶⁾や流砂の粒径²⁾にも大きく依存することが指摘されている。しかしながら、侵食速度のモデル化に関しては未だ議論の余地があり、岩の物性や流砂の粒径の影響を組み込んだ侵食量式の提案には至っていない。井上ら⁶⁾は、様々な実河川

における岩床の物性値と侵食量の関係調べている。彼らの実験は回転水槽内に一定の礫材を投入して相対的な侵食速度を計測するものであるため、彼らの実験から流砂量や粒径と侵食速度の関係を議論することはできないが、侵食速度が岩床の一軸圧縮強度の-2乗に比例することを明らかにしている。また、「軟岩河川の侵食特性マニュアル(案)」(寒地土木研究所, 平成25年度)²⁾には、侵食速度が粒径の約0.5乗に比例するデータが示されている。本研究で実施した実験結果と先に示した従来の実験結果を侵食速度と一軸圧縮強度の-2乗と粒径の0.5乗および単位幅流砂量で整理したものを図-4に示す。図の縦軸が $E/(\sigma^{-2}d_s^{0.5})$ である。ここで、Eは岩床の侵食速度 (m/s), σ は一軸圧縮強度, d_s は粒径である。図示した全データについての回帰直線は以下のとおりとなり、その相関係数は0.835である。

$$E/(\sigma^{-2}d_s^{0.5}) = 0.485q_{bx}^{0.963} \quad (1)$$

ここで q_{bx} は単位幅流砂量であり、上式より $E/(\sigma^{-2}d_s^{0.5})$ は q_{bx} にほぼ比例することがわかる。 $E/(\sigma^{-2}d_s^{0.5})$ が q_{bx} の一乗に比例するとして、その比例係数を図-4より求めると0.812であることから侵食速度は次式で表される。

$$E = 0.812q_{bx}\sigma^{-2}d_s^{0.5} \quad (2)$$

本実験および従来の実験で得られた侵食速度を整理することによって、上式のように単位幅流砂量、一軸圧縮強度および粒径との相関を考慮した侵食速度式を提案するとともに、その係数を実験結果より同定することができた。しかしながら、摩擦速度や岩床内部の不均一性なども侵食速度に若干ではあるが影響を与えることが本実験からも確認された。また、乾湿や融解による風化の影響が侵食速度に大きな影響をあたえることも示唆されている^{2), 6)}。これらの影響に関しては今後の課題である。

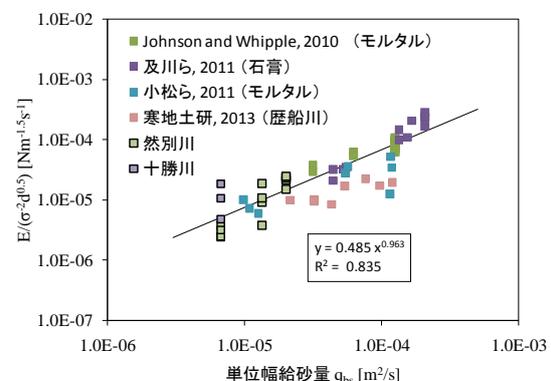


図-4 本実験および従来の実験で得られた侵食速度

参考文献

- 1) 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.

2) 寒地土木研究所: 軟岩河川の侵食特性マニュアル(案), 2013.

3) 及川森, 岩崎理樹, 山口里実, 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.

4) 及川森, 岩崎理樹, 山口里実, 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.

5) 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.

6) 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, *水工学論文集*, 第57巻, 2013.

7) 寒地土木研究所: 岩床上の粒砂運動実験業務報告書, 平成24年度施行, 2013.

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計3件)

① 内田有吏子, 岩崎理樹, 山口里実, 鈴木栄一, 清水康行: 急流都市河川豊平川における河道内構造物の維持管理および植生管理に関する検討—平成23年9月出水を受けて—, *土木学会河川技術論文集*, 第18巻, 203-208, 2012.

② 後藤裕也, 木村一郎, 川村里実, 清水康行, 井上卓也: 岩床河川における流砂移動モデルの構築と粒子の運動形態の解明, *土木学会北海道支部論文報告集*, 第65号, B-27, 2013.

③ 井上卓也, 清水康行, Gary Parker, 山口里実, 伊藤丹: 給砂量と岩床侵食地形の関係, *土木学会論文集 B1(水工学)*, Vol.70, No.4, I_1039-I_1044, 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 里実(山口里実) (KAWAMURA Satomi)

独立行政法人土木研究所・研究員

研究者番号: 70399583