

河川堤防の築堤材料や管理状況等が 越流時の侵食耐力に与える影響についての考察

CONSIDERATION ON INFLUENCE OF LEVEE MATERIALS AND MANAGEMENT CONDITION ON EROSION PROOF STRESS IN OVERFLOW

笹岡信吾¹・鈴木淳史²・上野俊幸³・諏訪義雄²
Shingo SASAOKA, Atsushi Suzuki, Toshiyuki UENO, and Yoshio SUWA

¹国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

²正会員 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室

³正会員 応用地質株式会社 流域・水資源事業部（〒331-8688 さいたま市北区土呂町2-61-5, 元国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室）

The inundation risk in an area influenced by tributary backwater is evaluated and determined by the most vulnerable section to overtop in both levees of the main and tributary stream. Thus, it is important to evaluate the resistance against the erosion caused by overtopping of all the linked levees for the purpose of disaster mitigation.

In this study, we compared the vegetation root density, the construction histories, levee materials, and the level of management of levee such as the frequency of weeding in both of the sections where had experienced breach and had not. From this comparison, we assessed how each index influenced the erosion resistance of the levees and analyzed how to increase the erosion resistance against overtopping for the future studies.

Key Words : river levee, overflow, erosion, back water

1. はじめに

平成28年8月16日から23日にかけて北海道を通過した台風7, 9, 11号による降雨により, 常呂川では越水による堤防法崩れ, 支川の柴山沢川及び東亜川(道管理区間)の背水区間で越水による決壊が発生した。

堤防は氾濫ブロックを守る一連区間が決壊しないことで背後地を外水氾濫から守る機能を持っており, 一連区間の堤防がすべて決壊しないことで機能を発揮することができるシステムである。本川堤防と支川背水区間の堤防は背後地にとっては上記システムを構成する一連区間の1例である。越水の発生は, 堤防の設計・管理の観点から見れば超過外力が作用している状態であるため, 外水氾濫を防止する機能を期待することはできないが, 本川及び支川背水区間の一連の堤防が決壊を免れれば外水氾濫による浸水被害は結果的に軽減される。本川及び支川背水区間の一連堤防の越水に対する耐力とそれに影響する要因を考察し, それらが施工や維持管理において改善可能なものか考察することは, 越水に対する減災の工夫を考える上で重要である。

例えば平成16年7月に発生した五十嵐川で発生した越流による破堤は, 7.13新潟豪雨洪水災害調査委員会報告書¹⁾において, 越流が生じた実堤防の決壊・破堤の要因を絞り込むために, 越流水によるせん断力と宇多ら²⁾が整理した植生の被度と継続時間とせん断力の関係図から読み取れる限界摩擦速度算を比較している。平成16年10月に円山川において発生した越流を主原因とした破堤については, 円山川堤防調査委員会報告書³⁾において, 五十嵐川と同様, 越流水によるせん断力と限界摩擦速度を比較するとともに, 堤体裏法面の植生流出後については, 堤体土を非粘着性材料と捉え, 粒径から推定される限界摩擦速度と生じうる摩擦速度を比較して, 堤体土が流失しえたことを確認している。

谷瀬ら⁴⁾は本論文の考察対象と同じ常呂川と支川の柴山沢川及び東亜川を対象に, 宇多ら²⁾が現地植生土羽に高流速を作用させる水理実験結果等をもとに提示している植生根毛層内の侵食深計算法を用いて, 裏法面上を流下する越流水脈によるせん断力で堤体裏法面の植生の根毛層内で生じる侵食深を計算し, 限界侵食深を2.5cmとして侵食発生の有無を考察している。

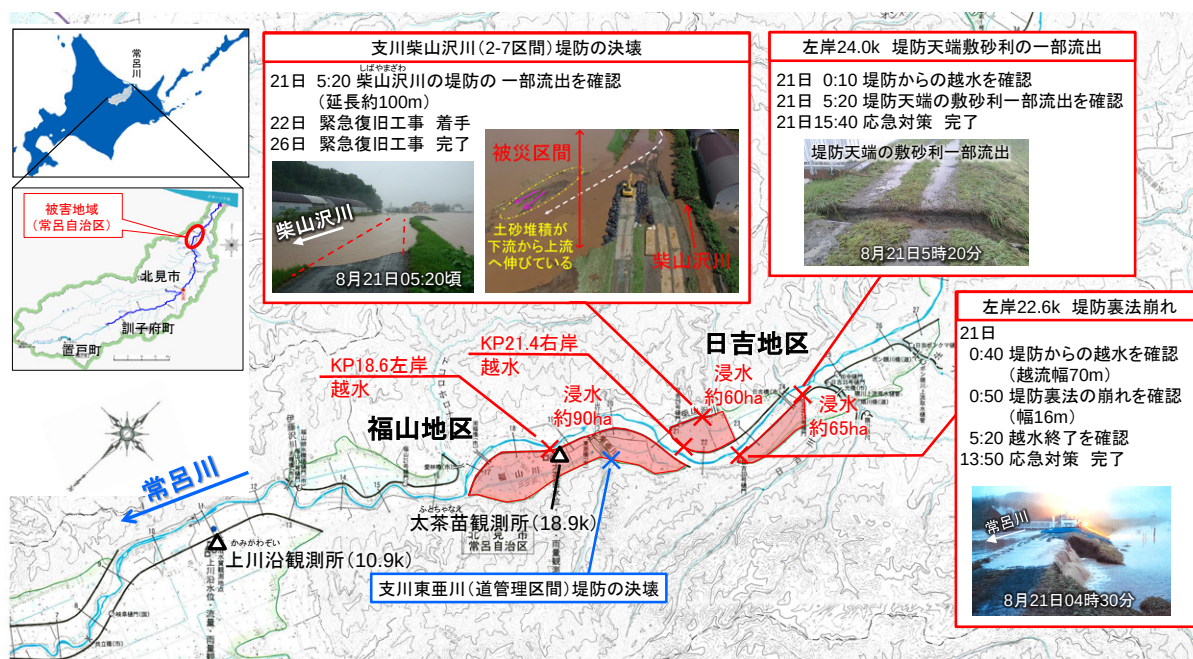


図-1 常呂川本川及び支川の被災・浸水状況

本論文は、考察対象とする越流箇所と決壊有無の比較考察を行う点においては谷瀬ら⁴⁾と同じであるが、以下の点が異なっている。堤体の耐力として、裏法植生に加えて、堤体土の耐力についても考察する。堤体植生の耐力評価については、堤体植生根毛層内の侵食深計算は谷瀬らと同じであるが、限界侵食深は根毛量鉛直分布調査結果をもとに設定する。侵食外力については、越流継続時間についても考慮し、谷瀬らが対象としている裏法面の等流近似流速に加えて、裏法面侵食後を想定した重力落下による流速も考慮する。堤体の施工履歴や築堤材料、除草等の管理水準と耐力を比較することにより、越水時の粘り強さを増す工夫の方向性について考察する。

2. 被災概要

図-1に被災の概要を示す。今回の記録的豪雨では、常呂川に設置されている太茶苗水位観測所(18.9k)において3回計画高水位を超え、最も長い8月20日の洪水では32時間にわたり計画高水位を超過した。

これにより常呂川本川では越水による堤防川裏法崩れ等による被害が複数発生したが、決壊には至らなかった。常呂川支川の柴山沢川においては延長約100mにわたり決壊し、東亜川においては延長約35mにわたり越水が発生し決壊に至った。柴山沢川の決壊地点は常呂川本川との合流地点より約1km上流で、決壊発生時刻は8月20日深夜から21日未明にかけて発生したことが確認されている。常呂川堤防調査委員会報告書⁵⁾によると、柴山沢川のピーク水位は8月20日15時頃となるが、この時巡視員は越水がないことを確認している。対して常呂川のピーク水位は8月21日1時であった。そのため、決壊発生推定時刻においては、常呂川本川からの背水による影響が大

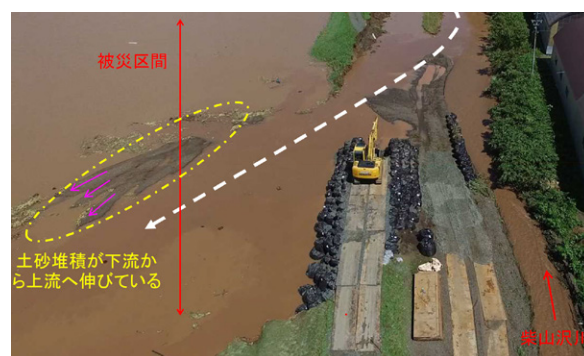


図-2 柴山沢川の被災後土砂堆積状況



図-3 東亜川の河道内状況

きく、越水が発生し決壊に至ったと推定されている。また、決壊後の土砂堆積状況が航空写真により確認されており、その流向が下流から上流に向かって広がっていたことから背水の影響が大きかったことが伺える(図-

2) .

柴山沢川の越流水深は現況堤防高とピーク時の推定水位より最大約30cm程度と推定されている。東亜川の決壊地点は常呂川本川との合流地点より約400m上流で、越流水深は30cm以上と推定されている。破堤後の現地調査では河道内樹木等が下流から上流に向かって倒れている状況が確認されている（図-3）。柴山沢川同様、決壊箇所は常呂川の背水区間であり、越水を主要因とした決壊であったと推定されている。

一方、常呂川本川においては、越水した箇所が複数あったが決壊には至っていない。中でも左岸22.6kにおいては約4時間程度、越水が続いたが堤防川裏法面の侵食に留まっている。

3. 堤防状況の違い

(1) 堤防形状及び土質、作用外力

今回の考察の対象とする3カ所の堤防形状を図-4に示す。常呂川左岸22.6kでは堤防高は6mであるが、今回の越水による裏法侵食が生じていた裏法小段までの高さは3.0m、堤防川裏の法勾配は2.5割であった。柴山沢川の決壊箇所は堤防高2.4m、堤防川裏の法勾配は2.5割、東亜川の決壊箇所は堤防高3.5m、堤防川裏の法勾配は2割であった。谷瀬ら⁴⁾から引用した越流水深、裏法勾配、等流流速とともに、裏法が天端まで侵食した場合の越流水の堤高相当分落下した時の流速を表-1に示す。等流流速と重力落下流速算出時の概念図を図-5に示す。重力落下流速では、底面摩擦による抵抗が働かないと仮定して算出している。

次に堤体土質状況について述べる。常呂川左岸22.6kの堤防は旧樋門の撤去箇所であり、撤去後の平成10年に施工されている。堤外側には大型接続ブロックと遮水シートが施工されている。開削により確認された堤体土質（図-6）は細粒分が多く粘性土主体の材料が用いられていたことが常呂川堤防調査委員会報告書⁹⁾により確認されている。堤防中央部（灰色部）と法面部（褐色部）の粒度構成や密度、透水係数はほぼ等しく、土質分類的な差は見られない。現場密度試験による締固め度は $D_c=85\sim104\%$ 、 N 値は局所的に小さい箇所があるものの1～5程度となっていた。また、基礎地盤表層には砂質土、その下に粘性土が確認されている。

柴山沢川の堤防開削状況を図-7に示す。堤防は昭和39年に砂質土主体で築堤されており、その後平成11年に礫質土による腹付け盛土が実施されている。堤外側には保護護岸等の設置はなされていない。現場密度試験による締固め度は、昭和39年築堤部分は $D_c=83\sim95\%$ 、平成11年腹付け部分は $D_c=85\%$ と比較的緩い部分があることが確認されており、 N 値も2～3と小さい。基礎地盤表層には砂質土、その下に粘性土が確認されており、表層の砂質土は細粒分が30%程度含まれている。

東亜川の堤防は昭和48年に国が施工管理区間として整

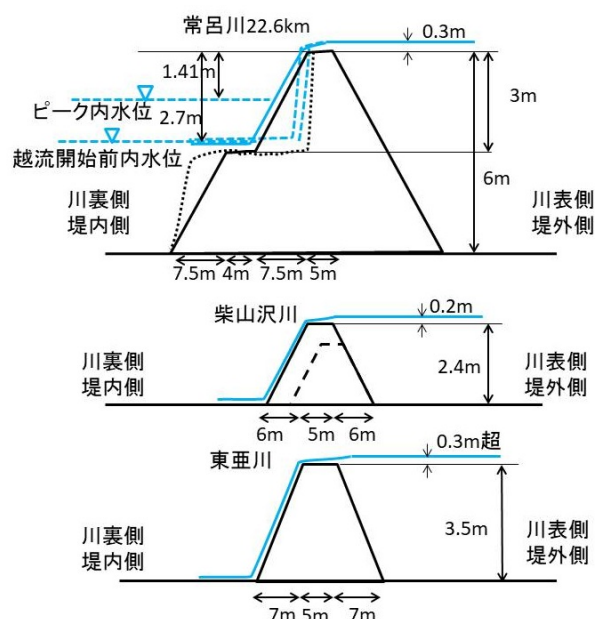


図-4 常呂川、柴山沢川、東亜川被災箇所横断概略図

表-1 堤防諸元と作用外力

地点	越流水深 (cm)	裏法勾配	等流流速 (m/s)	水脈厚 (m)	摩擦速度 (m/s)	堤高 (m)	重力落下流速 (m/s) ※※
常呂川左岸22.6k	30	2.5割	3.75	0.075	0.54	3※ (6)	8.0
柴山沢川	20	2.5割	2.94	0.052	0.45	2.4	7.1
東亜川	30	2割	4.01	0.07	0.59	3.5	8.6

※小段までの比高

※※川裏法面まで侵食されたときの落差を考慮した流速に相当

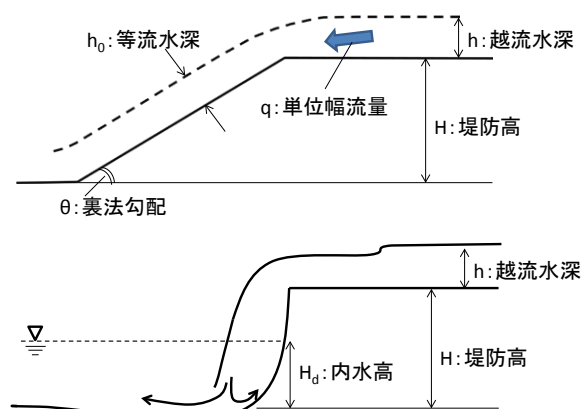


図-5 法尻流速の計算に用いた想定断面（上）と落差を考慮した流速計算に用いた想定断面（下）

備し、昭和52年に北海道へ返還されている。堤体土質は中央粒径0.16mm、礫分は10～17%程度、細粒分が50～58%程度と細粒分が比較的多かった。

(2) 植生状況と法尻付近の摩擦速度の整理

谷瀬ら⁴⁾は、今回対象の3箇所における堤防植生の根毛量について調査し、耐侵食性との関係を詳細にまとめている。

る。また、現地の植生状況を詳細に調査しており、それによると、植生状況と平均根毛量についてそれぞれ整理されており、柴山沢川においては決壊箇所周辺においての植生状況は良好で裸地化などは見られず、カモガヤやクサヨシといったイネ化植物が優占種として繁茂していた。東亜川決壊箇所付近の法尻部においては根毛量が少なく、これはタデ科のオオイタドリが繁茂することにより、下草がほとんど生えていなかったことが原因と推定されている。また、常呂川左岸22.6kにおいては、法面中段から法尻においてナデシコ科、イネ科植物が優勢した植生となっていたが、法尻付近は越流水による堆積土砂が広く分布していたため法尻における根毛量は少なかった。そのため平均根毛量は堤防川裏法面中段で採取した結果が用いられている。柴山沢川、東亜川においては堤防川裏法尻付近の堆積土砂や裸地化していない箇所調査した平均根毛量から法尻付近の摩擦速度を整理されており、植生の繁茂状況の差などから平均根毛量に明確な差が見られた。

また、常呂川左岸22.6kと柴山沢川における根毛量と深さの関係を図-8に示す。常呂川においては地表から5cm以深、柴山沢川においては4cm以深において根毛量が微量となることから、限界侵食深をそれぞれ5cm、4cmと設定した。根毛量鉛直分布の情報が無い東亜川については、谷瀬ら⁴⁾と同様2.5cmと設定した。限界侵食深を谷瀬らと異なる考え方とした理由は次の通りである。今回侵食深を評価する目的は、設計や照査ではなく、堤体が決壊や半壊状態でとどまった現象の定量的解釈をすることである。バラツキや不均質性を考慮して根毛層厚の半分とするということを行わず、根毛量鉛直分布調査結果を重視して設定した。なお、常呂川と柴山沢川に対して東亜川は除草回数に差が見られたことから、根毛量の差は採取位置による影響もあると思うが、除草回数等、管理状況の差が大きく影響した可能性も考えられる。

植生の根毛量と裏法面に作用するせん断力をもとに谷瀬ら⁴⁾が行ったと同様に侵食深計算を実施し、限界侵食深に達する継続時間を算出した。また、近傍の太茶苗水位観測所の水位ハイドロから各箇所の越流継続時間を推定した結果と合わせて表-2に示す。表から柴山沢川、東亜川については限界侵食深に達する時間よりも越流継続時間の方が明らかに長く、常呂川22.6kについては、限界侵食深に達する時間と越流継続時間がほぼ同じであった。越流継続時間がピーク時の越流量が継続するという侵食深を大きく評価している点に課題は残るが、決壊箇所と決壊しなかった箇所の差が植生根毛量の違いによると解釈することは可能と考えられる。

(3) 堤体土の引張り破壊応力からの侵食限界流速の試算

異なる土質を有する複数の堤体土の侵食耐力を比較する場合、侵食限界流速での比較が有用である。また、力学特性を直接測定でき、侵食限界流速を推定できる堤体

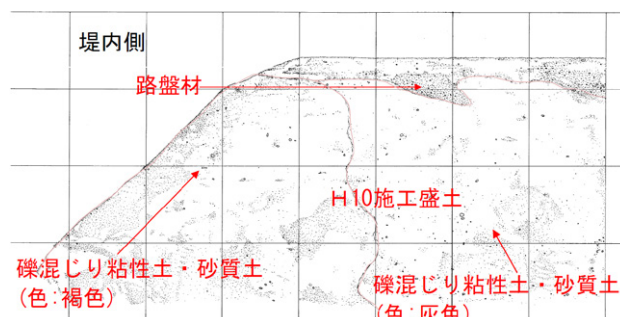


図-6 常呂川左岸22.6k開削状況及びスケッチ

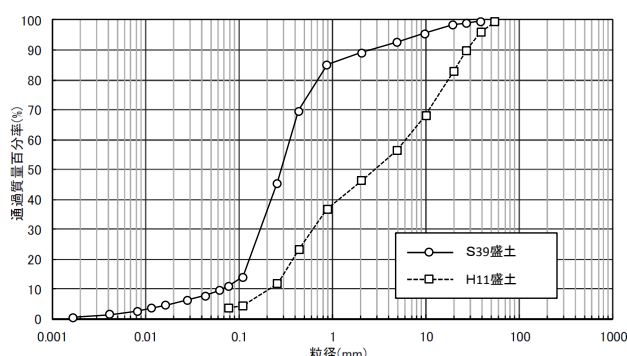
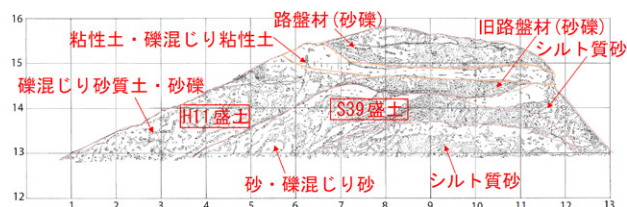
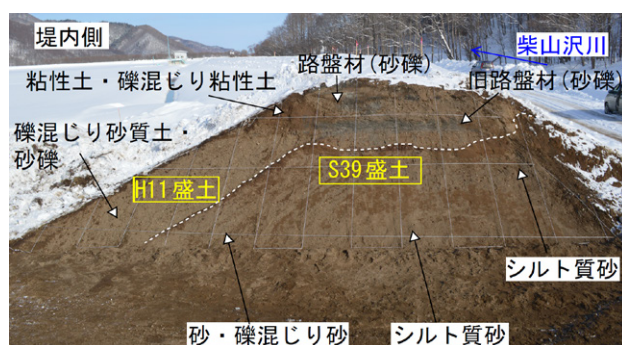


図-7 柴山沢川開削状況及びスケッチと堤体土粒度分布

土の引張り破壊応力を求める方法は宇多ら²⁾によって直感的でかつ簡便な方法が示されている。そこで、被災箇所近傍下流川の堤防川裏法面において、堤防法面を

50cm程度除去し、植生の影響を取り除いた上で、供試体を作成し、堤体土の引張り破壊応力を宇多ら²⁾の示す手法により調査した(図-9)。その結果から、宇多らのお整理した実物材料の侵食実験から整理される引張り破壊応力と侵食限界流速の関係から侵食限界流速を推定したところ、図-10のようになった。

常呂川左岸22.6kと柴山沢川における調査結果は引張り破壊応力において約3倍、侵食限界流速において約2倍の差が生じた。東亜川においてはその中間的な値が得られた。図-8には柴山沢川における堤体土の粒度分布を示す。これより柴山沢川の堤防川裏法面は礫質土で腹付けされていたため、粘着力も小さく、引張り破壊応力が低く算定されたものと考えられる。

粘性土の引張破壊応力から求まる侵食限界流速と谷瀬⁴⁾の整理している裏法面の等流流速を比較した結果が表-3である。表-3から常呂川22.6kは裏法面等流流速が侵食限界流速を下回っており、柴山沢川では裏法面等流流速が侵食限界流速を上回っていた。東亜川では侵食限界流速と裏法面等流流速がほぼ同等であった。常呂川22.6kでは堤体土羽の耐力が大きいことが被災を小さくしていた可能性がある。この耐力が全面に発揮されていれば、裏法侵食も起こらないことになるが、実際には裏法侵食が起きており、耐力が弱い場所が局所的に存在していたことが考えられる。柴山沢川では被災した要因が堤体土の耐力の小ささからも説明できる。東亜川では堤体土の耐力と裏法面流速がほぼ同等であり、耐力の不均一性も踏まえると被災したと整合していると考えられる。

表-3に、裏法侵食が天端まで達して滝状に越流水が落下する状況における重力落下流速と堤体土侵食限界流速の比較も併せて示すといずれの地点も重力落下流速が侵食限界流速を大幅に上回る。これは、裏法面侵食が進行すると、基礎地盤面に作用する流速が大きくなり、侵食が容易に止まらない可能性を示すものである。そこで、常呂川22.6kが半壊でとどまった要因について考察する。常呂川堤防調査委員会報告書⁹⁾によると図-4に示すように、常呂川左岸22.6kにおいては内水による湛水が一定程度有ったことが確認されており、ウォータークッションにより越流落水による裏法尻侵食が生じにくかったと考えられる。そのため、内水による湛水がなければ裏法尻侵食後の流速は引張り破壊応力より求められる侵食限界流速の5m/sを超え、侵食がさらに進んでいた可能性があったことが伺える。

4. まとめ

1) 越水に対する耐侵食性の評価を谷瀬⁴⁾らの調査を基に整理した。越水が生じたが破堤にまで至らなかった常呂川左岸22.6kにおける根毛の耐侵食力が高かった。また、破堤はしたもの東亜川に比べ柴山沢川の平均根毛量が多く耐侵食性が高かった。東亜川の法尻においてはオオ

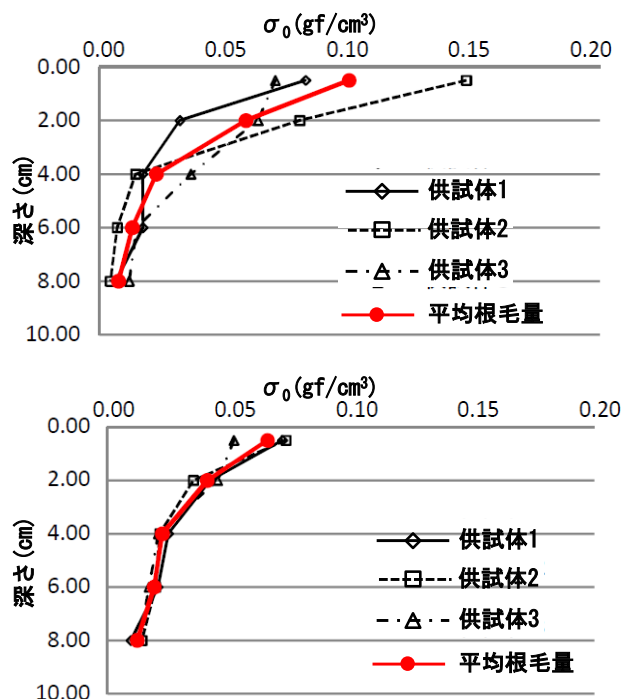


図-8 常呂川(上)と柴山沢川(下)における根毛量と深さの関係



図-9 引張り破壊試験実施箇所及び実施状況

イタドリ等の繁茂により下草が少なかった影響が大きいと思われる。そのため、今後本川と一連の背水区間とな

表-2 根毛量と摩擦速度、限界侵食深に到達する時間

地点	越流水深 (cm)	等流流速 (m/s)	平均根毛量 (g/cm ³)	摩擦速度 (m/s)	到達時間 (min)	越流継続時間 (min)	判定
常呂川 左岸22.6k	30	3.75	0.108	0.54	385.8 (限界侵食深5cm)	360以上	safe out
柴山沢川	20	2.94	0.041	0.45	19.2 (限界侵食深4cm)	120以上	out
東亜川	30	4.01	0.012	0.59	2.2 (限界侵食深2.5cm)	360以上	out

表-3 引張り破壊応力と侵食限界流速、落差を考慮した流速

地点	供試体細粒分 (%)	引張り破壊応力 (gf/cm ²)	侵食限界流速 (m/s)	越流水深 (cm)	等流流速 (m/s)	判定	重力※※ 落下流速 (m/s)	判定
常呂川 左岸22.6k	49.8	31.0	5.0	30.0	3.8	safe	8.0	out
柴山沢川	32.5	7.7	2.5	20.0	2.9	out	7.1	out
東亜川	33.3	21.0	4.0	30.0	4.0	safe out	8.6	out

※※川裏法肩まで侵食されたときの落差を考慮した流速に相当

る堤防においては除草等の管理水準や植生等の確認作業を本川と同じ水準とするなどの工夫による堤防の耐久性向上に向けた検討が考えられる。

2)堤体土の引張り破壊応力から侵食限界流速を試算した。礫質土で腹付けされていた柴山沢川においては常呂川左岸22.6kと比べ引張り破壊応力は1/3と低かった。堤防を築堤等する際には河川土工マニュアル等が参考とされるが、法面を構成する使用材料等に特に配慮することが堤防の耐久性向上につながるものと思われる。が、本川からの背水区間においては川裏法面を構成する使用材料等に特に配慮することが堤防の耐久性向上につながるものと思われる。

3)内水浸水によるウォータークッションが越流による裏法尻からの侵食破壊の進行を遅らせることができる。大雨時に限定的な内水浸水範囲をつくり、ウォータークッションとすることが減災の工夫として考えられる。

謝辞：本検討を行うにあたり、データの収集等において北海道開発局網走開発建設部治水課、(国研)土木研究所寒地土木研究所寒地水圏研究グループ水環境保全チームに多大なるご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

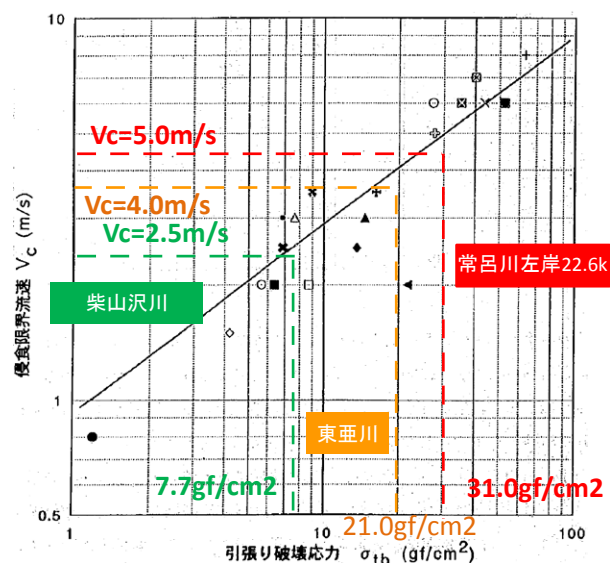


図-10 引張り破壊試験から得られる侵食限界流速

参考文献

- 1) 7.13 新潟豪雨洪水災害調査委員会報告書, 2005.5
- 2) 宇多高明, 望月達也, 藤田光一, 平林桂, 佐々木克也, 服部敦, 藤井政人, 深谷渉, 平館治: 洪水流を受けた時の多自然河岸防御工・粘性土・植生の挙動, 土木研究所資料第3489号, 1997.1.
- 3) 円山川堤防調査委員会報告書, 2005.3
- 4) 谷瀬敦, 矢部浩規, 新目竜一: 平成28年8月洪水により決壊した常呂川堤防の耐侵食評価, 第5回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.31-34, 2017.
- 5) 常呂川堤防調査委員会報告書, 2017.3
- 6) 福岡捷二, 藤田光一: 堤防法面張芝の侵食限界, 水工学論文集, 第34巻, pp.319-324, 1990

(2018. 4. 3受付)