

平成29年度

# 平成28年8月洪水により被災した常呂川堤防の 植生からの耐侵食評価

国立研究開発法人 土木研究所寒地土木研究所 水環境保全チーム ○谷瀬 敦  
寒地河川チーム 矢部 浩規  
水環境保全チーム 新目 竜一

堤防植生の根毛量と流水に対する耐侵食の関係についての既往の実験式を基にして、平成28年8月の北海道・東北豪雨により越水破堤した常呂川水系の河川堤防について、越流水に対する耐侵食性を評価した。その結果、越水したにも係わらず破堤に至らなかった箇所は、破堤した箇所と比較して根毛量が多く、植生による耐侵食の効果も発現されたことが、破堤しなかった要因の一つではないかと推察できた。

キーワード：越水破堤、堤防植生、耐侵食、根毛量

## 1. はじめに

河川堤防や河岸の植生の雨水や流水に対する耐侵食性については多くの研究事例があり、定量的な評価もされるようになっており、平均流速2m/s以下では侵食に起因する破壊が生じないとの報告もされている<sup>1)2)3)</sup>など。水理公式集<sup>4)</sup>では、「耐侵食性の機能としては、植生が流水抵抗となり地表面近傍の流速が低減されるためと考えられる。流水抵抗となる部分は、植生の地上部にあたる葉や茎および地下部である根および地下茎に大きく分けられるが、シバやチガヤでは、侵食に伴って地中から洗い出された根や地下茎が重なり合い地表面を被覆する層であることが判明している。」と記述されている。本稿では、植物の根および地下茎の重量（以下、根毛量）と流水に対する耐侵食機能の関係についての既往の実験結果を参考にして、平成28年8月の北海道・東北豪雨により越水破堤した常呂川水系の河川堤防について、現地を調査した植生の根毛量等の結果を基に、越流水に対する耐侵食性を評価したので、その結果を報告する。

## 2. 常呂川水系の堤防被災状況<sup>5)</sup>

平成28年8月16日から23日にかけて北海道地方を通過した台風7号、11号、9号による降雨の影響により、常呂川の一次支川2箇所（河川法施行令2条7号による国工事施行区間1箇所、道管理区間1箇所）において越水により堤防が決壊、また本川の複数箇所でも越水による堤防崩れなどによる被害が発生した（図-1）。この3個の台風による総降雨量は流域内の北見観測所で365mm、常呂観測所で364mmであった。常呂川中下流部の国による堤防整備は昭和38年から平成15年にか

て実施されている。堤防が決壊した支川の柴山沢川（国工事施行区間）も、昭和38年～39年に堤防が築造され、平成11年に腹付け盛土が実施された箇所である。堤防決壊や噴砂、低水護岸の流出等が確認された範囲はKP12.5～KP40.0の中流域であり、特にKP16.0～KP27.0付近に集中している。柴山沢川は常呂川KP21.0付近で本川に合流している。柴山沢川堤防の決壊箇所は本川合流地点から約1km上流で、決壊発生の推定時刻は8月20日深夜から21日未明にかけてであり、決壊延長は約100mである。越流水深は最大30cm程度と推定される。推定される堤防決壊の原因は、常呂川からの背水による水位上昇が決壊原因の一つであり、侵食による堤防決壊の可能性は低い。浸透が堤防決壊の主要因であることは考えにくいと整理されている。一方、道管理区間で決壊した東亜川は常呂川KP19.5付近で本川に合流している。東亜川の決壊箇所は本川合流地点から約400m上流であり、決壊延長は約35m、越流水深は最大で30cmを超えると推定される。東亜川の堤防決壊の原因は明らかにされていないが、堤防決壊箇所が常呂川の背水区間であることから、柴山沢川と同様に背水による水位上昇が決壊原因の一つであると推察する。決壊破堤した2箇所以外に、常呂川本川においては堤防天端から越水した箇所が複数あり、中には決壊破堤までは至らないものの、越水により部分決壊した箇所もあった。決壊箇所を含め、越水により堤体が被災した主な地点の諸元を表-1に示す。常呂川左岸kp22.5の日吉30号樋門付近の越水箇所の堤防高は約3.0m、法勾配は2割5分、柴山沢川の決壊箇所の堤防高は2.4m、法勾配は2割5分、東亜川の決壊箇所の堤防高は3.5m、法勾配は2割であり、東亜川の堤防は柴山沢川などと比較して高く、法勾配は急である。

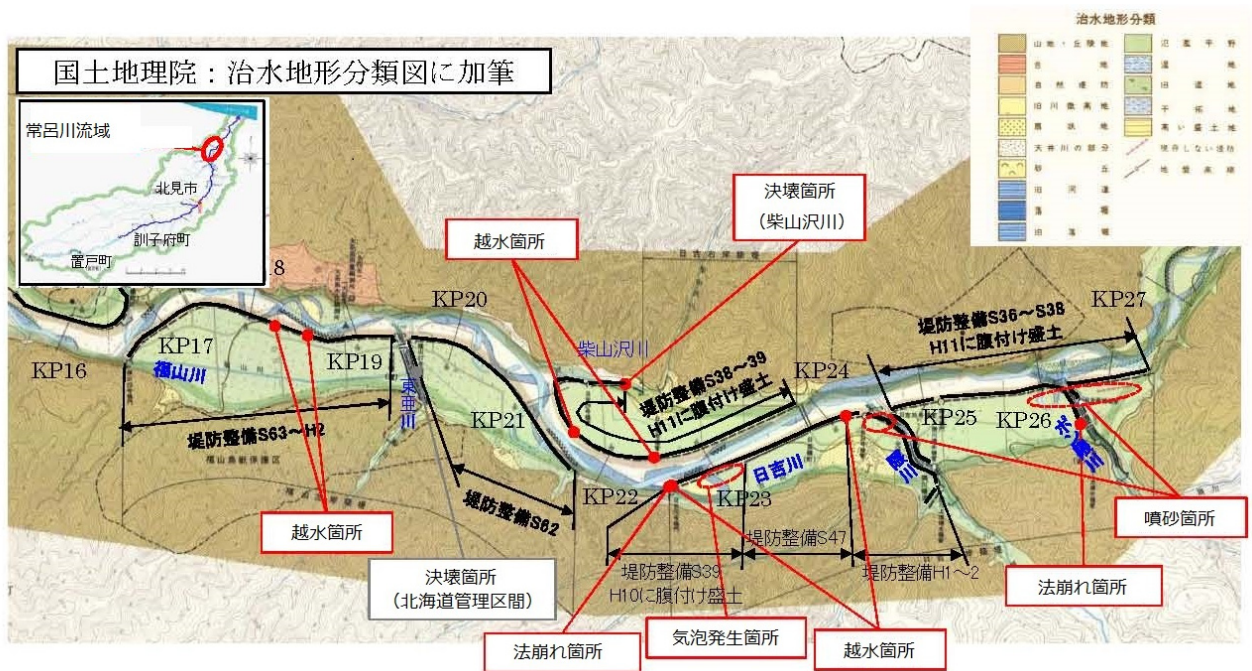


図-1 常呂川被災箇所図（常呂川堤防調査委員会報告書<sup>5)</sup>の図を加筆修正）

表-1 越流により堤防が被災した主な箇所の諸元

地点	被災状況	堤防高	堤防法勾配	越流水深(推定)
常呂川 KP22.5	堤体侵食	3.00m	2割5分	30cm
柴山沢川	決壊	2.40m	2割5分	20cm
東亜川	決壊	3.50m	2割	30cm超

### 3. 堤防被災箇所3地点の堤防耐侵食の推定

堤防植生の流水に対する耐侵食性を評価する方法として、既往の研究<sup>2)</sup>では植生の根毛量に着目して、底面の摩擦速度 $u_*$ と平均根毛量 $\sigma_0$ （地表から深さ3cmまでの単位体積当たりの土中に含まれる根および地下茎の総重量）と侵食深 $z$ の関係が実験により次式の様に提案されている。

$$z = \alpha u_* \log t, \quad \alpha = -50\sigma_0 + 9 \quad (1)$$

ここで、 $t$ は時間(分)である。上式は堤防法面植生の河川の流水に対する耐侵食性の効果を推定するために提案された実験式であり、この式が適用できる範囲は式を提案するために行った実験の範囲内であるとされているが、本検討では堤防越流水に対する植生の耐侵食効果を推定するため、この予測式を用いて評価を行うこととする。

#### (1) 根毛量調査の方法および結果

根毛量の試料採取は被災から約2ヶ月経過した平成28年10月20日～21日にかけて実施した。採取した地点は表-1に示した3箇所の外、比較のため常呂川本川の3箇所でも採取した。決壊した2地点では、決壊箇

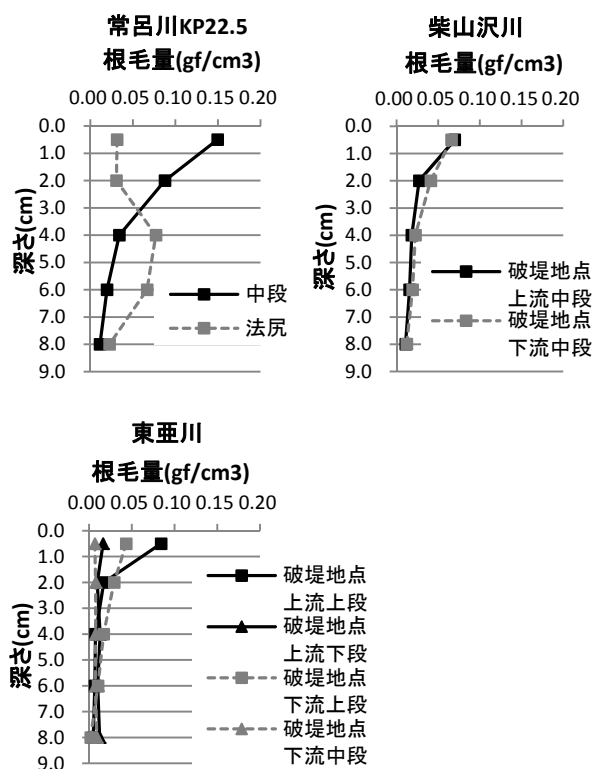


図-2 根毛量計測結果

所近傍の上流、下流の2箇所で試料採取した。試料採取は川裏法面で行い、採取位置は法面上段や中段、下段など法面の植生状況などを勘案して地点毎に異なっている。試料は、一端をナイフエッジ加工した長さ150mm、内径100mmの塩ビ管を、植生を刈り取った任意の地点に10cm以上打ち込み、採取位置毎に3検体採取した。重量の計測は後日、室内で行った。塩ビ管に

表-2 各地点の平均根毛量 $\sigma_0$ および $\alpha$ 値

地点	採取位置	根毛量 $\sigma_0$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\alpha =$ $-50 \cdot \sigma_0 + 9$	植生優占種
常呂川 KP22.5	中段	0.108	3.58	カモガヤ、オウシノケガサ
	法尻	0.031	7.46	不明
柴山沢川	破堤点上流中段	0.041	6.93	カモガヤ
	破堤点下流中段	0.049	6.54	クサヨシ
東亜川	破堤点上流上段	0.040	7.02	コヌカガサ
	破堤点上流下段	0.012	8.40	オオイタドリ
	破堤点下流上段	0.034	7.30	ヒロハウシノケガサ
	破堤点下流中段	0.008	8.63	オオイタドリ、ツルヨシ

表-3 流速、水深、摩擦速度の推定値

地点	越流水深 (代入値)	法尻付近流速 $u_f$ (m/s)	法尻付近水深 $h_f$ (m)	摩擦速度 $u_*$ (m/s)
常呂川 KP22.5	30cm	3.66	0.077	0.53
柴山沢川	20cm	2.87	0.053	0.44
東亜川	30cm	3.87	0.072	0.56

詰まった土を地表面とは逆側から計測厚毎に押し出し、カッターで切り取り、層毎に土に含まれる根および地下茎を水で洗い出した。計測は、地表面から1cm、その後2cmピッチで深さ9cmまでの5層に分割し、取り出した根および地下茎を、根毛と根茎・地下茎の2つに分離して、それぞれの湿重量を測った。図-2に地点毎の地表面からの深さと根毛量の関係を、表-2に計測して得られた平均根毛量 $\sigma_0$ と $\alpha$ の結果を示す。試料を採取したそれぞれの地点の植生種は異なっていたが、東亜川の下段および中段を除いて、地表面はイネ科の植物が優占した植生でほぼ覆われていた。常呂川 KP22.5 下段では、採取地点の地表面に越流水による土砂が堆積していたことにより、根毛量が少なかった。東亜川の下段および中段で他の地点と比較して根毛量が少なかった理由の一つは、試料採取位置にはオオイタドリの繁茂により、下草が殆ど生えていなかったためと考えられる。

## (2) 摩擦速度 $u_*$ の推定

次に、侵食深推定に必要な摩擦速度 $u_*$ の推定を行う。 $u_*$ は幅広水路上の流路を仮定すると、マンシングの平均流速公式から以下の通りとなる。

$$u_* = \sqrt{ghI_e} = g^{1/2}vm/h^{1/6} \quad (2)$$

ここで、 $u_*$ を求めるために必要な値は、重力加速度  $g$  のほか、マンシングの粗度係数  $n$  と流速  $v$ 、水深  $h$  である。本検討では、粗度係数  $n$  は高水敷の草地の値を参考にして一律 0.03 とした。流速  $v$ 、水深  $h$  は越流時の流速が速く、洗掘が初めに生じるとされている堤防法尻付近の値を次の様に求める。まず越流水深 $h_t$ と単位幅流量 $q$ の関係は、表法尻上と堤防天端上の流れを、エネルギー保存則を仮定して関係づけることにより、次の式で

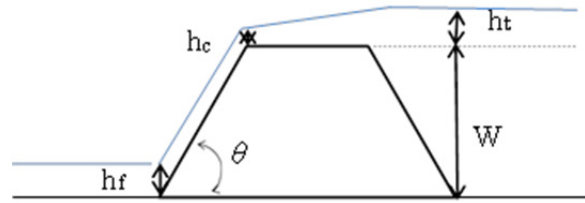


図-3 堤防断面と越流水の模式図

表現できる。

$$h_c = \frac{1}{3(h_t + W)^2} h_c^3 + \frac{2}{3} h_t, \quad q = \sqrt{gh_c^3} \quad (3)$$

ここで、 $W$ :堤防高さ、 $h_c$ :天端で生じる限界水深である(図-3参照)。裏法尻付近での水深 $h_f$ と流速 $v_f$ は、裏法での等流を仮定した場合(4)式の様に表示される。

$$h_f = \left(\frac{n^2 g}{i}\right)^{\frac{3}{10}} h_c^{\frac{9}{10}}, \quad v_f = \frac{q}{h_f} \quad (4)$$

ここで、 $i$ は $\sin \theta$ である。なお、加藤ら<sup>9)</sup>が行った実験では、越流水深が2m程度までは模型実験による流速と、(3)、(4)式から求めた裏法尻付近の流速 $v_f$ は同程度であったという結果が得られている。但し、その実験は植生のない法面で行われたため、植生がある今回の様な場合への適用については、更なる検証が必要であると考えられるが、本研究では、これらの式を使用し、粗度を0.03として検討した。

表-1の堤防諸元と式(2)~(4)を用いて推定された各地点の流速、水深、摩擦速度の一覧を表-3に示す。流速、水深の計算に当たって内水による湛水は考慮しなかった。東亜川の越流水深は30cmとして計算した。計算の結果、柴山沢川で法尻付近の流速2.87m/s、水深5.3cm、摩擦速度0.44m/sと他の2地点と比較して小さい値となった。この差は越流水深の違いと、堤防高が他と比較して低いことによるところが大きい。越流水深を同じ30cmとして計算した東亜川と常呂川の比較では、堤防高が高く、法勾配も急な東亜川の流速および摩擦速度が常呂川と比べ大きな値となったが、その差は僅かであった。

## (3) 侵食深および耐久時間の推定

3.1および3.2で得られた $\alpha$ および $u_*$ を用いて、時間毎の侵食深を求めることとする。なお、計算は式(1)を時間  $t$  で微分し、侵食速度形式の式(1)'に変換して行った。

$$dz/dt = (\alpha u_* / \ln 10) \times 10^{-z/\alpha u_*} \quad (1)'$$

式(1)を適用できる範囲はこの式を導く際に行われた実験の条件と仮定から以下の通りとされている<sup>2)</sup>。

・イネ科の植物が優占種である植物群落が繁茂してい

る。

- ・地面の構成材料がシルト～シルト混じり砂である。
- ・摩擦速度が約 0.27m/s 以下である。
- ・平均根毛量が 0.02～0.12g/cm<sup>3</sup> の範囲内であること。

現地計測した平均根毛量 $\sigma_0$ と計算で得られた摩擦速度 $u_*$ は表-2、表-3に示す通り、上記の適用範囲内に収まってはいないが、今回の検討では、式の適用は可能であると仮定して計算を行った。なお、堤体の土質条件の確認は実施していない。また、福岡ら<sup>1)</sup>は、植生による堤防の耐侵食は主に根毛層で発揮されるが、侵食は平均的に進むのではなく弱い部分が局部的に侵食を受けて根がはがされ、それが全体的に及んでいく。そのため、根毛層厚の半分程度が許容侵食限界であると、現地調査の結果から多摩川及び小貝川ではその深さを 2.5cm としている。本検討においても、侵食深が 2.5cm に達すると植生による耐侵食機能が大幅に低減し破壊が急激に進むと仮定して、耐久時間の評価を侵食深 2.5cm に到達する時間で行った。

図-4(1)～(3)に計算で得られた推定侵食深さの時間変化のグラフ、表-4に侵食深 2.5cm に到達する時間の表を示す。 $\alpha$  は各地点の根毛量から得られた表-2に示す値を用いたが、常呂川 KP22.5 については、法尻の根毛量を正確に計測できなかったため中段の値  $\alpha=3.58$  を用いた。柴山沢川については、破堤地点上下流の中段のそれぞれの値  $\alpha=6.93, 6.54$  の他に、比較的根毛量が豊富であった常呂川 KP22.5 中段の値  $\alpha=3.58$  を比較・検討のため計算に用いた。東亜川については、流速および摩擦速度の推定を行った法尻に近い破堤点上流下段および破堤点下流中段の値  $\alpha=8.63, 8.40$  の他、比較・検討のため常呂川 KP22.5 中段の値  $\alpha=3.58$  を用いた。

常呂川 KP22.5 地点の計算結果を考察する。この地点は、越水はしたが破堤までは至らなかった箇所であり、計算結果でも侵食深 2.5cm までに達する時間は 17 分と他の 2 地点と比較して耐侵食性が高い結果が得られた。このことより、根毛による耐侵食効果もある程度発揮されたことが、破堤まで至らなかった要因の 1 つに上げられると考えられる。これと比較して、柴山沢川と東亜川は初期の侵食速度が速く傾きが急であり、侵食深 2.5cm に到達するまでの時間の計算結果は、それぞれ 5～6 分と 2.1～2.2 分である。破堤した 2 河川の堤防は根毛による耐侵食効果は小さく、僅かな時間で侵食が急激に進んだと推定される。仮にこの 2 地点の根毛量が常呂川 KP22.5 と同程度であったとすると、柴山沢川と東亜川の侵食深 2.5cm に到達するまでの時間はそれぞれ 32 分、14 分となり、一定の耐侵食効果が得られていたと想定される。

#### (4) その他の越流箇所を含めた耐久性の推定

前節までで検討した 3 箇所以外の複数箇所でも越水が

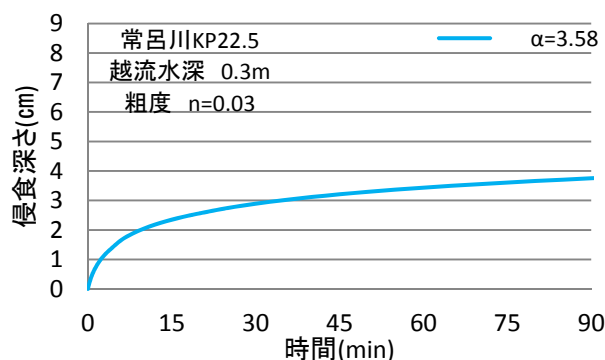


図-4(1) 侵食深さの計算結果 (常呂川)

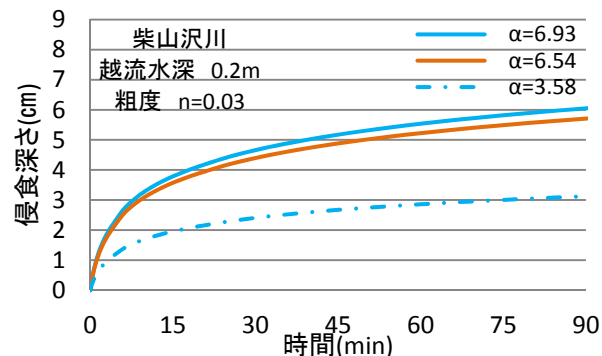


図-4(2) 侵食深さの計算結果 (柴山沢川)

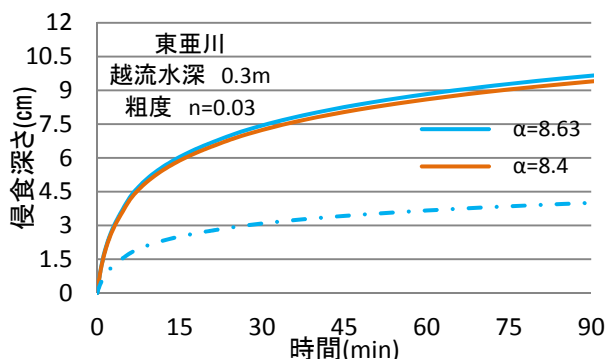


図-4(3) 侵食深さの計算結果 (東亜川)

表-4 侵食深 2.5cm に達するまでの時間

地点	$\alpha$	侵食深 2.5cm 到達時間
常呂川 KP22.5	3.58	17分
柴山沢川	6.93	5.2分
	6.54	6.0分
	(3.58)	(32分)
東亜川	8.63	2.1分
	8.40	2.2分
	(3.58)	(14分)

発生している。これらの箇所は越水による堤防被災が無いあるいは小さな被災で免れたため、越流水深を推定するなどの詳細な調査は行われなかった。但し、根毛量については被災した 3 箇所と同時期に現地で検体採取と分析を行ったほか、ベーン式根系強度計<sup>2)</sup>を用いて根系強度の測定も行っている (図-5)。その結果を破堤に至った箇所と至らなかった箇所に分けて考察

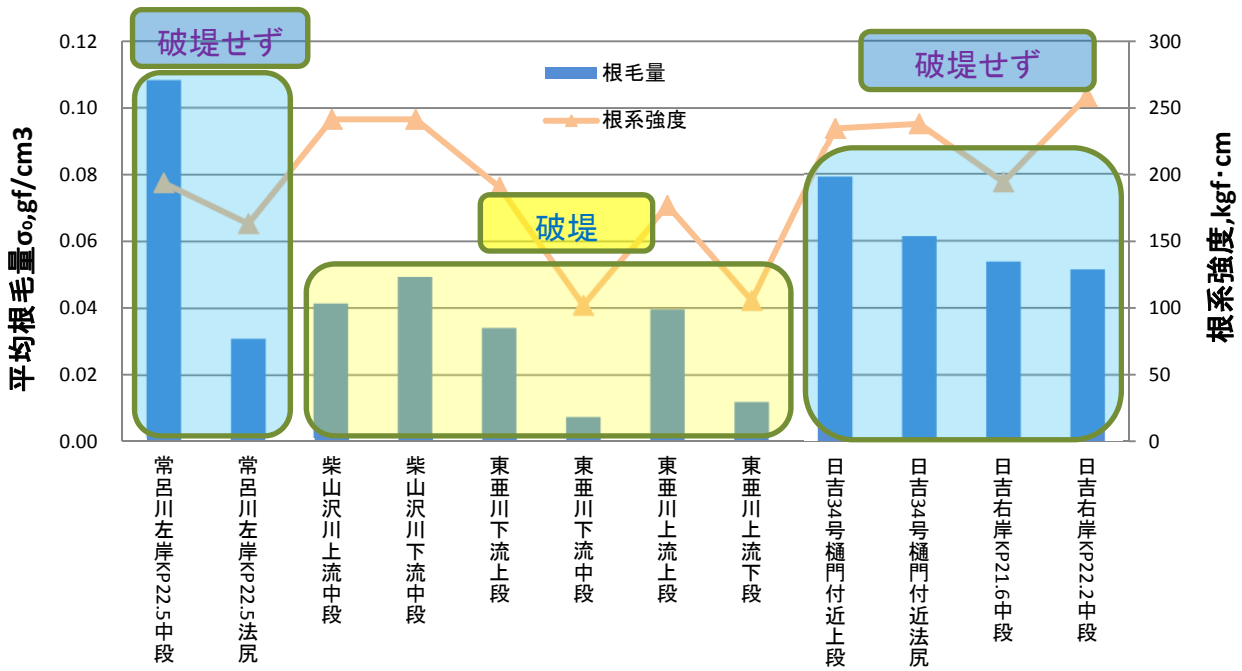


図-5 各地点の平均根毛量と根系強度計測結果

する。根系強度については破堤した柴山沢川の計測値が破堤に至らなかった常呂川左岸 KP22.5 の計測値よりも大きい結果が得られたが、概して破堤に至らなかった箇所計測値が大きい結果が得られた。平均根毛量については破堤した箇所の計測値が破堤に至らなかった箇所の計測値より小さい値を示した。これらからも、根毛量や根系強度の大小と越流に対する耐久性について関係性があると推察できる。

#### 4.まとめ

今回行った植生の根毛による耐侵食性の評価は、地表面から僅か 2.5cm までに達するまでの耐久時間の評価である。堤防が決壊に至るかどうかは、堤体の土質条件にも左右されるが、今回は、根毛量のみに着目して、越水により被災した常呂川水系の堤防の越流水に対する耐侵食性を既往の実験式を用いて評価した。現地計測した根毛量や推定した摩擦速度については、既往の実験式の適用範囲外の値もあったが、試行的に評価を行った結果、越水したにも係わらず破堤までに至らなかった箇所については、根毛量が比較的多く、根毛による耐侵食の効果が発揮されたことも破堤しなかった要因の1つではないかと推定された。

今後は、今回用いた侵食深推定式の適用可能範囲の

拡大や、水深の時間変化を考慮した侵食深の推定が可能となる様検討を進め、越水による堤防決壊の予測や堤防の耐久性の向上に繋げたい。

**謝辞：**本検討を行うに当たり、データの収集に北海道開発局網走開発建設部治水課に多大なるご協力を得た。また、国総研河川研究部河川研究室には検討を開始するに当たり貴重なアドバイスを頂いた。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 1)福岡捷二, 渡辺和足, 柿沼孝治: 堤防芝の流水に対する侵食抵抗, 土木学会論文集第 491 号/II-27, pp31-40,1994.
- 2)宇田高明ら: 洪水流を受けた時の多自然型河岸防御工・粘性土・植生の挙動, 土木研究所資料第 3489 号, 1997.
- 3)金高州吾, 渡邊康玄, 長谷川和義, 亀田祐二: 芝を生やした河岸における大型水理実験, 土木学会北海道支部論文報告集第 50 号, pp231-236,1993.
- 4)土木学会: 水理公式集 (平成 11 年版), 1999.
- 5)常呂川堤防調査委員会: 常呂川堤防調査委員会報告書, 平成 29 年 3 月
- 6)加藤史訓ら: 津波の越流に対して粘り強く減災効果を発揮する海岸堤防の構造検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.1, pp31-49, 2014.