

8.6 積雪寒冷地河川における河岸耐性及び侵食メカニズムと多自然河岸保護工の機能評価に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：伊藤丹、永多朋紀、川村里実

【要旨】

近年、全国各地で河畔林の樹林化が顕在化し、河川環境は数十年前とは全く異なる様相を呈している。このような河道変化の誘因としては様々な要因が挙げられるが、樹林化に至るプロセスやその決定的な要因は未だ十分明らかではない。本研究では、河道内の土砂輸送量を支配する要素として、植生の根系由来の抵抗力に着目し、根系を短繊維で模式化した移動床水理模型実験を行った。実験では、珪砂と短繊維の混合率のみを変化させ、河床材料に繊維状の物質が混入した際の流砂量の低減効果を計測した。実験の結果、河床材料に繊維状の物質が混入することで、その混合率に応じて流砂量が変化することがわかった。また、流水と接する河床面には、繊維状の物質が混入し砂粒子の移動が抑制された被覆層と、砂粒子のみで構成された移動層の状態があり、さらに、被覆層の鉛直上方には被覆層からの影響を強く受けた混合層が存在するものと仮定し、混合層内における被覆層からの低減効果を指数形の鉛直分布としてモデル化することで、実験結果を概ね良好に再現できることがわかった。キーワード：流砂量、阻害効果、植生の根系、短繊維

1. はじめに

近年、全国各地で河畔林の樹林化が顕在化しており、数十年前の河川環境とは大きく異なる状態へと変化しつつある。十勝川水系札内川は、古くは礫河原で覆われた複列砂州を有する網状河道であったが、数十年の期間を経て徐々にヤナギ林が河道内へと侵入し、これと並行して河床形態は複列砂州から単列交互砂州へと移行しつつある。過度に進行した樹林化は洪水時の流下阻害を招くほか、流路の単列化は流況を単調化し水生生物の生息環境を大きく変化させる可能性があるため、治水のみならず生態系へ及ぼす影響も懸念される。

このような河道変化の誘因として、ダムによる洪水調節や河川改修による川幅縮小など様々な要因が挙げられるが、樹林化に至るプロセスやその決定的な要因は未だ十分明らかではない。札内川の河道変遷過程をみると、流路の単列化は樹林化と並行して起きている場合が多く、現地観測でも、樹木が繁茂した砂州や高水敷上の河床面は草本や樹木の根で覆われ、出水時も土砂が流掃されにくい状況下にあることは容易に推察される。このことは、植生の侵入が河道形成過程において何らかの影響を及ぼしている可能性を示唆するものであるが、既往の研究では、植生は流水抵抗としてのみ取り扱われる場合が多く、

地下部の根系がもたらす土砂緊縛力が土砂輸送そのものに対する抵抗として作用する点はあまり考慮されていない。これは、土砂移動と植生生長の時間スケールが異なるためであるが、数十年スパンの河道変化を考える上では、植生地下部の抵抗は無視できないほどの影響を持つ可能性がある。

植生地下部の影響に関する研究としては、関根ら¹⁾によるエンバク、フッキソウを用いた人工降雨実験や、服部ら²⁾によるシバ、チガヤを用いた侵食実験が挙げられる。これらの研究では、根系の土砂緊縛力が斜面の耐侵食性を高めること、侵食抵抗力は地下部の根量に比例することが示されている。また、堀ら^{3, 4)}は短繊維混合土砂の地盤補強効果に関する研究において、繊維を土砂に混入した際、土粒子はブロック状に拘束され、各ブロック間には繊維の張力に起因した架橋効果が生じ、全体の強度が高まることを述べている。短繊維と植生の根系ではその性状は異なるが、繊維状の物質が土砂に混入した際の緊縛効果という観点からは、植生地下部で生じる力学的機構との類似性が想起される。

以上より、本研究では根系を短繊維で模式化した移動床水理模型実験を行い、繊維物質が土砂に混入した際の砂粒子の移動抑制効果を、流砂量の変化から定量的に評価する。ただし、植生の根系は複雑な

表-1 実験条件

給砂条件	被覆条件	実験番号	短繊維混合率： r_m (%)		流量条件 (L/s)：通水時間=1h				
			重量比	体積比	Q=2.8	Q=5.7	Q=11.3	Q=17.0	Q=22.6
給砂あり	全面	CASE 1	-	-	○	○	○	○	-
		CASE 2	0.005	0.015	-	-	○	○	○
		CASE 3	0.01	0.029	-	-	○	○	○
		CASE 4	0.1	0.291	-	-	○	○	○
		CASE 5	0.3	0.874	-	-	○	○	○
		CASE 6	0.4	1.165	-	-	○	○	○
		CASE 7	0.5	1.456	-	-	○	○	○
		CASE 8	0.6	1.747	-	-	○	○	○
	下流側半面	CASE 9	0.5	1.456	-	-	-	○	-
	上流側半面	CASE 10	0.5	1.456	-	-	-	○	-
給砂なし	全面	CASE 11	0.1	0.291	○	○	○	○	-
		CASE 12	0.5	1.456	-	○	○	○	○
		CASE 13	1.0	2.912	-	○	○	○	○

○：各ケースの設定流量

表-2 水路条件

item	value	unit
模型縮率	s	1/50
河床勾配	I	1/164
水路延長 (移動床部)	L	1.0 m
水路幅	B	1.0 m
河床材料の粒径	d_{60}	1.0 mm

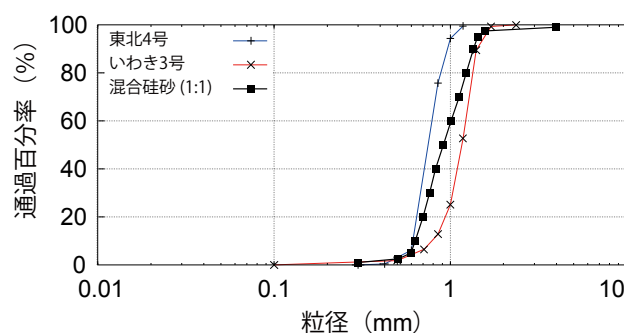


図-1 河床材料の粒度分布 (黒線)

生長・分布特性を有し、草本・木本による違いのみならず樹種や生育環境によっても大きく異なるため、短繊維による土砂緊縛効果の現地適用性には十分な検証が必要であるが、まずは当実験でその効果の概略を把握する。また、流砂量は侵食抵抗力と等価に比較できるものではないが、砂粒子が短繊維から受ける抵抗力を直接測定することは困難であるため、ここでは定量的に計測が可能な流砂量を用いてその効果を測ることとした。加えて、本研究では、実験経過をもとにした流砂量低減機構のモデル化及び数値解析を用いた実験結果の再現検証、さらに、河床面の被覆状況が上下流で面的に変化する場合の河床変動特性についても併せて検討を行った。

2. 水理模型実験

2.1 実験方法

実験では、珪砂に繊維状の物質が混入した際の流砂量の低減効果を見るため、両者の混合割合を各種変化させた河床材料を用いて定常流下の流砂量を計測した。珪砂と混合する繊維の割合は、空隙を控除した体積比で以下議論するものとし、これを「混合率： r_m 」と呼ぶ。

給砂ありの条件では、混合率のみを変化させたCASE1～CASE8の8ケースと、短繊維の有無を上下流に分けて面的な変化を与えたCASE9・CASE10の2ケースを行った。当実験の移動床区間は、河床表面層が植生地下部の根系によって緊縛された状態にある砂州上の植生域を想定しており、出水時は、砂州上に生じた流れによって、植生域の上流側からは砂礫のみで構成された流砂が供給されることを考慮し、給砂は、全ケース短繊維なしの河床材料を用いて、上流端の河床高を動的平衡に保つよう行った。また、上流からの土砂供給が無い場合との比較を行うため、CASE11～CASE13の3ケースは給砂なしの条件で行った。

各ケースの混合率と流量条件を表-1に、全ケース共通の水路条件と河床材料の粒度分布を表-2および図-1に、実験時の通水状況を図-2に示す。

本研究では、植生地下部の根系を模式化するにあたり、実験水路の規格や河床材料の粒径、現地植生の生長量を考慮し、縮率1/50の条件下でヤナギの根

8.6 積雪寒冷地河川における河岸耐性及び侵食メカニズムと多自然河岸保護工の機能評価に関する研究

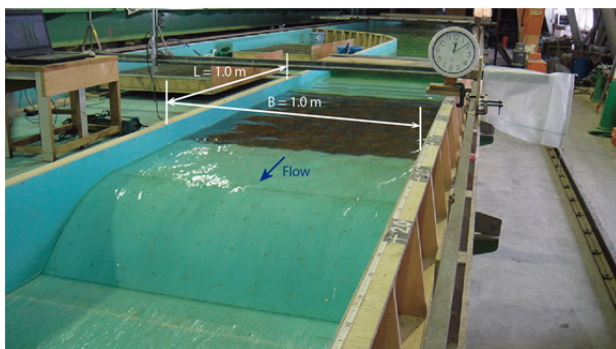


図-2 実験状況 (CASE12, Q=22.6(L/s))

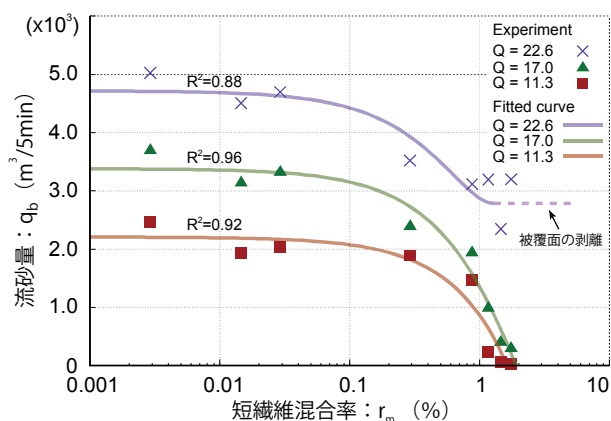


図-4 短繊維混合率 r_m と流砂量 q_b の関係

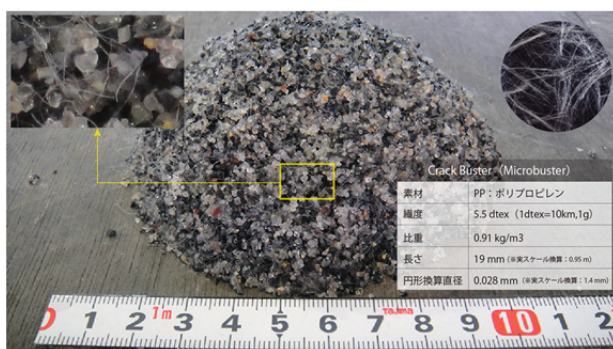


図-3 短繊維を混合した河床材料 ($r_m=0.291\%$)



図-5 短繊維による砂粒子の緊縛状況 ($r_m=1.456\%$)

長・根径に近い条件となるポリプロピレン製の短繊維 (製品名: Crack Buster、Microbuster) を植生の根に見立てて実験を行うこととした。砂と短繊維を混合する際は、繊維同士が絡まり合っただまになるのを防ぐため、短繊維と水を混ぜた状態の液体を作り、それをバケツに入れた砂に少しずつ足しながら、手動の攪拌機を用いて両者が均質に混ざり合う状態になるまで攪拌を行った。ポリプロピレンの比重は水より軽いので、攪拌の際は、砂と短繊維が分離することが無いよう水分量には十分留意して行った。均質に混ざり合った状態の河床材料と使用した短繊維の製品仕様を図-3 に示す。

実験は各ケース各流量に対して1時間の通水を行い、通水中は移動床部 (1m×1m) の中央で水深・流速の計測を30分間隔で計2回、流砂量と空隙率の計測を10分間隔で計6回行った。流砂量は、水路下流端に設置した掃流砂捕捉用の籠を用いて5分間の流砂の総量を計測、実験後、水中体積と乾燥重量から空隙を控除した砂粒子体積を求め、これを流砂量の計測値とした。

2.2 実験結果

短繊維の混合率を $r_m=0.015\sim 1.747\%$ まで変化させた CASE2～CASE8 について、通水1時間の平均流砂量と混合率の関係を流量毎にプロットした結果を図-4 に示す。図から、短繊維の混合率が 0.1% を超えた付近から流砂量は徐々に減少し始め、1.0% を超えると砂粒子の移動が大幅に抑制されることがわかる。また $Q=11.3, 17.0, 22.6(L/s)$ の3パターンの傾向を比較すると、流砂量が減少し始める混合率の値はいずれも 0.1% 前後で、異なる流量条件下であっても同様の傾向が見られた。

ただし、 $Q=22.6$ では混合率が 1.0% を超えると、他の流量条件とは大きく異なる傾向を示している。当該ケースの経過を観察すると、通水中、河床面に大きな剪断力が加わった際、短繊維によって緊縛されていた河床表層 (以下、被覆層) が団塊状に剥離し、短繊維と砂粒子が水中で分離しながら流下していく様子が確認された。これは、混合率が増すと繊維同士が絡まり合った空間構造が形成され、砂粒子を団塊状に緊縛する特性が強くなるためであると考えられる (図-5)。被覆層が部分的に剥離した箇所

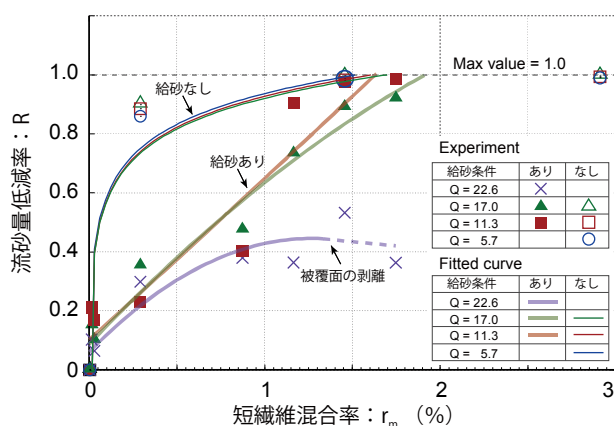


図-6 短繊維混合率 r_m と流砂量低減率 R の関係

は、やがて上流側から供給された短繊維を含まない河床材料へと置き換わるため、結果的に、流砂量が極端に低下することなく高止まりした状態で維持されたものと推察できる。

図-6 は、短繊維なし (CASE1) の流砂量を基準に、各ケースの流砂量計測値を低減率で示したものである。ただし、 $Q=22.6$ は基準となる実験データがないため、解析値で代用した。解析値の妥当性は次章で述べる。 $Q=11.3, 17.0$ (CASE2~CASE8) の給砂ありの条件では、混合率 1.0% で流砂量は約 60% 低下し、1.5% を超えると砂粒子の移動はほぼ無くなる。一方、 $Q=5.7, 11.3, 17.0$ (CASE11~CASE13) の給砂なしの条件では、水路内を移動する砂粒子は被覆層からの流出成分のみで構成されるため、初期河床の表層に含まれた砂粒子がある程度流出すると、河床面は混合率を増した被覆層で覆われる。その結果、混合率が 0.3% でも流砂量が約 90% 低下するなど、給砂ありの条件と比べ、短繊維による流砂量の低減効果はより顕著に現れている。

2. 3 考察 (短繊維混合に伴う流砂量の低減要因)

給砂ありの条件下における流砂量の計測値を見ると、通水開始から概ね 10~20 分で定常に達し、それ以降は混合率に応じた定常状態が維持されていた。流砂量が低下した状態のまま定常に至る理由として、本研究では以下のような推論を立てた。通水中、被覆層に含まれる短繊維の多くは砂粒子が流出した後も河床表層に残されるため、被覆層と流水との境界には、河床面から露出した短繊維の影響が及ぶ薄い層 (以下、混合層) が形成される。砂粒子がこの混合層内を移動する過程では、常に混合率に応じた移動抑制効果を受けるため、流砂量が低下した状態のまま定常に至る。上記は、目視観察から得られた推

論であるが、河床面から露出した状態の短繊維が流砂を捕捉する状況は確認されており、このような推論が成り立つ可能性は十分にある。

以上、実験結果から、河床材料に繊維状の物質が混入すると、その混合率に応じて流砂量が変わることがわかった。また、流砂量の多寡は砂粒子が移動する層の有無や、短繊維による河床面の被覆状況に強く支配されており、これらが混合率に応じて変化することで、流砂量の計測値にも違いが生じたものと推察された。

3. 数値実験

3. 1 解析モデル

実験から得られた上記知見をもとに、流砂量が減少するメカニズムをモデル化し、数値解析を用いて実験結果の再現性を検証する。本研究で行う解析は、北海道河川財団より無償配布されている「iRIC⁵⁾」及びそのソルバー「Nays2d ver4.0⁶⁾」を用いる。解析モデルの詳細はここでは省略するが、詳しくは文献を参照されたい。

本解析では上記モデルを基本に、短繊維混合に伴う流砂量低減機構を以下のようにモデル化する。図-7 左段にモデル化の概念図を示す。まず、流水と接する河床面には、繊維状の物質が混入し砂粒子の移動が抑制された被覆層と、砂粒子のみで構成された移動層の状態があり、さらに、被覆層の鉛直上方には被覆層からの影響を強く受けた混合層が存在するものと仮定する。移動層厚 E が混合層厚 L 以上の場合 (図-7 左段(a))、流水と接する河床面は砂粒子のみで構成された状態にあり、被覆層からの影響は及ばない。 $L > E$ の場合 (図-7 左段(b))、流水と接する河床面には移動層厚に応じた被覆層からの低減効果が間接的に働くものと仮定する。 $E=0$ の場合 (図-7 左段(c))、流水と接する河床面は短繊維によって砂粒子が緊縛された状態にあるため、流砂量の低減効果が直接的に働く。

ただし、ここでいう混合層は被覆層からの低減効果が及ぶ範囲をイメージした概念であり、その影響範囲 (混合層厚) や、被覆層からの影響がどの様に混合層内に及ぶかを実際に知ることは困難である。実験時の状況を観察すると、河床面から露出した短繊維が掃流砂の移動過程に影響を及ぼす範囲は、被覆層の表面から数ミリ程度の厚さであると推察された。このことから、混合層厚 L には粒径の数倍程度 ($d, 2d, 4d$) を与える。

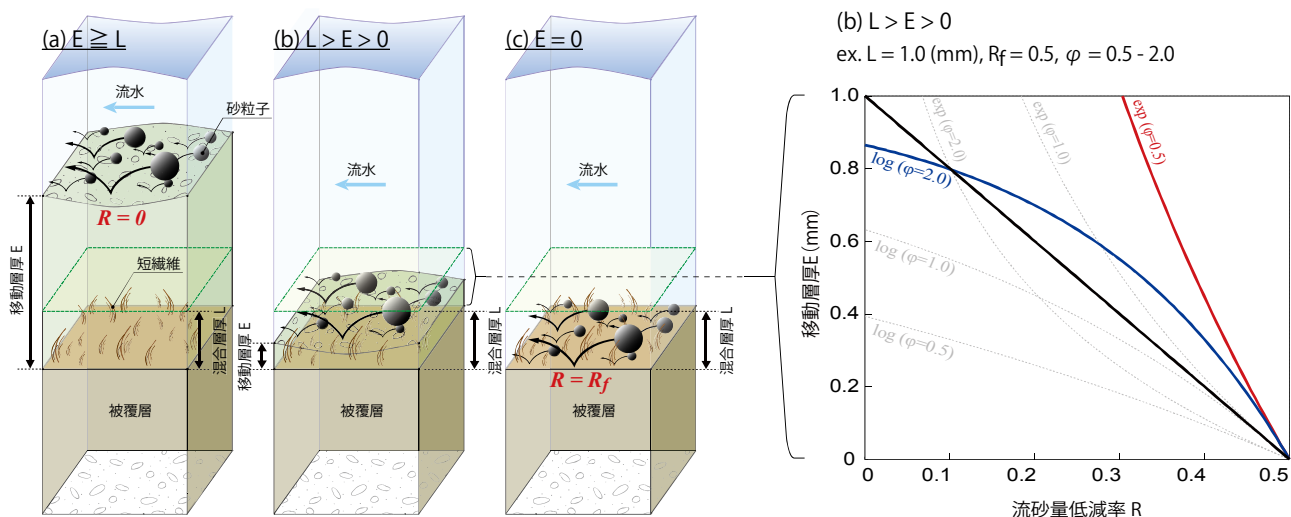


図-7 左図：植生被覆モデルの概念図、右図：混合層内における流砂量低減率の鉛直分布（左図(b)の場合に適用)

混合層内における流砂量の低減効果は、被覆層からの距離に比例して減衰するものと考えられることから、流砂量低減率 R と移動層厚 E の間にまずは単純な線形分布を仮定し、さらに凹形・凸形の変化を想定した指数形・対数形についても併せて検討を行う。混合層内における流砂量低減率の鉛直分布関数を(1)、(2)、(3)式に、解析に用いた鉛直分布曲線の一例を図-7 右段に示す。なお、図はモデル化の概念図との直感的な対応を意図し、縦軸を移動層厚（説明変数）として示している。

$$R = R_f \left(1 - \frac{E}{L}\right) \quad (1)$$

$$R = R_f \exp\left(-\phi \frac{E}{L}\right) \quad (2)$$

$$R = R_f \left[1 + \frac{1}{\phi} \ln\left(1 - \frac{E}{L}\right)\right] \quad (3)$$

ここに、 R ：混合層内の流砂量低減率、 R_f ：被覆層の流砂量低減率、 E ：移動層厚、 L ：混合層厚、 ϕ ：低減係数である。 ϕ は指数・対数関数の曲線の曲がり具合を表す係数であるが、ここでは混合層内における砂粒子の移動抑制効果が、被覆層からの距離に応じてどのように減衰するかを表す。今回 $\phi=0.5$ 、 1.0 、 2.0 の解析結果をそれぞれ比較検証した結果、 $\phi=0.5$ と(2)式、 $\phi=2.0$ と(3)式の組み合わせで高い再現性が得られたことから、次節ではこの両者の解析結果を示す（図-7 右段、赤線及び青線）。

河床変動量の算定は、単一粒径のもと掃流砂のみを対象とし、流砂量式には芦田・道上の式を用いた。短繊維なしの条件下で解析値と計測値の整合性を検証した結果、本解析では両者が最も漸近した下式を採用する。

$$q_b = 9(1 - R)\tau_*^{1.5} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \sqrt{s_g g d^3} \quad (4)$$

ここに、 q_b ：流砂量、 R ：混合層内の流砂量低減率、 τ_* ：無次元掃流力、 τ_{*c} ：無次元限界掃流力（岩垣の式）、 s_g ：砂粒の水中比重、 g ：重力加速度、 d ：河床材料の粒径である。

3.2 実験結果の再現検証

図-8 は、CASE1 を対象に行った解析から流砂量・水深・流速の時系列を求め、これに実験結果を重ね合わせたものである。短繊維なしの条件下では、流量条件に関わらず十分な再現性を有することを確認した。

次に、河床材料に短繊維が混入し砂粒子の移動が抑制された条件下での再現性を検証する。解析では、混合層内における流砂量低減率 R の鉛直分布に(1)～(3)式を仮定し、前節で示した混合層厚 ($L=d, 2d, 4d$) と低減係数 ($\phi=0.5, 2.0$) をそれぞれ与え、被覆層の低減率 R_f を $0.0 \sim 0.9$ まで 0.1 間隔で変化させた際の流砂量の時間変化を求めた。CASE1～CASE8、 $Q=17.0 \text{ L/s}$ の条件を対象に行った解析結果を図-9 に示す。図中、実線は解析値を、各プロットは実験から得られた計測値を示す。なお、実験の通水時間は

8.6 積雪寒冷地河川における河岸耐性及び侵食メカニズムと多自然河岸保護工の機能評価に関する研究

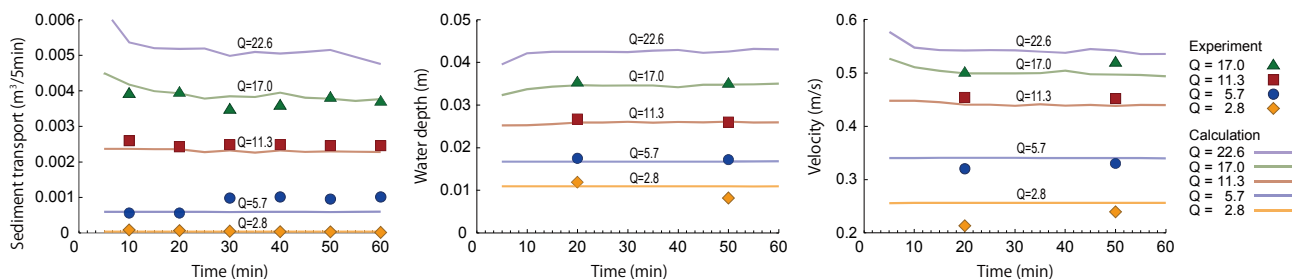


図-8 CASE1の計測値と解析値（左から流砂量・水深・流速）

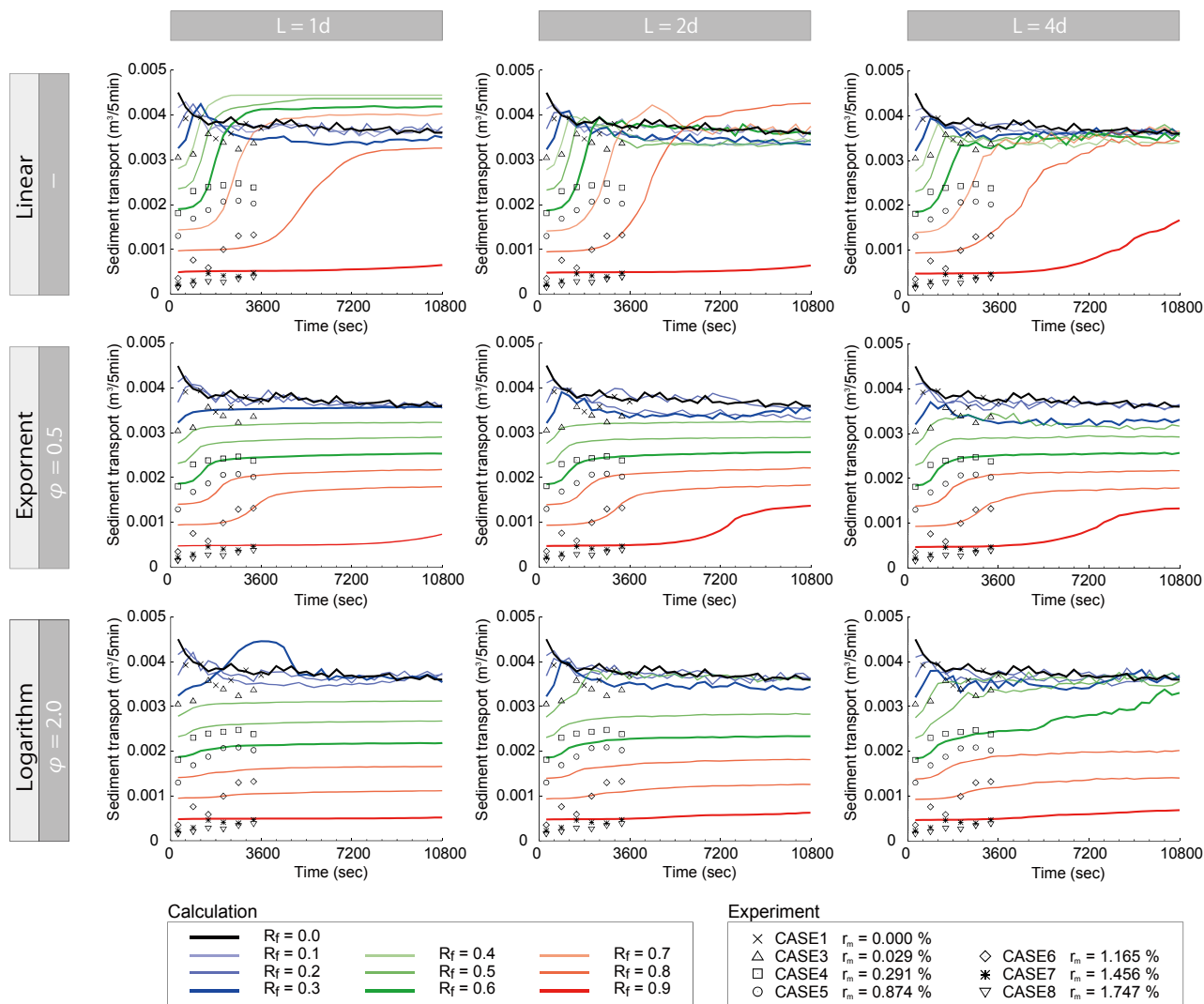


図-9 下流端流砂量の時間変化 (Q=17.0(L/s)、流砂量低減率Rの鉛直分布に線形、指数形、対数形を与えた場合)

1時間であるが、解析では定常状態を確認するため3時間の通水を行った。低減率Rに「線形」を仮定した場合(図-9 上段)、通水初期に流砂量は急激に上昇、その後 $R_f=0.0$ の解析結果へと漸近するとそのまま平衡状態に至る、流砂量が平衡状態に達した際の値(以下、平衡値)や通水初期段階における時間変

化はともに実験結果とは一致しない。

低減率Rに「指数形」を仮定した場合(図-9 中段)、 $\phi=0.5$ の条件下では、混合層厚に関わらず R_f の値に準じた平衡状態が保たれている。また、通水初期段階においては流砂量の時間遅れまでもが良好に再現されており、平衡値も実験結果とほぼ一致する。

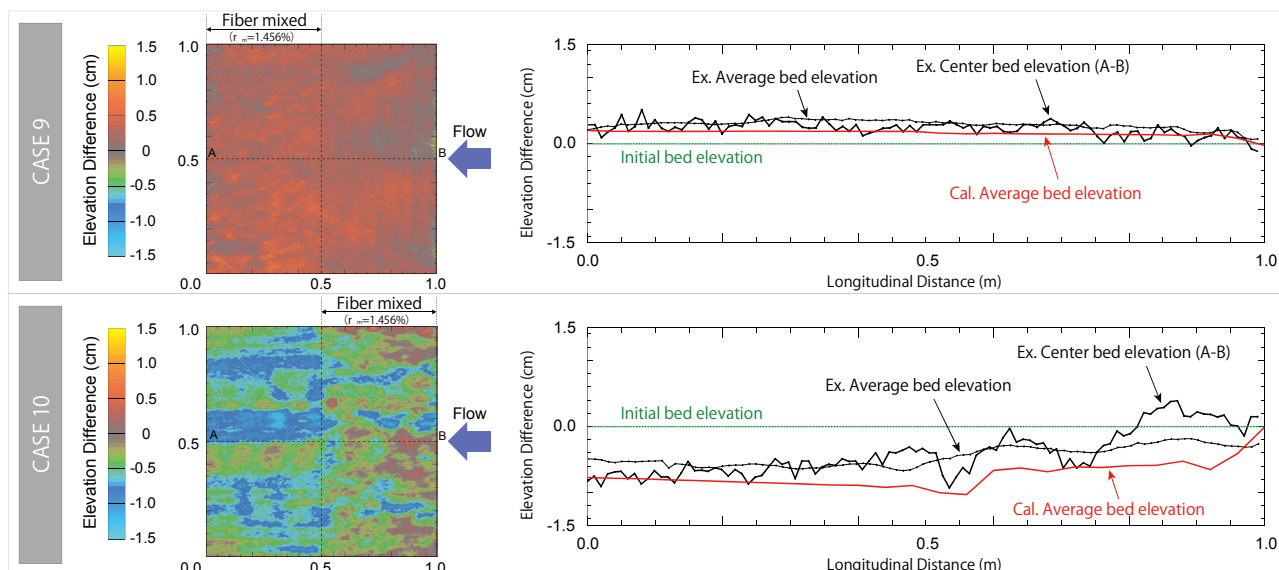


図-10 被覆層の有無が上下流で面的に変化する場合の河床変動特性（上段：CASE9，下段：CASE10）

低減率 R に「対数形」を仮定した場合（図-9 下段）、 $\phi=2.0$ の条件下では、全体的な傾向は「指数形」 $\phi=0.5$ の場合と類似し、概ね R_f の値に準じた平衡状態が保たれている。しかし、通水初期段階における流砂量の時間遅れまでは十分に再現されていない。

3. 3 被覆層の上下流端境界における河床変動特性

次は、上下流に被覆層の有無による面的変化を与えた CASE9・CASE10 の実験について、上記モデルを用いた再現検証を行う。この実験は、実河川においては植生域と非植生域との境界付近に、河床面の被覆状況が異なる 2 つの領域が隣り合った状態で存在していることを念頭に、このような境界付近で生じる土砂収支の非平衡性が、河道形状に及ぼす影響について、その概略を把握する目的で行ったものである。

図-10 上段は実験水路の下流側に短繊維を混合した河床材料を配置し、1 時間通水した後の実測河床高である。コンター図が全体的に赤みを帯びているのは、初期河床高に比べ、実験後の河床高が全体的に上昇したことを示しており、縦断面図に示すように河床高は平均 3~4mm 程度上昇した。これは、上流側から供給された砂粒子が下流側の被覆層を通過する過程で、単繊維による移動抑制効果を受けて停滞するため、解析からも、下流側の河床高の上昇に伴って掃流力が低下し、下流側から上流側へ向かって堆積傾向がもたらされたことがわかった。縦断面図の赤線は河床高の解析結果であるが、再現性は概ね良好であり水路下流側を中心に水路全体が堆積傾向

となることが十分再現されている。

図-10 下段は、先のケースとは逆に、実験水路の上流側に短繊維を混合した河床材料を配置し、1 時間通水した後の実測河床高である。コンター図が全体的に青みを帯びているのは、初期河床高に比べ、実験後の河床高が全体的に低下したことを示している。特に被覆層との境界から下流側が大きく侵食されており、上流側へもその影響が及んだ様子が見とれる。縦断面図からは、境界部分が局所的に洗掘され、全体的には下流側へ向かって侵食の程度が大きくなっている。解析からも、まず境界付近から洗掘がはじまり、やがて下流側の河床高が低下、さらにその影響が徐々に上流側へと及んだことがわかった。縦断面図の赤線で示す河床高の解析結果を見ると、侵食深は実測値に比べやや過大に現れているが、境界付近での局所的な洗掘や全体的な低下傾向は概ね良好に再現されている。

4. 結論

本研究では、河道内の土砂輸送量を支配する要素として、植生の根系由来の抵抗力に着目し、根系を短繊維で模式化した移動床水理模型実験を行った。実験では、珪砂と短繊維の混合率のみを変化させ、河床材料に繊維状の物質が混入した際の流砂量の低減効果を計測した。実験の結果、河床材料に繊維状の物質が混入することで、その混合率に応じて流砂量が変化することがわかった。また、混合層内における被覆層からの低減効果を指数形で仮定すること

で、実験結果を概ね良好に再現できることがわかった。

参考文献

- 1) 関根正人, 鍋島康大: 植生の根系と葉系が降雨による斜面侵食過程に及ぼす影響, 水工論文集, 54, 655-660, 2010.
- 2) 服部敦, 望月達也, 藤田光一: 年2回の草刈りを行っている堤防のり面の耐侵食性の評価, 水工論文集, 41, 367-372, 1997.
- 3) 堀智之, 山口智世, 前田健一: 短繊維補強斜面の流動抑制効果, 地盤工学研究発表会発表講演集, 45(1), 511-512, 2010.
- 4) 堀智之, 山口智世, 前田健一: 粒子回転に着目した短繊維補強土の強度発現メカニズム, 理論応用力学講演会講演論文集, 59, 305-306, 2010.
- 5) 北海道河川財団: iRIC, <http://i-ric.org/ja/>
- 6) 清水康行: 河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について, 水工論文集, 47, 643-648, 2003.

A STUDY ON THE MECHANISM OF BANK EROSION AND THE RESISTANCE CHARACTERISTICS, AND FUNCTIONAL EVALUATION OF RICH-IN-NATURE REVETMENT IN THE RIVER FOR SNOW COVERAGE AND COLD REGION

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : River Engineering Research Team

Author : ITO Akashi

Author : NAGATA Tomonori

Author : KAWAMURA Satomi

Abstract : Throughout Japan, riparian woods have been expanding in recent years, and the river environment now has an appearance that is entirely different from that of decades ago. As causal factors in such channel migration, various possibilities have been proposed. However, with respect to excessive forest growth, the dominant factor has not been fully investigated yet. In this study, we investigated the reduction in sediment transport by the addition of short fibers to silica sand at various mix ratios. The experiment results revealed when a fibrillary material gets mixed with riverbed materials, the sediment transport changes depending on a mixed rate. Based on the experiment results, the relation between a mixed rate and the reduction rate in sediment transport was modeled by an exponential function as the vertical distribution of reduction rates in sediment transport at the surface layer of riverbed. Numerical experiments using two-dimensional analysis of riverbed evolution were conducted, and the analysis results reproduced experiment results very well.

Key words : sediment transport, inhibitory effects, root systems of vegetation, short fiber