

コンクリート三面張り河川における 河川生物の生息場所再生に関する技術検討

Approach the method of habitat restoration for Macroinvertebrates
on Fixed River covered with Concrete

久加朋子¹・藤田正治²・竹林洋史³・三橋弘宗⁴・大澤剛士⁵・石田裕子⁶
Tomoko KYUKA, Masaharu FUJITA, Hiroshi TAKEBAYASHI, Hiromune MITSUHASHI,
Takeshi OSAWA and Yuko ISHIDA

¹学生員 京都大学 工学研究科 (〒612-8236 京都府京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

²正会員 工博 京都大学 防災研究所 (〒612-8236 京都府京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

³正会員 工博 京都大学 防災研究所 (〒612-8236 京都府京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁴兵庫県立人と自然の博物館 自然・環境マネジメント研究部 (〒669-1546 兵庫県三田市弥生が丘6)

⁵独立行政法人 農業環境技術研究所 (〒305-8604 茨城県つくば市観音台3-1-3)

⁶正会員 工博 摂南大学 理工学部生命科学科 (〒572-8505 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

Although there were lots of papers about setting spur dikes, none of them clear the characteristics about sediment transportation and deformation of river bed around spur dikes on the Fixed Bed. In this study, investigation of Ikejiri River, which had been set up spur dikes three years ago, and flume experiments were conducted in order to consider the suitable methods of setting spur dikes in restoration for Macroinvertebrates. The comparison of the experimental results, we could indicate three key points about construction: 1) They aren't attracted sediment transportation well between spur dikes, so it's better to set sediment there artificially 2) The submerged spur dikes should be set up three and more continuously, 3) The only first interval between spur dikes should be narrow.

Key Words: Fixed River, Spur dike, Sand transportation, Macroinvertebrates, Habitat restoration

1. はじめに

都市近郊や農村周辺を流れる中小河川では、治水や利水機能の向上を目的とした河道の三面コンクリート化が行われてきた。しかし、近年、こうした河川にも多様な生物が生息できる良好な河川環境を確保する事業が始まり、兵庫県三田市内を流れる池尻川(図-1)においても地元住民等の要望から、平成20年度よりコンクリート河川に生息するゲンジボタル(*Luciola cruciata*)幼虫の生息場所の再生を目的とした小規模水制群が設置されている¹⁾。これは、上流域からの少ない供給土砂を側壁沿いに捕捉し、治水機能にかかわる河積をできる限り損なわずに河川生物の生息場所を再生させることを期待するものである。

しかし、水制に関する既存報告は多数存在するものの、それらは水理実験にて水制周りの流れ場のみを扱ったもの²⁾他、移動床上の水制周りの洗掘を扱ったもの³⁾他、あるいは実河川の調査報告⁴⁾他が大半で、固定床上に設置された水制による浮遊砂⁵⁾6)、掃流砂の捕捉特性や地形



図-1 池尻川の水制施工箇所

形成過程に関する研究報告はほとんど存在しない。さらに、コンクリート製河床のような固定床上の流砂特性については十分な知見が得られておらず、河床地形や堆積した土砂の粒度の予測は非常に難しい。このため、池尻川の水制は移動床河川に関する設計基準⁷⁾を参考に配置が決められているのが現状である。

そこで、本研究では、固定床河川の側壁沿いに土砂を堆積させ、河川生物の生息場所を回復させることを目的に、実河川調査と水理実験から適する水制の設置方法について検討を行った。実河川調査では池尻川に既設の水制がもつ土砂捕捉機能や底生動物群集の再生効果を調べ、

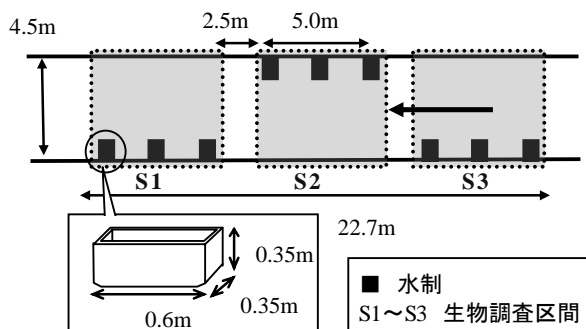


図-2 水制施工状況

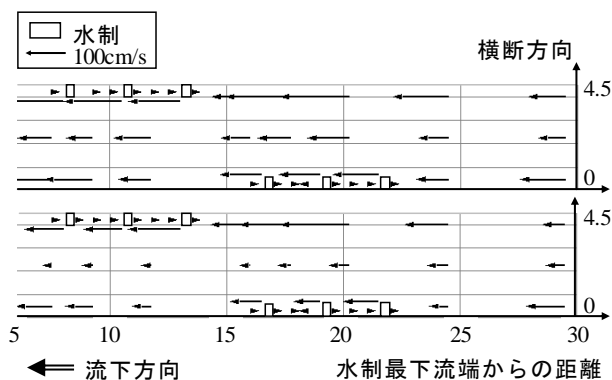


図-3 水制周りの時間平均流速 (2009年4月25日)

(上から順に表層、底層、上流から6基までを示す。)

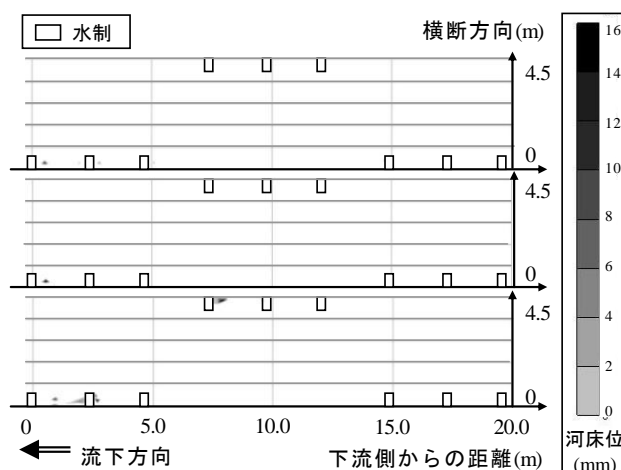


図-4 水制周りの土砂の堆積形状

(上から順に2010年3月28日, 7月16日, 8月22日)

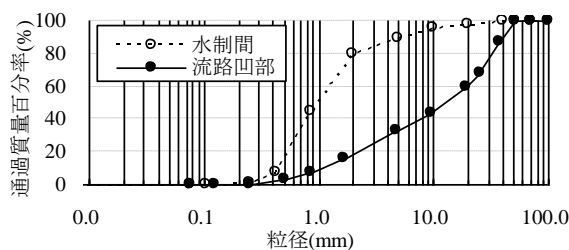


図-5 堆積した土砂の粒径加積曲線

現状での課題を抽出した。次に、水理実験では固定床上の水制による流砂の捕捉特性や地形の浸食特性などを水制間隔/水制長比に着目して調べ、固定床上的水制施工に関する知見を得た。

2. 池尻川に施工した水制周りの現地調査

(1) 池尻川の概要

池尻川は、兵庫県三田市内を流れる全長約2.8km、川幅4.0~4.5mの側岸と河床の3面がコンクリートで覆われた河川である。水制施工前、ゲンジホテル幼虫とその餌となるカワニナの生息は上流区間の一部(河床勾配1/100)のみで確認され、その他の区間に土砂の堆積や植生の繁茂、両種の生息は殆ど確認できなかった。

水制の施工は、2009年3月に図-1に示す中流区間(河床勾配1/50)で実施され、9基が片側3連ずつ交互に配置されている。各水制は、図-2に示すように水制長0.6m、水制幅0.35m、水制高0.35mであり、各々の水制間隔/水制長比(D/L)は3.5である。

(2) 水制周りの時間平均流速

水制周りに形成される流れ場を把握するため、2009年4月25日の増水時(Q=0.101m³/s、断面平均水深0.1m)に主流方向の時間平均流速を電磁流速計(AEM-1D, JFEアレック)にて測定した(図-3)。その結果、全ての水制間で逆流が生じ、その流れは主流域と異なり穏やかで

あった。これは、水制先端から剥離した流れの一部が水制間へと流入し、水制間内に水平渦を形成しているためと考えられる。既存研究によると、この水平渦を安定的に形成するには水制間隔/水制長比2.0~3.0程度^{2) 8)}が適すると報告されている。池尻川の水制間隔/水制長比は3.5と既存報告よりも若干広がったが、十分に安定した水平渦が形成されていたようである。土砂も増水時には輸送されていたと考えられるが、目視による観察であったため、掃流砂の輸送は確認されなかった。その他、水路中心部の底層に流速の遅い箇所が認められたが、これは大型糸状藻類が水路中心に密集して生息していたためである。

(3) 水制周りの土砂の堆積

水制周りの土砂の堆積状況を把握するため、河床高の変動量を測定した(図-4)。2010年3月28日は増水直後、2010年7月16日および2010年8月22日は降雨の少ない夏期にあたる。その結果、いくつかの水制間において平均粒径2.24mm程度の土砂が円形に近い形状で堆積した。これらの土砂と、水制より下流側に位置する凹部(流路中央部にある横断幅1m、縦断幅0.45m、深さ0.3mの孔)に堆積する土砂の粒径を比較したところ、凹部に堆積する土砂は平均粒径16.9mm程度(粒径500mm以上の出現頻度の小さい礫を除く)と大きく(図-5)、現状の水制群は水制周りに比較的小粒径の流砂のみを堆積させ、大粒径の流砂は非平衡性が強く、水路中心部を直線的に流下

表-1 水制施工後の底生動物群集

増水直後 (2010年3月28日)	水制施工			未施工		
	S1	S2	S3	C1	C2	C3
種類数	25	20	24	19	20	20
全個体数(5分間採集)	1,494	1,616	2,570	1,275	568	1,266
カワニナ	10					
シジミ属(稚貝)	2		40			
カワリヌマエビ属	17	18	9	7	1	2
シオカラトンボ	4		5	1		
コエグリトビケラ属	21	18	16	8	1	6
ニンギョウトビケラ	27	8	7	4	1	
ゲンジボタル						
平水時 (2010年7月16日)						
カワニナ	3		4			
シジミ属(成貝)	2		1			
ゲンジボタル						

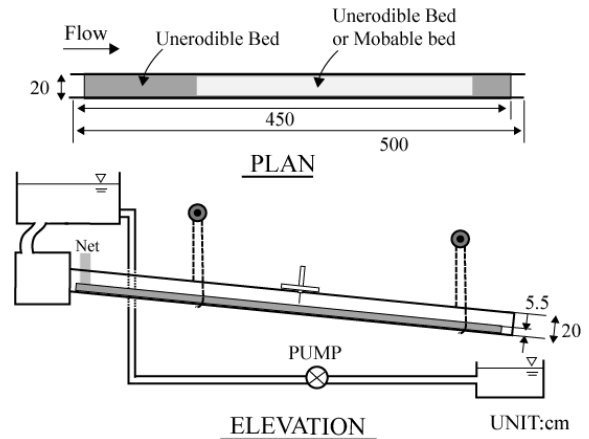


図-6 実験水路の概要

するため、水制間に流入しないようであった。

堆積地形は、調査日ごとに異なる形状を示し、堆積厚も数mm~15mm程度と小規模であった。これは、堆積した土砂が小粒径であるため地形が不安定で流されやすいこと、および上流域から供給される少量の流砂を水制によって適切に捕捉できていない等が理由として考えられる。これらに関しては、本論文の後半で再検討する。

この他、底生動物にとって重要な生息場所のひとつである植生は、堆積した土砂の上に殆ど繁茂しなかった。これは、地形が不安定なことに加え、土砂が植生の根付きやすい側壁沿いに堆積しなかったためと考えられる。

(4) 水制施工前後の底生動物群集の応答

水制によって固定床上に不安定ながらも土砂を堆積させることができた。そこで、水制による生息場所の再生効果について検討するため、詳細調査を2010年3月28日に、ゲンジボタルと貝類のみを対象とした簡易調査を2010年7月16日に行った。調査地点は、水制施工域として図-2に示すS1~S3(各々、片側3連水制を1セットとした縦断方向6m)を、未施工域としてC1~C3(各々、水制施工区間より数m上流に位置する縦断方向6m)を設定した。詳細調査では、調査時間を5分に統一して区間内の生物を採集する半定量調査を行い、兵庫県河川水辺の国勢調査の同定基準に従って目合い0.520mmのフルイの網の上に残る試料のみを分類した。簡易調査では、同じ6地点にて目視で対象種のみを生息を確認した。

各々の調査結果を表-1に示す。水制を施工した区間では底生動物の種類数、個体数ともに増加する傾向が認められ、以前は生息が確認されなかったカワニナも若干数認められた。その他、トンボ幼虫や石礫で巣をつくるトビケラ類などの大型種が増加したことも特徴的であった。露出した基質を特異的に好む底生動物は吸着器官を持つ生物等に限定されるため、これら大型種は、水制間に堆積した土砂を生息場所として利用していると考えられる。つまり、水制によって堆積した地形は、小規模かつ不安定であっても土砂の存在しない固定床河道に比べると生

物の生息場所として機能しているようである。これは、固定床河川が小規模な増水でも河道から土砂が流出する不安定な環境であるために大型底生動物の定着が難しく、水制間ではこの制約条件が多少緩和されたものと考えられる。ただし、ゲンジボタル幼虫が未確認であることを含め、生息場所の再生効果は満足できるものでなかった。

そこで、次に、固定床河川に適した土砂の被覆技術を検討するため、水理実験にて固定床上に設置した水制による掃流砂の捕捉特性と、水制間に形成された地形の浸食特性についてと移動床の場合と比較しながら検討する。

3. 固定床上の水制による掃流砂の捕捉特性

(1) 実験方法

実験水路を図-6に示す。水路は全長5m、幅0.2m、勾配0.003の循環型水路を用い、水路底にベニヤ板を敷いて固定床とした。水制は池尻川に設置したものと同じく不透過型とし、水制長30mm、水制幅15mm、水制高15mmとした。水制は全てのケースで右岸側に3基設置、および池尻川と同じく下流側へと連続水制が続くことを想定して左岸側に1基設置した(図-10参照)。設置位置は、最前列の水制先端を水路上流端から2.2m地点に統一し、給砂投入点を水路上流端より2.0mの地点とした。

実験の水理条件を表-2に、実験条件を表-3に示す。実験は、水制間隔/水制長比による砂礫の捕捉特性の違いを確認するため、水制長を30mmに統一し、水制間隔のみ変化させた。水制は、通水時において、全て越流する高さとなっている。水制間隔/水制長比2.0は、池田²⁾による水制と主流域間の流れ場の質量・運動量交換率が最も高くなる間隔であり、水制間隔/水制長比4.0は池尻川に既設の水制に近い値として与えた。給砂材料はフルイ1.0-0.88mmと0.71-0.5mm間の平均粒径0.95mmと0.53mmの一樣砂とした。どちらも移動床における移動限界掃流力付近の粒径であるが、固定床上では水制の無い領域で留まることなく輸送され、目視による流砂の運

表-2 実験の水利条件

実験条件			
流量(L/s)	1.25	等流水深 H_0 (mm)	20.00
一様砂(mm)	0.95	限界摩擦速度 U_*c	0.014
摩擦速度 U_* (m/s)	0.021	堆積限界掃流砂量(m^3/s)	2.70
一様砂(mm)	0.53	限界摩擦速度 U_*c	0.013
摩擦速度 U_* (m/s)	0.021	堆積限界掃流砂量(m^3/s)	2.01

表-3 実験条件

CASE	水制	水制間隔 (mm)	水制間隔/ 水制比	給砂 dm (mm)	給砂量 (g/min.)	実験 時間(min.)
F-1	片側	60	2.0	0.95	16	5
F-2	3連					
F-3	片側	120	4.0	0.53	20	5
F-4	3連					

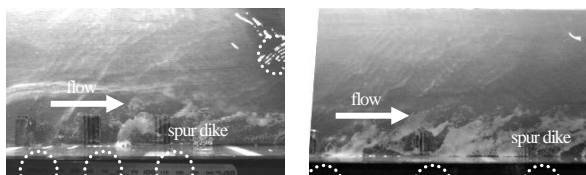


図-7 越流水制における塩化ビニル粉末の水平渦への取込み
(左：水制間隔/水制長比2.0, 右：同比4.0)

動形態は平均粒径0.95mmの砂礫が跳動、0.53mmの砂礫が滑動あるいは転動に近いものであった。実験終了後、河床地形の測定を行い、掃流砂の捕捉効果を確認した。

実験で与えた給砂量は固定床における堆積限界掃流砂量の約1/5倍（平衡流砂量はほぼ0 m^3/s ）とし、以下の芦田・道上式に椿らの研究成果より導かれた固定床上の限界摩擦速度⁹⁾を与えて求めた。

$$q_b = 17 \frac{\rho u_{*c}^3}{((\rho_s - \rho)gd_m)^{3/2}} \left(1 - \frac{u_*}{u_{*c}}\right) \left(1 - \frac{u_*^2}{u_{*c}^2}\right) \cdot \sqrt{(\rho_s - \rho)gd_m^3} \quad (1)$$

ここに、 q_b は流砂量 (m^3/s)、 ρ_s は砂礫の水中比重、 u_* 、 u_{*c} 、 u_{*e} はそれぞれ給砂材料に対する摩擦速度、限界摩擦速度、有効摩擦速度である。有効摩擦速度の算定には、芦田・道上⁹⁾による砂礫の移動限界付近の流れの抵抗則を利用した。

(2) 掃流砂の捕捉特性

固定床上に越流水制を設置し、水制間隔のみを変化させた場合、全ての実験ケースで掃流砂は水制間に捕捉されなかった。これは、最上流に位置する水制先端の水はね効果により、粒径に関係なく、ほぼ全ての掃流砂が対岸側へと輸送されたためである。

そこで、水制間へと流砂を捕捉するために必要な水平渦の形成状況を水よりも比重の軽い塩化ビニル粉末を用いて確認した（図-7）。給砂地点から投入した粉末は越流水制の上を通過し、各々の水制間内で一定時間巡回したあと主流域に取り込まれた。つまり、水平渦は形成されており、浮遊状態で流れる物質ほど水制先端の水はね効果の影響を受けずに水制間へ輸送されやすく、河床近傍を流れる掃流砂は水制間へ輸送されにくい。実際、い

くつかの既存報告によると、実河川の水制後部に堆積する河床材料は砂分とwash load成分が卓越すること¹⁰⁾、移動床上に置かれた水制後部に堆積する掃流砂の大部分が水制前部の洗掘に依存して供給されることなどが指摘されており¹¹⁾、河床上に土砂の殆ど存在しない固定床河川の場合、水制間に掃流砂を捕捉させることは難しいのかもしれない。

しかし、上述の池尻川では、少量ながらも掃流砂形態で輸送されてきたと思われる粒径の土砂を水制間に捕捉できている。これらについては、水制による掃流砂の捕捉が非定常流れや大型糸状藻類による流向の変化などによるものか、水制の配置方法を変えることで解決できる問題であるのか等の検討が必要と思われる。

一方、仮に水制による水制間への掃流砂の捕捉が難しくければ、あらかじめ水制間に土砂を置土してやる手法がある。そこで、次に、水理実験にて水制間への置土を行った場合における地形の浸食特性について検討する。

4. 水制間に置土した場合の地形浸食特性

(1) 実験方法

実験水路は上述の実験と同じものを利用した。移動床実験を行う場合のみ、図-6に示す水路底の一部をはずして珪砂5号（平均粒径0.52mm）を固定床の河床と同じ高さまで敷き詰め、移動床とした。水制は不透過型とし、非越流実験では水制長30mm、水制幅15mm、初期河床からの水制高100mm、越流実験では水制高のみを変化させて初期河床から水制が15mm突出するようにした。

実験条件を表-4に示す。水利条件は上述の実験と同じである（表-2）。実験CaseのFSは固定床実験を、MSは移動床実験を表す。水制間に置土した後の地形の浸食特性を把握するため、CaseFS-1～CaseMS-2では、固定床と移動床上に設置した非越流・越流条件の単一水制周りの水面形および地形の変動特性の比較を行った。CaseFS-3～CaseFS-6では、固定床上に連続越流水制（上述の実験と同じく右岸に3基、左岸に1基、図-10）を設置し、水制間隔の違いによる地形の浸食特性について比較した。

固定床実験における水制後部あるいは水制間への置土には、移動床実験の河床材料と同じく珪砂5号を用い、その置土範囲を水路横断方向30mm、縦断方向1m、堆積厚3mmとした。実験の水利条件は珪砂5号の移動限界掃流力付近であり、移動床実験では水制周りだけが洗掘された。このため、実験中に給砂は実施しなかった。

実験は固定床実験における地形浸食が平衡状態になるまでを行い、移動床実験の時間は固定床実験に準じた。実験中はCaseFS-1～CaseMS-2のみ単一水制周りの水面形の測定を行い、実験終了後に全ての実験にて河床地形の測定を行なった。なお、移動床実験では河床変動によって水面形が時間と共に変化した。このため、実験開始より10

表-4 実験条件

CASE	水制	河床	水制間隔 (mm)	水制間隔/水制比	非越流/越流	実験時間(min.)
FS-1	単一水制	固定床	-	-	非越流	20
FS-2			-	-	越流	20
MS-1	移動床	移動床	-	-	非越流	20
MS-2			-	-	越流	20
FS-3	片側3連	固定床	120	4.0	非越流	20
FS-4			120	4.0	越流	20
FS-5			60	2.0	越流	20
FS-6			240	8.0	越流	30

分程度経過し、水制周りの浸食が十分に進んでから測定を開始している。

(2) 固定床と移動床における水制後部の地形の変動特性

固定床と移動床上に設置した単一水制周りの水面形および河床地形図を、それぞれ図-8、図-9に示す。図-9より、固定床と移動床では水制の非越流・越流条件に対する堆積地形の流下方向への変動特性が異なることが明らかとなった。固定床実験では、越流水制ほど水制後部の置土の浸食および下流への伝播速度が速く、流下方向に長い地形の形成が認められる(図-9a,b)。これは、水制前後の水位差が大きく(図-8)、水制を越流して水制下流域に流れ込む流速が速いため、水制下流域の掃流力が非越流水制よりも大きくなるためと考えられる。一方、移動床実験では、固定床実験と異なり、越流水制ほど水制下流域の堆積地形の流下方向への伝播速度が遅い傾向が認められた(図-9c,d)。これは、越流水制と非越流水制を比べると、越流水制の方が水制前後の水位差が小さいため(図-8)、水制上流部の圧力上昇が小さく、局所洗掘深があまり深くならず、水制下流域に輸送・堆積する土砂量が少なかったためと考えられる。

(3) 連続的に水制を設置した場合の堆積地形の浸食特性

コンクリート製河床は増水時の流水を速やかに下流へ輸送するため施工されてきた構造物であり、防災の観点から、河道へ設置する水制はできる限り水位上昇の少ない越流型が望ましい。そこで、非越流水制を設置する代わりに、越流水制を連続して設置することによって、水制間の地形の浸食を抑制する方法についてCaseFS-3～CaseFS-6の結果を用いて検討する。

水制間隔/水制長比を統一した上で水制を連続配置し、非越流・越流条件のみを変化させたCaseFS-3,CaseFS-4,および越流水制を連続配置して水制間隔/水制長比のみを変化させたCaseFS-4～CaseFS-6の河床地形図を図-10に示す。CaseFS-4では、水制間の土砂の浸食は第1水制(最上流)と第2水制の間のみCaseFS-3より大きく、第2水制以降の水制間ではCaseFS-3との大きな違いは認められなかった(図-10a,b)。越流水制の第2水制より下流域では、第1水制による流速の低下により水制上流域の圧力上昇が小さく、水制前後の水位差が第1水制ほど大

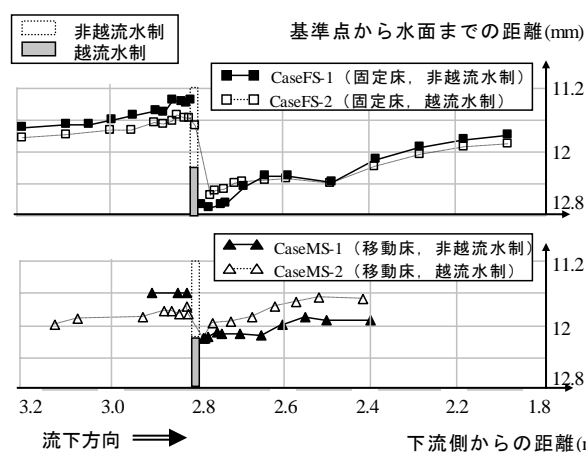


図-8 単一水制周り(水路右岸より2.0cm)の水位の縦断変化(上:固定床実験,下:移動床実験)

きくならない。そのため、越流水による高掃流力域が形成されず、第2水制以降は越流水制と非越流水制で地形の浸食に殆ど差が認められなかったものと考えられる。

このことから、越流水制であっても、連続して水制をいくつも設置することで、非越流水制のように水制間の堆積地形の浸食を効果的に抑制できることが期待される。

次に、CaseFS-4～CaseFS-6では、越流水制を連続的に配置し水制間隔のみを変化させた。水制間隔を長くしたCaseFS-6では、CaseFS-4と同様に、水制間の地形浸食は第1水制と第2水制との間でのみ認められ、第2水制以降の水制間では水制間隔の違いに対する地形の浸食量に殆ど違いが認められなかった(図-10b,c,d)。当然ながら、水制間隔を非常に大きくすると単一水制と同様となるが、本水理条件では、水制間隔は水制長の8.0倍あたりまで広間隔で配置しても、水制間の置土の流出は殆ど生じないようである。一方、水制間隔を短くしたCaseFS-5では、CaseFS-4と異なり、第1水制と第2水制との間の土砂浸食は殆ど生じなかった。これは、水制間隔が短くなり、河床近傍での流速があまり速くならず、越流水によって河床近傍の掃流力が急に上昇しなかったためと考えられる。

このことから、固定床河川に土砂の堆積地形を創出する手法として、固定床上に越流水制を連続的に配置し、水制間に置土を施す方法は、置土が水制の非越流・越流状態に関係なく固定床上に長期間存在し続ける可能性が高いことから、自然状態で上流から供給される流砂を水制間に捕捉することに比べて有効であると考えられる。

5. まとめ

固定床河川の側壁沿いに土砂を堆積させ、河川生物の生息場所を回復させることを目的に、実河川調査と水理実験から適する水制の設置方法について検討を行った。

兵庫県三田市内の池尻川では、コンクリート河床上に水制が設置された結果、水制間に小規模な土砂の堆積が

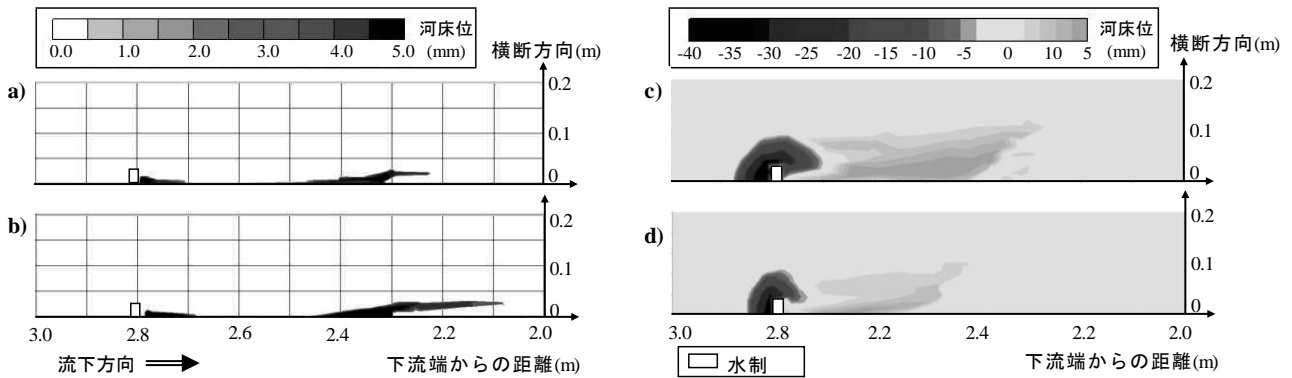


図-9 固定床と移動床実験における水制周りの地形の浸食と堆積 (a : CaseFS-1, b : CaseFS-2, c : CaseMS-1, d : CaseMS-2)

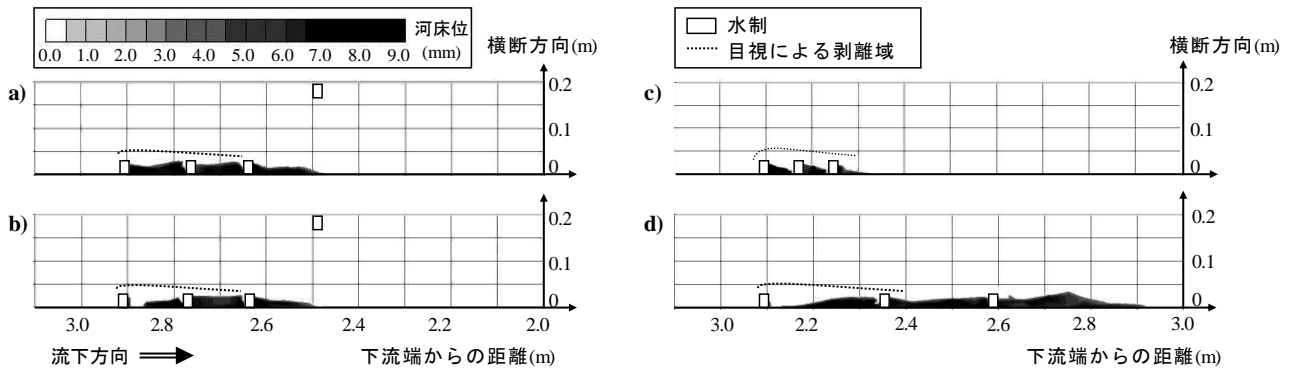


図-10 固定床実験における水制間隔と水制周りの地形の浸食 (a : CaseFS-3, b : CaseFS-4, c : CaseFS-5, d : CaseFS-6)

認められると共に、その堆積地形にてカワニナや大型底生動物などの若干の生息数増加を確認することができた。

しかし、堆積した土砂は増水のたびに地形変化するような不安定な環境であった。そこで、水理実験にて固定床上に効果的に土砂を被覆するための水制の設置方法について検討を行い、以下の3つの知見を得た。

- (1) 固定床上の水制は砂礫の捕捉効果が低く、水制間に土砂の堆積地形を創出するには置土が有効である。
- (2) 固定床上には防災面から越流水制の設置が望ましい。越流水制を単一で設置した場合、非越流水制よりも水制後部の置土の浸食量が大きくなるため、土砂の流出抑制には水制を連続的に配置することが有効である。
- (3) 土砂流出の抑制を目的とした越流水制の水制間隔は、最上流の第1水制と第2水制の間のみ水制間隔/水制長比2.0程度と間隔を狭くとることが望ましい。

謝辞：武庫川上流域ルネッサンス委員会事務局と委員会の皆様には計画から調査まで多大なご協力を頂きました。

参考文献

- 1) 久加朋子・清水洋平・大澤剛士・石田裕子・佐々木宏展・稲本雄太・三橋弘宗：コンクリート河川におけるゲンジボタルとカワニナの生息場所再生の試み—簡易水制の設置方法と効果検証—, 人と自然, No.21, pp.159-165, 2010.
- 2) 池田駿介・杉本高・吉池智明：不透水水制を有する流れの水理特性に関する研究, 土木学会論文集, No.656/II-52, pp.145-

155, 2000.

- 3) 福岡捷二・西村達也・岡信昌利・川口広司：越流水水制周辺の流れと河床変動, 水工学論文集, No.42, pp.997-1002, 1998.
- 4) 武藤裕則・北村耕一・馬場康之・中川一：ADCPを用いた水制域における流速分布計測, 水工学論文集, No.49, pp.637-642, 2005.
- 5) 谷祖鵬・赤堀良介・池田駿介：水制周辺における流れの瞬間構造と浮遊砂輸送の関係に関する研究, 混相流, No.23, pp.615-626, 2010.
- 6) 木村一郎・細田尚・村本嘉雄：止水域の浮遊砂堆積過程に関する水理パラメータ依存特性, 水工学論文集, No.42, pp.1057-1062, 1998.
- 7) 建設省九州地方建設局河川部：一多自然型川づくりのための—低水水制の設計参考資料(二次案), 建設省, 1997.
- 8) 富永晃宏・井嶋康二：越流水水制周辺の流れ構造に及ぼす水制間隔の効果, 水工学論文集, No.46, pp.475-480-1002, 2000
- 9) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文集報告集, No.206, pp.59-69, 1972.
- 10) 崇田徳彦・清水康行・板倉忠興：出水前後における水制近傍の河床材料調査について, 土木学会北海道支部論文報告集, No.52(B), pp.158-163, 1996.
- 11) 水谷英朗・中川一・川池健司・馬場康之・張浩：混合砂河床における水制周辺の局所洗掘及び粒度変化に関する研究, 水工学論文集, No.54, pp.808-808, 2010.

(2011.5.19受付)