

設置角度の異なる単独水制周辺の粒度分布変化に関する研究

Study on Sediment Sorting around Single Spur-dike with Different Orientations

水谷英朗・中川一・川池健司・張浩・Quentine LEJEUNE⁽¹⁾

Hideaki MIZUTANI, Hajime NAKAGAWA,
Kenji KAWAIKE, Hao ZHANG and Quentine LEJEUNE⁽¹⁾

(1) フランス・ストラスブール大学大学院

(1) National School of Water and Environmental Engineering of Strasbourg, France

Synopsis

This paper presents an experimental study on the impacts of orientation of a spur-dike on the bed topography and sediment sorting process of bed surface around a single impermeable spur-dike. The importance of one governing parameters, the orientation of the spur-dike, was emphasized through quantitative and qualitative evidences. It was found that each case of the spatial progress patterns of scour-deposition and sediment sorting were different in comparison with different types of orientations. Compared with the deflecting and attracting types of spur-dike, the repelling type has the property of promoting deposition in the wake region of the spur-dike. This property is caused by the difference of flow structure in the vicinity of spur-dike. The coarsened longitudinal region and fine sediment regions were observed, and it was indicated that the repelling type of spur-dike has the strongest intensity of sediment sorting of the three orientations of spur-dikes under same approach flow condition.

キーワード: 水制, 設置角度, 局所洗掘, 堆積, 粒度変化, 混合砂

Keywords: spur-dike, orientation, scouring, deposition, sediment sorting, mixture sediment

1. はじめに

水制は代表的な河川構造物で, 一般的には河岸から様々な角度で張り出した形状となっている。川の水を部分的に遮断することによって流れの方向を変え, 複雑な3次元乱流を生み出す構造物である。水制の基本的な機能としては, 「流速を低下させる」, 「水流の方向を変化させる(水刎ね)」の二つである。そして, この二つの機能から得られる様々な効果から, 古くから世界各国で河岸処理技術として用いられてきた。河岸侵食対策や航路維持, さらに近年では河川環境向上等の目的で水制工を設置してい

る。

これまで水工学分野において, 水制を代表とする河川構造物周辺の流れ構造, 河床洗掘機構の解明および洗掘深予測についての実験的研究が世界各国で盛んに行われてきた。代表的な研究としては, 設計時に役に立つ最大洗掘深予測式を提案したMelville(例えば, 1992)の研究, 水制周辺の複雑な流れ構造の理解に努めた研究はたくさんあるが, 例えばZhangら(2009)やDuan(2009)の研究, T型・L型や透過不透過混合型等の複雑な形状を有する水制の研究(Vaghefi et al., 2009; 鈴木ら, 2010; 小倉ら, 2012), 実河川を用いた清水ら(2004)や福留ら(2010)ら

の研究などがある。

これまでの精力的な研究により、水制設置により周辺河床がどれだけ洗掘するか、洗掘もしくは堆積する場所、水制設置による流れの変化、水制の設計条件（長さ、高さ、形状、設置角度等）が洗掘や堆積に与える影響については、多くのことが解明されてきた。ただし、これまでの水制周辺の局所洗掘に着目した移動床の実験的研究は、労力面の考慮や現象を単純化できることから粒径の様な均一砂河床を用いた実験が多く、混合砂を用いた移動床実験の研究事例はそれほど多くなく、水制周辺の粒度変化については未解明な部分が多く残されている。1990年代以降からは、数値シミュレーションによる研究も盛んに行なわれているが、水制周辺においては流れも複雑で局所的な変化が大きく、数値モデルのみの結果により水制周辺の粒度分布変化の現象が議論できるまで、数値モデル技術の信頼性が保証されている状況には未だない。

河床材料の粒度分布は河川を構成する重要な要素であり、流れに対する河床の安定性だけでなく、植生や魚など水生動植物の生息域、魚の産卵床などに対しても重要な要素である。社会要望の変化に応じて生態系などの環境を意識した高度な水制工の施工と計画が現場では求められている中、先述した背景より、混合砂河床における水制周辺の粒度変化に着目したさらなる実験的研究を実施し、混合砂河床上で起こる流砂現象の理解に努めることは非常に重要である。

著者らは、これまで直角型の単独水制に対して均一砂と混合砂河床を用いた移動床実験と流れ場の計測を地道に行い、非越流型および越流型水制がもたらす河床表層の粒度変化と3次元な流れ構造の解明に取り組んできた(Zhang et al., 2010, 水谷ら(2010,2011,2012), Mizutani et al, 2011, 2012)。本稿は、それらの研究の次のステップとして、水制工の設置角度が河床地形および周辺の粒度変化にもたらす影響について調べるために実施した混合砂移動床実験の結果について考察を行ったものである。

2. 設置角度の異なる単独水制周辺の移動床実験

2.1 実験水路と実験方法

実験には、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの幅0.4m、長さ8m、路床勾配 $i=1/1000$ の長方形直線開水路を用いた。Fig. 1にはその実験水路の模式図を示しており、図のように上流側の整流部を経て4mの位置に長さ1.7mのサンドピットを設けた水路を用いた。また、移動床開始地点（サンドピット上流端）から下流50cmの右岸側にFig. 2に示すように通水幅10cmを塞ぐように、幅1cmの不透過水制を側壁に設置し、角度は上流向き、直角、下流向きになるよう3種類に対して実験を実施した。

実験の手順は、まず下流端のゲートを閉じ、実験開始前に河床の砂粒が動かぬように水を塞ぎ止めながら水路内をゆっくりと水で満たし、そして水深が設定条件に到達した後、塞ぎ止めたゲートとポンプのバルブを開け設定流量を通水し実験を開始している。通水中には、実験水路上空から一眼レフカメラ(Nikon D5000)によりインターバル撮影を行い、河床や粒度分布の時間変化を撮影し、また通水終了時直前の準平衡河床状態においては、上空に設置したビデオカメラにより表層流れ場を撮影し、その動画をPIV法により表層流れ場の解析を実施している。その後、ポンプを停止して通水終了後、実験水路と移動床範囲に溜まった水を排水し、水路上部で縦断方向に移動可能な台車に設置されたレーザー変位計(KEYENCE社製LK-2000)を用いて最終河床形状の計測を行った。また、河床表層の粒度分布については、後に示す水制周辺の複数地点において、薬さじを用いて実験で用いた混合砂材料の最大粒径2.8mmの厚さ目安に表層の河床材料を慎重に採取し、粒度分析を行った。そして、相対的に目立って粗粒化および細粒化する領域については、その座標値を記録し、その領域内の代表地点についても粒度分析を行っている。

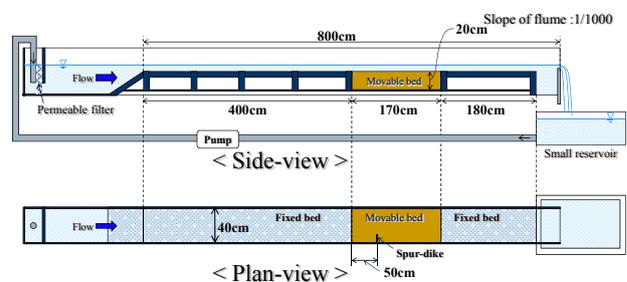


Fig. 1 Sketch of the experimental flume

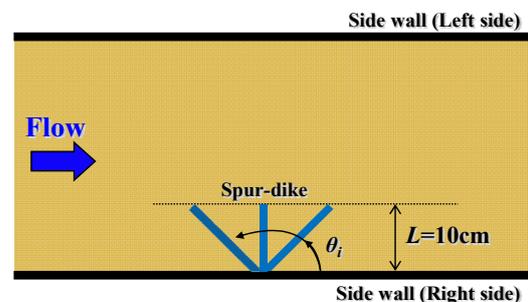


Fig. 2 Sketch of orientation of spur-dike

2.2 実験条件

本実験の接近流れの水力条件をTable 1に示す．本実験では，水制上流側から与える水力条件を全ケース同じとし，河床材料条件や水制設置角度や高さを実験ケース毎に変更することによって，主には水制設置角度の違いがもたらす水制周辺の地形変化，そして河床表層の粒度分布変化に与える影響を明らかにしている．

実験に使用した砂は，珪砂4号の平均粒径(D_{m0})が1.03mmの均一砂河床，そして混合砂ケースについては視覚的に河床表層の粒度分布の違いが確認できるようにカラーサンドを用いている．カラーサンドには粒径の小さい区分から赤(0.125mm $d < 0.50$ mm)・青(Blue:0.50mm $d < 1.40$ mm)・黒(Black:1.40mm $d < 2.36$ mm)とし，三色を水路外で斑がなくなるまで良く混合させてからサンドピット内に敷き詰めている．Fig. 2に均一砂とカラーサンド混合砂の粒度分布を示しており，カラーサンド混合砂の平均粒径についても，実験結果比較のために均一砂と同等になるよう設定している．Table 1の水力条件では，活発な土砂移動は水制周辺のみに限られる静的洗掘(clear-water scour)の状態にあるため，今回の実験についても上流からの土砂供給は行っていない．全ケースの通水時間は，本条件でほぼ平衡河床に近い河床形状が形成されることがこれまでの実験より確認できている3時間とした．

Table 1 Hydraulic conditions

Flow discharge Q (l/s)	5.7
Channel slope I	1/1000
Channel width B (cm)	40.0
Flow depth h (cm)	5.0
Flow velocity U (cm/s)	28.5
Friction velocity U_* (cm/s)	1.98
Reynolds number Re	14,250
Froude number Fr	0.41

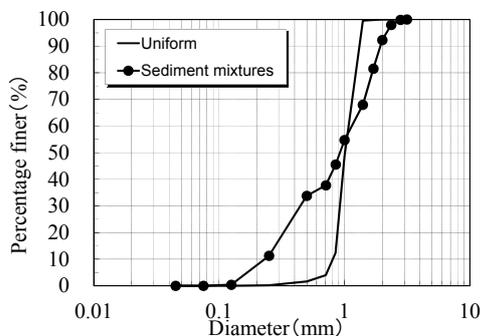


Fig. 3 Grain size distributions of sediment particles at initial bed

実験ケースは，Table 2に示す非越流型水制6ケース(Case1-Case6)，越流型水制6ケース(Case7-Case12)の計12ケースである．各越流条件に対して，均一砂・混合砂，そしてFig. 2に示すように水制設置角度3方向(直角:Deflecting, 上流向き:Repelling, 下流向き:Attracting)に対して実験を実施している．

Table 2 Experimental conditions for all cases

No.	Case name	S_b/h	D_{m0} (mm)	σ_g	U_*/U_{*c}	θ_i (deg.)
1	U-NS-D	>1.0	1.03	1.14	0.83	90
2	U-NS-R					135
3	U-NS-A					45
4	M-NS-D		1.01	2.55	0.84	90
5	M-NS-R					135
6	M-NS-A					45
7	U-S-D	0.5	1.03	1.14	0.83	90
8	U-S-R					135
9	U-S-A					45
10	M-S-D	1.01	2.55	0.84	0.84	90
11	M-S-R					135
12	M-S-A					45

3. 実験結果とその考察

まず最初に，非越流型水制実験の通水3時間後のほぼ平衡河床に違い最終河床形状をFig. 4に示す．Table 3はFig. 6に示す洗掘孔の大きさを示すパラメータを整理している．Fig. 4からも容易に確認できるように，水制設置角度の違いは水制周辺の局所洗掘および堆積特性にも影響をもたらしていることが確認できる．均一砂および混合砂の違いは洗掘深，洗掘孔の大きさや堆積の程度に影響を及ぼすことが分かっているが，本実験の結果より設置角度の違いによりその河床地形の空間的特性にまで違いを生じさせていることが確認できる．そして越流型水制の場合も例外ではないことが分かる(Fig. 5)．このように，水制の設置角度は周辺河床の空間形状を決める重要な要素であり，これらはその水制設置角度の違いがもたらす3次元流れの特性が，異なる河床形状をもたらしていることは容易に推測できる．

本章では，以降の節において設置角度の異なる水制がもたらす局所洗掘特性および堆積特性，3次元流れ，そして最後に粒度分布変化特性について順に考察する．

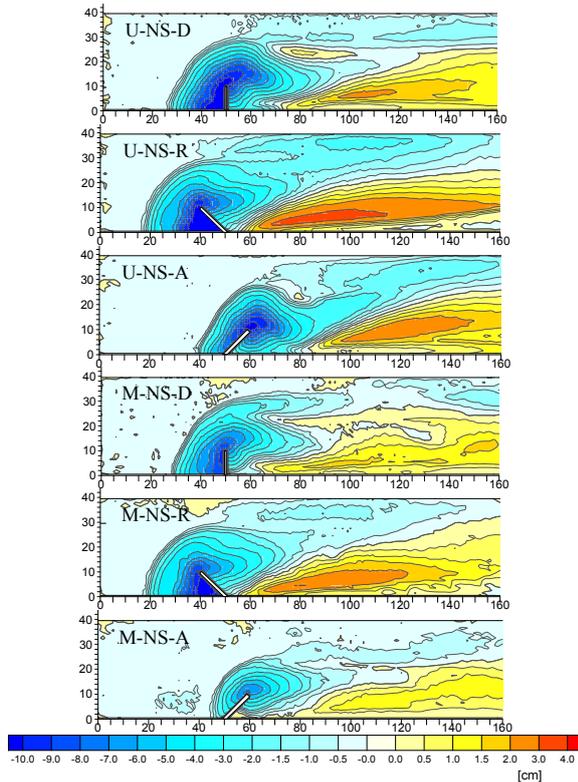


Fig. 4 Bed contour at the quasi-equilibrium stage for different orientations with uniform/non-uniform sediment bed under non-submerged conditions (Cases 1-6)

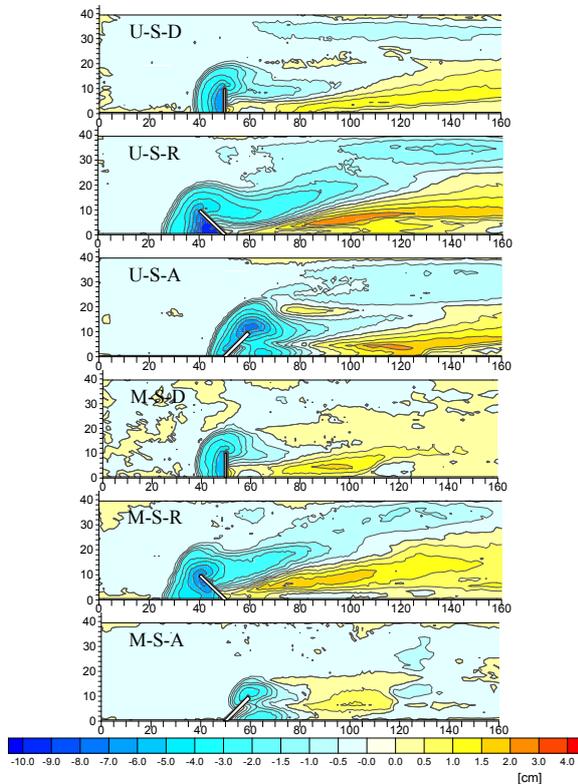


Fig. 5 Bed contour at the quasi-equilibrium stage for different orientations with uniform/non-uniform sediment bed under submerged conditions (Cases 7-12)

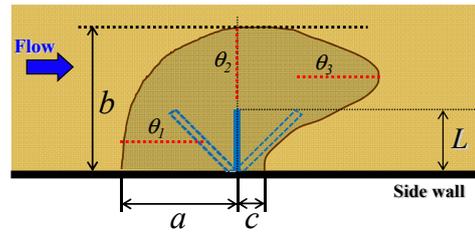


Fig. 6 Sketch of scour hole dimension parameters

Table 3 Bed topography features in current experiments.

No.	1	2	3	4	5	6
Case Name	U-NS-D	U-NS-R	U-NS-A	M-NS-D	M-NS-R	M-NS-A
e_m (cm)	11.7	12.3	10.8	9.3	10.8	7.2
e_m^*	1.65	1.74	1.53	1.32	1.53	1.02
V_s (cm ³)	5481	6422	4960	3662	4993	1699
V_d (cm ³)	1788	2947	1792	1847	2550	1236
a/L	2.3	3.2	1.1	2.1	3.2	0.4
b/L	2.8	2.8	2.7	2.9	2.8	2.3
c/L	2.0	0.5	3.1	1.0	0.4	0.0
θ_1 (deg.)	27.4	32.1	30.2	22.8	26.2	26.9
θ_2 (deg.)	31.0	26.4	30.6	23.6	24.0	28.2
θ_3 (deg.)	14.0	13.7	17.0	12.7	12.8	13.0

No.	7	8	9	10	11	12
Case Name	U-S-D	U-S-R	U-S-A	M-S-D	M-S-R	M-S-A
e_m (cm)	6.8	10.1	7.4	5.9	7.3	3.9
e_m^*	0.96	1.43	1.05	0.83	1.03	0.55
V_s (cm ³)	1284	2682	1896	918	1979	486
V_d (cm ³)	1147	1600	1154	1175	1757	600
a/L	1.2	2.4	0.7	1.1	2.4	0.0
b/L	2.0	2.0	2.2	2.1	2.2	1.7
c/L	0.0	0.0	3.3	0.0	0.0	2.9
θ_1 (deg.)	29.2	26.1	33.0	25.7	21.7	0.8
θ_2 (deg.)	25.0	25.8	31.4	22.8	26.7	27.8
θ_3 (deg.)	7.4	4.2	9.3	6.3	8.6	10.9

* e_m : maximum scour depth.

V_s : Scour hole volume, V_d : Deposition volume.

3.1 局所洗掘と堆積

水制周辺の局所洗掘は、実験開始直後に水制先端から始まり初期の洗掘孔を形成し、最初の5分間程度はその変化が著しい。そして、水制頭部付近の洗掘孔は水制前面の下降流に誘発された馬蹄形渦によって水制上流側において洗掘孔が発達する。本実験の通水3時間は、準平衡河床となるには十分な時間で、この段階では砂粒の移動はわずかで河床の変化は無視できる程度となっている。Fig. 4とFig. 5より水

制設置による河床変化の大きな特徴である水制頭部と前面域の洗掘と水制域下流側の堆積域が確認できる。その洗掘孔の形状や堆積の程度は水制の設置角度によって異なっており、その傾向について本実験結果を用いて整理する。

これまで、いくつかの既往研究において水制設置角度が局所洗掘に与える影響が議論されている（例えば、Elawady et al. 2001a,b; Ezzeldin et al. 2007）。しかし、まだまだ断面的な知識が蓄積されているような状況で総括的に整理されておらず、また十分に理解されていない現象も多く、先述したように水制設置角度の違いがもたらす粒度変化特性についてはほとんど未解明である。本研究では、水制模型により移動床実験の結果を利用して、水制設置角度の違いがもたらす粒度変化特性を明らかにし、流れ場の計測と数値シミュレーションも合わせて実施し、水制設置角度の違いがもたらす粒度分布変化と3次元流れの特性について考察を行う。

まず、Fig. 4, Fig. 5から確認できるように、異なる水制設置角度によって得られた最終河床形状には大きな違いがあることが確認できる。例えば、直角型水制では水制前面域と水制頭部近傍の洗掘が大きく、上流向き水制では水制前面域、特に河岸近傍で洗掘が顕著で最大洗掘深が他ケースに比べて最も大きくなっている、そして、下流向き水制は河岸側の洗掘深が大きく軽減していることが特徴で容易に図から確認できる。

Melville(1992)は、河道内の橋台や水制等の設計計画のための周辺河床の最大洗掘深予測式を提案しており、その式において水制設置角度の影響をパラメータ K により反映させている。その予測式内においては、直角型水制を基準とし、水制設置角度によって最大洗掘深が軽減もしくは増大しており、上流向きでは1割近く最大洗掘深が大きくなり下流向きでは1~2割程度最大洗掘深が軽減したパラメータが設定されており、本研究の実験結果も同様な最大洗掘深と設置角度の関係性が得られている(Table. 3)。

また、混合砂河床上の洗掘を考える場合は、さらにもう一つ重要なパラメータを考える必要がある。水谷ら(2011)は、粒度分布の幾何標準偏差 σ_g と最大洗掘深に関する重要な関係性を示した。Fig. 7は非越流型単独水制に関する最大洗掘深と幾何標準偏差 σ_g の関係性を示したもので、水制設置角度の異なる本研究の成果も合わせて表示したものである。図から確認できるように、直角型水制の場合(NS-D: Non-Submerged Deflecting cases)においては、線形に近い関係性が得られている。設置角度の異なる本研究の実験ケースの数は多くないため明瞭な違いや関係性を示すことは難しいが、上流向き水制(NS-R:

Non-Submerged Repelling cases)では最大洗掘深の σ_g の増加による軽減の程度が緩やかになっており、下流向き水制(NS-A: Non-Submerged Attracting cases)では反対に、 σ_g の増加による最大洗掘深軽減の程度が直角型水制に比べて大きくなっている傾向が本実験の条件内で確認できる。これらの違いは、 σ_g との関係性であるため、水制設置角度の違いにより分級(粗粒化)の進行速度が異なってくることを意味していると考えられるが、本実験結果のみでは、水制設置角度と粗粒化の進行速度に関する明確な関係性が残念ながら議論できていないため、この点についてはさらなる実験と分析が必要である。

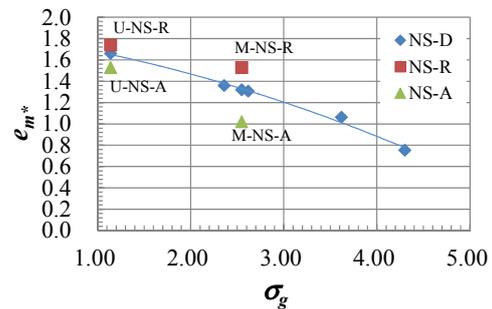


Fig. 7 Relationship between maximum scour depth and geometric standard deviation

次に、洗掘孔の空間的な形状の違いをもう少し分かりやすくするために、洗掘孔体積をFig. 8に示すように、水制設置位置より上流側と下流側、そして、水制域($y=0\text{cm} \sim y=L\text{cm}$)と主流路域($y=L\text{cm} \sim y=B\text{cm}$)の4領域に分けてレーダーチャートとしてFig. 9に示した。主流路域については、水制先端位置を基準に分割している。

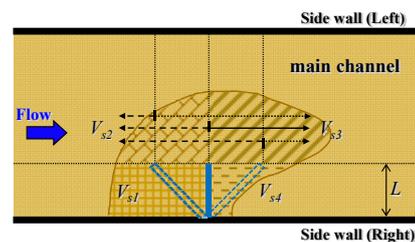
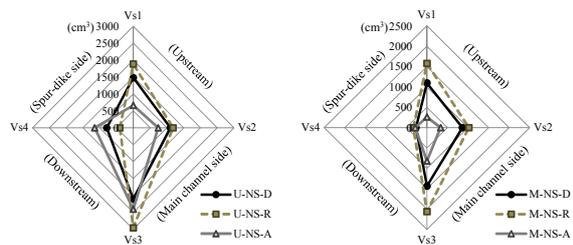


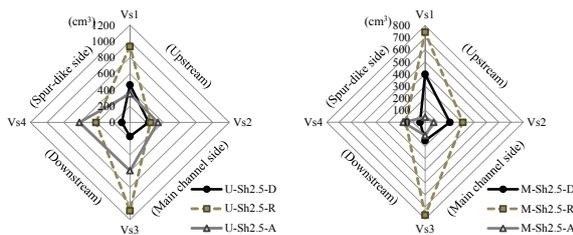
Fig. 8 Sketch of division of scour hole volume

3つの設置角度内において、上流向き水制ケースが最も最大洗掘深が大きいため、全体の堆積量が最も大きくなる自然な結果であるが、上流向き水制ケースは特に水制設置位置下流側の主流路 (V_{s3})と水制域上流側の洗掘 (V_{s1})が他ケースに比べて顕著で、水制域下流側 (V_{s4})は全体的に洗掘量が小さい傾向があることが分かる。下流向き水制ケースにおいて

は、他ケースとは異なり4領域内で相対的に水制設置位置より下流域の洗掘量が大きくなる傾向もFig. 9から確認できる。そして、越流状態の水制条件では水制上部においてそのまま流れが通過し、非越流状態に比べ水制頭部近傍での流れの集中度合が減少するため、全ケース洗掘量・最大洗掘深が減少している(Mizutani et al., 2011)。そして、越流状態の上流向き水制ケースも非越流状態と同様に主流路の水制下流側において洗掘が他ケースより卓越する結果となっている。Fig. 5からも確認できるように、洗掘孔が水制下流側において主流路側へと伸びていることが特徴的である。



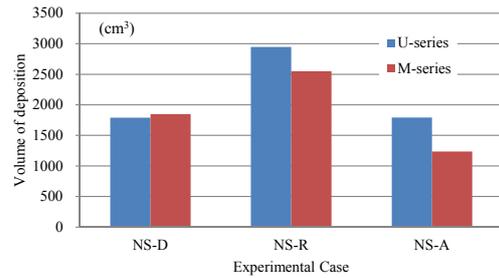
(a) Non-submerged condition



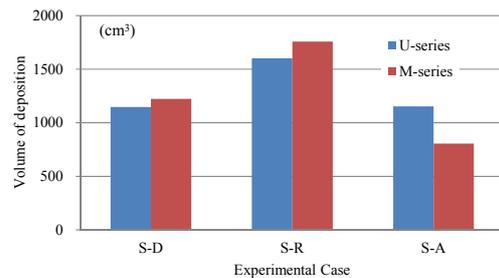
(b) Submerged condition.

Fig. 9 Division of the scour volume (uniform sediment, left; mixture sediment, right)

次に各設置角度の水制背後の堆積特性について着目する。Fig. 10は最終河床における水制背後の総堆積量を非越流、越流に分け、各設置角度対して比較したものである。図より上流向き水制ケースが越流状態に関係なく水制背後に最も堆積を促す特性を有していることが確認できる。この特性は側岸侵食に対して有効であるが、上流向き水制は3つの設置角度の中で水制上流側の側岸で最も大きな侵食特性があることを忘れてはいけない。上流向き水制を設計する場合は、上流側の側岸に対して何らかの対策を講じた上で下流側に土砂堆積を促すことを考えなければならない。そして、上流向き水制では水制背後域で土砂堆積によって河積減少による主流路域における洗掘促進がFig. 4(U-S-R, M-S-R)とFig. 9の本実験結果からも確認できる。



(a) Non-submerged condition.



(b) Submerged condition.

Fig. 10 Total volume of deposition for different orientations.

3.2 3次元流れ

水制の設定角度の違いが、周辺の3次元的な流れ場において影響を及ぼし、河床近傍の流れ場において違いを有していることは、これまで示した河床変化結果の違いから容易に推察できる。ここでは、表層の流れ場については、実験で撮影した動画とPIV解析から得られた表層流れ場を示し、水面下の流れ場については、実験より得られた河床地形と我々の研究グループがこれまで開発を進めている非構造格子系の3次元流れのRANSモデル(Zhang et al. 2009, Mizutani et al. 2012)を用いて数値シミュレーションを行ったので、その結果を合わせて考察を行った。

Fig. 11にはPIV解析から得られた3つの水制設置角度の表層流れ場の時間平均場を示し、Fig. 12からFig. 15には数値シミュレーションモデルより得られた3次元流れの解析結果を示している。

表層の流れ場では、扇形の放射状流れが非越流状態のどの設置角度ケースの水制背後にも現れており、水制背後において湧昇域があることが分かる。また、河床から0.5cmの高さにおける底面流速場(Fig. 12)では、水制設置位置を通過した下流側では、水制先端近傍を中心にして流れが横断方向に分離していることが確認できる。この流れの分離によって生じる水制背後へ向かう流れは、水制近傍で河床から離脱した砂粒を水制背後域へと輸送し堆積を促すもの

である．そして，水制背後へと向かう底面流れは，水制背後の側壁にぶつかり上向き流れになり，その位置は水制背後の湧昇域と一致することがFig. 11とFig. 12を見比べると分かる．このように水制背後へと向かう底面流れが湧昇流域を齎していることが確認でき，それは湧昇流の中心位置は設置角度によって異なるが設置角度に関係なく存在することが分かる．

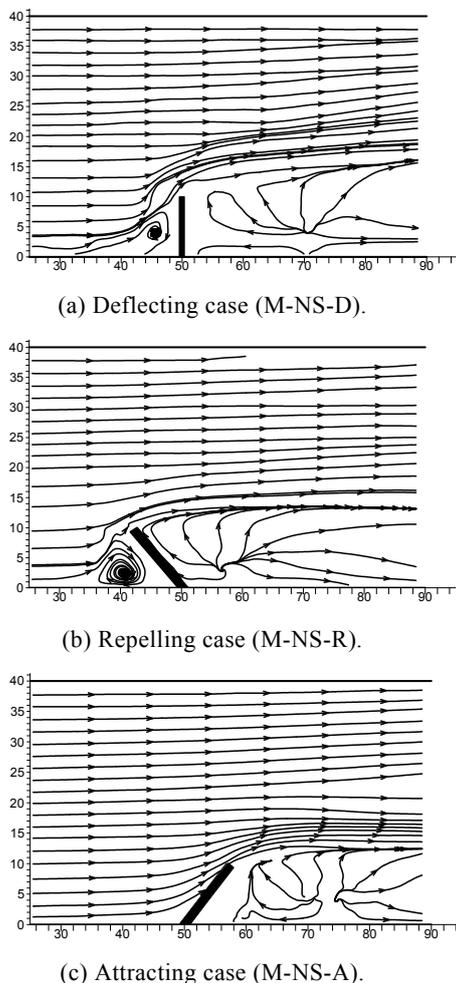


Fig. 11 Streamline of flow field at the water surface in the case of non-submerged conditions (Cases 4-6)

次に，十分に発達した洗掘孔内の河床近傍流れにおいて，洗掘孔縁の内側に低流速域が形成されていることがFig. 12より確認できる．それは上流から来る流れと水制の存在によって上向きや洗掘孔縁へと向かう流れの収束域であることが分かる．そして，その収束した流れは，極端に向きを変えながら洗掘孔縁に沿って下流へ向かう流れとなる．上向き水制ケースにおいては，その底面近傍の収束域の幅が他ケースに比べて広い傾向を有しており，また，水制先端から少し離れた下流側($x=50\text{cm}$, $y=16\text{cm}$ 近

傍)において，他ケースには見られない特徴的な底面近傍の低流速領域が確認できる(Fig. 12(b))．Fig. 13には水制設置横断面(水制先端から下流へ5cmの位置)の流速ベクトル図を示している．Fig. 13(b)よりその底面近傍の低流速域(上流向き水制)は，水制上流側から形成されている馬蹄形渦の一部であることが確認でき，その馬蹄形渦自体の流速は直角型水制に比べて小さいことが特徴的である．今回の数値シミュレーション結果の比較より，異なる設置角度の水制先端近傍の流れ構造には大きな違いがあることが明らかになった．Fig. 13には水制設置横断面の流速ベクトル図を示しているが，直角型水制，上流向き水制，下流向き水制では水制先端近傍表層の下向き流れに大きな違いがあることが分かる．直角型水制では，他ケースと比べて大きな下向き流れとなっているが，上流向き水制では対岸側(主流路側)下向きへとより偏向され，下流向き水制では下降流が軽減されていることが確認できる．Fig. 14の水制先端近傍の縦断面図($y=12.5\text{cm}$)からも明らかで，直角型水制では水制設置位置近傍とその下流域で下降流が広範囲に亘って卓越していることが確認でき，上流向き，下流向きの順にその程度も小さくなっていることが確認できる．これらは水制設置位置下流側での洗掘の大きさの違いを説明できるもので，水制先端近傍での下降流の大きさが洗掘に大きな関係があることを示している．直角型水制ではFig. 13(a)に示されるように，水制先端近傍で下向き流れが卓越し，その両側にその下降流によって加速された顕著な渦が存在する．上流向き，下流向きの水制ケースでは，下降流の程度が小さいため，直角型水制ケースに比べ馬蹄形渦の流速が弱まっている．上流向き水制においては，その主流路側へと向かう斜め下向きの下降流によって馬蹄形渦が押しつぶされており(Fig. 13(b))，また表層近傍での主流路側へと向かう流れは，馬蹄形渦の流れと逆向きで渦を弱める方向へと働くことになるため，その下降流の向きが馬蹄形渦自体の流速に与える影響も少なくないと考えられる．このように，この水制先端近傍の下降流の向きの違いが周辺の渦構造に影響を及ぼし，河床近傍の流れの違いを生み出している．そして，河床近傍流れの水制による主流路側への水刳ね効果は上流向き水制ケースが3ケースを比較すると最も弱いことが分かる．この傾向は，先述した水制背後の堆積特性の違い(Fig. 10)を説明できるもので，上流向き水制は河床近傍流れにおいて水制による水刳ね効果が弱く，主流路側へ輸送される砂粒の量が減少し，比較的流速の弱い水制背後へ輸送され堆積を増加させている．

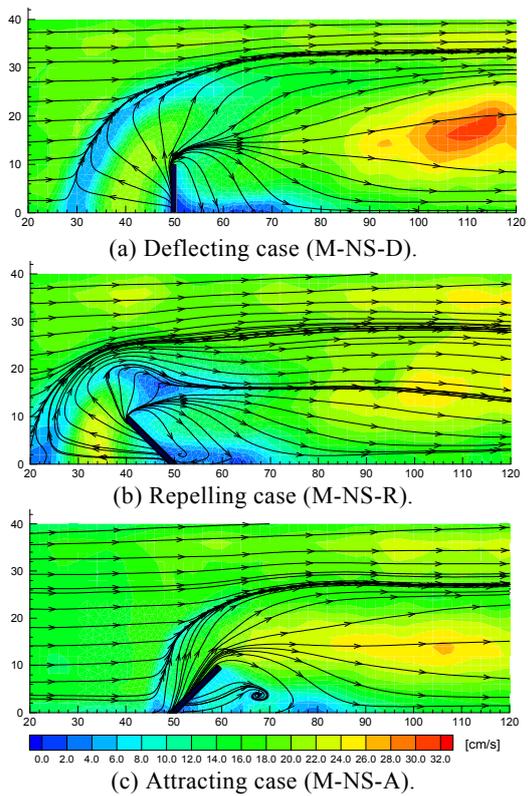


Fig. 12 Streamline of simulated flow field near the bottom with velocity contour in the case of non-submerged conditions (Cases 4–6)

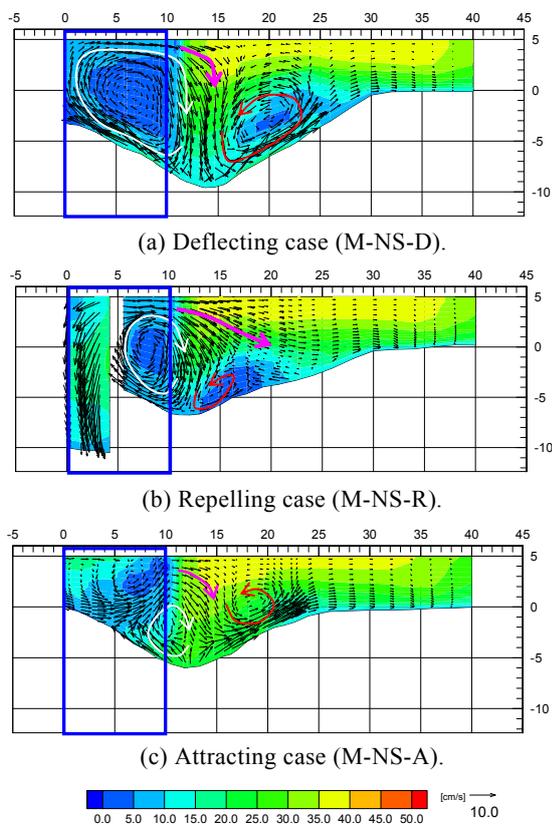


Fig. 13 Velocity vectors of cross-section at 5cm downstream from the tip of the spur-dike in the case of non-submerged conditions (Case 4, $x=55\text{cm}$; Case 5, $x=45\text{cm}$; Case 6, $x=65\text{cm}$)

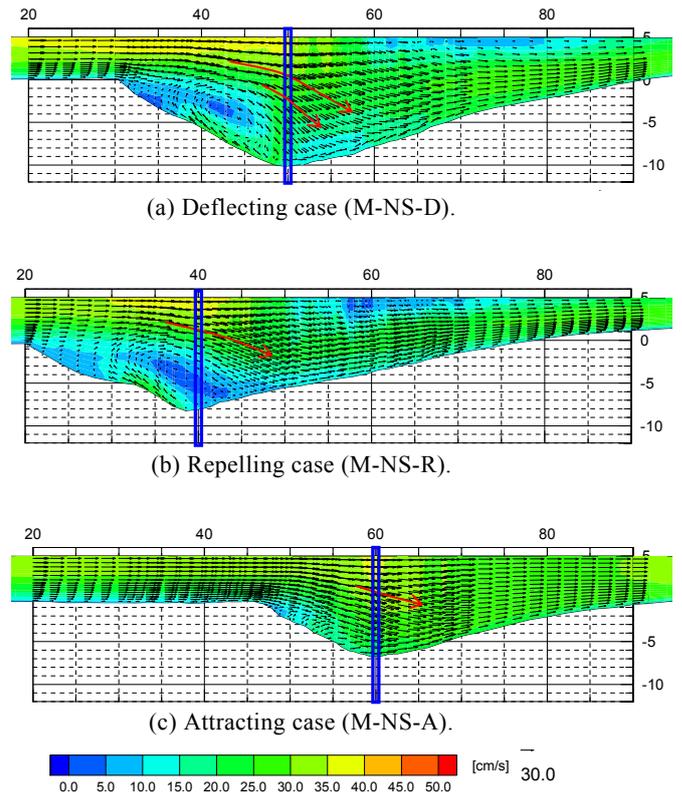


Fig. 14 Velocity vectors of longitudinal section at $y=12.5\text{cm}$ in the case of non-submerged conditions (Cases 4–6)

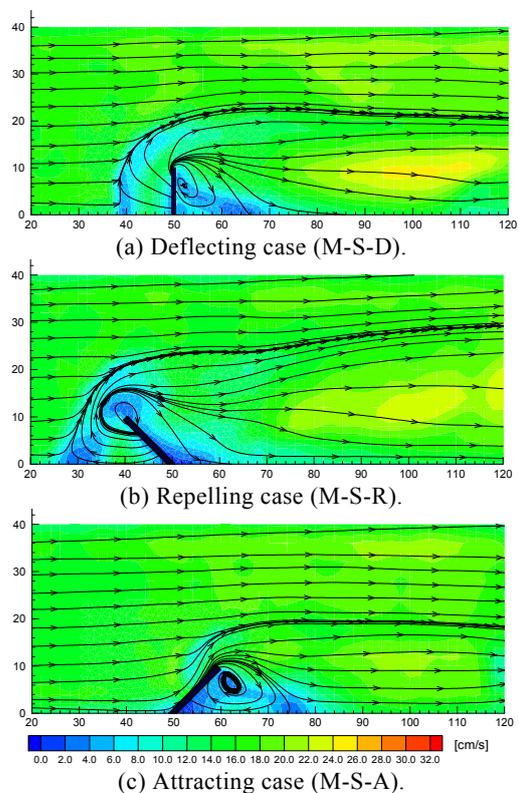


Fig. 15 Streamline of simulated flow field near the bottom with velocity contour in the case of submerged conditions (Cases 10–12)

一方、水制が越流状態となると、非越流状態に比べて水制下流側の横断方向への流れの分離傾向が弱まっており、Fig. 15の流線も水制下流側ではそのまま下流方向へと伸びていることが確認できる。この越流状態による底面近傍流速の横断方向への流れの弱まりは、砂の分級効果を弱めていることを意味する。越流状態になると横断方向への流れは弱まるが、3つの設置角度の中では上流向き水制が比較的横断方向の流れが大きいことが確認でき、後に示す粒度分布の傾向にも現れている。

3.3 河床粒度変化

直角型水制1基周辺の分級現象については、これまで基礎的な混合砂移動床実験によるデータを地道に蓄積し、現象の理解に努めてきた(Mizutani et al. 2012)。それらの分析結果から、水制近傍の複雑な底面近傍流れは、主に水制周辺のいくつかの渦構造により支配されており、渦構造に支配されて洗掘孔縁へ方向づけられた底面近傍流れと洗掘孔自体の局所的に急な河床勾配が、水制を迂回しながら下流へ輸送される砂粒を分級する機能が明らかになってきた。その分級によって縦断方向に粗粒化領域、さらにその両側に細粒化領域が形成されることがこれまでの直角型水制の実験により明らかになってきている。

Fig. 16には初期の平均粒径より無次元化された混合砂ケースの最終河床表層の平均粒径結果を示している。この図において、色塗りされた丸は粒度分布調査地点を示し、その色によって平均粒径の初期からの変化（暖色：粗粒化，寒色：細粒化）を示している。また赤線で囲われた領域については、粗粒化が相対的に顕著な領域を示しており、破線で囲まれた帯状領域は反対に相対的に粗粒化している領域を示している。なお、洗掘孔との位置関係を分かり易くするため、Fig. 16では実線で河床高の等高線を示している。

非越流ケースにおいて水制前面と水制頭部から下流へと伸びる粗粒化領域は、水制設置角度が上流向きでも下流向きでも顕著に形成される結果となった。越流ケースも同様で、本実験の結果より、どの水制設置角度においても水制前面と水制頭部から下流へと伸びる粗粒化領域は形成されることが確認でき、この縦断方向に伸びる粗粒化領域の形成は、混合砂河床において単独水制設置が持つ一つの機能と見えそうである。

Fig. 17はその粗粒化領域について、各ケース間の比較をするために、横断方向の幅を縦断方向に向かって比較した図である。非越流ケースにおいては、設置角度の違いで粗粒化域は縦断方向の位置で若干異なるが、平均的な幅を比較すると3ケース共に水

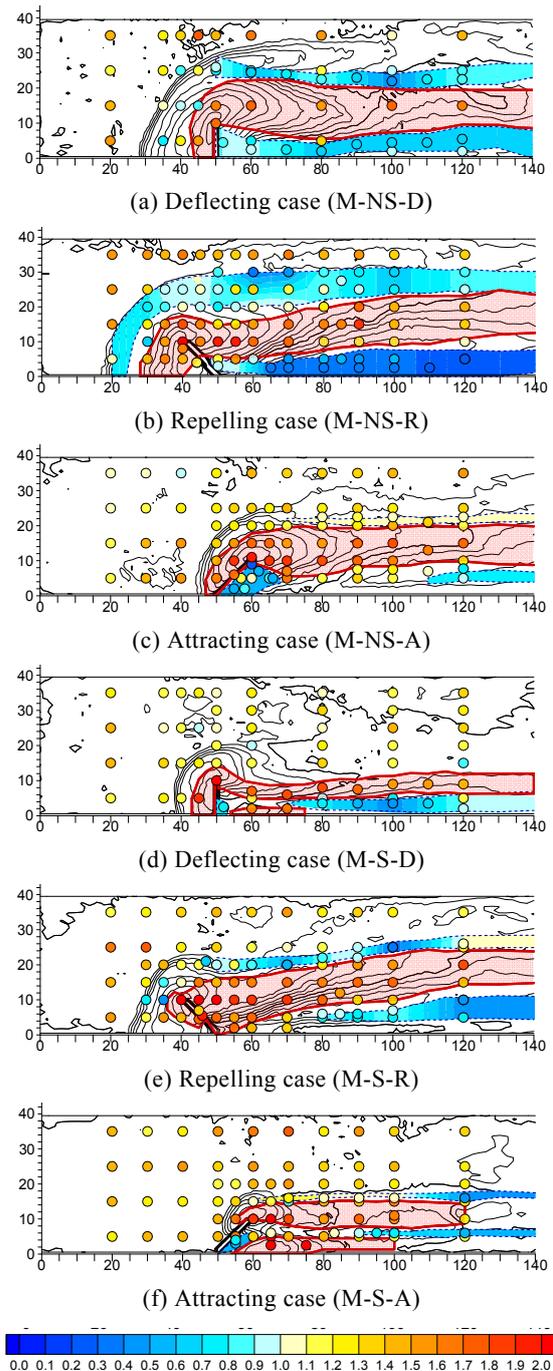
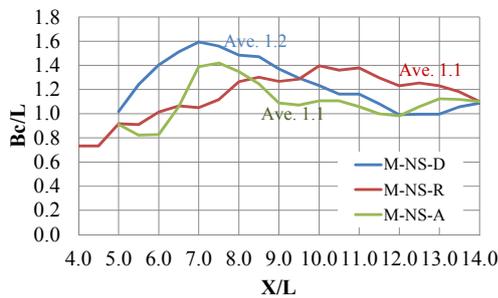


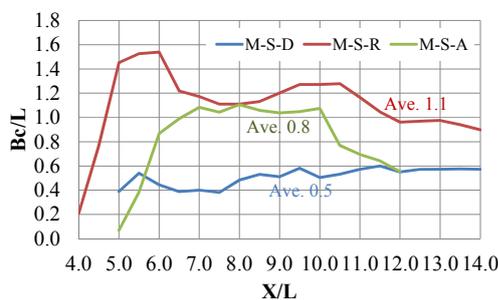
Fig. 16 Grain size distribution D_m/D_{m0} (circles: sampling points; belts: fine sediment belts; lines: bed contours)

制の長さ(L)の1.1倍程度と本実験条件では大きな差が生じなかった。ただし、先述した非越流の上流向き水制の底面近傍流れにおいて水制頭部近傍域で若干水刃効果が弱まっていた傾向(Fig. 12(b))は、その粗粒化域の横断幅の結果に表れている。また、Fig. 16(d), (e), (f)から確認できるように、越流状態になると粗粒化域の平面分布には非越流ケースに比べて、

設置角度の異なるケース間で差が大きくなっている。特に、上流向き水制ケースが、3ケースのうち最も粗粒化幅が大きく、Fig. 15で示された底面近傍流れの横断方向への分離の程度からそれが説明できる。



(a) Non-submerged condition.



(b) Submerged condition.

Fig. 17 Comparison of transverse width of coarsened region

帯状の細粒化領域については、細粒化の程度に違いはあるが上流向き、下流向き水制についても直角型水制と同様に水制背後と水路中央側の洗掘孔縁から縦断方向に伸びる位置に形成されている。上流向き水制ケースが最も二つの帯状細粒化領域が顕著に形成されることがこの結果より確認できる。特に非越流型水制の背後の細粒化については、上流向き水制が顕著で細粒化域が最も広く形成される傾向が示された。そして、下流向き水制ケースについては、水制背後に局所的な細粒化領域が形成されるが、上流向き水制と反対に二つの細粒化領域が他のケースに比べて顕著に形成されない傾向があることも分かった。洗掘孔が小さいため分級効果が弱い可能性があることと、Table 3に示されるように洗掘量が小さいために細粒分の砂が十分に水制背後に供給されなかったことがその原因として考えられる。ただし、下流向き水制ケースについては、最終河床時には他ケースに比べて明確な細粒化領域は形成されなかったが、実験の途中経過を目視で何度か確認した際には、目視で判断できる程度の細粒成分が帯状に輸送されている領域が同じ領域に形成されており、この

ケースは洗掘孔が小さいために、底面近傍流速が軽減されていない領域を細粒分が帯状に集中して輸送され、最終河床計測時には細粒分が下流へ輸送された結果と言えそうである。

4. 結論

本研究では、設置角度の異なる単独水制が河床地形および粒度変化にもたらす影響を明らかにするために、上流向き、直角、下流向きの3種類の水制設置角度に対して、均一砂・混合砂河床、そして非越流型・越流型の全12ケースの移動床実験を行った。設置角度と局所洗掘および堆積特性について考察し、水制高の異なる3ケースの洗掘河床における表層流れのPIV解析と3次元流れ数値シミュレーションを実施することによって、水制高の違いがもたらす河床表層の粒度分布変化と3次元流れの関係性についても考察を行った。そして、設置角度の異なる水制がもたらす局所洗掘、堆積、粒度分布変化、そして3次元流れの基本的特性について総括的に特性を整理した。

本実験で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- [1] 単独水制設置に関するその設置角度の影響は、周辺河床の洗掘および堆積特性だけでなく、周辺の3次元流れ構造、そして河床表層の粒度分布変化にも影響を及ぼすことが分かった。
- [2] 上流向き水制は、直角型水制および下流向き水制に比べより水制背後域への堆積を促す特性を持つことが明らかになり、それは水制近傍の流れの違いがもたらしていることが明らかになった。
- [3] 上向き水制の頭部直近傍の河床近傍流れでは、主流路側への水勿ね効果が直角型水制および下流向き水制に比べて弱く、水制頭部域の下降流の向きが馬蹄形渦の速度に影響を及ぼしていることが数値シミュレーション結果より確認された。
- [4] 上流向き、直角、下流向きのどの水制設置角度においても、越流状態に関係なく水制前面域と水制頭部から下流へと伸びる粗粒化領域は形成されることが実験結果より確認され、上流向き水制が越流状態に関係なくその粗粒化域が顕著に形成されることが分かった。
- [5] 水制背後と洗掘孔縁から縦断方向へと伸びる2つの細粒化域は、細粒化の程度と範囲の違いはあるが上流向き、直角、下流向きのどの水制設置角度においても形成されることが示された。そして、その中でも上流向き水制が最も水制背後へ土砂堆積を促し、細粒分を河床表層へ堆積させる傾向が強いことが示された。

謝 辞

本稿は、文部科学省 科学研究費補助金 若手研究(B) (No.22760369, 代表:張浩), 日本學術振興會 アジア・アフリカ學術基盤形成事業(コーディネーター:中川一), および京都大学若手スタートアップ研究費の助成を受けたものである。ここに厚く感謝する。

参考文献

小倉政利・中川一・張浩・水谷英朗(2012): 水制の型式が河床形状及び粒度の変化に及ぼす影響, 平成24年度土木学会全国大会, 第67回, II-072.
鈴木幸一・門田章宏・重松和恵・田中健治(2010): T型・L型水制に起因する河床形状変化特性, 水工学論文集, 第54巻, pp. 817-822.
福留脩文・藤田真二・福岡捷二(2010): 淵環境を回復した低水路水制の設計とその環境機能の評価, 水工学論文集, 第54巻, pp. 1267-1272.
水谷英朗・中川一・川池健司・馬場康之・張浩(2010): 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, 第54巻, pp. 805-810.
水谷英朗・中川一・川池健司・馬場康之・張浩(2011): 非越流・不透過型水制周辺の局所洗掘および粒度変化に関する研究, 水工学論文集, 第55巻, pp. 829-834.
水谷英朗・中川一・川池健司・馬場康之・張浩(2012): 相対水制高が水制周辺の局所洗掘と粒度変化に与える影響, 水工学論文集, 第56巻, pp. 1141-1146.
Duan, J.G., He, L., and Wang, Q. (2009): Mean flow and turbulence around experimental spur dike. *Advances in Water Resources*, Vol. 32, pp. 1717-1725.
Elawady, E., Michiue, M., and Hinokidani, O. (2001a): Characteristics of scour around repelling spur-dikes. *Proceedings of the 29th IAHR Congress, IAHR Vol. II*, pp. 343-349.

Elawady, E., Michiue, M., and Hinokidani, O. (2001b) An investigation of scour around attracting spur-dikes. *Proceedings of the 8th International Symposium on Flow Modeling and Turbulence Measurements*, Tokyo, Japan, pp. 111-118.
Ezzeldin, M.M., Saafan, T.A., Rageh, O.S., and Nejm, L.M. (2007): Local scour around spur dikes. *Proceedings of the 11th International Egyptian Water Technology Conference 2007*, Sharm ElSheikh, Egypt, pp. 779-795.
Melville, B.W. (1992): Local scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 4, pp. 615-631.
Mizutani, H., Nakagawa, H., Zhang, H., Kawaike, K., and Baba, Y. (2011): Influence of Overtopping Ratio on Scouring and Sediment Sorting around Spur Dyke, *RCEM 2011, Beijing*: pp. 1849-1862.
Mizutani, H., Nakagawa, H., Kawaike, K., Baba, Y., and Zhang, H. (2012): Study on local scour and variation of bed composition around non-submerged spur dyke. *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol. 30, No.1, pp. 29-46.
Vaghefi, Md., Ghodsian, M., Neyshaboori, S. (2009): Experimental study on the effect of a T-shape spur dike length on scour in a 90° channel bend, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 34, No.2B, pp. 337-348.
Zhang H., Nakagawa, H., Kawaike, K., and Baba, Y. (2009): Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dyke. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 24, No. 1, pp. 33-45.
Zhang H., Nakagawa, H., and Mizutani, H. (2010): Bed variation around spur dyke under non-uniform sediment transport. *Proceedings of the 7th IAHR-APD Congress*, Auckland, New Zealand: USB memory 3a045.

(論文受理日: 2013年6月4日)