

連続型水制周辺の掃流砂分級に関する基礎研究

Study on Bed-load Sorting around Series of Spur-dikes

水谷英朗・中川一・川池健司・張浩・小倉政利⁽¹⁾

Hideaki MIZUTANI, Hajime NAKAGAWA, Kenji KAWAIKE, Hao ZHANG and Masatoshi OGURA⁽¹⁾

(1) 京都大学大学院工学研究科

(1) Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

This paper presents an experimental study on the impacts of series of spur-dikes on bed topography and sediment sorting process of bed surface around impermeable spur-dikes. It was found that the vortex systems around spur-dikes were different in comparison with different number of spur-dikes and different submerged conditions on equilibrium stage. Compared with the results of single spur-dike cases and series of spur-dikes cases, the vortex systems are quite different between the spur-dikes. These differences cause different sediment transport and sorting process between the spur-dikes. The coarsened longitudinal region and fine sediment regions were observed, and it was indicated that series of spur-dikes also create not only bed morphology, but the diversity of surface bed composition. Furthermore, the scouring, deposition and sorting processes around spur-dikes were simulated by 3-D RANS with non-equilibrium bed load model using unstructured mesh system. The simulated results show generally good agreement with the experimental results of bed morphology and sediment sorting.

キーワード: 連続型水制, 洗掘, 堆積, 粒度変化, 混合砂

Keywords: series of spur-dikes, scouring, deposition, sediment sorting, mixture sediments

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り、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は、「河川断面一部の流速を低下させる」、「水流の方向を変化させる（水刎ね）」の二つと言われており、この二つの機能から得られる付随的な様々な効果から、世界各国で古くから河岸処理技術として用いられてきた。水流を河岸から遠ざけ水流を断面中央に集中することから河岸侵食対策や航路

維持、近年では水制が創り出す河床地形と複雑な流れ場から良好な水際環境の再生および創出等の河川環境向上の目的で水制工を設置している。

これまで水工学分野の研究において、水制を代表とする河川構造物周辺の複雑な流れの構造、河床洗掘機構の解明および洗掘深予測等の実験による実証的研究が世界各国で盛んに行われてきた。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数多くの研究(例えば、Elawady et al., 2000)がある。これまでの精力的な多くの研究により、水制設置により周辺河床がどれだけ洗掘するか、洗掘

および堆積の空間的な情報、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、多くのことが解明されてきた。1990年代以降からは、コンピュータ技術の進歩に伴って数値シミュレーションによる水制構造物の研究も盛んに行なわれているが（例えば、KoKen and Constantinescu, 2011）、水制周辺は流れも土砂移動も複雑で局所的な変化が大きく、残念ながら水制周辺の河床粒度変化現象の議論を数値シミュレーションのみに頼ること難しい状況にあり、今後の数値モデル技術向上に期待しなければならない。また、言うまでもなく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、社会要望の変化に応じて生態系などの河川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、混合砂河床における水制がもたらす粒度変化現象のさらなる理解が求められる。さらなる実証的な研究を実施することにより混合砂河床上で起こる流砂現象の理解に努めることが重要である。

著者らは、これまで直角型や設置角度を変化させた単独水制（水制1基）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構造の解明とそれに密接に関連する3次元的な流れ場の解明に取り組んできた(Zhang et al., 2010; 水谷ら (2010, 2011, 2012, 2013); Mizutani et al, 2011, 2012)。本稿は、それらの基礎研究の次ステップとして、水制工を複数設置した形態に着目し、連続型水制工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混合砂移動床実験および数値シミュレーションを実施し考察を行ったものである。

2. 連続型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2.5m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40cmの内10cmを塞ぐように、幅1cmの不透過水制を右側壁に設置し、水制設置基数、越流状況（水制高）、河床材料の異なる実験を実施した。本実験では、水路延長の制約から最大で水制4基までしか設置できず、また水制配置間隔も水制長の2倍と一定であるため、その2点の影響については今後実験を追加してさらなる検討する必要がある。

実験の手順は、これまでの著者らの研究と同様に、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き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、塞き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、篩による粒度分析を実施した。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も、その座標値を記録し、それらの領域の代表地点についても粒度分析を実施しデータを蓄積している。

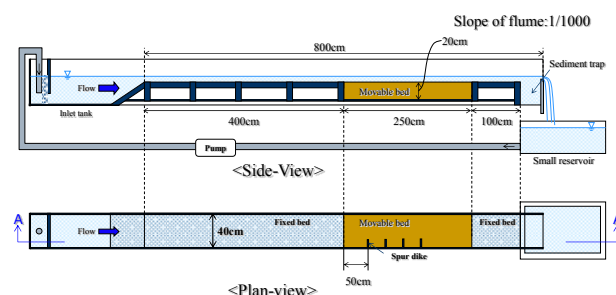


Fig. 1 Sketch of the experimental flume

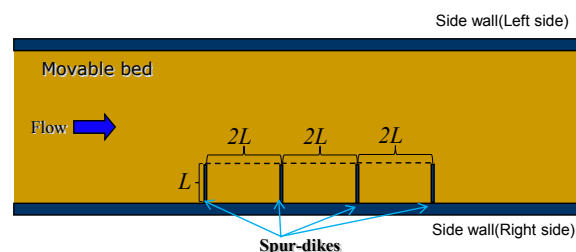


Fig. 2 Sketch of spur-dikes

2.2 実験条件

本実験の接近流れの水理条件をTable 1に示す。本実験ではこれまで蓄積してきたデータとの比較のため、これまでの研究と同様に設定し、水制上流側か

ら与える水理条件を本実験全ケース同じとした．水理条件を同一にし，河床材料条件や水制設置基数や水制高を変更することによって，主には水制設置基数，連続型水制の越流状況の違いがもたらす周辺地形の変化および河床表層の粒度分布変化を本実験によって明らかにする．

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 ($0.125\text{mm} < d < 0.50\text{mm}$) ・ 青 ($0.50\text{mm} < d < 1.40\text{mm}$) ・ 黒 ($1.40\text{mm} < d < 2.36\text{mm}$) となるようふるい分けし，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. 3 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 の水理条件では，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

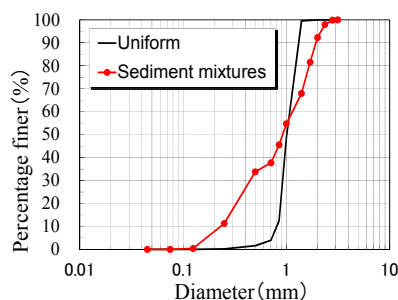


Fig. 3 Grain size distributions of sediment particles at initial bed

実験ケースは，Table 2 に示す均一砂河床で非越流型水制の設置基数が異なる 3 ケース (Case1-Case3)，非越流型の混合砂河床ケース (Case4-Case5)，越流型水制ケース (Case6-Case8) の計 8 ケースである．

Table 2 Experimental conditions for all cases

No.	Case name	N_s	S_h/h	D_{m0} (mm)	σ_g	U_*/U_{*c}
1	U-NS-S1	1	>1.0	1.03	1.14	0.83
2	U-NS-S2	2				
3	U-NS-S4	4				
4	M-NS-S1	1		1.01	2.55	0.84
5	M-NS-S4	4				
6	U-Sh4-S4	4	0.8	1.03	1.14	0.83
7	U-Sh2.5-S4	4	0.5			
8	M-Sh2.5-S4	4				

N_s ：水制設置基数， S_b ：水制高， D_{m0} ：初期河床の平均粒径， σ_g ：河床材料の幾何標準偏差， U^*/U_{*c} ：接近流の摩擦速度と限界摩擦速度の比

3. 実験結果と考察

最初に，非越流型水制で設置基数と河床材料が異なる実験ケース (Case1-5) 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 には各ケースの最大洗掘深および洗掘量を示している．Fig. 4 から確認できるように，水制設置基数の違いは水制周辺および主流路側の洗掘および下流の堆積特性に影響をもたらしていることが確認できる．これが水制が航路維持用途として用いられる所以である．また，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，本実験の同じ設置基数で河床材料のみ異なる実験ケースの結果からも洗掘孔の大きさや堆積量など河床地形の空間的特性の違いを生じさせていることが確認できる．そして越流型の連続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，水制の設置基数は周辺河床の空間形状を決める重要な要素であることが本実験結果からも分かる．

本章では，以降の節において水制設置基数および河床材料の異なる水制がもたらす局所洗掘特性および堆積特性，連続型水制周辺の 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．

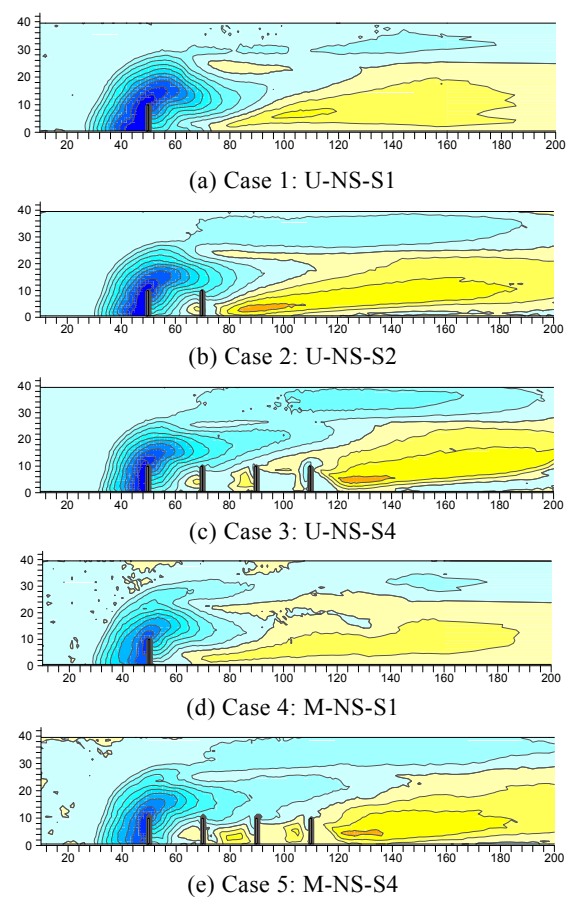


Fig. 4 Bed contour at the quasi-equilibrium stage for different number of spur-dikes with uniform/non-uniform sediment bed under non-submerged conditions (Cases 1-5)

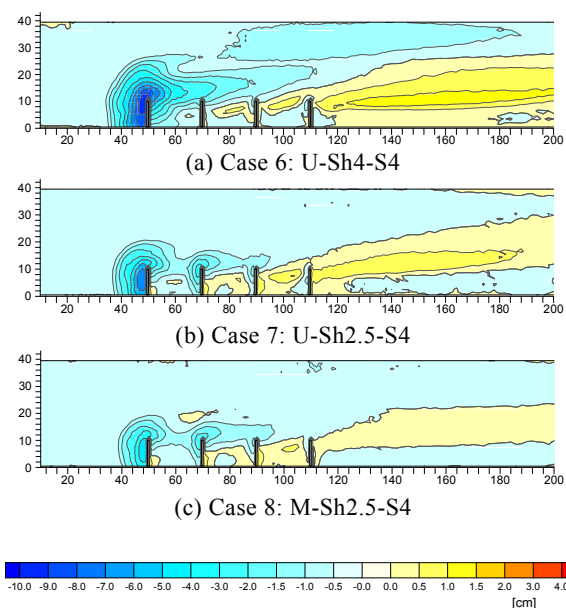


Fig. 5 Bed contour at the quasi-equilibrium stage for different spur-dike height conditions with uniform/non-uniform sediment bed under submerged conditions (Cases 6-8)

Table 3 Maximum scour depth and volumes of scour and deposition.

No.	Case name	e_m (cm)	V_s (cm ³)
1	U-NS-S1	11.7	6090
2	U-NS-S2	8.6	6611
3	U-NS-S4	8.0	7403
4	M-NS-S1	9.3	4290
5	M-NS-S4	7.9	6383
6	U-Sh4-S4	9.6	4801
7	U-Sh2.5-S4	7.7	1668
8	M-Sh2.5-S4	5.7	1251

* e_m : maximum scour depth. V_s : Scour volume.

3.1 洗掘と堆積

まず、均一砂河床で水制設置基数が異なるCase 1～Case 3を比較すると、空間的な洗掘および堆積領域は大きく変化しないことが確認できる。ただし、水制設置基数を変化させることにより、水制で挟まれる領域、水制背後域、主流路での洗掘および堆積量が異なってくることを確認できる。水制設置基数が多いほど洗掘量が増加する傾向がTable 3に示されており特に主流路側で洗掘量が増加しているのがFig. 4より確認できる。最大洗掘深はどのケースも1基目の上流側で発生し、単独水制のケースが最も大きく、水制設置基数が増加するにつれて減少する傾向が本実験の結果より確認された。これは設置基数が増えることにより、主流路側の洗掘増進の影響が考えられるが、単独水制ケースで生じていた後流渦構造が連続型水制ケースでは十分に発達していないことも影響していると考えている。この点については、実験を追加し議論を深める必要がある。

堆積域については、水制設置基数を増加させると水制に挟まれる領域に多くの砂は堆積せず、最下流側の水制背後に砂が堆積することが図より確認できる。均一砂と混合砂ケースを比べると、混合砂ケースの方が水制間に粒径の細かな砂が堆積しており、これらの結果から連続型水制では河床近傍で水制域へと向かう流れがそれほど小さくなく、掃流砂形態で粒径の小さいもののみが水制間に運ばれやすい傾向があると考えられる。

3.2 連続型水制周辺の流れ場

ここでは、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実施した結果を合わせて流れ場の考察を行った。

Fig. 6には平衡河床時においてPIV解析から得られた越流状態の異なる連続型水制周辺の表層流れ場の時間平均場を示し、Fig. 8およびFig. 9にはFig. 7の計算格子(平面図)を用いて上記の数値シミュレーションモデルより得られた底面近傍流れの解析結果を示している。

表層の流れ場において、非越流型の単独水制ケースでは水制背後に扇形の放射状流れが現れており湧昇域があることが確認できる。非越流型の連続型水制ケースとなると、鉛直方向に軸を持つ水平渦が水制間に存在し水制1基の場合と大きく異なる。Fig. 8に示す数値シミュレーション結果からも非越流型水制の水平渦構造が確認できる。また越流型水制ケース水制間の底面近傍流れは非越流型ケースと異なり、非越流型ケースは、水制間において下流側の水制近くから流れが水制域へ流入するのに対し、越流型は水制間中央もしくは上流側水制寄りの地点から流入するのがFig. 8(c)より確認できる。これはFig. 9の越流型水制ケースの流速ベクトル鉛直断面図から確認できるように、水制上部の流れによって水制背後域に水平方向に軸を持つ渦構造が現れ、その流れを補う補償流として底面近傍で水制間へ向かう流れが発生している。そして、その底面近傍の補償流が水制間で上流側と下流側へと底面近傍で分岐している様子がFig. 8(c)確認できる。これらは非越流型と越流型の連続水制近傍流れの大きな違いである。

3.3 河床の粒度変化

単独水制周辺の分級現象について、これまで基礎的な混合砂移動床実験の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, 水谷ら, 2013)。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の縁へと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。そして、同じく単独水制に対して設置角度の異なる実験から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実験により明らかになってきている。

Fig. 10には単独水制および連続型水制の実験終了後、水路内の水をゆっくり排水し乾燥させた後の河床表層の写真を示す。上述したように粒径区分を分けたカラーサンドの混合砂を用いているため、この

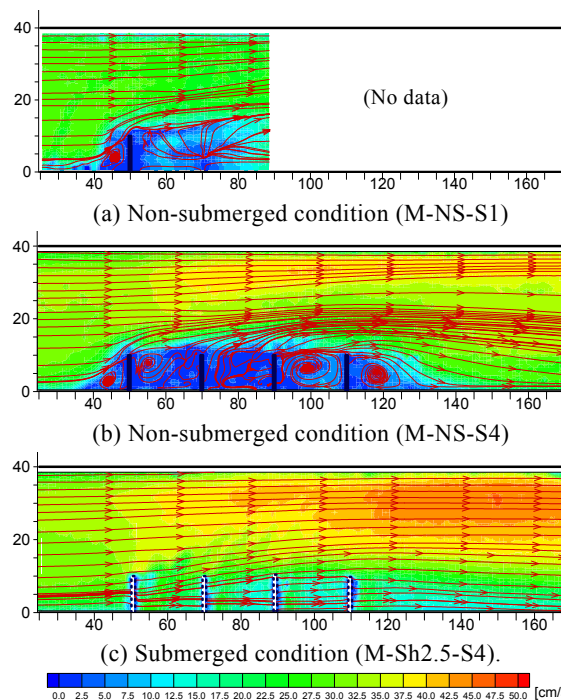


Fig. 6 Streamline of surface flow field in the case of non-submerged conditions (Case 4, Case 5 and Case 7)

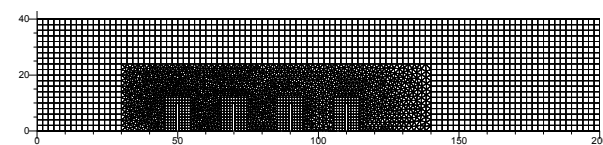


Fig. 7 Unstructured mesh for 3D-RANS simulations

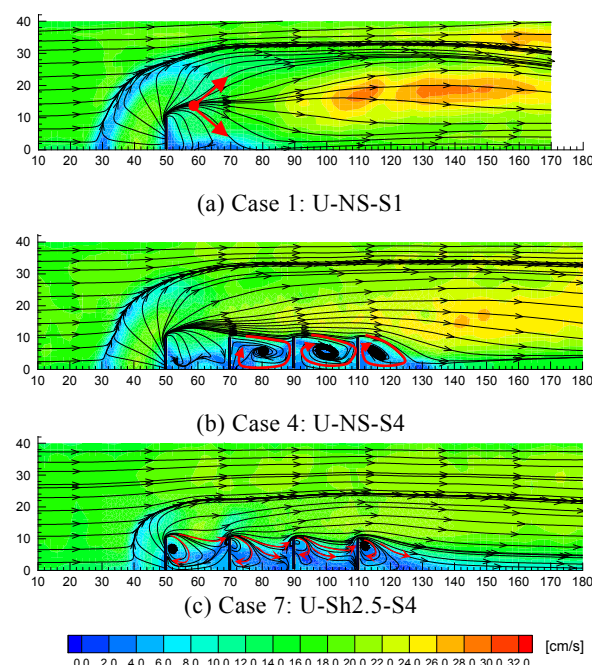


Fig. 8 Streamline of simulated flow field near the bottom with velocity contour in the case of non-submerged conditions (Cases 1, Case 4 and Case 7)

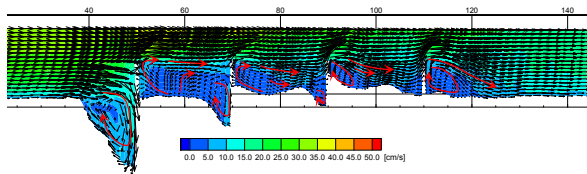


Fig. 9 Side view of simulated flow on $y=5$ section in Case 7(U-Sh2.5-S4); submerged condition

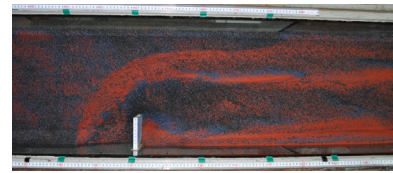
写真において黒色域が大きな砂粒が目立つ粗粒化域で赤色が細粒化域，青色がその中間粒径域となる．Fig. 10 (b), (c)の図中の白矢印は，実験中に目視で確認した砂粒の移動方向を示している．Fig. 11はFig. 10と同じ実験終了時の河床表層の砂粒を多数地点採取し，篩により粒度分布を分析し平均粒径を求めて図示したものである．図中において色付きの丸印が採取地点で色が平均粒径を示す．赤線で囲われた領域については，粗粒化が相対的に顕著な領域を示し，青線や帯状で囲まれた領域は反対に相対的に細粒化している領域を示している．なお，洗掘孔との位置関係を分かり易くするため，Fig. 11では実線で各ケースの河床高の等高線を示している．

非越流ケースにおいて単独水制ケースで生じた水制前面と水制頭部から下流へと伸びる粗粒化領域は，連続型水制ケースにおいても同様に形成されることが本実験より確認できた．そして，2基目以降の水制先端近傍も範囲は小さいが水制先端近傍において局所洗掘と粗粒化域が形成されていることも確認できる．

帯状の細粒化領域については，非越流型の連続型水制ケースは水制間に掃流砂形態の土砂輸送形態で細粒分が堆積し，最下流側水制背後において単独水制と同様に縦断方向に伸びる細粒化域が形成される結果となった．また，水路中央側の洗掘孔縁から縦断方向に伸びる位置についても相対的に細粒化する帯状領域が連続型水制においても形成されている．越流型の連続型水制ケースについても同様に細粒化領域が形成されるが，水制間において上流側の水制背後に細粒化領域が寄る結果となり，これはFig. 8(c)及びFig. 9の底面近傍流れの計算結果から説明できる．

4. 連続型水制周辺の流れ及び河床変化の数値シミュレーション

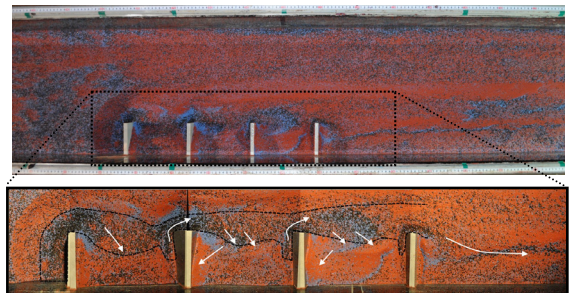
次に本研究で実施した実験の1ケース(Case 5; M-NS-S4)について河床変動シミュレーションを実施した結果を示す．計算モデルは，上記した非構造格子系の3次元流れのRANSモデルに掃流砂の土砂輸送過程をラグランジュ的に解析する非平衡流砂モデ



(a) Case 4 (M-NS-S1)



(b) Case 5 (M-NS-S4)



(c) Case 8 (M-Sh4-S4)

Fig. 10 Bed surface at the quasi-equilibrium stage for three cases with sediment mixtures; (a) Case 4, (b) Case 5 and (c) Case 8

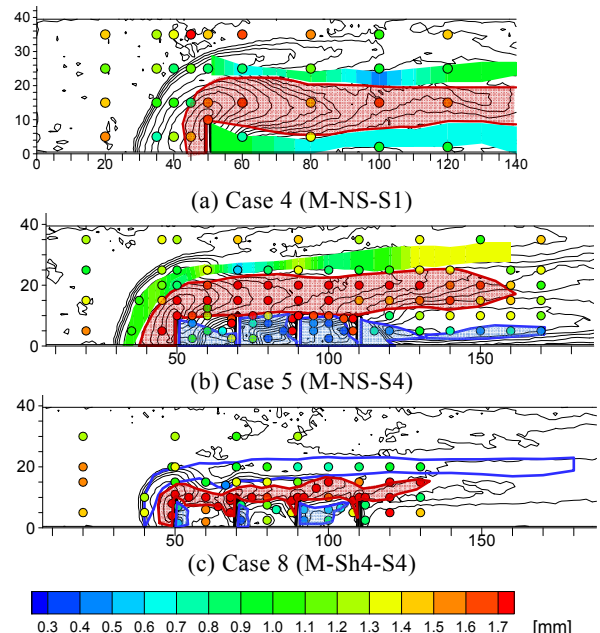


Fig. 11 Grain size distribution D_m ; (a) Case 4, (b) Case 5 and (c) Case 8 (circles: sampling points; belts: fine sediment belts; lines: bed contours)

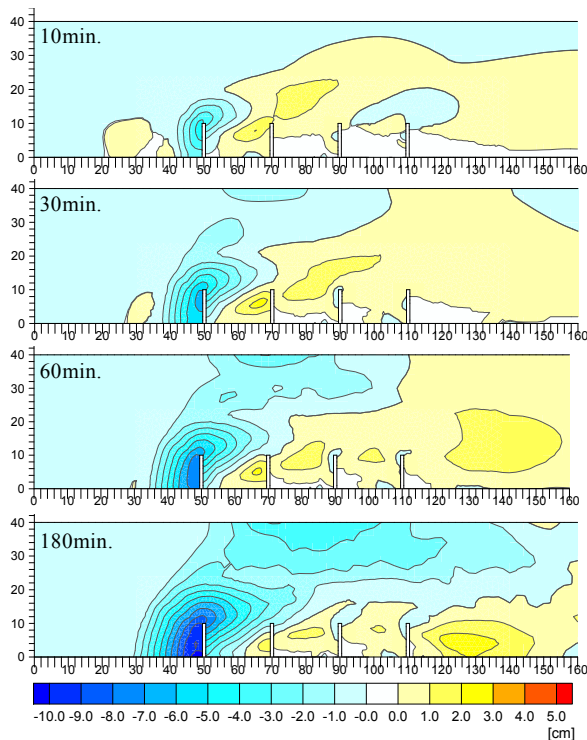


Fig. 12 Bed level contour of simulated results

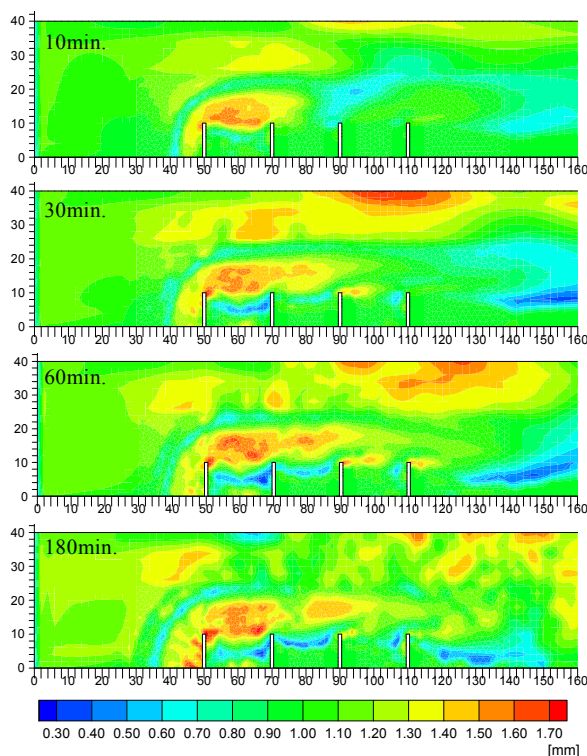


Fig. 13 Mean diameter contour of simulated bed surface results

ルを導入した解析モデルである（水谷ら，2010）．Fig.12には10分後，30分後，60分後，180分後（実験終了時）の河床変動高の計算結果，Fig.13にはFig.12と同時刻の河床表層の平均粒径結果を示

す．河床形状については，水制1基目周辺の洗掘孔や2基目以降近傍の小さな局所洗掘，水制域および最下流水制背後域の土砂堆積とFig. 4(M-NS-S4)の実験結果をおおむね良好に再現している．河床表層の平均粒径の計算結果についても，粗粒化・細粒化域の空間的な傾向が再現されている．実験と同様に掃流砂形態の土砂移動のみによって水制間と水制背後域の細粒化が再現され，縦断方向に延伸する粗粒化域も計算で現れている．ただし，粗粒化領域が実験に比べて明瞭ではなく，現状のモデルでは粗粒化・細粒化の傾向が弱く計算されることが確認でき課題が残されている．この点については，河床表層の粒度分布の計算手法や移動砂粒の堆積過程のモデル化等で課題が残されている推察している，本論文では議論するには十分にデータが揃っておらず今後の課題としたい．

5. 結論

本研究では，水制を複数設置した連続型水制がもたらす河床地形変化および粒度変化を明らかにするために，単独および連続型水制に対して均一砂および混合砂河床，そして非越流型・越流型の全8ケースの移動床実験を行った．水制周辺の洗掘および堆積特性について考察し，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の結果を分析することによって，単独と連続型水制，越流状態の違いがもたらす3次元流れの違いについても考察を行った．

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] 単独水制に比べ連続型水制は洗掘量が増加する傾向を示すが，最大洗掘深は同様の傾向を持たない．
- [2] 非越流の単独水制と連続型水制がもたらす洗掘河床上では，流れの渦構造が異なり，単独水制では縦渦が支配的であるが，連続型水制では鉛直方向に軸を持つ水平渦構造となる．そして，越流状態となると水制間の流れの構造が大きく異なってくる事が明らかとなった．
- [3] 連続型水制においても単独水制で見られた粗粒化域および細粒化帯状領域形成の掃流砂の分級現象が確認された．
- [4] 越流型の連続型水制では，非越流型と同様に水制域において細粒化域の形成が見られたが，上流側の水制に寄った細粒化域が形成される越流型連続型水制の特性が確認された．
- [5] 非構造格子系の3次元RANSモデルと混合砂の非平衡流砂モデルを用いることによって，本実験

の連続型水制近傍の河床変動および粒度変化を概ね良好に再現することができた。

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), 日本学術振興会 アジア・アフリカ学術基盤形成事業(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

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.

水谷英朗・中川一・川池健司・張浩・Quentine LEJEUNE (2013): 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, 京都大学防災研究所年報, 第56号B, pp. 485-495.

Elawady, E., Michiue, M., and Hinokidani, O. (2000) Experimental study of flow behavior around submerged spur-dike on rigid bed. Annual Journal of Hydraulic

Engineering, JSCE, Vol. 44, pp. 539-544.

KoKen, M. and Constantinescu, G (2011): Flow and turbulence structure around a spur dike in channel with a large scour hole. Water Resources Research, Vol. 47, W12511.

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 Hydrosience and Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 30, No.1, pp. 29-46.

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: 2014年6月9日)