

水制周辺の河床変化および砂の分級現象

水谷英朗*・中川一・川池健司・馬場康之・張浩

* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

水制周辺の洗掘現象において、水制高と河床の粒度分布が局所洗掘に与える影響、そして、水制がもたらす河床表層の粒度分布変化と水制高の関係性について明らかにするために、越流型および非越流型水制に対していくつかの混合砂河床の移動床実験を実施し、考察を行った。実験結果より、越流型水制の場合も非越流型と同様に、河床粒度の幾何標準偏差が最大洗掘深評価に重要なパラメータと成り得ることが示され、そして非越流型水制は越流型に比べて水制頭部の下流域で顕著な洗掘傾向が見られることが明らかとなった。また、越流状態の異なる流れ場の計測により、水制が高いほど水制先端近傍の下降流が大きくなり、その影響で水制が高いほど水制頭部から下流に伸びる河床表層の粗粒化域の横断幅が広くなることが明らかとなった。

キーワード: 水制, 混合砂, 粒度変化, 相対水制高

1. はじめに

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盛んに行われてきた。近年においては、松本ら(2008)の蛇籠を用いた移動床実験、鄭・富永(2009)の高水敷上に水制が有する場の流れ場の計測、そしてT型・L型水制の移動床実験(Ghodsian and Vaghefi, 2009; 鈴木ら, 2010; Masjedi et al., 2010)のように複雑な形状を有する水制や、特殊な場を想定した水制設置の実験的研究が行われている。

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、現象を単純化できることから粒径の一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い。しかし、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、魚の産卵床などに影響を与えるため、生態系などの環境を意識した水制施工計画を行うためには、さらなる混合砂河床を用いた粒度分布を意識した水制に関する研究が必要だと考える。著者らは、これまで基本的な実験条件と考えられる非越流型直角水制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(水谷ら, 2011)を行い、非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。本稿は、その研究の次のステップとして、越流状態の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調べるために実施した混合砂を用いた越流型水制の移動床実験と、これまでの非越流型水制の結果も含めて考察を行ったものである。

2. 水制周辺の移動床実験

2.1 実験水路

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す。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50cm下流の右岸側に長さ10cm、幅1cmの不透過水制を側壁に直角になるように設置し実験を実施した。実験開始の手順は、まず下流端のゲートを閉じ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、そして水深が条

件として設定した値に到達した後、塞き止めたゲートとポンプのバルブを開け設定した流量を通し実験を開始している。

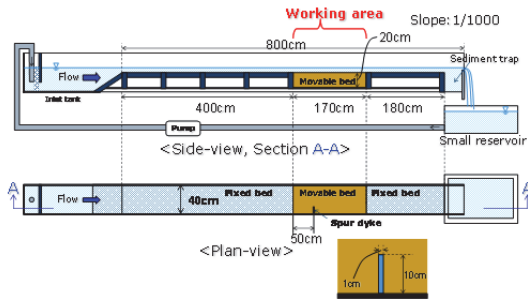


Fig. 1 Sketch of the experiment setup

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固定し、河床材料条件や水制高を実験ケース毎に変更することによって、初期河床の粒度分布や水制高の違いが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する。

Table 1 Hydraulic and spur dyke conditions

Flow discharge Q (l/s)	5.7
Channel slope I	1/1000
Channel width B (cm)	40.0
Flow depth h_0 (cm)	5.0
Flow velocity U (cm/s)	29
Friction velocity U_* (cm/s)	1.98
Reynolds number Re	14,250
Froude number Fr	0.41
Spur length L (cm)	10.0
Spur thickness b (cm)	1.0

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(Uniform),そして2号から7号までの0.17~2.5mmの範囲の砂を混ぜ合わせた混合砂河床を用いて実験を行った。混合砂ケースに

ついては、珪砂2号から7号までを均等割合で作成した連続粒度の混合砂(Well Graded: Mix-WG),2号と7号を2:3の割合で作成した不連続粒度の混合砂(Gap Graded: Mix-GG),そしてカラーサンドを用いて作成した混合砂(Color Sand: Mix-CS)の3種類である。Fig. 2に均一砂と3種類の混合砂の粒度分布を示す。

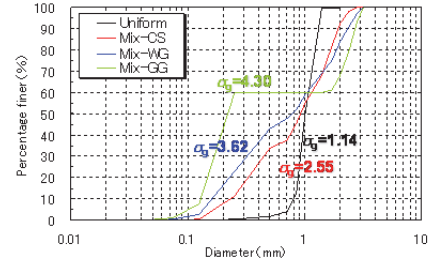


Fig. 2 Sieve analysis results of sediment particles at initial bed

各混合砂河床については、平均粒径が均一砂河床ケースと同等の平均粒径が1mmに近くなるよう考慮して設定している。河床粒度の幾何標準偏差(σ_g)については、Uniform, Mix-CS, Mix-WG, Mix-GGの順に1.14, 2.55, 3.62, 4.30と大きくなり、粒径範囲の幅が広がっている。なお、混合砂ケースの実験では、初期河床作成時に河床の粒度分布に斑ができないように水路外で良く混ぜ合わせた後に少しずつ水路に投入し、初期の平坦河床の作成を行った。

Table 2には本稿の全実験ケースの河床材料や水制高等の実験条件一覧を示している。Case1~6は均一砂河床を用いて水制高のみを変更し、Case7~Case15は代表的な3つの水制高条件に対して3つの混合砂を適用して行った実験ケースである。なお、摩擦速度と平均粒径の限界摩擦速度の比が全て1.0以下となる静的洗掘(clear-water scour)条件であるため、全ケース上流からの給砂は行っていない。

Table 2 Experimental conditions for all cases

Case No.	Case name	S_h	h_0/S_h	S_h/h_0	D_{m0} (mm)	σ_g	U_* / U_{*c}	τ_*
1	U-NS	—	<1.00	>1.0	1.03	1.14	0.83	0.024
2	U-Sh4	4.0	1.25	0.8				
3	U-Sh3	3.0	1.67	0.6				
4	U-Sh2.5	2.5	2.00	0.5				
5	U-Sh1.5	1.5	3.33	0.3				
6	U-Sh0.75	0.75	6.67	0.15				
7	M-CS-NS	—	<1.00	>1.0	1.03	2.55	0.96	0.024
8	M-CS-Sh4	4.0	1.25	0.8				
9	M-CS-Sh2.5	2.5	2.00	0.5				
10	M-WG-NS	—	<1.00	>1.0	1.01	3.62	0.96	0.024
11	M-WG-Sh4	4.0	1.25	0.8				
12	M-WG-Sh2.5	2.5	2.00	0.5				
13	M-GG-NS	—	<1.00	>1.0	1.05	4.30	0.95	0.023
14	M-GG-Sh4	4.0	1.25	0.8				
15	M-GG-Sh2.5	2.5	2.00	0.5				

S_h : Spur dyke height
 h_0 : Water depth(=5.0cm)
 h_0/S_h : Overtopping ratio
 S_h/h_0 : Relative spur dyke height
 D_{m0} : Initial mean diameter
 σ_g : Geometric standard deviation
 U_* / U_{*c} : Critical friction-velocity ratio
 τ_* : Dimensionless shear stress

3. 実験結果とその考察

3.1 局所洗掘と水制高の関係

Fig. 3に水制高の異なる均一砂河床実験の通水3時間後のほぼ平衡状態に達した河床形状を示す。この図は、非越流状態と相対水制高 (S_h/h_0 : 水制高 S_h と水深 h_0 の比) が0.15~0.8の範囲にある5段階の越流条件の結果を示しており、水制高が高くなれば洗掘深と洗掘範囲が大きくなっていることがまず容易に確認できる。

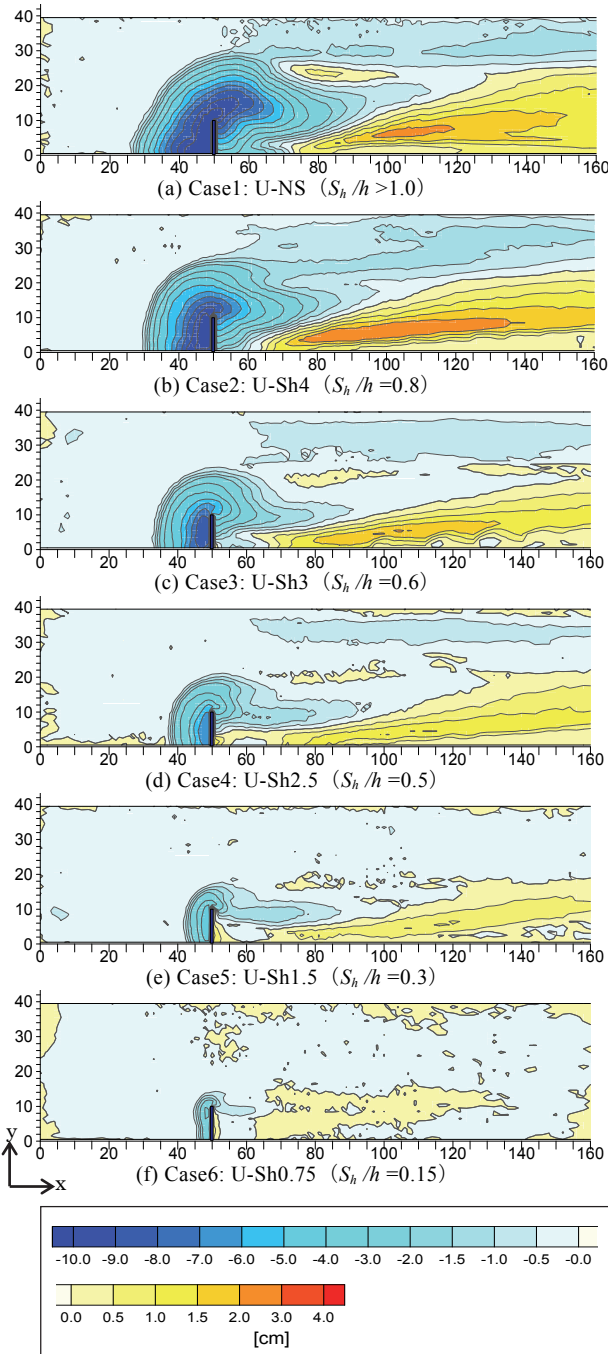
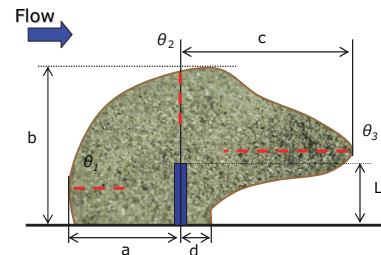


Fig. 3 Bed contour at the quasi-equilibrium stage for each Spur dyke height with uniform sediment bed

そして、ケース間の洗掘孔の違いや傾向を明らかにするために、非越流実験時と同様にFig. 4に示す洗掘孔のパラメータ (最大洗掘深や洗掘孔の大きさ、河床勾配等) をTable 3に整理した。



e_m : Maximum scour depth ($e_m^* = e_m / \sqrt{hL}$)
 h : Water depth (=5cm) L : Spur dyke length (=10cm)
 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$: Slope at designated section
 V_s : Volume of the scour hole

Fig. 4 Sketch of scour hole dimensions and several key parameters

Table 3 Bed topography features in U-series experiments

Case No.	1	2	3	4	5	6
Case Name	U-NS	U-Sh4	U-Sh3	U-Sh2.5	U-Sh1.5	U-Sh0.75
a/L	2.1	2.0	1.7	1.2	0.8	0.5
b/L	2.9	2.7	2.4	2.1	1.7	1.4
c/L	4.0	4.5	4.0	4.2	3.7	1.2
d/L	1.4	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
$\theta_1(^{\circ})$	31	30	29	30	31	32
$\theta_2(^{\circ})$	31	29	29	29	28	32
$\theta_3(^{\circ})$	12	12	18	15	14	1
e_m (cm)	11.7	11.0	8.8	6.8	4.9	3.1
e_m^*	1.66	1.56	1.24	0.96	0.69	0.44
V_s (cm ³)	5978	4410	2061	1102	460	148

Fig. 5に水制前面の縦断形状と水制設置位置 $x=50$ cmの横断方向の洗掘孔形状を示す。Fig. 5およびTable 3に示すとおり、均一砂河床上では水制前面と横断方向の洗掘孔の河床勾配 (θ_1, θ_2) は、どの水制高ケースにおいても $29^{\circ} \sim 32^{\circ}$ 程度と概ね一緒で、水中安息角程度の値を示している。

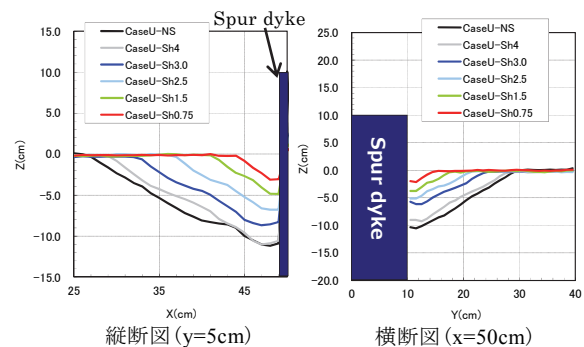


Fig. 5 Longitudinal and cross-section bed profiles near the spur dyke

Fig. 6 にはTable 3に示した洗掘孔の平面的な大きさと最大洗掘深の関係を示している。洗掘過程の後期において水制設置位置より上流側は、主に洗掘孔底部の河床低下によって河床勾配が水中安息角に到達し、砂のずり落ち現象により洗掘孔拡大が進行する。そのため、水制前面と横断方向の洗掘幅 (a/L, b/L) については水制近傍の最大洗掘深と正の相関があり、ほぼ線形関係に近い結果となっていることがこの図よりわかる。従って、水制前面と横断方向の洗掘幅については、洗掘深予測式等で求められた最大洗掘深から洗掘範囲を推定することによって、ある程度妥当な推定結果が得られると言えそうである。

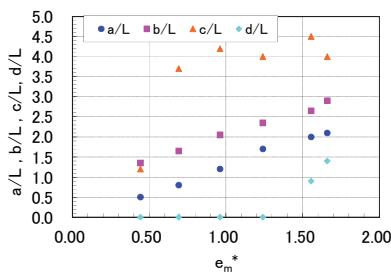


Fig. 6 Relation between scour hole width (a/L, b/L, c/L, d/L) and maximum scour depth

水制背後の洗掘幅 (d/L) については、洗掘が少ないケースにおいてはゼロの値を示し、非越流(Case1)および水制高4.0cmの非越流に近いCase2の洗掘の大きなケースのみ、水制背後に洗掘が生じている。Fig.7に示すように水制先端から水制背後にかけても河床勾配が水中安息角程度となっており、水制背後においても水制先端に向かって砂がずり落ちる現象によって洗掘範囲が拡大することがわかる。a/L, b/Lの水制上流と横断方向の洗掘幅については、最大洗掘深発生地点である水制前面の洗掘深の大きさによって砂がずり落ち洗掘幅が拡大するため、洗掘孔内の最大洗掘深によって支配されると考えられる。しかし、d/Lについては、洗掘幅が拡大する基本現象は同じと考えられるが、その洗掘幅の大きさを支配するのは、水制頭部から下流域に伸びる洗掘領域の深さとその縦断方向の長さだと考えられるためFig. 6においてa/L, b/Lとは傾向が異なっている。

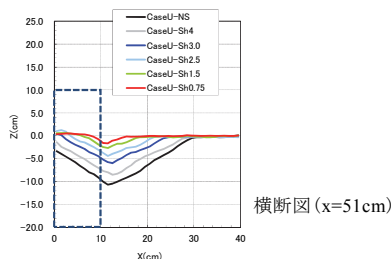


Fig. 7 Cross-section bed profiles behind the spur dyke

Fig. 8は水制先端から1cm離れた位置における河床の縦断形状である。縦断面からも水制高が高くなるにつれて相似形状で洗掘孔が大きくなっていることが確認できるが、非越流状態になることによる洗掘孔拡大の様子が若干他のケースと異なる。最大洗掘深位置が水制設置位置近くに発生し、相対水制高が0.8より低いケースまでは、相対水制高が大きくなるにつれて、水制上流側および下流側で同じ程度洗掘が進んでいる様子が確認できるが、非越流ケース(U-NS)と水制高4cm(U-Sh4)のケース間を比較してみると、Fig. 8の縦断面図では水制設置上流側の河床形状がほぼ同じで、下流側の洗掘の拡大のみが大きいことが確認できる。Fig. 3の河床コンター図からも越流ケースに比べて、非越流ケースの水制頭部とその若干下流域の洗掘が大きいことが確認できる。

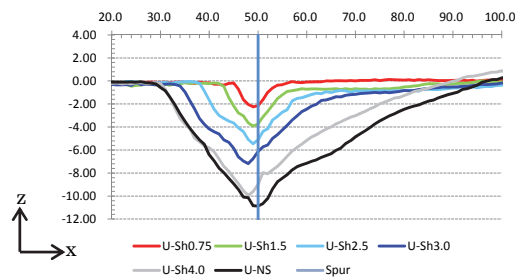


Fig. 8 Longitudinal bed profiles at the spur-dyke tip

Fig. 9にはFig. 3の河床高について、非越流に近い越流ケース (Case2: $S_h=4$) から非越流ケース (Case1) を差し引いた河床高の差をコンターで図示している。水制が非越流状態になることによって、水制上流側の側壁近くについては越流型と比べて洗掘が進行しているが、側壁から離れるとその差はそれほど大きくないことが確認できる。そして、注目すべきは水制頭部の若干下流の領域において、非越流状態は洗掘が特に大きくなっていることが図より確認できる。流れの計測結果は後に示すが、これは表層付近の流れを水制で完全に遮断することによって、越流時と比べて水制頭部に集中する流水が急増し、その影響により水制頭部域で顕著な下降流が発生し、そのため水制設置下流側で洗掘が大きくなったと考えられる。その影響は水制頭部近くだけでなく、水制背後域まで及んでいる。また、水制設置位置より下流の $y=25$ の位置で縦断方向に細長く伸びる堆積領域見られるが、これは非越流状態においては越流状態に比べて馬蹄形渦が顕著に存在するため、馬蹄形渦により上向きの流れが続く縦断領域が形成され、その領域では掃流力が相対的に周囲より小さくなるために形成されたと考えられる。

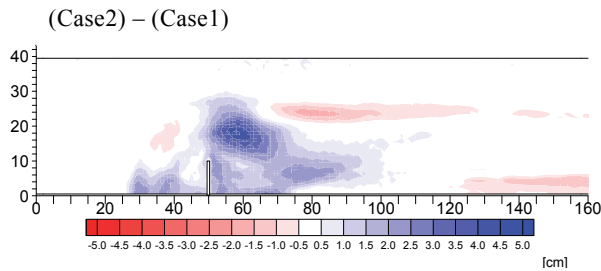


Fig. 9 Difference of bed height results between non-submerged and almost non-submerged cases.

水制高の変化に伴う上流側および下流側の洗掘量の変化傾向についても確認するために、Fig. 10には水制設置位置 ($x=50$) を境に洗掘量を上流側 (V_{s_up}) と下流側 (V_{s_down}) に分けて、相対水制高とその洗掘量の関係を図示したものである。この図より、越流状態の全ケースについては、水制より上流側の洗掘量が多いが、非越流状態ではその傾向が逆転し、下流側の洗掘量が急に増加していることが確認でき、非越流型水制では越流型と比べて下流側の洗掘が進行する特徴がこの図に表れている。

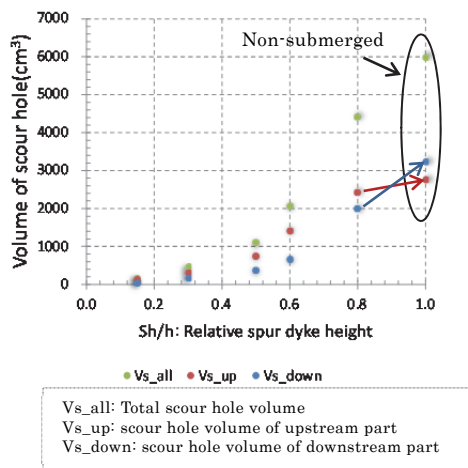


Fig. 10 Relation between volume of scour hole and spur dyke height

3.2 河床粒度分布が局所洗掘に与える影響

Fig. 11 には、非越流と水制高 $S_h=4.0\text{cm}$ ($S_h/h_0=0.8$) および $S_h=2.5\text{cm}$ ($S_h/h_0=0.5$) 越流状態において、Fig.2 に示した3つの混合砂ケースについて通水3時間後の河床高コンター図を示している。これらの図より、平均粒径が同等でも粒度分布が異なれば水制周辺の洗掘および堆積域が大きく異なってくるのが良くわかる。また Table 4 には均一砂実験と同様に、混合砂ケースについて最大洗掘深、洗掘孔の大きさや河床勾配等を表にして整理している。

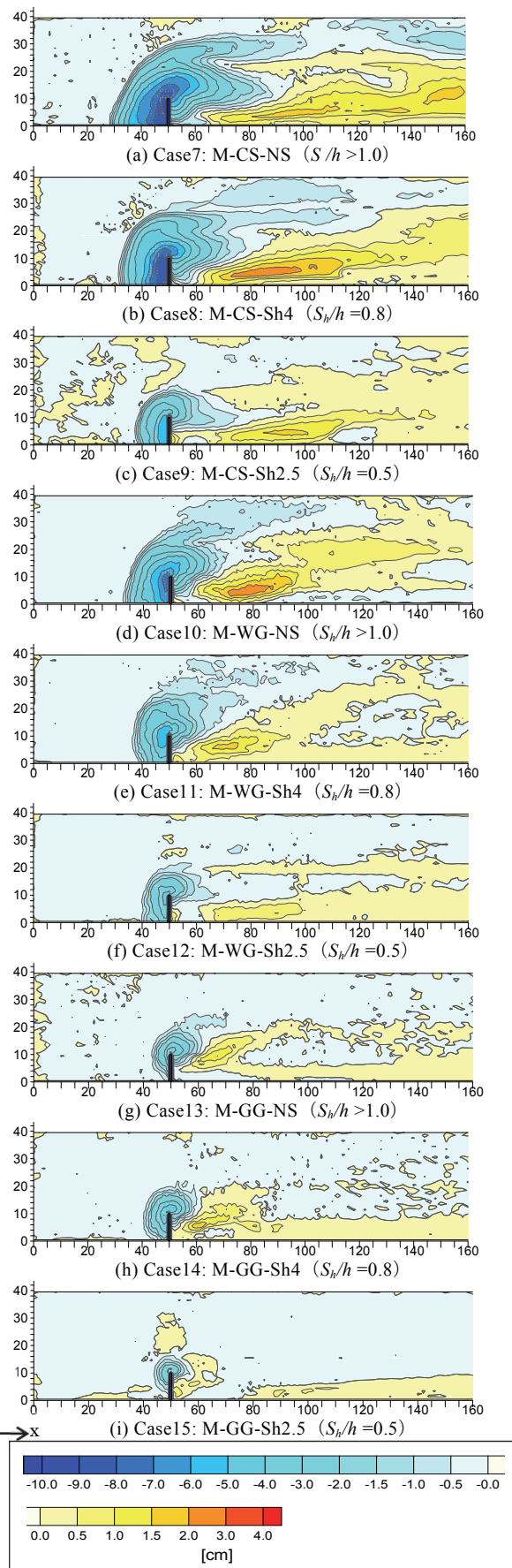


Fig. 11 Bed contour at the quasi-equilibrium stage for non-uniform sediment bed

Table 4 Bed topography features in M-series experiments

Case No.	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Case Name	CS NS	CS Sh4	CS Sh2.5	WG NS	WG Sh4	WG Sh2.5	GG NS	GG Sh4	GG Sh2.5
a/L	2.1	1.8	1.2	1.6	1.3	1.0	0.7	0.9	0.6
b/L	3.0	2.8	2.1	2.2	2.6	2.0	2.0	2.0	1.6
c/L	3.7	2.8	2.5	1.6	2.8	1.6	1.0	1.0	0.6
d/L	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$\theta_1(^{\circ})$	20	26	26	21	2.5	22	34	28	25
$\theta_2(^{\circ})$	24	21	23	21	17	20	27	27	29
$\theta_3(^{\circ})$	12	13	13	17	15	13	16	25	22
$e_m(\text{cm})$	9.3	8.9	5.9	7.5	6.0	4.4	5.3	5.2	3.2
e_m^*	1.32	1.25	0.83	1.06	0.84	0.62	0.75	0.74	0.45
$V_s(\text{cm}^3)$	4026	2826	891	1964	1236	487	353	500	117

Fig. 12には相対水制高と最大洗掘深の関係を各河床材料条件別に色分けして示している。この図より、混合砂河床においても、均一砂河床と同様に相対水制高が大きくなるにつれて最大洗掘深および洗掘量も大きくなる傾向が見取れる。

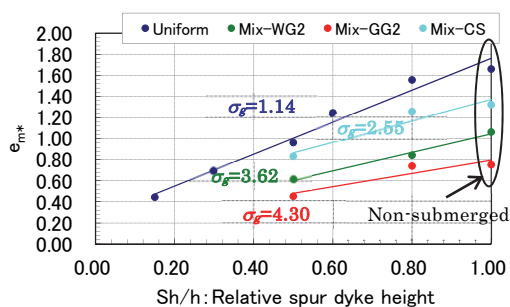


Fig. 12 Relation between (e_m^*) and (S_h/h)

Fig. 13には最大洗掘深と河床材料の幾何標準偏差 (σ_g) との関係を示す。非越流時の実験と同様に、どの越流状態の結果も σ_g が大きくなるにつれて洗掘深が小さくなる傾向を示している。そして、Fig. 14には水制先端位置の河床表面層粒度分布を示す。河床表面層において、洗掘する過程で細粒分が減少し、粗粒化が進んだ状況が粒度分布より確認でき、越流型水制においてもアーマ・コートが形成され洗掘が軽減していることが分かる。

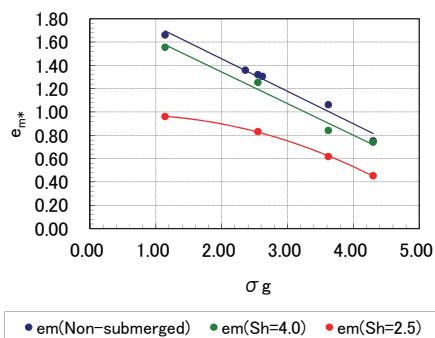
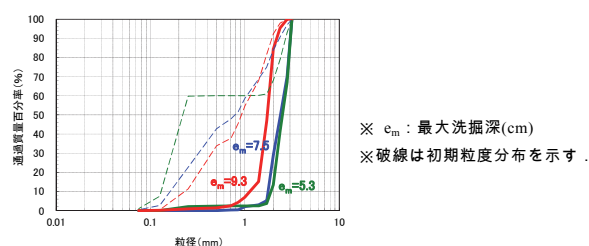
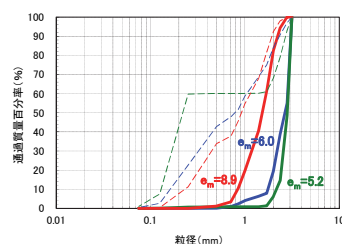


Fig. 13 Relation between (e_m^*) and (σ_g)



(a) Non-submerged ($S_h/h > 1.0$)



(b) Submerged ($S_h=4.0, S_h/h = 0.8$)

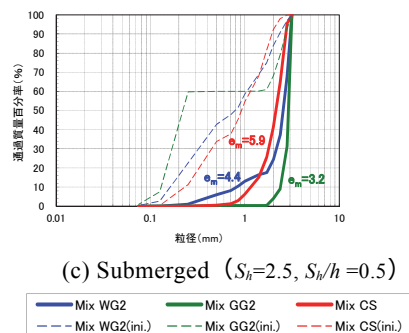


Fig. 14 Grain-size variation at the spur dyke head

3.3 越流状態の異なる3次元流れ場

越流型・非越流型水制周辺の複雑な3次元流れ構造を把握するために、電磁流速計を用いた点計測によりいくつかの代表断面の流速場、そしてPIV法を用いて表層流れの解析を行った。この節では、非越流型および越流型水制実験の代表ケースについて行った3次元流れ場の計測結果を示し、考察を行う。

まず、Fig. 15にはPIV法によって解析された表層流れの流速ベクトルおよび流線図を示す。本実験の非

越流状態洗掘河床の流れは、水制から下流へ2L（水制長の2倍）の位置に湧昇域が発生し、扇状で放射線状の表層流れとなっている。越流状態になると水制上部で水が流れ、表層においては障害される事なく滑らかに下流へ流れている様子が確認できる。ただし、後述する水制背後の縦渦によって、越流型水制ケースの表層流れは、水制背後域において左岸へ屈折する表層流れが発生しており、その屈折の程度は水制高が低い程小さいことが流線図より確認できる。

Fig. 16には $y=5\text{cm}$ の水制の中央位置の縦断面流速ベクトル図を示す。どの越流状態においても水制前

面で下降流が発生し、洗掘孔内においては渦が発生して河床を洗掘している様子が流れ場から窺える。また、水制下流側については、非越流と $S_h/h_0=0.8$ ケース共に、水制頭部の底部から右岸側壁に向かって水制背後へと回り込む流れが河床形状の影響により上昇流れとなっていることが確認できる。非越流ケースの水制背後域の表層流れは、湧昇域によって逆流域となっているが、越流ケース共に水制を越えてくる流水の影響を受け下流向きの流れとなっている。 $S_h/h_0=0.5$ ケースについては越流水の影響が大きく水制背後底部の近い領域のみにおいて流速が弱まっている様子が確認できる。

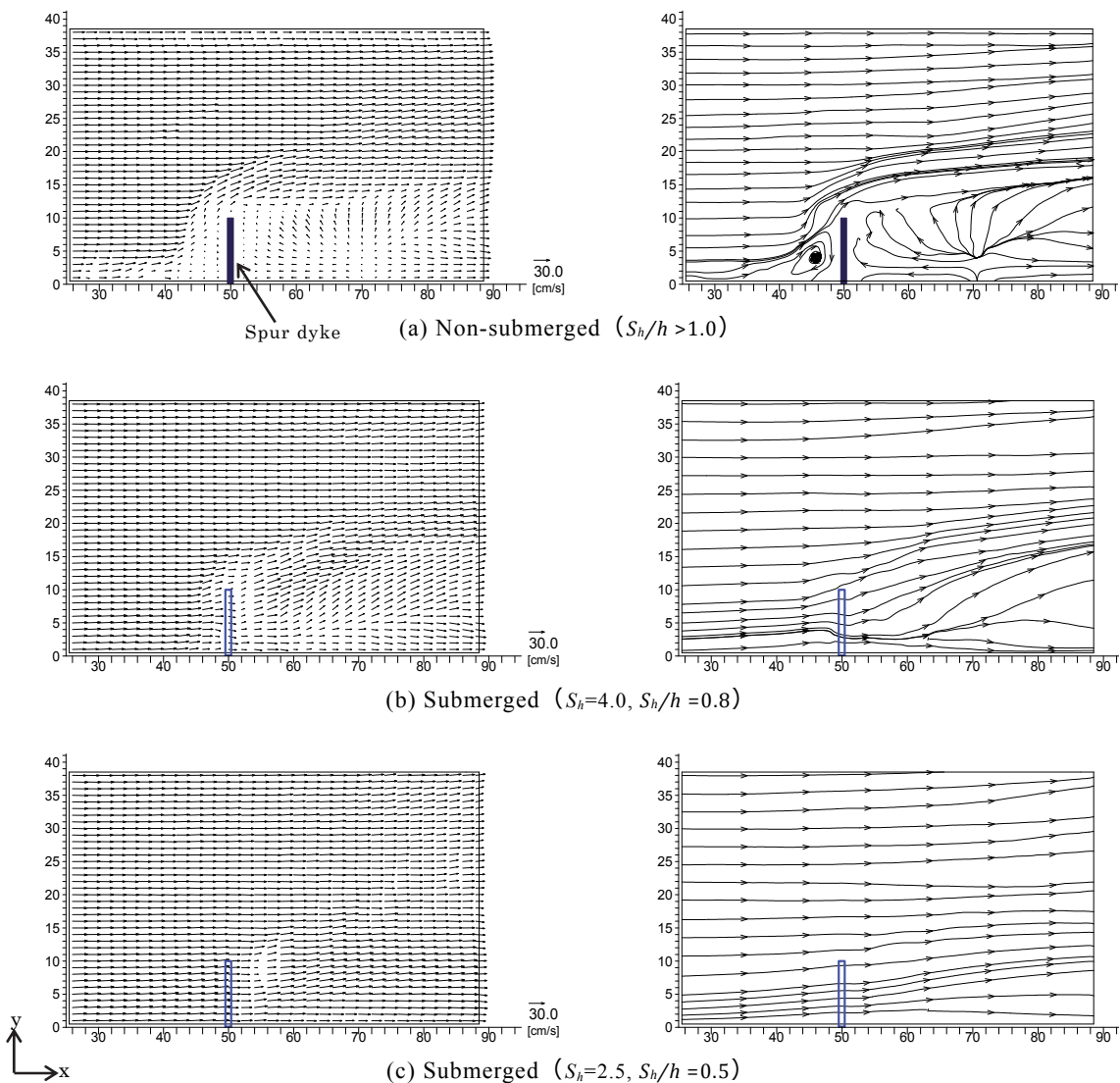


Fig. 15 Velocity vector (u,v) and stream line at the surface flow under scoured bed

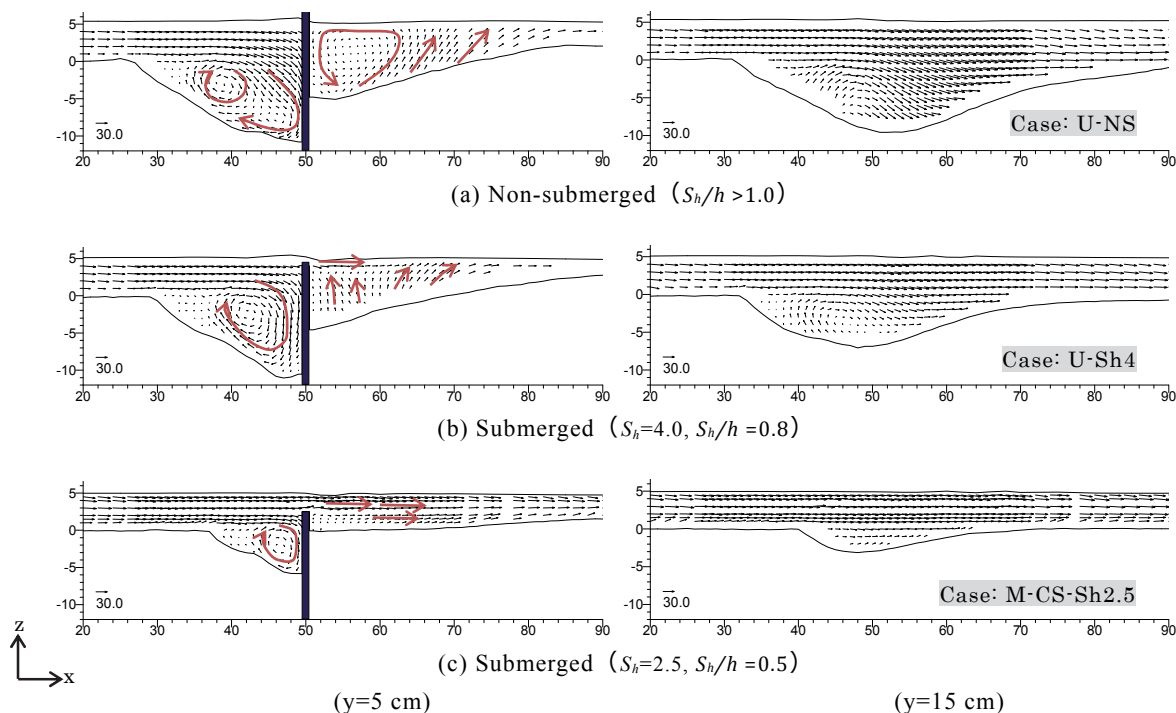


Fig. 16 Velocity vector (u, w) at the longitudinal section (left: $y=5$; right: $y=15$ cm)

ほぼ平衡状態に達した洗掘河床において、水制前面に存在する渦の中心位置は、非越流ケースが最も水制設置位置から遠く、水制高が低いほど水制に近づいている。Fig. 17(a)に水制前面の渦の中心位置にあたる $y=5$ cm, $z=-2$ cm 縦断の鉛直流速の比較図を示す。水制前面においての渦の上昇流および下降流の鉛直流速の大きさについては、ケース間でそれ程大きな差が見られないが、下降流の発生している幅は、水制が高いほど上流側に広いことが計測結果より示された。平衡河床上の流速場の計測のため、鉛直方向の流速の差があまり大きくないが、ケース毎の平衡時の河床形状の違いから、洗掘の進行が活発な過程においてケース間で鉛直流速が異なってくる可能性は高いと考えられる。Fig. 17(b)には水制頭部近傍の $y=15$ cm, $z=-1$ cm 縦断の洗掘孔内の鉛直流速に

関する比較図を示す。非越流ケースは水制位置より下流域において、接近流速の4割程度の大きさの顕著な下降流が発生しており、その縦断方向の範囲も広い。この下降流によって、非越流ケースにおいて水制頭部とその下流域の洗掘が越流ケースに比べて大きくなったことがわかる。また、水制高が低くなれば水制頭部の下降流の大きさと範囲が小さくなることがこの図より確認できる。Fig. 17(b)では $S_h/h_0=0.5$ ケースにおいて下降流域が存在しないが、これは後に示す横断図より確認できるが、下降流が生じていないのではなく、水制が低くなると水制頭部の下降流域が横断方向にも狭くなるために、水制高の低い $S_h/h_0=0.5$ ケースは $y=15$ cm の位置では下降流となくなってしまうためである。

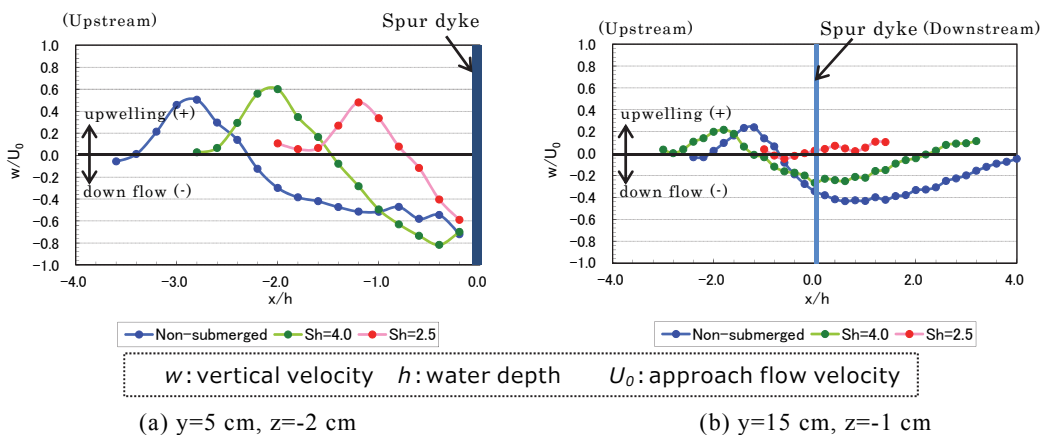


Fig. 17 Vertical velocity (w) in the scour hole

Fig. 18, Fig. 19 には非越流および越流 $S_h/h_0=0.8, 0.5$ ケースの $x=50\text{cm}$, 55cm 位置の横断面の流速ベクトル図を示す。横断面図より、水制前面から曲げられた馬蹄形渦の存在と、水制頭部における下降流領域、そして水制背後に馬蹄形渦と逆回転である後流渦の存在が確認できる。また、それらの縦渦によって水制背後域の表層流れが支配されていることが確認できる。水制設置位置である $x=50$ 断面においては、水制先端近くで顕著な下降流がどのケースも確認できる。ただし、その下降流が駆動力となっている馬蹄形渦については、非越流状態では顕著に存在しているが、水制が低くなると徐々に弱まり、 $S_h/h_0=0.5$ ケースにおいては水制頭部の馬蹄形渦が計測結果からは明瞭には確認できない。水制背後の $x=55$ 断面においては、水制先端近辺の下流域において下降流が発生しており、水制背後の後流渦は共通して見られる。非越流ケースについては馬蹄形渦が $x=55$ 断面においても顕著であり、左岸方向へ斜面を上る流速ベクトルも大きい。 $x=65$ 断面でも同様に計測は行っており、後流渦はどのケースにおいても存在し、そして馬蹄形渦についても非越流ケースのみ確認している。

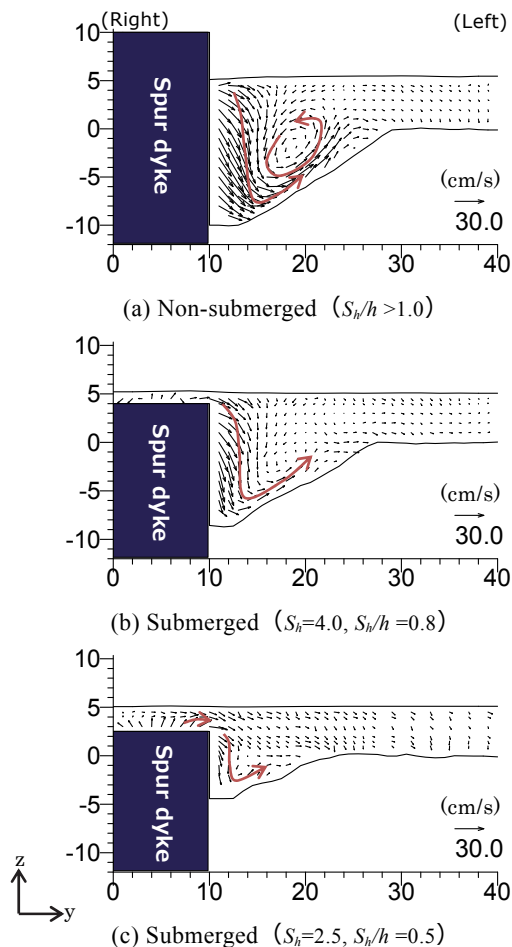


Fig. 18 Velocity vectors (v,w) at $x=50$ cross section

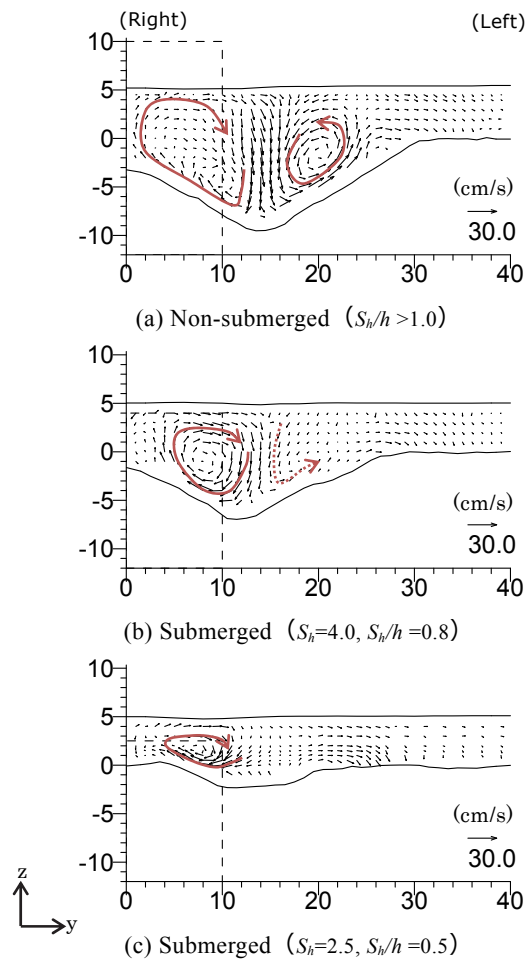


Fig. 19 Velocity vectors (v,w) at $x=55$ cross section

Fig. 20 には河床から一律 1.5cm の高さの平均流速を計測した底面近傍流れのベクトル図を示す。底面近傍の流れは、河床近傍掃流力の平面分布を把握するだけでなく、砂粒の輸送経路を把握するのにも有効である。どの越流状態においても、水制前面から水制頭部領域にかけて、馬蹄形渦により河床近傍において洗掘孔の縁に向かう流れが発生している。洗掘孔の縁付近では流れが衝突し流速が局所的に弱くなっており、その地点では流速ベクトルの変化も大きいことが特徴的である。水制設置による洗掘進行によって、水制背後域だけでなく水制上流側の洗掘孔の縁部分も局所的に流速が弱く淀んだ領域が形成されていることが確認できた。また、水制頭部の下流領域においては、各越流ケース共通して水制背後へ向かう流れが存在している。以上のように、水制周辺の洗掘孔河床底部の流れ場は、流れの3次元性、特に渦構造によって支配されており、流速ベクトルの変化が激しいことが確認できた。

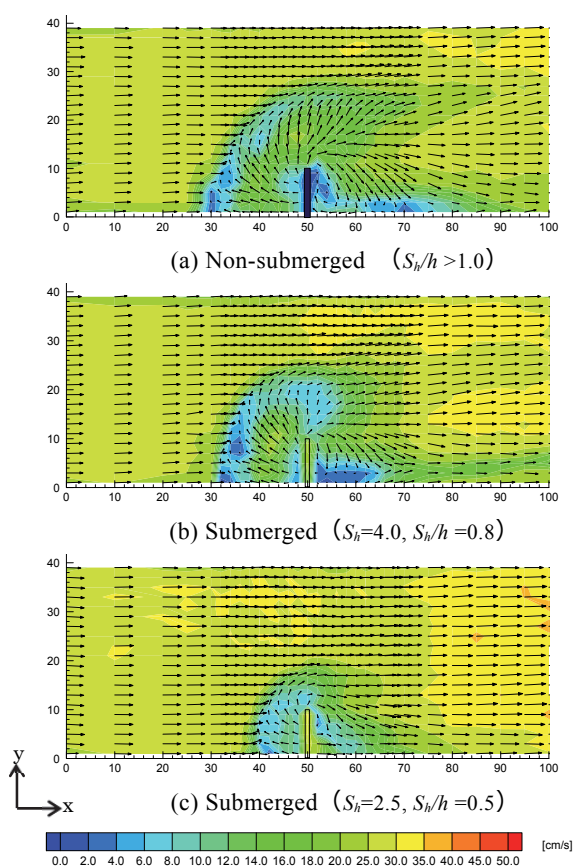
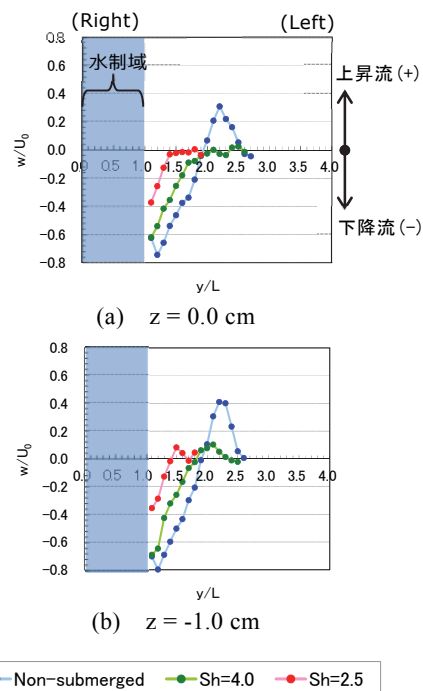


Fig. 20 Bottom velocity vectors and contour above 1.5cm from the bed

次に、水制高の違いが水制頭部近傍の鉛直流速に対してどのような影響を及ぼすのかを把握するために、水制設置断面である $x=50\text{cm}$ の鉛直方向の流速についての比較を行った。Fig. 21 には流速計測地点の共通の高さである $z=0.0, -1.0\text{cm}$ の鉛直流速に関する比較図を示している。この図より水制頭部の下降流については水制高が高い程大きな値を示し、その下降流域の横断方向の幅も大きいことが確認できる。これは、水制高の影響が水制頭部への流水集中度の違いを生んだ結果であると考えられる。非越流状態では、Fig. 15(a)に示すように水制を迂回する流れと主流部の流れが衝突する流水の量が多いが、越流状態においては水制上部では水がそのまま下流へと流れるため、水制頭部に集まる流水が減少する。そのため、水制頭部域の流水集中による鉛直方向の圧力勾配が弱まり、結果として水制高が小さい程水制頭部において下降流が弱まる結果となったと考えられる。また、Fig. 21 の上昇流の発生している領域については、斜面に沿って上昇流れとなっている馬蹄形渦の一部分が表示されている。



w : 鉛直方向流速 h : 水深 U_0 : 接近流速 L : 水制長

Fig. 21 Vertical velocity at the spur dyke section

次に各越流状態において、底面近傍の横断方向流速について比較を行った。Fig. 22 は $x=50, 55\text{cm}$ 横断における底面近傍の横断方向流速について、各越流ケース比較した図である。縦軸が横断方向の位置を示し、横軸が横断方向の流速 (v) を示し、プラス (+) は左岸方向、マイナス (-) は右岸方向の流れを表している。水制先端から左岸側 $1.0 < y/L < 2.5$ の水制頭部近傍の範囲において、非越流状態が最も左岸方向の流れが大きく、水制高が低くなる順にその値が小さくなっていることが図より確認できる。この原因については、前述した水制頭部近傍の鉛直流速に密接に関係し、水制頭部における下降流が弱いと馬蹄形渦の流れが弱まり、また河床近傍において左岸方向への流れが小さくなることが考えられる。

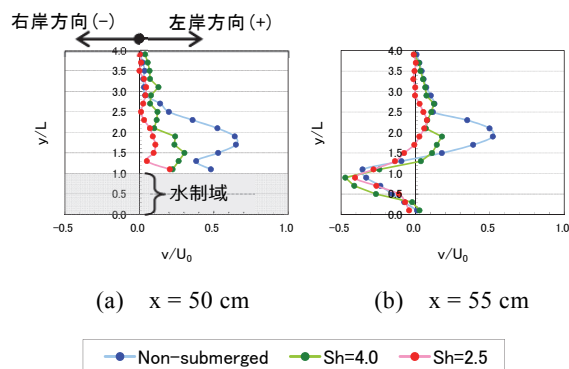


Fig. 22 Bottom velocity in the transverse direction

3.4 水制高と河床粒度分布変化の関係

Fig. 23 には、非越流、そして水位高 $S_h=4, 2.5$ の2つの越流状態について、Mix-CS 混合砂ケースの河床表層の平均粒径の変化について図示している。計測地点を丸で示し、その色については平均粒径の計測結果を初期の平均粒径で除した値を示し、粒度分布の初期からの粗粒化および細粒化を暖かい色と冷たい色に分けて示している。図の帯状領域については、特に細粒化および粗粒化している部分の範囲と粒度分布の計測を行ったので合わせて表示している。また、Photo 1 には Fig. 23 と同じケースについての通水3時間後の河床表層撮影画像を示している。カラーサンド混合砂を用いた実験については、ふるいで3つの粒径区分に分け、粒径の小さい区分から赤(0.125mm~0.50mm)・青(0.5mm~1.40mm)・黒(1.4mm~2.36mm)と色分けし混合して用いた。色分けすることによって通水中や通水後の河床表層の色の分布より、その地点の卓越する粒径範囲を目視や撮影画像によって把握することが可能となる。

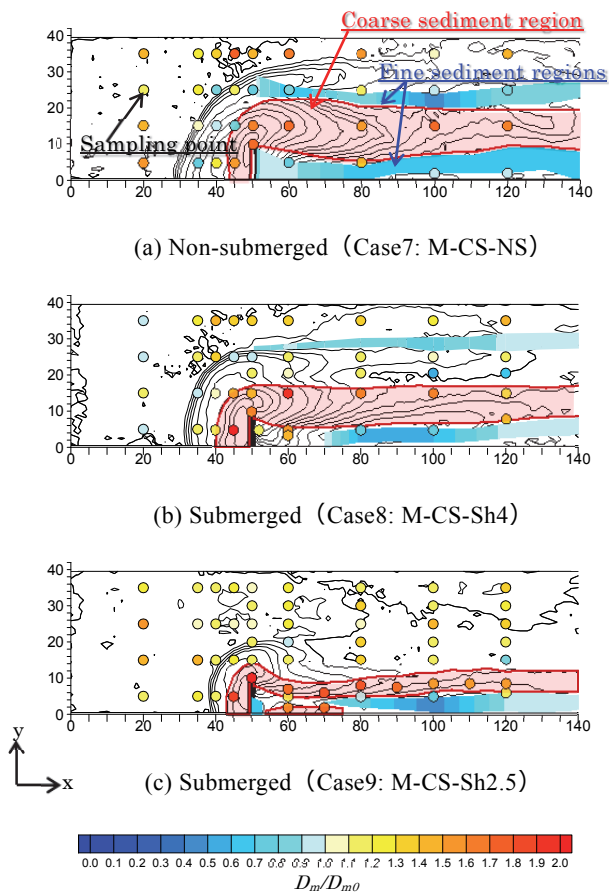
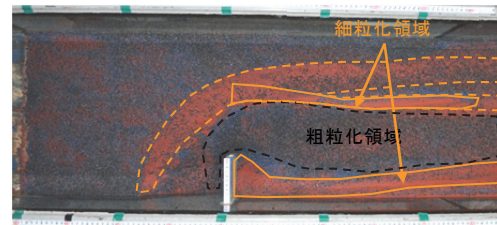


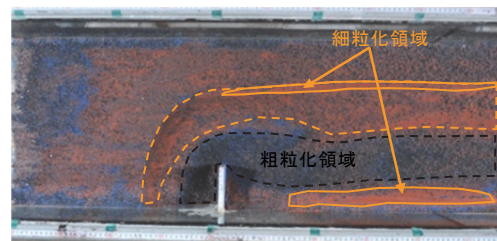
Fig. 23 Change ratio of mean diameter (D_m/D_{m0})

基本的には、clear-water scour条件の実験であるため、水制の効果により水制位置近辺の主流域については流速が相対的に大きくなり、小さな砂粒が下流へ運ばれ粗粒化が進むことになる。洗掘が進行し、準平

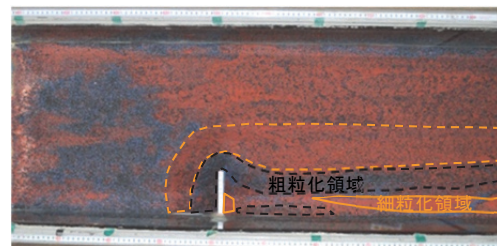
衡河床時においては、越流ケースも非越流ケースと同様に水制前面および頭部域とその下流領域に伸びる長い範囲において共通して粗粒化が進行している。馬蹄形渦により洗掘孔底部から洗掘孔縁へと向かう底面流れ (Fig. 20) と洗掘孔の河床勾配によって分級現象が生じ、混合砂河床の洗掘孔内底部では共通してアーマ・コートが形成されている。



(a) Non-submerged (Case7: M-CS-NS)



(b) Submerged (Case8: M-CS-Sh4)



(c) Submerged (Case9: M-CS-Sh2.5)

Photo 1 Bed surface of each color sand cases

水路中央側の洗掘孔縁の若干内側に形成される帯状細粒化領域については、非越流時には比較的顕著に形成されていたが、 $S_h/h_0=0.8$ ケースではその細粒化領域が非越流ケースに比べて細く形成され、そして、 $S_h/h_0=0.5$ ケースでは細粒分の帯状領域が形成されない結果となっている。越流ケースにおいては、細粒分が輸送過程において局所的に集まって運搬されず、Photo 1 (b),(c)の赤破線で示した領域で分散して下流に運搬されている様子がインターバル撮影画像や目視より確認され、非越流ケースに比べ細粒分が洗掘孔の縁に集中し難い状況にあったと考えられる。これは先に示した河床底面近傍において、越流ケースは非越流ケースに比べて左岸方向の流れが小さくなっていることが原因と考えられる。左岸方向の流れが弱く、粒径の小さな砂粒が水路中央側の細

粒化領域に運ばれる量が減り、 $S_h/h_0=0.5$ ケースについては左岸方向の流れが特に小さいことから細粒分が洗掘孔の縁に集中せずそのまま下流に輸送されたと考えられる。また Fig. 19, Fig. 20 に示すように、非越流ケースでは水路中央側の細粒化領域の位置において、馬蹄形渦によって流れが若干上向きとなり、その影響で局所的に河床近傍流速が低減されているが、越流ケースについてはその馬蹄形渦が顕著に存在しないために、流れが上向きに偏向することによる底面流速の低減域が形成されていない。この越流と非越流間の掃流力の違いが細粒化領域の形成に影響したことも、原因の一つと考えられる。

そして、どの混合砂河床を用いた実験においても、水制背後域に縦断方向に伸びる細粒化領域が形成された。これについては、どの越流状態においても水制頭部から水制背後域へ向かう細粒分を運ぶ河床近傍流れが存在していたことを意味しており、洗掘孔の河床勾配に逆らって後流渦が細粒分をより水制背後へと運搬したと考えられる。

越流ケースについては、Fig. 23(c)に見られるように水制直背後において局所的な細粒化領域が存在し、その細粒化域の下流側（水制位置から水制の長さ程度の位置）に粗粒化域、そしてその粗粒化域の下流側に長く細粒化域が作成されている。この部分的な粗粒化域については、非越流ケースでは見られない現象で特徴的である。これはFig. 24に示すように、平坦河床上の越流状態の水制背後には、水制上部を越えてくる流速の大きな流水によって水制背後に横断方向に軸を持つ渦が形成され、その渦によって水制直背後へと向かう底面流れが発生し、水制直背後領域に細粒分が運搬されたと考えられる。その水制を越えた流水が河床へ再付着する地点は、水制高 $S_h=2.5\text{cm}$ ケースでは、水制の高さの5倍程度のところに位置し、底面渦による逆流域の長さも $5S_h$ であった。ただし、水制背後の横断方向に軸を持つ底面渦は、Fig. 16(c)に示すように洗掘河床上の流れでは存在しておらず、水制周辺が洗掘することによって水制背後の流れ場も変化することが示されており、従って越流水制背後の細粒化小領域は洗掘過程の比較的初期に形成されたものと考えられる。

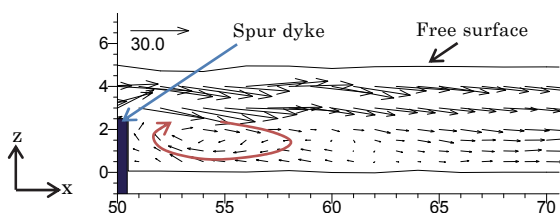


Fig. 24 Velocity vector (u, w) at the longitudinal section ($y=5$) on flat bed

4. 結論

本研究では、非越流型および越流型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、水制の高さを変化させた均一砂および混合砂河床の移動床実験を行った。水制の高さと局所洗掘の関係について考察し、水制高の異なる3ケースの洗掘河床における3次元流れ場の計測によって、水制高の違いがもたらす河床表層の粒度分布変化についても考察を行った。そして、非越流型だけでなく越流型の水制工設置によっても、多様な河床地形と粒度分布環境が創出されることが分かった。

本実験で得られた結果をまとめると以下のようになる。

(水制高と河床変化の関係)

- [1] 同一の均一砂河床を用いて水制高のみを変化させた実験により、水制近傍の最大洗掘深については相対水制高（すなわち Overtopping ratio の逆数）とほぼ線形関係にあることを示し、水制周辺の洗掘深を予測する上で相対水制高が重要なパラメータとなることを示した。
- [2] 非越流に近い越流状態と非越流状態の水制がつくりだす平衡状態に近い河床高の比較から、水制高が非越流になることによって水制上流側の洗掘の拡大よりも水制頭部下流側において洗掘が進む傾向が示され、越流状態内で相対水制高が高くなると進む平面的な洗掘傾向と傾向が異なることが明らかとなった。
- [3] 洗掘過程後半の水制上流側と横断方向の洗掘孔拡大は、主に水中安息角による砂のずり落ち現象に支配されるために、その洗掘孔の平面的な大きさは、最大洗掘深と線形関係に近いことが実験結果より示された。

(初期粒度分布が越流型水制周辺の河床洗掘に与える影響)

- [4] 均一砂河床と同様に、各混合砂においても相対水制高が大きくなるにつれて最大洗掘深および洗掘量が大きくなる傾向を示すことが分かった。そして、非越流型水制の実験結果と同様に、どの越流時の結果も σ_g が大きくなるにつれてアーマ・コートが形成されるまでに必要な洗掘深が小さくなり、最大洗掘深が小さくなる傾向が示された。

(水制高が洗掘河床の流れ場に与える影響)

- [5] 準平衡状態河床の洗掘孔内における水制前面の流れ場において、馬蹄形渦による上昇流およ

び水制直前面の下降流の鉛直流速については、水制高の異なるケース間ではそれ程大きな差が見られないが、下降流の発生している幅については、水制が高いほど上流側に広いことが計測結果より示された。

- [6] 水制先端から下流へ拡がる洗掘深の比較的大きな領域において、非越流時が最も下降流の大きさとその縦断及び横断方向の範囲が大きく、水制高が低くなるにつれてその下降流の大きさと範囲が小さくなるのが計測結果より示された。
- [7] 水制頭部近傍において水制高が高くなると下降流が強まり、その影響により馬蹄形渦の流れも強くなるため、水制先端から主流路側の河床近傍において、洗掘孔底部から斜面を駆け上がる左岸方向の河床近傍流れは、水制高が高い方が大きいことが示された。
- [8] 水制設置による洗掘孔形成によって、水制背後域だけでなく水制上流側の洗掘孔の縁部分にも局所的に流速が弱く淀んだ領域が形成されることが示された。

(水制高が河床表層の粒度変化与える影響)

- [9] 本実験の越流状態において、どの混合砂河床を用いた実験ケースにおいても水制背後域に細粒化領域が形成され、流れ場の計測によって非越流時と同様に、越流状態においても水制背後域へ細粒分を運ぶ顕著な後流渦が計測された。
- [10] 非越流実験では比較的顕著に形成された水路中央側の帯状細粒化領域については、越流状態ではその幅が狭くなり、水制高が低い越流ケースにおいては細粒化領域が形成されないケースも確認され、越流時は非越流状態に比べて水路中央側の帯状細粒化領域が形成され難いことが確認された。
- [11] 越流状態の洗掘の初期過程において、水制背後に横断方向に軸を持つ底面渦より底面近傍において逆流域が形成され、水制直背後に細粒化領域、そしてその下流に局所的な粗粒化領域が形成されることが確認された。
- [12] 水制頭部から下流に拡がる縦断方向に長い粗粒化域の横断方向の幅については、非越流時が最も広く水制高が低くなるにつれて粗粒化幅が狭く形成される傾向が示された。

本研究で行った一連の移動床実験の計測結果は、数値計算モデルの妥当性検証をする上で有効なデータである。越流型および非越流型水制周辺の局所洗

掘現象において、河床形状および流れ場だけでなく河床表層の粒度分布まで計測した総合的なデータは少なく、今後の”粒度分布の空間変化を精度良く計算可能な河床変動モデルの構築”のための検証材料として有用である。

謝 辞

本稿の実験は、文部科学省の科学研究費補助金(若手研究(B))、代表:張浩, No. 22760369)ならびに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)の助成を受けている。また、一部の実験については住友秀成君(現住友商事株式会社)の協力により実施している。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 鄭 載勲・富永晃宏(2009):高水敷に水制を有する複断面河道の流れ構造, 水工学論文集, 第53巻, pp. 913-918.
- 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.
- 松本大三・富永晃宏・石川光雄(2008):越流型水制群を用いた河床変動創出に及ぼす透過性の影響, 水工学論文集, 第52巻, pp. 637-642.
- 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.
- Ghodsian, M., Vaghefi, M. (2009): Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T-shape spur dike in a 90° bend, International Journal of Sediment Research, Vol. 24, No.2, pp.145-158.
- Masjedi, A., Dehkordi, V., Alinejadi, M., Taeedi, A. (2010): Experimental study on depth in around a T-shape spur dike in a 180 degree bend, Journal of American Science, 6 (10), pp. 886-892.
- Masjedi, A., Nadri, A., Taeedi, A., Masjedi, I. (2010): Control of local scour at single L-shape spur cike with wing shape in flume bend, Journal of American Science, 6 (10), pp. 893-897.
- 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.

Local Scour and Sediment Sorting around a Spur Dyke

Hideaki MIZUTANI*, Hajime NAKAGAWA, Kenji KAWAIKE, Yasuyuki BABA and Hao ZHANG

* Graduate School of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University, Japan

Synopsis

This paper presented an experimental study on the impact of both spur dyke height and grain size distribution on the bed topography and bed surface composition around an impermeable spur dyke. The importance of governing parameter, i.e. the relative spur dyke height, which is inverse number of overtopping ratio, was emphasized through quantitative evidences. It was found in the current experiments that the spatial progress pattern of scour-deposition in non-submerged and nearly non-submerged condition was different compared with full-submerged condition. Furthermore, in the submerged experiments using non-uniform sediment bed, it was found that the maximum scour depth decreased with the increased of the standard deviation as well as in non-submerged spur dyke experiments. The flow measurement around the spur dyke revealed the difference of three-dimensional flow structure under the different submergences of the spur dyke, and the relationship to the variation of the surface bed composition. It was also found that with the increase of the spur dyke height, the longitudinal coarse sediment region was expanded to transverse direction in the downstream region of the spur dyke head.

Keywords: Spur dyke, Non-uniform sediment, Grain-size variation, Relative spur dyke height