

1. はじめに

木曽川の河口から 37km 地点では、大規模な深掘れが確認され問題視されてきた。加えて現在では 38km 地点においても同様の深掘れが確認され上流側に拡大を続けている。この深掘れの形成過程として、まず、粘土層が侵食され砂層が露出することにより砂層の河床低下が発生し、段落ちが形成される。この段落ち部の側岸付近に鉛直軸を持つ平面渦が発生することにより深掘れが進行すると推測されている。また、平面渦の形成には砂州と河岸凸部の存在が影響していると考えられる。このメカニズムを解明し、深掘れの拡大の抑制を検討するため、段落ち深さ、砂州、河岸凸部と平面渦の関係を実験と計算により調べた。

2. 実験方法

実験水路は、長さ 12m、幅 0.6m の勾配可変水路を使用し、水路勾配 $I=1/1000$ とした。水路鳥瞰図を図-1 に示す。実験は移動床実験で、水路上流から 6~8m 付近に図-1 に示すような平坦河床から現地の深掘れを再現した勾配 1/3 の傾斜を有する段落ち部を経て、段落ち部と同勾配の段上がり部を設けている。また、平面渦発生のかきかけとなる側岸の凸部を段落ち部直前の左岸部に図-1 のような直方体を設置した。砂州無しの場合では、凸部は水路の構造上設置せず、図-2 のように砂州を模した高水敷を取り除くことで水が流れるようにした。段落ち深さは 4 号砂（平均粒径 0.611mm）を用いて図-1 のように斜面段落ち部を有する 40cm 幅の箇所に敷き詰めていき変化させた。流速計測は 2 成分電磁流速計を用い、サンプリング周波数 50Hz で 4096 個のデータを取得して解析を行った。x 座標、y 座標の原点は、ともに段落ち部直前の右岸とした。測定方法は、一定高さで縦横断方向に 10cm 間隔で平面的に計測を行い、兩岸付近は 1.5cm 離れた点において測定した。鉛直方向へは順次高さを下げていき、水面から 1.5cm を水面付近、半水深、河床から 1.5cm を底面付近として 3 断面で計測した。流量は現地の観測結果からフルード数、流量を算出し、フルードの相似則を用いることで決定した。また、砂州無しのケースでは、砂州有りのケースと段落ち部での流速が同程度になるように流量を設定した。実験条件を表-1 に示す。以降、図表に示しているケース名では、凸部有りのケースを s、無しのケースを ns、砂州無しのケースを nh とし、断面は水面付近を suimen 半水深を han 底面付近を teimen とする。河床高は段落ち深さとして示しており、末尾に値を示している。また、結果の図は特徴が顕著ものを示している。

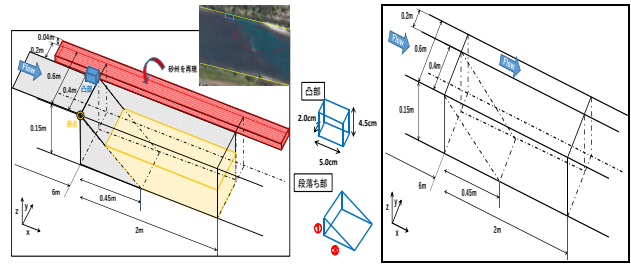


図-1 実験水路の鳥瞰図

図-2 砂州無し水路図

表-1 実験条件

	流量 Q(L/s)	水深 (cm)	平均流速 (cm/s)	フルード数 Fr	段落ち深さ (cm)	水路勾配 I
ns	2.6	2.33	17.87	0.37	-10.0	1/1000
		2.31	18.00	0.38	-7.5	
		2.32	17.99	0.38	-5.0	
	4.0	2.28	18.29	0.39	-2.5	
		3.11	21.41	0.39	-10.0	
		3.11	21.43	0.39	-7.5	
s	2.6	3.05	21.99	0.40	-5.0	
		3.00	22.20	0.41	-2.5	
		2.37	17.58	0.36	-10.0	
	4.0	2.37	17.82	0.37	-7.5	
		2.37	17.99	0.37	-5.0	
		2.35	17.70	0.37	-2.5	
nh	5.7	3.15	21.13	0.38	-10.0	
		3.15	21.14	0.38	-7.5	
		3.14	21.23	0.38	-5.0	
	3.6	3.12	21.40	0.39	-2.5	
		3.18	29.84	0.53	-2.5	
		2.18	29.86	0.53	-5.0	
	2.40	24.97	0.51	-2.5		
	2.42	24.79	0.51	-5.0		

3. 数値計算方法

水路実験と同じ実験水理条件で計算を行った。数値計算は、河川シミュレーションソフト三次元ソルバーである iRicNaysCUBE を用いた。乱流モデルには二次元非線形モデル k-ε モデルを、移流項の空間差分スキームには三次元精度 TVDMUSCL スキームを使用した。また、同ソフトにおいて河床変動解析もおこなった。

4. 実験結果

(1) 渦の中心位置推移について(凸部有り)

図-3 に $q=2.5l/s$ 凸部有りの段落ち深さ-7.5cm、-2.5cm における水面付近の流速ベクトル図を示す。凸部有りのケースにおいては、全ケースで渦構造が確認でき、円筒状に発達していた。渦の中心位置に着目すると、段落ち深さが浅くなるにつれて左岸側上流部へ移動していることが確認できる。図-4 に各段落ち深さにおける渦の中心位置をプロットした水路図を示す。なお、このデータはベクトル図から抽出したものである。この図から、渦の中心位置が水路上で左岸側上流部に移動していることがより分かりやすく確認できる。また、両ケースにおいてベクトル図から上流部付近で左岸側に凸部によるものと推測できる偏流、右岸側に河岸の水路幅収縮によるものと推測できる偏流が確認できる。図-5 に $y=38.5cm$ 水面付近における主流速縦断分布を示す。段落ち深さが浅くなるにつれて、逆流域が小さくなり左岸側へ縮小する傾向が確認できる。これは、段落ち深さを浅くできれば、渦構造が小さくできる可能性を示唆している。

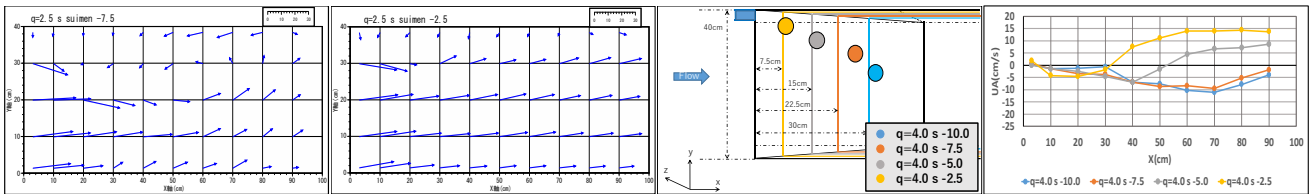


図-3 $q=2.5$ 凸部有り水面付近流速
(左-7.5cm, 右-2.5cm)

図-4 各段落ち深さの
渦の中心位置

図-5 主流速縦断分布
($y=38.5$ cm 水面付近)

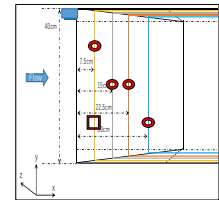
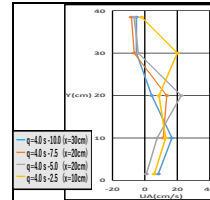
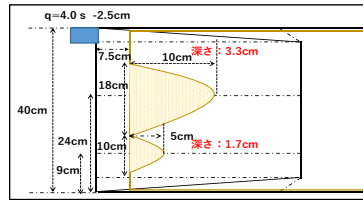
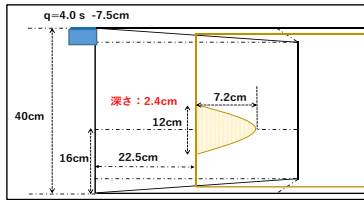


図-6 $q=4.0$ 凸部有り底面砂模式図(左-7.5cm, 右-2.5cm) 図-7 各段落ち深さ斜面最下点主流速分布(左(a), 右(b))

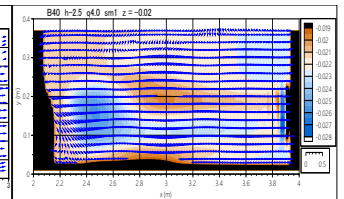
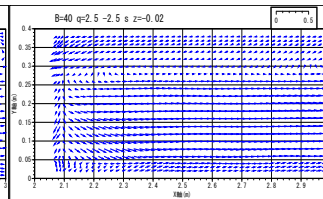
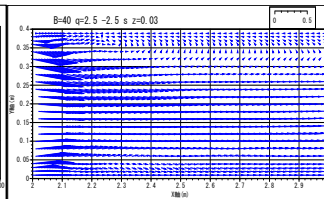
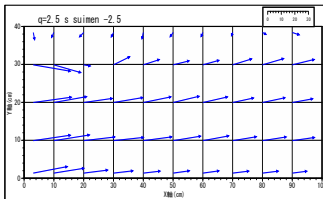


図-8 $q=2.5$ 凸部無し

図-9 $q=2.5$ 凸部有り流速

図-10 $q=4.0$ 凸部有り

水面付近流速砂州有り(-2.5cm)

(-2.5cm 左 水面, 右 底面 計算)

河床コンター(-2.5cm 計算)

$q=4.0$ l/s のケースも同様の傾向を示していた。

(2)深掘れの傾向について(凸部有り)

図-6 に $q=4.0$ l/s 凸部有りの段落ち深さ-7.5cm,-2.5cm における底面砂模式図を示す。両ケースともに右岸側に深掘れが確認できるが-2.5cm のケースでは、左岸側にも深掘れが確認できる。これは、段落ち深さが浅くなるにつれて右岸からの偏流が底面付近まで続くようになったためと考えられる。深掘れ位置に着目すると段落ち深さが浅くなるにつれて左岸側上流部に移動していることが確認できる。そこで、各段落ち深さ斜面最下点における主流速分布をプロットしたもの、それを水路上に示したものを図-7(a), (b)に示す。このグラフから、段落ち深さにより主流速最大点が異なっており、-2.5cm のケースでは値が大きい点が二か所存在していることが確認できる。水路上で確認すると、流速最大点は深掘れ位置に対応しており、深掘れは底面付近の流れにより発生していることが分かる。また、主流速最大点はそれぞれ、凸部、河岸による偏流の位置と一致し、偏流により深掘れが発生していると考えられる。

(3)凸部の有無、砂州の有無の影響について

図-8 に $q=2.5$ l/s 凸部無しの段落ち深さ-2.5cm における水面付近の流速ベクトル図を示す。渦構造が発達しておらず、凸部が無ければ渦構造は発達しにくいと考えられる。図は挙げていないが、砂州を取り除いた場合、左岸からの偏流がなくなっていた。この結果から、砂州を取り除くことで偏流の影響を弱められる期待ができる。

5. 数値計算結果

図-9 に $q=2.5$ l/s 凸部有りの段落ち深さ-2.5cm の水面、底面付近における計算結果の流速ベクトル図を示す。計算結果では、水面、底面付近において渦構造の発達が見られ、円筒状の渦構造の発達という類似の特徴を持っていた。しかし、渦の規模において計算の方がやや大きくなっていった。また、段落ち深さが浅くなるにつれ、底面付近で逆流を引き起こすような三次元的流れが発生する傾向があり、これは、斜面に沿う流れが底面付近まで続かなくなったからだと考えられる。

図-10 に $q=4.0$ l/s 凸部有りの段落ち深さ-2.5cm における河床コンターと底面付近ベクトルを示す。深掘れの発生が確認でき、深掘れの再現が期待できる。しかし、実験と比べてその位置がやや右岸側に存在しており、これは、ベクトル図から凸部による偏流が実験に比べ右岸側に向かっていることが原因と考えられる。

6. おわりに

実験結果から、深掘れの拡大傾向についての考察と抑制方法の検討を行う。先行研究から、底面掃流力の増加による上流端部の崩落と深掘れの拡大が示唆されている。今回の実験から渦の中心の推移が確認され、この知見から、拡大過程において上流端部が崩落した際に深さの差異が生じ、浅い部分において渦構造が左岸上流部に移動することにより深掘れが拡大していくことが示唆される。また、今回の実験から、凸部が砂州の河岸形状の変化によるものであること、コスト、労力、時間などを考慮した場合、凸部を掘削することが深掘れを抑制するための最善策であると考えられる。