

1. はじめに

中部地方を流れる木曾川では、渦の影響により粘性土層が露出し、さらに下の砂層が侵食され、段落ち部が確認されている。特に河口から 37km 地点では、最大洗掘深が 20m にも及ぶ。この段落ち部の影響により、河川構造物の不安定化や破損、生態系バランスの変化が懸念される。佐々らは大規模な深掘れが発生し進行した要因について、河床低下により段落ち部が形成されたことが一因であることを示唆した¹⁾。本研究では深掘れ拡大の要因である斜め段落ち部に着目し、段落ちの傾斜角を変えることと木曾川の特徴的な河岸凸部を設置することで平面渦がどのように変化するかについて、PIV 実験と数値計算を行い検討した。

2. 実験方法

実験水路は、長さ 7.5m、全幅 0.3m で勾配 1/1000 の長方形断面開水路において PIV 計測を行った。実験水路は図-1 に示すように、平坦路床から傾斜を有する段落ち部とトラフ部を経て、段落ち部と同じ勾配の段上がり部を設けている。段落ち開始から段上がりまでの長さ、段落ち深さを一定とし段落ち勾配の変化と凸部の有無で場合分けをした。凸部を設置するケースは、左岸側の段落ち直前に張出し長さ 3cm の台形凸部を設置した。実験水力条件とケース表は表-1、表-2 に示す。x 座標の原点は段落ち開始地点、y 座標の原点は右岸、z 座標の原点は段落ち上流端の平坦河床高さとした。

PIV 計測の流れの可視化には、直径 80 ミクロン、比重 1.02 のナイロン樹脂粒子を用い、厚さ約 3mm のシート状にしたグリーンレーザー光を開水路水平断面に照射し、水平面からビデオ撮影した。1 回の撮影では段落ち部全体をカバーできないため、上流側と下流側の 2 回に分けて撮影し合成した。

レーザー光の照射位置は、5mm 間隔で 10 断面 (z=-3cm~1.5cm) を計測した。この可視化画像は高速度カメラ (Ditect HAS-U1) を用いて 1024×1024 (pixel) の画像を 1/200s で撮影し、画像計測には FlowExpert (カトウ光研) PIV 解析ソフトを用いて流速ベクトル計測を行った。相互相関法により画像を 24×24 (pixel) の検査領域で解析して 16 秒間で 3200 個の平面流速ベクトルデータを得た。

3. 数値計算方法

PIV 実験と同じ実験水力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。

表-1 実験水力条件

流量 $Q(L/s)$	水深 $h(cm)$	平均流速 $U_m(cm/s)$	フルード数 Fr	水路幅 $B(cm)$	水路勾配 I
1.5	2.5	20.0	0.40	30.0	1/1000

表-2 実験ケース

case	段落ち勾配 I_s	段落ち深さ $h_s(cm)$	凸部長さ $dc(cm)$
1/1	1/1	3.5	0
1/2	1/2		
1/3	1/3		
1/5	1/5		
1/1s	1/1	3	3
1/2s	1/2		
1/3s	1/3		
1/5s	1/5		

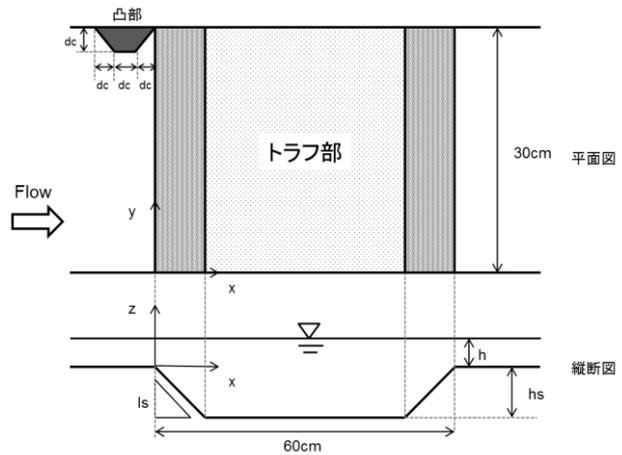


図-1 PIV 実験水路

4. 実験および数値計算結果

凸部を設置しないケースの勾配 1/1, 1/3, 1/5 の z=-3cm の平均流速ベクトルを図-2 に示す。図には段落ち部、トラフ部、段上がり部が分かりやすいように縦線を入れている。

段落ち勾配が 1/3 より急勾配では流れ構造の変化はあまり見られず平面渦の発生は見られなかった。特徴として、トラフ部中央あたりで再付着し、これより上流では逆流が発生しており不規則な流れであった。再付着点位置は 1/1 では hs の 6 倍程度、1/2, 1/3 では 7 倍程度である。1/2, 1/3 では側壁付近で逆流が水路中央に向かう傾向にある。また段上がり部では、y=5~10cm, y=20~25cm に流れが集中することが確認できた。段落ち勾配 1/5 では、他のケースのような逆流は見られず、水路中央へ集まる順流が見られ、側壁付近は低速となり下流では逆流も発生している。全勾配において、上層では順流のみの真っ直ぐな流れであった。したがって段落ち部で横断軸を持つローラー渦が支配

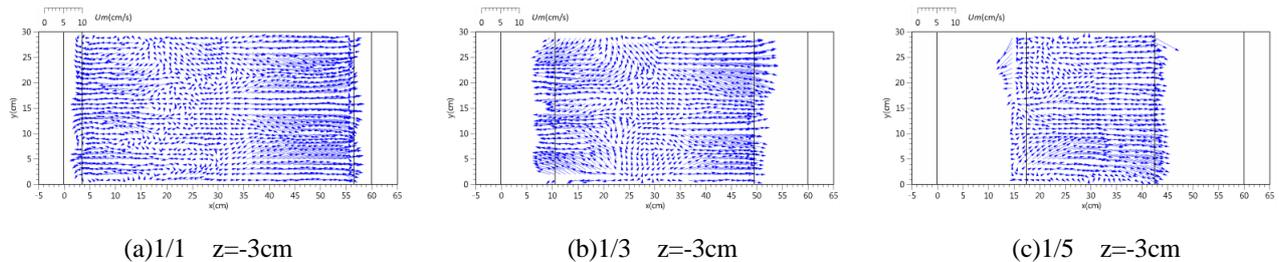


図-2 凸部を有しないケースでの各断面における平均流速ベクトル(実験)

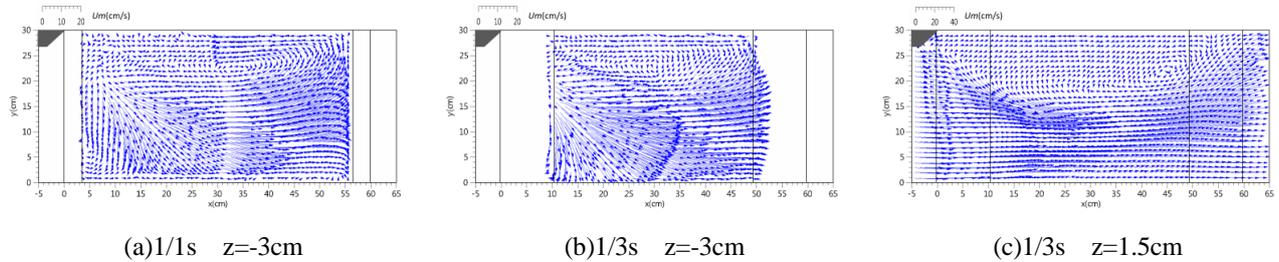


図-3 凸部を有するケースでの各断面における平均流速ベクトル(実験)

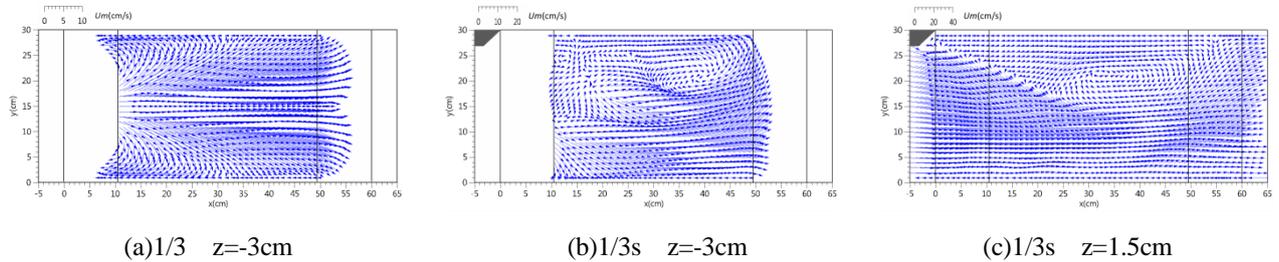


図-4 各ケース各断面における平均流速ベクトル(計算)

的となることわかる。ただし渦は不安定で横断方向に揺動している。

次に図-3 に凸部を設置したケースの勾配 1/1 の $z=-3\text{cm}$ および 1/3 の $z=-3\text{cm}$, $z=1.5\text{cm}$ の実験結果を示す。図において凸部を灰色で示している。すべての勾配、断面において左岸側に大きな平面渦が見られた。また、凸部から流路中央部にかけて偏流が発生し、流下に従って放射状に広がっている。ここから、凸部の下流に段落ちが存在することにより、凸部の水はねによる偏流が深い水深に入ること著しく増幅され、大規模平面渦を発生させることが明らかとなった。また、平面渦の中心部分における主流速横断分布を高さごとに比較したところほとんど変化は見られなかったため、2次元的な円筒状の強制渦が発生していることが分かった。

以上の結果から、勾配による流れ構造の変化は見られないものの、凸部を設置することで大規模平面渦が底層から水面近傍まで発生することが分かった。

数値計算においてケース 1/3 の $z=-3\text{cm}$, 1/3s の $z=-3\text{cm}$, $z=1.5\text{cm}$ の結果を図-4 に示す。凸部を設置しないケースについては、段落ち勾配が 1/1 では h_s の 7 倍付近で再附着し、これより上流が逆流となり、側壁付近は中央に寄る流れが見られた。これは、再附着が実験より大きいものの実験結果との適合性が見られた。

しかし勾配が 1/2, 1/3 では実験結果と異なった。実験では平面渦は見られず不規則な流れであったが、計算では明確な平面渦の発生が認められた。また実験では上層において順流に変化したのに対して、計算では、底層で見られた平面渦が上層にまで達しており、木曾川で見られたような平面渦構造と類似していた。

一方で、凸部を設置したケースについては、実験結果と流れ構造は基本的に似ていた。偏流の強さに違いは多少あるが、大規模平面渦や放射状に広がる流れの特徴は同じであった。

5. おわりに

凸部を設置しないケースでは、段落ち勾配を変化させることで流れ構造が変化した。実験と計算で結果が異なってしまった。今後はさらに実験精度を高めていく必要がある。凸部を設置するケースは、凸部の影響により大規模平面渦が発生することを確認できた。勾配による流れ構造の変化は見られなかったため、今後は段落ち深さ変化や、トラフ部の長さ変化などの条件を加えて実験を行い、斜め段落ち部における渦の形成機構についてさらなる検討をしていきたい。

参考文献

- 1) 佐々直彦, 富永晃宏: 木曾川における局所洗掘進行過程に関する考察, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol.74, No.4, I_709-I_714, 2018.