

斜め段落ち部における平面渦の発生に関する研究

名古屋工業大学 学生会員 ○中野優
 名古屋工業大学 フェロー会員 富永 晃宏

1. はじめに

中部地方を流れる木曾川では、大規模な深掘れが確認されており、特に河口から 37km 地点では、最大洗掘深が 20m にも及ぶ。この深掘れの影響により、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ている。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段落ち部に着目し、段落ちの傾斜角を変え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-2 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。段落ち深さを一定とし段落ち勾配を変化させた。実験水理条件は表-1 に示す。x 座標の原点は段落ち開始地点とし、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 ($z=-3\text{cm}\sim 1.5\text{cm}$) を設定した。この可視化画像は高速カメラ(DitectHAS-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。

表-1 実験水理条件

case	段落ち勾配 I_s	段落ち深さ h_s (cm)	流量 Q (L/s)	水深 h (cm)	平均流速 U_m (m/s)	フルード数 Fr	水路幅 B (cm)	水路勾配 I
1/1-3.5	1/1	3.5	1.5	2.5	20.0	0.40	30.0	1/1000
1/2-3.5	1/2							
1/3-3.5	1/3							
1/5-3.3	1/5	3.3						

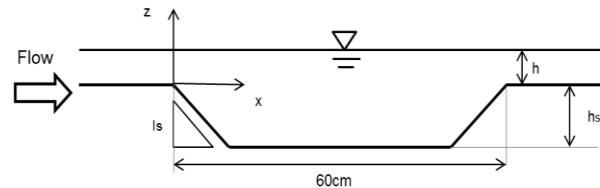


図-2 模型水路(縦断面図)

3. 数値計算方法

PIV 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。

4. 実験および数値計算結果

段落ち勾配 1/1, 1/3 の $z=-3\text{cm}$ および 1/5 の $z=-2.5\text{cm}$ における実験結果の平面流速ベクトルを図-3 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 h_s 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、 $y=5\sim 10\text{cm}$, $y=20\sim 25\text{cm}$ に流れが集中することが確認できた。これらのケースにおいて、上層では順流のみの真っ直ぐな流れであった。したがって段落ち勾配が 1/3 以上では段落ち部で横断軸を持つローラー渦が支配的となることがわかる。ただし渦は不安定で横断方向に揺動している。段落ち勾配 1/5

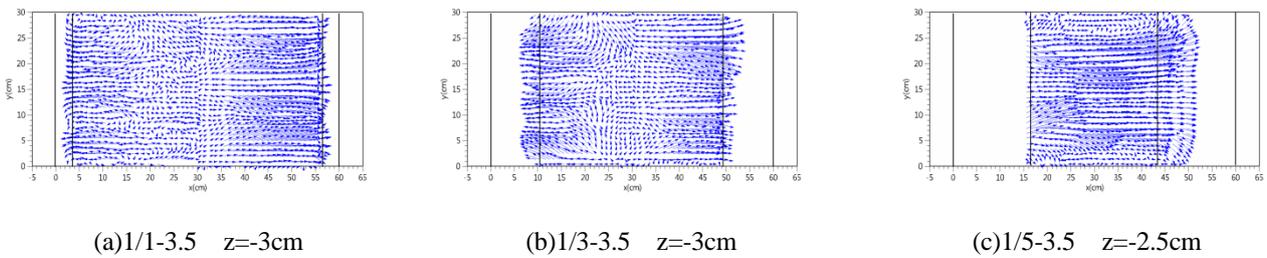


図-3 実験での平面流速ベクトル

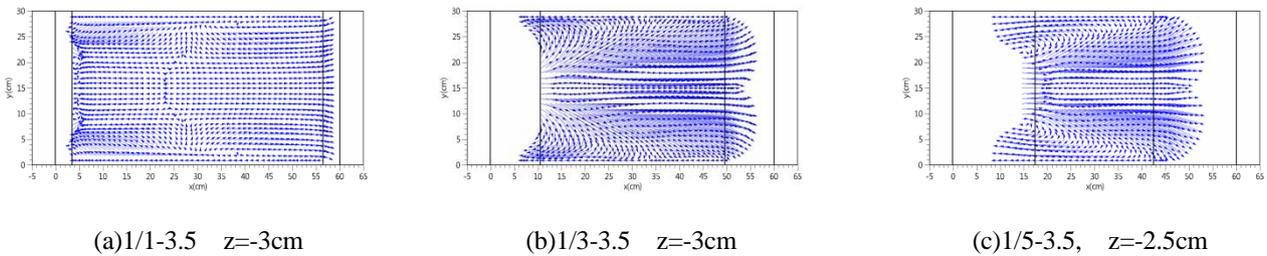


図-4 数値計算での平面流速ベクトル

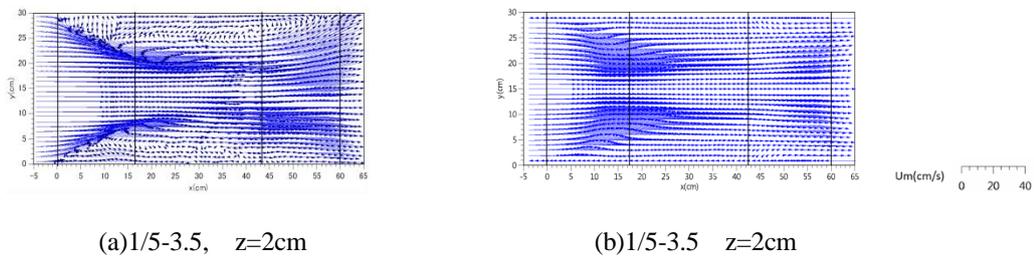


図-5 表層での平面流速ベクトル(左図:実験, 右図:計算)

では、他のケースのような逆流が見られず、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。

同じケース、同じ断面の数値計算の結果を図-4に示す。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る。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。勾配が 1/3 になると明確な平面渦が発生している。これは実験結果と大きく異なっている。勾配が 1/2 においても同様の平面渦の発生が認められた。またこの平面渦は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る。1/5 のケースでは 1/3 と同様に底層で中央に集まる順流が発生しており、実験結果を再現している。

次に図-5に 1/5 の $z=2\text{cm}$ における流速ベクトルの実験結果と計算結果を示す。実験でも表層近くで流れの中央への集中が見られ側壁付近で減速し、下流で平面渦構造が認められた。計算ではこの傾向が再現されている。数値計算の結果から、段落ち勾配が 1/2

以下で底層から表層に達する平面渦構造が発生することが示された。しかし実験では勾配が 1/5 で初めて流れ構造が変化し、流れの中央への集中を伴う平面渦構造が発生した。

この原因として考えられることは、実験装置上の問題が考えられるが、数値計算の精度の問題も考えられる。しかしこのような 2 次元的な段落ちにおいて 3 次元的な渦構造が発生するメカニズムは存在することは明らかである。

6. 今後の展望

今回の PIV 実験と数値計算から再現性を得ることはできなかったが、実験において斜め段落ち部における渦構造を確認することができた。今後はさらに実験精度を高めるとともに、段落ち深さを深くした場合についても実験を行い、斜め段落ち部における渦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.