

徳山工業高等専門学校 学生会員 ○藤田 恵未
徳山工業高等専門学校 正会員 渡辺 勝利

1. 緒論

洪水時、河川を横断する橋梁を支える橋脚周辺には局所的な河床洗掘が発生する恐れがある。過度な洗掘が基礎地盤まで到達すると、橋梁が沈下あるいは傾斜することで、多大な人命被害や河川災害が発生する¹⁾。このことから、橋脚周辺の洗掘現象の本質を解明するとともに、それを防止する方策を見出すことは河川工学上極めて重要である。

これまでも橋脚まわりの流れに関する研究が進められている。吉川ら²⁾は、橋脚の洗掘とその防止について円柱周辺の局所洗掘に関する実験を行った。その結果、円柱周りの洗掘が円柱の前面ではなく流れ方向に対して40～50°の側面から開始されることが見出された。福岡ら³⁾は、小判型橋脚周りの局所洗掘推定の数値解析を行い、実験値を良好に再現している。安藤ら⁴⁾は、新たな座標系を用いて小判型橋脚周りの流れと洗掘を数値解析により検討している。また、玉井⁵⁾らは、実際の洪水中に被災した橋脚の沈下原因を調査している。橋脚の洗掘原因としては、橋脚全面に形成される下降流、橋脚の周囲に形成される馬蹄形渦が指摘されている。

以上のように、円柱や小判型橋脚周りの流れに関する知見が得られており、その洗掘現象には組織構造が密接に関係していることが示唆されている。円柱周りに形成される組織構造については、カルマン渦や馬蹄形渦など固有の組織構造の特徴が詳細に明らかにされているが、小判型円柱に関する組織構造の詳細な特徴については十分な解明に至っていないように思われる。

それで本研究では、小判型橋脚を対象として、その模型周辺に形成される組織構造に注目して、流れの乱流特性を明らかにすることを目的とした。このために、流速計測法、流れの可視化法を用いて流れ場の平均流特性および組織構造の特徴の検討を行った。

2. 実験装置および方法

本実験には、水路勾配を1/1000に設定した、長さ10m、幅60cm、高さ15cmの透明アクリル樹脂性の滑面開水路を使用する(図-1)。水路の上流端には整流装置としての

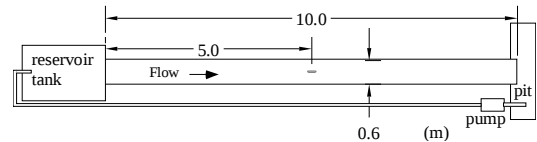
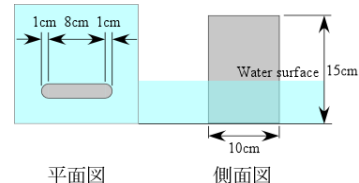
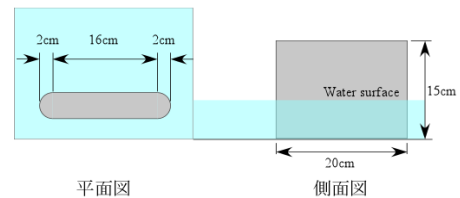


図-1 実験水路概要



小判型橋脚模型①



小判型橋脚模型②

図-2 小判型橋脚模型概要

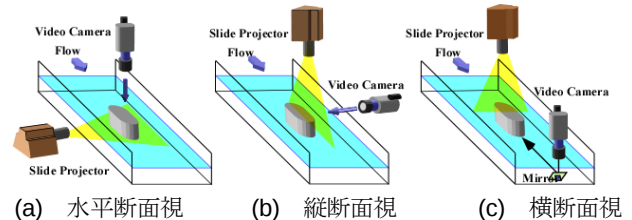


図-3 撮影断面視概要

ハニカム(径4mm、長さ3.2cm、幅60cm)、その下流20cmの地点には乱流促進用のスプリングワイヤを設置した。本水路の中に図-2のような小判型橋脚模型①(円形部直径2cm、直線部幅8cm、高さ15cm)、小判型橋脚模型②(円形部直径4cm、直線部幅16cm、高さ15cm)を上流から5mの底壁面に設置した。実験では、PTV(Particle Tracking Velocimetry)法を用いた流速測定及び蛍光染料注入法を用いた流れの可視化実験を行った。図-3は、PTV法および可視化法の概要を示している。PTV法においては、トレーサーとして微細粒子(平均粒径150μm、比重1.04)、照明としてスライドプロジェクター(1KW)のスリット光膜(厚さ3mm)を用いた。この微粒子を混入した水溶液を上流端から流れに連続して注入した後、流れの縦断面、水平断面におけるトレーサー粒子の流動状況をデジタル

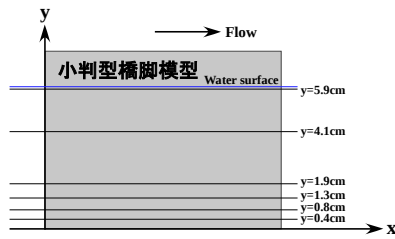


図-4 水平方向測定位置

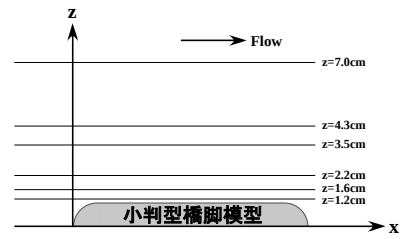


図-6 縦断方向測定位置

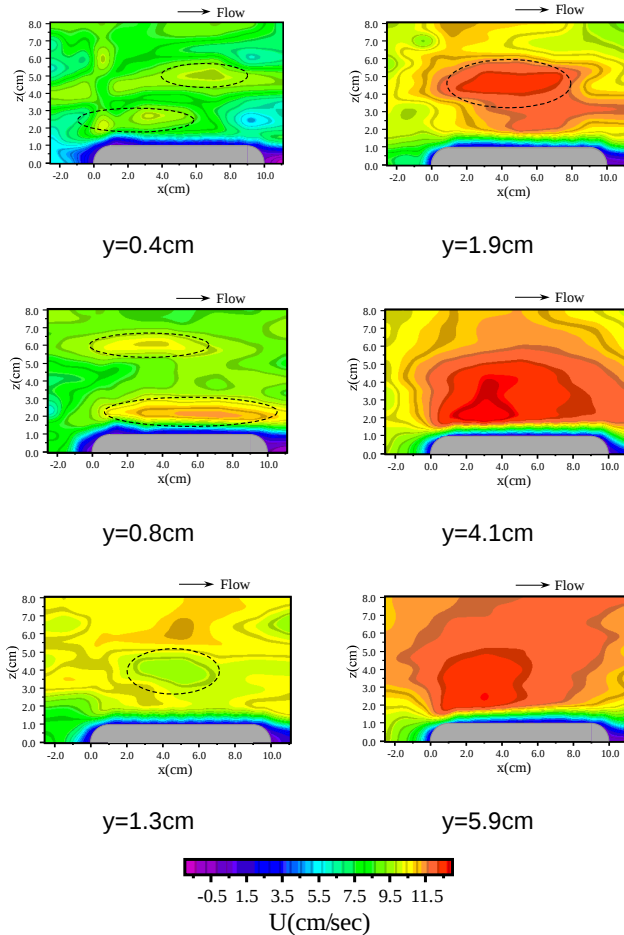


図-5 主流速分布水平断面分布

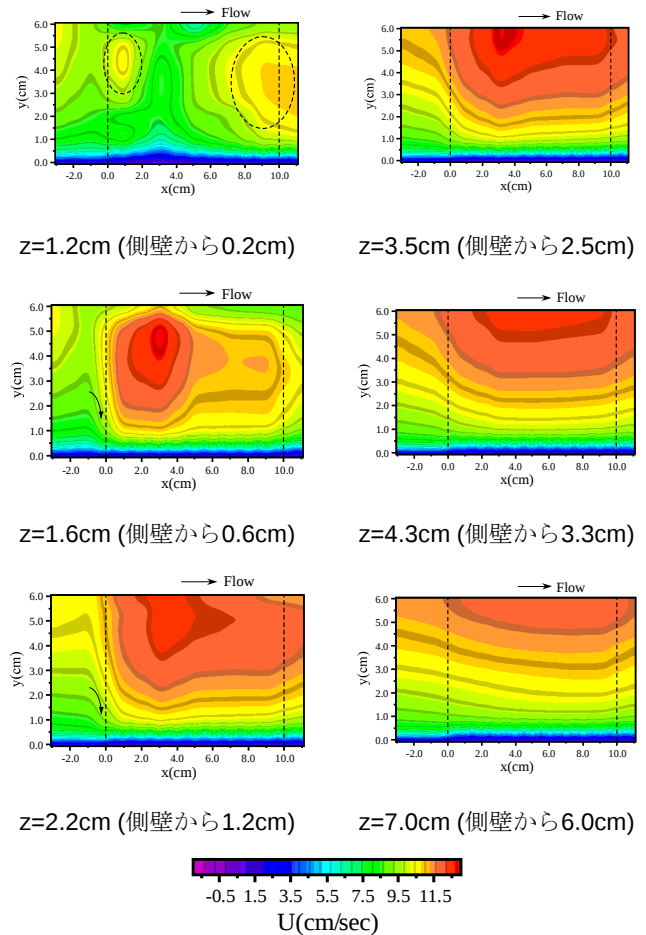


図-7 主流速縦断面分布

ビデオカメラで撮影した。PTVの解析においては、その粒子画像を連続的にコンピュータに取り込んだ。画像データ取り込み後「Flow PTV」((株)ライブラリ)を用い瞬時流速成分を求め、統計処理することで平均流速および乱れの分布を求めた。流れの可視化実験では、トレーサーに蛍光染料水溶液(比重 1.005)、照明に前出のスリット光を用いて流れの水平、縦断、横断面視を行った。これらの断面視では、本トレーサーの上流から一定量(約 200cc)を注入した後、注入に伴う初期攪乱部分が流下した後、流れの各断面における流況をビデオカメラで撮影した。なお、横断面視においては、可視化断面に影響を及ぼさない下流位置に設置した鏡(5×5cm)を用いて撮影した。

3. 実験結果および考察

(1) 主流速水平断面分布

図-4はPTVの水平断面の測定位置を示しており、図-5には、各計測位置における主流速の等値線図を示している。本図より、まず、底壁面付近における $y=0.4\text{cm}$ では、破線で囲んで示すように橋脚模型周辺に主流速の遅速が並列して形成されている。 $y=0.8\text{cm}$ においても同様な分布が見られるが、高速域はより速度が増加している。 $y=1.3\text{cm}$ になると橋脚先端付近と破線で示した $z=4.0\sim 5.0\text{cm}$ 付近の一部を除いて高速域が増えている。 $y=1.9\text{cm}$ では、 $y=1.3\text{cm}$ において低速域となっていた $z=4.0\sim 5.0\text{cm}$ 付近の領域が高速域となっている。 $y=4.1\text{cm}$ から水表面

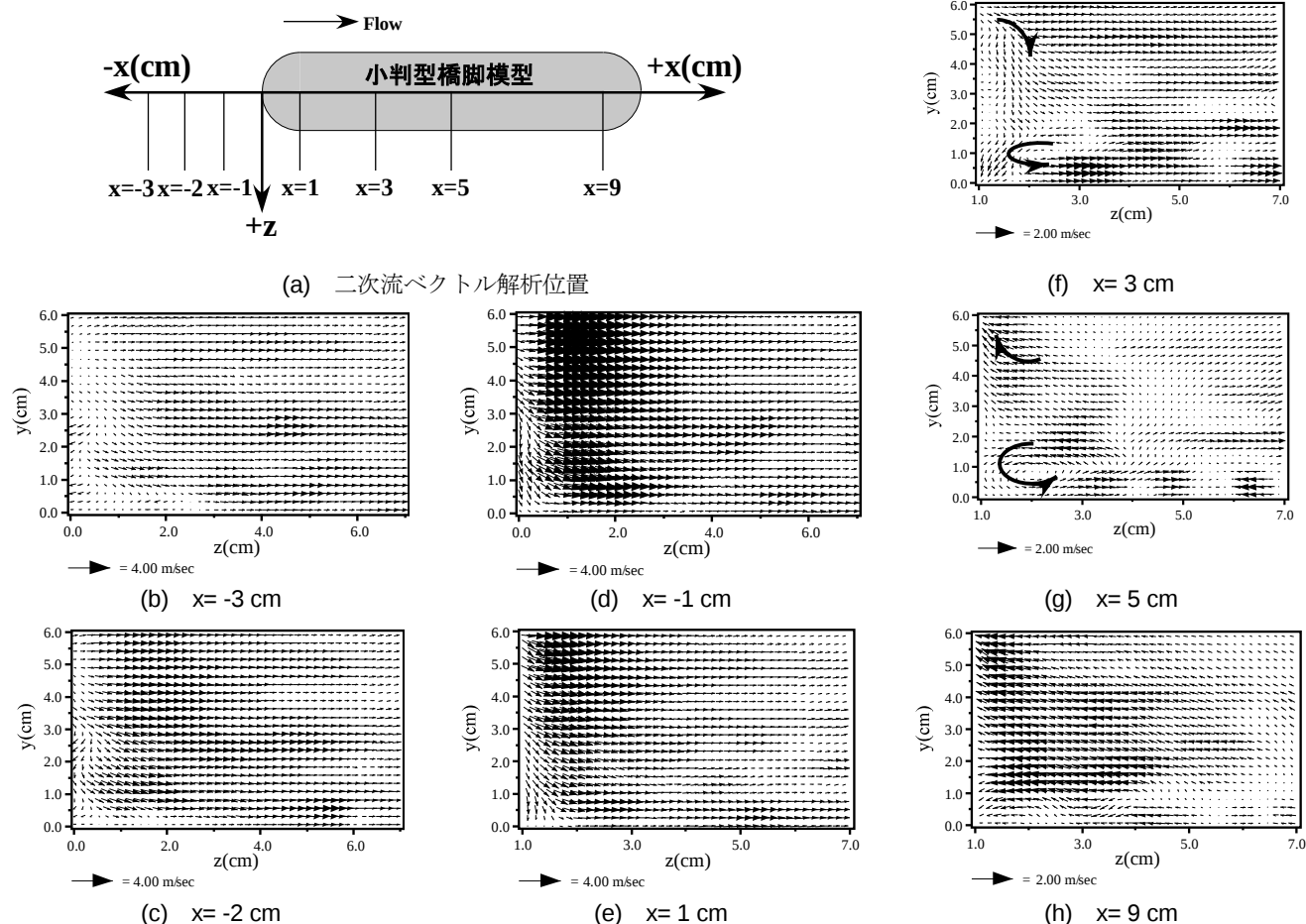


図-8 二次流ベクトル分布

に至っては、 $x = 0 \sim 4\text{cm}$ の橋脚模型の先端側面付近で最大流速が生ずる分布が形成されていることが注目される。一方、橋脚模型先端部近傍はすべての計測位置において低速であることから、橋脚先端部から側面に至る領域では主流速の急激な変化があることが明らかとなった。

(2) 主流速縦断面分布

図-6は、縦断方向の流速計測位置を示している。図-7は、縦断方向の主流速等値分布を示している。本図より、 $z = 1.2\text{cm}$ では、破線で示すように橋脚模型の先端部と後端部の水表面より低い位置で局所的な高速域が形成されている。 $z = 1.6\text{cm}$ では、 $z = 1.2\text{cm}$ と同様で水表面よりも下面が高速となっており、高速域がより底壁面方向に張り出して分布していることが明らかである。本図の橋脚先端($x = 0.0\text{cm}$)の位置では、等値線が下方に屈曲していることから、矢印で示したような下降流が生成されていることがわかる。 $z = 2.2\text{cm}$ から 3.5cm では図-5の主流速水平断面分布で見られたように、橋脚模型上流側の側面付近に高速域が分布している。 $z = 4.3\text{cm}$ 以降では、橋脚模型の影響が減少するため流速分布が流れ方向に一様化していることが認められる。

(3) 二次流分布

図-8は、二次流ベクトル (v, w) の計測結果を示している。同図(a)にはそれぞれの計測断面位置を示している。 $x = -3\text{cm}$ では、橋脚模型の中心位置に相当する $z = 0.0\text{cm}$ 付近でやや弱い下降流が形成され、横断面全域右岸方向に向かう横流れが形成されている。 $x = -2\text{cm}$ では、 $x = -3\text{cm}$ に比べて下降流および横方向の流れが大きくなっていることがわかる。 $x = -1\text{cm}$ では、さらに下降流、横流れが大きくなる。この $x = -3\text{cm} \sim -1\text{cm}$ の二次流れの分布の特徴は、橋脚模型の存在によってその中心部では模型に沿って下降流が形成され、模型の左右方向へ流れが分岐するために横流れが形成されと考えられる。橋脚模型の側面 $x = 1\text{cm}$ の断面では、 $x = -1\text{cm}$ よりも横流れが弱くなり、 $z = 1 \sim 2\text{cm}$ の間で斜めの下降流が形成されている。 $x = 3\text{cm}$ では、橋脚模型側面と底壁面との隅角部方向への二次流および反時計方向の旋回状の二次流分布の形成が認められる。 $x = 5\text{cm}$ では、 $x = 3\text{cm}$ に見られた反時計方向の旋回状の二次流分布が維持されている。また、橋脚模型側面の水表面付近の横流れの方向が $x = 3\text{cm}$ とは逆転し橋脚方向へ上昇するような流れに変化していることが注目される。

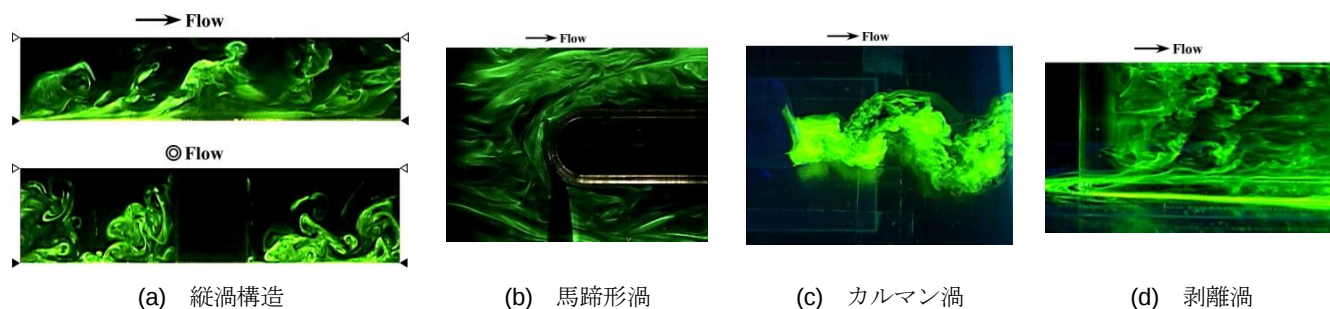


図-9 橋脚模型周辺に形成される組織構造

$x=9\text{cm}$ では、橋脚模型方向の流れが大きくなっていることがわかる。以上のように、橋脚模型周辺では、横流れと下降流および底壁面上における旋回状の二次流れが形成され、横流れの方向は橋脚模型の先端付近と後端付近で方向が逆転することが明らかとなった。

(4) 流れの内部流況

流れの可視化実験からは、本流れ場に形成される特徴的な4つの組織構造の存在が明らかとなった。図-9にはそれぞれの組織構造の概観を示している。同図(a)は、橋脚模型周辺に形成された縦渦構造の縦断面視および横断面視を示している。縦渦構造は壁乱流の普遍的な組織構造であり、二次流れや乱れの生成に主要な役割を果たすことが明らかにされている。本流れ場においては、橋脚模型付近を通過する縦渦構造が橋脚模型に衝突すると、橋脚の左右どちらかに移動するがその際に傾斜運動や伸長することが観察された。同図(b)は橋脚模型の底壁面付近に形成される馬蹄形渦である。本構造は、橋脚の洗掘現象の要因となることから重要な構造と考えられる。同図(c)は、橋脚の後端部に形成される剥離渦でカルマン渦であり、本渦構造は物体の後方に形成される普遍的な構造である。同図(d)は、橋脚模型の曲面部から直線部に变化する部分で発生する剥離渦である。本渦構造は鉛直方向に軸を有する渦構造であり、その水表面部分は水平渦に類似した形象が認められた。

図-10には、本研究によって得られて知見を踏まえ作成された小判型橋脚周囲の流れの概念図を示している。橋脚模型の上流側側面は高速域となり、底壁付近では並列した遅速分布が形成され、橋脚模型前面では顕著な下降流と側壁向きの横流れ、底壁面との隅角部には旋回状の二次流れが形成されている。本流れ場には上述のように4つの組織構造が形成されている。縦渦構造が橋脚模型に衝突すると、顕著な伸長や傾斜運動が発生し、高速流を底壁面方向へ輸送することが推察された。

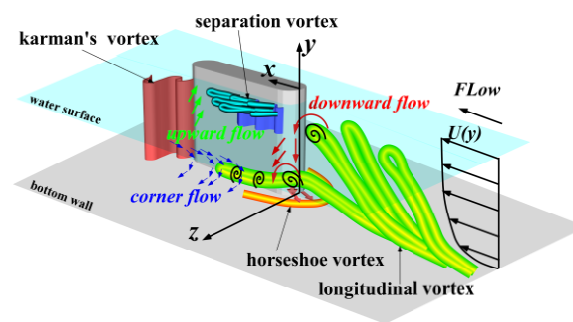


図-10 小判型橋脚周囲の渦構造の概念図

4. 結論

本研究では、小判型橋脚模型周辺の平均流速分布と組織構造の特徴を流速測定および流れの可視化を用いて検討した。以下に本研究において得られた結論を示す。

- (1) 橋脚模型側面の上流側には高速域、その底壁面付近には並列した遅速分布が形成される。
- (2) 橋脚模型前面では顕著な下降流と側壁向きの横流れ、底壁面との隅角部には旋回状の二次流れが形成される。
- (3) 橋脚模型周辺には、縦渦構造、剥離渦、カルマン渦、馬蹄形渦の4つの組織構造が形成される。
- (4) 縦渦構造が流下の際橋脚模型と衝突すると、縦渦構造の伸長や傾斜運動の発生が観察された。これにより顕著な流体輸送が発生することが推察された。

参考文献

- 1) 国土技術センター：河川を横断する橋梁に関する研究の手引き(案)，pp. 1-3, 2009.
- 2) 吉川秀夫，福岡捷二，岩間汎，曾小川久貴：橋脚の洗掘ならびにその防止に関する考察，pp. 83-90, 1971.
- 3) 福岡捷二，富田邦裕，堀田哲夫，宮川朝浩：橋脚まわりの局所洗掘推定のための実用的数値シミュレーションの開発，pp. 71-79, 1994.
- 4) 安藤嘉崇，西岡周平，伊福誠： $\sigma - \beta$ 座標による橋脚周辺の流れと局所洗掘の数値解析，pp. 823-828, 2011.
- 5) 玉井信行：礫床河川において洪水中に発生した橋脚の沈下原因の究明および対策工立案の研究，pp. 25-30, 2008.