

物体周りの流れによる洗掘現象と その制御に関する研究

野崎 潤*¹ 深江 忍*² 佐賀 孝徳*³

The study on the scour phenomenon induced by the local flow structure around the bluff body and the control technique

Jun NOZAKI*¹, Sinobu FUKAE*² and Takanori SAGA*³

Abstract

The flow structure around a bluff body, the scour phenomenon of a bluff body and the control technique of horseshoe vortex in the uniform and shear flow were investigated using the flow visualization technique. It was found that the structure characteristics and the difference of each vortex around several shape of bluff body in both uniform flow and shear flow. And the feature of the scour phenomenon around several shape of bluff body in shear flow was cleared and is interrelated with each flow structures. In particular, each circular cylinder with through hole and circular tube reduces the intensity of horseshoe vortex, or is able to control the local flow structure and local scour around the bluff body.

Key Words : horseshoe vortex, flow visualization, uniform flow, shear flow, scour

1. 緒論

河川に建設される橋脚は橋を支える重要な構造物であり、その構造物の安全性を確保することは、土木技術者にとって重要な使命である。日本の河川の河状係数は大きく、その流量の変化が非常に大きいことが知られている。洪水時における橋脚は、多くの漂流物からの衝撃力を受け、また橋脚により堰き止められた漂流物が流れを閉塞させることで、大きな被害をもたらすことが知られている。また、同時に橋脚の基礎部分は洗掘を受け、橋の安全性に甚大な影響を与える。近年では、2004年7月18日福井県地方で起きた豪雨により、JR越美北線の足羽川に架かる7橋脚のうち5つが流出するという災害が起こったばかりである。

この洗掘現象を明らかにし、制御することは、河川工学上重要な課題であり^{1)~3)}、この洗掘を引

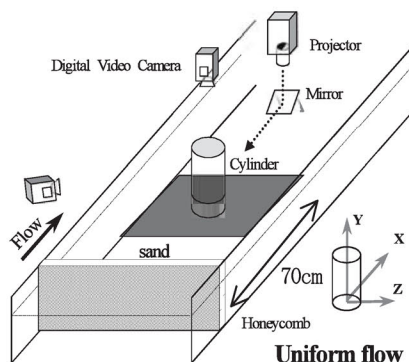


図-1 実験装置の概略図

き起こす局所流れとして馬蹄形渦の存在が知られている。馬蹄形渦に関する研究は、一様流では機

*1 環境建設工学専攻

*2 (株)建設技術研究所

*3 土木建築工学科

表-1 実験条件

	物体	代表長さ D (cm)	水深 H (cm)	レイノルズ数		備考
				Red=UD/ ν	Red=UH/ ν	
case1	円柱	8	10	3500	4400	
case2	円柱	4	10	1700	4400	一様流
case3	円柱	8	5.7	8700	6200	
case4	円柱	8	4	12600	6300	せん断流
case5	角柱	8	4	12600	6300	せん断流
case6	ひし形	11	4	17800	6300	せん断流
case7	円柱	8	11.6	4000	5800	
case8	有孔円柱	7.6	11.6	3800	5800	
case9	有孔円柱①	7.6	4	11500	6200	せん断流
case10	有孔円柱②	7.6	4	11500	6200	せん断流
case11	円柱	8	12.4	3800	6000	せん断流
case12	円筒付帯円柱	8	12.4	3800	6000	せん断流
case13	円柱	8	12.4	3800	6000	
case14	円筒付帯円柱	8	12.4	3800	6000	

械系も含め、多くの研究がなされている一方、せん断流においては、それについてあまり多く行われていないため、構造的に不明な点が多く残されている。他方、その馬蹄形渦を制御する実験も行なわれている⁴⁾。

佐賀らは、これまで円柱周りの流れ構造について流れの可視化法を用いて研究を進めている^{5)~8)}。

そこで本研究では、実際に橋脚の洗掘現象が生じるときの流れ場である、せん断流中に形成される馬蹄形渦の組織構造および変動特性を一様流中のそれと比較した。さらに、これらのことを踏まえて、従来の洗掘深の評価実験ではなく、洗掘機構を明らかにするため、物体の洗掘現象を一様流、せん断流において可視化実験し、その形成過程の特徴を流れ場の特徴を含め考察した。また、馬蹄形渦の制御を行う実験を行い、洗掘現象の変化と流れ場の変化についても考察を行った。なお本論で用いる「一様流」とは、ハニカム以降に形成される一様流が、水深の大部分を占める場合を示し、壁面近傍では層流境界層が形成されている。

2. 実験装置および実験方法

実験装置には、長さ 10m、幅 60cm、高さ 15cm、水路床勾配 1/1000 の総アクリル製開水路を使用した。開水路流れの中に円柱、ひし形、角柱、有孔円柱、円筒付帯円柱をそれぞれ鉛直に挿入し、せん断流においては上流端に整流用のハニカムお

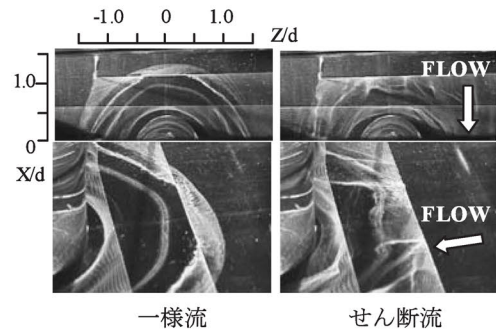


図-2 馬蹄形渦の可視化(case1)

よび乱流促進用のスプリングワイヤー、下流端には水位調節用の堰を設置した。一様流における実験では、円柱より上流 70cm の位置にハニカムを設置し、水素気泡のタイムラインを用いた流れの可視化により、乱れが生じてないこと、上部では水深方向の速度勾配を持たないことが確認された。

実験は水路上方からの全体視および斜め上方からの全体視による可視化を行い、その形象がデジタルビデオカメラにより撮影された。

流れの可視化には水素気泡をトレーサーとして使い、洗掘実験には標準砂を用いた。水素気泡は陰極にタングステン線、陽極に銅板を用い、それに 500V の電圧を加え、水の電気分解を行うことでタングステン線より発生させた。図-1 に実験装置の概略図、表-1 に実験条件を示す。

3. 馬蹄形渦の構造および変動特性

3.1 流れ場の相違による馬蹄形渦の比較

本研究においては、馬蹄形渦の制御を最終目標としている。しかし、流れ場における馬蹄形渦の構造的特徴を明らかにすることは重要なことである。そこで、この章ではこれまでに行なった研究内容を示す。

円柱周りの一様流とせん断流中における馬蹄形渦の一例を図-2に示す。それぞれ、上図は水路上方、下図は水路斜め上方より同時可視化を行ったものである。これより、一様流においては乱れが少なく、はく離現象に伴う安定的な3本の渦構造が認められる。せん断流中では、bursting現象に伴う低速縞の形成から、上昇流と下降流が時間的に非定常に形成されており、常に乱れが生じるため、渦構造は不安定となる⁷⁾。

これらの渦はビデオ観察より円柱近傍へと移動することが認められ、その変遷をまとめたものが図-3であり、上図は一様流、下図はせん断流の移動特性である。縦軸は円柱前端を原点とした上流方向への距離(L/D)、横軸は時間軸(t)を示し、それぞれ使用円柱径(D)、渦の発生周期(T_0)で無次元化している。これより、一様流では円柱径の8割程度より馬蹄形渦が安定的に発生し、移動していることが示される。しかし、円柱近傍に形成される渦はあまり変動しないが、渦の接近時のみ上流方向へ移動する傾向がある(図中 a)。

せん断流においては円柱径の6割程度から渦が発生し、形象は不明瞭となり安定的な3本の渦構造も見られないが、円柱近傍の渦(図中 c)は、わずかな移動を伴いながら安定性を保つ。特にビデオ映像より、せん断流中の変動特性は円柱から周囲方向への流れが一様でないため、強い流れが形成される領域では、外部からの円柱方向への流れと強い相互作用が認められた。

3.2 物体前方の馬蹄形渦構造

図-4は各馬蹄形渦の位置関係を明らかにするため、トレーサの発生高さY/Dを変化させたものである。Y/D=0.14の場合は円柱近傍の馬蹄形渦が、より水路床に近いY/D=0.044では遠方の馬蹄形渦が可視化された。また、ビデオ映像より、3本の馬蹄形渦の外側に上流方向へ掃き出される流れが認められたことから、馬蹄形渦の物体前端

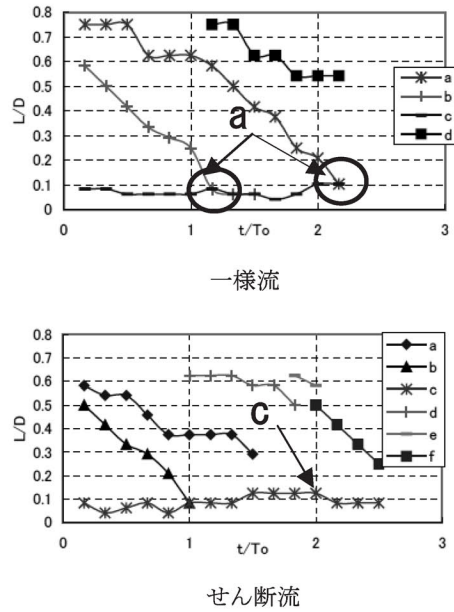


図-3 変動特性

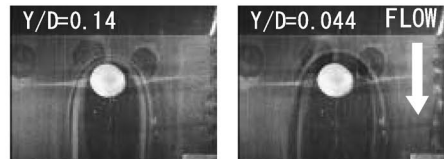


図-4 水平断面形象 (case2)

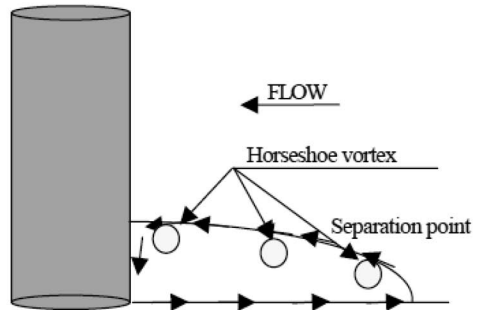
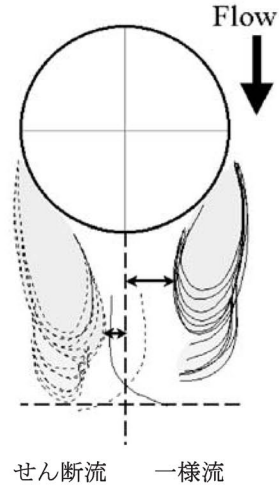


図-5 馬蹄形渦の円柱前方の移動モデル

での構造は図-5のような模式図で示される。

物体よりも遠方の領域ではく離れた流れが、馬蹄形渦を形成し、壁面から流れながら流下する。物体前端まで移送した渦は物体近傍の渦と相互作用しながら水路床方向へ巻き込まれ、馬蹄形渦の下側を通してはく離点方向の流れを形成する。



4. 洗掘現象

4.1 流れ場の相違による形象の比較

図-6は、円柱周りの一様流とせん断流における洗掘形象の変化を示している。これは、水路上方からの全体視の各形象1分間隔の連続写真8枚の洗掘の様子を合成させたものである。これより一様流中においては、側面付近で発生した馬蹄形渦は下流方向にほぼ直線状に流れており、せん断流中においては、流下するにつれ物体の中心線側に寄る傾向がある。また、時間経過とともに流下方向に発達する洗掘の広がり速度は、一様流に比べせん断流のほうが大きいことが認められる。

図-6 流れ場の相違による形象の比較(case3)

水平断面可視化の洗掘現象を時系列で示している。各画像は1分間隔で、流れ方向は、紙面の左から右である。河床には標準砂を用いた。

これまで明らかにしているように、一様流においては、下流方向へ引き伸ばされる渦運動があるのに対して、せん断流においては、円柱に巻き込む傾向がある。このため、上記のような洗掘形状の相違を生じさせていると考えられる。

図-7より、円柱においては、壁面に沿ってはく離せん断層近傍に洗掘現象が認められる。時間経過とともにその洗掘が流下方向に発達している(図-7,①~⑧)。ひし形においては、ひし形頂点からはく離が形成され、そこから洗掘が形成され斜め下流方向に急激に広がりながら発達している。このことは、ひし形前面に形成される境界層の流れが、はく離後もその方向に維持されるためと考

4.2 洗掘現象の時系列変化

図-7は、それぞれ円柱、ひし形、角柱における

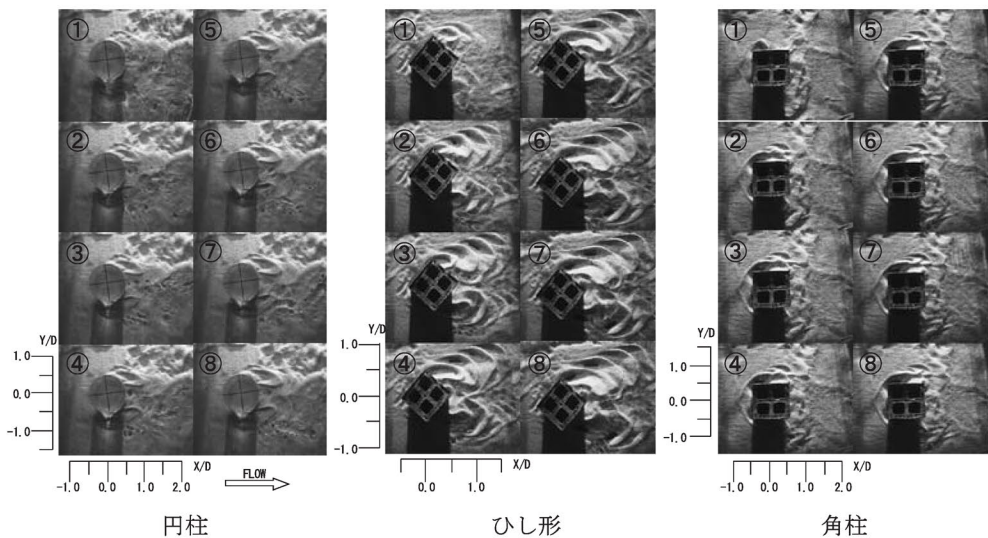


図-7 洗掘現象の時系列変化(case4, case5, case6)

えられる。角柱においては、前縁はく離が形成され、そこから流下方向へ洗掘が発達することが認められる。特に前縁部においては、洗掘深が最も大きいことが認められる。

これらの洗掘を比較する上で、物体前面のよどみ領域の大きさの観点より考察を行なう。よどみ領域が最も大きいと考えられる角柱では、その側面で強いせん断層が形成され強い馬蹄形渦により、洗掘深の大きな現象が発生したと考えられる。一方、円柱、ひし形では、よどみ領域は相対的には小さいため角柱のような洗掘が認められない。

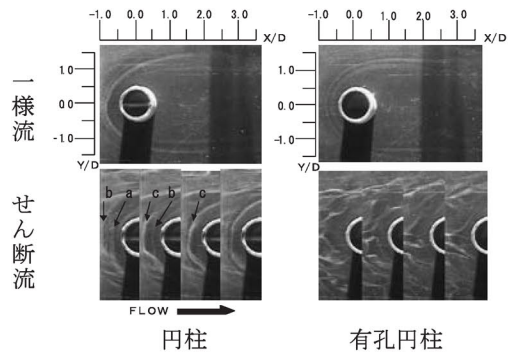


図-8 水素気泡を用いた馬蹄形渦の特徴 (case7, case8)

5. 洗掘の制御

5.1 有孔円柱

5.1.1 水素気泡を用いた馬蹄形渦の特徴

図-8 に水素気泡による全体視を示す。上図は一樣流、下図はせん断流の場合である。一樣流では、縦軸は円柱中心を原点とした Z 軸方向の距離、同じく横軸は X 軸方向の距離であり、円柱径 D で無次元化した値である。本実験では、 L_f/D 、 L_s/D 、 L_{b1}/D 、 L_{b2}/D を図-9 のように測定した。せん断流では、それぞれ円柱と有孔円柱の物体前部に形成される馬蹄形渦の形象を時系列に示しており、各画像は 1 秒間隔である。有孔円柱とは、馬蹄形渦の制御としてよどみ点の圧力調整を試みたものである(図-10)。

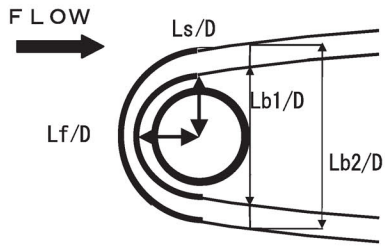
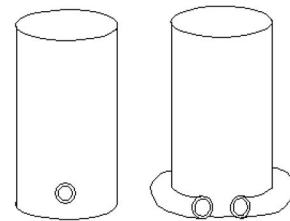


図-9 馬蹄形渦のモデル図

図-8 より一樣流中における円柱と有孔円柱の測定結果を比較する。円柱において $L_f/D=0.80$ 、 $L_s/D=0.60$ 、 $L_{b1}/D=1.93$ 、 $L_{b2}/D=2.34$ であり、有孔円柱においては、 $L_f/D=0.57$ 、 $L_s/D=0.71$ 、 $L_{b1}/D=1.87$ 、 $L_{b2}/D=2.10$ と円柱の馬蹄形渦が広く発生している。



有孔円柱 円筒付帯円柱

図-10 有孔円柱・円筒付帯円柱のモデル図

一方、せん断流において、円柱では馬蹄形渦が a, b, c (図-8) のように比較的安定に形成されているのに対して、有孔円柱においては不安定であり、あまり馬蹄形渦は観察されなかった。

また、円柱と有孔円柱において 1 分間に形成される馬蹄形渦の形成時間を調べ、図-11 に結果を示す。図中の黒い部分は、馬蹄形渦の形成時間を示し、白い部分は、馬蹄形渦が形成されていないことを示す。円柱においては、馬蹄形渦が比較的安定して形成されているのに対し、有孔円柱においては不安定で、円柱と比べると、あまり馬蹄形渦が確認されなかった。このことより、物体前面の圧力を低下させることにより馬蹄形渦の発生を

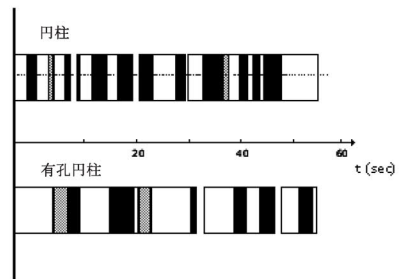


図-11 1分間に形成される馬蹄形渦の発生時間

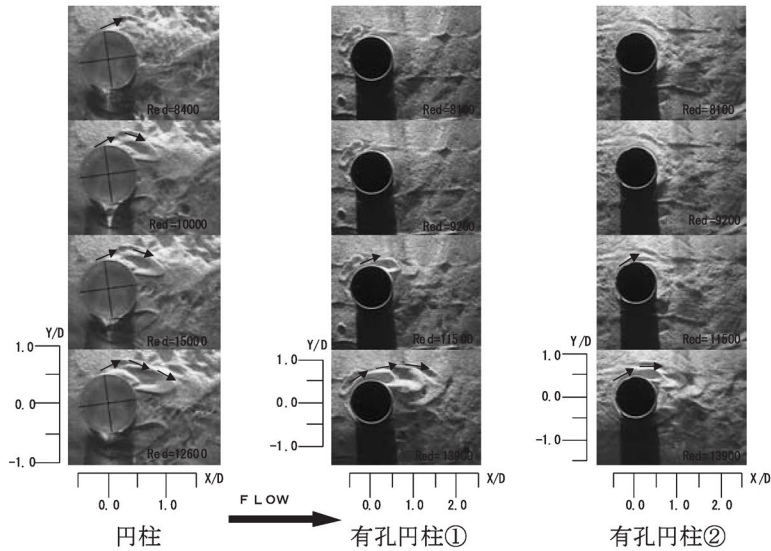


図-12 洗掘現象の比較(case4, case9, case10)

抑制していると考えられる。

5.12 上方全体視

図-12 は、それぞれ円柱、有孔円柱①、有孔円柱②における全体視の洗掘現象を示している。各画像は上から下に従い、低レイノルズ数から高レイノルズ数に変化する。洗掘の可視化には標準砂を用いた。有孔円柱①、有孔円柱②は、それぞれ砂層表面からほぼ上方 2mm, 1.2cm に直径 5mm のストロー 1 本を円柱に貫通させ、馬蹄形渦の制御として、よどみ点の圧力調整を試みた。

図-12 より、円柱においては、壁面に沿ってはく離せん断層近傍に洗掘現象が認められる。Red の上昇とともにその洗掘範囲が流下方向に発達している。有孔円柱①においては、Red=11500 で洗掘が形成されているが、有孔円柱②においては、わずかに洗掘が形成されているだけである。さらに、Red=13900 においても、有孔円柱①は有孔円柱②に比べ洗掘範囲が大きいことが認められる。

これらの洗掘を比較する上で、物体前面のよどみ点の流れ場の変化より考察を行なう。円柱では、円柱前面によどみ点が発生するため、馬蹄形渦が円柱周囲に形成され、洗掘現象が発生したと考えられる。一方、有孔円柱①、有孔円柱②では、円柱前面の穴により、よどみ点の圧力を低下させ、馬蹄形渦の形成が弱められる。そのため Red=9200 においては、有孔円柱①、②とも円柱前面に馬蹄形渦が形成されず、円柱前面の洗掘現象は観察さ

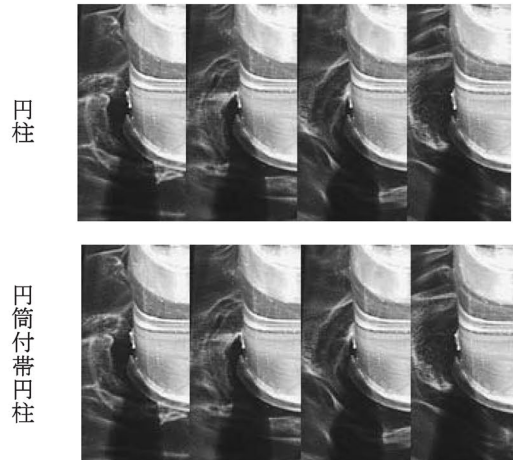


図-13 斜め全体視(case11, case12)

れない。

また、有孔円柱①、有孔円柱②における穴の高さの相違により、洗掘の形成に変化が認められ、有孔円柱②が相対的には効果的な制御を示している。このことについては、今後の位置と大きさを系統的に変化させ、その洗掘現象の変化を調べる必要がある。

5.2 円筒付帯円柱

5.21 斜め全体視

図-13 は、円柱と円柱に円筒物を巻き付けた円筒付帯円柱の物体の近傍に形成される流れ構造の特徴の相違を示している。円筒物は、河床と接するように取り付けられており、円筒物の穴の大きさは1.5cmである(図-10)。上図は物体の周りに円筒物を巻きつけていないものであり、下図は巻きつけているものである。各画像は1秒間隔であり、流れ方向は、紙面の左から右である。

図-13 より、円柱においては、前部に安定的な渦構造が形成され、時間の経過とともに渦が前部近傍で巻き続きを繰り返していることが認められる。一方、円筒付帯円柱においては、前部で安定的に渦構造が形成されることはなく、不規則な渦の流れが観察される。また、有孔円柱と同様に円柱と円筒付帯円柱における1分間に形成される馬蹄形渦の形成時間の結果を図-14に示す。

これらのことから、円柱においては渦度の強い馬蹄形渦が円柱周囲に形成され、また円筒付帯円柱においては、円柱前面の円筒物の穴によりよどみ点の圧力を低下させ、馬蹄形渦の形成を弱めていると考えられる。

5.22 上方全体視

図-15 に水素気泡による全体視を示す。上図は一樣流、下図はせん断流の場合である。

図-15 より一樣流中における円柱においては、安定した渦が形成されているのに対して、円筒付帯円柱においては、渦に乱れが生じ不安定であることが認められる(図中 a)。また、せん断流中における円柱においては、渦が流下するにつれて円柱の中心線に寄る傾向があるのに対して、円筒付帯円柱においては、渦が時間の経過とともにそのまま流下することが認められる。

これらのことから、円柱前面の円筒物の穴により、よどみ点の圧力を低下させ馬蹄形渦の形成を弱めていることが考えられる。この結果においても、有孔円柱と同様なことが考えられるが、実用化のことを視野に入れるならば、円筒付帯円柱を用いたほうが物体の構造が安定しており適当だと考えられる。また、今後の円筒物の穴の位置を系統的に変化させ、渦の形成の変化を調べる必要がある。

6. 結論

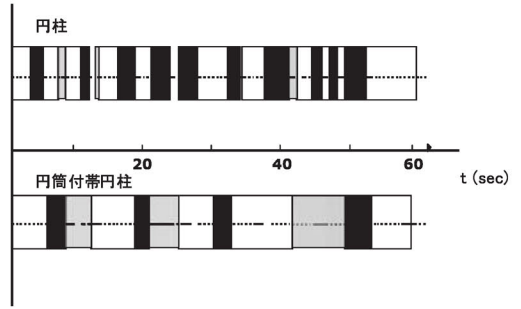


図-14 1分間に形成される馬蹄形渦の発生時間

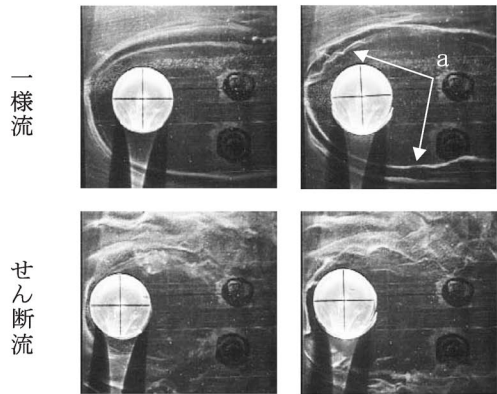


図-15 上方全体視(case13, case14)

一樣流中およびせん断流中に置かれた物体周りに形成される流れ構造、洗掘形象の特徴について可視化を行い、また制御実験における流れ構造の特徴から以下の結論が得られた。

- (1) せん断流に形成される馬蹄形渦による洗掘形象は、一樣流よりも流下するにつれ物体の中心線側に寄る傾向がある。また、時間の経過とともに洗掘の速度においても、せん断流の方が大きい
- (2) 物体の形状の変化における洗掘形象の相違について、角柱においては、よどみ領域が大きいためその側面で強い馬蹄形渦が形成し、洗掘深の大きな現象が発生した。一方、円柱、ひし形においては、よどみ領域は相対的に小さいため角柱のような洗掘は認められない。
- (3) 円柱と有孔円柱における洗掘形象の相違について、円柱においては、渦度の強い馬蹄形渦

が円柱周囲に形成されているため、深い洗掘が認められる。一方、有孔円柱では、通常の円柱に比べあまり洗掘は認められない。

- (4) 円柱、有孔円柱における馬蹄形渦の特徴について、一様流においては、円柱のほうが有孔円柱よりも広く渦が流下することが認められた。また、せん断流における円柱では、馬蹄形渦が安定して形成されるのに対し、有孔円柱では、あまり形成が認められない。
- (5) 円柱、円筒付帯円柱における馬蹄形渦の流れ構造の特徴について、円柱においては、前部に安定的な渦構造が形成されるのに対して、円筒付帯円柱においては、安定的ではなく不規則な渦構造が形成される。また、円柱の方が円筒付帯円柱よりも、渦が流下するにつれ円柱の中心線に寄る傾向がある。
- (6) これらの実験を総合して、有孔円柱・円筒付帯円柱は、馬蹄形渦を制御し、洗掘の制御も可能とする。しかし、構造的安定性を踏まえると、有孔円柱よりも円筒付帯円柱の方が実用的である。今後、流れ構造と洗掘との関係を明らかにするために低 Re 数で実験を行なったが、実用化のためには高 Re 数における実験が必要となる。

文献

- 1) 石野和男・後藤英一・中川良隆・岡田凌太：急潮流下海洋構造物周辺の捨石洗掘防止工に関する研究, 土木学会論文集, No. 462/VI-18, pp. 33-42, 1993.
- 2) 石野和男・大谷英夫・藤井秀博：急潮流下における橋脚周辺の捨石洗掘防止工の設計法に関する研究, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp. 123-133, 1995.
- 3) 池谷毅・漆山仁・秋山真吾：流れによる構造物周辺の最大洗掘深の予測と洗掘対策, 鹿島技術研究所年報, 第 47 号, 1999.
- 4) C. V. SEAL and C. R. SMITH: Visualization of a mechanism for three-dimensional interaction and near-wall eruption, J. Fluid Mech, pp. 394, pp. 193-203, 1999.
- 5) 佐賀孝徳・今本雅恵・渡辺勝利：せん断流中における円柱後流の三次元構造に関する研究, 水工学論文集, 第 46 巻, 2002.
- 6) Takanori SAGA: Study on the three dimensional vortical structure of the flow around a circular cylinder, CD-ROM PROCEEDINGS of 7th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, 2003.
- 7) 佐賀孝徳他：物体周りの流れの三次元構造に関する研究, 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, 第 2 巻, pp. 52-56, 2003.
- 8) 佐賀孝徳・野崎潤・渡辺勝利・松田智恵子・深江忍：物体近傍の洗掘現象に関する研究, 流体力の評価とその応用に関する研究論文集, 第 3 巻, 2004.

(2005. 9. 5 受理)