

開水路流れに設置した台座付平板周りの流れと局所洗掘について

Flow Structure and Local Scour around a Plate with Footing

石垣泰輔*・馬場康之**

Taisuke ISHIGAKI and Yasuyuki BABA

*正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

**正会員 工修 京都大学助手 防災研究所 (〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

Around a plate with footing in an open channel flow, vortexes separate from the edge of the plate and are carried away, and horse-shoe vortex and secondary flow can be observed. In this paper these phenomena are discussed by experimental results. The secondary flow is very strong and influences on vortex stretching of the separated vortexes. This secondary flow also has a close relation with local scour around the plate. The influence of the secondary flow on the vortex stretching is studied by flow visualization and velocity measurements. The results show that the secondary flow stretches the vortexes vertically, and makes them strong and stable. Another experiments are carried out for investigating the relation between the secondary flow and local scour in a channel with movable bed. The results show that the horse-shoe vortex is not dominant around the plate with footing, but the secondary flow is dominant there. In this case, the deepest scouring hole is formed apart from the footing.

Key Words : open channel, flat plate, vortex, secondary flow, local scour

1. はじめに

浅瀬で囲まれた岬や海峡部、マウンド上に設置された防波堤や突堤の先端周辺、フーチング付の水制、高水敷先端付近に設置された水理構造物周辺など、水平剥離渦と2次流構造が複雑に干渉する流れ場が存在する。このような局所流の構造を検討することは、物質の輸送現象や局所洗掘現象を解明する上で重要である。本研究では、このような流れの境界を単純化し、開水路流れに直角に設置された台座付平板周りの流れについて検討する。

いま対象としている現象には、複数の素現象が含まれる。平板周りでは、平板先端より剥離する渦（以下、水平剥離渦と呼ぶ）や、平板前面の底面付近で生起して平板を取り巻くように形成される馬蹄形渦、および、平板背後に形成されるよどみ域と主流との境界付近で生起するせん断不安定にもとづく渦が形成される。さらに、台座周りの局所的かつ非定常に発生する2次流や湧昇流が加わり、流れは非常に複雑になる¹⁾。従来の研究では、これらの個々の現象について検討がなされている。流れについては、海峡部の水平剥離渦（渦潮）²⁾、混合層流れ³⁾・⁴⁾、

複断面開水路流れなどに見られる境界形状に起因する2次流⁵⁾、などに関する研究がある。また、流れに起因する洗掘現象については、構造物周辺の流れと局所洗掘⁶⁾、海釜の形成⁷⁾、などに関する研究がある。しかし、これらは、個々の素現象を対象としたものであり、現象間の関係については検討されていない。そこで、本研究では、台座先端付近から形成される強い2次流（らせん流）に着目し、水平剥離渦などの流れの構造や洗掘現象に与える影響について、実験的手法を用いて検討することとした。

2. 実験方法

図-1に示す台座付平板を直線水路側壁に直角に設置し、周辺の流れの可視化、レーザ流速計による速度計測、および洗掘実験を行った。平板の厚みは0.25cmであり、その他の寸法は図に示すとおりである。なお、台座付平板を用いたCase Cとの比較のため、らせん流が存在しない平板のみを設置したCase Sについても同様の実験を行っている。流れの可視化には、幅39cm、長さ13mの固定床直線水路において、外径1.5mmの真鍮パイプを通して染料

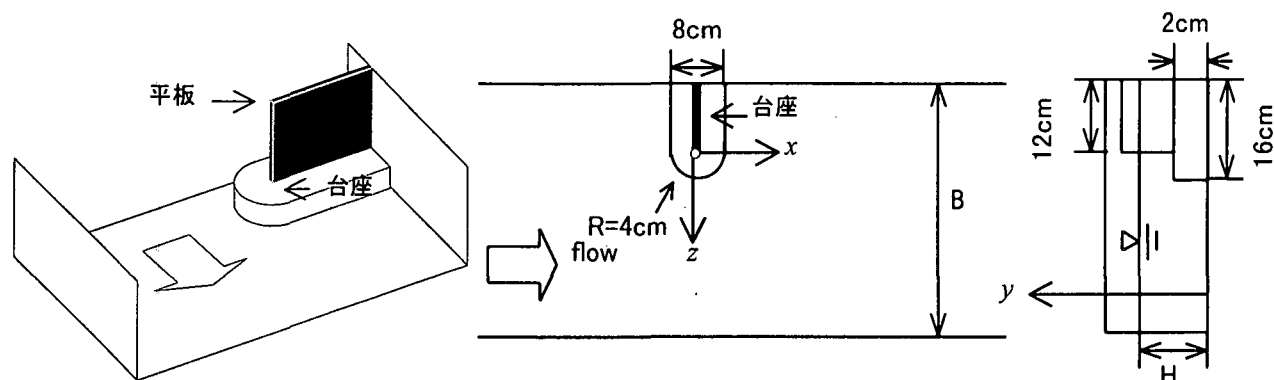


図-1 実験装置

表-1 水理条件

・流れの可視化・流速計測

Case	Slope I	Discharge † Q (l/s)	Channel width † B(cm)	Water depth H(cm)	depth averaged velocity (cm/s)	Reynolds number Re	Froude number Fr
S	1/800	0.54/0.56	39/40	4.0	5.0	1990	0.08
C-1		0.50/0.52		3.0		1490	0.09
C-2		0.37/0.38					

† 流れの可視化実験時/流速計測時

・洗掘実験

Case	Slope I	Discharge Q (l/s)	Channel width B (cm)	Water depth H (cm)	depth averaged velocity (cm/s)	u_* / u_{*c}	Reynolds number Re	Froude number Fr
S-15	1/372	2.28	50	4.0	15.0	0.89	5610	0.28
C-15		2.16			15.0	0.89	5600	0.28

のメチレンブルーを流れに注入する方法を用いた。速度計測は、幅 40cm、長さ 8m の固定床直線水路において、流下方向成分 u および鉛直方向成分 v の速度 2 成分の計測を行っている。また、洗掘実験は、幅 50cm、長さ 15m の直線水路の一部 (1.5m 区間) の路床を 4cm 下げ、そこに珪砂 7 号 (平均粒径 0.26mm) を敷設した移動床部分において、静的洗掘条件で実施した。本論文で用いた結果は、表-1 に示す水理条件で行ったものである。なお、Case C では、水深による構造の違いを検討するために 2 ケースの実験を行ったが、顕著な差異が見られなかったため、以下では、主に Case C-1 の結果を用いた。また、図-1 に示すように座標原点を平板の先端とし、流下方向を x 、鉛直上方向を y 、横断方向を z として結果を整理した。

3. 台座付平板周りの流れ

3. 1 平板周り (上層部) の流れ

ここでは、水平剥離渦が卓越する台座高さより上層の流れについて検討する。図-2 は、染料注入法

により可視化した水平剥離渦を、上方と側方に設置したデジタルビデオで撮影した画像である。なお、画像中の格子は 2cm 間隔である。また、Case S では、鉛直方向に並べた 3 本のパイプより染料を注入している。Case S の結果をみると、平板先端より剥離した渦は、流下するにつれて渦径が増大し、やがて消滅すること、および鉛直方向に一樣な構造を有していることが分かる。これに対し、Case C では、平板先端より c の渦までは、Case S と同様に流下とともに渦径が増大するが、それより下流の渦径は増大しておらず、崩壊せずに流下している。これは、縦断面可視化結果が示すように、渦の鉛直伸張が生じるため、渦径の増大が抑制されるとともに回転速度が速くなるためである。

この現象を、水面付近における水平剥離渦の移流軌跡および渦径の変化特性から検討する。図-3 は、ビデオ画像を 1/3 秒間隔で解析し、目視で判断した渦中心の軌跡を流下方向距離 x と時間 t で整理したものである。Case S では、単独で流下するものや、2~4 個の渦が合体するものがあり、渦は複雑な挙動を示し、合体位置も不規則である。これに比べ、

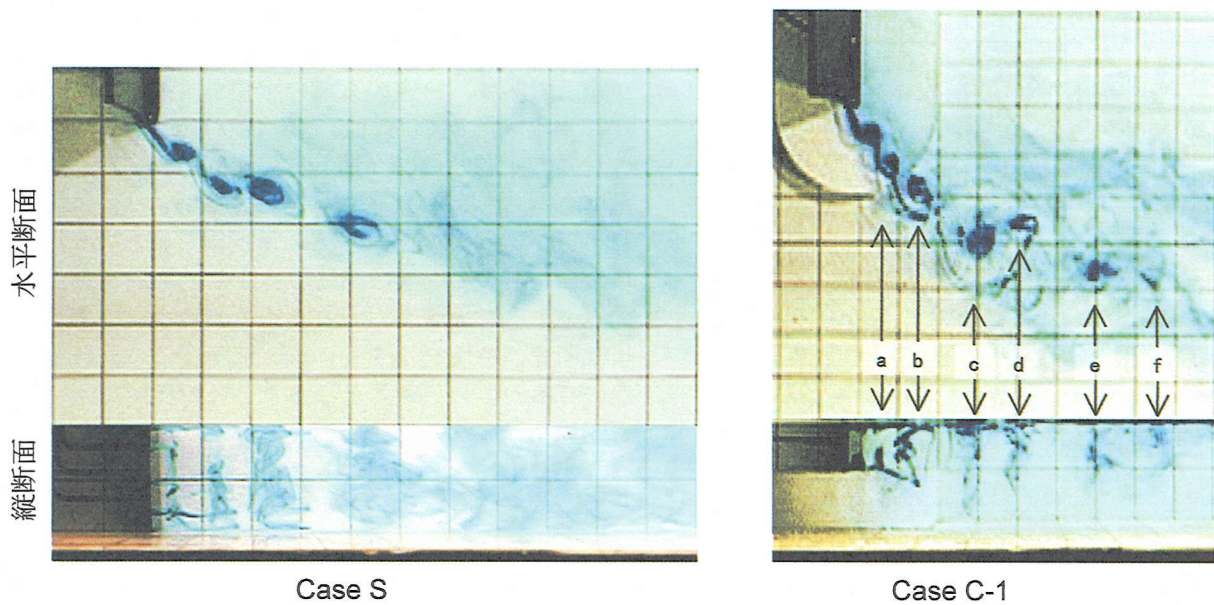


図-2 水平剥離渦の3次元構造

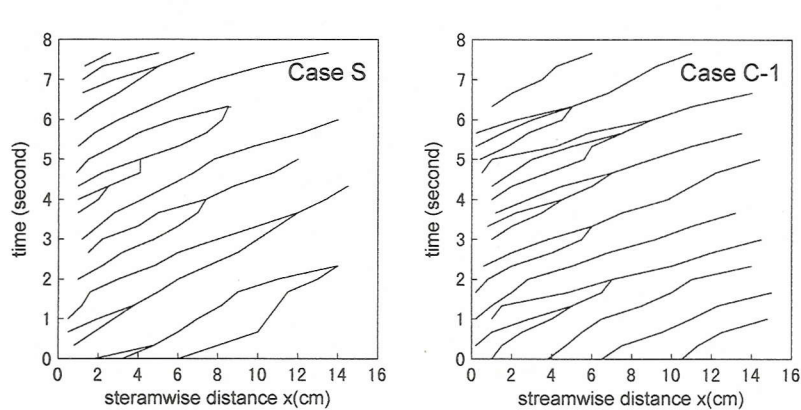


図-3 水平剥離渦中心の移流軌跡

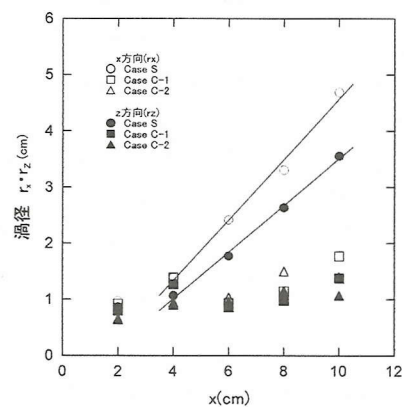


図-4 渦経変化特性

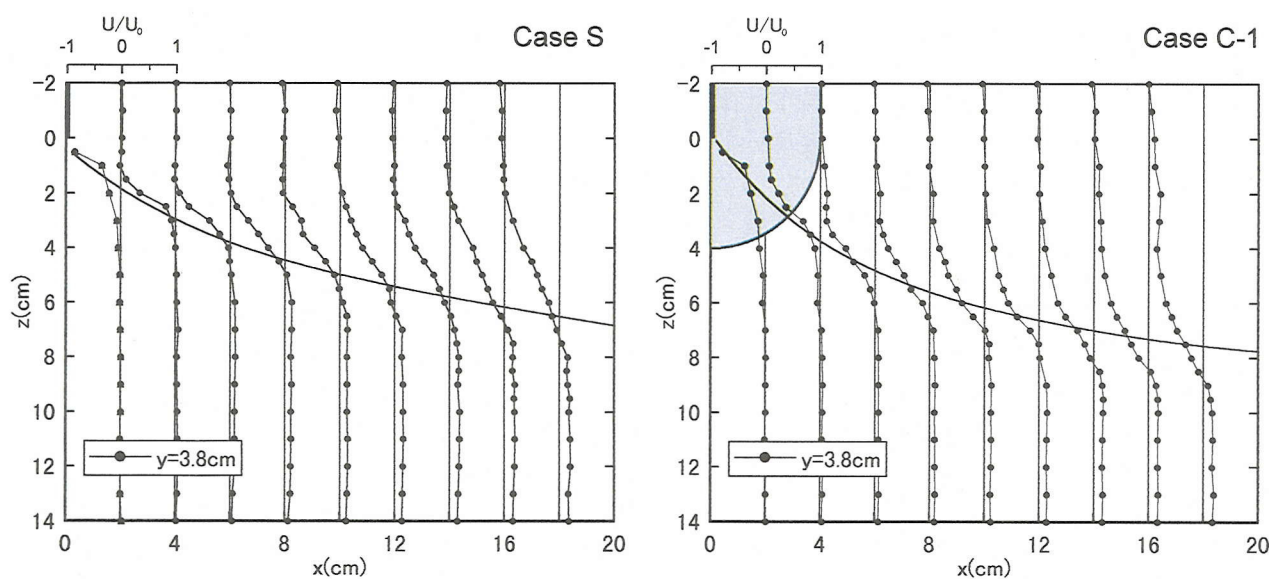


図-5 水面付近の平均速度分布と水平剥離渦の平均移流経路

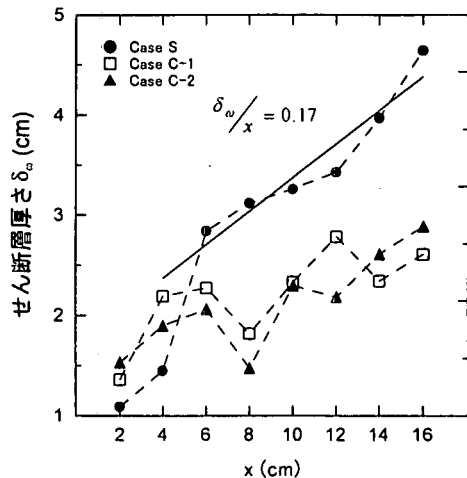


図-6 せん断層厚さの変化

Case C では $x=6\sim 8\text{cm}$ より下流では合体が起こらない。また、 $x=8\text{cm}$ より下流側では、渦がほぼ等間隔で並び、安定したものとなっている。一方、ビデオ画像を用い、各位置を通過する30個の渦について、目視で渦外縁を判断して得られた流下方向渦径 r_x および横断方向渦径 r_z の平均値を整理したものが図-4に示す渦径の変化であり、この結果からも、Case S と Case C の水平剥離渦の特性が異なっていることが分かる。図より、Case S では流下に伴い x に比例して渦径が増大するのに対し、Case C では抑制されていることが明らかであり、台座の有無が水平剥離渦の特性に大きな影響を与えていることが知れる。

これまでは、可視化で得られた瞬間値を用いた検討であるが、平均速度の分布からも台座の有無の影響が認められる。図-5は、水面付近 ($y=3.8\text{cm}$) の流下方向平均速度 U の分布と渦の平均移流経路 (図中の実線) を示したものである。なお、 U は $x=0\text{cm}$ における水路中央主流部の平均流速で無次元化して示している。図より、渦はせん断層のほぼ中央を流下しており、いずれのケースでも流下に伴ってせん断層厚は増加している。これらの速度分布より、Spencer & Jones⁸⁾ や Brown & Roshko³⁾ などが用いた(1)式で定義されるせん断層厚 δ_w を評価し、

$$\delta_w = \frac{U_1 - U_2}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{\max}} \quad (1)$$

流下方向距離 x に対して整理した結果が図-6である。なお、 U_1 は高速側の平均流速、 U_2 は低速側の平均流速であり、ここでは、それぞれ平均速度が一定となる領域での平均値を用いている。図より、Case S ではせん断層厚が $x=6\text{cm}$ 以降では一様に増加し、その比例常数 δ_w/x は 0.17 となる。この値は従来の研究⁹⁾ で得られている 0.18 とほぼ一致する。これ

に対し、Case C ではせん断層厚は増加傾向を示すものの、Case S の結果とは $x=6\text{cm}$ より下流では差異が顕著であり、台座の有無の影響が明確である。また、水平剥離渦の特性に差異がみられない $x=2\text{cm}$ において、渦の通過周期、移流速度および初期運動量厚さから算定したストローハル数 St は、Case S で 0.20、Case C で 0.21 と、ほぼ同じ値となり、平板から剥離した直後は同様の特性を示す。

以上より、上層でみられる水平剥離渦は、剥離直後は同様の特性を示すものの、流下するにつれて台座の有無の影響が顕著となることが知れた。これは、台座周りの流れの影響と考えられ、次節でこの点を検討する。

3. 2 台座周り (中層および下層) の流れ

図-7は、台座周りの流れと上層の水平剥離渦の関係を示した模式図とそれぞれの構造を可視化した結果をまとめたものである。図は、(a): 台座先端付近より発生する強いらせん流、(b): 台座前面で発生し、取り巻くように引き延ばされる馬蹄形渦、(c): 平板背後のよどみ域に高速で進入し、減速した後に湧昇する流れ (図-8も参照のこと)、の存在を示すとともに、上層の水平剥離渦が(a)の流れに伴う強い下降流によって鉛直方向に引き延ばされることを示している¹⁾。これらの構造は、平均速度分布にも影響を及ぼしている。台座高さ (中層: $y=2.1\text{cm}$) および底面付近 (下層: $y=0.3\text{cm}$) の分布は図-8のようであり、渦の平均移流経路 (図中の破線) よりよどみ域側では、高速流が進入し (U分布参照)、 $x=10\text{cm}$ より下流側で上昇する (V分布参照) 湧昇流の存在が認められる。また、台座の先端より渦の平均移流経路の主流側に沿って下降部が連なった部分が存在しており、平均的には前述した(a)のらせん流の下降部分に相当していることが分かる。この渦の移流経路に沿った強い下降部の存在は、図-2でもみられる水平剥離渦の鉛直伸張を引き起こしていることを説明するものであり、ここで水平剥離渦は急激に伸張される。

次に、ここに示した現象では台座先端から発生する強いらせん流の存在が重要と考えられるため、この流れを引き起こす要因について検討する。図-9は、平板の有無による影響をみるために、馬蹄形渦と台座先端付近の流れを可視化したものである。上段の(a),(b)が台座のみの場合、下段の(c),(d)が台座付平板の場合である。(a)と(c)を比較することにより、平板の有無が馬蹄形渦に与える影響が見て取れる。平板が無い(a)の場合、台座の前面で形成された馬蹄形渦は、台座を取り巻くように先端まで連なり、その後、主流に沿ってほぼ直線的に流下する。これに対し、(c)の平板がある場合は、先端よりやや上流側

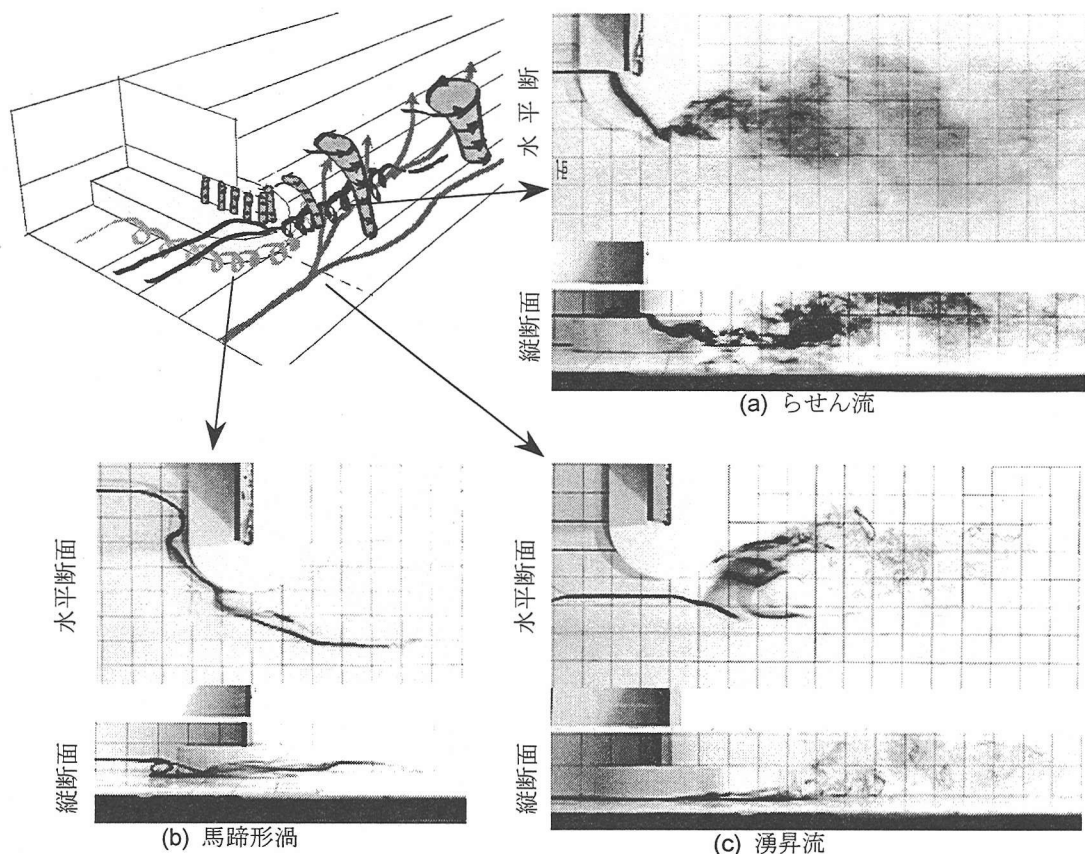


図-7 台座周りの流れの構造 (可視化例は Case C-1)

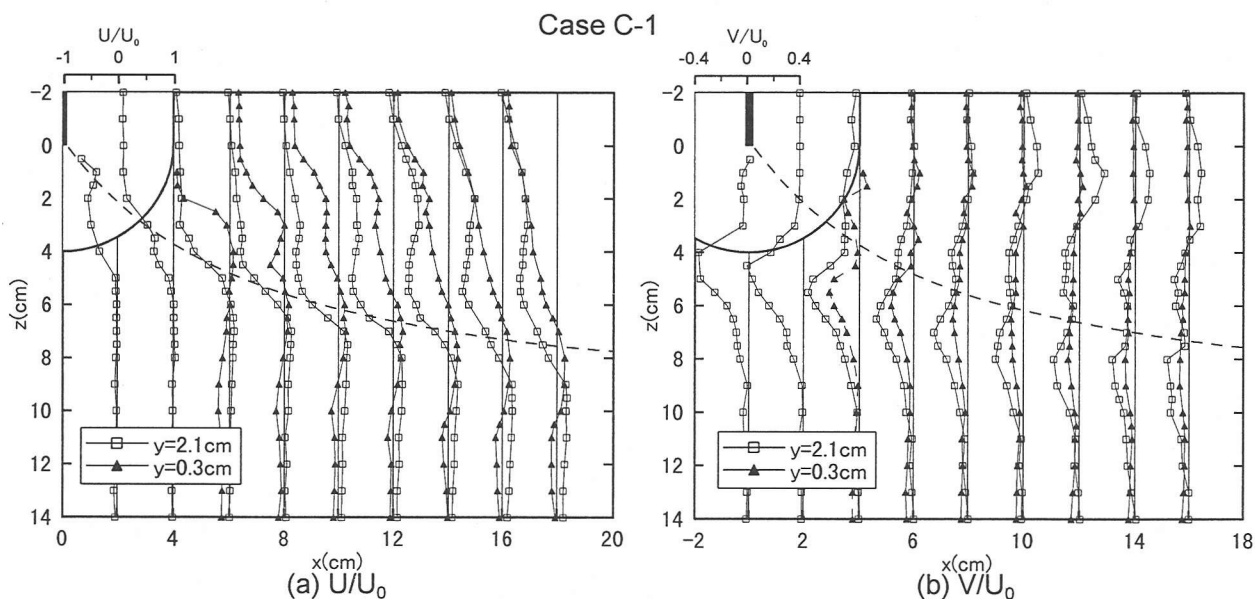
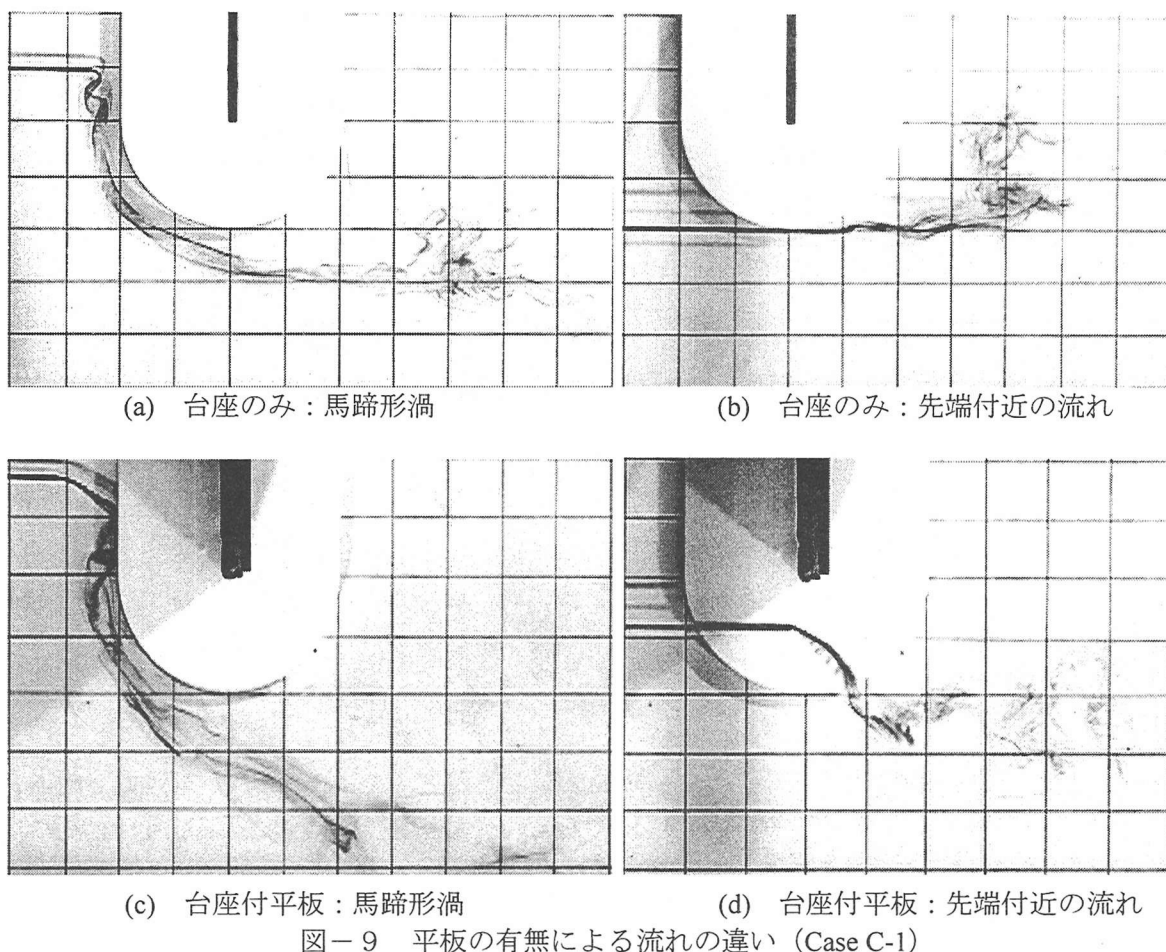


図-8 台座高さおよび底面付近の平均流速分布

で台座を離れ、ほぼ 45° 程度の角度で主流に巻き込まれて行く。このような違いは、(b)と(d)の先端付近の流れにもみられる。台座の上面高さから注入した染料は、(b)に示すように、平板が無い場合にはほぼ直線的に流下し、台座背後のよどみ域に取り込まれて行く。これに対して(d)の平板のある場合は、平板の存在により流向を変えられた流れが台座を斜めに横切り、図-7で示した先端付近のらせん流

に巻き込まれている。以上より、平板の存在により上層の流れと下層の流れが交差するため、その鉛直シアに起因して強い2次流が発生し、らせん流が発達すると言える。このような強いらせん流は、複断面蛇行流れの蛇行頂部付近で発生・発達することが知られており¹⁰⁾、ここで示した流れも同様の発生機構を持つものであり、その特性も類似したものであると考えられる。また、この流れは、底面せん



断力の分布にも強く影響することが指摘されている¹⁰⁾ことから、台座付平板周りの洗掘現象への影響が考えられ、次章で流れと洗掘現象について検討する。

4. 台座付平板周りの局所洗掘

4. 1 洗掘形状

台座付平板と平板のみの場合の洗掘形状の違いを検討するために、通水開始から3分、10分、20分経過した時点で通水を停止し、超音波河床計を用いて流下方向には2~4cmピッチ、横断方向には1mmピッチで河床位を計測した。その結果を等高線表示したものが図-10である。なお、図中のa~dは形成された順に洗掘孔に付した記号であり、時間経過にともなう移動を追跡して付している。水理条件は、水深4cm、狭窄部での断面平均流速15cm/sであり、あらかじめ平板を設置しない状態で評価した摩擦速度 u_* と岩垣の式で評価した限界摩擦速度 u_{*c} との比が0.89となる静的洗掘の条件を設定した(表-1)。図をみると、いずれのケースでも複数の洗掘孔が形成されており、時間が経過するにつれて洗掘深を増大させるとともに、下流側に新たな洗掘孔

を形成してゆくのが分かる。平板より離れた洗掘孔の形成機構は2次的なものであり、上流側の洗掘孔を形成している流れがその下流側に形成される堆積域の斜面に沿って上昇し、頂点付近で剥離した後、再付着する付近を洗掘するという現象の繰り返しで説明できる。したがって、ここではCase SとCase Cの違いを平板近傍の現象で検討する。

Case S-15では、 $t=3\text{min.}$ の結果に示すように、平板先端がまず洗掘されaの洗掘孔を形成した後、少し離れてb、さらにその下流にcが形成される。これに対しCase C-15では、台座より離れた位置にaの洗掘孔が形成された後、その下流側にbが形成される。その後、 $t=10\text{min.}$ の結果にみられるように、台座周りのcが形成されるとともに、bの下流側にdが形成される。また、最大洗掘深は、両者とも最初に形成された洗掘孔aで生じるが、洗掘孔の位置は異なっている。すなわち、Case Sの場合にはaが平板先端に形成されるのに対し、Case Cの場合には台座より離れた位置に形成される。このように、平板のみの場合と台座付平板の場合では、洗掘過程および最大洗掘深の生起位置が異なっている。これは、前章で検討したように、流れの構造が異なることに起因するものであり、次節で検討を加える。

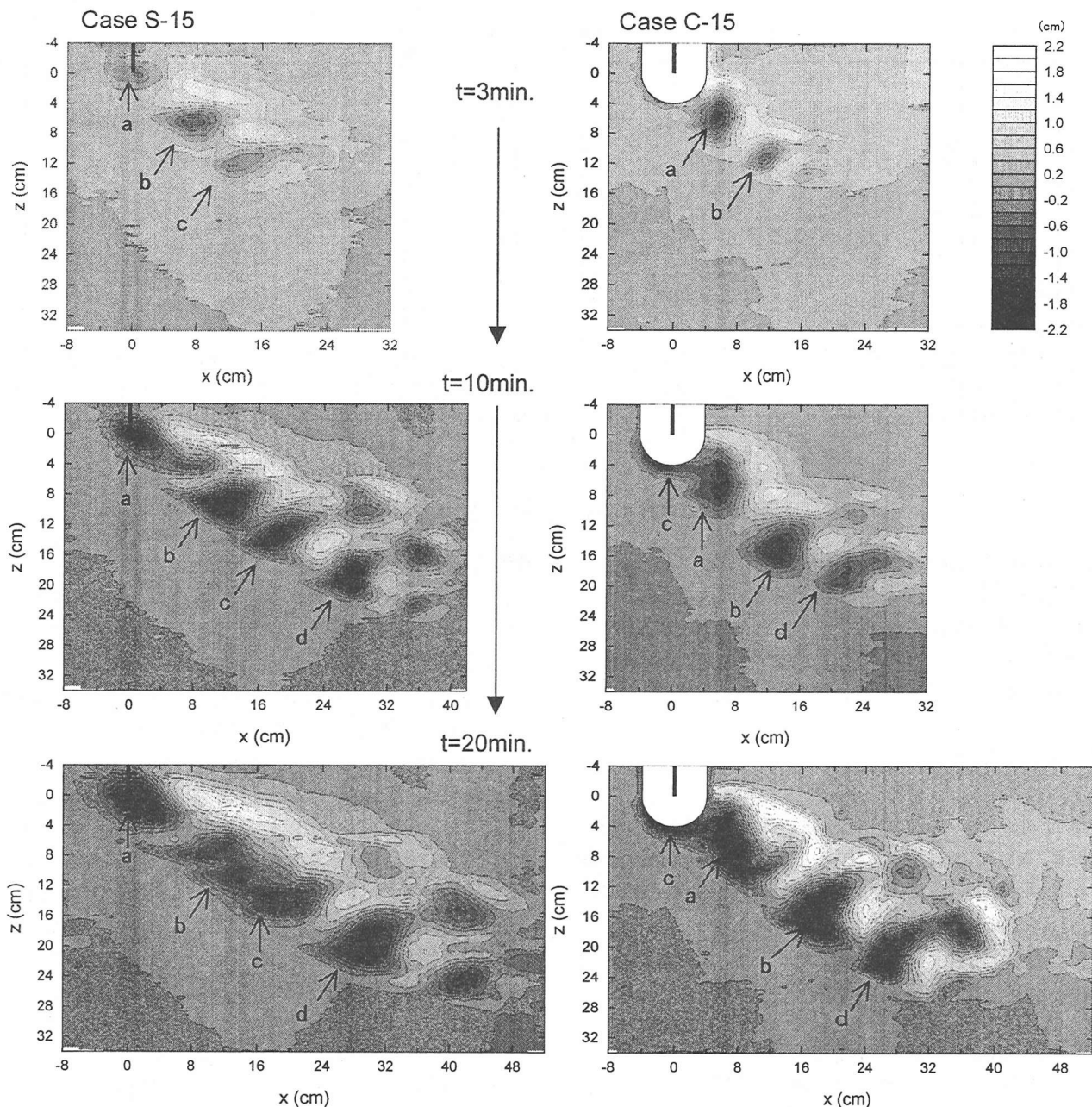
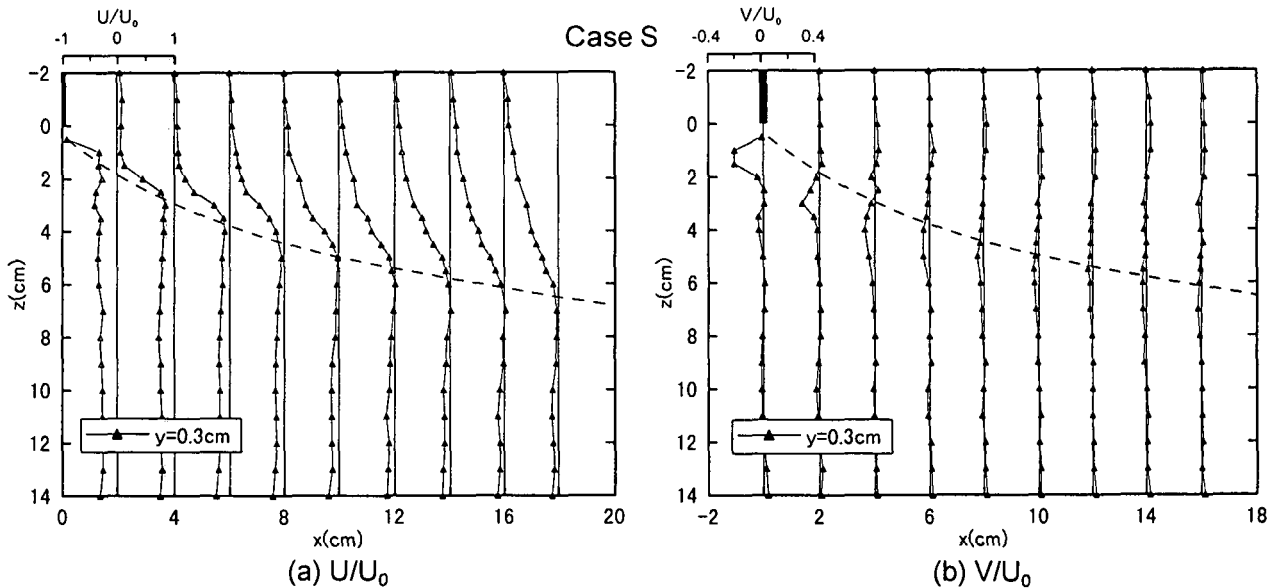


図-10 洗掘形状の経時変化の比較

4. 2 局所洗掘を引き起こす流れ

構造物周りにおける洗掘の主要因が馬蹄形渦にあることはよく知られた事実であるが、前節で示したように台座付平板周りの洗掘現象では、支配的ではない。このことは、図-11 に示す Case S および前述した図-8 の Case C の底面付近における速度分布と図-10 の洗掘形状計測結果と比較することにより検討が可能である。なお、図-8 および図-11 の結果はいずれも固定床における結果ではあるが、底面付近の速度分布は底面の掃流力分布と関連のあることから、流れの構造と洗掘現象の関係が検討できる。これらの結果の比較から、河床形状が変化す

る領域が、いずれのケースにおいても、 V の分布における渦の平均移流経路の主流側に沿ってみられる下降部に相当していることが分かる。この下降部は、Case S の場合は、前面に形成される馬蹄形渦の通過経路に相当しており、Case C の場合には、台座先端から生じる強いらせん流がみられる位置に相当している。前章で述べたように、Case C でも台座の前面に馬蹄形渦が形成されるが、図-9 にみられるように、台座先端の上流側で台座から離れて行くため、図-10 の結果が示すように通水初期には馬蹄形渦による洗掘はみられない。したがって、台座付平板周りでは、通水初期に、らせん流による洗掘孔が台



図一11 底面付近の速度分布 (Case S)

座より離れた位置に形成される。

以上のように、台座付平板周りの局所洗掘については、台座先端から発生する強い2次流であるらせん流が支配的であり、そのため、最大洗掘深が離れた位置に生じる、という説明ができる。

5. おわりに

本研究では、台座付平板周りの流れの構造と局所洗掘について、台座先端から生じる強い2次流に着目した実験的検討を行った。得られた主な結果は、以下のようである。

- 1) 台座の有無により、流れの構造が異なり、平板先端から発生する水平剥離渦の挙動や洗掘現象に大きく影響する。
- 2) 流れの構造における顕著な違いは、台座先端から発生する強い2次流（らせん流）の存在である。この流れは、台座の上層と下層部の流向の違いに起因する鉛直シアにより誘起されるものである。
- 3) 水平剥離渦はらせん流によって急激に鉛直伸張され、強く安定した渦となる。
- 4) 平板のみの場合、局所洗掘は馬蹄形渦が支配的であるが、台座付平板の場合にはらせん流が支配的となる。このため、最大洗掘深は、台座周りの洗掘孔には生じず、らせん流によって形成される離れた位置の洗掘孔に生じる。

以上のように、境界形状に起因して局所的かつ非定常に生起する2次流が、流れの構造や洗掘現象に影響を及ぼすことが知れた。同様の流れの構造は、種々の流れ場でみられるが、ここで対象とした境界形状および水理条件は単一のものであり、条件の違いによる構造や特性の変化については、今後の検討が必要である。

参考文献

- 1) 岸本秀隆, 石垣泰輔, 馬場康之: 剥離渦と2次流構造に関する実験的研究, 土木学会水工論文集, 第43巻, pp.287-292, 1999.
- 2) 西村 司: 鳴門の渦潮を追う-宇宙からその謎を追う-, 山文社, 1986.
- 3) Brown, G. L. and Roshko, A.: On density effects and large structure in turbulent mixing layers, J. Fluid Mech., vol. 64, 1974.
- 4) Winant, C. D. and Browand, F. K.: Vortex pairing; the mechanics of turbulent mixing layer growth at moderate Reynolds number, J. Fluid Mech., vol. 63, part 2, 1974.
- 5) 例えば, 石垣泰輔: 複断面開水路流れの3次元構造に関する研究, 学位論文, 1993.
- 6) 例えば, 宇民 正: 橋脚周辺の流れの機構と洗掘防止法に関する研究, 学位論文.
- 7) 八島邦夫: 沿岸の海の基本図資料等からみた瀬戸内海の高釜地形, 水路部研究報告, 第28号, pp.139-230, 1992.
- 8) Spencer, B. W., Jones, B. G.: Statistical investigation of pressure and velocity fields in the turbulence isobar, Symposium on Separated Flow, AGARD Conf. Proc. pp.4, 1971.
- 9) 日本流体力学会編: 流体力学ハンドブック, 丸善, pp.329-400, 1998.
- 10) 石垣泰輔, 武藤裕則, 澤井健二: 複断面蛇行開水路流れの2次流構造と掃流力分布に関する実験的検討, 土木学会水工論文集, 第43巻, pp.329-334, 1999.

(1999年4月23日受付)