

橋脚後流域の流れパターンについて

宇 民 正

FLOW PATTERN DOWNSTREAM OF BRIDGE PIERS

By *Tadashi* UTAMI

Synopsis

Downstream of bridge piers, there occur three kinds of vortices—wake vortex, Kármán vortex, and horse shoe vortex, which play an important role in local scour and deposition. So it is necessary to make clear the characteristics of these vortices in order to estimate the magnitude of deformation of river bed or to protect it.

An experimental study is made on laminar flow around circular bridge piers settled on flat bed and three dimensional characteristics of these vortices are made clear. Especially it is emphasized that these characteristics are different from ones of flow around circular cylinder in uniform flow.

1. 概 説

橋脚の後流域には一般に橋脚に接して洗掘が生じ、その下流側には堆積が生じるといわれているが、その発生の状況は非常に複雑である。たとえば Fig. 1 は建設省土木研究所での測定結果で、十分に洗掘・堆積が達しきった状態を示しているが、後流域における洗掘堆積の形状は流れのフルード数によって異なりその間に相似性が認め難いことを示している。ところが一方、橋脚後流域の流れのパターンは Fig. 2¹⁾ に示すようにレイノルズ数によって全くその様相を異にする。しかも当然のことながら洗掘・堆積形状はそれを規定する流

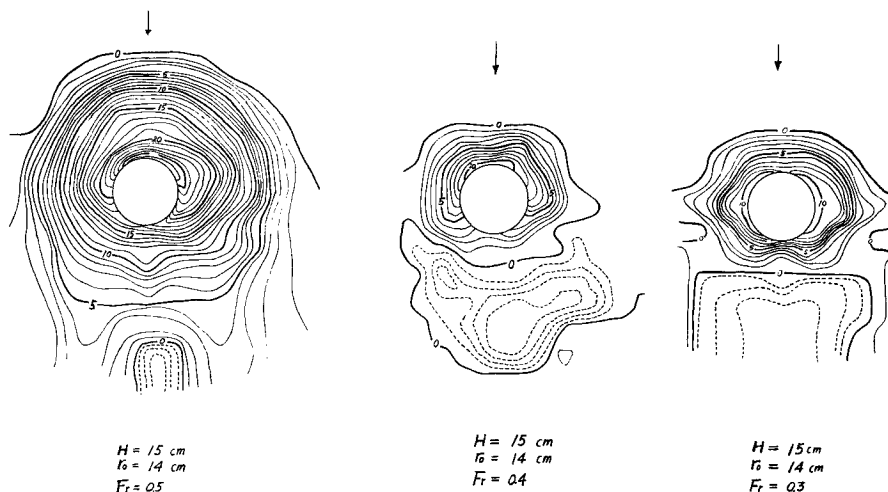


Fig. 1 Contours of local scour and deposition around bridge piers.

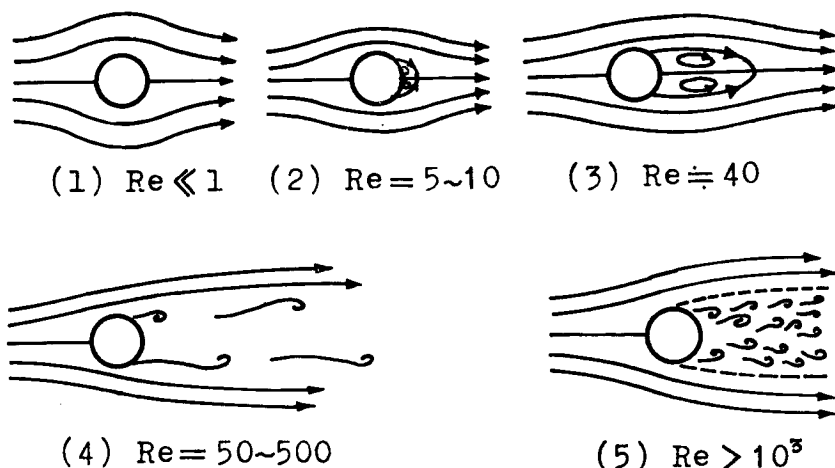


Fig. 2 Variation of flow pattern with Reynolds number.

況が始まってからの経過時間によっても変化する。こういった橋脚後流域の洗掘・堆積現象の複雑さは、その防止のための工種の選択やその効果についても不明な点を多く残している。

本報告は、このような橋脚後流域における複雑な洗掘・堆積状況を知る手がかりを得るために、平滑な固定床水路に円柱橋脚を一本設置した場合の後流域の流れパターンを調べたものである。いうまでもなく河川の流れは乱流であるが、乱流状態で実験を行なうと後流域の各種渦を含む複雑な流れのパターンを実測把握することが非常に困難なので、本報告では第一段階として層流で実験を行なった。実験に用いた流れのレイノルズ数は 10^0 という小さなものであり、一般河川における橋脚周辺の流れのレイノルズ数 $10^5 \sim 10^8$ とは桁ちがいである。したがって本実験結果を直接実河川の橋脚周辺の流れに適用することは無理であるが、このような低レイノルズ数の流れにおいても橋脚後流は興味ある三次元的な特性を示しており、このような特性を現象に忠実に叙述することによって、大きなレイノルズ数の場合の現象理解に幾分でも役立てようというのが本報告の目的である。

2. 実験方法と実験条件

現象を単純化し、その把握を容易にする目的で層流状態で実験を行なった。そのために水とグリセリンの混合液を流体として用いた。実験水路は幅 20 cm、長さ 6 m の透明アクリル樹脂製であり、こう配は 1/500 に設定した。水路のほぼ中程の中心断面に直径 2.0 cm の円柱を水路床に直角に設置し、円柱周辺の流れの三次元的な流速分布を水素気泡法を用いた Flow Visualization の方法で測定した。実測地点での水深は 4.5 cm ではほぼ一定である。接近流の水路中央における流速分布は Fig. 3 に示すようであり、図中の実線は放物型流速分布式を

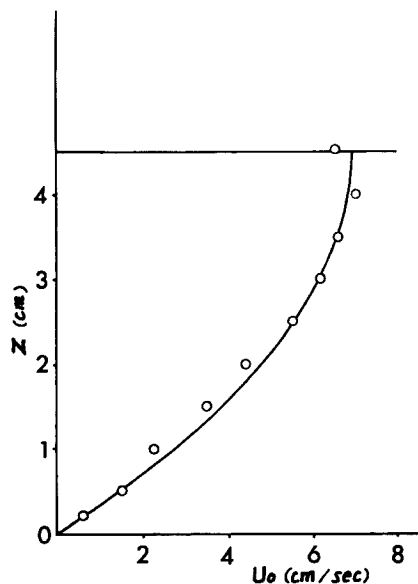


Fig. 3 Vertical distribution of approaching velocity.

したものである。この式が成立つと仮定して流体の動粘性係数を計算すると $\nu = 2.88 \text{ (cm}^2\text{/sec)}$ となり、橋脚の直径 $d = 2.0 \text{ cm}$ と平均流速 $U_{om} = 4.60 \text{ (cm/sec)}$ とを用いて計算したレイノルズ数は 3.19 となる。以後の説明の便のために、座標軸を Fig. 4 のように設定する。すなわち、円柱の中心軸の位置を原点として下流向きに x 軸、水路横断方向に y 軸、水路床面からそれに直角上向きに z 軸を設定する。また、それぞれの方向の流速の成分を u_x , u_y , および u_z とする。

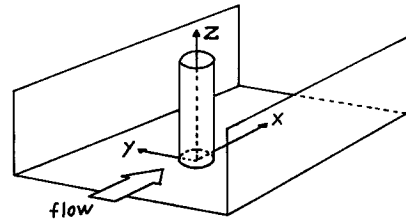


Fig. 4 Co-ordinate system.

3. 実験結果とその考察

(1) 流れパターンの水路底面からの観察

水素気泡法の陰極の白金線 ($\phi 0.03 \text{ mm}$, 長さ約 10 cm) に 2 mm 間隔に痕をつけておき、それを水平かつ水路横断方向に設置し、それに 0.2 sec 間隔でパルス状の電圧を荷した時に発生する水素気泡列が流下する様子を水路の底面を通して写真撮影した。白金線の設置位置は、 $x = -6, -4, -3, -2, -1.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 6, 8$ および 10 cm の横断面内の、高さがそれぞれ $z = 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2.0, 2.5, 3, 3.5, 4$ および 4.4 cm の位置であり、それぞれの設置位置について、白金線の直下に設置したカメラで 2~5 こまづつ撮影した。それらの撮影結果のうち、白金線を $x = -1.5 \text{ cm}$ の断面内に設置した場合と、 $x = 4.0 \text{ cm}$ 断面内に設置した場合の若干例を Photo 1 に示す。

これらの撮影結果から、橋脚の前面においても後流域においても流れの模様が水面近傍と水路床近傍とで全く異なったものとなっており、水面近傍の後流域のうち円柱の直下流部分（ほぼ $0 < x < 7 \text{ cm}$, $-1 \text{ cm} < y < 1 \text{ cm}$ の範囲）にはカルマン渦の発生が認められず、それとは別の回転運動があることがわかる。そこで便宜上この領域を後流はくり渦領域とよぶこととし、カルマン渦領域と区別することにする。たとえば、 $x = 1.5 \text{ cm}$ の断面を過ぎる流線についてみると、この断面で高さが 1.0 cm 以下にある流線は馬蹄型渦にまきこまれているが、後流はくり渦にはまきこまれない。後流はくり渦内にまきこまれる流線はこの断面で $1 \text{ cm} \leq z \leq 3.5 \text{ cm}$ の高さある流線であり、 $4 \text{ cm} \leq z \leq 4.5 \text{ cm}$ の高さの流線は後流はくり渦にまきこまれませんカルマン渦にまきこまれている。

また、円柱橋脚の下流側に陰極の白金線をおいた場合の観察と撮影結果からは次のことが明らかになった。すなわち、水路床面から 1.5 cm の高さ以下にある流線は比較的大きな曲率をもって水路中央線に向ってまきこまれており、これらの流線については橋脚後面あるいは側面でのはくり現象は認められない。さらにこの範囲においてはカルマン渦の発生も認められない。カルマン渦の発生が認められるのはほぼ $z = 2.5 \text{ cm}$ より上に位置する断面においてであり、その渦の強さと大きさは水面に近づくにつれて大きくなっているようである。カルマン渦の軸は水面に直角方向ではなく下流方向に向ってかなり傾いており、水面近傍においても流れは二次元的であるとはいえない。水面近傍においては橋脚表面で流れのはくりが認められるが、カルマン渦はその点で発生するのではなく、その点より若干下流（ほぼ $x = 6 \text{ cm}$ ）で橋脚の左右側に交互に発生し、下流へ流下するにつれて発達してゆくようである。ところがほぼ $x = 12 \text{ cm}$ より下流では渦列の間隔は横断方向にほぼ 6.5 cm で一定になっている。

以上の観察に基づいて水面近傍の後流域を渦の状況から分類すると、後流はくり渦領域とカルマン渦領域とに大別され、カルマン渦領域は発生域、発達域および一様域に区分される。これら各領域の大略の形状と大きさは Fig. 5 のようになる。はくり領域の幅は $\sqrt{\nu x / U}$ の大きさで変化すると一般にいわれているが²⁾、本実験で一様域が生じているのは、水路幅の影響と考えられる。また、本実験において、橋脚の直径と平均流速を用いたレイノルズ数は 3.19 であり、カルマン渦が水面近くに発生することを考慮して表面流速を用いて計算したレイノルズ数は 4.79 である。いずれにしてもレイノルズ数は 10^0 のオーダーである。一方、Fig. 2 に示

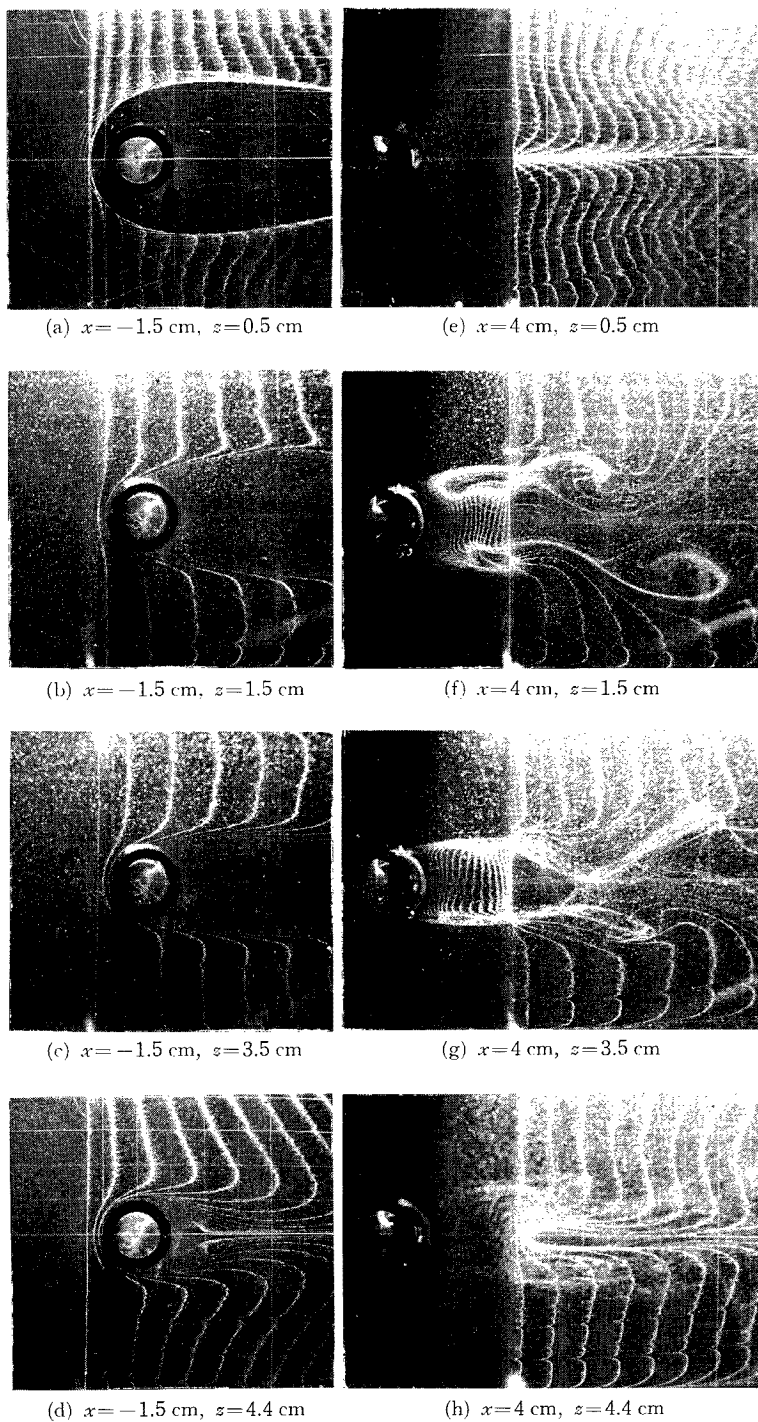


Photo 1 Examples of visualized flow pattern.

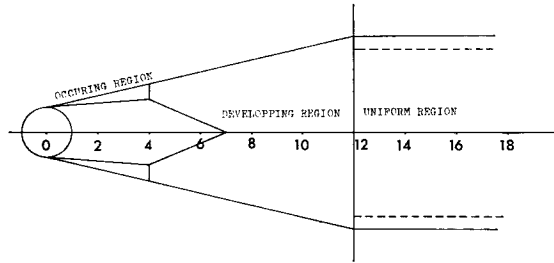


Fig. 5 Classification of flow downstream of bridge piers.
(near water surface)

した流れパターンと観測された流れパターンとを比較してみると一様流においてレイノルズ数が50ないし500のときに発生する流れパターンが三次元的な流れにおいては 10^0 といった低レイノルズ数の下で水面近傍ではあるが現われていることがわかる。

つぎに、カルマン渦のストラハル数を平均流速を用いて計算すると0.23となり、またカルマン渦が水面近傍で顕著に認められることにもつぎ水面における流速を用いて計算すると0.16となる。レイノルズ数が $5 \times 10^2 \sim 2 \times 10^5$ の範囲でストラハル数は約0.2で一定であるといわれているが³⁾、本実験のように 10^0 とい

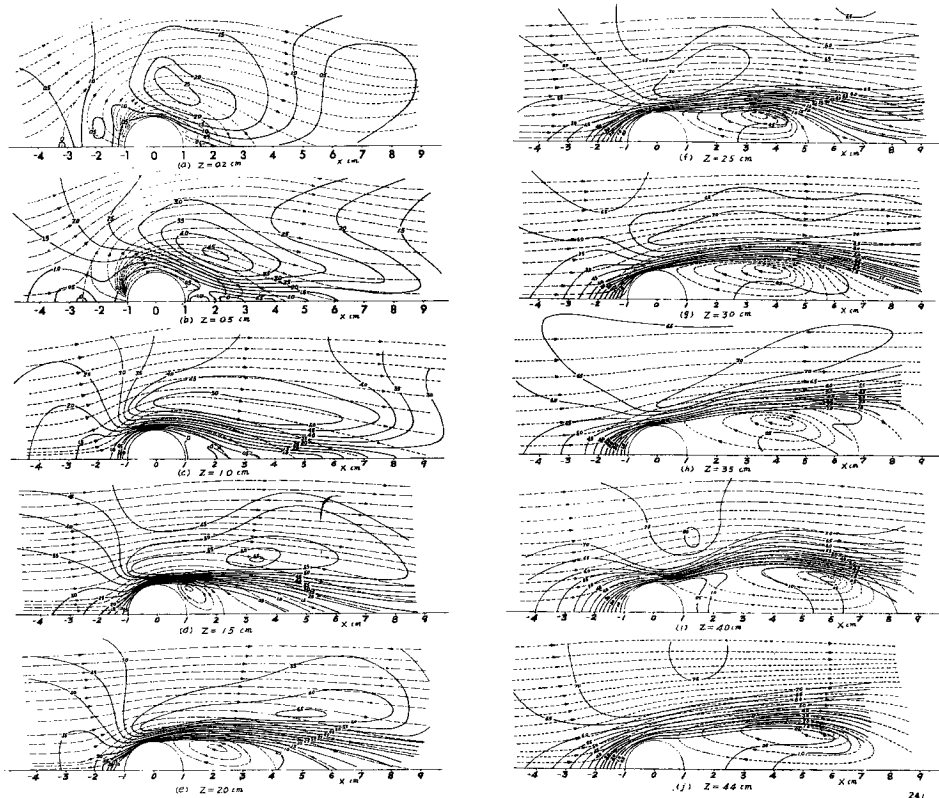


Fig. 6 Flow pattern and velocity distribution in each section parallel to the channel bed.

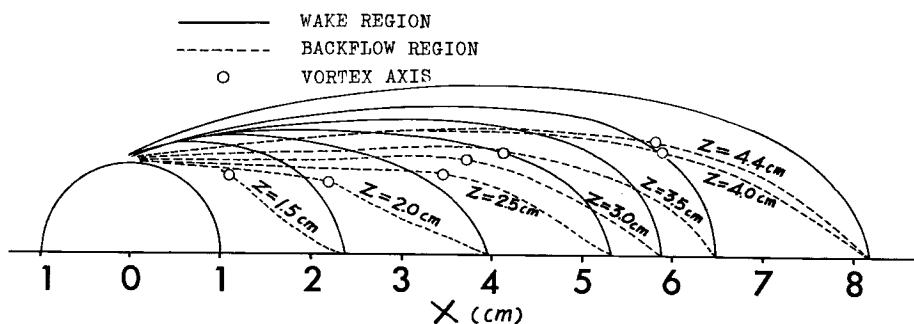


Fig. 7 Wake region, back flow region and position of vortex axis in each section.

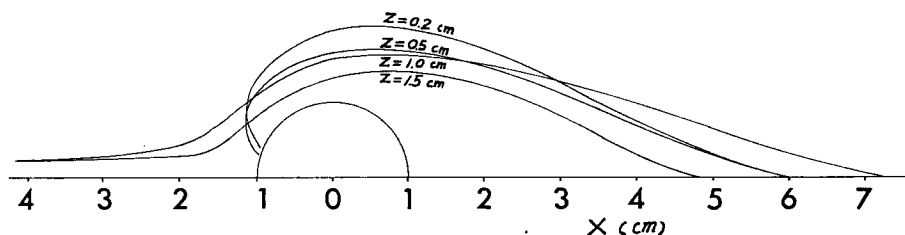
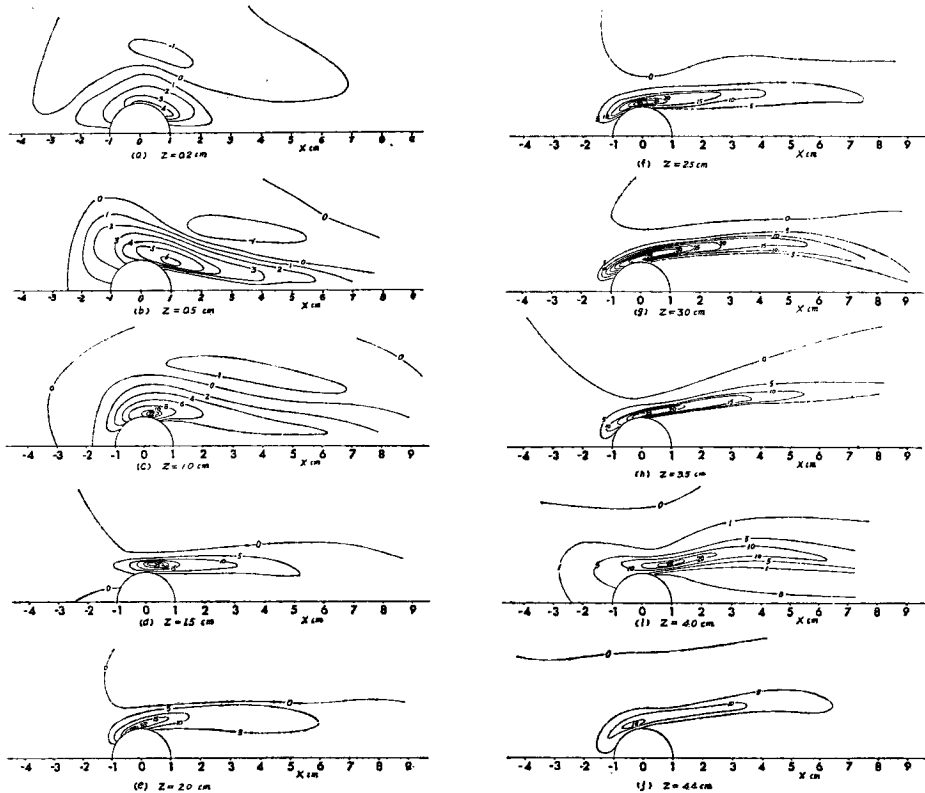


Fig. 8 Region of flow which is supplied to wake vortex.

った低レイノルズ数の場合でもそれに近い値がでていることが認められる。

つぎに、以上に得た撮影結果を時間的・空間的に重ねあわせることによって、水路床面に平行な各断面内の平均的な流速ベクトルの包絡線（便宜上、以後擬似流線とよぶ）と平均的な絶対流速 q （厳密には $\sqrt{u_x^2 + u_y^2}$ ）の分布を求め、Fig. 6 に示した。この図から、 $z > 1.5$ cm の断面では後流はくり渦の存在が認められる。この渦の回転軸の位置、渦領域および逆流領域の境界線が断面の水路床からの高さによってどのように変化するかを示したものが Fig. 7 である。この図から、回転軸は水面に近い断面ほど下流側へ偏していること、および後流はくり渦領域は水面に近づくほど大きくなっていることが認められる。一方、 $z > 1.5$ cm の各断面では円柱橋脚近傍を通過する流線は先述のように橋脚後方で水路中心へ向ってまきこまれ、上昇流を形成してはくり渦にまきこまれる。このような流線を含む領域の外側境界線を図示したものが Fig. 8 である。Fig. 7 に示したはくり渦にともなう逆流の流量はほぼ $1.4 \sim 1.5$ cm³/sec であり、一方 Fig. 8 の領域を通過する流量を $x=0$ 断面で見積った値も上と同じ値となる。以上のことから、Fig. 8 で示される領域を通過した流量が後流はくり渦を構成していると考えることができる。

Fig. 6 の作成過程において、擬似流線と絶対流速のそれぞれについて平均化を行なっているため、カルマン渦は図上には現われていないが、実際には後流はくり渦領域の外側境界線に沿ってカルマン渦が発生・発達していることが認められた。カルマン渦の発生は渦度の分布と密接な関連があると考えられるので、Fig. 6 から各断面における渦度ベクトルの z 方向成分 ζ を求め、その分布を Fig. 9 に示した。本図の計算にあたって、計算地点の流線の曲率半径を R とするとき、 $\zeta = q/R + \partial q/\partial R$ という式を用いているので、 $\partial q/\partial R$ や R の実測精度の面で十分とはいえないが、いちおう本図から次の点が指摘できる。すなわち、各断面において渦度 ζ の最大の点が円柱橋脚の両側面のはくり点の直下流に現われており、渦度の比較的大きな領域がその点から下流に向かって帯状に伸びている。渦度 ζ の最大値は水面には発生せず、 $x=3.0$ cm 断面で最大になっている。帯状にのびた渦度領域はその断面に近い断面ほどその形状が細長くなっている。 $z=4.0$ cm の断面で ζ が最大になっている位置付近で Navier Stokes の式の各項の大きさを概算してみると、流速ベクトルを u として慣


 Fig. 9 distribution of ζ .

性項 $(\mathbf{u} \cdot \text{grad})\mathbf{u}$ はほぼ $240 \text{ (cm/sec}^2\text{)}$ 粘性項 $\nu \partial^2 \mathbf{u} / \partial y^2$ はほぼ $1200 \text{ (cm/sec}^2\text{)}$ となって粘性の影響が非常に大きいことを物語っている。橋脚前面に生じる馬蹄型渦が主として慣性項に支配されているのに対して、以上の事実はカルマン渦は馬蹄型渦とはその発生の機構を異にしていることを示している。

(2) 流れパターンの水路側面からの観察

Photo 2 は先に述べた白金線の陰極を $x=1.5 \text{ cm}$, $z=0.5 \text{ cm}$ の位置に水平かつ水路横断方向に設定し、(a) から (e) にかけて時間経過を追いつながら水路側面から撮影したものである。これらの写真から、水路中央部分で強い上昇流がありそれが後流はくり渦を形成しており、一方橋脚の側方の流れはほぼ水路床に平行に流下していることが認められる。ただこのような撮影方法では大略的な流れの様子はつかめても各地点での流速ベクトルを詳細に把握することは困難なので、水路側面からの観測法としては、 $y=0, 0.5, 1$ および 1.5 cm の各断面の各位置内に水素気泡法の点状の陰極を設定し、そこから発生する水素気泡列を水路側面から写真撮影した。撮影結果の一例として $x=2.0 \text{ cm}$, $y=1.0 \text{ cm}$, $z=0.5 \text{ cm}$ の位置に陰極をおいた時の側面からの写真を **Photo 3** に示す。このような撮影結果を集積して **Fig. 6** と同様に各鉛直断面における平均的な擬似流線と絶対流速 $(\sqrt{u_x^2 + u_z^2})$ を求め、**Fig. 10** に示した。この図から、水路の中央 ($y=0 \text{ cm}$) においては接近流の平均流速に匹敵する大きさの上昇流があることが認められる。また、流線のパターンは各断面毎にその様相を全く異にしており、後流渦の複雑さを物語っている。 $y \geq 0.5 \text{ cm}$ の各断面には渦まき状の流線が認められるが、これは先に述べた後流はくり渦の鉛直断面を示したものである。次にこれらの図から渦度の y 方向成分 η を求めたものが **Fig. 11** である。この図も **Fig. 9** と同様の計算方法をとったため精度は十分ではないが、 $y=1.5 \text{ cm}$ の断面において底面近くに $\eta=301/\text{sec}$ という大きな渦度が生成されていることが認められる。この大

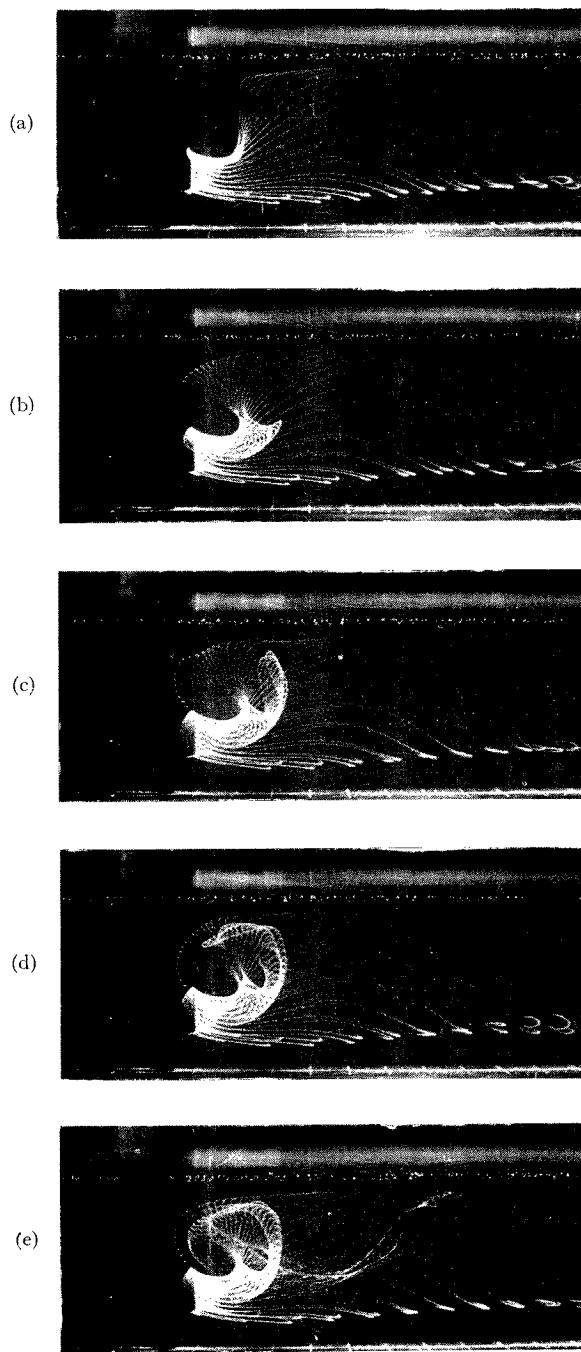


Photo 2 Side view of flow pattern downstream of bridge piers.
(horizontal line type electrode)

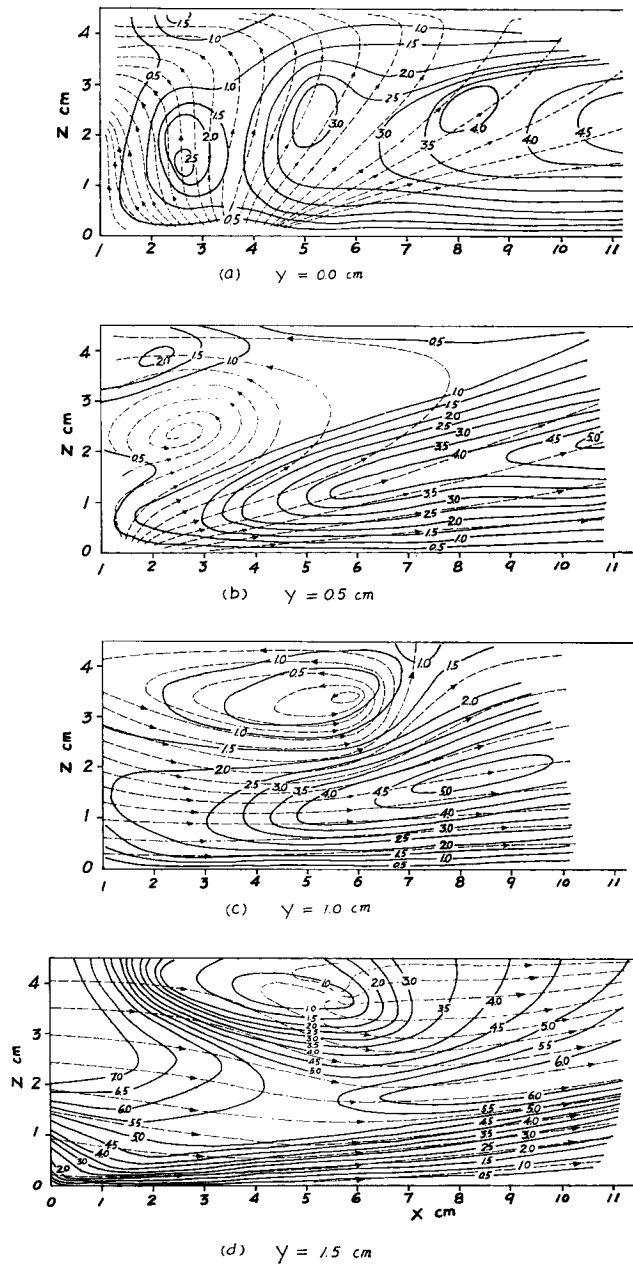


Fig. 10 Flow pattern and velocity distribution in longitudinally vertical section.

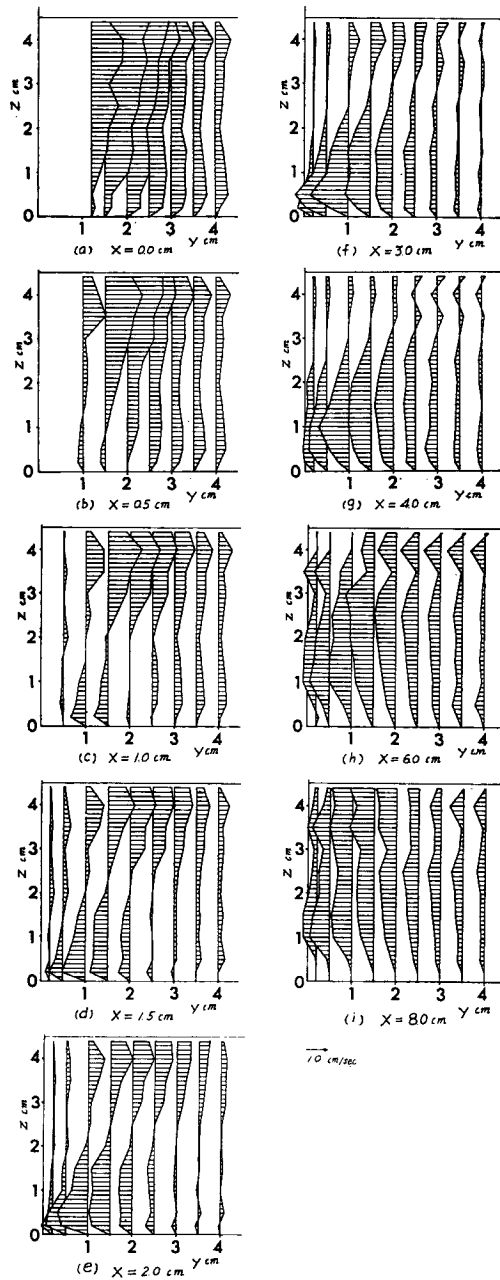


Fig. 12 Distribution of u_y in transverse section.

きさは Fig. 9 に現われているものの最大値と同程度の大きさである点が注目される。またこの渦度の生起場がちょうど Fig. 8 に示されている後流はくり渦へ流れを供給している領域に含まれる所から、この渦度が後流はくり渦の回転運動の原因を与えていると考えられる。換言すれば、橋脚前面および側面に下降流が生じるにともない橋脚表面で境界層が発達し、また水路床面近傍の流れが橋脚後方へまきこまれるにともなって水路床面に境界層が発達するが、これらの境界層中に含まれる渦度が原因の一つとなって橋脚後方のはくり渦が生成されると考えられる。したがってこの渦は三次元流において特徴的に現われるといえる。

(3) 水路横断面内の流れパターン

Fig. 6 から u_y が、また Fig. 10 から u_z がそれぞれ計算できるので、これらを水路の各横断面 ($x=0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 6, 8$ cm) ごとに図示すると Fig. 12 および Fig. 13 のようになる。これらの図から、円柱橋脚後方のはくり渦領域において x 軸方向に軸をもつ回転運動があることが認められる。 u_z の測定範囲が少ないため、渦度の x 方向成分 ξ を全後流域にわたって計算することができないので、 $\partial u_y / \partial z$ の分布を Fig. 14 に示した。この図から、 $x=0, 0.5, 1$ cm の各断面の右下あたりに負方向の回転が認められるが、これが馬蹄型渦の延長と考えられる。すなわち、馬蹄型渦は円柱橋脚の側面ではその軸の位置が若干高くなり、渦の強さは粘性のため小さくなってほとんど消滅していることが認められる。

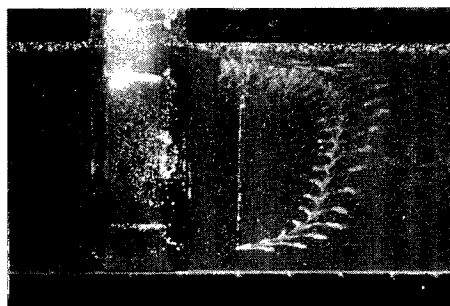


Photo 3 Side view of flow pattern downstream of bridge piers. (spot type electrode)

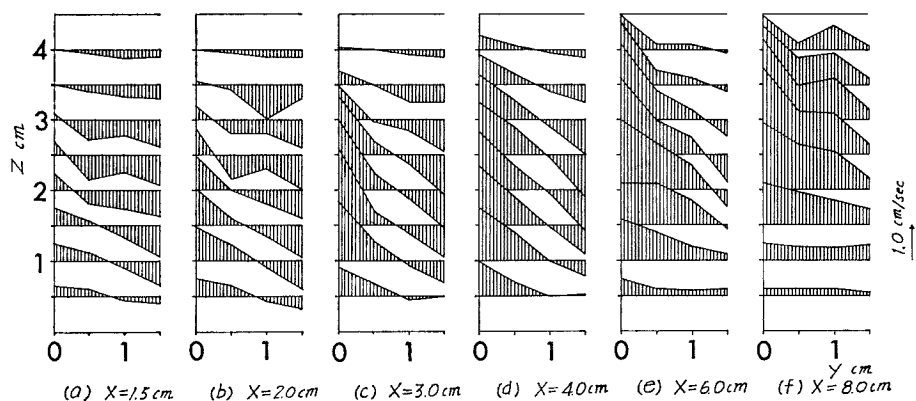


Fig. 13 Distribution of u_z in transverse section.

(4) 橋脚後方の三次元的な流れパターン

水路中心断面、円柱橋脚表面および水路床面における観測された流線のパターンの概略を示すと Fig. 15 のようになる。この図および、先に示した水路床に平行な各断面内の流れパターン、水路縦断方向の鉛直断面内の流れパターンおよび水路横断方向の断面内の流れパターンを総括することにより、円柱後流域における流れの三次元的な機構の概略を渦の形成に注目して図示すると Fig. 16 のようになる。すなわち、円柱橋脚後方の表面には特異点（結節点）が発生しており、この点を通り水面まで達する軸を中心に後方のはくり渦の回転運動がある。この渦は閉領域内の回転運動ではなく、橋脚側方で水路床近傍を通過する流体部分がまきこまれたものである。そして、その流体部分が水路床面および橋脚表面においてもつ速度勾配がこの渦の回転運動の

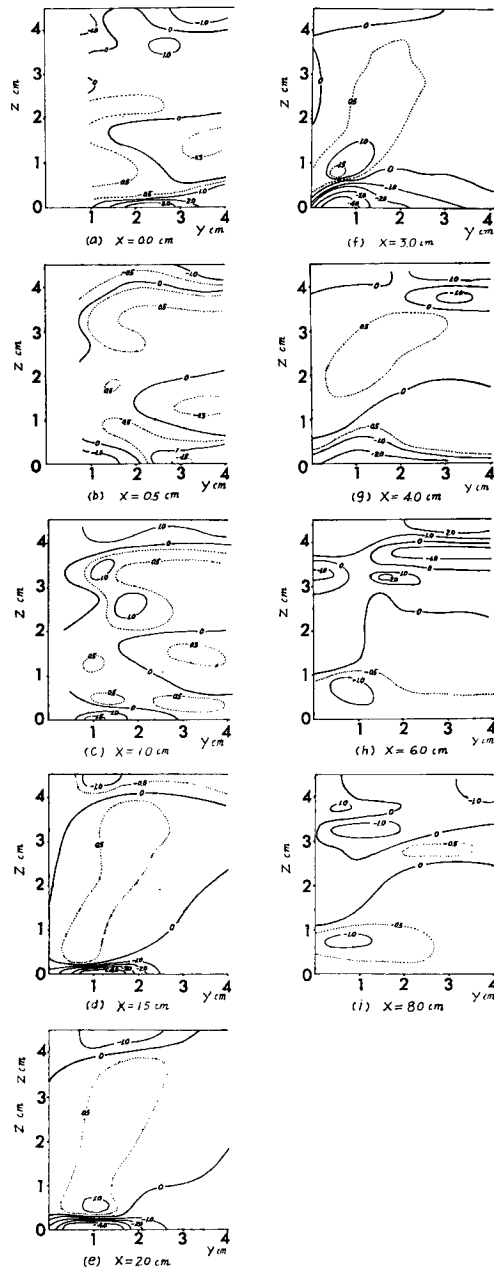


Fig. 14 Distribution of $\partial u_y / \partial z$ in transverse section.

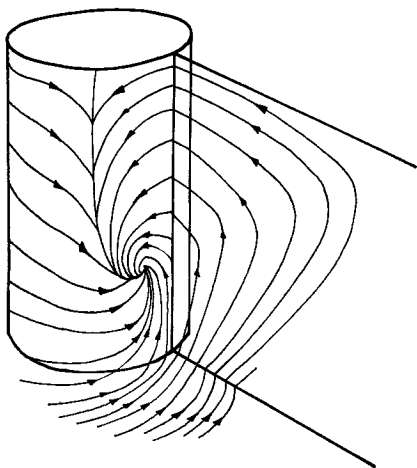


Fig. 15 Flow patterns on boundary surfaces and central section of the channel.

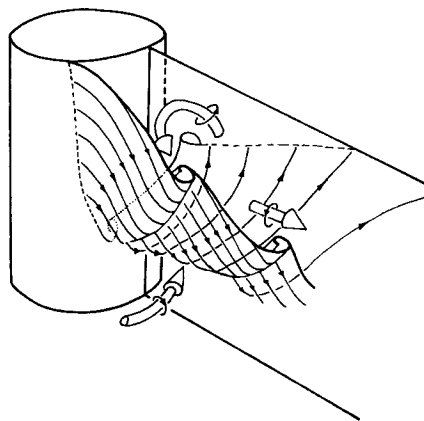


Fig. 16 Three-dimensional flow pattern downstream of bridge piers.

原因の一つと考えられ、この流体部分がらせん状に回転しながら水路中央断面近傍で上昇流を形成し、水面近くで逆流となって橋脚の後面に達し、再び水面近傍を下流側へ流下する。馬蹄型渦は橋脚の下流部では粘性のためほとんど消滅しており、後流はくり渦領域の外側は主流域とみなされる。後流はくり渦領域と主流域との境界面には粘性により強い渦度が形成され、そのような渦度を含む流体部分が下流に向って带状にひきのばされるにつれてカルマン渦が発生する。カルマン渦の発生する領域はほぼ $x=6\text{ cm}$ より下流側で、水路床からの高さが約 2.5 cm より上で水面までである。

4. 結 語

直径 2 cm の円柱橋脚の後流域の三次元的な流れパターンをレイノルズ数 3.19 の層流状態で観測した。流れの観察の結果、このような剪断流中におかれた円柱の後流は一樣流中におかれた円柱の後流とは非常に異なったものになることが明らかになった。得られた結果の主なものを列記するとつぎのとおりである。

(1) 後流域を渦の形成に着目して領域区分すると、主流域、後流はくり渦領域、カルマン渦領域および馬蹄型渦領域となり、後流域における全体的な流れの概要を図示すると **Fig. 16** に示すようである。

(2) 後流はくり渦は、橋脚前面および側面の下降流で橋脚側面あるいは後面において水路床近傍に達したものがらせん状に回転しながらまき上ったものであり、橋脚側面あるいは水路床面に発達した境界層に含まれる渦度が後流はくり渦の生成の主な原因となっている。この渦は閉領域を形成せず、また三次元的な流れの場に特徴的に現われる。

(3) カルマン渦は、主流と後流はくり渦の境界に生成される強い渦度が带状に下流へひきのばされることによって生成され、本実験条件では水路床面上約 2.5 cm の高さから水面までの間において、 $x=6\text{ cm}$ より下流の断面で発達し、 $x=12\text{ cm}$ より下流ではほぼ一様に達する。

(4) 馬蹄型渦は橋脚下流においては殆んど消滅している。

末筆ながら本研究を行なうあたり有益な助言をいただいた石原安雄京都大学防災研究所教授に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 今井 功：流体力学（前篇），裳華房，昭47，p. 3.

- 2) Landau, L. D. and E. M. Lifshitz: Fluid Mechanics, Pergamon, 1950, p. 73.
- 3) Roshko, A.: Experiments on the Flow past a Circular cylinder at Very High Reynolds Number. Jour. Fluid. Mech. No. 10, 1961, pp. 345-356.