

円柱橋脚前方における局所流の研究

LOCAL FLOW JUST UPSTREAM OF BRIDGE PIERS

宇 民 正*

By Tadashi UTAMI

1. 概 説

橋脚周辺の局所洗掘問題は、河川改修や河道維持のうえで無視できないものであり、洗掘の大きさや深さを見積もるため各種の研究がなされている。これらの研究において橋脚前方の馬蹄型渦や下降流などで特徴づけられる局所流が局所洗掘に重要な役割を果たすことがほぼ共通して指摘されている^{1)~3)}にもかかわらず、こういった局所流の機構の解明は非常におくれているといえる。このことは、局所流が3次元的でしかも時間的にも変動しているという複雑な機構をもつためと考えられる。

著者は以上の事情を考慮して、まず現象を単純化してその把握を容易にするという観点から、前報³⁾では固定床におかれた円柱橋脚周辺の層流状態の流れについて実験的かつ解析的な検討を行った。しかしいうまでもなく実河川における橋脚周辺の流れは乱流であるから、本報告では層流状態の流れについて前報において明らかにした水理学的な特性を基礎として乱流状態における橋脚周辺の局所流の機構を解明しようとした。すなわち本報告は、前報でえられた諸成果を基礎に、固定床上に設置された円柱橋脚前方の乱流状態の流れの局所的な機構を明らかにするとともに、層流状態の実験に基づいて導き出された橋脚周辺の3次元流速分布式の乱流の場合への適用性について検討したものである。

乱流の場合、いうまでもなく流況の時間的な変動が1つの特徴となるわけであるが、橋脚周辺の局所洗掘特性や洗掘防止法を検討する際には時間平均的な流況特性が特に重要な指標となると考えられる。そこで本報告では橋脚前方の局所流の機構の把握とその解析は時間平均的な流況特性について行うこととした。

なお、本報告中に用いられている記号は、原則として前報³⁾のそれが踏襲されている。

2. 円柱橋脚周辺の局所流に関する実験的研究

(1) 実験の目的と方法

本節の目的は、乱流状態における円柱橋脚前方の局所流の3次元のかつ時間平均的な特性をできるだけ詳細に把握することにある。

実験条件は表-1に示すとおりであり、実験水路は長さ12m、幅40cmで、その勾配は1/1000ないし1/500に設定されている。実験水路のほぼ中央の長さ2.8mの部分は三方が透明アクリル樹脂製で、底面および側面から流況を観察することができるようになっており、その他の部分は木製でペンキ塗装仕上げがなされている。

実験は、液体粒子、ミルク、細砂、木屑などのトレーサーによる流れの可視化法および熱膜流速計によって行われた。

(2) 水路床近傍の流れのパターン¹³⁾

Cl-Benzen と *n*-Hexane と蛍光塗料を適当な割合で混合することによりその密度を水のそれに等しくした液体は水に溶けないので、それを流れの中に細管を通して注入すると直径0.5~3mmの粒子状となる。このような液体の粒子をトレーサーとして橋脚前方の流れの状況を観察したところ、乱流の場合においても橋脚前方の水路床近くには大小さまざまな渦運動があることが認められた。図-1はrun Lの実験条件の下でのそのような渦を含む流況のトレーサーによる観測結果のうち水路床近傍の流跡線を図示したものである。本図において橋脚の直前方に橋脚から遠ざかる方向の流れがあることが認められるが、これは橋脚直前方の比較的大きな渦運動にともなう逆流を示しており、さらにその上流側には細かいらせん状の流跡線が認められる。

また、水路床面に細砂をまくと、それが流れによって

* 正会員 工博 京都大学助手 防災研究所

表-1 実 験 条 件

run	水 深 $H(\text{cm})$	流 量 $Q(\text{l/s})$	平均流速 $U_{om}(\text{cm/s})$	水路幅 $B(\text{cm})$	勾 配 I	フルード数 F_r	橋脚直径 $2r_0(\text{cm})$	$\frac{H \cdot U_{om}}{\nu}$	実 測 事 項
K - 1	7.40	9.62	32.50	40.0	1/500	0.382	8.0	24 050	流速, 流向, 渦の状況
L	12.05	5.90	12.20	"	1/1 000	0.111	10.0	14 701	
G 1-0	1.20	0.77	32.68	"	"	0.468	1.5~10.5	1 925	渦軸の位置, 渦の大きさ
10-0	5.19	9.43	45.04	"	"	0.632	"	23 550	
10-15	7.48	"	31.48	"	"	0.368	"	"	
10-3	12.10	"	19.48	"	"	0.179	"	"	
10-8	5.74	"	41.03	"	"	0.547	"	"	
20-0	8.10	20.00	61.73	"	"	0.693	"	50 000	
20-3	10.17	"	49.16	"	"	0.492	"	"	
20-8	15.50	"	32.26	"	"	0.262	"	"	
20-14	21.52	"	23.23	"	"	0.160	"	"	
30-0	10.34	30.00	72.53	"	"	0.721	"	75 000	
30-3	12.05	"	62.24	"	"	0.573	"	"	
30-8	17.95	"	41.78	"	"	0.315	"	"	
40-0	12.88	40.00	77.64	"	"	0.691	"	100 000	
40-3	13.93	"	71.79	"	"	0.614	"	"	
40-8	19.95	"	50.13	"	"	0.359	"	"	

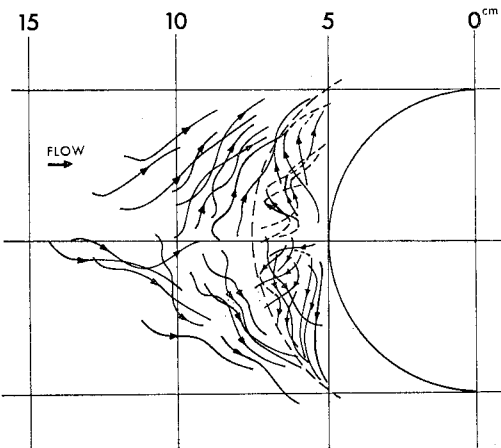


図-1 水路床近傍の流線 (run L)

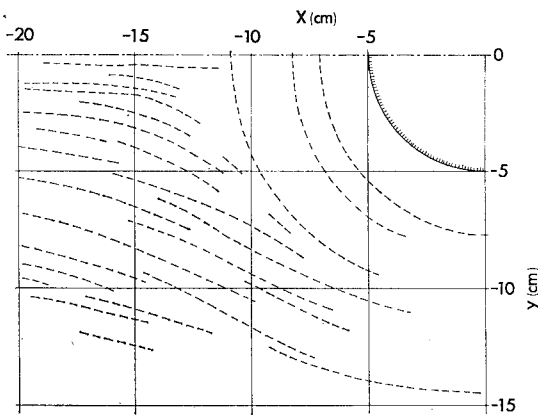


図-2 水路床面にまかれた細砂の配列模様 (run L)

たとえば図-2 のように配列される。本図で特徴的なことは、橋脚の前方に橋脚と同心円状の細砂の配列模様ができることである。これは先に示した各種渦運動のうち

相隣る2つの渦の境界面が水路床面と交わる曲線を示したものと考えられる。事実、上図の同心円状の模様のうち最も内側のものを図-1 に破線で示したところ、この破線は水路床面近傍の逆流域と細かいらせん運動がある領域とを区分するものとなっていることが認められる。なお、細砂をまいた後しばらくすると、同心円状の縞模様は砂の流下とともに消滅し、橋脚周辺の各種渦運動が存在する範囲(図-2における同心円状の縞模様のうち最も外側のものに囲まれる範囲)においては細砂が排除されてしまう。この部分を以後排除範囲とよぶこととする。

(3) 流れの対称面内の流線の形状¹⁴⁾

流れの対称面内の流線の時間平均的な形状を先に示した液体粒子状のトレーサーあるいはミルクを流すことにより観察した結果、その概念図は図-3 のように示されることがわかった。すなわち、橋脚前方には複数個のしかもつねに変動している渦が存在するが、その中で A_1 で示される渦はその強さも大きさも他の渦より卓越して

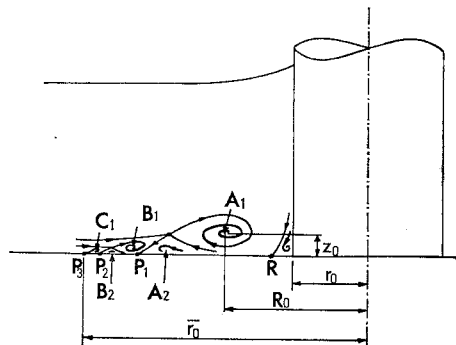


図-3 対称面内の時間平均的な流線形状の概念図

おり、また比較的安定している。この渦を以下では主渦とよぶこととする。

一方、図で B_1 および C_1 で示されている渦は、先の主渦に比べて弱小かつ不安定なものであり、以下ではこれらを微小渦とよぶこととする。さらに A_2 および B_2 で示される渦は、これらの渦の発生にともなう逆流と水路床面との摩擦のために生じたものと考えられ、その回転方向はしたがって主渦および微小渦と反対方向であるが、これらの渦は微小渦に比べてさらに弱小で不安定でありその回転運動も明確には認め難いものとなっている。先に図-2 に示した細砂の同心円状の配列模様は、図-3 においては点 P_1 および P_2 でその対称面内における位置が示されている。

(4) 渦を構成する流体の供給源¹³⁾

以上の検討から、乱流の場合も層流の場合と同様に、渦を構成する流体は主流から供給されていることが明らかになった。この事実を基礎に、前報における層流状態での実験結果から類推して、乱流の場合も接近流中に含まれていた渦度が集中させられて馬蹄型渦が発生すると考えてよいであろう。また、渦の発生領域を閉領域とした Allen¹⁰⁾ の考察は事実にあわないといえる。そこで、これらの各渦運動を構成する流体が主流のどの部分から供給されているかを次に実験的に調べた。すなわち run L の実験条件の下で、橋脚の上流側の $x = -8$ cm および -10 cm (x は橋脚の中心から下流に向かって測った距離) の横断面内の各位置で注入されたトレーサーが先に述べた 2 種の渦領域のうち主としてどちらにまきこまれるかを実験的に求めたものが図-4 である。本図で A と記されている点は、そこで注入されたトレーサーが主として主渦にまきこまれることを意味し、B は同じく微小渦にまきこまれ、C はいずれにもまきこまれずに主流中を流下することを意味する。また A と B の 2 つの文字が記入されている点は、そこで注入されたトレーサー

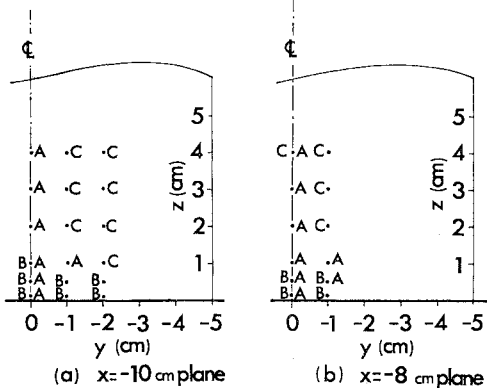


図-4 主渦および微小渦にまきこまれる主流部分の実測例 (run L)

は主渦にも微小渦にも導入されることを意味する。

本図から、主渦にまきこまれる主流部分は、流れの対称面およびその近傍の限られた部分であり、その部分の幅は本実験条件の場合橋脚の直径のほぼ 1/5 以下であることがわかる。

(5) 渦軸の位置と排除範囲の大きさ¹⁴⁾

run K-1 の実験条件の下で、ミルクをトレーサーとして用いて主渦の軸および微小渦のうち最も大きな渦の軸の平均的な位置を実験的に求め、その結果を図-5 に示した。ここで R_0 は渦軸の橋脚の軸からの距離を意味し、 z_0 は渦軸の水路床面からの高さを意味する。本図から、渦軸の平面的な形状は橋脚とほぼ同心円状であり、また主渦の軸の高さは橋脚の前方から側方にかけて若干低下する傾向が認められるが、ほぼ水路床面に平行であると見なしうる事がわかる。

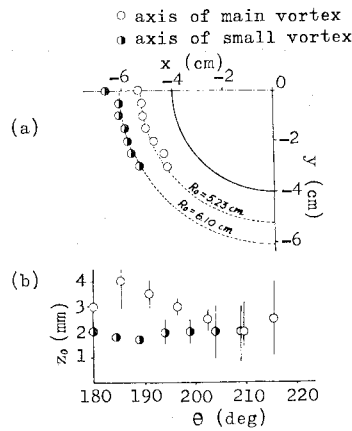


図-5 主渦および最大微小渦の軸の平均的な位置 (run K-1)

次に、流れの対称面内における渦軸の位置 (R_0, z_0) ならびに (2) で定義された排除範囲の流れの対称面での大きさ \bar{r}_0 (対称面内において橋脚の中心から排除範囲の外側境界線までの距離で図-3 に示されている) を各種実験条件の下で実測し、その結果を図-6 に示す。実験は表-1 に示す G 1-0 から G 40-8 までの 15 種の水理条件の下で、さらに各水理条件の下で橋脚の半径 r_0 を 7 種類 ($r_0 = 0.745, 1.015, 1.265, 2.013, 3.013, 4.013, 5.253$ cm) ないし 11 種類 (以上のほかに $r_0 = 1.518, 1.763, 2.495, 3.5$ cm) にわたって変化させて行った。なお H は水深を意味する。

本図から、同一流量かつ同一水深の下で橋脚の半径だけを変化させた場合、 $(\bar{r}_0 - r_0)/H$, $(R_0 - r_0)/H$ および z_0/H のそれぞれと r_0/H との関係は両対数紙上でほぼ直線となっていることが認められる。この事実から、

$$(\bar{r}_0 - r_0)/H = a_1 (r_0/H)^{m_1} \dots \dots \dots (1)$$

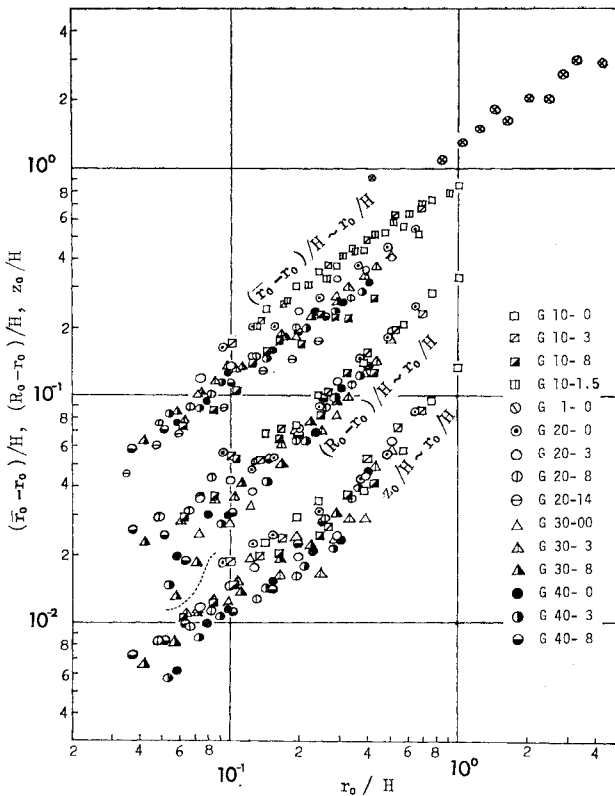


図-6 流れの対称面内における渦軸の位置および排除範囲の大きさ

$$(R_0 - r_0)/H = \alpha_2 (r_0/H)^{m_2} \dots \dots \dots (2)$$

$$z_0/H = \alpha_3 (r_0/H)^{m_3} \dots \dots \dots (3)$$

と似た場合、 $\alpha_1 \sim \alpha_3$ および $m_1 \sim m_3$ は接近流の水利条件により決定されると見なしうる。そこで、摩擦速度と水深を用いて計算したレイノルズ数 Re_i とこれらの係数との関係を求め図-7 に示した。測定精度が十分でないので若干のばらつきがあるが、 α_1, α_3 および m_3 は Re_i の増加とともに減少する傾向が認められ、 m_1, α_2 および m_2 はほぼ一定でそれぞれ 0.7, 0.3 および 1.0 ぐらいの値がえられる。

(6) 熱膜流速計による流速分布の実測¹⁵⁾

run K-1 の実験条件の下で熱膜流速計により平均流速を測定し、その結果の一部を染料を用いて測定した平均流向とともに図-8 に示す。本図から、当然のことではあるが、馬蹄型渦の存在のために水面近くの $z=6.0$ cm 断面内の流況と水路床面近くの $z=0.2$ cm 断面内の流況とは著しく異なっていること、および水路床面近くでもかなり大きな流速が生じていることが認められる。 $z=0.2$ cm 断面における逆流の存在は、そこでの流速の r 方向成分 U_r が 2 次元非回転流のそれとは異なるものであることを意味する。そこで図-9 に、 $z=0.2$ cm 断面における流速の θ 方向成分 U_θ の実測値と 2 次元非回

転流として計算した U_θ とを比較して示した。この図から、 U_θ の実測値は水路床面近傍でも 2 次元非回転流として計算したものにかなり近いことが認められる。この事実は (5) で述べた渦軸の位置と形状とに関する結論とともに重要である。すなわち、層流実験に基づく解析モデル⁹⁾ において、流れは主流と 2 次流とから成り、主流は 2 次元非回転流、2 次流は渦軸のまわりの回転運動と考えたわけであるが、渦軸が円柱橋脚とほぼ同心円状であるという先の実験事実に基づく 2 次流の θ 方向流速成分 u_θ' は 0 となるので、乱流の場合においても主流は 2 次元非回転流であるとして妥当であるといえそうである。

Johnston¹¹⁾ は、境界層内の流線が曲率をもつ場合、壁面のある点における各高さの流速ベクトルを同一平面内に 1 つの点を起点として表記したところ、それらのベクトルのうち壁面近くの約 10 多以外のものはその先端が同一直線上にならぶことを見出した。本実験でえられた実測値を用いて Johnston のプロットを若干の測定点について行い、その結果を図-10 に示す。図中のかっこ内の数字は測定地点の x および y 座標 (cm 単位) を意味し、各矢印の傍に記された数字は測定点の z 座標 (cm 単位) を意味する。 $z=0$ cm については流向だけを示している。これらの図から、流速ベクトルの鉛直方向の変化の様子は 2 種に分けられることがわかる。すなわち、第 1 群は (g)~(j) で、これらは Johnston のモデルがほぼ成り立っていることを示している。一方第 2 群の (a)~(f) では、Johnston のモデルが $z=2.0$ cm より上方ではほぼ成立しており、 $z=0.2 \sim 0.5$ cm ではまったく別の模様を示していることが認められる。以上の検討結果から、Johnston のモデルは主流域および微小渦領域ではほぼ成立するが、主渦領域においては成立しないことがわかる。

3. 乱流中におかれた橋脚の前方の流れに関する解析的研究¹⁶⁾

(1) 乱流の場合と層流の場合の流況特性の対応性

以上の実験的研究によって、乱流の場合の橋脚前方の流れの平均流特性がかなり明確になったが、それと前報⁹⁾ に述べた層流の場合の流れの特性との間に若干の相違点があることも明らかになった。そこで、前報において層流状態での実験を基礎に導き出した解析モデルが乱流の場合に適用することができるかどうかを検討する前に、まず乱流の場合と層流の場合との流況の対応性を具

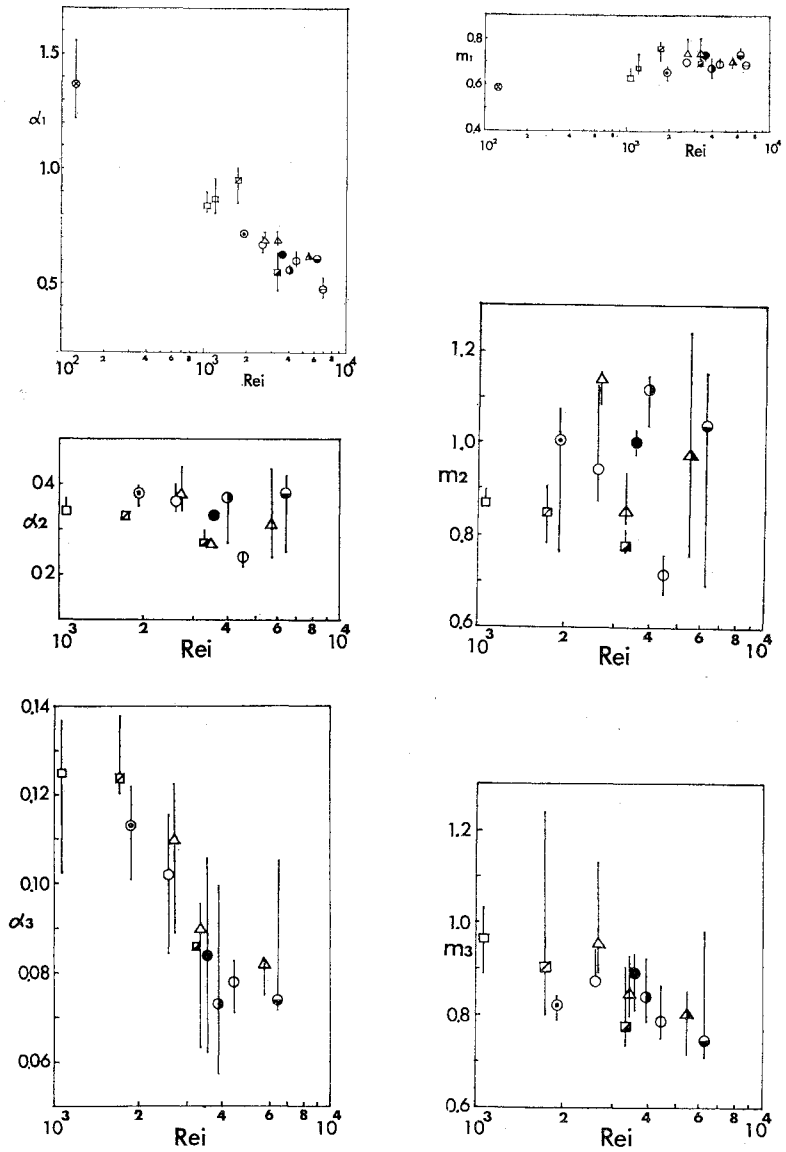
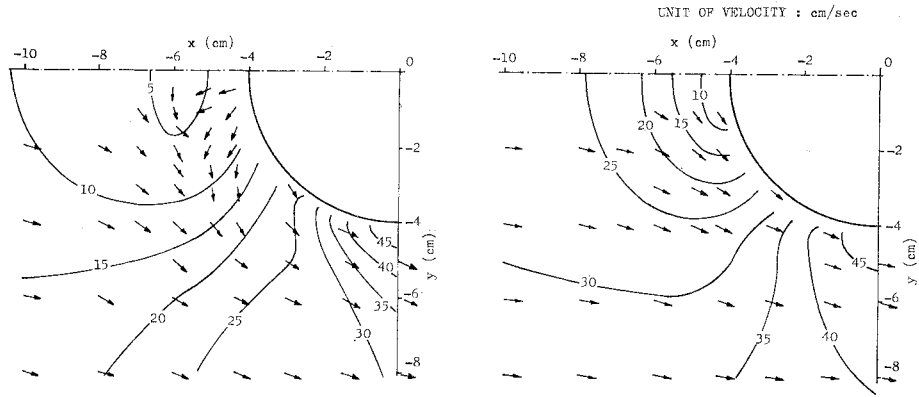


図-7 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, m_1, m_2, m_3$ とレイノルズ数との関係



(a) Flow pattern in the section $z=0.2\text{cm}$.

(b) Flow pattern in the section $z=6.0\text{cm}$.

図-8 水路床面に平行な断面内における平均流速と平均流向の分布(run K-1)

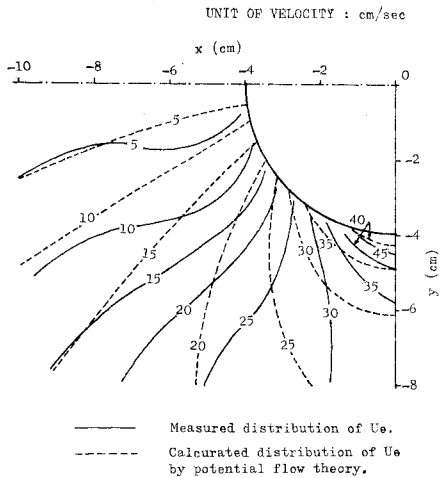


図-9 $z = 0.2 \text{ cm}$ 断面における θ 方向流速成分の (a) 実測値と (b) 2次元非回流の仮定に基づく計算値との比較 (run K-1)

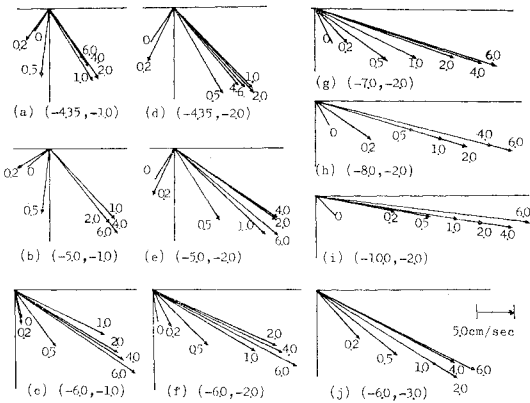


図-10 Johnston の3角形モデルの検討

体的に整理し検討することが必要である。

a) 乱れの影響

当然のことながら、乱流の場合流速の時間的変動という現象が新たに加わるが、平均流のみを考察の対象とする場合は解析モデルを根本的に変える必要はない。

b) 接近流速分布

平均流の接近流速分布も層流の場合と乱流の場合とは異なったものとなっているが、層流の場合の解析モデルでは接近流速が分布していることが重要であったが、原理的には分布則は何であってもよいはずである。したがって主流の流速が分布しているという面からは層流・乱流とも基本的な相違はない。なお以下の解析では流速分布則として 1/7 乗則を用いているが、それは 1/7 乗則による方が対数則によるより計算が簡単であり、また実測値もほぼそれに適合しているためである。

c) 渦の個数

層流状態では馬蹄型渦はただ1つであったが、乱流の場合は図-3に示されるように数個認められている。た

だ乱流の場合でも、それらの渦のうち主渦とよんできた橋脚に近い渦が他の渦に比べて強大なので、まず第1次近似として、主渦以外の渦の効果を無視して乱流の場合でも渦は単数個であると仮定することにすれば、層流の場合との相違点はなくなってくる。

d) 渦軸の位置と形状

馬蹄型渦の軸は乱流の場合水路床に平行ではなく、橋脚前方では下流側に向っていくぶん低下していることが認められたが、その低下の度合いはわずかなので第1次近似として渦軸は水路床に平行であると仮定することができる。また渦軸の水深に対する相対的な高さは乱流の場合の方が低くなっているが、乱流の場合も層流の場合と同様に渦軸の位置はレイノルズ数と r_0/H の関数として実験的に与えられるので、この点からも層流と乱流との原理的な差異は認められない。

(2) 解析モデルの構成

以上の考察によって、第1次近似としては乱流の場合と層流の場合とで流況に根本的な差異がないことが明らかになった。したがって乱流の場合の解析モデルも、層流の場合のそれと同様に、流れの場は主流と2次流とから成るものと仮定することができる。すなわち、主流としては水路床面に平行な断面内では2次元非回転流を仮定し、水深方向の流速分布については接近流の流速分布形状が保持されるとした。次に馬蹄型渦による回転運動とそれに伴う流体運動を2次流と仮定し、それらが主流に重ねあわされることにより局所流全体が形成されるものとするのである。

a) 主流の流速成分

主流の r, θ, z 方向の流速成分をそれぞれ u_r, u_θ, u_z とするとき、2. (6) の実験結果を考慮すると、これらは2次元非回転流理論により次のように与えられるとしてよいであろう。

$$u_r = U_0 \{1 - (r_0/r)^2\} \cos \theta \dots \dots \dots (4)$$

$$u_\theta = -U_0 \{1 + (r_0/r)^2\} \sin \theta \dots \dots \dots (5)$$

$$u_z = 0 \dots \dots \dots (6)$$

ここで U_0 は接近流速で z のみの関数であり、ここでは 1/7 乗則を仮定することにすると、次式で与えられる。

$$U_0 = U_{0s} (z/H)^{1/7} \dots \dots \dots (7)$$

ここで U_{0s} は接近流の水面における流速である。

b) 2次流の流速成分

2. (4) で述べたように、乱流の場合の馬蹄型渦の発生は、接近流の平均流速の流速分布という形で主流中に含まれていた渦度が、橋脚のために集中させられたためと考えられる。さらに先述のように、乱流の場合の第1次近似として、渦軸はただ1つでその水路床面からの高さは一定であるとし、かつ橋脚と同心円状であると仮定

する。このように考えると、乱流の場合の2次流は層流の場合と何ら変わることなく、それと同一の式で与えられることとなる。すなわち、

① $r_1 \leq a$ かつ $r_1' \leq a$ の領域,
 $u_z' = 0 \dots\dots\dots (8)$

$u_r' = -\frac{\kappa}{\pi r} \frac{R_0 z_0}{a^2} \dots\dots\dots (9)$

② $r_1 \leq a$ かつ $r_1' > a$ の領域,
 $u_z' = \frac{\kappa}{2\pi r} \frac{R_0(r-R_0)}{a^2} \left(-1 + \frac{a^2}{r_1'^2}\right) \dots\dots\dots (10)$

$u_r' = -\frac{\kappa}{2\pi r} R_0 \left(-\frac{z-z_0}{a^2} + \frac{z+z_0}{r_1'^2}\right) \dots\dots\dots (11)$

③ $r_1 > a$ かつ $r_1' > a$ の領域,
 $u_z' = \frac{\kappa}{2\pi r} R_0(r-R_0) \left(-\frac{1}{r_1'^2} + \frac{1}{r_1'^2}\right) \dots\dots\dots (12)$

$u_r' = \frac{\kappa}{2\pi r} R_0 \left(\frac{z-z_0}{r_1'^2} - \frac{z+z_0}{r_1'^2}\right) \dots\dots\dots (13)$

ここで、 κ は渦領域のまわりの循環の強さ、 a は渦領域の断面の半径、 r_1 は流速を求めようとする点から渦軸までの距離、 r_1' は同じく渦軸の鏡像の位置までの距離である。

c) κ の値の決定

層流の場合と同様に、乱流の場合も、円柱橋脚周辺の流れの3次元的な流速分布は、式(4)~(7)で与えられる主流の各流速成分と、式(8)~(13)で与えられる2次流の各流速成分とをおのおの加えあわせることにより求められると考える。また乱流の場合は渦軸は変動しているが、流れを平均流として取り扱うことにすれば渦軸は定まった位置に停っていると考えてよいであろう。そこで、渦軸の位置における r 方向流速成分が0に等しいという条件を用いて渦の強さ κ を求めると次のようになる。

$\kappa = \frac{\pi \delta^2 U_{0s}}{z_0} \left(\frac{z_0}{H}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \cos \theta \dots\dots\dots (14)$

ここで、 δ は $a \geq 2z_0$ のときは a に等しく、 $a < 2z_0$ のときは $2z_0$ に等しい量である。

d) 3次元流速分布式

式(14)で与えられる κ の値を2次流の流速分布式(8)~(13)に代入し、これを主流の流速分布式(4)~(7)に加えあわせることにより、乱流の場合における円柱橋脚前方の平均流の r, θ, z 方向流速成分 U_r, U_θ, U_z が次のように与えられる。

① $r_1 \leq a$ かつ $r_1' \leq a$ の領域,
 $\frac{U_r}{U_{0s}} = -\frac{R_0 \delta^2}{a^2 r} \left(\frac{z_0}{H}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \cos \theta$
 $+ \left(\frac{z}{H}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \cos \theta \dots\dots\dots (15)$

$\frac{U_\theta}{U_{0s}} = \left(-\frac{z}{H}\right)^{1/7} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \sin \theta \dots\dots\dots (16)$

$U_z = 0 \dots\dots\dots (17)$

② $r_1 \leq a$ かつ $r_1' > a$ の領域,
 $\frac{U_r}{U_{0s}} = -\frac{R_0 \delta^2}{2 z_0} \left(\frac{z_0}{H}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \frac{1}{r}$
 $\cdot \left(-\frac{z-z_0}{a^2} + \frac{z+z_0}{r_1'^2}\right) \cos \theta + \left(\frac{z}{H}\right)^{1/7}$
 $\cdot \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \cos \theta \dots\dots\dots (18)$

$\frac{U_\theta}{U_{0s}} = -\left(\frac{z}{H}\right)^{1/7} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \sin \theta \dots\dots\dots (19)$

$\frac{U_z}{U_{0s}} = \frac{R_0 \delta^2}{2 z_0} \left(\frac{z_0}{H}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \frac{r-R_0}{r}$
 $\cdot \left(-\frac{1}{a^2} + \frac{1}{r_1'^2}\right) \cos \theta \dots\dots\dots (20)$

③ $r_1 > a$ かつ $r_1' > a$ の領域,
 $\frac{U_r}{U_{0s}} = \frac{R_0 \delta^2}{2 z_0} \left(\frac{z_0}{H}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \frac{1}{r}$
 $\cdot \left(\frac{z-z_0}{r_1'^2} - \frac{z+z_0}{r_1'^2}\right) \cos \theta + \left(\frac{z}{H}\right)^{1/7}$
 $\cdot \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \cos \theta \dots\dots\dots (21)$

$\frac{U_\theta}{U_{0s}} = -\left(\frac{z}{H}\right)^{1/7} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \sin \theta \dots\dots\dots (22)$

$\frac{U_z}{U_{0s}} = \frac{R_0 \delta^2}{2 z_0} \left(\frac{z_0}{H}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \frac{r-R_0}{r}$
 $\cdot \left(-\frac{1}{r_1'^2} + \frac{1}{r_1'^2}\right) \cos \theta \dots\dots\dots (23)$

e) 渦領域の大きさ (k の値) の決定

対称面内の渦軸を通る鉛直線上における r 方向流速成分の分布は、渦軸の位置に対して式(2)および(3)を基礎とする実験定数を用いると、上記の3次元流速分布式に基づいて計算することができる。その結果の一例としてrun K-1 についての計算結果を実測値と比較して図-11に示す。図中実測値は白丸印で、計算結果は実線で示されており、また U_s は渦軸の位置における水面での流速で、

$U_s = U_{0s} (1 - r_0^2/R_0^2)$

で与えられる。また図中の k は a/z_0 を意味している。

本図から、 $k < 1.5$ であると水路床面での流速の計算値が実際現象に比べて過大となり、一方 $k > 2$ であると、計算値は $z = (k+1)z_0$ の高さの外に $z = (k-1)z_0$ の高さにおいても屈曲点をもつこととなってやはり現象

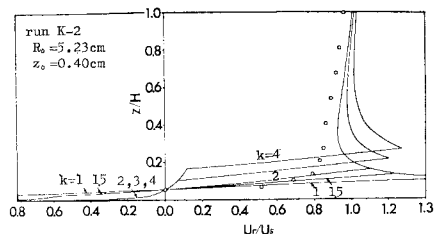


図-11 対称面内の渦軸を通る鉛直線上の流速分布

の特性と一致しないことがわかる。しかも $k=2.0$ のときに実測値と計算値との適合性がよい。そこで以下では、 k は一定値 2.0 をとるものとして考察を進める。なお、この $k=2.0$ という値は層流の場合の k の値と同じ結果となっている。

(3) 解析結果の適用性に関する検討

以上において橋脚前方における局所流の3次元流速分布の解析法を乱流の場合について提示したが、ここであらためて本解析で基本とした考え方あるいはその過程で用いた仮定のうち重要なものをまとめると次のようである。

① 橋脚前方の流れは主流と2次流とから成り、下降流や逆流で特長づけられる2次流は馬蹄型渦によりひき起こされる。

② 馬蹄型渦は接近流の流速分布と橋脚の幾何学的形状によって規定され、本解析式中の渦軸の位置および渦度領域の大きさは実測値を基礎にして求めることとしている。

③ 解析において、主流と2次流とを重ね合わせることで流れ全体が構成されると近似的に仮定している。

したがって本解析法はその適用において一定の限界をもつことが予想される。すなわち、

① 本解析法は平滑な固定床におかれた円柱橋脚前方の流れを対象としている。

② 本解析法においては、鉛直方向流速成分のうち橋脚周辺における水面勾配に伴うものや水面近傍の渦度によるものは無視されている。そのため鉛直方向流速成分については、解析値と実測値との適合性は水面近傍で十分でなくなることが予想される。

③ 解析モデルの性質上、2次流を規定するいわゆる渦度領域は水面以下にある必要があり、この条件は次式のように表示される。

$$(k+1)z_0 \leq H$$

この式に $k=2.0$ ならびに式(3)を代入し、さらに図-7 から α_3 および m_3 の値の概略の値を読みとって代入することにより、本解析式の適用範囲を与える r_0/H の上限値の目安を求めると表-2 のようである。

次に run K-1 の条件について実測値と計算値とを比較することにより本解析モデルの適用性を検討する。

a) z 方向流速成分の検討

表-2

Re_i	α_3	m_3	r_0/H の上限
10^3	0.13	1.0	2.6
5×10^3	0.08	0.8	6.0
10^4	0.06	0.7	11.6

対称面内において水路床から $3H/4, H/2, H/4, H/8$ および z_0 の各高さにおける z 方向流速成分の解析値と実

測値とを比較して 図-12 に示す。図で実測値は白丸印で、解析値は実線で、さらに吉川ら¹²⁾の解析値は破線で示されている。

本図から、渦軸の高さの断面およびその近傍では解析値と実測値との適合の度合いはよいといえるが、水面に近い断面では解析値は実測値よりかなり小さな値となっていることがわかる。これは先に示したような理由に基づくものと考えられる。

b) r 方向および θ 方向流速成分の検討

$\theta=180^\circ, 210^\circ, 240^\circ$ および 270° の各断面において、

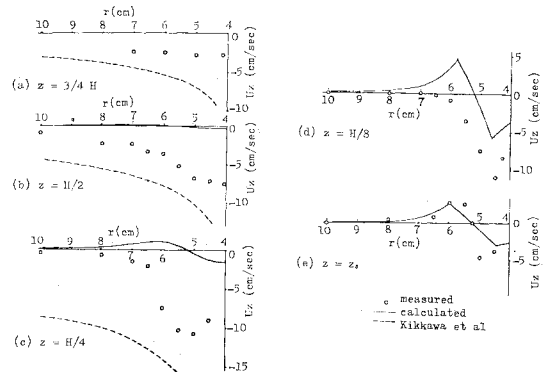


図-12 対称面内の各断面における z 方向流速成分の検討 (run K-1)

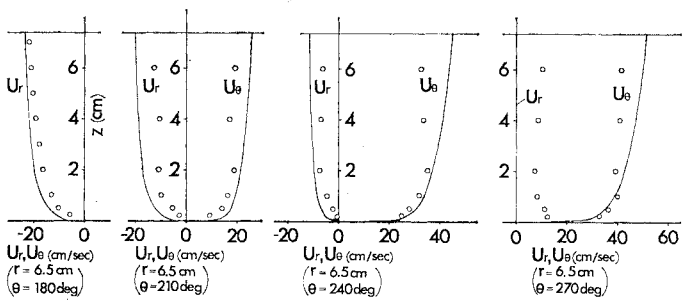
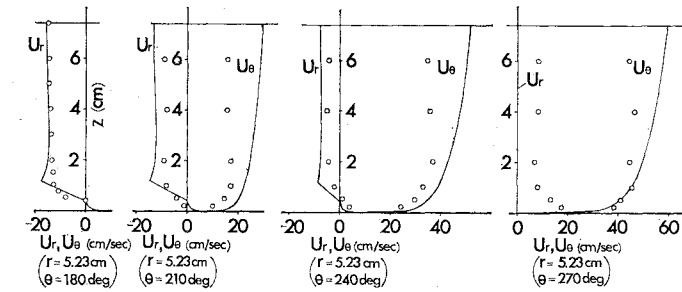


図-13 r 方向および θ 方向流速成分の検討 (run K-1)

$r=5.23$ cm (渦軸の位置) および $r=6.5$ cm の位置での U_r および U_θ の鉛直分布を示したものが図-13である。本図から、 U_r および U_θ については、実測値と解析値の一致の度合いはかなりよいといえる。ただ U_θ の実測値が水路床近くで若干大きくなる傾向を示しており、解析値ではこのような傾向を表現できていないことがわかる。これは橋脚前方での下降流に伴う橋脚側方での流量増加を本解析モデルでは十分表現できていないことに基づくものと考えられる。しかしながら、馬蹄型渦を含めて橋脚前方の局所流の3次元的な流況がかなりよく表現されているといえよう。

4. 結 論

前報⁹⁾で明らかになった層流状態における円柱橋脚周辺の局所流の特性を基礎に、乱流状態での局所流の時間平均的な特性を実験的ならびに解析的に明らかにした。えられた結論のうち主なものを列挙すると次のとおりである。

(1) 橋脚前方の水路床近くには数個の渦があり、それらは互いに干渉しながら変動あるいは消長している。このような渦を含む平均的な流線の対称面内の概念図は図-3のようである。これらの渦のうち橋脚近くにある渦 A_1 (主渦) は、強さの面でも大きさの面でも他の渦より卓越している。一方それ以外の渦 B_1 および C_1 (微小渦) は比較的不安定である。

(2) これら各渦を構成する流体は主流から供給されている。特に主渦に導入される主流部分は、橋脚の上流側の流れの対称面の近傍の範囲に限られており、その範囲の水路横断方向の幅は橋脚の直径の約 $1/5$ である。

(3) 主渦の軸の平均的な形状は橋脚と同心円状であり、その高さは橋脚前方から下流にいくにつれて若干低下する傾向があるが、ほぼ水路床と平行である。

(4) 主渦ならびに微小渦群のために生じる水路床面近傍の排除範囲の大きさ、ならびに主渦の軸の対称面内における位置は式 (1) ないし (3) で与えられ、式中の諸係数は摩擦速度と水深を用いたレイノルズ数の関数として実験的に与えられた。

(5) 乱流中におかれた橋脚の前方の流れの3次元流速分布式は、第1次近似として渦軸は単一でかつ水路床面に平行であると仮定すると、式 (15)~(23) で与えられる。

(6) これらの式を用いて計算される各流速成分をそ

れぞれの実測値と比較したところ、 x 方向成分 U_x については、水面近傍では計算値が若干小さくなるが、渦軸の近傍では適合性がよいことが認められた。また θ および r 方向流速成分については、解析値と実測値との適合性はかなりよいことが認められた。

末筆ながら、本研究を行うにあたり懇切なご指導を賜わった石原安雄京都大学教授に深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Keutner, Chr. : Strömungsvorgänge an Strompfeilern von verschiedenen Grundrissformen und ihre Einwirkung auf die Flussole, Die Bautechnik, Jahrgang 10, Heft 12, 1932, pp. 161-170.
- 2) Tison, L.J. : Érosion autour de piles de ponts en rivière, Annales des Travaux Publics de Belgique (Brussels), pp. 813-868, 1940.
- 3) 石原藤次郎 : 橋脚による河床洗掘に関する実験的研究(第3編), 土木学会誌, 第28巻, 第11号, pp. 974-1007, 1942.
- 4) Posey, C.J. : Why bridges fail in floods, Civil Engineering, Vol. 19, p. 42 and p. 90, 1949.
- 5) Laursen, E.M. and A. Toch : Scour around bridge piers and abutments, Iowa Highway Research Board Bulletin, No. 4, 1956.
- 6) Neil, C.R. : River-bed scour, Technical publication, No. 623, Canadian Good Roads Association, Ottawa, Canada, 1964.
- 7) Roper A.T., V.R. Schneider and H.W. Shen : Analytical approach to local scour, Proc. 12th Congress of IAHR, Vol. 3, Colorado State Univ., USA, pp. 151-161, 1967.
- 8) 中川博次・鈴木幸一 : 円柱橋脚周辺の流れと局所洗掘について, 第16回水理講演会講演集, 土木学会水理委員会, pp. 31-36, 1972.
- 9) 宇民 正 : 層流実験に基づく橋脚前面の局所流の研究, 土木学会論文報告集, 第228号, pp. 65-76, 1974.
- 10) Allen, J.R.L. : Current ripples, North-Holland, pp. 19-21, 1968.
- 11) Johnston, J.P. : On the three-dimensional boundary layer generated by secondary flow, Trans. ASME, Ser. D, Vol. 82, pp. 233-248, 1960.
- 12) 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, 土木学会論文報告集, 第194号, pp. 83-90, 1971.
- 13) 宇民 正 : 橋脚周辺部における流れのパターンについて, 京都大学防災研究所年報, 第12号 B, pp. 529-541, 1969.
- 14) 宇民 正 : 橋脚前面の渦の機構に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, 第16号 B, pp. 533-542, 1973.
- 15) 宇民 正・上野鉄男 : 円柱橋脚前面の3次元流速分布特性, 第29回土木学会年次学術講演会講演概要集, II, pp. 318-319, 1974.
- 16) 宇民 正 : 橋脚前面の3次元流速分布について, 昭和49年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, II, pp. 5-1~5-2, 1974.

(1975. 5. 16・受付)