

橋脚周辺の流れの機構と
洗掘防止法に関する研究

1975年5月

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

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

目 次

緒 論	.....	1
第 1 章 概 論		
1.1 従来の研究	.....	6
1.1.1 橋脚周辺の局所流に関する従来の研究	.....	6
1.1.2 橋脚周辺の局所洗掘防止法に関する従来の研究	.....	10
1.1.3 従来の研究のまとめ	.....	10
1.2 橋脚周辺の局所流の特徴	.....	15
1.2.1 運動方程式の各項の大きさの比較	.....	15
1.2.2 馬蹄型渦の発生に関する考察	.....	17
1.3 結言——本研究における現象理解の立場——	.....	19
第 2 章 層流実験に基づく橋脚前方の流れの機構に関する研究		
2.1 概 説	.....	22
2.1.1 層流実験の意義と目的	.....	22
2.1.2 局所流の解析法の発展	.....	23
2.2 層流における局所流の計測法に関する研究	.....	29
2.2.1 流体の選択	.....	30
2.2.2 実験水路と実験条件	.....	33
2.2.3 水素気泡法の電極	.....	35
2.2.4 橋脚前方の局所流の計測法	.....	36
2.2.5 カメラと照明器具の設置法	.....	39
2.3 層流中におかれた角柱の前方の流れに関する実験的研究	.....	39

2.3.1	実験の目的と概要	39
2.3.2	対称面内の水理特性	39
2.3.3	角柱前方の流れの3次元特性	47
2.4	層流中におかれた円柱前方の流れに関する実験的 研究	52
2.4.1	実験の目的と概要	52
2.4.2	対称面内の水理特性	53
2.4.3	円柱前方の流れの3次元特性	56
2.5	層流中におかれた円柱前方の流れに関する解析的 研究	60
2.5.1	解析モデルの構成	60
2.5.2	解析結果の実験的検討	71
2.6	結 言	74
第 3 章	乱流中に設置された橋脚前方の流れの機構に関する研究	
3.1	概 説	80
3.2	局所流の3次元計測法に関する研究	82
3.2.1	トレーサの選択	84
3.2.2	立体写真撮影の方法	85
3.2.3	立体写真解析の精度	86
3.3	乱流中におかれた橋脚前方の流れに関する実験的 研究	86
3.3.1	各種トレーサによる馬蹄型渦の観察	86
3.3.2	平均流向と平均流速	96
3.3.3	渦領域の大きさと渦軸の位置	101
3.3.4	粒子状トレーサによる渦内の流速分布の測定	104
3.4	乱流中におかれた橋脚前方の流れに関する解析的 研究	108
3.4.1	乱流の場合と層流の場合の流況特性の対応性	108

3.4.2	解析モデルの構成	109
3.4.3	解析結果の検討と主渦の特性	113
3.5	結 言	117
第 4 章	円柱橋脚後方の流れの機構に関する研究	
4.1	概 説	121
4.2	層流実験に基づく円柱橋脚後方の流れに関する研究	122
4.2.1	実験装置および方法	122
4.2.2	渦の形成状況による後流域の分類	123
4.2.3	水路床面に平行な断面内の流れのパターン	124
4.2.4	流下型の渦と渦度くの分布	127
4.2.5	流れパターンの水路側面からの観察	130
4.2.6	水路横断面内の流れパターン	131
4.2.7	橋脚後方の3次元的な流れパターン	133
4.3	乱流中に設置された円柱橋脚後方の流れに関する研究	134
4.3.1	実験の目的と方法	134
4.3.2	水面における流線形状	136
4.3.3	水路床面近傍における流線形状	138
4.4	結 言	140
第 5 章	円柱橋脚周辺の洗掘防止法に関する実験的研究	
5.1	概 説	142
5.1.1	橋脚周辺の洗掘防止法に関する水理学的考察	142
5.1.2	橋脚周辺の洗掘防止工の施工および維持・管理に関する検討	148
5.1.3	本章の目的	149
5.2	層流実験に基づく防止工の機能に関する研究	149
5.2.1	研究の目的と実験方法	149

5. 2. 2	対称面内の流れの水理学的特性	152
5. 2. 3	橋脚側方の流れの水理学的特性	159
5. 2. 4	水路床近傍の流れの水理学的特性	162
5. 3	乱流実験に基づく杭型防止工の機能に関する研究	164
5. 3. 1	研究の目的と実験方法	164
5. 3. 2	平滑な固定床水路における実験的研究	165
5. 3. 3	移動床水路における洗掘防止杭の効果に関する実 験的研究	170
5. 4	結 言	176
結 論	.....	182

橋脚は、交通運輸の一手段である橋梁と、治水・利水の対象である河川との結節点に相当するものである。橋梁や河川が担っている社会的役割を考慮すると、橋脚の安全性を確保することの重要性は明らかである。ところが橋脚は河流に対しては一種の障害物として作用するから、各種の災害の原因になりやすい。たとえば橋脚周辺に局所的な河床洗掘が生じて橋脚が沈下あるいは流失破損したり、橋脚が流れの疎通を妨げたために橋脚の近くの護岸や堤防が破壊されたりした例は多い。とくに、上流部におけるダムの建造や人工的な土砂採取にともない、全国的に河床が低下する傾向にある現在、橋脚周辺の局所洗掘が橋脚にとって重大な結果を招くおそれがある。また流木やごみが橋脚や橋桁にかかって流れの疎通を妨げて水位をせき上げたために破堤あるいははんらんに至った例も多い。これらの事実は、橋脚の安全性の問題は、河川災害における1つの重要な問題であることを示すものであるが、とくに橋脚に直接的に影響する河川工学上の問題点を整理するとつぎのようである。

- ① 橋脚による背水効果
- ② 橋脚周辺の局所洗掘・堆積効果とその防護対策
- ③ 橋脚の適正な配置方法
- ④ 橋脚に作用する流体力
- ⑤ 流木の橋脚に与える影響

橋と人間とのかかわりあいがい深いだけに、こういった問題点に関しては従来からいろいろの研究がなされて来たが、そのほとんどは巨視的な現象を表わす物理量を半経験的に見積るという段階にとどまっておき、橋脚周辺の流れの機構にまで立入った検討は不十分なままに残されて来ている。

これらの問題点を解明してゆくには、橋脚周辺の流れの水理学的な機構を明らかにすることが基本的な課題となるであろう。しかもこういった流れの本質を明らかにすることは、単に橋脚にとどまらず、その他の各種の河川構造物の水理学的な機能を明らかにすることにも通じるものと考えられる。

ところで、橋脚周辺には各種の渦運動で特徴づけられる局所流が発生し、そ

れが橋脚，水流および土砂などの間の相互作用の面で重要な役割を果していることは従来から多くの研究者の指摘するところではあった。このような局所流は3次元的にいりくんだ境界条件に支配されており，しかも時間的にも変動しているという複雑なものであり，このことが局所流の機構にまで立入った研究が立遅れた主要な原因であると考えられる。

本研究の目的と立場

本研究の目的は，橋脚に関する河川工学上の各種問題点を解明してゆくための基礎として橋脚周辺の局所流の機構を明らかにし，それによって洗掘防止などの実際上の諸問題を解決する方向を見出そうとしたものである。

橋脚周辺の流れは3次元境界値問題でもある訳であるが，本研究では数値解析上の問題として現象を把えるという方法はとらず，詳細な実験を基礎に現象を正確に把握し，現象の一般的特性を明らかにすることを重視した。その意味で，局所流の3次元的な計測方法を含めて現象の詳細な記述にかなりの頁数をさいている。

同時に，本研究はたんに理学的な興味に基づくものではなく，明らかにされた現象の特性に基づいて工学上の諸問題に対処しようとしたものである。したがって乱流状態における局所流の特性の把握においても，平均流の特性を重視し，さらにそれを層流状態の流れから推論するという方法についても検討している。

本研究の内容

第1章では，橋脚周辺の流れに関する従来の研究の検討に基づき，各種の渦運動で特徴づけられる局所流の水理学的な特性を明らかにしてゆくことの重要性を示す。ついで運動方程式中の各項の大きさの比較および馬蹄型渦の発生機構に関する若干の考察を行ない，最後に，これらの諸検討結果に基づいてえられた本研究の方向づけを示す。

第2章では，実際には乱流状態で生じている橋脚周辺の局所流に関する研究を層流状態での実験を基礎に行なう方法を提示し，その意義と具体的方法を明

らかにする。ついで角柱橋脚あるいは円柱橋脚を用いて層流状態で実験を行ない、馬蹄型渦を含む橋脚前方の局所流を詳細に把握し、その特性を明らかにする。さらにそこで得られた結果を基礎に、橋脚前方の流れの解析モデルを提示し、それに基づいて3次元的な流速分布式を導き出す。

第3章では、乱流状態における局所流の3次元的な特性を2台のカメラを用いた Flow Visualization 法によって計測する方法を述べる。ついで、この方法やその他各種のトレーサあるいは熱膜流速計を用いて円柱橋脚前方の流況を詳細に把握して平均流の特性を明らかにし、それを層流の場合の結果と比較検討する。最後に、第2章でえられた層流の場合の解析モデルを基礎に、乱流の場合の解析モデルを作成し、その妥当性を示す。

第4章では円柱橋脚後流域の流れの特性を実験的に明らかにする。そのために、まず現象が比較的単純な層流状態で実測を詳細に行ない、その特性を明らかにする。次いで乱流状態については、実測が比較的容易な水面と水路床面における流線のパターンを明らかにし、それを基礎に層流状態における現象把握を参照しながら乱流状態での後流域の渦の3次元的な特性について考察する。

第5章では、第1章から第4章までの研究結果の一つの応用として橋脚周辺の局所洗掘防止法について研究する。すなわち、まずはじめに防止工と局所流との関係を検討して、防止工が具備すべき水理学的な機能を明らかにする。ついで層流状態における実験に基づいて杭型防止工の優位性を明らかにする。最後に乱流状態において固定床の場合および移動床の場合について杭型防止工の機能に関する実験を行ない、杭型防止工を実際に用いる上での指針をえる。

結論は、以上の研究からえられた成果のうち主なものを列挙したものである。

記号の説明

本論文で使用する記号のうち、主なものを以下に列記する(図-1参照)。

x : 円柱の中心または角柱の前面の中心から下流方向に測った距離

y : 円柱の中心から水路に直角方向に測った距離

z : 水路床面からそれに垂直上向きに測った距離

r : 円筒座標系において円柱中心から測った距離

θ : r 軸が x 軸の正方向となす角度

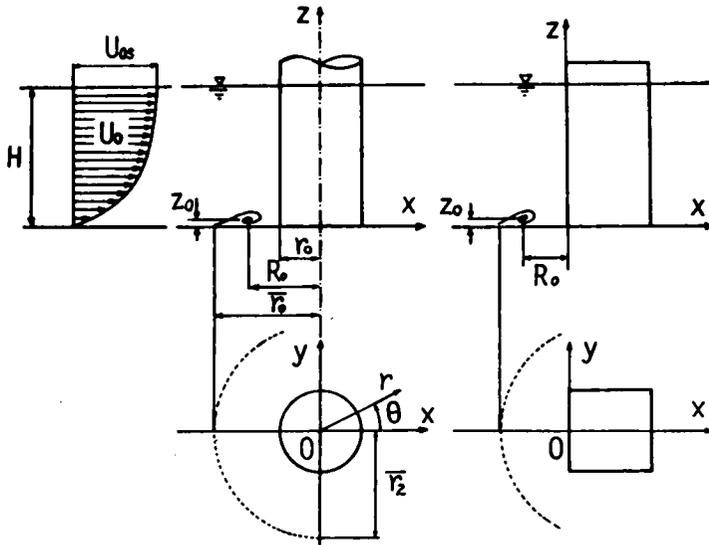


図1 記号の説明

- r_0 : 円柱の半径
- r'_0 : 杭型洗掘防止工の半径
- \bar{r}_0 : 円柱前面の流れの対称面において、水路床のごく近傍で x 方向の流速が 0 となる点の r 座標
- \bar{r}'_0 : 杭型洗掘防止工を単独に流れの中に設置したときの \bar{r}_0 に相当するもの
- r_1 : 流速を求めようとする点の渦軸からの距離
- r'_1 : 流速を求めようとする点の渦軸の鏡像の位置からの距離
- \bar{r}_2 : 水路床近傍で円柱の中心から水路横断方向に逆流域の境界線まで測った距離
- \bar{r}_* : 橋脚の前方に杭型洗掘防止工をおいたときの \bar{r}_0 に相当するもの
- L : 杭型洗掘防止工と橋脚との中心間隔
- R_0 : 円柱中心から馬蹄型渦の中心までの距離
- z_0 : 水路床から馬蹄型渦の中心までの高さ
- a : 二次流を規定する渦度領域の断面（円形）の半径
- U_0 : 水路床から高さ z における接近流の流速

U_0 : 接近流の水面における流速

U_x, U_y, U_z : 点 (x, y, z) における流速のそれぞれ x, y, z 方向成分

U_r, U_θ, U_z : 点 (r, θ, z) における流速のそれぞれ r, θ, z 方向成分

u_r, u_θ, u_z : 点 (r, θ, z) における主流流速のそれぞれ r, θ, z 方向成分

u'_r, u'_θ, u'_z : 点 (r, θ, z) における二次流流速のそれぞれ r, θ, z 方向成分

H : 水深

κ : 渦度領域のまわりの循環の値で、二次流を規定するもの。渦度ベクトルが θ の正方向をむくとき正

ω_0 : 渦度領域内の渦度で $\kappa/\pi a^2$ に等しい

ξ : 渦度ベクトルの x 方向成分

η : 渦度ベクトルの y 方向成分

ζ : 渦度ベクトルの z 方向成分

第 1 章 概 論

1. 1 従 来 の 研 究

1. 1. 1 橋脚周辺の局所流に関する従来の研究

実験室における詳細な計測を基礎に水理学上の諸問題に具体的に対処する方法が 20 世紀の初めに Engels や Rehbock といったドイツの研究者により確立され¹⁾、橋脚周辺の局所洗掘現象についても彼等による詳細な研究がなされている。それ以来橋脚周辺の局所洗掘については無数といえるほどの研究者によって追求されるものとなったが、この局所洗掘現象において橋脚周辺に発生する水平軸をもつ渦が重要な役割を果すということがほぼ共通の認識となっているようである。

ところがこのような渦運動あるいはそれにともなう下降流の機構に関する研究は意外に少ない。本節ではこれらの研究を跡づけることによって橋脚周辺の局所流に関する理解を深める。

(1) Keutner²⁾の研究

Keutner は橋脚周辺の水面こう配により馬蹄型渦が生成されると考えた。すなわち、流れの対称面における橋脚直上流の水面の逆勾配により橋脚前頭部上流側に水平軸をもつ渦が生成され、さらに橋脚側方の流れと直角方向の水面勾配により橋脚前頭部側方に水平軸をもつ渦が生成されると考えた。また橋脚側方および下流に鉛直軸をもつ渦が生成されることを指摘し、それをおのおの側面渦 (Seitenwältze)、下流渦 (Unterwältze) とよんでいる。

(2) Tison³⁾の研究

Tison は、橋脚前面付近における水平断面内での流線曲率と鉛直方向の流速分布のため、橋脚前面では河床に近づくほど位置の水頭と圧力水頭の和が小さくなり、そのために下降流が生じることを示した。さらに Tison は以上の考察を基礎に、洗掘軽減法についても重要な結論を得ている。

(3) 石原⁴⁾⁵⁾の研究

石原は橋脚前面の流れと水路彎曲部での流れとの類似性に着目し、水面勾配と遠心力の釣合いという考え方から橋脚前面のらせん流を説明した。石原の結論は Tison のそれと一致したものであるが、Tison の流体力学的考察の不備な点が是正されている。

(4) Shen⁶⁾⁷⁾らの研究

彼等は、橋脚周辺の流れの主要な特徴は大規模な渦運動にあるとし、それらには馬蹄型渦、はくり渦および後ひき渦があると指摘した。とくに馬蹄型渦は、橋脚により乱されてない流れの中にすでに存在していた渦度が橋脚によって集中させられた結果生じるものであることを指摘し、流れの対称面(stagnation 平面)内での渦度の積分を検討することにより渦の強さを求めようとした。すなわち、図 1-1 の ABCD 面内の渦度の積分 Γ はその周りに沿う流速ベクトル \mathbf{v} の循環に等しいから、BC に沿っての流速にポテンシャル流の流速分布を仮定し、DC および AD に沿っては流速は 0 であるとして、円柱橋脚の場合については次式を導き出した。

$$\Gamma \equiv \oint \mathbf{v} d\mathbf{s} \\ = U_{0s} x - \frac{U_{0s} r_0 x}{r_0 + R_0} \quad (1-1)$$

ここで、 $d\mathbf{s}$ は周に沿うベクトルを意味し、 U_{0s} は橋脚より十分上流における水面での接近流速、 x は BC あるいは AD の長さである。橋脚が設置されない場合の Γ の値は $U_{0s} x$ で与えられるので、上式右辺の第二項が橋脚を設置したために生じる Γ の増分 $\Delta\Gamma$ と考えられ、 $x \rightarrow \infty$ におけるこの値 $r_0 U_{0s}$ が渦の強さを規定する量と考え、このことから渦の強さは円柱の半径と接近流速とを用いたレイノルズ数 $r_0 U_{0s} / \nu$ の関数であるとした。

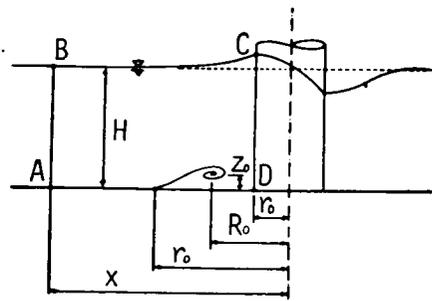


図 1-1 記号の説明

以上に述べた Shen らの考え方は渦度の概念から馬蹄型渦の強さを見積る指標をえようとした点で注目されるが、結論の所で疑問を残している。すなわち、D点をわずかに検査面の内側にずらせて $\Delta\Gamma$ を検討してみると、CDに沿ってはかなりの強さの下降流があり、またDAに沿っては同様に逆流がある。したがって $\Delta\Gamma$ の値は Shen らが考えたものよりずっと大きくなるはずであり、しかもこれらの下降流や逆流は r_0 や U_0 以外の要素によっても影響されるので、 $\Delta\Gamma$ の値は依然として未知である。いいかえるならば、Shen らによって与えられた $\Delta\Gamma$ は馬蹄型渦による渦度の他に橋脚の前面および水路床面に沿って生成された境界層の中に含まれる馬蹄型渦とは逆符号をもつ渦度をも含めたものとなっている。

(5) Allen⁸⁾の研究

Allenは平板上に設置された円柱周辺の流れについて、3次元境界層のはくり

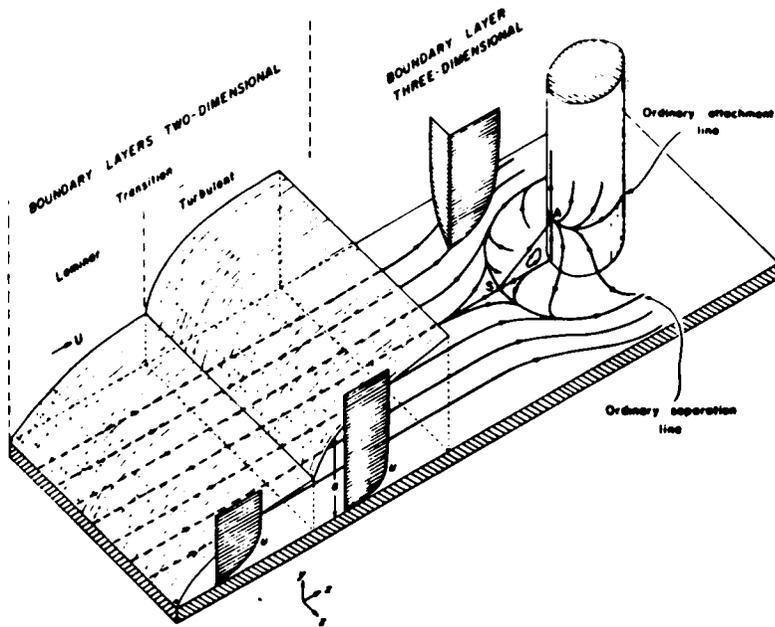


図 1 - 2 平板にとりつけられた円柱の周辺における境界層(Allenによる)

現象として説明し、それが2次元境界層のはくり現象と異なる点を強調した。そして橋脚前方の流れの模様を図1-2のように表示している。すなわち特異点Sではくりした流線はふたたびA点で橋脚に達すると考えた。

本図の特徴は、橋脚前方のはくり域が閉領域とされていることにある。はくり域内の流体は橋脚の周りをまわりながら流下する様子が示されているが、連続の条件の面で疑問を残している。

(6) 吉川ら⁹⁾の研究

吉川らも Shen らと同様に対称面内の流れに注目して、そこでの下降流の流速を求める式を導き出している。対称面内では流れは2次的であるから、Euler の運動方程式で θ 方向流速成分を0としたものを基礎方程式とし、 r 方向流速成分は円柱周辺のポテンシャル流のそれで与えられると仮定し、さらに流線に沿う Bernoulli の定理を利用して、下降流の流速分布として次式を導き出した。

$$U_z = r_0 \left(\frac{1}{2} \ln \frac{r - r_0}{r + r_0} - \frac{r_0}{r} \right) \frac{\partial U_0}{\partial z} \quad (1-2)$$

上式はいくつかの近似に基づいており、また解析も対称面内に限られてはいるが、下降流を数量的に求めた点で注目される。しかし、境界条件の取扱い方については、つぎのべるように根本的な疑問を残している。すなわち、第1に本解析では水路床面が平滑かあるいは洗掘されているかといった境界条件が考慮されていない。第2に、対称面内で θ 方向流速成分が0であるという事実は、本来は3次的な解析の境界条件として利用されるべきものであって、対称面内の2次元解析の基礎方程式の中にそれを導入した場合は、別の境界条件の流れの解を求める結果となる。言いかえるならば、吉川らの解析は、鉛直な平板に鉛直方向に流速分布をもつ水平な流れが当る時の平板に平行な流速成分を求めた結果になっている。

(7) 中川ら¹⁰⁾の研究

中川と鈴木は、Hawthorne¹¹⁾ が導き出した渦度の3次的な変形に関する理論式(2.1.2(2)参照)に基づき、橋脚周辺の流れの流速分布式を導き出した。

ところでHawthorneの理論式は、2次流は主流に比べて十分に小さいという仮定に基づいており、中川らの研究もこの仮定を踏襲したものとなっている。したがって中川らの研究は、主流にほぼ匹敵する馬蹄型渦を解析するには十分とはいえない。しかし中川らの研究は、2次流の概念を渦度の概念に結合することにより橋脚周辺の局所流の解析を行なおうとした点で、今後の解析法の発展方向を示唆したものといえよう。

1.1.2 橋脚周辺の局所洗掘防止法に関する従来の研究

橋脚周辺の局所洗掘防止法については、若干の研究者によりいくつかの工法が提案されている。それらのうち主なものを、防止工の形態に従って分類して示すと表1-1のようである。これらの研究の内でも石原⁴⁾⁵⁾の前頭部形状に関する研究は、相似則を含む系統的な実験に基づくもので、その結果は工学的に重要な意味をもつものである。また、ChangとKarim¹⁸⁾の実験も杭型防止工を実際に用いる上での指針を与えるものとなっている。ただChangらの導き出した結論は実験結果に基づく半経験的なものであり、局所流など流れの機構に関する水理学的な検討はほとんどなされていない。一方つば型防止工については、Tanakaら¹⁵⁾はつばによる最大洗掘深の軽減率は $\frac{1}{4}$ の関数と考えたのに対して、吉川らは軽減率に対する B/A の影響を重視している(表1-1参照)。これは、Tanakaらの実験では、つばを比較的大きくして水路床面に沿う境界層の効果を減少させることが重視されているのに対し、吉川ら⁹⁾の実験では下降流のために橋脚前面に沿って発達する境界層を制御することが意図されたためであると考えられる。しかし実際には施工上の問題や橋脚の安全性の確保のためにあまり大きなつばをつけることは不適當であり、その意味でTanakaらの結論は再検討を要する。

いずれにせよ、防止法に関する研究についてもいまだ実験的検討の域を出ておらず、局所流の発生機構と結合した形で防止工の水理学的機能を明らかにすることが必要である。

1.1.3 従来の研究のまとめ

橋脚周辺の局所流の機構に関する従来の研究および局所洗掘防止法に関する

表 1 - 1 局所洗掘防止法に関する従来の研究

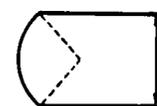
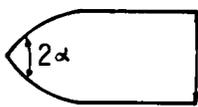
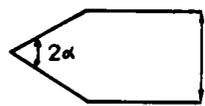
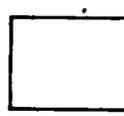
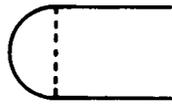
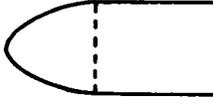
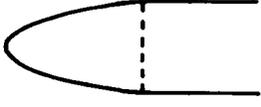
工法	研究者	実験条件	結果	
前	石原 ^{4) 5)}	 B	$B=15cm$ $2\alpha=180^\circ$	
		 B	$B=15cm$ $\alpha=33^\circ-74^\circ$ (7種)	$2\alpha=70^\circ-80^\circ$ が最適
		 B	$B=15cm$ $\alpha=16^\circ-90^\circ$ (11種)	$2\alpha=40^\circ-60^\circ$ が最適
頭 部 形 状	Laursen ¹²⁾	 長 方 形		長方形の場合に対する最大洗掘深の軽減率
		 半 円 形	長さ：幅	10%
		 長 円 形	2 : 1	20%
		 長 円 形	3 : 1	25%
		 両 凸 形 レンズ形	2 : 1	20%
		 同 上	3 : 1	30%

表 1-1 (つづき)

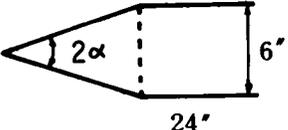
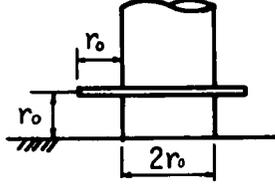
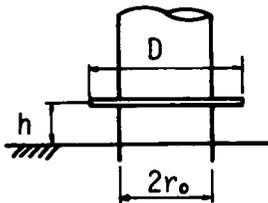
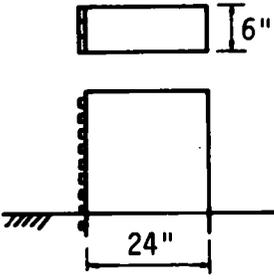
工法	研究者	実験条件	結果
前頭部形状	Shen Schneider Karaki ¹³⁾	 <p style="text-align: right;">2α =15°, 30°</p>	軽減率 26-85 %
つば型	Laursen Toch ¹⁴⁾		最大洗掘深 の軽減率 最大 41 %
	Tanaka Yano ¹⁵⁾	 <p style="text-align: right;">$\frac{D}{2r_0} = 3, 4, 5, 6$ $\delta =$ 上流境界 層厚 = 5 cm</p>	つばによる最 大洗掘深の軽 減率は h/δ の 関数で, h/δ の増加と共に 減少, Dの増 加と共に増加
防止工	Shen Schneider Karaki ¹³⁾	 <p style="text-align: right;">粗度の大きさ は $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times 2$ 上下方向の間 隔は $1/2$"</p>	粗度による軽 減率 9 ~ 21 %

表 1 - 1 (つづき)

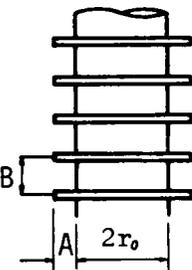
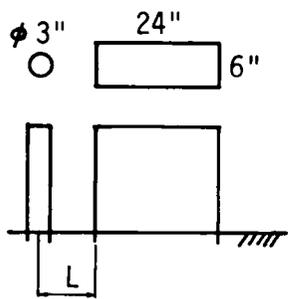
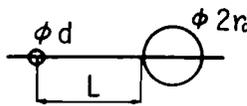
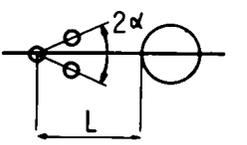
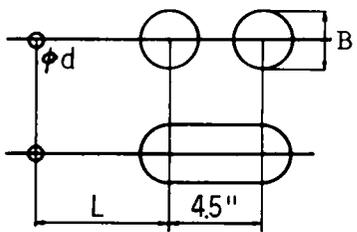
工法	研究者	実験条件	結果
つば型防止工	吉川 福岡 岩間 會小川 ¹⁶⁾	 <p style="text-align: right;">$2r_0 = 6\text{ cm}$</p>	<p>$B/A \approx 3$ で軽減効果は最大、そのときの軽減率はAの増加と共に増加</p>
杭	Shen Schneider Karaki ¹³⁾	 <p style="text-align: right;">$L = 1.1\text{ ft}$ 0.5 '' 0.125 ''</p>	<p>軽減率 15.4 % 55.7 % 45.2 %</p>
型防止	Chabert Engeldinger ¹⁷⁾	 <p style="text-align: right;">$d/2r_0 = \frac{1}{6}$</p>  <p style="text-align: right;">$2\alpha = 30^\circ$ $d/2r_0 = \frac{1}{6}$</p>	<p>$L/2r_0 = 1$ で軽減率は最大で約 30 %</p> <p>$L/2r_0 = 2-2.5$ で軽減率は最大で約 40 %</p>
工	Chang Karim ¹⁸⁾	 <p style="text-align: right;">$B = 1.5\text{ ''}$ $\frac{d}{B} = \frac{1}{4}$</p>	<p>$L/B = 1-1.5$ で軽減率は最大で約 30 %</p>

表 1 - 1 (つづき)

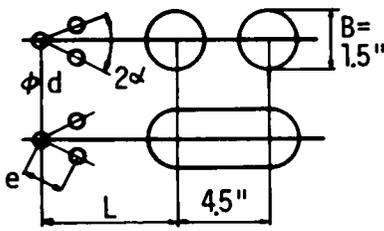
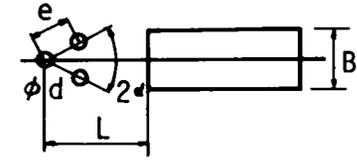
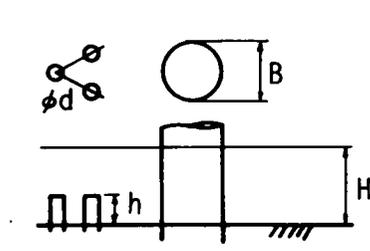
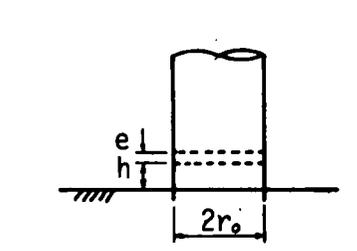
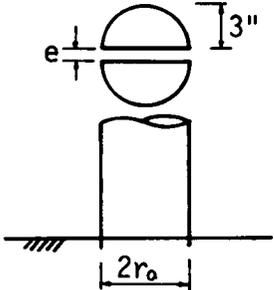
工法	研究者	実験条件	結果
杭型 防止工		 $\frac{d}{B} = \frac{1}{6}$ $\frac{e}{B} = 1, \frac{2}{3}$ $2\alpha = 20^\circ, 30^\circ$	$2\alpha = 20^\circ, d/B = 1/6, L/B = 2.5$ で軽減率は最大で 65% 軽減率は最低 40%
	Chang Karim ¹⁸⁾	 $\frac{d}{B} = \frac{1}{6}$ $\frac{L}{B} = 2-2.7$ $\frac{e}{B} = 1$ $2\alpha = 20^\circ, 30^\circ$	軽減率は最大 35%
			$\frac{h}{H} = 0.4$ で軽減率最大で約 40%
		流向が偏っている場合	省略
橋脚に孔をあける工法	Tanaka Yano ¹⁸⁾		$h = 0$ の付近で軽減率最大で約 20 - 30%

表 1 - 1 (つづき)

工法	研究者	実 験 条 件	結 果
橋脚に孔をあける工法	Shen Schneider Karaki ⁽¹³⁾		軽減率 24 - 38 %

従来の研究の主要なものについて述べたが、以上からつぎのような点が指摘できる。

① Tison の研究以来、橋脚前面の局所流の主要な原因を接近流の流速分布とする説明が一般になされているが、その接近流速分布を橋脚周辺の圧力分布に結びつけて局所流を説明する立場 (Tison, 石原) と接近流速分布を渦度の概念に結びつけて局所流を説明する立場 (Shen ら, 中川ら) とがある。

② 局所流の機構を定量的に解析しようとした Shen ら, 吉川らおよび中川らの研究はいずれも不十分さを残しており、局所流の研究はいまだに定性的な理解にとどまっているといえる。ただ、渦運動を渦度の集中によって説明しようとした Shen らの考察, および 2 次流の概念を渦度の概念に結合することにより局所流の解析を行なおうとした中川らの研究は今後の解析法の発展方向を示唆している。

③ 橋脚周辺の局所洗掘防止法に関する研究についてもいまだ実験的検討の域を出ておらず、今後は局所流の発生機構と結合した形で防止工の水理学的機能を明らかにしてゆく必要がある。

1.2 橋脚周辺の局所流の特徴

1.2.1 運動方程式の各項の大きさの比較

1.1.1 での検討から、橋脚周辺の局所流は、①橋脚前方をとり囲む馬蹄型渦

と、②橋脚前方付近に生じる下降流および、③橋脚後流域のはくり渦の3つで特徴づけられそうである。本項ではこれら3つの現象がそれぞれ運動方程式中のどの項によって主として規定されているかを調べてみる。そのために、実河川における橋脚周辺の流れを想定して、ここでは円柱の半径 r_0 が 10^2 (cm), 水深 H が 10^2 (cm), 主流の流速 U_0 が 10^2 (cm/sec) として運動方程式中の各項の大きさを見積もってみる。

長さの代表量を L , 流速の代表量を V , 渦動粘性係数を ϵ で表わすことにする。 ϵ の値については明確には決め難いが 10^{-1} (cm²/sec) のオーダーとしてよいであろう。馬蹄型渦については、 L は 1.1.1 に述べた各研究結果から考えて r_0 に匹敵すると考えられ、 V は U_0 に相当すると考えられる。つぎに橋脚前方から側方にかけて発生する下降流については、 L は水深 H に、 V は U_0 にそれぞれ相当すると考えられ、最後に後流はくり渦については、その発生領域である橋脚の側方では L は境界層の厚さ δ で表わされ、はくり渦が発達した後流域においては L は橋脚の半径 r_0 に相当すると考えられる。また後流はくり渦の V はいずれの領域においても U_0 に相当するとしてよいであろう。

以上の考察に基づいて運動方程式中の慣性力項とせん断力の項の大きさを見積もったものが表 1-2 である。この表から明らかなように、馬蹄型渦、下降流、

	馬蹄型渦	下降流	後流はくり渦	
			発生域	発達域
長さ L	$r_0 \sim 10^2$	$H \sim 10^2$	$\delta \sim 10^0$	$\delta \sim 10^2$
流速 V	$U_0 \sim 10^2$	$U_0 \sim 10^2$	$U_0 \sim 10^2$	$U_0 \sim 10^2$
慣性力項 V^2/L	$U_0^2/L \sim 10^2$	$U_0^2/H \sim 10^2$	$U_0^2/\delta \sim 10^4$	$U_0^2/\delta \sim 10^2$
せん断力項 $\epsilon V/L^2$	$\epsilon U_0^2/L^2 \sim 10^{-3}$	$\epsilon U_0^2/H^2 \sim 10^{-3}$	$\epsilon U_0^2/\delta^2 \sim 10^0$	$\epsilon U_0^2/\delta^2 \sim 10^{-3}$

表 1-2 運動方程式の各項の大きさの比較

あるいは後流はくり渦のいずれにおいても慣性力項がせん断力項に比べてはるかに大きい。このことから、橋脚周辺の局所流の平均流

としての特性を把握するに際しては、その平均流に関する完全流体の方程式を基礎としてよいといえよう。

1.2.2 馬蹄型渦の発生に関する考察

馬蹄型渦の発生が主として慣性力項に支配されていることが以上の考察で明らかになったが、その発生の機構をもう少し詳しく考察してみよう。

橋脚より十分上流で水路横断方向の渦管が流れに従って変形する様子を考える。図1-3に示すように、時刻 t_1 で $A_1 B_1 C_1$ で表わされている渦管は時刻 t_2 では $A_2 B_2 C_2$ に、時刻 t_3 では $A_3 B_3 C_3$ にというように、渦管が橋脚に近づくにつれて渦管の橋脚近くの部分は引きのばされる。したがってその部分の渦管の断面積は小さくなるから、Helmholtzの渦度保存則によってそこでの渦度は増大する。

以上により橋脚の前面で渦度が増大することが示された。しかし以上の考察によると、橋脚の表面に接する所で渦度が無限大になり、その点で以上の考察は、橋脚をとり囲んで発生する馬蹄型渦の発生機構を完全に説明するものとはなっていない。

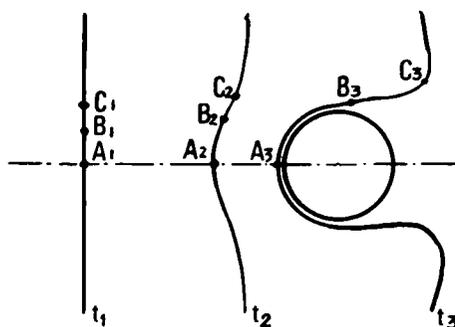


図1-3 橋脚周辺における渦糸の変形

そこで、つぎに流れの対称面内での渦運動に注目して考察を進める。対称面内では渦度ベクトルはその面に直交し、その強さは面内に2次的に分布するが、そのような状態をそのまま考察することは困難なので、ここでは近似的なモデルを設定して渦運動を考察する。すなわち、図1-4(a)に示すように、対称面内での渦運動が等強度かつ等間隔の半無限の渦系列で表示される渦面の運動で表わされるとする。Rosenhead¹⁹⁾は無限に延びた渦面に正弦関数で表わされる微小擾乱が加えられたときの渦面の変形について、またGoldstein²⁰⁾は無有限領域における半無限渦面の端のまき上がりについてそれぞれ研究しているが、ここでも同様の方法を用いて、図に示されるような境界をもつ半無限領域における半無限渦面の変形を求めた。その結果は図1-4に示すようである。図は時間経過とともに渦面が変形してゆく様子を示しているが、渦面の端が時間と

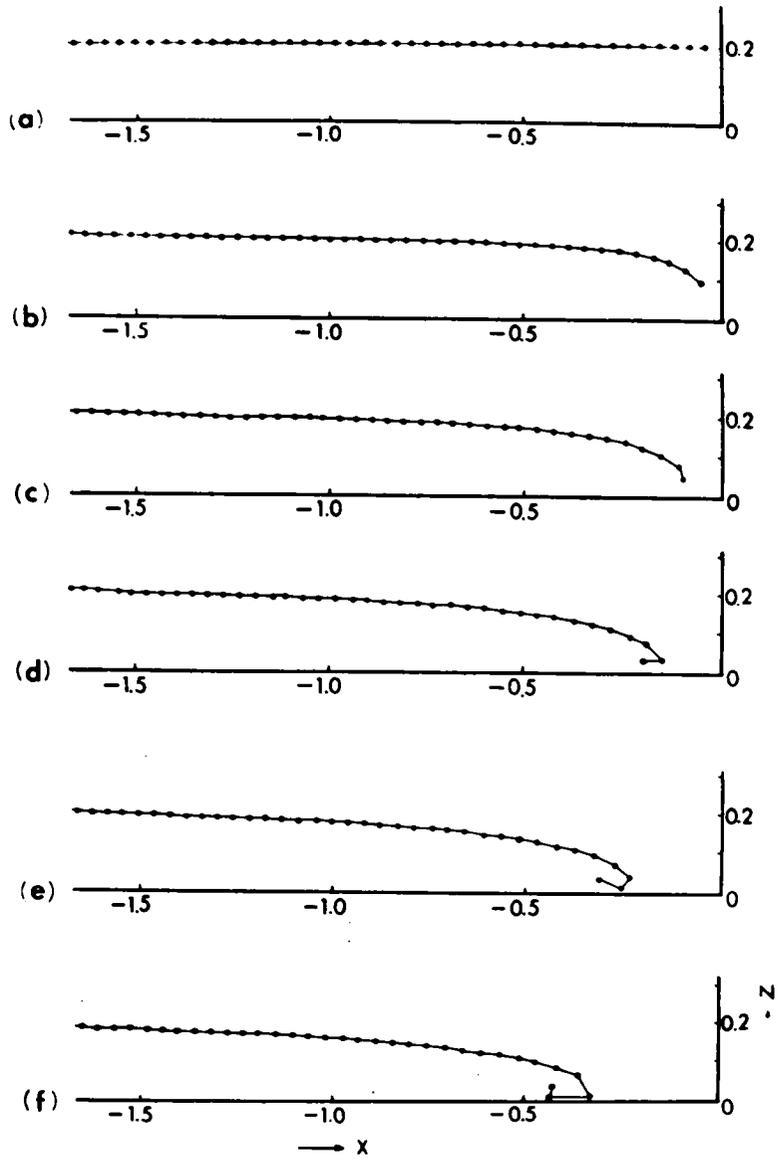


図 1 - 4 モデル化された渦面の変化

ともにまき上がっている様子が認められる。

本計算では主流はないとしているが、もし速度が渦面の端の移動速度に等しく方向が逆の主流を重ねあわせた場合を考えると、ある固定された位置で渦面のまき上げが進行することとなる。

以上の考察は渦度の2次元的な分布を無視しており、また本項のはじめに述べたような橋脚に近づくにつれて渦度が増大するという現象を説明することはできないが、橋脚前面のほぼ定常的な渦運動の発生を定性的に理解する上で充分参考になると考えられる。

1.3 結言 — 本研究における現象理解の立場 —

以上において主として従来の研究を基礎として橋脚周辺の局所流の機構について考察して来たが、次章以下においてさらに詳しい実験的あるいは解析的研究を行なうにあたり、どのような立場で実測し解析すべきかがある程度明らかになった。それらをまとめるとつぎのようになる。

①橋脚周辺の局所流は、橋脚の前方から側方にかけて発生する馬蹄型渦および下降流、および後方に発生する後流はくり渦で特徴づけられる。

②実際河川における橋脚周辺の流れを対象とする場合には、上記の馬蹄型渦、下降流および後流はくり渦の発達の機構は主として慣性力に規定されていると考えられる。

③したがって、渦度の変形に関する運動学的な概念を平均流に適用することにより、橋脚周辺の局所流の水理学的な特性を明らかにすることができそうである。

④すなわち、橋脚前面の馬蹄型渦および下降流の発生の主な原因は接近流がもつ流速分布であり、この流速分布は剪断力により形成されるものであるが、橋脚の十分上流においてこの流速分布は既に定まっているものとし、馬蹄型渦や下降流の発生機構はこの流速分布の中に含まれる渦度が慣性力により変形する過程と考えてよいだろう。

参 考 文 献

- 1) Rouse, H. and S. Ince : *History of Hydraulics*, Dover Publications, Inc., 1963, pp. 219-222.
- 2) Keutner, Chr. : *Strömungsvorgänge an Strompfeilern von verschiedenen Grundrissformen und ihre Einwirkung auf die Flussole*, Die Bautechnik, Jahrgang 10, Heft 12, 1932, pp. 161-170.
- 3) Tison, L. J. : *Érosion autour de piles de ponts en rivière*, Annales des Travaux Publics de Belgique (Brussels), 1940, pp. 813-868.
- 4) 石原藤次郎 : 橋脚による河床洗掘に関する実験的研究, 土木学会誌, 第24巻, 第1号, 1938, pp. 23-55.
- 5) 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, 1942, pp. 974-1007.
- 6) 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., U. S. A., 1967, pp. 151-161.
- 7) Shen, H. W., V. R. Schneider and S. Karaki : *Local scour around bridge piers*, Proc. ASCE, Vol. 95, No. HY 6, 1969, pp. 1919-1940.
- 8) Allen, J. R. L. : *Current ripples*, North-Holland, 1968, pp. 19-21.
- 9) 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, No. 194, 1971, pp. 83-90.
- 10) 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, 1972, pp. 31-36.
- 11) Hawthorne, W. R. : *The secondary flow about strut and airfoils*, Jour. Aeron. Sci., No. 21, 1954, pp. 588-608.
- 12) Laursen, E. M. : *Scour at bridge crossings*, Proc. ASCE, Vol. 86, No. HY 2, 1960, pp. 39-54.
- 13) Shen, H. W., V. R. Schneider and S. Karaki : *Mechanics of local scour supplement methods of reducing scour*, Civil Engineering Department Report CER 66 HWS 36, Colorado State Univ., 1966, pp.

13-18.

- 14) Laursen, E. M. and ^{A.}Toch : A generalized model study of scour around bridge piers and abutments, Proc. Minnesota Int. Hyd. Conv. IAHR, 1953, pp. 123-131.
- 15) Tanaka, S. and M. Yano : Local scour around a circular cylinder, Proc. 12th Congress of IAHR, Vol. 3, Colorado State Univ., U.S.A., 1967, pp. 193-201.
- 16) 前出 9)
- 17) Chabert, J. and P. Engeldinger: Etude des affouillement autor des piles de ponts, Laboratoire National D'Hydraulique, 6 Quai Watier, CHATOU, Series A, 1956, pp. 45-53.
- 18) Chang, F. M. and M. Karim : An experimental study of reducing scour around bridge piers using piles, South Dakota Department of Highways, 1972.
- 19) Rosenhead, L. : The formation of vortices from a surface of discontinuity, Proc. Roy. Soc. London, A 134, 1932, pp. 170-192.
- 20) Goldstein, S. : Modern developments in fluid dynamics, Dover Publications, Inc., 1965, pp. 44-45.

第2章 層流実験に基づく橋脚前方の 流れの機構に関する研究^{32) 33)}

2.1 概 説

2.1.1 層流実験の意義と目的

橋脚前方にはかなり強い下降流が存在し、さらに水路床近傍には橋脚をとり囲む形でいわゆる馬蹄型渦が発生する。この馬蹄型渦の発生にともなって水路床に沿って強い逆流が発生し、それが橋脚周辺の局所洗掘の主要な原因となっていることはかなり古くから指摘されてきた。^{1)~6)} 一般に橋脚周辺の流れの場が乱流であることはいうまでもないが、上記のような複雑な流れを乱流状態で観測し、その機構を明らかにすることは非常に困難である。すなわち、第1に流れの加速度が大きいために、測定器の位置がわずかにずれても流速および流向はかなり違ったものとなり、第2に、測定器が余程小さいものでなければ、現象を乱してしまう可能性があり、また橋脚と水路床とに囲まれた限られた空間に測定器を挿入することも困難である。第3に、乱流の場合流速および流向が共に変動するので、それらの測定結果が統計処理できる必要がある。などの点があげられる。

1950年頃から水理計測の分野で盛んに用いられるようになった Flow Visualization の方法は上述の第1および第2の困難さを解決するものとして注目値するが、第3の困難さに対処するにはまだ十分とはいえない。一方、最近水理計測面で注目されている熱膜流速計は、温度補正や熱膜にゴミが付着した時の補正といった実用技術上の配慮を十分に行なうならば統計処理が可能な流速の実測資料がえられる。ただこの熱膜流速計は絶対流速に感応する機構になっているため、平均流速に対して乱れ速度が相対的に大きな所では実際より大きな平均流速を検出する結果となり、さらに流向については別途に計測する必要がある。このような点で、熱線流速計を局所流の計測に用いるには若干問題を含んでいる。

以上に述べたような局所流の3次元的計測の困難さが局所流の現象把握ひいては局所流の解析を遅れさせた主要な原因の1つと考えられる。そこで、本研

究では次のような方法をとることにした。すなわち、まず実測の容易な層流状態で Flow Visualization 法に基づく実験を行ない、現象の水理学的な把握を詳細に行なう。次いでその結果を基礎として乱流の場合の実測を重点的にあるいは巨視的な項目についてのみ行なう。

当然層流状態における局所流の諸量は乱流状態の局所流の平均的な諸量とは異なっているわけであるが、橋脚前方の局所流は馬蹄型渦とそれにともなう下降流とで特徴づけられ、その渦の強さと大きさは接近流の速度勾配と橋脚の型状および大きさに主として規定されているようなので、⁷⁾⁸⁾ 接近流の速度勾配の差異について十分な考察を払うならば、層流状態での実測結果から乱流状態における平均的な諸量のある程度予測することができると考えられる。

本章ではこうした事情を考慮した上で、平滑な固定床上に設置された円柱橋脚のまわりの層流を対象として、第1に橋脚前面に発生する馬蹄型渦の特性を層流の場合について実験的に把握し、第2に、実験で明らかになった渦の力学的特性を基礎にして渦を含む全体の流況を表現するための解析モデルを提示して、渦運動に伴なう橋脚前方の下降流や水路床面に沿う逆流の大きさなどを推定する方法を示した。

2.1.2 局所流の解析法の発展

前章における従来の研究の検討から、橋脚周辺の局所流の機構に立入った解析的研究は現在のところ無いに等しいことが明らかになった。そこで本節では、橋脚周辺の流れに限らず、各種の形態の局所流に関して従来発展させられてきた解析法を概観することにより、橋脚周辺の局所流の解析法をさぐる。

(1) 1次元解析法と局所流

開水路流れの巨視的な特性、たとえば平均流速、流量、水深などを解析的に求める上で1次元解析法は現在なお広範かつ有効に用いられている方法である。ただ、1次元解析法においては微視的あるいは局所的な現象変化を無視して、巨視的あるいは平均的な量を用いることを前提としており、それにともなって各種の補正係数が導入される。とくに曲率が大きな流れについてはこの補正係数に関する独自の解析的あるいは実験的検討が必要となる。

a) Boussinesq などによる流線曲率のモデル

Boussinesq⁹⁾ は流線曲率が大きな流れについて、その曲率 $1/R$ が一様な勾配をもつ水路床での値 0 から水面における値 $\partial^2 h / \partial x^2$ まで線型的に変化するという仮定を設け、運動量保存則に基づいて水面形状に関する 3 次の微分方程式を導いている。同様な仮定は Golaz¹⁰⁾、Jaeger¹¹⁾らによっても用いられており、また Fawer¹²⁾ は流線の曲率が水路床からの距離とともに指数函数的に変化するという仮定を設けて解析している。

b) 段落流に関する中川と宇民¹³⁾の研究

圧力補正係数の変化がいかに重要な役割りを果たすかは中川と宇民の段落流に関する研究からも明らかである。従来段落部の流れについては等流水深と限界水深はいずれもほぼ一定と考えられていたため、段縁より若干上流に限界水深が発生する理由が水理学的に明快に説明されておらず、Rouse¹⁴⁾ は真の限界水深は段縁断面で生じる筈であるという誤った結論を導き出し、同様の主旨が Chow¹⁵⁾ の “Open-Channel Hydraulics” にも記述されている。中川と宇民は圧力補正係数 λ を実測値から計算し、それによって等流水深を計算した。その結果、図 2-1 に示すように限界水深はやはり段縁より若干上流に発生し、その点で限界水深曲線と等流水深曲線とが交叉していること、したがって限界水深点は 1 次元解析法における特異点（鞍形点）であり、限界水深点を通過する水面曲線は遷移水面であることを明らかにした。1 次元解析法における特異点の解析は従来水路床勾配、水路幅、流入流量などといった境界条件の変化する位置で検討されて来たが、上記の結果は、たとえ境界条件が一様でも圧力補正係数が変化すれば特異点が発生することを示している。

(2) 大きな曲率をもつ流れの 2 次元あるいは 3 次元解析

流れが複雑な形状の境界で囲まれている場合、境界層は通常流れの全領域に達しているため、壁面近くの境界層とその外側の非回転流とに流れの場を分割するという方法は用いられない。このような流れの解析には渦度の概念が有効に用いられるが、その基礎は Lamb¹⁶⁾ によって与えられ、さらにその 2 次元解析への具体的な適用が Long¹⁷⁾ や Yih¹⁸⁾ によってなされている。一方、2 次

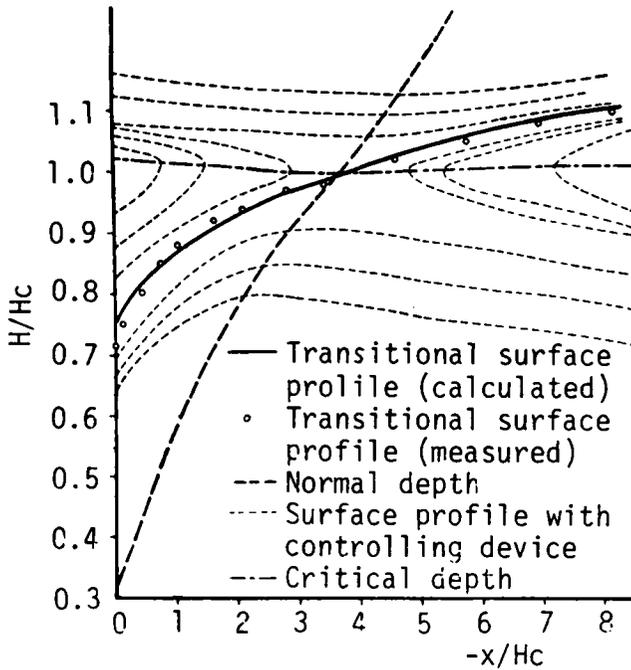


図 2 - 1 段落部における水面形状 (中川・宇民による)

流の概念を用いる方法が Squire と Winter¹⁹⁾ により導入され、渦度をもつ流れの 3 次元解析法は一つの方向づけを与えられた。

a) Lamb¹⁶⁾ の解析

Lamb は、流れの場における渦度分布が与えられたとき、それから流速分布を求める方法を明らかにした。すなわち、点 (x', y', z') における渦度が (ξ', η', ζ') で与えられていると、流速を求めるべき点 (x, y, z) と (x', y', z') との距離を r とするとき、

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{F} = \frac{1}{4\pi} \iiint \frac{\xi'}{r} dx' dy' dz' \\ \mathbf{G} = \frac{1}{4\pi} \iiint \frac{\eta'}{r} dx' dy' dz' \end{array} \right. \quad (2-1)$$

$$(2-2)$$

$$\left\{ \mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \iiint \frac{\zeta'}{r} dx' dy' dz' \right. \quad (2-3)$$

で定義される (F, G, H) を成分とするベクトル Φ を用いると、各点における流速 \mathbf{v} は

$$\mathbf{v} = \text{rot } \Phi \quad (2-4)$$

で与えられることを示した。

b) Yih¹⁰⁾ の解析

流れが2次元であれば、式(2-4)の \mathbf{v} は流れ関数 Ψ に相当し、

$$\text{rot } \mathbf{v} = -\Delta \Psi \quad (2-5)$$

となるが、2次元流ではさらに、Helmholtzの渦度保存則より $\Delta \Psi = \text{一定}$ で表示される流線上で $\text{rot } \mathbf{v}$ は一定だから、上式は

$$\Delta \Psi = f(\Psi) \quad (2-6)$$

と表わされる。Yihはこの式を図2-2に示すような境界条件をもつ流れに適用した。すなわち、図で上流側からは、

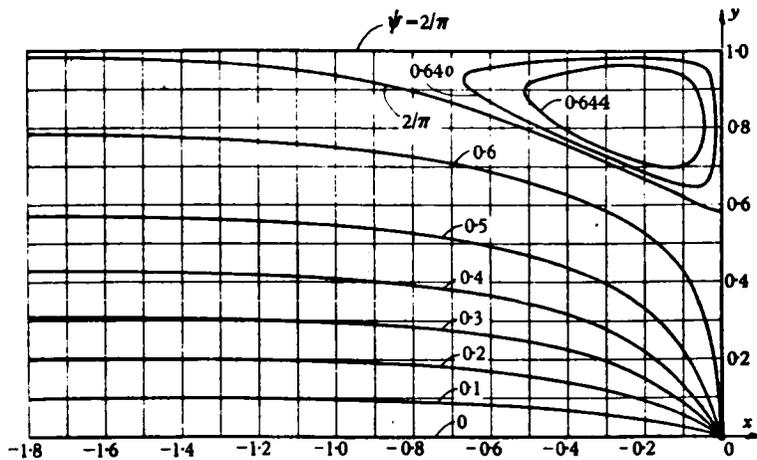


図2-2 点状の吸込みをもつ2次元流れの流線形状 (Yihによる)

$$u = \cos(\pi y/2) \quad (2-7)$$

という流速分布をもつ流れが供給され、下流端の原点の位置から無限に狭い幅を
通って流出がある場合の解を求めた。その結果が図中に示されているが、本
図は、接近流に流速分布がある場合急縮部の隅角部に閉じた流線をもつ渦が形
成されるという興味ある現象を示している。

c) Squire と Winter¹⁹⁾ の解析

並行して配置された翼列の間の流れあるいは曲管内の流れについて、Squire
と Winter は、流れは主流と 2 次流とから成るとし、主流は非回転流、2 次流は
回転流と考えた。彼等はまた、2 次流の発生機構を接近流の渦度が曲流部で変
形される過程として捉え、その変形過程を非粘性流に関する渦度保存則から明
らかにした。

d) Hawthorne²⁰⁾ の解析

Squire と Winter の概念と方法論を基礎にして、Hawthorne は渦度成分の変
形過程が一般に次式で示されることを示した。

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_r = 2q \cdot \frac{\partial U_0}{\partial z} \cdot \int \frac{1}{q^2} d\theta \\ \omega_n = \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial U_0}{\partial z} \\ \omega_z = 0 \end{array} \right. \quad (2-8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_r = 2q \cdot \frac{\partial U_0}{\partial z} \cdot \int \frac{1}{q^2} d\theta \\ \omega_n = \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial U_0}{\partial z} \\ \omega_z = 0 \end{array} \right. \quad (2-9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_r = 2q \cdot \frac{\partial U_0}{\partial z} \cdot \int \frac{1}{q^2} d\theta \\ \omega_n = \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial U_0}{\partial z} \\ \omega_z = 0 \end{array} \right. \quad (2-10)$$

ここで、 ω_r , ω_n および ω_z は、主流として仮定したポテンシャル流の流向方向、
それと直角かつ水平方向および流向と直角かつ上向き方向の各渦度成分を意味
し、 U_0 は z 方向にのみ変化すると仮定された接近流速であり、 q は接近流速が
1 の場合の 2 次元非回転流の絶対流速、および θ は流線の方向と接近流の流向
のなす角度である。

上式は、2 次流は主流に比べて十分小さいとする Squire と Winter の仮定を
踏襲しており、その結果、2 次元非回転流と仮定した主流によどみ点が生じな
いことも本解析結果を用いる上での前提条件となる。実際、上式を円柱周辺の
流れに適用してみると、はくり線上では ω_n が無限大に発散してしまうのである。

e) 村本²¹⁾の解析

村本は開水路彎曲部の流れに関する実験的検討から、接近流中に含まれている渦度の各方向成分が流下するにつれて変形する過程が図2-3のようにモデ

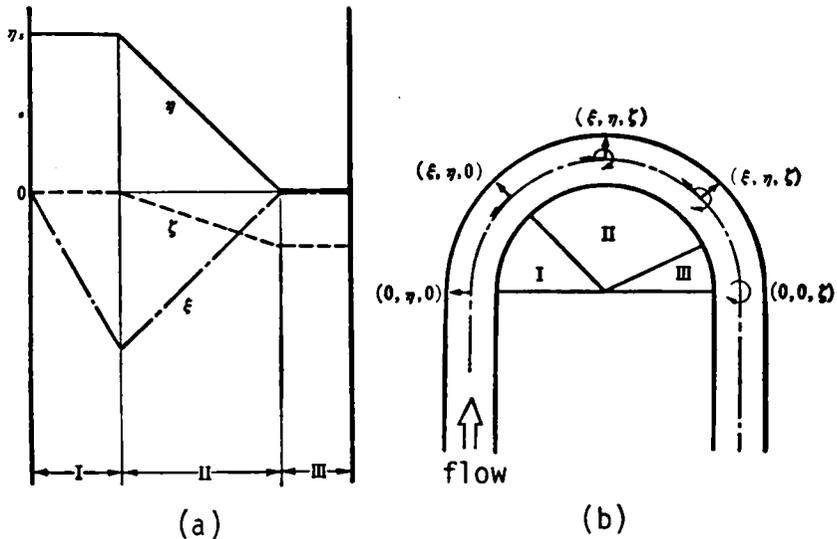


図2-3 開水路彎曲部の渦度変化（村本による）

ル化されることを明らかにし、それによって彎曲部の流れを2次流の発生域、発達域および完全発達域の3つに領域区分した。発生域での渦度の各成分の変化の様子はSquireとWinterおよびHawthorneの解析結果と一致するものであるが、発達域についてはこれらの解析では説明できない。村本はこの領域については渦度の粘性による拡散を考慮した解析を展開した。

(3) 橋脚周辺の局所流の解析法に関する検討

以上において局所流の解析法の発展の歴史を概観したが、この結果と第1章の1.1.1での橋脚周辺の局所流に関する検討とから、橋脚周辺の局所流の解析法についてはつぎの点が指摘できる。

① Boussinesq のように流線の曲率の分布から解析的に圧力分布を求めるとか、中川・宇民のように実測から圧力分布を求めることにより解析する方法は比較的簡単な境界条件の流れの解析には有効であるが、橋脚周辺の流れのように3次元的な流れの解析には平均流の渦度の変形を考慮した解析法の方が有効に用いられそうである。

② 橋脚周辺の流れと開水路彎曲部の流れとの類似性に関する石原の指摘と、開水路彎曲部の流れに関する村本の領域区分を参考にして、1.2.1で述べた運動方程式の各項の大きさの比較に基づき橋脚周辺の流れを検討してみると、それはつぎのように概括的に把握できそうである。すなわち、a) 橋脚より十分上流では剪断力の影響によって流速分布すなわち渦度が形成される。b) 橋脚近くでかつ橋脚の前方 ($90^\circ < \theta < 180^\circ$ の範囲) ではその渦度が慣性力によって変形をうけ、下降流や馬蹄型渦が形成される。c) 橋脚の後方 ($-90^\circ < \theta < 90^\circ$) では馬蹄型渦の渦度は剪断力の影響で拡散される一方、新たな渦度が生成されてはくり渦を形成する。

2.2 層流における局所流の計測法に関する研究

先にも述べたように、層流状態での実験を行なうに至った主要な理由は、層流の場合現象がいくぶん単純化され、Flow Visualization の方法、とくに水素気泡法が容易に利用できると考えたからである。ところが、水工学上の諸問題の解明に水以外の粘性の高い流体を用いて層流状態を作り出して実験を行なったという例はほとんど発表されておらず、層流を作り出すために適当な液体の選定やその際の測定方法などに関して未知の点が多い。

一方、水素気泡法は1954年にGeller²²⁾が始めて用いたと言われており²³⁾、その後ClutterとSmith²⁴⁾(1961)によってプローブが改良され、また等時間間隔でパルス状に気泡を出すことによりえられるtime lineによる流速測定法が開発されている。さらにSchraub²⁵⁾(1965)は等間隔に被覆をつけたプローブを上記の方法に用いることによりいわゆるcombined time-streak markers法を開発した。一方、浅沼と武田²⁶⁾(1965)は電力供給を高めることにより23 ft/secといった高速にも水素気泡法が用いられることを明らかにした。

水素気泡法は上記以外にも多数の研究者により工夫・発展させられて来たが、

本実験では流体として特別のものを用いていること、および流れの3次元計測を行なう必要があることから独自の工夫が必要とされる。

以上の点から、本節では、特別の流体を用いて層流を作り出す方法と、そのようにしてえられた流れを水素気泡法を用いて3次元的に計測する方法、およびそれらの問題点について述べる。

2.2.1 流体の選択

層流状態を作り出すためには、いうまでもなくレイノルズ数を小さくすればよい訳であるが、そのためには実験装置をごく小さなものにする方法、主流の流速を小さくする方法、粘性の大きな流体を用いる方法およびこれらの方法の2つ以上を組合せる方法が考えられる。そのうち実験装置は計測機器との関係もあって幅20 cmの水路を用いることとした。またその場合、水を用いると流速を小さくする方法では流速を0.5 cm/sec以下にする必要があり、かえって実測が困難になることが予想される。そこで本研究では粘性の大きな流体を用いることにより層流状態を作り出すこととしたのである。

粘性の大きな液体としては表2-1のようなものがある。しかし実験を容易

物質	粘度 η (poise)
Glycol (25°C)	0.1809
Glycerol (20°C)	8.717
水 あめ	10
原 油	10
水ガラス	$10^2 - 10^3$
ワックス	10^6
ピッチ	10^{10}

表2-1 粘性の高い物質とその粘度

に行なうという点から考えると、粘性の大きさの他に次のような条件を備えているのが望ましい。すなわち、第1にNewton流体であること、第2に無色透明でFlow Visualizationの方法が適用できること、第3に物理的性質が安定しており、それが既に明らかにされていること。すなわち、微少な温度変化により粘性が急変したり、吸湿とか蒸発などによって比重や粘性が変わるといったことができるだけ少ないこと、および第4に人体や測定器具に対して無害でありしかも入手が容易であること。

以上の点を考慮して本実験ではグリセリンを水と混ぜて用いることにした。

参考までにこの混合液の粘性を示すと表 2 - 2 のようである。ただし表において

d_{20}^{20}	η_{20} (millipoises)	d_{20}^{20}	η_{20} (millipoises)
1.0000	10.09	1.2155	747.8
1.1014	37.34	1.2240	1108
1.1699	153.6	1.2463	4093
1.1848	235.4	1.2568	8717
1.2057	496.7		

て d_{20}^{20} は 20°C の水の密度に対する混合液の相対密度を意味し、 η_{20} は 20°C における混合液の粘性係数であって、 $d_{20}^{20} = 1.2568$ で純粋のグリセリン

表 2 - 2 グリセリンと水の混合液の粘度

とみなされる。

グリセリンを実験に用いる上で問題となるのは、上記の必要条件のうち、物理的性質の安定性である。すなわち、実験中に温度が変化した場合、粘性係数がどれ程変化するかといった問題と、グリセリンの吸湿性によって液の密度ひいては粘性が変化しないかという問題である。まず、温度変化によって動粘性係数はかなり変化すると考えられるので、それについては実験中常に温度を測定し、温度変化がほとんどないことを確認するようにした。幸い Flow Visualization の方法を用いると実験は比較的短時間に済まされるので、上記の方法で実験中の温度変化による粘性の変化の影響はさけられたと考えられる。しかし、つぎに述べる吸湿性とも相まって、同じ実験条件を後で厳密に再現させることは非常に困難であった。

吸湿性に関しては手近かに十分な資料がなかったので、次のような実測を行なった。すなわち、直径 5 cm の蒸発皿に各種混合率のグリセリン溶液を 20 グラムずつ入れ、室内に放置してそれら溶液の重量変化を実測した。結果は図 2 - 4 に示すようであり、図中溶液の重量変化を示す実線の傍に記した百分率はグリセリンの混合比を重量百分率で示したものである。室内の温度や湿度がかなり変化しているので、本図は目安を与える資料としてしか利用できないが、それでも次の事が明らかになった。すなわち、グリセリンの混合率が 100 % のものは吸湿による重量増加が認められるが、70.8 % 以下のものはいずれも重量は減少しており、これは吸湿作用より蒸発作用の方が大きいためと考えられる。

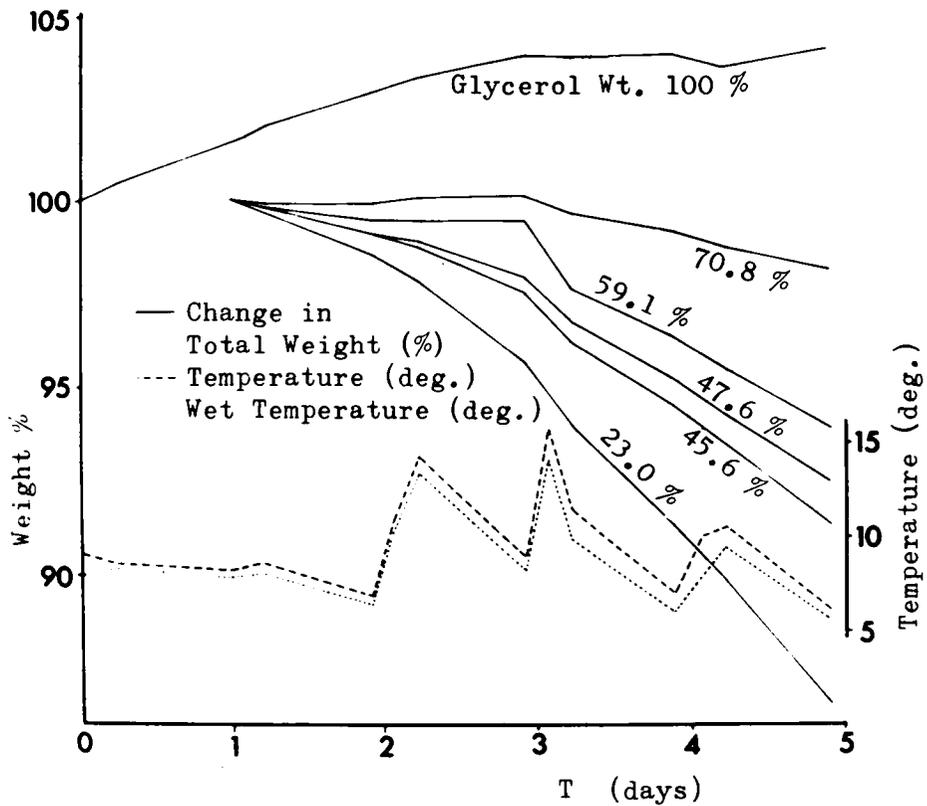


図 2 - 4 グリセリンと水の混合液の重量変化

この場合、混合率の低いものほど重量の減少の度合いは大きい。また、混合率が 70.8 % 以下の溶液の重量の変化率は時間がたつほど大きくなる傾向が認められる。その原因としては温度と湿度の影響の他に、時間経過とともに溶液中のグリセリンが底の方へたまっていったため、蒸発が早くなった事も考えられる。したがって、実験時には溶液を循環利用していることもあってかなり攪拌しているので、そのような状態では重量の減少率も本図のものより小さくなると考えられる。

以上に述べた所から、グリセリンを用いると粘性係数 η を 8.7 poise から $1/100$

poise まで任意に変化させることができ、しかも Flow Visualization 法も有効に用いられるという利点がある一方、吸湿や蒸散にともなう密度変化や温度変化にともなって粘性が変化するので、長時間にわたる実験では流れの特性が変化し、また実験の後で実験条件を再現することも困難であるという欠点も指摘される。したがって今後このような溶液を用いる実験では周到な準備と計画が必要であろう。

2.2.2 実験水路と実験条件

実験水路は幅 20 cm, 長さ 6 cm で、両側面および底面は水路全長にわたって透明アクリル樹脂製とし、Flow Visualization のための写真撮影および照明がどこからでも行なえるようにした。勾配は 1/500 に設定した。水路の中程の中心断面での流速分布を 3 種の水理条件について実測し図 2-5 に示した。図中の

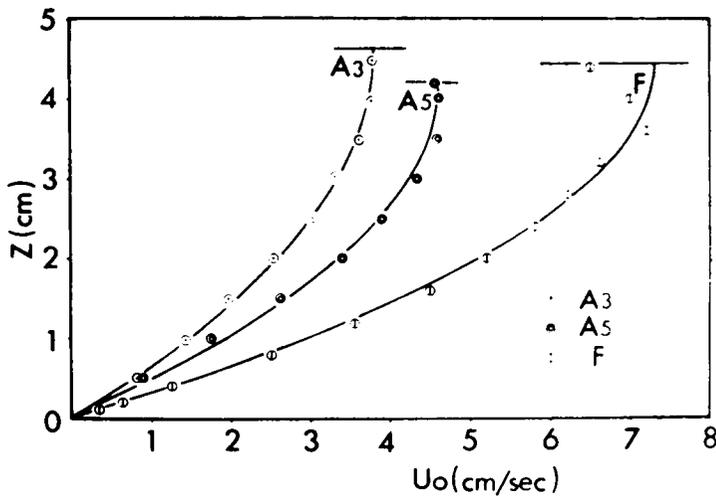


図 2-5 接近流速分布 (層流・角柱の場合)

実線は層流の放物型流速分布を示したものであり、本図から流れはほぼ放物型流速分布に従っているとみなせよう。各場合の動粘性係数を実測の接近流速分布から求めると表 2-3 のようになる。同表には以下に行なう各実験の条件も

run	接近流速	水深 H (cm)	最大流速 U_{0s} (cm/sec)	ν (cm^2/sec)	角柱の辺長 $2a_0$ (cm)	$\frac{HU_{0s}}{\nu}$	$\frac{2a_0U_{0s}}{\nu}$
A-3	A_s	4.63	3.74	5.62	5.0	3.08	3.33
A-5	A_s	4.20	4.60	3.76	5.0	5.14	6.12
F-1	F	4.45	7.30	2.66	2.0	12.21	5.49
F-2					2.5	"	6.86
F-3					3.0	"	8.23
F-4					3.5	"	9.61
F-5					4.0	"	10.98
F-6					4.5	"	12.35

表 2-3 実験条件 (層流・角柱の場合)

あわせ記入されている。

次にグリセリン溶液の循環システムを用いた実験での技術上の問題を2,3述べよう。実験を行なうにあたって最も障害となったことは、微細な気泡が流れの中に多数混入し、実測のために発生させた水素気泡と判別がつかなくなることである。このような気泡は、一部は水素気泡が浮き上がらずにそのまま循環したため次第に増加していったものもあるが、ほとんどは循環中に流れの中に混入した空気泡がポンプによって打砕かれたものである。この気泡は非常に微細で、水路上流端の整流部に布をはって濾すようにしたが問題の微小な気泡はほとんど布目を通過するので効果はなかった。そこで、水路から低水槽へ溶液が落下する際に泡が混入しないようにシュートを設けたり、低水槽の水位をできるだけ高くしていわゆる吸込み渦が発生しないようにしたところ、これらの微小な気泡をかなり除去できることがわかった。また、流れがポンプに入る直前の所に気泡を除く装置をつけるとさらに効果的であることがわかった。

また循環使用するため溶液が徐々に汚れて来て Flow Visualization を妨げるということもある。溶液の汚れの原因の大部分は鉄さびであった事から、循環系にはできるだけさびない材料を使うことも必要であるといえる。

2.2.3 水素気泡法の電極

水素気泡法において電極の形状、寸法および支持方法は最も技術上の工夫を要するものの1つである。

(1) 電極の形状

電極（白金線）の形状についてはGeller²²⁾が用いた最も原始的な直線上のものから、ClutterとSmith²⁴⁾が用いた波型のもの、Schraub²⁵⁾が用いた格子型や一部被覆型のものまで様々な工夫がこらされて来た。しかし波型のもはそれが流下方向を向くように設置するのは困難であるし、たわみも大きい。一方、格子型は作ることが困難であるし、流れへの抵抗が多いことから現象を乱すことも考えられる。そこで著者は白金線に2mm間隔の印をつける方法をとった。すなわち、たとえばアラルライトのような接着剤を2mm毎に白金線に塗り、直後に加熱すると接着剤が白金線に付着したまま0.1mm程度の球状になる。これを電極として用いた。

(2) 電極の大きさ

電極の太さは細いほど流れに対する抵抗がないので望ましいが、細すぎると実験中に断線したりするので、本実験では直径0.03~0.05mmの白金線を用いた。また白金線の長さについては、長くなるほど水素気泡の発生濃度も小さくなるので、負荷電力に応じた適当な長さが自ずから決ってくる。本実験で用いた水素気泡発生装置の電力は300~400Vであり、その場合、白金線電極の長さは5~15cmが適当であることがテストの結果判明した。

(3) 電極の支持方法

白金線電極の支持方法としては、Flow Visualizationの目的に応じて図2-6に示す3種のものを採用した。

a) 鉛直型電極——水路の鉛直縦断面内の流れの模様を水路の側方から撮影する際に有効に用いられる。白金線電極の下端を支える絶縁体および弾性金属板は、水路床近傍の流速分布を乱さないようにできるだけ薄い方がよい。

b) 水平型電極——白金線電極が水路横断方向かつ水平になるように設置

し、水平断面内の流れの模様を水路床から撮影するのに用いられる。

白金線の支持棒については、白金線にある程度の張力を与えるために一定の弾力があること、内部に電導性のものを封入でき、それを流れから絶縁できること、

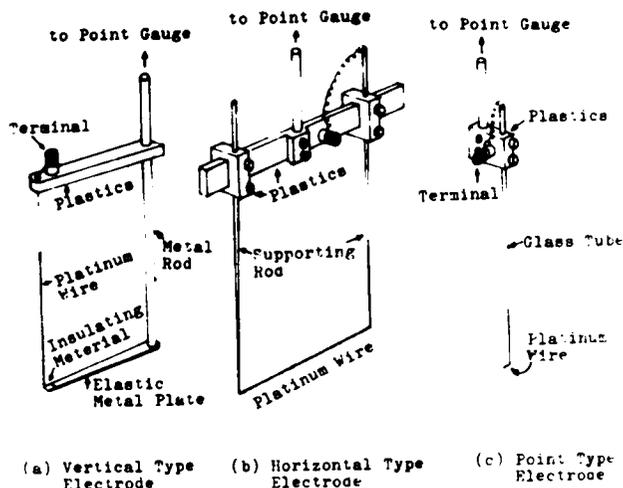


図 2-6 水素気泡法の陰極の支持方法

支持棒の先端で容易に導線と白金線とを結合できることなどの条件が必要とされる。本実験ではステンレスあるいはリン青銅の直径2mmの棒を絶縁性の接着剤あるいは塩化ビニル管で被覆したものをを用いたが、金属棒を接着剤で被覆する方法によると、その先端（白金線との接続点）付近を細く削って流れに対する抵抗を少なくすることができるので、この方法による方がよいようである。

c) 点型電極 — 1つ1つの流線の形やそれに沿う流速分布を測定するのに用いられる。この電極を用いる場合、支持棒の影響ができるだけ小さくなるようにとくに工夫する必要がある。そのため、ガラス管を加熱してその先端を細く引伸ばしたものを支持棒に用い、その中に白金線を先端がわずかに露出するようにして封入した。

2.2.4 橋脚前方の局所流の計測法

局所流の1つの主要な特徴は、その流線が曲率をもち、しかも3次元的事であることである。したがって、その計測には3次元的なFlow Visualizationの方法を用いる必要がある。このような方法として一般に、①各断面毎の流線と流

速を実測する。② 2台のカメラを直角方向に設置して同じトレーサを同時に撮影する、および③ 2台のカメラを平行方向に設置して同じトレーサを同時に撮影する、などの方法が考えられる。しかし2台のカメラを同時に用いる方法は、第3章3.2で述べるように、撮影技術も難しいし、その結果の解析にも多大の労力を要する。

ところで、水素気泡法を用いる場合は、トレーサの挿入位置が明らかであり、とくにここでは層流を対象としているから、1台のカメラによる撮影結果からでもかなりの情報を得ることができる。本項では各種の目的に応じた撮影方法をその撮影結果の例を示しながら明らかにする。

(1) 対称面内の流線と流速の測定

前述したように橋脚の前方では流れは3次元であるが、流れの対称面すなわち水路の中心軸を含む鉛直面内では流速ベクトルはその面内に含まれる。ただし後流域に発生するカルマン渦の影響と考えられるわずかな変動は前面においても認められるが、ここではそれを無視するものとする。すなわち対称面内における流速ベクトルは2次元であると見做すことができ、その測定は比較的容易である。さらにその面内における流れの諸特性が明らかになれば、橋脚前方 ($90^\circ < \theta < 270^\circ$) の流れ全体についてもある程度のことは推測することができる。以上の考察に基づいて、本章では微細にわたる現象把握は対称面内に限って行ない、橋脚前方の全領域にわたる現象については巨視的あるいは測定が容易な事項についてのみ測定することにした。

対称面内の流線および流速の測定は次のようにして行なった。すなわち、角柱橋脚の上流に水素気泡法の陰極の白金線を水路横断方向に水平に張り、それに等時間間隔 (0.2~0.4 sec) のパルス状電圧をかける。このとき陰極の白金線に発生した水素気泡が流体とともに下流へ運ばれるが、流れの対称面とそこごく近傍だけを水路底面から照明し、水路側面から写真撮影することによって等時間間隔のスポットとして流線がえられる。写真2-1はそのようにして撮影した結果の一例である。陰極を同じ位置に設定して数回写真撮影し、その結果を平均化することによって、その位置を通過する流線の平均的な位置と形状および流線に沿う流速分布がわかる。以上の操作を陰極の各高さ毎に行ない、

それらの結果を集積することによって対称面内のすべての流線型状と流速分布が明らかになる。

以上の方法は平均化操作も可能で厳密な実測に適用されるが、それだけに労力も要する。次に述べる方法はそれに比べて簡単であるが精度は十分とはいえない。すなわち、先に述べた2mmごとに印をつけた鉛直型の陰極を対称面内におき、やはり等時間間隔のパルス状電圧をかけると、対称面全体にわたる流線が水素気泡によって描き出される。それを写真撮影するとたとえば写真2-2のような模様がえられる。この写真からも明らかなように、このような方法では渦の周辺や水路床面近くの微細な流れの機構は把握しにくい。

(2) 任意の流線の測定

任意の流線の3次元的な形状の測定には先に述べた点状の陰極が有効に用いられる。すなわち、写真2-3はそれによって発生させられた水素気泡列を水路床から撮影したものである。陰極の位置を撮影の都度実測しておけば、このような実測からでも流線の3次元的な形状がかなり明らかになる。

橋脚周辺の渦領域からいくぶん離れた所では流れはほぼ2次元적であり、そのような流れについては2mm毎に印をつけた水平型の陰極から発生する水素気泡列を水路床面から撮影することによって陰極の高さにおける水平面内の流線と流速分布が観測される。写真2-4はその一例で、B型の接近流速の中に5cm角の橋脚をおき、その上流に陰極を水路床面から1.25cmの高さにおいた場合の観測結果であり、流れの対称面近くの流線がある程度橋脚に近づいた所で下降流が発生している様子を示している。

(3) 渦の形成状況の観察

橋脚前方の渦の中の流れのように、流線が何重にも重なって撮影される領域については、印をつけない陰極線を用い、パルスの発生間隔に比べてパルスの時間幅を短かくして撮影すれば、例えば写真2-5のような結果がえられ、渦の形成状況に関するかなり詳しい情報が得られる。とくにこの写真と写真2-3で示される個々の流線の形状とを組み合わせることによって、渦内の3次元的な流速分布がある程度正確に推測できる。

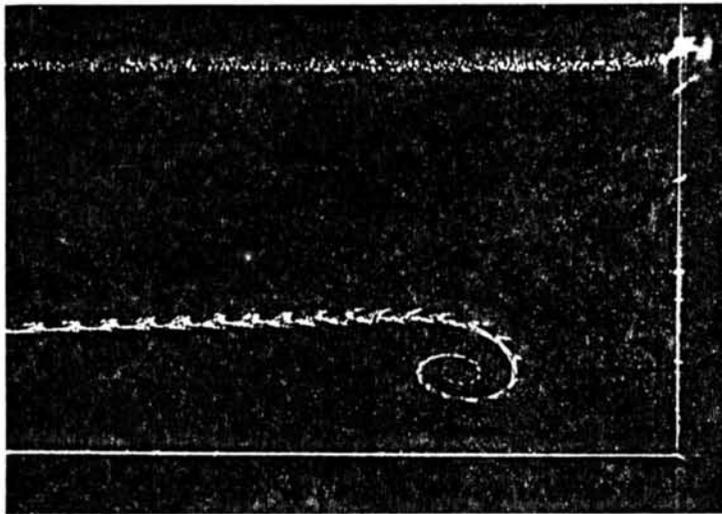


写真 2 - 1 対称面内の流線と流速の観測

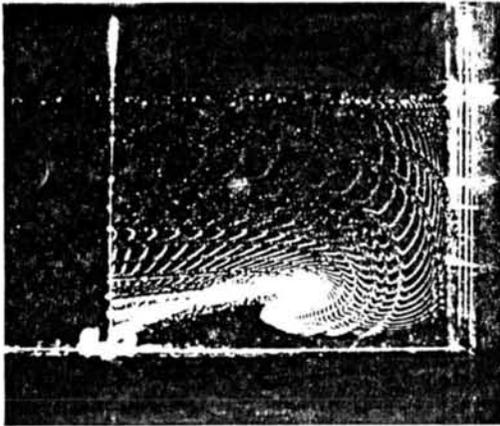


写真 2 - 2 対称面内の全体的な
流況観測

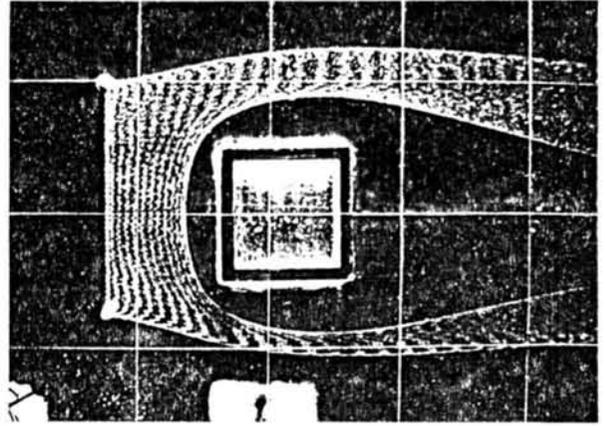


写真 2 - 4 流れがほぼ 2 次元的な場
での流線と流速の同時観測

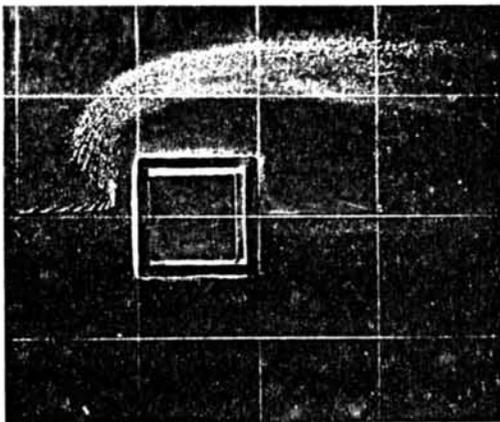


写真 2 - 3 個々の流線の形状と
それに沿う流速の観測

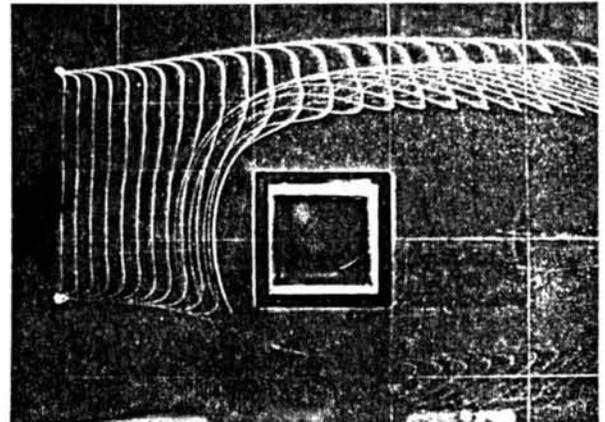


写真 2 - 5 渦の形成状況の観測

2.2.5 カメラと照明器具の設置法

Schraub²⁵⁾あるいはClaytonとMassey²⁶⁾は、トレーサを照明する平行光線がカメラの方向と65°傾いているとき最もよい結果がえられることを経験的に示した。しかし本論では水面における乱反射の影響をさけるためカメラおよび照明の方向は水路床から上向きあるいは水路側方から水平方向とし、両者は互に直交するようにした。

平行光線を得るには市販されているスポットライトを用いる方法もあるが、十分な光量を得るためにはかなり大型のものが必要で、その場合放熱量も多くなるので取扱いにくい。先に示した写真はどれもカメラに連動されたストロボ光をスリットを通して照らすことによって撮影したもので、十分な平行光線にはなっていない。

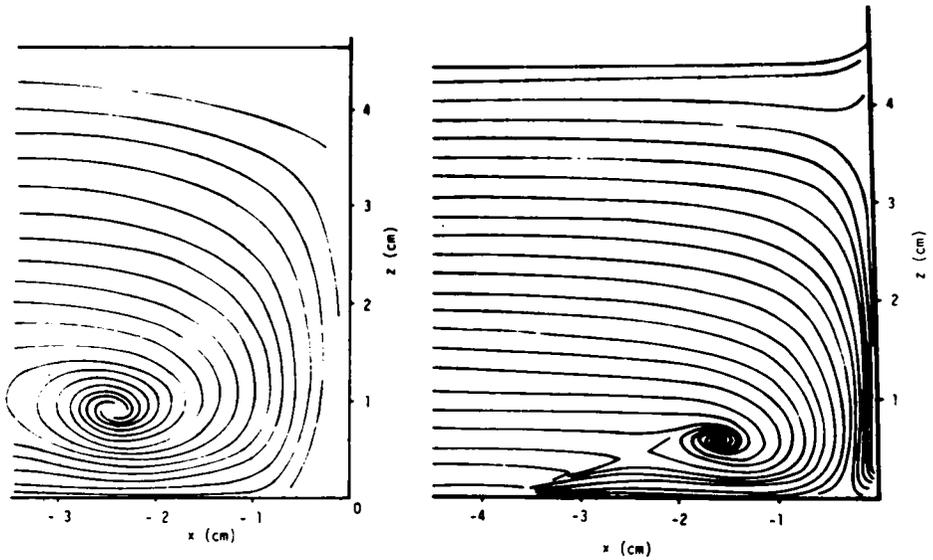
測定結果の検定にはトレーサの位置に物指しを入れて予め同じ条件の下で撮影しておくという方法をとった。

2.3 層流中におかれた角柱の前方の流れに関する実験的研究

2.3.1 実験の目的と概要

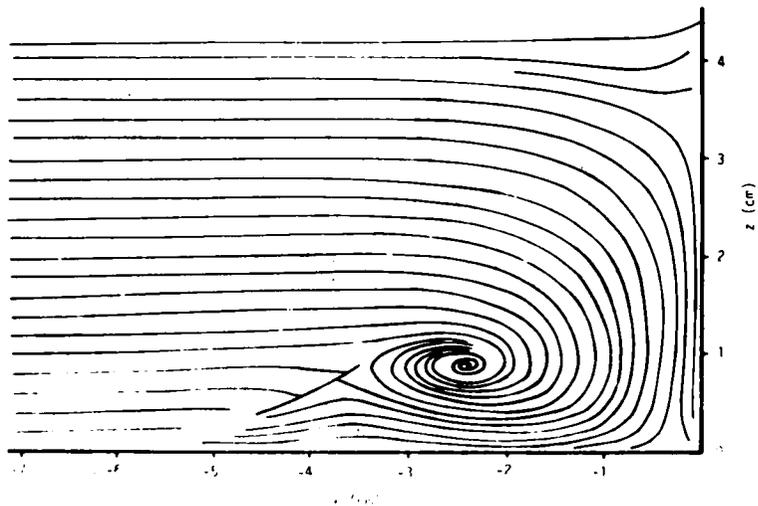
最近建造される橋脚の多くは円柱状の単一橋脚であり、橋脚周辺の流れは乱流である。それにもかかわらず本節では層流状態でしかも角柱橋脚で実験を行なった。層流で実験を行なった理由については既に明らかにしたが、角柱を用いて実験を行なったのは次のような理由に基づく。すなわち、Shenら⁷⁾⁸⁾は鈍頭 (blunt nosed) な構造物において馬蹄型渦が発生し、それが局所洗掘の原因となることを指摘しているが、著者の若干の予備的な実験においても同一水理条件下では円柱橋脚よりも角柱橋脚前方における方が発生する馬蹄型渦の強さも大きさも卓越することが認められた。円柱、角柱いずれの場合についても渦の発生機構に本質的な差異はないと考えられるので、橋脚前方の局所流の機構を検討する場合、馬蹄型渦が顕著に現われる角柱橋脚前方の流れについてまず実験を行ない、馬蹄型渦の機構を明らかにしようとした。なお、2.3での実験条件は表2-3に既に示したとおりである。

2.3.2 対称面内の水理特性



(a) run A-3

(c) run F-5



(b) run A-5

図 2 - 7 角柱前方の対称面内の流線形状

(1) 流線形状と流速分布

2.2で述べたように、対称面内の流況はその観測が比較的容易であり、しかもそれが明らかになれば橋脚前方の流れ全体の機構もある程度推測されると考えられる。そこで2.2.4(1)の方法を用いて対称面内の流線形状と流速分布を観測した。

まず流線形状の実測結果の一部を示したものが図2-7である。この図から、本実験条件では1つの卓越した馬蹄型渦が橋脚前方に現われ、その軸はほぼ定位置に安定していることがわかる。また、渦を構成する流線は渦巻き状に主流から連らなっているという重要な特性を見出すことができる。すなわち、橋脚前方に発生する馬蹄型渦は、隅角部などに発生する2次元的な渦と異なり、渦を構成する流体が主流から供給されており、また連続の条件から考えて、供給された流体は渦軸方向に橋脚の両側をまわるようにして下流へ流下することが推測される。

対称面内の流線の模様をもう少し詳しく見てみよう。図2-7に示した流線図から、対称面内の流線形状は図2-8に示す4種に分類される。すなわち、

B領域に含まれる

流線は、渦による

逆流におされて渦

の外側をまわるよ

うに横方向へ流下

している。A領域

に属する流線は馬

蹄型渦にまきこま

れ、その一部は渦

巻き形状を描きな

がら渦軸にまで達

し、残りの部分は

P点とR点の間の

水路床近傍で逆流

を形成する。この逆流の発生に伴って水路床面に沿って境界層が発達するた

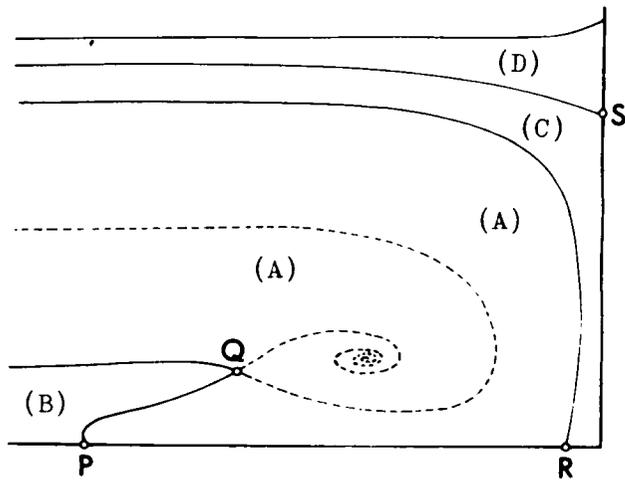


図2-8 対称面内の流線形状からみた領域区分

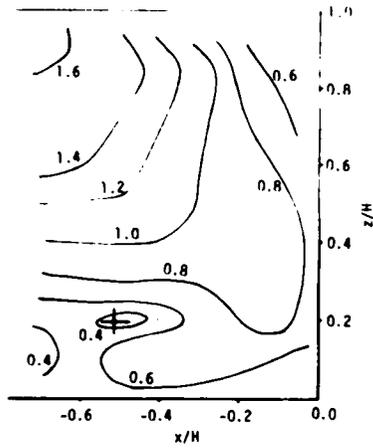
め、P点とR点間の水路床近傍の流れがもつ渦度の符号は馬蹄型渦のそれと逆になり、したがって流線の曲率も互に逆になっている。またA領域とB領域の境界線の高さは渦軸の高さにほぼ等しい。つぎにC領域に属する流線は同じく馬蹄型渦の影響により橋脚の直前面で下降流を形成するが、その下降流に伴なって橋脚の表面に沿って発達する境界層によって、R点近傍の隅角部では馬蹄型渦とは逆の曲率をもつ流線が現われている。最後に、D領域の流線は馬蹄型渦とはあまり関係ないようであり、むしろ橋脚直前面でわずかながら上昇流を形成していることが認められる。

また、各領域を区分する流線が橋脚表面あるいは水路床面に達する点において Lightbill²⁷⁾ が指摘するように特異点が発生していると考えられる。すなわち、P点では鞍形点、R点およびS点では結節点が生じていると考えられる。Q点およびその近傍の流体力学的特性についてはさらに検討が必要である。

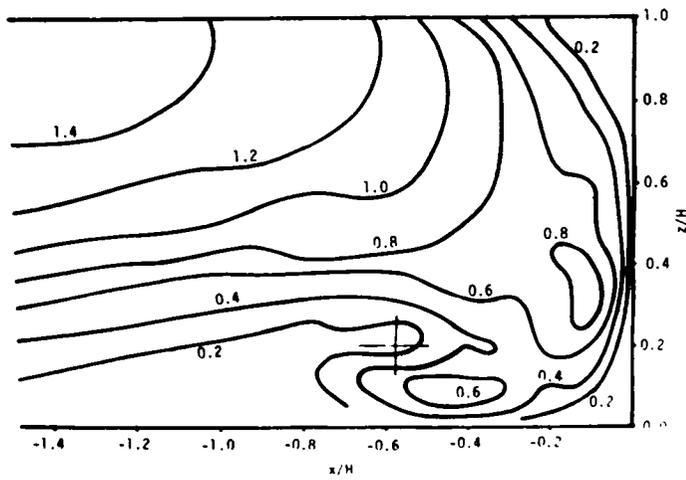
Allen²⁸⁾ は、第1章で述べたように、乱流せん断流中の橋脚前方の馬蹄型渦を、閉領域内の回転運動と見なすモデルを設定しているが、少なくとも本実験結果から見てこのようなモデルは適当でないといえよう。

つぎに、対称面内での流速の絶対値 q を接近流の平均流速 U_{0m} で除して無次元化した等流速線図が図2-9であり、この絶対流速を x 方向成分 U_x と z 方向成分 U_z に分けて、それぞれを同じく U_{0m} で除して無次元化したものの等流速線図を示したものが図2-10(a)および(b)である。これらの図から、橋脚の直前面の下降流は $U_z/U_{0m} = -0.8$ という大きな値に達すること、また水路床近傍の逆流の大きさも $U_x/U_{0m} = -0.6 \sim -0.4$ という値に達することが認められる。また、渦軸は定位置に安定しているので、そこでは流速が0であるが、その周辺で渦軸からの距離の増加とともに流速が増加する領域が存在することが認められる。乱流の場合もこれと同様の領域が存在し、そこでは接線方向流速は渦軸からの距離に比例することが Shenらによって指摘されており、彼等はその部分を核 (core) と呼んでいる。このことは乱流の場合と層流の場合との類似性を示すものとして注目される。

つぎに、対称面内の渦軸の位置の座標 (R_0, z_0) を水深 H で割って無次元化したものと、角柱橋脚の一辺を同じく H で割った無次元量との関係を図示すると図2-11のようになる。この図で F-1 ~ F-5 は同一水深、同一接近流速



(a) run A-3

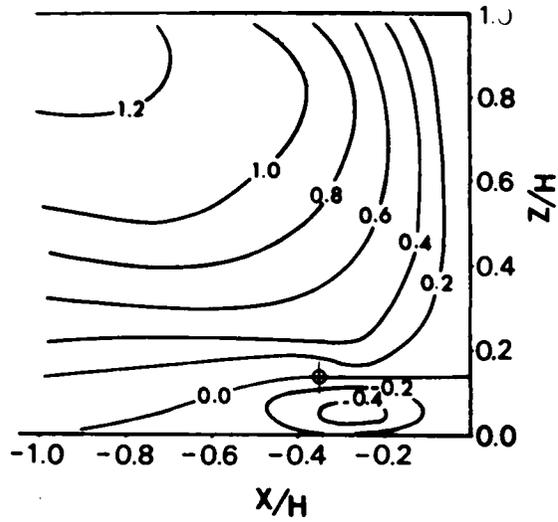


(b) run A-5

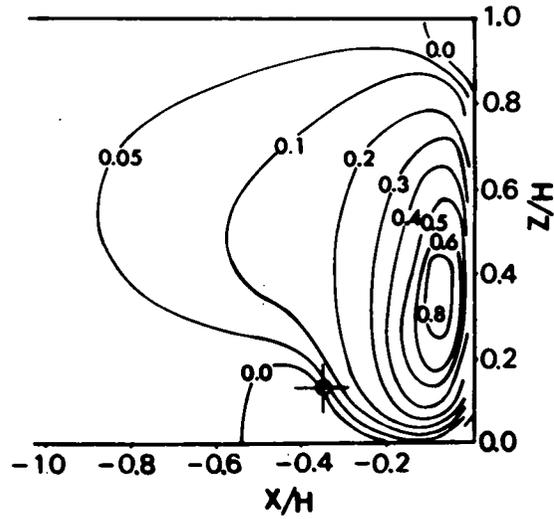
図 2-9 対称面内の無次元化された絶対流速の分布

で、角柱橋脚の辺の大きさだけを変化させたものであるが、これらはほぼ同一直線上にならんでいることが認められる。以上の事実から、

$$R_0/H = \alpha_2 (2a_0/H)^{m_2} \quad (2-11)$$



(a) Distribution of U_x (run F-2)



(b) Distribution of $-U_z$ (run F-2)

図2-10 対称面内の無次元化された x, z 方向流速成分の分布(run F-2)

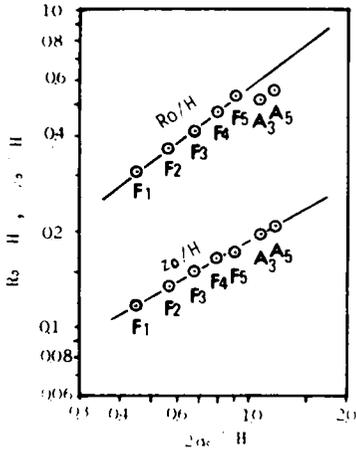


図 2-11 対称面内の渦軸の位置
(層流, 角柱の場合)

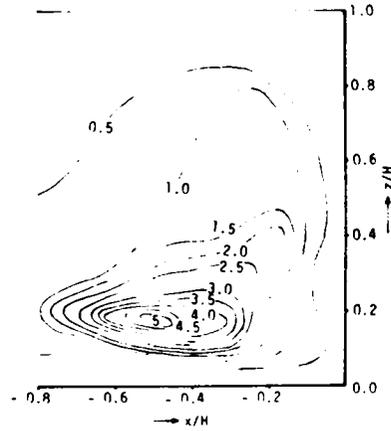


図 2-12 対称面内の渦度の分布
(run A-3)

$$z_0/H = \alpha_3 (2\alpha_0/H)^{m_3} \quad (2-12)$$

と置ける。さらに、 $\alpha_2, \alpha_3, m_2, m_3$ は水深と接近流速分布の関数と考えられるから、

$$\alpha_2, \alpha_3, m_2, m_3 = f_n(R_s) \quad (2-13)$$

と置いてよいであろう。ここで R_s はレイノルズ数であり、そこに含まれる流速および長さの次元をもつ量として何をとるべきかはさらに検討を要するが、ちなみに F-1 ~ F-6 の場合について各係数を求めると、 $\alpha_2 = 0.570$, $\alpha_3 = 0.187$, $m_2 = 0.79$ および $m_3 = 0.59$ となる。

(2) 渦度分布

run A-3 の実験について、対称面内における y 方向の渦度成分 η を計算したものが図 2-12 である。計算にあたって図 2-7 (a) および図 2-9 (a) をを用い、流線の曲率半径を R として $\eta = q/R + \partial q/\partial R$ の関係を用いたので、

計算精度はあまり良好とはいえない。しかしながら、渦軸に近づくにつれて渦度が急激に大きくなっていることが明らかに認められる。このことと前述した流線形状の特徴とをあわせ考えると、馬蹄型渦の発生は主流に含まれている渦度が橋脚によって集中させられるためであるという Shenら⁷⁾⁸⁾の指摘が正しい事が認められる。

つぎに、対称面内において、橋脚の影響を受けない上流部で単位面積をしめる流体部分が、流下するにつれて変形して対称面内で占める面積が α となり、そこでの渦度の成分を η とすると、 $\alpha \cdot \eta$ の分布を図2-7(a)、図2-9(a)および図2-12から計算したものが図2-13である。この図において、左側の縦軸は接近流の渦度分布すなわち $\alpha \cdot \eta$ を示している。この図と図2-7(a)の流線図とを比較してみると、渦軸、水路床面および橋脚前面のごく近傍の部分を除いて、流線に沿って $\alpha \cdot \eta$ の値がほぼ一定となっており、このことは非粘性流体に関する Helmholtz の渦度保存則が近似的に成立していることを示している。この事実は、主流中の渦度の集中により馬蹄型渦が発生するという前述の事実とともに馬蹄型渦の重要な特性である。

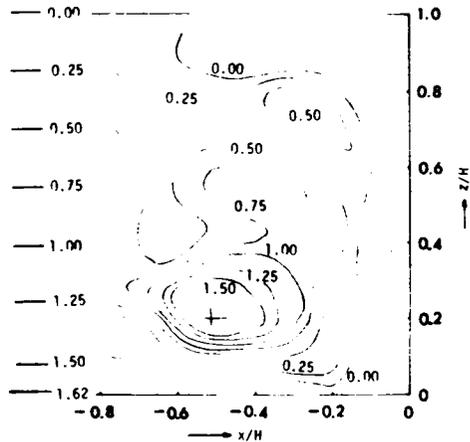


図2-13 対称面内の $\alpha \cdot \eta$ の分布 (run A-3)

(3) 2次元発散の分布

対称面内の2次元発散の値($\partial U_x / \partial x + \partial U_z / \partial z$)をrun A-5で実測された流速分布から計算し図2-14に示す。2次元発散の計算には、流線に沿って設定した曲線座標系における式

$$\frac{1}{h_1 h_2} \cdot \frac{\partial}{\partial s} (h_2 q) \quad (2-14)$$

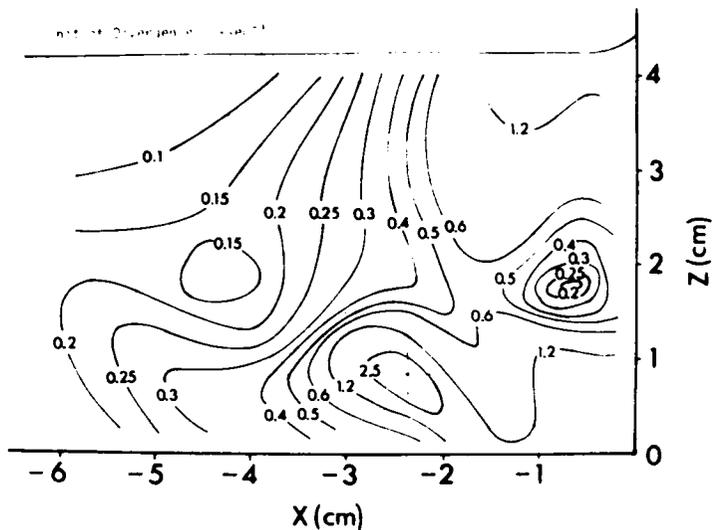


図 2 - 14 対称面内の 2 次元発散の分布 (run A - 5)

を用いた。ここで s は流線に沿う座標軸で、 h_1 、 h_2 は流線方向 およびそれと直角方向の長さ要素、 q は絶対流速である。この図から、十字線の交点で示される渦軸の位置に近づくにつれて発散の値が急激に大きくなっていることが認められる。この図で -2.5 1/sec の等強度線より内側の領域の発散の値は事実上計算が無理だったので記入してないが、その領域内の発散の平均値を約 -4 1/sec とするならば、渦軸を中心とする約 1 cm^2 の領域における発散の積分値は $-2.6 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となる。発散の値はこの場合単位面積内への流入流量を意味するから、対称面に上流から供給される流量 $12.88 \text{ cm}^2/\text{sec}$ の約 20% が渦軸周辺のわずか 1 cm^2 の面積から流失していることがわかる。

2.3.3 角柱前方の流れの 3 次元特性

(1) 馬蹄型渦の 3 次元形態

以上において流れの対称面内における流線と流速分布の実測からえられた馬蹄型渦の諸性質を明らかにして来たが、つぎに馬蹄型渦の 3 次元形態につ

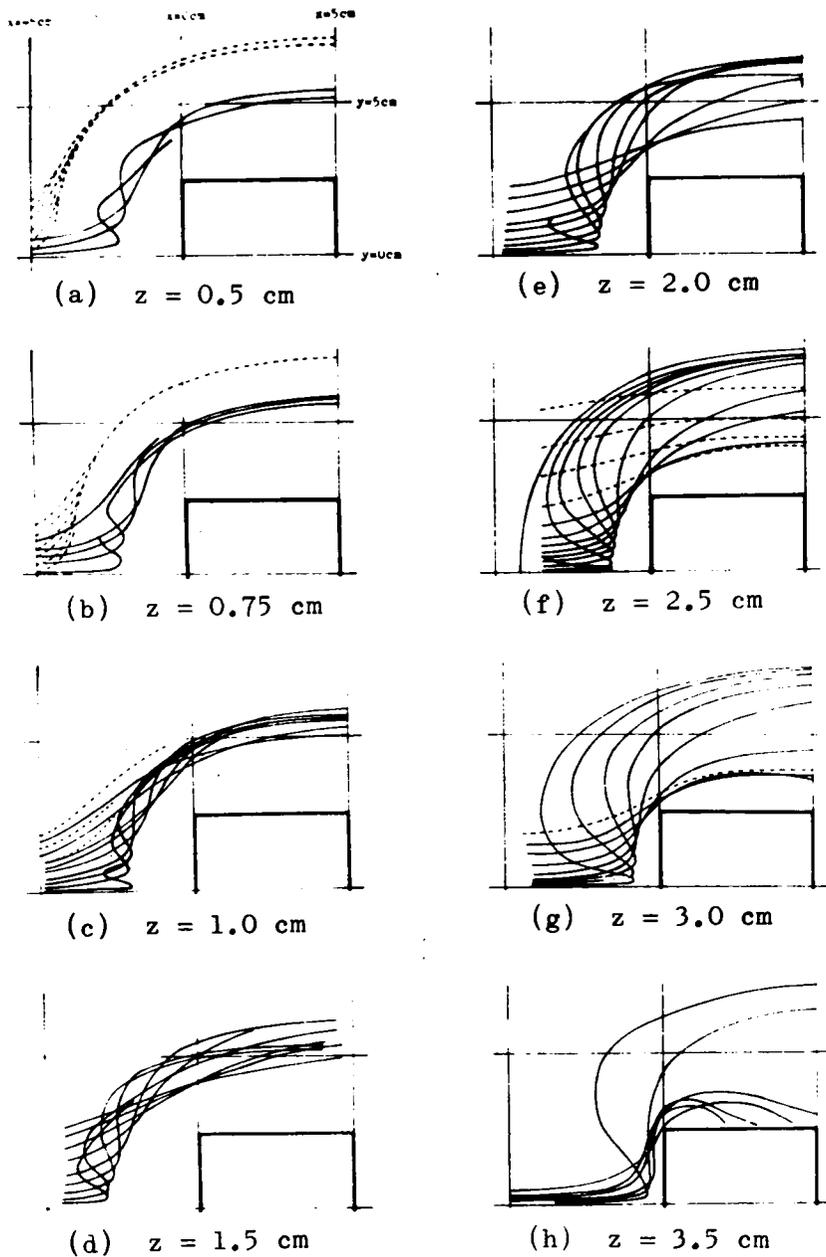


図2-15 $x = -5 \text{ cm}$ の横断面内の各高さを通過する流線の形状 (run A-3)

いて検討してみよう。

図2-15は、 $x = -5\text{ cm}$ の横断面内の各位置を通過する流線が描く形状を水路の底から写真撮影し、その結果を示したもので、馬蹄型渦にまきこまれる流線は実線で、まきこまれない流線は破線で示されている。流線が馬蹄型渦にまきこまれているかどうかの判定は、 $x = 5.0\text{ cm}$ 断面で最も橋脚に近づいている流線を基準としてここでは考えることにした。この図から、図2-7(a)に対称面内の断面が示されている馬蹄型渦は角柱橋脚の前方から側方にかけてそれを取り囲む形で発生しており、観測された範囲内($-5\text{ cm} \leq x \leq 5\text{ cm}$)では、対称面内における渦の大きさがほぼそのまま維持されていることが認められる。また、上流側で $z \leq 0.5\text{ cm}$ の流線は渦には全くまきこまれないが、それより上で対称面近くにある流線は渦にまきこまれ、らせん形状を描いて下流に達しており、しかも上流側で高い位置にある流線ほど大きな径のらせんを描いている。すなわち、図2-16は上流側での各高さ z の流線が描くらせん形の大きさと位置を示したものであるが、上に述べた事実を示している。

つぎに図2-15からも明らかなように、上流側で各高さにある流線のうち、対称面近くの流線だけが渦にまきこまれている。図2-17に示す点線で囲まれている範囲は、 $x = -5\text{ cm}$ の

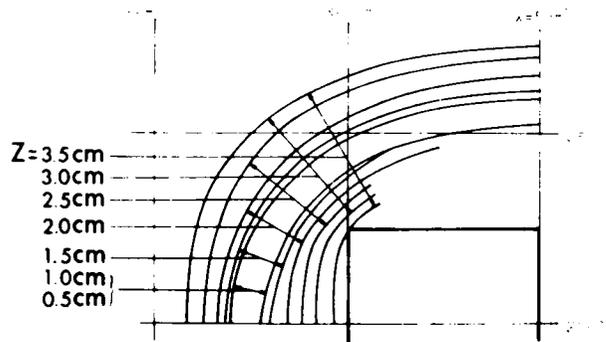


図2-16 流線の描くらせん形の位置と大きさ(run A-3)

横断面内の領域で、ここを通過する流線は馬蹄型渦にまきこまれることを示している。

(2) 逆流域の3次元形状

対称面内の流線の形状を示す図2-7から明らかなように、馬蹄型渦の発生

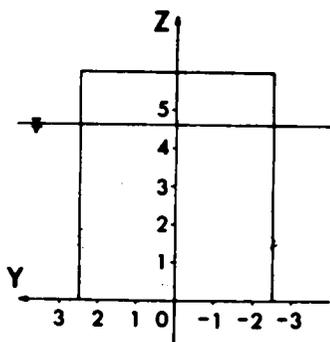


図2-17 渦にまきこまれる流線が
 $x = -5\text{cm}$ 断面を通過する範囲

にともなって橋脚直前面の水路床付近に逆流が発生する。対称面の外ではこのような流れを「橋脚から遠ざかる流れ」と表現すべきものであろうが、ひとまずこのような流れの生じている場を逆流域と名づけることにする。この逆流域のために、橋脚の十分上流側で水路床近傍の流れは横方向に排除されて橋脚表面には達しないで、たとえば図2-15(a) および(b)に破線で示されるような流線形状を描く。run F-1 ~ F-5の実験についてこのような流線の内側包絡線を求めると図2-18が

得られるが、これは逆流域の大きさを示しているものと考えられる。すなわち、逆流域の水平断面は角柱橋脚の軸を中心とする円形にほぼ近いことがわかる。また図2-19は逆流域の対称面内の断面を示したもので、横軸は橋脚前面から

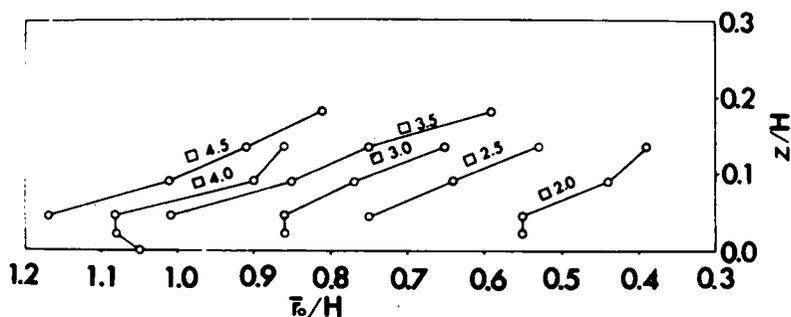
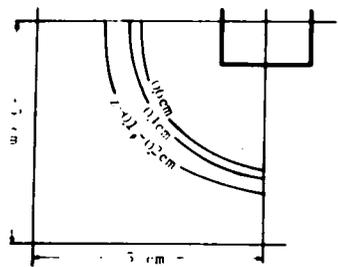
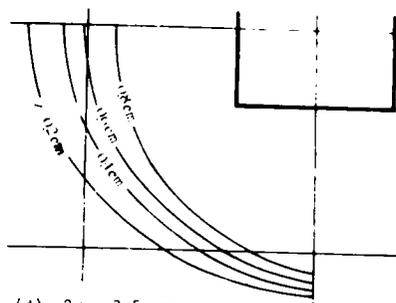


図2-19 逆流域の対称面内の断面(run F-1 ~ F-6)

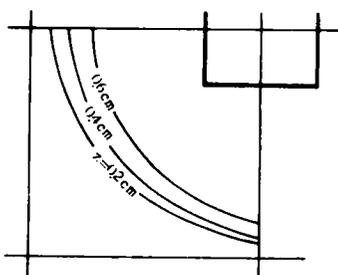
逆流域の境界までの距離 r_0 を水深で割って無次元化したもので、縦軸は水路床からの高さを同じく水深で割って無次元化したものであり、実測値(白丸印)



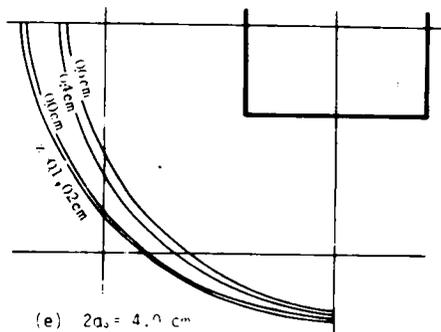
(a) $2a_0 = 2.0 \text{ cm}$



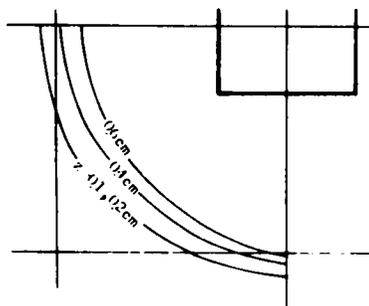
(d) $2a_0 = 3.5 \text{ cm}$



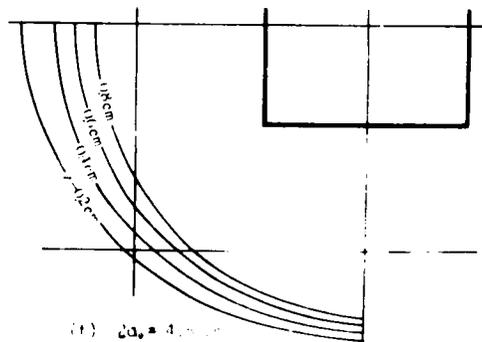
(b) $2a_0 = 2.5 \text{ cm}$



(e) $2a_0 = 4.0 \text{ cm}$



(c) $2a_0 = 3.0 \text{ cm}$



(f) $2a_0 = 4.5 \text{ cm}$

図 2-18 水路床近傍に生じる逆流域の大きさ (run F-1 ~ F-6)

に付した数字は角柱の辺長 (cm) を示す。この図から、同じ水深で同じ接近流速の流れの中にあっても、逆流域の形状は相似にはならず、境界面の勾配は角柱橋脚の一辺が大きなものほど小さくなっていることがわかる。

2.4 層流中におかれた円柱前方の流れに関する実験的研究

2.4.1 実験の目的と概要

前節の角柱橋脚前方の流れに関する実験の結果、橋脚前方の馬蹄型渦の機構についてかなり明らかになった。これらの結果を乱流中に設置された円柱橋脚周辺の流れに適用する前に、層流中に設置された円柱橋脚周辺の流れについて同様の実験を行ない、渦の機構について得られた結果をより一層普遍的なものにしておく必要がある。

以上の観点から、2.4 では 2.3 と同じ実験水路を用い、同様の実験方法で、ただ角柱を円柱におきかえて実験を行なった。また実験結果も同様の方法で整理し、角柱橋脚と円柱橋脚とでその前方の流れがどのように類似しているかあるいは相異しているかを明らかにしようとした。実験は表 2-4 に示す 16 の条件の下で行なった。接近流速分布は図 2-20 に示す 4 種を用いた。

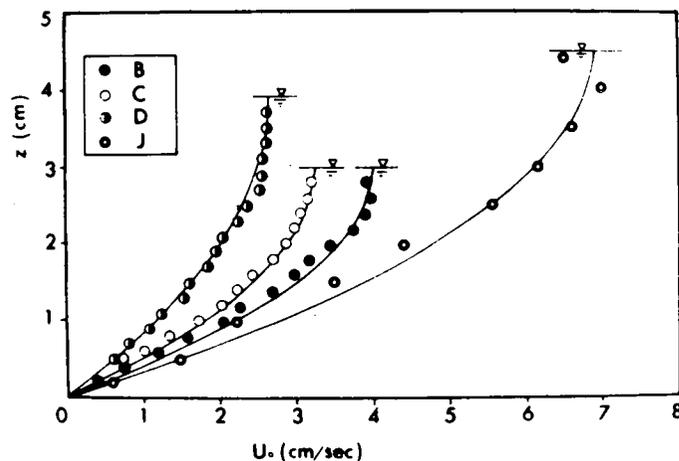


図 2-20 接近流速分布 (層流・円柱の場合)

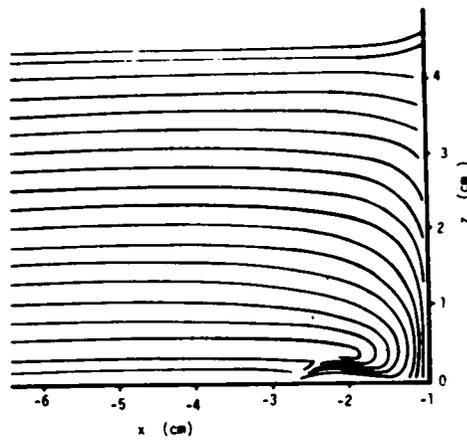
run	接近 流速	水深 H (cm)	最大流速 U_{0s} (cm/sec)	ν (cm^2/sec)	円柱の直径 $2r_0$ (cm)	$\frac{HU_{0s}}{\nu}$	$\frac{2r_0U_{0s}}{\nu}$
B-1					1.80		3.26
B-2					2.20		3.98
B-3	B	3.00	4.00	2.21	3.525	5.44	6.38
B-4					4.025		7.29
B-5					5.000		9.05
C-1					1.80		2.16
C-2					2.20		3.25
C-3	C	3.00	3.25	2.71	3.525	3.59	4.23
C-4					4.025		4.83
C-5					5.000		6.00
D-1					1.80		0.84
D-2					2.20		1.03
D-3	D	3.92	2.66	5.67	3.525	1.84	1.66
D-4					4.025		1.89
D-5					5.000		2.35
J	J	4.50	6.90	2.88	2.000	10.78	4.79

表 2-4 実験条件 (層流・円柱の場合)

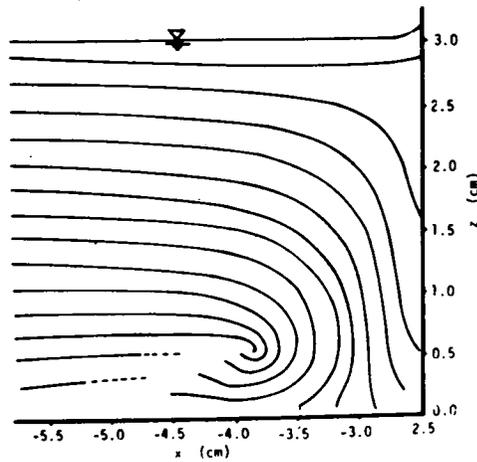
2.4.2 対称面内の水理特性

(1) 流線形状

2.3.2 (1) と同様の方法で求められた円柱橋脚前方の対線面内での流線の模様を図 2-21 に示す。この図から、円柱橋脚の場合も角柱橋脚の場合と同様に 1 つの卓越した馬蹄型渦が橋脚前面に現われ、しかもその渦を構成する流線は主流から連なっていることが認められる。すなわち、対称面内の主流の流線の大部分は橋脚の直前面で下降流を形成し、さらにその一部は水路床付近で逆流を形成していることが認められる。ただしこの場合、図 2-7 に示されてい



(a) run J



(b) run B-5

図 2-21 対称面内の流線形状

る角柱橋脚前方の流れと異なり、渦軸のごく近くを除いて流線はまき上っておらず、逆流を形成するだけで終わっていることが認められる。

(2) 流速分布

図 2-22 は対称面内の絶対流速の分布を示したものである。前節の図 2-9 は、1 辺 2.5 cm の角柱橋脚前方の対称面内の流速分布を示したものであり、橋脚の大きさの面ではほぼ本図の円柱橋脚の直径に匹敵するが、両図を比較してみると、下降流の大きさにしろ、逆流の大きさにしろ円柱橋脚の場合の方がかなり小さくなっていることがわかる。

(3) 渦軸の位置

対称面内の渦軸の位置の座標 $(R_0 - r_0, z_0)$ を水深 H で割って無次元化したも

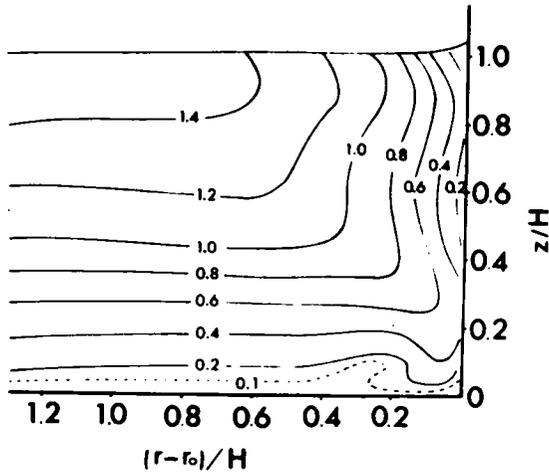


図 2-22 対称面内の無次元化された絶対流速の分布 (run J)

$$(R_0 - r_0)/H = \alpha'_2 (r_0/H)^{m'_2} \quad (2-15)$$

$$z_0/H = \alpha'_3 (r_0/H)^{m'_3} \quad (2-16)$$

$$\alpha'_2, \alpha'_3, m'_2, m'_3 = fn(R_*) \quad (2-17)$$

と置いてよいであろう。ちなみに、run B-1~B-5, run C-1~C-5 および run D-1~D-5 の α'_2 , α'_3 , m'_2 および m'_3 をそれぞれ求め、まきつ速度と水深を用いたレイノルズ数と関係づけると図 2-24 がえられる。本実験範囲内では、 m'_2 の値の変動は若干大きいですが、ほぼ一定値を示すとみなせるようで、それぞれ、 $\alpha'_2 = 0.58$, $\alpha'_3 = 0.19$, $m'_2 = 0.60$, および $m'_3 = 0.80$ の値となっている。

(4) 渦度分布

図 2-21 に示されている流線図と、図 2-22 に示されている絶対流速の分布図とから、前節と同様にして対称面内の渦度分布を求めたものが図 2-25 である。この図から、円柱橋脚の場合も角柱橋脚の場合と同様に渦軸の位置に向か

のを、円柱橋脚の半径を水深で割って無次元化したものとそれぞれ関係づけると図 2-23 がえられた。この図においても、角柱橋脚の橋合と同様に、同一の水深と接近流速という条件の下では $(R_0 - r_0)/H$ と r_0/H の関係は両対数紙上で直線的に変化していることが認められる。したがって円柱橋脚の場合においても、

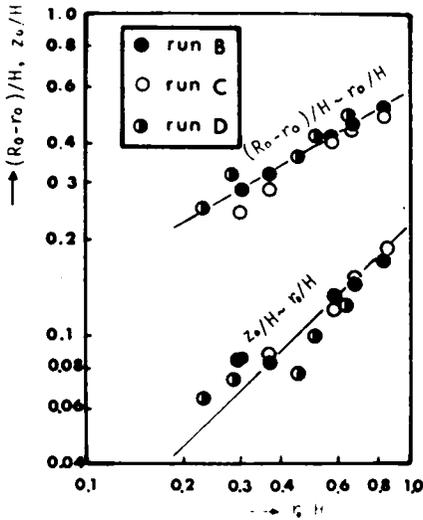


図2-23 対称面内の渦軸の位置

べるために run D-4 の実験条件でまず $x = -7.5 \text{ cm}$ 断面内の各点を通る流線の形状を実測した。その結果のうち、 $x = -7.5 \text{ cm}$ で $z = 0^*, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 \text{ cm}$ の各高さを通る流線の形状を図2-26に示した。本図において、いずれの高さの流線も円柱橋脚表面まで達してないことが認められる。実験中の観察によれば、これらのうち、 $z = 0^*, 0.5 \text{ cm}$ の高さを通る流線

って渦度が集中している様子が認められる。接近流速が放物型分布をしているとしてそれがもつ最大の渦度（水路床面での渦度）は $2U_{0z}/H$ で与えられるが、本実験条件ではこの値は $3.06 (1/\text{sec})$ となる。一方集中した渦度の最大値は図示のように約 $6.0 (1/\text{sec})$ であり、これは接近流のもつ最大渦度のほぼ2倍に相当することがわかる。

2.4.3 円柱前方の流れの3次元特性

(1) 馬蹄型渦の

3次元的な形態

馬蹄型渦の3次元的な形態を調

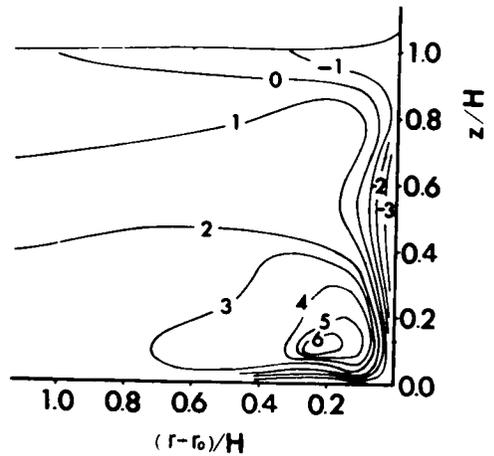


図2-25 対称面内の渦度分布 (run J, $\phi 2.0 \text{ cm}$)

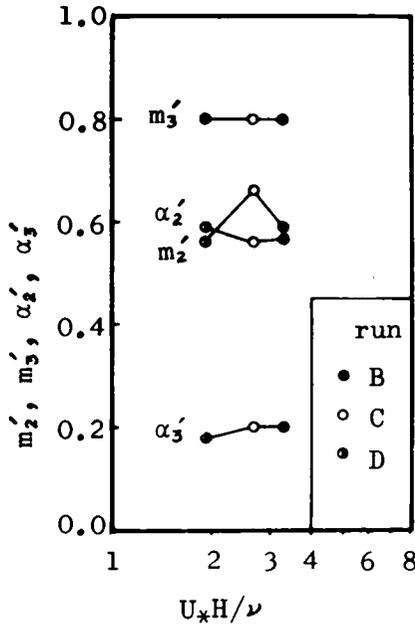


図 2-24 $\alpha'_2, \alpha'_3, m'_2, m'_3$ とレイノルズ数との関係

線のうち $x=0$ 断面で最も橋脚に近づくものを境とし、 $x=0$ 断面でそれより対称面に近い領域にある流線を渦にまきこまれるものとして判定した。この図によると、求められた範囲は $z=0.5 \sim 0.7$ cm あたりを境に上下に分かれていることが認められるが、このうち上の領域を通過する流線が馬蹄型渦にまきこまれ、下の領域を通過するものは先に述べた馬蹄型渦の外側の水路床近くに発生するもう 1 つの馬蹄型渦に導入されていると考えられる。ただしこの馬蹄型渦は橋脚直前面の馬蹄型渦に比べて大きさの面でも強さの面でも小さいので、以

については馬蹄型渦の発生に伴ない水路床近傍に生成される逆流のため側方へおしやられている。また、 $z \geq 1.0$ cm の流線は馬蹄型渦にまきこまれるように橋脚の直前面で下降流を形成している。また $z=0$ cm^{*} および $z=0.5$ cm の高さを通過する流線の平面図は 2 つの曲線に収斂していることが認められるが、これは馬蹄型渦の外側にもう 1 つ渦が存在することを意味するものと考えられる。

前節と同様に、この図から渦にまきこまれる流線が $x=-7.5$ cm の横断面を通過する範囲を求めると図 2-27 のようになる。渦にまきこまれる流線とまきこまれない流線の区別は、 $x=-7.5$ cm 断面で同じ高さを通過する流

*) 水素気泡法の白金線電極を水路床面に密着させた場合を $z=0$ cm と表現することにする。以下もこれにならう。

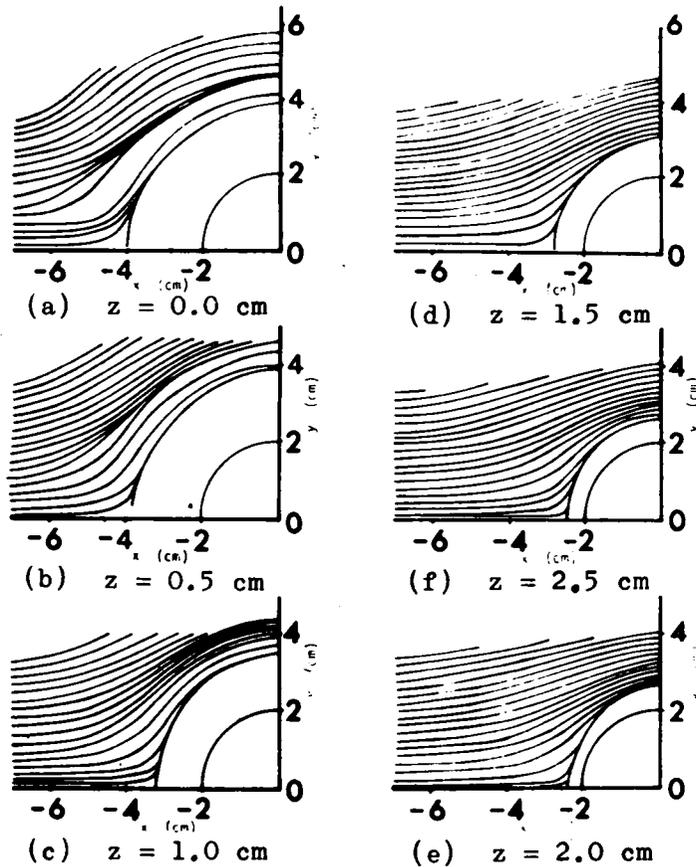


図2-26 $x = -7.5\text{ cm}$ 断面の各高さを通過する流線の形状 (run D-4)

下では層流状態での実験に関する限り単に馬蹄型渦という場合は橋脚直前面のそれを指すことにする。

(2) 逆流域の3次元的な形状

図2-23(a)で示されるように水路床近傍の流線が橋脚近傍で排除される $r = 2\text{ cm}$ から $r = 4\text{ cm}$ までの部分は、馬蹄型渦にともなう逆流域を意味するが、円柱橋脚の中心軸から逆流域の外側境界線までの距離を水路床面に沿って対称面

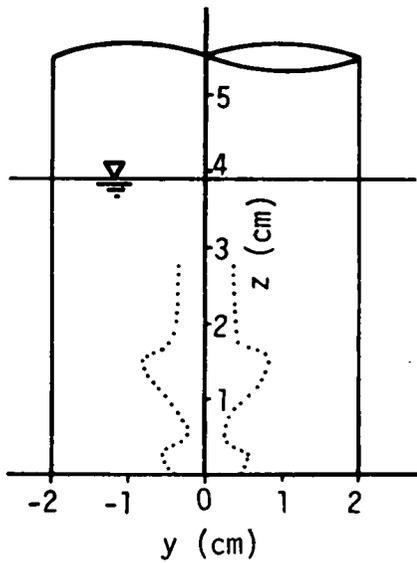


図 2-27 渦にまきこまれる流線が $x = -7.5 \text{ cm}$ 断面を通過する範囲 (run D-4)

内で測った値を \bar{r}_0 とし、 $(\bar{r}_0 - r_0)/H$ と r_0/H との関係を図示すると図 2-28 のようになる。この図から、それぞれ接近流速によって若干傾向を異にしているが、ほぼ $\bar{r}_0 = 2r_0$ といった関係がえられる。

図 2-29 は、やはり水路床面のごく近くの逆流域の形状を調べるために、逆流域の大きさを円柱の中心軸から y 軸に沿って測った値 \bar{r}_2 と \bar{r}_0 との比が円柱の直径と平均流速を用いたレイノ

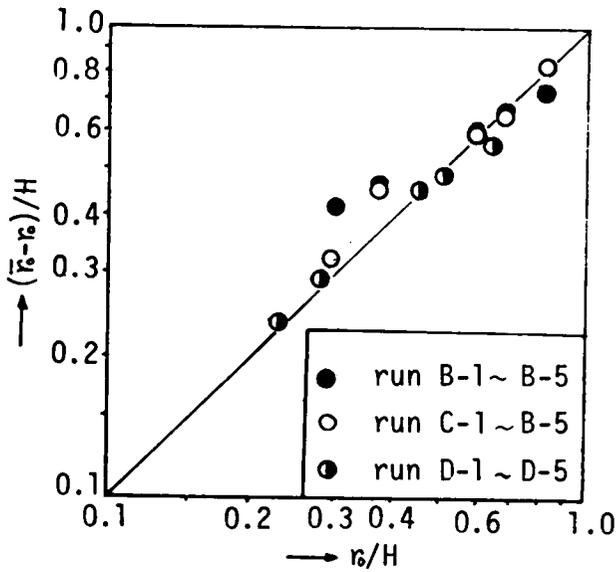


図 2-28 底面近傍の逆流域の大きさ

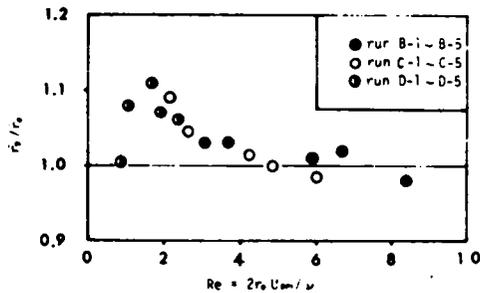


図2-29 底面近傍の逆流域の形状の検討

の形状を知るために、高さ z における円柱軸から逆流域の境界までの距離を \bar{r}_2 とし、 \bar{r}_2/H と z/H との関係を図2-30に示した。本図から、逆流域の対称面内での断面は楔型で、その大きさは円柱の半径が増大するにつれて大きくなっていることがわかる。そこで、近似的に \bar{r}_2 が z とともに線型的に変化すると仮定して、

$$\bar{r}_2/H = \beta z/H + r \quad (2-18)$$

とおき、 β と r の値を r_0/H の関数として求めたものが図3-31である。本図から、 β も r もともに r_0/H の増加とともにほぼ直線的に増加していることが認められる。

2.5 層流中におかれた円柱前方の流れに関する解析的研究

2.5.1 解析モデルの構成

2.3 および 2.4 で述べた所から、馬蹄型渦は主流中に存在していた渦度が橋脚のために集中させられた結果発生すること、ならびに渦軸のごく近傍や境界面近傍の粘性の影響が大きい所を除けば、渦度の集中の機構は非粘性流に関する Helmholtz の渦度保存則にはほぼ支配されることが実験的に認められた。

さて、1.2.2 および 2.1.2 で述べたように、渦度の存在する流れの場の解析は Rosenhead²⁹⁾、Goldstein³⁰⁾ あるいは Yih¹⁸⁾ などによってすでになされているが、これらはいずれも2次元場の解析にとどまっている。一方3次元的な流れの場

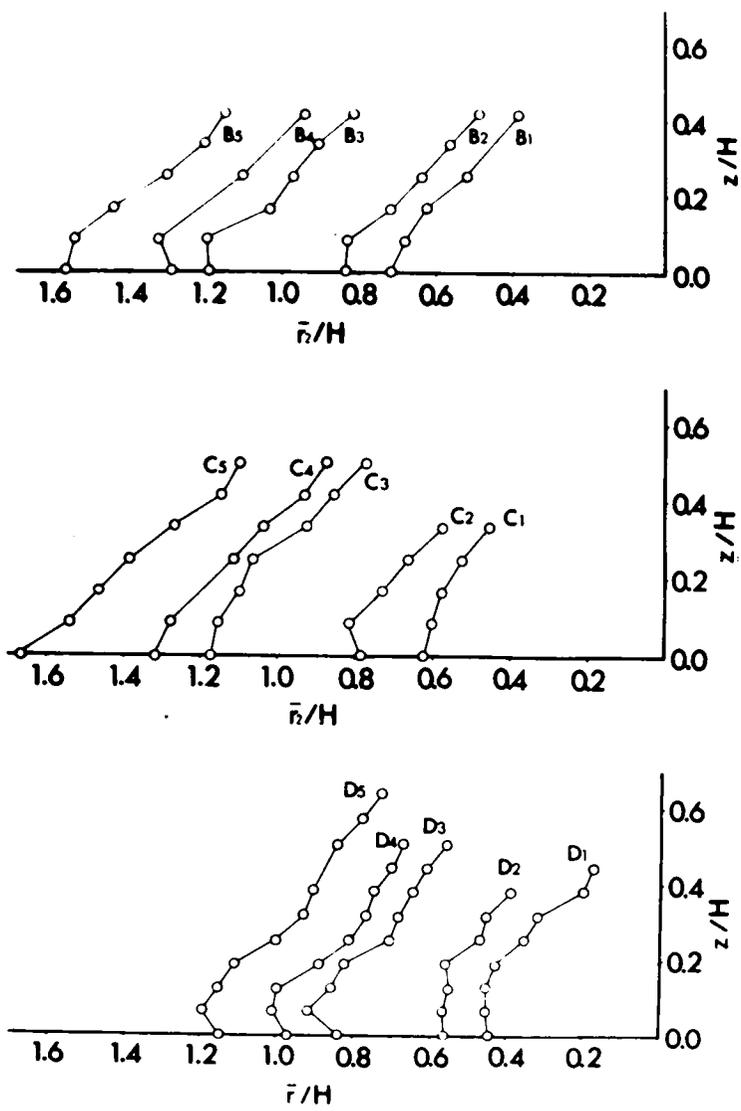


図 2-30 対称面内における逆流域の形状

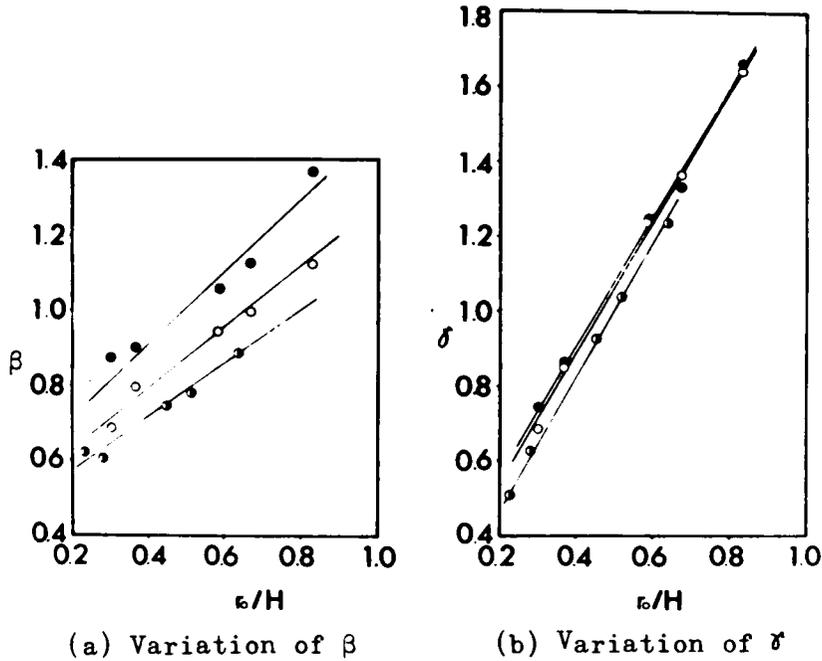


図 2-31 $\bar{v}_z/H = \beta z/H + \gamma$ とおいたときの β と γ の変化

に渦度が分布する場合に関する Lamb¹⁶⁾ の解は、無限に広がる流れの場を前提としているため、物体周辺の流れのように複雑な境界条件をもつ流れの場の解析には困難のようである。また Squire と Winter¹⁹⁾ および Hawthorne²⁰⁾ らによって発展させられた 2 次流の概念と渦度保存則に基づく解析法は、2 次流は主流に比べて十分小さいという前提に立っているため、図 2-22 で示されるように馬蹄型渦の周辺で主流にほぼ匹敵する逆流が生じている橋脚周辺の流れの解析にそのまま適用するには一定の限界がある。

そこで本節では、前節までに述べた橋脚周辺の層流に関する実験的観測を基礎にして、馬蹄型渦の存在とそれに伴う下降流と逆流をも考慮に入れた解析モデルを設定し、それによる流れの解析を行なった。モデルの設定に際して、流れの場は主流と 2 次流とから成るとした。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。これらの仮定はHowthorne²⁰⁾の方法を踏襲したものである。一方、円柱橋脚周辺での2次流は主流と匹敵しうるぐらい大きいので、Howthorneの微小偏差の仮定は満足されず、ここでは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考えた。

(1) 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、これらは2次元非回転流理論によってつぎのように与えられる。

$$u_r = U_0 \{ 1 - (r_0/r)^2 \} \cos \theta \quad (2-19)$$

$$u_\theta = -U_0 \{ 1 + (r_0/r)^2 \} \sin \theta \quad (2-20)$$

$$u_z = 0 \quad (2-21)$$

ここで、 U_0 は接近流の流速分布を表わすが、図2-5あるいは図2-20から判断して、層流の場合には水路側壁面がある場合も近似的に放物型分布式に従うとしてよさそうなので、 U_0 は次式で与えられるとした。

$$U_0/U_{0s} = (z/H)(2 - z/H) \quad (2-22)$$

$$U_{0s} = gH^2 i / 2\nu \quad (2-23)$$

ここで、 U_{0s} は接近流の水面における流速であり、 i は水路床の勾配、 ν は動粘性係数である。

(2) 2次流の流速成分

まずはじめに馬蹄型渦の渦軸近傍の渦度の分布を検討する。角柱の場合、対称面内の渦度の実測値(図2-12)から主流のもっている渦度をさしひいて求めた2次流を与える渦度分布が図2-32である。このように2次流を与える渦度は渦軸の周辺に集中的に分布していることがわかる。したがって、2次流の大きさを正確に求めるにはこのような渦度の分布を前提とすべきであるが、ここでは便宜的に2次流を与える渦度の分布を次のように単純化して考える。すなわち、図2-33(a)に示すように円柱前方に渦軸からの距離が一定値 a 以内の一つの領域を設定し、それが2次流を与える渦度が存在する領域であるとし、それ以外の領域では2次流の渦度は0であるとする。またこの領域の $\theta = \theta$ 断

面 (図2-33 (b)) 内では2次流の渦度 ω_z は一様に分布するが、 ω_z の値は θ とともに変化するものとする。また渦軸の位置は円柱の前方($90^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$)では式(2-15)~(2-17)によって与えられるものとする。

以上の設定の下で各 $\theta = \theta$ 断面内で2次流を求めようとするわけであるが、上述のように単純化された渦度分布の下でも円柱表面および水面における境界条件を満足する解を求めることは困難なので、ここでは無限に広が

った空間内におかれた渦輪およびその近傍の流れについてLamb⁽¹⁶⁾が与えた次式を近似的に利用することにした。すなわち、軸対称流の場合に定義される流れ関数を ψ_1 とするとき、渦領域の内部において

$$\psi_1 = -(\kappa/2\pi) R_0 \cdot \left\{ \log(8R_0/a) - 3/2 - (r_1/a)^2/2 \right\} \quad (2-24)$$

渦領域の外部において、

$$\psi_1 = -(\kappa/2\pi) R_0 \left\{ \log(8R_0/r_1) - 2 \right\} \quad (2-25)$$

である。ここで κ は渦領域周辺の循環の強さで θ の正方向をむく渦度ベクトルに対して κ は正となるようにしており、その値は $\pi a^2 \omega_0$ に等しい。 r_1 は ψ_1 を求

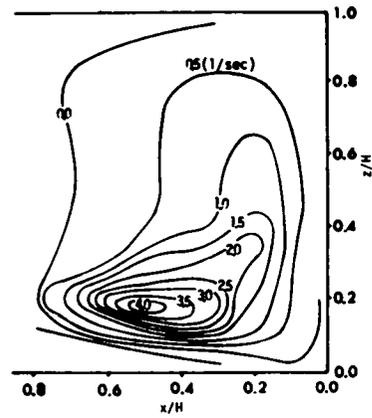


図2-32 実測値から算出した2次流の渦度

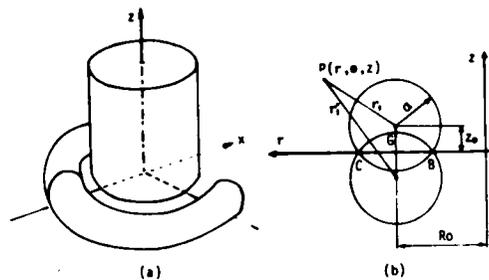


図2-33 記号の説明

めるべき点と渦軸との距離を意味する。上式においては κ は θ 方向に変化しないことが前提となっているが、ここでは κ は θ の関数であるとする。さらに上式は先述のように無限に広がった空間におかれた渦輪の式であるからこのままでは水路床面、水面および円柱橋脚表面における境界条件を満たしていない。ここでは水路床面における境界条件のみを考慮し、水面および円柱橋脚表面での境界条件は考えないことにした。水路床面における境界条件を考慮するには、渦領域の水路床面に関する鏡像を求め、鏡像による流れ関数 ψ_2 ともとの流れ関数 ψ_1 との和を ψ とすると、 ψ を流れ関数として用いるとよい。この場合、図2-33(b)に示すように $a > z_0$ であれば渦領域は水路床面と交わることになる。そのときは \triangle CQBの領域で2次流の渦度は0となる。

2次流の z および r 方向の流速成分をそれぞれ u'_z 、 u'_r とすると、これらは

$$u'_z = -(1/r) (\partial\psi/\partial r), \quad u'_r = (1/r) (\partial\psi/\partial z) \quad (2-26)$$

で与えられるから(2次流の θ 方向流速成分は0としている)、図2-33(b)に示すように渦軸の鏡像の位置から流速を求めるべき点 $P(r, z)$ までの距離を r_1 とすると、点 (r, z) における u'_z および u'_r はそれぞれ次のようになる。

① $r_1 \leq a$ かつ $r'_1 \leq a$ の領域,

$$u'_z = 0 \quad (2-27)$$

$$u'_r = -\frac{\kappa}{\pi r} \frac{R_0 z_0}{a^2} \quad (2-28)$$

② $r_1 \leq a$ かつ $r'_1 > a$ の領域,

$$u'_z = \frac{\kappa}{2\pi r} - \frac{R_0(r - R_0)}{a^2} \left(-1 + \frac{a^2}{r_1'^2} \right) \quad (2-29)$$

$$u'_r = -\frac{\kappa}{2\pi r} R_0 \left(-\frac{z - z_0}{a^2} + \frac{z + z_0}{r_1'^2} \right) \quad (2-30)$$

③ $r_1 > a$ かつ $r'_1 > a$ の領域,

$$u'_z = \frac{\kappa}{2\pi r} R_0 (r - R_0) \left(-\frac{1}{r_1'^2} + \frac{1}{r_1'^2} \right) \quad (2-31)$$

$$u'_r = \frac{\kappa}{2\pi r} R_0 \left(\frac{z - z_0}{r_1'^2} - \frac{z + z_0}{r_1'^2} \right) \quad (2-32)$$

(3) κ の値の決定

円柱橋脚周辺の流れの3次元的な流速分布は式(2-19)～(2-23)で与えられる主流の各流速成分と式(2-27)～(2-32)で与えられる2次流の各流

速成分とをそれぞれ加えあわせることにより求められる。ところで、層流の場合には、2.3.2(1)で角柱周辺の流れについて、また2.4.2(3)で円柱周辺の流れについて述べたように、渦軸の位置はほぼ安定していることが実験的に認められたので、その場合、渦軸の位置における合成された流速の r 方向および z 方向成分は0とならなければならない。この条件を用いて κ の値を求めると次式がえられる。

$$\kappa = \frac{\pi \delta^2 U_{0z}}{H} \left(2 - \frac{z_0}{H}\right) \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \cos \theta \quad (2-33)$$

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。上式から κ は θ 方向には $\cos \theta$ の形で変化すること、従って ω_0 も同様に変化することがわかる。

(4) 3次元流速分布式

式(2-33)により与えられる κ の値を2次元の流速分布式(2-27)~(2-32)に代入し、これを主流の流速分布式(2-19)~(2-23)に加えあわせることにより円柱橋脚前方における3次元の流速の r 、 θ 、 z 方向成分 U_r 、 U_θ 、 U_z が与えられるものとした。これらの合成された流速成分は流体の運動方程式を厳密な意味では満足していないが、近似式としては適用できると考え、その近似の度合いあるいは適用範囲については後で実験的に検討することにした。以上のようにしてえられた3次元流速分布式はつぎのようである。

① $r_1 \leq a$ かつ $r_1' \leq a$ の領域,

$$\frac{U_r}{U_{0r}} = -\frac{R_0 \delta^2}{a^2 r} \frac{z_0}{H} \left(2 - \frac{z_0}{H}\right) \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \cos \theta + \frac{z}{H} \left(2 - \frac{z}{H}\right) \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \cos \theta \quad (2-34)$$

$$\frac{U_\theta}{U_{0\theta}} = -\frac{z}{H} \left(2 - \frac{z}{H}\right) \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \sin \theta \quad (2-35)$$

$$U_z = 0 \quad (2-36)$$

② $r_1 \leq a$ かつ $r_1' > a$ の領域,

$$\begin{aligned} \frac{U_r}{U_{0r}} = & -\frac{R_0 \delta^2}{2H} \left(2 - \frac{z_0}{H}\right) \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \frac{1}{r} \cdot \left(-\frac{z-z_0}{a^2} + \frac{z+z_0}{r_1'^2}\right) \cos \theta \\ & + \frac{z}{H} \left(2 - \frac{z}{H}\right) \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \cos \theta \end{aligned} \quad (2-37)$$

$$\frac{U_\theta}{U_{0\theta}} = -\frac{z}{H} \left(2 - \frac{r}{H}\right) \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \sin \theta \quad (2-38)$$

$$\frac{U_z}{U_{0z}} = \frac{R_0 \delta^2}{2H} \left(2 - \frac{z_0}{H}\right) \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \frac{r - R_0}{r} \cdot \left(-\frac{1}{a^2} + \frac{1}{r_1'^2}\right) \cos \theta \quad (2-39)$$

③ $r_1 > a$ かつ $r_1' > a$ の領域,

$$\begin{aligned} \frac{U_r}{U_{0r}} = & -\frac{R_0 \delta^2}{2H} \left(2 - \frac{z_0}{H}\right) \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \frac{1}{r} \cdot \left(-\frac{z - z_0}{r_1'^2} + \frac{z + z_0}{r_1'^2}\right) \cos \theta \\ & + \frac{z}{H} \left(2 - \frac{z}{H}\right) \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \cos \theta \end{aligned} \quad (2-40)$$

$$\frac{U_\theta}{U_{0\theta}} = -\frac{z}{H} \left(2 - \frac{z}{H}\right) \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \sin \theta \quad (2-41)$$

$$\frac{U_z}{U_{0z}} = \frac{R_0 \delta^2}{2H} \left(2 - \frac{z_0}{H}\right) \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \frac{r - R_0}{r} \cdot \left(-\frac{1}{r_1'^2} + \frac{1}{r_1'^2}\right) \cos \theta \quad (2-42)$$

ここで、 δ は式 (2-33) において定義したものと同一である。

(5) 渦領域の大きさの決定

以上の解析モデルを用い、対称面内の渦軸位置での r 方向速度成分の分布を求めた結果の 1 例が図 2-34 であり、run D-5 の実測値と比較されている。

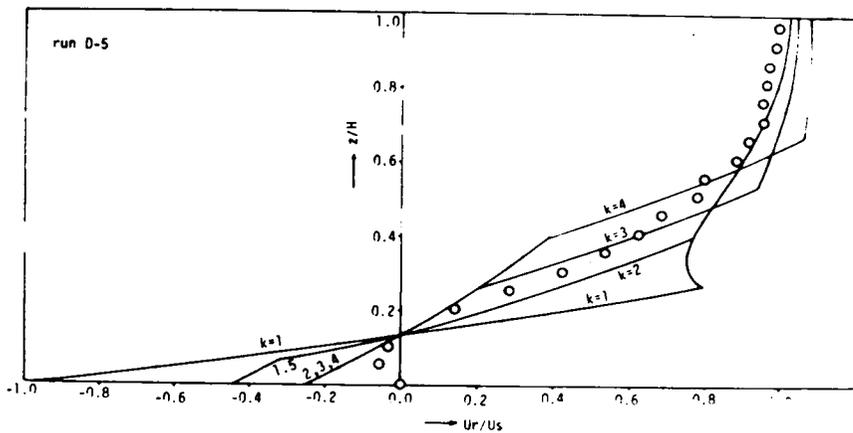


図 2-34 対称面における渦軸を通る鉛直線上の流速分布に関する実測値と計算値の比較

図中 U_s はその位置における水面での流速で、 $U_s = U_{\infty} \{1 - (r_0/R_0)^2\}$ で与えられる。また、図中、 k は a/z_0 を表わしているが、図から k が 2.0 の場合に解析値と実測値の適合性がよいようであり、以下では k は一定値 2.0 をとるものとして考察をすすめる。

(6) 渦度の集中に関する検討

2.3.2(2)で実験的に明らかにしたように、馬蹄型渦を形成する渦度は主流中に含まれていた渦度が集中したものであるが、解析モデルの渦領域における渦度が主流のどの部分からどれほど供給されているかを検討してみよう。

対称面においては渦軸と水路床の近傍の粘性の影響が大きな部分を除けば非粘性流に関する Helmholtz の渦度保存則がほぼ成り立つことが 2.3.2(2) で実験的に認められた。

そこで、対称面内において、微小な間隔をもつ 2 つの流線 AB および CD を考える(図 2-35(a))。微小時間 dt 後に流れに従って A は A' に、 B は B' に、

C は C' に、 D は D' に移動したとし、渦度ベクトルは対称面に直角に交わっていることを考慮すると、Helmholtz の渦度保存則に従って次式が成立する。

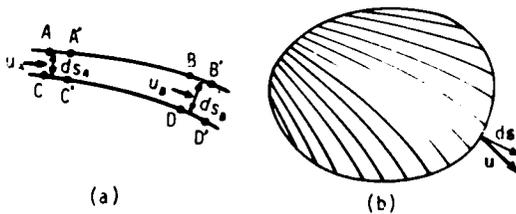


図 2-35 記号の説明

$$\int_{ABCD} \eta dS = \int_{A'B'C'D'} \eta dS$$

ここで、 η は渦度の大きさ、 dS は対称面内の微小な面積要素を意味する。上式から次式が導かれる。

$$\int_{AA'C'C} \eta dS = \int_{BB'D'D} \eta dS$$

$AA'C'C$ および $BB'D'D$ の面積は微小であることを考慮すると、その中の η はそれぞれ点 A および B での η の値で代表されうる。それをそれぞれ η_A および η_B とする。一方 A 点での流線間隔を ds_A 、 B 点での流線間隔を ds_B とし、 A

点での流速を u_A 、B 点での流速を u_B とすると、上式は次のように変形される。

$$\eta_A \cdot u_A \cdot dt \cdot ds_A = \eta_B \cdot u_B \cdot dt \cdot ds_B$$

すなわち次式が成立つ。

$$\eta_A u_A ds_A = \eta_B u_B ds_B \quad (2-43)$$

したがって対称面内に 1 つの閉領域を設定すると、この領域は図 2-35 (b) に示すように多数の微小な流管から成ると考えられ、その流管 1 つ 1 つについて上式が成立つから、その領域の境界線上で、

$$\oint \eta \cdot (\mathbf{u} \cdot d\mathbf{s}) = 0 \quad (2-44)$$

が成立つ。ここで \mathbf{u} は流速ベクトルであり、 $d\mathbf{s}$ は境界線に沿う微小長さを大きさとし、境界線の内側法線方向を向くベクトルである。

図 2-36 に示すように対称面内の渦度領域を BCF とし、B を通過する流線を AB とするとき、領域 ABFCD について式 (2-44) の成立の度合いを検討してみよう。AB および DC はそれぞれ流線と一致しているから、それに沿う式 (2-44) の左辺の積分は 0 である。つぎに DA に沿う積分は、

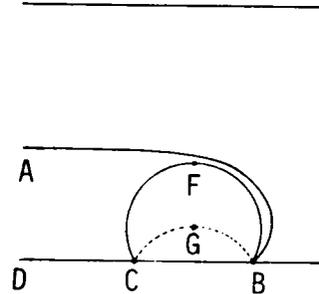


図 2-36 記号の説明

$$\begin{aligned} \int_D^A \eta \cdot (\mathbf{u} \cdot d\mathbf{s}) &= \int_0^{z_A} \eta U_0 dz \\ &= \{U_0(z_A)\}^2 / 2 \end{aligned}$$

となる。ここで z_A は A 点の z 座標であるが、ここでは図 2-21 を考慮して近似的に $z_A = a + z_0 = 3z_0$ とした場合と、 $z_A = H$ とした場合について考察する。 U_0 に式 (2-22) を代入して上式を計算すると次のようになる。

$$\int_D^A \eta \cdot (\mathbf{u} \cdot d\mathbf{s}) = U_{0s}^2 \cdot g_1(z_0/H)$$

ここで、 $z_A = 3z_0$ の場合は、

$$g_1(z_0/H) = (9z_0^2/2H^2)(2-3z_0/H)^2$$

となり、 $z_A = H$ の場合は、 $g_1 = 0.5$ となる。一方、BFCに沿う積分は、

$$\int_B^C \eta(\mathbf{u} \cdot d\mathbf{s}) = -U_{0z}^2 \cdot g_2(\tau_0/H)$$

の形で表わせられ、 g_2 は式 (2-19) ~ (2-21) ならびに (2-37) ~ (2-39) を用いて数値積分を行うこ

とによって求められ、結

果は図 2-37 のようになる。

本図には g_1 も τ_0/H の関数に書きかえて記入

したが、両者进行比较してみると、たとえ $z_A = 3z_0$ の

場合でも $\tau_0/H = 0.1$ に対し $g_2/g_1 = 0.32$ 、また τ_0/H

$= 1$ で $g_2/g_1 = 0.77$ であるから、つねに $g_1 > g_2$ となり、

これは渦度領域で想定した渦度は上流の $z_A =$

$3z_0$ 以下を流下する渦度の一部しか含んでいない

ことを示している。残りの部分は、水路床近くの

流体が渦領域にまきこま

れずにその外側を流下する

ために、その流れのも

つ渦度も渦領域に含まれ

なかったものと考えられ

る。また上流において z_A

$= 3z_0$ から水面までの間を流下する渦度 (図で $z_A = H$ の場合の g_1 と $z_A = 3z_0$ の

場合の g_1 との差で表わされている) も、渦度領域に流入する渦度に比べてとくに τ_0/H が小さい場合に大きくなっていることが認められる。ところが本解析

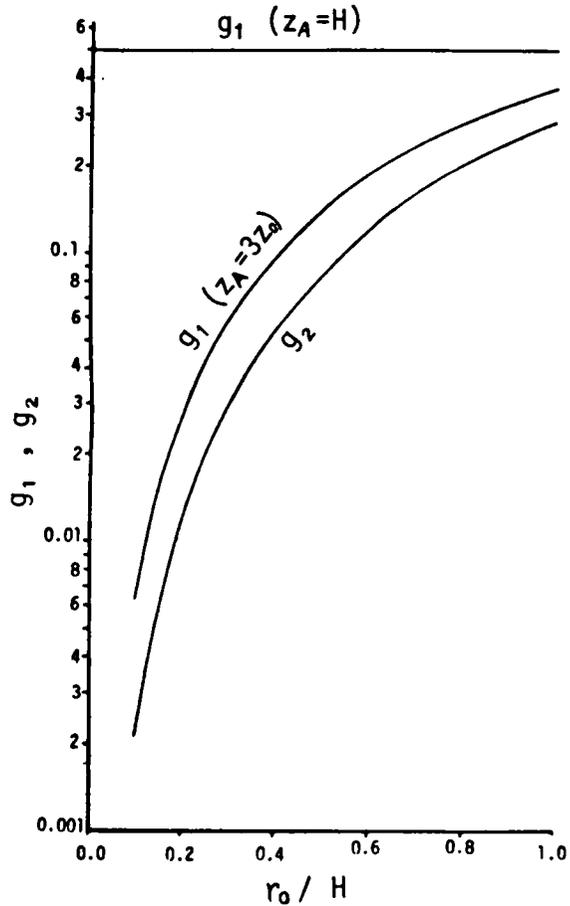


図 2-37 Helmholtz の渦度保存則の検討

も、渦度領域に流入する渦度に比べてとくに τ_0/H が小さい場合に大きくなっていることが認められる。ところが本解析

では、この渦度は無視される結果になっていることがわかる。

2.5.2 解析結果の実験的検討

以上、橋脚前面における局所流の3次元流速分布の解析方法を提示したが、解析の過程で用いた仮定あるいは近似を整理するとつぎのようである。

まず、主流と2次流とを算術的に加算することにより局所流の流速がえられるとした点についてであるが、渦度場から速度場を求めるLamb¹⁶⁾の式によれば、両者は線型の関係にあるので、このような加算の方法自体はLambが示した条件に適合する限り正当である。ただ本文の場合、無限遠においても主流に渦度があると仮定しており、また、2次流の渦度分布としてもかなり単純化されたモデルを仮定しており、さらにそれから流速を求める際にも橋脚表面および水面における境界条件を無視した近似式を用いており、また2次流の θ 方向流速成分も無視される結果になっている。したがって、結果としてえられた局所流の流速分布式は流体の運動方程式を厳密には満たしていないことになる（連続の条件に関しては、主流も2次流もおのおのこれを満たしており、連続の条件式は線型であるから、合成された流速分布式も連続の条件を満たしている）。本解析はまた完全流体を前提としているので、粘性の影響の強い底面付近においては解析式は適用しにくいと考えられる。

以上のような仮定あるいは近似に基づく限り、本解析の適用には自ずと制約があると考えられ、本節ではそれを明らかにする目的でrun D-4の条件で直径4.025 cmの円柱橋脚を設置した場合の実測値と解析値とを比較する。

(1) z方向流速成分の検討

流れの対称面内において底から $3H/4$ 、 $H/2$ 、 $H/4$ および z_0 の高さでのz方向流速成分の解析値と実測値とを比較して図2-38に示す。図で実測値は白い丸印、解析値は実線でそれぞれ示されており、さらに参考までに吉川³¹⁾らの解析値が破線で示されている。まず、これらの図の全体を通していえることは、解析値ではいずれの高さにおいても渦軸の位置より上流部分にかなりの上昇流が算出されているが、実測値では上昇流が存在しないことである。この差異の原因としては、解析では2次流の θ 方向流速成分を0としているため、下降流

あるいは逆流を形成する流れが連続条件に従って上昇流を形成する結果になったこと、さらに2次流の渦度領域以外の渦度の存在を解析では無視したが、実際にはこの無視された渦度が上昇流をおさえる役割を果たしていることなどが

考えられる。
次に、 $z = z_0$ (渦軸の高さ) における下降流については解析値と実測値とはかなりよい一致を示していることが認められるが、 $z = H/4, H/2, 3H/4$ の各高さでは解析値は実測値より若干少なく算出されている。

橋脚前方の流れの場合はA, B, CおよびD領域に区分されることをさきに示したが、B領域では粘性の影響

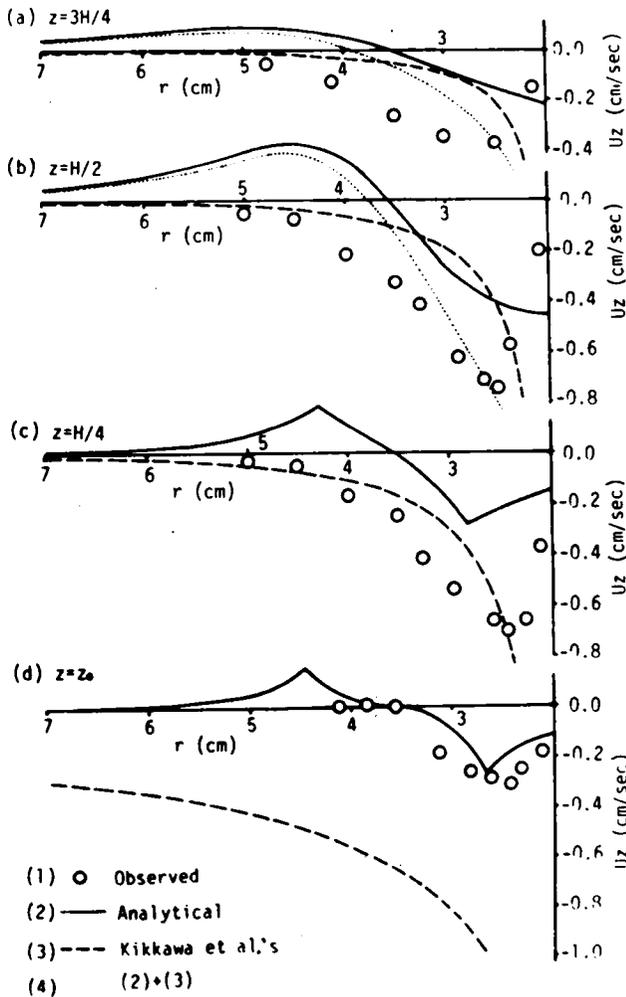


図2-38 z方向流速成分に関する実測値と解析値との比較 (run D-4)

が大きいので、ここでは本解析も吉川らの解析も適用することができない。本解析はA領域で適合性がよいといえよう。このことは先述の実測値と解析値との比較からもいえるが、また解析方法の基礎となっている渦度の集中を主としてA領域に注目して考慮したことや、さらに本解析で無視した円柱および水面における境界条件の影響がA領域では小さいと考えられることなどからもいえる。いかえらるならば、本解析ではC領域に存在する渦度の影響を無視しているわけで、この領域に生成される下降流もA領域で集中した渦度の影響によるものとして説明される結果になっている。一方、吉川らの解析ではA領域における渦度の集中およびそれが下降流に及ぼす影響は無視されており、その意味で吉川らの解析は、C領域の流れを対象にしたものと考えられる。したがって、C領域の流れについては本解析結果と吉川らの解析結果とを加えあわせたものがよりいっそう現象をよく説明することが考えられる。事実、図2-38で両者の解析結果を加えあわせたものを点線で示しているが、以上の考察を裏づけたものになっている。

(2) r 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、 $r = 3.561 \text{ cm}$ (渦軸の位置) および $r = 5 \text{ cm}$ 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2-39である。この図から実測値と計算値との一致はかなりよいことが認められる。ただ $\theta = 180^\circ$ の断面(対称面)で認められる逆流については、水路床面のごく近くで実測値との隔りがあるが、これは水路床面における粘性の影響を無視したためであろう。また、 U_θ については全般的に水路床面に近づくにつれて実測値が解析値より大きくなる傾向が認められる。これは、解析においては2次流の θ 方向流速成分を0としているために図2-38に現われるような上昇流が算出されるが、実際にはさきにも述べたように上昇流が形成されず、その結果その分だけ連続の条件に従って水路床近くで流量が増え、従って U_θ が解析値より大きくなるものと考えられる。

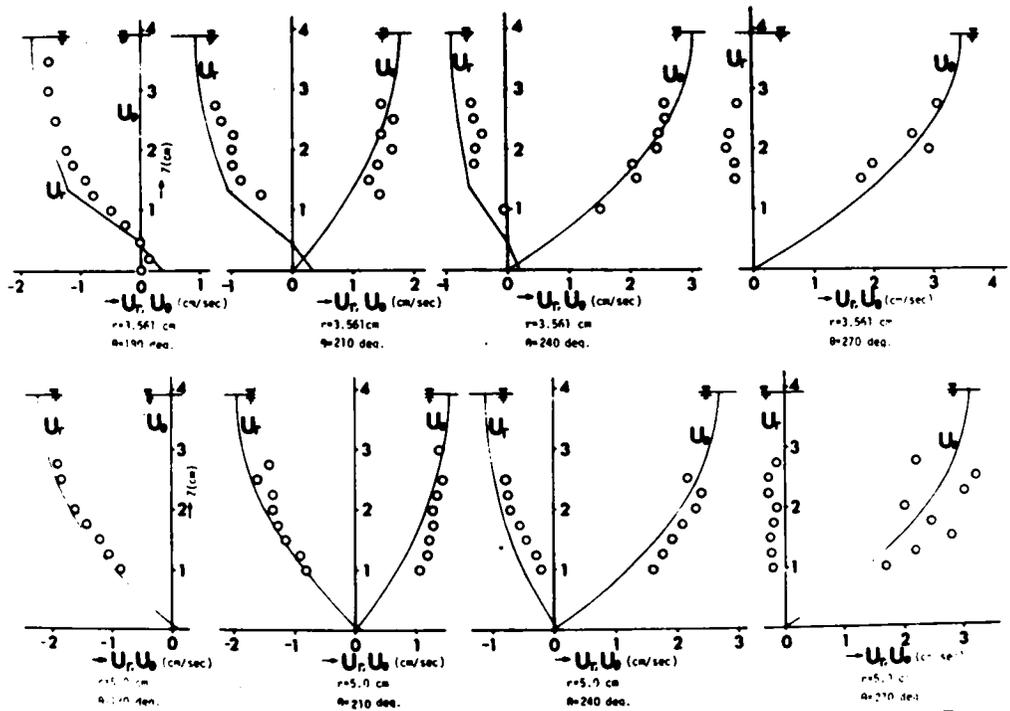


図 2-39 r 方向流速成分および θ 方向流速成分に関する実測値と解析値との比較 (run D-4)

2.6 結 言

橋脚前方の局所流について馬蹄型渦の発生に注目して層流状態で実験を行い、その結果に基づいて流れの場をモデル化することにより 3 次元的な流速分布式を導き出した。えられた結論のうち主なものをあげるとつぎのとおりである。

2.1 では、橋脚周辺の流れに関する従来の研究成果を概観した結果、橋脚周辺の馬蹄型渦が重要な役割を果していることが多くの研究者により強調されて

いるにもかかわらず、その馬蹄型渦に関する研究が非常におくれており、その一因がこういった局所流の計測方法が確立されていない点にあることを明らかにした。

2.2 では局所流の特性を把握するのに、まず層流を用いた実験による方法を提案し、その具体的内容を明らかにした。すなわち、

① Flow Visualization の方法を適用するという前提で層流状態を作り出すにはグリセリンを用いて粘性をあげる方法が最適であるが、ただこの場合グリセリンの吸湿性や、温度変化にともなう粘性係数の変化といった物理的な安定性の面では若干問題がある。

② 水素気泡法の白金線電極に絶縁性の接着剤などで等間隔に印をつけておき、それに時間的に等間隔のパルス状電圧を荷すことによって流線形状と流速分布とが同時に計測される。

③ 層流の場合はトレーサの注入点が流線の始点と一致し、しかもその位置は予め実測しておけるから、白金線電極の支持法（鉛直型、水平型、点型など）とカメラの設置法の適当な組合せによって、1台のカメラでもかなり正確に流れの3次元的な特性を把握することができる。

2.3 においては、層流中におかれた角柱前方の流れについて前記の方法によって実測を行なった。その結果つぎの点が明らかになった。

① 橋脚前方から側方にかけて馬蹄型渦が発生し、そのスケールおよび軸の位置は流下距離によってほとんど変化しない。

② 馬蹄型渦を構成する流体は、主流のうち対称面付近の部分から供給されている。

③ 対称面内の流線の形状は図2-8に示す4種に分類される。すなわち、A領域の流線は馬蹄型渦にまきこまれて一部は渦巻き状に回転しながら渦軸に達し、残りの部分は水路床近くで逆流を形成してB領域と境を接する。B領域に属する流線は渦による逆流におされて渦の外側をまわるようにして横方向へ流下する。さらにC領域の流線は橋脚の直前面で下降流を形成するが、馬蹄型渦にはまきこまれない。最後にD領域の流線は下降流をも形成せず、橋脚直前面の水面近傍で馬蹄型渦と逆方向の回転運動を行なう。

④対称面内の渦軸の位置の座標(R_0, z_0)は式(2-11)~(2-13)で表わされる。

⑤馬蹄型渦の発生は、主流中に存在していた渦度が橋脚前面の水路床近くに集中させられるためであり、渦度が集中する機構は Helmholtz の渦度保存則にほぼ支配されている。

⑥馬蹄型渦にともなって発生する逆流域の水平断面は、橋脚の前方においては橋脚の軸を中心とする円形にほぼ等しく、その半径は水路床からの高さとともに直線的に減少している。

⑦対称面内の2次元発散の値は渦軸近傍で集中的に大きくなっており、このことはそこで渦糸が水路横断方向にひき伸ばされることを意味する。

2.4は層流中におかれた円柱橋脚前方の流れについての実験的考察を述べたものである。その結果円柱橋脚の場合も角柱橋脚の場合と同様に馬蹄型渦が発生し、上記の①~⑥がやはり成立することが確かめられた。ただし円柱橋脚の場合馬蹄型渦のスケールは比較的小さく、また渦軸の位置は式(2-15)~(2-17)のような表示となる。

2.5では、以上の実測結果に基づいて円柱橋脚周辺の流れの場をモデル化することによりその3次元流速分布式を導き出し、さらに計算結果と実測値との比較から流れの機構について検討した。えられた結論のうち主なものは次のようである。

①円柱橋脚前方の3次元流速分布は式(2-34)~(2-42)で与えられる。

②橋脚前方の流れの場は図2-8で示したようにA~Dの4つの領域に区分されるが、本解析はA領域における渦度の集中にとくに注目したものであり、CおよびD領域に存在する渦度の効果を見逃している。したがってC領域に生成される下降流もA領域で集中した渦度の作用によるものとして説明される結果になっている。一方、吉川らの解析を固定床上に設置された円柱橋脚周辺の流れに適用することを考えると、その解析はA領域における渦度の集中およびその効果を見逃しており、C領域の渦度の効果を考察の対象としていることがわかる。以上の考察の結果がz方向流速成分の検討により確かめられた。

③ r 方向および θ 方向流速成分については実測値と解析値とはかなりよい一致を示すことが認められた。

参 考 文 献

- 1) Tison, L. J. : Érosion autour de piles de ponts en rivière, Annales des Travaux Publics de Belgique (Brussels), 1940, pp.813-868.
- 2) Keutner, Chr. : Strömungsvorgänge an Strompfeilern von verschiedenen Grundrissformen und ihre Einwirkung auf die Flussole, Die Bautechnik, Jahrgang 10, Heft 12, 1932, pp.161-170.
- 3) Posey, C. J. : Why Bridges fail in floods, Civil Engineering, Vol. 19, 1949, p.42, 90.
- 4) Laursen, E. M. and A. Toch : Scour around bridge piers and abutments, Iowa Highway Research Board Bulletin, No. 4, 1956.
- 5) Neill, C. R. : River-bed scour, Technical publication, No. 623, Canadian Good Roads Association, Ottawa, Canada, 1964.
- 6) 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, 1942, pp.974-1007.
- 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., U. S. A., 1967, pp.151-161.
- 8) Shen, H. W., V. R. Schneider and S. Karaki : Local scour around bridge piers, Proc. ASCE, Vol. 95, No. HY6, 1969, pp.1919-1940.
- 9) Boussinesq, J. V. : Essai sur la théorie des eaux courantes, Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des sciences, Paris, 1877.
- 10) Golaz, M. : Considerations théoriques sur le mouvement plan des liquides naturels et leur application, au calcul du débit d'un déversoir à crête arrondie, Science et Industrie, 1933.
- 11) Jaeger, C. : Engineering fluid mechanics, Blackie and Son Ltd. 1956. pp.120-145.

- 12) Fawer, C. : Étude de quelques écoulement permanents à filets courbes, Thesis, Université de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 1937.
- 13) 中川博次, 宇民正 : 底部スリットを有する開水路流れの特性について (第2報), 京大防災研究所年報, 第11号B, 1968, pp. 233-248.
- 14) Rouse, H. : Discharge characteristics of the free overfall, Civil Engineering, Vol. 6, No. 4, 1936, pp. 257-260.
- 15) Chow, V. T. (石原藤次郎訳) : 開水路の水理学, I, 丸善株式会社, p. 42.
- 16) Lamb, H. : Hydrodynamics, Cambridge, 1932.
- 17) Long, R. R. : Some aspects of the flow of stratified fluids, Tellus, Vol. 5, 1953, pp. 42-58.
- 18) Yih, C. S. : Two solutions for inviscid rotational flow with corner eddies, Jr. Fl. Mech., Vol. 5, 1959, pp. 36-40.
- 19) Squire, H. B. and K. G. Winter : The secondary flow in a cascade of airfoils in a nonuniform stream, Jr. Aeron. Sci., No. 18, 1951, pp. 271-277.
- 20) Hawthorne, W. R. : The secondary flow about struts and airfoils, Jr. Aeron. Sci., No. 21, 1954, pp. 588-608, 648.
- 21) 村本嘉雄 : 開水路彎曲流に関する研究, 学位論文, 1966.
- 22) Geller, E. W. : An electrochemical method of visualizing the boundary layer, Jr. Aeron. Sci., Vol. 22, 1955, pp. 869-870.
- 23) Clayton B. R. and B. S. Massey : Flow visualization in water — a review of techniques, Jr. Sci. Instrument, Vol. 44, 1967, pp. 2-11.
- 24) Clutter, D. W. and A. M. O. Smith : Techniques of flow visualization using water as the working medium, Aerospace Engineering, Vol. 20, 1961, pp. 24-27 and 74-76.
- 25) Shraub, F. A., S. J. Kline, J. Henry, P. W. Runstadler and A. Littell : Use of hydrogen bubbles for quantitative determination of time-dependent velocity field in low-speed water flows, Trans. AS

ME, Ser. D, Vol. 87, 1965, pp. 429-444.

- 26) 浅沼強, 武田定彦: 水の電気分解による流れの可視化について, 日本機械学会誌, 第 31 巻, 222 号, 1965, pp. 223-232.
- 27) Lighthill, M. J. : Boundary layer theory, Laminar boundary layers (edited by L. Rosenhead), Oxford Univ. Press, 1963, p. 72.
- 28) Allen, J. R. L. : Current ripples, North-Holland, 1968, pp. 19-21.
- 29) Rosenhead, L. : The formation of vortices from a surface of discontinuity, Proc. Roy. Soc. London, A 134, 1932, pp. 170-192.
- 30) Goldstein, S. : Modern developments in fluid dynamics, Dover Publications, Inc., 1965, pp. 44-45.
- 31) 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, No. 194, 1971, pp. 83-90.
- 32) 宇民正: 開水路断面急変部における流れの局所機構について, 第 16 回水理講演会講演集, 土木学会水理委員会, 1972, pp. 37-42.
- 33) 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, 1974, pp. 65-76.

第3章 乱流中に設置された橋脚前方の 流れの機構に関する研究^{14) 15) 16)}

3.1 概 説

橋脚周辺に発生する局所的な深掘れの形状や大きさは橋脚の形状、大きさ、水流の状態、上流からの土砂供給の有無、および河床構成材料など多くの因子により支配されていると考えられる。したがって局所洗掘といった複雑な現象の機構を明らかにし、それによって洗掘の大きさを予測したりあるいはその防止法を見い出そうとする場合、その第一段階として、局所洗掘に影響を与える諸因子のうち若干のものを取去って現象を単純化して模型実験を行なうという方法は有効なものと考えられる。そのような観点から、前章ではできるだけ単純な境界条件の下でしかも層流を用いて実験を行なったが、その結果、馬蹄型渦の発生とその特性は接近流のもつ渦度の変化の様相と重大なかわりあいがあることが明らかになった。ところが乱流中におかれた橋脚周辺の局所洗掘現象を馬蹄型渦あるいは渦度の集中と結びつけて実験的にあるいは解析的に検討した例はきわめて少ない。たとえば Posey¹⁾ は、橋脚周辺の洗掘孔の中の渦運動を、透明な実験用橋脚の中に挿入した鏡を通して観察しているが定量的な実測には至っておらず、また小川²⁾ は、固定床上に設置された円柱橋脚前方の逆流域の大きさを水路床上にまかれた細砂の排除される範囲から実測しているが、馬蹄型渦の機構に立入った検討は行っていない。一方橋脚周辺の局所流に関する解析的研究としては Shen^{3) 4)} ら、吉川⁵⁾ らおよび中川⁶⁾ の研究があるが、1.1に示したように、これらの研究はいずれも不十分な所を残しており、馬蹄型渦の発生にともなう逆流や下降流の大きさを水理学的に明快にかつ定量的に与えるには至っていない。

このような馬蹄型渦あるいはそれに伴う逆流の実験的検討はむしろ空気力学の分野で進められてきた。すなわち、Gregory と Walker⁷⁾ (1951) は、層流境界層中に一つの円柱状の表面突起がある場合、それによって生じる擾乱が下流方向に拡大しない限界の突起高さを求める目的で実験を行なったが、その突起周辺の流れの様相を図3-1のように与えており、この結果は前章までに述

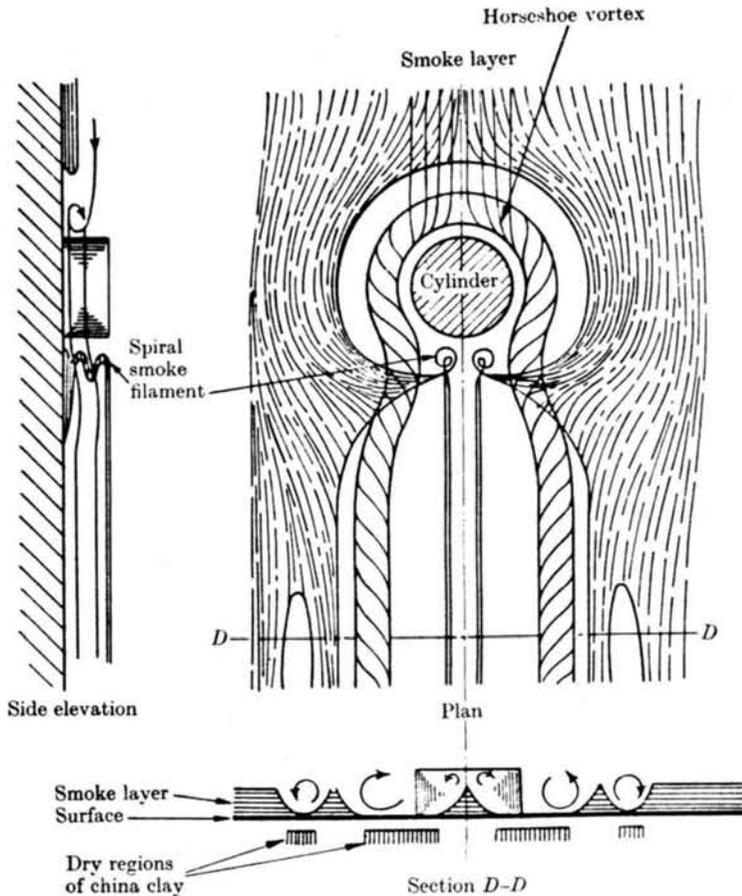


図3-1 Gregory と Walker による円柱周辺の流れのモデル

べた成果の妥当なことを示している。また, Johnston⁸⁾ は主流の流線が曲率をもっている場合の乱流境界層内の流れについていわゆる三角形モデル (3.3.2 (3)参照) を提案したが, Hornung と Joubert⁹⁾ (1963) は, 平滑床上の円柱周辺の流れについて詳しい実測を行ない, その結果から三角形モデルは実測値によく適合し, 逆流域においても相当正確 (reasonably accurate) であると結論づけている。彼等はさらに2次元境界層に用いられる流速分布則が3次元流に

もそのままの形で適用されることを示した。この実験は直径 22 in の円柱を用いた大規模かつ詳細なものであるが、鉛直方向の流速成分については測定しておらず、とくに馬蹄型渦領域内での測定点がわずかなこともあって渦運動を単に逆流としてしかとらえていない点で不充分さを残している。この実験とほぼ同様でしかも同規模（円柱の直径が 24 in）の実験が East と Hoxey³⁰⁾(1969) によっても行なわれ、ほぼ同様の結論が導かれている。この実験も詳細なものであったが、馬蹄型渦領域での測定点は少なく、渦の位置や下降流の大きさといった渦に関する実測は含まれていない。

これらの研究結果をみてもわかるように、馬蹄型渦の中では流速は 3 次元的に変化し、しかも乱流の場合は速度変動にもなって馬蹄型渦の位置や大きさも変動するので、その実測は非常に困難であり、現在のところ馬蹄型渦内の詳細な流れの実測はないに等しいといえる。

以上の点を考慮して、本章の目的をつぎのように設定した。第 1 に、局所流の 3 次元的な計測法を見出すこと、第 2 に、その方法を用いて馬蹄型渦の特性をなるべく詳細に把握すること、第 3 に、その実測値を用い、第 2 章で提案された解析モデルを基本として、乱流の場合の解析モデルについて考察すること、である。

実験に用いた水路は幅 40 cm、長さ 12 m で、勾配は $1/500$ および $1/1000$ に設定されている。水路の中央部 2.8 m の区間は両側面および底面が厚さ 10 mm の透明アクリル樹脂製で、底面および側面からの観測が可能になっている。水路のそれ以外の部分は木製でペンキ塗装仕上げがなされている。

本章における実験条件および測定事項は、表 3-1 に示すとおりである。

3.2 局所流の 3 次元計測法に関する研究

当然のことながら、測定する対象によって測定方法は変ってくる。たとえば、渦の発生領域や渦領域へ流入する主流の範囲などといった巨視的な量は染料の拡散範囲から容易にかつかなり正確によみとれる。また平均的な流向や渦軸の平均的な位置といった量も拡散しにくいトレーサたとえばミルクなどを用いるとある程度正確に実測できる。しかし渦内の流速の 3 次元計測となると、そこでは流速の変動がとくに著しいこともあって必ずしも容易でない。この

run	水深 H (cm)	流量 Q (l/s)	平均流速 U _{0m} (cm/s)	水路幅 B (cm)	勾配 I	Fr	橋脚直径 2r ₀ (cm)	$\frac{H \cdot U_{0m}}{\nu}$	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,
L	12.05	5.90	12.20	"	1/1,000	0.111	10.0	14,701	渦の状況
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	"	"	

表 3-1 実験条件 (乱流の場合)

目的のためには、本章では熱膜流速計による方法と、Flow Visualization による方法とを用いたが、ここではとくに後者の方法について述べる。

3.2.1 トレーサの選択

Flow Visualization の方法を用いるとき、まず問題になるのは使用すべきトレーサの選択である。水の電気分解によって発生する水素気泡をトレーサに用いるいわゆる水素気泡法は、層流あるいは層流から乱流への遷移状態に近い流れの場合に有効なものであることは第2章で述べたとおりである。一方、浅沼と武田¹¹⁾ (1965) は 23 ft/sec といった高速流の実測にも水素気泡法が有効に用いられることを示した。しかし若干のテストの結果、乱れ速度が平均流速を上まわるような馬蹄型渦軸近傍の流れの中では水素気泡がすぐ飛散してしまうため、これをトレーサとして有効に利用することは無理であることがわかった。そこで別の適当なトレーサが必要となるが、その際に、水と密度がほぼ同じであること、流れを乱すことなく容易に注入できるものであること、さらに渦のスケールに比べて十分小さく、また写真撮影できるように適当な大きさをもつことなどの条件が要求される。そこで、水には不溶あるいは難溶の液体を2つ以上混合し、その密度を水の密度に等しくしたものをトレーサに用いることとした。このような液体としては、

Benzen	$d_4^{15} = 0.879$	わずかに水溶性
Cl-Benzen	$d_4^{20} = 1.107$	不溶
Toluene	$d_4^{20} = 0.866$	わずかに水溶性
n-Hexane	$d_4^{20} = 0.660$	不溶
Nitro Benzen	$d_4^{15} = 1.205$	すこし水溶性

などが考えられる。ここで d_4^m は、水の 4°C での密度に対する液体の $m^\circ\text{C}$ の相対密度を意味する。数種のものを実験した結果、Cl-Benzen と n-Hexane の混合液に螢光塗料を混じてその密度を水のそれに等しくしたものをトレーサとして用いることが有効であることが判明した。この溶液を水中に細管を通して注入すると、直径は流速によって異なるが、ほぼ 0.5~5 mm の粒子状になり、先に示した条件を満たすものがえられた。すなわちこの方法によれば、水素気泡法と同様に、トレーサ挿入にともなう現象の攪乱は微少であると考えられる。ま

た注入された粒子の流れへの追従性は、粒子と水との密度の差異、粒子の大きさと測定しようとする現象とのスケールの大小関係、および注入速度と流速との差異などで決まるが、このトレーサの場合、前2者は問題ないので、注入場所を測定場所から十分隔てておけば測定場所では粒子は流れにほぼ追従するものと考えられる。

3.2.2 立体写真撮影の方法

水素気泡法による場合は、水素気泡が微細なこともあってその水流への追従性が非常によいので、白金線のほぼ直下流から測定することができる。したがって白金線の位置（たとえば水路床面からの高さ）を定めておけば、トレーサの位置もほぼわかる。しかし、粒子状トレーサの場合は、上述のように注入場所と測定場所とが隔たっているために、測定場所におけるトレーサの位置をも測定する必要がある。そこで図3-2に示すように流れの中に注入された粒子をストロボ照明の下に互に隔たった2台のカメラで立体撮影し、粒子像の3次元的な位置をステレオトプで読みとるという方法

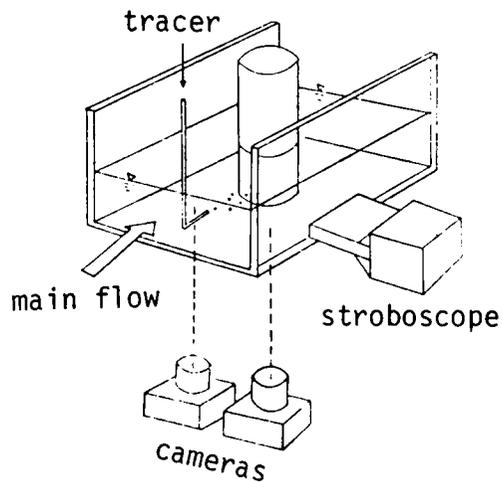


図3-2 トレーサの立体撮影

を採用した。光が水路壁中と水中とを通過することによる粒子像の偏位を概算すると、

$$\frac{b}{l} = \frac{\sqrt{1-\sin^2 i}}{\sqrt{1-\sin^2 i} - \sqrt{(a\mu b)^2 - \sin^2 i}} \left(\frac{x}{l} \frac{\sqrt{(a\mu b)^2 - \sin^2 i}}{\sqrt{1-\sin^2 i}} - \frac{\sqrt{(a\mu b)^2 - \sin^2 i}}{\sqrt{(a\mu c)^2 - \sin^2 i}} \right) \quad (3-1)$$

となる。ただし、 $a\mu b$ は媒質 A に対する媒質 B の屈折率であり、 $a\mu c$ および $b\mu c$ についても同様である。また i は入射角、 l は実際の粒子の位置、 x は粒子の像

の位置であって、図 3-3 に示すとおりである。

3.2.3 立体写真解析の精度

立体写真観測の誤差の原因としては、(1) アクリル板 (またはガラス板) の凹凸、(2) 写真機のレンズの歪み、(3) 写真機設置の際の位置と方向のずれ、(4) フィルムの凹凸および収縮、(5) 印画紙に焼付ける際のレンズの歪み、(6) 印画紙の収縮などがあり、いちがいに精度何%以内といった評価は難しい。そこでここでは流れの観測と同じ条件の下で水中に標的を置き、それを先に述べた立体写真解析法を用いて測定・解

析して誤差の目安をえることとした。すなわち、写真撮影には小型写真機と 35 mm フィルム、解析には 3 級図化機という初歩的な機械の組合せによる測定・解析の結果が図 3-4 である。この図は 1 枚の写真の中での誤差を示したもので、破線は水路床面に 5 cm 間隔で記した格子線を示しており、太い実線は標的に用いた物指を示している。また H はその物指の水路床からの高さを示す。また丸に囲まれた数字は、標的の水路床からの高さについて、実際の値とそれをステレオトプで読みとった後に上式で修正した値との差であり、長方形で囲まれた数字は、標的間の距離についての実際の値とステレオトプによる解析値との差である。この図から写真図面の周辺部においては誤差は大きいですが、中心部の誤差は 1 mm 以内であり、3 級図化機、ストロボ照明、小型写真機、35 mm フィルムという初歩的な機械の組合せによる方法でも観測目的と使用方法によっては十分利用価値があることを示している。

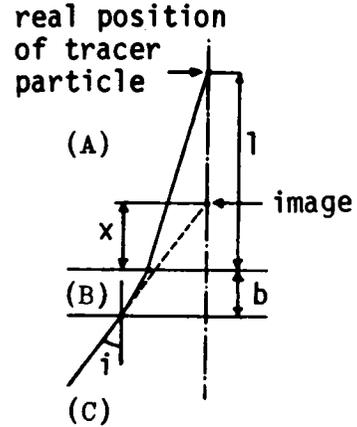


図 3-3 粒子像の位置と実際の粒子の位置

3.3 乱流中におかれた橋脚前方の流れに関する実験的研究

3.3.1 各種トレーサによる馬蹄型渦の観察

(1) 粒子状トレーサによる観察

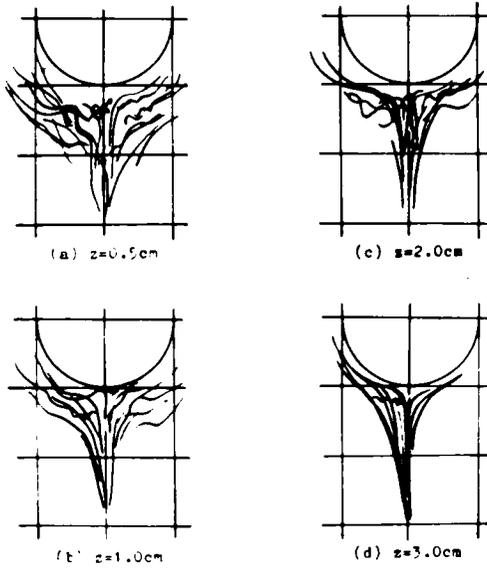


図 3 - 5 トレーサの流下軌跡 (run L)

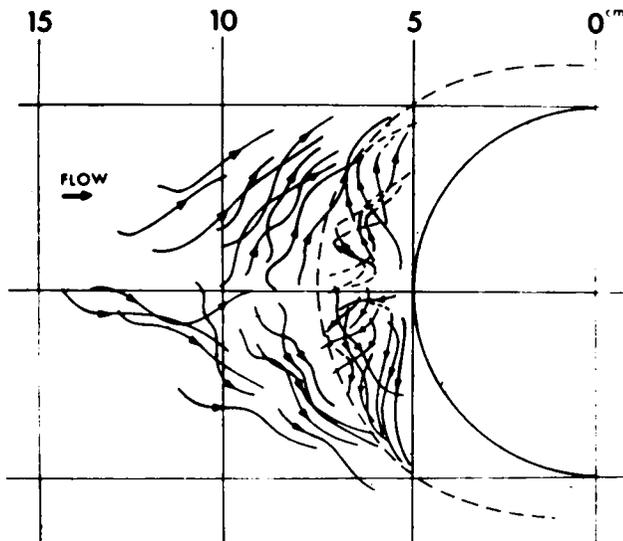


図 3 - 6 水路床近傍のトレーサの流下軌跡 (run L)

の屈曲の大きさから判断しての表現である。ところが $z = 2.0 \text{ cm}$ の高さから注入されたトレーサ粒子はほとんど円柱橋脚直前面の大きな方の渦にまきこまれており、さらに $z = 3.0 \text{ cm}$ およびそれより上の位置から注入されたトレーサ粒子はいずれの渦にもほとんどまきこまれなくて流下していることが認められた。

つぎに、これらの渦を形成するトレーサ粒子の水路床近傍での軌跡を同一図面に描くと図 3 - 6 のようになるが、この

図は水路床近傍の渦領域が 2 種の領域から成立っていることを明瞭に示している。そこで便宜上以下では円柱

橋脚の直前方の大きな渦を主渦，その発生する領域を主渦領域（あるいはA領域）とよび，その外側の比較的小さな渦群を微小渦，その発生領域を微小渦領域（あるいはB領域），さらに両者を総称して渦領域とよぶことにする。なお，A領域，B領域は主として図表での表現に用いることとする。

（２） 染料の拡散による観察

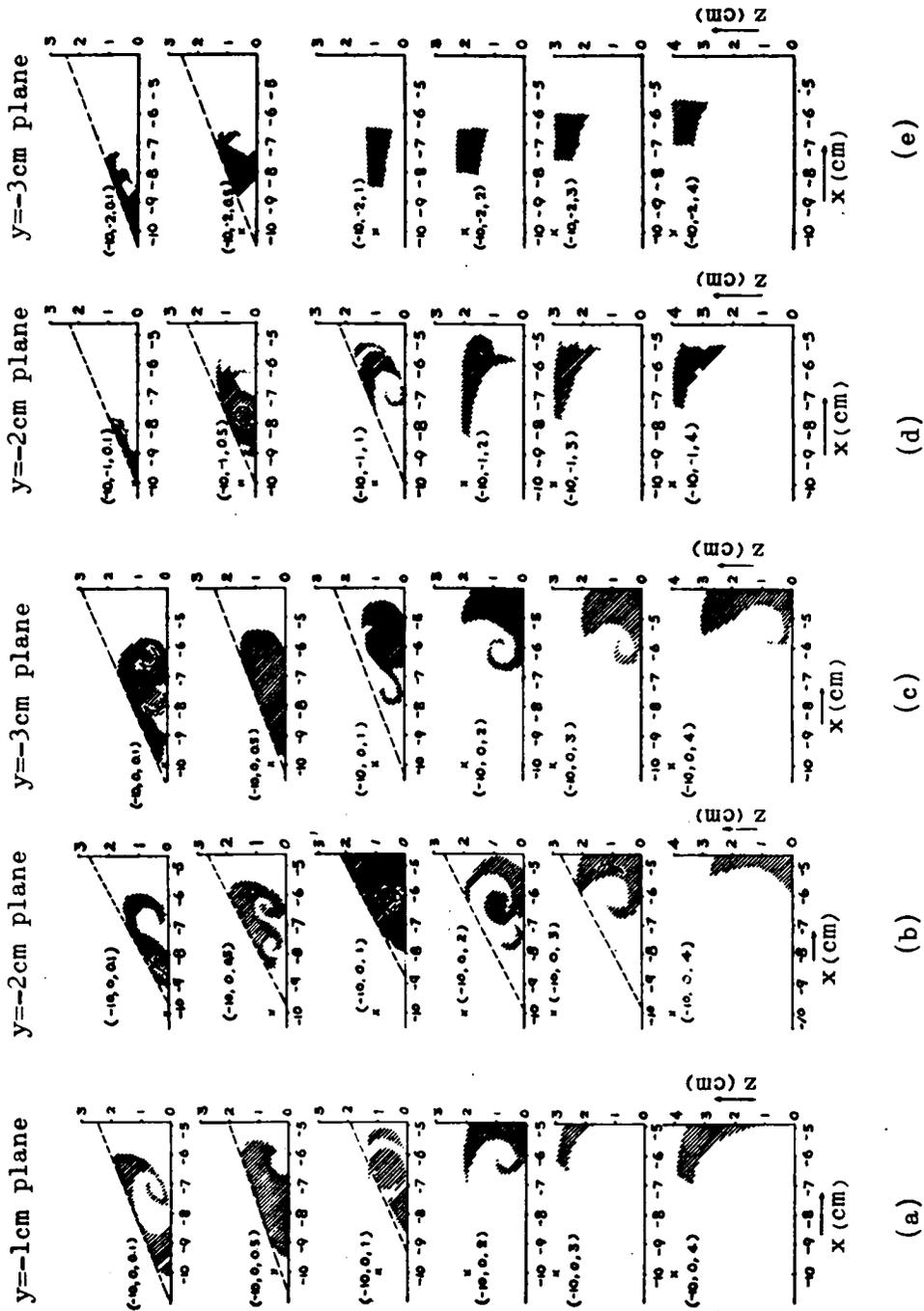
先述のトレーサ粒子の代りに染料を用いて実験を行なうと，橋脚の上流側の $z=0.5\sim 2.0\text{ cm}$ の位置で注入された染料の一部が橋脚直前面の大きな渦にまきこまれて水路床に達し，橋脚周辺をとり囲むような形で水路床近傍に帯状の拡散領域を描き出す。この領域の外側境界線を図3-6に破線で記入したが，この破線は同図の主渦と微小渦とを区分する線になっていることが認められる。

以上のような粒子状トレーサを用いた実験結果と染料の拡散実験の結果は，渦を構成する流体が主流から供給されていること，すなわち，渦領域が閉領域でないことを示している。この事実は，渦領域が閉領域であるかのように考えた Allen¹²⁾ のモデルが乱流の場合も層流の場合と同様に適正でないことを示しているものといえるが，同時に上記の領域区分において主流領域と渦領域の区分を画然と行ないにくいことも意味する。

そこで，同様の染料の拡散実験により渦のスケールがどのようなものであるか，あるいはさらに，主流のどの部分の流体が渦領域に流れこむかなどを調べてみた。図3-7はある点に注入された染料がその点より下流の各断面で拡散している平均的な領域をスケッチしたものである。すなわち，たとえば図3-7(a)は $y=-1\text{ cm}$ 断面内での拡散範囲を示したものであり，図中括弧内の3つの数字は染料の注入位置の x ， y および z 座標を示している。ただ(j)図だけはとくに注入点を $z=0\text{ cm}$ から 3 cm まで 3 mm 間隔に分布させた場合の図であり，その線状の注入点の位置 (x ， y 座標) が図の上の位置から順次 $(-10, 0)$ ， $(-10, -1)$ ， $(-8, 0)$ ， $(-8, -1)$ ， $(-8, -2)$ ， $(-7, 0)$ となっている。

渦領域では流れの変動が大きいので拡散領域も不安定であり，スケッチは必ずしも正確とはいえないが，それでもこれらの図から次に述べる諸点が明らかになった。すなわち，

①渦の発生する範囲は，平均的に見れば，円柱前方の水路床に接する楔形の



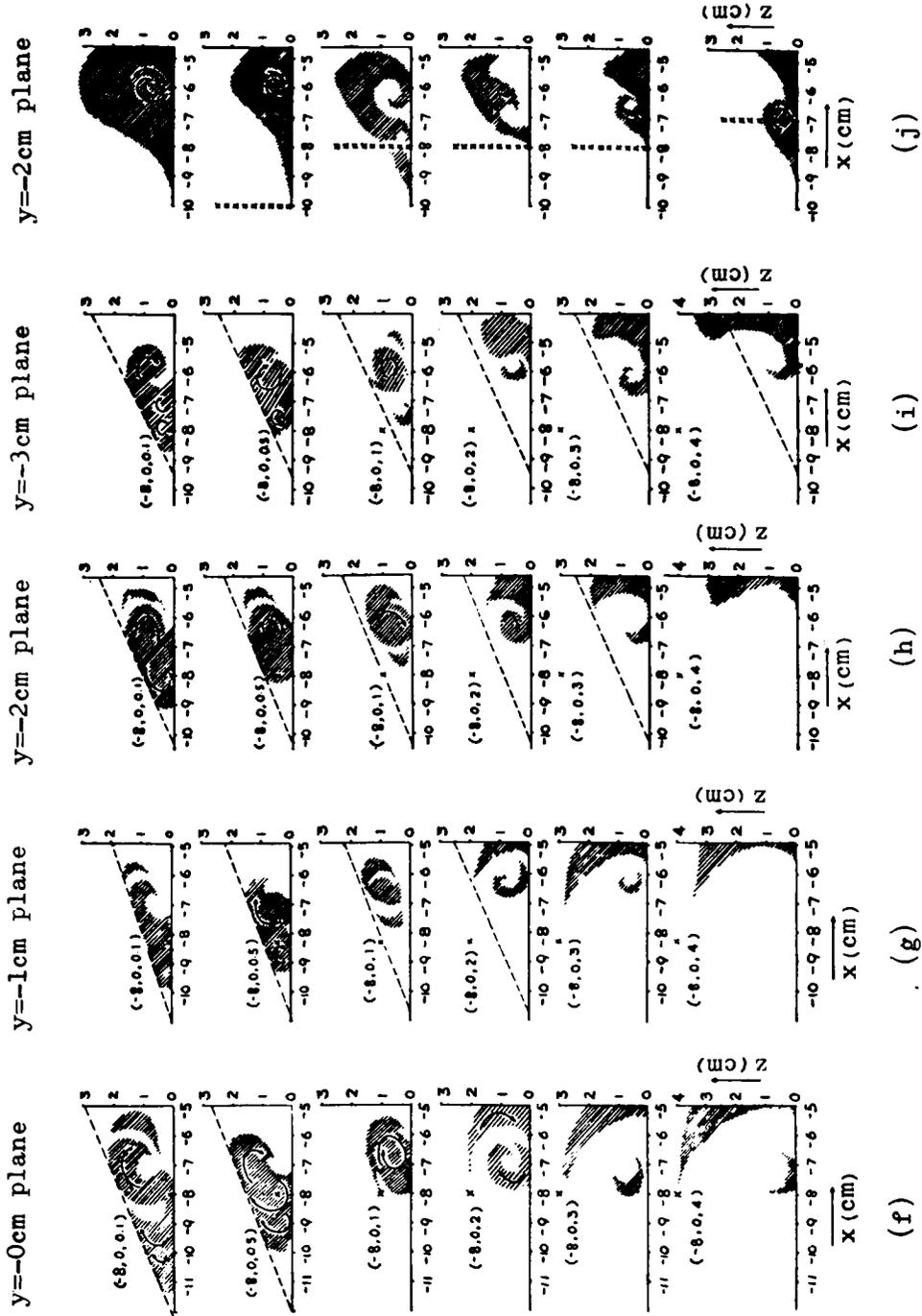


図 3-7 各位置で注入された染料が下流の各断面内で拡散する範囲のスケッチ (run L)

領域であり、その領域内で先に述べたように円柱橋脚に接して他の渦と比較して卓越して大きくまた比較的安定した主渦が発生しており、その外側（円柱橋脚から遠ざかった位置）にいくつかの不安定でスケールも小さな微小渦群が発生している。微小渦群は外側のものほどそのスケールが小さくなっている。

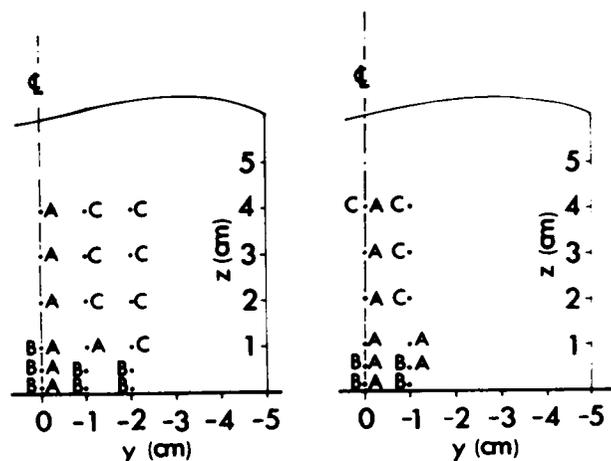
②同一の位置から注入された染料の拡散範囲は、下流側の断面（図では $|y|$ の値が大きくなることに対応する）におけるほど水路床面に近づく傾向が認められる。また、同一断面内での拡散範囲は、注入点が上方の位置にある場合ほど円柱橋脚に近づく傾向が認められる。

③水路床近くで注入された染料は主として微小渦領域にまきこまれ、それより上で注入された染料は主渦領域にまきこまれ、さらに水面近傍で注入された染料はいずれの渦領域へも導入されずほぼ水平に流下することが認められる。

各位置で注入された染料が各断面での領域に拡散しているかを示したものが表3-2であり、また、 $x = -8\text{cm}$ 平面および $x = -10\text{cm}$ 平面内の各地点で注入された染料が最終的に到達する領域をその注入点の位置に記入して図示したものが図3-8である。この図から、主渦領域へ導入される主流部分

の範囲は流れの対称面のごく近くであるが、ただ $z = 1.0\text{cm}$ のあたりでその幅が大きくなっていることが認められる。一方微小渦領域へ導入される主流部分の範囲は水路床から 1cm までの水路床に接した部分であることがわかる。

以上2種のトレーサを用いた実験の結果から、円柱橋脚前方の渦の形成状態



(a) $x = -10\text{ cm plane}$ (b) $x = -8\text{ cm plane}$

図3-8 各位置で注入された染料が主として拡散する領域 (run L)

coordinate of injecting point (cm)			plane of examination (cm)			
x	y	z	y=0	y=-1	y=-2	y=-3
-10	0	0.1		A,B	A,B	B
		0.5		A,B	A,B	A,B
		1.0		A,B	A,B	A,B
		2.0		A,B	A	A
		3.0		C	A	A
		4.0		C	A	A
-10	-1	0.1			B	
		0.5			B	
		1.0			A	
		2.0			C	
		3.0			C	
		4.0			C	
-10	-2	0.1				B
		0.5				B
		1.0				C
		2.0				C
		3.0				C
		4.0				C
-8	0	0.1	A,B	A,B	A,B	A,B
		0.5	A,B	A,B	A,B	A,B
		1.0	A	A	A	A
		2.0	A	A	A	A
		3.0	A,C	A,C	A,C	A
		4.0	A,C	A,C	A,C	A,C

A ; main vortex region
 B ; small vortices region
 C ; main flow region

表 3-2 各位置で注入された染料が主として拡散する領域 (run L)

は次のようであると考えられる。すなわち、流れの対称面内の流線を詳しく描くと図 3-9 のように回転方向の異なる複数個の渦が同時に発生しており、し

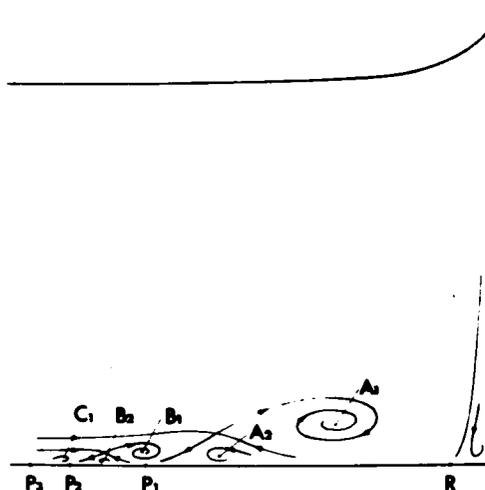


図 3-9 対称面内における渦の形成状況

かもこれらの渦が互に干渉しあって消長しているようである。これらの渦のうち、橋脚近くで最も大きく描かれている渦 A_1 が主渦であり、回転方向がそれと逆方向の渦 A_2 、 B_2 はいずれも非常に弱いもので、実際にはほとんど回転運動を行わず、単に逆流を形成しているだけのようなのである。したがって、主渦領域と今まで呼んできた領域は、主

渦 A_1 とその下に位置してそれと逆方向の回転を示す渦 A_2 、(あるいは逆流) とを含む領域であり、微小渦領域はそれ以外の渦領域ということになる。

(3) 細砂による観察

上で明らかにされた流れの領域区分および対称面内の渦を含む流線形状をさらに確かめるため、run L の実験条件の下で水路床に細砂をまいてその動きを観察した。まかれた砂が水路床上の流れに従って流下するにつれて水路床上に砂の模様が描き出されるが、それを写真撮影して図示したものが図 3-10 である。ただしこのような砂の模様は、砂がまかれた直後のものであり、また図の破線は砂の流下方向の包絡線ではなく、砂が流下するにつれて縞状に配列されるが、その縞模様を図示したものである。したがって、破線の形状と間隔は水路床に沿って発生している各種渦の形状とスケールを示すものと考えられる。この図において特徴的なことは、橋脚の周囲に橋脚とほぼ同心円状の 3 重の縞模様が描き出されており、しかも最も内側の縞模様は図 3-6 に示される主渦の領域とよく一致していることである。

さて、橋脚の上流側で砂の供給を続けると上図に示される砂の模様は若干の

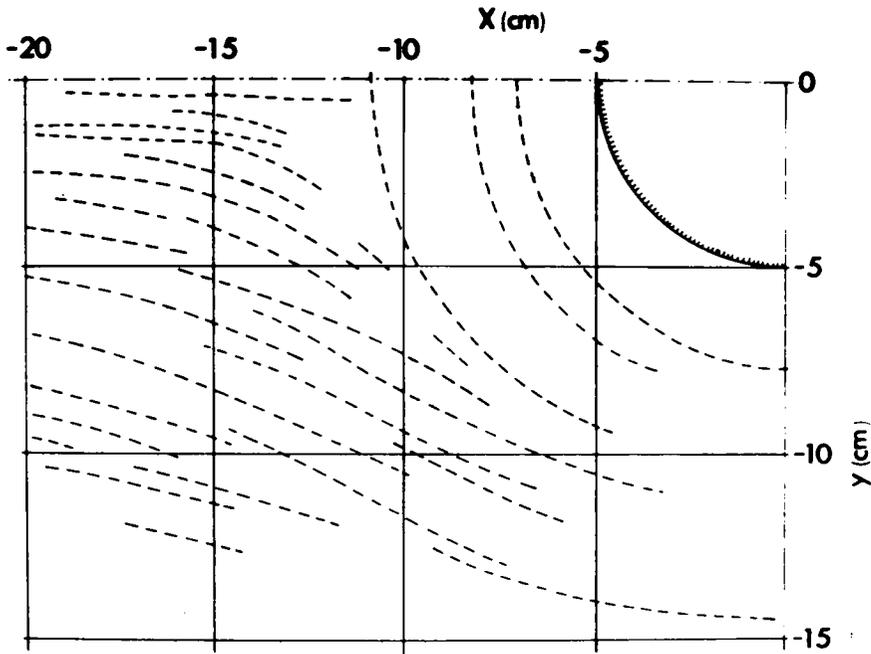


図3-10 水路床上にまかれた砂の描く模様 (run L)

変動を示しながらもほぼ同様の形で維持されるが、砂の供給を止めると、まず円柱橋脚周辺の縞模様のうち内側の2つがある場合には徐々に、またある場合は瞬間的に円柱から遠ざかる方向に移動し、最終的には消滅する。すなわち円柱と同心円状の3つの縞模様のうち最も外側の縞模様の内側の領域では砂がすべて排除されてしまうのである。

このような渦領域内における砂の移動現象を先に述べた渦の流線形状を基礎として考えると次のようになる。すなわち、図3-9において主渦 A_1 のためRからP₃までの水路床付近にはかなり強い逆流が存在するが、その逆流内に水路床に沿う境界層が発達する。この境界層内の渦度の符号は主渦 A_1 のもつ渦度の符号とは逆であり、そのような渦度が主渦の下に逆回転渦 A_2 の原因となっている。したがってこの逆回転渦 A_2 はそれと境を接する微小渦 B_1 とも当然渦度の符号を異にし、従ってこれら2つの渦の境界面が水路床に交わる曲線(本図

では P_1 で表わされている) は Lighthill¹³⁾ が示したように不安定な特異点を含む 1 つの流線を形成する。この流線が図 3-10 に示される同心円状の縞模様のうち最も内側の縞模様として描き出されている。同図のその外側の縞模様の形成状況もさらに外側の微小渦との関係において同様に説明される。またこれらの縞模様が外側へおしやられたのは、渦の位置、大きさおよび強さの変動および渦にともなう水路床近傍の逆流のためであると考えられる。

3.3.2 平均流向と平均流速

(1) 実験の方法

run K-1 の実験条件の下で平均流向と平均流速を測定した。平均流向は、測定位置に染料を細管で注入し、その流下方向を底面および側面から読みとる方法によった。その結果を図 3-11 および図 3-12 に矢印で示している。渦軸の近傍では流向の変動が著しく、平均的な流下方向さえつかみにくい測点もあるが、そのような測点では 2 本の矢印でその変動の範囲が示されている。平均流速の測定には熱膜流速計を用いた。ただし、本実験条件のように流向が時間的にも空間的にも著しく変動する場合、熱膜流速計の設定すべき方向が定まらないので、本実験では熱膜の支持棒が鉛直になるようにし、熱膜の軸は y 軸と平行になるように設置した。したがって、当然のことながら、平均流向と熱膜流速計の設定方向とのずれによる測定値の修正が必要である。さらに熱膜流速計はその機構上絶対流速に感応するようになっているので、渦軸近傍のように平均流速より乱れ速度の方が大きい場合には、平均流速の実測値は実際よりも大きくなっていると考えられ、その点でも実測値の修正が必要である。

(2) 平均流向、流速のパターン

以上のような問題があるが、それらの修正の方法は現在のところ明らかでないので、ここではひとまず実測された流速そのものを図 3-12 に平均流向とともに示した。

図 3-11 (a) において主渦および微小渦の存在が認められ、それにともない図 3-12 (a) および (b) では橋脚の直前面に逆流が認められる。一方微小渦領域内でとくに小さな渦が存在する部分では、渦のスケールが小さいことと渦軸

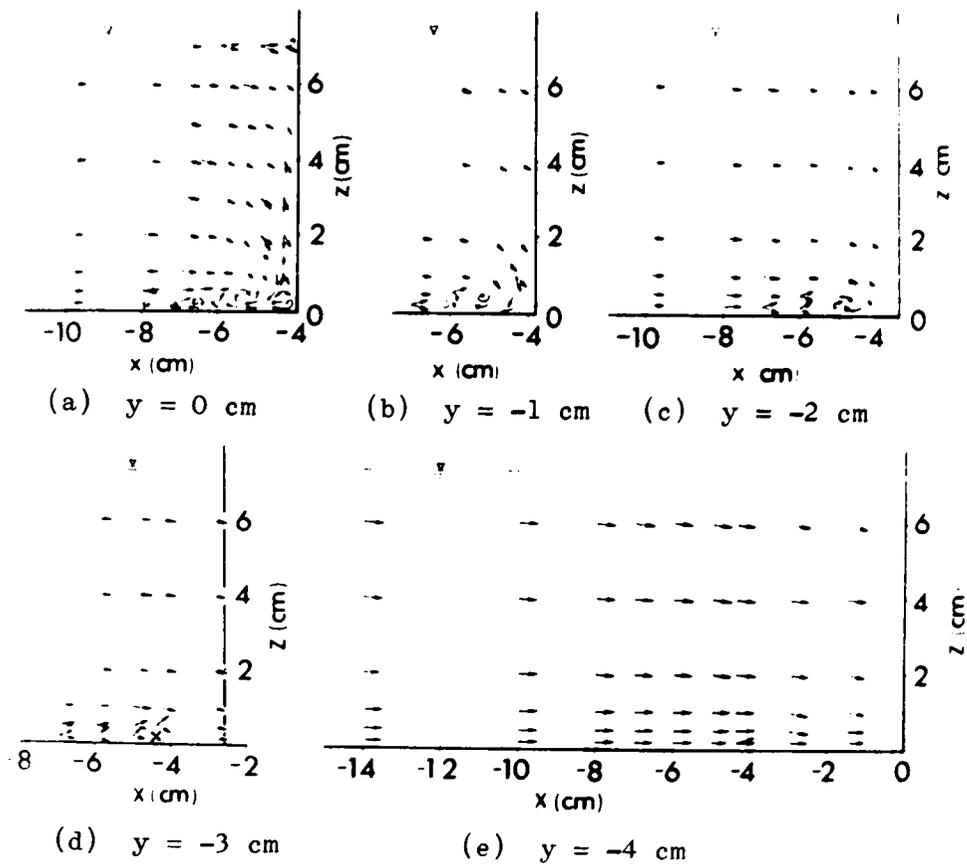


図3-11 鉛直縦断面内における平均流向 (run K-1)

の位置が時間的に変動することのため、渦内の水粒子の運動方向の測定は非常に困難である。したがって、図で示されている流向は渦軸の平均的な方向となっている。

(3) Johnston のモデル

Johnston⁶⁾ 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%以外のものはその先端が同一直線上

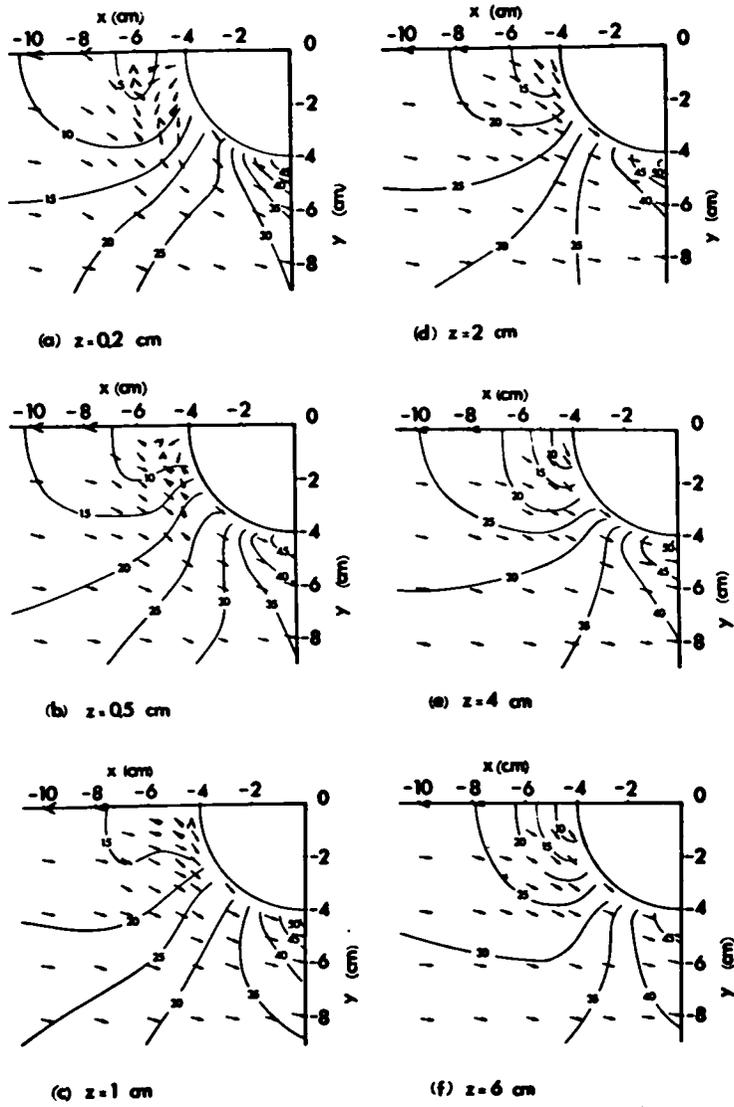


図3-12 水路床に平行な断面内の平均流速と平均流向 (run K-1)

にならぶことを見出した。このような流速ベクトルの特性は一般にJohnstonの三角形モデルといわれている。先に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ない、その結果を図3-13に示した。図中、括弧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

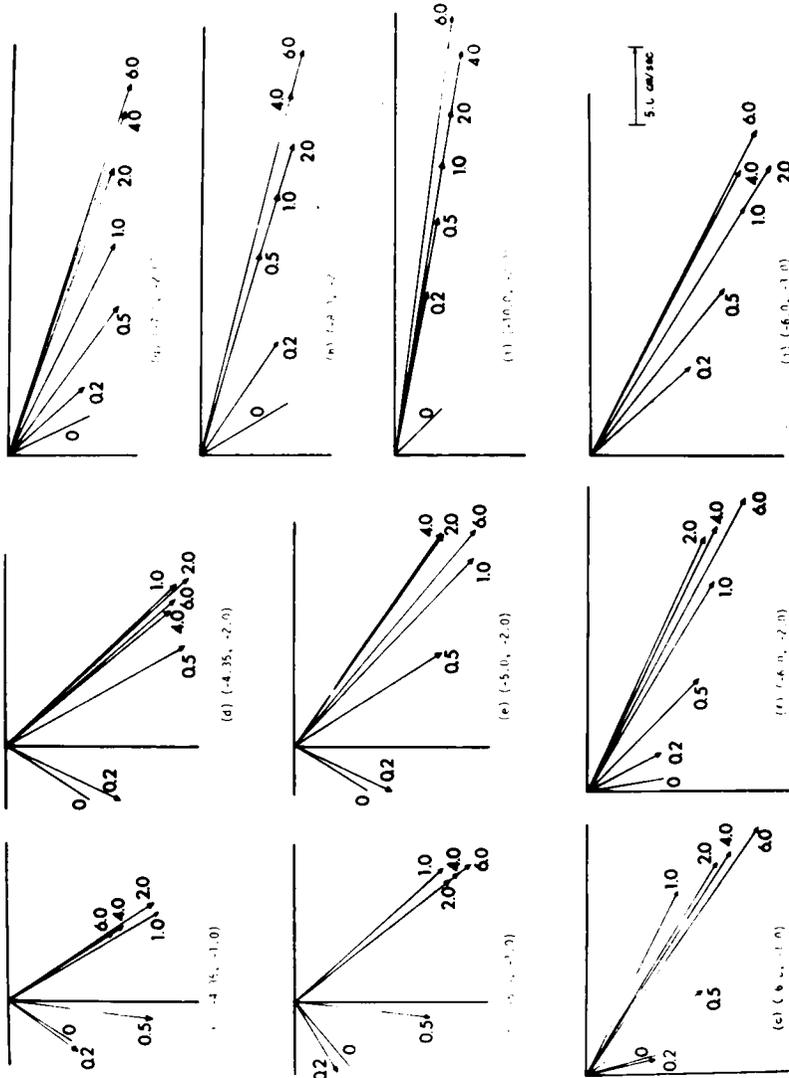


図3-13 Johnstonの三角形モデルの検討 (run K-1)

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。これらの図を概観すると、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群は図の (g) ~ (j) であり、Johnston のモデルがほぼ成立していることを示している。一方第2群の (a) ~ (f) は Johnston のモデルが $z=2.0$ cm より上の測点についてのみほぼ成立っており、 $z=0.2 \sim 0.5$ cm の測点については全く別の様子を示していることが認められる。さらに、第1群の測点については上部は主流域に下部は微小渦領域に属し、第2群の測点については上部は主流域に下部は主渦領域に属している。以上の観測結果を総合すると、Johnston のモデルは主流域および微小渦領域において成立つが、主渦領域においては成立せず、本実験条件では主渦領域の厚さは $1.0 \sim 2.0$ cm といえよう。

(4) 渦軸の形状

渦軸の平均的な位置と形状を知るために、図3-14において(a)にその平面的な位置を、また(b)にはその水路床からの高さ z_0 の θ 座標にともなう変化の様子を示した。ただし図中白丸印は主渦の軸の位置の実測値を示し、半白の丸印は微小渦のうち、最も卓越している渦の位置の実測値を示している。本図から、微小渦の軸は $R_0 = 6.10$ cm, $z_0 = 0.2$ cm でほぼ円柱橋脚と同心円状でかつ水路床に平行であることが認められる。一方、主渦の軸については $R_0 = 5.23$ cm

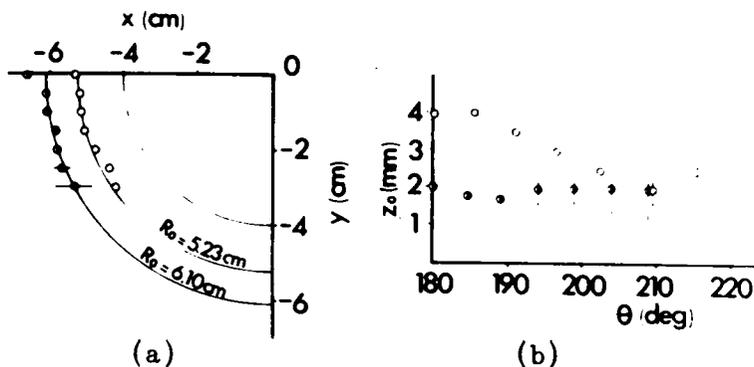


図3-14 渦軸の平均的な位置と形状 (run K-1)

ほぼ円柱橋脚と同心円状ではあるが水路床面からの高さは橋脚前方 ($\theta=180^\circ$) での $z_0=0.4\text{ cm}$ の高さから下流へ行くにつれて若干下っている傾向が認められる。

3.3.3 渦領域の大きさと渦軸の位置

(1) 実験の方法

幅 40 cm の実験水路の勾配を $1/1000$ に設定し、その中央に円柱断面をもつアクリル樹脂製の橋脚を1本設置して、渦領域の大きさおよび渦軸の位置を測定した (run G)。渦領域の測定は、表 3-3 に示すように、流量については5段階、水路の下流端におけるせき上げ状態については5種類設定し、その組合せによって15種類の流況の下で、かつ各流況の下で円柱の直径 $2r_0$ を 1.49 cm から 10.506 cm まで7種類 ($r_0=0.745, 1.015, 1.265, 2.013, 3.013, 4.013, 5.253\text{ cm}$) ないし11種類 (上記の他に $r_0=1.518, 1.763, 2.495, 3.500\text{ cm}$) について行なった。つぎに渦軸の位置の測定は上記のうち $Q=9.43, 20.0, 30.0, 40.0$ (l/sec) の流量で、下流端条件は自由落下の場合と、 3 cm および 8 cm のせきを設けた場合との組合せによる12種の流況について、また各流況毎に円柱橋脚は先述の7種類のものを設置して行なった。

渦領域の実測は次のようにして行なった。すなわち、細かい砂を水路床にまくと図 3-10 に示されるよう

Height of Weir at Downstream End	Discharge Q (l/sec)				
	0.77	9.43	20.0	30.0	40.0
0.0 cm	G 1-0	G 10-0	G 20-0	G 30-0	G 40-0
1.5 cm		G 10-1.5			
3.0 cm		G 10-3	G 20-3	G 30-3	G 40-3
8.0 cm		G 10-8	G 20-8	G 30-8	G 40-8
14.0 cm			G 20-14		

表 3-3 渦領域の大きさと渦軸の位置の実測のための実験条件

な模様が形成されることを先に示したが、各流況毎にこのような模様を写真撮影し、その結果から、同心円状の縞模様のうち最も外側の縞模様の対称面内での半径 \bar{r}_0 をよみとり、それで渦領域の大きさを代表させることにした。また渦軸の位置の測定は、流れの中に注入された染料が渦にまきこまれる様子から主渦の軸の対称面内における平均的な位置を水路床と円柱に刻みこんだ尺度から読みとることによったが、先述のように主渦軸もかなり変動しているので測定誤差が若干あると思われる。

(2) 渦領域

渦領域の大きさについては、 $\bar{r}_0 - r_0$ の実測値を水深 H で割って無次元化し、 r_0/H と関係づけた。その結果を図3-15に示す。この図から、同じ流況の下で設置する橋脚の半径だけを変化させると、渦領域の大きさの無次元量 $(\bar{r}_0 - r_0)/H$ は r_0/H の変化に従って両対数紙上でほぼ直線的に変化することが認められる。したがって、層流の場合の図2-25と同様に、

$$(\bar{r}_0 - r_0)/H = \alpha_1 (r_0/H)^{m_1} \quad (3-2)$$

とおくことができ、しかも α_1 と m_1 は r_0 には無関係で流況によって定まる定数と考えることができる。つぎに α_1 と m_1 をまさつ速度 $U_* = \sqrt{gHi}$ と水深 H を用いたレイノルズ数 $Re_i = U_* H/\nu$ と関係づけた結果が図3-16および図3-17である。ただしここで i は水路床勾配を意味し、また図においてプロットされた点は資料整理の結果えられた平均的な値であり、各点を通して縦方向にひかれた線分は各値の変動範囲を示している。これらの図から、 α_1 は Re_i の増加とともにほぼ直線的に減少し、一方、

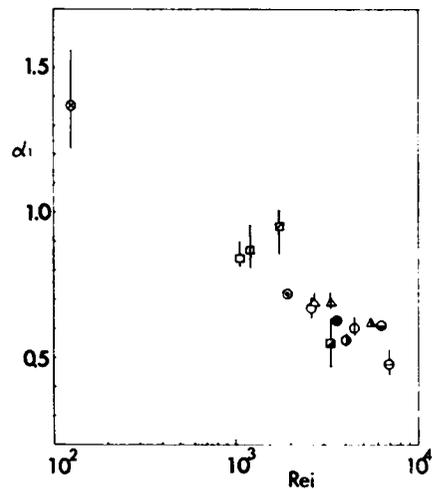


図3-16 α_1 と Re_i との関係

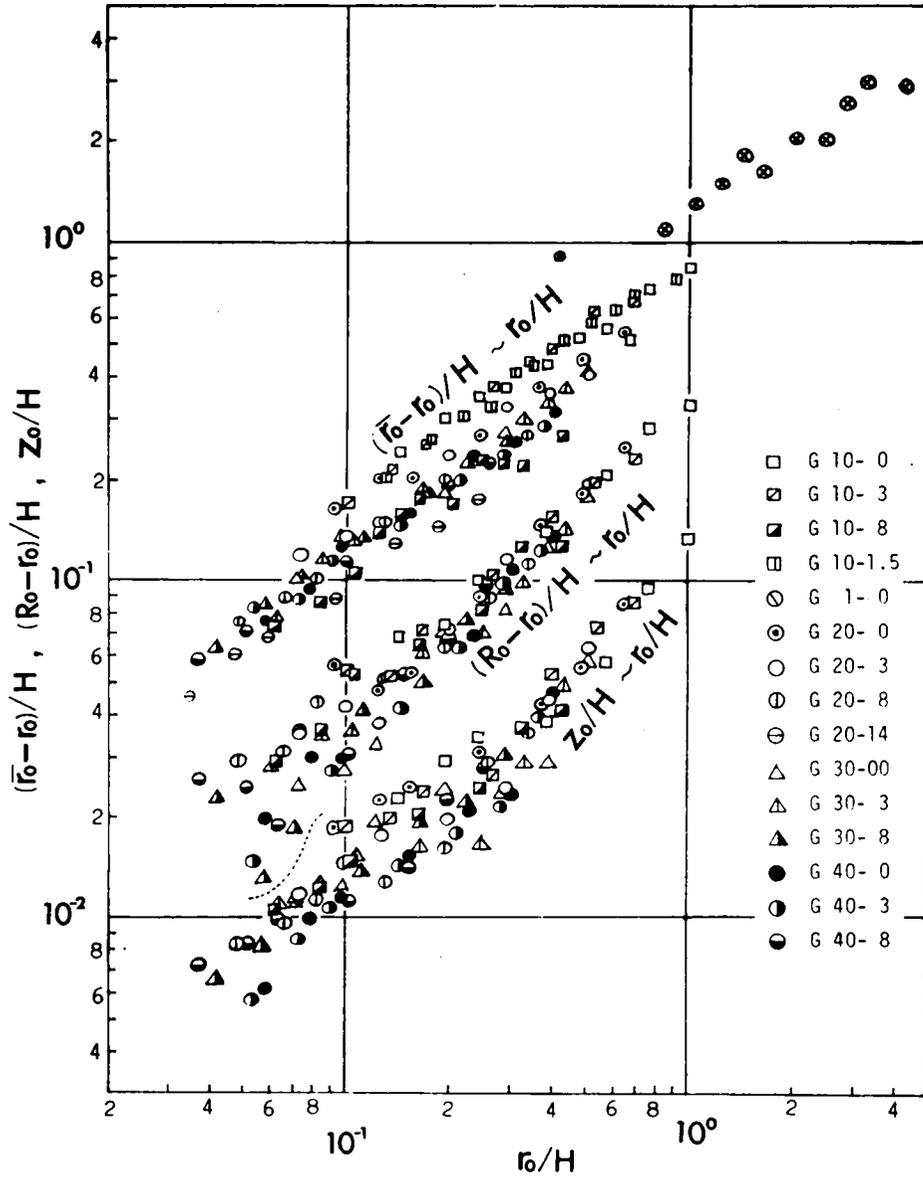


図3-15 渦領域の大きさと渦軸の位置

m_1 はほぼ 0.7 の一定値をとることがわかる。

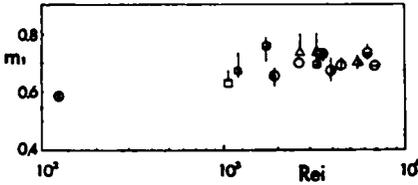


図 3-17 m_1 と Re_i との関係

(3) 渦軸の位置

渦軸の橋脚中心軸からの距離を R_0 、水路床面からの高さを z_0 とし、 $(R_0 - r_0)/H$ および z_0/H をそれぞれ r_0/H と関係づけ、その結果を同じく図 3-15 に示した。

先述のように渦軸の位置の変動がはげしく、その平均的な位置を正確に読みとることがかなり困難なため、上図においても資料のばらつきが大きくて明らかな相関関係をつかみにくいが、ここではひとまず先に述べた渦領域の大きさと同様に次式を設定して各係数を検討してみた。

$$(R_0 - r_0)/H = \alpha_2 (r_0/H)^{m_2} \quad (3-3)$$

$$z_0/H = \alpha_3 (r_0/H)^{m_3} \quad (3-4)$$

すなわち、上式中に含まれる α_2 、 α_3 、 m_2 および m_3 を渦領域の場合と同様に Re_i と関係づけ、その結果を図 3-18～3-21 に示した。これらの図から、 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る。つぎに α_2 および m_2 については点のばらつきが大きいのでそう明確ではないが平均的にはそれぞれ 0.3 および 1.0 ぐらいの値である。

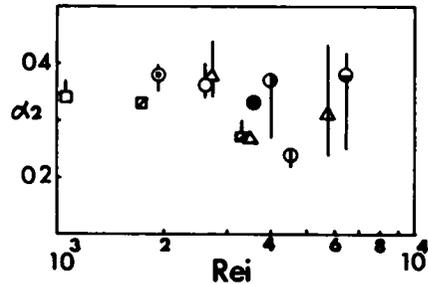


図 3-18 α_2 と Re_i との関係

3.3.4 粒子状トレーサによる渦内の流速分布の測定

先述した Cl-Benzen と n-Hexane の混合液をトレーサとして流れの中に注入し、それが流れに従って流下する様子をストロボ照明の下で 2 台のカメラを用

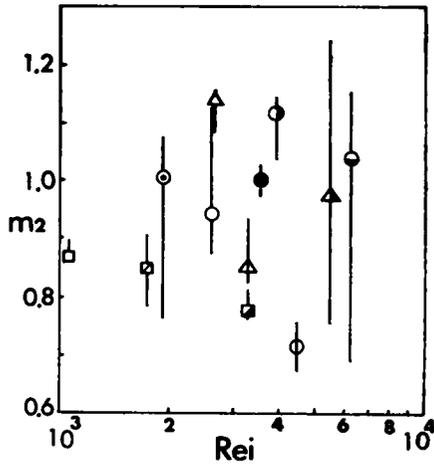


図 3-19 m_2 と Re_i との関係

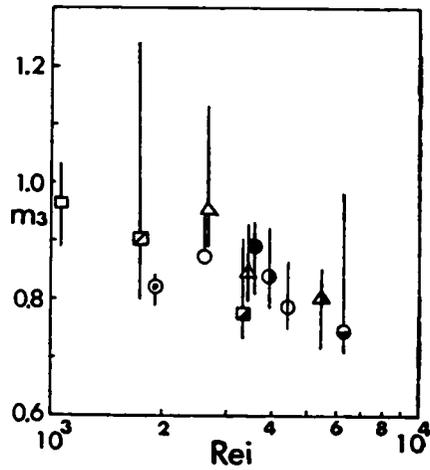


図 3-21 m_3 と Re_i との関係

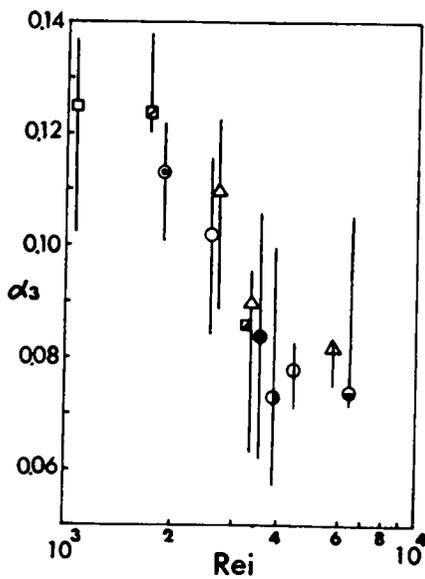


図 3-20 α_3 と Re_i との関係

いて立体写真撮影し、それをステレオトプを用いて解析することによって一つ一つの粒子の高さおよび平面的な位置を求めた。解析結果の一例を図3-22に示す。この図から、渦領域内に入った粒子はらせん状に渦軸のまわりを回転しながら流下していることが認められるので、渦軸に直角な方向の成分 v_r と渦軸に平行な方向の成分 v_z とに分けてそれぞれを計測した。すなわち、ストロボの照射サイクルを 1200 r.p.m. としたので、写真中の点の数から各粒子の渦軸のまわりの回転周期 T (sec) が求め

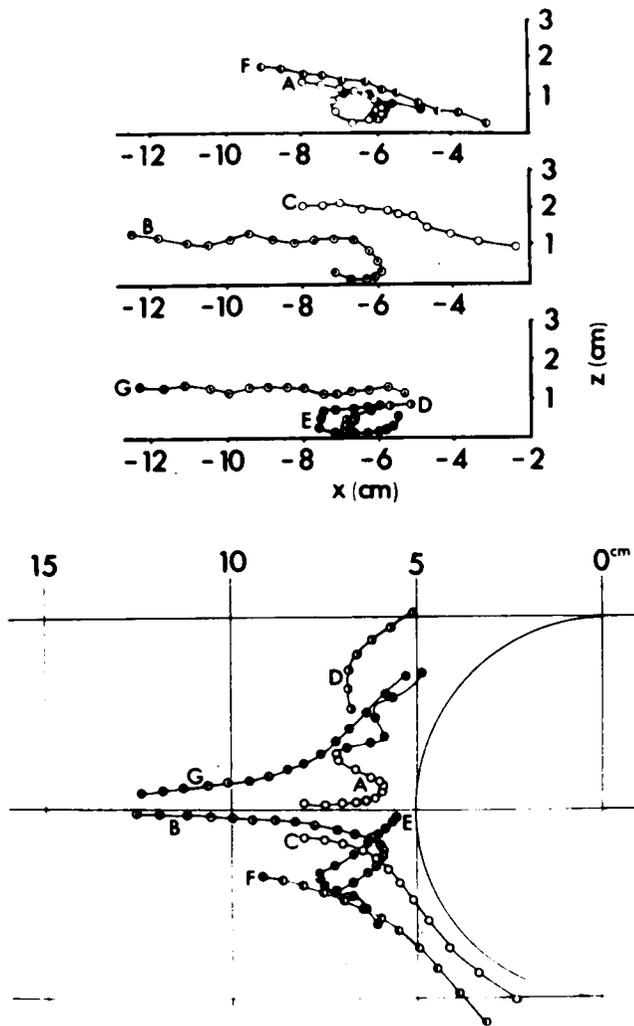


図3-22 立体写真撮影と3級図化機によるトレーサ粒子の位置の解析例

事がいえる。すなわち、微小渦のスケールはせいぜい直径 0.5 mm 程度であり、主渦内の v_θ の分布は、渦軸から 0.25 mm 以上隔たった所では、渦軸からの距離に無関係にほぼ 7.6 cm/sec で一定である。なお、 $2r = 0.5 \text{ cm}$ を下まわる実験資料

られ、一方上述の立体写真解析から粒子の平均的な回転半径 $r(\text{cm})$ が求められる。それらの関係を図示したものが図3-23である。この図から、主渦領域ではほとんどの資料は $2r > 0.5 \text{ cm}$ となっており、しかも平均的に $T(\text{sec}) = 8.2r(\text{cm})$ という関係があり、一方微小渦領域では T の大きさに無関係に $2r$ がほぼ 0.5 cm で一定であるという注目すべき事実が認められる。実験資料の数が少ないので、上の事実が普遍的に成立つとはいいがたいが、いちおうこの事実を前提とすれば次の

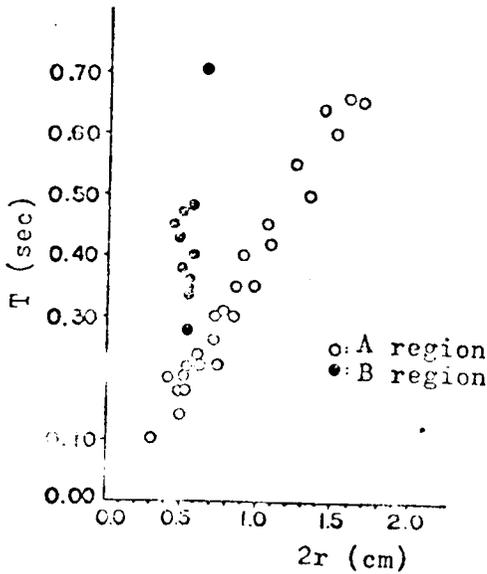


図3-23 渦内のトレーサ粒子の回転半径と回転周期との関係 (A: 主渦, B: 微小渦)

がほとんどないのは、トレーサ粒子の直径が2~3 mmであるため、0.5 cmより小さな直径の回転運動を行っていたとしても事実上回転運動として実測できなかったためと考えられる。

つぎに渦領域内のトレーサ粒子の渦軸と平行な方向(θ 方向)の流速成分 v_θ を度/sec単位で求め、 θ 座標と関係づけて図示したものが図3-24である。ところで、染料をトレーサとして用いた観察により主渦の軸の位置(R_0, z_0)はほぼ(6.5 cm, 0.5 cm)であることがわかっている。そこで、0.5 cmの高さにおける接近流速の実測値

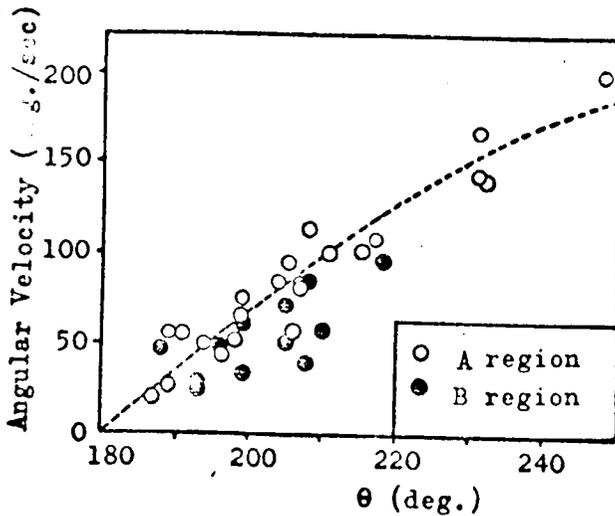


図3-24 渦領域内のトレーサ粒子の θ 方向流速成分 (A: 主渦, B: 微小渦)

14cm/secを接近流速として、2次元ポテンシャル流の流速分布式を用いて渦軸の位置における θ 方向の流速成分 v_θ を計算し、上図中に破線で示した。すなわち、図中の破線は円柱の直径 r_0 を5.0cmとして、 $r=6.5$ cmの位置の v_θ を求めたものである。本図から、主渦内の流速の θ 方向成分 v_θ は2次元ポテンシャル流と同様の流況を示すことが認められる。すなわち、主渦領域内の流体は近似的に、円柱のまわりの2次元非回転運動と渦軸のまわりの回転運動とを同時に行なっているという重要な事実が明らかになった。

3.4 乱流中におかれた橋脚前方の流れに関する解析的研究

3.4.1 乱流の場合と層流の場合の流況特性の対応性

前節まで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、それと層流の場合の流れの特性との間に若干の相異点があることも明らかになった。そこで、層流の実験を基礎にしてえられ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体的に整理し検討することが必要である。

(1) 乱れの影響 当然のことながら、乱流の場合乱れという現象が新たに加わるが、平均流のみを対象とする場合は基本的な解析モデルを根本的に変える必要はない。

(2) 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になっている。いうまでもなく乱流の場合の流速分布則はいわゆる対数則に従う。一方、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異はない。なお以下の解析では対数則の代りに $1/7$ 乗則を用いているが、それは $1/7$ 乗則による方が計算が簡単であり、また実測値もほぼそれに適合しているためである。

(3) 渦の個数 馬蹄型渦が層流の場合は単数であったが、乱流の場合は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呼んできた橋脚に近い渦が、強さの点でも大ききの点でも他の渦に比べて卓越しているので、まず第1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とすると、層流の場合との相異点はなくなってくる。

(4) 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かっていくぶん下っていることが認められたが、その低下は顕著でないので、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。また接近流中の渦度の分布が、乱流の場合の方が相対的に水路床近くに偏るので、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相異は認められない。

ただし層流の場合に対して、すでに解析モデルについてつぎのような問題点があることを指摘した。すなわち、第1に解析モデルにおいて、主流中に含まれている渦度のうち水路床近くのものについては、渦領域に集中させられるとしてその効果を考慮しているが、それ以外の主流中の渦度の役割は無視される結果になっている。そのため、橋脚前方の対称面内での下降流について解析値と実測値とを比較してみると、渦領域の近傍での適合性はよいが、それより上の部分では解析値は実測値より小さめの値になっている。したがって、第2に、実際には橋脚前方に生じる下降流のため橋脚の側方に近づくにつれて流量は下の方へ偏っているにもかかわらず、解析結果はこのような現象を表現できていない。すなわち、水路床近くで、流速の θ 方向成分の実測値は解析値より大きくなっている。

これらの点については、乱流の場合の解析結果を検討するときとくに留意しておく必要がある。

3.4.2 解析モデルの構成

前項までの考察によって、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。つぎに馬蹄型渦による回転運動とそれにとまなう流体運動を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。

(1) 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、これらは2次元非回転流理論によって次のように与えられる。

$$\begin{cases} u_r = U_0 \left\{ 1 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right\} \cos \theta & (3-5) \\ u_\theta = -U_0 \left\{ 1 + \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right\} \sin \theta & (3-6) \\ u_z = 0 & (3-7) \end{cases}$$

ここで U_0 は接近流速であり、流速分布則 (いまの場合 $1/7$ 乗則を仮定) によって z のみの関数である。上式は層流の場合の主流の流速成分を与える式(2-9)~(2-11)と形式上同じものである。

乱流の場合、先に述べたように U_0 は $1/7$ 乗則に従うと仮定するので、つぎのように与えられる。

$$U_0 = U_{0s} (z/H)^{1/7} \quad (3-8)$$

ここで、 U_{0s} は接近流の水面における流速である。

(2) 2次流の流速成分

3.3.1における粒子状トレーサあるいは染料を用いた実験から、乱流の場合も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。この事実と層流状態での実測結果とから、乱流の場合の馬蹄型渦の発生は接近流の平均流がもつ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て妥当であろう。さらに3.3における実測から、乱流の場合、渦軸は数個ありしかも渦軸の位置は下流へ行くにつれて若干水路床に

近づいているという傾向が認められたが、3.4.1(3)および(4)で述べたように、本解析においては第1次近似として渦軸はただ1つであり、またそれは水路床に平行で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、2次流については層流の場合と何ら変わる所がなく、層流の場合の2次流の式(2-27)～(2-32)と全く同じ形で乱流の場合の2次流が与えられることとなる。すなわちこれらの式を再記するとつぎのようである。

① $r_1 \leq a$ かつ $r_1' \leq a$ の領域、

$$u_z' = 0 \quad (3-9)$$

$$u_r' = -\frac{\kappa}{\pi r} \frac{R_0 z_0}{a^2} \quad (3-10)$$

② $r_1 \leq a$ かつ $r_1' > a$ の領域、

$$u_z' = \frac{\kappa}{2\pi r} \frac{R_0(r-R_0)}{a^2} \left(-1 + \frac{a^2}{r_1'^2}\right) \quad (3-11)$$

$$u_r' = -\frac{\kappa}{2\pi r} R_0 \left(-\frac{z-z_0}{a^2} + \frac{z+z_0}{r_1'^2}\right) \quad (3-12)$$

③ $r_1 > a$ かつ $r_1' > a$ の領域、

$$u_z' = \frac{\kappa}{2\pi r} R_0(r-R_0) \left(-\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_1'^2}\right) \quad (3-13)$$

$$u_r' = \frac{\kappa}{2\pi r} R_0 \left(\frac{z-z_0}{r_1^2} - \frac{z+z_0}{r_1'^2}\right) \quad (3-14)$$

(3) 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(3-5)～(3-8)で与えられる主流の各流速成分と、式(3-9)～(3-14)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るであろう。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、つぎのようになる。

$$\kappa = \frac{\pi \delta^2 U_{0s}}{z_0} \left(\frac{z_0}{H}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \cos \theta \quad (3-15)$$

ここで、 δ は $a \leq 2z_0$ 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。

(4) 3次元流速分布式

式(3-15)で与えられる ϵ の値を2次流の流速分布式(3-9)~(3-14)に代入し、これを主流の流速分布式(3-5)~(3-8)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 および z 方向流速成分 U_r 、 U_θ 、 U_z がつぎのように与えられる。

① $r_1 \leq a$ かつ $r_1' \leq a$ の領域,

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_r}{U_{0s}} = -\frac{R_0 \delta^2}{a^2 r} \left(\frac{z_0}{H}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \cos \theta \\ \quad + \left(\frac{z}{H}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \cos \theta \end{array} \right. \quad (3-16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_\theta}{U_{0s}} = -\left(\frac{z}{H}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \sin \theta \end{array} \right. \quad (3-17)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U_z = 0 \end{array} \right. \quad (3-18)$$

② $r_1 \leq a$ かつ $r_1' > a$ の領域,

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_r}{U_{0s}} = -\frac{R_0 \delta^2}{2 z_0} \cdot \left(\frac{z_0}{H}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \frac{1}{r} \left(-\frac{z-z_0}{a^2} + \frac{z+z_0}{r_1'^2}\right) \cos \theta \\ \quad + \left(\frac{z}{H}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \cos \theta \end{array} \right. \quad (3-19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_\theta}{U_{0s}} = -\left(\frac{z}{H}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \sin \theta \end{array} \right. \quad (3-20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_z}{U_{0s}} = \frac{R_0 \delta^2}{2 z_0} \left(\frac{z_0}{H}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \frac{r-R_0}{r} \left(-\frac{1}{a^2} + \frac{1}{r_1'^2}\right) \cos \theta \end{array} \right. \quad (3-21)$$

③ $r_1 > a$ かつ $r_1' > a$ の領域,

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_r}{U_{0s}} = \frac{R_0 \delta^2}{2 z_0} \left(\frac{z_0}{H}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \frac{1}{r} \left(\frac{z-z_0}{r_1^2} - \frac{z+z_0}{r_1'^2}\right) \cos \theta \\ \quad + \left(\frac{z}{H}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) \cos \theta \end{array} \right. \quad (3-22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_\theta}{U_{0s}} = -\left(\frac{z}{H}\right)^{1/2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right) \sin \theta \end{array} \right. \quad (3-23)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{U_z}{U_{0s}} = \frac{R_0 \delta^2}{2 z_0} \left(\frac{z_0}{H}\right)^{1/2} \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2}\right) \frac{r-R_0}{r} \left(-\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_1'^2}\right) \cos \theta \end{array} \right. \quad (3-24)$$

(5) 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 3.3.3 の式 (3-3) および (3-4) 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 3-25 に示す。図中実測値は白い丸印で、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、

$$U_r = U_{0s} (1 - r_0^2 / R_0^2) \quad (3-25)$$

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 $k=2.0$ のときに実測値と計算値との適合性がもっともよく、また、この場合の $k=2.0$ という値は層流の場合と同じ結果になっている。そこで、以下では乱流の場合においても k は一定値 2.0 をとるものとして以下の考察をすすめる。

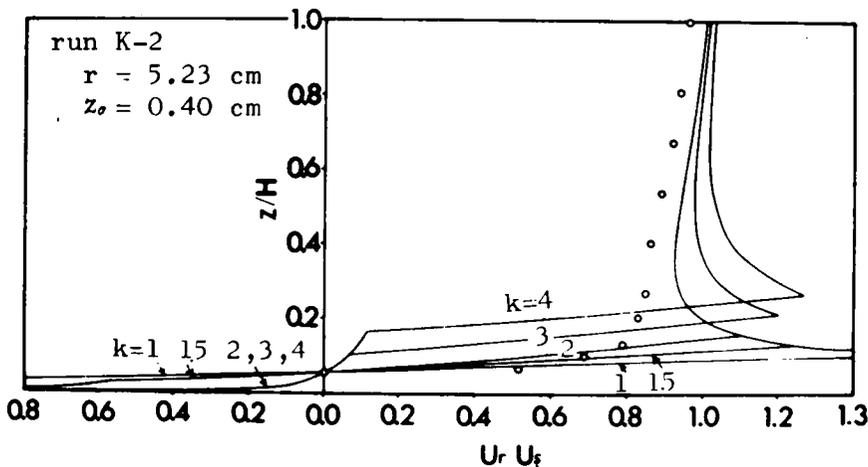


図 3-25 渦軸の位置における r 方向流速成分

3.4.3 解析結果の検討と主渦の特性

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、解析の過程での主要な仮定や近似のほとんどは層流の

場合のそれが踏襲されており、渦軸を単一とする近似がそれにさらに加わった結果になっている。

本項では 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明らかにするとともに、乱流の場合の馬蹄型渦の特性について検討を加える。

(1) z 方向流速成分の検討

対称面において底から $3H/4$, $H/2$, $H/4$, $H/8$, および z_0 の高さにおける z 方向流速成分の解析値と実測値とを比較して図 3-26 に示す。図で実測値は白い丸印で、解析値は実線で、さらに吉川らの解析値は破線で示されている。ただし $z=H/8$ および z_0 の断面においては吉川らの解析値は本図の U_z の目盛をはるかに越えているので記入されていない。

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の適合の度合いはよいといえるが、それ以外の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。

さて、第 2 章での実験的検討において、層流の場合の解析モデルは図 2-8 に示される A 領域すなわち渦にまきこまれる流線群を含む領域を主に対象としており、したがってその領域における実測値と解析値の適合性がよいことを示した。ところで、乱流の場合の解析モデルが基礎としている主要な仮定あるいは近似は層流の場合の解析モデルのそれをほとんど踏襲しているから、乱流の場合においても上記のことと同様なことが指摘できよう。ところが乱流の場合、接近流中の渦度分布は層流の場合に比べて水路床の方へ偏っていることもあり、図 2-23 と図 3-15 とを比べても明らかのように渦軸の水深に対する相対的な位置も低くなっている。したがって層流の場合の A 領域に相当する領域は、乱流の場合には水路床近くのかなり限られた範囲になっている。このことは 3.3.1 (2) の結果からも明らかである。すなわち、解析モデルにおいては主流中に含まれる渦度のうち水面近くの領域のものについてはその役割を無視した結果になっているわけであるが、そのような領域の範囲が乱流の場合の方が層流の場合に比べて相対的に大きくなっている。図 3-26 において解析値と実測値との適合性がよい範囲が限られているのは以上のような理由に基づくものと考えら

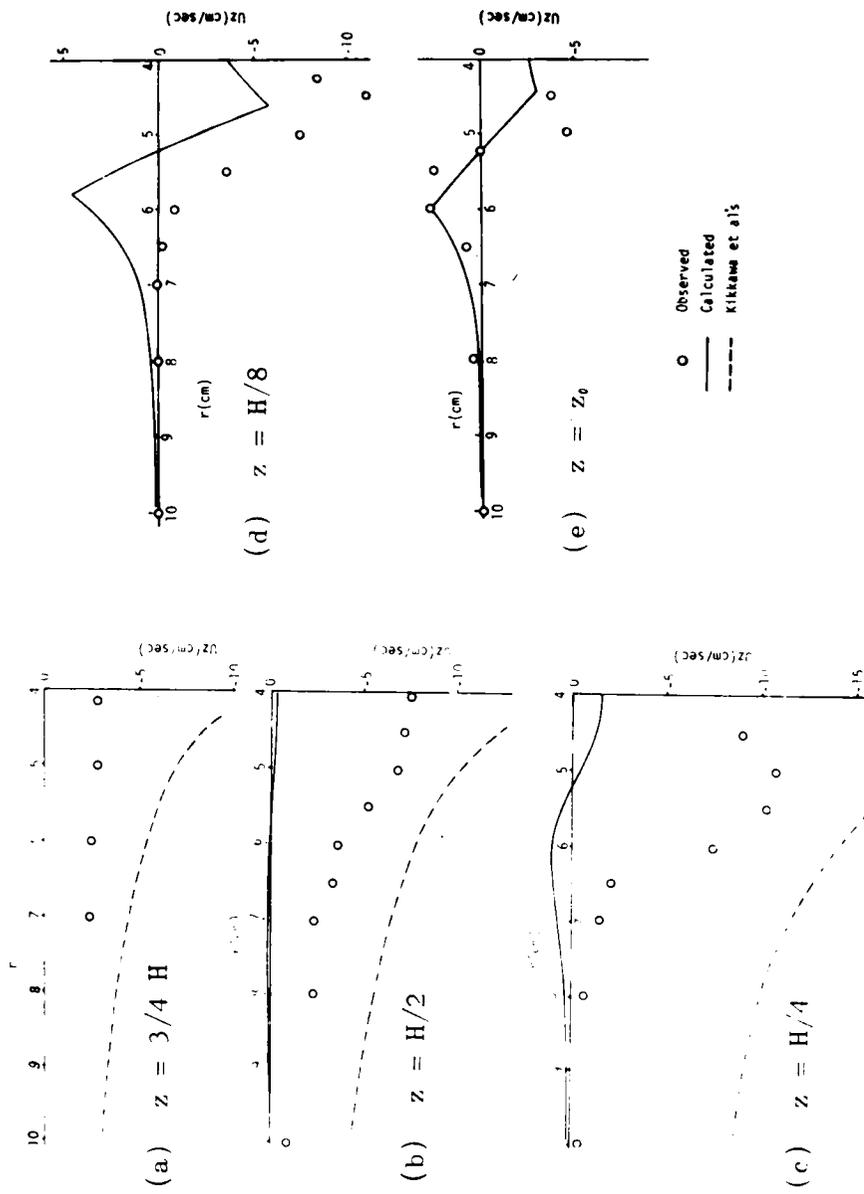


図3-26 対称面内における U_z の分布の検討

れる。

(2) r 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, $r = 5.23 \text{ cm}$ (渦軸の位置) および $r = 6.5 \text{ cm}$ 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 3-27 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

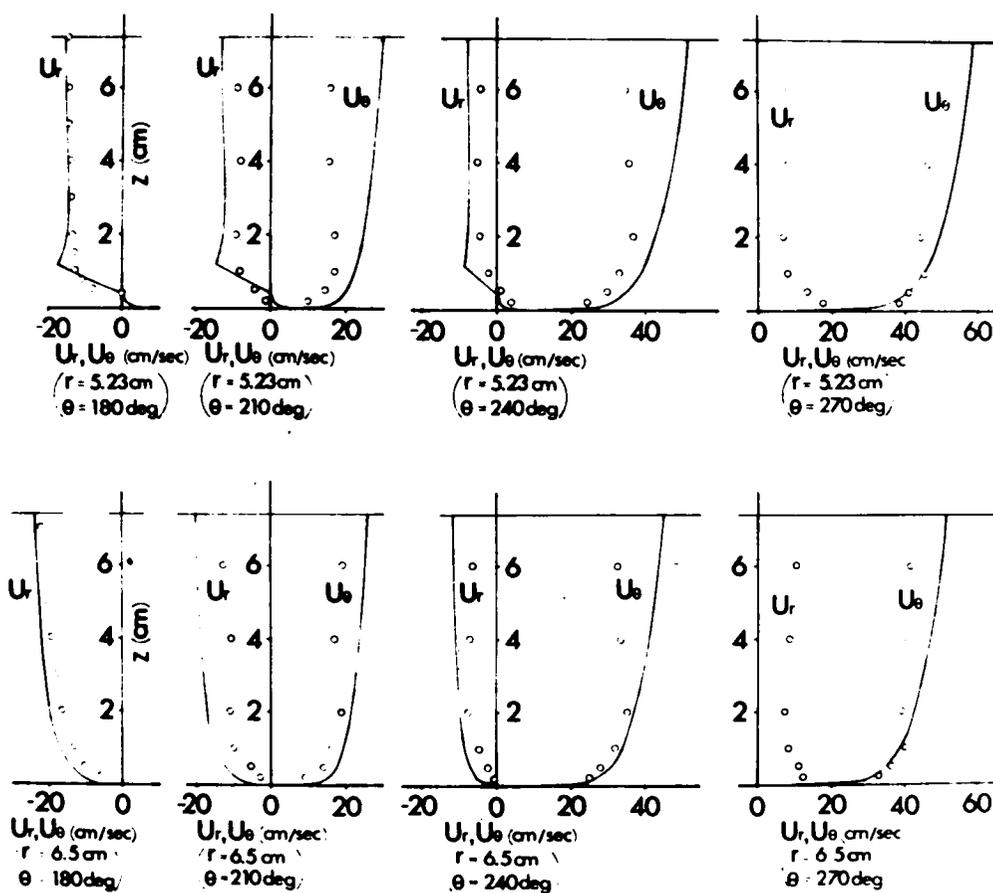


図 3-27 U_r および U_θ の分布の検討

しており、解析値ではこのような傾向を表現できてないことがわかる。本節のはじめに指摘したように、橋脚前方での下降流に伴な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、馬蹄型渦を含めて全体の3次元流況がかなりよく表現されているということができよう。

3.5 結 言

本章では、第1に、乱流の場合における局所流の3次元計測方法を明らかにすること、第2に馬蹄型渦の特性をなるべく詳細に把握すること、そして第3に、第2章で提案された解析モデルの乱流への適用性を明らかにすること、の3つの目的の下に実験的・解析的研究を行なった。

3.1では、空気流の場合も含めて剪断流中におかれた障害物前方の局所流に関する従来の研究を概観し、馬蹄型渦の実態把握がおくれていることを指摘した。

3.2では乱流状態における局所流の3次元計測法として、液体トレーサと2台の普通カメラによる立体撮影法とを組合せたFlow Visualizationの方法を提案し、その具体的内容を明らかにした。すなわち、

① Cl-Benzen と n-Hexane および蛍光塗料を混合してその密度を水のそれに等しくしたものを、細管を通じて流れの中に注入すると、直径が0.05~5mmの粒子状になり、これがトレーサとして有効に用いられることを実験的に明らかにした。

② 2台の普通カメラと35mmフィルムを使って水路の底から流れの中の標的を実体写真撮影し、その結果を3級図化機を用いて解析するという方法によって、フィルムの中央部分では1mm以内の精度で標的の位置をよみとることができることを具体的に示した。

③ ストロボ照明の下で上記のトレーサを流れの中に注入し、それを2台のカメラを用いて実態写真撮影し、その結果を統計的に処理することによって、乱流の場合の3次元流線形状と流速分布を実測することができた。

3.3 では、上記の方法を含む各種の方法を用いて、乱流中に設置された橋脚前方の局所流の実態を把握した。すなわち、

①橋脚前方の水路床近くには、数個の渦が発生しており、それらは互に干渉しながら変動し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を図示すると、対称面内では図3-9のようである。

②これらの渦を構成する流体は主流のうちの対称面の近くの部分から供給されている。

③これらの渦のうち橋脚の近くにある渦 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, C_1 は不安定であり、微小な渦群を形成している。

④Johnstonの三角形モデルは主流域および微小渦領域では成立つが、主渦領域では成立しない。

⑤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行くにつれて若干低下する傾向が認められる。

⑥主渦領域および微小渦領域の存在のために、橋脚前方には水路床近傍に逆流が生じるが、水路床面に接する逆流域の形状は橋脚とほぼ同心円状で、その半径 r_0 は式(3-2)で与えられる。

⑦主渦軸の対称面内における位置(R_0, z_0)は式(3-3)および(3-4)により与えられ、式中の諸係数はまさつ速度と水深を用いたレイノルズ数の関数として与えられた。

3.4 では、前章における層流実験に基づいて設定された解析モデルの乱流の場合への適用性と主渦の特性について検討した。すなわち、

①乱流の場合の実験結果から層流の場合の解析モデルが基礎としている主要な仮定あるいは近似は乱流の場合にもほぼ踏襲してよいことが明らかになった。さらに乱流の場合にこのモデルを適用するための第1次近似として、渦軸は単一でありかつ水路床面に平行であると仮定すると、乱流中に設置された橋脚前方の流れの3次元流速分布は式(3-16)～(3-24)で与えられる。

②上記の解析モデルは馬蹄型渦にまきこまれる流線を含む領域を主として解析の対象としているが、この領域は層流の場合に比較して相対的に狭くなって、

渦軸とその近傍あたりに限られている。その結果、 z 方向流速成分は渦軸とその近傍では適合性がよいが、それより外の領域では解析値は実測値よりかなり小さな値を与える。

③ θ および r 方向流速成分 U_θ および U_r については、解析値と実測値とはかなりよく一致している。ただ、橋脚前方の下降流のために、実際には橋脚側方で水路床近くに流速が偏る傾向が認められるのに対し、解析値ではこういった傾向は表現できていない。

参 考 文 献

- 1) Posey, C. J. : Why bridges fail in floods , Civil Engineering , Vol. 19, 1949, p. 42, 90 .
- 2) 小川芳昭 : 橋脚のまわりの流れに関する一実験的考察, 北海道開発局土木試験所月報, 第182号, 1968, pp. 15 - 25 .
- 3) 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., U. S. A., 1967, pp. 151 - 161 .
- 4) Shen, H. W., V. R. Schneider and S. Karaki : Local scour around bridge piers , Proc. ASCE, Vol. 95, No. HY 6, 1969, pp. 1919 - 1940 .
- 5) 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, No. 194, 1971, pp. 83-90 .
- 6) 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, 1972, pp. 31 - 36 .
- 7) Gregory, N. and W. S. Walker : The effect on transition of isolated surface excrescences in the boundary layer , Rep. Memor. Aero. Res. Coun., London, No. 2779, 1951, pp. 1 - 23 .
- 8) Johnston, J. P. : On the three-dimensional boundary layer generated by secondary flow , Trans. ASME, Ser. D, Vol. 82, 1960, pp. 233 - 248 .
- 9) Hornung, H. G. and P. N. Joubert : The mean velocity profile in

- three-dimensional turbulent boundary layers, *Jr. Fl. Mech.*, Vol. 15, 1963, pp. 368 - 384.
- 10) East, L. F. and R. P. Hoxey : Low-speed three-dimensional turbulent boundary-layer data, *Reports and Memoranda, Aeronautical Research Council, No. 3653*, 1969, pp. 1-82.
- 11) 浅沼強, 武田定彦 : 水の電気分解による流れの可視化について, *日本機械学会誌*, 第 31 巻, 222 号, 1965, pp. 223-232.
- 12) Allen, J. R. L. : *Current ripples*, North-Holland, 1968, pp.19-21.
- 13) Lighthill, M. J. : *Boundary layer theory, Laminar boundary layers* (edited by L. Rosenhead), Oxford Univ. Press, 1963, p. 72.
- 14) 宇民正 : 橋脚周辺部における流れのパターンについて, *京大防災研究所年報*, 第 12 号 B, 1969, pp. 529-541.
- 15) 宇民正 : 橋脚前面の渦の機構に関する実験的研究, *京大防災研究所年報*, 第 16 号 B, 1973, pp. 533-542.
- 16) 宇民正, 上野鉄男 : 円柱橋脚前面の 3 次元的な流速分布特性, *土木学会第 29 回年次学術講演会講演概要集*, 第 2 部, 1974, pp. 318-319.

第4章 円柱橋脚後方の流れの機構に関する研究¹⁾

4.1 概 説

橋脚の後流域の河床では一般に洗掘域と堆積域とが複雑な形状で交錯しながら発達する。たとえば図4-1は建設省土木研究所での実測結果を示したものの

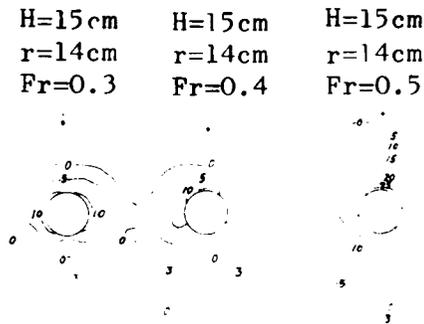


図4-1 円柱橋脚後流域の洗掘堆積形状

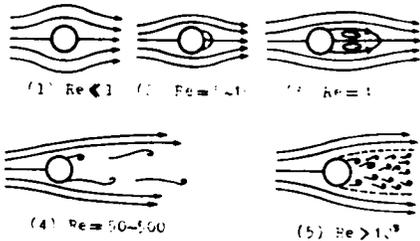


図4-2 一様流中の円柱後流パターン

が認められる。こういった橋脚後流域の洗掘・堆積現象の複雑さのため、それらを防止・軽減する方法の選択やその効果についても不明な点が多く残っている。

ところで、いうまでもなく河川流は一般に乱流であるが、乱流の場合、橋脚の後流域には大小無数の渦が存在し、しかもこれらが3次元的にからまりながら時間的にも変動するので、後流域での流れの特性を詳細に把握することは非

であるが、後流域での洗掘と堆積の様相が簡単な相似モデルでは表示しえないことを示している。一様流中に設置された円柱の後流域の流れの様相は図4-2¹⁾に示されているようにレイノルズ数によりその様相を異にするが、上記の洗掘・堆積の様相の非相似性

もこのような現象を反映したものと考えられる。さらに第1章～第3章で述べて来た接近流速分布に基因する局所流が円柱橋脚の後流域の洗掘・堆積形状に及ぼす影響も無視できないであろう。実際図4-1においても、橋脚の前方から側方にまで達する局所洗掘の影響が後流域にまで及んでいること

常に困難である。一方、層流で実験を行なうならば、現象も比較的単純であるし実測方法としても Flow Visualization 法が有効に用いられるのでかなり詳細に現象を把握できると考えられる。さらに乱流の場合の後流渦のうち低周波の渦の特性については、ある程度層流の場合の渦の基本特性から推定することができると考えられるし、実際に洗掘や堆積に重要な役割を果すのはこのような低周波の渦であろう。

そこで本章では、まず層流状態で円柱橋脚の後流に関する詳細な実測を行なって後流渦に関する基本的な特性を把握し、次いで乱流状態については比較的容易に実測できる事項のみを明らかにして、その結果を層流の場合と比較検討することによって後流渦の特性を把握しようとした。

層流の場合も乱流の場合も平滑な固定床水路で実験を行なったが、これは境界条件をできるだけ簡単にすることによって現象把握を容易にしようとしたためである。

4.2 層流実験に基づく円柱橋脚後方の流れに関する研究

4.2.1 実験装置および方法

実験は幅 20 cm、勾配 1/500 の実験水路で行ない、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 3 次元的速度分布を水素気泡法を用いた Flow Visualization によって測定した。測定点での水深は 4.5 cm でほぼ一定である。接近流の水路中央における流速分布は図 4-3 に示すようであり、図中の実線は表面流速を 6.9 cm/sec としたときの放物型流速分布式を図示したものである。第 2 章において接近流の流速分布が放物型流速分布に従うと仮定してその実測値から動粘性係数を求めたが、ここでも同様にして動粘性係

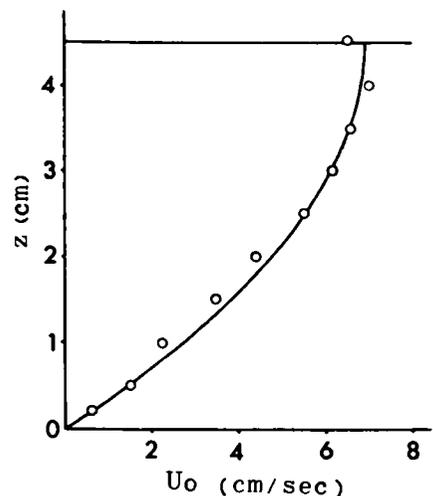


図 4-3 接近流速分布

数を計算すると $\nu = 2.88 \text{ cm}^2/\text{sec}$ となり、橋脚の直径 $2r_0 = 2.0 \text{ cm}$ と平均流速 $U_{0,m} = 4.6 \text{ cm}/\text{sec}$ とを用いて計算したレイノルズ数は 3.19 である。

4.2.2 渦の形成状況による後流域の分類

長さ約 10 cm の白金線の陰極を主流に直角かつ水平に、 $x = -2.0 \text{ cm}$ の位置で高さ方向に $z = 0.1, 0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 4.3 \text{ cm}$ にそれぞれ設定し、5 サイクルの電圧をかけたとき、それぞれの高さの陰極から発生する水素気泡の条線は一つの曲面を形成する。以下これを気泡曲面ということとする。

図 4-4²⁾ はこれらの気泡曲面の (a) $x = 0 \text{ cm}$, (b) $x = 2.5 \text{ cm}$, (c) $x = 5.0 \text{ cm}$ の各横断面における形状を示したものである。後述のように、本実験では $x = 6 \text{ cm}$ の所に一般にカルマン渦とよばれている渦が左右交互に発生し下流へ

流下することが認められているが、本図はこのような渦が発生しない領域の状況を示したものである。本図において破線によって A, B, および C の 3 つの領域を区分しているが、A 領域は円柱の存在に伴なう 3 次元流況が顕著に認められない領域で、ここでは流れはほぼ 2 次元であると見做し得る。一方 C 領域は前節までに詳しく調べて来た馬蹄型渦の延長に相当する部分である。ただ本図では C 領域で各気泡曲面の断面は大きな彎曲を示しているが、これは橋脚前方での回転運動によって各気泡曲面が彎曲させられた結果が本図の各横断面においても維持されているためであり、本図に示された各横断面内では、C 領域の回転運動は非常に微弱なものになっていることが認められた。いいか

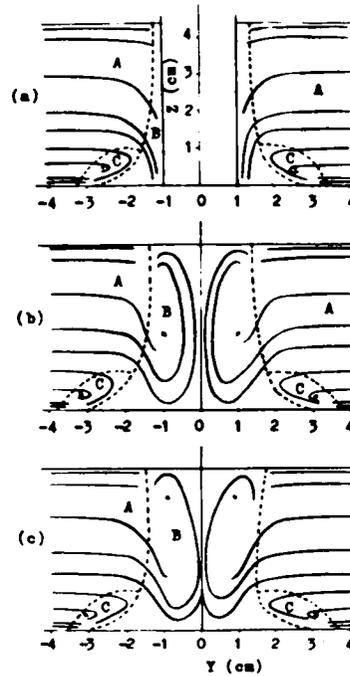


図 4-4 橋脚上流に水平にはった白金線から出る水素気泡が形成する曲面の横断形状

えるならば、馬蹄型渦は、本実験の場合、橋脚後方ではほとんど消滅しており、C領域はA領域と区別がつきにくくなっている。一方、B領域の回転運動は馬蹄型渦の回転運動と方向が逆であり、この回転運動にともなって水路中心断面近くでは強い上昇流が生じていることが認められた。このB領域に含まれる各気泡曲面はほぼ $z=2.5\text{cm}$ より下ではA領域につながっており、それより上ではA領域の気泡曲面とはつながっていないという特徴が認められる。また、 $x=-2.0\text{cm}$ の横断面を通過する流線のうち、 $z=0\sim 1.2\text{cm}$ の高さにあるものはA領域か馬蹄型渦にまきこまれておりB領域にはまきこまれない。B領域にまきこまれる流線は $x=-2.0\text{cm}$ の断面でほぼ $z=1.2\sim 3.5\text{cm}$ の高さにあるものであり、さらに $z=3.5\sim 4.5\text{cm}$ の流線はB領域にまきこまれず、A領域内を流下することが認められた。

以後便宜上、A領域を主流域、B領域を後流はくり領域、C領域を馬蹄型渦領域とよぶことにする。

4.2.3 水路床面に平行な断面内の流れのパターン

水路床面に平行な各断面内での流速と流向を実測し、その結果のうち若干例を図4-5に示した。すなわち水素気泡法により $x-y$ 平面内の流速ベクトルを実測し、これらのベクトルを接線とする一連の曲線（以下、便宜上擬似流線とよぶことにする）を破線で、またこの平面内の流速ベクトルの大きさ $q = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$ の等速度線を実線でそれぞれ図に示した。

これらの観測から、橋脚の前方においても後方においても流れの様子が水面近傍と水路床近傍とは全く異なったものになっていることが明らかになった。すなわち、円柱橋脚の直下流において、水路床面から 1.5cm までの高さにある流線は比較的大きな曲率をもって水路中央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一般にカルマン渦とよばれる下流へ流下してゆく渦（以下流下型渦とよぶことにする）も認められない。一方 $z=1.5\sim 4.5\text{cm}$ の各断面では橋脚の表面で流れのはくりが認められるが、流下型渦はほぼ $z=2.5\text{cm}$ より上に位置する断面で、はくり点より若干下流のほぼ $x=6\text{cm}$ の所で発生し下流へ流下するにつれて発達あるいは拡散していくようである。

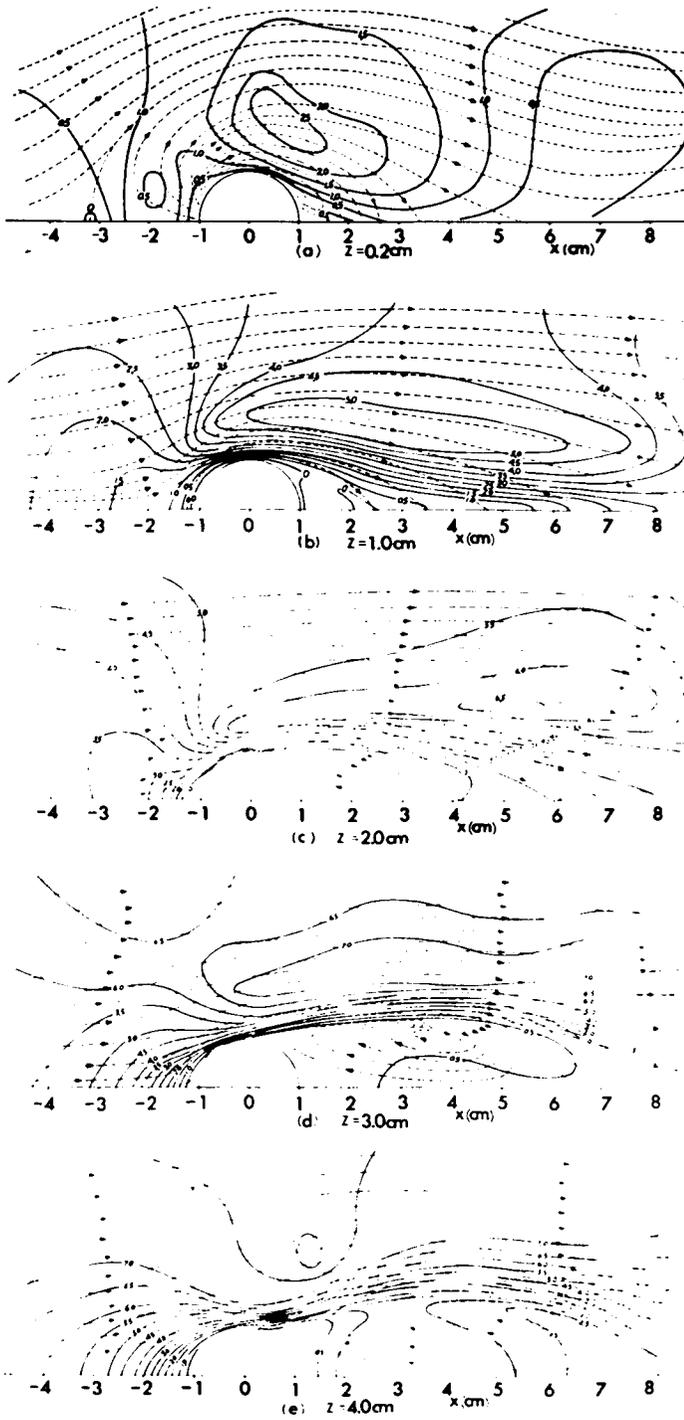


図 4-5 水路床面に平行な断面内の流速と流向の分布

さらに図4-5において、 $z \geq 2.0 \text{ cm}$ の各断面に流れの比較的安定した回転運動があることが認められる。上記の流下型渦に対して、この回転運動を以下においては定置型渦とよぶことにする。この定置型渦の回転運動の中心の位置、渦の領域およびそれにともなう逆流域の境界線が、水路床面からの高さ z によってどのように変化するかを示したものが図4-6である。この図から、定置

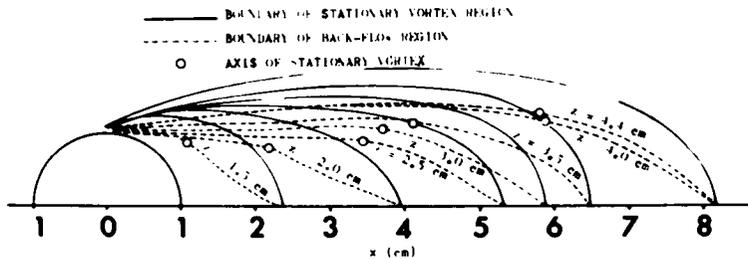


図4-6 定置型渦領域、逆流域および定置型渦軸の位置の空間的分布

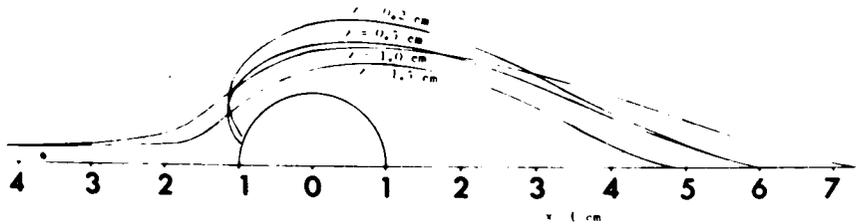


図4-7 定置型渦にまきこまれる流線を含む領域の空間的分布

型渦の回転運動の中心は水面に近づくとつれて下流側に偏っていること、および定置型渦の領域は水面に近づくとほど大きくなっていることが認められる。一方、 $z < 1.5 \text{ cm}$ の領域では、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、定置型渦にまきこまれる。そこでこのような流線すなわち水路床近傍にあって定置型渦にまきこまれている流線を内包する領域の外側境界線を示すと図4-7のようになる。図4-6に示じた定置型渦の回転運動にともなう逆流の流量はほぼ $1.4 \sim 1.5 \text{ cm}^3/\text{sec}$

と見積られ、一方 $x = 0 \text{ cm}$ の断面で図 4-7 に示された領域を通過する流量も上とほぼ等しい値となる。連続の条件を考慮すると、以上の事実から、図 4-7 で示される水路床面付近の領域を通過した流量が流れの対称面付近を上昇し、定置型渦を構成することが明らかになった。なお、図 4-6 と図 4-7 で示されている領域を加え合わせたものと図 4-4 で示される後流はくり領域とは境界線の位置を若干異にしているが、これは図 4-4 においては各気泡曲面の横断線の変曲点を目安に境界線を引いたのに対し、図 4-6 では、図 4-5 に示される水路床面に平行な擬似流線がほぼ閉じている範囲を定置型渦の領域としたためである。

4.2.4 流下型の渦と渦度 ζ の分布

2, 3 の予備的な実験によると、橋脚後方の土砂の洗掘・堆積現象に流下型渦が重要な役割を果していることが認められた。そこで、ここでは流下型渦の発生機構を層流状態での実験に基づいて考察する。

図 4-5 では、流線についても流速についてもともに平均的なものを示したので流下型渦は示されていないが、先述のように流下型渦は $z > 2.5 \text{ cm}$ かつ $x > 6.0 \text{ cm}$ の領域で現われることが認められた。また流下型渦の軸は水面に直角ではなく下流方向へかなり傾いており、水面近傍においても流れは 2 次元的好い難いことが認められた。ところで、ほぼ $x = 6 \text{ cm}$ の所で左右交互に現われる流下型渦は流下するにつれて発達あるいは拡散してゆくが、ほぼ $x = 12 \text{ cm}$ より下流では渦列の横断方向の間隔はほぼ一定で 3.2 cm となっている。先述のように橋脚の直径と平均流速を用いたレイノルズ数は 3.19 であるが、流下型渦が水面近くに発生することを考慮に入れて表面流速を用いてレイノルズ数を求めると 4.79 となる。一方、水面において観測された流れのパターンを図 4-2 と比較すると、一様流においてレイノルズ数が 50~500 のときに発生する流れのパターンが、本実験では 10° のオーダーの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。

つぎに流下型渦のストローハル数を平均流速を用いて計算すると 0.23 となるが、流下型渦が水面近傍で顕著に認められることに基づき水面における流速を用いて計算すると 0.16 となる。ストローハル数が約 0.2 でほぼ一定であるレイ

ノルズ数の範囲は $5 \times 10^2 \sim 2 \times 10^3$ といわれているが、³⁾本実験のように 10° のオーダーの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は注目すべきことである。

流下型渦の発生は渦度 ζ の分布と密接な関連があると考えられるので、図 4-5 から各水平断面における渦度ベクトルの z 方向成分 ζ_z を求め、その分布を図 4-8 に示した。本図の計算にあたって、計算位置での流線の曲率半径を R とするとき、 $\zeta = q/R + \partial q/\partial R$ の関係式を用いているので、 $\partial q/\partial R$ や R の実測精度から考えて十分正確とはいえないが、一応本図から次の点が指摘できる。すなわち、①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。②渦度 ζ の最大値は水面ではなく $z=3.0\text{cm}$ の断面で発生している。③帯状にのびた渦度領域はこの断面に近い断面におけるほどその形状が細長くなっている。

つぎに $z=4.0\text{cm}$ 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 \mathbf{u} として慣性項 $(\mathbf{u} \cdot \text{grad}) \mathbf{u}$ はほぼ $240 (\text{cm}^2/\text{sec})$ で、粘性項 $\nu \partial^2 \mathbf{u}/\partial y^2$ はほぼ $1200 (\text{cm}^2/\text{sec})$ となり、粘性の影響が非常に大きいことを物語っている。橋脚前方に生じる馬蹄型渦が主として慣性項に支配されていることは第 1 章における運動方程式中の各項の比較によってもまた第 2 章における実験的検討によっても示されているが、これに対して上記の事実は、層流状態における流下型渦は馬蹄型渦とはその発生の機構を異にすることを示している。

以上の実験的検討によって明らかになった諸事実を基礎に、水面近傍（ほぼ $2.5\text{cm} \leq z \leq 4.5\text{cm}$ ）における橋脚下流部の流れの領域区分を整理して示すと図 4-9 のようになる。すなわち、橋脚下流部の流れは、主流域と後流はくり領域とに大別され、後流はくり領域はさらに定置型渦領域と流下型渦領域とに領域区分される。流下型渦領域をさらに細分すると、渦の発生域、発達域および一様域となる。定置型渦領域はほぼ $x=6\text{cm}$ の位置まで達しており、またほぼ $x=12\text{cm}$ より下流が一様域となる。後流はくり領域は $x \doteq 12\text{cm}$ より上流では主流流下方向と約 13° の角度をなして拡がり、一様域の幅は約 3.7cm でこれは橋脚の直径の約 2 倍に匹敵する。

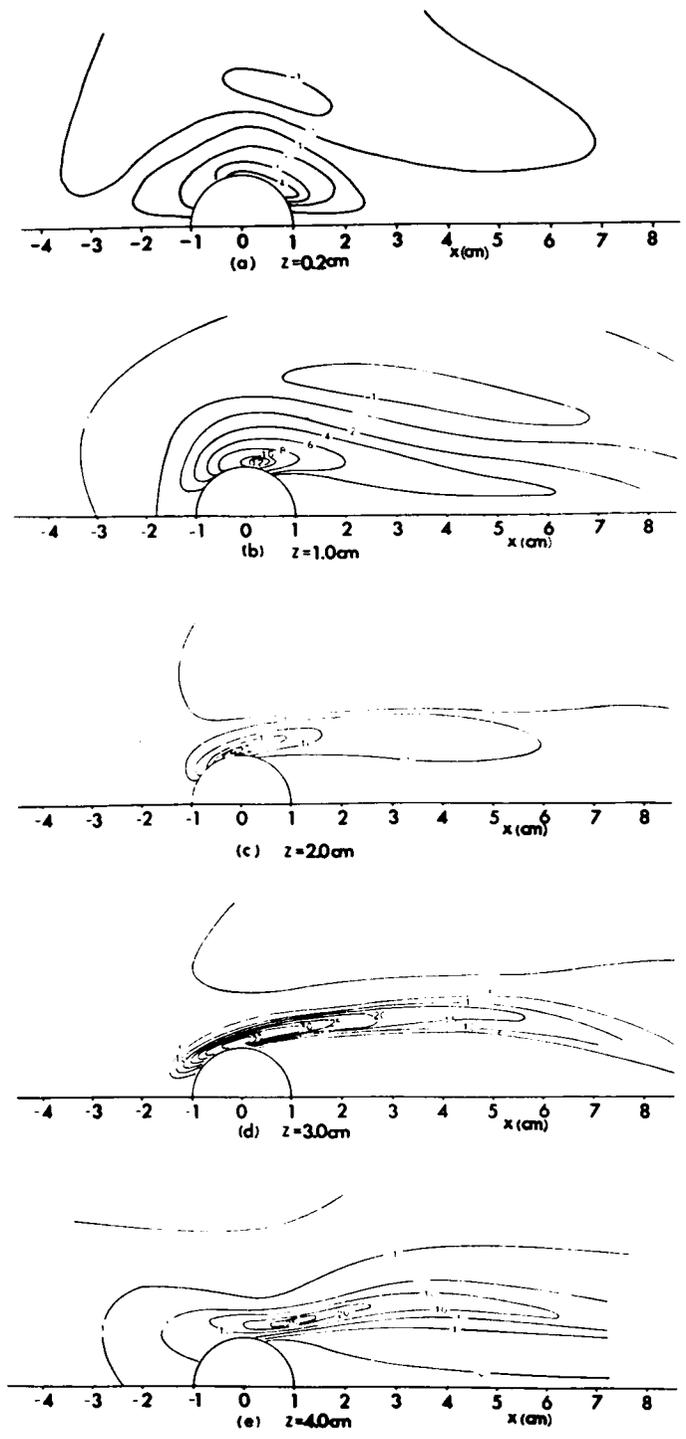


図 4-8 水路床面に平行な断面内の k の分布

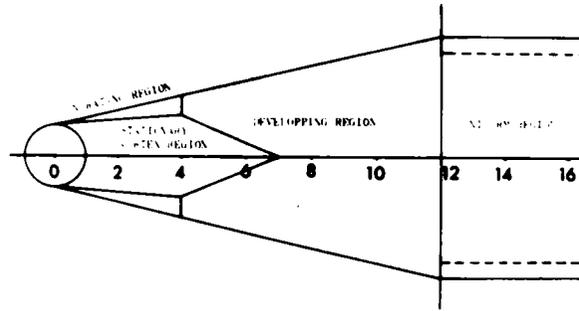


図 4-9 水面近傍の流れの領域区分

4.2.5 流れパターンの水路側面からの観察

$y = 0.0, 0.5, 1.0$ および 1.5 cm の各鉛直縦断面内の各位置に第 2 章の図 2-6 (c) で示されている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することにより、各断面内における流速ベクトルの実測を行なった。その結果から、各縦断面内の擬似流線を 4.2.3 と同様の方法で求め、 $q = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$ で表示される流速の等速度線とともに図 4-10 に示した。

この図から、水路の中央 ($y = 0.0 \text{ cm}$ の縦断面) 付近において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非常に異にしており、後流域における流れの複雑さを物語っている。 $y \geq 0.5 \text{ cm}$ の各断面には渦巻状の流線が認められるが、これは先に述べた定置型渦の鉛直断面を示したものである。

つぎに、これらの図から渦度の y 方向成分 η を求めたものが図 4-11 である。この図の作成にあたっては図 4-8 と同様の計算方法をとったため精度は十分ではないが、 $y = 1.5 \text{ cm}$ の縦断面において底面近くに $\eta = 30 \text{ } 1/\text{sec}$ という大きな渦度が生成されていることが認められる。この大きさは図 4-8 に現われている η の最大値と同程度の大きさである点が注目される。またこの渦度の最大値の位置が、ちょうど図 4-7 に示されている定置型渦へ流れを供給している領

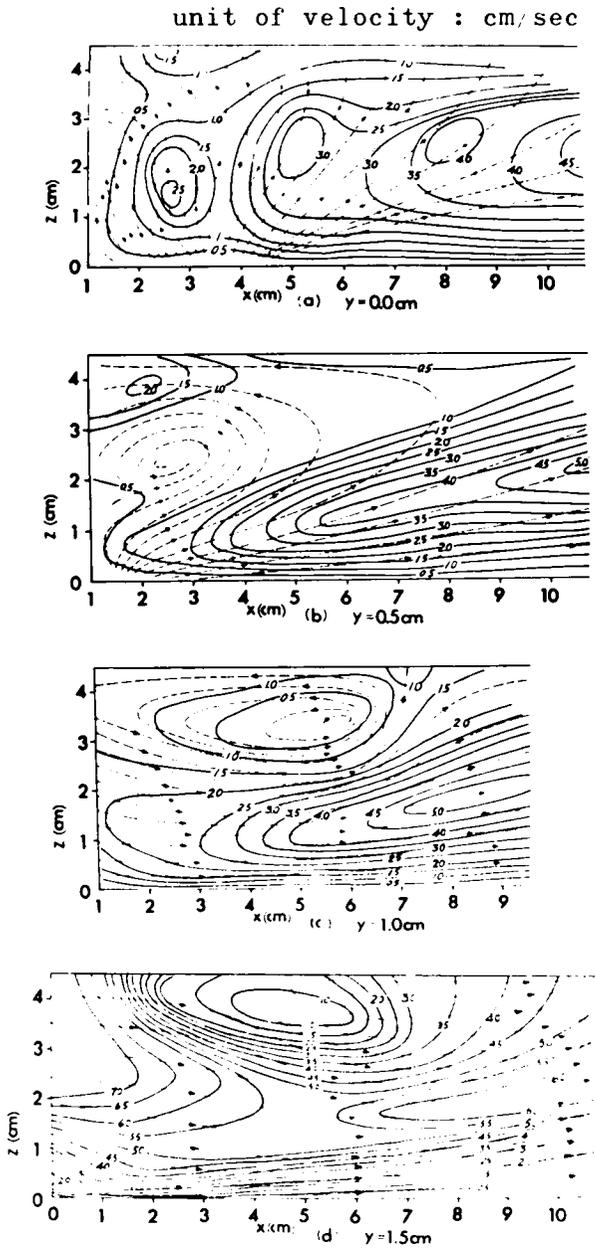


図4-10 鉛直な縦断面内の流速と流向の分布

域に含まれることから、この渦度が定置型渦の回転運動の原因を与えるものの1つであると考えられる。すなわち、橋脚前面および側面に生じた下降流にともなつて橋脚表面に境界層が発達し、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つ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となつて橋脚後方の定置型渦が生成されることが考えられる。したがつて、ここでいう定置型渦は3次元流において特徴的に現われるものといふことができよう。

4.2.6 水路横断面内の流れパターン

図4-5から U_y が、また図4-10から U_x がそれぞれ計算できるので、これらを水路の各横断面ごとに図示するとそれぞれ図4-12および図4-13のようになる。これらの図から、円柱橋脚の後流はくり領域において 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_x の測定断面が少ないため、渦度の x 方向成分 ξ を後流はくり領域の全域にわたって計算することができないので、図4-14に $\partial U_y / \partial z$ の分布を示した。これらのいずれの図においても、馬蹄型渦によるとと思われる回転運動は見うけられず、図4-14の $x=1.0\text{cm}$ および

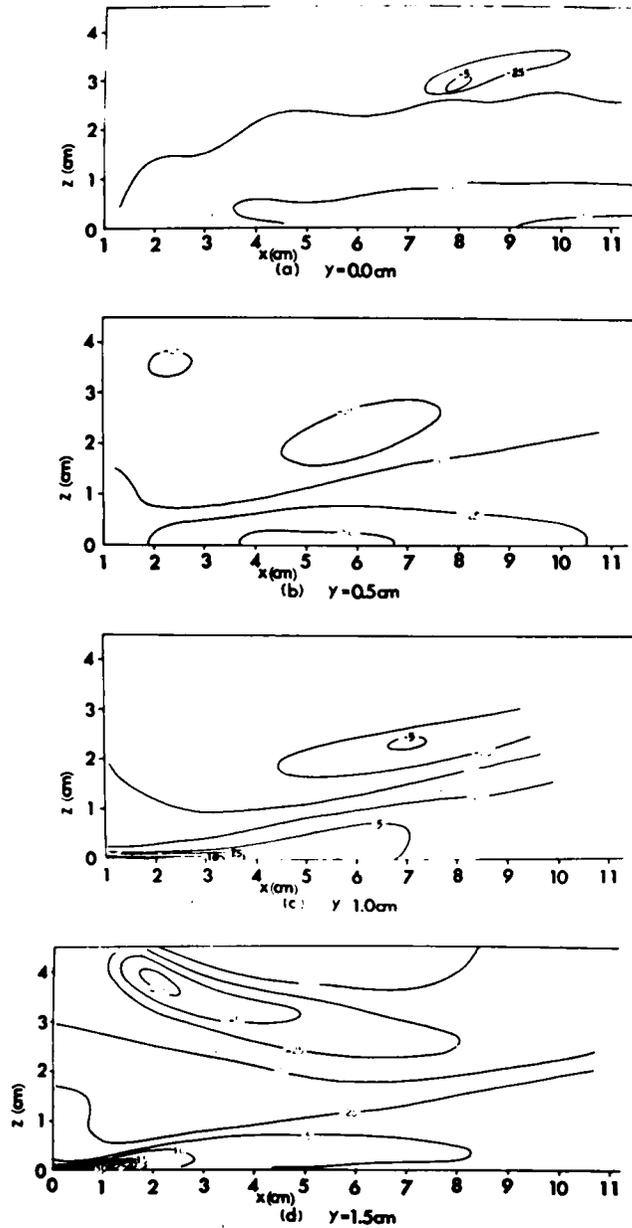


図4-11 鉛直な縦断面内の η の分布

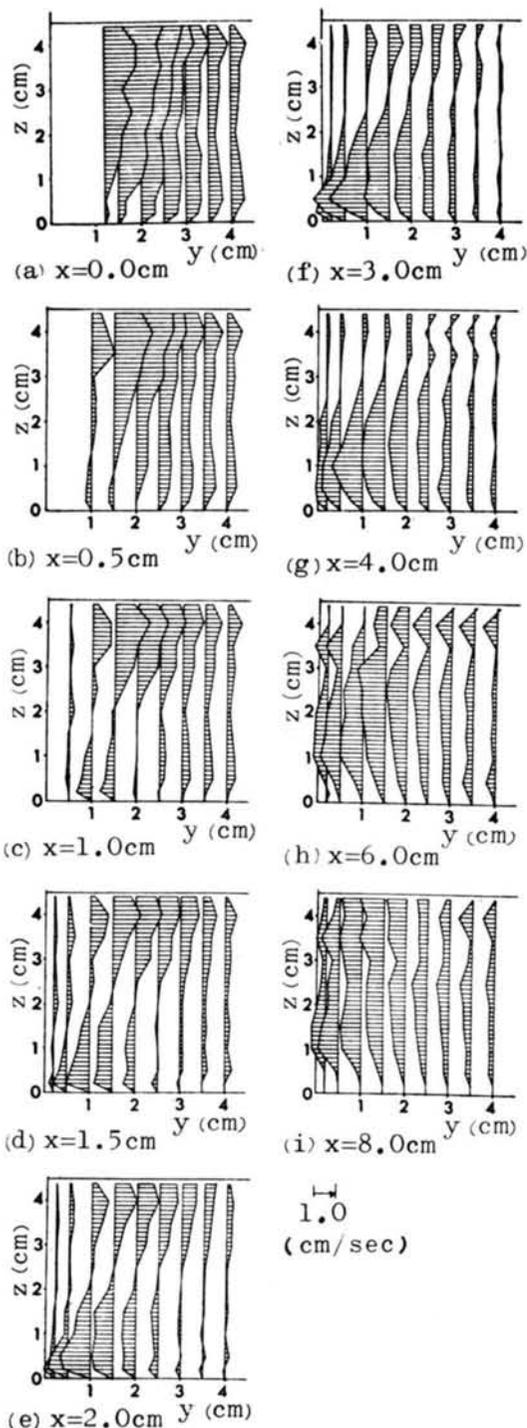


図4-12 横断面内の U の分布

その下流の断面ではむしろ水路床近傍に馬蹄型渦と逆方向の回転運動が認められる。すなわち馬蹄型渦は橋脚より下流では消滅したものと見なされ、このことは先に示した図4-4に関する考察と一致する。さらに第2章および第3章で設定した解析モデルにおいて馬蹄型渦の強さは橋脚の側方で0となるとしたが、上記の事実はこのモデルの正当性を裏づけている。

4.2.7 橋脚後方の3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流線のパターンの実測結果の概況を示すと図4-15のようになる。この図および図4-4, 図4-5, 図4-10を参照しながら、円柱後流域における流れの3次元的な機構の概略を渦の形成に着目して図示すると図4-16のようになる。すなわち、①円柱橋脚の後方には特異点(結節点)が存在しており、この点から水面まで達する1つの曲線の周りに

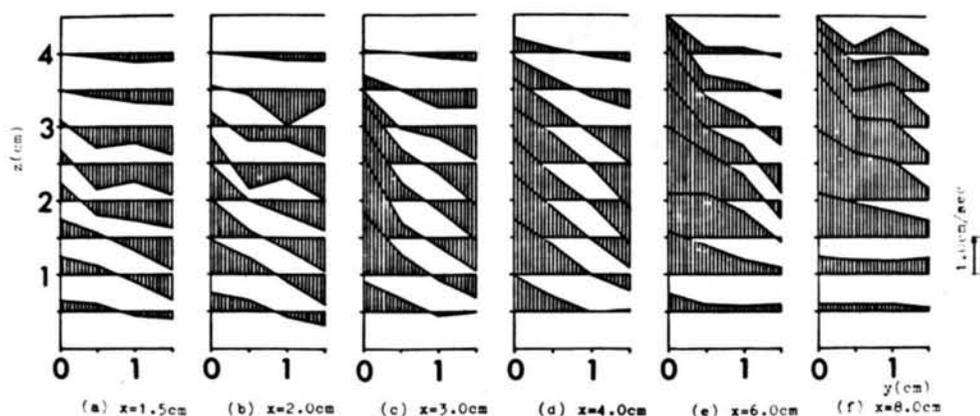


図 4-13 横断面内の U_z の分布

定置型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る形の運動をしている。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原因と考えられ、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。②馬蹄型渦は橋脚の下流部では消滅している。③定置型渦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方向へ帯状にひきのばされ、それによって流下型の渦が発生している。④流下型の渦の発達する領域はほぼ $x = 6\text{cm}$ より下流側で、水路床からの高さが約 2.5cm より上の水面までの範囲である。

4.3 乱流中に設置された円柱橋脚後方の流れに関する研究

4.3.1 実験の目的と方法

乱流状態における円柱橋脚の後流域の流れは非常に複雑で、その機構に立入った詳細な実測は困難である。しかし水面および水路床面といった流れの場の境界面付近の流線形状については、トレーサを用いた Flow Visualization の方法である程度その特徴を把握することができる。そこで本節では、これらの境界面付近における流線形状を実測し、その結果を基礎として、前節での層流状

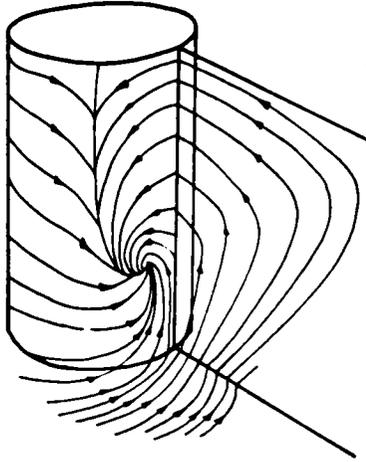


図 4-15 水路中心断面，円柱橋脚表面および水路床面における観測された流線の概略図

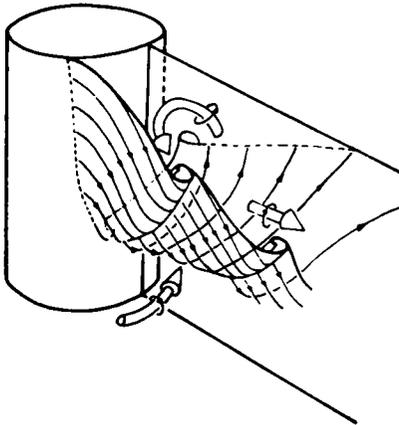


図 4-16 円柱後流域における流れの3次元的な機構の概念図

態での実測結果を参照しながら乱流の場合の橋脚後流域における流れの特性について考察する。

実験は，第 3 章で橋脚前方の局所流の特性がかなり明らかにされた run K-1 の実験条件の下で行なった。すなわち，水路幅 40 cm，勾配 1/500 の水路の中央に直径 8 cm の円柱橋脚を設置し，流量 9.62 l/sec を流した。橋脚を設置しない状態における水深は，橋脚の設置場所付近で 7.4 cm である。

水面での流線形状の実測には，トレーサとして木屑とアルミニウムの粉末とを混合したものを用い，また水路床近傍での流線形状の実測には，トレーサとして細砂を用い，その流下する模様を透明な水路床板を通して何度も写真撮影した。

4.3.2 水面における流線形状

水面における流線形状の撮影結果を図化したものの一例を図 4-17 に示す。本図から，乱流の場合における橋脚の後流はくり域内の流線は，図に示されている 2 本の流線 AA' と BB' で特徴づけられることがわかる。すなわち，図で AA' で示されている曲線は橋脚の側面

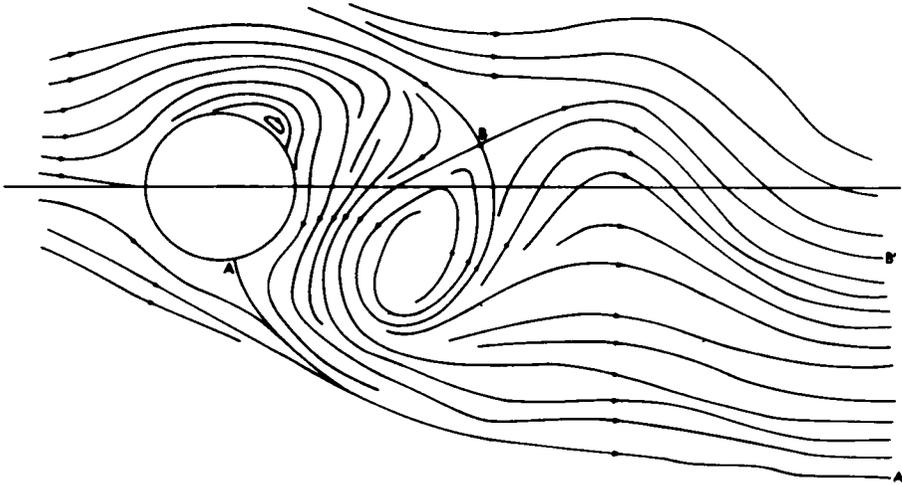


図4-17 乱流状態における橋脚後流域の水面での流線形状の実測例

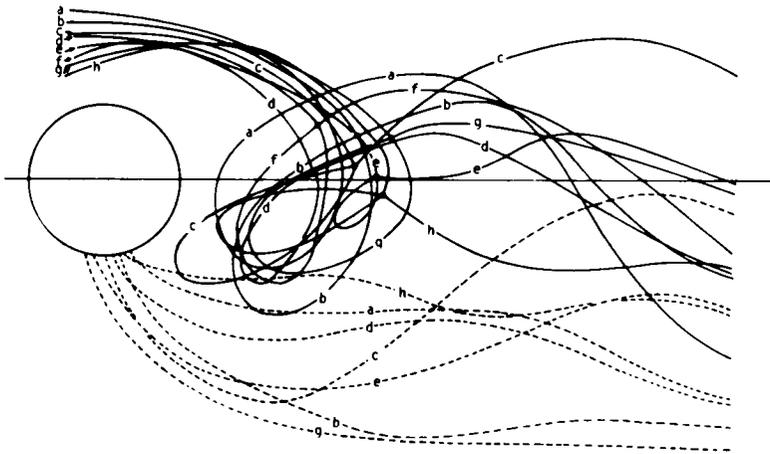


図4-18 後流はくり域の境界線AA'(破線)とBB'(実線)の変動

からはくりした流線を示しており、後流はくり域の一方の境界を示していると見做される。一方BB'で示されている流線は、橋脚の側方においてこの流線よ

り橋脚の側にある流線は橋脚の後流はくり領域内にまきこまれるが、その外側にあるものはまきこまれないことを示す境界であって、後流はくり領域のもう一方の境界を示すものと見做せる。すなわちここでいう後流はくり領域とは流線AA'およびBB'で囲まれる流れの領域をさすものとする。なお実際には、図4-17のような流線形状と流れの対称面に関して上下を逆にしたような流線形状とが、時間の経過とともに交互に現われることはいうまでもない。任意の時刻における流線の実測結果のうちいくつかについてこれらの流線AA', BB'を同一平面に描くと図4-18のようになる。ただし本図を作成するにあたり、AA'とBB'の位置関係が図4-17と逆になっている実測結果については、それを流れの中心線に関して対称に折返したものを記入している。また図でAA'は破線でBB'は実線で示されており、さらに、たとえば α の記号を付した流線AA'と α の記号を付した流線BB'とが同一時刻におけるものとして対応している。

以上に示した図4-17および図4-18からつぎの点が明らかになった。

①乱流の場合には大規模な渦運動をしている流体塊が直接橋脚の側面から左右交互にはくりして流下してゆくことが認められる。すなわち乱流の場合には、層流の場合と異なって、水面近傍では定置型渦は発生せず、後流はくり領域は流下型渦領域だけから成立っている。

②層流の場合の後流はくり領域は図4-9に示されるようにほぼ定まった位置に安定しているが、乱流の場合の後流はくり領域は時間的に変動しており、それにともなってはくり点の位置も変動している。

③流下型渦を構成する流体は、渦の発生直後においては回転運動を行なうが、渦が流下するにつれて波状の運動に移行する。

④層流の場合とは異なり、乱流の場合には水面近傍において橋脚の側方を通過する流線も後流はくり領域にまきこまれる。図4-18から、橋脚の位置($x = 0\text{cm}$ の横断面内)において流れの対称面から橋脚の直径にほぼ等しい距離の範囲までの流線が後流はくり領域にまきこまれるとみなされる。

4.3.3 水路床面近傍における流線形状

水路床面にまかれた細砂の移動状況の写真撮影結果に基づき、水路床面近傍の流線の概要を図化するとたとえば図4-19がえられる。本図で特徴的なこと

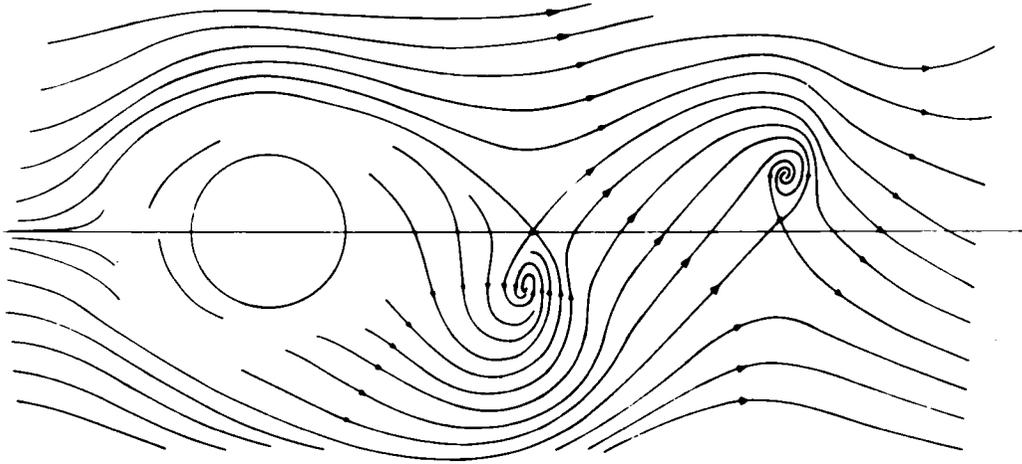


図4-19 乱流状態における橋脚後流域の水路床面近傍での流線形状の実測例

は、層流の場合と異なって後流渦の軸が水路床面にまで達しており、その軸付近にかなり強い吸込みが存在することである。実際、水路床面にまかれた細砂がこの渦に吸込まれてまき上げられる様子が観察された。乱流の場合も層流の場合と同様に橋脚の側方に下降流が認められるが、その下降流にともなって生じる境界層内の渦度が層流の場合には定置型の渦の原因となったのに対して乱流の場合にはそれが流下型渦にまきこまれるものと考えられる。乱流の場合、水面における流線パターンに定置型の渦が認められず、また水路床面近傍の渦軸の位置に吸込みが認められるのも上記のような現象に基づくものと考えられる。

なお図4-19で橋脚の前方から側方にかけて流線が記入されていない部分は馬蹄型渦領域に相当するものであるが、本実験においてはこの渦の後流域での流線形状に対する影響は認められなかった。

図4-19からはさらに、 $x = 0\text{cm}$ の横断面においては、ほぼ $-2r_0 \leq y \leq 2r_0$ の範囲を通過する流線が、水路床近傍においても水面近傍の流線と同様に、後流はくり域内にまきこまれることを示している。

4.4 結 言

円柱橋脚の後流域の流れの特徴を渦の形成状態に注目して明らかにした。実験はまず層流状態について詳細に行ない、それによる現象理解を基礎に乱流の場合の低周波数の渦の特性を明らかにした。

4.2では、直径2cmの円柱橋脚の後流域の3次元的な流れのパターンをレイノルズ数3.19の層流状態で観測した。

① 切断流中におかれた円柱の後流は、一様流中におかれた円柱の後流とは非常に異なっている。

② 円柱橋脚の下流の流れは主流域と後流はくり領域とに大別され、後流はくり領域は定置型渦領域と流下型渦領域とから成る。後流はくり領域における全体的な流れの概要は図4-16のようである。

③ 定置型の渦は、橋脚側方の下降流の中に発達した境界層がはくりしてまき上げられたものであり、その回転方向は馬蹄型渦と逆である。

④ 流下型の渦は、主流と定置型の渦との境界に生成される強い渦度が帯状に下流へ引伸ばされた結果生成され、その領域は水路床面にまでは達していない。

⑤ 馬蹄型渦は橋脚下流部では消滅している。

4.3では、レイノルズ数2400の乱流状態で、橋脚の後流域における水面と水路床面近傍の流線形状を観察し、検討を加えた。

① 乱流の場合、水面近傍では定置型の渦は認められず、後流はくり領域は流下型渦領域のみから構成されている。

② 橋脚の位置($x=0$ cmの横断面)において流れの対称面から橋脚の直径にほぼ等しい距離の範囲にある流線は後流はくり領域にまきこまれる。

③ 乱流の場合、流下型渦の軸は水路床面にまで達しており、水路床面近傍では渦軸付近に吸込み現象が認められる。

参 考 文 献

- 1) 今井功：流体力学（前編），裳華房，1973，p. 3.

- 2) 宇民正：橋脚周辺の馬蹄型渦について，土木学会第28回年次学術講演会講演概要集，第2部，1973，pp. 226-227.
- 3) Roshko, A. : Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number , Jr. Fl. Mech., Vol. 10, 1961, pp. 345-356.
- 4) 宇民正：橋脚後流域の流れパターンについて，京大防災研究所年報，第17号B，1974，pp. 701-715.

第5章 円柱橋脚周辺の洗掘防止法 に関する実験的研究

5.1 概 説

5.1.1 橋脚周辺の洗掘防止法に関する水理学的考察

(1) 洗掘の機構と流れとの関係

移動床に設置された橋脚周辺の洗掘深は、たとえば図4-1に示されているように、橋脚前方で大きくなる傾向が認められる。橋脚の前方の洗掘状況については、洗掘の初期の段階では馬蹄型渦による洗掘が進行するが、洗掘深がある程度にまで達すると洗掘孔の斜面が滑落する現象も認められる¹⁾。このように、橋脚周辺の洗掘孔という複雑な境界条件の下での土砂の掃流機構については現在のところ十分明らかにされていないが、一般的な限界掃流力理論の基礎となっている考え方には、White²⁾や栗原³⁾のように単位面積にはたらくせん断応力の概念によるもの、岩垣ら⁴⁾⁵⁾のように砂粒に作用する流体力の概念によるもの、あるいはEinstein⁶⁾のように乱れによる揚力の概念によるものなどがあり⁷⁾、いずれの考え方においても水路床面近傍における流速が限界掃流力の重要な因子として含まれることがわかる。一方掃流による土砂の輸送機構についても、砂粒にはたらく乱れによる揚圧力に着目した佐藤・吉川・芦田⁸⁾の研究やEinstein⁹⁾の研究、あるいは流れ方向にはたらく抵抗力を主として考えたKalinske¹⁰⁾の研究、さらには砂粒のsaltationの機構の考察に基づくYalin¹¹⁾、岸ら¹²⁾¹³⁾および土屋ら^{14)~18)}の研究をはじめとして多くの研究がなされているが、やはり水路床面近傍における流速が重要な因子として含まれるようである。すなわち、橋脚周辺の最終的な洗掘状況が動的平衡状態であろうと静的平衡状態であろうと、水路床面近傍の流速分布の影響が非常に大きいといえよう。

前章までの研究によると、平滑な固定床水路の場合には、水路床面近傍の流速を規定するのは橋脚周辺の局所流であるといえる。しかし、接近流中に含まれていた渦度の変形により馬蹄型渦や下降流が生じ、また後流域での渦度の変形によりはくり渦が発達するという点では、移動床の場合も固定床の場合と現象の本質においては変化はないものと考えてよいであろう。すなわち、移動床

における橋脚周辺の局所洗掘機構は局所流に規定されており、その局所流の水理学的特性は前章までに固定床に関して明らかにしてきたものと本質的に変わらないものと考えられる。したがって前章までに明らかにして来た局所流の特性と橋脚周辺の局所洗掘との関連を明らかにすることが、局所洗掘機構、ひいては局所洗掘防止法を検討する上で重要となる。

(2) 橋脚周辺の局所洗掘と局所流

前章までに詳述したように、橋脚周辺の局所流は、橋脚の前方($90^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$)と後方($-90^\circ < \theta < 90^\circ$)とでその機構をかなり異にしている。すなわち、橋脚の前方での局所流は馬蹄型渦と下降流とで特徴づけられ、後方での局所流は後流はくり渦で特徴づけられる。さらに橋脚の前方と後方において局所流を構成する共通の要素として主流がある。

洗掘防止法を検討する基礎として、まず、橋脚周辺に生じる上記のような各種局所流すなわち馬蹄型渦、下降流、主流および後流はくり渦が橋脚周辺の局所洗掘に果たす役割について考察を加えておくことが重要である。すなわち、橋脚周辺の各地点での洗掘がこれらの各種局所流のうち主としてどのような局所流成分に基因するものであるかを検討することであり、その総括を表5-1に示す。

洗掘の原因となる局所流 洗掘の場所	馬蹄型渦	下降流	主流	後流はくり渦
橋脚の前方	○	○		
" 斜前方	○	○	○	
" 側方	○	○	○	○
" 後方				○

まず、馬蹄型渦は、第3章および第4章における実験的研究および解析的研究が示すように、橋脚の前方から側方にかけて発生し、そのスケールは前方でも側方でもさほど変わらないが、その強さは前方ほど大きくなっている。しかも第3章の実験結果が示すように渦軸は水路床面に近く、また渦内の逆流の流速は

表5-1 橋脚周辺の各位置における局所洗掘・堆積の原因となる局所流

主流の平均流速に匹敵するほどの大きさをもつ。したがって橋脚の前方面に近いほど局所洗掘に果たす馬蹄型渦の役割が大きいことは明らかである。実際、

橋脚の前方付近では河床砂が渦にまきこまれて強いせん運動を行ないながら下流側へ運びさられる様子が多くの研究者により観察されている。^{19)~20)}

つぎに、下降流も橋脚の前方から側方にかけて発生する。ただ橋脚前方では、水路床付近での下降流は馬蹄型渦と画然と区別できなく、直接的に水路床の洗掘に寄与するのに対し、橋脚の側方では、橋脚の前方に生じた下降流のため連続条件に従って水路床近傍での流速が加速され、それによって水路床の土砂の洗掘・運搬が促進される。

また、主流の水路床に対する掃流力は橋脚の側方で最大となる。すなわち第3章の解析モデルが示すように、主流が2次元非回転流であるとする、円柱橋脚の側面で流速は最大となりその値は接近流速の2倍に達する。

最後に、後流はくり渦は、第4章で述べたように、それ自身下流に向って流下するものであるが同時に水路床付近で吸込み力をもっている。したがって後流はくり領域内の土砂ははくり渦によってまき上げられると同時に渦の流下にもなって下流へ運搬される。

以上は各局所流と河床土砂の洗掘・運搬との対応関係を示したものであるが、実際にはこれらの局所流は相互に関連しながら一連のものとして河床土砂に作用を及ぼすはずである。すなわち、橋脚前方で下降流あるいは馬蹄型渦による逆流によって洗掘された河床土砂は、馬蹄型渦にまきこまれてらせん状の運動をしながらあるいは掃流状態で下流に向って運搬される。橋脚の側方では馬蹄型渦の強さはほとんど消滅し、河床土砂の洗掘および運搬は橋脚前方の下降流により加速された橋脚側方の流速および主流によりなされるものと考えられる。このような河床土砂の洗掘運搬作用の結果、橋脚前方から側方にかけて橋脚をとりかこむ形で洗掘孔が発達する。

橋脚の後方においては、第4章の図4-1にみられるように上記のような橋脚側方における洗掘・運搬状態が維持されている領域が若干存在するが、後流域のそれ以外の部分では運搬されてきた土砂が堆積する傾向を示し、その堆積の高さは、先に述べたはくり渦による土砂運搬量が上流からの土砂供給量と均衡する状態で平衡に達するようである。

(3) 洗掘防止法と局所流

橋脚周辺の局所洗掘により橋脚が被害をうけないようにするためには、橋脚の根入れを河床変動と局所洗掘に耐えられるだけ十分深く施行するとか、橋脚周辺の河床に根固め工を施工するというような直接的な工法もありうるが、橋脚周辺の局所洗掘において局所流が果す役割についての上記のような現象認識に立脚するならば、橋脚周辺の局所流を軽減することが局所洗掘を軽減するのに有効であるといえそうである。そこで、第2章～第4章で明らかにした局所流の水理学的特性に基づいて、局所流を軽減する方法について1.1.2で述べた各種の防止工法と関連づけてつぎに検討する。

①馬蹄型渦の軽減法

馬蹄型渦を構成する流体は主流の一部から供給されており、馬蹄型渦はその部分の主流がもつ渦度が集中させられた結果生じるものであることを第3章で示した。したがって、馬蹄型渦を軽減するには、上記のような馬蹄型渦に対する流れの供給あるいは渦度の集中を妨げる方法を構えばよいことがわかる。このような方法としては、橋脚の前方に障害物を設置する方法および橋脚の前頭部の形状を工夫する方法が考えられる。

そこでまず、橋脚の前方に障害物を設置する方法について検討する。第3章の図3-8に示されているように、馬蹄型渦領域に供給される主流の部分は、橋脚の前方の対称面近傍のごく限られた部分である。したがって障害物としては、たとえば杭状のものとして、上記の主流部分とその杭の後流はくり領域に含まれるようにすればよいと考えられる。

杭状の障害物を設けた場合、その周辺にも当然局所的な洗掘が生じるであろう。ところで馬蹄型渦の軸の位置は第3章の式(3-3)および(3-4)で表わされ、これらの式は同一の水理条件の下では円柱の半径が小さいほど渦軸は橋脚の前面および水路床面に近づくことを示している。したがって、杭状障害物の半径が小さいほど、その周辺の洗掘範囲は小さくなることがわかる。さらに第3章の解析的研究において、馬蹄型渦をモデル化したいわゆる渦度領域のまわりの循環の値 κ は式(3-15)で表わされるが、この式は、同一の水理条件の下では橋脚の半径が小さいほど κ の値も小さくなることを示している。したがって杭状の障害物の半径を小さくすればその周辺の洗掘の強さも小さくなることがわかる。

馬蹄型渦を軽減するために杭状の障害物を用いる場合に関する以上の考察をまとめるとつぎのようになる。すなわち杭の周辺の馬蹄型渦を軽減・縮小するには杭の半径は小さなものほどよいが、一方橋脚の直前方における渦度の集中を妨げるためには、橋脚前方に生じる馬蹄型渦領域に本来供給されている主流部分が、杭の後流はくり領域に含まれるにたただけ杭の直径が大きくなければならない。したがって橋脚周辺の局所洗掘を軽減する上で最適な杭の大きさおよび杭と橋脚との中心間隔については詳細な検討を必要とする。なお、杭状の障害物のことを以後は杭型の洗掘防止工あるいは洗掘防止杭と呼ぶこととする。

つぎに、馬蹄型渦を軽減するために、橋脚前頭部の形状を工夫する方法について検討する。先にも述べたように、馬蹄型渦の強さ κ を与える式(3-15)は、円柱橋脚のまわりの渦の強さを示したものであるが、この式の誘導過程から考慮して、橋脚が円形以外の断面形状をもつ場合には式中の θ はその断面形の外側向き法線方向と主流流下方向のなす角度と近似的に考えてよいであろう。このような考察に基づくならば、橋脚前頭部の断面形状としては上流側に向って鋭く尖っているととも全体として流線形に近いほど、橋脚周辺の馬蹄型渦は軽減されると考えられる。なお、橋脚に孔をあける方法も、橋脚前頭部の形状を工夫することによって馬蹄型渦を軽減する方法の一つであると見なされる。

② 下降流の軽減法

第3章の実測結果、たとえば図3-11および3-12から、橋脚周辺の下降流は橋脚の表面に近接して生じていることがわかる。したがって橋脚の周囲につばをつけたり粗度をつけることによってこの下降流を軽減させるという方法が考えられる。ところが、このような方法を構じると、橋脚にそう境界層の厚さを増大させるのと同じ効果が生じることも予想され、その場合は橋脚の水流に対する抵抗が大きくなるから、橋脚周辺の局所流もかえって増強されるであろう。したがってつばや粗度を橋脚の表面に設置する場合には、その大きさと配置を余程適切にしなければならないが、実際には洪水にも大小があり、また河床の高さも変動するから、つばあるいは粗度の適切な大きさと配置を決めることは事実上非常に困難であると考えられる。

一方、先に述べた杭型洗掘防止工は下降流を軽減する効果をももっていると考えられる。すなわち、第4章で述べたように円柱の後流はくり領域には上昇

流が存在するが、杭型防止工の後流はくり領域における上昇流が、橋脚直前面の下降流を妨げる効果をもつものと期待される。

さらに、橋脚の前頭部形状を工夫する方法によっても下降流は軽減できると考えられる。なぜならば、下降流は、第2章および第3章で述べたように、水路床面からいくぶん隔たった位置における接近流中の渦度の変形(渦糸の伸長)に基づくものであるが、橋脚前頭部の形状が鋭角あるいは流線形状であれば、第1章1.2.2における考察によって、このような渦糸の伸長は鈍角の場合に比べて軽減されると考えられるからである。

③主流の軽減法

橋脚の斜前方から側方にかけての主流の流速を軽減する方法としては、まず橋脚前頭部の形状を工夫する方法が考えられる。たとえば橋脚を長軸の長さが d で短軸の長さが c のだ円柱状にして、主流方向と長軸方向を一致させて接近流速 U_0 の流れの中に設置すると、短軸端の主流の流速は $U_0(1+c/d)$ となり、円柱橋脚側面の流速 $2U_0$ より小さなものになる。橋脚の前方に杭を設置する場合についても、Tison¹⁹⁾は、その場合橋脚の先端をその杭の位置まで延ばした場合と同様な流況を呈し、洗掘が軽減されると指摘している。この指摘は、橋脚前方に杭を設けた場合、橋脚側方の主流の流速が軽減されることを意味していると考えられる。

④後流はくり領域の縮小法

物体の後流はくり域の幅は一般にその物体の流れに対する抵抗係数の平方根に比例する³⁰⁾が、この抵抗係数は物体の形状がいわゆる流線型に近いほど小さくなる³¹⁾。すなわち当然のことではあるが、同じレイノルズ数の下でも物体の形状が流線型に近いほど後流はくり域の幅は小さくなる。一方①で述べたように、物体の形状が流線型に近いほどその周辺の局所流は軽減される。したがって、同じレイノルズ数の下でも物体周辺の局所流が小さな形状であれば、後流はくり域の幅も小さくなるという関係が成立しそうである。このように考えると、橋脚前方に杭を設ける方法および橋脚前頭部の形状を工夫する方法は、橋脚の後流はくり領域を縮小する上でも有効であると考えられる。

⑤洗掘防止工の水理学的機能のまとめ

以上の考察に基づいて、橋脚周辺の局所洗掘の各種防止工がどのような局所

流を防止軽減する機能をもつものであるかをまとめたものが表5-2である。

洗掘防止工により 軽減される 局所流	馬 蹄 型 渦	下 降 流	主 流	後 は く り 流 渦	備 考
根固め工を施工する					直接的な工法
橋脚の根入れを深くする					
水平なつばをつける		○			局所流を軽減する 工法
橋脚前面に粗度をつける		○			
橋脚に孔をあける	○				
橋脚前方に杭を設ける	○	○		○	
橋脚前頭部の形状を工夫する	○	○	○	○	

表5-2 各種の洗掘防止工によって軽減される局所流

本表から、橋脚前方に防止杭を設ける方法と橋脚前頭部の形状を工夫する方法とは、各種の局所流に対してそれを軽減する機能をもっており、水理学的に優れたものであるといえる。

5.1.2 橋脚周辺の洗掘防止工の施工および維持・管理に関する検討

洗掘防止工を実際河川に施工する際には、それが局所洗掘を防止軽減する上で十分な機能を果すべきことはいうまでもないが、その他につきのような条件を満たす必要がある。①防止工の施工が容易であり、しかも洪水時に破損しないこと、②河川の浮流物がひっかかりにくいこと、③河床変動や流量の変動があっても洗掘防止工の機能が維持されていること。

これらの面から、1.1.2で示した各防止工法についてつぎに検討する。まずつばをつける工法については、その施工や維持が容易でないという難点が指摘される。さらにつばの枚数が1枚とか2枚の場合(Laursen³²⁾, Tanaka³³⁾)は、河床変動によってつばの河床に対する相対的な位置が変化すると、所期の機能が維持できなくなる。そういった意味からは、吉川³⁴⁾が提案しているようにつばを等間隔に多数つけておいて河床変動に対処するという方法の方が優れて

いるが、この方法では浮流物がひっかかりやすくなるという別の難点が生じてくる。

つぎに、橋脚に孔をあける工法（Tanaka ら³³⁾、Shen ら³⁴⁾）では、孔を大きくすると橋脚の安全性にかかわるし、小さくすると浮流物がつまる可能性があり、さらに河床に対する孔の相対的な位置も河床変動によって変化する。

一方、前頭部形状についての詳細で系統的な実験的検討を基礎に、上記の諸条件をも考慮して導き出された石原^{21)~23)}の結論は貴重なものといえよう。また、橋脚前方に1本の杭を設けて局所洗掘を軽減する方法（Shen ら³⁵⁾、Chabert ら³⁶⁾、Chang ら³⁷⁾）も、上記の諸条件を満たしている点で注目される。ただ複数の杭を設ける方法については浮流物がひっかかりやすい点で適当とは考えられない。

5.1.3 本章の目的

本章は、洗掘防止工法について以上に考察したことを実験的に裏づけ、さらにはその設計上の指針を得ようとすることを目的とする。

実験は第2章~第4章での方法を踏襲してまず層流状態で行ない、防止工周辺の局所流の機構を詳細に検討し、ついで乱流状態については巨視的な諸量についてのみ検討を加えることとする。

ところで以上までの検討から、橋脚前頭部の形状を工夫する方法と橋脚の前方に杭を設ける方法とが水理学的な機能の面でもすぐれているし、施工および維持・管理面で満たすべき条件もすべて満たしていることが明らかになったが、一方、前者の方法については石原の研究^{21)~23)}でかなりの部分が明らかにされているのに対して、後者の方法に関する従来の研究はいずれも水理学的な検討が十分でなくその結論は半経験的なものとなっている。

そこで本章では、洗掘防止工として杭型防止工を設ける方法について重点的に検討することとし、さらに比較のためにつばを設ける方法による場合の局所流の機構についても若干の検討を加えることとする。

5.2 層流実験に基づく防止工の機能に関する研究

5.2.1 研究の目的と実験方法

本節では、1本の円柱橋脚を平滑な固定床上に設置した場合と、さらに防止

工をそれにあわせて設置した場合との現象の変化に注目して、橋脚および防止工周辺の局所流の観察を行ない、これらの観察結果と第2章および第4章での結論を基礎に防止工の水理学的機能について検討を加え、基礎的な知識をえようとするものである。

実験水路としては、第2章および第4章での層流実験に用いた幅20cmの透明アクリル樹脂製のものを用い、勾配は1/500に設定した。平滑な固定床上で実験を行なった理由は、境界条件をできるだけ単純化することにより防止工を設置したときの局所流の挙動を容易に把握しようとしたためであるが、この実験条件は、橋脚周辺に根固め工をその他の防止工と併設する場合についてはその結果が直接適用できるような条件である。

防止工としては橋脚前方に杭を1本設ける方法と橋脚につばをつける方法と

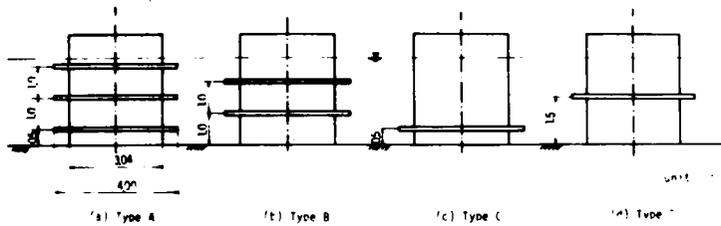


図5-1 実験に用いたつば型防止工

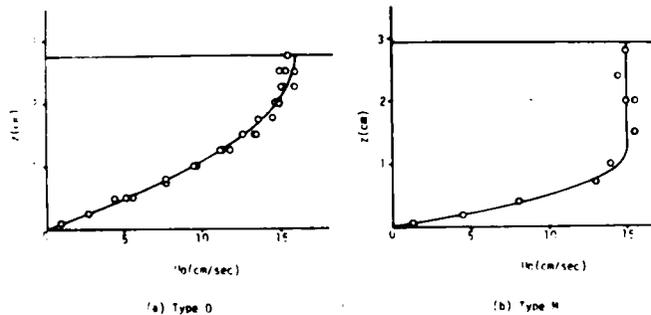


図5-2 接近流速分布

run	防 止 工		橋脚 $2\tau_0$ (cm)	実験水路	接 近 流				測 定 事 項	
	防 止 工 大 小 (cm)	配 置			流速 分布	水深 H (cm)	境界層厚 δ (cm)	ν (cm^2/sec)		平均流速 (cm/sec)	$\frac{U_{0m}H}{\nu}$
O-1		防止工なし							対称面内の流線と流速分布 。橋脚側面での流速分布 。逆流域の形状と大きさ	
O-2	$\phi 0.6$	$L=2.5cm$	3.04	I=1/500 B=20cm 透明アクリル樹脂製	O型	2.75	2.75	0.463		10.67
O-3	cm	$L=4.0cm$								
O-4	つ	A型(図5-1)								
O-5	ば	B型(")								
O-6	型	C型(")								
O-7	型	D型(")								
M-1	$\phi 0.2$	$L=2.08, 2.57, 3.02, 3.53, 3.97, 4.68, 5.67(cm)$								
M-2	$\phi 0.4$	$L=1.96, 2.42, 2.90, 3.33, 4.08, 4.50, 5.58(cm)$								
M-3	$\phi 0.6$	$L=2.00, 2.50, 3.04, 3.53, 4.56, 6.00(cm)$	3.04	同上	M型	2.93	1.20	0.094	境界層内で 10.00	
M-4	$\phi 0.8$	$L=2.50, 3.02, 3.56, 4.56, 6.02(cm)$							一様域内で 15.00	
M-5	$\phi 1.0$	$L=2.50, 3.00, 3.54, 4.58, 6.08(cm)$							境界層内で 127.7	

表 5 - 3 実験条件 (層流の場合)

について検討した。橋脚は直径3.04cmの円柱状であり、杭としては直径がそれぞれ0.2, 0.4, 0.6, 0.8, および1.0cmの5種類のものを用いた。またつばとしては厚さ1.5mm, 外径4.0cmの中空円板状のものを用い、それを図5-1に示すような4種の方法で橋脚につけた場合について検討した。

実験は水とグリセリンの混合液を用いて層流状態で行なった。接近流速分布は図5-2に示す2種のものを用いた。(a)図(O型)の流速分布の実測値(白丸印)から、層流の場合の放物型流速分布式に基づいて動粘性係数 ν を求めると $0.463\text{cm}^2/\text{sec}$ となり、平均流速と水深を用いたレイノルズ数は63.4となる。一方(b)図(M型)の流速分布については、実線で示されているように層流境界層厚が1.2cmでありそれより上層の流速は一様に分布していると見做されるので、層流境界層内で放物型流速分布を仮定して動粘性係数を求めると $0.094\text{cm}^2/\text{sec}$ となり、境界層の厚さと境界層内の平均流速とを用いて計算したレイノルズ数は127.7となる。

本実験における実験条件と測定事項をまとめると表5-3のとおりである。ただし表中、 L は杭型防止工を設置したときの杭と橋脚の中心間の距離である。

5.2.2 対称面内の流れの水理学的特性

(1) 杭型防止工を設置した場合の流線形状

図5-3にrun O-1~O-3の実験条件における対称面内の流線の形状を示す。ただし図において、(a)は防止工を設置しないで、直径3.04cmの円柱橋脚を1本水路中央部においた場合の橋脚の上流側対称面内の流線であり、(b)は防止工に用いた直径0.6cmの杭だけを単独に水路中央部においた場合のそれより上流側の対称面内の流線である。また(c)と(d)は直径3.04cmの円柱橋脚の上流に直径0.6cmの杭を1本設置した場合の橋脚より上流側における対称面内の流線で、杭と橋脚との中心間隔は(c)の場合は2.5cm, (d)の場合は4.0cmである。

本図から、まず第一に、杭を単独に流れの中に設置したとき、杭の前方に渦運動あるいはそれにとまなう水路床面近傍の逆流が認められないことが指摘される。このことについては前に5.1.1(3)で予想したことであるが、第2章での実験結果に基づき次のように説明できる。すなわち、本実験条件におけるま

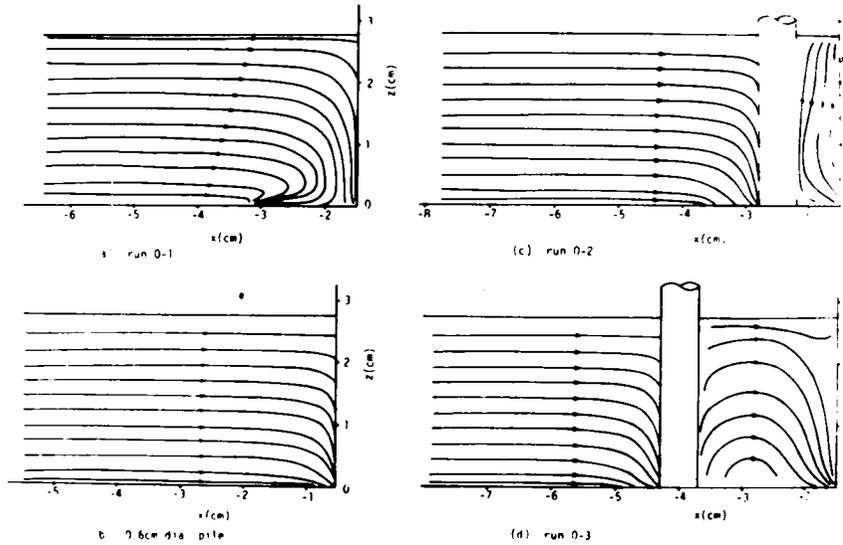


図 5 - 3 対称面内の流線形状（杭型防止工の場合）

さつ速度 2.32 cm/sec と水深 2.75 cm を用いたレイノルズ数は 13.8 となり、この値は、第 2 章の図 2-23 の実測範囲をこえたものであるが、いちおうそこでの結論を転用して $\alpha'_2 = 0.58$, $\alpha'_3 = 0.19$, $m'_2 = 0.60$, $m'_3 = 0.80$ とする。これらの値を第 2 章の実験式 (2-15) および (2-16) に代入して run 0-1 の場合および直径 0.6 cm の杭を単独に水路に設置した場合の渦軸の位値を求めると、

$$\text{run 0-1 の場合} : R_0 - r_0 = 1.12\text{ cm}, z_0 = 0.33\text{ cm}$$

$$\phi 0.6\text{ cm 杭の場合} : R_0 - r_0 = 0.42\text{ cm}, z_0 = 0.09\text{ cm}$$

となる。ここで R_0 は渦軸から円柱の中心軸までの距離、 z_0 は渦軸の水路床面からの高さであり、 r_0 は橋脚あるいは杭の半径である。この計算結果は、本水理条件 (O 型) の下では、円柱の半径が 3.04 cm から 0.6 cm に 0.20 倍になれば、 $R_0 - r_0$ は 0.38 倍にまた z_0 は 0.27 倍にそれぞれ減少することを示している。さらに第 2 章の 3 次元流速分布式 (2-34) によって、対称面内における渦軸の直下の水路床面での流速 U_r は、

$$\frac{U_r}{U_{0s}} = -\frac{z_0}{H} \left(2 - \frac{z_0}{H} \right) \left(1 - \frac{r_0^2}{R_0^2} \right)$$

で与えられるが、直径 0.6 cm の杭の場合の z_0 および R_0 に関する先の計算値を上式に代入すると、 $U_r/U_{0s} = -0.026$ がえられる。この結果は、直径 0.6 cm の杭を単独に設置した場合における渦軸の下の逆流は、接近流の水面での流速 U_{0s} の 3% にも達しないほど小さなものとなることを示している。事実、図 5-3 (b) に示された流線の形状からは逆流は認められないのである。

図 5-3 から、さらに、つぎのことが指摘される。すなわち、橋脚の前方に杭を設置した (c) run O-2 および (d) run O-3 の場合の杭の前方の流線形状は杭だけを設置した場合のそれ (図 5-3 (b)) によく似ていることが認められ、杭と橋脚の中心間隔 L が 4 cm の場合 (run O-3) の方が (b) の流線形状により一層似ていることが認められる。第 2 章において、円柱橋脚を単独に流れの中に設置した場合、橋脚前方の馬蹄型渦による逆流域の水路床近傍における大きさ r_0 は橋脚の直径 $2r_0$ にほぼ等しいことが示されたが、上記の事実から、杭を橋脚の前方に設置する場合、杭の周辺の流れが橋脚の影響をうけるかどうかのおおまかな指標は、橋脚と杭との中心間隔 L が $2r_0$ より大きいか小さいかであるといえそうである。

以上の流線形状に関する検討の結果、杭型防止工を設置することにより橋脚前方における局所流はかなり軽減されることが期待されることが明らかとなった。ただし図 5-3 において、杭と橋脚との間の部分に下降流が認められる。そこで、杭型防止工の機能をより一層明確にするために、上記の下降流を含めて流況に関する詳細な検討を (3) で行なうことにする。

(2) つば型防止工を設置した場合の流線形状

図 5-1 の Type A~D のつば型防止工を橋脚に設置した場合における橋脚上流側対称面内の流線形状をそれぞれ図 5-4 (a)~(d) に示す。本図から、つば型防止工を設置した場合には、いずれの場合においても逆流が生じており、その逆流の生成範囲はつば型防止工を設置しない場合 (run O-1) に比べてむしろ大きくなっていることが認められる。さらに下降流の生成範囲もかならずしも縮小されたとはいえない。Tanaka ら³³⁾は、つば型防止工によって水路床

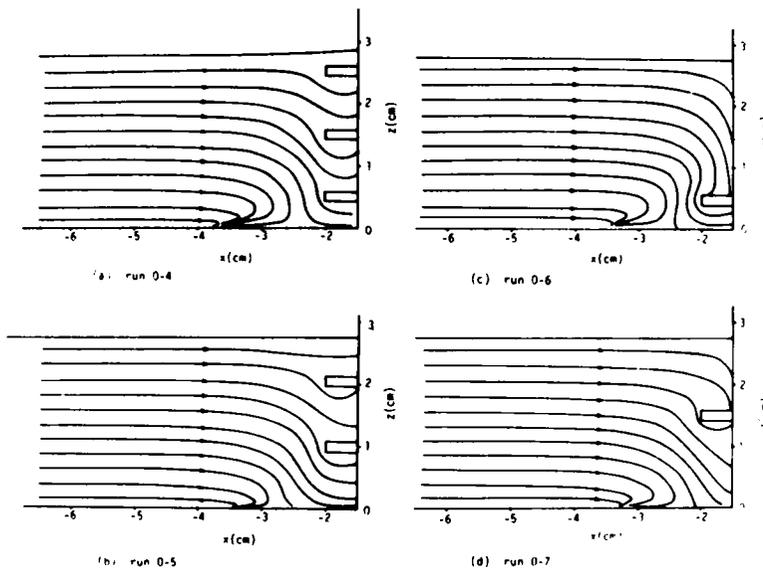


図 5 - 4 対称面内の流線形状 (つば型防止工の場合)

面に沿う境界層の厚さが小さくさせられるので、つば型防止工は局所洗掘を軽減すると考えたが、上記の実験事実からは Tanaka らの考察の正当性は認められない。むしろつば型防止工を設けた場合、下降流によって橋脚前面に発達する境界層の厚さが増大すると同様の効果が生じ、橋脚の水流に対する抵抗は逆に増大しているようである。事実、図 5 - 4 に示した流線形状に関しては、つばの枚数が多いほど水路床面近傍の逆流域は大きくなっており、またつばを一枚つける場合にしても、下降流に対する抵抗が大きな位置すなわち run O - 7 より run O - 6 の状態に つばをつける方が逆流域は大きくなっていることが認められる。

(3) 杭型防止工を設置した場合の流速分布

図 5 - 5 の (a) ~ (d) は、図 5 - 3 の (a) ~ (d) の各実験条件に対応する橋脚前方の対称面内の絶対流速の分布を示しており、図 5 - 6 の (a) ~ (d) は同じく下降流の流速分布を示したものである。

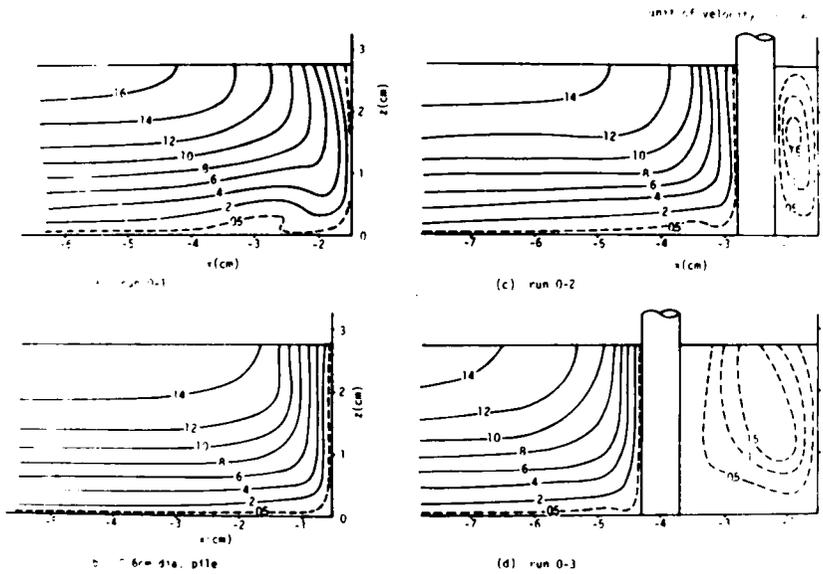


図 5 - 5 対称面内の絶対流速分布（杭型防止工の場合）

まず杭型の洗掘防止工を橋脚の前方に設置した run O - 2 および run O - 3 の場合の流速分布について検討する。杭の前方の絶対流速の分布および下降流の流速分布については、杭を単独に流れの中に設置した場合（図 5 - 5 (b) および図 5 - 6 (b)）のそれとよく似ていることが認められ、とくに杭と橋脚との中心間隔が橋脚の直径より大きい run O - 3 の場合の流速分布は単独杭のまわりのそれによく似ていることが認められる。流線形状についても同様のことが認められることを先に述べたが、これらの事実をあわせ考えると、杭と橋脚との中心間隔を橋脚の直径より大きくなるように杭を設置した場合、杭の前方の流況は杭を単独に設置する場合の流況とほとんど同じになるといえる。

以上の事実は、杭型の洗掘防止工を考える場合に重要な示唆を与えるものである。すなわち、橋脚の前方に洗掘防止杭を両者の中心間隔が橋脚の直径より大きくなるように設置すると、その杭の周辺の局所流は杭の直径を小さくすることにより軽減されることが明らかになった。

つぎに杭型の洗掘防止工と橋脚との間の部分の流況について検討する。この

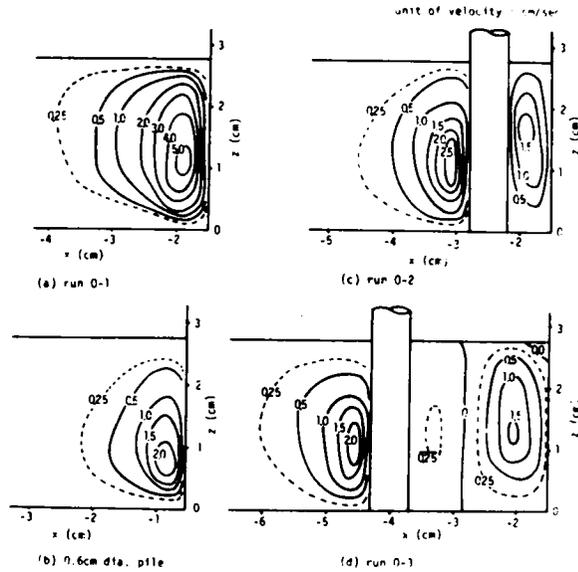


図 5 - 6 対称面内の下降流の流速分布（杭型防止工の場合）

部分は橋脚の前面の流れの水理学的特性と杭の後流域としての流れの水理学的特性とをあわせもつ複雑な領域である。円柱の後流域の流れの水理学的特性については第 4 章で検討して来たが、第 4 章の実験における平均流速と円柱の直径を用いたレイノルズ数は 3.19 で、一方本章での実験で杭を流れの中に単独に設置したときのレイノルズ数は 13.8 であるから、いずれの後流域特性も図 4 - 2 (2) に示した流れの領域に含まれるものと見なされ、第 4 章の後流域特性から本章における杭の下流側の流れの特性をある程度推測することができよう。

そこでまず第 4 章で明らかになった後流域特性のうち、とくに本章の実験に関連するものを記すと、①水面近傍におけるはくり領域は、円柱の側面を起点として主流流下方向と対して約 13° の角度で広がっている（図 4 - 9）。②水路床近傍では、主流の流線は円柱の後方にまきこまれている（図 4 - 5）。③これらのまきこまれた流れは、流れの対称面内およびその近傍で上昇流を形成し、その流速成分は、円柱の下流側において直径の数倍の流下距離の範囲内では、

接近流の平均流速の約半分に達する(図4-10)。

さて、杭型の洗掘防止工と橋脚の間の流況について、上記の第4章での結論および第2章での結論を参考しながら検討する。まずrun O-2の場合もrun O-3の場合も杭と橋脚の間に下降流が存在することが認められるが、これは第2章で述べた橋脚前面の水理特性が現われたものであろう。ところで、第2章の図2-18および2-19においては橋脚前面の下降流の大きさは接近流の平均流速の45%ほどに達しているのに対して、run O-2およびO-3の場合には下降流の最大値はいずれも1.5cm/secで、これは接近流の平均流速のわずか14%である。以上の事実は、洗掘防止杭を設置することによって下降流が大巾に軽減されることを示している。これは、杭の後流域に発生する上昇流が、橋脚前方の下降流の発生を妨げるためと考えられる。

また第2章において、円柱橋脚前方の馬蹄型渦にまきこまれる主流部分は、たとえば図3-8に示されるように橋脚の上流部で水路の対称面付近のごく限られた範囲を流下する部分であることが示された。このことと、上記の考察とを考えあわせると、橋脚前方の下降流を軽減させるには、橋脚前方の馬蹄型渦に流入する主流部分が、杭のはくり域内に含まれるようにすればよいといえそうである。このことに関連して、ChangとKarim³⁷⁾は、橋脚周辺の局所洗掘を軽減するためには杭のはくり域内に橋脚自体が含まれる必要があることを述べている。これら2つの考え方のうちどちらが正当なものであるかについては、後に移動床の実験で検討することにする。

(4) つば型防止工を設置した場合の流速分布

つば型防止工を設けたときの対称面内における流線形状を図5-4に既に表示したが、この図の(a)~(d)の各実験条件に対応する橋脚前方の対称面内の絶対流速の分布を図5-7(a)~(d)に、同じく下降流の流速分布を図5-8(a)~(d)にそれぞれ示した。

絶対流速の分布図から、A型およびC型のつば型防止工を設けた場合の水路床面近傍における逆流の最大値は0.5cm/secに達し、それ以外の型のつば型防止工を設けた場合の逆流もそれに近い流速に達していることがわかるが、この0.5cm/secという値は、防止工を設けず橋脚を単独に流れの中に設置したとき

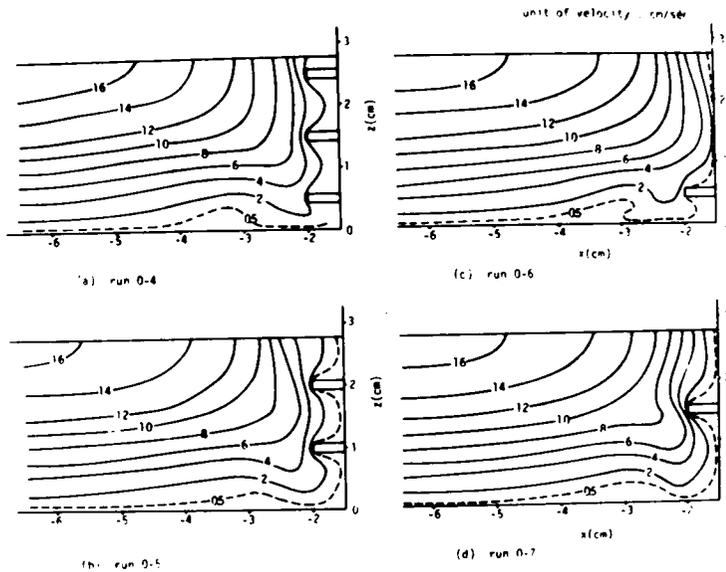


図 5 - 7 対称面内の絶対流速分布（つば型防止工の場合）

の逆流の最大値にほぼ等しい。先に図 5 - 4 の検討から、つば型防止工は逆流域を減少させる面では効果がないことが示されたが、上記の事実はさらに、つば型防止工は逆流の流速を減少させる上でもあまり効果がないことを示している。

つぎにつば型防止工を設けた場合の下降流の流速を検討する。図 5 - 8 から、この場合の下降流の最大値は $4 \sim 5 \text{ cm/sec}$ に達しており、この値はやはり、橋脚を単独に流れの中に設置した場合（run 0 - 1）の下降流の最大値とあまり変わらない。したがって下降流を防止するという点でもつば型防止工は有効でないことがわかる。

5. 2. 3 橋脚側方の流れの水理学的特性

以上の検討によって、つば型防止工は橋脚前方の局所流を軽減するには有効ではなく、一方杭型防止工は有効であることが示された。ただ以上の検討は、流れの対称面内の流況に限られたものである。そこで本項では、杭型防止工を

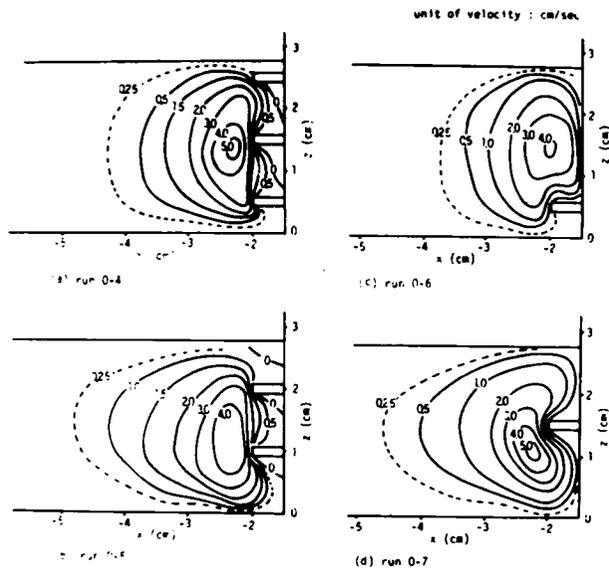
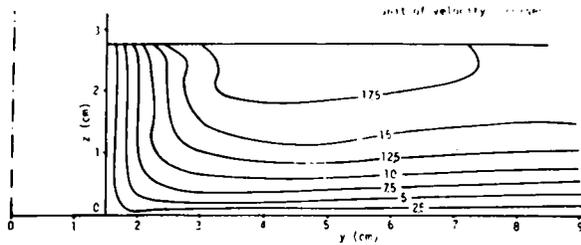


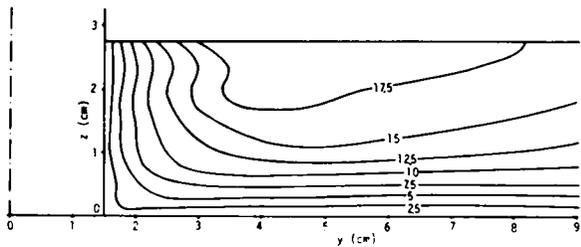
図 5 - 8 対称面内の下降流の流速分布（つば型防止工の場合）

設けた場合に橋脚の側方の流速分布がどのように変化するかを実測結果から検討する。

図 5 - 9 は橋脚側方の横断面 ($x = 0$ 断面) における流速分布を, run 0 - 1, 0 - 2 および 0 - 3 の各実験条件について示したものである。3つの流速分布を比較すると, 橋脚側面から隔たった所では流速分布の間にそれほどの差異は認められないが, 橋脚に接近した所では, 杭を設置した場合の方がそうでない場合に比べて水路床近くでは流速が小さく水面では流速が大きくなっていることがわかる。すなわち, たとえば上図に示された流速分布のうち $y = 2$ cm の地点での流速の z 方向の変化の様をよみとり同一図面上に示すと図 5 - 10 のようになり, 明らかに上記の傾向が認められる。第 2 章および第 3 章で述べたように, 橋脚前方に生じる下降流のため橋脚の側方の水路床近傍では連続の条件に従って流速が加速されるが, 橋脚前方に杭を設けると先述のように橋脚前方での下降流が軽減されるので, 上記の現象が軽減されたものと考えられる。



(a) run 0-1



(b) run 0-2

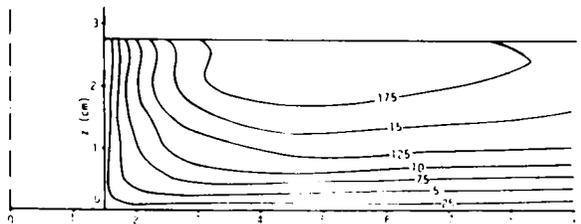


図 5-9 橋脚側方の横断面 ($x = 0$ 断面) における流速分布

以上の結果は、杭型防止工を設けることによって、橋脚前方のみならず側方においても洗掘力が軽減されることを示しており、杭型防止工の有効性をあら

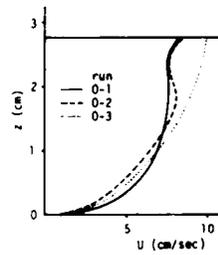


図 5-10 $x = 0, y = 2$ cm の地点での流速分布の比較

ためて示すものである。

5.2.4 水路床近傍の流れの水理学的特性

杭型防止工を設けた場合、逆流域はほとんど存在しないことが明らかになったが、図5-3の流線形状が示すように水路床近傍のトレーサは橋脚近傍の下降流におされて橋脚にまで達しない。そこで、run M-1 ~ M-5の実験条件において、水素気泡法の陰極の白金線を防止工の上流に水路横断方向に水路床に接して設置し、そこから流下するトレーサが防止工および橋脚周辺で排除さ

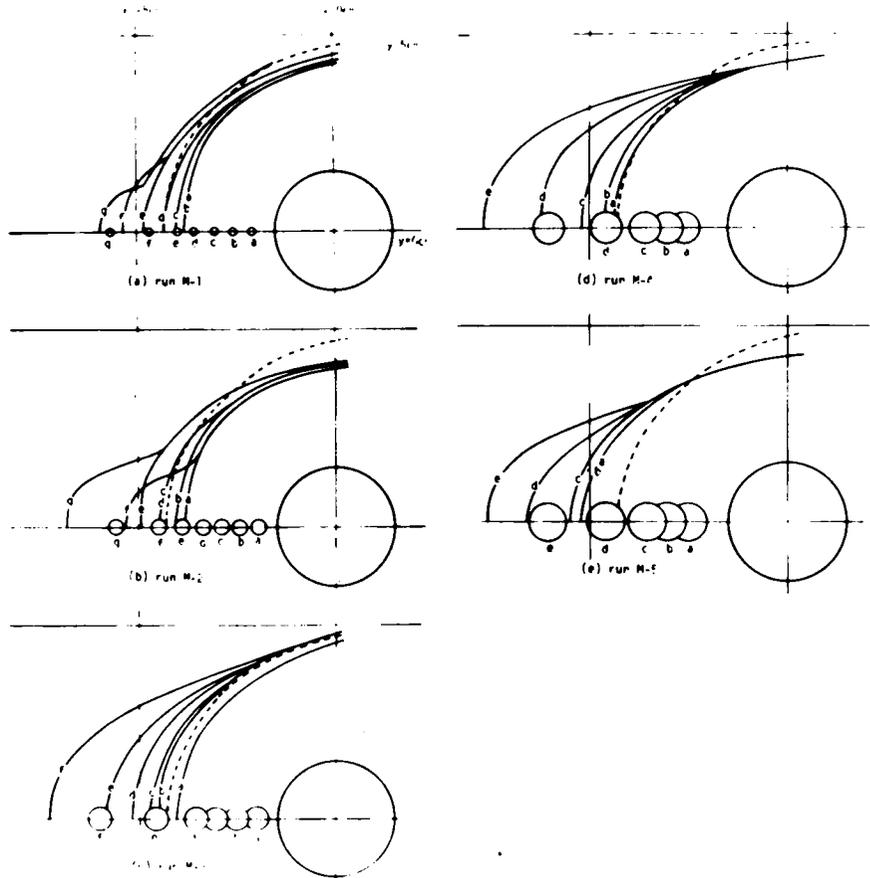


図5-11 杭型防止工を設置した場合の水路床近傍の排除範囲（層流の場合）

れる平面的な領域を観察した。その結果を図5-11に示す。図において破線は防止工を設けない場合の排除範囲を示しており、またたとえば a の記号のついた実線は a の位置に防止工を設けた場合の排除範囲を示している。

この図から、防止工の直径が小さい場合には、それを橋脚に近づけて設置すると、橋脚の前方における排除範囲は防止工がない場合の排除範囲より小さくなるが、防止工の直径が大き 경우에는、防止工を橋脚に接近して設置してもその排除範囲は防止工を設置しない場合のそれより大きいことがわかる。

そこで、防止工を設置したときの排除範囲の大きさが、防止工の位置と大きさによってどのように変化するかをつぎに調べてみる。図5-12に示すように

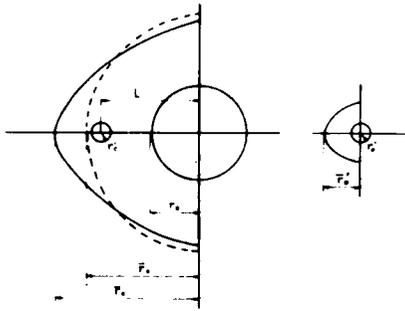


図5-12 記号の説明

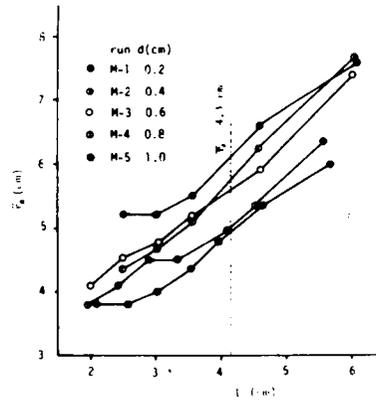


図5-13 防止工の位置と大きさによる排除範囲の変化（層流の場合）

各距離を表示する記号を定める。すなわち、 r_0 は杭を設置しない場合の半径 r_0 の円柱橋脚による排除範囲、 r_* は杭

を設置した場合の排除範囲、および r_0' は杭を単独に設置した場合の排除範囲の大きさをそれぞれ表わすとする。図5-11から r_* をよみとり、杭の直径 d および杭と橋脚との中心間隔 L との関係を求めると図5-13のようになる。

本実験では r_0 は4.3cmで一定であるが、本図から、 $L = r_0$ ならばすなわち杭がない場合における排除範囲の外側に杭を設置するならば、 r_* と L とはほぼ直線関係にあり、その勾配はほぼ45°であることが認められる。このことは、杭の直径が同じであれば $r_* - L$ は杭の位置に関係なく一定であることを意味する。

そこで図5-13から、 $\bar{\tau}_* - L$ の平均的な値を読みとり、それを杭を単独に設置した場合の排除範囲 $\bar{\tau}'_0$ と比較して表5-4に示す。この表から、 $(\bar{\tau}_* - L) / \bar{\tau}'_0$

run	$2\tau'_0$ (cm)	$\bar{\tau}_* - L$ (cm)	$\bar{\tau}'_0$ (cm)	$\frac{\bar{\tau}_* - L}{\bar{\tau}'_0}$
M-1	0.2	0.55	0.42	1.31
M-2	0.4	0.85	0.83	1.02
M-3	0.6	1.30	1.04	1.25
M-4	0.8	1.65	1.34	1.23
M-5	1.0	2.00	1.64	1.22

表5-4 排除範囲の大きさ（層流の場合）

の値はほぼ一定で1.2ないしは1.3であることがわかる。

一方 $L < \bar{\tau}_0$ の場合には、図5-13から明らかなように、 $\bar{\tau}_*$ と L との関係を示す曲線の勾配は L が小さくなるにつれてゆるやかになっており、その結果 $(\bar{\tau}_* - L) / \bar{\tau}'_0$ の値は L が小さいほど大きくなることがわかる。

水路床面における排除範囲の大きさは、馬蹄型渦の強さと大きさに重

要な関係があると考えられるが、表5-4の結果は、 $L > \bar{\tau}_0$ ならば、杭の前方の馬蹄型渦は、流れの中に杭を単独に設置した場合の馬蹄型渦とあまり変わらないが、 $L < \bar{\tau}_0$ ならば L が小さくなるにつれて杭の前方の馬蹄型渦は大きくなることを示している。以上の結論は、流線形状と流速分布の実測値に関する先の考察において、杭前方の流況に橋脚自体の影響が及ぶか及ばないかの指標を L が $\bar{\tau}_0$ より小さいか大きいかに求めたことが正当であったことを裏づけるものである。

つぎに $L < \bar{\tau}_0$ の場合においては、図5-13から、 L と $\bar{\tau}'_0$ が小さいほど排除範囲の大きさ $\bar{\tau}_*$ が小さくなることがわかる。このことは本項のはじめに述べた現象を説明するものである。また、杭型防止工を根固工と併用する場合には、局所流の強さを軽減するよりむしろ根固工の施工範囲を必要最小限にしたいという要請の方が優先する場合もありうるが、そのためには $\bar{\tau}'_0$ と L とを小さくすればよいことを上記の事実は示している。

5.3 乱流実験に基づく杭型防止工の機能に関する研究

5.3.1 研究の目的と実験方法

5.2において、橋脚前方に洗掘防止杭を1本設置した場合の橋脚および杭の周辺における流れの水理学的な特性の基本を検討するために固定床水路におけ

る層流状態での実験を行ない、杭型防止工が橋脚周辺の局所流を軽減するのに有効であるという推論をえた。本節では、まず、固定床水路において乱流状態で実験を行ない、実測が比較的容易な巨視的な量（水路床面での排除範囲や水面でのはくり範囲）の検討を基礎に、層流状態で明らかにした防止工の水理学的特性に関する結論が乱流の場合にも成立つことについての展望を得る。つぎに、移動床水路において杭型防止工を設置した場合の橋脚周辺の洗掘の模様を若干の実験条件の下で実測し、その結果を基礎に、固定床水路での実測結果に基づいて導き出されて来た杭型防止工の水理学的な特性に関する結論が実際の防止工の配置や大きさを決定する上でどのように適用されるかを検討する。

固定床水路での実験では、防止杭としては直径が 0.6 cm, 1.0 cm および 1.8 cm の 3 種を用い、これを 8 cm の橋脚の前方にいろいろな間隔で設置したとき、橋脚周辺の水路床近傍に生じる排除域の大きさや水面近傍のはくり域の大きさを実測し検討を加えた。実験は、第 3 章の実験でかなり詳しく局所流の特性が把握されている run K-1 と同じ水理条件の下で行なった。すなわち、実験水路の幅は 40 cm であり、流量は 9.62 l/sec, 勾配は 1/500, 橋脚周辺の水深は 7.4 cm である。

移動床水路での実験では、洗掘防止杭としては直径が 1.3 cm のものと 2.6 cm のものを用い、これを直径 13.4 cm の橋脚の前方に設置した。実験に用いた水路は幅 1.0 m で、水路床には図 5-14 に示されるような粒度分布（平均粒径 0.5 mm）をもつ砂を 1/300 の勾配でしきつめた。流量は 7.67 l/sec に設定したが、この流量の下で橋脚を設置しない状態での水深は 2.9 cm である。

本節における各実験の条件を表 5-5 にまとめて示す。

5.3.2 平滑な固定床水路における 実験的研究

(1) 水路床面近傍における 排除範囲

固定床水路に設置された橋脚の上流側に細かい砂をまくと、橋脚の周辺には馬

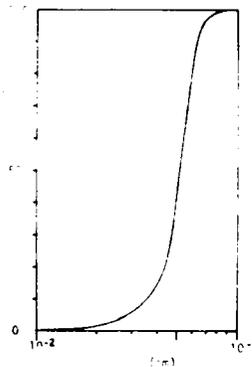


図 5-14 河床砂の粒度分布

run	防 止 杭		橋脚 直径 $2r_0$ (cm)	実 験 水 路		接 流			測 定 事 項	
	直径 $2r_0$ (cm)	位置 L (cm)		巾 B (cm)	勾配 I	水路床	流量 Q (L/sec)	水深 H (cm)		平均流速 U_m (cm/sec)	$\frac{U_m H}{\nu}$
K-2	0.6	5.0, 6.0,	8	40	1/500	固定床	9.62	7.4	32.5	24,050
		7.0, 8.0,								
		9.0, 10.0								
K-3	1.0	5.5, 5.95,	8	40	1/500	固定床	9.62	7.4	32.5	24,050
		6.9, 7.9,								
		8.9, 10.93,								
K-4	1.8	12.73,	8	40	1/500	固定床	9.62	7.4	32.5	24,050
		14.80								
		5.43, 5.85,								
N-1	設置せず	6.85, 7.9,	13.4	100	1/300	移動床 平均 粒径 0.5 mm	7.67	2.9	26.45	7,671
		8.77,								
		10.84,								
N-2	2.6	12.80,	13.4	100	1/300	移動床 平均 粒径 0.5 mm	7.67	2.9	26.45	7,671
		14.80								
		14.0								
N-3	1.3	16.5	13.4	100	1/300	移動床 平均 粒径 0.5 mm	7.67	2.9	26.45	7,671
		11.5								
		14.0								
N-4	1.3	16.5	13.4	100	1/300	移動床 平均 粒径 0.5 mm	7.67	2.9	26.45	7,671
		14.0								
N-5	1.3	16.5	13.4	100	1/300	移動床 平均 粒径 0.5 mm	7.67	2.9	26.45	7,671
N-6	1.3	16.5	13.4	100	1/300	移動床 平均 粒径 0.5 mm	7.67	2.9	26.45	7,671

表 5 - 5 実験条件 (乱流の場合)

蹄型渦による逆流のためにこの砂が排除される領域が生じることを第3章で述べた。ここでは平滑な固定床水路上に直径8 cmの円柱橋脚を設置し、その前方に直径0.6, 1.0あるいは1.8 cmの防止杭を1本設置したとき、水路床にまかれた細砂が橋脚および防止杭の周辺で流れによって排除される範囲を実測し、それが洗掘防止杭の直径 d や洗掘防止杭と橋脚との中心間隔 L によってどのように変るかを検討する。

排除範囲の実測結果は図5-15に示されるが、本図において、run K-2, K-3およびK-4は防止杭の直径がそれぞれ0.6, 1.0および1.8 cmの場合に相当し、またたとえば記号 a で示される実線は杭を a の位置においたときの排除範囲を示しており、破線は杭を設置しない場合の橋脚のみによる排除範囲を示している。なお、接近流の流速分布は第3章のrun K-1と同じであり、その平均流速は32.5 cm/sec, 水深は7.4 cmである。また実験水路の幅は40 cmで、勾配は1/500に設定されている。

図5-15から、層流の場合と同様に乱流の場合も、破線で示されている防止杭がない場

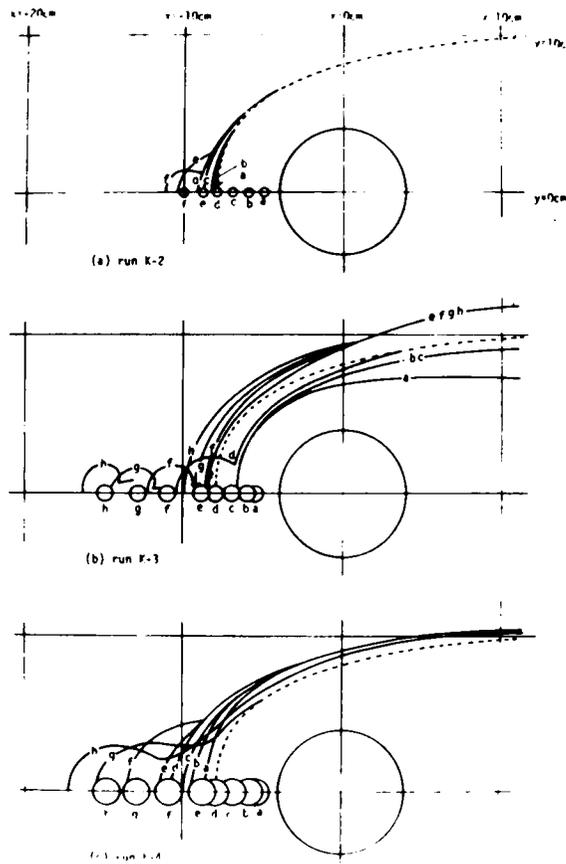


図5-15 水路床近傍の排除範囲（乱流・杭型防止工の場合）

合における橋脚による排除範囲の内側に杭がある場合と、その外側に杭がある場合とで排除範囲の形状がかなり異なっていることが認められる。すなわち、防止杭が橋脚のみによる排除範囲の内側にある場合、すなわち $L < \bar{r}_0$ の場合には、その排除範囲の形状は橋脚のみによる排除範囲の形状に類似したものとなっているが、防止杭と橋脚との中心間隔が上記の場合よりさらに大きく、 $L \geq \bar{r}_0$ となると、排除範囲の形状は防止杭による排除範囲と橋脚による排除範囲とがほぼ判別できる形で加え合わされた形状となっている。

run	d (cm)	$r_* - L$ (cm)	\bar{r}'_0 (cm)	$\frac{r_* - L}{\bar{r}'_0}$
K-2	0.6	1.3	0.95	1.37
K-3	1.0	1.7	1.45	1.17
K-4	1.8	2.7	2.20	1.22

表 5-6 排除範囲の大きさ
(乱流の場合)

す曲線は勾配 45° の直線に近いが、 $L < \bar{r}_0$ ではその勾配はかなりゆるやかになっている。 $L = \bar{r}_0$ における $\bar{r}_* - L$ の平均的な値と \bar{r}'_0 との関係を求めると表 5-6 のようになり、 $(\bar{r}_* - L) / \bar{r}'_0$ は 1.2~1.4 の値をとることがわかる。このことは、 $L \geq \bar{r}_0$ であれば洗掘防止杭前方の馬蹄型渦の強さや大きさは杭を単独に流れの中に設置した場合のそれとあまり変わらないことを意味している。このことから、排除範囲の特性については乱流の場合と層

前節の図 5-12 の記号を本節でも踏襲することにして、乱流の場合の排除範囲の大きさ \bar{r}_* の変化の様態を图示すると図 5-16 のようになるが、 $L \geq \bar{r}_0$ に従って排除範囲の特性が異なるという上記の事実はここでも認められる。すなわちこの図で、 \bar{r}_* と L との関係は、 L が $\bar{r}_0 = 7.95$ cm より大きいか小さいかによって変化しており、 $L > \bar{r}_0$ では \bar{r}_* と L との関係を示

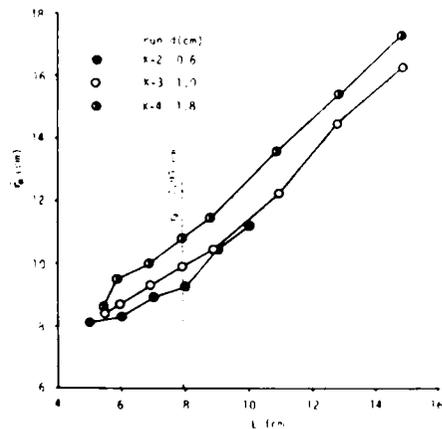


図 5-16 防止杭の位置と大きさによる排除範囲の変化(乱流の場合)

流の場合とはよく類似しているといえよう。したがって橋脚周辺の局所流の杭による変化の模様についても両者は類似していると考えられる。すなわち、図5-16から類推して、乱流の場合も防止杭を設けることによって橋脚前方の馬蹄型渦を軽減できることが期待される。

(2) 水面における後流はくり域の変動範囲

後流はくり域の幅は、5.1.1 (2)④で述べたように、橋脚前方の局所流が軽減されるほど小さくなると考えられる。

ところで、ここでの実験条件 (run K-1 ~ K-4) の下においては、橋脚の後流はくり域は後流はくり渦(カルマン渦)の生成にともないほぼ周期的に変動している。よって防止杭を橋脚の前方に設置した場合において橋脚の後流はくり域の大きさに対する防止杭の影響を検討する場合には、はくり域の最大値すなわちはくり域の変動範囲を包む範囲が問題であると考えられる。そこで第4章の実験と同様に水面に木屑とアルミニウムの粉末とを混ぜたものをまき、そ

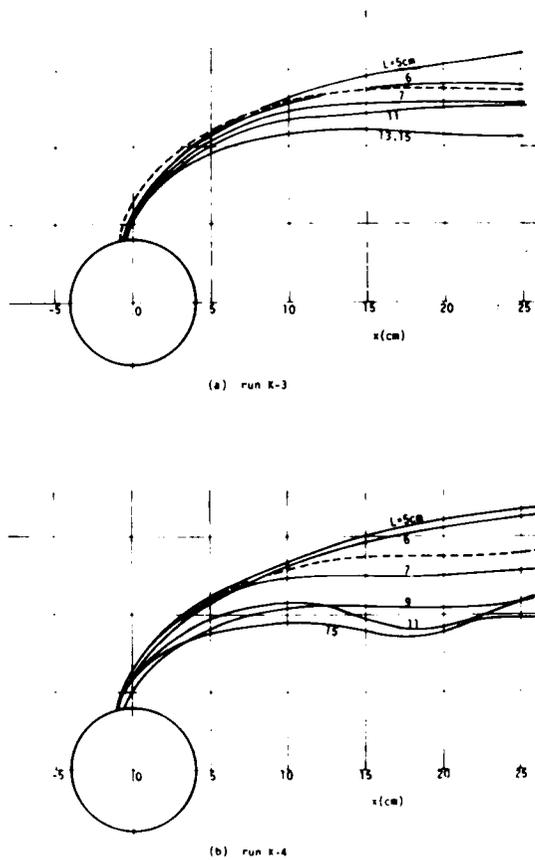


図5-17 水面におけるはくり域の変動範囲 (乱流の場合)

れが流下する様子を写真撮影する方法によって水面におけるはくり域の最大変動範囲を求めた。実験は前項と同じ水理条件の下で、直径8cmの円柱橋脚の前方に直径1.0cmの防止杭を1本設置した場合（run K-3）および直径1.8cmの杭を設置した場合（run K-4）について行なった。実測の結果は図5-17に示されているが、この図でたとえば $L = 5\text{cm}$ と記されている実線は、橋脚と防止杭との中心間隔が5cmの場合におけるはくり域の最大変動範囲を示しており、また破線は杭を設置しない場合のそれを示している。本図から、 $L = 5\text{cm}$ ないしは6cmで杭の位置が比較的橋脚に近い場合はかえって杭がない場合よりはくり域の変動範囲は大きくなっているが、杭の位置が7cm以上橋脚の中心から離れている場合ははくり域の変動範囲はかなり縮小されることが認められる。ところで、防止杭を設置しない時の水路床面における橋脚前方の排除範囲の大きさを r_0 は7.95cmであるから、上記の実験結果と前項での結論とからつぎのことが指摘できる。すなわち、 $L > r_0$ であれば橋脚前方の局所流が軽減されると同時に橋脚後方の局所流の範囲も縮小される。

5.3.3 移動床水路における洗掘防止杭の効果に関する実験的研究

本項では、移動床水路において橋脚の前方に洗掘防止杭を設置した場合のその周辺の洗掘の模様を実測し、その結果について水理学的に検討する。

5.1.1 (1)で述べたように、橋脚周辺の局所流は局所洗掘の重要な原因となっており、その局所流の水理学的な特性は移動床の場合と固定床の場合とで本質的には変わらないと考えられる。したがってここでは、固定床水路における層流あるいは乱流状態での実測結果に基づいて導き出されて来た杭型防止工の水理学的な特性に関する結論が、実際防止工の配置や大きさを決定する上でどのように適用されるかを検討することにより、防止杭の大きさや配置法についての指針を得ようとするものである。

(1) 実験条件の選択

a) 防止杭の位置

以上までに述べて来た固定床における実験的検討の結果、洗掘防止杭を橋脚のみによる排除範囲の内側におくか外側におくかで、杭および橋脚周辺の局所

流の水理学的な特性がかなり異なっていることが明らかになった。まず、杭を橋脚のみによる排除範囲の外側に設置する場合には、杭周辺の局所流と橋脚周辺の局所流とが加え合わさった形で発生し、杭周辺の局所流の大きさは杭と橋脚との中心間隔にかかわらずほぼ一定していることがわかった。ところで、杭が橋脚からあまり離れておれば、杭が橋脚周辺の局所流を軽減する効果が減少することが当然予想される。したがって、杭が排除範囲の外側境界線上にある場合が、杭による局所洗掘防止効果に対する杭の位置の影響を検討する上で1つの基準となると考えられる。そこで、本実験では、杭を排除範囲の外側境界線上においた場合と、杭をその位置より若干橋脚に近づけた場合および若干遠ざけた場合とについて、杭による洗掘軽減効果を比較検討することが必要となる。

排除範囲の大きさを求める式は第3章の式(3-2)で与えられており、この式の中の m_1 はほぼ0.7であり、 α_1 は図3-16から求められることがすでに示されている。本実験条件($H = 2.9\text{ cm}$, $r_0 = 6.7\text{ cm}$)では、まさつ速度は 3.07 cm/sec となり、まさつ速度と水深を用いたレイノルズ数は892となるから、図3-16から $\alpha_1 = 1.4$ が求められる。したがって式(3-2)から、排除範囲の大きさ r_0 が 14.0 cm と求められる。

b) 防止杭の直径

つぎに、橋脚を単独に流れの中に設置した際にその前方の馬蹄型渦に導入される主流部分(流れの対称面近くのかかなり狭い範囲に限られている)が杭によるはくり域内に含まれるならば、杭による局所流軽減効果は十分に期待されることを先に示した。このような考え方に基づくると、洗掘防止杭の半径についてつぎのような目安がえられる。すなわち、第3章の図3-8の示すところにより、半径 r_0 の円柱橋脚の馬蹄型渦に導入される主流部分は橋脚の上流における流れの対称面近くの部分であり、その範囲はせいぜい $-\tau_0/5 < y < \tau_0/5$ であるといえよう。また、第4章の図4-16~図4-18において図中の円柱を洗掘防止杭と見なすと、杭(半径 r_0')の位置において $-2r_0' < y < 2r_0'$ の範囲を通過する主流部分が杭によるはくり域内に導入されることがわかる。上記の2つの事実から杭の半径 r_0' は橋脚の半径 r_0 のほぼ $1/10$ でよいことがわかる。

一方ChangとKarim³⁷⁾は、杭のはくり域内に橋脚が含まれるときに杭による

局所洗掘の軽減率は高くなると考えている。第4章の実験に基づくならば、たとえば run K-1 の場合、橋脚後方のはくり域の変動範囲の巾は橋脚の直径の約4倍であり、その変動範囲は本章の図5-17にも破線で示されている。同様の事実が杭の周辺の流れについても成立つはずであるから、Chang と Karim の考え方に基づく杭の最適半径は、橋脚の半径のほぼ1/4ということになり、事実彼等はこのような半径の杭で実験を行なっている。また Chabert ら^{*)}は橋脚の半径の1/6の半径の杭を用いて実験を行なっている。

そこで本実験では、防止杭の大きさとしては、先述の考え方にに基づきその半径を約 $r_0/10$ としたものと、Chang らの考え方あるいは Chabert らの実験条件に近づけて半径を $r_0/4 \sim r_0/6$ としたものとを比較検討することが必要となる。

c) 実験で採用すべき条件

以上の考察によって洗掘防止工として採用することができると考えられる杭の位置や大きさの範囲が明らかにされたので、本実験で検討すべき条件の範囲を決定することができる。すなわち先に表5-5で示した run N-1 ~ N-6 は本実験で検討しようとする条件を一括して示したもので、まず run N-1 は橋脚だけを設置した場合である。つぎに run N-2 および N-3 は、杭の半径を Chang らあるいは Chabert らの考察および実験条件に近づけて約 $r_0/5$ としたものであり、杭と橋脚との中心間隔 L については、run N-2 では先の考察で L の基準となると判断した値 $r_0 = 14\text{cm}$ に等しくし、run N-3 では、 L としては橋脚の直径の1~1.5倍が適当であるという Chang らおよび Chabert らの共通の結論を考慮して $L = 16.5\text{cm}$ とした。さらに run N-4 ~ N-6 では、b) において局所流の機構に関する考察に基づいて杭の半径として最適と判断した値 $r_0/10$ を杭の半径に採用したもので、そこでの L としては、run N-5 では先の考察に基づく基準値 $L = r_0 = 14\text{cm}$ を用い、run N-4 ではそれより若干小さな $L = 11.5\text{cm}$ を用い、また run N-5 ではそれより若干大きく run N-3 と同じ $L = 16.5\text{cm}$ を用いている。

(2) 実験結果とその考察

以上の各実験条件の下で2時間通水した後の橋脚周辺の洗掘の状況を図5-18に示す。本図において実線および点線は初期河床高からの洗掘深を cm 単位で

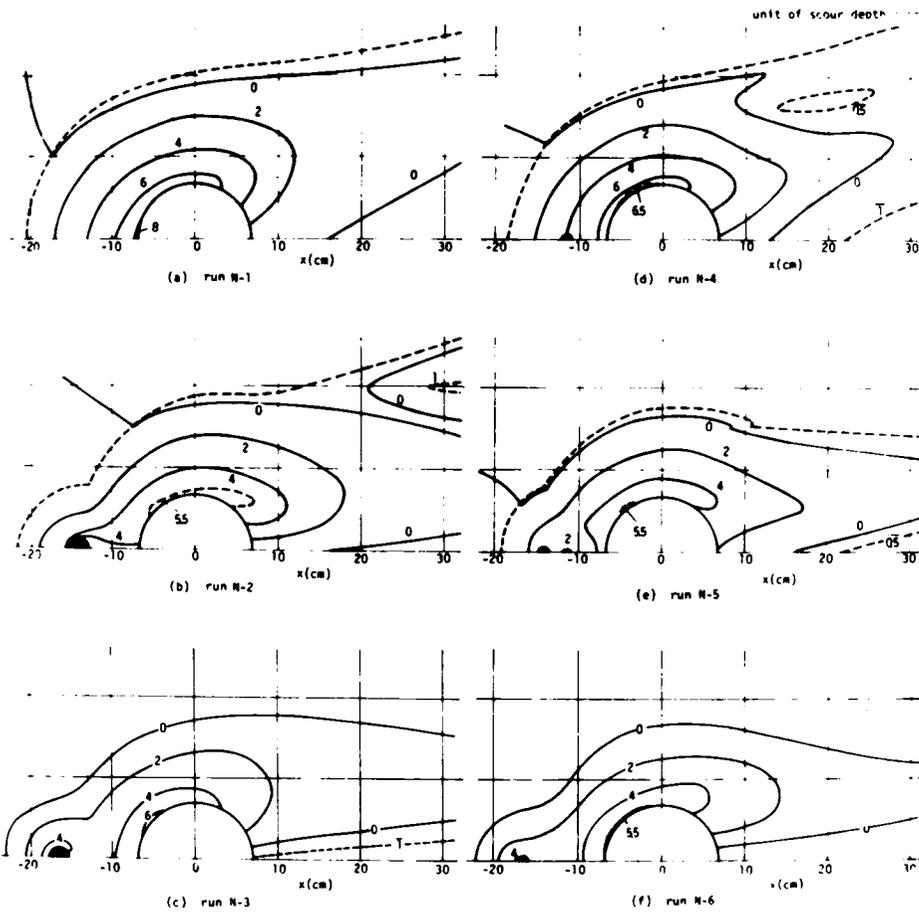


図5-18 橋脚周辺の洗掘状況（洗掘深の単位は cm ）

示したものであり、破線は河床高が急激に変化する位置を示している。また一つつけた数字は初期河床高からの堆積高さを示している。また図5-19には、(a)橋脚の直前面、(b)橋脚の側面および(c)防止杭の直前面の各点における洗掘深の時間変化をそれぞれ示した。図5-19から、通水時間2時間の時点でも洗掘深の経時変化を示す曲線の勾配は必ずしも水平ではなく、したがって図5-18の洗掘深も最終的なものとはいえないことがわかるが、ここでは図5-18を基礎として明らかになった点を指摘する。

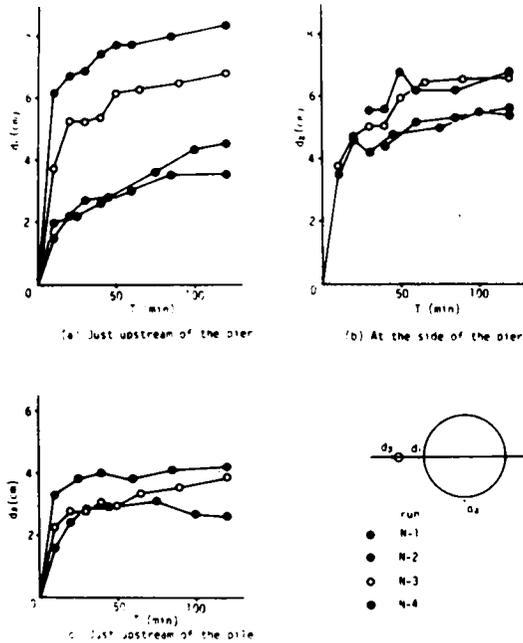


図5-19. 洗掘深の経時変化

に比べても小さくなっており、洗掘の範囲に関する限り $L = \bar{r}_0$ および $r_0' = r_0 / 10$ という基準が最もよいことが確められた。

b) 最大洗掘深の軽減率

各実験条件における最大洗掘深を表5-7に示す。この表から、杭を設置した場合にはいずれの場合も杭を設置しない場合よりも最大洗掘深が軽減されていることがわかるが、このことは、洗掘範囲について先に述べたことと同様に、洗掘防止杭が洪水時に有効であることを示している。

つぎに最大洗掘深の軽減率については、 $L = \bar{r}_0$ と設定した run N-2 と N-5 の場合がほぼ同程度の大きな値を示しているが、なかでも run N-5 の場合の軽減率はとくに大きくその値は32.5%となっている。すなわち最大洗掘深の軽減率を大きくするという点でも、 $L = \bar{r}_0$ および $r_0' = r_0 / 10$ という基準が最もよ

a) 洗掘の範囲

防止杭を設置することによって、いずれの場合においても洗掘の範囲は縮小されていることがわかる。このことから、たとえ防止杭の位置や大きさが最適でなくても、防止杭を設置することによって洗掘の範囲が拡大されることがないといえるから、流量や水深が刻々に変化する洪水時においても防止杭が有効であることがわかる。

また、run N-5 の場合の洗掘の範囲が他のいずれの場合のもの

run	防 止 杭		最大洗掘の状況		
	$2r_0'$ (cm)	L (cm)	深さ (cm)	軽減率 (%)	位置 α°
N-1	なし		8.3	0	0
N-2	2.6	14.0	5.8	30.1	52
N-3		16.5	6.1	26.5	45
N-4	1.3	11.5	6.75	18.7	65
N-5		14.0	5.6	32.5	51
N-6		16.5	5.9	28.9	45

表 5-7 最大洗掘深とその発生位置

α はそれぞれ表 5-7 のようになる。本表から、洗掘範囲の縮小の度合および最大洗掘深の軽減率がともに大きくなっている run N-2 および run N-5 の実験条件の下では、最大洗掘深の発生位置を示す α の値は 51~52° となつてほぼ共通していることが認められる。

d) 洗掘防止杭の位置と大きさ

表 1-1 にも示したように、Chabert と Engeldinger は橋脚の直径の 1/6 の直径をもつ杭を用い、また Chang と Karim は 1/4 の直径の杭を用いてそれぞれ実験した結果、杭と橋脚との中心間隔は橋脚の直径の 1 ないし 1.5 倍のとき最大洗掘深の軽減率は最大で約 30% に達するという共通した結論を導き出している。

一方本実験のうち、run N-2 はほぼ彼等の実験条件を再現するように設定されたものであるが、その実験結果においても彼等の結果とよく一致していることが認められる。一方 run N-5 については、防止杭の位置は彼等の条件を満たしているが、杭の直径はかなり小さい。それにもかかわらず最大洗掘深の軽減率は run N-2 の場合よりわずかではあるが大きくなっており、洗掘範囲についてはかなり縮小されている。

以上の検討から、洗掘防止杭のはくり域内に橋脚が含まれるかどうかということをもとに杭の位置 L および半径 r_0' を決めようとする Chang らの考え方より

いことが確かめられた。

c) 最大洗掘深の発生位置

2 時間通水した後における最大洗掘深は、いずれの実験条件の下においても橋脚の表面にほぼ接した所で現われている。最大洗掘深の発生位置と橋脚の中心を結ぶ直線が主流流下方向の逆方向となす角度を α とするとき、各実験条件における最大洗掘深および

も、橋脚および杭の周辺の局所流の機構に基づいてそれらを決めるという考えの方が正当であることが裏づけられた。このことはまた、5.3.3(1)で行なった考察の妥当性をも示すものである。したがって、 $L = \bar{r}_0$ および $r'_0 = r_0/10$ が洗掘防止杭の位置と大きさを与える最適値といえる。

最後に、上記の基準 $L = \bar{r}_0$ を、Chabert らおよび Chang らの基準 $L = 2r_0 \sim 3r_0$ と比較してみる。 \bar{r}_0 の実測値は第3章の図3-15で示されているが、 $L = \bar{r}_0$ と仮定できるのでその図の \bar{r}_0 は L にかきかえられ、 L と r_0/H との関係が図5-20のように示される。

すなわち本図で黒い丸印が最適な中心間隔を示すものであり、その値はたとえ r_0/H が同じでもその他の水理条件によって変化することを示している。一方、Chabert らおよび Chang らの $L = 2r_0 \sim 3r_0$ という関係は同図に破線のように示される。勿論図3-15はすべての実験条件を尽しているわけではないが、この図から黒丸印の分布範囲と2本の破線で囲まれる部分とは r_0/H が大きいときとかなりずれることが認められる。すなわち、彼等の杭と橋脚の中心間隔に関する基準は、 r_0/H が小さいときはほぼ適当であるが、 r_0/H が大きくなると若干大きすぎることがわかる。

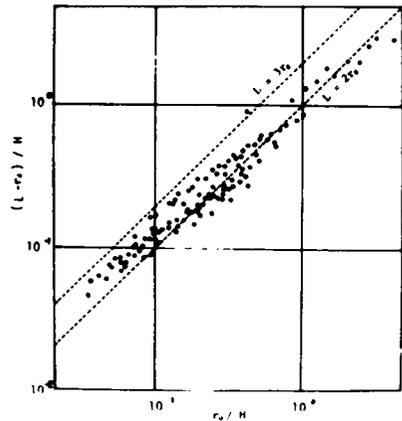


図5-20 杭と橋脚との中心間隔の最適値に関する検討

5.4 結 言

本章では、橋脚周辺の洗掘を防止する各種工法のうちとくに杭型防止工に重点をおき、その水理学的特性と適正な配置法について実験的に研究を行なった。実験ははじめに固定床水路で行なったが、そこではまず層流状態で防止工および橋脚周辺の水理現象を詳細に把握し、ついで乱流状態で実測が比較的容易な巨視的な量だけを測定することによって、層流状態での知識を基礎として乱流状態で防止工を設置したときの橋脚の周辺の流れの水理学的特性を明らかにし

た。最後に以上の結果に基づいて杭型防止工の適正な配置法とその大きさを提案し、移動床水路における実験によってその妥当性を検証した。

5.1では、橋脚周辺の局所流と局所洗掘との関係についての考察に基づいて、各種の洗掘防止工法の水理学的な機能を明らかにした。すなわち、

①橋脚周辺の局所洗掘を軽減防止するには、橋脚周辺の局所流とくに馬蹄型渦と下降流を軽減する方法が有効である。

②実際河川に防止工を施工するにあたっては、防止工が所期の目的を果すべきことは当然であるが、その他に、その施工が容易なこと、また浮流物や河床変動によってその機能が阻害されたりあるいは河流に悪影響を及ぼしたりしないことなどの条件が要請される。

③洗掘防止工に対する以上に述べたような水理学的な条件あるいは施工ならびに維持管理面での条件を最もよく満たしている方法は、橋脚の前頭部形状を工夫する方法および杭型防止工を用いる方法である。

5.2では、固定床における層流状態での実験を基礎に、杭型防止工と、比較のためにつば型防止工の周辺の局所流の機構について検討した。すなわち、

①つば型防止工はTanakaらが言うような、主流の境界層の厚さを減少させるという作用をあまりもたず、橋脚周辺の局所流を軽減する上であまり効果がない。

②橋脚を単独に水路に設置したときの水路床付近に挿入されたトレーサの排除範囲（以下単に排除範囲という）の外側に杭を設置した場合、杭の周辺の流れは橋脚の影響をほとんど受けず、しかも杭の直径が小さければその前方には逆流を生じない。したがって、杭周辺の局所流は杭の直径を小さくすることにより軽減される。

③杭の後流域に生じる上昇流は、橋脚前方に生じる下降流を軽減する効果をもつので、杭と橋脚の間の下降流は微弱となる。その結果、杭型防止工を設けることにより橋脚側方の水路床近傍の流速も軽減されることになる。これらの諸現象は杭型防止工の有効性を示している。

④②項の場合とは逆に、橋脚による排除範囲の内側に杭を立てることにより、

そのときの排除範囲を杭がなかった場合のそれより縮小することができる。

5.3では、まず固定床水路における乱流状態での実験によって杭型防止工を設置したときの橋脚周辺の流れの特徴を巨視的に把握し、層流状態での実験からえた知識に基づいて、実際に杭型防止工を設置する場合の最適な配置法および杭の大きさについての指針を示した。次いで移動床水路において実験を行ない、杭型防止工を設置した場合における橋脚周辺の洗掘特性を明らかにするとともに、上記の指針を検証した。すなわち、

①橋脚を単独に設置したときの排除範囲の外側に防止杭を設置すれば、層流の場合と同様に乱流の場合も橋脚および杭の周辺の局所流が軽減されるとともに、橋脚の後流はくり域の変動範囲も縮小される。

②杭型防止工の設置位置や大きさがたとえ最適なものでなくても、杭を設置すれば橋脚周辺の局所洗掘深は軽減される。

③橋脚が単独におかれたときの排除範囲の外側境界線上で流れの対称面内に防止杭を設置したとき、橋脚の周辺の洗掘深の軽減率は最大となる。一方防止杭の最適な大きさは、橋脚を単独においたときその周辺の馬蹄型渦に導入される主流部分の大きさと防止杭を単独においたときのはくり域の大きさを等しくすることによって決定され、このようにして決定される防止杭の最適な直径は橋脚の直径の約 $1/10$ である。

④以上の位置および直径で防止杭を設置したとき、その周辺の最大洗掘深は約30%軽減される。またその時の最大洗掘深は橋脚の前方から約 50° 偏った位置に生じる。

⑤ChangらおよびChabertらは、洗掘防止杭と橋脚との適正な中心間距離は橋脚の直径の $1\sim 1.5$ 倍としているが、この値は τ_0/H が大きい場合には大きすぎる。

参 考 文 献

- 1) 鈴木幸一, 吉舎広幸, 辻本哲郎: 橋脚周辺の局所洗掘について, 土木学会第28回年次学術講演会講演概要集, 第2部, 1973, p. 231.
- 2) White, C. M. : The equilibrium of grains on the bed of a stream,

Proc. Roy. Soc., A 174, 1940, pp. 322-338.

- 3) 栗原道徳：限界掃流力に就いて，九大流体力学研究所報告，第4巻，第3号，1948，pp. 1-26.
- 4) 岩垣雄一：限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，1956，pp. 1-21.
- 5) 岩垣雄一，土屋義人：砂面上におかれた礫の限界掃流力について，土木学会論文集，第41号，1956，pp. 22-38.
- 6) Einstein, H. A. : The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bulletin, No. 1026, 1950, pp. 1-71.
- 7) 石原藤次郎^{本内編}：応用水理学，中I，丸善，1958，pp. 15-21.
- 8) 佐藤清一，吉川秀夫，芦田和夫：河床砂礫の掃流運搬に関する研究(1)，建設省土木研究所報告，第98号，1957，pp. 13-30.
- 9) 前出6)
- 10) Kalinske, A. A. : Movement of sediment as bed load in rivers, Trans. AGU, Vol. 28, No. 4, 1947, pp. 615-620.
- 11) Yalin, M. S. : An Expression for bed-load transportation, Proc. ASCE, Vol. 89, No. HY3, 1963, pp. 221-250.
- 12) 岸力，福岡捷二：河床粒子の Saltation の機構と流砂量，土木学会第10回水理講演会講演集，1966，pp. 59-64.
- 13) 岸力，鈴木剋之，黒木幹男：流れによる河床粒子の Saltation の機構，土木学会第24回年次学術講演会講演集，第2部，1969，pp. 217-220.
- 14) 土屋義人，角野稔：水流による砂粒の運動機構に関する実験，京大防災研究所年報，第10号B，1966，pp. 97-107.
- 15) 矢野勝正，土屋義人，青山俊樹：掃流砂礫の Saltation に関する実験，京大防災研究所年報，第12号B，1969，pp. 491-502.
- 16) 土屋義人，渡戸健介，青山俊樹：水流による砂礫の Saltation の機構(1)，京大防災研究所年報，第12号B，1969，pp. 475-490.
- 17) 土屋義人，青山俊樹：水流による砂礫の Saltation の機構(2)—— Successive Saltation の理論について——，京大防災研究所年報，第13号B，19

- 70, pp. 199-216.
- 18) Tsuchiya, Y. : Mechanics of the successive saltation of a sand particle on a granular bed in a turbulent stream, Bull. DPRI, Kyoto Univ., Vol. 19, Part 1, No. 152, 1969, pp. 31-44.
 - 19) Tison, L. J. : Érosion autour de piles de ponts en rivière, Annales des Travaux Publics de Belgique (Brussels), 1940, pp. 813-868.
 - 20) Keutner, Chr. : Strömungsvorgänge an Strompfeilern von verschiedenen Grundrissformen und ihre Einwirkung auf die Flussole, Die Bautechnik, Jahrgang 10, Heft 12, 1932, pp. 161-170.
 - 21) 石原藤次郎 : 橋脚による河床洗掘に関する実験的研究, 土木学会誌, 第24巻, 第1号, 1938, pp. 23-55.
 - 22) 石原藤次郎 : 橋脚による河床洗掘に関する実験的研究(第2編), 土木学会誌, 第28巻, 第9号, 1942, pp. 787-821.
 - 23) 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, 1942, pp. 974-1007.
 - 24) Posey, C. J. : Why Bridges fail in floods, Civil Engineering, Vol. 19, 1949, p. 42 and p. 90.
 - 25) Laursen, E. M. and A. Toch : Scour around bridge piers and abutments, Iowa Highway Research Board Bulletin, No. 4, 1956.
 - 26) Neill, C. R. : River-bed scour, Technical publication, No. 623, Canadian Good Roads Association, Ottawa, Canada, 1964.
 - 27) Bata, C. : Erezija eke novesadskeg mostovskog stube, Institute za vodoprivreder, Iaroslav Cerai Beozrad Yugoslavia, 1960.
 - 28) 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., U. S. A., 1967, pp. 151-161.
 - 29) Shen, H. W., V. R. Schneider and S. Karaki : Local scour around bridge piers, Proc. ASCE, Vol. 95, No. HY6, 1969, pp. 1919-1940.
 - 30) 藤本武助 : 流体力学, 養賢堂, 1963, pp. 341-345.
 - 31) 高野暁 : 流体力学, 岩波書店, 1975, p. 79.

- 32) Laursen, E. M. and A. Toch : A generalized model study of scour around bridge piers and abutments, Proc. Minesota Inst. Hyd. Conv., IAHR, 1953, pp. 123-131.
- 33) Tanaka, S. and M. Yano : Local scour around a circular cylinder, Proc. 12th Congress of IAHR, Vol. 3, Colorado State Univ., U.S.A., 1967, pp. 193-201.
- 34) 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, No. 194, 1971, pp. 83-90.
- 35) Shen, H. W., V. R. Schneider and S. Karaki : Mechanics of local scour supplement methods of reducing scour, Civil Engineering Department Report CER 66 HWS 36, Colorado State Univ., 1966, pp. 13-18.
- 36) Chabert, J. and P. Engeldinger, Etude des affouillement autor des piles de ponts, Laboratoire National D'Hydraulique, 6 Quai Watier, CHATOU, Series A, 1956, pp. 45-53.
- 37) Chang, F. M. and M. Karim : An experimental study of reducing scour around bridge piers using piles, South Dakota Department of Highways, 1972.

結

論

橋脚周辺の流れといえば日常生活にも関連深く、それだけに水理学において近代的な研究手法が確立されて以来追求されてきた課題であったし、いくつかのかがやかしい研究上の発展段階を経て来た。本研究はこういった過去の研究成果を基礎とするものであるが、とくにこれらの研究のなかでその重要性が指摘されながらほとんど未解明のまま残されてきている橋脚周辺の局所流の機構を実験的かつ解析的に明らかにし、さらにそこでえた知見を洗掘防止法に応用するという点で従来の研究とは異なる特徴をもつものである。

橋脚周辺の局所流は、流況的には馬蹄型渦、下降流、後流はくり渦などで特徴づけられるが、工学的な観点からはこれらの局所流の時間平均的な流況の特性および渦の低周波数領域での特性がとくに重要である。本研究における現象把握の方法上での特徴は、乱流状態における局所流のこれらの特性が、層流状態での流れの特性から推定できるという予測のもとに、層流状態での現象把握を詳細な実験と水理学的解析とによって行ない、その成果を基礎に乱流状態での現象把握を行なっていることである。

本研究でえられた主要な成果は、第1に、局所流という複雑な現象を3次元的に把握する方法を具体的に示し、その方法により橋脚周辺の局所流を詳細に実測するとともにその水理学特性を明らかにしたこと、第2に、橋脚前方の局所流の3次元的な流速分布式を導き出したこと、第3に、これらの成果を基礎として、橋脚周辺の局所洗掘防止法に関する指針を得たこと、である。

つぎにこれらの成果の具体的な内容を各章毎に要約するとつぎのようである。

第1章では、橋脚周辺の局所流と洗掘防止法についての従来研究成果の検討を基礎に、本研究でとるべき現象理解および解析の立場を明らかにした。とくに、橋脚周辺の局所洗掘などの工学的問題を解明してゆく上で、局所流の機構解明が従来もっとも欠けており、かつもっとも重要な位置をしめていることを指摘し、ついで、こういった局所流の現象は渦度の変形過程として扱えられ、時間平均的な流況についてこのような考え方を適用することにより橋脚前方の局所流の理解と解析を進めるといふ本研究の基本的立場を示した。

第2章では、まず、局所流の時間平均的特性を把握するには、実測が比較的容易な層流を用いた実験が有用であることを示し、その具体的方法を示した。ついで層流中におかれた角柱および円柱の前方の流れに関する実測に基づき、馬蹄型渦を構成する流体は、主流のうち対称面付近の部分から供給されており、主流中に含まれていた渦度がHelmholtzの渦度保存則に従って集中させられた結果馬蹄型渦が生じることを明らかにした。また渦軸の位置が円柱の半径と水深との比および接近流のレイノルズ数の関数であることを実験的に示した。さらにこれらの実験的事実に基づいて流れの場の水理モデルを提示して、円柱橋脚前方の局所流の3次元的な流速分布式を導き出した。

第3章では、まず、乱流状態における局所流の3次元的な計測方法として、液体トレーサと2台の普通カメラによる立体撮影法とを組合わせたFlow Visualizationの方法を提案するとともに、その精度と有用性を明らかにした。ついでこの方法を含む各種の方法を用いて、乱流中に設置された円柱橋脚前方の局所流の時間平均的な特性を実験的に把握した。その結果、馬蹄型渦の発生の機構と形態については、本質的には乱流の場合も層流の場合と同じであるが、乱流の場合には渦が複数個発生するなどといった相違点もあることが明らかになった。最後に、この実験結果を参考にして、前章で層流の場合について導き出した解析モデルの乱流の場合への適用性について検討した。その結果、第1次近似として乱流の場合も馬蹄型渦はただ1つだけ発生しているという仮定を設けるならば、層流についてえられた解析モデルが、その基本に関する変更なしに、乱流の場合にも適用できることが実測値との比較によって示された。ただ馬蹄型渦から離れた水面に近い場所での下降流については計算値が実測値に比べ小さくなることが示された。

第4章では、円柱橋脚の後流域の流れの特徴を渦の形成状態に着目して明らかにした。そのためにまず層流状態について実験を詳細に行ない、それによる現象理解を基礎に乱流低周波領域におけるスケールの大きな渦の特性を明らかにした。層流状態での実験からは、後流はくり域は定置型渦領域と流下型渦領域とから成り、馬蹄型渦はほとんど消滅していることが示された。またそれぞれの渦の発生と発達機構は互に相異なるものであることが明らかにされた。一方乱流状態での実験からは、層流の場合と異なり、定置型の渦は流下型渦に

まきこまれており、しかも流下型渦の軸は水路床面にまで達しているので、水路床近くではその軸の周辺に強い吸込み効果があることが実測によって示された。さらに、橋脚の軸を含む横断面において流れの対称面から橋脚の直径にはほぼ等しい距離の範囲内にある流線は後流はくり領域にまきこまれるという事実が示された。

第5章では、前章までの現象把握および解析結果を基礎として、橋脚周辺の局所洗掘防止法について検討した。まず、橋脚周辺の局所流と局所洗掘の関連についての考察から、局所洗掘を防止軽減するには局所流を軽減すればよいという見通しを得、そのことと防止工の施工および維持管理面を考慮して、杭型防止工と橋脚の前頭部形状を工夫する方法とがもっともすぐれていることを示した。これらの方法のうち後者についてはかなりのところまで研究がなされているが、前者については洗掘防止工周辺の流れの機構および最適な杭の大きさや設置場所など不明な点が多い。

そこで本研究では、まず杭型防止工により局所流が軽減されることが、固定床水路における層流状態および乱流状態での実験で確かめられた。さらに、杭型防止工が橋脚による排除範囲の外側に設置されておれば、杭より上流の流れに対して橋脚の影響はほとんど及ばないこと、および杭の後流はくり域内における上昇流と対称面付近の流れに対する杭の遮蔽効果とが橋脚直前方における渦度の集中を妨げる効果をもつことが示された。以上の実験と移動床における洗掘実験とから、防止杭の位置や大きさが必ずしも最適でなくても杭を設けることにより局所洗掘は軽減されることが確かめられた。とくに洗掘防止杭の直径が橋脚の直径の約 $1/10$ で、その設置位置が橋脚の上流で橋脚による排除範囲の外側境界線上であるときに最適であって、そのときの洗掘の軽減率は約 30% となることが明らかにされた。

最後に、本研究の遂行にあたり終始懇切な御指導御鞭撻をいただいた京都大学教授石原安雄先生ならびに京都大学教授中川博次先生に深甚なる謝意を表するとともに、本研究のまとめに御協力いただいた京都大学防災研究所宇治川水理実験所の関係各位に対し感謝の意を表する。