

橋脚による流況変化が航行船舶に及ぼす 影響に関する研究 (その 1)

永井 荘七郎*・小田 一紀**

1. 緒 言

流れの中に構造物を設けると、その前方から側方にかけて、局所的に平均流の流向および流速が変化する領域と構造物から境界層が剝離して渦が生じ、これによってその下流側に複雑な渦乱を呈する、いわゆる後流域（あるいは渦流域）が形成される。このような流れの場を船舶が斜航あるいは横断するような場合には主流域から後流域または後流域から主流域に入ったときに流速の相違によって船体に大きな回頭モーメントが働きこれを打消すに足る舵圧モーメントをもたず操船不能に陥る可能性がある。また後流域を通過中は渦流によって船体に不規則な回頭モーメントが働き、操船が極めて困難になると考えられる。

本四連絡橋の橋脚のように、構造物が巨大になると、その周囲の流況変化領域も非常に大きなものとなる。しかも船舶が輻輳し、かつ流速が速い狭水路においては、このような流況変化が航行船舶に及ぼす影響は無視できないものとなる。

従来、流れの中に置かれた構造物近傍の流況に関する研究としては、古くから橋脚周囲の局所洗掘の機構に関連した数多くの研究^{1)~3)}があり、最近では円柱橋脚周囲の局所流に関する宇民⁴⁾の研究が発表されている。しかしこれらの研究は橋脚周囲の局所流、特に下降流や馬蹄型渦などの水路床付近の流れの解明に主眼が置かれており、ここで問題にしているような水面付近の流況を航行船舶の立場から研究したものではない。他に類似の研究として、水制の機能に関連した水制域の研究も数多く行われているが^{5),6)}、境界条件が異なるため、橋脚近傍の流況とは様相を異にするものと思われる。

この研究は本四連絡橋の航行安全対策の一環として、橋脚によって流況が変化する範囲を調査するとともに、このような流れの場に接航したときの船舶の挙動について明らかにし、さらには接航船舶の操船要領を作成するためになされたものである。本研究においては、まずその第一段階として船舶の操船に悪影響を及ぼすと考えられ

る後流域の範囲を実験的に研究することを主な目的とした。このため、後流域の微細構造を明らかにするのではなく、これを巨視的にとらえて、渦流の乱れの程度によって後流域を区分し、これを模式的に表現するようにした。そして、この後流域の大きさが橋脚の形状および流れに対する姿勢（迎え角）によって、どのように変化するかを明らかにした。今回の実験においては、橋脚隅角部近傍の平均流の特性についても調べたが紙数の関係上、次回に発表することにする。

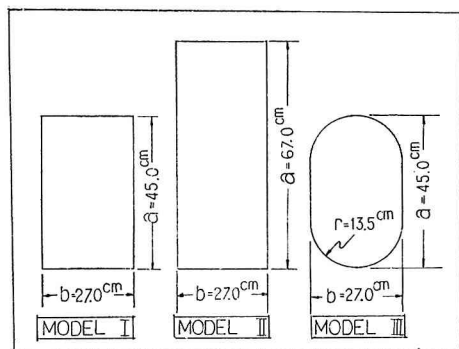
2. 実験施設と実験方法

実験は大阪市立大学河海工学実験場の平面水槽内に設けられた長さ 35.0 m、幅 4.0 m、深さ 0.8 m のコンクリート・ブロック積モルタル仕上げの開水路で行った。水は 60 m × 10 m × 2.5 m の貯水槽から止水バルブを有する内径 600 mm の鋼管を経て、開水路上流端に設けられた調整水槽に送られ、スルース・ゲートによって調節されて開水路に流出する。調整水槽の一端には越流堰を設けて、水槽内の水位を一定に保ち、流れが定常流になるようにした。ゲートの下流側に孔開き鉄板を取付け、ゲートから流出した流れを整流し、さらに孔開き板の下流側に生ずる水面の擾乱を除くために、水路幅とほぼ同じ長さの幅約 10 cm、厚さ 3 cm の板を浮べた。水流の水深と流速は水路の上流端および下流端のゲートの開度によって調節した。水路の最大可能流量は $Q_{\max} = 710 \text{ l/sec}$ である。

橋脚模型としては、本四連絡橋の南備讃瀬戸 5P (24.0 m × 59.0 m)、6P (35.0 m × 59.0 m)、および明石海峡大橋 2P (あるいは 3P) (40.0 m × 70.0 m) の計画図に基づいて、その断面形状が図-1 に示すような、MODEL I および MODEL II の 2 種類のものを基本形として、表面がラッカーの焼付け塗装された鉄板製のものをを用いた。MODEL I は南備讃瀬戸 6P の縮尺 1/130 および明石海峡 2P (あるいは 3P) の約 1/150 の模型、また MODEL II は南備讃瀬戸 5P の縮尺 1/90 の模型に相当する。MODEL I は流況におよぼす隅角部の形状影響が調べられるように、隅角部が取り換えられる構造になっている。また MODEL III は同じく隅角部の形状影響を調べ

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

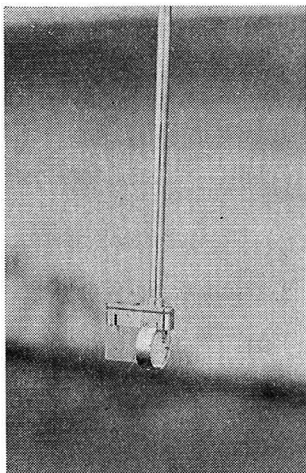
** 正会員 工修 大阪市立大学講師 工学部土木工学科



図—1 橋脚模型の断面形状

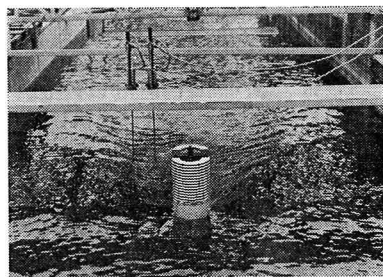
るために、断面の幅と長さを MODEL I と同じ大きさにして、隅角部の円弧の半径 r を断面幅 b の $1/2$ の大きさにしたものである。模型の高さはすべて 60 cm である。

橋脚模型周囲の流向および流速の計測には図—2 に示すような、直径 20 mm のプラスチック製 4 枚羽を有するプロベラ式流向・流速計（計測技研製、V-



図—2 流速計検出部

206 D 型) を用い、これを図—3 に示すように可動計測台車に載せ、任意点の流向・流速が計測できるようにした。流速計測点は流向・流速急変域である隅角部近傍では、その間隔を 5~10 cm と密に、後流域では 20~60 cm と粗く配置した。流速計測点の水面下の位置は、船の喫水程度（実物では最大 10~12 m）とし、水面の擾乱



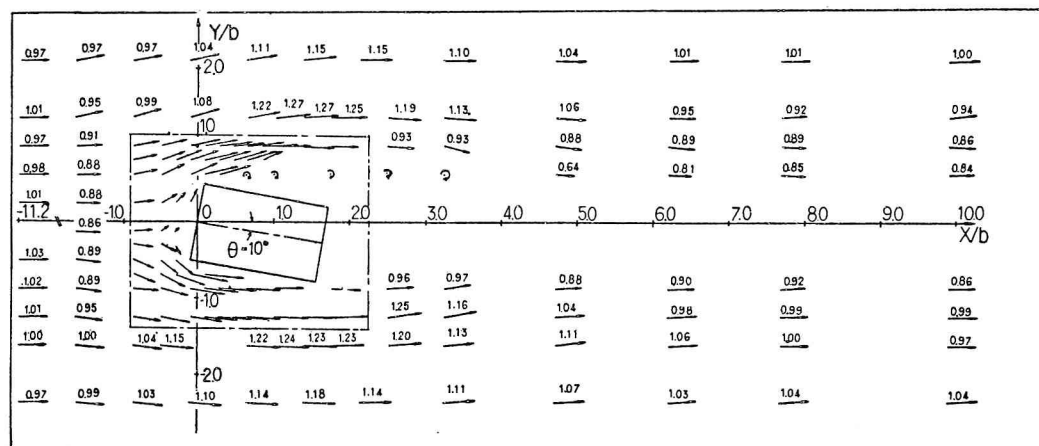
図—3 流況計測状況

の影響および流速計の検出部の大きさを考慮して、水面下 10 cm とした。

また一点における計測時間は、計測点の数が 180~200 点と非常に多いので、平均流を計測するに必要な最小計測時間を予備実験で調べ、その結果これを 60 sec とした。

検出部で検出された流速は 1 秒間の平均値が約 1.7 秒間隔で、流向の値と同時にプリンターに記録される。ただし流向はプリンターに記録される時の瞬時値である。プリンターに記録された 60 sec 間の流向および流速の値から、平均流向、平均流速 V および変動速度 v' の r.m.s. $\sqrt{v'^2}$ (2 乗平方根, または標準偏差) を求め、これから流向・流速ベクトル図および変動速度の r.m.s. と平均流速の比, いわゆる乱れの強さ $\sqrt{v'^2}/V$ の分布図を書き、流況の解析に用いた。図—4, 図—5 はそれぞれ、表—1 中の Run. 2 のときの流向・流速ベクトル図および乱れの強さ分布図の一例を示したものである。なお、図—4 および 図—5 中の数値はそれぞれ無次元流速 V/V_0 の値および乱れの強さ $\sqrt{v'^2}/V$ の 100 倍値 (すなわち乱れの変動係数) を表わす。

実施した実験の種類とそれぞれの実験条件の諸元は表—1 に示すとおりである。表—1 中で、 a/b は橋脚断面の長さとの比、 r/b は隅角部の円弧の半径と断面幅



図—4 流向・流速ベクトル図

の比で定義される, いわゆる乱れの強さ $\sqrt{v'^2}/V$ を基準にして, その値が接近流のその約2倍である, $\sqrt{v'^2}/V=0.10$ の値を有する等乱れ強さ線で囲まれる領域を後流域と定義した。また, この領域を, 乱れの強さが接近流の約5倍である, $\sqrt{v'^2}/V=0.25$ の等乱れ強さ線を境界として2分し, これより内側の領域を, 乱れがきわめて強いA領域, また外側を乱れの拡散領域であるB領域と呼ぶことにした。いうまでもなく, A領域とB領域の流れの性質は本質的に異なるものではないが, 便宜上, 一応の区別をした。なお, 表-1 に示した実験の範囲内では, 橋脚模型上流の接近流の乱れの強さ $\sqrt{v'^2}/V$ の値は, すべての場合において, 0.03~0.07 で, 平均値はほぼ 0.05 であった。

A領域は橋脚の隅角部から生ずる渦の影響を強く受けて, 流向および流速ともに絶えず大きく変化する。また, この領域内の橋脚側面および背面に近接する部分では接近流の流向と逆向き, いわゆる逆流を生ずる。B領域は乱れのきわめて強いA領域から橋脚による乱れがなくなる主流域への遷移領域であり, 接航船の操船に影響をおよぼすと考えられる, 流向および流速の変動がまだかなり残っている領域であると考えられる。

図-6 中の b_A , l_A および b_B , l_B はそれぞれ, A領域およびB領域の最大幅と長さ, また b_B^* は $x=l_A$ におけるB領域の幅を表わしている。

4. 実験結果とその考察

(1) 迎え角 θ の影響

$a/b=1.67$ の MODEL I を用いて, 隅角部が直角 ($r/b=0$) であるときの橋脚の後流域の大きさに及ぼす迎え角 θ の影響を調べた。図-7 は実験結果に基づいて,

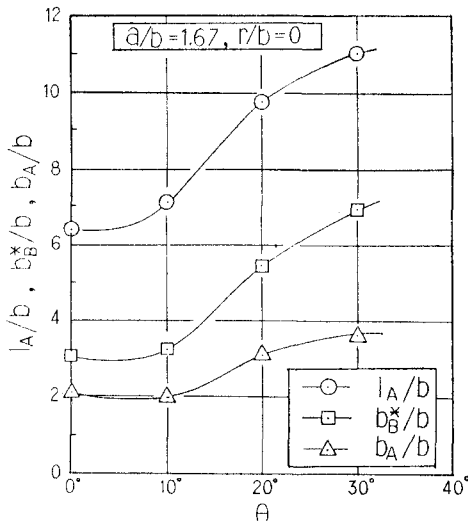


図-7 後流域の無次元幅および無次元長さとの迎角 θ の関係 ($a/b=1.67$, $r/b=0$)

橋脚幅 b を用いて表わしたA領域の無次元最大幅 b_A/b , 無次元長さ l_A/b および $x=l_A$ におけるB領域の無次元幅 b_B^*/b と迎角 θ の関係を示したものである。

図-7 によると, ほぼ $\theta=0^\circ \sim 10^\circ$ の範囲では b_A/b , l_A/b および b_B^*/b はともにほとんど変化していない。しかし θ が 10° より大きくなると, いずれも顕著な増加を示している。このような傾向は次のような理由によると考えられる。すなわち, θ がほぼ 10° より小さい間は, θ が変化しても境界層の剝離は前面両側の隅角部で生ずるので, 後流域の大きさはほとんど変化しない。しかし θ がほぼ 15° 以上になると, 前面隅角部ではほとんど剝離しなくなり, 剝離点は背面隅角部まで大きく移動すると共に, 流れに垂直な面に投影した橋脚の射影幅の増加割合も大きくなる。このため, θ がほぼ $10^\circ \sim 15^\circ$ 以上になると, 後流域の大きさが急に拡大すると考えられる。

上の考察からもわかるように, 後流域の大きさは橋脚の射影幅 b_p の増加に伴って増大する傾向にあるので, 後流域の大きさを b_p を用いて無次元化して, θ との関係を表わしたものが図-8である。図-8 によれば, A

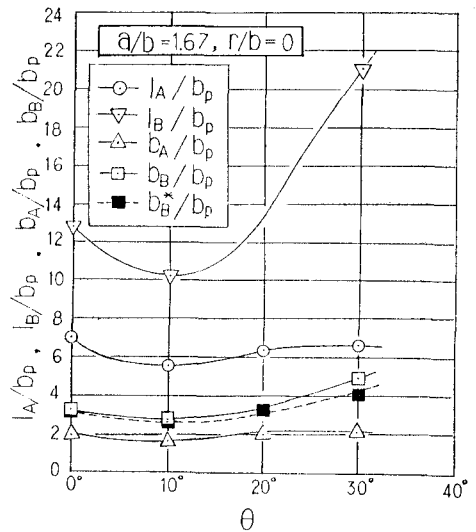


図-8 後流域の無次元幅および無次元長さとの迎角 θ の関係 ($a/b=1.67$, $r/b=0$)

領域の無次元最大幅 b_A/b_p および無次元長さ l_A/b_p は $\theta=10^\circ$ 附近を除いて, θ にほとんど無関係に, $b_A/b_p \approx 2.1$, $l_A/b_p \approx 6.5$ とほぼ一定な値を示している。 $\theta=10^\circ$ の場合には, 前述したように, 剝離点は依然として前面隅角部にあり, 後流域の大きさは $\theta=0^\circ$ の場合とほとんど同じであるにもかかわらず, 射影幅 b_p は $\theta=0^\circ$ の場合に比べて約 28% 増加するため, b_A/b_p および l_A/b_p の値は, θ が他の値の場合に比べて見掛け上小さくなると考えられる。

一方、B領域の無次元最大幅 b_B/b_p および無次元長さ l_B/b_p はA領域の場合とは異なり、 $\theta=0^\circ$ のときは、 $b_B/b_p \approx 3.2$ 、 $l_B/b_p \approx 12.8$ 、また $\theta=30^\circ$ のときは $b_B/b_p \approx 5.0$ 、 $l_B/b_p \approx 21.0$ と θ の増加に伴って増大する傾向を示している。この原因は、橋脚側面から下流に向かって離脱して行く主流の向きは θ の増加と共に後流の中心線と反対側に向いて行くが、背面隅角部で生じた乱れはこの側面から離脱して行く主流と同じ方向に拡散して行くためであると考えられる。

(2) 橋脚断面の長さとの比 a/b の影響

後流域の大きさに及ぼす橋脚断面形状の影響を検討するため、 $a/b=2.48$ である MODEL II の模型を用いて、 $\theta=0^\circ$ 、 10° および 20° の場合の後流域の大きさを調べ、これの無次元幅および無次元長さ θ との関係、 $a/b=1.67$ の場合と比較して表わしたものが 図-9 である。

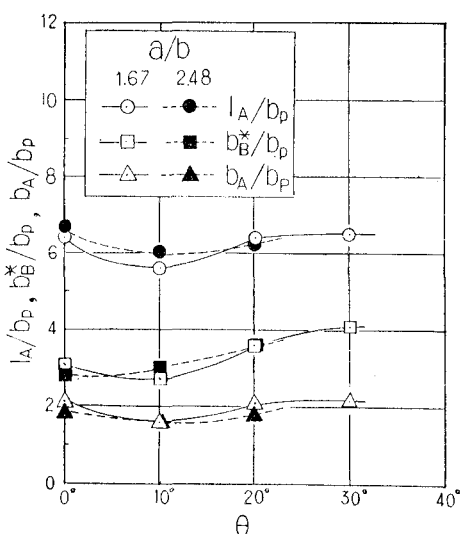


図-9 $a/b=1.67$ と 2.48 の場合の後流域の大きさの比較

図-9 によると、 $a/b=2.48$ の場合のA領域の無次元最大幅 b_A/b_p および無次元長さ l_A/b_p 、また $x=l_A$ におけるB領域の無次元幅 b_B^*/b_p は、実線で示される $a/b=1.67$ の場合とほぼ一致した値を示している。このことから、隅角部が直角な矩形断面の橋脚の後流域の大きさは、 $a/b=1.67 \sim 2.48$ の範囲においては、 a/b の値にほとんど関係なく、主として射影幅 b_p および迎え角 θ に関係すると思われる。

(3) 隅角部の円弧の半径と橋脚幅の比 r/b の影響

$a/b=1.67$ の場合について、後流域の無次元幅および無次元長さ θ と隅角部の円弧の半径と橋脚幅の比 r/b の関係を $\theta=0^\circ$ の場合について調べたところ 図-10 に示すような結果を得た。

図-10 から明らかなように、各領域の無次元幅および

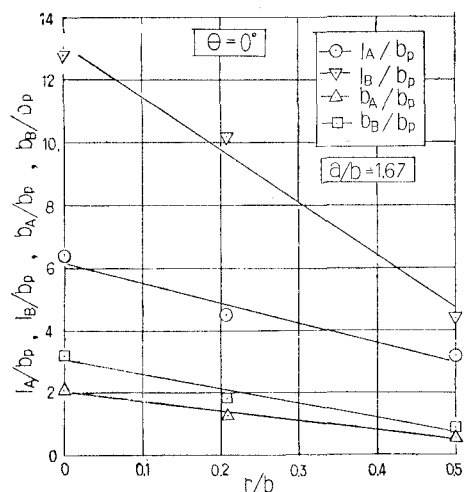


図-10 後流域の無次元幅および無次元長さ r/b の関係

無次元長さは r/b の増加と共に、これにほぼ比例して直線的に減少することがわかる。 $r/b=0.5$ のときには、A領域の無次元最大幅 b_A/b_p および無次元長さ l_A/b_p は隅角部が直角な場合 ($r/b=0$) に比べて、約 50~70%、またB領域のそれらは約 70% 減少し、隅角部を円弧状にすることによって後流域は著しく縮小することがわかる。

結 論

流れの中に設置された橋脚近傍の流況からこれに接近する船舶に対して、操船上どのような影響を与えるかを明らかにする研究の第1段階として、本研究においては、まず接航船の操船に大きな影響を及ぼすと考えられる後流域の大きさを調べた。そして、これを模式的に表わすことによって、その大きさが橋脚に対する流向および橋脚の断面形状によってどのように変化するかを模型実験によって明らかにした。その結果を要約すれば以下の如くである。

(1) 橋脚下流に生ずる後流域の大きさは、隅角部が直角な場合 ($r/b=0$) には、橋脚断面の長さとの比 a/b が $a/b=1.67 \sim 2.48$ の範囲では、 a/b の値にほとんど無関係であって、橋脚の射影幅 b_p と迎え角 θ のみ関係する。

(2) このうち、 $\sqrt{v^2}/V=0.25$ より大きい、乱れの極めて強いA領域の大きさは、 $\theta=0^\circ \sim 30^\circ$ の範囲では、 θ の値にほとんど関係なく、 b_p のみによって定まり、 b_A/b_p および l_A/b_p の値はそれぞれ $b_A/b_p \approx 2.1$ および $l_A/b_p \approx 6.5$ になる。

(3) 一方、B領域の無次元最大幅および無次元長さの値は、 θ の増加に伴って増大し、 $\theta=0^\circ$ のときは $b_B/b_p \approx 3.2$ 、 $l_B/b_p \approx 12.8$ 、また $\theta=30^\circ$ のときは、 $b_B/b_p \approx 5.0$ 、

$l_B/b_p \approx 21.0$ となる。

(4) また、隅角部に円弧をもたせると、後流域の無次元幅および無次元長さは円弧の無次元半径 r/b にほぼ比例して減少し、 $a/b=1.67$ の橋脚で、 $\theta=0^\circ$ のときは、 $r/b=0.5$ にすると b_A/b_p および l_A/b_p は隅角部が直角な場合に比べて約 50~70%，また $b_B/b_p, l_B/b_p$ は約 70% し、後流域は著しく縮小する。

参 考 文 献

1) 石原藤次郎：橋脚による河床洗掘に関する実験的

- 研究，第 24 巻，第 1 号，1938，pp. 23~55.
- 2) 吉川秀夫・福岡捷二・岩間 汎・會小川久貴：橋脚の洗掘ならびにその防止法に関する考察，土木学会論文報告集，No. 194. 1971，pp. 83~90.
- 3) 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.
- 4) 宇民 正：円柱橋脚前方における局所流の研究，土木学会論文報告集，No. 247，1976，pp. 61~69.
- 5) 秋競 他：水制に関する研究，土研報告 107 号.
- 6) 細井正延・杉山錦雄・小沢克之：水制の水理に関する研究 (II)，第 23 回年次学術講演会講演概要，1965，pp. 301~304.