

本報告は、平滑な固定床面に設置された円柱橋脚前面における馬蹄型渦を含む三次元的な流速分布を、乱流の場合について解析モデル設定の下に求めようとしたものである。えられた解析結果は、熱線流速計を用いた流速の実測値と比較され、かなりよい一致を示すことが明らかにされた。

1 解析モデルの構成

著者は層流を用いた橋脚周辺の局所流に関する実験的検討から、橋脚前面の馬蹄型渦の発生機構について次の点を明らかにして来た。①馬蹄型渦を構成する流体は主流から供給されている。②馬蹄型渦の軸の近傍には渦度が集中が認められる。③このような渦度の集中は非粘性流に関する Helmholtz の渦度保存則には従っている。こういった渦度の集中を含む複雑な流れの解析方法の一つに Hawthorne²⁾の方法がある。しかしこの方法では二次流が主流に比べて十分小さいという仮定が前提となっており、橋脚前面の流れの様子は二次流が主流に匹敵する大きさをもつ場合は適用しにくい。そこで、ここでは Hawthorne と同様に流れは主流と二次流とから成ると考えるが、二次流は主流に比べて小さいという仮定を設けない方法を追求した。

(1) 主流の流速分布 主流としては、水路床面に平行な断面内では二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。そうすると、主流の r , θ , z 方向流速成分 u_r , u_θ , u_z は次のように表わされる。

$$u_r/u_0 = \{1 - (r/r_0)^2\} \cos \theta, \quad u_\theta/u_0 = \{1 + (r/r_0)^2\} \sin \theta, \quad u_z = 0 \quad \dots (1)$$

ここで、 u_0 は接近流の流速分布を表わすが、乱流の場合 u_0 は $1/\eta$ 乗則に従うとすれば、接近流の水面での流速を U_{0s} とし u_0 は次の様に与えられる。 $u_0/U_{0s} = (z/H)^{1/7} \dots (2)$

(2) 二次流の流速分布 乱流の場合についても、層流の場合と同様に渦度が馬蹄型渦の軸の周辺に集中するものと考え、図-1 に示す様に円柱橋脚の軸に中心をおくドーナツ状の渦度領域を設定し、その領域内で二次流の渦度は $\omega_0(\theta)$ であり、その外側では 0 であると仮定した。さらに、このような渦度分布に基づく二次流の流速分布 u'_r , u'_θ , u'_z は、Lamb の Vortex Ring について導いた式を用いて次式で与えられるとした。

① $r_1 \leq a$ かつ $r_1' \leq a$ の領域で、

$$u'_z = 0, \quad u'_r = -\frac{\kappa}{\pi r} \frac{R_0 z_0}{a^2} \quad \dots (3)$$

② $r_1 \leq a$ かつ $r_1' > a$ の領域で、

$$u'_z = \frac{\kappa}{2\pi r} R_0 (r - R_0) \left(-\frac{1}{a^2} + \frac{1}{r^2}\right) \dots (4), \quad u'_r = \frac{\kappa}{2\pi r} R_0 \left(-\frac{z - z_0}{a^2} + \frac{z + z_0}{r^2}\right) \dots (5)$$

③ $r_1 > a$ かつ $r_1' > a$ の領域で、

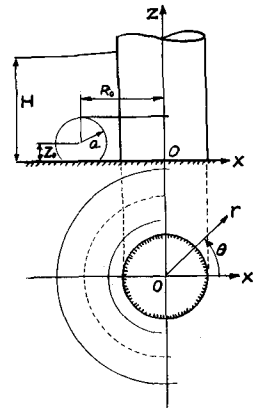


図-1 記号説明

$$u_z = \frac{\kappa}{2\pi r} R_0 (r - R_0) \left(-\frac{1}{r^2} + \frac{1}{R_0^2} \right) \dots (6), \quad u_r = -\frac{\kappa}{2\pi r} R_0 \left(-\frac{z - z_0}{r^2} + \frac{z + z_0}{r^2} \right) \dots (7)$$

ここで、 r は流速を求めようとする点から渦軸までの距離、 r' は同じく渦軸の鏡像までの距離、 κ は渦度領域のまわりの循環の値で、 $\kappa a^2 \omega_0$ に等しい。

(3) κ の値の決定 以上に得た主流の流速分布に二次流の流速分布を加えあわせることにより、橋脚前面の三次元流速分布がえられる。乱流の場合、馬蹄型渦は不安定でその軸は常に変動しているが、平均的に見れば同一位置に停止していると思わせる様であるから、渦軸の位置における r 方向流速成分が 0 であるという条件を導入して κ が次の様に求められる。

$$\kappa = U_0 z_0 \pi \delta^2 (z_0/H)^{1/2} \{1 - (r_0/R_0)^2\} \cos \theta \dots (8)$$

ここで、 δ は $\alpha > 2\pi$ のときは $\alpha/2\pi$ に等しく、 $\alpha < 2\pi$ では 2 に等しい数値を表わす。

2. 実測値と解析値との比較

乱流状態における橋脚

前面の局所流においては、流線の曲率、乱れの強さおよび加速度がいずれも大きいので、その流速分布を三次元的に正確に測定することは困難である。ここでは熱線流速計を用いて計測を行なった結果を述べるが、熱線流速計は絶対流速に感応する機構になっているので、渦軸近傍の様に主流に比べて乱れの強さが大きな所では実際より大きな平均

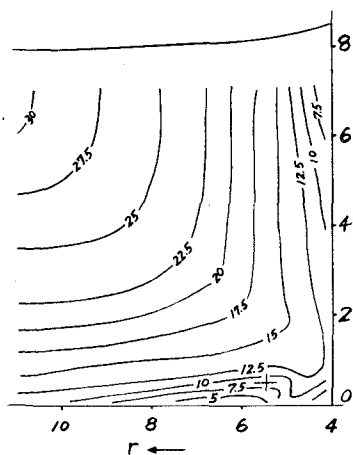


図-2 対称面内の流速分布 (実測値, cm-sec 単位)

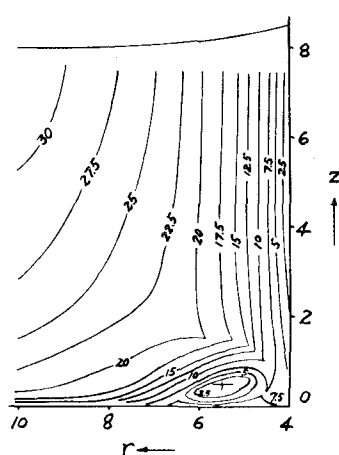


図-3 対称面内の流速分布 (解析値, cm-sec 単位)

流速が記録される。図-2 は、幅 40 cm、勾配 1/500 のアクリル樹脂製水路に巾 8 cm の円柱橋脚を一本設置し、流量 9.48 l/sec (初期水深 7.4 cm) を流したとき、橋脚前面の流れ対称面内の絶対流速分布の実測値を示したものである。先述の理由で、渦軸 ($r = 5.48$ cm, $z = 0.5$ cm) の位置で流速の実測値は 0 となっていない。図-2 から、渦軸よりほぼ 1 cm 隔った所で絶対流速の極大値が存在する傾向が認められるので、ここではひとまず $a = 1$ cm と仮定し、さらに渦軸の位置も実測値を用いて、先述の三次元流速分布式により絶対流速分布を計算し結果を図-3 に示した。図-2 と図-3 を比較してみると両者はかなりよく一致していることが認められる。ただ図-3 で渦軸の下水路近傍でかなり大きな流速が算出されているが、これは粘性の効果を見逃した結果と考えられる。

参考文献 1) 宇氏正：第 16 回水理講演会講演集，土木学会水理委員会，1972. 2.

2) Hawthorne, W. R.: Jr. Aeron. Sci., No. 21, pp. 588-608, 1954.