

II-181 馬蹄渦の外縁速度に関する実験的考察

(株)三井造船昭島研究所 正員 久宝啓作

1 まえがき

本研究は、柱状水理構造物まわりの局所洗掘の主要原因となる馬蹄渦に関して、洗掘に寄与する渦特性を評価するために、 Re 数 $10^4 \sim 10^5$ オーダーの円柱を用いた模型実験によって、馬蹄渦の主要寸法と流速分布についての検討を行うと同時に、これらの検討結果と Manningの平均流速分布式を用いて、馬蹄渦の外縁速度を推定する式を表し、それについて考察を加えたものである。

2 馬蹄渦の主要寸法

図1は円柱上流面における卓越渦断面の主要寸法をモデル化したもので、破線で示した高さ Z_c の楕円を馬蹄渦、その中央底面付近に馬蹄渦にほぼ内接する渦を卓越渦とすると、この渦が馬蹄渦からの流量補給を受けて顕在化することを考慮すれば、両者の外縁速度 u_o はほぼ等しいものとみなされる。ここで実験の結果、 Z_c は水深 H の影響を若干受けるが、円柱の直径を D とすれば、

$$\frac{Z_c}{D} = 0.25 \quad (1)$$

で示される。一方、卓越渦の渦心より底面までの高さ Z_o は Re 数や水深 H に影響されず、

$$\frac{Z_o}{D} = 0.033 \quad (2)$$

で示される。¹⁾ 円柱面から卓越渦の渦心までの距離 X_o については、乱流状態においては大きく変動し、 Re 数が大きくなるにつれて X_o もやや増大する傾向が実験結果にみられたが、 Re 数 $10^3 \sim 10^5$ オーダーの他の実験結果²⁾と比較、検討の結果、

$$\frac{X_o}{D} = 0.2 \quad (3)$$

と置いても実用上差し支えないことが認められた。

3 馬蹄渦の外縁速度

図2は卓越渦断面の流速分布の実測値を示したもので、拡大した流線の写真より読み取ったものである。同図より、1) 主流の流速 U_∞ が大きくなるにつれて2次流の流速 u が増大する 2) $U_\infty=0.15\text{m/s}$ の場合を除いて、無次元流速分布 u/U_∞ は大体 $1/6$ 乗則で近似できる 3) 円柱軸方向の高さ $Z=0.01D$ の位置における馬蹄渦の外縁速度 u_o は、 $0.3 \leq u_o/U_\infty \leq 0.55$ で示される、等が明かである。以上の結果から、卓越渦断面の流速分布が $1/6$ 乗則でほぼ表されることが明かとなったので、Manningの平均流速公式及びこれらの実験結果を用いて u_o を表してみる。底面から Z_c の高さにおける流速を u_c とすれば、Manningの公式より、

$$u_c = \frac{7}{6n} (Z_c - Z_o)^{1/6} (H - Z_o)^{1/2} (I)^{1/2} \quad (4)$$

が得られる。ここに、 n :Manningの粗度係数、 I :水面勾配である。ここで円柱の上流面より X_o の位置における接近流の流速 U_{X_o} が Manningの式と同様の形で表されるものとすれば、

$$U_{X_o} = \frac{1}{n} (H - Z_o)^{2/3} (I)^{1/2} \quad (5)$$

で示される。よって式(4)と(5)より、 u_c/U_{X_o} は、

$$\frac{u_c}{U_{X_o}} = \frac{7}{6} \left(\frac{Z_c - Z_o}{H - Z_o} \right)^{1/6} \quad (6)$$

となる。一方、円柱近傍において、接近流の流速 U_{X_o} と主流速度 U_∞ との間にポテンシャル理論が成り立つものとするれば、 U_{X_o}/U_∞ は、

$$\frac{U_{X_o}}{U_\infty} = 1 - \left(\frac{D}{D - 2X_o} \right)^2 \quad (7)$$

で表される。ここで u_0 は図1に示すように、馬蹄渦による循環の一部とみなされることから、 $u_0 = u$ と置くと、 u は式 (1) ~ (3) と (6)、(7) より、

$$u_0 = 0.57 \left(\frac{0.217 D}{H - 0.033 D} \right)^{1/6} U_\infty \quad (8)$$

で示されることになる。図3は u_0 の計測値と U_∞ との関係を示したもので、 u_0 は H による影響はみられないが大きくバラついており、渦が非常に不安定であることを示している。なお u_0 は U_∞ が大きくなるにつれて若干減少する傾向がみられる。図4は $H = 0.4\text{m}$ の場合における u_0 の計測値を白抜きでプロットし、比較のため、 u_0 に相当する値を文献³⁾から読み取りプロットしたものである。同図に式(8)により計算した u_0 を破線で示してみると、ほぼ実験結果を説明できることがわかる。なお u_0 の全体的な傾向をみると、 Re 数が大きくなるにつれて u_0 の実測値は若干減少している。このことは図3の u_0 が U_∞ が大きくなるにつれて若干減少する傾向にほぼ一致する。なお他の研究例や u_0 の計算値を含めて u_0/U_∞ をみると、 $Re > 10^5$ の範囲において

$$u_0/U_\infty = 0.5 \quad (9)$$

と置いてもよいと考えられる。

4 結論及び考察

以上の結果から、馬蹄渦の外縁速度 u_0 は式(8)に示すように、水深 H 、円柱直径 D 及び主流速度 U_∞ を関数とした形で表されることがわかる。しかし実際的には、卓越渦断面の流速分布が U_∞ の大きさによつては必ずしも $1/6$ 乗則で表現しにくいことや、式(8)には H を含んでいるにもかかわらず、 u_0 の実測値には H による有意な差がみられないこと等、問題点が残されている。今後はこれらの点について検討を進めてゆきたいと考えている。

(参考文献)

- 1) 久宝啓作：円柱前面の底渦に関する実験的考察、土木学会第42回年次学術講演会、1987
- 2) 例えば宇民正：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、No247、1976
- 3) 例えば中川他：橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究、京大防災研年報第17号B、1974

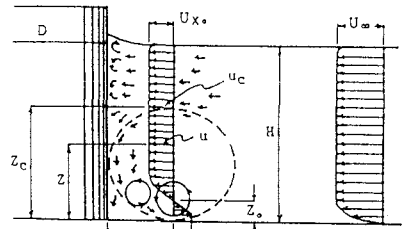


Fig. 1 Definition sketch of velocity in the horseshoe vortex section.

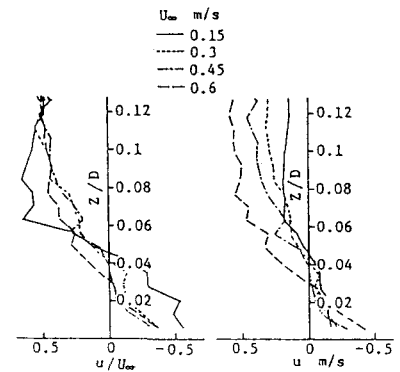


Fig. 2 Velocity profiles in the primary vortex section. ($H=0.4\text{m}$)

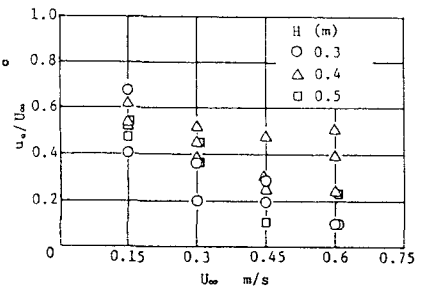


Fig. 3 Relation between u_0/U_∞ & U_∞ .

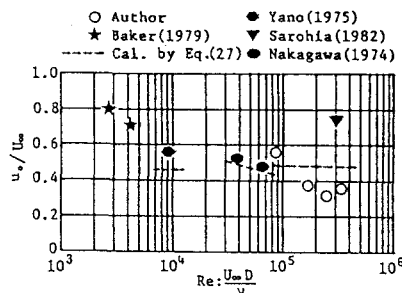


Fig. 4 Relation between u_0/U_∞ & Reynolds number.