

埼玉大学 工学部 正員 ○中村廣昭
 埼玉大学 工学部 正員 池田駿介
 (株)建設技術研究所 宮村昌幸

1. はじめに

自由表面の振動を上・下流に伝わる常流 ($Fr < 1$) の流れの中 (水路中心軸) に設置された供試体からカルマン渦が発生すると、その変動は上・下流に伝わる。自由振動水面波は、渦が交互に発生することによる水面の変動と、流れに直交する断面方向の重複波 (静振波) が共振して生ずると考えられ、その形状は図-1 に示すような二次元振動波である。波高は供試体に最も近い壁面で最大となり、供試体からかなり上流でも流れは強い非対称性を示すことが観測されている。本研究は開水路の中心軸上に置かれた円柱供試体のまわりに生ずる自由振動水面波に関してその発生要因につき実験的に考察するものである。

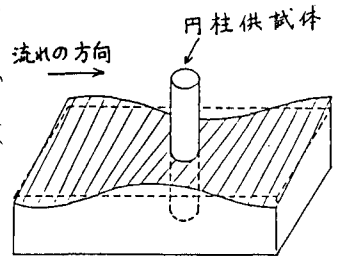


図-1 自由振動水面の形状

2. 実験装置および方法

実験は幅50cm、高さ40cm、長さ15m、の両面ガラス張り可変勾配水路を用いて行なわれた。用いた供試体は直径 $D=6.03\text{cm}$ ($=D_1$) および $D=7.60\text{cm}$ (D_2) の2種類の円柱で、いずれもプラスチック中空円筒である。上・下端はプラスチック板で密閉し、上部は空気抜き用コックを、下部内側には圧力計 (株・S T 研究所製・PM25、許容圧力 50kgf/cm^2) が取り付けられている。側壁にはそれぞれ下から42cm、20cmの位置に圧力測定用の小穴 ($d=0.35\text{cm}$) を設けた。供試体の設置位置は水路上流場から6.5m 地奥の水路中心軸とした。水位変動並びに変動周期は上記圧力計および抵抗式波高計2本を用いて測定した。圧力計は当初、供試体表面での渦による圧力変化を読みとることによって、カルマン渦の発生周期を測る目的で設置したが、実際には渦の発生による圧力変化よりも、水位変化による圧力変動の影響が大きくなり、渦の発生周期を分離することは不可能となった。(図-2) 流量は水路下流に設置された三角ゼキを用いて求めた。

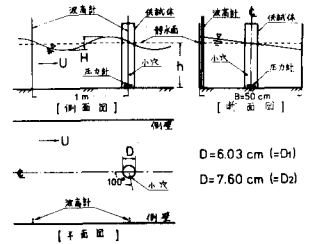


図-2 実験装置

実験は供試体を水路所定の位置に設置し、水路下流場の越えゲートを適当に調節し、水路に一定流量を流す。流量一定のまま水路勾配を上・下させることによって水深と流速が変化し、水面波の波高に変化が生ずる。勾配を変えるごとに圧力計と波高計の出力を電磁オシログラフに記録を取り、その中から波高の変化が最大となったケースを共振状態と考えた。この時測定項目は、平均水深: $h\text{cm}$ 、水面勾配: I 、水面波の振動周期: $T\text{sec}$ 、中心軸方向の見かけの流速: $C'\text{cm/sec}$ 、波長: $L'\text{cm}$ 、波高: $H\text{cm}$ 、流量: $Q\text{cm}^3/\text{sec}$ 、水温: $t^\circ\text{C}$ である。

以上が実験の一工程であり、さらに流量および越えゲートの高さを変えて種々の実験を繰り返して行なう。

3. 実験結果および考察

円柱の左側に渦が発生し十分成長した状態では、渦の発生側の水路では水位が低下し、反対側の壁面では水位が上昇する。そして渦が剥離した時点では両側とも水位は同じとなり、次に前とは反対側に渦が発生し、水位の上昇・下降が前とは逆になる。共振状態ではこのような繰り返しの運動が長くわけてあるが、渦の発生側と水面の上昇側とは常に逆となっている。この事は円柱設置奥において、水路幅 B を見として、 $m = 1/2$ とする静振波と、渦の発生による水面変動が共振しているものと理解出来、この水面振動が上・下流に二次元的波動として伝わって行く。

図-3は共振時における自由振動水面波の振動数 $f_0 (=1/T)$ を平均流速： $U = Q/BR$ と円柱の直径： D で無次元化した値： $S_0 = f_0 D/U$ とレイノルズ数： $Re = UD/\nu$ の関係をプロットしたものである。ここで S_0 は渦に関するストローハル数でなく、波の振動数に関する無次元数であることを注意しておく。

図-3によると S_0 は Re 数に無関係なく、 $S_0 = 0.23$ を中心として $0.22 \sim 0.25$ の範囲に入っている。また Re 数が 10^4 を境として分布が分かれているが、これは円柱の直径の違いで Re 数の範囲が異なっている事によるものである。

図-4は共振時の水面波の波高： H (円柱設置点の真横の波高計による) を円柱の直径： D によって無次元化した値： H/D と S_0 の関係を示したものである。この図より円柱いすれの場合にも $S_0 = 0.23$ を中心として上に凸の対称形を示し、 $S_0 = 0.23$ の時 H/D が最大値を示す傾向が見受けられる。

ところで、 $S_0 = f_0 D/U$ は共振と波高の関係を述べるには不都合な無次元量である。そこでもう少し一般化した関係を導き出すことを検討する。

本実験で用いる物理量に対して次元解析を行なうと

$$\varphi(R/B, U^2/gD, D/B, H/D, D/T_w U, D/T_w) = 0 \quad (1)$$

なる無次元量が求まる (ここで T_w は水路断面方向の静振波の周期である)。

図-3および図-4において、 $S_0 = f_0 D/U = D/T_w$ が $S_0 = 0.23$ Kピークを持つ傾向に着目し、ここで $S_0 = 0.23$ と S_0 を固定して考えることにする。そこで $h = D/(\lambda \sin \alpha)$ なる水面波の振動周期 $[T_h]$ を定義して式(1)中の $D/T_w U$ をこの h を用いて $[T_h/T_w]$ と書き換える、この理由は水面波の振動周期と断面方向の静振波の振動周期の比が、水面振動の共振状態に何らかの関係を持つと考えられるからである。そこで式(1)から R/B 、 H/D とこの T_h/T_w を選び出して、

$$H/D = F(T_h/T_w, R/B) \quad (2)$$

なる関数 F について検討を加えることにする。さて、静振波の周期： T_w は $m = 1/2$ とし、これを水路幅 B で表わすと $T_w = 2\pi / \sqrt{g/B} \cdot \tan \alpha$ であり T_w は水深 h の関数であるから、 $T_h/T_w = D/(0.23 U T_w)$ は共振時における、水深と流速及び円柱の直径の関係を表わす式となる。図-5(A)、(B)は R/B をパラメータとして T_h/T_w と H/D の関係を示したものである。この図より H/D はどちらの場合も T_h/T_w に関してはほぼ放物線状の分布を示し、 R/B が大きくなると分布が上側にきていることがわかる。このことは、水深が大きいほど波高が大きくなることを示している。また、 H/D は D_1 の方は $T_h/T_w = 1.05$ 、 D_2 は $T_h/T_w = 1.07$ を対称軸とする分布形を示している。そこでこの $T_h/T_w = 1.05$ と 1.07 に対してそれぞれ R/B が9時、 Fr 数を求めて見た、するとそれぞれ円柱に対して R/B に無関係なく、 Fr 数は、 $Fr(D_1) = 0.243$ および $Fr(D_2) = 0.307$ と求められた。静振波の周期 T_w の式は、波の波長に比べて水深が十分浅いとすれば、 $\tan \alpha \approx \alpha$ であるので、本実験の場合の条件では $T_w = 2\pi / g h$ ($m = 1/2$, $l = B$ の場合) となる。このことから、水路幅 B が一定の時、水深： h が一定ならば、円柱の直径： D と Fr 数とがある関係を満たしたとき自由振動水面波の波高： H が最大となることが云える。なお、共振状態における自由水面振動周期はほぼ定常的な変動周期で振動するが、実験条件によっては、振動の振幅が長周期で変動するウナリ現象(いわゆる振幅変動波のようなもの)も発生した。

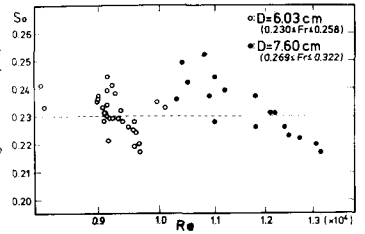


図-3 Re 数と水面振動数の関係

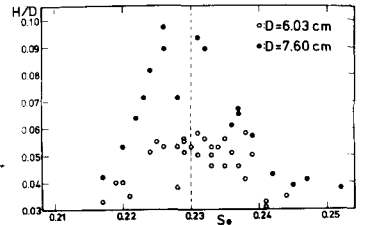
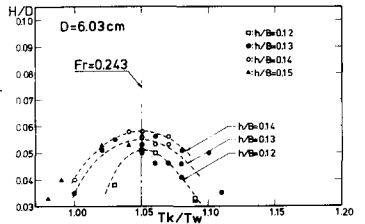
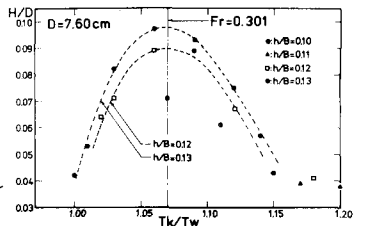


図-4 水面振動数と波高の関係



(A) $D = 6.03 \text{ cm} (=D_1)$



(B) $D = 7.60 \text{ cm} (=D_2)$

図-5 共振状態と波高の関係

参考文献 1) Rohde, FG: Self-Excited Surface Waves Around Cylinders, Indian Institute of Technology, Madras, 1970.