

II-275 振動円柱に作用する流体抵抗力について

鹿児島大学工学部

正会員 吉原 進

京都大学大学院工学研究科 学生会員 Katta Venkataramana

1. はしがき

比較的大きな固有周期を持つ海洋構造物は波浪中で大きく振動することになりがちなので、その安全を確保するためには、設計の段階から波浪による動的な挙動を正確に把握しておかねばならない。そのためには海洋構造物に働く波力および抵抗力が合理的に算定できなければならない。しかし海洋構造物周辺の海水の挙動は極めて複雑なもので、理論的にも、実験的にもこれら波力等を詳細に求めることは簡単でない。しかし動的挙動を推定するための応答計算を正確に経済的に行うには実用的な波力式が必要となる。そのひとつがいわゆるモリソン式を用いる方法であろうが、そのままでは応答計算に持ち込めず何らかの近似的取扱が必要になる。著者らは波力に仮定を設けることにより、そのまま応答計算に持ち込める実用的な波力式について、従来からひとつの提案をしている。その式を用いて、静水中で運動する円柱に働く力すなわち流体抵抗力について現象論的な考察を加え、その結果得られたモデル表示について報告する。

2. 新しい波力式と円柱の運動方程式

波浪中で振動する円柱を図-1で表す。この微小部分 dz に働く力として、海水の運動による力(dF :波力)と円柱自身の運動による力(dR :流体抵抗力)の和であると考え、それぞれ次式で与える。

$$\left. \begin{aligned} dF &= C_M \frac{W}{g} \pi r_0^2 \frac{\partial u}{\partial t} dz + C_D \frac{W}{g} r_0 u |u| dz \\ dR &= C_m \frac{W}{g} \pi r_0^2 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} dz + C_d \frac{W}{g} r_0 \frac{\partial x}{\partial t} \left| \frac{\partial x}{\partial t} \right| dz \end{aligned} \right\} (1)$$

ここに、 $u, \frac{\partial u}{\partial t}$ は水粒子の速度、同加速度、 $\frac{\partial x}{\partial t}, \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$ は円柱 dz 部分の応答速度、同加速度、 r_0 は円柱半径、 W は水の単位体積重量、 g は重力加速度、 C_M, C_D は質量力係数、抗力係数、 C_m, C_d は付加質量係数、抵抗力(減衰)係数である。

上式を用いると、規則的な波動中でロッキング振動する円柱の運動方程式は、

$$\left(\frac{m l^2}{3} + C_M \frac{W}{g} \pi r_0^2 \frac{R^3}{3} \right) \frac{d^2 \beta}{dt^2} + C_d \frac{W}{g} r_0 \frac{R^4}{4} \frac{d\beta}{dt} \left| \frac{d\beta}{dt} \right| + \left(\frac{BR}{2} - \frac{mg l}{2} \right) \beta = (i C_M F_H + C_D F_D) e^{i \omega t} \quad (2)$$

円柱の周りの水が静止しているとき、すなわち静水中の振動円柱の運動方程式は次式となる。

$$\left(\frac{m l^2}{3} + C_M \frac{W}{g} \pi r_0^2 \frac{R^3}{3} \right) \frac{d^2 \beta}{dt^2} + C_d \frac{W}{g} r_0 \frac{R^4}{4} \frac{d\beta}{dt} \left| \frac{d\beta}{dt} \right| + \left(\frac{BR}{2} - \frac{mg l}{2} \right) \beta = 0 \quad (3)$$

波動中の振動円柱に働く力を波力と流体抵抗力の和として表すこと、それらの力を式(1)で表すことの妥当性について述べる。質量力については、回折理論によってこれが可能であることを検証できる。抗力、抵抗力については理論的な検討が出来ないが、いくつかの構造物を用いた実験によりほぼ妥当と思われる質量力係数、抗力係数等が得られているので、これらについても妥当であると考えられる。

3. 実験結果と考察

実験には当学科に設置されている長さ、高さ、奥行きが 30m, 1.2m, 1m の 2 次元造波水槽を用いた。円柱模型は外径 6cm で長さ約 1m の塩化ビニール管を用いた。その底部は摩擦のないヒンジで固定した。静水中で円柱頂部の初期変位を様々に変化させて自由振動実験を行った後、規則波による強制振動実験も行った。ここでは自由振動実験の結果のみを解析する。なお円柱の振動状況は、円柱の運動および円柱周りの水の運動を乱さないように、非接触式の変位計によって計測した。

記録例を図-2に示す。これらの記録から、初期変位が小さい時と大きい時に振動開始直後の減衰の様子

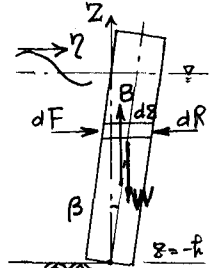


図-1 波浪中の円柱

に少し差があることが認められるが、全般的には減衰定数がそれほど大きくない線形減衰が支配的であるらしいと言えよう。この減衰曲線からは定性的にも、定量的にもこれ以上議論ができない。これらの自由振動記録の対数を取って図示したのが図-3である。変位が特に小さいときはノイズのレベルに近くなってしまうので、この様な点を除いて解析する。これによると初期変位が小さい場合は振動の繰返し回数(時間の経過)に対して変位の極値は完全に直線的に減少する。すなわちこの場合は円柱の速度が小さくそのために周辺の水に乱れがなく、結局線形減衰の支配下にあるものである。しかし初期変位が大きい場合で、しかも時間の経過が少なくまだ変位が大きい間すなわち円柱速度が大きい間は、周辺の水の乱れが大きくなるためか減衰力が極めて大きく、変位が急激に小さくなる。その上この場合、時間がある程度経過して変位が小さくなると、初期変位が小さい時と同じ様に線形減衰の影響を受けるようになること、しかも同じ大きさの減衰定数を持つことが明らかである。ここで問題にするように空間的、時間的に積分した形の、円柱の振動という、巨視的な観点に立つならば、減衰の機構、即ち抵抗力にはそれまでの振動の様子、すなわち過去の振動履歴の影響を受けていないと言える。

線形減衰の部分について、全てのデータから減衰定数 $\bar{h}$ を求めると初期変位に関係なく、0.041 から 0.044 程度のバラツキで、それらの平均を取れば、0.043 となる。また振動周期と模型の緒元より、付加質量係数 C_m を求めると 0.91 であった。

以上の実験結果を参照して、極めて大ざっぱながら、抵抗力として速度を用いた次のようなモデル表示が可能である。

$$\begin{aligned} D(v) &= 2\bar{h}\omega_0 v & v \leq v_0 \alpha \text{ とき} \\ D(v) &= 2\bar{h}\omega_0 v + N_k(v-v_0)|v-v_0| & v \geq v_0 \alpha \text{ とき} \end{aligned} \quad (4)$$

この様な式で表される抵抗力を持つものとしてシミュレーションを行った結果は図-4に示した。固有振動数、線形減衰定数その他の緒元は実験模型の値を用いた。非線形の抵抗力を表す残りのパラメータを適当に変えて計算を行って、全般的に実験結果とよく一致する値を定めたものである。抵抗力を速度の自乗で除して得られる抵抗力係数を図-5に示す。この図の横軸は円柱の水面位置における速度より算出されるレイノルズ数である。一様流中の剛円柱に働く力や静水中の運動円柱に働く力と厳密に対比できるものではないが、この結果はそれらとよく似ており、先に示した抵抗力のモデル表示が妥当であると言える。

4. むすび 他のデータなど詳細は講演発表時に示す。

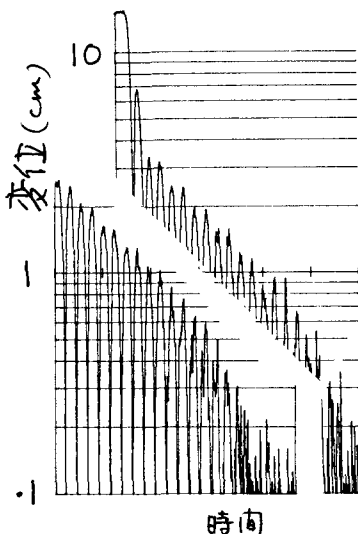


図-3 自由振動の対数(実験)

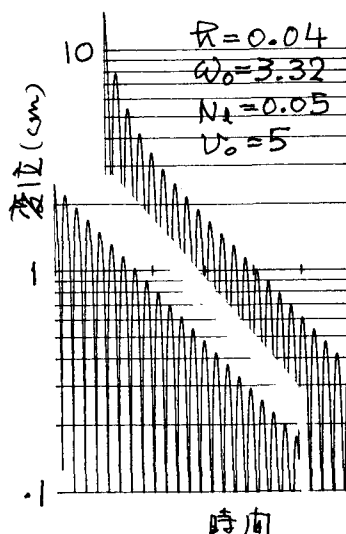


図-4 自由振動の対数(計算)

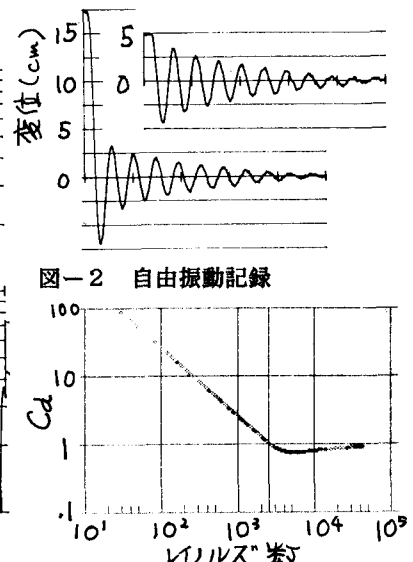


図-2 自由振動記録

図-5 抵抗力係数(計算)