

東京大学 正会員 堀川 清司
 東京大学大学院 学生会員 ○藤部 雅彦

構造物の振動について従来から多くの研究がなされてきているが、そのほとんどが空気中での問題を扱ったものであり、水中においての研究は今のところ数が少ない。ところで、構造物が水中で振動する場合、空気中とは違って抗力や揚力の影響を大きく受けるので、異なった現象が見られ、水中固有の問題が出てくるはずである。そこでこのような問題を扱う初歩的な段階として、弾性円柱の水中における強制振動について調べてみた。

1. 実験の概要

実験は図1のように、鋼材で作ったフレームを水路の上から水中につり下げてその底部に円柱を固定し、フレームを造波板に接続して単振動させた。測定は、入力振動(フレームの変位)、円柱上端の変位、円柱下端のひずみについて行ない、それぞれ誘導式変位計、8ミリカメラ、ストレインゲージを用いた。なお、実験に使用した水槽は幅80cm×長さ2.5m×深さ1m、円柱は直径2.95cm、長さ90.0cm、密度1.088g/cm³、曲げ剛性EI=1.75×10⁶gcm⁴で、ウレタンゴム製であり、水中での固有周期は1.30秒(一次)であった。

初めに、この水槽に水を入れずに、空気中での振動実験を行なった結果、線型性がよく成り立ち、減衰係数 $\beta = 2 \times 10^2$ と測定された。また入力方向に対して直角方向の振動(以下これを「横揺れ」と呼ぶ)は見られなかった。

これに対し、水中での実験では入力方向(縦方向)の振動とともに入力方向と直角な方向(横方向)の振動が起こった。このために円柱上端の揺る軌跡は直線的なものばかりでなく、だ円形になったり、8の字形になったりという定性的な変化をも示した。これについて代表的な例を示す入力振幅=4.7mmをとり、入力振動数を変化させたときの現象を記述すると次のようになる。まず、入力振動数が0.490Hzまでは横揺れはほとんどない。0.581Hzになると入力振動数の2

倍の横揺れが始まるが、このとき横方向の振動をとり出すと「うなり」のように見える。さらに0.769Hzになると横揺れ振動数は入力振動数に等しくなってしまうが、「うなり」のように見えることは変わらない。それが、0.803Hzからは横揺れも単振動になって、円柱上端は安定しただ円の軌跡を描くようになる。しかも、ここでは左右対称な2種類の安定な円軌道が存在し、初期条件によってどちらかが決定される。さらに0.990Hzになると2つの円運動の他に、前に見られ「うなり」のような運動も現われ、初期条件によって3種類の運動のうちどれかが決まる。そして1.02Hzでは円運動はなくなり、1.30Hzからは横揺れの振幅はほぼ0になってしまう。(図2参照)このように水中での振動が複雑であるのは、いわゆるカルマン渦のようなものの発生に起因すると考えられるが、本実験ではその定量的な性質について明らかにするには至らなかった。

図1. 実験模式図

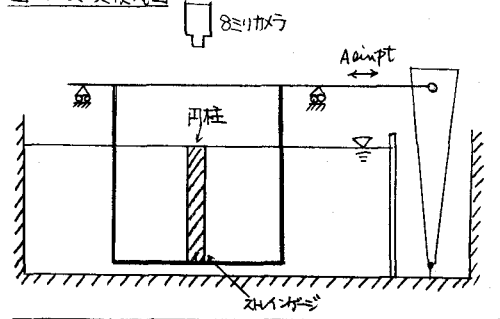


図2. 円柱上端の軌跡の変化の説明図



2. 数値計算

微小振動に対してはポテンシャル理論による解析ができ、これは参考文献に詳しいが、ここでは抗力を考えた簡単な方程式を数値的に解いた。構造減衰、造波抵抗に比べて抗力が大きく、円柱の自重によるモーメントは無視できるとし、 G_0 , G_H を一定とすれば基礎方程式は、

$$SS \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + 8EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} = G_0 \frac{\partial^2}{\partial z^2} (u - \frac{\partial u}{\partial z}) (u - \frac{\partial u}{\partial z}) + G_H SS \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - (G_H - 1) SS \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\left(\begin{array}{l} u = U/A(z) : \text{はりの変位} \quad S : \text{水の密度} \quad S' : \text{円柱の密度} \\ EI : \text{円柱の曲げ剛性} \quad D : \text{円柱の直径} \quad S : \text{円柱の断面積} \\ u_0 : \text{水波の速度} \quad G_0, G_H : \text{抗力係数 (1.0 と 2.0)} \end{array} \right)$$

となり、これを計算機で解くために円柱を N 個の要素に分けて連立方程式にし、 $u = U' + A \sin \theta$ を代入して、さらに無次元化した(2)式を解いた。

$$\bar{U}'' = \frac{3N}{\pi^2} K \bar{U}' + \frac{2G_0 A}{\pi(S'G_H + 1)} (\bar{U}' + \bar{P} \cos \bar{P} E) \bar{U}' + \bar{P} \cos \bar{P} E + \bar{P}^2 \sin \bar{P} E \quad (2)$$

$$\left(\begin{array}{l} \bar{U}' = U'/A, N = l/\Delta l, K_{ij} = [\frac{1}{2} (\frac{2i-1}{2N})^2 t_{ij}^2 (\bar{z} - t_{ij})]^{-1} \\ t_{ij} = \frac{2i-1}{2N-1} \quad (i \geq j), \bar{z} = S/S', F = \omega \Delta t, \omega_n = (\frac{8}{\pi^2}) \sqrt{\frac{3EI}{4S'(G_H-1)S}} \end{array} \right)$$

図3-1. 円柱上端変位の応答

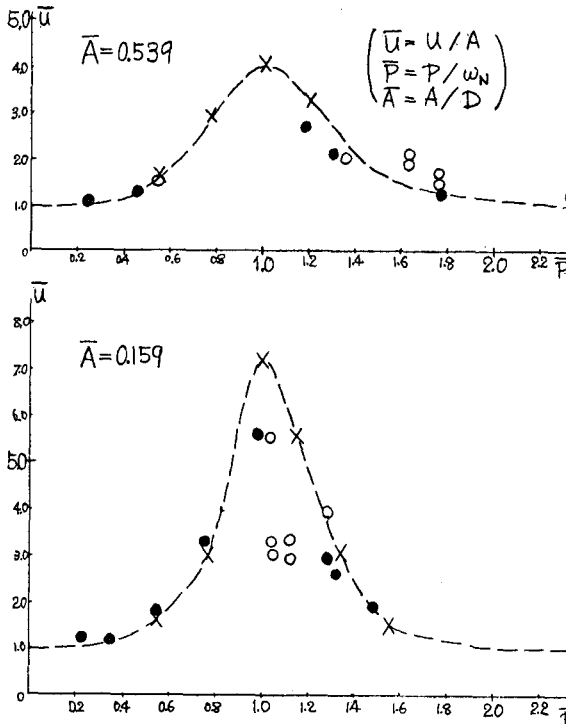
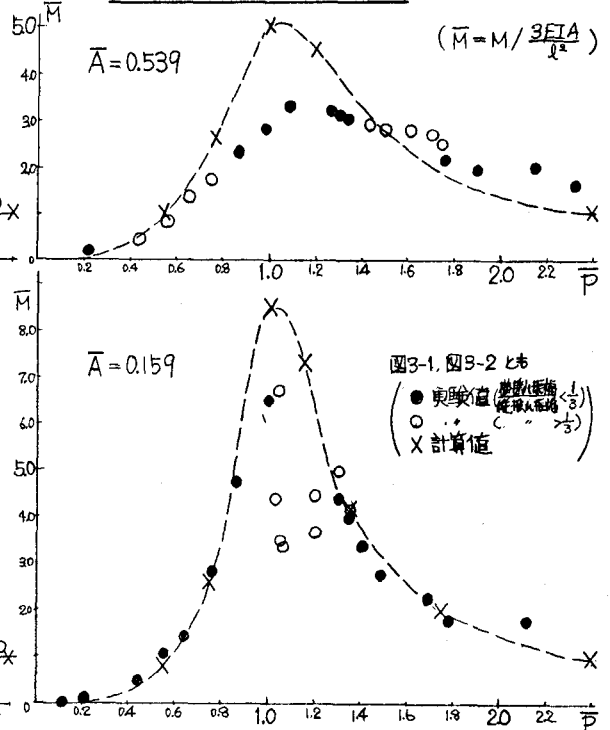


図3-2. 円柱下端モーメントの応答



3. 考察およびまとめ

まず円柱の水中での固有周期については、 $G_H = 2.0$ として計算した値 $T_0 = 1.32$ 秒に対して、実験値 1.30 秒であり、ポテンシャル理論から得られる $G_H = 1.94$ を用いると $T_0 = 1.30$ 秒となる。

次に応答の振幅についてはポテンシャル理論は適用できない。そこで前節で述べたような方法で計算した値と、実験で得られた縦方向の応答とを比較したのが図3-1と図3-2である。計算は横波の影響を無視したものであるが、ある程度充満の目安を与えている。しかも、レイノルズ数とポテンシャル理論から予想して、実際の G_0 はより大きく、 G_H はより小さいと思われる。このとき近似の程度はもう少しよくなるが、横波が相対的に大きい場合はずれが大きくなり、横波の変化の不連続性とともに今後の課題として残った。

参考文献 伊藤喜行・木原力

円柱の動座に伴う造波抵抗

運輸省港湾技術研究所報告 第11巻 第3号 2