

外部で液体に接する厚肉中空及び中実円筒体の自由振動特性

大分工業高等専門学校 都市システム工学科

北海道大学大学院

大同大学

工学研究科北方圏環境政策工学専攻

都市環境デザイン学科

正 会 員

フェロー会員

正 会 員

○名木野 晴暢

三上 隆

水澤 富作

1. まえがき

液体に接する円筒構造物は、石油タンク、種々の工業プラント、橋梁の橋脚等に用いられる。近年、構造技術の発展にともないこれらの構造物は、大型化の傾向にある。厚肉円筒構造要素では、厚さの増大にともない面外せん断変形と回転慣性の影響や半径方向の応力一ひずみ成分が無視できなくなる。また、これらの各種構造物は、地震動や波浪などの複雑な動的荷重を受けるため、構造設計においては、基礎的な情報として、自由振動特性(固有振動数と固有振動モード)、構造物と液体の動的相互作用によって生じる動水圧及び付加質量を把握することが必要不可欠になる。

このような流体一構造相関問題に関する研究は古くからなされているが、円筒構造物を3次元弾性体として取り扱った研究報告は、あまりなされていないようである。

本論文では、B-spline Ritz 法を用いて、外部で液体に接する厚肉中空及び中実円筒体の3次元自由振動解析を実施し、液体に接する円筒体の自由振動特性、付加質量及び動水圧に与える円周方向の波数、円筒体の厚さと長さ及び液体の高さの影響について明らかにすることを目的としている。

2. B-spline Ritz 法による自由振動問題の定式化^{1),2)}

図-1 には、解析モデル、円筒座標系 (r, θ, x) および円筒体の変位方向が示してある。等質、等方的な円筒弾性体の運動は、微小変形及び線形弾性である3次元弾性論に従うものとし、下面 $(x=0)$ で固定、上端 $(x=L)$ で自由とする。また、任意の時刻 t での r, θ, x 方向の円筒体の変位成分をそれぞれ、 w, v, u で表す。ここで、 $R_i, R_o, h(=R_o-R_i), L$ は、それぞれ、円筒体の内径、外径、厚さ及び長さであり、 H は液体の高さである。

液体は、非粘性、非回転及び非圧縮性とし、円筒体の回転軸から半径方向の外側に無限に広がっており、液底面は傾斜や隆起のない水平面であると仮定する。

なお、B-spline Ritz 法による流体一構造物系の自由振動問題の定式化の詳細は、文献1), 2)を参照されたい。

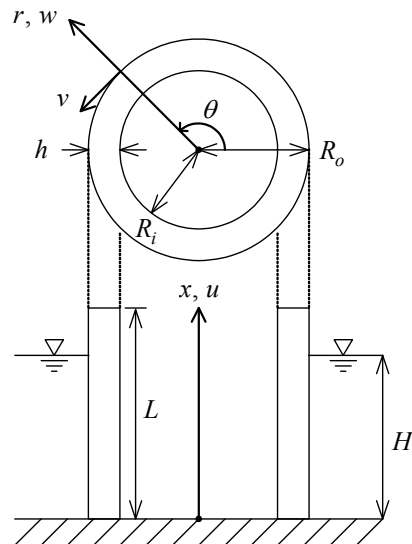


図-1 解析モデル、円筒座標系および変位方向の定義

3. 数値計算例および考察

ここでは、外部で液体に接する厚肉中空及び中実円筒体の3次元自由振動解析を実施し、液体に接する円筒体の自由振動特性と付加質量係数に与える円周方向の波数 n 、内径一外径比 R_i/R_o 、長さ一外径比 L/R_o 、液高比 H/L の影響について検討する。数値計算例では、円筒体の密度とポアソン比をそれぞれ、 $\rho_s = 7.84 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 0.3$ とし、液体の密度 $\rho_f = 1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いる。また、振動数パラメータ Ω は、次式で定義する。

$$\Omega = \omega R_o (\rho_s / G)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 ω は円振動数、 G はせん断弾性係数である。

動的構造設計においては、最低次の振動数(以下、基本振動数)を把握することが極めて重要になる。図-2 には、液体に接する短い円筒体($L/R_o = 2$)と長い円筒体($L/R_o = 20$)の Ω_{1st} に与える n と R_i/R_o の影響が示してある。ここで、 n は0から10まで変化させている。また、 $H/L = 1$ (満水状態)とし、 R_i/R_o は0(中実)、0.5(厚肉)及び0.8(中等厚肉)に設定した。なお、参考までに、液体に接していない結果($H/L = 0$)を実線で示した。これより、液体の有無に係わらず、短い厚肉中空及び中実円筒体の基本振動数は、 $n = 1$ の Ω_{1st} で

ある。次に、短い中等厚肉中空円筒体の基本振動数は、 $n = 2$ の Ω_{1st} であるが、中等厚肉中空円筒体の $n = 1$ の Ω_{1st} は、基本振動数($n = 2$ の Ω_{1st})の値にかなり近接している。また、短い厚肉中空及び中実円筒体の Ω_{1st} に与える H/L の影響はほとんど見られないが、中等厚肉中空円筒体の Ω_{1st} では、 n の増大に伴い、液体に接している円筒体の Ω_{1st} の値は、液体(付加質量)の影響により小さくなっている。したがって、液体に接する厚肉中空及び中実円筒体の Ω_{1st} の値は、液体に接していない Ω_{1st} の値から推定できる可能性がある。他方、長い円筒体では、液体の有無及び R_i/R_o に係わらず、基本振動数は、 $n = 1$ の Ω_{1st} である。また、長い円筒体の Ω_{1st} に与える H/L の影響は、短い厚肉中空及び中実円筒体と同様の傾向にある。したがって、液体の有無、 R_i/R_o 及び L/R_o に係わらず、液体に接する厚肉中空及び中実円筒体では、 $n = 1$ の Ω_{1st} が基本振動数になる。

ここで、液体(付加質量)の影響を図-2の結果から読み取することは困難であるので、付加質量係数 Θ を用いて、付加質量の影響を定量的に評価する。ここで、付加質量係数 Θ は、次のように定義される。

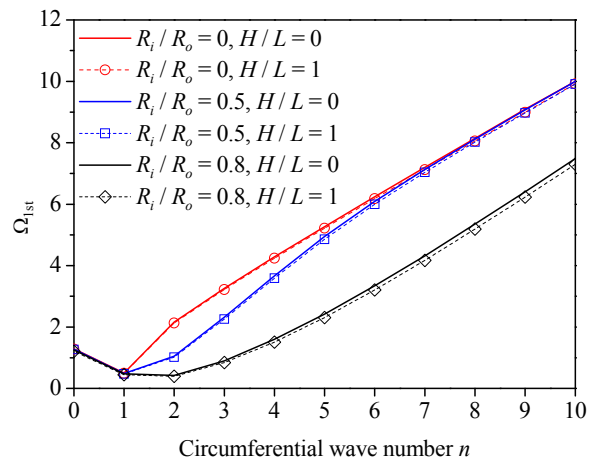
$$\Theta = \frac{\mathbf{M}_f}{\mathbf{M}} = \left(\frac{\Omega_0}{\Omega} \right)^2 - 1 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{M}$ 及び $\mathbf{M}_f$ は、それぞれ、一般化された円筒体の質量及び付加質量であり、 Ω_0 は、液体に接していない円筒体の振動数パラメータである。図-3には、液体に接する短い円筒体と長い円筒体の Θ_{1st} に与える n と R_i/R_o の影響が示してある。これより、中実円筒体の Θ_{1st} の値は、 L/R_o に係わらず、 $n = 1$ で最大値を示しており、基本振動数で振動しやすいことがわかる。次に、厚肉中空円筒体の Θ_{1st} の値は、長い円筒体の $n = 1$ で最大値を取るが、短い円筒体の場合には、基本振動数ではなく、 $n = 2$ で最大値を取っている。最後に、中等厚肉中空円筒体の Θ_{1st} の値は、短い円筒体の $n = 2$ で、長い円筒体の $n = 1$ で最大の値を取る。また、中空円筒体の厚さが小さくかつ円筒体が長くなるほど液体の影響を受けやすい。

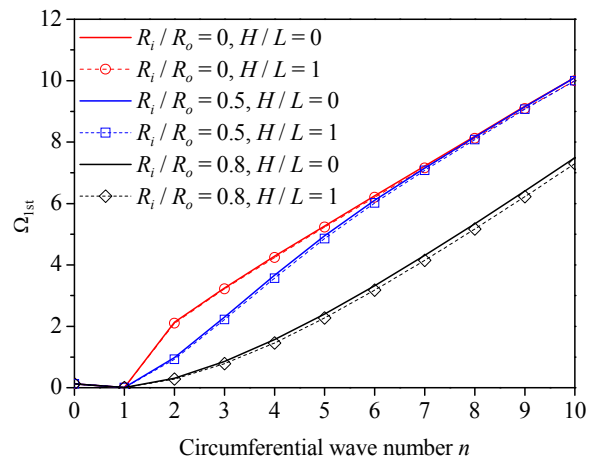
4. まとめ

本論文で得られた結果を纏めると、以下のとおりである。

- (1) H/L , R_i/R_o 及び L/R_o に係わらず、液体に接する厚肉中空及び中実円筒体では、 $n = 1$ の Ω_{1st} が基本振動数になるため、曲げ自由振動特性の把握が重要になる。
- (2) 中空円筒体の厚さが小さくかつ円筒体が長くなるほど液体(付加質量)の影響を受けやすい。



(a) $L/R_o = 2$



(b) $L/R_o = 20$

図-2 液体に接する短い円筒体と長い円筒体の Ω_{1st} に与える n と R_i/R_o の影響: $H/L = 1$

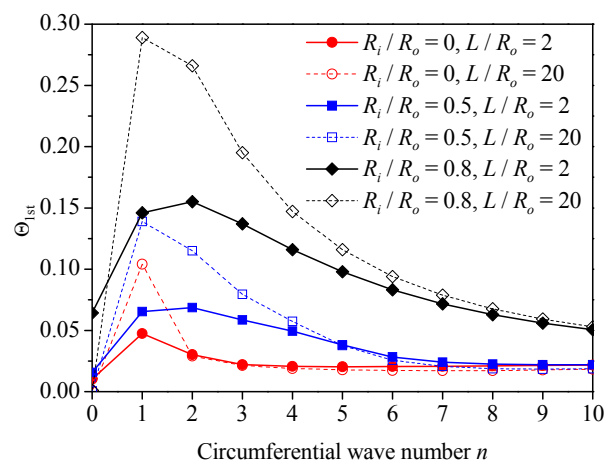


図-3 液体に接する短い円筒体と長い円筒体の Θ_{1st} に与える n と R_i/R_o の影響: $H/L = 1$

参考文献

- 1) 名木野晴暢, 三上隆, 水澤富作: 土木学会第 61 年次学術講演会, I-409, pp.815-816, 2006.
- 2) Nagino, Mikami and Mizusawa: The Proc. of 4th Int. Conf. ASEM, pp.1657-1669 (CD-ROM), 2008.