文章编号: 1007-6069(2008)03-0074-05

# 15 ×10$^4$ m$^3$ 储罐的动特性分析

赵福君[1],孙建刚[2],赵晓磊[3],张荣花[3],张 亮[3]
(1. 清华大学 土木工程系,北京 100084; 2. 大连民族学院 土木建筑工程学院,辽宁 大连 116600;
3. 大庆石油学院 土木建筑工程学院,黑龙江 大庆 163318)

**摘要**:立式钢制圆柱形储罐向着大型化和浮放式发展,其动力特性参数,如结构的固有频率和固有振型,在地震工程中经常被使用,以 15 ×10$^4$m$^3$储罐为例,应用 ADINA 有限元程序,采用弹簧单元来模拟地基,考虑液固耦合效应对其进行了模态分析。结果表明:采用弹簧单元来模拟地基进行储罐的分析时,有限元与规范近似算法比较接近;15 ×10$^4$m$^3$储罐液固耦合振动低频的振动形式比较丰富,以 cos$n\theta$、sin$n\theta$型梁式振动为主,液体晃动低频的振动形式比较单一,即 cos$n\theta$、sin$n\theta$型梁式振动;液固耦合振动频率对地基刚度最为敏感,储液高度与储罐高径比次之,受罐壁厚度的影响比较小;液体晃动频率对罐壁厚度和地基刚度不敏感,对储液高度与高径比则比较敏感。

**关键词**:大型储罐;模态分析;液固耦合;梁式振动
**中图分类号**: P315.983 **文献标志码**: A

# Dynamicl characteristic analysis of 15 ×10$^4$m$^3$ vertical liquid storage-tanks

ZHAO Fujun[1], SUN Jiangang[2], ZHAO Xiaolei[3], ZHANG Ronghua[3], ZHANG Liang[3]
(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Institute of Daqing Petroleum, Daqing 163318, China)

**Abstract:** Large-scale unanchored vertical liquid storage tanks are being applied extensively, its dynamic parameters, such as the natural frequency and mode shape, are very often used in seismic engineering. The natural mode of 15 × 10$^4$m$^3$ storage tank was analyzed by ADINA finite element technique using spring element to simulate foundation, and considering the liquid-structure interaction effect. The results show that: there is small difference between the finite element technique and the well-known code formula on mode analysis of tanks; the vibration forms of the low-frequency segment of 15 ×10$^4$m$^3$ storage tank are various, among which cos$n\theta$、sin$n\theta$ beam vibrations are the leading one, the vibration forms of the liquid are simple, namely cos$n\theta$、sin$n\theta$ beam vibration; the frequencies of liquid-structure coupled vibration are sensitive to foundation stiffness, are followed by the liquid height and the ratio of tank height to radius, and are insensitive to the thickness of tank wall; sloshing frequencies of liquid are insensitive to foundation stiffness as well as the thickness of tank wall, and are sensitive to liquid height as well as the ratio of tank height to radius.

**Key words:** large-scale storage tanks; modal analysis; liquid-solid coupling; beam vibration

**收稿日期**: 2008-06-12; **修订日期**: 2008-07-16
**作者简介**:赵福君(1968-),男,高级工程师,博士,主要从事大型储罐设计与力学性能分析研究. E-mail: zhaofujun069@163.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

# 引言

大型储罐属于充液薄壁容器,有其特殊的动力特性,首先薄壁结构固有频率非常密集,在圆周方向上呈现环向多波现象[1];其次罐内充液,属于流固耦合问题,计入流体后壳体频率降低[2]。由于储罐的基本振动周期将用于确定地震影响系数,因而有必要分析大型储罐的模态特性。本文以 15 ×10$^4$ m$^3$储罐为例,对其进行模态分析,并研究它的影响因素。

# 1　15 ×10$^4$ m$^3$储罐有限元模型的建立

15 ×10$^4$ m$^3$储罐基本参数[4]:半径 $R$ = 49 m,储罐高度 $H$ = 21. 7 m,充水高度 $H_w$ = 20. 18 m,水的密度为 $\rho$ = 1 ×10$^3$ kg/m$^3$,钢材密度 $\rho$ = 7. 85 ×10$^3$ kg/m$^3$,重力加速度 $g$ = 9. 8m/s$^2$,钢板的泊松比 $u$ = 0. 3,弹性摸量 $E$ = 2. 06 ×10$^5$ MPa,屈服强度 $\sigma_y$ = 490 N/mm$^2$,底板厚度 $t_0$ = 23 mm,壁板厚度 $t_b$ = 35 mm,剪切模 $G$ = 39. 73 N/mm$^2$。

储罐系统的柱坐标体系如图 1所示,坐标原点在底板中心点。

本文采用弹簧单元来模拟地基[3,4]。通过储罐半径、储液密度、地基的剪切波速等参数计算出地基总的等效刚度与总的等效阻尼,(例如中硬场地时 15 ×10$^4$ m$^3$浮放储罐弹簧的基本参数见表 1),之后可以得到每一个弹簧单元刚度与阻尼,其概念化模型见图 2。

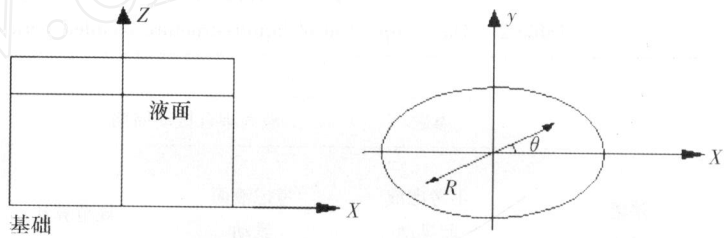



图 1　储罐几何柱坐标系统

Fig 1　Cylindrical coordinates system of a storage tank

罐壁及底板均采用 4节点等参壳单元,液体采用 8节点三维流体单元[5],在液体表面为自由面单元,其它为流体面单元。采用势流理论进行计算,该理论假设条件如下:a液体是无旋无粘微可压缩的,并且没有热传递[6];b液体边界是相对较小的位移;c液体没有净流速[7]。罐有限元模型见图 3。

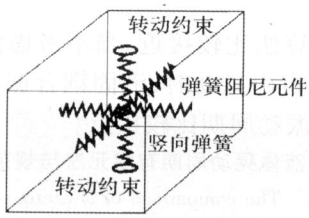



图 2　基础弹簧单元概念化模型

Fig. 2　The model of foundation spring elements

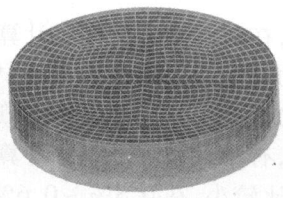


图 3　立式钢制储罐有限元模型

Fig. 3　The FE model of steel elevated storage tank

表 1　地基总的等效刚度与总的等效阻尼

Table 1　The general equivalent stiffness and damping of foundation

| 储罐 | 参数 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $K_x$、$K_y$ (N/m) | $K$/(N/m) | $C_{bx}$、$C_{by}$ (N · s/m) | $C_b$/(N · s/m) |
| 15 ×10$^4$m$^3$ | 5. 94 533 ×10$^{10}$ | 7. 38 769 ×10$^{11}$ | 4. 79 432 ×10$^9$ | 1. 03 428 ×10$^{10}$ |

$K_x$、$K_y$、$K_z$分别为储罐地基 $X$、$Y$、$Z$方向总的等效刚度。

# 2 理论验证

## 2 1　ADINA程序模态分析特点

本文采用 ADINA 8. 4程序对 15 ×10$^4$m$^3$储罐进行模态分析。在分析时,采用 Determinant search method

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

算法,不考虑浮顶的影响,忽略结构的阻尼及结构绕 $X$、$Y$、$Z$ 轴旋转的自由度[8]。

在 ADINA程序中,在求解系统频率时,一般有两种方法,一种是考虑液面的晃动,一种是不考虑液面的晃动,当考虑液面晃动的影响时,ADINA将输出液固耦合系统的三种模态:第一类是刚体模态,主要表现为流体所有节点上的压力值相同,而固体是在这个均布内压下变形;第二类是流体的低频晃动模态,其特点是自由液面上的流体节点压力变化比较大,固体随着晃动压力而变形,但这个变形相对于液体晃动较小;第三类是液固耦合振动模态,其特点是能量集中在固体的变形上,而流体的内部节点随着固体变形相应地产生压力变化[9]。当不考虑液面晃动时,ADINA将只输出系统的液固耦合振动模态。

### 2.2 有限元方法与规范算法比较

为验证 ADINA程序计算储罐模态的正确性,选用 4种常用的浮放储罐(分别为 1000 $m^3$、5000 $m^3$、10000 $m^3$、50000 $m^3$)进行分析,将结果与《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》中近似计算公式进行比较[10],证明该方法的有效性,(4种储罐的具体参数见《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》表 14[10])。

ADINA程序计算结果与《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》近似计算公式的比较见表 2和表 3。

表 2 耦合振动周期有限元法与规范算法的比较

Table 2 The comparison of liquid-structure coupled period between FE method and code formula

| 储罐类型 | 参数 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 参数 | 液固耦合振动周期 | | 误差 | |
| | 不考虑液面晃动 $T_c'$ (s) | 考虑液面晃动 $T_c''$ (s) | 规范算法 $T_c$ (s) | $\frac{\lvert T_c' - T_c \rvert}{T_c}$ ×100% | $\frac{\lvert T_c'' - T_c \rvert}{T_c}$ ×100% |
| 1 000 $m^3$ | 0.112 | 0.107 | 0.124 | 9.6% | 13.7% |
| 5 000 $m^3$ | 0.164 | 0.165 | 0.170 | 3.5% | 2.9% |
| 10 000 $m^3$ | 0.192 | 0.192 | 0.189 | 1.6% | 1.6% |
| 50 000 $m^3$ | 0.274 | 0.270 | 0.290 | 5.5% | 6.9% |

由表 2可见,在对储罐进行模态计算时,有限元法与规范近似算法比较接近,当不考虑液面的自由晃动时,液固耦合振动周期的误差在 1.6%～9.6%之间;当考虑液面的自由晃动时,液固耦合振动周期的误差在 1.6%～13.7%之间,说明有限元和规范近似算法计算的液固耦合振动周期比较接近。

由表 3可见,有限元与规范算法计算的液体晃动周期之间的误差比较小,在 0.3%～0.6%之间。

值得注意的是,表 2中储罐规范算法计算的耦合振动频率,有的并非是有限元计算的储罐的第 1阶固有频率。这主要是因为目前各国的储罐标准大多采用 $\cos n\theta$型梁式振动模型计算储罐液固耦合振动的固有频率,许多文献也提到 $\cos n\theta$型梁式振动在储罐振动中起主要作用[6]。有限元分析发现储罐的固有频率非常密集,$\cos n\theta$型梁式振动不一定是第 1阶频率,例如 50 000 $m^3$储罐的 $\cos n\theta$型梁式振动是第 2阶固有频率。

表 3 液体晃动周期有限元法与规范算法的比较

Table 3 The comparison of sloshing period of liquid between FEA method and code formula

| 储罐类型 | 参数 | | |
|---|---|---|---|
| | 液体晃动周期 | | 误差 |
| | 有限元法 $T_w'$ (s) | 规范算法 $T_w$ (s) | $\frac{\lvert T_w' - T_w \rvert}{T_w}$ ×100% |
| 1 000 $m^3$ | 3.64 | 3.65 | 0.3% |
| 5 000 $m^3$ | 4.96 | 4.99 | 0.6% |
| 10 000 $m^3$ | 5.71 | 5.73 | 0.3% |
| 50 000 $m^3$ | 9.04 | 9.08 | 0.4% |

## 3 15 ×$10^4$ $m^3$储罐的模态分析计算

15 ×$10^4$ $m^3$储罐液固耦合振动的前 11阶固有频率、振型及液面晃动的前 11阶固有频率和振型见表 4。从该表可见,15 ×$10^4$ $m^3$储罐液固耦合振动低频的振动形式比较丰富,以 $\cos n\theta$、$\sin n\theta$型梁式振动为主,$\cos n\theta$型梁式振动为第 5、6阶固有频率;液面晃动低频的振动形式比较单一,即 $\cos n\theta$、$\sin n\theta$型梁式振动。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

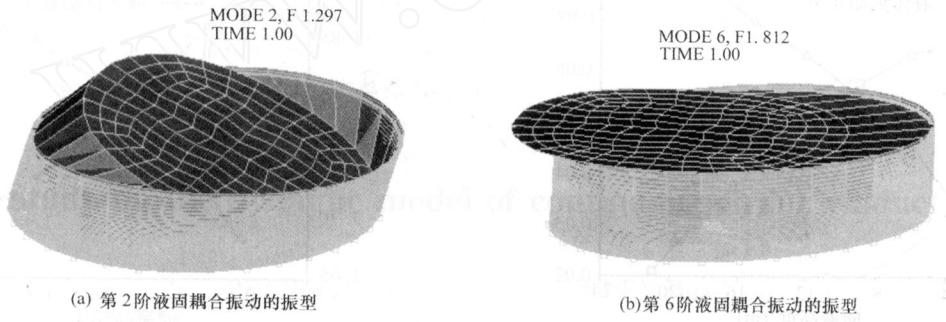
表 4　15 ×10$^4$m$^3$储罐固有特性

Table 4　The natural frequencies of 15 ×10$^4$m$^3$ storage tank

| 液固耦合振动 | | | | 液面晃动 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 阶次 | 模态振型 | | f/Hz | 阶次 | 模态振型 | | f/Hz |
| | m | n | | | m | n | |
| 1 | 竖向振动 | | 1.033 | 1 | - | - | 0.0 000 026 |
| 2、3 | 1 | 2 | 1.297 | 2、3 | 1 | 1 | 0.0 772 |
| 4 | 1 | 2 | 1.807 | 4 | 2 | 2 | 0.1 152 |
| 5、6 | 1 | 1 | 1.812 | 5 | 2 | 2 | 0.1 154 |
| 7 | 1 | 2 | 1.920 | 6 | 2 | 1 | 0.1 345 |
| 8 | 竖向振动 | | 2.269 | 7、8 | 2 | 3 | 0.1 426 |
| 9 | 扭转振动 | | 2.418 | 9、10 | 3 | 1 | 0.1 639 |
| 10、11 | 1 | 3 | 2.829 | 11 | 2 | 4 | 0.1 641 |

注:$m$ 表示沿径向分布的振型数,$n$ 表示沿环向的波数。

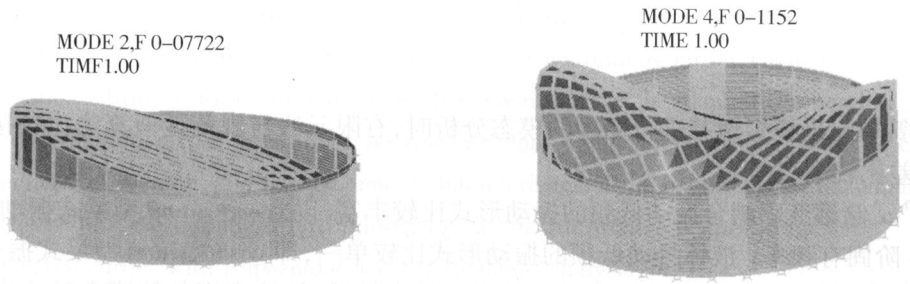
15 ×10$^4$m$^3$储罐第 2、6阶液固耦合振动的振型见图 4,第 2、4阶液体晃动的振型见图 5。




(a) 第 2阶液固耦合振动的振型　　(b)第 6阶液固耦合振动的振型

图 4　15 × 10$^4$m$^3$储罐第 2、6 阶液固耦合振动的振型

Fig. 4　The mode shapes of liquid-tank system




(a)第 2阶液体晃动振型　　(b)第 4阶液体晃动振型

图 5　15 × 10$^4$m$^3$储罐第 2、4 阶液面晃动的振型

Fig. 5　The sloshing mode shapes of liquid

# 4 结构参数对模态的影响

15 ×10$^4$m$^3$储罐液固耦合振动频率和液体晃动频率随地基刚度、罐壁厚度、储液高度、储罐高径比 (体积一定,液体高度与半径之比)的变化趋势见图 6～图 9,图中液固耦合振动频率与左侧纵坐标相对应,液体晃动频率与右侧纵坐标相对应。

由图 6～9可见,15 ×10$^4$m$^3$储罐液固耦合振动频率对地基刚度最为敏感,储液高度与储罐高径比次之,受罐壁厚度的影响比较小,随着地基刚度的减小、储液高度或储罐高径比的增大,液固耦合振动频率将减小,储罐壁厚增大时,液固耦合振动频率先增大后减小,但变化幅度比较小。15 ×10$^4$m$^3$储罐液体晃动频率对储液高度和储罐高径比比较敏感,受罐壁厚度的影响几乎可以忽略,地基刚度仅在中软场地时对晃动频率有较小的影响,随着储液高度、储罐高径比的增大,液体晃动频率将减小。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

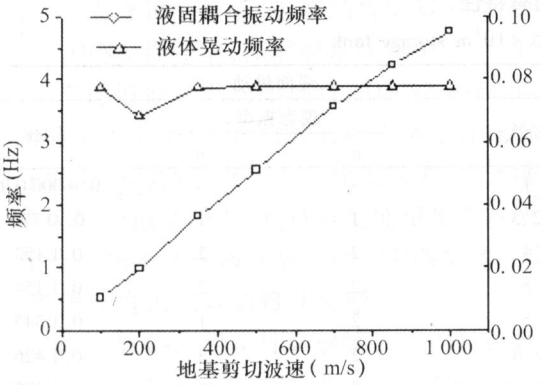



图 6 地基刚度对频率的影响

Fig. 6 Effect of foundation on natural frequencies

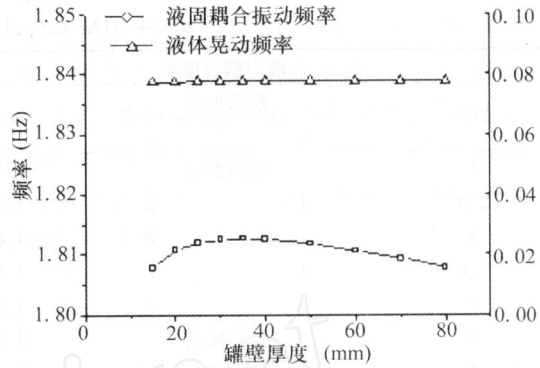



图 7 罐壁厚度对频率的影响

Fig. 7 Effect of tank wall thickness on natural frequencies

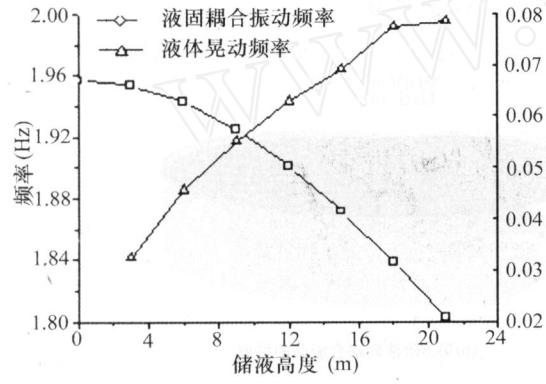



图 8 储液高度对频率的影响

Fig. 8 Effect of liquid height on natural frequencies

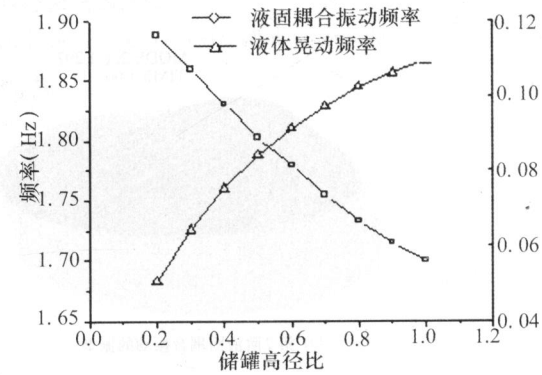



图 9 储罐高径比对频率的影响

Fig. 9 Effect of different ratio of tank height to radius on natural frequencies

## 5 结论

(1)应用弹簧单元来模拟地基进行储罐的模态分析时,有限元法与规范近似算法比较接近,特别是液体的晃动周期,误差比较小。

(2) 15 $\times 10^4 m^3$储罐液固耦合振动低频的振动形式比较丰富,以 $\cos n\theta$、$\sin n\theta$型梁式振动为主,$\cos n\theta$型梁式振动为第 5、6阶固有频率;液体晃动低频的振动形式比较单一,即 $\cos n\theta$、$\sin n\theta$型梁式振动。

(3) 15 $\times 10^4 m^3$储罐液固耦合振动频率对地基刚度最为敏感,储液高度与储罐高径比次之,受罐壁厚度的影响比较小;液体晃动频率对罐壁厚度和地基刚度不敏感,对储液高度、高径比比较敏感。

## 参考文献:

[1] Veletsos A S, Tang Y, Tang H T. Dynamic response of flexibly supported liquid-storage tanks[J]. J. of Structural Engineering, 1992, 118(1): 264 - 283.

[2] 陈健云. 基于复模态的有限元模型修正算法[J]. 世界地震工程, 2004, 20(2): 12 - 16.

[3] Haroun M A. Parametric Study of Seismic Soil-Tank Interaction. I: Horizontal Excitation[J]. J. of Structural Engineering, 1992, 118(3): 783 - 797.

[4] Haroun M A, Housner G W. Earthquake response of deformable liquidstorage tanks[J]. ASME, Journal of Applied Mechanics, 1981, 48(2): 411 - 418.

[5] Bathe K J. Adina理论手册(Ⅰ)[R]. 1999: 201 - 210

[6] Tang Y. Rocking response of tanks containing two liquids[J]. Nuclear Engineering and Design, 1994; 152(1/3): 103 - 115.

[7] Fischer F D, Seeber R. Dynamic response of vertically excited liquid storage tanks considering liquid soil interaction[J]. Earthquake Engineering and Structual Dynamics, 1988, 16(3): 329 - 342.

[8] 周利剑,孙建刚. 立式储罐与地基相互作用动力特性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 232 - 234.

[9] 陈志平,大型非锚固储油罐应力分析与抗震研究[D]. 浙江大学, 2006: 83 - 100.

[10] GB50341 - 2003, 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范[S].

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net