

文章编号: 1009 - 315X(2009)01 - 0071 - 03

# 15 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 浮放储罐的模态分析\*

赵晓磊, 张荣花, 张 亮

(大庆石油学院 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

**摘 要:**以 15 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 储罐为例, 应用 ADNA 有限元程序及《规范》算法对其进行了模态分析。结果表明, 有限元法与规范近似算法计算的模态比较接近, 15 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 储罐液固耦合振动低频的振动形式比较丰富, 以 cos n, sin n 型梁式振动为主; 液体晃动低频的振动形式较单一, 为 cos n, sin n 型梁式振动; 储罐液固耦合频率对地基刚度变化敏感, 液体晃动频率对储液高度变化敏感。

**关键词:**大型储罐; 模态分析; 液固耦合; 梁式振动

**中图分类号:** P315.9      **文献标志码:** A

## Modal Analysis of Unanchored 15 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> Storage Tank

ZHAO Xiao - lei, ZHANG Rong - hua, ZHANG L iang

(1. College of Architecture & Civil Engineering, Daqing Petroleum Institute,  
Daqing Heilongjiang 163318, China)

**Abstract:** Take 15 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> storage tank as an example, its model analysis was carried out by ADNA finite element technique and criterion method. The results show that: there is little difference between the finite element technique and the well - known code formula on the modal analysis of tanks; the vibration forms of the low - frequency segment of 15 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> storage tank are various, among which cos n, sin n beam vibration is the leading one, the vibration forms of the liquid is single, namely cos n, sin n beam vibration. The liquid - solid coupling frequency of tanks is sensitive to the ground hardness variation, and the liquid shaking frequency is sensitive to the height variation of storing liquid.

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

目前各国的储罐标准多采用 cos 型梁式振动模型计算储罐频率, 许多文献<sup>[1-2]</sup>也提到 cos 型梁式振动在储罐振动中起主要作用, 而储罐的固有频率非常密集, 无法估计哪种振型最容易被激发, 因此有必要对此问题作进一步的研究。本文考虑液固耦合振动, 采用有限元方法建立三维模型, 针对储罐模态问题进行研究。

### 1 15 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 储罐有限元模型的建立

15 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 储罐基本参数: 半径 R = 49 m, 储

罐高度 H = 21.7 m, 充水高度 H<sub>w</sub> = 20.18 m, 钢板泊松比 μ = 0.3, 弹性模量 E = 2.06 × 10<sup>5</sup> MPa, 屈服强度 σ<sub>y</sub> = 490 N · mm<sup>-2</sup>, 底板厚度 t<sub>b</sub> = 23 mm, 壁板厚度 t<sub>s</sub> = 35 mm, 剪切模量 G = 39.73 N · mm<sup>-2</sup>。

采用弹簧单元模拟地基<sup>[3]</sup>, 其概念化模型如图 1。罐壁及底板均采用 4 节点等参壳单元, 该单元可用来模拟薄壳, 如图 2。液体采用 8 节点三维流体单元<sup>[4]</sup>, 液体表面采用自由面单元, 其他采用流体面单元, 如图 3。

\* 收稿日期: 2008 - 06 - 10

作者简介: 赵晓磊 (1982 - ), 男, 河北邯郸人, 大庆石油学院土木建筑工程学院研究生, 主要从事结构控制与健康诊断研究。

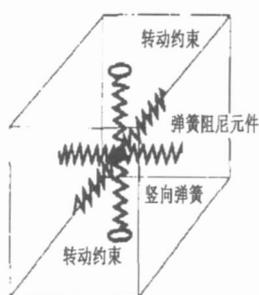


图 1 弹簧单元

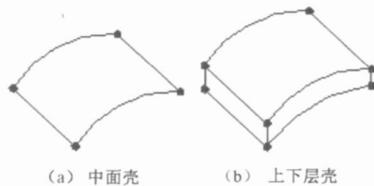


图 2 壳单元

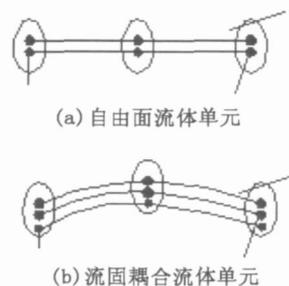


图 3 流体单元

## 2 理论验证

采用 Adina 8.4 程序对  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$  储罐进行模态分析。在求解系统频率时,一般有两种方法,一种是考虑液面晃动,一种是不考虑液面晃动,而不考虑液面晃动时得到的液固耦合振动频率更准

确<sup>[4]</sup>。为验证 ADINA 程序计算液固耦合结构模态的正确性,选用 4 种常用的浮放储罐(类型分别为  $2 \times 10^3$ ,  $5 \times 10^3$ ,  $2 \times 10^4$ ,  $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ )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,以证明该方法的有效性(见表 1)。

表 1 有限元法与规范算法的比较

储罐类型	液固耦合振动周期 / s		液体晃动周期 / s	
	不考虑液面晃动	规范算法	有限元法	规范算法
$2 \times 10^3 \text{ m}^3$	0.142	0.161	3.99	4.00
$5 \times 10^3 \text{ m}^3$	0.164	0.170	4.96	4.99
$2 \times 10^4 \text{ m}^3$	0.224	0.253	7.14	7.18
$5 \times 10^4 \text{ m}^3$	0.274	0.290	9.04	9.08

由表 1 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 3.5% ~ 11.8%,液体晃动周期的误差比较小,在 0.003% ~ 0.6%。

## 3 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐的模态分析计算

$15 \times 10^4 \text{ m}^3$  储罐液固耦合振动的前 11 阶固有频率和振型以及液面晃动的前 11 阶固有频率和振型见表 2。

表 2  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$  储罐固有特性

阶次	液固耦合振动		阶次	液面晃动		f/Hz
	模态振型			模态振型		
	m	n		m	n	
1	竖向振动		1	-	-	0.0000026
2,3	1	2	2,3	1	1	0.0772
4	1	2	4	2	2	0.1152
5,6	1	1	5	2	2	0.1154
7	1	2	6	2	1	0.1345
8	竖向振动		7,8	2	3	0.1426
9	扭转振动		9,10	3	1	0.1639
10,11	1	3	11	2	4	0.1641

注: m 表示沿径向分布的振型数, n 表示沿环向的波数。

由表 2 可见,储罐液固耦合振动形式有竖向振动、扭转振动、 $\cos n$ ,  $\sin n$  型梁式振动,频率存在重根的现象(例如第 2,3 阶,第 5,6 阶,第 10,11 阶),当  $n=1, m=1$  时为  $\cos$  型梁式振动,该振型出现在第 5,6 阶;液体晃动的振动形为

$\cos n$ ,  $\sin n$  型梁式振动,径向振型数分布在 1 ~ 3 之间,环向波数分布在 1 ~ 4 之间,第 1 阶振型为  $\cos$  型梁式振动。

表 2 中储罐第 2,6 阶液固耦合振动振型如图 4,第 2,9 阶液体晃动振型如图 5。



图 4  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$  储罐第 2,6 阶液固耦合振动振型



图 5  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$  储罐第 2,9 阶液体晃动振型

### 4 结构参数对模态的影响

$15 \times 10^4 \text{ m}^3$  储罐液固耦合振动频率和液体晃动频率随地基刚度、储液高度的变化趋势如图 6 - 图 7。

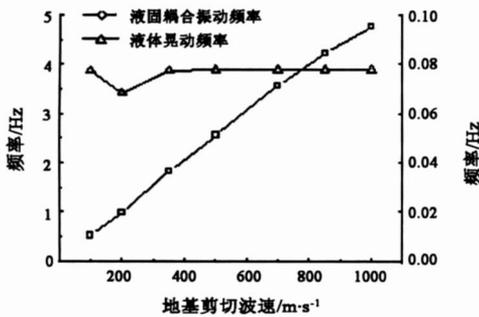


图 6 地基刚度对频率的影响

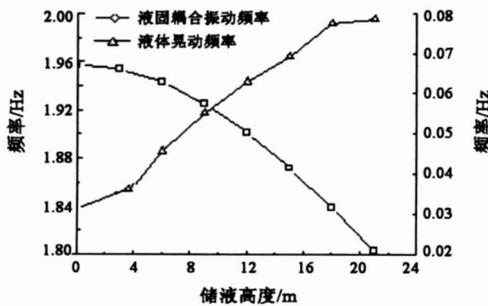


图 7 储液高度对频率的影响

由图 6 可见,当地基剪切波速由  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,储罐液固耦合振动频率从  $0.51 \text{ Hz}$  近似线性增加到  $4.7 \text{ Hz}$ ,液体晃动频率在剪切波速为  $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  处发生较小突变,整体上保持不变,为  $0.077 \text{ Hz}$ 。

由图 7 可见,当储液高度由  $0.2 \text{ m}$  增加到  $21.7 \text{ m}$  时,储罐液固耦合振动频率从  $1.96 \text{ Hz}$  减小到  $1.80 \text{ Hz}$ ,液体晃动频率从  $0.032 \text{ Hz}$  增加到  $0.078 \text{ Hz}$ 。

### 5 结 论

通过  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$  储罐的三维有限元模态分析,可以得出以下结论:

(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的误差比较小。

(2)  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$  储罐液固耦合振动低频的振动形式比较丰富,以  $\cos n, \sin n$  型梁式振动为主, $\cos n$  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,为  $\cos n, \sin n$  型梁式振动。

(3)  $15 \times 10^4 \text{ m}^3$  储罐液固耦合振动频率对地基刚度变化比较敏感,液体晃动频率对储液高度变化比较敏感。

### 参考文献:

- [1] 陈志平. 大型非锚固储油罐应力分析与抗震研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2006
- [2] 中国石油天然气集团公司. GB50341 - 2003 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范 [S]. 北京:中国计划出版社, 2003
- [3] HAROUN M A. Parametric study of seismic soil - tank interaction i: horizontal excitation[J]. ASCE, 1992, 118 (3): 783 - 812
- [4] BATHE K J. Adian理论手册: [Z]. 北京, 1996

(责任编辑 邹永红)