

基于两种模型下的储水罐应力计算

黄文, 谭添才, 马建中

中国核动力研究设计院核级设备鉴定实验室, 成都, 610041

摘要: 分别采用弹簧质量模型和流固耦合模型 2 种方式对大型储水罐进行相互验证计算。弹簧质量模型基于 HOUSNER 理论, 计算出脉冲液体质量 M_0 、脉冲液体重心高度 H_0 、对流液体质量 M_1 、对流液体重心高度 H_1 以及弹簧模拟对流液体晃动频率的等效刚度 k_1 , 并以此作为有限元模型的输入参数; 流固耦合模型采用 ANSYS 的流体单元 fluid80 模拟液体, 壳单元 shell181 模拟储水罐, 考虑液体及结构阻尼, 计算结构在地震时程下的响应。

关键词: HOUSNER 理论; 流固耦合; 地震时程

中图分类号: TB12 **文献标志码:** A

Stress Calculated by Two Models of Large Storage Tank

Huang Wen, Tan Tiancai, Ma Janzhong

Qualification Laboratory of Safety Classified Equipment, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: Two methods for mutual verification calculation of simplified model and fluid solid coupling model are used in the stress analysis of the large storage tank. The calculation for pulsed liquid quality M_0 , the height of gravity of pulsed liquid H_0 , the height of gravity of liquid convection H_1 , and the equivalent stiffness k_1 of spring simulating slosh frequency of liquid convection is based on HOUSNER theory and as the input parameters of finite element model. FLUID80 elements are used in the fluid solid coupling model to model the fluid and SHELL181 elements to model the storage tank. Fluid solid coupling model considering the structure damp is used to calculate the response of the tank under seismic time history.

Key words: HOUSNER theory, Fluid solid coupling method, Seismic time history

0 引言

本文利用 HOUSNER 理论公式建立了大型储水罐的弹簧质量模型, 计算了该模型的模态与地震载荷下储水罐的应力。同时, 采用流固耦合的方法建立了水体模型, 通过水体模型的模态和地震时程下的应力响应与简化模型计算结果进行相互验证。

1 计算对象结构

本文计算对象为圆柱形罐体, 罐体高度 16 m, 半径 4.85 m。罐体中液体成分为水, 水的高度为 13.5 m。

2 简化参数计算

2.1 HOUSNER 理论计算公式

由 HOUSNER 理论发展适用于圆柱形容器的

计算方程如下, 参数说明见表 1。

$$U = \frac{R}{H} \quad (1)$$

$$Z = \frac{H}{R} \quad (2)$$

$$M_0 = M \times \frac{\tanh(1.7 \times U)}{1.7 \times U} \quad (3)$$

$$H_0 = 0.38 \times H \times \left[1 + 1.33 \times \left(\frac{M}{M_0} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

$$M_1 = M \times 0.71 \times \tanh\left(\frac{1.8 \times Z}{1.8 \times Z}\right) \quad (5)$$

$$H_1 = H \times (C \times U^2 + D \times U) \quad (6)$$

$$K = \frac{4.75 \times g \times M_1^2 \times H}{M \times R^2} \quad (7)$$

表1 模型参数计算结果

Table 1 Parameter Calculation Result of Model

参数	参数名称	值
R/m	罐体半径	4.85
H/m	液面高度	13.5
M_0/kg	脉冲液体质量	889214
H_0/m	脉冲液体重心高度	5.96
M_1/kg	对流液体质量	141287
H_1/m	对流液体重心高度	9.91
$K/N \cdot m^{-1}$	总体弹簧等效刚度	534844
$k_1/N \cdot m^{-1}$	单根弹簧等效刚度	4245
$n_1/层$	轴向上弹簧分布	7
$n_2/根$	同一环面弹簧数量	36

2.2 单根弹簧刚度计算

若弹簧沿容器高度分布 n_1 层, 每层弹簧沿容器径向上均布了 n_2 根, 那么分布的单根弹簧刚度 k_1 应满足: $n_1 n_2 k_1 / 2 = K (n_2 \geq 3)^{[3]}$ 。

2.3 模型参数

根据 HOURSNER 理论公式, 弹簧质量模型中各参数的值见表 1。

3 有限元模型

根据表 1 的数据建立弹簧质量模型; 流固耦合模型采用单元 fluid80 模拟流体, 壳单元 shell181 模拟结构, 耦合流固交界面上节点的法向位移。

4 地震时程

流固耦合模型采用时程分析, 分析中输入的地震时程由楼层反应谱转化而来。该时程曲线的采集频率是 100 Hz, 总时程是 20 s。

5 模态计算与分析

通过对 2 种模型的模态进行计算, 分别得到弹簧质量模型和流固耦合模型的一阶流体频率、一阶壳式频率以及一阶梁式频率见表 2。

通过表 2 可看出, 一阶流体频率相同, 一阶

表2 2种模型的基本频率

Table 2 Nature Frequency of Two Models

一阶频率/HZ	弹簧质量模型	流固耦合模型
流体频率	0.3	0.3
壳式频率	1.5	3.0
梁式频率	8.1	7.4

梁式频率很接近, 一阶壳式频率相差比较大, 这是由于弹簧质量模型将静水质量均布在 $0 \sim 11.92 m (2H_0/m)$ 高度的筒壁上, 与流固耦合模型中水质量的分布不相同, 影响了罐体的局部模态。

6 地震载荷作用下的应力计算

弹簧质量模型在地震载荷下的应力计算采用谱分析与残余质量相结合的方法。采用流固耦合模型, 根据地震时程曲线计算 20 s 的时间内罐体的应力响应。2 种模型应力计算结果见表 3。

表3 地震载荷作用下罐体应力计算

Table 3 Stress Calculation of Vessels under Earthquake

载荷	弹簧质量模型应力/MPa	流固耦合模型应力/MPa
地震	51.6	50.4

7 结论

利用弹簧质量模型与流固耦合模型对储水罐进行相互验证计算, 计算结果表明 2 种模型在一阶流体模态、一阶梁式模态和罐体根部应力的计算上相差不大, 但是对于罐体的壳式频率和应力分布上的差异较大。2 种计算方法各有优劣:

(1) 弹簧质量模型可以简化计算对象, 提高计算效率, 在对罐体倾覆、罐体根部应力计算等方面是适用的, 但是该模型对罐体局部影响较大, 无法真实反映出罐体的整体应力分布以及壳式模态, 因此对于需要分析罐体局部效应如屈曲问题上, 该模型是不适用的。

(2) 流固耦合模型可以真实反映出罐体整体的应力分布, 但是采用流固耦合模型的计算速度慢, 对计算机性能要求很高, 并且流体单元对网格要求很高, 对于带孔的罐体, 流固耦合的方法是不太容易建立有限元模型的。

参考文献:

- [1] HORSNER G W. Dynamic Pressure on Accelerated FluidContainers [J]. Bulletin of the seismological of America, 1957, 47 (1): 15-35.
- [2] HORSNER G W. The Dynamic Behavior of Water Tanks[J]. Bulletin of the Seismological of America, 1963, 53 (2): 381-387.
- [3] 居荣初, 曾心传. 弹性结构与液体的耦联振动理论[M]. 北京: 地震出版社, 1983, 40-138.
- [4] 苟兴宇, 王利本, 马兴瑞, 等. 圆柱贮箱中液体晃动的模态分析[J]. 宇航学报, 1998, 19(1): 72-76.

(责任编辑: 杨洁蕾)