

文章编号:1007-6492(1999)02-0080-03

## 大型储罐结构的动力性能分析

郭馨艳<sup>1</sup>, 曾桂香<sup>2</sup>, 王 伟<sup>1</sup>, 孙利民<sup>1</sup>

(1. 郑州工业大学数理力学系, 河南 郑州 450002; 2. 濮阳工业学校, 河南 濮阳 457000)

**摘 要:** 对 10 万 m<sup>3</sup> 大型储罐进行模型简化, 用有限元法对储罐进行自振特性分析, 研究了气体容量对储罐自振特性的影响. 计算了储罐在  $x$  方向输入 EL-Centro 地震波作用下的时程响应, 观察不同高度处的位移及应力分布情况, 所得结果可为储罐的地震破坏提供理论上的依据.

**关键词:** 储罐; 有限元; 自振特性; 地震响应

**中图分类号:** O 342 **文献标识码:** A

### 0 引言

储气(液)罐是大型的压力容器, 在石油、天然气的储存和运输方面起着至关重要的作用. 它们大都处在受压状态下, 内部常常储存易燃易爆有毒性的气体, 直接威胁着国家的利益和人民的生命安全.

储罐在地震作用下易发生破坏, 其震害表现有多种, 有些震害还未从理论上加以解释. 本文利用子空间迭代法和时程分析法对储罐进行动力性能分析, 为研究储罐在地震中的破坏现象提供理论分析依据.

### 1 计算模型

10 万 m<sup>3</sup> 储罐为立形圆柱体内浮顶储罐, 其壁是由薄壁型钢 Q235B 焊接而成, 底部锚固于地基上, 环向加筋角数 5, 纵向加筋角数 20. 柜内压力 5884 Pa, 底面面积 1547 m<sup>2</sup>, 外接圆直径 44.747 m, 底部至柜檐高度 74.581 m. 为了简化模型, 将拱顶复杂结构简化为具有同等质量的圆板, 并将储罐外连接设备、管道略去, 把储罐简化为光滑壁<sup>[2]</sup>, 储罐材料假定为各向同性. 假定筋与壁在径向和加筋方向位移连续. 模型单元由两种单元组成, 罐壁采用折板单元, 筋采用梁单元, 整个模型是由很多折板单元和梁单元粘合而成. 计算模型共有结点 127 个, 折板单元 120 个, 梁单元 200 个. 储罐全部是由钢材 Q235B 焊接而成. 罐壁厚

度 0.005 m, 筋为工字钢, 型号为 22b. 计算模型如图 1 所示.

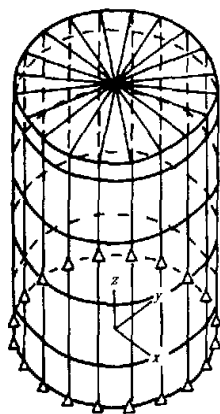


图 1 储罐计算模型简图

### 2 计算方法及基本理论

结构的动力分析同静力分析步骤一样, 首先进行单元划分, 然后求解单元刚度矩阵和质量矩阵. 坐标转换后组集单元刚度矩阵和单元质量矩阵, 得到整体刚度矩阵和整体质量矩阵<sup>[1]</sup>. 由此可得储罐结构的振动方程为

$$[M]\{\ddot{U}\} + [K]\{U\} = \{0\}, \quad (1)$$

式中:  $[M]$  为结构总质量矩阵;  $[K]$  为结构总刚度矩阵;  $\{U\}$  为节点位移列阵, 本文采用子空间迭代法求解上述动力方程.

储罐在地震作用下的动力方程为

收稿日期: 1999-01-05; 修订日期: 1999-03-30

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(984053000)

作者简介: 郭馨艳(1971-), 女, 河南省郑州市人, 郑州工业大学硕士研究生.

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{\ddot{U}_g\}, \quad (2)$$

式中:  $[C]$  为结构总阻尼矩阵;  $\{\ddot{U}_g\}$  为输入的地面运动加速度时程曲线. 采用振型迭加法计算储罐的地震响应, 阻尼矩阵采用瑞利阻尼理论

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  与  $\beta$  为比例常数. 在本文中输入 EL - Centro 地震波.

3 计算结果

为了考察储罐的动力特性, 就以下几种不同工况对储罐进行自振特性分析.

(1) 储罐在未存入气体时(工况 1), 空罐前 5 阶固有频率的计算值列于表 1. 从计算机绘制的振型图可以看出, 储罐的第 1 阶振型以弯曲振动为主, 第 2, 3, 4, 5, 6 阶振型反应了弯曲扭转耦合振动.

(2) 当储罐存有少量气体, 活塞的位置位于离底部 12 m 处(工况 2), 该工况下储罐结构的前 5 阶固有频率计算值列于表 1.

(3) 当储罐存有较多气体, 活塞的位置位于离底部 66 m 处(工况 3), 该工况下储罐结构的前

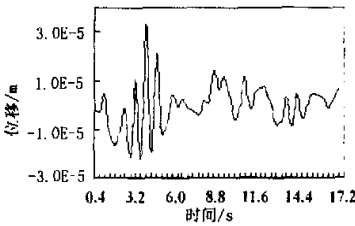
5 阶固有频率计算值列于表 1.

表 1 3 种不同工况下的自振特性计算结果 Hz

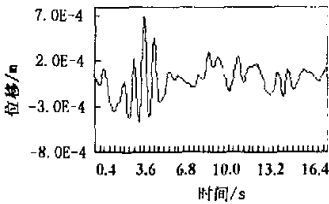
频率阶次	工况 1	工况 2	工况 3
1	1.106	0.018	0.018
2	3.985	1.106	1.406
3	3.986	4.577	4.923
4	4.012	4.578	4.924
5	4.012	4.744	5.001

对比不同工况下储罐结构的固有频率可以看出, 空罐和存有气体储罐结构的自振特性发生了很大的变化. 空罐的固有频率比存有气体储罐的固有频率大得多, 其振型图的变化也比存有气体储罐振型图变化得剧烈. 气体容量的不同造成的固有频率变化不大, 它们的振型图基本相似.

为研究储罐在地震作用下的响应, 给空罐在  $x$  方向输入最大幅值为 0.1 g (相当于地震烈度 7 度) 的 EL - Centro 地震波后, 计算储罐动力响应. 选取一侧进行分析, 输出结点 14 (储罐最底部), 116 (储罐上部) 在  $x$  方向输入 EL - Centro 地震波时,  $x$  方向位移地震响应及输出单元 10 (储罐底部), 90 (储罐顶部) 的竖向应力地震响应如图 2、图 3 所示.

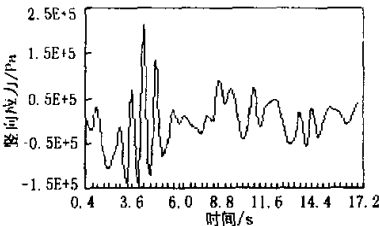


(a) 14 结点  $x$  方向反应曲线

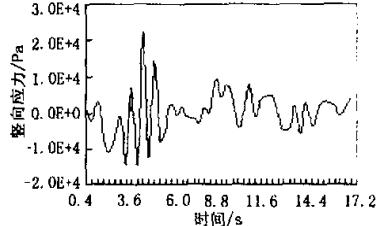


(b) 116 结点  $x$  方向反应曲线

图 2 储罐横向位移时程曲线



(a) 10 单元地震竖向应力反应曲线



(b) 90 单元地震竖向应力反应曲线

图 3 储罐竖向应力时程曲线

从计算结果可以看出, 储罐受到  $x$  方向输入 EL - Centro 地震波的响应过程中, 各结点变形规律基本一致. 结点在  $x$  方向的位移最大, 最大位移发生在顶部, 在最大地震波幅值为 0.1 g 时计

算值为  $7.07E - 04$  m. 各单元的竖向应力是横向应力的十几倍, 最大竖向应力和剪应力均发生在 2 单元 (结构底部), 分别为  $2.10E + 05$  Pa,  $6.51E + 05$  Pa. 值得说明的是, 本文采用储罐模型

是线性分析模型,结构的地震反应与最大地震波的幅值成正比,可按烈度要求改变地震波最大幅值<sup>[3]</sup>.

#### 4 结论

作为初步分析,本文是在没有考虑气体对储罐气-固耦合作用的前提下进行计算的,从计算结果可以得出以下结论:

(1) 储罐内未存入气体与储罐内存入气体两种工况相比,自振特性发生了很大变化.气体容量较少或较多两种工况下的自振特性变化不大.

(2) 储罐在地震过程中出现的“象足”等现象是由于竖向受压过大而造成的局部失稳.

(3) 从储罐在  $x$  方向输入 EL-Centro 地震波后的应力计算结果来看,底部所受的竖向应力和剪应力最大,上部受力较小.在储罐设计时建议不同部位采用不同型号的钢材,以减少不必要的浪费.

#### 参考文献

- [1] 罗定安.工程结构数值分析方法与程序设计[M].天津:天津大学出版社,1994.
- [2] 王翎羽,何玉敖,陈冠卿.储液罐在地震作用下的“象足”失稳分析[J].天津:天津大学学报,1992(4):78-84.
- [3] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,1988.

### Dynamic Analysis for Big Storage Using FEM

GUO Xin-yan<sup>1</sup>, ZENG Gui-xiang<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, SUN Li-min<sup>1</sup>

(1. Department of Mathematics, Physics & Mechanics, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China; 2. Puyang Industry School, Puyang 457000, China)

**Abstract:** In this paper, the big storage model of 100 thousand cubic meter has been simplified. The dynamic character is analyzed by using the finite element method and the volume function in storage destory is studied. Under the earthquake wave of  $x$  direction, the storage is analyzed in view of the distribution of displacement, stress in different height. The reliable foundation has been achieved.

**Key words:** storage tank; FEM; dynamic character; earthquake response

## 1999 年度河南省杰出青年科学基金评审揭晓

### 我校该项基金申报工作再结硕果

经河南省各学科专家小组评审、候选人答辩、评审委员会投票表决,1999 年杰出青年科学基金审核确定了 23 位获得者,我校有 3 位青年教师获此殊荣,同河南大学,洛阳工学院共居省高校之首.

杰出青年基金是我省资助经费较多、范围较广、类型较全面的科学技术基金.数理学科的杰出青年基金获得者,每位将获得 10 万元资助;其余学科的杰出青年基金获得者,每位将获得 15 万元资助.资助经费采取一次审定,3 年分期拨款.在今天的申报工作中,我校再获丰收,获准项目创历史最高水平,化学与化工学科的获得者为任保增副教授,材料学科的获得者为高丹盈教授,信息与工程学科的获得者为王宗敏副教授,3 位获得者均已取得博士学位,为我校的骨干青年教师.