

# 考虑液固耦合储液罐非线性地震反应分析

王翠翠<sup>1</sup>, 雷昕弋<sup>2</sup>

(1. 中铁工程设计院有限公司, 北京 100070; 2. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055)

**摘要:** 利用 ADINA 有限元软件研究了考虑液固耦合的立式圆筒形锚固储液罐非线性地震反应。通过分析计算 1000m<sup>3</sup> 储液罐自振特性, 储液罐的加速度峰值沿罐壁高度变化趋势, 罐壁的应力分布等反应, 初步揭示其破坏机理, 分析结果为储液罐的抗震设计提供重要的参考依据。

**关键词:** 有限元; 液固耦合; 储液罐; 非线性; 地震反应

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-8047(2011) 01-0019-04

## 0 前言

储液罐的地震破坏是地震次生灾害的主要原因<sup>[1-3]</sup>, 往往会造成火灾、爆炸、环境污染、燃油短缺等严重次生灾害, 使灾情大大加重, 所产生的人员伤亡和建筑毁坏数量相当惊人。例如, 1964年6月16日, 日本新潟地震中储液罐的破坏和电力故障导致整个油罐区起火, 造成极大经济损失。储油罐的火势迅速蔓延引起相邻的工厂发生新的火灾和爆炸, 成为第二火源, 进而引发更大的火灾。新潟炼油厂的整个厂区变成废墟, 80多个油罐报废, 造成500多人死亡, 75%的煤气管道和11座变电站遭到破坏。

因此, 储液罐的抗震研究成为普遍关注的课题。在60年代至80年代中期, 对锚固储液罐研究做了大量工作。其中, 最具深远意义的模型是1957年 Housner 提出的质量-弹簧系统模型<sup>[4]</sup>。由于 Housner 没有考虑罐壁的弹性变形与液体的耦联及储液罐与地基的相互作用, 其给出的地震剪力和地震弯矩偏低, 按其理论设计的美国大量储液罐在1964年阿拉斯加地震中遭到破坏, 从而促使人们去研究液体和罐壁的耦联振动问题, 即按柔性壁研究储液罐振动。1969年, Edwards 首次用有限元法在计算机上对储液罐-流体耦合系统的地震反应进行了数值模拟<sup>[5]</sup>。1974—1986年, 美国麻省理工学院在 Nash 教授的指导下, 用有限元法对圆柱形储液罐进行了多方面的研究<sup>[6,7]</sup>。他们在不计液体自由表面晃动的

前提下, 同时将不可压缩理想流体和柔性罐壁进行有限元离散, 罐壁作为弹性薄壳采用环形单元, 流体离散成矩形截面的环形单元, 最终将罐-液耦合问题简化成一个具有附加质量的空罐振动问题。他们用这种模型研究了空罐及各种液深的储液罐的动力反应、土壤作用的影响等, 并推广到具有弹性罐顶的情况。

多年来世界上许多国家的学者对此开展了大量研究, 取得了一系列有价值的研究成果, 但还存在一些问题有待进一步研究, 如储液罐的非线性液固耦合问题、储液罐的破坏机理等。随着 ADINA 等有限元分析软件的开发与发展, 对储液罐非线性动力响应分析提供了有效的分析计算工具。本文利用 ADINA 有限元分析软件实现了储液罐考虑液固耦合非线性地震反应分析, 通过算例初步研究储液罐的破坏机理, 对减小地震灾害具有重要的意义。

## 1 储液罐模型建立及自振特性分析

### 1.1 储液罐有限元模型

储液罐罐体采用四节点壳单元, 该单元可以用来模拟厚壳或薄壳结构。由于储液罐为薄壁构件, 所以采用该单元是恰当的, 单元如图1所示。储液罐采用的理想弹塑性本构关系为双线性随动硬化模型, 如图2所示。液体采用三维势流体单元, 本文所考虑的液固耦合是发生在两相交界面之上的。

收稿日期: 2010-12-11

作者简介: 王翠翠(1982—), 女, 辽宁鞍山人, 工学硕士, 助理工程师, 现主要从事结构设计。

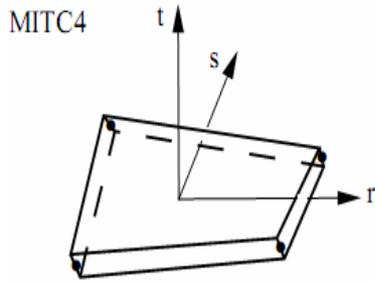


图 1 四节点壳单元

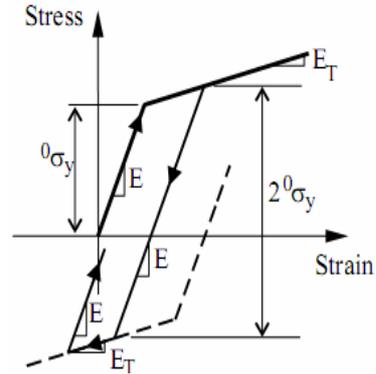


图 2 双线性随动硬化模型

储罐主要参数：1000m<sup>3</sup>立式锚固储液罐，直径 D=12m，储液罐高度 H=8.42m，罐壁和底板厚度 t=0.005m，罐壁和底板弹性模量 E=2.1×10<sup>11</sup>Pa，泊松比 ν=0.3，屈服强度 σ<sub>y</sub>=2.35×10<sup>8</sup>Pa，密度 ρ=7.8×10<sup>3</sup>kg/m<sup>3</sup>；液体密度 ρ<sub>l</sub>=1.0×10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>，液体体

积模量 K=2.1×10<sup>9</sup>Pa。

### 1.2 储液罐自振特性分析

本文分别对液面高度为储液罐高度的 90%、50%以及空罐建立了有限元分析模型。在不同液面高度情况下储罐前三阶自振周期如表 1 所示。

表 1 储罐—自振周期 (s)

阶数	空罐	50%液面高度	90%液面高度
1	0.0194	0.0756	0.1228
2	0.008361	0.0389	0.0589
3	0.007564	0.0266	0.0403

从上表可以看出，储液罐的自振周期随着储液罐液面高度的增加而逐渐增加。例如 90%液面高度的储液罐比空罐的自振周期大很多，说明了液体的加入改变了储液罐的自振特性。

## 2 储液罐地震反应分析

### 2.1 地震波输入及分析方法

为了考虑地震动特性对储液罐系统地震反应

的影响，本文选取了五条地震波，即迁安波、Parkfield 波、EI-Centro 波、Taft 波和天津波，并采用时程分析法对储液罐进行了分析。限于篇幅仅列出 EI-Centro 地震波，见图 3。

### 2.2 储液罐加速度峰值反应结果分析

由计算得到在五条地震波作用下，当地面加速度峰值为 400gal 时，不同液面高度储液罐水平方向加速度峰值绝对值沿罐高变化曲线（图 4—6）。

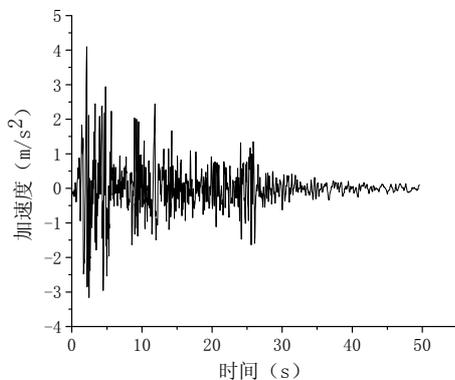


图 3 EI-Centro 波

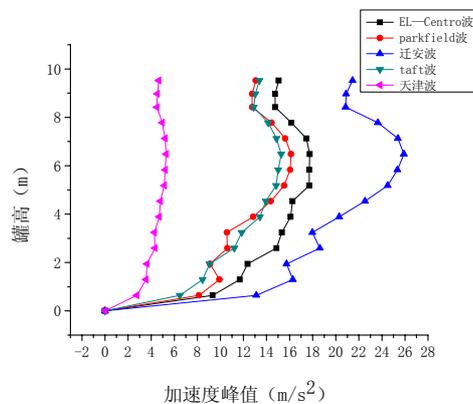


图 4 90%液面高度储罐加速度峰值沿罐高变化曲线

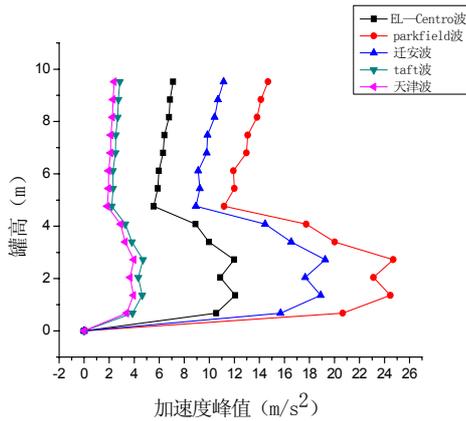


图 5 50%液面高度储罐加速度峰值沿罐高变化曲线

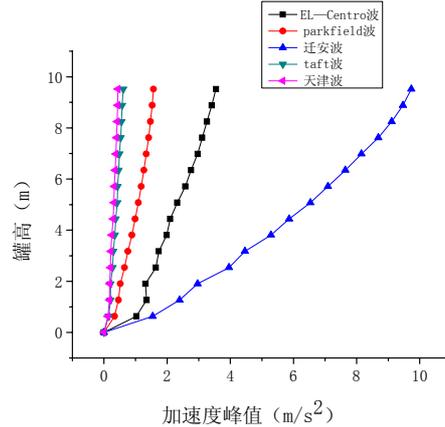


图 6 空罐加速度峰值沿罐高变化曲线

从图中变化趋势可以看出，不同液面高度的储液罐沿罐高加速度峰值变化不同。空罐时储罐沿罐高加速度峰值的最大值位于罐顶；90%液面高度时，储罐加速度峰值的最大值位于罐高的2/3附近，50%液面高度时，加速度峰值最大值位于罐高1/3附近。相同液面高度的储液罐在不同场地条件的地震波作用下加速度峰值不同，总的来说，在软弱场地天津波作用下比其它场地地震波作用下的加速度峰值反应要小，这主要是储罐的第一阶自振周期远离天津波卓越周期的缘故。不同液面高度的储罐其第一阶自振周期接近坚硬场地条件下地震波的卓越周期，所以在坚硬场地地震波作用下的加速度峰值

最大。

### 2.3 储液罐有效应力结果分析

储液罐的“象足”破坏现象和“菱形”破坏现象与储液罐的应力大小及分布有关，所以研究储液罐的应力是如何分布的，对于研究储液罐的破坏机理有重要意义。只有90%液面高度的储液罐进入了非线性，为了节省篇幅，主要给出90%液面高度的有效应力分析结果。

由计算得到，储罐在地面加速度峰值为620gal的迁安波、El-Centro波、Taft波作用下，90%液面高度的储液罐部分有效应力值达到屈服强度，具体结果见表2。

表 2 90%液面高度储罐屈服后有效应力最大值、出现时间及位置

输入地震波	迁安波	El-Centro 波	Taft 波
有效应力最大值 (Mpa)	250.284	246.543	239.711
有效应力最大值出现时间 (s)	3.61	4.68	9
有效应力最大值出现位置 (结点编号)	500、628	758、878	754

(注：有效应力是指折算为单轴应力试验中的应力。)

从表2可以看出，不同场地条件下，屈服后有效应力最大值相差不大，所对应的结点均位于距罐底部1m左右的位置。此外，还给出了不同地震波作用下储罐有效应力达到屈服的结点数量。在迁安波作用下，在3.47s-4.37s区间内有509个结点达到屈服强度；El-Centro波作用下，在3.62s-6.02s区间内有163个结点达到屈服强度；在Taft波作用下，只在9s和9.06s时刻有21个结点达到屈服强度。由此可以看出，在坚硬场地迁安波作用下储罐更容易进入屈服。

### 3 结束语

本文利用有限元软件ADINA对储液罐进行了在五条不同场地地震波作用下考虑液-固耦合的非线性地震反应分析，得到如下结论：

(1) 储液罐的自振周期随着储液罐液面高度的增加而增大。空罐的自振周期比有液体储液罐自振周期小很多，说明了液体对储液罐系统自振特性的影响很大。

(2) 在不同地震波作用下，不同液面高度的

储液罐沿罐高加速度峰值变化不同, 加速度峰值最大值的位置也不同。相同液面高度的储液罐在不同场地条件地震波作用下, 其加速度峰值不同。这与储液罐的自振特性有关。在软弱场地地震波作用下, 储液罐的加速度反应较小; 对于自振周期小的储液罐, 在坚硬场地地震波作用下, 其加速度峰值较大。

(3) 储液罐在地震波作用下, 应力达到屈服强度、材料进入塑性状态后, 其地震反应不仅与加速度峰值有关, 还与储液罐的液面高度、自振特性、场地条件有关。加速度峰值越大、液面高度越高储液罐越容易进入屈服状态, 进入屈服状态的节点数也越多。储液罐进入屈服状态的节点主要集中在靠近罐壁底部位置, 进入屈服后应力进行了重分布。

#### 参考文献:

- [1] 汤爱平, 欧进萍, 董莹. 生命线系统的震害特征及其对震后应急反应的影响[J]. 世界地震工程. 2000, 16(1): 84-88.
- [2] 高田至郎. 生命线系统的震害与对策[J]. 特种结构. 1997, 14(4): 25-30.
- [3] 罗奇峰. 日本兵库县南部地震中生命线系统的震害及其震后恢复[J]. 灾害学. 1997, 12(1): 43-48.
- [4] Housner G W. Dynamic Pressures on accelerated fluid containers[J]. Bulletin of the Seismological Society of America. 1957, 47(1): 15-35
- [5] Edwards H W. A Procedure for dynamic analysis of thin walled liquid storage tanks Subjected to lateral ground moments[D]. Ph.D Dissertatlion University of Michigan, 1969.
- [6] Shaaban S H and Nash W A. Finite Element Analysis of a Seismically Excited Cylindrical storage tank. Ground Supported and Partially Filled with Liquid[R]. Report To Nation Science Foundation University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts. 1976(7).
- [7] Daysal H and Nash W A. Soil structure interaction effects on the seismic behavior of Cylindrical liquid storage tanks[C]. Proc. 8th WCEE. San Francisco. Calif. 1984. (5): 223-229.

## Nonlinear Seismic Response Analysis of Liquid Storage Tanks Considering Liquid-solid Coupling

Wang Cuicui<sup>1</sup>, Lei Xinyi<sup>2</sup>

(1. *China Railway Engineering Design Institute CO., LTD, Beijing 100070*; 2. *China Railway Engineering Consultants Group, Beijing, 100055*)

**Abstract:** Using the finite element software of ADINA, nonlinear seismic response analysis of an anchored cylindrical liquid storage tank was performed taking into account the liquid-solid coupling effects. The dynamic vibration characteristics, the peak acceleration response tendency along the height of tank, and the stress distribution of the tank wall corresponding to a tank with a volume of 1000m<sup>3</sup> were investigated in order to reveal its failure mechanism. Proposals and recommendations were presented for the seismic design of liquid storage tanks.

**Key words:** finite element; liquid-solid coupling; liquid storage tanks; nonlinear; seismic response