

球形储液罐液-固耦联地震反应及减振方法

戴鸿哲, 王伟, 肖志刚

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, dairedstone@163.com)

摘要: 为了减轻球形储液罐在地震灾害中的损失, 基于 ANSYS 软件建立了考虑液体晃动的 1000 m^3 球形储液罐有限元模型, 研究了球形储液罐的地震反应以及液体晃动对地震反应的影响, 结果表明支撑体系是球形储液罐的薄弱环节, 为此通过引进被动控制技术和改变支撑角度的措施研究球形储液罐的减振方法. 数值分析结果表明, 被动控制技术对球形储液罐具有较好的减振效果, 改变支柱支承角度可以有效提高球罐的抗震性能.

关键词: 球形储液罐; 地震反应; 被动控制; 改进支撑

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)04-0515-06

Fluid-structure interactive seismic response and vibration dissipation method of spherical liquid-storage tank

DAI Hong-zhe, WANG Wei, XIAO Zhi-gang

(Harbin Institute of Technology, School of Civil Engineering, Harbin 150090, China, dairedstone@163.com)

Abstract: To alleviate the damage of spherical liquid-storage tank under earthquake, this paper performs seismic response analysis by building a finite element model with ANSYS for the tank, which involves fluid sloshing with the volume of 1000 m^3 . The effect of fluid sloshing on the seismic response is studied. The result shows that the support system is the weak link of the tank. Accordingly, this paper investigates the methods for dissipating the vibration energy by introducing the passive control technology and changing the angle of the support system. Numerical analysis result shows that the seismic response of the spherical liquid-storage tank can be effectively reduced by conducting passive control on the system of the tank, and the angle change of support system can improve the anti-seismic capacity of the tank effectively.

Key words: spherical liquid-storage tank; seismic response; passive control; improved support system

有关球形储液罐的抗震分析, 国内外学者进行了大量的研究^[1-7]. 球罐结构的荷载主要集中于球体中心, 且支柱结构属于弹性结构体系, 因此国内外的有关抗震设计标准和规范中, 均将球罐简化为单质点体系. 利用附加质量法, 忽略液体晃动效应以及液体对结构刚度的影响, 将动水压力作为一个附加质量加载在结构上, 该方法以其简单实用性已在抗震设计中广泛运用. 然而, 球形储液罐的振动是液固耦联振动, 所涉及的数学和力

学问题复杂, 早期的数值分析受到当时计算机硬件的制约, 程序难以编制, 工程上很难采用^[8-9]. 本文借助有限元分析软件 ANSYS 建立了考虑液体晃动的球形储液罐模型, 对球罐进行地震反应分析, 其计算结果更加接近实际. 在此基础上将被动控制技术运用到球罐的抗震中, 根据球罐地震反应特点, 在球罐结构体系的薄弱部位安装摩擦阻尼器与粘滞阻尼器, 以达到耗能减振的目的, 并分析了其减振效果和可行性. 最后对球罐结构体系抗震措施做进一步探讨, 尝试改变支柱支承角度, 分析改进后球罐的抗震性能, 确定了合理的抗震结构形式.

收稿日期: 2009-02-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50678056).

作者简介: 戴鸿哲(1980—), 男, 博士研究生.

王伟(1957—), 男, 教授, 博士生导师.

1 球形储液罐有限元模型建立

所建模型以容积为 1000 m^3 液化石油气球罐为原型. 在 ANSYS 软件中, 选用 Shell181 单元建立罐壁及各连接板模型、Shell63 单元建立支柱模型、Fluid80 单元建立罐内液体模型以及 Link10 单元建立斜撑拉杆模型. 所建的单元模型和接触单元模型如图 1 所示. 其中: 罐内储存液化石油气, 其密度为 480 kg/m^3 , 弹性模量为 $2.04 \times 10^9\text{ N/m}^2$, 粘滞系数为 0.001 13 Ns/m . 球壳材料采用 16MnR, 密度为 $7.85 \times 10^3\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 $2.06 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$, 泊松比为 0.3 , 考虑材料的非线性, 采用双线性强化模型, 屈服强度取 $2.15 \times 10^8\text{ N/m}^2$, 切线模量为 $2.06 \times 10^9\text{ N/m}^2$. 球壳的直径为 12.3 m , 壁厚为 0.034 m , 地面与球壳中心的距离为 8 m . 球罐由 10 根支柱支承, 选用 $\Phi 426 \times 10$ 钢管, 在相邻支柱间交叉布置拉杆, 截面直径为 0.056 m , 一共有 10 对, 以增强结构的稳定性. 支柱与球壳的连接处设有连接板, 其材料属性与支柱、拉杆相同, 密度为 $7.8 \times 10^3\text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $1.92 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$, 泊松比 0.3 . 材料非线性同样采用双线性强化模型, 支柱、耳板、连接板屈服强度均取 $2.15 \times 10^8\text{ N/m}^2$, 切线模量为 $2.06 \times 10^9\text{ N/m}^2$. 拉杆的屈服强度取 $4.9 \times 10^8\text{ N/m}^2$, 切线模量为 $2.06 \times 10^9\text{ N/m}^2$.

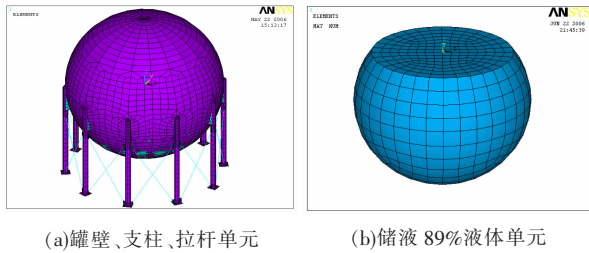


图 1 球形储液罐有限元模型

球罐是由球壳、支柱和拉杆组成的特殊结构, 在构造上焊接较多. 从地震破坏的实例来看, 球壳本身一般不易发生破坏, 支柱、拉杆、耳板和地脚螺栓等支撑结构才是薄弱环节. 例如, 拉杆被拉断、钢管支柱产生失稳, 支柱与拉杆之间连接板的两端焊缝拉裂, 支柱地脚螺栓被拉长或剪断等. 针对球罐的破坏特点, 本文主要研究图 2 所示球罐各点的地震反应.

2 球形储液罐地震反应分析

2.1 考虑液固耦联地震反应分析

对储液 89% 球罐进行时程分析, 输入三向地震动, 抗震设防烈度为 8 度. 选用的地震动为天津

波, 适合于三、四类场地, 加速度峰值为 0.2 g , 持续时间 10 s , 时间步长 t 为 0.02 s . 图 3 为输入地震波 5.3 s 时(发生最大位移时)球罐的水平位移云图, 相应地该时刻球壳等效应力、拉杆应力以及柱底竖向反力也发生最大值. 对于球壳, 在右侧与柱的连接处, 在内压和连接板拉力共同作用下产生的最大等效应力为 161 MPa , 低于屈服应力值 215 MPa . 所以在考虑地震荷载作用下球壳设计时, 壳的厚度都能够保证安全, 不易发生屈服破坏. 图 4 为地震输入 5.3 s 时, 所有拉杆的应力分布云图. 可以看出有一半的拉杆处于工作状态, 而另一半拉力为 0 , 其中前后两侧拉杆应力达到最大值, 这与实际情况相符.

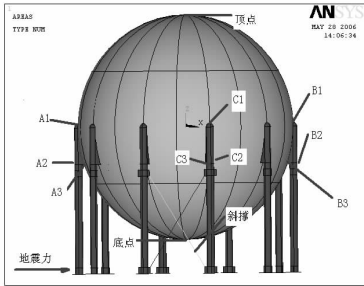


图 2 地震作用下主要危险点示意图

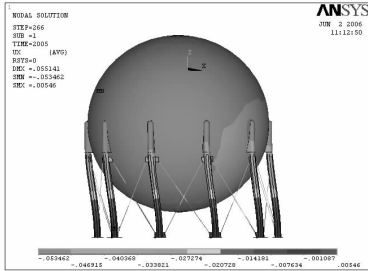


图 3 输入地震波 5.3 s 时球罐水平位移图

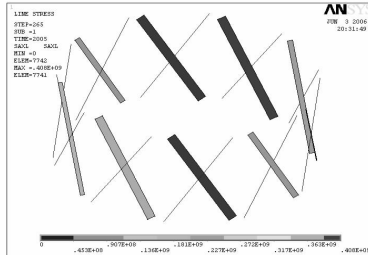


图 4 输入地震波 5.3 s 时各位杆应力分布云图

图 5 和图 6 为球罐左侧 A 柱底部竖向反力和剪力时程曲线, 可以看出, 在自重和内压载荷共同作用下球罐支柱竖向反力的最大值达到 1 538.25 kN , 并且在地震过程中产生了负向最大值 222.74 kN , 即竖向的拔出力最大值; 底部最大剪力为 197 kN . 拔出力是由拉杆上产生的拉力, 球壳倾覆力

矩在支柱上产生的拉力以及垂直地震荷载产生的向上拉力组成的. 为了把地震荷载从球罐支撑结构传递到基础上,一般支柱基础底板上设有地脚螺栓,拔出力主要作用在地脚螺栓上,同时地脚螺栓和抗剪板又要承担底部剪力,所以地脚螺栓为结构在地震作用下的较薄弱环节. 大量震害表现中,地脚螺栓被拉断或剪坏,就是因为拔出力和底部剪力过大而引起的.

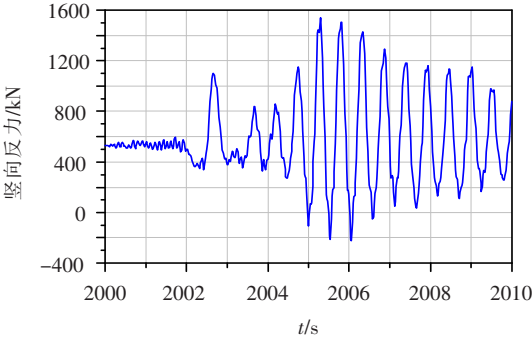


图 5 A 柱底竖向反力时程曲线

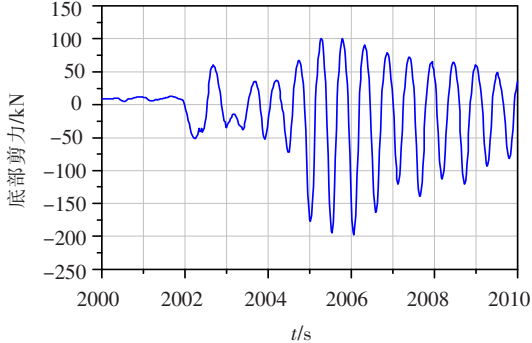
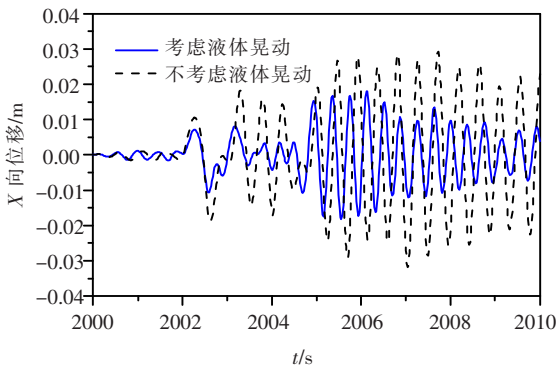


图 6 A 柱底部剪力时程曲线

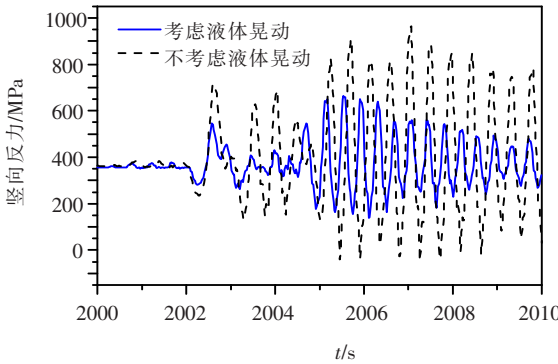
2.2 球形储液罐液体晃动影响分析

分别采用考虑液体晃动模型(model_1)和按附加质量方法不考虑液体晃动模型(model_2)对储液 50% 球罐进行时程分析,并将两种方法计算结果比较,从而分析液体晃动对球罐地震反应的影响. 输入一维地震动天津波(X 向),加速度峰值为 0.2 g,持续时间 10 s,时间步长 t 为 0.02 s,球罐内压为 1.6 MPa. 图 7(a)和(b)分别为球罐顶点位移时程和支柱底竖向反力时程曲线. 由图 7(a)可见,考虑液体晃动模型 1 球罐顶点最大位移为 18 mm,而不考虑液体晃动模型 2 球罐顶点最大位移为 32 mm,比模型 1 增加 78%;由图 7(b)可见,模型 2 的柱底竖向反力最大值为 963.9 kN,比模型 1 中柱底竖向反力最大值大 44.9%. 在单向地震动作用下,模型 1 位移、拉杆应力、柱底剪力以及竖向反力等各项指标衰减得更快. 显然,考虑液体晃动的计算结果比按等效质量方法

计算所得结果小很多.



(a)顶点位移时程



(b)支柱 A 底竖向反力时程

图 7 两种模型时程曲线

图 8 为支柱 A1 点的等效应力时程曲线,A1 点为上支柱盖板顶点与球壳连接点. 可以看出地震作用下,模型 1 和模型 2 的 A1 处最大应力值基本相当. 图 9 为支柱 D1 点的等效应力时程曲线,D1 点为下支耳与支柱连接点,模型 1 最大应力值为 179 MPa,模型 2 为 302 MPa,降低了 40.73%. 从球罐结构体系各连接处应力分析来看,支柱与球壳连接处应力变化不大,主要是受内压力作用,动液压力对该连接处的影响很小. 而支撑体系中连接处(上下支柱连接处、耳板与支柱连接处)应力值在考虑液体晃动后大幅度降低. 可见,是否考虑液体晃动对球罐进行地震反应计算差别很大,因此在进行球形储液罐的抗震设计时应充分考虑液体晃动对球形储液罐地震反应的影响.

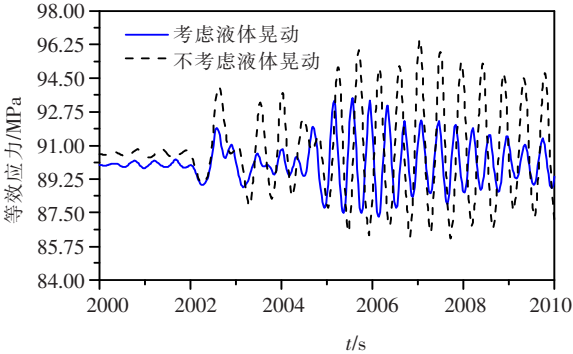


图 8 盖板与球壳连接处 A1 点应力时程

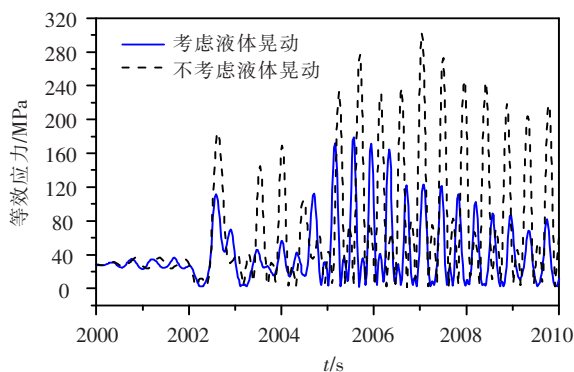


图9 下支耳与柱底连接处D1点等效应力时程

3 被动控制在球罐减振中的应用

本文以摩擦阻尼器和粘滞阻尼器为例研究被动控制在球罐减振上的效果. 主要方法是将原结构承受拉力的斜撑拉杆替换为拉压杆, 并在上面安装阻尼器, 从而达到被动耗能减振目的, 减轻结构的地震反应. 选取 COMBIN37 单元来模拟阻尼器. 摩擦阻尼器刚度设为 1.2×10^7 N/m, 起滑力为 8×10^4 N. 另外, 选取线性粘滞阻尼器, 确定粘滞阻尼系数为 $C_a = 600$ kN · (s/m). 然后将强震作用下被动控制结构与原结构的地震反应做比较. 按地震设防烈度为 9 度, 输入 X 向天津波, 并将峰值调整为 0.4 g. 此时, 球罐储液量为 89%, 内压为 1.6 MPa.

图 10 为 X 向天津波作用下安装摩擦阻尼器的结构和无控状态下球罐内右侧与罐壁相毗邻的液体竖向位移时程曲线. 在 X 向天津波作用下原结构液体的最大竖向位移为 0.72 m, 安装摩擦阻尼器后最大值为 0.52 m, 比原来减小了 28.6%. 液体自由晃动的自振周期基本没有改变, 约为 2.3 s. 由于阻尼器有效耗散地震能量, 控制后位移时程曲线变得更加平缓, 液体受地震作用影响变小. 图 11 为球罐左侧支柱竖向反力时程曲线. 控制后, 底部竖向反力最大值由 2 500 kN 减小到 705 kN, 降低了 71.8%; 在地震作用下, 原结构支柱底部产生的负向最大竖向力为 942 kN, 即向上

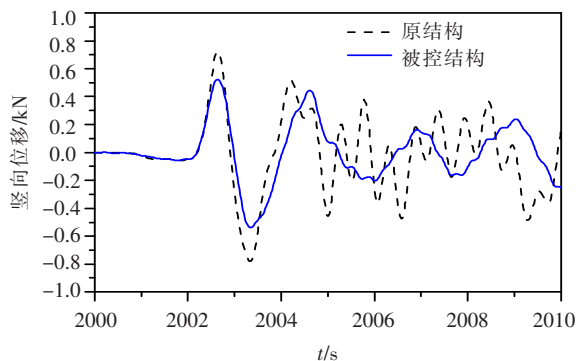


图10 液体竖向位移时程曲线

的拔出力, 在控制后没有出现负值, 消除了拔出力. 通过分析比较, 安装摩擦阻尼器后, 结构内力比无控下大幅度降低, 保证了大震作用下支撑体系各连接处构件的安全.

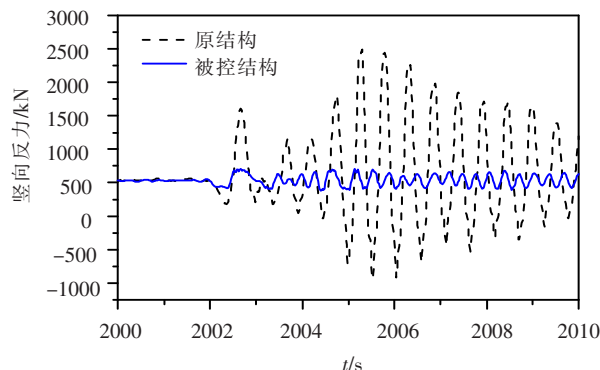


图11 左侧柱底部竖向反作用力时程曲线

图 12 为安装粘滞阻尼器的结构和无控状态下球罐 X 向顶点位移时程曲线, 球罐的顶点位移峰值由原来的 0.106 m 减小为 0.030 m, 降低了 71.7%, 取得了很好控制的效果. 图 13 为球罐左侧柱底部竖向反力时程曲线, 其峰值由 2 500 kN 减小到 682 kN, 降低 73%; 而且柱底不再产生向上拔出力, 而原来结构在地震作用下产生的最大的拔出力为 942 kN, 可见安装粘滞阻尼器后对结构内力控制明显.

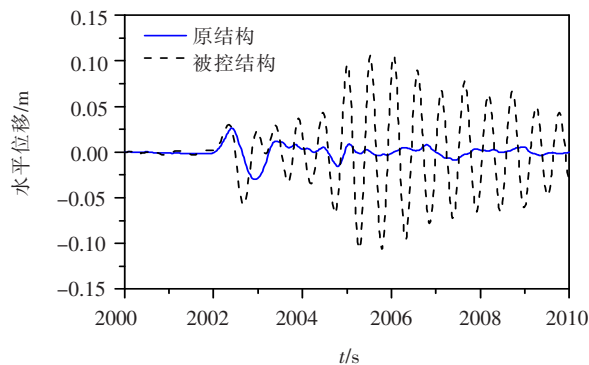


图12 球罐顶点X向位移时程曲线

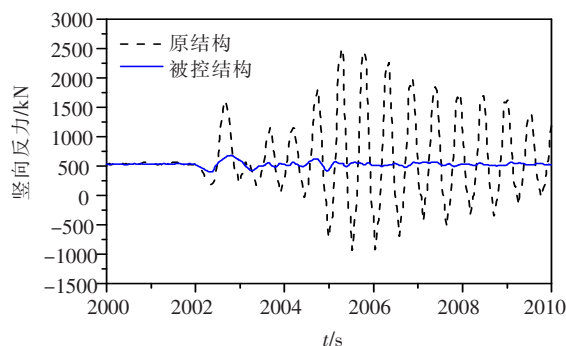


图13 A柱底部竖向反力时程曲线

4 改变支柱支撑角度

相间柱布置拉杆方案是大型球罐支撑形式之

一,将其运用到改变支柱支承角度结构体系中,在原来赤道正切柱式球罐基础上,将支柱底部向外侧移动,使每根支柱在支承球壳时都与地面水平方向夹角成锐角.首先建立有限元模型,结构的几何尺寸以及材料属性均与前述模型相一致,球壳中心到地面的距离仍然为 8 m.此模型支柱采用 pipe16 单元,考虑改进支柱后对结构地震反应的影响,主要是对球罐位移和内力的分析,故直接将拉杆连接在支柱上,忽略其间的连接板.以支承角度 10°为例,有限元模型如图 14 所示.

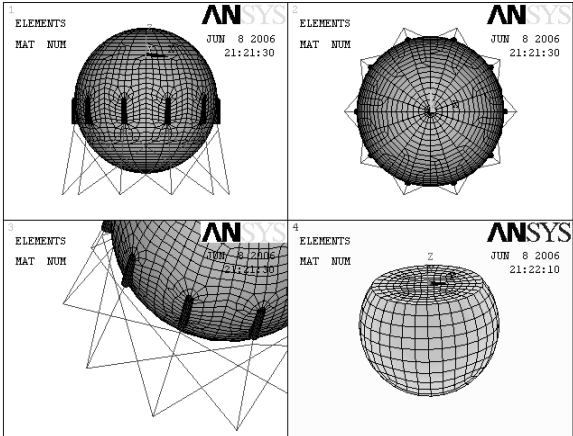


图 14 支柱与地面法向夹角为 10°球罐有限元模型

输入 X 向天津波,加速度峰值为 0.4 g.球罐储液量为 89%,内压为 1.6 MPa.图 15 为与右侧壳壁毗邻液体的竖向位移时程曲线,最大竖向位移从 0.728 m 减小到 0.569 m,降低了 21.8%.改变支柱角度后,曲线走势与原来基本相同,自由液面的特征周期保持不变.储罐液体自身动力特性保持不变,与改进球罐支撑体系无关.图 16 为球罐左侧 A 柱底部竖向反力时程曲线,可以看出竖向反力峰值由 2 500 kN 减小到 1 600 kN,降低 36%;柱底向上拔出力由 942 kN 减小到 335 kN,降低了 64.4%.

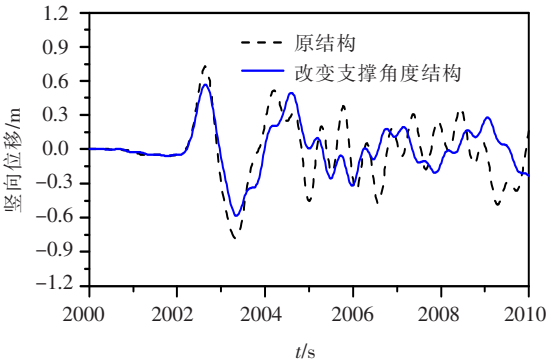


图 15 液体竖向位移时程曲线

利用上述方法,分别对支撑角度为 0°(拉杆中有预应力)、5°、15°和 20°时的球罐进行了时程分析,计算结果见表 1.表中给出了采用相间柱用施加预应力拉杆连接模型在支柱支承角度不同时的位移、速度、加速度、底部剪力和竖向反力峰值大小.当支柱支承角度为 0°时,与原结构相比没有减小地震反应,反而大大增加了底部剪力;而在不断增大支承角度后,抗震效果越来越好,底部剪力也逐渐减小,在 15°时地震反应最小;当继续增加角度时,底部剪力又开始增加,其他指标基本变化不大.综合以上分析,可以证明有角度支撑柱式支撑结构(支柱相间布置斜撑)比传统的赤道正切柱式球罐结构形式更加合理,当支承角度为 15°达到了最好的抗震效果.

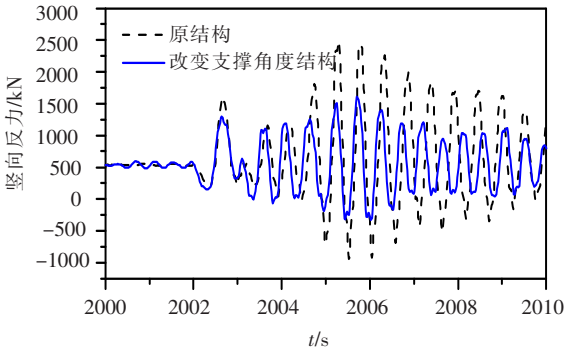


图 16 A 柱底部竖向反力时程曲线

表 1 改进支撑后球罐地震反应计算结果

角度	球罐顶点位移 反应峰值/m	球罐顶点速度 反应峰值/(m·s ⁻¹)	球罐顶点加速度 反应峰值/(m·s ⁻²)	A 柱底部剪力 反应峰值/kN	A 柱竖向反力 反应峰值/kN	球罐拉杆应力 反应峰值/MPa
原结构	0.11	1.32	15.200	401.0	2500	628
0°	0.12	1.31	14.740	913.0	2518	633
5°	0.09	1.08	14.300	863.0	2130	540
10°	0.05	0.68	8.510	581.0	1600	388
15°	0.03	0.46	6.348	371.8	1298	281
20°	0.03	0.42	6.160	411.0	1289	284

5 结 语

球壳本身在地震作用下是偏于安全的,而支撑

体系是结构的薄弱环节,如拉杆、地脚螺栓等,在抗震设计中应保证其足够的强度.基于此特点进行了球罐减振方法的研究:在其拉杆处分别安装摩擦阻

尼器和粘滞阻尼器,可以起到非常好的减振效果;此外改变支柱支承角度同样可以提高球罐的抗震性能,当支柱支承与垂直(地面法向)方向为 15° 时,结构形式比较合理,抗震效果最好。

参考文献:

[1] 沈利英, 沈士明. 大型储罐地震动力响应研究综述[J]. 压力容器, 2008, 25(9): 49 – 53.

[2] CHO J R, SONG J M, LEE J K. Finite element techniques for the free-vibration and seismic analysis of liquid-storage tank [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2001, 37(6 – 7): 467 – 483.

[3] PANIGTAHY P K, SAHA U K, MAITY D. Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks [J]. Ocean Engineering, 2009, 36(3 – 4): 213 – 224.

[4] 范德宝, 肖志刚. 球形储液罐地震反应分析[J]. 低

温建筑技术, 2008, 126(6): 88 – 90.

[5] LAY K S. Seismic coupled modeling of axisymmetric tanks containing liquid [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(9): 1747 – 1761.

[6] PAPASPYROU S, VALOUGEORGIS D, KARAMANOS S A. Refined solutions of externally induced sloshing in half – full spherical containers [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(12): 1369 – 1379.

[7] IBRAHIM R A, PILIPCHUK V N, IKEDA T. Recent advances in liquid sloshing dynamics [J]. Applied Mechanics Review, 2001, 54(2): 133 – 177.

[8] 李永泰, 黄金国. 球形储罐的分析设计[J]. 压力容器, 2003, 20(5): 34 – 36.

[9] 温德超, 郑兆昌, 孙焕纯. 储液罐抗震研究的发展[J]. 力学进展, 1995, 25(1): 60 – 71.

(编辑 赵丽莹)

(上接第 514 页)

[5] LAY T, KANAMORI H. An asperity model of great earthquake sequences [C]//Earthquake Prediction – An International Review, Geophysical Monograph Series, American Geophysical Union. Washington D. C: American Geophysical Union, 1981: 14.

[6] TSAI P C C. Ground motion modeling for seismic hazard analysis in the near-source regime: An asperity model [J]. Pure and Applied Geophysics, 1997, 149: 265 – 297.

[7] ANDREWS D J. A stochastic fault model: 1. Static case [J]. Journal of Geophysical Research, 1980, 85: 3867 – 3877.

[8] ANDREWS D J. A stochastic fault model: 2. Time-independent case [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86: 10821 – 10834.

[9] ZENG Y H, ADERSON J G, GUANG Y. A composite source model for computing realistic synthetic strong ground motions reference [J]. Geophysical Research Letters, 1994, 21(8): 725 – 728.

[10] HISEDE Y. A theoretical omega-square model considering the spatial variation in slip and rupture velocity. Part 2: case for a two – dimensional source model [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(4): 651 – 666.

[11] WANG H Y. Finite Fault Model Source Model for Predicting Near-Field Strong Ground Motion [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics China Earthquake Administration, 2004.

[12] SOMERVILLE P G, IRIKURA K, GRAVES R W, WALD D, ABRAHAMSON N, IWASAKI Y, KAGAWA T, SMITH N, KOWADA A. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion [J]. Seismological Research Letters, 1999, 70(1): 59 – 80.

[13] GALLOVIC F, BROKESOVE J. On strong ground motion synthesis with k^{-2} slip distributions [J]. Journal of Seismology, 2002, 8(2): 211 – 224.

[14] 欧进萍, 王光远. 结构随机振动[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

[15] 孙晓丹. 震源对大跨度空间结构地震动输入的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.

[16] 陶夏新, 孙晓丹. 九龙江断裂上 6 级强烈地震引起的漳州盆地及周边地区地震动预测工作报告[R]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

[17] 陶夏新, 孙晓丹. 兰州市活断层地震危害性评价工作报告[R]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

(编辑 赵丽莹)