

沈朝勇, 郑俊杰, 卢民鹤. 近场地震作用下大型储罐三维隔震地震响应分析[J]. 华南地震, 2017, 37 (4): 66-71. [Shen Chaoyong, Zheng Junjie, Lu Minhe. Seismic Response Analysis of Large 3D Isolation Storage Tanks Subjected to Near Field Earthquake [J]. South China journal of seismology, 2017, 37(4): 66-71.]

近场地震作用下大型储罐三维隔震地震响应分析

沈朝勇, 郑俊杰, 卢民鹤

(广州大学工程抗震研究中心, 广州, 510405)

摘要: 为研究近场多维地震作用下三维隔震储罐的动力响应, 采用 ADINA 软件建立了 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐的有限元模型, 选取弹簧单元模拟三维隔震支座, 分别输入水平与竖向的近场地震动, 定量分析了其动力响应。分析结果显示: 对于大型储罐应当考虑竖向地震作用; 三维隔震装置可以有效降低储罐的动力响应, 但是对晃动波高无控制效果; 近场竖向地震作用下的晃动波高幅值很小, 实际工程中可以忽略不计。

关键词: 近场; 三维隔震; 储罐; 时程分析; ADINA

中图分类号: TU352.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2017) 04-0066-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.04.012

Seismic Response Analysis of Large 3D Isolation Storage Tanks Subjected to Near Field Earthquake

SHEN Chaoyong, ZHENG Junjie, LU Minhe

(Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: In order to study the dynamic response of three dimensional isolation tank subjected to near field earthquake, a finite element model of $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ tank was established, and the ADINA software program was adopted. During the dynamic response analysis, the spring element was selected to simulate three-dimensional isolator, the horizontal and vertical near field ground motion were input respectively. The results show that: the seismic response of the large tank should consider the influence of the vertical earthquake. The three dimensional isolation system can effectively reduce the dynamic response, but has no control effect on the sloshing height. The amplitude of the sloshing height is very small, and can be ignored in actual engineering

Keywords: Near field; 3D isolation; Tank; Time history analysis; ADINA

收稿日期: 2017-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578168)资助

作者简介: 沈朝勇(1972-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事防灾减灾及防护工程方面的研究。

E-mail: shency@gzhu.edu.cn.

通信作者: 郑俊杰(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事防灾减灾及防护工程方面的研究。

E-mail: zhengjunjiawangyi@163.com.

0 引言

随着我国工业化进程的加速，对石油、天然气等资源的需求量越来越大，立式圆筒型储罐也逐渐向大型化发展。大型立式圆筒型储罐作为一种薄壁储液结构，在地震作用下容易遭到破坏^[1-5]。伴随着罐体破坏的是内部易燃、易爆、有毒介质的泄露，极易引发火灾爆炸等严重的次生灾害，因此必须保障大型储罐在地震作用下的安全^[6-10]。

许多学者运用土木工程中的基础隔震措施来降低储罐的地震响应：KIM N S^[11]通过理论研究分析了带有铅芯橡胶支座的立式储罐在水平地震激励下的动力响应，研究结果显示铅芯橡胶支座能大幅降低储罐的地震响应；Malhotra P K^[12-14]定量对比分析了隔震前后储罐罐壁的应力，发现基础隔震可以显著减小地震作用下罐壁的轴向应力；刘伟兵^[15]对考虑 SSI(土与结构的相互作用)效应的隔震储罐进行了动力响应分析，提出考虑 SSI 效应会使隔震储罐的地震响应增大；孙建刚^[16-21]对储罐隔震做了大量的理论和实验研究，结果表明隔震周期和隔震层阻尼比是影响其动力响应的主要因素，不同体积与高径比的储罐存在不同的隔震参数优化区间。

以上研究都集中在水平向地震激励下，所采用的隔震措施也均为一维隔震装置，在隔离了水平向地震动之后，竖向地震动引起的液固耦联振动会成为储罐破坏的重要原因，且近场地震动的长周期脉冲效应会加剧这种破坏，本文将三维隔震系统引入储罐隔震中，来进一步降低近场三维地震作用下储罐的动力响应。

1 大型储罐的有限元模型

本文研究的15×10⁴ m³ 储罐的参数为：底面半径为 50 m，底板中副板 11 mm，边缘板 23 mm；总高度 21.7m，储液高度 20.1 m，罐壁沿着高度方向分为 8 层如表 1 所示。物理参数为：罐内液体密度为 1 000 kg/m³；罐壁钢材密度为 7 800 kg/m³，弹性模量为 2.1×10¹¹ N/m²，泊松比为 0.3，屈服强度为 4.9×10⁸ N/m²，剪切模量为 2.15×10⁹ N/m²。

大型立式储罐属于薄壁储液结构，罐壁采用四节点等参 Shell 单元来模拟，罐内液体采用 8 节点 3 维势流体单元模拟，当设置了自由液面之后，软件能够自动找到流固耦合边界，采用 spring 单元模拟三维隔震支座，所建立的有限元模型如图 1、2 所示。

表 1 罐壁高度与厚度
Table 1 The wall thickness and height

罐壁层次	高度/m	厚度/mm
底	2.98	40
2	2.68	33
3	2.68	26
4	2.68	22
5	2.68	17
6	2.66	12
顶	2.66	12

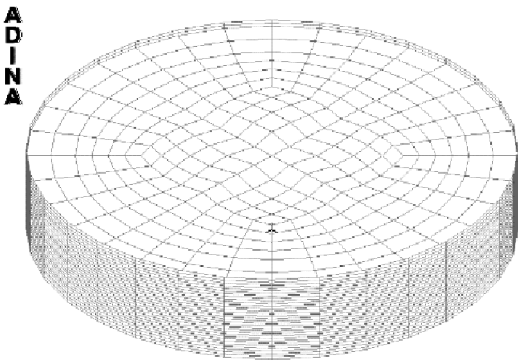


图 1 储罐有限元模型
Fig.1 Finite element model of tank

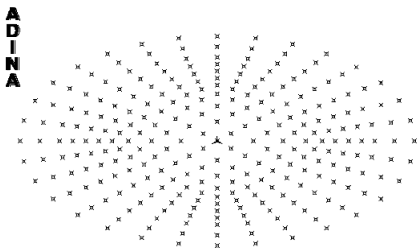


图 2 隔震层有限元模型
Fig.2 Finite element model of isolation story

水平与竖向隔震周期 T 都取为 2 s，隔震层阻尼比 ξ 都取为 0.1，隔震层采用等效线性化的模型，其刚度 K 与阻尼系数 C 的计算公式为：

$$K=(\frac{2\pi}{T})^2 \cdot m \tag{1}$$

$$C=\frac{4\pi}{T} \cdot \xi \cdot m \tag{2}$$

其中 m 为储罐的总质量， T 为隔震周期， ξ 为隔震层阻尼比，计算所得到的参数为隔震层的总的水平、竖向的刚度与阻尼，将其平均分配给罐底面的节点，得到每个节点所对应的弹簧阻尼单元的刚度 K_x 、 K_y 、 K_z 和阻尼系数 C_x 、 C_y 、 C_z 如表 2 所示。

表 2 弹簧单元的参数

Table 2 Parameter of spring element

K_x 、 K_y 、 K_z	C_x 、 C_y 、 C_z
$5.417\ 3 \times 10^6$	$3.450\ 5 \times 10^5$

2 地震波的选取

近场地震波选取水平和竖向的 ELcentro array#4 波, 水平向加速度峰值调整为 0.4 g, 水平向与竖向加速度峰值比按照 1:0.65 取值, 时程分析选择 ADINA 中的 Newmark 法, 采用重启动计算的方法, 前 1 s 为静力分析, 动力分析在静力分析的基础上进行, 动力分析总时长取 10 s, 调整后的地震波如图 3、4 所示。

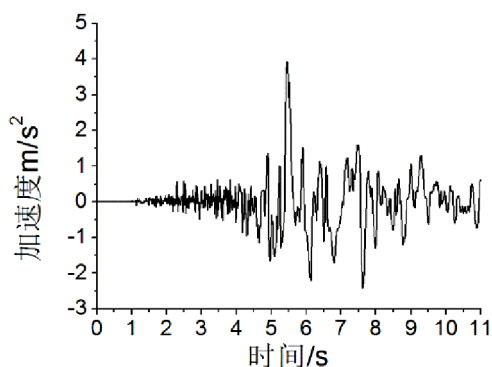


图 3 水平向地震波

Fig.3 Horizontal seismic wave

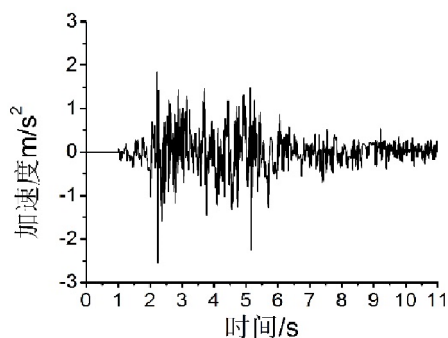


图 4 竖向地震波

Fig.4 Vertical seismic wave

3 数值分析

3.1 近场水平向地震作用下动力响应分析

三维隔震储罐与非隔震储罐在近场水平向地震作用下的罐壁轴向动应力、环向动应力峰值沿罐壁高度变化的情况如图 5、6 所示。其最大值列在表 3 中。

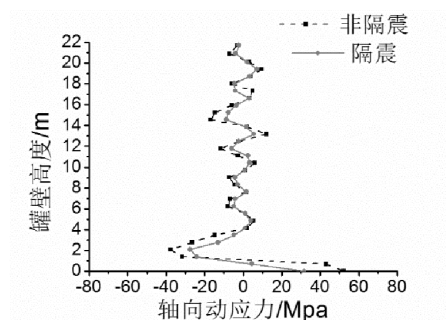


图 5 轴向动应力

Fig.5 Axial dynamic stress

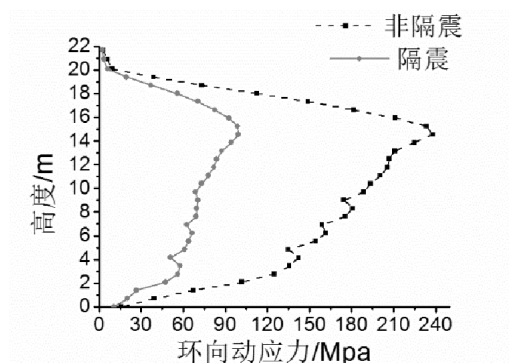


图 6 环向动应力

Fig.6 Hoop dynamic stress

表 3 轴向与环向应力最大值

Table 3 Peak value of axial and hoop dynamic stress

类型	轴向动应力	环向动应力
非隔震	52.19 Mpa	237.99 Mpa
隔震	31.71 Mpa	99.29 Mpa
减震率	39.2 %	58.3 %

从图 6 可以看出, 近场水平向地震作用下罐壁环向动应力的峰值部分集中在储罐的中上部分, 这个部位在地震中容易发生液固耦联振动, 产生应力集中效应。从表 3 可以看出: 与非隔震储罐相比三维隔震储罐的罐壁轴向动应力从 52.19 Mpa 降低到了 31.71 Mpa, 环向应力从 237.99 Mpa 降低到了 99.29 Mpa, 作为主控应力的环向动应力减震率高达 58.3%, 减震效果良好。

近场水平向地震作用下, 沿罐壁高度方向的加速度包络曲线为图 7, 动液压力曲线如图 8 所示, 相应的峰值见表 4。

从图 7、8 和表 4 可以看出: 近场水平向地震作用下, 三维隔震储罐沿罐壁高度方向的加速度降低幅度较大, 整体呈现平动的趋势, 由近场水平向地震作用引起的动液压力也从 91.90 Kpa 降低到 38.03 Kpa, 减震率为 58.6%。

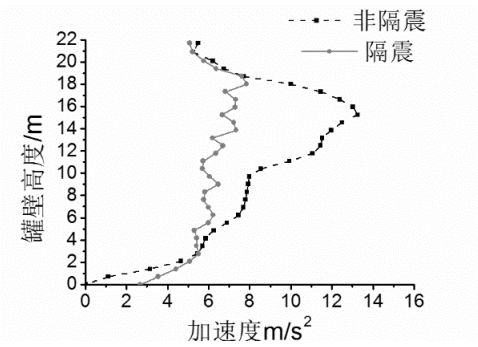


图 7 加速度峰值
Fig.7 Peak value of acceleration

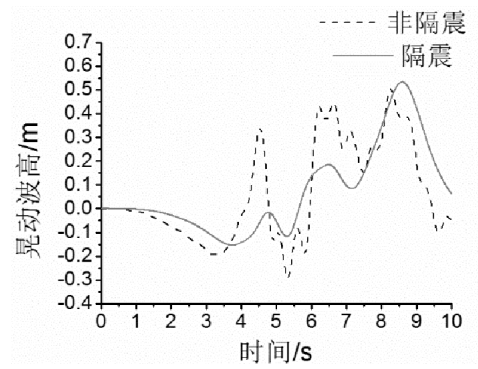


图 10 晃动波高时程曲线
Fig.10 Time history curve of sloshing height

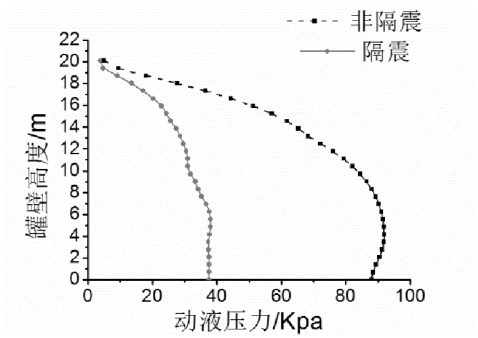


图 8 动液压力
Fig.8 Dynamic pressure

表 4 加速度与动液压力峰值 Table 4 Peak value of dynamic pressure and acceleration		
类型	加速度峰值	动液压力峰值
非隔震	13.26m/s ²	91.90 Kpa
隔震	7.84m/s ²	38.03 Kpa
减震率	40.9 %	58.6 %

近场水平向地震作用下非隔震与三维隔震储罐的基底剪力、晃动波高的时程曲线如图 9、10 所示，对应的峰值如表 5 所示。

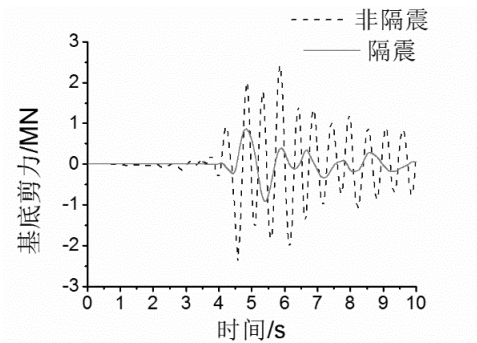


图 9 基底剪力时程曲线
Fig.9 Time history curve of base shear

表 5 基底剪力与晃动波高峰值 Table 5 Peak value of base shear and sloshing height		
类型	基底剪力峰值	晃动波高峰值
非隔震	2.42×10 ⁸ N	0.506 m
隔震	9.18×10 ⁷ N	0.535 m
减震率	62.1%	-5.7%

从表 5 可以看出，近场水平向地震作用下，三维隔震装置可以显著降低基底剪力的峰值，减震率高达 62.1%，但是对晃动波高起放大作用，其减震率为负值，原因是：根据 Haroun-Hosner 的相关理论，立式储罐可以简化为三质点的模型，从下到上依次为刚性脉冲质点、柔性脉冲质点、对流晃动支点，其中流晃动质点属于长周期分量，刚性、柔性脉冲质点为短周期分量，刚性、柔性脉冲质点所贡献的地震基底剪力占总基底剪力的主要部分，因此基础隔震措施可以延长刚性、柔性脉冲质点的自振周期从而降低基底剪力，而对流晃动分量本身就是长周期分量，无法通过延长其自振周期来降低其动力响应，晃动波高呈放大现象。

3.2 近场竖向地震作用下动力响应分析

非隔震与带三维隔震支座的储罐在近场竖向地震作用下的沿罐壁高度方向的轴向动应力峰值与环向动应力峰值如图 11、12 所示，轴向、环向动应力的最大值见表 6。

从图 11、12 和表 6 可以看出，在近场竖向地震作用下，带三维隔震支座的储罐的轴向动应力从 18.91 Mpa 降低到了 5.25 Mpa，减震率为 72.2%，环向动应力在储罐中上部达到最大值，其减震率为 47.6%，通过对比近场水平和竖向地震作用下的主控应力环向应力可以看出，竖向地震作

用下的非隔震环向动应力为 62.05 Mpa, 水平地震作用下的环向动应力为 237.99 Mpa, 竖向向地震作用产生的环向动应力达到了水平向的 26.1%, 占到较大比例, 因此在近场地震作用下对于 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的大型立式储罐应当考虑竖向地震动对其动力响应的影响。三维隔震装置对于隔离近场竖向地震动产生的轴向、环向动应力效果显著。

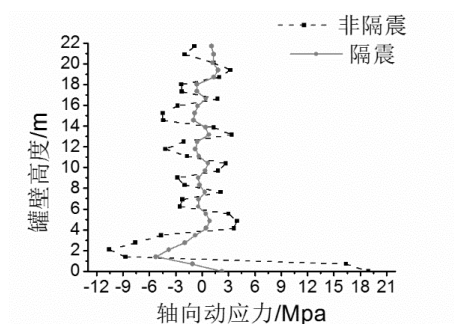


图 11 轴向动应力

Fig.11 Axial dynamic stress

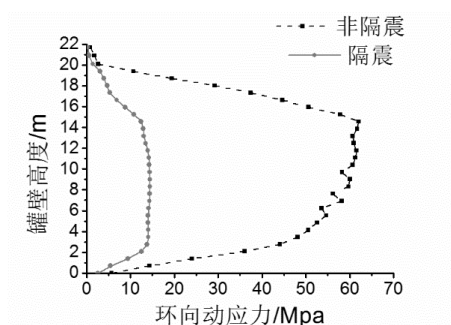


图 12 环向动应力

Fig.12 Hoop dynamic stress

表 6 轴向、环向动应力最大值

Table 6 Peak value of axial and hoop dynamic stress

类型	轴向动应力	环向动应力
非隔震	18.91 Mpa	62.05 Mpa
隔震	5.25 Mpa	14.46 Mpa
减震率	72.2%	47.6%

非隔震与三维隔震储罐在近场竖向地震作用下沿罐壁高度变化的加速度、动液压力峰值如图 13、14 所示, 对应的最大值如表 7 所示。

从图 13、14 和表 7 可以看出, 近场竖向地震引起的液固耦联振动会对罐壁产生一个峰值为 15.81 m/s^2 的水平向加速度, 在三维隔震储罐中这个值降低到了 1.01 m/s^2 , 三维隔震装置可以明显降低近场竖向地震引起的水平向加速度, 动液压力减震率为 63.2%, 减震率效果良好。

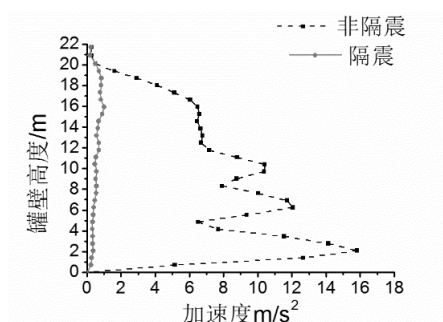


图 13 加速度峰值

Fig.13 Peak value of acceleration

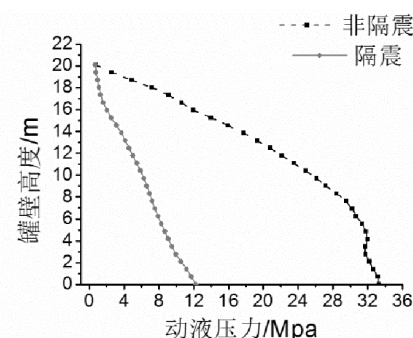


图 14 动液压力

Fig.14 Dynamic pressure

表 7 加速度与动液压力最大值

Table 7 Peak value of dynamic pressure and acceleration

类型	加速度	动液压力
非隔震	15.81 m/s^2	33.29 Kpa
隔震	1.01 m/s^2	12.26 Kpa
减震率	93.6%	63.2%

非隔震与三维隔震储罐在近场竖向地震作用下的罐壁水平向峰值加速度的时程曲线、晃动波高时程曲线如图 15、16 所示。

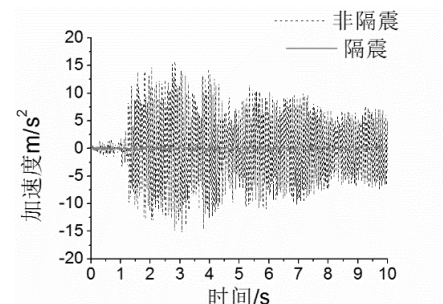


图 15 加速度时程曲线

Fig.15 Time history curve of base shear

图 16 中近场竖向地震作用下非隔震储罐的晃动波高为 0.027 m, 带三维隔震支座的储罐的液面晃动波高为 0.084 m, 隔震之后晃动波高呈放大现

象,近场水平地震作用下隔震、非隔震的晃动波峰值分别为 0.506 m 和 0.570 m,与水平地震作用之下的晃动波高相比,竖向地震作用下的晃动波高值很小,工程中可以忽略不计。

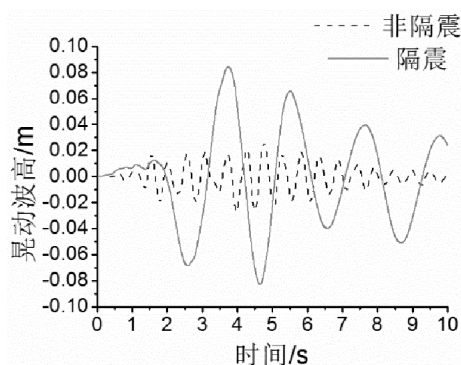


图 16 晃动波高时程曲线

Fig.16 Time history curve of sloshing height

4 结语

本文通过定量对比分析各个工况下大型储罐的动力响应,得到以下结论:

(1) 近场竖向地震作用下产生的环向动应力较大,大型储罐在实际工程中应当考虑近场竖向地震用。

(2) 三维隔震装置可以显著降低近场水平、竖向地震作用下的地震响应,但是对晃动波高无控制效果。

(3) 近场竖向地震作用下隔震与非隔震的晃动波高与水平地震作用下的相比,其值很小,工程中可以忽略不计。

参考文献:

- [1] Palmer S C. Stresses in storage tanks caused by differential settlement[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering 1989-1996, 1994, 208(15): 5-16.
- [2] Shrimali M K, Jangid R S. Seismic analysis of base-isolated liquid storage tanks [J]. Journal of Sound & Vibration, 2004, 275(1-2): 59-75.
- [3] Haroun M A, Abou-Izzeddine W. Parametric Study of Seismic Soil-Tank Interaction. I: Horizontal Excitation[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(3): 783-797.
- [4] Jacobsen L S. Impulsive hydrodynamics of fluid inside a cylindrical tank and of fluid surrounding a cylindrical pier [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1949, 39(3): 189-204.
- [5] Jacobsen L S, Ayre R S. Hydrodynamic experiments with rigid cylindrical tanks subjected to transient motions [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1951, 41(4): 313-346.
- [6] 赵福君, 孙建刚, 赵晓磊, 等. 15×10~4m~3 储罐的动特性分析[J]. 世界地震工程, 2008, 24(3): 76-80.
- [7] 王振, 袁朝庆, 孙建刚. 立式钢制储罐隔震抗震设计的工程化方法[J]. 世界地震工程, 2000, 16(4): 92-95.
- [8] 韦树莲. 必须重视大型石油储罐的抗震问题 [J]. 国际地震动态, 1995(3): 17-21.
- [9] 王永岗, 吕英民, 张对红, 等. 储液罐抗震研究[J]. 油气储运, 1999, 18(6): 1-7.
- [10] 于洋. 储罐减震耗能有限元数值模拟分析[D]. 大庆石油学院, 2002.
- [11] Kim N S, Lee D G. Pseudo dynamic test for evaluation of seismic performance of base-isolated liquid storage tanks [J]. Engineering Structures, 1995, 17(3): 198-208.
- [12] Malhotra P K. Method for seismic base isolation of liquid-storage tanks [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(1): 113-116.
- [13] Malhotra P K. New method for seismic isolation of liquid-storage tanks [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 1997, 26(8): 839-847.
- [14] Malhotra P K. Seismic strengthening of liquid-storage tanks with energy-dissipating anchors [J]. Journal of structural engineering, 1998, 124(4): 405-414.
- [15] 刘伟兵, 孙建刚, 崔利富, 等. 考虑 SSI 效应的 15×10~4 m~3 储罐基础隔震数值仿真分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(06): 153-158.
- [16] 孙建刚, 郝进锋, 刘扬, 等. 考虑摆动效应的立式储罐隔震分析简化力学模型[J]. 振动与冲击, 2016, 35(11): 20-27.
- [17] 孙建刚, 崔利富, 赵长军, 等. 15×10~4m~3 立式储罐隔震设计分析[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(04): 153-158.
- [18] 孙建刚, 王向楠, 赵长军. 立式储罐基底隔震的基本理论[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(04): 639-643.
- [19] 孙建刚, 齐晗兵, 王莉莉. 双参数立式储罐隔震设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008(06): 970-973.
- [20] 孙建刚, 王振, 袁朝庆. 储罐隔震设计简化分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2001(02): 157-160.
- [21] 孙建刚, 郝进锋, 王振. 储罐基底隔震振型分解反应谱计算分析研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(5): 649-651.