

毛景远, 沈朝勇, 黄襄云, 等. 近场地震下立式隔震储罐试验研究及理论分析[J]. 华南地震, 2018, 38 (4): 90-95. [MAO Jingyuan, SHEN Chaoyong, HUANG Xiangyun, et al. Experimental Investigation and Theoretical Analysis of Isolation Storage Tanks Subjected to Near Field Earthquake[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(4): 90-95]

## 近场地震下立式隔震储罐试验研究及理论分析

毛景远<sup>1</sup>, 沈朝勇<sup>1,2,3</sup>, 黄襄云<sup>1,2,3</sup>, 谭平<sup>1,2,3</sup>

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405;  
3. 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广州 510405)

**摘要:** 针对近场地震激励下隔震储罐响应的问题, 采用简化后的三质点力学模型, 分别对铅芯橡胶支座隔震储罐模型在近、远场地震作用下的响应进行了对比分析, 并将理论分析结果和振动台试验结果进行了对比。对比结果显示, 理论分析得出的加速度响应与振动台试验结果相近, 但理论分析结果会略微偏小。进一步的理论分析结果表明: 近场地震下基础隔震能有效降低储罐的基底剪力和基底弯矩, 而晃动波高有所增大; 隔震后储罐加速度峰值位于液固耦合质点附近。

**关键词:** 近场地震; 基底隔震; 储罐; 理论分析; 振动台试验

中图分类号: TE972 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2018)04-0090-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.04.015

## Experimental Investigation and Theoretical Analysis of Isolation Storage Tanks Subjected to Near Field Earthquake

MAO Jingyuan<sup>1</sup>, SHEN Chaoyong<sup>1,2,3</sup>, HUANG Xiangyun<sup>1,2,3</sup>, TAN Ping<sup>1,2,3</sup>

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;  
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology, Guangzhou 510405, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigation and Structural Safety, Ministry of Education, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the dynamic responses of LRB isolated storage tank under near field seismic excitation, the simplified three particle mechanical model was adopted to analyze and compare the near and far field seismic responses of LRB isolation model tank. the results of theoretical analysis and shaking table test were compared. The comparison results show that the acceleration response of the theoretical analysis is similar to

收稿日期: 2018-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578168); 广东省教育厅创新团队项目(2016KCXTD016); 广东特支计划项目(2014TX01C141)资助。

作者简介: 毛景远(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事防灾减灾及防护工程方面的研究。

通信作者: 沈朝勇(1972-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事工程隔震及抗震研究。

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

those of the shaking table test, but the results of theoretical analysis are slightly smaller. Further theoretical analyses show that the base shear force and base bending moment can be effectively reduced by base isolation under near field earthquakes, while the height of sloshing wave increases. The peak acceleration of isolation storage tank locates near the liquid-solid coupling joint.

**Keywords:** Near field earthquake; Base isolation; Storage tanks; Theoretical analysis; Shaking table test

## 0 引言

立式储罐作为主要的储存设施,广泛应用于石油化工行业中,其作为一种薄壁储液结构,具有柔度大、刚度小的特点,在地震中极易遭到破坏。大量震害表明,储罐破坏不仅会造成严重的经济损失,而且会导致火灾、环境污染等次生灾害<sup>[1]</sup>。

随着隔震技术的发展,基础隔震已被证明有较大的工程意义,能有效降低工程结构物的地震作用效应。对于储罐的隔震,大量学者也作了相关的研究:Malhotra 提出了在储罐底部圈板处添加柔性支座的隔震方案,通过隔震前后对比分析,得出基础隔震能有效降低储罐地震作用效应的结论<sup>[3-4]</sup>;Shrimali 和 Jangid 通过理论分析了储罐在铅芯支座(LRB)隔震下的地震作用效应,结果表明铅芯支座对储罐隔震能起到良好的效果<sup>[5]</sup>;国内学者孙建刚等对储罐叠层橡胶支座隔震进行了大量研究,推导出了隔震储罐三质点简化力学模型及理论计算方法,并通过振动台试验验证了基础隔震能降低储罐地震作用效应的结论<sup>[6-8]</sup>;李扬等对 LRB 隔震储罐在不同场地普通地震动下的响应进行了对比分析,结果表明,场地越硬,隔震效果越好,但有效隔震频率范围不一定越广<sup>[9]</sup>。

目前大多数有关储罐隔震的研究都是基于远场普通地震动下进行,而对于近场地震动激励下的隔震储罐涉及较少。因此,对于近场地震动作用下隔震储罐的响应仍需进行更深入的研究。

## 1 隔震储罐模型与支座简化模型

### 1.1 隔震储罐简化力学模型

假设罐内液体为无粘、无旋、不可压缩的理想液体。忽略储罐浮顶以及基底摆动的作用,可建立隔震储罐简化后的三质点力学模型,如图 1 和图 2 所示。

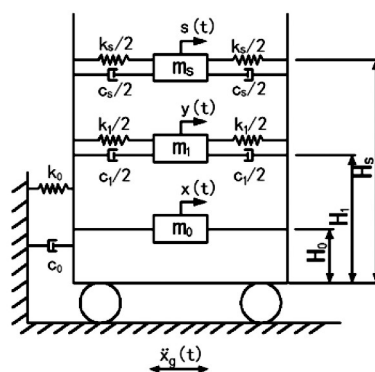


图1 隔震储罐力学模型

Fig.1 Mechanical model of isolated storage tank

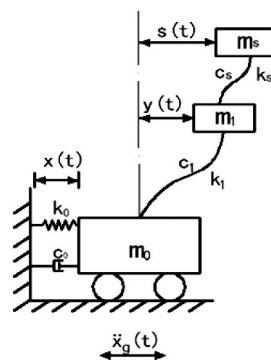


图2 简化后的隔震储罐力学模型

Fig.2 Simplified mechanical model of isolated storage tank

根据 D'Alembert 原理可建立隔震储罐在水平地震激励下的动力方程为:

$$\begin{bmatrix} m_s \\ m_1 \\ m_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{s} \\ \ddot{y} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & -c_s & 0 \\ -c_s & c_s+c_1 & -c_1 \\ 0 & -c_1 & c_1+c_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{s} \\ \dot{y} \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_s & 0 \\ -k_s & k_s+k_1 & -k_1 \\ 0 & -k_1 & k_1+k_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ y \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_s \\ m_1 \\ m_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{x}_g \quad (1)$$

式中:

$$c_s=2\xi_s\sqrt{m_s k_s} \quad (2)$$

$$c_1=2\xi_1\sqrt{m_1 k_1} \quad (3)$$

隔震储罐在水平地震激励下的基底剪力、基底弯矩、晃动波高分别为：

$$Q = -[m_0(\ddot{x}_g + \ddot{x}) + m_1(\ddot{x}_g + \ddot{y}) + m_s(\ddot{x}_g + \ddot{s})] \quad (4)$$

$$M = -[m_0 H_0(\ddot{x}_g + \ddot{x}) + m_1 H_1(\ddot{x}_g + \ddot{y}) + m_s H_s(\ddot{x}_g + \ddot{s})] \quad (5)$$

$$h_e = 0.841 R \frac{\ddot{x}_g + \ddot{s}}{g} \quad (6)$$

式中： $m_s$ 、 $m_1$ 、 $m_0$ 、 $H_s$ 、 $H_1$ 、 $H_0$ 分别为晃动质点、液固耦合质点、刚性脉冲质点的质量及各质点距离地面的高度，可按文献<sup>[10]</sup>取值； $k_s$ 、 $k_1$ 、 $k_0$ 分别为晃动刚度、液固耦合刚度、隔震层的刚度； $c_s$ 、 $c_1$ 分别为晃动质点、液固耦合质点由式(2)和(3)求得，式中液体晃动阻尼比及液固耦合阻尼比按我国规范分别取 0.005 和 0.05<sup>[11]</sup>； $c_0$ 为隔震层对应的阻尼， $s$ 、 $y$ 、 $x$ 分别为晃动位移、液固耦合位移、刚体位移。

## 1.2 铅芯橡胶支座恢复力模型

使用双线性恢复力模型进行数值模拟能达到工程上的精度要求，且能有效减少计算量，便于程序的编写。因此研究中采用双线性恢复力模型模拟铅芯橡胶支座的力学性能，如图 3。

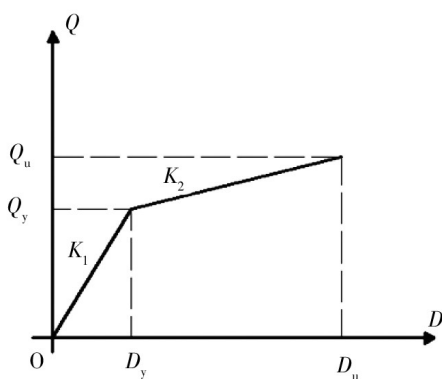


图3 双线性恢复力模型

Fig.3 Bi-linear restoring force model

## 2 振动台试验

### 2.1 试验对象及其参数

本文的试验在广州大学工程抗震研究中心完成。试验选用实际原型为 1000 m<sup>3</sup>，相似比为 1:5 的储罐模型，分别在隔震与非隔震的工况下进行，如图 4。



图4 模型储罐实体

Fig.4 Model storage entity

模型储罐的基本参数为：底面半径 1.16 m，总高度为 2.12 m，罐液高度为 1.93 m，罐壁厚 0.0012 m；罐内液体为水，密度为 1000 kg/m<sup>3</sup>，罐壁密度为 7800 kg/m<sup>3</sup>，弹性模量为 2.06×10<sup>11</sup> N/m<sup>2</sup>，泊松比取 0.3。采用 4 个相同的铅芯橡胶支座 LRB100 作为隔震层均匀布置在罐底，其参数如表 1 所示。隔震层等效阻尼比近似取 0.05。

表1 LRB100 参数

Table 1 Parameter of LRB100

屈服前刚度/ $k_1$	屈服后刚度/ $k_2$	屈服力/ $Q_y$
1100 kN/m	110 kN/m	1.409 kN

### 2.2 测点布置

试验采用加速度计、位移计、激光位移计三种传感器，布置方案如图 5 和图 6 所示。沿罐壁高度  $Z$  向布置的 6 组传感器对应的高度分别为：15 mm、295 mm、590 mm、1 085 mm、1930 mm、2050 mm。

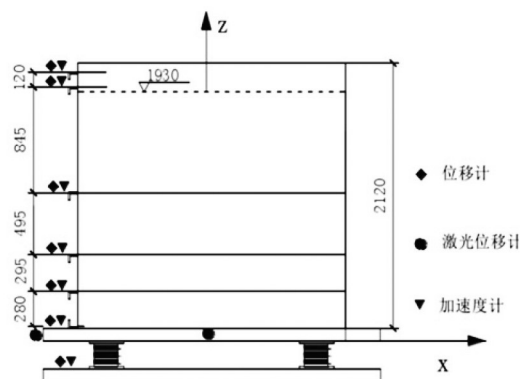


图5 竖向传感器布置

Fig.5 Vertical sensor layout

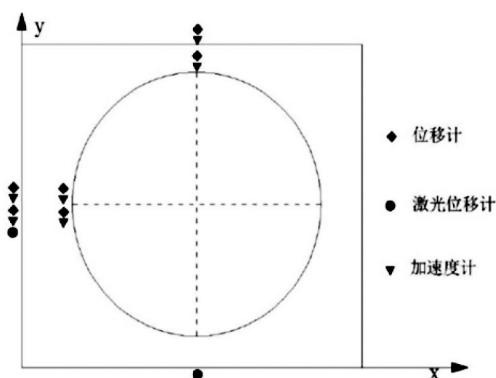


图6 水平向传感器布置

Fig.6 Horizontal sensor layout

## 2.3 地震波的选取

为研究隔震储罐在地震作用下的响应，选用二类场地远场地震 taft 波东西向及近场地震汶川卧龙地震波东西向，地震波幅值调整为 8 度 0.2 g，地震波记录根据相似比压缩为原来的 1/5。调整后的地震波分别如图 7 和图 8 所示。

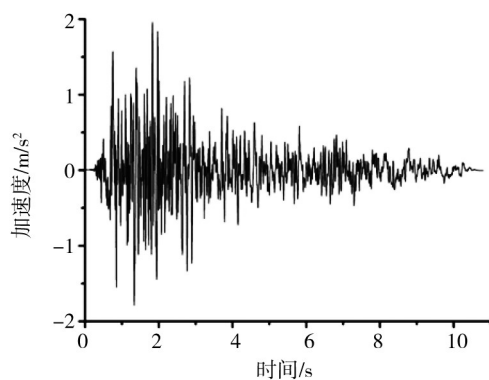


图7 taft地震波

Fig.7 The taft seismic wave

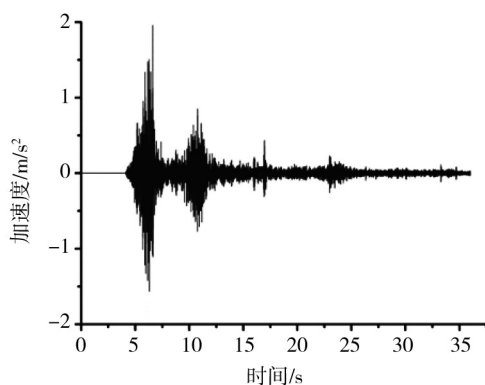


图8 汶川卧龙地震波

Fig.8 The Wolong seismic wave

## 3 试验结果分析与对比

### 3.1 试验结果分析

针对储罐隔震与非隔震体系，取试验得到的罐壁水平方向的加速度进行分析，得隔震前后罐壁水平加速度沿罐壁高度分布如图 9、10 所示。

图 9、10 表明，储罐在水平地震动激励下，储罐加速度沿罐壁高度方向总体呈现先增大后减小的趋势，隔震后罐壁上的峰值加速度较非隔震时有所下降，说明隔震峰值加速度有良好减震效果。

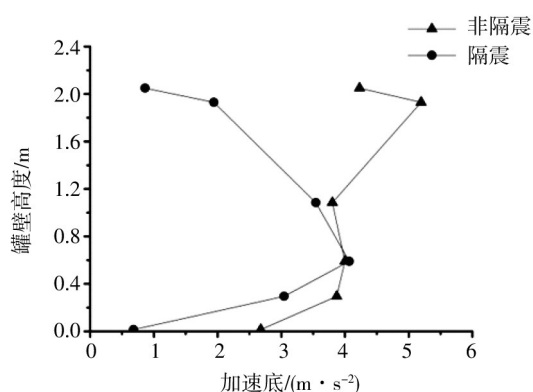


图9 taft波激励下罐壁加速度分布

Fig.9 Acceleration distribution under taft excitation

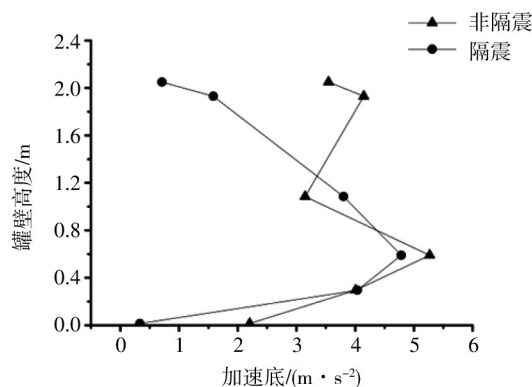


图10 卧龙波激励下罐壁加速度分布

Fig.10 Acceleration distribution under Wolong excitation

### 3.2 试验结果与理论对比

选取储罐在 taft 波及汶川卧龙波水平激励下的加速度响应，对振动台试验及理论的计算结果进行对比分析，结果见表 2。

从表 2 中可以看出：储罐在振动台试验下得到的刚性脉冲质点、液固耦联质点及晃动质点的加速度与理论计算结果相近，在工程可接受的误

差范围内,证明理论分析可靠性较高;理论分析的结果相对于试验结果偏小,其原因在于理论分析只考虑了一阶阵型的响应,是一种简化的计算,而振动台试验结果更接近真实的情况;隔震后的储罐峰值加速度在中部偏下的位置达到最大值,此位置位于液固耦联质点附近,液固耦联振动相对显著,造成此处罐壁加速度较其他位置大。

表 2 理论与实验加速度对比

Table 2 Acceleration comparison of theory and experiment

		试验/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	理论/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )
taft	非隔震 液固耦联质点	3.85	3.18
	晃动质点	4.27	1.97
	隔震 刚性脉冲质点	1.96	1.93
	液固耦联质点	3.68	2.18
	晃动质点	3.00	2.17
	非隔震 液固耦联质点	3.71	2.24
卧龙	晃动质点	3.49	1.97
	隔震 刚性脉冲质点	1.96	1.96
	液固耦联质点	4.06	1.98
	晃动质点	3.05	1.97

同时在振动台试验结果中可得到 LRB 的最大水平位移,并利用隔震层的等效刚度求出隔震储罐的基底剪力。其中隔震储罐在 taft 波及汶川卧龙波作用下 LRB 的最大水平位移分别为 3.59 mm、1.09 mm,得基底剪力为 2 301.91 N、700.58 N,而通过理论计算得到的基底剪力分别为 2 388.00 N、633.68 N,两者误差率分别为 3.61%、9.54%。误差率很小,说明振动台实验结果与理论计算结果相近,这进一步验证了理论分析的可靠性。

## 4 数值模拟

通过 matlab 软件编写相关程序对隔震储罐进行理论分析,并分别求得水平地震激励下储罐隔震前后基底剪力,基底弯矩及晃动波高的时程曲线如图 11 至图 16 所示,对应峰值及减震率列于表 3 中。

由图 11 至图 16 和表 2 可知,在近场或远场水平向地震激励下,储罐采用隔震装置后都能达到降低基底剪力与基底弯矩的效果。其中,隔震储罐对应的基底剪力减震率在 taft 波、汶川卧龙波激励下分别为 89.50%、95.87%,基底弯矩减震率

分别为 91.00%、96.17%,减震效果非常明显。其原因在于采用 LRB 隔震后,适当增加了整体结构的阻尼,一定程度上延长了储罐刚性脉冲质点与液固耦联质点的自振周期,从而降低了储罐的地震作用效应。而在隔震储罐罐内液体晃动波高方面,其减震率分别为-40.11%、-13.10%,呈放大现象。原因是非隔震时晃动质点在地震激励下为长周期振动,隔震后对其自振周期的延长对罐内液体晃动波高影响不大甚至会引起共振现象,导致晃动波高增大。

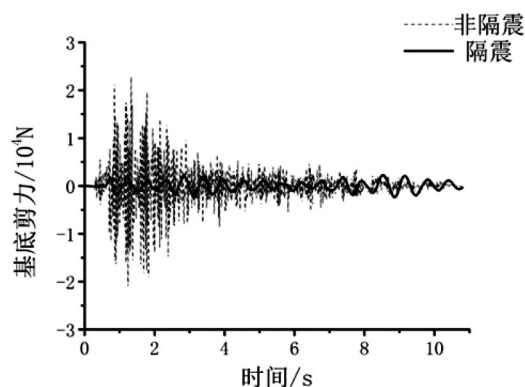


图 11 taft 波激励下的基底剪力

Fig.11 Base shear under taft excitation

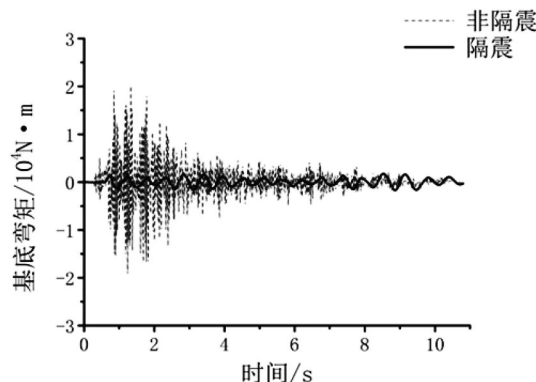


图 12 taft 波激励下的基底弯矩

Fig.12 Base bending moment under taft excitation

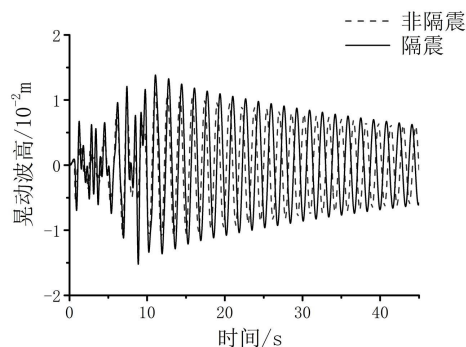


图 13 taft 波激励下的晃动波高

Fig.13 Sloshing wave height under taft excitation

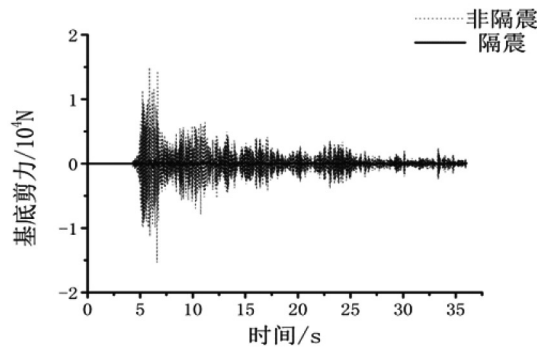


图 14 卧龙波激励下的基底剪力

Fig.14 Base shear under Wolong excitation

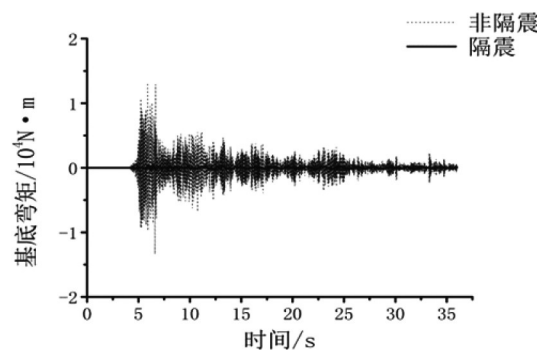


图 15 卧龙波激励下的基底弯矩

Fig.15 Base bending moment under Wolong excitation

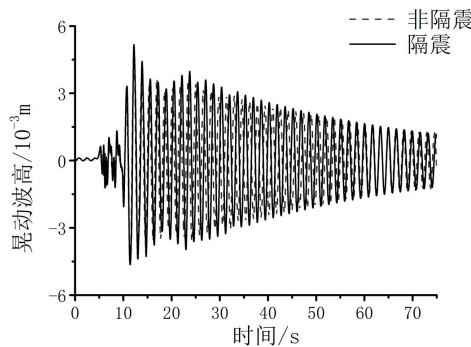


图 16 卧龙波激励下的晃动波高

Fig.16 Sloshing wave height under Wolong excitation

表 3 水平地震激励下隔震储罐减震效果

Table 3 Seismic isolation effect under horizontal seismic excitation

		基底剪力	基底弯矩	晃动波高
taft	非隔震	22 733.83 N	20 069.75 N·m	0.011 m
	隔震	2 388.00 N	1 806.40 N·m	0.015 m
	减震率	89.50%	91.00%	-40.11%
卧龙	非隔震	15 353.32 N	13 358.12 N·m	0.004 6 m
	隔震	633.68 N	511.40 N·m	0.005 2 m
	减震率	95.87%	96.17%	-13.10%

## 5 结语

本文通过对隔震储罐进行振动台试验,并通过进一步的理论分析得出了以下结论:

(1)理论分析可靠性较高,储罐理论分析与实验结果相近,但储罐三质点处加速度响应的理论值相对于实验值偏小。

(2)隔震后储罐罐壁加速度沿高度总体呈先增大后减小的趋势,并会在液固耦联质点附近达到最大值。

(3)LRB 隔震在近场地震与远场普通地震激励下都能有效降低储罐的基底剪力与基底弯矩,但对罐内液体的晃动波高影响不大,甚至会出现晃动波高增大的现象。

## 参考文献:

- [1] 孙建刚. 大型立式储罐隔震[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [2] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社,1997.
- [3] Malhotra P.K. New method for seismic isolation of liquid-storage tanks [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 1997, 26(8): 839-847.
- [4] Malhotra P.K. Method for seismic base isolation of liquid-storage tanks [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(1): 113-116.
- [5] Shriali M.K, Jangid R.S. Non-linear seismic response of base-isolated tanks to bi-directional excitation [J]. Nuclear Engineering & Design, 2002, 217 (1) : 1-20.
- [6] 孙建刚. 立式储罐地震响应控制研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2002.
- [7] 孙建刚,王振,杨宇,等. 模型储罐三维地震反应振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(5):639-643.
- [8] 孙建刚,袁朝庆,郝进峰. 橡胶基底隔震储罐地震模拟试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(6):806-809.
- [9] 李扬,李自力,李艳. 不同类型场地对隔震储罐地震响应的影响[J]. 中国石油大学学报,2008,32(5):108-113.
- [10] 孙建刚,王向楠. 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(4):639-643.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50341-2014:立式圆筒形钢制焊接储罐设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2014.