

高举架立式圆筒型储液容器柱顶隔震 地震动响应研究

孙建刚¹,吕 远²,崔利富¹,王 振¹

(1. 大连民族大学土木工程学院,辽宁 大连 116650;2. 大连海事大学交通运输
装备与海洋工程学院,辽宁 大连 116026)

摘要 目的 针对高举架储罐结构特点提出柱顶隔震措施,并构建柱顶隔震简化力学模型和有限元数值仿真模型. 方法 从数值分析及有限元建模进行隔震研究. 结果 柱顶隔震措施能有效控制高举架储罐的地震动响应,其减震效率与地震波频谱特性密切相关;随隔震周延长,上部储罐各工况减震率也变大,但支承结构各工况减震率逐渐减小;隔震层阻尼比变大时,各工况大致先减小后增大,有优化区间;理论解与有限元解相差不大,相互验证计算结果的正确性. 结论 建议柱顶隔震设计时应综合考虑场地类型、隔震周期和隔震层阻尼比对减震效率的影响,优化隔震设计.

关键词 高举架;立式圆筒型储罐;柱顶隔震;理论分析;有限元数值仿真;地震动响应

中图分类号 TU352 文献标志码 A

Seismic Response Study of Top Isolation Elevated Vertical Cylinder Storage Tanks

SUN Jiangan¹, Lü Yuan², CUI Lifu¹, WANG Zhen¹

(1. School of Civil Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian, China, 116650; 2. Transportation Equipment and Ocean Engineering College, Dalian Maritime University, China, Dalian, 116026)

Abstract: According to the characteristics of the elevated storage tank structure, the top isolation measures are proposed, and the simplified mechanical model and finite element numerical simulation model of top isolation are established. In this paper, seismic isolation research from numerical analysis and finite element modeling, the result was indicative: the isolation measures can effectively reduce seismic response of elevated vertical cylinder storage tanks, and that the damping efficiency is closely related to the seismic spectral characteristics. With the increase of the isolation period, the vibration reduction rate of the upper storage tank is gradually increased, but the vibration reduction rate of the supporting structure is reduced gradually. With the increase of damping ratio, the vibration reduction rate first increases and then decreases and there is a reasonable range of

收稿日期:2017-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51478090,51878124);辽宁省自然科学基金项目(20180550073)

作者简介:孙建刚(1959—),男,教授,博士,博士研究生导师,主要从事防灾减灾工程及防护工程方面研究.

damping ratio optimization. The theoretical solution and the finite element solution are close to each other, which verify the accuracy of the results. Top isolation design should consider the influence of site type, isolation period and damping ratio and optimize isolation design.

Key words: elevated structure; vertical cylinder storage tanks; top isolation; theoretical analysis; finite element numerical simulation; seismic response

高举架立式圆筒型储液容器在石油化工领域以及人们日常生活中都扮演着举足轻重的角色,研究其在地震作用下的动力反应及其减震措施具有重要意义.国内外学者对大型立式储罐减震控制进行了大量研究^[1-12],部分研究成果已成功应用于立式储罐的抗震设计中.但学者们对高举架储液容器研究较少,且多偏重于基础隔震的研究:H. W. Shenton 和 M. K. Shriali 等^[13-14]采用数值分析方法研究了高举架储罐基础隔震地震响应研究,发现基础隔震能有限降低结构地震响应;王振教授^[15-16]研究了不同条件下(频率、罐容、场地)基础隔震对高举架储罐地震响应的减震效率,系统地论证了基础隔震在此类结构中应用的可行性.吕远等^[17]有限元手段研究了不同参数情况下(隔震参数,储液量及地震动输入)高举架立式储罐基础隔震减震率,较为详细的分析了不同参数对减震率的影响,为隔震设计提供了依据.

一般来讲,隔震可分为基础隔震与层间

隔震,针对高举架储罐这一结构形式来说可将隔震层安装于罐底与支承的平台板之间,形成柱顶隔震.国内外学者对柱顶隔震的研究并不多,基于此,笔者针对此种隔震方式,基于现有的高举架立式圆筒型储罐简化力学模型,给出了新的抗震和柱顶隔震简化力学模型,同时利用有限元软件 ADINA 建立其有限元数值仿真模型,从建立简化力学模型及有限元值仿真两方面进行了地震响应对比分析.

1 理论分析

1.1 简化力学模型及运动控制方程式

将高举架储罐底部框架结构按梁层数简化为若干等效质量点;由于高举架储罐罐体尺寸相对偏小,故储罐的力学模型可采用立式储罐刚性理论,将储液简化为两质点模型(晃动质量 m_c , 刚性质量 m_r)^[18].由此将框架结构力学模型与储罐力学模型组合可得高举架储罐的力学模型,如图1所示.

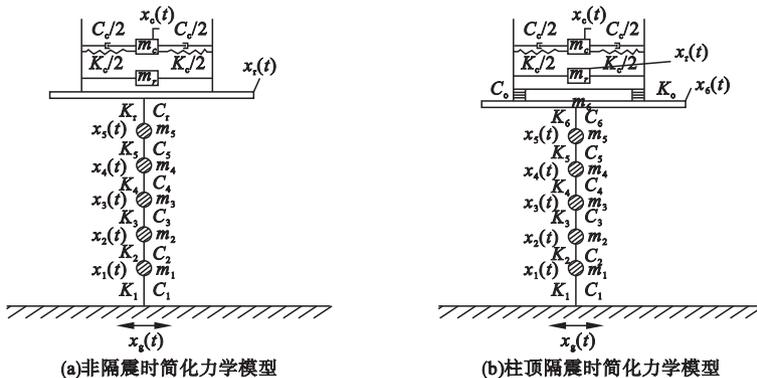


图1 简化力学模型

Fig. 1 Simplified mechanical model

图1(b)中隔震层参数等效为线性刚度系数 K_0 和阻尼系数 C_0 :

$$K_0 = m \left(\frac{2\pi}{T_b} \right)^2. \quad (1)$$

表1 算例参数

Table 1 The example parameter

支承结构	圈梁间距/m	截面尺寸/m
第一、二层圈梁	7.5	0.45 × 0.45
其余圈梁	5.0	0.40 × 0.40
圈梁	—	0.25 × 0.40

框架结构顶部圈梁直径为 4.8 m, 支柱具有一定倾斜角度, 为 1/20, 底部圈梁直径为 8.05 m. 放置储罐的平台板厚 0.2 m. 支承体系的梁、柱、板均为钢筋混凝土结构, 等效杨氏模量 $E = 2.6 \times 10^{10}$ Pa, 密度 $\rho =$

$2\,400\text{ kg/m}^3$. 圆筒形储罐直径与顶层圈梁相同, 钢制筒形罐壁罐壁高 3.0 m, 储罐底板和罐壁厚均为 10 mm. 储罐为拱顶罐, 拱顶钢板厚 6 mm. 钢材弹性模量 $E = 2.06 \times 10^{11}$ Pa, 屈服强度 $\sigma_y = 490$ Pa, 剪切模 $G = 39.73$ Pa. 罐内液体密度 $\rho = 1.0 \times 10^3\text{ kg/m}^3$, 液面高度可设为 2.2 m.

1.2.1 地震动输入的选取

选取 $\text{PGA} = 0.2\text{ g}$, 将如图 2 所示 4 类地震波作为地震动荷载, 加速度时程曲线如图 2 所示.

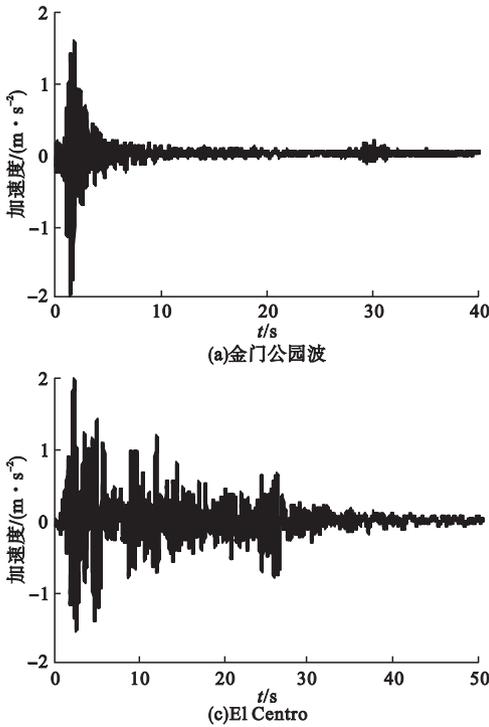


图2 水平地震动

Fig. 2 Horizontal seismic

1.2.2 数值分析

运动控制方程基于 Newmark - β 数值分析方法求解, 其中, $T_b = 2\text{ s}$, $\zeta = 0.1$. 以晃动波高、基底剪力、倾覆弯矩、层间位移角为控制目标, El Centro 波作为地震动输入进行地震动响应对比分析, 计算结果如图 3 所示.

从图 3 中可以看出采用柱顶隔震措施后, 对基底剪力、倾覆弯矩、层间位移角三种工况都能起到很好地减震控制效果, 而对储

液晃动波高控制有限. 当荷载频率与隔震体系自振频率的比值大于 $\sqrt{2}$ 时, 会产生减震效果, 且比值越大减震效果越好. 从图 3(e)、图 3(f) 可知地震动的卓越频率为 2.16 Hz, 采用柱顶隔震措施后第一、二阶自振频率分别为 0.39 Hz、0.79 Hz, 频率比分别为 5.54、2.73, 均大于 $\sqrt{2}$, 所以柱顶隔震措施能起到减震效果.

根据图 3(d) 中各层层间位移角峰值可

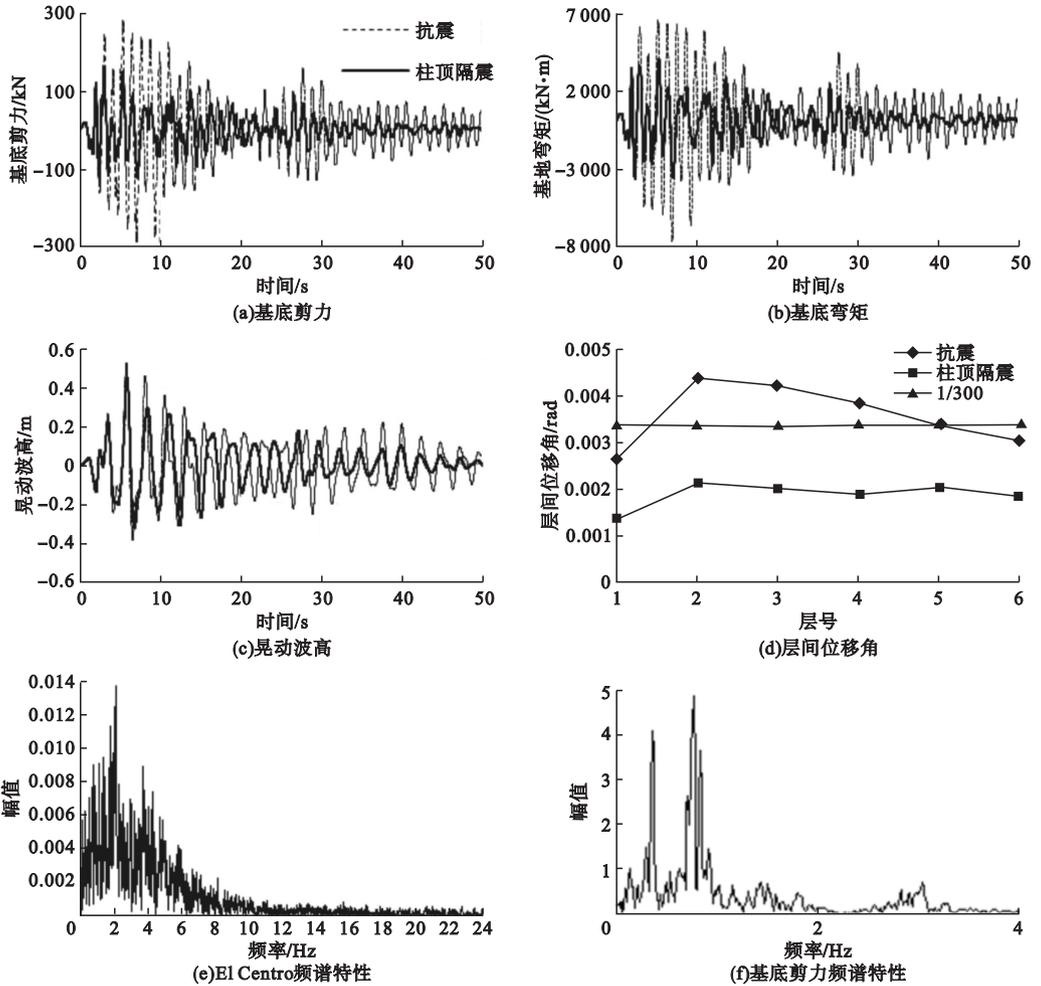


图3 地震动响应

Fig. 3 Ground motion response

知,采用隔震措施后,最大层间位移角都在控制目标值 1/300 之下,说明采用柱顶隔震措施后能减小支承结构的变形,降低其地震响应.从图 3(c)可以看出,柱顶隔震措施对储液晃动波高的控制有限.

上述内容表明,隔震体系的减震效率与地震动输入的频率密切相关,由此以如图 2 所示四类地震波作为地震动输入,进行响应研究,计算结果如表 2 所示.

表 2 不同地震动输入地震动响应峰值及减震率

Table 2 The vibration reduction rate and each condition peak for different ground motion input

地震输入	工况	基底剪力/kN	倾覆弯矩/(kN·m)	晃动波高/m	层间位移角/rad
金门公园地震波	抗震	82.451	1 146.5	0.100 8	1/1 104
	柱顶隔震	56.840	1 032.2	0.097 7	1/922
北京饭店地震波	抗震	742.701	20 477.0	1.861 8	1/90
	柱顶隔震	571.872	15 812.0	1.606 9	1/124
El Centro 波	抗震	290.320	7 844.3	0.521 1	1/228
	柱顶隔震	160.620	3 916.3	0.441 9	1/477
Pasadena 波	抗震	452.731	12 339.0	0.740 7	1/149
	柱顶隔震	283.740	7 390.8	0.718 3	1/260

从表2中可知,对不同地震动荷载,柱顶隔震的减震效率有较大差异.例如对金门公园地震动输入来说,采用柱顶隔震后基底剪力与基底弯矩变小,但层间位移角反而增大.“金门公园”地震动卓越频率比较大,远离结构自振频率,由此采用柱顶隔震后也并未起到明显的减震作用,其地震动响应总的来说比较小.对“北京饭店”地震动输入来说,考虑柱顶隔震措施后,虽有一定的减震效果但结构地震动响应仍然非常剧烈.由此可见,柱顶隔震措施的参数设计需根据实际结构及抗震要求进一步优化.

2 有限元数值仿真分析

2.1 有限元模型的建立

利用有限元软件 ADINA 建立数值仿真模型.由于储罐罐壁厚度与储罐直径比值十分小,故建模中可采用等参四节点壳单元;采用八节点三维实体单元模拟储罐支承平台板,液体采用 3D - Potential fluid 单元,支承采用空间 Beam 单元.隔震层采用弹簧单元

模拟,简化为平动的弹簧和阻尼.有限元模型如图4所示.

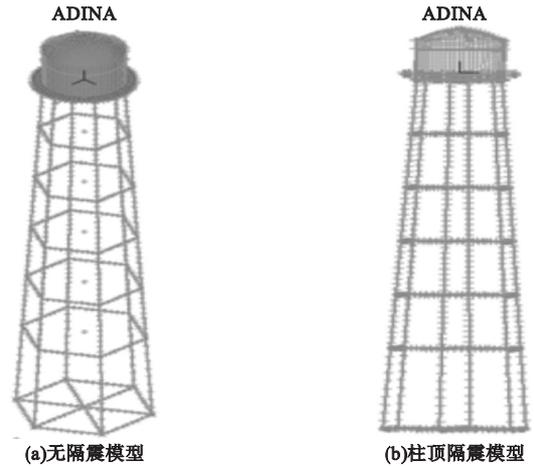


图4 有限元模型

Fig.4 The FE model

2.2 数值仿真分析

2.2.1 隔震周期不同时影响

选取 El Centro 波作为地震动输入, $PGA = 0.2 g$, 研究柱顶隔震隔震不同周期时 ($T_b = 2 s, 3 s, 4 s, 5 s, \xi = 0.1$) 的减震效率, 计算结果如表3所示.

表3 隔震周期不同情况下各工况峰值及减震率

Table 3 The vibration reduction rate and each condition peak for different isolation periods

T_b/s	储液晃动	罐壁有效动应	柱底竖向反力	柱底上拔力	最大支柱位	支柱底部水平
	高度/mm	力峰值/kPa	峰值/ $10^5 N$	峰值/ $10^5 N$	移角/rad	剪力峰值/ $10^5 N$
0	493.8	3 921.8	8.197 59	2.602 5	1/217	2.097 7
2	503.9	2 602.8	5.611 40	0	1/529	1.405 4
3	404.2	1 008.9	5.564 21	0	1/503	1.411 9
4	304.3	8 348.0	5.791 91	0	1/393	1.605 9
5	175.6	529.2	6.230 40	0	1/332	2.047 5

注: $T_b = 0 s$ 为无隔震工况.

根据表3数据,柱顶隔震隔震周期越大时上部储罐各工况(储液晃动高度、罐壁有效动应力峰值)越小,但下部支柱结构各工况(柱底竖向反力峰值、支柱最大位移角以及支柱底部水平剪力峰值)随着隔震周期的延长而增大.说明柱顶隔震隔震层能够起到隔断地震动能量由下部结构向上部结构的传

导作用.因此若采用柱顶隔震措施,需综合考虑储罐和支承结构的地震动响应,选取最佳的隔震周期设计方案.

2.2.2 隔震层阻尼比不同时影响

选取 El Centro 波作为地震动输入, $PGA = 0.2 g$, 研究柱顶隔震阻尼比不同时 ($T_b = 3 s, \xi = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$) 的减震效

率. 计算结果如表 4 所示.

表 4 阻尼比不同情况下各工况峰值及减震率

Table 4 The vibration reduction rate and each condition peak for different damping ratios

阻尼比 ξ	储液晃动 高度/mm	罐壁有效动应 力峰值/kPa	柱底竖向反 力峰值/ 10^5 N	柱底上拔力 峰值/ 10^5 N	最大支柱位 移角/rad	支柱底部水平 剪力峰值/ 10^5 N
0	493.8	3 921.8	8.197 59	2.602 5	1/217	2.977 0
0.1	404.2	1 008.9	5.564 21	0	1/503	1.411 9
0.2	363.3	869.2	5.385 30	0	1/600	1.296 7
0.3	352.1	608.3	5.660 66	0	1/502	1.366 7
0.4	353.7	753.3	5.926 44	0	1/457	1.428 7

注: $\xi=0$ 为无隔震工况.

根据表 4 数据,柱顶隔震隔震层阻尼比增大,各工况响应值有优化区间,呈现先减小后增大的趋势. 当 $\xi=0.2$ 时,下部支承地震动响应减震率达到最大; $\xi=0.3$ 时,上部储罐各工况减震率最大;由此对本工程实例来说, $\xi=0.2 \sim 0.3$ 时为最优设计. 说明进行柱

顶隔震设计时应对照隔震层阻尼比进行仔细验算,选取最合适的阻尼比参数.

2.2.3 地震动输入不同时地震响应对比

选取 $PGA=0.2 g$,将如图 2 所示 4 类地震波作为地震动荷载,其中 $T_b=3 s, \xi=0.1$. 计算结果如表 5 所示.

表 5 不同地震动输入各工况峰值及减震率

Table 5 The vibration reduction rate and each condition peak for different ground motion input

地震动输入	工况	储液晃动 高度/mm	罐壁有效动应 力峰值/kPa	柱底竖向反 力峰值/ 10^5 N	柱底上拔力 峰值/ 10^5 N	最大支柱位 移角/rad	支柱底部水平 剪力峰值/ 10^5 N
金门公园地震波	非隔震	135.3	4 715	4.015 5	0	1/1 162	0.719 3
	隔震	107.8	1 085	4.482 5	0	1/1 353	0.644 5
北京饭店地震波	非隔震	2 641.7	9 687	15.644 0	10.358 0	1/105	6.332 5
	隔震	2 397.4	7 645	12.474 6	6.677 4	1/157	4.465 9
El-Centro 地震波	非隔震	493.4	3 921	8.197 5	2.602 5	1/217	2.977 9
	隔震	404.2	1 008.9	5.564 2	0	1/503	1.411 8
Pasadena 地震波	非隔震	1323.0	4 816	10.041 0	4.706 3	1/169	3.981 1
	隔震	761.8	3 604	7.964 1	0.938 5	1/292	2.339 3

根据表 5 可知,当地震动输入不同时柱顶隔震措施减震效率大不相同,但均能起到一定的减震效果. 从数据中可以看出,“El-Centro”地震动输入时减震率最高;“金门公园”地震动输入时减震效率最低,但由于地震动响应较小,结构仍处于控制目标范围内. “北京饭店”、“Pasadena”地震动输入时,虽然减震率较高,但考虑隔震措施后支柱底部仍

有较大上拔力,且层间位移角未达到控制目标 1/300. 由此进行隔震设计时,应综合考虑场地特征频率,优化隔震参数.

3 数值解与有限元解对比

选取 $PGA=0.2 g$,将如图 2 所示 4 类地震波作为地震动荷载,进行地震动响应的数值解与有限元解对比分析,计算结果如表 6、

表7所示.

表6 抗震模型理论解与有限元解对比

Table 6 Comparison between theoretical solution and finite element solution of seismic model

地震动输入	计算模型	支柱底部水平剪力峰值/ 10^5 N	储液晃动高度/mm	层间位移角/rad
金门公园地震波	简化力学模型	0.824	101	1/1 104
	有限元模型	0.719	135	1/1 162
北京饭店地震波	简化力学模型	7.427	1 862	1/90
	有限元模型	6.332	2 642	1/105
El Centro 地震波	简化力学模型	2.903	521	1/228
	有限元模型	2.978	493	1/218
Pasadena 地震波	简化力学模型	4.527	741	1/149
	有限元模型	3.981	1 323	1/169

表7 柱顶隔震模型理论解与有限元解对比

Table 7 Comparison between theoretical solution and finite element solution of top isolation

地震动输入	计算模型	支柱底部水平剪力峰值/ 10^5 N	储液晃动高度/mm	层间位移角/rad
金门公园地震波	简化力学模型	0.568 4	98	1/1 093
	有限元模型	0.516 3	118	1/1 353
北京饭店地震波	简化力学模型	5.718 7	1 607	1/124
	有限元模型	6.6480	2 849	1/114
El Centro 地震波	简化力学模型	1.606 2	442	1/476
	有限元模型	1.405 3	504	1/529
Pasadena 地震波	简化力学模型	2.837 4	719	1/260
	有限元模型	2.741 0	1 201	1/227

由表6、表7可知,在不同的地震动输入条件下,理论解与有限元解的差异率也不相同,但总的来说基底剪力与层间位移角的数值解与有限元解比较接近.但从表中数据可以看到晃动波高差异率偏大,这是由于在建立简化力学模型时,对于储液的晃动形态只考虑了其第一阶的贡献,而实际罐内储液的晃动形态十分复杂,是由多阶振型叠加而成^[20],所以数值计算结果与有限元计算结果产生一定的差异.总的来说,数值计算结果与有限元计算结果能够相互验证其可靠性.

4 结论

(1)考虑柱顶隔震后,能有效控制高举

架立式圆筒型储液容器地震动响应,结构设计时可降低抗震设防烈度,并且随着隔震周期的增大上部储罐地震动响应逐渐减小,而支承结构地震动响应逐渐增大,隔震周期有优化区间;随着隔震层阻尼比的增大,减震率先增大后减小,具有优化区间;

(2)建议柱顶隔震设计时应综合考虑场地类型、隔震周期和隔震层阻尼比对减震效率的影响,优化隔震设计;

(3)高举架立式圆筒型储液容器地震动响应的数值计算结果与有限元计算结果能够相互验证其可靠性.

参考文献

[1] HOUSNER G W. Dynamic pressures on accel-

- erated fluid containers[J]. Bulletin of the seismological society of America, 1957, 47 (1): 15 - 35.
- [2] HOUSNER G W. The dynamic behavior of water tanks[J]. Bulletin of the seismological society of America, 1963, 53 (2): 381 - 387.
- [3] EDWARDS N W. A procedure for the dynamic analysis of thin walled liquid storage tanks subjected to lateral ground motions[D]. Michigan; University of Michigan, 1969.
- [4] HAROUN M A. Vibration studies and tests of liquid storage tanks[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2010, 11 (2): 179 - 206.
- [5] KIANOUSH M R, CHEN J Z. Effect of vertical acceleration on response of concrete rectangular liquid storage tanks[J]. Engineering structures, 2006, 28 (5): 704 - 715.
- [6] 李文刚, 金玉姬, 高锐. 水平地震激励下储罐液体晃动分析[J]. 自然灾害学报, 2007 (2): 138 - 142.
(LI Wengang, JIN Yuji, GAO Rui. Sloshing analysis of fluid in storage tank under lateral seismic excitations[J]. Journal of natural disasters, 2007 (2): 138 - 142.)
- [7] 孙建刚, 蒋峰, 张荣花. 隔震立式储罐地震反应谱分析[J]. 世界地震工程, 2009, 25 (2): 130 - 139.
(SUN Jiangan, JIANG Feng, ZHANG Ronghua. Earthquake response spectrum analysis of storage tanks with seismic isolation[J]. World earthquake engineering, 2009, 25 (2): 130 - 139.)
- [8] 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 (4): 639 - 643.
(SUN Jiangan, WANG Xiangnan, ZHAO Changjun. Theoretical study on seismic isolation of storage tanks[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2010, 42 (4): 639 - 643.)
- [9] HAROUN M A. Vibration studies and tests of liquid storage tanks[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2010, 11 (2): 179 - 206.
- [10] 孙颖, 孙建刚, 崔利富. 大型立式浮顶储罐基础隔震数值研究[J]. 世界地震工程, 2011, 27 (3): 120 - 125.
(SUN Ying, SUN Jiangan, CUI Lifu. Numerical research on large base isolation vertical storage tanks with floating roof[J]. World earthquake engineering, 2011, 27 (3): 120 - 125.)
- [11] 张莹. 大型全容式 LNG 储罐地震响应数值模拟研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
(ZHANG Ying. Seismic response numerical simulation of large full capacity LNG storage tanks[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2011.)
- [12] HAROUN M A, HOUSNER G W. Dynamic interaction of liquid storage tanks and foundation soil[C]// Dynamic response of structures experimentation, observation, prediction and control. [S. l.]: ASCE, 2014: 346 - 360.
- [13] SHENTON H W, HAMPTON F P. Seismic response of isolated elevated water tanks[J]. Journal of structural engineering, 1999, 125 (9): 965 - 976.
- [14] SHRIMALI M K, JANGID R S. Earthquake response of isolated elevated liquid storage steel tanks[J]. Journal of constructional steel research, 2003, 59: 1267 - 1288.
- [15] 王振, 沈笑飞, 唐立强. 基础隔震高举架储油罐地震反应分析[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34 (6): 72 - 76.
(WANG Zhen, SHEN Xiaofei, TANG Liqiang. Seismic response of base isolation highly-elevated oil storage tanks[J]. Journal of northeast forestry university, 2006, 34 (6): 72 - 76.)
- [16] 王振. 不同场地类型下基础隔震高举架储油罐减震效果分析[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30 (4): 52 - 62.
(WANG Zhen. Analysis of the earthquake absorption effect of the base isolation highly-elevated oil storage tanks on different sites[J]. Journal of Daqing petroleum institute, 2006, 30 (4): 52 - 62.)
- [17] 吕远, 孙建刚, 郝进锋, 等. 高举架立式圆筒型储液容器基础隔震有限元数值仿真分析[J]. 地震工程与工程震动, 2016, 36 (5): 126 - 131.
(Lü Yuan, SUN Jiangan, HAO Jinfeng, et al. The finite element numerical simulation analysis of base isolation elevated vertical cylinder storage tanks[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2016, 36 (5): 126 - 131.)
- [18] 孙建刚. 大型立式储罐隔震理论方法及实验[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
(SUN Jiangan. Isolation of large vertical storage tank theory, method, test[M]. Beijing: Science Press, 2009.)
- [19] 张俊发. 支架式水塔水平位移的实用简化计算[J]. 特种结构, 2004, 21 (3): 39 - 41.
(ZHANG Junfa. Horizontal displacement of scaffolding towers practical simplified calculation[J]. Unique construction, 2004, 21 (3): 39 - 41.)
- [20] 赵晓磊. 15 万立方米浮放储罐静动力数值分析[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2009.
(ZHAO Xiaolei. The static and dynamic numerical analysis of 150 000 m³ unanchored storage tank[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2009.)