

文章编号: 1000-1301(2012)06-0153-06

考虑 SSI 效应的 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐基础隔震数值仿真分析

刘伟兵¹ 孙建刚^{2,3} 崔利富² 逯严磊¹

(1. 东北石油大学 土木建筑工程学院 黑龙江 大庆 163318; 2. 大连民族学院 土木建筑工程学院 辽宁 大连 116600;
兰州理工大学 土木工程学院 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 为考虑土与结构相互作用 (SSI) 对 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 大型立式储罐基础隔震效应的影响, 采用弹簧-阻尼系统模拟地基土和隔震层, 罐壁及底板采用壳单元, 流体采用势流体单元, 利用 ADINA 建立 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐有限元模型, 在峰值加速度 0.2g El Centro 波地震激励下, 应用 Newmark 数值积分方法进行地震响应分析, 结果表明: 考虑 SSI 效应时, 非隔震储罐的地震响应有所减小, 而基础隔震时地震响应有放大效应。储罐抗震减震设计时, 中软地基土上储罐从结构设计安全角度来说需要考虑土与结构的相互作用。

关键词: 储罐; 土与结构相互作用; ADINA; 基础隔震

中图分类号: TU352; P315.92

文献标志码: A

Finite element analysis of $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ storage tanks with base isolation considering soil-structure interaction (SSI)

LIU Weibing¹ SUN Jiangang^{2,3} CUI Lifu² LU Yanlei¹

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. College of Civil and Architecture Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China;

3. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To consider the soil-structure interaction (SSI) effect on the base isolation of the $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ vertical storage tank, this paper presents a method by using spring-damper system to simulate the foundation soil and the isolation layer, and shell element in the analysis of tank wall and bottom plate, while the fluid is simulated by potential fluid element, and the ADINA method is used to establish the $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ tank finite element model. Newmark numerical integration methods for earthquake response analysis is applied under the seismic excitation, in which the El Centro ground motion is used with peak acceleration 0.2g. The results show that in the case of considering the effect of SSI, the seismic responses of the non-isolation tank are decreased when there is amplification effect of the base isolation. In tank seismic design, soil-structure interaction in soft subsoil needs to be considered from the point of view of structure safety.

Key words: storage tanks; soil-structure interaction; ADINA; base isolation

引言

立式储罐是石油、化工等企业的重要工业设施, 强震作用下易发生罐壁屈曲、脱离等直接震害, 同时易引

收稿日期: 2012-08-27; 修订日期: 2012-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51078063/E0808); 中国寰球工程公司中国石油集团公司科技专项 (H201104006)

作者简介: 刘伟兵 (1988-) 男, 硕士研究生, 主要从事防灾减灾及防护工程研究. E-mail: lw2275@163.com

通讯作者: 孙建刚 (1959-) 男, 教授, 主要从事防灾减灾工程及防护工程研究. E-mail: sjg728@163.com

发火灾及环境污染等次生灾害,给生产和国民经济造成重大损失。目前,关于储罐抵抗地震灾害的研究,主要采用抗震和隔震两种途径^[1],多集中于理论研究和数值仿真研究。在储罐非隔震研究方面,孙建刚、崔利富等^[2]考虑土与结构相互作用对储罐地震响应的影响,进行了理论研究,指出了考虑土与结构相互作用的重要性;周利剑等^[3]对抗震的立式储罐进行了考虑土与结构相互作用的数值仿真研究,并进行了参数影响分析。在储罐隔震研究方面,崔利富等^[4]对大型立式基础隔震储罐进行了考虑土与结构相互作用理论方面的研究;孙颖等^[5]对大型立式储罐进行了隔震数值仿真研究,但并未考虑土与结构的相互作用。在建筑结构方面,于勉等^[6]研究了土-结构动力相互作用对隔震结构地震响应的影响,认为 SSI 效应对隔震结构楼层加速度反应有明显放大作用。有关研究表明^[7]:地震时,由于场地的放大效应,建在厚软土地面上的结构所受的破坏比建在临近基岩上的结构所受破坏要厉害得多。另外考虑土-结构相互作用时结构的刚度和阻尼等也将发生变化,同时引入隔震层后,地基土刚度和阻尼与隔震层刚度和阻尼对结构体系的综合影响也值得深入研究。综上所述,在储罐基础隔震考虑土与结构相互作用的数值仿真研究方面还没有相关报道。本文通过改变地基弹簧参数来考虑 SSI 效应,与未考虑 SSI 效应情况对结构的影响进行对比分析。因此,本文针对 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 立式储罐,采用弹簧-阻尼系统模拟地基土和隔震层,罐壁及底板采用壳单元,流体采用势流体单元,利用有限元软件 ADINA 建立 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐有限元模型,对建在刚性基础(未考虑 SSI)和柔性基础(考虑 SSI)上的非隔震和基础隔震储罐进行地震动响应三维有限元数值仿真对比分析,为储罐基础隔震设计提供较为精确的数值验证保障。

1 有限元模型建立及参数选取

1.1 几何参数

本文模拟罐容积为 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$,罐直径为 100 m,底板中幅板 11 mm,边缘板 23 mm;总高为 21.7 m,沿高度方向分为 8 层,罐内液体模拟为水 $\rho = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,高度为 20.1 m。每层高度及厚度如表 1 所示。

材料属性:罐壁采用钢材,密度为 7800 kg/m^3 ,弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,泊松比为 0.3,屈服强度为 $3.7 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

1.2 有限元单元的选取

罐壁及底板采用四节点等参壳单元;液体采用势流体理论来计算,该理论假设条件如下:液体是无黏、无旋、无热传递;微可压缩;液体边界有相对较小的位移或没有位移,实际液体流速小于声速或没有液体流动,因此罐内液体采用三维势流体单元模拟;液面为自由面,考虑液固耦合,采用 Newmark 数值分析法进行动力求解,建立考虑基础土有限元模型,如图 1 所示:

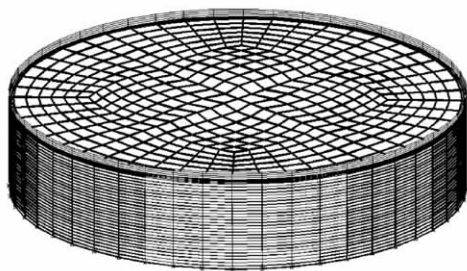


图 1 储罐有限元模型

Fig. 1 The FE model of vertical storage tank

表 1 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 立式储罐罐壁厚度和高度

Table 1 The wall thickness and height of $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ liquid storage tank

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

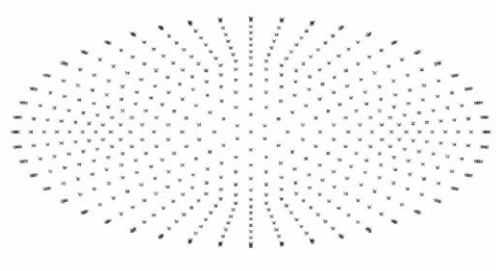


图 2 地基和隔震层弹簧单元模型

Fig. 2 The spring element model of foundation and isolation layer

1.3 地基模型及参数

将地基土简化为弹簧阻尼体系来模拟基础的滑移及土体对上部结构的约束作用,通过选取不同剪切波

速来代表地基土的“软硬”程度,即场地类别。本文考虑单层中软土的储罐土-结构相互作用,假定土层的剪切波速为 200 m/s ,地基土层密度取为 $\rho_f = 2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,考虑 SSI 效应时弹簧刚度系数 K_f 和阻尼系数 C_f 表达式为^[8]:

$$G_f = V_f^2 \cdot \rho_f$$

(1)

$$K_f = \frac{32(1 - v_f) G_f R}{(7 - 8v_f)}$$

(2)

$$C_f = 0.576 K_f R \sqrt{\frac{\rho_f}{G_f}}$$

(3)

式中: G_f 为土体的剪切模量; V_f 为剪切波速; v_f 为泊松比; R 为储罐半径。

1.4 隔震层参数

文献[1]中的研究表明,隔震层等效黏滞阻尼比 ζ 在 $0.1 \sim 0.4$ 时,可以起到很好的隔震效果,隔震频率 $\omega = 2 \sim 4 \text{ rad/s}$ 时可以有效降低基底剪力。本文取隔震层自振周期 $T_b = 2 \text{ s}$;隔震层等效黏滞阻尼比 $\zeta = 0.1$;隔震层弹簧刚度系数 K_b 和阻尼系数 C_b 为^[9]:

$$K_b = m \cdot \left(\frac{2\pi}{T_b}\right)^2$$

(4)

$$C_b = \zeta m \cdot \frac{4\pi}{T_b}$$

(5)

将代表地基和隔震层的弹簧串联,求出串联后的弹簧总刚度,平均分配到底面下表面节点上,计算出每个弹簧单元水平刚度系数 K_1 和阻尼系数 C_1 ,具体数值见表 2。将储罐底板的下表面定义为 3 个方向弹簧,如图 2 所示,其中水平方向弹簧参数由计算得出。为简化计算,考虑竖向弹簧参数为无穷大。体系中的弹簧刚度与地基土和隔震层的刚度有关,阻尼则代表了地基土和隔震层的耗能特性。

表 2 4 种工况水平刚度 K_1 和阻尼系数 C_1
Table 2 Stiffness K_1 and damping coefficients C_1 in four conditions

工况	非隔震不考虑 SSI	非隔震考虑 SSI	隔震不考虑 SSI	隔震考虑 SSI
水平弹簧刚度 K_1 (N/m)	1×10^{21}	$3.582\ 19 \times 10^7$	$3.067\ 649 \times 10^5$	$3.041\ 602 \times 10^5$
阻尼系数 C_1 (Ns/m)	0	5.154×10^6	$9.764\ 918 \times 10^3$	$5.168\ 12 \times 10^6$

2 计算工况

分别考虑:(1)非隔震不考虑 SSI;(2)非隔震考虑 SSI;(3)隔震不考虑 SSI;(4)隔震考虑 SSI 4 种工况。非隔震不考虑 SSI 工况即弹簧刚度取无穷大,阻尼系数 $C_1 = 0$,固结在刚性地基上的情况;非隔震考虑 SSI 工况即水平弹簧刚度 K_1 取土层刚度, C_1 取土层阻尼,建在软土地基上的情况;隔震不考虑 SSI 工况即水平弹簧刚度 K_1 取隔震层刚度, C_1 取隔震层阻尼的情况;隔震考虑 SSI 工况即水平弹簧刚度 K_1 取隔震层刚度和土层刚度并联, C_1 取隔震层阻尼和土层阻尼求和的情况。各个工况竖向弹簧刚度均取为无穷大。

3 地震动输入

为比较分析 SSI 效应对结构的影响,地震动采用水平 x 向 El Centro 地震波,持续时间为 20 s ,输入地震动加速度峰值为 0.2 g ;该地震动是自由场地上的地震动,并未考虑反推透射边界上的位移和加速度作为新的输入,这将在以后进行深入研究。地震动加速度时程曲线如图 3 所示:

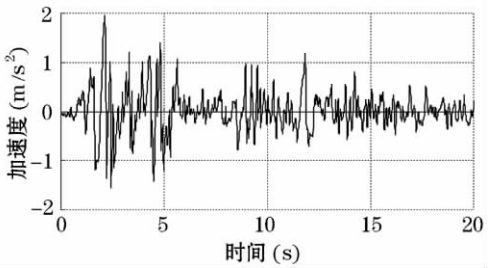


图 3 El Centro 水平地震动

Fig. 3 El Centro horizontal ground motion

4 数值分析

4.1 计算结果

为了对比分析 模拟各种工况遭遇相同的地震烈度(8 度) 提取数据点均位于罐壁各层的顶端 各个工况下地震响应峰值的对比如表 3 所示。

表 3 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐各个工况地震响应峰值对比
Table 3 Earthquake responses of $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ tank

	环向应力(MPa)		轴向应力(MPa)		径向应力(MPa)		基底弯矩($10 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}$)	
	非隔震	隔震	非隔震	隔震	非隔震	隔震	非隔震	隔震
未考虑 SSI	225.262	62.080	76.586	8.393	39.082	22.083	7.889	0.882
考虑 SSI	156.942	98.335	36.232	32.195	28.294	32.436	5.112	4.183
对比(%)	30.329	-58.400	52.691	-283.557	27.603	-46.882	35.201	-374.263

注: 对比 = $\frac{\text{未考虑 SSI} - \text{考虑 SSI 数值}}{\text{未考虑 SSI 数值}} \times 100\%$

4.2 地基土的影响对比分析

在水平 x 向 El Centro 地震动作用下 得出各个工况沿着罐壁高度方向变化的径向应力、环向应力、轴向应力和绝对加速度的峰值包络曲线以及基底弯矩时程曲线如图 4 ~ 图 8 所示:

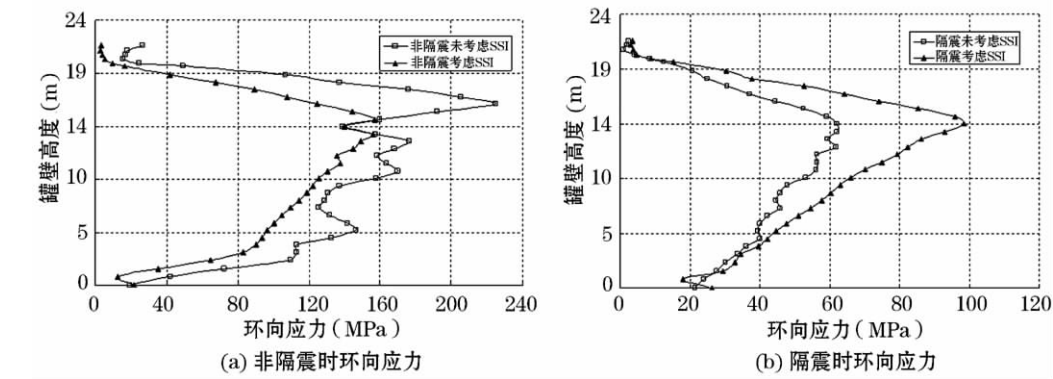


图 4 环向应力对比

Fig.4 Hoop stress contrast

从图 4 中可以看出隔震情况下的峰值较非隔震情况下的峰值要小 隔震有明显效果。隔震和非隔震环向应力在罐底和灌顶处较小 罐壁高度 10 ~ 15m 范围内峰值较大 设计时应重点考虑。非隔震考虑 SSI 工况中土层起到隔震层作用 减小了环向应力峰值 较非隔震未考虑 SSI 工况减小了 30.329%; 隔震考虑 SSI 工况较隔震未考虑 SSI 工况环向应力峰值放大了 58.4% 隔震时考虑 SSI 效应使隔震效果降低。

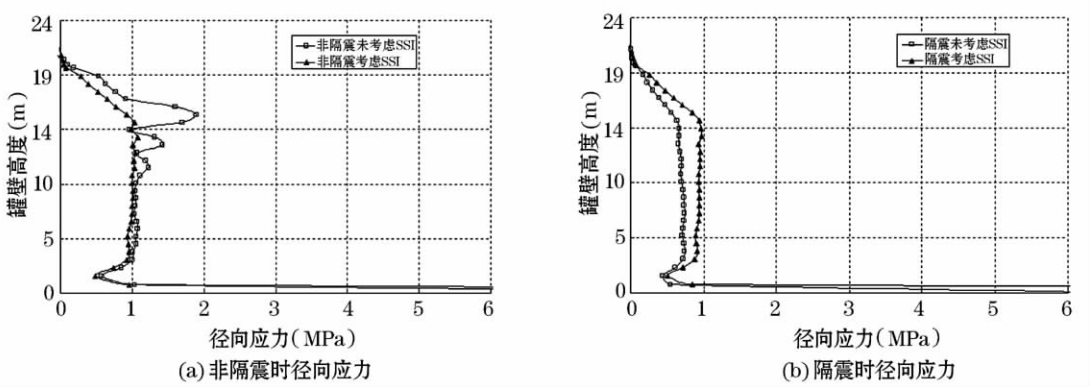


图 5 径向应力对比

Fig.5 Radial stress contrast

从图5中可以看出,沿罐壁高度方向隔震结构减震效果不明显,无论是非隔震还是隔震考虑SSI后对径向应力的影响不大。非隔震时考虑SSI效应径向应力有所减小;隔震时考虑SSI效应径向应力有所放大,这是由于隔震层刚度和土层刚度并联后的刚度小于隔震层的刚度引起的。由于径向应力较环向应力小很多,设计时可以忽略。

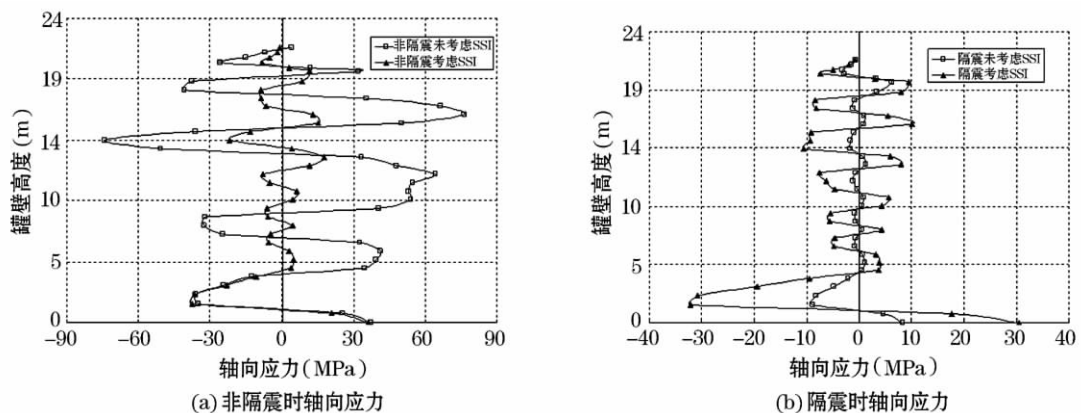
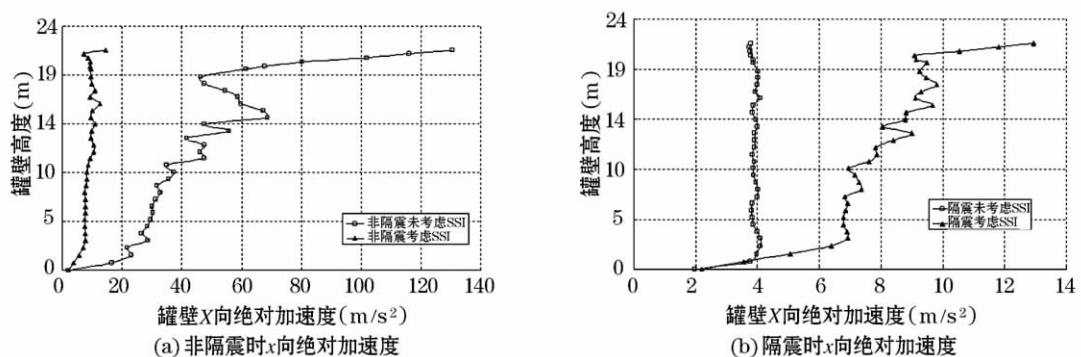


图6 轴向应力对比

Fig. 6 Axial stress contrast

由图6可以看出,轴向应力在非隔震时考虑SSI较未考虑SSI降低了52.69%,在隔震时考虑SSI较未考虑SSI放大了2.83倍。

图7 x 向绝对加速度对比Fig. 7 Absolute acceleration contrast in x -direction

从图7可以看出,非隔震未考虑SSI工况的绝对加速度随着罐壁高度的增加而增大,非隔震时考虑SSI和未考虑SSI差别很大,非隔震未考虑SSI罐顶峰值比其他位置峰值大很多。从图7(a)和(b)对比来看,隔震情况加速度明显小于非隔震情况;另外非隔震考虑SSI和隔震时的工况罐壁 x 向加速度峰值分别在一个相对稳定的范围内,罐壁呈现平动的特点。

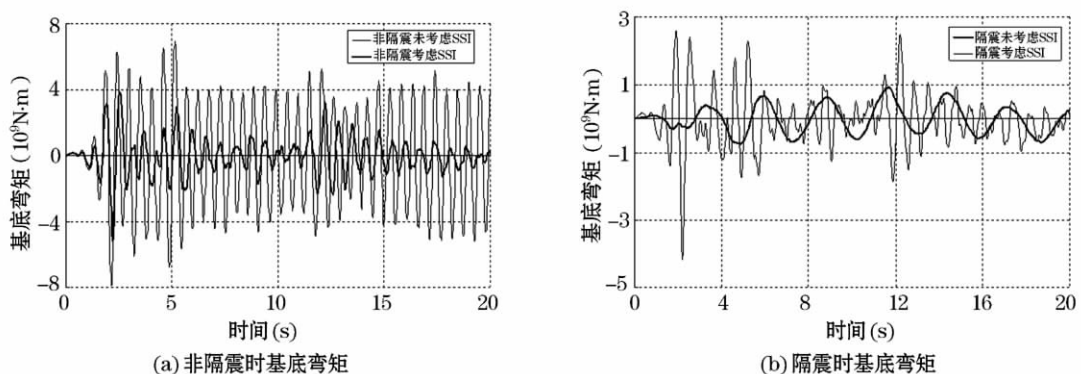


图8 基底弯矩对比

Fig. 8 Base bending moment contrast

从图8中非隔震和隔震对比来看,隔震时基底弯矩有明显的下降,说明基础隔震体系能很好降低基底弯矩。非隔震时考虑SSI基底弯矩最大值较不考虑SSI时降低了35.2%,隔震时考虑SSI放大了3.7倍。

5 结论

本文应用ADINA有限元分析系统进行了考虑SSI和不考虑SSI效应的 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 大型储罐在非隔震和基础隔震情况下的地震响应数值分析,得出以下结论:

(1) 考虑SSI效应后,非隔震时,环向应力、径向应力、轴向应力、罐壁加速度峰值和基底弯矩均降低,这一点表明现行的不考虑SSI效应的设计,在软场地时偏于保守。

(2) 隔震状态下,考虑和不考虑SSI效应的环向应力、径向应力、轴向应力、罐壁加速度峰值和基底弯矩均较非隔震状态下的响应降低,隔震能起到很好的抑制作用。

(3) 环向应力在罐底和罐顶较小,受地基土的影响较小;在罐的中间部位较大,在15m左右达到最大值,此处受地基土的影响较大。无论是非隔震还是隔震考虑SSI后对径向应力的影响不大。

(4) 本文仅对一种储罐,单一场地和地震动输入进行了分析,对其他情况储罐非隔震减震设计时要视设计安全需要综合考虑场地类别及地震动输入等因素来决定是否考虑SSI效应。

参考文献:

- [1] 孙建刚. 大型立式储罐隔震——理论、方法及实验[M]. 北京: 科学技术出版社, 2009.
SUN Jiangang. Isolation of large vertical storage tank——theory, method, test[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [2] 孙建刚, 崔利富, 张 营, 等. 土与结构相互作用对储罐地震响应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(3): 141–146.
SUN Jiangang, CUI Lifu, ZHANG Ying, et al. Research on seismic responses of storage-tanks considering soil-structure interaction[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(3): 141–146. (in Chinese)
- [3] 周利剑. 水平地震激励下立式储罐与地基相互作用动力响应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
ZHOU Lijian. Earthquake response analysis of liquid storage tanks under lateral excitations with soil-structure interaction[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese)
- [4] 崔利富, 孙建刚, 李德昌, 等. 考虑SSI效应的立式储罐水平基础隔震研究[J]. 世界地震工程, 2011, 27(2): 140–141.
CUI Lifu, SUN Jiangang, LI Dechang, et al. Seismic response of vertical storage tanks with horizontal base isolation considering soil-structure interaction (SSI) [J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(2): 140–141. (in Chinese)
- [5] 孙 颖, 孙建刚, 崔利富, 等. 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): 121–123.
SUN Ying, SUN Jiangang, CUI Lifu, et al. Numerical research on large base isolation vertical storage tanks with floating roof[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(3): 121–123. (in Chinese)
- [6] 于 旭, 宰金珉, 庄海洋, 等. SSI效应对隔震结构地震响应的影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(6): 846–847.
YU Xu, ZAI Jinmin, ZHUANG Haiyang, et al. Effects of soil-structure interaction on earthquake response of isolated structure system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(6): 846–847. (in Chinese)
- [7] J. P. 瓦尔夫. 土-结构动力相互作用[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
Wolf J P. Dynamic soil-structure interaction[M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1989. (in Chinese)
- [8] Haroun M A. Parametric study of seismic soil-tank interaction I: horizontal excitation[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1992, 118(3): 783–797.
- [9] 李 慧, 王亚楠, 杜永峰. 土-结构动力相互作用对基础隔震结构的影响[J]. 工程非隔震与加固改造, 2012, 34(1): 38–39.
LI Hui, WANG Yanan, DU Yongfeng. Influence of soil-structure dynamic interaction on base-isolation structure[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2012, 34(1): 38–39. (in Chinese)