

立式储罐基础隔震力学模型对比分析

崔利富¹, 孙建刚¹, 郑建华², 李金光²

(1. 大连民族学院 土木建筑工程学院, 116600 大连 辽宁; 2. 中国寰球工程公司, 100028 北京)

摘要: 为了给立式储罐基础隔震提供设计理论支撑, 基于现有储罐弹性理论的抗震模型, 引入基础隔震措施, 建立了便于工程设计人员应用的储罐基础隔震力学模型, 同时与储罐弹性理论三质点隔震力学模型参数进行对比. 针对 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 大型立式储罐, 隔震层采用等效线性本构关系, 选取峰值加速度为 $0.40g$ 的 El-Centro 水平地震波作为地震动输入, 运动方程采用数值积分方法求解, 进行储罐弹性理论隔震模型参数及地震响应对比分析. 结果表明: 不同储罐弹性理论隔震模型的质量参数和高度参数差异不大, 设计时可以互相对比参照计算, 几种模型中对流质量占总质量70%以上, 设计时应给予注意; 隔震主要降低的是弹性脉冲分量引起的地震响应, 隔震后长周期的对流分量起主导作用; 从反映的实际情况出发, 所提出的储罐弹性理论三质点隔震力学模型是可行的, 适用的.

关键词: 立式储罐; 基础隔震; 弹性理论; 力学模型; 地震响应

中图分类号: TU352.12 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2013)06-0102-05

Base isolation mechanical model comparative analysis of vertical storage tank

CUI Lifu¹, SUN Jiangan¹, ZHENG Jianhua², LI Jinguang²

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Dalian Nationalities University, 116600 Dalian, Liaoning, China;
2. China Huanqiu Contracting & Engineering Cooperation, 100028 Beijing, China)

Abstract: To provide base isolation design theory support of vertical storage tank, based on existing elastic theory seismic model, introducing the base isolation measures, the base isolation mechanical model was established, which was convenient to engineering design staff, at the same time, base isolation mechanical model was compared to elasticity theory three-mass tank isolation mechanical model which was author put. For $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ vertical storage tanks, isolation layer using the equivalent linear model, selecting $0.40g$ El-Centro seismic wave as the ground motion input, the equations of motion using numerical integration method, the model parameters and seismic response were analyzed. The results showed that: several elastic theory tank isolation model mass and height parameters were similar, storage tank design could be compared with reference to calculation. Convective mass of several models more than 70% total mass, it should be give attention. Isolation reduces the earthquake response of elastic impulse component, while long period convective component plays a leading role. From the actual situation, elasticity theory three-mass tank isolation mechanical model of author was feasible and applicable.

Key words: vertical storage tanks; base isolation; elasticity theory; mechanical model; seismic response

自20世纪60年代开始发展至今,关于立式储罐抗震设计的简化模型主要有两种. 其中一种

是基于 Housner 刚性壁假设的刚性理论模型^[1-3],但是按刚性理论设计的大量美国钢制储罐在1964年阿拉斯加(Alaska)地震中遭到了严重破坏^[4]. 鉴于此,国内外研究者考虑罐壁弹性变形的影响,提出了弹性理论模型,并写入了相关储罐设计规范. 发展至今成熟的模型有欧洲 EC8 规范^[5]的 Malhotra 两质点模型^[6]. 美国第11版 API650 规范^[7]考虑罐壁弹性变形的影响,将原刚

收稿日期: 2012-07-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51078063);
中国石油集团公司科技专项基金(H201104006).

作者简介: 崔利富(1982—),男,博士,讲师;
孙建刚(1959—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 孙建刚, sjg728@163.com.

性壁理论的冲击质量等价于柔性壁理论的冲击质量, 并考虑对流质量的影响进行储罐抗震设计. 基于 Haroun-Housner 模型^[8], 我国储罐抗震鉴定标准^[9]给出了考虑对流分量、随罐壁一起作弹性运动的弹性脉动分量和随地面一起运动的刚性脉动分量的三质点力学模型.

上述储罐抗震的模型已被各国规范所采用, 但是即使通过抗震设计的储罐仍然在震害中有事故发生^[10]. 本文基于土木工程中的基础隔震思想, 基于现有储罐弹性理论抗震力学模型, 提出易于工程设计人员理解和应用的储罐隔震力学模型, 同时与弹性理论三质点力学模型^[11-13]进行对比, 为立式储罐基础隔震设计提供理论和技术支撑. 本文选取 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 大型立式储罐为研究对象, 验证了立式储罐基础隔震弹性理论三质点力学模型的可行性.

1 储罐基础隔震力学模型及控制方程

1.1 立式储罐几何物理属性

如图 1 所示的立式圆筒形钢制储罐, 其罐壁高度为 H , 半径为 R , 罐壁厚度为 t_s , 储液高度为 H_1 , 罐壁弹性模量为 E_s , 罐壁密度为 ρ_s , 储液密度为 ρ_l .

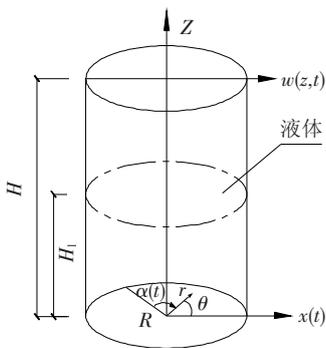


图 1 储罐几何坐标系

1.2 立式储罐弹性理论基础隔震力学模型

基于 EC8 与 API650 模型的立式储罐基础隔震力学模型如图 2 所示.

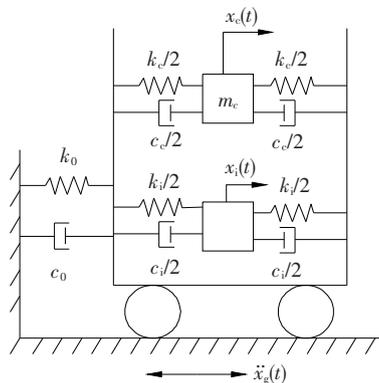


图 2 基于 EC8 与 API650 的储罐隔震模型

图 2 中将罐内液体质量简化为对流质量 m_c 和弹性脉冲质量 m_i , 其等效高度分别为 h_c, h_i , 由等效弹簧刚度 k_c, k_i 及阻尼常数 c_c, c_i 与罐壁相连. 隔震层刚度为 k_0 , 阻尼为 c_0 . 隔震层位移为 $x_0(t)$ 、弹性脉冲质量位移为 $x_i(t)$ 、对流晃动位移为 $x_c(t)$ 和地面运动位移为 $x_g(t)$.

图中的刚度和阻尼参数可由下式确定, 即

$$\begin{cases} k_0 = \omega_0^2 (m_i + m_c), \\ k_c = m_c \omega_c^2, \\ k_i = m_i \omega_i^2, \\ c_0 = 2\xi_0 \omega_0 (m_i + m_c), \\ c_c = 2\xi_c \omega_c m_c, \\ c_i = 2\xi_i m_i \omega_i. \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_0 为隔震频率; ω_c 为一阶晃动频率; ξ_0, ξ_i 和 ξ_c 分别为隔震层、弹性脉冲质点和晃动分量的阻尼比, 分别取 0.2、0.02 和 0.005.

EC8 (Malhotra) 模型参数系数如表 1 所示. 弹性脉冲分量自振周期为

$$T_i = c_i \frac{H_1 \sqrt{\rho_l}}{\sqrt{\frac{t_s}{R} \times \sqrt{E_s}}}$$

表 1 EC8 模型参数系数

H_1/R	c_i	$c_c / (s \cdot m^{-2})$	m_i/m_1	m_c/m_1	h_i/H_1	h_c/H_1
0.3	9.28	2.09	0.176	0.824	0.400	0.521
0.5	7.74	1.74	0.300	0.700	0.400	0.543
0.7	6.97	1.60	0.414	0.586	0.401	0.571
1.0	6.36	1.52	0.548	0.452	0.419	0.616
1.5	6.06	1.48	0.686	0.314	0.439	0.690
2.0	6.21	1.48	0.763	0.237	0.448	0.751
2.5	6.56	1.48	0.810	0.190	0.452	0.794
3.0	7.03	1.48	0.842	0.158	0.453	0.825

对流分量自振周期为

$$T_c = c_c \sqrt{R}.$$

基于 API650 模型的立式钢制储罐隔震力学模型参数分别为

$$m_i = \begin{cases} \frac{\tanh\left(0.866 \frac{D}{H_1}\right)}{0.866 \frac{D}{H_1}} m_1, & \frac{D}{H} \geq 1.333; \\ \left(1.0 - 0.218 \frac{D}{H_1}\right) m_1, & \frac{D}{H} < 1.333. \end{cases}$$

$$h_i = \begin{cases} 0.375 H_1, & \frac{D}{H} \geq 1.333; \\ \left(0.5 - 0.094 \frac{D}{H_1}\right) H_1, & \frac{D}{H} < 1.333. \end{cases}$$

$$m_c = 0.230 \frac{D}{H_1} \tanh\left(\frac{3.67 H_1}{D}\right) m_1.$$

$$h_c = \left[1.0 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67 H_1}{D}\right) - 1}{\frac{3.67 H_1}{D} \sinh\left(\frac{3.67 H_1}{D}\right)} \right] H_1.$$

冲击分量自振周期为

$$T_i = \frac{1}{\sqrt{2000}} \frac{C_i H_1}{\sqrt{t_s}} \left(\frac{\sqrt{\rho_1}}{\sqrt{E_s}} \right).$$

对流分量自振周期为

$$T_c = 1.8 \times K_s \sqrt{D}.$$

式中: C_i 、 K_s 分别为冲击分量系数和对流分量系数, 可由文献[11]查得.

由 Hamilton 原理, 得运动控制方程为

$$\begin{bmatrix} m_c & 0 & m_c \\ 0 & m_i & m_i \\ m_c & m_i & m_i + m_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_c & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 \\ 0 & 0 & c_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{x}_i \\ \dot{x}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 \\ 0 & k_i & 0 \\ 0 & 0 & k_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ x_i \\ x_0 \end{bmatrix} = -\ddot{x}_g(t) \begin{bmatrix} m_c \\ m_i \\ m_c + m_i \end{bmatrix}.$$

基底剪力、罐壁倾覆力矩及波高方程分别为

$$\begin{aligned} Q &= -m_i [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_i(t)] - m_c [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_c(t)]; \\ M &= -m_i h_i [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_i(t)] - m_c h_c [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_c(t)]; \\ h_v &= 0.837R \frac{\ddot{x}_c + \ddot{x}_0 + \ddot{x}_g}{g} \quad (\text{EC8 规范}), \\ h_v &= R \frac{\ddot{x}_c + \ddot{x}_0 + \ddot{x}_g}{g} \quad (\text{API650 规范}). \end{aligned}$$

本文提出的基于 Housner-Haroun 弹性理论的立式储罐基础隔震力学模型如图 3 所示.

图 3 中 m_0 为刚性脉冲质量, 等效高度为 h_0 , 其他符号意义同前. 图中的 k_0 和 c_0 可由下式确定, 其他量可由式(1)确定.

$$\begin{aligned} k_0 &= \omega_0^2 (m_i + m_c + m_0), \\ c_0 &= 2\xi_0 \omega_0 (m_i + m_c + m_0). \end{aligned}$$

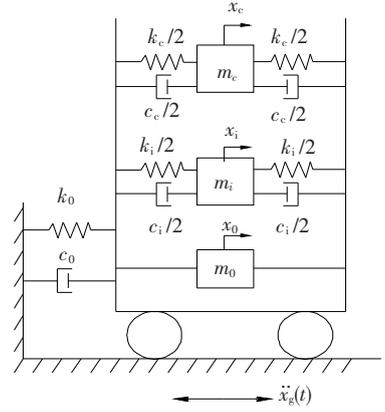


图 3 基于 Housner-Haroun 弹性理论的储罐隔震模型

由 Hamilton 原理, 得运动控制方程为

$$\begin{bmatrix} m_c & 0 & m_c \\ 0 & m_i & m_i \\ m_c & m_i & m_i + m_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_c & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 \\ 0 & 0 & c_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{x}_i \\ \dot{x}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 \\ 0 & k_i & 0 \\ 0 & 0 & k_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ x_i \\ x_0 \end{bmatrix} = -\ddot{x}_g(t) \begin{bmatrix} m_c \\ m_i \\ m_c + m_i + m_0 \end{bmatrix}.$$

基底剪力、倾覆力矩及波高方程分别为

$$\begin{aligned} Q &= -m_0 [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] - m_i [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_i(t)] - m_c [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_c(t)]; \\ M &= -m_0 h_0 [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] - m_i h_i [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_i(t)] - m_c h_c [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_c(t)]; \\ h_v &= 0.837R \frac{\ddot{x}_c + \ddot{x}_0 + \ddot{x}_g}{g}. \end{aligned}$$

基于 Housner-Haroun 弹性理论模型参数为

$$\begin{cases} m_c = m_1 (1.01327 - 0.87578S + 0.35708S^2 - 0.06692S^3 + 0.00439S^4), \\ m_i = m_1 (-0.15467 + 1.21716S - 0.62839S^2 + 0.14434S^3 - 0.0125S^4), \\ m_r = m_1 (-0.01599 + 0.86356S - 0.30941S^2 + 0.04083S^3), \\ m_0 = m_r - m_i. \end{cases}$$

$$\begin{cases} h_c = H_1(0.524\ 10 - 0.107\ 92S + 0.339\ 58S^2 - \\ \quad 0.193\ 57S^3 + 0.047\ 91S^4 - 0.004\ 55S^5), \\ h_i = H_1(0.440\ 86 - 0.119\ 72S + 0.167\ 52S^2 - \\ \quad 0.060\ 89S^3 + 0.007\ 51S^4), \\ h_r = H_1(0.442\ 33 + 0.084\ 45S + 0.079\ 16S^2 - \\ \quad 0.026\ 77S^3 + 0.003\ 26S^4), \\ h_0 = \frac{(m_i h_r - m_i h_i)}{m_0}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \omega_i = \frac{P}{H_1} \sqrt{\frac{E_s}{\rho_s}}, \\ \omega_c = \sqrt{1.84 \left(\frac{g}{R}\right) \tanh\left(1.84 \frac{H_1}{R}\right)}. \end{cases}$$

$$P = 0.037\ 085 + 0.084\ 302S - 0.050\ 88S^2 + 0.012\ 523S^3 - 0.001\ 2S^4.$$

本文提出的三质点储罐基础隔震模型力学模型参数为

$$\begin{cases} m_c = (0.002\ 12S^5 - 0.009\ 58S^4 - 0.043\ 65S^3 + \\ \quad 0.378\ 96S^2 - 0.969\ 56S + 1.094\ 59)m_1, \\ m_i = (-0.001\ 81S^5 + 0.005\ 98S^4 + 0.058\ 58S^3 - \\ \quad 0.396\ 21S^2 + 0.911\ 99S - 0.095\ 82)m_1, \\ m_0 = (-0.000\ 31S^5 + 0.003\ 60S^4 - 0.014\ 93S^3 + \\ \quad 0.017\ 25S^2 + 0.057\ 57S + 0.001\ 23)m_1, \\ h_c = H_1(-0.002\ 48S^5 + 0.028\ 19S^4 - 0.121\ 18S^3 + \\ \quad 0.216\ 93S^2 - 0.015\ 20S + 0.509\ 60), \\ h_i = H_1(-0.000\ 63S^5 + 0.008\ 07S^4 - 0.041\ 23S^3 + \\ \quad 0.097\ 84S^2 - 0.065\ 46S + 0.468\ 14), \\ h_0 = H_1(-0.003\ 04S^5 + 0.031\ 20S^4 - 0.123\ 99S^3 + \\ \quad 0.238\ 81S^2 - 0.223\ 47S + 0.017\ 06), \\ k_i = \frac{4\pi^5 E_s t_s m_i}{m_1} [0.000\ 335S^3 - 0.000\ 021S^2 - \\ \quad 0.063\ 61S + 0.065\ 598]^2, \\ \omega_c^2 = \frac{1.84g}{R} \tanh(1.84S). \end{cases}$$

2 算例分析

2.1 几何物理参数

以 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 储罐为研究对象, 其储液密度

ρ_l 为 $1\ 000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 弹性模量 E_s 为 $2.06 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 罐壁高度 $H = 21.7 \text{ m}$, 半径 $R = 50 \text{ m}$, 储液高度 $H_1 = 20.1 \text{ m}$.

2.2 地震波选取和控制方程求解方法

选取如图 4 所示的峰值加速度为 $0.40g$ 的 El-Centro 水平地震波作为地震动输入, 隔震层采用等效线性本构关系, 运动方程用 Wilson- θ 数值分析法求解。

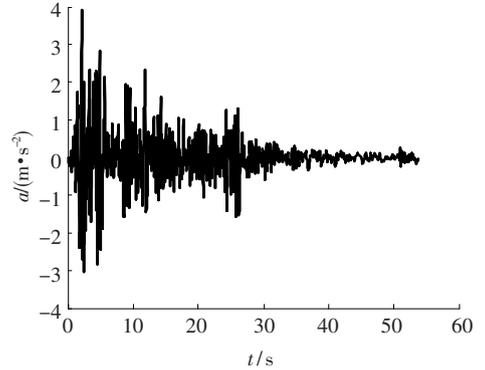


图 4 Elcentro 水平地震波

2.3 不同储罐隔震模型的参数对比

不同储罐隔震模型的参数对比如表 2 所示。可见, 就质量参数而言, 由于 EC8 模型的弹性脉冲质量和对流质量考虑了一阶振型质量与高阶振型质量的组合, 而 API650 模型的弹性脉冲质量采用的是刚性理论中 Housner 模型^[1-3]的刚性脉冲质量, 对流质量只考虑一阶振型质量, 导致 EC8 模型略大于 API650 模型的质量; 弹性理论中 Housner-Haroun 模型刚性脉冲质量比本文模型大 3 倍多, 弹性脉冲质量与本文模型基本一致, 由于本文模型中的对流质量包括高阶振型质量, 要大于只考虑一阶振型质量的 Housner-Haroun 模型对流质量。就高度参数而言, EC8 模型考虑了高阶振型对基底倾覆弯矩的贡献, 导致弹性脉冲质量的等效高度要大于 API650 模型, 但 API650 模型对流质量的等效高度有增大修正; Housner-Haroun 模型与本文模型的刚性脉冲质量等效高度差别较大, 本文模型中的柔性脉冲质量和对流质量的等效高度略大于 Housner-Haroun 模型。另外, 对高径比较小的 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 矮胖罐, 其对流质量达到总质量的 70% 以上。

表 2 不同储罐隔震模型的参数对比

隔震模型	m_0/m_1	m_i/m_1	m_c/m_1	h_0/h_l	h_i/h_l	h_c/h_l
EC8 模型		0.238 6	0.761 4		0.400 0	0.532 4
API650 模型		0.232 0	0.718 3		0.375 0	0.699 6
Housner-Haroun 模型	0.080 0	0.203 8	0.714 7	0.902 0	0.416 0	0.524 2
本文模型	0.026 3	0.208 0	0.763 0	-0.041 5	0.455 2	0.531 4

2.4 不同储罐隔震模型的地震响应对比

不同储罐隔震模型的地震响应对比如表 3 所示. 可见, 除晃动波高外, 基底剪力和倾覆力矩减震效应明显, 隔震主要降低的是弹性脉冲分量引起的地震响应, 隔震后长周期的对流分量起主导作用. 由于 Housner-Haroun 模型和本文模型中的弹性脉冲质量不包含刚性脉冲质量, 缩小了弹性脉冲质量对基底剪力的贡献, 导致基底剪力小于

EC8 模型与 API650 模型的基底剪力; 对于倾覆力矩来说, 由于模型中等效质量及等效刚度的不同, 各种模型倾覆力矩略有差异; 对于晃动波高来说, 除 API650 模型对一阶振型晃动波高公式给出修正, 其他模型都是按照小幅线性一阶振型晃动理论计算的, 结果基本一致. 从反映实际情况出发, 本文提出的储罐弹性理论三质点隔震力学模型是可行的, 适用的.

表 3 不同储罐隔震模型地震响应对比

隔震模型	基底剪力/ 10^6N		倾覆力矩/ $(10^8\text{N}\cdot\text{m})$		晃动波高/m		减震率/%		
	抗震	隔震	抗震	隔震	抗震	隔震	基底剪力	倾覆力矩	晃动波高
EC8 模型	433.665	82.366	34.925	6.570	0.555	0.543	81.007	81.190	2.086
API650 模型	467.262	78.573	34.897	5.984	0.687	0.680	83.185	82.852	0.952
Housner-Haroun 模型	383.254	90.524	33.182	8.369	0.578	0.575	76.380	74.778	0.482
本文模型	366.461	83.592	34.691	7.721	0.578	0.572	77.189	77.744	0.954

3 结 论

1) 从现有储罐弹性理论抗震力学模型出发, 引入基础隔震思想, 提出了储罐隔震力学模型, 为立式储罐基础隔震设计提供了理论支撑.

2) 通过 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 大型立式储罐隔震模型参数对比表明, 不同储罐弹性理论隔震模型质量参数和高度参数差异不大, 设计时可以互相对比参照计算, 几种模型中对流质量达到总质量的 70% 以上, 设计时应给予注意.

3) 除晃动波高外, 基底剪力和倾覆力矩减震效应明显, 隔震主要降低的是弹性脉冲分量引起的地震响应, 隔震后长周期的对流分量起主导作用.

4) 从反映的实际情况出发, 提出储罐弹性理论三质点隔震力学模型, 工程实践证明模型是可行的, 适用的.

参考文献

[1] HOUSNER G W. Dynamic pressures on accelerated 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] 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.

[4] 温德超, 郑兆昌, 孙焕纯. 储液罐抗震研究进展 [J]. 力学进展, 1995, 25(1): 60 - 71.

[5] CEN - EC8 - 2003. Eurocode 8; design of structures for earthquake resistance; part 4: silos, tanks and pipelines [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2003.

[6] MALHOTRA P K, WENK T, WIELAND M. Simple procedure for seismic analysis of liquid storage tanks [J]. Structural Engineering International: Journal of the IABSE, 2000, 10(3): 197 - 201.

[7] API 650 - 2007. Welded steel tanks for oil storage [S]. Washington: American Petroleum Institute, 2007.

[8] HAROUN M A. Vibration studies and tests of liquid storage tanks [J]. Earthquake Engineering Structure Dynamic, 1983, 11: 179 - 206.

[9] SH 3026—1990. 常压立式储罐抗震鉴定标准 [S]. 上海: 中国石油化工总公司上海高桥石油化工公司, 1990.

[10] HANDAM F H. Seismic behavior of cylindrical steel storage tanks [J]. Journal of Construction Steel Research, 2000, 53: 307 - 333.

[11] 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.

[12] 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.

[13] 崔利富. 大型 LNG 储罐基础隔震与晃动控制研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2012.

(编辑 魏希柱)