

立式浮顶储罐基础隔震地震响应研究

孙建刚^{1,2}, 崔利富³, 杜蓬娟¹, 赵长军²

(1. 大连民族学院 土木建筑工程学院, 116600 辽宁 大连, sjg728@163.com; 2. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 163318 黑龙江 大庆; 3. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 116026 辽宁 大连)

摘 要: 为研究浮顶储罐基础隔震地震响应问题, 将浮顶假定为均质刚性圆板, 波高振动形式受浮顶约束假设为沿半径线性分布. 由速度势理论出发, 建立液体运动势函数、基底剪力、倾覆力矩表达, 由板振动理论建立浮顶运动方程, 由能量原理建立罐体运动控制方程. 采用时程分析方法研究了浮顶储罐基础隔震的地震响应, 数值结果表明: 隔震基频宜取 $2 \sim 3 \text{ rad/s}$ 、隔震阻尼比宜取 0.1 , I 类、II 类场地减震率效果好于 III 类、IV 类场地, 场地不同对波高的影响不同, 高径比对隔震浮顶储罐的地震响应影响不大.

关键词: 浮顶储罐; 基础隔震; 波高; 基底剪力; 倾覆力矩

中图分类号: P315.952 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)08-0140-05

Study on the seismic responses of vertical floating roof storage tanks with the base isolation

SUN Jian-gang^{1,2}, CUI Li-fu³, DU Peng-juan¹, ZHAO Chang-jun²

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Dalian Nationalities University, 116600 Dalian, Liaoning, China, sjg728@163.com; 2. College of Civil and Architecture Engineering, Northeast Petroleum University, 163318 Daqing, Heilongjiang, China; 3. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, 116026 Dalian, Liaoning, China)

Abstract: To study the seismic response of floating roof storage tank with the base isolation, the floating roof is assumed as a homogeneous rigid circular plate, the vibration form of wave height is assumed as linear distribution along the radius. By the velocity potential theory, the velocity potential function of the liquid movement and the expression of base shear and overturning moment are established and by the plate vibration theory and energy principle, the motion equation for the floating roof and the motion equation for the tank system are presented, respectively. With the time history analysis, the seismic responses for the isolated floating roof storage tanks are studied. The numerical results show that the fundamental frequency of isolation is applicable to be $2 \sim 3 \text{ rad/s}$, while the damping ratio of isolation is 0.1 . The damping rates of I, II site are better than those of III, IV site. The effects of different sites on wave height are different, and the ratio of height to diameter has little effect on the seismic response of the isolated floating roof storage tanks.

Key words: floating roof storage tank; base isolation; wave height; base shear; overturning moment

引发立式浮顶的震害主要包括浮顶的卡顶、失稳、罐壁象足屈曲、菱形屈曲、连接部件的破坏等因素^[1-4]. 从储罐抗震问题研究角度看, 侧重自由表面晃动的储罐地震响应分析文献多, 考虑浮顶影响的文献

相对较少^[5-8]. 关于基础隔震研究, 文献[9-11]针对自由面储罐橡胶隔震已做了大量理论和实验研究, 国外 Chalhoub and Kelly^[12]、Malhotra^[13]、Kim and Lee^[14]、Shrimali and Jangid^[15]等研究了自由面储罐滑移、橡胶垫隔震的问题, 结果表明隔震能够有效降低储罐的倾覆力矩, 减少罐壁的轴向应力, 但对波高有放大效应. 可见, 储罐结构控制的研究多以自由面来考虑问题. 实际的结构体系中, 浮顶作为附加质量对储罐的晃动是有影响的. 同时, 由于地震激励产生晃动对浮顶的冲击

收稿日期: 2010-03-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51078063/E0808);

教育部财政资助自主科研项目.

作者简介: 孙建刚 (1959—), 男, 教授, 博士生导师.

作用也是浮顶设计的重要依据. 鉴于此,本文考虑浮顶对动响应的影响,假定其为均质刚性圆板,波高振动形式假设为沿半径线性分布,研究基础隔震立式浮顶储罐地震响应的分析理论.

1 基本理论

1.1 基本假定

浮顶储罐内液体为无旋、无粘、不可压缩的理想流体,浮顶为均质刚性圆板,质量为 m , 储罐基础为橡胶隔震层,隔震层顶部位移为 $x_0(t)$, 隔震层为线性隔震,刚度为 k_0 , 阻尼系数为 c_0 , 储罐壳壁为弹性,具有位移 $w(\theta, z, t)$ 的变化,地面输入激励为 $\ddot{x}_g(t)$. 罐几何和坐标系见图 1.

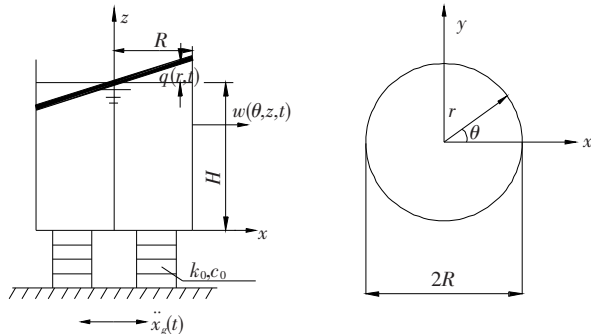


图 1 罐几何和坐标系

1.2 贮存液体圆柱壳的运动势及压力

液体产生的速度势由水平地震激励、液体的晃动、液体沿罐壁的径向运动构成. 为此,将液体的速度势分解为由地面水平地震激励和隔震层运动产生的运动速度势 φ_1 , 浮顶晃动的速度势 φ_2 , 弹性壁径向运动产生的速度势 φ_3 , 则总的速度势为

$$\begin{aligned} \Phi(r, \theta, z, t) &= \varphi_1(r, \theta, z, t) + \varphi_2(r, \theta, z, t) + \varphi_3(r, \theta, z, t) = \\ &\sum_{n=1}^{\infty} [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] \frac{2I_1(\lambda_n r)(-1)^{n+1} \cos(\lambda_n z)}{\lambda_n^2 HI'_1(\lambda_n R)} \cos \theta + \\ &\sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \ddot{h}_{nv}(t) + b_n [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] + c_n \ddot{w}(t)\} \cdot \\ &\quad \operatorname{ch}\left(\frac{\sigma_n z}{R}\right) J_1\left(\frac{\sigma_n r}{R}\right) \cos \theta + \\ &\sum_{n=1}^n \ddot{w}(t) \cos \theta \frac{2I_1(\lambda_n r) \cos(\lambda_n z)}{H \lambda_n I'_1(\lambda_n R)} k_n. \quad (1) \end{aligned}$$

2 运动分析方程

2.1 浮顶运动方程

针对图 1 的基础隔震体系,由速度势 Φ 在浮顶产生的动水压力进行积分,推导得其运动方程为

$$\sum_{n=1}^{\infty} m_n^* \ddot{h}_{nv}(t) + \sum_{n=1}^{\infty} K_{Ln} h_{nv}(t) +$$

$$m_{12} \ddot{w}(t) + m_{13} \ddot{x}_0(t) = -m_{13} \ddot{x}_g(t). \quad (2)$$

2.2 液体与壳体耦合振动方程

由速度势 Φ 在罐壁产生的动水压力 $P = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{r=R}$, 并沿罐壁高度和圆周方向进行积分,同时根据 Hamilton 原理得侧向壁的振动方程:

$$m_{21} \ddot{h}_{1v}(t) + m_{22} \ddot{w}(t) + m_{23} \ddot{x}_0(t) + k_s w(t) = -m_{23} \ddot{x}_g(t). \quad (3)$$

2.3 基础隔震层振动方程

由底层基底剪力在虚位移 δx_0 上所做虚功等于隔震层的变形能和阻尼耗散所做的虚功得

$$m_{31} \ddot{h}_{1v}(t) + m_{32} \ddot{w}(t) + m_{33} \ddot{x}_0(t) + c_0 \dot{x}_0(t) + k_0 x_0(t) = -m_{33} \ddot{x}_g(t). \quad (4)$$

2.4 系统振动方程

由式(2),(3)和(4)构成系统分析的振动方程,并考虑液体的晃动阻尼 c_L 和壳体的阻尼 c_s , 得

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{h}_{1v}(t) \\ \ddot{w}(t) \\ \ddot{x}_0(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_L & & \\ & c_s & \\ & & c_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{h}_{1v}(t) \\ \dot{w}(t) \\ \dot{x}_0(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{L1} & & \\ & k_s & \\ & & k_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_{1v}(t) \\ w(t) \\ x_0(t) \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{Bmatrix} \ddot{x}_g(t). \quad (5)$$

3 倾覆力矩和波高

侧壁倾覆力矩

$$\begin{aligned} M''(t) &= -\rho \pi R \sum_{n=1}^{\infty} [\ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_0(t)] \cdot \\ &\frac{2I_1(\lambda_n R)(-1)^n \beta_n}{\lambda_n^3 HI'_1(\lambda_n R)} - \rho \pi R \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \ddot{h}_{nv}(t) + \\ &b_n [\ddot{x}_g(t) + \ddot{x}_0(t)] + c_n \ddot{w}(t)\} J_1(\sigma_n) \delta_n - \\ &\rho \pi R \sum_{n=1}^{\infty} \ddot{w}(t) \frac{2I_1(\lambda_n R) k_n \beta_n}{\lambda_n^2 HI'_1(\lambda_n R)}. \quad (6) \end{aligned}$$

底板上倾覆力矩

$$\begin{aligned} M_b(r, \theta, 0, t) &= -((\rho_w \sum_{n=1}^{\infty} [\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)] \cdot \\ &\frac{2\pi R^2 I_2(\lambda_n R)}{\lambda_n^3 HI'_1(\lambda_n R)} + \rho_w \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \ddot{h}_{nv}(t) + b_n [\ddot{x}_0(t) + \\ &\ddot{x}_g(t)] + c_n \ddot{w}(t)\} \frac{\pi R^3}{\sigma_n^2} J_1(\sigma_n) + \\ &\rho_w \sum_{n=1}^{\infty} \ddot{w}(t) \frac{2\pi R^2 k_n I_2(\lambda_n R)}{\lambda_n^2 HI'_1(\lambda_n R)}). \quad (7) \end{aligned}$$

波高

$$q(r, \theta, t) = h_{1v}(t) \frac{r}{R} \cos \theta. \quad (8)$$

4 数值分析

以 15 万方立式钢制浮顶储罐为研究对象,研究隔震与非隔震在地震动作用下,高径比、隔震基频、阻尼比、场地对地震响应的影响.

4.1 高径比对储罐地震响应影响

图 2 给出的是在 El - Centro 波地震作用下,加速度峰值为 0.4g,隔震基频为 2.093rad/s,隔

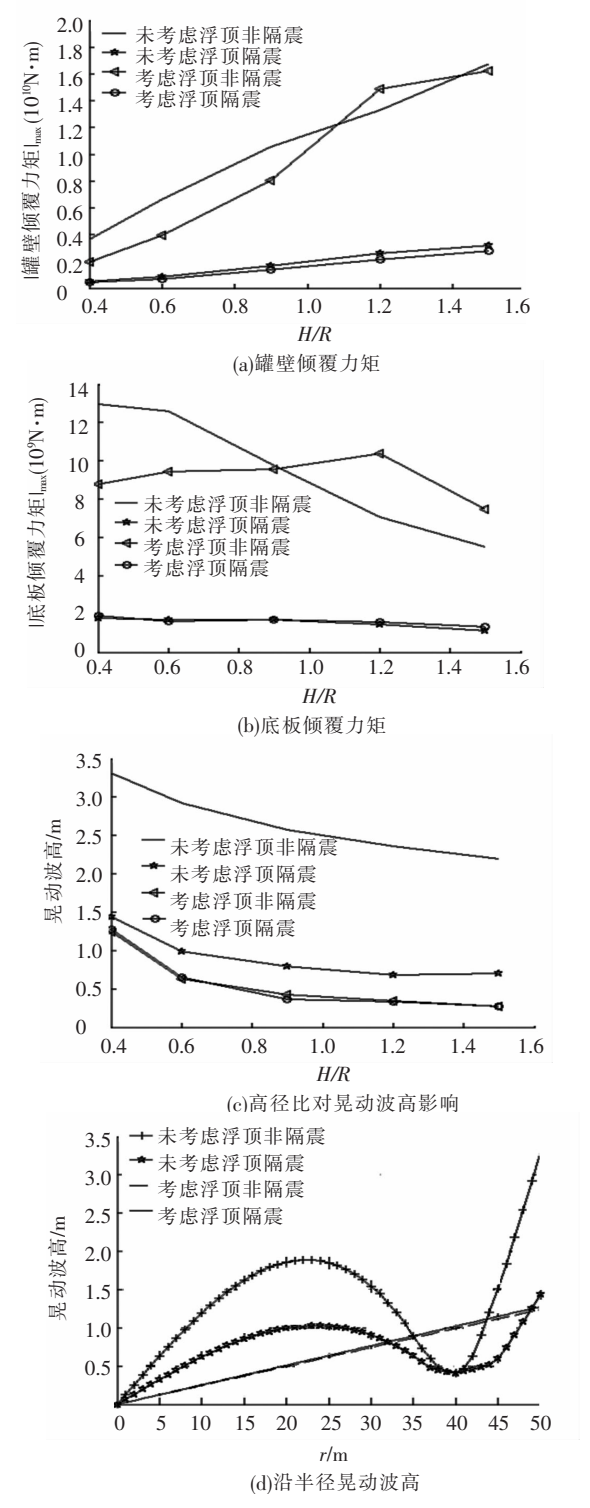


图 2 不同高径比非隔震与隔震地震响应对比

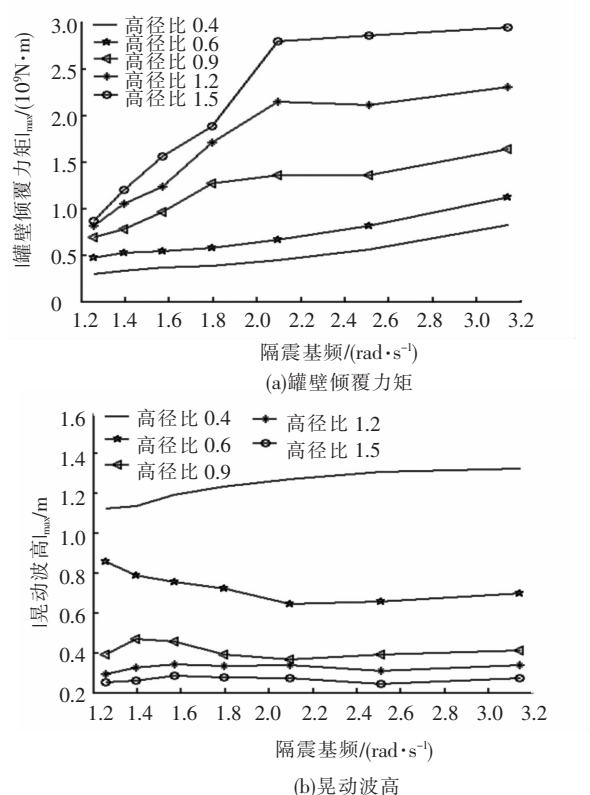
震阻尼比为 0.1,高径比变化对隔震、非隔震储罐地震响应的影响对比曲线.

图 2 为隔震、非隔震考虑浮顶和未考虑浮顶 4 种状态在不同高径比下的地震响应. 从图中的结果分析可知:①高径比对非隔震储罐的倾覆力矩影响比较大,考虑浮顶储罐的侧壁倾覆力矩在高径比小于 1 的范围内,比自由表面储罐的小,并随高径比的增加而增大,底板产生的倾覆力矩是小项,且随高径比的增大变化不大;②隔震对考虑浮顶和未考虑浮顶相对于非隔震而言均有减震效应,两者的侧壁倾覆力矩、底板倾覆力矩的响应接近,且随高径比的增大,变化不大;③高径比对考虑浮顶和未考虑浮顶的非隔震储罐的波高有影响,浮顶具有降低波高的作用;④考虑浮顶和未考虑浮顶的隔震储罐的波高随高径比增大而降低,两者的波高差值不大. 从图 2(d)沿半径的时程曲线分析可见,隔震对自由表面波高有降低效应,对有浮顶的晃动波高有轻微的放大效应.

4.2 隔震基频对浮顶储罐地震响应影响

图 3 给出的是在 El - Centro 波地震作用下,其加速度峰值为 0.4g,隔震阻尼比为 0.1,不同隔震基频,5 种高径比情况下的浮顶储罐倾覆力矩、晃动波高随隔震基频变化的关系曲线.

从图 3(a) ~ (b) 给出的结果分析可知倾覆力矩随隔震基频增大而增大,高径比对基底剪力、



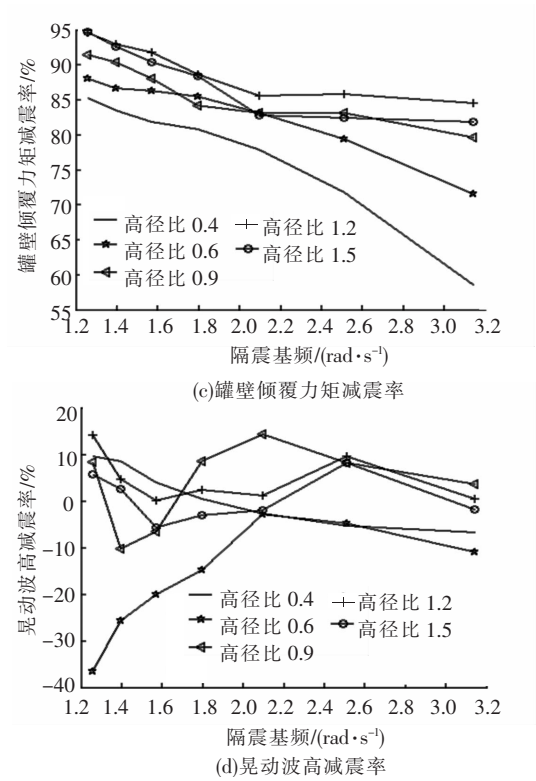


图 3 储罐随隔震基频变化的地震响应分析

倾覆力矩有影响,在隔震基频一定时,基底剪力和罐壁的倾覆力矩随高径比增大而增大;总的倾覆力矩在高径比为 0.4、0.6 时,由于底板倾覆力矩的加入,在隔震基频大于 2 rad/s 时有些变化,但总的趋势为随隔震基频增大而增大;浮顶储罐的最大晃动波高随隔震基频变化不明显,高径比小晃动波高大.从图 3(c) ~ (d) 给出的减震率结果分析可知:① 隔震基频在 1.2 ~ 3.2 rad/s 之间,基底剪力和总的倾覆力矩的减震率达 60% 以上,且随着隔震基频的减小而减震效果增大,高罐减震效果大于矮罐;② 隔震基频对波高的减震效果影响较大,隔震基频较小时对波高有放大效应,高径比不同放大效应不同,放大影响的隔震基频段也不同,隔震基频对高径比为 0.4 储罐的波高影响最大,而这一高径比恰为工程中常用的比值,由此可见在设计隔震时要结合储罐的投资造价及地震响应进行优化设计.

4.3 场地对隔震浮顶储罐地震响应影响

图 4 给出的是在 4 类地震波作用下,其加速度峰值为 0.4 g、隔震阻尼比为 0.1、隔震基频为 2.093 rad/s、高径比为 0.4 的浮顶储罐倾覆力矩、晃动波高随时间变化的曲线.

图 4 的结果表明:场地不同,总倾覆力矩、晃动波高的反应时程不同.Ⅲ类、Ⅳ类反应峰值较大.其总倾覆力矩减震效果也有一定的差异,I类、Ⅱ类场地的总倾覆力矩的减震率达 90% 以上,波高减震率达 8% 以上.

Ⅲ类、Ⅳ类场地的总倾覆力矩的减震率达 60% 以上,Ⅲ类场地的波高略有放大,放大 2.7% 左右,Ⅳ类场地的波高减震率为 14.4%,这一点说明隔震对不同的地震动的波高影响是不一样的,设计时要进行相应的时程分析来保证.

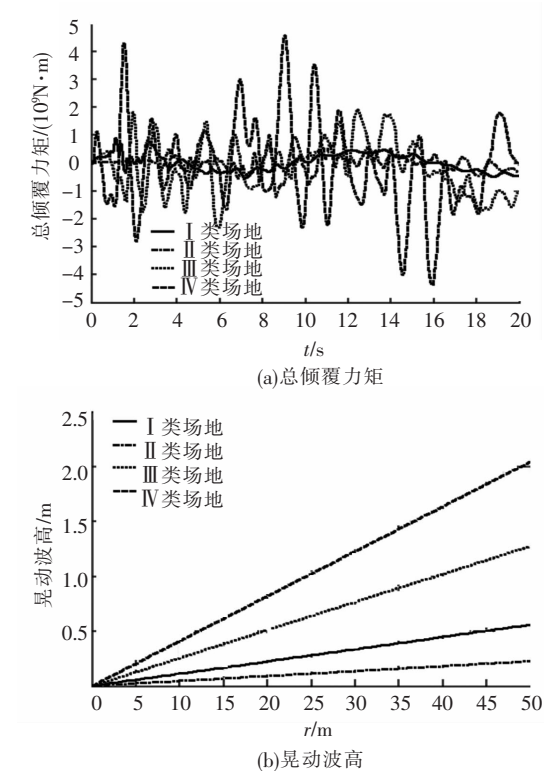


图 4 不同场地隔震储罐地震响应时程

4.4 隔震阻尼比对隔震储罐地震响应影响

图 5 给出的是在 El-Centro 波地震作用下,

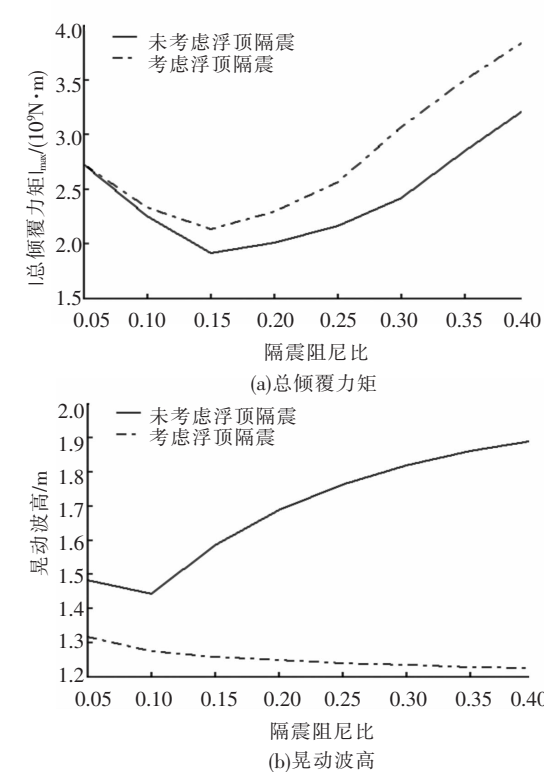


图 5 隔震阻尼比对隔震储罐地震响应影响

其加速度峰值为 $0.4g$ 、隔震基频为 2.093 rad/s 、高径比为 0.4 的浮顶储罐总倾覆力矩、晃动波高随阻尼比变化的曲线。

图 5 的结果表明:隔震阻尼比在 $0.05 \sim 0.15$ 段考虑浮顶和未考虑浮顶储罐总的倾覆力矩随隔震阻尼比增大而下降,当隔震阻尼比大于 0.15 时,考虑浮顶和未考虑浮顶储罐总的倾覆力矩随隔震阻尼比增大而增大;隔震阻尼比在 $0.05 \sim 0.10$ 段考虑浮顶和未考虑浮顶储罐的波高随隔震阻尼比增大而下降,当隔震阻尼比大于 0.10 时,考虑浮顶储罐的波高随隔震阻尼比增大而下降,未考虑浮顶储罐的波高随隔震阻尼比增大而增大。由此分析可知,隔震阻尼比存在优化区间,一般宜取 0.1 。

5 结 论

1) 由速度势理论出发,建立了考虑浮顶隔震储罐的基本理论,给出了基底剪力、波高、倾覆力矩的基本表达,并由能量原理建立了运动分析方程。

2) 不隔震浮顶具有降低波高的作用,隔震对浮顶储罐和自由表面储罐的倾覆力矩均有良好的降低作用,隔震对非浮顶储罐波高有降低作用,但对浮顶储罐波高的降低效应取决于高径比、隔震基频及场地地震动特性等。

3) 高径比影响浮顶储罐的地震响应结果。隔震储罐倾覆力矩受高径比的影响效果不大;波高随高径比增大而降低,隔震对自由表面波高有降低效应,对有浮顶的晃动波高有轻微的放大效应。

4) 隔震基频在 $1.2 \sim 3.2 \text{ rad/s}$,且随着隔震基频的减小减震效果增大,高罐减震效果大于矮罐;隔震基频对波高的减震效果影响较大,隔震基频较小时对波高有放大效应,高径比不同放大效应不同,放大影响的隔震基频段也不同,存在优化区间,隔震基频宜取 $2 \sim 3 \text{ rad/s}$ 。

5) I 类、II 类场地减震率效果好于 III 类、IV 类场地,场地不同对波高的影响不同。隔震阻尼比宜取 0.1 。

参考文献:

[1] BERAHMAN F, BEHNAMFAR F. Seismic fragility curves for un-anchored on-grade steel storage tanks: bayesian approach [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2007, 11:166-192.

[2] HAMDAN F H. Seismic behaviour of cylindrical steel

liquid storage tanks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000,53:307-333.

- [3] NIWA A, CLOUGH R W. Buckling of cylindrical liquid-storage tanks under earthquake loading [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamic, 1982, 10: 107-122.
- [4] RAMMERSTORFER F G, SCHARF K, FISH F D. Storage tanks under earthquake loading [J]. ASME Applied Mechanics Review, 1990,43(11):261-282.
- [5] NAKAGAWA K. On the vibration of an elevated water Tank II [R]. Osaka: Osaka University, 1955:317-336.
- [6] YAMAMOTO Y. The liquid sloshing and the impulsive pressures of oil storage tanks due to earthquakes [J]. Journal of High Pressure Institute of Japan, 1965,3(1):2-8.
- [7] MATSUI T. Sloshing in a cylindrical liquid storage tank with a single-deck type floating roof under seismic excitation [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2009,131/021303-1-021303-10.
- [8] MATSUI T, UEMATSU Y, KONDO K. Wind effects on dynamic response of a floating roof in a cylindrical liquid storage tank [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2009,131/031307-1-031307-10.
- [9] 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.
- [10] 孙建刚,郝进峰,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(6):649-651.
- [11] 孙建刚,王向楠,张荣花,等. 立式储罐并联隔震地震反应分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(10):105-109.
- [12] CHALHOUB M S, KELLY J M. Shake table test of cylindrical water tank in base isolated structures [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1990,116(7):1451-1472.
- [13] MALHOTRA P K. New method for seismic base isolation of liquid storage tanks [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997,26:839-847.
- [14] 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.
- [15] SHRIMALI M K, JANGID R S. Seismic response of liquid storage tanks isolated by sliding bearings [J]. Engineering Structure, 2002,24(7):907-919.

(编辑 刘 彤)