

立式储罐基底隔震的基本理论

孙建刚^{1,2}, 王向楠², 赵长军²

(1. 大连民族学院 土木建筑工程学院, 辽宁 大连 116600, sjg728@163.com;

2. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘 要: 鉴于目前储罐基底的隔震研究大都是在 Haroun 模型的基础上进行的. 本文以储罐基底隔震为基础, 从储罐的晃动、刚性运动、液固耦联弹性运动出发, 根据储罐结构所满足的速度势和边界条件, 选择合理的势函数, 研究储罐动水压力、波高、基底剪力和弯矩的动响应理论表达. 利用相同激励下原型罐和等效力学模型罐基底剪力和弯矩等效原则, 求出储罐分析力学模型的等效质量及相对质心高度, 建立了隔震三质点控制体系简化分析的力学模型, 给出了储罐抗震设计参数波高、基底剪力和弯矩简化分析表达. 由 Hamilton 原理出发, 考虑晃动和罐——液耦联振动周期相差较大, 将两者作为不耦联运动, 建立了隔震体系的运动方程. 并对 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐隔震和非隔震地震响应进行了时程分析研究, 结果表明, 基底隔震体系起到了很好的隔震效应.

关键词: 立式储罐; 隔震; 势函数; 地震响应

中图分类号: P315.952

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)04-0639-05

Theoretical study on seismic isolation of storage tanks

SUN Jian-gang^{1,2}, WANG Xiang-nan², ZHAO Chang-jun²

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China, sjg728@163.com;

2. College of Civil and Architecture Engineering, Northeastern Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: Based on the seismic isolation study of the storage tanks, starting with sloshing, rigid motion and fluid-structure coupling motion of the tanks, the dynamic response theory of hydrodynamic pressure, sloshing wave, base shear and overturning moment of the storage tanks was studied. Rational potential function was selected according to the velocity potential and boundary conditions that the structure of storage tanks satisfied. The equivalent mass and the relative height of mass center were given by using the same base shear and overturning moment of the liquid tank system and equivalent mechanical model when subjected to the same ground motion, and a three centralized particles mechanics analysis model was established. The simplified expressions of sloshing wave, base shear and overturning moment were given as well. The motion equation of the seismic system was established according to Hamilton principle. The earthquake responses of $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ and $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ isolated and non-isolated tanks were analyzed by adopting the time history method. The numerical result shows that the base isolation seismic system exhibits good performance of seismic isolation.

Key words: vertical storage tank; isolation; potential function; earthquake response

立式储罐为液固耦合体系, 壁薄、体积大、基础浮放, 其地震反应机理复杂, 有些问题尚未研究清楚, 各国的设计规范也不统一, 考虑问题的出发点不一致. 鉴于此, 国内外学者自上世纪 90 年代

以来, 引申土木工程结构控制的思想, 从减少其动响应、避免出现复杂动响应角度出发, 开始致力于大型立式储罐的地震响应控制研究^[1-3]. 由于其结构的特殊性, 难于实施主动控制, 研究者多以被动控制为切入点.

对于储罐的被动控制研究, Chalhoub 等^[4]对采用基底隔震结构的储液罐进行了振动台试验,

收稿日期: 2009-03-03.

基金项目: 辽宁省教育厅科技基金资助项目(2009A151).

作者简介: 孙建刚(1959—), 男, 教授, 博士生导师.

并与非隔震结构进行了对比,证明了采用隔震装置的储罐,其动水压力随着液面的缓慢上升而显著降低.梁波等^[5]对柔性储液罐采用铅芯橡胶支座作为隔震装置进行了地震反应分析研究,证实了隔震装置能够有效降低储罐的地震响应.Zayas等^[6]用摩擦摆动支座进行储罐的地震隔离.Malhotra^[7]基底板采用水平弹性橡胶支座,施加单向地面运动,对圆柱储罐进行了地震响应研究.Malhotra^[8]采用周边附加扭转梁钢阻尼器的方法实现耗能减震.Wang等^[9]采用摩擦摆动系统(FPS)在单向激励下,对储罐进行了地震响应探究,发现隔震系统能够有效降低地震响应.Cho等^[10]考虑液体、结构以及土壤的相互作用,采用有限元和边界元耦合的方法,将地基假定为半空间无限体,对采用基底隔震结构的储罐进行了地震响应分析研究.Jadhav等^[11]对分别采用弹性橡胶支座和滑移系统作为隔震装置的储罐进行了地震响应分析研究,并对影响隔震效果的参数进行了对比分析,提出了评价储罐隔震地震响应的近似模型,文献[12-14]建立了隔震三质点控制体系简化分析的力学模型;给出了立式储罐基底隔震控制体系的运动方程,针对不同场地地震动水平激励,进行了储罐地震响应时程分析研究.上述研究的基础都是在 Haroun 模型的基础上,直接采用其晃动对流质点质量、刚性脉冲质点质量、液固耦合质点质量构成三质点力学模型进行研究,并没从理论上研究建立推导立式储罐基底隔震的简化力学模型.

本文从考虑晃动、液固耦联运动、刚性脉冲运动出发,研究立式储罐基底隔震分析基本理论和简化分析方法.

1 立式储罐基底隔震的基本理论

从晃动问题的分析得知,不加隔震基础时,由于地面运动的短脉冲作用引起的基底剪力包含晃动质量产生的剪力是弱项,计算分析表明所产生的基底剪力不超过总剪力的10%,工程上可以忽略不计,可以按刚性质量计算总剪力.加入隔震基础时,由于底部输入中引入了长周期成分,在所产生的基底剪力中晃动质量引起的基底剪力将不是弱项,计算分析表明晃动所产生的基底剪力超过总剪力的30%以上.为此,在采用基底隔震时,对立式储罐这种结构体系,分析中应包含刚性项,晃动对流项和液固耦联振动项.

1.1 一般性的讨论

假定液体无旋无粘,不可压缩,在大地地面运

动与上部结构底部之间引入隔震层运动 $x_0(t)$, 考虑表面重力波的影响,考虑液固耦联的壳壁弹性振动,系统分析模型见图1.

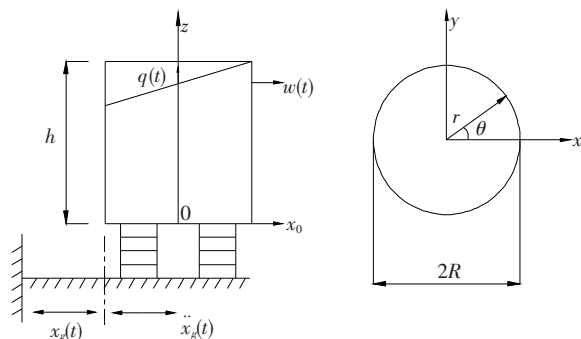


图1 系统分析模型

在上述假定条件下,设其总速度势 Φ , 储液的速度势 Φ 应满足拉普拉斯方程和边条件:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} &= 0; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial r} \Big|_{r=R} &= [\dot{x}_0(t) + \dot{x}_g(t) + \dot{w}(t)] \cos \theta; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} &= 0; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0, \pi} = 0; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=h} + gh_v(r, \theta, t) &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $h_v(r, \theta, t)$ 为液体自由表面的方程.

把式(1)速度势 Φ 表示为3个势之和:

$$\Phi(r, \theta, z, t) = \varphi_1(r, \theta, z, t) + \varphi_2(r, \theta, z, t) + \varphi_3(r, \theta, z, t).$$

势 φ_1 , φ_2 和 φ_3 分别满足拉普拉斯方程和下列边界条件

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi_1 &= 0; \quad \nabla^2 \varphi_2 = 0; \quad \nabla^2 \varphi_3 = 0; \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0, \pi} &= \frac{\partial \varphi_2}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0, \pi} = \frac{\partial \varphi_3}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0, \pi} = 0; \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} \Big|_{z=0} &= \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial \varphi_3}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \\ \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} \Big|_{r=R} &= [\dot{x}_0(t) + \dot{x}_g(t)] \cos \theta; \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial r} \Big|_{r=R} &= 0; \quad \frac{\partial \varphi_3}{\partial r} \Big|_{r=R} = \dot{w}(z, t) \cos \theta; \\ \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \Big|_{z=h} + gh_{2v} &= - \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} \Big|_{z=h} - gh_{1v}; \\ \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} \Big|_{z=h} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

取刚性速度势为

$$\varphi_1(r, \theta, z, t) = r [\dot{x}_0(t) + \dot{x}_g(t)] \cos \theta. \quad (3)$$

采用分离变量法,并利用式(2)得晃动速度势 φ_2

$$\varphi_2(r, \theta, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R \dot{q}_n(t)}{(\sigma_n^2 - 1) J_1(\sigma_n)} \times$$

$$\frac{\operatorname{ch}\left(\sigma_n \frac{z}{R}\right)}{\operatorname{ch}\left(\sigma_n \frac{h}{R}\right)} J_1\left(\sigma_n \frac{r}{R}\right) \cos \theta . \quad (4)$$

式中: $\dot{q}_n(t)$ 为液体晃动速度; $J_1(\sigma_n)$ 为一阶贝赛尔函数; σ_n 为 $J_1'(\sigma_n) = 0$ 的根.

将罐壁的弹性变形取为 $w(t, z) = \sin\left(\frac{\pi z}{2h}\right)w(t)$ 、并利用式(2)的边条件得液固偶联速度势

$$\varphi_3 = \sum_{n=1}^{\infty} \dot{w}(t) \frac{2 I_1\left(\lambda_n r\right) \cos \left(\lambda_n z\right) \cos \theta}{\lambda_n h I_1'\left(\lambda_n R\right)} k_n . \quad (5)$$

式中: $k_n = \frac{h}{\pi}\left[\frac{1}{2 n}\left(1-(-1)^n\right)\right] - \frac{h}{\pi}\left[\frac{1}{2(n-1)}\left(1+(-1)^n\right)\right]$; $I_1\left(\lambda_n r\right)$ 为一阶修正贝赛尔函数; $\lambda_n = (2 n-1) \pi / 2 h$.

有了 φ_2 的总速度势, 可以考察在重力场作用下, 储罐液体表面的振动形状函数

$$h_v = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \Big|_{z=h} . \quad (6)$$

将式(4)代入式(6), 并将 r 展开为贝赛尔函数

$$h_v = -\frac{R\left[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)\right]}{g} \cos \theta \cdot \sum_{n=1}^{\infty}\left[1 + \frac{\ddot{q}_n(t)}{\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)}\right] b_n J_1\left(\sigma_n \frac{r}{R}\right) . \quad (7)$$

式(7)为隔震分析时的波高计算公式, 波高计算是储罐抗震设计控制液体溢出的设计指标.

由总的速度势 $\Phi(r, \theta, z, t) = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3$ 得液体速度势对罐壁任一点所产生的动水压力:

$$\begin{aligned} P(R, \theta, z, t) &= -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{r=R} = \\ &= -\rho R \cos \theta\left[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)\right] - \rho \cos \theta \sum_{n=1}^{\infty} \ddot{q}_n(t) \cdot \\ &\quad \frac{2 R \operatorname{ch}\left(\sigma_n \frac{z}{R}\right)}{\left(\sigma_n^2-1\right) \operatorname{ch}\left(\sigma_n \frac{h}{R}\right)} - \\ &\quad \rho \cos \theta \sum_{n=1}^{\infty} \dot{w}(t) \frac{2 I_1\left(\lambda_n R\right) \cos \left(\lambda_n z\right)}{h \lambda_n I_1'\left(\lambda_n R\right)} \cdot \\ &\quad \int_0^h \sin \frac{\pi z}{2 h} \cos \left(\lambda_n z\right) \mathrm{d} z . \end{aligned} \quad (8)$$

抗震设计时, 关心的是作用在侧壁上的液动压力所产生基底剪力和基底弯矩. 由式(8)作用于侧壁上的液动压力, 可得基底剪力和基底弯矩

$$\begin{cases} Q = -m_0\left[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)\right] - m_1\left[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{y}(t)\right] - m_s\left[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{s}(t)\right]; \\ M = -m_0 H_0\left[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)\right] - m_1 H_1\left[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{y}(t)\right] - m_s H_s\left[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t) + \ddot{s}(t)\right] . \end{cases} \quad (11)$$

式(11)的相关参数为

$$m_0 = m_r - m_f - m_s, m_1 = m_f,$$

$$\begin{aligned} Q(t) &= \int_0^h \int_0^{2 \pi} R \cos \theta P_d^w(R, \theta, z, t) \mathrm{d} \theta \mathrm{d} z = \\ &= -\left[\alpha_1 \ddot{w}(t) + \alpha_2\left[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)\right] + \alpha_{sq} \ddot{q}_n(t)\right] M_L . \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M(t) &= \int_0^h \int_0^{2 \pi} z P_d^w(R, \theta, z, t) R \cos \theta \mathrm{d} \theta \mathrm{d} z = \\ &= -\left[\alpha_3 \ddot{w}(t) + \alpha_4\left[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)\right] + \alpha_{sm} \ddot{q}_n(t)\right] M_L \cdot h . \end{aligned}$$

式中:

$$\alpha_1 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 I_1\left(\lambda_n R\right) \sin \left(\lambda_n h\right)}{\lambda_n^2 R h^2 I_1'\left(\lambda_n R\right)} k_n ;$$

$$\alpha_2 = 1 ; \alpha_3 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 I_1\left(\lambda_n R\right)}{\lambda_n^2 I_1'\left(\lambda_n R\right) R h^3} \cdot\left[h \sin \left(\lambda_n h\right) - \frac{1}{\lambda_n}\right] k_n ;$$

$$\alpha_4 = \frac{1}{2} ; \alpha_{sq} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 R \cdot \operatorname{th}\left(\frac{\sigma_n h}{R}\right)}{\sigma_n\left(\sigma_n^2-1\right) h} ;$$

$$\alpha_{sm} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 \operatorname{th}\left(\frac{\sigma_n h}{R}\right)}{\left(\frac{\sigma_n h}{R}\right)\left(\sigma_n^2-1\right)} -$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\left[\operatorname{ch}\left(\frac{\sigma_n h}{R}\right)-1\right]}{\left(\frac{\sigma_n h}{R}\right)^2\left(\sigma_n^2-1\right) \operatorname{ch}\left(\frac{\sigma_n h}{R}\right)} .$$

1.2 简化分析力学模型

为将 $w(t)$ 的运动, 转化为耦合到罐体系的运动当中, 由流体对罐壁产生的压力所做的功与等效质点惯性力所做的功相等, 取 $w(t, z) = w(t) \sin\left(\frac{\pi z}{2h}\right)$, 可得

$$\ddot{w}(t) = \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_5}\right) \ddot{y}(t) . \quad (9)$$

$$\text{式中: } \alpha_5 = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2 I_1\left(\lambda_n R\right)}{R \lambda_n I_1'\left(\lambda_n R\right) h^2}\right) k_n^2 .$$

由于 σ_n 有 n 个不同的根, 对于晃动问题, 其第一振型的振动能量占主导地位, 故取 $n = 1$, $q_1(t) = s(t)$, 令:

$$\begin{cases} m_r = \alpha_2 M_L, m_f = \frac{\alpha_1^2}{\alpha_5} M_L, m_s = \alpha_{sq} M_L ; \\ H_r = \frac{\alpha_4}{\alpha_2} h, H_f = \frac{\alpha_3}{\alpha_1} h, H_s = \alpha_{sm} h . \end{cases} \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入式(9)、(10)与绝对加速度相关的表达式:

$$m_0 H_0 = m_r H_r - m_f H_f - m_s H_{s1}, H_1 = H_f . \quad (12)$$

对式(11),可得图2 简化分析力学模型.

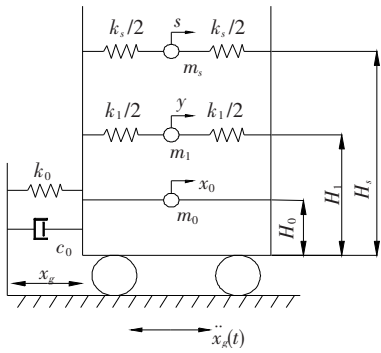


图2 简化分析力学模型

由上述的(12)式,取振型 $X_1(z) = \sin(\pi z/2h)$ 计算不同 h/R 比值下的 m_f 、 m_r 、 m_0 与液体总质量 M_L 的比值、 H_f 、 H_r 、 H_0 与储液高度 H_w 的比值,并由回归分析,得出 m_1 、 m_s 、 m_0 、 H_1 、 H_s 、 H_0 便于工程计算的拟合公式.

$$m_1 = (-0.00181l^5 + 0.00598l^4 + 0.05858l^3 - 0.39621l^2 + 0.91199l - 0.09582)M_L,$$
$$H_1 = h(-0.00063l^5 + 0.00807l^4 - 0.04123l^3 + 0.09784l^2 - 0.06546l + 0.46814),$$
$$m_s = (0.00212l^5 - 0.00958l^4 - 0.04365l^3 + 0.37896l^2 - 0.96956l + 1.09459)M_L,$$
$$H_s = h(-0.00248l^5 + 0.02819l^4 - 0.12118l^3 + 0.21693l^2 - 0.01520l + 0.50960),$$
$$m_0 = (-0.00031l^5 + 0.00360l^4 - 0.01493l^3 + 0.01725l^2 + 0.05757l + 0.00123)M_L,$$
$$H_0 = h(-0.00304l^5 + 0.03120l^4 - 0.12399l^3 + 0.23881l^2 - 0.22347l + 0.01706).$$

式中: $l = h/R$.

图2中的等效刚度^[12]:

$$k_1 = \frac{4\pi^5 E_s t_s m_i}{m} [0.000335 \left(\frac{H}{R}\right)^3 - 0.000021 \left(\frac{H}{R}\right)^2 - 0.06361 \left(\frac{H}{R}\right) + 0.065598]^2.$$

利用边条件 $\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} \Big|_{Z=h} + gh_{2v} = -\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} \Big|_{Z=h} - gh_{1v}$ 可得液体晃动振动方程:

$$\ddot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = -[\ddot{x}_0(t) + \ddot{x}_g(t)].$$

式中,当 $n = 1$ 时, $\sigma_1 = 1.84$, $\omega_s^2 = \frac{1.84g}{R} \text{th}(1.84l)$.

于是有计算分析所需的 $k_s = \omega_s^2 m_s$.

1.3 运动分析方程

在图2 简化分析力学模型中,由于晃动和罐——液耦联振动周期相差较大,一是长周期振动,一是短周期振动,故将两者作为不耦联运动.由Harmilton原理建立相应的运动方程.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W dt = 0. \tag{13}$$

式中: T 、 V 为系统的动能和势能, W_{nc} 为考虑系统阻尼而耗散的功.

由式(13)得运动方程

$$\begin{bmatrix} m_s & & \\ & m_s & \\ m_1 & & m_1 \\ m_s & m_1 & m_0 + m_1 + m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{s} \\ \ddot{y} \\ \ddot{x}_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & & \\ & c_1 & \\ & & c_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{s} \\ \dot{y} \\ \dot{x}_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & & \\ & k_1 & \\ & & k_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} s \\ y \\ x_0 \end{Bmatrix} = -\ddot{x}_g(t) \begin{bmatrix} m_s \\ m_1 \\ m_0 + m_1 + m_s \end{bmatrix} \tag{14}$$

式中: $c_s = 2\xi_s \omega_s m_s$; $c_1 = 2\xi_y \omega_1 m_1$ $c_0 = 2\xi \omega M_L$, $k_0 = \omega^2 M_L$, ω 为隔震层圆频率. 阻尼比 ξ_s 、 ξ_y 、 ξ 通常取为: $\xi_s = 0.005$, $\xi_y = 0.05$, $\xi = 0.1 \sim 0.3$.

2 地震响应时程分析

针对方程(14)采用New mark- β 时程分析方法,以 $2 \times 10^4 \text{m}^3$ 和 $15 \times 10^4 \text{m}^3$ 立式钢制储罐为例,研究隔震周期为 $T = 3 \text{ s}$,隔震层阻尼比为 $\xi = 0.2$,场地为I、II、III、IV类、地震烈度为9度条件下的地震动响应. 基底剪力、基底弯矩和晃动波高时程分析的数值结果见表1和图3.

表1 不同场地储罐基底隔震体系的减震效果 %

场地类型	基底剪力减震率		基底弯矩减震率		晃动波高减震率	
	$V = V_1$	$V = V_2$	$V = V_1$	$V = V_2$	$V = V_1$	$V = V_2$
I类场地(金门公园波)	94.14	73.03	94.27	71.50	5.78	6.74
II类场地(外交公寓波)	85.97	82.54	87.85	83.56	-5.13	-6.91
III类场地(El-Centro波)	82.79	86.61	84.38	87.09	10.75	2.16
IV类场地(Pasadena波)	65.69	76.71	68.55	78.18	6.71	-6.35

注: V 为储罐容量, $V_1 = 2 \times 10^4 \text{m}^3$, $V_2 = 15 \times 10^4 \text{m}^3$.

由表1及图3的结果可以看出,在此隔震周期和阻尼下,储罐的基底剪力和基底弯矩,随着场

地类型的不同,其减震率不同.但总体来说,基底隔震体系对立式钢制储罐的基底剪力和基底弯矩控制效果明显,均在60%以上;对立式钢制储罐晃

动波高来说,其减震率随着场地类型的不同既有增大又有减小,但变化范围并不明显,说明对晃动波高没有很好的控制效果.实际工程中,可以根据建筑场地土的类型,调整隔震周期、阻尼比,达到隔震体系的显著减震效果.

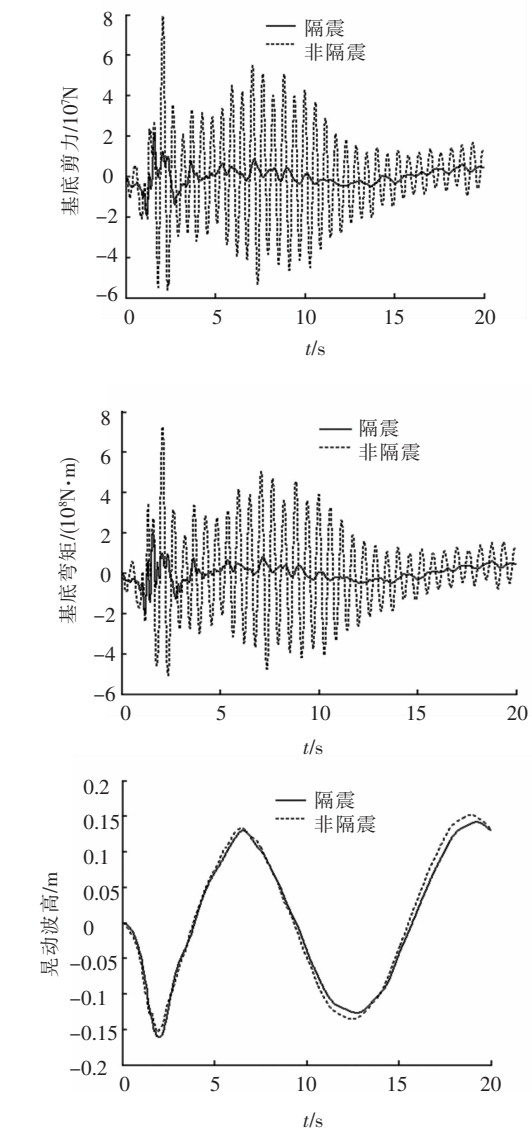


图3 $15\times 10^4\text{m}^3$ 储罐 I 类场地基底剪力、基底弯矩和晃动波高时程曲线

3 结 论

1) 在一定的隔震周期下,随着场地类型的不同,立式储罐的基底剪力和基底弯矩的减震率不同,但均具有一定的减震效果.因此在实际工程中,应该根据建筑场地土的类型,调整隔震周期,达到隔震体系的显著减震效果.

2) 对于晃动波高来说,其减震率变化不明显,隔震对波高影响不大.

参考文献:

[1] 杨武. 一种新型的钢制隔震器的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.

[2] 周锡元. 建筑结构的隔震、减震和振动控制[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(2): 68-70

[3] 韦树莲. 必须重视大型石油储罐的抗震问题[J]. 国际地震动态, 1995(3): 17-21.

[4] 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.

[5] LIANG B, TANG J X. Vibration studies of base isolated storage tanks [J]. Computers and structures, 1994, 52: 1051-1059.

[6] ZAYAS V S, LOW S S, MAHIN S A. Simple pedulum technique for achieve seismic isolation. [J]. Earthquake Spetra, 1990, 6(2): 317-333.

[7] MALHOTRA P K. New method for seismic base isolation of liquid storage tanks [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, 26: 839-847.

[8] MALHOTRA P K. Seismic strengthening of liquid-storage tanks with energy-dissipating anchors [J]. Journal of structural Engineering, ASCE, 1998, 124(4): 405-414.

[9] WANG Y P, TENG M C, CHUNG K W. Seismic isolation of rigid cylindrical tanks using friction pendulum bearing [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2001, 30: 1083-1099.

[10] CHO K H, KIM M K, LLM Y M, et al. Seismic response of base-isolated liquid storage ta-nks considering fluid-structure-soil interaction in time domain [J]. Soil Dynamics & Earthquakes Engineering, 2004, 24(11): 839-852.

[11] JADHAV M B, JANGID R S. Response of base-isolated liquid storage tanks [J]. Shock and Vibra-tion, 2004, 11: 33-45.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

(编辑 赵丽莹)