

立式储罐基础隔震性能对比分析

杨宇¹

摘要: 为了对采用滑移隔震支座、铅芯叠层橡胶隔震支座的基础隔震储罐的地震响应差异有一个综合的认识和理解, 在考虑弹性壁振动对晃动分量影响的情况下, 分别建立了立式储罐基础滑移隔震、铅芯叠层橡胶支座隔震的数学模型及运动微分方程, 编制了相应的地震响应时程分析程序。计算结果表明, 加速度峰值变化对滑移隔震的减震效果影响不明显, 减震率变异系数小于1%, 对铅芯叠层橡胶支座隔震的减震效果有一定影响, 减震率变异系数小于15%, 储罐容积变化对两种隔震体系的晃动波高控制效果影响较大, 变异系数大于15%。

关键词: 储罐; 滑移隔震; 铅芯叠层橡胶支座隔震; 地震响应

Doi : 10.3969/j.issn.1006-6896.2016.9.013

Performance Comparison Analysis of Base Isolation of Vertical Storage Tanks

Yang Yu

Abstract: For a comprehensive understanding about seismic response differences of base isolation tanks, i.e. sliding isolated bearing and lead rubber bearing isolation, considering the influence of elastic wall vibration to sloshing component, mathematical models and differential equations of motion are set up for base sliding isolation of vertical storage tanks and lead rubber bearing isolation, time history analysis program of seismic response is complicated. The results show that change of acceleration peak has no obvious influence to damping effect of sliding isolation, decreasing amplitude ratio is less than 1%. Change of acceleration peak has some influences to damping effect of lead rubber bearing isolation, decreasing amplitude ratio is less than 15%. Volume variation of tanks has a great influence to sloshing wave, decreasing amplitude ratio is more than 15%.

Key words: storage tanks; sliding isolation; lead rubber bearing isolation; seismic response

目前对于立式储罐基础隔震研究多以 Haroun-Housner 模型为主^[1], 以 Haroun 提出的对流、脉冲和刚性质量的三质点力学模型为基础, 并未考虑弹性壁振动对晃动分量的影响。本文在考虑液固耦联弹性振动因素对液体对流晃动的影响下, 以速度势理论下推导的储罐运动方程为基础, 给出了滑移隔震支座、铅芯叠层橡胶隔震支座的隔震性能对比分析结果。

1 隔震支座

立式储罐基础隔震是通过在上部结构和基础之间设置隔震层, 隔震层刚度较小, 限制了地震动水平分量向上部结构的传递, 减小了上部结构的相对位移和内力。滑移隔震支座是在基础顶面设置滑移

层作为隔震层, 通过滑移层与上部结构连接, 当地震力作用使滑移层产生滑移时, 隔震支座能够消耗和阻止地震能量的传递, 常用的摩擦材料为聚四氟乙烯、铅粒和石墨等。铅芯叠层橡胶隔震支座由薄橡胶板和薄钢板分层交替叠合, 中心圆孔处压入铅芯, 经高温高压硫化粘结形成, 由于橡胶层与钢板紧密粘结, 当支座承受水平荷载时, 橡胶层的相对位移减小, 使橡胶支座可达到很大的整体侧移而不失稳, 并且保持较小的水平刚度, 同时铅芯具有提高支座的吸能能力, 确保支座有适度的阻尼, 增加支座的初始刚度、控制风反应和抵抗微震的作用, 铅芯叠层橡胶支座既具有隔震作用, 又具有阻尼作用。

¹大庆油田工程有限公司

2 隔震体系数学模型

首先假设液体为无黏滞性、无旋转的理想流体，仅考虑重力波影响，不考虑液体的压缩性，从速度势原理出发，在考虑储罐液体的对流晃动、液固耦联弹性振动、刚性脉冲运动，并引入液固耦联弹性振动因素对液体对流晃动的影响的前提下，建立了储罐运行系统分析模型，如图1。

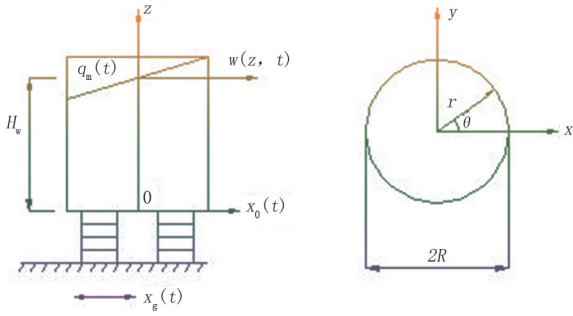


图1 系统分析模型

储液的速度势应满足如下 Laplace 方程和边界条件：

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} \right|_{\theta=0, \pi} = 0 \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right|_{r=R} = (\dot{x}_0(t) + \dot{x}_g(t) + \dot{w}(z, t)) \cos \theta \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{z=H_w} + gh_v = 0 \quad (5)$$

式中： Φ —— r 、 θ 、 z 、 t 函数；

h_v ——液体自由表面方程；

$\dot{x}_g(t)$ ——水平方向地震激励；

$\dot{x}_0(t)$ ——水平方向地震激励而产生的隔震层速度；

$w(z, t)$ ——水平地震激励 $\cos \theta = 1$ 时的罐壁径向变形。

以上述方程及边界条件，将总速度势分解为刚体运动速度势、弹性变形速度势、对流晃动速度势三个分量，进一步推导动水压力、基底剪力、罐壁基底弯矩和晃动波高计算公式^[2]，并得到如下立式储罐基础隔震运动方程：

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{w}(t) \\ \ddot{x}_0(t) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{w}(t) \\ \dot{x}_0(t) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} w(t) \\ x_0(t) \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} M_{12} \\ M_{22} \end{pmatrix} \ddot{x}_g(t) \quad (6)$$

$$M_{11} = \frac{1}{2} \rho_s \pi R t_s H_w + M_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2k_n^2 I_1(\lambda_n R)}{\lambda_n H_w^2 R I_1'(\lambda_n R)} \quad (7)$$

$$M_{12} = M_{21} = M_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2k_n I_1(\lambda_n R) \sin(\lambda_n H_w)}{\lambda_n^2 R H_w^2 I_1'(\lambda_n R)} \quad (8)$$

$$M_{22} = M_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_1(\lambda_n R)}{\lambda_n^3 H_w^2 R I_1'(\lambda_n R)} \quad (9)$$

$$k_1 = \frac{E_s t_s \pi H_w}{2(1 - \mu^2) R} \quad (10)$$

$$\lambda_n = \frac{(2n - 1)\pi}{2H_w} \quad (11)$$

$$M_1 = \rho \pi R^2 H_w \quad (12)$$

$$k_n = \int_0^{H_w} x_1(z) \cos(\lambda_n z) dz \quad (13)$$

$$x_1(z) = \sin\left(\frac{\pi z}{2H_w}\right) \quad (14)$$

式中： k_0 、 c_0 ——隔震层的刚度和阻尼；

k_1 、 c_1 ——罐壁的刚度和阻尼；

$\ddot{x}_0(t)$ ——隔震层相对于地面的加速度；

$\ddot{w}(t)$ ——罐壁相对于隔震支座的加速度；

$\dot{x}_g(t)$ ——地面加速度分量；

E_s ——壳壁弹性模量；

t_s ——壁厚；

μ ——泊松比；

ρ_s ——罐壁材料密度；

I_1 ——第一类修正 Bessel。

3 不同隔震层支座的运动控制方程

对于以铅芯叠层橡胶为隔震支座及以带有限位功能的速变摩擦恢复力滑移支座这两种隔震体系，其运动控制方程为

$$[m]\{\ddot{z}\} + [c]\{\dot{z}\} + [k]\{z\} + \{Q\} = -[m][r]\{\ddot{u}_g\} \quad (15)$$

$$[m]\{\ddot{z}\} + [c]\{\dot{z}\} + [k]\{z\} + \{F\} = -[m][r]\{\ddot{u}_g\} \quad (16)$$

式(15)为速变摩擦恢复力支座运动方程，式(16)为铅芯叠层橡胶支座隔震运动方程，其中 $[r]$ 为矩阵的影响系数， $[r] = [0 \ 1]^T$ ； $[m]$ 、 $[c]$ 以及 $[k]$ 分别为质量、阻尼以及系统的刚度矩阵，其表达式见式(6)；恢复力模型 $\{Q\}$ 、 $\{F\}$ 分别见文献[3]、[4]。

4 数值分析

采用 matlab 编程对两种隔震支座的运动方程进行求解，考虑同一场地条件（Ⅲ类场地），El-Centro 地震波作用下，设计基本地震加速度峰值采用与 7~9 度抗震设防烈度对应的 $0.1g \sim 0.4g$ ，对四种典型储罐进行铅芯叠层橡胶支座隔震与滑移隔震地震响应计算，给出其减震效果对比分析结果。

表1 不同加速度峰值下四种储罐的滑移隔震减震率

地震响应	0.1 g				0.2 g				0.4 g			
	1×10^3	5×10^3	5×10^4	10×10^4	1×10^3	5×10^3	5×10^4	10×10^4	1×10^3	5×10^3	5×10^4	10×10^4
基底剪力	74.2	79.7	85.8	80.8	74.6	80.3	85.7	81.1	74.9	80.4	85.7	81.1
基底弯矩	75.6	80.9	86.7	82.0	76.1	81.4	86.6	82.2	76.2	81.5	86.6	82.2
晃动波高	46.1	41.2	75.8	72.3	46.5	42.4	75.8	73.8	46.6	42.3	75.8	73.9

表2 不同加速度峰值下四种储罐的橡胶支座隔震减震率

地震响应	0.1 g				0.2 g				0.4 g			
	1×10^3	5×10^3	5×10^4	10×10^4	1×10^3	5×10^3	5×10^4	10×10^4	1×10^3	5×10^3	5×10^4	10×10^4
基底剪力	62.7	72.4	77.7	66.8	67.8	77	80.4	68.6	72	79.9	83.3	73.3
基底弯矩	64.7	74	79	68.2	69.4	78.4	81.2	68.7	73.4	81	83.8	73.2
晃动波高	53.3	43.3	66.9	41.3	55	51.4	69	45.4	59.4	56.4	73.3	52.5

4.1 滑移隔震减震性能

摩擦支座材质采用聚四氟乙烯,摩擦系数取0.02,0.1 g~0.4 g加速度峰值下滑移隔震减震率见表1。四种储罐的基底剪力、基底弯矩、晃动波高的变异系数分别为5.2%、4.9%、26.9%。

4.2 铅芯叠层橡胶支座隔震减震性能

隔震层隔震周期取 $2t$,阻尼比取0.2,0.1 g~0.4 g加速度峰值下铅芯叠层橡胶支座隔震减震率见表2。四种储罐的基底剪力、基底弯矩、晃动波高的变异系数分别为8.6%、8.1%、18.2%。

4.3 对比分析

由表1、表2可知,对于两种隔震体系的基底剪力与基底弯矩, $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以下储罐减震率偏差不大,减震效果相仿,对于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐,滑移隔震减震率较大,两种隔震体系基底剪力、基底弯矩减震率变异系数均较小,变异系数小于10%,说明对不同容积的储罐均具有较好的减震效果;两种隔震体系对于晃动波高的控制性能小于基底剪力与基底弯矩, $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以下储罐减震率差异较小,对于 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 储罐,滑移隔震的减震效果优于铅芯叠层橡胶支座隔震减震,两种隔震体系的晃动波高减震率变异系数较大,变异系数大于15%。在地震加速度峰值逐渐增大时,滑移隔震的地震响应变化很小,减震率变异系数小于1%,铅芯叠层橡胶支座隔震的地震响应减震率有一定程度的增大,变异系数小于15%。

5 结论

(1) 加速度峰值变化对滑移隔震的减震效果影

响不明显,减震率变异系数小于1%,对铅芯叠层橡胶支座隔震的减震效果有一定影响,减震率变异系数小于15%。

(2) 储罐容积变化对两种隔震体系的晃动波高控制效果影响较大,变异系数大于15%。

(3) 进行立式储罐基础隔震设计时,可由已知的场地条件、储罐容积、建造成本及施工难易程度等因素确定合理的隔震层参数及基础隔震形式。

参考文献

- [1] HAROUN M A, HOUSNER G W. Earthquake response of deformable liquid storage tanks[J]. ASME J Appl Mech, 1981, 48 (2): 411-418.
- [2] 杨宇. 双向地震作用立式储罐基础隔震研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2011.
- [3] 樊爱武. 滑移隔震结构的滑移位移研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [4] SHRIMALI M K, JANGID R S. Non-linear seismic response of base-isolated liquid storage tanks to bi-directional excitation [J]. Nuclear Engineering & Design, 2002, 217 (1/2): 1-20.

作者简介

杨宇: 工程师,工学博士,2011年毕业于东北石油大学油气储运工程专业,从事结构工程设计工作,13359605688, yangyuyy@126.com, 黑龙江省大庆市让胡路区西苑街46号,163712。

收稿日期 2016-03-29

(栏目编辑 纪焯杰)