

建筑技术

夹层橡胶垫隔震液化天然气储罐地震响应分析

张云峰 田晓雪 郭迎利¹ 于 洋 薛景宏

(大庆石油学院土木建筑工程学院, 大庆 163318; 大庆油田有限责任公司第九采油厂¹, 大庆 163000)

摘要 采用夹层橡胶垫作为 LNG 储罐的隔震装置, 对 LNG 储罐在隔震前后的地震响应进行有限元分析。计算了隔震前后 LNG 储罐外壁在 El Centro 波、Taft 波和天津波作用下的地震响应。对模态、位移和加速度进行对比分析, 得出了夹层橡胶垫隔震装置对 LNG 储罐的隔震效果。

关键词 LNG 储罐 夹层橡胶垫 隔震 地震响应

中图法分类号 TU311.3; **文献标志码** A

液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)具有便于运输和储存、使用安全的特点, 正在我国获得更广泛的使用, 而作为 LNG 的储罐, 虽在国内外已有不少研究并且在很多工程中得到应用, 但储罐的地震安全性一直是一个十分关心的问题。采用夹层橡胶垫作为全容式 LNG 储罐的隔震装置, 针对 LNG 储罐外壁在 El Centro 波、Taft 波和天津波作用下的地震响应进行分析, 并对 LNG 储罐的隔震前后进行比较。

1 LNG 储罐的基本参数

以某 50 000 m³ 低温(-167℃)地上式全容积 LNG 储罐为研究对象^[1,2]。该储罐为预应力钢筋混凝土全容式储罐, 基础采用桩基础。将底板分为两层, 中间设置夹层橡胶垫作为隔震装置(见图 1)。夹层橡胶垫的结构参数一般采用形状系数来表征。每层橡胶的有效承压面积与其自由表面积之比, 称

为第一形状系数, 反映橡胶垫中的钢板对橡胶层变形的约束程度。橡胶垫有效承压体的直径与橡胶总厚度之比, 称为第二形状系数, 反映橡胶垫受压时的稳定性^[3]。其中, 第二形状系数 S_2 对水平刚度的影响比较明显。所以采用天然橡胶的第二形状系数为 $S_2 = 5$ 和 $S_2 = 5.5$, 其它参数相同的两种夹层橡胶垫。并设 $S_2 = 5$ 时为参数 1, $S_2 = 5.5$ 时为参数 2。

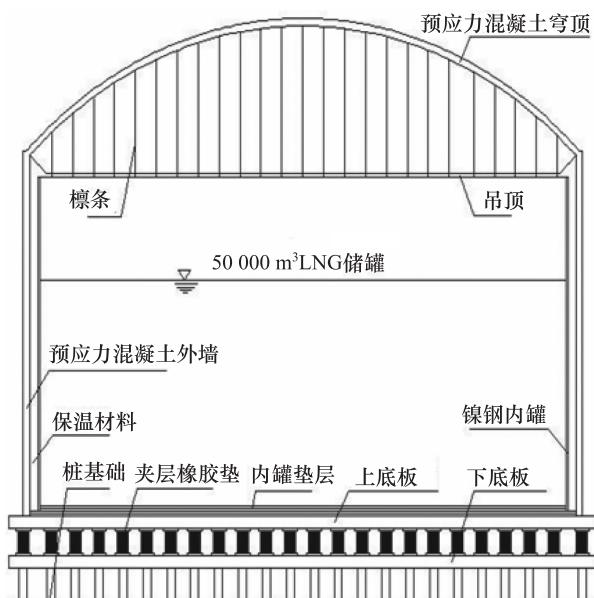


图 1 隔震 LNG 储罐示意图

2010年5月31日收到 黑龙江省自然科学基金(ZD200805)和

黑龙江省教育厅科学技术基金(11541002)资助
第一作者简介: 张云峰(1966—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 预应力
混凝土结构。

储罐所处场地为Ⅱ类,其抗震设防烈度为8度,设计地震分组为第一组。储罐的罐体内径为54.8 m,外径为56.1 m,壁厚0.65 m,内壁高度29.3 m,上面形成环梁及穹顶,穹顶半径为54.8 m,矢高7.342 m,穹顶厚度为400 mm。罐体支承在桩基上,底板厚度1 m,直径59.1 m。

2 有限元模型建立

2.1 隔震前模型

此罐的罐顶与罐壁的连接处、罐壁与底板的连接均采用固结。由于罐壁厚度远小于长度和内径,故可以将其视为板壳问题,采用壳单元。根据储罐结构和荷载的对称性,取外罐的1/4进行分析,利用ANSYS中的SOLID45实体单元建立模型,(见图2)。



图2 LNG预应力储罐计算模型

2.2 隔震前模型

隔震后,把隔震层的力学模型简化为由水平方向的非线性弹簧、粘滞阻尼器以及竖向的线性弹簧所组成。

采用ANSYS提供的一系列的弹簧阻尼等连接单元,由若干单元相结合的方式来实现隔震支座的模拟。一个隔震支座由三个单元模拟组成:竖向刚度的模拟采用combin14单元,在两个水平方向采用combin40单元,该单元可以引入双线性的强化模型、粘滞阻尼的影响。combin40单元力学原理图及隔震垫单元图(见图3和图4)。这个模

型是由弹簧滑块和阻尼器相并联,然后用串联的方式耦合到一个间隙上的组合体。质量可以分配到一个或者两个节点上。此模型每一个节点有一个自由度:节点的平动、旋转、压力或温度。模型中的质量、刚度、阻尼、滑移和间隙可以有选择地选用^[4]。

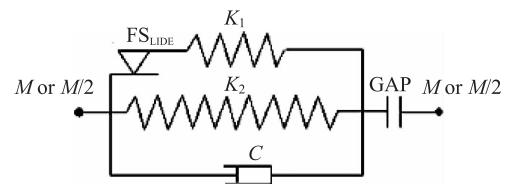


图3 combin40 单元力学原理图



图4 隔震垫单元图

3 地震响应分析

3.1 隔震前后LNG储罐外壁模态分析

根据建立的有限元模型对储罐进行模态分析,可以得到空罐、半罐及满罐时LNG储罐外壁的固有频率和周期结果如表1~表3所示。

由储罐隔震前后基本频率变化的对比可知,隔震装置对储罐的固有频率起到了很好的减小效果,相应的储罐的自振周期也明显增加。施加隔震装置的储罐在隔震后低阶频率降低要较高阶频率降低明显。对于两种参数的夹层橡胶垫,参数1比参数2在隔震前后频率减小的更加显著,周期延长也更加显著。

表 1 隔震前储罐外壁固有频率和周期

阶数	空罐		半罐		满罐	
	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s
1	9.744	0.103	6.189	0.162	5.848	0.171
2	10.714	0.093	7.243	0.138	6.893	0.145
3	10.907	0.092	7.674	0.130	7.144	0.140
4	13.365	0.075	9.839	0.102	9.453	0.106
5	14.164	0.071	10.683	0.094	9.902	0.101
6	14.654	0.068	11.145	0.090	10.326	0.097
7	15.375	0.065	11.785	0.085	10.473	0.095
8	15.535	0.064	11.946	0.084	11.105	0.090
9	16.264	0.062	12.547	0.080	11.364	0.088
10	16.424	0.061	13.516	0.074	12.048	0.083
11	17.929	0.056	14.978	0.067	12.784	0.078
12	19.661	0.051	15.551	0.060	14.497	0.069

表 2 参数 1 的隔震垫隔震后储罐外壁固有频率和周期

阶数	空罐		半罐		满罐	
	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s
1	0.243	4.115	0.216	4.630	0.171	5.848
2	1.560	0.641	1.524	0.656	1.282	0.780
3	4.940	0.202	3.893	0.257	3.834	0.261
4	5.824	0.172	4.697	0.213	4.633	0.216
5	9.221	0.108	8.090	0.124	7.912	0.126
6	9.853	0.101	8.622	0.116	8.356	0.120
7	10.183	0.098	8.945	0.112	8.671	0.115
8	10.564	0.095	9.323	0.107	9.042	0.111
9	11.593	0.086	10.349	0.097	10.063	0.099
10	12.421	0.081	11.172	0.090	10.881	0.092
11	13.018	0.077	11.760	0.085	11.466	0.087
12	14.110	0.071	12.850	0.078	12.553	0.080

表 3 参数 2 的隔震垫隔震后储罐外壁固有频率和周期

阶数	空罐		半罐		满罐	
	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s
1	0.431	2.321	0.353	2.834	0.251	3.984
2	1.876	0.533	1.821	0.549	1.484	0.674
3	7.576	0.132	5.291	0.189	5.093	0.196
4	8.130	0.123	6.135	0.163	5.981	0.167
5	11.236	0.089	9.615	0.104	9.383	0.107

续表

阶数	空罐		半罐		满罐	
	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s
6	12.500	0.080	10.526	0.095	10.016	0.100
7	12.821	0.078	10.638	0.094	10.348	0.097
8	13.699	0.073	11.236	0.089	10.732	0.093
9	15.152	0.066	12.195	0.082	11.762	0.085
10	16.949	0.059	13.699	0.073	12.603	0.079
11	18.519	0.054	14.493	0.069	13.182	0.076
12	20.408	0.049	15.625	0.064	13.889	0.072

3.2 储罐外壁隔震前后时程分析

对 LNG 储罐在内罐泄漏状态下隔震前后的空罐、半罐及满罐时分别输入 EL centro 波南北向、Taft 波南北向和天津波南北向进行分析。把地震波幅值调为 8 度抗震设防加速度峰值为 400gal, 地震持时取 15 s。

从隔震结构的动力反应机理看,由于在基础底板和罐底垫板之间添加夹层橡胶垫隔震层的原因,使结构的基本周期延长。这样,由地震的反应谱可知,结构绝对加速度反应随着周期的增大而降低,而结构的位移反应则随周期的增大而增大。本文用 η 来定义隔震层的减震效果^[5], $\eta = \frac{\Delta}{\delta}$, 其中 Δ 为隔震后结构响应, δ 为隔震前结构响应, 结构的响应包括结构的位移、速度和加速度等, 当 $\eta < 1$ 时表示隔震后响应减小, 当 $\eta > 1$ 时表示隔震后响应增大。

表 4 ~ 表 6 所示分别为 EL centro 波 taft 波、天津波作用下参数 1 和参数 2 隔震前后位移、加速度的最大地震反应。

从表中可以看出,在三种波作用下储罐隔震后的变化趋势基本相同。位移较隔震前增大,而加速度较隔震前明显减小,其中,储罐在空罐状态下较装有储液时的减震效果要好。两种参数的隔震层相比,在 El centro 波,taft 波作用下参数 2 位移增大值较参数 1 增大的值要小,参数 1 减震效果优于参数 2 的隔震效果,而对天津波参数 1 位移增大值较参数 2 增大值要小,参数 2 减震效果优于参数 1 的隔震效果,且空罐的隔震效果要优于存有储液的罐体。

表 4 El Centro 波作用下隔震前后储罐外壁最大地震反应

		工况		
		空罐	半罐	满罐
形 状 系 数 $S_2 = 5$	隔震前位移/mm	39.51	31.37	25.83
	隔震后位移/mm	44.61	34.35	27.25
	位移减震效果 η_1	1.129	1.095	1.055
	隔震前加速度/(cm·s ⁻²)	3 145.73	1 593.17	1 547.05
	隔震后加速度/(cm·s ⁻²)	287.57	748.78	688.84
	加速度减震效果 η_2	0.090	0.459	0.445
形 状 系 数 $S_2 = 5.5$	隔震前位移/mm	39.51	31.37	25.83
	隔震后位移/mm	43.38	33.06	26.17
	位移减震效果 η_1	1.098	1.054	1.013
	隔震前加速度/(cm·s ⁻²)	3 145.73	1 593.17	1 547.05
	隔震后加速度/(cm·s ⁻²)	374.38	792.61	751.30
	加速度减震效果 η_2	0.119	0.498	0.485

表 6 天津波作用下隔震前后储罐外壁最大地震反应

		工况		
		空罐	半罐	满罐
形 状 系 数 $S_2 = 5$	隔震前位移/mm	35.92	30.56	24.80
	隔震后位移/mm	39.37	31.87	25.12
	位移减震效果 η_1	1.096	1.043	1.013
	隔震前加速度/(cm·s ⁻²)	2 431.65	1 341.10	1 001.77
	隔震后加速度/(cm·s ⁻²)	596.93	716.55	511.51
	加速度减震效果 η_2	0.245	0.534	0.511
形 状 系 数 $S_2 = 5.5$	隔震前位移/mm	35.92	30.56	24.80
	隔震后位移/mm	40.76	33.68	27.08
	位移减震效果 η_1	1.135	1.102	1.092
	隔震前加速度/(cm·s ⁻²)	2 431.65	1 341.10	1 001.77
	隔震后加速度/(cm·s ⁻²)	299.09	686.64	492.87
	加速度减震效果 η_2	0.123	0.512	0.492

4 结论

1) 夹层橡胶垫在地震作用下起到了一定的隔震效果,参数 1 的隔震层对 El centro 波,taft 波有较好的隔震效果,而参数 2 的隔震装置对天津波的隔震效果较好。

表 5 Taft 波作用下隔震前后储罐外壁最大地震反应

		工况		
		空罐	半罐	满罐
形 状 系 数 $S_2 = 5$	隔震前位移/mm	34.24	28.27	23.07
	隔震后位移/mm	40.61	31.42	25.05
	位移减震效果 η_1	1.186	1.111	1.086
	隔震前加速度/(cm·s ⁻²)	2 406.36	1 246.87	1 073.62
	隔震后加速度/(cm·s ⁻²)	286.43	661.36	493.87
	加速度减震效果 η_2	0.119	0.530	0.460
形 状 系 数 $S_2 = 5.5$	隔震前位移/mm	34.24	28.27	23.07
	隔震后位移/mm	37.52	30.43	24.20
	位移减震效果 η_1	1.095	1.076	1.049
	隔震前加速度/(cm·s ⁻²)	2 406.36	1 246.87	1 073.62
	隔震后加速度/(cm·s ⁻²)	356.47	705.05	549.65
	加速度减震效果 η_2	0.148	0.565	0.484

2) 隔震装置对空罐、半罐、满罐在三种地震波下加速度和频率都明显的降低,尤其对空罐的隔震效果最优。

3) 罐壁的位移有所增加,但是加速度和频率降低的幅度很大,由于位移增大的幅度不是很大,能够满足使用要求,故可以采用此装置。

参 考 文 献

- 1 张云峰,张彬.预应力 LNG 储罐混凝土外墙地震响应分析.大庆石油学院学位论文,2009
- 2 束廉阶,顾炜,施广明,等.大型低温液化天然气钢筋混凝土储罐预应力设计与施工技术.工业建筑,2007;11:32—44
- 3 孙建刚,孙颖.夹层橡胶垫耗能低剪力墙非线性性能的理论分析.大庆石油学院学位论文,2002
- 4 陈燕华,刘建军,袁康,等.叠层橡胶基础隔震结构的地震动力反应分析.工业建筑,2009;39:289—294
- 5 马德革.隔震 LNG 储罐的地震反应分析.哈尔滨工业大学学位论文,2007

(下转第 6326 页)

- 社,1998
 2 钟新谷. 箱形梁的研究. 湘潭矿业学院学报,2001;5(9):68—73
 3 楼庄鸿. 对预应力混凝土连续刚构几个问题的认识. 中国公路学会桥梁和结构工程分会 2004 年全国桥梁学术会议论文集;北京:人民交通出版社,2004;303—306

- 4 中华人民共和国交通部.《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004). 北京:人民交通出版社,2004
 5 唐益群,叶为民. 土木工程测试技术手册. 上海:同济大学出版社,1999;290—291

Discussion about the Calculation of Shear Capacity of Beam Using Vertical Prestressed Bars

LIU Can

(Civil and Traffic School in South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China)

[Abstract] Vertical prestressed bars have been widely used in long span bridges. Experimental study about the calculation of shear capacity of beam using vertical prestressed bars has been done. Experimental results are compared with the corresponding formula in the “Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts” (JTG D62—2004), the results show that the formula in the code is reliable, but needs to be improved, mainly in the following areas: (a) Formula in the code does not consider the shear capacity of stirrups when using vertical prestressed bars, (b) Formula in the code does not take into account that the working mechanism of vertical prestressed bars is different from ordinary stirrups, (c) Formula in the code does not express the influence of the different ways of setting vertical prestressed bars. At last, a formula to compute the shear capacity of beam using vertical prestressed bars is suggested, the accuracy of the proposed formula is verified by the experimental results.

[Key words] vertical prestressed bars shear capacity formula in the code

(上接第 6321 页)

Earthquake Response Analysis of Liquified Natural Gas (LNG) Prestressed Storage Tank with Rubber Interlayer Seismic Isolation

ZHANG Yun-feng, TIAN Xiao-xue, GUO Ying-li¹, YU Yang, XUE Jing-hong

(Civil Engineering College, Daqing Petroleum Institute, Daqing, Daging 163318, P. R. China;
 the minth oil extraction factory of Daqing oilfield Limited Liabilily Lompany¹, Daging 163000, P. R. China)

[Abstract] Rubber interlayer was used as the seismic isolation of LNG storage tank, which was taken the finite element analysis before and after seismic isolation to earthquake response respectively, Before and after seismic isolation the earthquake response of LNG storage tank's outer wall are calculated under El Centro Wave, Taft Wave and Tianjin Wave. the modality, shift and acceleration are analyzed comparatitely, then the rubber interlayer seismic isolation's seismic isolation effect to LNG storage tank is obtained.

[Key words] LNG storage tank rubber interlayer seismic isolation earthquake response