

考虑流固耦合效应的核电储液结构 晃动特性与隔震特性研究

赵杰¹, 王建山¹, 黄杰华²

(1. 大连大学 建筑工程学院 辽宁 大连 116622; 2. 广东顺控发展股份有限公司容桂分公司 广东 佛山 528300)

摘要: 泳池式反应堆是一种核能供热堆厂房结构, 其中的堆水池是关键部位。在地震发生时, 堆水池内的液体会与结构发生流固耦合效应, 威胁到堆水池的完整性, 因此需要进行抗震分析和隔震保护。首先, 以某反应堆的堆水池为研究对象, 在地面地震动水平双向输入条件下, 对比分析了非隔震结构和隔震结构的动力响应; 其次, 使用位移、加速度、主应力、晃动波高和基底剪力指标分析隔震层对储液结构抗震性能的提升程度。研究结果表明: 设置隔震层对加速度、位移、应力和基底剪力都有明显降幅, 隔震效果明显, 起到了良好的隔震效果; 而对于晃动波高来说, 隔震尚不能有效控制晃动波高, 反而有一定的放大作用。研究成果可为核电储液结构的隔震设计提供参考。

关键词: 堆水池; 流固耦合; 隔震层; 时程分析; 地震响应

中图分类号: TU352

文献标识码: A

Research on the dynamic characteristics and isolation properties of nuclear power liquid storage structures considering fluid-structure interaction effects

ZHAO Jie¹, WANG Jianshan¹, HUANG Jiehua²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China;

2. Guangdong Shunkong Development Co., Ltd., Ronggui Branch, Foshan 528300, China)

Abstract: The swimming pool-type reactor is a type of nuclear heating reactor facility, and the pool of the reactor is a critical component. During an earthquake, the liquid inside the pool undergoes fluid-structure interaction, posing a threat to the integrity of the pool. Therefore, seismic analysis and isolation protection are necessary. Firstly, the pool of a certain reactor is taken as the research object. Under the input of bidirectional ground motion during an earthquake, a comparative analysis of the dynamic responses of non-isolated and isolated structures is conducted. Then, displacement, acceleration, principal stress, wave height, and base shear indicators were then used to analyze the degree of improvement in the seismic performance of the liquid storage structure by the isolation layer. The results show that the addition of an isolation layer significantly reduces acceleration, displacement, stress, and base shear, indicating a significant isolation effect. However, for wave height, isolation is not yet effective in controlling it and may even have an amplification effect. The research findings can provide reference for the seismic isolation design of nuclear power liquid storage structures.

Key words: reactor pool; fluid-structure interaction; isolation layer; time history analysis; seismic response

0 引言

储液结构广泛应用于化工、能源和核工程领域。在地震作用下, 容器会发生振动, 连带容器里面的液体也发

收稿日期: 2023-10-18; 修回日期: 2024-04-07

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51408255)

作者简介: 赵杰(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事地下工程、工程抗震等研究。E-mail: 13942691061@163.com

生振动,产生流体-结构相互作用,与此同时产生较大的倾覆力矩,破坏容器底部支撑,可能造成重大的衍生灾害,严重威胁群众的生命财产安全,因此研究考虑流固耦合效应储罐结构的晃动特性和隔震特性至关重要。

液体-结构相互作用是储罐抗震设计不可规避的难题,针对该问题,国内外研究人员通过理论分析和数值模拟等多种手段做了大量工作,也产生了许多成果。早在20世纪60年代,Housner^[1]就提出可将刚性储罐内部的液体等效为罐体的附加质量;本世纪初,刘焕忠^[2]利用ABAQUS对储罐动力试验模型进行了数值模拟,并提出一种新的用于表述附加质量分布规律的公式;马驰骋等^[3]根据虚拟质量法(virtual mass method, VMM)结合边界元法和有限元法构建了系统的动力学模型,研究了航天器贮箱变质量流固耦合系统的动力学特性;刘雨等^[4]采用附加质量法考虑流体的流固耦合作用;王向英等^[5]考虑流固耦合,通过ABAQUS软件建立球罐有限元模型,引入了光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法进行储罐的地震反应分析;崔利富等^[6]通过数值研究发现储罐晃动对卧式储罐地震响应有一定的抑制作用;张浩天等^[7]研究了不同储罐状态下储罐结构在爆炸地震动下的动力响应;针对于异性水箱,李建波等^[8]基于声学-结构耦合法(coupled acoustic-structural method, CAS)提出一种精度高和效率好的分布质量模型。

从20世纪30年代起,随着研究的深入,学者们逐渐将“抗震”的思想转变为“隔震”^[9],并在理论研究和试验分析方面取得了诸多成果。CHALHOUB等^[10]通过振动台实验,发现基础隔震可以明显降低储罐的动水压力;KIM等^[11]在储罐上施加了叠层铅芯橡胶支座来模拟动响应试验,结果表明采用隔震支座可以显著降低储罐的动力响应;孙建刚等^[12]根据机械动力学原理,设计了一种滚动隔震装置,结果表明隔震装置可以有效降低地震响应;樊海龙等^[13]通过有限元软件ADINA考虑接触非线性,用弹簧-阻尼系统等效代替三维隔震,进行储罐隔震响应数值分析,结果表明隔震效果良好。

这些研究结果对储罐结构的地震分析、设计和抗震性能提供了有价值的指导和认识,有助于提高这些结构的地震抗性和安全性。然而,关于核电厚罐壁储罐结构的流固耦合响应和隔震特性的研究相对较少,本文研究基于与生态环境部核与辐射安全中心合作项目,以我国某型号泳池式反应堆为研究对象,利用ANSYS有限元软件对堆水池液体晃动进行计算,与中国核电厂抗震设计规范推荐采用的Housner模型和规范法进行计算对比分析,验证FLUID80单元用于建模的合理性,再通过加速度、晃动波高和基底剪力等指标来研究隔震响应分析。

1 计算分析原理

1.1 Housner 理论

Housner 理论的实现原理是将储罐池罐里的液体自下而上等效成两个主要部分:一部分是处于池罐下部与器壁形成刚性域连接的脉冲质量;另一部分是分布于池罐上部与器壁弹性连接的一系列奇数阶阵型晃动质量,如图1所示。Housner理论解则由式(1)~式(6)计算得出。

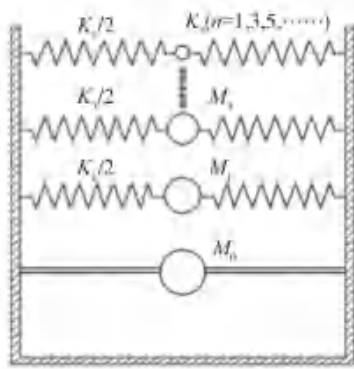


图1 Housner 理论示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Housner theory

$$M_0 = M \frac{\tan h(1.7R/h)}{1.7R/h} \quad (1)$$

$$h_0 = \frac{3}{8}h \left\{ 1 + \alpha \left[\frac{M}{M_1} \left(\frac{R}{h} \right)^2 - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

$$M_1 = M \frac{0.6 \tan h(1.8h/R)}{1.8h/R} \quad (3)$$

$$h_1 = h \left[1 - 0.185 \left(\frac{M}{M_1} \right) \left(\frac{R}{h} \right) - 0.56\beta \frac{R}{h} \sqrt{\left(\frac{MR}{3Mh} \right)^2 - 1} \right] \quad (4)$$

$$k_1 = 5.4 \frac{M_1^2 gh}{M R^2} \quad (5)$$

$$T_w = 2\pi \sqrt{\frac{M_1}{k_1}} \quad (6)$$

式中: R 为容器的半径; M 和 h 依次为容器内液体的总质量和深度; 系数 α 和 β 的数值分别为 1.33 和 2.00; T_w 为液体晃动的固有周期。

1.2 第一振型周期计算

《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》(GB50341—2014)^[14] 给出了规范算法计算储液罐耦联振动基本周期和储液晃动基本周期的计算式(7)和式(8)。

储罐与储液耦合振动的基本自振周期,可按式(7)计算:

$$T_c = K_c H_w \sqrt{\frac{R}{\delta_3}} \quad (7)$$

式中: T_c 为罐液耦连振动基本周期(s); R 为储液罐内半径(m); δ_3 为罐壁距底板 1/3 高度处的有效厚度(m); H_w 为设计液面高度(m); K_c 为耦连振动周期系数。

储液晃动基本周期应按式(8)计算:

$$T_w = K_s \sqrt{D} \quad (8)$$

式中: T_w 为储液晃动基本周期(s); K_s 为晃动周期系数,无量纲; D 为储液罐内径(m)。

2 模态分析

2.1 堆水池模型建立

2.1.1 堆水池尺寸

图2为某堆型中的堆水池是属于圆柱体储液结构(统称为“储液结构”),该结构整体高 29 m,内径为 5 m,外径为 6 m,壁厚为 1 m,池底厚度为 2 m,则实际的有效储液高度为 27 m,池内水溶液的液深为 24 m。圆柱形储液容器用 SOLID185 单元进行模拟,而水溶液用经典的 Housner 流体理论进行专一性的优化和改进而来的 FLUID80 单元进行模拟,底部为固定约束。

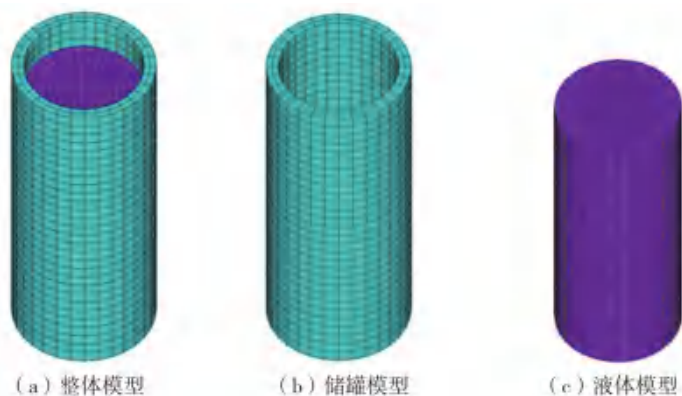


图2 储液结构有限元模型

Fig. 2 Finite element model of liquid storage structure

2.1.2 材料选取

圆柱形储液容器为混凝土结构,其内部装载的是水溶液,相关的材料参数见表1。

表 1 材料参数汇总
Table 1 Summary of material parameters

材料参数类型		数值	单位
水溶液	密度	1 000	kg/m ³
	体积模量	2.068 5×10 ⁹	Pa
	黏性系数	0.001 009	Pa·s
储液主容器	密度	2 500	kg/m ³
	弹性模量	4.225×10 ¹⁰	Pa
	泊松比	0.2	—

2.2 隔震模型

2.2.1 隔震支座参数及布置

表 2 为此次所采用隔震支座的性能参数,为了满足隔震层水平总刚度的数值要求,综合考虑选取了 73 个隔震支座,并按照轴对称和放射状的形式去布置,如图 3 所示,

表 2 隔震支座的性能参数
Table 2 Performance parameters of isolation bearing

参数	数值	单位
橡胶直径	700.00	mm
橡胶总厚度	110.00	mm
支座高度	216.50	mm
第 1 形状系数	34.50	—
第 2 形状系数	6.36	—
水平刚度	1.136×10 ⁶	N/m
阻尼比	<5.0	%
竖向刚度	3 900×10 ⁶	N/m

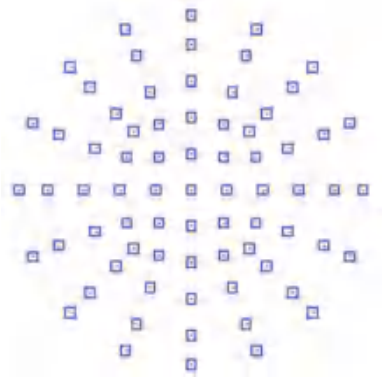


图 3 隔震支座布置图

Fig. 3 Layout of isolation bearing

2.2.2 隔震单元选择

本文的研究主要聚焦于泳池式反应堆的地震响应,选取 COMBIN14 单元模拟隔震支座的效果,具体思路是:在相互独立的三个方向上建立 COMBIN14 单元,以此来体现刚度和阻尼特性,进而表达出相应的力-位移关系,最终实现隔震支座的等效线性力学模型的模拟,如图 4 所示。

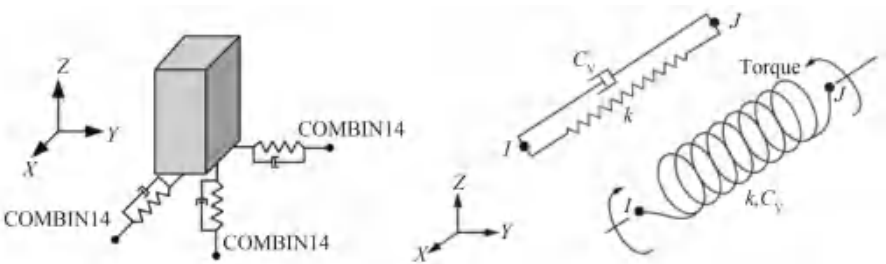


图 4 隔震支座的单元组合示意图

Fig. 4 Schematic diagram of unit combination of isolation bearing

在加入柔性程度较大的隔震层后,其各向刚度的合理确定是重要至极的,这会直接影响到结构是否具备富余的抗震安全裕度。在开展隔震层设计时,其水平总刚度的确定可由规范《隔震橡胶支座试验方法》(GB/T 20688.1—2007)^[15]中公式计算。

$$K_h = \frac{(2\pi)^2 M}{T^2} \tag{9}$$

式中: M 为隔震层上部结构总质量; T 为结构的隔震周期。

需要注意的是:一般场地的特征周期 T_g 处于 0.2~0.9 s 的范畴内。整个地震反应谱分为三个阶段,上升段:地震谱曲线的起始部分,周期小于 0.1 s,呈现出直线上升的趋势。水平段:从 0.1 s 到特征周期 T_g 的区

段,此区段内地震影响系数(α_{\max})达到最大值,反映了建筑物在此期间对地震作用的响应达到峰值。下降段:自特征周期至 5 倍特征周期的区段,曲线开始逐渐下降。在这一段内,衰减指数应取 0.9,表示地震影响系数随时间的增长而逐渐减小。隔震原理是通过设置隔震措施,使主结构的自振周期提高至大于特征周期,处于地震反应谱的下降段,从而使地震影响系数变小,降低地震载荷,从而达到隔震效果。

关于隔震层的水平阻尼是属于位移相关类型的^[16-17],其阻尼系数主要由剪切变形时的阻尼比所确定,该参数的确定可由规范《隔震橡胶支座试验方法》(GB/T 20688.1—2007)^[15]中公式换算求得:

$$C_h = 2\xi\sqrt{K_h M} \tag{10}$$

式中: ξ 为阻尼比,一般为 20%~30%,具体数值由厂家提供,且因隔震支座而异。

经过综合考虑,取隔震结构的隔震周期为 1.5 s,阻尼比为 0.25,结构与储液的总质量为 4.7524×10^6 kg,通过代入公式求解得到储液结构的水平隔震层的具体参数见表 3。

表 3 隔震模型的水平隔震层参数

Table 3 Parameters of horizontal isolation layer of isolation model

参数	数值
水平总刚度 K_h	8.34×10^7 (N/m)
水平阻尼系数 C_h	9.95×10^6 (N·s/m)



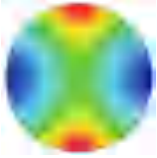


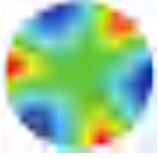
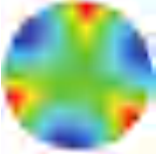
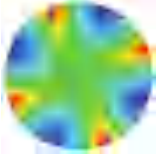
2.3 模态分析结果

2.3.1 储液罐自振频率研究

由流体力学^[18]和液固耦合力学^[19]等相干理论可知:自由液面的晃动行为是不可避免的,最为关注的是液体外溢的可能性问题,即剧烈的液面晃动是否会导致液体超越安全储备高度,从而在容器口处产生外溢现象。计算结束后,提取前八阶模态结果整理汇总于表 4。

表 4 自由液面前八阶晃荡振型

Table 4 First eight sloshing modes of free surface

阶次	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶
振型				
频率/Hz	0.291 50	0.291 50	0.369 44	0.371 55
阶次	第五阶	第六阶	第七阶	第八阶
振型				
频率/Hz	0.410 87	0.424 21	0.424 21	0.466 53

由表 4 可知:前两阶为对流振动(sloshing),即液面晃动,为长周期振动。其他的为脉冲振动(impulsive),即罐体与液体的耦联振动,其周向所形成波峰和波谷的数目也会相应增多,表现出典型的 $\cos(n\theta)$ 型梁式振动振型,为短周期振动,而这也是储液晃动振型的主要形式。

2.3.2 与 Housner 理论的模式对比

计算所需的参数可采用下列公式进行相关计算,其中公式(1)~公式(6)依次为求圆柱形储液容器的等效脉冲质量及其作用高度、等效晃动质量及其作用高度和弹簧刚度,见表 5。第一阶晃动周期对比如表 6 所示。

表 5 Housner 等效力学模型参数

Table 5 Parameters of Housner equivalent mechanical model

参数	圆柱形储液结构	参数	圆柱形储液结构
M_0 /kg	1.81×10^6	h_1 /m	21.22
M_1 /kg	1.31×10^5	k_1 /(N·m ⁻¹)	4.62×10^5
h_0 /m	4.51		

表 6 第一阶晃动周期对比

Table 6 Comparison of first-order sloshing period

计算方法	FLUID80 的 ANSYS 有限元解	Housner 的理论解
第一阶周期/s	3.431	3.343

由表 6 的数据可知: 基于 FLUID80 的周期数值与采用 Housner 理论得出的结果基本吻合, 且误差仅为 2.63%, 在合理范围内。

2.3.3 规范法理论解对比

规范法计算参数如表 7 所示, 使用上述公式 (7)、(8) 计算理论, 并与提取的晃动和耦连第一阶周期的比较验证, 对比结果见表 8。

表 7 规范法计算参数

Table 7 Normalization factor calculation

计算参数	H_w 为设计液面高度/m	R 为储液罐内半径/m	δ_3 为罐壁距底板 1/3 高度处的有效厚度/m	K_c 为耦连振动周期系数	K_s 为晃动周期系数
数值	24	5	1	5.2×10^4	1.047

表 8 一阶振型周期计算结果对比

Table 8 Comparison of the calculation results of the first-order mode period

振型类型	周期/s		误差/%
	ANSYS 有限元解	理论解析解	
一阶晃动	3.431	3.310	3.5
一阶耦联	0.0167	0.0279	-67.1

由表 8 中不难发现: 晃动一阶振型周期 ANSYS 解和规范解吻合, 误差只有 3.5%, 而对于耦联一阶振型周期误差较大, 为-67.1%, 这是由于堆水池壁厚过大, 导致规范法不适用。而液面晃动周期不考虑壁厚, 仍在合理误差范围内, 故所得结果具备相当的可信度。

3 支座对堆水池的隔震效果分析

3.1 地震波动输入

沿储罐模型的 X 和 Y 两个水平向施加峰值加速度为 0.30 g 的改进型 RG1.60 地震动开展动力瞬态分析, 其对应的时程曲线如图 5 所示。本文在对堆水池的瞬态分析中, 结构阻尼比根据规范《核电厂抗震设计规范》(GB 50267—2019) [20] 推荐取 5%。

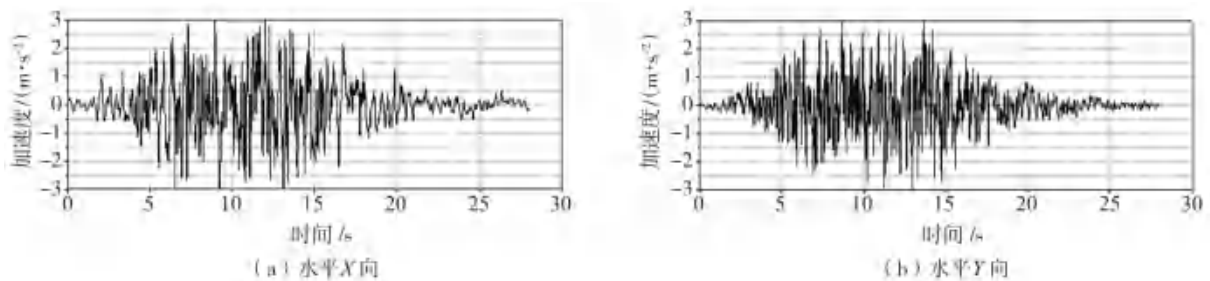


图 5 改进型 RG1.60 地震动时程曲线

Fig. 5 Ground motion time history curve of improved RG1.60

3.2 隔震效果分析

为了更加直观地体现隔震效果, 引入减震率 ψ (SR) 这一量化评价指标 [21], 其具体表达式如下所示:

$$\psi = \frac{\delta - \Delta}{\delta} \times 100\% \quad (11)$$

式中: δ 为隔震前的地震响应; Δ 为隔震后的地震响应。当 $\psi > 0$ 时, 即可认为隔震措施促使结构地震响应减弱; 相反则认为隔震措施更进一步地激发和放大了地震响应。

3.2.1 加速度分析

为了清楚掌握结构加速度的变化情况,选择如图6所示结构壁上的节点作为结果提取点。基于数值分析得到各提取点加速度最大值的分布曲线,如图7所示。

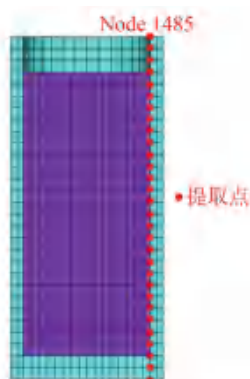


图6 器壁上的结果提取节点

Fig. 6 Result extraction node on the wall

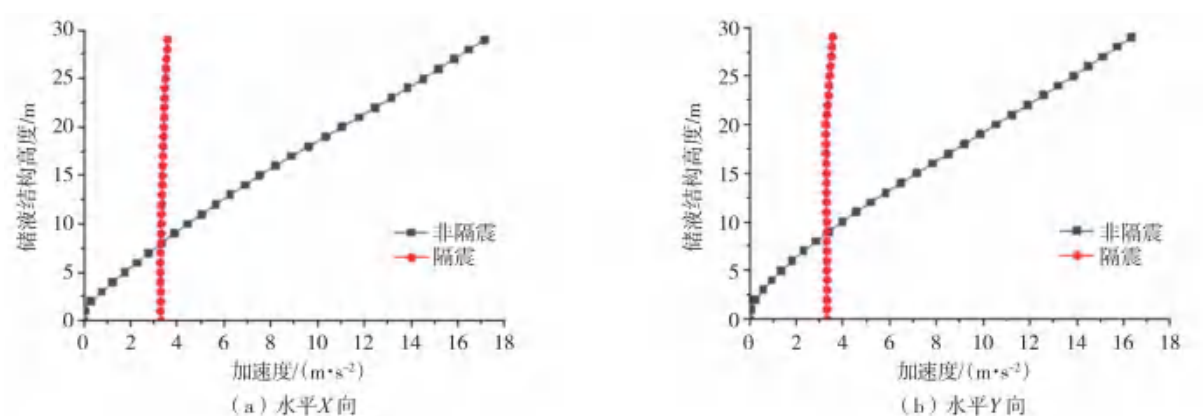


图7 加速度最大值沿器壁高度分布的包络曲线

Fig. 7 Envelope curve of maximum acceleration distribution along the wall height

由图7可以看出:水平 X 向和 Y 向隔震前后加速度变化明显,减震率分别达到79.07%和78.21%。

鉴于器壁顶点的加速度峰值最大,是整体结构上遭受冲击最大和面临较高破坏风险的薄弱部位,故将顶部 Node 1485 隔震前后的加速度时程曲线提取出来进行对比,如图8所示。

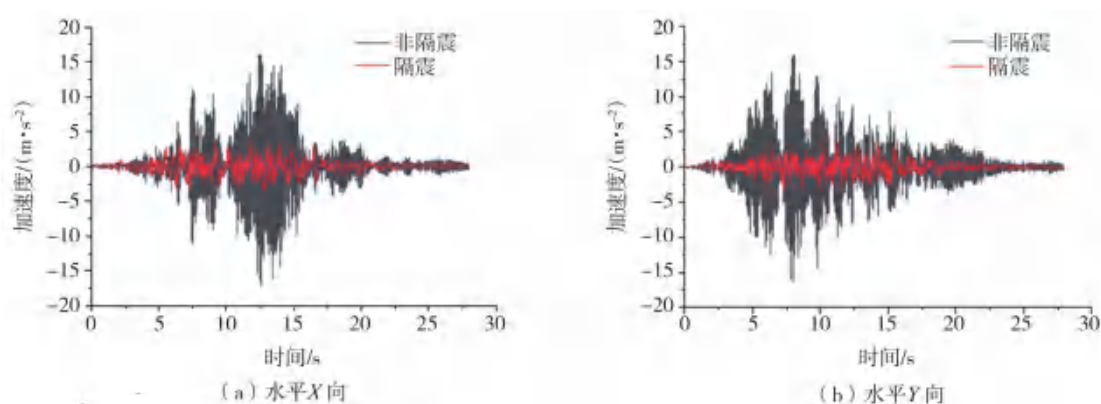


图8 储液结构顶点 Node 1485 的加速度时程曲线

Fig. 8 Acceleration time history curve of node 1485 at the vertex of liquid storage structure

以水平 X 向为例,从图8中的加速度时程响应不难看出:施加隔震层后,结构顶部的加速度响应降幅明显,整体时程曲线较之非隔震情况显著减小,与此同时曲线的变化频率也降低了许多。此外,非隔震情况的加速度峰值产生于12.59 s,而隔震情况则出现在12.81 s,因此隔震措施令加速度峰值的出现形成了一定的滞后效应,说明起到了良好的减震成效。

3.2.2 位移分析

表 9 总结了隔震前后储液结构的最大位移。观察表 9 的数据可以得出: 无论是否进行隔震, 结构的最大位移响应都出现在结构顶点位置。为了进行对比, 提取了顶部 Node1485 的隔震前后位移时程曲线, 并在图 9 中进行展示。通过结合表 9 和图 9 的分析, 可以看出隔震结构的位移时程变化频率减小明显。此外, 隔震结构的位移相较于非隔震结构也增大了一定倍数, 具体而言, 水平 X 向约增大了 12 倍, 水平 Y 向约增大了 7 倍。这些位移的主要增幅归因于隔震层的作用。由于隔震层的施加, 使得结构与地表之间具有较小的刚度特性, 使得隔震层可以产生较大的平动变形, 从而耗散传递到上部的地震能量, 达到隔震的目的。

表 9 结构最大位移统计

Table 9 Statistics of maximum displacement of structure

水平向	部位 H/m	非隔震结构位移/ m	隔震位移/ m			减震率/%
			隔震层位移	隔震上部结构位移	隔震结构总位移	
X 向	29	0.008 92	0.106 20	0.003 03	0.109 23	66.0
Y 向	29	0.008 82	0.058 73	0.001 72	0.060 45	80.5

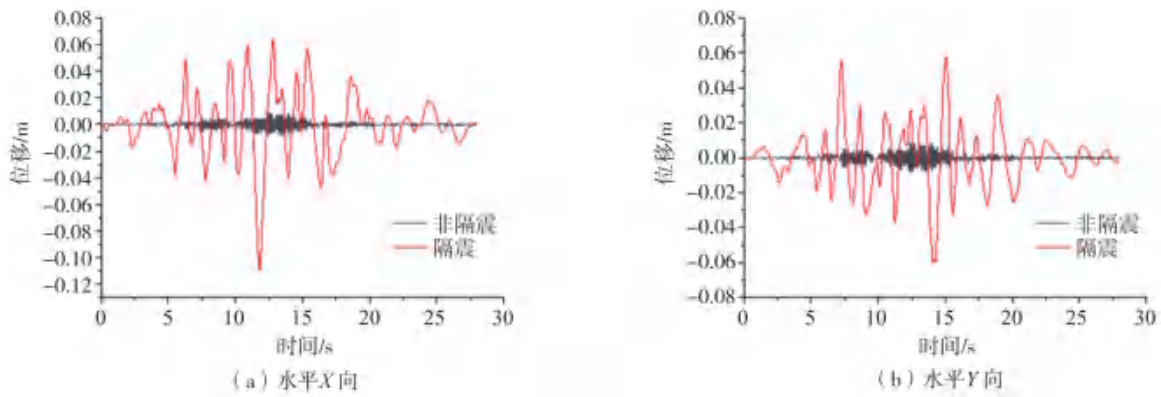


图 9 储液结构顶点 Node 1485 的位移时程曲线

Fig. 9 Displacement time history curve of node 1485 at the vertex of liquid storage structure

图 10 显示了隔震前后储液结构相对于基底的水平位移响应最大值沿器壁高度的分布情况。结果表明, 与非隔震情况相比, 隔震后的结构在水平 X 和 Y 方向上相对于基底的位移显著减小, 减震率最大分别为 66.0% 和 80.5%。这表明隔震层有效减少了地震能量, 促使结构以双向平动方式响应, 进而减小了结构的变形, 尤其是层间位移微小。因此, 可以得出水平隔震效果良好的结论。

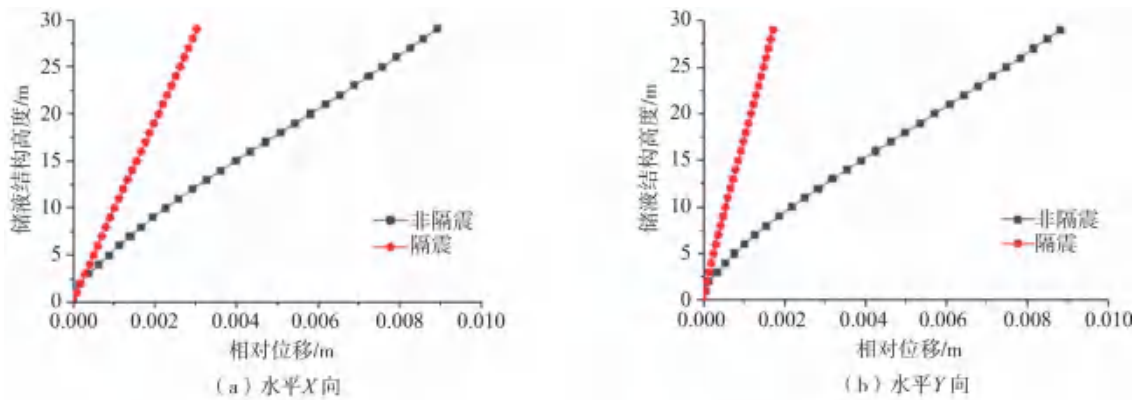


图 10 相对位移最大值沿器壁高度的分布曲线

Fig. 10 Distribution curve of maximum relative displacement along wall height

3.2.3 基底剪力分析

基底剪力在众多技术规程和规范标准中被重点提及并被提出了相关要求, 是不可或缺的地震反应指标。本节引入该指标作为隔震效果的评价依据之一, 并将隔震与否两种工况的基底剪力时程曲线提取出来, 如图 11 所示。

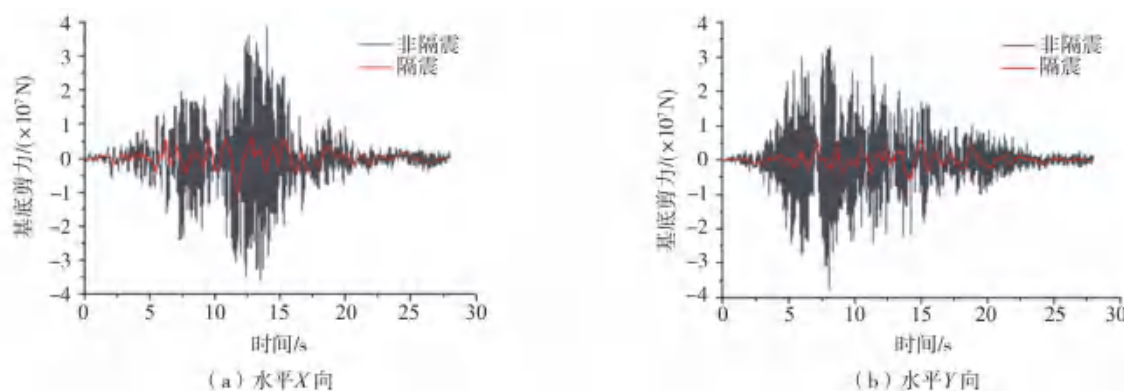


图 11 基底剪力时程曲线

Fig. 11 Time history curve of base shear force

根据图 11 可知: 在水平 X 向, 结构在隔震前和隔震后的基底剪力最大值分别为 3.8269×10^7 N 和 9.8035×10^6 N, 减震率为 74.4%。在水平 Y 向, 非隔震结构的最大基底剪力为 3.7396×10^7 N, 隔震后则为 5.5347×10^6 N, 减震率高达 85.2%。隔震后, 两个方向的反应峰值均大幅减小。随着时间的推移, 非隔震结构的基底剪力经历了剧烈的波动和急剧的变化, 而隔震结构的基底剪力变化频率较低, 其曲线相对平滑, 并且总体数值始终保持在比非隔震结构更低的水平。

3.2.4 主应力分析

本节将对隔震前后储液结构的主应力进行分析, 其中包括影响混凝土开裂的第一主应力和反映抗压强度性能的第三主应力。图 12~图 13 分别为储液非隔震结构和隔震结构处于地震动峰值时刻的主应力云图。

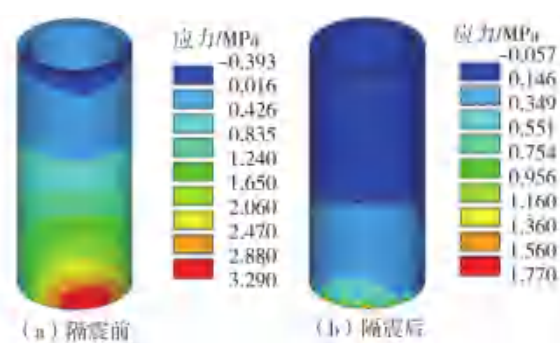


图 12 第一主应力云图对比

Fig. 12 Comparison of nephogram of the first principal stress

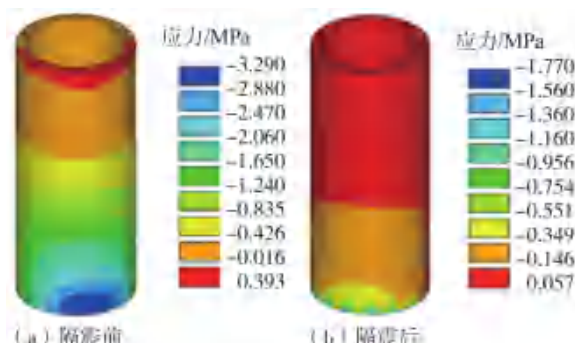


图 13 第三主应力云图对比

Fig. 13 Comparison of nephogram of the third principal stress

图 12~图 13 显示, 无论是否隔震, 储液结构主拉应力和主压应力分布关于 X 轴对称, 且数值基本相同, 结构一半受压, 一半受拉(双向受力状态)。这是因为环向结构具有对称性, 在地震力作用下, 储液波动并晃动, 导致一侧压应力增加, 而另一侧受到相等的拉应力影响。以第一主应力云图为例, 隔震前底部附近的应力最大, 形成应力集中区, 应力峰值为 3.29 MPa, 沿结构自下向上以层状分布逐渐减小, 直至容器口附近的应力最小。隔震后的应力云图与隔震前基本相似, 但底部应力集中区明显减小, 仅部分边缘出现应力集中, 高度方向的应力也显著降低, 应力峰值为 1.77 MPa, 减震率达到 46.2%。

3.2.5 晃动波高分析

液面晃动波高过大, 主要导致液体溢出, 以及液体冲击顶盖。因此在液面提取若干点进行分析, 如图 14 所示。

根据图 15 的结果, 观察到 Node 3689 和 Node 4938 与 Node 3437 和 Node 6237 的晃动波高时程曲线在 x 轴上分别对称, 数值大小相近, 方向相反。自由液面中心的 Node 3413 节点的晃动非常微弱, 这表明储液的晃动主要是由基本振型引起的。

故本文着重探讨隔震措施对晃动波高的影响, 以 Node 3689 和 Node 6237 为自由液面提取点, 其对应的晃动波高时程曲线如图 16 所示。



图 14 自由液面提取点

Fig. 14 Free surface extraction point

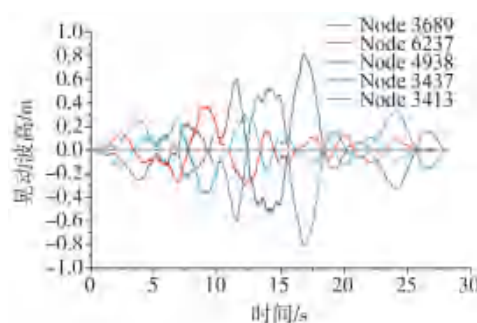
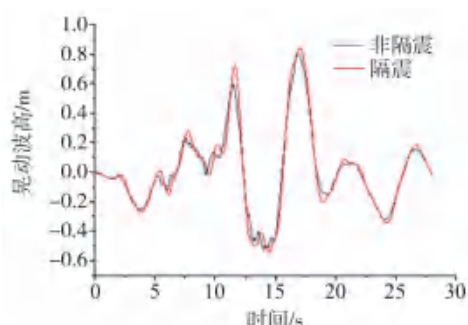
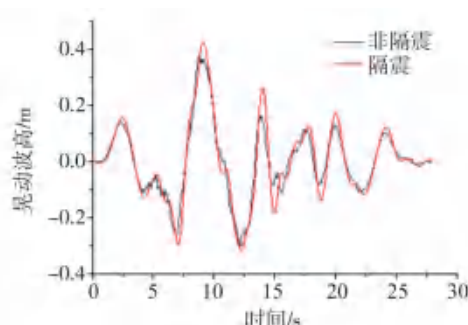


图 15 自由液面提取点的晃动波高时程曲线

Fig. 15 Time history curve of sloshing wave height at the extraction point of free liquid surface



(a) Node 3689



(b) Node 6237

图 16 自由液面的晃动波高时程曲线

Fig. 16 Time history curve of sloshing wave height on free liquid surface

从图 16 中可以看出: 1) 隔震前后的晃动波高曲线在形态和走向上非常相似, 但隔震曲线相对平滑, 波高最大值出现的时刻晚于地震动峰值出现的时刻。2) 对于非隔震结构, Node 3689 和 Node 6237 的波高峰值分别为 0.811 05 m 和 0.376 69 m, 而采取隔震措施后, 波高峰值增加至 0.840 36 m 和 0.425 01 m, 减震率分别为 -3.61% 和 -12.8%。因此, 可以得出结论: 隔震层的应用在一定程度上放大了晃动波高, 这是由于液体晃动成分本身具有低频长周期振动特性, 与隔震层的长周期特性相吻合, 进一步激发了液体的晃动特性, 导致波高的增加。综上所述, 隔震尚不能完全有效地控制晃动波高。

4 结论

本文主要以某堆型中的堆水池(储液结构)为研究对象, 考虑流固耦合效应来研究液体的晃动特性, 并在此基础上对结构施加基底隔震层, 对其隔震特性进行研究, 本文得出主要结论如下:

1) 基于有限元的模态分析表明: 储液罐的低周期振动为脉冲振动(impulsive), 即罐体与液体的耦联振动, 其周向所形成波峰和波谷的数目也会相应增多, 表现出典型的 $\cos(n\theta)$ 型梁式振动振型。而长周期振动主要为对流振动(sloshing), 即液面晃动, 与经典理论解基本吻合。

2) 通过合理的隔震措施与隔震参数的设定, 能有效对堆水池进行有效隔震作用, 通过流固耦合有限元模拟分析, 可知隔震后的结构在水平 X 向和 Y 向上, 加速度减震率分别达到 79.07% 和 78.21%; 基底位移减震率最大分别为 66.0% 和 80.5%; 基底剪力减震率分别为 74.4% 和 85.2%, 高度方向的应力也显著降低, 减震率为 46.2%; Node 3689 和 Node 6237 波高峰值的减震率分别为 -3.61% 和 -12.8%, 峰值出现时间分别延长 0.21 s 和 0.36 s。目前隔震措施设置, 主要针对短周期的耦联振动起作用, 对长周期的对流振动影响较小。

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] 刘焕忠. 附加质量法在储液罐动力分析中的应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.

- LIU Huanzhong. Studying of added mass method for dynamic analysis of cylindrical tank [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)
- [3] 马驰骋,张希农,罗亚军,等. 航天器贮箱变质量流固耦合系统的动力学响应[J]. 航空动力学报, 2015, 30(3): 736-745.
- MA Chicheng, ZHANG Xinong, LUO Yajun, et al. Dynamic responses for a fluid-structure coupling system with variable mass in a tank of spacecraft[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(3): 736-745. (in Chinese)
- [4] 刘雨,党俊杰,陆道纲,等. AP1000 非能动安全壳冷却水贮存箱流固耦合动态特性实验和分析[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(6): 1027-1033.
- LIU Yu, DANG Junjie, LU Daogang, et al. Experiment and analysis on dynamic characteristics of AP1000 PCCWS Tregarding fluid-structure interaction[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(6): 1027-1033. (in Chinese)
- [5] 王向英,赵诗扬,张洋,等. 引入 SPH 方法的储液罐地震反应分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(3): 103-109.
- WANG Xiangying, ZHAO Shiyang, ZHANG Yang, et al. Study on seismic response of liquid storage tank with SPH method[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(3): 103-109. (in Chinese)
- [6] 崔利富,孙建刚,吕远,等. 储液晃动对卧式储罐地震响应的影响研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(3): 190-198.
- CUI Lifu, SUN Jiangang, LV Yuan, et al. Effect of liquid sloshing on horizontal storage tank seismic response[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(3): 190-198. (in Chinese)
- [7] 张浩天,赵雪川,宋春明,等. 爆炸地震动下储液结构动力响应试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(21): 97-108, 128.
- ZHANG Haotian, ZHAO Xuechuan, SONG Chunming, et al. Test study on dynamic response of liquid storage structure under explosion ground motion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(21): 97-108, 128. (in Chinese)
- [8] 李建波,杨波,李志远,等. 基于 CAS 法的核电工程异形水箱分布质量计算模型[J]. 工程力学, 2024, 41(2): 160-170, 193.
- LI Jianbo, YANG Bo, LI Zhiyuan, et al. Distributed mass calculation model of special-shaped tank in nuclear power project based on CAS method [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(2): 160-170, 193. (in Chinese)
- [9] 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: 27-45.
- SUN Jiangang. Isolation of large vertical storage tank: theory, method, test [M]. Beijing: Science Press, 2009: 27-45. (in Chinese)
- [10] CHALHOUB M S, KELLY J M. Shake table test of cylindrical water tanks in base-isolated structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(7): 1451-1472.
- [11] KIM Y W, LEE Y S. Coupled vibration analysis of liquid-filled rigid cylindrical storage tank with an annular plate cover[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 279(1-2): 217-235.
- [12] 孙建刚,崔利富,王振,等. 立式储罐滚动隔震地震模拟振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(6): 92-101.
- SUN Jiangang, CUI Lifu, WANG Zhen, et al. Earthquake simulated shaking table test of vertical tank with rolling isolation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(6): 92-101. (in Chinese)
- [13] 樊海龙,李欣业,袁志丹,等. 大型立式隔震储液罐的地震响应数值模拟[J]. 油气储运, 2021, 40(1): 84-89.
- FAN Hailong, LI Xinye, YUAN Zhidan, et al. Numerical simulation on seismic response of large vertical isolated liquid storage tank[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(1): 84-89. (in Chinese)
- [14] GB 50341—2014 立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- GB 50341—2014 Code for design of vertical cylindrical welded steel oil tanks[S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)
- [15] GB/T 20688.1—2007 橡胶支座 第1部分: 隔震橡胶支座试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- GB/T 20688.1—2007 Rubber bearings-Part 1: Seismic-protection isolators test methods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese)
- [16] 杨彦飞,何文福. 橡胶隔震支座基本力学性能试验研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(5): 6-9.
- YANG Yanfei, HE Wenfu. Research on basic mechanical properties of rubber isolators[J]. Building Science, 2010, 26(5): 6-9. (in Chinese)
- [17] 王涛,李吉超,王飞. 针对核电厂三维隔震的厚层橡胶支座力学性能研究[J]. 核动力工程, 2015, 36(5): 37-40.
- WANG Tao, LI Jichao, WANG Fei. Experimental study on thick rubber bearings of three-dimensional isolation of nuclear power plants [J]. Nuclear Power Engineering, 2015, 36(5): 37-40 (in Chinese)
- [18] 何川,龙天渝,童思陈,等. 流体力学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2018.
- HE Chuan, LONG Tianyu, TONG Sichen, et al. Fluid Mechanics[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2018. (in Chinese)
- [19] 叶正寅,张伟伟,史爱明,等. 流固耦合力学基础及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2010.
- YE Zhengyin, ZHANG Weiwei, SHI Aiming, et al. Fundamentals of fluid-structure coupling and its application[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2010. (in Chinese)
- [20] GB 50267—2019 核电厂抗震设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- GB 50267—2019 Standard for seismic design of nuclear power plants[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)
- [21] 吴洁颖,余倩倩,顾祥林,等. 近断层地震下基于新型减隔震装置的大型 LNG 储罐动力响应研究[J/OL]. 工程力学, 1-19 [2024-07-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20240102.1430.010.html>.
- WU Jieying, YU Qianqian, GU Xianglin, et al. Dynamic response study of large LNG storage tanks based on a new type of isolation device under near-fault earthquakes [J/OL]. Engineering Mechanics: 1-19 [2024-04-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20240102.1430.010.html>. (in Chinese)