

一体化快堆核岛厂房基底隔震对比分析研究

苗 鑫, 张博韬*, 刘一哲, 刘林顶
(中国原子能科学研究院 核工程设计研究所, 北京 102413)

摘要:为提高一体化快堆的极限安全地震动设计能力,拓宽其厂址适用范围,引入了基底隔震技术。针对一体化快堆核岛厂房整体质量大、刚度大的特点,研制了适用于本项目的铅芯橡胶隔震支座,并利用该系列隔震支座进行了核岛厂房的基底隔震设计。隔震设计以将极限安全地震动从 $0.2g$ 提高至 $0.4g$ 为目标,基于动力时程分析方法,分析了隔震核岛厂房结构的安全性,同时研究了整体隔震效果。分析结果表明,核岛厂房隔震层的安全性能满足规范要求,水平向隔震效果显著,当频率大于 1 Hz 时,抗震结构的水平向楼层反应谱可包络隔震结构的楼层反应谱。竖向地震动在 $0.4g$ 输入地震动和隔震层的作用下被二次放大,需结合其他技术手段进一步实现提高竖向极限安全地震动的目标。

关键词:一体化快堆;核岛厂房;基底隔震;减震效果

中图分类号: TL43.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2025)S1-0140-08

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0823

Comparative Analysis on Seismic Base Isolation for Integrated Fast Reactor Nuclear Power Plant

MIAO Xin, ZHANG Botao*, LIU Yizhe, LIU Linding

(Department of Nuclear Engineering Design, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The fast reactor is one of the principal reactor types in the fourth generation of nuclear power technologies worldwide. The integrated closed-cycle fast reactor nuclear energy system (referred to as the integrated fast reactor) is a nuclear energy system co-located within a single site. This system integrates the fast reactor, fuel regeneration subsystem (including spent fuel reprocessing and new fuel fabrication), and other supporting subsystems, achieving self-sustaining circulation of nuclear fuel within the site. To enhance the design ultimate safety ground motion of the integrated fast reactor and expand its site applicability, base isolation technology was introduced. Given the unique structural characteristics of the integrated fast reactor nuclear island plant, such as its large mass and high stiffness, customized parameters for lead rubber bearings were developed. These bearings were subsequently employed in the base isolation design of the nuclear island plant, aiming to increase the ultimate safety ground motion from $0.2g$ to $0.4g$. The isolated and aseismic nuclear island plant was modeled and analyzed using ETABS software. Based on the time history analysis method, the safety of the isolated nuclear island plant structure was evaluated, and the seismic isolation effects, as well as the

收稿日期: 2024-11-14; 修回日期: 2025-02-04

基金项目: 中核集团集中研发项目

* 通信作者: 张博韬

floor response spectrum under different elevations and seismic acceleration inputs, were systematically studied. The analysis results demonstrate that the safety performance of the isolation layer, designed using the developed lead rubber bearings, complies with the requirements of the relevant specifications. The horizontal seismic isolation effect of the nuclear island plant is significant. For frequencies above 1 Hz, the horizontal floor response spectrum of the non-isolated structure can envelop that of the isolated structure, indicating effective seismic energy dissipation. Considering the seismic resistance of the equipment, the isolation system meets the original horizontal seismic isolation design objectives. Furthermore, the isolation scheme itself does not significantly amplify the vertical seismic response of the nuclear island plant. The primary factor contributing to the significant increase in vertical seismic response is the increase in the vertical input seismic motion from 0.2g to 0.4g, resulting in a maximum vertical seismic response ratio of 2.54 between the isolated and non-isolated structures. If the original vertical seismic motion target remains unchanged, additional measures such as vertical seismic reduction or three-dimensional isolation may be needed to further achieve the goal of improving the vertical ultimate safety ground motion. The displacement limitation of the isolation layer in nuclear island buildings is often a critical control factor in isolation design. The development of high-performance lead rubber bearings has significant positive implications for such projects.

Key words: integrated fast reactor; nuclear island plant; base isolation; damping effect

快堆是世界第四代核电技术的主推堆型之一,也是我国核能发展“三步走”战略“热堆-快堆-聚变堆”的关键一步。而一体化闭式循环快堆核能系统(简称一体化快堆)是第二步的高级阶段和必然选择,是保障国家能源安全、铀资源利用、解决核废物环境安全的有效途径^[1-2]。

对快堆来说,其高温低压的特点决定了其设备壁厚较薄、抗震能力较弱,因此目前初步设计均按照假想厂址且极限安全地震动为0.2g开展相关工作。但随着中国核能产业的发展,厂址资源越来越稀缺,特别是待一体化快堆建造时,设计地震动问题很可能面临巨大挑战。《核电厂抗震设计标准 GB 50267—2019》^[3]指出“我国极限安全地震动加速度不超过0.3g的县级行政区数量超过县级行政区总数的3/4”,且世界第三代反应堆,如AP1000、华龙一号等,均将设计极限安全地震动提高至0.3g^[4]。因此有必要引入隔震技术提高一体化快堆设计极限安全地震动至0.3g及以上,提升其地震等自然灾害下安全防护能力,同时拓宽厂址适用范围。

隔震技术在民用领域的应用已非常成熟和广泛,但在核电领域的应用却十分有限。目前,世界上仅6座投入运营的核电站采用隔震技术^[5],集中在法国和南非。国际上一些小型的先进反应堆(如IRIS堆、ALMR堆)在设计之初均考虑了隔震

技术。国内虽然目前没有应用于实际核岛厂房隔震案例,但已在某核电厂的应急柴油发电机厂房、汽轮机厂房中等进行了试点工作。国内一些学者已对核岛厂房隔震技术进行了相关研究^[6-10],但多数研究是针对反应堆厂房、安全壳等小体积厂房结构,利用常规铅芯橡胶隔震支座即能满足相关要求,且隔震设计目标多是基于特定厂址,以减小该地震动输入下上部结构的响应。也有学者对其他形式的隔震支座,如摩擦摆、滑动支座,进行了对比分析^[11]。另外,还有学者对三维隔震核岛厂房的机理进行了初步分析和研究^[12-13]。

一体化快堆核岛厂房质量、刚度极大,整体坐落于同一个筏基上但筏基底标高不同。本文利用ETABS结构分析软件建立一体化快堆核岛厂房结构模型,同时考虑已有隔震技术的成熟度,采用研制的铅芯橡胶隔震支座参数对其进行整体基底隔震设计。基于时程分析方法,分析核岛厂房整体隔震结构的安全性,研究厂房基底隔震效果以及结构不同标高、不同地震加速度输入下的楼层反应谱。

1 厂房概况与地震设计参数

1.1 厂房概况

一体化堆核岛厂房包含反应堆厂房、蒸汽发生器厂房、人员通行厂房等6个子厂房,人员通行

厂房为混凝土框架结构,其余厂房均为混凝土墙板结构。除人员通行厂房外,每个子厂房相邻部分共用墙体,整体平面尺寸呈圆形,直径约100 m,共同坐落于平板式筏基上。其中反应堆厂房外墙采用C50混凝土,其他厂房外墙和外墙采用C45混凝土,其他墙体和楼板采用C40混凝土。厂房沿高度方向主要分12层(地下1层,地上11层),筏板顶标高为-5.0 m和-8.0 m,拱顶标高约79 m。厂房筏基厚3 m,外墙多为1.0 m、0.8 m厚,内墙多为0.8 m厚,楼板多为0.8 m、0.5 m厚。核岛厂房模型采用ETABS软件进行建模分析,其中一般墙体和楼板采用薄壳单元建模,对于堆坑环墙、筏型基础等区域采用厚壳单元以考虑剪切变形的影响,结构阻尼采用瑞利阻尼的方式进行考虑,厂房整体有限元模型如图1所示。

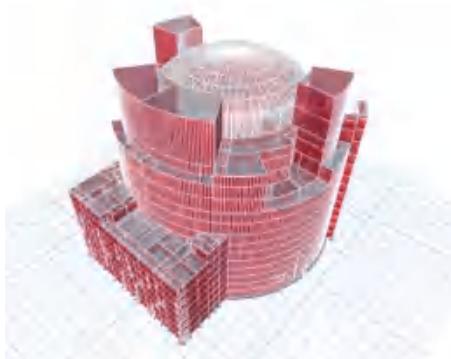


图1 核岛厂房整体有限元模型
Fig. 1 Finite element model of nuclear island plant

1.2 地震设计参数

核岛厂房为抗震I类,其设计地震动^[3]为极限安全地震动(即SL2,年超越概率为10⁻⁴)。本项目的隔震设计目标是采取隔震措施后,在不改变标准初步设计的情况下,提高厂房极限安全设计基准地震动至0.4g,因此对于抗震结构其SL2取0.2g,隔震结构SL2取0.4g,三方向加速度取值为1:1:1,且暂不考虑土与结构的相互作用。厂房抗震结构设计反应谱采用美国核管理委员会NRC颁布的RG1.60标准反应谱,隔震结构设计反应谱采用外推的RG1.60反应谱。外推得到20%阻尼比得到RG1.60的方法有很多种^[14],本文采用大崎顺彦方法进行外推,具体反应谱参数列于表1。

抗震分析所需的设计地震加速度时程为人工

表1 RG1.6反应谱与外推RG1.6反应谱

Table 1 RG1.6 reaction spectrum and extrapolated RG1.6 reaction spectrum

阻尼比/%	水平向不同频率反应谱			
	33 Hz	9 Hz	2.5 Hz	0.25 Hz
5	1	2.61	3.13	0.47
7	1	2.27	2.72	0.43
20	1	1.3945	1.7011	0.3093

阻尼比/%	竖直向不同频率反应谱			
	33 Hz	9 Hz	3.5 Hz	0.25 Hz
5	1	2.61	2.98	0.32
7	1	2.27	2.59	0.29

拟合时程,可同时满足2%、3%、4%、5%和7%这5个阻尼比的要求,该组时程包括3条独立且正交的波(x 、 y 、 z)。为保障后续分析的准确性,图2以 x 向时程为例,对比了其与外推得到的20%阻尼比RG1.60谱的差异。从图2可看出,在隔震结构前3阶模态对应的周期点处(分别为2.709、2.707、2.616 s),外推RG1.60谱(阻尼比20%)和波转谱(阻尼比20%)误差分别为-10.6%、-10.6%和-8.1%,且该时程有效持续时间为23.8 s,满足规范对于地震动时程频谱特性、持续时间的要求^[15],因此认为该时程能满足结构分析的需要。

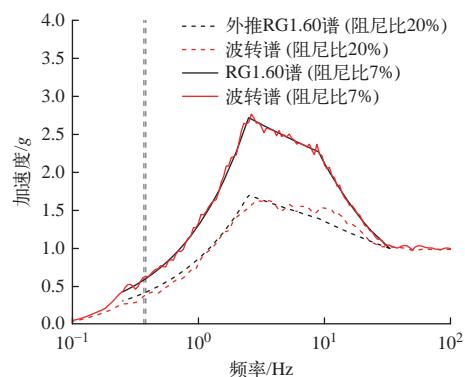


图2 设计地震动加速度时程与RG1.6反应谱对比
Fig. 2 Comparison between design seismic acceleration time history and RG1.6 response spectrum

2 厂房隔震设计方案

隔震设计对象为整体平板式筏基上所有的上部结构。根据初步试算结果同时考虑到现有隔震支座厂家的生产能力,最终选择3种铅芯橡胶支座用于本次核岛厂房的隔震设计,具体支座列于表2。在进行隔震支座布置时,采用圆形布置方

案,首先保证支座与关键环墙对齐,其次保证控制质心和刚心的偏心率控制在1%以内以避免引起过大的扭转效应。同时,为方便大直径隔震支座

后期的维修与更换,设计方案时应保证支座间留有足够的间距,本方案隔震支座中心距最小为3.8 m。

表 2 铅芯橡胶隔震支座性能参数

Table 2 Performance parameters of lead rubber bearing

规格型号	竖向刚度/(kN/mm)	水平等效刚度(100%)/(kN/mm)	屈服前刚度/(kN/mm)	屈服后刚度比	屈服力/kN	橡胶层厚度/mm
LRB1500	7400	5.17	40.72	0.077	1.41	240
LRB1600	9000	5.63	46.65	0.077	1.41	240
LRB1700	9000	5.95	52.65	0.077	1.41	240

经多方案对比计算,最终确定隔震支座布置方案如图3所示。支座总数为536个,其中:ZZ1区域布置LRB1500支座,共计19个;ZZ2区域布置LRB1600支座,共计134个;ZZ3区域布置LRB1700支座,共计383个。根据核岛厂房隔震结构计算结果,SL2级地震作用下,隔震层x向偏心率为0.78%、y向偏心率为-0.36%。

本项目采用ETABS进行结构计算分析。对于隔震支座的模拟,其轴向力学行为考虑拉压刚度的不一致性,取受拉刚度为竖向受压刚度的1/10,同时用Rubber Isolator并联GAP单元来实现;其水平向力学行为考虑x、y向行为的耦合,利用Rubber Isolator来实现。上述单元的具体行为特性详见文献[16]。

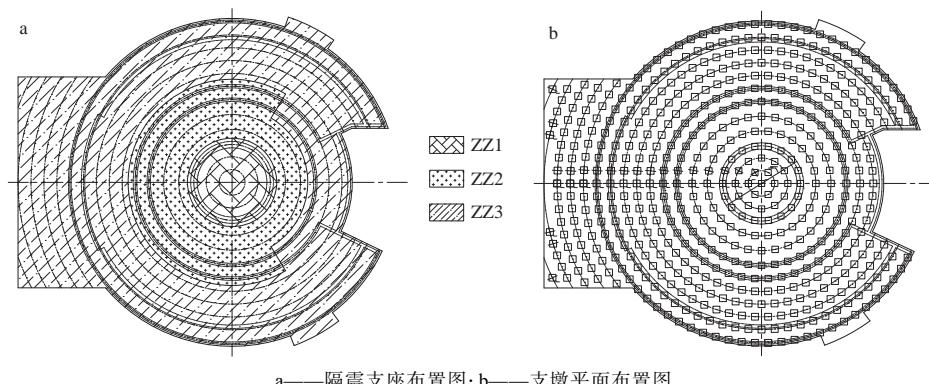


图3 隔震支座平面布置

Fig. 3 Isolation bearings layout

3 厂房隔震安全性分析

3.1 上部结构安全性分析

隔震层间位移角反映了结构本身的变形特点,是衡量隔震结构安全性能的重要指标。核岛厂房隔震后x向最大层间位移角为1/5405,y向最大层间位移角为1/6061。结果表明,SL2级地震作用下各楼层之间的相对水平位移非常有限,上部隔震结构仍处于弹性状态且满足规范要求^[15]。

3.2 隔震层安全性分析

1) 抗风承载力

隔震层抗风承载力验算是确保隔震结构在强风作用下安全稳定,防止非预期位移或损坏,保障

建筑整体安全性的必要步骤。经计算,风荷载作用下隔震层最大水平剪力设计值为105 491 kN,而隔震层总屈服力为337 680 kN,风荷载产生的总水平力约为结构总重力的1%,隔震层总屈服力与风荷载作用下隔震层水平剪力标准值比值大于等于3.2,保证了风荷载作用下隔震层不发生位移,满足相关规范安全系数大于1.7的要求^[15,17]。

2) 抗倾覆能力

隔震层抗倾覆能力验算是确保建筑稳定性的重要指标,防止地震时结构翻转破坏。SL2级地震作用下隔震层最大倾覆力矩为32 661 978 kN·m,而结构抗倾覆力矩229 066 632 kN·m,核岛厂房隔

震结构抗倾覆力矩与隔震层倾覆力矩比值最小为 7.1, 满足规范安全系数大于 1.1 的要求^[18]。

3.3 隔震支座安全性分析

1) 重力荷载下支座应力

为保证隔震支座长期荷载作用下的力学性能, 需限制隔震支座的压力限值。为满足隔震层水平刚度的要求, 本项目布置的隔震支座数量较多, 相应重力荷载下支座的应力偏小。对于 LRB1500 支座, 隔震支座最大压应力为 4.32 MPa; 对于 LRB1600 支座, 隔震支座最大压应力为 6.21 MPa; 对于 LRB1700 支座, 隔震支座最大压应力为 5.61 MPa, 满足规范 10 MPa 的要求^[15,17-18]。

2) SL2 级地震作用下支座应力

根据相关规范^[18], 应考虑三向地震作用产生的最不利轴力, 最大压应力考虑的荷载组合为 $1.4(D+0.2L)+1.0E$, 最小压应力考虑的荷载组合为

$1.0(D+0.2L)-1.0E$, 其中, D 为永久荷载, L 为活荷载, E 为极限安全地震作用。核岛厂房采取隔震措施后, 对于 LRB1500、LRB1600、LRB1700 3 种支座最小应力分别为 -1.13 MPa、-1.48 MPa 和 -0.13 MPa, 满足规范拉应力不应大于 1 MPa 的要求^[15]。3 种支座最大应力分别为 -6.54 MPa、-9.49 MPa 和 -9.58 MPa, 满足规范压应力不应大于 20 MPa 的要求^[15,18]。

3) SL2 级地震作用下支座变形

隔震支座在极限安全地震作用下的最大水平位移应小于支座橡胶层总厚度的 1.3 倍, 且应小于 300 mm^[15]。隔震支座 x 向最大水平变形为 219.9 mm, y 向最大水平变形为 161.7 mm, 其合成位移最大为 270 mm, 均小于规范 300 mm 的要求。支座水平变形对应的最大剪应变 x 向为 91.60%, y 向为 67.38%, 列于表 3, 均满足规范小于 200% 的要求^[18]。

表 3 地震作用下支座力学性能验算

Table 3 Mechanical performance verification of LRB under earthquake action

规格型号	重力荷载代表值下支座应力/MPa	极大应力/MPa	极小应力/MPa	最大剪应变/%	
				x	y
LRB1500	4.32	6.54	1.13	90.14	65.10
LRB1600	6.21	9.48	1.48	90.86	65.97
LRB1700	5.61	9.58	0.13	91.63	67.38

4 厂房隔震效果分析

4.1 结构自振特性

根据极限安全地震动作用下支座水平向位

移-剪力滞回曲线, 得到支座相应地震条件下的等效水平刚度。根据该结果对核岛厂房进行模态分析, 抗震和隔震结构模态结果列于表 4。

表 4 厂房结构模态分析结果对比

Table 4 Comparison of modal analysis results for nuclear island plant

方向	阶数	抗震结构		隔震结构	
		周期/s	质量参与系数/%	周期/s	质量参与系数/%
x	1 阶	0.251	53.22	2.709	98.9
	2 阶	0.138	64.22		
y	1 阶	0.276	50.98	2.707	99.9
	2 阶	0.112	70.99		
z	1 阶	0.111	43.05	0.133	34.3
	2 阶	0.086	55.64	0.125	50.5

由表中数据可知: 1) 抗震结构水平向主要频率集中在 4 Hz 左右, 采取隔震措施后, 结构主频

率大幅度降低至 0.4 Hz 左右, 隔震后结构第一频率仅为原来的 1/10; 2) 隔震前, 垂直方向结构主频

率为 9 Hz 左右, 隔震后竖直方向结构主频率为 7.5 Hz 左右, 结构竖向主频率变化不显著; 3) 隔震结构前 3 阶模态结构整体参与质量已经接近 100%, 而抗震结构参与质量不到 60%; 4) 抗震结构水平向主要频率与 RG1.6 反应谱峰值(2.5 Hz)接近, 其对应的加速度控制点放大系数约为 2.55, 而隔震结构水平向主要频率在反应谱的下降段, 其对应的加速度控制点放大系数约为 0.42, 说明在相同的地震动水平下, 抗震结构水平响应约为隔震结构的 6 倍; 5) 抗震结构竖直向主要频率对应的加速度控制点放大系数为 2.27, 隔震结构竖直向主要频率对应的加速度控制点放大系数为 2.357, 说明在相同的地震动水平下, 隔震结构竖向响应略有放大, 约为抗震结构的 1.04 倍。

4.2 水平地震作用

图 4 示出了厂房隔震前后层间剪力的对比以及水平向减震系数。从图 4 可看出: 1) 对于抗震结构, x 、 y 两方向存在刚度差异导致两向地震作用差异较大, 而采取隔震措施后 x 、 y 方向隔震层刚度相当, 上部结构呈刚体平动, 该结果与模态结

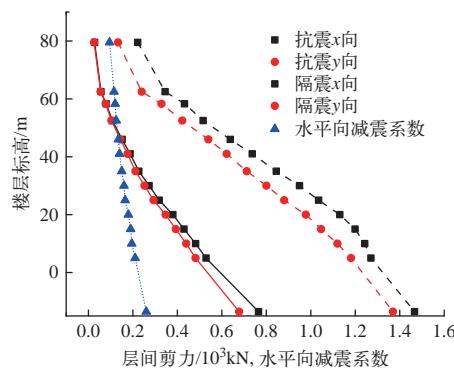


图 4 抗震、隔震结构水平地震作用对比

Fig. 4 Comparison of horizontal seismic effect between non-isolated and isolated structures

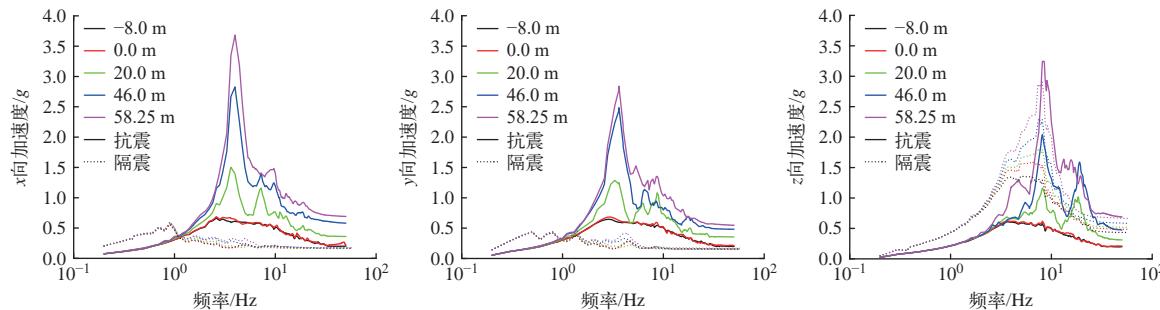


图 5 抗震、隔震结构楼层反应谱对比

Fig. 5 Comparison of response spectra between non-isolated and isolated structures

果趋势一致; 2) 从整体基底反力结果来看, 隔震结构 SL2(0.4g)下的基底反力为抗震结构 SL2(0.2g)下的 50% 左右, 该结果与上述反应谱反应出的加速度控制点放大系数也较为吻合; 3) 结构水平向减震系数最大值为 0.26, 小于 0.4, 因此上部结构设计时其水平地震作用可按照降低一度开展^[17], 即极限安全地震动 SL2 取 0.2g; 4) 采取隔震措施后, 结构减震效果随着楼层的升高而有所提高, 隔震结构顶部楼层剪力仅为抗震结构的 10%~15% 左右。

4.3 楼层反应谱

图 5 示出核岛厂房不同标高处关键位置的 5% 阻尼比楼层反应谱。由图 5 可知, 1) 未采用隔震措施前, 核岛厂房抗震结构关键位置处楼层反应谱水平向主频率 2~4 Hz 左右, 坚直向楼层反应谱主频率 4~8 Hz 左右; 采取隔震措施后, 核岛厂房隔震结构关键位置处楼层反应谱水平向主频率 0.9 Hz 左右, 坚直向楼层反应谱主频率与抗震结构无显著差别。2) 对于水平向楼层反应谱, 隔震使结构周期增大、频率减小, 结构低频响应增加, 但当频率大于 1 Hz 时, 抗震结构楼层反应谱可完全包络隔震结构。3) 隔震层坚向刚度约为上部结构坚向刚度 2~3 倍, 隔震结构整体坚向刚度约为原抗震结构的 0.7~0.75 倍, 当提高坚向地震动为原来的 2 倍后, 隔震结构坚向地震响应与抗震结构坚向地震响应最大比值仅 2.54, 说明隔震后引起的坚向响应放大并不显著, 该结果与模态分析结果趋势一致。4) 随着结构标高由-8.0 m 升高至 58.25 m, 水平向楼层反应谱峰值由 0.65g 提升至 3.6g, 零周期加速度逐渐由 0.2g 提高至 0.7g; 采取隔震措施后, 水平向楼层反应谱峰值基本保持在 0.55g~0.60g 左右, 零周期加速度

逐渐在 $0.16g \sim 0.17g$ 范围内小幅增加。5) 随着结构标高的增加, 抗震结构竖向楼层反应谱峰值加速度 $0.6g$ 提高至 $3.3g$, 而零周期加速度则在 $0.2g \sim 0.7g$ 范围内小幅提升; 采取隔震措施后, 竖向楼层反应谱则有较大幅度的增加, 峰值加速度由 $1.4g$ 提高至 $2.9g$, 而零周期加速度则在 $0.4g \sim 0.7g$ 范围内小幅提升。6) 随着结构标高的增加, 隔震结构的竖向地震响应增速较抗震结构明显放缓, 甚至在结构顶部出现隔震结构峰值加速度小于抗震结构的情况。可利用该特点, 调整相关设

备位置, 进而实现竖向极限地震动提高的目标。

为进一步说明竖向输入地震动对上部结构竖向响应的影响, 表 5 比较了隔震结构不同标高位置在 $0.2g$ 和 $0.4g$ 竖向地震动输入下的峰值加速度。由表中数据可知: $0.2g$ 地震动输入下, 隔震结构与抗震结构在 0.0 m 位置竖向加速度峰值的比值为 1.27, 其余位置该比值均小于 1, 更说明隔震方案本身不会导致竖向地震动响应的过度放大, 而竖向输入地震动的提高是导致竖向楼层响应大幅增加的主要因素。

表 5 抗震、隔震结构竖向楼层反应谱峰值加速度对比

Table 5 Comparison of peak acceleration of vertical floor response spectra between non-isolated and isolated structures

楼层标高/m	抗震结构 $a_0/g(\text{SL2}=0.2g)$	隔震结构 $a_1/g(\text{SL2}=0.2g)$	a_1/a_0	隔震结构 $a_2/g(\text{SL2}=0.4g)$	a_2/a_0
-8.0	0.609	0.605	0.993	1.363	2.239
0.0	0.626	0.797	1.273	1.592	2.544
20.0	1.164	0.990	0.851	1.811	1.556
46.0	2.042	1.149	0.563	2.301	1.127
58.25	3.247	1.146	0.353	2.911	0.896

5 结论与展望

本文以一体化快堆核岛厂房为研究对象, 采用 ETABS 分别对抗震结构和隔震结构进行了极限安全地震动下的动力时程分析, 具体结论如下。

1) 通过对一体化快堆核岛厂房进行支座布置和隔震设计, 确保了隔震层抗风承载能力符合规范标准, 同时在极限安全地震动 $0.4g$ 作用下, 隔震层抗倾覆能力、支座位移及应力均满足规范控制要求, 保障了隔震层的安全性能。

2) 一体化快堆核岛厂房采取隔震措施后, 上部结构呈刚体平动, 结构水平向减震系数最大值为 0.26, 上部结构设计时其水平地震作用可按照极限安全地震动为 $0.2g$ 开展。

3) 当频率大于 1 Hz 时, 抗震结构水平向楼层反应谱可包络隔震结构。考虑到厂房内大部分设备对于低频震动不敏感, 因此认为隔震结构水平向极限安全地震动水平可提高至 $0.4g$ 。

4) 本项目提出的隔震方案本身不会导致核岛厂房结构竖向地震动响应的过度放大, 局部竖向地震动大幅增加的主要原因是竖向输入地震动的增加。当竖向输入地震动由 $0.2g$ 提高至 $0.4g$ 后, 隔震与抗震结构竖向地震动响应最大比值为 2.54, 需考虑采取竖向减震、三维隔震等手段对其

加以控制。

5) 与常规隔震结构相比, 核岛厂房隔震层位移限制通常是隔震设计中的关键控制因素, 因而对隔震层刚度要求更高, 研发大刚度隔震支座对此类项目有显著的积极意义。

6) 在后续核岛厂房隔震研究工作中, 可进一步研究适用于隔震设计的大阻尼比 RG1.60 反应谱, 同时研究可包括 2%、5%、7%、10%、20% 等多阻尼比的设计地震动加速度时程拟合技术, 进一步提高核岛厂房隔震设计的准确性和可靠性。

参考文献:

- [1] 周培德. 一体化闭式循环快堆核能系统[J]. 中国核工业, 2024(4): 26-27.
- [2] 叶玉星. 一体化快堆与干法后处理[J]. 科学中国人, 2000(4): 12-13.
- [3] YE Yuxing. Integrated fast reactor and dry reprocessing [J]. Scientific Chinese, 2000(4): 12-13(in Chinese).
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50267—2019 核电厂抗震设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [5] 李忠诚, 张涛, 许波涛. 基底隔震技术用于核电厂厂房的问题研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(4): 21-26.
- [6] LI Zhongcheng, ZHANG Tao, XU Botao. Application survey and prospect of base-seismic isolation technology

- for nuclear power plants[J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(4): 21-26(in Chinese).
- [5] 林霞娟, 魏陆顺, 陈睦锋, 等. 核电厂隔震技术的发展与应用[J]. 山东工业技术, 2018(17): 163-164.
- [6] 忻嘉, 靳金平, 杨建华, 等. “华龙一号”某核安全相关厂房基底隔震设计与分析研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(2): 255-261.
- XIN Jia, JIN Jinping, YANG Jianhua, et al. Design and analysis of base isolation of a nuclear safety-related plant in Hualong One[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2023, 55(2): 255-261(in Chinese).
- [7] 徐智凌. 多模块高温气冷堆核岛厂房隔震体系抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.
- [8] 李广洲, 谭平. 核岛厂房整体基础隔震研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(6): 207-216.
- LI Guangzhou, TAN Ping. Research on overall base isolation of nuclear island plant[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(6): 207-216(in Chinese).
- [9] 张雷, 梁伟桥, 王罡, 等. 核反应堆厂房基底隔震设计与地震响应分析[J]. 工业建筑, 2019, 49(7): 70-76.
- ZHANG Lei, LIANG Weiqiao, WANG Gang, et al. Base seismic isolation design and seismic response analysis of nuclear reactor buildings[J]. Industrial Construction, 2019, 49(7): 70-76(in Chinese).
- [10] 莊初立, 张永山, 汪大洋. AP1000核岛结构基础隔震设计与参数影响分析[J]. 核动力工程, 2016, 37(6): 45-49.
- ZHUANG Chuli, ZHANG Yongshan, WANG Dayang. Seismic isolation design and parameter effect analysis of AP1000 nuclear island structure[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, 37(6): 45-49(in Chinese).
- [11] 任国鹏, 潘蓉, 孙锋, 等. 不同类型隔震支座对核岛厂房隔震性能的影响分析[J]. 工业建筑, 2021, 51(12): 41-48.
- REN Guopeng, PAN Rong, SUN Feng, et al. Influence of different types of isolation bearings on isolation performance of nuclear island plant[J]. Industrial Construction, 2021, 51(12): 41-48(in Chinese).
- [12] 王玉静, 孔德睿, 李春, 等. 分离式三维隔震核岛动力响应与抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(3): 130-138, 148.
- WANG Yujing, KONG Derui, LI Chun, et al. Research on dynamic characteristics and seismic performance of separate three-dimensional isolated nuclear island[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2022, 44(3): 130-138, 148(in Chinese).
- [13] 冯海斌. 某核岛厂房减隔震研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [14] 夏祖讽, 李韶平, 王晓雯, 等. 近期核电厂抗震设计输入及AP1000核岛隔震的总体考虑[J]. 南方能源建设, 2017, 4(3): 1-6.
- XIA Zufeng, LI Shaoping, WANG Xiaowen, et al. General consideration for seismic input of NPP seismic design and seismic-isolated research for AP1000 nuclear island[J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(3): 1-6(in Chinese).
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 51408—2021 建筑隔震设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [16] 北京金土木软件技术有限公司, 中国建筑标准设计研究院. SAP2000中文版使用指南[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [18] 国家能源局. NB/T 20627—2021 核电厂结构隔震设计技术规程[S]. 北京: 原子能出版社, 2021.