

“华龙一号”某核安全相关厂房基底隔震设计与分析研究

忻 嘉，靳金平，杨建华，隋春光，王海龙

(中国核电工程有限公司 北京核工程研究设计院, 北京 100840)

摘要: 基底隔震技术是减小结构地震响应的一种有效方式。本文以“华龙一号”某核安全相关厂房为工程背景, 开展基底隔震技术的工程设计与研究。本文从厂房概况、地震输入参数、基底隔震布置方案和隔震支座性能参数的确定入手, 对隔震层安全性分析、隔震结构自振特性、隔震结构减震效果等方面分别进行了论述。通过分析研究发现, 采用隔震技术能够有效降低结构及其附属设备的水平向地震响应, 提高结构及其附属设备的抗震安全裕度, 有利于高烈度地震地区核电厂的选址建设。作为国内首次将基底隔震应用于核电厂中的核安全相关厂房, 本研究为后续核电厂的隔震设计与研究提供了良好的工程借鉴意义和有益的设计经验。

关键词: 华龙一号；核电厂；核安全相关；基底隔震；减震效果

中图分类号: TU4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0255-07

Design and analysis of base isolation of a nuclear safety-related plant in Hualong One

XIN Jia, JIN Jinping, YANG Jianhua, SUI Chunguang, WANG Hailong

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing Institute of Nuclear Engineering, Beijing 100840, China)

Abstract: Base isolation technique is an effective way to reduce the seismic response of structures. In this paper, the engineering design and research of base isolation technology are carried out based on the engineering background of a nuclear safety-related plant in Hualong One. Starting from the determination of the general situation of the plant, the seismic input parameters, the base isolation layout scheme and the performance parameters of the isolation bearing, the safety analysis of the isolation layer, the natural vibration characteristics of the isolation structure and the damping effect of the isolation structure are discussed respectively. The analysis shows that the seismic isolation technology can effectively reduce the horizontal seismic response of the structure and its auxiliary equipment, improve the seismic safety margin of the structure and its auxiliary equipment, and is beneficial to the site construction of nuclear power plants in high-intensity earthquake areas. As the first application of base isolation in nuclear safety-related plant in China, this study provides a good engineering reference and useful design experience for subsequent nuclear power plant isolation design and research.

Key words: Hualong One; nuclear power plant; nuclear safety related; base isolation; damping effect

我国是个多地震国家, 核电站在地震下的安全性是选址、设计、运行过程要考虑的关键问题之一。如何解决我国自主知识产权的三代核电机组“华龙一号”在高烈度区域的推广应用成为了目前核电站标准化设计过程中亟待解决的重要问题。厂房基底隔震技术是一个有效的解决上述问题的途径^[1]。经分析, “华龙一号”核电机组中某核岛厂房(以下简称 D 厂房)体量较小、布置相对简单、

与相邻核岛厂房接口很少, 比较适合作为基底隔震技术尝试运用的实施对象。本文将从 D 厂房隔震设计方案确定、支座参数选取、隔震层安全性分析、隔震结构减震效果分析进行详细论述。鉴于核安全相关结构分析精度要求同时结合查阅相关文献^[2], D 厂房的隔震结构分析采用 ANSYS 软件进行。

1 厂房概况与地震输入参数

1.1 D 厂房结构概况

D 厂房为多层钢筋混凝土剪力墙结构，出于防飞射物撞击考虑，厂房底板、屋面板和外墙采用 C45 混凝土，内部的墙体及楼板采用 C40 混凝土。D 厂房平面尺寸为 $26.60 \text{ m} \times 15.00 \text{ m}$ ，筏板基础底标高为 -12.60 m ，屋面结构顶标高为 24.00 m 。沿高度方向主要分 7 层(地下 2 层，地上 5 层)。厂房筏基厚 2.0 m ，外墙厚 0.8 m ，内墙厚多在 $0.3 \sim 0.4 \text{ m}$ (地下有 1.2 m 厚内墙)，楼板厚多在 $0.3 \sim 0.4 \text{ m}$ (0.50 m 板板厚 0.8 m)。厂房内在 -10.60 m 层布置有约 72 t 的重要设备，在 0.50 m 层布置有约 93 t 的重要设备，结构总质量(含设备)约 14250 t 。厂房 0.50 m 层结构平面图及剖面图如图 1 所示；厂房以与 $5 \sim 6$ 轴平行方向为 X 向，与 $U \sim W$ 轴平行方向为 Y 向，竖直方向为 Z 向。

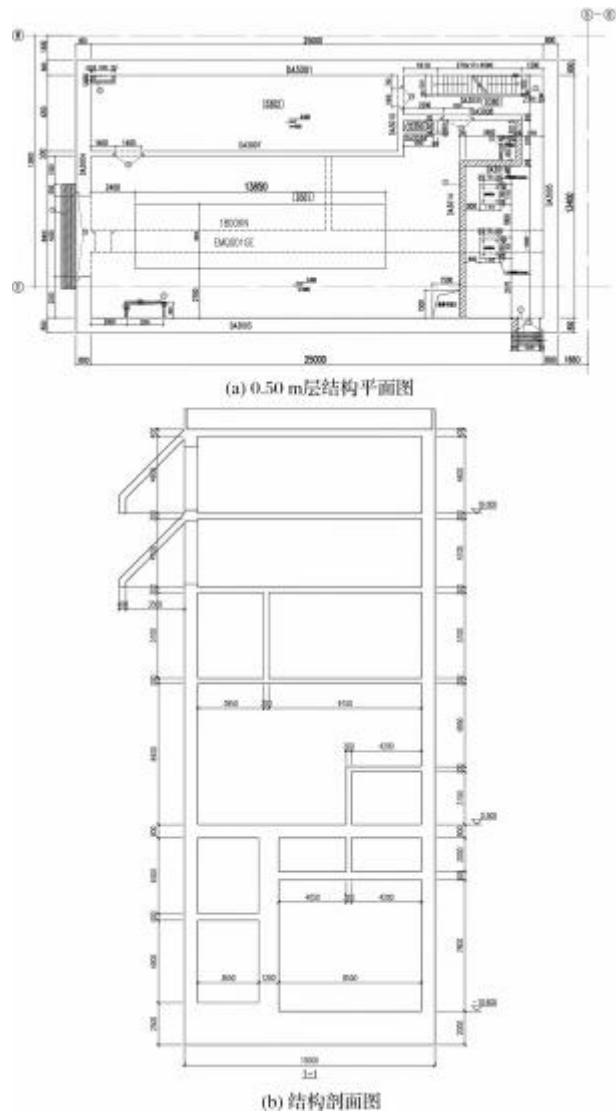


图 1 D 厂房 0.50 m 层结构平面图和剖面图

Fig. 1 0.50 m structure plan and profile of D plant

1.2 厂房地基参数

根据厂址地勘资料，D 厂房基底为微风化中细粒黑云母二长花岗岩，动力参数见表 1。本文通过在厂房有限元模型中依据地基参数建立地基弹簧来模拟岩土-结构相互作用的影响^[3]。

表 1 D 厂房基底地基参数

Tab. 1 Foundation parameters of D plant

| 地基参数 | |
|--|-------|
| 横波波速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 3 029 |
| 纵波波速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 5 083 |
| 密度 /($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 2.65 |
| 动弹性模量 /GPa | 64.07 |
| 动剪切模量 /GPa | 26.17 |
| 泊松比 | 0.244 |

1.3 地震输入设置

D 厂房属核安全相关的抗震 I 类厂房，根据相关规范要求^[3]，设计地震动按极限安全地震作用(SL-2 级，年超越概率为 10^{-4})输入。输入的地震波时程以改进型 RG1.60 谱(如图 2 所示)为目标反应谱的人工拟合时程。输入时程共有 7 组，每组包括相互独立且正交的 3 条时程(水平 X 向、水平 Y 向和竖直 Z 方向)，时间间隔为 0.01 s ^[4]。每组时程采用 3 个方向加速度按 $1 : 1 : 1$ 比例同步输入，加速度峰值均为 0.30 g ，激震作用点位于厂房基底。

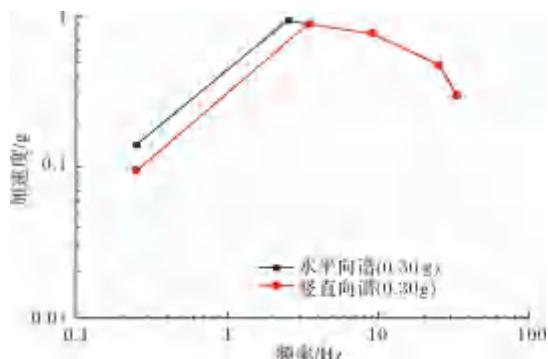


图 2 改进型 RG1.60 反应谱

Fig. 2 Improved RG1.60 response spectrum

2 厂房基底隔震设计方案

2.1 隔震支座的选择

根据上部结构总质量，结合预期的隔震结构主频对隔震层总等效刚度进行预估，本工程确定采用两种隔震支座，分别是铅芯橡胶支座 LRB1000 和天然橡胶支座 LNR800。考虑到隔震支座参数的不确定性以及不同厂家设计参数的差异性^[4]，隔震橡胶支座力学性能参数采用了表 2 和表 3 中的数据。设计分析过程中，隔震支座主要力

学性能参数均采用上下限值进行包络设计。

表 2 铅芯橡胶支座 LRB1000 力学性能参数

Tab. 2 Mechanical performance parameters of Lead rubber bearing LRB1000

| | 出厂平均值 | 计算采用值 |
|-----------------------------------|--------|-------------|
| 竖向刚度/(kN·mm ⁻¹) | 4 296 | 3 900~4 700 |
| 100%等效水平刚度/(kN·mm ⁻¹) | 2.85 | 2.45~2.85 |
| 屈服前刚度/(kN·mm ⁻¹) | 20.17 | 18.20~22.30 |
| 屈服后刚度/(kN·mm ⁻¹) | 1.75 | 1.40~1.75 |
| 屈服力/kN | 202.88 | 195~210 |
| 等效阻尼比/% | 22.77 | 22~27 |

表 3 天然橡胶支座 LNR800 力学性能参数

Tab. 3 Mechanical performance parameters of natural rubber bearing LNR800

| | 出厂平均值 | 计算采用值 |
|-------------------------------|-------|-------------|
| 竖向刚度/(kN·mm ⁻¹) | 2 885 | 2 500~3 000 |
| 等效水平刚度/(kN·mm ⁻¹) | 1.37 | 1.10~1.40 |

2.2 隔震支座布置方案的确定

结构基底隔震布置方案的确定需要同时考虑以下因素：(1)隔震支座的竖向承载力在静力和地震工况下能够满足受力要求；(2)隔震层的水平变形在可控的范围之内，不会导致隔震支座的破坏；(3)在三向地震作用下，隔震支座的拉、压应力在支座的承受范围内，不会导致结构的整体失稳；(4)有适当的减震效果和减震率。

在力求隔震层刚心与隔震层上部结构刚心接近重合的目标下，通过调整支座刚度和布置间距，经多方案比选，最终确定采用如图 3(a)所示的隔震支座布置方案。隔震层由布置于外围的 32 个 LRB1000 支座和内部的 6 个 LNR800 支座组成，本方案使得两个刚心之间的偏差控制在 1% 以内。隔震层总高度为 2 米，满足检修要求，其中隔震支座高度约 0.4 m，支座上、下支墩高度均为 0.8 m；隔震支座通过上支墩与厂房底板相连，通过下支墩与隔震池底板相连。D 厂房隔震结构有限元模型见图 3(b)。

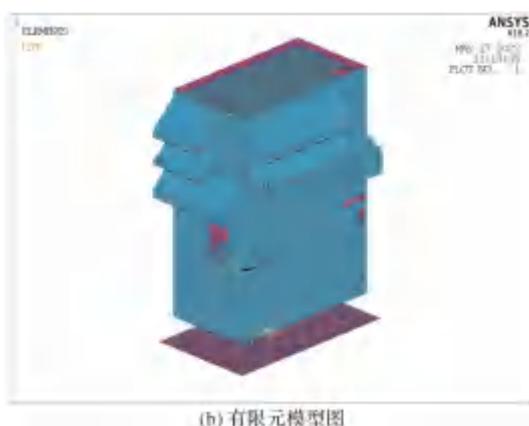
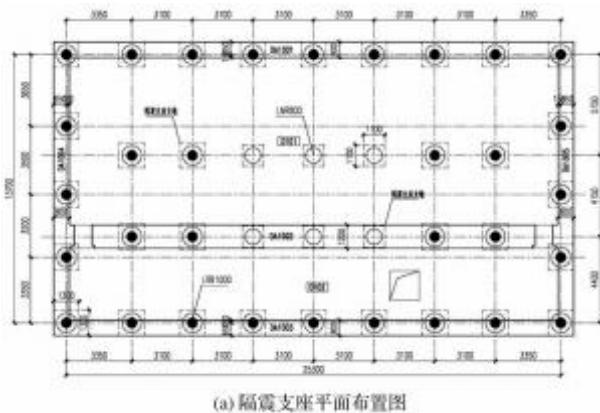


图 3 D 厂房隔震支座平面布置图和有限元模型图

Fig. 3 Isolation bearings layout and finite element model of D plant

2.3 隔震支座单元模拟方式

天然橡胶支座水平方向位移-力滞回曲线如图 4(a)所示，属于典型的线弹性模型^[5]；其竖向力学模型如图 4(b)。水平向线弹性刚度取水平等效刚度；竖直向采用拉压双线弹性模型，竖向受拉刚度取竖向受压刚度的 1/10。

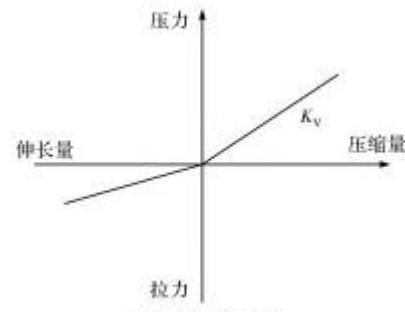
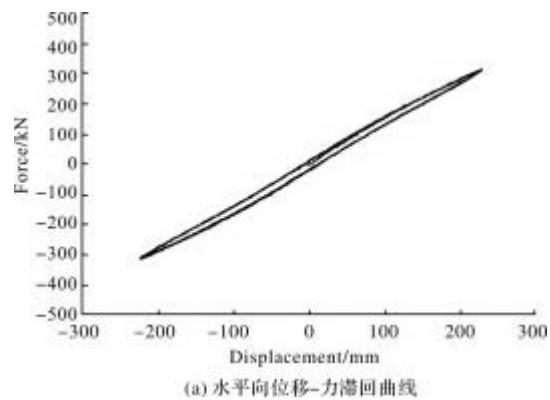


图 4 天然橡胶支座(LNR)本构关系模型图

Fig. 4 Constitutive relation model of natural rubber bearing

铅芯橡胶支座水平方向位移-力滞回曲线如图 5(a)所示，可按照双线性模型来考虑^[5]；其竖向力学模型如图 5(b)所示。支座竖直向采用拉压双线弹性模型，竖向受拉刚度取竖向受压刚度的 1/10；水平向力学模型采用双线性模型，恢复力曲线的大小和形状由屈服力、屈服前水平刚度和屈服后

水平刚度确定。

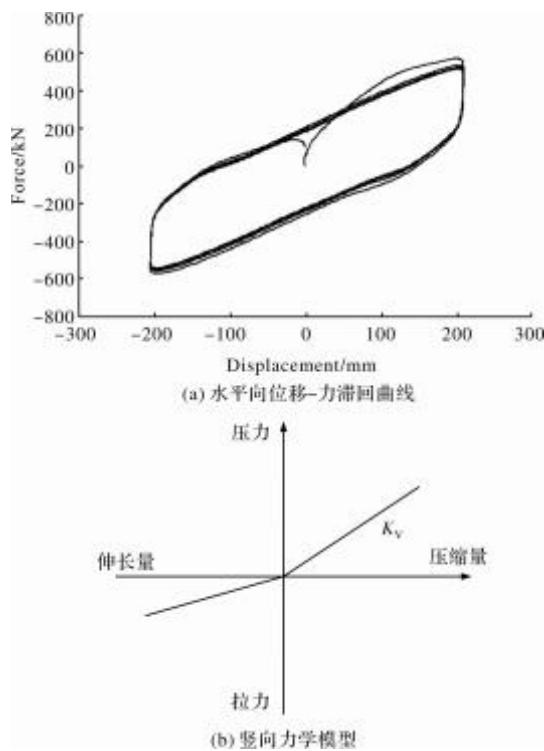


图 5 铅芯橡胶支座(LRB)本构关系模型

Fig. 5 Constitutive relation model of lead rubber bearing

在 ANSYS 软件中, LRB 支座的水平向力学性能通过 Combine40 单元模拟, LNR 支座的水平向力学性能通过 Combine14 单元模拟, LRB 和 LNR 支座的坚向力学性能通过 Combin39 单元模拟。

3 隔震层安全性分析

3.1 控制目标

依据现行标准^[4,6-7], 隔震层的主要控制目标包括自重和地震工况下的应力和位移限值两个方面。自重工况下, 隔震支座最大压应力不大于 10 MPa; SL-2 级地震作用下, 仅允许角部支座出现竖向受拉且最大拉应力小于 1 MPa, 最大压应力小于 20 MPa; SL-2 级地震作用下, 隔震层水平位移限值满足隔震支座与隔震池的间距, 以及隔震支座直径 0.55 倍与各层橡胶厚度之和 3 倍二者的较小值。

3.2 隔震支座在自重工况下的安全性分析

隔震支座在上部结构自重工况下的压力分布呈外围大中间小的特征。LRB1000 支座最大压力分别为 4 332.71 kN, 对应的压应力为 5.52 MPa; LNR800 支座最大压力为 2 526.36 kN, 对应的压应力为 5.03 MPa。满足控制目标要求。

3.3 隔震层在 SL-2 级地震作用下的安全性分析

图 6 显示了在 SL-2 级地震作用下隔震支座产生坚向拉力最大值时的坚向拉、压力分布图。表 4 中列出了隔震支座在 SL-2 级地震作用下的坚向力和位移最大值。

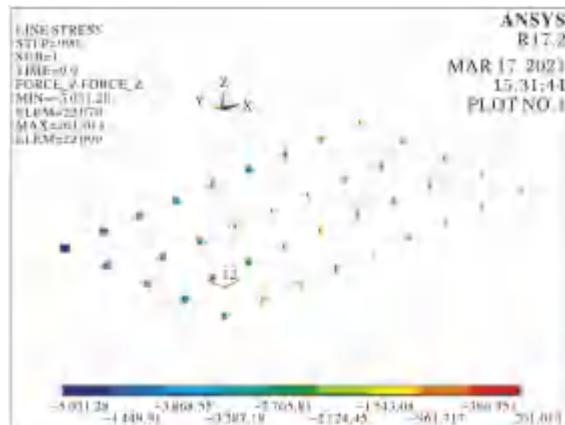


图 6 SL-2 地震作用下产生坚向拉力最大值时隔震支座
坚向拉压力分布图(单位: kN)

Fig. 6 Vertical tension and compression force distribution diagram when maximum vertical tension generated under SL-2 earthquake action (unit: kN)

表 4 隔震支座在 SL-2 地震作用下的坚向力和水平向位移
最大值

Tab. 4 Maximum vertical force and horizontal displacement of isolation bearing under SL-2 earthquake action

| | 参数下限 | 参数上限 |
|----------------------------------|-----------|-----------|
| LRB1000 支座最大压力 /kN | -8 851.09 | -8 668.13 |
| LRB1000 支座最大拉力 /kN | 127.81 | 201.01 |
| LRB1000 支座最小投影面积 /m ² | 0.683 | 0.709 |
| LRB1000 支座最大压应力 /MPa | -12.00 | -11.74 |
| LRB1000 支座最大拉应力 /MPa | 0.128 | 0.256 |
| 出现拉力的支座数量 | 1 | 1 |
| X 向最大位移 /mm | 154 | 152 |
| X 向最大摆动位移角 | 1/9 174 | 1/8 928 |
| Y 向最大位移 /mm | 133 | 128 |
| Y 向最大摆动位移角 | 1/4 902 | 1/5 208 |
| 最大扭转位移角 | 1/2 611 | 1/2 725 |

从上述图表可以看出: 隔震层在 SL-2 地震作用下的水平向位移最大值为 154 mm, 低于隔震池与主体结构之间防震缝宽度(400 mm)的 1/1.5, 隔震层的最大水平向摆动位移角和扭转位移角均小于 1/1 000, 位移控制满足要求^[4]。隔震支座仅在角部出现坚向拉力且拉应力值低于 1 MPa, 最大竖向压应力低 20 MPa, 满足竖向应力控制要求。

4 隔震结构的自振特性与减震效果分析

4.1 隔震结构的自振特性

根据隔震支座等效水平刚度的计算原则^[3]，不同地震水平对应不同的等效刚度，相应的隔震结构自振特性也有所区别。依据 LRB1000 支座在 SL-2 级地震作用下的水平向位移-剪力滞回曲线，得到支座相应地震作用下的等效水平刚度。根据 LRB1000 和 LNR800 支座的水平和竖向等效刚度，得到隔震结构 SL-2 级地震作用下的模态分析结果如表 5 所示。

表 5 隔震结构与抗震结构模态分析结果对比

Tab. 5 Comparison of modal analysis results between isolated and seismic structure

| 振型 | 抗震结构 | | 隔震结构 | |
|-----|--------|-----------|--------|-------------|
| | 频率 /Hz | 质量参与系数 /% | 频率 /Hz | 质量参与系数 /% |
| X 向 | 1 阶 | 5.638 | 55.16 | 0.401~0.441 |
| | 2 阶 | 18.095 | 9.41 | |
| Y 向 | 1 阶 | 3.418 | 59.86 | 0.476~0.533 |
| | 2 阶 | 10.185 | 11.61 | |
| Z 向 | 1 阶 | 11.410 | 19.57 | 9.702~9.850 |
| | 2 阶 | 15.080 | 32.91 | 71.95 |

从图表中数据可知：(1)隔震结构与抗震结构相比，水平方向的主频降低幅度很大，SL-2 地震作用下约为抗震结构的 1/14~1/7；(2)隔震结构与抗震结构相比，竖直方向的主频变化不多；(3)抗震结构振型的质量参与系数比较分散，水平方向第 1 阶频率的质量参与系数不到 60%；而隔震结构第 1 阶频率的质量参与系数已经达到了 98%，表现出了明显的刚体整体运动特性；(4)抗震结构受上部结构长宽比和刚度影响，两个水平方向的主频表现出明显的差异；而隔震结构主频主要由于上部结构呈现刚体运动特征，两个水平方向的主频十分接近。(5)结合地震输入谱来看，抗震结构两个水平方向的主频与输入谱主频(2.5 Hz)比较接近；而隔震结构两个方向的主频远小于输入谱主频，约为输入谱主频的 1/6~1/5。

4.2 隔震对水平向地震力的削减作用

隔震对结构的优势主要体现在对结构自身水平向地震作用的有效削减上。结构水平向地震作用的大小通常通过地震层剪力和基底倾覆力矩来衡量。图 7~8 显示了隔震结构与抗震结构两个方向地震层剪力对比图，表 6 列出了隔震结构与抗震结构的基底倾覆力矩和基底接地率对比值，地震

层剪力和基底倾覆力矩结果为 7 组时程分析结果的平均值。

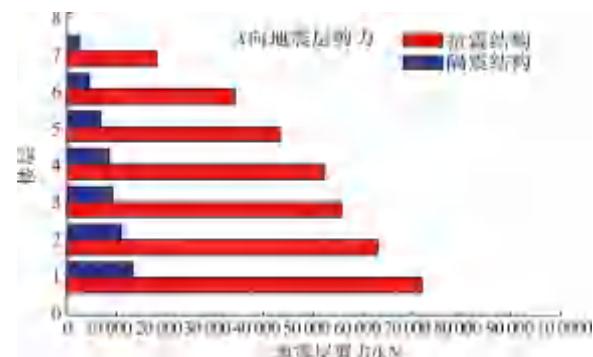


图 7 隔震结构与抗震结构 X 向地震层剪力对比图

Fig. 7 Comparison of X-direction seismic shear force between isolated and seismic structure

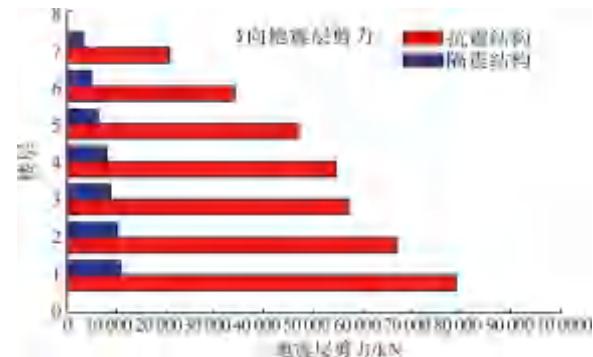


图 8 隔震结构与抗震结构 Y 向地震层剪力对比图

Fig. 8 Comparison of Y-direction seismic shear force between isolated and seismic structure

表 6 隔震结构与抗震结构基底倾覆力矩和基底接地率对比

Tab. 6 Comparison of base overturning moment and base grounding rate of isolated and aseismic structures

| | 基底倾覆力矩 /(kN · m) | | 基底接地率 /% | |
|------|------------------|-----------|----------|-------|
| | X 向 | Y 向 | X 向 | Y 向 |
| 隔震结构 | 2.630E+05 | 2.204E+05 | 93.9 | 113.6 |
| 抗震结构 | 1.485E+06 | 1.270E+06 | 80.1 | 52.0 |

从上述图表可以看出：(1)由于隔震结构的水平向主频远小于地震输入谱的主频，由地基传导到上部结构的水平向地震力大幅度减少，主要表现为隔震结构两个水平向的地震层剪力和基底倾覆力矩均比抗震结构削减了 80% 左右；(2)抗震结构两个水平向基底接地率分别为 80.1% 和 52.0%，Y 向已接近限值 50%^[3]；而隔震结构两个水平向基底接地率均超过了 90%，极大提高了结构整体稳定性裕度；(3)剪力墙的水平和竖向配筋量主要受墙平面内地震剪力大小控制，而地震层剪力值与墙平面内地震剪力值成正比，故采用隔震结构可以适当减少隔震层以上结构墙体配筋量，有助于结构设计标准化。

4.3 隔震对楼层反应谱的削减作用

楼层反应谱是建/构筑物各楼层对应特定地震的震动频率响应曲线，通常取为具有不同自振频率单自由度系统的最大响应包络线，是附属结构及设备抗震设计的重要依据。隔震的优势不仅体现在对结构自身水平向地震作用的有效削减上，同时还体现在对设备抗震用楼层反应谱的显著降低上。图9~11显示了D厂房内布置有重要抗震设备的-10.60 m、0.50 m和19.00 m层隔震结构与抗震结构2%阻尼比X、Y、Z向楼层反应谱对比图，楼层反应谱结果为7组时程分析结果的平均值。

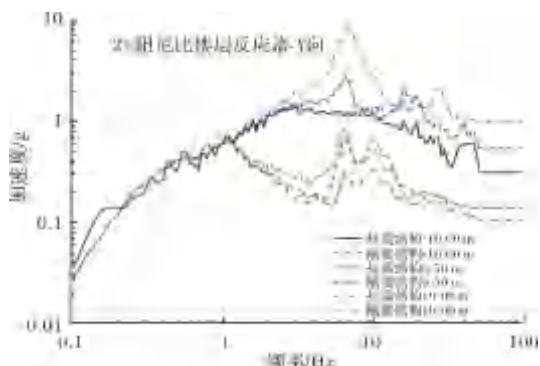


图9 隔震结构与抗震结构X向楼层反应谱对比图

Fig.9 Comparision of X-direction response spectra between isolated and aseismic structures

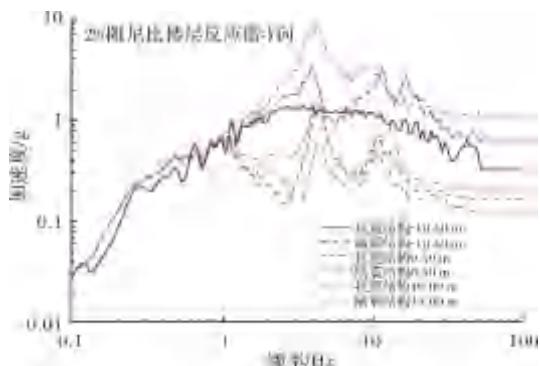


图10 隔震结构与抗震结构Y向楼层反应谱对比图

Fig.10 Comparision of Y-direction response spectra between isolated and aseismic structures

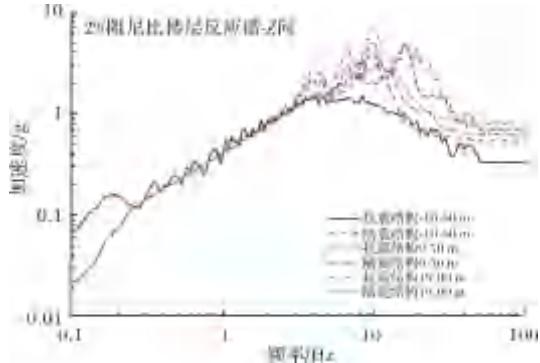


图11 隔震结构与抗震结构Z向楼层反应谱对比图

Fig.11 Comparision of Z-direction response spectra between isolated and aseismic structures

通过楼层反应谱图对比，可以得出如下结论：

(1)水平方向反应谱在频率 $>1\text{ Hz}$ 的频段降低十分显著，-10.60 m层反应谱峰值降低了30%~50%，0.50 m和19.00 m层的反应谱峰值降低了70%以上；(2)隔震结构的反应谱沿高度方向趋于稳定，变化不大；抗震结构的反应谱沿高度方向表现为逐层放大的状态，且放大作用十分明显；(3)竖直方向，隔震结构与抗震结构相比反应谱峰值有一定程度的放大，以-10.60 m层最为明显。但由于隔震对竖向地震的放大作用有限，通常不属于结构及设备抗震的控制工况，因此其不利影响在可接受的范围内。

5 结论

通过在“华龙一号”某核安全相关厂房开展厂房基底隔震的设计与分析研究并首次应用于实际工程可以得出以下重要结论：

(1)通过对隔震支座的合理布置，使隔震支座在极限安全地震作用下的水平向位移和竖向拉、压应力最大值均满足了相关规范中的控制要求，且有效发挥了支座的耗能作用，保证了隔震层的安全性；

(2)采用基底隔震结构后，厂房的自振特性呈现出典型的刚体平动特征。在水平方向对结构自身地震作用的削减效果突出，同时提高了结构整体稳定性裕度；在竖直方向未体现出减震作用，考虑其非控制工况，因此影响有限且可控；

(3)采用基底隔震结构同时可以有效削减厂房附属设备设施的水平向地震响应，提高了设备设施在地震作用下的安全裕度，对核安全具有积极意义；

(4)在高烈度地震区采用隔震技术可以适当降低结构及其附属设备设施的抗震设计成本，有利于“华龙一号”标准化设计的推广。

参考文献 References

- [1] 谢礼立,翟长海.核电工程应用隔震技术的可行性探讨[J].地震工程与工程振动,2012,32(1):1-10.
XIE Lili, ZHAI Changhai. Feasibility study on applica-

- tion of isolation technology in nuclear power engineering[J]. Earthquake engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(2):1-10.
- [2] 杨青涛,魏陆顺. ANSYS 软件隔震结构分析的二次开发 [J]. 低温建筑技术, 2012, 67(1):1-10.
YANG Qingtao, WEI Changshun. Secondary development of ANSYS software isolation structure analysis[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2012, 67 (2): 1-10.
- [3] 中国地震局. 核电厂抗震设计标准:GB 50267—2019 [S]. 北京:中国计划出版社, 2019.
China Seismological Bureau. Standard for seismic design of nuclear power plants: GB 50267-2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [4] 国家能源局. 核电厂结构隔震设计技术规程:NB/T 20627-2021 [S]. 北京:中国计划出版社, 2021.
National Energy Administration. Design Criteria for Seismic Isolation of Structures in Nuclear Power Plant: NB/T 20627-2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑橡胶隔震支座:JGT 118—2018 [S]. 北京:标准出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Rubber isolation bearing for building: JGT 118—2018 [S]. Beijing: China Standards Press, 2018.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑隔震设计标准:GB/T 51408—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for seismic isolation design of buildings: GB/T 51408—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范(2016 年版):GB 50011-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings (2016 version): GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

(编辑 桂智刚)