

文章编号:1671-4229(2014)06-0028-08

# 核电站反应堆厂房隔震研究

谭 平, 范世凯, 徐 凯, 金建敏, 周福霖

(广州大学 减震控制与结构安全国家重点实验室培育基地, 广东 广州 510405)

**摘要:** 对核电站典型 CPR1000 堆型反应堆厂房应用隔震技术进行了系统的研究。针对反应堆底部的圆形筏基, 进行了隔震支座的布置与选型。基于时程分析法, 研究了核电站基础隔震效果, 并建立了结构内部设备层的楼层反应谱。此外, 文章研究了地震波加速度峰值、设备层所处标高及设备阻尼比对楼层反应谱的影响。研究结果表明, 应用隔震技术后大大提高了核电站反应堆厂房的抗震安全储备。

**关键词:** 核电站反应堆; 基础隔震; 楼层反应谱; 时程分析; 混合分析模型

中国分类号: TL 48 文献标志码: A

基础隔震体系是指在结构物底部与基础顶面之间设置隔震装置而形成的结构体系<sup>[1]</sup>, 隔震装置起到隔离地震作用向上部结构传输和耗散地震能量的作用, 保障上部结构及设备的安全。目前, 我国设计的 CPR1000 堆型核电站设计运行安全地震动限于 0.2 g 以下, 安全储备有限。将基础隔震技术应用于核电站的设计, 可提高其抗震能力, 提高厂房结构与内部设施的安全性, 有利于实现核电厂厂房及内部结构和设施的标准化和模块化设计, 提高核电厂厂址的适应性。核电站反应堆厂房中安全壳是核反应堆的外围维护结构, 是阻止放射性物质由内向外扩散的最后一道重要安全屏障, 因此, 对反应堆安全壳进行基础隔震技术研究具有重要意义。李冬梅等<sup>[2]</sup>对核电厂安全壳进行隔震地震反应分析, 讨论了隔震的效果; 曾奔等<sup>[3]</sup>基于功率谱密度函数法对采用隔震技术后的核电厂房的楼层反应谱进行了分析; 曾奔<sup>[4]</sup>研究了土-结构动力相互作用效应对 CPR1000 核电厂房结构动力特性以及隔震效果的影响; FRANO<sup>[5]</sup>在核电厂的研究中给出了隔震和不隔震安全壳在极限停堆地震作用下竖向和水平反应加速度的对比, 肯定了隔震的效果; 郑志<sup>[6]</sup>对核电站安全壳隔震可靠度进行了分析; 王涛<sup>[7]</sup>对核电站三维隔震

技术进行了理论和实验研究; 朱秀云<sup>[8]</sup>考虑 SSI 效应对核电站反应堆厂房进行楼层反应谱分析。范世凯<sup>[9]</sup>系统地研究了核电站结构物应用隔震技术的效果。本文对核电站反应堆厂房进行了基础隔震设计, 研究基础隔震效果; 基于时程分析法, 建立了反应堆厂房内部设备层的楼层反应谱, 分析地震波加速度峰值、设备层所处标高及设备阻尼比对楼层反应谱的影响。

## 1 分析模型

核电站 CPR1000 堆型反应堆厂房结构由筏板基础、安全壳结构、内部结构 3 大部分组成。目前, 对反应堆厂房的分析多采用集中质量-梁单元计算模型<sup>[10]</sup>, 但该模型不能模拟隔震层的布置及支座受力计算。本文采用 SAP2000 对核电站反应堆厂房建立上部结构为集中质量-梁单元, 筏板基础为三维实体单元的混合分析模型, 见图 1。该混合模型将上部结构的质量和转动惯量均集中在各节点上, 而两相邻节点间的连接采用梁单元模拟, 下部筏板基础采用 Solid 单元模拟, 可精确模拟隔震层橡胶支座的布置, 方便对隔震支座进行受力计算。

收稿日期: 2014-07-04; 修回日期: 2014-09-15

基金项目: 重点基础研究发展计划资助项目(2012CB723304); 中国工程院学部重点咨询项目(2011-XZ-25); 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(91315301-07)、长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT13057)

作者简介: 谭 平(1973-), 男, 研究员, 博士。E-mail: ptian@gzhu.edu.cn

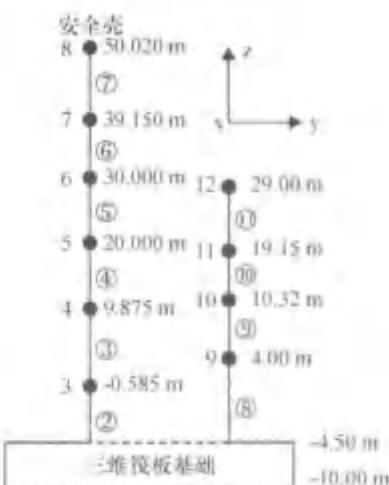


图1 混合分析模型示意图

Fig. 1 Diagram of the hybrid analysis model

隔震后上部结构层间位移明显减小,这是由于隔震层水平刚度远小于上部结构,地震作用时,位移主要集中在隔震层,上部结构作整体水平平动。

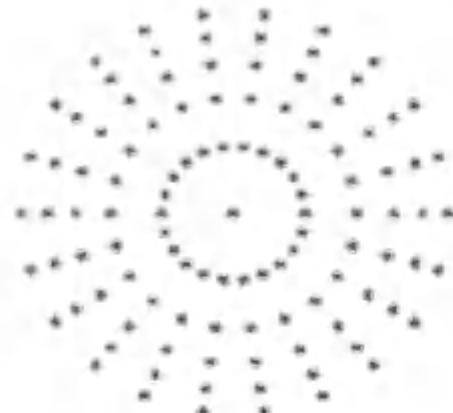


图2 支座布置图

Fig. 2 Diagram of bearings configuration

## 2 隔震设计

### 2.1 隔震支座的布置及选型

隔震层支座布置时,考虑到结构的重要性,以及隔震层位移要求和隔震效果,设计时将隔震周期控制在2~3 s,屈服比大于4%,为增加隔震结构的安全储备,将每个支座的长期面压控制在5 MPa左右。隔震支座对称布置,以减小偏心的影响。基于上述原则,最终选用111个直径为1200 mm的铅芯橡胶支座(简写为LRB1200),支座的竖向刚度为 $7.605 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,屈服后刚度为 $2.198 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,屈服力为360.6 kN,支座100%剪应变时对应的等效刚度为 $3.947 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。隔震支座采用辐射状布置,将圆形筏基等分成22份,角度为 $16.36^\circ$ ,各圆周的半径按照每个支座分配面积相等的原则确定,图2为隔震支座布置图。分析结果表明,隔震后周期为2.376 s,各支座的长期面压较均匀,最大长期面压5.2 MPa,满足规范对甲类建筑长期面压的规定。

在设计风荷载作用下,隔震结构不应产生水平位移,即要求隔震结构所受风荷载的设计值应小于隔震结构各支座的屈服力之和。根据荷载规范计算得结构风荷载设计值为2620.5 kN,小于隔震层支座总屈服力40026 kN,故满足抗风要求。

### 2.2 动力特性分析

基础隔震使结构的自振特性发生变化,图3和图4分别为隔震结构和对应抗震结构前4阶振型图。从图中可见抗震结构上部层间位移较大,而

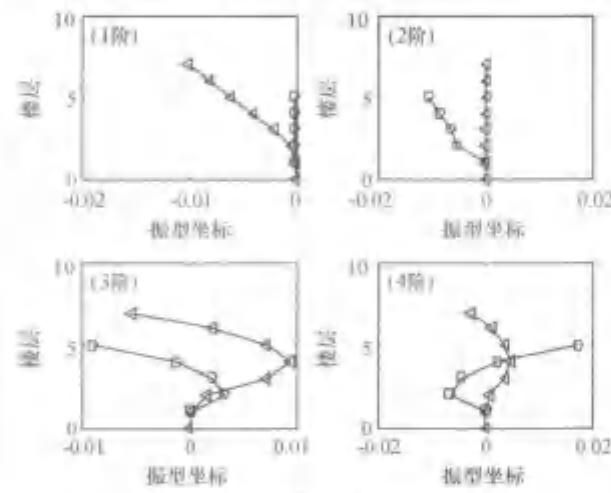


图3 抗震结构振型图

Fig. 3 Vibration mode of anti-seismic structure

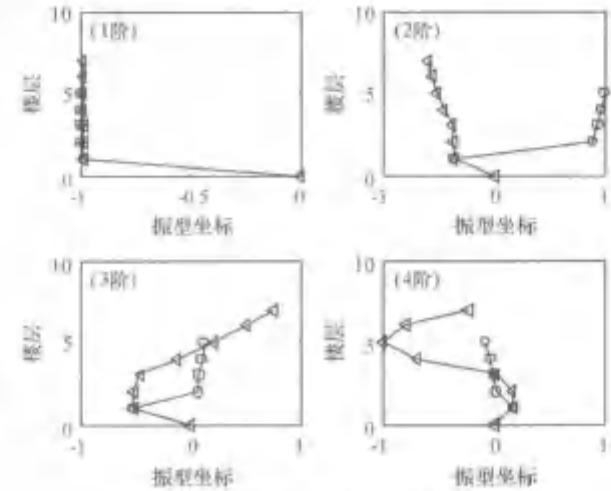


图4 隔震结构振型图

Fig. 4 Vibration mode of isolated structure

表1为隔震前后结构自振特性对比。结果表明,结构基本周期从0.225 s增大到2.376 s,抗震结构的前10阶振型参与系数均较大,而隔震后结构第1阶振型参与系数达到98%,高阶振型对隔震结构的影响很小。

### 3 动力时程分析

#### 3.1 地震动输入

本文采用根据RG1.60标准设计谱拟合得到的地震波<sup>[3]</sup>作为地震动输入,设防烈度地震作用

下水平向地面运动加速度峰值取为0.16 g,竖向加速度峰值取为0.11 g;罕遇地震作用下水平向地面运动峰值加速度取为0.33 g,竖向加速度峰值取为0.22 g。

图5为3条地震波加速度频谱分析图。结果表明,X、Y向的地震波在0~5 Hz频段谱强度较大,对比表1可知,此频段对应于结构前4阶频率,质量参与系数较大,对结构作用较大。3条地震波频段范围以0~15 Hz频段为主,与结构前10阶频率范围一致。对比表1可得结构在大于15 Hz频段质量参与系数较小,地震波对结构的影响很小。

表1 抗震与隔震结构自振特性对比  
Table 1 Model analysis of seismic and isolated structures

| 阶数 | 抗震结构  |       |          | 隔震结构  |       |          | 方向 |
|----|-------|-------|----------|-------|-------|----------|----|
|    | 周期/s  | 频率/Hz | 质量参与系数/% | 周期/s  | 频率/Hz | 质量参与系数/% |    |
| 1  | 0.225 | 4.44  | 30.00    | 2.376 | 0.42  | 98.000 0 | Y  |
| 2  | 0.225 | 4.44  | 30.00    | 2.376 | 0.42  | 98.000 0 | X  |
| 3  | 0.179 | 5.58  | 31.00    | 0.226 | 4.42  | 0.007 0  | Y  |
| 4  | 0.179 | 5.58  | 31.00    | 0.226 | 4.42  | 0.007 0  | X  |
| 5  | 0.078 | 12.79 | 2.45     | 0.153 | 6.54  | 0.009 3  | Y  |
| 6  | 0.078 | 12.79 | 2.45     | 0.153 | 6.54  | 0.009 3  | X  |
| 7  | 0.073 | 13.73 | 38.00    | 0.084 | 11.88 | 78.000 0 | Z  |
| 8  | 0.069 | 14.58 | 6.77     | 0.077 | 12.97 | 0.000 4  | Y  |
| 9  | 0.069 | 14.58 | 6.77     | 0.077 | 12.97 | 0.000 4  | X  |
| 10 | 0.067 | 15.01 | 31.00    | 0.069 | 14.50 | 3.030 0  | Z  |

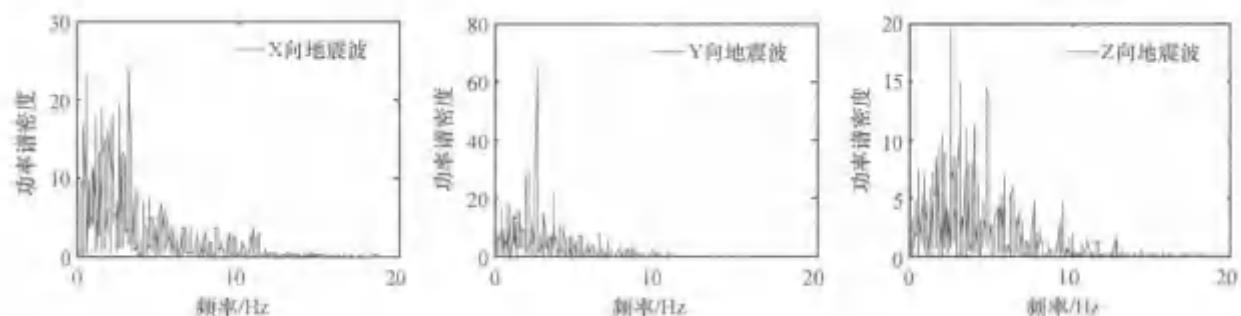


图5 加速度频谱分析图  
Fig. 5 Frequency spectrum of ground motions

#### 3.2 减震系数

设防烈度地震作用下抗震和隔震结构的各楼层剪力值见表2,各楼层倾覆弯矩值见表3,表中层号1~10为上部结构的楼层号,分别对应图1中的3~12点。由表2和表3可得,采用基础隔震技术后,结构的楼层剪力和倾覆弯矩大大减小,隔震结构与抗震结构楼层剪力比最大值为0.22,楼层倾覆弯矩之比最大值为0.19,根据抗震规范规

定,结构减震系数为0.22,上部结构可降1度设计,大大提高了反应堆厂房的设防烈度安全储备等级。

罕遇地震作用下结构顶层层间位移时程曲线和绝对加速度时程曲线见图6。从图中可得,隔震后结构顶层层间位移峰值由3.00 mm降低到0.54 mm,绝对加速度峰值由10.80 mm·s<sup>-2</sup>降低到1.33 mm·s<sup>-2</sup>,隔震效果明显。

表 2 楼层的剪力值/kN

Table 2 The shears of floors/kN

| 层号 | 水平 X 向 |        | 剪力比  | 水平 Y 向 |        | 剪力比  |
|----|--------|--------|------|--------|--------|------|
|    | 抗震结构   | 隔震结构   |      | 抗震结构   | 隔震结构   |      |
| 1  | 73 590 | 15 159 | 0.21 | 75 880 | 16 083 | 0.21 |
| 2  | 72 959 | 15 318 | 0.21 | 74 822 | 16 352 | 0.22 |
| 3  | 68 621 | 12 879 | 0.19 | 69 409 | 14 045 | 0.20 |
| 4  | 61 265 | 9 914  | 0.16 | 61 001 | 11 110 | 0.18 |
| 5  | 51 030 | 7 625  | 0.15 | 50 036 | 8 716  | 0.17 |
| 6  | 36 881 | 5 530  | 0.15 | 36 320 | 6 352  | 0.17 |
| 7  | 84 158 | 15 810 | 0.19 | 82 300 | 16 853 | 0.20 |
| 8  | 64 612 | 11 465 | 0.18 | 64 212 | 12 232 | 0.19 |
| 9  | 40 319 | 6 305  | 0.16 | 41 016 | 6 702  | 0.16 |
| 10 | 7 592  | 930    | 0.12 | 8 076  | 982    | 0.12 |

表 3 楼层倾覆弯矩值/(kN·m)

Table 3 The overturning moments of floors/(kN·m)

| 层号 | 水平 X 向    |         | 弯矩比  | 水平 Y 向    |         | 弯矩比  |
|----|-----------|---------|------|-----------|---------|------|
|    | 抗震结构      | 隔震结构    |      | 抗震结构      | 隔震结构    |      |
| 1  | 3 439 000 | 667 600 | 0.19 | 3 420 000 | 600 600 | 0.18 |
| 2  | 3 138 000 | 595 300 | 0.19 | 3 135 000 | 532 400 | 0.17 |
| 3  | 2 335 000 | 414 500 | 0.18 | 2 369 000 | 362 700 | 0.15 |
| 4  | 1 612 000 | 267 000 | 0.17 | 1 648 000 | 228 000 | 0.14 |
| 5  | 971 400   | 153 000 | 0.16 | 993 000   | 128 100 | 0.13 |
| 6  | 475 300   | 71 320  | 0.15 | 480 900   | 59 890  | 0.12 |
| 7  | 1 654 000 | 306 400 | 0.19 | 1 640 000 | 287 600 | 0.18 |
| 8  | 528 000   | 79 260  | 0.15 | 497 700   | 74 940  | 0.15 |
| 9  | 157 200   | 15 740  | 0.10 | 141 100   | 14 780  | 0.10 |
| 10 | 26 590    | 2 917   | 0.11 | 23 250    | 1 977   | 0.09 |

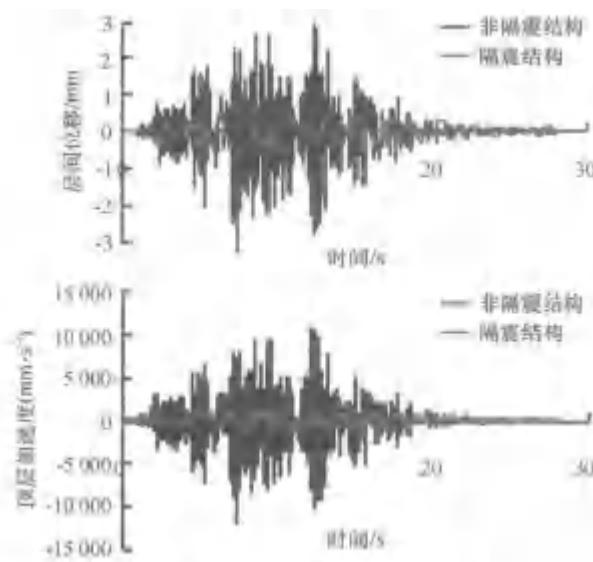


图 6 顶层层间位移和加速度对比

Fig. 6 Comparison of roof displacements and accelerations

### 3.3 支座验算

罕遇地震作用下,隔震支座受力计算见表 4,计算结果表明,支座的极大、极小面压值符合《叠层橡胶支座隔震技术规程》<sup>[11]</sup>规定。

表 4 支座面压

Table 4 Surface pressure of bearings

| 面压分类 | 计算公式                    | 计算值/MPa |
|------|-------------------------|---------|
| 极大面压 | $1.2D + 0.5L + 1.0FEK1$ | 9.30    |
| 极小面压 | $1.0D + 0.5L - 1.0FEK2$ | 1.12    |

《叠层橡胶支座隔震技术规程》<sup>[11]</sup>规定的支座最大容许位移为  $0.55Dr$  和  $3Tr$  两者的较小值, LRB1200 支座  $Dr$  为 1 200 mm,  $Tr$  为 203 mm, 故最大容许位移为  $3Tr = 609.0$  mm。根据时程分析结果,罕遇地震作用下结构隔震层最大位移为 149.2 mm, 小于最大容许位移,满足规程规定。

依照国标 GB20688.3-2006《橡胶支座 第3部分 建筑隔震橡胶支座》<sup>[12]</sup>9.3.2 条可知,对隔震支座产品在安装前,应对工程中所用原型隔震支座产品进行出厂检验,而对核电站等特别重要的建筑,产品抽样数量应为总数的 100%,隔震支座的各项性能指标必须严格满足 GB 20688.3-2006 的要求。

#### 4 楼层反应谱分析

楼层反应谱是核电厂房主结构和设备子系统抗震设计的主要依据,本文采用时程分析法,建立结构在水平和竖向的楼层反应谱。考虑输入参数、结构模型和计算方法上的不确定性引起的结构主频的不确定性,按照我国核电厂设计规范 GB 50267-97《核电厂抗震设计规范》<sup>[13]</sup> 的作法,对计算的楼层反应谱在峰值处按 15% 进行拓宽。

##### 4.1 基础隔震结构与抗震结构楼层反应谱对比

采用基础隔震后,结构楼层水平向反应谱发生了较大变化,竖向反应谱变化不大。图 7 为隔震和抗震结构内部设备顶层点 12 处楼层反应谱的对比,阻尼比为 5%。

图 7 表明,结构水平向在频率大于 0.50 Hz 时,基础隔震结构楼层反应谱远远低于抗震结构的楼层反应谱,但在小于 0.50 Hz 的低频段隔震结构楼层反应谱值大于抗震结构。这是由于基础隔震是通过增大结构的周期来降低结构的地震反应,对低频段长周期的结构作用不明显。低频段反应谱峰值出现在 0.42 Hz,对应于结构隔震后第 1 阶频率,说明此时附属设备与主结构产生共振,放大了附属设备的地震反应;高频段在 6.54 Hz 处楼层反应谱值最大,对应于结构第 5 和第 6 阶频率,说明激发了基础隔震结构的高阶振型,会对处于此频率段的附属设备产生不利影响。基础隔震不能降低结构竖向楼层反应谱,这是由于基础隔震支座竖向刚度较大,不能降低结构的竖向地震反应。

##### 4.2 不同设备楼层处水平向楼层反应谱对比

图 8 为隔震结构在不同设备楼层处的水平向楼层反应谱对比,阻尼比为 5%。图中 floor9、floor10、floor11、floor12 分别对应图 1 中的 9、10、11、12 点。

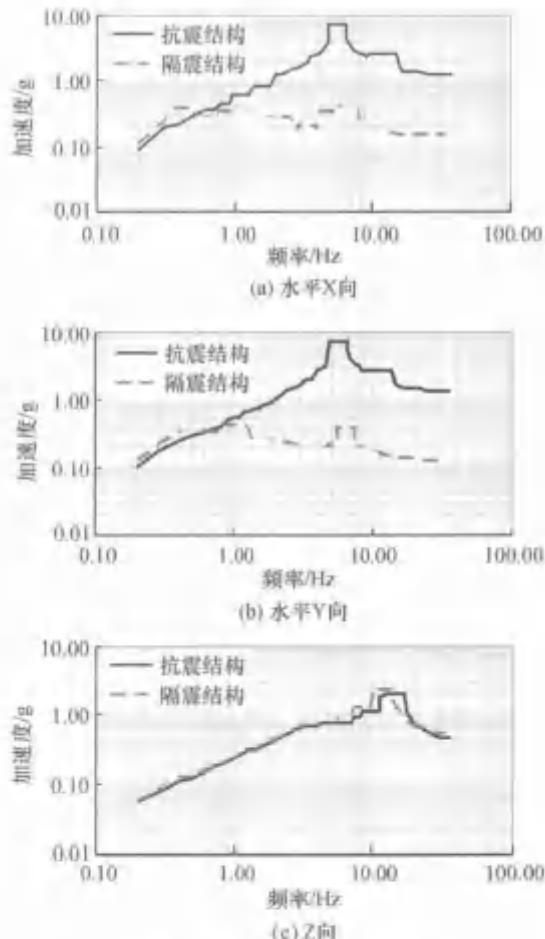


图 7 设备顶层楼层反应谱

Fig. 7 Floor response spectrum at roof of equipment

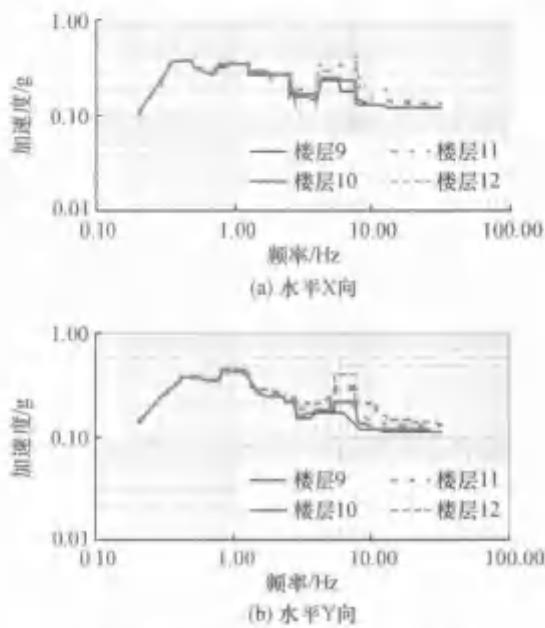


图 8 不同设备楼层处的楼层反应谱

Fig. 8 Floor response spectrum of the different equipment floors

图8表明,隔震结构在不同设备层处楼层反应谱形状相似,结构水平向反应谱峰值随设备所在楼层标高的增大而增大,在大于3 Hz的频段设备层所处标高对反应谱值的影响明显,因此,可根据设备的自振特性和重要性选取设备适合放置的楼层。

#### 4.3 不同地震烈度下隔震结构楼层反应谱分析

改变结构输入的地震波加速度峰值,定义工况1为水平向峰值0.330 g,竖向为0.220 g;工况2为水平向峰值0.160 g,竖向为0.110 g;工况3为水平向峰值0.080 g,竖向为0.055 g。选取设备顶层为对象,得到结构在不同地震烈度下的水平向楼层反应谱,见图9,阻尼比为5%。

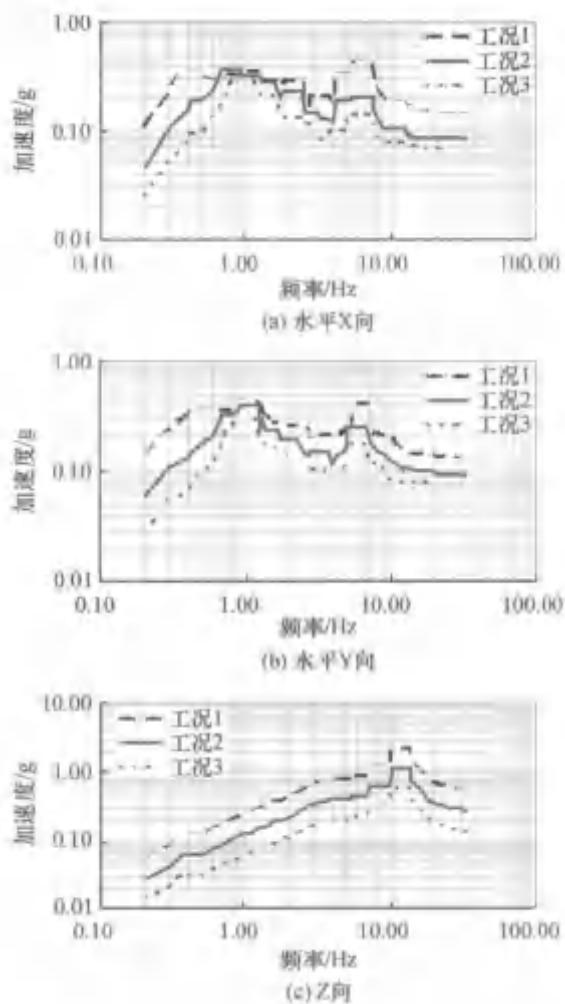


图9 不同地震烈度下的楼层反应谱

Fig. 9 Floor response spectrum under different seismic intensities

从图9可得,结构竖向楼层反应谱值随着地

震烈度的增大而增大,结构水平向楼层反应谱值在大多数频段也随着输入地震烈度的增大而增大,但在0.7~1.4 Hz频率段内的一些频率点处,低烈度地震作用下的结构楼层反应谱值超过高烈度时的楼层反应谱值,这可能导致自振频率在此频率点的附属设备在高烈度地震作用时安全,却在低烈度地震作用时遭受破坏。这主要是由于铅芯橡胶支座非线性特性的影响,导致基础隔震结构的等效隔震周期不断变化,当结构等效隔震周期与附属设备周期相近时,会放大附属设备反应。

#### 4.4 设备阻尼比对楼层反应谱的影响

改变附属结构的阻尼比,选取设备顶层为对象,得到结构在不同阻尼比下的楼层反应谱,见图10。结果表明,增加结构附属设备的阻尼比,可降低结构的楼层反应谱值。

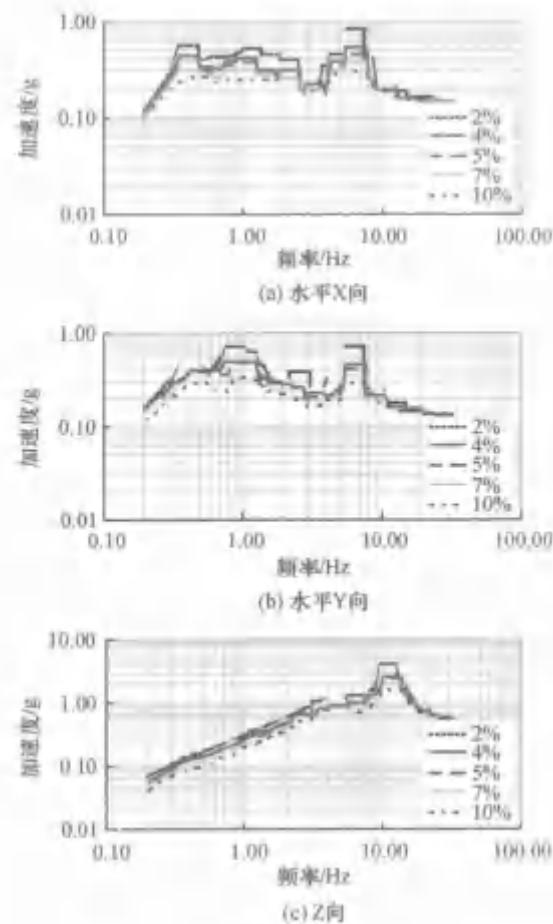


图10 不同阻尼比设备顶层的楼层反应谱

Fig. 10 Floor response spectrum at root of equipment for different damping levels

## 5 结 论

本文应用基础隔震技术对核电站反应堆厂房进行了系统的研究,得到以下结论:

(1) 本文设计的核电站反应堆厂房的隔震支座选型及布置合理,支座长期面压均控制在 5 MPa 左右,满足抗风设计要求;罕遇地震下隔震层位移、支座短期面压均符合规范规定。

(2) 目前设计的 CPR1000 堆型核电站设计运行安全地震动限于 0.2 g 以下,采用基础隔震后,结构的减震系数为 0.22,可将设计运行安全地震

动提高到 0.8 g 以上,大大提高了核电站反应堆厂房的安全储备。

(3) 基础隔震可降低结构水平向的楼层反应谱;楼层反应谱值随设备楼层标高的增大而增大,可根据设备的自振特性和重要性选取设备适合放置的楼层;增加设备的阻尼可降低结构楼层反应谱值;由于铅芯橡胶支座的非线性特性,低烈度地震作用下结构在某些频率点处的楼层反应谱值要大于高烈度时相应频段的楼层反应谱值,因此,对采用基础隔震的并带有重要附属设备的结构,应尽量使附属设备周期远离结构等效隔震周期。

## 参 考 文 献:

- [1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.  
ZHOU F L. Engineering structure vibration control [M]. Beijing: Seismological Press, 1997.
- [2] 李冬梅. 某核电站安全壳的隔震地震反应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.  
LI D M. Analysis of a nuclear power plant containment isolation seismic response [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [3] 曾奔, 周福霖. 基于功率谱密度函数法的核电厂房增加隔震措施后的楼层反应谱分析[J]. 核动力工程, 2009, 30(3): 13-16.  
ZENG B, ZHOU F L. Floor response spectrum analysis of nuclear reactor buildings with additional base-isolation measures based on PSDF [J]. Nucl Power Engin, 2009, 30(3): 13-16.
- [4] 曾奔. 考虑土-结构相互作用下基础隔震技术在 CPR1000 型核电厂房中的应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.  
ZENG B. The research on application of base-isolated technique on the reactor building of CPR1000 considering soil-structure interaction [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2009.
- [5] FRANO R L, FORASASSI G. Isolation systems' influence in the seismic loading propagation analysis applied to an innovative near term reactor[J]. Nucl Engin Design, 2010, 240: 3539-3549.
- [6] 郑志. 某核电站安全壳隔震可靠度分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
ZHENG Z. Seismic reliability analysis of base-isolated concrete containment in a nuclear power plant [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [7] 王博, 王飞, 丁路通. 核电站三维隔震技术的理论和试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 238-242.  
WANG B, WANG F, DING L T. Theoretical and experimental study on three-dimensional base-isolated nuclear power plant [J]. China Civil Engin J, 2012, 45(1): 238-242.
- [8] 朱秀云, 潘蓉, 李建波. 考虑 SSI 效应的核电站反应堆厂房楼层反应谱分析[J]. 核技术, 2013, 36(4): 1-8.  
ZHU X Y, PAN R, LI J B. FRS comparative analysis of the nuclear power plant considering SSI effect [J]. Nucl Tech, 2013, 36(4): 1-8.
- [9] 范世凯. 核电站隔震技术研究[D]. 广州: 广州大学, 2014.  
FAN S K. Technology study of base-isolation nuclear power plants [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2014.
- [10] 李忠诚, 李忠献. 大亚湾核电厂反应堆厂房地震响应分析评估[J]. 核动力工程, 2005, 26(6): 614-617.  
LI Z C, LI Z X. Analysis and evaluation of seismic response of reactor building for Daya Bay Nuclear Power Plant [J]. Nucl Power Engin, 2005, 26(6): 614-617.

- [11] CECS126-2001《叠层橡胶支座隔震技术规程》[S].北京:中国工程建设标准化协会,2001.  
CECS 126-2001 Technical specification for seismic-isolation with laminated rubber bearing isolators [S]. Beijing: CECS, 2001.
- [12] GB 20688.3-2006《橡胶支座 第3部分 建筑隔震橡胶支座》[S].北京:中国标准出版社,2007.  
GB 20688.3-2006 Rubber bearing—Part 3: Elastomeric seismic-protection isolation for buildings [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [13] GB 50267-97《核电厂抗震设计规范》[S].北京:中国计划出版社,1998.  
GB 50267-97 Code for seismic design of nuclear power plants [S]. Beijing: China Planning Press, 1998.

## Study on base-isolated nuclear power reactor structure

TAN Ping, FAN Shi-kai, XU Kai, JIN Jian-min, ZHOU Fu-lin

(Cultivation Base for State Key Laboratory of Seismic Control and Structural Safety, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** This paper systematically investigates the application of base-isolated technology on nuclear power plant reactor structure. Considering the circular raft of reactor structure, isolators are optimized and arranged for nuclear power plant reactor structure herein. Time-history analysis of the isolated nuclear power plant reactor structure is carried out and control effectiveness of base isolation of nuclear power plant reactor structure is evaluated. In addition, the floor response spectrum of the internal equipment in nuclear power plant reactor is set up and thus the floor response spectrum of base-isolated structure and base-fixed structure are compared. The effects of seismic intensity, height of the equipment and damping ratio of isolators to the response spectrum are investigated in this paper. Results show that base isolation technology can significantly increase seismic safety reservation.

**Key words:** nuclear power plant reactor; base isolation; floor response spectrum; time-history analysis; hybrid analysis model

【责任编辑:周 全】