

DOI:10.13512/j.hndz.2014.01.013

某核电厂应急指挥中心基础隔震研究

范世凯, 谭 平, 刘德稳, 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: 应急指挥中心是核电厂应为紧急核事故而专设的指挥中心, 本文对某核电厂应急指挥中心进行基础隔震设计, 分析了隔震效果; 建立了各楼层的楼层反应谱, 对比分析了隔震前后结构楼层反应谱与目标反应谱的关系。结果表明, 隔震后结构明显降低了应急指挥中心的地震反应, 同时, 其楼层反应谱也大大降低, 确保核电厂应急指挥中心在应急抢险中充分发挥其功能作用。

关键词: 核电厂应急指挥中心; 基础隔震; 楼层反应谱

中图分类号: TU352.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-8662 (2014) 01-0080-06

Research on Base Isolation of Emergency Center in a Nuclear Power Plant Structure

FAN Shikai, TAN Ping, LIU Dewen, ZHOU Fulin

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

Abstract: An emergency center is established for dealing with emergency accidents in nuclear power plant. A complete base isolation design of reactor structure is presented in this paper. The control effectiveness of isolated emergency center is evaluated. The floor response spectrum of isolated emergency center, base-fixed emergency center and the target floor response spectrum of the emergency center are compared. Results show that base-isolated technology can significantly reduce the seismic response and the floor response spectrum of emergency center, thus base-isolated technology can greatly enhance the function of emergency center in emergency accidents.

Keywords: Emergency center of nuclear power plant; Base isolation; Floor response spectrum

收稿日期: 2013-12-08

基金项目: 中国工程院重点咨询项目(2011-XZ-25)

作者简介: 范世凯, 男, 1989年生, 硕士研究生, 主要从事结构隔震方面的研究。

E-mail: 848838001@qq.com.

通讯作者: 谭平, 男, 1973年生, 博士, 研究员, 主要从事结构隔震与减震控制研究。

E-mail: ptan@gzhu.edu.cn .

0 引言

应急指挥中心是核电厂应对紧急核事故而专设的指挥中心，主要作用是在处理应急核事故期间，为应急指挥工作人员提供工作场所，在保证人员安全的前提下处理核事故。在 3.11 日本地震引发的福岛核电站事故中，核电厂应急指挥中心在应急抢险和指挥中发挥了重大作用。我国核安全局在福岛核电站后要求发生事故时，核电站应急指挥中心构筑物要保持整体的完整性，不受相邻建筑物的影响，且设计时应满足应急响应期间的可居留性要求^[1]。基础隔震是目前应用比较成熟的一种可有效降低结构物地震反应的技术^[2]，它是通过在结构的地基与上部结构之间设置隔震层，通过隔震层的耗能而减少了地震产生的能量向地上建筑物的传输，保障结构在地震下的安全。谢

礼立等^[3]对隔震技术在核电工程领域的应用的可行性作了系统的总结与介绍。本文对某核电厂应急指挥中心大楼进行了基础隔震设计，分析基础隔震效果，建立结构楼层反应谱，将隔震结构与抗震结构的楼层反应谱和设备厂家提供的目标谱进行对比分析。

1 工程概况

某核电站指挥应急指挥中心建筑类别为甲类，地区抗震设防烈度为 6 度，设计地震分组为第一组，场地类别 II 类，基本风压为 0.98 kN/m^2 ，地面粗糙度为 A 类结构上部两层为剪力墙结构，层高分别为 4.8 m 和 4.5 m，隔震层设置在基础顶面，层高为 2 m，采用 ETABS 建立结构的有限元模型，见图 1。



图 1 ETABS 有限元分析模型

Fig.1 Finite element analysis model of ETABS

2 隔震设计

《叠层橡胶支座隔震技术规程》^[4]规定，甲类建筑隔震支座的长期面压控制在 10 MP 以下，基于上述原则，再根据结构隔震层每个支座承担的荷

载来选取支座直径，每个支座的长期面压控制在 $5 \sim 10 \text{ MP}$ 之间，最终选取的直径为 500 mm 和 600 mm，支座型号为 LRB500、LNR500、LRB600 和 LNR600，支座的力学参数见表 1，支座布置见图 2。

表 1 橡胶隔震支座力学参数

Table1 The mechanical parameters of rubber bearings

支座类型	橡胶层厚度 T_r (mm)	屈服后刚度 k_d (kN/mm)	屈服力 Q_d (kN)	竖向刚度 k_v (kN/mm)
LRN600	120	0.909	/	2092
LRB600	120	0.929	90.2	2445
LNR500	100.1	0.757	/	1576
LRB500	100.1	0.772	50.7	1866

隔震支座布置时，尽量使铅芯型橡胶支座（LRB）布置在结构的外围，而天然橡胶支座（LNR）布置在内部，支座的布置见图2。经计算，结构屈重比为2.3%，结构X向和Y向的偏心率分别为1.69%、0.1%，隔震结构偏心很小。对隔震结

构，在设计风荷载作用下，隔震结构应不产生水平位移，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。计算结构风荷载设计值为784 kN，小于隔震层屈服力1 439.9 kN，满足抗风要求。

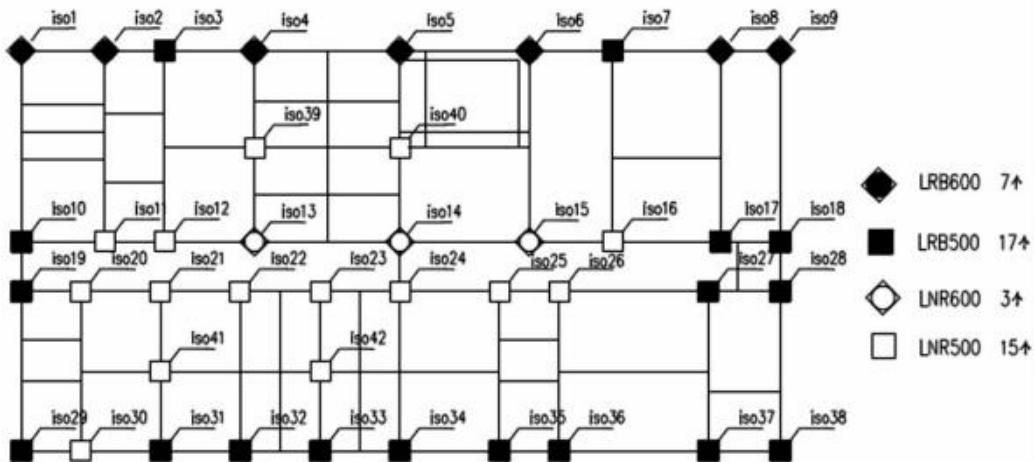


图2 隔震支座布置图

Fig.2 Diagram of bearings configuration

隔震前后结构的自振特性对比见表2，结构基本周期从0.082 1 s增大到2.279 9 s，周期增大明显，隔震后结构前两阶振型为整体平动，第三阶为扭转，模态质量参与系数达到99.9%，高阶振型对结构影响较小。

需要说明的是，表2中抗震结构与隔震结构的不同之处在于第一层的竖向承力构件，在进行分析时，抗震结构的第一层是由混凝土柱子组成，而隔震结构的第一层是由隔震支座来模拟，两种结构中梁和剪力墙的尺寸、布置等完全一样。

表2 抗震结构与隔震结构自振特性

Table 2 Modal analysis of seismic and isolated structure

振型号	抗震结构				隔震结构			
	周期	质量参与系数%		周期	质量参与系数%		X	Y
		X	Y		X	Y		
1	0.082 1	0.076 9	74.461 0	2.279 9	99.949 7	0.043 0		
2	0.070 0	77.985 7	0.084 2	2.272 3	0.045 9	99.128 0		
3	0.066 6	9.072 2	0.016 3	2.037 1	0.004 4	0.828 9		

3 隔震效果分析

3.1 地震动输入

本文所采用的地震动输入分为两组，见表3。第一组为根据核电站RG1.60标准谱拟合得到的地震动^[5]，包括2条水平方向地震波和1条竖向输入地震波，用于橡胶支座面压和位移的验算。第二组为按照厂址特定SL-2级地面运动基岩水平向和竖直向加速度反应谱，拟合多阻尼目标反应谱所

得到的人工地震波，也包括2条水平方向地震波和1条竖向输入地震波，用于计算结构的楼层反应谱。两组地震波均三向输入，分为2个工况，分别为S1S2Sz和A1A2Az。图3为第一组三条地震波频谱图，图4为第二组三条地震波频谱图。

3.2 隔震反应分析

工况S1S2Sz作用下，隔震结构与抗震结构上部楼层水平方向剪力对比见图5，剪力比最大值为0.26，上部结构的减震效果达到74%。工况

表3 选用地震波

Table 3 Selection of seismic waves

序号	地震波名称	方向	峰值/g
第一组	RG1.60 标准反应谱 h1-0.33 g (简写为 S1)	水平	0.33
	RG1.60 标准反应谱 h2-0.33 g (简写为 S2)	水平	0.33
	RG1.60 标准反应谱 V-0.22 g (简写为 Sz)	竖向	0.22
第二组	Ag-h1 (简写为 A1)	水平	0.16
	Ag-h2 (简写为 A2)	水平	0.16
	Ag-v (简写为 Az)	竖向	0.11

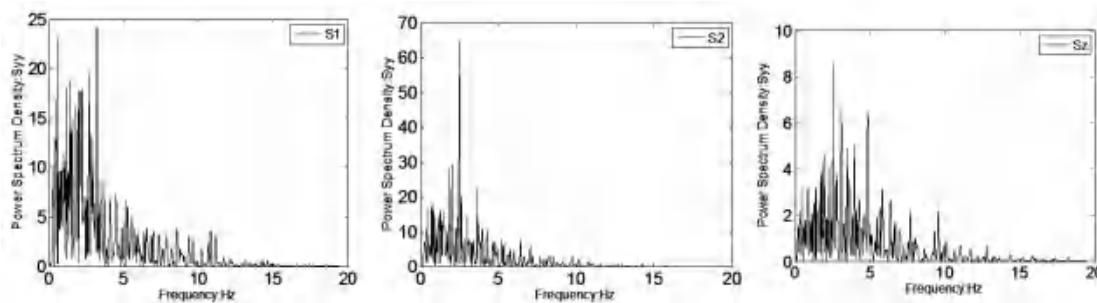


图3 第一组地震波频谱图

Fig.3 Frequency spectrum of ground motion in the first group

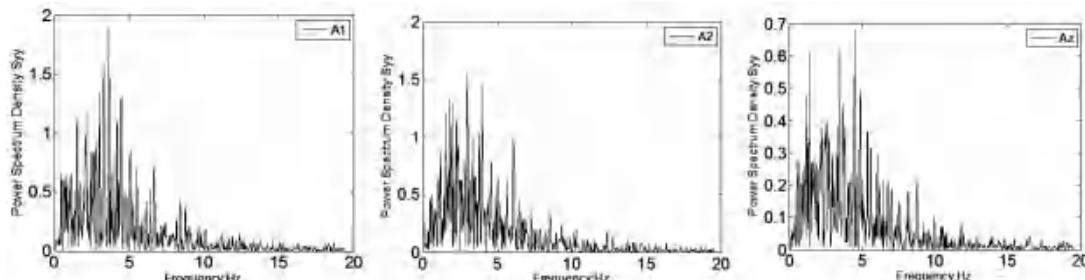


图4 第二组地震波频谱图

Fig.4 Frequency spectrum of ground motion in the second group

A1A2Az 作用下，隔震结构与抗震结构上部楼层水平方向剪力对比见图 6，剪力比最大值为 0.18，上部结构的减震效果达到 82%。根据抗震规范规定，

结构减震系数为 0.26，隔震后结构的水平地震作用比非隔震结构时降低了一度，大大提高结构的安全储备。

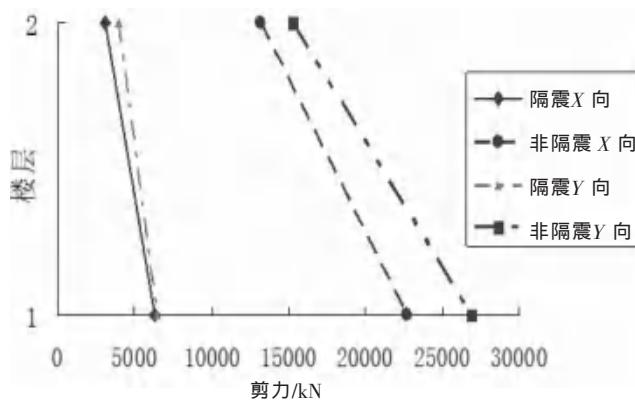


图5 工况 S1S2Sz 上部结构楼层剪力

Fig.5 Shears of the upper-structures under S1S2Sz

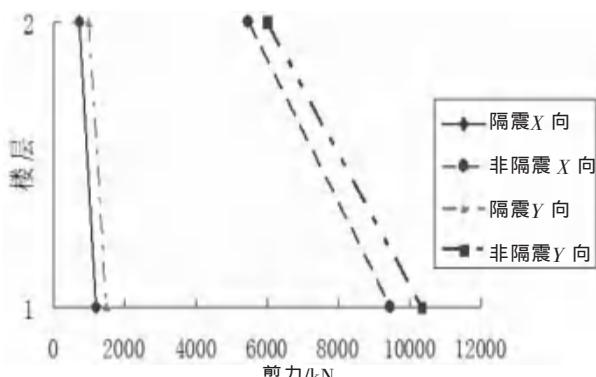


图6 工况 A1A2Az 上部结构楼层剪力

Fig.6 Shears of the upper-structures under A1A2Az

非隔震结构与隔震结构顶层绝对加速度时程曲线对比见图 7, 顶层相对位移时程曲线对比见图

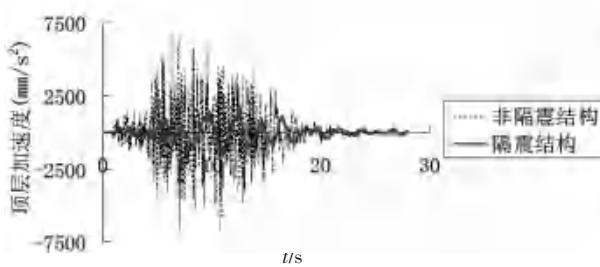


图 7 顶层绝对加速度对比

Fig.7 Comparison of the roof acceleration

根据《叠层橡胶支座隔震技术规程》^[4]规定, 支座的最大容许位移为 0.55 D 和 3Tr 两者的较小值, 据此计算得到的支座最大容许位移 275 mm。工况 S1S2S_z 作用下, 隔震层最大位移为 259 mm, 小于最大容许位移, 满足规范要求。支座短期极大面压为 14.6 MPa, 短期极小面压为 2.09 MPa, 支座不受拉, 满足规范要求。

4 楼层反应谱分析

楼层反应谱(FRS)是核电厂房主结构和设备子系统抗震设计的主要依据。本文基于时程法建立结构各层的楼层反应谱。为了考虑输入参数、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, 参考核电厂设计规范 GB50267-97^[6]的做法, 对计算的楼层反应谱在峰值处按 15% 进行拓宽。选取每一层加速度反应最大点为对象, 建立抗震和隔震结构的楼层反应谱, 包括水平和竖向楼层反应谱, 阻尼比取 0.05。

图 9 为隔震层水平方向的楼层反应谱, 从图中可看出, 隔震结构楼层反应谱在大于 1Hz 时远远小于目标谱和抗震结构反应谱, 但在小于 1Hz

8, 从图中可看出, 隔震后结构顶层绝对加速度和层间位移明显减小, 隔震效果明显。

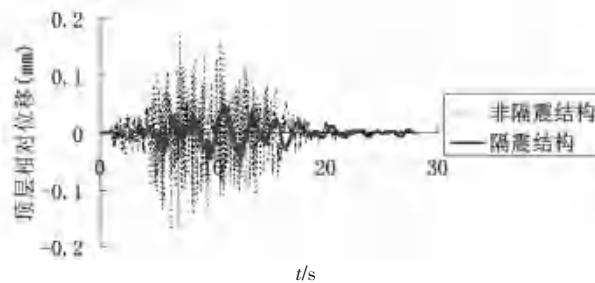


图 8 顶层层间位移对比

Fig.8 Comparison of the roof displacement

的低频段隔震反应谱要大于目标谱和抗震结构反应谱, 这是由于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不起作用。

图 10 为隔震层竖向的楼层反应谱, 从图中可看出, 隔震结构和抗震结构在低频段均与目标谱相差不大, 但在高频段均大于目标谱, 且隔震结构反应谱要大于抗震结构, 这主要是由于隔震支座竖向刚度较大, 不能降低结构的竖向地震反应。

图 11 为地上一层水平方向的楼层反应谱, 从图中可得, 隔震反应谱值在大于 1Hz 时远远小于目标谱值, 而抗震谱在峰值处要大于目标谱。图 12 为地上一层竖向的楼层反应谱, 从图中可得, 在高频段抗震结构和隔震结构反应谱均小于目标谱, 但隔震结构反应谱峰值要大于抗震结构反应谱峰值, 隔震后稍微放大了结构的竖向地震反应。

图 13 为地上二层水平方向的楼层反应谱, 图 14 为地上二层竖向的楼层反应谱。从图 13 可得, 隔震结构水平向反应谱值在大于 1Hz 时要小于目标谱值, 而抗震谱在峰值处要稍大于目标谱, 隔震后可使反应谱满足目标谱的要求。从图 14 可得, 抗震结构和隔震结构竖向的反应谱峰值均大

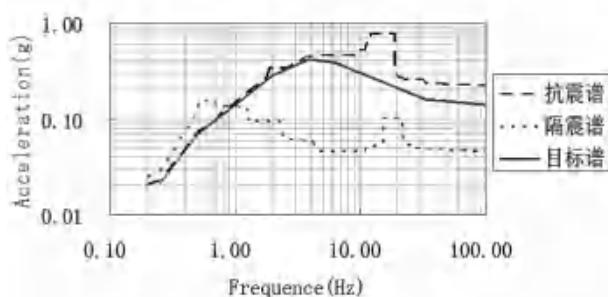


图 9 隔震层水平向楼层反应谱

Fig.9 The horizontal FRS of the isolation layer

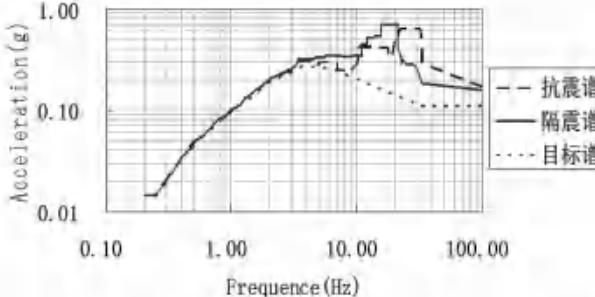


图 10 隔震层竖向楼层反应谱

Fig.10 The vertical FRS of the isolation layer

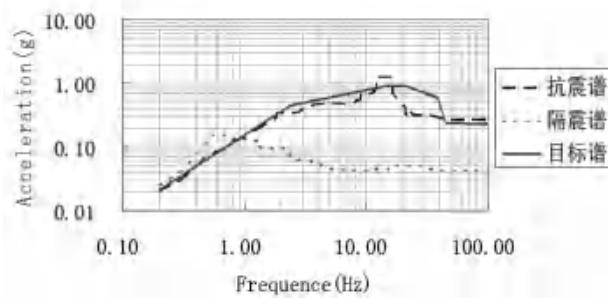


图 11 地上一层水平向楼层反应谱

Fig.11 The horizontal FRS of the first floor

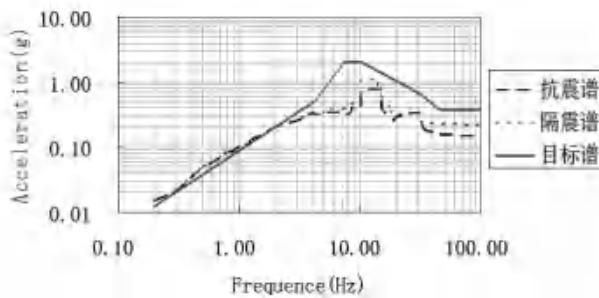


图 12 地上一层竖向楼层反应谱

Fig.12 The vertical FRS of the first floor

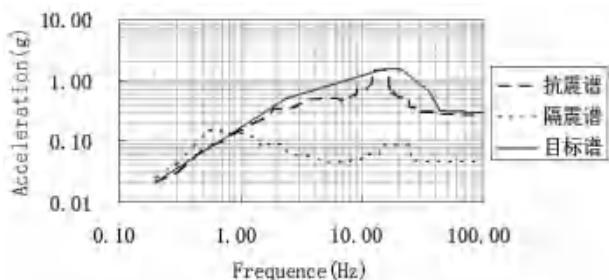


图 13 地上二层水平向楼层反应谱

Fig.13 The horizontal FRS of the second floor

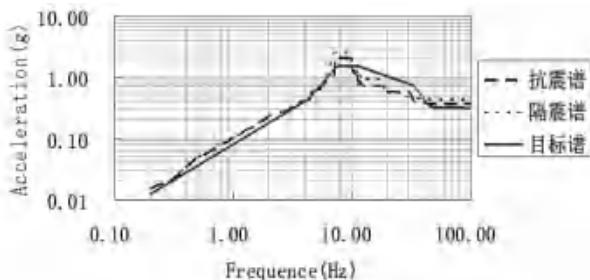


图 14 地上二层竖向楼层反应谱

Fig.15 The vertical FRS of the second floor

于目标谱，且隔震结构反应谱峰值要大于抗震结构反应谱峰值。

从以上分析可知，采用基础隔震可明显降低结构水平向的楼层反应谱，有利于设备抗震安全。虽然隔震结构在小于 1 Hz 的频段放大了结构水平向的楼层反应谱值，但是由于核电厂中设备主要集中在 4 Hz 以上，因此，可忽略隔震后对小于 1 Hz 频段反应带来的不利影响。此外，由于隔震支座的竖向刚度较大，隔震结构楼层反应谱较抗震结构稍有放大，不能起到隔离竖向地震的作用。

5 结论

本文对某核电站应急指挥中心进行了基础隔震设计，研究了隔震结构的隔震效果，建立了结构各层楼层反应谱，并将抗震结构与隔震结构的反应谱及目标谱进行了对比分析。通过以上研究，可得到如下结论：

(1) 本文设计的某核电厂应急指挥中心的支座布置和选型合理，满足抗风要求，支座长期面压小于 10 MPa，罕遇地震下支座短期面压和隔震层位移均符合规范要求。

(2) 采用基础隔震技术后结构的减震效果明显，结构加速度反应和层间位移反应大大减小，结构减震系数为 0.26，隔震后结构的水平地震作

用比非隔震结构时降低了一度，结构抗震安全储备大大提高。

(3) 基础隔震可明显降低结构水平向的楼层反应谱，当设备抗震按照相同地震输入进行设计时，可提高楼层设备的抗震安全储备。隔震结构在小于 1 Hz 的频段的水平向反应谱值大于抗震结构的楼层反应谱值，但核电厂中设备频率主要集中在 4 Hz 以上，因此，可忽略隔震后对小于 1 Hz 频段反应带来的不利影响。隔震结构竖向楼层反应谱峰值稍大于抗震结构竖向楼层反应谱峰值，水平隔震对降低结构竖向楼层反应谱效果有限。

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.
- [2] 王骏. 核电厂应急指挥中心设计[J]. 核安全，2012，4：67–71.
- [3] 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.
- [4] 中国工程建设标准化协会. CECS126–2001 叠层橡胶支座隔震技术规程[S]. 北京：中国计划出版社，2001.
- [5] 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.
- [6] 中国地震局. GB 50267–97 核电厂抗震设计规范[S]. 北京：中国计划出版社，1997.