

# 核电站应急指挥中心基底隔震技术方案

李忠诚, 张 涛, 李松奇

(深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518172)

**摘要:** 日本福岛核电站事故之后, 中国国家核安全局正式发布《福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求》, 提高了核电站应急指挥中心的抗震安全要求。本文以防城港核电站应急指挥中心示范项目为分析对象, 探讨了采用橡胶支座作为隔震装置的基底隔震方案, 并进行了隔震效果评价。通过采用 43 个橡胶隔震支座, 可以显著地削弱地震响应, 提高应急指挥中心的抗震裕量。通过该技术方案可以保护应急指挥中心的人员、设备和系统的安全, 从而提升核电站震后应急能力。分析研究成果和工程实践经验可在后续核电站建设中推广应用。

**关键词:** 核电站; 应急指挥中心; 基底隔震; 隔震支座; 方案

**中图分类号:** TU352.12

**文章标志码:** A

**文章编号:** 0258-0918(2016)02-0218-05

## Base seismic-isolation system for an emergency control center building

LI Zhong-cheng, ZHANG Tao, LI Song-qi

(China Guangdong Nuclear Power Design Company, Shenzhen, 518172, CHINA)

**Abstract:** After Fukushima nuclear power plant accident in Japan, the Chinese National Nuclear Safety Administration issued a General Technical Action Requirements for Nuclear Power Plant Safety Improvement after Fukushima Nuclear Accident, which emphasis the further improvement of the seismic safety of emergency control center in a nuclear power plant. As a research and engineering demonstration project for base seismic-isolation technology, the emergency control center in Fangchenggang nuclear power plant is discussed in this paper, and a base seismic-isolation system as well as its' effect is investigated. Through the use of 43 rubber bearings, the seismic response of the superstructure can be greatly weakened, such that the seismic margin of the emergency control center can be improved clearly. This technical solution can be employed to protect the emergency control center personnel, equipment and system, enhance the emergency response capacity of nuclear power plant after an earthquake.

修回日期: 2015-07-12

基金项目: 国家能源局资助项目“中国二代加核电厂抗震能力提升及超设计基准地震裕量分析研究”

作者简介: 李忠诚(1971—), 男, 四川人, 研究员级高级工程师, 工学博士, 现主要从事核安全相关结构设计与研究等工作

The research results and engineering practice can be applied in the construction of the nuclear power station in the future.

**Key words:** nuclear power station; emergency control center; base seismic-isolation system; isolation device; layout scheme

日本福岛核电站事故之后,地震安全问题得到了前所未有的重视。核电工业界既关注核电站系统、结构和部件(SSCs)的地震安全性,也关注地震后核电站应急设施的可用性和有效性。应急指挥中心(EM)承担着事故后的核电站应急指挥、技术支持、应急保卫、维修、公众信息发布和后勤支持等任务,在设计基准地震作用下,确保其结构安全、功能正常显得至关重要。中国国家核安全局正式发布了《福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求》,明确要求提高核电站应急指挥中心的抗震安全性。为了提高应急指挥中心的地震安全水准,同时推动基底隔震技术在核电站的推广应用,将广西防城港核电站应急指挥中心作为示范项目,对其开展了基底隔震方案研究,并付诸工程实施。本文结合示范项目的情况,给出了隔震装置的布置方案,进行隔震效果评价,并通过工程实例说明了隔震方案的可行性。该示范项目采用国内规范标准设计、制造、供货和建造,对于基底隔震技术在核电站的推广应用,具有较好的示范引领作用。

## 1 工程概况

本文以位于中国广西壮族自治区的防城港核电站应急指挥中心(EM)示范项目为分析对象。应急指挥中心(EM)地上建筑高度9.3 m,包括地下1层(含隔震层)、地上2层。隔震层设置在基础顶面,层高2.0 m。地上1层层高4.8 m,2层层高为4.5 m。其结构型式为钢筋混凝土剪力墙结构。应急指挥中心(EM)隔震层施工场景见图1。

应急指挥中心(以下简称EM)±0.00 m楼板及以下部分采用C35级混凝土,其余部分采用C30级混凝土。采用HRB400及HPB300级钢筋,以上材料性能参数均按中国国家标准GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》规定取用。



图1 隔震层施工场景

Fig.1 Overview of the isolation layer construction

## 2 设计规范及抗震设计基准

针对核电站构筑物基底隔震的设计,日本发布了核电站隔震设计指针<sup>[1]</sup>,欧洲核设施的设计均采用民用规范<sup>[2,3]</sup>。本文针对EM隔震设计采用中国相关的设计标准和规范,主要包括:《建筑抗震设计规范》(2010年版)(GB 50011—2010)、《橡胶支座 第1部分:试验方法》(GB 20688.1—2006)、《橡胶支座 第3部分:建筑隔震橡胶支座》(GB 20688.3—2006)、《叠层橡胶支座隔震技术规程》(CECS 126:2001)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)。

日本福岛核电站事故之后,中国国家核安全局提高了核电站应急指挥中心的抗震安全要求,正式发布《福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求》,要求核电站应急指挥中心按照厂址所在地区基本烈度提到一度进行抗震设计,并按照设计基准地震动SL2(相当的地面加速度)进行校核。该要求在设计上比较难于操作,为了简化设计,采用与核岛厂房相同的地震动输入,作为EM隔震设计的抗震设计输入。

厂址的水平向安全停堆地震动峰值为0.16 g,为了实现研究成果更广的适应性,采用美国核管会(NRC)推荐的RG1.60标准反应

谱<sup>[4]</sup>作为地震动输入,水平向地面峰值加速度取 0.33 g(竖向取水平向的 2/3)进行隔震分析。该输入比厂址地震动水平高,主要是考虑形成高地震输入的标准设计,可以广泛应用于多个不同的厂址,0.33 g 是根据潜在厂址的地震动水平确定的。以 RG1.60 标准谱拟合的加速度时程曲线见图 2。

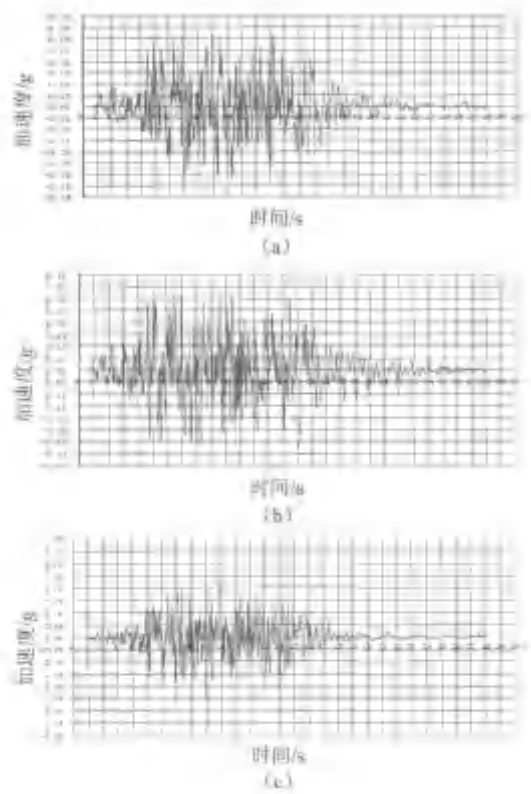


图 2 地震动加速度时程  
Fig. 2 Time histories for input  
(a) 水平方向(X);(b) 水平方向(Y);(c) 竖向(Z)

3 隔震支座

隔震支座采用橡胶隔震支座,该支座分为

含铅芯(LRB)及不含铅芯(LNR)两种(见图 3)。LNR 属于双向线性支座,LRB 属于双向非线性支座,其本构模型见图 4。所使用支座的主要参数见表 1。

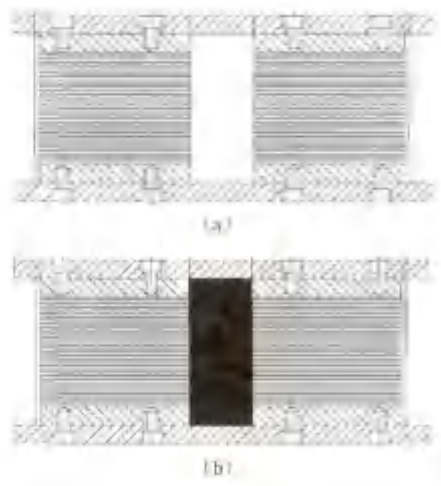


图 3 隔震支座  
Fig. 3 Seismic isolator  
(a) 不含铅芯隔震支座(LNR);  
(b) 含铅芯隔震支座(LRB)

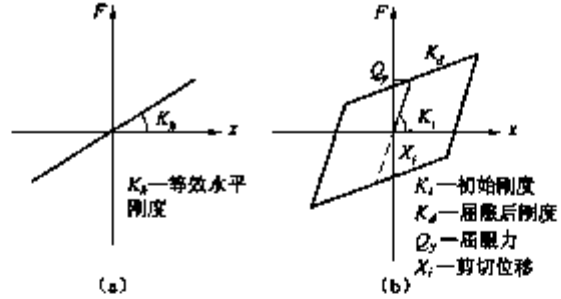


图 4 隔震支座本构模型  
Fig. 4 Relationship between force and displacement of isolators  
(a) 不含铅芯隔震支座(LNR);  
(b) 含铅芯隔震支座(LRB)

表 1 隔震支座参数  
Table 1 Properties of isolators

性能	参 数	单位	LNR600	LRB600	LNR500	LRB500
剪切模量	橡胶 G 值	N/mm <sup>2</sup>	0.392	0.392	0.392	0.392
形状参数	橡胶支座外径	mm	620.0	620.0	520.0	520.0
	支座总高度	mm	267.5	267.5	226.1	226.1
竖向性能	标准面压	N/mm <sup>2</sup>	10.0	10.0	10.0	10.0
	竖向刚度	kN/mm	2 092	2 445	1 576	1 866

性能	参 数	单位	LNR600	LRB600	LNR500	LRB500
水平性能	屈服后(等效)刚度	kN/mm	0.909	0.929	0.757	0.772
	屈服力	kN	—	90.2	—	50.7
极限性能	最大水平位移	mm	480.0	480.0	350.0	350.0

隔震支座布置示意图 5。支座布置遵循了如下基本原则:隔震层刚度中心尽量与上部结构的质量中心重合,重力荷载下尽可能保证各个隔震垫应力均等,同时考虑了足够的高度和空间用于支座的维护和更换。

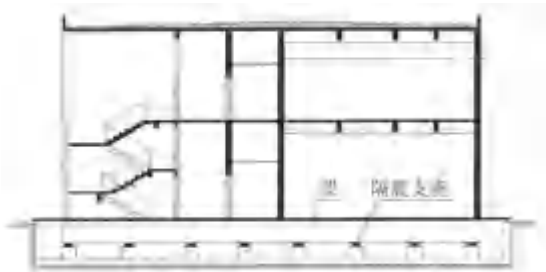


图 5 隔震支座布置示意图  
Fig. 5 Arrangement of the seismic isolators

4 计算模型及控制指标

首先通过如图 6 所示的单质点弹簧阻尼系统的隔震体系的计算,初步得到隔震层的总刚度、隔震支座的总个数和最大水平位移。在初算中,假设隔震后体系的基本周期为 2.5 s,假定隔震层的阻尼比为 20%,单个支座的基本面压为 8.0 MPa,支座直径为 500 mm,厂房总重量 M 为 63 993.8 kN,由此可以得到隔震层的总刚度 K 为 40 380.0 N/mm,需要的支座数量为 40 个,初算的隔震层水平位移为 218.0 mm。在此基础上,采用精确计算手段对支座的数量和型号进行小幅调整,并满足相关验收指标要求。

由于含铅芯隔震支座具有非线性的力学性能,因此简化计算只供初步分析所用,具体的隔震布置方案和效果需要通过三维有限元动力非线性时程分析确定。为此,采用 SAP2000 计算软件进行隔震计算,SAP2000 所提供的橡胶隔震单元可以较好地模拟上述天然橡胶隔震支座和带铅芯隔震支座。

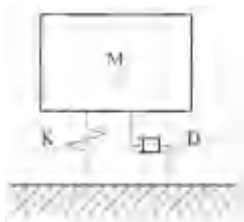


图 6 隔震体系简化模型  
Fig. 6 Simplified model for base-isolated system

对于上部结构,混凝土墙、板使用壳单元模拟,梁和柱则使用框架单元模拟。

隔震前结构周期为 0.08 s,隔震后结构周期为 2.27 s。各项控制指标均满足验收标准(见表 2)。

表 2 主要验收指标  
Table 2 Acceptance criteria for the seismic isolator system

主要指标	计算结果	验收准则
隔震支座标准面压/MPa	9.97	10.0
隔震支座最小压应力/MPa	3.13	1.0
隔震层最大水平位移/mm		350.0
抗风验算/kN	风荷载 784	抗力 1 493
隔震层偏心率	X 向 1.59% Y 向 0.10%	刚心与质心尽量重合

5 隔震效果

隔震之后,EM 基底剪力削减约 70%,楼层加速度峰值削减 50%~65%。隔震效果十分显著。

对于 EM 各楼层的地震响应谱,隔震方案与不隔震方案的楼层反应谱曲线对比见图 7。由图可见,在水平方向,隔震后厂房地震响应明显低于非隔震的方案,楼板零周期加速度和峰值加速度均显著减小。采用隔震方案后结构体

系刚度显著降低,因而反应谱整体向低频端偏移,由此表明水平方向的隔震效果明显;在竖向,由于隔震垫竖向刚度很大,隔震后的地震响应与非隔震方案相比没有显著改变,说明现有的橡胶隔震支座的竖向隔震效果不明显。由于

计算楼面谱选点等原因甚至出现竖向谱存在局部放大的现象。通过全面分析论证表明,纵然竖向隔震效果不明显,但水平方向的隔震效果可以大大改善 EM 的整体抗震安全性,本文的隔震技术方案可以满足设计要求。

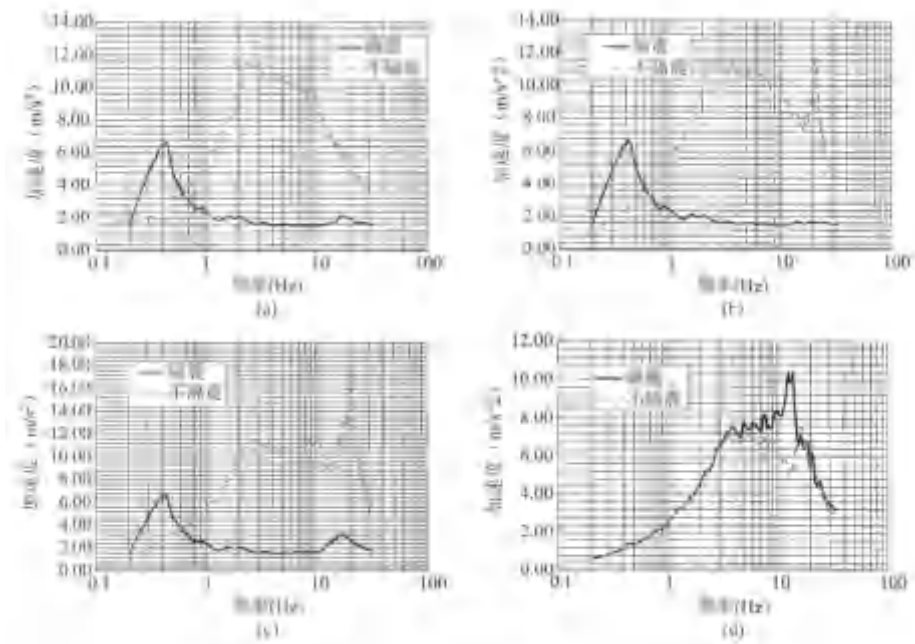


图 7 楼层反应谱对比  
Fig. 7 Comparison of floor response spectra  
(a) 0.9m 水平向;(b) 4.8m 水平向;(c) 9.3m 水平向;(d) 9.3m 竖向

6 结论

本文以防城港核电站应急指挥中心(EM)为分析对象,分析给出了基底隔震方案,并评价了该方案的合理性。通过采用 43 个橡胶隔震支座,可以显著地削弱地震响应,提高应急指挥中心的抗震裕量。通过该技术方案可以保护应急指挥中心的人员、设备和系统的安全,从而提升核电站震后应急能力。此外,由于设计基准地震动水准比较高,因此,该项成果具有较为广泛的厂址适应性,可以作为标准设计应用到不同的核电厂址。目前防城港 EM 示范项目进展顺利,分析研究成果及工程经验可在后续核电站建设中推广应用。

致谢

在隔震技术方案研究中得到了广州大学周

福霖院士、谭平教授、马玉宏研究员等的帮助和指导,在此一并致谢。

参考文献:

[1] Japan Electric Association (JEA), Nuclear Standard Committee of JEA, Design and Technical Guideline of Seismic Isolation Structure for Nuclear Power Plant[S], JEAG 4614-2000.  
[2] European standard, NF EN 1337-1; Structural bearings [S], 2000.  
[3] European standard, NF EN 15129, 2010, Anti-seismic devices[S], 2010.  
[4] NRC Regulatory Guide 1.60-1973, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants [S].  
[5] A. H. HADJIAN, W.S. TSENG, Issues in Seismic Isolation of Nuclear Power Plants [J]. Nuclear Engineering and Design, 1985, 84: 433-438.