

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.03.001

# 近期核电厂抗震设计输入及 AP1000 核岛隔震的总体考虑

夏祖讽, 李韶平, 王晓雯, 杨杰, 孙渝刚  
(上海核工程研究设计院, 上海 200233)

**摘要:** 介绍了近期美国、日本和中国核电厂抗震设计地震动规范的现状和趋势, 以上海核工程研究设计院开展的 AP1000 机型核岛基础隔震设计课题为例, 分析了 AP1000 机型核岛基础隔震设计的必要性及总体概念设计内容, 研究了美国核管会目前重点关注的核岛基础隔震设计内容以及上海核工程研究设计院的应对策略, 研究成果为核电厂的抗震设计及核岛结构基础的隔震设计提供了重要的参考依据。

**关键词:** 核电厂; 抗震设计; AP1000; 基础隔震

中图分类号: TL4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)03-0001-06

## General Consideration for Seismic Input of NPP Seismic Design and Seismic-isolated Research for AP1000 Nuclear Island

XIA Zufeng, LI Shaoping, WANG Xiaowen, YANG Jie, SUN Yugang

(Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Current situation and developing trends of the seismic input of nuclear power plant are firstly introduced and analysed in U. S. A., Japan and China. Taking the seismic-isolated foundation project of nuclear island as the example in Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, the article mainly focuses on the necessity research and general concept design of nuclear island seismic-isolated foundation for AP1000 units. Then the main content of seismic-isolated foundation from U. S. Nuclear Regulatory Commission and countermeasures from Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute are researched. This work provides some guidance for further study on seismic input of nuclear power plant and seismic-isolated foundation of nuclear island as a reference.

**Key words:** nuclear power plant; seismic design; AP1000; seismic-isolated foundation

### 1 核电厂的抗震设计地震动要求

#### 1.1 近期美国的规范性提升<sup>[1]</sup>

美国在 20 世纪 70 年代采用 RG1.60 地面谱<sup>[2]</sup>, 确定核电厂地震设计输入安全停堆地震 (SSE) 概率为  $10^{-4}$ /年。1997 年 NRC 出台 RG1.165<sup>[3]</sup>, 首次

提出新核电厂设计参考概率为  $10^{-5}$ /年。2006 年美国土木工程师学会 ASCE43-05 标准<sup>[4]</sup>提出基于功能方法来定义场地相关地震动的新方法, 把新一代核电厂的安全功能目标概率定为  $10^{-5}$ /年。2007 年美国核管会 (NRC) 出台 RG1.208<sup>[5]</sup>替代 RG1.165, 赞同 ASCE43-05 标准中基于功能方法的观点, 确定新一代核电厂的安全功能目标概率应为  $10^{-5}$ /年。按 ASCE43-05 标准确定的地震输入, 新一代核电厂地震输入的实际操作水平已达到 20 世纪 70 年代确定的 SSE 的 1.0~1.8 倍<sup>[6]</sup>。

#### 1.2 近期日本的规范性提升

日本在 2001 年前的核电厂抗震设计指南

收稿日期: 2016-10-20

基金项目: 上海核工程研究设计院隔震课题 (ZB01K08F)

作者简介: 夏祖讽 (1941), 男, 浙江镇海人, 全国工程设计大师, 研究员级高级工程师, 国家核安全专家委员, 主要从事核工业土建结构设计和研究工作 (e-mail) xiazf@snerdi.com.cn。

JEAG4601<sup>[7]</sup>均无大的改动:全厂性的 $S_1$ 级概率为 $10^{-4}$ /年; $S_2$ 级作为假想地震,仅用于少数最重要物项,参考概率约 $2 \times 10^{-5}$ /年; $S_2 \approx 1.5S_1$ 。2006年版JEAG4601只统一设置 $S_s(S_2)$ ,参考概率为 $10^{-5}$ /年,导致全日本所有核电厂址的地震输入比2001版 $S_2$ 有1.20~1.62倍提升。按日本2007年7月16日新泻6.8级地震及2011年3月11日的东日本海域9.0级地震对其邻近核电厂柏崎刈羽及福岛核电厂的地震实例记录看,JEAG4601的2006版的提升是及时且完全有必要的<sup>[8]</sup>。

### 1.3 中国核电厂抗震设计值的现状及趋势

中国目前对核电厂抗震设计的输入要求一直遵循美国20世纪70年代作法。上海核工程研究设计院(以下简称上海核工院)自主设计的全国首个核电厂秦山核电厂 $SSE=0.15\text{ g}$ ,出口的恰希玛软地基厂址自由场 $SSE=0.25\text{ g}$ 。中国20世纪80年代从法国引进的M310机组的标准输入值 $0.2\text{ g}$ 已能适用于多数厂址。近期引进的第三代核电AP1000机组的抗震标准输入值已达 $0.3\text{ g}$ (采用RG1.60修正谱),它可覆盖目前已建所有核电厂址需求。苏北、福建、广东沿海某些新选厂址的普选报告已有超过 $0.3\text{ g}$ 的实例,台湾地区已确定核电厂址抗震输入值已达 $0.4\sim 0.5\text{ g}$ 。根据福岛事件教训,将来我国对新一代核电地震设计输入提升趋势是明显的。上海核工院作为核电设计企业已自行制订出比现行国际标准更严格的企业标准来适应可能的提升。

## 2 核岛基础隔震设计的必要性及设计目标

### 2.1 烈度区厂址采用基础隔震设计的必要性

采用非隔震设计的三代核电AP1000机组的标准设计能力已高达 $0.3\text{ g}$ ,它的抗震设计能力集中体现了当代最先进水平。经上海核工院对该AP1000机组所作的抗震裕度评估,受机组中某些抗震薄弱环节如反应堆堆内构件和堆芯组件等制约,其高置信度低失效概率(HCLPF)裕度地震也不过为 $0.5\text{ g}$ 。该值可看成现有非隔震核电厂抗震最大能力的极限。

核电厂抗震能力提升的瓶颈是机组中薄弱的核设施,只要它们已有的设计技术未能取得关键突破,机组抗震设计强度按规范设计值,也就难超过 $0.3\text{ g}$ 。否则只不过是挖掘这些薄弱环节的抗震强度裕量。对高烈度区厂址,只有采用核岛隔震这

种目前最有效的措施,控制核岛上部结构在 $0.3\text{ g}$ 以内,才能确保达到抗震规范必要的强度安全度。

另外,地震所引发的安全功能失效概率也是值得关注的。对美国二代核电厂的地震概率风险评估表明,它们的堆芯损伤频率CDF的中值为 $1.2 \times 10^{-5}$ /堆年,而三代AP1000机组标准设计(非隔震 $0.3\text{ g}$ )的CDF则为 $5 \times 10^{-7}$ /堆年,可见它的抗震设计的功能安全性要高得多。如三代核电AP1000机组采用基础隔震,即使在 $SSE=0.6\text{ g}$ 厂址也同样能控制核岛实际承受像标准设计中的 $0.3\text{ g}$ ,故CDF仍可达 $5 \times 10^{-7}$ /堆年;但对AP1000机组要求按 $SSE=0.6\text{ g}$ (2倍标准设计值)作非隔震设计,即使强度分析能勉强通过,但从ASCE43-05标准中两个功能准则即对SSE的功能不可接受概率小于1%,对1.5倍SSE功能不可接受的概率小于10%的说法推测,此时CDF必然会比原先 $0.3\text{ g}$ 时高出上百倍,功能安全性明显要降低不少。

### 2.2 上海核工院核岛隔震设计目标

法国20世纪70年代的M310机组因当时出口的需要,首次采用核岛基础隔震,把其抗震设计能力从 $0.2\text{ g}$ 提高至 $0.3\text{ g}$ ,但未见对重要厂用水管道的破断风险作交待。日本20世纪80年代已作过核岛隔震的可行性研究,由于2007年7月新泻地震对柏崎刈羽核电站实测地震超过设计地震,从2008年起针对第三代核电机组又作了核岛基础隔震的试验研究,可惜国内无缘当面听取日本的宝贵经验。

上海核工院于2008年下半年也开始策划隔震设计课题。该课题是在刚引进的三代核电AP1000机组原有全套标准设计不变的前提下,根据该机组不存在核安全级地下管道的有利条件实施核岛基础底板隔震,使该机组的抗震设计能力从 $0.3\text{ g}$ 翻成 $0.6\text{ g}$ (水平 $0.6\text{ g}$ ,竖向 $0.4\text{ g}$ )使上部核岛结构仍处于原 $0.3\text{ g}$ 地震的标准设计的弹性极限状态之内,而控制隔震支座的剪应变处于非线性极限应变 $\gamma_1=250\%$ 以内,以确保隔震支座的安全功能。

为应对超设计基准地震,以水平向 $0.9\text{ g}$ ,竖向 $0.6\text{ g}$ 作为隔震设计的最大考虑地震,此时使上部核岛处于原裕度地震为 $0.5\text{ g}$ 的评估状态,以免发生堆芯融毁。并控制隔震支座的剪应变处于其破断极限应变 $\gamma_2=400\%$ 以内,橡胶垫的最大拉应力在 $1.5\text{ MPa}$ 以内,以保证橡胶隔震支座的结构完整性。

实际核电厂中免不了还有些非安全级而带有放射性的地下管道需要关注:

1) 如一经采用基础隔震, 反倒因有可观位移带来地下管道破断的不利因素。

2) 在厂址出现概率较高的中小地震工况下, AP1000 机组原先常规非隔震设计的抗震能力足以安全地承受且无地下管道破断的风险。

3) 经上海核工院从工程设计全局上反复推敲后, 首次提出在采用基础隔震垫的同时配置按一定阈值释放的闭锁装置这样更完美的隔震方案。这一设想于 2009 年成功申请了国家技术专利<sup>[9]</sup>, 对二代及三代核电同样适用。

4) 这些闭锁装置由地震作用打开。如把打开阈值确定在大于厂址 OBE 且小于原 AP1000 标准设计值 0.3 g (例如取 0.20 g), 那么该专利技术的应用可在核电厂基础隔震设计中, 使多发的中小地震下没有地下管道破断发生, 而在罕见的大地震下能实施减震确保安全大局, 从而带来最佳工程效果。

### 3 核岛基础隔震设计中地震动输入的确定

#### 3.1 地面谱的确定

按现有规范, 核电厂隔震设计中的地震动设计输入应与非隔震核电厂完全相同。

AP1000 核电机组的标准设计采用 RG1.60 修正谱(25 Hz 处提高 30%)。但原 RG1.60 谱只给定阻尼比 ≤ 10% 的标准谱幅值。而目前常规的铅芯叠层橡胶垫的等效阻尼比在设计工况下通常处于 20% ~ 25%。把 RG1.60 修正谱推广至阻尼比为 20%, 流行方法有多种, 但结果差别不少, 如图 1 所示。

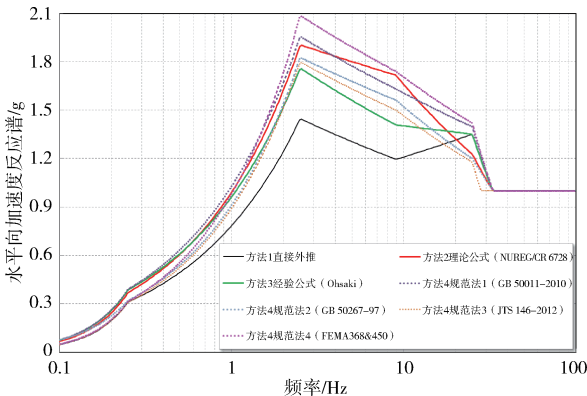


图 1 按不同方法所推定的 20% 阻尼的地面反应谱时程

Fig. 1 Different ground response spectrums with 20% damping

从谱幅值的保守性, 谱形与原标准的符合性以及隔震工程所涉长周期频段相对 5% 谱的阻尼调整系数取值的合理性等综合对比, 上海核工院在国内首次自主选定以基于随机振动理论推导的 NUREG/CR - 6728 方法作为核岛基础隔震设计的基准谱, 如图 1 所示, 但此谱只作为初步设计的框算。

#### 3.2 时程的确定

核电工程设计操作中, 会同时作反应谱分析和时程分析。为了协调这两者分析结果, NRC 规定其输入的时程必须是从种子时程库中合适选用经修正的(但不修改原相位)而与原地面设计反应谱相匹配的人工时程波。按最新规范, 这些人工时程波可采用与 5% 阻尼比的目标谱按规定的匹配要求产生, 该法可适用于其他阻尼比的结构分析。

由于隔震垫的强非线性, 规范要求在设计中应采用多于 4 组的人工时程分析并取均值。上海核工院隔震课题中按 ASCE4 - 09 的规定, 取 7 组独立的人工时程均值, 目前上海核工院自主的时程资料库有八组以上的统计独立人工时程组可选用。

### 4 隔震设计中的工程验收准则

核岛杆模型的初步结果如图 2 所示, 隔震后在设计工况 0.6 g 的水平地震下实际隔震效果显著。

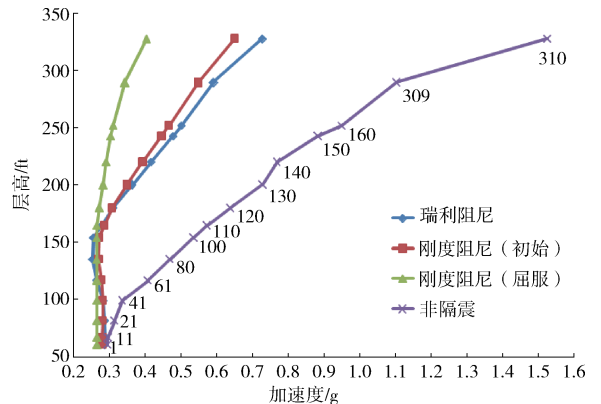


图 2 ASB 区域节点 Y 向加速度峰值对比

Fig. 2 Comparison of acceleration peak value of nodes of ASB region in Y direction

通常核岛的土建结构本身的抗震设计裕量很大, 从图 2 可看出, 隔震后核岛厂房根部的地震弯矩和剪力要比非隔震的标准设计低得多, 因此在隔震后, 核岛土建结构的抗震能力完全不必担心。

在核岛隔震设计中, 上海核工院最关注的是核

岛厂房中诸多核设施的安全性。而这些核设施的抗震设计主要依赖于所在各层的楼面设计反应谱。如隔震后核岛结构各层楼面谱在水平向 0.6 g 的设计工况下均能被原非隔震的标准设计地震(0.3 g)的相应各层楼面谱所包络,那么这次隔震设计就是成功的。

作为标准设计, AP1000 机组的楼面设计反应谱是六种不同厂址地质条件的包络结果。在水平及竖向同为 0.3 g 的地震下,又规定所有位于厂坪标高 100 英尺以下的地下室中设备均保守地采用其地下室顶板(100 英尺标高)的楼面设计谱,这就导致 AP1000 机组下部所有设备本底地震最大允许值水平向为 0.36 g,竖向为 0.46 g。

经初步分析,在隔震后各层水平向楼面谱中,除  $\leq 1.0$  Hz 附近频段外,均能被非隔震的标准设计楼面谱所包络(如图 3 所示),但所有核设施的自振频率均高于 2.0 Hz,表明这一隔震设计是成功的。

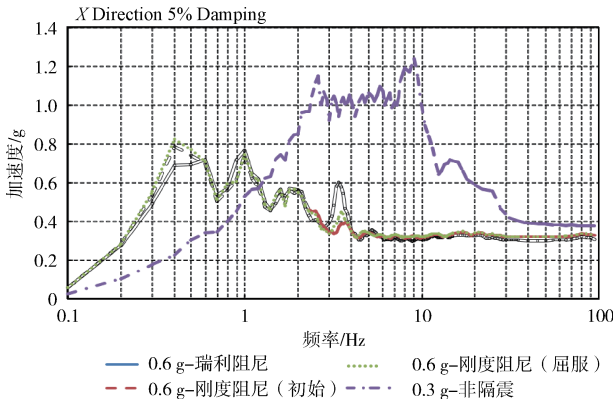


图3 ASB 区域下部节点 41 的隔震后楼面反应谱

Fig. 3 Floor response spectrum of node 41 below the ASB region with seismic-isolated foundation

## 5 核岛隔震设计中, NRC 目前的重点关注及上海核工院的应对策略

### 5.1 NRC 对核电厂隔震设计的总体看法

2012 年 6 月 NUREG 隔震草案“*Technical Consideration for Seismic Isolation of Nuclear Facilities*”<sup>[10]</sup>中对核设施隔震垫材料及支座形式特地作出界定:在美国核设施中,不宜采用诸如氯丁橡胶及高阻尼橡胶等人造橡胶;NRC 仅支持采用低阻尼的天然橡胶(LDR)支座、铅芯天然橡胶(LR)支座及摩擦摆这三类水平隔震支座的形式。

在上述隔震草案中明确指出目前在核岛隔震设

计中可能的好处是在安全性、可信性及经济性上,但具体实施中主要的挑战有下列三方面:在目前的隔震设计中,核岛的竖向地震加速度反应是没法减轻的;隔震支座的力学分析的非线性处理还存在一定的复杂性;核岛上部结构的相对大位移需要重点关注。

### 5.2 上海核工院隔震课题的应对策略

#### 5.2.1 隔震课题策划中对竖向地震加速度反应的考虑

根据对隔震设计的传统分析包括对隔震结构所作的常规土—结相互作用 SSI 分析,隔震层以上结构的竖向加速度反应的确总是有增无减的。在上海核工院隔震课题中,核岛水平隔震频率约为 0.4 Hz,竖向隔震频率约为 18 Hz。据此上海核工院打算考虑对地震输入作多点非一致性运动(incoherence)分析来揭示隔震层以上核岛结构更真实的竖向反应的折减。

Incoherence 分析的这种加速度幅值折减,主要是考虑到地震波本身实际的斜入射,使传入的地震波横穿核岛基础各点在到达时间上的差别,形成有序化的空间改变。根据上海核工院以往在非隔震核岛结构上所作 incoherence 分析探索,对类似目前基础,托盘最小尺寸为 52 m 以上,且竖向频率为 18 Hz 的情形,所得竖向楼面谱幅值的折减将会十分明显,但对 0.4 Hz 这样低的水平楼面谱影响极小。

#### 5.2.2 隔震课题策划中对非线性隔震支座垫的力学分析考虑

不论上海大学设计团队还是上海核工院的核岛结构分析设计创新团队,在初步设计中均已平行地开展了对本课题核岛结构多质点杆模型的非线性时程分析的初算;上海核工院团队习惯采用 ANSYS 通用程序分析,但通过调研在隔震结构的非线性时程分析中该通用程序对粘滞阻尼的模拟操作以往一直没有一个公认的合适方法;

上海核工院参阅了发表于 2006—2013 年间的《*Earthquake Engineering and Structural Dynamics*》中的几篇论文<sup>[11]</sup>,采用了三种流行的不同阻尼考虑方法作了杆模型的复核初算,结果表明,其中直接采用传统全瑞利阻尼的方法会对第一振型(0.4 Hz 隔震频率)处的结构反应有较大的抑制(见图 3),而对其中取质量比例阻尼为 0,仅采用初始刚度而确定的刚度比例阻尼的分析结果更趋近于单质点模

型的时程分析结果, 且相对也更保守(见图2)。在今后的详细设计中上海核工院拟打算采用该方法作多组时程的非线性时程分析。

### 5.2.3 隔震课题策划中对隔震设计中大位移的处置

CAP 系列机组的设计, 由于不会出现重要厂用管道破断可能引发严重事故, 介除了对核安全的最大担忧。但核岛中尚有 8~9 根地下管道, 它的破断也会产生放射性污染(可收集在专设托盘中)。上海核工院提出的采用基础隔震垫同时配置按一定阈值释放的闭锁装置的新概念<sup>[9]</sup>, 它使厂址地下管道破断概率大幅减少, 且能够轻松应对基础隔震设计中抗龙卷风难题。

为防止大位移引起的核岛地下部分与隔震支座托盘间可能的碰撞, 设计中会控制两者间有足够的净空。为防止过大位移的陡边效应(cliff-edge effects)止档间隙会控制在隔震支座破断剪应变 $\gamma_2 = 400\%$ 时位移限值之内, 以保证支座的完整性。

## 6 上海核工院核岛隔震课题概况

### 6.1 上海核工院核岛隔震课题的总体安排

上海核工院的 AP1000 系列机组核岛隔震课题经前期两年筹划, 于 2010 年正式开题立项, 因外协经费至 2013 年才落实原因, 于 2016 年 6 月才全部完成。课题共分成五个子课题分别执行:

1) 第一子课题: 非隔震核岛结构固端地基地震的基准分析及地震输入准备(上海核工院)。

2) 第二子课题: AP1000 核岛基础底板隔震的总体概念设计(上海核工院)。

3) 第三子课题: 研发大型高性能基础叠层橡胶隔震支座垫(上海核工院外委上海大学)。

4) 第四子课题: 研发隔震支座相配套的闭锁装置(上海核工院外委上海大学)。

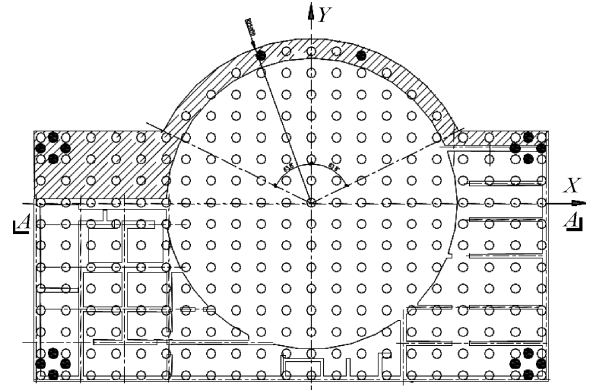
5) 第五子课题: 核岛隔震的效果分析(上海核工院与上海大学共同承担)。

### 6.2 上海核工院核岛隔震课题的主要设计参数

整个 AP1000 机组核岛底板下满布配套隔震装置约 282 套如图 4 所示。

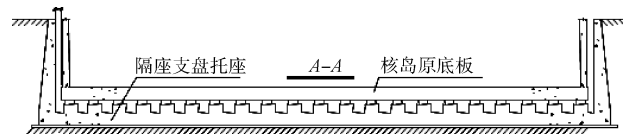
每支座竖向压力为(5~10)MN, 设计工况橡胶拉应力 $<1$  MPa。地基介质为适用于 RG1.60 修正谱的硬地基, 输入时程用以实际大地震记录获得的与谱相匹配的拟合人工时程, 按 ASCE4-98<sup>[12]</sup> 标准分析。自由场 SSE 设计值为 0.6 g(水平向)和

0.4 g(竖向), 核岛上部结构控制在原 AP1000 机组标准设计 0.3 g 以内。楼面谱能被非隔震标准谱包络。闭锁装置打开阈值为水平向 0.20 g 左右。基础处最大相对位移为 41 cm, 支座剪应变为 175%。

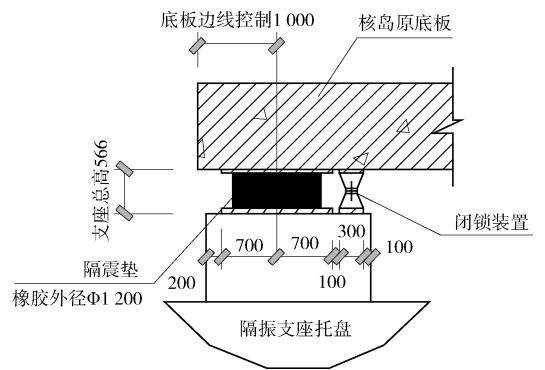


注: 原底板面积 3 015.0 m<sup>2</sup>; 新底板面积 3 414.2 m<sup>2</sup>; 核岛底板以上恒载 1.275 GN; 设计隔震垫 282 套, 每套平均载荷 4.55 MN。

(a) 核岛底板隔震装置平面布置图



(b) 核岛底板隔震装置 A-A 剖面图



(c) 联合装置立面图

图 4 核岛基础隔震装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the seismic-isolated foundation

为应对超设计基准地震的发生, 隔震基础的最大考虑地震为水平向 0.9 g, 竖向 0.6 g, 此时核岛处于裕度地震值 0.5 g 以内。基础最大位移约 74 cm, 支座剪应变的 320%。实体止档间隙为 85 cm(相当于支座剪应变 $\gamma = 360\%$ )。

## 7 结论

本文介绍了近期美国、日本和中国核电厂抗震

设计地震动规范的现状和趋势,以上海核工程研究设计院开展的 AP1000 机型核岛基础隔震设计课题为例,分析了 AP1000 机型核岛基础隔震设计的必要性及总体概念设计内容,研究了美国核管会目前重点关注的核岛基础隔震设计内容以及上海核工程研究设计院的应对策略。总结上海核工院核岛基础隔震设计课题特点如下:

1) 隔震课题使 AP1000 和 CAP1400 系列机组标准抗震能力实现最大化:不改动核岛的原标准设计,使机组地震设计工况提升至 0.6 g 而确保安全。直接以 0.9 g 作为超设计基准工况,保持核岛仍处于原裕度地震 0.5 g 以内。强大的抗震设计能力足以覆盖全世界包括土耳其、伊朗等强震区核电厂。

2) 核岛基础隔震设计的首创性:上海核工院 2009 年首创带闭锁隔震专利,使核岛地下管道破断概率大幅减少。按美国三代核电抗震标准,以 NRC 对隔震设计要求,首次以核岛基础隔震设计提升 AP1000 机组抗震能力,实现上海核工院从技术引进到创新发展之路。首次以 Incoherence 先进分析技术来揭示核岛隔震结构竖向地震反应的折减,打破基础隔震中竖向地震没法减轻的传统,消除人们的过分担忧。在隔震的非线性分析领域,上海核工院勇于独立探索,取得与国内权威团队相一致的平行分析成果,使上海核工院从隔震设计的外行很快取得主动。

#### 参考文献:

- [1] 夏祖颢. 美国核电厂抗震主系统分析要求的近期变化——SRP3.7.2 1989 版、2007 版及 2013 版主要对比 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(4): 1-7.  
XIA Z F. Recent changes of seismic system analysis SRP 3.7.2 in 1989, 2007 and 2013 versions for NPPs in U. S. A. [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(4): 1-7.
- [2] U. S. Nuclear Regulatory Commission. Design response spectra

for seismic design of nuclear power plants: Regulatory guide 1.60 [S]. Washington D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1973: 1-6.

- [3] U. S. Nuclear Regulatory Commission. Identification and characterization of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion; Regulatory guide 1.165 [S]. Washington D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1997.
- [4] American Society of Civil Engineers. Seismic design criteria for structures, system, and components in nuclear facilities: ASCE/SEI 43-05 [S/OL]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2005. [http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784407622\\_fm](http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784407622_fm).
- [5] U. S. Nuclear Regulatory Commission. A performance-based approach to define the site-specific earthquake ground motion; Regulatory guide 1.208 [S]. Washington D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission; 2007.
- [6] KENNEDY R P. Risk (performance-goal) based approach for establishing the design basis response spectrum for future nuclear power plants [R]. U. S. A: RIC, 2006.
- [7] PARK Y J, HOFMAYER C H. Technical guide lines for aseismic design of nuclear power plants; Translation of JEAG 4601-1987 [Z]. Washington D. C.: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1994.
- [8] 山本知史, 古川茂, 岛本龍, 等. 次世代轻水反应堆核电厂隔震技术的开发(PART-1)隔震技术的开发计划[C]//日本建筑学会大会学术论文集. 日本: 出版者不详, 2010: 1131-1132.
- [9] 夏祖颢, 王明弹, 王晓雯. 带闭锁功能的核电厂核岛结构基础隔震装置; 201546235U [P]. 2010-08-11.
- [10] ANNIE K, ANDREW W, MICHAEL C. Technical considerations for seismic isolation of nuclear facilities (draft for comment)[R]. U. S. A.: Office Nuclear Regulatory Research, 2012.
- [11] ANIL K C, MICHAEL F, MASAYOSHI N. Earthquake Engineering and Structural Dynamic [J]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2006-2013.
- [12] American Society of Civil Engineers. Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary: ASCE 4-98 [S]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2000. [http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784404331\\_fm](http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/9780784404331_fm).

(责任编辑 郑文棠)

