

莊初立, 张永山, 汪大洋, 等. 核电站结构隔震研究进展[J]. 华南地震, 2014, 34 (2): 25-33. [ZHUANG Chuli, ZHANG Yongshan, WANG Dayang, et al. State of the Art of Nuclear Power Plant Using Base Isolation[J]. South china journal of seismology, 2014, 34(2): 25-33.]

核电站结构隔震研究进展

莊初立, 张永山, 汪大洋, 魏陆顺, 韩启浩
(广州大学土木工程学院, 广州 510006)

摘要: 基底隔震已经大量应用于一般民用建筑中, 被认为是在剧烈地震中保护建筑物最具发展前景的技术之一, 但对于核电站这类特殊的建筑物应用较少, 且研究比较薄弱。介绍了核电站水平及三维隔震装置的研发及性能测试, 概述了核电站隔震系统抗震性能的研究进展和核电站隔震设计规范, 指出了在核电站中应用隔震技术还有待解决的问题, 对今后核电站隔震的研究提出了一些建议。

关键词: 基底隔震; 核电站; 隔震装置; 抗震性能; 规范

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2014) 02-0025-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.02.004

State of the Art of Nuclear Power Plant Using Base Isolation

ZHUANG Chuli, ZHANG Yongshan, WANG Dayang, WEI Lushun, HAN Qihao
(Department of Civil Engineering of Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The base isolation has been widely used in general civil building, which is considered as one of the most promising technology to protect building from violent earthquakes. But it is seldom used in this special structure of nuclear power plant, and the research on it is rather weak. This paper introduces the research and development as well as the performance test of nuclear power plant horizontal and three-dimensional seismic isolation devices, and summarizes seismic performance research advances about nuclear power plant seismic isolation systems. Finally, seismic design code for nuclear power plant is presented, furthermore, some suggestions on nuclear power plant isolation for future research are put forward.

Keywords: Base isolation; Nuclear power plant; Isolation device; Seismic performance; Code

收稿日期: 2014-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378135); 教育部博士点基金项目(20134410120003); 广东省自然科学基金项目(S2012040007215)

作者简介: 莊初立 (1990-), 男, 硕士研究生, 从事结构振动控制研究, E-mail: cholap@163.com

通信作者: 张永山 (1964-), 男, 教授, 博士, 从事工程抗震和计算软件研究.

0 前言

核能发电不像化石燃料发电那样排放巨量的污染物质到大气中,核电是一种清洁的能源,正常运行的核电站排放的放射性辐射并不大,发展核电可以有效改善我国的能源供应结构,在应对气候变化等方面发挥积极的作用。根据国际原子能机构 2011 年公布的最新数据,目前全球正在运行的核电机组共 442 个,核电发电量约占全球发电总量的 16%,正在建设的核电机组 65 个。截止至 2012 年我国核电发电量为 980 亿千瓦,不到全国发电总量的 2%^[1],与世界核电发电量的平均水平相距甚远,发展清洁高效的核能是中国能源发展的长期战略选择。

核电站结构的抗震能力是保障核电安全的重要内容^[2-3]。近些年来地震活动频繁,对核电站造成了一定的影响,而这些影响大多是核电站抗震性能不足的体现,如 2007 年日本新潟县发生里氏 6.8 级地震,此次地震实际记录地震动超过柏崎刈羽核电站设计基准地震动,比该厂地震设计基准高出甚多,地震发生后,4 个运行机组均能实现自动停堆,但引发了多起核安全事故。2011 年日本“3.11”大地震引发福岛两座反应堆发生故障,其中第一核电站在地震后发生爆炸,造成放射性物质传播。

隔震技术已经是一种成熟的技术,能有效的减轻地震作用,在建筑工程、桥梁工程中得到广泛的运用^[4-9],如昆明新机场航站楼^[10]、芦山县人民医院^[11]、港珠澳大桥^[12]等。基础隔震技术是指在整個结构底部与基础面之间设置隔震装置,柔性隔震层能降低上部结构的地震反应,使结构遭受地震破坏的概率大大减小。核电站结构采用隔震技术能提高核电站全系统的抗震性能,可以有效解决地震不确定性导致的核电站风险,并可以促进

核电站设计和生产的标准化^[13]。

1 核电站隔震装置的研发及性能测试

为了提供温度、压力和屏蔽辐射,核电站的建造一般都使用厚钢筋混凝土墙,这也造成结构非常笨重及刚度大,这些特点也使得核电站隔震的想法能够被实现,核电站结构属于短周期结构可以容易的实现周期延长,而且大刚度的厚钢筋混凝土墙可以在使用隔震时几乎消除上部结构的变形。核电站的设计和建造要求十分严格,对抗震性能要求更高,若核电站采用隔震技术进行设计建造,对于隔震支座要求具备防辐射、防高温等特点,而核电站结构质量极大,这需要有直径的隔震支座,提供所需承载力之外,还必须能够达到更大的位移同时保持支座稳定。

美国能源部支持研究的先进核项目,研究了将隔震技术应用于两个先进的液态金属反应堆,在文献[14]中对钠冷快堆 SAFR(Sodium Advanced Fast Reactor)采用低形状系数的高阻尼橡胶支座(如图 1)进行隔震,支座用螺栓及销钉两种连接方式,测试隔震支座的水平、竖向的性能及破坏形态。试验结果表明,水平及竖向隔震频率分别低于 1 Hz 和 4 Hz,从而有效地避开了大部分设备的固有频率,在安全停堆地震 SSE(safe shutdown earthquake)作用下,支座的侧向位移为 23 cm(191%的剪切变形),此外,用螺栓连接的隔震支座与销钉连接的隔震支座相比,证实螺栓连接的隔震支座具有更大的容许位移和稳定性。

2000 年日本对快中子增殖反应堆 FBR(Fast Breeder Reactor)应用三维隔震技术开展了一项大规模的研究,在文献[15-23]提出了三种隔震装置:①滚动密封式空气弹簧;②钢丝加强型空气弹簧(如图 2);③液压三维隔震装置(如图 3)。采用三

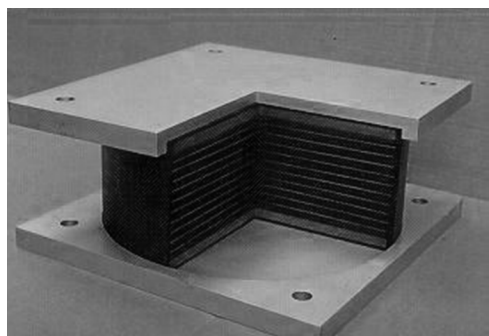


图 1 高阻尼橡胶支座

Fig.1 High damping rubber bearing

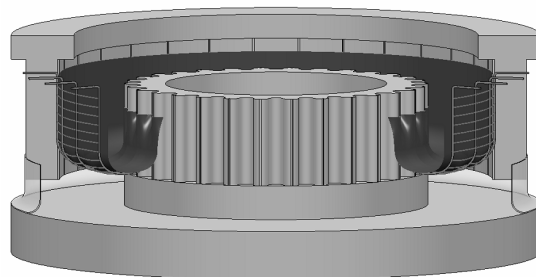


图 2 钢丝加强型空气弹簧

Fig.2 Independent cable reinforced rolling-seal air spring

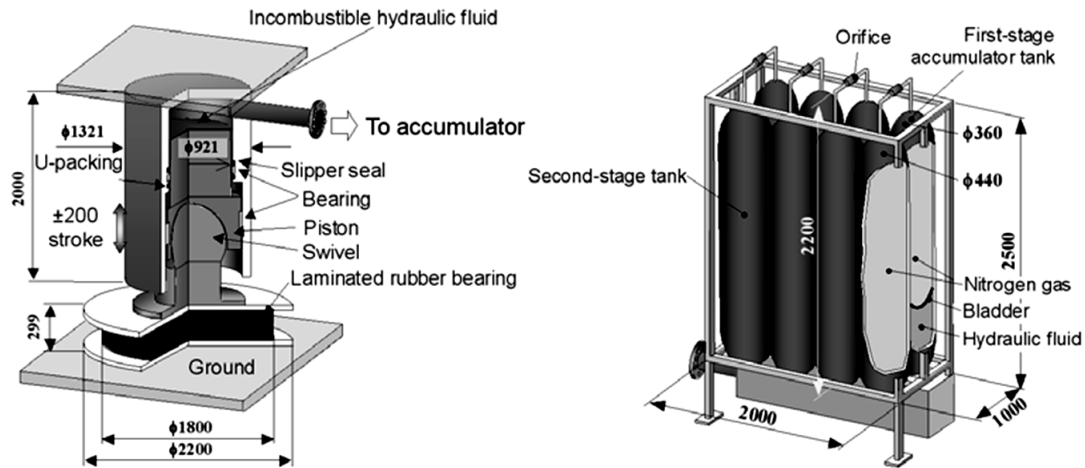


图 3 液压三维隔震装置

Fig.3 The 3D base isolation device with hydraulic system and rubber bearing

维隔震的 FBR 反应堆对隔震装置的竖向频率要求小于或等 1Hz，阻尼比在 20%~40%之间。研究从隔震支座的性能(阻尼比、变形及竖向频率)、系统可靠性、便于维护、经济性等方面，对三维隔震装置进行评估，得出滚动密封式空气弹簧的性能优于另外两种隔震装置，特别是在性能方面适合用于核电站。

韩国对第四代反应堆应用隔震技术开展了研究，其中文献[24]对保障可运输式自持反应堆 STAR-LM(Secure Transportable Autonomous Reactor)开发了一种新型的三维基础隔震支座(如图 4 所示)，文献[25]对韩国第四代堆型 KALIMER (600 MW,Korea Advanced Liquid Metal Reactor)使用的叠层橡胶支座(如图 5)进行性能测试，首先，对隔震支座所用橡胶进行了大量的样本测试，包括剪切动态测试、单轴拉伸试验、等轴拉伸试验及平面(纯剪)试验，再对缩尺橡胶支座进行性能试验，

测试了加载速率、轴向载荷及加载历史对橡胶支座的影响，进行了剪切破坏试验，为橡胶支座实际应用于 KALIMER 反应堆隔震设计提供真实的测试数据。

2 核电站结构隔震的抗震性能研究

目前全世界只有 40 年前设计建造的南非 Koeberg 核电站和法国的 Cruas 核电站^[26-27]使用了基底隔震技术。虽然这两座核电站在经长期使用后均出现了一些问题，Cruas 核电站所使用的合成氯丁橡胶隔震支座，随着使用年限的增加，发生老化，影响其在地震作用下的性能，Koeberg 核电站则是隔震支座连接部位的机械性能不佳而被禁止使用，但不可否认隔震支座应用于核电站的可行性及有效性^[13]。此外，法国南部卡达拉奇地区(Cadarache)正在兴建的两座核电站也采用了隔震

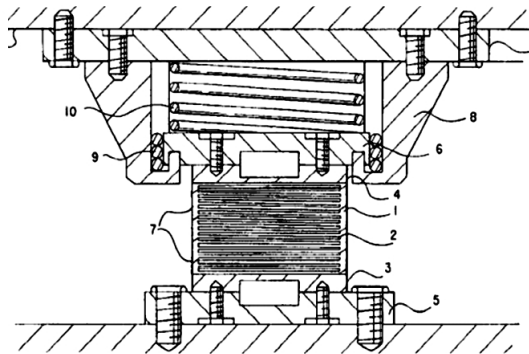


图 4 三维基础隔震支座

Fig.4 The 3D base isolation bearing

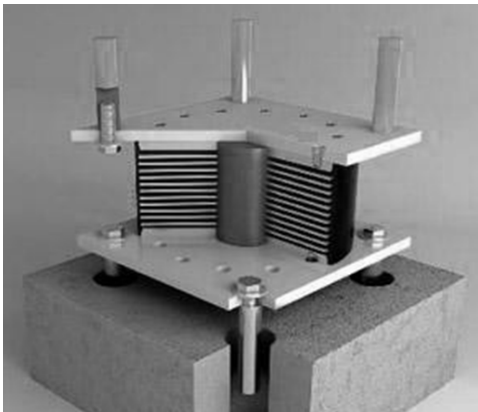


图 5 铅芯橡胶支座

Fig.5 Lead rubber bearing

技术^[28], 尽管在过去 40 年里极少采用隔震技术来兴建核电站, 但是美国、日本及欧洲等国家进行了大量的研究^[14,29-32], 以便将隔震技术应用于核电工程的建设中。

2.1 核电站结构水平隔震抗震性能研究

文献[32]从隔震技术在建筑和桥梁结构的应用中, 指出核电站采用隔震技术在原理上是合理可行的, 通过对核电站假设研究, 得出隔震后能显著降低核电站内部结构的加速度谱, 间接提高了次级结构和设备的安全性。文献[33-34]对隔震后的核电站, 采用数值和物理模拟进行分析, 研究表明, 使用水平隔震后, 能明显降低核电站辅助系统的地震响应。文献[35-36]建立了核电站反应堆结构的数值模型, 对核电站二次系统结构的抗震性能进行分析, 模型采用了 16 种不同参数的隔震支座(摩擦摆支座 6 种、铅芯橡胶支座 6 种及高阻尼橡胶支座 4 种)与传统结构进行时程响应对比。分析结果表明, 对于中级地震及小震, 隔震后能极大地降低二次系统结构的抗震需求, 而对于大震, 减震效果不明显, 使用长周期的隔震装置能把二次系统结构的抗震需求最小化。

文献[37]提出了核电站基础隔震方法和建议, 用有限元分析了核电站在隔震及不隔震情况下的地震响应, 指出隔震后的结构响应是不隔震结构的 1/4~1/5。文献[38]采用型号为 HDS.A900 的铅芯橡胶隔震支座对核电站安全壳进行隔震设计, 对安全壳隔震结构进行数值模拟分析, 分析结果表明, 可以有效地减小结构加速度、底部剪力和相对位移, 且隔震层位移在隔震支座的极限变形之内。文献[39]对核电站混凝土安全壳进行数值模拟, 对比隔震与非隔震安全壳的地震反应, 时程分析结果表明, 安全壳顶点加速度、位移及剪力的最大减震率分别为 81%、93.06%和 88.96%, 很明显隔震系统有效的降低了结构响应, 此外, 隔震前结构主要运动是扭转运动, 采用水平隔震后隔震结构为单纯的侧向平动。

文献[40]介绍了美国通用电气公司为标准化设计液态金属反应堆对 PRISM (Power Reactor Inherently Safe Module)厂房进行隔震设计研究, 隔震概念厂房如图 6 所示, 设计采用 20 个高阻尼橡胶隔震支座支撑 40 000 kN 重的上部结构, 支座直径为 132 cm, 高度 58.8 cm, 形状系数为 23, 由于采用的是高阻尼橡胶支座, 故没有增加附加阻尼, 为结构提供的侧向及竖向基本周期分别为

1.33 s 和 0.05 s。动力测试结果显示, 隔震后显著降低反应堆组件的水平加速度响应谱, 在安全停堆地震作用下, 支座的侧向位移为 19 cm(127%的剪切变形), 因此, 基础隔震能够节省上部结构的建设成本和提高结构的抗震裕度。

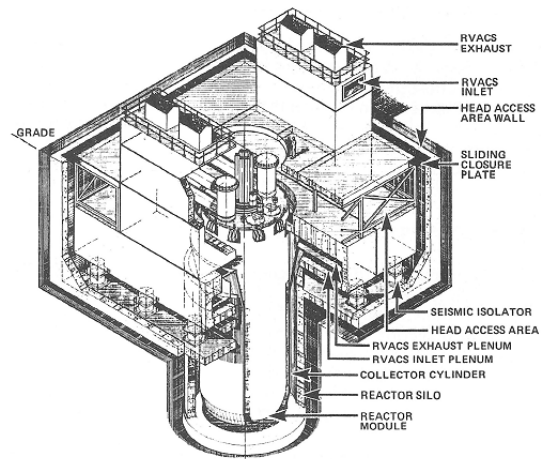


图 6 PRISM 隔震厂房示意图

Fig.6 The 3D schematic of PRISM isolated plang

文献[41]对国际革新安全反应堆 IRIS (International Reactor Innovative and Secure)中的核蒸汽供应系统 NSSS(Nuclear Steam Supply System)结构进行隔震设计研究, 采用基底隔震技术, 在基础板与 NSSS 底板间共布置了 120 个直径为 1 m、橡胶总高度为 84 mm 的高阻尼橡胶支座。动力特性分析结果表明, 采用隔震技术的 NSSS 结构加速度明显降低(如图 7 所示), 相对位移没有明显增加, 而且采用隔震技术后显著改善了地震诱发的堆芯熔化频率。

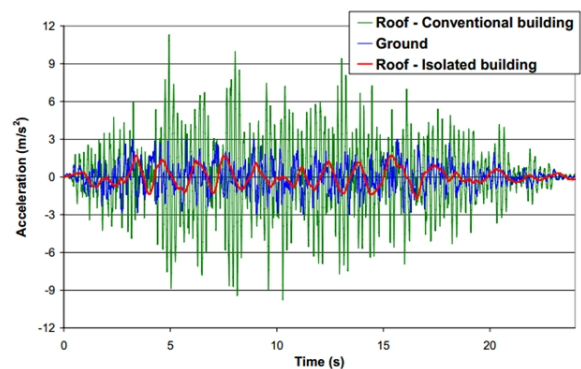


图 7 地面加速度、NSSS 结构隔震前与隔震后顶部加速度对比

Fig.7 Comparison between the ground acceleration and the acceleration at the roof of the NSSS building before and after isolation

文献[25]详细介绍了韩国第四代堆型 KALIMER (600 MW, Korea Advanced Liquid Metal Reactor) 使用基础隔震技术的研究, 对叠层橡胶支座进行力学性能测试, 对反应堆隔震结构进行振动台试验与数值仿真结构对比, 证实隔震反应堆的抗震性能的有效性, 有效的提高了 KALIMER 反应堆的安全性及结构设计经济性, 同时指出三维隔震要比水平隔震更有效果。

水平隔震是最常见的隔震方式, 也是目前唯一应用于核电站的隔震系统, 不仅能够有效的消耗水平地震能量, 减小结构响应, 还能提高核电站次级结构的安全。然而水平隔震也存在着一些问题, 地震动作用是多向的, 水平隔震系统不能消耗竖向地震能量, 水平隔震支座的竖向刚度比较大, 地震作用下可能会产生比较大的效应甚至放大效果。核电站内有着复杂的设备管线系统, 竖向地震作用威胁着核电站设备管线系统的安全, 所以竖向地震作用不能忽略。隔震结构的主要变形集中在隔震层, 隔震系统与非隔震系统间应保持一定的隔震距离, 防止相互间的碰撞, 管线连接应采用柔性接头, 隔震与非隔震系统间的管线连接变形要确保大于隔震层的变形, 这对于设计人员来说是一项大的挑战。此外, 核电站反应堆结构一般都十分笨重, 刚度极大, 难以发挥隔震技术的优越性。

2.2 核电站结构三维隔震抗震性能研究

文献[24]研究了将隔震技术应用于 STAR-LM 反应堆, 采用了两种隔震系统: ①采用水平隔震系统, 高阻尼叠层橡胶支座; ②三维隔震系统, 高阻尼叠层橡胶支座串联碟形弹簧(如图4所示)。结果表明: 与传统结构相比, 水平隔震及三维隔震系统都能有效降低楼层水平加速度, 与水平隔震系统及传统结构相比, 三维隔震系统能降低楼层竖向加速度, 此外, 增加隔震装置的阻尼, 能减小隔震反应堆系统与非隔震结构间的间隙, 但是在 1.5~5 Hz 的频率范围会加大楼层加速度。

文献[42]设计了一套由厚层橡胶隔震支座和油阻尼器组成的三维基础隔震系统, 通过试验检测了三维隔震装置的力学性能, 最后进行了 1/15 缩尺模型的振动台试验, 结果表明, 在水平方向与传统隔震系统具有相同的隔震效果, 而且可以对厂房内部设备和管道进行竖向隔震, 具有较为稳定的振动特性, 提高了核电站结构的抗震能力。

文献[18]为商业 FBR 核电站研发了液压三维隔

震系统, 由一组液压承载缸连接储气装置与一组摇摆抑制装置串联, 并且每个叠层橡胶支座下都有一个承载缸, 共布置 270 个隔震装置, 商业 FBR 的主要隔震规格是水平向及竖向周期分别为 2.8 s 和 2 s, 竖向容许位移为 ± 200 mm, 对反应堆隔震结构进行缩尺振动台试验。试验结果表明, 符合预期的性能目标, 可以明显地抑制摇摆运动, 降低地震响应。文献[19]对滚动密封型空气弹簧和液压摇摆抑制系统进行了振动台试验研究, 试验结果表明: ①隔震装置的特性(固有频率、阻尼系数等)的测试值与设计值几乎相等; ②测试的结构最大反应与预测值相近; ③对于三向地震输入液压摇摆抑制装置能有效控制结构摇摆反应; ④隔震系统能极大的降低竖向加速度(如图8所示), 证实这套三维隔震装置可应用于核电站。

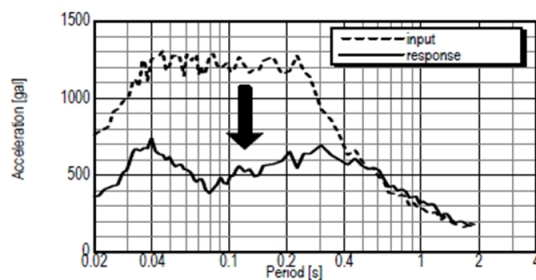


图8 隔震前后竖向加速度谱

Fig.8 Response spectrum in vertical direction before and after isolation

文献[43]为下一代核电站研发了一种三维隔震系统(独立钢丝加强型空气弹簧), 这套系统由钢丝加强型空气弹簧、防摇摆装置(rocking arresters)及粘滞阻尼器组成, 空气弹簧外径、内径、高度分别为 8 m、6 m 及 3.5 m, 水平及竖向的容许位移分别为 1 m 和 0.5 m, 将这套系统应用于中型钠冷快堆(medium scaled sodium cooling type FBR), 隔震装置平面布置如图9所示, 为了验证这个系统的性能进行了振动台试验、结构完整性试验, 研究结果表明, 隔震系统的动力特性、隔震装置的一阶固有频率、阻尼力可以作为设计方法的评估参数, 这套三维隔震系统适用于实际的核能发电厂。

三维隔震技术对于核电站而言是比较理想的隔震技术, 能同时消耗水平和竖向地震能量, 大大提高核电站全系统的抗震性能, 但此项技术也存在着一些缺点, 到目前为止很少将三维隔震技术应用于实际建设中, 主要原因是很难抑制三维

隔震结构的摇摆问题及竖向隔震装置的承载力不足,研发承载力大和稳定力学性能的隔震支座,能够为三维隔震技术在核电站的应用创造良好的条件。

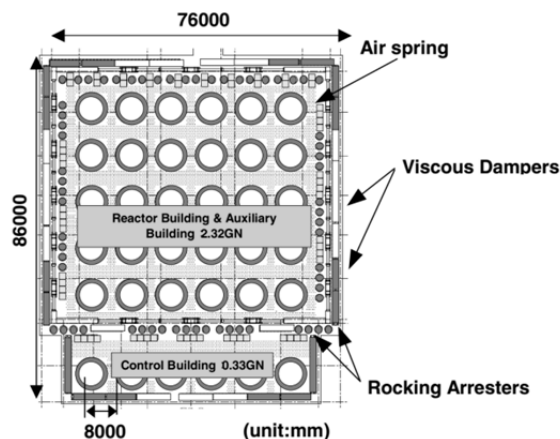


图9 基础隔震系统在实际核电站中的布置

Fig.9 The layout of base isolation system in the actual power plant

3 核电站结构隔震技术规程

隔震技术在核电站结构上的应用,首先面临的问题是隔震设计所需要的核电站隔震结构设计规范。我国现行的《核电厂抗震设计规范》(GB 50267-97)^[44]中没有隔震结构设计方面的内容。而为了保证核电站结构的可靠性,要保证相关规范的可靠和与时俱进。目前我国的核电站抗震规范落后于实际建设需要^[45],近些年来地震活动频繁,若引发核安全事件,将造成重大损失,因此,加快修订我国核电站抗震规范已十分紧迫。

为了推进隔震技术在核电工程的应用,2000年日本电力协会发布了世界上第一个关于核电站结构的隔震设计规范《核电厂隔震结构设计技术指南》(JAEG 4614-2000)^[46];2009年日本核能安全机构发布了《隔震结构审查规则指南》(JNES-SS-1001)^[47]。《核电厂隔震结构设计技术指南》主要讲述了以下几个方面:①对使用隔震技术的核设施按照抗震重要性分为四类:As、A、B、及C,其中As为最高级,C为最低级;②隔震设计与评价的方法;③荷载组合和必需的安全裕度;④隔震支座及耗能装置的性能要求,允许使用三类支座:铅芯橡胶支座、天然橡胶支座加阻尼器、高阻尼支座;⑤辅助系统的设计要求(管道、机械等);⑥隔震支座的质量控制和维护要求。《隔震结构审查规则

指南》所编写的规范条文不仅适用于日本本土也适用于日本以外的国家,增加了竖向隔震的内容,且不指定隔震装置的类型,推荐使用被动隔震装置以防地震后失去厂外电力支持。

美国有着一套完整的核电法规体系,但并没有专门针对核电站隔震设计发布规范,而美国核管会(NRC)相关导则指南(RG)中的一些一般性条款在隔震设计时具有重要的参考意义,RG1.60《核反应堆设计反应谱》^[48]是一本关于核电厂选取地震动的规范,需要指出的是RG1.60设计谱并没有考虑场地土类型对反应谱的影响,对于土层场地和岩土场地采用相同的设计谱,而且RG1.60所确定的控制地面运动具有一定的保守性;RG1.208《基于性能的方法确定特定厂址地震动》^[49]是用来确定指定场地的地震动反应谱规范,核电站设计所采用的安全停堆地震动可以由此得到。NRC推荐RG1.208与ASCE 43-05一起使用对核电站结构进行基于性能的设计^[50],目前,NRC在其发布的一系列核电厂设计相关导则指南的基础上正在制定专门针对核电厂的隔震设计规范^[51]。此外美国土木工程师学会在其新版的ASCE 4中增加了核电站隔震设计的内容^[50],认为低阻尼橡胶支座、铅芯橡胶支座及由重力提供恢复力的滑动支座适合应用于核电站结构,要求采用时程分析对核电站隔震结构进行设计。

4 核电站结构隔震研究有待解决的问题

核电站采用基础隔震技术可以在很大程度上提高核电站的抗震性能,虽然美国、日本等国家对核电站隔震技术进行了大量的研究,并出台了相关的隔震设计规范,但未见其在实际核电工程中应用隔震技术,目前还存在着一些需要进一步研究和改进的方面。

(1) 隔震技术能提供优于传统的抗震方案,但目前国内缺少核电站隔震设计的相关规范,核电站隔震结构的设计、施工、验收、运行缺少规范的指导,无法给核电站设计人员提供设计依据。

(2) 安装于辐射区域的隔震支座,要具有能防辐射,抗热的功能,需要定时检查支座的性能,而检查人员接近的时间有限,不利于诊断支座的性能,目前,缺少具备上述功能的支座及可以远程诊断支座性能的技术。

(3) 核电站内部存在大量复杂的动力设备和管道系统,不同的设备及各类管线,在有限的空

间纵横交错,相互影响,管道的连接处及支座处在地震作用下容易产生应力集中,从而发生破坏,有可能造成核事故或危及核电站的安全,然而目前核电站的研究更多是针对主体结构的抗震性能研究,对于设备和管线抗震性能的研究比较薄弱。

(4) 2011年的日本311地震引发巨大海啸,造成福岛核多站多个机组发生停堆,而应急发电机也因为海啸丧失应急功能,最后引发核泄漏,而我国核电站基本建设在沿海地区,如何应对地震引发的海啸,及沿海地区频发的台风,也是值得研究的问题。

(5) 三维隔震技术能有效隔离水平和竖向地震,能减小传输到结构和部件上的地震作用,而且也会明显降低它们之间的耦合影响,但日前而言此项技术还未成熟,需进一步研发,为核电站的全方位保护提供可能。

(6) 日前我国正大力兴建核电站,内陆发展核能源是必然的选择,而目前对于地震发生的机理并没有完全了解,断裂层带具有潜伏性,近断层地震动对核电站隔震结构抗震性能影响的研究很少。此外,主余震连续作用下核电站隔震结构的抗震性能变化及隔震装置的损伤研究很少。

5 结语

(1) 对核电站内部设备管线及次级结构的抗震性能研究较少。已有的试验研究大多针对核电站主体结构的抗震性能,主体结构的抗震性能并不能反应核电站整体的抗震性能,核电站内的流体系统、部件、管线一旦失效可能会危及到整个核反应堆的正常运作。

(2) 近断层地震动及主余震连续作用对核电站抗震性能的研究尚少。近断层地震动的竖向分量可能大于水平分量且具有脉冲特性,隔震结构对于脉冲型地震较为敏感,在脉冲型地震动作用下,结构底部会产生过大的变形,有可能与周边结构发生碰撞。此外,在主震、余震多次作用下,隔震装置和材料是否能持续工作以保证核电站结构的安全,是值得研究的问题。

(3) 对核电站竖向隔震的研究尚不成熟。与水平隔震技术相比竖向隔震发展缓慢,整体结构采用三维隔震支座时,由于支座刚度较小,地震发生时,如何解决隔震结构的摇摆问题和确保支座的稳定性和安全性,一直是三维隔震长期没有解决的国际前沿课题。

建议:以核电站全系统为研究对象,通过理论分析、数值模拟和隔震结构振动台试验相结合的手段,深入研究核电站隔震结构的减震机理、水平与竖向地震反应耦合效应及其动力响应控制方法,以及在强震作用下核电站内部设备、管线的地震响应规律,简化核电站隔震结构力学模型,提出近似假定的计算模型,建立一套完整的核电站隔震结构的计算模型,建立核电站隔震结构的反应预测方法,为核电站的建造提供有效解决地震不确定性导致核电站风险的技术手段,并可以促进核电站设计和生产的标准化。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家原子能机构. 全球核电站之最及其分布 [EB/OL]/<http://www.caea.gov.cn/n16/n1253/n1448/301715.html>.
- [2] 林皋. 核电工程结构抗震设计研究综述(I)[J]. 人民长江, 2011, 42 (19): 1-5.
- [3] 林皋. 核电工程结构抗震设计研究综述 (II)[J]. 人民长江, 2011, 42 (21): 1-6.
- [4] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997: 38-45.
- [5] Melkumyan M G. Seismic isolation of civil buildings in Armenia [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2002, 4 (4): 344-352.
- [6] Martelli A, Forni M. Seismic isolation of civil buildings in Europe[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2005, 1 (3): 286-294.
- [7] Fu Lin Zhou. Seismic isolation of civil buildings in the People's Republic of China [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2001, 3(3): 268-276.
- [8] Fujita T. Seismic isolation of civil buildings in the Japan[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 1998, 1 (3): 295-300.
- [9] Robinson W H. Seismic isolation of civil buildings in New Zealand[J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2000 (2): 328-334.
- [10] 王曙光, 陆伟东, 刘伟庆, 等. 昆明新国际机场航站楼基础隔震设计及抗震性能分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30 (11): 260-265.
- [11] 周云, 吴从晓, 张崇凌, 等. 芦山县人民医院门诊综合楼隔震结构分析与设计[J]. 建筑结构, 2013, 43 (24): 23-27.
- [12] 宁京, 戴建国. 港珠澳大桥的非线性地震响应分析[J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2011, 31 (6): 31-35.
- [13] 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.
- [14] Tajirian F F, Kelly J M, Aiken I D, et al. Seismic

- isolation for advanced nuclear power stations [J]. *Earthquake Spectra*, 1990, 6 (2): 371–401.
- [15] Inoue K, Fushimi M, Moro S, et al. Development of three-dimensional seismic isolation system for next generation nuclear power plant [C]//*Proceedings of the 13TH World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver: International Association for Earthquake Engineering, 2004.
- [16] Morishita M, Inoue K, Fujita T. Development of three-dimensional seismic isolation systems for fast reactor application[J]. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 2004, 4 (3): 305–310.
- [17] Takahashi K, Inoue K, Morishita M, et al. Development of three-dimensional seismic isolation systems for fast reactor applications [C]// *Proceedings of the 2005 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*. Colorado: The American Society of Mechanical Engineers, 2005.
- [18] Shimada Takahiro, Fujiwaka Tatsuya, Moro Satoshi, et al. Study on three-dimensional seismic isolation system for next-generation nuclear power plant: hydraulic three-dimensional base isolation system [C]// *Proceedings of the 13TH World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver: International Association for Earthquake Engineering, 2004.
- [19] Shimada Takahiro, Suhara Junji, Inoue Kazuhiko. Three dimensional seismic isolation system for next-generation nuclear power plant with rolling seal type air spring and hydraulic rocking suppression system [C]// *Proceedings of the 2005 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*. Colorado: The American Society of Mechanical Engineers, 2005.
- [20] Inoue K, Morishita M, Fujita T. Development of three-dimensional seismic isolation technology for next generation nuclear power plant in Japan [C]// *Proceedings of the 2004 ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. California: The American Society of Mechanical Engineers, 2004.
- [21] Kageyama M, Iba T, Somaki T, et al. Development of cable reinforced 3-dimensional base isolation air spring [C]// *Proceedings of the 2002 ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. Vancouver: The American Society of Mechanical Engineers, 2002.
- [22] Kashiwazaki A, Shimada T, Fujiwaka T. Feasibility tests on a three-dimensional base isolation system incorporating hydraulic Mechanism [C]// *ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conference*. Vancouver: The American Society of Mechanical Engineers, 2002.
- [23] Suara J, Tadashi T, Okada Y, et al. Development of three dimensional seismic isolation device with laminated rubber bearing and rolling seal type air spring [C]// *ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conference*. Vancouver: The American Society of Mechanical Engineers, 2002.
- [24] Yoo B, Kulak R F. Application of seismic isolation to the STAR-LM reactor [C]// *Proceedings of the 10TH International Conference on Nuclear Engineering*. Arlington Virginia USA: The American Society of Mechanical Engineers, 2002.
- [25] Yoo B, Lee J H, Koo G H, et al. Seismic base isolation technologies for Korea advanced liquid metal reactor [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2000, 199: 125–142.
- [26] Malushte S R, Whittaker A S. Survey of past isolation applications in nuclear power plants and challenges to industry/regulatory acceptance [C]// *Transactions of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*. Beijing: International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology, 2005.
- [27] Forni M. Seismic isolation of nuclear power plants [C]// *Proceedings of the “Italy in Japan 2011” Initiative Science, Technology and Innovation*. Japan: European Nuclear Energy Agency, 2011.
- [28] Grandis S D, Forni M, Bruyn D D, et al. Seismic isolation of gen IV lead-cooled reactors [C]// *Transactions of the 21th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*. New Delhi: International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology, 2011.
- [29] Fujita T. Seismic isolation rubber bearing for nuclear facilities [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1991, 127 (3): 379–397.
- [30] Kato M, Sato S, Shimomura I. Utilities/Industries joint study on seismic isolation systems for LWR (Part I) experimental and analytical studies on seismic isolation systems [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1991, 127: 303–312.
- [31] Martelli A, Mason P, Forni M, et al. ENEA activities on seismic isolation of nuclear and non-nuclear structures [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1991, 127 (3): 265–272.
- [32] Buckle I G. New Zealand seismic base isolation concepts and their application to nuclear engineering [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 313–326.
- [33] Fan F G, Ahmadi G. Seismic responses of secondary systems in base-isolated structures [J]. *Engineering Structures*, 1992, 14: 35–48.
- [34] Kelly J M. The influence of base isolation on the seismic response of light secondary equipment [R]. Berkeley, California: California Univ., Berkeley, Earthquake Engineering Research Center, 1982.
- [35] Huang Y N, Whittaker A S, Constantinou M C, et al. Seismic demands on secondary systems in base-isolated

- nuclear power plants [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007, 36: 1741–1761.
- [36] Huang Y N, Whittaker A S, Kennedy R P, et al. Assessment of base-isolated nuclear structures for design and beyond-design basis earthquake shaking[R]. Buffalo, NY: Technical report MCEER-09-0008, 2009.
- [37] Sun L, Gu F Y. A primary study of base isolation technology in NPP[C]// 15th SMiRT. K17-2. Korea, 1999: 359–365.
- [38] 侯钢领, 陈树华, 李冬梅. 核电厂安全壳隔震减振分析[J]. *核动力工程*, 2011, 32 (增刊): 76–79.
- [39] Chunfeng Zhao, Jianyun Chen. Numerical simulation and investigation of the base isolated NPPC building under three-directional seismic loading[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2013, 265: 484–496.
- [40] Tajirian F F, Kelly J M, Gluekler E L. Testing of seismic isolation for the PRISM advanced liquid metal reactor under extreme loads[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. San Francisco: International Association for Structural Mechanics in Reactor Technology, 1989.
- [41] Formi M, Poggianti A, Bianchi F, et al. Seismic isolation of the IRIS nuclear plant[C]// Proceeding of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference. Prague Czech: The American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [42] 王涛, 王飞, 丁路通. 核电厂三维隔震技术的理论和试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2012, 45 (增刊): 238–242.
- [43] Kageyama Mitsuru, Hino Yoshihiko, Moro Satoshi. Study on three-dimensional seismic isolation system for next generation nuclear power plant: independent cable reinforced rolling-seal air spring[C]// Proceedings of the 2004 ASME Pressure Vessels and Piping Conference. California: The American Society of Mechanical Engineers, 2004.
- [44] 中华人民共和国建设部. GB 50267-97 核电厂抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1998.
- [45] 钱国桢, 孙宗光, 倪一清. 对现行核电站抗震设计规范中若干问题的讨论与建议[J]. *工程抗震与加固改造*, 2012, 34 (6): 111–115.
- [46] Japan Electric Association. JEAG 4614-2000, design and technical guideline of seismic isolation structure for nuclear power plant[S]. Japan: Japan Electric Association, 2000.
- [47] Japan Nuclear Energy Safety Organization. JNES SS-1001, regulatory guideline for reviewing seismic isolation structures (2009 Edition) [S]. Japan: Japan Nuclear Energy Safety Organization, 2009.
- [48] Nuclear Regulatory Commission. Regulatory guide 1.60, design response spectra for seismic design of nuclear power plants[S]. Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission, 1973.
- [49] Nuclear Regulatory Commission. Regulatory guide 1.208, a performance-based approach to define the site-specific earthquake ground motion [S]. Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission, 2007.
- [50] 周志光. 核电厂隔震设计相关规范的现状及发展[J]. *结构工程师*, 2013, 29 (5): 180–187.
- [51] Mahin S A. Seismic isolation of NPPs [C]. Berkeley, California: Workshop on Seismic Research Topics for Nuclear Facilities, 2012.