

文章编号: 1000-1301(2012)01-0001-10

核电工程应用隔震技术的可行性探讨

谢礼立^{1 2}, 翟长海²

(1. 中国地震局 工程力学研究所 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 本文旨在观察和分析有关基底隔震技术在核电工程中应用的相关问题, 重点讨论如何将此类已经相当成熟的技术应用于核电这一类十分特殊、十分重要、十分敏感而又十分复杂的工程中。文中指出隔震技术有很多优点, 可以整体改进核电工程的安全性和可靠性, 有利于促进未来核电厂设计和建造的标准化, 缩短建设时间, 降低建厂的初始投资和生命周期中的运行成本。同时也指出要在核电工程中应用隔震技术还需要在隔震系统的设计、施工、采购、测试以及质量控制和质量保证等方面解决一系列科学和技术上的问题, 更要注意改变目前尚缺乏将这一类技术应用于核电工程的各种规范和标准的局面。

关键词: 核电工程; 核电厂; 基底隔震; 质量保证和质量控制; 整体隔震; 抗震设计; 超限设计

中图分类号: TU351.1; TL48; TU315.92; TM623

文献标志码: A

A prospective study on applicability of base isolation in nuclear power plants

XIE Lili^{1 2}, ZHAI Changhai²

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: This paper is to review the present-status of application of seismic base isolation in nuclear power plant (NPP), discuss the related issues of applicability of this technology to NNP structures characterized by the particular importance, special sensitivity and very complicated configuration, and look into the prospect of NPP provided with the seismic base isolation. It is pointed out that the base isolation is a mature technology that can benefit the NPP in resisting the potential severe earthquake and facilitating the standardization of NPP design and construction, as well as reducing the initial and life-cycle cost. It is also emphasized that there are still a number of bottle-neck problems in base-isolation to be solved to receive the acceptance from the NPP industry and regulatory for deployment in the NPPs.

Key words: seismic base isolation; nuclear power industry; nuclear power plant; quality-guarantee and quality-control; beyond design ground-motion

引言

基底隔震是一项成熟的技术, 在世界各地得到了广泛的应用, 不仅在地震区的建筑与桥梁工程中得到了大量的应用, 而且在许多重要的基础设施和重大关键项目中得到了应用。据估计全世界已经有上万栋的各类结构使用了这类技术^[1], 但是隔震技术要直接应用于核电工程目前还受到许多限制。从理论上讲, 隔震

收稿日期: 2012-02-10; 修订日期: 2012-02-15

基金项目: 地震行业科研专项经费项目(201208013); 中国工程院咨询研究项目(2011-XZ-25)

作者简介: 谢礼立(1939-), 男, 教授, 中国工程院院士, 从事地震工程及安全工程研究。Email: llxie@iem.cn

技术的优点不仅可以在核电工程的抗震安全中得到充分的发挥,而且还能使核电工程获得许多潜在的好处,其中最重要的是可以改善核电厂的整体可靠性和安全性。这是因为采用了基底隔震技术可以使核电厂的主要结构和设备的抗震设计不必拘泥于设计地震动的大小而实施标准化的作业。也就是说,当设计地震加速度峰值发生变化时,只需通过选择相应的隔震系统来调整其抗震能力,无需改变核电结构本身。而标准化设计必将加速核电厂的设计和施工进度,进而降低设计和制造的成本。此外,由于采用了基底隔震措施,还可以在设备、管道和各种连接件时实现真正的去耦化,从而使设计简化,因为这时只需要考虑在标准化厂房上生成的各种楼板谱。最后,即使将核电厂建在地震活动性较高的地区,由于采用了基底隔震技术仍可确保较高的抗震安全性。

可是迄今为止,在全世界所有已经商业运行的核电厂中,只有两座使用了基底隔震技术,这就是法国的 Cruas 核电厂和南非的 Koeberg 核电厂。此外正在兴建的核电厂中也只有两座采用了相应的隔震技术。看来隔震技术目前还没有在核电工程中得到广泛的应用,一个很重要的原因是世界上目前存在的核电厂绝大多数是建于上世纪 70~80 年代,且是采用水冷技术的。这类反应堆的结构十分坚固,刚度大,鲁棒性高,再加上这些核电厂多数兴建在地震活动很低的非地震区,在这种情况下显然很难发挥隔震技术的优越性。但是近来随着核电技术的不断改进,即使仍然采用水冷式的,例如 IRIS(International Reactor Innovative and Secure) 反应堆和 4S(Super Safe, Small and Simple) 反应堆,由于它们的体量和刚度已明显减小,隔震技术的优越性才得以彰显,成为不二的选择。

与此截然相反的是,几乎在所有的快堆中,诸如:先进的液态金属反应堆(ALMR, Advanced Liquid Metal Reactor), 新型的小模块反应堆(S-PRISM, Power Reactor Innovative Small Module) 韩国的先进液态金属反应堆 KALIMER(Korea Advanced Liquid Metal Reactor), 快中子增殖示范反应堆(DFBR, Demonstration Fast Breeder Reactor), 可安全运输的自理式液态金属反应堆(STAR-LM, Secure Transportable Autonomous Reactor-Liquid Metal) 和欧洲快堆(EFR, European Fast Reactor) 都毫不例外地使用或计划使用隔震技术。究其原因,一方面也是因为这些新型的反应堆结构都采用了相对柔性的结构和部件,在地震作用下它们都会放大地震的破坏作用,另一方面也都希望新开发的反应堆能有朝一日被应用到高地震活动性地区,因此就不得不诉求于使用先进的隔震技术来减小地震的影响。遗憾的是上面提到的这一系列采用了隔震技术的核设施都仍在设计阶段,迄今尚未正式运行,因此仍然缺乏有关它们的详细设计或实验数据。

1 基底隔震技术的发展和优点

基底隔震又称基础隔震,是指在结构底部与基础面之间设置某种隔震装置,既能很好地承担结构的竖向荷载,又因它的侧向刚度较低,能够增大结构的自振周期和减小上部结构的地震反应,从而可确保上部结构的安全,使之免遭或少遭地震的破坏。目前,隔震装置通常是由橡胶支座和阻尼装置构成。

基础隔震的概念最早是由日本学者河合浩藏于 1881 年提出的,建议在搁置建筑物的混凝土基础下部放置几层圆木,以削弱地震通过混凝土基础向上传递的能量;之后 1909 年美国的 J. A. 卡兰特伦茨,1921 年的美国 F. L. 莱特,1924 年日本的鬼头健三郎都先后提出了在建筑物的柱脚与基础之间插入轴承的隔震方案。1927 年,日本的中村太郎提出了加装阻尼吸能装置的想法,以及上世纪 60 年代我国的李立等都在这个领域进行了有益的探索。

作为现代意义上具有工程应用价值的隔震技术发轫于 20 世纪 60~70 年代,这是与叠层橡胶垫、铅芯叠层橡胶垫、高阻尼橡胶垫以及各种阻尼器的研发成功,并逐步发展成为主要的隔震装置密不可分的。新西兰于 1981 年建成的建筑总面积达 17 000 m² 的 4 层威廉克雷顿大楼,是世界上第一个采用铅芯橡胶支座的结构;之后日本在 1982 年建成有 6 个叠层橡胶支承的 2 层民宅,美国于 1985~1986 年在 Foothill 地区利用具有 10% 阻尼的合成橡胶支座建成了总建筑面积也是 17 000 m² 的 4 层办公楼等等。目前世界上已有 30 多个国家开展这方面的研究,这项技术已被应用在桥梁、建筑,甚至是核设施上。迄今为止世界上(包括我国在内)已建成了约 10 000 多个基底隔震工程^[1],其中 80% 以上采用叠层橡胶隔震垫。

我国对橡胶隔震支座的研究和应用起步较晚,但发展较快。80 年代以后,基础隔震研究开始在我国得到重视,不少学者对国际上流行的基础隔震体系进行了研究和引进,取得了较大的进展。1993 年在汕头建成第一幢叠层橡胶垫隔震房屋,1994 年在安阳建成无黏结叠层橡胶垫隔震房屋。目前我国已建造了 4 000

余幢各类基础隔震体系的建筑物,有叠层橡胶垫隔震体系、砂垫层滑移摩擦体系、石墨砂浆滑移体系、悬挂隔震结构体系等,其中绝大多数是采用黏结型叠层橡胶垫。现代隔震技术经过30年的历程,得到了广泛的应用,目前在日本等国家隔震技术已经成为主导的建筑技术;2008年,我国应用隔震的建筑面积首次超过日本。

基底隔震技术之所以能快速发展,和它在地震时表现出来的优良性能是分不开的。具体来说,它有下列优点:

(1) 能有效减轻结构的地震反应。国内外大量建筑物的强震观测资料以及室内振动试验结果或数值分析的结论都一致表明采用隔震技术的结构在强震作用下的地震反应只有传统抗震结构的 $1/6 \sim 1/3$ 。

(2) 能使结构在地震中有较好的抗震性态。由于隔震层能有效地减小从地基上传的地震力,因此在强烈地震作用下,上部结构仍能处于弹性工作状态,可确保结构具有良好的性态和室内人员的安全,以及维持结构的正常功能。

(3) 采用隔震技术的建筑造价一般来说仍处于相对合理的水平。据初步估计,使用隔震装置需要增加造价约5%,但是因为有了基底隔震技术可以降低抗震设防的费用,以致它的建筑总造价并没有明显提高,在高烈度区总造价有时还能降低。

(4) 震后的修复工程量较小,也比较容易进行,有时根本不需修复即可正常使用。

2 基底隔震技术在核电工程中的潜在优势

由于核电工程要求高安全性,因此大大地增加了设计、施工和运行的难度,但却为隔震技术在核电工程中的应用提供了机遇,带来许多潜在的优点。

(1) 可以改善核电工程的整体可靠性和安全性。因为采用了隔震技术可有效地大幅减小上传的地震力,使核电工程上部结构的抗震设计对设计地震动幅值就不再那么敏感,就为核电结构抗震设计迈向标准化提供了重要的前提。当设计地震加速度幅值在一定范围内变化时,可以简单地通过选择相应的隔震系统来满足这种变化,而不需改变结构的设计。根据同样的原理可知采用隔震技术的核电厂要比非隔震的核电厂对地震的作用有更大的安全边际。

(2) 可以在设计设备管道和各种组件时实现去耦化。因为采用了基底隔震技术,在对核电厂的各种设备、管道和各类组合件进行抗震设计时,可以只考虑和使用在基底隔震的标准化厂房上产生的各种楼层反应谱,使它们的设计大大简化。核电工程(厂)结构极其庞杂,不同构件、部件以及各类管道和电缆,乃至支撑它们的基础在有限的空间纵横交叉,相互影响。采用了基底隔震技术不仅可以减小传输到这些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,也有利于核电工程设计的标准化,促使核电工程的设计和施工成本降低,进度加快。

(3) 可以为高烈度地区建设核电厂提供解决方案。按照美国核管理委员会(核管会)导则 RG1.165 (NRC,1997)的要求,核电厂应该采用重复期为100 000年的地震动作抗震设计。这对于许多拟建核电厂的厂址(这很可能是采用新一代核电设施的候选场地),特别是在美国中部和东部,相关的设计地震动^[2]是相当高的,在这样的场地兴建核电厂的费用极其昂贵,甚至有时是不可能的。在我国虽然对核电厂只规定采用重复期为10 000年地震动做抗震设计,也同样会使我国广大地区建设核电厂受到许多难以逾越的技术和经济上的障碍。而隔震技术就有可能成为解决这一棘手问题的有效方法。

(4) 易于应对核电厂抗震设计中不确定性因素的影响。采用基底隔震能有利于解决核电结构在抗震设计中遇到的许多不确定性因素的影响。如最近在对美国中部和东部未来拟建核电厂的地区所开展的地震危险性研究表明,在它们的场地相关设计谱的高频段(有的地方还同时在中频段)的谱值要比美国核管会编制的导则 RG1.60 规定^[3]的值有所增加。在我国也同样发生过类似的问题,上世纪90年代我国地震专家在编制我国核电厂抗震设计规范时,也发现按照中国地震危险性分析获得的设计谱在高频和中频段的谱值要高于美国规范规定的值。虽然高频分量的增大对结构的地震反应可能意义不是很大,可是对这一类问题终究还未做很充分的研究,高频谱值的增大会带来多大的影响尚无最终的结论,但是采用了基底隔震技术,这些问题就能容易解决。除此之外,在考虑大型基础下可能存在的输入地震动的不均匀性影响时,或要考虑地基-基础-结构相互作用中的参数不确定性的影响时,都会给设计带来众多的麻烦。但是如果采用基底隔

震技术,这些麻烦都能迎刃而解,使问题得到简化^[4]。

如上所述,现代基底隔震技术已经是一门十分成熟的技术,而且一旦核电工程应用了这类技术,能比其它工程获取更多的优势。可是世界核电工业,尤其是美国的核电工业和核电监管机构对这项技术仍然持十分谨慎的态度,长期以来一直停留在仔细地总结以往使用基底隔震技术的经验,小心翼翼地鉴别可用于核电站的基本隔震技术(包括经改进的技术),反复地考察和论证一旦使用这项技术时可能需要的种种独特的维护和测试内容。核电业界及其监管部门对使用现代隔震技术持如此谨慎的态度,究其原因不外乎(1)核电工程要求的安全性和可靠性远远高于其它工程;(2)核电工程面临的环境要比一般的工程更为复杂,它不仅受到环境因素的严格制约,更会担心造成环境潜在放射性污染的危险;(3)核电厂内部的结构和设施及其相互之间的联系和制约要比一般工程更为复杂和脆弱。本文旨在观察和研究各方面的专家针对隔震技术在核电厂应用的前景所持的观点和态度,以期获得能反映各方面的比较全面和统一的意见,促使隔震技术在核电工程中尽早得到应用。

3 世界上已经采用隔震技术的核电厂 经验、教训和问题

迄今为止世界上已经建成并正式投入商业运行的核电厂中只有两个电厂共计六个压水反应堆(PWR)采用了隔震技术:这两个厂一个在法国,另一个在南非^[5,6]。

法国的 Cruas 核电厂始建于1978年,先后在2003年和2011年与我国秦山核电厂建立姐妹厂关系,是世界上第一个使用基底隔震技术的核电厂。Cruas 核电厂于1983~1984年间建成并交付使用,为整个法国提供约4%~5%的电力,采用罗纳河中的水进行冷却,全厂有1200个工人,占地148公顷。该厂设有4座900兆瓦总共3600兆瓦的压水反应堆,每个反应堆都安放在1800个氯丁橡胶隔震垫上,每个橡胶垫的尺寸为500×500×65 mm,其中第4号反应堆已于2009年12月1日停止运行。该核电厂采用隔震技术的初衷是因为负责该电厂设计的法国电力公司(Electricité de France, EDF)为了将另一个用在地震活动性较低地区(设计地震动SSE为0.2 g)的反应堆结构的现成设计直接应用到地震活动性较高的 Cruas 地区(设计地震动SSE为0.3 g),便采用了这个应对措施。

在南非的 Koeberg 核电厂是非洲大陆唯一的一座核电厂,2010年与我国大亚湾核电厂建立姐妹厂关系,该厂和法国 Cruas 核电厂(图1)的情况基本相似,也是出于相同的原因才采用基底隔震技术,厂址的设计地震动SSE也为0.30 g。它们将两个反应堆体安放在2000个氯丁橡胶垫上,每个橡胶垫的尺寸为700×700×100 mm,不过在 Koeberg 核电厂采用的隔震垫块的上下侧都安装了一个滑动面,下表面由铅-铜合金板组成,上表面由抛光的不锈钢板做成。当上下层发生滑动时,可确保传递到反应堆压力容器上的侧向力不会超越滑动界面之间的摩擦力。



图1 法国 Cruas 核电厂的4座压水型反应堆^[6]

Fig. 1 4 PWRs of Cruas NPP in France^[6]

可是经长期使用后,这些隔震垫所表现出来的性能表明不适宜在核反应堆及其附属设施中继续应用。法国 Cruas 核电厂的隔震垫是合成氯丁橡胶制成的,容易发生老化现象,随着使用年限的增加,橡胶会变硬,隔震垫的性能发生变化。而南非 Koeberg 使用的具有双金属界面的隔震垫也因为它们的机械性能不佳,被禁止使用。

此外,继法国的 Cruas 核电厂和南非的 Koeberg 核电厂之后,在法国的卡达拉其地区(Cadarache, France)

还有两个正在建设的核电厂也使用了隔震技术,其中之一为遽尔思-呼拉威兹反应堆(Jules Horowitz Reactor, JHR),它采用了195个氯丁橡胶隔震垫,每个橡胶垫的尺寸为 $900 \times 900 \times 181$ mm;另一个是国际热核实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor)也采用了类同的隔震技术。

前面已经提到由于压水型反应堆的外部结构坚固,刚度大,很难发挥隔震技术的优越性。不过随着新的反应堆结构的出现,如4S超级安全小型反应堆(Super Safe, Small and Simple)和IRIS国际新型安全反应堆(International Reactor Innovative and Secure),虽然也仍然采用水冷式塔,也都采用了基底隔震技术。因为它们都具有体量小,质量和刚度都远小于现有的堆型,有利于发挥基底隔震技术降低地震反应,减小地震荷载,确保核电厂安全的功能。

其中4S超级安全小型反应堆是一个千兆瓦级的反应堆,由日本的东芝电器公司和美国的西屋电气公司共同研制开发,专门为美国阿拉斯加高地震活动性地区噶乐纳(Galena, Alaska,设计地震加速度峰值为SSE: 0.3g)建设核电厂量身设计的,它所采用的隔震系统是由20个大型铅芯橡胶垫构成,系统水平方向的自振频率为0.5 Hz。整个系统是按照日本电力协会导则JAE 4614-2000设计的,不过这个装置迄今尚未获得美国核管会的批准^[5,6]。

IRIS国际新型安全反应堆(International Reactor Innovative and Secure)是由日本东芝电气与美国西屋电气共同牵头的一个多国合作项目。反应堆的隔震系统由意大利电气公司、意大利米兰理工学院以及比萨大学联合建议并共同设计的。在2006年到2010年的5年中,他们针对这种新型核反应堆研制出由99个高阻尼硬橡胶支座构成的基底隔震系统,每个支座的直径为1~1.2 m,橡胶的剪切弹性模量为1.4 MPa,整个隔震系统的横向自振频率为0.7 Hz,橡胶支座在极限地震SSE=0.3 g作用下的侧向变形为10 cm^[7]。

4 针对隔震技术应用于核电工程所开展的研究工作

尽管各国对隔震技术用于核电工程还存在众多的疑虑,但是环绕这个命题的研究工作始终没有停止过,其中包括:

(1) 新型隔震系统与新型隔震垫材料的研发

在1998~1999年期间,加拿大原子能有限公司AECL,也就是加拿大的核蒸汽发生系统供应商(NSSS, Nuclear Steam Supply System: 核蒸汽供应系统)在土耳其的Akkuyu核电项目竞标中曾积极倡导使用基底隔震技术,他们采用聚四氟乙烯作为滑动式隔震垫的材料,可以承受较高的辐射剂量且照射后的性能没有明显的恶化。此外,日本、美国和意大利等国家还开发了高阻尼天然橡胶或人工橡胶的隔震垫,各种尺寸的铅芯橡胶垫以及硬质橡胶的隔振垫等。

(2) 将基底隔震技术应用于新一代核反应堆开展的研究工作

这里所说的新一代核反应堆主要是指快堆,也就是快中子反应堆。目前还没有一个实际运行的快堆使用了基底隔震技术,但是业界都看好基底隔震技术在快堆中具有很大的应用前景。随着科技的发展,新一代的更加可靠更加安全的反应堆正在不断地出现,而它们的设计和建造要求也更为严格。一般来说它们在构造上和传统的反应堆结构具有明显的不同,新一代的反应堆结构具有较大的柔性,因而反应堆在地震荷载作用下的安全问题就被更加关注,尤其是采用铅冷类反应堆的冷却介质具有较高的密度,因此它们在冷却池中的地震晃动效应备受关注。

美国能源部(DOE)在上世纪80年代曾支持美国通用电气和日本日立公司在一种先进的液态金属反应堆(ALMR)上采用基底隔震技术,以改善核岛的地震安全性,并进一步开发使之能用于不同地震强度的地区。在这个反应堆的原型设计中采用66个高阻尼橡胶支座将整个系统包括反应堆容器,安全壳,反应堆的冷却系统以及所有的辅助系统作为一个整体隔离起来,被隔离的系统总重23 000吨。同时还对这些支座的原型进行了多项测试,目前已知其水平向的自振频率为0.7 Hz,竖向为20 Hz。设计的极限地震SSE的水平向和竖向地震加速度峰值都达到了0.5 g。美国能源部也曾长期致力于开发另一个先进的钠冷快堆(SAFR),同样采用了隔震技术,并在其原型设计中采用了100个人工橡胶隔震支座。为验证其性能,已经对这类隔震器的小比例模型进行了测试^[8]。

早在上世纪80年代,美国通用电气公司就开发出一种小型快堆,称为新型的小模块反应堆(S-PRISM, Power Reactor Innovative Small Module),它的容量为415兆瓦,开发这类反应堆的主要目的是要研发一种可

以广泛应用于不同地区的具有标准设计的模块式反应堆,这种模块式的反应堆被认为能获取高额的商业回报。但是从技术上来说,要使一个具有标准设计的反应堆工程能应用于不同地震活动性的地区,抗御不同强度的地震却是一项巨大挑战,要化解这一挑战目前唯一可选择的途径就是采用隔震技术。这个快堆的隔震系统采用20个高阻尼橡胶块,水平向的自振频率为0.7 Hz,竖向不采用隔震措施,自振频率为21 Hz。据初步研究,它可以使上传的水平地震力降低约2/3。值得注意的是通用电气公司于1994年放弃了这个计划,转而去开发另一个要求更为严格的第4代核反应堆系统。新的系统依然采用基底隔震技术,目前正在努力设法获得美国核管会的正式使用许可。

美国阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory ANL)时下正在研发一种可安全运输的自理式的液态金属反应堆(STAR-LM Secure Transportable Autonomous Reactor-Liquid Metal),它的设计标准甚至超过前述的S-PRISM快堆。这类反应堆的设计地震OBE和SSE分别达到为0.2 g和0.3 g。隔震层是由直径为1.2 m、高度为0.5 m圆柱型橡胶垫构成,隔震系统的水平向自振频率为0.5 Hz,竖向未采用隔震措施,自振频率也是21 Hz。此外,针对这个系统的竖向隔震也正在研发中,估计经竖向隔震后的系统竖向自振频率可降到1.1 Hz。

正在研发中的快中子增殖示范反应堆(DFBR, Demonstration Fast Breeder Reactor)和欧洲快堆(EFR, European Fast Reactor)也都毫不例外地使用或计划使用隔震技术。

由韩国原子能研究院开发的一种KALIMER反应堆(韩国先进液态金属反应堆, Korea Advanced Liquid Metal Reactor),是一类既经济又安全,且又环境良好,可防止核扩散(可防止转化为核武器)的反应堆,也同样采用了基底隔震技术。隔震层设置在地基和反应堆与燃料控制楼之间的底板上,隔震层共使用164个柱状高阻尼橡胶垫,每个橡胶垫的直径为1.2 m;被隔离的结构与周围的固定墙体之间的距离达到了1.2 m,可以确保一旦设计地震动加速度峰值超过1 g时,被隔震的结构不至于和固定墙体发生碰撞。

(3) 应用于超设计地震动情况下的研究

美国西屋电气公司在上世纪的90年代,也对其AP600核电反应堆开展了水平隔震的研究。这项研究主要是针对超出常规的SSE设计地震动标准0.2 g开展的,目的是想进一步使该反应堆应用于设计地震动标准SSE达到并超过0.3 g的日本核电厂。

在美国还有不少能提供先进轻水反应堆的供应商也都希望利用现代隔震技术来应对超限设计地震动。有些厂家还专门针对美国中、东部场地的相关设计谱可能会超出美国核管会指南RG1.60^[3]规定的设计谱,研究使用隔震措施来解决。

(4) 为在核电工程中应用隔震技术准备相应的技术文件

日本政府在过去20年中(1990-2009)曾对隔震技术用于核电工程的研究中提供过多方面的支持。其中最重要的,也是最有别于其它国家做法的是组织各方面的专家编制为将基底隔震技术应用于核电工程为目的的各种相关标准(包括设计、施工、材料以及测试方面的标准),诸如前面曾提到的用以指导4S超级安全小型反应堆设计的日本电力协会制定的“保证结构安全和核电厂设计的基底隔震技术导则”JAEG 4614-2000^[9],以及在1987~1996年间,日本中央电力工业研究院制定和发布的可用于快中子堆和轻水反应堆的隔震技术的相关导则“用于快增殖反应堆的基底隔震导则草案”和“快中子增殖反应堆隔震技术的质量验证测试规定”^[9];此外日本东芝电器也依据上述的各类导则制定了“采用基底隔震技术的质量控制和管理控制指南”。虽然日本目前还没有在核电厂中使用隔震技术,但是他们所制订的各种导则、指南和规定是目前世界上有关核电工程中应用基底隔震的唯一技术标准系统。也因为他们已经有了相应的标准,日本就具备了可以随时在反应堆设施上使用隔震技术的可能性。此外,日本还曾正式提出过申请试图在一个“国际热核实验反应堆”上使用基底隔震技术^[9]。

5 核电工程应用隔震技术有待解决的问题

要在核电厂中采用隔震技术尚需研究解决下列几方面的问题:

(1) 确立明确的隔震技术使用准则

一般来说,核电厂要避开将厂址选择在地震活动性强烈的地区,这时地震荷载往往不是控制核电厂设计的主要因素(核电厂设计通常是由辐射屏蔽、偶发荷载等因素控制的),可是对核电厂中的许多设备、管道,

以及其它与安全相关的物项来说,地震作用就成为首先要考虑的问题。除此以外,一方面由于地震活动性存在极大的不确定性,许多被认为不会发生强烈地震的地区,都先后发生了“意想不到的地震”,另一方面,随着核电厂被广泛地应用,有时不得不将核电厂选择在地震活动性相对较高的地区。在这种情况下,地震荷载就会上升到核电工程设计中起控制作用的因素,这时现代隔震技术就会成为首选的方案。遗憾的是在这种情况下,许多核电工程管理部门以及核电厂设计人员往往会受困于传统习惯的束缚,出现一种“群体的惯性”,明知隔震技术能给核电工程带来新的出路和潜在好处,但由于缺乏明确的核电工程隔震设计准则,以致只能继续选择传统的设计方案。要想使基底隔震技术能在核电厂设计中被早日接受,需要依靠核管理部门、核电工程领域的科研和设计人员的通力合作,在核电厂抗震设计中尽快确立并制定明智的使用隔震技术的准则。

(2) 开发和应用整体隔震技术

一旦在核电厂工程中采用了基底隔震技术,就需要尽量减少穿越在隔震系统与非隔震系统之间的柔性连接。为此最好是能将整个核岛(即,将全部结构及其附属系统的设备)进行整体隔震。这时就需要采用一个公共的整体隔震板(Isolation Diaphragm)来支撑隔震系统上的所有相关的结构和设施,以防止核岛上的不同上部结构之间产生过大的相对位移。采用整体隔震技术的另一个好处是可以减少不同部位之间因不协调的振动带来的不良影响。但是采用整体隔震方法也会引发新的问题,如,核岛上的各种部件的质量和刚度大小不等,空间分布参差不齐,核岛上的不同结构(包括其内部的附属结构)要求的底板厚度也不尽相同,因此会造成施工的困难,也会使各个系统承受的地震作用难以均匀一致,因此采用整体隔震的方案也可能会带来弊病。可是,如对核岛上的各个结构采用分散的,各自独立的隔震势必增加造价,增加施工的复杂性。因此在考虑要不要采用整体隔震时,需要对这些因素作全面的权衡。还有,对于一个质量和刚度分布都不规则的整体隔震板,还一定要采用适宜的隔震支座布局策略,否则会引起隔震支座的不均匀运动,进而激起对隔震系统的上颠(uplift)运动和倾覆运动^[5]。

(3) 隔震支座的寿命、终极分析和运行条件

新一代核电工程的使用寿命将要达到60年甚或更长。因此,要求用在核电工程中的隔震垫能在放射性辐照和高温的环境下(如遇到失去冷却液的事故[LOCA],或动力蒸汽逸散的事故)具有长久的可靠性。如果出现老化迹象,就会使它的隔震能力有所降低,一旦出现这种情况就必须进行所谓的“终极分析”(“end of life” analysis),以评估其尚存的隔震能力。同样,还需要对所有的隔震系统进行严格的监测和精心的维护以确保其持续的可靠性。在任何情况下,一定要使设计的隔震垫在一旦出现寿命终止现象时,还具备一种“缓冲”特性,以确保隔震垫的长期工作性能。

(4) 隔震缝的设置以及隔震条件下的接头和连接件的采购或制造要求

核电厂的辅助设备系统包括动力蒸汽系统及锅炉给水系统等组成的大型系统,在这些系统中会有许多穿越不同隔震系统或隔震系统与非隔震系统之间的部件、管线或各类连接件,因此一方面要采取措施,使它们之间能保持一定的隔震距离或隔震缝,防止这些作相对运动的部件发生碰撞,另一方面也要为它们配上柔性的可以自由伸缩的接头,使其能适应设备之间的相对运动。这些相对运动估计在30~70 cm左右(尤其是在强烈地震区),设计这类部件的防撞接头也是一项重大的挑战。对这些特定物项的采购和设计需要事先计划周密,并要与相关的部门密切协调。从某种意义上说,地震隔震系统的可行性以及隔震垫的选用往往直接取决于是否具备能伸缩自如的接头。

(5) 研发经济有效的竖向隔震技术和竖向隔震系统

对没有采用隔震系统的核电厂来说,结构和附属系统的竖向地震反应也是一项重要的设计内容。对于采用基底隔震的核电厂,就需要研究其在水平地震动和竖向地震动共同作用下的影响,以充分了解竖向地震动对隔震系统地震反应的影响。最期待的是能研发出可以同时隔离水平和竖向地震动的一体式隔震支座。很久以来隔震行业一直在这个方向尝试各种努力,但是,迄今为止尚未找到一种能令各方都普遍接受的一体式的隔震方案。

(6) 超设计标准的设计准则

考虑到地震风险有可能增加(如出现更大的地震动,包括SSE的增大和设计谱值在局部频段上的提高)或性能目标需要提高(如,限制核电厂在遭遇安全停堆地震SSE时的允许变形),或者需要考虑某些特殊荷载如飞行器撞击等因素的影响时,还应该制定“超设计标准”的设计准则。在当前核安全管理部门没有作出

规定时,业主就应主动考虑并选择恰当的应对策略,如,可适当调整或提高防撞缝的大小,以及在隔震支座的滑动量程超过极限值时,可考虑采用弹簧/阻尼器来缓冲传递到隔震垫上的冲击力等。

(7) 为核电工程中的隔震系统制定专门的质量保证、质量控制和测试的规范和标准

用于核电工程的隔震系统也必须遵照核电工程的严格规定,在设计、施工、采购、安装以及运行阶段实施严格的质量保证、质量控制制度,每一步都会涉及测试、验证及其相应的“标准”和“规定”的问题。

制造与供应:首先,在为核电工程中的隔震系统采购材料或提供服务时,需要从质量保证、测试、规范和标准诸因素加以考虑。如在美国,要在核电厂使用隔震系统,必须首先要获得美国核管理委员会(NRC)的批准(按类别的或逐案的批准)和随之而来的监管。如要将隔震垫用于与核安全相关的物项上,必须按照10 CFR 50的QA/QC附录B的要求采购隔震垫。隔震垫生产商往往不习惯于那种在核工业中常见的严谨程序,他们关注的只是根据需要的规模来调节他们的生产能力,而往往忽视核电厂对不同尺寸、不同承载能力和不同性能的隔震垫的供应数量和供应速度的需求。因此就有必要协助生产厂商懂得并适应他们面临的挑战。

测试问题:测试和检验是核电工程在建设和运行过程中保证和控制质量的重要举措,核电工程中的隔震设施和隔震系统自然也需要建立相应的测试和检验系统,其中需要关注和解决问题有如下几点:1)测试的种类:对隔震垫的测试有的是带有针对性的(例如,对滑动隔震垫要做摩擦性质的测试,对橡胶隔震垫要做冲击载荷试验),而另一些是通用的,例如,长期运行的影响、高温和高辐射的影响等;2)测试时间和测试频率:在设计与制造阶段,应确保测试者的资质和制造过程中的测试程序符合要求,特别是测试的时间点以及测试的频率。在隔震垫采购、安装、正式运行前以及运行过程中也需要有专门的标准进行定时的检查、测试和维护;3)在进行监管时一般应按照惯例,需要由独立的第三方专家进行审查和评估以确保质量。

适用的规范/标准:对于应用在核电厂的隔震设施的测试必须制定针对性的规范或标准,以确保质量和安全。这里还是以美国为例,美国许多规范和标准都含有设计和测试隔震系统的技术要求。除了标准ASCE4-98以外,其余的都不是针对核电应用的。尽管如此,在不同的规范和标准中规定的许多条款仍然可以,或者经适当修改后可以用于核电厂的基底隔震系统。美国核管理部门也正在组织制定隔震核电厂测试乃至设计和施工的适用标准或设计导则。以下列出了部分可供使用或参照的规范、标准和细则的目录:

- ASCE 4-98^[10] 这是一份有关分析和评论核电结构抗震安全的文件。该文件的第3.5.6节对隔震结构提出了抗震分析的要求,但目前美国核管会并没有对此表示认同。最近ASCE 4标准委员会又对这一节做了重要的修订(包括对设计地震动时程曲线的要求)。预计ASCE 4的下一版本会以此作为平台,全面接受基底隔震的应用。

- ASCE 7-02^[10] 这是一份与一般建筑结构安全有关的文件“建筑物和其他结构的最小设计荷载”。该文件在第9.13节中根据NEHRP-2000对隔震结构的规定^[12]制定了相应的条款。这些条款并不是针对核电设施的,但仍可以在核电工程中参考应用。

- FEMA 368和FEMA 369^[12],FEMA 450和FEMA 451^[13] 这几个文件都是根据美国国家地震减灾计划(NEHRP)编制的对一般结构的设计规定,其中都包含对基底隔震设计提出的要求^[13]。同样,这些规定也不是针对核电设施应用的。

- NIST报告NISTIR 5800和新ASCE的隔震系统测试标准:1996年由美国土木工程师学会(ASCE)组织编制的隔震系统的测试规范。他们利用美国国家标准与技术研究院(NIST)早期编制的测试导则(NIST Report NISTIR 5800)^[14]作为源文件,内容包括人造橡胶支座和滑动隔震支座的基本性能测试,原型测试和质量控制测试。

随着业界的广泛参与,这些文件中的材料,最终都会逐渐演变为相应的专题报告或管理导则(其中包括测试指南、质量保证和质量控制要求,以及有关辅助设备连接件的规定)。所有这方面的进展必然能为核电厂成功使用隔震系统作出贡献。

(8) 注意相关的施工问题

在核电工程中应用基底隔震技术,总体来说,可减少工程的建设时间,因为这时的上部结构、主体设备以及管道大多已被标准化,有的甚至可以在工厂得到加工,但是仍有一些问题有待进一步研究解决。

整体隔震板(Isolation Diaphragm)的设计和施工问题:若要将核安全壳及其辅助设施采用整体隔震策略,这时就需要一个共同的大型隔震板,本文称之为整体隔震板,因为这个板的形状和构造十分复杂,甚至板

的尺寸和厚度也会有很大的变化,势必造成施工的困难。板的厚度变化虽然可以通过优化使之最小化,但仍然会增加混凝土和钢筋的用量。成本效益分析以评估成本、施工难度、施工时间并取得相应的平衡。如果单从施工的角度来看,会更倾向于对核岛结构采用分块式的隔震板,进行分块式的基础隔震。但这样就要在隔震板和基础之间预留足够的空间,以便能对隔震支座进行检查、维护、监控和更换,这样会导致增加工期和成本,也会因此需要增添大量隔震接头而进一步增加成本。

防撞槽或防撞沟的设置问题:为了适应隔震建筑在地震中可能发生的水平运动,需要在隔震基础的四周留有足够的净空,称之为防撞槽。有时安全壳辅助建筑会部分埋在地下,因此隔震系统也要跟着被安置到地下,这时就要将防撞槽设计成防撞沟。防撞沟和防撞槽的宽度应该大于按照“超设计地震动”计算得到的最大侧向位移。

防撞沟的特殊建筑要求:对于埋在地下或半地下的基底隔震核电厂来说,反应堆和它的附属结构往往要埋入地下数米量级的深度。这时就需要设计和建造挡土墙以保持防撞沟周边的土体稳定。对于埋置更深的安全壳及其附属设施,防撞沟的设计和施工更需要精心考虑。

电梯坑和污水坑的配置:电梯坑和污水坑的配置是另一类需要在建筑上考虑的问题。通常情况下,在隔震建筑中的电梯坑悬置在上部结构的底层下面,往往恰好位于隔震垫提供的空间中。因此也要保证在电梯坑和污水坑的周围有足够的净空,以防止隔震支座在最大地震侧向位移时与电梯坑或污水坑的墙壁发生碰撞和干扰。

6 结论

尽管现代隔震技术已经十分成熟而且早已经被广泛应用于其它各类工程中,也尽管核电业界早已看好隔震技术会给核电工程的发展带来许多潜在的好处,诸如:可以简化设计,促进核电工程设计的标准化,降低建设成本,改善核电工程的抗震性能,增加其抗震安全边际(margin),甚至可以突破许多重大的限制,例如可以在原本不宜建造核电厂的地震禁区提供新的解决方案。但是要在核电工程中真正使用隔震技术,还有许多科学和技术上的瓶颈问题有待解决,更重要的是还有许多行业监管方面的问题需要加以研究和评估。概括起来,它还面临着如下几方面的挑战:

(1) 地震环境方面的挑战。这里需要评估和解决的问题是 1) 采用隔震技术后可以在多大程度上降低核电工程的地震风险;或者说它的极限设计地震动 SSE 可以提高到多大的水平; 2) 如果遭遇到近场地震动的袭击,特别是在那些被视为隔震系统主要克星的具有脉冲型、长周期特性的近场地震动以及能导致地表发生永久性残余位移的、长周期近场滑冲型地震动的作用下,会对采取隔震措施后的核电系统产生怎样的影响。 3) 进一步研究核电隔震系统对来自不同方位的飞行器撞击的响应也同样是非常重要的。毫无疑问这些问题的解决,必将大大降低核电工程的地震风险,降低兴建核电厂的地震门槛,乃至降低在地震区兴建核电厂的成本。

(2) 隔震垫材料方面的挑战。这里包括要研发具有良好的抗热和抗辐照能力的隔震垫材料,制造适应核电厂隔震系统所需要的特种形状和尺寸的隔震垫,以及提高它们在开发、制造、购买、安装和运行过程中的测试、质量保证和质量控制以及寿命终极分析和应对的能力。

(3) 隔震系统方面的挑战。在这方面最关注的是要研发新一代的隔震系统,特别是要研发既能在水平方向又能在竖直方向进行有效隔震的三维隔震支座和三维隔震系统。此外,也包括能设计和建造出符合核电工程要求的,用以连接穿越在隔震与非隔震系统上,或不同的隔震系统上的设施(特别是那些直径大,内部装有高温高压物质的管道)的接头或连接件的能力,以及对这些接头和连接件的测试和维护能力。除此之外,还包括有关整体隔震板以及与此相关的防撞槽和防撞沟的设计、施工和运行过程中的各种因素的优化和成本效益分析。作为一项基础性的工作,目前还需要对新的一代核电隔震系统进行一定比例尺的模拟试验,以取得所需的科学数据。

(4) 有关制定核电工程隔震系统的各类标准和培养监管人才方面的挑战。核电厂属于高风险的行业,化解风险的主要措施是要在每一个环节中严格遵照规定、规范和标准行事。这些环节包括设计、采购、建造、安装、运行、更换、拆除、应急等等。目前核电工程业界虽然对应用隔震技术充满了期待和热情,但在相关的标准制定上还远未到位,在没有标准的情况下再好的隔震技术也难以在核电厂中发挥作用。与执行和监管

核电隔震系统标准密切相关的另一项挑战就是要加紧培养监管人才。应该说监管工作是消除核电工程风险的最后一道关口,没有训练有素的监管人才就很难把好这道关口。

以上挑战中,最关键的无疑是能制造出核电隔震工程所需的各种特色器件和材料,制定出用以实施核电工程隔震技术的各项标准以及培养出高素质的监管人才。上述的各项挑战的顺利解决是保证隔震技术在核电工程中获得应用的必要前提,是制定核电隔震工程各项标准的科学支撑,是实现核电隔震工程安全的根本保证。

参考文献:

- [1] Martelli A, Forni M. State of the art on application, R&D and design rules for seismic isolation, energy dissipation and vibration control for civil structures, industrial plants and cultural heritage in Italy and other countries[C]//Proceedings of the 11th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Guangzhou, China, 2009.
- [2] Carrato P J, Litehiser J J. Characterization of design ground motion for Central And Eastern United States [C]//Transactions of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), K02-4, 2005.
- [3] US Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.60, revision 1. Design response spectra for seismic design of nuclear power plants[S]. 1973.
- [4] Ostadan F. Soil-structure interaction analysis including ground motion incoherency effects[C]//Transactions of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), K04-7, 2005.
- [5] 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 (SMiRT 18), K10-7, 2005.
- [6] Forni M. Seismic isolation of nuclear power plants[C]//Proceedings of the "Italy in Japan 2011" Initiative Science, Technology and Innovation, 2011.
- [7] Forni M, Poggianti A, Bianchi F, et al. Seismic isolation of the Iris nuclear plant[C]//Proceedings of the 2009 ASME Pressure Vessel and Piping Conference, PVP 2009, Prague, July 26-30, 2009.
- [8] Aiken I D, Kelly J M, Tajirian F F. Mechanics of low shape factor elastomeric seismic isolation bearings[R]. Report No. UCB/EERC-89/13, University of California at Berkeley, 1989.
- [9] Fujita T. Progress of applications, R&D and design guidelines for seismic isolation of civil buildings and industrial facilities in Japan[C]//International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Seismic Vibrations of Structures, Taormina, Italy, 1997.
- [10] ASCE Standard 4. Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary[S]. Published by the American Society of Civil Engineers, 1998.
- [11] ASCE Standard 7. Minimum design loads for buildings and other structures [S]. Published by the American Society of Civil Engineers, 2002.
- [12] FEMA 368 and 369. NEHRP 2000 Recommended provisions and commentary for seismic regulations for new buildings and other structures[S]. Published by the US Federal Emergency Management Agency (Now Part of the Department of Homeland Securities), 2001.
- [13] FEMA 450 and 451. NEHRP 2003 Recommended provisions and commentary for seismic regulations for new buildings and other structures[S]. Published by the US Federal Emergency Management Agency (Now Part of the Department of Homeland Securities), 2004.
- [14] Shenton H W. Guidelines for pre-qualification, prototype and quality control testing of seismic isolation systems[R]. Report NISTIR 5800, Structures Division, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA 1996.