文章编号: 1001-1455(2014)05-0615-07 **DOI**: 10.11883/1001-1455(2014)05-0615-07

基础隔震系统对核电站安全壳抗震的影响*

赵春风,陈健云
(大连理工大学土木工程抗震研究所,辽宁 大连 116024)

摘要: 为了确保核电站在遭受破坏性的地震后,安全壳要保持密封性且不被破坏,基于地震波在结构中的传播规律,从隔震技术的原理出发,建立较为准确的三维安全壳有限元模型,运用定性的方法对核电厂安全壳进行数值模拟,对比了极限安全地震动作用下采取隔震技术和不采取隔震技术安全壳的动力响应。采取隔震措施的安全壳的顶点在 x、y、z 方向的最大加速度分别为 2.85、12.84 和3.05 m/s^2,相比于无隔震措施的安全壳,加速度分别降低了 79.52%、27.56%和 79.47%。结果表明,隔震技术能有效地减小核电站安全壳的地震反应。

关键词: 爆炸力学;隔振系统;确定性的方法;核电站;动力响应;抗震能力
中图分类号: O383.2 **国标学科代码**: 1303599 **文献标志码**: A

地震是威胁核电站安全的自然灾害之一,2011 年日本福岛核事故是由于地震引起的海啸造成,因此研究核电站安全壳在地震作用下的安全性具有非常重要的意义。核电站预应力安全壳是核电站的最后一道防线,要求其在各种不利作用下具有良好的密封性,防止发生核事故后产生核泄漏对环境和人类产生危害。核电站的设计和建造过程中需要进行地震动分析,因此需要对现存的和新建核电站的抗震能力进行评估[1]。

在核电站的抗震设计中,需要有结构真实准确的动力响应分析,主要依赖于核电站结构、场地条件和动力特性。为了改进核电站的设计,需要高效的方法对核电站的薄弱性进行评估,如果可能的话,加固现有的核电厂房,因此必须对核电站在正常工作期间遭受极限地震激励下的动力响应进行评估。

目前,减小地震危害一般采取的措施有避震、控震、抗震和隔震。避震是指在城市、工厂的选址、规划以及工程建设中,充分考虑地震的因素,进行地震危险性分析与工程建设场地抗震性能评价,尽可能避开孕育地震活动的断层;控震是将地震中的建筑物的震动予以控制,有主动与被动控制;抗震是通过增大结构的强度来增强结构抵抗地震的能力,即"以刚克刚"。隔震是通过某种隔离装置将地震动与结构隔开,以达到减小结构振动的目的。隔震技术是一项成熟的技术,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。本文中对核电站采用隔震技术进行了分析并对有隔震措施和无隔震措施的安全壳进行了对比研究,验证隔震技术的有效性[2-3]。

1 动力响应分析

核电站是由许多连接结构组成的,建立反应核电站安全壳动力响应的有限元模型应当考虑核心结构和连接结构的相互作用。采用有限元方法对地震波在核电站结构中传播和动力响应进行定性的评估以确定核电站结构及其组成构件遭受极限安全地震动时的抗震能力,对采取隔震技术和不采取隔震技术的核电站进行分析。隔震支座设置在基础,通过对有隔震支座的核电站结构进行地震分析得到核电站结构及其连接件上传递的地震荷载和运动效果。为了分析隔震技术对提高抗震安全,减小结构响应和破坏,避免经济损失等有何影响,特别对采用隔震系统的核电结构对动力荷载传播进行了分析。

* **收稿日期**: 2013-02-01; **修回日期**: 2013-06-03
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51138001);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110041110012)
作者简介: 赵春风(1983—),男,博士研究生。

基于减小核电站结构的主要自振频率和增加能量消散的方法来达到减震效果。其的核心思想是利用一般的结构在适当的隔震装置作用下减震的可能性,隔震装置通过弹簧和减震器耦合进行模拟。目前已有许多种隔震装置,如叠层钢板橡胶隔震器、摩擦滑移隔震器、铅芯橡胶隔震器等。

1.1 有限元模型

利用有限元软件 ANSYS 建立核电结构的模型,利用简单的弹簧和减震器模拟隔震装置并对结构进行地震荷载时程分析。为了分析的方便,简化边界条件,本文中部考虑土和结构的相互作用。有限元模型采用合适的单元类型和数量,即混凝土结构采用 SOLID 65 单元,预应力钢筋采用 SHELL41 膜单元进行模拟,隔震支座采用非线性弹簧阻尼单元 COMBIN14 和 COMBIN40 分别模拟,安全壳由竖直筒体和顶部的圆形穹顶组成。

采用和无隔震装置一样的材料对有隔震装置的安全壳进行隔震效果分析,对有无隔震装置的安全壳进行极限安全地震动作用下的动力响应分析。为了得到合适的三维基础隔震系统,采用水平和竖向隔震支座。有无隔震装置的安全壳模型如图 1 所示。

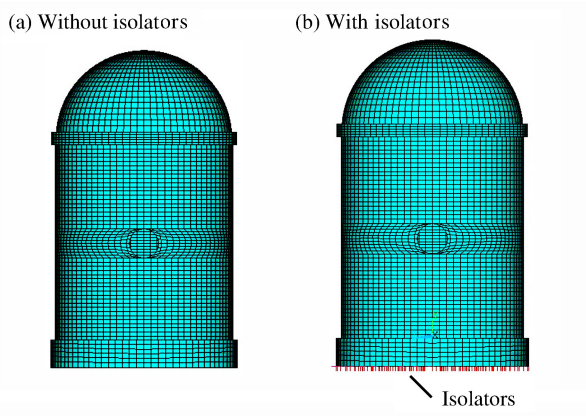

图 1 安全壳模型

Fig. 1 Reinforced concrete containment models

1.2 隔震体系

隔震器能有效的减小核电站厂房结构的加速度动力响应,所以核电站厂房可以通过增加隔震器来加快能量消耗。实际设计中基础隔震对减小地震响应和节约成本具有重要的作用[4]。

隔震技术逐渐的成为一项普通而有强大的方法可以保护结构免受地震破坏,通过减小结构的地震响应来提高结构的可靠性和安全性。积极效果是增加阻尼,在基板和地基中间加入隔震装置使得上部结构和基础发生解耦。隔震支座或隔震器能使结构在合适的初始设计或后期改进措施后可以抵抗破坏性的地震冲击。传统的方法主要依赖于增加结构的强度,而隔震器是由橡胶层和钢板组成的,通过橡胶的硫化和钢板紧密的结合在一起,以期同时减小水平和竖向地震荷载,特别是重要结构中的设备和部件的地震效应[5]。

目前,世界上将基础隔震技术应用于核电工程中的只有法国的 Cruas 和南非的 Koeberg 核电站,而前面所述的先进隔震技术还处于研究发展阶段。法国的 Cruas 压水堆核电站采用了 1 800 个500 mm×500 mm×65 mm 的橡胶垫层,而南非的 Koeberg 核电站采用了 2 000 个 700 mm×700 mm×100 mm的橡胶隔震支座。该垫层采用了橡胶支座加滑动摩擦板,这个隔震体系把核电站有关结构建立在上层筏基础上,在下筏上装有叠层橡胶,在上下筏之间安装 2 块滑板,通过滑板的摩擦减小地震力向上传播。但是这种技术已显过时,目前已经研制成功更好的隔震系统如高阻尼橡胶隔震系统[6]。

本文中应用的就是高阻尼橡胶隔震系统,具有良好的弹性和高阻尼特性,是当前应用比较广泛、可靠的隔震系统。隔震技术是把上部结构和地基运动解耦,即在上部建筑和基础之间引入适当的能量吸收装置并提供足以支撑结构重力和竖向荷载作用的竖向刚度。隔震支座良好的弹性使得主要结构的基频降低,避免和地基的频率接近引起共振,这就使得地基加速度被滤去的同时结构的加速度迅速降低。

隔震装置的橡胶支座,如图 2 所示。必须有足够的强度足以支撑上部结构的重量,通过稳定的、适当的水平变形消散地震的输入能量。必须指出的是隔震装置是以增大结构和基础之间的相对位移为代价而减小结构的动力响应的,因此隔震支座的位移必须和其他设备的位移相协调,使得隔震支座既能承受较大的变形还能保持承载能力。为了协调隔震结构的侧向位移,应设置可供组装和检查等需要的适当的伸缩缝。高阻尼橡胶支座隔震装置必须确保它的过滤功能和消能的功能保持 60 年有效性,与核电站的设计寿命相一致。

首先将隔震装置简化为弹簧质量阻尼系统，接着通过模型分析验证它的有效性。隔震的有效性通过采取隔震措施和不采取隔震措施的安全壳的最大加速度的比值来定性的研究。

在进行非线性瞬时地震分析之前，需要确定隔震装置的数量和种类，隔震装置主要由其 2 个主要特性决定：(1)改变系统基频的能力，即使得结构的频率不落在常见地震作用下地面运动的频率带范围内，地基运动加速度的频率随着隔震装置振动频率(周期)的减小(增大)而减小，而相对位移随着隔震装置振动频率(周期)的(增大)而增大，如图 3 所示。(2)隔震装置的消散地震能量的能力。

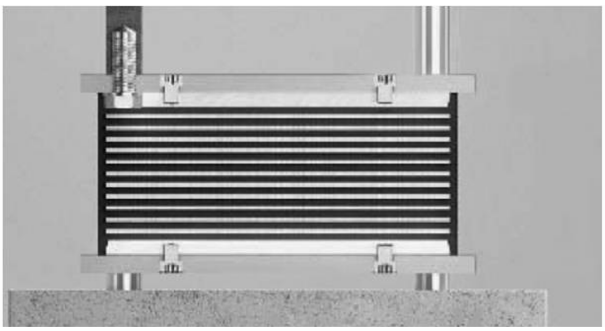

图 2 隔震支座

Fig. 2 Isolator scheme

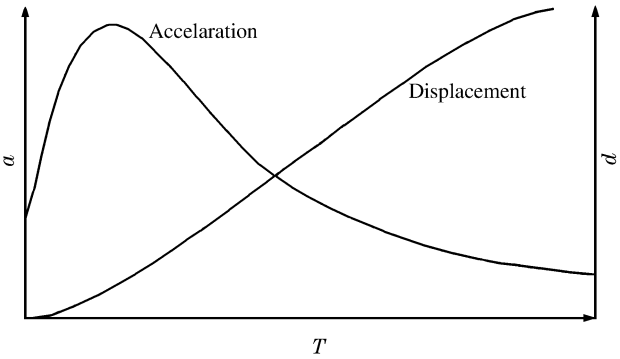

图 3 采用隔震支座后安全壳整体位移和加速度

Fig. 3 Acceleration and displament of containment with isolator scheme

为了准确地确定隔震装置的属性，首先假定在 0.3g 的地面峰值加速度作用下，给定隔震频率下的位移谱表达式：

$$S_d = \frac{S_a g}{\omega^2} \tag{1}$$

式中：S_d 和 S_a 分别为位移谱和加速度谱，ω 是隔震装置频率，g 是重力加速度。代入周期为 $T=2.7$ s($f_i=0.363\ 4$ Hz)时的加速度谱得到最大加速度谱为：

$$S_a \mid_{T=2.7} = 0.54g \tag{2}$$

根据得到的位移和已知的质量可以确定隔震器的刚度 k，根据简化计算公式得到的结果，从现有工厂生产的隔震器中选择隔震器的型号和数量，简化的计算公式如下[5]：

$$f_i = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{3}$$

$$k = 4\pi^2 m f_i^2 \tag{4}$$

式中：m 是结构的总质量，k 为结构总刚度，f_i 是初始选定的隔震频率为 0.363 Hz。

因此设置在上部结构和基础之间的隔震器的数量为：

$$N = \frac{(2\pi f_i)^2 m}{k} \tag{5}$$

由于隔震器中的橡胶是用来抵抗剪切变形的材料，橡胶的阻尼越大，耗散能力越好。高阻尼橡胶的阻尼比变化范围为 10%到 20%，剪切模量 G 为 0.8～1.4 MPa[7]。根据文献[8]中的结果，本文中的隔震器的阻尼取为 20%。

2　数值模拟

利用上文中的有限元模型，对结构进行模态和地震加速度瞬态分析，模态分析可以采用模态叠加法，直接积分法和子结构法。通过对有隔震措施和无隔震措施的安全壳进行模态分析得到 2 种结构的模态和频率，并对不同安全壳的动力响应进行评估分析；采用直接积分的方法对结构进行非线性瞬态分析，分析中选择合适的阻尼材料代表隔震系统中的耗能装置。

采取人工加载的地震波加速度对安全壳进行时域分析，峰值加速度取为 0.3g，输入水平（a_x、a_z）和竖向（a_y）加速度时程，地震激励持续时间为 12 s，加速度时程曲线如图 4 所示。

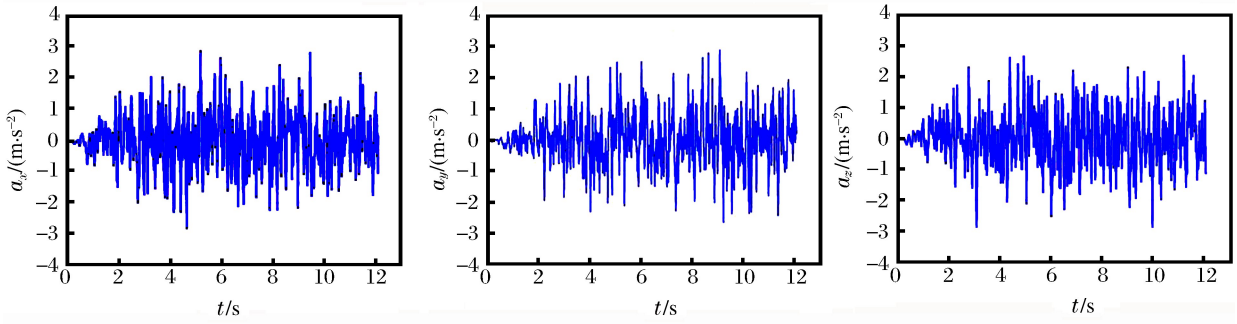

图 4 人工加载的地震波加速度时程曲线

Fig. 4 Histories of acceleration by artificial loading

在抗震分析中，首先对结构进行模态分析得到反映结构本身阻尼特性的主要频率。计算了安全壳结构的前 20 阶振型和频率。结构的自振频率和振型反映了核岛的地震反应特性，比如和材料能量消耗与阻尼效果相关的地震放大系数。另外，通过模态分析对比了采取基础隔震措施和无隔震措施的结构的一阶频率，验证分析中选择的隔震频率和隔震结构的一阶频率的是否对应，本文中选取的自振频率为 0.363 4 Hz，如图 5 所示。

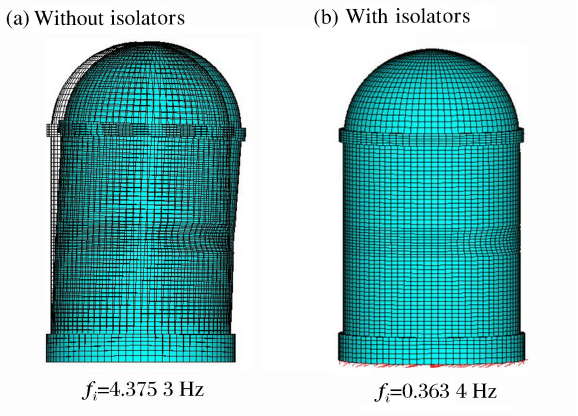

图 5 安全壳的一阶振型

Fig. 5 The first frequency of containment

在图 5 中，有隔震装置和无隔震装置结构的第 1 阶振型（悬臂梁行为）和频率分别表示了 2 种结构的变形形状，由图 5 中可知，隔震结构主要呈水平平移，而非隔震结构则表现为摇摆状态。有隔震和无隔震装置的结构的频率和振型计算结果见表 1。

表 1 隔震和不隔震安全壳的的振动模态

Table 1 Vibration mode of containment

模态	f_i/Hz		T/s	
	无隔震	有隔震	无隔震	有隔震
1	4.375 3	0.363 4	0.228 6	2.752 2
2	4.395 4	0.402 4	0.227 5	2.484 9
3	6.249 8	0.402 4	0.160 0	2.484 9
4	6.252 8	4.283 4	0.159 9	0.233 5
5	7.139 1	4.287 6	0.140 1	0.233 2

3 计算结果

为了评估地震风险，除了要定义核电结构和主要组件的地震响应（通常特指的是加速度，位移，应力等），还需要对数值模型进行初始的抗震分析。通过对有隔震措施和无隔震措施不同的结构进行抗震分析，得到不同结构不同楼层位置的最大加速度和位移，通过对比 2 种结果的最大加速度和位移来分析隔震系统对减小结构地震响应的有效性和阻尼系统的能量耗散能力。通过有限元计算得到有隔震和无隔震措施安全壳的顶点的加速度和位移时程曲线如图 6～7 所示。

由图 6～7 可知，采取隔震措施的安全壳的顶点 x、y 和 z 方向（x、z 表示的是水平方向，y 表示竖直方向）的最大加速度分别为 2.85、12.84 和 3.05 m/s^2，相比于无隔震措施的安全壳，加速度分别降低了

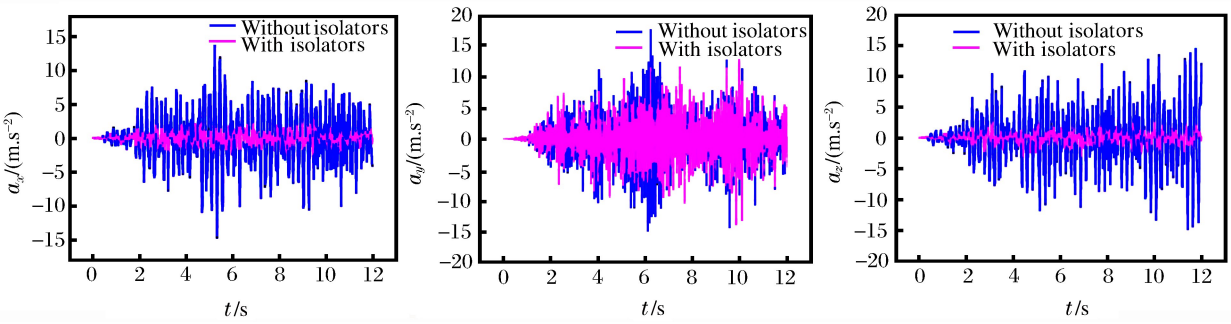

图 6　安全壳顶点加速度响应时程曲线

Fig. 6　Histories of acceleration at containment dome vertex

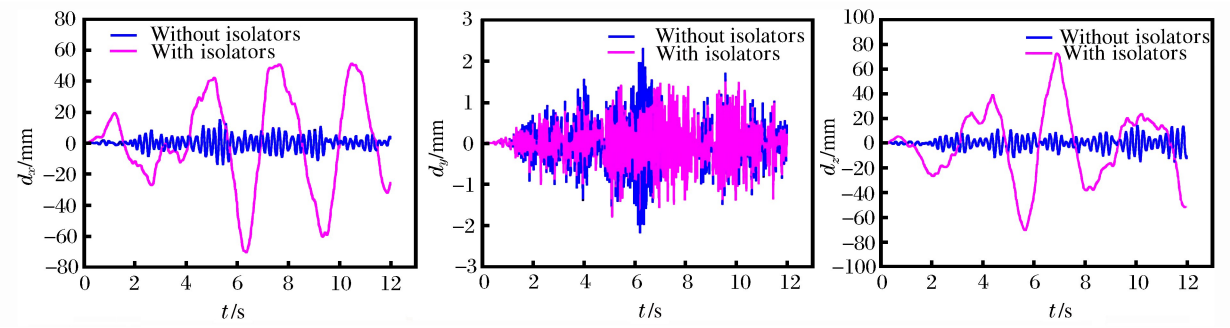

图 7　安全壳顶点位移响应时程曲线

Fig. 7　Histories of displacement at containment dome vertex

79.52%、27.56%和 79.47%；采取隔震措施的安全壳 x、y 和 z 方向的最大位移分别为70.07、1.79 和 72.65 mm；无隔震措施的安全壳 x、y 和 z 方向的最大位移分别为 14.98、2.30 和15.10 mm；采取隔震措施的最大位移是未采取隔震措施结构位移的 4.71、0.778 和 4.81 倍，安全壳整体结构的最大的倾角仅为 0.001 37°。

综上所述，在多向地震作用下。安全壳采取隔震措施后，整体的隔震效果明显，安全壳结构本身的相对位移很小，如图 8 所示。隔震结构主要是隔震层在水平方向的平移，整体结构没有发生大的变形；由于隔震措施采用的柔性支撑造成安全壳整体结构水平方向的位移较大，因此，必须考虑隔震措施对与安全壳连接的管路设备等影响。

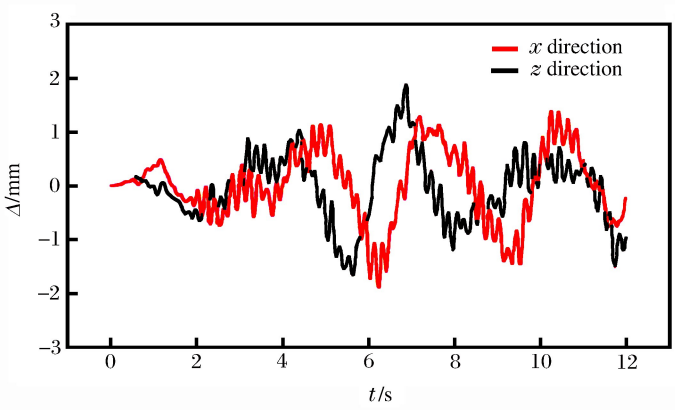

图 8　安全壳顶点相对位移响应时程曲线

Fig. 8　Histories of relative displacement at containment dome vertex

对比采取隔震和未隔震的安全壳的倾角变化发现，采取隔震措施后安全壳的倾角很小，最大的倾角为 0.001 37°，比未隔震的结构减小了约 90%，说明安全，安全壳在多向地震作用下整体结构的变形很

小,没有发生整体的晃动或扭转,不会对反应堆造成影响。从加隔震措施前后的频率变化看,前三阶频率从 4～6 Hz 降低到不到 1 Hz,这可能对安全壳底板楼层产生很大影响,如图 9 所示。

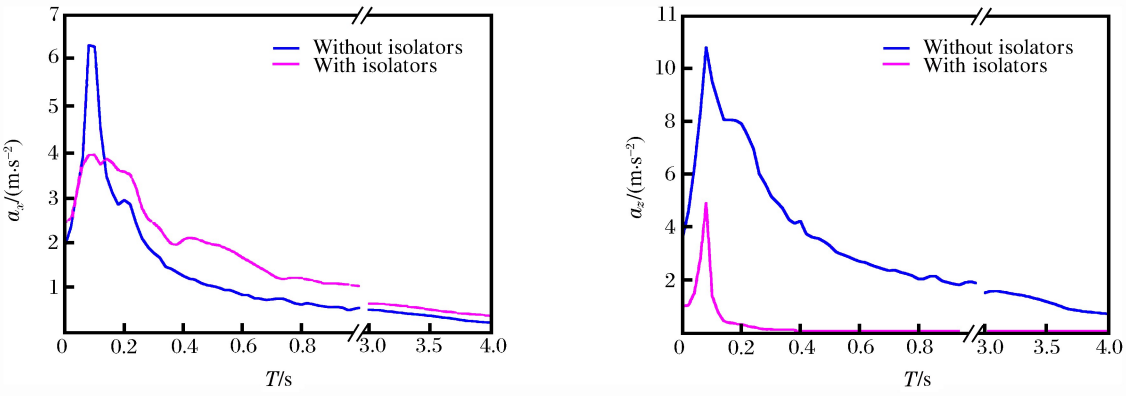

图 9 安全壳底板楼层特征位置加速度响应谱

Fig. 9 Response spectra at base floor reference point for isolated and not isolated containment

此外,地震荷载(包括加速度时程或是反应谱)的传播依赖于每个结构的强度、刚度、模态特性等动力特性,和隔震系统依赖于输入的极限安全地震动时程的强度相类似。

4 结 论

本文中建立有隔震和无隔震措施核电站安全壳动力响应的有限元模型,并对有隔震和无隔震措施的安全壳在相同的地震动输入,材料和几何属性条件下进行抗震分析。采用人工加载加速度时程对核电站结构及其内部构件在极限安全地震动工况作用下结构动力响应进行分析和评估,并对基础隔震的有效性进行研究。通过对有隔震和无隔震措施安全壳的加速度、位移和相对位移进行对比发现,在选择合理的隔震水平刚度和阻尼比的情况下,基础隔震措施能有效地减小结构在地震作用下的动力响应,验证了隔震技术的有效性。采取隔震措施后,安全壳结构本身的相对位移很小,整体变形很小,没有发生整体的晃动或扭转,但由于隔震措施采用的柔性支撑造成安全壳整体结构水平方向的位移较大,可能会对安全壳的连接管路造成影响,因此需要整体的协调和优化。

参考文献:

[1] Zhao C F, Chen J Y, Wang Y, et al. Damage mechanism and response of reinforced concrete containment structure under internal blast loading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2012,61:12-20.

[2] 文静,司国建,孙造占,等. 核电厂厂房基础隔震设计研究的构想[J]. 核安全,2010,4:50-55.
Wen Jing, Si Guo-jian, Sun Zao-zhan, et al. Proposal on research and design of base seismic isolation for nuclear power buildings in China[J]. Nuclear Safety, 2010,4:50-55.

[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.
Xie Li-li, Zhai Chang-hai. A prospective study on applicability of base isolation in nuclear power plants[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012,32(1):1-10.

[4] Yoo B, Lee J H, Koo G H, et al. Effects of high damping rubber bearing on seismic response of superstructure in base isolated system[C]// Proceedings of the 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. Porto Alegre, Brazil, 1995.

[5] Frano R L, Forasassi G. Isolation systems influence in the seismic loading propagation analysis applied to an innovative near term reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010,240(10):3539-3549.

[6] 李冬梅. 某核电站安全壳的隔震地震反应分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.

[7] Burtscher S L, Dorfmann A. Compression and shear tests of anisotropic high damping rubber bearings[J]. Engineering Structures, 2004,26(13):1979-1991.

[8] 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(1/2):125-142.

Influences of base isolation system on seismic resistance of nuclear power plant containment*

Zhao Chun-feng, Chen Jian-yun

(*Institute of Earthquake Engineering, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *Liaoning*, *China*)

Abstract: The study explored how to keep the reinforced concrete containment sealed and undamaged for the nuclear power plant subjected to a severe earthquake during the plant life. The propagation of seismic waves along the structure was analyzed. And based on the structural isolation technology, a three-dimensional finite element model was developed for the reinforced concrete containment. The application of the isolation technology to the reinforced concrete containment was discussed by applying a deterministic methodological approach. For the nuclear power plant subjected to a safe shutdown earthquake, the dynamic response of the reinforced concrete containment with isolators was compared with that of one without isolators. The accelerations at the dome vertex of the isolated containment along the x, y and z axes are about 2.85 m/s^2, 3.05 m/s^2 and 12.84 m/s^2, respectively, which are 79.52%, 79.47% and 27.56%, respectively, lower compared with the isolated containment. So the isolation system is helpful for mitigating the seismic response of the nuclear power plant containment.

Key words: mechanics of explosion; isolation system; deterministic methodological approach; nuclear power plant; dynamic response; seismic resistance

---

* Received 1 February 2013; Revised 3 June 2013

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51138001)

Corresponding author: Zhao Chun-feng, zhaowindy@126.com

(责任编辑　王易难)

本刊关于稿件、版权等的声明

在投稿、稿件处理、发表等过程中，作者需注意如下问题：

1. 稿件是作者独立取得的原创性研究成果，无抄袭，无一稿多投，未在国内外公开发表过。

2. 稿件无政治错误，不涉及保密和拟申请专利的内容，已经过作者单位保密审查。

3. 作者署名和排序无异议，单位署名和排序无争议，且无知识产权纠纷。在稿件处理过程中，如有作者或单位署名变更，需有全体作者亲笔签名和全部单位盖章同意的书面声明。

4. 稿件由编辑部组织审稿。自收稿之日时，编辑部将在 4 个月内反馈处理结果。若超过 4 个月未答复的，作者有权另行处理稿件，但需事先通知编辑部。

5. 对录用的稿件，在尊重稿件内容的基础上，编辑部有权作必要的修改和删减，按规定进行标准化和规范化。

6. 稿件录用后，稿件的所有出版权归编辑部。

7. 稿件发表后，编辑部赠送样刊，并一次性付给作者稿酬及版权转让费。

爆炸与冲击

2014 年 9 月 25 日