

# 核电站结构隔震研究

范世凯，谭平，刘德稳，周福霖

(广州大学减震控制与结构安全国家重点实验室培育基地，广州 510405)

**摘要：**建立了核电站 CPR1000 堆型反应堆厂房的混合分析模型，上部结构采用集中质点—梁单元，下部筏基采用三维实体单元模拟。完成了对典型核电站结构的基础隔震设计，隔震层设置在筏板基础底面，采用铅芯橡胶支座，支座长期面压控制在 5 MPa；比较了隔震前后反应堆厂房的动力特性；基于时程分析法，研究了隔震效果，建立了结构内部设备楼层的楼层反应谱；对隔震前后结构水平向和竖向的楼层反应谱进行了对比分析。结果表明，对于核电站结构采用混合分析模型兼有较高的计算效率和精度；隔震后可明显降低结构的地震反应和楼层反应谱，大大提高结构的抗震安全性。

**关键词：**核电站；混合分析模型；基础隔震；楼层反应谱

中图分类号：TU352.1 文献标识码：A 文章编号：1672-2132(2015)05-0685-06

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2015.05.020

## Research on Seismic-isolated Nuclear Power Plant Structure

FAN Shikai, TAN Ping, LIU Dewen, ZHOU Fulin

(Cultivation Base for State Key Lab of Seismic Control and Structural Safety, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** This paper builds a mixed analytical model for based-isolated CPR1000 reactor structure, in which superstructure and raft foundation are modeled by lumped mass-beam elements and three-dimensional solid elements, respectively. A complete base isolation design of CPR1000 reactor structure is presented in this paper. The lead-rubber bearings are placed under the raft foundation. The surface pressure of lead-rubber bearings is about 5 MPa. The dynamic behavior of base-isolated reactor structure is investigated. Nonlinear time-history analysis of the isolated nuclear power plant structure is carried out. The shears and overturning moments of the based-isolated reactor structure are compared with the base-fixed structure. In addition, floor response spectrum of the base-isolated CPR1000 reactor structure is set up for analysis of the internal equipment and compared with the base-fixed case. Results show that the mixed analytical model for reactor structure possesses enough calculating efficiency and precision. Base-isolated technology can significantly reduce the shears, the overturning moments and the floor response spectrum of the reactor structure, and enhance its safety greatly.

**Keywords:** nuclear power plant; mixed analysis model; base isolation; floor response spectrum

\* 收稿日期:2014-04-20;修回日期:2015-08-17

基金项目:国家科技支撑计划子课题(2012BAJ07B02)、中国工程院学部重点咨询项目(2011-XZ-25)、国家基金委面上项目(51078097)、国家教育部博士点基金(20104410110002)资助

作者简介:范世凯(1989-),男,硕士研究生。主要从事结构隔震方面的研究。Email:fanshikai2011@163.com

通讯作者:谭平(1973-),男,研究员,博导。主要从事结构隔震与减震控制研究。Email:ptan@gzhu.edu.cn

## 引言

CPR1000 是中国改进型“二代加”百万千瓦级压水堆核电技术,是目前我国设计自主化、设备本地化、建设自主化、运行自主化水平最高且以国内运行业绩最佳核电站为参考基础的技术方案。因此,研究 CPR1000 核电站在地震作用下的安全性具有重大意义。基础隔震技术<sup>[1]</sup>是在结构的地基与上部结构之间增加一层隔震装置,地震时地面运动的能量部分被隔震装置耗散,从而减少了地震产生的能量向地上建筑物的传输,保障上部结构、设备、内部人员的安全。目前,基础隔震技术的可靠性及经济性已得到广泛认可<sup>[2]</sup>。核电站建筑物采用基础隔震技术对提高核设施的安全有重要意义。谢礼立等<sup>[3]</sup>对隔震技术在核电工程领域的应用作了系统的总结与介绍。曾奔等<sup>[4-5]</sup>研究了基于功率谱密度函数法的核电厂房增加隔震措施后的楼层反应谱分析。李冬梅<sup>[6]</sup>对核电厂安全壳进行了隔震地震反应分析。Frano 等<sup>[7]</sup>对核电厂的研究给出了隔震和不隔震安全壳在极限停堆地震作用下竖向和水平反应加速度的对比,肯定了隔震的效果。郑志<sup>[8]</sup>对核电站安全壳隔震可靠度进行了分析。本文建立了 CPR1000 反应堆厂房的混合分析模型,对其进行基础隔震设计研究;基于时程分析法,研究了隔震效果,分析了内部设备层的楼层反应谱。

## 1 CPR1000 反应堆厂房

CPR1000 堆型反应堆厂房由筏板基础、安全壳结构、内部结构 3 大部分组成<sup>[5]</sup>,图 1 为厂房剖面。

筏板基础为圆形钢筋混凝土板,半径为 19.8 m,平均厚度约为 5.8 m。筏板基础主要用于支承安全壳结构和内部结构。安全壳是包容核蒸汽供应系统的主要结构,起到对环境提供有效辐射防护的作用。安全壳由一预应力混凝土圆筒体组成,其底部为筏板基础,顶部则由预应力混凝土穹顶封闭,内表面由密封的钢衬里覆盖。内部结构主要由钢筋混凝土墙体和楼板组成。其功能主要是承受载荷、辐射防护及实体隔离。

## 2 混合分析模型

目前,对 CPR1000 堆型反应堆厂房的分析多采

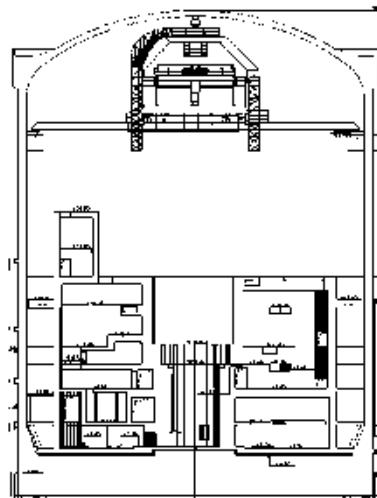


图 1 反应堆厂房结构剖面

Fig. 1 The section of reactor building structure

用集中质量-梁单元计算模型<sup>[9]</sup>,该模型将结构的质量和转动惯量均集中在各节点上,而两相邻节点间的几何惯性矩和剪切面积则由连接节点的梁来表达。在隔震设计时,考虑到集中质量-梁单元计算模型不能模拟隔震层的布置及支座受力计算,而三维实体模型的计算效率又较低,故本文采用 SAP2000 建立上部结构为集中质量-梁单元、下部筏板基础为三维实体单元的混合分析模型,相邻节点间的连接仍然采用梁单元模拟,下部筏板基础采用 Solid 单元模拟。混凝土的材料参数见表 1,各梁单元的特性参数见表 2,结构在水平 X 和 Y 方向对称,上部结构各节点的相对坐标、集中质量和转动惯量见表 3。图 2 为采用 SAP2000 建立的有限元分析模型。

表 1 混凝土材料性能参数

Table 1 Concrete material performance parameters

材料	弹性模量 / (N · m <sup>-2</sup> )	剪切模量 / (N · m <sup>-2</sup> )	泊松比	密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )	阻尼比 /%
混凝土	$4.0 \times 10^{10}$	$1.6 \times 10^{10}$	0.2	2500	7

表 2 梁单元特性参数

Table 2 The parameters of beam elements

单元类别	梁号	横截面积 /m <sup>2</sup>	惯性矩 /m <sup>4</sup> ( $J_{XX} = J_{YY}$ )	剪切系数 ( $a_x = a_y$ )	剪切面积 /m <sup>2</sup> ( $S_{ax} = S_{ay}$ )
2	②	176	30570	2	88.0
3	③-⑦	107	19241	2	53.5
4	⑧	50	5720	2.632	19.0
5	⑨	110	8160	1.571	70.0
6	⑩	140	8160	2	70.0
7	⑪	60	325	2	30.0

表3 节点坐标、质量及转动惯量

Table 3 Coordinates, mass and the rotary inertia of node

节点	坐标/m			质量/ $10^3 \text{kg}$	转动惯量/ $(10^6 \text{kg} \cdot \text{m}^2)$	
	X 方向	Y 方向	Z 方向		$J_{XX} = J_{YY}$	$J_{ZZ}$
3	0.0	0.0	-0.585	2288.0	424.0	824.0
4	0.0	0.0	9.875	3033.0	568.0	1087.0
5	0.0	0.0	20.000	2960.0	554.0	1063.0
6	0.0	0.0	30.000	2960.0	554.0	1063.0
7	0.0	0.0	39.150	3068.0	562.0	1081.0
8	0.0	0.0	50.020	6271.0	910.0	1727.0
9	0.0	0.0	4.000	5710.0	370.0	0.0
10	0.0	0.0	10.320	5970.0	394.0	0.0
11	0.0	0.0	19.150	6750.0	500.0	0.0
12	0.0	0.0	29.000	1270.0	110.0	0.0

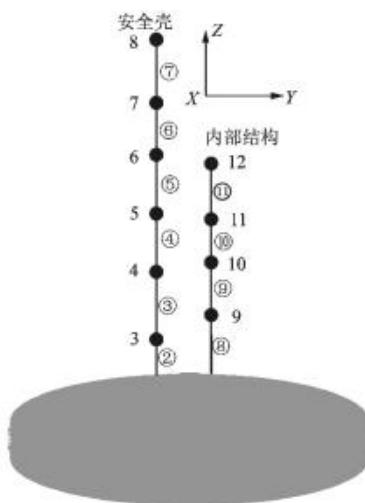


图2 SAP2000有限元分析模型

Fig. 2 Finite element analysis model of SAP2000

表4 模型周期对比

Table 4 The comparison of model periods

阶数	混合分析 模型	集中质量 模型	阵型 方向	误差/%
1	0.225063	0.225417	X	0.16
2	0.225063	0.225417	X	0.16
3	0.179099	0.179237	X	0.96
4	0.179099	0.179237	X	0.96
5	0.078156	0.078173	X	0.03
6	0.078156	0.078173	X	0.03
7	0.072810	0.072877	Z	0.08
8	0.068586	0.068623	X	0.06
9	0.068586	0.068623	X	0.06
10	0.066636	0.066695	Z	2.25

表4为集中质量-梁单元计算模型与混合分析模型的周期对比,由于结构对称,X和Y向振型是相邻出现的,表中只给出X向阵型的周期。从该表

可看出,混合分析模型与集中质量分析模型的误差很小,验证了混合分析模型的精度。

### 3 隔震设计

#### 3.1 隔震支座的布置及选型

综合考虑结构的重要性、隔震效果及隔震后结构的安全储备,设计时将隔震后周期控制在2~4 s,每个支座的长期面压在5 MPa左右。根据结构的重量和底部筏基的面积,结合支座面压要求对支座进行选型,确定支座的个数和直径。为减小偏心的影响,使隔震支座对称布置。经过试算,最终采用111个铅芯橡胶支座LRB1200,直径D为1200 mm,橡胶总厚度 $T_r$ 为203 mm,支座的等效水平刚度为3947 kN/m,屈服后刚度为2198 kN/mm,竖向刚度为7605 kN/mm,屈服力为360.6 kN。隔震支座采用辐射状布置,将筏基等份分成22份扇形面积,各圆周的半径按照每个支座分配面积相等的原则确定,隔震支座布置见图3。根据上述布置原则,计算得到隔震层屈重比为6.43%,各支座的长期面压较均匀,最大长期面压为5.2 MPa。

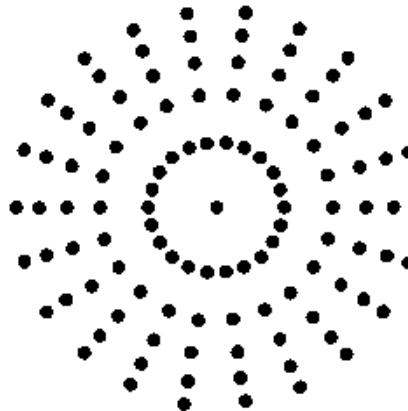


图3 支座布置

Fig. 3 Diagram of bearings configuration

隔震后结构的前十阶周期、频率、振型的方向及质量参与系数见表5。从表中可得,隔震后结构周期为2.376 s,较抗震结构大大延长。结构一阶振型质量参与系数大约为98%,高阶振型对结构影响较小。

#### 3.2 地震动输入

采用根据核电站抗震设计标准谱RG1.60拟合得到的地震波,其时程曲线见图4。

表5 抗震结构和隔震结构自振特性

Table 5 Modal analysis of seismic and isolated structure

阶数	周期/s	频率/Hz	质量参与系数/%	方向
2, 376	0.42	98.00	Y	
2, 376	0.42	98.00	X	
0.226	4.42	0.0070	Y	
0.226	4.42	0.0070	X	
0.153	6.54	0.0093	Y	
0.153	6.54	0.0093	X	
0.084	11.88	78.00	Z	
0.077	12.97	0.0004	Y	
0.077	12.97	0.0004	X	
0.069	14.50	3.03	Z	

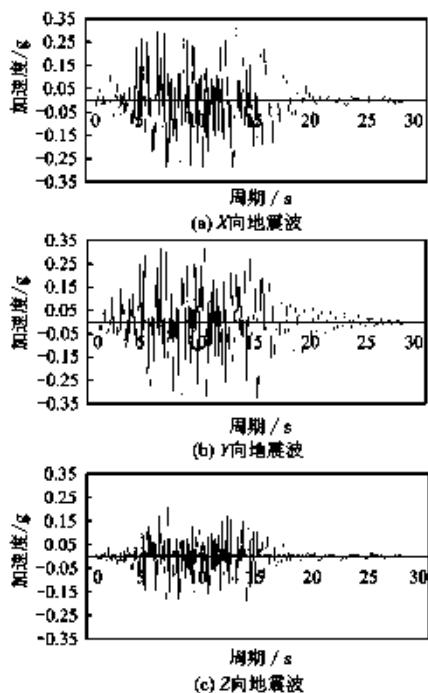


图4 地面加速度时程曲线

Fig. 4 Time history of ground acceleration

图5为3条地震波加速度频谱分析。结果表明,3条地震波频段范围以0~15 Hz频段谱为主,与结构前10阶频率范围一致。地震波在0~5 Hz频段谱强度较大,对应于结构前4阶频率,质量参与系数较大,对结构影响较大。

## 4 隔震分析

对结构进行时程分析,设防地震下水平向地面运动加速度峰值取0.16g,竖向加速度峰值取0.11g;罕遇地震下水平向地面运动峰值加速度取0.33g,竖向加速度峰值取0.22g。

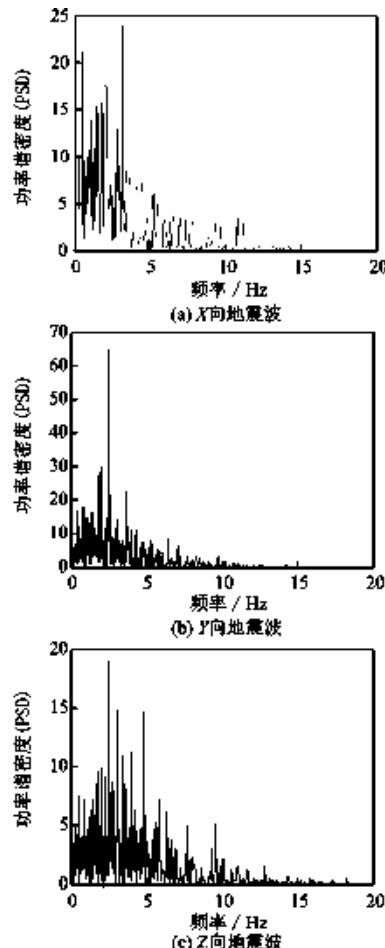


图5 加速度频谱分析

Fig. 5 Frequency spectrum of ground acceleration

### 4.1 设防地震下结构反应

设防地震下,上部结构楼层剪力见图6,楼层倾覆弯矩见图7。图中,安全壳指外围维护结构,对应图3中的安全壳,内部设备层对应图3中的内部结构。

从图6、图7可看出,隔震结构各楼层的剪力和倾覆弯矩与抗震结构相比明显减小,隔震结构与抗震结构楼层剪力比和倾覆弯矩比的最大值为0.22,根据《建筑抗震设计规范》<sup>[10]</sup>,上部结构水平地震作用可以降低1度进行设计,结构抗震安全性大大提高。

### 4.2 罕遇地震下结构反应

罕遇地震下隔震结构叠层橡胶支座的极大面压为+9.30 MPa,极小面压为+1.12 MPa,满足规范规定。结构隔震层最大位移为149.2 mm,小于0.55D和3T<sub>r</sub>两者的最小值,隔震层位移满足要求。

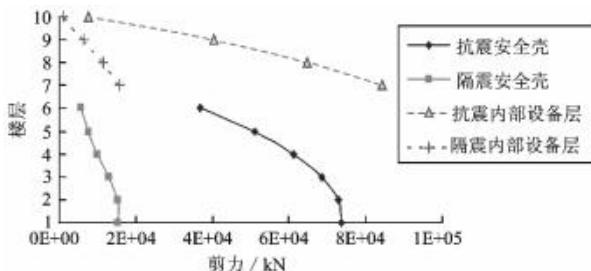


图6 上部结构楼层剪力

Fig. 6 Shears of the upper-structures

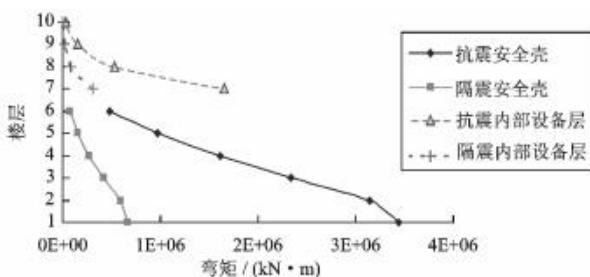


图7 上部结构楼层倾覆弯矩

Fig. 7 Overturning moment of the upper-structures

罕遇地震下结构顶层层间位移时程曲线见图8。由图可得,隔震后结构顶层层间位移大大减小,有利于结构安全。

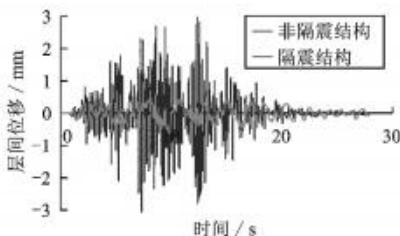


图8 顶层层间位移时程曲线

Fig. 8 Roof displacement time history

## 5 楼层反应谱分析

楼层反应谱(FRS)是核电厂房主结构和设备子系统抗震设计的主要依据<sup>[9]</sup>。楼层反应谱计算方法有两种,一种是通过地震动反应谱输入直接得到楼层谱,简称“直接法”;另一种是通过地震波输入的时程分析计算,简称“时程法”。本文采用时程法建立设备顶层的楼层反应谱。

为了考虑输入参数、结构模型和计算方法上的不确定性引起的结构主频的不确定性,参考规范RG1.122的做法,对计算的楼层反应谱在峰值处按15%进行拓宽。图9为结构内部设备顶层处水平方

向的楼层反应谱,阻尼比为5%。

图9表明,基础隔震降低了结构水平向的楼层反应谱。在频率大于0.5 Hz的频段,隔震结构楼层反应谱值远远低于抗震结构的,在小于0.5 Hz的频段,隔震结构楼层反应谱值大于抗震结构的,这是由于基础隔震是通过增大结构的周期来降低结构的地震反应,对低频段长周期的结构不起作用。低频段反应谱峰值出现在0.42 Hz,对应于结构隔震后第1阶频率,说明此时附属设备与主结构产生共振,放大了附属设备的地震反应;高频段在6.54 Hz处楼层反应谱值最大,对应于结构的第5和第6阶频率,说明激发了基础隔震结构的高阶振型,这会对处于此频率段的附属设备产生不利影响。

图10为隔震前后设备顶层的竖向楼层反应谱对比,由图可知,基础隔震不能降低竖向的楼层反应谱。这是由于基础隔震支座的竖向刚度与上部结构刚度相差不大,不能通过有效增大结构的竖向周期来降低结构的反应。

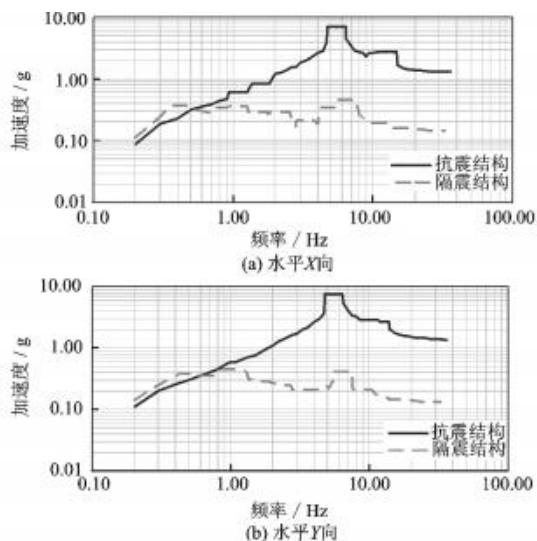


图9 设备顶层水平向楼层反应谱

Fig. 9 FRS at roof of equipment in horizontal direction

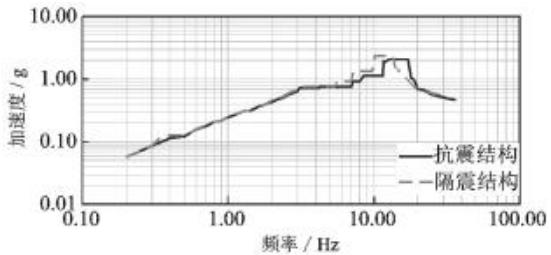


图10 设备顶层Z向楼层反应谱

Fig. 10 FRS at roof of equipment in vertical direction

## 6 结 论

建立了 CPR1000 反应堆厂房的混合分析模型, 对反应堆厂房进行基础隔震研究。采用时程分析法, 研究了反应堆厂房结构的隔震效果, 并建立了结构的楼层反应谱。得到如下结论:

(1) 本文所提出的 CPR1000 反应堆混合分析模型兼具计算效率和精度, 可方便地用于 CPR1000 反应堆厂房的隔震设计与分析。

(2) 应用基础隔震技术后其减震效果明显, 结构减震系数仅为 0.22, 上部结构水平地震作用可以降低 1 度进行计算, 结构抗震安全性能大大提高。

(3) 基础隔震可明显降低结构水平向的楼层反应谱, 有利于反应堆内部设备的地震安全, 增加安全储备。隔震后可大大拓宽 CPR1000 反应堆厂房对场地的要求。

## 参 考 文 献 :

- [1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.  
Zhou F L. Engineering Structure Vibration Control [M]. Beijing: The Earthquake Publishing House, 1997.
- [2] 党 育, 杜永峰, 李 慧. 基础隔震结构设计及施工指南[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.  
Dang Y, Du Y F, Li H. Guidelines on the Design and Construction of Base Isolation Structure [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2007.
- [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 L L, Zhai Ch H. 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] 曾 奔, 周福霖. 基于功率谱密度函数法的核电厂房增加隔震措施后的楼层反应谱分析[J]. 核动力工程, 2009, 30(3): 13-16.  
Zeng B, Zhou F L. Floor response spectra analysis of nuclear reactor buildings with additional base-isolation measures based on PSDF[J]. Nuclear Power Engineering, 2009, 30(3): 13-16.
- [5] 曾 奔. 考虑土-结构相互作用下基础隔震技术在 CPR1000 型核电厂房中的应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.  
Zeng B. The research on application of base-isolated technique on the reactor building of CPR1000 considering soil-structure interaction[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2009.
- [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.  
Li D M. Analysis of a nuclear power plant containment isolation seismic response[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [7] 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): 3539-3549.
- [8] 郑 志. 某核电站安全壳隔震可靠度分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
Zheng Zh. Seismic reliability analysis of base isolated concrete containment in nuclear power plants [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [9] 朱秀云, 潘 蓉, 李建波. 考虑 SSI 效应的核电站反应堆厂房楼层反应谱分析[J]. 核技术, 2013, 36(4): 1-8.  
Zhu X Y, Pan R, Li J B. FRS comparative analysis of the nuclear power plant considering SSI effect [J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(4): 1-8.
- [10] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S].