

# 隔震体系的特征参数对 AP1000 地震响应影响的研究

周志光 魏晓冬

(同济大学,上海 200092)

**摘 要:**隔震技术能使核电厂结构获得许多潜在的好处,其中最重要的是使得核电厂的抗震设计标准化。当设计地震动变化时,可以通过选择不同的隔震体系来满足这种变化,而不需要重新设计隔震层上部的“结构、系统和部件”,从而使得隔震体系的设计显得尤为重要。本文通过建立三维集中质量-杆系模型并在三个方向输入地震波,改变隔震支座恢复力模型的相关参数,研究隔震体系的特征参数对 AP1000 核电厂结构地震响应的影响。改变的参数包括水平初始刚度、屈服后刚度和屈服力,通过数值模拟得到 AP1000 结构不同位置处的楼层加速度反应和隔震支座的位移响应。数值模拟表明隔震支座的初始刚度、屈服后刚度和屈服力对 AP1000 结构的响应有不同程度的影响,具体设计隔震体系时可参考这些趋势结果优化隔震体系的特征参数。

**关键词:**AP1000;三向地震动;隔震体系的特征参数;加速度反应谱;核电厂

**中图分类号:**TU352.1 **文献标识码:**A

## 引 言

基础隔震技术是通过设置水平向刚度较小的隔震装置,减少传入上部结构的能量,从而达到降低上部结构地震响应的目的。地震作用下,隔震层以上的结构做近似平动,结构位移、加速度及层间作用力相对于非隔震时大幅减小<sup>[1]</sup>。

日本从 1981 年开始对核电厂隔震进行了研究,并于 2000 年发布《原子力发电所免震构造设计技术指南》(JAE 4614—2000)<sup>[2]</sup>;欧盟原子委员会在 1995 年提出相应的核电厂建造及隔震规范<sup>[3]</sup>;美国核管会(NRC)制定了一系列导则指南,规定了对核电厂基于性能的设计。然而由于核电厂隔震设计规范不完善以及审批过程的复杂等原因,隔震在核电的应用还十分有限;目前只有南非的 Koeberg 核电厂和法国的 Cruas 核电厂运用了隔震技术并投入使用至今。

许多学者对核电厂隔震进行了相关研究,Huang<sup>[4]</sup>对核电的性能设计进行了研究,指出隔震能提高结构的抗震性能并能减少次要部件的损坏。Annie Kammerer 等人<sup>[5]</sup>对隔震反应堆的连接部位进行了研究。周福霖<sup>[6]</sup>建立层间隔震体系的两质点简化分析模型与多质点动力时程分析模型,提出层间隔震体系隔震层参数优化设计的方法。王涛<sup>[7]</sup>

基金项目:国家自然科学基金项目资助(51478357);重大科技专项(2013ZX06005004-002-001)

作者简介:周志光,博士,副教授。

对核电厂三维隔震技术进行了理论和试验研究,指出三维隔震系统能减少设备的竖向反应。周志光<sup>[8]</sup>研究了核电厂模型在竖向地震作用下的结构响应,给出不同竖向隔震体系对结构竖向反应的影响。刘彦辉<sup>[9]</sup>针对叠层橡胶隔震支座与地下室悬臂柱组成的串联隔震体系的 P- $\Delta$  效应及叠层橡胶隔震支座转动进行了研究。对于隔震支座的力学模型,文献<sup>[10]</sup>研究了在大变形下隔震支座有受拉出现橡胶空洞化的情况,提出了损伤的模型。文献<sup>[11]</sup>研究了大形隔震支座在大剪切变形以及有轴压力作用下力-位移曲线,并考虑了不同的水平加载方向的影响。Jenna<sup>[12]</sup>对某核电厂隔震结构进行二维分析,通过改变隔震参数,说明不同初始刚度、屈服后刚度和屈服力对核电厂响应的影响。本文研究三向输入地震波作用下隔震体系的特征参数对 AP1000 核电厂结构地震响应的影响。

## 1 数值分析模型

### 1.1 分析过程

在本文中为考虑隔震体系参数取值的不同,首先建立整体 AP1000 模型,由于重点考察整体结构的动力响应而不是研究某一区域的响应,因此采用动力等效的集中质量-杆系模型。建立隔震支座,采用双线性力学恢复模型。在三个方向同时输入地震波,通过分别改变隔震支座的初始刚度、屈服后刚度和屈服力进行分析,提取结构不同位置处的加速度反应谱(楼层加速度反应),观察参数的变动对加速度反应谱的影响。

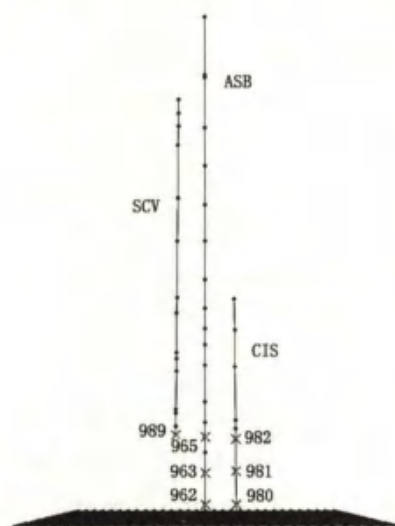


图 1 AP1000 模型

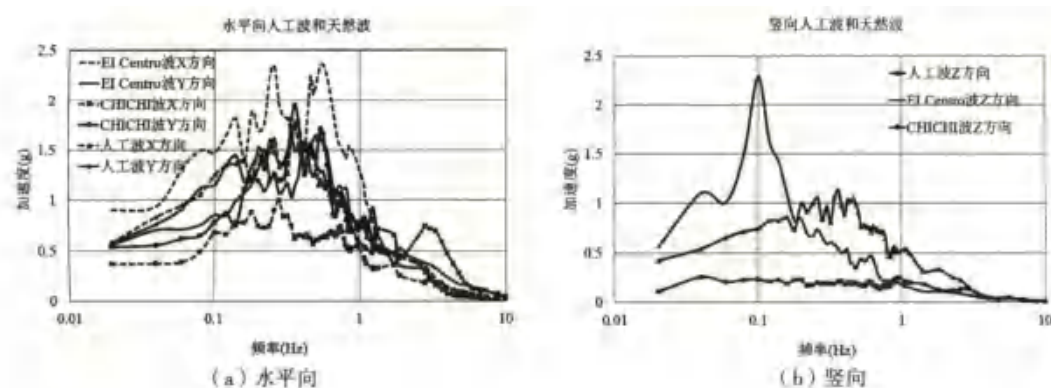


图 2 地震波反应谱

### 1.2 结构模型

AP1000 分为三个主体部分:辅助厂房和屏蔽厂房(ASB)、钢制安全壳容器(SCV)和

安全壳内部结构(CIS)。ASB高度为83.10m,SCV高度为67.48m,CIS高度为33.07m。AP1000的钢制安全壳是安装在辅助厂房和屏蔽厂房(混凝土安全壳)内部的,所以钢制安全壳的底部高于辅助厂房和屏蔽厂房底部12.04m。AP1000为非能动反应堆,在屏蔽厂房的顶部71.55m处安装有非能动安全壳冷却系统,在钢制安全壳的49.83m处安装有回转式吊车,这两个节点均具有较大的质量。

图1为AP1000模型,在基底中心位置处有三个集中质量-杆系结构,为便于说明图中将三个集中质量-杆系错开显示。整个AP1000模型建立在45.72m×45.72m的方形刚性底板上,三个主体结构总重量12.403万吨,全部重量由刚性底板支撑。

### 1.3 输入地震动

对于AP1000核电结构,运用美国核电规范RG1.60谱生成人工波,同时对原RG1.60频谱中高频部分进行放大。人工波水平两个方向加速度峰值为0.5g,竖向加速度为0.33g。同时取台湾集集地震波和El Centro波两条天然波,将水平一个方向峰值加速度放大为0.5g,其余的一个水平方向和竖向乘以相同的放大系数。图2为人工波和两条天然波的加速度反应谱。

### 1.4 隔震设计

隔震体系的特征取决于隔震支座的参数和属性,铅芯橡胶支座的滞回曲线分为两种:(1)双线性,有明显的初始刚度、屈服后刚度和屈服力;(2)Bouc-Wen模型,接近真实滞回曲线形状,曲线较光滑,可以进行精细化分析。

本文考虑应用双线性模型,计算工况1取隔震支座初始刚度 $K_1$ 的放大系数为25%、50%、100%、200%和400%,并且保持其他值不变;工况2取隔震支座初始刚度 $K_2$ 的放大系数为25%、50%、100%、200%和400%,并且保持其他值不变;对于屈服力 $Q_d$ ,考虑其真实情况下改变情况较小,因此取 $Q_d$ 的放大系数为80%、90%、100%、110%和120%,此记为工况3。工况4为保持屈服后刚度与初始刚度比值0.1不变,改变隔震支座初始刚度为25%、50%、100%、200%和400%倍。如图3分别为工况1、工况2、工况3和工况4的力-位移曲线图。

## 2 结构频率分析

### 2.1 上部结构频率分析

AP1000模型上部三个主体结构的频率见表1所列。对于三个主体结构,其水平两个方向的动力特性比较一致,有利于进行隔震设计。

表1 上部结构频率

名称	ASB		SCV		CIS	
方向	X	Y	X	Y	X	Y
频率(Hz)	3.255	3.603	5.721	5.782	12.753	13.864

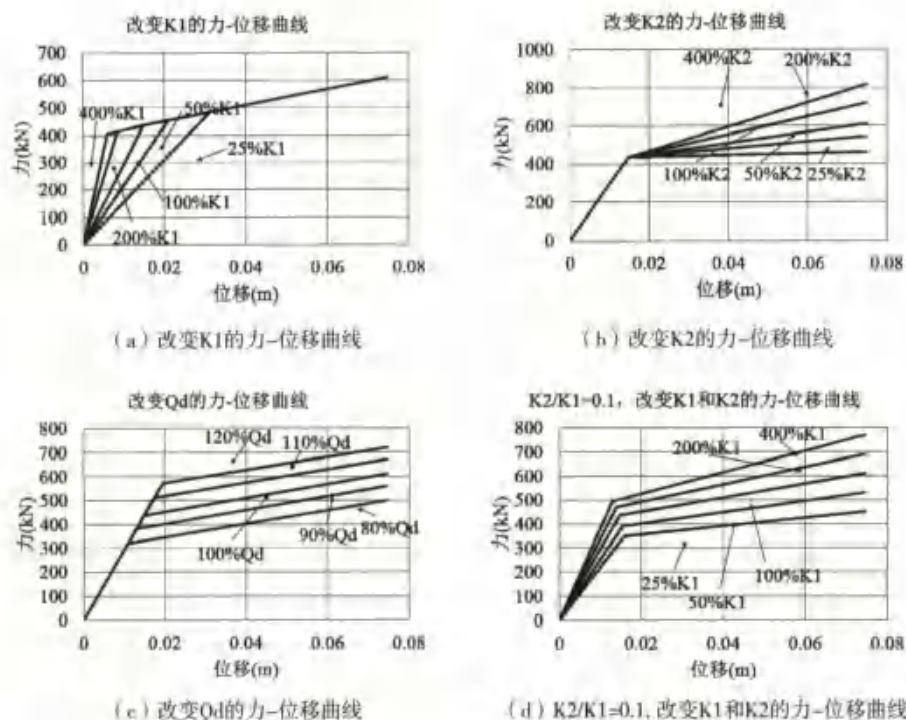


图3 双线性模型

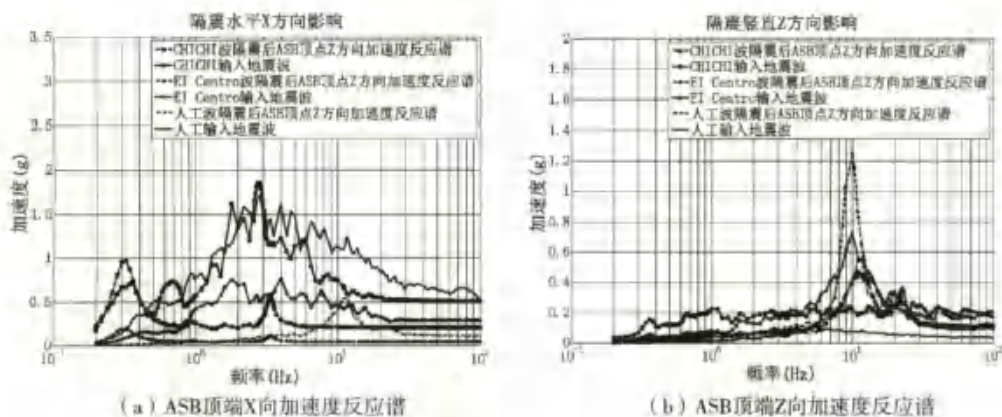


图4 隔震效果示意图

## 2.2 隔震结构频率分析

隔震支座建立在模型底板的下方,提供总水平等效刚度为  $6.01 \times 10^5 \text{ kN/m}$ ,总竖向刚度为  $2.81 \times 10^8 \text{ kN/m}$ 。隔震支座的竖向刚度较大,在本例中 AP1000 隔震仅为水平方向隔震。水平方向周期为 2.9s,竖向周期为 0.05s。以上述隔震支座属性值为基准属性值,即放大系数为 100%对应的支座属性。

### 3 地震反应分析结果

#### 3.1 隔震的减震效果

首先考察采用基准属性隔震支座相比于固定支座的减震效果,图4显示了ASB顶端水平和竖直方向的加速度反应谱以及输入地震动的反应谱。结果显示隔震能明显降低水平加速度反应,尤其降低高频部分峰值,对于低频也就是隔震系统频率附近,峰值变大;同时隔震会对竖向的加速度有放大的效果。本文采用SAP2000进行非线性直接积分时程分析,楼层加速度反应谱的阻尼均取5%。

#### 3.2 工况1:初始刚度的影响

图5显示出主体结构ASB顶端在不同初始刚度下水平X方向的加速度反应谱。对于频率从低到高,加速度反应谱首先出现的峰值对应于隔震系统频率处的峰值,其次出现的峰值对应于所选主体结构的第一频率,再其次出现的峰值对应于主体结构第二频率。从图中可以观察到,初始刚度的改变几乎不改变低频处加速度反应谱峰值对应的频率,这是由于等效刚度在这个工况下是不变的,因此隔震系统的频率基本不发生移动。随着初始刚度的增加,隔震系统频率处的楼层反应加速度在减小。同时,对于主体结构第一频率对应的峰值加速度随着初始刚度的增加在逐渐增大。X方向与Y方向动力特性较为一致,出现的频谱变化也较为统一,因此下文均只列出X方向加速度反应谱。

#### 3.3 工况2:屈服后刚度的影响

图6显示出主体结构ASB顶端在不同屈服后刚度下水平X方向的加速度反应谱。观察图可以看出,屈服后刚度对结构加速度反应谱的影响较为明显,随着屈服后刚度增加,对于人工波和El Centro波隔震系统频率处的楼层反应加速度急剧增加,而对于集集地震波,这种变化相对小一些。当屈服后刚度减小,隔震系统频率处的楼层反应加速度减小,屈服后刚度增加的倍数对加速度反应谱的影响比屈服后刚度减小的倍数的影响大。

#### 3.4 工况3:屈服力的影响

图7显示出主体结构ASB顶端在不同屈服力下水平X方向的加速度反应谱。随着屈服力增加,隔震系统频率处的楼层反应加速度峰值略有减小,主体结构峰值略有增加;在0.5Hz到4Hz之间,加速度峰值随着屈服力的增加而增加。

#### 3.5 工况4:初始刚度和屈服后刚度共同的影响

图8显示出主体结构ASB顶端在不同初始刚度和屈服后刚度(刚度比值保持不变)下水平X方向的加速度反应谱。该工况与工况2变化趋势较为类似,这说明了 $K_2$ 变动起主导作用,但是同工况2相比,改变屈服后刚度的同时也改变初始刚度会对隔震频率处的加速度峰值有抑制作用,对主体结构频率处的加速度峰值有放大作用。

#### 3.6 隔震支座位移

限于篇幅,这里选取工况1考察隔震支座的位移轨迹,图9展示了El Centro波和集

集地震波作用下其中一个隔震支座的位移平面图。从图中可以看出,由于地震波的 PGA 均到达 0.5g 隔震支座的位移相对较大。可以看出随着屈服后刚度的改变,隔震支座的 面内运动轨迹会显著改变,支座的位移随着初始刚度的增大而减小。

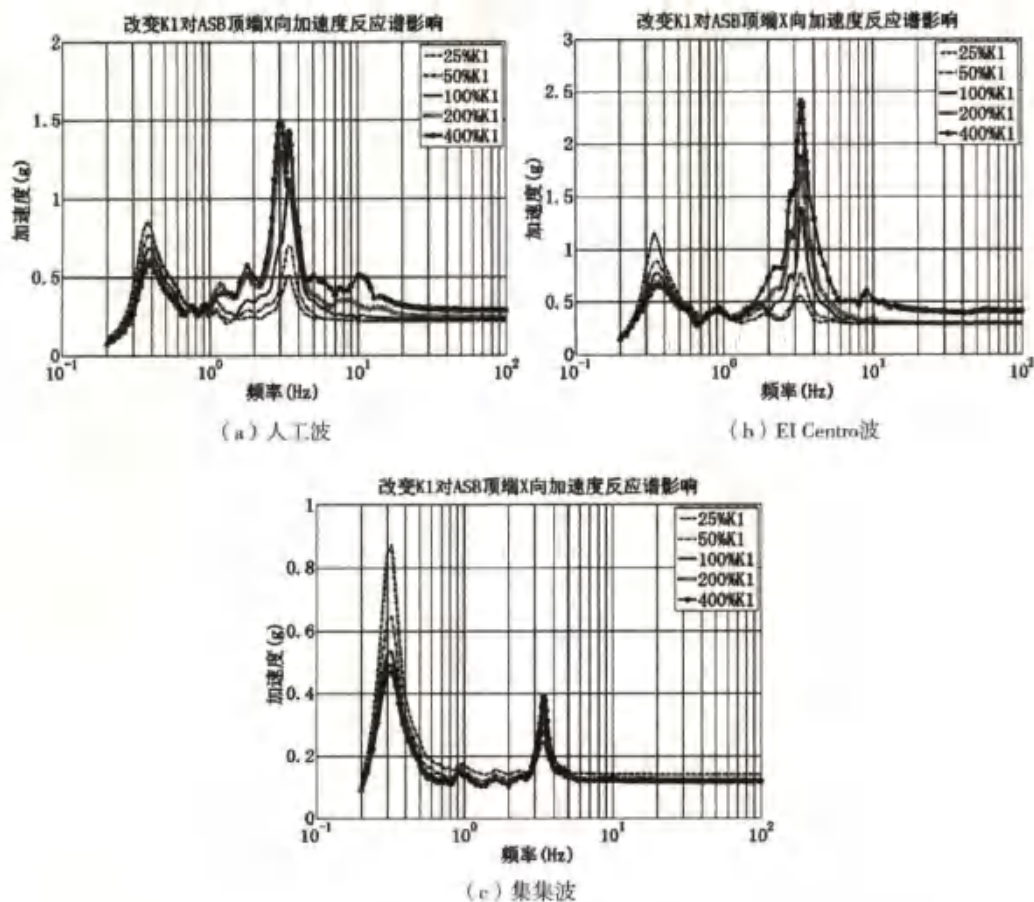
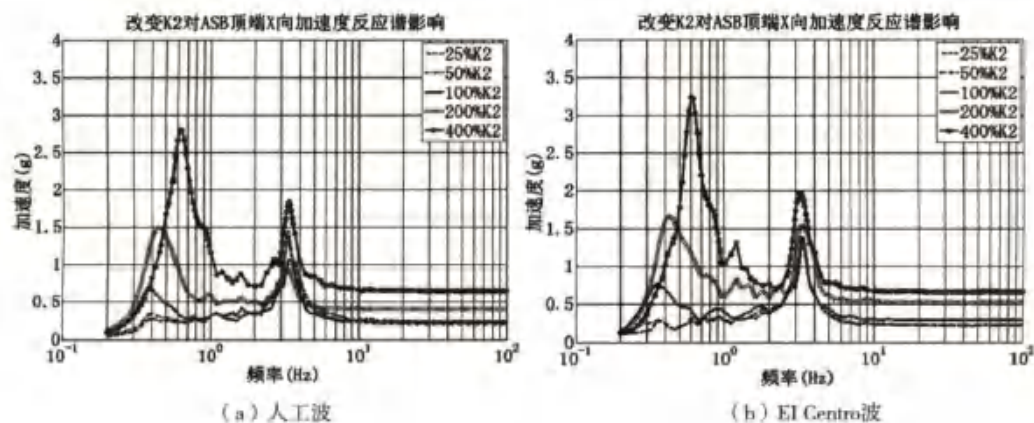


图5 初始刚度的影响





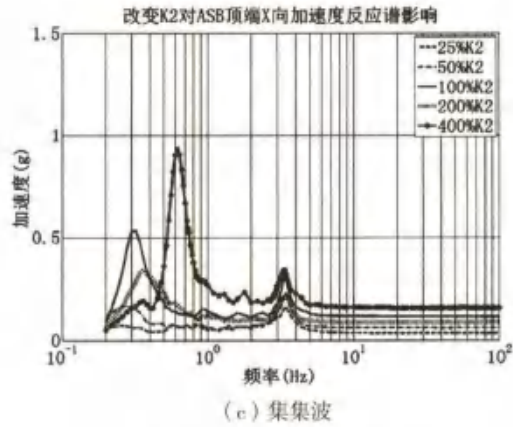


图6 屈服后刚度的影响

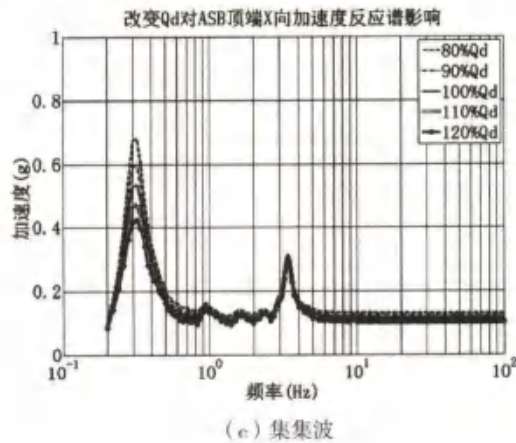
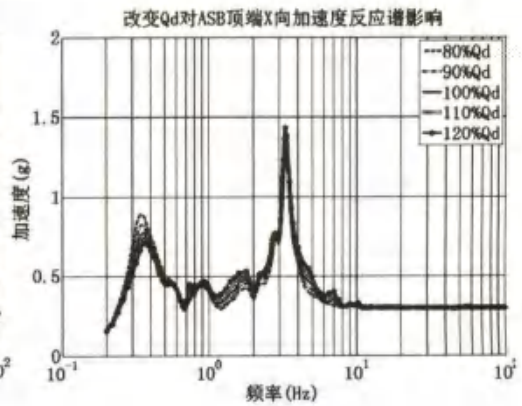
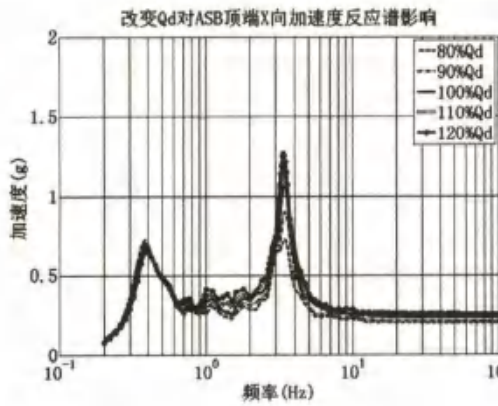


图7 屈服力的影响

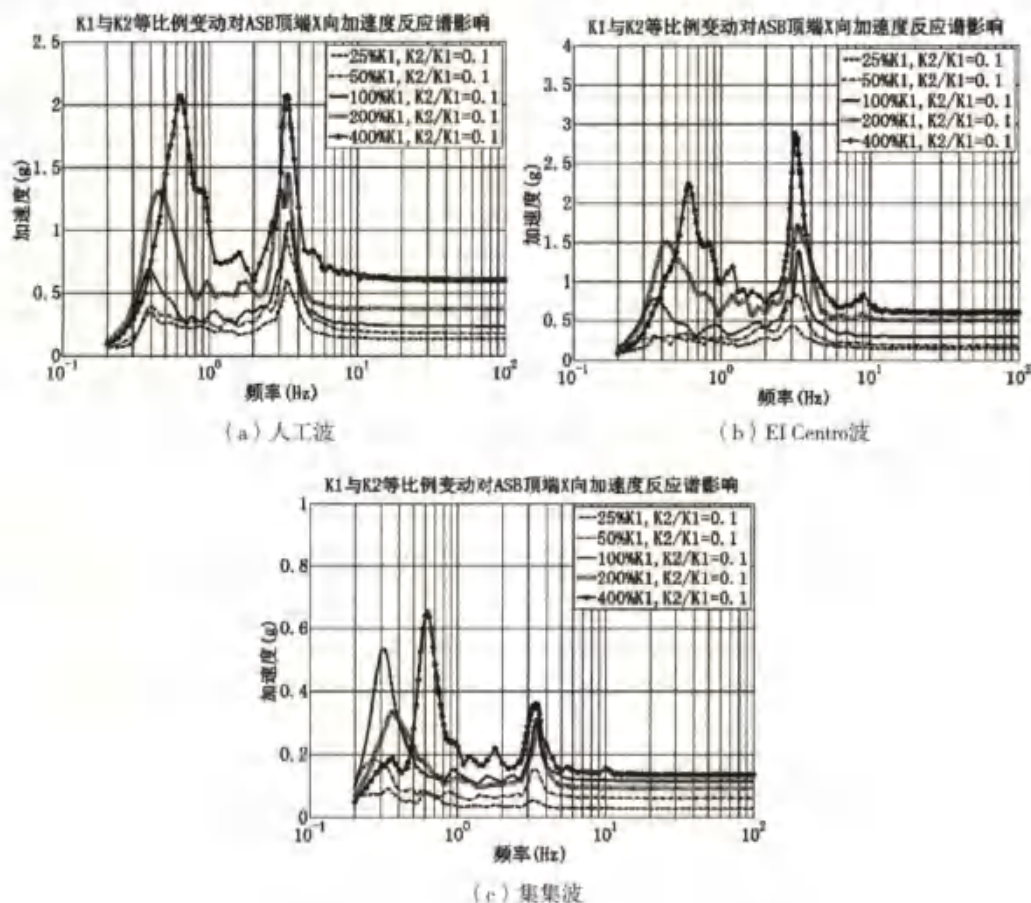


图8 初始刚度和屈服后刚度比例变化时的影响

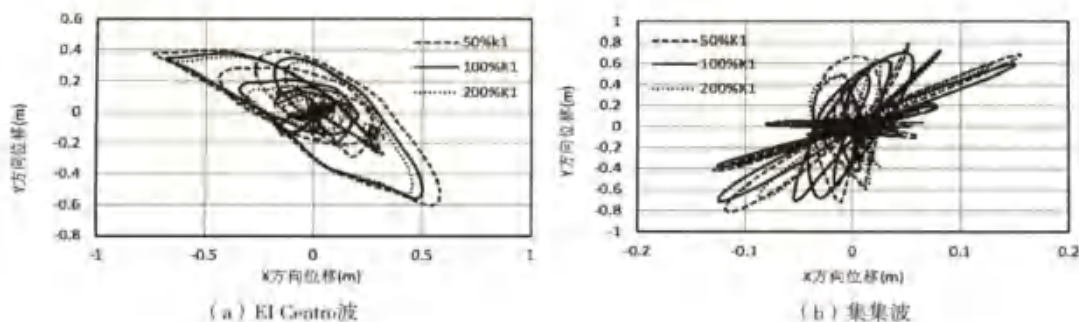


图9 隔震支座的位移(变化初始刚度)

## 4 结 论

本文考虑隔震支座的不同特征参数对 AP1000 核电厂模型地震响应的影响,通过提取 AP1000 中主体结构加速度反应谱和支座的位移,比较不同初始刚度、屈服后刚度和屈服力对模型地震响应的影响。通过分析,得到以下结论:



(1)对于 AP1000 核电厂这种刚性较大的结构,水平方向隔震能明显降低结构水平加速度反应谱值,减小结构地震响应,但是竖向加速度反应谱会放大。

(2)随着隔震支座初始刚度的增加,隔震系统频率处的加速度反应谱峰值会减小,而上部结构基频处的加速度反应谱峰值会增大。

(3)屈服后刚度对结构加速度反应谱影响较大,屈服力对结构加速度反应谱有一定的影响。

(4)改变屈服后刚度的同时改变初始刚度会对反应谱有部分影响,与只改变屈服后刚度情况相比,改变屈服后刚度的同时也改变初始刚度会对隔震频率处的加速度反应谱峰值有抑制作用,对主体结构频率处的加速度反应谱峰值有放大作用。

(5)隔震参数设计的合理性对于 AP1000 隔震十分重要,不同的隔震参数会对 AP1000 楼层处的加速度反应谱和支座的位移产生不同影响。

## 参考文献

- [1] 谭平,周福霖. 隔震技术的研究与工程应用[J]. 施工技术,2008,37(10): 5-6(Tan Ping, Zhou Fulin. Research and application of Seismic Isolation System for Civil Engineering Structures[J]. Construction Technology,2008,37(10): 5-6. (in Chinese))
- [2] 原子力発電所免震構造設計技術指針[S]. 2000(JEAG 4614-2000 Design specifications of base isolation technology of nuclear power plant[S]. 2000(in Japanese))
- [3] Martelli A, Forni M, Bergamo G, et al. Proposal for design guidelines for isolated nuclear facilities [C] //Proc. 13th Congress SMIRT. Italy, 1995.
- [4] Yin-Nan Huang, Andrew Whittaker. Seismic performance assessment of base-isolated safety-related nuclear structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 39(13): 1421-1442.
- [5] Annie Kammerer, Andrew Whittaker, Justin Coleman. Regulatory Gaps and Challenges for Licensing Advanced Reactors Using Seismic Isolation[R]. U. S. : Idaho National Laboratory, 2016: 33-41.
- [6] 周福霖,张颖,谭平. 层间隔震体系的理论研究[J]. 土木工程学报,2009,42(8): 1-8(Zhou Fulin, Zhang Ying, Tan Ping. Theoretical study on story isolation system[J]. China Civil Engineering Journal, 2009,42(8): 1-8(in Chinese))
- [7] 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(1): 238-242(Wang Tao, Wang Fei, Ding Lutong. Theoretical and experimental study on three-dimensional base-isolated nuclear power plant[J]. China Civil Engineering Journal, 2012,45(1): 238-242. (in Chinese))
- [8] Zhiguang Zhou, Jenna Wong, and Stephen Mahin. Potentiality of Using Vertical and Three-dimensional Isolation Systems in Nuclear Structures[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2016, 48(2): 285-296.
- [9] 刘彦辉,周福霖,谭平,等. 考虑隔震支座转动及 P- $\Delta$  效应的串联隔震结构响应研究[J]. 土木工程学报,2015,48(9): 60-66(Liu Yanhui, Zhou Fulin, Tan Ping et al. Study of dynamic response of serially isolated structure considering P- $\Delta$  effect and rotation of bearings[J]. China Civil Engineering Journal, 2015,48(9): 60-66 (in Chinese))
- [10] Manish Kumar, Andrew S. Whittaker and Michael C. Constantinou. An advanced numerical model

of elastomeric seismic[J]. Earthquake Engineering Structural Dynamics,2014,43(13): 1955—1974.

[11] Masaru Kikuchi, Takahito Nakamura, and Ian D. Aiken. Three-dimensional analysis for square seismic isolation bearings under large shear deformations and high axial loads [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2010,39(13): 1513—1531.

[12] Jenna Wong, Andreas Schellenberg, Stephen Mahin. Effects of Isolator Modeling on Floor Response Spectra of Seismically Base Isolated Nuclear Power Plant[C] //Proc. 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Japan, 2013.

## **Study on the influence of the characteristic parameters of isolation systems on the seismic response of the AP1000 structure**

Zhiguang Zhou Xiaodong Wei

(Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Isolation technology can bring many potential benefits to nuclear structures. The most important one is to make standardized seismic design of nuclear power plants. Chang of design base earthquake can be adapted by selecting a different isolation system, without the need to redesign "Structures, Systems and Components" above the isolation layer. So it is important to design the isolation system properly. A 3D lumped-mass stick model was established to study the seismic response of AP1000 nuclear structure under three-directional input motions. The effect of changing characteristic parameters of isolation systems on the seismic response of nuclear structures was studied. The characteristic parameters include initial stiffness, post-yield stiffness and isolator strength. Floor response spectra at different positions and response displacements of the isolators were compared. The results show that initial stiffness, post-yield stiffness and isolator strength have different degrees of effects on seismic response of the nuclear structures.

**Keywords:** AP1000; three-directional motions; characteristic parameters of isolation systems; floor response spectra; nuclear power plant

**E-mail:** zgzhou@tongji.edu.cn