

安栋.汽机弹簧隔振基础地震反应及弹簧变形分析[J].地震工程学报,2020,42(6):1444-1450.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1444

AN Dong.Seismic Response of Spring Vibration-isolated Foundation for Turbo-generators and Associated Spring Deformation Analysis[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(6):1444-1450.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1444

汽机弹簧隔振基础地震反应及弹簧变形分析

安 栋

(北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144)

摘要: 采用 SeismoStruct 软件建立有限元模型对某汽轮发电机组弹簧隔振基础进行时程分析,研究弹簧隔振基础的频率振型和地震响应、层间变形、弹簧变形等特性。研究表明,弹簧隔振基础的自振频率较低,竖向自振频率远离机组工作扰频;弹簧隔振装置能够在地震作用时减小台板加速度反应,并根据刚度重新分配水平地震作用,充分发挥立柱的抗震能力。结果表明基础设计符合《建筑抗震设计规范》标准,达到了弹簧隔振抗震的目标,基础设计合理、安全可靠。SeismoStruct 作为有限元分析软件,对汽机基础的模拟能够达到工程需要。

关键词: 弹簧隔振基础; 频率; 弹簧变形; SeismoStruct 模型

中图分类号: TU362; TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)06-1444-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.06.1444

Seismic Response of Spring Vibration-isolated Foundation for Turbo-generators and Associated Spring Deformation Analysis

AN Dong

(School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: A finite element model of the spring vibration-isolated foundation for a turbo-generator was established by using SeismoStruct for time history analysis. The frequency, vibration mode, seismic responses, inter-story deformation, and spring deformation of the foundation were analyzed. Results show that the natural frequencies of the spring vibration-isolated foundation are lower than those of common ones and the vertical frequencies are far from the working disturbance frequency of the units. The spring vibration-isolated device can reduce the acceleration response of the bedplate under an earthquake and redistribute the horizontal earthquake action according to the stiffness, thus ensuring the maximum seismic capacity of the column. A numerical simulation shows that the foundation design meets the standard of the Code for Seismic Design of Buildings in China and achieves the goal of spring vibration isolation. Overall, the foundation design is reasonable, safe, and reliable.

Keywords: spring vibration-isolated foundation; frequency; spring deformation; SeismoStruct model

收稿日期: 2019-07-28

基金项目: 北方工业大学青年拔尖人才培养计划(XN012/072)

第一作者简介: 安 栋(1986-), 男, 博士, 讲师, 主要从事结构抗震与吸能减震研究方面的工作。E-mail: andong@ncut.edu.cn.

0 引言

据世界核能协会统计,中国大陆核电已有超过 40 个机组进入商业运行,约 20 个机组在建,还有更多机组准备开建^[1]。汽轮发电机组是核电电力的重要组成部分。作为常规岛承载汽轮发电机组的结构,汽机基础在承担巨大设备重量的同时,还要承受汽机的动力荷载^[2]。随着核电设计自主化和机组功率大型化的发展,半速汽轮发电机组的使用不可避免地增多,但其 25 Hz 的运行频率与常规框架基础的竖向基频十分接近,易产生“共振”效应,不利于机组运行。

减小汽机基础地震响应有两条对策^[3]:一是降低结构的基频;二是提高体系的阻尼。将台板和立柱分离开的弹簧隔振系统恰好可以满足这两点。五十多年前研究人员首次将弹簧隔振技术运用在汽轮发电机基础上。国外弹簧隔振基础的工程实例较多,但仅限汽机正常运行后的实测分析,没有系统地进行过理论或试验研究^[4]。国内许多专家学者针对核电常规岛使用弹簧隔振基础开展研究,进行了设计选型、理论分析、试验研究、现场测试等工作。罗国澍等^[3]讨论了 3 个实例使用弹簧隔振基础的抗震性能,在基础模型、计算程序、计算假定、计算方法均不相同的情况下得到了相近的结论:弹簧隔振基础可以降低汽机基础的基本频率,使用阻尼器提高体系阻尼比能够有效减小地震响应。朱彤等^[5]建立弹簧隔振系统的动力方程并进行了有限元分析,发现弹簧阻尼隔振可以使结构系统的基础频率前移,减少工作频率下发生共振的几率。宋远齐等^[6]针对我国首台采用弹簧隔振基础的岭澳二期半速机进行了基础选型、设计标准、振动分析和现场测试等一系列研究,结果表明弹簧基础的竖向第一频率远小于半速机组的工作频率,具有较好的动力特性;弹簧基础可以降低地震作用时台板的加速度响应,具有良好的抗震性能,其在核电常规岛中的应用取得了成功。试验方面,邵晓岩等^[4,7]进行了首例汽轮发电机组弹簧隔振基础的模型试验研究,结果表明弹簧隔振基础提高了结构的抗震性能,阻尼器对结构阻尼比的提高有利于结构抗震性能的提高;动力特性方面,通过与数模计算对比,整体计算模型更接近试验结果,即工作频率为 25 Hz 的半速机采用弹簧基础是最佳的方案选择。康灵果等^[8]研究了基础动力特性对机组轴系振动的影响。随着弹簧隔震技术的应用,研究手段更加先进,李汪繁等^[9]搭建了轴系与弹

簧隔振基础联合振动试验台,专门研究了弹簧隔振基础对轴系振动特性的影响。

对弹簧隔振基础的理论分析、数值模拟、试验研究和现场实测已有不少,多数针对动力特性、隔振效率、频率阻尼等进行研究,本文尝试采用 SeismoStruct 软件对基础进行模拟,在符合试验结果的前提下研究基础的弹簧变形,以期达到工程需要的目的,并作为试验的必要验证和补充。而且笔者曾参与的汽机基础模型试验中^[7,10-15],模型差异较大,极有必要单独进行研究。尤其是弹簧隔振基础的立柱顶端放置弹簧隔振器后,基础整体动力特性会发生改变,有必要采用多种手段全面研究。

基于此,本文拟采用数值模拟的方法研究汽轮发电机组弹簧隔振基础的抗震性能,首先进行自振特性分析得到基础的频率和振型,随后输入Ⅶ度设防地震的加速度时程,通过时程分析研究汽机基础的地震响应、弹簧变形等,最后给出基础的抗震性能评价,为该类结构的数值模拟和设计提供指导。

1 数值模拟

1.1 模型设计

本文所研究汽机弹簧隔振基础的尺寸来自文献^[16],平面图与剖面图如图 1 所示。模型所用弹簧隔振器的刚度列于表 1。

1.2 有限元模型

SeismoStruct 是考虑材料和几何非线性的结构地震反应计算程序。进行结构时程分析时,输入混凝土和钢筋材料参数与文献^[16]一致。钢筋和混凝土本构关系分别采用强化 Menegotto-Pinto 模型^[17]和 Mander 非线性本构模型^[18],分别定义纵筋和箍筋的直径、位置和数量。梁柱单元采用基于位移的 infrmDB 单元,截面纤维个数取 150。采用瑞利阻尼,阻尼比为 0.05。弹簧隔振装置采用 Link 单元和线性模型,分别按照试验中隔振器的刚度系数设置水平向与竖向刚度。汽机基础的 SeismoStruct 模型如图 2 所示。

1.3 地震波选取

工程项目所在地设防烈度为Ⅶ度,设计基本加速度 0.1g,地震分组第一组,场地类别Ⅱ类。选用人工地震波、Imperial Valley(美国,1979)和 Alaska(美国,2002)的典型强震记录。根据设防烈度将数字化地震加速度时程的幅值调整为Ⅶ度设防地震^[19]的峰值加速度。模型输入的地震波反应谱见图 3。根据输入地震波及其不同方向将工况分为 6 种(表 2)。

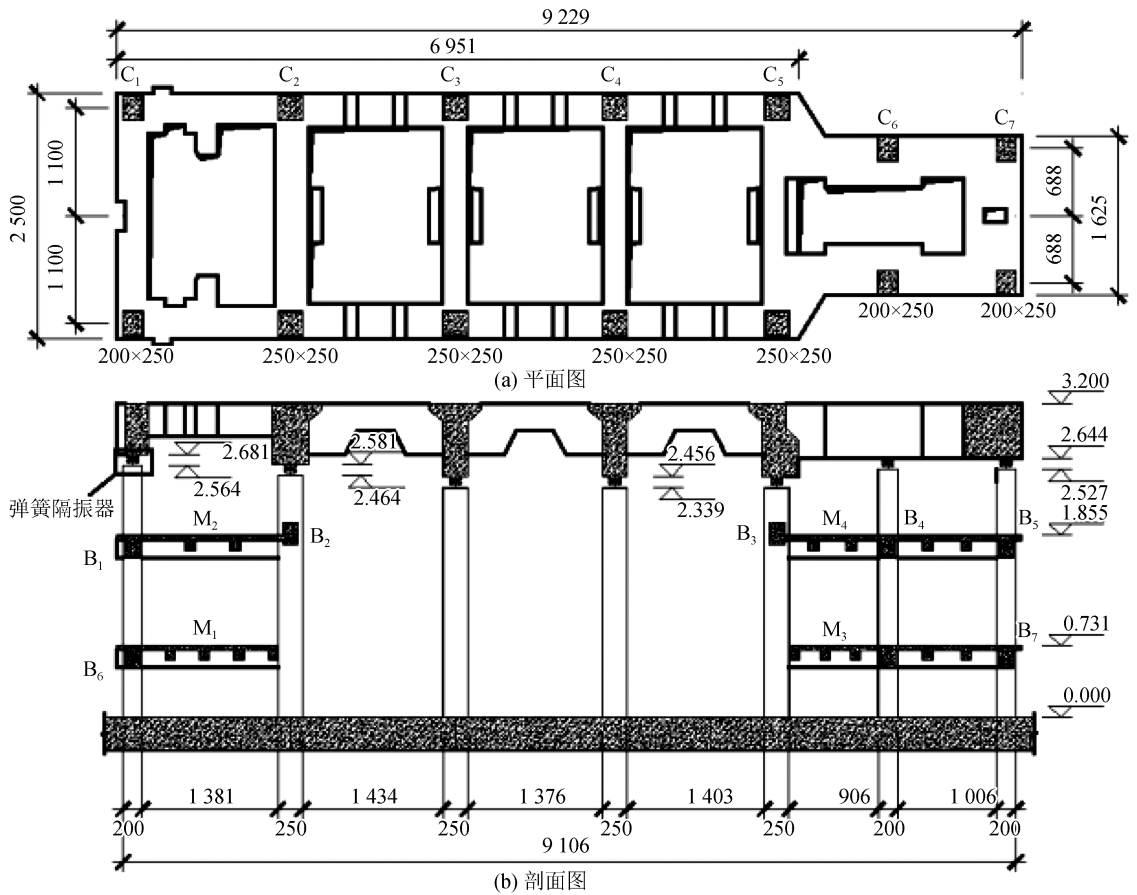


图 1 模型平面和剖面图(尺寸单位 mm,标高单位 m)

Fig.1 Plan and profile of the foundation model

表 1 弹簧隔振器的刚度系数

Table 1 Stiffness coefficient of spring vibration isolator

立柱编号		C ₁	C ₂	C ₃ /C ₄ /C ₅	C ₆	C ₇
弹簧刚度/(kN·mm ⁻¹)	竖向	30.96	59.09	52.44	36.34	20.89
	水平向	16.01	29.74	25.44	20.24	11.36

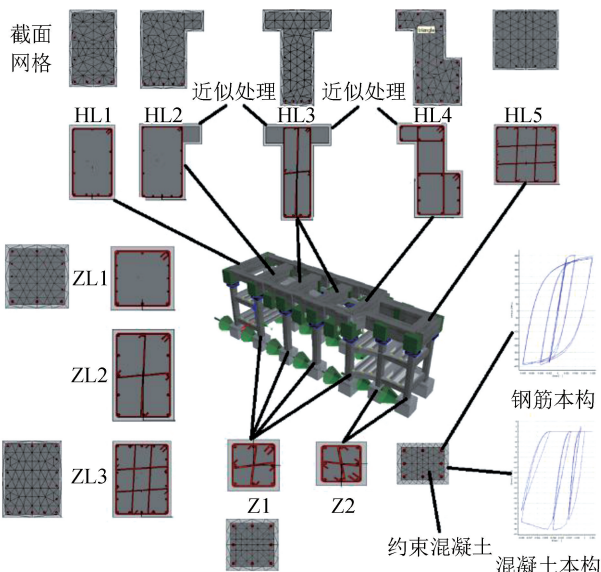


图 2 SeismoStruct 模型及截面网格

Fig.2 Model established by SeismoStruct and section mesh

2 自振特性

图 4 为振型结果及对应的频率。从前 6 阶频率和振型特征可以看出,弹簧隔振基础的自振频率较低,竖向基频远离汽机工作扰频(25 Hz);前两阶振型分别为水平横向平动和纵向平动,自振频率分别为 1.06 Hz 和 1.15 Hz,较为接近。因此进行基础地震反应时程分析时,不能仅输入单向地震动,应分别输入横向和纵向的地震波。基础前 6 阶振型均主要表现为台板振动,说明弹簧隔振装置将台板和立柱分隔,能够在一定程度上实现动力解耦,从而减少机组运行时台板到立柱的动力传递。

3 地震反应

3.1 地震位移反应

对基础有限元模型进行地震反应分析,6种工

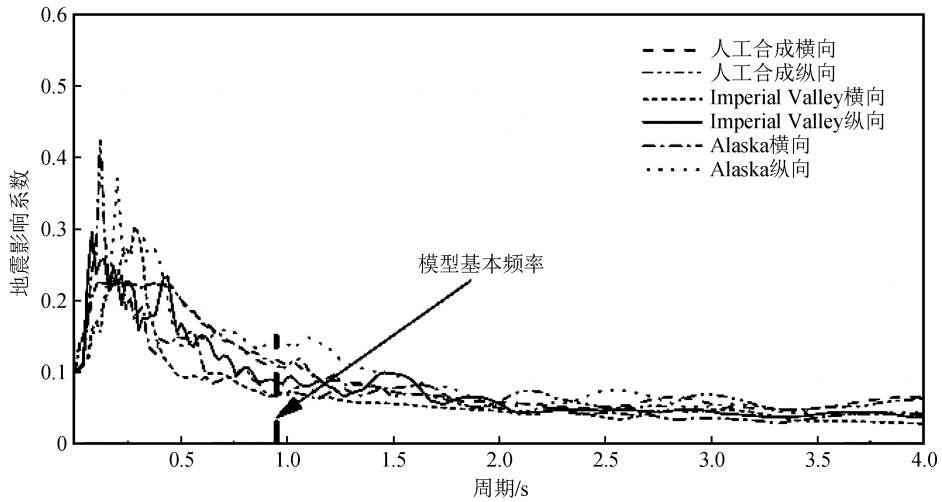


图 3 地震加速度时程反应谱

Fig.3 Response spectra of acceleration applied in pseudo-dynamic experiments

表 2 模拟工况

Table 2 Simulation conditions

地震类型	Ⅶ度设防					
序号	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
地震波名称	人工合成	ImperialValley	Alaska	人工合成	Imperial Valley	Alaska
方向	横向			纵向		

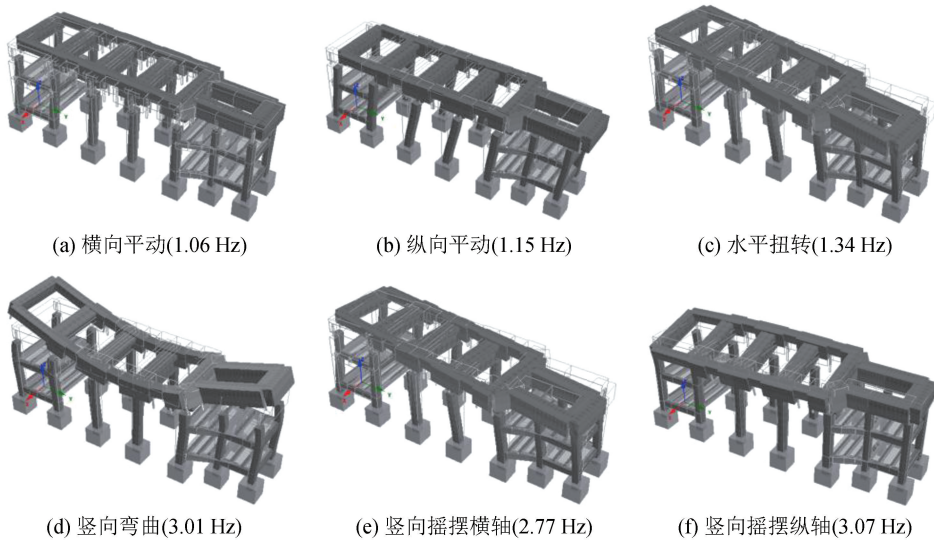


图 4 振型及对应的频率

Fig.4 Vibration mode and corresponding frequency

况下基础台板的位移反应时程曲线见图 5。

将汽机基础台板地震反应的最大值列于表 3。从表 3 可见,Ⅶ度设防地震作用下基础台板加速度的最大反应为 0.93 m/s^2 。弹簧隔振基础的一阶自振频率为 1.06 Hz (周期 0.96 s),远超过场地卓越周期 (0.35 s),使地震影响系数(放大系数)进入反应谱的下降段,加速度反应并未被放大。可见弹簧隔振装置延长了结构的自振周期,有利于基础抗震性

能的提高。基础台板位移的最大反应为 48.59 mm ,其 1.2 倍 (58.31 mm) 小于按照规范要求设置的结构缝 (200 mm)^[19]。综上所述,弹簧隔振装置不会对基础整体与厂房结构产生不利影响。

3.2 基础位移

图 6 为基础不同位置的地震位移最大反应。测点位置从下到上分别是一层平台、二层平台、立柱顶端和台板。横向加载时以 C_2 立柱和 M_1/M_2 平台

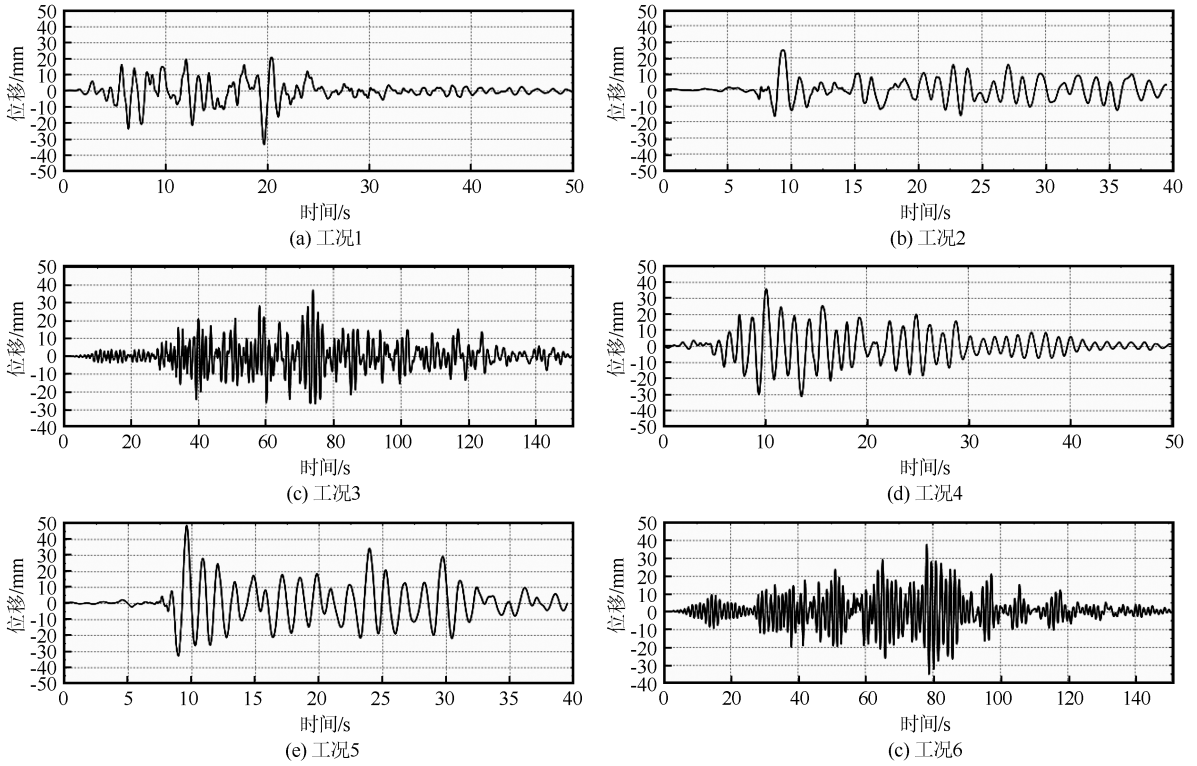


图5 地震位移反应时程曲线

Fig.5 Displacement time-history curves under earthquake

表3 地震反应最大值

Table 3 Maximum values of seismic response

工况	位移/mm	加速度/($m \cdot s^{-2}$)	速度/($m \cdot s^{-1}$)	恢复力/kN
1	32.55	0.60	0.12	9 948
2	24.67	0.45	0.10	7 727
3	37.25	0.59	0.13	9 585
4	35.78	0.77	0.17	9 636
5	48.59	0.93	0.21	14 444
6	37.84	0.85	0.18	12 888

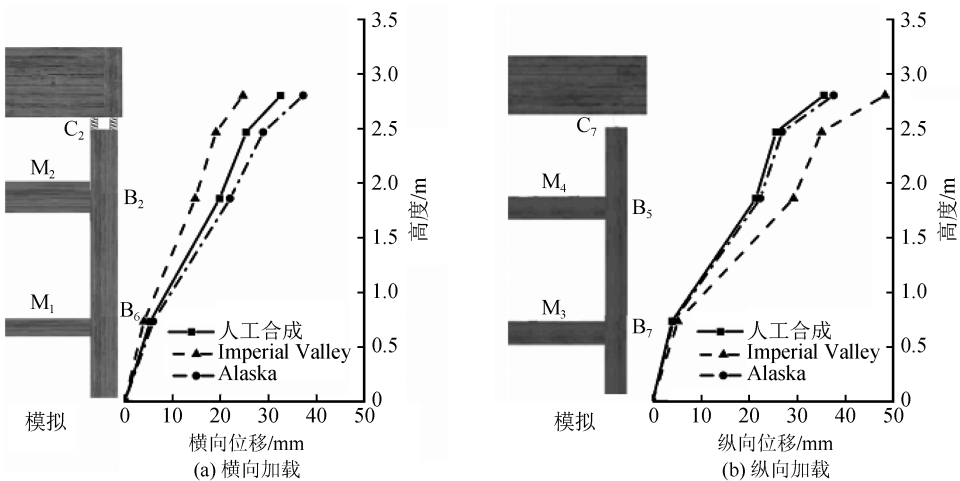


图6 基础不同位置地震位移反应最大值

Fig.6 Maximum values of displacement at different location of foundation under earthquake

所在剖面为例,纵向加载以 C₇ 立柱和 M₃/M₄ 平台为例。其中,B₆、B₇ 为一层平台梁测点,B₂、B₅ 为二层平台梁测点;B₂、B₆ 为横向测点,B₅、B₇ 为纵向测点。从图 6 可知,刚度占比是基础变形的主要因素,一、二层平台板的约束作用使变形曲线出现折点,弹簧变形占比较大。

3.3 弹簧变形

弹簧隔振装置将立柱与台板分隔开来是弹簧基

础与常规基础的最大不同,这一改变使得水平地震作用时框架基础的立柱位移不再相等。图 7 为横向加载时各立柱顶端位移与台板位移的比较。从柱顶位移连线可以看出,基础弹簧隔振器的刚度决定了弹簧变形较小,因此 C₂、C₃、C₄、C₅、C₆ 立柱顶端的位移较大。两个低压缸之间的立柱除通过弹簧隔振器与台板连接外,与整体结构再无其他联系,相比于其他立柱刚度较低,因此各工况下立柱顶端位移最

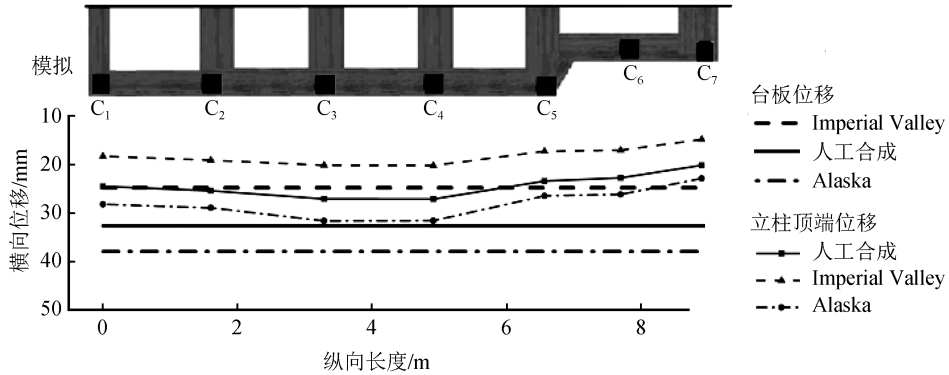


图 7 基础台板与立柱顶端位移地震反应对比

Fig.7 Comparison between displacements of foundation deck and column top under earthquake

大值均出现在 C₃ 和 C₄。

表 4 列出了各种工况下台板位移与弹簧变形最大值的比较。C₃ 和 C₄ 的尺寸相同,柱顶弹簧隔振器的水平刚度也相同,弹簧变形应相等,表中数据刚好证明了这一点:纵向加载时 C₃ 和 C₄ 顶端的弹簧变形占比完全相等。从弹簧变形可以看出,各立柱及对应

弹簧隔振器的刚度均不同,但弹簧变形占台板位移比值多在 20%左右,仅个别超过 40%。弹簧变形基本按照立柱和弹簧刚度反比分配,刚度小的立柱顶端位移大,刚度大的立柱顶端位移小,可见弹簧隔振装置重新分配了立柱承担的地震作用,充分发挥了各立柱的抵抗作用,提高了基础整体的抗震性能。

表 4 弹簧变形与台板位移(单位:mm)

Table 4 Spring deformation and displacement of foundation deck (Unit:mm)

方向	地震波	工况	立柱编号						
			C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
横向	人工合成	1	8.09(25%)	7.19(22%)	5.50(17%)	5.45(17%)	9.20(28%)	9.86(30%)	12.47(38%)
	Imperial Valley	2	6.45(26%)	5.62(23%)	4.57(19%)	4.53(18%)	7.48(30%)	7.70(31%)	9.90(40%)
	ALASKA	3	9.08(24%)	8.34(22%)	5.66(15%)	5.70(15%)	10.82(29%)	11.13(30%)	14.44(39%)
纵向	人工合成	4	14.81(41%)	12.12(34%)	7.03(20%)	7.00(20%)	14.62(41%)	14.63(41%)	13.76(38%)
	Imperial Valley	5	11.94(25%)	13.29(27%)	3.58(7%)	3.22(7%)	14.61(30%)	15.23(31%)	15.73(32%)
	ALASKA	6	9.98(26%)	10.78(28%)	3.74(10%)	3.62(10%)	12.00(32%)	12.99(34%)	13.10(35%)

注:括号内为弹簧变形与台板位移之比,以百分数表示。

4 结语

本文对汽轮发电机组弹簧隔振基础进行有限元建模与地震反应分析,主要结论如下:

(1) SeismoStruct 数值模型的前两阶频率分别为 1.06 Hz 和 1.12 Hz,表明弹簧隔振基础的自振频率较低,竖向自振频率远离机组工作扰频(25 Hz);

(2) VII 度设防地震作用下汽机基础台板加速度、速度、位移和恢复力的最大反应分别为 0.93 m/s²、

0.19 m/s、48.59 mm 和 14 444 kN。地震作用下基础台板的加速度没有放大,弹簧隔振装置能够在地震时减少加速度影响,保护汽轮机组;

(3) 隔振弹簧在抵抗地震作用中效果显著,立柱与台板分隔后,立柱顶端位移不再相等,基础受到的水平地震力由弹簧隔振装置进行调整,并重新分配给各立柱,能够充分发挥每个立柱的抗震能力;

(4) 针对本文研究对象的模拟效果较好,能够满足工程需要,今后研究此类结构的抗震性能时应

针对试验进行数值模拟以作为补充。

参考文献(References)

- [1] World Nuclear Association. Nuclear Power in China[EB/OL]. www.world-nuclear.org, 2018.
- [2] LIU H C. Concrete Foundations for Turbine Generators: Analysis, Design, and Construction[M]. American Society of Civil Engineers, 2018.
- [3] 罗国澍, 房俊喜, 王建. 汽轮发电机组弹簧隔振基础的抗震性能[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(增刊): 436-442.
LUO Guoshu FANG Junxi, WANG Jian. Aseismic Performance of Spring Supported Turbo-generator Foundation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(Supp): 436-442.
- [4] 邵晓岩, 周建章, 尹学军, 等. 汽轮发电机组弹簧隔振基础模型试验研究——动力特性试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(增刊): 364-368.
SHAO Xiaoyan, ZHOU Jianzhang, YIN Xuejun, et al. Research of Model Test of Spring Vibration Isolated Turbogenerator Foundation: Test of Dynamic Character[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(Supp): 364-368.
- [5] 朱彤, 陈春雷. 动力机器框架式基础的隔振研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 121-124.
ZHU Tong, CHEN Chunlei. Vibration Isolation for Frame Foundation of a Power Machinery[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(2): 121-124.
- [6] 宋远齐, 周向群, 吴建军, 等. 岭澳核电站二期半速汽轮发电机基础选型及弹簧隔振基础设计应用[J]. 核动力工程, 2011, 32(增刊2): 34-37.
SONG Yuanqi, ZHOU Xiangqun, WU Jianjun, et al. Selection and Design of Spring Foundation of Half Speed Turbine Generator for Lingao Phase II NPP[J]. Nuclear Power Engineering, 2011, 32(Supp2): 34-37.
- [7] 邵晓岩, 周建章, 尹学军, 等. 汽轮发电机组弹簧隔振基础模型试验研究——拟动力地震试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(增刊): 389-392.
SHAO Xiaoyan, ZHOU Jianzhang, YIN Xuejun, et al. Research of Model Test of Spring Vibration Isolated Turbogenerator Foundation: Pseudo-dynamic Earthquake Test[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(Supp): 389-392.
- [8] 康灵果, 李晓文, 谢艳丽, 等. 汽轮发电机组框架式基础结构振动特性试验研究及分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(增刊): 20-26.
KANG Lingguo, LI Xiaowen, XIE Yanli, et al. Experimental Research and Analysis on Dynamic Characters of Turbine-generator Unit Frame Foundation[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(Supp): 20-26.
- [9] 李汪繁, 王秀瑾, 孙庆, 等. 核电半速机组模拟轴系与弹簧隔振基础联合振动试验台设计[J]. 动力工程学报, 2017, 37(11): 890-894, 944.
LI Wangfan, WANG Xiujin, SUN Qing, et al. Design of a Combined Vibration Test Rig for Shafting and Spring Vibration-
- isolated Foundation of Nuclear Power Half-speed Units[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(11): 890-894, 944.
- [10] AN D, QU T J. Seismic Behavior of Turbine-Generator Foundation under Strong Earthquake Action in Different Directions[J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018: 1-10.
- [11] 陈晓光, 屈铁军. 1 000 MW 汽轮发电机组基础模型模态试验研究[J]. 北方工业大学学报, 2017, 29(5): 129-134.
CHEN Xiaoguang, QU Tiejun. Modal Test on the Model of a Foundation for 1 000 MW Turbo-unit[J]. Journal of North China University of Technology, 2017, 29(5): 129-134.
- [12] 竺苗苗, 屈铁军. 汽轮发电机弹簧隔振基础的隔振效率测试[J]. 北方工业大学学报, 2015, 27(1): 80-83.
ZAN Miaomiao, QU Tiejun. Test of the Vibration Isolation Efficiency of Spring-supported Turbo-generator Foundation[J]. Journal of North China University of Technology, 2015, 27(1): 80-83.
- [13] 屈铁军, 向坤, 尹学军, 等. 汽轮发电机基础抗震性能拟动力试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(1): 115-119.
QU Tiejun, Xiang Kun, YIN Xuejun. Pseudo-dynamic Test of the Anti-seismic Performance of Turbine Generator Foundation[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(1): 115-119.
- [14] 安栋, 孙昕, 屈铁军, 等. 汽轮发电机组弹簧隔振基础模型试验模态分析[J]. 北方工业大学学报, 2012, 24(3): 84-88.
AN Dong, SUN Xin, QU Tiejun, et al. Modal Analysis of Experiment on Model of Spring Vibration Isolated Turbine-generator Foundation[J]. Journal of North China University of Technology, 2012, 24(3): 84-88.
- [15] 安栋, 屈铁军. 弹簧隔振汽机基础变形性能试验研究[C]//《工业建筑》2018年全国学术年会论文集. 北京, 2018: 71-74.
AN Dong, QU Tiejun. Experimental Study on the Deformation Performance of Spring Vibration Isolated Turbine-generator Foundations[C]// Proceedings of the 2018 National Academic Annual Conference of Industrial Building. Beijing, 2018: 71-74.
- [16] 王旭亚. 考虑重力效应的汽轮发电机组弹簧隔振基础抗震性能研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2016.
WANG Xuya. Research on the Seismic Performance of Spring Vibration Isolation Foundation of Steam-turbine Generator Considering Gravity Effect[D]. Beijing: North China University of Technology, 2016.
- [17] MENEGOTTO M, PINTO P E. Method of Analysis of Cyclically Loaded RC Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-elastic Behavior of Elements under Normal Force and Bending[R]. Preliminary Report, IABSE, 1973: 15-22.
- [18] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
- [19] GB50011-2010; 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
GB50011-2010; Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.