

考虑结构与设备相互作用的主厂房结构易损性分析

胡扬^{1,2,3}, 柏文^{1,2}, 戴君武^{1,2}, 李庆文³, 胡激吉⁴

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 中国能源建设集团辽宁电力勘测设计院有限公司, 辽宁 沈阳 110170; 4. 宁波市北仑区工务市政建设有限公司, 浙江 宁波 315800)

摘要: 火力发电厂的核心建筑主厂房中布置着大量机械设备、电气设备等, 其内的设备是整个建筑的重要组成部分。该文建立考虑设备与结构相互作用的主厂房结构计算模型, 并以单独的火力发电厂主厂房结构模型作为对比, 通过静力推覆分析, 对其进行抗震性能评估, 并对两模型进行基于SPO2IDA的地震易损性分析, 发现主厂房结构-设备相互作用体系弹塑性阶段具有更大的刚度, 煤斗对于煤斗层及其相邻层有很大的减震作用, 但对于出现最大层间位移角的楼层反而层间位移角有略微增大, 得到基于SPO2IDA方法的主厂房结构-设备相互作用体系地震易损性曲线。

关键词: 结构-设备相互作用; 静力推覆; SPO2IDA; 地震易损性; 火力发电厂主厂房结构

中图分类号: TU375.4; P315.9

文献标志码: A

Fragility analysis of main building structure considering structure-equipment interaction

HU Yang^{1,2,3}, BAI Wen^{1,2}, DAI Junwu^{1,2}, LI Qingwen³, HU Jiji⁴

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China; 3. China Energy Engineering Group Liaoning Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd., Shenyang 110170, China; 4. Ningbo Beilun District Public Works and Municipal Construction Co., Ltd., Ningbo 315800, China)

Abstract: The main building structure in a thermal power plant houses a large number of mechanical and electrical equipment, which is an essential component of the entire building. In this study, a calculation model for the main building structure considering the interaction between equipment and structure was established. A separate structural model of the main building structure was used as a comparison. Through static push-over analysis, the seismic performance of the structure was evaluated. The seismic fragility analysis based on SPO2IDA was conducted for both models. It was found that the structure-equipment interaction system in the elastic-plastic stage has a higher stiffness. The coal bunker has a significant damping effect on the coal bunker layer and adjacent layers, but it slightly increases the inter-story drift angle on the floor with the maximum inter-story displacement angle. The seismic fragility curve of the structure-equipment interaction system in the main power plant is obtained based on the SPO2IDA method.

Key words: structure-equipment interaction; static push-over analysis; SPO2IDA; seismic fragility; main power plant structure in a thermal power plant

收稿日期:2024-05-24; 修回日期:2024-12-13

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2024C22);云南省市一体化项目(202202AH210004);国家自然科学基金项目(52378542, 52008382)

作者简介:胡扬(1987—),女,博士研究生,主要从事结构抗震研究。E-mail:172822833@qq.com

通信作者:柏文(1990—),男,副研究员,博士,主要从事结构和设备的减震和隔振技术研究。E-mail:baiwen@iem.ac.cn

0 引言

火力发电厂主厂房的设计核心在于满足复杂的电力生产工艺流程要求^[1],其结构布局首要服务于内部主要及辅助设备的合理布置、高效运行、便捷安装与检修。这使其显著区别于民用建筑。主厂房通常由锅炉房、汽机房、除氧间和煤仓间等关键功能单元组成,这些单元的组合形式及其内部设备的布置方案共同决定了主厂房的不同布置类型。尽管许多学者对主厂房结构的抗震性能进行了深入研究^[2-8],但对结构-设备动力相互作用的考量仍相对欠缺。

汽机房布置有汽轮发电机、给水泵、凝结水泵、回热加热器和供热设备等。除氧间一般分为3层,上层布置除氧器,中层布置管道,下层布置厂用配电装置。煤仓间的主要作用是储存原煤、磨制煤粉和向锅炉供应燃料。煤仓间一般分为3层,第1层即底层地面,布置磨煤机和排粉风机;第2层布置给煤机、煤秤、给粉机等设备,其上部悬挂原煤仓或煤粉仓;第3层布置皮带输煤机。

合并的除氧煤仓间布置形式即将内煤仓与除氧间合并为单框架结构,与除氧间和煤仓间并列在汽机房和锅炉房之间形成双框架的布置形式相比,合并的除氧煤仓间布置形式具有汽水管道较短、节约合金材料、占地较小、土建费用较低的优点;其缺点是中间车间设备布置较为拥挤,且从结构上看,单框排架抗震更为不利。GB 50049—2011《小型火力发电厂设计规范》^[9]中7.2.1条“主厂房的布置形式宜按汽机房、除氧间(或合并的除氧煤仓间)、煤仓间、锅炉房的顺序排列。当采用其他的布置形式时,应经技术经济比较后确定”,GB 50660—2011《大中型火力发电厂设计规范》^[11]中6.1.3条“主厂房的布置可采用汽机房、煤仓间或除氧煤仓间、锅炉房3列式布置,汽机房、除氧间、煤仓间和锅炉房4列式布置,侧煤仓布置等多种布置形式。”国内各种规模的火力发电厂采用此种主厂房布置型式的比较多,且具有一定代表性。所以本文以合并的除氧煤仓间布置形式的主厂房为例,对考虑结构与设备相互作用的主厂房结构易损性进行研究。

火力发电厂主厂房中机械设备、电气设备众多。位于除氧煤仓间一层的厂用配电装置,以及位于汽机房一层的给水泵、凝结水泵等,直接安装在位于厂房内零米地面的设备基础上,不与主厂房结构产生关联;汽轮发电机组独立布置,四周留有与其他结构的变形缝;此类设备不需考虑设备对结构的影响。其他布置在主厂房楼板上的设备中,重点考虑质量较大,且质心位于楼层和楼层之间的设备,因此将煤斗、除氧器、消防水箱和给煤机作为对象,研究主厂房结构与设备之间的相互作用。

1 有限元模型建立及模态分析

以某已投产的循环流化床(CFB)机组钢筋混凝土框排架主厂房为原型,厂房采用3列式布置,煤仓间与除氧间合并为单框架结构,汽机房、除氧煤仓间依次布置。

本工程厂址区域场地类别为Ⅱ类,地震基本烈度为7度,设计基本地震加速度为0.15g,设计地震分组第1组。根据GB 50223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》^[10],GB 50011—2010(2016年版)《建筑抗震设计规范》^[11]及DL/T 5022—2023《发电厂土建结构设计规定》^[12],本工程抗震设防类别为标准设防类(丙类)电厂。主厂房抗震设防分类为丙类,地震作用按7度(0.15g)设计,抗震措施按7度考虑。

模型以基础顶、框架柱底标高-4.0m处作为上部结构嵌固端,主厂房结构纵向柱距为8m,7个柱距,除氧煤仓间跨度为13.5m,结构为8层:零米厂用配电装置为±0.0m、管道层为4.5m、运转层为8.0m、除氧器和给煤机层为16.0m、皮带层为30.5m,皮带拉紧层为24.5m、皮带头部楼层标高为37.0m,水箱间为43.2m。除氧煤仓间屋面标高为37.0m,局部为49.6m。汽机房跨度为21m,其内设汽机基础及加热器平台,与主厂房结构通过设置伸缩缝不连为一体,本模型不考虑其内部汽机基础及加热器平台,所以汽机房为屋面结构采用梯形钢屋架的大跨单层结构,与除氧煤仓间形成单框排架。主要考虑主厂房内部布置在结构楼层上,且质量较大、质心距其支承楼板有一定距离的设备,所以把煤斗、除氧器、消防水箱和给煤机作为

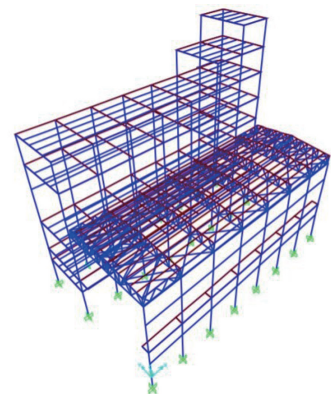


图1 模型A三维数值模型

Fig. 1 3D numerical model of model A

此模型中对于主厂房中设备的考察对象,建立考虑结构与设备相互作用的主厂房结构模型,编号为模型 B,见图 2,同时把单独的主厂房结构模型 A 作为本研究的不考虑结构与设备相互作用的主厂房结构对照模型。模型 A 将设备以质量的形式施加在设备支座所在的楼板位置上,而模型 B 根据设备实际的大小、高度、重量以及与楼板的连接方式进行建模,目的是反映设备的质心高度以及设备与结构的连接方式对结构的影响,由于本研究并不考虑设备的损坏,因此,在对设备建模时,以能够反映设备质量分布及设备-结构连接方式为原则,选用梁单元或壳单元进行建模。整个结构加设备总质量约 11 800 t。

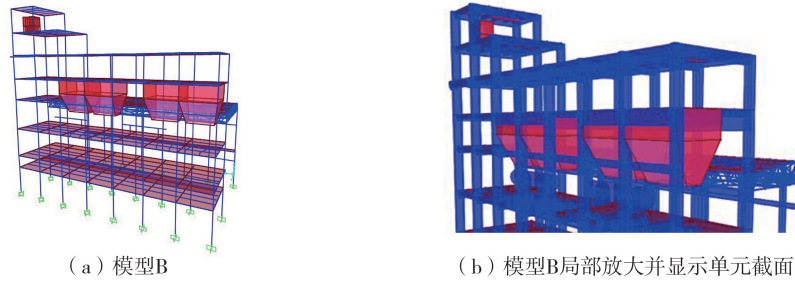


图 2 模型 B 三维数值模型

Fig. 2 3D numerical mode of model B

主厂房原型为 2 炉 2 机,每台锅炉对应 2 个煤斗,每个钢煤斗对应 2 台称重刮板给煤机,设 2 台除氧器。钢煤斗单个含煤重 340 t,悬挂在 30.5 m 层煤斗大梁下,钢煤斗与主厂房煤斗大梁上预留的钢埋件通过焊缝相连,在模型 B 中煤斗采用壳单元按实际煤斗大小及材料属性建模,并考虑满煤时质量,与模型中煤斗大梁处采用共用节点的形式连接。给煤机布置在 16 m 层,通过给煤机支座与楼板预留埋件焊接固定,在模型 B 采用梁单元按实际给煤机高度及质量分布进行建模,支座处与 16 m 楼板共用节点,每个煤斗对应 2 台给煤机,每台给煤机重约 9 t。除氧器同样布置在 16 m 层,为卧放的圆筒形设备,成套设备含水重 110 t,每个除氧器有 2 个支座,其中 1 个为固定支座,1 个为可沿圆筒轴向滑动的滑动支座,除氧器中心线距楼面为 2.5 m,模型 B 采用梁单元按实际除氧器高度及质量分布进行建模,固定支座处与楼板对应节点采用约束 3 个方向的平动及沿轴向转动的节点约束,滑动支座处与楼板对应节点采用约束除轴向外 2 个方向的平动及沿轴向转动的节点约束。消防水箱位于主厂房顶层,整个水箱含水重 25.5 t,水箱置于高于楼层 1.9 m 的混凝土支座上,水箱通过焊接方式与混凝土制作上埋件连接,在模型 B 中水箱采用壳单元按实际大小及材料属性建模,并考虑满水时质量,与模型中混凝土支座处采用共用节点的形式连接。设备总重约占结构与设备总重的 14.2%。

模型 B 其他建模方式及设计参数与模型 A 一致,梁、柱、桁架及支撑采用梁单元,楼、屋面板采用薄壳单元来模拟;主厂房屋面系统的钢屋架及屋面支撑按实际建模。混凝土梁柱材料的非线性由塑性铰来模拟,塑性铰描述的是框架截面整体的力和位移之间的关系,框架梁两端添加弯矩铰,框架柱两端添加 P-M2-M3 铰,塑性铰的属性由梁柱截面配筋决定。模型中采用的阻尼为 Rayleigh 经典阻尼,取值为 0.05。本文以模型 B 与模型 A 作为对比模型,对结构与设备相互作用体系进行研究。

对模型 B 进行模态分析,得到模型 B 的前 6 阶模态,见图 3。模型 A 和模型 B 前 6 阶模态周期对比见表 1。由图 3 和表 1 可知,模型 A 和模型 B 前 6 阶模态振动方向一致,模型 B 各阶周期均略小于模型 A,但相差不大于 5%。

表 1 模型 A、B 自振特性

Table 1 Natural frequency characteristics of model A and model B

阵型序号	模型 A		模型 B		模型 B 与模型 A 对比存在的偏差/%
	振动方向	周期/s	振动方向	周期/s	
1	主厂房 X 向振动	2.177	主厂房 X 向振动	2.111	-3.03
2	主厂房 Y 向振动	1.441	主厂房 Y 向振动	1.408	-2.29
3	主厂房整体扭转	1.309	主厂房整体扭转	1.246	-4.81
4	主厂房 X 向振动	0.728	主厂房 X 向振动	0.694	-4.67
5	主厂房 X 向振动	0.546	主厂房 X 向振动	0.544	-0.37
6	主厂房整体扭转	0.495	主厂房整体扭转	0.491	-0.81

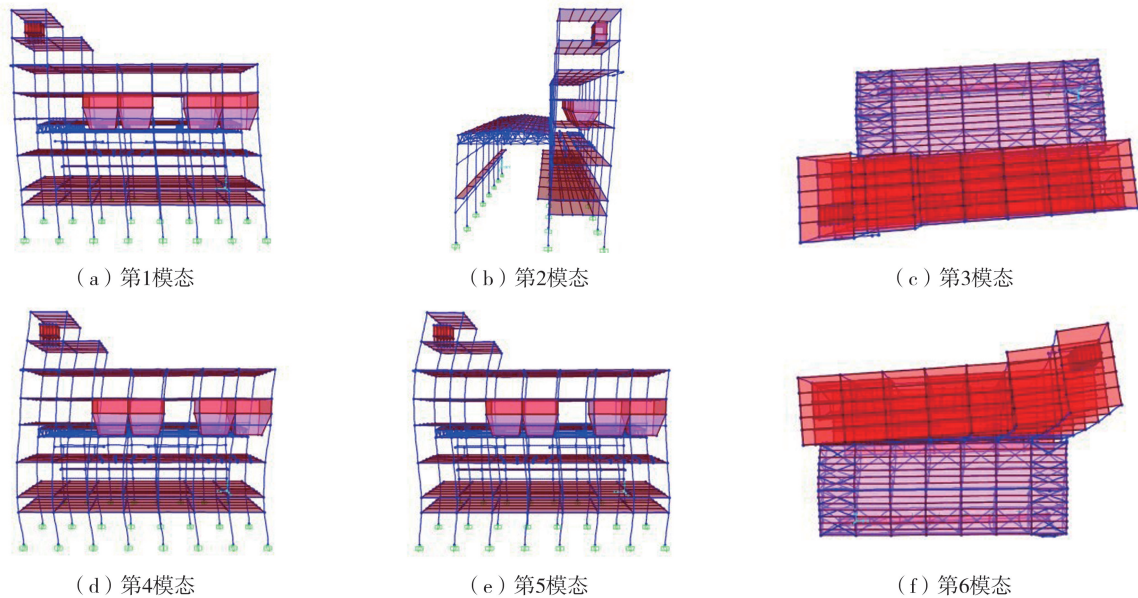


图3 模型B前6阶模态

Fig. 3 The first six modes of model B

2 静力推覆分析

静力推覆分析 (static pushover) 的基本做法是在结构分析模型上施加符合水平地震作用分布规律的侧向力。通过逐步增加水平侧向力,使结构的各个构件相继进入塑性状态,直到结构模型的控制点位移达到目标位移或结构倾覆为止,也被称为静力弹塑性分析方法。

对模型 A 和模型 B 进行具有与第 1 模态成比例的侧向荷载模式的静力推覆分析,对结构施加水平荷载进行推覆之前,首先要定义重力非线性工况,本文初始荷载采用自重标准值和各可变荷载组合值之和,可变荷载组合值系数取值依据 DL/T 5022—2023《发电厂土建结构设计规程》^[12]。水平荷载施加采用位移控制方式,使用除氧煤仓间顶层节点进行位移监测,将第 1 振型推覆目标位移拟定为 1 300 mm。得到模型 A 和模型 B 的 SPO 曲线见图 4。由图 4 可知,2 种结构的 SPO 曲线的不同,模型 A 的 SPO 曲线呈现三线型,并出现明显下降段;模型 B 更接近双线型,没有出现下降段。两模型 SPO 曲线的弹性段基本重合,进入弹塑性后,模型 B 与模型 A 相比,刚度下降更小,表现出更大的刚度,这是由于模型 A 中只考虑了设备对结构的质量贡献,而模型 B 中同时考虑了设备对结构的质量贡献和刚度贡献。

本文采用 ATC-40 能力谱法对模型 A 和模型 B 进行抗震性能评估,为考察设备与结构相互作用的影响,需要考查对比两模型在不同强度地震下的抗震性能,按照 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范(2016 版)》^[11] 中场地类别为 II 类,地震分组为第 1 组,地震烈度为 7 度(0.1 g)、8 度(0.2 g)、9 度(0.4 g),分别考虑多遇地震和罕遇地震,建立规范反应谱,并将其转化为需求谱,与 SPO 曲线转化为的能力谱绘于同一坐标系中,两曲线交点即为性能点。性能点,即为在此地震强度水平下,该结构的地震反应,从而评估结构的抗震性能。

模型 A 和模型 B 的初始基本周期分别为 2.177、2.111 s,初始阻尼均为 0.05。两模型在不同地震烈度的规范反应谱的性能点处的等效周期和等效阻尼见表 2。由表可知,地震强度越大,等效周期和阻尼与初始情况相比增加的越多,尤其是 9 度多遇地震和 7、8、9 度罕遇地震,表明此阶段结构已经进入明显的塑性变形阶段。在塑性变形阶段,模型 A 与模型 B 相比,等效周期和阻尼增长更快,说明模型 A 的刚度下降更多,与两模型 SPO 曲线对比得到的结论相吻合。

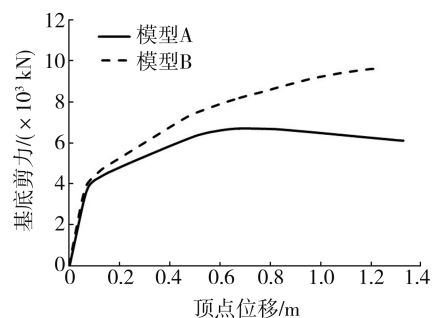


图4 模型A和模型B的SPO曲线

Fig. 4 SPO curves of model A and model B

表 2 模型在性能点处的等效周期和阻尼

Table 2 Equivalent period and damping at performance points for two models

地震烈度		模型 A		模型 B	
		T_{eq}/s	ξ_{eq}	T_{eq}/s	ξ_{eq}
7 度 (0.1 g)	多遇	2.166	0.050	2.100	0.050
	罕遇	3.092	0.231	2.992	0.266
8 度 (0.2 g)	多遇	2.170	0.051	2.104	0.051
	罕遇	4.299	0.257	4.041	0.245
9 度 (0.4 g)	多遇	2.396	0.118	2.339	0.122
	罕遇	5.461	0.262	4.959	0.243

两模型在各性能点处各层位移见图 5。由于主厂房框架柱截面较大,两模型并没有表现出框架结构典型的剪切型变形,而是介于剪切型和弯曲线之间。7 度多遇工况,结构处于小变形阶段,重力工况的变形会对结果产生较大影响,使结果有较大误差,所以对 7 度多遇不进行讨论。当两模型进入塑性变形阶段,两模型第 1~5 层位移接近,第 6~9 层位移有明显区分,模型 B 小于模型 A。

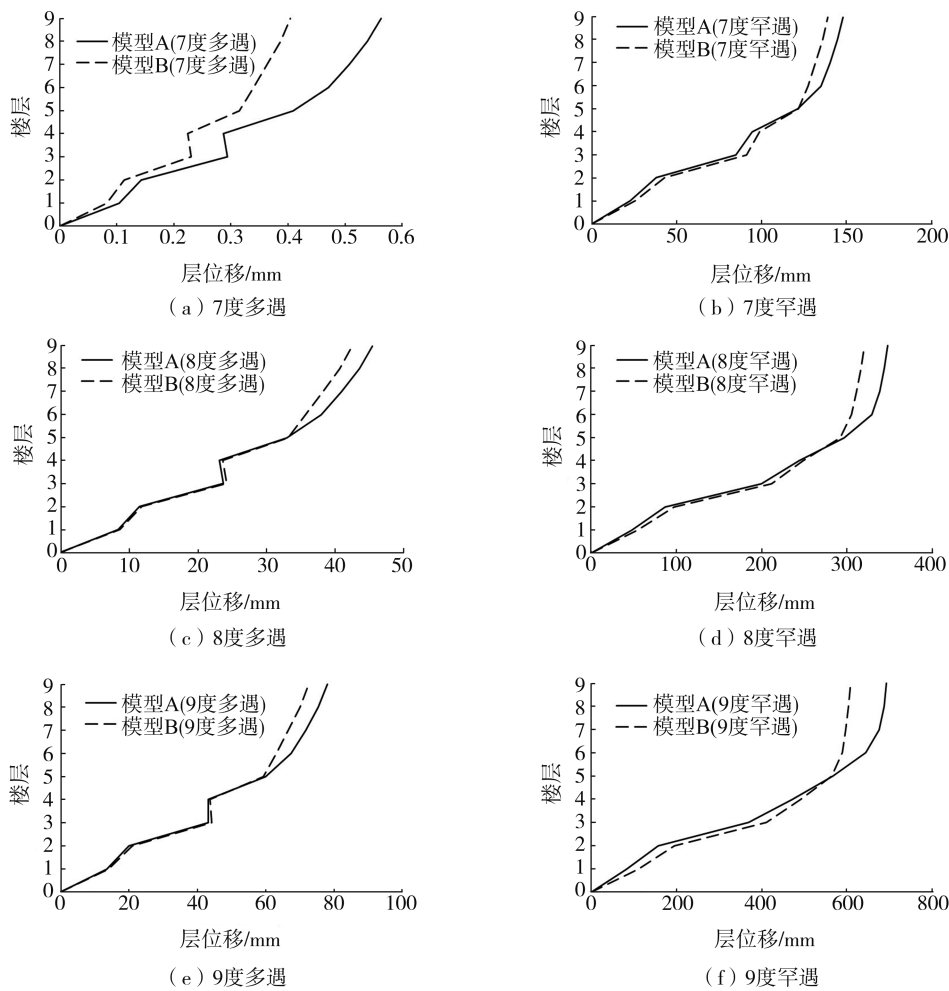


图 5 模型在性能点处各层位移

Fig. 5 Displacements of each floor at performance points for two models

两模型在各性能点处各层层间位移角见图 6。当两模型进入塑性变形阶段,两模型最大层间位移角出现在第 3 层,两模型第 3 层的层间位移角接近,模型 A 稍小于模型 B;可明显看出,模型 B 的第 5、6、9 层的层间位移角与模型 A 相比明显减小。根据文献[13] 给出的主厂房结构性能指标,两模型在 7 度多遇和 8 度多

遇地震时均能满足最大层间位移角 $\theta_{\max} \leq 1/550$, S1 正常使用; 9 度多遇地震时能满足最大层间位移角 $1/550 \leq \theta_{\max} \leq 1/300$, S2 立即使用; 7 度罕遇地震时能满足最大层间位移角 $1/300 \leq \theta_{\max} \leq 1/110$, S3 修复后使用; 8 度罕遇地震时能满足最大层间位移角 $1/110 \leq \theta_{\max} \leq 1/55$, S4 大修可用; 9 度罕遇地震时最大层间位移角 $\theta_{\max} \geq 1/55$, 完全破坏。

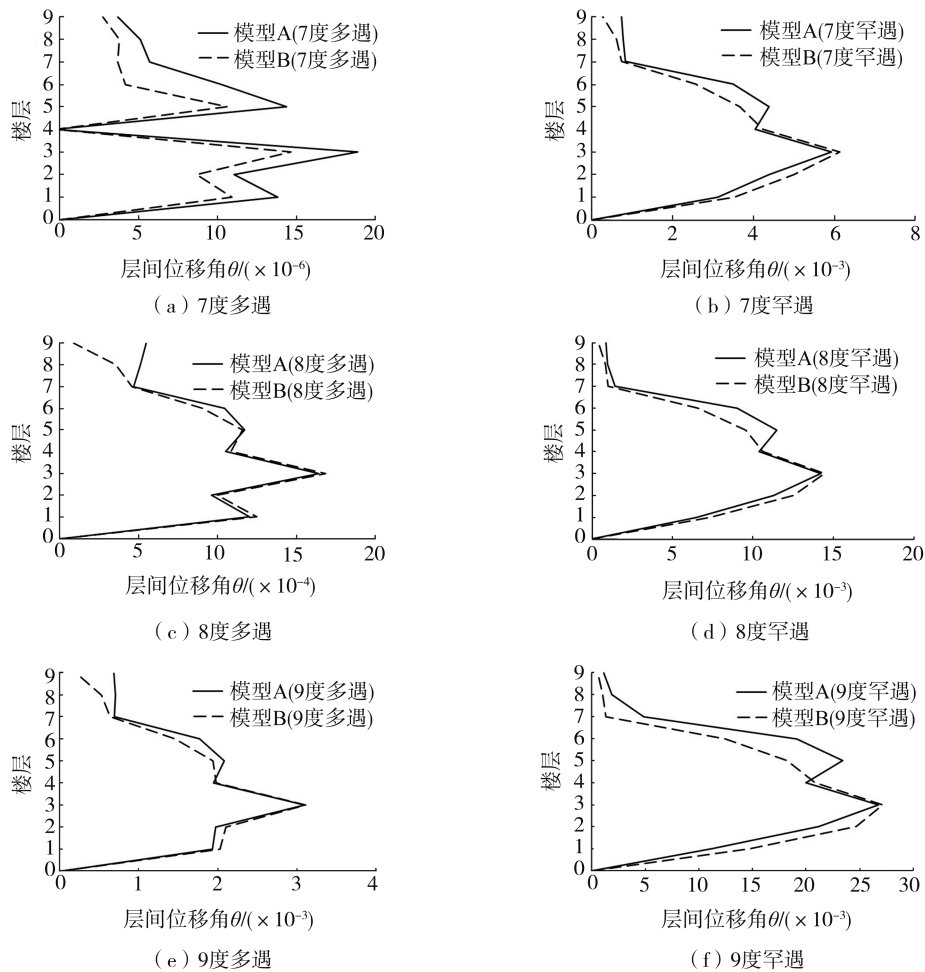


图6 模型在性能点处各层层间位移角

Fig. 6 Inter-story displacement angles of each floor at performance points for two models

综上所述, 钢煤斗连煤总重 1360 t, 占整个结构总质量的 11.5%, 悬吊于结构的第 6 层, 质心位于结构第 5 层和第 6 层之间, 煤斗的存在对主厂房结构起到明显的减震作用, 使模型 B 的第 5 层和第 6 层层间位移角以及 5 层以上的层位移明显小于模型 A, 但由于主厂房自身结构特点, 最大层间位移角位于第 3 层 (除氧器层), 煤斗对结构的减震作用并未影响到结构的最大层间位移角, 考虑设备 (除氧器、给煤机) 的作用对结构第 3 层的层间位移角的影响比较细微, 但却与煤斗对结构的作用相反, 略微增加了第 3 层的层间位移角。煤斗、水箱、除氧器和给煤机这 4 类设备重量不同, 自身频率不同, 与结构的连接方式不同, 对结构也产生了不同的影响。最终对于结构的最大层间位移角, 考虑设备与结构相互作用的模型 B 的最大层间位移角稍大于不考虑设备与结构相互作用的模型 A。

3 易损性分析

采用基于 SPO2IDA^[14-15] 的易损性分析方法对模型 A 和模型 B 进行易损性分析。首先对两模型的 SPO 曲线进行分段线性拟合^[16], 根据两模型的 SPO 曲线形状, 对模型 A 采用三线性拟合, 对模型 B 采用双线性拟合。拟合结果见图 7。

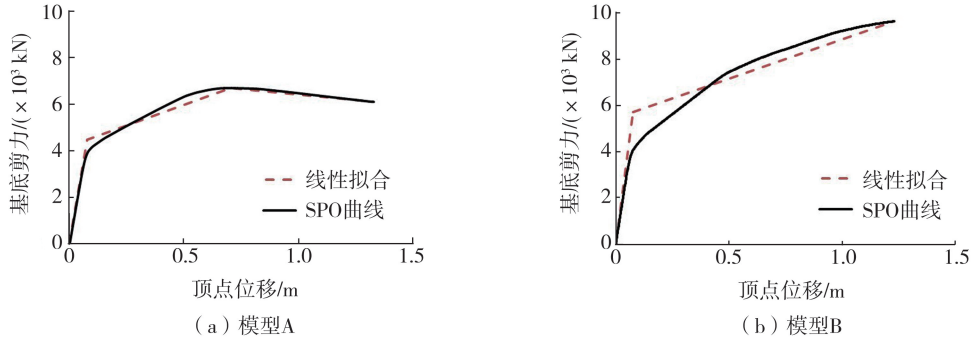


图 7 模型 SPO 曲线的线性拟合

Fig. 7 Linear fit of the model SPO curves

利用 SPO2IDA 方法获得模型 A 和模型 B 近似的 IDA 中位数曲线及其 16% 和 84% 的分位数曲线,见图 8。通过这 3 条曲线提供的中位数和相应的离散程度,以及文献[13]定义的主厂房结构的性能指标,可以得到模型 A 和模型 B 相应的 4 个性能指标的易损性曲线^[17-18]见图 9,易损性参数见表 3。

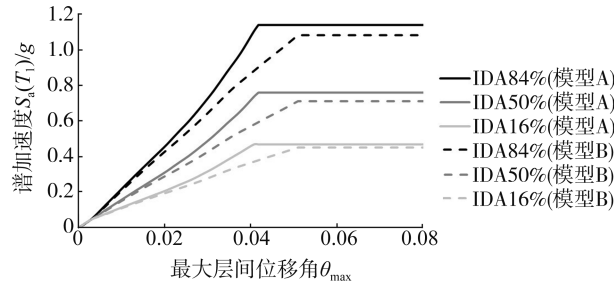


图 8 模型 A 和模型 B 的近似 16%、50% 和 84% 分位数 IDA 曲线

Fig. 8 Approximate 16%, 50% and 84% percentile IDA curves for model A and model B

由图 8 可知,在相同地震谱加速度下,模型 B 的最大层间位移角大于模型 A,随着地震谱加速度的增加,模型 A、模型 B 的最大层间位移差越来越大;在最大层间位移角达到 0.04 时,模型 A 的 IDA 曲线开始进入平台段,模型 B 在最大层间位移角达到 0.05 时 IDA 曲线进入平台段。

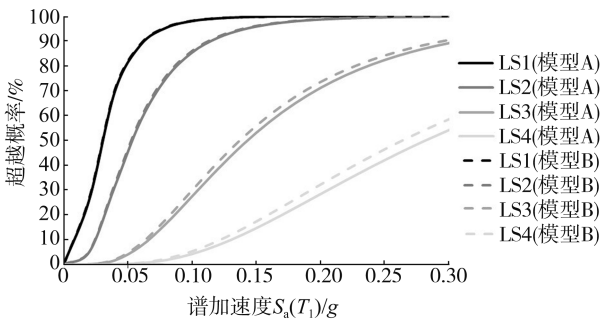


图 9 模型 A 和模型 B 易损性曲线

Fig. 9 Fragility curves of model A and model B

表 3 模型 A 和模型 B 易损性函数参数

Table 3 Fragility function parameters for model A and model B

性能水平	谱加速度 $S_a(T_1)/g$			
	模型 A		模型 B	
	中值 μ	标准差 β	中值 μ	标准差 β
S1	0.0293	0.60	0.0289	0.60
S2	0.0533	0.60	0.0524	0.60
S3	0.1435	0.60	0.1375	0.60
S4	0.2824	0.60	0.2644	0.60

由图 9 和表 3 可知,模型 A 和模型 B 对应性能水平 S1 和性能水平 S2 的易损性函数中值相差不大,模型 B 比模型 A 略小 0.01 g,两模型的易损性曲线几乎重合。对于性能水平 S3 和性能水平 S4,两模型的易损性曲线出现轻微差别,同一地震强度指标下,模型 B 的失效概率大于模型 A。说明当采用最大层间位移角作为地震需求参数时,相对于模型 A,模型 B 具有更高的易损性。这与静力推覆分析的结果相吻合。

4 结束语

本文建立了考虑设备与结构相互作用的主厂房结构计算模型 B,与单独的主厂房结构模型 A 进行对比两者的动力特性。结果表明,模型 B 各阶周期均略小于模型 A,但相差不大于 5%。对两模型进行静力推覆

分析,采用能力谱法对模型 A 和模型 B 进行抗震性能评估,并对两模型进行基于 SPO2IDA 的地震易损性分析,发现考虑设备与结构相互作用的模型弹塑性阶段具有更大的刚度,煤斗对结构煤斗层有明显的减震作用,但出现最大层间位移角的楼层的层间位移角有小幅增大。由于基于 SPO2IDA 的地震易损性分析采用最大层间位移角作为需求参数,因此考虑设备与结构相互作用的主厂房结构计算模型 B 相对于模型 A,具有更大的易损性,但这种差别并不明显。

参考文献:

- [1] GB 50660—2011 大中型火力发电厂设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2011.
GB 50660—2011 Code for design of fired power plant[S]. Beijing: China Planning Press,2011. (in Chinese)
- [2] HU Y, BAI W, DAI J W, et al. Fragility analysis of the main building-coal conveyor trestle interaction system of a thermal power plant[J]. Buildings, 2023, 13(11), 2864.
- [3] 尹业先,王健泽,周裕洲,等.复杂火电厂主厂房结构减隔震体系抗震性能评估[J].建筑结构,2022,52(14):85-91.
YIN Yexian, WANG Jianze, ZHOU Yuzhou, et al. Seismic performance evaluation for a complex thermal power plant building using isolation and supplemental damping systems[J]. Building Structure, 2022, 52(14): 85-91. (in Chinese)
- [4] 黄友强,陈世玺.土耳其火力发电厂主厂房钢屋架的竖向地震反应分析[J].世界地震工程,2017,33(3):160-164.
HUANG Youqiang, CHEN Shixi. Vertical seismic analysis of a main power building roof truss of a power plant in Turkish[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(3): 160-164. (in Chinese)
- [5] 王莉,薛涛.大型火力发电厂主厂房动力特性分析[J].世界地震工程,2016,32(3):233-236.
WANG Li, XUE Tao. Dynamic characteristics analysis of main workshop of large thermal power plant[J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(3): 233-236. (in Chinese)
- [6] 张景瑞,陈雨,袁国锋.火电厂主厂房不同布置方式下地震反应对比分析[J].水利与建筑工程学报,2011,9(2):155-159.
ZHANG Jingrui, CHEN Yu, YUAN Guofeng. Comparing and analyzing for seismic response of main workshop of heat-engine plant under different arrangement formation[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(2): 155-159. (in Chinese)
- [7] 戴靠山,周裕洲,李波,等.近断层地震动对电厂主厂房的地震响应影响分析[J].地震工程与工程振动,2020,40(4):8-16.
DAI Kaoshan, ZHOU Yuzhou, LI Bo, et al. Effects of near-fault ground motions on seismic responses of a thermal power plant[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(4): 8-16. (in Chinese)
- [8] 尹龙星.火电厂主厂房框排架结构多维地震反应分析与性能设计方法研究[D].西安建筑科技大学,2013.
YIN Longxing. Research on multi-dimensional seismic response and performance-based seismic design method of frame-bent structure for thermal power plant [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] GB 50049—2011 小型火力发电厂设计规范[S].北京:中国计划出版社,2011.
GB 50049—2011 Code for design of small fired power plant[S]. Beijing: China Planning Press, 2011. (in Chinese)
- [10] GB 50223—2008 建筑工程抗震设防分类标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
GB 50223—2008 Standard for classification of seismic protection of building construction[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [11] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [12] DL/T 5022—2023 发电厂土建结构设计规程[S].北京:中国计划出版社,2023.
DL/T 5022—2023 Code for design of civil structure of power plant [S]. Beijing: China Planning Press, 2023. (in Chinese)
- [13] 胡扬,戴君武,柏文,等.火力发电厂主厂房结构地震易损性研究[J].建筑结构,2022,52(增刊2):699-703.
HU Yang, DAI Junwu, BAI Wen, et al. Seismic fragility analysis of frame-bent main building of thermal power plant[J]. Building Structure, 2022, 52(Sup. 2): 699-703. (in Chinese)
- [14] VAMVATSIKOS D, CORNELL C A. Direct estimation of the seismic demand and capacity of oscillators with multi-linear static pushovers through IDA[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(9): 1097-1117.
- [15] ZACHARENAKI A E, FRAGIADAKIS M, PAPADRAKAKIS M. Reliability-based optimum seismic design of structures using simplified performance estimation methods[J]. Engineering Structures, 2013, 52: 707-717.
- [16] DE LUCA F, VAMVATSIKOS D, IERVOLINO I. Near-optimal piecewise linear fits of static pushover capacity curves for equivalent SDOF analysis[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(4): 523-543.
- [17] FRAGIADAKIS M, VAMVATSIKOS D. Fast performance uncertainty estimation via pushover and approximate IDA[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 39(6): 683-703.
- [18] REN Y Y, MA D H, WANG W, et al. Application of SPO2IDA in seismic performance evaluation of ancient timber structures[J]. International Journal of Architectural Heritage, 2024, 18(8): 1308-1322.