

超超临界燃煤机组侧煤仓有限元分析及设计

陈兆雄[✉], 马旻, 陶林惠, 熊雄

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 超超临界燃煤机组主厂房侧煤仓高度较高、荷载巨大, 是结构设计的难点, 以实际工程为例, 尝试解决这一难题。[方法] 通过SAP2000、SATWE两种软件对结构进行有限元分析, 针对侧煤仓结构选型、抗震性能计算分析、基础设计、剪力墙分析设计、煤斗大梁分析设计等关键问题进行较为详细的分析和论述。[结果] 结果表明: 单跨侧煤仓剪力墙结构选型是合理的, 煤斗大梁的配筋具备深受弯构件的特征, 需按深受弯构件进行设计。[结论] 所提供的分析与论述为同类工程提供较好的参考。

关键词: 侧煤仓; 大跨度; 有限元分析

中图分类号: TM611; TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)S2-0075-07

开放科学(资源服务)二维码:



Finite Element Analysis and Design of Side Bunker Structure of Advanced Ultra-supercritical Coal-fired Units

CHEN Zhaoxiong[✉], MA Min, TAO Linhui, XIONG Xiong

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] For the height is higher, the loads are huge, side bunker is the difficulty of structure design in advanced ultra-supercritical coal-fired units. The paper aims to solve this problem. [Method] SAP2000 and SATWE were used to analysis the structure, structure selection and seismic performance calculation and analysis, analysis and design of base, shear wall and coal beam were analyzed. [Result] The results show that the type selection of shear wall structure of single span side coal bunker is reasonable, and the reinforcement of coal bunker girder has the characteristics of deep bending component, which needs to be designed according to the deep bending component. [Conclusion] The analysis and discussion provided in this paper provide a better reference for similar projects.

Key words: side bunker; longspan; finite element analysis

燃煤机组主厂房一般有顺列式布置和侧煤仓布置两种。侧煤仓布置, 具有以下优点: 能减小主厂房体积, 降低四大管道工程量、有效缩短输煤栈桥长度。超超临界燃煤机组主厂房侧煤仓高度较高、荷载很大, 如何保证荷载巨大的含煤煤斗在运行工况下安全可靠, 且结构又能再地震作用下满足要求, 是结构设计的难点。

为了解决这一难题, 本文以某沿海超超临界燃煤汽轮发电机组项目为例, 通过SAP2000、SATWE两种有限元软件对结构进行有限元分析, 针对

侧煤仓结构选型、抗震性能计算分析、基础设计、剪力墙分析设计、煤斗大梁分析设计等关键问题进行较为详细的分析和论述。

1 项目概况

某沿海电厂项目建设2×1 000 MW超超临界燃煤汽轮发电机组。该项目结构设计参数: 地震作用: 抗震设防烈度7度, 地震加速度0.112 g, 地震分组第一组, 场地类别Ⅱ类。风荷载: 50年一遇基本风压为0.8 kN/m², 地面粗糙度类别为A类。

主厂房采用侧煤仓方案。侧煤仓高58.9 m, 给煤机层设置于16.970 m, 皮带层设置于40.970 m, 煤斗吊于31.720 m。侧煤仓一端为转运站, 另外一

收稿日期: 2020-05-26 修回日期: 2020-07-07

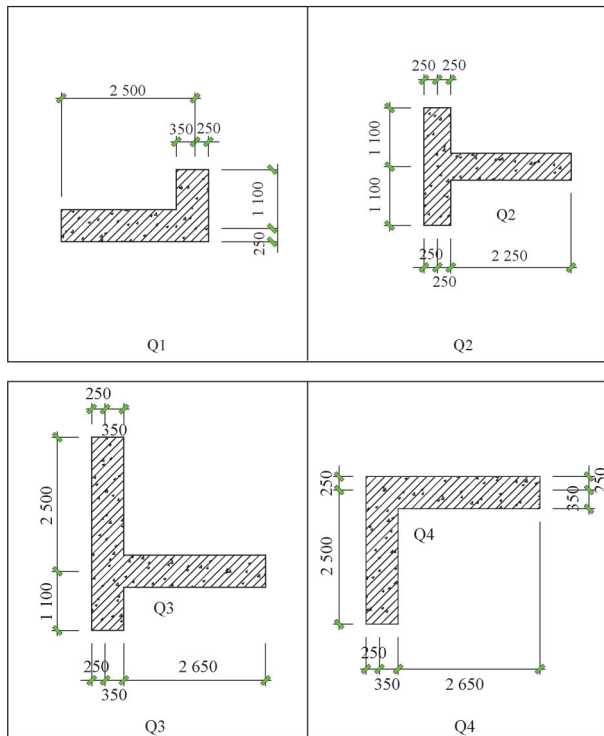
基金项目: 中国能建广东院科技项目“高烈度区主厂房结构抗震体系研究”(EV05531W)

端为电子设备间。

2 结构选型及抗震性能分析

2.1 结构选型

本工程侧煤仓高度较高,超过了纯框架的适用高度,因此不能设计为纯框架煤仓间结构形式^[1-2]。为了提高整个结构的抗侧力水平,本设计采用剪力墙结构。同时,由于短肢剪力墙的抗震性能差,因此本工程在剪力墙设计时注意调整墙肢的长度与剪力墙的厚度;经过验算,侧煤仓在轴线处布置的T、L形剪力墙,不属于短肢剪力墙,而是一般剪力墙,如图1所示,采用该结构布置可以满足规范要求。



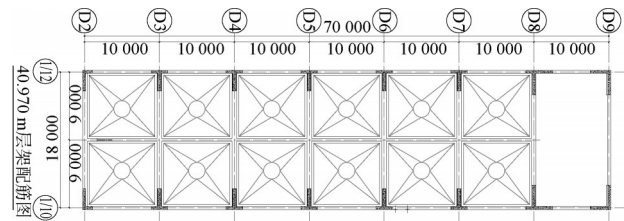
注:图中尺寸单位为mm。

图1 剪力墙尺寸

Fig. 1 Shear wall size

由于煤斗容积大,且工艺不允许按双跨布置,只能单跨布置,单跨的跨度达18m,这对结构设计带来了相当大的难度。本设计充分利用了煤斗侧壁,把煤斗侧壁设计为支承煤斗的大梁,同时该大梁向上延伸亦作为皮带层的框架梁。

侧煤仓结构布置图如图2和图3所示。



注:图中尺寸单位为mm。

图2 侧煤仓皮带层平面布置图

Fig. 2 Layout plan of belt layer of side coal bunker

2.2 结构模型建立

由于侧煤仓结构高度较高、承受荷载巨大,因此本设计采用两个不同力学模型的三维有限元空间分析软件SAP2000和SATWE进行结构分析。在SAP2000模型中,剪力墙和煤斗侧壁(煤斗大梁)均采用壳单元模拟。SAP2000和SATWE模型如图4~图5所示。

2.3 结构振型分析

对比SAP2000和SATWE模型的振型结果(如图6~图11所示),从中可以发现:两个模型的振型结果是相似的:第一振型为沿纵向的平动,第二振型为沿横向的平动,第三振型为扭转。两个模型的模态分析结果如表1所示。

从模态分析结果可看出:结构模态和周期结果能满足规范要求,结构选型是合理的。

2.4 抗震性能分析计算

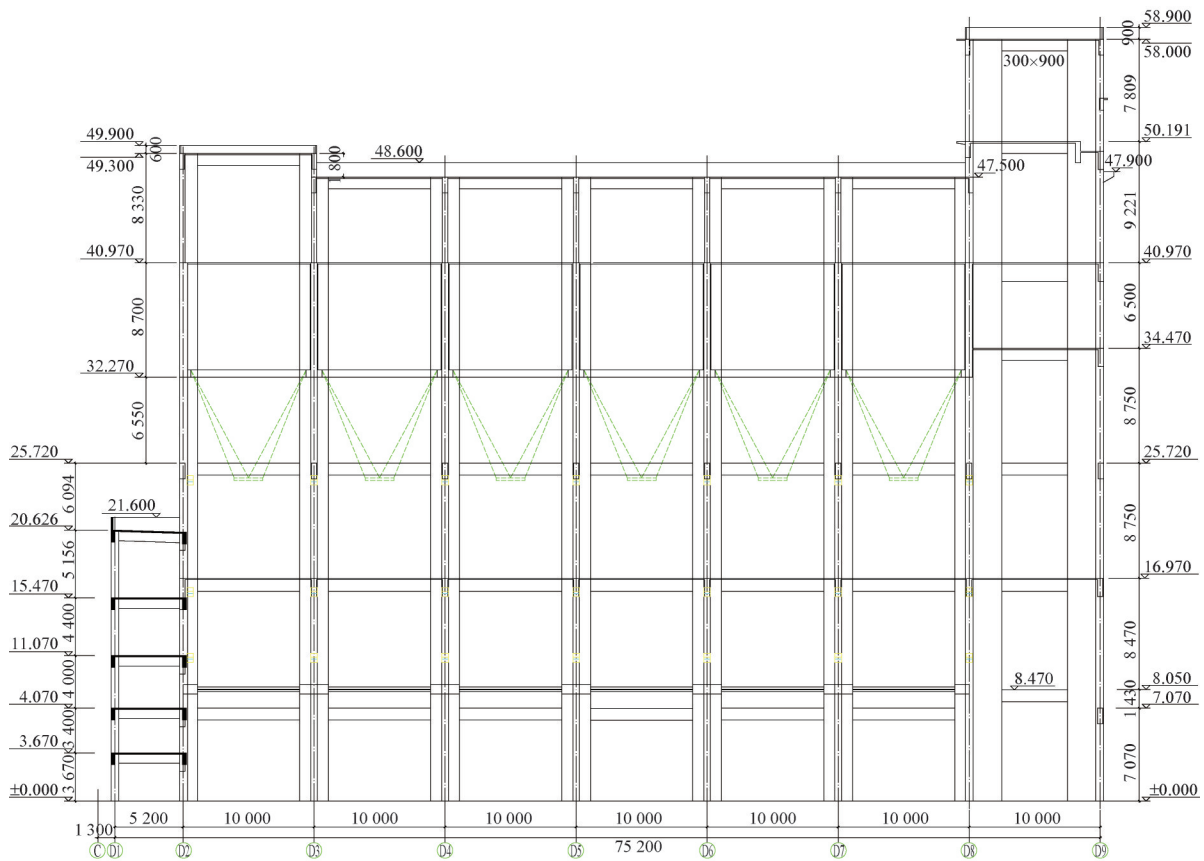
本分析计算按规范要求^[1,3-5],采用两阶段分析保证结构安全:第一阶段多遇地震作用下弹性分析、第二阶段罕遇地震作用下弹塑性分析。

多遇地震下选用3条地震波形进行多遇地震下的时程分析补充计算;罕遇地震作用下采用PUSH-OVER方法,主要结果见表2。

3 基础设计

根据地质条件,本项目采用桩基础,采用直径为1m的冲孔灌注桩,单桩竖向承载力设计值为6000kN。桩及承台布置图如图12所示。

为了更准确地传递上部荷载,模拟不规则承台、反应地基土刚度,反应真实的受力情况,本设计考虑了桩—承台—上部结构的耦合作用。具体做法是:在SAP2000整体模型中建立承台和桩,采用壳单元模拟承台,用土弹簧模拟桩,而桩的刚度通过试桩报告中得出。SAP2000基础模型如图13



注:图中尺寸单位为mm。

图3 侧煤仓立面布置图

Fig. 3 Vertical layout of side bunker

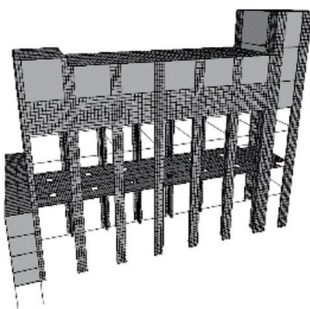


图4 SAP2000模型

Fig. 4 SAP2000 model

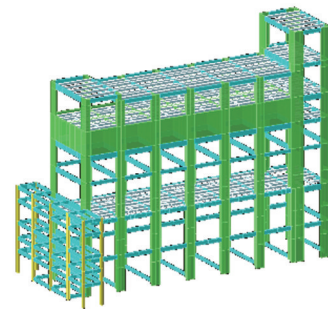


图5 SATWE模型

Fig. 5 SATWE model

所示。

对承台进行内力分析, 得出承台顶面与底面两个方向弯矩 (如图 14 和图 15 所示), 根据弯矩值进行承台的配筋设计; 并验算承台的抗剪承载力与抗冲切承载力。

该精细化的基础设计, 可比传统的基础设计方法, 降低基础工程量 16% 左右。

4 上部结构设计中的关键问题

4.1 关键设计参数判定

1) 从模型计算结果可以看出, 该结构框架部分所承担的总剪力只占基底总剪力的 5% 左右, 比例很小, 整个结构工作性能接近于纯剪力墙结构, 而框架部分无法承担抗震设防第二道防线的的作用, 故框架部分地震水平剪力不进行调整。

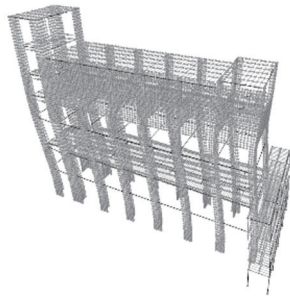


图 6 SAP2000 第一振型
Fig. 6 First mode shape of SAP2000

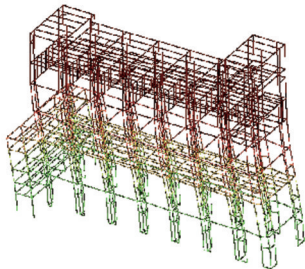


图 7 SATWE 第一振型
Fig. 7 First mode shape of SATWE

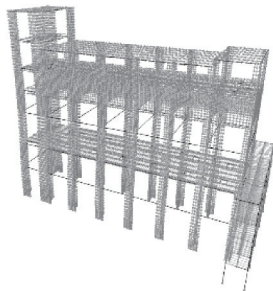


图 8 SAP2000 第二振型
Fig. 8 Second mode shape of SAP2000

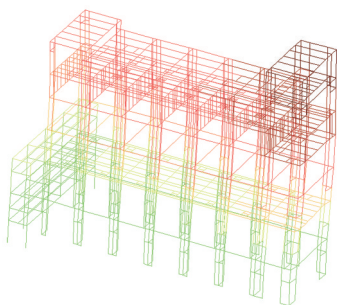


图 9 SATWE 第二振型
Fig. 9 Second mode shape of SATWE

2) 层间最大位移与层高之比限值采用剪力墙结构要求, 为 1/1 000。

3) 剪力墙抗震设计等级为二级, 框架抗震设计等级为二级。

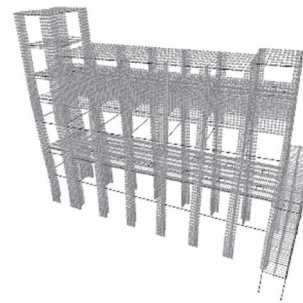


图 10 SAP2000 第三振型
Fig. 10 Third mode shape of SAP2000

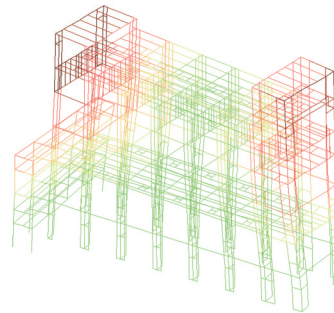


图 11 SATWE 第三振型
Fig. 11 Third mode shape of SATWE

表 1 模态分析结果

Tab. 1 Results of modal analysis

振型号	SATWE 计算结果			SAP2000 计算结果	
	周期/S	转角/(°)	平动系数(X+Y)	扭转系数	周期/S
1	1.882 8	89.98	1.00 (0.00+1.00)	0	1.923 1
2	1.462 4	179.98	0.98 (0.98+0.00)	0.02	1.514 8
3	1.170 9	0.12	0.11 (0.11+0.00)	0.89	1.196 9

表 2 弹塑性层间最大位移角

Tab. 2 Elastoplastic maximum displacement angle between floors

方向	层间最大位移角	规范标准	规范限制	规范判定
纵向	1/176	GB 50011—2010	1/120	满足
横向	1/197	第 5.5.5 条		

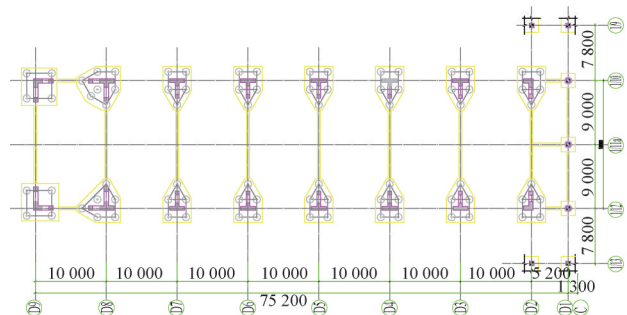


图 12 基础平面布置图

Fig. 12 Foundation layout plan

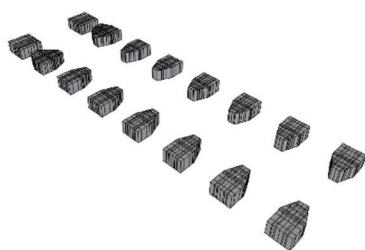


图 13 SAP2000 基础模型

Fig. 13 Foundation model of SAP2000

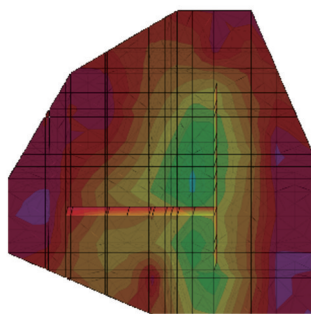


图 14 承台弯矩 M11

Fig. 14 Cap moment M11

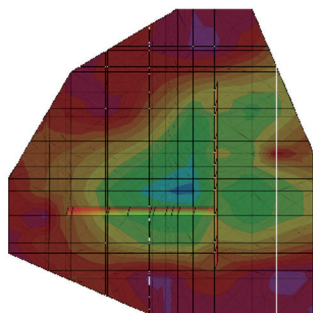


图 15 承台弯矩 M22

Fig. 15 Cap moment M22

4.2 剪力墙分析设计

在本侧煤仓结构中, 剪力墙既作为竖向荷载的承重构件, 也是最重要的抗侧力构件, 对于整个结构的重要性不言而喻, 是本工程重点分析设计的结构构件^[6-7]。

1) 剪力墙底部加强部位的选择

底部加强部位的范围, 若按规范要求^[2], 取底部两层和墙体总高度的 $1/10$ 二者的较大值。而对于本工程, 在煤斗层荷载很大, 所作用的位置很高, 边缘构件配筋也比较大, 故本项目取底部加强部位高度为底层到煤斗层。

2) 加强边跨剪力墙

从两个模型的受力分析可以得出, 边跨剪力墙

的受力较大, 而且从振型分析结果可以看出, 第三振型为扭转, 所以有必要对边跨剪力墙进行加强, 以增加结构的整体抗扭刚度。在具体设计时, 对边跨剪力墙的墙肢长度加强, 并适当加大剪力墙的厚度。

3) 剪力墙薄弱部分应力分析

本设计采用SAP2000的壳单元模拟剪力墙, 通过全过程应力计算, 得出剪力墙沿全高范围内的应力。对应力结果进行分析筛选, 得出剪力墙薄弱部位是: 位于与煤斗大梁(侧壁)端部连接处, 如图16所示。因此在设计中, 特别对此部位(即煤斗层及以上一层)剪力墙配筋进行加强。

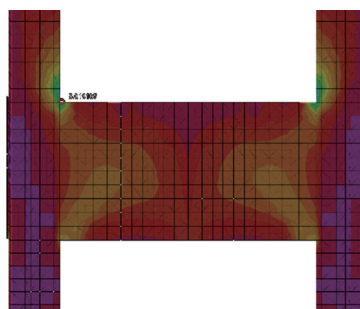


图 16 剪力墙与煤斗大梁连接处应力配筋云图

Fig. 16 Cloud chart of stress reinforcement at the joint of shear wall and coal scuttle girder

4.3 煤斗大梁分析设计

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[8](2015版)指出, 高跨比小于5的梁统称为深受弯构件。对于本工程煤斗大梁(侧壁), 其高跨比小于5, 按规范要求应按深受弯构件进行设计。在SAP2000模型中用壳单元模拟煤斗大梁(侧壁), 煤斗大梁两个方向的应力云图见图17和图18所示。通过应力分析可以看出, 煤斗大梁(侧壁)配筋有以下特征:

1) 该煤斗大梁跨中配筋较多, 支座配筋较少。

2) 梁跨中受拉区的面积要比一般梁的要大, 范围要到 $0.2H$ (H 代表梁高, 下同), $0.2H \sim 0.5H$ 配筋逐渐减少, $0.5H$ 以上配筋很少, 基本为构造配筋。

3) 梁的配筋整体来看与一般梁有所不同, 具备深受弯构件的特征, 与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(2015版)附录G关于深受弯构件的条款比较吻合。

煤斗大梁在具体设计时, 从SATWE模型中抽

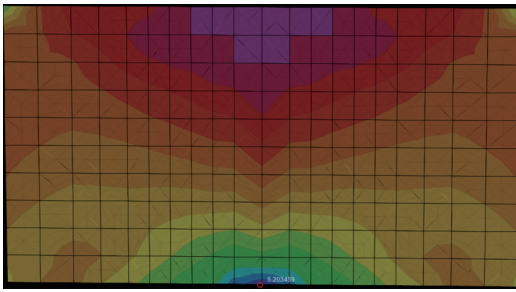


图 17 煤斗大梁水平向应力配筋云图

Fig. 17 Cloud chart of stress reinforcement at the horizontal direction of coal hopper girder

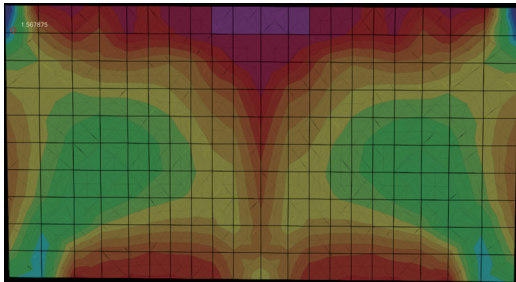


图 18 煤斗大梁竖向应力配筋云图

Fig. 18 Cloud chart of stress reinforcement at the vertical direction of coal hopper girder

取梁的内力，在专门计算深受弯构件的结构计算软件中对煤斗大梁进行配筋设计，并与 SAP2000 配筋结果进行比较，得出梁的受弯受剪钢筋；且按规范要求设置深受弯构件的构造钢筋。同时验算煤侧压作用下的受力以及空斗、满斗情况下梁的受扭作用，综合得出煤斗大梁的最终配筋。

5 结论

本文通过 SAP2000、SATWE 两种有限元软件对大跨侧煤仓结构进行分析，对结构选型、抗震性能分析计算、剪力墙设计、煤斗大梁设计等关键问题进行较为详细的论述，得出以下结论：

1) 通过对侧煤仓剪力墙剪力墙肢长度与厚度的合理布置，规避了短肢剪力墙，单跨侧煤仓剪力墙结构满足规范要求。

2) 侧煤仓 SAP2000 和 SATWE 模型的振型结果相近，结构模态和周期结果能满足规范要求，结构选型是合理的。

3) 通过多遇地震作用下弹性分析和罕遇地震作用下弹塑性分析来确定侧煤仓结构的抗震性能，分析结果表明侧煤仓抗震性能符合规范要求。

4) 本设计考虑了桩—承台—上部结构的耦合

作用，在 SAP2000 整体模型中建立承台和桩，采用壳单元模拟承台，用土弹簧模拟桩。该精细化的基础设计，可比传统的基础设计方法，降低基础工程量 16% 左右。

5) 剪力墙是本设计重点分析的结构构件。分析计算表明：剪力墙底部加强部位为底层到煤斗层；边跨剪力墙需要加强；剪力墙薄弱部位位于与煤斗大梁（侧壁）端部连接处。

6) 煤斗大梁的配筋具备深受弯构件的特征，需按深受弯构件进行设计；同时需验算煤侧压作用下的受力以及空斗、满斗情况下梁的受扭作用，综合得出煤斗大梁的最终配筋。

参考文献：

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010 [S]. 北京:中国工业出版社,2016:31-32.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of building (2016 edition): GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2016: 31-32.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ3—2010 [S]. 北京:中国工业出版社,2011: 77-79.
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for concrete structure of high rise building: JGJ3—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011: 77-79.
- [3] 陶林惠,李杰. 中美抗震设计规范主要地震动参数的对比研究 [J]. 南方能源建设,2015,2(3):122-126.
TAO L H, LI J. Comparative study on the main parameters of ground motions in seismic design codes in China and America [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 122-126.
- [4] 黄丹. 中国、印度、孟加拉规范设计地震反应谱比较 [J]. 南方能源建设,2016,3(1):105-109.
HUANG D. Comparison of design seismic response spectrum of Chinese, India and Bangladesh codes [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(1): 105-109.
- [5] 万海涛,杨琳,戚永乐,等. 常规岛主厂房基于变形的抗震性能研究 [J]. 南方能源建设,2015,2(4):111-115.
WAN H T, YANG L, QI Y L, et al. Research on deformation-based seismic design of conventional island main plant [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(4): 111-115.
- [6] 国家能源局. 火力发电厂土建结构设计技术规程:DL 5022—2012 [S]. 北京:中国计划出版社,2012:120-123.
National Energy Bureau. Technical stipulation for the design of civil structure of thermal power plant: DL 5022—2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012: 120-123.

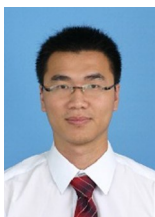
- [7] 宋扬,张略秋,郭莉. 侧煤仓单跨结构抗震性能分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2012,45(增刊1):7-10.

SONG Y,ZHANG L Q, GUO L. Aseismic behavior of single-span structure of boiler-side bunker room [J]. Journal of Wuhan University(Engineering Edition),2012,45(Supp. 1):7-10.

- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2015: 237-243.

Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures (2015 edition): GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press,2015:237-243.

作者简介:



陈兆雄

陈兆雄 (通信作者)

1983-, 男, 广东佛山人, 高级工程师, 一级注册结构工程师、注册岩土工程师、一级建造师, 主要从事电力土建设计与研究工作 (e-mail) chenzhaoxiong@gedi.com.cn。

项目简介:

项目名称 高烈度区主厂房结构抗震体系研究 (EV05531W)

承担单位 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

项目概述 针对钢筋混凝土结构主厂房中存在的柱截面尺寸大、结构抗侧力不足、抗震性能差等问题, 将钢筋混凝土框架结构 (含异形柱或短肢剪力墙) 改为框架-支撑结构体系, 采用承载力高的竖向承重构件 (如高强度混凝土) 承担竖向荷载, 竖向承重构件和框架梁连接组成框架结构, 在框架中增设新型抗侧力构件 (如耗能支撑), 提高结构体系的抗震性能, 从而进一步明确竖向构件竖向承载功能和水平抗侧力构件的抗侧力功能, 从整体上达到减小构件截面尺寸、提高结构体系抗侧刚度和抗震性能。

主要创新点 (1) 建立波纹钢管混凝土框架-防屈曲支撑子结构精细化分析模型, 涉及波纹钢管混凝土柱、钢筋混凝土梁、防屈曲支撑及连接节点等; (2) 提出波纹钢管混凝土框架和防屈曲支撑连接的合理构造措施, 通过有限元分析和子结构拟静力试验确定安全合理的连接构造措施, 保证防屈曲支撑与波纹钢管混凝土框架连接节点不先于构件发生破坏; (3) 进行波纹钢管混凝土框架-防屈曲支撑体系优化设计, 通过调整不同位置处波纹钢管混凝土框架和防屈曲支撑的截面尺寸可对波纹钢管混凝土框架-防屈曲支撑体系进行优化设计, 在满足抗震要求的基础上提高该结构体系的经济性。

(责任编辑 李辉)

