

常规岛主厂房基于变形的抗震性能研究

万海涛¹, 杨琳^{2*}, 戚永乐³, 张瀚文¹

(1. 河南大学 土木建筑学院, 开封 475001; 2. 河南大学 教育科学学院, 开封 475001;
3. 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: 为了确保工作人员安全的情况下同时保障常规岛主厂房内的贵重设备在大震情况下不至于遭受到较大的损失, 常规岛主厂房的抗震设计要求应该采用更高标准, 因此文章采用基于结构变形的抗震设计方法。针对常规岛主厂房的变形特点, 在小震, 中震和大震作用下, 通过有限元软件 SAP 2000 进行静力弹塑性分析和动力时程分析。用 SAP2000 对常规岛主厂房整体结构进行建模时, 设置了整体建模参数和结构分析系数, 并按照《建筑抗震设计规范》要求选取了 3 条实际地震波和 2 条人工波, 进行静力弹塑性分析和动力时程分析后获取了常规岛主厂房在不同地震水准作用下整体层间位移角。分析结果表明, 常规岛主厂房结构整体在小震、中震以及大震作用下, 不论是横向地震作用还是纵向地震作用下的层间位移角平均值远小于设定的整体层间位移角限值, 符合预期设定变形目标要求。

关键词: 常规岛主厂房; 基于变形的抗震设计; 静力弹塑性法; 动力时程法; 层间位移角

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0111-05

Research on Deformation-based Seismic Design of Conventional Island Main Plant

WAN Haitao¹, YANG Lin^{2*}, QI Yongle³, ZHANG Hanwen¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475001, China;

2. Institute of Educational Science, Henan University, Kaifeng 475001, China;

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

Abstract: To ensure the safety of workers and protect the valuable equipment in conventional island main plant under the earthquake situation will not suffer a greater loss, seismic design requirements of conventional island main plant should adopt higher standards, the paper used the deformation-based seismic method. Aimed at the deformation characteristics of the conventional island main plant, proceed PUSHOVER analysis and dynamic time history analysis by the finite element software SAP2000 under small earthquake, moderate earthquake and severe earthquake. When modeling conventional island main plant whole structure by SAP 2000, set structure analysis coefficient and whole structure parameters, choose 3 actual seismic wave and 2 artificial seismic wave under the Code for seismic design of buildings requirement, then get the global story drift angle of conventional island main plant under the earthquake by PUSHOVER analysis and dynamic time history analysis. The result showed when the conventional island main plant whole structure under the force of small earthquake, moderate earthquake and severe earthquake, whether horizontal or vertical average of story drift angle is much smaller than pre set story drift angle limit, accord with the pre set deformation target.

Key words: conventional island main plant; deformation-based seismic design; PUSHOVER analysis; dynamic time history analysis; story drift angle

伴随着社会对于能源需求快速持续增长和国家“十三五”启动的核电重大专项规划编制工作的开

展, 国内核电事业已经由全面进口到推进设计自主化研究, 核电所占电能比例将迅速增长。但核电厂的事故具有放射性, 对于社会的影响极其重大, 因此核电厂应具有极高的抗震能力^[1]。受施工技术和地理条件的制约以及核电厂常规岛主厂房的荷载分布和变形分布不均匀, 导致其抗震能力一般。国内核电站常规岛主厂房一般仍遵循民用抗震要求中的“三水准, 两阶段”的设计准则进行抗震设计, 但传

收稿日期: 2015-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408195)

作者简介: 万海涛(1979), 男, 江西临川人, 副教授, 博士, 主要从事结构抗震研究(e-mail) wht110119040@163.com。

*通信作者: 杨琳(1981), 女, 助教, 硕士(e-mail)86146041@qq.com。

统的抗震设计方法是一种基于承载力加简单的变形构造措施为主的设计思想^[2]。该设计思想主要是保证建筑物在大地震来临时不会立即倒塌以保证建筑物内的人员能安全逃离。但常规岛主厂房工作人员较少,设备价值远超过建筑本身造价,且常规岛抗震能力更会影响到核岛的安全性。因此,常规岛主厂房的抗震设计要求应该采用更高的标准,在抗震设计中应采用基于结构变形的的设计方法,能够在确保人员安全的情况下同时保障常规岛主厂房内的贵重设备在大震情况下不至于遭受到较大的损失。

本文针对常规岛主厂房的变形特点,在小震,中震和大震作用下,以有限元软件 SAP 2000 为数值模拟工具对常规岛主厂房整体的变形性能进行静力弹塑性分析与动力时程分析,明确结构的破坏模式,以正确评估常规岛主厂房的整体抗震变形性能。

1 常规岛主厂房基于变形的抗震设计提出

基于变形的抗震理论是当前国外最先进的抗震思想,抗震研究领域领先的美国、日本、新西兰、欧洲的抗震设计规范目前已经由传统基于承载力设计方法转变为基于变形的抗震方法^[3]。为了保证常规岛主厂房内的工作人员安全和贵重设备安全,因此本文也将采用基于变形的抗震设计方法。基于变形的抗震设计方法的特点是:使抗震设计从宏观定性的目标向具体量化的多重目标过渡,业主和设计人员可选择所需的变形目标;抗震设计中更强调实施变形指标的深入分析和论证,通过论证可以采用现行规范中还未明确规定的新结构体系、新技术与新材料;有利于针对不同抗震设防烈度、场地条件及建筑的重要性采用不同的变形指标和抗震措施。基于变形的抗震设计流程图如图 1 所示。

参照《火力发电厂土建结构设计技术规定》^[4]可知,在常规岛主厂房抗震变形计算中,结构应满足《核电厂抗震设计规范》^[5]中对层间位移角限值的相应要求。但是常规岛主厂房结构内部有很多运输管道和汽轮机等设备,这些管线和设备的结构高度不在同一平面上,且厂房中楼板有些地方根据设备设置需求进行了大面积开洞,造成常规岛主厂房不能根据一般方法确定结构层次^[6],所以在结构变形计算中,把常规岛主厂房整体结构当成一个结构层,层间位移角定义为常规岛主厂房屋顶的侧移与常规岛主厂房高度的比值(称为“整体层间位移角”),

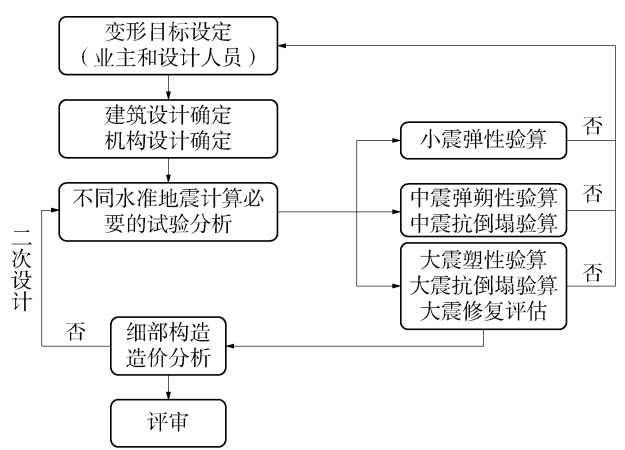


图 1 基于变形的抗震设计流程图

Fig. 1 Flowsheet of Deformation-Based Seismic Design

在综合考虑工程情况与设计人员的从业经验后,对常规岛主厂房的整体变形指标定为如表 1 所示。

表 1 整体层间位移角指标			
Table 1 Index of Global Machine Hall Story Drift Angle			
地震水准	小震	中震	大震
整体层间位移角	$\frac{1}{1\ 100}$	$\frac{1}{58}$	$\frac{1}{300}$

2 常规岛主厂房整体有限元模型的建立

由于常规岛主厂房与传统工业厂房的结构存在一定差异,为了体现其在动力学上的特点,结构的承载力及变形计算均采用静力弹塑性分析法和动力时程分析法进行分析。本文采用有限元软件 SAP 2000 对常规岛主厂房进行整体建模,常规岛主厂房整体模型图如下图 2 所示。

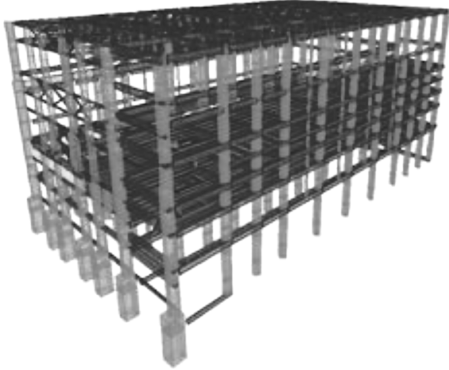


图 2 常规岛主厂房模型图

Fig 2 Model of Conventional Island Main Plant

2.1 整体建模参数的设置

在实际建模中,梁、柱、山墙等重要构件按截

面偏心设定。

梁柱构件间节点大部分按照铰节点设定以释放自由度外, 个别节点根据实际情况采用刚接。

为了输入风荷载、屋面恒载、活载及墙自重荷载等面荷载, 在模型中采用不考虑质量与刚度的壳单元用于输入上述面荷载。同样定义不考虑质量和刚度的虚梁用于输入楼面荷载^[7]。

框架结构中重要构件的混凝土均选用强度为 C40 的混凝土, 楼板的混凝土选用强度为 C30 的混凝土; 对于梁和柱构件, 主筋选用强度为 335 MPa 的二级带肋钢筋, 箍筋选用强度为 235 MPa 的一级光圆钢筋。

2.2 地震波选取

地震波的选取须兼顾结构动力反应的特征和地震波的特性。参阅《建筑抗震设计规范》^[8]可知, 地震波的选取应满足以下条件: (1)原则上选择的地震波的持续时间要长, 最好是结构自振周期的 5 倍; (2)地震强度主要由地面运动的加速度峰值的大小来确定, 地震波的频谱特性由地震波的主要周期来确定, 因此选择地震波的时候不仅要使峰值加速度与设防等级相当, 而且要使地震波的主要周期与场地的卓越周期相接近; (3)采用时程分析法时, 应按照建筑的场地类别和设计地震分组至少选用两条实际强震记录波和一条人工模拟波。

综上所述, 本文采用了 5 条符合《建筑抗震设计规范》规定的地震波, 这 5 条地震波为: Whittier Narrows(以下表格中均称为波 1)、EI centro(以下表格中均称为波 2)、Northridge(以下表格中均称为波 3)以及 2 条人工模拟波(以下表格中均称为波 4、波 5), 本文地震波按纵向和横向进行地震输入。

2.3 静力弹塑性分析

本文选用有限元软件 SAP 2000 进行静力弹塑性分析计算(PUSHOVER 方法)。本文的地震波是按照纵向和横向两个方向进行输入, 以下图 3、4 即为两个方向的 PUSHOVER 分析结果。

由图 3、图 4 可知能力谱与需求谱相交求得的性能点基本处于弹性段内。

3 常规岛主厂房结构变形动力时程分析

3.1 小震下的结构变形分析

3.1.1 小震下结构分析系数的设置

由 PUSHOVER 法分析可知, 小震下结构整体

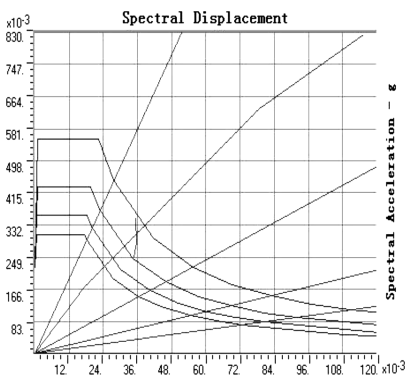


图 3 大震下纵向 PUSHOVER 分析
Fig. 3 PUSHOVER Analysis of Longitudinal Wave Under Severe Earthquake

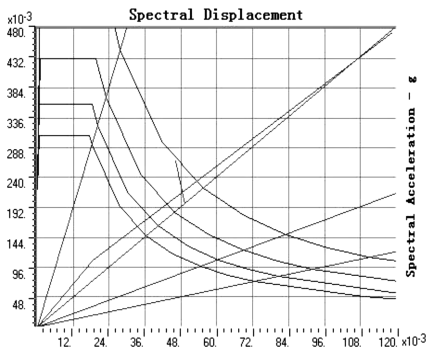


图 4 大震下横向 PUSHOVER 分析
Fig. 4 PUSHOVER Analysis of Transverse Wave Under Severe Earthquake

的变形仍在弹性范围内, 所以在线弹性阶段对结构整体变形进行动力时程分析。

在结构中楼板只占整体结构的一小部分, 因此将楼板设为刚性的假设并不适合本模型。结构中构件的抗震等级和特别规定(角柱等)要严格遵循规范设定, 以便程序自动调整相关系数, 结构的主要系数如表 2 所示。

表 2 小震下 SAP 2000 的结构分析系数	
Table 2 Structure Analysis Coefficient Under Small Earthquake in SAP 2000	
结构分析系数	数值
梁端弯矩调幅系数	0.70
梁弯矩增大系数	1.00
边梁刚度增大系数	1.20
中梁刚度增大系数	1.50

3.1.2 小震下的结构变形分析

在横向和纵向地震作用下, 整体层间位移角如表 3 所示。

表 3 小震下结构整体层间位移角

Table 3 Story Drift Angle of the Total Structure Under Small Earthquake

方向	波 1	波 2	波 3	波 4	波 5	均值
横向	$\frac{1}{9\ 355}$	$\frac{1}{16\ 385}$	$\frac{1}{8\ 282}$	$\frac{1}{9\ 256}$	$\frac{1}{9\ 655}$	$\frac{1}{9\ 995}$
纵向	$\frac{1}{4\ 197}$	$\frac{1}{6\ 183}$	$\frac{1}{6\ 538}$	$\frac{1}{5\ 395}$	$\frac{1}{6\ 012}$	$\frac{1}{5\ 527}$

由表 3 可以看出，常规岛主厂房结构整体在小震作用下，不论是横向地震作用还是纵向地震作用下的层间位移角平均值远小于表 1 所示的整体层间位移角限值(1/1 100)，故整体结构的设计满足要求。

3.2 中震下的结构变形分析

3.2.1 中震下结构分析系数的设置

抗震等级在 SAP 2000 中设定为四级，不对结构构件做特殊处理，设定分析程序不按照规范自动调整分析系数，其它主要的结构分析系数如表 4。

表 4 中震下 SAP 2000 的结构分析系数

Table 4 Structure Analysis Coefficient Under Moderate Earthquake in SAP 2000

结构分析参数	数值
梁端弯矩调幅系数	0.80
梁弯矩增大系数	1.00
边梁刚度增大系数	1.20
中梁刚度增大系数	1.50

3.2.2 中震下的结构变形分析

由 PUSHOVER 法分析可知，中震下大部分结构的变形仍在弹性范围内，只有小部分进入弹塑性范围，所以在弹塑性阶段对结构整体变形进行动力时程分析。

在横向和纵向地震作用下，整体层间位移角如表 5 所示。

表 5 中震下结构整体层间位移角

Table 5 Story Drift Angle of the Total Structure Under Moderate Earthquake

方向	波 1	波 2	波 3	波 4	波 5	均值
横向	$\frac{1}{3\ 353}$	$\frac{1}{6\ 318}$	$\frac{1}{2\ 901}$	$\frac{1}{3\ 352}$	$\frac{1}{3\ 519}$	$\frac{1}{3\ 612}$
纵向	$\frac{1}{1\ 522}$	$\frac{1}{2\ 301}$	$\frac{1}{2\ 296}$	$\frac{1}{1\ 979}$	$\frac{1}{2\ 519}$	$\frac{1}{2\ 058}$

由表 5 可以看出，常规岛主厂房结构整体在中震作用下，不论是横向地震作用还是纵向地震作用

下的层间位移角平均值远小于表 1 所示的整体层间位移角限值(1/580)，故整体结构的设计满足要求。

3.3 大震下的结构变形分析

3.3.1 大震下结构分析系数的设置

常规岛主厂房结构在在大震作用下的有限元模型中对地震内力组合系数和分项系数应不予考虑，且材料、荷载作用的分项系数和抗震承载力调整系数应同样不予考虑。对结构分析时梁单元应考虑重力二阶效应，但柱单元和侧向支撑应予考虑。材料在输入时按标准值取值。

抗震等级在 SAP 2000 中设定为四级，不对结构构件做特殊处理，设定分析程序不按照规范自动调整分析系数，其它主要的结构分析系数如表 6。

表 6 大震下 SAP 2000 的结构分析系数

Table 6 Structure Analysis Coefficient Under Severe Earthquake in SAP 2000

结构分析参数	数值
梁端弯矩调幅系数	0.85
梁弯矩增大系数	1.00
边梁刚度增大系数	1.25
中梁刚度增大系数	1.60

3.3.2 大震下的结构变形分析

由 PUSHOVER 法分析可知，大震下结构整体大部分变形进入弹塑性范围。

在横向和纵向地震作用下，整体层间位移角如表 7 所示。

表 7 大震下结构整体层间位移角

Table 7 Story Drift Angle of the Total Structure Under Severe Earthquake

方向	波 1	波 2	波 3	波 4	波 5	均值
横向	$\frac{1}{2\ 016}$	$\frac{1}{3\ 803}$	$\frac{1}{1\ 501}$	$\frac{1}{1\ 558}$	$\frac{1}{1\ 773}$	$\frac{1}{1\ 900}$
纵向	$\frac{1}{8\ 62}$	$\frac{1}{1\ 301}$	$\frac{1}{1\ 156}$	$\frac{1}{917}$	$\frac{1}{1\ 286}$	$\frac{1}{1\ 073}$

由表 7 可以看出，常规岛主厂房结构整体在大震作用下，不论是横向地震作用还是纵向地震作用下的层间位移角平均值远小于表 1 所示的整体层间位移角限值(1/300)，故整体结构的设计满足要求。

4 结论

1)相较于传统的基于承载力的抗震设计方法，

本文采用的基于结构变形的抗震设计方法更能够保证常规岛主厂房内的工作人员和贵重设备在大震作用下的安全。

2)通过有限元软件 SAP 2000 对常规岛主厂房进行静力弹塑性分析和动力时程分析,能够获得常规岛主厂房结构在不同地震水准作用下整体层间位移角。

3)常规岛主厂房结构整体在小震作用下,不论是横向地震作用,还是纵向地震作用下的层间位移角平均值远小于设定的整体层间位移角限值(1/100)。

4)常规岛主厂房结构整体在中震作用下,不论是横向地震作用还是纵向地震作用下的层间位移角平均值远小于设定的整体层间位移角限值(1/580)。

5)常规岛主厂房结构整体在大震作用下,不论是横向地震作用还是纵向地震作用下的层间位移角平均值远小于设定的整体层间位移角限值(1/300)。

参考文献:

- [1] 郁静红. 核电站常规岛主厂房结构抗震性能设计 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 96-101.
YU Jinghong. Performance Based Seismic Design of the Main Power Building in Conventional Island of Nuclear Power Plant [J]. Energy Construction, 2015, 2(2): 96-101.
- [2] 林生逸, 彭雪平, 韩小雷. 核电站常规岛主厂房基于性能的抗震分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2011, 5(31): 50-59.
LIN Shengyi, PENG Xueping, HAN Xiaolei, et al. PBSO Study on Seismic Behavior of Main Machine Hall in Conventional

al Island [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 5(31): 50-59.

- [3] 万海涛. 钢筋混凝土梁、柱构件抗震性能试验及其基于变形性能的参数研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
WAN Haitao. Seismic Performance Test of RC Beams and Columns and Research on Parameter of Deformation Performance [D]. GuangZhou: South China University of Technology, 2010.
- [4] DL 5022-2012, 火力发电厂土建结构设计技术规定 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2012.
DL 5022-2012, Technical Stipulation for the Design of Civil Structure of Thermal Power Plant [S]. Beijing: China Building Industry Press. 2012.
- [5] GB50267-97. 核电厂抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 1997.
GB50267-97. Code for Seismic Design of Nuclear Plants [S]. Beijing: China Building Industry Press. 1997.
- [6] 戚永乐, 万海涛. 核岛侧常规岛主厂房山墙抗倒塌能力分析 [J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 70-74.
QI Yongle, WAN Haitao. The Capacity of Resisting Collapse of the Main Power Building Gable nearby Nuclear Island [J]. Energy Construction, 2014, 1(1): 70-74.
- [7] 林生逸. 基于性能的核电站常规岛主厂房结构抗震性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
LIN Shengyi. Study on Anti-seismic Behavior of Main Machine Hall in Conventional Island Based on PBSO [D]. GuangZhou: South China University of Technology, 2012.
- [8] GB 50011 - 2010, 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011 - 2010, Code of Seismic Design of Buildings [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

(责任编辑 林希平)

(上接第 110 页 Continued from Page 110)

5 结论

核电站常规岛厂房屋盖宜采用较经济的网架结构,设计时需采用合适的软件,选择适当的计算模型和参数,同时还要考虑加工和安装方便等问题;常规岛厂房屋面及墙面采用双层压型钢板围护要考虑其耐久性、抗风性能、隔热性能及防水性能;地下防水需要同时采取设排水沟、设建筑防水层及结构采用防水混凝土等多种措施,才能达到较好的防水效果;由于钢结构具有施工方便、工期短、质量可靠、环保和经济性好等优点,厂房结构型式应优先采用钢结构。这些结构设计方面的经验来源于大量的实际工程,可供核电站设计、建设人员在常规

岛厂房设计中参考。核电站常规岛厂房结构设计较普通火电厂要求更高,尚需广大设计人员不断积累经验,进一步提高设计水平。

参考文献:

- [1] 李广军. 建筑结构选型 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 王静峰, 王波. 钢结构设计与应用范例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] 乐嘉龙, 李勇, 江世哲, 等. 轻钢结构墙面屋面设计手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [4] 沈春林. 地下防水工程实用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

(责任编辑 林希平)