

核电站常规岛主厂房结构抗震性能设计

郁静红

(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: 核电站常规岛主厂房结构布置受限于工艺流程, 含较多的错层、跃层, 使结构的刚度与质量分布严重不均匀, 往往超过了规范的适用条件, 地震期间若出现功能中断或设备受损都将造成巨大的损失。基于性能的抗震设计应用于主厂房结构的抗震设计与评估中, 在承载力和变形能力两个方面量化其抗震水平, 确保主厂房的抗震能力满足预期设防目标。承载力依据现行抗震规范设计, 变形能力的评估细化到构件的层次进行, 在此基础上选取了 5 条地震波记录对典型常规岛主厂房结构进行弹塑性分析。结果表明: 核电站常规岛主厂房结构能够在地震作用下保持不倒塌, 结构具有较大冗余度, 能保证核岛安全。

关键词: 常规岛; 主厂房; 弹塑性; 抗震性能

中图分类号: TU352.11

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)02-0096-06

Performance Based Seismic Design of the Main Power Building in Conventional Island of Nuclear Power Plant

YU Jinghong

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

Abstract: The main building of nuclear power station is a special kind of industrial structure, with irregular in mass and stiffness. The analysis and design should be carried on very carefully. If functional disruption or damage to the equipment during an earthquake, huge damage will be generated. the perform-based seismic design method is used to the main plant structure, the seismic bearing capacity and deformability capacity are both scrutinized, to ensure the seismic capacity of the main plant to achieve predetermined seismic aims. Design can be based on the current code for seismic design of buildings, and the evaluation of deformability capacity can be based on the element level. On this basis, five seismic waves recorded are used on the main plant structure. Results show that through reasonable design the main power building can have larger redundancy to avoid collapse under earthquake and sudden loss of bearing capacity of its key component, and can ensure the safety of the nuclear island.

Key words: conventional island; main building of power station; elastoplastic; seismic performance

全球能源需求持续增长, 雾霾、温室气体成为制约煤炭能源使用的主要因素。在我国积极规划、推进清洁的核电项目越来越受到重视。但核电可能存在的高度技术风险而备受社会各界关注, 为确保其抗震安全性, 需要采取最高级别的抗震安全措施来确保核安全。受工艺流程的制约, 电厂主厂房的

结构质量、刚度分布不均匀, 其整体抗震性能较差。“5.12”汶川 8.0 级地震中, 造成电厂主厂房较大的损害, 电厂短期内无法正常发电。核电常规岛主厂房与普通的民用建筑相比, 设备所占的造价远超土建。地震作用下, 设备停止运行或损坏都会造成无法承受的损失, 也会造成巨大的社会恐慌。核电厂运行阶段人员很少, 其设计应重点关注由于结构破坏、变形而引起的设备损害, 采用基于性能的抗震设计方法可以细化到构件层次评估其抗震性能, 为确保核安全提供了有力支撑。

近年来, 关于大型火电厂框排架抗震性能的研究已有大量成果, 吴涛等^[1]进行了 1/7 比例含有 3

收稿日期: 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378221)

作者简介: 郁静红(1970), 女, 浙江宁波人, 高级工程师, 硕士, 一级注册结构师, 主要从事企业科技管理工作(e-mail)yujinghong@gedi.com.cn。

跨3榀5层框排架子空间模型抗震性能拟动力和拟静力试验研究,白晓红等^[2]对钢筋混凝土框排架结构在多维地震作用下的空间性能进行了分析,白国梁等^[3]进行了1/7比例缩尺的某火电厂RC分散剪力墙-SRC框排架模型结构进行了拟动力试验和拟静力试验,马申^[4]在多个火电厂主厂房设计的工程经验的基础上,给出了一些提高钢筋混凝土单跨框排架结构安全度的可靠措施,戚永乐^[5]通过静力弹塑性分析和拆除构件法,对核电站常规岛主厂房核岛侧山墙在地震作用下和重要构件突然丧失承载力时的安全性进行了研究。上述成果表明,工业厂房的抗震性能与民用建筑的抗震性能之间存在较大差异,这种差异主要由于工业厂房的结构布置受到工艺流程的影响,造成了结构的不规则性。

对于核电站常规岛主厂房结构,用层间弹塑性位移角限值验算罕遇地震下的抗倒塌能力,是不合适的。因为在主厂房结构中经常出现楼面标高错层、平面布置不规则、纵向不等跨、高度方向布置不规则,与抗震概念设计有较大距离,“强梁弱柱”、“短柱”、“异形节点”这些薄弱环节不能避免,构件间的区别较大,没有明显的“层概念”。若主厂房结构按照常规设计,在小震下的设防目标可以基本保证,但在中、大震下能否实现避免或减少财产损失是值得商榷的。如果基于构件层次,考虑诸如配筋率、截面尺寸、轴压比、配箍率等设计参数对构件变形能力的影响^[6],将不同构件区别对待,将比宏观的层间位移角限值更为精细,对结构的性能评估也能具体到每个构件而不是某一层。

基于上述评估思想,本文针对主厂房的特点,设计预想在强震作用下,以动力弹塑性分析为研究手段,采用基于性能抗震设计方法,基于结构构件和结构整体两个方面详细评估了主厂房的抗震性能。

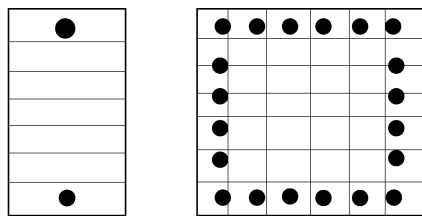
1 Perform-3D 模型的建立

Perform-3D 软件具有强大的抗震非线性分析与评估功能^[7],采用 ASCE41-06 的性能评估准则,以变形或承载力为基础的性能指标限值来评估结构性能,软件提供的需求——能力比符合工程评估需要,是目前工程界进行性能化设计的主流软件之一。与其它有限元相比,Perform-3D 采用的宏单元模型可以从试验中得出,可以用于描述构件的拉、

压、弯、剪、扭等效应。

1.1 梁、柱纤维模型

梁的纤维由沿梁高方向的多层纤维组成,柱的纤维由沿柱截面2个方向的多层纤维组成,纤维的力学特性由材料的单轴本构确定,箍筋加密区的混凝土,可由约束混凝土的本构确定^[8]。因此,纤维模型可以自动考虑截面的压、弯耦合作用。截面的几何属性,钢筋和混凝土纤维的位置坐标确定后,截面的力学行为就确定了,构件力学行为由多组截面组装而成,因此使得 Perform-3D 具有较大灵活性。



(a) 梁纤维单元

(b) 柱纤维单元

图1 Perform-3D 纤维单元截面^[8]

Fig. 1 Sections of Fiber Component in Perform-3D

1.2 骨架曲线和滞回曲线

Perform-3D 程序的骨架曲线采用图2所示的统一形式。曲线由“YULRX”5个特征点来表达子单元荷载一位移的非线性关系^[7],见图2。

试验中观察到的诸如试件的强度退化、刚度退化、滞回捏缩现象均可由荷载一位移曲线的相关参数定义。通过试验可以得到滞回环的面积,退化前后面积的比值可以确定 Perform-3D 中的能量退化系数。能量退化系数很大程度上影响了结构的非线性动力响应。

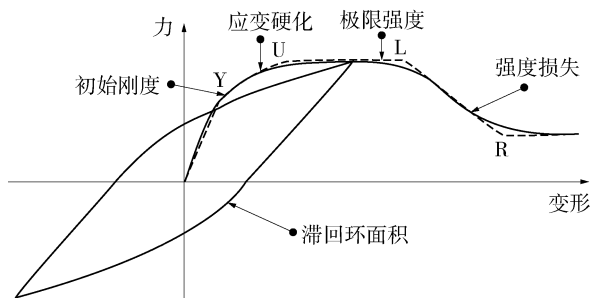


图2 骨架曲线和滞回曲线^[7]

Fig. 2 Skeleton Curve and Hysteretic Curve

1.3 主厂房弹塑性分析模型

主厂房的分析模型如图3所示。在地震作用下,梁、柱的塑性变形通常发生在柱端和梁端,

指定柱端和梁端箍筋加密区范围为塑性区,采用纤维截面模拟其非线性力学行为,其它区域采用弹性杆模拟,对于塑性区内的混凝土采用约束混凝土本构。所有的柱构件均打开 $P-\Delta$ 开关,用以考虑几何非线性。梁柱节点假设为刚接,简化为刚域。

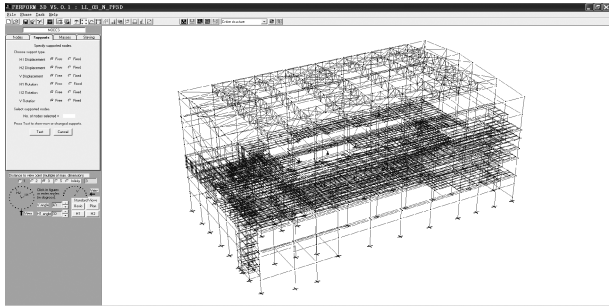


图3 Perform-3D主厂房模型

Fig. 3 Model of the Main Building in Perform-3D

2 地震波选取

2.1 设计地面运动加速度

采用 SL-1 级地面运动(重现期为 500 年)计算地震作用,本算例对应的 SL-1 级地面运动加速度峰值为 0.1 g,在 SL-1 地震作用下进行主厂房的配筋计算;以 SL-1 的配筋计算结果为依据建立主厂房的非线性分析模型,补充 SL-2 级地面运动(重现期为 10 000 年)作用下的动力弹塑性分析,在构件变形层次评估主厂房的抗震性能,保证在 SL-2 作用下不倒塌,本算例的 SL-2 级地震按设计数据文件取为 0.2 g。

2.2 美国 PEER-NGA 地震记录数据库

PEER-NGA 是美国太平洋地震中心下一代地震衰减模型的新一代强震数据库,PEER-NGA 数据库

含有 1 456 个地震台记录的 173 次地震,总计 3 551 套三个方向的地震波加速度时程(参见 <http://peer.berkeley.edu/nga/>)。收录的地震记录依据断层的走向进行坐标变换为垂直于断层方向和平行于断层方向。本算例依据核电反应谱 NRG1.60 谱进行地震动的选取。

2.3 地震波的选取要求

地震波的选择必须同时考虑地震的特性和结构非线性反应的特性。参考《建筑抗震设计规范》,本文的地震动选取采用较严格的标准,同时满足以下条件^[10]:(1)地震波的持续时间不宜小于结构第一自振周期的 5 倍,且不小于 15 s,地震波的采样点间距可取 0.01 s 或 0.02 s;(2)所选地震波样本的平均影响系数与振型分解反应谱法得到的结果应在统计意义上相符,平均差异不宜相差 10%;在 T 不大于 3.0 s 时不宜相差 15%,在 T 大于 3.0 s 时不宜相差 20%。(3)按比例调整地震加速度记录峰值,使位于 0.2~1.5 倍结构基本周期范围内任一点的加速度值不得低于设计谱加速度值的 90%,且在此周期范围内的加速度平均值不得低于设计谱加速度平均值。其中,0.2 倍为考虑高频高阶振型的影响,1.5 倍为考虑结构进入塑性周期会延长。(4)进行弹性时程分析,单条地震波计算出的基底剪力不应小于振型分解反应谱法计算出的基底剪力的 65%,多条地震波得到的基底剪力平均值不应小于振型分解反应谱法得到的基底剪力的 80%。

最后选取满足上述要求的 5 条场地地震波分别为:Northbridge(GM1)、EI Centro(GM2)、Loma prieta(GM3)、两条人工波(GM4、GM5),考虑双向地震,两个方向的加速度峰值比为 1:0.85。

3 模型校正

为了校验 Perform-3D 模型的准确性,分别采用 SAP2000 和 Perform-3D 软件对结构进行模态分析及时程分析。

本算例的分析目的是评价主厂房的抗震性能,因此仅输入与重力荷载代表值相关的荷载,参考《火力发电厂土建结构设计技术规定》包括恒载、均布活荷载、设备荷载、吊车荷载、检修荷载、管道荷载等。两者差别不大,可以认为 Perform-3D 模型基本能表达结构的动力特性。

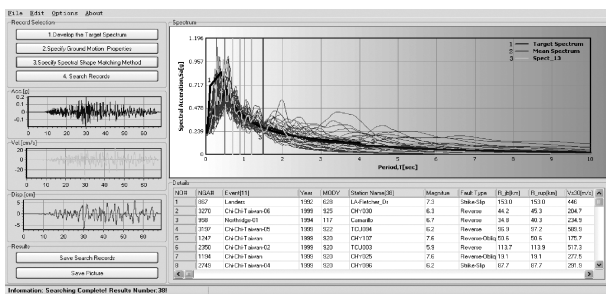


图4 选用的地震波与规范反应谱的频谱对比

Fig. 4 Comparison of Site Acceleration Records and Response Spectrum

表 1 Perform-3D、SAP2000 模态分析结构对比
Table 1 Natural Periods Comparison Between Perform-3D and SAP2000

振型	周期(s)	
	SAP2000 弹性模型	Perform-3D 弹塑性模型
1	1.03	0.98
2	0.86	0.85
3	0.70	0.73

在厂房的纵向输入小震下的 EI-Centro 地震波 (峰值加速度调整为 98 cm/s^2), 此时 Perform-3D 模型为弹塑性模型, 但结构并未进入塑性。取 SAP2000 和 Perform-3D 时间—顶点位移进行对比可知, 由于软件对质量源的处理不同, SAP2000 基于对象的模型, 采用了自动边束缚, 造成反应略有差别, 但基本一致, 工程上可以接受。

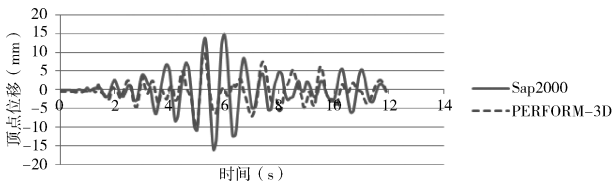


图 5 顶点位移时程响应对比图

Fig. 5 Top Displacement of linear time-history Analysis

4 结构整体及构件性能分析

4.1 SL-1 作用下结构整体性能分析

在 0° 和 90° 地震作用下, 整体层间位移角如表 2 所示:

表 2 SL-1 作用下结构整体层间位移角

Table 2 Drift of the Total Structure Under SL-1 Earthquake

角度	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	AVE
0°	1/1 719	1/3 256	1/1 504	1/1 727	1/1 810	1/1 862
90°	1/787	1/1 163	1/1 228	1/1 016	1/1 296	1/1 064

按照《建筑抗震设计规范》^[10], 在 CQC 法下 0° 时整体位移角为 1/1 510, 90° 时整体位移角为 1/997。若以整体位移角作为衡量标准, CQC 法下的整体位移角小于规范规定值, 满足 SL-1 处于弹性的变形验算要求。若以竖向构件的位移角为评定标准, SL-1 地震下最大构件位移角为 1/596, 亦满足弹性变形的校核要求。在 SL-1 级地震作用下, 在表 2 所示的 5 条地震波作用下, 结构的顶点位移角

有着较大的差别, 这也说明了结构的动力响应除了与地震动的选取密切相关, 5 条地震波下结构均基本处于弹性, 核岛侧山墙混凝土柱的最大轴压比为 0.35, 承载能力满足设计要求。SL-1 级地震的配筋结果用于后续 SL-2 的弹塑性分析。

4.2 SL-2 级地震作用下的结构性能分析

SL-2 下的分析模型中材料按标准值输入, 配筋按 SL-1 实际计算配筋, 结构质量采用集中质量分布于单元节点上。在 0° 和 90° 地震作用下, 结构顶点的整体位移角如表 3 所示。

表 3 SL-2 作用下结构整体层间位移角

Table 3 Drift of the Total Structure Under SL-2 Earthquake

角度	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	AVE
0°	1/1 059	1/1 990	1/746	1/827	1/915	1/983
90°	1/455	1/668	1/599	1/471	1/535	1/534

在动力非线性分析中, Perform-3D 每一步都计算结构的动能、弹性变形能、非线性变形能、粘滞阻尼能以及它们占整个耗能中的比例, 提供能量平衡图。以典型地震波 GM1 为代表, 结构能量耗散如图 6、7 所示:

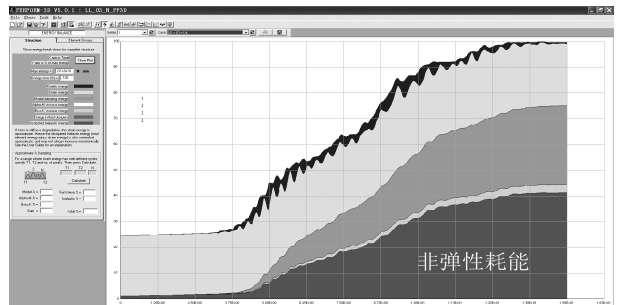


图 6 GM1X 能量耗散图

Fig. 6 Energy Dissipation Under GM1X

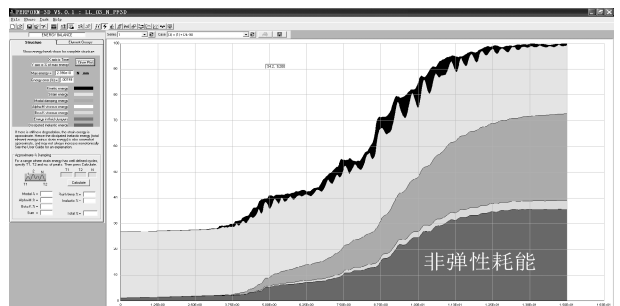


图 7 GM1Y 能量耗散图

Fig. 7 Energy Dissipation Under GM1Y

从主厂房结构能量耗散的分布中可以看出, 0° 和 90° 方向主厂房结构的能量耗散发展略有区别,

在 0° 的 SL-2 级地震作用下，结构进入弹塑性状态，弹塑性耗能约占整体能量的 42%；在 90° 的 SL-2 作用下，弹塑性耗能约占整体能量的 37%。在 0° 和 90° 两个方向下，图中非弹性耗散能在后期均呈现水平，表明在弹塑性分析后期地震能量输入与耗散间达到了平衡，结构的塑性铰区不在迅速发展，也表明所选择的 seismic wave 时长已经满足了要求，用此条 seismic wave 进行性能评估是可靠的。

4.3 SL-2 作用下的结构构件性能分析

根据主厂房结构的特点，SL-2 地震作用下主厂房构件的性能目标应满足表 4 要求。

表 4 SL-2 地震水准下结构构件性能目标

Table 4 Performance Targets of Structure Components Under SL-2 Earthquake

构件	SL-2	
靠近核岛处山墙	钢结构柱	中等破坏
	混凝土柱	中等破坏
靠近核岛处山墙	平面内支撑	中等破坏
	平面外支撑	中等破坏
靠近核岛处山墙	钢结构梁	严重破坏
	混凝土梁	严重破坏
普通框架柱子	主要混凝土柱	中等破坏
	次要混凝土柱	严重破坏
	主要钢结构柱	中等破坏
	次要钢结构柱	严重破坏
普通框架支撑	主要支撑	中等破坏
	次要支撑	严重破坏
普通框架梁	主要混凝土梁	中等破坏
	次要混凝土梁	严重破坏
	主要钢结构梁	中等破坏
	次要钢结构梁	严重破坏

表 4 中中等破坏、严重破坏的详细定义见参考文献^[6,11-13]，文献^[6,14-19]中详细给出了每种破坏类型对应的变形限值。根据基于性能抗震设计思想，在 SL-1 级地震作用下重点关注构件的承载力，而在 SL-2 地震作用下更加关注构件的变形能力，一般中等破坏对应的变形在承载力峰值附近，此时结构修复费用少于重建费用；严重破坏不超过变形能力极限，结构能依靠自身的延性能力保持不倒塌。

地震波作用下整体结构变形性能如图 8、9 所示。依据文献^[6,14]给出的变形限值，图中用云图的形式表示了柱的性能状态，仅 4 个远离核岛侧的次

要构件接近而未到倒塌限值，从图中可以看出，柱子在 SL-2 级地震作用下，性能限值远离倒塌状态，在 SL-2 级地震作用下具有足够的安全裕度。

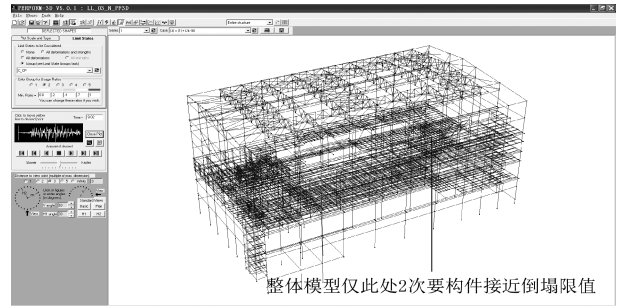


图 8 GM1 X 向地震作用下结构整体变形性能

Fig. 8 Deformation Behavior of the Total Structure Under GM1X

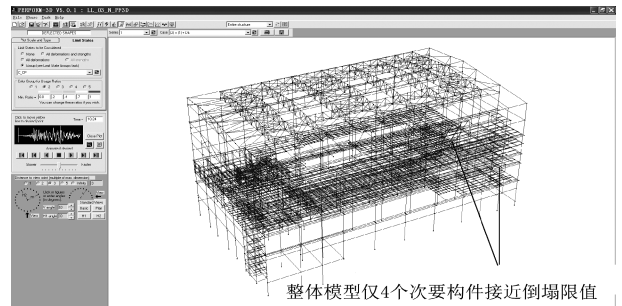


图 9 GM1 Y 向地震作用下结构整体变形性能

Fig. 9 Deformation Behavior of the Total Structure Under GM1Y

5 结论

对主厂房进行动力弹塑性分析与评价的关键在于合理的弹塑性分析模型与构件性能目标。PERFORM-3D 可以构件的需求能力比为评价指标，内置了 ASCE/SEI 41-06 等基于性能抗震设计规范的性能指标限值，并能够灵活的自定义，可以满足对常规岛主厂房结构的动力弹塑性分析要求；通过合理的设计，可以保证在 SL-1 地震作用下结构基本保持弹性，在 SL-2 地震作用下，部分构件屈服，但其变形满足要求，不会对设备造成重大影响，可以确保核电站常规岛主厂房的安全运行。

参考文献:

[1] 吴涛, 白国良, 刘伯权. 大型火力发电厂钢筋混凝土框架排架主厂房结构抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 46-52.
WU Tao, BAI Guoliang, LIU Boquan. Experimental Study on Seismic Behavior of rc Frame-Bent Structure of a Large Scale Power Plant [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 46-52.

- [2] 白晓红. 钢筋混凝土框排架结构的平扭耦联多维地震反应分析 [D]. 西安建筑科技大学, 2008.
BAI Xiaohong. Multi-Dimensional Seismic Response Analysis of the Reinforced Concrete Frame-Bent Structure Considered Lateral-Torsional Coupled [D]. College of Civil Engineering Xi'An University of Architecture & Technology, 2008.
- [3] 白国良, 白涌滔, 李红星, 等. 大型火电厂分散剪力墙-SRC框排架结构抗震性能试验研究 [J]. 工程力学, 2011, 28(6): 74-80.
BAI Guoliang, BAI Yongtao, LI Hongxing et al. Experimental Study on Aseismic Behavior of Scattered Shear Wall-SRC Frame-bent Structure in Large-Scale Thermal Power Plant [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(6): 74-80.
- [4] 马申. 主厂房采用混凝土单跨框-排架结构的抗震设计措施 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(10): 90-94.
MA Shen. Use of Aseismic Measures of Single Span Concrete Structure of Framed Bent in Main Power Buildings [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(10): 90-94.
- [5] 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.
- [6] 戚永乐. 基于材料应变的 RC 梁、柱及剪力墙构件抗震性能指标限值研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
QI Yongle. Research on Deformation Limits of RC Beams, Columns and Shear Walls Based on Material Strain [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [7] Computer and Structures Inc. Perform-3D Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures User Guide [M]. Computer and Structures, 2006.
- [8] Computer and Structures Inc. Perform Components and Elements for Perform-3D and Perform-Collapse [M]. Computer and Structures, 2006.
- [9] 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.
- [10] 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 aseismic design of buildings [S]. Beijing: China Building Industry Press. 2010.
- [11] QI Yongle, ZHOU Xinxian, XIE Candong. Research on Material damage Limits of RC Components for Performance-Based Seismic Design and Assessment [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 12(477): 1101-1104.
- [12] Yongle Qi, Xiaolei Han. Failure Mode Classification of Reinforced Concrete Columns Using Fisher Method [J]. Journal of Central South University of Technology, 2013, 10(20): 2863-2869.
- [13] QI Yongle, ZHOU Xinxian, XIE Candong. Research on Deformation Index Limits of RC Shear Wall Based on Material Damage [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 1(507): 322-327.
- [14] 戚永乐, 韩小雷, 周新显. 钢筋混凝土梁变形指标限值 [J]. 建筑结构学报. 2011, 42(3): 262-270.
QI Yongle, HAN Xiaolei, ZHOU Xinxian. Deformation performance Index Limits of RC Beams [J]. Journal of Building Structures, 2011, 42(3): 262-270.
- [15] FEMA-445. Next Generation Performance Based Seismic Design Guidelines-program for the New and Existing Buildings [S]. Washington DC., Federal Emergency Management Agency, 2006.
- [16] FEMA-356. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings [S]. Washington DC., Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [17] PRIESTLEY M J N, CALVI G M, Kowalsky M J. Displacement Based Seismic Design of Structures [M]. Iuss Press Pavia, Italy, 2007.
- [18] ASCE/SEI 41-13. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings [S]. US; Federal Emergency Management Agency, 2013.
- [19] GRAHAM H P. Modeling for Structural Analysis [M]. USA: University of California at Berkeley, 2010.

(责任编辑 林希平)