

孙静,薛小杰.基于实例分析的绿色钢结构抗震与环保性能研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1665-1670.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1665
SUN Jing, XUE Xiaojie. Seismic and Environmental Protection Performance of Green Steel Structures Based on a Case Study[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1665-1670. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1665

基于实例分析的绿色钢结构抗震与环保性能研究

孙 静¹, 薛小杰²

(1. 延安职业技术学院, 陕西 延安 716000; 2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 为优化绿色钢结构建筑的安全性能与环保性能,基于一40层框架-支撑钢结构建筑实例进行抗震性能与环保性能分析。根据实际建筑参数构建该绿色钢结构建筑剖面图,基于时程分析法记录不同地震波作用下建筑水平位移随时间变化情况,基于Pushover分析法分析方钢管混凝土组合异形柱在罕见地震中的基底剪力和弹塑性变形,基于对比实验方法验证其环保优越性,并得出以下结论:建筑的方钢管混凝土组合异形柱符合国家抗震性能要求,整体建筑的抗震性能随楼层的增加而减弱;与钢筋混凝土结构、砖混结构相比,钢结构能有效节约施工水电用量、降低施工噪声,是一种抗震性强、环保性能优的绿色建筑形式。

关键词: 绿色建筑; 抗震性能; 时程分析法; 异形柱; Pushover分析法; 环保因素

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1665-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1665

Seismic and Environmental Protection Performance of Green Steel Structures Based on a Case Study

SUN Jing¹, XUE Xiaojie²

(1. Yan'an Vocational & Technical College, Yan'an 716000, Shaanxi, China;

2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: To optimize the safety and environmental protection performance of green steel structure buildings, the seismic and environmental protection performances of a 40-story, steel-braced frame structure were analyzed. According to the actual building parameters, a profile of the green steel structure is presented, and the variations in horizontal displacement with time under different seismic waves were recorded using a time-history analysis method. Based on the Pushover analysis method, the base shear force and elastic-plastic deformation of special-shaped, square, concrete-filled steel tubular (SCFT) columns were analyzed under rare earthquakes conditions. Results of the comparative experiments lead to the following conclusions: the special-shaped SCFT building columns met national requirements for seismic performance. Compared with rein-

收稿日期: 2018-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(11202159)

第一作者简介: 孙 静(1983-),女,陕西延安人,硕士,讲师,造价工程师,招标师,咨询工程师,研究方向为建筑工程管理、建筑结构研究。E-mail: lxw23@163.com。

forced concrete and brick-concrete structures, green steel structures can effectively save water and electricity consumption during construction and reduce construction noise, and show strong earthquake resistance and excellent environmental protection.

Keywords: green building; seismic performance; time history analysis method; special-shaped column; pushover analysis method; environmental protection factors

0 引言

工程建筑施工产生大量环境污染物^[1],权威数据显示:全球每年排放的二氧化碳总量中约有6.9%来自水泥行业,城市噪声有33%来自建筑工程噪声,建筑产生的垃圾约占城市垃圾总量的35%。为全面改善城市环境,亟需发展绿色建筑产业,减少传统建筑垃圾造成的环境污染。近年来,国外大部分高层办公建筑以绿色、环保、生态作为设计思想,将绿色建筑视为主流发展方向。绿色建筑在满足大众生态环保需求的同时,也应考虑建筑的安全性和抗震性。钢结构具有抗震性能优、绿色环保、节约资源与能源、循环再利用的优点,国内外建筑设计行业均倾向选取其作为主材打造绿色建筑^[2-6]。钢结构自重较轻、工程承载力强,符合绿色建筑环保、抗震的要求^[7]。钢结构建筑能有效协调节材、节水、环保等多种绿色生态理念间的关系,是一种崭新、有效的资源节约、环境友好的发展方式^[6]。因此,本文将钢结构建筑作为测试对象,研究绿色建筑的抗震性能与环保因素作用,采用时程分析法获取结构水平位移随时间的变化趋势^[8],分析钢结构建筑总体抗震性能;基于Pushover分析法测试钢结构建筑中方钢管混凝土组合异形柱的抗震性能;以整体建筑为测试对象研究绿色建筑的环保因素作用。研究钢结构绿色建筑的抗震性能和环保作用,为适应绿色建筑工程设计方向提供可靠的设计依据,对打造资源节约型社会、营造安全舒适的生存环境具有重要意义。

1 绿色建筑的抗震性能与环保因素作用分析

1.1 基于时程分析法测试抗震性能

基于时程分析法记录绿色建筑在不同方向地震波作用下结构水平位移随时间变化情况^[9]。设置场地为Ⅷ度抗震,34.5 cm/s²为该建筑场地的加速度最大值;采用国家地震研究所提供的El-Centro波、Taft波、一条人工波模拟地震波输入,同时求取地震波单相输入^[10-11];运算包含1 600个数据的地震波,共耗费68 h。在ANSYS软件中完成瞬态结构

分析,考虑计算机硬件与计算速率,将PCG作为迭代计算方式;积分方式为New-mark,积分参数为0.05;定义 $\alpha > 0.25$ 、 $\delta = 0.5$ 时,计算精度高、计算环境无波动。

1.2 基于Pushover分析法测试抗震性能

基于Pushover分析法分析绿色建筑结构在罕见地震中的基底剪力和弹塑性变形^[12],评估其抗震性能。清楚体现建筑结构在地震中的变换过程是Pushover分析法的主要功能与优势^[13]。Pushover分析法基于能力谱法分析建筑结构的变化情况,具体过程为:

首先,通过静力弹塑性分析得到建筑结构的基底剪力-顶点位移曲线^[14-15]。

其次,通过Pushover曲线转化获取建筑结构的能力谱曲线,式(1)与式(2)为详细计算方法。

$$S_a = \frac{V_b}{M_1^*}, S_d = \frac{u_n}{\Gamma_1 \cdot \phi_{n1}} \quad (1)$$

$$M_1^* = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (\omega_1 \phi_{i1}) / g \right]^2}{\sum_{i=1}^n (\omega_1 \phi_{i1}^2) / g}, \Gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (\omega_1 \phi_{i1}) / g}{\sum_{i=1}^n (\omega_1 \phi_{i1}^2) / g} \quad (2)$$

式中: Γ_1 表示绿色建筑结构的第一振型参与系数; M_1^* 表示绿色建筑结构的模态质量; V_b 是基底剪力; u_n 为顶点位移; ω_i/g 表示第*i*层质点的质量; ϕ_{i1} 、 ϕ_{n1} 分别表示振型1的质点*i*与顶层质点的振幅。

最后,构建需求谱曲线,获取性能点。性能点即能力谱与需求谱曲线的交点^[16],采用原结构顶点位移代替性能点相应位移,可得到建筑在地震作用下的顶点位移和层间位移情况。

方钢管混凝土组合异形柱结构加载通过倒三角与均匀分布的方式实现^[17]。加载工况设置为:(1)重力与X向加速度组合;(2)重力与Y向加速度组合;(3)重力与模态1的组合;(4)重力与模态2的组合。上述工况中,模态1与模态2即X向与Y向,前两种加载工况为均匀分布模式,后两种加载工况

为倒三角分布模式。

1.3 基于对比实验测试环保因素性能

建筑施工噪声是建筑过程中的一大环境污染,亦是对比实验主要测试的环保性能指标。建筑材料的降噪性对于在城市化进程中受建筑噪声干扰的居民有重要意义。

其次是对施工废土量的对比测试。施工废土造成地表扬尘,严重影响城市环境空气质量,废土量多寡与环保性能的优劣直接相关。除此之外,分别从施工条件、水电用量、施工占地等方面测试建筑材料的环保性能。

2 实例分析

2.1 工程总体概况

本研究基于一 40 层框架-支撑钢结构建筑的实例进行抗震性能与环保性能分析。建筑的首层层高以及其他楼层的标准层高分别为 9.7 m、3.5 m。该建筑将 6~10 层设置为过渡区域,以保障高层建筑的安全性及抗震性。绿色钢架构在 10 层以上,具体采用钢管混凝土柱的形式构筑建筑的外框,将内筒钢柱-中心支撑、偏心支撑作为建筑结

构体系,将压型钢板组合楼盖作为绿色钢结构建筑的楼板。图 1 为绿色钢结构建筑的有限元剖面图。

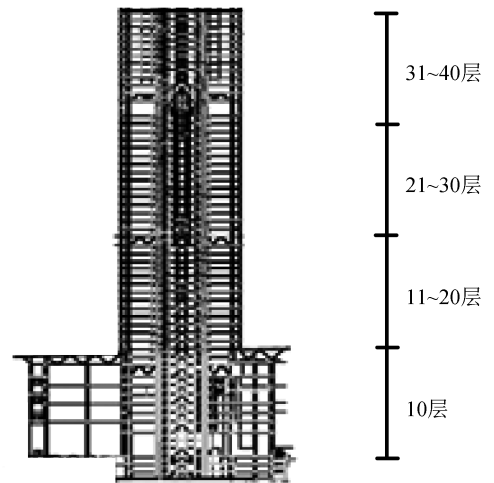


图 1 绿色钢结构建筑剖面图

Fig.1 Section of the green steel structure building

(1) 模型参数设计

表 1 为钢结构建筑关键性构建的尺寸,限于篇幅仅列举部分参数。

表 1 关键构建参数设计(单位:mm)

Table 1 Parameters design of key components (Unit:mm)

楼层	1~10	10~20	20~30	30 及以上
箱型柱 A	1 600×1 600 混凝土	1 300×1 300	1 200×1 200	1 000×1 000
箱型柱 B	剪力墙厚度为 850	700×1 300	700×110	700×900
箱型柱 C	剪力墙厚度为 750	360×800	360×800	360×700
主梁	混凝土主梁	700×290	-	700×360
支撑	-	-	310×310	-

其中,钢材型号为 Q345B,选用 C60 等级的墙体混凝土。

(2) 模型计算条件假设

计算绿色建筑的抗震性变量与参数时,需设定以下假设条件:(1)将理想的弹塑性模型作为材料模型;(2)将基础地面、地下室的周围部分看作完全嵌固,因为地下室部分刚度较大,地基嵌固作用突出;(3)基于等效原则折算钢管混凝土、钢骨混凝土的刚度值。

选取 ANSYS 软件进行有限元分析计算。该软件具备计算复杂结构的能力,可高效、精准分析建筑结构的瞬态动力、位移谱、时程等。表 2 详细描述了高层钢结构建筑的工程概况。

2.2 方钢管混凝土组合异形柱概况

将该 40 层绿色钢结构建筑的 H 户型作为绿色建筑抗震性能测试对象,首先构建建筑结构有限元模型,在 MIDAS/Gen 中完成。测试以 L 形、T 形、十

表 2 工程概况

Table 2 General situation of the project

建筑使用年限	50 年
建筑抗震设防烈度	Ⅷ度
特征周期	0.48 s
安全等级	二级
场地土类型	中软场地土
地震加速度基本值	0.22g

字形的异形柱为对象,采用 3.5 mm 厚的开孔钢板焊接钢筋混凝土柱形成异形柱,Q235、C30 分别为钢材与混凝土的型号。图 2 为 H 户型的承重框架图。

将墙单元模拟连接板作为计算模型,相比采用杆单元模拟,结构整体刚度更大,结构更加牢固。两种计算模型在三阶振型中的变形参数如表 3 所列。

2.3 绿色钢结构建筑总体抗震性分析

以绿色钢结构建筑的 10 层、25 层、35 层、40 层作为抗震性能分析的对象,采用时程分析法获取 X

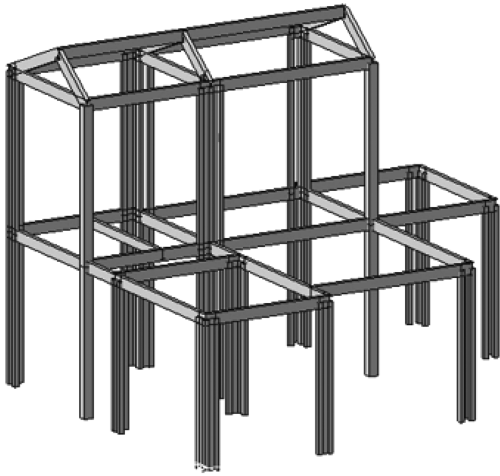


图 2 H 户型建筑的承重框架图

Fig.2 Load-bearing frame diagram of H-type building

表 3 异形柱结构自振特性

Table 3 Natural vibration characteristics of the structure with special-shaped columns

振型	周期/s		变形方式
	墙单元模拟	杆单元模拟	
一阶	0.415 8	0.558 5	X 向水平侧移
二阶	0.370 1	0.536 7	Y 向水平侧移
三阶	0.265 9	0.428 9	扭转变形

方向地震波作用下结构水平位移随时间变化的条形图(图 3)。

由图 3 能够看出三种不同地震波输入下不同楼层建筑 X 方向位移变化情况,以此分析绿色建筑的抗震性能。三种 X 方向位移变化量均显示:楼层 40 水平位移>楼层 35 水平位移>楼层 25 水平位移>楼层 10 水平位移,因此高层钢结构绿色建筑中,楼层越高、水平位移越大,楼层的抗震性能越弱。

2.4 方钢管混凝土组合异形柱抗震性能分析

2.4.1 结构性能分析

基于 Pushover 分析法得到 4 种荷载工况下基底剪力-顶点位移曲线,如图 4 所示。分析图 4 得到以下三点结论:(1)4 种曲线的初始阶段呈平滑状态,顶点位移和基底剪力成正比例关系,测试后期 4 种工况曲线呈现差异性波动态势,突破平滑线性增长的趋势,产生波动变化的节点为顶点位移 12.5 mm,证明绿色钢结构建筑步入塑性阶段;(2)Y 向加速度提前进入塑性阶段,因为比较 X 向加速度与 Y 向加速度发展趋势可知,Y 向加速度的平滑长度小于 X 向加速度,提前发生波动,模态 2(Y 方向)相比模态 1(X 方向)提前产生波动,形成这种现象的

原因是 Y 向加速度偏心大,结构平面与里面的布置不是对称分布状态;(3)绿色钢结构建筑的基底剪力-顶点位移曲线分布受加载模式的干扰,当顶点位移一定时,均匀分布模式中的基底剪力较大。

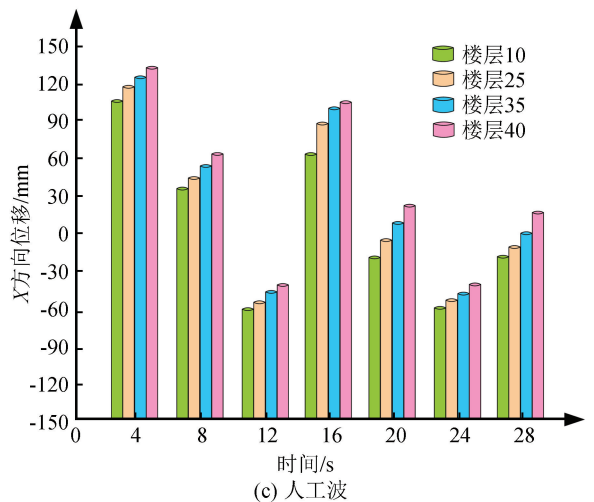
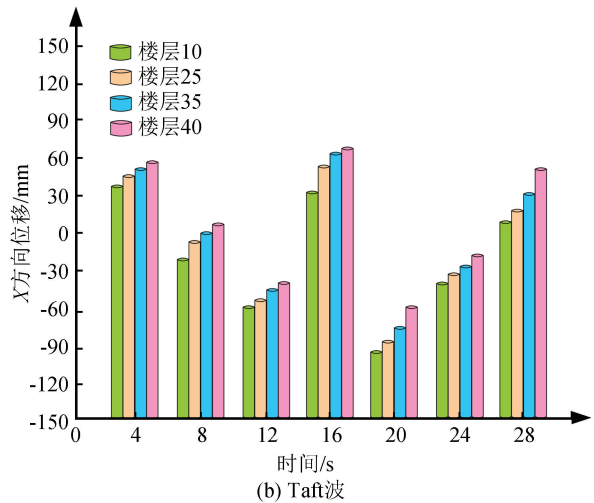
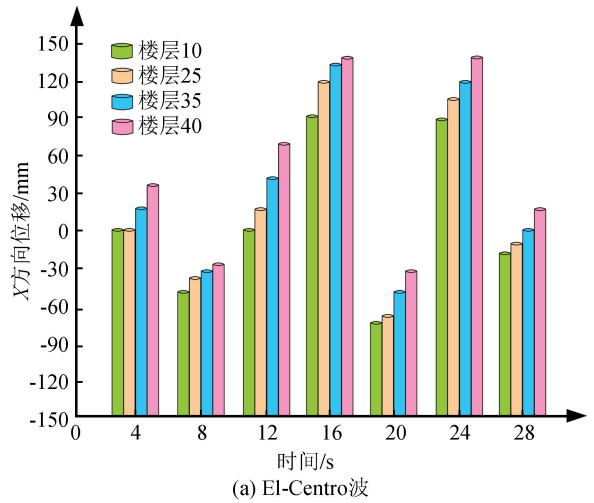


图 3 X 方向地震波作用下绿色建筑时程分析

Fig.3 Time-history analysis of the green building under X-direction seismic wave

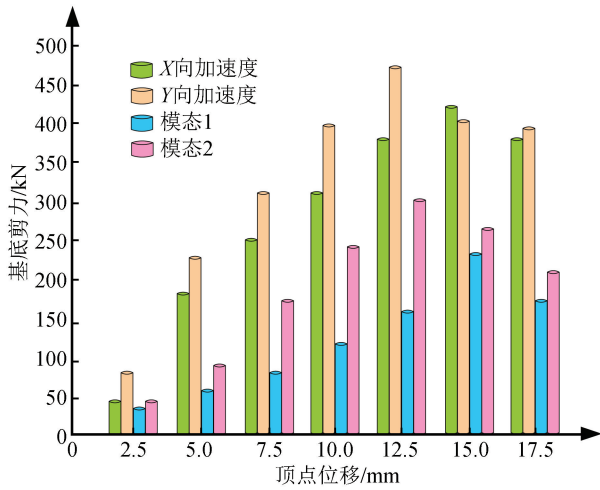


图 4 基底剪力-顶点位移曲线

Fig.4 Base shear force-vertex displacement curve

能力谱曲线和需求谱曲线是否存在交点即性能点是判断绿色钢结构建筑抗震性能优劣的标准,存在性能点证明绿色钢结构建筑的抗震性能优,反之,则证明其抗震性能差。本研究构建的绿色异形柱钢结构建筑模型存在性能点,其具体参数如表 4 所列。

表 4 绿色钢结构建筑异形柱结构的性能点参数

Table 4 Performance point parameters of the green steel structure with special-shaped columns

荷载工况	X 向加速度	Y 向加速度	模式 1	模式 2
谱位移 S_d	0.028	0.045	0.051	0.061
谱加速度 S_a	0.803	0.841	0.749	0.601
基底剪力 V/kN	263.5	428.7	242.2	305.1
顶点位移 D/m	0.49	0.69	0.89	0.091

表 6 不同结构建筑的环保指标对比

Table 6 Comparison of environmental protection indicators for different structural buildings

结构形式	环保评估指标				
	施工噪声/dB	施工废土量/t	施工条件	施工水电用量/kg	施工占地/km ²
钢结构建筑	0.40	0.15~0.35	优	0.35~0.55	0.25~0.35
钢筋混凝土结构建筑	1.00	1.00	良	1.00	1.00
砖混结构建筑	0.80	1.20~1.50	差	0.85~0.95	1.20~1.30

表 6 中的数据以钢筋混凝土结构建筑数据为基数 1.0 的方式体现。由表 6 可知,施工量与施工对象相同的情况下,钢结构产生的施工噪声、废土量、水电用量均最小,并且施工条件优于钢筋混凝土结构和砖混结构,施工占地面积较小。上述数据显示,钢结构建筑施工存在显著的环保优势。

3 结论

本文重点研究了钢结构绿色建筑的抗震性能与环保因素作用,采用 Pushover 分析法、时程分析法获取地震动参数,以此分析建筑的抗震性能。Pushover

分析表 4 能够看出,在两种不同的荷载作用下性能点的参数不同,倒三角分布模式下结构的顶点位移在均匀分布模式之上,但结构谱加速度小于均匀分布模式,谱位移与基底剪力无明显的分布规律。

2.4.2 结构侧向变形分析

基于 Pushover 分析法获取罕见地震下结构的侧向变形数据,并列于表 5。由国家抗震规范可知,钢筋混凝土框架、多高层钢结构的弹塑性层间位移角最大值为 1/50,低于该数值的层间位移角才符合抗震要求。

表 5 不同荷载工况下钢结构建筑异形柱结构的层间位移角最大值

Table 5 Maximum story drift ratio of the steel structure with special-shaped columns under different load conditions

荷载工况	层间位移角最大值
X 向加速度	1/127
Y 向加速度	1/91
模式 1	1/74
模式 2	1/55

分析表 5 可知,四种荷载工况下层间位移角最大值均小于 1/50,证明钢结构异形柱的抗震性能符合规范。

2.5 环保因素作用分析

以高层钢结构建筑的 10~20 层作为环保因素作用分析对象,计算 10~20 层建筑施工的噪声、用水量、废土量等环保评估指标,并与钢筋混凝土结构、砖混结构的环保评估指标对比,结果列于表 6。

分析法清楚体现建筑结构在地震中的变化过程,据此构建建筑结构在地震作用下的破坏机制。

基于实例进行绿色钢结构建筑抗震性与环保作用研究,得出以下结论:高层钢结构建筑的抗震性能随楼层的增加而减弱,绿色钢结构建筑中的方钢管混凝土组合异形柱符合国家抗震标准。因此在以后的绿色建筑设计中应重点加强高楼层的抗震性能,减小高楼层的形变与位移。实例分析结果同样表明钢结构环保性能优于钢筋混凝土结构和砖混结构,由此可知,钢结构建筑不仅具备环保与生态循环的优势,同时具备优异的抗震性能,是未来绿色建筑工

程设计的主要发展方向。

参考文献(References)

- [1] 叶凌,程志军.我国绿色建筑标准发展现状及展望[J].建筑科学,2016,32(12):6-12.
YE Ling, CHENG Zhijun. Overview on Green Building Standards Development[J]. Building Science, 2016, 32(12): 6-12.
- [2] 张昱,吴建华,陈瑶,等.日本 9.0 级地震甘肃地下流体资料同震响应特征分析[J].地震工程学报,2017,39(增刊1):97-101.
ZHANG Yu, WU Jianhua, CHEN Yao. Characteristics of the Co-seismic Response of Fluid Data in the Gansu Area Prior to the 2011 Tohoku M9.0 Earthquake, Japan [J] China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(Supp1): 97-101.
- [3] 王娟.高层建筑在连续振动下的壁板结构失稳定 BIM 模型设计[J].地震工程学报,2018,40(3):413-420.
WANG Juan. Panel Structure Instability BIM Model Design of High-rise Buildings under Continuous Vibration [J] China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 413-420.
- [4] 陈建伟,边瑾靓,苏幼坡,等.应用 OpenSEES 模拟方钢管混凝土柱的抗震性能[J].世界地震工程,2015,31(3):71-77.
CHEN Jianwei, BIAN Jinliang, SU Youpo, et al. Application of OpenSEES on Calculating Lateral Force-Displacement Hysteretic Curves of Concrete-filled Rectangular Steel Tubular Columns[J]. World Earthquake Engineering, 2015, 31(3): 71-77.
- [5] 熊海贝,许鸿盛,陈佳炜.轻木-混凝土跃层住宅抗震性能分析[J].结构工程师,2017,33(1):85-92.
XIONG Haibei, XU Hongsheng, CHEN Jiawei. Seismic Performance of Light Wood-Concrete Structure for Duplex Apartment Building[J]. Structural Engineers, 2017, 33(1): 85-92.
- [6] 王万祯,李华,郭鸣鸣,等.隔板贯通方钢管轻骨料混凝土柱-H形梁与箱形梁异形节点抗震性能试验[J].建筑科学与工程学报,2018,35(1):40-50.
WANG Wanzhen, LI Hua, GUO Mingming, et al. Test on Seismic Behavior of Diaphragm-through Irregular Joints of Lightweight Aggregate Concrete-filled Square Steel Tubular Column and H-section Steel Beam and Steel Box Beam [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(1): 40-50.
- [7] CHIANG H L, NOONAN D. Strategic Behavior in Certifying Green Buildings: An Inquiry of the Non-building Performance Value[J]. Environmental Management, 2017, 60(2): 231-242.
- [8] 王颖杰,杨波,左慧芳,等.基于 MgB₂ 高温超导材料的吉瓦级远程直流输电研究[J].电力工程技术,2017,36(4):80-85.
WANG Yingjie, YANG Bo, ZUO Huifang, et al. Research on GW Level Remote HVDC Based on MgB₂ HTS Superconductor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 80-85.
- [9] 雷宏刚,邱斌,姬艳玲.装配式轻钢结构住宅中自攻螺丝连接受力性能研究评述[J].太原理工大学学报,2017,48(3):265-274.
LEI Honggang, QIU Bin, JI Yanling. An Overview Study on Bearing Capacity Properties of Self-Tapping Screw Connection in Prefabricated Light-Gauge Steel Structure Residence [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(3): 265-274.
- [10] 王波,王静峰,完海鹰,等.循环荷载作用下高层钢结构建筑填充墙体性能与连接构造研究[J].建筑钢结构进展,2015,17(6):44-50.
WANG Bo, WANG Jingfeng, WAN Haiying, et al. Study on Performance and Connection Detail of Filled Walls in High-Rise Steel Structures under Cyclic Loadings [J]. Progress in Steel Building Structures, 2015, 17(6): 44-50.
- [11] 臧兴震,杨远龙,徐创泽.加劲 T 形钢管约束混凝土柱滞回性能研究[J].地震工程与工程振动,2017,37(5):129.
ZANG Xingzhen, YANG Yuanlong, XU Chuangze. Hysteretic Behaviors of Stiffened T-shaped Steel Tubular Confined Concrete Columns [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, 37(5): 129.
- [12] 南力菲,李海旺,李伟伟.具有隔震支座钢管拱桁架结构体系抗震性能研究[J].太原理工大学学报,2014,45(6):785-790.
NAN Lifei, LI Haiwang, LI Weiwei. Study on Elastoplastic Seismic Performance of Isolators Technology on Three-dimensional Steel Arch-truss [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2014, 45(6): 785-790.
- [13] 宋祥,叶燕华,张诗浩,等.型钢自密实混凝土叠合剪力墙恢复力模型[J].建筑结构学报,2017,38(9):10-19.
SONG Xiang, YE Yanhua, ZHANG Shihao, et al. Experimental Study on Restoring Force Model of Self-compacting Concrete Composite Shear Walls with Profile Steel [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(9): 10-19.
- [14] 田宇,崔帅文,沈钰皓.钢结构建筑物抗震性能数值仿真与试验研究[J].工程抗震与加固改造,2017,39(4):60-64.
TIAN Yu, CUI Shuaiwen, SHEN Yuhao. Numerical Simulation and Experimental Study on Seismic Behavior of Steel Structures [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(4): 60-64.
- [15] 王静峰,叶慧君,李金超,等.填充节能复合墙板钢框架结构的抗震性能[J].建筑钢结构进展,2015,17(6):35-43.
WANG Jingfeng, YE Huijun, LI Jinchao, et al. Seismic Behavior of Steel Frame Structures Filled with Sandwich Composite Panels [J]. Progress in Steel Building Structures, 2015, 17(6): 35-43.
- [16] 薛建阳,戚亮杰,隋葵,等.钢结构仿古建筑双梁-柱中节点的受力机理[J].土木建筑与环境工程,2016,38(1):17-22.
XUE Jianyang, QI Liangjie, SUI Yan, et al. Mechanical Performance of the Double Beam-column Inner Joints in Steel Imitated Ancient Building [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(1): 17-22.
- [17] 谭平.钢管混凝土在异形高层建筑中的施工应用[J].四川建筑科学研究,2016,42(3):130-132.
TAN Ping. Application of Concrete Filled Steel-tube in the Irregular High-rise Building [J]. Sichuan Building Science, 2016, 42(3): 130-132.