

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210123001

# 防屈曲支撑钢框架模块装配式结构 及其抗震性能分析\*

杨超, 欧进萍

(哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 深圳 518055)

**摘要:** 防屈曲支撑是一种兼具承载和耗能的抗侧力构件, 相比于普通支撑, 具有耗能稳定且延性好的优点, 在模块化结构中, 防屈曲支撑可作为模块内单元, 通过带防屈曲支撑模块单元装配的方式形成防屈曲支撑钢框架模块结构。提出了防屈曲支撑钢框架模块装配结构体系、防屈曲支撑在模块化结构中的设计要求以及结构体系设计方法, 并以20层住宅楼为例进行设计, 包括典型高层住宅及其模块划分及结构在小震和大震下的抗震性能进行分析。反应谱分析结果表明: 设计的模块化结构能满足规范对结构的各项要求。对布置了普通支撑与等刚度防屈曲支撑的模块化结构进行了静力弹塑性分析, 静力弹塑性分析结果表明: 在8度罕遇地震下, 普通支撑结构部分支撑发生屈曲破坏, 布置等刚度的防屈曲支撑框架只有第二层出现塑性铰, 结构能够经受8度罕遇地震的考验, 防屈曲框架结构的初始刚度与普通框架结构一致, 但极限承载力明显大于普通支撑框架结构; 防屈曲支撑较普通支撑能显著提高模块化结构的承载力, 且能率先屈服发挥耗能作用, 保护主体结构安全, 符合双重抗侧力体系的原则, 防屈曲支撑钢框架模块装配式结构体系具有优越的抗震性能, 有很好的应用前景。

**关键词:** 模块化钢结构; 抗震性能; 防屈曲支撑; 静力弹塑性分析

**中图分类号:** TU391   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2021)05-0917-11

## Buckling Restrained Brace Steel Frame Modular Assembly Structure and Its Seismic Performance Analysis

YANG Chao, OU Jinping

(School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology(Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Buckling restrained brace (BRB) is a kind of anti-side force member with both load-bearing and energy consumption. Compared with the ordinary brace, it has the advantages of stable energy consumption and good ductility. In a modular structure, BRB can be used as a unit in the module. The module unit with BRB is assembled to form the BRB steel frame module structure. This article introduces the assembly structure system of BRB steel frame modules, including typical high-rise residential buildings and their module division, BRB steel frame module assembly structure and structural system design method, the design requirements of BRB in modular structure, and the 20-story residential

\* 收稿日期: 2021-01-23; 修回日期: 2021-03-08

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2017YFC0703605)资助

作者简介: 杨超(1994—), 男, 博士研究生。主要从事装配式钢结构研究。E-mail: yangchao@stu.hit.edu.cn

通讯作者: 欧进萍(1959—), 男, 教授, 博士, 中国工程院院士。主要从事防灾减灾、结构健康监测与振动控制方面的研究。E-mail: oujinping163@163.com

building was designed as an example to analyze the seismic performance of the structure under frequent and rare earthquakes. The results of response spectrum analysis show that the designed modular structure can meet the requirements of the code for the structure. A static elasto-plastic analysis of the modular structure with ordinary brace and equal-rigidity BRB was carried out. The results of the static elasto-plastic analysis show that some supports of the ordinary brace structure buckled and broke under the rare earthquake of 8 degrees. In the BRB frame with equal stiffness BRB, only the second layer has plastic hinges, and the structure can withstand the test of 8 degree rare earthquake. The initial stiffness of the BRB frame structure is the same as that of an ordinary brace frame structure, but the ultimate bearing capacity is significantly greater than that of the ordinary brace frame structure. The BRB can significantly improve the bearing capacity of the modular structure compared with the ordinary brace, and can first yield to play an energy dissipation role, which protects the safety of the main structure and comply with the principle of the dual lateral force system. The BRB steel frame modular assembly structure system has superior seismic performance and has a good application prospect.

**Keywords:** modular steel structure; seismic performance; buckling restrained brace; static elastoplastic analysis

## 引言

近年来,在制造业转型升级大背景之下,国家大力推进装配式建筑。模块化建筑是一种新兴的建筑构造体系,是一种由模块化构件组成的建筑形式。所有的模块均应在工厂生产预制,然后到现场安装。

模块化钢结构建筑属于预制装配式中高度装配化的结构形式,有着装配率高、建造速度快以及节约劳动力等优点。模块化结构的推广与其抗震性能密切相关,在模块化结构中采用耗能减震措施,可以有效提高结构抗震性。

R. M. Lawson等<sup>[1]</sup>对高层模块化建筑结构体系进行了分析,探讨了模块化建筑的结构设计对其建筑设计的影响,分析了在模块化建筑结构体系当中,钢结构和混凝土框架结构的混合使用会大大提高模块化建筑结构体系的设计广度。并对应用在模块化钢结构中的轻钢墙板进行了轴压屈曲试验,分析其在模块单元中的受力情况。A. Fathieh等<sup>[2]</sup>针对Annan教授的带斜撑模块单元建立四层框架结构进行地震分析,应用OpenSees有限元软件对钢结构模块化建筑进行静力弹塑性分析和动力时程分析。K. Park等<sup>[3]</sup>探讨了三种实现模块化建筑在高层中应用的结构形式,分别为核心筒、基于平台

上的核心筒、填充式模块化,着重研究了填充式模块化的结构形式应用于高层建筑。2012年,王伟等<sup>[4-5]</sup>对分层装配式支撑钢结构工业化建筑体系进行了拟静力加载试验,考察了该结构在水平地震作用下的抗侧力机制、滞回特性、破坏模式及其刚度和承载力的变化规律。刘学春等<sup>[6-9]</sup>对钢结构模块化建筑,从节点、斜支撑、桁架梁等方面进行试验研究<sup>[10-11]</sup>,成功研发了装配式斜支撑节点钢框架。天津大学陈志华等<sup>[12-14]</sup>对节点铰接和刚接情况的模块化结构分别进行了对比分析,针对模块单元与钢框架复合结构体系,对提出的节点形式得出了相应的简化计算模型,并对模块化结构在地震作用下的响应进行了分析,陈志华等<sup>[15-18]</sup>提出两种用于模块化结构的连接节点并进行了试验,通过试验研究得出该节点具有良好的力学性能。杨晓杰等<sup>[19]</sup>提出一种采用厚壁冷弯型钢作为结构骨架的钢结构模块建筑体系,与采用冷弯薄壁型钢作为结构骨架的模块建筑相比,其承载力更高。陈红磊等<sup>[20]</sup>对在模块内布置了无屈曲波纹钢板剪力墙和普通支撑两种不同的抗侧力构件的模块化结构进行了对比分析。徐亚冲<sup>[21]</sup>、杨超<sup>[22]</sup>分别对模块化框架、框架支撑结构抗震性能进行了分析,通过耗能减震技术能提高模块化结构的抗震性能。

国内外对与模块化建筑结构体系的研究还比较少,而且多集中在低层模块化住宅的研究,模块

化结构抗震性能较差,制约了模块化结构建筑在高层建筑中的应用。因此,有必要研究易于现场装配,抗震性能良好,组装功能多样的模块化建筑结构体系。同时设计轻质、规整、符合模数、立面丰富、适用高层、便于运输的模块单元,对于模块化建筑的推广也尤为重要。

防屈曲支撑是一种既不易屈曲又具有良好耗能能力的支撑形式,小震时可以为结构提供刚度,在中震和大震时又可以通过受拉屈服而耗能。本文将防屈曲支撑应用到模块化结构中,提出了防屈曲支撑钢框架模块装配结构体系及设计方法,防屈曲支撑在模块化结构中的设计要求,并以20层住宅楼为例进行设计,对结构在小震和大震下的抗震性能进行分析,通过静力弹塑性分析,对比将普通支撑与等刚度防屈曲支撑模块化结构的抗震性能,为推广该结构体系的实际应用提供参考。

## 1 防屈曲支撑钢模块及其装配式结构

### 1.1 防屈曲支撑钢模块装配式结构

在模块化钢结构中,常采用角柱承重式模块单元的相互堆叠连接形成结构,对于高层结构框架模块的抗侧性能不够,将防屈曲支撑布置在钢框架模块内的形成防屈曲支撑钢模块,模块内支撑的连接构造、模块在结构中的布置和单个模块三维图如图1所示。

模块化框架防屈曲支撑结构组装示意如图2所示,通过带防屈曲支撑的钢模块采用连接节点组装成如图2所示的结构体系。

### 1.2 模块构件计算模型

模块单元之间的连接可采用插销螺栓连接方式,如图3所示,当模块单元运输到施工现场,插销件的尺寸设计成小于模块柱的内尺寸,便于插入柱子中,用插销件将上下模块柱连接。通过插销件将多梁多柱形成节点域,插件外伸一块连接板,在上下模块梁相邻处,使用高强螺栓将上下模块梁翼缘连接起来,在左右模块梁相邻处,使用高强螺栓将左右模块梁腹板连接起来。

在水平作用下,其中插销件和螺栓起到抗剪的

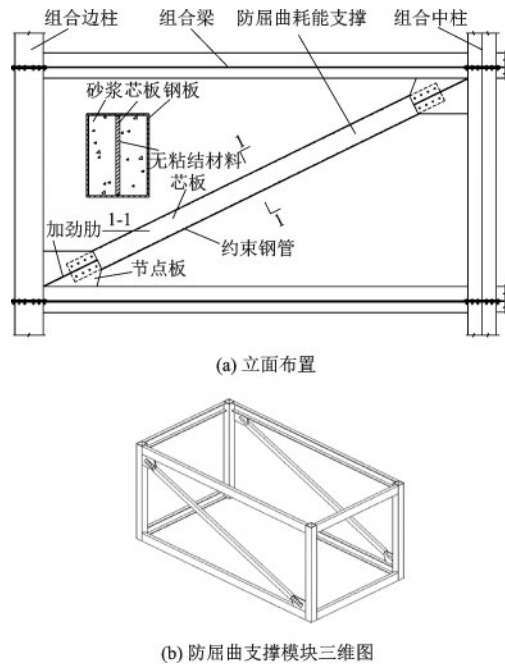


图1 防屈曲支撑在模块化结构内的布置

Fig.1 Buckling restrained brace disposed within the modular structure

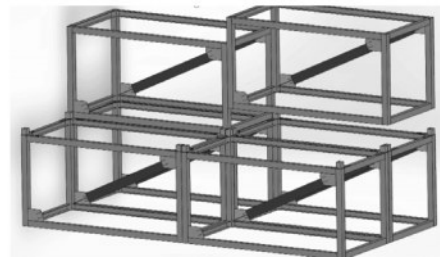


图2 模块化框架防屈曲支撑结构的组装示意

Fig.2 Assembly diagram of the modular frame buckling restrained brace structure

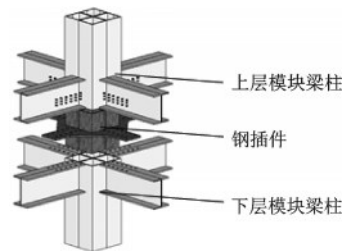


图3 插销螺栓连接节点构造示意

Fig.3 Structural configuration of the bolted connection with plug-in

作用,同时螺栓群产生的拉压力进行抗弯,承受节点处的弯矩。还可设置加劲肋、在柱端外包钢板及节点域灌浆等措施提高节点的刚度和强度,本文中节点假定为刚性连接,每根模块梁、柱用梁单元模拟,

整体结构分析时简化为如图4所示的简化模型。

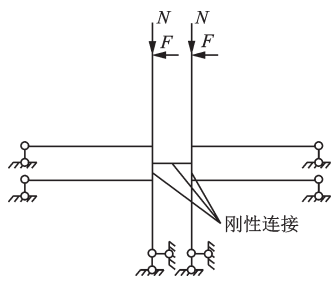


图4 节点简化模型

Fig.4 Simplified model of the connection

注:  $N$ 为轴压力,  $F$ 为水平力

## 2 钢模块中防屈曲支撑设计

### 2.1 防屈曲支撑设计

防屈曲支撑(BRB)阻尼器刚度是由核心单元消能段、转换段与连接段三段共同串联后组成,如图5所示。

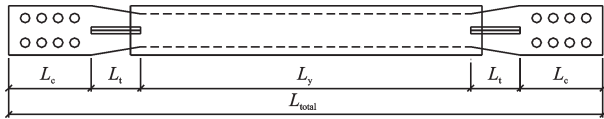


图5 防屈曲支撑各功能段组成

Fig.5 Composition of functional sections of the buckling restrained brace

注:  $L_y$ 为消能段长度;  $L_t$ 为转换段长度;  $L_c$ 为连接段长度,  $L_{total}$ 为支撑总长度

防屈曲支撑的设计主要包括支撑的屈服力、屈服位移和最大位移。通过对比参考各防屈曲支撑的性能,本文采用一字形内芯防屈曲支撑用于模块化钢结构,并提出在模块化结构中采用承载耗能型防屈曲支撑的设计方法,具体的设计过程如下:

对于模块划分后得到模块尺寸,一个模块中布置的防屈曲支撑的几何长度参数如图6所示。

内芯屈服段的长度依据屈服位移和钢材类型确定,一般情况下,屈服位移以层间侧移角的形式给出。保证防屈曲支撑满足小震下的刚度要求,支撑屈服位移  $\Delta_y$  对应的层间位移角  $\alpha_y$  应大于钢结构建筑层间位移角的限值  $1/250$ ,根据划分的钢模块几何尺寸,由式(1)可计算支撑的屈服位移限值。

$$u_y = \alpha_y H \quad (1)$$

$$\Delta_y = u_y \cos \theta \quad (2)$$

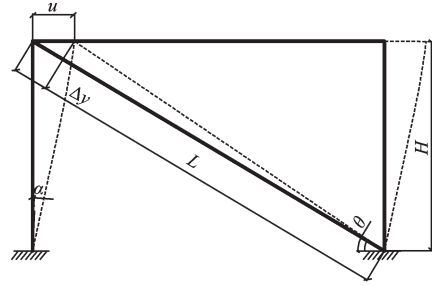


图6 模块中防屈曲支撑布置参数

Fig.6 Arrangement parameters of the buckling restrained brace in the module

注:  $H$ 为模块层高,  $u_y$ 为支撑屈服时模块的水平位移,  $\theta$ 为支撑与水平方向的夹角,  $\Delta_y$ 为支撑的轴向屈服位移,由防屈曲支撑满足小震下的刚度要求,屈服位移对应的位移角  $\alpha_y$  应大于钢结构建筑层间位移角的限值  $1/250$

再由钢材种类得到屈服应变  $\epsilon_y$ ,求得支撑的屈服段最小长度  $l_{y1}$ 为:

$$l_{y1} = \Delta_y / \epsilon_y \quad (3)$$

对防屈曲支撑除了有屈服位移的要求外,还有延性的要求,要求BRB在大震下性能稳定,即具有稳定的耗能能力。按照图6中所示的几何关系由式(4)得到结构最大层间位移  $u_u$ ,由式(5)可以计算得到支撑的最大轴向变形  $\Delta_u$ ;同时为保证BRB充分耗能和防止BRB低周疲劳破坏,取结构大震弹塑性层间位移角限值  $\alpha_u$  为  $1/50$  时BRB对应的最大应变  $\epsilon_{max}$  为  $2\%$ ,并假设总轴向变形集中在支撑内芯上,由此可计算出BRB的屈服段最小长度  $l_{y2}$ 。

$$u_u = \alpha_u H \quad (4)$$

$$\Delta_u = u_u \cos \theta \quad (5)$$

$$l_{y2} = \frac{\Delta_u}{\epsilon_{max}} \quad (6)$$

最终防屈曲支撑屈服段最小长度  $L_y$  可取  $l_{y1}$  与  $l_{y2}$  中较大值。

除了屈服位移要求,BRB还有屈服力的要求,根据要求的支撑屈服力  $P_y$ ,按式(7)根据设计屈服承载力确定消能段面积  $A_y$ :

$$A_y = \frac{P_y}{\sigma_y} \quad (7)$$

还要确定外套管长度  $l_a$ ,根据内芯长度  $l$  (整个内芯的长度,内芯屈服段与内芯上过渡段长度之和)和最大变形  $\Delta l_{max}$ ,外套管长度  $l_a$  按式(8)计算得到:

$$l_a = l - \Delta l_{max} \quad (8)$$

确定内芯与外套管的间隙  $\delta$ ,依据内芯的最大

应变  $\epsilon_{\max}$ , 得到支撑的最小间宽比  $\mu = 0.25\epsilon_{\max}$ , 由内芯的宽度  $b_c$ , 根据式(9)可求出外套管与内芯的间隙:

$$\delta = \mu b_c \quad (9)$$

根据刚度、强度和厚度要求确定外套管的尺寸。

若按以上设计满足要求, 则完成设计, 否则重新选取内芯尺寸, 直至截面尺寸合理。

对于防屈曲支撑两端无约束非屈服段, 一般通过增大截面面积来实现不屈服, 取两端非屈服段横截面面积为屈服段的  $k$  倍, 支撑屈服段截面面积为  $A_y$ , 则非屈服段截面面积为  $kA_y$ 。

## 2.2 防屈曲支撑的滞回骨架曲线

防屈曲支撑不同于普通支撑, 防屈曲支撑作为耗能与承载构件, 要得到其骨架曲线用于结构设计, 典型的双折线骨架曲线如图7所示。

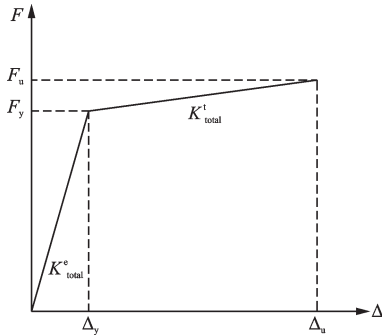


图7 防屈曲支撑骨架曲线

Fig.7 Skeleton curve of the buckling restrained brace

依据设计的防屈曲支撑的尺寸参数可以得到骨架曲线的弹性刚度  $K_{\text{total}}^e$  和塑性刚度  $K_{\text{total}}^t$  计算如下:

$$K_{\text{total}}^e = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_y} + 2\frac{1}{K_t} + 2\frac{1}{K_c}\right)} \quad (10)$$

$$K_{\text{total}}^t = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_u} + 2\frac{1}{K_t} + 2\frac{1}{K_c}\right)} \quad (11)$$

式中,  $K_t = \frac{EA_t}{L_t}$ ;  $K_c = \frac{EA_c}{L_c}$ ;  $K_y = \frac{EA_y}{L_y}$ ;  $K_u = \frac{E_t A_y}{L_y}$ ;  $A_y$  为消能段断面积;  $L_y$  为消能段长度;  $A_t$  为转换段中点断面积;  $L_t$  为转换段长度;  $A_c$  为连接段全段面积;  $L_c$  为连接段长度。

骨架曲线的屈服承载力  $F_y$ 、屈服位移  $\Delta_y$ 、极限

承载力  $F_u$  和极限位移  $\Delta_u$  分别计算如下:

$$F_y = \sigma_y A_y \quad (12)$$

$$\Delta_y = \frac{F_y}{K_{\text{total}}^e} \quad (13)$$

$$F_u = \sigma_u A_y \quad (14)$$

$$\Delta_u = \epsilon_{\max} L_y + \frac{F_u}{K_t} + \frac{F_u}{K_c} \quad (15)$$

式中,  $\sigma_y$  为核心段屈服强度,  $\sigma_u$  为核心段极限强度。

对于模块中的防屈曲支撑的设计可以根据模块的尺寸确定防屈曲支撑各段的长度, 通过需要的承载力, 设计合适的支撑, 得到其恢复力模型用于结构设计及弹塑性分析。

## 3 结构体系设计方法

模块化钢框架-防屈曲支撑装配式结构体系是双重抗侧力体系, 在水平地震作用下, 防屈曲支撑作为抗震第一道防线首先进入屈服耗能, 保障主体结构的安全, 结构合理的屈服顺序为: 防屈曲支撑-模块化框架梁-模块化框架柱, 其设计流程如图8所示。具体的设计步骤如下: ①对建筑进行模块划分确定装配成结构的模块类型及模块单元的尺寸; ②根据结构竖向荷载初步设计楼板及模块梁柱尺寸; ③根据模块大小考虑防屈曲支撑在模块的布置, 并考虑低周疲劳要求初步设计防屈曲支撑尺寸; ④对结构建模分析, 调整防屈曲支撑与模块化钢框架各模块梁柱尺寸; ⑤大震弹塑性分析, 验算结构能否满足抗大震要求, 结构构件的屈服顺序是否合理, 不合理则调整防屈曲支撑与模块化钢框架各模块梁柱尺寸。

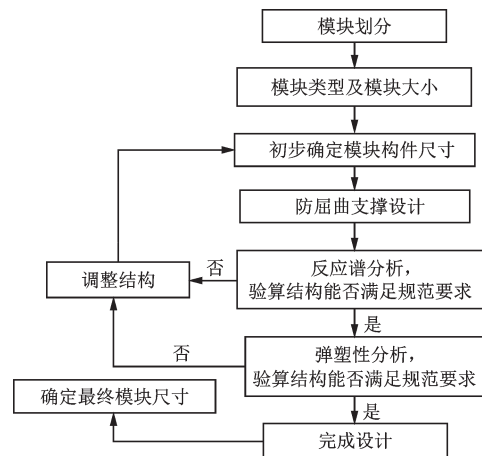


图8 结构体系设计方法流程

Fig.8 Flowchart of structural system design method

## 4 装配式结构抗震设计与大震弹塑性时程分析实例

### 4.1 典型高层住宅及其模块划分

#### 4.1.1 典型高层住宅

设计了一栋易于模块化建造的住宅,住宅为一

层两个单元,一梯两户,户型为三室两厅一厨两卫,同时为了兼顾外立面的丰富可以采用悬挑的飘窗和阳台,以及内阳台等形式。结构类型为钢框架支撑结构,总层数为20层,层高为3.0 m,平面尺寸为51.6 m×11.7 m,如图9所示是该住宅一个单元标准层平面。

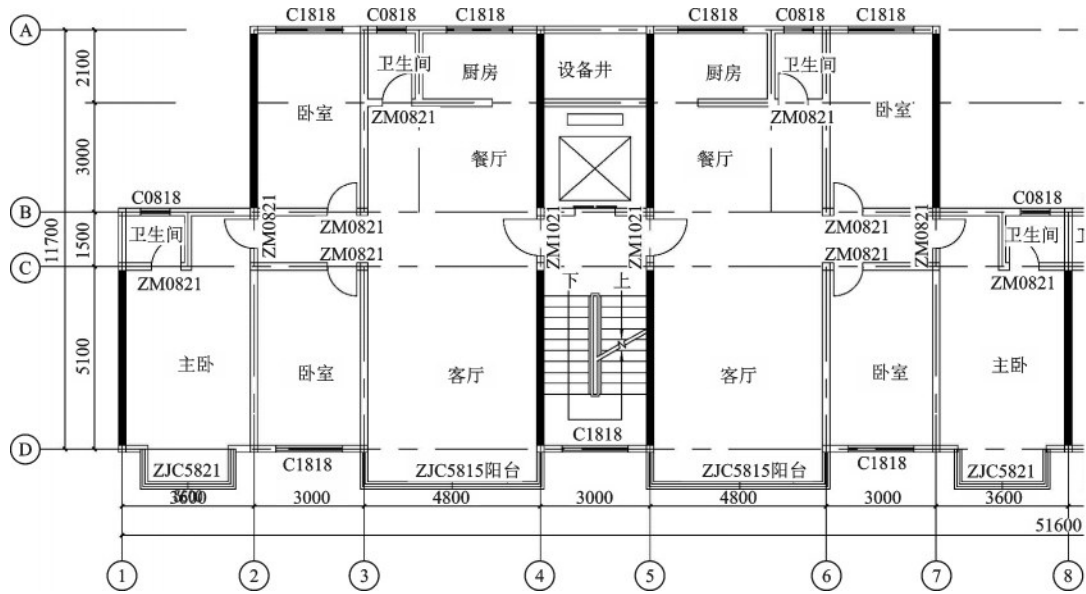


图9 一个单元标准层建筑平面

Fig.9 Standard floor plan of one unit

#### 4.1.2 模块划分

根据建筑结构的使用功能,按一般模块划分原则,将标准层划分出6种模块单元,如图10所示。具体功能和尺寸见表1。

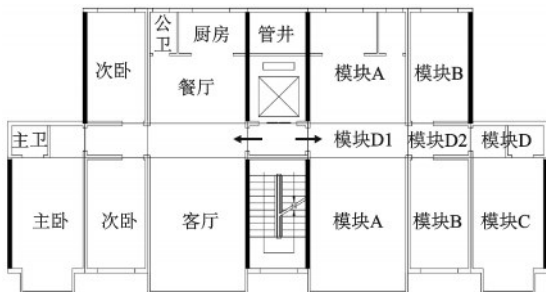


图10 住宅一个单元模块划分图

Fig.10 Residential unit module division diagram

如图11所示是不同形式的单元模块以及结构平面布置,图中加粗黑线表示支撑布置位置,整个建筑结构可由以下模块装配成防屈曲支撑钢框架模块化结构体系。

表1 模块单元功能与尺寸

Table 1 Module unit function and sizes

单位:mm

模块编号	建筑功能	长	宽	高
A	客厅	5 100	4 200	3 000
B	卧室	5 100	3 000	3 000
C	卧室	5 100	3 300	3 000
D1	走廊	5 100	1 500	3 000
D2	走廊	3 300	1 500	3 000
楼梯模块	楼梯	5 100	3 000	3 000

### 4.2 结构计算模型

本工程抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度为0.2g,工程设计基准期50年,地震分组为第一组,Ⅱ类建筑场地,建筑类别为丙类,罕遇地震作用下最大水平地震影响系数 $\alpha_{\max}=0.9$ ,对应的特征周期值为0.4 s。按照《建筑结构荷载规范》<sup>[23]</sup>确定

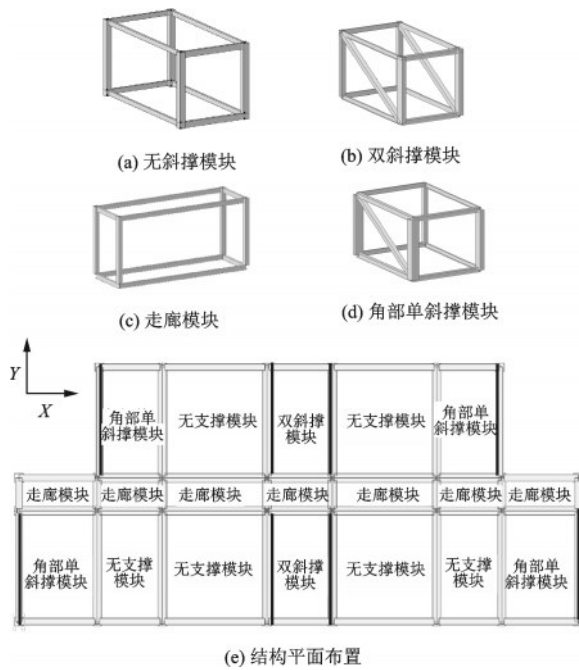


图11 不同形式模块单元与平面布置

Fig.11 Different forms of modular units and floor plans

50年重现期获得的基本风压取 $0.6\text{ kN/m}^2$ ,地面粗糙度为B类。支撑材料采用Q235,其余构件钢材材料都使用Q345,楼板混凝土等级为C30。

设计时所取恒、活荷载,楼面恒荷载取 $3.0\text{ kN/m}^2$ ,楼梯恒荷载取 $3.0\text{ kN/m}^2$ ,内墙恒荷载 $2.0\text{ kN/m}^2$ ,外墙恒荷载 $3.0\text{ kN/m}^2$ 。楼面活荷载包括走廊活荷载取 $2.0\text{ kN/m}^2$ ,楼梯荷载取 $3.5\text{ kN/m}^2$ ,不上人屋面取 $0.5\text{ kN/m}^2$ 。

使用Midas/Gen有限元软件进行二十层模块化钢框架建模设计与计算,模块化结构的多梁多柱形式,每根梁柱均采用梁单元进行模拟,通过刚性短杆连接如图12所示。

### 4.3 模块构件设计

模块单元柱的长度取层高,并都选用方钢管柱,模块梁根据其位置选择槽钢或者工字钢,由模块装配成的结构要满足整体结构各方面力学性能的要求,通过结构计算分析和设计确定各模块构件的尺寸,最终取模块梁、柱及支撑的截面见表2,等核心段面积的防屈曲支撑设计参数见表3。

### 4.4 结构反应谱分析

#### 4.4.1 结构整体动力特性计算

总共计算了20阶振型,其中前三阶振型如图13所示,第一阶振型是X向平动,周期大小为 $2.76\text{ s}$ ,

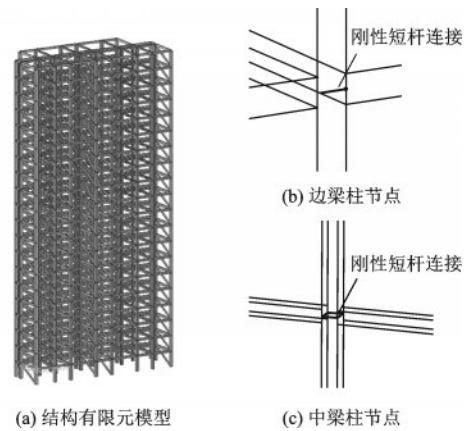


图12 模块化结构有限元模型与节点连接方式

Fig.12 Modular structure finite element model and node connection methods

表2 模块梁柱构件尺寸

Table 2 Dimensions of modular beams and columns

单位:mm

楼层	1-10	11-20
边模块柱B	$400 \times 200 \times 12$	$400 \times 200 \times 10$
角模块柱B	$400 \times 16$	$400 \times 8$
中模块柱B	$200 \times 10$	$200 \times 8$
边模块梁HW	$200 \times 200 \times 8/12$	$175 \times 175 \times 7.5/11$
中模块梁C	$200 \times 73 \times 7/11$	$160 \times 65 \times 8.5/10$
支撑B	$200 \times 200 \times 5$	$200 \times 200 \times 4$

注:B为方钢管,HW为H型钢,C为槽钢

表3 防屈曲支撑设计参数

Table 3 Design parameters of the buckling restrained brace

楼层	1-10	11-20
$A_y/\text{mm}^2$	3 900	3 140
$A/\text{mm}^2$	7 800	6 280
$L_y/\text{mm}$	3 800	3 800
$L/\text{mm}$	5 600	5 600
$L_c/\text{mm}$	600	600
$L_t/\text{mm}$	300	300
$F_y/\text{kN}$	916.5	738.0
$K_{\text{total}}^e/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$1.67 \times 10^5$	$1.35 \times 10^5$
$K_{\text{total}}^t/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$1.67 \times 10^3$	$1.35 \times 10^3$

注:塑性刚度 $K_{\text{total}}^t$ 近似取弹性刚度的0.01倍

属于结构平面纵轴方向的平动;第二振型是Y向的平动,周期大小为 $1.64\text{ s}$ ,属于结构平面横向运动;第三振型是绕Z轴扭转,周期大小为 $1.50\text{ s}$ 。

本模型的周期比大小为 $1.50/2.76=0.54 < 0.85$ ,满足《高层民用建筑钢结构技术规程》<sup>[24]</sup>要求。在20阶振型累积的有效质量,X方向平动的振型参

与质量占总质量的97.95%,Y方向平动的振型参与质量占总质量的97.72%,扭转的振型参与质量占总质量的97.62%,满足《高层民用建筑钢结构技术规程》<sup>[24]</sup>中90%要求。



图13 二十层模块化钢框架支撑结构前3阶振型

Fig.13 First 3 vibration modes of the 20-layer modular steel frame bracing structure

#### 4.4.2 结构位移计算结果

结构总高度为60 m,在风荷载作用下,顶点最大位移为X方向101.7 mm,满足《高层民用建筑钢结构技术规程》<sup>[24]</sup>里关于风荷载作用下最大位移为结构高度的1/500要求。在风和地震荷载作用下,结构的层间位移角如图14所示,风荷载作用下层间

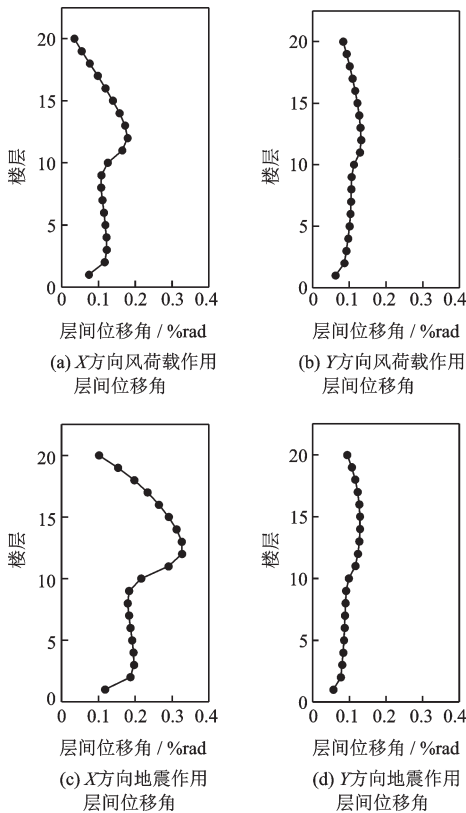


图14 水平作用下结构层间位移角

Fig.14 Displacement angle between structural layers under horizontal action

位移角满足1/400限值要求,地震作用下层间位移角满足《建筑抗震设计规范》<sup>[25]</sup>中的1/250限值要求。

#### 4.4.3 构件应力计算结果

在Midas/Gen中对结构构件进行验算,得到所有构件包括模块梁、模块柱以及斜撑的组合应力验算比结果如图15所示,横轴是构件的单元编号,纵轴是构件的应力验算比大小都小于1,说明截面上的作用力并没有超过截面的承载力,并且验算比多数小于0.6,结构安全可靠。

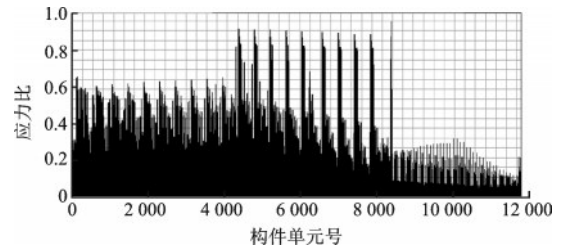


图15 结构构件验算比率

Fig.15 Checking ratio of structural members

### 4.5 结构静力弹塑性分析

#### 4.5.1 静力弹塑性分析模型

采用通用有限元分析软件Midas/Gen进行结构的静力弹塑性分析,在各柱端设置了轴力弯矩铰(PMM铰),在各梁端设置了弯矩铰(M铰),在斜向支撑中部设置了轴力铰(P铰)。并按照ATC-40所建议的方法将各铰的性能骨架曲线定义为如图16所示的形式。其中水平轴表示变形或位移,竖向轴表示力,骨架曲线分为线性上升段AB、强化段BC、下降段CD和水平段DE分别表示构件弹性工作、屈服后强化、达极限强度后承载力下降并部分退出工作的状态,点IO、LS和CP代表铰的能力水平,它们

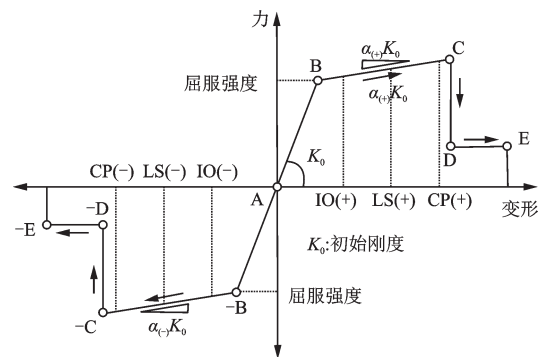
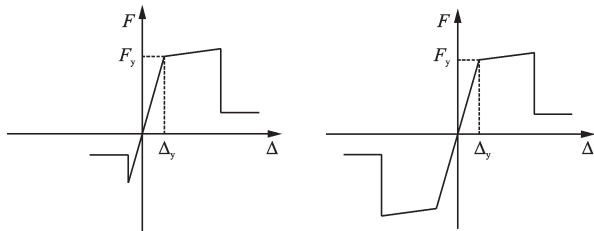


图16 塑性铰性能骨架曲线示意

Fig.16 Schematic diagram of skeleton curve of plastic hinge performance

分别对应于直接使用、生命安全和防止倒塌。

对于设置于普通支撑上的轴力铰(P铰),由于支撑受压时会产生失稳破坏,并且这种破坏是没有延性的,轴力铰应当考虑支撑受压屈曲,在计算中,按照各支撑的实际截面和计算长度分别计算了其承载力得到了形状如图17(a)所示的轴力铰(P铰)骨架曲线。同时,为避免结构的弹性刚度差异引起的结构弹性阶段地震作用的差异,取原支撑作为防屈曲支撑内核单元核心段截面,忽略防屈曲支撑连接段和过渡段的刚度影响,近似取防屈曲支撑弹性阶段刚度与原支撑相同。即采用等刚度的防屈曲支撑代替普通支撑,防屈曲支撑骨架曲线如图17(b)所示,采用拉压同性的骨架曲线。加载模式采用沿结构高度均匀分布的水平荷载分布模式。



(a) 普通支撑轴力铰骨架曲线 (b) 防屈曲支撑轴力铰骨架曲线  
图17 静力弹塑性分析骨架曲线

Fig.17 Skeleton curve of static elastoplastic analysis

#### 4.5.2 静力弹塑性分析结果

##### (1) 出铰情况分析

分析得到两种结构沿Y方向推覆过程中的塑性铰发展如图18和图19所示,从性能点处的塑性铰发展看,在8度罕遇地震下,普通支撑结构支撑发生

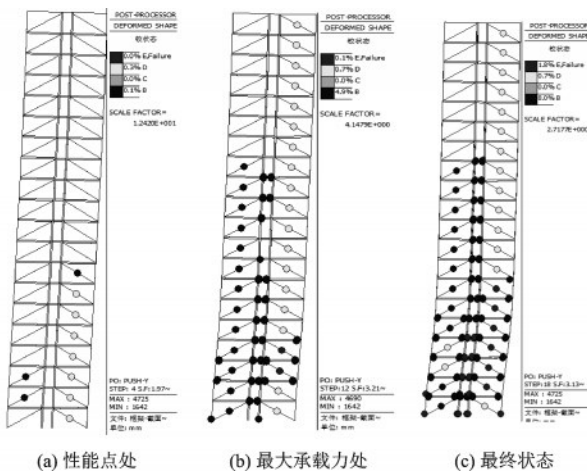


图18 普通支撑结构 Pushover 分析结果

Fig.18 Pushover analysis results of the common brace structure

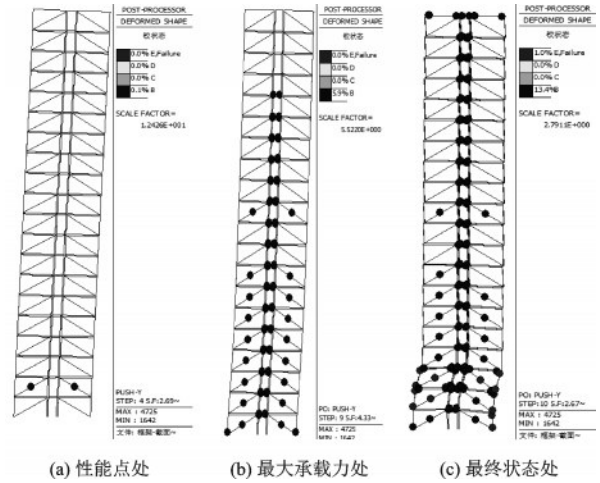


图19 防屈曲支撑结构 Pushover 分析结果

Fig.19 Pushover analysis results of the buckling restrained brace structure

屈曲破坏,布置等刚度的防屈曲支撑框架,只有第二层出现塑性铰。结构虽然在少数部位出现了塑性铰,但大多数塑性铰的屈服程度并不深,仍处于强化上升阶段,因此结构能够经受8度罕遇地震的考验。整个推覆过程中,结构受压的普通支撑由于受压屈曲破坏,而防屈曲支撑框架两边受压支撑与受拉支撑同时屈服。从破坏机制来看,模块化框架结构首先发现支撑屈服,然后模块梁端出现塑性铰,最终由于模块柱端出现塑性铰导致结构承载力迅速下降,失效模式合理。

图20给出了整体结构在性能点处的塑性铰分布情况。从中可知,普通支撑结构的构件出现塑性铰较多,且塑性发展程度较深。两种结构的整体趋

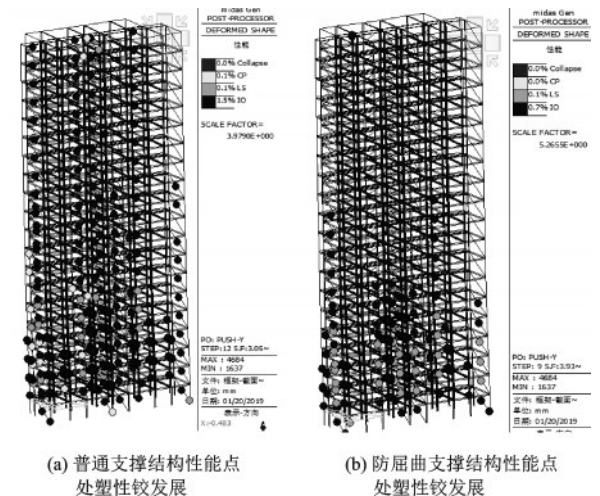


图20 整体结构性能点处塑性铰发展

Fig.20 Development of plastic hinge at performance points of the overall structure

势相同,即塑性铰主要出现在结构中下部的支撑中,个别梁、柱端也出现塑性铰,塑性铰大部分处于B-IO阶段,少数处于IO-LS阶段,说明结构具有较好的抗大震性能,布置防屈曲支撑能提高结构的抗震性能。

### (2)结构基底剪力-顶点位移相关曲线

图21为两种结构对应的基底剪力-顶点位移曲线对比,普通支撑结构与防屈曲支撑结构初始刚度相同,随着侧向位移的增加,由于普通支撑出现屈曲,普通支撑结构的刚度衰减更快,防屈曲支撑结构的承载力较普通支撑结构提升较大。从最终破坏模式看,防屈曲支撑结构的延性有所降低,这是由于为了便于对比,采用等刚度的防屈曲支撑代替普通支撑,防屈曲支撑的刚度较大,模块框架柱的承载力不够,可对布置防屈曲支撑的模块化框架进行优化。

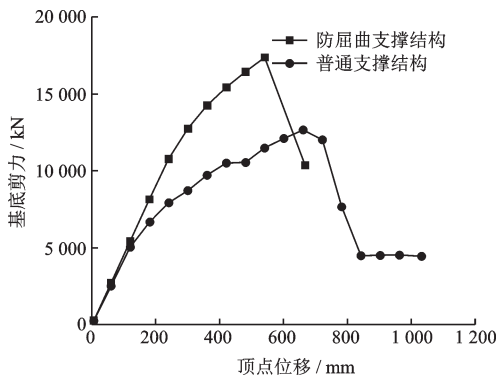


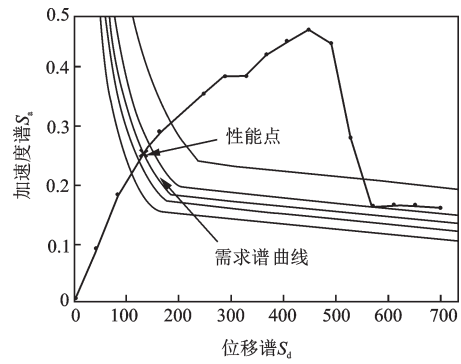
图21 两种支撑对应结构的基底剪力-顶点位移曲线对比

Fig.21 Comparison of base shear-vertex displacement curves of two kind of brace structures

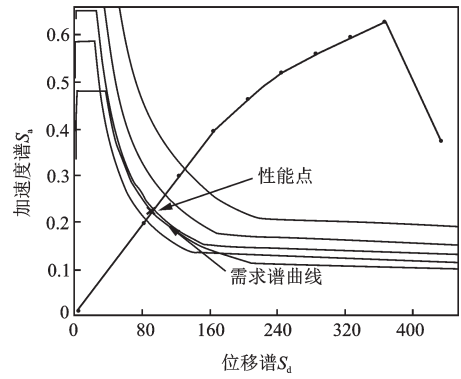
### (3)能力需求谱

采用 Pushover 方法进行结构的非线性地震反应分析。得到结构的荷载-变形相关曲线以后,按反应谱形式给出对应于所考察地震的性能要求。

图22为结构在8度罕遇地震作用下沿Y方向的弹塑性分析结果曲线,图中从原点出发的粗线为能力谱,五条需求谱曲线中,中间箭头标记的为通过反复迭代求出的与能力谱相交的8度罕遇地震需求谱,其余四条谱曲线分别对应于5%、10%、15%和20%阻尼比的8度罕遇地震需求谱。需求谱和能力谱相交于一点,即罕遇地震性能点。从图中可以看到,结构具有抗8度罕遇地震的能力,性能点离峰值点较远,结构且具有较大的承载力储备。



(a) 普通支撑结构



(b) 防屈曲支撑结构

图22 两种结构能力需求谱

Fig.22 Two kinds of structural capacity requirement spectrum

## 5 结论

通过对防屈曲支撑钢框架模块装配结构体系的分析,所得结论如下:

(1)提出了防屈曲支撑钢框架模块装配结构体系以及结构体系的设计方法。总结了防屈曲支撑在模块化结构中的设计要求。设计的模块化建筑易于模块划分,结构设计及反应谱分析结果表明结构满足规范对结构的各项要求。

(2)对布置了防屈曲支撑与普通支撑的框架进行了静力弹塑性分析,在8度罕遇地震下,普通支撑结构支撑发生屈曲破坏,布置等刚度的防屈曲支撑框架只有第二层出现塑性铰,结构能够经受8度罕遇地震的考验。防屈曲框架的初始刚度与普通框架一致,极限承载力明显大于普通支撑框架,但从最终破坏模式看,结构延性有所降低。

(3)防屈曲支撑率先屈服发挥耗能作用,保护主体结构安全,具有优越的抗震性能,但结构整体破坏时,只有部分BRB屈服,考虑结构的经济合理性,可对BRB的设计参数进行优化。

## 参考文献:

- [1] Lawson R M, Richards J. Modular design for high-rise buildings[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings. 2010, 163 (3) : 151-164.
- [2] Fathieh A, Mercan O. Seismic evaluation of modular steel buildings[J]. Engineering Structures. 2016, 122: 83-92.
- [3] Park K, Moon J, Lee S, et al. Embedded steel column-to-foundation connection for a modular structural system [J]. Engineering Structures. 2016, 110: 244-257.
- [4] 周青,王伟,陈以一,等. 分层装配式支撑钢结构工业化建筑体系抗震性能试验研究[J]. 建筑结构. 2012, 42(10): 61-64.  
Zhou Q, Wang W, Chen YY, et al. Experimental research on seismic performance of floor-by-floor assembled steel braced structures for prefabricated buildings [J]. Building Structure. 2012, 42(10): 61-64. (in Chinese)
- [5] Wang W, Zhou Q, Chen YY, et al. Experimental and numerical investigation on full-scale tension-only concentrically braced steel beam-through frames[J]. Journal of Constructional Steel Research. 2013, 80: 369-385.
- [6] Liu X C, Zhan X X, Pu S H, et al. Seismic performance study on slipping bolted truss-to-column connections in modularized prefabricated steel structures [J]. Engineering Structures. 2018, 163: 241-254.
- [7] Liu X C, Xu A X, Zhang A L, et al. Static and seismic experiment for welded joints in modularized prefabricated steel structure [J]. Journal of Constructional Steel Research. 2015, 112: 183-195.
- [8] Liu X C, Pu S H, Zhang A L, et al. Static and seismic experiment for bolted-welded joint in modularized prefabricated steel structure [J]. Journal of Constructional Steel Research. 2015, 115: 417-433.
- [9] Liu X C, Pu S H, Zhang A L, et al. Performance analysis and design of bolted connections in modularized prefabricated steel structures[J]. Journal of Constructional Steel Research. 2017, 133: 360-373.
- [10] 刘学春,徐阿新,张爱林. 模块化装配式斜支撑节点钢框架结构整体稳定性能研究[J]. 北京工业大学学报. 2015, 41(5): 718-727.  
Liu X Ch, Xu A X, Zhang A L. Study on the integral stability behaviors of a modularized prefabricated steel structures with lean-brace joints [J]. Journal of Beijing University of Technology. 2015, 41(5) : 718-727. (in Chinese)
- [11] 倪真,赵越,刘学春,等. 模块化装配式钢结构桁架梁承载力性能研究[J]. 工业建筑. 2014, 44(8): 14-18.  
Ni Zh, Zhao Y, Liu X Ch, et al. Research on bearing capacity performance of the truss girder in the modular prefabricated steel structure [J]. Industrial Construction. 2014, 44(8): 14-18. (in Chinese)
- [12] 曲可鑫. 钢结构模块化建筑结构体系研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.  
Qu K X. Study on steel structural system in modular buildings [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [13] 张鹏飞. 多层钢结构模块结构与力学性能研究 [D]. 天津:天津大学, 2016.  
Zhang P F. Design and mechanical properties of multi-storey steel module structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [14] 张鹏飞,张锡治,刘佳迪,等. 多层钢结构模块与钢框架复合建筑结构设计与分析[J]. 建筑结构, 2016, 46(10): 95-100.  
Zhang P F, Zhang X Zh, Liu J D, et al. Structural design and analysis of multi-storey steel structure module and steel frame composite structures [J]. Building Structure, 2016, 46(10): 95-100. (in Chinese)
- [15] Chen Zh H, Liu J D, Yu Y J, et al. Experimental study of an innovative modular steel building connection [J]. Journal of Constructional Steel Research. 2017, 139: 69-82.
- [16] Chen Zh H, Liu J D, Yu Y J. Experimental study on interior connections in modular steel buildings [J]. Engineering Structures. 2017, 147: 625-638.
- [17] Chen Z, Liu Y, Zhong X, et al. Rotational stiffness of inter-module connection in mid-rise modular steel buildings [J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109273.
- [18] Chen Z, Wang J, Liu J, et al. Tensile and shear performance of rotary inter-module connection for modular steel buildings [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 175: 106367.
- [19] 杨晓杰,陆焜,顾超,等. 新型多高层钢结构箱式模块建筑的设计[J]. 建筑钢结构进展. 2016, 18(5): 41-47.  
Yang X J, Lu Y, Gu Ch, et al. Structural design of steel modular high-rise and multi-story buildings [J]. Progress in Steel Building Structures. 2016, 18(5): 41-47. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)

(下转第 953 页)