

带可更换抗侧耗能装置的装配式钢框架 结构静力性能研究

姜子钦^{1,2}, 杨晓峰¹, 张爱林^{1,2,3}, 陈鑫¹, 康轶涛¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124;

2. 北京工业大学北京市高层和大跨度预应力钢结构工程技术研究中心, 北京 100124;

3. 北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘要:为实现钢框架结构震后损伤可快速修复的功能,基于损伤控制思想,提出一种带可更换抗侧耗能装置的装配式钢框架结构.利用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟分析,首先对该钢框架结构的受力机理开展研究,分析钢框架体系内力流传递路径,提出结构的合理失效顺序,建立相应失效准则;而后对该装配式钢框架结构与对应刚接框架及铰接框架进行对比分析;最后进行变参数分析,着重讨论该柱脚节点抗侧剪切件截面宽度、厚度及高度、节点板连系螺栓数量、柱脚横梁刚度及柱轴压比等参数对该装配式钢框架结构力学性能的影响.研究表明,合理设计的该装配式钢框架结构在屈服荷载及抗侧刚度两方面可以与对应刚接柱脚框架完全等效,且该新型钢框结构主体构件的应力分布优于对应刚接框架,可以将结构内的塑性损伤集中在翼缘连接盖板、抗侧耗能装置等易于更换的耗能元件上,使梁柱等主体构件基本处于弹性状态,具备震后可恢复功能.

关键词:可恢复功能;钢框架结构;损伤控制;柱脚节点;可更换抗侧耗能装置;有限元分析

中图分类号: TU 392.1; TU 317.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2021)04-0365-09

doi: 10.11936/bjtxb2020110040

Study on Static Behavior of Steel Frame Structure With Lateral Resistance Energy-consuming Device

JIANG Ziqin^{1,2}, YANG Xiaofeng¹, ZHANG Ailin^{1,2,3}, CHEN Xin¹, KANG Yitao¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Engineering Research Center of High-rise and Large-span Prestressed Steel Structure, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Beijing Advanced Innovation Center for Future City Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: To accomplish the quick repair function of steel frame structure after earthquake damage, based on the idea of damage control, a prefabricated steel frame structure with lateral resistance energy-consuming device was put forward in this paper. An numerical simulation was carried out by using ABAQUS. First, the stress mechanism of the steel frame structure was studied, the internal force-transferred path of the steel frame system was analyzed, the reasonable failure sequence of the structure was put forward, and the corresponding failure criteria were established. Then, the prefabricated steel frame structure was compared with the corresponding rigid frame and hinged frame. Finally, the variable parameter analysis was carried out. The influences of the cross-section width, thickness and height of

收稿日期: 2020-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078013, 51608014); 北京市自然科学基金资助项目(8174060)

作者简介: 姜子钦(1988—), 男, 副教授, 主要从事装配式钢结构方面的研究, E-mail: jzqb2010@163.com

lateral shear plates, the number of connecting bolts of joint plates, the stiffness of column-foot beams and the axial compression ratio of columns on the mechanical properties of the prefabricated steel frame structure were emphatically discussed. The research shows that the prefabricated steel frame structure with reasonable design can be completely equivalent to the corresponding frame with rigid column feet in terms of yield load and lateral stiffness, and the stress distribution of the main members of the steel frame structure is better than that of the corresponding rigid frame. The plastic damage in the structure can be concentrated on the easily replaceable energy dissipation elements such as flange connection cover plates and lateral energy dissipation devices, so that the main members such as beams and columns are basically in an elastic state and have the earthquake-resilience.

Key words: earthquake-resilience; steel-frame structure; damage control; column foot joint; lateral resistance energy-consuming device; element analysis

可恢复功能结构摒弃单一追求结构抗倒塌能力的传统设计理念, 转变成兼顾结构抗倒塌能力且损伤可控、震后可修、结构可恢复的设计理念, 要求主体构件在地震中无损伤或轻微损伤, 塑性损伤主要集中在易于更换的耗能元件上, 震后只需更换或修复损伤元件即可恢复结构的正常使用功能。如今大力发展的装配式钢结构具有易拆装的优点, 十分有利于可恢复功能设计理念在其中的实现。然而若没有合理的理论支撑和技术指导, 装配式钢结构建筑在地震作用下仍会发生区域内的整体破坏, 导致体系内主体构件发生不同程度的塑性损伤, 不易实现结构的震后修复。这使得装配式钢结构建筑的震后修复与其他传统建筑结构无异, 装配式钢结构易拆装的优点在震后可恢复功能领域无法进一步发挥^[14]。因此, 亟需研发一种具有可恢复功能的装配式钢框架结构, 通过合理设计使结构中的塑性损伤主要集中在易于更换的耗能元件上, 震后只需更换耗能元件即可实现结构功能的快速恢复, 充分发挥装配式钢结构建筑的优越性。

国内外学者对震后可恢复结构开展了一系列研究。Oh等^[5]将一种带缝钢板阻尼器引入到钢框架体系中, 研究表明, 带缝钢板阻尼器可以增加体系耗能与损伤控制能力, 保证主体构件始终处于弹性状态, 易于震后修复。贾明明等^[6]提出一种摇摆桁架-钢框架结构体系, 并对其设计方法和需求刚度比的建议取值进行了相关探索, 对整个体系的耗能能力及延性指标进行分析, 研究了体系中塑性铰形成过程及失效模式。Zhang等^[7]提出一种中间柱设置摩擦阻尼器的自复位钢框架体系, 通过试验分析该框架结构整体抗震性能, 研究表明, 阻尼器可以消耗较多能量从而抑制主体构件的塑性发展, 该钢框架体系震后残余变形较小, 表现出良好的自复位效果。

Castiglioni等^[8]研发了一种设置耗能元件的抗震组合钢框架结构, 旨将结构在强震作用下的损坏全部集中于损伤元件上, 修复工作仅限于更换损伤元件而框架主体构件无须修复。Zhang等^[9-10]、Jiang等^[11]提出一类可恢复功能的装配式钢结构梁柱节点, 研究表明, 通过合理设计翼缘盖板厚度及中间螺栓间距, 可将塑性损伤控制在可更换的翼缘盖板上, 易于节点震后修复。Hou等^[12]将形状记忆合金材料加入到中心支撑自复位钢框架中, 重点研究形状记忆合金材料类型及磁滞特性对该钢框架地震行为的影响, 研究表明, 通过合理设计的自复位钢框架结构在控制峰值位移及消除残余变形方面表现优良, 所有类型的形状记忆合金均能使该框架满足既定性能目标。Dubina等^[13]用齐平端板及螺栓将偏心支撑框架与可拆卸连梁连接组成双重结构配置, 高强钢用于外部构件, 以此将塑性损伤集中到可拆卸连梁上, 减少框架结构的残余位移, 增强整体抗震性能。Lü等^[14]对一种自复位框架结构进行振动台试验, 研究表明, 预应力筋可有效将震中抬升的柱脚复位, 且无残余变形, 具备良好的自复位性能。Mansour等^[15]设计了一种可更换剪切连接件的钢偏心支撑框架, 研究表明该连接具有良好的延展性和现场可更换性。陈以一等^[16]提出一种适用于抗弯钢框架的可更换组合梁连接构造, 通过一系列试验验证在地震作用下, 该构造将损伤集中于钢梁翼缘处的可更换角钢, 便于震后更换。王先铁等^[17]提出一种外张拉式自复位方钢管混凝土柱脚节点, 研究表明, 该柱脚节点完全遵循自复位柱脚的工作原理, 能够实现铰接机制, 具备良好的自复位能力, 该自复位柱脚的耗能集中于可更换的防屈曲钢板及盖板, 可实现震后的快速修复。刘阳等^[18]提出一种在柱脚处设置可更换耗能件的震损可更换组合柱, 试验

研究表明,该柱脚受损伤的消能部件可实现原位更换,且更换前后柱脚均具有良好的抗震性能. Fang等^[19]在传统端板连接中引入形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)螺栓,使得试件具有良好回缩能力和中等耗能能力,并通过数值模型和试验结果对该结论进行验证.

基于上述内容,本文提出一种带可更换抗侧耗能装置的装配式铰接钢框架结构. 通过设置附加抗侧耗能装置的柱脚节点及削弱型翼缘连接盖板等构造将框架结构内的塑性损伤转移至可更换的耗能元件上,震后只需更换耗能元件即可恢复结构的使用功能. 本文首先对该钢框架结构的受力机理开展研究,分析钢框架体系内力流传递路径,提出结构的合理失效顺序,建立相应失效准则;而后对该装配式铰接钢框架结构与对应刚接框架及对应纯铰接框架分别进行对比分析;最后进行变参数分析,着重讨论抗侧剪切件截面宽度厚度及高度、节点板连系螺栓数量、柱脚横梁刚度及柱轴压比等参数对该装配式钢框架结构力学性能的影响.

1 构造及数值模型建立

1.1 框架设计

本文提出的装配式铰接钢框架结构具体形式如图1所示,主体部件包括方钢管柱、悬臂梁段、普通工字梁段,两梁段间连接装置以及柱脚抗侧耗能装置等. 本钢框架结构采用变截面的方钢管柱,上、下柱截面均为 $300\text{ mm} \times 12\text{ mm}$,中柱加厚段截面为 $300\text{ mm} \times 16\text{ mm}$,三段方钢管柱总长 $3\ 200\text{ mm}$. 在方钢管柱内与悬臂梁翼缘和柱脚横梁翼缘相对应的位置分别加设内环板,以此减轻方钢管柱损伤程度. 普通梁段采用截面为 $300\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 的工字型钢,长度为 $2\ 600\text{ mm}$. 与柱子相连的悬臂梁为钢框架受力较大处,为确保其处于弹性状态而进行加强,采用截面为 $300\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ 的工字型钢,其长度即方钢管柱中心至悬臂梁端部的距离为 800 mm . 为减轻普通梁段受力转动时螺栓挤压而对主体构件产生的局部损伤,在悬臂梁翼缘上的螺栓孔全部采用沿梁长方向的长圆形,梁腹板上中心螺孔为圆形,上下螺孔为长圆形. 框架内梁柱节点构造与课题组先前所研究的节点构造^[4]相同,即通过外置翼缘连接盖板、腹板剪切板及高强螺栓连接2个梁段,其中翼缘连接盖板采用狗骨削弱及降低板件材性的方式,以此将结构中的塑性铰转移至翼缘连接盖板上,避免框架梁

塑性损伤. 框架内柱脚节点由铰接方钢管柱、抗侧耗能装置及高强螺栓组成,其中抗侧耗能装置由节点板、柱脚横梁及抗侧剪切件焊接而成. 柱脚横梁由一小段工字型钢梁与3块加劲肋组成,柱脚横梁规格为 $240\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的工字型梁,横梁加劲肋布置于抗侧耗能装置两侧边对应位置,确保横梁正常传力. 抗侧剪切件采用 $160\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 1\ 000\text{ mm}$ 的3块钢板组合而成,板件间距为 20 mm ,两侧各焊接5块均匀排布的缀板. 通过柱底铰接和附加抗侧耗能装置2种措施,柱脚节点将塑性损伤集中于易于更换的抗侧耗能装置上,震后只需更换损伤部件即可实现节点的功能恢复,从而使柱脚节点兼具承载、耗能、震后可修复等功能. 本钢框架各部件其他细节尺寸如图2所示.

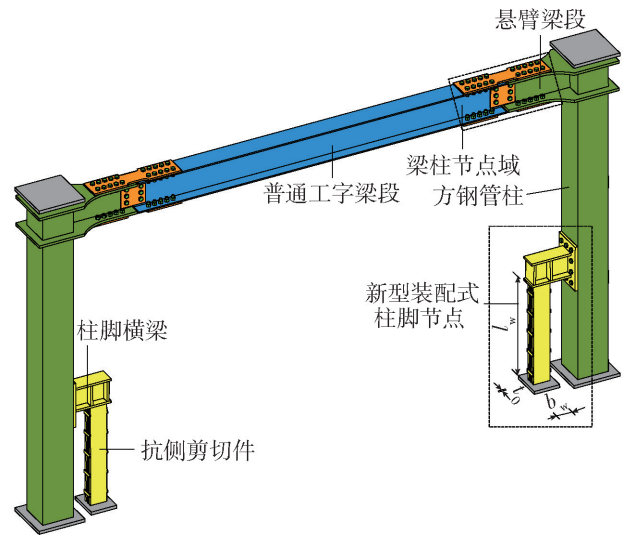


图1 装配式钢框架结构形式

Fig. 1 Prefabricated steel frame structure

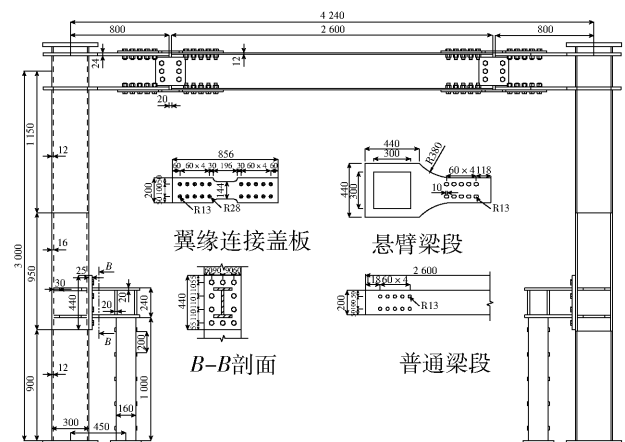


图2 装配式钢框架尺寸

Fig. 2 Dimension of prefabricated steel frame

1.2 模型建立

采用大型通用有限元分析软件 ABAQUS 建立

本装配式钢框架的数值模型^[20],单元类型选择三维实体 C3D8R 单元模拟. 为减小网格离散化影响及考虑板件局部屈曲等问题,对钢框架受力较大部位及关键板件进行网格局部加密处理,有限元模型及网格划分情况如图 3 所示. 柱脚抗侧剪切件及翼缘连接盖板屈服强度设为 235 MPa,其余板件均设为 345 MPa,材料本构采用考虑塑性后强化的双折线模型,强化段斜率设为弹性模量的 0.02 倍,见表 1. 模型内所有螺栓均选用 10.9 级 M24 高强摩擦型螺栓,并施加 225 kN 的螺栓预紧力^[21]. 对方钢管柱、螺栓帽头、柱脚抗侧耗能装置、悬臂梁段、翼缘连接盖板、普通梁段等相接触的板件之间建立摩擦约束,摩擦因数取为 0.45;对上、中、下方钢管柱之间,以及悬臂梁段与方钢管柱之间等建立绑定约束. 对两端方钢管柱底设置铰接约束,柱脚抗侧耗能装置下端设置刚性约束,方钢管柱顶端部加载端设置刚性垫块以施加 90.0 mm 的位移约束(层间转角 0.03 rad)来实现框架梁端静力加载模拟,并在柱顶施加恒定轴压比. 此外,为防止钢框架发生平面外变形,对方钢管柱及普通工字梁设置面外约束.

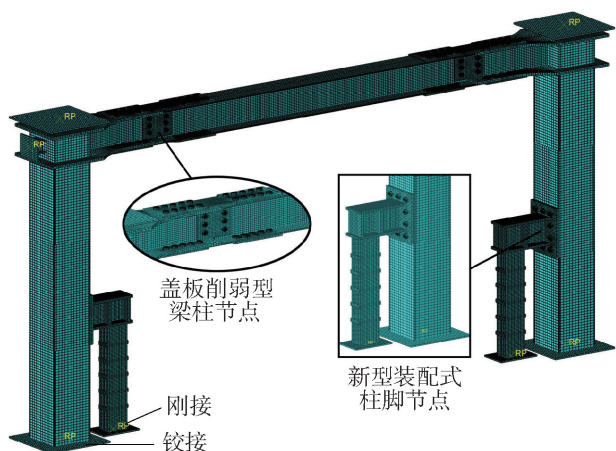


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

表 1 板件材性参数

Table 1 Material parameters of plate

参数	抗侧剪切件	其他板件	高强螺栓
$E^{①}/10^5 \text{ MPa}$	2.06	2.06	2.06
$\nu^{②}$	0.3	0.3	0.3
$f_y^{③}/\text{MPa}$	235	345	900
$f_u^{④}/\text{MPa}$	470	580	1 000
$\varepsilon_u^{⑤}$	0.052	0.052	0.029

① E 为弹性模量. ② ν 为泊松比. ③ f_y 为屈服强度. ④ f_u 为极限抗拉强度. ⑤ ε_u 为极限应变.

2 受力性能分析

2.1 受力机理研究

由于本装配式钢框架结构与传统钢框架结构相比梁柱节点域构造及柱脚节点处构造有所差异,故其力流传递路径亦存在不同. 本装配式钢框架结构传力路径(以弯矩传递为例)为悬臂梁截面弯矩通过高强螺栓传递至翼缘连接盖板上,此时翼缘连接盖板主要承受轴向力,高强螺栓主要承受剪力,后经高强螺栓传递至普通梁段上,普通梁段绕中心转动,继续经高强螺栓传递至翼缘连接盖板、悬臂梁段、框架柱;方钢管柱弯矩通过节点板及高强螺栓传递给柱脚横梁,柱脚横梁传递给抗侧剪切件,此时抗侧剪切件处于压、弯、剪受力状态,且由于方钢管柱底部铰接释放柱底弯矩,与抗侧剪切件对应的下柱段几乎无弯矩作用.

本装配式钢框架结构受力较为合理,通过柱底铰接及设置柱脚抗侧耗能装置等构造使竖向轴力主要由方钢管柱承担,柱弯矩及剪力则主要由抗侧耗能装置承担,改善柱内力分布,保护框架柱免受塑性损伤,且遵循抗侧刚度分离的设计理念. 通过框架梁分段、设置削弱型翼缘连接盖板及加强悬臂梁段刚度等构造将塑性铰转移至可更换的翼缘连接盖板处,保护框架梁免受损伤.

综合上述措施可将钢框架体系内的塑性损伤集中在翼缘连接盖板、柱脚抗侧耗能装置等易于更换的耗能元件上,使梁、柱等主体构件基本处于弹性状态,震后只需更换耗能元件即可实现结构功能的快速恢复.

通过有限元模拟分析本装配式钢框架结构内各部件的塑性发展历程可知,首先抗侧剪切件角部进入塑性状态,加载点荷载-转角曲线出现拐点,标志着钢框架结构发生屈服,而后梁翼缘连接盖板逐渐进入塑性状态,随着柱转角的继续增加,抗侧剪切件及翼缘连接盖板塑性区域不断发展,柱脚横梁发生塑性破坏,翼缘连接盖板鼓曲变形逐渐明显,直至加载结束. 本装配式钢框架结构的最终破坏模式为:方钢管柱绕柱底转动,抗侧剪切件受剪变形破坏;普通梁段绕其中心轻微转动,翼缘连接盖板鼓曲变形破坏. 整体看来,可更换的耗能元件(如翼缘连接盖板、柱脚抗侧耗能装置等)变形明显且破坏严重,但主体梁柱未见塑性变形现象.

2.2 力学性能对比

本装配式钢框架结构采用柱底铰接以及附加抗

侧耗能装置等构造,柱底铰接可释放底部弯矩,避免结构柱塑性损伤,附加的抗侧耗能装置又能为钢框架结构提供抗侧刚度及必要的承载能力,使其综合刚接框架及铰接框架的优势.此外,本文提出的装配式柱脚节点是基于与刚接柱脚节点等效原则设计的,故将该柱脚节点放入钢框架后组成的装配式钢框架结构应与刚接柱脚钢框架结构等效,即本装配式钢框架结构的屈服荷载及初始刚度应等于或略大于对应刚接框架结构.

图 4 为本文提出的带有抗侧耗能装置的装配式铰接钢框架结构与对应纯铰接框架及刚接框架柱端荷载-转角曲线.对比本装配式铰接钢框架结构与对应的纯铰接框架柱端荷载-转角曲线可以发现,本钢框架结构曲线始终在铰接框架曲线之上,表明抗侧耗能装置可明显提高铰接钢框架的初始刚度及承载能力.对比本装配式铰接钢框架结构与对应刚接框架柱端荷载-转角曲线发现,两榀框架的曲线走势基本相同,且本装配式钢框架结构的屈服荷载及初始刚度均略大于对应刚接框架,完全符合等效设计原则,可用本装配式铰接钢框架结构等效代替对应结构.

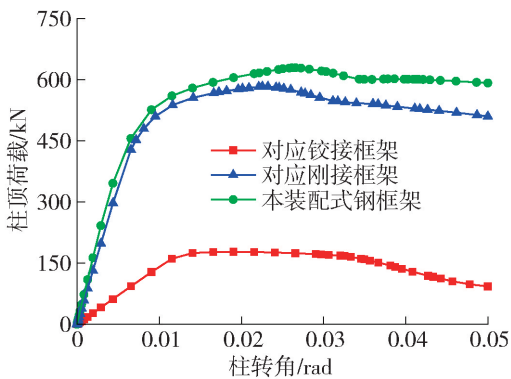
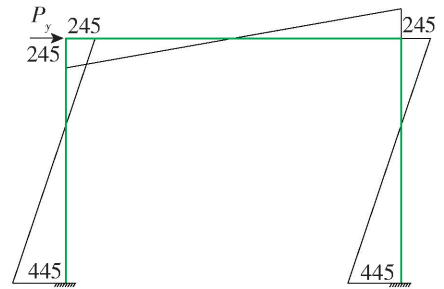


图 4 框架承载能力对比曲线

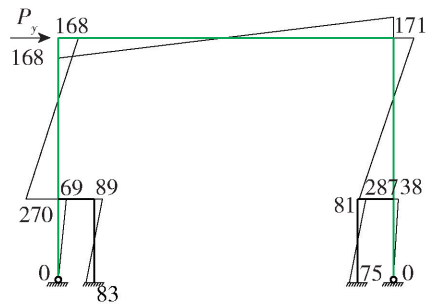
Fig. 4 Comparison curve of frame bearing capacity

通过数值模拟计算本装配式钢框架与对应传统刚接框架的屈服荷载均约为 450 kN,绘制两榀框架刚进入屈服时的弯矩分布图,如图 5 所示.对比两弯矩图发现,抗侧耗能装置对框架柱内弯矩调幅作用非常明显,弯矩最大处由框架柱底部移至抗侧耗能装置连接处,弯矩最大值减小约 40%,框架柱沿高度方向的弯矩分布更加均匀.由此可以认为,本文提出的设置柱脚抗侧耗能装置的装配式铰接钢框架结构受力更加合理,其受力性能相对传统刚接框架结构有所提升.

图 6 给出本装配式铰接钢框架与对应刚接框架



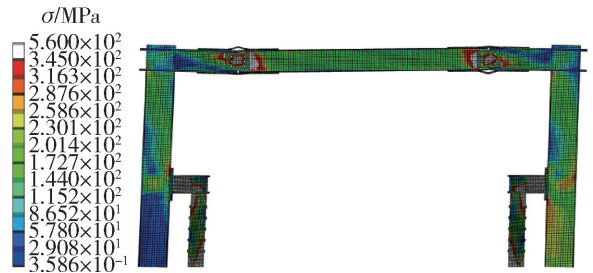
(a) 传统刚接框架弯矩



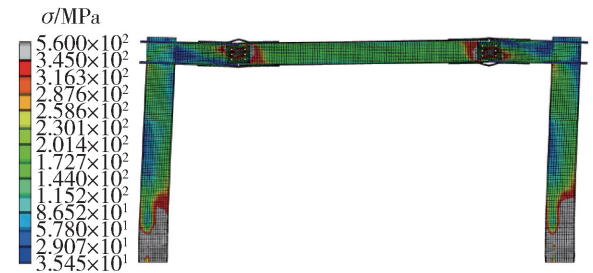
(b) 本装配式钢框架弯矩

图 5 框架弯矩对比(单位: kN·m²)

Fig. 5 Comparison of frame bending moment(Unit: kN·m²)



(a) 本装配式钢框架结构应力云图(0.03 rad)



(b) 刚接框架结构应力云图(0.03 rad)

图 6 框架应力云图对比

Fig. 6 Comparison of frame stress nephogram

在柱转角为 0.03 rad 时整体结构的应力云图.由图 6(a)可知,本装配式钢框架中柱脚抗侧耗能装置、翼缘连接盖板等损伤较为严重,而主体梁柱除局部腹板进入塑性外,其他部位基本处于弹性状态;与图 6(b)所示的刚接柱脚钢框架应力云图对比发现,抗侧耗能装置的设置可改善框架柱的受力状态,结合翼缘连接盖板的设置可将结构内的塑性损伤集中在

易于更换的耗能元件上,使梁柱等主体构件基本处于弹性状态,具备震后更换耗能元件实现结构修复的功能。

3 变参数分析

本文主要围绕抗侧剪切件截面宽度(b_w)及厚

度(t_w)、抗侧剪切件高度(l_w)、节点板连系螺栓数量(n_b)、柱脚横梁刚度比(ψ_{bw})、柱轴压比(n)等几个主要参数对本装配式钢框架结构力学性能开展相关研究,其中, ψ_{bw} 为柱脚横梁与抗侧剪切件截面惯性矩比, t_w 为抗侧剪切件单块钢板厚度 t_{w0} 总和。各组算例模型参数见表2。

表2 各算例参数

Table 2 Parameters of each model

算例名称	b_w/mm	t_w/mm	l_w/mm	n_b	ψ_{bw}	n
KJ_ZJ1_1~6	115~190	60	1 000	10	3	0.30
KJ_ZJ2_1~6	160	42~72	1 000	10	3	0.30
KJ_ZJ3_1~6	160	60	750~1 450	10	3	0.30
KJ_ZJ4_1~6	160	60	1 000	2~12	3	0.30
KJ_ZJ5_1~6	160	60	1 000	10	1~6	0.30
KJ_ZJ6_1~6	160	60	1 000	10	3	0.0~0.5

3.1 抗侧剪切件截面参数影响

由柱脚抗侧剪切件截面宽度对本装配式钢框架结构受力性能的影响曲线(见图7)可知,截面宽度越宽,钢框架承载能力及初始刚度越大。算例KJ_ZJ1_2与算例KJ_ZJ1_4相比,屈服荷载降低21.5%,算例KJ_ZJ1_6与KJ_ZJ1_4相比,屈服荷载增加26.4%,表明抗侧剪切件截面宽度是影响本钢框架屈服荷载及初始刚度的主要影响因素。此外,算例KJ_ZJ1_6在加载末期柱端荷载急剧下降,这是由于该算例抗侧剪切件截面宽度较大,抗侧剪切件由3块钢板组合而成,其宽度越大,越易发生平面外失稳;模拟结果显示该算例在加载末期抗侧剪切件发生了非常明显的平面外变形,因而承载力迅速降低。

由柱脚抗侧剪切件截面厚度对本装配式钢框架结构受力性能的影响曲线(见图8)可知,与截面宽度的影响相似,抗侧剪切件截面厚度越厚,钢框架承载能力及初始刚度越大。对比各条曲线走势,算例KJ_ZJ2_1和KJ_ZJ2_2相对其他算例承载力增幅情况有所差异,这是由于这2个算例截面厚度较薄,与算例KJ_ZJ1_6一样发生了抗侧剪切件平面外失稳现象,但二者又存在一些区别。算例KJ_ZJ2_1和KJ_ZJ2_2自加载开始抗侧剪切件即逐渐发生平面外变形,其框架屈服由板件平面外失稳控制,而非板件强度控制;而算例KJ_ZJ1_6框架屈服仍由板件强度控制,当柱转角较大时,板件才发生平面外失稳。此外,算例KJ_ZJ2_6较算例KJ_ZJ2_4截面面积增加

20.0%,屈服荷载增加10.0%,其截面面积增加量大致等于算例KJ_ZJ1_6较算例KJ_ZJ1_4的增加量,但屈服荷载的增加量相对较小,这表明柱脚抗侧剪切件截面宽度对框架承载力的影响大于厚度的影响。

综上所述,柱脚抗侧剪切件截面宽度及厚度是影响本装配式钢框架承载能力及初始刚度的主要参数,且截面宽度影响要大于其厚度影响;此外,抗侧剪切件截面宽度较宽时或厚度较薄时应重点验算是否会平面外失稳,若发生应采取相应措施以避免其对框架承载力的影响。

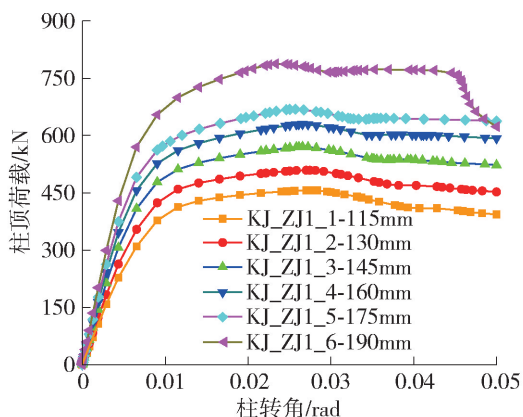


图7 抗侧剪切件截面宽度影响

Fig. 7 Influence of lateral resistance shear member width

3.2 抗侧剪切件高度参数影响

由柱脚抗侧剪切件高度对本装配式钢框架结构受力性能的影响曲线(见图9)可知,抗侧剪切件高

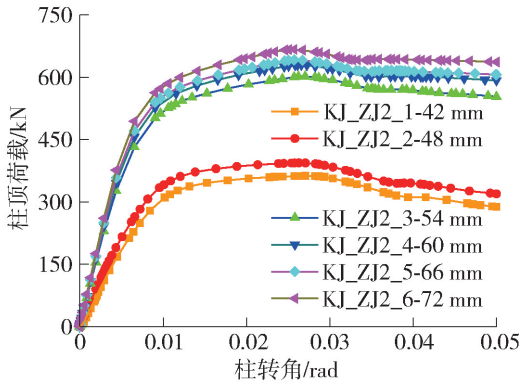


图 8 抗侧剪切件截面厚度影响

Fig. 8 Influence of lateral resistance shear member thickness

度几乎不影响本装配式钢框架结构的承载能力与初始刚度. 提取方钢管柱上各观测点在柱转角为 0.05 rad 时的应力分布情况, 并绘制应力分布对比图, 如图 10 所示. 观察各曲线可知, 各算例柱应力发展趋势基本相同, 均在柱高度约 2 300 mm 的位置应力为 0, 此处为柱反弯点, 这与图 5 所示的柱弯矩分布一致; 随着柱高度的降低, 应力逐渐增加, 并在与节点板相连的对应位置应力达到最大值, 高度低于节点板后应力逐渐减小, 直至为 0. 高度越低的抗侧剪切件会对柱的约束更强, 这使得低于节点板的柱各处应力稍小. 综上, 各算例框架柱除与节点板相连的局部区域进入塑性外, 其余各处均为弹性状态, 抗侧剪切件高度的不同仅会造成柱应力峰值位置有所差异, 但并不影响方钢管柱的损伤控制效果.

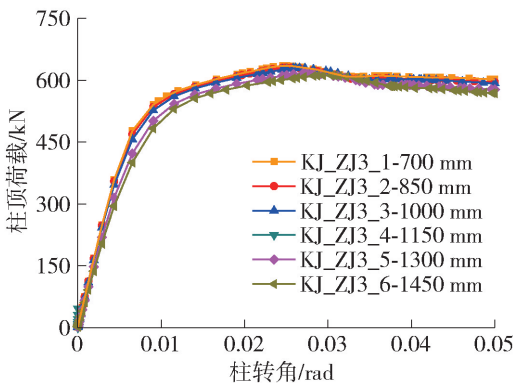


图 9 抗侧剪切件高度影响

Fig. 9 Influence of lateral resistance shear member height

3.3 节点板连系螺栓数量参数影响

由节点板连系螺栓对本装配式钢框架结构受力性能影响曲线 (见图 11) 可知, 随着螺栓数量的增加, 钢框架承载能力及初始刚度有所提高, 待增加到一定数量时不再影响钢框架的力学性能. 提取各算

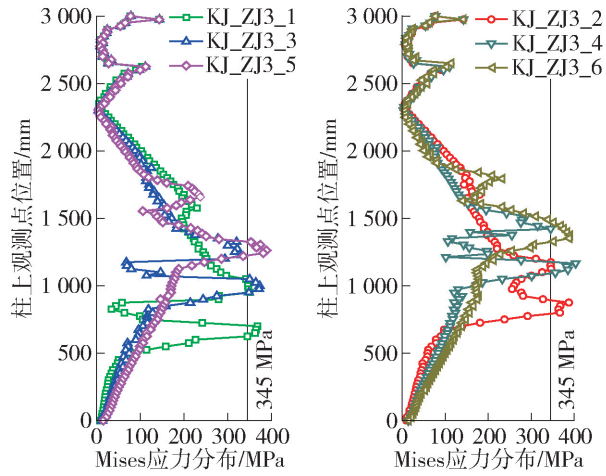


图 10 柱应力分布对比

Fig. 10 Comparison of column stress distribution

例节点板与方钢管柱之间的相对滑移量并绘制滑移曲线如图 12 所示. 对比各曲线可知, 算例 KJ_ZJ4_1 ~ 3 由于采用的螺栓数量较少, 其滑移时刻相对其他 3 个算例较早, 滑移量相对较大, 此 3 个算例框架屈服由螺栓滑移控制而非板件屈服控制, 加载后期也会由于板件间大幅滑移而卸力, 故其屈服荷载及极限荷载相对其他算例小一些, 荷载-转角曲线亦在其他 3 个算例曲线之下; 当螺栓数量大于螺栓设计阈值时, 螺栓滑移时刻及滑移量均得以控制, 此时即使继续增加螺栓数量, 框架的力学性能也不会再有所改变, 故算例 KJ_ZJ4_4 ~ 6 的荷载-转角曲线以及滑移曲线均基本重合.

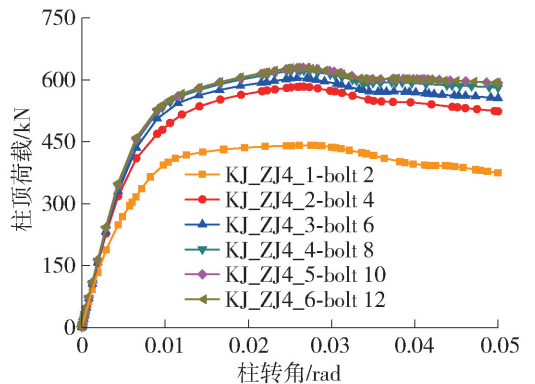


图 11 节点板连系螺栓数量影响

Fig. 11 Influence of the number of connecting bolts

3.4 柱脚横梁刚度比参数影响

柱脚横梁用于方钢管柱与柱脚抗侧剪切件之间的连接与传力, 若横梁抗弯刚度过小, 横梁会过早破坏影响力流传递. 由柱脚横梁刚度对本装配式钢框架结构受力性能的影响曲线 (见图 13) 可知, 与节点板连系螺栓数量参数影响类似, 随着柱脚横梁刚度

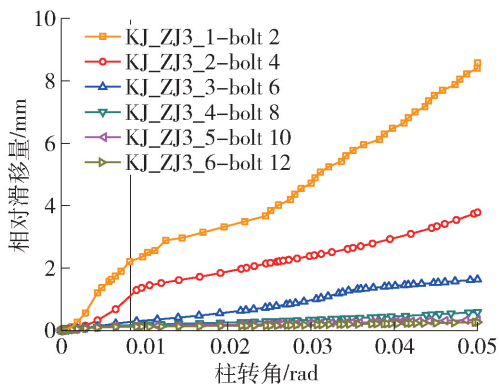


图 12 相对滑移量对比曲线

Fig. 12 Comparative curve of relative slip

的增加,钢框架承载能力及初始刚度有所提高,在增加到一定程度后几乎不再影响钢框架结构的力学性能. 图 14 为各算例在柱转角为 0.03 rad 时的抗侧剪切件塑性损伤区域图. 为表现更加直观,图中彩色高亮部分代表应力超过 235 MPa,表明该区域已进入塑性状态,灰色部分为应力小于 235 MPa. 当柱脚横梁刚度较小时(如算例 KJ_ZJ5_1),柱脚横梁对抗侧剪切件约束将不足,抗侧剪切件破坏模式类似于下端连接、上端自由的厚钢板剪力墙破坏模式,即主要底部区域塑性发展,无法充分受力和耗能,因而框架承载力及初始刚度均偏低. 随着柱脚横梁刚度的增加,其对抗侧剪切件的约束也逐渐增强,抗侧剪切件破坏模式逐渐变为上、下端均连接的厚钢板剪力墙破坏模式,即板件上、下端均存在大区域破坏,塑性发展及耗能相对充分,框架承载力及初始刚度也逐渐增大. 综上,柱脚横梁刚度直接影响抗侧剪切件的破坏模式,进而影响本钢框架结构的承载力及抗侧刚度.

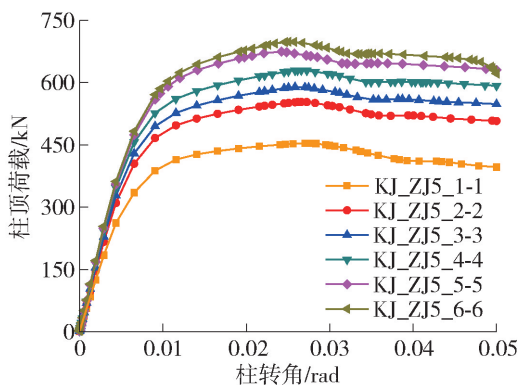


图 13 柱脚横梁刚度比影响

Fig. 13 Influence of column foot beam stiffness ratio

3.5 柱轴压比参数影响

由轴压比对本装配式钢框架结构受力性能的影响

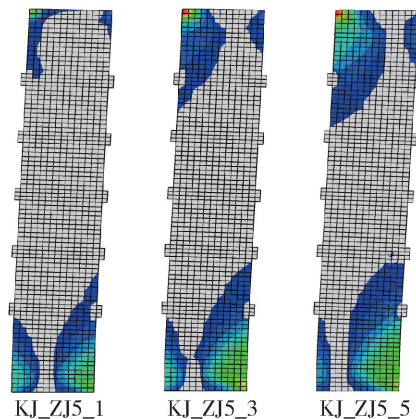


图 14 各算例抗侧剪切件破坏模式对比

Fig. 14 Comparison diagram of failure modes

响曲线(见图 15)可知,轴压比基本不影响刚框架结构的屈服荷载及初始刚度,但对极限荷载影响较大,且随着轴压比的增大,钢框架结构的极限荷载逐渐减小. 这是由于柱轴压垂直柱顶施加,加载前期柱转角较小,轴压产生的附加弯矩几乎可以忽略不计,故各算例曲线前期基本重合,其屈服荷载及初始刚度基本相同;随着柱转角的增加,附加弯矩对钢框架的影响逐渐增大,此时钢框架会因轴力的不同而产生不同程度的力学响应.

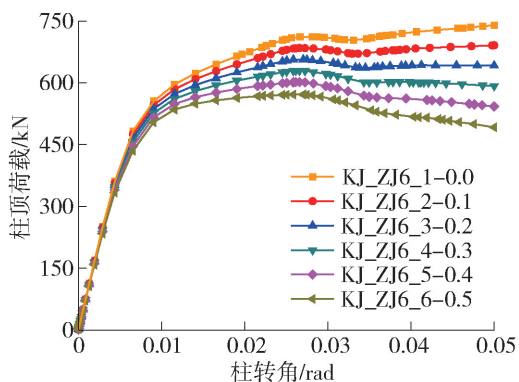


图 15 柱轴压比影响

Fig. 15 Influence of column axial compression ratio

4 结论

本文针对带可更换抗侧耗能装置的装配式铰接钢框架结构开展了力学性能及滞回性能的数值研究,重点分析抗侧剪切件截面宽度、厚度及高度、连系螺栓数量及柱脚横梁刚度等参数对钢框架结构相关性能的影响,得到以下结论:

1) 本装配式铰接钢框架结构在屈服荷载及抗侧刚度两方面可以与对应刚接柱脚框架完全等效,且本文提出的钢框结构主体构件的应力分布方面优

于对应刚接框架,本装配式铰接钢框架结构可以作为对应刚接框架的等效结构使用。

2) 本文提出的装配式铰接钢框架结构合理设计后可以将结构内的塑性损伤集中在翼缘连接盖板、抗侧耗能装置等易于更换的耗能元件上,使梁柱等主体构件基本处于弹性状态,具备震后修复的功能。

3) 柱脚抗侧剪切件截面宽度及厚度是影响框架屈服荷载、初始刚度的主要参数,其中宽度参数的影响程度要更大一些;抗侧剪切件高度仅会影响柱应力峰值位置,而对钢框架的力学性能几乎不产生影响。

4) 连系螺栓数量直接影响节点板的滑移时刻及钢框架的滑移荷载,采用足够螺栓数量能保证节点板不会过早滑移,使钢框架具备较好的承载能力。

5) 柱脚横梁刚度较小时会改变抗侧剪切件的破坏模式,进而影响钢框架的力学性能,故不建议采用小刚度的柱脚横梁构造。

参考文献:

[1] 张爱林. 工业化装配式高层钢结构体系创新、标准规范编制及产业化关键问题[J]. 工业建筑, 2014, 44(8): 1-6.
ZHANG A L. The key issues of system innovation, drawing up standard and industrialization for modularized prefabricated high-rise steel structures [J]. Industrial Construction, 2014, 44(8): 1-6. (in Chinese)

[2] 沈祖炎, 李元齐. 促进我国建筑钢结构产业发展的几点思考[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(4): 15-21.
SHEN Z Y, LI Y Q. Some thoughts on promoting the development of China's building steel structure industry [J]. Progress in Building Steel Structure, 2009, 11(4): 15-21. (in Chinese)

[3] 郝际平, 孙晓岭, 薛强, 等. 绿色装配式钢结构建筑体系研究与应用[J]. 工程力学, 2017, 37(1): 1-13.
HAO J P, SUN X L, XUE Q, et al. Research and application of green assembled steel structure building system [J]. Engineering Mechanics, 2017, 37(1): 1-13. (in Chinese)

[4] 姜子钦, 杨晓峰, 张爱林, 等. 可恢复功能装配式中柱节点耗能装置试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 15-23.
JIANG Z Q, YANG X F, ZHANG A L, et al. Experimental study on energy dissipation device of earthquake-resilient prefabricated middle column foot joint

[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1): 15-23. (in Chinese)

[5] OH S, KIM Y, RYU H. Seismic performance of steel structures with slit dampers [J]. Engineering Structures, 2009, 31(9): 1997-2008.

[6] 贾明明, 周洲, 吕大刚, 等. 摇摆桁架-钢框架结构的刚度比需求及地震响应分析[J]. 工程力学, 2018, 35(10): 66-74.
JIA M M, ZHOU Z, LÜ D G, et al. Stiffness ratio requirement and seismic response analysis of swing truss-steel frame structure [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(10): 66-74. (in Chinese)

[7] ZHANG Y, LIU A, ZHANG A. Seismic performance analysis of a resilient prestressed steel frame with intermediate column containing friction dampers [J]. Advanced Steel Construction, 2017, 13(3): 241-257.

[8] CASTIGLIONI C A, KANYILMAZ A, CALADO L. Experimental analysis of seismic resistant composite steel frames with dissipative devices [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 76: 1-12.

[9] ZHANG A L, LI S H, JIANG Z Q, et al. Design theory of earthquake-resilient prefabricated sinusoidal corrugated web beam-column joint [J]. Engineering Structures, 2017, 150: 665-673.

[10] ZHANG A L, ZHANG H, JIANG Z Q, et al. Low cycle reciprocating tests of earthquake-resilient prefabricated column-flange beam-column joints with different connection forms [J/OL]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 164: 105771 [2019-11-15]. http://schlr.cnki.net/new/Detail/index/SJES_03/SJES815F0095ED807FA6576E7ECB08116F71.

[11] JIANG Z Q, YANG X F, DOU C, et al. Cyclic testing of replaceable damper: earthquake-resilient prefabricated column-flange beam-column joint [J]. Engineering Structures, 2019, 183: 922-936.

[12] HOU H, LI H, QIU C, et al. Effect of hysteretic properties of SMAs on seismic behavior of self-centering concentrically braced frames [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(3): 1-4.

[13] DUBINA D, STRATAN A, DINU F. Dual high-strength steel eccentrically braced frames with removable links [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, 37(15): 1703-1720.

[14] LÜ X L, CUI Y, LIU J, et al. Shaking table test and numerical simulation of a 1/2-scale self-centering reinforced concrete frame [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(12): 1899-1917.

- Engineering Journal, 2012, 45 (12): 29-37. (in Chinese)
- [17] 胡淑军, 顾琦, 姜俊, 等. 自复位 SMA 支撑的滞回性能与简化力学模型[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增刊1): 66-75.
HU S J, GU Q, JIANG J, et al. Hysteresis performance and simplified mechanical model of an innovative self-centering SMA brace [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Suppl 1): 66-75. (in Chinese)
- [18] KAMPERIDIS V C, KARAVASILIS T L, VASDRAVELLIS G. Self-centering steel column base with metallic energy dissipation devices [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 149: 14-30.
- [19] 赵祥, 刘忠华, 王杜良, 等. 形状记忆合金复合黏滞阻尼器设计及分析[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(6): 72-78.
ZHAO X, LIU Z H, WANG D L, et al. Design and analysis of an innovative hybrid shape memory alloys viscous damper [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 36 (6): 72-78. (in Chinese)
- [20] QIU C X, ZHANG Y C, QU B, et al. Cyclic testing of seismic dampers consisting of multiple energy absorbing steel plate clusters [J]. Engineering Structures, 2019, 183: 255-264.
- [21] 张邑尘. 震后可恢复功能的新型消能减震装置研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
ZHANG Y C. Novel devices for seismic resistance and resilience of structures [D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese)
- [22] WADA A, HUANG Y H, IWATA M. Passive damping technology for buildings in Japan [J]. Progress in Structural Engineering and Materials, 2000, 2(3): 335-350
- [23] ABAQUS. Analysis User's manual [M]. Providence: Dassault Systems Simulia Corp., 2014.
- [24] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures-part 1-8: design of Joints: EN 1993-1-8: 2005 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.

(责任编辑 张 蕾)

(上接第 373 页)

- [15] MANSOUR N, CHRISTOPOULOS C, TREMBLAY R. Experimental validation of replaceable shear links for eccentrically braced steel frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(10): 1141-1152.
- [16] 陈以一, 贺修樟. 配置可更换角钢连接构造的钢框架试验研究[J]. 钢结构, 2020, 35(8): 1-16.
CHEN Y Y, HE X Z. Test on moment resistant frame connection with replaceable angles [J]. Steel Construction, 2020, 35(8): 1-16. (in Chinese)
- [17] 王先铁, 林麟琿, 陈峰梅, 等. 外张拉式自复位方钢管混凝土柱脚的受力性能和设计方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(6): 812-819.
WANG X T, LIN L H, CHEN F M, et al. Study on mechanical behavior and design method of external tension self-resetting concrete filled square steel tubular column foot [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Sciences Edition), 2017, 49(6): 812-819. (in Chinese)
- [18] 刘阳, 郭子雄, 贾磊鹏, 等. 震损可更换组合柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 45-54.
LIU Y, GUO Z X, JIA L P, et al. Experimental study on seismic performance of innovative replaceable composite columns [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41 (7): 45-54. (in Chinese)
- [19] FANG C, YAM C H, AUGUS C C, et al. Cyclic performance of extended end-plate connections equipped with shape memory alloy bolts [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 94: 122-136.
- [20] 齐威. ABAQUS 6.14 超级学习手册 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016: 31-176.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计规范: GB50017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.

(责任编辑 郑筱梅)