

损伤可控型钢框架边节点的试验研究

丁 杰, 邹 昀, 蔡 鑫, 李天祺, 郑黎君, 赵桃干

(江南大学环境与土木工程学院, 江苏, 无锡 214122)

摘 要: 该文提出一种损伤可控型钢框架节点(DCSF 节点)。在梁端腹板上设置连接钢板, 通过高强摩擦螺栓将梁、柱拼接在一起, 并在梁内布置预应力筋来提供节点的复位能力。在小震作用下, 通过高强螺栓来提供节点的初始刚度和抗弯承载力; 在中震作用下, 通过螺栓杆在螺栓孔壁内的滑移来改善节点的耗能, 以此避免梁、柱主体构件受到损伤。共设计完成了 4 个足尺试件的低周往复加载试验, 分别考虑了连接钢板的不同接触表面、预应力筋的初张拉值以及高强螺栓预紧力对该类节点的初始刚度、损伤特征、滞回性能和自复位能力的影响。研究结果表明: 高强螺栓在螺栓孔内的滑移为节点提供了良好的耗能能力; 预应力筋能够减少结构的残余变形, 提供节点的自复位能力; 当层间位移角达 2.4% 时, 主体构件未发现明显损伤, 螺栓杆与孔壁发生挤压破坏, 更换连接钢板后, 节点的承载力和耗能能力基本不变, DCSF 节点具有良好的抗震性能; 节点的连接无需现场施焊, 施工方便、快捷, 可在地震区推广应用。

关键词: 损伤可控; 钢框架节点; 试验研究; 摩擦耗能螺栓; 自复位性能

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.04.S019

EXPERIMENTAL STUDY ON EXTERIOR JOINT OF DAMAGE CONTROL STEEL FRAME

DING Jie, ZOU Yun, CAI Xin, LI Tian-qi, ZHENG Li-jun, ZHAO Tao-gan

(School of Environment Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: This paper presents a damage control steel-frame-joint (DCSF joint). By setting a splice plate on the web of a beam end, a beam and a column are connected by high strength friction bolts, and the prestressed reinforcement in the beam can provide re-centering capacity for the joint. Under a small earthquake, high strength friction bolts provide the initial stiffness and flexural bearing capacity for the joint; under a medium earthquake, and the slip of a bolt rod in a bolt hole dissipates energy for the joint. Therefore, main structural members are protected from damage. In order to study the initial stiffness, damage characteristics, hysteretic behavior and re-centering capacity of the joint, four full-size specimens were designed and tested under cyclic loading. Considering the effects of different contact surfaces of splice plates, the pretension of prestressed reinforcement, and pre-tightening force of high strength bolts respectively, the experimental study shows that: the slip of a high strength bolt rod in a bolt hole can provide good energy dissipation ability for the joint; the prestressed reinforcement can reduce the residual deformation of the structure and provide re-centering capacity for the joint;

收稿日期: 2017-04-29; 修改日期: 2018-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378240); 2015 年江苏省建筑节能与建筑产业现代化科技支撑项目; 2016 年江苏省建筑产业现代化示范基地项目

通讯作者: 邹 昀(1967—), 女, 安徽人, 教授, 博士, 主要从事结构抗震研究(E-mail: zouyun_22@126.com).

作者简介: 丁 杰(1994—), 男, 江苏人, 硕士生, 主要从事装配式结构抗震研究(E-mail: 1007096061@qq.com);

蔡 鑫(1992—), 男, 江苏人, 硕士生, 主要从事装配式结构抗震研究(E-mail: caixin_686@126.com);

李天祺(1979—), 男, 辽宁人, 副教授, 博士, 主要从事结构抗震研究(E-mail: ltq_tiger15@126.com);

郑黎君(1991—), 男, 安徽人, 硕士生, 主要从事装配式结构抗震研究(E-mail: viazheng@126.com);

赵桃干(1993—), 男, 安徽人, 硕士生, 主要从事装配式结构抗震研(E-mail: 18352537922@163.com).

when inter-story displacement angle reaches 2.4%, the damage was mainly concentrated in bolt rods and the extrusion area of bolt holes on a splice plate, no obvious damage was found in main structural members. The bearing capacity and energy dissipation capacity of the joint basically remains unchanged after replacing the splice plate. The results of the study show that DCSF joint can be popularized and applied in earthquake regions due to its good seismic performance and convenient construction process without site welding.

Key words: damage control; steel frame joint; experimental study; friction energy-dissipation bolts; re-centering capacity

钢结构具有强度高、塑性韧性好、材质均匀、能够工业化生产、施工速度快、降低污染等优点。而钢结构的节点构造很大程度上决定了其抗震性能^[1-2]。“损伤可控”的结构抗震设计概念,是指结构在遭遇设防地震或罕遇地震后,仅需很小的成本即可恢复其使用功能,且结构体系易于建造和维修,经济效益较高。“损伤可控”的思想是在研究预制无黏结预应力混凝土框架上发展起来的,目前实现结构损伤可控的方案有:增设摇摆墙、摇摆柱梁,设置预应力筋、耗能减震阻尼器、可更换结构构件,或者是多种方案共同采用等方法^[3-9]。国内外对损伤可控型结构的研究^[10-12]不多。Wolski 和 Ricles^[13]提出在梁腹板附加摩擦耗能装置,并进行了 0.6 比例缩尺的四跨七层钢框架试验。周云等^[14]提出在预制的梁柱试件连接节点部位安装制作好的扇形阻尼器,以此提高装配式框架结构的耗能减震能力,减少装配式框架因节点的破坏而倒塌的风险。张艳霞等^[15]针对自复位钢框架结构体系设计了一组长孔螺栓摩擦耗能器,对不同的长孔宽度和接触面进行了往复加载试验,研究发现钢-黄铜接触时耗能能力更优、滞回性能更稳定;并且螺栓长孔宽度的增加,耗能性能的离散程度随之增加。“损伤可控”型结构已成为国际地震工程领域的研究热点,也是工程抗震研究的可持续发展的重要方向之一。

本文提出一种损伤可控型钢框架节点(DCSF 节点),梁、柱通过梁端腹板的高强摩擦型螺栓连接在一起,螺栓孔径比杆径大 1.5 mm,以便螺栓杆可在圆形孔内滑移耗能。通过在梁内布置预应力筋为节点提供复位能力,降低残余变形。共设计完成了 4 个足尺试件的低周往复加载试验,分别考虑了连接钢板的不同接触表面、预应力筋的初张拉值以及高强螺栓预紧力对该类节点的初始刚度、损伤特征、滞回性能和自复位能力的影响。

1 节点低周反复荷载试验

1.1 节点试件设计

试件梁柱截面采用焊接工字型钢,分别采用 H450×160×8×16 和 H380×380×8×16。梁的顶部封板为 450×160×40,梁底部封板为 450×380×10,柱两侧端头封板为 380×380×30,在梁柱腹板位置分别布置多道加劲肋,节点构造如图 1 所示。拼接处采用 10.9 级 M20 高强螺栓摩擦型连接,螺栓孔径为 23 mm 钻成孔,共 12 个,每侧各 6 个,分两列布置,连接钢板构造如图 2 所示。共进行了 4 组试验,其试验参数如表 1 所示。

试件钢材为 Q345B,实测屈服强度为 350 MPa,抗拉强度为 470 MPa。钢绞线采用低松弛高强预应力钢绞线,实测抗拉强度为 1930 MPa。梁张拉端放置压力环(YBY-600kN 型)以测预应力值的变化。

1.2 加载装置及加载方式

试验采用 100 t 电液伺服作动器对试件进行加载。采用“横柱竖梁”的模式进行加载。按照 0.2

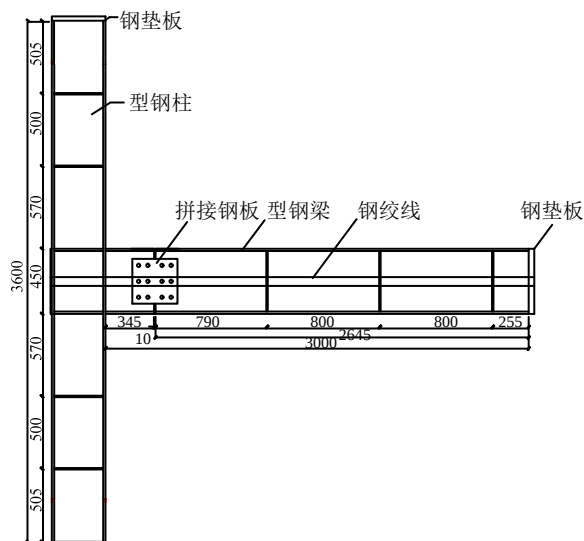


图 1 节点试件构造图

Fig.1 Construction diagram of joint specimen

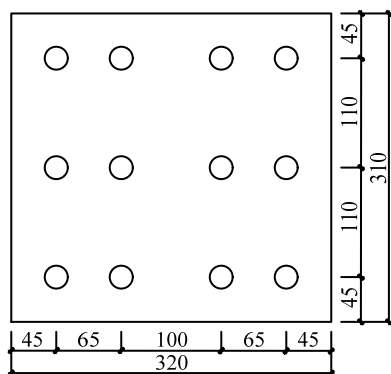


图2 连接钢板构造图

Fig.2 Construction diagram of splice plate

表1 试件的设计参数

Table.1 Design parameters of specimens

节点 编号	连接钢板接触面 处理方式	单根预应力筋 初张拉的预应力/kN	对高强螺栓施加 的扭矩/(kN·m)
DCSF1	普通接触面	76.33	155
DCSF2	普通接触面	84.25	155
DCSF3	喷砂接触面	89.50	155
DCSF4	抛丸接触面	72.75	300

的轴压比,用千斤顶施加轴力,试验加载装置如图3所示。加载过程参照 ECSC^[16]推荐的加载方案,加载时先施加 $P=5\text{ kN}$ 的反复荷载循环一周,检查位移计和其他数据采集仪的工作情况,然后以位移作为加载控制,每次以 5.44 mm 的位移为级差,每个位移上水平循环3周。

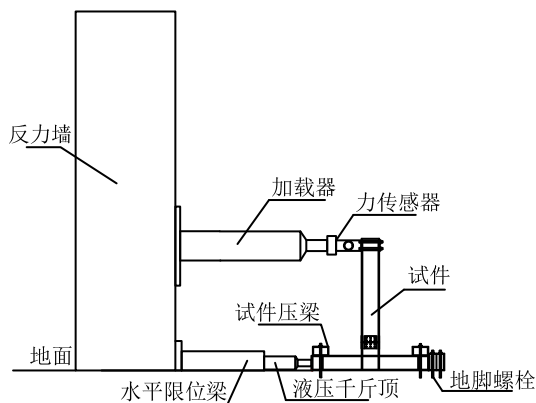


图3 试验加载装置

Fig.3 Test loading device

1.3 测点布置

在梁的左右翼缘靠近拼接缝处分别布置2个竖向位移计,在梁底左右翼缘分别布置2个竖向位移计;在距离拼接缝上方 1000 mm 的梁的右侧翼缘处布置一个水平位移计,在柱底封板处布置1个水平位移计。应变片布置在梁的翼缘和腹板位置,以及连接钢板上面。位移计和应变片布置如图4所示。

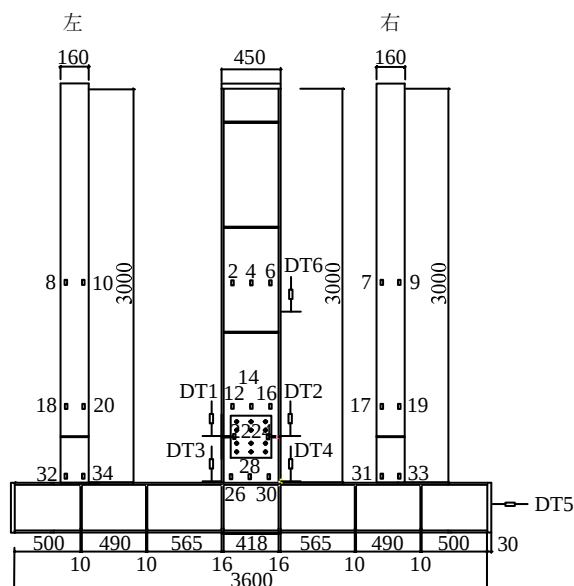


图4 位移计、应变片布置

Fig.4 Arrangement of displacement meters and strain gauges

2 试验结果

2.1 试验现象

加载过程中观察到的现象如下:

1) DCSF1 节点试件在加载初期节点荷载位移呈线性关系,节点表现出较好的强度和刚度。当节点加载到层间位移角为 2.2% 时,腹板接触,有点轻微鼓曲。当加载到层间位移角为 2.6% 时,梁的右侧腹板开始挤压。当加载到层间位移角为 3.4% 时,腹板挤压比较严重,同时在连接钢板的外表面垫片旁出现滑痕。

2) DCSF2 节点试件在加载到层间位移角为 2.0% 时,在第2个循环时出现轻微声响,在加载到层间位移角为 2.4% 时,出现连续声响,且声响较大,同时观测到螺栓杆发生了轻微滑移。

3) DCSF3、DCSF4 节点试件加载到层间位移角为 2.8% 时,出现连续的声响,由于螺杆与连接钢板发生挤压,滞回曲线的尾部出现上翘的趋势。

4) 试验结束拆除连接钢板,发现梁的腹板有轻微鼓凸,连接钢板与梁腹板的螺栓孔壁有一定的挤压破坏现象,并且外侧两列的孔壁变形比较明显,如图5所示。

2.2 试验数据分析

2.2.1 滞回曲线

试验过程中,测得的梁端荷载-位移滞回曲线如图6所示。

1) 在加载初期,各试件基本呈线弹性,随着施



图 5 腹板上螺栓孔的变形

Fig. 5 Deformation of bolt holes on web

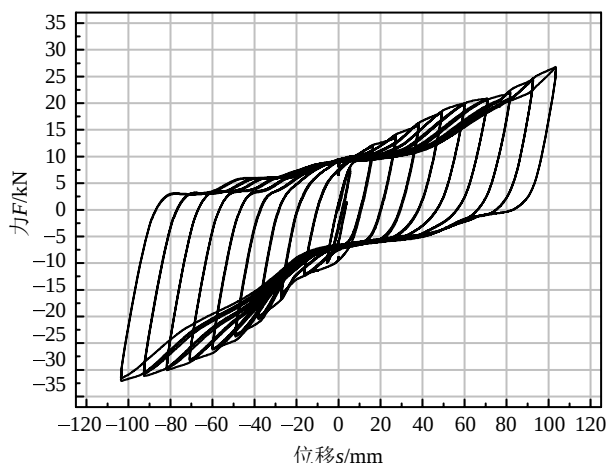
加的位移逐步加大, 连接钢板与梁腹板产生细微滑动, 位移进一步增大后, 连接钢板、高强螺栓以及梁腹板之间滑动更加明显, 同时伴随着螺栓杆与孔壁的挤压, 试件进入非线性, 滞回曲线更加饱满, 其原因是连接钢板处的摩擦滑移挤压变形增大, 耗能也随之增大。

2) 各节点的滞回曲线出现一定程度的捏拢现象, 表明预应力钢筋有一定的回弹作用, 可以提供节点的自复位能力。

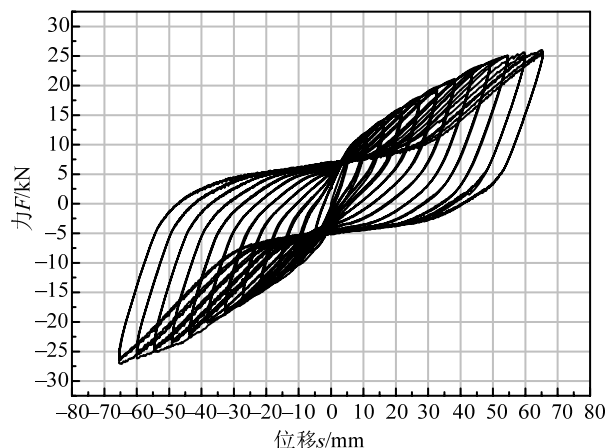
3) DCSF2、DCSF4 的滞回曲线比 DCSF3 饱满, 即节能的耗能能力更强, DCSF4 节点的抛丸接触面以及较大的预紧力高强螺栓, 增大了界面的摩擦力, 增强了节点的耗能能力。

2.2.2 骨架曲线

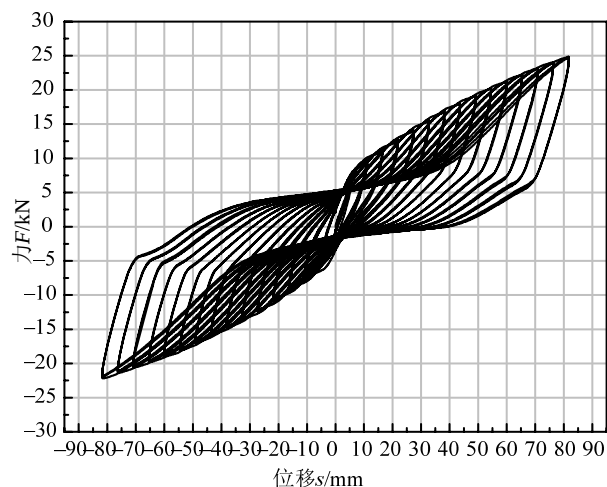
4 个试件的骨架曲线如图 7 所示, 可以看出 DCSF3 节点的刚度较 DCSF1 节点大, DCSF4 节点的承载力较 DCSF3 节点大。分析原因, 可知 DCSF3 节点的预应力筋的初张拉值为 34.4%, 较 DCSF1 节点的 29.3% 大, 所施加的预应力可增强试件的刚度和承载力。由于 DCSF4 节点采用抛丸处理的接触面, 并且对高强螺栓施加了较大的预紧力, 增强了拼接触面的摩擦力, 提高了节点的承载力。



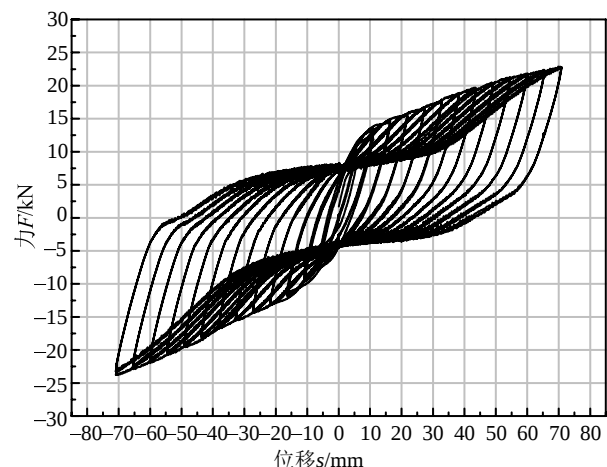
(a) DCSF1



(b) DCSF2



(c) DCSF3



(d) DCSF4

图 6 节点滞回曲线

Fig.6 Hysteresis curves of joints

2.2.3 预应力筋索力变化曲线

在位移施加到 59.84 mm(层间位移角为 2.2%) 时, 4 个试件的钢绞线索力-节点转角关系曲线如图 8 所示。当节点转角较小时, 预应力钢绞线的索力也较小; 随着节点转角增大, 预应力筋被拉长, 索

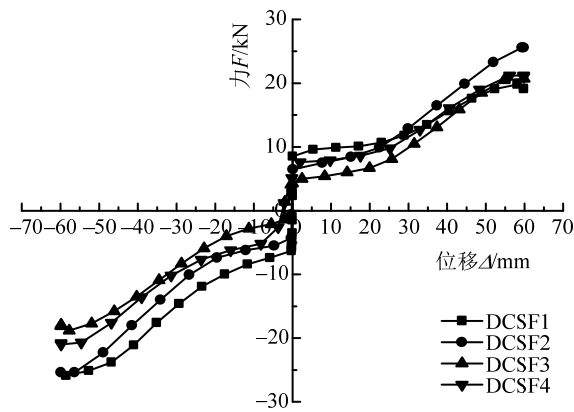
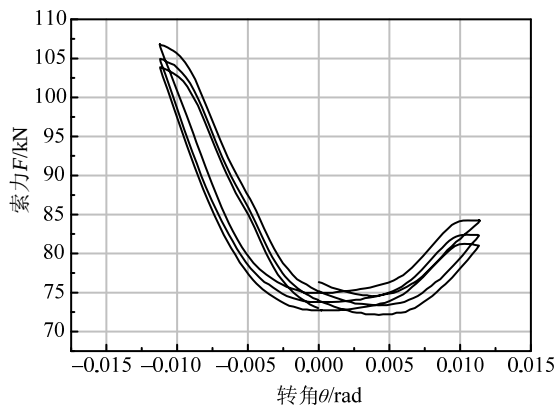
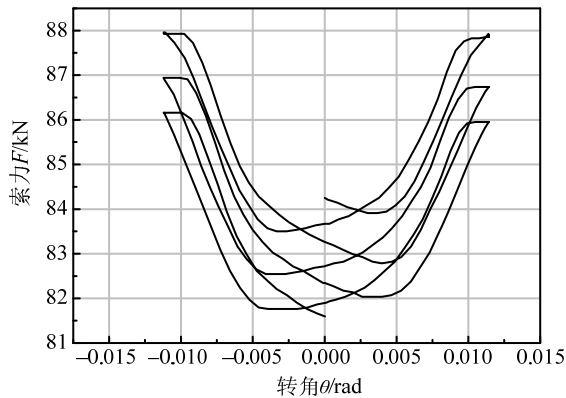


图7 试件骨架曲线

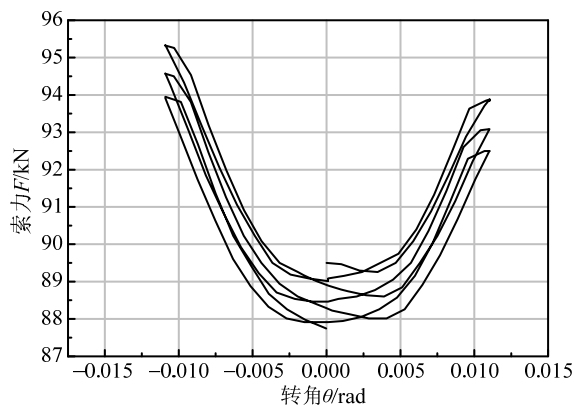
Fig.7 Skeleton curves of joints



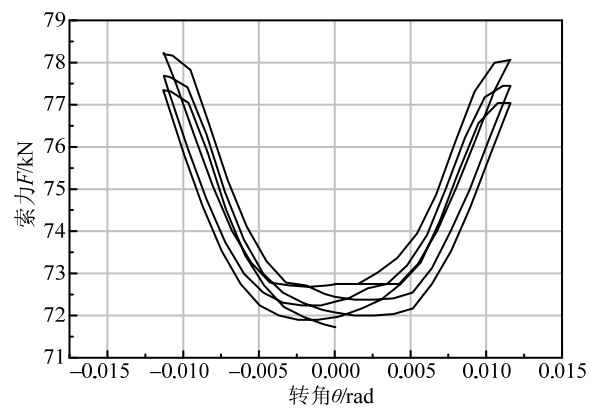
(a) DCSF1



(b) DCSF2



(c) DCSF3



(d) DCSF4

图8 节点预应力筋钢绞线索力-转角曲线

Fig.8 Cable force-rotation curves of the prestressed strands

力也随之增大。在卸载过程, 节点转角不断减小, 故索力也不断减小。在正、反的往复荷载作用下, 钢绞线的索力基本上呈对称关系。DCSF1~DCSF4 试件的初张力分别为 29.3%、32.4%、34.4% 和 27.9%, 均处于钢绞线抗拉强度的 70% 以内, 故在加载过程中, 索力增量与施加的位移呈正比关系。

3 结论

本文通过 4 个足尺钢节点低周往复试验, 得到以下结论:

(1) 试件的破坏主要发生在连接钢板处, 试件主体没有明显破坏, 可实现损伤可控。

(2) 高强螺栓起滑后有一定的滑移变形, 所得的滞回曲线更加饱满; 更换连接钢板后试件的承载力略有降低, 但滞回曲线形状基本一致, 骨架曲线也基本相似, 说明该类节点具有可更换性。

(3) 预应力筋的设置, 使试件具有一定的自复位, 降低了残余变形; 随着钢绞线初始张拉力的提高, 试件的残余变形减小, 预应力筋的自复位能力增强。

(4) 提高拼接处高强螺栓上的预紧力, 节点的承载力在一定程度上有所提高。

(5) 加大螺栓孔的孔径可进一步提高试件的转动变形能力, 减轻螺栓孔壁的挤压破坏, 提高试件的耗能能力, 从而改善节点的抗震性能。

参考文献:

- [1] 薛伟辰. 预制混凝土框架结构体系研究与应用进展[J]. 工业建筑, 2002, 32(11): 47—50.
Xue Weichen. Progress of studies and applications of precast concrete frame structure systems [J]. Industrial Construction, 2002, 32(11): 47—50. (in Chinese)

- [2] 邹昀, 林晖, 马卫强. 具有自复位功能装配式框架节点抗震性能的影响因素分析[J]. 工程力学, 2015, 32(增刊 2): 72—77.
Zou Yun, Lin Hui, Ma Weiqiang. Influence factors analysis on aseismic behavior of prefabricated frame joints with capacity of self-centering [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(Suppl 2): 72—77. (in Chinese)
- [3] 李波, 杨庆山, 茹继平, 等. 梁腹板开圆孔的钢框架抗震性能研究[J]. 工程力学, 2009, 26(1): 64—73.
Li Bo, Yang Qingshan, Ru Jiping, et al. Investigation on aseismic behaviors of steel moment resisting frame including opening in beam web [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(1): 64—73. (in Chinese)
- [4] 李启才, 刘刚, 胡安吉, 等. 钢框架中钢梁高强螺栓拼接摩擦耗能的试验研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(5): 78—81.
Li Qicai, Liu Gang, Hu Anji, et al. Experimental study on frictional energy-dissipation behavior of bolted steel beam splicing in rigid frame [J]. Building Structure, 2011, 41(5): 78—81. (in Chinese)
- [5] 郁有升, 王燕. 钢框架梁翼缘削弱型节点力学性能的试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 168—175.
Yu Yousheng, Wang Yan. Experimental study on the mechanical property of reduced beam section connections of steel frames [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2): 168—175. (in Chinese)
- [6] Kim H J, Christopoulos C. Friction damped post tensioned self-centering steel moment-resisting frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134 (11): 1768—1779.
- [7] 蔡小宁, 孟少平, 孙巍巍. 自复位预制框架边节点组件受力性能试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 160—167.
Cai Xiaoning, Meng Shaoping, Sun Weiwei. Experimental study on performance of components of the exteriors self-centering post-tensioned precast connections [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 160—167. (in Chinese)
- [8] 蔡小宁, 孟少平. 预应力自复位混凝土框架节点抗震性能数值模拟[J]. 工程力学, 2016, 33(3): 143—151.
Cai Xiaoning, Meng Shaoing. Numerical analysis for seismic behavior of self-centering post-tensioned precast beam-to-column connections [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(3): 143—151. (in Chinese)
- [9] 蔡小宁, 孟少平. 预应力自复位混凝土框架节点恢复力模型研究[J]. 工程力学, 2018, 35(1): 182—200.
Cai Xiaoning, Meng Shaoing. Research on restoring force model of the prestressed self-centering concrete frame joints [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(1): 182—200. (in Chinese)
- [10] 周颖, 吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 1—10.
Zhou Ying, Lü Xilin. State-of-the-art on rocking and self-centering structures [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 1—10. (in Chinese)
- [11] 纪晓东, 马琦峰, 王彦栋, 等. 连梁可更换消能梁段抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(6): 1—11.
Ji Xiaodong, Ma Qifeng, Wang Yandong, et al. Cyclic tests of replaceable shear links in steel coupling beams [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(6): 1—11. (in Chinese)
- [12] 吕西林, 陈聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34 (1): 27—36.
Lü Xilin, Chen Cong. Research progress in structural systems with replaceable members [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34 (1): 27—36. (in Chinese)
- [13] Wolski M, Ricles J M, Sause R. Experimental study of a self-centering beam-column connection with bottom flange friction device [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135 (5): 479—488.
- [14] 吴从晓, 周云, 徐昕, 等. 扇形铅黏弹性阻尼器滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 199—207.
Wu Congxiao, Zhou Yun, Xu Xin, et al. Experimental investigation on hysteretic performance of sector lead viscoelastic damper [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(4): 199—207. (in Chinese)
- [15] 张艳霞, 赵文占, 陈媛媛, 等. 长孔螺栓摩擦阻尼器试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(4): 90—95.
Zhang Yanxia, Zhao Wenzhan, Chen Yuanyuan, et al. Experimental research of slotted bolted friction device [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(4): 90—95. (in Chinese)
- [16] ECCS. Study of design of steel building in earthquake zones [R]. Doc. ECCS-TWG 1.3, No.47, 1986: 3/1—3/71.