

T 型件单边螺栓连接梁柱节点抗震性能试验研究

赵军洋¹, 王新武², 褚怀保¹, 孙海粟², 布欣², 刘欢欢²

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南省新型土木工程结构国际联合实验室(洛阳理工学院), 河南 洛阳 471023)

摘要: 为研究 T 型件单边高强螺栓连接梁柱节点的抗震性能和破坏机理, 对 4 个方钢管柱与 H 型钢梁单边螺栓 T 型件连接节点进行了拟静力试验, 分析 T 型件翼缘厚度和在 T 型件上加三角肋板对此类节点受力性能和破坏模式的影响; 详细观察节点试验的全过程和破坏特征, 分析此类节点的滞回性能、承载能力、延性系数、耗能能力等抗震性能指标。研究发现: T 型件加三角肋板对梁柱节点的抗震性能影响较大; T 型件翼缘厚度对梁柱节点的抗震性能相对影响较小。T 型件单边螺栓连接梁柱节点具有较好的延性及滞回性能, 非常适合在地震区域中应用。

关键词: 梁柱节点; 单边高强螺栓; T 型件连接; 抗震性能; 拟静力试验

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)05-0665-10

Experimental research on seismic performance of T-piece unilateral bolted beam-column joints

ZHAO Junyang¹, WANG Xinwu², CHU Huaibao¹, SUN Haisu², BU Xin², LIU Huanhuan²

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. International Joint Laboratory for New Type Civil Engineering Structures of Henan Province,

Luoyang Institute of Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: In order to study the seismic performance and failure mechanism of the T-piece unilateral high-strength bolt-connected beam-column node, a pseudo-static test was carried out on the four square steel tube column and the H-shaped steel beam unilateral bolt T-piece connection node, and the effects of T-piece flange thickness and the addition of triangular ribs on T-pieces on the mechanical performance and failure mode of such joints were analyzed. The whole process and failure characteristics of the joint experiment were observed in detail, and the seismic performance indexes such as hysteresis performance, bearing capacity, ductility coefficient and energy dissipation capacity of such joints were analyzed. It is found that the addition of T-pieces and triangular ribs has a greater impact on the seismic performance of beam-column joints; the thickness of T-piece flanges has relatively little influence on the seismic performance of beam-column joints. T-piece unilateral bolted beam-column joints have good ductility and hysteretic performance, and can play a good seismic performance under the action of earthquakes.

Key words: beam-column joints; single-sided high-strength bolts; t-piece connection; seismic performance; pseudo-static test

“大力发展装配式建筑”已成为我国重要的产业政策。近年来, 国家发布了一系列政策文件和标准, 以促进装配式建筑的发展。其中, 装配式钢结构具有强度高、自重轻、抗震性能好、施工周期短、安装方便、环境污染小等优点^[1], 在国外已有较为广泛的应用。20 世纪末, 美国北岭和日

本阪神发生大地震, 从震后研究发现, 焊接下的梁柱节点发生了各种程度的脆性破坏^[2-3], 而采用螺栓连接的半刚性节点脆性破坏较少, 国内外学者针对螺栓连接的半刚性钢结构展开了大量研究。

Popov、Piluso 等^[4-5]研究发现 T 型钢连接钢框架具有良好的力学性能。李国强等^[6]针对钢结构

收稿日期: 2021-08-21 修改稿日期: 2022-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678284); 中原科技创新领军人才(214200510002); 河南省高校科技创新团队(21IRTSTHN010); 河南省科技厅科技攻关(212102310969); 河南省高等学校重点科研项目(21B560010)河南省高校青年骨干教师培养计划(2020GGJS244); 洛阳理工学院预研项目(2019YZ10)

第一作者: 赵军洋(1995—), 男, 硕士生, 主要研究方向为结构工程。E-mail: hpu330zju@163.com

通信作者: 王新武(1971—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为钢结构抗震性能研究。E-mail: lywxw518@163.com

闭口截面构件难以用全螺栓连接的问题,利用单边高强螺栓紧固件,提出了梁柱全螺栓连接半刚性框架设计方法. Korol^[7]和 Huang^[8]分别对单边螺栓及其连接件进行了大量的研究,研究表明:单边螺栓具有较强的抗拉强度,其连接件具有良好的强度、刚度和延性. 郝书朔^[9]等为研究自锁式单边螺栓与普通高强螺栓在梁柱试件中抗震性能的差异,设计 6 组现场试验作为对比研究,结果表明:自锁式单边螺栓节点承载力和普通高强螺栓连接方式基本一致,自锁式单边螺栓能够满足节点设计要求. 刘仲洋等^[10]设计 3 个足尺方钢管柱自锁式单边螺栓外伸端板连接节点进行单向静力加载试验,采用 ABAQUS 有限元进行数值模拟与试验结果进行对比分析,以增加柱壁和端板厚度为变量,研究表明:端板厚度和柱壁厚度的增加,节点的刚度和承载力都有显著的提高.

目前,国内外学者关于柱梁节点的研究主要集中在 H 型柱和自锁式单边螺栓的一般连接形式上,而在嵌套式单边高强螺栓 T 型件连接梁柱节点的研究却非常少,并且不够系统深入^[11-14]. 使用方钢作为柱子能够有效解决 H 型柱截面的强轴和弱轴两个方向的惯性矩有差异、不利于单一构件的稳定性等问题. 单边螺栓可以实现单侧拧紧、单侧施工作业,可以在不破坏截面形式的前提下完成封闭截面构件的节点施工,从而解决了封闭式方钢管柱无法双侧紧固构件问题.

因此,本文通过改变节点构造参数设计了 4 个方钢管柱和 H 型钢梁 T 型件单边螺栓连接节点试件,并对其进行拟静力抗震试验,通过研究构件受力形式、破坏现象、滞回性能、耗能能力、延性变形能力、刚度等^[15-16],分析单边高强螺栓 T 型件连接梁柱节点的抗震性能.

1 试验概况

1.1 试件设计

节点模型取自多层钢框架结构的边柱节点,试验采用平面节点,以 T 型件翼缘厚度和 T 型件翼缘加肋板为研究参数,按照 GB50017—2017^[17]《钢结构设计标准》和 GB50011—2010^[18]《建筑抗震设计规范》的要求,试验模型按 1:2 缩尺设计,共设计制作了 4 个 T 型件单边高强螺栓连接梁柱节点,试件钢材牌号均为 Q235B,螺栓型号为嵌套式 10.9 级 M20 单边高强螺栓见图 2,钢梁与 T 型件腹板间采用 10.9 级 M20 摩擦型高强螺栓连接,所有试件柱高 $H=2\,000\text{ mm}$,截面规格为 $\square 250\times$

250×12 ,梁长 $L=1\,900\text{ mm}$,梁截面规格 HN350 $\times 175\times 7\times 11$,4 个试件所用的 T 型件规格见表 1,节点连接尺寸见图 1,节点模型见图 4.

表 1 节点连接件规格尺寸

Tab. 1 Node connector size

模型名称	T 件截面尺寸 /mm \times mm \times mm	加肋	三角肋尺寸 /mm \times mm \times mm
JT14-1	T270 \times 200 \times 9 \times 14	否	-
JT16-1	T270 \times 200 \times 10 \times 16	否	-
JT14-2	T270 \times 200 \times 9 \times 14	是	100 \times 80 \times 10
JT16-2	T270 \times 200 \times 10 \times 16	是	100 \times 80 \times 10

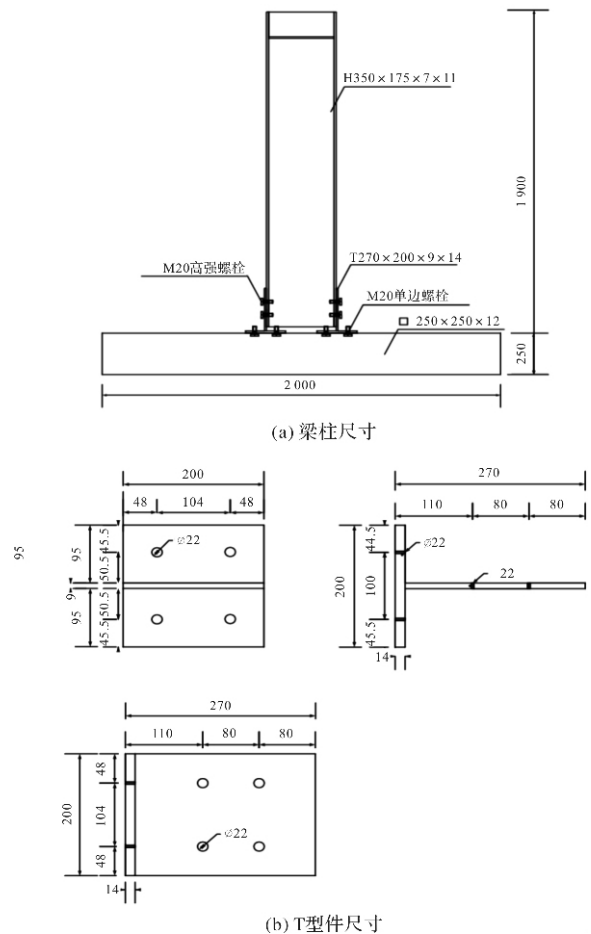


图 1 节点连接尺寸图

Fig. 1 Node connection size

本文使用的嵌套式单边高强螺栓由于外套筒的原因,其标准螺栓孔径为 30 mm,连接件开孔孔径远大于常规高强螺栓;在研究过程中发现,由于 T 型件翼缘的螺栓孔径过大,螺栓垫片和螺栓帽由于受力过大被挤压进入螺栓孔内,导致使 T 型件过早的进入塑性状态,降低了节点强度. 为改善这一状况,将方钢管柱按标准孔径 30 mm 开孔,而 T 型件翼缘按螺杆直径开 22 mm 孔,将外套筒切割与柱壁同厚,从而形成异孔的形式. 如图 3 所示.



图 2 嵌套式单边螺栓组成

Fig. 2 Composition of nested single-sided bolts



图 3 T 型件翼缘和柱壁开孔实图

Fig. 3 Actual drawing of the opening of the flange and column wall of the T-shaped piece

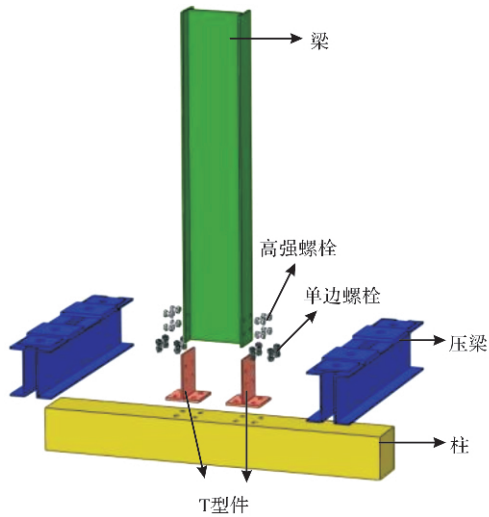


图 4 节点模型图

Fig. 4 Node model diagram

1.2 材性试验

试验安装之前, 将试件所需钢材以不同厚度分别取样, 按照 GB/T288.1—2010^[14]《金属材料室温拉伸试验方法》标准进行材性试验. 所有试样均在 INSTRON5587 型液压万能试验机上进行拉伸测试见图 5, 可检测出以下相关指标: 材料屈服强度(f_y)、抗拉强度(f_u)、弹性模量(E)、收缩率(A), 试验结果如表 2 所示.

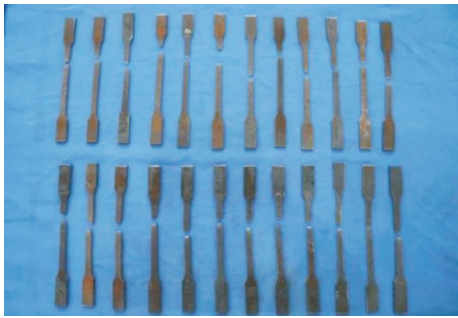


图 5 材性试验样品图

Fig. 5 Material property test sample diagram

表 2 钢材力学性能参数表

Tab. 2 Material test results

钢材	t /mm	f_y /MPa	f_u /MPa	E /GPa	$A/\%$
Q235B	7	286.9	448.2	198.0	36.3
	9	313.0	464.0	206.0	32.1
	11	265.5	423.4	201.0	38.7
	12	283.0	456.0	203.0	30.0
	14	280.6	453.0	208.6	33.5
	16	290.7	450.6	202	33.3

1.3 试验加载装置和测量方案

试验现场加载装置如图 6 所示. 试验采用梁端加载, 将柱子平躺放置, 用 30 mm 钢板将两端柱口密封, 两端分别放置一个 50 kN 液压千斤顶, 起到对方钢管柱的顶紧作用. 千斤顶后置竖向的限位顶柱, 作为钢柱两端的反力装置. 为防止柱子挤压弯曲, 在柱端竖向位置放置限位压梁, 组合形成铰支座, 再用地锚螺栓加固. 依次安装试件后, 在 H 型梁端位置连接加载装置, 即 100 t 液压伺服作动器.

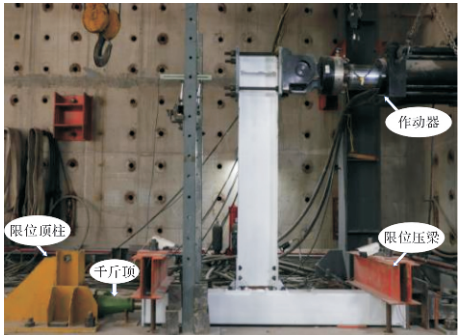


图 6 加载装置图

Fig. 6 Loading device diagram

试验采用荷载-位移双控制的方法进行加载, 规定以推为正, 分级加载. 实时监测节点各构件的应变发展情况, 当 T 型件的应变值达到材性试验的屈服应变后, 切换为位移控制加载, 将此时的最大位移量称为屈服位移 Δ , 以屈服位移的整数倍为级差控制加载, 即 Δ 、 2Δ 、 3Δ ... 依次施加,

每一级位移加载循环3次,加载制度如图7所示.直到构件发生明显破坏或者承载力下降到试件极限荷载的85%以下,则试验终止.

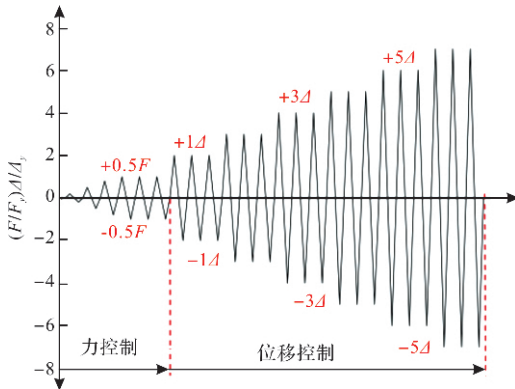


图7 加载制度图

Fig. 7 Load system diagram

采用针状位移计和拉线位移计分别测量梁段水平位移和梁柱节点转角位移,在梁底端放置电子倾角仪,在实验过程中记录每一级位移下转角的变化.在梁柱节点关键部位放置应变片和应变花测量应变,YY1~YY9分布在T型件的翼缘上,FB1~FB15分布在T型件的腹板上,L1~L10分别分布在梁端螺栓孔附近.试件应变和位移测点布置见图8、图9.

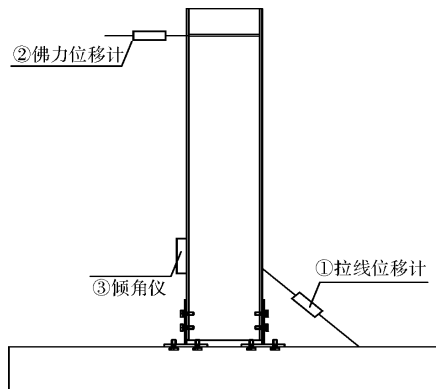


图8 位移计布置图

Fig. 8 Displacement meter layout

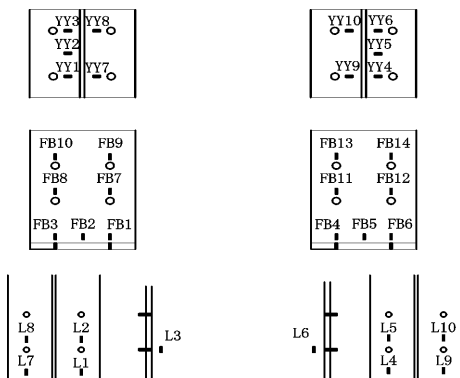


图9 主要应变片布置图

Fig. 9 Layout of main strain gauges

2 试验现象

2.1 JT14-1

荷载加载至25 kN时,T型件翼缘最先屈服,应变值达到材性试验的屈服应变值,梁端屈服位移 Δ 约为21 mm.受拉侧T型件翼缘与柱壁开始产生空隙.试件屈服后进入位移加载阶段,加载至 6Δ ,第三循环时,试件的承载力达到56.8 kN,T型件翼缘与柱壁出现7 mm空隙,T型件翼缘和腹板交接处出现不连续的细小裂纹,翼缘螺栓孔附近漆面起皮,漆痕鼓起呈分散式点状.继续加载至 8Δ ,第三循环时,梁端位移达到90 mm,T型件翼缘发生断裂,试验结束,T型件翼缘与柱壁空隙达到9 mm,螺栓受拉倾斜,柱壁受拉有轻微鼓曲现象,试件破坏形态如图10(a)所示.

2.2 JT16-1

荷载加载至25 kN时,T型件翼缘最先屈服,应变值达到材性试验的屈服应变值,梁端屈服位移 Δ 约为18 mm,T型件翼缘与柱壁间没有产生空隙.改荷载控为位移控,加载至 5Δ 时,梁端位移为90 mm,T型件翼缘与柱壁间产生明显空隙,约为5 mm.随位移增大至 7Δ 时,T型件翼缘与柱壁完全脱离,T型件腹板与梁翼缘连接的螺栓发生滑移,实验过程中发出间断性摩擦声响.加载至 10Δ 第二循环,梁端位移达到180 mm时,T型件翼缘发生不完全断裂,试验终止,柱壁受拉鼓曲严重,单边螺栓轻微被拉出,试件破坏形态如图10(b)所示.

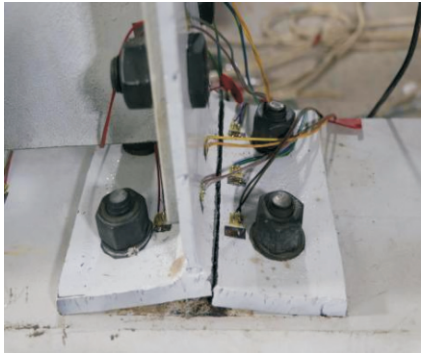
2.3 JT14-2

荷载加载至32 kN时,T型件翼缘最先屈服,应变值达到材性试验的屈服应变值,梁端屈服位移为24 mm,除了梁有轻微倾斜,其他部位均没有明显现象.试件屈服后进入位移加载阶段,位移至 2Δ ,受拉T型件翼缘一部分微微翘起,一部分紧贴柱壁,翘起空隙约2 mm.加载至 4Δ ,T型件腹板、翼缘与加劲肋端点焊缝出现裂缝,呈横向半包围状,T型件翼缘和腹板的交界处,出现大小不一两条裂缝.位移加载至 5Δ ,第三循环时,随着T型件腹板与加劲肋焊缝处的裂缝不断增大,最终产生横向撕裂破坏,方钢管柱面严重鼓曲,试验终止,试件破坏形态如图10(c)所示.将试件拆分后,T型件腹板上螺栓孔严重变形,呈不规则椭圆状,T型件翼缘螺栓孔附近出现放射性裂纹.

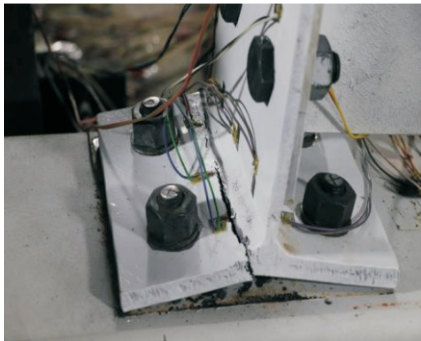
2.4 JT16-2

加载至40 kN时,T型件翼缘最先屈服,应

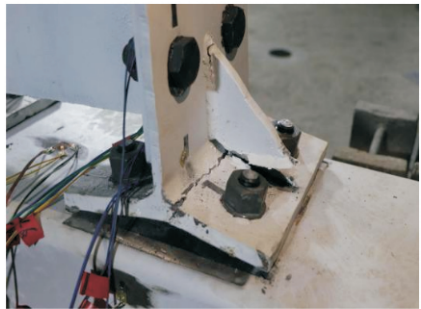
变值达到材性试验的屈服应变值, 梁端屈服位移 Δ 约为 20 mm, T 型件翼缘与柱壁出现了约为 1 mm 空隙. 位移加载阶段至 3Δ , 第二循环时, 方钢管柱面发生鼓曲, T 型件翼缘翘起, 产生的空隙约为 4 mm. 加载至 5Δ 时, T 型件腹板与加劲肋焊缝出现裂缝, 受拉侧单边螺栓被严重拉起. 继续加载至 8Δ , 第三循环时, 试件突然发出断裂响声, T 型件翼缘与加劲肋对接焊缝产生断裂破坏, 同时, T 型件翼缘与腹板交接处也产生断裂破坏, T 型件与柱壁的空隙约 21 mm, 方钢管柱柱壁严重鼓曲, 试验结束, 试件破坏形态如图 10(d) 所示. 拆分试件后, 发现 T 型件翼缘上螺栓孔被挤压轻微凹陷, 腹板上的螺栓孔被拉, 发生严重变形, 呈椭圆状, 柱壁上的螺栓孔被撕裂破坏, 出现分裂状裂缝, 单边螺栓螺杆被严重磨损, 螺栓套筒变形.



(a) JT14-1 试验现象



(b) JT16-1 试验现象



(c) JT14-2 试验现象



(d) JT16-2 试验现象

图 10 试验现象图

Fig. 10 Test phenomenon diagram

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

四个试件的试验结果如表 3 所示, 分析可知: 改变 T 型件的厚度或者加三角肋板对构件的极限位移和承载力均有不同程度的影响. (1)增加 T 型件翼缘厚度, JT16-1 比 JT14-1 的极限荷载提升了 28.94%, 梁端极限侧移有很大变化, 提升了 101.10%; (2)在 T 型件厚度同为 14 mm 的情况下, 加肋板的 JT14-2 比不加肋板 JT14-1 的极限承载力和梁端极限侧移分别提升了 31.28%、37.83%; (3)JT16-2 比 JT16-1 在 T 型件翼缘厚度 16 mm 条件下加肋梁端承载力和极限位移有比较明显的变化, 分别是 13.28% 及 -6.11%; (4) JT16-2 比 JT14-2 在同时加肋的状态下, 改变其翼缘的厚度, 承载力和梁端极限侧移提升了 11.27% 及 37.01%.

表 3 试验结果

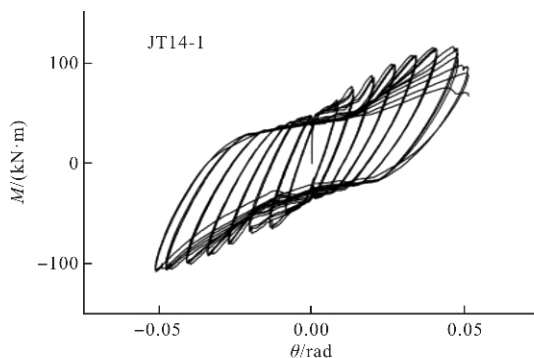
Tab. 3 Experimental data

试件 编号	加载控制 位移 Δ /mm	屈服荷载 F /kN	极限侧移 Δ_u /mm	极限荷载 F_u /kN
JT14-1	12.04	25.0	90.11	59.56
JT16-1	17.98	23.3	181.24	76.80
JT14-2	24.12	32.81	124.20	78.19
JT16-2	20.07	41.5	170.17	87.00

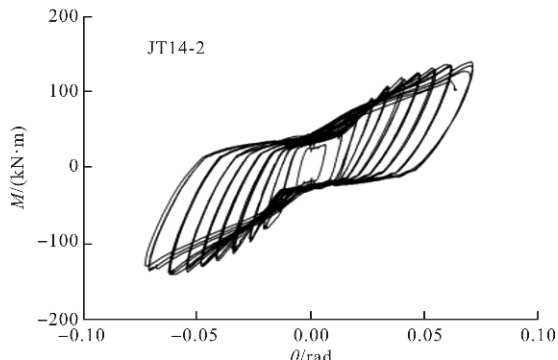
3.2 滞回曲线

图 11 为节点试验弯矩-转角的滞回曲线, 反映结构在反复受力过程中的相关力学特性^[15]. 从各曲线的形状来看, 属于典型的反 S 形, 出现较为严重的“捏缩”现象, 这是因为构件中均采用摩擦性螺栓: (1)随着拉力的逐渐增大, 螺栓的预紧力有所损耗, 减小了螺栓与试件之间的摩擦力; (2)在反复加载过程中, 螺栓与试件的接触面磨损, 使得接触面变得光滑, 从而减小了螺栓与试件之

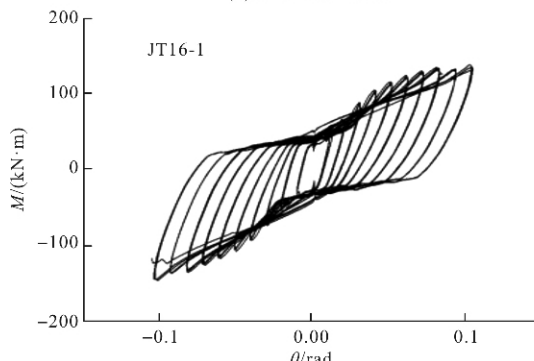
间的摩擦力, 所以产生不同程度的滑移. 在卸载阶段, 螺栓反向受力而重新产生滑移回到初始位置, 在此过程中, 螺栓承载力很小, 从而造成该阶段滞回曲线产生荷载急剧下降的小斜率滑移线段. 实验的前中期, 反复推拉三次加载过程中, 残余变形很小, 每一圈的滞回环基本重合. 随着梁端位移的增大, 螺栓产生滑移, 使得每个滞回所吸收和耗散的能量逐渐增多, 导致节点部位塑性变形区域不断的扩展, 每一级的滞回环开始有所偏差. 对比各图分析, T 型件翼缘厚度的增加滞回饱和度和无明显的变化, T 型件加肋板之后, 出现螺栓的滑移现象提早, 导致滞回曲线的拐点出现较早. 每一级的峰值来看, 曲线的斜率逐渐有小幅度的减小, 说明反复荷载作用下, 节点的刚度开始有所退化. 总体来说, 四个构件的滞回曲线饱满度一般, 刚度的退化不明显, 表明此类节点的抗震性能和变形能力较好.



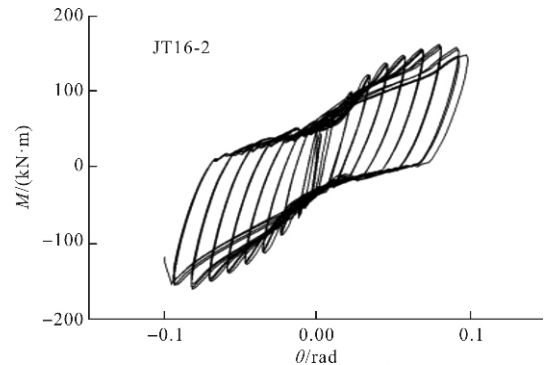
(a) JT14-1滞回曲线



(b) JT14-2滞回曲线



(c) JT16-1滞回曲线



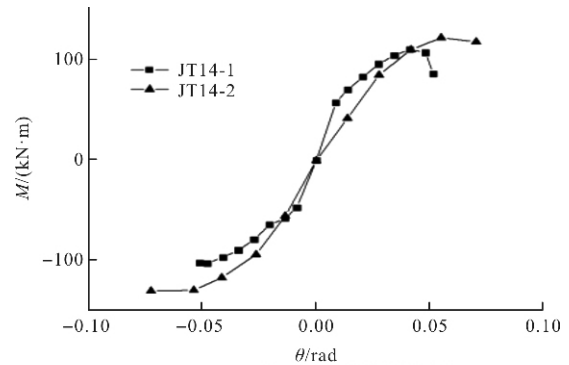
(d) JT16-2滞回曲线

图 11 滞回曲线

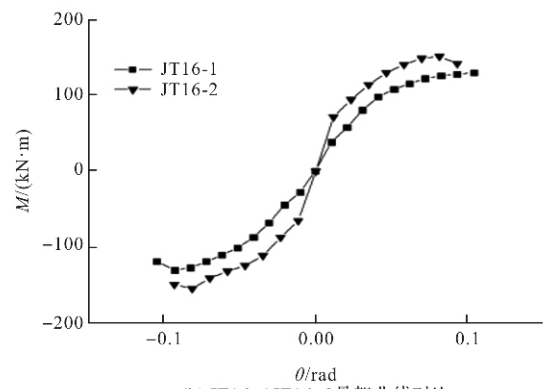
Fig. 11 Hysteretic curves

3.3 骨架曲线

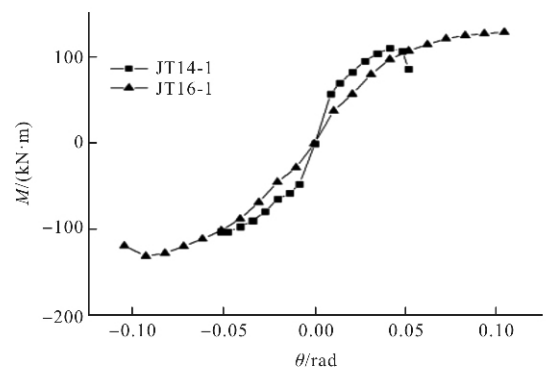
骨架曲线可以清晰的分析得出节点承载力的发展规律, 图 12 分别展示了不同构造参数 T 型件连接节点骨架曲线的两两对比情况.



(a) JT14-1与JT14-2骨架曲线对比



(b) JT16-1与JT16-2骨架曲线对比



(c) JT14-1与JT16-1骨架曲线对比

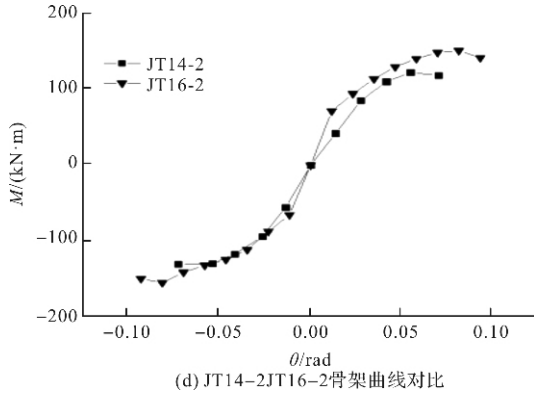


图 12 骨架曲线

Fig. 12 Skeleton curve

(1)图 12(a)为在 T 型件翼缘厚度为 14 的基础上加肋板的 JT14-2 和不加肋板的 JT14-1 曲线对比图,可以看出 JT14-2 的梁端极限位移和极限弯矩承载力要优于 JT14-1,因为加肋板之后,节点的刚度得到提升,在同级位移加载下, JT14-2 的斜率变化速度要比 JT14-1 缓慢。

(2)图 12(b)是在 T 型件翼缘厚度均为 16 mm 时不加肋板 JT16-1 和加肋板 JT16-2 两个骨架曲线的对比,很明显的可以观察到两曲线层次分明,在相同位移等级中, JT16-2 的弯矩承载力都是要高于 JT16-1 的弯矩承载力。

(3)图 12(c)中为不同翼缘厚度的情况下,同时,不选择加肋板的两骨架曲线的对比图, JT14-1 在破坏之前相同位移等级下,弯矩承载都是要高于 JT16-1 的, JT14-1 在达到极限位移后, JT16-1 继续试验直至破坏,最终结果来看 JT16-1 的极限弯矩承载力和极限位移均要大于 JT14-1 的极限弯矩承载力。

(4)图 12(d)为同时加肋板的条件不同翼缘厚度的两个骨架曲线对比,在正向加载阶段 JT16-2 的弯矩承载力均要高于 JT14-2 的弯矩承载力,而在负向加载阶段,构件在达到极限之前,有大部分曲线有所重叠。最后一级,达到最高点时, JT16-2 的弯矩承载力和位移要明显超过 JT14-2。

结合四个骨架曲线的对比分析,得出 T 型件在增大翼缘的厚度和增加肋板的情况下,梁柱节点弯矩承载力都有明显的提升。

3.4 刚度退化

刚度退化作为评价结构抗震性能的重要指标,指构件刚度随着加载等级的增加而降低的特点,反应出构件的损伤程度^[16]。构件在进入塑性状态之后采用割线刚度来表述节点的转动刚度,用计算公式(1)来确定数值成表 4,图 13 为各构件节点

转动刚度退化率-荷载等级相互对比图。

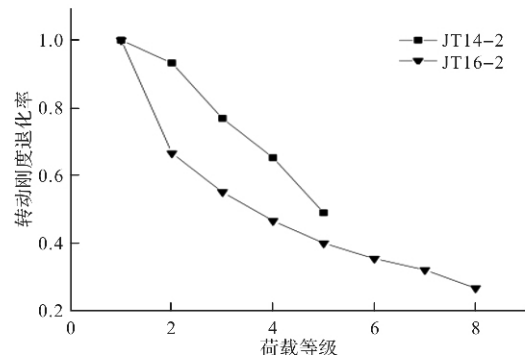
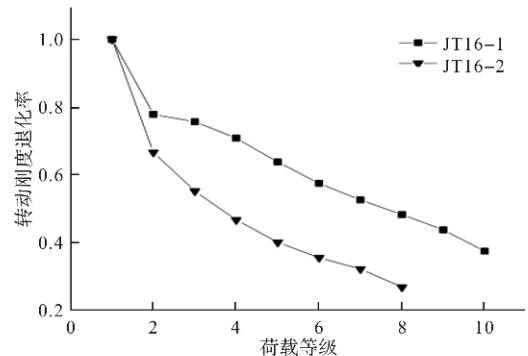
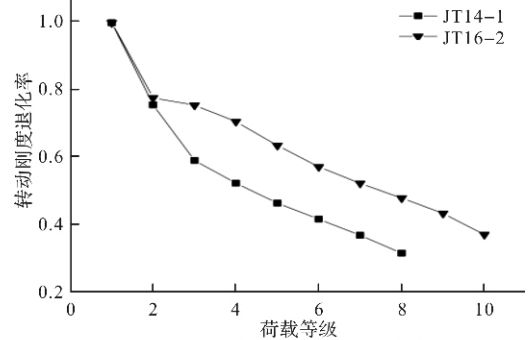
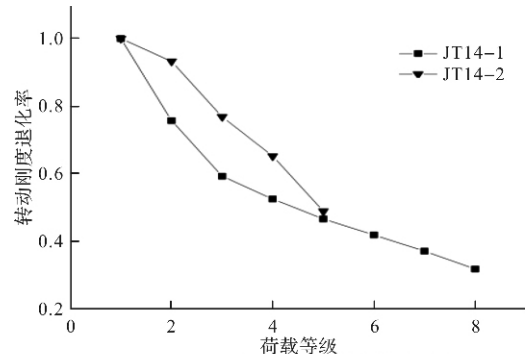


图 13 刚度退化

Fig. 13 Rigidity degradation

$$K_i = \frac{|+M_i| + |-M_i|}{|+\theta_i| + |-\theta_i|} \quad (1)$$

式中: K_i 为节点的弯矩转动刚度; M_i 为某一级荷载作用下弯矩承载力峰值; θ_i 某一级荷载作用下弯矩承载力峰值对应的转角; 正负号为加载方向, 推为正, 拉为负。

表4 节点刚度 $K(\text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad})$ Tab. 4 Joint stiffness $K(\text{kN} \cdot \text{m}/\text{rad})$

Δ/Δ_y	JT14-1	JT14-2	JT16-1	JT16-2
1	3 181.71	3 529.21	3 169.19	5 838.31
2	2 824.82	3 290.74	2 464.39	3 883.58
3	2 537.11	2 711.81	2 395.69	3 212.83
4	2 245.81	2 300.64	2 241.21	2 714.77
5	1 925.95	1 725.76	2 016.93	2 328.39
6	1 760.58	-	1 816.66	2 062.28
7	1 587.80	-	1 662.33	1 867.60
8	1 490.46	-	1 524.45	1 553.32
9	-	-	1 380.68	-
10	-	-	1 181.90	-

从表4数据分析得知, T型件翼缘厚度同为14 mm时, 加肋板的JT14-2与不加肋板的JT14-1相比较初始转动刚度提升了10.92%; 翼缘厚度为16 mm加肋板后, JT16-2的初始转动刚度有明显的增大, 提升了84.22%; 在不加肋板的情况下, 只增加T型件翼缘厚度, JT14-1的初始转动刚度相比较于JT16-1几乎没有什么变化, 说明在不加肋板时, 翼缘的厚度对构件的转动刚度影响很小. 但在同时加肋板后, JT16-2相比较JT14-2的初始转动刚度增加了65.43%, 表明加肋板后T型件的增强, 使得整个构件的刚度有大幅度的提升.

图13为转动刚度退化率-荷载等级示意图, 表现试件在每一级的变化, 图13(a)、(d)JT14-2相比JT14-1、JT16-2下降速度明显要迅速, 图13(b)、13(c)中JT16-1相比较JT14-1和JT16-2初期有一重叠段, 随着荷载等级的增加刚度退化下降速度逐渐加快. 通过分析可知T型件的翼缘厚度对节点刚度提升影响不大, 在T型件上加肋板后, 初始转动刚度变化有明显加强.

3.5 延性和耗能能力

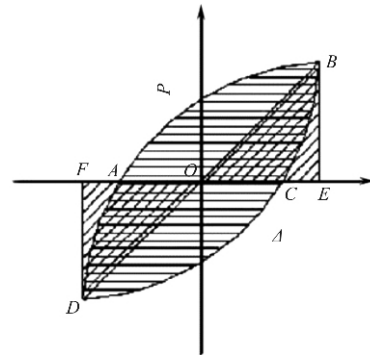
在节点试验中, 采用转角延性进行分析, 延性系数越大表示其构件在地震作用下变形能力便越强、耗散地震的能量越多, 计算公式为(2).

$$\mu_\theta = \theta_u / \theta_y \quad (2)$$

式中: θ_u 为节点破坏时的转角; θ_y 为节点屈服时的转角.

耗能能力采用等效黏滞阻尼系数 h_e , 能量耗散系数 E 及试验总耗能来表示, h_e 的值越大说明结构的耗能能力越好, 结构的抗震性能越好, 由公式(3)和(4)分别来计算 h_e 、 E , 四个试验计算结

果见表(5)所示.

图14 等效粘滞阻尼系数 h_e 计算简图Fig. 14 Calculation diagram of equivalent viscous damping coefficient h_e

$$e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (3)$$

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (4)$$

式中: $S_{(ABC+CDA)}$ 为滞回圈 ABCD 的面积; $S_{(OBE)}$ 为三角形 OBD 的面积; $S_{(ODF)}$ 为三角形 ODF 的面积.

从表(5)中数据分析得出, 每一个节点试验的转角延性系数表现良好, 数值均在2~3之间, 说明四个构件都具备良好的变形能力. 具体分析来看:

(1)在T型件上加肋板后, JT14-2和JT16-2的转角延性系数要小于不加肋板的JT14-1和JT16-1, 延性系数分别下降了27.46%和22.09%, 说明在T型件加肋板后, T型件的刚度有所提升, 使得在试验过程中变形能力相对有所下降. 增加T型件翼缘的厚度对构件的延性系数影响不大, JT16-1延性系数比JT14-1减小了9.15%, JT16-2比JT14-2减小了2.43%;

(2)在T型件翼缘厚度同为14 mm的情况下加肋对整个构件有一定的影响, 加肋的JT14-2与不加肋板的JT14-1等效黏滞阻尼系数及能量耗散系数分别提升了6.94%、7.08%; 当都不加肋板的条件下增加T型件的厚度JT16-1相较于JT14-1等效黏滞阻尼系数和能量耗散系数同样有显著的提高, 分别为37.54%、13.83%. 在增加翼缘厚度的同时又加肋板试件JT16-2的耗能能力表现稍差, 相对于同厚度不加肋板的JT16-1和不同厚度加肋板的JT14-2, 不但没有所增加反而有明显下降, 等效黏滞阻尼系数分别减小了50.46%、36.28%, 能量耗散系数下降了39.98%和36.19%. 其主要原因有两点: 1)不管翼缘的厚度增加还是加肋板都是加强了T型件的刚度, 构件

变形能力有所下降，在实验过程中，使得螺栓的滑移提前发生，加剧滑移的程度；2) 肋板是后期人工在原有的 T 型件上附加焊接，在翼缘的厚度由 14 增加到 16 后 T 型件的自身刚度有所提升，而加肋板的焊缝的塑性变形能力较差，从而导致 JT16-2 的整体耗能能力急剧减弱。

表 5 转角延性系数及试件等效粘滞阻尼系数

Tab. 5 Corner ductility coefficient and equivalent viscous damping coefficient of specimen

	θ_y /mrad	θ_u /mrad	μ_0	W_{total} /kJ	ξ_e	E
JT14-1	18.15	51.53	2.84	41.75	0.317	1.995
JT14-2	34.52	71.14	2.06	46.31	0.339	2.136
JT16-1	40.72	104.97	2.58	65.79	0.436	2.271
JT16-2	48.56	97.26	2.01	72.94	0.216	1.363

4 结论

(1) 以单边螺栓和 T 型件为连接形式的梁柱节点在梁端承受弯矩内力后，梁柱之间产生相对的转角变形，转动刚度相对刚性节点要低，节点承受弯矩的能力有所下降，此类连接形式的节点不符合刚性和铰接形式的力学假设，属于典型的半刚性梁柱连接节点，节点的塑性变形主要分布在 T 型件腹板与翼缘的直角交接处，此处的塑性应变随位移的增大发展最为迅速；

(2) 四个试件试验得到的滞回曲线均呈现反 S 形，捏缩现象比较严重；等效黏滞阻尼系数 h_e 大于 0.2，表明四个试件有良好的耗能特性和抗震能力；转角延性系数都大于 2，半刚性节点的屈服位移 Δ 相较于刚性节点要大，说明其节点均具有良好的变形能力；

(3) 在 T 型件上加肋板是影响节点极限承载力、初始转动刚度和变形能力的重要原因，而增加 T 型件翼缘的厚度，对节点的承载能力和变形能力影响相对较小。此外，T 型件肋板的焊缝塑性变形能力较差，在实验中成为不可控制的因素，在循环加载过程中受拉侧的焊缝容易发生脆性断裂，有待优化改进；

(4) T 型件上翼缘和方钢管的开孔孔径一大一小呈异孔，而且增加了 T 型件翼缘与螺栓帽的受力面积，避免了试验过程中 T 翼缘在螺帽的挤压下产生变形的可能。

参考文献 References

[1] 李德山,陶忠,王志滨. 钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓连

接节点静力性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(3):43-49.

LI Deshan, TAO Zhong, WANG Zhibin. Experimental study on static performance of concrete-filled steel tube column-steel beam unilateral bolt connection[J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2015, 42(3): 43-49.

[2] KISHI N, HASAN R, CHEN W F, et al. Study of Eurocode 3 steel connection classification[J]. Engineering Structures, 1997, 19(9):772-779.

[3] SABOL P T A. Seismic-resistant steel moment connections: developments since the 1994 Northridge earthquake[J]. Progress in Structural Engineering & Materials, 2010, 1(1):68-77.

[4] POPOV E P, TAKHIROV S M. Bolted large seismic steel beam-to-column connections Part 1: experimental study[J]. Engineering Structures, 2002, 24(12): 1523-1534.

[5] PILUSO V, RIZZANO G. Experimental analysis and modelling of bolted T-stubs under cyclic loads[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(6):655-669.

[6] 李国强,马人乐,王伟等. 钢结构高效螺栓连接关键技术研究进展[J]. 建筑钢结构进展,2020,22(6):1-20,28.

LI Guoqiang, MA Renle, WANG Wei, et al. Research progress on key technologies of high-efficiency bolt connection of steel structures[J]. Progress in Building Steel Structures, 2020, 22(6): 1-20,28.

[7] KOROL R M, GHOBARAH A, MOURAD S. Blind bolting W‐Shape beams to HSS columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(12): 3463-3481.

[8] HUANG Yao, GOLDSWORTHY Helen, EMAD Gad. Experimental and numerical investigation of the tensile behavior of blind-bolted T-stub connections to concrete-filled circular columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(2): 198-208.

[9] 郑书朔,王燕,王修军,等. 矩形钢管柱与 H 型钢梁单边螺栓连接节点的抗震性能与恢复力模型研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(5):168-179.

JIA Shushuo, WANG Yan, WANG Xiujun, et al. Research on seismic performance and restoring force model of rectangular steel tube column and H-shaped steel beam unilateral bolt connection[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(5): 168 -179.

[10] 刘仲洋,汤青松,董新元,等. 冷弯方钢管柱-H 型钢梁外伸端板单向螺栓连接节点性能试验研究[J]. 建筑结构,2021,51(2):57-63.

- LIU Zhongyang, TANG Qingsong, DONG Xinyuan, et al. Experimental study on performance of cold-formed square steel tube column-H-beam extension end plate unidirectional bolt connection[J]. Building Structure, 2021, 51(2): 57-63.
- [11] 李秀梅,张克实,王涛,等. 梁柱 T 形钢连接节点力学性能及加强方式研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(3): 53-58, 11.
- LI Xiumei, ZHANG Keshi, WANG Tao, et al. Research on the mechanical properties and strengthening methods of the beam-column T-shaped steel connection joints [J]. Building Structure, 2015, 45 (3): 53-58, 11.
- [12] 王燕,冯双,王玉田. 钢框架刚性连接加强型节点滞回性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(5): 57-68.
- WANG Yan, FENG Shuang, WANG Yutian. Experimental study on hysteretic performance of rigid connection reinforced joints in steel frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(5): 57-68.
- [13] 王双,王波,侯兆新,等. 自锁式单向螺栓工程应用现状与研究方向[J]. 钢结构, 2016, 31(9): 30-33.
- WANG Shuang, WANG Bo, HOU Zhaoxin, et al. Engineering application status and research direction of self-locking one-way bolts[J]. Steel Structure, 2016, 31(9): 30-33.
- [14] GIRAO COELHO A M, BIJLAARD F S K, SIMOES-DA SILVA L. Experimental assessment of the ductility of extended end plate connections[J]. Engineering Structures, 2004, 26(9) : 1185-1206.
- [15] 薛建阳,杨青峰,刘祖强,等. 型钢混凝土异形柱中框架和边框架抗震性能试验对比分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(3): 316-320.
- XUE Jianyang, YANG Qingfeng, LIU Zuqiang, et al. Comparative analysis of seismic performance test of steel reinforced concrete special-shaped column middle frame and side frame[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2016, 48(3): 316-320.
- [16] 吴芸,张其林,王旭峰. 钢框架抗震性能试验研究和数值分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006, 28(4): 486-490.
- WU Yun, ZHANG Qilin, WANG Xufeng. Experimental study and numerical analysis of seismic performance of steel frames [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2006, 28(4): 486-490.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Steel structure design standard: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2017.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings : GB50011-2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.
- [19] 中华人民共和国住房国家质量监督检验检疫总局. 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法: GB/T228. 1—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Housing Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Metallic materials tensile test Part 1: Room temperature test method GB/T228. 1—2010 [S]. Beijing: China Standards Press, 2011.
- [20] 布欣,王新武,谷倩. T 型钢连接框架边柱空间节点抗震试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 117-123.
- BU Xin, WANG Xinwu, GU Qian. Experimental study on seismic resistance of T-shaped steel connection frame side column space joints [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(9): 117-123.
- [21] 贺欢欢,王新武. 加强型 T 型钢连接空间中柱节点抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2018, 40(3): 9-15.
- HE Huanhuan, WANG Xinwu. Research on seismic performance of reinforced T-steel connection space middle column joints [J]. Seismic Engineering and Reinforcement, 2018, 40(3): 9-15.

(编辑 桂智刚)