

单边螺栓连接钢结构仿古建筑异形节点地震 损伤性能评估

吴占景^{1,2}, 王新武^{1*}, 布欣^{1,2}, 米红甫³, 董金爽⁴

(1. 洛阳理工学院 河南省新型土木工程结构国际联合实验室, 河南 洛阳 471023;

2. 洛阳理工学院 智能建造与土木工程学院, 河南 洛阳 471023;

3. 重庆科技大学 安全科学与工程学院, 重庆 401331;

4. 海南大学 土木建筑工程学院, 海口 570228)

摘要: 为了评估单边螺栓连接钢结构仿古建筑(steel Chinese traditional-style building, SCTB)异形节点在地震作用下的损伤特性, 在原有全焊连接仿古建筑异形节点的基础上, 依据中国古建筑形制构造要求, 采用单边螺栓-T型钢连接形式, 设计并制作了4个单边螺栓连接SCTB异形节点。通过拟静力试验, 获得了节点的破坏模式、滞回性能及刚度退化等抗震性能指标。试验结果表明: 单边螺栓连接SCTB异形节点的变形和破坏主要集中在T型钢区域, T型钢翼缘先发生弯曲变形, 最终在翼缘与腹板交界处出现裂纹并断裂。双梁节点的滞回曲线更为饱满, 且整体刚度高于单梁节点的整体刚度。采用考虑残余变形累积损伤修正的Park-Ang损伤模型研究了节点的损伤演化过程与破坏程度。研究成果为装配式SCTB的优化设计与推广应用提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 钢结构仿古建筑; 异形节点; 单边螺栓连接; 损伤演化; 损伤评估

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)09-0031-10

DOI: 10.13969/j.jzgigjz.20250422001

Seismic Damage Assessment of Irregular Joints in Steel Chinese Traditional-Style Buildings with Blind Bolts

WU Zhanjing^{1,2}, WANG Xinwu^{1*}, BU Xin^{1,2}, MI Hongfu³, DONG Jinshuang⁴

(1. Henan International Joint Laboratory of New Civil Engineering Structure, Luoyang Institute of Science and

Technology, Luoyang 471023, China; 2. School of Intelligent Construction and Civil Engineering,

Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 3. College of Safety Science

and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

4. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

*Corresponding author: lywxw518@163.com

Abstract: In order to evaluate the seismic damage characteristics of irregular joints in steel Chinese traditional-style buildings

收稿日期: 2025-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(52008330), 国家重点研发计划资助项目(2019YFD1101003), 河南省科技厅科技攻关资助项目(242102320318), 海南省重大科技计划资助项目(ZDKJ201803)

作者简介:

吴占景(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事钢结构抗震及仿古建筑结构抗震性能方面的研究。E-mail: zhanjing_wu@163.com。

通信作者:

王新武(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构方面的教学与研究。E-mail: lywxw518@163.com。

(SCTBs) with blind bolts, four specimens were designed and fabricated based on the fully welded joints previously used in such structures. The design complied with the architectural and structural requirements of traditional Chinese architecture and incorporated blind bolt-T-stub connections. Quasi-static tests were conducted to investigate seismic performance indicators, including failure modes, hysteretic behavior, and stiffness degradation. The results indicated that deformation and failure of irregular joints in SCTBs with blind bolts were primarily concentrated in the T-stub region, where the flange first underwent bending deformation, followed by cracking and fracture at the junction between the flange and web. Compared with single-beam-column joints, double-beam-column joints exhibited fuller hysteresis loops and greater overall stiffness. The damage evolution and failure severity of the specimens were investigated using a modified Park-Ang damage model that considers cumulative damage due to residual deformation. The findings may provide a theoretical basis and technical support for the optimized design and broader application of prefabricated SCTBs.

Keywords: steel Chinese traditional-style building (SCTB); irregular joint; blind-bolted connection; damage evolution; damage assessment

中国传统古建筑凝聚了我国古代的建造科技与艺术精华。近年来,随着现代材料与建造技术的发展,融合现代钢结构体系、遵循传统营造法则的钢结构仿古建筑(steel Chinese traditional-style building, SCTB)逐渐兴起^[1]。为了满足古建筑形制构造要求,此类建筑中的梁-柱节点依据“额枋”形式分为双梁节点和单梁节点两类。国内学者针对全焊连接形式的SCTB开展了大量研究工作,涵盖钢转换柱^[2]、双梁-柱节点^[3]、附设黏滞阻尼器^[4]、附设摩擦阻尼器^[5]的新型阻尼节点及带斗拱的钢框架^[6]等。然而,关于预制装配式连接在SCTB中的应用研究仍相对较少,其关键技术难点在于此类建筑普遍采用圆钢管柱,传统螺栓连接在封闭截面构件中的施工困难,制约了该类建筑装配式应用的发展^[6]。针对上述问题,近年来研究者们通过在空心矩形钢管柱节点^[7-8]、外方内圆的复式钢管混凝土柱节点^[9]、方钢管混凝土柱节点^[10-12]中引入单边螺栓连接技术,以突破传统螺栓在封闭截面构件施工中的应用局限。相关研究结果表明,单边螺栓-T型钢连接节点具有良好的抗震性能,T型钢尺寸对节点承载力与刚度退化具有显著影响。

当前SCTB的研究主要聚焦于全焊连接形式,然而在部分文物遗址保护类工程中需尽量避免现场焊接作业,因此亟需探索适用于此类场景的全螺栓连接装配式构造体系。本文在课题组已完成的全焊SCTB异形节点的基础上,提出了单边螺栓连接SCTB异形节点。该类节点通过工厂预制梁、柱构件,现场采用单边螺栓与高强螺栓实现装配式连接,为SCTB装配式连接提供了可行的构造方案。本文通过拟静力试验,研究单边螺栓连接SCTB异形节点的力学性能,并基于Park-Ang损伤模型研究其损伤演化和破坏程度,验证了该连接形式的可靠性与抗震性能,具备一定的工程应用价值。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

本次试验所用节点是在课题组前期完成的全焊SCTB双梁-柱节点^[2]的基础上,通过增加T型钢、内外垫板、高强螺栓、单边螺栓等连接件设计而成。采用T型钢作为连接件将圆钢管柱和H型钢梁连接;圆钢管柱和T型钢腹板之间设置内、外圆弧垫板,并通过10.9级M16×80嵌套式单边螺栓连接;H型钢梁和T型钢翼缘通过10.9级M16高强螺栓连接,如图1所示。T型钢由成品热轧H型钢经过火焰切割、打磨抛光和打孔等工艺加工制成。

试件尺寸参考课题组全焊连接SCTB异形节点试验,并且结合西安某景区殿堂式仿古建筑钢结构工程实例,依据宋代《营造法式》中“材份等级”制确定^[12],共加工制作了4个缩尺比例为1:2.6的单边螺栓连接SCTB异形节点试件,包括2个双梁节点试件(JD1、JD2)和2个单梁节点试件(JD3、JD4)。

试件主要参数如表1所示。钢转换柱和梁加工方法与前期开展的全焊连接节点试验^[2]相同,在钢转换柱和梁连接部位预先开孔,并在其内侧焊接内垫板。单边螺栓连接构件部位的表面开孔尺寸为24 mm。梁与柱拼接时将内、外垫板和T型钢对准至柱壁开孔位置,并将内、外垫板分别置于钢管柱壁两侧后固定。采用与文献[12]相同规格的M16摩擦型高强螺栓,接合面摩擦系数为0.35,安装前对构件接合面进行喷砂处理,并严格控制了预紧力。所有试件均采用Q235B钢,实测钢材和单边螺栓的物理力学性能指标见表2。

1.2 试验加载和测量方案

试验采用梁端加载方式,试验现场加载如图2所示。柱顶通过油压千斤顶施加275 kN轴压力,对应轴压比0.2;柱底通过单向铰支座与基础固定连接;阑额和

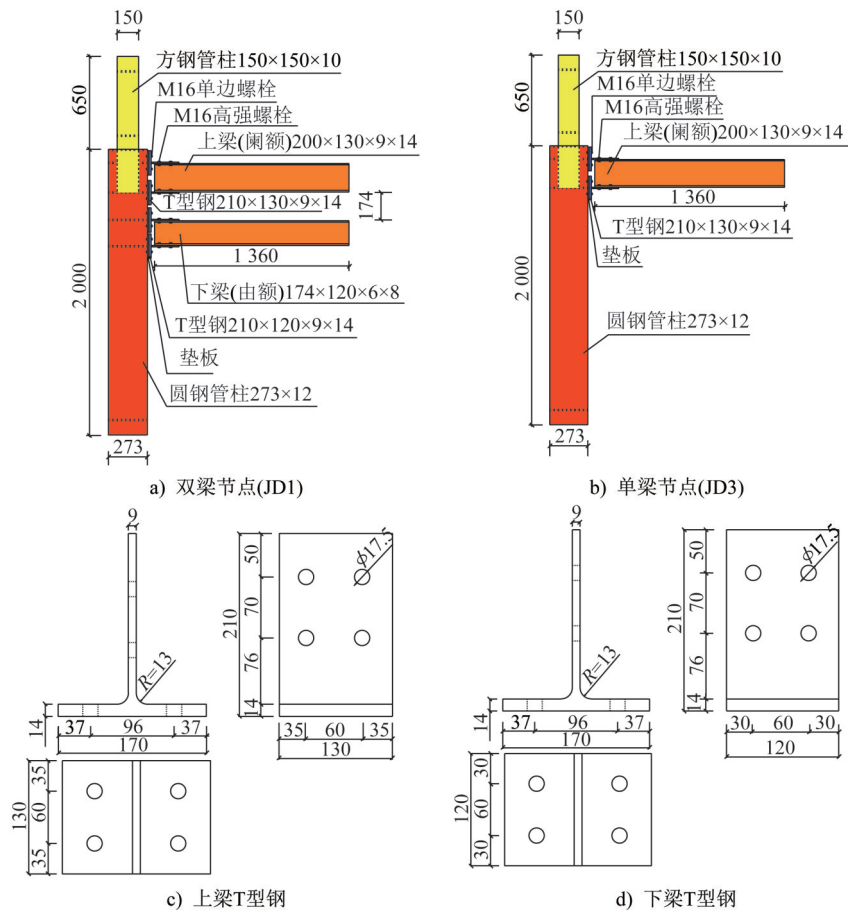


图1 试件尺寸及构造(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions and construction of specimens(unit:mm)

表1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

mm							
梁类型	试件编号	圆钢管柱	方钢管柱	T型钢(阑额)	T型钢(由额)	上梁(阑额)	下梁(由额)
双梁	JD1	273×12	150×10	T210×130×9×14	T210×120×9×14	200×130×6×8	174×120×6×8
	JD2			T210×130×8×12	T210×120×8×12		174×120×6×8
单梁	JD3			T210×130×9×14	—		—
	JD4			T210×130×8×12	—		—

表2 材料力学性能指标

Table 2 Mechanical properties of materials

连接件/板件	材料厚度 <i>t</i> /mm	屈服强度 <i>f_y</i> /MPa	极限强度 <i>f_u</i> /MPa	弹性模量 <i>E_s</i> /GPa	伸长率 <i>δ</i>	屈服应变 <i>ε_y</i> /(×10 ⁻⁶)
M16×80 单边螺栓	—	1 014	1 126	210	0.20	4 828
圆钢管	12	288	388	192	—	1 393
梁翼缘	8	252	440	199	0.32	1 379
梁腹板	6	280	442	196	0.35	1 417
T型钢翼缘(JD1、JD3)	14	268	447	196	0.34	1 415
T型钢腹板(JD1、JD3)	9	271	445	216	0.37	1 417
T型钢翼缘(JD2、JD4)	12	283	483	221	0.39	1 407
T型钢腹板(JD2、JD4)	8	330	450	215	0.36	1 417

由额之间设置专用双梁连接器以保证与实际工程受力状态相符;梁端采用500 kN电液伺服作动器施加循环荷载。加载制度示意图见图3^[14]。试件屈服后,按照屈服位移的0.5倍进行加载,每级循环3次,以液压伺服作动器伸出为正向,缩进为负向。当荷载下降至极限荷载的85%或试件发生破坏时,结束试验。

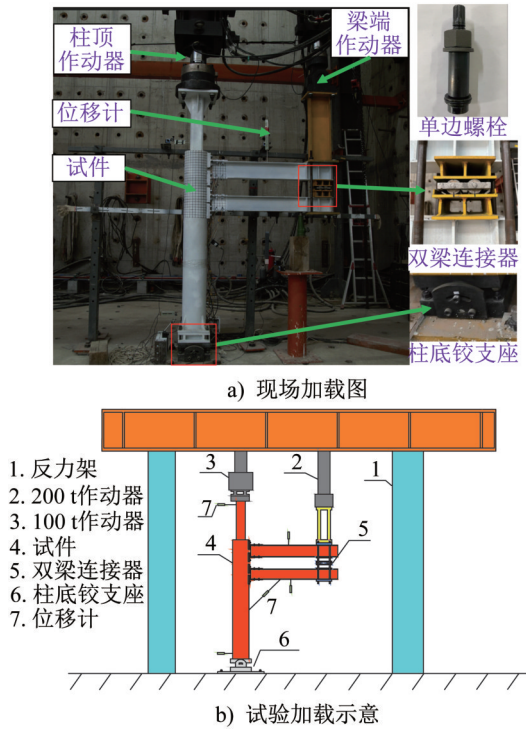


图2 加载装置
Fig. 2 Test setup

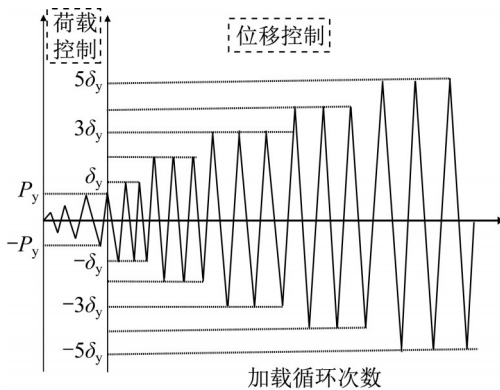


图3 加载制度
Fig. 3 Loading system

在柱顶、柱底、梁中部及梁-柱节点区设置位移计;在柱子、梁和单边螺栓位置布置应变片,其中T型钢的翼缘和腹板、梁端翼缘和腹板位置为应变片的重点布置区域,以捕捉节点区域发生的局部屈服及破坏行为。测点布置如图4所示,其中,T、B、C分别表示T型钢、梁和柱构件;

对于T型钢及梁测点,数字1、2分别表示上、下梁位置,后续数字表示具体应变片编号;C1~C6表示柱上不同位置的应变测点。

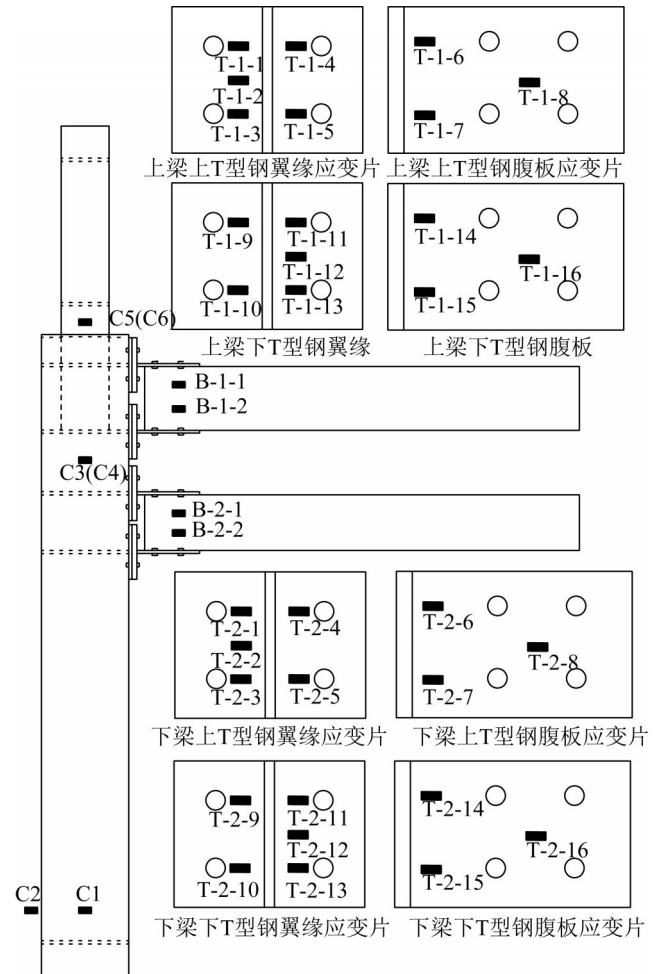


图4 应变片布置
Fig. 4 Arrangement of strain gauges

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及破坏形态

各试件破坏现象如图5和表3所示。在循环荷载作用下,单边螺栓连接SCTB异形节点主要呈现以下破坏模式:(1)在加载初期,试件整体处于弹性阶段,T型钢腹板与梁端连接高强螺栓开始出现微小相对错动,上、下T型钢翼缘与外垫板之间逐渐出现缝隙。(2)加载中期,T型钢腹板及梁端部分测点也先后达到屈服状态,T型钢翼缘与外垫板之间的缝隙逐渐变大,T型钢翼缘发生明显弯曲变形,试件整体进入塑性发展阶段,外垫板和柱壁未发生变形。主要原因是T型钢腹板将拉力传递至翼缘后,在拉力和单边螺栓的预紧力作用下T型钢翼缘发生弯曲变形。外垫板和柱壁刚度较大,因此屈服发生在T型钢翼缘区域。(3)加载后期,试件逐步达到极限承载状

态并进入破坏阶段,梁端高强螺栓滑移增大,下T型钢翼缘与腹板的交界处首先出现裂纹,随后上T型钢翼缘同一位置也出现裂纹,最终下T型钢翼缘与腹板交界处发生断裂。

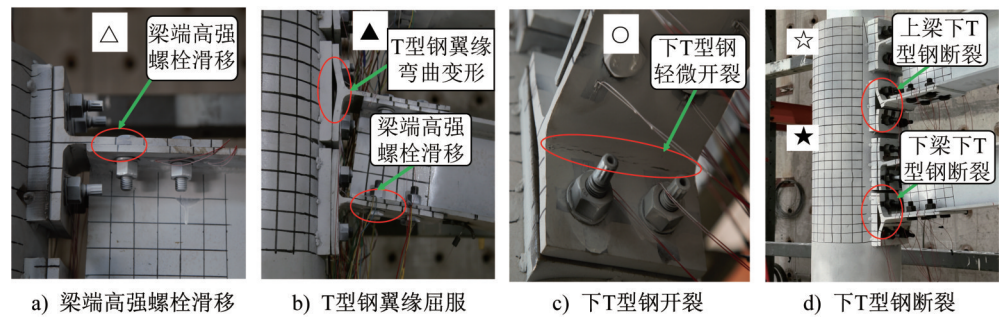


图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

表3 试验现象

Table 3 Test phenomena

试件编号	弹性阶段		损伤发展阶段		破坏阶段		破坏阶段	
	荷载等级	试验现象	荷载等级	试验现象	荷载等级	试验现象	荷载等级	试验现象
JD1						★	$7\delta_y$	☆★
JD2	δ_y	△	$2\delta_y\sim5\delta_y$	▲○	$6\delta_y$	★	$7\delta_y$	☆★
JD3						☆	—	—
JD4						☆	—	—

注: δ_y 为屈服位移;△表示梁端高强螺栓滑移;▲表示T型钢翼缘弯曲变形;○表示T型钢翼缘和腹板交界处开裂;☆表示上梁下T型钢断裂;★表示下梁下T型钢断裂。

由表3可知,各试件的整体破坏过程大致可分为以下三个阶段:局部屈服的初期阶段,表现为T型钢腹板和梁端之间错动;损伤发展阶段,表现为高强螺栓滑移和T型钢翼缘发生弯曲变形;破坏阶段,表现为T型钢翼缘与腹板交界处裂纹萌生直至断裂。

双梁与单梁节点的破坏模式相似,局部屈服均最先发生在下T型钢部位,表明该部位为受力集中区域。在下梁下T型钢发生断裂后,双梁节点由于具备双梁的构造特性,其上梁的下T型钢翼缘与腹板交界处产生裂纹但尚未断裂,仍具有一定承载能力。继续加载至 $7\delta_y$ (δ_y 为屈服位移)时,上梁的下T型钢裂纹扩展并最终断裂,试件整体达到完全破坏状态。

2.2 滞回特性及承载力分析

图6为试件梁端的弯矩-转角滞回曲线与骨架曲线,其中 M 和 θ 分别为梁端的弯矩与转角。

由图6可知,加载初期滞回环包围面积较小,骨架曲线基本呈线性。随着加载的进行,梁端高强螺栓产生轻微滑移,T型钢腹板与梁翼缘之间出现一定程度错动,随后T型钢翼缘发生弯曲变形,试件进入屈服阶段。此时,滞回环的包围面积逐渐增大,骨架曲线的斜率逐渐减小,

弯矩-转角关系逐步呈现非线性特征。加载后期,由于T型钢断裂,负向加载的滞回曲线出现急剧下降。

与单梁节点相比,双梁节点滞回曲线更为饱满,耗能能力更强。对比试件JD3、JD4可知,二者滞回曲线饱满程度相当,没有明显差异。这主要是由于二者均为单梁节点,T型钢连接件数量一致,且厚度变化不大。

各个试件的延性系数见表4。由表4可知,双梁节点因增加了T型钢数量,其刚度有所提升,从而增强了节点的抗弯承载能力。相较于单梁节点,双梁节点的极限弯矩承载力增幅分别为10.60%和22.47%;延性系数的增幅分别为10.60%和22.47%,表明其滞回性能和延性均优于单梁节点的滞回性能和延性。

2.3 刚度退化

采用割线刚度表示试件在每个荷载等级下的转动刚度,计算公式见式(1)。图7为各试件的刚度退化曲线。

$$K_i = \frac{|+M_i| + |-M_i|}{|+\theta_i| + |-\theta_i|}$$

(1)

式中: K_i 为第*i*级循环荷载时的弯矩-转角刚度; M_i 为第*i*级循环荷载时弯矩的最大承载力; θ_i 为第*i*级循环荷载时弯矩最大承载力所对应的转角;正负号表示加载方向,推

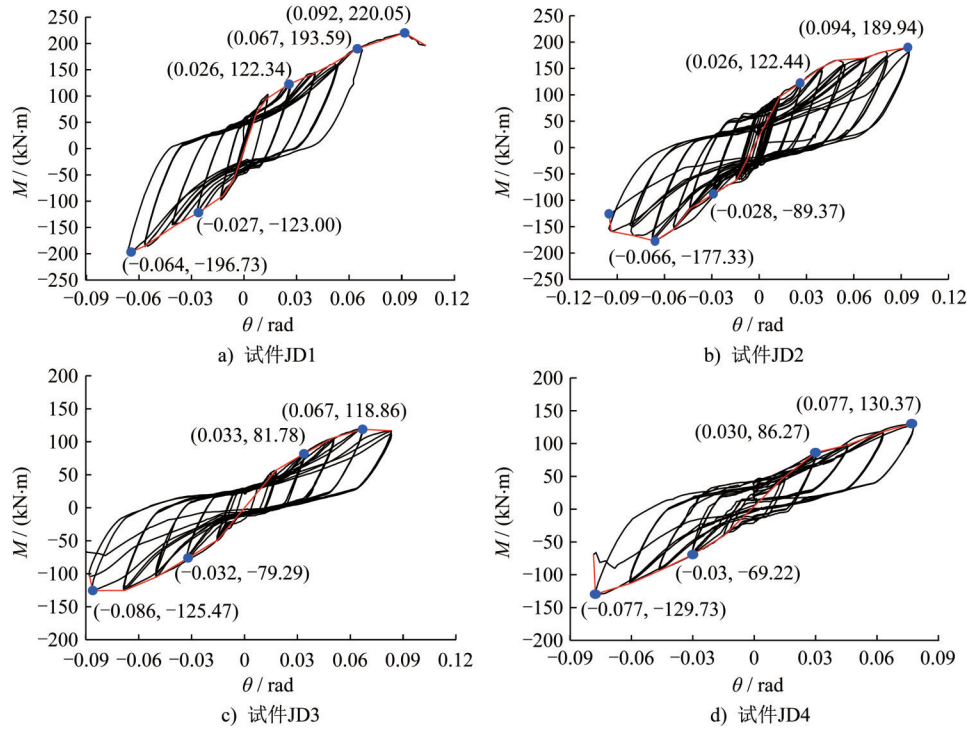


图6 各试件滞回曲线与骨架曲线

Fig. 6 Hysteresis curves and skeleton curves of specimens

表4 各试件延性系数

Table 4 Ductility coefficient of specimens

试件 编号	屈服状态		承载力极限状态		μ
	θ_y / rad	$M_y / (\text{kN}\cdot\text{m})$	θ_u / rad	$M_u / (\text{kN}\cdot\text{m})$	
JD1	0.026	122.51	0.092	220.05	3.53
JD2	0.026	122.44	0.094	189.94	3.62
JD3	0.033	81.78	0.083	116.77	2.51
JD4	0.031	77.69	0.077	132.98	2.48

注: M_y 和 M_u 分别为屈服弯矩承载力和极限弯矩承载力; θ_y 和 θ_u 分别为屈服转角和极限转角; μ 为延性系数的平均值。

为正、拉为负。

由图7可知,随着加载等级的逐步提高,各试件刚度均呈现出明显的退化趋势,主要由T型钢塑性变形不断累积引起。

双梁节点中T型钢数量较单梁节点的T型钢数量有所增加,显著提升了试件的初始转动刚度。同级荷载下,双梁节点刚度明显大于单梁节点刚度。以双梁节点试件JD2和单梁节点试件JD4为例,其初始刚度分别为 $5\,632.36 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 和 $3\,907.99 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$, 试件JD2的初始刚度较试件JD4的初始刚度提高了约44.12%。

2.4 应变分析

鉴于各试件的破坏模式和应变演化过程较为一致,

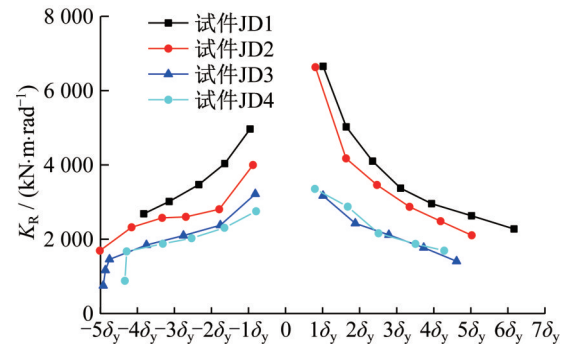


图7 各试件刚度退化曲线

Fig. 7 Stiffness degradation curves of specimens

本文选取双梁节点试件JD2为典型代表,其主要测点的应变变化曲线如图8所示。

试验过程中梁、柱构件的应变值均未超过 $500 \mu\epsilon$, 表明钢材始终处于弹性工作阶段,未达到屈服应变。应变分析结果显示,试件的塑性变形主要集中于T型钢翼缘部位。试验过程中,T型钢翼缘处的应变最先达到钢材的屈服应变,并迅速增大,大部分测点的应变值超过 $4\,000 \mu\epsilon$, 该现象与T型钢翼缘发生屈服的试验观测结果相一致。

随着加载的进行,T型钢腹板也逐步进入屈服。加载过程中,下T型钢的翼缘应变大于腹板应变,这与试验中T型钢翼缘先发生弯曲变形,随后翼缘与腹板交界处出现裂纹并扩展至断裂的试验现象相吻合;双梁节点的下梁各T型钢的翼缘与腹板应变明显高于上梁的相应

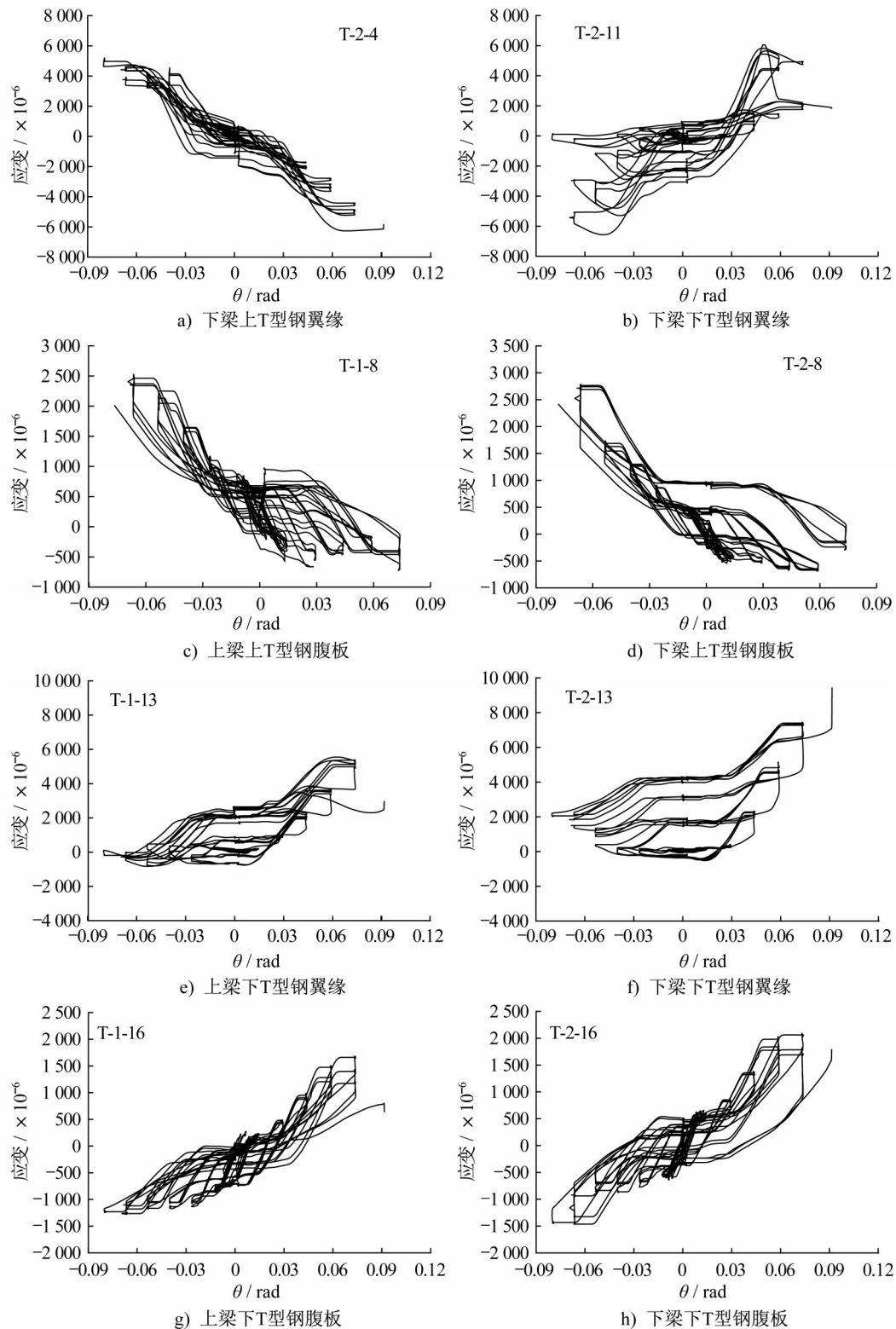


图8 试件JD2应变曲线
Fig. 8 Strain curves of specimen JD2

值,与试验中双梁节点T型钢的破坏顺序一致。

单边螺栓的应变值均未超过 $4\,000\,\mu\epsilon$,低于其屈服应变,仅有1个螺栓在加载后期进入屈服阶段。试验结束后,对拆卸下来的单边螺栓进行观察,发现其螺纹部位存在轻微磨损,但螺杆本体未见明显塑性变形,说明该类螺

栓在节点中具备良好的紧固性能。

3 损伤指数计算及损伤评估

3.1 损伤计算

参考文献[16]基于构件最大变形量与累积滞回耗

能,提出了Park-Ang双参数损伤评估模型,并进一步修正该模型以适用于箱形截面和工字型截面钢构件,计算公式如下:

$$D=(1-\beta_s)\frac{\theta_{\max,i}-\theta_y}{\theta_u-\theta_y}+\beta_s\frac{[dE]}{M_y(\theta_u-\theta_y)} \quad (2)$$

式中: D 为修正后的构件损伤指数; $\theta_{\max,i}$ 为第*i*级循环荷载最大转角位移; θ_y 和 θ_u 分别为节点的屈服转角和失去弯矩承载力时的极限转角; M_y 为节点的屈服弯矩承载力; dE 为滞回耗能增量; β_s 为修正模型的组合系数。

根据损伤指数 $D=1$ 时的数据反推组合系数 β_s 的取值,计算公式如下:

$$\beta_s=\frac{M_y(\theta_u-\theta_m)}{[dE]-M_y(\theta_m-\theta_y)} \quad (3)$$

采用试验实测值计算得到各试件的组合系数 β_s 值如表5所示,其均值为0.018,标准差为0.003。

表5 各试件参数计算结果

Table 5 Calculation results of specimen parameters

试件编号	$M_y(\theta_u-\theta_m)$	$[dE]-M_y(\theta_m-\theta_y)$	β_s
JD1	655.22	38 628.28	0.017
JD2	950.78	40 131.50	0.023
JD3	305.18	19 801.93	0.015
JD4	400.23	25 367.45	0.016

表6为损伤指数计算结果,当 β_s 取0.018时,损伤指数平均值为1.118 0,标准差为0.018 0,变异系数为0.016 1;当 β_s 取0.025时(参考文献[16]),损伤指数平均值为1.165 3,标准差为0.025 0,变异系数为0.021 5。由此可见,当 β_s 取0.018时,各试件在达到最终破坏状态时的损伤指数均值更接近1.0,且结果离散性明显减小。综合考虑计算合理性与参数稳定性,本文后续分析中统一采用 $\beta_s=0.018$ 。

表6 损伤指数计算结果

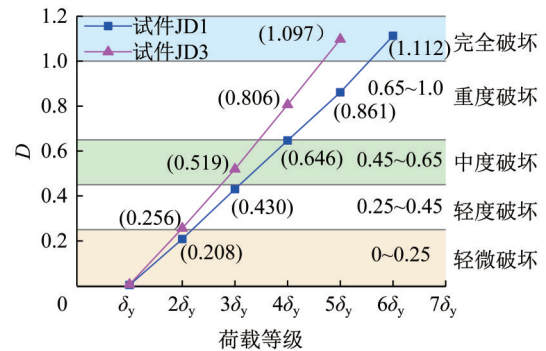
Table 6 Calculation result of damage index

试件编号	D 最大值 ($\beta_s=0.018$)	D 最大值 ($\beta_s=0.025$)
JD1	1.112	1.156
JD2	1.138	1.192
JD3	1.097	1.135
JD4	1.128	1.178
平均值	1.118 0	1.165 3
标准差	0.018 0	0.025 0

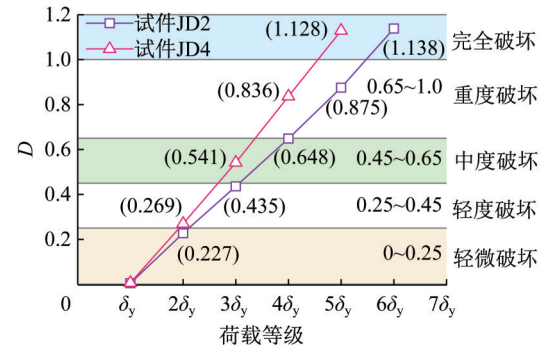
3.2 损伤评估

根据式(2)计算得到各试件的损伤指数 D ,并参考文

献[16]进行损伤等级划分,如图9所示。节点的损伤演化过程大致可分为以下几个阶段:(1)上、下T型钢翼缘与外垫板之间逐渐出现缝隙,伴随着T型钢腹板与梁端连接处的高强螺栓开始出现轻微滑移,表现为轻微破坏和轻度破坏(图5a));(2)T型钢翼缘发生弯曲变形,试件进入明显的塑性变形发展阶段,表现为中度破坏(图5b));(3)下T型钢翼缘与腹板的交界处出现裂纹,伴随高强螺栓的显著滑移,损伤迅速扩展,表现为重度破坏(图5c));(4)单梁节点的下T型钢翼缘发生断裂;而双梁节点的由额下T型钢、阑额下T型钢依次断裂,表现为完全破坏(图5d))。



a) 试件JD1和JD3



b) 试件JD2和JD4

图9 各试件损伤指数分布

Fig. 9 Damage index distribution of specimens

在各级荷载作用下,双梁节点试件(JD1和JD2)相对于单梁节点试件(JD3和JD4)的破坏程度均低一个等级。以在 $4\delta_y$ 循环荷载为例,双梁节点处于中度破坏,而单梁节点已进入重度破坏。继续加载至 $5\delta_y$ 时,单梁节点下T型钢连接件发生断裂,其损伤指数均大于1,达到完全破坏;而双梁节点的上梁下T型钢尚未破坏,试件整体并未完全破坏。直至加载到 $6\delta_y$ 时下梁下T型钢发生断裂,标志着双梁节点也达到完全破坏。

4 结论

本文提出了一种采用单边螺栓连接的SCTB异形节点,通过拟静力试验研究了受力特性和损伤演化规律,主

要得到以下结论:

(1) 单边螺栓连接 SCTB 异形节点塑性变形主要由 T 型钢连接件变形引起,试件的破坏形态表现为 T 型钢翼缘先发生屈服,最终在翼缘与腹板交界处出现裂纹并发展至断裂。

(2) 与单梁节点相比,双梁节点因具备双梁结构特性及更多 T 型钢连接件,表现出更高的初始转动刚度及同级荷载下的刚度,其抗弯承载能力更强,滞回性能和延性也明显优于单梁节点的滞回性能和延性。试件的刚度退化主要由 T 型钢的塑性变形累积以及构件间的相对滑移引起。

(3) 采用考虑残余变形累积效应的 Park-Ang 改进损伤模型能够很好地描述该类节点的损伤演化过程和破坏程度。同级荷载下,双梁节点试件的破坏程度比单梁节点试件的破坏程度低一个等级,体现出更优的抗震性能。

(4) 单边螺栓连接在 SCTB 异形节点中表现出良好的紧固性能,可有效替代传统全焊连接形式,适用于焊接受限或施工条件受限的仿古建筑工程,为 SCTB 装配式设计与工程应用提供了试验依据与设计参考。

参考文献:

- [1] 赵鸿铁,张风亮,薛建阳,等.古建筑木结构的结构性能研究综述[J].建筑结构学报,2012,33(8):1-10.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2012.08.002.
- ZHAO Hongtie, ZHANG Fengliang, XUE Jianyang, et al. Research review on structural performance of ancient timber structure[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(8): 1-10. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.08.002. (in Chinese)
- [2] 薛建阳,翟磊,高卫欣,等.仿古建筑矩形与圆形钢管柱连接抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(2):81-91. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2016.02.011.
- XUE Jianyang, ZHAI Lei, GAO Weixin, et al. Experimental study on seismic performances of connections between rectangular steel pipe column and circular steel pipe column in imitated ancient building [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(2): 81-91. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.02.011. (in Chinese)
- [3] 薛建阳,吴占景,隋龚,等.仿古建筑钢结构双梁-柱边节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(3):80-89. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2015.03.010.
- XUE Jianyang, WU Zhanjing, SUI Gong, et al. Experimental study on seismic performance of steel double-beams column exterior joints in Antique style building [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(3): 80-89. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.03.010. (in Chinese)
- [4] QI L J, XUE J Y, SUI Y, et al. Smart retrofitting of irregular steel joints in traditional Chinese buildings by viscous dampers [J]. Engineering Structures, 2021, 228: 111526. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111526.
- [5] YUAN Z, QI L J, XUE G M, et al. Resilient joints with SMA bar-shear friction damper (SSFD) device in steel modern Chinese traditional-style buildings: Seismic performance evaluation and optimized design [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 82: 108300. DOI: 10.1016/j.job.2023.108300.
- [6] 薛建阳,戚亮杰,李亚东,等.传统风格建筑钢框架结构拟静力试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(8):133-140. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.08.014.
- XUE Jianyang, QI Liangjie, LI Yadong, et al. Quasi-static test on steel frame structure in traditional style buildings [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(8): 133-140. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.08.014. (in Chinese)
- [7] 蒋蕴涵,李国强,陈琛,等.自锁式单向螺栓在拉剪共同作用下的承载力研究[J].土木工程学报,2022,55(4):23-32,41. DOI:10.15951/j.tmgxb.2022.04.010.
- JIANG Yunhan, LI Guoqiang, CHEN Chen, et al. Study on bearing capacity of self-lock blind bolt subjected to combined tension and shear [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(4): 23-32, 41. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2022.04.010. (in Chinese)
- [8] WANG P J, SUN L L, ZHANG B X, et al. Experimental studies on T-stub to hollow section column connection bolted by T-head square-neck one-side bolts under tension [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 178: 106493. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106493.
- [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. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.0365.
- JIA Shushuo, WANG Yan, WANG Xiujun, et al. Seismic behavior and restoring force model of connections between rectangular tubular columns and H-shaped beams using single direction bolts [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(5): 168-179. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0365. (in Chinese)
- [10] 张玉芬,王夺,高嘉岐,等.单边螺栓-T形件连接节点滞回性能试验研究[J].建筑结构,2023,53(10):55-61. DOI:10.19701/j.jzjg.20210513.
- ZHANG Yufen, WANG Duo, GAO Jiaqi, et al. Experimental study on hysteresis behaviors of T-stub joints with single-side bolt [J]. Building Structure, 2023, 53(10): 55-61. DOI: 10.19701/j.jzjg.20210513. (in Chinese)
- [11] LIU H H, YAN S L, WANG X W, et al. Experimental study on the seismic damage behavior of composite joints of concrete-filled steel tube column with blind bolts [J]. Structures, 2024, 70: 107767. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.107767.
- [12] 布欣,孙海粟,刘欢欢,等.单边螺栓T型钢连接梁柱节点地震损伤性能评估[J].建筑钢结构进展,2024,26(1):22-29,53. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.01.003.
- BU Xin, SUN Haisu, LIU Huanhuan, et al. Seismic damage assessment of a beam-to-column connection with blind bolts and

