

翼缘双摩擦面Z形悬臂梁式全螺栓连接梁柱节点 抗震性能研究

沙磊*, 屠锋, 康超懿, 吴正清

(国网浙江省电力有限公司, 杭州 310000)

摘要: 为研究所提出的新型翼缘双摩擦面Z形悬臂梁式全螺栓连接梁柱节点的抗震性能,设计相关试件进行拟静力试验和有限元分析。同时利用有限元模拟对新型梁柱节点进行参数化分析,以验证节点的适用性及设计方法的合理性。研究表明:新型节点发生梁端受弯破坏,最终在悬臂梁翼缘与钢柱焊接处开裂;翼缘螺栓连接段内无滑动现象,滞回曲线饱满无捏缩;连接节点的承载能力强,变形能力良好;有限元分析结果与试验结果吻合良好;当按等强连接配置螺栓时,不同截面尺寸节点模型的滞回性能相近,破坏模式相同,可按规范规定的刚接节点设计方法进行设计。

关键词: 装配式钢结构; 全螺栓连接; 梁柱节点; 抗震性能; 有限元模拟

中图分类号: TU352.1⁺1, TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)02-0083-08

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230914001

Seismic Performance of Cantilever Beam-Column Joint with Z-shaped Fully Bolted Connection and Double Friction Surfaces at the Flange

SHA Lei*, TU Feng, KANG Chaoyi, WU Zhengqing

(State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

*Corresponding author: 94568052@qq.com

Abstract: In order to study the seismic performance of a new cantilever beam-column joint with Z-shaped fully bolted connection and double friction surfaces at the flange, relevant specimen was designed for pseudo-static test and finite element analysis. Additionally, parametric analysis of the new beam-column joint was conducted using finite element simulation to verify the applicability of the proposed joint design method. The results show that the new joint experiences bending failure at the beam end, ultimately cracking at the weld between the cantilever beam flange and the steel column. There is no sliding phenomenon in the connection section, and the hysteresis curves are plump without pinching. The bearing capacity of the joint is high and the deformation capacity is good. The finite element analysis results are in good agreement with the experimental results. When the bolts are configured with equal strength connections, the hysteretic properties and failure modes of the joint models with different section sizes are similar, and the rigid joint design method according to the specification can be used to design the joint.

Keywords: prefabricated steel structure; fully bolted connection; beam-column joint; seismic performance; finite element simulation

收稿日期: 2023-09-14

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目: 35-750kV 变电站建筑物及基础装配性能提升技术研究 (5200-202222082A-1-1-ZN)

作者简介:

沙磊 (1983—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事变电站设计方面的研究。E-mail: 94568052@qq.com。(通信作者)

屠锋 (1985—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事变电站设计方面的研究。

目前,钢框架梁柱连接节点主要采用焊接或栓焊连接的方式。现场采用焊接方式有其独有的优势,然而,根据工程经验,采用焊接方式也会存在以下问题:第一,现场施工条件复杂,焊接质量难以保证,增加质量风险和管理成本;第二,大量的动火作业影响设备的安装和运行,增加安全风险;第三,焊接工人需持证上岗,增加施工工序和管理成本等。因此,焊接技术虽然应用广泛,但对于建设质量要求高、施工安全性高的建筑物及构筑物,现场焊接作业仍然存在着难以避免的缺点。采用全栓接连接节点是解决传统焊接或栓焊连接所存在问题的有效途径,能够提高钢结构的安装效率,保证钢结构安装的质量,降低施工现场动火作业带来的安全风险,减少焊接对环境的污染。全栓接连接符合绿色装配式建筑的发展理念。

现有的装配式全栓接梁柱节点主要分为以下3类:(1)连接件式连接,即在梁端通过钢连接件实现梁翼缘和腹板与柱的连接;(2)端板式连接,在梁端焊接端板,梁端板与柱壁板通过螺栓连接;(3)悬臂梁式连接,即在工厂将悬臂梁段与柱焊接在一起,在施工现场采用螺栓完成主梁与悬臂梁段的拼接。通过合理的设计,3种连接方式的梁柱节点均能达到刚接节点的效果。

对于传统的全栓接梁柱节点,国内规范已经规定了较为实用的设计方法^[1-2],国内外学者也对钢结构全栓接梁柱连接节点开展了大量的试验研究。孙海粟等^[3]、梁乘玮等^[4]对T型钢连接件的钢结构梁柱节点及整体框架进行了大量试验研究,结果表明,T型钢连接梁柱节点具有良好的耗能能力、变形能力以及优良的抗震性能。罗建良^[5]、李永超^[6]通过对传统的连接件式梁柱节点进行改进,提出了一种基于损伤控制的屈曲约束梁柱连接(buckling restrained-reduced beam section, BR-RBS)节点,并分别对采用T形和L形屈曲约束连接件的梁柱连接节点开展了试验研究,结果表明,BR-RBS节点能很好地实现损伤控制,其变形能力满足我国规范的要求。张爱林等^[7-9]、方鄂龙等^[10]、郁有升等^[11]在悬臂梁式连接梁柱节点的基础上分别提出了一种带Z字形和“互”形悬臂梁段拼接的梁柱节点,该类节点中悬臂梁段下翼缘长于上翼缘,主梁上翼缘长于下翼缘,在施工现场可直接将主梁搁置在悬臂梁上,便于主梁的就位安装,这两种连接节点通过合理设计均可达到与传统钢框架结构梁柱节点相同的性能。

传统的全栓接梁柱节点也存在着一一定的弊端:在施工现场将钢梁吊装就位后,需要螺栓安装完成后才可移除起吊设备;同时在节点连接区域由于梁上翼缘存在拼接板(上翼缘存在凸起),对预制楼板的施工会造成诸多不便。为解决上述问题,本文基于带Z字形悬臂梁段拼接的梁柱节点,提出一种新型翼缘双摩擦面Z形悬臂梁

式全螺栓连接梁柱节点,并对该节点进行拟静力试验和有限元分析,研究节点破坏模式和抗震性能,为该新型梁柱节点构造的应用提供技术支撑。

1 节点构造

翼缘双摩擦面Z形悬臂梁式全螺栓连接梁柱节点由框架柱、悬臂短梁、主梁、连接板及配套螺栓组成。主梁上翼缘长于下翼缘,且在上翼缘下表面螺栓连接段贴焊有一块与翼缘等厚的钢板;悬臂短梁下翼缘长于上翼缘,且在下翼缘上表面螺栓连接段贴焊有一块与翼缘等厚的钢板。所有部件均在工厂加工而成,现场仅采用螺栓进行连接。

在现场安装过程中,主梁上翼缘和悬臂短梁下翼缘长出段发挥就位板的作用,待构件吊装就位后,可移除吊装设备,然后在梁的上、下翼缘内侧通过翼缘连接板和高强螺栓将悬臂梁与主梁的翼缘连接,通过腹板连接板和高强螺栓将主梁与悬臂短梁的腹板连接。详细节点构造如图1所示。

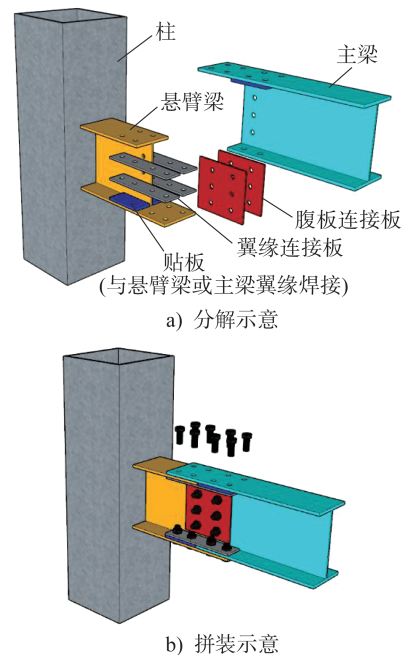


图1 新型梁柱连接节点

Fig. 1 New beam-column joint

该种节点构造形式具有以下优点:(1)钢梁顶面无翼缘连接板,叠合板可直接放置于梁上翼缘顶部,对于悬臂梁上翼缘未连接段存在的下凹问题,可通过在施工现场加设垫板等方式进行找平;(2)框架梁就位后可直接搭接在悬臂梁上,移除吊装设备,方便施工,提高了现场施工效率,缩短了设备使用周期;(3)下翼缘下表面不设连接板,无需在梁底仰视调节连接板位置,降低了施工难度;(4)文献[2]中要求悬臂梁段距柱轴线的长

度一般不超过1.6 m,翼缘双摩擦面可有效减小悬臂梁的长度,使其更易满足规范要求,方便构件运输;(5)主梁与悬臂梁的上下翼缘连接段位于同一竖直截面,受力更加合理。

2 试验研究

2.1 试件设计

本次试验选取框架结构中常见的中柱节点,根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[1]、《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)^[2]等国家现行规范,按照

“强节点弱构件,强柱弱梁”的设计原则及等强连接的设计理念,设计了1个刚接梁柱节点试件。

试件左右梁参数完全相同,梁采用H型钢,截面尺寸为H380 mm×240 mm×8 mm×12 mm;柱采用焊接方钢管,截面尺寸为□350 mm×14 mm。悬臂梁与柱采用贯通隔板式连接,上下贯通隔板厚度均为14 mm;主梁与悬臂梁上下翼缘通过8 mm厚的翼缘连接板和10.9级M24高强螺栓连接;腹板通过6 mm厚的腹板连接板(双板)和10.9级M20高强螺栓连接。试件详图如图2所示。试件所用钢材的实测强度如表1所示。

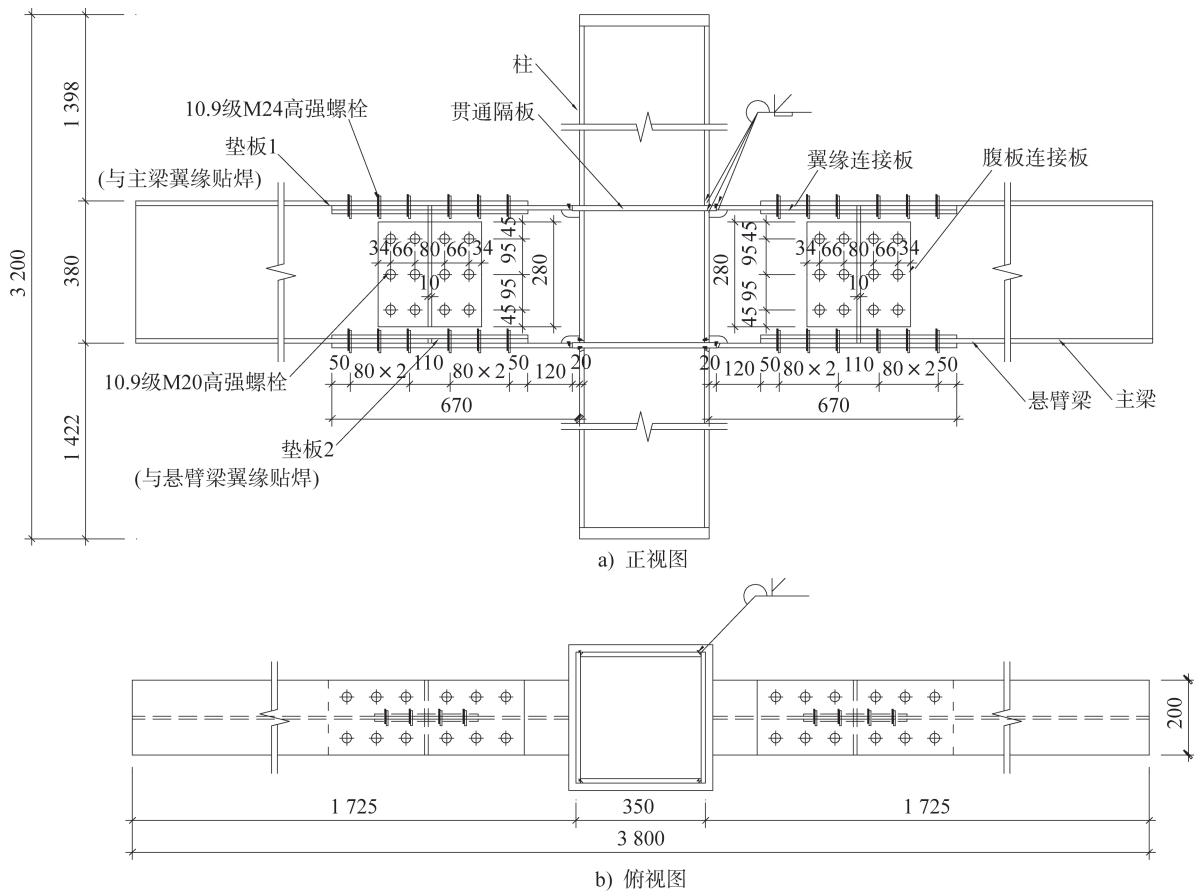


图2 试件构造及尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Details and dimensions of specimen (unit:mm)

表1 钢材实测强度

Table 1 Measured strength of steel

部件	厚度/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
腹板连接板	6	385	493
梁腹板、翼缘连接板	8	382	502
梁翼缘、贴板	12	441	551
柱壁、贯通隔板	14	381	507

2.2 试验方案

试验加载装置如图3所示,试件通过自平衡反力架进行固定。试件下端安装于铰支座上,通过销轴节点约束其水平和竖向的平动自由度;上端依靠夹具和撑杆提供水平平动约束,释放其竖向和转角自由度。试验时首先通过1个压力千斤顶对柱施加竖向荷载,并在试验过程中保持荷载稳定,然后通过2个拉压千斤顶对两侧梁端施加反向低周往复荷载,并规定顺时针为正向加载,逆时针为负向加载。整个加载过程按梁端转角控制加载的

方式依次以 0.003 75 rad、0.005 rad、0.007 5 rad、0.01 rad、0.015 rad、0.02 rad、0.03 rad、0.04 rad…逐级加载,其中当转角 < 0.01 rad 时每级加载 1 圈,当转角 ≥ 0.01 rad 时每级加载 3 圈。当试件突然出现严重破坏或梁端承载力下降至峰值荷载的 85% 以下时,结束加载,停止试验。试验中量测了试件关键位置的应变和加载点位移,测点布置如图 4 所示。

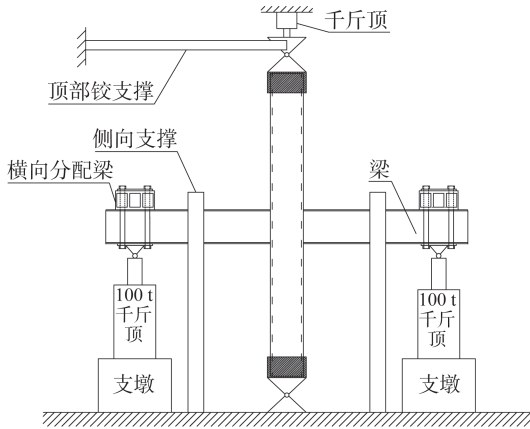


图 3 加载装置
Fig. 3 Test setup

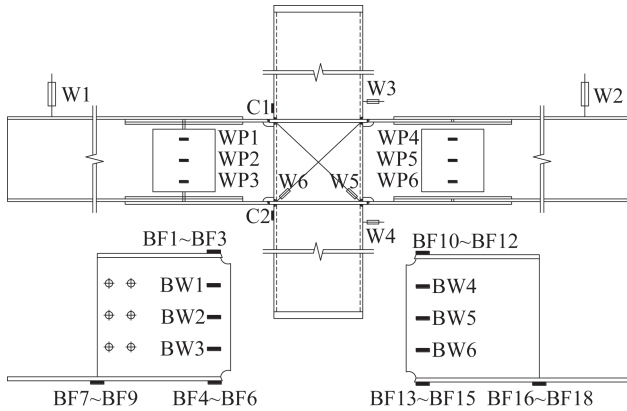


图 4 测点布置(正视图)
Fig. 4 Layout of measuring points (front view)

2.3 试验现象及破坏形态

根据加载过程中观察到的现象及采集的试验数据可知:试验加载初期,试件无明显现象,基本处于弹性阶段;在加载达到 0.01 rad 时,左右梁上下翼缘均发生屈服,其余位置未出现屈服或破坏;在加载达到 0.02 rad 时,梁腹板 1/4 和 3/4 等分点处达到屈服应变,除弯曲变形外试件未出现肉眼可见的变化,连接段无滑移,节点域及柱截面也未发生屈服;在加载达到 0.03 rad 第 1 圈时,试件出现明显弯曲变形,两侧梁受压侧翼缘出现轻微鼓曲变形(图 5a)),节点域及柱截面发生屈服,螺栓连接段依然保持稳定无滑动,承载力继续上升;在 0.03 rad 第 2 圈负向加载

过程中,试件出现响声,左侧悬臂梁上翼缘与柱连接处出现轻微撕裂,但试件依然能承担较大荷载;在向 0.04 rad 正向加载过程中,试件出现一声巨响,右侧悬臂梁上翼缘与柱连接位置焊缝被整段撕裂(图 5b)),但腹板焊缝未出现明显破坏,荷载出现突降,左侧悬臂梁下翼缘与柱连接处出现轻微撕裂;在向 0.04 rad 负向加载时,试件同样出现较大响声,左侧悬臂梁上翼缘沿上级加载焊缝撕裂位置继续延伸(图 5c)),悬臂梁腹板与柱壁连接焊缝出现轻微撕裂(图 5d)),承载力急剧下降,试验结束。试验完成后将试件拆解,梁翼缘及翼缘连接板无明显滑动现象(图 5e))。

试件在悬臂梁与柱隔板连接位置发生破坏,为典型的梁端受弯破坏模式。首先悬臂梁非螺栓连接段翼缘发生屈服,然后悬臂梁腹板也发生屈服,随着转角的继续增加,由于轴向压力的作用及梁端弯矩的不断增大,框架柱受压侧和节点域发生屈服,最后悬臂梁与柱连接的焊缝撕裂导致试件破坏。在整个试验过程中梁连接段未出现明显滑动,满足“强节点弱构件,强柱弱梁”的设计原则,也符合连接节点等强设计理念。

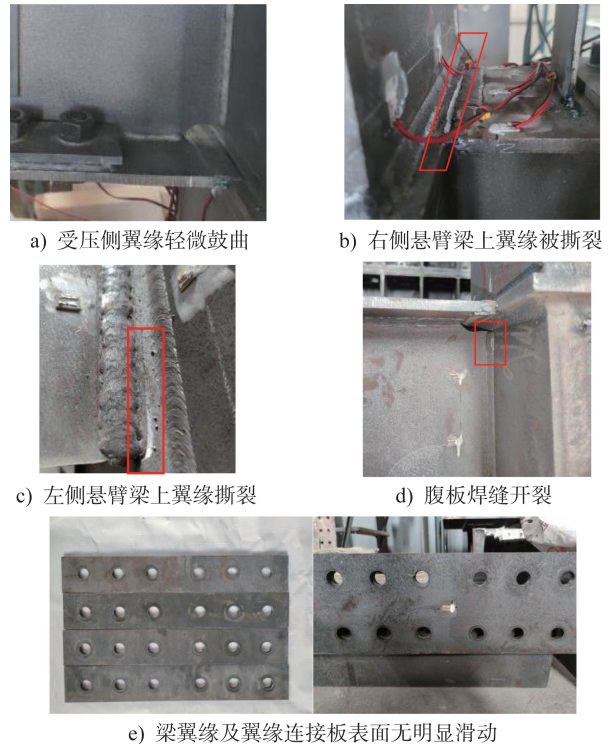


图 5 试验现象
Fig. 5 Test phenomena

2.4 试验结果分析

2.4.1 弯矩-转角曲线

试件两侧梁的弯矩-转角滞回曲线以及对应的骨架曲线(曲线绘制时将右侧梁的曲线以 y 轴为轴线进行了

对称处理)分别如图6和图7所示。可以看出,两侧梁的滞回曲线和骨架曲线基本对称,加载初期,试件刚度变化小,曲线基本呈线性增长,试件处于弹性阶段;翼缘屈服后试件刚度出现退化,骨架曲线形状偏离直线,滞回曲线呈饱满的梭形;在加载超过0.03 rad后,由于焊缝的撕裂,试件荷载出现下降。滞回曲线饱满无捏缩,试件耗能能力强,各级加载曲线无平移段,表明试件未出现明显的滑动,与试验现象吻合,按规范设计方法确定的螺栓配置安全可靠。

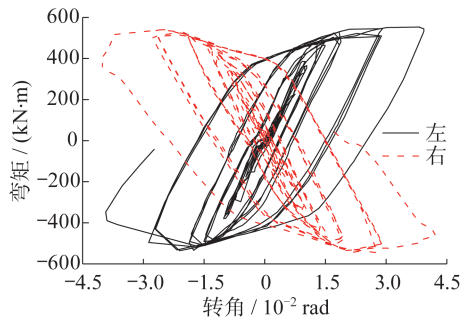


图6 试件滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curves of specimen

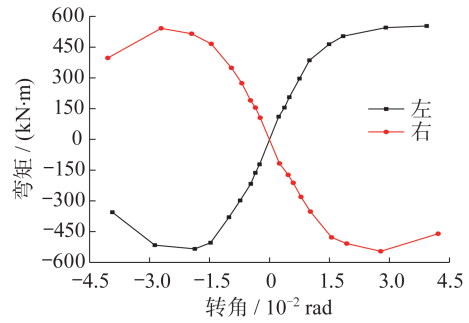


图7 试件骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves of specimen

2.4.2 承载能力和变形能力

由采集的试验数据可得到试件两侧梁的屈服弯矩 M_y 、峰值弯矩 M_p 、破坏弯矩 M_u 以及对应转角 θ_y 、 θ_p 、 θ_u , 位移延性系数 $\mu = \theta_u / \theta_y$ 。将各特征点的试验结果及延性系数列于表2。由表2可知,同侧梁的正负向加载峰值承载力基本相同,误差在3.5%以内,表明此节点的Z形构造并未对梁的正、负弯矩受力产生影响;两侧梁的正负向加载延性系数均高于3.5,破坏时的转角也超过0.03 rad,具有良好的变形能力。

表2 主要试验结果

Table 2 Main test results

梁位置	加载方向	屈服点		峰值点		破坏点		μ
		$M_y / (\text{kN}\cdot\text{m})$	$\theta_y / 10^{-2} \text{ rad}$	$M_p / (\text{kN}\cdot\text{m})$	$\theta_p / 10^{-2} \text{ rad}$	$M_u / (\text{kN}\cdot\text{m})$	$\theta_u / 10^{-2} \text{ rad}$	
左梁	正向	342	0.88	553	3.92	553	3.92	4.4
	负向	352	0.92	534	1.97	454	3.27	3.6
	平均	347	0.90	544	2.95	503	3.60	4.0
右梁	正向	333	0.90	541	2.82	517	3.72	4.1
	负向	313	0.87	546	2.79	464	4.21	4.8
	平均	323	0.88	544	2.81	490	3.96	4.5

3 有限元模拟

3.1 有限元模型建立

利用ABAQUS有限元软件对梁柱节点进行建模分析。有限元模型选用实体单元C3D8R模拟。钢材和螺栓的本构关系均采用双折线模型,并遵循非线性随动强化准则和 von Mises 屈服准则。钢材的屈服强度和极限强度按试验试件实测材性取值,如表1所示,螺栓的屈服强度取900 MPa,极限强度取1 000 MPa;钢材与螺栓的弹性模量 E 均取206 GPa,泊松比 ν 均取0.3。

进行建模时,假定所有焊接节点均为等强连接,模型中钢材之间的焊接部位设置为“绑定”约束。钢板与钢板接触面、螺母和螺帽与钢板接触面均定义为面面接触,法

向设为“硬接触”,切向采用“罚”,摩擦系数按文献[1]取0.4;螺杆与钢板孔壁之间设为“硬接触”。模型与试验试件的边界条件和加载制度完全相同。最终建立的有限元模型如图8所示。

3.2 有限元结果校验

为了验证有限元模型的准确性,建立了1个与试验试件相同参数的有限元模型。

有限元模拟计算得到的梁端弯矩-转角滞回曲线与试验滞回曲线的对比如图9所示。可以看出,有限元模拟得到的梁端弯矩-转角滞回曲线与试验滞回曲线吻合较好,整体呈梭形,固定翼缘与腹板的螺栓并未出现滑

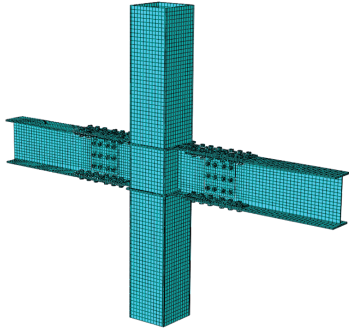


图8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

移,滞回环饱满无捏缩,与试验结果一致。由于试验中梁柱连接处的焊缝出现撕裂,而有限元中难以模拟这一现象,因此在转角达到0.04 rad时并未出现承载力下降现象。有限元模拟得到的峰值承载力约为550 kN·m,与试验承载力基本相同。

有限元分析得到的节点应力云图及其与试验结果的对比如图10所示。除螺栓外应力较大位置主要出现在节点域及悬臂梁段,主梁及连接板基本处于弹性阶段,与试验中应变测点的采集结果基本一致。靠近柱的悬臂梁翼缘截面应力最大,约为500 MPa,接近于材料的极限强度(502 MPa),与试验试件在此位置首先发生屈服的现象相吻合;试验过程中,柱节点域与柱壁在转角达到0.03 rad时发生屈服,有限元模拟节点域侧面及受压侧柱壁的应力刚刚超过屈服应力(381 MPa),与试验结果基本吻合。两侧梁发生明显变形,节点域也发生轻微剪切变形,有限元模型也可模拟试件破坏前的变形情况。总体而言,有限元模型能够较为准确地模拟试件出现断裂破坏之前低周往复加载试验的试验结果。

3.3 有限元参数分析

采用上述经验证的有限元模型,考虑连接螺栓的数量、型号以及节点的尺寸等参数,建立4个参数分析模型,如表3所示,模型LZA-1的参数与试验试件完全相同。

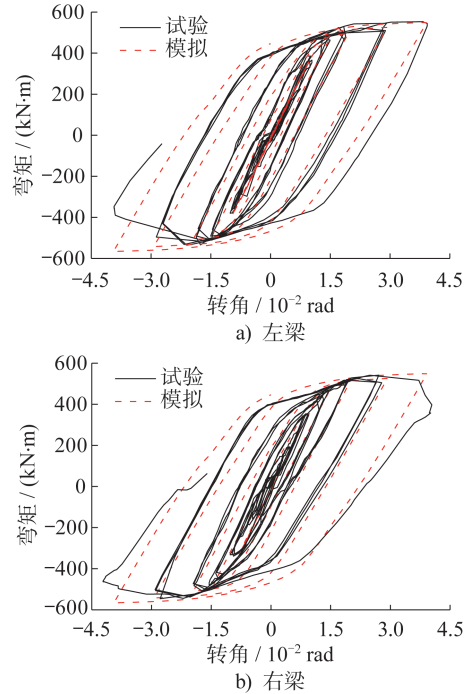


图9 试验与模拟滞回曲线对比

Fig. 9 Comparison of hysteresis curves between experimental and simulation results

表3 有限元模型参数

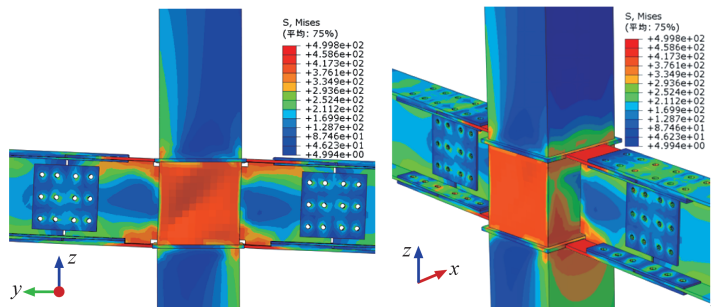
Table 3 Parameters of finite element models

模型编号	节点尺寸	翼缘螺栓	腹板螺栓	备注
LZA-1	A	12个M24	12个M20	等强连接
LZA-2	A	8个M24	12个M20	非等强连接
LZB-1	B	12个M30	12个M24	等强连接
LZB-2	B	12个M24	12个M24	非等强连接

注:节点尺寸A代表的梁截面尺寸为H380 mm×240 mm×8 mm×12 mm,柱截面尺寸为□350 mm×14 mm;节点尺寸B代表的梁截面尺寸为H450 mm×250 mm×10 mm×14 mm,柱截面尺寸为□400 mm×18 mm;高强螺栓按摩擦型连接配置是否满足梁承载力的要求分类,满足要求的即为等强连接,不满足要求的即为非等强连接。



a) 试验结果



b) 有限元模拟应力云图(单位: MPa)

图10 试验与模拟结果对比

Fig. 10 Comparison between experimental and simulation results

4个节点模型的梁端弯矩-转角滞回曲线如图11所示。相同截面尺寸模型的初始刚度基本一致,滞回曲线也基本重合,加载初期滞回曲线基本处于弹性状态,节点发生很小的弯曲变形;当模型屈服后,随着转角的增加,未按等强设计配置螺栓的模型LZA-2和LZB-2的翼缘连

接段出现滑动,模型进入滑移段,继续加载,螺杆与孔壁接触,高强螺栓由摩擦型连接转变为承压型连接,模型承载力继续上升,按等强设计配置螺栓的模型LZA-1和LZB-1的滞回曲线饱满,无平移段,与试验结果相吻合,符合预期。

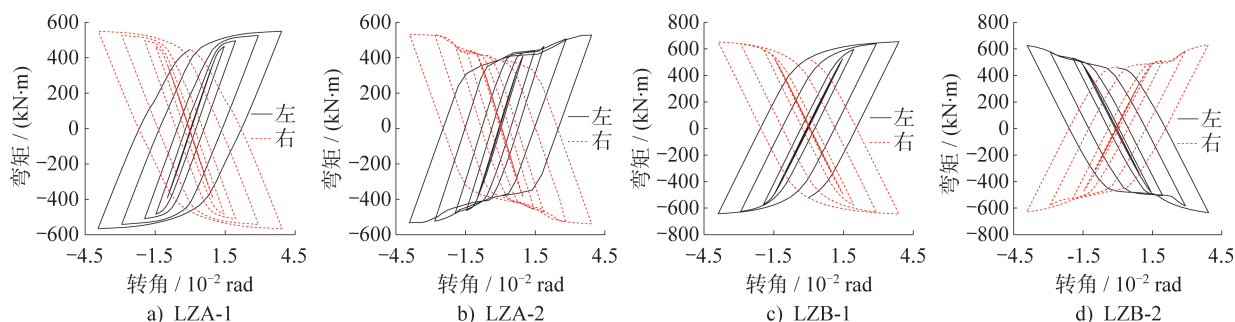


图11 有限元模拟滞回曲线

Fig. 11 Hysteresis curves of finite element simulation

4个节点模型的Mises应力分布云图如图12所示(模型LZA-1的应力云图如图10b)所示)。应力最大位置均出现在靠近柱的悬臂梁翼缘截面,节点均发生梁端受弯破坏,节点域应力较大,当采用贯通隔板形式时,可适当提高节点域位置的柱壁厚度,以确保满足“强节点弱构件”的要求。

对比不同截面尺寸的两个等强连接模型LZA-1和LZB-1,二者均按国家现行规范进行刚接节点设计,破坏模式相同,滞回曲线形状基本一致,整体呈梭形,滞回环饱满无捏拢,且具有相同的滞回性能,表明规范设计方法适用于本文提出的节点构造形式。

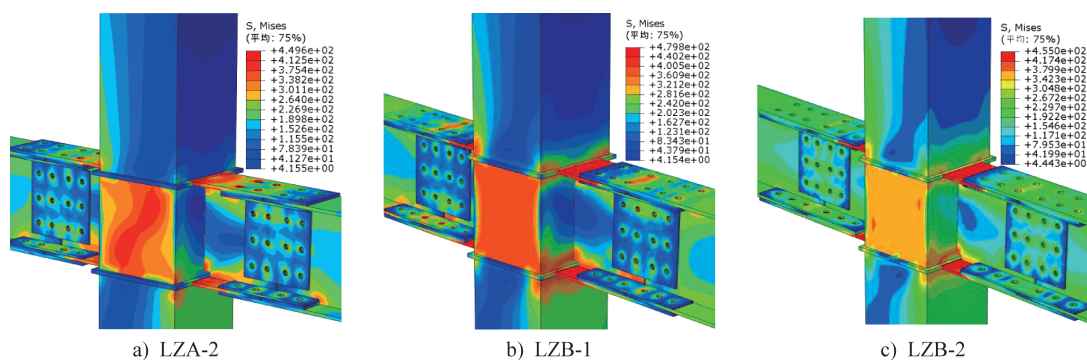


图12 有限元模拟应力云图(单位:MPa)

Fig. 12 Stress contours of finite element simulation (unit: MPa)

4 结论

本文提出了一种新型翼缘双摩擦面Z形悬臂梁式全螺栓梁柱连接节点,并通过节点试验和有限元模拟研究了其抗震性能,得到如下主要结论:

(1) 连接节点在悬臂梁翼缘与钢柱连接处开裂,为梁端受弯破坏,梁翼缘屈服后,柱壁和节点域才发生屈服,满足“强节点弱构件”和“强柱弱梁”的设计理念。

(2) 试件的滞回曲线饱满,变形能力良好,试验承载力与计算承载力相同,连接节点抗震性能优良。

(3) 试验试件按等强节点进行设计,在荷载作用下,

梁翼缘和腹板连接位置均未出现滑动;对节点连接段的螺栓配置进行了有限元参数模拟,结果表明按等强连接设计的模型未出现滑动,按非等强设计的模型连接段出现滑动,表明设计方法合理。

(4) 建立了连接节点的有限元模型,将有限元结果与试验结果进行对比,二者吻合良好,模拟方法合理、适用。

(5) 按规范中刚接梁柱连接节点的设计方法对节点截面尺寸进行了参数分析,分析结果表明不同尺寸的连接节点滞回性能接近,破坏模式相同。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.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, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.高层民用建筑钢结构技术规程:JGJ 99—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Steel Structure of Tall Building: JGJ 99—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [3] 孙海粟,布欣,王新武,等.T型钢连接钢框架梁柱节点抗震性能试验研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2020,39(6):164-169. DOI:10.16186/j.cnki.1673-9787.2020.6.24.
SUN Haisu, BU Xin, WANG Xinwu, et al. Experimental study on seismic behavior of beam-column joints of T-stub connecting steel frames [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2020, 39(6): 164-169. DOI: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2020.6.24. (in Chinese)
- [4] 梁乘玮,王新武,布欣.钢框架梁柱T型钢连接空间节点抗震性能研究[J].工业建筑,2018,48(5):162-168. DOI:10.13204/j.gyjz201805027.
LIANG Chengwei, WANG Xinwu, BU Xin. Research on seismic behavior of steel frame beam to column connection with T-stub [J]. Industrial Construction, 2018, 48(5): 162-168. DOI: 10.13204/j.gyjz201805027. (in Chinese)
- [5] 罗建良.基于损伤控制的屈曲约束钢梁柱连接节点抗震性能研究[D].济南:山东大学,2018.
LUO Jianliang. Study on seismic performance of buckling restrained steel beam-column connections based on damage control[D]. Jinan: Shandong University, 2018. (in Chinese)
- [6] 李永超.单边T形屈曲约束钢梁柱节点抗震性能研究[D].济南:山东大学,2019.
LI Yongchao. Behavior of steel moment connections with single-sided energy dissipating T-stus [D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese)
- [7] 张爱林,郭志鹏,刘学春,等.带Z字形悬臂梁段拼接的装配式钢框架节点抗震性能分析[J].北京工业大学学报,2016,42(11):1669-1680. DOI:10.11936/bjutxb2016040004.
ZHANG Ailin, GUO Zhipeng, LIU Xuechun, et al. Analysis of seismic behavior of prefabricated steel frame joints with Z-shaped cantilever beam splicing [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(11): 1669-1680. DOI: 10.11936/bjutxb2016040004. (in Chinese)
- [8] 郭志鹏,张爱林,刘学春,等.装配式钢框架节点带Z字形悬臂梁段和削弱梁段连接的抗震性能研究[J].建筑结构学报,2017,38(6):43-52. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.06.005.
GUO Zhipeng, ZHANG Ailin, LIU Xuechun, et al. Seismic behavior of prefabricated steel frame connection with Z-shaped cantilever beam and reduced beam section [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6): 43-52. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.06.005. (in Chinese)
- [9] 张爱林,郭志鹏,刘学春,等.带Z字形悬臂梁段拼接的装配式钢框架节点抗震性能试验研究[J].工程力学,2017,34(8):31-41. DOI:10.11936/bjutxb2016040004.
ZHANG Ailin, GUO Zhipeng, LIU Xuechun, et al. Experimental study on aseismic behavior of prefabricated steel-frame-joints with Z-shaped cantilever-beam splicing [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(8): 31-41. DOI: 10.11936/bjutxb2016040004. (in Chinese)
- [10] 方郅龙,郁有升.“互”形节点钢框架抗震性能的有限元分析[J].结构工程师,2023,39(1):79-90. DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2023.01.009.
FANG Yunlong, YU Yousheng. Finite element analysis of seismic behavior of steel frame with “HU” joints [J]. Structural Engineers, 2023, 39(1): 79-90. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2023.01.009. (in Chinese)
- [11] 杨文秀,郁有升,张海宾.钢框架翼缘加强互形装配式节点力学性能研究[J].建筑钢结构进展,2021,23(8):105-112. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.08.012.
YANG Wenxiu, YU Yousheng, ZHANG Haibin. A study on the mechanical properties of HU-shaped assembly connection strengthened by steel frame flange [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(8): 105-112. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.08.012. (in Chinese)