

# 交错桁架-柱装配式节点滞回性能试验研究

童乐为<sup>1,3</sup>, 黄俊峰<sup>1,3</sup>, 余 鹏<sup>1,3</sup>, 王平山<sup>2,3</sup>, 徐继东<sup>2,3</sup>, 崔家春<sup>2,3</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200011; 3. 上海装配式建筑技术集成工程技术研究中心, 上海 200011)

**摘要:** 针对交错钢桁架与柱子装配式连接的工程应用和抗震设计需要, 设计了三个不同连接构造的节点, 试验研究了由上弦杆、斜腹杆和柱子组成的受轴力循环作用的桁架节点滞回性能, 试验表明斜腹杆与节点板的焊接部位是薄弱环节, 容易开裂破坏。在以上节点的斜腹杆破坏失效后, 选择了其中两个节点, 继续试验研究了由弦杆和柱子组成的受弯矩循环作用的框架节点滞回性能。分析了这些节点在斜腹杆失效前后的破坏特征、承载力、延性、耗能能力等性能以及不同连接构造细节对这些性能的影响。研究表明受循环轴力的桁架节点具有较高的承载力和初始刚度, 但延性、耗能能力一般, 弦杆与柱的连接构造形式对节点性能影响不显著; 受循环弯矩的框架节点仍具有较高的抗弯承载力和耗能能力, 但是弦杆与柱的连接构造形式对节点性能有较大的影响。为了抵抗地震作用, 建议交错钢桁架的 H 形截面弦杆的上下翼缘应与柱子可靠连接, 来确保斜腹杆破坏退出工作后弦杆通过抗弯方式传力到柱子, 实现强节点的功效。

**关键词:** 交错钢桁架; 弦杆-斜腹杆-柱子装配式节点; 连接构造; 滞回性能; 试验研究

中图分类号: TU352. 1; TU391

文献标志码: A

## Experimental Investigation on Hysteretic Behavior of Staggered Truss-Column Assembled Joints

TONG Lewei<sup>1,3</sup>, HUANG Junfeng<sup>1,3</sup>, YU Peng<sup>1,3</sup>, WANG Pingshan<sup>2,3</sup>, XU Jidong<sup>2,3</sup>, CUI Jiachun<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. East China Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200011, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Assembly Building Technology Integration, Shanghai 200011, China)

**Abstract:** For the need of engineering application and

aseismic design of assembled connection between a staggered steel truss and a column, three kinds of joints were designed with different connection constructions. The hysteretic behavior of chord-web-column truss joints was investigated experimentally under cyclic axial force. It was found that the welded connection between diagonal web member and gusset plate was a weak link, liable to cracking. After the diagonal web member was damaged in the truss joint above, two of the three joints were selected to continue the tests on the hysteretic behavior of chord-column moment frame joints under cyclic bending moment. The performance such as failure feature, load bearing capacity, ductility and energy dissipation as well as influence of connection construction details was analyzed for these joints before and after the diagonal web member was damaged respectively. It is concluded that the truss joints subjected to cyclic axial force has a high loading capacity and initial rigidity, but a general ductility and energy dissipation ability. The chord-column connection configuration has no significant effect on the joint performance. The moment frame joints subjected to cyclic bending moment still has a high bending capacity and energy dissipation ability, but the effect of chord-column connection configuration on the joint performance is significant. In order to resist earthquake action, it is suggested that both the upper and lower flanges of H-section chord member in a staggered steel truss should be connected with the column reliably, which will cause the chord to transfer load to the column by means of bending resistance after the diagonal web member damages and then realize the function of a strong joint.

**Key words:** staggered steel truss; chord-web-column assembled joint; connection construction; hysteretic behavior; experimental investigation

收稿日期: 2021-09-28

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFC0703809); 科技部国家重点实验室基金课题(SLDRCE19-B-04)

第一作者: 童乐为(1961—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为钢结构及组合结构。Email: tonglw@tongji.edu.cn

通信作者: 王平山(1968—), 男, 教授级高工, 工学博士, 主要研究方向为建筑工业化与复杂结构设计技术。

Email: pingshan\_wang@arcplus.com.cn



论文  
拓展  
介绍

交错桁架结构体系(staggered truss frame system, STFS)是自美国诞生的一种装配式新型钢结构体系(图1),具有开间大、结构质量轻、施工便捷、经济、高效、环保等优势,适用于多高层住宅、旅馆、学校、医院、办公楼等一般为矩形平面的钢结构建筑。近年来随着我国大力发展装配式建筑,交错桁架结构体系的应用研究在我国在逐步受到了重视。

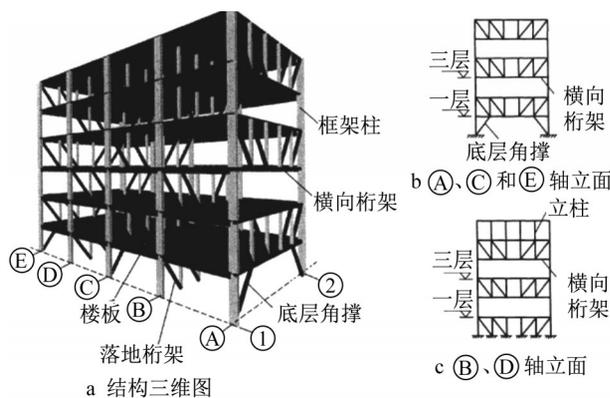


图1 交错钢桁架结构体系

Fig. 1 Staggered steel truss structure system

国内外对交错桁架结构体系的研究主要是结构整体的受力性能,包括静力与动力性能<sup>[1-6]</sup>,在节点构造及其性能方面的研究非常有限。周绪红团队<sup>[4-6]</sup>的研究指出:柱子可看做轴心受力构件,弯矩很小;桁架中各类杆件内力也以轴力为主,即使空腹节间竖腹杆也是如此。大震时结构的外柱上无塑性铰出现,塑性铰集中出现在桁架单元;交错桁架结构体系是一种抗侧刚度很好的结构体系,水平荷载主要由桁架承受,柱中分配的剪力较小。卢林枫等<sup>[7]</sup>针对美国钢结构协会(AISC)规范中桁架与柱的连接节点,给出了相关的计算公式。李启才等<sup>[8]</sup>对交错桁架体系中桁架与柱栓焊连接节点的受力性能进行了有限元分析,研究了节点的设计方法。我国在2012年和2015年分别出台了《交错桁架钢框架结构技术规程》(CECS 323:2012)<sup>[9]</sup>和《交错桁架钢结构设计规程》(JGJ/T 329—2015)<sup>[10]</sup>,主要涉及的是材料、构件和结构层面的内容,有关连接构造的条文很少,且所提及的连接形式主要是焊接或栓焊混合连接,这种需在现场焊接的连接方式可装配性差。苏明周、孙艳文团队针对弦杆采用端板及高强螺栓与柱的连接方式,试验研究节点静力和抗震性能<sup>[11-12]</sup>,分析了节点的破坏模式、承载力、延性、耗能能力等。

从近年来装配式交错桁架结构体系在工程中的应用来看,大跨度的整榀桁架先在工厂里制造好后,

然后运输到施工现场,与竖立和H形钢柱在弱轴方向装配连接(图2),在建筑的横向形成桁架-框架柱结构。桁架的上下弦杆采用H形钢,腹杆常采用方钢管。若桁架与框架柱在现场采用端板式螺栓连接,则需要很高的制造精度和安装精度,施工难度大。

为促进交错桁架与H形钢柱在施工现场能更快速方便地实现装配式连接,本文采用钢桁架端部与H形钢框架柱弱轴通过竖向连接板以及高强度螺栓的装配化连接方式。鉴于交错钢桁架是一种新型结构体系,节点的抗震性能是设计上特别关注的问题。为此,本文针对交错钢桁架端部的上弦节点(包含上弦杆、斜腹杆和柱子,见图2中圆圈所示),试验研究在水平地震作用下的节点滞回性能。

对交错桁架结构体系在水平地震作用下的有限



图2 交错钢桁架结构的施工

Fig. 2 Construction of staggered steel truss

元预分析表明在上弦杆端部节点处:(1)上弦杆、斜腹杆主要承受轴力作用,且发生拉、压循环变化;柱子也主要承受轴力,弯矩很小;(2)斜腹杆所受轴力较大,通常会在节点板焊接处开裂率先破坏;(3)当斜腹杆失效后,端部节间形成了空腹节间,由原来的桁架节点退化为空腹节点,相当于“框架”节点(后续称为框架节点),由上弦杆与柱连接的节点能继续承载发挥作用,但是上弦杆受力模式由原来受轴力为主转变为受弯为主。

基于以上的概念,本文每个交错钢桁架端部上弦节点的滞回试验分为两部分:首先进行轴力滞回的原桁架节点试验,其次在斜腹杆失效后再进行上弦杆弯矩滞回的框架节点试验,研究节点在斜腹杆失效前后的破坏模式、滞回曲线、骨架曲线、延性、耗能等抗震性能指标,并研究节点连接构造细节对这些性能的影响,为工程应用选择合理可靠的连接形式。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

本文设计了三个具有工程尺度的节点试件,即试

件J1、J2和J3,节点的形式与主要尺寸如图3所示。三个试件在连接构造细节上有些差别(图4),用以考察比较交错钢桁架与柱子现场连接的不同构造细节对节点性能的影响,为工程选用提供依据。所有试件的斜腹杆都采用连接板与柱内竖连接板通过8个10.9级M22摩擦型高强螺栓相连。其中,试件J1和J2上弦杆的上下翼缘都通过盖板与柱内的横隔板相连(上下翼缘分别有4个10.9级M22摩擦型高强螺栓),两者的差别在于:J2竖向连接板处底部的横隔板一侧外伸至竖连接板边缘,对其有侧向支撑作用,提高竖连接板面外抗弯能力,而J1没有外伸。试件J3与J1之间的差别在于上弦杆与柱的连接方式:J3是仅仅通过上弦杆腹板与柱内上部的竖向连接板通过4个10.9级M22摩擦型高强螺栓与柱相连,这种连接方式更简便,而J1是仅仅通过上弦杆上下翼缘与柱横隔板相连。

所有试件采用Q235B钢,柱子采用H400×400×13×21的H型钢,上弦杆采用300×200×8×14的焊接H形钢,斜腹杆采用150×150×8的方钢管,截面尺寸与工程设计需求匹配。试件的主要受力构件采用熔透焊与角焊缝的组合焊缝,非主要受力构件采用角焊缝。试件J1的斜腹杆通过4道焊缝与节点板连接,试件J2、J3的斜腹杆通过8道焊缝与节点板连接,以考察增加焊缝是否能改善斜腹杆插板式连接的受力性能。所有高强螺栓均施加预紧力至《钢结构设计标准》(GB50017—2017)<sup>[13]</sup>所规定的大小。

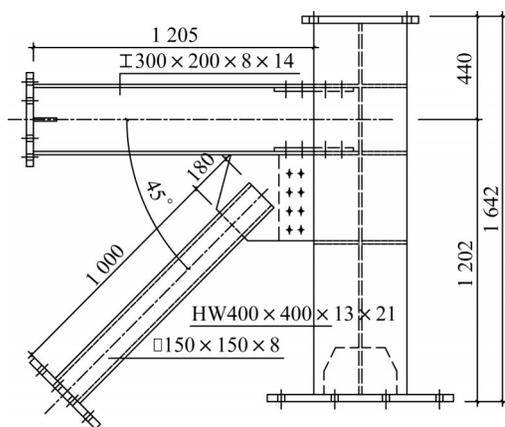


图3 3个节点共性部分的尺寸(单位: mm)

Fig. 3 Dimensions of the common part of three joints (unit: mm)

## 1.2 材性试验

对节点区域的构件进行了材性试验,按照钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T2975—2018)<sup>[14]</sup>的要求制备标准拉伸试样,试样与试验构件

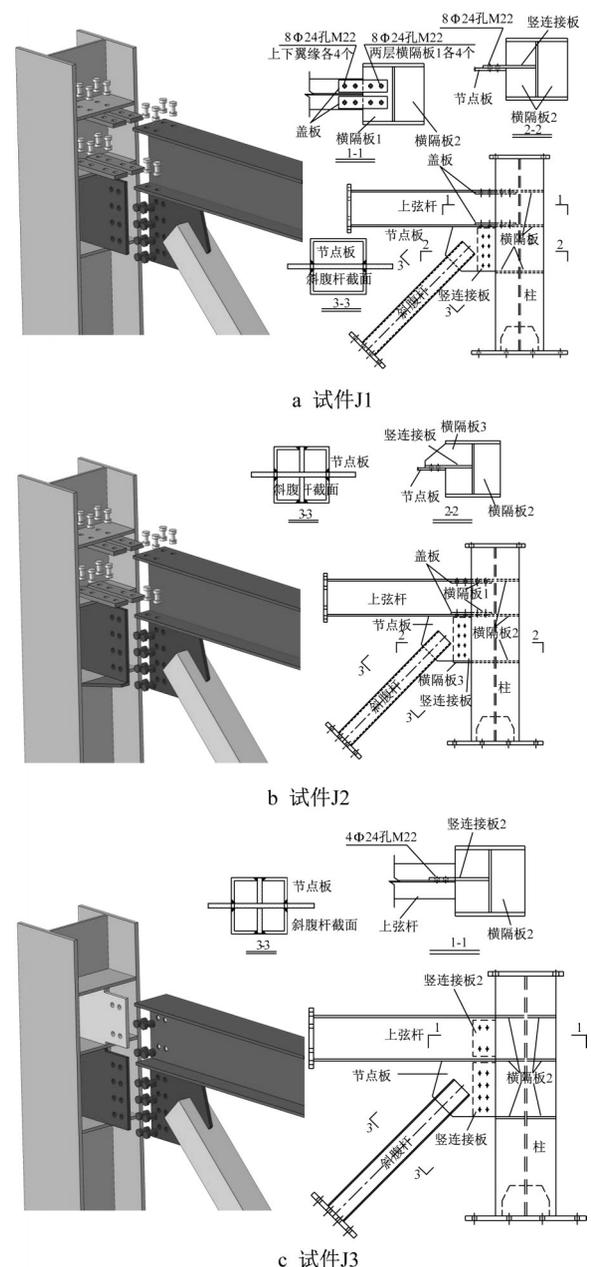


图4 三个节点在构造细节上的差异

Fig. 4 Structural differences between three joints

为同一批次钢材,每种板厚制作三个试样。

材性试验按照GB/T228.01—2010《金属材料拉伸试验:第1部分:室温试验方法》<sup>[15]</sup>进行,试验结果取平均值,汇总于表1,可见钢材的屈强比在0.63~0.68范围,伸长率在25.9%~27.6%范围,均满足《钢结构设计标准》(GB50017—2017)<sup>[13]</sup>中对于钢材屈强比和延伸率的要求。材性试验发现表1中厚度13 mm和21 mm钢板的测试屈服强度、抗拉强度比Q235钢材的名义屈服强度、抗拉强度偏高,这与厂家的钢产品制造有关,以往的钢板材性试验也经常有此类现象。

表 1 Q235B 钢材力学性能试验结果

Tab. 1 Experimental results of mechanical property of Q235B steel

部位	钢板厚度 /mm	屈服强度 $f_y$ /MPa	抗拉强度 $f_u$ /MPa	屈服应变 $\epsilon_y/10^{-6}$	峰值应变 $\epsilon_u/10^{-6}$	伸长率 $\delta/\%$	屈强比 $f_y/f_u$
斜腹杆	8	287	427	1 434	179 313	27.0	0.67
柱腹板	13	365	534	1 728	146 367	25.9	0.68
梁翼缘/横隔板	14	292	442	1 368	172 893	27.0	0.66
节点板/连接板	16	252	385	1 227	195 060	27.1	0.66
加劲肋	20	276	438	1 337	197 970	27.1	0.63
柱翼缘	21	343	518	1 656	154 840	27.6	0.66

1.3 试验加载装置与量测

如图 5 和图 6 及表 2 所示,节点试验的加载方案先后分为桁架节点试验和框架节点试验两种工况。桁架节点试验研究节点在正常工作状态下的受力性能,而框架节点试验则是探索节点在斜腹杆破坏失效后还具有怎样的受力性能和能力。

在桁架节点 T-J1、T-J2、T-J3 滞回试验中,试件柱底铰接,斜腹杆两端铰接。在柱顶采用 10 000kN 伺服作动器施加恒定的竖向轴力  $N$ (轴压比 0.4),作动器与柱顶铰接,柱顶同时有水平和竖向位移跟动装置。在上弦杆端部采用 500 kN 伺服作动器施加循环作用的水平轴力  $T$ ,向右推出为正向“+”,向左拉回为反向“-”(图 5a)。

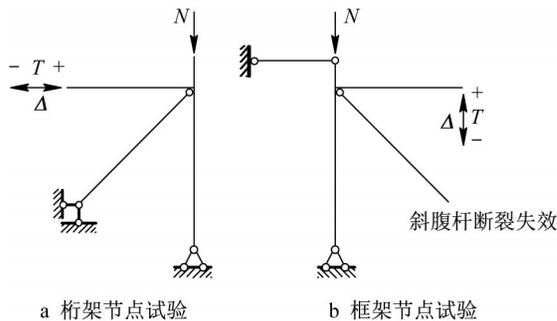


图 5 节点边界与加载图示

Fig. 5 Boundary conditions and loading patterns of joints

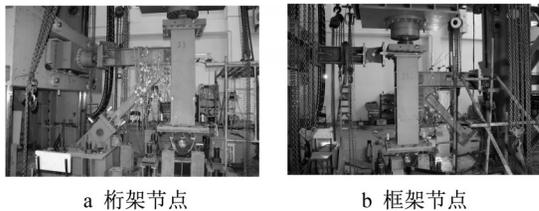


图 6 节点试验现场

Fig. 6 Experimental site of joints

在桁架节点滞回试验结束后,本文选择了 J1 和 J3 继续进行框架节点 F-J1 和 F-J3 的滞回试验,此时斜腹杆下端悬空,释放掉支座的约束,柱顶采用水平

连杆约束柱顶的水平位移,并有竖向位移跟动装置。在上弦杆端部采用竖向 500 kN 伺服作动器施加循环作用的竖向力  $T$ ,向上推出为正向“+”,向下拉回为反向“-”(图 5b),并设置上弦杆的面外支撑。其他情况维持不变。没有进行 J2 的框架节点滞回试验,是因为该节点的斜腹杆断裂破坏后,J2 的上弦杆与柱的连接方式与 J1 是完全相同的。

表 2 节点试验说明

Tab. 2 Outline of experiments of joints

节点试验代号	试件代号	节点构造	节点试验类型	滞回加载方式
T-J1	J1	图 4a	桁架节点试验	上弦轴力
T-J2	J2	图 4b	桁架节点试验	上弦轴力
T-J3	J3	图 4c	桁架节点试验	上弦轴力
F-J1	J1	图 4a	T-J1 试验后的框架节点试验	上弦剪力
F-J3	J2	图 4c	T-J3 试验后的框架节点试验	上弦剪力

注:代号 T 表示桁架, F 表示框架。

采用荷载-位移双控制的方法<sup>[16]</sup>进行加载,试件弹性阶段采用力控制逐级加载,每级荷载循环 1 圈,试件进入屈服后采用位移控制逐级加载,每级荷载循环 3 圈,如图 7 所示。在桁架和框架节点试验中,  $\Delta_y$  分别为试件屈服时上弦杆端的水平位移和竖向位移(图 5)。

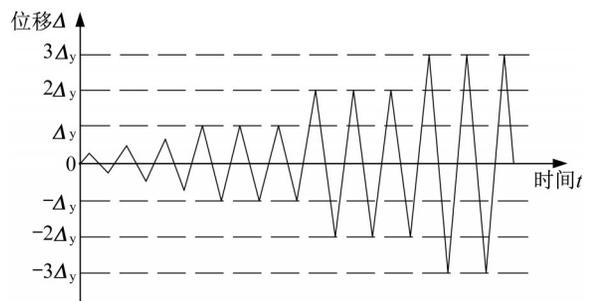


图 7 节点加载制度示意图

Fig. 7 Loading system for joints

节点试验前,应用 ABAQUS 对节点性能进行有限元预分析,得到节点的荷载-位移曲线,以节点刚

度下降至初始刚度的10%时的荷载和位移作为节点试验时参考的屈服荷载 $T_y$ 和屈服位移 $\Delta_y$ 。节点滞回试验过程中,当出现以下情况之一时,结束试验:①上弦杆端荷载下降至极限荷载的85%以下;②试件发生断裂或失稳,不能继续承载;③试件产生过大变形。

图8、图9分别给出了桁架节点和框架节点试验中位移计的布置情况。限于篇幅,图10仅给出桁架节点T-J1的单向和三向应变片布置情况(其他节点情况类似),涉及节点区域、上弦杆翼缘、上弦杆腹板、柱翼缘、柱腹板和斜腹杆等部位。

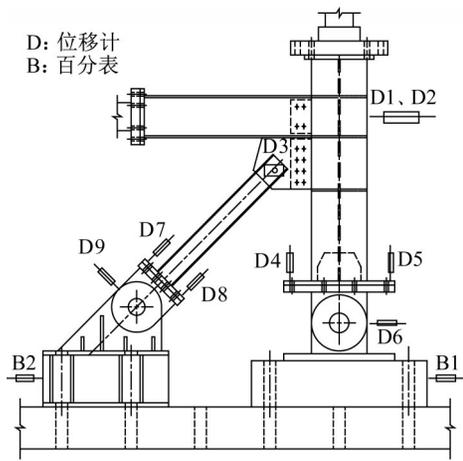


图8 桁架节点试验时位移计布置

Fig. 8 Layout of displacement meters during tests of truss joints

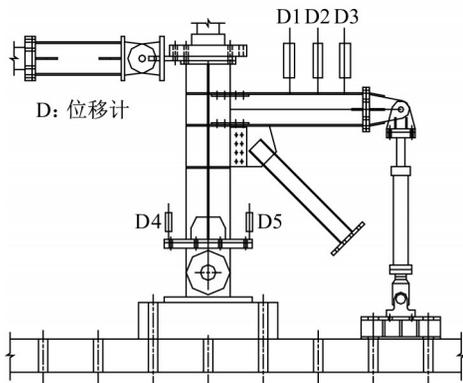


图9 框架节点试验时位移计布置

Fig. 9 Layout of displacement meters during tests of frame joints

## 2 节点试验的破坏过程和特征描述

### 2.1 节点T-J1

参见图11:①斜腹杆节点板上侧焊缝端部开裂;②上侧裂缝从端部沿焊缝扩展,下侧焊缝端部开始

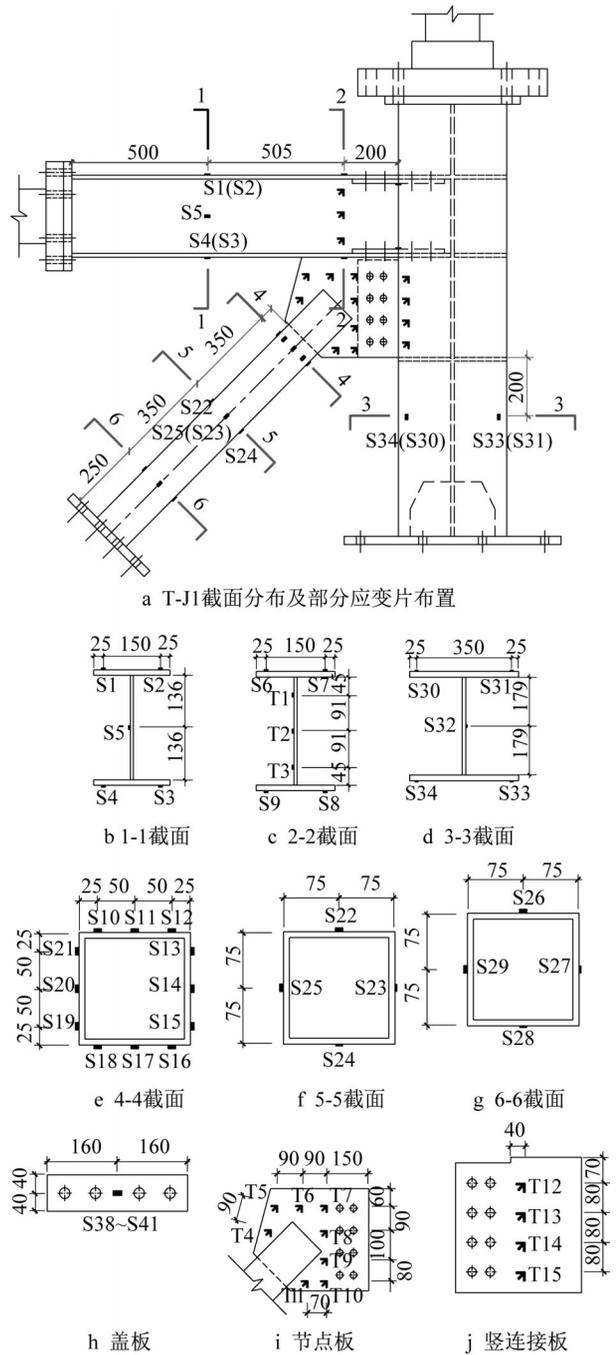


图10 桁架节点T-J1应变片布置(单位:mm)

Fig. 10 Layout of strain gauges in truss joint T-J1 (unit:mm)

出现裂纹;③上侧整条焊缝破坏。上弦杆上下翼缘及连接盖板未发生明显塑性变形,节点板发生一定的平面外弯曲。图11中序号的①、②、③与以上描述的顺序对应,余同。

### 2.2 节点T-J2

参见图12:①和②与节点T-J1相同;③斜腹杆在铰支座处局部失稳,塑性变形集中在该处;④斜腹杆在铰支座处被拉断。

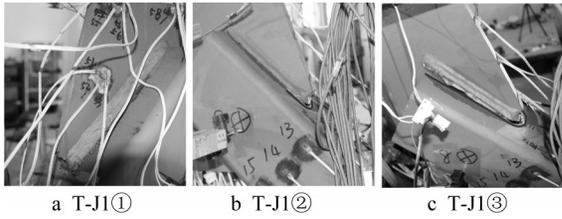


图11 节点T-J1破坏实况  
Fig. 11 Failure of Joint T-J1

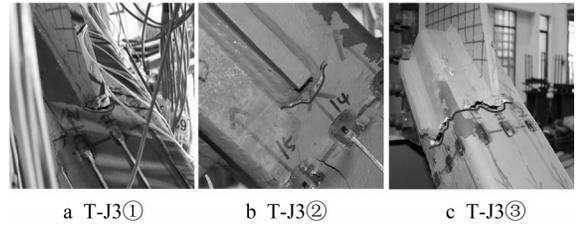


图13 节点T-J3破坏实况  
Fig. 13 Failure of Joint T-J3

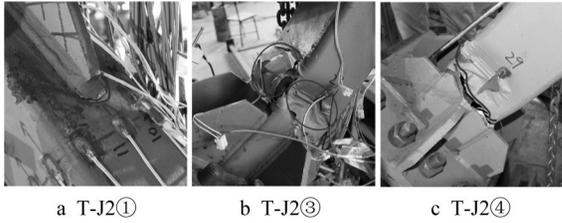


图12 节点T-J2破坏实况  
Fig. 12 Failure of Joint T-J2

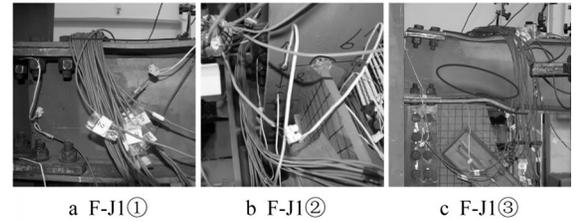


图14 节点F-J1破坏实况  
Fig. 14 Failure of Joint F-J1

2.3 节点T-J3

参见图13:①斜腹杆节点板焊缝端部开裂;②裂纹在节点板焊缝端部扩展,侧边焊缝端部开始出现裂纹,斜腹杆局部鼓曲;③上侧裂纹和侧边裂纹贯通,斜腹杆截面被拉断。上弦杆腹板以及与其相连的竖向连接板未发生明显塑性变形,节点板发生一定的平面外弯曲。

2.4 节点F-J1

参见图14:①上弦杆上翼缘局部屈曲;②上弦杆腹板局部屈曲,下翼缘与节点板端部的焊缝开裂;③上弦杆腹板近节点板处出现贯穿裂缝,上下翼缘和腹板明显屈曲。

2.5 节点F-J3

参见图15:①上弦杆上翼缘出现局部屈曲,下翼

缘连接板端部出现裂纹;②上弦杆腹板高强螺栓出现滑移;③腹板近节点板端部出现裂纹;④高强螺栓处腹板出现裂纹并扩展,腹板剪坏。

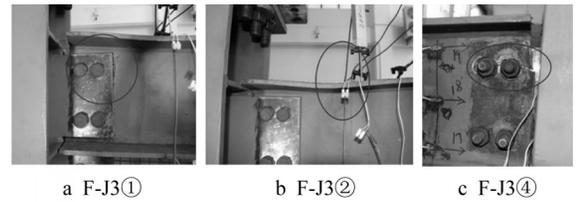


图15 节点F-J3破坏实况  
Fig. 15 Failure of Joint F-J3

将以上各节点的破坏特征汇总归纳于表3。

表3 各节点破坏特征汇总归纳

Tab. 3 Summary of failure features of joints

节点试验代号	破坏特征
T-J1	斜腹杆在节点板的上、下侧焊缝开裂破坏,节点板有一定的平面外弯曲
T-J2	斜腹杆在节点板的上、下侧焊缝开裂破坏,斜腹杆在支座处局部失稳、拉断
T-J3	斜腹杆在节点板的侧焊缝端部开裂,斜腹杆截面被拉断,节点板有一定的平面外弯曲
F-J1	上弦杆翼缘和腹板屈曲,上弦杆翼缘在节点板处开裂、腹板在靠近节点板处出现贯穿裂缝
F-J3	上弦杆上翼缘局部屈曲,下翼缘开裂,腹板螺栓滑移、开裂、剪切破坏

3 节点滞回性能分析

3.1 节点滞回曲线

图16为桁架节点T-J1、T-J2、T-J3的力T-位移Δ滞回曲线,其中T和Δ分别为上弦杆端部水平低周往

复轴向力和对应的位移。可见滞回曲线有以下特点:

(1)滞回曲线存在滑移段,这是由斜腹杆底部支座销轴的间隙滑移造成的;

(2)随着荷载的增加,刚度逐渐有所退化,这是由于斜腹杆部分截面开始进入塑性,部分焊缝出现

了裂纹,高强螺栓连接开始出现滑移;在卸载时,刚度基本保持弹性,与初始刚度大致相同;

(3)三种构造形式的节点承载力、初始刚度都基

本相同,这是因为它们的上弦杆轴力主要通过节点板向斜腹杆传递,在弹性阶段节点的构造差异对该传力路径的影响较小。

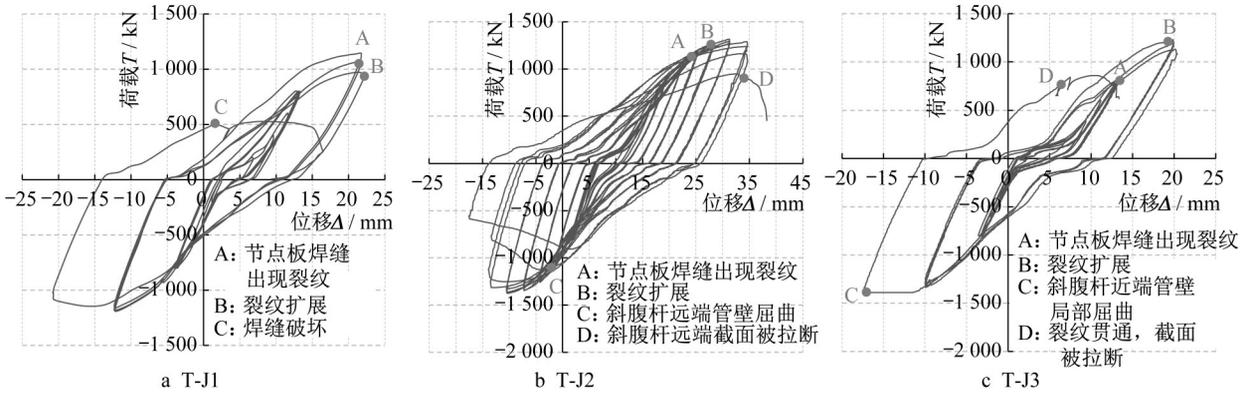


图 16 桁架节点的轴力-位移滞回曲线

Fig. 16 Axial force - displacement hysteretic curve of truss joints

图 17 为框架节点 F-J1 和 F-J3 的弯矩  $M$ -转角  $\theta$  滞回曲线,其中  $\theta$  为上弦杆与柱子之间的转角, $M$  为上弦杆与柱轴线交点处的弯矩,计算如下: $M = T \cdot L$ . 式中: $T$  为上弦杆端部竖向作用器的荷载值(图 6b); $L$  为上弦杆端部加载点至柱轴线的距离。由图 17 可见滞回曲线有以下特点:

(1)随着荷载的增加,切线刚度有从减小到增大再到变小的趋势,这是由于上弦杆与柱子连接的高强螺栓出现滑移,当螺栓滑移至螺栓孔边缘(上弦杆端部向下反向加载,参见图 5b)或上弦杆上翼缘和柱内横隔板接触(上弦杆端部向上正向加载)时,节点的刚度明显增加,荷载继续增大时,则部分板件开始屈曲,部分焊缝出现裂纹,节点刚度逐渐降低,而在

卸载时,刚度基本保持弹性,与初始刚度大体相同;

(2)对比图 17a 和图 17b 可见,当上弦杆端部向上正向加载时,两者的承载力、刚度、延性等基本一致;当上弦杆端部向下反向加载时,F-J3 节点的承载力和刚度明显小于 F-J1 节点。其机理在于,当向上加载时,随着螺栓的滑移,上弦杆上翼缘与柱内横隔板相接触(图 4a),直接传递压力,两者此时的主要传力路径基本相同;而当向下加载时,F-J1 上翼缘拉力通过盖板传到柱内横隔板上,F-J3 的弯矩通过上弦杆的腹板高强螺栓连接(上下翼缘没有盖板连接)传递到节点板,再通过高强螺栓传至柱内竖向连接板,承受弯矩能力弱、传力路径长。

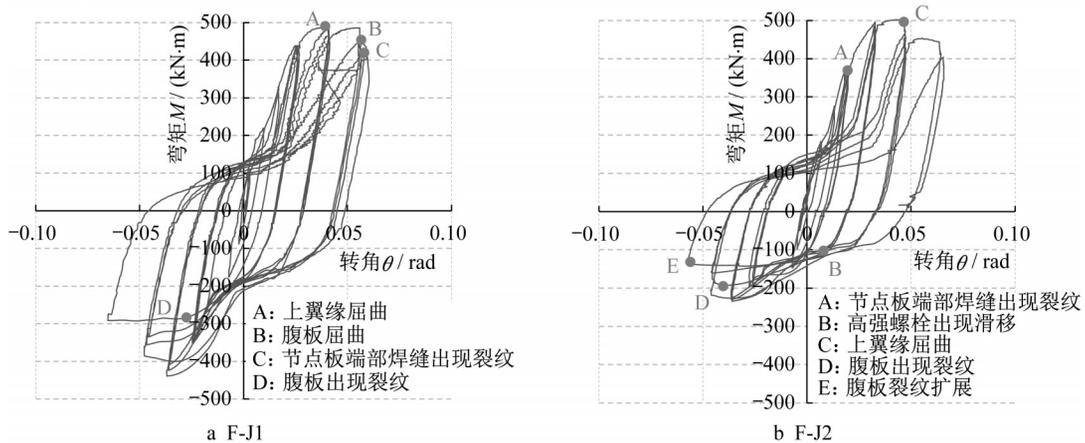


图 17 框架节点的弯矩-转角滞回曲线

Fig. 17 Moment-rotation hysteretic curve of frame joints

### 3.2 节点骨架曲线

骨架曲线是滞回曲线内各加载级第一循环的峰值点所连成的包络线,是每级加载所能达到最大荷载的轨迹。骨架曲线能够基本反映节点在不同受力阶段的力学特性,包括初始刚度、最大承载力及延性

等性能。图18a和图18b分别给出了桁架节点和框架节点试验的骨架曲线,可见三种构造形式(图4)的节点在桁架节点和框架节点受力模式下,初始刚度都基本一致。

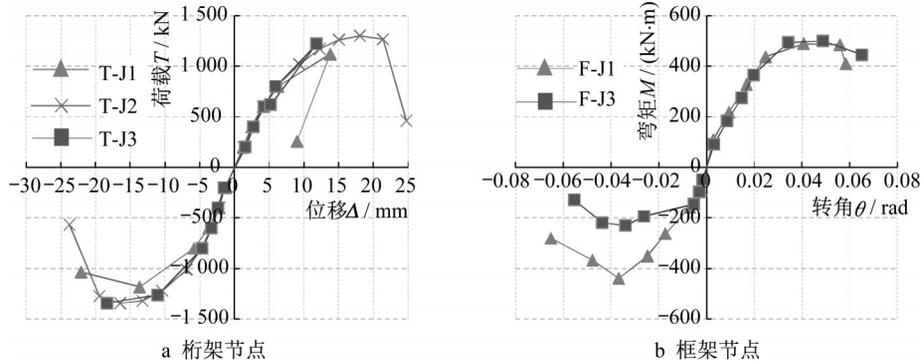


图18 节点滞回骨架曲线

Fig. 18 Skeleton hysteretic curves of joints

### 3.3 节点承载能力

本文参考《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101—2015)<sup>[16]</sup>,针对图18的桁架节点的骨架曲线,采用Park<sup>[17]</sup>的方法(图19)来确定节点的屈服荷载 $T_y$ 和位移 $\Delta_y$ 、极限荷载 $T_{max}$ 和位移 $\Delta_{max}$ 、破坏荷载 $T_u$ 和位移 $\Delta_u$ ,其中定义节点破坏荷载 $T_u = 0.85T_{max}$ ,相应的节点位移为破坏位移 $\Delta_u$ ,详见见表4所示。

采用相同的方法来确定框架节点的屈服弯矩

$M_y$ 和转角 $\theta_y$ 、极限弯矩 $M_{max}$ 和转角 $\theta_{max}$ 、破坏弯矩 $M_u$ 和转角 $\theta_u$ ,详见表5所示。

由表4可知,在桁架节点试验中,三种构造形式的节点在极限状态及其之前(包括正、反向加载)总体上差别不大,相对来说,节点T-J2和T-J3的极限承载力比T-J1高一些,这是因为T-J2和T-J3的斜腹杆在节点板处采用了8道焊缝,而T-J1采用了4道焊缝。在破坏阶段,正、反向加载的承载力差别较大,这是因为

表4 桁架节点骨架曲线的特征点

Tab. 4 Characteristic points on skeleton curve of truss joints

节点试验代号	加载方向	屈服状态		极限状态		破坏状态	
		$T_y$ /kN	$\Delta_y$ /mm	$T_{max}$ /kN	$\Delta_{max}$ /mm	$T_u$ /kN	$\Delta_u$ /mm
T-J1	正向	920	9.55	1 122	13.81	258	9.02
	反向	-960	-9.13	-1 183	-13.68	-1 035	-22.08
T-J2	正向	1 130	11.47	1 302	18.06	461	24.78
	反向	-1 145	-9.08	-1 343	-16.47	-567	-23.76
T-J3	正向	1 090	10.05	1 222	11.86	622	5.23
	反向	-1 190	-10.02	-1 344	-18.34	—	—

注:“—”表示该方向承载力在试验结束时依然大于极限荷载的0.85倍,无破坏状态数据。

表5 框架节点骨架曲线的特征点

Tab. 5 Characteristic points on skeleton curve of frame joints

节点试验代号	加载方向	屈服状态		极限状态		破坏状态	
		$M_y$ /(kN·m)	$\theta_y$ /rad	$M_{max}$ /(kN·m)	$\theta_{max}$ /rad	$M_u$ /(kN·m)	$\theta_u$ /rad
F-J1	正向	443	0.026 8	489	0.040 7	401	0.058 3
	反向	-385	-0.030 5	-439	-0.036 7	-280	-0.065 2
F-J3	正向	440	0.028 0	500	0.048 8	445	0.065 1
	反向	-190	-0.023 2	-230	-0.033 9	-217	-0.055 3

注:破坏状态取承载力下降阶段经过0.85倍极限荷载后的第一个点。

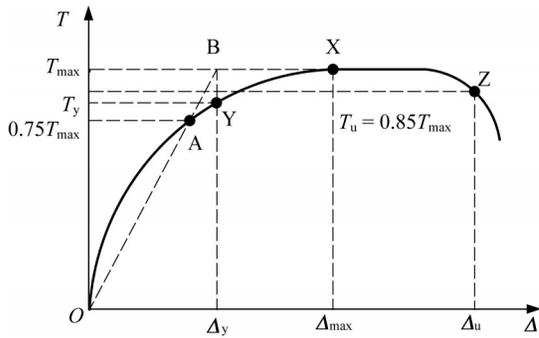


图 19 节点骨架曲线的特征点确定方法

Fig. 19 Determination of characteristic points on skeleton curve

正向加载时斜腹杆受拉,斜腹杆开裂则难以承载,而反向加载时斜腹杆受压,开裂可继续承载。

由表 5 可见,框架节点试验中节点 F-J1 和 F-J3 的承载力表现出正向加载基本一致、反向加载差异较大的特点,并且, F-J1 在到达极限状态及其以前的承载力在正、反向加载时基本相同,这是由于上弦杆滞回受弯下两种节点构造差异造成的(图 5a 和 5c), F-J1 的上弦杆在上下翼缘都有盖板与柱子连接,正向和反向都能可靠抗弯,而 F-J3 的上弦杆通过腹板与柱子连接,正向受弯时一定程度上可通过上翼缘与横隔板受压顶紧传力,而反向受弯时上翼缘脱开,抗弯能力显著减弱。

表 6 和 7 分别给出了桁架节点、框架节点的极限承载力试验值与理论计算值的对照,可见试验值均大于按照构件全截面屈服强度(采用材性试验实测值)计算的理论值(F-J3 反向加载除外)。

表 6 桁架节点承载力试验值与理论值对照

Tab. 6 Loading capacity of truss joints between test and theory

节点试验代号	上弦杆极限轴力 试验值 $T_{max,ex}/kN$		斜腹杆全截面 屈服荷载理论值 反算上弦杆轴力 $T_{p,th}/kN$
	正向	反向	
T-J1	1 122	-1 182	932
T-J2	1 301	-1 343	
T-J3	1 221	-1 344	

表 7 框架节点承载力试验值与理论值对照

Tab. 7 Loading capacity of frame joints between test and theory

节点试验代号	上弦杆极限弯矩 试验值 $M_{max,ex}/(kN\cdot m)$		上弦杆全截面 屈服弯矩 理论值 $M_{p,th}/(kN\cdot m)$
	正向	反向	
F-J1	321	-288	277
F-J3	328	-151	

3.4 节点延性

延性系数是反映结构塑性变形性能和衡量抗震性能的重要指标。由表 4 的位移和表 5 的转角数据,可分别计算得到桁架节点位移延性系数  $\mu$  和框架节点转角延性系数  $\mu_\theta$ <sup>[18]</sup>,列于表 8、表 9。

表 8 桁架节点的位移延性系数

Tab. 8 Displacement ductility coefficient of truss joints

节点试验代号	加载方向	$\mu = \Delta_u/\Delta_y$
T-J1	正向	1.45
	反向	2.42
T-J2	正向	2.16
	反向	2.62
T-J3	正向	1.18
	反向	1.83*

注:“\*”表示因表 4 无可用的  $\Delta_u$ ,则取  $\Delta_{max}$  计算  $\mu$

表 9 框架节点的转角延性系数

Tab. 9 Rotation ductility coefficient of fasting joints

节点试验代号	加载方向	$\mu_\theta = \theta_u/\theta_y$
F-J1	正向	2.17
	反向	2.14
F-J3	正向	2.33
	反向	2.38

由表 8 可见,三个桁架节点的位移延性系数  $\mu$  在 1.18~2.62 范围, T-J2 的延性系数相对高一些。总体上说,在桁架节点受力模式下延性一般,这源于斜腹杆在节点板焊接处开裂及其扩展带来的不利影响,因此,降低焊接部位的应力集中、控制焊接质量有助于提高节点的延性。

由表 9 可见,框架节点的转角延性系数  $\mu_\theta$  在 2.14~2.38 范围。另外,参照我国《建筑抗震设计规范》GB50011—2010 规定<sup>[19]</sup>,多、高层钢结构弹性和弹塑性层间位移角限值分别为:  $[\theta_e] = 1/250 =$

0.004 和  $[\theta_p]=1/50=0.02$ 。表6的弹性极限层间位移角  $\theta_y$  和弹塑性极限位移角  $\theta_u$  都能分别超过  $[\theta_e]$  和  $[\theta_p]$  限值,表明当桁架节点的斜腹杆破坏失效后,空腹节间形成的框架节点仍有较大的变形能力。

### 3.5 节点耗能能力

滞回曲线所包围的面积反映了结构从加载开始至破坏时所消耗能量的大小,是抗震性能好坏又一个衡量指标。根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJT101—2015)<sup>[18]</sup>的规定,耗能能力可用等效粘滞阻尼系数  $h_e$  或能量耗散系数  $E$  来衡量,本文采用后者按照图20和计算公式(1)来评价。

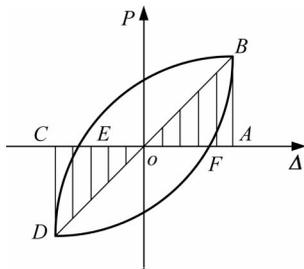


图20 荷载-位移曲线包络线

Fig. 20 Envelope of load-displacement curve

$$E = \frac{S_{FBED}}{S_{AOB} + S_{COD}} \quad (1)$$

式中:  $S_{FBED}$  表示滞回圈包络线面积( $FBED$ );  $S_{AOB}$  表示三角形面积( $AOB$ );  $S_{COD}$  三角形面积( $COD$ )。

表10给出了由式(1)计算得到的节点能量耗散系数  $E$ , 可见当桁架节点的斜腹杆破坏失效后,空腹节间形成的框架节点仍有较好的耗能能力,且比桁架节点具有更高的能量耗散系数。

表10 节点能量耗散系数

Tab. 10 Energy dissipation coefficient of joints

节点试验类型	节点代号	能量耗散系 $E$
桁架节点	T-J1	1.622
	T-J2	1.695
	T-J3	1.334
框架节点	F-J1	2.301
	F-J3	2.181

## 4 结论

本文针对交错桁架与柱子装配式连接的特点和工程应用需要,试验研究了交错桁架的上弦杆、斜腹杆与柱子三种连接构造(J1、J2和J3)的节点滞回性能,获得以下结论:

(1)先期桁架节点受循环轴力的滞回试验揭示三种连接构造的节点总体来讲,承载力、初始刚度较高,延性、耗能能力一般,连接构造上的差异没有对节点性能产生大的影响。

(2)三种连接构造的节点均发生了斜腹杆端部与竖向节点板焊接处的开裂及其裂纹扩展,是节点的薄弱环节,造成斜腹杆破坏失效,这源于该处构造的应力集中以及斜腹杆的偏心引起附加弯矩,导致该处应力远高于其他部位,且焊接部位的钢材韧性有所下降。

(3)斜腹杆在节点板设置8道焊缝的节点J2和J3,虽然仍旧在焊接处开裂,但是比设置4道焊缝的节点J1具有高一些的承载力,这源于焊缝增多的斜腹杆轴力在节点板处传力扩散得到改善。

(4)节点J2的竖向连接板处底部横隔板一侧外伸至竖连接板边缘的构造处理,起到了侧向支撑作用,限制了竖向连接板和节点板的面外弯曲,提高了节点域的整体性和面外刚度,降低了应力,缓解了节点板的裂纹开展。

(5)在斜腹杆破坏失效、退出工作后,后续框架节点受循环弯矩的滞回试验揭示节点仍能承载,且具有较高的抗弯承载力,耗能能力比开始的桁架节点受力状况好。

(6)节点J1与J3上弦杆与柱子不同的连接构造方式对节点抗弯滞回性能有着重要的差别,节点J1上弦杆通过上下翼缘的连接方式明显优于节点J3通过腹板连接的方式,J1能够可靠地承受正向和反向作用的弯矩,J3承受反向弯矩作用的能力显著降低。

(7)在水平地震作用下,本文讨论的交错钢桁架-柱装配式节点的斜腹杆容易发生焊接部位的断裂破坏,抗震设计时可适当考虑该节点退化为空腹节间形成框架节点的抗震能力,建议上弦杆与柱子的连接方式采用节点J2(优先)或J1那样上弦杆翼缘连接的构造方式,确保上弦杆弯矩可靠地传递到柱子。

### 作者贡献声明:

童乐为:本合作课题同济大学一方负责人,试验方案细节制定者、指导试验者开展研究。

黄俊峰:试验实施、试验数据分析者。

余鹏:试验实施、试验数据分析者。

王平山:本合作课题华东建筑设计院一方负责人,研究对象和要求制定者。

徐继东:结构及节点分析设计、试验方案提出者。

崔家春:结构及节点分析设计、试验方案提出者。

## 参考文献:

- [1] SCALZI J B. The staggered-truss system: structural considerations [J]. *Engineering Journal*, AISC, 1971, 8(10): 138.
- [2] BASHA H S, GOEL S C. Special truss moment frames with Vierendeel middle panel [J]. *Engineering Structures*, 1995, 17(5): 352.
- [3] 梁启智,梁平. 高层建筑跳层桁架体系侧力作用的结构分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1996(6): 61.  
LIANG Qizhi, LIANG Ping. Structural analysis of lateral forces of staggered truss system in tall buildings [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 1996(6): 61.
- [4] 潘英,周绪红. 交错桁架体系的抗震性能动力分析[J]. 土木工程学报, 2002(4): 12.  
PAN Ying, ZHOU Xuhong. Aseismic behavior of the staggered-truss system [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002(4): 12.
- [5] 周绪红,周期石. 水平荷载作用下交错桁架结构的内力和侧移计算[J]. 建筑结构学报, 2004(4): 66.  
ZHOU Xuhong, ZHOU Qishi. Calculation of internal forces and drift of staggered truss structure under lateral loads [J]. *Journal of Building Structures*, 2004(4): 66.
- [6] 周绪红,莫涛,刘永健,等. 高层钢结构交错桁架结构的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006(5): 86.  
ZHOU Xuhong, MO Tao, LIU Yongjian, *et al.* Experimental study on high-rise staggered truss steel structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2006(5): 86.
- [7] 卢林枫,顾强,苏明周,等. 钢结构错列桁架节点构造与设计要点[J]. 工业建筑, 2005(7): 83.  
LU Linfeng, GU Qiang, SU Mingzhou, *et al.* Joint texture and design main points of steel staggered truss [J]. *Industrial Construction*, 2005(7): 83.
- [8] 李启才,何若全,顾强,等. 交错桁架体系中桁架与柱的连接节点设计方法研究[J]. 建筑钢结构进展, 2008(4): 39.  
LI Qicai, HE Ruoquan, GU Qiang, *et al.* Design method on truss to column joint in staggered-truss system [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2008(4): 39.
- [9] 中国工程建设标准化协会. 交错桁架钢框架结构技术规程: CECS 323: 2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.  
China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for staggered truss steel framing system: CECS 323: 2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 交错桁架钢结构设计规程: JGJ/T 329—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. Specification for design of staggered steel truss framing systems: JGJ/T 329—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [11] 孙艳文,胡零松,连鸣,等. 装配式交错桁架上弦与柱连接节点静力性能试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(7): 34.  
SUN Yanwen, HU Lingsong, LIAN Ming, *et al.* Experimental study on static performance of connected joints of top chord of fabricated staggered truss with column [J]. *Building Structure*, 2018, 48(7): 34.
- [12] 孙艳文,仇杰,连鸣,等. 装配式交错桁架上弦与柱连接节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(7): 39.  
SUN Yanwen, QIU Jie, LIAN Ming, *et al.* Experimental research on seismic behavior of connected joints of top chord of fabricated staggered truss with column [J]. *Building Structure*, 2018, 48(7): 39.
- [13] 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, 2018.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [14] 冶金工业信息标准研究院. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
China Metallurgical Information and Standardization Institute. Steel and steel products—location and preparation of samples and test pieces for mechanical testing: GB/T 2975—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [15] 中国钢铁工业协会. 金属材料拉伸试验: 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.01—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
China Iron and Steel Association. Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.01—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—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. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [17] Park R. State of the art report ductility evaluation from laboratory and analytical testing [C]//Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo, Kyoto, Japan: [s.n.], 1988: 605-616.
- [18] 冯远,罗涛,钱若军,等. 钢框架节点抗震性能评价方法的研究 [C]//第四届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津: [s.n.], 2004: 231-234.  
FENG Yuan, LUO Tao, QIAN Ruojun, *et al.* Study on evaluation method of seismic performance of steel frame joints [C]//The 4th National Symposium on Modern Structural Engineering. Tianjin: [s.n.], 2004: 231-234.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.