

使用改进端板连接节点的钢框架力学性能试验研究

方 瑜¹ 吴祖咸¹ 于 明¹ 段 雄² 罗金辉² 郭小农^{2,*}

(1. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 杭州 310000; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘 要 目前常见的端板节点只能在强轴方向连接 H 型钢柱和 H 型钢梁, 本研究设计了一种改进的端板节点, 该节点通过在 H 型钢柱弱轴方向设置特殊加劲肋, 使得两个方向的框架梁能够通过完全相同的端板节点与框架柱进行连接。本文旨在探究特殊加劲肋对框架强轴方向力学性能的影响。分别设计了一个有支撑和一个无支撑的单层单榀钢框架, 两榀框架均使用改进节点进行连接。对框架进行了单调侧向荷载作用下的力学性能试验, 分析了两个试件的内力和变形。研究表明, 使用改进端板节点的框架节点核心区的剪切变形明显减小; 支撑的存在会显著提升框架的刚度和承载力, 但会使得框架的破坏模式从端板弯曲转变为支撑的净截面拉断, 严重削弱了框架的延性。

关键词 钢框架, 端板节点, 刚度, 极限承载力, 延性

中图分类号: TU352.1 文献标志码: A DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0015

Experimental Study on Mechanical Performance of Steel Frame Connected by Improved End-Plate Joint

FANG Yu¹ WU Zuxian¹ YU Ming¹ DUAN Xiong² LUO Jinhui² GUO Xiaonong^{2,*}

(1. Zhejiang Huayun Power Engineering Design Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract At present, conventional end-plate connections can only join H-shaped steel beams to the strong axis of H-shaped steel columns. This paper presents an improved end-plate connection: by installing special stiffeners in the weak axis direction of the H-shaped steel column, frame beams in both directions can be connected to the column using identical end-plate joints. The study focuses on examining the influence of these special stiffeners on the mechanical behavior of the frame along its strong axis. Two single-story, single-bay steel frames—one braced and one unbraced—were designed, both incorporating the improved connection. Monotonic lateral loading tests were carried out to assess the mechanical performance, and the internal forces and deformations of the two specimens were analyzed. Results indicate that the shear deformation in the joint core area is significantly reduced when using the improved end-plate connection. The addition of bracing notably enhances the stiffness and load-bearing capacity of the frame; however, it also alters the failure mode from bending of the end-plate to tensile fracture of the brace net section, which substantially reduces the ductility of the frame.

Keywords steel frame, end-plate joint, stiffness equation, ultimate bearing capacity, ductility

收稿日期: 2025-06-03

作者简介: 方 瑜, 男, 正高级工程师, 研究方向为变电站土建设计。E-mail: 5008239@qq.com

* 联系作者: 郭小农, 男, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为铝合金结构和钢结构。E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

0 引言

端板节点是钢结构梁柱连接中常用的节点形式,普通的端板节点被认为是半刚性节点,可以传递剪力和弯矩,有一定的转动变形能力,根据建筑结构的实际需求,也可通过各种构造措施实现端板节点的刚接或铰接^[1]。

目前,众多学者针对端板节点的力学性能及设计方法开展了系统研究。刘卫然等^[2]对钢框架平齐端板节点(端板厚度小于规范构造要求)进行了试验与参数分析,结果显示其主要破坏模式包括柱翼缘屈曲、端板翘曲、螺栓拉断等,且极限抗弯承载力和延性系数随端板厚度、柱翼缘厚度及螺栓直径的增加而提升。熊川等^[3]通过试验研究与数值模拟梁柱齐平端板半刚性节点的力学性能,探究了各参数对节点弯矩-转角曲线的影响,发现端板厚度对节点力学性能影响较小,而增大柱翼缘尺寸或增设加劲肋可显著提高节点承载力。施刚等^[4-5]针对端板节点连接的钢框架抗震性能开展试验研究,提出了节点“强连接、弱板件”的设计原则。Wang 等^[6]对采用单边螺栓连接的方钢管柱-H型钢梁端板节点进行单调拉伸试验与数值模拟,评估了节点在拉力作用下的屈服强度、极限强度及单边螺栓的工作性能,结果表明柱翼缘宽厚比和螺栓规格对节点性能影响显著,不同节点最终呈现三种不同的破坏模式。Merad Boudia 等^[7]对带加劲肋的外伸式端板节点进行数值模拟与参数分析,研究了端板加劲肋、柱加劲肋、螺栓直径及端板厚度对节点力学性能的影响,发现端板加劲肋、柱加劲肋和端板厚度对节点初始刚度及极限承载力影响较大,螺栓直径则会改变节点的破坏模式。Fan 等^[8]对采用穿芯螺栓的平齐式端板节点和外伸式端板节点进行往复加载试验,提出了节点承载力计算公式。姜晓明等^[9]对螺纹锚固单边螺栓端板连接节点的弯剪作用性能进行了试验研究,结果表明剪力对节点的力学性能影响更大。刘维泉等^[10]对使用T形方颈单边螺栓连接的端板节点进行了数值模拟和参数分析,提出了适用于实际工程的节点构造措施。

已有学者对带加劲肋的端板节点的力学性能和破坏模式进行了研究,但加劲肋的形式仍然局限于单一的平板式加劲肋,使用这种加劲肋的端板节点只能在强轴方向连接H型钢柱和H型钢

梁,应用存在一定的局限性。对于本文采用的十字形加劲肋和盖板,目前还没有学者研究过该构造对端板节点连接钢框架的影响。为此,本文分别设计了一个有支撑和一个无支撑的单层单榀钢框架,两榀框架均使用改进节点进行连接,对框架进行了水平方向的单调加载试验,研究改进端板节点对框架力学性能和破坏模式的影响。

1 试验概况

1.1 节点设计

传统的端板节点构造如图1(a)所示,在框架柱主轴方向上,端板与梁焊接,然后与柱翼缘之间采用螺栓连接,并且在框架柱上梁翼缘对应位置处焊接加劲肋以提高节点的力学性能。然而这种连接节点的构造形式不便于框架柱弱轴方向与框架梁的连接,通常情况下只能将加劲肋扩大,通过焊接连接弱轴方向的框架梁翼缘。为此,本文对加劲肋的形式进行了改进,如图1(b)所示,将传统节点中板式的两块加劲肋改为十字形加劲肋,加劲肋与柱翼缘平齐,然后在外部焊接一块盖板,通过盖板上的螺栓孔即可实现弱轴方向的端板节点连接。

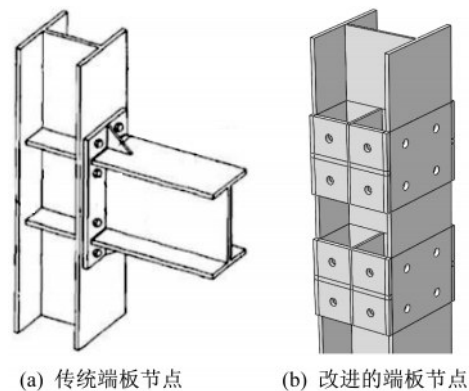


图1 端板节点构造

Fig.1 Configuration of the end-plate joint

2.2 试件设计

为研究使用改进节点的钢框架主轴方向的性能,设计了一个不带支撑的纯框架和一个交叉支撑的框架,如图2所示。框架柱截面为H200×200×6×10,长度为2.95 m,节点区中心高度为2.52 m,框架梁截面为H280×150×6×10,长度为3 m,支撑截面为[100×50×3×3,长度3.55 m,支撑中心线与节点区中心点和柱底中心点连线重合。

整个框架中的所有构件均采 Q355b 钢材制造, 框架梁柱节点采用 8.8 级 M16 高强螺栓连接, 支撑与框架采用 10.9 级 M22 螺栓连接。

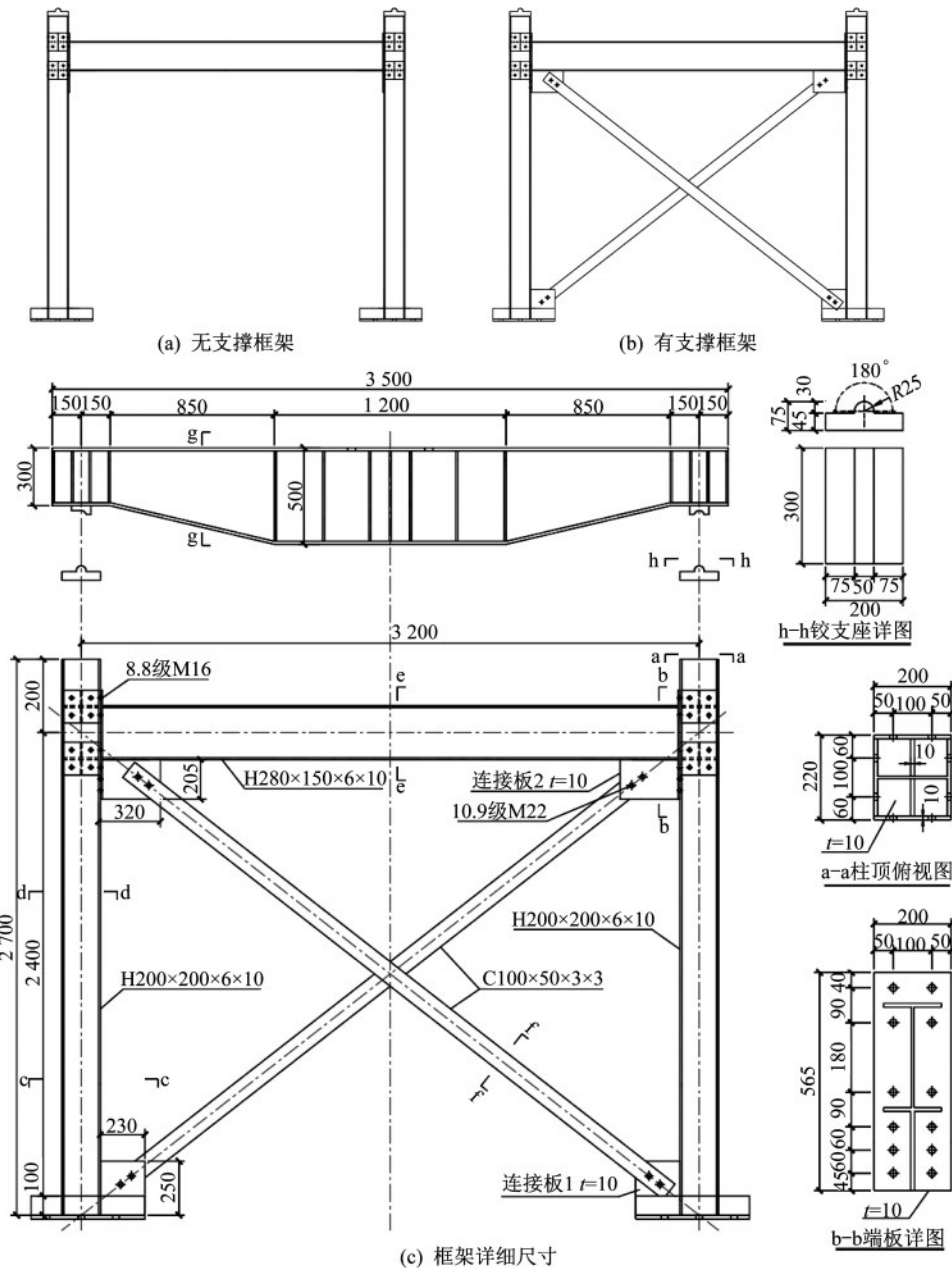


图2 试件加工图

Fig.2 Fabrication drawing of the specimens

2.3 加载装置

本试验采用的加载装置为 10 000 kN 多功能结构试验系统, 如图 3 所示。试验中, 竖直方向需要施加荷载 1 300 kN, 节点区中心水平方向施加强制位移 100 mm, 水平方向最大反力约为 320 kN, 完全在试验系统可提供的荷载和变形范围内。实际试验时还在框架柱和框架梁平面外设置水平约

束装置用于约束框架的面外变形, 防止框架发生平面外失稳。

2.4 加载制度

试验加载包括预加载和正式加载两个阶段。

预加载时, 首先在竖直方向上施加 500 kN 的力, 观察框架柱上各个应变片读数, 判断加载点是否对中; 然后水平方向上施加 5 mm 的强迫位移,

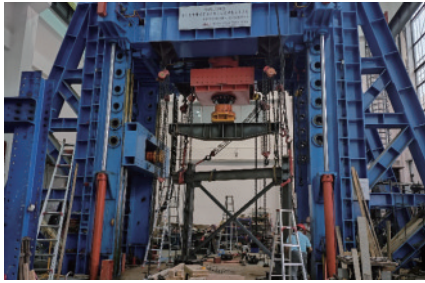


图3 加载装置

Fig.3 Loading device

观察各个测点的读数是否正常。预加载完成后先进行水平方向的卸载,然后再进行垂直方向的卸载。

正式加载时,首先在垂直方向上施加 1 400 kN 的力,加载速率为 100 kN/min,加载完成后每根柱的轴压比为 0.35。竖向力施加完成后持荷 5 min, 然后进行水平方向的加载。水平方向加载采用位

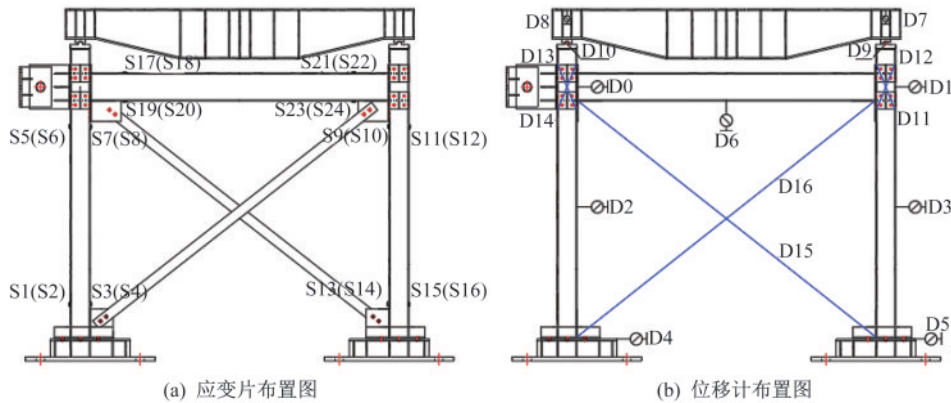


图4 测点布置图

Fig.4 Layout of measuring points

3 试验现象

3.1 无支撑框架

在第八级荷载(35~40 mm)加载过程中,监测设备上节点区中心的荷载-位移曲线斜率有较大的下降,试件在该过程中屈服,结合应变数据可知,此阶段柱脚应变为 0.002 5 左右,已经屈服,说明试验中框架的屈服源于框架柱柱脚板件的屈服,而初始屈服发生在第七级荷载(30~35 mm)加载过程中;水平位移为 68 mm 左右时,试件达到极限承载力;后续加载过程中,试件的承载力开始下降,降至 85% 时停止加载,此时框架的侧移约为 90 mm。此时观察试验现象,发现节点区端板被完全拉开,如图 5(a)所示,可以认为这是试验中无支撑框架的破

坏原因,将试件拆开,可以看到连接节点的高强螺栓没有发生破坏,如图 5(b)所示;节点区端板有明显的弯曲,如图 5(c)所示。此外还需要说明的是,整个加载过程中,位移测点 D9 和 D10 显示无支撑框架几乎没有发生平面外的变形。

移控制,单调分级加载,每一级荷载 5 mm,以 D0 和 D1 读数的平均值为准,试件屈服之前加载速率为 2 mm/min,屈服之后为 4 mm/min。

试验中停止加载的标准包括:①试件承载力降低至极限承载力的 85%;②节点区螺栓拉断;③框架平面外变形超过 5 mm。

2.5 测点布置

试验中主要采用的测点有应变片和位移计。应变片的布置如图 4(a)所示,S1—S24 位于梁柱端部的翼缘外侧。位移计的布置如图 4(b)所示,其中 D0—D5 用于监测框架柱的变形,D6 监测框架梁的跨中挠度,D7 和 D8 监测柱顶竖向变形,D9 和 D10 监测柱顶面外变形,D11—D14 监测节点区的变形,D15 和 D16 监测框架整体的变形,两榀框架位移计的布置相同。

坏原因,将试件拆开,可以看到连接节点的高强螺栓没有发生破坏,如图 5(b)所示;节点区端板有明显的弯曲,如图 5(c)所示。此外还需要说明的是,整个加载过程中,位移测点 D9 和 D10 显示无支撑框架几乎没有发生平面外的变形。

3.2 有支撑框架

在第七级荷载(30~35 mm)加载过程中,监测设备上节点区中心的荷载-位移曲线斜率有较大的下降,试件在该过程中发生屈服,结合支撑上的应变数据和试验过程中拍摄的视频,此阶段内受压支撑发生面外失稳,如图 6(a)所示,说明试验中框架的屈服是由于受压支撑的屈曲导致的;水平位移为 60 mm 左右时,试件承载力达到极限;此后一级荷载加载过程中,试件的承载力迅速下降,

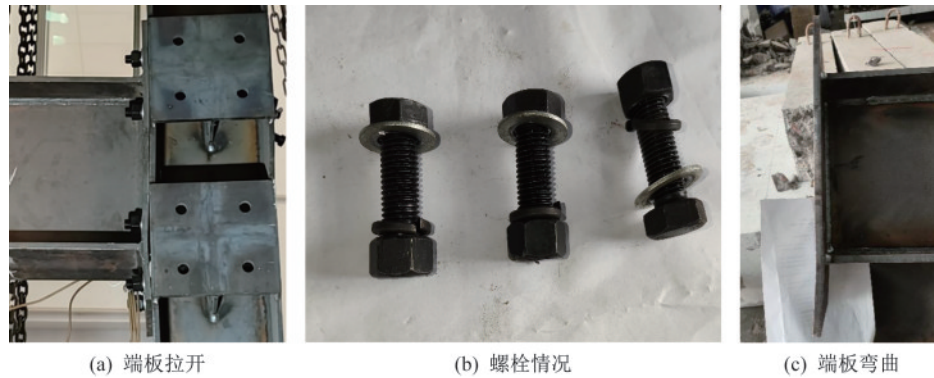


图5 无支撑框架试验现象

Fig.5 Test phenomena of the unbraced frame

降至 85% 时停止加载。此时观察试验现象,可以发现受拉支撑发生螺栓孔处净截面的拉断,如图 6(b)、(c)所示;支撑端部在拉力的作用和高强螺栓的约束下发生了严重翘曲,如图 6(d)所示;框架梁柱节点内的端板基本没有发生变形,如图 6(e)所示;螺栓也没有被拉断,如图 6(f)所示,说明

试验中框架的破坏模式为受拉支撑的净截面拉断;试验结束后,受压支撑出现明显的整体失稳,支撑中部面外的残余变形约为 210 mm,如图 6(g)所示。此外还需要说明的是,整个加载过程中,位移测点 D9 和 D10 显示有支撑框架几乎没有发生平面外的变形。



图6 有支撑框架试验现象

Fig.6 Test phenomena of the braced frame

4 试验结果分析

4.1 荷载-位移曲线

本研究绘制了两榀框架水平荷载-节点区中心水平位移的曲线,如图 7 所示。从荷载-位移曲

线上提取了两榀框架的初始抗侧刚度、屈服荷载、极限承载力和位移延性系数等力学性能指标,并将结果列于表 1 中,从表格中可以得出,有支撑框架初始刚度约为 12.52 kN/mm,屈服荷载为 292.1 kN,极限承载力为 327.8 kN,延性系数为

2.15;无支撑框架初始刚度约为 5.12 kN/mm,屈服荷载为 130.6 kN,极限承载力为 143.7 kN,延性系数为 3.18。由于交叉支撑的存在,有支撑框架与无支撑框架相比初始刚度提高了 144%,屈服荷载提高了 123%,极限承载力提高了 128%,延性系数下降了 32%。有支撑框架延性较差的原因在于:框架中的绝大部分抗侧力均由受拉支撑提供,受拉支撑拉断后框架承载力迅速下降至最大承载力的 85%。为防止该现象出现在实际框架中,本研究建议:①有支撑框架中的支撑应采用刚性支撑或屈曲约束支撑,防止受压支撑过早地发生屈曲,从而使拉压支撑能够共同工作;②合理选择支撑截面,避免出现支撑抗侧刚度远大于框架柱抗侧

刚度的情况,从而避免支撑承担绝大部分的水平力。

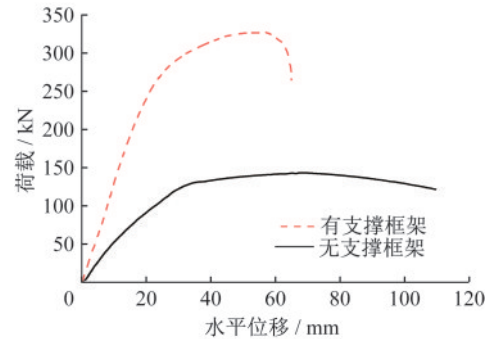


图7 两榀框架的荷载-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curves of the two frames

表 1 两榀框架的力学性能

Table 1 Mechanical properties of the two frames

| 框架类型 | 初始刚度/(kN·mm ⁻¹) | 屈服荷载 | | 极限承载力 | | 85%极限承载力 | | 延性系数 |
|------|-----------------------------|--------|-------|--------|-------|----------|--------|------|
| | | 力/kN | 位移/mm | 力/kN | 位移/mm | 力/kN | 位移/mm | |
| 无支撑 | 5.12 | 130.60 | 34.56 | 143.70 | 68.46 | 122.10 | 109.79 | 3.18 |
| 有支撑 | 12.52 | 292.10 | 29.65 | 327.80 | 56.38 | 278.90 | 63.82 | 2.15 |

4.2 构件的应变

本研究对梁柱构件和支撑上的各个应变测点的数据进行了归纳和整理,通过以下图 8、图 9 来反映各个点的应变变化规律,图中纵轴表示节点区中心水平位移,以 5 mm(加载制度中的一级荷载)为梯度选取应变值绘制。本节中应变仅包含了水平加载阶段构件的应变,竖向力作用下构件的初始应变被消除了。

4.2.1 无支撑框架梁柱的应变

无支撑框架左侧框架柱、右侧框架柱和框架梁上各个应变测点的数据变化如图 8 所示,从图 8 中可以发现左侧框架柱柱底受压侧翼缘的应变在第十级荷载加载完成后迅速增大,左侧框架柱柱底受压侧翼缘的应变在第十四级荷载加载完成后迅速增大,结合框架的荷载位移曲线可知,柱脚翼缘受压屈服也是框架承载力下降的原因之一。

4.2.2 有支撑框架梁柱应变

有支撑框架左侧框架柱、右侧框架柱和框架梁上各个应变测点的数据变化如图 9 所示,从图中可以发现,除了柱脚翼缘之外,在加载过程后期柱顶的翼缘也发生了屈服,这是由于支撑连接的外伸节点板在无加劲肋约束的情况下直接与柱翼

缘接触导致的。

4.3 节点区的变形

两榀框架中节点区交叉位移计读数关于节点区中心水平位移的变化规律如图 10 所示,从图中可以看出,由于框架左侧用于连接水平作动器的接头的存在,两榀左侧节点区的变形小于右侧节点区;如果将梁柱构件视为刚体,仅考虑节点区的变形对框架的整体变形的影响,根据几何关系,当框架的水平总侧移为 60 mm 时,节点区变形造成的侧移为 1.5 mm,约为实际侧移的 2.5%,因此可以将节点区视为刚体,忽略节点区剪切变形对框架侧移的影响。

5 结 论

本文对使用改进端板节点连接的带支撑钢框架和不带支撑钢框架进行了单调加载试验,研究了框架在单调荷载作用下的力学性能,得到以下主要结论:

(1) 对于本次试验的两榀框架,无支撑框架的破坏模式为端板受拉侧严重弯曲变形,有支撑框架的破坏模式为受拉支撑净截面拉断。

(2) 有支撑框架与无支撑框架相比,初始刚

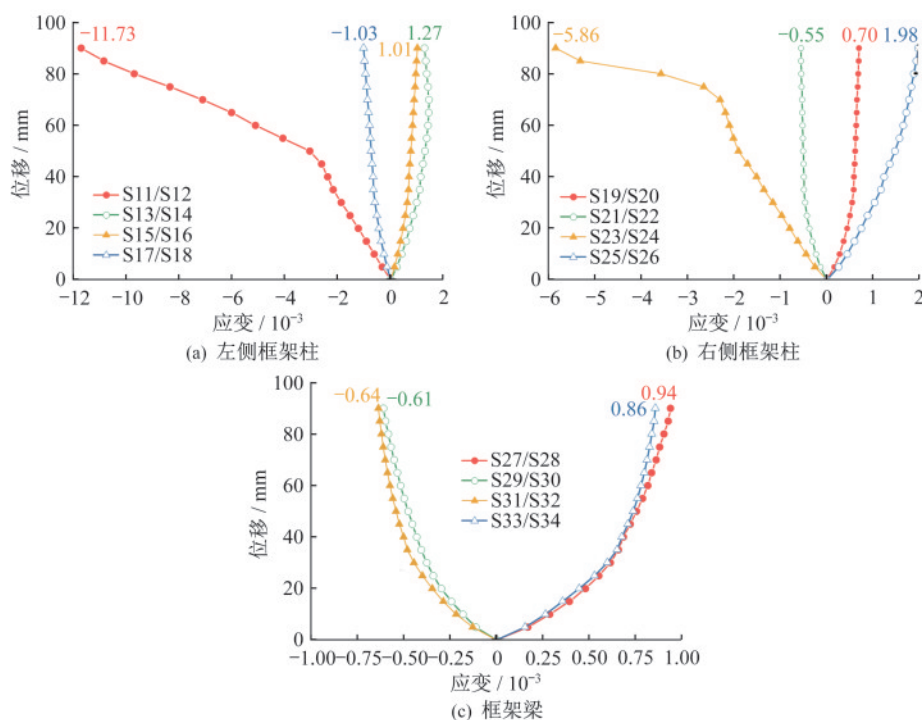


图8 无支撑框架的应变

Fig.8 Strain of the unbraced frame

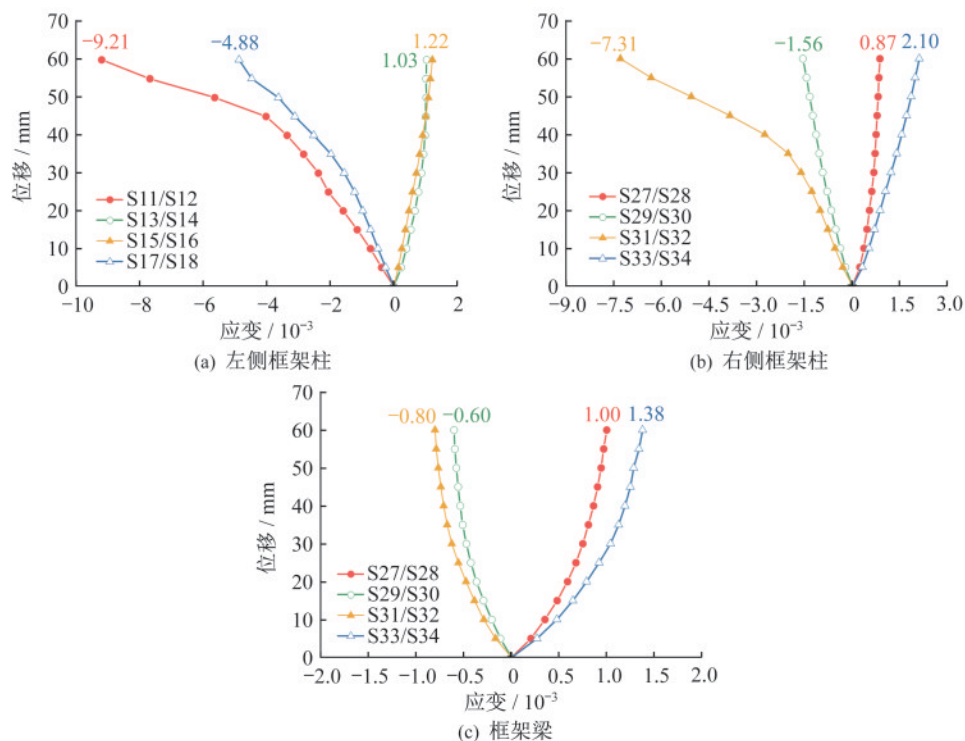


图9 有支撑框架的应变

Fig.9 Strain of the braced frame

度提高了144%，屈服荷载提高了123%，极限承载力提高了128%，表明柔性交叉支撑的存在可以有效提高框架的侧向承载力和刚度。

(3) 有支撑框架的位移延性系数小于3，并且在支撑拉断以后承载力迅速下降，表明交叉支撑的存在会严重削弱框架的延性。

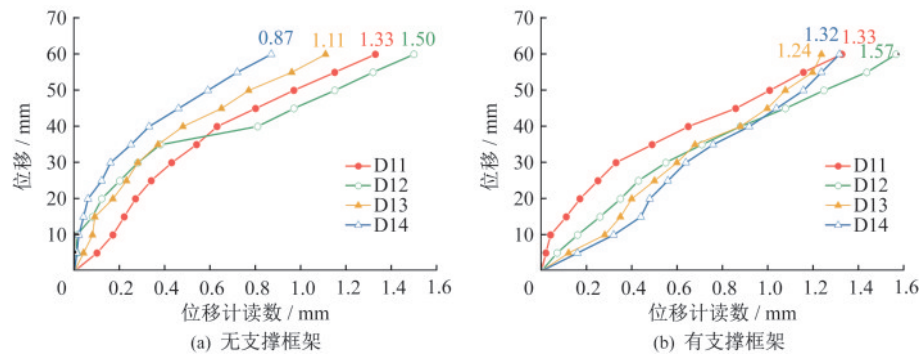


图 10 节点的变形

Fig.10 Deformation of the joints

(4) 十字形加劲肋和连接的存在显著提升了节点核心区的刚度,核心区剪切变形很小,可以忽略。

参 考 文 献

- [1] TSAI K, POPOV E P. Cyclic behavior of end-plate moment connections [J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116(11):2917-2930.
- [2] 刘卫然,周晋普,方斌,等. 钢框架平齐端板节点力学性能试验研究与参数分析[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(5):274-286.
LIU Weiran, ZHOU Jinpu, FANG Bin, et al. Experimental study and parametric analysis on mechanical properties of flush end-plate connections in steel frames [J]. Engineering Science and Technology, 2025, 57(5):274-286. (in Chinese)
- [3] 熊川,郭耀杰,李旋. 梁柱齐平端板半刚性节点力学性能研究[J]. 中国科技论文, 2019, 14(10):1066-1071.
XIONG Chuan, GUO Yaojie, LI Xuan. Study on mechanical properties of beam-column flush end-plate semi-rigid connections [J]. China Sciencepaper, 2019, 14(10):1066-1071. (in Chinese)
- [4] 施刚,石永久,李少甫,等. 多层钢框架半刚性端板连接的循环荷载试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005 (2):74-80,93.
SHI Gang, SHI Yongjiu, LI Shaofu, et al. Experimental study on cyclic loading of semi-rigid end-plate connections in multi-story steel frames [J]. Journal of Building Structures, 2005(2):74-80,93. (in Chinese)
- [5] 施刚,石永久,王元清,等. 多层钢框架半刚性端板连接的试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004(3):391-394.
SHI Gang, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing, et al. Experimental study on semi-rigid end-plate connections in multi-story steel frames [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004 (3):391-394. (in Chinese)
- [6] WANG Z Y, WANG Q Y. Yield and ultimate strengths determination of a blind bolted endplate connection to square hollow section column [J]. Engineering Structures, 2016, 111:345-369.
- [7] MERAD BOUDIA S B, BOUMECHRA N, BOUCHAIR A, et al. Modeling of bolted endplate beam-to-column joints with various stiffeners [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 167:105963.
- [8] FAN J, ZHAO J, HUA L, et al. Seismic performance and analytical model of CFDST joint with endplates and long bolts [J]. Structures, 2022, 35:483-499.
- [9] 姜晓明,王光伟,张曼,等. 螺纹锚固单边螺栓端板连接节点弯剪作用性能研究[J]. 结构工程师, 2022, 38(6):101-110.
JIANG Xiaoming, WANG Guangwei, ZHANG Man, et al. Study on bending-shear behavior of end-plate connections with threaded anchorage unilateral bolts [J]. Structural Engineers, 2022, 38(6):101-110. (in Chinese)
- [10] 刘泉维,孙乐乐,叶守杰,等. T形方颈单边螺栓连接梁柱节点力学性能研究[J]. 结构工程师, 2025, 41(1):43-54.
LIU Quanwei, SUN Lele, YE Shoujie, et al. Study on mechanical properties of beam-column joints with t-shaped square neck unilateral bolt connections [J]. Structural Engineers, 2025, 41(1):43-54. (in Chinese)