

改进型钢管混凝土柱-H型钢梁槽形端板节点 抗震性能研究

高春彦^{1,2}, 王延彬^{1*}, 孙凯琦³, 王净杰¹

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古自治区 包头 014010; 2. 内蒙古自治区土木工程安全与耐久
重点实验室, 内蒙古自治区 包头 014010; 3. 中交一公局集团有限公司, 北京 100024)

摘要: 为研究方钢管混凝土柱与H型钢梁槽形端板连接节点的抗震性能, 对3个槽形端板连接节点和1个普通端板连接节点进行了低周往复加载试验, 研究了节点的破坏机理与特征、承载能力、节点区应力分布以及抗震性能等, 分析了节点构造参数不同对其抗震性能的影响。在试验研究基础上, 采用ABAQUS有限元软件进行了有限元适应性验证和参数分析, 对比了槽形端板连接节点和普通端板连接节点承载力、延性和初始转动刚度的差异性。试验研究表明: 试件均在端板和梁翼缘连接处出现对接焊缝撕裂以及焊缝附近母材断裂现象, 普通端板发生了明显翘曲, 与柱翼缘之间出现明显缝隙; 试件滞回曲线均呈现梭形, 没有明显的捏缩现象, 说明具有良好的耗能能力; 相较于普通端板连接节点, 槽形端板连接节点的极限承载力和初始转动刚度分别平均提高了6.5%和29.7%, 延性和耗能能力分别平均下降了16.7%和14.5%, 表明采用槽形端板对节点初始转动刚度的影响最显著。建议设计中槽形端板侧面伸出长度取柱宽的一半即可满足要求。

关键词: 槽形端板; 普通端板; 连接节点; 抗震性能; 有限元分析

中图分类号: TU398⁺.9, TU352.11 文献标志码: A 文章编号: 1671-9379(2025)08-0001-12

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240312002

Seismic Performance of Improved Concrete-Filled Steel Tubular Column to H-Shaped Steel Beam Groove End-Plate Joint

GAO Chunyan^{1,2}, WANG Yanbin^{1*}, SUN Kaiqi³, WANG Jingjie¹

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;
2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability, Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou 014010, China;
3. China First Highway Engineering Co., LTD., Beijing 100024, China)

*Corresponding author: wybzs1998@163.com

Abstract: In order to study the seismic performance of concrete-filled square steel tubular column and H-shaped steel beam groove end-plate connection joints, low cyclic loading tests were conducted on three groove end-plate connection joints and one ordinary end-plate connection joint. The failure mechanism and characteristics, bearing capacity, stress distribution and seismic performance of the joints were studied, the influences of different structural parameters on the seismic performance of the joints were analyzed. On the basis of experimental research, the finite element adaptability

收稿日期: 2024-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(51768056), 内蒙古自然科学基金(2019MS05038), 内蒙古自治区高校青年科技英才项目(NJYT22068)

作者简介:

高春彦(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究。E-mail: gao-197844@163.com。

通信作者:

王延彬(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究。E-mail: wybzs1998@163.com。

verification and parametric analyses were carried out using ABAQUS finite element software, and the differences of bearing capacity, ductility and rotational stiffness between groove end-plate connection joints and ordinary end-plate connection joints were compared. Test study showed that the butt weld tore and the base metal near the weld fractured at the connection between the end-plates and beam flanges. The ordinary end-plate warped and exhibited an obvious gap between the end-plate and the column flange. The hysteretic curves of the specimens exhibited spindle-shape without obvious pinching phenomenon, indicating the specimens have good energy dissipation capacity. Compared with the ordinary end-plate connection, the bearing capacity and rotational stiffness of the groove end-plate connection increased by 6.9% and 29.7%, respectively, and the ductility and energy dissipation capacity decreased by 16.7% and 14.5%, respectively. These results indicate that the groove end-plate has the most significant effect on the rotational stiffness of the connection. It is suggested that the side extension length of the groove end-plate should be half of the column width to meet the design requirements.

Keywords: groove end-plate; ordinary end-plate; connection joint; seismic performance; finite element analysis

钢管混凝土柱具有承载力高、刚度大、塑性韧性强、耐火性能好、施工方便等优良性能,目前在工程实践中应用广泛^[1]。方形钢管截面闭合且双轴对称,具有较好的抗弯和抗扭刚度,传统的方(矩)形钢管柱和H型钢梁的连接主要采用焊接连接形式,这种连接刚度大、承载力高,但在强烈地震作用下易出现脆性断裂破坏,不利于地震能量的耗散。

螺栓连接可以实现钢结构节点的装配式连接,从而大大提高现场安装效率,与焊接接头相比也避免了节点转动能力不足导致的脆性破坏。近年来国内外学者对方(矩)形钢管柱与H型钢梁采用螺栓连接的节点进行了大量研究,设计出多种新型螺栓连接形式来改善节点的性能。KHADOR等^[2]、RICHARDS等^[3]、LEE等^[4]、BIAN等^[5]、刘学春等^[6-9]、王燕等^[10]、钱玉龙等^[11]对不同构造的装配式梁柱螺栓连接节点的受力机理、承载力、转动能力以及抗震性能等进行了研究。

螺栓端板连接属于典型的半刚性节点连接形式,在多层高层建筑中得到越来越广泛的应用。目前国内外学者对方(矩)形钢管柱和H型钢梁的梁柱端板连接节点的性能研究已取得了部分研究成果,关于节点涉及的构造形式和几何参数也种类繁多,比如:平齐式和外伸式、端板外伸部分有无加劲肋以及加劲肋的形式、端板厚度、螺栓种类、螺栓直径和等级、螺栓排列位置等。到目前为止,WAQAS等^[12]、ELSABBAGH等^[13]、WANG等^[14-15]、MORRISON等^[16]、GUO等^[17]、李国强等^[18-19]、王燕等^[20]、赵均海等^[21]、索雅琪等^[22]、石永久等^[23]对不同构造的端板连接节点的受力机理、承载性能、弯矩-转角关系模型、抗震性能和恢复力模型等进行了试验研究和理论分析。

以往的研究绝大多数通过增加端板厚度、增加螺栓直径以及设置端板加劲肋等方式来提高节点的承载能力和转动刚度,但普通端板连接中梁上下翼缘的拉力和压力通过端板直接传到柱翼缘上,容易出现端板屈服、端板

加劲肋屈曲以及柱壁屈服等情况。基于此,本文提出一种改进型钢管混凝土柱-H型钢梁槽形端板连接节点形式,设计制作了4个方钢管混凝土柱(方钢管柱)与H型钢梁槽形端板螺栓连接节点试件,并进行低周往复加载试验,系统地研究了节点的承载力、破坏模式以及抗震性能等,之后进行有限元模型的验证以及参数分析,进一步探讨钢管混凝土槽形端板连接节点与普通端板连接节点性能的差异。

1 试验概况

1.1 试件设计

为研究方钢管混凝土柱与H型钢梁槽形端板连接节点的抗震性能,设计制作了3个方钢管混凝土柱-H型钢梁节点试件和1个空心方钢管柱-H型钢梁节点试件,改变的参数为端板形式(槽形端板、普通端板)、端板侧面伸出长度(0、100 mm、200 mm)、钢管内是否填充混凝土,对这4个节点试件进行低周往复加载试验。

试件的梁、柱长度均取自反弯点处,梁、柱截面分别选取 $\square 200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, HN300 mm \times 150 mm \times 6 mm \times 8 mm,节点满足“强柱弱梁”要求。根据节点的承载力及刚度确定端板厚度及螺栓规格,端板厚度均取16 mm,槽形端板由3块钢板在工厂焊接而成。螺栓采用5排2列的排列方式,规格为10.9级M20摩擦型高强螺栓。理论上讲,方形钢管柱为闭口截面构件,其与H型钢梁的节点连接应采用单面螺栓连接。而本文试验中由于钢管柱较短,在工厂制作时将其与H型钢梁采用常规高强螺栓连接。试件制作时首先将端板焊接在梁端,其中梁翼缘与端板采用全熔透对接焊缝,梁腹板与端板采用双面角焊缝;在端板与柱壁连接前特制一个加长扳手,提前将螺栓从柱壁内侧放入螺栓孔中,将钢管内螺栓头固定,之后在外侧拧紧螺母施加预紧力锁紧端板。试件的外形尺寸及构造参数如图1和表1所示,试件编号中OEP(Ordinary end plate)表示普通端板,GEP(Groove

end plate)表示槽形端板。试验时在梁端加载点处设置了加劲肋,以防止加载点处钢梁发生屈曲变形。试件钢

材均采用Q235钢,方钢管柱内灌注C40混凝土,钢材和混凝土的力学性能均由标准试验测得,见表2。

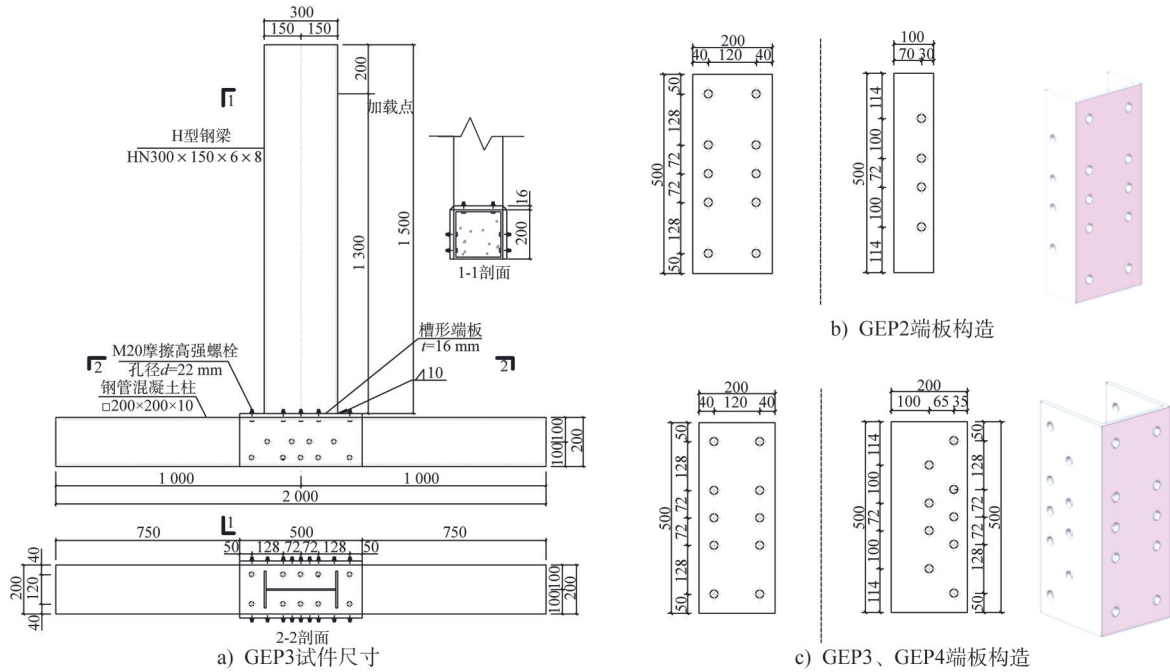


图1 节点构造详图(单位:mm)

Fig. 1 Joint construction details(unit:mm)

表1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件 编号	柱截面/ mm×mm×mm	梁截面/ mm×mm×mm×mm	端板厚度/ mm	端板 形式	端板侧面 伸出长度	钢管柱内 填充混凝土	柱长/mm		梁长/mm	
							实测值	计算值	实测值	计算值
OEP1	□200×200×10	HN300×150×6×8	16	普通	—	是	2000	1700	1500	1300
GEP2	□200×200×10	HN300×150×6×8	16	槽形	一半柱宽	是	2000	1700	1500	1300
GEP3	□200×200×10	HN300×150×6×8	16	槽形	全部柱宽	是	2000	1700	1500	1300
GEP4	□200×200×10	HN300×150×6×8	16	槽形	全部柱宽	否	2000	1700	1500	1300

表2 钢材和混凝土的力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel and concrete

	钢材厚度/mm	屈服强度/(N·mm ⁻²)	抗拉强度/(N·mm ⁻²)	弹性模量/×10 ⁵ (N·mm ⁻²)	泊松比	
						钢材
	8	318	432.02	2.05	0.30	
	10	315	437.71	2.10	0.30	
	16	389	496.03	2.10	0.31	
混凝土	混凝土配合比/ (kg·m ⁻³)	水	水泥	沙子	石子	减水剂
		172.0	441.0	786.0	1001.0	8.8
		28d f _{cu,k} /(N·mm ⁻²)		试验时 f _{cu,k} /(N·mm ⁻²)		E _c /(N·mm ⁻²)
		45.87		48.42		42 645

1.2 试验装置与加载方案

试验在内蒙古自治区土木工程安全与耐久重点实验

室进行,试验装置如图2所示。H型钢梁垂直放置,通过500 kN的MTS液压电动伺服作动器沿着水平方向在梁

端施加水平荷载;方钢管混凝土柱卧位放置,柱两端支座处设置压梁,压梁通过地脚螺栓固定于实验室地槽中,以抵抗水平荷载产生的倾覆力矩。梁端两侧设置了滑动装置,以防止试验过程中钢梁扭转发生平面外失稳。试验装置安装时,进行了严格的对中校核。

试验采用低周往复加载方式。试验前通过数值模拟初步计算试件的屈服荷载和屈服位移。正式加载时采用位移控制加载:(1)试件屈服前位移增量为2 mm,每级循环1周,接近屈服时位移增量减小为1 mm进行加载;(2)试件屈服后,位移增量取屈服位移的0.25倍,即依次施加 Δy 、 $1.25\Delta y$ 、 $1.5\Delta y$ 、 $1.75\Delta y$ 、 $2\Delta y$...进行加载,每级循环3周,直至节点破坏。加载制度如图3所示。加载过程中定义液压伺服作动器推出方向为正向。当节点连接处出现端板明显翘曲、梁翼缘屈曲或焊缝撕裂时,停止加载。

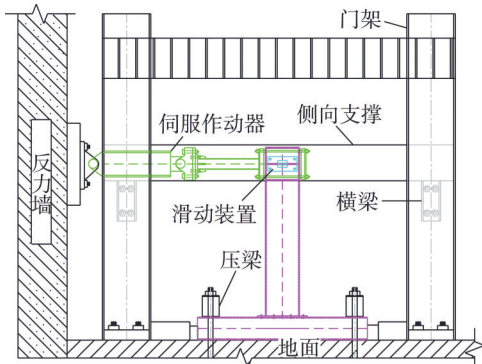


图2 试验加载装置

Fig. 2 Test setup

1.3 节点区测量方案

位移计测点及其布置如图4所示,位移计D1、D2(布置在梁端加载点处)主要测量梁端水平位移;位移计D3、D4(布置在梁右侧翼缘距端板200 mm处)与百分表D5、D6(布置在距梁左、右侧翼缘200 mm处)主要测量节点相对转角;位移计D7、D8布置在钢管混凝土柱轴线方向的左、右两侧,以监测试验过程中支座的嵌固程度。另外在节点梁端、端板的关键部位布置了应变片,以测量加载过程中节点区应变。

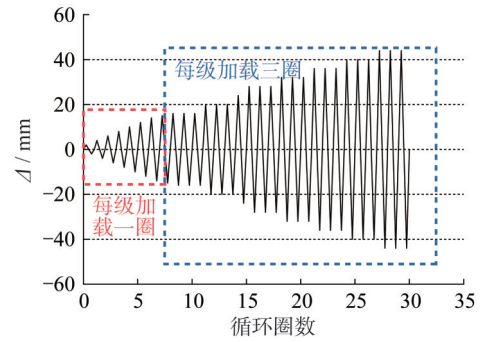


图3 加载制度

Fig. 3 Loading system

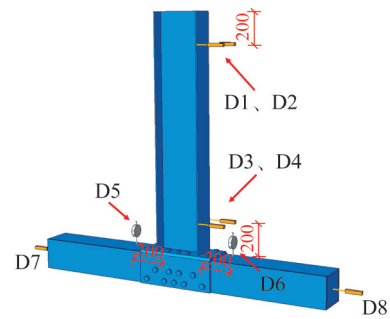


图4 位移计布置

Fig. 4 Arrangement of displacement meters

2 试验结果分析

2.1 节点破坏过程与特征

试件OEP1为普通端板螺栓连接节点。试验过程中,梁端位移加载到15 mm时,节点试件屈服,此时远加载端梁翼缘与端板连接焊缝开始出现撕裂现象。当加载至位移为24 mm时,近加载端梁翼缘与端板连接焊缝附近的母材已撕裂至约5 cm,而另一侧焊缝撕裂了约3 cm。此时端板出现翘曲现象,端板与柱翼缘的缝隙已不能闭合,缝隙宽度比较明显(图5),此时连接端板与柱翼缘的受拉侧螺栓并没有断裂。当加载至位移为42 mm时,近加载端梁翼缘与端板连接焊缝附近的母材撕裂贯通,另一侧端板与梁翼缘的焊缝基本撕裂贯通,终止试验。

所有GEP试件的破坏过程基本相同,在此以试件GEP2为例对其破坏过程进行分析。当梁端加载至位移



图5 试件 OEP1 破坏模式

Fig. 5 Failure mode of specimen OEP1

为 15 mm 时,节点试件屈服,此时近加载端槽形端板与梁翼缘连接焊缝开始出现撕裂现象。当加载至位移为 21 mm 时,该处焊缝撕裂至约 3 cm,试件出现很大且密集的砰砰响声。当加载至位移为 24 mm 时,另一侧梁翼缘与端板连接焊缝附近的母材撕裂至 5 cm,且撕裂程度还在逐渐增大。当加载至位移为 27 mm 时,近加载端梁翼缘与端板连接焊缝撕裂至 6 cm,梁下翼缘受压屈曲变形明显(图 6)。当加载至位移为 30 mm 时,近加载端梁翼缘与端板连接焊缝撕裂十分明显,加载持续进行,焊缝裂隙已基本贯通。当加载至位移为 36 mm 时,另一侧梁翼缘与端板连接焊缝附近的母材裂缝基本贯通,终止试验。试件 GEP3 和 GEP4 的破坏情况亦如此。



图6 试件 GEP2 破坏模式

Fig. 6 Failure mode of specimen GEP2

综上所述,所有槽形端板连接节点均在端板和梁翼缘连接处出现不同程度的对接焊缝撕裂以及焊缝附近母材断裂现象,没有出现端板翘曲以及螺栓被拉出的现象。而普通端板连接节点主要发生了端板翘曲,端板与柱翼缘之间出现缝隙,螺栓被拉出但并没有断裂。

2.2 试件荷载-位移曲线

图 7 为各节点梁端荷载-位移($P-\Delta$)滞回曲线。由图可知,加载初期节点的 $P-\Delta$ 曲线基本呈线性变化;随着位移的增加,滞回曲线所包围的区域逐渐增大;当达到极限荷载后节点的承载能力开始下降,此时残余变形增加,试件的滞回曲线更加饱满。

总体来讲,所有试件的滞回曲线均呈现较为饱满的“梭形”,正负向加载曲线基本对称,表现出良好的耗能能力。对比试件 OEP1 和试件 GEP 的滞回曲线发现,试件

OEP1 在加载过程中,由于端板发生翘曲,端板与柱翼缘之间出现缝隙,螺栓滑移较为明显,从而导致滞回曲线上出现了明显的水平段。

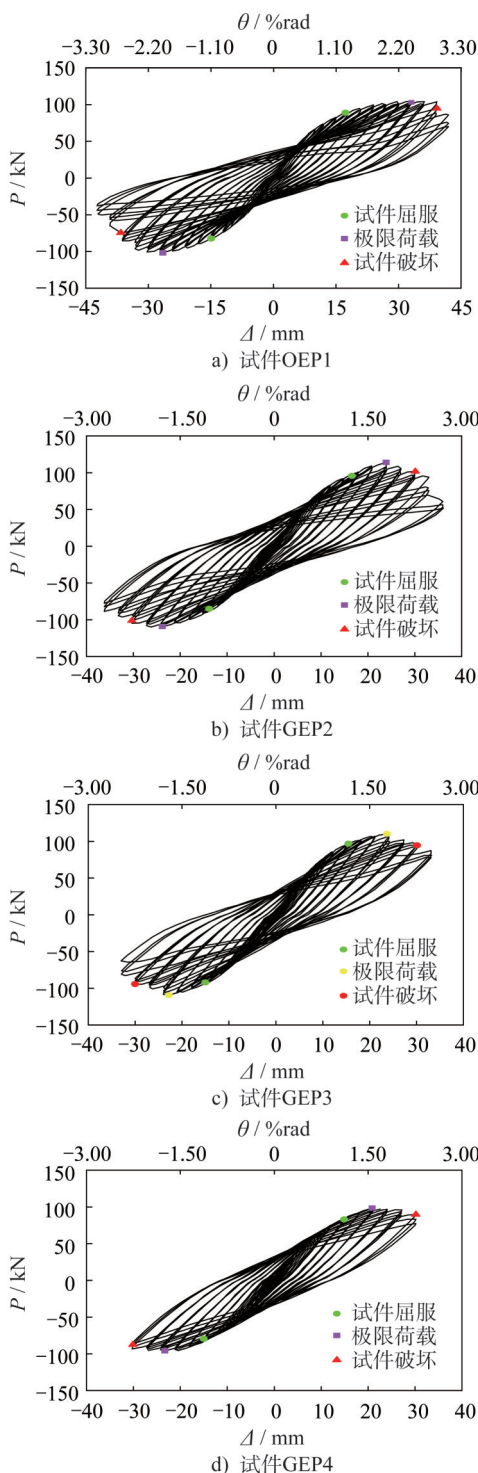


图7 荷载-位移滞回曲线

Fig. 7 Load-displacement hysteretic curves

2.3 骨架曲线和延性

节点的 $P-\Delta$ 骨架曲线如图 8 所示,表 3 给出了各节点骨架曲线的特征值。鉴于节点试件的骨架曲线没有明显

屈服特征,采用等效弹塑性能量法求出节点的屈服荷载及屈服位移^[24]。

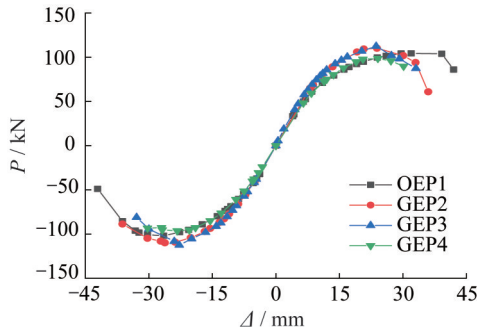


图8 荷载-位移骨架曲线

Fig. 8 Load-displacement skeleton curves

由图8和表3可知,槽形端板连接节点GEP2、GEP3的峰值荷载相较于普通端板连接节点OEP1分别提高了2.9%、10.1%。槽形端板连接节点GEP2、GEP3的延性相较于普通端板连接节点OEP1分别降低了12.5%、20.8%。对于槽形端板连接节点而言,试件GEP3相较于试件GEP2的峰值荷载提高了6.9%,延性降低了9.5%,说明增大端板侧面伸出长度在提高承载力的同时会降低

节点的延性。试件GEP3与试件GEP4相比,峰值荷载提高了15.5%,延性降低了5.0%,说明钢管内灌注混凝土会大大增加节点的承载力,对节点延性影响不大。

2.4 构件耗能

采用累积耗能 E_{sum} 反映节点在加载过程中的耗能情况。随着加载位移的增加,累积耗能-位移关系曲线如图9所示。采用最后一级加载循环中等效黏滞阻尼系数 h_e 对构件的耗能能力进行比较^[25],累积耗能 E_{sum} 和等效黏滞阻尼系数 h_e 的计算结果见表3。

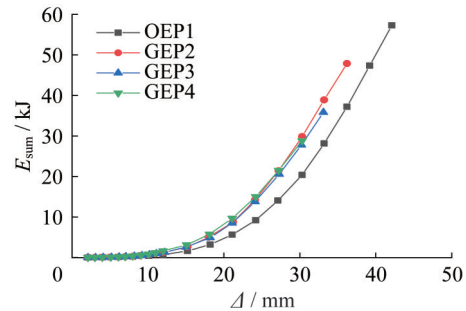


图9 试件累积耗能-位移关系曲线

Fig. 9 Relationship between cumulative energy dissipation and displacement of specimens

表3 试件试验特征值

Table 3 Characteristic values of test

试件编号	加载方向	P_y/kN	Δ_y/mm	P_{max}/kN	Δ_{max}/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	μ	$\bar{\mu}$	$K_i/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$	$\bar{K}/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$	$E_{sum}/(kJ)$	h_e
OEP1	正向	82.7	17.8	104.4	32.0	88.9	41.6	2.3	2.4	15 546.6	14 904.9	57.3	0.182
	反向	-89.4	-16.4	-100.2	-31.5	-82.5	-40.5	2.5		14 263.1			
GEP2	正向	95.5	15.0	110.1	23.7	93.6	30.9	2.1	2.1	18 519.1	17 994.2	47.8	0.163
	反向	-92.1	-14.3	-100.5	-22.3	-92.1	-29.6	2.1		17 469.2			
GEP3	正向	98.4	16.6	112.8	23.9	96.9	31.9	1.9	1.9	21 542.8	20 677.4	35.8	0.148
	反向	-90.9	-16.2	-112.5	-22.5	-90.4	-30.6	1.9		19 812.0			
GEP4	正向	86.9	15.7	98.6	24.1	83.8	33.1	2.1	2.0	14 112.6	15 181.3	28.8	0.155
	反向	-88.4	-16.2	-96.3	23.4	-82.0	-30.6	1.9		16 250.0			

注: P_y 、 Δ_y 为屈服荷载及其位移; P_{max} 、 Δ_{max} 为峰值荷载及其位移; P_u 、 Δ_u 为极限荷载及其位移; μ 、 $\bar{\mu}$ 为延性系数及其均值; K_i 、 \bar{K} 为初始转动刚度及其均值; E_{sum} 为累积耗能; h_e 为试件最大等效黏滞阻尼系数。

由图9可知,在试验前期槽形端板连接节点的累积耗能值在同一位移时刻均大于普通端板连接节点的累积耗能值,且端板侧面伸出长度为一半柱宽时,节点的累积耗能最大。在最后一级加载循环中普通端板连接节点的累积耗能>槽形端板连接节点(端板侧面伸出长度为一半柱宽)的累积耗能>槽形端板连接节点(端板侧面伸出长度为全部柱宽)的累积耗能。由表3可知,槽形端板连接节点GEP2、GEP3的等效黏滞阻尼系数 h_e 相较于普通端板连接节点OEP1分别降低了10.4%、18.6%,说明改变

端板形式会使得节点的耗能能力明显下降。对于槽形端板连接节点而言,试件GEP3相较于试件GEP2的耗能能力降低了10.1%。试件GEP3与试件GEP4相比,等效黏滞阻尼系数 h_e 降低了4.5%,说明钢管柱内是否灌注混凝土对累积耗能的影响不大。

2.5 刚度退化

滞回曲线上坐标原点与某次循环的荷载峰值连线的斜率,称为节点的等效刚度。等效刚度随位移的不断增

大而降低的现象,称为等效刚度退化。滞回环中每次循环的等效刚度与初始等效刚度的比值,称为等效刚度退化系数^[26]。图10为4个节点试件的等效刚度退化系数对比曲线。

由图可知,各试件都具有显著的刚度退化,且刚度退化的速率基本一致,刚度退化的原因是由于试验过程中端板与梁翼缘不同程度的焊缝撕裂以及焊缝附近母材的断裂。在加载前期普通端板节点OEP的刚度整体低于槽形端板节点GEP的刚度,而在加载后期普通端板节点由于端板翘曲,螺栓滑移明显,导致节点刚度退化的速率减缓。柱内是否灌注混凝土对节点刚度退化的影响不明显。

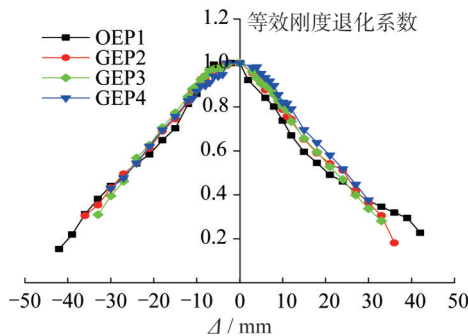


图10 刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness degradation curves

2.6 节点刚度分析

参考欧洲规范 EN 1993-1-8^[27],基于 $M/M_p-\theta_{j1}/\theta_{jp}$ 曲线对节点刚度进行判别,其中 M 为梁端弯矩, M_p 为梁截面达到全截面塑性时的弯矩, θ_{j1} 为节点转角, $\theta_{jp}=M_pL/(EI_b)$, L 为梁跨度(相邻两柱轴线间距离), I_b 为梁截面惯性矩,各试件的刚度评估结果如图11所示。

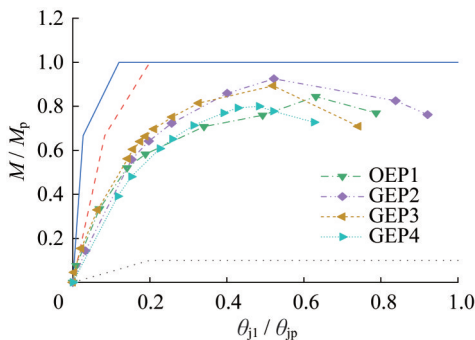


图11 节点刚度

Fig. 11 Stiffness of joints

图11中蓝色实线为无支撑体系刚性/半刚性节点的分界线,对应初始斜率为25;红色虚线为有支撑体系刚性与半刚性节点的分界线,对应初始斜率为8;而黑色点

线为半刚性与铰接节点的分界线,对应初始斜率为0.5。根据图11中的数据可以得出以下结论:试验节点全部为半刚性连接节点。其中,槽形端板连接节点GEP2、GEP3的初始转动刚度相较于普通端板连接节点OEP1的初始转动刚度分别提高了20.7%、38.7%。对于槽形端板连接节点而言,试件GEP3相较于试件GEP2的初始转动刚度提高了14.9%。试件GEP3与试件GEP4相比,初始转动刚度提高了36.2%。

3 有限元分析与试验结果对比

3.1 有限元模型

采用有限元软件ABAQUS对试验节点进行了模拟分析。模型节点的尺寸、构造以及材料与试验试件完全相同。模型节点各部件均采用八节点缩减积分格式的三维实体单元C3D8R模拟,节点GEP3的有限元模型如图12所示。模型经过多次试算来确定加密区域,主要涉及螺栓孔周围、节点核心区附近等区域。

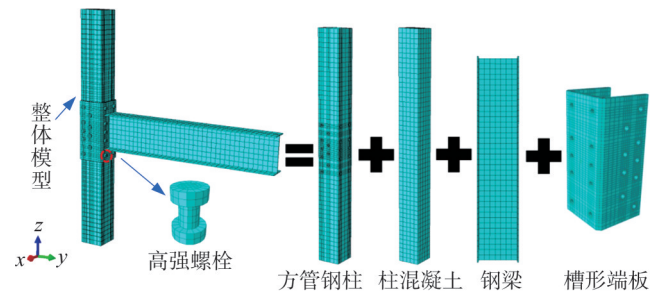


图12 试件GEP3有限元模型

Fig. 12 Finite element model of specimen GEP3

钢材应力-应变关系采用二次塑流模型,材料弹塑性的发展和单元刚度采用混合强化理论,由Von Mises屈服准则及相关的流动法则确定。高强螺栓本构模型为各向同性两折线模型,具体应力-应变关系见表4。混凝土本构关系采用刘威^[28]提出的考虑钢管约束效应的核心混凝土本构模型。钢材与混凝土的材料属性均取自材料试验结果。端板与钢梁梁端连接采用绑定(Tie)接触,其余部件相互作用属性采用接触(Contact),接触面分为法向和切向两个方向,采用“硬接触”和“罚摩擦”来定义,其中端板与钢管、螺栓与螺栓孔间摩擦系数取0.3,钢管与核心混凝土之间的摩擦系数取0.6。

为提高模型收敛性,螺栓预紧力分两步施加:先加载

表4 高强螺栓应力-应变关系

Table 4 Stress-strain relationship of high-strength bolts

应力/MPa	990	1 160
应变	0.004 83	0.150 00

10 kN使板件接触,再增至目标值155 kN。

有限元模型的边界条件与试验保持一致,首先在柱两端与梁端建立3个参考点,并通过相互作用模块建立约束命令,与构件相应位置进行耦合。接着利用荷载模块创建边界条件命令,对柱两端分别施加 U_1 、 U_2 、 U_3 三个方向位移约束;在梁端参考点处施加与试验一致的往复荷载,在梁端 U_1 方向施加平动约束阻止钢梁侧向失稳。

3.2 试验试件有限元模拟

3.2.1 破坏模式

图13为试件的有限元分析与试验破坏模式对比。由图可知,有限元方法较好地模拟了端板翘曲(试件OEP1)、梁翼缘屈曲(试件GEP2、GEP3)以及端板与梁翼缘连接处应力高度集中等现象,与试验中观察到的现象较为吻合。

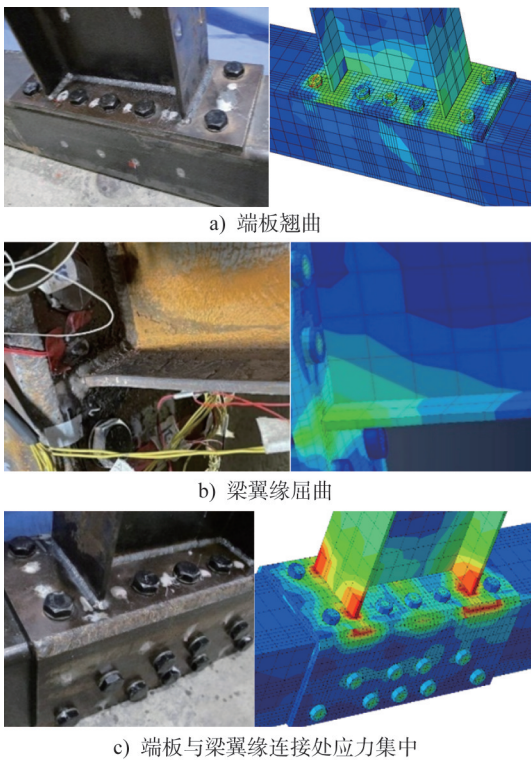


图13 试件有限元分析与试验破坏模式对比
Fig. 13 Comparison of failure modes between FEA and test of specimens

3.2.2 荷载-位移曲线

有限元计算的节点滞回曲线与试验曲线的比较如图14所示。由图可知,在弹性阶段两者基本吻合,试验得到的峰值荷载略低于有限元计算值。其主要原因为:①有限元模拟时,假设结构所用材料都处于理想状态,没有考虑节点试件实际制造以及加工缺陷;材料本构模型也不能模拟材料及焊缝断裂;在试验加载后期试件端

板与梁翼缘连接处出现不同程度的焊缝撕裂以及焊缝附近的母材断裂、端板出现了翘曲等,这些现象有限元分析过程不能全部模拟,无法精确反映整个试验受力全过程。②试验加载后期螺栓预紧力损失严重,导致节点区域松动,后期普通端板变形较大。总体来讲,尽管有限元模拟和试验的滞回曲线存在一定的误差,但是有限元模拟仍能较好地反映节点的应力分布规律以及受力全过程。

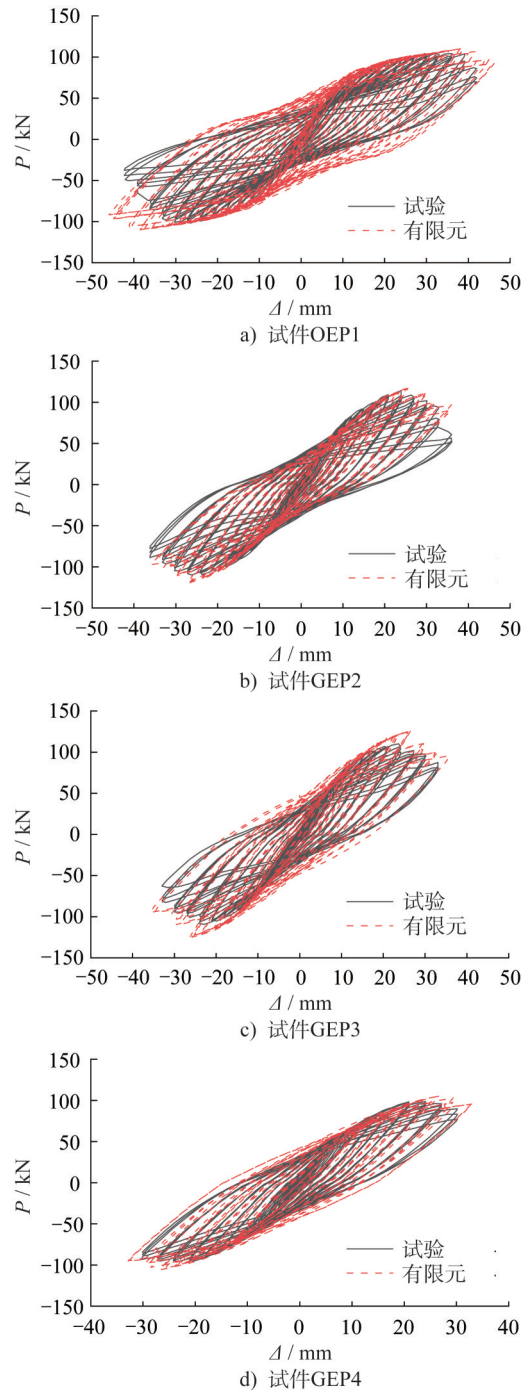


图14 试件有限元分析与试验滞回曲线对比
Fig. 14 Comparison of hysteretic curves between FEA and test of specimens

3.2.3 塑性区域发展情况

在此仅给出试件 OEP1 和试件 GEP3 有限元计算终止时的应力分布情况,如图 15 和图 16 所示。由图可知,各试件破坏时的应力分布规律与试验基本吻合。

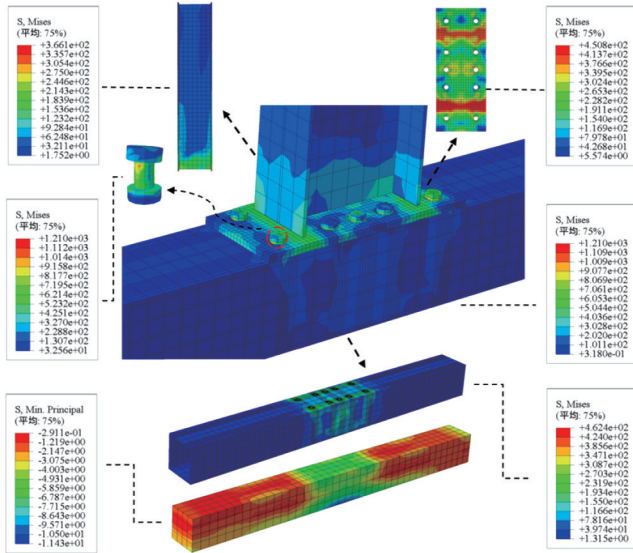


图 15 试件 OEP1 的 Mises 应力图(单位:MPa)

Fig. 15 Mises stress contour of specimen OEP1

(unit: MPa)

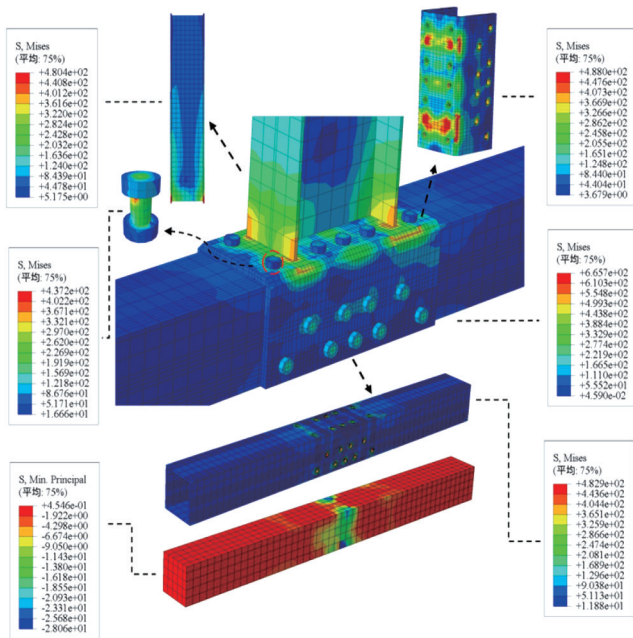


图 16 试件 GEP3 的 Mises 应力图(单位:MPa)

Fig. 16 Mises stress contour of specimen GEP3

(unit: MPa)

对于试件 OEP1,随着荷载的增加,节点各部件的应力持续增长。端板的应力在与梁上、下翼缘连接处最为集中,呈对称的“一字形”分布,最大应力达到 450.8 MPa;连接端板与柱翼缘的螺栓孔附近的应力也较集中。钢梁

的应力在离端板 $H/3$ (H 为梁高)范围内较大,其中在梁翼缘与端板连接处的外侧应力最为集中,最大应力达到 366.1 MPa。螺栓的最大应力位于受拉区最外排的位置(图 15),应力值达到 1 210.0 MPa。方钢管柱的应力在柱翼缘上螺栓孔附近最为集中。

槽形端板连接节点 GEP3 节点区的应力分布完全不同于普通端板连接节点 OEP1。槽形端板的最大应力在端板与梁上、下翼缘连接处呈“点状”分布,最大应力值达到 488.0 MPa。钢梁的最大应力为 480.4 MPa,位于钢梁梁端上、下翼缘与端板连接处边缘位置,应力集中区域远大于普通端板节点,说明槽形端板能更有效地将梁端内力传递至柱端。螺栓的最大应力仍然位于受拉区最外排的位置,应力值远远小于普通端板连接节点,为 437.2 MPa,分析其原因是槽形端板与柱翼缘以及两侧柱腹板均采用螺栓连接,增大了节点刚度以及梁对柱的约束程度,缓解了端板外伸段螺栓的应力集中。另外,由于槽形端板产生的“卡扣”效应,使得槽形端板覆盖区域内混凝土的压应力大于普通端板连接节点混凝土的压应力,柱钢管的应力集中区域从槽形端板覆盖区向外扩展,最大应力值为 482.9 MPa。

4 有限元参数分析

为进一步研究方钢管混凝土柱-H型钢梁槽形端板连接节点与普通端板连接节点在极限承载力、初始转动刚度等方面的差异,共设计 7 个节点进行参数分析。变化参数包括槽形端板侧面伸出长度(取值 0、100 mm、150 mm、200 mm)、普通端板厚度(取值 16 mm、14 mm、12 mm)。有限元参数分析时方钢管混凝土柱与 H 型钢梁截面尺寸、长度、边界条件等均与试验相同。表 5 中给出了各模型试件的承载力、初始转动刚度和延性系数,表中模型编号第一个数值为端板侧面伸出长度,第二个数值为端板厚度。

表 5 模拟试件特征值

Table 5 Simulated characteristic values of specimens

模型编号	承载力/ kN	初始转动刚度/ (kN·m·rad ⁻¹)	延性 系数
OEP-0-16	110.4	14 877.89	2.50
GEP-100-16	116.8	18 459.32	1.97
GEP-150-16	121.0	18 566.95	1.93
GEP-200-16	126.1	20 789.39	1.76
OEP-0-14	97.8	13 926.67	2.75
OEP-0-12	81.7	12 295.37	2.92

4.1 端板侧面伸出长度

图 17 中给出了端板侧面伸出长度分别为 0、

100 mm、150 mm、200 mm时模型节点的 $P-\Delta$ 骨架曲线以及弯矩-转角($M-\theta_r$)曲线的对比情况。由图可知,相较于普通端板连接节点,端板侧面伸出长度分别为100 mm、150 mm、200 mm的槽形端板连接节点承载力分别提高了5.7%、9.6%、14.2%;初始转动刚度分别提高了24.1%、24.7%、39.7%;而延性分别下降了21.2%、22.8%、29.6%。说明相较于普通端板,采用槽形端板对节点刚度的影响最显著,对节点承载力的影响最小。而改变端板侧面伸出长度时,节点承载力、初始转动刚度以及延性的变化幅度并不明显。故当采用槽形端板连接节点时,端板侧面伸出长度取柱宽的一半便可满足设计要求。

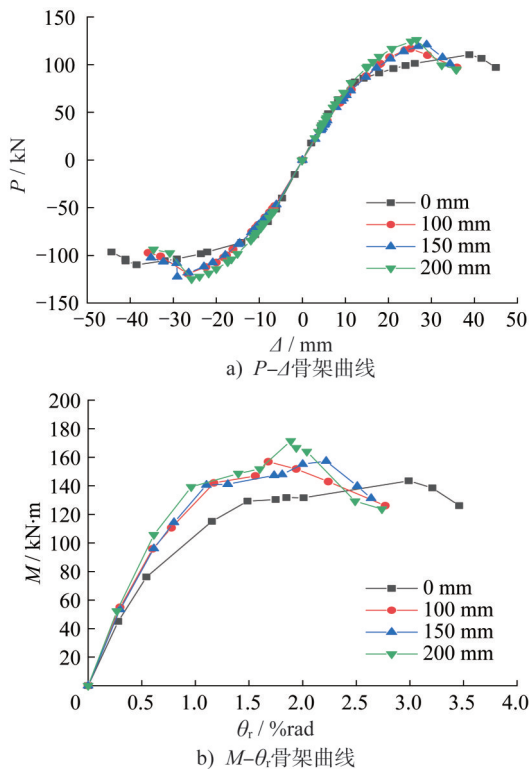


图17 端板侧面伸出长度对节点力学性能的影响
Fig. 17 Influence of the end-plate side extension lengths on the mechanical properties of joints

4.2 普通端板厚度

图18中给出了普通端板厚度分别为12 mm、14 mm、16 mm时模型节点的 $P-\Delta$ 骨架曲线以及 $M-\theta_r$ 曲线的对比情况。由图可知,与厚度为12 mm的节点相比,厚度为14 mm、16 mm的节点承载力分别提高了12.8%、35.1%;初始转动刚度分别提高了13.2%、30.7%;延性分别下降了5.8%、14.3%。说明普通端板厚度改变时对节点承载力和初始转动刚度的影响更显著,对延性的影响相对较小。

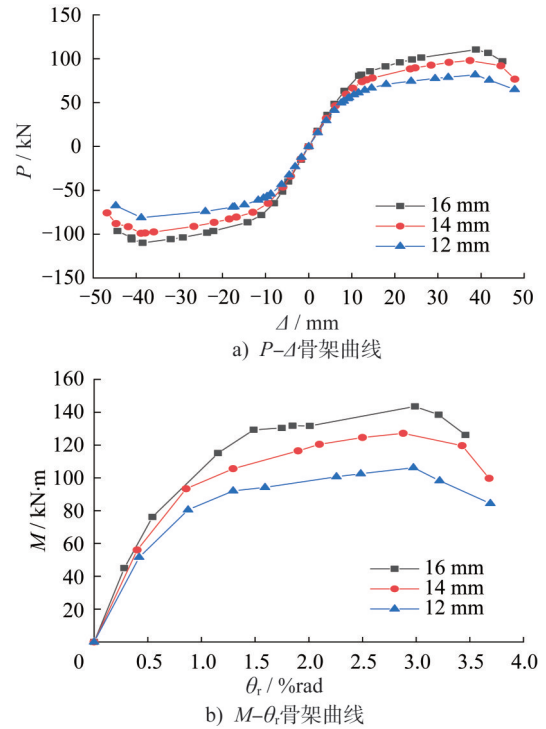


图18 普通端板厚度对节点力学性能的影响
Fig. 18 Influence of the ordinary end-plate thicknesses on the mechanical properties of joints

5 结论

本文针对传统端板连接在钢管混凝土柱-H型钢梁节点中存在的端板屈服和螺栓失效问题,提出了一种新型槽形端板连接,并通过试验与有限元分析验证其性能,得到的结论如下:

(1) 所有槽形端板连接节点均在端板和梁翼缘连接处出现对接焊缝撕裂以及焊缝附近母材断裂现象;普通端板连接节点主要出现端板翘曲,螺栓发生滑移被拉出而破坏。

(2) 钢管混凝土槽形端板连接节点的滞回曲线均呈梭形,没有明显的捏缩现象,说明具有良好的抗震性能和耗能能力;按照欧洲钢结构设计规范中节点刚度的分类方法,槽形端板连接节点属于半刚性节点。

(3) 相较于普通端板连接节点,槽形端板连接节点极限承载力和初始转动刚度分别平均提高了6.5%和29.7%、延性和耗能能力分别平均下降了16.7%和14.5%,表明采用槽形端板对节点初始转动刚度的影响最显著。

(4) 在节点破坏模式、滞回曲线以及节点区塑性发展情况等方面,进行了有限元适应性验证,发现槽形端板能显著增大节点刚度以及梁对柱的约束程度,缓解端板外伸段螺栓的应力集中。有限元计算结果与试验结果吻合较好,为后续参数分析奠定了基础。

(5) 有限元参数分析表明,改变端板侧面伸出长度时,节点承载力、初始转动刚度以及延性的变化幅度较小。建议设计中槽形端板侧面伸出长度取柱宽的一半即可满足要求。在节点设计时,采用槽形端板或增加普通端板厚度对节点受力性能的影响较为明显。

参考文献:

- [1] 韩林海,杨有福,杨华,等. 基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论及其应用[J]. 科学通报, 2020, 65(增刊2): 3173-3184. DOI:10.1360/TB-2020-0618.
HAN Linhai, YANG Youfu, YANG Hua, et al. Life-cycle based analytical theory of concrete-filled steel tubular structures and its applications[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65 (Suppl. 2): 3173-3184. DOI: 10.1360/TB-2020-0618.(in Chinese)
- [2] KHADOR M, CHAN T M. Cyclic behaviour of external diaphragm joint to CHS column with built-in replaceable links[J]. Steel Construction, 2016, 9(4):331-338. DOI:10.1002/stco.201610040.
- [3] RICHARDS P W, OH S S. Cyclic behavior of replaceable shear fuse connections for steel moment frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145 (12): 04019156. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002412.
- [4] LEE J, GOLDSWORTHY H M, GAD E F. Blind bolted moment connection to sides of hollow section columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(12):1900-1911. DOI:10.1016/j.jcsr.2011.06.007.
- [5] BIAN J L, CAO W L, ZHANG Z M, et al. Cyclic loading tests of thin-walled square steel tube beam-column joint with different joint details[J]. Structures, 2020, 25: 386-397. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.03.027.
- [6] LIU X C, WU X T, CHEN X S. Seismic performance of joint between L-shaped CFST column and H-section beam with lower plate and extended flange plate [J]. Engineering Structures, 2022, 261: 114283. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114283.
- [7] 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)
- [8] 刘学春,杨志炜,王鹤翔,等. 螺栓装配多高层钢结构梁柱连接抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6): 34-42. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2017.06.004.
LIU Xuechun, YANG Zhiwei, WANG Hexiang, et al. Seismic performance of beam-column connection in bolted assembled multi-high-rise steel structure [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38 (6): 34-42. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.06.004.(in Chinese)
- [9] 刘学春,浦双辉,徐阿新,等. 模块化装配式多高层钢结构全螺栓连接节点静力及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36 (12): 43-51. DOI: 10.14006/j.jzjgxb. 2015. 12.006.
LIU Xuechun, PU Shuanghui, XU Axin, et al. Experimental study on static and seismic performance of bolted joint in modularized multi-layer and high-rise prefabricated steel structures[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36 (12): 43-51. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2015.12.006.(in Chinese)
- [10] 王修军,王燕,安琦. 装配式梁柱外环板高强螺栓连接节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(6): 53-63, 78. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2020.06.005.
WANG Xiujun, WANG Yan, AN Qi. Experimental study on seismic behavior of prefabricated beam-to-column high-strength bolted joint with external diaphragms[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(6): 53-63, 78. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2020.06.005.(in Chinese)
- [11] 钱玉龙,常鸿飞,刘帅鹏,等. 槽钢连接的装配式矩形钢管柱-H型钢梁节点平面内受弯性能分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39 (增刊2):1-7. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.S2.001.
QIAN Yulong, CHANG Hongfei, LIU Shuaipeng, et al. In-plane bending behavior of channel connections between rectangular tubular column and H-shaped beam [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39 (Suppl.2): 1-7. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.S2.001.(in Chinese)
- [12] WAQAS R, UY B, THAI H T. Experimental and numerical behaviour of blind bolted flush endplate composite connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 153: 179-195. DOI:10.1016/j.jcsr.2018.10.012.
- [13] ELSABBAGH A, SHARAF T, NAGY S, et al. Behavior of extended end-plate bolted connections subjected to monotonic and cyclic loads[J]. Engineering Structures, 2019, 190: 142-159. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.04.016.
- [14] WANG J F, GUO S P. Structural performance of blind bolted end plate joints to concrete-filled thin-walled steel tubular columns[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 60: 54-68. DOI: 10.1016/j.tws.2012.07.006.
- [15] WANG J F, WANG J X, WANG H T. Seismic behavior of blind bolted CFST frames with semi-rigid connections[J]. Structures, 2017, 9:91-104. DOI:10.1016/j.istruc.2016. 10.001.
- [16] MORRISON M, SUAREZ S. Experiments and analysis of unstiffened eight-bolt end-plate moment connections for seismic applications [J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148 (4): 04022005. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003293.
- [17] GUO B, GU Q, LIU F. Experimental behavior of stiffened and unstiffened end-plate connections under cyclic loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132 (9): 1352-1357. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:9(1352).

- [18] 李国强,段炼,陆焯,等. H型钢梁与矩形钢管柱平齐端板单向螺栓节点承载力性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 162-169. DOI: 10.11908/j. issn. 0253-374x.2018.02.003.
LI Guoqiang, DUAN Lian, LU Ye, et al. Bearing capacity for flush end-plated connections between rectangular tubular columns and H-shaped beams with single direction bolts[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(2): 162-169. DOI: 10.11908/j. issn. 0253-374x. 2018.02.003. (in Chinese)
- [19] 李国强,段炼,陆焯,等. H型钢梁与矩形钢管柱外伸式端板单向螺栓连接节点承载力试验与理论研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(9): 91-100. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2015. 09.012.
LI Guoqiang, DUAN Lian, LU Ye, et al. Experimental and theoretical study of bearing capacity for extended endplate connections between rectangular tubular columns and H-shaped beams with single direction bolts [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(9): 91-100. DOI: 10.14006/j. jzjgxb.2015.09.012.(in Chinese)
- [20] 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)
- [21] 赵均海,樊军超,高伟琪. H型钢梁与矩形钢管混凝土柱平齐式端板单边螺栓连接节点弯矩-转角分析模型[J]. 工程力学, 2021, 38(6): 91-102. DOI: 10.6052/j. issn. 1000-4750. 2020.07.0436.
ZHAO Junhai, FAN Junchao, GAO Weiqi. Moment-rotation analysis model of flush end-plate bolted connections between H-shaped steel beams and rectangular CFST columns [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(6): 91-102. DOI: 10.6052/j. issn.1000-4750.2020.07.0436. (in Chinese)
- [22] 索雅琪,范圣刚,刘飞,等. 新型单面螺栓梁柱外伸端板连接节点受力性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 417-424. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-0505. 2020.03.002.
SUO Yaqi, FAN Shenggang, LIU Fei, et al. Experimental study on mechanical properties for extended end-plate connections of beam-column joints using new blind bolt [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(3): 417-424. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-0505.2020.03.002. (in Chinese)
- [23] 石永久,施刚,王元清. 钢结构半刚性端板连接弯矩-转角曲线简化计算方法[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 19-23. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-131X. 2006.03.003.
SHI Yongjiu, SHI Gang, WANG Yuanqing. A simplified calculation method for moment-rotation curve of semi-rigid end-plate connections [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 19-23. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-131X. 2006. 03.003. (in Chinese)
- [24] 殷晓三. 无明显屈服特征构件屈服点的确定与评价[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(3): 143-150. DOI: 10.13197/j. eeev.2019.03.143.yinx.014.
YIN Xiaosan. Evaluation and determination methods on yield point of structural components without obvious yield feature [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(3): 143-150. DOI: 10.13197/j. eeev. 2019.03.143. yinx. 014. (in Chinese)
- [25] 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. (in Chinese)
- [26] 王燕. 钢结构新型延性节点的抗震设计理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
WANG Yan. Seismic design theory and application of new ductile joints in steel structures [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [27] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-8: Design of Joints: EN 1993-1-8[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [28] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005. (in Chinese)