

引用本文:梁书亭,杨 简,朱筱俊,等. 矩形钢管混凝土柱-混凝土梁搭接式节点抗震性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(3): 13-20.

LIANG Shu-ting, YANG Jian, ZHU Xiao-jun, et al. Research on Seismic Performance of Lap Connection Between Rectangular CFST Column and RC Beam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(3): 13-20.

DOI:10.19815/j.jace.2019.01043

矩形钢管混凝土柱-混凝土梁搭接式节点 抗震性能研究

梁书亭¹, 杨 简¹, 朱筱俊², 党隆基¹

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学建筑设计研究院有限公司, 江苏 南京 210096)

摘要:在现有钢管混凝土柱与混凝土梁连接形式基础上,提出一种新型搭接式钢管混凝土柱-混凝土梁节点,通过低周反复荷载试验和数值模拟分析,研究了节点的破坏形态、承载能力、刚度退化、延性及耗能能力等,分析了梁端纵筋和搭接牛腿翼缘的应变发展规律。结果表明:钢管混凝土柱-混凝土梁搭接式节点表现出典型的混凝土梁端塑性铰破坏模式,符合“强节点、弱构件”的抗震设防理念;节点的滞回曲线饱满,捏缩现象较轻,刚度退化明显,强度退化较小,具有较好的延性及耗能能力;梁纵筋及牛腿各测点中搭接牛腿端部截面应变最大,通过搭接连接方式可实现梁端弯矩和剪力的有效传递,但搭接牛腿长度不足会使节点发生锚固破坏;在节点设计时,应保证足够的搭接长度,以实现钢筋混凝土梁纵筋在弯剪复合受力状态下锚固性能的可靠性,充分发挥节点的抗震耗能能力;有限元计算结果与试验结果吻合良好,该模型能够准确反映节点在实际受力情况下的力学特性,所得结论可为此类新型搭接式节点工程应用提供技术支撑。

关键词:梁柱节点; 钢管混凝土柱; 混凝土梁; 低周反复荷载试验; 抗震性能

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)03-0013-08

Research on Seismic Performance of Lap Connection Between Rectangular CFST Column and RC Beam

LIANG Shu-ting¹, YANG Jian¹, ZHU Xiao-jun², DANG Long-ji¹

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. Architects & Engineers Co., Ltd of Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: A new type lap connection between concrete-filled steel tubular (CFST) column and reinforced concrete beam was proposed on the basis of current connection forms of CFST column and reinforced concrete (RC) beam. The failure mode, bearing capacity, stiffness degradation, ductility and energy dissipation capacity of the connection were studied by low cyclic loading test and numerical simulation analysis. The strain development law of longitudinal reinforcement at beam end and lap corbel flange was analyzed. The results show that the lap connection of CFST column and RC beam shows a typical failure mode of plastic hinge at the end of concrete beam,

收稿日期: 2020-07-05

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51908336); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX18-0122); 江苏省建筑设计研究院有限公司研究生工作站项目(8505000995)

作者简介: 梁书亭(1964-), 男, 河南禹州人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: stliang@seu.edu.cn。

which accords with the seismic fortification concept of “strong connection and weak member”. The hysteretic curve of the connection is full, the pinch phenomenon is light, the stiffness degradation is obvious, the strength degradation is small, and the connection has good ductility and energy dissipation capacity. The cross section strain at the end of lap bracket is largest among measuring points of longitudinal reinforcement and corbel. The effective transfer of bending moment and shear force at beam end can be realized by lap connection, but the insufficient lap corbel length will lead to anchorage failure. In the design of connections, enough lap length should be ensured to realize the reliability of anchorage performance of longitudinal reinforcement of reinforced concrete beam under the condition of bending shear composite force and give full play to the seismic energy consumption capacity of the connections. The finite element results are in good agreement with the experimental data. The model can accurately reflect the mechanical characteristics of the connections under the actual stress. The research results can provide technical support for the engineering application of this new type of lap connections.

Key words: beam-column joint; CFST column; RC beam; low cyclic loading test; seismic performance

0 引言

钢管混凝土柱能够发挥钢材与混凝土材料的优势^[1],可有效减小构件的截面尺寸,提高建筑的实用性能,在高层结构中得普遍运用。中国高层结构多采用钢筋混凝土梁-板承重体系,因此钢管混凝土柱与混凝土梁的连接节点是钢管混凝土结构推广应用的核心技术之一。虽然圆钢管混凝土柱具有更好的经济效益,但由于建筑造型及功能需求,方钢管混凝土柱更适用于实际工程^[2]。

目前,国内外学者已对钢管混凝土柱-混凝土梁节点进行了大量研究。聂建国等^[3-4]进行了钢管混凝土柱-钢筋混凝土外加强环式节点在单调和低周反复荷载作用下的力学性能研究,结果表明外加强环式节点具有较高的承载力与刚度,滞回曲线饱满,具有良好的延性及耗能能力。周颖等^[5-6]进行了钢管混凝土叠合柱-钢筋混凝土环梁节点在静力和低周反复荷载作用下的力学性能研究,结合有限元分析提出了节点的抗弯承载力计算公式,结果表明环梁类节点符合“强节点、弱构件”的抗震设防理念,具有较好的耗能能力,公式计算结果与试验结果吻合良好。杨奋^[7]通过数值模拟对钢管混凝土柱-混凝土井式双梁节点受力性能进行分析,得出框架梁设计参数对节点抗弯承载力及刚度的影响规律,结合理论分析提出了井式双梁相应的设计方法。Tang等^[8]提出一种新型贯穿式 CFST 柱-RC 梁节点,并通过拟静力试验研究节点的抗震性能,结果表明此类节点具有良好的延性与耗能能力,通过合理设计可以实现“强节点”的抗震设防目标。尽管上述 4 类

钢管混凝土柱-混凝土梁节点在研究中体现了良好的抗震性能,但在工程设计及施工中仍存在以下问题:①加强环式节点由于节点区加强环间距较小,且梁柱钢筋分布密集,很难保证节点区施工质量;②环梁类节点由于钢筋混凝土环梁材料为各向异性,某些截面存在应力集中现象,会过早开裂,且节点截面尺寸较大,影响建筑的视觉效果;③井式双梁节点由于框架梁纵筋与钢管没有接触,梁柱协同工作能力较弱,无法形成刚性节点,不适用于截面尺寸较大的结构;④贯穿式 CFST 柱-RC 梁节点由于钢管在节点区不连续,施工难度较大,且梁宽度较大时此类节点便不再适用。

针对现有节点存在的问题,以镇江苏宁广场工程项目为背景提出一种新型钢管混凝土柱-混凝土梁搭接式节点(图 1),此新型节点在钢管外侧焊接一段 H 型钢牛腿与混凝土梁搭接连接,牛腿翼缘板通过钢管侧壁的矩形孔洞插入钢管内部,型钢翼缘布置抗剪栓钉以避免钢牛腿与混凝土梁发生黏结滑移。该节点的钢结构施工可在工厂内完成,现场施工无焊接作业,施工方便。

本文通过低周反复荷载试验和数值模拟,研究新型搭接式节点的破坏模式,分析节点的承载力、延性、耗能能力等,以验证新型搭接式节点在工程中的应用的可行性。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验选取常规框架中节点梁柱反弯点间的组合体为节点试件^[9]。考虑实际加载条件与对试件破坏

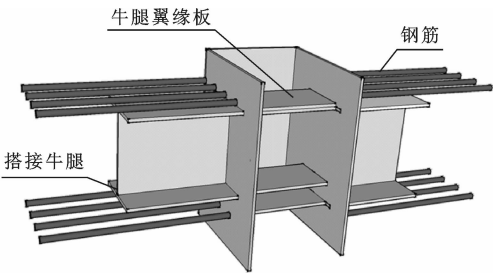


图 1 钢管混凝土柱-混凝土梁搭接式节点

Fig. 1 Lap Connection of CFST Column and RC Beam 模式的控制^[10],柱缩尺比为 1 : 10,梁缩尺比为 1 : 4。试件构造和几何尺寸见图 2(*P* 为荷载)。

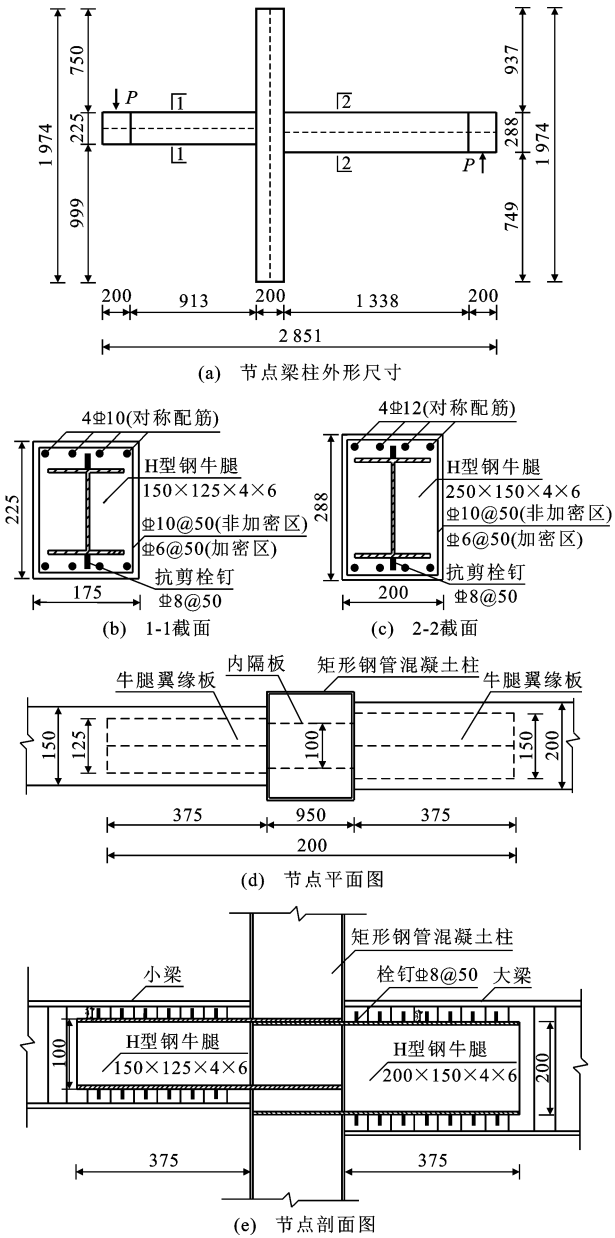


图 2 试件尺寸和构造形式(单位:mm)

Fig. 2 Dimension and Configuration of Specimen (Unit:mm)

矩形钢管截面为 200 mm×250 mm,钢管壁厚 5 mm。节点大梁截面为 200 mm×288 mm,采用 4 根 12 对称配筋,H 型钢牛腿尺寸为 200 mm×150 mm×4 mm×6 mm。小梁截面为 175 mm×225 mm,采用 4 根 10 对称配筋,H 型钢牛腿尺寸为 150 mm×125 mm×4 mm×6 mm。大小梁搭接段内箍筋为 Φ6@50,非搭接段内箍筋为 Φ10@50,两侧搭接牛腿长度均为 375 mm。在牛腿翼缘中线处焊接 Φ8@50 单排抗剪栓钉,栓钉高 25 mm。

1.2 材性试验

节点试件采用 C30 混凝土,在浇筑试件时同时浇筑 3 个 150 mm×150 mm×150 mm 的立方体试块,与节点试件同条件养护 28 d,按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2015)^[11] 中规定,将混凝土立方体抗压强度按式(1)折算为标准抗压强度,混凝土弹性模量 E_c 按式(2)计算。混凝土材性试验结果见表 1。

$$f_{ck}=0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k}\tag{1}$$

$$E_c=1\times10^5/(2.2+\frac{34.7}{f_{cu,k}})\tag{2}$$

式中: $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值; f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值; α_{c1} 为棱柱体强度与立方体强度比值; α_{c2} 为混凝土考虑脆性折减系数。

表 1 混凝土材性试验结果

Tab. 1 Test Results of Material Properties of Concrete			
试件编号	$f_{cu,k}$ /MPa	f_{ck} /MPa	E_c /MPa
1	40.20	26.89	32 646
2	42.99	28.75	33 254
3	41.32	27.63	32 897
平均值	41.50	27.76	32 937

纵筋和箍筋采用 HRB400 级钢筋,钢管与搭接牛腿选用钢材为 Q235B。钢构件的制作加工、钢筋的绑扎及混凝土的浇筑和养护工作均与实际施工工艺相同。钢材的强度按照规范^[12] 规定的方法测得,钢筋及钢材的力学性能指标见表 2。

1.3 加载装置和加载制度

梁柱节点的加载方式有梁端加载和柱端加载^[13],由于本文研究对象为节点梁端塑性铰及核心区,因此采用梁端加载方式,试验加载装置见图 3。试验时在柱底设置柱底靴板,实现柱端为不动铰支座的边界条件,左右两侧梁端设置为自由端。由于试验采用梁端加载方式,加载装置较为复杂,为防止加载过程中构件因变形过大出现平面外失稳,在柱

表 2 钢材及钢筋材性试验结果

Tab. 2 Test Results of Material Properties of Steel and Reinforcement

构件	钢筋强度	设计厚度/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
柱钢管	Q235	5	325	447
牛腿翼缘	Q235	6	387	521
牛腿腹板	Q235	4	325	442
梁纵筋	HRB400	10	434	620
	HRB400	12	437	600
梁箍筋	HRB400	6	412	583
	HRB400	10	437	600

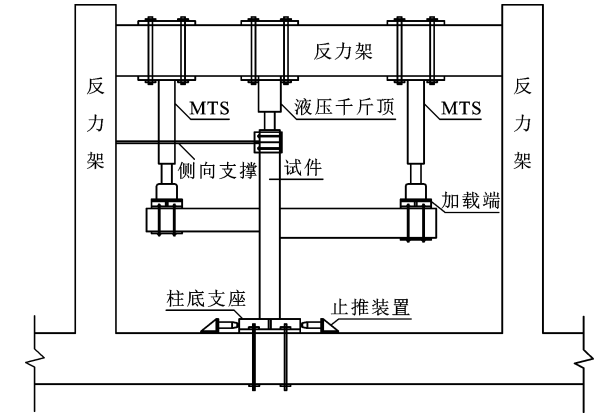


图 3 试验加载装置
Fig. 3 Test Loading Device

顶设置水平侧向支撑。柱顶端轴压荷载由反力架和液压千斤顶施加，轴压比取 0.15，梁端荷载由行程±250 mm 的电液伺服作动器施加。

试验按照《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[14]中有关拟静力的加载方法进行。试验采用荷载-位移混合加载制度，具体加载程序为：①试件屈服前采用荷载控制，每级荷载往复 1 次，至钢筋测点或牛腿测点达到屈服，表示试件屈服；②试件屈服后转为位移控制，加载位移取屈服位移的整数倍，每级循环 3 次。每级加载持荷 5 min 用于观察裂缝发展及试件变形情况。出现下列情况时试验终止：①承载力下降至峰值荷载的 85% 以下；②节点出现严重破坏。

1.4 数据采集

采用压力传感器观测并记录柱端施加的轴向压力，梁端荷载-位移数据由电液伺服试验系统自动记录。使用 TST3826 动态分析系统及 DH3816 静态分析系统采集各应变片及位移计的数据，关键应变测点的布置如图 4 所示。

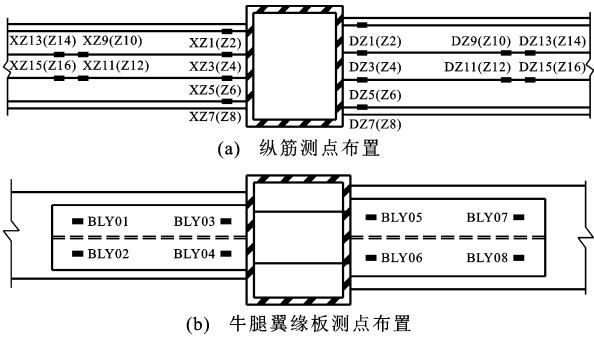


图 4 应变测点布置
Fig. 4 Arrangement of Strain Measuring Points

2 试验现象和破坏形态

2.1 加载过程及现象

小梁加载前期，梁上、下表面距柱 375 mm 处出现数条弯曲裂缝，随着梁端荷载的增大，上、下表面裂缝逐渐向梁侧面延伸，形成相互交叉的斜向裂缝。进入屈服阶段后，裂缝宽度逐渐增加，交叉裂缝上、下三角区域混凝土压碎、剥落，梁纵筋与箍筋露出，形成塑性铰。小梁在牛腿翼缘端部发生梁铰破坏。

大梁加载前期，与小梁相同，距柱 375 mm 处截面出现数条弯曲裂缝，随梁端荷载增加，梁上、下表面裂缝向侧面延伸。当梁端荷载接近屈服荷载时，梁搭接段(距柱 375 mm 以内)出现斜向裂缝，斜向裂缝沿 45°方向发展，沿梁中和轴对称分布。进入位移加载阶段时，搭接段内斜向裂缝不断发展，搭接段外出现数条弯曲裂缝。当位移加载至 64.6 mm 时，梁柱搭接处纵向钢筋出现较大滑移，混凝土受拉开裂，大梁承载力下降至极限承载力 85% 以下，大梁搭接处纵筋出现锚固失效破坏。

2.2 裂缝分布及破坏形态

试件加载过程中钢管柱及节点核心区未破坏，混凝土梁呈现梁铰破坏和搭接段锚固失效破坏 2 种形态，试件的破坏形态及裂缝分布如图 5 所示。

节点试件裂缝主要分布在混凝土梁上，裂缝类型主要为弯曲裂缝和弯剪斜裂缝。试件加载时，混凝土梁在上、下表面刚度突变区出现弯曲裂缝，裂缝基本贯穿截面。随梁端位移增大，梁端裂缝分别从顶部和底部边缘向梁中部发展并延伸贯通。当试件进入屈服阶段，大梁纵筋出现滑移导致混凝土受拉开裂，搭接段内出现弯剪斜裂缝，大梁发生锚固破坏；小梁纵筋锚固强度足够，其裂缝形式多为弯曲裂缝，小梁最终在刚度突变处发生梁铰破坏。

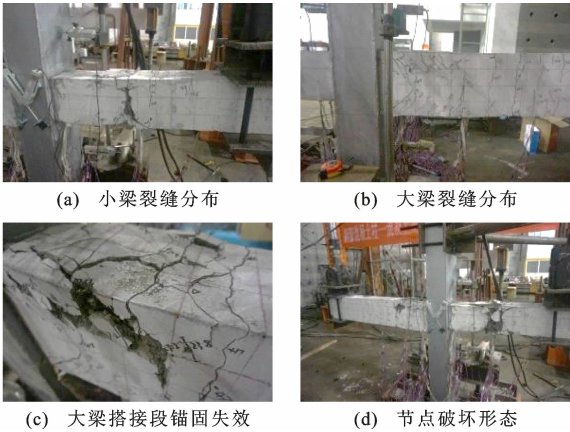


图 5 试件破坏形态及裂缝分布

Fig. 5 Failure Modes and Crack Distribution of Specimens

2.3 梁端滞回曲线

试件在低周往复荷载作用下的梁端荷载-位移滞回曲线如图 6 所示。

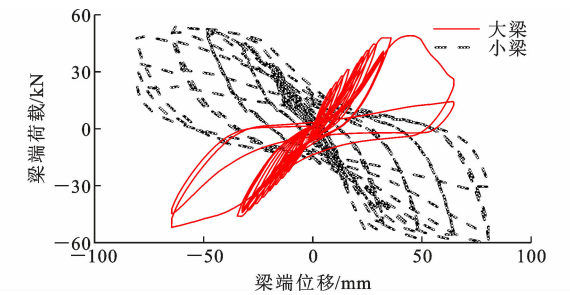


图 6 梁端荷载-位移滞回曲线

Fig. 6 Load-displacement Hysteretic Curves

由图 6 可看出：

(1)加载初期,梁端荷载较小,混凝土梁尚未开裂,处于弹性工作状态,荷载-位移滞回曲线呈线性关系,加载与卸载路径基本重合,滞回环面积较小,耗能能力较弱。随梁端荷载的增加,节点滞回曲线逐渐饱满,由于混凝土裂缝开展与纵筋滑移导致滞回曲线呈现一定的“捏缩”现象。节点小梁滞回曲线呈弓形,耗能能力较强,而大梁的滞回曲线呈反“S”形,存在一定的捏缩效应,节点具有较好的滞回性能。

(2)随梁端荷载的增大,达到峰值荷载前,节点梁强度退化不明显,刚度退化较明显,即节点在发生变形的情况下仍能保持稳定的承载力,具有较好的抗震性能。受纵筋滑移影响,大梁承载力达到峰值后迅速降低,表现出脆性破坏的特征,延性及耗能能力较差,在工程中可通过增加搭接长度予以避免。

2.4 梁端骨架曲线

试件在低周反复荷载作用下的骨架曲线如图 7

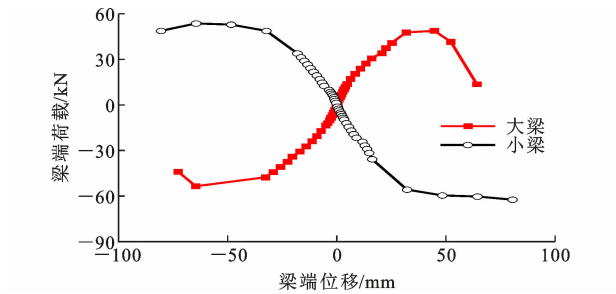


图 7 梁端荷载-位移骨架曲线

Fig. 7 Load-displacement Skeleton Curves of Beam End

所示。通过综合分析荷载-位移骨架曲线和钢材应变发展规律,钢管混凝土柱-混凝土梁搭接式节点的加载过程可分为 4 个阶段：

(1)弹性工作阶段。该阶段内试件大、小梁的荷载-位移曲线基本呈线性关系,梁端无裂缝出现。

(2)裂缝发展阶段。大、小梁初始裂缝均出现在梁刚度突变区,随梁端荷载增大,梁端裂缝不断发展贯通。节点核心区未出现较大剪切变形,该阶段内钢筋、型钢牛腿和钢管柱均未屈服。

(3)屈服阶段。该阶段内混凝土梁内搭接处纵筋受拉屈服,混凝土压碎剥落,塑性铰逐渐形成,而钢管和型钢牛腿始终未屈服。

(4)破坏阶段。节点核心区未发生较大剪切变形,小梁端荷载达到峰值后,塑性铰充分发展,承载力平缓下降,具有较好的延性和耗能能力;大梁因锚固失效出现脆性破坏,达到峰值荷载后即失去承载能力,延性和耗能能力未得到充分发挥。

屈服荷载 P_y 采用图解法^[15]求得,极限荷载 P_m 取荷载-位移曲线最高点对应的荷载值。试件的屈服荷载 P_y 、极限荷载 P_m 和破坏荷载 P_u 数值如表 3 所示。由表 3 可知:由于组合梁截面及材料分布的不对称性,节点试件的负向承载力高于正向承载力;小梁极限荷载 P_{max} 在 2 个加载方向均高于大梁,原因在于试验过程中大梁发生锚固破坏,破坏时尚未达到其极限承载能力。

表 3 试件承载力

Tab. 3 Bearing Capacity of Specimen

位置	P_y /kN		P_{max} /kN		P_u /kN	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向
大梁	42.2	-46.4	48.8	-53.5	41.5	-46.1
小梁	55.7	-44.8	53.6	-62.5	48.7	-62.5

2.5 延性

由于试验中节点因搭接段混凝土梁出现塑性铰破坏,因此采用梁端位移延性系数 μ 衡量节点的变形能力^[16]。位移延性系数的计算公式为

$$\mu=\frac{\Delta_u}{\Delta_y}\tag{3}$$

式中： Δ_y 为试件的屈服位移； Δ_u 为试件的极限位移。

位移延性系数值越大，能够耗散地震能量和承受非弹性变形的能力越强。试件梁端的屈服位移 Δ_y 、峰值位移 Δ_{\max} 、极限位移 Δ_u 及延性系数 μ 见表 4。由表 4 可知：节点试件的位移延性系数大于 2.0，高于钢筋混凝土结构对位移延性系数的要求^[17]，说明新型搭接式节点延性较好。同时，搭接处纵筋锚固失效降低了节点的延性，若锚固强度能够得到保证，节点延性性能可进一步提升。

表 4 节点的位移延性系数

Tab. 4 Displacement Ductility Coefficient of Connection

位置	Δ_y /mm		Δ_{\max} /mm		Δ_u /mm		μ
	正向	负向	正向	负向	正向	负向	
大梁	26.6	−31.3	44.7	−64.6	52.2	−72.6	2.3
小梁	32.2	−28.5	64.4	−80.5	80.5	−62.5	

2.6 耗能能力分析

图 8 为试件等效黏滞阻尼系数 h_e 随梁端加载级数之间的关系。

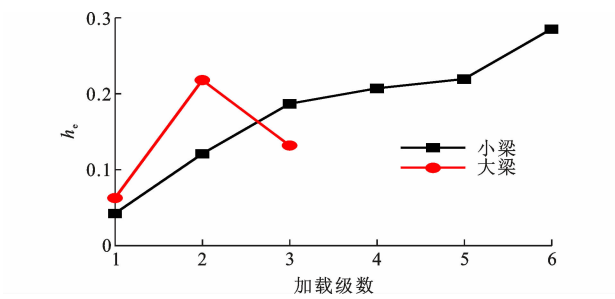


图 8 等效黏滞阻尼系数与加载级数的关系曲线
Fig. 8 Relation Curves of Equivalent Viscous Damping Coefficient and Load Grade

从图 8 可以看出：

(1)试件屈服前，塑性铰未完全形成，耗能能力较弱，等效黏滞阻尼系数 h_e 数值较小，试件屈服后，小梁梁端塑性铰逐渐形成，耗能能力逐步增强，等效黏滞阻尼系数 h_e 不断增大。大梁由于发生锚固破坏，塑性铰未能充分发展，耗能能力较差。

(2)节点达到极限状态时的等效黏滞阻尼系数 $h_e=0.169$ ，而普通混凝土结构的等效黏滞阻尼系数 h_e 约为 0.1^[18]。可见新型搭接式节点的耗能能力优于普通混凝土结构，满足抗震设计的要求。

2.7 钢筋应变分析

试验采集了各测点的应变，得到了各测点应变-时间关系曲线。为研究节点搭接段的内力传递机理，分析梁内纵筋与翼缘板应变分布规律，选取小梁

纵筋测点与小梁牛腿翼缘测点进行分析。图 9 为试件加载过程中的应变曲线。

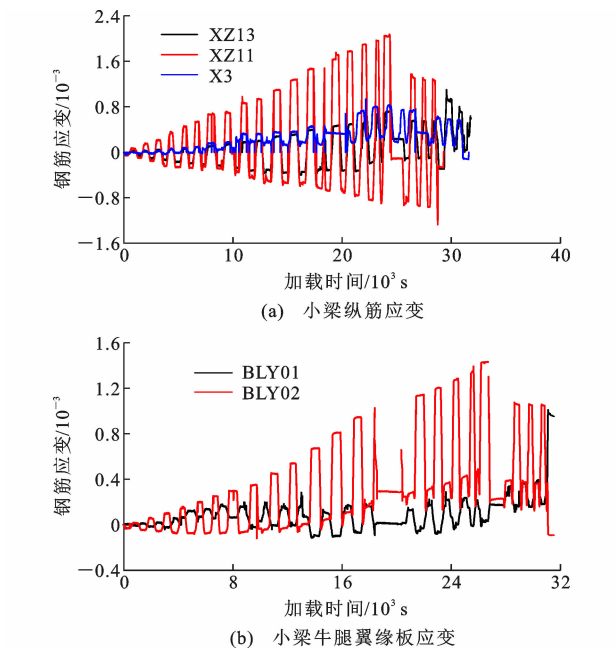


图 9 关键点应变分布

Fig. 9 Strain Distribution of Key Points

从图 9 可以看出：

(1)混凝土梁纵筋各测点中牛腿翼缘板端部测点应变最大，同时牛腿翼缘板端部测点应变高于根部测点应变，即同一单元各测点中搭接段应变最大，说明梁端荷载能够有效从混凝土梁段传递至搭接段牛腿，进而传递至节点核心区。

(2)对各测点应变数值分析可知，混凝土梁各测点中仅搭接段 XZ11 测点达到钢筋屈服应变，而牛腿翼缘板各测点均未达到屈服应变，说明梁端荷载由牛腿端部混凝土梁截面承担，应变数据与试验中小梁在搭接段端部发生梁铰破坏现象吻合。

3 ABAQUS 有限元分析

3.1 模型建立

有限元模型的试件尺寸、构造方式、边界条件设置与荷载施加制度与试验一致，各材料选用 ABAQUS 软件中提供的单元进行模拟，混凝土使用 C3D8R 单元进行模拟，钢管、钢牛腿使用 S4R 单元进行模拟，钢筋采用 T3D2 单元模拟。钢筋、钢板与混凝土之间的采用 Embedded 约束。考虑钢管与节点核心区混凝土的黏结滑移效应，核心混凝土与钢管之间切向作用通过库仑摩擦模型进行模拟，摩擦因数按照文献[19]建议取值 0.25，法向作用通过“硬接触”进行模拟。混凝土采用塑性损伤模型，钢

材采用双折线强化材料本构模型,具体参数取材性试验实测值。有限元模型及网格划分如图 10 所示。

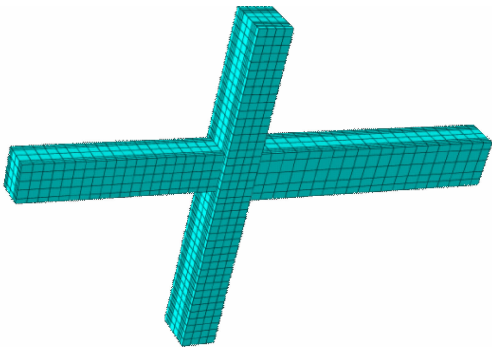
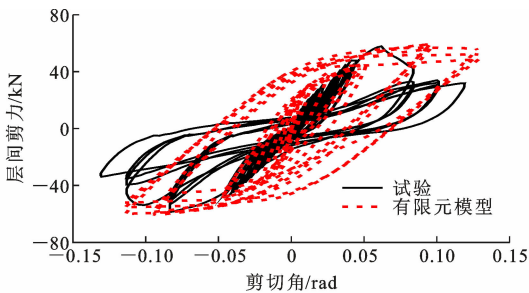


图 10 有限元模型及网格划分

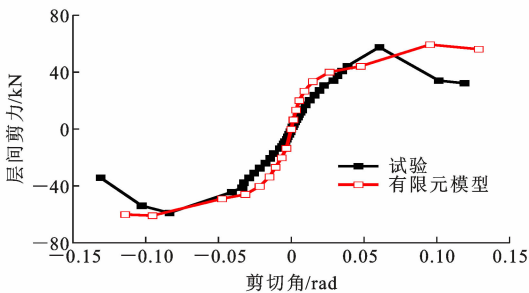
Fig. 10 Finite Element Model and Mesh Generation

3.2 滞回曲线与骨架曲线分析

有限元分析得到节点层间剪力-剪切角滞回曲线和骨架曲线与试验曲线对比如图 11 所示。



(a) 滞回曲线对比



(b) 骨架曲线对比

图 11 模拟结果与试验结果对比

Fig. 11 Contrast of Experimental and Simulation Results

由图 11 可知,有限元模拟结果与试验结果吻合良好。在弹性加载阶段,两者差异较小,试件进入屈服阶段后,由于有限元模拟未考虑混凝土与钢筋的黏结滑移作用,数值模拟结果与试验结果偏差逐渐增大。

3.3 层间剪力对比

表 5 为有限元模拟层间剪力与试验层间剪力峰值的对比。由表 5 可知,有限元模拟结果与试验结果吻合良好,相对误差均在 3% 左右。该模型能够准确地反映构件的受力情况。

表 5 层间剪力对比

Tab. 5 Contrast of Story Shear Force

加载方向	试验层间剪力/kN	模拟层间剪力/kN	相对误差/%
正向	57.66	59.52	-3.23
负向	-58.80	-60.82	-3.44

4 结 语

(1)钢管混凝土柱-混凝土梁搭接式节点的破坏模式为梁端出现塑性铰破坏,节点核心区基本处于弹性工作阶段,符合“强节点、弱构件”的抗震设计要求。

(2)钢管混凝土柱-混凝土梁搭接式节点的滞回曲线较为饱满,试件承载力较高,在加载过程中刚度退化现象明显,强度退化较小,具有较好的延性及耗能能力。

(3)梁柱搭接处纵筋的有效锚固是防止发生脆性破坏,充分发挥试件承载力、延性及耗能能力的重要保证,应保证搭接处纵筋在弯剪复合作用下锚固的可靠性,避免构件因锚固失效出现脆性破坏。

(4)本文数值分析结果与试验结果吻合良好,该成果可为节点的优化设计提供分析基础。

参考文献:

References:

[1] 徐 嫚,吴振宇,张令心,等.方钢管混凝土柱-钢梁角钢连接节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017,38(增 1):384-393.
XU Man, WU Zhen-yu, ZHANG Ling-xin, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Angle Connection Joints for Concrete-filled Square Steel Tubular Column to Steel Beam[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(S1): 384-393.

[2] 韦 宏,陈添明,刘庆辉.钢筋混凝土梁-方钢管混凝土柱环梁节点静力试验研究及设计方法[J]. 建筑结构学报, 2013,34(1):76-84.
WEI Hong, CHEN Tian-ming, LIU Qing-hui. Experimental Research on RC Beam-STCC Column Joint Connected with Ring Beam and Design Method[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 76-84.

[3] 聂建国,王宇航,陶慕轩,等.钢管混凝土叠合柱-钢筋混凝土梁外加强环节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012,33(7):88-97.
NIE Jian-guo, WANG Yu-hang, TAO Mu-xuan, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Laminated Steel Tube Column-concrete Beam Joint with Outer Stiffening Ring[J]. Journal of Building Structures,

- 2012,33(7):88-97.
- [4] 刘记雄,戴绍斌,黄俊,等. T形截面钢管混凝土组合柱-钢筋混凝土梁加强环筋连接节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(8):23-32.
- LIU Ji-xiong, DAI Shao-bin, HUANG Jun, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Stiffening Ring Joint of T-shaped Concrete-filled Rectangular Composite Steel Tubular Column and RC Beam[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(8): 23-32.
- [5] 周颖,于海燕,钱江,等. 钢管混凝土叠合柱节点环梁试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(2):69-78.
- ZHOU Ying, YU Hai-yan, QIAN Jiang, et al. Experimental Study on Ring Beams of Joints of Concrete Filled Steel Tubular Laminated Columns[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(2): 69-78.
- [6] 周颖,于海燕,钱江,等. 钢管混凝土叠合柱节点环梁受弯承载力计算方法[J]. 建筑结构学报,2015,36(2):79-86.
- ZHOU Ying, YU Hai-yan, QIAN Jiang, et al. Moment Capacity Calculation Method on Ring Beams of Joints of Concrete Filled Steel Tubular Laminated Columns[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(2): 79-86.
- [7] 杨奋. 井式双梁节点受力性能分析[D]. 广州:华南理工大学,2015.
- YANG Fen. Structural Behavior Analysis of Double-beam Joint[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [8] TANG X L, CAI J, CHEN Q J, et al. Seismic Behaviour of Through-beam Connection Between Square CFST Columns and RC Beams[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 122: 151-166.
- [9] 崔中敏. SRC柱-钢梁及SRC柱-组合梁节点抗震性能试验研究[D]. 郑州:郑州大学,2017.
- CUI Zhong-min. Study on the Seismic Behavior of Frame Joints with SRC Columns and Steel Beams and Steel-concrete Composite Beams [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [10] LI W, HAN L H. Seismic Performance of CFST Column to Steel Beam Joints with RC Slab: Analysis[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(1): 127-139.
- [11] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [12] GB/T 228.1—2010, 金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法[S].
- GB/T 228.1—2010, Metallic Materials — Tensile Testing — Part1: Method of Test at Room Temperature[S].
- [13] 王伟,秦希,王俊杰. 内隔板式与隔板贯通式方钢管混凝土柱-H形钢梁节点抗连续倒塌性能对比[J]. 建筑结构学报,2017,38(增1):362-368.
- WANG Wei, QIN Xi, WANG Jun-jie. Comparison of Progressive Collapse Behavior Between Inner-diaphragm Stiffened and Through-diaphragm Stiffened Concrete Filled SHS Column-H Beam Joints[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(S1): 362-368.
- [14] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].
- JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Buildings[S].
- [15] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京:东南大学出版社,1989.
- TANG Jiu-ru. Seismic Resistance of Joints in Reinforced Concrete Frames[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989.
- [16] 邹恩福,乐风江,张利新,等. 装配式预应力混凝土框架梁端延性试验研究[J]. 建筑科学,2017,33(1):57-62.
- ZOU En-fu, YUE Feng-jiang, ZHANG Li-xin, et al. Experimental Study on Ductility of Prefabricated Prestressed Concrete Frame Beam End[J]. Building Science, 2017, 33(1): 57-62.
- [17] 周海兵,何益斌,郭健,等. 钢骨钢管混凝土柱-钢骨混凝土梁组合节点试验研究[J]. 土木工程学报,2012,45(3):67-73,165.
- ZHOU Hai-bing, HE Yi-bin, GUO Jian, et al. Experimental Study on Composite Joints of Steel-reinforced Concrete-filled Steel Tubular Columns and Steel-reinforced Concrete Beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 67-73, 165.
- [18] 徐桂根,聂建国. 方钢管混凝土柱内隔板贯通式节点核心区抗震性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2011,44(8):25-32.
- XU Gui-gen, NIE Jian-guo. Experimental Study of Connections of Concrete-filled Square Steel Tubular Columns with Continuous Diaphragms[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8): 25-32.
- [19] SCHNEIDER S P. Axially Loaded Concrete-filled Steel Tubes[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(10): 1125-1138.