



# 矩管混凝土柱-SRC 梁型钢 贯通节点抗震性能试验研究

何乐平<sup>1</sup>, 凌霄<sup>1</sup>, 胡启军<sup>1</sup>, 蔡其杰<sup>2</sup>, 孟庆成<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学 土木工程与建筑学院, 成都 610500; 2. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031)

**摘要:**提出一种适用于快速施工的新型矩管混凝土柱-SRC 梁型钢贯通节点形式。参考实际两种建筑规格,设计4个节点试件,基于拟静力荷载试验,探讨节点试件抗震性能,分析各试件的破坏现象、滞回性能、刚度、延性及耗能能力等抗震性能。结果表明:节点的破坏形态为梁端混凝土压坏,型钢翼缘屈曲,形成塑性铰;试件的滞回曲线相对饱满,刚度退化明显,延性系数在2.33~3.8之间,等效黏滞阻尼系数在0.283~0.4之间。与已有节点对比,新型节点刚度大,同时避免了核心混凝土浇筑困难的问题。

**关键词:**型钢混凝土梁;节点;破坏形态;抗震性能;刚度

**中图分类号:**TU398 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)06-0118-09

## Experimental analysis of seismic performance of the joint of rectangular tube concrete column-SRC beam steel

He Leping<sup>1</sup>, Ling Xiao<sup>1</sup>, Hu Qijun<sup>1</sup>, Cai Qijie<sup>2</sup>, Meng Qingcheng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, P. R. China;  
2. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** A new type of through-node of rectangular tube concrete column-SRC beam steel suitable for rapid construction is proposed. With reference to two actual building specifications, four-node test pieces were designed. Based on the pseudo-static load tests, the seismic performance of the joint specimens was discussed, and the seismic behaviors, such as failure phenomena, hysteretic behavior, stiffness, ductility and energy dissipation capacity were analyzed. The test results show that the failure mode of the joint is the compression failure of the concrete at the beam end concrete, coupled with the buckling of steel flange and finally forming a plastic hinge. The hysteresis curve of the specimen is relatively full, and the stiffness is obviously degraded. The ductility coefficient is between 2.33 and 3.8. The equivalent viscous damping coefficient is between 0.283 and 0.4. Compared with the existing nodes, the new type of joint has high

**收稿日期:**2019-05-08

**基金项目:**国家自然科学基金(51574201);四川省科技支撑计划(2015SZ0232)

**作者简介:**何乐平(1979-),女,讲师,主要从事建筑与土木工程研究,E-mail:171278402@qq.com。

胡启军(通信作者),男,教授,博士,E-mail:huqijunswpu@163.com。

**Received:**2019-05-08

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51574201); Science and Technology Support Program (No. 2015SZ0232)

**Author brief:** He Leping(1979-), main research interests: architecture and civil engineering, E-mail:171278402@qq.com.  
Hu Qijun(corresponding author), professor, PhD, E-mail: huqijunswpu@163.com.

rigidity and avoids the problem of difficult core concrete pouring.

**Keywords:** steel reinforced concrete beams; joints; failure modes; seismic performance; stiffness

由钢管混凝土(CFST)柱和型钢混凝土(SRC)梁组成的框架结构形式是钢管混凝土结构体系中较优的组合形式。在该结构体系中,柱梁节点一般采用工厂预制、现场装配的施工方式,以确保施工快速进行。作为CFST柱-SRC梁体系设计中最重要因素之一,节点的抗震性能和施工工艺一直是相关学者关注的热点话题<sup>[1-4]</sup>。

近年来,结构工程领域不断涌现出新的节点形式,并分别针对其构造特征、传力性能、破坏形态及抗震性能等进行了许多探索。已有的CFST柱梁节点类型有贯通节点<sup>[5-7]</sup>、螺栓节点<sup>[8-10]</sup>、加强环节点<sup>[11-12]</sup>、钢牛腿节点<sup>[13-14]</sup>等。其中贯通节点由于具有机械化加工、节省空间、施工安装方便等优缺点,得到了越来越广泛的应用,常见的有隔板贯通节点<sup>[15-17]</sup>和钢筋贯通节点<sup>[18-19]</sup>等。文献<sup>[16, 20-21]</sup>提出了几种新型隔板贯通节点,并对其进行了抗震性能试验。文献<sup>[22]</sup>提出了CFST柱-RC梁之间新型对射连接,钢接头中断,纵向钢筋穿过核心区。Li等<sup>[23]</sup>对连续翼缘和垂直锚固这两种嵌入单元连接进行试验研究,连续翼缘连接有效的将钢梁的内力传递到节点板区,垂直锚固连接具有更好的刚度。MZHD等<sup>[24]</sup>提出直肋加劲钢梁弯矩连接,型钢直接贯通钢管柱,节点具有更好的刚度和延性。上述文献着重对节点抗震性能的研究,忽略了节点复杂程度或核心混凝土浇筑难的问题,无法兼顾性能良好和施工便捷的综合考量。

针对上述节点存在的问题,作者提出一种适用于快速施工的矩管混凝土柱-SRC梁型钢贯通式节点形式。设计4个新型节点试件,对其快速施工工艺进行阐述,开展拟静力荷载试验,研究新型节点的破坏形态及抗震性能,以期丰富钢管混凝土柱-型钢混凝土梁框架结构节点类型。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计及基本参数

为研究新型矩管混凝土柱-SRC梁型钢贯通式节点的破坏形态和抗震性能,参照规范选择两类原型建筑尺寸,设计加工了4个新型节点试件,并对其进行了低周反复荷载试验。试验在室内反力架上进行,限制了构件大小,采用缩尺模型,缩尺比例 $\lambda$ 取为1:3。4个试件对应两种建筑结构,编号 $J_1 \sim J_4$ , $J_1、J_2$ 为第一类尺寸,对应商业、办公建筑,以 $J_1$ 为例,如图1所示,工字钢穿插方式见图2; $J_3、J_4$ 为第二类尺寸,对应民用建筑。试件参数如表1所示。

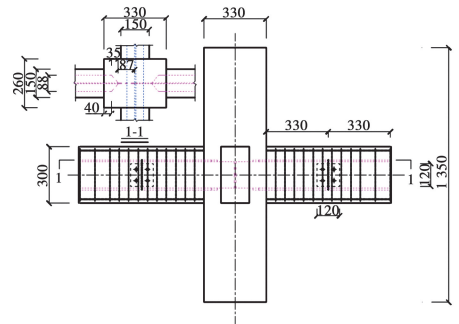


图1 试件主要尺寸

Fig. 1 Main dimensions of test piece

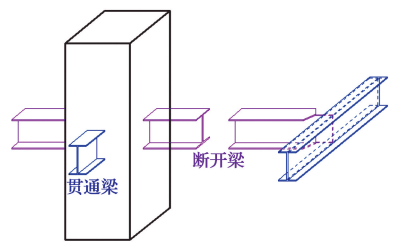


图2 工字钢穿插示意图

Fig. 2 Schematic diagram of I-beam insertion

试件加工过程中,在工厂预制钢管和型钢后,需回炉去应力。将预制件运至现场,现场拼接及配筋。拼接过程中,断开梁端型钢腹板嵌入贯通型钢的上下翼缘之间,并且与贯通梁腹板垂直贴合,在配置纵筋时,在符合规范的情况下,适当调整纵筋和箍筋的位置,以保证纵筋的顺利焊接。在现场浇筑过程中,钢管混凝土柱管内管外需同时振捣,以保证管内混凝土填充密实。

表 1 试件变化参数

Table 1 test piece change parameters

编号	柱截面	梁截面	型钢	混凝土	钢	纵筋	箍筋
$J_1, J_2$	330 mm×260 mm×7 mm	300 mm×150 mm	150 mm×75 mm×5 mm×7 mm	柱:C60	Q235B	HRB400	HPB300
$J_3, J_4$	270 mm×220 mm×5 mm	200 mm×120 mm	125 mm×60 mm×4 mm×6 mm	梁:C40			

## 1.2 试验装置及加载制度

试验所需的仪器有反力架、60 t 液压千斤顶、50 t 作动器、数据测量设备等,如图 3 所示。试验采用拟静力加载,梁加载端荷载-位移由液压伺服拟静力试验系统自动记录。柱顶通过液压千斤顶施加竖向荷载,由于加载条件限制,在整个试验过程中施加轴压力 500 kN,并保持恒定,作为上部楼层的反作用力<sup>[8,24-28]</sup>。计算所得轴压比为  $J_1, J_2: 0.25; J_3, J_4: 0.31$ ,满足《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)对矩形钢管混凝土柱轴压比不宜大于 0.8 的要求。试验开始时,将轴压力施加到预定值,柱底和柱顶均设置钢帽,均匀分配轴向荷载的同时,限制矩管混凝土柱水平位移及偏转。试件加载位置如表 2 所示。试验重点观测内容:1)观测节点核心区破坏方式,测定位移、内力,分析其薄弱位置;2)确定节点的屈服承载力和极限承载力;3)绘制节点滞回曲线及骨架曲线,探讨其刚度、延性及耗能能力。

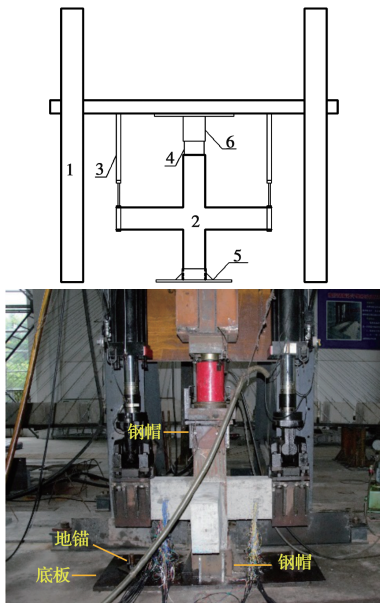


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test setup

表 2 试件加载位置

Table 2 Test piece loading position

试件编号	加载位置
$J_1$	断开梁端
$J_2$	贯通梁端
$J_3$	贯通梁端
$J_4$	断开梁端

试验开始由作动器向梁端施加低周往复荷载,采用荷载-位移加载制度。在加载初期采用荷载控制,每级荷载增量±20 kN,每级循环 1 次,加载速率 0.5 kN/s,直至构件屈服,试验过程中观察液压伺服拟静力试验系统界面荷载-位移的变化来判断试件屈服,屈服后采用位移加载。以屈服位移为第 1 级荷载,加载级别为屈服位移倍数,加载速率 1 mm/s,每级循环两次,直至构件破坏。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 节点破坏形态分析

试件破坏形态如图 4 所示。左侧在梁端荷载为 60 kN 时,梁上部距节点 220 mm 处产生第 1 条裂缝,随着荷载增加,裂缝向斜向扩展,新增裂缝快速发展并贯通截面。荷载为 100 kN 时,梁端位移明显增大,试件达到屈服荷载,此时梁端位移为 15 mm。改为位移控制,加载至梁端位移为 20 mm 处时,钢管柱壁鼓起,梁端倾角增大。达到 40 mm 级位移时,试件荷载下降到峰值荷载的 80%,试验结束。考虑到裂缝仅仅在梁中部发展,节点核心区梁柱未出现明显破坏,试件  $J_1$  的破坏模式可归结为梁-铰破坏。



图 4 破坏现象

Fig. 4 Failure modes of specimen

$J_2$  构件右梁栓焊混合连接率先破坏,具体原因为焊缝质量偏差,焊缝横向位置有宽 0.5 mm,长为 4 mm 的空隙,加载过程中此处先行破坏。裂缝撕裂

后,由螺栓和型钢腹板承受全部剪力,最终型钢腹板先被剪断,如图 5 所示。



图 5 栓焊连接破坏

Fig. 5 Failure modes of specimen

试件  $J_3$ 、 $J_4$  在加载初期的现象与  $J_1$  基本相同,梁中混凝土大面积破碎脱落,梁中型钢翼缘屈服,节点核心区未见明显破坏,见图 6,试件  $J_3$ 、 $J_4$  也可归为梁-铰破坏。

相比于型钢混凝土梁的破坏程度,节点核心区变形很小,型钢贯通连接对节点区刚度和抗剪性能提升很大。



(a)  $J_3$ 破坏形态

(b)  $J_4$ 破坏形态

图 6 试件破坏形态

Fig. 6 Failure modes of specimen

## 2.2 试件 $P-\Delta$ 曲线

为方便观察节点破坏过程,试件在破坏时就停止加载,故最后一级荷载未形成滞回环。图 7 显示 4 个试件梁端荷载位移曲线。

试件  $J_1$  在梁端位移达到 20 mm 时,检测到梁端

荷载增长缓慢,此时判断其即将达到极限承载力,梁端位移达到 30 mm 时,荷载不再增加,判断其破坏,不进行下一级加载,故没有完整的滞回环。达到 40 mm 位移时,试件荷载下降到峰值荷载的 80%,停止加载,试验结束。

梁柱节点处混凝土在加载过程中被压坏而退出工作,随着循环荷载的增加,节点区梁端上下部位混凝土破坏程度不一致,所以试件的滞回环呈明显的不对称性,推力作用下的滞回环面积明显大于拉力作用下的滞回环面积。试件  $J_4$  在加载过程中进行了完整的荷载-位移加载,其滞回曲线较  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$  更完整。梁柱交接处混凝土脱离柱壁后,在荷载正交替过程中,此时混凝土未参与工作,仅由型钢承受荷载,所以试件滞回曲线存在一定捏拢现象。钢管与核心混凝土、型钢与混凝土、钢筋与混凝土均未发生明显的粘结滑移现象,各组件能很好的协同工作。

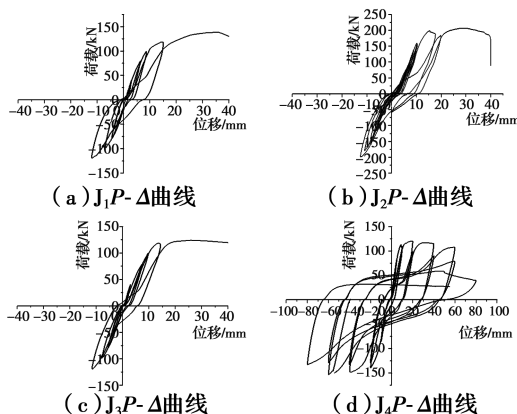


图 7 试件曲线

Fig. 7  $P-\Delta$  hysteresis curves of the tested specimens

2.3.1 试件延性分析 将试验测得的滞回曲线上每级循环的各个荷载峰值点相连,可以得到各试件的  $P-\Delta$  骨架曲线。如图 8 所示。从节点试件荷载-位移骨架曲线上确定屈服状态、极限荷载及破坏荷载如表 3 所示。利用延性系数  $\mu^{[29]}$  来衡量节点延性,延性计算结果列于表 3。由表 3 可知试件  $J_1$ 、 $J_2$  的延性系数比  $J_3$ 、 $J_4$  大,原因是  $J_1$ 、 $J_2$  梁柱截面尺寸较大,具有更高的延性,同时数据表明贯通梁延性系数大于断开梁。4 个试件的延性系数在 2.33~3.8 之间,符合混凝土结构层间位移延性系数大于等于 2 的要求。

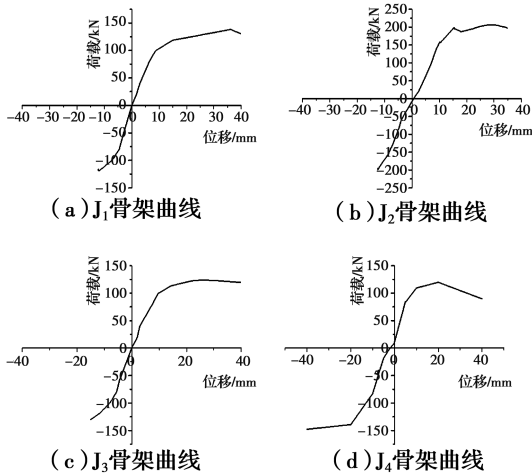


图8 节点骨架曲线

Fig. 8  $P-\Delta$  hysteresis curves of the tested specimens

## 2.3 延性、刚度、耗能能力

表3 延性系数表

Table 3 Ductility coefficients of the tested specimens

节点编号	屈服状态		极限状态		延性系数 $\mu$
	$p_y$	$\Delta_y$	$P_u$	$\Delta_u$	
$J_1$	108	12	124	38	3.16
$J_2$	175	10	190	38	3.8
$J_3$	100	10	118	27	2.7
$J_4$	110	9	125	21	2.33

2.3.2 刚度退化 试件的刚度可用割线刚度  $k_j$  来表示,割线刚度应按式(1)来计算<sup>[29]</sup>。

$$k_j = \frac{|+F_j| + |-F_j|}{|+X_j| + |-X_j|} \quad (1)$$

式中: $F_j$  为第  $j$  次峰点荷载值; $X_j$  为第  $j$  次峰点位移值。由于混凝土开裂等因素的影响,试件刚度  $k_j$  随着位移级别的增大而减小,这与节点屈服后型钢弹塑性性质及累计损伤有关。

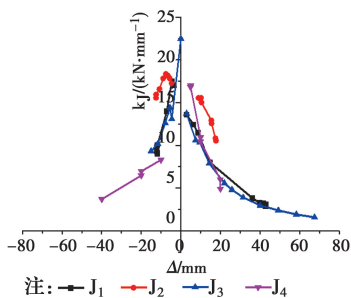


图9 试件刚度退化曲线

Fig. 9 Stiffness degradation of the tested specimens

2.3.3 耗能能力分析 构件的能量耗散能力应以荷载-位移滞回曲线(如图10所示)所包围的面积来

衡量,能量耗散系数  $E$  应按式(2)、式(3)计算。

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (2)$$

$$\xi_i = \frac{E}{2\pi} \quad (3)$$

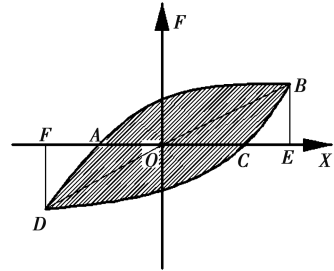


图10 曲线滞回环

Fig. 10 Load versus displacement hysteresis loop

前文所述节点在最后一级荷载中没有进行完整的循环,所得出的能量耗散系数  $E$  是根据破坏前一级循环产生的滞回环得出,计算结果偏小,计算结果列于表4。试件  $J_2$  为贯通梁加载,其耗能指标偏小,原因是加载过程中梁栓焊混合连接发生破坏。观察表4中试件  $J_3$ 、 $J_4$  的等效黏滞阻尼系数可知,在保证栓焊连接质量时,贯通梁  $\xi$  明显大于断开梁,作为次受力梁的等效黏滞阻尼系数  $\xi$  在 0.3 左右。

表4 节点耗能指标

Table 4 Energy dissipation coefficients of the tested specimens

节点编号	能量耗散系数 $E$	等效黏滞阻尼系数 $\xi$
$J_1$	2.49	0.396
$J_2$	1.81	0.288 1
$J_3$	2.41	0.384
$J_4$	1.78	0.283

## 2.4 结果分析

通过对4个试件进行低周反复荷载试验,分析其破坏形态及抗震性能,可以得出以下结论:

1)从破坏形态上看, $J_1$ 、 $J_3$ 、 $J_4$  均属于梁-铰破坏, $J_2$  因栓焊混合连接处焊缝质量偏差,导致此处先行破坏。可以看出贯通梁( $J_2$ 、 $J_3$ )由于保持型钢的完整性,其破坏位置相较于断开梁( $J_1$ 、 $J_4$ )更远离梁端。

2)贯通梁( $J_2$ 、 $J_3$ )充分发挥了工字钢的延性、刚度及耗能能力,断开梁( $J_1$ 、 $J_4$ )也拥有良好的抗震性能,满足抗震需求。

3)在相同的轴压力作用下,尺寸较大的试件  $J_1$  比尺寸较小的试件  $J_4$  拥有更好的延性和耗能能力。

### 3 典型节点对比分析

节点类型与矩管混凝土柱-SRC 梁型钢贯通式节点作对比分析,结果见表 5。表中各试件均能达

到抗震要求,因各试件尺寸和试验轴压比不同,节点延性无法比较。

表 5 典型节点对比  
Table 5 Typical node comparison

作者	节点类型	破坏形态	刚度	节点区构造与施工工艺
陈振明 <sup>[13]</sup>	CFST 柱-SRC 梁 钢牛腿节点	钢牛腿变截面加劲肋屈服	型钢与管壁通过焊缝连接,刚度较小	构造复杂、梁外包混凝土不便于浇筑。
苏锋 <sup>[30]</sup>	CFST 柱-SRC 梁 外加加强环节点	型钢混凝土梁率先受弯破坏	节点区型钢与加强环通过焊缝连接,刚度一般	节点呈扁圆筒状,外观不美观,节点区混凝土不便于浇筑。
韦丹 <sup>[2]</sup>	CFST 柱-SRC 梁 外环板节点	梁铰破坏	节点区用于连接的部件多,刚度大	钢梁与节点通过外环板连接,梁内钢筋与节点环梁式连接,节点内部布置内环板。
贾真 <sup>[20]</sup>	折线隔板贯通式节点	隔板与翼缘对接焊缝撕裂	刚度较大	折线隔板构造复杂,用钢量较大,施焊量大
Tang <sup>[22]</sup>	CFST 柱-RC 梁 钢筋贯通式节点	梁在节点外侧失效	刚度小	钢筋贯通钢管柱,采用多层钢网架和拉力箍筋组成固接系统,节点构造复杂,混凝土难以浇筑。
Li <sup>[23]</sup>	CFST 柱-钢梁 翼缘贯通节点	梁翼缘屈服破坏	梁端剪力全由焊缝承担,刚度较小	翼缘贯通钢管,承载力不足,节点适用单梁。
	CFST 柱-钢梁 垂直锚固节点	钢管柱壁鼓起,梁铰破坏	刚度大	用钢量大,且柱内加锚施工不便。
Mahdi <sup>[24]</sup>	CFST 柱-钢梁 贯通节点	梁铰破坏	刚度大	节点核心区型钢垂直交叉,柱内混凝土浇筑困难。
Khanouki <sup>[26]</sup>	圆钢管混凝土柱-单梁贯通	节点区梁翼缘屈服	刚度大	仅适用于单梁。
本文	矩管混凝土柱-SRC 梁型钢贯通节点	梁铰破坏	贯通梁型钢本身具有良好的性能,断开梁型钢嵌入矩管混凝土柱,嵌入长度为矩管柱长边距离,核心混凝土对断开梁的约束长度增加,节点刚度大。	构造简单,施工方便,外观美观,用钢量少,节点核心区断开梁削翼缘处理,相较于型钢直接穿插类型的节点,其柱内混凝土更便于浇筑。

由表 5 可知,矩管混凝土柱-SRC 梁型钢贯通节点较以往节点具有明显优势。将断开梁型钢嵌入核心混凝土可提高节点的刚度和抗震性能,同时减轻对管壁的抗剪要求。矩管混凝土柱刚度大、承载力高、塑性和韧性好。贯通梁本身具有良好的性能,断开梁嵌入矩管混凝土柱短边,使得核心混凝土对断开梁的约束长度增加。

### 4 结论

设计了一种新型矩管混凝土柱-SRC 梁型钢贯通式节点,并结合节点的低周反复荷载试验,分析了试件破坏形态及抗震性能,与已有节点形式对比,得出以下结论:

1) 新型节点构造简单,工厂预制、现场拼装的施

工工艺能发挥钢管混凝土柱-型钢混凝土梁快速施工和经济的优势。节点既适用于单梁情况下的梁柱节点,也适用于十字交叉型或丁字型梁对应的梁柱节点。

2) 矩管混凝土柱-SRC 梁型钢贯通式节点试件的破坏模式均为梁铰破坏。试件滞回曲线相对饱满,没有明显的捏缩效应,试件在整个加载过程中刚度退化明显,试件达到极限承载力时等效黏滞阻尼系数为 0.283~0.4 之间,延性系数在 2.33~3.8 之间,表明新型节点具有良好的抗震性能和耗能能力。

3) 通过与外环板、内隔板、隔板贯通式、钢牛腿等节点类型对比,矩管混凝土柱-SRC 梁型钢贯通式节点具有构造简单,施工方便,外观美观,节约材料

等优点,同时节点核心区断开梁削翼缘处理后相较于两型钢直接穿插类型的节点,其核心混凝土更易浇筑,综合性能表现优异。

### 参考文献:

- [1] 王琨,智海祥,曹大富,等. 预应力型钢混凝土梁-钢管混凝土叠合柱框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(12):29-38.  
WANG K, ZHI H X, CAO D F, et al. Test on hysteretic behavior of prestressed steel reinforced concrete beam to steel-tube reinforced concrete column joints[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39 (12):29-38. (in Chinese)
- [2] 韦丹. 列车冲击作用下高铁站房钢管混凝土柱-型钢混凝土梁节点受力性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.  
WEI D. Study on mechanical behavior of connection between concrete-filled steel tubular column and steel reinforced concrete beam in high-speed railway station under impact of train [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [3] 王顺祥. 钢管混凝土柱-型钢混凝土梁组合框架结构抗连续倒塌分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.  
WANG S X. Analysis on prevention of progressive collapse for concrete filled steel tubular column; steel reinforced concrete beam composite frame structure[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [4] 袁沈峰. 型钢混凝土梁-钢管混凝土核心柱组合框架抗震性能试验与分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.  
YUAN S F. Test and analysis on seismic performance of frame structure of steel reinforced concrete beam and steel-tube encased concrete column[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014. (in Chinese)
- [5] 陈庆军,薛华,汤序霖,等. 梁贯通式圆钢管混凝土柱-混凝土梁边节点的抗震性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2015,43(7):33-41.  
CHEN Q J, XUE H, TANG X L, et al. Seismic behavior of beam-through circular steel tubular columns-concrete beam edge joints [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(7):33-41. (in Chinese)
- [6] NISHIYAMA I, FUJIMOTO I, FUKUMOTO T. Inelastic force-deformation response of joint shear

panels in beam-column moment connections to concrete-filled tubes [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130( 2 ): 244-252.

- [7] 李自林,丁宏毅,张聪. 方钢管混凝土柱-H型钢梁全螺栓隔板贯通式节点弯矩-曲率滞回模型研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(11): 51-54,59.  
LI Z L, DING H Y, ZHANG C. Research on hysteretic model of moment-curvature for all-bolts and clapboard-through joint connecting concrete-filled square steel tubular column and H-shaped steel beam [J]. Building Structure, 2015, 45(11): 51-54,59. (in Chinese)
- [8] 张爱林,孙勇,刘学春,等. 方钢管混凝土柱-H形钢梁螺栓连接节点受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017,38(11):64-73.  
ZHANG A L, SUN Y, LIU X C, et al. Experimental study on mechanical performance of concrete-filled square steel tubular columns to H-section steel beam bolted connection [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(11):64-73. (in Chinese)
- [9] SHEET I S, GUNASEKARAN U, MACRAE G A. Experimental investigation of CFT column to steel beam connections under cyclic loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 86: 167-182.
- [10] WANG Z Y, TIZANI W, WANG Q Y. Strength and initial stiffness of a blind-bolt connection based on the T-stub model [J]. Engineering Structures, 2010, 32 (9): 2505-2517.
- [11] 周浩林. 方钢管混凝土柱-H型钢梁外加强板式节点受力性能研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.  
ZHOU H L. Research on the stress performance of reinforced slab joints of square steel tubular column-H beam [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [12] SHIN K J, KIM Y J, OH Y S. Seismic behaviour of composite concrete-filled tube column-to-beam moment connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(1) :118-127.
- [13] 陈振明,慈龙胜,楼国彪,等. 牛腿式钢管混凝土柱与型钢混凝土梁节点试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42 (12):96-103.  
CHEN Z M, CI L S, LOU G B, et al. Experimental study on bracket-type joints of concrete filled steel tubular column and section-steel concrete beam [J].

- Industrial Construction, 2012, 42(12): 96-103. (in Chinese)
- [14] 陈远洲. 福田站钢管混凝土柱-型钢混凝土梁节点研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(6): 77-81.
- CHEN Y Z. Research on the joint between concrete-filled steel tubular column and steelreinforced concrete beam of Futian Railway Station [J]. Building Structure, 2013, 43(6): 77-81. (in Chinese)
- [15] 张广泰, 韩建红, 荣彬. 隔板贯通式钢管混凝土节点有限元分析[J]. 建筑钢结构进展, 2016, 18(2): 26-33.
- ZHANG G T, HAN J H, RONG B. Finite element analysis on concrete-filled steel tubular column connections with through diaphragm[J]. Progress in Steel Building Structures, 2016, 18(2): 26-33. (in Chinese)
- [16] 王万祯, 黄友钱, 陈飞益, 等. 圆弧扩大头狗骨隔板贯通方钢管混凝土柱-H形钢梁节点抗震性能分析[J]. 工程力学, 2016, 33(5): 106-114, 123.
- WANG W Z, HUANG Y Q, CHEN F Y, et al. Seismic performance of diaphragm-through type joints between concrete-filled square steel tubular column and H-section steel beam with enlarged ARC dog-bone junctures[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 106-114, 123. (in Chinese)
- [17] 荣彬, 陈志华, 杨楠, 等. 方钢管混凝土柱隔板贯通节点静力拉伸试验及有限元分析[J]. 工业建筑, 2012, 42(10): 126-132.
- RONG B, CHEN Z H, YANG N, et al. Static tensile loading experiment and finite element analysis of diaphragm-through joint of concrete-filled square steel tubular column[J]. Industrial Construction, 2012, 42(10): 126-132. (in Chinese)
- [18] ZHOU X H, CHENG G Z, LIU J P, ET AL. Behavior of circular tubed-RC column to RC beam connections under axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 130: 96-108.
- [19] CHEN Q J, CAI J, BRADFORD M A, et al. Seismic behaviour of a through-beam connection between concrete-filled steel tubular columns and reinforced concrete beams [J]. Engineering Structures, 2014, 80: 24-39.
- [20] 贾真, 刘五峰, 王万祯, 等. 折线隔板贯通方钢管轻骨料混凝土柱-H形钢梁异型节点破坏机理分析[J]. 空间结构, 2017, 23(4): 77-83.
- JIA Z, LIU W F, WANG W Z, et al. Failure mechanism analysis of diaphragm-through irregular joints of lightweight aggregate concrete-filled square steel tubular column and H-section steel beams with linear strengthened junctures [J]. Spatial Structures, 2017, 23(4): 77-83. (in Chinese)
- [21] 林彦, 周学军, 韩雪野等. 方钢管混凝土柱-外包钢混凝土组合梁隔板贯通节点抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(Sup2): 8-13.
- LIN Y, ZHOU X J, HAN X Y, et al. Study on seismic behavior of concrete-filled square steel tubular column to steel-encased concrete composite beam joint with through diaphragm [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup2): 8-13. (in Chinese)
- [22] 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.
- [23] LI B Y, YANG Y L, CHEN Y F, et al. Behavior of connections between square CFST columns and H-section steel beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 145: 10-27.
- [24] MZHDI J M, RAMLI SULONG N H, ARABNEJAD M M. Seismic performance of a new through rib stiffener beam connection to concrete-filled steel tubular columns: An experimental study [J]. Engineering Structures, 2017, 131: 477-491.
- [25] 金怀印, 薛伟辰, 杨晓, 等. 预应力型钢混凝土梁-钢管混凝土柱节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(8): 66-74.
- JIN H Y, XUE W C, YANG X, et al. Experimental research on seismic behavior of connection between prestressed steel reinforced concrete beam and concrete-filled steel tubular column [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(8): 66-74. (in Chinese)
- [26] KHANOUKI M M A, RAMLI SULONG N H, SHARIATI M, et al. Investigation of through beam connection to concrete filled circular steel tube (CFCST) column [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121: 144-162.
- [27] 戴颖. 不同轴压比下 T 形截面钢管混凝土柱与钢梁节点滞回性能的研究[C]//第十三届沈阳科学学术年会论文集(理工农医), 2016.
- DAI Y. Study on hysteretic behavior of T-section



concrete-filled steel tubular columns and steel beam joints under different axial compression ratios[C]//The 13th Shenyang Science Academic Conference Proceedings (Science and Technology Agricultural Medicine). 2016. (in Chinese)

- [28] 张月. 不同轴压比下十字形截面钢管混凝土柱-钢梁节点滞回性能的研究[C]//第十五届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 2015.

ZHANG Y. Study on hysteretic behavior of concrete-filled steel tubular column-steel beam joints with cross-section under different axial compression ratios[C]//Proceedings of the 15th National Conference on Modern Structural Engineering, 2015. (in Chinese)

- [29] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建

筑工业出版社, 2010.

Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

- [30] 苏锋, 蔡永昌, 蒋晔. 新型钢管混凝土梁柱节点试验研究及数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(6): 1192-1200.

SU F, CAI Y C, JIANG Y. Experimental investigation and numerical analysis on the behavior of a new type of concrete-filled steel tube column joint [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(6): 1192-1200. (in Chinese)

(编辑 胡玲)