

文章编号:1673-2049(2007)01-0064-05

# 带有芯钢管的钢管混凝土节点的受力机理

王毅红,郭增辉,李先顺,付敏,黄琨

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

**摘要:**在已破坏的钢管混凝土梁-柱节点试件上,截取尚未破坏的节点区域,研究带有芯钢管的钢管混凝土节点的受力机理。对节点采用不同加载方式使其破坏,从其破坏过程、破坏形态及荷载-位移曲线等方面,分析在不同加载方式下节点各组成部分的工作状态、特点及性能差异。研究结果表明:对节点全截面加载可得到节点的最大承载力,仅对芯钢管内混凝土加载可得到节点最小承载力,其最小承载力大于所连接的钢管混凝土柱的承载力,满足节点要求;对于不同加载方式,节点的芯钢管受力状态不同,但无论何种加载方式,芯钢管、外围密排环箍主要为间接受力,起约束核心混凝土的作用。

**关键词:**钢管混凝土;节点;受力机理;芯钢管;试验

**中图分类号:**TU528.59 **文献标志码:**A

## Bearing Mechanism of Concrete-filled Steel Tubular Joint with Core Steel Tube

WANG Yi-hong, GUO Zeng-hui, LI Xian-shun, FU Min, HUANG Kun

(School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** The bearing mechanism of a new type joint with core steel tube was studied. The specimens were intercepted from the remnant joints area of being destroyed concrete-filled steel tubular joints specimen. The characteristic of the member of the joint was analyzed by the failure process, the main failure formation and the load and displacement curve in the different load modes. The result shows that the maximal bearing capacity was obtained by loading on the full section of the joint, and the minimal bearing could be obtained by loading on the concrete of the core steel tube. But the minimal bearing is also bigger than the bearing capacity of the CFST column; it meets the joint seismic principle. The core steel tube of the joint has different bearing states under different loading modes. The loading modes of the core steel tube and the looping take restriction effort on the core concrete indirectly.

**Key words:** concrete-filled steel tube; joint; bearing mechanism; core steel tube; experiment

## 0 引言

目前有关钢管混凝土节点的研究中,钢管混凝土柱与钢筋混凝土梁连接的节点在受力机理和构造形式上还有很多有待研究的问题<sup>[1-7]</sup>。一些文献中

提出了一种带有芯钢管的钢管混凝土节点,钢管混凝土柱的外钢管在节点区全部或部分中断,使钢管混凝土梁中的钢筋在节点处直通,在节点区配置芯钢管、竖向钢筋和环向钢筋加强节点。试验证明,该种节点的承载力大于所连接钢管混凝土柱的承载

收稿日期:2007-01-04

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2006E208)

作者简介:王毅红(1955-),女,山东烟台人,教授,工学硕士,E-mail:wangyh@chd.edu.cn。

力,带有该种节点的梁-柱试件在破坏时节点基本完好<sup>[8-11]</sup>。

为了进一步探讨这种节点的受力机理,对文献[8]~[11]中 9 个试件中未破坏的节点区域,用不同的方式再次施加轴向荷载至节点破坏,研究节点的受力机理。

### 1 试验概况

试验中的 9 个带芯钢管的钢管混凝土节点,在第 1 次试验时,与节点相连的梁柱已破坏,但节点区域完好,原试件见图 1,截去上下钢管混凝土柱。截取方式分两种,第 1 种共 4 个试件,以露出节点区竖向短钢筋而未露出芯钢管为截断标准,第 2 种共 5 个试件,以一面露出芯钢管为界截取。与节点连接的钢筋混凝土梁在第 1 次试验中根部裂缝已贯通,因对试件加载没有影响,故未截去。9 个试件中试件 JD-1A、JD-2A、JD-3A、JD-1B、JD-2B 的芯钢管的尺寸为 89 mm×4 mm,屈服强度  $f_y$  和极限强度  $f_u$  分别为 232、427 MPa;其他的芯钢管尺寸为 89 mm×4.56 mm,屈服强度  $f_y$  和极限强度  $f_u$  分别为 390.1、542.7 MPa。试件的其他材料性能见表 1。

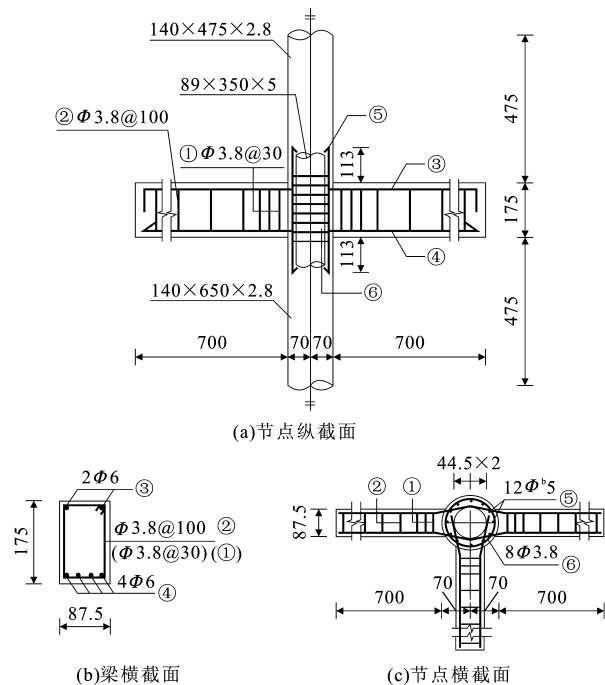


图 1 试件截面尺寸及配筋(单位:mm)  
Fig. 1 Section Dimension and Reinforcement of Specimens(Uint:mm)

试件加载采用两种方式,加载方式 I 为节点全截面受荷,加载方式 II 为芯钢管内混凝土受荷。试件 JD-2A、JD-3A、JD-C、JJD-A 采用加载方式 I;其

余 5 个试件采用加载方式 II。加载方式 I 的试件除 JD-3A 由 YE-200A 的液压式试验机加荷外,其余均采用 YAE-20000 长柱微机控制电液伺服压力试验机,加载的荷载与位移数据由计算机采集、位移控制加载。加载方式 II 的加载仪器使用型号为 YE-200A 的液压式试验机,专门制作一直径略小于芯钢管直径的加载块,对芯钢管内的混凝土施加轴向荷载,同时在试件的对称两侧各设一个百分表测试试件竖向变形,分析结果取两百分表的平均值,试验加载速度平均每秒约为 0.2 MPa,由手动进油阀控制,不间断地对试件施加轴向压力,直至试件破坏。

| Tab. 1 Strengths of Materials and Other Parameters |         |               |      |   |  |
|--|---------|---------------|------|---|--|
| 试件   | 试件高度/mm | $f_{cu}$ /MPa | 节点特性 | 环箍筋   | 竖向钢筋   |
| JD-1A  | 263     | 35.80         | AX   | $6\Phi^b 4.8$<br>$f_y = 525 \text{ MPa}$<br>$f_u = 776 \text{ MPa}$ | $12\Phi 6$<br>$f_y = 275 \text{ MPa}$<br>$f_u = 555 \text{ MPa}$     |
| JD-2A  | 280     | 39.90         | AX   |   |  |
| JD-3A  | 360*    | 28.90         | AX   |   |  |
| JD-1B  | 250     | 30.20         | BX   |   |  |
| JD-2B  | 340*    | 30.50         | BX   | 8# 铁丝<br>$f_y = 423 \text{ MPa}$<br>$f_u = 515 \text{ MPa}$         | $12\Phi^b 4.7$<br>$f_y = 676 \text{ MPa}$<br>$f_u = 795 \text{ MPa}$ |
| JD-C   | 415     | 39.32         | BY   |   |  |
| JD-D   | 379     | 34.45         | BY   |   |  |
| JJD-A  | 419     | 39.32         | CY   |   |  |
| JJD-B  | 388     | 34.45         | CY   |   |  |

注: $f_{cu}$ 为混凝土立方体抗压强度;X表示不连通;Y表示半连通;A表示中节点;B表示边节点;C表示边角节点;带\*的数值为按芯钢管长度截取时的推算值。

### 2 节点破坏形态

#### 2.1 节点全截面受压

半连通节点 JD-C、JJD-A 破坏时,钢管局部连通处,钢皮折卷,角部开裂,环箍筋断裂;节点区混凝土碎裂,竖向短筋在无梁一侧外鼓,如图 2 所示;不连通节点 JD-2A、JD-3A 加荷时,梁端混凝土迅速开裂,节点荷载达到极限承载力时,从外观上看,除了梁端开裂无其他现象。砸开周边梁可见竖向钢筋外鼓、环箍筋拉断现象,JD-3A 使用 YE-200A 试验机加载,加载时未采集试件位移数据,其余 3 个试件的荷载-位移曲线见图 3。

#### 2.2 芯钢管内混凝土受压

边角节点的破坏从无梁一侧开裂开始,中节点破坏从四边梁根部裂缝延伸、扩展开始;随着荷载增加,逐步发展为混凝土脱落、环箍筋拉断,芯钢管外混凝土酥碎,竖向短筋冒出,芯钢管内混凝土凹陷,砸开节点,可观察到芯钢管中部明显外鼓,见图 4,



图 2 试件 JD-C 破坏形态

Fig. 2 Failure Formation of Specimen JD-C



图 5 中节点破坏形态

Fig. 5 Failure Formation of Mid-joint

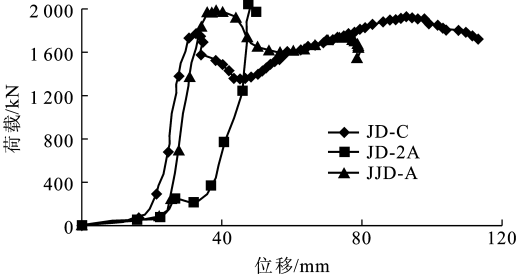


图 3 全截面受压荷载-位移曲线

Fig. 3 Pressed Load and Displacement Curves of Full Section

节点破坏形态见图 5、6；节点的荷载-位移曲线见图 7；各节点及试件的极限承载力比较见表 2。



图 4 芯钢管混凝土柱的变形

Fig. 4 Deformation of Core Steel Tube Concrete Column

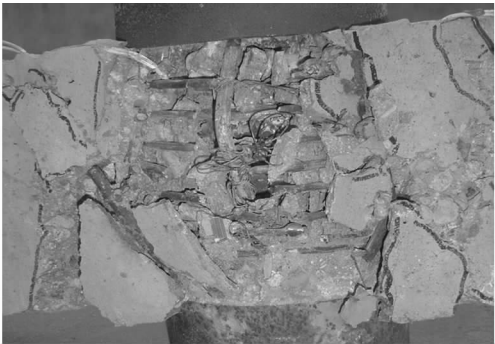


图 6 边节点破坏形态

Fig. 6 Failure Formation of Edge-joint

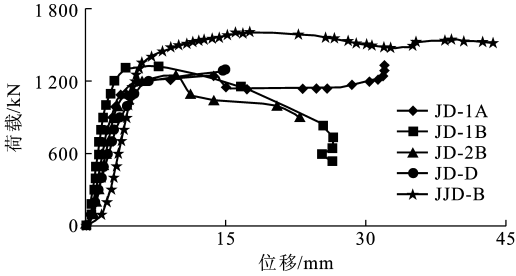


图 7 芯钢管内混凝土受压荷载-位移曲线

Fig. 7 Pressed Load and Displacement Curves of Core Steel Tube Concrete

表 2 各试件及节点的极限承载力比较

Tab. 2 Comparisons of Ultimate Bearing Capacities of Specimens and Joints

| 试 件   | kN                   |                      | 加载方式 |
|-------|----------------------|----------------------|------|
|       | 试件极限承载力<br>(第 1 次试验) | 节点极限承载力<br>(第 2 次试验) |      |
| JD-2A | 2 050                | 1 050                | I    |
| JD-3A | 1 680                | 750                  | I    |
| JD-C  | 1 930                | 1 120                | I    |
| JJD-A | 1 970                | 1 130                | I    |
| JD-1A | 1 250                | 980                  | II   |
| JD-1B | 1 320                | 850                  | II   |
| JD-2B | 1 250                | 900                  | II   |
| JD-D  | 1 300                | 1 100                | II   |
| JJD-B | 1 600                | 1 156                | II   |

土同步受力、变形协调。当荷载较小时,可按各组成部分的本构关系求得各部分承担的外荷载;当荷载较大时,混凝土横向变形加大,芯钢管内混凝土和外围混凝土分别受到芯钢管和环箍筋的横向约束,处于三向受压状态,承载力有较大幅度的提高,而芯钢管则处于两轴拉压状态,屈服强度在两个方向均有所降低。环箍筋受到轴向拉力,节点破坏时,芯钢管纵向、横向均屈服,达到极限承载力,大部分断裂,外围混凝土酥碎。加载方式Ⅰ的荷载-位移曲线出现两次峰值,在节点第 1 次全截面受压达到第 1 个峰值后,外围混凝土压碎使曲线下落,但芯钢管混凝土尚未完全破坏,继续承担外荷载达到第 2 次峰值。

加载方式Ⅱ仅对核心混凝土加载,荷载较小时,仅混凝土受轴向力;荷载增大,混凝土横向变形,芯钢管对其产生被动的约束力;随着荷载加大,管内混凝土使芯钢管横向变形加大,外围混凝土、密排环箍筋受到横向拉力,环箍筋、外围混凝土、芯钢管对芯钢管内混凝土形成多重约束,管内混凝土承载力大幅度增加。在破坏时环箍筋几乎全部被拉断,在芯钢管内混凝土受轴向力的同时,由于芯钢管与混凝土间的摩阻力,芯钢管、外围混凝土也受到一定的竖向力,破坏时,竖向钢筋冒出原试件平面,表明芯钢管外围混凝土产生了竖向变形,也说明外围混凝土已酥碎,与竖向钢筋黏结力完全破坏,导致变形的不一致,竖向钢筋冒出。加载方式Ⅱ的荷载-位移曲线符合典型的约束混凝土的荷载-位移曲线。

### 3.2 各组成部分工作状态

#### 3.2.1 外围混凝土

在加载方式Ⅰ中,外围混凝土与螺旋钢筋约束混凝土柱的工作状态接近,可用相应的公式计算外围混凝土承载力<sup>[12]</sup>。与螺旋钢筋混凝土柱的不同点在于,由于芯钢管混凝土在较大荷载作用时,产生向外膨胀的力也作用于外围混凝土,使外围混凝土产生环向拉应力,从而降低外围混凝土承载力。

在加载方式Ⅱ中,外围混凝土未直接受力,主要承受来自芯钢管的环向拉应力,并将此拉应力传递给环箍筋,从而环箍筋、芯钢管共同形成对核心混凝土的多重约束。在达到极限荷载时,外围混凝土完全酥碎。在计算对核心混凝土提供约束的环向拉力时,不计混凝土受拉作用,但混凝土传递芯钢管产生的拉应力对环箍筋起了重要作用。

#### 3.2.2 环箍筋

环箍筋主要起约束外围混凝土的作用。两种加

载方式的受力机理相同。主要经历了屈服、极限强度和断裂 3 个阶段。

#### 3.2.3 竖向钢筋

竖向钢筋在两种加载方式中的作用不同,加载方式Ⅰ下,竖向钢筋有两个作用,一是直接承受竖向荷载,极限强度取其屈服值,二是与环箍筋形成约束混凝土的骨架,对外围混凝土起约束作用。在加载方式Ⅱ中,竖向钢筋仅有上述第 2 种功能,试件破坏时,竖向钢筋受横向力弯曲变形。

#### 3.2.4 芯钢管

无论采用何种加载方式,芯钢管均处于纵向受压、横向受拉状态,在加载方式Ⅰ中,芯钢管与管内混凝土同步变形。根据各自的弹性模量和面积分担竖向力,由于处于双向拉-压状态,其纵向受压与横向受拉的屈服强度均降低。加载方式Ⅱ中,芯钢管主要受横向拉力,但由于管内混凝土黏结力的存在,使管内混凝土所受压力部分传递给芯钢管,因此在两种加载方式中,考虑芯钢管对承载力的贡献时,屈服强度均应降低。

#### 3.2.5 芯钢管内混凝土

在两种加载方式中,管内混凝土均处于三向受压状态,混凝土承载力较单轴承载力的提高幅度取决于多重约束作用的效果。

### 3.3 节点的承载力

节点承载力的理论研究见文献[13]。从本次节点试验可得,对节点全截面加载可得到节点的最大承载力,仅对核心混凝土加载可得到节点的最小承载力,两种方式加载节点均达到了极限状态,节点各组成部分均充分发挥了作用。节点试验的极限承载力均大于试件的极限承载力,进一步证明了该种节点的优越性。

## 4 结 语

(1)通过 9 个节点试件的试验研究,分析了芯钢管半连通和不连通节点的受力机理,但无论采用何种方式加载,节点的各组成部分在极限状态时,全部充分发挥作用,试验现象和分析结果均证明节点的构造是合理的。

(2)两种加载方式得出不同的节点承载力,仅对芯钢管内混凝土加载得到的承载力,可视为节点最小的承载力。全截面加载得到的承载力可视为节点最大的承载力,节点最小承载力大于节点所连接的钢管混凝土柱的承载力,证明该种节点具有很好的强度和刚度,满足强节点的要求。

(3)在带有芯钢管的钢管混凝土节点中,芯钢管混凝土的承载力是节点承载力的主要部分。芯钢管、外围混凝土、环箍筋、竖向钢筋主要起约束芯钢管混凝土的作用。

(4)芯钢管节点受力机理的分析为正确计算芯钢管混凝土节点的承载力,研究芯钢管节点在钢管混凝土结构中的性能及工程应用提供了参考。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京:清华大学出版社,2003.  
ZHONG Shan-tong. Structures of Concrete-filled Steel Pipe[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.  
CAI Shao-huai. Modern Concrete-filled Steel Pipe Structures [M]. Beijing: China Communications Press,2003.
- [3] 曹宝珠,周绪红,刘永健. 钢管混凝土桁架新型节点试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(1):45-48.  
CAO Bao-zhu, ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian. Experimental Research on New Joints of Concrete-filled Steel Tube Truss [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2006,23(1):45-48.
- [4] 裴万吉,赵均海,魏雪英. 钢管混凝土的截面形式及其承载力分析[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(1):49-53.  
PEI Wan-ji, ZHAO Jun-hai, WEI Xue-ying. Analysis of Section Types of Concrete-filled Steel Tube and Its Load Capacity[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2006,23(1):49-53.
- [5] 黄文金,陈宝春. 钢管混凝土桁梁受弯试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(1):29-33.  
HUANG Wen-jin, CHEN Bao-chun. Experimental Research on Concrete-filled Steel Tube Truss Girder Under Bending[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2006,23(1):29-33.
- [6] 丁发兴,余志武. 恒高温后圆钢管混凝土轴压短柱弹塑性分析[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(1):34-38.  
DING Fa-xing, YU Zhi-wu. Elasto-plastic Analysis of Concrete-filled Circular Steel Tube Stub Columns After Constant High Temperature[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2006,23(1):34-38.
- [7] 王毅红,汤文锋. 芯钢管连接的钢管混凝土中柱节点

- 试验研究[J]. 建筑结构,2004,34(12):60-63.  
WANG Yi-hong, TANG Wen-feng. The Experimental Study on Mid-joint of CFST with Core Steel Tube [J]. Building Structure,2004,34(12):60-63.
- [8] 王毅红,汤文锋. 新型钢管混凝土节点-芯钢管边柱节点的试验研究[J]. 工业建筑,2005,35(1):59-61.  
WANG Yi-hong, TANG Wen-feng. The Experimental Study on New Type Joint of CFST-core Steel Joint in the Side Column[J]. Industrial Construction,2005,35(1):59-61.
- [9] 王毅红,蒋建飞,周绪红,等. 芯钢管连接的钢管混凝土半连通边节点试验研究[J]. 土木工程学报,2006,39(12):54-59.  
WANG Yi-hong, JIANG Jian-fei, ZHOU Xu-hong, et al. Experimental Study on Semi-connected Edge Joint with Core Steel Tube Concrete Filled Steel Tubular(CFST) [J]. China Civil Engineering Journal, 2006,39(12):54-59.
- [10] 卢先军. 半连通钢管混凝土柱-芯钢管角节点试验研究[D]. 西安:长安大学,2005.  
LU Xian-jun. The Experiment Study on Semi-connected Corner-joint with Core Steel Tube of Concrete-filled Steel Tube(CFST) [D]. Xi'an: Chang'an University,2005.
- [11] 王毅红,付敏,郭增辉,等. 带有芯钢管的钢管混凝土节点轴压承载力试验研究[J]. 建筑结构学报,2006,27(增):491-498.  
WANG Yi-hong, FU Min, GUO Zeng-hui, et al. Experiment Study on Bearing Capacity of the Joint with Core Steel Tube in Concrete Filled Steel Tubular (CFST)[J]. Journal of Building Structures,2006,27(S):491-498.
- [12] 王毅红,傅鹏斌,毛元平. 芯钢管连接的钢管混凝土节点轴压承载力[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(8):358-360.  
WANG Yi-hong, FU Peng-bin, MAO Yuan-ping. Bearing Capacity of Joint with Core Steel Tube in Concrete Filled Steel Tubular Under Axially Load [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2005,37(8):358-360.
- [13] 王毅红,傅鹏斌,毛元平. 芯钢管连接的钢管混凝土节点偏压承载力[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,26(2):61-64.  
WANG Yi-hong, FU Peng-bin, MAO Yuan-ping. Bearing Capacity of Joint with Core Steel Tube in Concrete Filled Steel Tubular Under Eccentrically Load[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2006,26(2):61-64.