

梁通柱断式方钢管混凝土节点抗震性能试验研究

王毅红¹, 肖丽丽², 吴小敬³, 高航宇¹

(1. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 西安翻译学院, 陕西 西安 710105;
3. 中国建筑国际工程集团有限公司, 上海 200063)

摘要:研究梁通柱断式方钢管混凝土中节点在低周反复荷载作用下的受力性能和抗震性能. 该种节点在节点区中断柱的外钢管, 使钢筋混凝土梁的纵筋在节点直通. 在节点区设置芯钢管、密排箍筋、竖向短筋连系上下钢管混凝土柱. 通过 2 个缩尺模型试件的拟静力试验, 得到节点试件的破坏过程、破坏形态、试件滞回曲线和试件各组成部分的荷载-应变关系. 试验结果表明: 该种节点在低周反复荷载作用下性能良好. 试件破坏发生在梁根部, 节点区尚有较大承载潜力, 试件的耗能性能、位移延性良好. 轴压比的增大对于承载力有提高作用, 但耗能能力和位移延性有降低趋势.

关键词:方钢管混凝土节点; 低周反复荷载; 轴压比; 抗震性能; 试验研究

中图分类号: TU392.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)02-0164-06

钢管混凝土柱与钢筋混凝土梁节点受力复杂, 一般节点保持柱上下贯通, 钢筋混凝土梁通过各种方式与钢管混凝土柱连接, 为保证节点弯矩、剪力可靠传递, 节点往往外形冗重, 构造较复杂. 本文设计一种梁通柱断式节点, 该种节点在节点区中断或部分中断钢管混凝土柱的外钢管, 使钢管混凝土梁的纵筋在节点直通. 节点区设置一段芯钢管, 保持上下钢管混凝土柱的连续性. 该种节点在竖向荷载作用下的合理性、可行性已被证实^[1-4], 但节点在低周反复荷载作用下的受力性能尚未研究. 本文通过试验研究节点在低周反复荷载作用下的破坏形态、承载力、刚度退化、延性和耗能能力等抗震指标, 验证节点的可行性和合理性, 考察不同轴压比, 对节点抗震性能的影响规律.

1 试验设计

1.1 试件设计

选择多层多跨框架在水平力作用下, 框架上下柱反弯点、左右梁反弯点之间的“十”字型部分作为试验单元, 设计了 2 个 1/3 缩尺的中节点试件. 钢管混凝土柱的设计长度为 2 500 mm, 截面尺寸为方形 150 mm×150 mm. 上钢管柱在梁顶面处断开, 并在下钢管柱上端有梁方向处开 100 mm×230 mm 的槽口, 无梁部位保持钢管上下贯通, 上下外钢管最后焊接形成整体. 在节点处配置芯钢管、竖向钢筋和箍筋对节点区进行加强, 试验节点构造如图 1.

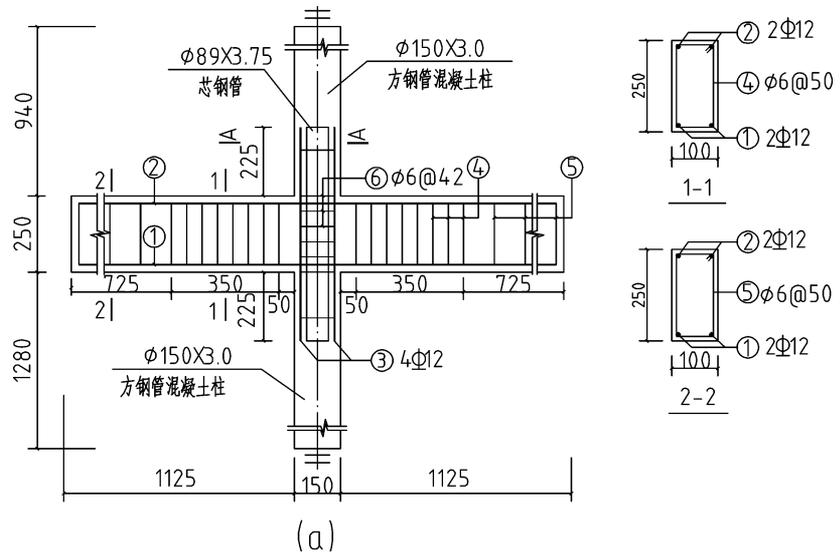


图 1 试件尺寸及配筋

Fig. 1 Section dimension and reinforcement details of specimens

收稿日期: 2011-07-07 修改稿日期: 2012-03-28

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2006E208)

作者简介: 王毅红(1955-), 女, 山东烟台人, 教授, 博士生导师, 主要从事混凝土结构及组合结构研究.

1.2 试件材料性能

此模型试件中钢材的力学性能见表 1. 混凝土立方体抗压强度为 34.48 N/mm^2 , 弹性模量为 $30\,700 \text{ N/mm}^2$.

1.3 试验方案

试验重点观测梁塑性铰和核心区的情况, 试件应变测点及位移测量仪表 A、B、C、D 布置如图 2 所示

表 1 力学性能试验结果

Tab. 1 Test result of mechanical properties of materials of the specimens

名称	材料	直径或壁筋 /mm	屈服强度 / $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	极限强度 / $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	弹性模量 / $10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$	屈服应变 $\mu\epsilon$
外钢管	Q235	3	365.13	443.50	2.12	1723
芯钢管	Q215	3.75	366.08	420.13	2.14	1711
梁中纵筋	Q335	12	352.09	523.89	1.94	1817
节点竖筋	Q335	12	352.09	523.89	1.94	1817
梁中箍筋	Q235	6	403.70	574.24	2.50	1617
节点箍筋	Q235	6	403.70	574.24	2.50	1617

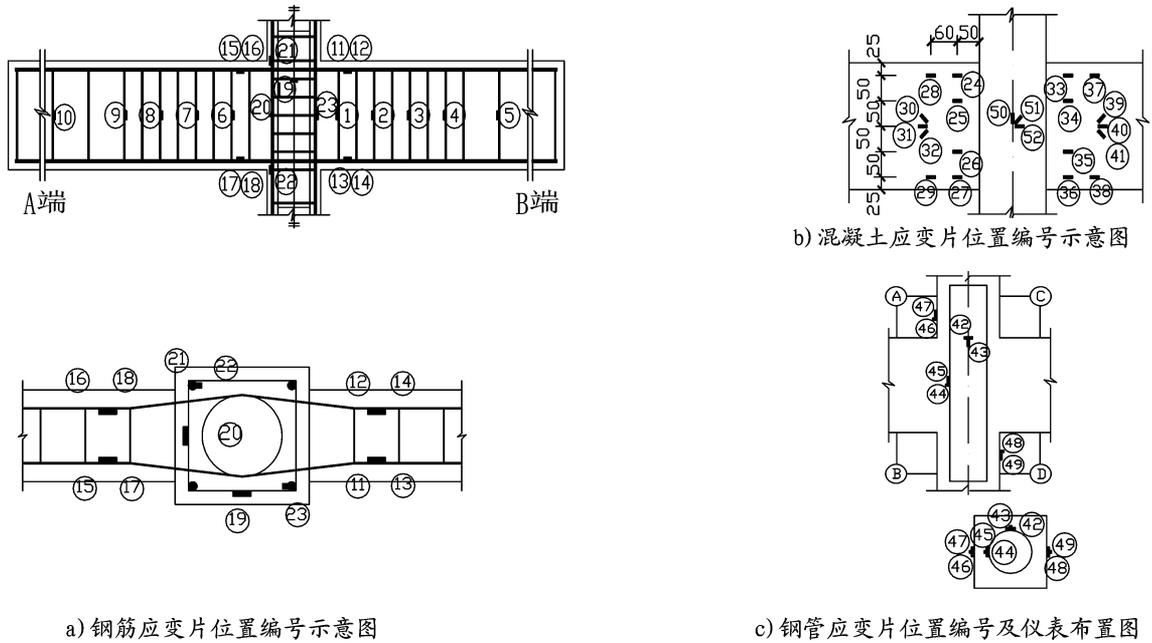


图 2 应变测点及位移测量仪表布置图

Fig. 2 Layout of strain gauges and displacement measurement

试件利用反力架固定, 通过 500 kN 液压千斤顶施加在柱顶上, 柱底设置球铰, 以放松柱端的转角约束. 两侧梁端各布置两个 MTS 作动器施加低周反复荷载. 试件 JD-T1 轴压比为 0.15 , JD-T2 轴压比为 0.30 . 加载示意图如图 3 所示.

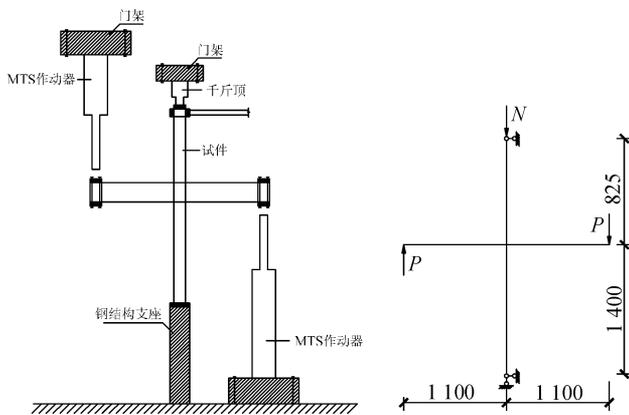


图 3 加载装置

Fig. 3 Loading set-up

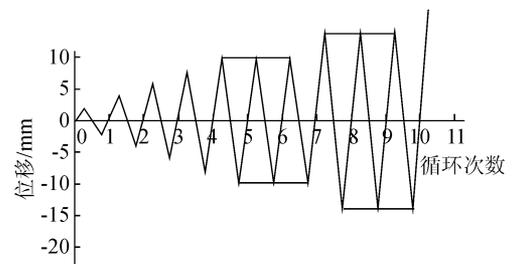


图 4 循环加载制度

Fig. 4 Loading process diagram

试验采用电液伺服结构试验机进行低周反复循环加载,采用位移控制方法.当试件承载力过峰值后下降到峰值的85%时认为试件破坏.梁钢筋屈服前,每步位移循环1次,屈服后,每步位移循环3次.循环加载制度如图4所示.节点的荷载-位移滞回关系曲线由MTS加载系统自动进行采集,试件的应变、位移和转角等数据的采集由计算机数据采集,并在试验的全过程中对外钢管、芯钢管、节点核心区和钢筋混凝土梁的变形和应变变化进行时时监测,混凝土梁的裂缝用裂缝仪进行观测.试验加载装置全貌如图5所示.

2 试验现象及破坏过程

由于试件两侧梁对称,取试件一侧(B端一侧)梁作为描述对象,荷载向下为正,向上为负.两个试件的破坏形式和破坏过程基本上相同,均表现为钢筋混凝土梁沿柱边缘形成通缝,梁受拉纵筋屈服,柱边缘处梁根部上下端混凝土压碎,试件承载力迅速下降,形成梁端弯曲破坏形式.

试件JD-T1(JD-T2)的破坏过程一并叙述如下,其中括号内数值为JD-T2的数值.位移加载初期,试件处于弹性状态.位移加载到-4 mm,梁侧面底部出现第一条微小的裂缝,此时对应的开裂荷载为7.4 kN(8.1 kN).位移加载到10 mm(8 mm)时,梁顶面和底面出现几条贯穿直裂缝,与梁侧面的裂缝相交;梁顶面和底面根部都出现梁长方向的裂缝,同时在钢筋混凝土梁与钢管混凝土柱壁交接处开始出现细小的剥离裂缝,试件反向加载时,裂缝闭合.位移加载到22 mm(14 mm)时,梁根部形成了一条完全贯通的主裂缝,此时正(反)向荷载达到极值15.9 kN(-14 kN).加载到28 mm时,反(正)向荷载达到极值-11.25 kN(15.8 kN).加载到-34 mm(46 mm)时,梁侧面根部混凝土压碎,混凝土块剥落,钢筋裸露.位移加载到52 mm(46 mm)后,荷载下降到极限承载力的85%,试验结束.试件破坏状态见图6、图7.



图5 实验装置图



图6 试件JD-T1破坏状况



图7 试件JD-T2破坏状况

Fig. 5 Schematic view of test equipment

Fig. 6 The failure pattern of specimen JD-1

Fig. 7 The failure pattern of specimen JD-2

3 试验结果分析

3.1 试件破坏形态分析

从节点试验的破坏现象看,两个节点均为梁根部塑性铰区破坏,属于梁弯曲破坏.试件JD-T1的梁端塑性铰是在梁柱交接处,而试件JD-T2的梁端塑性铰稍微偏离梁柱交接处,随着轴压比的增大,梁根部混凝土塑性铰有向外转移的趋势.

试验时,钢管混凝土柱没有很明显的破坏现象,仅节点核心区产生轻微的剪切变形.钢管混凝土柱及节点核心区未破坏,满足了抗震设计中的“强柱弱梁,强节点弱构件”的要求,试验结果表明,该种节点在地震作用下工作性能良好.

3.2 梁端荷载-位移滞回曲线($P-\Delta$ 滞回曲线)分析

本试验采用MTS伺服加载系统记录节点梁端荷载(P)-位移(Δ)滞回关系曲线,图8为本次试验节点梁端荷载-位移滞回曲线(取试件B侧梁试验数据进行分析),图中荷载自下而上为正,反之则为负,位移亦然.

从图8可以看出,该滞回曲线与一般框架梁往复荷载作用下的滞回曲线特征和规律基本相同.开始加载时,梁端荷载与变形几乎成线性增长,刚度无明显变化,结构基本处于弹性状态.随着反复加载位移的幅值增大以及循环次数的增多,混凝土受拉裂缝不断开展、延伸、钢筋的拉应变与混凝土的压应变逐渐增大,节点核心区钢筋出现滑移,总变形持续增加,滞回环逐渐增大丰满,荷载卸载为零后,试件均有残余变形,结构进入非线性阶段,节点刚度逐渐退化,随着低周反复荷载的逐级加大.混凝土和钢筋的塑性变形、裂缝的开闭以及钢筋锚固滑移等因素的影响,试件的滞回曲线有“捏缩”现象.从结构屈服开始,滞回环的面积不断增大,此时主要依靠梁铰机制来进行耗能.

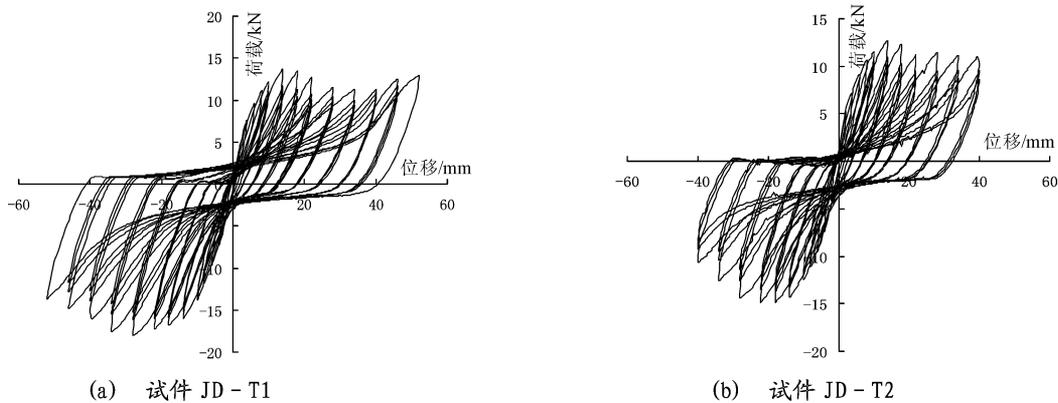


图 8 节点梁端荷载-位移滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curve of beams

3.3 节点的耗能性能分析

本文采用能量耗散系数 E 和等效粘滞阻尼系数 ξ_{eq} 来评价节点试件的耗能能力,如图 9 的滞回环中,能量耗散系数 E 定义为构件在一个滞回环的总能量与构件弹性能的比值.通过计算得到试件达到极限状态时滞回环的能量耗散系数 E 和等效粘滞阻尼系数 ξ_{eq} 如表 2 所示.

从表 2 可看出,JD-T1 和 JD-T2 两个试件耗散系数 E 都超过 0.8. 等效粘滞阻尼系数分别为 0.15 和 0.13,钢筋混凝土节点的 ξ_{eq} 一般为 0.1 左右,型钢混凝土节点的 ξ_{eq} 约为 0.3 左右^[5]. 本文节点核心区未破坏,整个节点试件是梁端塑性铰发展导致的最终破坏形式.其试件的耗能能力优于钢筋混凝土节点的耗能能力,节点的耗能性能良好,可以应用于有抗震要求的工程结构.从中还可以看出,轴压比(n)对试件的能量耗散系数 E 和等效粘滞阻尼系数 ξ_{eq} 主要有以下影响:试件 JD-T2 的能量耗散系数要比 JD-T1 的小,说明随着轴压比的增加,能量耗散系数 E 和等效粘滞阻尼系数 ξ_{eq} 有下降的趋势,节点的耗能能力随着轴压比增大而有所降低,在一定范围内,轴压比对试件耗能性能有不利的影响.

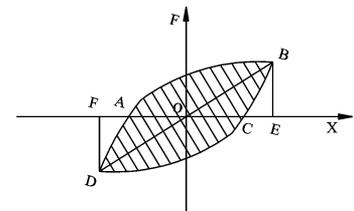


图 9 荷载-位移曲线滞回环

Fig. 9

表 2 节点耗能系数

Tab. 2 Energy dissipation of specimens

试件编号	轴压比 n	能量耗散系数 E	等效粘滞阻尼系数 ξ_{eq}
JD-T1	0.15	0.96	0.15
JD-T2	0.30	0.80	0.13

3.4 节点试件的位移延性分析

本文采用位移延性系数研究节点试件的延性特性.以梁端竖向极限位移 Δ_u 与屈服梁端竖向位移 Δ_y 的比值定义为位移延性系数,即:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3.4)$$

试件的位移延性系数见表 3.

由表 3 可见,JD-T1 的位移延性系数为 5.67,位移延性系数均较高,试件延性较好,满足一般框架中节点的位移系数大于 4 的抗震要求. JD-T2 的

位移延性系数为 4.67,延性较好,满足大于 4 的抗震要求.从本次试验结果来看,轴压比对节点位移延性有一定影响,试件的延性系数随轴压比的提高而有所降低.

3.5 试件受力分析

图 10、图 11 为芯钢管纵向和环向荷载-应变骨架曲线.芯钢管的纵向及环向的最大应变值仍比材料拉伸试验时的屈服应变值低很多,尤其是环向应变还很小,这说明节点的承载力还有很大的储备空间,满足“强节点、弱构件”的抗震设计要求.

表 3 试件位移延性系数

Tab. 3 Ductility factor of beams

试件编号	Δ_y^+ /mm	Δ_y^- /mm	Δ_y /mm	Δ_u^+ /mm	Δ_u^- /mm	Δ_u /mm	μ
JD-T1	9	-6	7.5	36	-49	42.5	5.67
JD-T2	9	6	7.5	46	-24	35	4.67

注:其中 $\Delta_y = \frac{(|\Delta_y^+| + |\Delta_y^-|)}{2}$; $\Delta_u = \frac{(|\Delta_u^+| + |\Delta_u^-|)}{2}$; Δ_y^+ 、 Δ_y^- 分别为正向加载和负向加载时的屈服位移; Δ_u^+ 、 Δ_u^- 分别为正向加载和负向加载时的极限位移.由于试验中存在误差,所以 Δ_y^+ 与 Δ_y^- 、 Δ_u^+ 与 Δ_u^- 有差异.

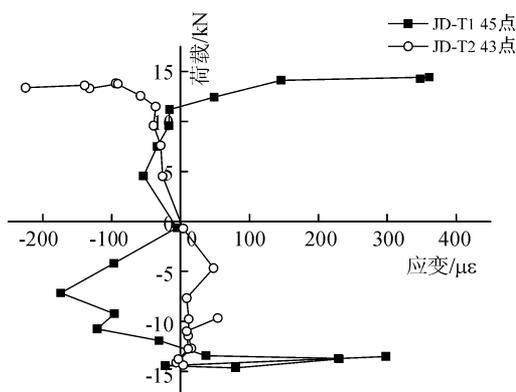


图10 芯钢管纵向荷载-应变骨架曲线

Fig. 10 Load-strain curves for instruments of the longitudinal the core steel tube

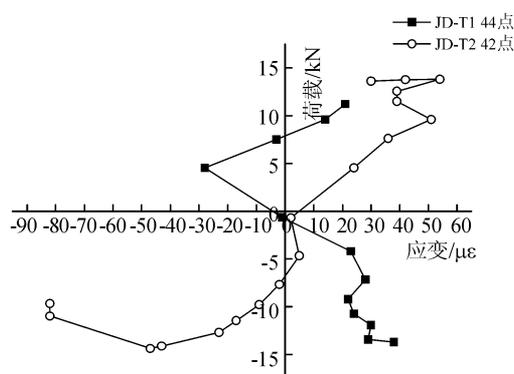


图11 芯钢管环向荷载-应变骨架曲线

Fig. 11 Load-strain curves for instruments of the transverse the core steel tube

图12、图13为外方钢管纵向和环向荷载-应变骨架曲线。外钢管的纵向及环向应变很小,并且环向应变比纵向应变小很多,这表明内部混凝土横向变形很小,钢管混凝土柱还远未被破坏。

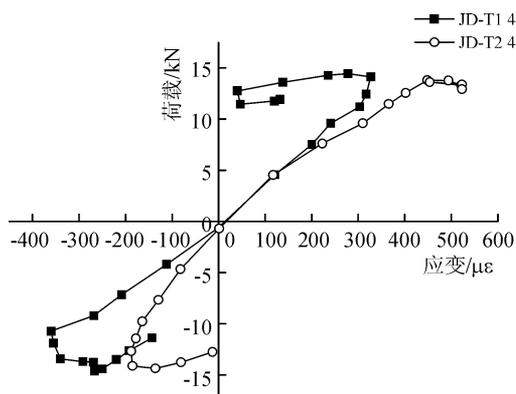


图12 外钢管纵向荷载-应变骨架曲线

Fig. 12 Load-strain curves for instruments of the longitudinal the outside of steel tube

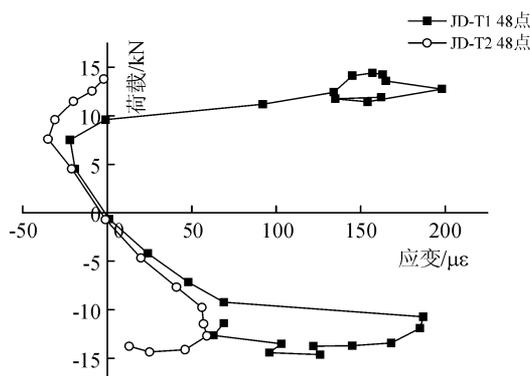


图13 外钢管横向荷载-应变骨架曲线

Fig. 13 Load-strain curves for instruments of the transverse the outside of steel tube

由本文试验结果可看出:节点试件的破坏发生在钢管混凝土梁根部,节点区未破坏。因试件按正常节点缩尺,未专门设计弱节点试件,试件的破坏形式与设计预期一致。说明该种梁通柱断式芯钢管节点用于方钢管混凝土柱能够经受水平地震反复作用。验证了节点在地震作用下的合理性和可行性。试件的芯钢管、节点竖筋、箍筋等处的应变数据显示,当试件破坏时,这些节点核心部位的应变均较小,大部分还处于弹性状态。

试验表明,梁通柱断式方钢管混凝土节点不仅在竖向荷载作用下可靠,在水平地震作用下也具有很好的受力和抗震性能。

4 结 论

(1)梁通柱断式方钢管混凝土节点在低周反复荷载作用下具有良好的受力和变形性能,节点构造合理。试件破坏发生在钢筋混凝土梁根部,节点核心区承载力在试件破坏时尚有很大潜力。该种节点符合强节点弱构件的抗震要求。

(2)本文的方钢管节点试件具有很好的吸收和耗散地震能量的能力。两个试件的耗能系数分别达0.96和0.8。

(3)本文的方钢管节点试件具有较大的位移延性系数,两个试件分别达5.67和4.67。

(4)轴压比对节点的承载力和延性有一定影响。随轴压比增大,试件的承载力有所增大。但是,粘滞阻尼系数和能量耗散系数有下降趋势。

参考文献 References

- [1] 王毅红. 钢管混凝土梁通柱断式新型节点的试验研究及承载力计算[D]. 西安: 长安大学, 2006.
WANG Yi-hong, Experimental Study and Bearing-capacity Calculation on a New Type Concrete Filled Steel Tube Joint with Continual Beam and Discontinuous Column [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [2] 汤文锋, 王毅红. 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(371): 59-61.
TANG Wen-feng, WANG Yi-hong. The Experimental Study On New Type Joint of Cfst-Core Steel Tube Joint in the Side Column[J]. Industrial Construction, 2005, 35(371): 59-61.
- [3] 王毅红, 蒋健飞. 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): 56-59.
WANG Yi-hong, JIANG Jian-fei. Experimental study on semi-connected edge joint with core steel tube in CFST [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(12): 56-59.
- [4] 王毅红, 汤文峰. 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, [J]. Building Structure, 2004, 34(12): 60-63.
- [5] 周起敬. 钢与混凝土组合结构设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991.
ZHONG Qi-jing. Steel and Concrete Composite Structure Design and Construction Manual [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1991.
- [6] Isao Nishiyama, Shosuke Morino. US-Japan cooperative earthquake research program on CFT structures; achievements on the Japanese side[J]. Prog. Struct. Engng Mater., 2004(6): 39-55.
- [7] AISC committee. Load and resistance factor design specification for structural steel buildings[S]. Chicago, IL: American Institution of Steel Construction, 2001.
- [8] SHI Xu-dong, Tan T H, Tan K H, et al. Concrete constitutive relationships under different stress-temperature paths [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(12): 1511-1518.

Study on the aseismic performance of concrete filled square steel tube joint with continual beam and discontinual column

WANG Yi-hong¹, XIAO Li-li², WU Xiao-jing³, GAO Hang-yu¹

(1. School of Civil Engineering of Chang'an University, Xi'an 710061, China;
2. Xi'an FANYI University, Xi'an 710105, China; 3. Shanghai 200063, China)

Abstract: The paper presents a study on the mechanical behavior and seismic performance of concrete filled square steel tube joint with continual beam and discontinual column. The outer steel tube of this kind of joint was partially broken off and the longitudinal steel bars in RC beams were continuous in the joint zone. The core steel, spaced stirrups and vertical short bars tube were set in the joint core zone that can keep continuity of the steel tube. Through pseudo static test of two scale model of the specimen, the load - strain relations of the destruction process of joint, failure modes and specimen hysteresis curve of specimen is obtained. The test showed that this joint was in good condition under low reversed cyclic loading. The failure of specimens occurs in the roots of the beam and the joint area still have greater bearing potential and the energy dissipation and ductility are in good condition. The increases of axial compression ratio may improve the capacity, but the energy dissipation capacity and ductility tended to decrease.

Key words: concrete filled square steel tube joint; low reversed cyclic loading; axial compression ratio; aseismic performance; experimental study