

方钢管混凝土柱外环肋节点及其改进型破坏模式研究

邓 芃^{1,2}, 杨登科^{1,2}, 王 来^{1,2}, 李 楠³

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266590;

3. 山东科技大学 资源与土木工程系, 山东 泰安 271019)

摘 要: 通过对方钢管混凝土柱-钢梁外环肋节点的拟静力试验研究和数值分析, 探讨了节点的变形特征和破坏模式, 指出外环肋节点虽然可满足抗震设计的要求, 但存在节点承载力偏小、节点焊缝应力集中等缺陷。借鉴圆钢管混凝土结构中的内锚构造, 提出改进型外环肋节点, 即在钢管混凝土柱内壁增设“T”型或“L”型内锚。通过对改进型外环肋节点单调加载理论分析, 研究了节点各组件受力情况和节点的荷载-位移曲线, 指出改进型节点的内锚增强了混凝土的约束效应, 显著提高了节点的承载力。

关键词: 方钢管混凝土; 外环肋节点; 内锚; 破坏模式; 约束效应

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2013)04-0062-05

Study of Failure Modes of Improved Square Concrete-filled Steel Tubular Columns with Ring-stiffening

Deng Peng^{1,2}, Yang Dengke^{1,2}, Wang Lai^{1,2}, Li Nan³

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. Department of Resources and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an, Shandong 271019, China)

Abstract: The deformation behavior and the failure mode of steel beam to concrete-filled square steel tube column connections with outer stiffening ring were discussed through quasi-static tests and numerical analysis. It is concluded that though it can meet requirements of seismic design, the connection has disadvantages of low bearing capacity and stress concentration at welds. However, the connection can be improved by adding “T” or “L” anchors inside the square steel column like details in concrete-filled circular steel tube column. According to the analysis of monotonic loading process which contains stress and $P-\Delta$ curves of connections, the improved connection shows higher capacity as a result of restraining effect of anchors.

Key words: concrete-filled square steel tubes; joint with ring-stiffening; anchors inside; failure modes; local restraint effect

方钢管混凝土柱-钢梁结构体系具有较高的承载力和延性, 可满足高烈度区抗震设防的要求^[1-3], 目前, 工程中通常采用内隔板和外加环式节点^[4], 这两类节点的试验和理论研究都比较充分^[5-10], 但内隔板节点加工繁琐、混凝土浇筑不便; 外加环式节点尺寸过大, 导致建筑构造复杂, 这要求学术界和工程界提出更为方便的节点形式。

在文献^[11-14]的基础上, 本研究提出改进型外环肋节点。所谓外环肋节点是指在钢管柱外侧焊接“T”型外环肋, 从而增加连接区管壁的厚度、增强混凝土的约束效应, 也便于钢梁翼缘拉力向柱腹板传递。但是,

收稿日期: 2013-04-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51178259); 山东省“泰山学者”建设工程专项经费项目

作者简介: 邓 芃(1970—), 男, 山东滕州人, 副教授, 博士, 主要从事钢结构和组合结构方面的研究。

E-mail: dengpeng1226@sdust.edu.cn.

外环肋节点存在承载力偏小、应力集中等比较明显的缺陷。对外环肋节点进行改进,即在钢管混凝土柱-钢梁外环肋构造的基础上,设置“T”型内锚或“L”型锚板以提高节点的承载力,并避免外环肋与柱连接处焊缝破坏的缺陷。通过对外环肋节点和改进型外环肋节点破坏模式、混凝土主应力以及荷载-位移曲线的分析,验证了设置内锚可改变主应力轨迹,提高节点的承载力,避免应力集中。

1 外环肋节点破坏模式及变形特征

1.1 外环肋节点试验概况

外环肋节点尺寸及试验装置如表 1 和图 1 所示,方钢管柱采用全熔透坡口焊缝,H 型钢梁与柱采用栓接,采用 M16 摩擦型高强螺栓,10.9 级。外环肋为 50 mm×10 mm 钢板,宽度以覆盖钢管柱为准,外环肋与柱壁采用角焊缝围焊, $h_f=6$ mm;外环肋与水平连接板构成“T”型连接件,钢梁上、下翼缘与外环肋水平连接板焊接。单调加载试验以及拟静力试验都采用 0.4 的轴压比系数,拟静力试验采用控制力和控制位移混合加载模式,达到节点极限承载力的 85%时结束试验。

表 1 试件参数及材料性能表
Tab.1 Parameters of specimens and materials

试件编号	柱截面尺寸 /mm	梁截面尺寸 /mm	钢材屈服强度 f_y /MPa	钢材极限强度 f_u /MPa	150 mm 土立方抗拉强度 $f_{cu,150}$ /MPa
CZ1	300×300×4	200×150×6×8	292	422	23.35
CZ2	300×300×6		302	438	



(a) 试验加载装置图
(a) Loading device



(b) 试验测点图
(b) Test points

图 1 外环肋节点试验装置图
Fig.1 Test device of connection

采用图解法^[16]确定结构的屈服荷载和屈服位移,结构的破坏荷载取极限荷载的 85%。对图 2 所示骨架曲线进行分析可知:CZ1 和 CZ2 骨架曲线差别并不明显,二者的屈服荷载分别为 65.03 和 70.66 kN,极限荷载分别为 80.39 和 84.67 kN,破坏荷载分别为 68.33 和 71.97 kN;另外,CZ1 和 CZ2 的层间位移延性系数达到 3.07 和 3.66,弹性层间变形角为 0.004 0 和 0.004 7,极限塑性转角为 0.017 和 0.018,参照文献[17]对结构弹性层间位移角和弹塑性层间位移角的规定($[\theta_e]=1/250$,结构弹性层间位移角; $[\theta_p]=1/50$,弹塑性层间位移角),可发现二者都可以满足规范对弹塑性层间位移角的规定;虽然 CZ2 管壁厚度较 CZ1 增加 2 mm,但由于焊缝过

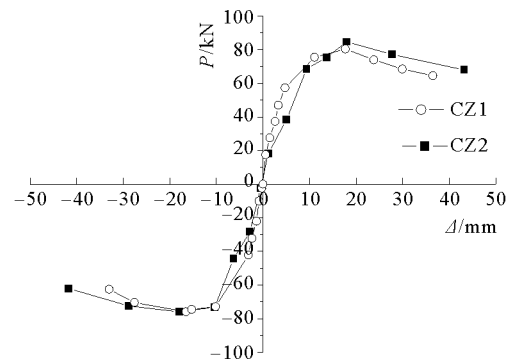


图 2 节点 P-Δ 骨架曲线图
Fig.2 Framework P-Δ curves of connection

早出现,导致 CZ2 无法满足结构对弹性层间位移的限值。

1.2 变形特征及破坏模式分析

图 3 为钢梁第 1 主应力轨迹图,可观察到梁翼缘变截面处及外环肋与柱壁交角处主应力较大,表明钢梁翼缘拉力可部分通过外环肋水平连接板传至钢管柱腹板,可避免受拉翼缘仅依靠管壁厚度平衡钢梁翼缘拉力的缺陷。由于方钢管腹板的约束作用,导致钢管柱壁中间区和边缘区刚度差别大,钢管柱壁中间区变形大、材料进入塑性状态后,翼缘拉力更多依靠肋板端部向钢管柱腹板传递,而该区域焊缝密集、材料损伤较为严重,这也是图 4 外环肋端部焊脚破坏以及图 5 钢管柱壁焊缝破坏的原因。试件 CZ1 柱壁厚度 4 mm,而 CZ2 柱壁厚度 6 mm,但二者骨架曲线极为接近,出现这种现象的原因是后者焊缝破坏发生较早,导致 CZ2 的节点承载力提高并不显著。图 6 为受压翼缘区主压应力轨迹曲线,可观察到主压应力主要沿钢管柱中间区进行传递,钢管腹板的环肋作用非常有限,钢梁翼缘的压应力主要依靠钢管柱与混凝土的接触作用进行传递。

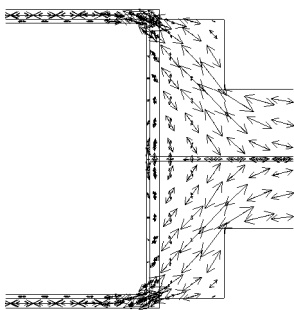


图 3 受拉翼缘区第 1 主应力图

Fig. 3 The first main stress of joint



图 4 外环肋节点端部焊缝破坏图

Fig. 4 Damage of ring welds

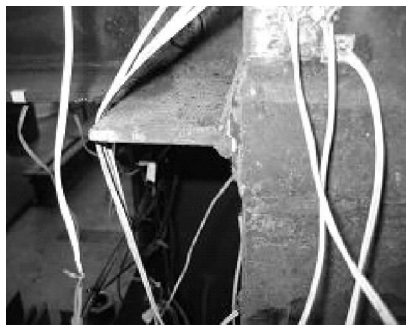


图 5 钢管柱焊缝破坏图

Fig. 5 Damage of column welds

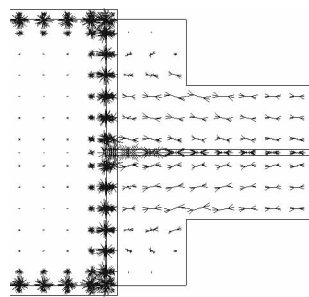


图 6 外环肋节点受压翼缘区第 3 主应力图

Fig. 6 The third main stress of joints

2 改进型外环肋节点构造

虽然方钢管柱设置外环肋可提高管壁的抗弯能力、增强方钢管柱对混凝土的约束作用,同时借助较宽大的水平板,实现了翼缘拉力向钢管柱腹板的传递,使外环肋节点可满足结构抗震设计的要求,但这种节点还存在两个缺陷:首先是套箍效应不明显,节点区混凝土第 3 主应力轨迹基本与柱高度方向平行;另外,钢梁翼缘拉力导致外环肋端部应力较大,由于该区域焊缝密集,外环肋与柱壁的水平连接焊缝、外环肋端部的竖向连接焊缝以及柱壁焊缝破坏现象比较严重。为调整钢梁应力传递路线、增强钢管对混凝土的三向约束作用,本研究提出在钢管内壁焊接“T”型内锚和“L”型内锚,为避免内锚与柱腹板焊缝过长,内锚仅布置在对应翼缘处;鉴于内锚中间区操作空间小,焊接操作不便,故采用“L”型内锚,如图 7 所示。

3 改进型外环肋节点受力特征

为了解改进型外环肋节点的承载能力和变形特征,对 CZ1 和 CZ2 试件增加“T”型内锚并进行单调加载的理论分析。“T”型内锚由 80 mm×80 mm×10 mm,60 mm×80 mm×20 mm 的两块钢板组成,“L”型内锚由“T”型内锚切割一端而成。采用 ANSYS 软件中的 Solid45 和 Solid65 单元分别模拟钢材和混凝土,钢材的本构关系采用双线随动强化模型,材料的屈服强度、弹性模量取自表 1 中的试验数据,钢材屈服后切线模量取弹性阶段的 1/100;混凝土采用文献[15]所提出的应力-应变关系曲线,混凝土的立方体抗压强度取自表 1 数据;数值分析中未考虑混凝土和钢材的相对滑移。

与普通的外环肋节点不同,设置内锚后钢管内混凝土的第 3 主应力轨迹曲线有显著差别,图 8 为“T”型内锚节点混凝土第 3 主应力轨迹曲线,可观察到内锚与管壁之间的混凝土形成斜压短柱,而普通外环肋节点因约束效应不显著,节点区混凝土主压应力轨迹方向基本与柱高度方向平行。图 9 为改进型外环肋节点第 1 主应力轨迹曲线图,与图 3 所示的外环肋节点主拉应力不同的是,内锚改变了该区域主拉应力的分布趋势,内锚与管壁连接区出现较大的应力;同时,内锚对中间区钢板的约束作用,改变了柱壁刚度分布不均匀的状态,减小了柱壁向外凸出。

图 10 为外环肋节点、带“T”型内锚节点以及带“L”型内锚节点的单调加载曲线图,可观察到增加内锚后,节点的承载力较无内锚节点有明显的提高,无内锚外环肋节点的屈服荷载为 74.57 kN,而设置“L”型和“T”型内锚节点的屈服荷载分别为 147.35 和 161.05 kN,分别是未设置内锚的节点承载力的 1.98 倍和 2.16 倍,增幅非常明显。

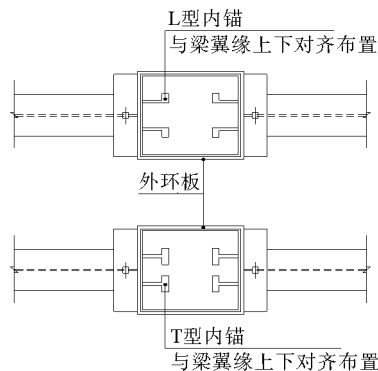


图 7 改进型外环肋节点图

Fig. 7 Improved ring-stiffening-connection

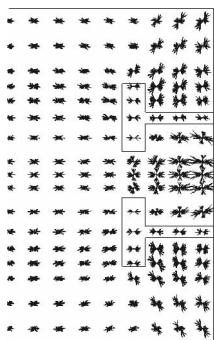


图 8 混凝土第 3 主应力轨迹示意图(“T”型内锚)

Fig. 8 The third main stress of concrete with T anchors

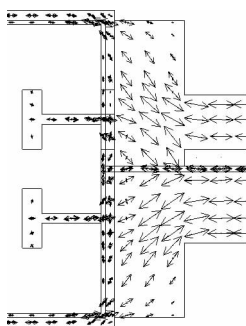


图 9 “T”型内锚节点 1 主应力示意图

Fig. 9 The first main stress of joint with T anchors

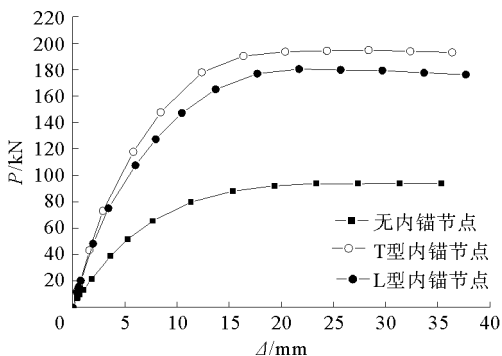


图 10 改进型外环肋节点 P-Δ 单调曲线图

Fig. 10 Improved ring-stiffening P-Δ curves comparing

4 结论

通过对外环肋节点破坏模式和带内锚外环肋节点破坏模式的分析,可以得出如下结论:

- 1) 设置内锚可改善钢管柱壁刚度不均匀的现象,增强钢管柱壁的抗弯性能,减小钢管柱壁的变形,从而提高节点的承载力。
- 2) 内锚和柱壁间的混凝土具有斜压短柱的受力特征,能够局部改善混凝土的约束作用,提高节点承载力。

3)改进型外环肋节点仍保持普通外环肋节点荷载传递路线的基本特征,通过外环肋的水平连接板,部分应力可传至钢管柱腹板,从而减小外环肋端部的应力水平,避免该区域焊缝集中破坏。

参考文献:

- [1]韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社,2000:1-4.
- [2]韩林海,杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007:2-5.
- [3]中国建筑技术研究院. JGJ 99-98 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [4]中国工程建设标准化协会标准. CECS159:2004 矩形钢管混凝土结构技术规程[S].
- [5]周天华,聂少锋,卢林枫,等. 带内隔板的方钢管混凝土柱-钢梁节点设计研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(5):23-29.
Zhou Tianhua, Nie Shaofeng, Lu Linfeng, et al. Design of concrete-filled square tube column and steel beam joint with internal diaphragms[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(5): 23-29.
- [6]王来,王铁成,邓芃. 方钢管混凝土框架内隔板节点抗震性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(1):76-80.
Wang Lai, Wang Tiecheng, Deng Peng. Experimental research on seismic performances of joint reinforced with inner ring stiffener of concrete-filled square tubular frame[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(1): 76-80.
- [7]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):1-8.
Xu Guigen, Nie Jianguo. Experimental study of connections of concrete-filled square steel tubular columns with continuous diaphragms[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8): 1-8.
- [8]Fukumoto T, Masaya T. Local elasto plastic behavior of steel beam to concrete-filled square steel tubular column connections. Internal diaphragm type of column to wide flange beam connections[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2002(560): 213-220.
- [9]聂建国,秦凯,肖岩. 方钢管混凝土柱节点的试验研究及非线性有限元分析[J]. 工程力学,2006,23(11):99-109,115.
Nie Jianguo, Qin Kai, Xiao Yan. Experimental investigation and nonlinear finite element analysis on the behavior of concrete-filled square steel tubular column connections[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(11): 99-109, 115.
- [10]王文达,韩林海,游经团. 方钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点滞回性能的实验研究[J]. 土木工程学报,2006,39(9):17-25.
Wang Wenda, Han Linhai, You Jingtuan. Experimental studies on hysteretic behaviors of steel beam to concrete filled SHS column connections with stiffening ring[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 17-25.
- [11]高峰,王连国,王来. 方钢管混凝土柱-钢梁外隔板节点三维非线性有限元研究[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2009,40(2):264-268.
Gao Feng, Wang Lianguo, Wang Lai. 3D nonlinear fem analysis of concrete-filled square tubular column and steel beam joint [J]. Journal of Shandong Agricultural University; Natural Science Edition, 2009, 40(2): 264-268.
- [12]王来,李楠. 一种新型方钢管混凝土柱——H 钢梁节点抗震性能的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(s):447-450.
Wang Lai, Li Nan. Study on seismic behavior of new type joint between concrete-filled square steel tube and H-type steel beam[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(s): 447-450.
- [13]李楠,王来. 方钢管混凝土柱-钢梁外环肋节点抗震性能研究[J]. 工业建筑,2010,40(10):117-121,143.
Li Nan, Wang Lai. Study on seismic behavior of joint with exterior diaphragms between concrete-filled square steel tubular column and steel beam[J]. Industrial Construction, 2010, 40(10): 117-121, 143.
- [14]王先铁,郝际平,王丰平,等. 锚定式方钢管混凝土柱与钢梁节点抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2007,27(5):95-102.
Wang Xiantie, Hao Jiping, Wang Fengping, et al. Experimental studies on seismic behaviors of connections with anchorages for concrete-filled square steel tubes[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(5): 95-102.
- [15]韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2004:69-70.
- [16]中国建筑科学研究院. JGJ101-96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [17]GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

(责任编辑:吕文红)