

钢管约束钢筋混凝土受压构件力学性能试验研究

高春彦¹, 刘明洋¹, 段雅鑫¹, 郭大伟²

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 包钢西北创业建设有限公司, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 以钢管径厚比(55、110)、试件长细比(12、24)和加载偏心率(0、0.23、0.46)为主要参数, 完成了 12 个钢管约束钢筋混凝土构件的受压试验. 研究了试件的破坏形态、承载力和荷载-挠度曲线, 并分析了各试验参数对试件力学性能的影响规律. 试验结果表明: 径厚比对该类试件破坏形态和承载力的影响不大; 试件长细比和加载偏心率对试件破坏形态和承载力影响显著. 轴压构件的典型破坏形态为试件中部钢管外凸或撕裂, 核心混凝土出现明显的斜向剪切破碎带; 偏压构件破坏位置主要集中在切缝处, 该处受拉侧混凝土被拉裂, 受压侧混凝土被局部压溃. 试验数据可为钢管约束混凝土柱在实际工程中的应用提供参考.

关键词: 钢管约束钢筋混凝土; 偏心受压构件; 径厚比; 长细比; 偏心率

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0833-06

Experimental study on mechanical properties of the tube confined reinforced concrete compression members

GAO Chunyan¹, LIU Mingyang¹, DUAN Yaxin¹, GUO Dawei²

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Baogang Northwest Venture Construction Co. Ltd., Baotou 014010, China)

Abstract: The text of 12 tube confined reinforced concrete compression members were completed by using steel pipe diameter-thickness ratio (55, 110), slender ratio (12, 24) and loading eccentricity ratio (0, 0.23, 0.46) as the main parameters. The failure mode, bearing capacity, and load-deformation curve of the specimens are studied, and the influence law of the mechanical properties of each test parameter is analyzed. The test results show that the diameter-thickness ratio has little effect on the failure mode and bearing capacity of this kind of specimens. The slender ratio and loading eccentricity ratio of the specimens had a significant effect on the failure mode and bearing capacity of the specimens. The typical failure mode of axial pressure member is the convex or tearing of steel pipe, and the core concrete appears obvious oblique shear crushing zone. The failure position of the compression member is mainly concentrated in the cutting seam, where the tensile side concrete is fractured and the pressed side concrete is partially crushed. The experimental data in this paper can provide reference for the application of steel pipe constrained concrete column in practical engineering.

Key words: steel tube confined reinforced concrete; eccentric compression member; diameter-thickness; slender ratio; eccentricity ratio

钢管约束钢筋混凝土柱是在薄壁钢管内填充混凝土, 其中钢管不直接承受纵向荷载, 仅对核心混凝土起约束作用的一种组合构件. 1967 年 Gardner 最早开始研究钢管约束素混凝土构件的力学性能, 发现圆钢管约束素混凝土轴压构件的承载力要高于圆钢管混凝土构件^[1], Prion^[2]、Peter^[3]和 Jasim^[4]分别对钢管约束素混凝土柱进行了试验研究, 得出了圆钢管约束混凝土短柱的轴压承载力公式和外包圆钢管可以有效提高钢筋混凝土短柱的抗剪承载力、延性和耗能能力, 使钢筋

混凝土短柱的破坏形态由剪切破坏转向弯曲破坏等重要理论成果. 目前, 钢管约束钢筋混凝土柱在中国被广泛推广并成功应用于大连中国石油大厦^[5]等大型复杂公共建筑中, 取得了良好的经济效益, 国内学者对钢管约束混凝土构件的研究也在不断深入, 韩林海^[6]、王玉银^[7]、张素梅^[8]、刘界鹏^[5-6, 11-12]、周绪红^[13-15]等对钢管约束混凝土构件的力学性能做出了大量的试验研究和理论分析, 并取得了阶段性的研究成果.

钢管约束混凝土构件继承了型钢混凝土、密

收稿日期: 2019-03-01

修改稿日期: 2019-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51368042); 内蒙古自然科学基金项目(2018MS05041)

第一作者: 高春彦(1978—), 女, 博士, 副教授, 从事组合结构和结构抗震性能研究. E-mail: gao-197844@163.com

排箍筋混凝土和钢管混凝土的优点,可以有效解决钢筋混凝土框架结构层间变形能力差,抗震性能要求难以满足,梁柱节点构造复杂,不方便施工等问题.目前钢管约束混凝土组合结构主要应用在两个方面:一方面集中于新建结构中出现的短柱或超短柱;另一方面使用在修复与加固钢筋混凝土框架柱和桥梁的工程中.鉴于实际工程中的钢筋混凝土柱主要是中长柱并且存在一定的偏心,因此本文针对该类组合构件,以径厚比、加载偏心率和试件长细比为试验参数,对不同参数下该类组合构件的典型破坏形态、承载力和荷载-变形曲线关系等进行了试验研究,并给出相应的理论分析.

1 试验研究

1.1 试件设计

选取钢管径厚比(55、110),试件长细比(12、24)和加载偏心率(0、0.23、0.46)作为参数,进行了 12 个圆钢管约束钢筋混凝土受压构件的试验研究.试件尺寸如图 1 所示.

试件钢管外直径 D 为 219 mm,混凝土内配纵筋 4C14,箍筋 2A8@200,端板厚 20 mm.试件编号及参数见表 1,试件命名方法以 CTRC-4-50-24 为例来说明,CTRC 表示 circular tubed reinforced concrete,4 表示钢管厚度,50 表示偏心距,24 表示试件长细比.

为保证钢管不直接承担纵向荷载,只对核心混凝土起约束作用,用角磨机在距试件两端 30 mm

处各割出一道宽度为 10 mm 的切缝.并在切缝下侧分别加焊宽 20 mm,厚 3 mm(针对 2 mm 的钢管)、5 mm(针对 4 mm 的钢管)的环向条带.

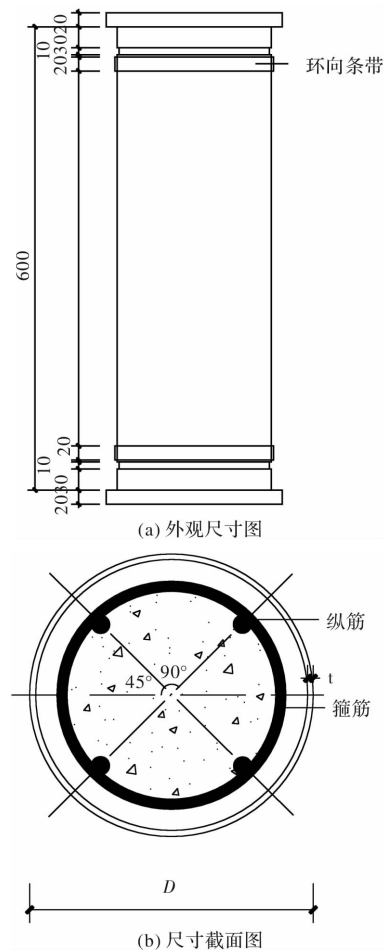


图 1 试件尺寸图

Fig. 1 Specimen dimension

表 1 试件参数

Tab. 1 Specimen parameters

试件编号	柱高/mm	长细比 λ	径厚比 D/t	偏心距 e_0 /mm	偏心率 $e(e_0/r)$
CTRC-2-0-12	660	12	110	0	0
CTRC-2-25-12			110	25	0.23
CTRC-2-50-12			110	50	0.46
CTRC-4-0-12			55	0	0
CTRC-4-25-12			55	25	0.23
CTRC-4-50-12			55	50	0.46
CTRC-2-0-24	1 320	24	110	0	0
CTRC-2-25-24			110	25	0.23
CTRC-2-50-24			110	50	0.46
CTRC-4-0-24			55	0	0
CTRC-4-25-24			55	25	0.23
CTRC-4-50-24			55	50	0.46

本次试验所用钢管采用 Q235 钢, 箍筋选取 HPB300 级钢筋, 纵筋选取 HRB400 级钢筋, 钢管和钢筋力学性能见表 2, 核心混凝土强度等级为 C30, 其力学性能见表 3。

表 2 钢材的力学性能
Tab. 2 Mechanical properties of Steel

钢材类型	钢材标号	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率%	弹性模量/GPa
钢管	Φ219×2(2.07)	560	896	20	206
	Φ219×4(3.97)	290	463	27	204
钢筋	HPB300	338	517	28	212
	HRB400	468	611	24	202

注: 括号内为钢管实际厚度/mm.

表 3 混凝土的力学性能
Tab. 3 Mechanical properties of concrete

28 d $f_{cu,k}$ /MPa	试验时 $f_{cu,k}$ /MPa	弹性模量/MPa	配合比水泥 : 沙子 : 石子 : 水
30	32.8	2.41×10^4	380 : 771 : 1 124 : 165

1.2 试验装置和量测方案

加载装置如图 2 所示, 试验加载过程为一次性压溃加载, 在弹性阶段每级荷载为极限荷载的 1/10, 钢管达到屈服荷载后, 每级荷载约为极限荷载的 1/15, 每级荷载加载持荷时间约为 2 min, 直至最终试件破坏. 考虑到加载时应满足不同试件不同偏心率的要求, 加工了 50 mm 厚的钢板作为加载板, 并在上面按预定的偏心距剔槽。



图 2 加载装置
Fig. 2 Test device

试验前在每个试件不同位置的钢管表面(顶部、中部和底部), 沿圆周方向每隔 90°粘贴纵向、环向应变片, 以考察加载过程中钢管表面应变状况. 在试件端板角部布置 1 个 YHD 位移计以测量试件在受力过程中的轴向变形, 在各试件中部布

置 1 个 YHD 位移计以测量其侧向挠度. 应变片和位移计布置见图 3.

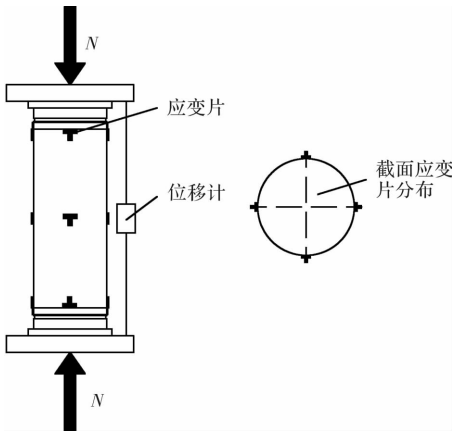


图 3 应变片和位移计布置图
Fig. 3 Strain gauges and displacement gauge layout

2 试验结果分析

2.1 破坏形态及其分析

各试件的破坏形态见表 4 和图 4、图 5、图 6, 偏心受压柱端部破坏详图, 如图 7 所示。

对各试件的破坏形态进行总结可知, 钢管约束钢筋混凝土试件的径厚比越大, 加载偏心率越大, 钢管切缝处和中部的撕裂程度越严重, 切缝下侧混凝土的局部压溃也更为严重, 反之径厚比越小, 加载偏心率越小, 钢管对核心混凝土的约束作用越充分, 钢管在不同截面处出现不同程度的凸曲。

相比较而言, 大长细比的试件的混凝土均无明显破坏现象, 破坏也主要发生在切缝处, 而长

细比越大钢管越容易发生鼓曲现象但不易被撕裂。对于无偏心率和长细比小的试件切缝处会被压的更加紧密,钢管在中部沿着斜向或纵向被撕裂,混凝土发生剪切破坏。

2.2 荷载-挠度曲线分析

本文分析了部分有代表性试件的荷载-挠度曲线,如图 8 所示,曲线中包含了钢管屈服点和极限荷载点。图 8(a)表示长细比相同,径厚比相同时,偏心率对试件荷载-挠度曲线的影响规律,由图可知,随着偏心率的增大,试件承载力降低。对于短柱试件,随着偏心率的增大,刚度降低,钢管容易被撕裂,导致极限荷载显著降低。中长柱偏压试件较之于轴压试件,极限承载力降低了 40%,CTRC-4-50-24 试件和 CTRC-4-25-24 试件极限荷载基本没有变化,是因为两个试件的最终的破坏均集中在切缝处,且钢管均出现水平环向鼓曲带。

图 8(b)表示长细比相同,偏心率相同时,径

厚比对试件荷载-挠度曲线的影响规律,由图可知,当加载偏心率、试件长细比相同时,钢管径厚比的变化对试件极限承载力影响较小,但对延性的影响较大。在到达极限荷载以后,径厚比为 55 的试件的荷载-挠度曲线更为平缓,延性较好。

图 8(c)表示径厚比相同,偏心率相同时,长细比对试件荷载-挠度曲线的影响规律,由图可知当加载偏心率、钢管径厚比相同时,随着试件长细比的增大,试件的极限承载力降低。以 CTRC-2-25-12 试件和 CTRC-2-25-24 试件为例,相较于 CTRC-2-25-12 试件,CTRC-2-25-24 试件的承载力降低了 40%,但达到极限荷载后的挠度增加。这一现象主要与试件最终破坏形态相关联,试件 CTRC-2-25-12 达到极限荷载后,受压侧切缝处钢管被撕裂,混凝土压溃,荷载急剧下降,而试件 CTRC-2-25-24 切缝处钢管未撕裂,仅在试件不同位置处有几道环向鼓曲带,承载力下降缓慢,表现出较好的延性。

表 4 各试件破坏形态

Tab. 4 Failure modes for all specimens

受压状态	试件		破坏形态
	长细比	试件编号	
轴心受压	12	CTRC-2-0-12	试件中部钢管外凸或纵向被撕裂,剖开钢管后可以发现,核心混凝土都出现明显的斜向剪切破坏面,斜裂缝处的混凝土均被压碎,纵向钢筋屈服,如图 4 所示。
		CTRC-4-0-12	
	24	CTRC-2-0-24	试件出现较明显的纵向弯曲,钢管表面没有鼓曲现象,如图 6 所示。
		CTRC-4-0-24	
偏心受压	12	CTRC-2-25-12	试件切缝处受拉侧混凝土被拉裂,随着荷载的增加,裂缝不断加宽,并扩展至受压侧。最后受压侧切缝闭合,切缝下方环向条带断裂,钢管被撕裂,剖开钢管后发现,该处混凝土已被压碎,如图 5 所示。
		CTRC-2-50-12	
		CTRC-4-25-12	受拉侧切缝加宽,混凝土被拉裂,裂缝向受压侧延伸;受压侧切缝完全闭合,环向条带下侧钢管鼓曲。其中 CTRC-4-25-12 试件中部受压侧出现两道环向鼓曲带,如图 5 所示。
		CTRC-4-50-12	
	24	CTRC-2-25-24	钢管受拉侧切缝开口增大,该侧混凝土被拉裂,裂缝延伸至受压侧;受压侧切缝完全闭合,沿试件高度方向在 1/3、1/2 截面处受压侧均出现水平环向鼓曲带。CTRC-2-50-24 试件中部受拉侧约 1/2 圆周的钢管被撕裂,如图 6 所示。
		CTRC-2-50-24	
		CTRC-4-25-24	试件受拉侧切缝开口增大,混凝土被拉裂,裂缝贯穿全截面;受压侧切缝几乎闭合。在 CTRC-4-25-24 试件的 1/3 处出现两道环向鼓曲,而在 CTRC-4-50-24 试件的受压侧环向条带下钢管鼓曲,鼓曲带占全截面的 1/3,如图 6 所示。
		CTRC-4-50-24	



图 4 轴心受压短柱破坏形态

Fig. 4 Failure mode for axial compression short column

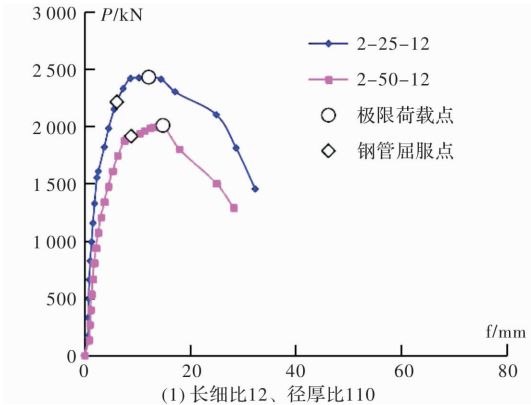


图 5 偏心受压短柱破坏模式

Fig. 5 Failure mode for short column

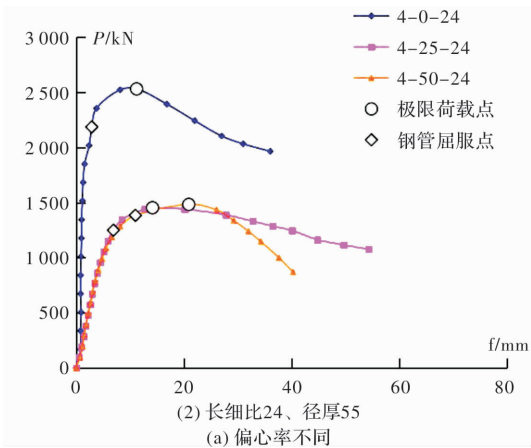


图 6 中长柱破坏模式

Fig. 6 Failure mode for middle long column
eccentrically loaded

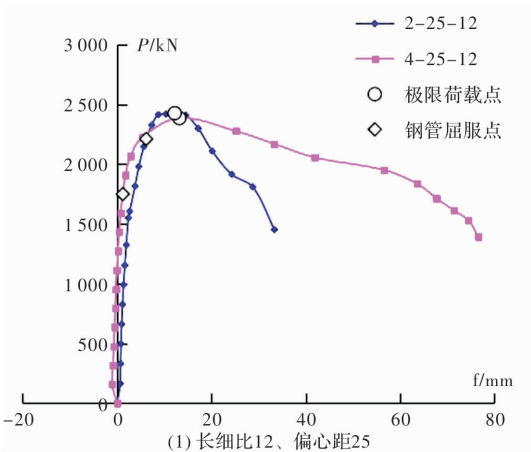
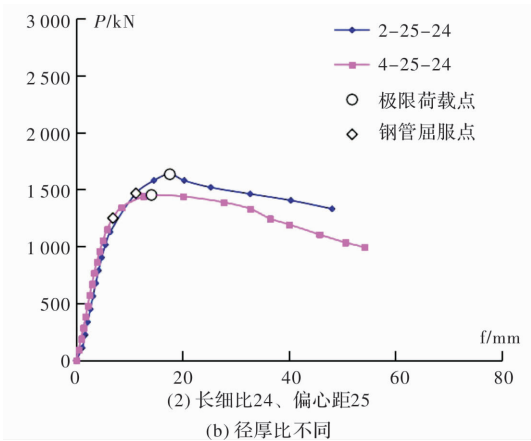


图 7 偏心受压柱端部破坏

Fig. 7 Failure details for specimen



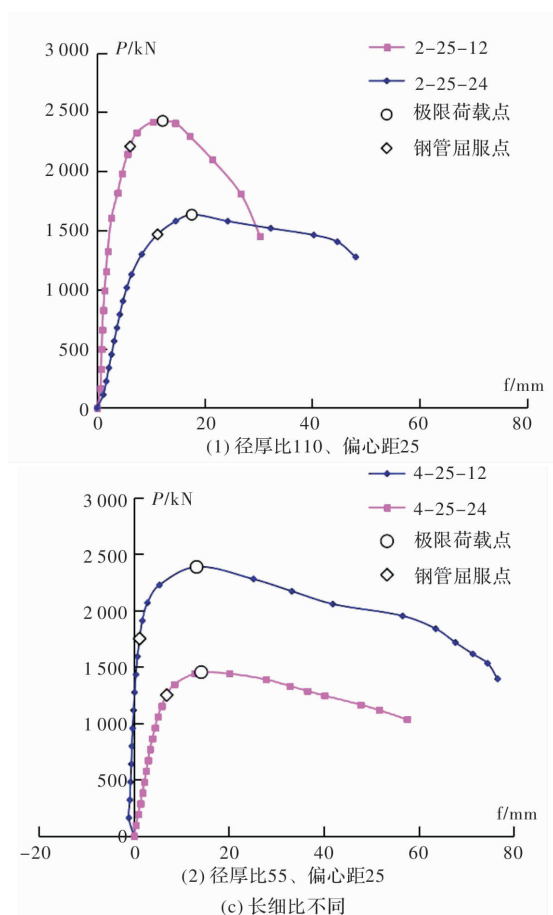


图8 荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load deflection curves

3 结论

本文进行了12个圆钢管约束钢筋混凝土受压构件的试验研究,得出以下结论:

(1) 圆钢管约束钢筋混凝土轴心受压短柱的破坏形态为剪切破坏,试件中部核心混凝土出现明显的斜向剪切破坏面,轴心受压长柱没有出现明显的破坏现象。

(2) 圆钢管约束钢筋混凝土偏心受压短柱切缝下侧混凝土被局部压溃,部分试件切缝下侧钢管被撕裂;而偏心受压长柱切缝处的破坏较轻微,其破坏位置主要集中在中部截面。

(3) 钢管径厚比对该类试件破坏形态和承载力的影响不大,对其延性的影响较大;试件长细比和加载偏心率对破坏形态和承载力影响显著。

(4) 根据本文试验结果,钢管约束钢筋混凝土组合结构适宜用于轴心受压短柱试件,可以更好的发挥钢管对混凝土的约束作用。

参考文献 References

[1] GARDNER N J, JACOBSON E R. Structural behavior of concrete filled steel tubes[J]. Journal of America

Concrete Institute, 1967, 64-38:404-413.

[2] PRIONH G L, BOEHMNE J. Beam column behavior of steel tubes filled with high-strength concrete[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 21(1): 207-218.

[3] MEI H, KIIIOUSIS P D, EHSANI M R, et al. Confinement effects on high-strength concrete [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(4):548-553.

[4] JASIM Ali Abdullah, ZHANG Xi, et al. Behavior and design method of square-tubed reinforced concrete short columns under axial compression[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 17(2):269-277.

[5] WANG Xuanding, LIU Jiepeng, ZHOU Xuhong. Behaviour and design method of short square tube-steel-reinforced-concrete columns under eccentric loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 116: 193-203.

[6] LIU Jiepeng, ZHOU Xuhong. Behavior and strength of tubed RC stub columns under axial compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009(66):28-36.

[7] 张小冬, 刘界鹏. 大连中国石油大厦结构方案优化设计[J]. 建筑结构学报, 2009(S1):27-33.

ZHANG Xiaodong, LIU Jiepeng. Optimum design on dalin China petrol tower [J]. Journal of Building Structures, 2009(S1):27-33.

[8] 尧国皇, 韩林海. 钢管约束混凝土压弯构件滞回性能的实验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004(6): 89-96.

YAO Guohuang, HAN Linhai. Cyclic behavior of steel tube confined concrete beam-columns[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004(6):89-96.

[9] 王玉银. 圆钢管高强混凝土轴压短柱基本性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003.

WANG Yuyin. Axial behavior of circular high strength concrete steel tube stub columns [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003.

[10] 张素梅, 刘界鹏. 圆钢管约束高强混凝土轴压短柱的试验研究与承载力分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3):24-31.

ZHANG Sumei, LIU Jiepeng. Axial compression test and analysis of circular tube confined HSC stub columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3):24-31.

[11] 王宇航, 刘界鹏, 周绪红, 等. 偏压荷载下钢管混凝土柱的抗扭性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(7):50-61.

WANG Yuhang, LIU Jiepeng, ZHOU Xuhong. Experimental study on behavior of concrete filled steel tube columns under torsion and eccentric compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(7): 50-61.