

文章编号:1673-2049(2009)02-0021-05

内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土长柱轴压性能试验

李帽昌, 罗江龙, 聂尧, 任秋实

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:为了研究内置碳纤维复合材料(CFRP)圆管的方钢管高强混凝土长柱的力学性能,对4根内置CFRP圆管的方钢管高强混凝土柱和4根方钢管高强混凝土柱进行了承载力对比试验研究,绘制了荷载-变形曲线,并对内置CFRP圆管的方钢管高强混凝土轴压长柱的力学性能进行了全过程分析。结果表明:在含钢率相同的条件下,随着长宽比的增大,相同CFRP层数的方钢管高强混凝土柱承载力有所降低;随着CFRP层数的增加,在长宽比相同的情况下,方钢管高强混凝土柱承载力有显著提高;对核心混凝土的约束效应增加,延缓了构件的屈服时间;CFRP层数对试件的承载力影响更为显著。

关键词:内置 CFRP 圆管; 方钢管高强混凝土; CFRP 层数; 含钢率; 长宽比; 承载力

中图分类号:TU392.3 文献标志码:A

Experiment on Performance of High-strength Concrete-filled Square Steel Tube Long Columns with Inner CFRP Circular Tube Under Axial Compression

LI Guo-chang, LUO Jiang-long, NIE Yao, REN Qiu-shi

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: In order to study the performance of columns of high-strength concrete-filled square steel tubes with inner carbon fiber reinforced polymer (CFRP) circular tube, the contrast tests of bearing capacities of 4 columns of high-strength concrete-filled square steel tubes with inner CFRP circular tube, and 4 columns of high-strength concrete-filled square steel tubes were made. Curves on the relationship of stress-strain were drawn. The whole process analysis on the performance of columns of high-strength concrete-filled square steel tubes was carried out. The results show that under the same steel ratio, the bearing capacity of high-strength concrete-filled square steel tube column with the same number of CFRP layers decreases when slenderness ratio increases. Under the same slenderness ratio, with increase of the number of CFRP layers, the bearing capacity of high-strength concrete-filled square steel tube column is obviously improved, the confining effect on the core concrete is better and the yield time of structural member is prolonged.

Key words: inner CFRP circular tube; high-strength concrete-filled square steel tube; number of CFRP layer; steel ratio; slenderness ratio; bearing capacity

0 引言

近年来,随着钢管混凝土结构设计理论的不断成熟,其在实际工程中的应用越来越广泛^[1-5]。方钢管混凝土结构具有节点构造简单、稳定性能好等优点,将其与高强混凝土相结合,能够减小构件的截面尺寸、节约水泥,经济效益显著^[6-7]。但是方钢管对高强混凝土的约束较圆钢管的约束差,管壁易产生局部屈曲^[8]。因此笔者提出了内置碳纤维复合材料(CFRP)圆管的方钢管高强混凝土新型组合结构,将CFRP圆管内置其中,可以利用CFRP材料轻质高强的特点有效地约束核心混凝土,并利用混凝土变形对管壁的压力提高组合构件的承载能力^[9-12]。另外,内置CFRP圆管的方钢管高强混凝土构件,可以解决大型钢管混凝土结构必须采用厚壁钢管或高强钢管的问题,降低耗钢量或减少高强钢的消耗,减轻构件自重,具有广阔的应用前景。

1 试验概况

1.1 设计参数与材料性能

本次试验共计8个试件,由于主要目的是研究长宽比对极限承载力的影响,故以内置CFRP圆管的方钢管高强混凝土柱的长宽比L/B作为变化的主要设计参数,其中,L、B分别为试件的长度和方钢管边长。试件参数见表1。

表1 试件主要参数

Tab. 1 Main Parameters of Specimens

试件编号	L/mm	B/mm	$L \cdot B^{-1}$	t/mm	α	δ_{cfrp}/mm	N_u/kN
0-1	2 600	200	13	5	0.108	0.000	3 750
0-2	2 800	200	14	5	0.108	0.000	3 700
0-3	3 000	200	15	5	0.108	0.000	3 550
0-4	3 200	200	16	5	0.108	0.000	3 300
2-1	2 600	200	13	5	0.108	0.334	3 986
2-2	2 800	200	14	5	0.108	0.334	3 910
2-3	3 000	200	15	5	0.108	0.334	3 760
2-4	3 200	200	16	5	0.108	0.334	3 490

注:试件编号中“-”前数字为CFRP层数;t为钢管壁厚度; δ_{cfrp} 为CFRP的厚度; α 为含钢率; N_u 为钢管混凝土试件轴心受压时的极限承载力。

钢材材料性质通过标准拉伸试验测得,先将钢板做成3个标准试件,再在万能机上进行拉伸试验。利用U-CAM-70A静态数据自动采集系统采集数据,测得钢板的平均屈服强度 f_y 、极限强度 f_u 、弹性模量 E_s 、泊松比 μ_s 等指标,测试结果见表2。

表2 钢材性能

Tab. 2 Property of Steel

f_y/MPa	f_u/MPa	μ_s	$E_s/10^2 \text{ GPa}$
320	423	0.272	2.16

由CFRP拉伸试验测得CFRP单张极限强度为1 988 MPa,实测弹性模量为145 GPa。CFRP圆管1层厚度为 $t_{cf}=0.167 \text{ mm}$ 。

所用混凝土为商用混凝土,在浇注的同时制作尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的立方体试块,在标准条件下养护,龄期为28 d,试块强度为92 MPa,混凝土的抗压标准强度 $f_{ck}=65 \text{ MPa}$ 。

1.2 试件的制作

试验采用Q235直焊缝钢管。在制作试件时,按照要求的尺寸加工空钢管,保证端面与轴线垂直。对应每个试件加工2块尺寸为250 mm×250 mm×20 mm的端板,然后先将空钢管的一端与端板焊接,并保证焊缝的质量。

本试验在加载过程中,为防止发生局部屈曲而影响轴压长柱的整体失稳,相应地在试件顶端和下端分别制作2块尺寸为250 mm×250 mm×50 mm的Cr12特种钢盖板。

在浇注钢管内的混凝土时,将内置CFRP圆管的方钢管竖直放置,使未焊接端板的一端向上,从顶部灌入混凝土。采用分层灌入法,每灌入1层,即在振捣台上用Φ50插入式振捣棒振捣直至密实。

1.3 试验方法

试验在沈阳建筑大学建筑工程实验室的5 000 kN长柱试验机上完成,试件采用上端刀铰、下端球铰加载。试验加载装置如图1所示。在试件的纵向和水平方向设置位移计,测定纵向应变和侧向挠度。采用分级加载,在弹性范围内每级荷载为预计极限荷载的1/10;当荷载达到0.6倍极限荷载后,每级荷载为预计极限荷载的1/20~1/15;最后连续加载直到破坏。试验采用U-CAM-70A静态数据采集系统采集数据,同时绘

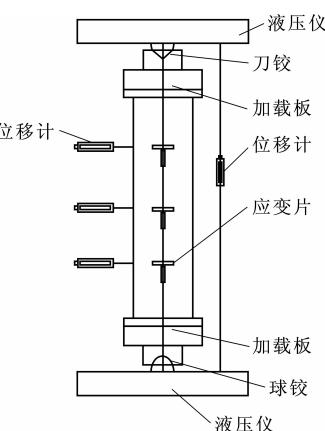


图1 试验加载装置
Fig. 1 Loading Device in Experiment

制荷载 挠度曲线。

2 试验结果及分析

试件荷载 P 与长宽比 L/B 以及柱中挠度 δ 的关系曲线分别如图 2、3 所示。

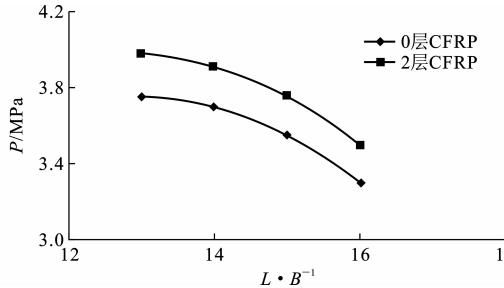


图 2 P 与 L/B 的关系

Fig. 2 Relations of P and L/B

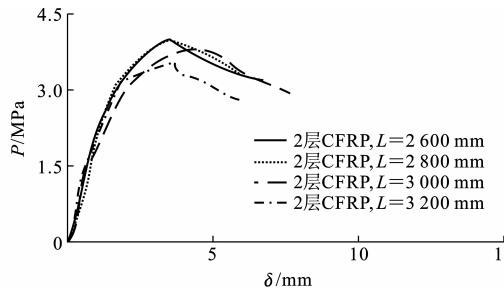


图 3 不同长宽比、相同 CFRP 配置率的 P - δ 曲线

Fig. 3 Relations of P and δ with Different Slenderness Ratios and Same CFRP Ratio

由图 2 可以看出: 在其他参数相同的情况下, 随着 CFRP 层数的增加, 试件的极限承载力明显增大; 而随着长宽比的增大, 试件的极限承载力呈逐渐下降趋势。结果表明, 在长宽比较大情况下, 内置 CFRP 圆管仍对方钢管混凝土试件的极限承载力有一定影响。在相同长宽比的 2 组试件中, 其试件的极限承载力的差值呈线性关系。

由图 3 可以看出: P - δ 曲线都具有上升段和下降段及相应的峰值荷载点。在加载初始阶段, 挠度较小, 曲线近似线性变化, 属于弹性阶段; 之后, 挠度增长加快, 试件进入弹塑性阶段。随着长宽比的不断增加, 试件在进入塑性阶段前达到临界力, 发生失稳破坏; 在试件达到极限荷载后, 侧向变形急剧增加, 荷载开始下降, 曲线均出现下降段。通过对试验曲线的分析得出: 在含钢率相同的条件下, 随着长宽比的增大, 相同 CFRP 层数的方钢管高强混凝土柱的承载力有所降低。

由图 4 可以看出: 在试件加载初期, 每组 2 个试件的跨中挠度在弹性阶段随着荷载的变化呈线性关

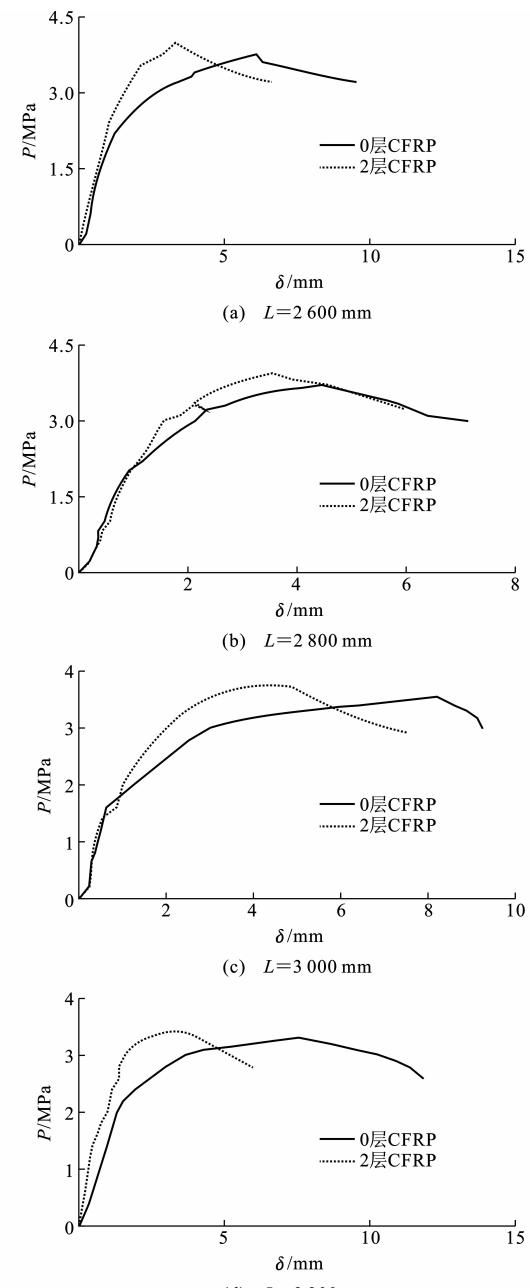


图 4 相同长宽比、不同 CFRP 配置率的 P - δ 曲线

Fig. 4 Relations of P and δ with Same Slenderness Ratio and Different CFRP Ratios

系; 但是当达到弹塑性阶段时, 含有内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土长柱试件的跨中挠度增加的小, 极限承载力不断增加。这说明内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土长柱试件的稳定承载能力较好, 且试件的抗变形能力较好。随着 CFRP 层数的增加, 在长宽比相同的情况下, 方钢管高强混凝土柱的极限承载力有显著提高, 其提高比例在 5%~10% 之间, 对核心混凝土约束效应的增加, 延缓了试件的屈服时间, 通过对承载力的提高比例进行分析

可知,CFRP 层数的增加对方钢管高强混凝土柱的承载力影响更为显著。

由图 5 可以看出:从开始加载直至 CFRP 圆管断裂,试件逐渐达到极限承载力,钢管与 CFRP 圆管的应变基本一致,这充分说明了 CFRP 圆管、钢管以及高强混凝土能够协同工作,并且从开始加载直至 CFRP 圆管断裂,试件的纵向应变 ϵ 随着长宽比的增大而增大;从 CFRP 圆管断裂直至下降,下降段趋于平缓,说明 CFRP 圆管对核心高强混凝土约束效应比较明显,增强了试件的延性和整体性;同时随着长宽比的增大,试件的极限承载力呈逐渐下降趋势。

3 受力全过程分析

为了便于分析内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土轴压长柱的工作机理,本文中笔者选取了图 5(d)进行荷载-应变全过程的分析,其试件的荷载-纵向应变曲线如图 6 所示。

由图 6 可以看出,内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土轴压长柱的受力全过程分为 3 个阶段:

(1) 弹性阶段(*oa* 段)。CFRP 圆管核心混凝土、CFRP 圆管、CFRP 圆管与钢管之间混凝土和钢管共同工作,内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土轴压长柱在初始荷载阶段,CFRP 圆管核心混凝土和 CFRP 圆管与钢管之间混凝土泊松比小于 CFRP 圆管和钢管的泊松比,因此混凝土与 CFRP 圆管和钢管之间不会发生挤压,不存在相互作用力。

(2) 弹塑性阶段(*ab* 段)。随着纵向应变的增加,混凝土内部发生微裂并不断发展,CFRP 圆管核心混凝土的侧向膨胀超过 CFRP 圆管的侧向膨胀,CFRP 圆管对核心混凝土的约束增加。如前所述,CFRP 圆管处于环拉应力状态,混凝土处于三向受压状态。

(3) 下降阶段(*bc* 段)。CFRP 圆管退出工作。此阶段,CFRP 圆管的环拉应力继续增大,直至达到 CFRP 圆管的极限承载力,此时 CFRP 圆管发生脆性破坏,并伴随着一声脆响;继而,CFRP 圆管退出工作,混凝土的紧箍作用减小,由 CFRP 圆管承担的环向应力传递到钢管以及 CFRP 圆管与钢管之间混凝土上,只有钢管约束 CFRP 圆管核心混凝土和 CFRP 圆管与钢管之间的混凝土,钢管与其内部混凝土之间产生了内力重分布。此时,试件的工作机理与普通钢管混凝土相同。

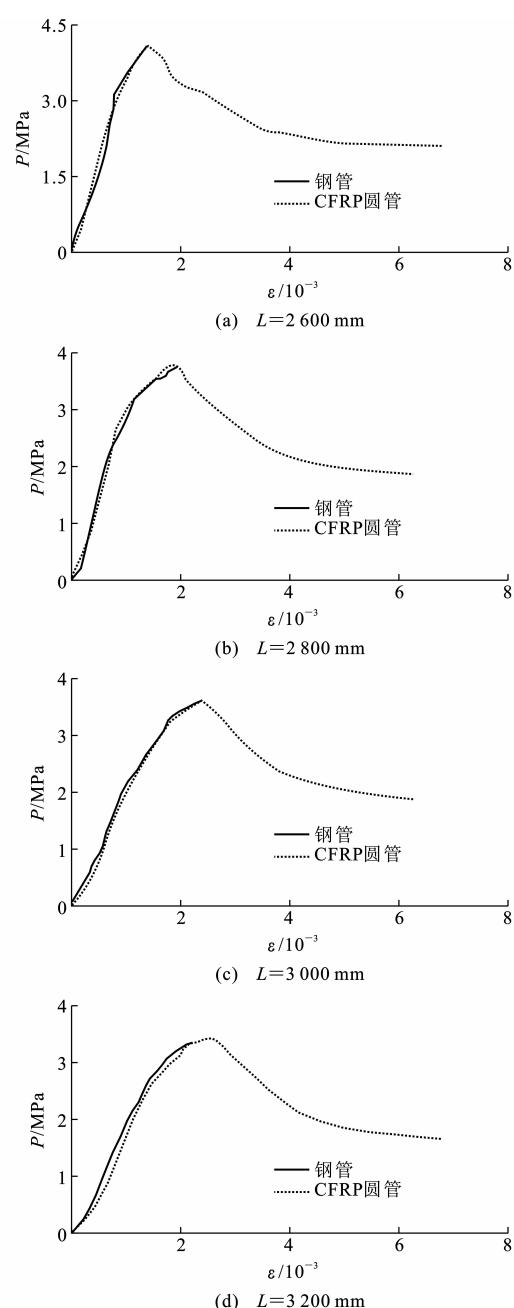


图 5 4 种长宽比的 P - ϵ 曲线

Fig. 5 Relations of P and ϵ with Four Different Slenderness Ratios

4 结语

(1) 长宽比对内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土轴压长柱的极限承载力影响显著,在其他条件相同的情况下,随着长宽比的增大,试件的极限承载力降低。

(2) 内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土轴压长柱的极限承载力均高于相同长宽比下普通方钢管高强混凝土轴压长柱,且随着 CFRP 圆管层数的增

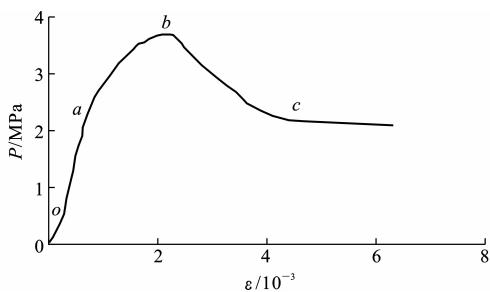


图 6 荷载-纵向应变曲线

Fig. 6 Relation of Load and Longitudinal Strain

加,试件极限承载力提高的比例增大,说明碳纤维加强核心混凝土的约束对试件承载力的提高起着重要的作用。

(3)由荷载-纵向应变曲线可以看出:试件从开始加载到达到极限承载力,钢管与 CFRP 圆管的应变基本一致,这充分说明了 CFRP 圆管、钢管以及高强混凝土能够协同工作;而荷载-纵向应变曲线下降段平缓,说明 CFRP 对核心高强混凝土的约束明显,增强了试件的延性和整体性。

参考文献:

References:

- [1] SHANMUGAM N E, LAKSHMI B. State of the Art Report on Steel-concrete Composite Columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57 (10): 1041-1080.
- [2] SCHNEIDER S P. Axially Loaded Concrete-filled Steel Tubes [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(10): 1125-1138.
- [3] 钟善桐.钢管混凝土统一理论——研究与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2006.
ZHONG Shan-tong. Concrete-filled Steel Tube United Theory — Research and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [4] 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.
HAN Lin-hai, YANG You-fu. Modern Concrete-filled Steel Tube Structure Technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [5] 韩林海.钢管混凝土结构——理论与实践 [M]. 2 版. 北京:科学出版社,2007.
HAN Lin-hai. Concrete-filled Steel Tubular Structures—Theory and Practice [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [6] 李惠.高强混凝土及其组合结构 [M]. 北京:科学出版社,2004.
LI Hui. High-strength Concrete and Its Composite Structure [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [7] TENG J G, HUANG Y L, LAM L, et al. Theoretical Model for Fiber-reinforced Polymer-confined Concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11 (2): 201-210.
- [8] 陶忠,于清.新型组合结构柱——试验、理论与方法 [M]. 北京:科学出版社,2006.
TAO Zhong, YU Qing. New Composite Structure Column—Test, Theory and Method [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [9] 李帽昌,麻丽,杨景利,等.内置 CFRP 圆管的方钢管高强混凝土轴压短柱承载力计算初探 [J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2008,24(1):62-66.
LI Guo-chang, MA Li, YANG Jing-li, et al. Bearing Capacity of Short Columns of High-strength Concrete Filled Square Steel Tubular with Inner CFRP Circular Tubular Under Axially Compressive Load [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2008, 24(1): 62-66.
- [10] 张淑云,白国良,高志刚.高层组合框架-混凝土筒体混合结构静力数值分析 [J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(1): 36-40.
ZHANG Shu-yun, BAI Guo-liang, GAO Zhi-gang. Static Characteristics of Core-RC and Composite Frame Hybrid Structure in High-rise Buildings [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(1): 36-40.
- [11] 张淑云,白国良,李红星,等.钢筋混凝土框架异型节点抗剪承载力研究 [J]. 西安科技大学学报, 2006, 26 (2): 170-174.
ZHANG Shu-yun, BAI Guo-liang, LI Hong-xing, et al. Anti-shear Capacity of Abnormal Joints of RC Frame [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2006, 26(2): 170-174.
- [12] 周天华,郭彦利,卢林枫,等.方钢管混凝土柱-钢梁节点的非线性有限元分析 [J]. 西安科技大学学报, 2005, 25(3): 283-287.
ZHOU Tian-hua, GUO Yan-li, LU Lin-feng, et al. Nonlinear FEM Analysis of Bearing Capacity Behavior of Concrete-filled Square Tubular Column and Steel Beam Joints [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25(3): 283-287.