

文章编号:1671-6833(2014)04-0001-04

轴向循环荷载下 FRP-混凝土-钢管组合方柱性能研究

王代^{1,2}, 高丹盈¹, 王勇智²

(1. 郑州大学 新型建材与结构研究中心, 河南 郑州 450002; 2. 中州大学 工程技术学院, 河南 郑州 450044)

摘要: 通过 8 根方柱的循环轴压试验, 重点研究了加载方式、钢管空心率、径厚比对 FRP-混凝土-钢管组合方柱轴压性能的影响。结果表明, 加载方式对组合方柱的峰值荷载及轴向应力-应变曲线外包络线影响不显著, 循环荷载下柱试件与相应单调轴压下试件的极限状态类似。相较空心率, 内钢管径厚比对组合方柱在轴向循环荷载下的峰值荷载有显著影响。

关键词: FRP; 循环荷载; 轴压试验; 组合柱; 方形截面

中图分类号: TU398.9 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.04.001

0 引言

由于纤维增强聚合物(Fiber Reinforced Polymer, FRP)材料具有较高的强重比及较好的耐腐蚀性等优良性能, 近年来被日益广泛地应用于已有结构的外包加固或新建土木工程结构中。常用的 FRP 材料有玻璃纤维增强聚合物(Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP)、碳纤维增强聚合物(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)、芳纶纤维增强聚合物(Aramid Fiber Reinforced Polymer, AFRP)等。新型 FRP-混凝土-钢管组合柱分别由内层钢管、外层 FRP 管和二者之间填充的混凝土三部分组成。圆形截面 FRP-混凝土-钢双壁管柱在轴压、偏压荷载及弯曲荷载下的性能已进行了较多研究^[1-10], 由于内外管的约束, 核心混凝土的强度和延性均得到较大提高。一些应力-应变设计模型被提出, 进一步证实 FRP-混凝土-钢管组合柱在不同荷载条件下所具有的优良性能。随着目前建筑向空间的迅猛发展, 该组合柱有着广阔的应用前景, 尤其是强震区高层建筑。

方形截面柱因其可靠的梁柱连接方式及易于装修等优点, 目前与圆形柱有着同样广泛的应用。但是, 已有研究仅限于单调轴压荷载下的 FRP-混凝土-钢管组合方柱, 作为一个尤其适合应用于抗震区的结构形式, 其在循环荷载下的性能研究显得更为重要。文献[2, 8]分别进行了该组合

圆柱在轴向压力和循环水平力联合作用下的性能研究, 文献[10]研究了组合圆柱在轴向循环荷载下的性能, 但关于 FRP-混凝土-钢管组合方柱在循环轴压荷载下的研究少有报道。笔者进行了 FRP-混凝土-钢管组合方柱在循环轴压荷载下的试验研究, 包括 3 组组合方柱试件, 重点研究加载方案、内钢管空心率(钢管外直径 d 与混凝土外边长 b 之比)、径厚比(钢管外直径 d 与钢管厚度 t 之比)对组合柱轴压性能的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计及材料性能

按内钢管规格不同, 制作了 3 个系列共 8 个试件。试件高度 500 mm, 试件混凝土外边长 150 mm, 倒角半径 20 mm, 如图 1 所示。试件具体参数详见表 1。

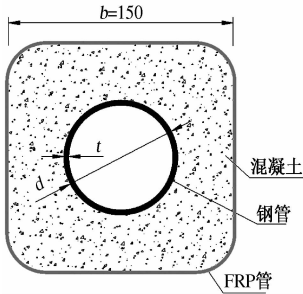


图 1 组合方柱横截面示意图

Fig. 1 Transverse section of composite square columns

收稿日期:2014-03-26; 修订日期:2014-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50579068); 郑州市科技攻关资助项目(112PPTGY251-6)。

作者简介:王代(1979-), 女, 河南扶沟人, 中州大学讲师, 博士研究生, 主要从事纤维复合材料及结构性能研究, E-mail:987453942@qq.com.

试件外 FRP 管由湿粘法成型,通过在已硬化的混凝土外表面缠绕 2 层 CFRP + 2 层 GFRP 布而成,FRP 提供环向约束. 试件两端通过多缠绕 3 层宽 30 mm CFRP 布进行增强,防止端部发生局

部破坏. FRP 布材性试验结果见表 2. 混凝土立方体抗压强度为 50.8 MPa, 轴心抗压强度为 39 MPa.

表 1 试件设计参数及主要试验结果
Tab. 1 Details of specimen and key test results

试件编号	钢管规格/mm	空心率	径厚比	加载方案	峰值荷载/kN	破坏方式
XSC1-1	108×4	0.72	27	单调轴压	1 267.3	中上部
XSC1-3				加压、卸压(循环 3 次)	1 306.6	
XSC2-1	76×4	0.51	19	单调轴压	1 463.3	
XSC2-3				加压、卸压(循环 3 次)	1 429.4	从上端部破坏,柱加载后期倾斜严重,下端加强区拉断
XSC3-1a	108×6	0.72	18	单调轴压	1 100.0	
XSC3-1b	108×6	0.72	18	单调轴压	1458.9	中上部
XSC3-3				加压、卸压(循环 3 次)	1 464.3	
XSC3-5				加压、卸压(循环 5 次)	1 433.8	

表 2 FRP 布拉伸试验结果
Tab. 2 FRP tension test results

FRP 类型	名义厚度/mm	E_{frp} /GPa	f_{frp} /MPa
CFRP	0.17	240	3 434
GFRP	0.17	160	2 650

注: E_{frp} 为 FRP 布的弹性模量, f_{frp} 为 FRP 布的抗拉强度.

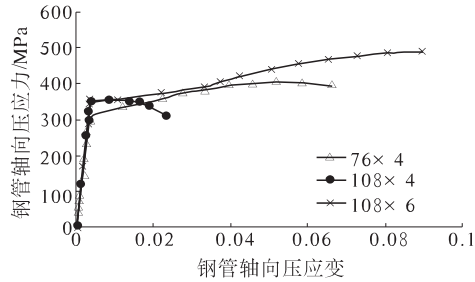


图 2 钢管轴向应力 - 应变关系曲线
Fig. 2 Axial stress-strain curves of steel tubes

根据 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》,进行了钢材拉伸试验,结果如表 3 所示. 另外,分别进行 3 种规格空钢管轴压试验,试验时采用力控方式加载,加载速率在钢管屈服前为 1 kN/s,在钢管屈服后为 0.5 kN/s,得出钢管的应力 - 应变关系曲线如图 2 所示.

表 3 钢材拉伸试验结果
Tab. 3 Steel tension test results

钢管规格/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ GPa
76×4	331.8	465.5	190.1
108×4	346.9	495.3	202.6
108×6	351.2	498.1	206.3

1.2 量测及数据采集

在钢管中高度截面相对两侧,分别粘贴两个轴向应变片和两个环向应变片,用于测量钢管的应变;通过安装在试件中高度为 270 mm 范围内相对两侧两个位移计,量测组合柱轴向变形. 在柱中高度截面 FRP 布上,搭接区外沿纤维方向均匀粘贴 4 个应变片,用于测量柱的环向应变.

本试验的加载设备为上海某公司生产的 YA-3000 电液式压力试验机. 试验时先进行预加载,预加荷载值为试件极限荷载的 10%. 正式加载采用力控、分级加载的加载制度,每级加载值为试件极限荷载的 10%,每级荷载稳载 2 min,当荷载到达极限荷载的 90% 后,采用连续缓慢加载,直至试验结束. 所有试验结果,包括荷载、应变和位移均通过 IMP 数据采集系统同步记录.

1.3 加载方案

加载方案均采用完全卸载/再加载的方式,即卸载至荷载为零时(为了保证试验机的稳定工作,试验中只卸载至荷载为 20 kN 处),再加载至同一循环的卸载位移值处. 预设的卸载位移值根据相应 FRP - 混凝土 - 钢管组合柱的单调轴压试验结果确定,以保证第 1 次卸载开始时混凝土的应变位于 0.001 ~ 0.003 5 之间,其他 4 次卸载值确定便于研究约束混凝土在不同程度塑性变形情况下的卸载/加载响应.

2 试验结果与分析

如试验前预计,所有试件均以柱中高度一定

范围 FRP 布被拉断(裂)而破坏,如图 3 所示. 所有 FRP-混凝土-钢管组合柱试件轴向应力-应变曲线如图 4 所示,其中轴向应变由柱两侧两个位移计的读数经计算得到.



图 3 试验后的试件 XSC1-3
Fig.3 Specimen XSC1-3 after test

图 4 表明,与单调轴压性能相类似^[11],FRP-混凝土-钢管组合方柱在循环轴压荷载下仍具有良好的延性.且循环轴压荷载下试件应力-应变曲线的外包络线与相应单调荷载下柱的应力-应变曲线相吻合,说明加载/再卸载对组合方柱的包络线没有影响.试件 XSC3-5 外包络线与单调

试件 XSC3-1b 差别稍明显,一是因为试件 XSC3-5 成型时,FRP 与混凝土外表面局部存在脱空区,造成 FRP 没有完全发挥约束作用;二可能与卸载点的设置有关.由图 4 还可以看出,循环加载历史对累计塑性变形的影响,即循环次数越多,塑性变形值越大.

2.1 峰值荷载

表 1 及试验结果表明,轴压循环荷载下柱试件的极限状态与单调荷载下试件的极限状态几乎相同.峰值荷载较接近,相差最大仅为 3.1%,说明循环荷载的加载方式对 FRP-混凝土-钢管组合方柱的峰值荷载影响不显著.表 1 中试件 XSC3-1a 峰值荷载明显比相同试件 XSC3-1b 小,由于试件成型时有缺陷,内钢管有轻微倾斜,从而导致柱高度方向混凝土厚度不均匀.另外,轴向加载、卸载对组合柱轴向应力-应变关系影响较小,仅应变有所增大.表 1 中第二组和第三组试件空心率不同,径厚比较接近,但两组试件峰值荷载接近,平均值相差 0.4%,说明空心率对轴向循环荷载下组合柱峰值荷载影响不大.第一组、第三组试件空心率相同,径厚比相差较大,两组试件峰值荷载相差较大,说明钢管径厚比对组合柱峰值荷载影响较大.

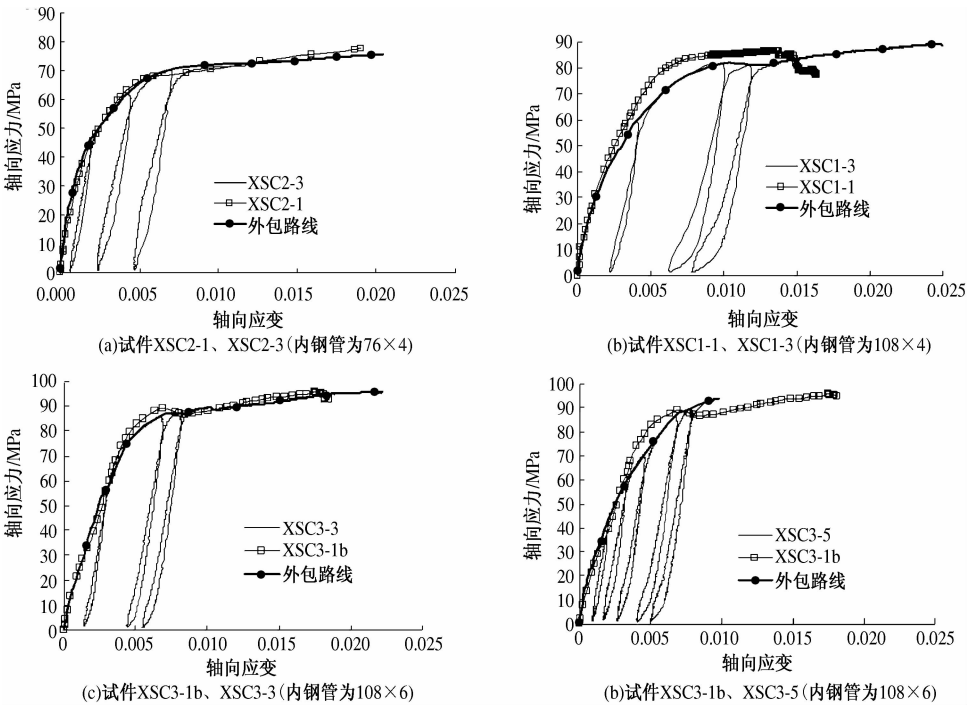


图 4 组合柱轴向应力-轴向应变曲线
Fig.4 Axial stress-strain curve of composite square columns

2.2 塑性应变

材料的塑性应变是指当应力恢复为 0 时的残余应变. 当组合柱中钢管和混凝土达到一定的值, 而这个应变值比钢管的屈服应变大, 那么混凝土所产生的塑性应变要比钢管产生的小许多, 因为混凝土的非线性是材料破坏即刚度退化的主要因素之一, 而钢管的塑性应变几乎完全依赖它的塑性. 因此, 在整个卸载过程中, 钢管先于组合柱轴向压力首先达到 0. 当轴向力完全卸载时, 钢管会出现拉应力以平衡混凝土中的压应力, 此时, 两种材料间会发生粘结滑移, 相对混凝土, 钢管将缩短更多的长度. 这样, 当组合柱接下来被重新加载时, 混凝土正好可以立即承受荷载进而发生变形. 直至钢管接触到承压板, 两种材料才又发生相同的轴向应变.

图 5 所示为试件 XSC1-3 中钢管和混凝土轴向应变随时间的发展情况, 其中钢管应变值来自于钢管轴向应变片, 混凝土应变值为轴向位移计的读数. 试验结果证实了上述现象, 尤其是最后一个循环(如图 4b, 试件 XSC1-3 的第一个卸载点设置位于弹性段内), 并进一步表明, 组合柱荷载为 0 时的轴向应变一般要比混凝土产生的塑性应变大, 且总是小于钢管产生的塑性应变.

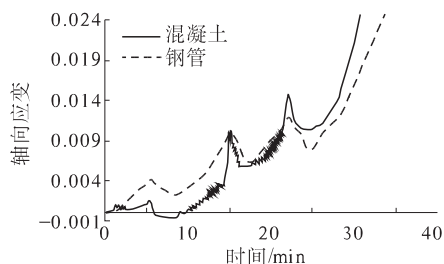


图 5 混凝土和钢管的轴向应变

Fig. 5 Axial strain of concrete and steel tube

3 结论

(1) 试验研究表明, 循环轴压荷载对 FRP-混凝土-钢管组合方柱峰值荷载几乎没有影响, 且组合柱在循环荷载下仍然具有良好的延性. 试验结果还表明, 重复卸载/再加载循环对组合柱的累积塑性变形有一定影响, 即随着循环次数增多, 塑性变形值增大.

(2) 与单调轴压性能相似, 内钢管径厚比对循环轴压荷载下组合柱的峰值荷载有较大影响, 径厚比越大, 峰值荷载越小. 空心率对循环轴压荷载下组合柱的峰值荷载影响不显著.

(3) 由于钢管和混凝土两种材料塑性性能的差别, 在初始的加载/卸载循环中, 两种材料的塑

性应变几乎是同步的, 但随着循环次数的增加, 尤其是最后一个循环, 钢管的塑性应变要远远大于混凝土的塑性应变.

(4) 循环轴向荷载作用下, 组合柱试件应力-应变外包络线与相应单调荷载下试件应力-应变曲线相接近, 因此, 已有组合圆柱中混凝土在单调轴压下的应力-应变模型, 通过考虑截面形状的影响, 也许可以较精确预测组合方柱中混凝土在循环轴压下的应力-应变曲线的外包络线.

参考文献:

- [1] 滕锦光, 余涛. FRP 管-混凝土-钢管组合柱力学性能的试验研究和理论分析[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(5): 1-7.
- [2] HAN Lin-han, TAO Zhong, LIAO Fei-yu, et al. Tests on cyclic performance of FRP-concrete-steel double-skin tubular columns [J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48 (6): 430-439.
- [3] 张冰. FRP 管-高强混凝土-钢管组合短柱轴压性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2009.
- [4] 余小伍. CFRP-混凝土-钢管组合柱轴压性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2006.
- [5] 王志滨, 陶忠. FRP-混凝土-钢管组合受弯构件力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(4): 5-8.
- [6] YU T, WONG Y L, TENG J G, et al. Flexural behavior of hybrid FRP-concrete-steel double skin tubular members[J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10(5): 443-452.
- [7] 钱稼茹, 刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管短柱轴心抗压试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 104-113.
- [8] 钱稼茹, 刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管柱抗震性能试验[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 29-36.
- [9] YU T, TENG J G, WONG Y L. Stress-strain behavior of concrete in hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2010; 136(4): 379-389.
- [10] YU T, ZHANG B, CAO Y B, TENG J G. Behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns subjected to cyclic axial compression[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 61: 196-203.
- [11] 王代, 段向攀, 王勇智. FRP-混凝土-钢管组合方柱轴心抗压试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2013(10): 39-42.

(下转第 13 页)