

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.020

新型玄武岩 FRP 布加固混凝土结构性能试验^{*}

祝百茹,宋洋,张向东

(辽宁工程技术大学土木工程学院,辽宁阜新 123000)

摘要:为研究新型玄武岩纤维增强复合材料(FRP)布加固混凝土圆柱结构性能,制作了12根试件并进行轴心受压试验,通过改变不同粘贴层数,分析了混凝土柱承载力、延性的变化,以及玄武岩FRP布约束混凝土作用机理。结果表明,粘贴玄武岩FRP布加固结构,可以有效改善结构的力学性能,提高混凝土极限强度和极限应变,提高加固墩柱的承载能力;随着玄武岩FRP布层数增加,混凝土的延性得到较大改善,外贴1~3层玄武岩FRP布加固时,混凝土柱的延性提高幅度约为30.9%~80.7%;玄武岩FRP布约束力主要是在混凝土受压后达到屈服应力时产生;采用玄武岩FRP布进行结构加固,并不是粘贴层数越多加固效果越好。

关键词:玄武岩纤维增强复合材料布;混凝土柱;轴心抗压;承载力;延性;作用机理

中图分类号: TU375.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)08-0093-04

Experimental on Structures and Properties of Strengthening Concrete with Basalt FRP Sheet

Zhu Bairu, Song Yang, Zhang Xiangdong

(College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to study structure and performance of new type of basalt fiber reinforced polymer (FRP) sheet reinforced concrete cylinder, 12 axial compression and test specimens were made, by changing different paste layer, the change of the concrete column bearing capacity, ductility, and basalt FRP confined concrete mechanism were analyzed. The results show that the paste basalt FRP reinforced structure can effectively improve the mechanical properties of the structure, improve the ultimate strength and ultimate strain of concrete, improve the bearing capacity of strengthening pier. With basalt FRP cloth layer increasing, the ductility of concrete can be improved, the ductility of the concrete column increases about 30.9%~80.7%, attached with 1~3 layers of basalt FRP. Basalt FRP cloth binding mainly begins when concrete reaches the yield stress after the compression. Using basalt FRP cloth for structural reinforcement, not the more the layer number pasted is, the better reinforcement effects is.

Keywords: basalt fiber reinforced polymer sheet; concrete column; axial compression; bearing capacity; ductility; mechanism

纤维增强复合材料(FRP)具有高强、轻质、抗氧化、耐高温、耐腐蚀等诸多优点,在结构加固领域已经广为应用^[1]。混凝土柱结构承受轴向压力时产生横向膨胀,通过粘贴FRP布进行约束使其处于三向受压状态,将大幅度提高其强度和延性,从而增加结构使用寿命^[2-4]。近年来,国内外针对芳纶纤维增强复合材料(AFRP)布、碳纤维增强复合材料(CFRP)布约束混凝土柱进行大量的实验和理论研究^[5-15],取得了一定的成果,但对新型玄武岩FRP布加固混凝土柱结构性能分析研究较少。笔者通过对混凝土圆柱外贴玄武岩FRP布进行轴心受压性能试验,研究不同约束条件下玄武岩FRP布约束混凝土柱作用机理,为该FRP布的工程应用作参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验中设计12根钢筋混凝土短圆柱,短柱高

$L=600$ mm,直径 $D=200$ mm,混凝土强度等级为C20,混凝土保护层厚度为25 mm,纵筋直径为16 mm,共计6根;箍筋直径为5 mm,间距为75 mm。混凝土柱配筋及尺寸如图1所示,图2为制作完成的混凝土短圆柱试件。试验中使用的玄武岩FRP布主要力学性能参数见表1,加固方式采用全包式粘贴。试件分为M0~M3共4组,每组包含3个试件,其中M0为对比试件,每组参数如表2所示。

表1 玄武岩FRP布力学参数

拉伸强度 (f_u)/ MPa	拉伸弹性模 量 (E_f)/ GPa	单层厚度 (t_f)/ mm	单位质量 / ($g \cdot mm^{-2}$)
2130	93	0.109	263

^{*} 国家自然科学基金项目(51504123)

联系人:祝百茹,博士,主要从事工程结构加固研究

收稿日期:2017-05-17

表2 试验分组

试验组号	试验内容	玄武岩 FRP 布层数 (n_f)	试件个数
M0	轴心受压	0 层	3
M1	轴心受压	1 层	3
M2	轴心受压	2 层	3
M3	轴心受压	3 层	3

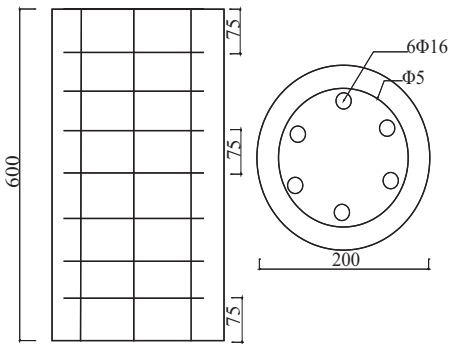


图1 混凝土柱配筋及尺寸



图2 混凝土柱试件

1.2 试验加载

试验分别测量不同包裹层数下,混凝土圆柱的承载力变化以及玄武岩 FRP 布的应力应变、延性变化规律。试验采用 200 t 液压试验机,加载方式采用分级加载,第 1 条裂缝生成之前每级所加荷载为 60 kN,之后每级所加荷载为 100 kN,每一级荷载施加后均要持荷 2 min,待荷载与变形稳定后记录各试验数据。试验试件屈服后,裂缝发展又较宽时,不再逐级加载,连续加载直至破坏,观测各项参数变化。加载现场如图 3 所示。

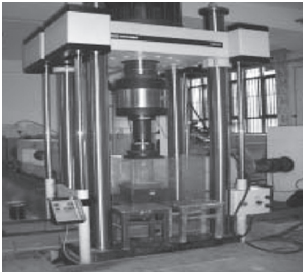


图3 试验加载现场

2 试验现象和结果分析

2.1 试验现象

在试验加载初期包裹玄武岩 FRP 布便产生响

声,随着荷载的不断增加,混凝土柱产生横向变形,对比试件端部产生多条竖向裂缝,并逐渐向中部延伸并贯通;当施加荷载达到破坏载荷的 60%~70% 时,试验混凝土柱中部包裹的玄武岩 FRP 布局部由黑色变为白色,试件中部逐渐产生横向变形;当荷载达到极限荷载的 90% 左右时,玄武岩 FRP 布发出连续清脆的响声,编织细条产生崩断现象,试件中部挤压出混凝土碎片;当荷载达到极限荷载时试件中部玄武岩 FRP 布瞬间发生崩裂,核心混凝土被压碎,混凝土柱发生坍塌。图 4 为试件破坏形态。



图4 试件破坏形态

2.2 承载力分析

试验中各结果如表 3 所示,与未包裹玄武岩 FRP 的相比,包裹 1 层玄武岩 FRP 布混凝土柱承载力平均提高 53%,包裹 2 层和 3 层平均提高 66% 左右。玄武岩 FRP 布加固混凝土柱,包裹形成的握裹力抑制了混凝土的横向变形,从而提高了钢筋混凝土柱极限承载力。包裹层数不同,混凝土柱承载力的提高幅度也不相同。对比看出,玄武岩 FRP 布包裹 2 层、3 层与 1 层相比,抗压强度仅提高 13% 左右,提高幅度没有包裹 1 层明显,价格却增加 1 倍,所以从实际成本出发,并不是层数越多越经济。

表3 混凝土柱轴心受压试验结果

混凝土柱编号	承载力 / kN	承载力提高率 / %	最大载荷时挠度 / mm
M0-1	1000	0	2.41
M0-2	1050	0	2.43
M0-3	1050	0	2.48
M1-1	1588	53.7	2.10
M1-2	1612	56.1	2.05
M1-3	1558	50.8	2.13
M2-1	1720	66.5	2.02
M2-2	1732	67.7	2.04
M2-3	1768	71.2	1.97
M3-1	1705	65.1	2.07
M3-2	1742	68.6	2.05
M3-3	1721	66.6	2.01

2.3 延性

由于我国加固规范中没有直接体现 FRP 布环向约束应力与柱的延性之间的关系,笔者根据美国

加固规范,环向粘贴玄武岩 FRP 布后,约束混凝土强度 f'_{cc} 为:

$$f'_{cc} = f'_c \left[2.25 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1.25 \right] \quad (1)$$

式中: f'_c ——混凝土的轴心抗压强度标准值, C20 取值为 9.6 MPa; 环向玄武岩 FRP 布产生的约束应力 f_l 为:

$$f_l = \frac{k_a \rho_t f_{te}}{2} = \frac{k_a \rho_t \varepsilon_{te} E_t}{2} \quad (2)$$

圆形混凝土试件中 $k_a=1.0$; FRP 布有效拉应变设计值 $\varepsilon_{te}=0.003$; 环向约束体积 $\rho_t=4n_t t_f/d$; t_f , E_t 由表 1 给出; n_t 由表 2 给出。

环向玄武岩 FRP 布约束混凝土有效应变 ε'_{cc} 为:

$$\varepsilon'_{cc} = \frac{1.71(5f'_{cc} - 4f'_c)}{E_c} \quad (3)$$

在我国的加固规范中 C20 混凝土的弹性模量 $E_c=25500$ MPa, 美国规范 $E_c = 5000\sqrt{f'_c} = 15811$ MPa。根据式 (1) 计算出玄武岩 FRP 布约束混凝土的强度 f'_{cc} , 将其带入式 (3), 即可得到玄武岩 FRP 布约束混凝土应变 (ε'_{cc}) 和未粘贴玄武岩 FRP 布约束混凝土应变 (ε'_{cc0}), 计算结果见表 4。由表 4 可知, 依据美国规范, 包裹 1~3 层玄武岩 FRP 布进行加固时, 混凝土柱的延性提高幅度为 30.9%~80.7%。由此可见, 包裹玄武岩 FRP 布可以显著提高混凝土柱的延性。

表 4 混凝土柱延性分析

粘贴层数 (n_t)	$\varepsilon'_{cc0}/\%$	粘贴玄武岩 FRP 布	
		$\varepsilon'_{cc1}/\%$	$\frac{\varepsilon'_{cc1} - \varepsilon'_{cc0}}{\varepsilon'_{cc0}} \times 100\% / \%$
1	0.1055	0.1381	30.9
	0.1055	0.1381	30.9
	0.1055	0.1381	30.9
2	0.1055	0.1693	60.5
	0.1055	0.1693	60.5
	0.1055	0.1693	60.5
3	0.1055	0.1906	80.7
	0.1055	0.1906	80.7
	0.1055	0.1906	80.7

2.4 玄武岩 FRP 布约束混凝土作用机理分析

(1) 玄武岩 FRP 布与混凝土的相互作用。

图 5 为粘贴 1 层玄武岩 FRP 布约束混凝土柱轴向应力与玄武岩 FRP 布应变关系曲线。由图 5 可以看出, 应力没有达到混凝土柱屈服应力之前, 玄武岩 FRP 布产生的应变非常小, 几乎没有对混凝土柱施加约束作用; 当应力达到混凝土柱屈服应力之后, 玄武岩 FRP 布应变迅速增大, 对混凝土柱施加

约束力也随之增大, 因此玄武岩 FRP 布施加的约束力主要发生于混凝土柱屈服之后。

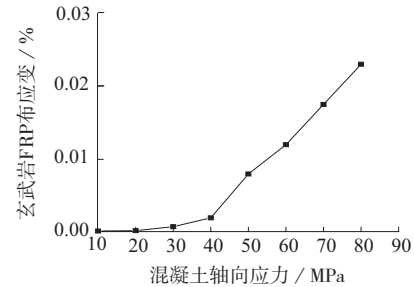


图 5 混凝土轴向应力与玄武岩 FRP 布应变关系

(2) 玄武岩 FRP 布应变与约束混凝土应力沿柱高分析。

图 6 和图 7 分别为粘贴 1 层玄武岩 FRP 布的混凝土柱即将破坏时玄武岩 FRP 布应变和约束混凝土应力沿混凝土柱高的变化曲线。由图 6, 图 7 可知, 在柱的上、下端由于环箍效应存在使得混凝土的变形较小, 玄武岩 FRP 布的拉应变也较小; 在混凝土柱的中段部分, 随着轴向压力的不断增大, 混凝土柱的横向膨胀逐渐加大, 使得玄武岩 FRP 布产生了较大拉应变。约束混凝土应力在混凝土柱的上、下端较小, 在混凝土柱的中段应力较大且比较稳定。

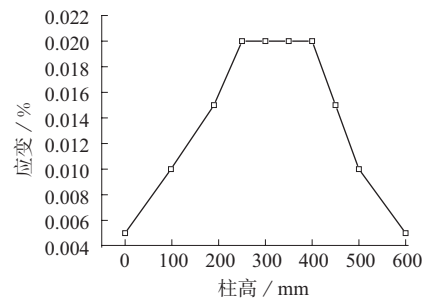


图 6 玄武岩 FRP 布应变沿柱高变化曲线

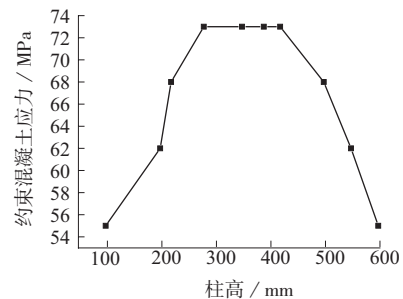


图 7 约束混凝土应力沿柱高变化曲线

3 结论

(1) 粘贴玄武岩 FRP 布加固结构, 可以有效改善结构的力学性能, 提高混凝土极限强度和极限应变, 提高加固墩柱的承载能力。

(2) 随着玄武岩 FRP 布层数增加, 混凝土的延

性得到较大改善。外贴1~3层玄武岩FRP布加固时,混凝土柱的延性提高幅度约为30.9%~80.7%。

(3) 玄武岩FRP布约束力主要是在混凝土受压后达到屈服应力时产生。

(4) 采用玄武岩FRP布进行结构加固,并不是粘贴层数越多加固效果越好。

参考文献

- [1] 卢亦焱,黄银桑,张号军,等. FRP加固技术研究新进展[J]. 中国铁道科学,2006,27(3):34-42.
Lu Yiyang, Huang Yinshan, Zhang Haojun, et al. New progress in the study of the technology of reinforcement with fiber reinforced plastics[J]. China Railway Science, 2006, 27(3):34-42.
- [2] 陆新征,冯鹏,叶列平. FRP布约束混凝土方柱轴心受压性能的有限元分析[J]. 土木工程学报,2003,36(2):46-51.
Lu Xinzheng, Feng Peng, Ye Lieping. Behavior of FRP-confined concrete square columns under uniaxial loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(2):46-51.
- [3] 周长东,赵峰,张艾荣,等. 预应力FRP布加固混凝土桥墩的力学性能研究[J]. 工业建筑,2009,39(4):124-127.
Zhou Changdong, Zhao Feng, Zhang Airong, et al. The mechanical behavior of concrete pier strengthened with lateral prestressed FRP sheets[J]. Industrial Construction, 2009, 39(4): 124-127.
- [4] 白晓彬. 环向预应力FRP加固混凝土圆柱轴心受压性能研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.
Bai Xiaobin. Study on the performance of circular concrete columns confined with lateral pre-tensioned FRP under axial load[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [5] Yan Z H, Pantelides C P, Reaveley L D. Posttensioned FRP composite shells for concrete confinement[J]. Composites for Construction, 2007, 11(1):81-90.
- [6] Mortazavi A A, Pilakoutas K, Son K S. RC column strengthening by lateral pre-tensioning of FRP[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(6 / 7):491-497.
- [7] Yamakawa T, Nasrollahzadeh N K, Satoh H. Seismic or emergency retrofit of RC short columns by use of prestressed aramid fiber belts as external hoops[J]. Aij Journal of Structural and Construction Engineering, 2001, 550:135-141.
- [8] 曹国辉,方志,饶欣频,等. CFRP片材约束混凝土短柱徐变性能及极限承载力试验[J]. 中国铁道科学,2007,28(2):55-60.
Cao Guohui, Fang Zhi, Rao Xinpin, et al. Experiment on creep behaviors and ultimate bearing capacity of short concrete columns confined with CFRP laminates[J]. China Railway Science, 2007, 28(2):55-60.
- [9] 王继兵,周德源,雷真. BFRP加固砌体结构试验研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2013,45(2):56-61.
Wang Jibing, Zhou Deyuan, Lei Zhen. Experimental studies on masonry structures reinforced by BFRP[J]. Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition, 2013, 45(2):56-61.
- [10] 王全凤,李飞,陈浩军,等. 玄武岩纤维布加固木梁抗弯性能的试验研究与有限元分析[J]. 工业建筑,2010,40(4):126-130.
Wang Quanfeng, Li Fei, Chen Haojun, et al. Experimental study on flexural behavior of timber beams[J]. Industrial Construction, 2010, 40(4):126-130.
- [11] 邓宗才,李凯. 预应力与非预应力AFRP加固腐蚀钢筋混凝土梁疲劳性能研究[J]. 土木工程学报,2009,42(9):54-60.
Deng Zongcai, Li Kai. Experimental study on fatigue performance corroded reinforced concrete beams strengthened with prestressed AFRP Sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9):54-60.
- [12] 陈绪军,戴木香,宋晓娥. BFRP布加固钢筋混凝土梁的变幅疲劳寿命试验研究[J]. 公路交通科技,2017,34(2):75-80.
Chen Xujun, Dai Muxiang, Zhu Xiao'e. Experimental study on variable amplitude fatigue life of RC beams strengthened with BFRP[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(2):75-80.
- [13] Oudah F, El-Hacha R. Performance of RC beams strengthened with prestressed NSM-CFRP strips subjected to fatigue loading[J]. Compos Constr, 2012, 16(3):3-7.
- [14] 欧阳利军,丁斌,陆洲导. 玄武岩纤维及其在建筑结构加固中的应用研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料,2010,27(2):1-5.
Ouyang Lijun, Ding Bin, Lu Zhoudao. BFRP and its application review in structural strengthening[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2010, 27(2):1-5.
- [15] 刘春浩. 新型混凝土材料加固框架节点抗震性能试验研究[D]. 上海:同济大学,2010.
Liu Chunhao. Experimental study on seismic behavior of framed joint strengthened with new type concrete material[D]. Shanghai: Tongji University, 2010.

本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿,同时收取高额注册费、审稿费、版面费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办,杂志社所在地为山东省济南市,本刊唯一合法投稿网址为 www.epa1973.com,本刊未委托任何机构和个人从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿网址,辨别来电属地,不要给个人账号汇款,防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

(工程塑料应用杂志社)