

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.05.015

拉挤型 FRP 管轴向压缩承载性能研究^{*}

马森,黄亚新,赵启林,徐康

(解放军理工大学野战工程学院,南京 210007)

摘要:针对单向纤维增强树脂基复合材料(FRP)压缩强度远低于其拉伸强度的问题,对影响拉挤 FRP 管轴向压缩承载力的一些因素进行研究,探讨提高拉挤 FRP 管轴向压缩强度的途径。结果表明,无端部约束情况下增加包裹对提高 FRP 管承载力效果不明显;端部约束可改变 FRP 管破坏形式,对提高其承载力效果显著;在端部约束情况下增加包裹也可有效提高 FRP 管承载力。

关键词: FRP 管;包裹;端部约束;轴向压缩承载力

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)05-0066-04

Axial Compression Performance of FRP Pipe Made by Pultrusion

Ma Sen, Huang Yaxin, Zhao Qilin, Xu Kang

(Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract : Aiming at the problem that the compression strength of the fiber reinforced resin composites(FRP) is much lower than the tensile strength, the factors that affected the axial compression bearing capacity of pultruded FRP were studied, the ways to improve the axial compressive strength of pultruded FRP pipe were explored. The results show that the claddings do little work to the compression strength without end-restraints, the failure mode of the specimens will change and the compressive strength will improve if install the end-restraints. Claddings are helpful to the compression strength in conditions of end-restraints.

Keywords : FRP pipe ; cladding ; end-restraint ; axial compression bearing capacity

单向纤维增强树脂基复合材料(FRP)具有轻质、高强、耐疲劳、耐腐蚀、成本低廉等优点,在土木工程中尤其受到重视^[1-2]。然而其作为工程承压构件时的使用效率却很低,远不如其作为承拉构件具有推广价值^[3-5]。在单向纤维增强复合材料横向施加压力可以有效提高其纵向压缩强度,C. W. Weaver等^[6]的研究表明,对于某碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP),当静水压力由100 MPa增加到500 MPa时,压缩强度提高约400 MPa。工程实际和相关试验研究表明,对于复合材料承压构件,适当的端部约束能够改变其破坏模式,并提高其纵向压缩强度。黄亚新等^[7]的研究表明,端部约束可以改变FRP筋材的破坏方式,提高筋材压缩强度;不同端部约束形式对不同FRP筋材压缩强度的提高作用不同;杜刚等^[8]在进行复合材料缠绕管试验时也强调为防止局部破坏,试件端部应有良好的约束。

笔者根据单向FRP材料的特点,借鉴用碳纤维布增强混凝土压缩强度^[9]和对复合材料筋材施加端部约束^[10]的思路,提出用纤维布对复合材料管进

行外包约束和端部约束的方案,以此来抑制复合材料管材的横向膨胀和端部效应,并进行相关试验,在此基础上提出了合理的提高拉挤FRP管轴向压缩承载力的措施。

1 实验部分

1.1 主要原材料

环氧乙烯基酯树脂:NB-103,青岛佳创新型材料有限公司;

玻璃纤维(GF):无捻粗纱,EW210H-4800,线密度为4800 tex,四川华原玻璃纤维公司;

碳纤维(CF):T700,线密度为800 tex,日本东丽公司;

玄武岩纤维(BF):江苏绿材谷新材料科技发展有限公司。

有关原材料的性能参数如表1所示。

^{*} 国家科技支撑计划项目(2012BAK05B00)、国家973计划项目(2012CB026202)

联系人:马森,硕士,主要从事新型复合材料在工程结构上的应用研究

收稿日期:2013-02-15

表 1 原材料的性能

材料	拉伸弹性模量 / GPa	泊松比
环氧乙烯基酯树脂	3.3	0.37
GF	85	0.5
CF	200	0.25
BF	72	0.45

1.2 主要仪器、设备

万能试验机: DNS300 型, 长春试验机研究所。

1.3 试样制备

实验中所使用的外包纤维布由纤维束缝编而成, 管材由环氧乙烯基酯树脂和增强纤维拉挤固化成型, 纤维沿管长度方向单向排布, 其中混杂纤维 (HFRP) 管所使用的纤维由 CF、GF 和 BF (体积比为 5:1:3) 混杂而成, 将纤维布沿纤维方向裁成与管材长度相等的长条, 浸胶后缠绕在管材表面, 最后固化成型, 所得试样见图 1。试样尺寸为: 壁厚 $t=8$ mm, 外径 $D=76, 104$ mm, 长度 $L=200$ mm, 端部约束长度 $h=15$ mm, 端部约束厚度 $a=30$ mm, 约束方式为钢凸缘和套筒约束。

笔者主要研究无端部约束、有端部约束情况下包裹以及端部约束对 FRP 管轴向压缩承载力的影响, 因此根据以上要求准备了相关试样。试样分为 3 组: Group1, Group2 为 GF 增强树脂基复合材料 (GFRP) 管, Group3 为 HFRP 管。试样相关参数如表 2 所示。

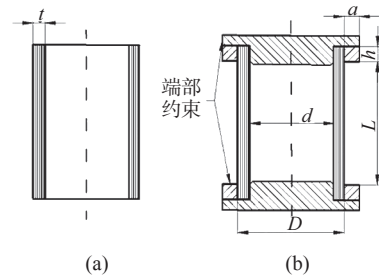
表 2 试样相关参数

组别	编号	包裹材料	包裹厚度 / mm	试样数量 / 个	材料	端部约束
Group1	G76-0-UC		0	2	GFRP	无
	G76-C1-UC	CF	1	2	GFRP	无
	G76-C2-UC	CF	2	2	GFRP	无
Group2	G104-0-UC		0	2	GFRP	无
	G104-C1-UC	CF	1	2	GFRP	无
	G104-C2-UC	CF	2	2	GFRP	无
Group3	H104-0-UC		0	2	HFRP	无
	H104-0-C		0	2	HFRP	有
	H104-G1-UC	GF	1	2	HFRP	无
	H104-G1-C	GF	1	2	HFRP	有
	H104-C1-C	CF	1	2	HFRP	有

注: 试样的编号由 3 部分组成, 第 1 部分表示 FRP 管的材料 (G, H 分别代表 GFRP、HFRP) 和外径 (76, 104 mm); 第 2 部分表示包裹的材料 (C, G 分别代表 CF 布、GF 布) 和厚度; 第 3 部分表示端部约束情况, UC, C 分别表示无端部约束、有端部约束。如 H104-G1-C 表示包裹了 1 mm 玻璃纤维布、外径为 104 mm、两端约束的 HFRP 试样。

1.4 试验过程

将试样两端面打磨平整, 使两端面相互平行且与轴线垂直 (端部约束的试样在约束安装完毕后两端面也须满足以上要求); 将试样放置于万能试验机两平行压板之间, 压板加载面平整光滑且可以由



a—无端部约束试样; b—有端部约束试样

图 1 试样尺寸

球绞自由调整平行度, 试样的轴线与压板中心对正, 确保试样受轴向荷载, 加载过程如图 2 所示。

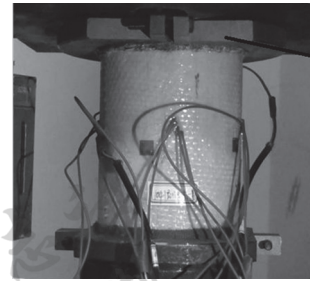


图 2 试样加载过程

试验过程中采集轴向压缩荷载, 对端部约束试样同时采集跨中位置的轴向应变、环向应变和位移。应变片布置如图 3 所示, 轴向应变片编号为 A-1, A-2, A-3, A-4, 环向应变片编号为 B-1, B-2, B-3, B-4。

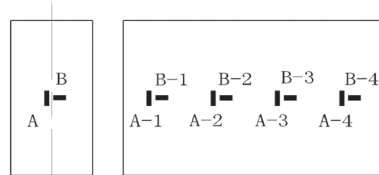


图 3 应变片布置示意图

试验过程采用手动控制加载, 加载速度约为 10 kN/min, 试样安装调试完毕后, 加载直至破坏。

2 结果与讨论

2.1 无端部约束时包裹的影响

无包裹 FRP 试样在荷载达到极限时突然发出劈裂声, 同时从试验机的荷载显示器上观察到荷载值急剧下降, 观察试样的破坏现象, 发现无包裹时现象类似, 端部层间开裂现象明显, 并出现贯穿性裂缝 (见图 4a), 典型的破坏形式为 FRP 的端部分层和纵向开裂; 有包裹 FRP 试样在荷载达到极限时突然发出劈裂声, 荷载显示器显示荷载值急剧下降, 包裹 1 mm 时, 试样端部包裹层被拉断现象严重, 同时端部有压溃现象 (见图 4b); 包裹 2 mm 时, 更多的是

出现端部压溃 (见图 4c)。有包裹时,典型的破坏形式为试样端部压溃和包裹纤维拉断。

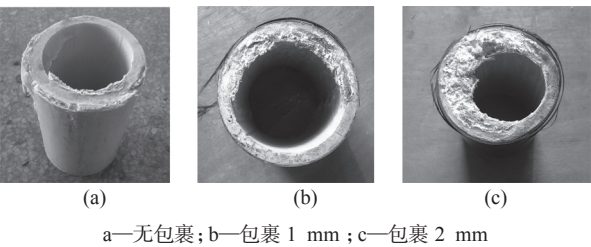


图 4 无端部约束 GFRP 管压缩破坏形式

从以上试验现象可以看出,无端部约束情况下,拉挤 FRP 管的破坏形式主要受端部控制,包裹纤维后会对其破坏模式产生很大影响。施加轴向荷载时,端部会产生较大的应力集中,同时由于 FRP 的各向异性特性^[1],垂直于纤维方向的拉伸、压缩强度比较弱,端部首先产生层间剥离;随着荷载的持续增加,无包裹时裂缝向跨中位置扩展,产生明显的贯穿性裂缝;有包裹时,包裹给予试样一定的预紧力,并且改变了裂缝的发展方式,阻止裂缝向跨中位置扩展,迫使端部材料迅速压溃。试验测得 Group1, Group2 试样的极限纵向压缩应力如表 3 所示。

表 3 无端部约束 GFRP 管的极限荷载

试样编号	极限纵向荷载 / kN	破坏形式
G76-0-UC-1	425	端部分层、纵向开裂
G76-0-UC-2	441	端部分层、纵向开裂
G76-C1-UC-1	462	端部压溃、包裹拉断
G76-C1-UC-2	477	端部压溃、包裹拉断
G76-C2-UC-1	480	端部压溃、包裹拉断
G76-C2-UC-2	485	端部压溃、包裹拉断
G104-0-UC-1	815	端部分层、纵向开裂
G104-0-UC-2	810	端部分层、纵向开裂
G104-C1-UC-1	650	端部压溃、包裹拉断
G104-C1-UC-2	621	端部压溃、包裹拉断
G104-C2-UC-1	625	端部压溃、包裹拉断
G104-C2-UC-2	621	端部压溃、包裹拉断

由表 3 看出,无端部约束情况下,增加包裹对 FRP 管承载力的提高效果并不明显,在管径为 104 mm 时甚至出现了下降趋势。增加包裹可提高包裹对端部材料的预紧力和约束作用,对控制端部压溃趋势有一定效果,但并没有改变试样的破坏模式,对提高管件承载力没有多少裨益。因此,实际应用中,若想改变拉挤 FRP 管的破坏模式,提高承载力,必须采取适当的端部处理措施,阻止端部破坏。

2.2 端部约束时包裹的影响

针对 FRP 拉挤管极易出现端部压溃破坏的问题,考虑采取适当的端部处理控制 FRP 管的端部破

坏,观察了试验现象并测量对比了极限荷载。无端部约束 HFRP 管破坏形式类似,端部压溃现象明显 (见图 5a);端部约束无包裹 FRP 管试样,在荷载接近极限值时,发出噼啪的劈裂声,观察试样破坏现象发现,端部没有明显的破坏现象,跨中位置纤维层剥离 (见图 5b),典型的破坏形式为 FRP 管材增强纤维断裂;端部有约束纤维布包裹 FRP 管,在荷载达到极限值时,一声巨响,试样破坏,打开端部固定套筒后,发现金属固定环下部的复合材料管被剪切破坏 (见图 5c),典型的破坏形式为 FRP 管壁剪切破坏。

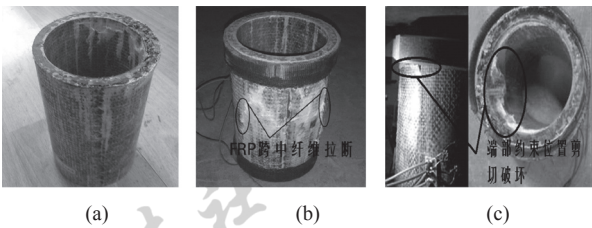


图 5 HFRP 管压缩破坏形式

从以上试验现象可以看出,增加端部约束后,试样的破坏模式发生了改变。当施加轴向荷载时,端部因钢套的约束无法自由变形,中间段没有约束到的部位因泊松效应发生环向和径向变形,无包裹试样在环向和径向应变达到极限值时,试样出现整体破坏;有包裹时,包裹可以限制中间段 FRP 的变形,但在钢套和管件接触部位存在很大的横截面剪应力,导致试样剪切破坏。

表 4 为包裹和约束对 FRP 管极限荷载的影响。

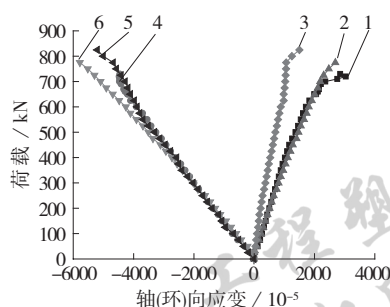
表 4 包裹和约束对 FRP 管极限荷载的影响

试样编号	极限纵向荷载 / kN	破坏形式
H104-0-UC-1	510	端部压溃
H104-0-UC-2	494	端部压溃
H104-G1-UC-1	521	端部压溃、包裹拉断
H104-G1-UC-2	529	端部压溃、包裹拉断
H104-0-C-1	730	跨中开裂、纤维拉断
H104-0-C-2	675	跨中开裂、纤维拉断
H104-G1-C-1	775	约束处剪坏
H104-G1-C-2	790	约束处剪坏
H104-C1-C-1	825	约束处剪坏
H104-C1-C-2	830	约束处剪坏

对比表 4 中 H104-0-UC, H104-0-C 和 H104-G1-UC, H104-G1-C 可以看出,端部约束的作用分别使无包裹和包裹 1mm GF 的 HFRP 管的平均极限荷载提高了 43% 和 47.6%,说明端部约束对提高拉挤 FRP 管极限纵向压缩应力具有很好的效果;在端

部有约束的情况下,对比 H104-0-UC, H104-G1-C, H104-C1-C 可以看出,外包 1mm GF 布和 1mm CF 布的两组试件平均极限承载力相对于无包裹试件而言,分别提高了 11% 和 18%,由此可见,FRP 管外包纤维布可以有效提高构件承载力,而且外包材料刚度越大,提高效果越明显。

图 6 示出有端部约束时 FRP 管的荷载-应变曲线。由图 6 可知,增加包裹后 FRP 管跨中位置的环向应变和轴向应变得到了约束,使 FRP 管不会因跨中位置应变量大而破坏;但由于端部约束为钢质套筒,刚度很大,该位置处存在较大的剪应力,很容易使该位置处材料剪切破坏。由图 6 也可以看出,CF 外包管相对于 GF 外包管在相同荷载下具有更小的环向应变,这是由于 CF 具有更大的弹性模量,在相同荷载下,变形更小,端部约束与管接触位置相对变形量更小,因此有助于提高承载力。



1—环向应变,无包裹;2—环向应变,1 mm GF 包裹;
3—环向应变,1 mm CF 包裹;4—轴向应变,无包裹;
5—轴向应变,1 mm CF 包裹;6—轴向应变,1 mm GF 包裹

图 6 端部约束时 FRP 管荷载-应变曲线

3 结论

(1) 拉挤 FRP 外包管轴向压缩承载力主要受端部控制,无端部约束情况下增加包裹对提高 FRP 管承载力没有帮助,甚至使其下降,工程应用中若将 FRP 管用于承压结构必须经过端部处理。

(2) 端部约束可显著提高拉挤 FRP 管的承载性能。

(3) 在有端部约束情况下,对拉挤 FRP 管进行外包也可提高其轴向压缩承载力,且包裹层刚度越大,对构件承载力提高越明显。

参考文献

- [1] Youakim, S A, Karbhari V M. An approach to determine long-term behavior of concrete members prestressed with FRP tendons[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(5):1 052-1 060.
- [2] Wang Xin, Wu Zhishen. Evaluation of FRP and hybrid FRP cables for super long-span cable-stayed bridges[J]. Composite Structures, 2010, 92(10):2 582-2 590.
- [3] 张新越,欧进萍. FRP 加筋混凝土短柱受压性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2006, 38(4):467-472. Zhang Xinyue, Ou Jinping. Experimental research on compressive properties of concrete stub square column reinforced with FRP bars[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2006, 38(4):467-472.
- [4] 周继凯,杜钦庆,袁明亮,等. GFRP 筋抗压力学性能试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(4):542-545. Zhou Jikai, Du Qinqing, Yuan Mingliang, et al. Experimental study on compressive mechanical properties of GFRP rebars[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2008, 36(4):542-545.
- [5] 高丹盈,李士会,朱海堂,等. 玻璃纤维增强聚合物筋压缩和剪切性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(3):28-32. Gao Danying, Li Shihui, Zhu Haitang, et al. Experimental research on basic mechanical properties of GFRP bars[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(3):28-32.
- [6] Weaver C W, Williams J G. Deformation of a carbon-epoxy composite under hydrostatic pressure[J]. Journal of Materials Science, 1975, 10(8):1 323-1 333.
- [7] 黄亚新,苗大胜,程曦,等. 不同种类拉挤 FRP 筋材压缩强度研究[J]. 工程塑料应用, 2012, 40(8):81-85. Huang Yaxin, Miao Dasheng, Cheng Xi, et al. Compressive strength of different kinds of pultruded FRP rods[J]. Engineering Plastics Application, 2012, 40(8):81-85.
- [8] 杜刚,曾竟成,肖加余,等. 复合材料圆管端部加强对其轴压性能影响的实验分析[J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(3):457-459. Du Gang, Zeng Jingcheng, Xiao Jiayu, et al. Experimental study on the effects of end-strengthening on the axial compressive properties of composite tubes[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2007, 25(3):457-459.
- [9] 赵彤,谢剑,刘明国,等. 碳纤维布改善高强混凝土性能的研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(3):42-44. Zhao Tong, Xie Jian, Liu Mingguo, et al. Research on new method of improving properties of high strength concrete by using continuous carbon fiber sheet[J]. Industrial Construction, 2001, 31(3):42-44.
- [10] 杜运兴,尚守平,周芬. CFRP 筋带方向及端部锚固对加筋土抗剪强度的影响[J]. 中南公路工程, 2003, 28(3):30-34. Du Yunxing, Shang Shouping, Zhou Fen. Influences of GFRP strip direction and anchoring end on shear strength of reinforced earth[J]. Central South Highway Engineering, 2003, 28(3):30-34.
- [11] 沈观林. 复合材料力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1996. Shen Guanlin. Mechanics of composites[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.