

CFRP 粘贴圆钢管柱构造措施研究

完海鹰, 施文林

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: CFRP 包裹钢结构探究力学性能的试验已有不少, 但关于使用 CFRP 探究构造措施的研究尚少, 文章采用间隔粘贴的构造措施, 以间隔距离 30 mm、50 mm、80 mm 的钢管为研究对象, 采用试验探究、有限元验证的方式, 探索使用 CFRP 间隔粘贴的构造措施对钢管构件破坏形态的影响, 以及钢管构件的延性、承载力和控制截面的变化情况, 得到使用碳纤维间隔粘贴柱长 $1/4\sim 3/4$ 范围的有效性及其合理粘贴间距: 碳纤维粘贴间隔建议取 30~50 mm 之间, 且在此区间内间隔距离越短, 越能有效推迟碳布与钢柱剥离。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 间隔粘贴; 构造措施; 有效性及合理粘贴间距

中图分类号: TU391

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382 (2021) 01-001-06

Research on Construction Measures of CFRP Reinforced Cylindrical Steel Pipe Column

WAN Haiying, SHI Wenlin

(College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: There have been many studies on strengthening steel structures with CFRP, but few study has been conducted on exploring structural measures with CFRP. The construction measures of interval pasting are adopted in this paper. Taking the steel pipe with spacing of 30 mm, 50 mm and 80 mm as the research object, with the experiment to explore and finite element modeling method to verify, this paper explores the influence of the structural measures of CFRP interval bonding on the failure mode of the component, as well as the ductility, bearing capacity and change of the control section of the steel pipe component. The validity and reasonable bonding interval of the columns with carbon fiber spacing in the range of $1/4\sim 3/4$ are obtained: The interval of carbon fiber paste is recommended to be 30~50mm, and in this interval, the shorter the interval is, the more effective it is to delay the peeling between carbon cloth and steel column.

Key words: carbon fiber reinforce plastic; interval paste; structural measures; the validity and reasonable bonding interval

CFRP 包裹钢结构探究力学性能的试验已有不少, 随着技术的成熟, 纤维材料的种类也在不断变化, 可以说, 关于纤维材料加固钢结构的性能研究已日趋成熟。但始终缺乏关于纤维材料粘贴结构的构造研究, 本文将研究焦点集中在此处, 探索间隔粘贴的构造措施中最佳间隔范围, 可以成为今后钢结构加固相关规范制定的参考依据。

1 试验设计

1.1 试件设计

本文试验的基本思路是: 碳纤维粘贴方向采用纵向粘贴, 三层环包, 材料纤维与柱轴同向, 以 100 mm 宽度为一段, 以 30 mm、50 mm、80 mm 为范围间隔粘贴, 对比加固效果^[1], 具体粘贴方式如图

收稿日期: 2020-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51165020, 51565029)

作者简介: 完海鹰 (1960-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 钢结构、大跨空间结构。

1 所示,试件编号见表 1,柱子采用铰接连接方式固定。对照组:1 根不加固的圆钢管柱但柱底和柱顶 350 mm 处均采用 CFRP 包裹 3 层、1 根全包裹圆钢管柱,试验组:3 根间隔纵向粘贴纤维材料的圆钢管柱,柱顶和柱底各包裹 3 层 350 mm 纤维材料。^[2] 柱子外径为 102 mm,厚 4 mm,设计长度为 1.5 m,试件长细比 $\lambda = 43.27^{[3]}$ 。

表 1 试件编号

编号	层数	碳布宽度 (mm)	间隔 (mm)
G_0			0
G_1	3	100	30
G_2			50
G_3			80

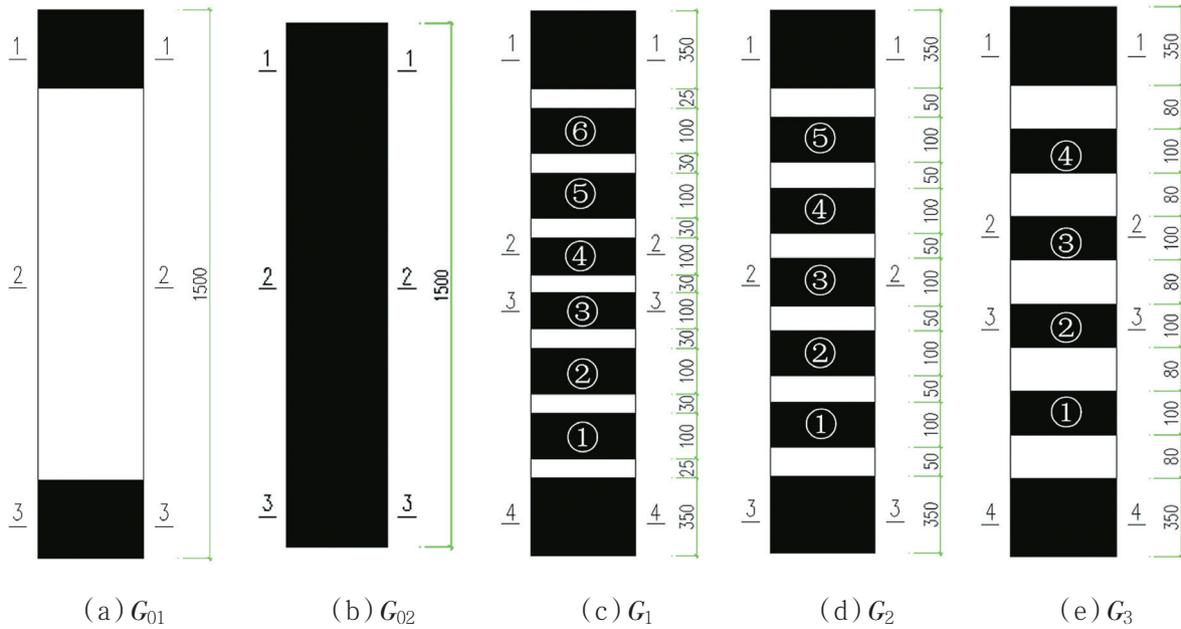


图 1 试件粘贴方案及碳布编号



图 2 试验构件的整体破坏模式图

1.2 材料属性

试验材料采用 Q235 钢管,日本东丽 UT70-30 高性能碳纤维单向布,具体材料参数如表 2 所示。^[4]

表 2 材料性能

材料	屈服强度 (MPa)	性能参数	厚度 (mm)	抗拉强度 (MPa)
Q235	241	E=203 GPa $\mu=0.295$	4	280
CFRP	/	E=240 GPa	0.166	3958
SST Resin 220	/	E=3.17 GPa	0.15	41

2 试验结果

文章共研究了五组对照试验,一组全包碳布,一组仅两端包裹碳布,还有三组采用间隔包裹的方法,主要实验现象有:CFRP 纵向撕裂,与钢管剥离,钢管柱部分屈曲。

2.1 构件整体失稳

由图 2 实验图片可知,构件弯曲变形严重,最终破坏形式为整体失稳。试件 G_{01} 、 G_1 、 G_2 、 G_3 的极限承载力分别是 303、323、305、300 kN。

2.2 钢管局部屈曲



图 3 G_2 试件受压侧局部屈曲

此外,仅发现 G_2 试件压侧,裸钢柱中部位出现局部屈曲,发生位置在 3、4 号碳布之间,见图 3。

2.3 碳布撕裂与剥离

本文仅列出部分碳布剥离和撕裂示意图,见图 4。

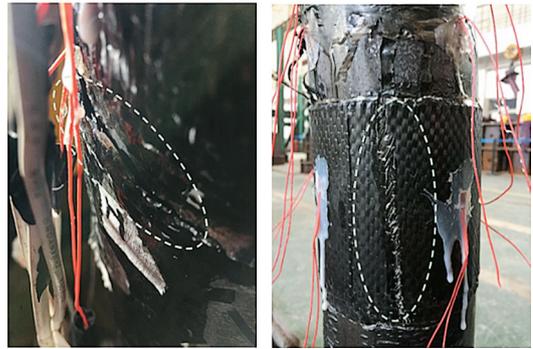


图 4 碳布剥离与撕裂

G_1 、 G_2 、 G_3 试件碳布破坏现象相似,在压侧发生碳布撕裂,并且都是纵向撕裂破坏。 G_1 试件碳布撕裂主要集中在柱中及偏下区域,共约 1/3 柱长, G_2 试件碳布撕裂主要集中在柱中及偏上区域,共约 1/6 柱长, G_3 试件碳布撕裂主要集中在柱中,共约 1/6 柱长,位于 2、3 号碳布之间。

3 有限元与试验结果比较

3.1 破坏模式比较

利用有限元对 G_1 、 G_2 、 G_3 三个试件进行受力分析,钢材使用 C3D8R 实体单元、CFRP 层使用 S4R 壳单元,使用位移加载方式模拟静力加载,得到构件在极限状态下的应力云图,见图 5。

将图 5 与图 2 进行对比可知:

3.1.1 整体失稳

试验构件与 ABAQUS 模拟的构件受力模式基本一致,弯曲变形较大,无扭转,最终破坏形式为整体失稳,说明有限元模拟时采用的初始缺陷计算方法较为准确。并且加固区 CFRP 应力值由中间往两端递减,每截碳布与钢管搭接处受压侧有应力集中现象,说明试件模拟时 CFRP 与钢柱协同作用良好。

3.1.2 局部屈曲

G_2 试件 3、4 号碳布之间 50 mm 未包碳布区域受压侧有局部向外膨胀屈曲现象,原因是屈曲位置上下两侧都由 100 mm 宽的 3 号、4 号碳布包裹,碳布和钢柱协同作用良好,包裹区刚度明显加强,未包裹的裸钢区域为薄弱层,在荷载作用下,裸钢处易成为控制截面,上下侧均向控制截面施加压力,因此易形成局部屈曲现象。

实验现象说明 G_1 未发生局部屈曲,有限元分

析应力云图说明 G_1 试件钢管受力较均匀,未出现明显的分段加强区域,CFRP 受力较小,说明 30 mm 间隔较小,不影响 CFRP 整体包裹效果,整体包裹效果较好,整体失稳先于构件局部破坏。

实验现象说明 G_3 未发生局部屈曲,是因为 80mm 间隔较大,虽然裸钢与包钢处也有刚度差异,但是裸钢处应力传递路径较长,受力较均匀,没有明显的应力集中。

3.1.3 粘结界面破坏

试件在承载能力极限状态前,CFRP 与钢管柱作用良好,随着荷载增大,应力突减,CFRP 完好但与钢管柱剥离,说明粘结界面在一定荷载作用时会发生破坏。 G_1 试件在荷载突减到峰值的 48% 时出现受拉剥离,剥离程度较小, G_2 试件在荷载突减到

峰值的 56% 时出现受拉剥离,剥离程度较小, G_3 试件在荷载突减到峰值的 66% 时出现受拉剥离,最终构件失效时剥离程度较明显^[5]。

3.1.4 控制截面转移

对比图 2 和图 5 可知, G_1 的控制截面在柱中偏下位置,可能是由于 30 mm 间隔太小,碳布粘贴误差,导致控制截面下移; G_2 的控制截面在柱中偏上位置,是因为试件中间段有包裹,所以偏上和偏下的未包裹处刚度较弱,控制截面转移到中上部, G_3 试件的控制截面基本位于柱中,与对照试件相同。

3.2 荷载 - 位移曲线比较

通过有限元和试验分别模拟了钢管柱的荷载 - 位移曲线,得到图 6 所示结果。

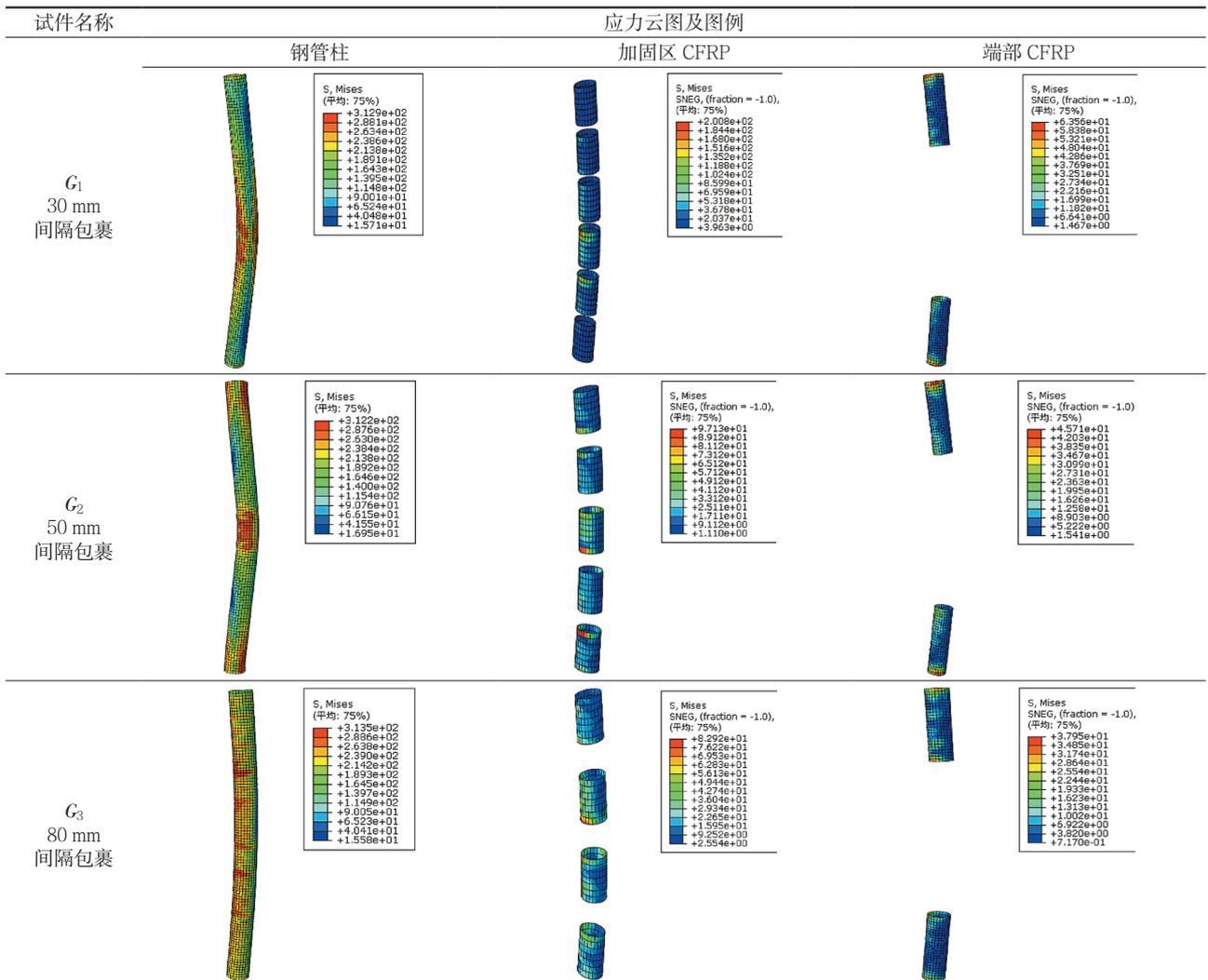
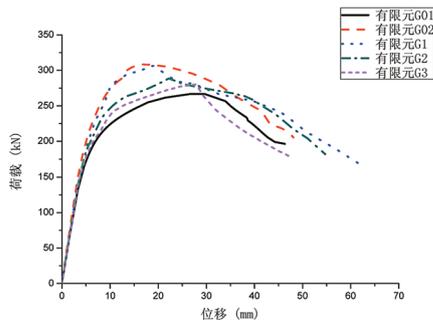
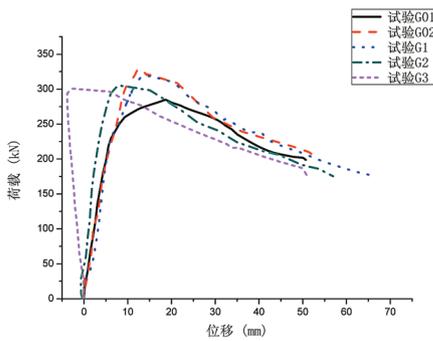


图 5 各试件应力云图



(a) 有限元的荷载 - 柱中侧向位移曲线



(b) 试验的荷载 - 柱中侧向位移曲线

图 6 荷载 - 位移曲线

根据图 6 可知:

(1) 图 6(a) 和图 6(b) 曲线变化趋势一致,在弹性阶段相似性更高,有限元模拟与试验结果接近,图 6(b) 中 G_3 曲线一开始为负值可能是因为未固定牢固,加载时产生反向滑移;

(2) 有限元曲线塑形阶段明显,有较好的延性,可能是因为试验钢材有杂质,钢材较脆,承载能力更高,延性较差;

(3) G_1 、 G_2 、 G_3 试件的试验曲线在极限状态对应的极限位移,较有限元曲线要低 9.56%、4.75%、7.06% 左右^[6],是因为试验时两端约束较弱,构件更易整体失稳。

(4) 对比 G_1 、 G_2 、 G_3 曲线发现,碳布粘贴间隔距离越大,试件曲线越偏右,承载力越小,位移越大,说明间隔距离越小,构件越刚,承载力越高,延性越差。

3.3 极限承载力比较

将有限元与试验的极限荷载对比,见表 3,可知:

(1) 极限承载力相差 7% 以内,且 G_1 、 G_2 、 G_3 试件相比于对照组,试验数据和有限元数据的极限荷载差值也基本相同,说明数值模拟准确性较高。

(2) 将 G_1 、 G_2 、 G_3 试件与 G_{01} 试件对比,极限承载力增大幅度较小,最大仅为 9.7%,说明间隔粘贴不能显著提高承载力,但是 30 mm 间隔粘贴已快接近全包效果。

(3) 对比 G_1 、 G_2 、 G_3 试件,发现碳布粘贴间隔距离越大,极限承载力越小,变化的幅度越小,可以判断,0~30 mm 范围内,间隔包裹对极限承载力的提高效果更好。

4 结论

通过研究 30 mm、50 mm 和 80 mm 间隔包裹 3 层 CFRP 材料的试验和数值模拟分析,考虑材料双折线模型、几何非线性和初始缺陷,其中几何非线性是先进行特征值屈曲分析再进行非线性全过程分析得到荷载比例因子极限值,初始缺陷主要是在屈曲分析时编辑命令引入模态和系数。引入结论如下:

(1) 30 mm 间隔包裹时,CFRP 明显有效作用范围约为柱中往两侧延伸柱长的 1/6 左右,共 1/3 柱长,50 mm、80 mm 间隔包裹时,CFRP 明显有效作用范围约为柱中往两侧延伸柱长的 1/12 左右,共 1/6 柱长。

(2) 30 mm 间隔粘贴方式碳布与钢柱剥离推迟

表 3 有限元分析与参照试验对比分析表^[7]

试件编号	极限荷载 /kN		$\frac{P_a - P_e}{P_e} \times 100\%$	$\frac{G_x - G_{01}}{G_{01}} \times 100\%$		$\frac{G_x - G_{02}}{G_{02}} \times 100\%$	
	试验值 P_e	有限元 P_a		试验	有限元	试验	有限元
G_{01}	290.92	277.94	4.46%	/	/		
G_{02}	327.93	306.64	6.49%				
G_1	319.14	304.68	4.53%	9.70%	9.62%	2.68%	0.64%
G_2	310.42	295.52	4.80%	6.70%	6.33%	5.34%	3.63%
G_3	305.83	286.29	6.39%	5.13%	6.74%	3.00%	6.64%

(下转第 20 页)

- [6] 王士民,于清洋,彭博,等.水下盾构隧道管片衬砌结构渐进性破坏机理模型试验研究[J].土木工程学报,2016,49(4):111-120.
- [7] 杨雨冰,谢雄耀.基于断裂力学的盾构隧道管片结构开裂破坏机制探讨[J].岩石力学与工程学报,2015,34(10):2114-2124.
- [8] 杨林德,伍振志,时蓓玲,等.开裂及接缝渗漏条件下越江盾构隧道管片混凝土氯离子运移规律研究[J].岩土工程学报,2008,30(12):1826-1831.
- [9] 刘四进,孙齐,封坤,等.海底盾构隧道管片接头氯离子侵蚀运移规律研究[J].现代隧道技术,2016,53(6):100-107.
- [10] 黄宏伟,徐凌,严佳梁,等.盾构隧道横向刚度有效率研究[J].岩土工程学报,2006,28(1):11-18.
- [11] 叶飞,杨鹏博,毛家骅,等.基于模型试验的盾构隧道纵向刚度分析[J].岩土工程学报,2015,37(1):83-90.
- [12] 王承震.扬州瘦西湖盾构隧道工程施工关键技术[J].隧道建设,2015,35(8):828-833.
- [13] 章定文,刘志祥,沈国根,等.超大直径浅埋盾构隧道土压力实测分析及其计算方法适用性评价[J].岩土力学,2019,40(S1):91-98.
- [14] 黄钟晖,廖少明,侯学渊.盾构法隧道错缝拼装衬砌的受力分析[J].地下工程与隧道,2003(3):6-9,16-56.
- [15] 黄钟晖,廖少明,侯学渊.错缝拼装衬砌纵向螺栓剪切模型的研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(6):952-958.
- [16] 黄建明.盾构管片计算模型的选择[J].铁道建筑,2004,44(6):29-31.
- [17] 胡欣雨,张子新.双圆盾构隧道衬砌不同内力计算模型对比分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(1):44-49.
- [18] 钟小春,朱伟,秦建设.盾构隧道衬砌管片通缝与错缝的比较分析[J].岩土工程学报,2003,25(1):109-112.
- [19] 杨雄.南京长江隧道超大断面管片衬砌结构相似模型试验与数值分析[D].成都:西南交通大学,2007.
- [20] 叶飞,何川,王士民.盾构隧道施工期衬砌管片受力特性及其影响分析[J].岩土力学,2011,32(6):1801-1807,1812.

(上接第 5 页)

到极限荷载的 48.7%,其他依次降低,间隔距离越短,能有效推迟碳布与钢柱剥离。

(3)采用本文所设计的构造方式,对构件承载力影响不明显,但是可以显著提高构件的延性,距离越短,构件越脆,延性越差,但承载力较高。所以在间隔粘贴钢构件的构造方法中,碳纤维粘贴间隔建议取 30~50 mm 之间。建议补充 40 mm、60 mm 间隔距离的试验探究,缩小间隔范围,找到最有效的构造措施。

参考文献:

[1] 丁磊,高鹏,殷强,等.粘贴形式对 CFRP 布约束柱轴压

性能影响试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2018,41(6):812-816,864.

[2] 唐红元,王灿军,潘毅,等.CFRP 加固冷弯薄壁槽钢短柱偏心受压承载力试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(11):159-165.

[3] 丁卉.CFRP 布加固空心钢管柱稳定性参数化数值模拟研究[D].合肥工业大学,2015.

[4] 钱拓.CFRP 加固空心圆钢管柱稳定性试验研究[D].合肥工业大学,2015.

[5] 薛耀.CFRP-钢粘贴界面粘结性能试验研究[D].南京:东南大学,2015.

[6] 李兆阳.碳纤维增强复合材料(CFRP)加固钢管柱力学性能数值分析[D].西安:长安大学,2016.

[7] 李甜.混杂 FRP 加固偏心受压方钢管柱的承载力分析[D].西安:西安建筑科技大学,2016.