

CFRP 加固开孔钢板的静力力学性能研究

姜 丰^{1,2}, 史亚龙^{1,2}, 王清远^{1,2,3}

(1. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 深地科学与工程教育部重点实验室, 成都 610065;
3. 成都大学, 成都 610106)

摘 要:采用中心 CFRP 加固开孔钢板的单轴拉伸试验,对 6 mm 厚开孔钢板采用 1-3 层 CFRP 加固,对 3 mm 厚开孔钢板采用 1-2 层 CFRP 加固,研究了 CFRP 加固层数和钢板厚度对开孔钢板试件的影响。试件在单轴拉伸荷载作用下有 4 种典型的破坏形态,破坏形态与 CFRP 的层数以及 CFRP 与钢板之间结构胶的粘接强度有关。试验结果表明,随着 CFRP 层数的增加,试件的极限承载力呈线性增大,而极限位移却减少;开孔钢板的厚度不同,CFRP 的加固效果也不同。同时,还通过在试件钢材表面和 CFRP 表面粘贴应变片的方法测量试件在单轴拉伸荷载下各关键部位的应变值,测得了加载过程中未加固试件和单层 CFRP 双面加固试件表面各点的应变变化特征。

关键词:开孔钢板;CFRP 加固;CFRP 层数;钢板厚度;力学试验

中图分类号:TU31

文献标志码:A

引 言

钢构件经常需要在连接等部位的板上开孔。开孔会削弱截面面积、造成孔口周围的应力集中,并导致构件的静力和疲劳性能降低。开孔钢板的加固设计是工程应用中较关键的问题。

使用结构胶将 CFRP 胶接在结构受损部位以提高其承载能力的方法能够取得良好的加固效果^[1]。与传统的加固方法相比,CFRP 拥有弹性模量较大、抗拉强度高且疲劳性能好^[2]等特点,特别适合于受拉钢结构构件的加固^[3]。并且 CFRP 的形状易于根据实际加固设计修剪,因此在开孔钢板加固中的优势显得尤为突出。

国内外对于未受损钢板加固的研究较多,研究了 CFRP 对钢板加固试件的拉伸力学性能的改善,也提出了一些 CFRP 与钢板共同工作问题的分析模型。碳纤维布粘接加固后的钢板,在屈服之前能够很好地工作,CFRP 加固对钢板屈服前的刚度影响较小,钢板的屈服荷载提高较明显,钢板屈服后,由于 CFRP 布的应变增长滞后,碳纤维布逐渐脱胶或拉断^[4,5]。马建勋等发现脱胶程度和位置将对极限承载力有显著的影响,因此结构胶的性能对钢板的加固起着重要的作用^[6]。李耘宇等通过将 CFRP 布包裹钢板复合而成的 FRP/钢复合板试验发现,随着 CFRP 布层数的增加,钢板获得了稳定良好的二次刚度^[7]。Bocciarelli 和 Colombi 通过模拟,解析式

收稿日期:2018-01-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51208325)

作者简介:姜 丰(1991-),女,山东青岛人,硕士生,主要从事结构加固方面的研究,(E-mail)jfeducation@163.com

通信作者:王清远(1965-),男,重庆人,教授,博士,博士生导师,主要从事新型材料和工程结构方面的研究,(E-mail)wangqy@scu.edu.cn

和试验的方式研究了钢板和 CFRP 脱胶强度的影响因素,并推荐在钢板的 CFRP 加固中,应当采用高断裂能的结构胶和高轴向刚度的 CFRP 布^[8]。

相较钢板 CFRP 加固,开孔钢板 CFRP 加固的试验研究较少。在钢板的开孔方式上,冲孔、钻孔^[9]以及氧气切割、等离子切割和激光切割^[10-11]等不同的开孔方式对结构构件和连接件的强度、延性和疲劳性能产生不同的影响。此外,还有其他方式的加固设计。张宁等采用试件中间位置两侧各开设一个半圆孔以模拟钢构件的缺陷部位,结果显示 CFRP 布对提高构件屈服强度效果明显(16%以上)^[12]。Perluigi Colombi 等研究了 CFRP 板对开孔钢板的修复加固作用,利用应变片测试分析了各加载阶段 CFRP 板与钢板的协同工作状态^[13]。

尽管近年来学者对开孔钢板 CFRP 方面做了较多的研究,然而还需要对一些问题做出进一步的分析解释:(1)CFRP 加固对中心开孔钢板试件的影响;(2)开孔钢板 CFRP 布加固中 CFRP 布和钢板的协同工作原理。

本文采用中心开孔钢板 CFRP 加固单轴拉伸试验,试验了 1-3 层 CFRP 加固对 6mm 厚开孔钢板的影响和 1-2 层 CFRP 加固对 3 mm 厚开孔钢板的影响。另外,通过在试件钢材表面和 CFRP 表面粘贴应变片的方法测量试件在单轴拉伸荷载下各关键部位的应变值,对比了开孔钢板和双面加固试件表面的应变数据。

1 试验方案设计

1.1 试件设计

试件长度为 300 mm,宽度为 30 mm,厚度分别为 3 mm 和 6 mm,试验加载时两端各留 35 mm 的夹持长度。在钢板正中心开设直径为 12 mm 的圆孔,用以模拟实际工程中的情况,计算 CFRP 布的加固修复效果。所有 CFRP 的长度均为 200 mm。试件具体构造如图 1 所示。试件均使用激光开孔。试件准备时,将 CFRP 布剪成宽 30 mm、长 200 mm 的长条形。钢板表面先用砂轮打磨去除铁锈,然后用脱脂棉蘸丙酮擦拭,去除表面油渍。将环氧树脂粘接剂 Sikadur 330 的 A 组份和 B 组份按 4:1 的比例调配好,均匀地涂抹在待加固钢板表面,然后将 CFRP 布覆于环氧树脂上,用滚轮将多余的环氧树脂和气泡挤出。试件做好后,在室温环境下放置 7 天以

上,待环氧树脂凝固变硬后,使用电钻在 CFRP 上开孔和去除孔口处挤出的环氧树脂粘接剂。

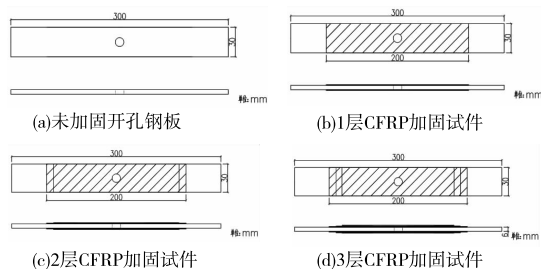


图 1 试件尺寸和构造

1.2 试验设备

试验在四川大学建筑与环境学院的岛津万能试验机(型号为 AG-Xplus 100 kN)上进行,如图 2 所示,加载速率统一控制为 2 mm/min,试验机每 0.01 s 自动记录一次数据,所有试件均连续加载直至破坏。选用东华 DH3816 应变箱进行应变片数据采集。在试件中间开孔位置安装一个标距 50 mm 的 SSG50-10 引伸计测量拉伸位移。

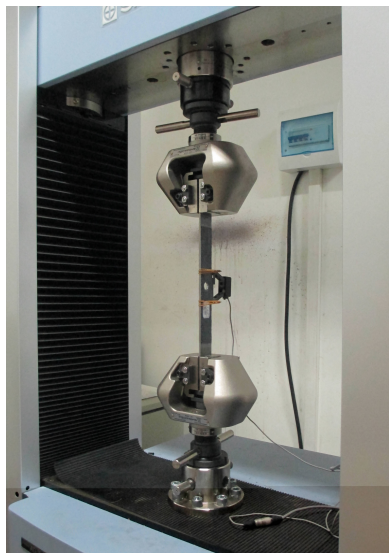


图 2 进行中的单轴拉伸试验

1.3 试验材料和参数

3 mm 钢板和 6 mm 钢板分别对应规范 GB/T700^[14]和 GB/T1591^[15]中对应的等级为 Q235 和等级为 Q345 的钢材,由拉伸试验测得钢材应力-应变曲线,如图 3 所示。钢板使用激光切割开孔。CFRP 布采用目前市场上常用的日本东丽 UT70-30 型 CFRP 布,作为一种脆性材料,CFRP 没有明显的屈服点,在受拉断裂前保持线

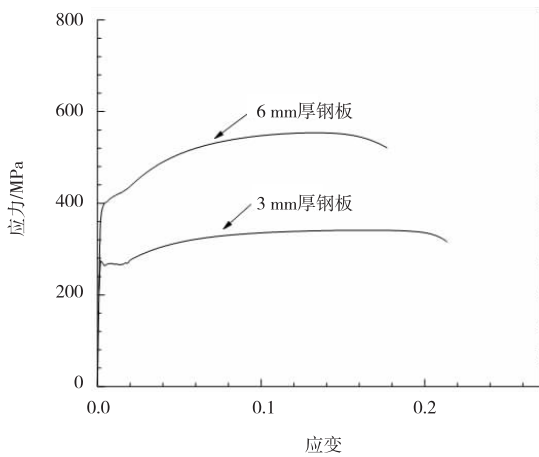


图 3 钢材应力 - 应变曲线

弹性。钢材和 CFRP 布的弹性模量根据产品规格说明取 210 Pa 和 252 GPa。Sikadur 330 结构加固环氧粘接胶是瑞士的西卡公司生产的一种高强度渗入型环氧树脂粘着

剂,主要用于粘贴 CFRP,具有良好的触变性和机械强度,其主要力学性能参数根据产品说明书采用^[16]。各个材料的基本力学性能见表 1

表 1 试验材料的力学性能

材料类别	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa	设计厚度 /mm
Sikadur 330	—	30	4.5	—
UT70 - 30	—	4216	252	0.167
Q235 钢(3mm)	272	341	210	3
Q345 钢(6mm)	388	553	210	6

试件编号见表 2。试件编号记为 $S_x - CDyL$,其中 x 表示钢板的厚度,CD 表示钢板两侧均使用 CFRP 补强加固, yL 表示 CFRP 布的层数。例如, $S_3 - CD1L$ 表示 3 mm 厚钢板开孔试件使用一层 CFRP 双侧加固。

表 2 试件参数及实验结果

试件编号	钢板厚度	钢板开孔直径	CFRP 层数	试件数量	破坏模式	K_b
S6 - C0	6	12	0	2	I	0.65
S6 - CD1L	6	12	1	2	II	0.77
S6 - CD2L	6	12	2	2	III	0.81
S6 - CD3L	6	12	3	2	III	0.85
S3 - C0	3	12	0	2	I	0.80
S3 - CD1L	3	12	1	2	III	1.05
S3 - CD2L	3	12	2	2	IV	1.21

2 试验结果

2.1 试验现象

如图 4 所示,将试验中试件的破坏模式分为 4 类。模式 I:钢板从中部拉断,断口处有颈缩现象;模式 II:CFRP 全部被拉断,该模式或伴随局部由洞口开始的 CFRP 脱胶;模式 III:全部脱胶破坏,该模式或伴随局部纤维布残余粘借,模式 III 与模式 II 不同的是,最早的脱胶部位为碳纤维布两端;模式 IV:从未加固处断裂破坏。不同编号的试件的破坏模式见表 2。

模式 II 的破坏过程为:在钢板弹性阶段过后,开孔处钢板屈服,CFRP 一直承受荷载,CFRP 断裂后承载力骤降,之后钢板继续承载迅速断裂。在到达峰值荷载以前,可能在试件开孔处的应力较大部位发生局部的脱胶或 CFRP 断裂。在模式 II 中,可以认为此时钢板和 CFRP 布之间的结构胶具有足够的粘接强度,所以钢板

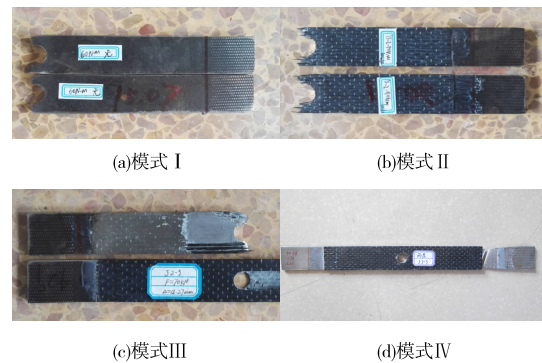


图 4 破坏模式分类

和 CFRP 能够共同承受荷载作用,直至截面面积最小的开孔部位发生破坏。编号为 $S_6 - CD1L$ 的试件破坏形态为模式 II。

模式 III 的破坏过程为:在钢板弹性阶段过后,开孔处钢板屈服,导致钢板与 CFRP 之间的相对位移迅速增大,CFRP 开始从两端向中间脱胶,脱胶至开孔处后 CFRP 不受力,曲线骤降,之后钢板承受拉力直

至受拉破坏。在模式Ⅲ中,可以认为此时钢板与结构胶的粘接强度小于 CFRP 与结构胶的粘接强度,且钢板与结构胶的粘接强度已经不能继续保证协同受力,因此在钢板界面发生脱胶。承载过程中,由于钢板的塑性变形与 CFRP 产生变形差,结构胶承受剪切力的作用,导致试件端部结构胶应力集中部位最先发生破坏,并逐渐向中部扩展。这种破坏模式较多存在于多层 CFRP 加固试件中,如编号为 S6 - CD2L 和 S6 - CD3L 的试件。

2.2 开孔对试件抗拉承载力的影响

根据应力集中系数手册^[17],对于不同的钢板宽度、厚度和开孔直径,孔口两侧的应力集中系数通常大于 2。为了研究开孔对钢板承载力的影响,使用开孔钢板试件的极限承载力除以未开孔钢板的极限承载力,计算了承载力系数 K_b ,见表 2。同时,计算开孔钢板的净截面面积与未开孔钢板横截面面积的比值,为 0.6。编号 S6 - C0 和 S3 - C0 的试件 K_b 的值分别为 0.65 和 0.8,该数值大于 0.6 的净截面面积率。因此,虽然开孔导致了应力集中,但是极限荷载下的名义应力却没有降低。这是因为,在开孔后局部应力集中区发生屈服后,孔口塑性区开始扩展,拉伸荷载可以继续增大。综上,净截面面积率可以作为计算开孔钢板和 CFRP 加固开孔钢板极限抗拉承载力的参照,如果已知未开孔钢板的极限抗拉承载力和开孔钢板的开孔情况,就可以保守估算开孔钢板或 CFRP 加固开孔钢板的最低极限抗拉承载能力。

2.3 应变分析

对编号 S3 - C0 的试件和编号 S3 - CD1L 的试件测试应变。应变片粘贴位置如图 5 所示。

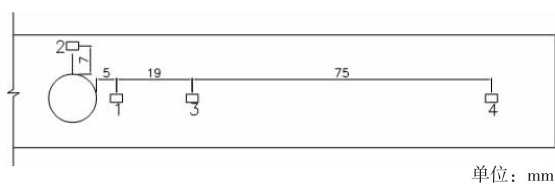


图 5 应变片位置示意

由图 6 测点应变与荷载关系曲线可知,未加固试件 S3 - C0 孔口处的测点 2 在荷载达到 20 kN 时,即表现出明显的屈服现象,应变迅速增大;而远离孔口的测点 3 和测点 4 的弹性阶段较长,直到荷载达到 30 kN 后才出现塑

性应变;垂直于孔口的测点 1 的应变一直维持在比较低的水平,并呈缓慢上升的趋势,其间因为塑性区扩展造成的应力应变重分布导致应变有一个下降段。

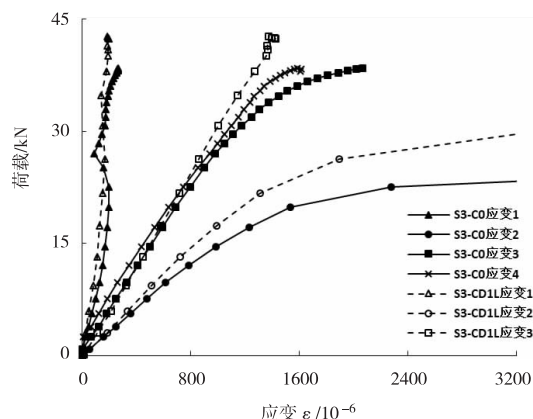


图 6 各测点应变 - 荷载曲线

由图 6 中 S3 - C0 试件和 S3 - CD1L 试件各测点应变数据对比,可知:(1) 在荷载相同时,双面 CFRP 加固试件孔口两侧的应变 2 低于未加固试件的应变 2;在两者均处于弹性阶段时,双面加固试件孔口处的应变仅为未加固试件的 40% 左右。(2) S3 - CD1L 试件距离孔口较远的测点 3 处由于 CFRP 加固作用没有屈服,而 S3 - C0 试件远离孔口的测点 3 发生了屈服现象。(3) S3 - C0 试件和 S3 - CD1L 试件沿孔口的测点 1 的应变均维持在较低的水平。

3 试验因素分析

以下研究 CFRP 层数和钢板厚度对试验结果的影响,将峰值荷载和位移、屈服荷载和位移、线性段刚度 $K1$ 和二次刚度列在表 3 中。具体地,定义引伸计夹持区段 0.2% 的残余应变对应的荷载为屈服荷载,屈服位移为屈服荷载对应的引伸计测得的位移值, $K1$ 为试件线性段刚度, $K2$ 为屈服荷载与极限荷载之间的割线刚度。

3.1 CFRP 层数的影响

随着 CFRP 布层数的增加,CFRP 层的刚度也逐渐增加。由表 2 中的破坏模式对比可知,S6 试件随着 CFRP 层数的增加,破坏类型由 I 至Ⅲ发生转变。说明随着 CFRP 层数的增加,试件逐渐发生 CFRP 层和钢板之间的粘接破坏,结构胶粘接强度对试件的承载能力影响显著。S3 试件钢板厚度较小,当一层 CFRP 布加固时,发生了模式Ⅲ的全部脱胶破坏,当两层 CFRP 加固时,则从钢板未加固处断裂破坏。

表 3 结果分析

试件编号	峰值荷载/kN	峰值位移/mm	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	K1/(kN/mm)	K2/(kN/mm)
S6 - C0	56.03	3.44	37.69	0.21	336.19	5.67
S6 - CD1L	66.18	1.46	43.73	0.23	326.34	18.31
S6 - CD2L	69.58	0.41	53.54	0.20	504.69	77.12
S6 - CD3L	72.44	0.37	54.07	0.21	509.07	112.01
S3 - C0	19.63	2.22	15.8	0.18	195.47	1.88
S3 - CD1L	25.8	0.86	22.25	0.17	321.03	5.11
S3 - CD2L	29.59	0.32	/	/	/	/

图 7 中的位移数据是使用引伸计采集到的数据。由图 7 可知,随着 CFRP 层数的增加,试件的极限承载力增大,而极限位移却减少。为了研究极限承载力和极限位移的变化趋势,分别以 S6 - C0 和 S3 - C0 试件为基准,计算系数 K 和系数 D。即

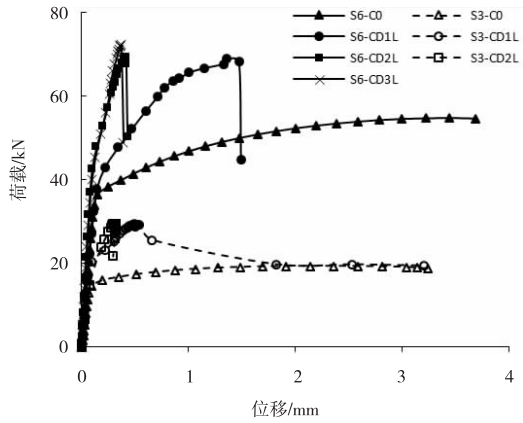


图 7 荷载 - 位移曲线

$$K_j = F_{Si-CDjL} / F_{Si-C0}$$

$$D_j = d_{Si-CDjL} / d_{Si-C0}$$

如图 8 所示,对于 3 mm 钢板和 6 mm 钢板的试件,随着 CFRP 层数的增加,极限荷载的增长可以看作是线性的增长。加固试件的位移随着 CFRP 层数的增加而减小,且 1 层 CFRP 时的减小趋势最大,2 层和 3 层 CFRP 时减小的趋势逐渐减小。

由表 3 可知,随着 CFRP 层数的增加,屈服位移基本不变,屈服荷载增加显著。如图 8(c) 所示,可视为 S6 试件屈服荷载随 CFRP 层数的增加线性增长。具体地,S6 试件加固后屈服荷载提高 16% 以上,S3 试件加固后屈服荷载提高 40%。

试件加固后线性阶段的刚度 K1 有所提高。对于 S6 试件,一层 CFRP 加固试件的 K1 没有增加,而二层、三层 CFRP 加固试件的刚度 K1 基本相同,为未加固试件的

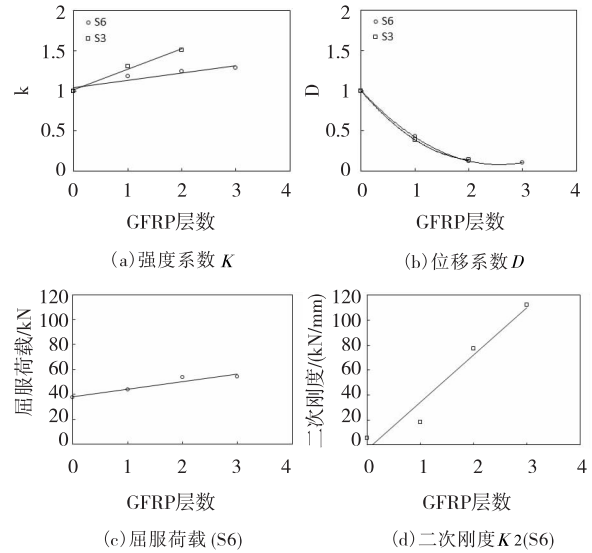


图 8 CFRP 层数对试件的影响

1.51 倍,由表 2 可知,CFRP 材料的弹性模量比钢板大,钢板表面粘贴 CFRP 共同受力能够增大试件的弹性刚度,随着 CFRP 布层数的增加,CFRP 层抗拉刚度增大,提高了 CFRP 层与钢板的刚度比,使试件线性刚度的增加更加明显。对于 S3 试件,一层 CFRP 加固试件的 K1 就已经有了显著的增加,为未加固试件的 1.64 倍。

如图 7 和图 8(c) 所示,CFRP 加固试件的二次刚度 K2 增加显著,可认为 S6 试件二次刚度随 CFRP 层数的增加线性增长。此外,对于 S6 试件,编号 S6 - C0 的试件和编号 S6 - CD1L 的试件其屈强比约为 0.66,编号 S6 - C0 的试件和编号 S6 - CD1L 的试件其屈强比约为 0.75,说明较低层数的 CFRP 加固使试件拥有更充足的强度储备。

3.2 钢板厚度的影响

CFRP 对开孔钢板的加固具有显著提高极限承载力和减小极限位移的作用,但是不同厚度的钢板,加固作用又有区别,主要原因是 CFRP 层与钢板的刚度比不同。由表 3 中的数据可得:1 层 CFRP 加固极限荷载比未加

固试件提升 31% ,2 层 CFRP 加固极限荷载比未加固试件提升 51%。而 6 mm 开孔钢板使用 CFRP 加固时,1 层 CFRP 加固试件极限荷载比未加固试件提升 18% ,2 层 CFRP 加固试件极限荷载比未加固试件提升 24%。可以看出,同等层数的 CFRP 加固情况下,3 mm 开孔钢板极限荷载的提升幅度更大。这是因为 CFRP 具有很大的弹性模量和抗拉强度,越薄的钢板厚度匹配越厚的 CFRP 层数,则 CFRP 和钢板的刚度比越大, K_1 值将显著增大。编号 S3 - CD2L 的试件发生了未加固部位的破坏,说明此时加固后试件的开孔薄弱部位的强度已经强于未加固部位,加固效果较好。

4 结 论

采用中心开孔钢板 CFRP 加固单轴拉伸试验,讨论了 CFRP 层数和钢板厚度对开孔钢板承载力的影响。通过在试件钢材表面和 CFRP 表面粘贴应变片的方法测量试件在单轴拉伸荷载下各关键部位的应变值,分析了加载过程中未加固试件和单层 CFRP 双面加固试件表面各点的应变变化特征。得出以下结论:

(1) CFRP 加固开孔钢板在单轴拉伸荷载作用下有四种典型的破坏形态,破坏形态与 CFRP 的层数以及 CFRP 与钢板之间结构胶的粘接强度有关。

(2) 虽然开孔导致了应力集中,但由于孔口塑性区的扩展,导致极限荷载下的名义应力却没有降低。因此可以通过净截面面积率保守估算开孔钢板或 CFRP 加固开孔钢板的最低极限抗拉承载能力。

(3) 双面加固试件孔口处的应变低于相同荷载作用下未加固试件的应变,弹性阶段双面加固试件孔口处的应变仅为未加固试件的 40% 左右。相同荷载作用下,距离孔口较远的测点处由于 CFRP 加固作用没有屈服,而未加固试件远离孔口处的测点发生了屈服现象。

(4) 随着 CFRP 层数的增加,试件的极限承载力呈线性增大,而极限位移却减少。

(5) 相同层数的 CFRP 加固下,随着钢板厚度的增加,CFRP 与钢板的刚度比减小,加固效果降低。

参 考 文 献:

[1] Wang Z Y, Wang Q Y. Fatigue strength of CFRP

strengthened welded joints with corrugated steel plates [J].Composites Part B:Engineering,2015,72:30-39.

[2] YOU X,WANG Z Y,WANG Q Y,et al.Effect of shot blasting on fatigue strength of Q345B steel plate with a central hole[J].Metals,2017,7(12):51701-51710.

[3] 张宁,王志宇,付磊,等.CFRP 加固受拉钢板的研究进展[J].四川理工学院学报:自然科学版,2016,29(1):64-70.

[4] 杨勇新,岳清瑞,彭福明.CFRP 布加固钢结构的黏结性能研究[J].土木工程学报,2006,39(10):1-5.

[5] 伍希志,任会礼,钟懿.基于粘聚力理论的 CFRP 加固钢板剥离机理研究[J].固体力学学报,2015,36(3):197-204.

[6] 马建勋,宋松林,赖志生.粘贴 CFRP 布加固钢构件受拉承载力试验研究[J].工业建筑,2003,33(2):1-4.

[7] 李耘宇,王言磊,欧进萍.FRP/钢复合板单轴拉伸性能试验研究[J].工业建筑,2013,43(S):80-83.

[8] BOCCIARELLI M,COLOMBI P.Elasto-plastic debonding strength of tensile steel/CFRP joints[J].Engineering Fracture Mechanics,2012,85:59-72.

[9] BROWN J D,LUBITZ D J,CEKOV Y C,et al.Evaluation of influence of hole making upon the performance of structural steel plates and connections[R].Drilling,2007.http://www.utexas.edu/research/ctr/pdf_reports/0_4624_1.pdf.

[10] GARCIA T,CICERO S,IBÁÑEZ F T,et al.Fatigue Performance of thermally cut bolt holes in structural steel S460M[J].Procedia Engineering,2015,133:590-602.

[11] YILBAS B S,AKHTAR S S,KELES O.Laser cutting of small diameter hole in aluminum foam[J].International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2015,79(1-4):101-111.

[12] 张宁,岳清瑞,佟晓利,等.CFRP 布加固修复钢结构粘界面受力性能试验研究[J].工业建筑,2003,33(5):71-80.

- [13] COLOMBI P, POGGI C. Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates [J]. *Construction & Building Materials*, 2005, 20(1): 22-33.
- [14] GB/T700-2006, 碳素结构钢[S].
- [15] GB/T1591-2008, 低合金高强度结构钢[S].
- [16] Sika 公司(西卡)材料汇总[EB/OL]. [2018-01-05]. <http://www.cngzdg.com/sika.htm>
- [17] 殷启华, 胡英敏, 黄海珠, 等. 应力集中系数手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.

Study on Static Mechanical Properties of CFRP Reinforced Open-Hole Steel Plate

JIANG Feng^{1,2}, SHI Yalong^{1,2}, WANG Qingyuan^{1,2,3}

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Key Laboratory of Deep Underground Science and Engineering (Ministry of Education), Chengdu 610065, China;

3. Chengdu University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In this paper, the open-hole steel plate with 6mm thick is strengthened by 1-3 layers of CFRP, while the open steel plate with 3mm thick is strengthened by 1-2 CFRP. The effect of CFRP reinforcement layer number and steel plate thickness on the perforated steel plate is studied by the uniaxial tensile test. The test results show that with the increase of CFRP number, the ultimate bearing capacity of specimens increases linearly, while the ultimate displacement decreases. And the reinforcement effect of CFRP is different from the thickness of steel plate. In addition, the key parts on steel and CFRP of the surface of specimens have been measured the strain values under uniaxial tensile loads, and the transmission mechanism between the steel and CFRP under single CFRP double side reinforcement is studied.

Key words: open-hole steel plate; CFRP reinforcement; the number of CFRP layers; thickness of steel plate; force transfer mechanism