

基于双剪试验 CFRP-混凝土界面黏结性能影响因素研究

孙家国^{1,2}, 谷艳玲^{1,2}, 尹秋雨¹

(1.武夷学院土木工程与建筑学院, 武夷山 354300; 2.徐州工业职业技术学院, 221140)

摘要:通过双面剪切试验设计了九组试验方案,以 CFRP 黏结长度、黏结宽度、黏贴层数三个因素为变量,根据 CFRP 应变、黏结应力的变化规律,研究了 C30 混凝土试件和碳纤维片材界面的黏结性能,以及在各级荷载作用下沿黏结长度的分布情况,分析了 CFRP-混凝土界面的有效黏结长度。结果表明,随着 CFRP 黏结厚度、长度、宽度的增大,试件的极限荷载和应变均明显增加,但对初始剥离荷载和应变的影响不大;当继续增加荷载时,应力传递区域的长度不断加大,呈现动态变化趋势。

关键词:CFRP; 混凝土; 黏结应力; 应变

Abstract: According to the changing rule of the CFRP strain and bond stress, 9 groups of schemes were designed by taking CFRP bond length, bond width and paste layer as the variables through double-sided shear test to explore bond properties of the C30 concrete specimen and carbon fiber sheet interface. Meanwhile, the effective bond length of CFRP-concrete interface was analyzed by observing the distribution of the bond length under load at all levels. The results show that the ultimate load and strain of the specimen increase obviously with the increase of the thickness, length and width of CFRP, but it has little effect on the initial peeling load and strain. As the load continues to increase, the length of the stress transfer area also increases and shows a dynamic trend.

Key words: CFRP; Concrete; Bond stress; Strain

中图分类号:TU375 文献标识码:A 文章编号:1000-4637(2018)09-77-04

0 前言

碳纤维增强复合材料(CFRP)加固混凝土结构技术是用浸渍树脂将 CFRP 片材粘贴在结构的表面进行加固,从而提高构件的力学性能^[1]。CFRP 修复加固混凝土技术与传统方法相比,其优点主要包括强度高、体积小、施工方便和耐腐蚀性好等^[2]。近年来,该技术已经广泛应用于混凝土结构修复补强领域,加固效果显著。

CFRP 与混凝土结构共同工作的基础是两者之间良好的黏结性能^[3],如果黏结性能满足不了要求,就会导致黏结界面发生剥离破坏,既造成混凝土加固强度降低,又在经济上产生了浪费,因此,研究 CFRP-混凝土界面黏结性能的影响因素十分必要。目前,很多国内外学者已经开展了 CFRP-混凝土界面黏结性能研究,相关研究结果表明,CFRP 与混凝土界面的黏结破坏主要存在两种情况,一种是在混凝土试件 1~2 mm 表层发生剥离,另一种是在混凝土

黏结界面区域破坏,其根本原因是黏结应力快速集中,而关键影响因素主要包括 CFRP 黏结长度、宽度、刚度(厚度)等^[4]。

本文以 CFRP-混凝土界面黏结性能为研究内容,采用 CFRP-混凝土双剪试验,通过测定加载过程中 CFRP-混凝土界面的应力应变变化以及破坏时的极限荷载,找出 CFRP 粘贴长度、宽度和层数对黏结性能的影响规律。

1 试验方案

1.1 原材料

(1)混凝土原材料

水泥:P·O 42.5 级水泥;粗骨料:福建当地地产石灰岩碎石,最大粒径 ≤ 20 mm;细骨料:福建当地河砂,细度模数 2.55;外加剂:FDN-C 聚羧酸高效减水剂;水:自来水。

(2)碳纤维片材

采用一级碳纤维布,品牌是 SKO(赛克),由上海某公司生产,其主要力学参数见表 1。

(3)浸渍树脂

采用 HT-403 聚氨酯树脂。

基金项目:福建省自然科学基金项目(2017J01717);国家级大学生创新创业训练计划项目(201610397012)。

表1 碳纤维片材的主要力学性能参数

| 表观密度 /(g/m ²) | 拉伸强度 /MPa | 弹性模量 /GPa | 延伸率 /% | 名义厚度 /mm |
|------------------------------|--------------|--------------|-----------|-------------|
| 200 | 3 895 | 287 | 1.55 | 0.111 |

1.2 试验设计

采用碳纤维片材-混凝土双面剪切试验,混凝土试件尺寸为150 mm×150 mm×150 mm,其强度等级均为C30。试验时为了增加CFRP-混凝土界面的黏结性能,先打磨平整试件的两个相对侧面,然后把一整条CFRP片材的两端分别粘贴在打磨过的试块表面,其中一面是试验测试面,另一面必须进行锚固处理,保证混凝土试件能够进行双面剪切试验。试验变量为CFRP黏结长度(80 mm、100 mm和120 mm)、CFRP黏结宽度(50 mm、100 mm)、CFRP黏结厚度,分别为0.111 mm(一层)、0.222 mm(二层)。根据试验变量一共设计九组试验方案,编号分别为S1~S9,共27个试块,试验方案见表2。主要量测不同加载条件下界面应变、应力变化,以及CFRP-混凝土界面极限承载力。

表2 CFRP混凝土试验方案

| 试件编号 | 黏结长度 /mm | 黏结厚度 /mm | 黏结宽度 /mm | 混凝土 强度等级 |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| S1 | 80 | 0.111 | 50 | C30 |
| S2 | 100 | 0.111 | 50 | C30 |
| S3 | 120 | 0.111 | 50 | C30 |
| S4 | 80 | 0.222 | 50 | C30 |
| S5 | 100 | 0.222 | 50 | C30 |
| S6 | 120 | 0.222 | 50 | C30 |
| S7 | 80 | 0.111 | 100 | C30 |
| S8 | 100 | 0.111 | 100 | C30 |
| S9 | 120 | 0.111 | 100 | C30 |

1.3 加载装置和量测系统

加载装置采用HCT106D-9微机控制电液伺服万能试验机,在加载区安装专用上下夹具,见图1。



图1 试验加载装置

试验时碳纤维片材套着半圆形加载钢块连接下部夹具,混凝土试块放在上部夹具中,采用位移控制连续加载方式,同时控制加载速度为0.5 mm/min。开始加载时,通过横梁向下移动,将外部荷载由夹具施加给碳纤维片材。

通过量测系统自动采集相关试验数据,其中拉力由力传感器量测,应变由电阻应变片测量。为了考察CFRP-混凝土界面的应变分布情况,将5个应变片粘贴在CFRP片材表面,其间距沿长度方向按25 mm等距离布置,加载端和自由端边界上分别预留25 mm的非黏结区,在上夹具持荷柄处安装力传感器,测量碳纤维片材上的拉力。

2 试验结果分析

2.1 破坏过程

由试验可见九组试件的破坏过程比较相近,基本都是混凝土试件基体拉剪破坏模式,所有试件黏结性能的试验结果见表3。

表3 试验结果

| 试件编号 | 极限荷载 /kN | 黏结应力 /MPa | 应变 /μ ϵ |
|------|-------------|--------------|---------------------|
| S1 | 8.0 | 3.90 | 3 920 |
| S2 | 10.7 | 4.01 | 4 370 |
| S3 | 12.8 | 3.60 | 4 650 |
| S4 | 13.5 | 5.16 | 2 744 |
| S5 | 14.7 | 4.76 | 3 059 |
| S6 | 17.2 | 4.15 | 3 255 |
| S7 | 10.1 | 3.19 | 4 782 |
| S8 | 12.6 | 3.18 | 5 245 |
| S9 | 14.8 | 2.82 | 5 587 |

以S2试件为例,选择10个荷载等级为变量,找出界面应变分布状况随荷载增加的变化规律,具体见图2。由图2可见,当加载数值较低时(小于极限荷载的38%),碳纤维片材的应变值较小,大约为1 000 μ ϵ 左右,传力区域较短,此时加载端附近局部黏结胶有时容易开裂,偶尔会发出轻微“啪”的撕裂声;随着荷载水平的增加(在极限荷载38%~65%的范围内),靠近加载端的碳纤维片材应变迅速增大,可达到3 000 μ ϵ 左右;如果荷载水平继续增加(在极限荷载65%~100%的范围内),在加载端附近应变变化梯度逐渐变小,应变分布在粘贴区域内逐渐呈现饱满趋势,同时此区域黏结应力也开始降低;当荷载加至极限荷载10.7 kN时,加载端应变达到4 370 μ ϵ ,伴随着“嘭”一声响声,碳纤维片材从混凝土试件上剥离,多数会粘带着混凝土薄层一起脱落,一般厚度约1~2 mm左右。观察试验可见,在

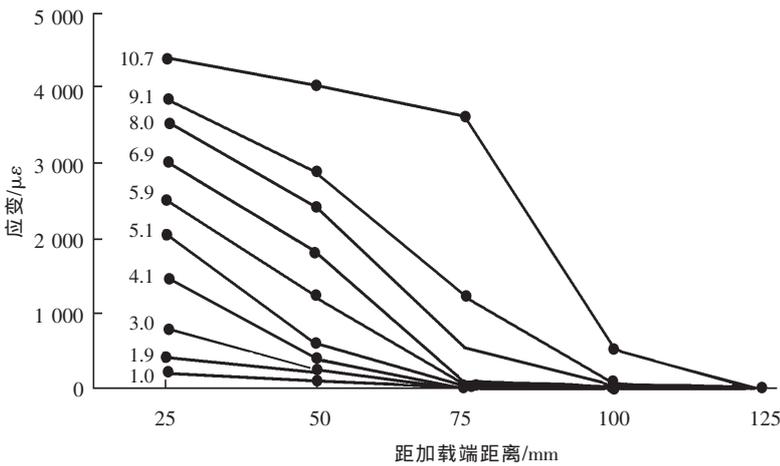


图2 S2试件应变发展情况

混凝土试件破坏时,界面剥离区周围未出现较宽裂缝,破坏前也没有明显预兆。同时,试验中发现,如果加载到某一水平不变时,碳纤维片材的应变也非固定,而是呈现逐渐变化的趋势。

2.2 CFRP表面应变的分布

由图2可见,10条曲线的形状比较相似,显示碳纤维片材的应变发展比较平稳。加载初期,由于黏结应力的传递区域非常短,仅加载端的应变有所增加,而相邻点的应变基本没有变化,此时黏结应力的传递区域主要集中在加载端附近,纤维应变分布图呈二次曲线形状;随着荷载水平的增加,应变曲线由下凹形转为上凸形状,此变化拐点出现在第五级加载点(5.9 PN)上。继续加载后,除加载端以外测点的应变陆续开始增加,CFRP-混凝土界面黏结应力也逐步向自由端方向传递。但是,自由端测点(距加载端125 mm)应变值在加载过程中无变化,而邻近自由端测点(距加载端100 mm)应变略有增加。因此,本试验有效黏结长度应该在75~100 mm之间。

2.3 黏结应力的变化

以试件S2为例,根据10级荷载作用下黏结应力的发展规律,以距加载端距离为横坐标绘制了黏结应力和极限荷载的关系图,见图3。由图3可见,开始加载时,加载端附近范围界面的黏结应力较大,而其他区域的应力都很小,说明在加载初期,黏结应力的峰值出现在加载端,而距加载端位置较远的区域,碳纤维片材承受的荷载相对比较小^[5]。随着荷载水平的增加,黏结应力的最大值位置不断向自由端方向延

伸,在接近破坏荷载的65%(6.9 PN)左右时,加载端附近的黏结应力逐渐减小,而加载端相邻测点的应力增大,在接近有效黏结长度时黏结应力减小。试验观察可得,黏结应力突变的拐点是碳纤维片材开始剥离之时,此时剥离区域的黏结应力突然增大。

2.4 黏结应力变化机理分析

试验研究表明,CFRP-混凝土通过浸渍树脂紧密结合在一起,在荷载作用下共同抵抗外力,受力变形协调一致^[6]。当荷载水平较小时,CFRP-混凝土界面黏结应力和碳纤维片材的应力随外力的增大而变大,在加载端处出现界面黏结应力最大值,其应力值沿界面粘贴长度方向逐渐减小。当荷载增加到破坏荷载的55%(5.9 PN)左右时,荷载与应变呈现出非线性关系,此时混凝土试件主应力的最大值接近抗拉强度,在界面薄弱处产生一些细微裂缝,同时使CFRP-混凝土界面的黏结应力重新分布。随着荷载水平继续增大,界面黏结应力不再提高,其峰值位置逐渐转向自由端,表明界面的微裂缝区域正在逐渐向自由端扩展^[7]。而后,当加载达到极限荷载10.7 PN时,加载端附近界面产生明显剥离,并且向着自由端区域扩展,当CFRP-混凝土界面剥离面积增加到一定程度时,就会引发脆性剥离破坏^[8]。

力随外力的增大而变大,在加载端处出现界面黏结应力最大值,其应力值沿界面粘贴长度方向逐渐减小。当荷载增加到破坏荷载的55%(5.9 PN)左右时,荷载与应变呈现出非线性关系,此时混凝土试件主应力的最大值接近抗拉强度,在界面薄弱处产生一些细微裂缝,同时使CFRP-混凝土界面的黏结应力重新分布。随着荷载水平继续增大,界面黏结应力不再提高,其峰值位置逐渐转向自由端,表明界面的微裂缝区域正在逐渐向自由端扩展^[7]。而后,当加载达到极限荷载10.7 PN时,加载端附近界面产生明显剥离,并且向着自由端区域扩展,当CFRP-混凝土界面剥离面积增加到一定程度时,就会引发脆性剥离破坏^[8]。

2.5 黏结性能的影响分析

2.5.1 黏结长度

本试验碳纤维片材的黏结长度分别为80 mm、100 mm、120 mm。由表2可知,在相同混凝土强度等级前提下,不同的碳纤维片材黏结长度对界面黏

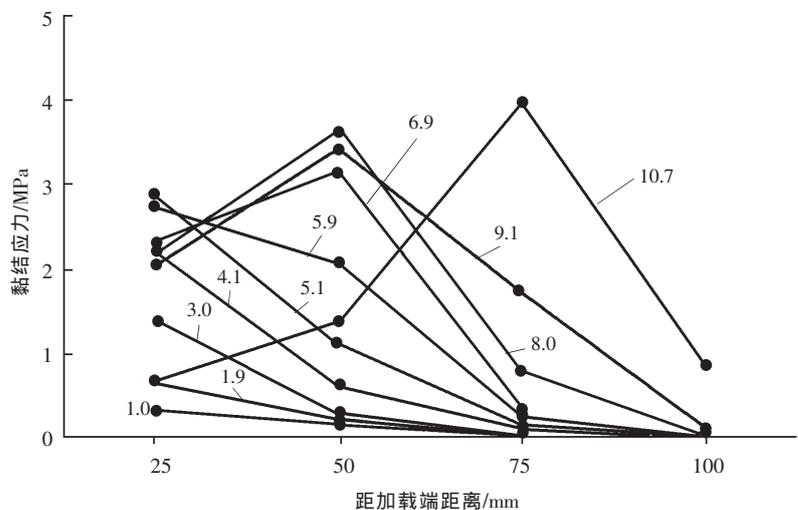


图3 S2试件黏结应力发展情况

结应力的影响程度不同,为观察黏结长度对黏结应力的影响,以试件 S2 为例绘制图 2。由图 2 可见,随着测点与加载端位置距离的增加,试件界面应变值的变化逐渐变缓;当测点与加载端位置距离达到一定值后,试件界面应变值就基本趋于平稳,即试件界面的黏结应力基本降至零。这说明 CFRP-混凝土界面存在一个“有效黏结长度”,在长度区域内黏结应力发生变化,超过此区域,极限荷载不再改变^[9]。本试验中,当碳纤维片材黏结宽度为 50 mm,试件发生剥离破坏时,有效黏结长度为 75~100 mm。

2.5.2 粘贴宽度和厚度

为观察黏结量对黏结应力的影响,以碳纤维片材黏结长度为横坐标,绘制了不同的粘贴宽度、厚度对极限荷载影响的关系,见图 4 和图 5。由图 4 可以看出,S8 试件(粘贴宽度为 100 mm)同 S2 试件(粘贴宽度为 50 mm)相比,其极限荷载增加了 17.8%。另外,由图 5 可以看出,当 S2 试件粘贴 2 层(0.222 mm)时,比粘贴 1 层(0.111 mm)的极限荷载要增加 37.4%,可见,CFRP 的粘贴层数和宽度对界面黏结应力的影响很大。研究表明,CFRP 弹性模量的大小对界面黏结应力影响明显,弹性模量越大,界面黏结应力也随之提高^[10],而增加粘贴层数,就是增大了碳纤维片材的弹性模量,也就提高了界面黏结应力的峰值。但是,应力峰值提高的幅度同粘贴

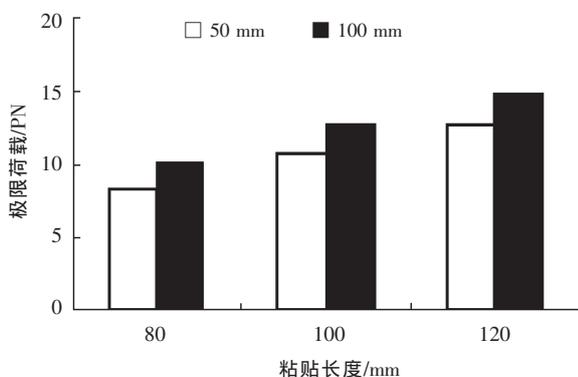


图4 粘贴宽度对极限荷载的影响

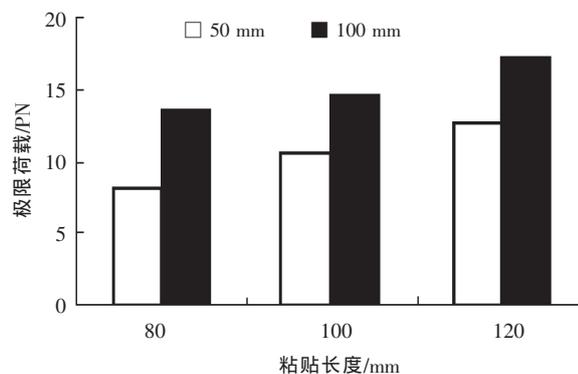


图5 粘贴厚度对极限荷载的影响

层数不成倍数增长关系,不宜采用过多粘贴层数的方式提高黏结应力,本文建议,混凝土构件黏结碳纤维片材的层数不宜超过3层。

3 结论

(1)CFRP-混凝土界面黏结应力仅在“有效黏结长度”范围内变化,超过此区域后,试件的极限荷载就不再提高,本研究的“有效黏结长度”约为80 mm左右。

(2)碳纤维片材黏结长度越大,混凝土试件破坏时的极限荷载增大,但是,黏结长度对初始剥离荷载与应变影响不大。

(3)当增加碳纤维片材粘贴量(厚度和宽度)时,可以提高混凝土构件的力学性能,但是增加碳纤维片材的粘贴层数和宽度,对黏结应力峰值的提高幅度不成倍数增长关系。

参考文献:

- [1] 张迪,张家玮,李朋亚,等.基于双面剪切试验的CFRP-混凝土界面黏结-滑移关系研究[J].南阳理工学院学报,2016(3):83-86.
- [2] 方恩权,刘桂凤,张雷顺.CFRP-混凝土界面黏结性能试验研究[J].建筑材料学报,2007(2):32-35.
- [3] 黎雅乐,高建勇,罗敏,等.CFRP布加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2017(4):51-53.
- [4] 郭樟根,孙伟民.FRP与混凝土界面黏结性能的试验研究[J].南京工业大学学报,2006,28:37-42.
- [5] 冯展磊,顾祥林.碳纤维布与混凝土间黏结性能试验研究[J].结构工程师,2008,24:110-114.
- [6] 王占桥,高丹盈.碳纤维片材与混凝土有效黏结长度的试验研究[J].四川建筑科学研究,2009,35(1):36-39.
- [7] Zhen yu WANG,Dai yu WANG,Da gang LU,et al.Stress-strain model for moderate-confined reinforced concrete square columns [J].Journal of Building Structures,2011,32(4):101-109.
- [8] 孙家国,谷艳玲.大掺量粉煤灰混凝土抗压强度影响分析[J].混凝土,2013(11):97-100.
- [9] Xiao bing HE,Bo YAN,Qiang SHEN.Interface shear performance of interply hybrid GFRP/CFRP composite and concrete [J]. Journal of Building Materials,2013,16(6):1004-1011.
- [10] Pei yan HUANG, Xiao hong ZHENG,Hao ZHOU,et al. Fatigue behavior CFRP-concrete interface [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012,40(10):84-89.

收稿日期:2018-04-16

作者简介:孙家国(1968-),男,教授、硕士。

通讯地址:徐州市鼓楼区襄王路1号

联系电话:15959777466

E-mail:sunjiaguo1968@163.com