

文章编号:1007-9629(2023)01-0045-09

# 基于 DIC 的混凝土嵌入式 BFRP 筋拔出行为及黏结性能研究

孙亚楠<sup>1</sup>, 金祖权<sup>1,\*</sup>, 逢博<sup>1</sup>, 朱德举<sup>2</sup>

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 基于数字图像相关(DIC)技术对混凝土内嵌入式玄武岩纤维增强聚合物(BFRP)筋的界面黏结性能及其拔出过程开展了研究. 采用数字图像采集处理技术获取了 BFRP 筋从混凝土表面拔出过程的应变场演变数据并计算了界面的黏结应力. 结果表明: BFRP 筋从混凝土表面拔出过程中, 黏结应力与应变沿筋材呈现对称分布; 随着拉拔荷载的增加, 界面黏结应力、应变均不断增大, 养护龄期为 7 d 的 C50 混凝土与 BFRP 筋的黏结界面在靠近加载端区域的最大应力和应变分别为 3.3 MPa、0.020; 与淡水河砂混凝土相比, 当养护龄期达到 28 d 时, 相同水胶比下海水海砂混凝土与 BFRP 筋界面黏结处的最大应力提高了 19% 左右; 延长养护龄期可有效增大混凝土与 BFRP 筋的界面黏结应力; 界面黏结应力和应变沿加载端到自由端呈线性下降趋势; 拔出后加载端混凝土损伤严重, BFRP 筋黏结段呈现部分纤维拉断剥离现象.

**关键词:** 数字图像相关; BFRP 筋; 界面黏结; 海水海砂混凝土

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.01.007

## Pulling-out Process and Interfacial Bonding Performance of BFRP Bar in Concrete Based on DIC

SUN Yanan<sup>1</sup>, JIN Zuquan<sup>1,\*</sup>, PANG Bo<sup>1</sup>, ZHU Deju<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Interfacial bonding performance and pulling-out process of basalt fiber reinforced polymer(BFRP) bars in concrete were studied by digital image correlation(DIC). The image acquisition and digital image correlation technique were used to obtain the strain field evolution data of BFRP bars during pulling-out from concrete surface and calculate the bonding stress. Test results show that the bonding stress-strain is symmetrically distributed along the BFRP bars during the pulling-out process. With increasing pulling load, the interfacial bond stress and strain increases continuously. The maximum stresses and strains at the adhesion interface between C50 concrete and BFRP bars in the region near the loading end with the curing age of 7 d are 3.3 MPa and 0.020, respectively. Compared with freshwater river sand concrete of the same water-binder ratio, the maximum stress of bonding interface between seawater sea sand concrete and BFRP bars increases by about 19% with the curing age of 28 d. Extending the curing age effectively increases the interfacial bonding strength between concrete and BFRP bars. The interfacial bonding stress and strain decrease linearly along the loaded end to the free end, and the concrete at the loaded end is severely damaged after pulling-out, and the bonded section of BFRP bars shows partial fiber pulling-out and peeling phenomena.

收稿日期: 2021-11-21; 修订日期: 2022-02-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1806225, 52078259); 泰山学者工程专项经费资助项目(ts20190942)

第一作者: 孙亚楠(1993—), 女, 山东滨州人, 青岛理工大学博士生. E-mail: syn\_qut@163.com

通讯作者: 金祖权(1977—), 男, 四川南充人, 青岛理工大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: jinzuquan@126.com

**Key words:** digital image correlation(DIC); BFRP bar; interfacial bonding; seawater sea sand concrete

钢筋混凝土结构被广泛应用于海洋工程建设中,但海洋环境中高浓度氯离子导致混凝土中钢筋腐蚀速率迅速增加,结构快速失效;远海岛礁建设对海水、海砂等原材料的使用加剧了钢筋锈蚀问题,严重制约“海洋强国”与“一带一路”战略的实施<sup>[1-2]</sup>.纤维增强复合材料(FRP)具有高抗拉、高比强、耐腐蚀、抗疲劳等优异性能,可弥补氯盐环境下钢筋耐蚀性能不足的短板,近年来已被应用于海工混凝土结构<sup>[3-4]</sup>.

目前,国内外学者针对FRP筋增强混凝土结构的界面黏结性能已开展了广泛研究<sup>[5-6]</sup>.测试FRP筋与混凝土界面黏结性能常采用拉拔的方法,围绕FRP筋直径、肋间距、埋置长度、混凝土强度和保护层厚度等影响因素开展研究<sup>[7-8]</sup>.目前的黏结强度试验多采用力学试验机、采集应变仪和位移传感器结合的方式进行<sup>[9]</sup>,该方法局限于纵向应力与应变数据的单点采集与分析,难以实现对FRP筋及周围握裹浆体在拉拔过程中多点位的二维应变全过程实时监测,也无法直接获取FRP筋-混凝土多点位应变-时间与应变-检测位点的相关性数据.粘贴应变片看似简便,但在实际测量中很难获得准确结果,应变片在布置过程中不可能非常紧密,导致得到的剪切应变结果偏差较大.另外,混凝土材料组成随机分布,对测量获得的界面应变有很大影响.因此,用局部应变数据很难获得较为准确的黏结-滑移关系.毛风华等<sup>[9]</sup>基于有限元分析对FRP筋-混凝土黏结界面的应力分布及其变化开展研究,认为影响黏结应力的因素较复杂,有限元模拟所得黏结-滑移本构关系与实际情况存在一定的差异,仅凭借有限元分析难以准确地对其进行数值模拟.数字图像相关(DIC)技术是一

种新型的非接触式光学测量与计算方式,具有全场式、非接触、精度高以及操作便利等优点,能够对试件加载初期到后期破坏进行全过程监测,在材料拉伸、钢筋混凝土腐蚀等方面得到了应用<sup>[10-11]</sup>.通过DIC技术可获得材料受荷过程中全程位移与应变数据,能够记录界面脱黏过程更全面的信息,获得最易破坏区域,有效解决有限元理论分析与真实结果拟合失真的局限性问题.

本文基于DIC技术对嵌入式玄武岩纤维增强聚合物(BFRP)筋开展轴心单端拉拔试验,对其拔出全过程进行监测,并计算黏结界面位移、应变与应力,从而获取黏结界面任意位置处纵横向的应变场与应力场,为后续研究BFRP筋与混凝土的界面黏结性能以及滑移关系提供新的方法和试验基础.

## 1 试验

### 1.1 原材料及试验配合比

水泥采用P·I 52.5硅酸盐水泥;粗骨料为粒径5~20 mm连续级配的花岗岩;细骨料为河砂与海砂,细度模数分别为2.7、2.2;水为自来水(淡水)与海水.混凝土配合比及立方体抗压强度见表1.表1中,C代表淡水河砂混凝土,S代表海水海砂混凝土,编号后面的数字代表设计强度等级.筋材为江苏绿材谷新材料科技发展有限公司生产的直径为12 mm的BFRP筋,其力学性能见表2.

### 1.2 试验设计

依据不同强度等级(C30、C50、S30、S50)、不同养护龄期(7、28 d)设计8组试验共24个拉拔试件.考虑到DIC技术主要观测和计算试件表面变形,将长度700 mm、直径12 mm的BFRP筋以嵌入方式埋入

表1 混凝土配合比及立方体抗压强度

Table 1 Mix proportion and cubic compressive strength of concretes

Concrete	Mix proportion/(kg·m <sup>-3</sup> )					Cubic compressive strength/MPa	
	Cement	Sea sand/river sand	Gravel	Seawater/freshwater	Water reducing agent	7 d	28 d
C30	415.00	665.00	1 085.00	200.00	0	32.8	40.1
C50	462.00	645.00	1 096.00	176.00	1.44	48.2	57.3
S30	415.00	665.00	1 085.00	200.00	0	36.1	43.4
S50	462.00	645.00	1 096.00	176.00	1.44	49.4	58.2

表2 BFRP筋的力学性能

Table 2 Mechanical properties of BFRP bar

Effective diameter/mm	Cross-sectional area/mm <sup>2</sup>	Elastic modulus/GPa	Tensile strength/MPa	Ultimate tensile strain/%
12	113.04	61.05	1 405	2.56

尺寸为100 mm×100 mm×300 mm的混凝土长方体试件中,如图1所示.试件尺寸是在De Lorenzis<sup>[12]</sup>相关试验基础上进行改进选定的,由于表面嵌入的BFRP筋界面黏结强度较低,该尺寸能够防止混凝土在黏结区域未发生破坏时出现横向开裂破坏,并保

证试件不因混凝土的宽度而影响黏结区域的破坏形式.为了能够在单端轴心拉拔试验中较为准确地反映出表面内嵌BFRP筋与混凝土之间的界面黏结性能以及避免试验结果的离散,每组均制备3个试件,结果取平均值.

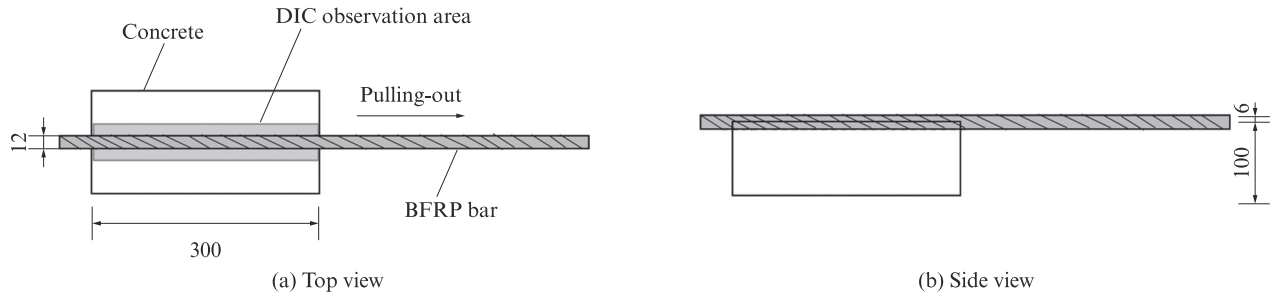


图1 拉拔试件示意图

Fig. 1 Schematic of pulling-out specimen(size: mm)

1.3 试验加载装置

采用天津市东丽区亚兴自动化试验厂生产的ML-3型锚杆拉拔仪,使用定制的夹具将BFRP筋夹紧,两端采用台钳将混凝土试件固定,保持千斤顶、夹具以及BFRP筋在同一水平线上,从而保证BFRP筋处于轴心受力状态,加载装置如图2所示.试验过程中采用手动加载方式,直至混凝土与BFRP筋界面产生劈裂、混凝土局部开裂或纤维筋拔出破坏时,则立即停止试验,记录此时的破坏拉力以及试件的最终破坏形态.

变,如图3所示.在图像测试区域上方,放置了2个立式LED光源以获得足够的图像对比度,摄像头与BFRP筋混凝土试件被固定在防震台上,在整个测试过程中没有移动.试件表面采用随机的散斑模式.通过软件VIC-2D操作系统对采集的照片进行处理,本截面的标定结果为0.15 mm/像素,计算选取区域内应变随时间的演化情况.

采用DIC技术测得试件全过程的应变场后,将黏结-滑移本构模型输入VIC-2D操作系统中得到全过程的应力场.目前,国内外的学者提出了多种FRP筋与混凝土界面黏结滑移的本构关系分析模型<sup>[14-16]</sup>.本文采用张望喜等<sup>[17]</sup>的模型.

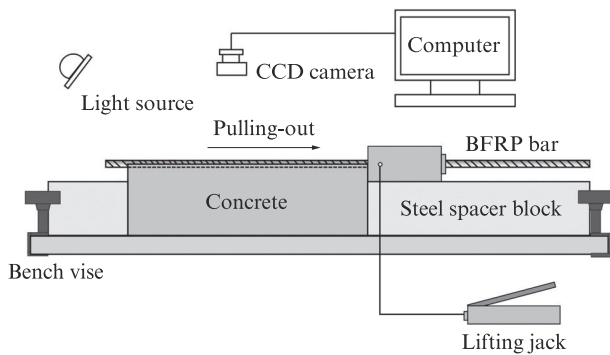


图2 拉拔试验加载装置示意图

Fig. 2 Schematic of pulling-out test device

1.4 BFRP筋拉拔过程中图像采集与本构模型选取

DIC是一种基于光学的全场表面位移和应变的测量方法.其基本原理是通过对变形过程中被测物体表面信息的搜索识别和相关计算,得到变形物体的位移应变信息<sup>[13]</sup>.在DIC测试中,安装了一个带有75 mm微距镜头的数码相机,该数码相机的分辨率为1 200像素×1 600像素,并提供256级灰度输出,图像采集频率为25帧/s.使用该相机对靠近拉拔端BFRP筋与混凝土黏结部分的矩形截面区域采集应

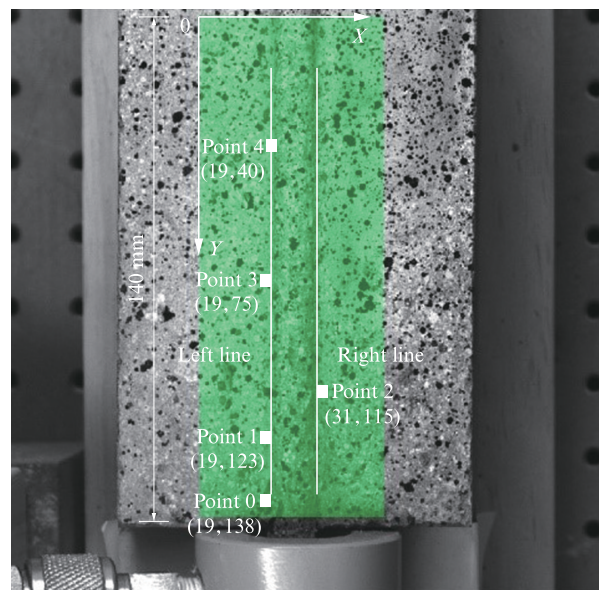


图3 BFRP筋与混凝土黏结界面应变分析区域  
Fig. 3 Area for strain analysis of bonding interface between BFRP bar and concrete

## 2 结果与分析

### 2.1 BFRP筋-混凝土界面应变场与应力场

对养护龄期为7 d的C30和C50试件进行拉拔试验,记录不同时刻对应的拉拔仪数显设备上的力值,并对BFRP筋及邻近混凝土区域的图像进行实时采集,通过数字图像计算获得BFRP筋-混凝土界面区应变场与应力场演变,结果如图4~7所示。

由图4(a)可见:当BFRP筋受拉承载40 s(拉拔荷载约为1.06 kN)时,养护7 d的C30试件中BFRP筋与混凝土黏结界面处已经有位移和变形产生,加载端部混凝土表面应变约为0.002;随着加载时间的延长(即拉拔荷载的增加),90 s之后BFRP筋与混凝土黏结界面处应变快速增加,混凝土与BFRP筋的黏结界面局部开裂;当加载至120 s时,黏结界面处的应变值达到最大,为0.010;应变在靠近加载端的附近区域先增大,沿着黏结长度方向由加载端向自由端传递,应变值逐渐减小。

由图4(b)可见:随着加载时间的延长,养护7 d的C30试件中BFRP筋与混凝土黏结界面的应力逐渐增大,在BFRP筋两侧呈现对称分布的状态;当加载至120 s时,靠近加载端的应力可达到0.8 MPa;沿加载端向自由端,应力逐渐减小,直至趋近于0;随着加载时间的延长,靠近加载端的应力会逐渐下降,这是因

为BFRP筋与混凝土之间的黏结界面被破坏。

为进一步分析拉拔过程中BFRP筋与混凝土黏结界面不同部位的应力、应变演变规律,在距离加固端不同位置处选取了5个点(见图3)进行分析,结果见图5。由图5可见:随着加载时间的延长,养护龄期为7 d的试件C30黏结界面上各点的应变、应力逐渐增大;在0~80 s时,各点的应变、应力增长幅度较为平缓;在80~90 s之后,应变、应力增长幅度显著增大;距离加载端较近的点0在120 s时应力达到最大值0.8 MPa,该点的应变最大值约为0.012;在远离加载端的点4处,应力最大值为0.1 MPa。

图6给出了养护龄期为7 d的试件C50黏结界面应变场与应力场演变。由图6可见:养护龄期为7 d的试件C50黏结界面应变场与应力场随加载时间的演变规律与试件C30相同;在20 s时其应力、应变均较小;在120 s时应变达到最大值0.020,应力最大值约为3.0 MPa。相比于C30混凝土,强度等级提升使得BFRP筋与C50混凝土界面黏结应力最大值增长了3.25倍。由于强度等级以及养护龄期的影响,与试件C30相比,C50混凝土与BFRP筋黏结界面的应变最大值出现在距离拔出端位置更近处。

同样,选取试件C50黏结界面处5个点(见图3)进行分析,结果见图7。由图7可见:随着加载时间的延长,养护龄期为7 d的试件C50黏结界面上各点的

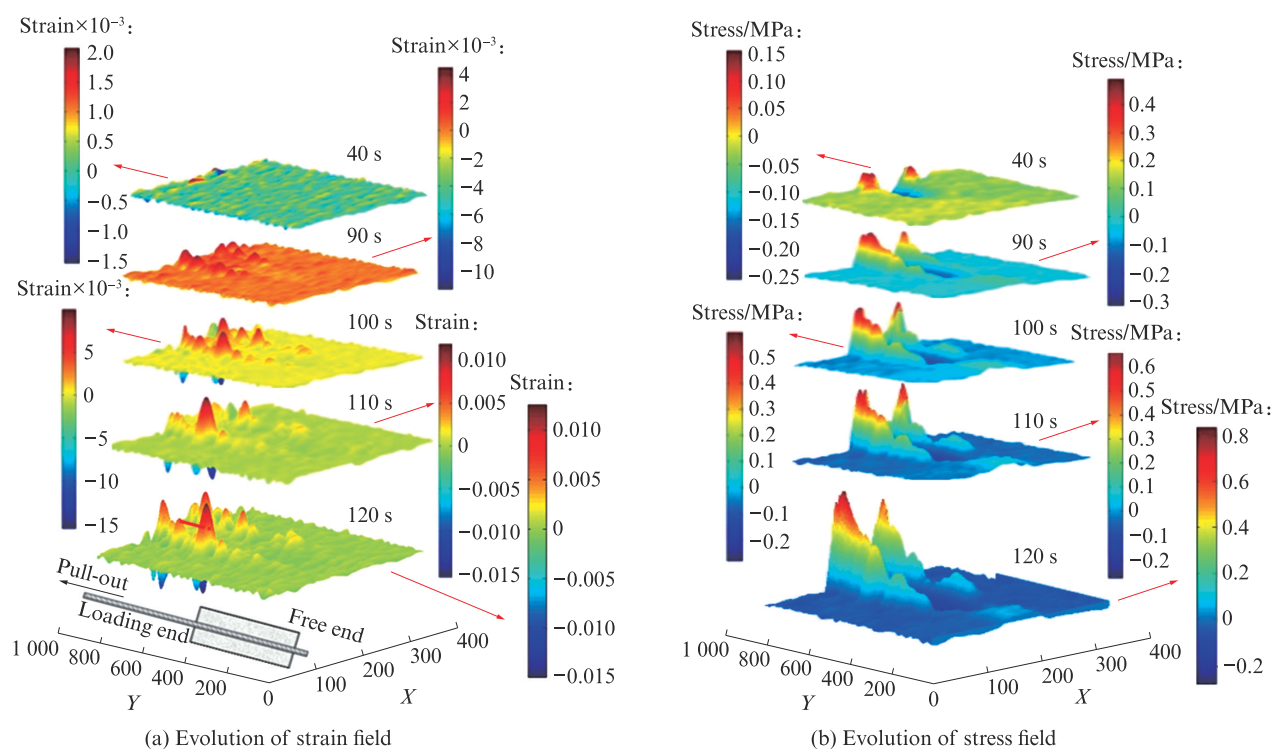


图4 养护龄期为7 d的试件C30黏结界面应变场与应力场演变

Fig. 4 Evolution of strain field and stress field at bonding interface for specimen C30 at 7 d

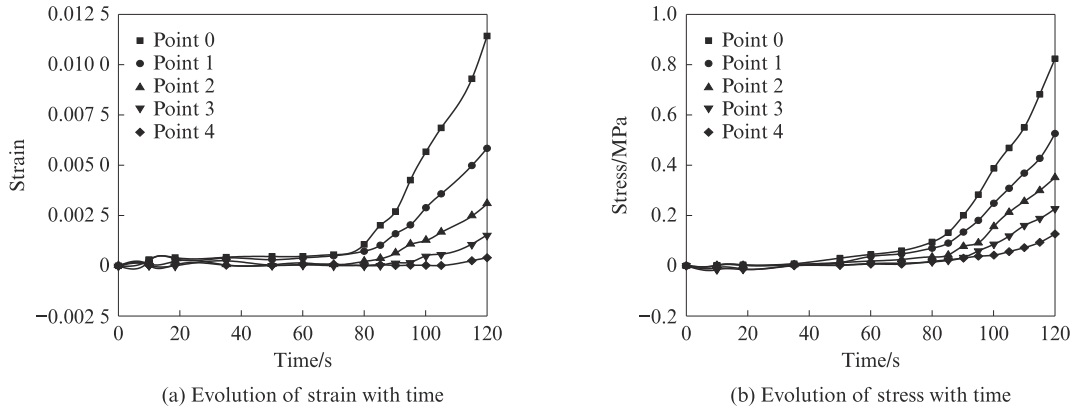


图5 养护龄期为7 d的试件C30界面黏结区域选取点的应变、应力随时间的变化

Fig. 5 Variation of strain and stress with time at selected points of interface bonding area for specimen C30 at 7 d

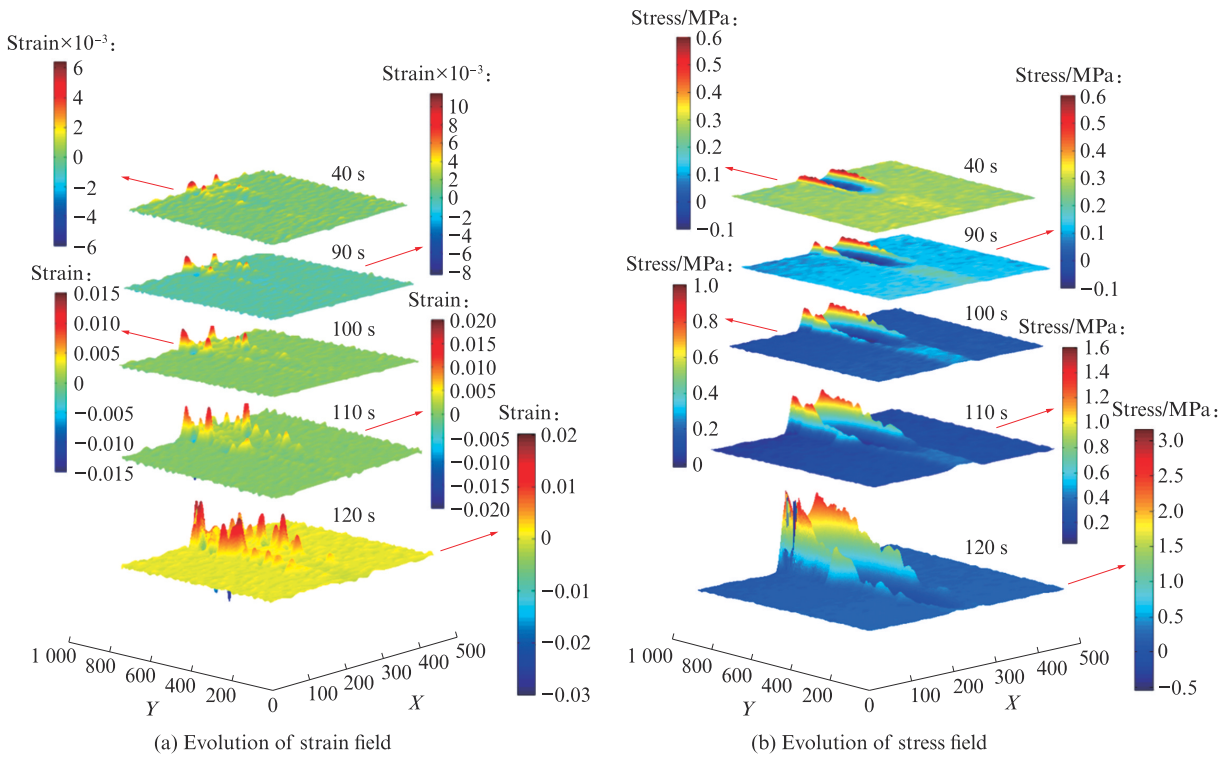


图6 养护龄期为7 d的试件C50黏结界面应变场与应力场演变

Fig. 6 Evolution of strain field and stress field at bonding interface for specimen C50 at 7 d

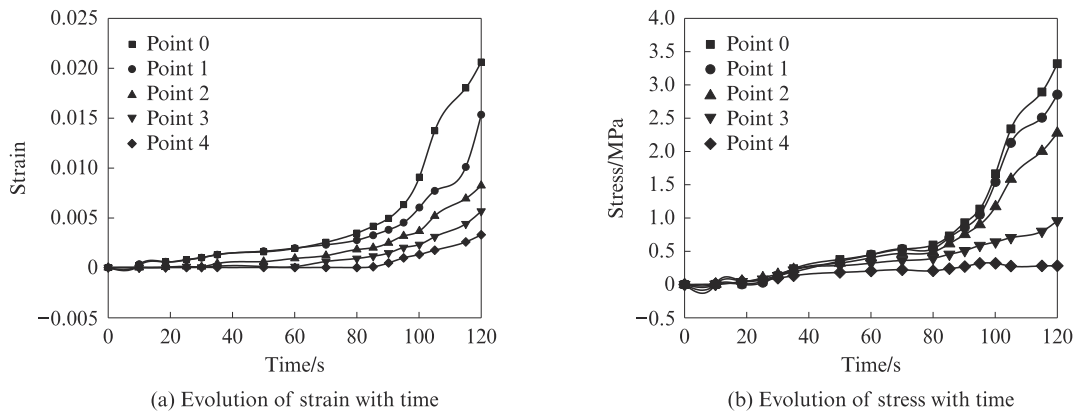


图7 养护龄期为7 d的试件C50界面黏结区域选取点的应变、应力随时间的变化

Fig. 7 Variation of strain and stress with time at selected points of interface bonding area for specimen C50 at 7 d

应变、应力均增大;在80 s之前,各点应变、应力的增长幅度较小,在80 s之后应变、应力的增长幅度较大;在85~120 s内,靠近加载端附近点0的应变从0.005增长至0.020,应力由1.0 MPa增长至3.3 MPa,此时黏结界面出现较为明显的破坏现象。

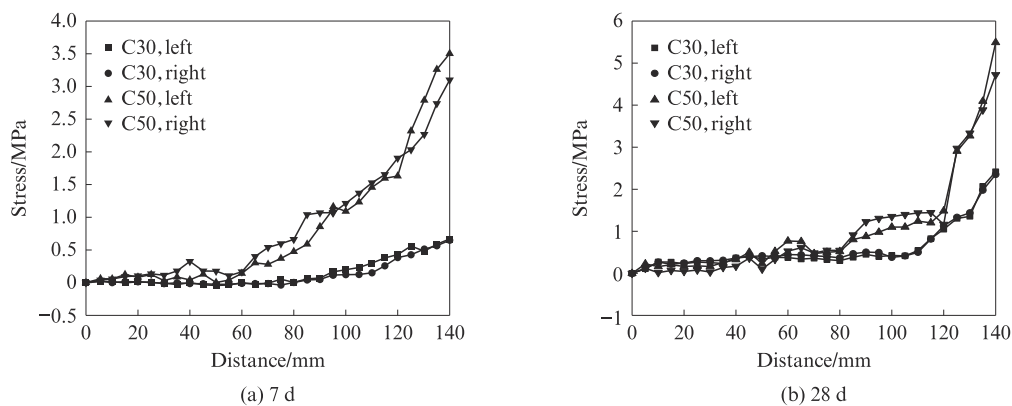


图8 普通混凝土试件中BFRP筋两侧黏结界面处的应力分布  
Fig. 8 Bonding stress distribution at BFRP interface in ordinary concrete

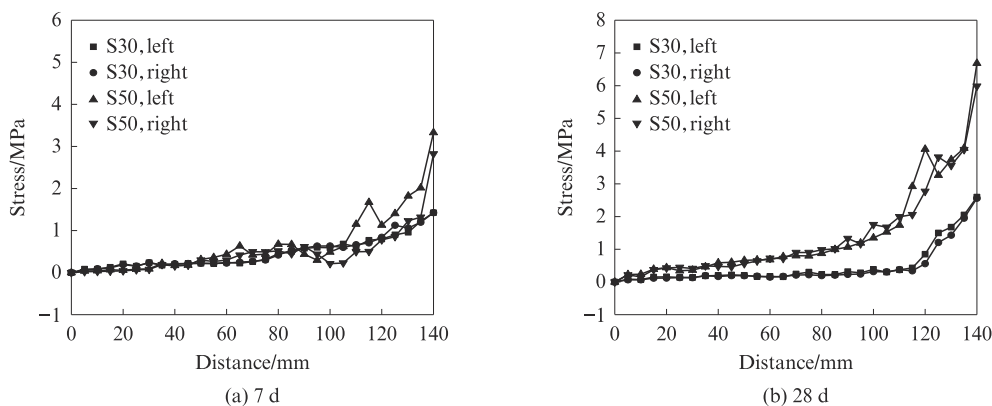


图9 海水海砂混凝土中BFRP筋两侧黏结界面处的应力分布  
Fig. 9 Bonding stress distribution at BFRP interface in seawater sea sand concrete

由图8可见:随着混凝土强度的提高,BFRP筋与混凝土黏结界面的应力也随之提高,这是因为混凝土强度等级提高使其抗拉强度提高,混凝土周围的环向应力增大,混凝土抗劈裂强度提高,黏结作用增强;各试件BFRP筋两侧黏结界面的应力从加载端到原点处逐渐呈现出减小的趋势,在加载端附近应力达到最大值,试件C50中BFRP筋两侧黏结界面的应力在加载端附近区域有急速上升的趋势,而试件C30中BFRP筋两侧黏结界面的应力从加载端至原点增长较为平稳;在养护龄期为7 d时,试件C50与试件C30相比,前者BFRP筋两侧黏结界面的最大应力增加了3.25倍左右,比龄期为28 d时各试件BFRP筋两侧黏结界面的应力增长幅值都要大.此现象有可能是因为在养护龄期为7 d时,强度发展还未完成,强度等级对应力增长幅值有较大影响.Achilides

## 2.2 混凝土强度等级对黏结界面应力的影响

选取BFRP筋与混凝土拉拔试验最后时刻的数字图像进行分析,并绘制BFRP筋左右两侧黏结界面处的应力分布曲线,如图8、9所示,其中横坐标表示距原点的距离,纵坐标表示应力。

等<sup>[18]</sup>认为当混凝土强度等级较低、小于C30时,在混凝土破坏之前,黏结强度与混凝土的抗剪强度有较大的关系,且低于较高强度等级的混凝土.张望喜等<sup>[17]</sup>基于试验数据得出,黏结强度和立方体抗压强度的0.75次方成正比.黏结强度与混凝土强度之间的关系尚需更多的试验数据来验证。

由图9可见:随着海水海砂混凝土强度等级的提高,BFRP筋两侧黏结界面处的应力沿原点到加载端逐渐增大;当龄期为7 d时,试件S50、S30中BFRP筋两侧黏结界面的应力均在加载端附近达到最大值(3.2、1.3 MPa),而原点处的应力值均在零点附近徘徊,在距离加载端40 mm处,试件S50中BFRP筋两侧黏结界面的应力曲线位于试件S30的上方,最大应力增加了1.4倍左右;当龄期为28 d时,试件S50、S30中BFRP筋两侧黏结界面的应力最大值分别为7.0、

2.5 MPa, 试件S50与试件S30相比, 前者BFRP筋两侧黏结界面的最大应力增长了1.80倍左右。

### 2.3 养护龄期对黏结界面应力的影响

对比图8(a)、(b)可见: 养护龄期为28 d的试件C30中BFRP筋两侧黏结界面的应力分布曲线位于养护7 d试件C30曲线的上方, 且随着距离不断靠近加载端, 应力呈现逐渐上升的趋势, 在靠近加载端40 mm处, 最大应力增加了2.83倍; 对于试件C50, 随着距离逐渐靠近加载端, 养护龄期为7、28 d时试件的应力均沿着黏结界面呈现缓慢增长的趋势, 28 d龄期试件的黏结界面应力在靠近加载端附近增长至5.5 MPa, 相比7 d龄期试件, 28 d龄期试件最大应力增长57%左右。说明C30混凝土较C50混凝土更易受养护龄期的影响。

对比图9(a)、(b)可见: 海水海砂混凝土试件S30中BFRP筋两侧黏结界面的应力沿自由端到加载端缓慢增长, 在加载端附近区域增长至最大值, 分别为2.5、1.4 MPa, 28 d龄期时的最大应力大于7 d龄期时, 最大应力增长约78%; 对于试件S50, 28 d龄期时的应力分布曲线均位于7 d曲线之上, 在距离加载端60 mm处, 应力增长幅值突然增大, 28 d龄期试件在靠近加载端区域达到最大应力(6.5 MPa), 与7 d龄期时相比, 增加约91%。当龄期为28 d时, 相比普通混凝土, 相同水胶比下的海水海砂混凝土与BFRP筋界面黏结处的最大应力增加了19%左右。

综上, 无论是普通混凝土还是海水海砂混凝土, 当混凝土强度等级较低时, 龄期对其黏结强度的影响都较大。

## 3 破坏形态分析及界面黏结机理

试件进行拉拔试验后的破坏模式基本分为2种: 试件边缘的混凝土拉剪破坏和BFRP筋周围的混凝土局部开裂破坏。由于BFRP筋采用嵌入式埋置于混凝土中, 拉拔试验中并未发生混凝土全部劈裂、BFRP筋被拉断的破坏模式。在试验逐渐加载的过程中, BFRP筋与混凝土界面处均出现不同程度的起裂, 在

加载后期, 由于拉拔能量过大, BFRP筋被拔出, 开裂的混凝土崩出。通过分析可知, 混凝土与BFRP筋的弹性模量相近<sup>[3,17]</sup>, 在拉拔过程中, 试件产生纵向滑移, 进而引起较大的膨胀力, 若混凝土保护层厚度不足, 则BFRP筋黏结区域的混凝土将会开裂。

图10、11为养护龄期7 d的试件C50中BFRP筋与混凝土黏结界面开裂形态及破坏形态。由图10、11可见, 在加载端附近混凝土损伤较为严重, 被拉断的混凝土呈现椎体的形式, 该区域所受应力较大。应变、应力均在靠近加载端附近区域达到最大值, 并且BFRP筋与混凝土黏结界面两侧的损伤程度基本呈对称分布状态。

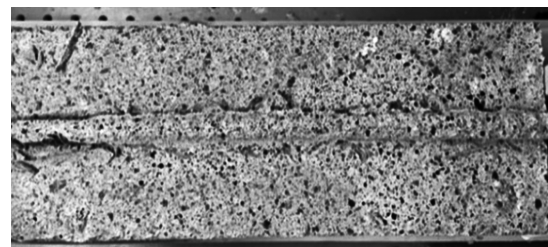


图10 BFRP筋与混凝土黏结界面开裂形态图  
Fig. 10 Cracking of bonding interface between BFRP bar and concrete



图11 拔出后混凝土的破坏形态  
Fig. 11 Damage pattern of concrete

采用VHX-7000型超景深显微镜对养护龄期7 d的试件C50中拔出的BFRP筋进行观测。将未黏结区域作为对照组, 选取拔出过程中黏结区域的小段样本进行分析, 结果见图12。由图12可见: 在靠近加载端20 mm处, BFRP筋表面有纤维被剥离的现象, 在

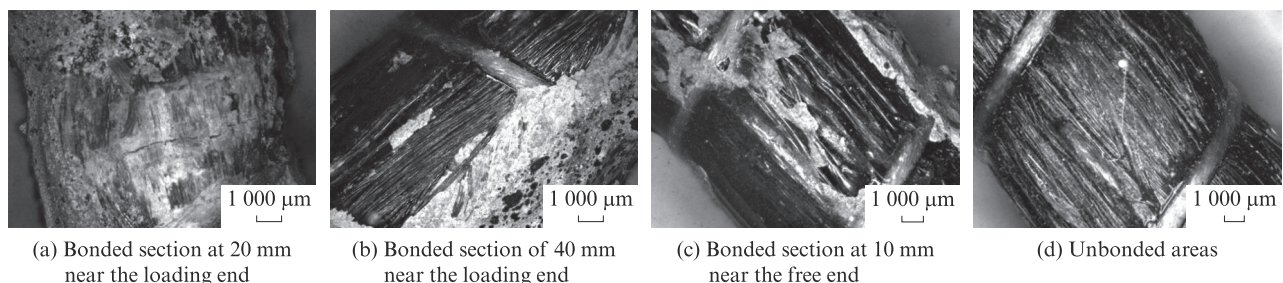


图12 BFRP筋与混凝土黏结界面微观测试结果

Fig. 12 Microscopic test results of bonding interface between BFRP bar and concrete

较大的拉拔力作用下,局部区域损伤严重;在靠近加载端40 mm处,与非黏结段相比,黏结段中部分纤维渗入混凝土颗粒,较图12(a)中损伤程度要轻;图12(c)为靠近原点处的区域,其损伤微乎其微。

## 4 结论

(1)BFRP筋从混凝土表面拔出过程中,黏结界面的应力、应变沿BFRP筋呈现对称分布状态.随着拉拔荷载的增加,BFRP筋与混凝土黏结界面的应变、应力沿远端原点到加载端增长缓慢.在距离加载端40 mm处,应力快速增大直至界面破损.在靠近加载端附近区域,黏结界面的应变、应力达到最大值。

(2)BFRP筋嵌入式混凝土表面拉拔的最终破坏模式有2种:试件边缘混凝土拉剪破坏、BFRP筋周围的混凝土局部开裂破坏.在加载端附近被拉断的混凝土呈现椎体的形式,破坏过程具有明显的脆性.采用超景深显微镜观测到在距离加载端20 mm处纤维损伤严重。

(3)采用DIC技术可对BFRP筋嵌入式混凝土表面拔出全过程进行动态监测,并计算黏结界面的应变与应力,从而获取黏结界面任意位置、纵横向的应变场和应力场。

(4)混凝土强度等级由C30提高到C50,其界面黏结处最大应力增加了3.25倍左右,由S30提高到S50,其界面黏结处最大应力增加了1.80倍左右;混凝土养护龄期由7 d延长至28 d时,最大应力增加了2.83倍;而相比普通混凝土,相同水胶比下的海水海砂混凝土与BFRP筋界面黏结处的最大应力增加了19%左右。

## 参考文献:

- [1] 侯一烈,赵颖华,张力伟.重复荷载作用下受腐蚀CFRP钢筋混凝土柱的试验研究[J].土木工程学报,2010,43(6):146-152. HOU Yilie, ZHAO Yinghua, ZHANG Liwei. An experimental study on corroded CFRP strengthened RC columns under repeated loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6):146-152. (in Chinese)
- [2] WILLIAMSON J, ISGOR O B. The effect of simulated concrete pore solution composition and chlorides on the electronic properties of passive films on carbon steel rebar[J]. Corrosion Science, 2016, 106:82-95.
- [3] 华云涛,尹世平,王璐晨.玄武岩纤维筋海水海砂混凝土梁承载性能及使用性能影响因素研究[J].建筑结构学报,2021,42(2):166-177. HUA Yuntao, YIN Shiping, WANG Luchen. Study on influence factors of bearing capacity and serviceability of BFRP reinforced seawater and sea-sand concrete beams[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(2):166-177. (in Chinese)
- [4] MOYEENUDDIN A S. Shear properties and durability of GFRP reinforcement bar aged in seawater[J]. Polymer Testing, 2019, 75:312-320.
- [5] SOLYOM S, BALAZS G L. Analytical and statistical study of the bond of FRP bars with different surface characteristics[J]. Composite Structures, 2021, 270:113953.
- [6] ELLIS D S, TABATABAI H, NABIZADEH A. Residual tensile strength and bond properties of GFRP bars after exposure to elevated temperatures[J]. Materials, 2018, 11(3):346.
- [7] EL REFAI A, AMMAR M A, MASMOUDI R. Bond performance of basalt fiber-reinforced polymer bars to concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(3):1-12.
- [8] 尹世平,华云涛,徐世焱.FRP配筋混凝土结构研究进展及其应用[J].建筑结构学报,2021,42(1):134-150. YIN Shiping, HUA Yuntao, XU Shiliang. A review on research progress and application of concrete structures internally reinforced with FRP bars[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1):134-150. (in Chinese)
- [9] 毛凤华,李宝磊.FRP筋混凝土黏结滑移本构模型的有限元对比分析[J].中国科技信息,2015(11):113-115. MAO Fenghua, LI Baolei. Finite element comparative analysis of bonding slip constitutive model of FRP bars and concrete[J]. China Science and Technology Information, 2015(11):113-115. (in Chinese)
- [10] 田建勃,申丹丹,王梦梦,等.BFRP-钢板-混凝土组合双连梁抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2022,43(8):100-111. TIAN Jianbo, SHEN Dandan, WANG Mengmeng, et al. Experimental study on seismic behavior of BFRP-plate-reinforced composite double coupling beams [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(8):100-111. (in Chinese)
- [11] 王潇敏,金祖权,姜玉丹,等.基于DIC与应变测试的混凝土中钢筋锈胀应力分析[J].材料导报,2019,33(8):2690-2696. WANG Xiaoxian, JIN Zuquan, JIANG Yudan, et al. Analysis of stress in concrete induced by corrosion of reinforcing bar based on DIC and strain test[J]. Materials Reports, 2019, 33(8):2690-2696. (in Chinese)
- [12] DE LORENZIS L, RIEEO A, LA TEGOLA A. A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete[J]. Composites Part B: Engineering, 2002, 33(8):589-603.
- [13] JIANG Y D, JIN Z Q, ZHAO T J, et al. Strain field of reinforced concrete under accelerated corrosion by digital image correlation technique[J]. Journal Advanced Concrete Technology, 2017, 15(7):290-299.
- [14] MALVAR L J. Bond stress-slip characteristics of FRP rebar[R]. Report TR-2013-SHR, Port Hueneme, California: Naval facilities Engineering Service Center, 1994.