

[文章编号] 1003—4684(2021)05-0100-04

FRP 筋混凝土在低温下的粘结性能

周培龙, 李 扬, 黄中华

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 通过自主设计的低温加载设备,对 0~−30 ℃ 范围内的 FRP 筋混凝土试件进行四点弯梁式拉拔试验。该试验考虑了温度、FRP 筋直径和粘结长度等影响因素,通过测得粘结应力-滑移曲线在低温下的变化规律,分析 FRP 筋和混凝土在低温下的粘结性能。研究表明:在低温环境下,FRP 筋混凝土的粘结性能随温度的降低有明显增强的趋势;增加 FRP 筋的直径和粘结长度,FRP 与混凝土的粘结性能会随之减弱。

[关键词] 低温; 梁试拉拔试验; FRP 筋; 粘结性能

[中图分类号] TU502 [文献标识码] A

钢筋的腐蚀是导致钢筋混凝土结构退化的主要因素之一,为克服这一难题,一种新型纤维增强聚合物(FRP)钢筋正在被用作传统钢筋的替代品。这类新型高性能材料的应用范围从新建工程到修复退化的混凝土结构,变得越来越广泛。薛伟辰^[1]为了研究 FRP 筋的粘结性能,分别进行了梁试件和拉拔试件的试验,结果表明,FRP 筋的粘结强度低于钢筋。王晓璐^[2]通过对 20~350 ℃ 范围内的 FRP 筋混凝土进行了拉拔试验,FRP 筋和混凝土之间的粘结性能随着温度的升高而降低。Ahmed Godat^[3]通过拉拔试验研究不同 FRP 筋(玻璃、碳纤维和玄武岩)在再生骨料混凝土中的粘结性能。尽管纤维增强聚合物(FRP)材料具有较强的抗腐蚀性,但当暴露于腐蚀性环境中时,FRP 筋表面树脂会恶化,从而影响 FRP 筋和混凝土之间的粘结性能^[4]。FRP 筋在低于零度会导致力学性能的变化,并在 FRP 材料中产生额外的微裂纹。在较低温度下的微裂纹可以进一步导致在较高温度下吸水率的增加,从而导致增加基体的塑化和水解。裂缝和空隙中冻结水的膨胀也会导致脱粘和横向微裂纹的生长^[5]。刘元珍^[6]通过中心拔出试验,得出了钢筋和混凝土的粘结滑移曲线,结果表明,粘结性能随着钢筋直径的增大而减小。在超低温环境下,钢筋和混凝土的粘结强度随温度变化非常明显^[7]。由于 FRP 筋和混凝土的表面形态差异较大,粘结破坏模式也会有所不同,Solyom^[8]通过拉拔试验,研究了混凝土的抗

压强度、弹性模量、表面轮廓和 FRP 筋直径对粘结强度的影响。

国内外对常温下 FRP 筋混凝土粘结性能的研究较多,而低温环境下的则处于初步探索阶段。为实现在低温环境下同时施加荷载,课题组自主研发了温度-荷载一体的低温试验箱。本文提出的实验方案主要是为了研究低温对 FRP 筋和混凝土的粘结性能的影响。

1 实验

1.1 试件设计及制作

胶凝材料选择强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥,纤维增强聚合物选择 GFRP 钢筋。混凝土的配合比为 V(水):V(水泥):V(骨料):V(砂)=0.46:1:2.58:1.2。依据 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》对混凝土试件进行设计,混凝土梁试件的长度为 550 mm,由一根 FRP 钢筋将两个梁连接为一个混凝土梁试件,并在钢筋上粘贴低温应变片。试件的非粘结区,采用 PVC 管对其 FRP 筋进行包裹,如图 1 所示,试件类型如表 1 所示。

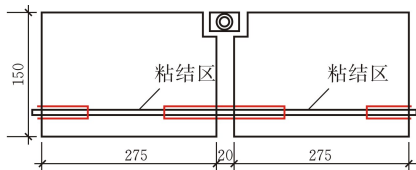


图 1 梁构件设计示意图

[收稿日期] 2020—11—25

[基金项目] 湖北省科技厅自然科学基金面上项目(2020CFB860)

[第一作者] 周培龙(1994—),男,河南许昌人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为低温下 FRP 筋混凝土的力学性能

[通信作者] 李 扬(1986—),男,工学博士,宁夏石嘴山人,湖北工业大学副教授,研究方向为混凝土裂缝控制及极端温度下混凝土构件力学性能

表 1 试件类型

组号	试件编号	试验温度/(℃)	FRP 筋直径 d /mm	粘结长度/mm	平均粘结应力 τ /MPa	FRP 筋应力 σ /MPa
1	T0-8-5D	0	8	40	9.85	196.97
	T0-8-7D		8	56	7.03	197.69
	T0-10-5D		10	50	6.37	127.39
	T0-10-7D		10	70	4.55	127.39
2	T10-8-5D	-10	8	40	9.85	196.97
	T10-8-7D		8	56	7.03	197.69
	T10-10-5D		10	50	6.37	127.39
	T10-10-7D		10	70	4.55	127.39
3	T20-8-5D	-20	8	40	9.85	196.97
	T20-8-7D		8	56	7.03	197.69
	T20-10-5D		10	50	6.37	127.39
	T20-10-7D		10	70	4.55	127.39
4	T30-8-5D	-30	8	40	9.85	196.97
	T30-8-7D		8	56	7.03	197.69
	T30-10-5D		10	50	6.37	127.39
	T30-10-7D		10	70	4.55	127.39

1.2 低温加载设备

通过自主设计的低温加载设备,实现了低温环境下同时加载,如图 2 所示。低温加载设备由三部分组成,分别为试验箱、数据采集系统和钢配重。通过往试验箱内输送液氮使试验构件达到预期的降温目标。试验箱的尺寸为 1500 mm×1000 mm×1200 mm,温度控制范围为室温到-196 ℃,其工作空间和变温区间满足试验所需要的的条件,试验箱的降温速率可控制在 1~10℃/min。采用 TDS-530 数据采集仪,可以通过控制台实时监测试件的温度变化和应变。通过钢配重对其混凝土构件施加荷载,钢配重的砝码分别为 50 kg、100 kg、200 kg、500 kg,另外制有多个 25 kg 的 C 型砝码。

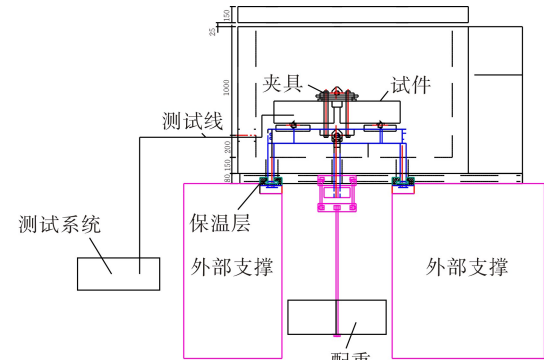


图 2 低温加载装置

1.3 试验方法

试验开始前先将试件固定在低温试验箱内,并调整其上下支座的位置,如图 3 所示。对试件在-10℃、-20℃、-30℃进行四点弯加载试验。采用分级加载的方式,共有 8 个加载等级。往试验箱输送液氮而实现所需要的低温环境,通过控制台对目

标温度进行设定,而降温过程中的数据变化可从连接数据采集系统的显示器中实时得出。通过加载过程中的数据变化来确定试件加载状况,如果试件破坏,则立即停止加载。



(a) 固定试件于试验箱内 (b) 调整支座位置

图 3 试件加载

2 数据处理

为了方便计算,提出用平均粘结应力来表示 FRP 筋和混凝土间的粘结应力^[9]。计算平均粘结应力,取试验梁的一半进行分析(图 4)。

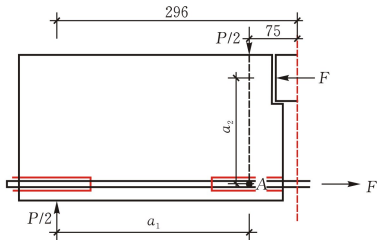


图 4 半梁受力图

$$\sum M_A = 0, \frac{p}{2} \times a_1 = F \times a_2 \tag{1}$$

$$F = \frac{pa_1}{2a_2} \tag{2}$$

式中, p 为钢配重重力,kN; a_1 为支座到 A 点的水平距离,221 mm; F 为 FRP 与混凝土的粘结力,kN; a_2 为力 F 到 A 点的垂直距离,96 mm。

根据以下两式计算 FRP 筋与混凝土的粘结应力,以及 FRP 筋的应力

$$\tau = \frac{F}{A_b}, \sigma = \frac{F}{A_s} \tag{3}$$

式中, τ 为平均粘结应力,MPa; A_b 为粘结段 FRP 筋与混凝土的接触面积, mm^2 ; σ 为 FRP 筋应力,MPa; A_s 为 FRP 筋横截面积, mm^2 。

由(2)和(3)即可得到平均粘结应力

$$\tau = \frac{pa_1}{2a_2A_b}, \sigma = \frac{pa_1}{2a_2A_s} \tag{4}$$

由于测试得出的应变数据是由温度和荷载共同得出的,为了得到荷载引起的应变,需要去除温度作用而产生的影响。于是提出了原位补偿法^[10],从而准确的得出了特定温度下加载产生的应变。在加载时,用稳定温度下有荷载作用时测得的数据减去同一温度下无荷载作用时测得的数据,即可以消除温度效应所产生的影响。

3 数据分析

3.1 温度对粘结强度的影响

图 5 为低温对 FRP 筋粘结强度的影响,从图中可以看出低温对粘结强度有显著的改善,在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时强度增强最明显, $-10\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内粘结强度随温度的降低而增强。在低温环境下,FRP 筋和混凝土界面处的冻结水会产生额外的粘结应力,混凝土的微裂缝和孔隙中的水冻结成冰,提高了混凝土强度。此外,考虑到 GFRP 筋和混凝土的热膨胀系数存在差异,会对其粘结性能产生影响,GFRP 筋的径向热膨胀系数大于混凝土的热膨胀系数,当温度降低时,GFRP 筋的收缩会大于混凝土的,会降低两者的粘结性能。但是,这种影响是轻微的,不会影响到 FRP 筋混凝土在低温下粘结性能的整体趋势。

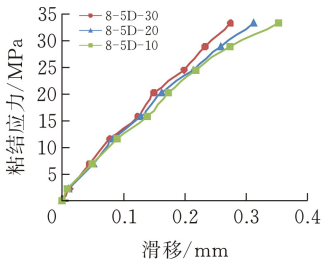


图 5 8-5D 在低温下粘结应力-滑移曲线

3.2 直径对粘结强度的影响

通过对不同直径的 FRP 筋进行测试,得到 FRP 筋在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下粘结应力-滑移曲线,如图 6 和图 7 所示。结果表明,当温度和 FRP 筋粘结长度不变时,增加 FRP 筋的直径,粘结强度就会降低。分析其原因是,随着 FRP 筋直径的增加,其相对粘结面积反而越小,从而导致 FRP 筋混凝土界

面之间的粘结性能减弱;FRP 筋与混凝土界面上的应力是非线性分布的,直径较大的 FRP 筋需要更长的埋置长度来产生同样的粘结应力,平均粘结强度会随着埋置长度的增长而降低。

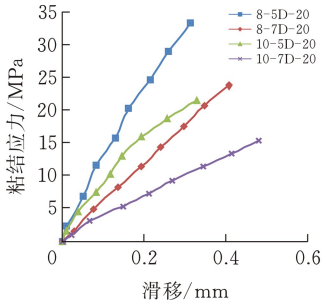


图 6 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下粘结应力-滑移曲线

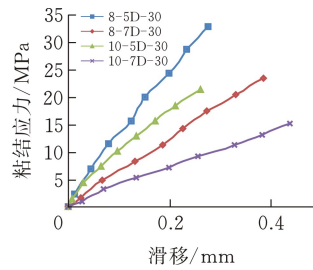


图 7 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下粘结应力-滑移曲线

3.3 粘结长度对粘结强度的影响

图 8 和图 9 为 FRP 筋混凝土在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下粘结应力随粘结长度变化的曲线图,可以得出,FRP 筋的粘结长度越大,其粘结强度反而越小。究其原因,FRP 筋中间段具有较大的粘结应力,而两端的粘结应力较小,就会引起粘结应力的不均匀分布。当继续加载和增加粘结长度时,这种现象会更加明显,最终导致局部粘结应力的差值越来越大,而粘结应力越来越小。

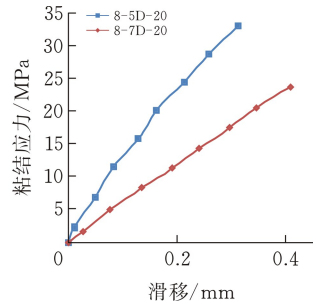


图 8 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下粘结应力-滑移

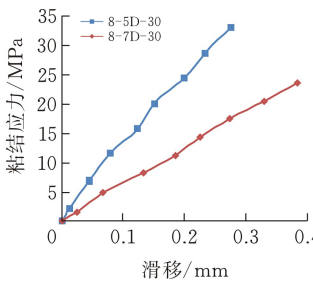


图 9 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下粘结应力-滑移

4 结 论

- 1)在-10~-30 ℃ 范围内,两者的粘结强度随温度的降低有明显增强的趋势。
- 2)当温度和粘结长度不变时,FRP 筋直径的增大会使粘结强度降低。
- 3)仅当粘结长度为唯一变量时,减少粘结长度,其粘结强度会有所增强。

[参 考 文 献]

[1] 薛伟辰,刘华杰,王小辉.新型 FRP 筋粘结性能研究[J].建筑结构学报,2004(2):104-109+123.

[2] 王晓璐,查晓雄,张旭琛.高温下 FRP 筋与混凝土的粘结性能[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(6):8-15.

[3] GODAT AHMED, ALDAWEELA SHAIMA, AL-JABERI HAMDA, et al. Bond strength of FRP bars in recycled-aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials,2021,267:1-13.

[4] REBECCA J. GRAVINA, JUNWEI LI, SCOTT T.

SMITH,et al. Environmental durability of FRP bar-to-concrete bond; critical review[J]. Journal of Composites for Construction, 2020, 24(4): 03120001.

[5] MATHIEU ROBERT, BRAHIM BENMOKRANE. Behavior of GFRP Reinforcing Bars Subjected to Extreme Temperatures [J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(4):353-360.

[6] 刘元珍,秦小超,王文婧,等.钢筋直径对钢筋-再生保温混凝土粘结锚固性能影响的研究[J].科学技术与工程,2016,16(15):277-281.

[7] 谢剑,李海瑞,李会杰.超低温下钢筋与混凝土粘结性能试验研究[J].冰川冻土,2014,36(3):626-631.

[8] SOLYOM, SANDOR ,BALÁZS, GYÖRGY L.Comparitive study of bond behaviour for different FRP and steel bars[C]// 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 2018,153-160.

[9] 郑山锁,裴培,张艺欣,等.钢筋混凝土粘结滑移研究综述[J].材料导报,2018,32(23):4182-4191.

[10] 李扬,杨侗伟,黄德瑞.超低温下钢筋混凝土梁开裂前受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(4): 110-116.

Bond Properties of Frp Bars and Concrete at Low Temperature

ZHOU Peilong, LI Yang, HUANG Zhonghua

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: The four-point bending beam drawing test was carried out for FRP bars and concrete specimens in the range of 0~-30℃ by the self-designed low temperature loading equipment. In this test, the influence factors such as temperature, DIAMETER of FRP bars and bond length are considered, and the change rule of bond stress-slip curve at low temperature is measured, and the bond performance of FRP bars and concrete at low temperature is analyzed. The results show that the bond performance of FRP bars and concrete increases with the decrease of temperature at low temperature. If the diameter and bonding length of FRP bars are increased, the bonding performance of FRP and reinforced concrete will be weakened.

Keywords: low temperature; beam test drawing test; FRP tendons; bonding performance

[责任编辑:裴 琴]