

考虑应变率效应的 FRP-混凝土界面正拉黏结性能研究

罗 威, 何栋尔, 肖云逸, 张裕华, 章子华*

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 宁波 315211)

摘要: 为揭示 FRP-混凝土界面正拉黏结性能的应变率效应, 对 60 个标准试件进行快速荷载下的正拉试验, 研究了加载速率、FRP 种类及混凝土强度等级 3 个参数对 FRP-混凝土界面正拉黏结强度的影响规律. 在欧洲规范建议的幂函数模型基础上, 通过回归拟合建立了考虑应变率效应的正拉黏结强度预测模型, 并验证其可靠性. 结果表明: 正拉黏结强度随着加载速率的增大而提高; 在中高加载速率时, 加载速率对正拉黏结强度的影响有减弱趋势; 黏贴 CFRP 的试件正拉黏结强度明显高于黏贴 BFRP 的试件; 正拉黏结强度随着混凝土强度等级的提高而提高.

关键词: 快速荷载; FRP; 应变率效应; 界面破坏; 正拉黏结强度

中图分类号: TU528.58

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 03-0089-05

目前常用的混凝土结构加固方法包括加大构件截面、预应力加固、外贴纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Plastics/Polymer, FRP)加固等^[1], 相比钢材等其他加固材料而言, FRP 具有密度小、耐腐蚀性强、耐疲劳性佳、可设计性好等优点, 因此被广泛用于各类建筑结构的后期加固中.

值得注意的是, 经 FRP 加固的工程结构(例如桥墩、基础、高层建筑等)在服役期间往往会遭受冲击、碰撞、地震等短时动力作用, 而混凝土作为一种应变率敏感材料^[2-5], 动载条件下的力学性能(抗压/拉强度)与静载状态截然不同. 已有研究表明, FRP-混凝土界面黏结性能具有类似的应变率效应^[6-8]. 由于正拉黏结强度是衡量 FRP-混凝土界面黏结性能的重要参数^[9], 在目前国内外研究和工程设计中尚未充分考虑应变率效应对正拉黏结强度的影响^[10-11], 这给短时动力荷载下的 FRP 加固混凝土结构埋下了安全隐患.

本文有针对性地设计制作 60 个标准正拉试件, 定量分析加载速率、FRP 种类及混凝土强度等级对 FRP-混凝土界面正拉黏结强度的影响, 同时基于幂函数模型回归拟合得到了考虑应变率效应的正拉黏结强度预测模型, 为后续混凝土结构加固设

计和拓宽正拉黏结强度应用范围提供重要参考.

1 试验概况

1.1 试验材料

试验原材料为标号 32.5R 普通硅酸盐水泥(海螺牌), ISO 标准砂, 5~20 mm 连续粒径碎石以及自来水. 碳纤维(CFRP)布和玄武岩纤维(BFRP)布为国产 SKO 牌一级纤维布, 环氧树脂胶为国产 SKO 牌高级纤维浸渍胶, 浸渍胶分为 A 胶和 B 胶, 按 2:1 的质量比配制而成. 环氧树脂胶与纤维布的材料性能见表 1.

表 1 环氧树脂胶与纤维布的材料性能

名称	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	密度/ (g·cm ⁻³)	伸长率/%
环氧树脂胶	40	2.5	1.75	-
CFRP	3 700	240	1.80	1.7
BFRP	3 000	85	2.80	3.1

1.2 试件制作

试验共制作 60 个混凝土试件, 并采用同一配合比制作 3 组(9 个)标准混凝土立方体试块. 在室温条件下自然养护 3 个月后, 按照《普通混凝土力学性能试验方法标准(GB50081-2002)》^[12]的规定进

收稿日期: 2017-09-29.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51308307); 浙江省自然科学基金(LY18E080013); 宁波市自然科学基金(2016A610089).

第一作者: 罗威(1992-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: FRP 加固混凝土结构. E-mail: 2436293197@qq.com

*通信作者: 章子华(1984-), 男, 浙江宁波人, 博士/副教授, 主要研究方向: FRP 加固混凝土结构. E-mail: zhangzihua@nbu.edu.cn

行混凝土强度测试,混凝土配合比及其强度测试数值见表 2。待其强度测试合格后,进行标准正拉试件制作,具体步骤如下:(1)打磨试件黏贴面,并沿其指定区域(40 mm×40 mm)割出宽深各为 2 mm 的预切缝;(2)用乙醇清洁试件与钢标准块黏贴面;(3)在黏贴面指定区域涂刷环氧树脂胶,并黏贴尺寸为 40 mm×40 mm 的 FRP;(4)待其固化后,于 FRP 上表面再次涂刷一层胶水,最后贴上钢标准块。成型后的标准正拉试件如图 1 所示。

表 2 混凝土配合比及强度

混凝土强度等级	材料用量/(kg·m ⁻³)				抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
	水泥	粗骨料	细骨料	水		
C20	272	1 185	740	205	21.6	1.78
C30	376	1 210	625	192	32.9	2.89
C40	460	1 214	552	190	45.9	3.98

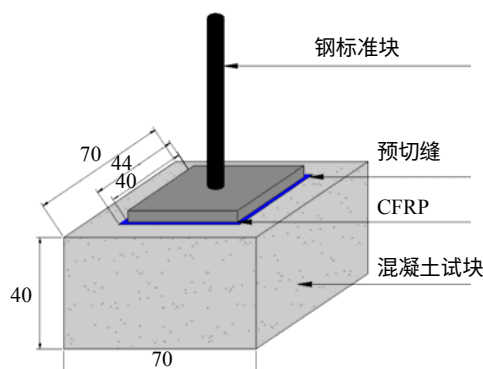


图 1 标准正拉试件尺寸(单位: mm)

1.3 试验加载

标准正拉试件在室温下养护 7 d, 然后依据《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程(CESC146:2003)》^[9]附录 A 进行正拉加载试验。试验装置采用深圳世纪天源仪器有限公司的 MTS(SANS) CMT-5305 微机控制电子万能试验机, 加载过程采用力控制, 加载速率分别为 100, 1 000 和 10 000 N·s⁻¹, 试验装置及加载示意如图 2 所示。

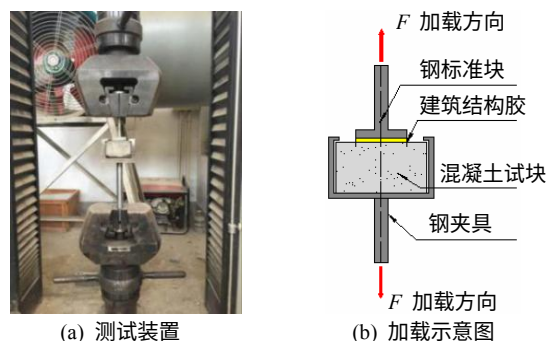


图 2 试验装置及加载示意图

2 试验结果及其分析

2.1 试验现象与破坏形态分析

在抵达破坏荷载前, 荷载—位移曲线基本呈线性增长关系, 接近破坏荷载时, 会听到“砰”的一声脆响, 钢标准块与 FRP-混凝土界面瞬间剥离, 属于脆性破坏, 剔除部分施工质量不合格的试件, 剩余试件破坏面均位于混凝土层, 各组试件破坏形态如图 3 所示。从图 3 中可以看出:(1)随着加载速率的提高, 试件破坏面面积有增大趋势, 且试件表层破坏深度也逐渐增加, 高加载速率下的纤维布表层黏附的混凝土碎块明显多于低加载速率, 说明加载速率越高混凝土内聚破坏(破坏发生在混凝土表层 2~5 mm 处)特征越为明显;(2)黏贴 CFRP 试件的界面破坏损伤面积较 BFRP 试件大, 说明采用该种环氧树脂胶时, 混凝土与 CFRP 之间的黏结更为有效;(3)随着混凝土强度等级的提高, 混凝土表层破坏深度由 5 mm 趋于 2 mm, 说明混凝土抗拉强度对正拉黏结破坏深度影响较大。

2.2 正拉黏结强度

规范^[9]指出正拉黏结强度是评价 FRP-混凝土界面黏结有效的重要指标, 其表达式如下:

$$f_{\sigma} = P / A, \quad (1)$$

式中, f_{σ} 为正拉黏结强度, MPa; P 为正拉破坏荷载,

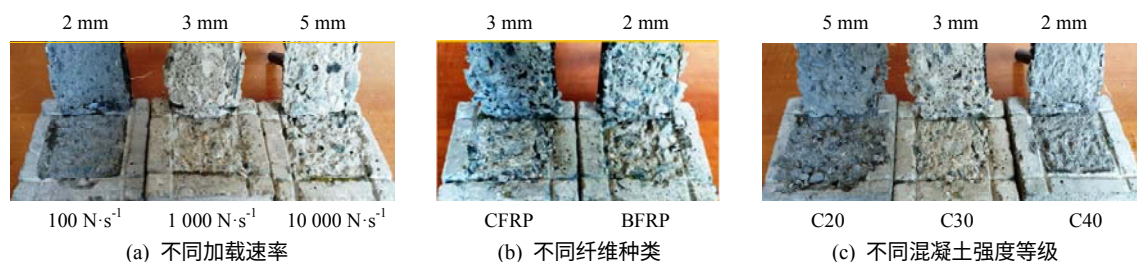


图 3 试件破坏形态对比

表 3 试验方案及结果

试件组编号	加载速率/(N·s ⁻¹)	FRP 种类	混凝土强度等级	破坏形态	f_{σ} /MPa	变异系数 $\delta_{f_{\sigma}}$
C20C I 1-5	100	CFRP	C20	4A+B	2.404	0.102
C20C II 1-5	1 000			4A+C	2.517	0.098
C20C III 1-5	10 000			3A+B+C	3.018	0.121
C30C I 1-5	100	CFRP	C30	5A	3.167	0.123
C30C II 1-5	1 000			4A+C	3.279	0.056
C30C III 1-5	10 000			4A+B	3.950	0.099
C30B I 1-5	100	BFRP	C30	5A	2.963	0.105
C30B II 1-5	1 000			4A+B	3.114	0.115
C30B III 1-5	10 000			5A	3.763	0.151
C40C I 1-5	100	CFRP	C40	5A	3.661	0.021
C40C II 1-5	1 000			5A	3.779	0.087
C40C III 1-5	10 000			4A+C	4.521	0.146

注: A 代表内聚破坏(破坏面处于混凝土内部); B 代表粘附破坏(破坏面处于胶层与纤维复合材料/钢标准块之间); C 代表混合破坏(上述 2 种破坏面形式共存); “4A+B”表示 5 个标准正拉试件中 4 个试件为内聚破坏, 1 个试件为粘附破坏。

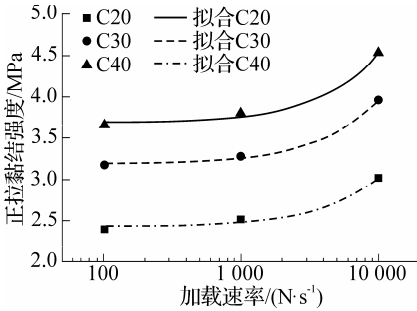
kN; A 为钢标准块粘贴面积, mm²。各试件组的破坏形态、平均正拉黏结强度及变异系数见表 3。

图 4 对不同材料性能下各组试件的正拉黏结强度(f_{σ})与加载速率(ν)进行拟合(图中横坐标为对数坐标)。由图可知, 各组试件的正拉黏结强度均随着加载速率的增大而提高, 基本符合对数增长规律, 应变率效应显著。从图 4(a)中可以明显看出, 正拉黏结强度随着加载速率的提高呈上升趋势。在 10 000 N·s⁻¹ 的加载速率下, C40 试件的 f_{σ} 较 C30 试件提高 21.4%, C30 试件的 f_{σ} 较 C20 试件提高 30.3%, 这与动力作用下混凝土材料力学性能的研究成果一致, 即低强度等级的混凝土具有更显著的应变率效应^[3-7]。图 4(b)比较了纤维种类对正拉黏结强度的影响。在 100, 1 000 和 10 000 N·s⁻¹ 的加载速率下, CFRP 试件的 f_{σ} 分别高于 BFRP 试件 6.9%, 5.3%和 5.0%, 通过对比表 2 中 2 种 FRP 材料的材料性能可知, CFRP 各项指标均优于 BFRP, 但 2 条拟合曲线切线斜率基本保持平行, 说明不同纤维种类仅影响 f_{σ} 的数值, 不影响其随加载速率增大而上升的趋势。

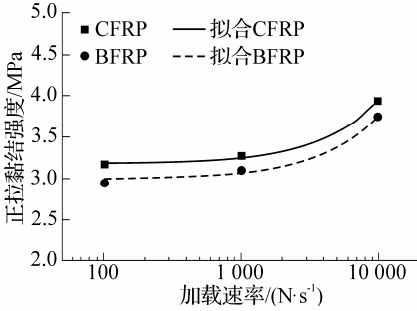
2.3 界面应变率效应分析

2.3.1 正拉黏结强度预测模型

由于混凝土力学性能的应变率效应与 FRP-混凝土界面黏结性能较为一致, 因此可通过混凝土动力增大系数(Dynamic Increase Factor, DIF)模型^[13]来描述 FRP-混凝土的正拉黏结性能。目前常用的



(a) 混凝土强度的影响



(b) 纤维种类的影响

图 4 材料性能对界面正拉黏结强度的影响

混凝土 DIF 模型主要有指数函数、对数函数、幂函数 3 种形式, 施嘉伟等^[6]采用幂函数模型得到了界面断裂能和峰值剪应力随应变率提高而增大规律; Vos 等^[14]基于幂函数模型分析带肋钢筋-混凝土界面黏结滑移关系, 发现界面黏结滑移量随应变率增大呈现上升趋势。本文采用欧洲规范(CEB-FIP 1990)建议的幂函数模型^[15]来分析 FRP-混凝土界面正拉黏结性能, 并对正拉黏结强度这一重要参

数进行回归分析, 模型形式如下:

$$T_{\text{DIF}} = (\dot{\varepsilon}_d / \dot{\varepsilon}_s)^\alpha, \quad (2)$$

式中, $T_{\text{DIF}} = f_d / f_s$; f_d 和 f_s 分别为动态正拉黏结强度和准静态正拉黏结强度; $\dot{\varepsilon}_d$ 和 $\dot{\varepsilon}_s$ 分别为动态应变率和准静态应变率; α 为与材料性能和环境因素有关的参数。

由于试验中发生的正拉破坏主要位于界面附近混凝土表层 2~5 mm 处, 故在本文研究范围内假定参数 α 只跟混凝土强度有关。具体形式如下:

$$\alpha = a / (f_{\text{cu}} + b), \quad (3)$$

式中, f_{cu} 为混凝土立方体试块抗压强度; a, b 均为拟合参数。联立式(2)和式(3)可得:

$$f_d / f_s = (\dot{\nu}_d / \dot{\nu}_s)^{a/(f_{\text{cu}} + b)}. \quad (4)$$

本文以准静态加载速率($100 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$)作为图 5 应变率效应模型的静载基准值。在此基础上, 通过回归拟合分析可得: $a=3.3, b=45.7$, 代入式(3)可得:

$$\alpha = 3.3 / (f_{\text{cu}} + 45.7). \quad (5)$$

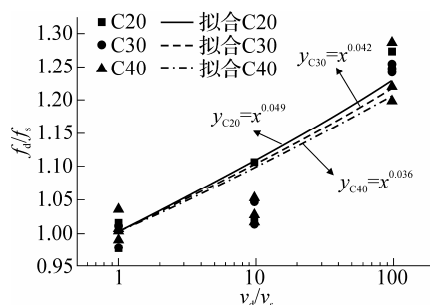


图 5 正拉黏结强度应变率效应模型

因此, 基于幂函数模型所得到的正拉黏结强度应变率效应模型可表示为:

$$f_d / f_s = (\dot{\nu}_d / \dot{\nu}_s)^{3.3/(f_{\text{cu}} + 45.7)}, \quad (6)$$

将式(6)变形, 可得:

$$f_d(v) = f_s(v/100)^{3.3/(f_{\text{cu}} + 45.7)}, \quad (7)$$

式中, v 为加载速率; f_{cu} 为混凝土立方体试块抗压强度; f_s 为对应混凝土强度等级正拉试件在 $100 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ 下的正拉黏结强度。根据式(7)可得到不同应变率下混凝土强度等级与正拉黏结强度的变化关系。

从图 6 可以明显看出: (1)正拉黏结强度随加载速率的增大而提高, 当加载速率范围在 $0 \sim 1000 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 正拉黏结强度随加载速率的变化影响较大, 当加载速率超过 $1000 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 加载速率对正拉黏结强度的影响有减弱趋势; (2)应变率效应对采用低强度混凝土的界面正拉黏结强度影响更为

显著, 这与图 4(a)中数据拟合获得的规律一致。

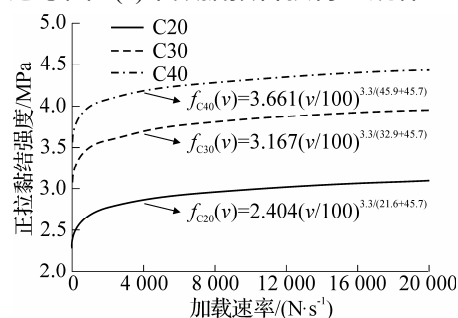


图 6 基于幂函数模型的正拉黏结强度预测曲线

2.3.2 预测模型的验证

为验证预测模型的可靠性, 将静载基准值代入正拉黏结强度应变率效应模型, 得到模型预测值, 结合本文试验加载值, 两者对比结果见表 4。

表 4 正拉黏结强度的试验值与模型预测值比较

试件组编号	试验加载值 f_E/kN	模型预测值 f_P/kN	f_E/f_P
C20C I 1-5	2.404	2.404	1.000
C20C II 1-5	2.517	2.691	0.935
C20C III 1-5	3.018	3.013	1.002
C30C I 1-5	3.167	3.167	1.000
C30C II 1-5	3.279	3.488	0.940
C30C III 1-5	3.950	3.843	1.028
C40C I 1-5	3.661	3.661	1.000
C40C II 1-5	3.779	3.978	0.950
C40C III 1-5	4.521	4.322	1.046

注: 平均值为 0.989, 标准差为 0.039, 变异系数为 3.943%。

从表 4 可以看出, 各组试件的试验值与模型预测值非常接近, 说明本模型预测应变率效应下的正拉黏结强度具有较高精度。需要指出的是, 本文正拉试件破坏形式均为内聚破坏。若采用高强混凝土, 界面可能发生粘附破坏(破坏发生在胶层与 FRP 之间), 导致预测模型失效。因此, 将本模型的适用范围限定为混凝土强度 $f_{\text{cu}} \leq 60 \text{ MPa}$ [16]。

3 结论

(1)试件的正拉黏结强度随加载速率的增大而提高, 当加载速率范围在 $0 \sim 1000 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 正拉黏结强度随加载速率的变化影响较大, 当加载速率超过 $1000 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 加载速率对正拉黏结强度的影响有减弱趋势; (2)在本文给定条件下, CFRP 与混凝土之间的黏结效果要优于 BFRP; (3)正拉黏结强度随混凝土强度的提高而提高; (4)通过回归拟合

建立了考虑应变率效应的 FRP-混凝土界面正拉黏结强度预测模型, 将试验值与模型预测值比较分析发现, 该模型具有较高的预测精度。

参考文献:

- [1] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3):24-36.
- [2] Pham T M, Hao H. Review of concrete structures strengthened with FRP against impact loading[J]. Structures, 2016, 5(7):59-70.
- [3] Wang S S, Hoang T N, Leong H P, et al. Effect of high strain rate on compressive behavior of strain-hardening cement composite in comparison to that of ordinary fiber-reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 136(1):31-43.
- [4] Li C, Qin F, Jiang X Q, et al. Combined effects of high temperature and high strain rate on normal weight concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 86(12):40-56.
- [5] Xiao J Z, Li L, Shen L M, et al. Effects of strain rate on mechanical behavior of modeled recycled aggregate concrete under uniaxial compression[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93(15): 214-222.
- [6] 施嘉伟, 朱虹, 吴智深, 等. FRP 片材-混凝土界面应变率效应试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12):99-107.
- [7] Saiidi M S, Johnson R, Maragakis E. Strain rate effects on strength of unidirectional FRP fabrics and bond to concrete[C]. Proceedings of the 3rd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, Hong Kong, China, 2006:79-82.
- [8] 许斌, 龙业平. 基于纤维模型的钢筋混凝土柱应变率效应研究[J]. 工程力学, 2011, 28(7):103-108.
- [9] CECS146:2003. 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程[S].
- [10] 祝涛, 李杉, 李伟捷, 等. 碳纤维布与混凝土正拉黏结性能试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(3):1-4.
- [11] Li Y, Liu X F, Wu M K. Mechanical properties of FRP-strengthened concrete at elevated temperature[J]. Construction and Building Materials, 2017, 13(4):424-432.
- [12] GB/T50081-2002. 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
- [13] Malvar L J, Crawford J E. Dynamic increasing factors for concrete[R]. Naval Facilities Engineering Service Center, CA: Hueneme Port.
- [14] Vos E, Reinhardt H W. Influence of loading rate on bond behavior of reinforcing steel and prestressing strands[J]. Materials and Structures, 1982, 15(1):3-10.
- [15] CEB-FIP modelcode 1990[S]. Trowbridge, Wiltshire, UK: Redwood Books, 1990.
- [16] 刘贵. 玻璃纤维布(GFRP)——高强混凝土界面粘结性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

Experimental analysis on interfacial tensile bonding performance between FRP and concrete concerning strain rate effect

LUO Wei, HE Dong-er, XIAO Yun-yi, ZHANG Yu-hua, ZHANG Zi-hua*

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211 China)

Abstract: In order to reveal the strain-rate effect on the tensile bonding performance of FRP-concrete interface, based on the tensile test using sixty standard specimens under fast load, we investigate the effects of loading rate, FRP type and concrete strength grade on the tensile bonding strength of FRP-concrete. By applying the power function model proposed by European researchers, an estimated model of the tension bond strength concerning the strain rate is presented using regression fitting technique. The test results show that the tensile bonding strength increases along with the increase of loading rate, and the influence of loading rate on the tensile bonding strength is reduced when the loading rate turns to either medium or high level. The tensile bonding strength of the specimen pasted with CFRP is found to be significantly higher than that of BFRP. Moreover, the tensile bonding strength increases as the concrete strength grade goes up.

Key words: fast load; FRP; strain rate effect; interfacial failure; tensile bonding strength

(责任编辑 章践立)