

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.078



湿热环境下粘钢加固混凝土界面的粘结性能

姚国文¹, 刘宇森¹, 吴甜宇², 李世亚¹

(1. 重庆交通大学 山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地; 土木工程学院, 重庆 400074;

2. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 钢板-混凝土界面粘结性能是粘贴钢板加固混凝土结构的关键。通过对湿热环境下 27 个钢板-混凝土试件进行试验研究, 分别进行 5、10、15 d 的加速湿热老化, 然后进行双剪试验, 获得了钢板-混凝土界面发生剪切剥离破坏过程中的极限荷载、钢板应变分布及荷载-位移关系。分析了环境温度、湿度耦合作用对钢板-混凝土界面粘结耐久性能的影响, 并综合考虑钢板-混凝土的粘结破坏模式、受力过程、粘结界面相对位移发展规律, 提出了粘结界面剪应力、滑移与温度和湿度相关的表达式。建立了考虑温度、湿度影响的粘结-滑移本构关系模型, 数值模拟结果与试验结果吻合较好。

关键词: 粘贴钢板; 湿热环境; 耐久性能; 粘结滑移本构关系模型

中图分类号: TU511.352 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)04-0112-10

Bond behavior study on interface between steel plate and bonded concrete under hydrothermal environment

Yao Guowen¹, Liu Yusen¹, Wu Tianyu², Li Shiya¹

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Mountain Bridge and Tunnel Engineering; School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, P. R. China)

Abstract: The interface performance between steel plate and concrete is the key to strengthened concrete structure. Firstly, a total of 27 specimens for steel plate bonded concrete under hydrothermal environment were carried out in this study. The accelerated hydrothermal aging was conducted in 5 days, 10 days and 15 days, respectively. Then, the double-shear test was performed to obtain the ultimate load, strain distribution and relationship of load-displacement during the shear failure process on steel plate-concrete interface. After long term temperature and humidity coupling, the durability of the steel plate-concrete interface was studied. Considering the analysis of bond failure mode, loading process and the relative displacement evolution on bonding interface, the expression of shear stress and slip was proposed, which was related to temperature and humidity. Finally, the bond-slip constitutive model was established in

收稿日期: 2018-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(11627802, 51478071); 国家重点研发计划(2017YFC0806001)。

作者简介: 姚国文(1974-), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁长期性能、土木工程环境耐久性研究, E-mail: yaoguowen@sina.com。

Received: 2018-11-28

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 11627802, 51478071); the Sub Program of National Key R&D Plan of China(No. 2017YFC0806001).

Author brief: Yao Guowen (1974-), professor, PhD, main research interests: long-term behaviour of bridges and environmental durability of civil engineering, E-mail: yaoguowen@sina.com.

consideration of the temperature and humidity. The numerical simulation results were in good agreement with the experimental results.

Keywords: bonded steel plate; hydrothermal environment; durability; bond-slip constitutive model

粘贴钢板加固法是修复受损混凝土结构并延长其剩余使用寿命的常用加固方法,在广泛使用的同时存在着诸多耐久性问题^[1]。而在西南地区的湿热环境长期作用下,胶粘剂的抗拉强度、弹性模量明显降低,环氧树脂的变形性能也会发生改变^[2],使得带裂缝工作的混凝土结构更容易发生碳化、化学腐蚀、钢筋锈蚀及粘钢材料界面滑移等耐久性能的劣化,对加固结构的耐久性极为不利,不能满足正常使用寿命周期内的安全性、可靠性^[3]。因此,湿热环境下粘钢加固混凝土结构的耐久性研究,具有重要的指导意义和工程价值。

钢板和混凝土之间良好的粘结性能保证了两者之间的荷载传递,直接关系着加固结构的效果^[4]。已有研究表明^[5],粘钢加固混凝土界面的粘结应力主要为剪应力,加固构件的失效形式不是加固材料的受拉破坏,而是在外贴钢板和混凝土界面粘结处,因抗剪承载力不足而引起的剥离失效。而实际工程结构中的腐蚀劣化环境会加速其脆性破坏,这种破坏不同于粘贴纤维补强聚合物(FRP)加固的软化段破坏,不仅造成钢材的浪费,而且影响加固结构的安全性。近年来,学者们采用试验方法和有限元模拟对粘钢加固混凝土结构的整体受力特性^[6-7]、界面剥离行为^[8]、疲劳性能^[9]进行了研究,但考虑湿热环境下粘钢加固耐久性的研究较少,而纤维粘贴加固在这方面的研究较多;Shrestha 等^[10]通过潮湿环境作用下的 FRP 与混凝土试样,研究了湿度对界面粘结强度及组成材料耐久性的影响;Dai 等^[11]考虑高温环境对 FRP 与混凝土界面粘结滑移行为的影响,从断裂力学角度确定了界面断裂能和脆性系数的双参数曲线模型;胡克旭等^[12]研究了温度作用下胶粘剂性能对碳纤维(CFRP)-混凝土界面有效黏结长度的影响,并以胶粘剂玻璃化温度与试验温度的温差值参数对存在胶体软化段的界面剪切性能进行修正及预测。然而,加固混凝土结构的耐久性试验研究都集中于单一环境温度或湿度,考虑温湿度耦合作用的试验研究较少。

为探明实际服役环境尤其是湿热耦合环境对粘钢加固结构造成的耐久性损伤,以钢板-混凝土为研

究对象,在环境温度、湿度的耦合作用下,对钢板-混凝土试件进行双剪试验,测量钢板应变分布,并分析粘结界面在湿热环境中的剪切性能,结合试验结果提出考虑环境折减系数的粘结-滑移本构模型,以评价湿热环境对界面耐久性能的影响。

1 钢板-混凝土界面双剪试验

1.1 试验材料及试件制作

钢板-混凝土试件由混凝土、钢板、粘钢胶、钢筋 4 种材料构成。参照《道路建筑材料》确定试验混凝土配合比为水泥:碎石:砂:水=1:1.33:3.10:0.39,采用重庆市拉法水泥有限公司生产的 LARFAGE 牌 P.O 42.5R 型普通硅酸盐水泥,粗骨料为粒径 5~20 mm 的碎石,细骨料为细砂,制备强度等级为 C40 的混凝土立方体试件,在标准养护室中养护 28 d。根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005),通过液压式压力试验机进行立方体试件的力学性能试验,实测立方体抗压强度 $f_{cu,k}$ 为 42.5 MPa,根据《混凝土结构设计规范》(GB 50367—2013)换算得到混凝土力学性能参数,见表 1。钢板采用重庆钢铁有限公司生产的 Q235B 热轧普碳钢板,厚度为 3 mm,针对西南地区高温、潮湿、多雨的气候特点,采用可在湿热环境中正常粘接的普通粘结剂——四川隆昌承华牌 CH-2C 手涂式环氧粘钢 AB 胶,按重量比 10:3 配制,钢板和环氧树脂粘结剂的力学性能见表 2、表 3。采用公称直径 22 mm 的 HRB400 级月牙肋钢筋,长度为 460 mm,起辅助加载作用。

表 1 混凝土的力学性能

Table 1 Measured mechanical property of concrete

立方体 抗压强度/ MPa	弹性 模量/ GPa	轴心抗 压强度/ MPa	轴心抗 拉强度/ MPa	泊松比	线膨胀系数/ ($m \cdot ^\circ C^{-1}$)
42.5	33.0	28.4	2.45	0.23	1×10^{-5}

表 2 钢板的力学性能

Table 2 Mechanical property of steel plate

规格	厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
Q235B	3	285	440	35.5

表3 环氧树脂粘结剂的力学性能

Table 3 Mechanical property of epoxy resin

规格	弹性模量/ 拉伸强度/		压缩强度/ 剪切强度/		弯曲强度/MPa
	MPa	MPa	MPa	MPa	
CH-2C	≥3 500	≥33	≥65	≥15	≥45
检测结果	3 893.2	41.6	86.4	17.7	66.7

混凝土试块截面尺寸为 150 mm×150 mm, 长度为 300 mm, 由两个带有钢筋的混凝土试块组成双剪试验试件, 如图 1。在浇筑试块前埋入带肋钢筋, 埋入混凝土长度为 300 mm, 并将其穿过截面圆心处预留的钢筋外径大小的木模板, 从孔口延伸出 150 mm, 便于加载, 也使两个混凝土试块中用来实施加载的钢筋保持在同一直线上, 保证界面在加载过程中处于纯剪状态, 避免所测试验数据不准确。

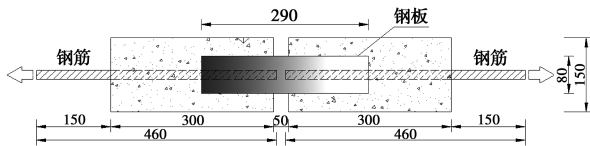


图1 双剪试件(单位:mm)

Fig. 1 Double-shear specimens (unit:mm)

根据《钢材力学及工艺性能试验取样规定》(GB 2975—1982) 裁制钢板, 钢板长度 290 mm, 厚度 3 mm, 钢板与混凝土粘结宽度 80 mm, 混凝土养护 28 d 后, 在混凝土表面进行打磨并采用丙酮清洗, 用滚筒刷涂抹底胶, 待底胶干燥后混凝土表面无气泡、无缺漏时双面粘贴钢板, 并采用加压工具压实 24 h, 再置于室内养护 10 d, 直至环氧树脂粘结胶完全固化, 如图 2。

1.2 试验方案

为避免室外环境暴露使试验针对性不强、可重复性不高, 采用室内加速试验, 分析界面在湿热环境中的剪切粘结耐久性能。根据西南地区亚热带气候高温、潮湿、多雨的大气环境, 选取试验特征温度为 8(冬季室温)、25、60 °C, 湿度为 78%(冬季室内湿度)、85% RH、95% RH, 模拟湿热环境。同时, 考虑到温度与湿度的耦合作用, 采用全面试验, 因素为环境变量中的温度、湿度、腐蚀时间, 将两对湿热环境(25 °C/85%RH)、(60 °C/95%RH)交叉组合, 设置 4 种工况(25 °C/85%RH)、(25 °C/95%RH)、(60 °C/85%RH)、(60 °C/95%RH), 将钢板-混凝土试件分批次置于高低温湿热环境试验箱中, 该仪器是上海多禾试验设备有限公司生产的 DSCR-53-4 0-P-A

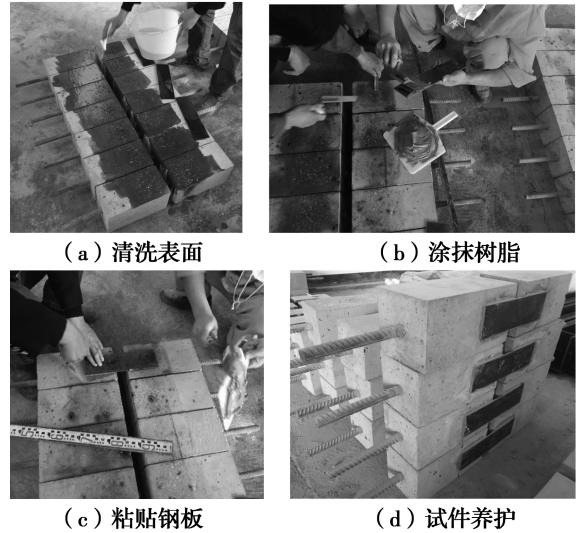


图2 粘贴钢板制作过程

Fig. 2 Manufacturing process of bonded steel plate

型步入式高低温环境试验箱, 可在 1 h 内提高精准的试验环境, 并通过放置于试验箱的温度计、湿度计, 进行实时监测, 如图 3。根据《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013) 及《纤维增强塑料性能实验方法总则》(GB/T 1446—2005) 对恒温恒湿处理条件的规定, 分别进行 5、10、15 d 的加速湿热老化, 并与未经过湿热处理的室温组试件(8 °C/78%RH) 对比, 共 9 组, 每组 3 个试件, 试验分组见表 4。试验主要考虑高温高湿的最不利环境, 对(25 °C/85%RH)、(60 °C/85%RH) 试件组仅开展 5 d 的湿热老化试验。



图3 放置于高低温湿热环境箱的双剪试件

Fig. 3 Double-shear specimens placed in the high and low temperature hydrothermal environment box

1.3 试验加载及测试内容

双剪试验的加载是通过两个混凝土试件中间的千斤顶向两端推出来实现, 但较难准确控制加载过程的荷载步。试验对此做了改进, 利用带肋钢筋表面凸起的肋纹与试块混凝土的机械咬合力及接触面上的摩擦力, 由试块两端伸出的钢筋实现间接加

载。加载前,通过夹具将混凝土试块的上下端夹紧,将电子数显千分表布置在两个混凝土块中间;加载开始,对下夹头施加荷载,钢筋与混凝土的粘结作用将钢筋的受力传给混凝土;荷载增加,钢板与混凝土试块产生相对位移,实现界面在加载过程中纯剪切状态。

表 4 试验分组

Table 4 Test groupings

湿热老化环境条件	分组编号	湿热老化时间/d	试件编号
室温环境	S	0	S1~S3-8℃/78%RH-0d
25℃/ 85%RH	A1	5	S1~S3-25℃/85%RH-5d
	B1	5	S1~S3-25℃/95%RH-5d
25℃/ 95%RH	B2	10	S1~S3-25℃/95%RH-10d
	B3	15	S1~S3-25℃/95%RH-15d
60℃/ 85%RH	C1	5	S1~S3-60℃/85%RH-5d
	D1	5	S1~S3-60℃/95%RH-5d
60℃/ 95%RH	D2	10	S1~S3-60℃/95%RH-10d
	D3	15	S1~S3-60℃/95%RH-15d

注:试件编号首字母 S 表示试件进行的双剪试验,各数字表示每种工况下有 3 个独立试件、湿热环境、老化时间。

湿热老化后,在室温条件下,待试件自然晒干,在 100 t 微机控制电液伺服万能试验机上进行加载试验,如图 4。采用荷载控制,分级荷载取 S 组试件极限荷载的 5%,5 kN 为一级,下夹头以 0.5 kN/s 的加速度向下施加荷载,每级荷载稳定 15 s,记录破坏过程;钢板外表面布置应变片,通过 YE2539 高速静态应变仪采集应变数据,并用电子数显千分表测量两个混凝土试块间的相对位移;分级加载至钢板与混凝土试块完全脱离,观察试件粘结面、混凝土的破坏形态,并记录界面破坏时的极限荷载。其中,混凝土块间距为 50 mm,沿试件间隔中线(加载端)向一侧混凝土试块方向(自由端)均匀布置应变片,间距为 35 mm,在选取的 5 个测点截面上横向布置 3 个应变片,进行数据校核,测点布置如图 5。

2 试验结果及分析

2.1 破坏模式

所有试件都表现为钢板与混凝土粘结面的剪切

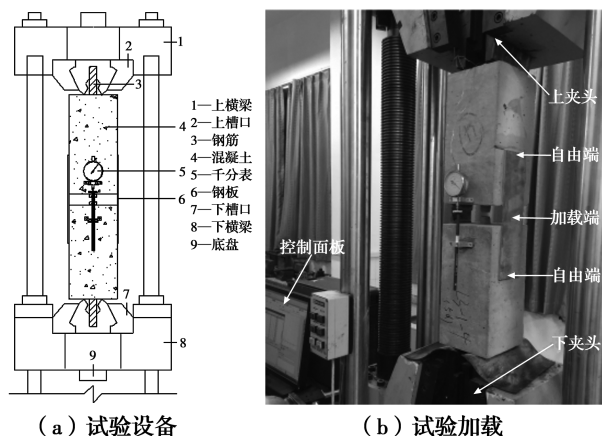


图 4 试验设备及加载

Fig. 4 Test equipment and loading

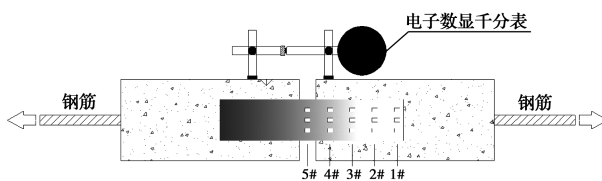


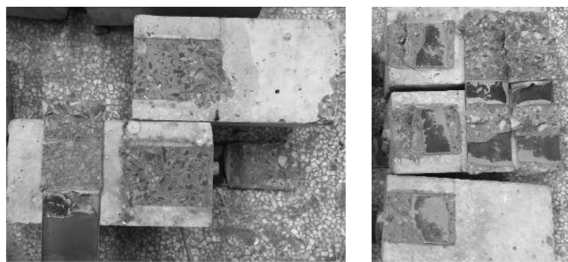
图 5 应变测点布置

Fig. 5 Measurement point arrangement of strain

剥离破坏。加载初期,钢板应变值很小,仅在加载端附近的 1~2 个应变片约 45 mm 范围内有读数;随着荷载增加,千分表读数变大,钢板与混凝土间的滑移更加明显,加载端附近应变急剧增加,并能听到轻微响声;继续加载,接近界面粘结强度时,千分表读数急剧上升,钢板与混凝土间相对位移凸显。最终,“咔嚓”一声,试件由于界面剪应力过高而产生剥离破坏,钢板与混凝土完全脱离,不再有残余应变,胶层保留在钢板和混凝土上。

试件界面的破坏模式可能表现为钢板破坏、胶层破坏、界面表层混凝土破坏。图 6(a)为室温环境下的破坏形态,钢板表面粘有一层骨料混凝土,破坏发生在表层混凝土;对比图 6(b)湿热老化后的试件,可看见混凝土表面灰色的环氧粘钢胶,部分混凝土没有被粘下,试件破坏是胶层内部与表层混凝土的综合表现,说明湿热环境对粘结树脂产生了腐蚀,粘结树脂强度降低,湿热老化作用对界面粘结性能有不利影响。若在界面粘结剪切应力达到胶层抗剪强度前,钢板达到其极限拉应变,则会发生钢板被拉断的破坏,但钢板强度较大,不同的湿热老化环境和环境作用时间下,并未出现钢板被拉断的现象。因此,钢板-混凝土试件界面的破坏模式与湿热老化条件和胶层的抗剪强度有关,与钢板强度、混凝土性

能、环境作用时间没有明显的相关性。



(a) 室温组 (b) 湿热老化组

图6 试件破坏模式

Fig. 6 The failure pattern of specimens

2.2 剪切粘结强度

表5中剪切粘结强度 τ_{avg} 直接反映了钢板-混凝土界面的粘结性能,其计算公式为

$$\tau_{avg} = \frac{P_u}{S} \quad (1)$$

式中: P_u 为界面破坏时的极限承载力; S 为界面粘结面积。

由于25℃试件组所处环境对胶体的后固化作用^[13],未完全固化的胶体随温度升高而加速固化,这对界面粘结强度的有利影响大于湿热老化的不利因素,故相比于室温S组试件,A1、B1组的粘结强度有所提升。但是,胶体和混凝土具有不同的热膨胀系数,随着腐蚀时间延长,吸水老化后的胶体会在界面产生应力,湿热劣化因子对界面的影响逐渐占主导,引起界面粘结力退化,10、15 d湿热作用的

B2、B3组粘结强度有明显下降;从60℃试件组来看,高温高湿状态下的C1、D1组试件,粘结强度相比于A1、B1组下降更为显著,说明实际环境中的温度、湿度不利因素,两者耦合作用下的影响比单一不利因素更大,随着劣化时间增加,这种湿热老化更为明显,15 d湿热处理的D3组试件粘结强度较室温S组试件下降最大,达到9.32%。

另一方面,分别对比腐蚀5 d的试验组,仅在湿度变化下,A1和B1粘结强度较室温组试件分别提高了7.49%和7.16%,C1和D1分别降低了7.12%、8.19%,但两组对比都变化不大。这意味着湿度的改变对界面粘结强度的影响不敏感;但是,60℃湿热作用下的C1、D1组粘结强度较25℃作用的A1、B1组分别下降更多,说明随着温度的上升,粘结强度下降凸显,温度劣化对界面粘结强度的影响更为敏感,且大于25℃环境的后固化作用。同时,10、15 d腐蚀的D2、D3组试件在高温高湿条件下,环境中大量的水分子热作用加速,进入钢板与混凝土粘结界面的微小孔隙,扩散进入树脂后与环氧树脂大分子相结合,产生新的关联而引起大分子溶胀,使树脂材料变脆^[14],宏观力学性能表现在极限荷载下降显著,导致粘钢界面粘结性能的退化,直接影响粘钢加固结构的效果,这也进一步说明高温高湿环境耦合作用加速了界面剪切粘结强度的下降,本文从试件的宏观力学行为证明了这一点。

表5 试验结果

Table 5 Test results

分组编号	试件编号	湿热环境	试验周期/d	极限荷载/kN	P_u /kN	剪切粘结强度 τ_{avg} /MPa	粘结强度相对变化率/%
S	S1-8℃/78%RH-0d	8℃/78%RH	0	71	70.93	3.694	
	S2-8℃/78%RH-0d	8℃/78%RH	0	70.21	70.93	3.694	
	S3-8℃/78%RH-0d	8℃/78%RH	0	71.58	70.93	3.694	
A1	S1-25℃/85%RH-5d	25℃/85%RH	5	76.18	76.24	3.971	
	S2-25℃/85%RH-5d	25℃/85%RH	5	74.51	76.24	3.971	7.49
	S3-25℃/85%RH-5d	25℃/85%RH	5	78.03	76.24	3.971	
B1	S1-25℃/95%RH-5d	25℃/95%RH	5	77.65	76.01	3.959	
	S2-25℃/95%RH-5d	25℃/95%RH	5	72.02	76.01	3.959	7.16
	S3-25℃/95%RH-5d	25℃/95%RH	5	78.36	76.01	3.959	
C1	S1-60℃/85%RH-5d	60℃/85%RH	5	66	65.88	3.431	
	S2-60℃/85%RH-5d	60℃/85%RH	5	64.30	65.88	3.431	-7.12
	S3-60℃/85%RH-5d	60℃/85%RH	5	67.43	65.88	3.431	
D1	S1-60℃/95%RH-5d	60℃/95%RH	5	66.35	65.12	3.392	
	S2-60℃/95%RH-5d	60℃/95%RH	5	64.31	65.12	3.392	-8.19
	S3-60℃/95%RH-5d	60℃/95%RH	5	64.7	65.12	3.392	

续表 5

分组编号	试件编号	湿热环境	试验周期/d	极限荷载/kN	P_u /kN	剪切粘结强度 τ_{avg} /MPa	粘结强度相对变化率/%
B2	S1-25℃/95%RH-10d	25℃/95%RH	10	73.12	73.48	3.827	3.60
	S2-25℃/95%RH-10d	25℃/95%RH	10	74.97	73.48	3.827	
	S3-25℃/95%RH-10d	25℃/95%RH	10	72.35	73.48	3.827	
D2	S1-60℃/95%RH-10d	60℃/95%RH	10	64.95	64.67	3.368	-8.83
	S2-60℃/95%RH-10d	60℃/95%RH	10	63.61	64.67	3.368	
	S3-60℃/95%RH-10d	60℃/95%RH	10	65.45	64.67	3.368	
B3	S1-25℃/95%RH-15d	25℃/95%RH	15	72.04	72.04	3.752	1.56
	S2-25℃/95%RH-15d	25℃/95%RH	15	71.97	72.04	3.752	
	S3-25℃/95%RH-15d	25℃/95%RH	15	72.11	72.04	3.752	
D3	S1-60℃/95%RH-15d	60℃/95%RH	15	63.60	64.32	3.350	-9.32
	S2-60℃/95%RH-15d	60℃/95%RH	15	64.96	64.32	3.350	
	S3-60℃/95%RH-15d	60℃/95%RH	15	64.40	64.32	3.350	

注:极限荷载为试件破坏时的荷载值,界面承载力 P_u 为 3 个试件极限荷载的平均值,粘结强度相对变化率为 A、B、C、D 湿热组试件分别与室温 S 组试件剪切粘结强度的差值与室温 S 组试件剪切粘结强度的比值。

2.3 局部剪应力

钢板与混凝土粘结界面在长度和宽度方向上存在不均匀分布的局部剪应力,为说明湿热老化环境对界面剪力传递的劣化作用,假定相邻应变片间的轴力线性变化,其局部平均剪应力可由式(2)计算^[15]。

$$\tau = \frac{\Delta F}{b \cdot \Delta l} \quad (2)$$

式中: ΔF 为两个相邻应变测点的应变求得的轴力差值; Δl 为两个相邻应变测点的距离; b 为钢板和混凝土的粘结宽度。

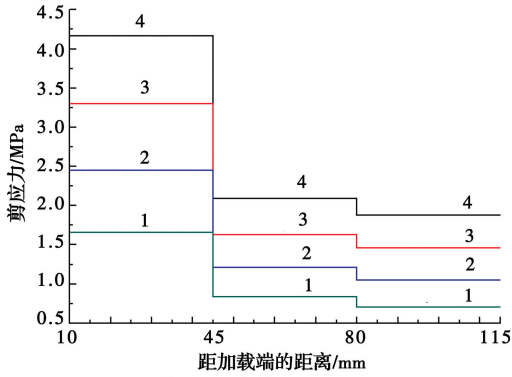
图 7 所示为不同荷载水平下,试件各个应变测点间钢板与混凝土粘结面上局部平均剪应力随荷载变化的曲线。从图 7 中可以看出:1)同一荷载等级下,剪应力主要分布在加载端 45 mm 范围内,远离加载端的剪应力偏小,呈现指数递减的趋势;2)随着荷载等级增加,胶层约束了钢板与混凝土间的相对位移并将荷载传递给钢板,距加载端 45 mm 范围内的剪应力增加迅速,距加载端越远,胶层传递作用越弱,钢板传力区域即钢板量测到的应变向两端延伸;3)外荷载 40 kN 作用下,相比于室温组试件,经过 60℃/95%RH 高温高湿环境处理 15 d 的 D3 组试件在加固端 45、45~80、80~115 mm 范围内的局部平均剪应力变化较大,分别从 3.302、1.624、1.457 MPa 变为 2.707、1.925、1.471 MPa,说明高温高湿耦合作用下,界面从加载端向自由端的剪力传递更显著。

总体上看,试件加载端 45 mm 范围内主要承受外部荷载,湿热作用使得加载端 45~115 mm 范围内的局部剪应力增长加快,剪应力的传递路径更快向自由端发展,并且在高温高湿环境作用下,靠近加载端的界面承担剪应力作用变小,较早出现损伤,进而导致粘钢界面的抗剪性能退化。

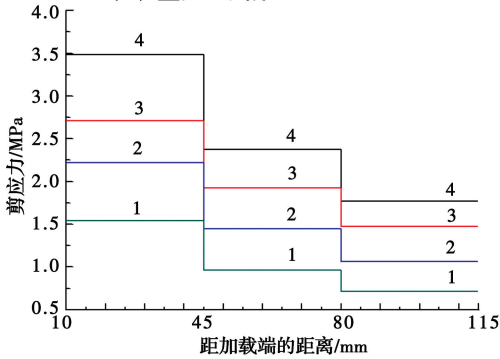
2.4 相对位移

图 8 为试件加载全过程中实测的荷载 F 与混凝土块相对位移 x 的关系曲线图, $F-x$ 曲线的斜率体现粘钢界面抵抗滑移变形的能力。加载初期,界面的变形随着荷载的增加而呈现线性变化;当荷载达到 40 kN 以后,粘结界面开始出现损伤,位移呈现非线性增长,刚度减弱;加载至极限荷载,界面剥离破坏。

通过千分表量测得到的两个混凝土试块之间的相对位移,虽不能精确地反映钢板-混凝土界面总的滑移量,却可以看出不同工况下的劣化规律。从图 10 中可以看出:1)处于高温高湿状态 60℃/95%RH 条件下的 D1 组试件的 $F-x$ 曲线斜率最大,即相同荷载下,钢板与混凝土结合面产生更大的位移,刚度变小,这是粘钢界面粘结性能退化的体现;2)D1 组试件的极限荷载较其他工况试件最小,却在更小的极限荷载作用下,产生更大的极限位移,试件更易变形,说明高温高湿环境下,界面层受到的湿热腐蚀比其他组更严重;3)将 60℃工况的高温高湿 C1、D1 组与 25℃的常温高湿 A1、B1 组对比,C1、D1 组的 $F-x$ 曲线斜率更大,极限荷载更小,界面抵抗变形能力更弱,这是因为随着湿热劣化程度加深,在高温高



(a) 室温组试件S2-8°C/78%RH-0d

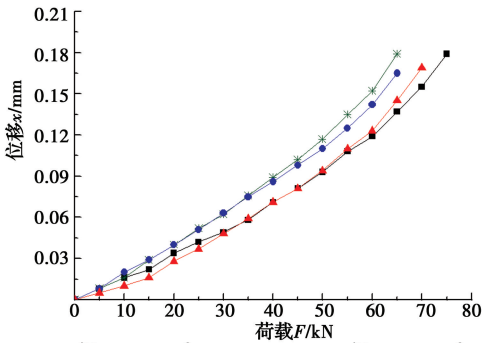


(b) 高温高湿组试件S3-60°C/95%RH-15d

注: 1·P=20 kN 2·P=30 kN 3·P=40 kN 4·P=50 kN

图7 钢板与混凝土之间的局部剪应力分布

Fig. 7 Local shear stress distribution between steel plate and concrete



注: ■ A1组S1-5d-25°C/85%RH ▲ B1组S2-5d-25°C/95%RH
● C1组S3-5d-60°C/85%RH * D1组S1-5d-60°C/95%RH

图8 不同湿热环境下的荷载-位移(F-x)曲线

Fig. 8 Relative displacement evolution under different hydrothermal environment

湿耦合腐蚀下,相对位移更快地发展,粘钢界面的粘结性能退化更为严重。

3 粘结滑移模型

3.1 单线性的粘结-滑移模型

通过面内双剪试验测得钢板-混凝土界面剪切粘结强度,钢板厚度很小,可以认为钢板内的拉应力均匀分布,即钢板表面应变可以代表钢板内的拉伸

应变。同时,考虑钢板和胶层为线弹性材料,钢板很薄,忽略抗弯刚度,仅考虑界面剪力传递作用^[16]。图9为钢板微元体的静力平衡条件,推导出式(3)来计算钢板与混凝土界面某点*i*处的粘结剪应力。

$$\tau_x = E_s t_f \frac{\epsilon_i - \epsilon_{i-1}}{\Delta x} \quad (3)$$

式中: τ_x 为测点*i*和测点*i-1*之间的粘结剪应力; ϵ_i 、 ϵ_{i-1} 为钢板在*i*、*i-1*处的应变; Δx 为两个测点间的距离; t_f 为钢板的计算厚度; E_s 为钢板弹性模量。

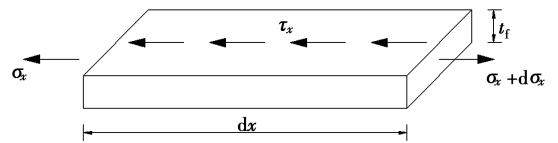


图9 钢板微元体受力图

Fig. 9 The force diagram of the plate element

界面某点*i*的滑移量*s_i*是该点处钢板的滑移量与混凝土、环氧粘钢胶结合面滑移量的差值。已有研究表明,钢板截断处的相对滑移为0^[1,17],基于湿热老化试件的破坏模式是界面表层混凝土与胶层的综合表现,忽略界面较远处混凝土的剪切变形,界面胶层作为连接媒介,其粘结强度较钢板抗拉强度很小,忽略钢板变形。通过钢板上的应变(环氧粘钢胶界面结合层在混凝土块受拉后的总变形),从钢板自由端向加载端,按公式(4)数值积分得到界面某点*i*处粘结滑移。

$$s_i = s_{i-1} + \int_{x_{i-1}}^{x_i} \epsilon_x dx \quad (4)$$

式中:*s_i*、*s_{i-1}*为测点*i*、*i-1*处滑移量; ϵ_x 为测点*i*、*i-1*间的应变(*i*=1,2,3,4,5)。

按式(3)、式(4)计算不同荷载等级下粘结界面的滑移和粘结剪应力,得到粘结剪应力-滑移关系曲线,图10为两个室温组试件的粘结-滑移曲线,其拟合参数*R*²为0.98,SSE非常接近0。从图10中看出,试验数据均匀分布在拟合直线附近,随着滑移量的增加,粘结剪应力呈现明显的线性特征,贴合相对位移的发展规律。当粘结应力达到最大值时,试件直接剥离破坏,钢板上量测不到应变,滑移量为0,这不同于FRP加固时软化段破坏的下降段。

图11为钢板-混凝土界面粘结滑移模式,主要有3个参数:粘结剪应力峰值 τ_{max} ;粘结应力最大值对应的极限滑移*s_u*;曲线的斜率为等效抗剪刚度*k_{T,H}*,表征粘钢界面抵抗变形能力。

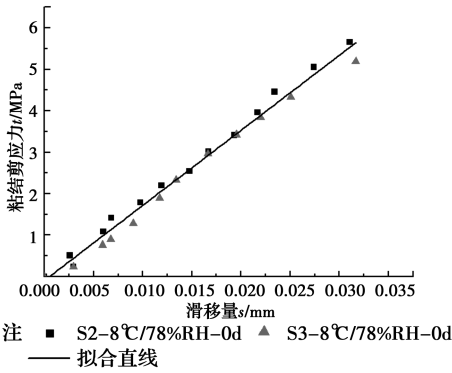


图 10 室温组试件粘结-滑移曲线

Fig. 10 Bond-slip curve of room specimen

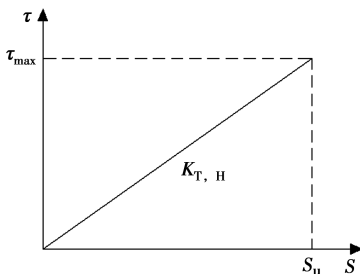


图 11 粘结-滑移本构关系模型

Fig. 11 Bond-slip constitutive model

3.2 湿热环境粘结-滑移本构模型

基于加载过程中试验数据分析及剪应力-滑移单线性曲线的关系,同时,参考相关研究成果^[18-19],提出采用考虑与温度、湿度相关的单线性模型来定义粘结界面的本构关系,表达式为

$$\begin{cases} \tau = k_{T,H} \cdot s & s \leq s_u \\ \tau = 0 & s > s_u \end{cases} \quad (5)$$

式中:τ为界面粘结强度;s为界面滑移;s_u为界面破坏时的滑移,根据不同湿热预处理试件的极限滑移平均值,试验取 0.033 1 mm;k_{T,H}为温湿度相关系数,代表湿热环境下界面的等效刚度。

考虑温、湿度的耦合及单线性的本构关系,假设系数 k_{T,H}的数学方程为

$$k_{T,H} = k_0 + c_1 T + c_2 H + c_3 T \cdot H \quad (6)$$

式中:k₀为材料相关系数;c₁为温度系数;c₂为湿度系数;c₃为湿热耦合系数。

选取 4 种 5 d 试验工况的 3 个独立试件中的两组数据进行拟合,得到不同湿热环境粘结-滑移模型的直线斜率,即温湿度相关系数 k₁、k₂、k₃、k₄,其拟合参数 R² 保持在 0.96 以上,SSE 非常接近 0,如图 12。

把代表 4 种湿热工况下粘钢界面等效刚度的拟

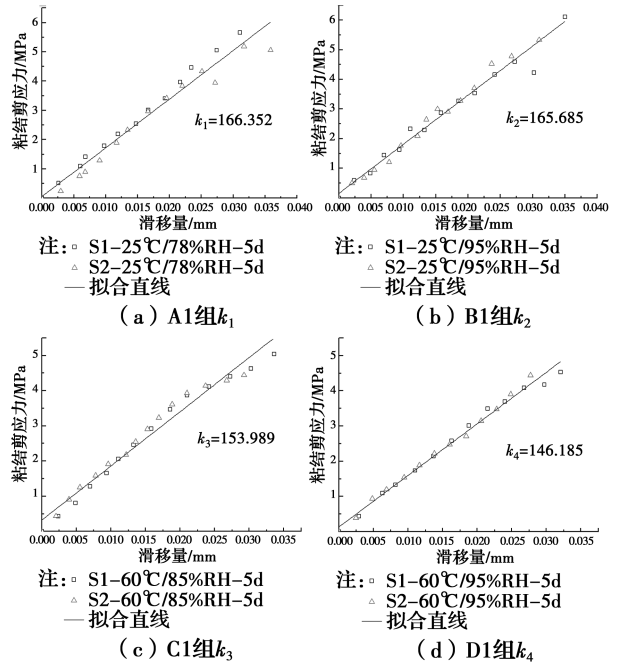


图 12 不同湿热环境拟合的 k 值

Fig. 12 The fitting k values under different hydrothermal environment

合系数 k₁、k₂、k₃、k₄ 代入式(5),求解出

$$k_{T,H} = 136.3 + 1.432T + 0.458H - 0.021T \cdot H \quad (7)$$

将式(7)代入表达式(5)得到本文模型,再把 5 d 试验组余下的一组数据及 B 组、D 组的 10、15 d 试验数据代入模型并进行校核,如图 13。

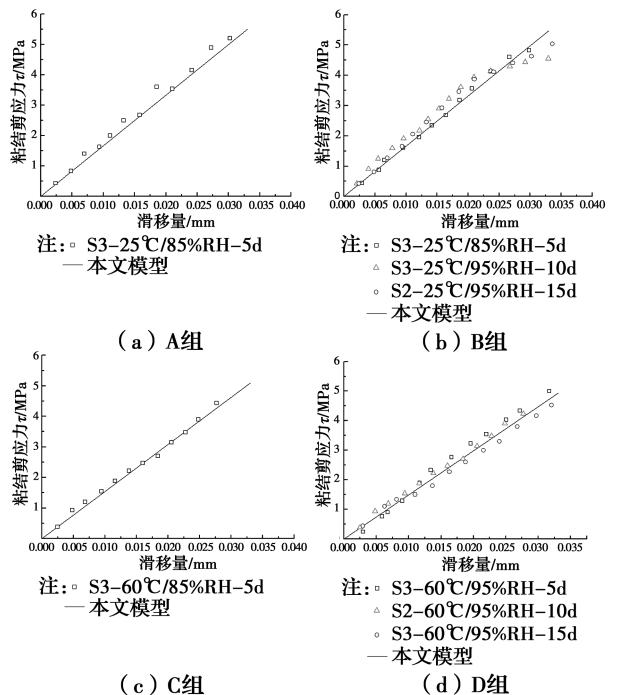


图 13 不同湿热环境的拟合模型

Fig. 13 The fitting models under different hydrothermal environment

从图 13 可以看出,不同试验工况的温度、湿度代入模型后,数值模拟结果与试验数据吻合良好,表明该本构模型能够正确描述湿热环境影响下界面的抗剪受力行为。在图 13(b)、(d)中,B、D 组 10、15 d 的粘结-滑移曲线大致符合模型规律,却具有更小的斜率,即相同剪应力作用下,10、15 d 作用下的试件具有更大的位移,说明湿热作用时间对粘结界面的强度有影响,模型能准确描述不同湿热耦合环境的影响,但不能精确考虑湿热作用时间因素。同时,在钢板剥离发生脆性破坏时存在很强的离散性,随着湿热环境作用时间的持续,混凝土材料的变形及测试中夹具滑移使试验离散性增强,部分试验数据存在跳跃。

4 结论

1) 钢板与混凝土界面的破坏模式为表层混凝土与胶层的综合表现,界面达到粘结强度后直接剥离破坏,受湿热作用影响,与结构胶性能有关。

2) 温度劣化对钢板-混凝土界面粘结强度的影响敏感,而高温高湿耦合作用会加速界面粘结性能的退化,粘结强度较室温组试件最大降低 9.32%;随着湿热老化天数延长,粘结性能进一步劣化。

3) 高温高湿状态对钢板-混凝土界面粘结性能有较大不利影响,其实质是界面粘结胶层在湿热老化过程中性能退化,使剪应力从加载端更快向自由端发展,粘结刚度下降,对界面耐久性损伤加剧。

4) 提出的粘钢加固界面在湿热耦合作用下的粘结-滑移本构模型与试验结果吻合较好,可为实际加固工程应用和相应规范编制提供参考。

参考文献:

[1] 吴甜宇. 湿热环境下粘钢加固混凝土结构界面力学性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.
WU T Y. Mechanical properties study of bonding interface between steel and concrete under wet-thermal condition [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (In Chinese).

[2] ZHANG P, WU G, ZHU H, et al. Mechanical performance of the wet-bond interface between FRP plates and cast-in-place concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18(6):1-9.

[2] ZHANG P, WU G, ZHU H, et al. Mechanical performance of the wet-bond interface between FRP plates and cast-in-place concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 2014, 18(6): 14-16.

[3] 黄培彦,周昊,郑小红,等. 湿热环境下 FRP 加固 RC 构件耐久性实验方法研究[J]. 实验力学, 2011, 26(5): 603-610.
HUANG P Y, ZHOU H, ZHENG X H, et al. On the experimental method for durability measurement of RC members strengthened with FRP served in hot and humid environments [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5): 603-610. (in Chinese)

[4] 杨勇新,岳清瑞,彭福明,等. 碳纤维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, 18.
YANG Y X, YUE Q R, PENG F M, et al. Study on the bond behavior of CFRP sheets to steel [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 1-5, 18. (in Chinese)

[5] 林于东,宗周红,陈宏磊. 粘钢加固混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(8): 90-98.
LIN Y D, ZONG Z H, CHEN H L. Experimental study on shear performance of concrete beams strengthened with steel plates[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(8): 90-98. (in Chinese)

[6] REN W, SNEED L H, GAI Y T, et al. Test results and nonlinear analysis of RC T-beams strengthened by bonded steel plates [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2015, 9(2): 133-143.

[7] 刘廷滨,赵建昌,张家玮,等. 粘钢加固 RC 梁非线性分析方法[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(4): 47-54.
LIU T B, ZHAO J C, ZHANG J W, et al. Nonlinear analysis method for RC beam strengthened with bonded steel[J]. China Railway Science, 2017, 38(4): 47-54. (in Chinese)

[8] 鲍安红. 粘贴加固混凝土梁的剥离研究[D]. 重庆:重庆大学, 2005.
BAO A H. The study for the desquamation of affixed reinforced RC beam [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese)

[9] LU Y Y, HU L, LI S, et al. Experimental study and analysis on fatigue stiffness of RC beams strengthened with CFRP and steel plate[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(3):701-707.

[10] SHRESTHA J, UEDA T, ZHANG D W. Durability of FRP concrete bonds and its constituent properties under the influence of moisture conditions[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(2): A4014009.

[11] DAI J G, GAO W Y, TENG J G. Bond-slip model for FRP laminates externally bonded to concrete at elevated temperature [J]. Journal of Composites for

- Construction, 2013, 17(2): 217-228.
- [12] 胡克旭,董坤,杨耀武. 温度作用对碳纤维-混凝土界面黏结性能的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 845-852.
HU K X, DONG K, YANG Y W. Temperature effect on bond behavior of carbon fiber reinforced polymer to concrete interface [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(6): 845-852. (in Chinese)
- [13] 李杉. 环境与荷载共同作用下 FRP 加固混凝土耐久性 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2009.
LI S. Durability of concrete strengthened with FRP under environmental and loading conditions [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [14] 张晖,阳建红,李海斌,等. 湿热老化环境对环氧树脂性能影响研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(3): 41-43.
ZHANG H, YANG J H, LI H B, et al. Effects of hydrothermal aging on properties of epoxy resin [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(3): 41-43. (In Chinese).
- [15] 吕西林. 建筑结构加固设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
LV X L. Structural reinforcement design [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [16] 郑小红. 湿热环境下 CFL-混凝土界面粘结-滑移机理研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
ZHENG X H. Study on the bond-slip mechanism of CFL-concrete interface under hot-wet environment [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [17] BISCAIA H C, CHASTRE C, SILVA M A G. Nonlinear numerical analysis of the debonding failure process of FRP-to-concrete interfaces [J]. Composites Part B Engineering, 2013, 50(7): 210-223.
- [18] 郭樟根,孙伟民,曹双寅,等. FRP 与混凝土界面黏结-滑移本构关系的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 1-5.
GUO Z G, SUN W M, CAO S Y, et al. Experimental study on bond-slip behavior between FRP and concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 1-5. (in Chinese)
- [19] CERONI F, IANNICIELLO M, PECCE M. Bond behavior of FRP carbon plates externally bonded over steel and concrete elements: Experimental outcomes and numerical investigations [J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 92: 434-446.

(编辑 胡玲)