

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.06.007

严酷水环境下胶-混凝土界面黏结性能

王永泉^{1,2},周 博¹,谭卓群¹,陈天骄¹

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 南京工程学院建筑工程学院,江苏 南京 211167)

摘要: 为了研究胶-混凝土界面黏结性能在严酷水环境下的劣化规律,设计了胶-混凝土黏结试件在泡淡水、泡淡水与持续荷载耦合以及冻融循环 3 种环境下的劣化试验。试验方案同时考虑了 2 种混凝土强度和 2 种界面胶黏剂,共制作了 100 个试件。在劣化处理后,对试件进行四点弯曲试验,实测了不同劣化时长下试件的破坏荷载、破坏形态和荷载-位移曲线。在此基础上,分析了胶-混凝土界面黏结性能的劣化规律。试验结果表明:淡水环境对胶-混凝土界面的影响可忽略不计;淡水与持续荷载耦合环境的劣化作用较为明显,42 d 后试件的最大承载力的下降可达 41.2%;冻融循环的劣化作用在循环次数 25 次时不明显,但当循环次数达到 50 次后,试件最大承载力的下降可达 28.3%;各种劣化环境下试件的破坏形态均为胶-混凝土混合破坏;荷载-位移曲线表明胶-混凝土混合破坏属于脆性破坏。

关键词: 胶-混凝土界面;冻融循环;持续荷载;淡水环境;黏结性能

中图分类号:TV331 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2019)06-0529-06

Research on bond performance of adhesive-concrete interface under harsh water environment

WANG Yongquan^{1,2}, ZHOU Bo¹, TAN Zhuoqun¹, CHEN Tianjiao¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. School of Architecture Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: In order to study the deterioration law of the bond performance of adhesive-concrete interface, the deterioration tests of adhesive-concrete specimens were designed under the environments of freshwater, coupling of freshwaters and sustain load, and freeze-thaw cycles. Considering two kinds of concrete strengths and two kinds of adhesive in the tests, a total of 100 sandwiched beam specimens containing adhesive-concrete interface were prepared. After the deterioration treatment, the specimens were experimented by four-point bending test, and the failure load, failure mode and load-displacement curves at different time were measured. Based on test results, the deterioration law of bond performance of the adhesive-concrete interface was analyzed. The test results showed that the influence of freshwater environment on the adhesive-concrete interface was negligible, the deterioration effect under coupled environment of freshwater and sustain load was more significant, and the ultimate load capacity of specimens decreased by 41.2% after 42 days. Besides, the deterioration effect of freeze-thaw cycles was not significant after 25-times cycles, but the ultimate load capacity of the specimens decreased by 28.3% after 50-times cycles. The failure mode of specimens under various deterioration conditions was adhesive-concrete mixed failure, and the load-displacement curves showed that this kind of failure was brittle failure.

Key words: adhesive-concrete interface; freeze-thaw cycles; sustained load; freshwater environment; bond performance

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51409084)
作者简介: 王永泉(1981—),男,副教授,博士,主要从事工程结构监测、检测与加固修复研究。E-mail: wyq_seu@126.com
引用本文: 王永泉,周博,谭卓群,等. 严酷水环境下胶-混凝土界面黏结性能[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):529-534.
WANG Yongquan, ZHOU Bo, TAN Zhuoqun, et al. Research on bond performance of adhesive-concrete interface under harsh water environment[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(6):529-534.

结构胶具有强度高、综合性能好等优点而被广泛应用于土木工程中,其与混凝土所形成的界面是土木工程中一种常见的界面。研究发现,胶-混凝土界面是通过黏结应力来实现荷载传递的,即加固后结构的承载力取决于结合面的黏结力^[1-2]。因此,对结合面的研究成为应用此类工程技术的关键。

对混凝土结构进行外贴 FRP 加固、化学植筋或灌缝修补裂缝等,会形成一个或多个黏结界面。目前,对 FRP 混凝土界面黏结性能的研究可分为试验研究^[3-4]、有限元模拟^[5-6]和数值分析^[7-8]三方面。研究表明,结合面的剥离失效是外贴 FRP 加固混凝土结构的主要破坏形式^[9-11]。郑晓芬等^[12]对植筋胶与混凝土界面黏结性能进行研究,将界面的压力-滑移曲线分为弹性阶段、黏滞滑移段和摩擦滑移段。董岩岩^[13]对混凝土路面灌缝胶失效机理进行研究,认为失效的直接原因是胶-混凝土界面存在弱边界层。水工结构不可避免地要承受水环境、持续荷载以及其他不利因素。Lin 等^[14]研究发现,水环境下,结构胶会发生水解引起黏结性能的下降。Al 等^[15]研究发现,持续荷载作用下,FRP 混凝土梁其界面承载力有显著的下降。

本文在前人研究的基础上,重点对胶-混凝土界面在多种严酷环境下的劣化性能进行试验研究,考虑 2 种界面胶黏剂和 2 种混凝土强度,基于四点弯曲梁试验,研究了泡淡水、泡淡水与持续荷载耦合的不同劣化时长作用下,以及不同冻融循环次数作用下,胶-混凝土界面黏结性能的劣化规律。

1 试验概况

1.1 试验设计

本次四点弯曲试验,考虑了 2 种混凝土强度和 2 种界面胶。混凝土强度选用 C30 和 C40,界面胶采用德国的 HILTI-RE500 和国产的 SJK-21 锚固型胶黏剂。HILTI-RE500 与混凝土的正拉黏结强度为 9.2 MPa,SJK-21 的劈裂抗拉强度不小于 8.5 MPa。进行试验的试件由两块尺寸为 100 mm × 100 mm ×

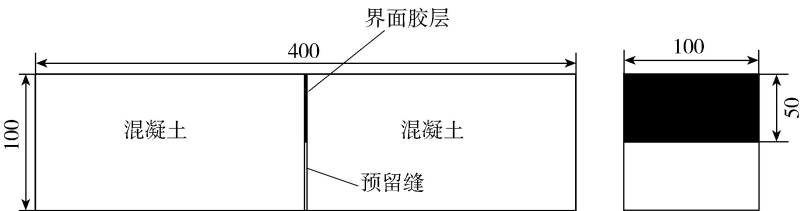


图 1 黏结试件示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic graph of the adhesive-concrete beam specimen (units: mm)

200 mm 的混凝土梁(按 GB 50010—2002 制作,养护 28 d),用界面胶黏结在一起组成。保证四点弯曲试验中裂缝出现在梁正中央位置,在界面胶下部使用胶带隔离胶层,进行“预留缝”处理,如图 1 所示。

进行四点弯曲试验前,对黏结试件在不同劣化环境下进行预处理。包括:(a)泡淡水环境;(b)泡淡水与持续荷载耦合环境;(c)冻融循环环境。干燥环境为试验的对照组。具体处理方法如下:

- a. 泡淡水处理:将黏结试件竖直浸泡于水桶中,胶-混凝土界面位于水面以下大于 3 cm 位置,保证界面处于持续水环境中。劣化时长分为:14 d、28 d 和 42 d。
- b. 泡淡水与持续荷载耦合处理:泡淡水的处理方法不变。持续荷载大小参考 Zhou 等^[16]的试验,施加重量为 10% P_c 的砝码,其中 P_c 为控制试件(即干燥环境的试件)的最大承载力。劣化时长分为:14 d、28 d、42 d。
- d. 冻融循环处理:采用快冻法,按规范 JGJ145—2013 的要求进行试验^[17]。将黏结试件放入试件模套,模套尺寸略大于试件。在装入黏结试块的模套中加水至高出试件 2 ~ 3 cm,然后将模套轻放入冻融箱中。冻融箱中温度 -25 ~ 25℃。冻融循环次数为 25 次和 50 次。进行四点弯曲试验的黏结试件共有 100 个:其中泡淡水、泡淡水与持续荷载耦合、和冻融循环环境下每组各 24 个,干燥环境下共 28 个。

1.2 试验仪器及方法

本次试验采用的仪器为:YWC 位移传感器、万能试验机,和四点弯曲加载工具:上压头之间的距离为 100 mm,下压头之间为 300 mm。

试验方法为,将四点弯曲加载工具按要求安装于万能试验机工作台上,固定压头底座位置,保证试验过程中底座不发生移动。将万能试验机与计算机连接,将位移传感器通过 DH3817F 系统与计算机连接,确保两个通道通畅。将黏结试件居中放于压头上,依次启动 DH3817F 系统进行位移测量、启动万能试验机系统进行荷载测量。从 0 kN 开始加载,直至试件破坏为止,导出位移-时间曲线和荷载-时间曲线。四点弯曲试验如图 2 所示。

2 试验结果及分析

2.1 荷载-位移曲线

四点弯曲试验主要利用万能试验机对黏结试件进行加载,用位移测量计记录跨中位移。以控制试件为例,如图3所示,对应的荷载-位移曲线可分为两个阶段:荷载上升阶段、垂直下降阶段。在荷载上升阶段,试验机加载接头与试件开始转为接触状态,在这个过程中,黏结试件开始承受弯矩,随着荷载逐渐增大,试件的位移也越来越大,预留缝开始向顶部扩展。当达到承载极限时,预留缝迅速扩展,黏结试件发生脆断。断裂的瞬间,荷载-位移曲线进入直线下降阶段,由于断裂发生时间非常短暂,断裂发生后加载接头脱离,因而荷载瞬间降到零点,位移值因试件脱离而迅速加大。在四点弯曲试验中,将荷载-位移曲线的峰值即试件破坏时所施加的外荷载视为最大承载力。由图3可判断,黏结试件的破坏为脆性破坏。

2.2 破坏特征

黏结试件的破坏是混凝土抗拉强度与界面胶黏结强度相互竞争的结果。实际破坏界面表现出3种不同的特征:(a)混凝土破坏(图4),特点为断裂界面发生在混凝土层,胶层平整未发生脱落,可直接观察到破坏面1、2上被凹凸不平的混凝土覆盖,表明界面黏结应力大于混凝土的抗拉强度;(b)界面胶破坏(图5),特点为断裂界面发生在界面胶层,混凝土层平整无明显破坏,破坏面1、2上可清楚地看到由于受拉作用被撕裂的胶层,表明界面黏结应力大于界面胶自身的黏结力;(c)胶-混凝土界面混合破坏(图6),特点为断裂发生在胶-混凝土黏结界面,破坏面1、2上可清楚地看到凹凸不平的混凝土层与被撕裂的胶层,表明完全发挥了胶与混凝土的抗拉强度。

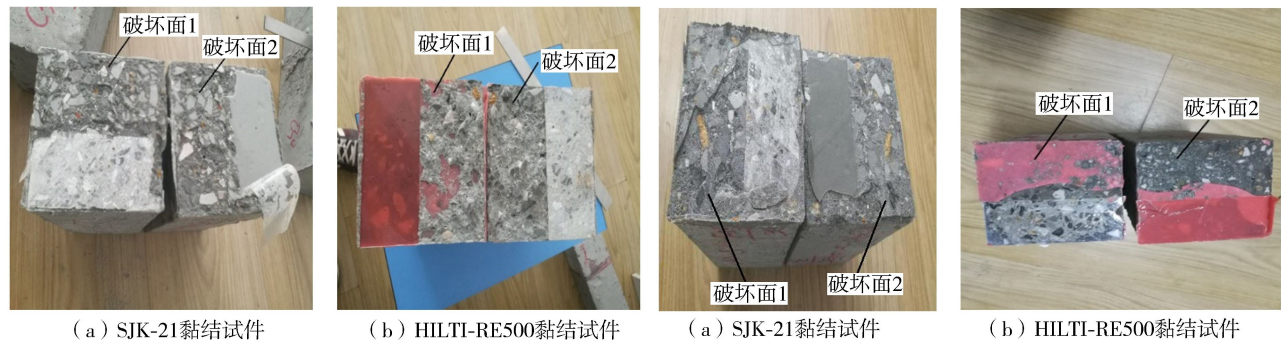


图4 混凝土层破坏
Fig.4 Concrete failure

图5 界面胶层破坏
Fig.5 Adhesive failure

试验的统计数据见表1,其中大频率发生的为胶-混凝土界面混合破坏,占少数的为混凝土破坏和界面胶层破坏。

需说明,经对比分析,黏结试件破坏类型的分布与劣化时长(14 d、28 d 和 42 d)无明显关系,与冻融次数(25 次和 50 次)无明显关系。表1 为不考虑劣化时长及冻融循环次数下,黏结试件破坏类型的分布。

2.3 最大承载力及其下降程度

本文以黏结试件断裂时所承受的荷载为最大

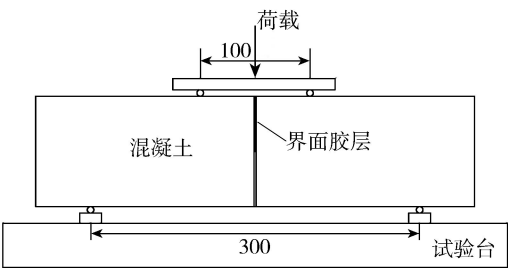


图2 四点弯曲试验示意图(单位:mm)
Fig.2 Schematic graph of four-point bending test (units: mm)

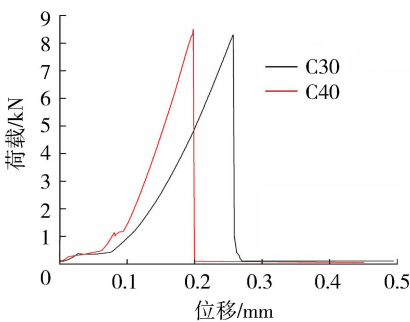


图3 控制试件荷载-位移曲线
Fig.3 Load-Displacement curves of control specimens

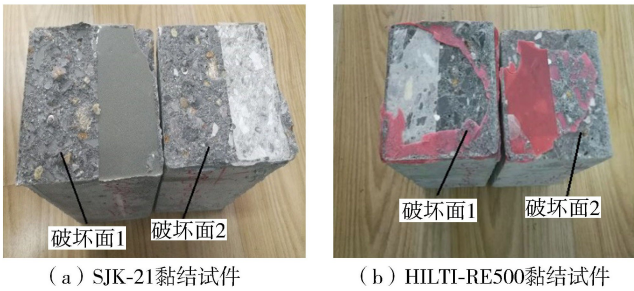


图6 胶-混凝土界面混合破坏
Fig.6 Adhesive-concrete mixed failure

承载力。试验中泡淡水、泡淡水与持续荷载耦合条件下,每组黏结试件为 2 个,冻融循环条件下,每组黏结试件为 3 个。取每组的平均值作为最大承载力的代表值。

2.3.1 泡淡水环境下最大承载力及其下降程度

泡淡水环境下,对于同一种界面胶,不同劣化时长对应的最大承载力表现出,混凝土强度越大其最大承载力越大的特点。图 7 中拟合了不同条件下,最大承载力的时变函数。采用线性函数时拟合结果较好,评价回归方程优劣的校正决定系数 $R^2=0.84\sim 1$ 。

由图 8 可知,随着劣化时间的增加,黏结试件最大承载力下降程度有微小的递增,下降程度最大仅为 5%。表明界面损伤速度与裂化时间没有明显关系。当劣化时长 t 分别为 14 d、28 d、42 d 时,无论采用哪种界面胶,C40 的黏结试件其最大承载力下降程度与 C30 的差值均在 $\pm 1\%$ 。表明界面损伤速度在混凝土强度与界面胶种类不同时,无显著差异。图 8 中拟合了不同条件下,最大承载力下降程度的时变函数。采用线性函数时拟合结果较好,校正决定系数 $R^2=0.84\sim 1$ 。

综合图 7 和图 8 来看,该组试验中,SJK-21 胶黏剂的性能优于 HILTI-RE500。

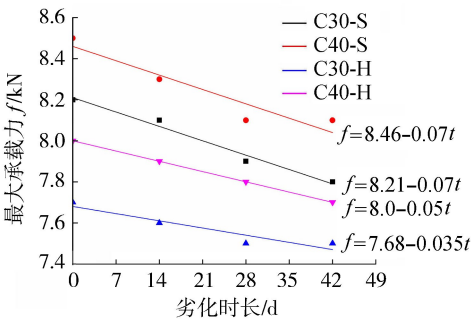


图 7 泡淡水环境最大承载力变化

Fig.7 Variation of failure loads with time in freshwater environment

表 1 黏结试件破坏类型分布				
Table 1	Distribution of failure types of specimens			
劣化环境	试件 编号	混凝土 破坏/%	界面胶 破坏/%	胶-混凝土 界面混合破坏/%
干燥	C30-S	0.0	57.1	42.9
	C40-S	0.0	71.4	28.6
	C30-H	0.0	100	0.0
	C40-H	14.3	57.1	28.6
泡淡水	C30-S	16.7	66.7	16.7
	C40-S	16.7	83.3	0.0
	C30-H	0.0	83.3	16.7
	C40-H	0.0	16.7	83.3
泡淡水+ 持续荷载	C30-S	16.7	66.7	16.7
	C40-S	0.0	83.3	16.7
	C30-H	0.0	66.7	33.3
	C40-H	0.0	100	0.0
冻融循环	C30-S	0.0	100	0.0
	C40-S	33.3	66.7	0.0
	C30-H	16.7	66.7	16.7
	C40-H	33.3	66.7	0.0

注:C30、C40 表示混凝土基材强度等级;H、S 表示界面胶种类为 HILTI-RE500、SJK-21 锚固型胶黏剂。

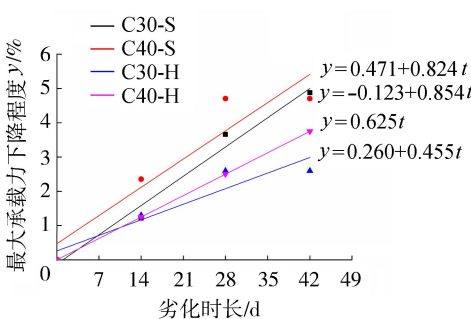


图 8 泡淡水环境最大承载力下降程度变化

Fig.8 Decline degree of failure loads with time in freshwater environment

2.3.2 泡淡水与持续荷载耦合环境下最大承载力及其下降程度

泡淡水与持续荷载耦合环境下,对同一种界面胶,在 $t=14$ d 时,混凝土强度为 C40 的黏结试件最大承载力大于 C30 的,在 $t=42$ d 时,混凝土强度为 C30 的黏结试件最大承载力大于 C40 的。图 9 中拟合了不同条件下,最大承载力的时变函数,采用二次函数时拟合结果较好,校正决定系数 $R^2=0.95\sim 0.99$ 。

由图 10 可知,随着劣化时间的增大,黏结试件最大承载力的下降程度明显,最大可达 41.2%。劣化时长 t 为 14 d、28 d、42 d 时,C40-S 的黏结试件其最大承载力下降程度与 C30-S 的差值分别为 1.0%、5.2%、5.0%,C40-H 的黏结试件其最大承载力下降程度与 C30-H 的差值分别为 -1.4%、0.6%、5.0%。以上数据表明,随着劣化时长的增大,C40 的黏结试件其界面损伤速度大于 C30 的。图 10 中拟合了不同条件下,最大承载力下降程度的时变函数,采用线性函数时拟合结果较好,校正决定系数 $R^2=0.89\sim 0.94$ 。

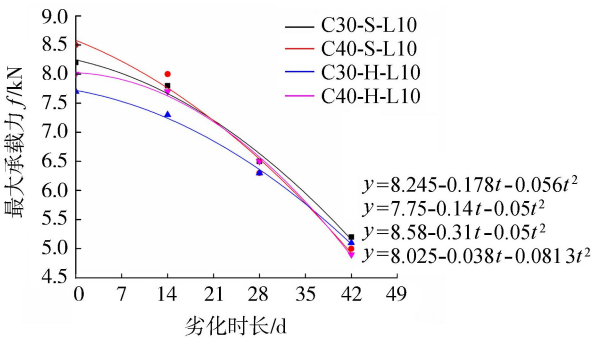


图 9 泡淡水与持续荷载耦合环境最大承载力变化

Fig.9 Variation of failure loads with time in freshwater and sustain load coupled environment

综合图 9 和图 10 来看,该组试验中,SJK-21 胶黏剂的性能优于 HILTI-RE500。

2.3.3 冻融循环环境下最大承载力及其下降程度

冻融循环环境下,对于同一种界面胶,当循环次数 $c=25$ 次时,C40 的黏结试件最大承载力大于 C30 的;当循环次数 $c=50$ 次时,C30 的黏结试件最大承载力大于 C40 的。图 11 中拟合了不同条件下,冻融次数与最大承载力的函数,采用二次函数拟合的结果最佳。

由图 12 可知,随着循环次数的增加,黏结试件最大承载力的下降程度明显,最大可达 28.3%。当循环次数 $c=25$ 次和 $c=50$ 次时,C40-S 的黏结试件其最大承载力下降程度与 C30-S 的差值分别为-1.3%、10%,C40-H 的黏结试件其最大承载力下降程度与 C30-H 的差值分别为-1.4%、15.9%。表明当循环次数小于 25 次时,C30 的黏结试件其界面损伤速度与 C40 的无明显差别。当循环次数大于 50 次时,C40 的黏结试件其界面损伤速度大于 C30 的。图 12 中拟合了不同条件下,冻融次数与最大承载力下降程度的函数,采用二次函数拟合的效果最佳。

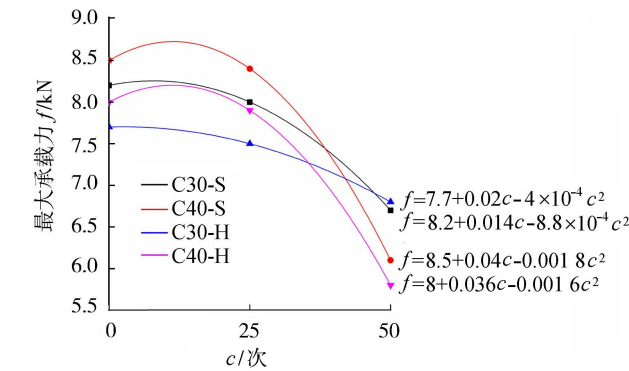


图 11 冻融循环环境下最大承载力变化

Fig. 11 Variation of failure loads with time in freeze-thaw cycles environment

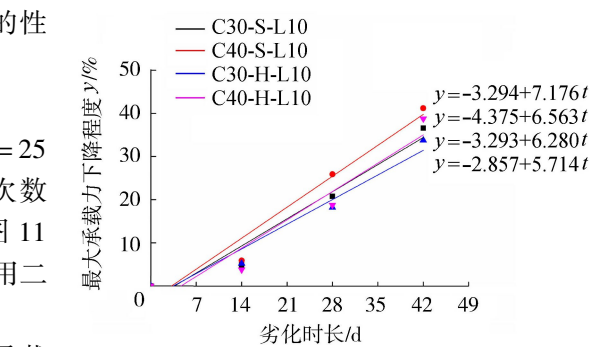


图 10 泡淡水与持续荷载耦合环境最大承载力下降程度变化

Fig. 10 Decline degree of failure loads with time in freshwater and sustain load coupled environment

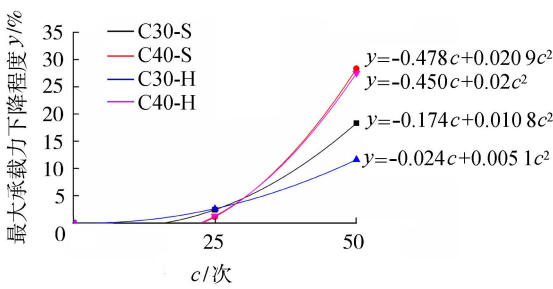


图 12 冻融循环环境下最大承载力下降程度变化

Fig. 12 Decline degree of failure loads with time in freeze-thaw cycles environment

综合图 11 和图 12 来看,该组试验中,SJK-21 胶黏剂的性能优于 HILTI-RE500。

3 结 论

- a. 黏结试件在混凝土基材强度、界面胶种类、劣化环境和劣化时长不同的情况下,大频率发生的为胶-混凝土界面混合破坏。
- b. 严酷水环境下的水工结构,劣化时长远大于 42 d。处于泡淡水环境下,优先考虑高标号 C40 的混凝土;若处于泡淡水与持续荷载耦合、或冻融循环的环境下,最大承载力下降显著,优先考虑低标号 C30 的混凝土;无论处于哪种严酷水环境,优先选择性能良好的界面胶。
- c. 若实际劣化环境与本文相同,则混凝土结构黏结界面的劣化规律和特性可参考图 7 ~ 12 中拟合的时变函数。对于更加复杂的环境,应结合黏结界面的实际受力特点,设计劣化和加载试验,研究其劣化规律。

参考文献:

[1] 叶锋. FRP-混凝土黏结性能的有限元分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
[2] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
[3] LIU X, LI Y. Experimental study of seismic behavior of partially corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened with FRP composites with large deformability[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 1071-1081.
[4] BILOTTA A, LUDOVICO M D, NIGRO E. FRP-to-concrete interface debonding: experimental calibration of a capacity model

- [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2011, 42(6): 1539-1553.
- [5] PHAM H B, Al-Mahaidi R. Modelling of CFRP-concrete shear-lap tests[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(4): 727-735.
- [6] 李伟文, 彭伟, 杨泳, 等. 基于黏结单元的 FRP-混凝土黏结界面的数值分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(1): 119-125. (LI Weiwen, PENG Wei, YANG Yong, et al. Numerical analysis of bond behavior of FRP concrete interface based on cohesive elements[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(1): 119-125. (in Chinese))
- [7] ZHANG D, GU X, YU Q, et al. Fully probabilistic analysis of FRP-to-concrete bonded joints considering model uncertainty[J]. *Composite Structures*, 2018, 185: 786-806.
- [8] ANTINO D T, PELLEGRINO C. Bond between FRP composites and concrete: assessment of design procedures and analytical models[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 60: 440-456.
- [9] MAZZOTTI C, SAVOIA M, FERRACUTI B. An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(7): 1409-1421.
- [10] 杨勇新, 岳清瑞, 胡云昌. 碳纤维布与混凝土黏结性能的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2001, 22(3): 36-42. (YANG Yongxin, YUE Qingrui, HU Yunchang. Experimental study on bond performance between carbon fiber sheets and concrete[J]. *Journal of Building Structures*, 2001, 22(3): 36-42. (in Chinese))
- [11] 方恩权. 碳纤维布与混凝土界面黏结性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2005.
- [12] 郑晓芬, 张建荣, 艾永江, 等. 植筋胶与混凝土界面结合性能的试验研究[J]. *结构工程师*, 2016, 32(5): 139-145. (ZHENG Xiaofen, ZHANG Jianrong, AI Yongjiang, et al. Experimental study on bonding behavior of adhesive and concrete interface[J]. *Structural Engineers*, 2016, 32(5): 139-145. (in Chinese))
- [13] 董岩岩. 基于弱边界层理论的灌缝胶失效机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [14] LIN M W, BERMAN J B, KHOSHBAKHT M, et al. Modeling of moisture migration in an FRP reinforced masonry structure[J]. *Building and Environment*, 2006, 41(5): 646-656.
- [15] AL C G, THERIAULT M, NEALE K W. Creep behaviour of CFRP-strengthened reinforced concrete beams[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(4): 1640-1652.
- [16] ZHOU A, BUYUKOZTURK O, LAU D. Debonding of concrete-epoxy interface under the coupled effect of moisture and sustained load[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2017, 80: 287-297.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构后锚固技术规程: JGJ145—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

(收稿日期: 2018-10-17 编辑: 张志琴)