

硫酸盐溶液干湿循环对 FRP 加固混凝土梁抗剪性能的劣化作用

李伟文¹, 徐文冰¹, 周英武¹, 隋莉莉¹, 邢 锋¹, 管天成²

(1. 广东省滨海土木工程耐久性重点实验室, 深圳大学 土木工程学院, 深圳 518060;

2. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 深圳 518055)

摘要: 为了研究和分析 CFRP 加固混凝土梁在沿海恶劣条件下的耐久性问题, 进行了人工模拟硫酸钠溶液干湿循环试验, 重点研究了硫酸盐溶液干湿循环因素对 CFRP 加固混凝土梁抗剪性能的劣化影响. 研究表明: 硫酸盐溶液干湿循环对加固梁极限荷载有明显影响, 极限承载力有明显下降, 对 FRP 的有效应变也有较大影响, 但没有改变应变的分布规律.

关键词: 纤维增强复合材料; 钢筋混凝土梁; 抗剪性能; 硫酸盐腐蚀; 干湿循环

中图分类号: U 461; TP 308

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2014)08-1226-06

Effect of Sulfate Solution Dry-Wet Cycling Environment on Shear Behavior of Concrete Beam Externally Bonded FRP

LI Wei-wen¹, XU Wen-bing¹, ZHOU Ying-wu¹, SUI Li-li¹, XING Feng¹, GUAN Tian-cheng²

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory for Marine Civil Engineering, College of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: To investigate the mechanical performances of the concrete beams externally bonded fiber reinforced polymer (FRP) under severe environmental conditions, seven shear-strengthened beams with CFRP were designed and studies in the artificial accelerating test of sulfate solution dry-wet cycling degradation. Experimental results show that sulfate solution dry-wet cycling degradation affects significantly the shear behavior of shear-strengthened beams. The shear capacity of specimen decreases obviously with the time of the artificial ageing test and the FRP effective strain reduces rapidly. However, the strain distribution of FRP along the beam's longitudinal axis seems not to be influenced by the sulfate/dry-wet cycling corrosion.

Key words: fiber reinforced polymer (FRP); reinforced concrete beam; shear behavior; sulfate corrosion; dry-wet cycling test

随着纤维增强复合材料 (fiber reinforced polymer, FRP) 越来越普遍应用于结构加固工程^[1-2], FRP 加固混凝土结构的耐久性问题引起了人们的极大关注^[3-4]. 目前, 国内外对 FRP 加固混

凝土结构的耐久性已进行了大量研究, 内容涉及 FRP 加固混凝土构件在冻融循环、干湿循环、温度、酸/碱/盐溶液等环境下的耐久性, 研究层次包括 FRP 材料的耐久性研究^[5]、FRP 混凝土界面的

收稿日期: 2013-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278305); 国家“973”计划资助项目(2011CB013604)

作者简介: 李伟文(1967—), 男, 副教授, 主要从事 FRP 加固技术及混凝土耐久性方面的研究, E-mail: liweiwen@szu.edu.cn

耐久性研究^[6-7]、FRP 加固构件的耐久性研究^[8-11]。近年来,国内外对钢筋混凝土梁正截面承载力的加固试验和理论研究比较多,而对钢筋混凝土梁斜截面抗剪承载力进行补强加固的试验研究和理论分析相对偏少^[1-2,5-6],对于 FRP 加固钢筋混凝土梁抗剪耐久性研究几乎空白。

本文通过 7 根 CFRP 加固钢筋混凝土梁在硫酸盐溶液干湿循环作用下的抗剪性能试验研究,着重进行了极限荷载和 FRP 有效应变等方面的分析。

1 试件设计与试验方法

1.1 试验材料

试验梁所用混凝土按照普通混凝土进行配合比设计,设计强度 C30。每立方米混凝土材料用量设计值分别为:水 175 kg;水泥 285 kg;砂 795 kg;石子(最大粒径 75 mm)1 t;混凝土水灰比 0.5。试验梁同批浇筑,浇筑时制作一组立方体标准试块,与试验梁同条件养护 28 d 后进行抗压试验,试件编号 2-1、2-2、2-3 的抗压强度分别为 40.9、45.9、40.7 MPa,28 d 后抗压强度的平均值为 42.5 MPa。

试验梁所用纵筋为 HRB400,直径 20 mm;箍筋为 HPB235,加固区箍筋直径 6 mm,非加固区箍筋直径 8 mm。在构件加固区截面中,为了贴近工程的实际情况,正常配置了抗剪箍筋,如图 1 所示。为了尽可能避免构件在加固区斜截面破坏前出现正截面破坏和非加固区的斜截面破坏,试验梁超强配置了抗弯纵筋,并在非加固区超强配置了抗剪箍筋,如图 2 所示。

1.2 试验设计

试验梁为矩形截面简支梁,计算跨度 $l_0 = 1\ 300\text{ mm}$,钢筋笼的实际长度为 $1\ 450\text{ mm}$,实际保护层厚度 20 mm ,本文中取构件截面有效高度为 220 mm 。加固方式为 U 型条带一层 + 压条,试验采用 4 点弯曲加载试验方式。各梁的编号及详细信息如表 1 所示。

本次耐久性试验主要根据中国南方沿海地区气候环境特点^[3-4],采用硫酸盐溶液干湿循环的人工加速劣化试验作为抗剪加固梁的劣化条件。劣化试验主要技术参数如表 2 所示。

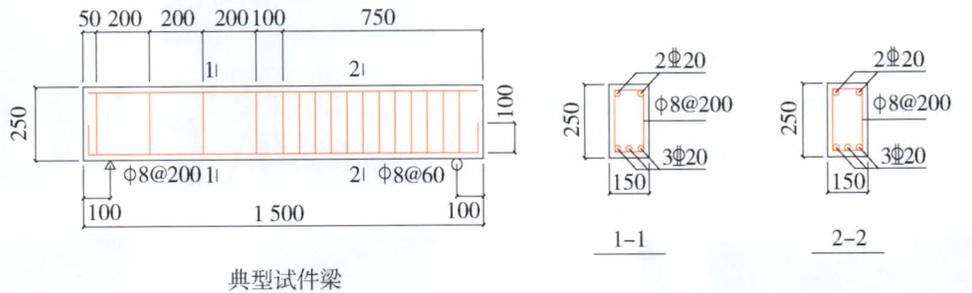


图 1 构件尺寸及配筋(mm)

Fig. 1 Design and scheme of RC beam (mm)

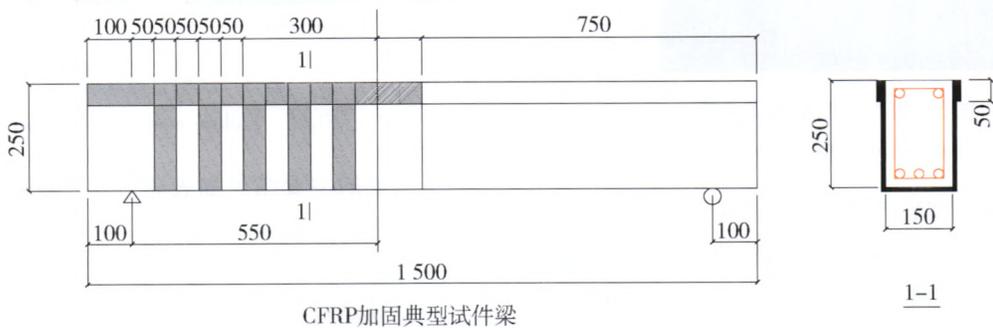


图 2 混凝土梁抗剪加固方案(mm)

Fig. 2 Configuration of beam shear-strengthened with FRP (mm)

表1 试验梁加固及试验方案

Table 1 Test program and scheme of strengthened beams

劣化环境	试件编号	劣化时间/d	加固情况
对比梁	B-0	0	未加固
	B-1	0	U型一层+压条
盐溶液干湿循环	B1-30	30	U型一层+压条
	B1-45	45	U型一层+压条
	B1-60	60	U型一层+压条
	B1-75	75	U型一层+压条
	B1-90	90	U型一层+压条

表2 硫酸盐溶液干湿循环的人工加速劣化试验参数

Table 2 Details of sulfate solution dry-wet cycling test

劣化环境	试验参数	劣化时间/d
硫酸盐溶液干湿循环	1) 5%质量浓度的硫酸钠溶液喷雾,喷雾时温度	30
	35 ± 1 °C,湿度 > 70%,持续	45
	时间 2 h.	60
	2) 45 °C热风干燥,持续时	75
	间 3 h.	90

试验采用的环境模拟箱由苏州晨光试验设备有限公司制作的盐水喷雾试验箱. 循环环境由设定程序自动控制. 环境模拟试验箱如图3所示.



图3 模拟环境加速试验箱

Fig. 3 Chamber for artificial acceleration test

本试验采用ZY-50型液压力式压力试验机,通过分配钢梁进行4点弯曲加载试验. 加载时由荷载控制,在开裂或接近破坏时以每级5 kN进行加载,其他情况以每级10 kN进行加载. 每级加载后,持荷一段时间,待仪表的指示值基本稳定后观察裂缝的发展情况,并记录有关试验数据. 随后,继续下一级加载. 试验装置如图4所示.



图4 试验装置照片

Fig. 4 Setup for four-point bending test

2 试验结果及分析

对完成试验所需的干湿循环时间后的FRP抗剪加固试验梁取出,此时试验梁表面潮湿,待试验梁逐渐自然恢复干燥,将试验梁表面析出的盐粉擦去,在FRP表面粘贴相应数量的应变片,进行加载试验.

在极限荷载作用下,所有试验梁均发生典型的剪切破坏. 劣化前后的抗剪加固试验梁的FRP条带在荷载作用下均发生剥离破坏. 图5分别给出了部分梁破坏后的照片.

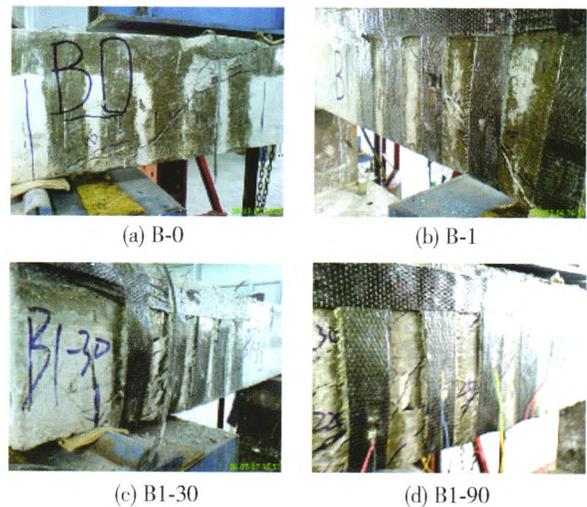


图5 试验梁破坏模式

Fig. 5 Failure modes of specimens

试验的主要结果如表3所示. 极限荷载的加固效果是指各FRP抗剪加固试验梁抗剪强度相对于对照梁B-0的提高率;劣化效果是指各FRP抗剪加固试验梁经过不同劣化周期后的抗剪强度相对于未劣化加固梁B-1的下降率. FRP有效应变中的劣化效果是指各FRP抗剪加固试验梁经过不同劣化周期后的FRP有效应变相对于未劣化加固梁B-1的下降率.

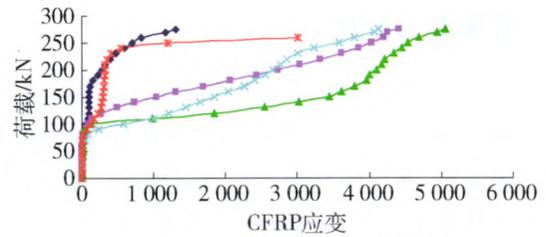
表 3 试验梁的抗剪极限荷载及 FRP 有效应变
Table 3 Testing results of shear ultimate load and FRP effective strain of specimens

试件编号	试验梁极限荷载			FRP 有效应变	
	极限荷载/kN	加固效果/%	劣化效果/%	极限应变/ $\mu\epsilon$	劣化效果/%
B-0	227.8	—	—	—	—
B-1	279.7	22.8	0	5 065	0
B1-30	270.1	18.6	-3.4	4 900	-3.26
B1-45	269.8	18.4	-3.5	4 735	-6.52
B1-60	265.2	16.4	-5.2	4 419	-12.75
B1-75	257.7	13.1	-7.9	4 159	-17.89
B1-90	244.4	7.3	-12.6	3 886	-23.28

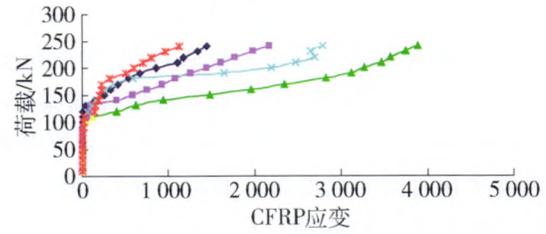
CFRP 条带和箍筋对于钢筋混凝土梁的抗剪承载力贡献的作用机理基本相同,但是由于 FRP 与钢筋的材性各异,因而会对混凝土梁的整体力学性能产生不同的影响. 箍筋是延性材料,位于最大剪应力位置的箍筋首先屈服,但并未拉断,其良好的延性将保证其他箍筋也相继进入屈服阶段. CFRP 条带为脆性材料,不同位置处的应变均随着应力的增加而线性增大,但很难保证最终破坏时所有的 CFRP 条带均能达到极限拉伸强度. 由于弯剪区的斜裂缝宽度不均匀,因此各 FRP 条带的有效应变亦不一样. 图 6(a)和(b)分别绘制出未劣化加固梁 B-1 和劣化 90 d 加固梁 B1-90 上各 CFRP 条带的应变-荷载曲线.

由图 6 可看出,经盐溶液干湿循环后试验梁斜截面 CFRP 应变-荷载曲线与未劣化试件梁具有相似的发展规律. 梁开裂前,碳纤维应变很小,斜裂缝端部条带上的应变相对较小,在中部相对很大. 随着荷载的增大,两者的差值也不断增加. 而未与斜裂缝相交的条带,应变很小,增长缓慢. 当梁达到开裂荷载时,应变突然增大,表明外包碳纤维在梁开裂后开始发挥作用,与箍筋共同承担荷载,CFRP 主要在加载后期发挥其良好的抗剪作用. 此外,图 6 也清晰显示出在相同的荷载情况下,不同位置的 CFRP 条带在相同荷载作用下所测量到的应变数值也是各异.

图 7 给出了未劣化加固梁 B-1 和劣化 90 d 试验梁 B1-90 在同一剪力水平下,斜截面上 CFRP 应变分布的实测结果. 试验结果表明:无论是劣化加固梁还是未劣化加固梁,外贴 CFRP 条带的应变分布



(a) 未劣化的抗剪加固梁B-1



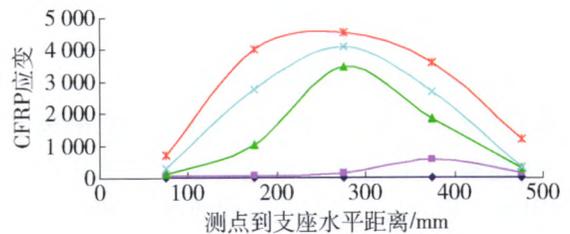
(b) 劣化90 d的抗剪加固梁B1-90

—frp1 —frp2 —frp3 —frp4 —frp5

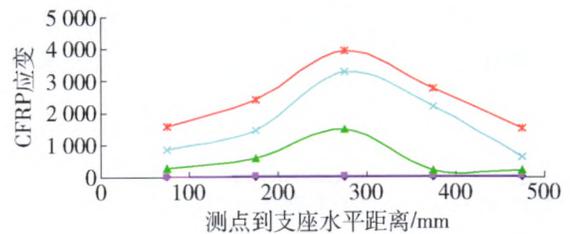
图 6 斜截面 CFRP 应变发展曲线

Fig. 6 FRP strain development against applied load

都不均匀,在剪跨区中部,应变增加较快,而在剪跨区两端(即靠近加载点和支撑点),应变增加缓慢. 这与斜裂缝开展的位置密切相关.



(a) B-1梁CFRP应变分布曲线



(b) B1-90梁CFRP应变分布曲线

—50 kN —100 kN —150 kN —200 kN —250 kN

图 7 CFRP 应变分布曲线

Fig. 7 Strain distribution of FRP along the longitudinal axis of beam

通过对劣化前后试验梁试验数据的统计整理和对斜截面 CFRP 应变发展和分布特点的初步分析,可看出盐溶液干湿循环对外贴纤维加固混凝土梁 CFRP 应变发展和分布规律无影响,也就是说劣化作用主要影响到力学指标的变化,而对加固梁的破坏模式影响则不大.

3 抗剪承载力分析

从表3中的试验结果可看出,与未加固的对比梁(梁B-0)相比,采用CFRP布对钢筋混凝土梁进行抗剪加固后,无论构件是否经过盐溶液干湿循环,斜截面承载能力均有不同程度的提高,构件抗剪荷载提高幅度最大值为22.8%(梁B-1),幅度提高最小的亦有7.3%(梁B1-90)。然而,在经过不同周期的硫酸盐溶液干湿循环劣化试验后,试验梁的抗剪效果均下降。与未经过劣化试验的抗剪加固梁(梁B-1)进行比较,发现经过劣化试验的加固梁的极限荷载随着劣化时间的增加而呈加速下降的趋势。利用分析软件对下降趋势进行拟合(见图8),得出考虑硫酸盐干湿循环腐蚀作用下的极限荷载下降率与劣化时间之间存在一个三次方的函数关系,因变量 β 称为硫酸盐溶液干湿循环的强度劣化影响因子。对于存在硫酸盐溶液干湿循环环境的加固梁可通过乘以一个 β 来考虑硫酸盐干湿循环下梁抗剪承载力中FRP的贡献作用,即对 V_f 进行修正。劣化因子 β 是一个基于试验劣化条件的参数,应根据不同的劣化环境进行选取。

$$\beta = 4.16532 \times 10^{-5} t^3 - 0.00446 t^2 + 0.19858 t + 0.03064 \quad (1)$$

基于图8拟合曲线及式(1)强度劣化影响因子 β 的发展趋势,可设想在硫酸盐溶液干湿循环作用下,加固梁抗剪承载力随劣化时间的增加,极限承载力下降速度越来越快。当劣化时间超过某一特征值(本研究为100d)时,试验梁的抗剪承载力将进入急剧下降阶段。在短时间内试验梁将完全失去承载能力。

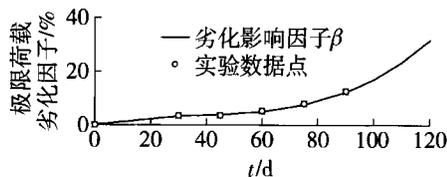


图8 抗剪承载力劣化因子与硫酸盐干湿循环时间的关系

Fig.8 Relationship between shear strength degradation factor and time of sulfate solution dry-wet cycling test

4 FRP有效应变分析

由表4可看出,随着劣化时间的增加,与斜裂缝相交的FRP条带的有效应变也是持续下降。未劣化加固梁B-1破坏时CFRP有效应变为5065 $\mu\epsilon$,而劣

化90d梁B1-90上CFRP有效应变为3886 $\mu\epsilon$ 。说明由于混凝土受到硫酸盐溶液和干湿循环耦合因素的影响,混凝土与FRP之间的黏结性能下降,不能有效保证FRP-混凝土界面的黏结性能,因此CFRP的利用率相应下降,对混凝土梁的抗剪贡献亦随之降低。

另外在试验中可发现,盐溶液干湿循环对CFRP与混凝土的界面黏结性能影响显著。黏结界面经过90d劣化后局部出现少量鼓胀现象,这可能是混凝土由于硫酸盐腐蚀变得疏松和体积膨胀,而干湿循环会加剧这一现象的严重程度,影响到FRP-混凝土界面黏结强度降低,提前出现剥离现象。

从表3中可看出,经过干湿循环后FRP有效应变随时间增长而有较明显的下降,当干湿循环达到90d时,FRP有效应变的下降量达到了23.28%。利用分析软件可拟合出FRP有效应变随着劣化时间的变化关系曲线(如图9所示),得出考虑硫酸盐干湿循环腐蚀作用下的FRP有效应变下降率与劣化时间之间存在一个二次方的函数关系,因变量 ξ 称为硫酸盐溶液干湿循环的FRP有效应变劣化影响因子。

$$\xi = 0.00224 t^2 + 0.06684 t - 0.27702 \quad (2)$$

通过有效应变劣化影响因子 ξ 可便利地预测出加固梁中FRP有效应变随劣化时间的变化规律。

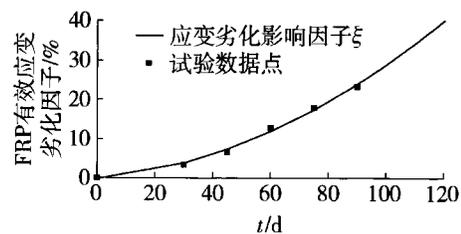


图9 FRP有效应变劣化因子与硫酸盐干湿循环时间的关系

Fig.9 Relationship between FRP effective strain degradation factor and time of sulfate solution dry-wet cycling test

5 结论

1) 硫酸盐溶液干湿循环对FRP加固钢筋混凝土梁抗剪极限承载力影响显著。在硫酸盐干湿循环劣化环境下,FRP加固梁的极限承载力会下降;随劣化时间的延长,下降速率随之增加;当劣化时间超过某一特征值时,抗剪承载力的下降幅度会急剧增加。

2) 硫酸盐溶液干湿循环对FRP有效应变的影响较显著。在硫酸盐干湿循环劣化环境下,FRP有

效应会下降;而随劣化时间的延长,下降速率随之增加。

3) 虽然硫酸盐溶液干湿循环对FRP加固混凝土梁的抗剪极限承载力和FRP有效应变会造成显著的影响,但并未改变加固梁的破坏模式。

4) 通过试验研究,经验回归了硫酸盐溶液干湿循环条件下加固梁抗剪承载力、FRP有效应变随劣化时间的关系曲线。由此,初步建立了强度劣化影响因子 β 和FRP有效应变劣化影响因子 ξ 的经验回归公式。

参考文献:

- [1] 于清. FRP的特点及其在土木工程中的应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(6): 26-30.
YU Qing. Character and application of FRP composites in civil engineering [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2000, 33(6): 26-30. (in Chinese)
- [2] 腾锦光, 陈建飞, 史密斯 S T, 等. FRP加固混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 100-124.
- [3] 张光辉. 混凝土结构硫酸盐腐蚀研究综述[J]. 混凝土, 2012(1): 49-61.
ZHANG Guang-hui. Sulfate corrosion of concrete structure review [J]. Concrete, 2012(1): 49-61. (in Chinese)
- [4] 梁咏宁, 袁迎曙. 硫酸盐侵蚀环境因素对混凝土性能退化的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 452-457.
LIANG Yong-ning, YUAN Ying-shu. Effects of environmental factors of sulfate attack on deterioration of concrete mechanical behavior [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(4): 452-457. (in Chinese)
- [5] 任慧韬, 姚谦峰, 胡安妮. 纤维增强复合材料的耐久性试验研究[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 520-526.
REN Hui-tao, YAO Qian-feng, HU An-ni. Experimental study on durability of fiber reinforced polymer [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5): 520-526. (in Chinese)
- [6] 李伟文, 邢锋, 严志亮, 等. 硫酸盐腐蚀环境下CFRP-混凝土界面性能研究[J]. 深圳大学学报: 理工版, 2009, 26(1): 86-91.
LI Wei-wen, XING Feng, YAN Zhi-liang, et al. Investigation on the mechanical behavior of adhesive bonded CFRP-concrete joints under the sulfate solution [J]. Journal of Shenzhen University: Science & Engineering, 2009, 26(1): 86-91. (in Chinese)
- [7] 李伟文, 邢锋, 隋莉莉, 等. 硫酸盐溶液对CFRP-混凝土界粘结合性能的影响[J]. 施工技术, 2010, 39(4): 94-97.
LI Wei-wen, XING Feng, SUI Li-li, et al. Influence of sulfate solution on CFRP-concrete interface bonding strength [J]. Construction Technology, 2010, 39(4): 94-97. (in Chinese)
- [8] 李趁趁, 高丹盈, 赵军. 干湿环境下FRP全裹与条带间隔加固混凝土圆柱耐久性试验研[J]. 土木工程学报, 2009, 42(11): 8-14.
LI Chen-chen, GAO Dan-ying, ZHAO Jun. Experimental study on durability of FRP entirely-wrapped concrete cylinders and FRP strip-wrapped concrete cylinders under wet-dry cycles in salt solution [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(11): 8-14. (in Chinese)
- [9] TOUTANJI W, GOMEZ W. Durability performance of concrete beam externally bonded with FRP composite sheets[J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(4): 351-358.
- [10] SOUDKI K, EL-SALAKAWY E, CRAIG B. Behavior of CFRP strengthened reinforced concrete beams in corrosive Environment [J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(3): 291-298.
- [11] RAMANI K, VERHOFF J, KUMAR G, et al. Environmental durability of moisture-cured urethane adhesive joints [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2000, 20(5): 377-385.

(责任编辑 杨开英)