

碳纤维材料应用于桥梁工程的耐久性研究

诸葛萍, 丁 勇*, 布占宇

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 力学性能优异的碳纤维增强复合材料(CFRP)在桥梁工程中具有广泛的应用前景, 然而 CFRP 材料及其与桥梁结构组合体系的耐久性还有待研究. 笔者对近年来对 CFRP 材料、CFRP 材料加固混凝土梁(柱)、CFRP 筋—混凝土主梁的耐久性及劣化机理等问题的研究成果进行系统的归纳和总结. 指出: 桥梁用 CFRP 材料多因素耦合环境加速腐蚀试验方法、CFRP 材料应用于桥梁工程的防腐措施、CFRP 材料与结构的组合界面力学行为随环境变化的规律、含 CFRP 材料的桥梁结构耐久性年限理论预测模型以及 CFRP 拉索和预应力筋的锚固体系耐久性等有待进一步研究.

关键词: 碳纤维增强复合材料; 桥梁工程; 耐久性; 腐蚀

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2013) 03-0099-06

碳纤维增强复合(CFRP)材料具有高强度、高模量、耐疲劳及密度小等优点, 从 20 世纪 80 年代开始被大量地应用于桥梁工程, 且在该领域中的应用日益广泛. CFRP 材料常作为补强材料用于旧桥加固, 作为预应力筋用于预应力梁, 作为拉索和吊索用于斜拉桥、悬索桥及拱桥等. 上述应用均存在 CFRP 材料本身及其与粘结介质界面的耐久性问题, 其中 CFRP 材料与组合结构粘结界面耐久性主要包括该材料与混凝土和环氧树脂粘结界面耐久性. 诸多研究表明, 不利环境因素(如酸、盐、冻融循环以及水等)及长期荷载作用会降低材料本身及粘结界面的力学性能, 设计时需对相应的力学性能作折减处理, 日本、美国、加拿大及挪威等国家考虑耐久性后对 CFRP 材料性能的设计取值作了相应的规定^[1]. 20 世纪 90 年代以来, 学者开始对 CFRP 材料应用于桥梁工程时存在的材料和相应组合结构耐久性进行了研究, 并取得了诸多重要的成果, 但还存在研究系统性不强、不深入、不全面以及理论研究不足等问题, 这些问题需要通过通过对现有研究成果加以整理、分析和总结方可有所了解.

笔者对各种不利因素作用下 CFRP 材料本身

的耐久性、CFRP 布(筋)加固混凝土梁(柱)的耐久性、劣化机理及耐久性理论进行了分析和总结, 指出了耐久性试验研究方法、耐久性研究对象及耐久性理论研究等方面的不足, 为今后研究提供参考.

1 CFRP 材料耐久性

CFRP 材料可以索、筋、布及片材的形式作为斜拉桥拉索或悬索桥和拱桥的吊索、混凝土主梁的预应力筋, 混凝土梁和钢桥的加固材料应用于各式桥梁结构中, 但材料本身存在着耐久性问题, 需加以研究.

1.1 不利环境因素作用对耐久性的影响

有学者研究表明, 恶劣环境(如冻融、潮湿、酸、碱、盐及紫外线等)因素和金属电偶作用会降低 CFRP 材料的力学性能, 在实际工程应用中, 其性能须作相应的折减考虑. CFRP 材料的耐久性主要通过不利环境加速腐蚀试验进行考察. 加速腐蚀试验是指在比实用条件苛刻的情况下进行的腐蚀试验, 目的是在比实用条件更短的时间内能得出相对比较的结果.

Cusson 等^[2]对大量 CFRP 材料试件在 750 h 内

收稿日期: 2012-11-23.

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

基金项目: 国家重点实验室开放基金(201202); 浙江省教育厅科研项目(Y201222960); 交通行业重点实验室开放基金(201202).

第一作者: 诸葛萍(1982-), 男, 浙江瑞安人, 博士/讲师, 主要研究方向: 桥梁工程. E-mail: zhugeping@nbu.edu.cn

*通信作者: 丁 勇(1975-), 男, 浙江余姚人, 副教授, 主要研究方向: 桥梁工程. E-mail: dingyong@nbu.edu.cn

进行 250 次冻融循环作用, 温度涨落为 $-29\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 实验结束后测试试件的张拉强度、弹性模量、极限应变及层间剪切强度. 结果表明: 冻融循环作用对 CFRP 性能影响较小. Francesco 等^[3-4]将 CFRP 筋浸泡于酸(HCl)、碱($\text{Ca}(\text{OH})_2$)、盐($\text{NaCl}+\text{CaCl}_2$)等溶液中, 结果表明: CFRP 筋的直径、材料表面的光洁度、温度和基材的类型对 CFRP 筋抵抗碱溶液腐蚀能力有较大的影响. 文献[4-7]的研究表明: 在潮湿、盐、热、低温以及 UV 辐射等环境因素中, 使 CFRP 材料的弯曲和拉伸强度下降最多的是海洋环境对应的环境因素. Chen 等^[8]将 CFRP 筋材置于 5 种溶液(蒸馏水、 NaOH 、 $\text{Ga}(\text{OH})_2$ 、 NaCl 、 Na_2SO_4)中进行不利环境加速腐蚀试验, 并进行了干湿和冻融循环试验, 结果表明: CFRP 的质量、组分、生产工艺以及纤维-基体界面情况对其耐久性影响较大.

CFRP 的湿热老化一直是研究的焦点. 目前, 对于湿热环境作用下 CFRP 的耐久性研究还不充分, 研究结论存在一定的分歧. 文献[9-10]的研究表明: 通常情况下单向 CFRP 的轴向拉伸性能基本不受湿热环境的影响. 但 Abanilla 等^[11]的研究表明: 湿热作用对 CFRP 的抗拉强度和弹性模量有显著影响, 试件在 23.0 、 37.8 、 $60.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下湿热老化 100 周后其抗拉强度分别降低了 1.0% 、 12.2% 和 19.4% , 弹性模量分别降低了 5.3% 、 11.7% 和 27.0% .

CFRP 和金属材料之间有着较大的电位差, 在腐蚀介质中, 当二者接触时, 会引起金属材料的电偶腐蚀, 金属材料的腐蚀速率明显加快, 会在较短时间内即可造成有效破坏. Tucker^[12]在试验中发现, CFRP 与金属形成的偶合对在海水浸泡后, CFRP 阴极附近的溶液 pH 值上升, 其表面逐渐出现结晶体, 表明聚合物基体树脂发生了降解反应. 在 CFRP 材料耐久性改良方面, Mathieu 等^[13]研究表明: 在 CFRP 材料基体中加入适度的无机粉末(如粘土粉)可提高材料的机械强度、防火性能及体积稳定性等力学性能.

张新越等^[14]对 CFRP 筋产品进行酸碱盐介质腐蚀与冻融作用对耐久性的影响的试验研究, 结果表明: CFRP 筋具有较好的耐酸盐介质腐蚀与冻融循环作用的性能, 同时还具有很好的耐碱性. 在酸碱盐 3 种不利环境作用下, 碳纤维强度下降了

4%左右, 弹性模量下降了 15%左右. 王伟等^[15]将碳纤维绞线(CFCC)置于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 碱溶液进行耐久性加速试验, 结果表明: CFCC 筋表面未出现坑蚀现象, 弹性模量提高了 12.6% . 王琦等^[16]采用中性盐雾条件模拟海洋大气环境对 CFRP 材料进行了加速老化试验, 结果表明: CFRP 的层间剪切强度和弯曲强度分别下降了 10.3% 和 9.8% .

综上所述, CFRP 材料耐久性研究主要通过不利环境加速腐蚀试验进行, 但尚未形成成熟的耐久性试验方法, 且很多研究者的结论不尽相同. 目前的耐久性试验研究基本不考虑与实际工程环境相符的多种不利环境的耦合作用, 此方面还有待进一步研究.

1.2 应力腐蚀作用对耐久性的影响

CFRP 材料内部在长期较高拉应力的作用下, 可能会出现松弛开裂现象, 称之为应力腐蚀.

Francesca 等^[1]认为, CFRP 筋在长期较大拉应力作用下, 其内部会开裂, 进而出现松弛现象. 长期应力的存在对纤维本身几乎不影响, 但对基体影响较大. 松弛的程度和纤维的含量有着很大的关系. Budelman 等^[17]研究显示: 长期作用在 CFRP 筋上的荷载小于其短期极限承载力的 60% 时, 其内部不会出现上述的松弛裂缝, 因此, 若 CFRP 筋不用于预应力筋时, 在正常使用情况下, 其内部不会出现松弛裂缝. 这就是为什么日本土木工程协会制定的 CFRP 材料耐久性试验方法中, CFRP 材料进行长期持荷试验时, 不需要同时暴露在恶劣环境下. Yamaguchi 等^[18]对 CFRP 进行了加载测试, 结果表明: 松弛开裂强度与时间的对数呈线性关系, 并对其在 $5\times 10^6\text{ h}$ (57 年)后的松弛开裂强度进行了推算, 是短期极限强度的 93% .

在 CFRP 材料应力腐蚀测试方法上, 日本土木工程协会^[19]和美国混凝土协会^[20]均给出了相应的测试方法.

1.3 考虑 CFRP 材料耐久性后的有关设计规范

有关国家对应用于混凝土结构考虑耐久性后的 CFRP 材料性能设计取值问题作了规定^[1](表 1), 主要对考虑不利环境因素作用后的强度折减及长期荷载作用时拉应力的上限值作规定.

有关国家只是对应用于混凝土结构的考虑耐久性后的 CFRP 材料本身的设计取值问题进行了

规定,没有对 CFRP-混凝土界面及结构体系的耐久性进行规定,此方面还有待研究。

表1 考虑耐久性后 CFRP 材料的有关设计规定

标准	强度折减系数	长期拉应力上限
ACI 440	0.9~1.0	0.55
NS 3473	1	—
CHBDC	0.85	0.9~1.0
JSCE	0.87	0.7
BISE	0.6	—
CNR	0.9~1.0	0.9

注: ACI、NS、CHBDC、JSCE、BISE 及 CNR 分别为美国混凝土协会、挪威标准、加拿大公路桥梁设计规程、日本土木工程协会、英国结构工程师协会及意大利国际研究委员会。长期拉应力上限值是指施加于 CFRP 的拉应力与抗拉强度的比值。

综上所述,各不利环境因素和长期荷载作用会降低 CFRP 材料的力学性能,须对 CFRP 材料应用于桥梁工程后的材料及结构的耐久性问题加以考虑。

2 CFRP 材料加固混凝土梁(柱)的耐久性

CFRP 材料主要以布和片材的形式用于桥梁混凝土梁的加固,考虑到桥梁所处环境的不同和复合材料本身的特点,通常要考虑在潮湿、盐水、酸碱、高温、紫外线以及冻融循环等环境下的物理性能和力学性能的下降问题。

CFRP 材料加固主梁的耐久性问题主要归结为粘结界面的耐久性问题。CFRP 材料—梁体之间主要通过环氧树脂胶进行粘结,影响环氧树脂胶耐久性的主要因素是水和温度变化,其他不利环境因素作用对界面的耐久性影响相对较小。有研究表明^[21-22]:随着时间的推移,水会逐渐扩散到界面的空隙中,再通过毛细作用在结合面处替代胶体,从而降低界面的粘结性能。Ferrier 等^[23]研究发现:软化点(T_g)越高的粘结材料,其力学性能在高温下退化得越少,建议采用 T_g 高于 50 °C 的粘结材料。Hamilton 等^[24]对 CFRP 布加固混凝土梁的耐久性进行研究后发现,包括冻融循环作用在内的正常的温度变化对加固后的耐久性几乎没有影响。Cromwell 等^[25]对 CFRP 片材加固的混凝土梁进行了耐久性试验,试验共设置了多种不利环境(水、盐溶液、碱溶液、干热、柴油、紫外线及冻融循环等),试验结果表明:CFRP 片材在各种不利环境作用下,

仍可保持较好的性能。根据试验结果,笔者建议对应用于混凝土结构加固,CFRP 材料在考虑一般不利环境作用后其折减系数可采用 0.9,若有特别恶劣环境作用,该折减系数需另行考虑。Karim 等^[26]通过实验研究和数值模拟计算提出了考虑耐久性后的 CFRP 板加固混凝土结构破坏预测模型。

在 CFRP 加固混凝土柱方面,Nicolas 等^[27]对外包 CFRP 材料的圆形混凝土短柱进行了短期和中期的耐久性试验,结果表明:相同荷载作用下,CFRP 的环向应变在不利环境作用前后没有发生根本性的改变,但笔者建议不利环境作用前后 CFRP 的相对极限环向应变的大小需考虑。Satoshi^[28]就 CFRP 布采用自紧法包裹混凝土柱后的抗冲击荷载性能进行了试验研究,结果表明:用合适的自紧法包裹后的混凝土柱,其抗冲击性能获得了较大幅度的提升,组合体的疲劳寿命有所提高。李趁趁等^[29]对干湿环境下 CFRP 全裹和条带间隔加固混凝土圆柱耐久性进行了试验研究,结果表明:经过盐溶液干湿循环作用之后,CFRP 加固混凝土圆柱的强度和延性有所降低。王强^[30]利用电化学腐蚀原理,对长期在腐蚀环境下工作的 CFRP 包裹钢筋混凝土梁和钢筋混凝土柱外加恒定电流,加速其腐蚀,结果表明:钢筋混凝土构件经 CFRP 包裹后其耐久性有不同程度的提高。

有关 CFRP 材料—混凝土梁(柱)界面的耐久性,还需对不同环境作用下粘结强度的变化规律、粘结应变的分布、粘结—滑移本构关系以及它们与对应环境作用的相关关系等方面开展研究。

3 CFRP 筋—混凝土梁耐久性

CFRP 筋—混凝土梁组合结构耐久性的考察重点是粘结界面的耐久性及界面环境对 CFRP 筋材耐久性的影响问题。粘结界面的不利环境作用会对 CFRP 筋造成腐蚀,由于 CFRP 材料内部基体和材料生产工艺的多样性,界面不利环境的复杂性等因素的存在,使得混凝土环境中的 CFRP 材料的耐久性研究变得较为复杂。对耐久性影响较大的主要不利环境因素包括:碱、水和温度。

Lawrence 等^[31]对 CFRP 筋与混凝土的粘结性能的耐久性进行了研究,结果表明:相对置于常温(21 °C)水环境中的试件,置于 80 °C 水环境中的

CFRP 筋材料性能发生了明显的老化. Francesca 等^[1]研究表明: 对 CFRP-混凝土梁的开裂和刚度起控制作用的是界面的粘结性能和温度. Francesco^[3]研究表明: 对 CFRP 筋-混凝土梁结构, 相对于不利环境因素的循环作用, CFRP 材料内部的树脂基体对 CFRP 筋的增强作用效果影响较大.

目前, 对 CFRP 筋-混凝土结构耐久性研究还不够深入, 学者们还未对该课题进行较为系统的研究, 且很少考虑多种不利环境的耦合作用, 在试验方法上也还有待规范. 但现有的研究表明: 相对于钢筋混凝土结构, CFRP-混凝土结构的耐久性要好的多.

4 劣化机理及耐久性理论

4.1 劣化机理总结

CFRP 材料有 CFRP 纤维和聚合物基体构成, 其中的纤维本身具有极好的耐久性, 而聚合物基体耐久性较差, 不利环境因素的作用对基体造成了一定程度的破坏, 从而使得 CFRP 材料的整体性能有所下降. Bank 等^[32]认为水分子破坏了 CFRP 内部聚合物链间的范德华力, 使得 CFRP 主要性能指标发生变化. Hayes 等^[33]认为水分导致膨胀应力的出现, 从而引起基体水解、开裂及纤维与基体脱离等情况. Jones^[34]和 Machida^[35]认为, 对于一般热固性树脂, 聚合物骨架的化学性质决定了其耐久性, 各种树脂的骨架中几乎都有酯键, 酯键在碱溶液中的水解可能就是树脂劣化的原因. Francesca 等^[1]研究表明: CFRP 筋在长期较大的拉应力作用下, 其内部聚合物基体会发生蠕变, 待蠕变达到一定程度后, 会突然产生蠕变破裂, 从而导致材料整体性能下降.

对目前有关 CFRP 材料的劣化机理可作如下归纳: (1)环境介质渗入材料内部与大分子发生反应使其主价键出现破坏和裂解. (2)环境介质渗入材料内部破坏大分子次价键并使大分子溶解或膨胀. (3)环境介质渗透扩散致使纤维和聚合物在界面处出现脱粘现象. (4)环境介质与应力共同作用或应力单独作用使树脂产生微裂纹. (5)经受多种不利环境和应力因素的共同作用引起损伤与开裂使材料性能下降. (6)与金属材料之间的电偶腐蚀会使聚合物基体发生降解反应致使材料性能下降.

4.2 CFRP 材料耐久性相关理论研究

CFRP 材料耐久性试验的开展及最终寿命预测需以相应的理论模型作支撑. 模拟加速试验的理论基础: 一个特定的扩散过程在温度不变时期扩散系数是一定的, 当温度发生变化后, 扩散系数随之变化. 为了解扩散系数和温度的关系, 我们须用到阿列纽斯方程(the Arrhenius equation). 阿列纽斯方程反映了温度对离子扩散速度的影响, 其在 CFRP 筋耐久性试验中的主要贡献是实现不同温度下离子侵蚀速度的相互转换, 从而为加速试验提供了必要的理论依据.

利用 CFRP 材料耐久性试验获取的试验数据(如温度、环境作用时间等)结合相应的理论可对 CFRP 材料在不利环境长期作用下的强度进行预测. Fick's 定律和 Arrhenius 方程就是典型的预测理论, 很多学者利用它们再结合试验数据建立 CFRP 材料性能退化与时间的对应关系^[36-39]. 但是 Fick's 定律只适用于短期预测模拟加速试验结果, 对于长期试验, 由于基材的破坏导致裂缝出现, 因此该定律不适用.

5 结语

CFRP 材料以拉索、筋材、织物(布)及片材的形式应用于各式桥梁结构. 在结构中它们往往是重要的承重构件, 因此, 对材料本身及与桥梁结构组成的组合体的耐久性研究显得非常重要. 然而, 相关耐久性研究才刚刚起步, 还存在着研究系统性不强、不深入及研究对象不全面等问题. 通过对现有研究成果的分析和总结, 认为有待研究的主要问题有: (1)深化对 CFRP 材料及结构体系开展与实际工程环境相符的多因素耦合加速腐蚀试验研究. (2)形成成熟的可靠的耐久性试验方法. (3)CFRP 材料应用于桥梁工程的防腐措施研究. (4)CFRP 布-混凝土梁界面力学行为随环境变化而变化规律研究. (5)开展含 CFRP 的桥梁结构耐久性年限理论预测模型的研究. (6)开展 CFRP 拉索和预应力筋的锚固体系耐久性研究.

致谢 宁波大学土木工程材料学科课题组提供了相关文献资料并对本文的结构提出了有益的建议, 特此感谢!

参考文献:

- [1] Francesca C, Edoardo C, Manfredi G. Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2006, 28:857-868.
- [2] Cusson R, Xi Yunping. The behavior of fiber-reinforced polymer reinforcement in low temperature environmental climates[R]. Colorado: University of Colorado Boulder, 2003.
- [3] Francesco M, Antonio N. Durability of FRP rods for concrete structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2004, 18:491-503.
- [4] Fares E T, Saadatmanesh H. Durability of AR glass fiber reinforced plastic bars[J]. *ASCE-J Compos Constr*, 1999, 3(1):9-12.
- [5] Jamond R M, Hoffard T A, Novinson T, et al. Composites in simulated marine environments, SP-2083-SHR[R]. California: Naval Facilities Engineering Service Center, 2000.
- [6] Malvar L J, Jamond R M, Hof F T A, et al. GFRP composites in simulated marine environments[C]//2nd International Conference on Durability of FRP Composites for Construction. Montreal: Special Publication, 2002:191-202.
- [7] Caceres A, Jamond R M, Hoffard T A, et al. Salt-fog accelerated testing of glass fiber reinforced polymer composites, TR-2215-SH R[R]. California: Naval Facilities Engineering Service Center, 2002.
- [8] Chen Yi, Julio F D, Indrajit R, et al. Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures[J]. *Composite Structures*, 2007, 78:101-111.
- [9] Zhang M, Mason S E. The effects of contamination on the mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 1999, 33(14):1363-1374.
- [10] 王晓洁, 梁国正, 张伟, 等. 湿热老化对高性能复合材料性能的影响[J]. *固体火箭技术*, 2006, 29(4):301-304.
- [11] Abanilla M A, Li Y, Karbh A V M. Durability characterization of wet layup graphite/epoxy composites used in external strengthening[J]. *Composites Engineering*, 2006, 37(3):200-212.
- [12] Tucker W C. Crystal formation on graphite/polymer composites[J]. *Composite Materials*, 1988, 22(8):742-748.
- [13] Mathieu R, Patrice C, Amir F, et al. Effect of the addition of modified mica on mechanical and durability properties of FRP composite materials for civil engineering[J]. *Polymer Composites*, 2011, 32:1202-1209.
- [14] 张新越, 欧进萍. FRP 筋酸碱盐介质腐蚀与冻融耐久性试验研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2007, 29(1):33-36.
- [15] 王伟, 孟艳玲, 钱文军. 碱侵蚀环境下 FRP 筋的耐久性[J]. *合成树脂及塑料*, 2009, 29(2):27-30.
- [16] 王琦, 檀琳琳, 王洁. 碳纤维环氧复合材料盐雾老化试验研究[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(5):39-42.
- [17] Budelman H, Rostasy F S. Creep rupture behaviour of FRP elements for prestressed concrete-phenomenon, results and forecast models[C]//Proceedings of ACI International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures. Vancouver: Special Publication, 1993:87-100.
- [18] Yamaguchi T, Kato Y, Nishimura T, et al. Creep rupture of FRP rods made of aramid, carbon and glass fibers[C]//Proc 3rd int symposium FRPRCS-3. Sapporo: Japan Concrete Institute, 1997:86-105.
- [19] JSCE-E 533. Test method for creep failure of continuous fibre reinforcing materials[R]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 1995.
- [20] American Concrete Institute. Guide test methods for fibre-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures[R]. Farmington Hills, 2004.
- [21] Karbhari V M, Engineer M, Eckel D. On the durability of composite rehabilitation schemes for concrete: Use of peel test[J]. *Journal of Materials Science*, 1997, 33(1):147-156.
- [22] 姜铁斌, 李敏, 孙志杰, 等. 老化对 CFRP 混凝土正拉粘结强度的影响[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2002(5):7-10.
- [23] Ferrier E, Hanaehn P. Durability of external carbon epoxy reinforcement of Concrete[C]//Proc 12th Conference on Composite Materials. Paris: Woodhead Publishing, 1999.
- [24] Hamilton H R III, Dolan C W. Durability of FRP reinforcements for concrete[J]. *Prog Struct Engng Mater*, 2000(2):139-145.
- [25] Cromwell J R, Harries K A, Shahrooz B M. Environmental durability of externally bonded FRP materials intended for repair of concrete structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25:2528-2539.
- [26] Karim B, Francesco F, Michel F. A damage model to predict the durability of bonded assemblies: Debonding behavior of FRP strengthened concrete structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25:547-555.
- [27] Nicolas S, Chris P P, Asce M. Short and medium term durability evaluation of frp-confined circular concrete[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10(3):244-253.

- [28] Satoshi K. Effect of autofrettage on durability of CFRP composite cylinders subjected to out-of-plane loading[J]. Composites: Part B, 2012, 43:1720-1726.
- [29] 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究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(11):8-14.
- [30] 王强. 海洋环境下碳纤维加固钢筋混凝土构件耐久性试验研究[J]. 混凝土, 2011(7):121-124.
- [31] Lawrence C B, Moshe P, Amnon K. The effect of material degradation on bond properties of FRP reinforcing bars in concrete[J]. ACI Mater J, 1998, 95(3):132-143.
- [32] Bank L C, Gentry T R. Accelerated test methods to determine the long-term behaviour of FRP composite structure: Environmental effects[J]. Journal of Reinforced Plastic and Composites, 1998, 14:558-587.
- [33] Hayes M D, Garcia K, Verghese N, et al. The effects of moisture on the fatigue behavior of a glass/vinyl ester composite[C]//Fiber Composite on Fiber Composites in Infrastructure ICCI98. Tucson: Transportation Research Board, 1998:1-13.
- [34] Jones F R. A review of deterioration mechanisms of sewer renovation materials[R]. Guildford: Department of Metallurgy & Materials Technology University of Surrey, 1984.
- [35] Machida A. State of the-art report on continuous fiber reinforcing materials[R]. Tokyo: Society of Civil Engineers, 1993.
- [36] Chen Y, Davalos J F, Ray I. Durability prediction for GFRP reinforcing bars using short term data of accelerated aging tests[J]. Journal of Composites for Construction, 2006, 10(4):279-286.
- [37] Dejke V, Teppers R. Durability and service life time prediction of GFRP for concrete reinforcement[C]//Fibre Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS5). London: Thomas Telford, 2001:505-513.
- [38] Tannous F E, Saadatmanesh H. Environmental effects on the mechanical properties of E-glass FRP rebars[J]. ACI Mater J, 1998, 95(2):87-100.
- [39] Sen R, Mullins G, Salem T. Durability of E-glass/vinyl ester reinforcement in alkaline solution[J]. ACI Struct J, 2002, 99(3):369-375.

Study on the Durability of CFRP Applied in Bridge Engineering

ZHUGE Ping, DING Yong*, BU Zhan-yu

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

Abstract: Carbon fiber reinforced plastic has the excellent mechanics performance showing good application prospects in bridge engineering. However, the durability of CFRP material and the bridge structure that contain the materials should be studied in advance. The durability research progresses of CFRP-bridge composite structure are reviewed, and the research results have been summarized systematically. It focuses on the durability and deterioration mechanism of the CFRP materials, concrete beams or pillars reinforced with CFRP, and CFRP rod-bridge composite structure. The results show that the accelerated corrosion testing methods and the multi-factor coupling are still far from mature. It lacks anti-corrosion measures for CFRP-bridge composite structure. The mechanics behavior variation laws of the interface of CFRP-bridge corresponding to environmental changes need further investigation. The durability theoretical prediction model of CFRP-bridge composite structure should be established, and thus far the durability of the anchorage systems of CFRP strand and rods has not been fully studied.

Key words: carbon fiber reinforced plastics; bridge engineering; durability; corrosion

(责任编辑 史小丽)