

文章编号:1673-9469(2008)01-0001-04

FRP 筋耐久性试验方法研究进展

王伟¹,薛伟辰¹,钱文军¹,孟艳玲²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海实业振泰化工有限公司, 上海 201400)

摘要:纤维增强聚合物筋(FRP筋)是一种具有高强、轻质、耐腐蚀、耐疲劳等特点的新型复合材料,用其代替钢筋是解决钢筋锈蚀问题的新途径之一。本文对FRP筋耐久性试验方法研究现状进行了分析,并重点介绍了碱环境下FRP筋耐久性试验方法。

关键词:FRP筋;耐久性;试验方法;加速老化

中图分类号:TU502

文献标识码:A

Research progress on durability test method of FRP bars

WANG Wei¹, XUE Wei-chen¹, QIAN Wen-jun¹, MENG Yan-ling²

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China;

2. Shanghai SIIC Zhentai Chemical CO. LTD, shanghai, 201400, China)

Abstract: Fiber reinforced polymer (FRP) bars, which is a new compound material with high tensile strength, light weight, strong resistance to corrosion and fatigue, is a new solution to the corrosion of steel reinforcement in concrete if replaced by FRP bars. This paper is engaged in the analysis on the durability test method of FRP bars, and especially introduces the durability test method of FRP bars under alkali environment.

Key words: FRP bars; durability; test method; accelerated ageing

钢筋锈蚀是影响混凝土结构耐久性的一个重要因素,为解决钢筋混凝土中的钢筋锈蚀问题,国内外学者经过近50年的分析、研究,普遍认为^[1]采用新型的聚合物材料FRP(Fiber Reinforced Polymer)筋替代钢筋是一个较好的选择。FRP筋^[2]是由多股连续长纤维(如玻璃纤维、碳纤维及芳纶纤维等)采用基底材料(如聚酰胺树脂、聚乙烯树脂、环氧树脂等)胶合后,经过特制的模具挤、拉拔成型的,其中纤维的含量为55%~80%,基材的含量为20%~45%,FRP筋可分为玻璃纤维塑料筋(GFRP筋)、碳纤维塑料筋(CFRP筋)和芳纶纤维塑料筋(AFRP筋)等三种,其中应用最广的是GFRP筋,其次是CFRP筋,AFRP筋由于价格原因应用较少。

随着FRP筋在土木工程结构中的应用,国内外越来越多的学者发现很多环境作用(如潮湿、酸、碱、盐溶液,紫外线等)对FRP筋的不利影响是

不可忽视的,为了保证FRP筋在混凝土结构中更加安全合理使用,有必要对其在应力和环境因素共同作用下的耐久性能做进一步的研究。

1 FRP 筋耐久性试验方法

从复合材料自身来看,FRP筋的耐久性主要分为三个层面^[3]:纤维的耐久性,基材的耐久性和纤维与基材黏结界面的耐久性。纤维是FRP筋中起承载作用的组分,受到腐蚀后将会降低或丧失承载力;基材对纤维起保护作用,一旦受到侵蚀,纤维就会直接暴露于环境中;纤维与基材黏结界面的协同作用,使外加荷载能够均匀的分配到各股纤维上,受到侵蚀后协同作用丧失,纤维很容易由于受力不均而断裂,从而导致FRP筋的承载能力降低。由于FRP筋组成的复杂性,造成了FRP筋耐久性试验研究的复杂性。FRP筋耐

收稿日期:2007-11-16

基金项目:交通部西部交通建设科技项目(20063182244)

作者简介:王伟(1980-),男,山东菏泽人,博士研究生,从事FRP筋力学性能及其耐久性研究。

久性试验方法^[4]主要有自然暴露试验、试验室模拟自然环境试验和模拟加速试验。

1.1 自然暴露试验

自然暴露试验的优点是环境因素最接近实际情况,所获得的试验成果可信度最高,缺点是各种参数难以控制,试验周期太长;有关自然老化曝置方法,国外已有多种^[5],常用的有 90°角面南曝置、45°角面南曝置、水平 5°角曝置。曝置方法的选择应遵循以下原则:1)能模拟最终使用条件;2)老化效果明显;3)装置简单,易于操作。

自然环境对 FRP 筋材的影响因素大致分为以下几个方面:1)每日温度和湿度的交替变化(当温度低于 0℃时,表现为冻融作用);2)干湿交替作用(降雨、降雪等);3)太阳光辐射;4)其他因素(风吹等);实际自然环境的作用是以上各因素或其中某几种因素的耦合作用。

1.2 实验室模拟自然环境试验

实验室模拟自然环境试验的优点是便于控制环境参数,将各种对 FRP 筋的耐久性有影响的因素单独出来进行研究,缺点是试验时间太长,最为常用的试验方法有^[6]:1)在一个合适的容器中放入酸、碱、盐溶液,来模拟自然环境;2)将 FRP 筋直接浸入水中,每天进行冻融循环,冻融循环的温度从 -17.8~7℃;3)在试验室用人工紫外线对 FRP 筋试件进行照射试验,试验结束后对试件进行材性试验,同时利用扫描电镜(SEM)对试件表面进行放大成像分析以考察紫外线对试件的侵蚀情况。

1.3 模拟加速试验

模拟加速试验是通过提高环境恶劣程度(如离子浓度、紫外线强度、冻融循环频率和环境温度等)使环境对 FRP 筋的腐蚀作用加速,从而可以利用较短时间的试验考察试件真实情况下长时间的耐久性能,但是此类试验存在模拟试验环境与自然环境如何对应的问题。由于在试验时间上的绝对优势,加速试验方法已成为一门独立的研究课题^[7]。

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。为了了解扩散系数和温度的关系,我们就用到阿列纽斯方程(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 FRP 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^[8]。虽然将阿列纽斯方程应用于复合材料中的离子扩散问题上适用性受到一定的限制,但是从趋势上来讲,阿列纽斯方程较好的反映了真实情况。

不同温度下的扩散渗透侵蚀发生到某一程度需要的时间可以用下式计算

$$t_{\text{reaction}} = c/D \quad (1)$$

式中 t_{reaction} - 发生特定程度的扩散侵蚀所需要的时间; c - 常数。

则不同温度下侵蚀达到同一程度所需要的时间比例即可以通过下式得到。

$$TSF = \frac{t_1}{t_2} = \frac{c}{D_1} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{D_0 \cdot \exp\left(\frac{Q}{kT_2}\right)}{D_0 \cdot \exp\left(\frac{Q}{kT_1}\right)} = \exp\left(\frac{Q}{k}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right) \quad (2)$$

式中 TSF - 时间换算比例因子; t_1, t_2 - 在温度 T_1 和 T_2 下试件发生同样程度的扩散渗透侵蚀所需要的时间; c - 常数; D_1, D_2 - 在温度 T_1 和 T_2 下的扩散系数; D_0 - 频率因子; Q - 扩散激活能; k - 玻尔兹曼常数; T_1, T_2 - 绝对温度。

根据这一理论,通过实验确定 Q 值后,我们就可以提高温度加快侵蚀速度,从而在很短的时间里完成常温下几十年的试验。确定 Q 值的具体试验方法为反推法,即取两个以上不同的稳定试验温度,其他试件参数及环境因素均相同,在经历相同的试验时间后,测量离子的侵蚀深度并进行对比得出时间换算比例因子 TSF,对公式(2)两端取对数,得 $Q = \frac{\ln TSF \cdot k}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)}$ 。

加速试验影响因素:加速试验方法一般要考虑到化学老化、物理老化和力学性能衰减三个方面。化学老化是指树脂不可逆变化,比如交联或者断链作用。化学退化机制包括热氧化作用、热力作用和水解作用。在典型的 PMC 操作温度(75℃~350℃)下,交联和氧化是主要的化学老化机制。对于暴露于空气中基材随着温度和时间的增加,热氧化作用变得非常重要。一般情况下,如此的交联度加速结果可以严重影响到力学性能密实度,并且增加纤维软化温度(T_g)。物理老化是当聚酯被冷却到它的软化温度之下时发生的,材料往热动平衡发展。这种变化表现在聚酯体

积自由变化,焓变和熵变以及在力学特性上。力学性能退化机制是一个不可逆的过程,并且可以宏观地表现出来。这些退化机制包括基体裂缝,分成剥离,交接面退化,纤维断裂或者非弹性变形;这样就会直接地影响它的机械性质。

根据上述三种老化状况,测定加速试验前后的弹性模量、拉伸强度、层间剪切强度、粘结强度等,借此评价其失效机理。

碱环境下 FRP 筋加速试验方法:根据 ACI 440.3R-04 有关规定^[9],试验方法在环境温度为 60℃ 作用下进行,可以采用三种方式进行试验,每一种方式都有一个明确的应力状态。

1) 在无应力状态下,FRP 试件应该浸没在温度为 $60 \pm 3^\circ\text{C}$ 的溶液中,浸入时间除非有特殊条件规定需要较长时间外,一般为 1 个月,2 个月,3 个月,4 个月和 6 个月。在规定时间内进行试验后,样品应该首先去掉碱溶液,然后再用不含任何离子水进行冲洗,用干毛巾擦干,称重并进行试验直到拉力失效。这种试验方式控制参数为 pH 值、碱溶液温度和浸入时间。

2) 在持续拉力荷载作用下,FRP 试件应该两端安装好锚具,试件测试截面应该浸泡在碱溶液环境的环境箱内或者一个温度为 $60 \pm 3^\circ\text{C}$,盛满碱溶液的容器内,试件应该放在承受持续拉力荷载的荷载装置下,除非有特殊条件规定需要较长时间规定外,一般为 1 个月,2 个月,3 个月,4 个月和 6 个月。试验控制参数为持续荷载、pH 值和碱溶液温度及浸入时间。

3) 在持续荷载作用下,FRP 试件被潮湿混凝土环境包裹,即试件的测试截面埋置在潮湿的混凝土中,典型的混凝土尺寸如图 1 所示,如果采用较大直径的 FRP 筋,则试件直径尺寸应在 150mm 基础上适当增加。混凝土应该采用标准拌和料,在水中养护 28d 之后,样品应该根据规范要求在其两端安装锚具,然后在持续拉力荷载作用下进行浸泡试验,浸泡时间除非有特殊条件规定需要较长时间外,一般为 1 个月、2 个月、3 个月、4 个月和 6 个月。混凝土圆柱体应该保持潮湿环境,并且在整个实验中,环境试验箱应该保持 $60 \pm 3^\circ\text{C}$,FRP 试件应该附着在混凝土圆柱体上进行试验。试验控制参数为持续拉力荷载、pH 值、混凝土温度和浸入时间。

碱溶液 pH 值应该在试验开始和抗碱性试验结束后进行量测,在整个试件浸入过程中,碱溶液

pH 值应该每 5d 进行监测和调整,如果必要的话,保持试验刚开始时的 pH 值和相同的组成成份。在 1)、2) 中所用到的碱溶液应该能够代表波特兰水泥混凝土里毛细水的碱环境,建议碱混合溶液应该在 1 升无离子水中含有 $11.85\text{gCa}(\text{OH})_2$, 0.9gNaOH 和 4.2gKOH 。碱溶液 pH 值应该达到 12.6 ~ 13 之间,应该能够反映适龄混凝土孔隙水溶液环境 pH 值。在试验前和试验期间应该覆盖容器,避免碱溶液与大气中 CO_2 发生反应。

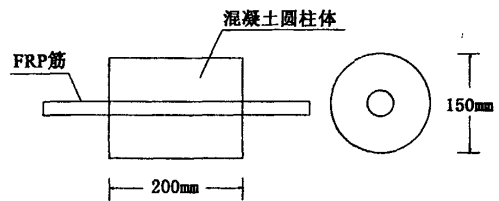


图1 混凝土圆柱体尺寸

Fig.1 Dimensions of concrete cylinder

抗碱试验前后应对比试件颜色变化,表面形状及形状改变,如果必要的话,试件可以被分割并进行磨光处理,其横断面应该在显微镜下进行观测。

对于 1)、2)、3) 三种情况,试件应该首先在一定的环境条件下浸泡一段时间,在去除外部因素影响后,24 小时之内必须进行完试件残余抗拉强度试验。

环境侵蚀试验结束后,对试件进行一系列测试,如测量吸湿率 M ,抗拉强度 f_m 、弹性模量 E_c 和短梁剪切强度等,同时对试件切片进行扫描电镜(SEM)成像,以考察试件在经受侵蚀后各项性能的变化情况。

2 讨论

综上所述,FRP 筋耐久性试验方法主要有自然暴露试验、试验室模拟自然环境试验和模拟加速试验。自然暴露试验能够准确有效地反映实际情况,其试验结果比较有说服力。但是在自然暴露试验中会涉及到各种与自然环境因素有关的参数,这些参数难以控制,并且试验周期太长;实验室模拟自然环境试验对在自然暴露试验中涉及到的试验参数有较大改进,能够便于控制环境参数,将各种对 FRP 筋的耐久性有影响的因素单独列举出来进行研究,但是试验时间仍旧太长,在时间参数方面没有任何改进;模拟加速试验是通过提高

环境恶劣程度(如离子浓度、紫外线强度、冻融循环频率和环境温度等)使环境对 FRP 筋的腐蚀作用加速,从而可以利用较短时间的试验考察试件真实情况下长时间的耐久性能,由于在时间上占有绝对优势,使得模拟加速试验在 FRP 筋耐久性试验中应用较为广泛,此类实验一般是将 FRP 筋放入模拟化学溶液中,通过提高溶液中的离子浓度和溶液温度来实现。但这与 FRP 筋在实际环境中的工作状态有较大差异,埋置于混凝土中的 FRP 筋与人工孔溶液中的 FRP 裸筋经历相同时间后,其力学性能会有很大差异。另外,这种模拟试验环境与自然环境相对应的问题仍然值得探讨。

3 结语

FRP 筋耐久性研究刚刚起步,对其性能退化规律及材性损伤还局限于试验阶段,可见,制订出一个标准的试验方法是迫在眉睫的问题。对 FRP 筋进行耐久性试验的目的就是为了模拟出混凝土结构 50~100 年的使用要求,要想在较短时间内得到这个结果,就必须利用加速老化试验来提高这种退化的进程。据此,我们进一步需要研究的工作还很多比如:

1)酸环境和盐环境作用下,FRP 筋耐久性标准试验方法的研究,建立科学合理的耐久性试验方法和评价指标体系。

2)利用 Fick 定律和 Arrhenius 方程,建立 FRP 筋材料性能退化与时间的对应关系。

3)持续应力作用下,FRP 筋加速腐蚀规律与时间对应关系。

4)埋置于混凝土中的 FRP 筋,在加速腐蚀情况下,材性退化规律与时间对应关系。

参考文献:

- [1] NANNI A. FRP reinforcement for concrete structures [M]. Elsevier Science Publishers, 1993.
- [2] 薛伟辰,康清梁. 纤维塑料筋 FRP 在混凝土结构中的应用[J]. 工业建筑, 1999, 29(2): 19-21.
- [3] 刘志勇,吴桂芹,马立国,等. FRP 筋及其增强砼的耐久性与寿命预测[J]. 烟台大学学报. 2005, 18(1): 66-72.
- [4] BANK L C, GENTRY T R. Accelerated test methods to determine the Long - Term Behavior of FRP composite structure: environmental effects [J]. Journal of Reinforced Plastic and Composites, 1995, (14): 423-437.
- [5] 岳清瑞,杨勇新,郭春红,等. 浸渍树脂快速与自然老化试验对应关系[J]. 工业建筑, 2006, 36(8): 1-5.
- [6] 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.
- [7] 祁德庆,钱文军,薛伟辰. 土木工程用 FRP 筋的耐久性研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料. 2006, (2): 47-50.
- [8] THOMAS S GATES. On the use of accelerated test methods for characterization of advanced composite materials [C]. NASA/TP, 2003.
- [9] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide test methods for fibre - reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures[M]. Amorian Concrete Institute, Farmington Hills, 2004.

(责任编辑 刘存英)

作者: [王伟](#), [薛伟辰](#), [钱文军](#), [孟艳玲](#), [WANG Wei](#), [XUE Wei-chen](#), [QIAN Wen-jun](#), [MENG Yan-lin](#)

作者单位: [王伟, 薛伟辰, 钱文军, WANG Wei, XUE Wei-chen, QIAN Wen-jun\(同济大学, 土木工程学院, 上海, 200092\)](#), [孟艳玲, MENG Yan-lin\(上海实业振泰化工有限公司, 上海, 201400\)](#)

刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) [ISTIC](#)

英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING\(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)

年, 卷(期): 2008, 25(1)

被引用次数: 1次

参考文献(9条)

1. [NANNI A](#) FRP reinforcement for concrete structures 1993
2. [薛伟辰;康清梁](#) 纤维塑料筋FRP在混凝土结构中的应用 1999(02)
3. [刘志勇;吴桂芹;马立国](#) FRP筋及其增强砼的耐久性与寿命预测[期刊论文]-烟台大学学报 2005(01)
4. [BANK L C;GENTRY T R](#) Accelerated test methods to determine the Long-Term Behavior of FRP composite structure:environmental effects 1995(14)
5. [岳清瑞;杨勇新;郭春红](#) 浸渍树脂快速与自然老化试验对应关系[期刊论文]-工业建筑 2006(08)
6. [任慧韬;姚谦峰;胡安妮](#) 纤维增强复合材料的耐久性能试验研究[期刊论文]-建筑材料学报 2005(05)
7. [祁德庆;钱文军;薛伟辰](#) 土木工程用FRP筋的耐久性研究进展[期刊论文]-玻璃钢/复合材料 2006(02)
8. [THOMAS S GATES](#) On the use of accelerated test for characterization of advanced composite materials 2003
9. [AMERICAN CONCRETE INSTITUTE](#) Guide test methods for fibre-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures 2004

本文读者也读过(10条)

1. [张鹏](#), [薛伟辰](#), [唐小林](#), [郑文静](#), [韦树英](#), [ZHANG Peng](#), [XUE Wei-chen](#), [TANG Xiao-lin](#), [ZHENG Wen-jing](#), [WEI Shu-ying](#) 纤维塑料筋混凝土梁延性分析的能量表示法[期刊论文]-武汉理工大学学报2005, 27(8)
2. [祁德庆](#), [钱文军](#), [薛伟辰](#), [QI De-qing](#), [QIAN Wen-jun](#), [XUE Wei-chen](#) 土木工程用FRP筋的耐久性研究进展[期刊论文]-玻璃钢/复合材料2006(2)
3. [张鹏](#), [薛伟辰](#), [李冰](#), [邓宇](#), [ZHANG Peng](#), [XUE Wei-chen](#), [LI Bing](#), [DENG Yu](#) FRP筋混凝土梁变形计算与控制研究[期刊论文]-广西工学院学报2006, 17(4)
4. [薛伟辰](#), [韩梅](#) 纤维塑料筋混凝土结构的系列研究[期刊论文]-混凝土与水泥制品2000(z1)
5. [金叶](#), [吕西林](#), [JIN Ye](#), [LU Xilin](#) 纤维筋耐久性能研究现状分析[期刊论文]-结构工程师2005, 21(6)
6. [张新越](#), [欧进萍](#), [ZHANG Xin-yue](#), [OU Jin-ping](#) FRP筋酸碱盐介质腐蚀与冻融耐久性试验研究[期刊论文]-武汉理工大学学报2007, 29(1)
7. [张力文](#), [孙卓](#), [张俊平](#) FRP筋混凝土耐久性研究综述[会议论文]-2007
8. [朱崇钊](#) CFRP及CFRP结构在海水腐蚀环境下的耐久性能研究[学位论文]2006
9. [王伟](#), [孟艳玲](#), [钱文军](#), [Wang wei](#), [Meng Yanling](#), [Qian Wenjun](#) 碱侵蚀环境下FRP筋的耐久性[期刊论文]-合成树脂及塑料2009, 26(2)
10. [周俊龙](#), [江世永](#), [欧忠文](#), [ZHOU Jun-long](#), [JIANG Shi-yong](#), [OU Zhong-wen](#) 玄武岩纤维增强塑料筋耐海水腐蚀性研究[期刊论文]-后勤工程学院学报2011, 27(2)

引证文献(1条)

1. 刘小艳. 王新瑞. 刘爱华. 陈雷. 蒋亚清 海洋工程中GFRP筋耐久性研究进展[期刊论文]-水利水电科技进展 2012(3)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjkjxyxb200801001.aspx