

文章编号:1673-2049(2018)06-0073-07

侵蚀环境下 GFRP 筋力学性能退化试验

陆春华,何礼远,褚天舒,延永东

(江苏大学 土木工程与力学学院,江苏 镇江 212013)

摘要:为了研究侵蚀环境下玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋的力学性能退化机理,对 3 种不同直径的 GFRP 筋进行了为期半年的溶液浸泡试验。试验采用了清水、碱溶液以及盐溶液 3 种侵蚀环境,在浸泡不同时间后分别对筋材进行了外观检测和力学性能试验。结果表明:不同侵蚀环境下,GFRP 筋的抗拉强度在碱环境中下降最多,平均为 11.44%,其次是盐环境,平均为 4.59%,下降最少是清水环境,平均为 4.30%;GFRP 筋的剪切强度在清水、盐、碱环境中分别平均下降了 23.03%,18.69%,28.28%,说明侵蚀环境对其力学性能有明显的影响;在盐环境下,直径为 8,12,16 mm 的试样抗拉强度分别下降了 3.53%,9.42%,0.82%,说明 GFRP 筋力学性能退化具有一定的尺寸效应;GFRP 筋的剪切强度退化随浸泡时间的增加而增大,在前 36 d 下降较快,36 d 后下降则趋于平缓。

关键词:玻璃纤维增强复合材料筋;侵蚀环境;尺寸效应;力学性能;耐久性能

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

Experiment on Mechanical Properties Degradation of GFRP Bars in Eroded Environment

LU Chun-hua, HE Li-yuan, CHU Tian-shu, YAN Yong-dong

(Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties degradation mechanism of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars under eroded environment, three kinds of GFRP bars with different diameters were tested in solution immersion for six months. In the experiment, three kinds of eroded environments, such as clear water, alkali solution and salt solution, were used to test the appearance and mechanical properties of the reinforcement materials after soaking different time. The results show that in different eroded environment, the tensile strength of GFRP bars decreases mostly in alkaline environment, the average is 11.44%, in the salt environment, the average is 4.59%, in the water environment, the average is 4.30%, and the shear strengths decrease 23.03%, 18.69%, 28.28% in water, salt and alkali environments respectively, which indicates that the eroded environment has a significant effect on mechanical properties. In the salt environment, the tensile strengths of 8, 12 and 16 mm specimens decrease by 3.53%, 9.42% and 0.82% respectively, which indicates that the mechanical properties of the samples have a certain size effect. The shear strength degradations of GFRP bars increase with the increase of immersion time, and decrease rapidly in previous 36 d and slowly after 36 d.

Key words: GFRP bar; eroded environment; size effect; mechanical property; durability

收稿日期:2017-12-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51578267,51378241,51608233);江苏省“六大人才高峰”高层次人才资助项目(2015-JZ-008)

作者简介:陆春华(1979-),男,江苏镇江人,副教授,工学博士,E-mail:lch79@ujs.edu.cn。

0 引 言

众所周知,钢筋锈蚀问题始终制约着钢筋混凝土结构的发展^[1],主要是钢筋锈蚀会导致混凝土结构性能退化,是引起结构失效的主要因素之一^[2]。然而随着新材料的发展,纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer,FRP)凭借着其轻质高强、抗疲劳、耐腐蚀、耐久性好等优良性能脱颖而出,在土木与建筑工程中的研究与应用十分活跃,已逐渐形成了一个新的学科增长点^[3-5]。因此,人们认为采用FRP筋替代普通钢筋是解决混凝土结构中钢筋锈蚀问题行之有效的办法之一。其中,玻璃纤维增强复合材料(GFRP)筋价格较低廉,性价比较高,且应用最为广泛。因此,有必要对 GFRP 筋在恶劣侵蚀环境作用下的力学性能及耐久性进行研究,为 GFRP 筋能够更好地运用到混凝土结构中提供一定试验基础。

目前,国内外关于 GFRP 筋在侵蚀环境中的加速老化研究主要体现在腐蚀前后其力学性能的劣化规律等方面。Chen 等^[6]将 GFRP 筋分别置于 60℃和 40℃的水中,湿度均为 100%,70 d 后测得其抗拉强度分别降低 29%和 3%;王伟等^[7]将 GFRP 筋浸泡在碱环境和埋入潮湿混凝土中,54 d 后测得其抗拉强度分别损失了 38.6%和 34.5%;Stamenovic 等^[8]的试验结果表明,增加 pH 值的碱性环境将导致玻璃纤维管材力学性能更剧烈的退化,而酸性环境实际上使抗拉强度和弹性模量有所增加。Benmokrane 等^[9]通过表观水平剪切强度试验测试,发现在碱环境条件下,G/V 具有最佳的力学性能,其次是 B/E,最低的为 B/V。Montaigu 等^[10]将新开发的乙烯和聚酯玻璃纤维增强聚合物浸泡在 60℃的碱环境中,180 d 后其性能基本稳定,未表现出明显的变化。

从上述研究情况来看,目前国内外已对各种侵蚀环境下 GFRP 筋力学性能进行了一定研究,但研究成果相对而言还比较少,并且有些方面还存在不足。有些研究学者只是选取一种侵蚀环境,然后根据溶液浓度的不同来对比分析,在实际工程中所面临的恶劣环境是多样的;还有些学者选取温度作为参数条件,但是温度选择太高,对实际工程没有多大的意义;虽然有选取时间作为控制因素,但并没有和其他参数一起来对比分析;尺寸效应作为筋材的基本属性,却鲜有学者去研究分析,结合相关因素的分析就更少。总体而言,研究者对溶液的浓度、温度、

筋材直径及时间等参数的选取存在差异,导致试验结果也存在很大的差异。另外,大部分是对拉伸性能试验的研究,鲜有通过表观水平剪切试验来研究其力学性能的,FRP 筋材在构件里不仅受拉,还要受剪,所以两者都要研究。

鉴于此,本文对不同直径、侵蚀环境以及浸泡时间的 GFRP 筋力学和耐久性能进行了试验研究。主要分析了不同侵蚀环境对 GFRP 筋抗拉及剪切性能的影响、尺寸效应对破坏形式和力学性能的影响、浸泡时间对筋材耐久性能的影响等。研究结果可为 GFRP 筋在土木工程尤其在恶劣侵蚀环境下的推广应用提供一定的理论基础。

1 试验方案

1.1 试样设计

试验采用南京锋晖复合材料有限公司拉挤成型的 GFRP 筋,由玻璃纤维和乙烯基酯树脂组成,其物理力学性能参数见表 1。拉伸试样浸泡时间为 180 d,试样共 34 个,具体参数见表 2,用于盐、碱环境的 GFRP 筋每种直径为 4 根,清水、实验室环境则每种直径为 1 或 2 根。剪切试样浸泡时间分别为 12,36,72 d,试样共 44 个,具体参数见表 3。

表 1 GFRP 筋物理力学性能

Tab. 1 Physical Mechanical Properties of GFRP Bars

直径 d/ mm	纤维质量 分数/%	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	剪切强度/ MPa
8	64	1 409.52	50.00	
12	64	864.36	38.22	13.67
16	64	958.23	45.73	23.21

注:8 mm 试样直径太小,不适合做剪切试验。

表 2 GFRP 筋拉伸试样参数

Tab. 2 Tensile Specimen Parameters of GFRP Bars

试样编号	直径/mm	个数	总长度/mm	测试区长度/mm
T-8	8	11	1 000	400
T-12	12	11	1 000	400
T-16	16	12	1 000	400

表 3 GFRP 筋剪切试样参数

Tab. 3 Shear Specimen Parameters of GFRP Bars

试样编号	直径/mm	个数	有效长度/mm	实际长度/mm
S-12	12	22	84(7 d)	104
S-16	16	22	80(5 d)	100

1.2 侵蚀环境

浸泡试验在自制的无盖铁皮溶液箱中进行,温度为常温。侵蚀环境主要有以下几种:①碱环境,根

据 ACI Committee 440. 3R-04 规范^[11] 建议的方法进行配置,在 1 L 去离子水中加入 118. 50 g Ca(OH)₂, 0. 90 g NaOH, 4. 20 g KOH,实测 pH 值为 12. 82; ②盐环境,依据 ASTM D665-03 规范^[12],在 1 L 去离子水中加入 24. 53 g NaCl, 5. 20 g MgCl₂, 4. 09 g Na₂SO₄, 1. 16 g CaCl₂, 0. 70 g KCl; ③清水环境,自来水; ④实验室环境。

1.3 试验方法

试验仪器见图 1。拉伸试验参考《定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法》^[13],在加载之前,为了避免应力集中造成筋材的损坏,在加载端用环氧树脂胶和套管进行锚固。拉伸试验在 WAW-1000D 型电子万能试验机上进行,如图 1(a) 所示,加载时间持续 2~4 min。使用计算机监控的数据采集系统对测试过程中的数据进行记录。

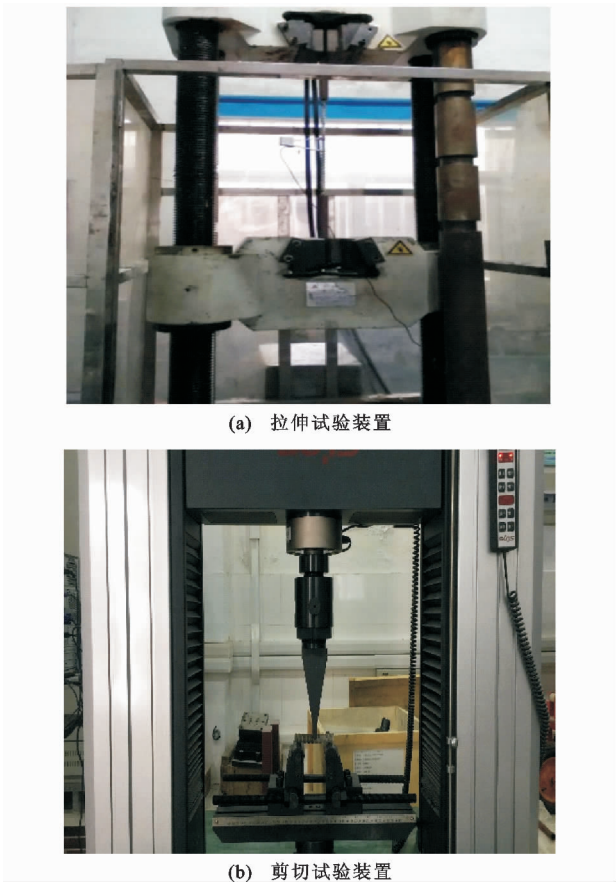


图 1 试验仪器
Fig. 1 Test Instruments

表观水平剪切试验采用《拉挤玻璃纤维增强塑料杆力学性能试验方法》^[14] 规范标准。将试样放在支座上,调整支撑块和试样的位置至规定跨距,以保证试样能够剪切破坏。剪切试验在 UTM5305 型电子万能试验机上进行,如图 1(b) 所示,试验加载速

率为 1. 3 mm · min⁻¹,加载速率是在不使试样受到任何冲击的情况下进行的。

2 试验结果与分析

2.1 破坏形式

(1)拉伸试验。当试样加载一段时间后开始发出“噼噼啪啪”的响声;随着加载的持续,纤维断裂的声响不断加大而且更加密集;达到极限应力后,可以看到筋材表面部分纤维束逐渐被拉断。断裂纤维束逐渐增多,随着“砰”的一声,筋材的中部突然发生“爆炸式”破坏,与文献[15]的结果相一致,破坏部位的纤维呈发散状,同时飞散出许多细小的纤维丝,如图 2(a) 所示,此时试验结束。

(2)表观水平剪切试验。初期施加荷载时,试样中部会慢慢向下弯曲;荷载逐渐增大时,可以听见有持续的响声;达到最大荷载时,试样在试验过程中断裂,会听到脆性断裂的声音,断口有明显的脆性断裂迹象^[16],如图 2(b) 所示。



图 2 试样的破坏形式
Fig. 2 Failure Forms of Specimens

2.2 试验结果

2.2.1 拉伸试验

由于拉伸断裂后,无法测得 GFRP 筋断口的截面尺寸,故仍采用初始截面面积计算试样的抗拉强度,即

$$\sigma=\frac{4P_T}{\pi d^2} \tag{1}$$

式中: σ 为名义极限抗拉强度; P_T 为最大破坏荷载; d 为筋材初始直径。

拉伸弹性模量采用在弹性极限范围内应力与相应应变的比值来计算, 即

$$E = \frac{4(P_1 - P_2)}{\pi(\epsilon_1 - \epsilon_2)d^2} \quad (2)$$

式中: E 为筋材弹性模量; P_1, P_2 分别为 60% 最大破坏荷载和 40% 最大破坏荷载; ϵ_1, ϵ_2 分别为 P_1, P_2 对应的应变。

根据拉伸试验数据以及计算公式, 得出在实验室环境下 3 种不同直径筋材的抗拉强度值(表 1)。筋材的应力-应变曲线能较好地反映其延伸率以及破坏形式, 最后得到的 GFRP 筋试样的应力-应变关系如图 3 所示。

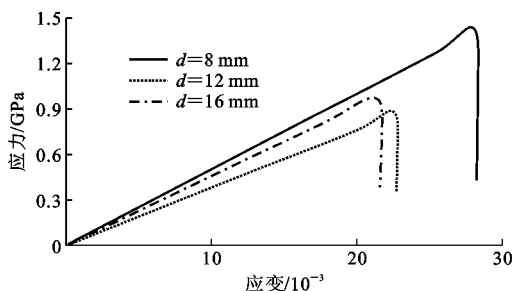
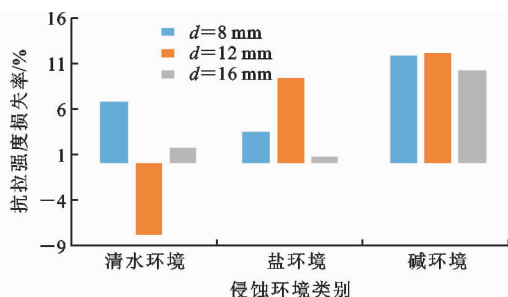


图 3 实验室环境下 GFRP 筋应力-应变曲线

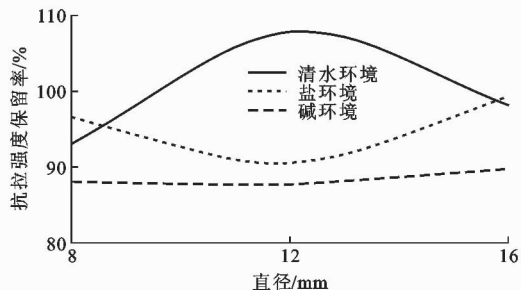
Fig. 3 Stress-strain Curves of GFRP Bars in Laboratory Environment

由图 3 可以看出, 当逐渐增加到最大应力时, GFRP 筋应力-应变曲线始终保持为直线, 没有明显的屈服点, 整个试验过程基本是呈线弹性增长。从图 3 还可以看出, 在实验室环境下 GFRP 筋极限应变随直径的变化并不明显, 具体表现为, 试样的应变都在 0.02~0.03 之间, 变化幅度很小, 说明筋材的极限延伸率比较低。当超过最大荷载之后, 就会出现骤降阶段, 表明 GFRP 筋在断裂前没有屈服阶段, 主要发生脆性破坏^[17]。

为了更好地研究筋材的性能退化规律, 选择环境类别和直径 2 个不同参数进行对比分析, 具体结果如图 4 所示。从图 4(a)可以看出, GFRP 筋的极限抗拉强度在不同侵蚀环境下都有一定程度的下降, 说明侵蚀环境对其抗拉强度有明显的影响。具体表现为, 直径 8 mm 的 GFRP 筋在 3 种侵蚀环境下抗拉强度损失率在 3%~12% 之间; 直径 12 mm 的筋材在每种侵蚀环境下的抗拉强度损失率大不相同, 在清水环境中抗拉强度反而有一定的增加 (GFRP 筋在拉伸过程中会出现一定容错率), 在碱环境中抗拉强度损失最多, 为 12.20%; 直径 16 mm



(a) 不同侵蚀环境下试样抗拉强度损失率



(b) 不同直径的 GFRP 筋抗拉强度保留率

图 4 GFRP 筋试样的抗拉强度变化率

Fig. 4 Tensile Strength Change Rates of GFRP Bar Specimens

的筋材在清水和盐环境下抗拉强度变化较少, 而在碱环境下损失最多。已有类似研究^[18]表明: GFRP 筋除在碱性环境中表现较差外, 氯盐环境下抗腐蚀性能较好, 这也说明了 GFRP 筋相比于钢筋具备良好的耐氯离子腐蚀特性。这也为 GFRP 筋代替海工环境下的普通钢筋来发挥其优势提供一定的试验基础。

GFRP 筋的抗拉强度在碱、盐和清水环境中的平均损失率分别为 11.44%, 4.59% 和 4.30%。上述试验结果也可以从 GFRP 筋的微观结构特性进行分析^[19]: FRP 筋是一种复合材料, 由纤维和基体组成, 因此 FRP 筋性能退化机理与其组成成分密切相关。由试验结果分析可知, GFRP 筋受碱环境侵蚀的影响最为明显, 这主要因为玻璃纤维中 Si-O 键分别与水分子和碱环境中 OH⁻ 交换或发生化学反应使 Si-O 键断裂造成 GFRP 筋性能劣化。被侵蚀过后筋材纤维含量减少导致截面面积变小, 这与本文对其外形观察结果一致。

图 4(b)给出了同一环境作用下筋材抗拉强度随直径的变化规律。从图 4(b)可以看出, 当直径 12 mm 和 8 mm 的筋材作对比时, 在盐和碱环境下其抗拉强度都有所降低。从图 4(b)还可以看出, 直径 16 mm 筋材的抗拉强度反而比直径 12 mm 筋材的要高, 并且比直径 8 mm 筋材的也高, 也就是说, 其抗拉强度没有降低反而增大了。在盐环境下, 直径

8,12,16 mm 试样的抗拉强度分别下降了 3.5%, 9.42%和 0.82%,曲线大致呈先下降再上升趋势。

侵蚀环境下,直径 8,12,16 mm 试样的抗拉强度分别平均下降了 7.42%,10.81%和 4.27%。由此可以得出结论:①在小直径情况下,GFRP 筋抗拉强度具有较明显的尺寸效应;②在大直径情况下,其抗拉强度则会受到长径比的影响。文献[20]研究也表明,筋材抗拉强度会随着长径比的减小而增大。本试验中直径 8,12,16 mm 试样的长径比分别为 50.0,33.3,25.0,也就是说当筋材的极限抗拉强度受长径比影响的增大值大于受尺寸效应影响的降低值时,大直径筋材的极限抗拉强度就会高于小直径筋材。

2.2.2 表观水平剪切试验

依据规范^[14]规定,本试验在测定剪切强度时采用连续加载,故 GFRP 筋的剪切强度可按式(3)计算

$$\tau_s = \frac{8P_s}{3\pi d^2} \tag{3}$$

式中: τ_s 为剪切强度; P_s 为最大破坏荷载。

表 4 给出了不同侵蚀环境下 GFRP 筋的表观水平剪切强度。为了更为直观地对比研究筋材的剪切性能,选取侵蚀环境和浸泡时间为不同参数,根据剪切强度损失率等研究其退化规律,见图 5。

表 4 不同侵蚀环境下的剪切强度

Tab. 4 Shear Strength in Different Eroded Environments			
侵蚀环境	浸泡时间/d	平均剪切强度/MPa	
		d=12 mm	d=16 mm
实验室环境	0	13.67	23.21
清水环境	12	13.90	21.67
	36	10.76	18.81
	72	10.11	18.57
盐环境	12	13.06	22.36
	36	9.87	21.73
	72	9.88	20.97
碱环境	12	12.44	21.70
	36	8.06	20.16
	72	7.96	19.78

由图 5(a)可知,在不同侵蚀环境作用下,GFRP 筋的剪切强度均有较明显的下降。具体来说,与实验室环境测得的初始剪切强度相比,12 d 时清水、盐和碱环境下试样剪切强度分别下降了一1.68%,4.46%,9.00%;36 d 时分别下降了 21.29%,27.80%,41.04%;72 d 时则分别下降了 26.05%,27.72%,41.77%。由此可以直观地反映出,不论在

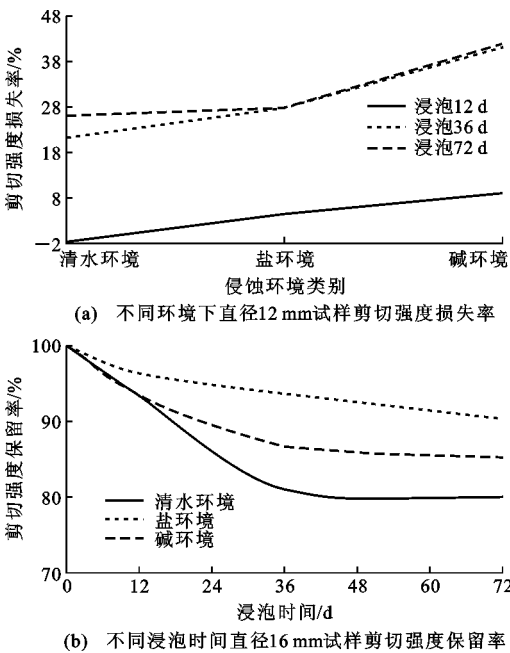


图 5 GFRP 筋试样的剪切强度变化率
Fig. 5 Shear Strength Change Rates of GFRP Bar Specimens

任何时间段都是清水环境下的剪切强度最高,其次是盐环境,最低的则是碱环境。值得一提的是,层间剪切强度的大小揭示了树脂和纤维之间的界面性质,也可以根据前面从 GFRP 筋的微观结构分析其性能退化机理中得到验证。

图 5(b)则可以更直观地反映出直径 16 mm 的 GFRP 试样在不同浸泡时间下剪切强度的保留率。与实验室环境测得的参考值相比,浸泡 12,36,72 d 后,盐环境作用下剪切强度损失率分别为 3.66%,6.38%,9.65%;碱环境剪切强度损失率分别为 6.51%,13.14%,14.78%;清水环境剪切强度损失率分别为 6.64%,18.96%,20.00%。随着浸泡时间的增加,筋材的剪切强度平均下降了 5.60%,12.83%,14.81%。已有的类似研究中发现^[21],FRP 筋在侵蚀初期,剪切强度下降较快,随着侵蚀时间的增加,下降渐渐变缓,这是 FRP 筋被腐蚀的重要特点。在本文的侵蚀周期内,GFRP 筋的退化符合以上特点,例如在碱环境中,0~36 d 内剪切强度下降高达 13.14%,而在 36~72 d 期间,剪切强度仅下降 1.64%。分析认为腐蚀介质在 FRP 筋中的扩散达到一定深度后难度加大,反应生成物在 FRP 筋内部堆积使反应日趋缓慢是造成以上现象的主要原因。

综合图 5(a),(b)可知,GFRP 筋在清水、盐、碱环境中的剪切强度分别下降了 23.03%,18.69%,

28.28%,可见侵蚀环境对其力学性能有明显的影响。

图6给出了表观水平剪切试验中典型的荷载-位移曲线关系,描述的是 GFRP 筋试样在碱环境作用下不同侵蚀阶段(12,36,72 d)试样受荷达到极限承载力时所产生的位移。可以看出,原始试样的剪切断裂机制在横断面发生脆性断裂,在 2 mm 左右开始发生破坏。被侵蚀过的试样荷载-位移曲线表现出相似的模式,包括在早期加载阶段的线性弹性行为,持续加载时的非线性段和峰值后的负载能力下降阶段。随着浸泡时间的增加,试样的最大破坏荷载在减小以及破坏时其位移量也随之降低。这主要是碱环境对筋材的纤维与基体界面造成了一定的破坏。

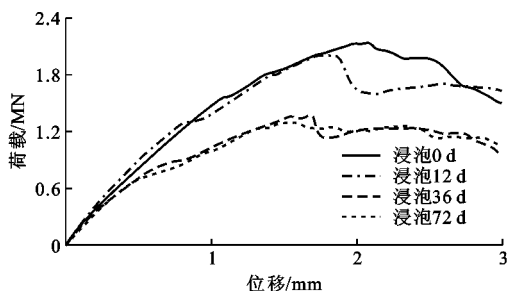


图6 碱环境下直径 12 mm GFRP 筋的荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement Curves of GFRP Bars with 12 mm Diameter in Alkali Environment

3 结 语

(1)GFRP 筋在 3 种侵蚀环境下的力学性能均有一定退化,基本为在碱环境条件下性能降低最多,其次是盐环境,最少的是清水环境;氯盐环境下其腐蚀性能较好,这也说明 GFRP 筋相比于钢筋具备良好的耐氯离子腐蚀特性,从而能够代替海工环境下的普通钢筋来发挥其优势。

(2)侵蚀环境下,直径 8,12,16 mm 试样的抗拉强度分别平均下降了 7.42%,10.81%,4.27%。可以得出初步结论:小直径时 GFRP 筋力学性能退化具有较明显的尺寸效应,抗拉强度随直径的增大而减小;大直径下的情况则相反,有可能是筋材的极限抗拉强度受长径比影响的增大值大于受尺寸效应影响的降低值。

(3)随浸泡时间的增加,直径 8,12,16 mm 试样的剪切强度平均下降了 5.60%,12.83%,14.81%,其性能随时间的增加而降低。在 0~36 d 时性能下降较快,36~72 d 时下降趋于平缓,说明在浸泡一段时间后溶液对基体和纤维之间界面造成的损伤较

大,之后反应生成物在 FRP 筋内部堆积使反应日趋缓慢。

参考文献:

References:

- [1] 陈肇元. 混凝土结构安全性耐久性 & 裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
CHEN Zhao-yuan, Safety, Durability and Crack Control of Concrete Structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [2] WANG W, XUE W C. Advances in Durability of FRP Bars Under Alkaline Environment[C]//IEEE. Proceedings of 2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering. Piscataway: IEEE, 2011: 1915-1918.
- [3] 叶列平. 土木工程科学前沿[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
YE Lie-ping. Frontier and Development in Civil Engineering [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [4] HOLLOWAY L C. A Preview of the Present and Future Utilization of FRP Composite in the Civil Infrastructure with Reference to Their Important in Service Properties[J]. Constructions and Building Materials, 2010, 24(12): 2419-2445.
- [5] 茹继平, 刘加平, 曲久辉, 等. 建筑、环境与土木工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
RU Ji-ping, LIU Jia-ping, QU Jiu-hui, et al. Architecture, Environment and Civil Engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [6] 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.
- [7] 王伟, 薛伟辰. 碱环境下 GFRP 筋拉伸性能加速老化试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 760-766.
WANG Wei, XUE Wei-chen. Accelerated Aging Tests for Evaluations of Tensile Properties of GFRP Rebars Exposed to Alkaline Solution[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 760-766.
- [8] STAMENOVIC M, PUTIC S, RAKIN M, et al. Effect of Alkaline and Acidic Solutions on the Tensile Properties of Glass-polyester Pipes[J]. Materials and Design, 2011, 32(4): 2456-2461.
- [9] BENMOKRANE B, ALIA H, MOHAMED H M, et al. Laboratory Assessment and Durability Performance of Vinyl-ester, Polyester, and Epoxy Glass-FRP

- Bars for Concrete Structures[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 114: 163-174.
- [10] MONTAIGU M, ROBERT M, AHMED E A, et al. Laboratory Characterization and Evaluation of Durability Performance of New Polyester and Vinylester E-glass GFRP Dowels for Jointed Concrete Pavement [J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 17(2): 176-187.
- [11] ACI Committee 440. 3R-04, Guide Test Methods for Fiber-reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures[S].
- [12] ASTM D665-03, Standard Test Method for Rust-preventing Characteristics of Inhibited Mineral Oil in the Presence of Waters[S].
- [13] GB/T 3354—2014, 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法[S].
GB/T 3354—2014, Test Method for Tensile Properties of Orientation Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Materials[S].
- [14] GB/T 13096—2008, 拉挤玻璃纤维增强塑料杆力学性能试验方法[S].
GB/T 13096—2008, Test Method for Mechanical Properties of Pultruded Glass Fiber Reinforced Plastic Rods[S].
- [15] 李国维, 葛万明, 倪 春, 等. 加载速率对大直径 GFRP 筋足尺试件抗拉性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 37(7): 1469-1477.
LI Guo-wei, GE Wan-ming, NI Chun, et al. Effect of Loading Rate on Tensile Properties of Full-scale Specimen of Large-diameter Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Bar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 37(7): 1469-1477.
- [16] BRAHIM B, FAREED E, EHAB A, et al. Characterization and Comparative Durability Study of Glass/Vinylester, Basalt/Vinylester, and Basalt/Epoxy FRP Bars[J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(6): 8-20.
- [17] 武 军, 陈文学, 焦裕钊. 不同直径 GFRP 筋的拉伸性能尺寸效应试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(4): 35-40.
WU Jun, CHEN Wen-xue, JIAO Yu-zhao. Experimental Study on the Size Effect of Tensile Performance of GFRP Bars with Different Diameters [J]. FRP/Composites, 2015(4): 35-40.
- [18] MICELLI F, AIELLO M A. Residual Tensile Strength of Dry and Impregnated Reinforcement Fibres After Exposure to Alkaline Environments[J]. Composites Part B: Engineering, 2017: 1-12.
- [19] AL-SALLOUM Y A, EL-GAMAL S, ALMUSALLAM T H, et al. Effect of Harsh Environmental Conditions on the Tensile Properties of GFRP Bars[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45: 835-844.
- [20] 周继凯, 杜钦庆, 陈礼和, 等. GFRP 筋拉伸力学性能尺寸效应试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(2): 242-247.
ZHOU Ji-kai, DU Qin-qing, CHEN Li-he, et al. Experimental Study on Size Effect in Tensile Mechanical Properties of GFRP Bars[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2008, 36(2): 242-247.
- [21] 吴 刚, 朱 莹, 董志强, 等. 碱性环境中 BFRP 筋耐腐蚀性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(8): 32-41.
WU Gang, ZHU Ying, DONG Zhi-qiang, et al. Experimental Study on the Corrosion Resistance Performance of BFRP Bars in the Alkaline Environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(8): 32-41.