DOI:10.20038/j.cnki.mra.2022.000412

海洋环境下BFRP筋力学性能时变规律研究

杨永民^{1,2,3}, 祁长辉^{2,3}, 关淑鸿¹, 陈耿杰¹, 刘炳岳¹, 刘丹萍¹, 刘俊辉¹, 唐昀超^{1*} (1. 仲恺农业工程学院城乡建设学院, 广东广州 510225; 2. 广东省岭南乡镇绿色建筑工业化工程技术研究中心, 广东广州 510225; 3. 仲恺农业工程学院建筑节能可持续发展研究所, 广东广州 510225)

摘要:为研究 BFRP 筋在复杂海洋环境下的力学性能演变规律,以玄武岩纤维(basalt fiber-reinforced polymers, BFRP)筋试件为研究对象,研究其在蒸馏水、海水侵蚀和碱性溶液环境中浸泡后 BFRP 筋的拉伸力学性能和吸水能力,表征 BFRP 筋在海水与碱海水环境下的纵断面微观结构。结果表明:BFRP 筋在海水中浸泡半年后,试件强度提高了 19%、拉伸强度降低了 5.8%;采用地质聚合物砂浆包裹之后,BFRP 筋在模拟海水环境下拉伸强度的衰退程度得到改善;在海水环境中,腐蚀性介质先造成微观结构中纤维和树脂脱落,后侵蚀纤维丝表面,导致 BFRP 筋拉伸强度降低。通过最大抗拉强度、伸长率的测定,以及微观组织形貌时变规律的研究,建立 BFRP 筋的抗拉强度退化模型,为 BFRP 筋混凝土结构实现工程应用奠定 理论基础。

关键词:BFRP筋;海洋环境;强度退化;微观结构
 中图分类号:TU528
 文献标志码:A
 文章编号:1673-9981(2022)04-0592-08

引文格式:杨永民,祁长辉,关淑鸿,等.海洋环境下BFRP筋力学性能时变规律研究[J].材料研究与应用,2022,16(4): 592-599.

YANG Yongmin, QI Changhui, GUAN Shuhong, et al. Study on Time-Corrosion Mechanism of Mechanical Properties of BFRP Bars in Marine Environment[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(4): 592-599.

海洋环境下,混凝土受海水腐蚀会造成结构恶 化,这对工程结构的耐久性、安全性和稳定性都有至 关重要的影响^[1]。海水中主要存在Cl⁻、SO₄²⁻和 Mg²⁺,混凝土的水化产物会与这些离子发生化学反 应^[2-5],使得混凝土碱性降低,破坏混凝土微观结构 的稳定性,对暴露在海水环境中的混凝土结构物造 成腐蚀^[6]。同时,钢筋的膨胀锈蚀也会影响结构物 耐久性^[7]。海水中足量的Cl⁻渗透混凝土表层并破 坏钢筋的钝化膜,使钢筋活化并发生腐蚀破坏,最终 导致混凝土结构物开裂^[8]。

在海洋环境下使用玄武岩纤维材料代替普通钢筋可以改善海洋混凝土结构性能,有效解决海水和 氯离子腐蚀钢筋等一系列问题^[9-10]。玄武岩纤维 (basalt fiber-reinforced polymers, BFRP)筋是指由玄 武岩矿石经高温熔化后,通过挤压与拉拔纤维与树 脂基体材料制备而成的一种新型非金属复合材 料^[11-12]。与钢筋相比,BFRP筋具有轻质高强、耐腐 蚀等优点,可以有效抵抗 CI⁻渗透,在海水环境中有 较好的工作性能^[13-14]。在盐环境下 BFRP筋的抗拉 强度退化较小^[15],然而碱离子会对 BFRP筋造成一 定程度的腐蚀^[16],在模拟海洋环境下(pH值为 12.7 和 13.4)BFRP筋表面的硅酸盐和碱离子反应会导 致较明显的性能退化^[17]。Lu和 Ali等^[18-19]研究结果 表明,BFRP筋在 60 ℃碱性环境下浸泡半年后的粘 结强度下降 69%,浸泡 5000 h后的横向抗剪强度、 抗弯强度与层间剪切强度分别下降了 12%、19% 和 21%。因此,在碱性海水环境下需要考虑 BFRP筋 性能退化对结构物的影响。

为进一步研究 BFRP 筋在复杂海水环境下的力 学性能及微观结构变化,分别设计了直径为6和8

收稿日期:2022-03-07

基金项目:中国博士后科学基金面上基金(2021M690765);广州市科技计划项目(202102080269)

作者简介:杨永民(1981-),男,内蒙古赤峰人,博士,主要研究方向为混凝土材料,E-mail: 381982967@qq.com。

通信作者:唐昀超(1983-),男,湖南衡阳人,博士,主要研究方向为建筑机器人和结构健康监测,E-mail: ryan. twain@zhku. edu. cn。

mm的普通BFRP筋及用地质聚合物砂浆包裹后的 BFRP筋两组试件,研究试件在自来水、模拟海水和 模拟碱性海水浸泡后拉伸强度的退化程度,以及放 置在海浪区域后的拉伸性能的退化程度。根据 BFRP筋在不同海水环境下的横断面微观结构、试 件腐蚀时间及剩余拉伸强度,建立海水环境下 BFRP筋拉伸强度退化模型,为BFRP筋在混凝土 海工应用给予试验依据和数据支撑。

1 试验部分

1.1 试验原材料

1.1.1 地质聚合物胶凝材料

基于本研究支撑课题的前期研究成果,制备了 一种粉体状的地质聚合物胶凝材料(GI),其主要由 韶钢粒化高炉矿渣、黄埔电厂粉煤灰、艾肯硅灰、激 发剂及缓凝增强组分组成,其中韶钢S95矿渣、黄埔 电厂II级粉煤灰、硅灰、模数为1.4的固体硅酸钠和 碳酸钠混合激发剂及缓凝增强剂的质量比为 70:12:5:8:5。地质聚合物胶凝材料的化学组成和 物理力学性能分别列于表1和表2,粉体粒度分布如 图1所示。

制备地质聚合物时未使用外加剂,主要采用的 是韶关钢铁集团的粒化高炉矿渣(S95),其化学组 成列于表3。

BFRP筋试件来自四川航天拓鑫玄武岩实业有限公司,共有直径6和8mm两个规格。BFRP筋本身没有屈服强度,极限抗拉强度基本在800—1100 MPa,大约是同半径热轧光圆型钢筋(HPB300,屈服强度为300 MPa)极限抗拉强度的1.65倍、同半径三级热轧带肋钢筋(HRB400,屈服强度为400 MPa)极限抗拉强度的1.59倍。此外,BFRP筋的伸长率较钢筋低约为2.0%,而钢筋伸长率约为20.0%,大约为BFRP筋的10倍。

表 1 地质聚合物胶凝材料的化学组成 Table 1 Chemical composition of geopolymer binder

| 组成成分 | SiO_2 | AlO_3 | $\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$ | ${\rm TiO}_2$ | CaO | MgO | SO_3 | P_2O_5 | K_2O | Na_2O | LOI |
|--------|------------------|---------|-----------------------------|---------------|-------|------|-----------------|----------|--------|---------|------|
| 含量 w/% | 30.56 | 19.56 | 2.22 | 0.85 | 34.40 | 3.23 | 1.23 | 0.05 | 2.09 | 4.88 | 0.93 |





Figure 1 Particle size distribution of geopolymer binder

表 3 矿渣的化学组成 ble 3 Chemical composition of GBFS

| 组成成分 | SiO_2 | $\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$ | $\mathrm{Fe}_{2}\mathrm{O}_{3}$ | ${\rm TiO}_2$ | CaO | MgO | SO_3 | P_2O_5 | K_2O | Na_2O | LOI |
|--------|------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------|-------|-------|--------|----------|--------|---------|-------|
| 含量 w/% | 35.07 | 12.15 | 0.32 | 0.74 | 37.08 | 11.27 | 1.19 | — | 0.49 | 0.25 | -0.61 |

1.1.2 人工海水

根据ASTMD 1141-98(2003)和GB/T 15748-

1995 船用金属材料电偶腐蚀试验方法,来配制实验 使用的人工海水,人工海水组成列于表4。

| Table 4 Artificial seawater composition | | | | | | | | | |
|---|------|----------|------------------------------|----------|-----|---------------|-----|------------------------|----------|
| 化合物 | NaCl | $MgCl_2$ | $\mathrm{Na}_2\mathrm{SO}_4$ | $CaCl_2$ | KCl | $\rm NaHCO_3$ | KBr | $\mathrm{H_{3}BO_{3}}$ | $SrCl_2$ |
| 浓度/(g•L ⁻¹) | 24.5 | 5.2 | 4.1 | 1.2 | 0.7 | 0.2 | 0.1 | 0.03 | 0.03 |

表4 人工海水组成

1.2 试验方法

将长1100 mm的BFRP筋试件浸入人工海水中,经过预定的龄期之后取出,去除试件表面水分, 参考美国ACI440.3R-04 纤维增强聚合物(FRP)筋 增强混凝土结构试验方法指南的设计和制作BFRP 筋拉伸试件,拉伸试件总长L=1000 mm,具体尺寸 如图2所示。



图 2 BFRP 筋拉伸试件 Figure 2 Tensile specimens of BFRP bars

在拉伸试验过程中,为避免拉力机夹具对 BFRP筋拉伸试件两端产生剪切破坏,在BFRP筋 两端用长度为200 mm的钢套筒(壁厚3 mm、底直 径为30 mm、顶直径为35 mm)锚固,钢套筒与 BFRP筋之间通过灌注环氧树脂粘结。

根据纤维增强复合材料筋基本力学性能试验方法(GB/T 30022-2013),在电液伺服万能试验机上测试BFRP筋样品极限抗拉强度及拉应变,采用位



移控制并控制试件在1—10 min内破坏。

2 实验结果及分析

2.1 海水浸泡对 BFRP 筋力学性能的影响

图3为在自来水、模拟海水条件下浸泡后 BFRP 筋拉伸强度的变化情况。从图 3 可见: 在自 来水浸泡下,试件拉伸强度略有提升后下降,最后有 倾向稳定的趋势;在模拟海水浸泡下,BFRP筋强度 降低;用地质聚合物砂浆包裹后的BFRP筋强度衰 退情况得到改善,其拉伸强度在腐蚀过程中先迅速 下降后缓慢下降,即腐蚀介质在BFRP筋中扩散达 到一定深度后达到平衡,此时反应生成物在BFRP 筋内部堆积使侵蚀反应放缓;对比直径分别为6和 8 mm的BFRP筋,在地质聚合物砂浆包裹状态下初 始拉伸强度均为1158 MPa,在海洋环境下浸泡 360 d 后最终拉伸强度分别为 961.433 和 1 005.433 MPa;随着浸泡时间的递增,在同一环境下直径为6 mm的BFRP筋拉伸强度比直径8mm的稍低。表 明,后续需要持续关注更大直径下BFRP筋在腐蚀 环境中的退化现象。





Figure 3 Variation of tensile strength of BFRP bars in different corrosive medium

由于受到海浪冲击,海滨环境下BFRP筋腐蚀 情况较静置海水或普通盐雾环境复杂。将BFRP筋 试件放置海滨环境(海边浪溅区)下,半年后测试试件的拉伸强度并观察BFRP筋的性能变化。

图 4 为放置 BFRP 筋试件的示意图,表5为 BFRP 筋的拉伸性能结果。由表5可知,老化BFRP 筋的拉伸强度为1053.1 MPa、拉伸弹性模量达到 47.8 GPa,未经老化的 BFRP 筋的拉伸强度为 899.1 MPa、拉伸弹性模量为 50.8 GPa。半年老化后,试样的强度提高了 19%、拉伸强度降低了 5.8%,说明BFRP筋在海水浸泡半年内未有明显性能退化。



图 4 浪溅区浸泡 180 d 的 BFRP 筋 Figure 4 BFRP bars aged 180 days in the splash zone

表 5 BFRP 筋(海水浪溅区暴露 180 d)的拉伸性能 Table 5 Tensile properties of BFRP bars (180 days exposure in seawater splash zone)

| 试样规格 | 拉伸强度/MPa | 平均值/MPa |
|-------|---|---------|
| 直径6mm | 1 007. 85,998. 83,923. 33,982. 36,918. 83,1 071. 12,969. 52,942. 94,1 026. 93,945. 31 | 978.70 |
| 直径8mm | 926.33,1073.11,981.45,994.44,990.03,910.66,987.56,938.49,1028.91,1054.18 | 988.52 |

2.2 海洋环境下BFRP筋抗拉强度退化模型

在自来水、模拟海水和碱性模拟海水(饱和 Ca(OH)₂人工海水溶液)中浸泡后BFRP筋试样外 观如图5所示。从图5可见,在不同条件下BFRP筋 表面变化是不一样的。浸泡在自来水中,BFRP筋 表面无明显变化;浸泡在模拟海水中,28d之后筋材 表面的光泽度降低,浸泡90d之后光泽度比28d后 的黯淡,浸泡一年之后筋材肋痕凹处变得粗糙;浸泡 在碱性模拟海水中,28d后筋材光泽度显著下降且 表面粗糙,浸泡60d后试件肋痕凹处由黑色变为黄 棕色(玄武岩纤维颜色)、凸起处变为灰色,浸泡90d 后凸起变窄、黄棕色纤维原丝裸露明显,浸泡180d 后筋材表面变成了黄棕色松散纤维,浸泡一年后筋 材表面树脂稀少、纤维完全松散。





图 6 为 BFRP 筋在水和海水环境下浸泡 180 d 的横断面 SEM 图。从图 6 可见:在水中浸泡 180 d 的 BFRP 筋,其横断面树脂和 BFRP 纤维丝结合紧 密且没有孔隙;在海水中浸泡180d的BFRP筋的边缘处外层纤维出现孔隙,并且表面结构遭受侵蚀后 而松散。



图 6 BFRP 筋在水和海水中腐蚀 180 d 后的横断面微观结构 **Figure 6** Cross sectional microstructure of BFRP bars after 180 days of corrosion in water and seawater

水和海水环境下 BFRP 筋纵断面的微观结构见 图 7。从图 7 可见:未受海水腐蚀的 BFRP 筋纵断面 中, BFRP 纤维丝与树脂之间嵌合紧密, BFRP 纤维 表面光滑平整;在海水中浸泡 180 d 后, BFRP 纤维 丝松散,中间粘结的树脂消失,在纤维丝表面附着了 大量盐类结晶物这是由于在腐蚀过程中,腐蚀性介质主要沿着筋材径向由外向内逐步深入,早期主要造成纤维和树脂的脱落,后期造成纤维丝表面的腐蚀,最后引起BFRP筋拉伸强度的显著降低。





通过对 BFRP 筋的微观分析可知, BFRP 筋在 海水环境下的退化机理是纤维-树脂基体界面的剥 离破坏,表达式如下^[20]。

$$f_f = (100 - Y_{\infty}) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + Y_{\infty} \tag{1}$$

式(1)中 Y_∞为腐蚀时间趋于无穷的 BFRP 筋剩余拉 伸强度,*t*为由腐蚀温度决定的特定时间。

地质聚合物混凝土中BFRP筋在海洋环境下侵 蚀主要分为两个方面,一个是海水的侵蚀,另一个是 地质聚合物内部的碱侵蚀。因此对公式(1)进行了 修正^[21],修正后方程如下。

$$f_f = Y_{\infty} \times \exp\left(-b \times t\right)^c + Y_{\infty} \tag{2}$$

为验证修正后的方程,对直径6和8mm的 BFRP筋(地质聚合物砂浆包裹)在海水浸泡下拉伸 性能时变规律进行模拟(图8),拟合参数列于表6。 由表6可知,在该环境下,直径为6mm的BFRP筋最 终强度为695 MPa,直径8mm的BFRP筋最终强度 为663 MPa。衰退模型分别为直径6mm的BFRP筋 衰退模型 f_f =695.38×(1-exp(-8.19958× $10^{-7} \times t))^{-0.04694}$ 和直径8mm的BFRP筋衰退模型 f_f =663.76×(1-exp(-1.98349×10⁻⁶×t))^{-0.04248}。

表 6 BFRP 筋退化拟合参数 Table 6 Fitting parameters to describe the degradation of BFRP bar

| 参数 | 直径6mm | 直径8mm |
|--------------|---------------------------|--------------------------|
| Y_{∞} | 695.38 | 663.76 |
| b | 8.199 58×10^{-7} | 1.98349×10^{-6} |
| С | -0.04694 | -0.04248 |
| R^2 | 0.92197 | 0.95115 |

表7为海水浸泡下直径6和8mm的BFRP筋拉 伸强度误差值结果。从图8及表7可见:直径6mm 的BFRP筋拟合最小相对误差绝对值为0.499%, 最大为2.556%;直径8mm的BFRP筋拟合最小相 对误差为0.003%,最大为0.15%。说明衰退模型 对直径8mm的BFRP筋拟合效果优于增加6mm。 表明,相较于增加8mm,部分直径6mm的BFRP试 件受海水腐蚀及碱腐蚀影响较大,可能是由于小直 径试件加工精度不足,由此对实验结果产生影响。 而有关腐蚀温度、湿度、海水离子种类及受力形式对 BFRP筋造成的侵蚀破坏,仍待进一步深入研究。



表 7 海水浸泡下直径 6 和 8 mm 的 BFRP 筋拉伸强度误差值 Table 7 Error value of tensile strength of Φ6mm and Φ8 mm BFRP bar immersed in marine environment

| | . a.b | | e en engin er i e | | | | | |
|------|-----------------|------------|-------------------|-------|------|------------|----------------|-------|
| 试样 | 浸泡时间/ | 实际拉伸 | 预测拉伸 | 相对误差 | 试样 | 实际拉伸 | 预测拉伸 | 相对误差 |
| 规格 | d | 强度/MPa | 强度/MPa | 绝对值/% | 规格 | 强度/MPa | 强度/MPa | 绝对值/% |
| | 28 | 1 159.702 | 1 153. 336 | 0.548 | | 1 141. 334 | 1 147.23 | 0.005 |
| | 56 90 120 | 1 126. 251 | 1 109.452 | 1.491 | | 1 128.831 | 1 110.832 | 0.015 |
| | | 1 108.919 | 1 080. 437 | 2.556 | | 1 111.45 | 1 086.633 | 0.022 |
| C | | 1 069. 744 | 1 063. 325 | 0.600 | 0 | 1 073. 324 | 1 072.309 | 0.009 |
| 6 mm | 180 | 1 027.556 | 1 039.077 | 1.121 | 8 mm | 1 037.664 | 1 051.945 | 0.013 |
| | 240 | 1 017.421 | 1 022. 507 | 0.499 | | 1 021.791 | $1\ 037.\ 982$ | 0.015 |
| | 300 | 1 010. 471 | 1 009.669 | 0.079 | | 1 021.791 | 1 027.138 | 0.005 |
| | 360 | 1 005.433 | 999.3626 | 0.603 | | 1 014. 437 | 1 018. 415 | 0.003 |

3 结论

以直径为6和8mm的普通BFRP筋及用地质 聚合物砂浆包裹后的BFRP筋两组试件作为参考, 研究不同模拟海洋环境下BFRP筋及其界面性能时 变规律和力学性能,根据BFRP筋力学性能时变规 律所造成承载力的损失,建立了基于承载力衰退的 BFRP筋拉伸强度模型。

(1)BFRP 筋在自来水浸泡下的条件下抗拉强 度先略有增加后下降,最后趋于稳定。在模拟海水 中浸泡的条件下,其拉伸强度会随老化时间的增加 而逐步降低。直径为6mm的BFRP 筋的拉伸强度 在此条件下的衰退相比于直径为8mm的严重,最 终拉伸强度分别为961.433 MPa和1005.433 MPa。 (2)BFRP 筋在海中的浪溅区裸露半年后的伸强度变化较小。经半年老化,试样的强度提高了 19%,而拉伸强度降低了5.8%。说明,海水半年时间内的浸泡下并未引起 BFRP 筋的拉伸性能明显 退化。

(3)BFRP 筋表面外观在自来水中浸泡后无变 化。试件外观在模拟海水中浸泡后随浸泡时间增加 逐步劣化,在海水中浸泡180 d后,BFRP 筋边缘外 层出现孔隙,筋材外表树脂稀疏,纤维几乎完全松 散,纤维丝表面附着大量盐类结晶物。

(4)根据 BFRP 筋在海水环境下的退化机理建 立并修正强度衰退模型,对直径为6和8mm的 BFRP筋(地质聚合物砂浆包裹)在海水浸泡下拉伸 性能时变规律进行模拟,结果表明直径为6mm的 BFRP 筋最终强度为695 MPa,而直径为8mm的 BFRP 筋最终强度为663 MPa。

参考文献:

- [1] QU F, LI W, DONG W, et al. Durability deterioration of concrete under marine environment from material to structure: A critical review [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 35: 102074.
- [2] EL MAHDI SAFHI A, BENZERZOUR M, RIVARD P, et al. Development of self-compacting mortars based on treated marine sediments [J]. Journal of Building Engineering, 2019, 22: 252-261.
- [3] WEGIAN F M , ENGINEERING S. Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete
 [J]. The IES Journal Part A: Civil Structural Engineering, 2010, 3(4): 235-243.
- [4] RAGAB A M, ELGAMMAL M A, HODHOD O A, et al. Evaluation of field concrete deterioration under real conditions of seawater attack [J]. Construction Building Materials, 2016, 119:130-144.
- [5] ISLAM M M, ISLAM M S, AL-AMIN M, et al. Suitability of sea water on curing and compressive strength of structural concrete [J]. Journal of Civil Engineering, 2012, 40(1): 37-45.
- [6] YI Y, ZHU D, GUO S, et al. A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment [J]. Cement Concrete Composites, 2020, 113:103695.
- YANG Y, LIZ, ZHANG T, et al. Bond-slip behavior of basalt fiber reinforced polymer bar in concrete subjected to simulated marine environment: Effects of BFRP bar size, corrosion age, and concrete strength
 [J]. International Journal of Polymer Science, 2017(6): 1-9.
- [8] ATHIBARANAN S, KARTHIKEYAN J, RAWAT S, et al. Investigation on service life prediction models of reinforced concrete structures exposed to chloride laden environment [J]. Journal of Building Pathology Rehabilitation, 2022, 7(1):1-15.
- [9] LI S, GUO S, YAO Y, et al. The effects of aging in seawater and SWSSC and strain rate on the tensile performance of GFRP/BFRP composites: A critical review [J]. Construction Building Materials, 2021, 282: 122534.
- [10] ŽIVKOVIĆ I, FRAGASSA C, PAVLOVIĆ A, et al. Influence of moisture absorption on the impact properties of flax, basalt and hybrid flax/basalt fiber

reinforced green composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 111: 148-164.

- [11] 吴刚,董志强,徐博,等.海洋环境下 BFRP 筋与混 凝土黏结性能及基本锚固长度计算方法研究[J].土 木工程学报,2016,49(7):89-99.
- [12] 朱海堂,程晟钊,高丹盈,等.BFRP 筋钢纤维高强混 凝土梁受弯承载力试验与理论[J].复合材料学报, 2018,35(12):3313-3323.
- [13] XIONG Z, LIN L, QIAO S, et al. Axial performance of seawater sea-sand concrete columns reinforced with basalt fibre-reinforced polymer bars under concentric compressive load [J]. Journal of Building Engineering, 2022,47:103828.
- [14] WEI Y, ZHU C, MIAO K, et al. Compressive performance of concrete-filled steel tube columns with in-built seawater and sea sand concrete-filled FRP tubes
 [J]. Construction Building Materials, 2022, 317: 125933.
- [15] WU G, DONG Z Q, WANG X, et al. Prediction of long-term performance and durability of BFRP bars under the combined effect of sustained load and corrosive solutions [J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(3):4014058.
- [16] LU Z, SU L, XIAN G, et al. Durability study of concrete-covered basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars in marine environment [J]. Composite structures, 2020, 234:111650.
- [17] GUO F, AL-SAADI S, RAMAN RS, et al. Durability of fiber reinforced polymer (FRP) in simulated seawater sea sand concrete (SWSSC) environment[J]. Corrosion Science, 2018, 141:1-13.
- [18] LU Z, SU L, LAI J, et al. Bond durability of BFRP bars embedded in concrete with fly ash in aggressive environments [J]. Composite Structures, 2021, 271: 114121.
- [19] ALI A H, MOHAMED H M, BENMOKRANE B, et al. Durability performance and long-term prediction models of sand-coated basalt FRP bars[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 157:248-258.
- [20] PHANI K K, BOSE N R. Temperature dependence of hydrothermal ageing of CSM-laminate during water immersion[J]. Composites science, 1987, 29(2):79-87.
- [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(8):32-41.

Study on Time-Corrosion Mechanism of Mechanical Properties of BFRP Bars in Marine Environment

YANG Yongmin^{1,2,3}, QI Changhui^{2,3}, GUAN Shuhong¹, CHEN Gengjie¹, LIU Bingrui¹, LIU Danping¹, LIU Junhui¹, TANG Yunchao^{1*}

(1. College of Urban and Rural Construction, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Guangdong Lingnan Township Green Building Industrialization Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510225, China; 3. Institute of Sustainable Building and Energy Conservation of Zhongkai College of Agricultural Engineering, Guangzhou 510225, China)

Abstract: In order to study the evolution of mechanical properties of basalt fiber-reinforced polymers (BFRP) bars in complex marine environment, two types of BFRP bars specimens as the research object were designed after immersion in distilled water, seawater erosion and alkaline solution environment, respectively. The tensile mechanical properties and water absorption capacity of BFRP bars is characterized along the longitudinal section microstructure of BFRP bars in seawater and alkaline seawater environment. The results shows that after immersion in seawater for half a year, the residual tensile strength of BFRP bars increases by 19%, while the tensile strength decreases by 5.8%. In the seawater environment, the corrosive medium first causes the fibers and resins in the microstructure to fall off, and then erodes the surface of the fiber filaments, resulting in a decrease in the tensile strength of BFRP bars. By testing the maximum tensile strength and elongation, this paper investigates the time-corrosion mechanism of microstructure and morphology and establishes the tensile strength degradation model of BFRP bars, which lays a theoretical foundation for the engineering application of BFRP reinforced concrete structures. **Keywords:**BFRP bar; marine environment; strength degradation; microstructure

(学术编辑:黎小辉)