

文章编号:1673-2049(2018)05-0188-06

# GFRP 筋混凝土柱海水环境受压性能

孙 丽<sup>1</sup>, 杨泽宇<sup>1</sup>, 居理宏<sup>2</sup>, 张春巍<sup>3</sup>

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳市现代建筑产业化管理办公室, 辽宁 沈阳 110825;  
3. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘要:**从新的角度和采用真实的腐蚀条件, 首先通过混凝土材料在海洋环境下的腐蚀试验排除海洋环境对混凝土材料的影响, 然后对玻璃纤维增强塑料(GFRP)筋体进行腐蚀试验, 将不同腐蚀时间的 GFRP 筋进行绑扎、支模和浇筑, 制作成混凝土柱并进行试验。根据相关力学试验结果, 对比混凝土构件内筋体腐蚀前后其极限承载力、破坏形态以及筋体腐蚀后构件各项性能的变化情况。结果表明:人工制备的高浓度海水溶液对混凝土材料的力学性能影响不大, 有必要排除混凝土保护层对传统腐蚀试验的影响;在柱内筋体受到 180 d 腐蚀的条件下, 钢筋混凝土柱的极限承载力保留率下降到 70.2%, 降低了 29.8%;GFRP 筋混凝土柱的极限承载力保留率下降到 86.5%, 降低了 13.5%;海水环境下 GFRP 筋在受压构件中具有比钢筋更好的性能优势和使用价值。

**关键词:**GFRP 筋;混凝土柱;海水环境;受压性能

**中图分类号:**TU377 **文献标志码:**A

## Compression Performance of GFRP Reinforced Concrete Columns Under Seawater Environment

SUN Li<sup>1</sup>, YANG Ze-yu<sup>1</sup>, JU Li-hong<sup>2</sup>, ZHANG Chun-wei<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China;  
2. Shenyang City Modern Building Industrialization Management Office, Shenyang 110825, Liaoning, China;  
3. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China)

**Abstract:** The tests with a new point of view and real corrosion conditions were carried out. First, the effect of marine environment on the concrete material was eliminated through the corrosion test of concrete in the marine environment. Then the corrosion test of the GFRP reinforcement was initiated. The GFRP tendons with different corrosion time were lashed, formed and poured into concrete column and the related tests were carried out. According to the experimental results of the related mechanics test, the ultimate bearing capacity, failure mode of concrete members before and after corrosion, and the changing status of various properties of reinforcement body after corrosion were compared. The results show that the artificial high concentration seawater solution has little influence on mechanical properties of concrete materials. It is essential that overcoming the influence of concrete protection layer on traditional corrosion test. Under the condition of inner tendons corroded for 180 days, the retention rate of ultimate bearing capacity of reinforced concrete column reduces from 100% to 70.2% for about

收稿日期:2018-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51578347);沈阳市科技计划项目(18-013-0-31);辽宁省重点研发计划指导计划项目(2017231010);  
辽宁省自然科学基金项目(2015020578)

作者简介:孙 丽(1974-),女,辽宁营口人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:sunli2009@163.com。

29.8%。The retention rate of ultimate bearing capacity of GFRP-reinforced concrete column reduces from 100% to 86.5% for about 13.5%。It can be found from the experimental results that the compression components in seawater, GFRP tendons are better than rebar in performance and value of application.

**Key words:** GFRP reinforcement; concrete column; seawater environment; compression performance

## 0 引言

纤维材料的耐久性一直是国内外学者关心的重点,因为在温湿度变化、紫外线辐射、化学物质侵蚀和冻融往复循环等恶劣环境下,纤维增强复合塑料(FRP)耐久性的优劣直接决定 FRP 筋能否替代钢筋在腐蚀环境中工作。国内外学者开展了大量与 FRP 材料和 FRP 构件耐久性相关的试验,取得了一定进展。

祁德庆等<sup>[1]</sup>分析了纤维筋的耐久性,在酸、碱、盐和其他溶液环境中浸泡后,对纤维材料起到主要腐蚀作用的是溶液中的氯离子和氢氧根离子。任慧韬等<sup>[2-3]</sup>在研究中得出了纤维筋的耐久性能在冻融循环、碱性环境和浸水等环境下的变化情况;此外,在普通混凝土梁中掺入短切碳纤维可改善混凝土的韧性并起到增强阻裂的效果。毕永清<sup>[4]</sup>在试验中探究了碳纤维增强塑料(CFRP)混凝土梁和 CFRP 混凝土柱在人工海水侵蚀环境下的强度、变形和试验材料的破坏情况。付凯等<sup>[5-6]</sup>根据 ASTM D665 规定的试验方法,开展了不同温度条件下 GFRP 筋在人工海水环境中的加速老化试验,并设计了 FRP 纵筋在细长混凝土柱中的应用方案。孙丽等<sup>[7-9]</sup>研究了偏心受压 GFRP 混凝土柱相关受力性能,通过 GFRP 筋混凝土柱海水腐蚀后的抗压性能试验,得出了在近似海洋腐蚀环境下 GFRP 筋作为受力筋在受压构件中可以有效提高其结构耐久性。国外学者为了达到理想状态下的预测效果<sup>[10-11]</sup>,通常采用阿伦尼乌斯方程作为 GFRP 筋寿命预测的理论基础,来实现侵蚀程度在不同温度条件下的相互转换。刘小艳等<sup>[12-13]</sup>通过试验提出了运用加速腐蚀试验来预测 GFRP 筋使用寿命的新思路,并通过在水泥基材料中掺入碳纤维来研究纤维材料对构件导电性和抗压强度的影响。阎西康等<sup>[14]</sup>通过试验探究了腐蚀时间不同的钢筋混凝土梁其正截面承载力的变化情况。张新越等<sup>[15]</sup>通过对 FRP 加筋混凝土短柱进行轴心受压破坏试验,发现在没有其他多余约束条件时,GFRP 筋混凝土柱的极限抗压强度略高于

CFRP 筋混凝土柱。王军强等<sup>[16]</sup>以 Fick 第二扩散定律作为理论依据,探究钢筋混凝土构件在海洋环境下的寿命预测模型。毕傑俐<sup>[17]</sup>通过试验将刚度和强度都不同的纤维筋按面积比进行混合,通过纤维筋的依次断裂来使试验构件的破坏形态从脆性破坏变成延性破坏。赵洋<sup>[18]</sup>设计的材料腐蚀试验针对温差、湿度、海水浓度和紫外线因素等,通过模拟自然环境试验和加速试验来认识腐蚀规律和机理对材料耐腐蚀性的影响。GFRP 材料长期处于强碱环境下时抗拉强度下降较大,强碱环境对 GFRP 材料的破坏很严重。Zhang 等<sup>[19]</sup>通过对 FRP 筋混凝土柱的轴向压缩试验,分析了其失效模式和应变曲线。

从国内外研究现况可以看出,海洋环境下钢筋混凝土构件主要受到氯离子和氢氧根离子的侵蚀,并且在传统的 FRP 混凝土构件耐久性试验研究中可以看出,传统的试验方案存在一定局限性,并不能得到真实、保守、有指导性意义的试验结论。因此,本文制备了 10 倍海水浓度的 NaCl 弱碱性盐溶液,并从新的思路和试验方案入手,排除混凝土保护层等其他因素,得到 FRP 筋混凝土柱在高浓度海水环境下的最不利情况,为 FRP 筋在实际工程中的应用奠定基础。

## 1 试验方案

### 1.1 混凝土标准立方体试块受压性能试验

本试验腐蚀溶液为质量分数 30% 的 NaCl 弱碱性盐溶液,浓度设定的目的是以极限状态加速溶液中离子侵蚀的速率,同时通过未经腐蚀的标准立方体试件与经过腐蚀的标准立方体试件的强度对比,明确本试验腐蚀环境对混凝土材料本身的影响,试验方案如表 1 所示。将制作好的标准混凝土立方体试块一组直接进行轴心受压试验,另一组放入到试验溶液中浸泡。浸泡 180 d 后取出试件再进行轴心受压破坏试验,探究试验中的腐蚀环境对混凝土材料本身极限抗压承载力的影响。

### 1.2 新试验方法的混凝土柱轴心受压破坏试验

对 2 种筋笼进行编号,编号中第 1 个数字为不

表 1 混凝土腐蚀的试验方案

Tab. 1 Test Scheme of Concrete Corrosion

腐蚀时间/d	第 1 组标准立方体试块个数	第 2 组标准立方体试块个数
0	6	0
30	0	0
60	0	0
90	0	0
120	0	0
150	0	0
180	0	6

同时间节点的组次编号,4 个数字 0,1,2,3 分别对应 0,60,120,180 d 的腐蚀天数。字母“R”代表的是钢筋筋笼,字母“G”代表 GFRP 筋筋笼。第 2 个数字为相同腐蚀环境下的筋笼编号,见表 2。

表 2 钢筋和 GFRP 筋筋笼腐蚀时间和编号

Tab. 2 Corrosion Time and Serial Number of Rebars and GFRP Bar Cages

腐蚀时间/d	钢筋筋笼编号	GFRP 筋筋笼编号
0	0R-1	0G-1
	0R-2	0G-2
	0R-3	0G-3
60	1R-1	1G-1
	1R-2	1G-2
	1R-3	1G-3
120	2R-1	2G-1
	2R-2	2G-2
	2R-3	2G-3
180	3R-1	3G-1
	3R-2	3G-2
	3R-3	3G-3

进行轴心受压破坏试验,得出被 10 倍海水浓度的 NaCl 弱碱性盐溶液腐蚀后的筋笼对混凝土柱极限承载力的影响,试验方案见表 3。

表 3 混凝土柱轴心受压破坏试验方案

Tab. 3 Failure Test Scheme of Concrete Columns Under Axial Compression

腐蚀时间/d	钢筋混凝土柱根数	GFRP 筋混凝土柱根数
0	3	3
30	0	0
60	3	3
90	0	0
120	3	3
150	0	0
180	3	3

2 试验结果与讨论

2.1 混凝土标准试块的受压性能试验结果

2.1.1 试验现象及试验数据的处理与分析

通过标准混凝土立方体试块的轴心受压破坏试

验,分别得出了不同腐蚀环境下每个标准混凝土立方体试块的极限荷载和抗压强度,试验数据如表 4,5 所示。

表 4 未腐蚀条件下的混凝土标准试块受压性能试验数据

Tab. 4 Compressive Property Test Data of Concrete Standard Cube Under Non Corrosion Condition

腐蚀时间/d	极限荷载/kN	抗压强度/MPa	抗压强度平均值/MPa
0	802.5	35.7	36.1
	815.7	36.3	
	820.3	36.5	
	823.5	36.6	
	798.2	35.5	
	810.3	36.0	

表 5 长期腐蚀条件下的混凝土标准试块受压性能试验数据

Tab. 5 Compressive Property Test Data of Concrete Standard Cube Under Long Term Corrosion

腐蚀时间/d	极限荷载/kN	抗压强度/MPa	抗压强度平均值/MPa
180	801.3	35.6	36.3
	830.6	36.9	
	827.0	36.8	
	816.2	36.3	
	819.5	36.4	
	806.4	35.8	

从表 4,5 的试验数据可以看出,混凝土试块的抗压强度随着腐蚀时间的增加而变化不大,不仅没有降低反而略有升高。绘制混凝土标准立方体试块的极限荷载变化曲线,如图 1 所示。

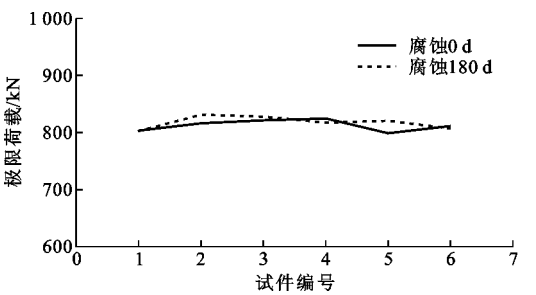


图 1 混凝土标准立方体试块在不同腐蚀条件下的极限荷载

Fig. 1 Ultimate Load of Standard Concrete Cube Specimen Under Different Corrosion Conditions

2.1.2 试验结果分析

未经腐蚀与腐蚀 180 d 的混凝土标准立方体试块抗压强度平均值分别为 36.1 MPa 和 36.3 MPa。可以看出氯离子腐蚀对混凝土材料本身的影响不大,其抗压强度不仅没有大幅度衰减还略有升高。这是因为混凝土材料本身呈弱碱性,其化学组成主

要为硅酸三钙( $3\text{CaOSiO}_2$ )、硅酸二钙( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ )和铝酸三钙( $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ ),3 种组成都不与氯化钠发生化学反应,所以对试件承载力的影响不大。同时,混凝土试块所处环境从空气变成了溶液,提高了混凝土的养护条件从而使强度略有升高。

2.2 基于新试验方法的混凝土柱轴心受压破坏试验结果与分析

2.2.1 试验现象

钢筋混凝土柱在受压试验中发生了轴压破坏和劈裂破坏。筋笼未腐蚀的混凝土柱发生轴压破坏,而筋笼腐蚀 180 d 的混凝土柱发生劈裂破坏,并且构件延性也大幅度降低。长时间的腐蚀使筋体的力学性能发生了较大变化,筋体受力性能、屈服强度等因素的降低使构件在钢筋受力薄弱区域发生了应力集中,从而导致了劈裂破坏的发生。裂缝情况如图 2 所示。

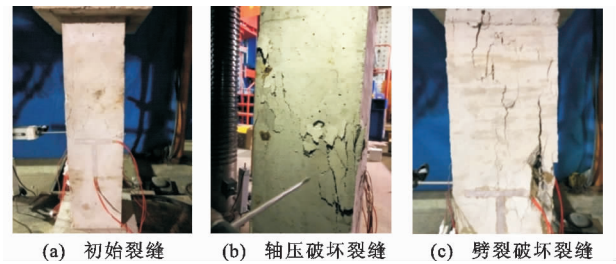


图 2 钢筋混凝土柱的外部裂缝情况

Fig. 2 External Crack Status of Reinforced Concrete Column

GFRP 筋混凝土柱在受压试验中同样发生了轴压破坏和劈裂破坏,但与钢筋混凝土柱相比,筋笼腐蚀 120 d 的 GFRP 筋混凝土柱开始出现了劈裂破坏现象,提前了一个腐蚀阶段。因为 GFRP 筋是脆性材料且延性较差,在与混凝土协同工作时更容易发生应力集中现象。虽然 GFRP 筋混凝土柱的极限承载力不断降低,但较钢筋混凝土柱降低 29.8%而言,其降低幅度并不大,只有 13.5%。GFRP 筋长期腐蚀后其混凝土柱的承载力要高于同条件钢筋混凝土柱的承载力,裂缝情况如图 3 所示。

2.2.2 试验结果分析

通过表 6 可以看出,随着柱内筋体腐蚀时间的

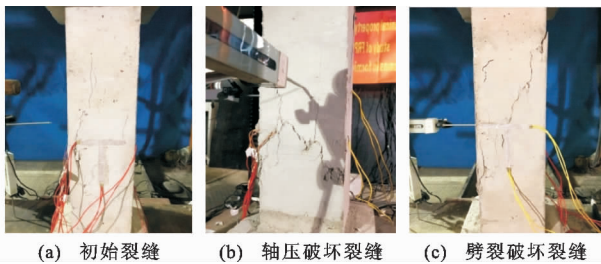


图 3 GFRP 筋混凝土柱的外部裂缝情况

Fig. 3 External Crack Status of GFRP-reinforced Concrete Column

增加,混凝土柱极限承载力不断降低,并且降低幅度较大。在腐蚀 120 d 时承载力急剧下降。腐蚀 60 d 时,钢筋混凝土柱极限承载力的保留率为 92.6%,降低了 7.4%;腐蚀 120 d 时,钢筋混凝土柱的极限承载力保留率下降到 83.1%,降低了 16.9%;腐蚀 180 d 时,钢筋混凝土柱的极限承载力保留率为 70.2%,降低了 29.8%。从数据可以看出,钢筋在腐蚀溶液中的耐腐蚀能力较差,筋体的力学性能受到极大的影响,当柱内筋体腐蚀 180 d 时,钢筋混凝土柱在结构中基本处于失效状态,虽然仍具有延性但极限承载力已经越来越低。

由表 7 可以看出,GFRP 筋混凝土柱极限承载力的降低幅度较为均匀。腐蚀 60 d 时,极限承载力保留率为 95.4%,降低了 4.6%。腐蚀 120 d 时,极限承载力保留率为 92.1%,降低了 7.9%。腐蚀 180 d 时,极限承载力保留率为 86.5%,降低了 13.5%。从数据可以看出,GFRP 筋具有较强的耐腐蚀能力。

2 种筋体材料混凝土柱轴心受压破坏试验的对比分析如图 4 所示。由图 4 可以看出,试验钢筋混凝土柱的承载力下降幅度较大。当腐蚀 180 d 时,混凝土柱的抗压承载力由 688.7 kN 下降到 483.9 kN,保留率只有 70.2%。同时,钢筋混凝土柱极限承载力下降的速率越来越快,腐蚀 0~60 d 时抗压承载力保留率下降 7.4%;腐蚀 60~120 d 时,抗压承载力保留率下降 9.5%;腐蚀 120~180 d 时,抗压承载力保留率下降 12.9%。GFRP 筋混凝土柱承载力下降较为平缓,当腐蚀 180 d 时,混凝土柱的抗

表 6 腐蚀溶液环境下钢筋混凝土柱轴心受压试验数据

Tab. 6 Axial Compression Test Data of Reinforced Concrete Columns in Corrosive Solution Environment

试件编号	极限荷载/kN	纵筋极限应变/ $10^{-6}$	箍筋极限应变/ $10^{-6}$	混凝土横向应变/ $10^{-6}$	混凝土柱竖向位移/mm	破坏形态
0R	688.7	1 243	1 089	1 801	3.06	轴压破坏
1R	638.3	1 636	1 148	1 934	4.10	轴压破坏
2R	572.3	2 974	1 574	2 723	4.60	轴压破坏
3R	483.9	4 540	2 017	3 322	6.02	劈裂破坏

表 7 腐蚀溶液环境下 GFRP 筋混凝土柱轴心受压试验数据

Tab. 7 Axial Compression Test Data of GFRP-reinforced Concrete Columns in Corrosive Solution Environment

试件编号	极限荷载/kN	纵筋极限应变/ $10^{-6}$	箍筋极限应变/ $10^{-6}$	混凝土横向应变/ $10^{-6}$	混凝土柱竖向位移/mm	破坏形态
0G	647.0	1 743	1 103	1514	2.04	轴压破坏
1G	617.4	1 893	1 194	1 625	2.25	轴压破坏
2G	596.5	2 234	1 364	1 863	2.70	轻微劈裂破坏
3G	559.9	3 116	1 784	1 992	4.06	劈裂破坏

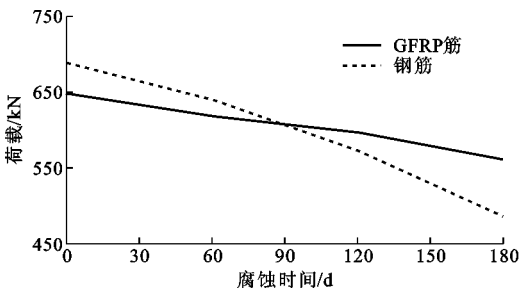


图 4 不同腐蚀时间下 2 种筋体材料混凝土柱的强度曲线  
Fig. 4 Strength Curves of Concrete Columns with Two Kinds of Reinforcement Materials Under Different Corrosion Time

压承载力由 647 kN 下降到 559.9 kN,抗压承载力保留率为 86.5%,并且下降速率也较为稳定。腐蚀 0~60 d 时,抗压承载力保留率下降 4.6%;腐蚀 60~120 d 时,抗压承载力保留率下降 3.3%;腐蚀 120~180 d 时,抗压承载力保留率下降 5.6%。通过对比相同腐蚀时间对应的混凝土柱承载力可以得出,未腐蚀阶段和腐蚀的前期阶段钢筋混凝土柱的抗压承载力大于 GFRP 筋混凝土柱,因为钢筋与混凝土材料之间的协同作用要优于 GFRP 筋。两者间极限承载力的差距随着筋体腐蚀时间的增加而逐渐缩小。当筋体腐蚀 90 d 左右时,2 种不同筋体材料的混凝土柱抗压承载力基本相等。筋体腐蚀 90 d 后,GFRP 筋混凝土柱的极限抗压承载力逐渐大于钢筋混凝土柱的极限抗压承载力,并且差距逐渐增大。这说明在腐蚀环境中 GFRP 筋的耐腐蚀性比钢筋更强,并且可以有效地改善混凝土受压构件在海水腐蚀环境下的耐久性能。

3 结 语

(1)混凝土材料本身呈弱碱性,其化学组成主要为硅酸三钙、硅酸二钙和铝酸三钙,三部分化学组成都不与氯化钠发生化学反应,试验配制的腐蚀溶液对混凝土材料本身的力学性能影响不大。因此,用腐蚀后的筋笼来制作混凝土柱,再进行轴心受压试验,得到的海水环境下构件的力学性能将更加真实可靠。

(2)在传统模拟海洋环境下混凝土柱腐蚀试验中,由于混凝土柱保护层的作用,腐蚀溶液并不能很好地侵蚀到混凝土柱内的筋体。因此,传统试验得出的结论不具有代表性。本文给出了构件在腐蚀过程中的最不利条件(柱内筋体直接暴露在腐蚀溶液中),得到了构件遭受腐蚀破坏的保守时效。钢筋混凝土柱腐蚀 180 d 后承载力下降近 30%,承载力保留率只有未腐蚀状态下的 70.2%,在建筑结构中基本处于失效工作状态。GFRP 筋混凝土柱腐蚀 180 d 后承载力只下降了 13.5%,小于钢筋混凝土柱强度一半的下降量,承载力保留率为未腐蚀状态下的 86.5%。

(3)在轴心受压试验中,GFRP 筋混凝土柱的破坏形态为脆性破坏,在柱内筋体未腐蚀阶段,与钢筋混凝土柱相比没有优势;经长期腐蚀后,GFRP 筋混凝土柱的优势逐渐明显。同时,腐蚀环境下 GFRP 筋混凝土柱抗压强度的下降趋势较为稳定。因此,在沿海地区和海洋工程里,GFRP 筋混凝土结构比钢筋混凝土结构有更大的优势。

参考文献:

References:

[1] 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.  
QI De-qing,QIAN Wen-jun,XUE Wei-chen. Progress of Studies on Durability of FRP Rods Used in Civil Engineering[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites,2006(2): 47-50.

[2] 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.

[3] 任慧韬,吴英伯,韩少楠,等. CFRC 复合梁力学性能试验研究[J].大连理工大学学报,2017,57(6):601-606.  
REN Hui-tao,WU Ying-bo,HAN Shao-nan, et al. Experimental Study of Mechanical Properties of

- CFRC Composite Beams[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2017, 57(6): 601-606.
- [4] 毕永清. 碳纤维增强钢筋混凝土梁、柱抗海水腐蚀的试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.
- BI Yong-qing. Experimental Study on Seawater Corrosion Resistance of Carbon Fiber Reinforced Concrete Beams and Columns[D]. Tianjin: Tianjin University, 2002.
- [5] 付 凯, 薛伟辰. 人工海水环境下 GFRP 筋抗拉性能加速老化试验[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1): 35-41.
- FU Kai, XUE Wei-chen. Accelerated Aging Tests for Evaluations of Tensile Properties of GFRP Bars Under Artificial Seawater Environment[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1): 35-41.
- [6] XUE W C, PENG F, FANG Z Q. Behavior and Design of Slender Rectangular Concrete Columns Longitudinally Reinforced with Fiber-reinforced Polymer Bars[J]. ACI Structural Journal, 2018, 115(2): 311-322.
- [7] 孙 丽, 张 娜. 海水环境腐蚀下的 GFRP 筋抗压性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2013, 29(1): 36-43.
- SUN Li, ZHANG Na. The Compression Performance of GFRP Bars in Seawater Environment[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2013, 29(1): 36-43.
- [8] 孙 丽, 吴松岩, 朱春阳, 等. 人工海水环境下 GFRP 筋受压性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(增): 94-98.
- SUN Li, WU Song-yan, ZHU Chun-yang, et al. Experimental Study on the Compression Performance of GFRP Bars in Artificial Marine Environment[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(S): 94-98.
- [9] SUN L, WEI M H, ZHANG N. Experimental Study on the Behavior of GFRP Reinforced Concrete Columns Under Eccentric Axial Load[J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 214-225.
- [10] 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.
- [11] BANK L C, GENTRY T R, THOMPSON B P, et al. A Model Specification for FRP Composites for Civil Engineering Structures[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(6/7): 405-437.
- [12] 刘小艳, 王新瑞, 刘爱华, 等. 海洋工程中 GFRP 筋耐久性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 86-89.
- LIU Xiao-yan, WANG Xin-rui, LIU Ai-hua, et al. Research Progress on Durability of GFRP Bars Used in Marine Engineering [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 86-89.
- [13] 刘小艳, 张玉梅, 左俊卿. 不同种类碳纤维对水泥基材料导电和抗压强度的影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2017(2): 3-5, 11.
- LIU Xiao-yan, ZHANG Yu-mei, ZUO Jun-qing. Influence of Different Carbon Fiber on Electrical Conductivity and Compression Strength of Cement-based Materials[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2017(2): 3-5, 11.
- [14] 阎西康, 赵少伟, 许素兰. 钢筋混凝土梁遭受海水腐蚀后的受弯计算[J]. 河北工业大学学报, 2006, 35(5): 91-94.
- YAN Xi-kang, ZHAO Shao-wei, XU Su-lan. The Calculation of Bending Capacity to the Reinforced Concrete Beams Corroded by Seawater[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2006, 35(5): 91-94.
- [15] 张新越, 欧进萍. FRP 加筋混凝土短柱受压性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2006, 38(4): 467-472, 485.
- ZHANG Xin-yue, OU Jin-ping. Experimental Research on Compressive Properties of Concrete Stub Square Column Reinforced with FRP Bars[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2006, 38(4): 467-472, 485.
- [16] 王军强, 陈年和. 海水环境下钢筋混凝土结构使用寿命的预测[J]. 徐州建筑职业技术学院学报, 2004, 4(1): 10-12.
- WANG Jun-qiang, CHEN Nian-he. Prediction of the Service Life of the Reinforced Concrete Structure in Seawater Surroundings[J]. Journal of Xuzhou Institute of Architectural Technology, 2004, 4(1): 10-12.
- [17] 毕傑俐. 基于混合配筋的 FRP 筋混凝土偏心受压柱性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- BI Li-li. Study of Performance of Eccentric Compression Column Reinforced with Hybrid FRP Bars[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [18] 赵 洋. 海水和紫外线环境下 GFRP 性能演变规律的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- ZHAO Yang. Performance Evolution Rule Research of Glass Fiber Reinforced Plastic Under Seawater and Ultraviolet Ray Environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [19] ZHANG Y F, LV Z L, ZHAO D W. Experimental Research on the Effects of Reinforcement Ratio on Axial Compression Properties of FRP Reinforced Concrete Column[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 193-194: 721-726.