

蔡小玲,包超,闫忠义,等.自然腐蚀环境下钢筋混凝土梁疲劳应用性能试验研究[J].地震工程学报,2019,41(6):1454-1459.
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1454
CAI Xiaoling,BAO Chao,YAN Zhongyi,et al.Experimental Study on the Fatigue Performance of Reinforced Concrete Beams in a Natural Corrosion Environment[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(6):1454-1459.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1454

自然腐蚀环境下钢筋混凝土梁疲劳应用性能试验研究

蔡小玲¹,包超²,闫忠义³,韩文臣³

(1. 无锡城市职业技术学院 建筑与环境工程学院,江苏 无锡 214153; 2. 宁夏大学 土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021; 3. 青岛腾远设计事务所,山东 青岛 266590)

摘要:在海岸与近海结构工程中被广泛应用的钢筋混凝土构件,由于长期处在有海水腐蚀、干湿交替和循环荷载的严酷环境中,导致钢筋因侵蚀结构严重损伤。本文对6根钢筋混凝土试验梁进行了腐蚀与循环荷载作用下的疲劳试验研究,循环荷载幅值设计为 $2\% \sim 40\% P_u$ 和 $2\% \sim 60\% P_u$ 两种,对试验梁在大气环境中、淡水环境中 and 海水腐蚀环境中疲劳破坏情况进行试验探索,研究在三种环境与循环荷载作用下钢筋混凝土构件的力学性能及刚度损伤演化规律,同时分析了破坏形态、裂缝宽度、挠度的发展规律和疲劳寿命。结果表明:腐蚀与循环荷载共同作用下,短期内腐蚀溶液不会对梁内部钢筋造成显著影响从而降低耐久性;在循环次数达到一定范围内,试验梁耐久性降低42%,其中两个试验梁在循环荷载上限为 $0.6P_u$ 时的耐久性分别降低54%和37%。

关键词:钢筋混凝土梁;海水腐蚀环境;疲劳刚度;循环荷载;疲劳寿命

中图分类号: TU375.1; TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)06-1454-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1454

Experimental Study on the Fatigue Performance of Reinforced Concrete Beams in a Natural Corrosion Environment

CAI Xiaoling¹, BAO Chao², YAN Zhongyi³, HAN Wenchen³

(1. School of Architecture and Environmental Engineering, Wuxi City College of Vocational Technology, Wuxi 214153, Jiangsu, China; 2. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Qingdao Tengyuan Design Institute, Qingdao 266590, Shandong, China)

Abstract: Nowadays, reinforced concrete components are widely used in coastal and offshore structural engineering. In harsh environments with seawater corrosion, dry-wet alternation, and extended cyclic loads, steel bar corrosion eventually leads to serious structural damage. In this paper, fatigue tests of six reinforced concrete test beams under corrosion and cyclic loading were carried out. Two kinds of cyclic loading amplitudes ($2\% - 40\% P_u$ and $2\% - 60\% P_u$) were designed, and fatigue failures in the atmospheric environment, freshwater environment, and corrosional seawater environment were studied. Mechanical

收稿日期: 2019-08-31

基金项目: 国家档案局科技项目(2017-X-43); 宁夏高烈度区高层和超高层建筑抗震关键技术研究(2018EG03009)

第一作者简介: 蔡小玲(1970-),女,副教授,主要从事岩土工程和结构工程方面的教学和研究。E-mail: caixl123456@126.com。

通信作者: 包超,男,博士,主要从事结构减振控制及动力灾变行为研究。E-mail: baochao@nxu.edu.cn。

properties and damage to reinforced concrete beams under three kinds of environments and cyclic loads, based on the evolution law of stiffness, were further explored. Failure mode, crack width, deflection development, and fatigue life were analyzed. Study results showed that under the combined action of corrosion and cyclic load, the corrosional solution did not significantly affect the internal reinforcement of the beam in the short term. Durability of the test beam as reduced by 42% within certain cyclic times, and durability of the two test beams were reduced by 54% and 37% when the upper limit of cyclic load was 0.6 P_u .

Keywords: reinforced concrete beam; seawater corrosion environment; fatigue stiffness; cyclic load; fatigue life

0 引言

自 20 世纪波特兰水泥问世以来,在工民建、公路、桥梁等工程中混凝土材料被广泛的应用。随着工业化和城市化以及能源需求的快速发展,钢筋和水泥更是最大程度的应用在建筑、公路、桥梁、隧道等工程中。随着大量使用钢筋混凝土构件,其构件锈蚀或结构损伤导致承载力严重下降,混凝土耐久性问题一直是工程界和学术界研究人员高度关注的,也是当今工程领域需要解决的重大问题^[1-3]。

国内外学者通过大量分析疲劳次数、变化挠度和裂缝分布等研究钢筋混凝土梁的疲劳性能变化,但结果与现实情况有较大误差,例如电化学腐蚀与自然腐蚀的锈蚀机理有一些不同,不能完全反映出劣化性能在腐蚀环境下的规律。现有研究对钢筋混凝土梁在腐蚀与循环荷载作用下的性能进行研究分析^[4-9]。钢筋混凝土结构在正常使用阶段的工作状态中,腐蚀与循环荷载长期共同作用下导致裂缝的产生和挠度的不断增大。本文通过循环荷载和腐蚀环境共同作用下钢筋混凝土梁的性能试验研究,进一

步验证不同荷载和腐蚀环境下构件挠度发展、钢筋腐蚀和循环寿命的规律。研究结果对进一步开展海岸与近海结构工程的耐久性研究具有重要的意义^[9-17]。

1 计算模型

1.1 材料

该试验梁混凝土强度设计等级为 C30,水泥采用中联牌普通硅酸盐水泥(PO.42.5),青岛地区河砂、碎石(粒径经过筛选直径不大于 20 mm)。梁浇筑配置混凝土之前,对所设计的混凝土应用条件进行了试配,最终的混凝土用量比为水泥:砂:石子:水=1:2.13:3.84:0.52,水灰比 0.52,砂率 0.36。每立方米钢筋混凝土各材料配比用量见表 1,实测立方体混凝土试块(100 mm×100 mm×100 mm)养护 28 天的平均抗压强度为 34.5 MPa。单位体积钢筋混凝土配比用量及各龄期试件立方体抗压强度试验数据列于表 2,试件制作过程如图 1 所示。由表 2 可知混凝土强度随龄期增长,在龄期 70 d 抗压强度达到 52 MPa,且 70 d 期强度保持稳定。

表 1 混凝土配合比

Table 1 Mix proportion of concrete

配合比/kg						坍落度 /mm	弹性模量 /MPa	强度/MPa	
水灰比	水	水泥	砂	石子	减水剂			28 天	70 天
0.52	195	390	653	1 162	1.6	150	2×105	34.5	52

表 2 混凝土养护周期

Table 2 Maintenance period of concrete

养护周期/天	28	70	155	389	431
强度/MPa	34.5	52	47	49	52

1.2 试验方法

本文试验根据《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010),按照理论设计制作了 10 根试验梁($b \times h \times L = 2\ 100\ \text{mm} \times 120\ \text{mm} \times 150\ \text{mm}$)和配筋都相同的矩形截面简支梁(图 2)。采用四点加载方案,根据理想的力学模型,设计了试验梁的简支支座(图 2)。其中试验梁的纯弯段为 500 mm,剪跨段为 700 mm,

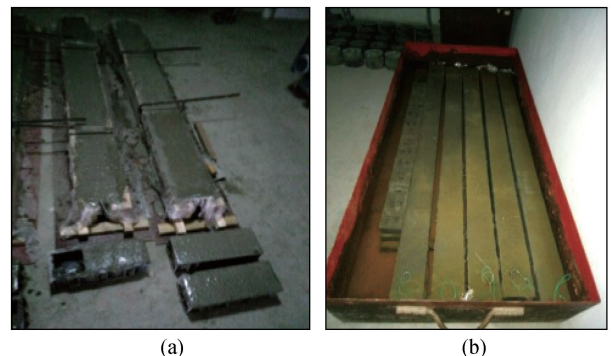


图 1 试件制作过程

Fig.1 Making process of specimens

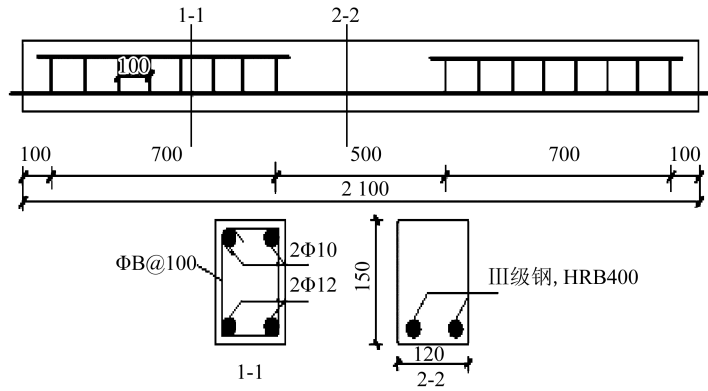


图2 试验梁尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig.2 Dimension and reinforcement diagram of test beams (Unit:mm)

剪跨比为 $\lambda = 5.6$ 。纵向受拉钢筋采用 HRB400, 直径 12 mm, 梁混凝土保护层厚度为 25 mm, 配置 HRB335 受压钢筋和箍筋防止剪切破坏, 受压钢筋直径 10 mm, 箍筋直径为 8 mm。梁纯弯段只配置了受拉钢筋是为了消除其他钢筋影响。

加载系统采用多通道电液伺服协调系统, 疲劳加载装置(图 3)采用四点等幅重复疲劳加载方式, 荷载波形为正弦波, 静力加载和疲劳加载都是在多通道电液伺服疲劳试验机上进行, 通过分配梁对试件施加两点集中荷载, 电脑控制系统控制荷载的大小以及施加的时间。

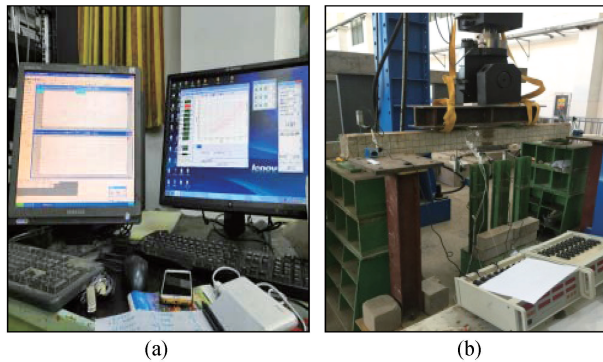


图3 试验梁腐蚀疲劳加载试验系统

Fig.3 Corrosion fatigue loading test system for test beams

疲劳试验的疲劳荷载上限为极限承载力的 50% 和 60%, 疲劳下限 2 kN, 频率为 2.5 Hz。在疲劳循环次数达到 1、5、10、15、20、25、30、40、60、80、90……100 万次, 停止循环加载改为静载循环加载, 从荷载下限开始 12 级加载至疲劳荷载上限, 然后再逐级卸载至荷载下限。试验梁循环次数达到 100 万次后停止循环加载改为静力加载, 静载加载至梁破坏。施加静载时, 记录每级荷载下混凝土和钢筋应变、梁跨中挠度和观察裂缝宽度和扩展情况。

1.3 配合比及混凝土强度

根据参考, 混凝土的养护周期和配合比见表 1 和表 2。

2 结果及分析

2.1 试验钢筋混凝土梁破坏形态

如图 4(a) 所示, 在静载加载过程中裂缝首先出



图4 钢筋混凝土试验梁加载破坏形态

Fig.4 Failure modes of reinforced concrete test beams under loading

现在钢筋混凝土梁的受拉区下部,并且试验梁加载点处裂缝宽度增大明显,在腐蚀环境与循环荷载作用下钢筋混凝土梁受拉区首先产生裂缝,产生的应力大多集中在受拉区局部位置,从而使得裂缝增宽更明显。当钢筋屈服后继续加载,纵向裂缝出现在试验梁受压区位置,并且继续往试验梁上部发展,加载荷载达到极限荷载时受压区混凝土被压碎(图 4(b))。属于典型的弯曲破坏形态。

2.2 相同荷载水平不同环境梁挠度与荷载循环次数关系

通过该试验研究结果认为,海水腐蚀环境对梁的疲劳性能影响最大。图 5 给出了相同幅值(0.6P_u)循环荷载作用时,钢筋混凝土 B-2、C-2 和 D-2 试验梁在不同荷载循环次数时的循环荷载上限所对应跨中最大挠度,循环 1 000 次后以试验梁跨中最大挠度为基准,对比试验梁不同循环次数对应的最大挠度增长率,得出试验梁在 3 种环境下荷载循环次数与跨中挠度增长率的关系曲线。

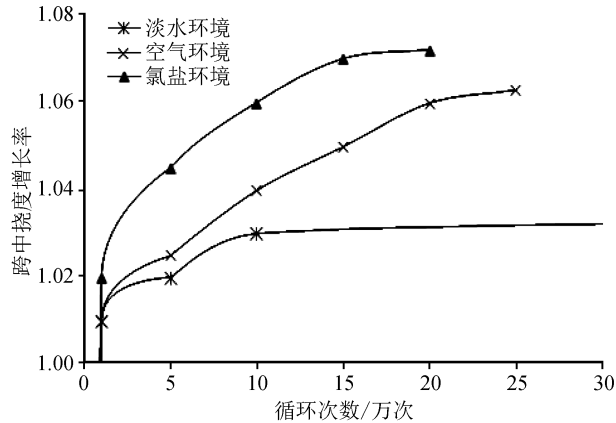


图 5 60%P_u 梁在 3 种环境下挠度增长率和荷载循环次数关系曲线

Fig.5 Relation curves of deflection growth rate and load cycle number for beams in three environments (60%P_u)

3 根试件梁的挠度增长速度不同的主要原因为混凝土离散性比较大。从图中可以看出在循环荷载作用下,海水环境中的试验梁挠度增长速率最快,其次是在淡水中,最后是在大气环境中。从图可得,试验梁在海水环境中挠度增长曲线最陡,说明海水腐蚀环境加速了疲劳试件的损伤累积和发展,海水环境中加速的更快。

由图 6 可以看出,试验梁在海水腐蚀环境中循环荷载幅值不同导致挠度累积增长速率不同,试验梁 D-2 荷载上幅值 0.6P_u 时在循环次数达到 9 万次后增长速率较大。图中钢筋混凝土 D-2 试验梁挠度增大曲线趋势最陡,说明荷载水平加速了梁的劣化

损伤。腐蚀环境中由于循环荷载的作用下,压强作用氯离子通过裂缝进入钢筋表面产生钢筋锈蚀,使得钢筋与混凝土粘结性能显著降低,极大的影响了试验梁的耐久性。腐蚀与循环荷载共同作用下,短期内腐蚀溶液不会对梁内部钢筋造成显著影响从而降低耐久性,在循环次数达到一定范围内试验梁耐久性降低 52%,其中两个试验梁在循环荷载上限为 0.6P_u 时的耐久性降低 54%和 37%。

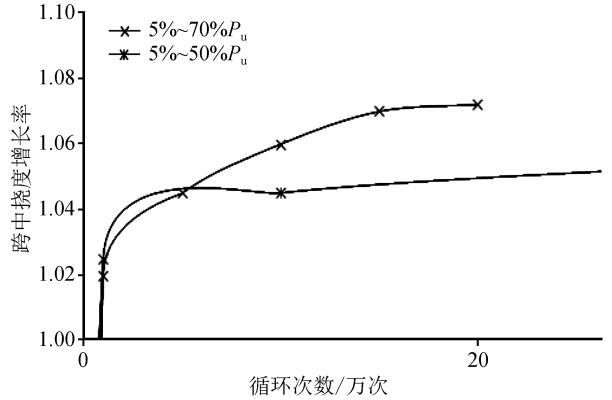


图 6 2%~60%P_u 梁在海水环境下挠度增长率和荷载循环次数关系曲线

Fig.6 Relation curves of deflection growth rate and load cycle number for beams in seawater environment (2%~60%P_u)

2.3 腐蚀与循环荷载作用下的混凝土应变分析

在试验梁受拉区和受压区到梁顶面的距离分别为 10 mm、30 mm、140 mm 粘贴了应变片,静载加载时受压区循环荷载加载后梁残余应变和最大应变有变化,受拉区混凝土应变破坏。试验梁受压区距梁顶 10 mm 处混凝土荷载循环次数和压应变关系曲线见图 7~图 9。

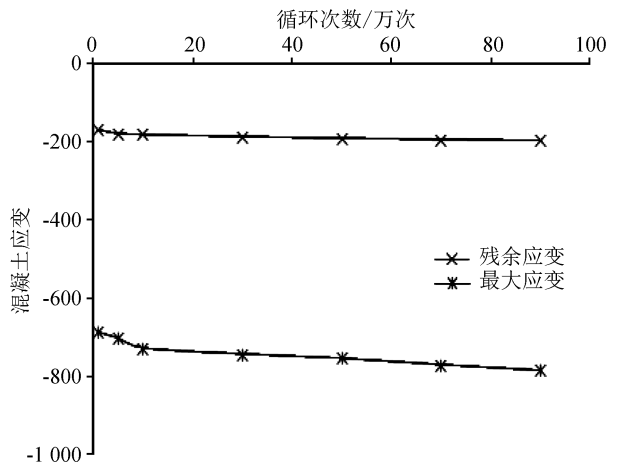


图 7 空气环境中混凝土循环次数与应变的关系曲线
Fig.7 Curve of relationship between cycling times and strain of concrete in air environment

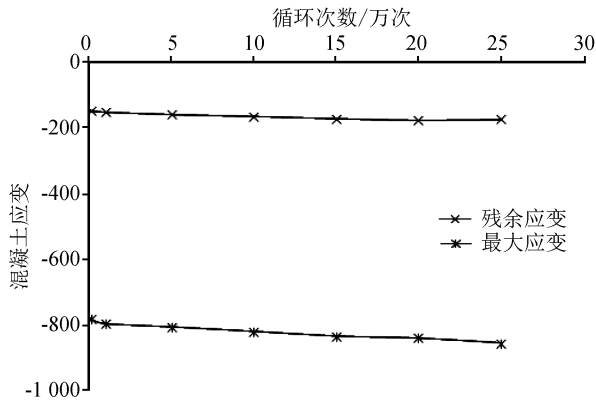


图8 淡水环境中混凝土循环次数与应变的关系曲线

Fig.8 Curve of relationship between cycling times and strain of concrete in freshwater environment

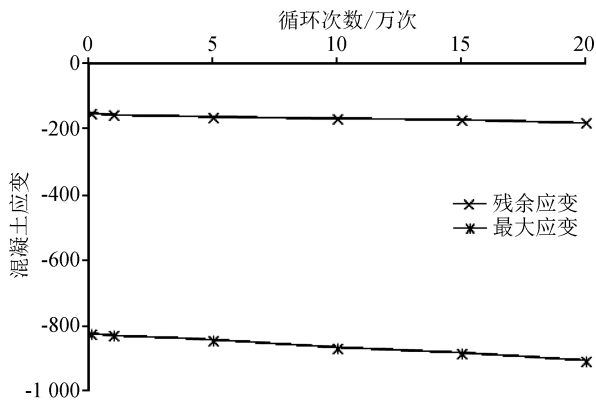


图9 海水环境中混凝土循环次数与应变的关系曲线

Fig.9 Curve of relationship between cycling times and strain of concrete in seawater environment

比较空气、淡水和海水环境下梁混凝土应变,处在海水环境中的疲劳梁最大应变较大。循环次数和混凝土应变的关系曲线图变化浮动较小,说明循环荷载作用过程中混凝土损伤累积也是缓慢增长,并且应变增长速度缓慢。试验梁在3种环境下的荷载-挠度曲线大致相似,跨中挠度随着循环次数的增加而不断增大。在循环荷载作用下挠度初始均增大较快,随后进入增速缓慢的过程。在腐蚀环境和循环荷载共同作用下,试验梁随着循环次数增加挠度曲线出现阶梯状增长趋势,海水通过裂缝进入钢筋表面引起钢筋的腐蚀,导致挠度增长明显加快,使其试验梁刚度降低。超载加载会使试验梁产生不可恢复的挠度变形。试验梁在这3种环境下疲劳破坏形态相同,疲劳破坏发展过程基本一致,区别在于疲劳损伤速度的快慢(海水大于淡水,淡水大于大气)。加载点处的裂缝都是疲劳断裂发生的位置,表明钢筋表面腐蚀缺陷和应力集中导致钢筋在循环荷载作

用下的疲劳腐蚀断裂。两根试验梁在淡水和海水环境中的疲劳寿命较大气环境中下降了62%和78%。影响构件耐久性的主要因素是荷载水平和腐蚀环境两者的共同作用。

3 结论

(1) 钢筋混凝土构件的疲劳寿命与加载环境和循环荷载水平密切相关。在大气环境与 $0.2P_u$ 循环荷载共同作用下,构件循环次数能达到100万次以上。试验梁在淡水和海水腐蚀环境中, $0.6P_u$ 循环荷载的循环次数比 $0.2P_u$ 循环荷载降低了40%以上。

(2) 腐蚀环境中循环荷载作用下,由于压强的作用,氯离子通过裂缝进入钢筋表面产生钢筋锈蚀,使得钢筋与混凝土粘结性能显著降低,极大的影响了试验梁的耐久性。腐蚀与循环荷载共同作用下,短期内腐蚀溶液不会对梁内部钢筋造成显著影响从而降低耐久性,在循环次数达到一定范围内试验梁耐久性降低42%,其中两个试验梁在循环荷载上限为 $0.6P_u$ 时的耐久性降低54%和37%。

(3) 试验梁在这3种环境下疲劳破坏形态相同,疲劳破坏发展过程基本一致,区别在于疲劳损伤速度的快慢(海水大于淡水,淡水大于大气)。加载点处的裂缝都是疲劳断裂发生的位置,表明钢筋表面腐蚀缺陷和应力集中导致钢筋在循环荷载作用下的疲劳腐蚀断裂。两根试验梁在淡水和海水环境中的疲劳寿命较大气环境中下降了48%和67%。影响构件耐久性的主要因素是荷载水平和腐蚀环境两者的共同作用。

参考文献(References)

- [1] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理和分析[M].北京:清华大学出版社,2003:416-417.
GUO Zhenhai, Shi Xudong, Reinforced Concrete Theory and Analyse[M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2003:416-417.
- [2] 牛荻涛.混凝土结构耐久性与寿命预测[M].北京:科学出版社,2003:1-4.
NIU Ditao. Durability and Life Durability and Life Forecast of Reinforced Concrete Structure [M]. Beijing: Science Press, 2003:1-4.
- [3] 王海超.钢筋混凝土构件腐蚀疲劳试验研究与理论分析[D].大连:大连理工大学,2004.
WANG Haichao. Experimental and Theoretical Analysis of Reinforced Concrete Members under Corrosion Fatigue Condition [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.

- [4] 商峰,何世钦,安雪晖.锈蚀后钢筋混凝土梁的剪切疲劳试验[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(9):1361-1364.
SHANG Feng, HE Shiqin, AN Xuehui. Shear Fatigue of Corroded Reinforced Concrete Beams[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2010, 50(9): 1361-1364.
- [5] 吴瑾,王晨霞,徐贾,等.疲劳荷载下锈蚀钢筋混凝土梁弯曲性能试验研究[J].土木工程学报,2012,45(10):118-124. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2012.10.018.
WU Jin, WANG Chenxia, XU Jia, et al. Study on Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams under Fatigue Loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 118-124.
- [6] 雷兵.部分预应力混凝土梁疲劳性能试验研究及数值模拟[D].大连:大连理工大学,2013.
LEI Bing. Experimental Research and Numerical Simulation on Mechanical Properties of P.P.C Beam under Fatigue Loading [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [7] LUO G C, LIU J H. Fatigue Life Prediction of Corroded Reinforced Concrete Beams under Flexural Loading[C]//GeoHunan International Conference 2011, June 9-11, 2011, Hunan, China, 2011.
- [8] 李士彬,张伟平,顾祥林,等.加速锈蚀钢筋的疲劳试验研究[J].铁道学报,2010,32(5):93-97.
LI Shibin, ZHANG Weiping, GU Xianglin, et al. Experimental Study on Fatigue Properties of Corrosion-Accelerated Steel Bars[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(5): 93-97.
- [9] 周正祥.锈蚀钢筋疲劳力学性能研究[D].长沙:中南大学,2013.
ZHOU Zhengxiang. Fatigue Performance Study on Corrosion Steel Bars[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [10] 曾志兴,宋小雷.锈蚀钢筋混凝土梁静承载力性能试验[J].华侨大学学报(自然科学版),2011,32(1):92-95.
ZENG Zhixing, SONG Xiaolei. Experimental Investigation on Static Mechanical Behavior of Concrete Beams with Corroded Reinforcement [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2011, 32(1): 92-95.
- [11] 肖长永.荷载与锈蚀共同作用对钢筋混凝土梁性能影响的研究[D].武汉:湖北工业大学,2013.
XIAO Changyong. The Study of Capability of Reinforced Concrete Beams Affected by the Load and Corrosion[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2013.
- [12] 李忠.箍筋锈蚀钢筋混凝土梁斜截面疲劳性能试验研究[D].浙江大学,2017.
LI Zhong. Experimental Study on Oblique Section Fatigue Performance of Stirrup Corroded Reinforced Concrete Beams [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [13] ADAM ISHAG IBRAHIM OMER. Experimental and Theoretical Study on Seismic Behavior of Concrete Columns Reinforced with Steel-Basalt FRP Composite Bars and Hybrid Stirrups[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [14] 朱红兵.公路钢筋混凝土简支梁疲劳试验与剩余寿命预测方法研究[D].长沙:中南大学,2011.
ZHU Hongbing. Method and Experiment Research on Highway Reinforced Concrete simply-supported Girder Bridge's Fatigue Residual Service Life Forecast[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [15] OUSMANE MARIKO. Experimental Analysis and Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Reinforced with GFRP[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [16] 史波.氯盐环境下基于概率和性能的混凝土结构耐久性研究[D].大连:大连理工大学,2009.
SHI Bo. Probability and Performance Based Durability Study for Reinforced Concrete Structures in Chloride Environment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [17] 禹卓杰.疲劳荷载作用下混凝土中氯离子渗透性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.
YU Zhuojie. Study on Chloride Ion Permeability of Concrete under Fatigue Load [D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2017.