

海水喷淋干湿循环持续载 RC 受弯梁试验研究

焦俊婷¹, 叶英华², 杨荣华¹, 郭志峰¹

(1. 厦门理工学院土木工程与建筑学院, 厦门 361024; 2. 北京航空航天大学机场与道路工程系, 北京 100191)

摘要: 为了解沿海地区正常使用工作状态下承受较大持续荷载钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 梁的力学性能劣化问题, 通过实验室模拟经历 180 d 大气环境 + 180 d 海水喷淋干湿循环 (简称 I 腐蚀) 或 180 d 海水喷淋干湿循环 + 180 d 大气环境 (简称 II 腐蚀) 后, 由静力加载试验测试 RC 梁试件力学性能劣化规律. 试验结果, RC 梁试件在不同持续荷载和一定腐蚀环境共同作用下, 随着持续荷载增大其屈服荷载 P_y 、极限荷载 P_m 和延性系数 u 降幅变大. II 腐蚀梁试件的 P_y 、 P_m 和 u 降幅大于 I 腐蚀梁试件的 P_y 、 P_m 和 u 降幅. 梁试件的抗弯刚度随着持续荷载增大而降低. 试验结果表明较大持续荷载与一定腐蚀环境共同作用对 RC 梁力学性能劣化影响明显.

关键词: 海水喷淋干湿循环; 持续荷载; 钢筋混凝土 (RC) 梁; 力学性能劣化; 耐久性

中图分类号: TU 502; TU 375.1

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2017)12-1893-07

doi: 10.11936/bjtxb2017030017

Experimental Study of RC Flexural Beams Under Sustained Damage Load and Seawater Spraying Dry-Wet Cycles

JIAO Junting¹, YE Yinghua², YANG Ronghua¹, GUO Zhifeng¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Department of Airport and Road Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to solve the problem of deterioration of mechanical properties of reinforced concrete (RC) beam in coastal zone under normal working condition of the larger load, the mechanical behavior deterioration of RC beam specimens was investigated by static loading test, after they experienced 180 d atmospheric environment and 180 d seawater spraying dry-wet cycle (Simplified by I corrosion); or they experienced 180 d seawater spraying dry-wet cycles and 180 d atmospheric environment (Simplified by II corrosion) by the laboratory simulation. Test results yielded load P_y , limited load P_m , and ductility factor u of them decreased when the beam specimens were acted on by sustained damage load in I corrosion (or II corrosion); and P_y , P_m and u decreased more with the sustained damage load increasing; the decrease of P_y , P_m and u for the beam specimens in II corrosion were greater than those of P_y , P_m and u for the beam specimens in I corrosion. The flexural stiffness of the beam specimens became smaller with the increase of the sustained damage load. The experimental results show that the effect on the mechanical properties of RC beams is obvious from the larger sustained damage load and certain corrosive environment.

Key words: seawater spray dry-wet cycle; sustained load; reinforced concrete (RC) beams; mechanical behavior deterioration; durability

收稿日期: 2017-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478404, 51578031); 大学生创新资助项目(201611062321)

作者简介: 焦俊婷(1968—), 女, 教授, 主要从事钢筋混凝土结构及其耐久性方面的研究, E-mail: jtjiao@xmut.edu.cn

钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)结构在服役过程中可能会承受不同幅值的短期或长期荷载,产生不同程度荷载损伤. 沿海地区 RC 结构不仅承受荷载作用同时还遭受环境氯离子侵蚀或大气环境的作用,使得 RC 结构耐久性大大降低. 现有国内外关于荷载和海洋环境(或大气环境)共同作用下 RC 结构耐久性研究主要为:1)电化学钢筋锈蚀和混凝土材料抵抗氯离子渗透方面的研究;2)多从混凝土材料性能方面研究裂缝宽度与氯离子扩散以及钢筋锈蚀之间关系. Malumbela 等^[1]试验了不同持续荷载水平作用下混凝土开裂与钢筋腐蚀等级,结果为混凝土开裂与裂缝整体状态有关,钢筋腐蚀质量损伤 1% 时引起 0.04 mm 开裂裂缝. 朱方之等^[2]试验了在短期拉、压荷载作用损伤后混凝土抗氯离子侵蚀、抗冻性能,结果为混凝土在受拉荷载作用下其耐久性持续劣化,而在受压荷载作用下混凝土经历可逆、不可逆和加速劣化三劣化阶段. 高丽燕等^[3]利用实际海洋暴露环境试验了持续荷载作用下混凝土氯离子扩散性能,结果表明当持续荷载水平为 60% 时受拉区混凝土氯离子扩散系数接近没荷载作用时的 2 倍. 姬永生等^[4]试验了荷载引起横向裂缝宽度对受拉钢筋腐蚀影响,结果表明荷载引起的横向裂缝能直接提供钢筋腐蚀需要的氧气和水从而加速钢筋锈蚀. Yoon 等^[5]试验了不同荷载水平作用下(0 ~ 75% 的极限荷载)在氯化钠溶液中电流加速腐蚀 RC 梁,结果表明加载历史和持续荷载水平对钢筋初始锈蚀时间和锈蚀速度影响明显. Masoud 等^[6]试验了在重复荷载下碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced composites, CFRP)加固 RC 梁的氯离子侵蚀性能. Ballim 等^[7]和 Malumbela 等^[8]试验了较小持续荷载水平作用下腐蚀 RC 梁力学性能变化. Malumbela 等^[9]试验了在持续荷载作用下经历干湿循环(5% 的氯化钠溶液)过程后 RC 梁的性能改变情况,结果为在干湿循环作用下钢筋腐蚀最严重,持续荷载水平对钢筋锈蚀影响很小. Zhu 等^[10]试验了在服役(持续)荷载作用下暴露在氯离子侵蚀环境 26 a 的 RC 梁,结果表明持续荷载损伤和氯离子侵蚀共同作用对梁的承载力有重要影响,梁抗弯承载力受钢筋与混凝土黏结强度影响显著. 较少文献研究 RC 结构受持续损伤荷载和氯离子侵蚀共同作用下力学性能劣化规律. 沈宇等^[11]试验了不同裂缝宽度 RC 偏压柱经海水干湿循环腐蚀后力学性能劣化,结果表明当裂缝宽度较大(大于 0.10 mm)时,偏压柱力学性能下降明显.

RC 梁在服役过程中承受持续荷载作用,一般带裂缝工作;荷载裂缝引起梁损伤程度与荷载大小密切相关. 在正常使用阶段梁通常荷载约为 $0.4 P_u$ (P_u 为参照梁承受的静力加载最大荷载),但某些情况也会达到约 $0.7 P_u$. 故本文旨在试验研究持续荷载较大时受弯梁力学性能劣化规律. 本文试验研究当持续荷载分别为 $0.00 P_u$ 、 $0.45 P_u$ 、 $0.60 P_u$ 和 $0.75 P_u$ 时,RC 受弯梁试件在经历 I 腐蚀(或 II 腐蚀)后力学性能劣化规律,以期对 RC 构件耐久性设计、寿命预测提供参考.

1 试验概况

1.1 试件材料

水泥采用中国建筑材料科学研究院的强度等级 42.5 普通硅酸盐水泥. 粗骨料为厦门市产粒径 6 ~ 14 mm 玄武岩碎石. 细骨料用厦门市石料厂产的中砂. 水为自来水.

混凝土设计强度等级 C25,水、水泥、砂、石子的配合比为 0.60:1:2.15:3.50. 纵向受拉钢筋、架立筋及箍筋均采用直径为 6 mm HPB300 级钢筋. 测得钢筋的屈服强度、极限强度分别为 428、493 MPa^[12].

1.2 试件设计

本试验共设计了 9 根梁试件,其中 1 根为参照梁,另外 8 根施加持续荷载分别为 $0.00 P_u$ 、 $0.45 P_u$ 、 $0.60 P_u$ 和 $0.75 P_u$. 试件分组、持续荷载幅值以及腐蚀类型见表 1. 9 根试件几何尺寸、配筋和混凝土材料均相同. 试件尺寸宽 × 高 × 长 = 110 mm × 150 mm × 550 mm,保护层厚度 25 mm. 试件配筋如图 1 所示.

1.3 试验方案

试验过程分 3 个阶段.

表 1 梁试件分组、持载幅值和腐蚀类型

Table 1 Beam specimen groups, holding amplitude and test corrosion environment

试件编号	持载幅值	腐蚀
1-C25-B00	$0.00 P_u$	I
1-C25-B45	$0.45 P_u$	I
1-C25-B60	$0.60 P_u$	I
1-C25-B75	$0.75 P_u$	I
2-C25-B00	$0.00 P_u$	II
2-C25-B45	$0.45 P_u$	II
2-C25-B60	$0.60 P_u$	II
2-C25-B75	$0.75 P_u$	II
C25 参照梁	0.00	标准养护

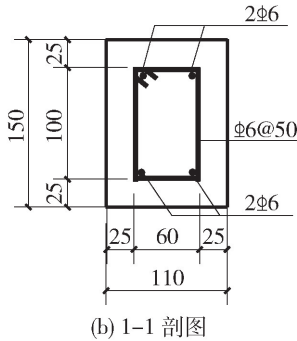
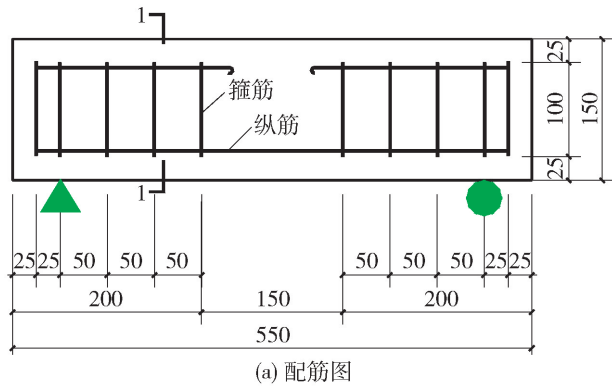


图 1 试件配筋(单位:mm)

Fig. 1 Specimen steels (Unit: mm)

1.3.1 试件制作以及混凝土试块和参照梁力学性能测定阶段

试件浇筑后养护龄期 28 d (带模养护 1 d, 拆模后室温养护 27 d). 试件养护龄期 28 d 后, 测得混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 为 45.3 MPa^[13]; 用弯曲静力加载测得参照梁 C25-Bref 最大承载力 P_u 为 40.2 kN.

1.3.2 对梁试件施加持续荷载并腐蚀阶段

1) 对 1 组的 4 根梁施加持续荷载, 见图 2(a), 进行 I 腐蚀.

2) 对 2 组的 4 根梁施加持续荷载, 见图 2(a), 进行 II 腐蚀.

海水喷淋干湿循环采用自制喷淋系统(见图 2(b))和人工海水(在自来水中加入 3.5% NaCl 制成). 每个干湿循环持续 1 d(24 h), 即用人工海水喷淋 8 h, 在大气环境中静置 16 h.

1.3.3 试件加载测试阶段

试件完成腐蚀后, 在最大量程 50 t 压弯试验机上测试, 试验加载装置示意图如图 3 所示. 电子位移计量程 0 ~ 30 mm. 加载过程中, 电子位移计接入东华 DH3815N 静态应变仪, 加载力 P 与电子位移计位移通过电脑同步采集. 试验过程以等速位移方

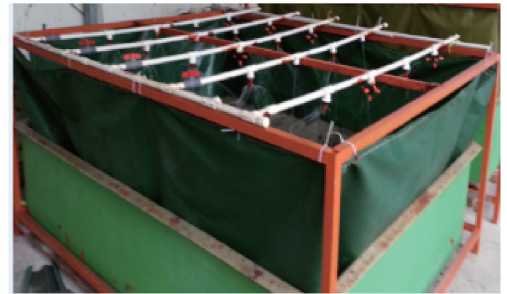
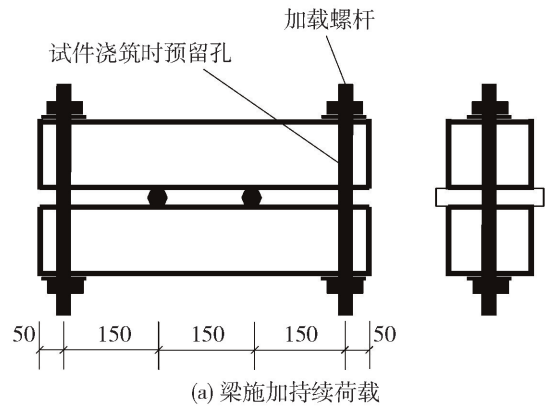


图 2 梁施加持续荷载和喷淋系统

Fig. 2 Beams with sustained damage load and spraying system diagram

式加载, 加载速度为 0.5 mm/min.

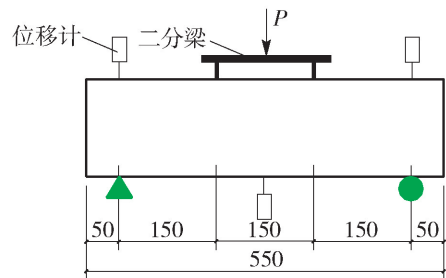


Fig. 3 Test loading diagram

2 试验结果与分析

2.1 梁的破坏

梁试件的破坏均为正截面适筋破坏. 施加持续荷载为 $0.00P_u$ 时, 梁试件纯弯段受拉区混凝土随着荷载增加开裂, 而其他梁试件纯弯段受拉区混凝土原有裂缝随着荷载增加基本没有变化. 当加载至极限荷载的 70% ~ 80% 时, 钢筋屈服, 某条裂缝突然加宽, 并向上发展, 最终受压区混凝土被压碎, 梁发生延性破坏. 图 4 给出部分试件的破坏图.

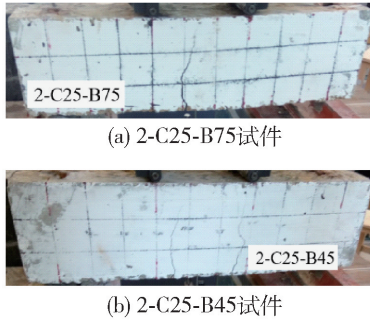


图4 梁试件的破坏形态

Fig.4 Some beam specimen failure diagrams

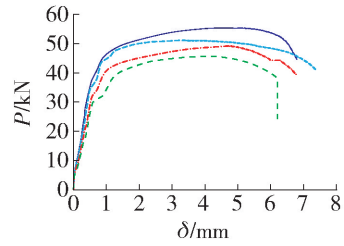
2.2 梁静载试验结果

2.2.1 荷载-挠度曲线

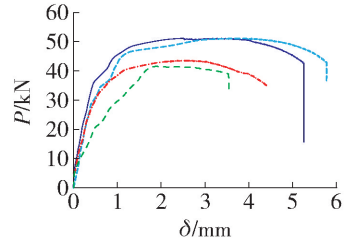
图5给出2组梁试件的荷载 P -挠度 δ 曲线.从图5可以看出,2组梁试件经历腐蚀后,随着持续荷载增大,其承载力降低、刚度退化、延性降低.其中经历II腐蚀的持续荷载 $0.75P_u$ 梁试件刚度、延性降低最显著.

2.2.2 静载试验结果

表2给出经历持续荷载和海水干湿循环共同作用后,梁试件弯曲静载试验结果.其中, P_y 为屈服荷载; P_m 为极限荷载; δ_y 为屈服荷载对应的梁跨中挠度; δ_u 为梁跨中极限挠度,指越过极限荷载后下降至



(a) I腐蚀



(b) II腐蚀

— $0.00P_u$ - - - $0.45P_u$ - - - $0.60P_u$ - - - $0.75P_u$

图5 梁试件的荷载-挠度曲线

Fig.5 Load-deflection curves of beam specimens

85%极限荷载时对应的挠度.从表2可以看出,梁试件在不同持续荷载和I(或II)环境腐蚀作用下,随着持续荷载增大,梁试件的 P_y 、 P_m 降低,延性有一定程度降低.其中经历II腐蚀梁的 δ_u 比经历I腐蚀梁的 δ_u 降低明显.

表2 梁试件静力加载试验结果

Table 2 Static loading test results of beam specimens

试件编号	荷载		挠度		延性系数 $u = \delta_u / \delta_y$	腐蚀
	P_y / kN	P_m / kN	δ_y / mm	δ_u / mm		
1-C25-B00	45.5	55.4	0.92	6.80	7.39	I
1-C25-B45	43.5	51.0	0.81	5.49	6.78	I
1-C25-B60	38.1	49.2	0.94	6.30	6.70	I
1-C25-B75	34.1	45.8	0.96	6.03	6.28	I
2-C25-B00	42.5	51.1	0.83	5.26	6.34	II
2-C25-B45	40.5	51.0	0.92	5.73	6.23	II
2-C25-B60	34.5	43.6	0.74	4.42	5.97	II
2-C25-B75	28.5	41.7	0.89	3.54	3.98	II

2.3 梁力学性能劣化

梁试件力学性能劣化指在荷载和环境腐蚀作用后力学性能的退化,主要表现为屈服荷载 P_y 、极限荷载 P_m 、延性系数 u 和刚度等指标降低.

2.3.1 P_y 、 P_m 和 u 劣化

表3和图6给出每组梁试件与该组外加持续荷载为 $0.00P_u$ 梁试件相比,其 P_y 、 P_m 和 u 降幅值.由

表3和图6可以看出:

1) 随着持续荷载增大,梁试件的 P_y 、 P_m 和 u 降幅加大.

2) 经历I腐蚀持续荷载 $0.75P_u$ 梁试件的 P_y 、 P_m 和 u 降幅分别达到25.05%、17.33%和15.0%.

3) 经历II腐蚀持续荷载 $0.75P_u$ 梁试件的 P_y 、 P_m 和 u 降幅分别达到32.94%、18.40%和37.26%.

4) II 腐蚀持续荷载 $0.75 P_u$ 梁试件的 P_y 、 P_m 和 u 降幅比 I 腐蚀同持续荷载梁试件的相应降幅大,尤其是延性. 可见在持续荷载与海水干湿循环共同作用下,特别是持续荷载幅值 G 较大时,梁试件力学性能劣化幅度需引起高度重视.

表 3 梁试件静力加载试验结果劣化

Table 3 Deterioration of static loading test results for beam specimens

试件编号	$\Delta P_y/\%$	$\Delta P_m/\%$	$\Delta u/\%$	腐蚀
1-C25-B00	0.00	0.00	0.00	I
1-C25-B45	4.40	7.94	8.28	I
1-C25-B60	16.26	11.19	9.31	I
1-C25-B75	25.05	17.33	15.00	I
2-C25-B00	0.00	0.00	0.00	II
2-C25-B45	4.71	0.20	1.76	II
2-C25-B60	18.82	14.72	5.79	II
2-C25-B75	32.94	18.40	37.26	II

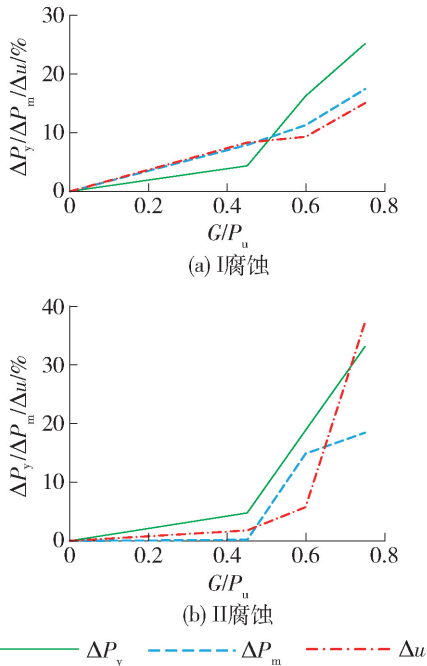


图 6 梁试件力学性能随持续荷载幅值的降幅

Fig. 6 Mechanical behavior reduction of beam specimens with sustained loading amplitude

RC 梁试件 P_y 、 P_m 承载力劣化的主要原因为:

1) 持续荷载使受拉混凝土出现横向裂缝,裂缝数量及宽度对钢筋锈蚀都有影响. 裂缝加快了氯离子的渗透,进而加快了钢筋腐蚀的发生.

2) 持续荷载破坏骨料界面与水泥浆体的初始

状态,造成混凝土初始损伤,使混凝土变得较疏松,混凝土力学性能降低;拉区混凝土在拉应力作用下密实性下降. 混凝土抗渗性被削弱,钢筋锈蚀速度加快.

3) 随着持续荷载增大,梁的初始横向裂缝高度、宽度以及数量都在增加,为氯离子和水的渗透提供通道,加速混凝土的劣化. 混凝土内部疏松及微裂缝的增加,降低了保护层的质量,使得氧气及水分的供给量增多,又加快了钢筋锈蚀速度. 现有研究^[14]表明钢筋锈蚀会引起钢筋截面面积减小、钢筋屈服强度降低、钢筋与混凝土之间黏结性能退化,会降低梁试件受弯正截面承载力.

RC 梁试件延性降低主要因为:延性与钢筋混凝土黏结性能、钢筋塑性性能发展有密切关系^[15-19]. 当钢筋锈蚀率较小时,钢筋能充分发挥强度,黏结性能退化不多甚至还有小幅提高,这对钢筋塑性性能发挥和结构延性影响不大,黏结性能退化不明显. 一旦钢筋锈蚀率增大,钢筋的屈强比增大,塑性性能下降;再加上钢筋混凝土黏结性能退化使得钢筋塑性性能不能发挥,结构的延性也就得不到充分发挥,甚至完全丧失. 随着持续荷载增大,钢筋锈蚀越大,进而钢筋混凝土黏结性能退化和钢筋塑性性能发展越明显,梁试件的延性下降越厉害.

2.3.2 梁试件抗弯刚度劣化

图 7(a)(b) 分别为不同持续荷载作用下经历 I 和 II 腐蚀后,梁试件抗弯刚度 B 随静力试验载荷变化情况(说明本文梁试件抗弯刚度为外加荷载与跨中挠度比值). 从图 7 可以看出,在持续荷载和海水喷淋干湿循环及大气环境共同作用后,梁试件抗弯刚度随持续荷载幅值增大而降幅增大. 主要原因为由于持续荷载作用使梁试件产生裂缝和塑性变形,当梁试件再次加载时刚度下降;外加持续荷载水平越高,梁试件的裂缝、塑性变形越大,干湿循环及大气环境作用后再次加载梁试件的抗弯刚度下降越多.

2.3.3 试件力学性能劣化受环境影响

图 8(a)(b)(c) 分别给出经历 I 和 II 腐蚀环境后,梁试件的 P_y 、 P_m 和 u 等劣化受腐蚀环境以及持续荷载幅值影响. 从图 8 可以看出,在持续荷载和环境腐蚀共同作用下,II 腐蚀的梁试件比 I 腐蚀的梁试件, P_y 、 P_m 和 u 降幅大. 笔者认为 II 腐蚀的梁试件先经历海水喷淋干湿循环 180 d,海水中氯离子较容易通过裂缝渗入混凝土内导致钢筋锈蚀,引起钢筋的屈服强度和塑性性能降低;之后即使在大气环

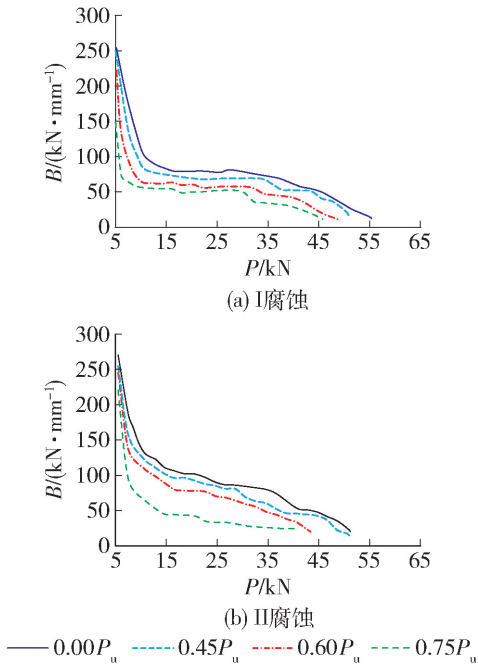


图7 梁试件抗弯刚度随荷载幅值的劣化
Fig. 7 Bending stiffness deterioration of beam specimens with loading amplitude

境中静置 180 d 受持续荷载的作用,其钢筋通过裂缝渗透空气和水作用继续锈蚀. 本项试验研究目的期望探讨腐蚀环境对 RC 结构构件力学性能劣化影响.

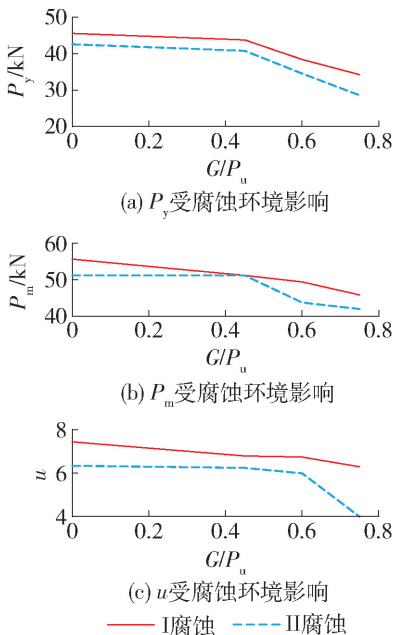


图8 梁试件力学性能劣化受腐蚀环境影响

Fig. 8 Deterioration of residual mechanical properties of beam specimens affected by corrosion environment

3 结论

1) 不同持续荷载梁试件经历腐蚀后,其 P_y 、 P_m 和 u 均随持续荷载幅值的增加而降低. 经历 I 腐蚀后,持续荷载 $0.75P_u$ 梁试件 P_y 、 P_m 和 u 的降幅分别达到 25.05%、17.33% 和 15.0%. 经历 II 腐蚀后,持续荷载 $0.75P_u$ 梁试件 P_y 、 P_m 和 u 的降幅分别达到 32.94%、18.40% 和 37.26%.

2) 在持续荷载和 I (或 II) 腐蚀共同作用下,随持续荷载幅值增幅越大,梁试件抗弯刚度降低越明显.

3) 梁试件经历 I 或 II 腐蚀,II 腐蚀的梁试件比 I 腐蚀的梁试件, P_y 、 P_m 和 u 延性系数降幅大.

参考文献:

- [1] MALUMBELA G, ALEXANDER M, MOYO P. Interaction between corrosion crack width and steel loss in RC beams corr-oded under load [J]. Cement & Concrete Research, 2010, 40(9): 1419-1428.
- [2] 朱方之, 赵铁军, 姜福香, 等. 荷载损伤后混凝土劣化机理和试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(12): 67-71.
ZHU F Z, ZHAO T J, JIANG F X, et al. Experimental study and analysis on deterioration mechanism of damaged concrete induced by mechanical load [J]. Industrial Building, 2012, 42(12): 67-71. (in Chinese)
- [3] 高丽燕, 万小梅, 任心波. 持续荷载下混凝土的氯离子扩散性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012, 192(12): 21-25.
GAO L Y, WAN X M, REN X B. Study on chloride diffusion of concrete under sustained load [J]. China Concrete and Cement Product, 2012, 192(4): 21-25. (in Chinese)
- [4] 姬永生, 曾平, 马辉荣, 等. 荷载引起的横向裂缝区钢筋锈蚀率[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(2): 36-41.
JI Y S, ZENG P, MA H R, et al. Experimental research on influence of transverse crack on corrosion rate of rebar in concrete [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(2): 36-41. (in Chinese)
- [5] YOON S, WANG K, WEISS W J, et al. Interaction between loading, corrosion and serviceability of reinforced concrete [J]. ACI Materials Journal, 2000, 97(6): 637-644.

- [6] MASOUD S, SOUDKI K, TOPPER T. CFRP-strengthened and corroded RC beams under monotonic and fatigue loads [J]. *Journal of composites for construction*, 2001, 5(4): 228-236.
- [7] BALLIM Y, REID J C. Reinforcement corrosion and the de-deflection of RC beams—an experimental critique of current test methods [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2003, 25(6): 628-635.
- [8] MALUMBELA G, MOYO P, ALEXANDER M. Behavior of RC beams corroded under sustained service loads [J]. *Construction & Building Materials*, 2009, 23(11): 3346-3351.
- [9] MALUMBELA G, ALEXANDER M, MOYO P. Variation of steel loss and its effect on the ultimate flexural capacity of RC beams corroded and repaired under load [J]. *Construction & Building Materials*, 2010, 24(6): 1051-1059.
- [10] ZHU W, FRANCOIS R, CORONELLI D, et al. Effect of corrosion of reinforcement on the mechanical behavior of highly corroded RC beams [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56: 544-554.
- [11] 沈宇, 叶英华, 刁波, 等. 海水干湿循环对带裂缝钢筋混凝土柱力学性能及氯离子含量的影响[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(增刊1): 69-74.
SHEN B, YE Y H, DIAO B, et al. Effect of seawater wet-dry cycles on performance and chloride content of RC columns with different initial cracks [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35 (Suppl 1): 69-74. (in Chinese)
- [12] 中国钢铁工业协会. 金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法: GB/T228. 1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-15.
- [13] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T50081—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 3-14.
- [14] 何世钦, 贡金鑫. 钢筋混凝土梁中锈蚀钢筋粘结性能的试验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, 38(12): 2167-2170.
HE S Q, GONG J X. Experimental studies on bond characteristics of corroded steel bar in reinforced concrete beams [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 42(12): 67-71. (in Chinese)
- [15] YOUNG B, HANCOCK G J. Compression tests of channels with inclined simple edge stiffeners [J]. *Journal of Structural Engineering Research*, 2003, 129 (10): 1403-1411.
- [16] 孙洋, 刁波, 张笑, 等. 侵蚀与荷载耦合作用下砼梁承载力与延性试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(12): 1972-1976.
SUN Y, DIAO B, ZHANG X, et al. Experimental study on bearing capacity and ductility of reinforced concrete beam in multi-aggressive and loading coupling [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(12): 1972-1976. (in Chinese)
- [17] 吴庆, 袁迎曙. 锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(12): 42-47.
WU Q, YUAN Y S. Experimental study on the deterioration of mechanical properties of corroded steel bars [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(12): 42-47. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 34-53.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构耐久性设计规范: GB/T 50476—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 5-15.

(责任编辑 郑筱梅)