

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202302052024081961

文章编号:1674-599X(2024)04-0065-11

引用格式:柏玉良,金伟良,张怡雪,等.多因素作用下混凝土梁长期性能时变劣化规律[J].交通科学与工程,2024,40(4):65-75.

Citation: BAI Yuliang, JIN Weiliang, ZHANG Yixue, et al. Time-varying deterioration of concrete beams under the action of multiple factors[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 65-75.

多因素作用下混凝土梁长期性能时变劣化规律

柏玉良,金伟良,张怡雪,吴俊,黄爽,朱明江

(浙江大学 建筑工程学院,浙江 杭州 310058)

摘要:为了探究混凝土梁在锈蚀、疲劳、徐变等多因素长期作用下的性能劣化规律,对21根试验梁开展了锈蚀、疲劳和徐变的正交分组试验,通过对钢筋锈蚀深度、梁的刚度和疲劳寿命的测量计算,研究了钢筋混凝土梁长期性能的时变劣化规律。研究表明:相较于无损梁,在2.5%、15.0%、60.0%疲劳寿命比和3、6个月持续荷载作用下,损伤混凝土梁的锈蚀深度扩大了1.337~1.934倍;随着钢筋锈蚀和疲劳损伤程度的加深,损伤梁的刚度下降了1.694 kN·m²,在持续荷载作用下,其刚度仅为无损梁的34.1%;在锈蚀和徐变相继作用后,损伤梁的疲劳寿命仅为无损梁的16.14%。根据试验研究结果,给出了损伤混凝土梁的临界锈蚀深度衰减系数、短期刚度降低系数、刚度退化系数和疲劳寿命衰减系数,以反映复杂荷载与环境作用对混凝土梁长期性能的影响,为混凝土结构的长期性能评估提供了科学依据。

关键词:多因素作用;混凝土梁;临界锈蚀深度;短期刚度;疲劳寿命;长期性能

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Time-varying deterioration of concrete beams under the action of multiple factors

BAI Yuliang, JIN Weiliang, ZHANG Yixue, WU Jun, HUANG Shuang, ZHU Mingjiang

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to investigate the performance degradation law of concrete beams under the long-term influence of multiple factors such as corrosion, fatigue, and creep, orthogonal grouping experiments involving corrosion, fatigue, and creep were conducted on 21 test beams. Measurements and calculations were performed on the corrosion depth of the steel reinforcement, the stiffness of the beams, and their fatigue life. The research results indicate that, compared to undamaged beams, the corrosion depth in damaged concrete beams increases by 1.337 to 1.934 times under 2.5%, 15.0% and 60.0% fatigue life ratios and 3 and 6 months of sustained loading. As the degree of reinforcement corrosion and fatigue damage deepens, the stiffness of the damaged beams decreases by 1.694 kN·m², and under sustained loading, their stiffness is only 34.1% of that of the undamaged beams. After the combined effects of corrosion and creep, the fatigue life of the damaged beams is reduced to only 16.14% of that of the undamaged beams. Based on the experimental results, critical corrosion depth attenuation coefficients, short-term stiffness reduction coefficients, stiffness degradation coefficients, and fatigue life attenuation coefficients for damaged concrete beams are provided, reflecting the impact

收稿日期:2023-02-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51638013、51820105012、52178176)

通信作者:金伟良(1961—),男,教授,主要从事混凝土结构耐久性和全寿命分析方面的研究工作。E-mail:jinwl@zju.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

of complex loading and environmental factors on the long-term performance of concrete beams. These findings offer a scientific basis for the long-term performance assessment of concrete structures.

Key words: multi-factor action; concrete beam; critical corrosion depth; short-term stiffness; fatigue life; long-term performance

在服役期间,环境腐蚀、循环荷载以及持续荷载可能会引发结构一系列不利现象,如钢筋锈蚀、疲劳损伤和混凝土徐变等。这些现象会导致结构的安全性、适用性和耐久性逐渐退化,从而影响其整体可靠性和使用寿命。例如,在沿海工程结构中,钢筋混凝土构筑物在服役期间会不可避免地受到氯盐的侵蚀以及各类荷载的作用^[1];公路和铁路桥梁不仅要承受车辆荷载带来的疲劳效应,还需应对长期荷载引发的混凝土徐变现象^[2]。这些复杂外部因素的共同作用,会降低钢筋混凝土构筑物的安全性、耐久性和使用寿命。相比于单一作用,多种荷载与环境因素的共同作用会加速结构长期性能的退化。例如,荷载的作用会导致混凝土损伤,甚至形成裂缝,而裂缝的存在给氯离子的快速扩散提供了通道,加速了钢筋的锈蚀^[3]。锈蚀会导致钢筋与混凝土之间黏结性能退化。而混凝土在疲劳作用下,微损伤的累积会逐渐降低其强度,进而导致在恒定荷载的作用下,混凝土的长期徐变变形显著增大。锈蚀不仅会导致混凝土与钢筋之间的界面黏结性能退化,进一步增大构件的长期变形,而且会造成钢筋截面积的减小。这种截面积的减小直接影响了钢筋在疲劳断裂时的表现,降低了其疲劳次数,最终使得构件的抗疲劳能力下降。所有作用综合在一起后会导致结构的长期性能显著劣化,降低结构的使用寿命^[4-6]。

结构的长期性能劣化是一个复杂的过程,它不仅源于环境腐蚀的影响,还涉及到长期荷载以及这两者之间的耦合作用。这种性能退化贯穿于结构的整个服役期间,它不仅会影响结构的耐久性,还会影响其在疲劳、徐变等长期作用下的适用性和安全性。因此,结构长期性能的劣化是结构在服役过程中综合性能逐渐下降的体现^[7]。已有学者对循环荷载、持续荷载和氯盐环境作用下钢筋混凝土梁的长期性能进行了大量的研究。毛江鸿等^[8]发现在耐久性能方面,以钢筋锈蚀导致混凝土保护层锈胀开裂的问题最为突出;赵羽习等^[9]根据锈胀开裂三阶段理论,建立了混凝土保护层胀裂时钢筋锈蚀深度的计算模型;张建仁等^[10]通过研究37根不同钢筋类

型和锈蚀率的钢筋混凝土梁中的裂缝发现:当锈蚀率较小时($<4\%$)锈胀裂缝特征与无损混凝土梁的相似,随着锈蚀率的增大,裂缝间距和宽度逐渐增大。赵羽习等^[11]通过模拟混凝土构件受锈胀力的现象,提出了计算混凝土保护层锈胀开裂时非均匀钢筋锈蚀率的方法;陆春华等^[12]以钢筋均匀锈蚀为前提,根据弹性力学和Faraday腐蚀定律,推导出混凝土保护层锈胀开裂时钢筋锈蚀率以及锈胀开裂时间计算公式;ZHONG等^[13]基于Faraday腐蚀定律,建立了钢筋混凝土保护层开裂前后钢筋均匀锈蚀的时变模型。在适用性方面,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)对服役混凝土结构构件的挠度进行了规定,当混凝土结构构件的挠度过大时,会影响建筑的适用性^[14-15]。何世钦等^[16]通过持续荷载作用后锈蚀梁的四点弯曲试验发现:负载作用下锈蚀梁的挠度随钢筋锈蚀的发展而增加,其中早期增长较大;孙彬等^[17]考虑了锈蚀钢筋混凝土梁黏结性能的退化,并结合试验数据,对规范中的短期刚度计算公式进行修正,提出了锈蚀梁抗弯刚度的计算方法;汪小平等^[18]在模拟短期低应力徐变作用后对钢筋混凝土梁进行静载试验,试验结果表明:经过短期低应力徐变作用后的梁,在经受较低水平的静载作用时,随堆载徐变时间的增加,跨中挠度显著增大,且挠度随荷载增加速率的增长而增大;张建仁等^[19]通过对4根相同钢筋类型的钢筋混凝土梁开展研究发现:锈蚀梁在低锈蚀率($<5\%$)、小荷载($<$ 开裂荷载)作用下的抗弯刚度有所增加,在屈服荷载前的挠度随着钢筋锈蚀率的增加而减小。在安全性能方面,腐蚀和循环荷载共同作用引起的疲劳破坏,会大大缩短结构的服役寿命,严重影响结构的安全性能^[20]。已有学者^[21-24]对锈蚀钢筋混凝土梁的疲劳性能进行研究并发现:锈蚀钢筋混凝土梁在循环荷载的作用下,在蚀坑处引发应力集中和重分布现象,导致钢筋疲劳裂纹不断发展而发生疲劳断裂,结构寿命缩短,安全性能降低。

目前对于复杂工况下混凝土结构长期性能的研究主要集中于循环荷载、持续荷载与氯盐环境三者单一或两种因素共同作用层面,关于三种因素共

同作用下混凝土结构或构件长期性能问题的研究较少。由于三种因素共同作用下的破坏机理复杂,本文基于疲劳、锈蚀和徐变的正交试验,从锈蚀深度、刚度和疲劳寿命三个长期性能指标出发,对混凝土梁的耐久性、适用性和安全性进行了研究,研究结果可以为相关工作者提供科学有效的加固维修策略,有利于提高结构的稳定性和使用寿命,具有重要的理论及工程意义。

1 试验概况

1.1 材料参数

本试件采用C30混凝土,水泥采用P·O 42.5,粗骨料采用具有5~16 mm连续级配的碎石,细骨料采用细度模数为2.8的河砂,砂率为0.36,水灰比为0.55,混凝土配合比及其基本力学性能见表1。同时浇筑边长为150 mm的混凝土立方体试块,在自然条件下养护28 d后测得轴心抗压强度 f_c 为32.65 MPa,混凝土弹性模量 E_c 为 1.71×10^4 MPa,钢筋的力学性能见表2。

表1 混凝土配合比及其力学性能

Table 1 Mix ratio and mechanical properties of concrete

混凝土配合比/(kg·m ⁻³)				水灰比	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
水泥	水	粗骨料	细骨料			
382	210	1 157	651	0.55	32.65	1.71×10^4

表2 钢筋力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel bars

钢筋类型	公称直径/mm	实测截面积/mm ²	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa	伸长率/%
HPB300	6	26.42	313.5	424.0	2.06×10^5	28.4
	8	45.36	320.3	441.5	2.05×10^5	30.0
HRB400	10	72.38	497.1	572.9	1.95×10^5	20.8

1.2 试件设计

钢筋混凝土梁的尺寸及配筋如图1所示。矩形钢筋混凝土梁试件的尺寸为100 mm×150 mm×1 700 mm。底部纵筋为2根直径为10 mm的HRB400钢筋;弯剪段设置直径为6 mm,间距为100 mm的HPB300箍筋;架立筋采用4根直径为8 mm的HPB300钢筋,呈对称布置;纯弯段不设架立筋。混凝土保护层厚度为15 mm。底部配筋率为1.22%,按照规范设计为适筋梁。梁的受剪承载力高于受弯承载力,以保证梁在试验过程中不发生受剪破坏。

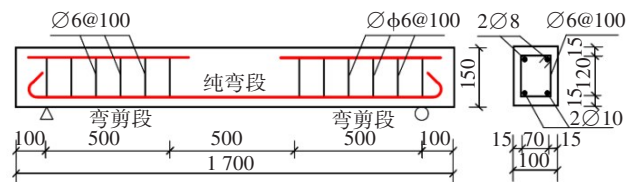


图1 试验梁的尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Sectional dimension and reinforcing bars of test beam (unit:mm)

1.3 试验概况

静力加载时,使用手摇式千斤顶进行四点弯曲加载,并采用分级加载的方式进行试验:30.0 kN前每级加载2.0 kN,30.0 kN后每级加载1.0 kN。在跨中和两端支座处布置LVDT直线式位移传感器并连接至DH5921动态数据采集仪,进行跨中和支座挠度数据采集,得到梁的受弯极限荷载为38.1 kN。静力加载试验装置如图2所示。

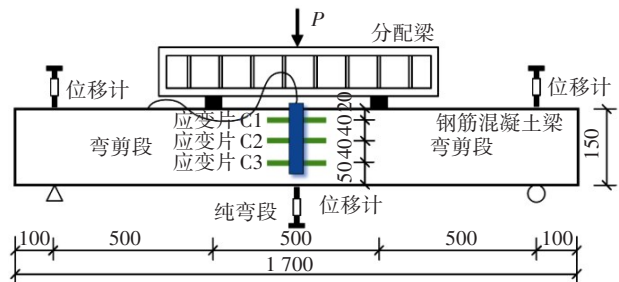


图2 静力加载试验装置

Fig. 2 Static loading test device

1) 疲劳试验。

疲劳试验中使用PMW800电液式脉动疲劳试验机进行等幅疲劳加载,加载频率为4 Hz,输出波形为正弦波。在正式疲劳加载前,先进行2次拟动力加卸载;进入正式循环加载后,当循环次数分别到达2 000、4 000、1万、2万、5万、10万、20万、50万次时停止循环荷载,分级加载至疲劳上限,分级荷载值分别为0.0、4.5、7.5、11.5、15.5、19.5、23.5、26.7 kN,直至梁发生疲劳破坏。此时,记录梁的跨中和两端支座处挠度,并得到梁疲劳破坏时的疲劳寿命为159 033次。疲劳加载试验装置如图3所示。

2) 通电加速锈蚀试验。

通电加速锈蚀前,先将试验梁放入5%氯化钠溶液中浸润2 d,便于形成电流回路。同时,采用外加恒定电流加速钢筋锈蚀,将梁内钢筋通过预设的导线直接与直流电源正极相连,不锈钢网与电源负极相连。腐蚀槽内为5%氯化钠溶液,不锈钢网和吸水海绵放置在垫块上,保持溶液液面高度不超过

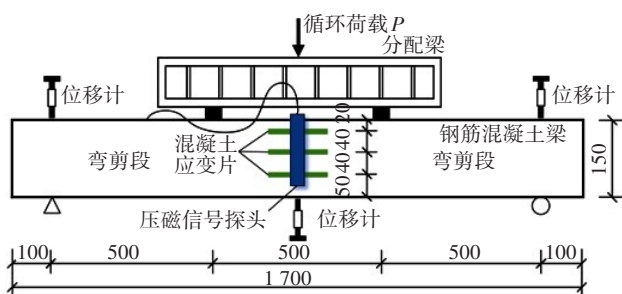


图3 疲劳加载试验装置

Fig. 3 Fatigue loading test device

海绵顶部,而梁底部则通过吸水海绵与盐溶液接触,既能保持梁底湿润,又可以避免将试验梁完全浸入溶液中而造成锈蚀产物随盐溶液大量流出^[25]。电流密度*i_{corr}*为200 μA/cm²,理论通电时间可以根据Faraday定律进行计算,则有^[13]:

$$\Delta\omega_s = \frac{MI_{\text{corr}}t}{zF} \quad (1)$$

$$I_{\text{corr}} = i_{\text{corr}} \cdot \pi dl \quad (2)$$

式中: $\Delta\omega_s$ 为钢筋因锈蚀损失质量,g; M 为铁元素的摩尔质量,取为56 g/mol; t 为通电时间,h; z 为铁离子的化学价(Fe^{2+} 的为2, Fe^{3+} 的为3); F 为法拉第常数,取为96 500 C/mol; I_{corr} 为实际通电流大小,A; i_{corr} 为电流密度,μA/cm²;d,l分别为钢筋的直径和长度,mm。

待到试件破坏后将混凝土敲碎,取出锈蚀钢筋。首先,清洗并除去锈蚀钢筋表面少量附着的混凝土,再放入12%稀盐酸溶液中进行除锈。而后,洗去锈蚀产物,再用石灰水中和。最后,经清水漂洗干净并充分干燥,测量每根钢筋的实际重量,并依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)计算钢筋实际锈蚀率。试验装置如图4所示。

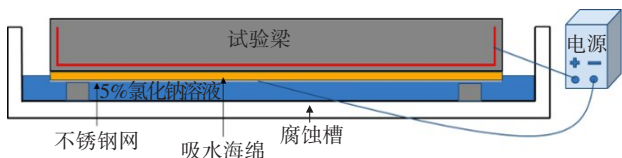


图4 通电加速锈蚀示意图

Fig. 4 Schematic diagram of accelerated corrosion by electrification

3) 堆载试验。

采用四点堆载试验,在梁的三分点处施加荷载,

总荷载为10.0 kN。在持续荷载作用期间,用千分表测量试件的跨中挠度,测点分别位于跨中截面距梁顶10、20 mm处。

2 耐久性能试验分析

2.1 试验分组及过程

以7根钢筋混凝土梁的耐久性能为主要研究对象,同时考虑循环荷载和持续荷载对钢筋混凝土梁耐久性的影响,将试验进行分组,见表3。根据钢筋混凝土梁锈蚀深度的变化情况,研究在循环荷载与持续荷载作用下,存在疲劳和徐变损伤的钢筋混凝土梁的耐久性退化规律。

2.2 腐蚀环境下的耐久性能劣化规律

在腐蚀环境下由钢筋锈蚀引起的混凝土结构耐久性能退化分为四个阶段:钢筋初锈、混凝土保护层锈胀开裂、裂缝宽度达到限值、承载能力达到限值^[26]。混凝土梁经历循环荷载和持续荷载作用后,其表面已产生较多的裂缝,在腐蚀环境下,钢筋表面氯离子浓度很快就达到临界值,使钢筋迅速发生锈蚀。因此将钢筋初锈作为耐久性能的失效准则已不适用。基于此,本文将混凝土保护层锈胀开裂作为循环荷载和持续荷载作用下耐久性能的失效准则。

当钢筋锈蚀达到一定程度时,混凝土保护层锈胀开裂。钢筋锈蚀程度可以用锈蚀深度来衡量^[27],在通电加速锈蚀试验中,如假定钢筋均匀锈蚀(不考虑钢筋在腐蚀环境下的非均匀锈蚀),则最终锈蚀深度 $\delta_{u,ex}$ 可以根据式(3)求得。此外,含疲劳和徐变损伤的混凝土梁在通电加速锈蚀试验中,由于电流强度保持恒定不变,可以认为钢筋处于匀速锈蚀状态,锈蚀深度与锈蚀时间成正比。因此,混凝土保护层锈胀开裂时的临界锈蚀深度 $\delta_{cr,ex}$ (考虑循环加载与持续荷载的作用)可以根据式(4)求得。试验结果如表4所示。

$$\delta_{u,ex} = d \left(1 - \sqrt{1 - \eta_m} \right) \quad (3)$$

$$\delta_{cr,ex} = \frac{t_{cr,ex}}{t_{u,ex}} \delta_{u,ex} \quad (4)$$

式中: $t_{cr,ex}$ 为混凝土保护侧锈胀开裂时间; $t_{u,ex}$ 为人工加速锈蚀试验最终通电时间; η_m 是钢筋平均锈蚀率。

表3 锈蚀试验分组及参数
Table 3 Groups and parameters of corrosion experiment

试验梁编号	损伤试验	疲劳试验参数			徐变试验参数		锈蚀试验参数	
		S_{max}	r	R	持荷水平/kN	持荷时间/d	电流密度/ ($\mu A \cdot cm^{-2}$)	通电时间/h
B_E	锈蚀						200	288
$B_{F2.5C3E}$	先疲劳后徐变再锈蚀	0.7	0.1	0.025	10	90	200	288
B_{F15C3E}	先疲劳后徐变再锈蚀	0.7	0.1	0.150	10	90	200	288
B_{F60C3E}	先疲劳后徐变再锈蚀	0.7	0.1	0.600	10	90	200	288
$B_{F2.5C6E}$	先疲劳后徐变再锈蚀	0.7	0.1	0.025	10	180	200	288
B_{F15C6E}	先疲劳后徐变再锈蚀	0.7	0.1	0.150	10	180	200	288
B_{F60C6E}	先疲劳后徐变再锈蚀	0.7	0.1	0.600	10	180	200	288

注: B_E 为无损梁的锈蚀试验,作为对照组; S_{max} 表示疲劳应力水平(循环荷载上限与极限抗弯承载力的比值); r 表示疲劳应力比; R 为疲劳寿命比($R = N/N_0$, N_0 为循环次数); $B_{F2.5C3E}$ 表示无损梁先进行2.5%疲劳寿命次数的循环加载试验,然后进行3个月(每个月30 d)的徐变堆载试验,最后进行288 h的通电加速锈蚀试验,其他梁编号的含义以此类推。

表4 混凝土保护层锈胀开裂时间和钢筋锈蚀深度试验结果

Table 4 The test results of concrete cover cracking time and reinforcement corrosion depth

试验梁编号	锈胀开裂时间/h	通电时间/h	平均锈蚀率/%	钢筋直径/mm	最终锈蚀深度/mm	临界锈蚀深度/mm
B_E	113.8	288	3.59	10	0.181	0.071 0
$B_{F2.5C3E}$	80.1	288	7.30	10	0.242	0.067 3
B_{F15C3E}	61.8	288	5.87	10	0.298	0.064 0
B_{F60C3E}	48.6	288	4.78	10	0.372	0.062 8
$B_{F2.5C6E}$	65.4	288	6.89	10	0.284	0.064 4
B_{F15C6E}	54.8	288	5.59	10	0.326	0.062 1
B_{F60C6E}	49.6	288	6.42	10	0.350	0.060 4

从表4中可以看出,混凝土梁经历疲劳和徐变损伤后,临界锈蚀深度逐渐减小。经历2.5%、15.0%和60.0%疲劳寿命次数循环加载试验后,在3个月的持续荷载作用下,相较于无损梁,有损梁临界锈蚀深度分别减少了5.21%、9.86%、11.55%;在6个月的持续荷载作用下,有损梁临界锈蚀深度分别减少了9.30%、12.54%、14.93%。腐蚀环境下最终锈蚀深度的变化情况如图5所示。在持续荷载的作用下,随着疲劳损伤程度的增大,钢筋最终锈蚀深度增幅明显,进行60.0%疲劳寿命次数的循环加载试验后,试验梁的最终锈蚀深度接近于无损梁的2倍。

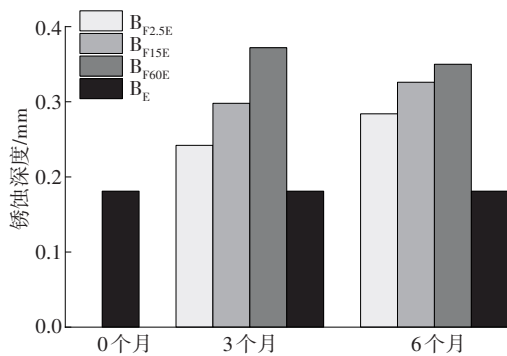


图5 锈蚀深度状况
Fig. 5 Corrosion depth condition

2.3 临界锈蚀深度修正系数

保护层锈胀开裂时钢筋的锈蚀深度为临界锈蚀深度,王胜年等^[28]考虑了混凝土保护层厚度、混凝土水胶比、混凝土强度等级、钢筋直径等因素,给出了混凝土保护层锈胀开裂时的临界锈蚀深度(不含疲劳和徐变损伤):

$$\delta_{cr} = k_1 k_2 k_3 \left[0.15 (R_{wb})^{1.55} \cdot f_{cu,28}^{0.34} \left(1 + \frac{2c}{d} \right)^{0.19} \cdot d^{-0.30} \right] \quad (5)$$

式中: $k_1 = 1 - 0.07m_1 - 0.54m_2 - 2.47m_3$, k_1 为掺合料修正系数, m_1 、 m_2 、 m_3 分别是粉煤灰、矿渣和矿灰掺量; k_2 为钢筋位置修正系数,当钢筋在角区位置时 $k_2 = 1.00$,当钢筋在边中位置时 $k_2 = 1.33$; k_3 为钢筋种类修正系数,当钢筋为带肋钢筋时 $k_3 = 1.00$,当钢筋为光圆钢筋时 $k_3 = 0.88$; $f_{cu,28}$ 是混凝土立方体28 d抗压强度; c 为混凝土保护层厚度; R_{wb} 为混凝土水胶比。

由于疲劳和徐变损伤的影响,在288 h通电加速锈蚀试验中,混凝土梁的保护层会提前锈胀开裂。这是因为循环荷载和持续荷载的作用会使保护层混凝土产生裂缝与扩展,进而使得锈蚀后混凝土保护层更易锈胀开裂,钢筋临界锈蚀深度不断减小。基于式(5),本文引入临界锈蚀深度衰减系数 $\kappa(R, T)$,以此评判疲劳和徐变损伤对钢筋临界锈蚀深度的影响程度。

$$\kappa(R, T) = \frac{\delta_{cr,ex}(R, T)}{\delta_{cr,ex}(R = 0, T = 0)} \quad (6)$$

式中: $\delta_{cr,ex}(R, T)$ 为任意疲劳寿命比 R 和持荷时间 T 下的临界锈蚀深度; $\delta_{cr,ex}(R = 0, T = 0)$ 为无损梁的临界锈蚀深度。拟合后得到式(7):

$$\kappa(R, T) = 1 - 0.004R - 0.017T + 4.7 \times 10^{-5}R^2 + 5.691 \times 10^{-4}T^2 + 1.637 \times 10^{-5}RT \quad (7)$$

拟合结果如图6所示。从图6可以看出,临界

锈蚀深度衰减系数拟合程度较高,能很好地反映在疲劳、徐变损伤下,梁内部钢筋的锈蚀情况。因此,当钢筋混凝土梁在循环荷载和持续荷载的作用下,循环次数不超过疲劳寿命的60%,持荷时间不超过6个月时,损伤后的钢筋混凝土梁临界锈蚀深度理论表达式见式(6)~(7)。

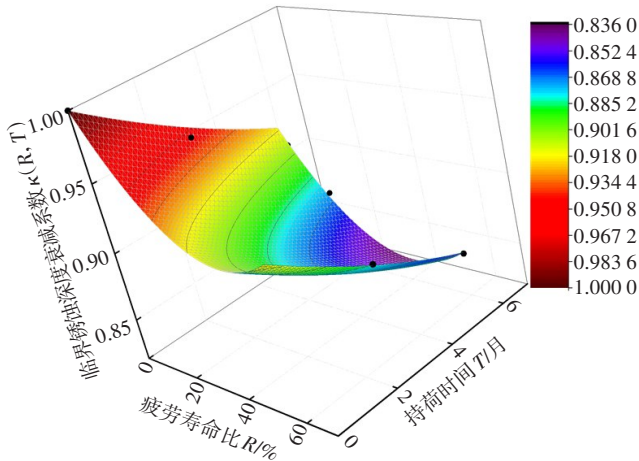


图6 钢筋临界锈蚀深度衰减系数

Fig. 6 Attenuation coefficient of critical corrosion depth of steel bars

3 适用性能试验分析

3.1 试验分组及过程

以5根钢筋混凝土梁的徐变变形为主要研究对象,同时考虑腐蚀环境和循环荷载对钢筋混凝土梁长期刚度的影响,将试验进行分组,如表5所示。通

过已产生锈蚀和疲劳损伤混凝土梁的徐变试验,研究在腐蚀环境和循环荷载作用下混凝土梁基于刚度指标的适用性退化规律。

3.2 持续荷载作用下的适用性能退化规律

氯盐的侵蚀导致混凝土保护层锈胀开裂,混凝土内部初始缺陷增多,在循环荷载的作用下,加速了裂缝的扩展。循环荷载作用下的混凝土结构会产生疲劳效应,产生内部初始缺陷,随着损伤的积累,裂缝相互连接、扩展,并与骨料及砂浆之间的黏结裂缝相互贯穿,形成主裂缝。在持续荷载的作用下,钢筋与混凝土之间的黏结性能不断下降,使得结构挠度提前产生,结构刚度降低。由于钢筋锈蚀率很低、疲劳循环次数较少,产生的微裂缝对混凝土梁的变形影响较小,因此损伤混凝土梁产生的变形可以认为是弹性变形,根据结构力学的相关知识,本试验中梁的短期刚度 B_s 可以通过跨中挠度求得,如式(8)所示。

$$B_s = \lambda \frac{Ml_0^2}{f} \tag{8}$$

式中: λ 是挠度系数; M 是弯矩; l_0 是计算跨径; f 是跨中截面的挠度。

锈蚀钢筋混凝土梁在循环荷载作用下刚度的变化情况如表6所示。从表6可以看出,混凝土梁在锈蚀和疲劳复合作用下,刚度不断减小。相较于无损梁,经历2%和4%锈蚀率的锈蚀试验梁在4000次循环荷载作用下,刚度分别降低了33.00%、39.39%,在22000次循环荷载作用下,刚度分别降低了46.86%、52.09%。

表5 徐变试验分组及参数

Table 5 Groups and parameters of creep experiment

编号	损伤试验	锈蚀试验参数		疲劳试验参数			徐变试验参数	
		电流密度/ ($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	通电时间/h	S_{\max}	r	R	持荷水平/kN	持荷时间/d
B_c	徐变						10	190
B_{E2F3C}	先锈蚀后疲劳再徐变	200	114	0.7	0.1	0.03	10	190
B_{E2F15C}	先锈蚀后疲劳再徐变	200	114	0.7	0.1	0.03	10	190
B_{E4F3C}	先锈蚀后疲劳再徐变	200	228	0.7	0.1	0.15	10	190
B_{E4F15C}	先锈蚀后疲劳再徐变	200	228	0.7	0.1	0.15	10	190

注: B_c 为无损梁的徐变试验,作为对照组; B_{E2F3C} 表示无损梁先进行2%锈蚀率的通电加速锈蚀试验,再进行3%疲劳寿命次数的循环加载试验,最后进行190 d的徐变堆载试验,其他梁编号的含义以此类推。

表 6 锈蚀梁疲劳损伤下的刚度
Table 6 Stiffness of corroded beams under fatigue damage

试验梁编号	不同循环次数下的抗弯刚度/(kN·mm ²)							
	0	200	1 000	4 000	5 000	15 000	20 000	22 000
B _{E0F0}	3.252×10 ⁸							
B _{E2F3}	3.020×10 ⁸	2.362×10 ⁸	2.237×10 ⁸	2.179×10 ⁸				
B _{E4F3}	2.815×10 ⁸	2.908×10 ⁸	2.206×10 ⁸	1.971×10 ⁸				
B _{E2F15}	3.020×10 ⁸	4.255×10 ⁸	2.061×10 ⁸	1.934×10 ⁸	1.915×10 ⁸	1.815×10 ⁸	1.736×10 ⁸	1.728×10 ⁸
B _{E4F15}	2.815×10 ⁸	5.370×10 ⁸	1.964×10 ⁸	1.593×10 ⁸	1.562×10 ⁸	1.566×10 ⁸	1.571×10 ⁸	1.558×10 ⁸

注: B_{E0F0} 为无损梁的疲劳试验, 作为对照组; B_{E2F3} 表示无损梁先进行 2% 锈蚀率的通电加速锈蚀试验, 再进行 3% 疲劳寿命次数的循环加载试验, 其他梁编号的含义以此类推。

然而混凝土结构在实际服役期间除了遭受氯离子侵蚀作用和循环荷载作用, 还会遭受持续荷载的作用。含锈蚀和疲劳损伤的混凝土梁在持续荷载的作用下, 刚度随持荷时间的增加逐渐降低, 试验结果如表 7 和图 7 所示。从图 7 可以看出, 随着持荷时间的增加, 梁的刚度呈下降趋势, 且持荷时间较短时, 刚度的下降速度较快。当持荷时间较长时, 在低锈蚀率水平、低疲劳水平下, 梁的刚度逐渐趋于稳定。

表 7 持荷作用下损伤梁的时变刚度

Table 7 Time-varying stiffness of damaged beam under sustained loading

试验梁编号	不同持荷时间(d)下的时变刚度/(kN·mm ²)				
	0	60	120	180	190
B _{E0F0}	3.252×10 ⁸	1.756×10 ⁸	1.431×10 ⁸	1.304×10 ⁸	1.333×10 ⁸
B _{E2F3}	2.179×10 ⁸	1.534×10 ⁸	1.453×10 ⁸	1.358×10 ⁸	1.390×10 ⁸
B _{E4F3}	1.971×10 ⁸	1.392×10 ⁸	1.321×10 ⁸	1.208×10 ⁸	1.206×10 ⁸
B _{E2F15}	1.728×10 ⁸	1.222×10 ⁸	1.159×10 ⁸	1.073×10 ⁸	1.070×10 ⁸
B _{E4F15}	1.558×10 ⁸	1.207×10 ⁸	1.153×10 ⁸	1.098×10 ⁸	1.111×10 ⁸

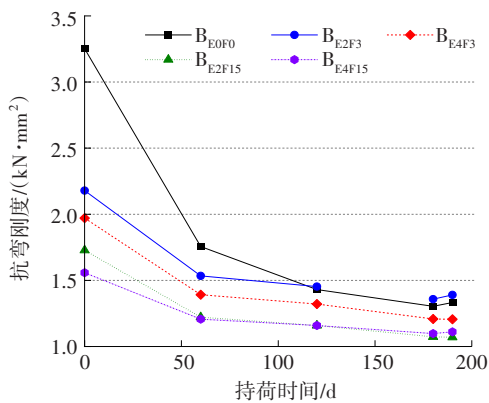


图 7 刚度时变图

Fig. 7 Time-varying stiffness diagram

3.3 刚度修正系数

在服役过程中, 变形是衡量结构适用性能的重要指标^[29], 变形过大会严重影响结构的正常使用性能。而刚度的大小可以定量地表征结构抵抗变形的能力, 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[14]给出了在裂缝控制等级要求的荷载组合作用下, 混凝土矩形截面受弯构件短期刚度的计算公式:

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15 \left(1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\rho_{te} \sigma_s} \right) + 0.2 + 6\alpha_E \rho} \quad (9)$$

式中: E_s 为钢筋弹性模量, MPa; A_s 为纵向受拉钢筋的截面积, mm²; h_0 为截面有效高度, mm; f_{tk} 为混凝土轴心抗拉强度标准值, MPa; ρ_{te} 为由有效受拉混凝土截面面积计算的纵向受拉钢筋配筋率; σ_s 为纵向受拉钢筋应力, MPa; α_E 为钢筋与混凝土弹性模量的比值; ρ 为纵向受拉钢筋配筋率。

本文引入刚度降低系数 $\beta(\eta, R)$ 以综合考虑循环荷载和钢筋锈蚀对构件黏结力的影响:

$$\beta(\eta, R) = \frac{B_{sc}^f(\eta, R)}{B_{sc}^f(\eta = 0, R = 0)} \quad (10)$$

式中: $B_{sc}^f(\eta, R)$ 为锈蚀梁在任意疲劳寿命比作用下的刚度; $B_{sc}^f(\eta = 0, R = 0)$ 为无损梁的刚度。

通过 Exponential2D 函数进行曲面双因素拟合得到刚度降低系数 $\beta(\eta, R)$ 与锈蚀率 η 和疲劳寿命比 R 的关系式, 如式(11)所示。拟合结果如图 8 所示。从图 8 可以看出, 短期刚度降低系数拟合程度较高, 能很好地反映梁在锈蚀、疲劳损伤下, 钢筋与混凝土之间黏结性能的退化情况。因此, 钢筋混凝土梁在腐蚀和循环荷载的共同作用下, 当锈蚀率较低 ($\leq 4\%$)、疲劳损伤程度较轻 (疲劳寿命比不超过

0.15)时,可以用式(11)来表征损伤梁的刚度降低情况。

$$\beta(\eta, R) = 0.4623 + 0.5354e^{[-(\eta/3.7803) + (-R/8.5449)]} \quad (11)$$

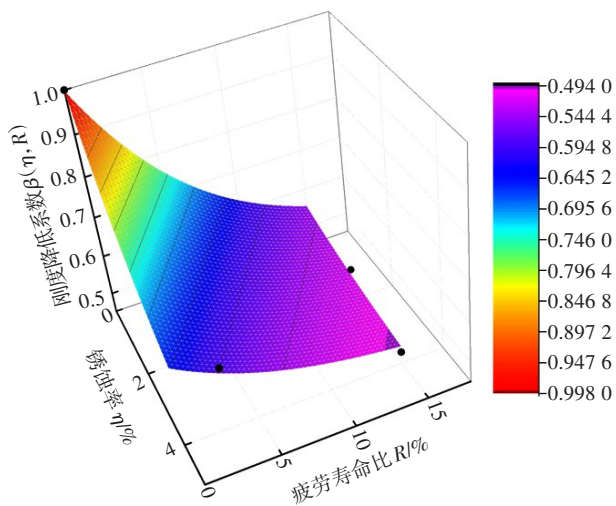


图8 短期刚度降低系数

Fig. 8 Attenuation coefficient of short-term stiffness

同时,含锈蚀和疲劳损伤的梁在持续荷载作用下,刚度随持荷时间的增加逐渐降低。根据试验结果,引入刚度退化系数,通过ExpDec1函数对刚度退化系数 $\theta(t)$ 进行非线性拟合,结果如图9所示。

从图9可以看出,损伤梁在持续荷载作用下,刚度退化系数表达式为:

$$\theta(t) = a_0 + b_0 e^{-t/c_0} \quad (12)$$

式中: a_0 取值为0.60~0.72; b_0 取值为0.28~0.40; c_0

取值为38~48; t 为持荷时间(不考虑无损梁)。

则混凝土梁在锈蚀、疲劳和徐变共同作用下修正后的刚度 B_{se}^{ef} 表达式为:

$$B_{se}^{ef} = \beta(\eta, R) \cdot \theta(t) \cdot B_s \quad (13)$$

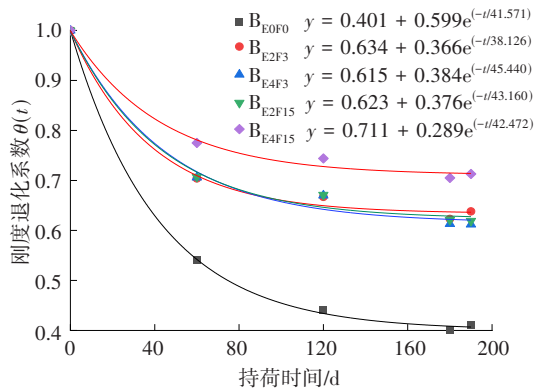


图9 刚度退化系数

Fig. 9 Stiffness degradation coefficient

4 疲劳安全性能试验分析

4.1 试验分组及过程

以9根钢筋混凝土梁的疲劳安全性能为主要研究对象,同时考虑腐蚀环境和持续荷载对钢筋混凝土梁的影响,将试验进行分组,如表8所示。通过含锈蚀和徐变损伤的混凝土梁疲劳试验,并根据混凝土梁疲劳寿命的变化情况,研究混凝土梁服役期安全性衰减规律。

表8 疲劳试验分组及参数

Table 8 Groups and parameters of fatigue experiment

试验梁编号	损伤试验	锈蚀试验参数		徐变试验参数		疲劳试验参数	
		电流密度/($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	通电时间/h	持荷水平/kN	持荷时间/d	S_{\max}	r
B_F	疲劳						
B_{E3C0F}	先锈蚀后疲劳	200	170	10		0.7	0.1
B_{E6C0F}	先锈蚀后疲劳	200	340	10		0.7	0.1
B_{E9C0F}	先锈蚀后疲劳	200	510	10		0.7	0.1
B_{E12C0F}	先锈蚀后疲劳	200	680	10		0.7	0.1
B_{E3C6F}	先锈蚀后徐变再疲劳	200	170	10	180	0.7	0.1
B_{E6C6F}	先锈蚀后徐变再疲劳	200	340	10	180	0.7	0.1
B_{E9C6F}	先锈蚀后徐变再疲劳	200	510	10	180	0.7	0.1
B_{E12C6F}	先锈蚀后徐变再疲劳	200	680	10	180	0.7	0.1

注: B_F 为无损梁的疲劳试验,作为对照组; B_{E3C6F} 表示无损梁先进行3%锈蚀率的通电加速锈蚀试验,再进行180 d的徐变堆载试验,最后进行循环加载试验至试件破坏,其他梁编号含义以此类推。

4.2 循环荷载作用下的安全性能劣化规律

钢筋混凝土梁在服役期间遭受氯盐侵蚀,保护层锈胀开裂,在持续荷载的作用下,混凝土内部微裂缝不断发展,导致混凝土密实度不断降低,出现拉应力并形成拉应力裂缝。伴随着循环荷载的作

用,结构挠度及裂缝宽度超限,使结构承载能力不足,疲劳寿命急剧缩短,结构提前失效。评判混凝土结构的疲劳性能时,疲劳寿命是最为直观的指标之一。疲劳寿命是材料在疲劳破坏前所经历的应力循环次数。含锈蚀和徐变损伤的混凝土梁在循

环荷载作用下的疲劳寿命变化情况见表 9。

表 9 锈蚀及持续荷载作用后的疲劳寿命

Table 9 Fatigue life after corrosion and sustained loading

试验梁编号	疲劳寿命/次	疲劳寿命衰减系数
B _F	159 033	1.000
B _{E3C0F}	113 487	0.714
B _{E6C0F}	75 852	0.477
B _{E9C0F}	46 137	0.290
B _{E12C0F}	29 853	0.188
B _{E3C6F}	122 801	0.772
B _{E6C6F}	71 154	0.447
B _{E9C6F}	35 815	0.225
B _{E12C6F}	25 661	0.161

从表 9 可以看出,在锈蚀和徐变的复合作用下,随着锈蚀率的提高、持荷时间的增加,损伤梁的疲劳寿命最低仅为无损梁的 16.1%。并且随着持续荷载时间的增加,结构安全性能不断降低。循环荷载作用下损伤梁疲劳寿命的衰减情况如图 10 所示。

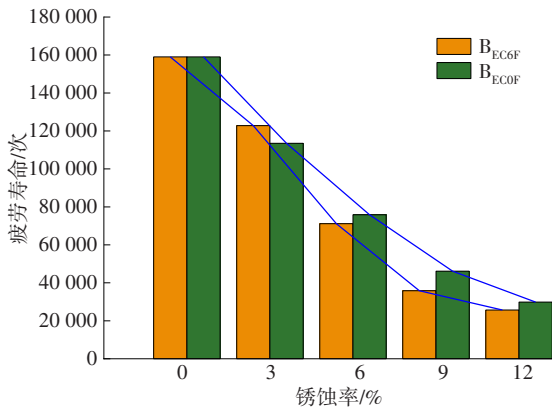


图 10 疲劳寿命变化

Fig. 10 Variation of fatigue life

从图 10 可以看出,在循环荷载作用下,锈蚀徐变损伤梁相较于锈蚀梁,其疲劳寿命随着锈蚀率的提高,下降的速度更快。

4.3 疲劳寿命衰减系数

本文定义疲劳寿命衰减系数,用以表征锈蚀和徐变损伤致使梁疲劳寿命的衰减程度。引入疲劳寿命衰减系数 $\gamma_f(\eta, T)$,如式(14)所示,以此综合评判钢筋锈蚀和持续荷载对疲劳寿命的影响。

$$\gamma_f(\eta, T) = \frac{N_f(\eta, T)}{N_f(\eta = 0, T = 0)} \quad (14)$$

式中: $N_f(\eta, T)$ 为任意锈蚀率 η 和持荷时间 T 下的损伤梁的疲劳寿命; $N_f(\eta = 0, T = 0)$ 为无损梁的疲劳寿命。

通过 Gauss2D 函数进行曲面双因素拟合,得到关于锈蚀率 η 和持荷时间 T 的关系式,如式(15)所示,拟合结果如图 11 所示。从图 11 可以看出,疲劳寿命衰减系数拟合程度较高,能很好地反映已产生锈蚀、徐变损伤的梁在循环荷载作用下疲劳寿命的衰减情况。因此,钢筋混凝土梁在腐蚀环境和持续荷载的共同作用下,当持续荷载不超过 6 个月时,可以用式(15)来反应损伤梁在循环荷载作用下疲劳寿命的衰减程度。

$$\gamma_f(\eta, T) = 0.135 + 0.97 \exp \left\{ \begin{matrix} -0.5 \left[(\eta + 2.354) / 5.654 \right]^2 \\ -0.5 \left[(T - 7.917) / 30.783 \right]^2 \end{matrix} \right\} \quad (15)$$

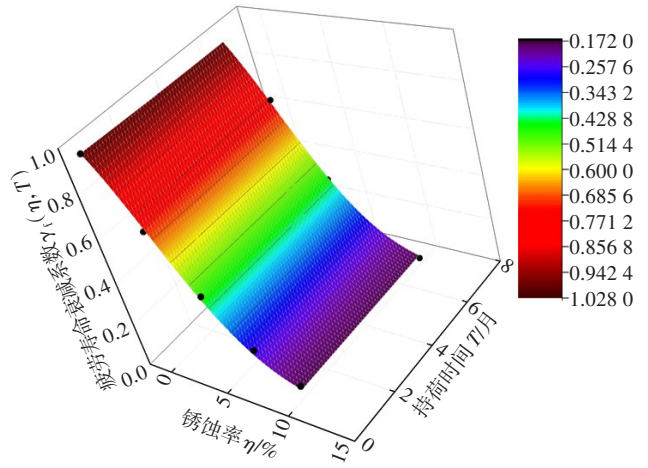


图 11 疲劳寿命衰减系数

Fig. 11 Attenuation coefficient of fatigue life

5 结论

1) 混凝土梁经历疲劳、徐变损伤后,临界锈蚀深度逐渐减小。经历 2.5%、15.0% 和 60.0% 疲劳寿命次数循环加载试验后,在 3 个月的持续荷载作用下,相较于无损梁,有损梁临界锈蚀深度分别减少了 5.21%、9.86%、11.55%;在 6 个月的持续荷载作用下,有损梁临界锈蚀深度分别减少了 9.30%、12.54%、14.93%。通过引入临界锈蚀深度衰减系数 $\kappa(R, T)$,为损伤混凝土结构的耐久性分析提供依据。

2) 混凝土梁在锈蚀和疲劳复合作用下,刚度不断减小。经历 2% 和 4% 锈蚀率的锈蚀试验梁在 4 000 次循环荷载作用下,刚度分别降低了 33.00%、39.39%,在 22 000 次循环荷载作用下,刚度分别降

低了46.86%、52.09%。通过引入刚度降低系数 $\beta(\eta, R)$,用以修正短期刚度,并以刚度退化系数 $\theta(t)$ 考虑徐变对结构长期性能的影响。

3) 混凝土梁遭受锈蚀和徐变损伤后,在6个月持续荷载作用下,随着锈蚀率的增加,疲劳寿命降低了22.8%、55.3%、77.5%、83.9%。通过引入疲劳寿命衰减系数 $\gamma_i(\eta, T)$,为混凝土结构的安全性分析提供依据。

参考文献(References):

- [1] 金伟良, 夏晋, 毛江鸿. 混凝土结构耐久性电化学方法: 防护、修复、提升和控制[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
JIN Weiliang, XIA Jin, MAO Jianghong. Electrochemical technology for durability of concrete structures in protection, repair, enhancement and control [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [2] 崔晨光, 汪小平, 张奕, 等. 疲劳荷载作用对高性能混凝土收缩徐变影响的试验研究[J]. 混凝土, 2019(1): 77-80. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2019.01.019.
CUI Chenguang, WANG Xiaoping, ZHANG Yi, et al. Experimental study on the influence of fatigue loading on high performance concrete shrinkage and creep performance [J]. Concrete, 2019 (1): 77-80. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2019.01.019.
- [3] 何世钦, 曹泽阳, 刘伟杰, 等. 长期荷载和氯盐环境耦合作用对钢筋混凝土梁挠度的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(11): 902-909. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.26.022.
HE Shiqin, CAO Zeyang, LIU Weijie, et al. Influence of long-term load and chlorine corrosion on reinforced concrete beam deflection [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, 59(11): 902-909. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.26.022.
- [4] MENG Q L, ZHU J S, WANG T L. Numerical prediction of long-term deformation for prestressed concrete bridges under random heavy traffic loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(11): 04019107. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001489.
- [5] 任国盛. 持续荷载与氯离子侵蚀耦合作用下钢筋与混凝土间的黏结性能[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
REN Guosheng. Bond behavior between steel bar and concrete under sustained load coupled with chloride ion erosion [D]. Qingdao: Qingdao Tehcnology University, 2018.
- [6] ZHANG W P, LIU X G, GU X L. Fatigue behavior of corroded prestressed concrete beams [J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 198-208. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.119.
- [7] 金伟良, 张大伟, 吴柯娴, 等. 混凝土结构长期性能的若干基本问题探讨[J]. 建筑结构, 2020, 50(13): 1-6, 29. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.13.001.
JIN Weiliang, ZHANG Dawei, WU Kexian, et al. Discussion on fundamental problems on long-term performance of concrete structures [J]. Building Structure, 2020, 50(13): 1-6, 29. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.13.001.
- [8] 毛江鸿, 陈佳芸, 崔磊, 等. 氯盐侵蚀钢筋混凝土锈胀开裂监测及预测方法[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 59-64. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2016.01.010.
MAO Jianghong, CHEN Jiayun, CUI Lei, et al. Monitoring and predicting method for reinforced concrete expansion and cracking induced by chloride erosion [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 59-64. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2016.01.010.
- [9] 赵羽习, 金伟良. 钢筋锈蚀导致混凝土构件保护层胀裂的全过程分析[J]. 水利学报, 2005, 36(8): 939-945. DOI: 10.3321/j.issn: 0559-9350.2005.08.008.
ZHAO Yuxi, JIN Weiliang. Analysis on the cracking of concrete cover due to rebar corrosion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(8): 939-945. DOI: 10.3321/j.issn: 0559-9350.2005.08.008.
- [10] 张建仁, 邓鸣. 锈蚀钢筋混凝土梁的裂缝研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2007, 4(3): 23-28. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2007.03.004.
ZHANG Jianren, DENG Ming. Cracks of corrosive reinforced concrete beams [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2007, 4(3): 23-28. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2007.03.004.
- [11] 赵羽习, 金伟良. 混凝土锈胀时刻钢筋锈蚀率的数值分析方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(6): 1080-1084. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2008.06.035.
ZHAO Yuxi, JIN Weiliang. Numerical-based method for calculating reinforcement corrosion at concrete cover cracking due to corrosion [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(6): 1080-1084. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2008.06.035.
- [12] 陆春华, 赵羽习, 金伟良. 锈蚀钢筋混凝土保护层锈胀开裂时间的预测模型[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 85-92. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.02.010.
LU Chunhua, ZHAO Yuxi, JIN Weiliang. Modeling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 85-92. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2010.02.010.
- [13] ZHONG X P, JIN W L, XIA J. A time-varying model for predicting the life-cycle flexural capacity of reinforced concrete beams [J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(1): 21-32. DOI: 10.1260/1369-4332.18.1.21.
- [14] 沈蒲生. 混凝土结构设计原理[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2020.
SHEN Pusheng. Design principle of concrete structure [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2020.

- [15] 赵羽习, 金伟良. 正常使用极限状态下混凝土结构构件可靠度的分析方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(6): 674-679. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2002.06.017.
ZHAO Yuxi, JIN Weiliang. Methods of reliability based on serviceability limited state for concrete structural members [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002, 36(6): 674-679. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2002.06.017.
- [16] 何世钦, 贡金鑫. 荷载钢筋混凝土梁钢筋锈蚀及使用性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34(4): 474-479. DOI: 10.3321/j.issn:1001-0505.2004.04.012.
HE Shiqin, GONG Jinxin. Experimental studies on steel bar corrosion and service ability of reinforced concrete beam under service loading [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2004, 34(4): 474-479. DOI: 10.3321/j.issn:1001-0505.2004.04.012.
- [17] 孙彬, 牛荻涛, 王庆霖. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯刚度分析与计算[J]. 建筑结构, 2004, 34(10): 42-45. DOI: 10.19701/j.jzjg.2004.10.011.
SUN Bin, NIU Ditao, WANG Qinglin. Analysis and calculation of flexural rigidity of corroded reinforced concrete beam [J]. Building Structure, 2004, 34(10): 42-45. DOI: 10.19701/j.jzjg.2004.10.011.
- [18] 汪小平, 崔晨光, 张奕, 等. 短期低应力徐变作用后钢筋混凝土梁静力试验研究[J]. 江西理工大学学报, 2019, 40(1): 1-4. DOI: 10.13265/j.cnki.jxlgdxxb.2019.01.001.
WANG Xiaoping, CUI Chenguang, ZHANG Yi, et al. Experimental study on static characteristics of reinforced concrete beams after short-term and low stress creep [J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2019, 40(1): 1-4. DOI: 10.13265/j.cnki.jxlgdxxb.2019.01.001.
- [19] 张建仁, 吴晓俊, 王磊. 锈蚀率对同类型RC梁抗弯刚度影响[J]. 长沙交通学院学报, 2008, 24(3): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2008.03.001.
ZHANG Jianren, WU Xiaojun, WANG Lei. The impact of corrosion ratio to the same type RC beam flexural stiffness [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2008, 24(3): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2008.03.001.
- [20] 张军, 金伟良, 张凯, 等. 混凝土结构内锈蚀钢筋的疲劳研究综述[J]. 水利水运工程学报, 2019(6): 22-30. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2019.06.003.
ZHANG Jun, JIN Weiliang, ZHANG Kai, et al. A review on fatigue research of corroded reinforcing steel bars inside reinforced concrete structures [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 22-30. DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2019.06.003.
- [21] ZHANG W P, YE Z W, GU X L, et al. Assessment of fatigue life for corroded reinforced concrete beams under uniaxial bending [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(7): 04017048. DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001778.
- [22] MA Y F, XIANG Y B, WANG L, et al. Fatigue life prediction for aging RC beams considering corrosive environments [J]. Engineering Structures, 2014, 79: 211-221. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.07.039.
- [23] ZANUY C, ALBAJAR L, DE la, FUENTE P. Sectional analysis of concrete structures under fatigue loading [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(5): 667-677. DOI: 10.14359/51663107.
- [24] SUN J Z, DING Z H, HUANG Q. Corrosion fatigue life prediction for steel bar in concrete based on fatigue crack propagation and equivalent initial flaw size [J]. Construction and Building Materials, 2019, 195: 208-217. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.056.
- [25] 夏晋. 锈蚀钢筋混凝土结构力学性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
Xia Jin. Research on mechanical properties of corroded reinforced concrete structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [26] 金伟良, 吕清芳, 赵羽习, 等. 混凝土结构耐久性设计方法与寿命预测研究进展[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(1): 7-13. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.01.002.
JIN Weiliang, LYU Qingfang, ZHAO Yuxi, et al. Research progress on the durability design and life prediction of concrete structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(1): 7-13. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2007.01.002.
- [27] 刘海, 姚继涛, 牛荻涛. 钢筋混凝土结构基于锈胀开裂寿命准则的耐久性设计方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(1): 25-31. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7930.2009.01.005.
LIU Hai, YAO Jitao, NIU Ditao. Durability design of RC structures based on the life criterion of cover cracking [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2009, 41(1): 25-31. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7930.2009.01.005.
- [28] 王胜年, 田俊峰, 范志宏. 基于暴露试验和实体工程调查的海工混凝土结构耐久性寿命预测理论和方法[J]. 中国港湾建设, 2010, 30(增刊1): 68-74.
WANG Shengnian, TIAN Junfeng, FAN Zhihong. Research on theory and method of service life prediction of marine concrete structures based on exposure test and field investigation [J]. China Harbour Engineering, 2010, 30(sup 1): 68-74.
- [29] 江楠, 邓扬, 刘扬, 等. 持续荷载与腐蚀共同作用下RC梁的抗弯刚度计算方法[J]. 公路交通科技, 2016, 33(4): 66-72. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.04.011.
JIANG Nan, DENG Yang, LIU Yang, et al. A calculation method of flexural stiffness of RC beam under sustained load coupled with corrosion [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(4): 66-72. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.04.011.

(责任编辑:薛仪;英文编辑:王佳)