

文章编号:1673-2049(2016)01-0022-08

# 腐蚀钢绞线预应力混凝土梁的弯曲疲劳性能退化特征

李富民<sup>1</sup>, 杨俊<sup>1</sup>, 施小飞<sup>1,2</sup>

(1. 中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 南通航运职业技术学院 交通工程系, 江苏 南通 226010)

**摘要:**采用与实际氯盐环境腐蚀效果更为接近的内掺盐加速腐蚀方式,制作4根不同掺盐率的钢绞线预应力混凝土梁试件并放置90 d以产生不同程度的腐蚀,然后对腐蚀梁试件进行疲劳加载直至出现断丝破坏,其中在每 $1 \times 10^5$ 次疲劳作用后进行1次静力加载试验,以考察疲劳破坏、疲劳寿命退化以及弯曲刚度退化等特征。结果表明:钢绞线表现出典型的坑蚀特征;坑蚀钢丝在疲劳作用下会出现多个疲劳裂纹,其中1个裂纹最终发展至瞬断而成为梁疲劳破坏的标志;钢丝疲劳断口呈现出典型的宏观脆性断口特征,断口表面清晰可见蚀坑区、疲劳断裂区及瞬断区;梁的疲劳寿命随掺盐率增加呈指数函数关系退化;疲劳作用导致腐蚀梁的荷载-挠度曲线由前、后2个刚度不同但都近似呈直线的区段组成;氯盐作用和疲劳作用愈强,二者叠加引起梁的刚度退化也愈显著。

**关键词:**预应力混凝土梁;钢绞线;耐久性;氯盐环境;腐蚀;疲劳;弯曲刚度

**中图分类号:** TU378

**文献标志码:** A

## Degradation Characteristics of Flexural Fatigue Property of Prestressed Concrete Beam with Corroded Steel Strand

LI Fu-min<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>, SHI Xiao-fei<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. Department of Traffic Engineering,

Nantong Shipping College, Nantong 226010, Jiangsu, China)

**Abstract:** The accelerated corrosion method of mixing salt into concrete which had a similar corrosion result with the situation of actual chloride environment was used. Four prestressed concrete beams with steel strands and different salt contents were fabricated and placed for 90 d to achieve different corrosion degrees. Then the corroded specimens were loaded in fatigue until to failure with one steel wire fracturing, and a static loading test was executed after every  $1 \times 10^5$  times fatigue loading. Based on the experiment, the characteristics of fatigue failure, fatigue life degradation and flexural rigidity degradation were studied. The results show that the steel strands are corroded in typical pitting appearance. Multiple fatigue cracks appear on the pitting corroded wires under the action of fatigue, and one of them develops to fracture ultimately and marks the failure state. The fatigue fractures of wires show typical macro-brittle characteristic. The pitting corrosion region, fatigue fracture region and final fracture region are presented clearly

收稿日期:2015-06-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51178454);徐州市科技基金项目(XM13B125)

作者简介:李富民(1972-),男,甘肃静宁人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:lfmfm@163.com。

in the fatigue fractures. The fatigue life degenerates in the exponential function law with the increase of salt content. For the influence of fatigue action, the load-deflection curve of corroded beam is changed to be composed with two approximate straight lines with different slopes. The stronger the chloride action and fatigue action are, the more prominent the rigidity of the beam degenerates.

**Key words:** prestressed concrete beam; steel strand; durability; chloride environment; corrosion; fatigue; flexural rigidity

## 0 引言

预应力混凝土结构在强度、刚度、抗裂性、疲劳性等方面具有特殊优势,因而广泛用于土木工程结构中。然而,正如普通混凝土结构一样,预应力混凝土结构也存在着严峻的耐久性问题<sup>[1]</sup>。

预应力混凝土结构耐久性退化的主要原因有 3 个:①碱-骨料反应、冻融循环作用、硫酸盐腐蚀等引起的混凝土损伤及其粘结性能退化<sup>[2-4]</sup>;②氯盐侵蚀、碳化作用等引起的预应力钢筋腐蚀损伤及其粘结性能退化<sup>[5-8]</sup>;③氯盐侵蚀、碳化作用等引起的锚固连接体系腐蚀损伤<sup>[9]</sup>等。这些材料性能的退化都会引起结构性能的退化,其中以预应力钢筋腐蚀引起的受弯构件性能退化问题最为突出。

目前,关于预应力钢筋腐蚀引起受弯构件性能退化问题的研究主要集中在静力性能上<sup>[10-11]</sup>,这显然是不够的,因为许多预应力混凝土受弯构件还会承受公路车辆、铁路列车、工业吊车等可变荷载产生的疲劳作用。单纯的力学疲劳作用可通过限制疲劳应力幅不要超过材料的疲劳极限以使构件免于疲劳破坏,但当这些构件同时受到海洋环境、除冰盐环境、浆体空腔局部潮湿环境(灌浆质量问题)等引起的电化学腐蚀作用时,腐蚀与疲劳二者将产生彼此促进和非线性发展的耦合损伤效应,钢筋的疲劳极限消失,再小的应力幅也能引起不收敛的腐蚀疲劳损伤,并最终导致腐蚀疲劳断裂<sup>[12-13]</sup>。

为了研究腐蚀与疲劳作用引起的受弯构件力学性能退化行为,试验模拟是一条必要途径;由于耗时过长,因此要作腐蚀与疲劳长期共同作用的试验模拟较为困难,几乎所有相关研究都作了大幅加速处理,即先进行加速腐蚀作用,完成后再进行加速疲劳作用。

截至目前,关于钢筋腐蚀后混凝土结构疲劳性能退化问题的研究主要针对普通混凝土结构<sup>[14-18]</sup>,对预应力混凝土结构的相关研究很少。余芳等<sup>[19]</sup>对 3 根预应力混凝土梁进行了钢绞线腐蚀后的受弯

疲劳性能退化特征试验,其中钢绞线的腐蚀采用通电加速腐蚀方式,腐蚀失重率为 0%, 4.31%, 7.89%;疲劳弯矩幅为静力极限弯矩的 35%。结果表明:钢绞线腐蚀会显著降低梁的疲劳寿命;在相同疲劳次数下,腐蚀失重率越大,受拉区非预应力钢筋的应变和梁的裂缝宽度也越大,但梁跨中挠度受腐蚀失重率的影响并不显著。余志武等<sup>[20]</sup>研究了普通钢筋腐蚀(采用通电加速腐蚀方式)后预应力混凝土桥梁疲劳破坏形态及疲劳寿命变化规律,结果表明,随普通钢筋腐蚀失重率增大,混合配筋合适的预应力混凝土梁疲劳寿命随之减少,在腐蚀失重率超过 7% 以后,容许疲劳寿命会急剧减少,容许疲劳寿命接近或低于  $2 \times 10^6$  次,且呈现出低周疲劳破坏特征。

## 1 试验方案

考虑到通电加速腐蚀方式形成的钢筋腐蚀形态(相对均匀)与实际氯盐环境引起的钢筋腐蚀形态(坑蚀特征更为显著)之间存在较大差距,本文采用与实际腐蚀效果更为接近的内掺盐加速腐蚀方式<sup>[21-22]</sup>。首先制作 4 根不同掺盐率的钢绞线预应力混凝土梁试件并放置 90 d 以产生不同程度的腐蚀,然后对腐蚀梁试件进行疲劳加载损伤直至出现断丝破坏以获取疲劳寿命并观察疲劳破坏特征;同时,每完成  $1 \times 10^5$  次疲劳作用后进行 1 次静力加载试验以考察弯曲刚度退化特征,从而综合考察腐蚀及疲劳对预应力混凝土梁受弯性能的影响。

### 1.1 腐蚀与疲劳作用设定及试件编号

试件腐蚀采用内掺盐加速腐蚀方式,腐蚀作用强度主要通过变化掺盐率来控制,即在试件浇筑时掺入占水泥质量一定百分比的氯化钠,然后在室内自然环境下腐蚀 90 d,其中前 28 d 洒水养护。腐蚀期为徐州地区冬季 11 月到次年 1 月,日平均气温为  $0^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ ,日平均空气相对湿度为 40%~50%。

试件疲劳作用强度按梁内预应力钢绞线的疲劳应力幅和加载频率控制,所有试件疲劳应力幅和加

载频率均设定为 150 MPa 和 2 Hz。

本文试验 4 根梁试件的腐蚀与疲劳作用设定及试件编号如表 1 所示。

表 1 腐蚀与疲劳作用设定及试件编号

Tab. 1 Settings of Corrosions and Fatigue Actions and Specimen Numbers

试件 编号	腐蚀作用		疲劳作用	
	掺盐率/%	腐蚀时间/d	应力幅/MPa	加载频率/Hz
B0	0	90	150	2
B1	5	90	150	2
B2	10	90	150	2
B3	15	90	150	2

1.2 试件设计与制作

本文试验采用 150 mm×150 mm×1 700 mm 的小型矩形截面预应力混凝土梁试件(图 1)。为考察预应力钢筋腐蚀引起梁的疲劳性能退化特征,受拉区纵向受力钢筋仅采用 1 根  $\phi^s15.2$  (1×7) 的 1860 级预应力钢绞线并与混凝土直接粘结接触;在此基础上,根据截面延性需求另在受压区配置 3 根  $\phi14$  的 HRB335 级受压纵筋;为了确保梁的抗剪能力高于抗弯能力,在三分点加载的 2 个端部剪跨段配制 2 根  $\phi6@80$  的 HPB235 级箍筋,同时还在这 2 个区段下部各配置 2 根  $\phi6$  的 HPB235 级纵向架立钢筋。

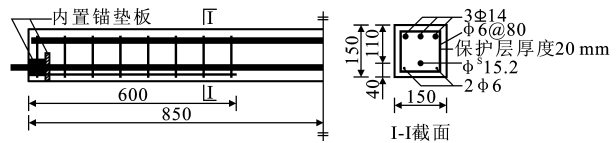


图 1 试件设计(单位:mm)

Fig. 1 Specimen Design (Unit:mm)

试件混凝土强度等级为 C30,水、水泥、砂、石子的配合比为 0.53 : 1.00 : 1.84 : 3.00。水泥采用徐州淮海水泥厂生产的巨龙牌 R42.5 普通硅酸盐水泥,砂采用徐州产河砂,石子采用徐州产碎石,其粒径为 10~20 mm,水采用徐州本地普通自来水。养护 28 d 时实测混凝土立方体抗压强度平均值为 32.4 MPa。腐蚀用盐采用市场销售的工业氯化钠;钢绞线采用徐州钢绞线厂生产的产品,普通钢筋均来自市场销售产品。

考虑到试件截面尺寸较小,为了控制截面预压应力不要过大,钢绞线的有效预拉应力设定为 700 MPa,对应的梁下边缘混凝土的有效预压应力为 9.6 MPa。

试件制作时,为使钢绞线与混凝土直接粘结接触以便于腐蚀,需要采用先张法的制作工艺。然而,

先张法工艺所形成的两端预应力传递区段长度之和将在 2 500 mm 以上,这对于仅有 1 700 mm 长的短试件来说意味着无法建立起充分、均匀的有效预应力。为此,本文试验在先张法工艺的基础上,同时还在试件 2 个端面内各设置 1 套锚具和垫板(图 1),使得预应力筋在截断回缩过程中主要依靠锚具和垫板抵压混凝土端面来建立有效预应力,如此即可获得与后张法工艺一样沿梁长分布较为均匀和充分的有效预应力。基于这种工艺及设定的有效预拉应力,通过计算确定张拉控制应力为 930 MPa。

试件主要制作过程为:首先在型钢模板上按照张拉控制应力在一端张拉钢绞线,24 h 后在另一端按同样张拉控制应力进行补张拉插垫片以减小张拉长度过短引起的锚固预应力损失<sup>[23]</sup>。然后将事先套在模板之内钢绞线上的锚垫板就位并轧紧锚具夹片使其固定在钢绞线上,再将木制端模板就位并浇筑混凝土,养护 28 d 后切断两端钢绞线以使试件获得有效预应力。

1.3 疲劳加载与静力性能试验方案

试件腐蚀 90 d 后,立即进行疲劳加载损伤。疲劳加载采用李富民等<sup>[24]</sup>发明的一种机械式疲劳试验机完成,该疲劳试验机造价低廉、能耗低、噪声小,长期工作性能稳定,能同时进行多试件、多幅值疲劳加载试验,加载频率在 3 Hz 以内无级可调。

本文试验 4 根梁试件设定了相同的疲劳应力幅和加载频率,因此采用一套共同的支承和分配系统由疲劳试验机对其进行同步疲劳加载,加载装置如图 2 所示。每根梁的支承跨度为 1 500 mm,2 个三分加载点距各自一端的支承点 500 mm。



图 2 疲劳加载装置

Fig. 2 Fatigue Loading Setup

疲劳试验机直接输出的是往复位移作用,该作用可根据梁试件的刚度换算出往复力的大小,且对力传感器监测值进行修正,然后根据预应力混凝土梁正截面受弯理论推算出预应力钢绞线的应力变化范围。本文疲劳加载试验中,预应力钢绞线的最低和最高应力分别设定为 750 MPa 和 900 MPa,对应

的每根梁两点荷载之和的最小值和最大值分别为 2.4 kN 和 44 kN。疲劳加载频率为 2 Hz,每天加载约 14 h,这样可以实现每天疲劳加载  $1 \times 10^5$  次。另外,每疲劳加载  $1 \times 10^5$  次后停机做 1 次静载试验,直至钢绞线出现疲劳断裂后停止疲劳加载。

静力性能试验采用与疲劳加载相同的三分点加载方案,但对每个试件分别进行独立加载及测试。静力加载仍然在疲劳加载原位进行,采用手动千斤顶进行加载,机械式百分表人工读取并记录梁的挠度值。每次疲劳加载后的静力加载均从 0 kN 开始分级加载,每加载至 1,5,10,15,⋯,40,44 kN(疲劳加载最大荷载值)时,持荷 2 min 后读取百分表读数。

## 2 弯曲疲劳破坏特征

不管是腐蚀梁还是未腐蚀梁,疲劳加载初期几个循环即导致纯弯段全面出现垂直裂缝,平均裂缝间距在 150 mm 左右,裂缝随加载、卸载过程而张开和闭合;全程疲劳加载循环以及静力加载中,裂缝数量基本保持恒定,裂缝宽度和深度逐渐缓慢增大,但直到钢绞线出现疲劳断裂破坏前裂缝最大宽度也均未超过 0.3 mm,说明梁端锚垫板的使用较好地保持了全梁内的预应力水平,且预应力钢绞线保持了良好的弹性性能。

当疲劳加载循环次数增加到一定数量时,钢绞线钢丝会发生疲劳断裂;断丝时伴随着清晰可辨的声响,此即为梁达到疲劳寿命的标志,疲劳加载就此停止。

将破型试件取出钢绞线,可以观察到钢绞线典型的坑蚀特征,如图 3 所示。

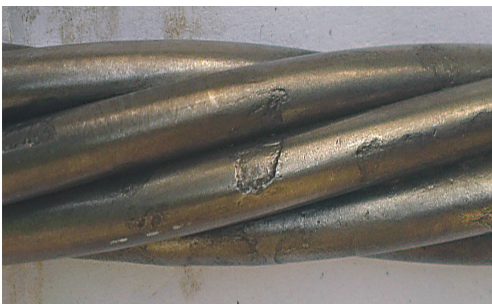
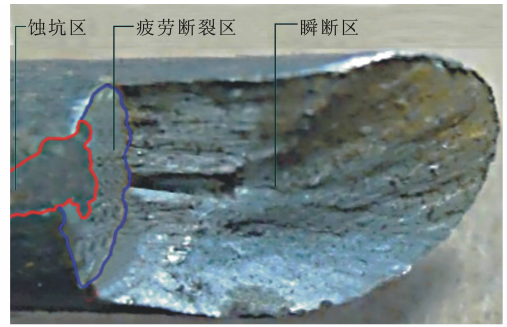


图 3 钢绞线典型坑蚀特征  
Fig. 3 Typical Pitting Corrosion  
Characteristic of Steel Strand

钢丝断口全部呈现出典型的宏观脆性断口特征,断口附近没有明显颈缩变形,整个断口表面清晰可见蚀坑区、疲劳断裂区及瞬断区[图 4(a)],这与



(a) 拉伸疲劳断口



(b) 静力拉伸断口

图 4 腐蚀钢绞线钢丝断口

Fig. 4 Fractures of Wire in Corroded Steel Strands

腐蚀钢绞线的静力拉伸断口特征明显不同,后者往往呈现出明显的颈缩变形及铣刀式或杯锥式断口形貌等典型宏观延性断口特征[图 4(b)]<sup>[25]</sup>。

另外,除了所有试件钢绞线存在 1 根断丝之外,有些试件钢绞线中还存在清晰可见的疲劳裂纹却没有发生瞬断的钢丝(图 5),说明腐蚀钢绞线在疲劳应力作用下会在多个部位引起疲劳裂纹的形核和扩展,这与未腐蚀钢筋主要在一处引起疲劳损伤发展差别明显。

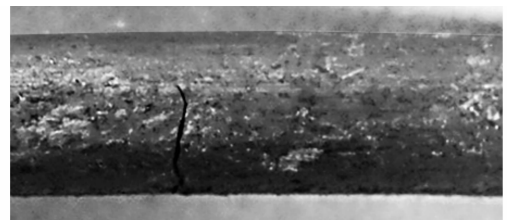


图 5 腐蚀钢绞线钢丝疲劳裂纹

Fig. 5 Fatigue Crack of Wire in Corroded Steel Strand

## 3 弯曲疲劳寿命退化特征

本文试验中 4 根梁的疲劳寿命随掺盐率增大而退化的特征如图 6 所示。由图 6 可以看出,钢绞线腐蚀对其疲劳寿命影响非常显著。随掺盐率增加,疲劳寿命呈指数函数关系退化,即腐蚀程度较轻时,疲劳寿命即出现迅速缩短的趋势,而随着腐蚀程度



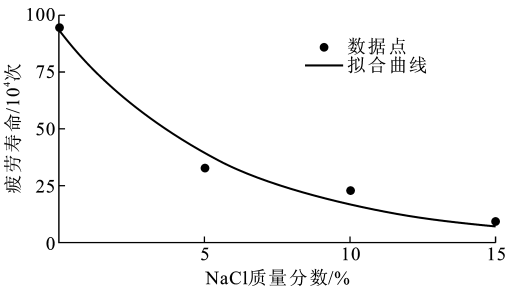


图 6 疲劳寿命随掺盐率增大而退化的特征  
Fig. 6 Degradation Characteristic of Fatigue Life with Salt Content Increasing

逐渐增大,疲劳寿命缩短的速率却在逐渐减慢。

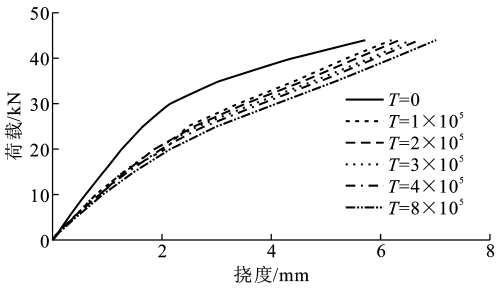
同所有金属材料疲劳断裂问题一样,钢绞线的疲劳断裂寿命主要由疲劳裂纹孕育期和扩展期共同组成,其中前者占绝大部分;另一方面,钢绞线在氯盐腐蚀下具有典型的坑蚀特征,而且即使在轻微腐蚀条件下也能形成较为显著的蚀坑<sup>[26]</sup>,这些蚀坑非常有利于疲劳裂纹的孕育和形成,因而大幅缩短孕育期的时长,从而大幅缩短整个疲劳断裂寿命;与轻微腐蚀相比,更严重的腐蚀主要体现在老蚀坑的长大和新蚀坑的形成上,而这样的变化对加速疲劳裂纹的孕育和形成作用并不显著,因而对缩短整个疲劳断裂寿命的作用也不显著。

#### 4 弯曲刚度退化特征

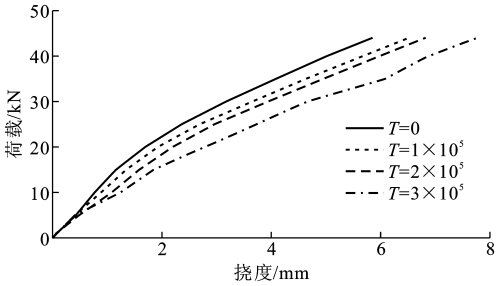
预应力混凝土梁的弯曲刚度是其正常使用性能的一个重要指标。腐蚀和疲劳单独作用都会引起梁内钢筋和混凝土的损伤,因而都会引起梁的弯曲刚度退化;对于已经发生腐蚀的预应力混凝土梁,进一步的疲劳作用还会放大损伤效应,这必然会体现在弯曲刚度退化的特征上。

各试件在不同腐蚀条件和疲劳条件下的荷载-挠度曲线分别见图 7,8。疲劳及腐蚀对最大荷载挠度的影响见图 9。下面据此分析腐蚀及疲劳作用引起预应力混凝土梁弯曲刚度退化的特征。

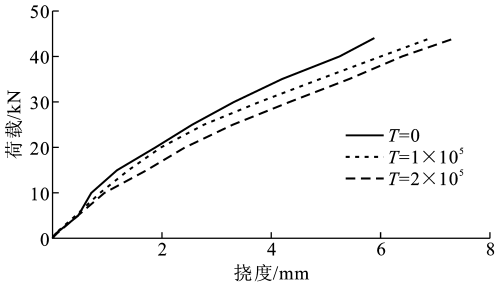
(1)各掺盐率试件在不同疲劳次数  $T$  下的荷载-挠度曲线均由一个较为明显的过渡区将其分为刚度不同的 2 段,前半段刚度大于后半段。该过渡区对于未经受疲劳作用的试件荷载-挠度曲线[图 8(a)]而言,应是开裂引起的刚度速变;对于经受过疲劳作用的试件荷载-挠度曲线[图 8(b),(c),(d)],由于疲劳荷载已经导致试件开裂,因而应是消压引起的刚度速变。另外,疲劳作用对试件荷载-挠度曲线后半段的形状带来较为明显的变化,未经受过疲劳作用的试件持续向挠度轴弯曲,体现了塑性变形



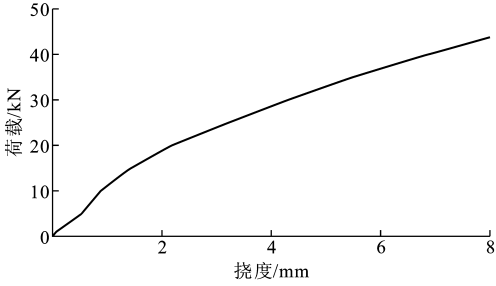
(a) 试件B0(未腐蚀)



(b) 试件B1(掺盐率为5%,腐蚀90 d)



(c) 试件B2(掺盐率为10%,腐蚀90 d)



(d) 试件B3(掺盐率为15%,腐蚀90 d,  $T=0$ )

图 7 试件在不同腐蚀条件下的荷载-挠度曲线  
Fig. 7 Load-deflection Curves of Specimens Under Different Corrosion Conditions

发展的特征;经受过疲劳作用的试件基本呈直线形状,说明前期的疲劳作用已经消除了受压区混凝土的塑性变形,从而使整个试件呈现近似弹性的工作特征。

(2)随疲劳次数增大,各掺盐率试件的荷载-挠度曲线均呈现出向挠度轴方向旋转的趋势(图 7),同时,最大荷载挠度也随之增大[图 9(a)]。这说明疲劳作用会引起预应力混凝土梁的弯曲刚度衰减。前文已述及,疲劳作用可以消除受压区混凝土的塑性变形而使其处于近似弹性工作状态,因此,梁整体

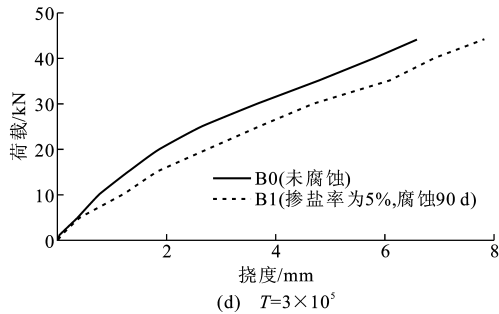
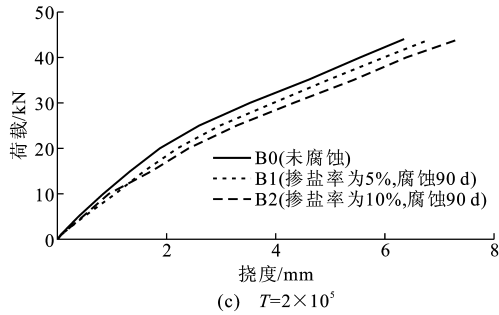
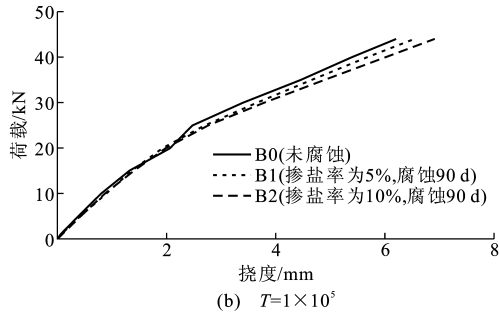
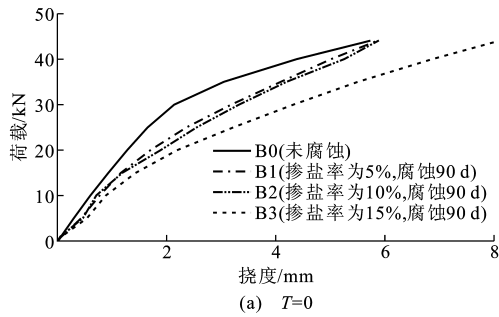


图 8 试件在不同疲劳条件下的荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection Curves of Specimens Under Different Fatigue Conditions

刚度退化并非来自材料刚度的退化,而应来自疲劳引起裂缝深度扩展继而引发截面刚度的衰减。

(3)随掺盐率的增大,各疲劳次数下试件的荷载-挠度曲线均呈现出向挠度轴方向旋转的趋势(图 8),同时最大荷载挠度也随之增大[图 9(b)]。这说明氯盐的腐蚀作用会引起预应力混凝土梁的弯曲刚度衰减。本文试验所有试件湿养护 28 d 时,混凝土孔隙液仍接近饱和状态,掺入的氯化钠也处于溶解状态,不会产生孔隙压力,因此,此时掺盐试件与不掺盐试件的强度和弹性模量基本一致;放置 90 d 的

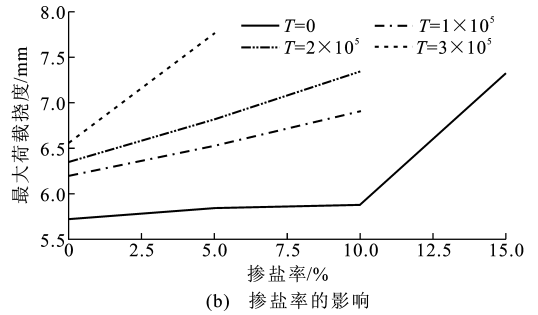
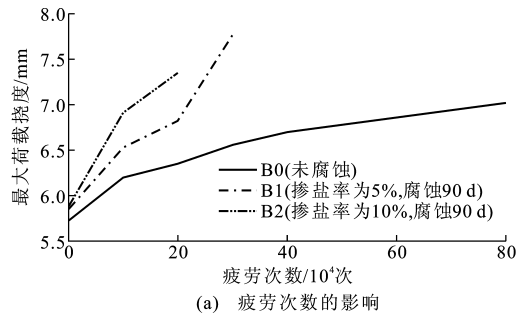


图 9 疲劳和腐蚀对最大荷载挠度的影响

Fig. 9 Influences of Fatigue and Corrosion on Deflection Under Maximum Load

过程中,所有试件混凝土孔隙水必然会逐渐减少,而引起部分掺入的氯化钠出现结晶而在混凝土孔隙内产生结晶压力,这会引起混凝土的损伤而降低其弹性模量;另一方面,钢筋的腐蚀也会产生锈胀力,这也会引起混凝土弹性模量降低。上述 2 个方面应是氯盐引起弯曲刚度衰减的主要原因。

(4)腐蚀作用和疲劳作用愈强,二者叠加引起的刚度退化也愈显著,如图 7,8 所示,随掺盐率或疲劳次数的增大,相邻疲劳次数曲线之间或相邻掺盐率曲线之间的间距总体呈增大趋势;由图 9 可知,随掺盐率或疲劳次数的增大,最大荷载挠度随疲劳次数或掺盐率增大的速率(曲线斜率)也在增大。这都从不同角度验证了上述刚度退化特征。

## 5 结 语

(1)采用与实际氯盐环境腐蚀效果更为接近的内掺盐加速腐蚀方式进行腐蚀,钢绞线表现出典型的坑蚀特征,从而引起预应力混凝土梁弯曲疲劳性能显著退化。

(2)全程疲劳作用下,腐蚀梁裂缝数量基本保持恒定,裂缝宽度和深度逐渐缓慢增大。

(3)腐蚀钢绞线在疲劳应力作用下会在多根钢丝、多个部位引起疲劳裂纹的形核和扩展,其中必有 1 根钢丝发生了疲劳断裂而成为梁疲劳破坏的标志,此时还有一些钢丝具有清晰的疲劳裂纹但却没

有发生最终瞬断。钢丝疲劳断口全部呈现出典型的宏观脆性断口特征,断口表面清晰可见蚀坑区、疲劳断裂区及瞬断区。

(4)钢绞线腐蚀对预应力混凝土梁的疲劳寿命影响非常大,随着掺盐率增加,疲劳寿命呈指数函数关系退化,当腐蚀程度较弱时,疲劳寿命即出现迅速缩短的趋势,但随着腐蚀程度逐渐增大,疲劳寿命缩短的速率却在逐渐减慢。

(5)腐蚀钢绞线预应力混凝土梁疲劳损伤后的荷载-挠度曲线由一个较为明显的过渡区将其分为刚度不同的 2 段,前半段刚度大于后半段,且由于疲劳作用消除了受压区混凝土的塑性变形,导致后半段曲线形状也近似呈直线。

(6)氯盐的腐蚀作用与疲劳作用均会引起预应力混凝土梁的弯曲刚度衰减。氯盐作用和疲劳作用愈强,二者叠加引起梁的刚度退化也愈显著。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 李富民,邓天慈,王江浩,等. 预应力混凝土结构耐久性研究综述[J]. 建筑科学与工程学报,2015,32(2): 1-20.  
LI Fu-min, DENG Tian-ci, WANG Jiang-hao, et al. Review of Research on Durability of Prestressed Concrete Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(2): 1-20.
- [2] LARSON N A, BAYRAK O, JIRSA J O. Effects of Alkali-silica Reaction and Delayed Ettringite Formation on Anchorage of Prestressing Strands in Trapezoidal Box Beams with Dapped Ends[J]. PCI Journal, 2012, 57(3): 119-131.
- [3] 曹大富,秦晓川,袁沈峰. 冻融后预应力混凝土梁受力全过程试验研究[J]. 土木工程学报,2013,46(8): 38-44.  
CAO Da-fu, QIN Xiao-chuan, YUAN Shen-feng. Experimental Study on Mechanical Behaviors of Prestressed Concrete Beams Subjected to Freeze-thaw Cycles[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(8): 38-44.
- [4] 朱兰芳,曹大富. 预应力混凝土梁受硫酸盐腐蚀后的力学性能研究[J]. 混凝土,2009(6): 28-30.  
ZHU Lan-fang, CAO Da-fu. Mechanics Property of Prestressed Concrete Beams After Corrosion of Sulfate[J]. Concrete, 2009(6): 28-30.
- [5] 李富民,袁迎曙,杜健民,等. 氯盐腐蚀钢绞线的受拉性能退化特征[J]. 东南大学学报:自然科学版,2009, 39(2): 340-344.

- LI Fu-min, YUAN Ying-shu, DU Jian-min, et al. Deterioration of Tensile Behavior of Steel Strands Corroded by Chloride[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(2): 340-344.
- [6] LI F M, YUAN Y S. Effects of Corrosion on Bond Behavior Between Steel Strand and Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 413-422.
- [7] 李富民,袁迎曙. 腐蚀钢绞线预应力混凝土梁的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,31(2): 78-84.  
LI Fu-min, YUAN Ying-shu. Experimental Study on Bending Property of Prestressed Concrete Beams with Corroded Steel Strands[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 78-84.
- [8] ROGERS R A, WOTHERSPOON L, SCOTT A, et al. Residual Strength Assessment and Destructive Testing of Decommissioned Concrete Bridge Beams with Corroded Pretensioned Reinforcement[J]. PCI Journal, 2012, 57(3): 100-118.
- [9] 朱尔玉,王冰伟,周勇政,等. 酸雨对预应力体系腐蚀的试验研究[J]. 水利学报,2012,43(11): 1365-1372.  
ZHU Er-yu, WANG Bing-wei, ZHOU Yong-zheng, et al. Experimental Study of Acid Rain Corrosion to the Prestressed System[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(11): 1365-1372.
- [10] CORONELLI D, CASTEL A, VU N A, et al. Corroded Post-tensioned Beams with Bonded Tendons and Wire Failure [J]. Engineering Structures, 2009, 31(8): 1687-1697.
- [11] 李富民,袁迎曙,王 波,等. 腐蚀钢绞线预应力混凝土梁受弯承载力评估[J]. 建筑结构学报,2011,32(2): 10-16.  
LI Fu-min, YUAN Ying-shu, WANG Bo, et al. Evaluating on Flexural Strength of Prestressed Concrete Beams with Corroded Steel Strands [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 10-16.
- [12] ACI. Corrosion of Prestressing Steels[R]. Farmington Hills: ACI, 2001.
- [13] SALAS R M, SCHOKKER A J, WEST J S, et al. Corrosion Risk of Bonded, Post-tensioned Concrete Elements[J]. PCI Journal, 2008, 53(1): 89-107.
- [14] 王海超,贡金鑫,曲秀华. 钢筋混凝土梁腐蚀后疲劳性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2005,38(11): 32-37, 101.  
WANG Hai-chao, GONG Jin-xin, QU Xiu-hua. An Experimental Study on the Fatigue Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 32-37, 101.

- [15] YI W J, KUNNATH S K, SUN X D, et al. Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams with Corroded Steel Reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 2010, 107(5): 526-533.
- [16] 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.  
WU Jin, WANG Chen-xia, 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.
- [17] 唐小祝, 于卫国. 预应力混凝土上拱度分析及控制[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10): 267-269.  
TANG Xiao-zhu, YU Wei-guo. Analysis and Control of Deflection Upwards of Prestressed Concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(10): 267-269.
- [18] KASHANI M M, ALAGHEBAND P, KHAN R, et al. Impact of Corrosion on Low-cycle Fatigue Degradation of Reinforcing Bars with the Effect of Inelastic Buckling [J]. International Journal of Fatigue, 2015, 77: 174-185.
- [19] 余 芳, 贾金青, 宋玉普. 钢绞线腐蚀后的部分预应力混凝土梁抗弯疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(1): 97-100.  
YU Fang, JIA Jin-qing, SONG Yu-pu. Experimental Research on Fatigue Behavior of Prestressed Concrete Beams with Corroded Steel Strands [J]. Building Structure, 2012, 42(1): 97-100.
- [20] 余志武, 李进洲, 宋 力. 普通钢筋锈蚀后预应力混凝土桥梁疲劳试验研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(4): 64-72, 93.  
YU Zhi-wu, LI Jin-zhou, SONG Li. Experimental Study on Fatigue Behaviors of PC Bridge Beams with Corroded Steel Bars [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(4): 64-72, 93.
- [21] YUAN Y S, JI Y H, SHAH S P. Comparison of Two Accelerated Corrosion Techniques for Concrete Structures[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(3): 344-347.
- [22] 李富民, 袁迎曙. 氯盐环境下混凝土内钢绞线的锈蚀特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(4): 23-28.  
LI Fu-min, YUAN Ying-shu. Corrosion Behaviour of Steel Strand in Concrete Under Chloride Environment [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(4): 23-28.
- [23] 李富民. 预应力混凝土结构耐久性研究的若干试验技术[J]. 徐州工程学院学报: 自然科学版, 2013, 28(2): 33-40.  
LI Fu-min. Some Experimental Techniques for Study of the Durability of PC Structures [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology: Natural Sciences Edition, 2013, 28(2): 33-40.
- [24] 李富民, 范 力, 袁迎曙. 一种加载疲劳试验机: 中国, CN 102262004A[P]. 2011-11-30.  
LI Fu-min, FAN Li, YUAN Ying-shu. A Load Fatigue Test Machine: China, CN 102262004A [P]. 2011-11-30.
- [25] 李富民, 袁迎曙. 锈蚀钢绞线的静力拉伸断裂特性[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2007, 37(5): 904-909.  
LI Fu-min, YUAN Ying-shu. Fracture Behaviour of Corroded Steel Strands Under Static Tension [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(5): 904-909.
- [26] 李富民, 袁迎曙. 氯盐腐蚀钢绞线蚀坑几何尺寸的分布特征[J]. 煤炭学报, 2011, 36(11): 1826-1831.  
LI Fu-min, YUAN Ying-shu. Distributing Character of Size of Pits on Steel Strands Corroded by Chloride [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1826-1831.