

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.062



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



锈蚀 PC 梁疲劳寿命预测及界面滑移区量化研究

戴理朝¹, 刘静瑾¹, 涂荣辉², 王磊¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 长沙 410114; 2. 浙江省交通工程管理中心, 杭州 310023)

摘要:重复荷载和锈蚀共同作用会造成预应力混凝土(PC)构件疲劳损伤,降低其使用寿命。以钢绞线疲劳裂纹扩展尺寸、混凝土疲劳累积残余应变为损伤参数,综合考虑钢绞线疲劳裂纹扩展、界面锈蚀疲劳粘结退化及混凝土疲劳损伤的影响,提出考虑力筋残余应变的粘结滑移区不协调变形量化方法及锈蚀PC梁疲劳寿命预测方法。然后通过试验数据验证预测方法的合理性,并讨论不同预应力、锈蚀程度和应力水平作用下锈蚀PC梁界面疲劳粘结滑移情况。结果表明:提出的预测方法可有效预测界面滑移情况及锈蚀PC梁的疲劳寿命;预应力大小是影响锈蚀PC梁发生疲劳粘结滑移的重要参数,随着锈蚀率、应力水平的提高,构件易发生疲劳粘结滑移,而预应力的增大可有效减少界面疲劳粘结滑移的发生;在高应力水平下更严重的应变不协调会导致更大的残余滑移,滑移量曲线及其斜率随着应力水平的提高而整体抬升、变陡。

关键词:预应力混凝土;锈蚀;疲劳寿命;应力水平;粘结滑移

中图分类号:TU378.2 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)04-0088-12

Fatigue life prediction and interface slip zone quantitative study of corroded PC beams

DAI Lizhao¹, LIU Jingjin¹, TU Ronghui², WANG Lei¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China;

2. Traffic Engineering Management Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310023, P. R. China)

Abstract: The combined effects of repeated load and corrosion could cause fatigue damage of prestressed concrete (PC) beams, which would reduce their service life. The fatigue crack growth size of strand and cumulative residual strain of concrete were taken as damage parameters in the present study, a quantitative method of uncoordinated deformation in bond-slip zone considering the residual strain of strands and steel bars and a fatigue life prediction method of corroded PC beams were proposed. The methods comprehensively consider the influence of fatigue crack growth of steel strand, interface corrosion fatigue bond degradation and

收稿日期:2023-02-28

基金项目:国家自然科学基金(52008035、52278140);国家重点研发计划(2021YFB2600900);湖南省自然科学基金(2020JJ1006、2021JJ40574);湖南省研究生科研创新项目(CX20210779)

作者简介:戴理朝(1989-),男,博士,副教授,主要从事桥梁耐久性研究,E-mail:lizhaod@csust.edu.cn。

王磊(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:leiwang@csust.edu.cn。

Received: 2023-02-28

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52008035, 52278140); National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2600900); Natural Science Foundation of Hunan Province (Nos. 2020JJ1006, 2021JJ40574); Postgraduates Scientific Research Innovation Project of Hunan Province (No. CX20210779)

Author brief: DAI Lizhao (1989-), PhD, associate professor, main research interest: bridge durability, E-mail: lizhaod@csust.edu.cn.

WANG Lei (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: leiwang@csust.edu.cn.

fatigue damage of concrete. Then the rationality of the fatigue life prediction method was verified by experimental data, and the interfacial fatigue bond-slip of corroded PC beams under different prestresses, corrosion degrees and stress levels were discussed. Results show that the proposed methods can effectively predict the interface slip and the fatigue life of corroded PC beams. The prestress is an important parameter that affects the fatigue bond-slip of corroded PC beams. With the increase of corrosion loss and stress level, the specimen is prone to occur the fatigue bond-slip, and the increase of prestress force can effectively reduce the interfacial fatigue bond-slip. At the high stress levels, the more serious strain incompatibility would lead to more residual slip, the slip curve and its slope would rise and steepen as the stress level increases.

Keywords: prestressed concrete; corrosion; fatigue life; stress level; bond-slip

预应力混凝土结构因自重轻、强度高、整体密实性好等特点,长期以来被认为具有良好的粘结性能和服役能力。既有桥梁结构处于侵蚀环境下,其内部的力筋易受氯离子侵蚀而发生锈蚀,产生蚀坑。桥梁结构又一直承受车辆荷载、风浪荷载等的重复作用,蚀坑作为潜在的疲劳源,在循环荷载作用下,裂纹易从蚀坑处衍生,导致结构性能劣化^[1]。此外,循环荷载和力筋锈蚀均会导致界面粘结性能退化,产生界面滑移。力筋与混凝土间的界面滑移会导致力筋产生残余应变,增大力筋的实际应力,可能使PC梁在预期使用寿命前就发生疲劳破坏,危及结构安全和使用寿命。

一些学者对预应力混凝土梁进行了疲劳试验研究,分析了疲劳荷载下正截面破坏形态、裂缝宽度、挠度变化规律及疲劳寿命。Zhang等^[2]通过预应力混凝土梁的锈蚀疲劳试验,发现疲劳荷载会导致钢绞线在形成蚀坑的最小横截面处发生疲劳断裂。余芳等^[3]通过轴向拉伸疲劳试验发现,锈蚀严重影响钢绞线的疲劳寿命,相同荷载下疲劳寿命的衰减随锈蚀率增大呈指数关系变化。Du等^[4]通过开展预应力混凝土梁疲劳试验,发现PC梁的疲劳破坏模式是底部受拉钢筋在纯弯曲截面上的疲劳断裂,在等幅疲劳荷载作用下,主裂纹宽度、刚度退化和最大位移均表现出三阶段的发展规律。

上述研究主要讨论的是锈蚀PC梁在疲劳荷载下的疲劳寿命及破坏形态,关于其在疲劳荷载下界面粘结滑移的研究甚少。Mohandoss等^[5]通过试验研究了预应力混凝土结构中混凝土抗压强度、预应力和钢绞线的嵌入长度对粘结应力-滑移行为的影响。Lin等^[6]考虑混凝土保护层、箍筋和腐蚀电流密度的影响,建立了粘结强度退化的经验模型。张建仁等^[7]通过开展试验,研究了锈蚀对钢绞线与混凝土界面间粘结性能的影响,研究结果表明,钢绞线锈蚀会降低界面粘结性能,粘结应力峰值随试件锈胀裂缝宽度的增加而降低。然而研究针对的是静载下试件粘结滑移的变化规律。疲劳荷载作用下

钢绞线会因其往复作用而产生残余应变,其粘结滑移变化与静载时不同。因此,静载情况下的粘结滑移分析方法并不适用于疲劳荷载下粘结滑移的研究,有必要对现有静载粘结滑移分析方法进行优化,使其适用于疲劳荷载作用下的界面滑移分析。

此外,现有疲劳寿命计算模型大多只考虑单一影响因素。如基于Paris公式,通过考虑锈蚀引起的疲劳裂纹萌生和疲劳裂纹扩展,计算给定频率下的疲劳寿命^[8-9];或根据试验数据,拟合出锈蚀钢绞线的S-N曲线来预测疲劳寿命^[10-11];又或是建立重复荷载作用下锈胀开裂试件的局部粘结应力-滑移本构关系模型,推导得到粘结疲劳寿命^[12]。考虑单一影响因素并不能准确反映混凝土结构在实际情况中的应力状态,锈蚀PC梁疲劳劣化是一个多因素共同作用的过程。腐蚀和疲劳的共同作用会引起界面间粘结强度退化、PC梁受压区混凝土疲劳损伤、蚀坑根部应力集中等。这些均会导致PC梁内部出现应力重分布,增大混凝土和力筋的实际应力,加快疲劳裂纹扩展速率,使PC梁可能在未达到预期使用寿命就发生疲劳破坏。因此,有必要同时考虑多种因素,以提高锈蚀PC梁疲劳寿命预测的准确性。

笔者提出可综合考虑钢绞线疲劳裂纹扩展、界面锈蚀疲劳粘结退化及混凝土疲劳损伤影响的疲劳寿命预测方法,即通过考虑疲劳荷载导致的蚀坑根部应力集中、界面锈蚀疲劳粘结退化导致的应变不协调以及混凝土疲劳损伤带来的残余应变对结构应力及钢绞线裂纹扩展速率的影响,以提高锈蚀PC梁疲劳寿命预测精度。然后,通过锈蚀PC梁疲劳试验数据验证该方法的合理性。最后,分析不同预应力、锈蚀程度和应力水平对锈蚀PC梁界面粘结滑移的影响。

1 锈蚀PC梁疲劳寿命预测方法

1.1 锈蚀PC梁疲劳寿命全过程分析

已有的疲劳寿命计算模型大多考虑单一因素,

容易造成混凝土构件疲劳寿命预测误差大。以钢绞线疲劳裂纹扩展尺寸和混凝土疲劳累积残余应变为疲劳损伤参数,考虑疲劳荷载下锈坑根部应力集中、界面锈蚀疲劳粘结退化及混凝土疲劳损伤对结构应力及钢绞线裂纹扩展速率的影响,提出多因

素作用下锈蚀PC梁疲劳寿命计算方法,可提高锈蚀PC梁疲劳寿命预测的准确性。

锈蚀PC梁的疲劳寿命可分成3个阶段:疲劳裂纹初始阶段、稳定扩展阶段和结构失效阶段^[13]。图1为锈蚀PC梁的疲劳劣化过程。

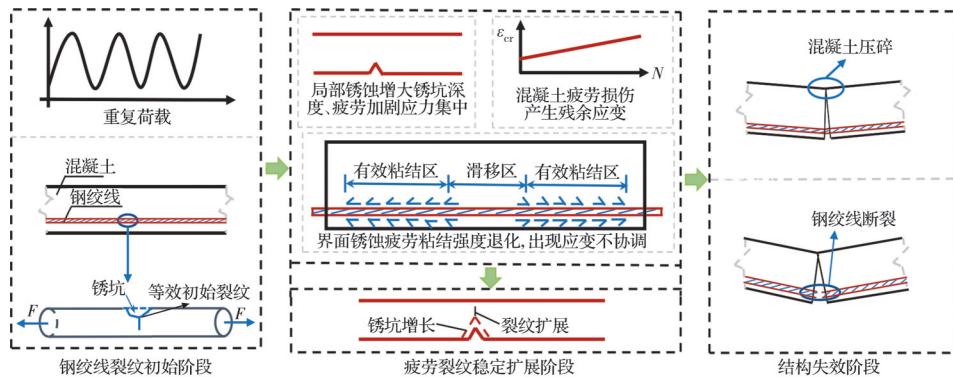


图1 锈蚀PC梁疲劳劣化过程

Fig.1 Fatigue degradation process of corroded PC beams

第1阶段:疲劳裂纹初始阶段。钢绞线在腐蚀环境下表面易产生蚀坑,伴随着重复荷载作用,容易导致锈坑根部应力集中,从而加剧疲劳裂纹在锈坑根部的扩展。基于等效初始裂纹尺寸概念^[14],将钢绞线锈蚀后形成的锈坑模拟为钢绞线表面裂纹,确定等效初始裂纹尺寸。

第2阶段:疲劳裂纹稳定扩展阶段。锈蚀和重复荷载的共同作用使锈坑根部产生应力集中,加剧裂纹扩展,导致界面间发生疲劳粘结强度退化,引起钢绞线与混凝土间出现变形不协调。同时,受压区混凝土也会随着循环次数的增加积累疲劳损伤,导致材料力学性能不断降低,从而降低PC梁的疲劳受力性能。因此,在此阶段综合考虑疲劳荷载导致的锈坑根部应力集中、粘结强度退化导致的力筋残余应变以及混凝土疲劳损伤带来的残余应变对结构应力及钢绞线裂纹扩展速率的影响。

第3阶段:结构失效阶段。以钢绞线疲劳裂纹扩展尺寸和混凝土疲劳累积残余应变为疲劳损伤参数,判断结构失效模式,并根据裂纹扩展寿命计算公式得到锈蚀PC梁疲劳寿命。

1.2 锈蚀钢绞线疲劳裂纹扩展模型

在氯离子含量高的腐蚀性环境作用下,氯离子、空气中的水分和力筋三者之间极易发生电化学作用,造成功筋锈蚀。由于空间环境、混凝土骨料和保护层厚度等的不均匀性,钢绞线锈蚀具有非均匀特征。一些学者通过试验研究表明,钢绞线锈蚀后会表现出典型的局部坑蚀特征,并在坑蚀位置处形成较为明显的应力集中区域,使锈蚀力筋处于不利位置^[15-16]。蚀坑作为潜在的疲劳源,在循环荷载

作用下裂纹容易从蚀坑处衍生,形成裂纹扩展区,最终导致锈蚀钢绞线疲劳断裂。

现有关于疲劳裂纹扩展的研究多集中于钢筋和钢丝方面,关于预应力钢绞线腐蚀裂纹扩展的研究甚少。钢绞线由7根钢丝捻制而成,故采用钢丝疲劳裂纹扩展模型进行分析。钢丝的裂纹扩展模型可分为3个区域^[17],分别为近门槛区(I区)、中部稳态扩展区(II区)和快速扩展区(III区),3个区域的裂纹扩展速率依次递增。

裂纹扩展Paris公式适用于II区的宏观裂纹发展,难以反映近门槛区的材料疲劳行为。而实际服役环境中的结构普遍存在小于或接近于门槛值的疲劳载荷。为考虑小幅载荷对钢绞线疲劳寿命的影响,采用由Donahue^[18]改进的裂纹扩展速率公式计算I、II区裂纹扩展,其表达式为

$$da/dN = C(\Delta K - \Delta K_{th})^m \quad (1)$$

式中: da/dN 为裂纹扩展速率; C 、 m 分别为裂纹扩展的系数和指数,一般情况下可通过试验数据拟合得到; ΔK_{th} 为裂纹扩展门槛值,需考虑应力比 R 对其的影响; ΔK 为应力强度因子幅值; a 为裂纹深度; N 为疲劳荷载循环次数。

对式(1)进行移项积分,可得裂纹扩展寿命的计算表达式

$$N_s = \int_0^{N_s} dN = \int_{a_i}^{a_c} \frac{1}{C(\Delta K - \Delta K_{th})^m} da \quad (2)$$

式中: a_i 为等效初始裂纹尺寸; a_c 为临界裂纹尺寸。

采用Liu等^[19]提出的应力强度因子幅值 ΔK 计算式,其适用于存在长裂纹的寿命预测及裂纹扩展分析,如式(3)所示。

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{\pi \left\{ a + d \left[1 - \exp \left(-\frac{a}{d} (K_t^2 - 1) \right) \right] \right\}} \quad (3)$$

式中: $\Delta \sigma$ 为钢绞线应力幅值,MPa; a 为裂纹深度; d 为坑深; K_t 为应力集中系数。

采用Cerit等^[20]所得的应力集中有限元分析数据进行拟合,建立坑深与应力集中系数的关系表达式,见式(4)。

$$K_t = 2.663 \times (d + 0.0624)^{0.353} \quad (4)$$

式中: K_t 为应力集中系数; d 为坑深, $d=0.5D(1-\sqrt{1-\eta})$,其中 D 为钢绞线直径, η 为钢绞线的锈蚀率。

1.3 锈蚀钢绞线与混凝土界面疲劳粘结退化评估

1.3.1 锈蚀钢绞线与混凝土界面疲劳粘结应力

锈蚀和重复荷载均会导致粘结强度退化,故锈蚀钢绞线在经历疲劳荷载循环后的有效粘结应力需重新确定。考虑锈蚀和疲劳对粘结应力的影响,在未锈蚀钢绞线平均粘结应力的基础上分别乘以锈蚀退化系数及疲劳退化系数,以获取经历 n 次疲劳荷载循环的锈蚀钢绞线平均粘结应力。

采用Wang等^[21]提出的等效双折线模型进行未锈蚀钢绞线平均粘结应力 τ_{ave} 的计算,该模型中粘结应力的非线性增加段和线性递减段均采用平均粘结应力表示,并采用Wang等^[21]建立的锈蚀钢绞线与混凝土间粘结应力随锈蚀率的退化预测模型,见式(5)。

$$R_c(\eta) = \begin{cases} 1.0, & \eta \leqslant 6\% \\ 2.03e^{-0.118\eta}, & \eta > 6\% \end{cases} \quad (5)$$

式中: $R_c(\eta)$ 为考虑锈蚀影响的归一化粘结强度,即锈蚀钢绞线与未锈蚀钢绞线的粘结强度比值; η 为钢绞线的锈蚀率。

疲劳会导致粘结性能逐渐恶化,甚至导致疲劳粘结失效。现有关于疲劳荷载对粘结强度影响的研究多集中于钢筋,对钢绞线的研究甚少,故采用反映疲劳荷载与钢筋粘结强度关系的公式进行计算,如式(6)所示^[22]。

$$R_f(n) = \begin{cases} 1.0, & \lg n \leqslant 4 \\ -0.0685 \lg n + 1.274, & \lg n > 4 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $R_f(n)$ 为考虑疲劳荷载循环次数影响的归一化粘结强度,即经历 n 次疲劳荷载循环的钢筋粘结强度与未经历疲劳作用的钢筋粘结强度的比值。

综合上述表达式,经历 n 次疲劳荷载循环的锈蚀钢绞线平均粘结强度如式(7)所示。

$$\tau_{ave,n} = R_c(\eta) R_f(n) \tau_{ave} \quad (7)$$

故经历 n 次疲劳荷载循环的锈蚀钢绞线与混凝土间的有效粘结力可表示为

$$F_{eb} = l_{eb} L_p \tau_{ave,n} \quad (8)$$

式中: F_{eb} 为锈蚀钢绞线与混凝土间的有效粘结力; l_{eb} 为有效粘结长度; L_p 为钢绞线截面周长。

1.3.2 考虑力筋残余应变的滑移区不协调变形量化方法

疲劳初期,钢绞线与混凝土间粘结强度较大,钢绞线所受拉力可能小于有效粘结力和有效预拉力之和,此时基本没有滑移发生,钢绞线与混凝土间的变形满足平截面假定。随着疲劳次数的增加,界面间粘结强度不断退化,当钢绞线所受拉力大于有效粘结力和有效预拉力之和时,钢绞线与混凝土间便会出现滑移,导致钢绞线与混凝土间的变形存在不协调现象^[23]。在重复荷载的作用下,力筋与混凝土间的粘结滑移会导致力筋出现残余应变,进而使结构中力筋的应力分布发生变化,改变结构的受力性能和疲劳性能,造成结构承载力下降,疲劳寿命减短。因此,须考虑界面滑移导致的残余应变对PC梁疲劳寿命评估的影响。

假定循环 n 次时粘结滑移区内根据平截面假定得到的钢绞线和钢筋应变分别为 $\epsilon_p(n)$ 和 $\epsilon_s(n)$,则疲劳荷载循环 n 次时,考虑残余应变的钢绞线与钢筋应变可分别表示为式(9)、式(10)。

$$\begin{cases} \epsilon'_p(n) = \epsilon_p(n), & n = 1 \\ \epsilon'_p(n) = \epsilon_p(n) + \epsilon_{pr}(n-1), & n > 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \epsilon'_s(n) = \epsilon_s(n), & n = 1 \\ \epsilon'_s(n) = \epsilon_s(n) + \epsilon_{sr}(n-1), & n > 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\epsilon_{pr}(n-1)$ 和 $\epsilon_{sr}(n-1)$ 分别为疲劳 $n-1$ 次时钢绞线和钢筋的残余应变。

张丽华^[24]假定在开裂截面和抗拉极限状态截面长度范围内的力筋变形值平均分布,且认为力筋的残余应变是截面间力筋与混凝土的应变差异导致的,得出任意疲劳荷载循环 n 次后,钢绞线和钢筋的残余应变公式如式(11)、式(12)所示。

$$\epsilon_{pr}(n) = \frac{A_p}{2A_p^f(n)} + \sqrt{\left(\frac{A_p}{2A_p^f(n)} \right)^2 + \frac{2\pi d_p E_b^f(n) W_{pr,n}}{n_{pf} f_{ct}(n) A_p^f(n)} \cdot f_{ct}(n)} \quad (11)$$

$$\epsilon_{sr}(n) = \frac{A_s}{2A_s^f(n)} + \sqrt{\left(\frac{A_s}{2A_s^f(n)} \right)^2 + \frac{2\pi d_s E_b^f(n) W_{sr,n}}{n_{sf} f_{ct}(n) A_s^f(n)} \cdot f_{ct}(n)} \quad (12)$$

式中: A_p 、 A_s 分别为钢绞线和钢筋的初始面积; $A_p^f(n)$ 、 $A_s^f(n)$ 分别为钢绞线和钢筋破坏时的有效面积; d_p 、 d_s 分别为钢绞线和钢筋的直径; $W_{pr,n}$ 和 $W_{sr,n}$ 均取值为 0.02 mm。

荷载作用下,粘结滑移区内锈蚀钢绞线与混凝土的变形不再满足平截面假定,但整个滑移区内锈蚀钢绞线的总变形与相应位置处混凝土的总变形相等。根据此原则,Wang 等^[21]提出了静载过程中锈蚀钢绞线与混凝土间不协调变形的量化求解方法。该方法将混凝土梁划分为多个平面单元依次进行计算,进而累积得到滑移区内钢绞线与相应位置处混凝土总变形,建立整体变形协调关系。由于在疲劳荷载下力筋会产生残余应变,若继续采用上述方法必然会与实际结果存在差异,故本文在该方法的基础上进一步考虑疲劳荷载带来的残余应变影响,进而对该方法进行优化,使其能够对疲劳荷载作用下的钢绞线与混凝土间界面滑移进行分析。

疲劳 n 次时,粘结滑移区内钢绞线及混凝土的总伸长量计算公式如式(13)、式(14)所示。

$$\Delta L_p(n) = 2S_s(n) + \sum_{i=e}^f [l_{w,i}(\epsilon'_{p,i}(n) - \epsilon_{pe,i}(n))] \quad (13)$$

$$\Delta L_c(n) = \sum_{i=e}^f \Delta \epsilon_{pc,i}(n) l_{w,i} \quad (14)$$

式中: $\Delta L_p(n)$ 为疲劳 n 次时粘结滑移区内钢绞线的总伸长量; $\epsilon_{pe,i}$ 为任意单元 i 钢绞线的初始应变; $l_{w,i}$ 为梁单元长度; 粘结滑移区内编号为 e 到 f ; $S_s(n)$ 为有效粘结区内钢绞线与混凝土的相对滑移量; $\Delta L_c(n)$ 为疲劳 n 次时粘结滑移区内混凝土的总伸长量; $\Delta \epsilon_{pc,i}$ 为混凝土的应变增量。

1.4 混凝土疲劳损伤

作为不均匀的复合材料,混凝土内部存在原始缺陷。重复荷载作用会导致这些缺陷逐渐发展,在混凝土内部产生残余应变,造成疲劳损伤累积。一些学者提出,将混凝土内部损伤达到一定程度后作为混凝土在重复应力作用下失效的依据。通常把在疲劳荷载作用下疲劳累积残余应变达到 0.4 f_c 的静载受压应变作为混凝土疲劳失效的判断依据^[25]。

$$\epsilon_{cr} \geqslant 0.4 \frac{f_c}{E_b} \quad (15)$$

式中: $E_b = \beta E_c$, E_c 、 E_b 分别为混凝土的初始受压弹性模量和初始弯曲受压变形模量; β 为混凝土初始弯压弹性模量比。

当混凝土残余应变 ϵ_{cr} 确定后,其弯曲受压疲劳弹性模量可由式(16)表示。

$$E_b^f = \frac{\sigma_{cmax}^f}{\frac{\sigma_{cmax}^f}{E_b} + \epsilon_{cr}} \quad (16)$$

1.5 锈蚀 PC 梁疲劳寿命预测计算流程

由于界面的疲劳粘结退化和混凝土疲劳损伤均会导致 PC 梁内部应力重分布,即便对 PC 梁进行常幅疲劳加载仍将导致混凝土和钢绞线的变幅疲劳应力。因此,宜对钢绞线的疲劳裂纹增长分阶段进行分析。在每一阶段中,假定截面和材料的特性稳定不变,对梁疲劳弯曲控制截面按照线弹性方法进行应力分析。每完成一个阶段的计算时,相关参数都予以更新,为加快计算速率,积分计算步长取为 1 000,如此循环反复,直至满足锈蚀 PC 梁失效准则。

锈蚀钢绞线疲劳裂纹扩展阶段性分析的表达式如式(17)所示。

$$N_s = \int_{a_1}^{a_u} \frac{1}{C(\Delta K - \Delta K_{th})^m} da \quad (17)$$

式中: N_s 为一个计算阶段的疲劳荷载循环数; a_1 和 a_u 分别为积分下限和积分上限。

为清楚说明所提出的预测方法,图 2 给出了锈蚀 PC 梁疲劳寿命预测方法计算流程图。

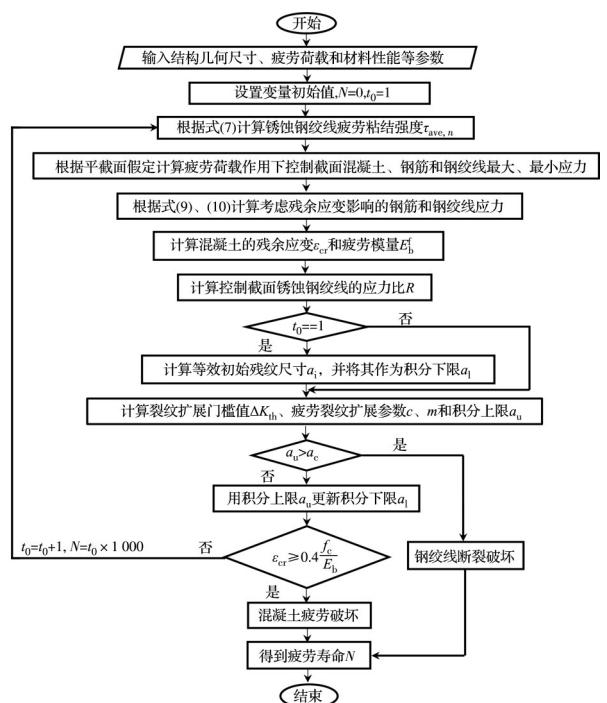


图 2 疲劳寿命预测计算流程图
Fig. 2 Calculation flow chart of fatigue life prediction

2 试验研究及模型验证

2.1 局部锈蚀试件设计

试验共设计制作 6 根 PC 梁。梁尺寸为 200 mm × 350 mm × 3 800 mm, 计算跨度 3 500 mm。梁底部

75 mm 处布置一根直径为 15.2 mm 的钢绞线,其张拉控制应力取抗拉强度的 75%,即 1 395 MPa。梁端钢绞线被长度为 150 mm 的聚氯乙烯(PVC)管覆盖,以避免局部应力集中。此外,梁底部设置两根直径为 16 mm 的 HRB400 级受拉钢筋,梁顶部设置两根直径为 10 mm 的 HRB400 级受压钢筋,箍筋为 HPB300, 直径为 8 mm, 跨中箍筋间距为 100 mm,

梁端箍筋间距改为 70 mm, 普通钢筋的保护层厚度为 30 mm。本试验中试件混凝土强度等级按 C40 设计,水泥、水、粗骨料和细骨料的重量比为 1:0.54:3.58:2.49。为测量跨中钢绞线的滑移,在梁跨中底部设置一个空心区域,尺寸为 500 mm×60 mm×100 mm。试验梁具体尺寸及配筋情况如图 3 所示。

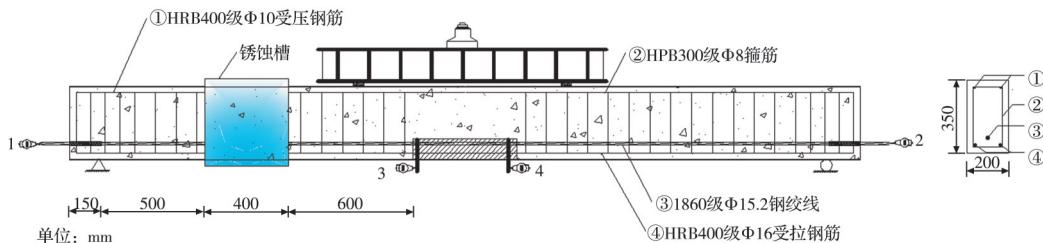


图 3 PC 梁构造及配筋

Fig.3 Reinforcement and details of beams

梁 S1 未锈蚀,为对比梁。其余 5 根梁 S2~S6 经过 28 d 养护后,对纵向预应力筋通直流电进行电化学加速锈蚀。一个专门的局部锈蚀槽安装在距梁端 650 mm 位置处,槽长 400 mm。通过控制通电时间和电流大小获取不同的局部锈蚀率。试验结束后,测得锈蚀梁 S2~S6 的锈蚀率分别为 4.6%、10.4%、14.6%、19.7%、36.5%。

2.2 疲劳试验加载和量测

疲劳加载在 MTS 液压伺服系统上进行,采用四点弯曲加载法对试验梁进行等幅重复加载。疲劳荷载上限和下限分别取为 $0.5P_u$ (70 kN) 和 $0.1P_u$ (15 kN), 其中, P_u 为非锈蚀试件单调加载下的极限荷载, 应力比为 0.2。当疲劳循环次数达到 0、1 万、2 万、5 万、10 万、20 万、30 万、50 万、70 万、100 万、150 万、200 万次时, 停机进行静载试验, 从 0 kN 开始, 分 7 级加载至疲劳荷载上限。施加静载时, 在每级荷载下量测跨中钢绞线滑移量和裂缝宽度。当试验梁内任意 1 根主筋发生疲劳断裂, 即试验荷载的变化超限, 作动器自动卸载保护, 防止破坏后的试验梁继续受力, 试验终止。若试验梁循环 200 万次后尚未发生破坏, 则继续加载, 直至静力破坏。

2.3 锈蚀-疲劳作用下的跨中粘结滑移

疲劳加载过程中各试验梁跨中荷载-滑移曲线如图 4 所示。试验梁 S1 在疲劳 10 万次后的静载试验中出现轻微滑移, 达到荷载上限时, 滑移量为 0.05 mm; 疲劳 150 万次和 200 万次后进行静载试验, 达到荷载上限时的滑移量分别为 0.5、0.96 mm, 滑移量增加明显, 表明钢绞线与混凝土间的滑移会随着疲劳次数的增加而增加。

试验梁 S2 和 S6 的锈蚀率分别为 4.6%、36.5%, 侧面锈胀裂缝最大宽度分别为 0.25、0.61 mm, 与

梁 S2 相比, 梁 S6 侧面最大锈胀裂缝宽度增长率为 144.0%。在疲劳前的静载试验中, 梁 S2 和 S6 初滑移荷载分别为 40、10 kN, 达到疲劳荷载上限时的滑移量分别为 0.20、0.28 mm。与梁 S2 相比, 在疲劳前的静载试验中, 梁 S6 初滑移荷载下降率为 75%, 滑移量增长率为 40%。锈胀开裂会导致界面粘结性能退化, 初滑移荷载的降低及滑移量的增加验证了这一点。

如图 4 所示, 各试验梁滑移量随着荷载的增加而增加。试验梁 S2~S5 在不同疲劳次数下的滑移曲线近似为线性增长, 且初滑移荷载变化不大, 多集中在 30、40 kN, 达到疲劳荷载上限时, 滑移量基本稳定在 0.25 mm 左右, 表明此时钢绞线与混凝土间粘结尚未破坏, 性能较好。此时钢绞线的滑移量可理解为其在多次重复荷载作用下发生弹性变形而导致的滑移量。

2.4 破坏模式及疲劳寿命

疲劳阶段的荷载裂缝发展如图 5 所示, 图中数字代表产生裂缝的疲劳次数。不管是锈蚀梁还是未锈蚀梁, 第一次静载过程中底部受拉区均出现多条受拉裂缝, 裂缝间距约为 100~200 mm。疲劳加载过程中, 试验梁底部的受拉裂缝宽度和深度会随着疲劳次数的增加而增大。由于试验梁采取的是局部锈蚀, 故两边裂缝发展不对称。经历多次重复荷载后, 与未锈蚀梁 S1 相比, 锈蚀梁 S2~S6 在疲劳荷载作用下均在锈蚀区域内产生了 3~4 条竖向裂缝, 并向受压区发展。这是因为钢绞线锈蚀产物的膨胀导致混凝土开裂, 降低了该区域混凝土的抗拉性能, 故在疲劳荷载作用下锈蚀区域内均出现竖向裂缝。

疲劳加载阶段, 试验梁裂缝演变基本符合快速增加、稳定发展、急剧变化的“三阶段”发展规律, 裂

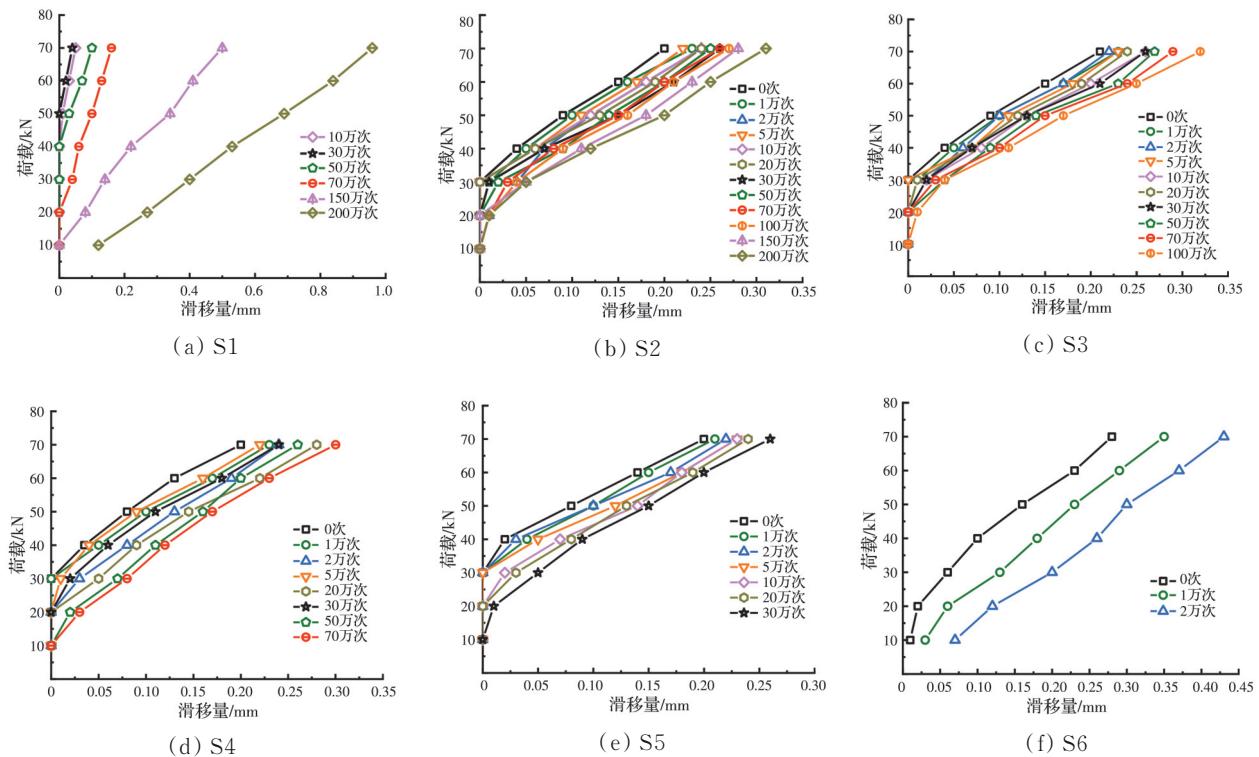
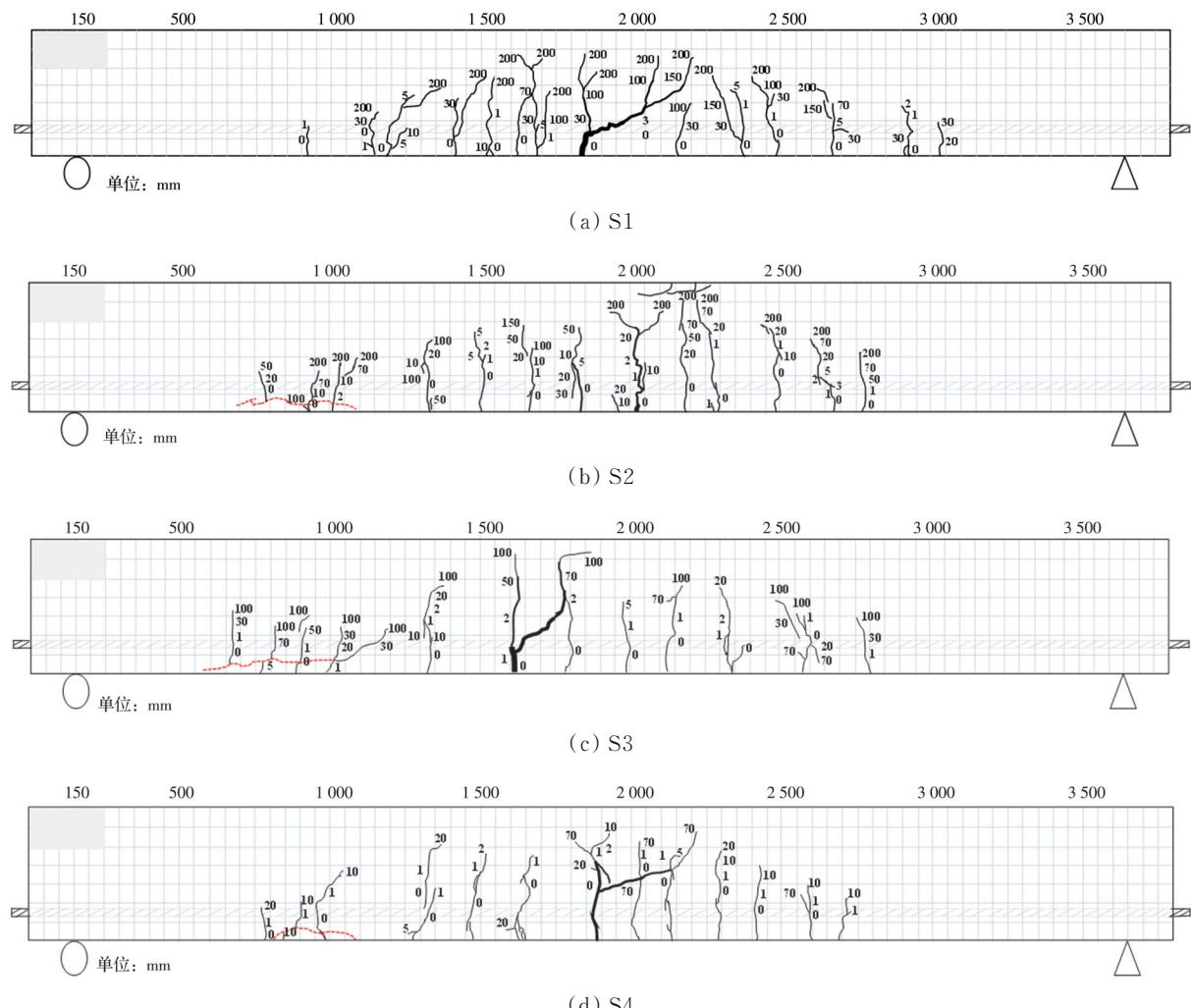


图 4 试验梁跨中粘结滑移
Fig. 4 Bond-slip of test beams in midspan



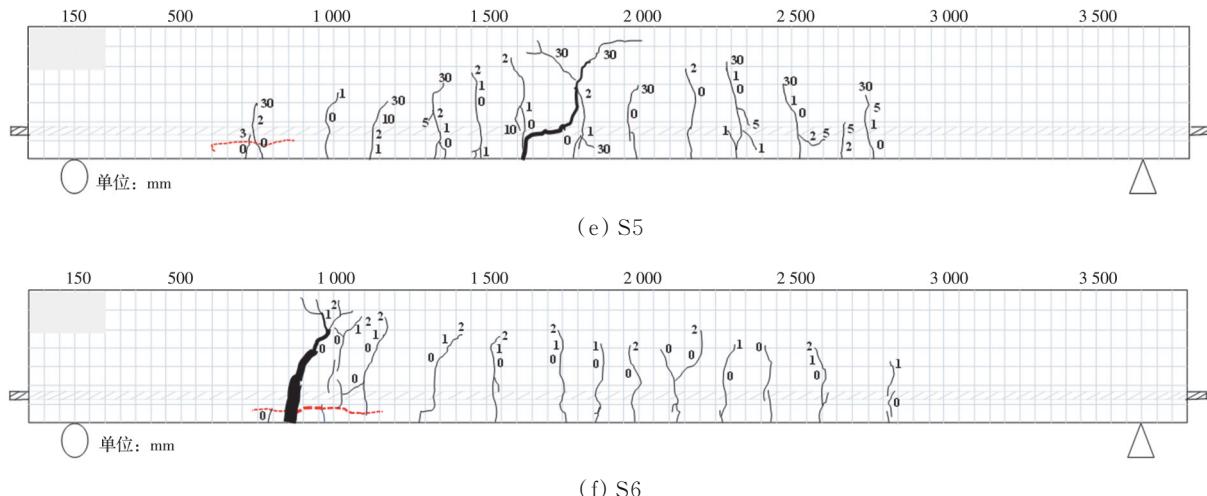


图 5 试验梁裂缝发展图

Fig. 5 Crack development of test beams

缝快速增加和急剧变化阶段约占疲劳寿命的前10%及后10%。由图5可知,试验梁S1~S3快速增加阶段在疲劳加载20万次内基本结束,试验梁S4~S5快速增加阶段在疲劳加载5万次内基本结束。随后裂缝进入稳定发展阶段,裂缝开展缓慢、持续时间久。临近疲劳破坏时,所有试验梁的纵向裂缝又迅速向梁顶发展。

图 6 为各试验梁控制截面的破坏形态, 破坏形态包括混凝土压碎、钢绞线断裂及钢筋断裂。未锈蚀梁 S1 和轻微锈蚀梁 S2 在 200 万次重复荷载后均未发生疲劳破坏, 随后进行静载破坏试验, 破坏时钢绞线断裂, 加载点附近的混凝土被压碎, 跨中形成不可恢复的主裂缝, 为延性破坏, 说明重复荷载不会对试验梁的静载破坏形态产生实质影响。

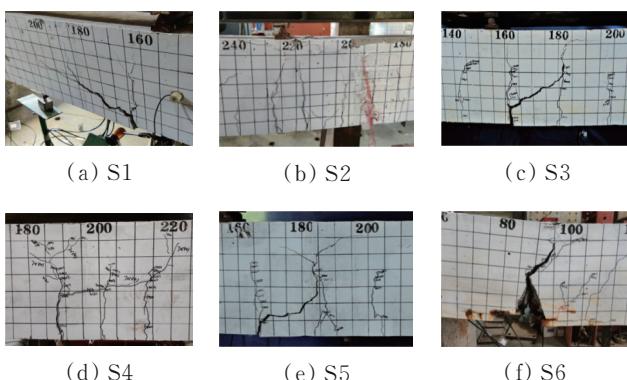


图 6 试验梁破坏形态

Fig. 6 Failure modes of test beams

试验梁S3~S5的破坏均发生在疲劳阶段,其破坏为跨中钢绞线钢丝突然断裂,伴有一声脆响,挠度突然变大,并在梁跨中形成较宽的主裂缝,为脆性疲劳破坏。由于锈蚀前对钢筋的防锈处理不当,造成钢筋锈蚀严重,试验梁S6疲劳加载进行到2万

次时,锈蚀区域内的钢筋突然断裂,形成不可恢复的主裂缝,裂缝扩展至梁截面高度的约93%。

各试验梁的疲劳寿命及破坏形态见表1,由表1可知,钢绞线锈蚀对试验梁的疲劳寿命影响显著,随着锈蚀率的增大,PC梁疲劳寿命快速降低。这是由于随着钢绞线锈蚀率的增大,锈坑深度增加,应力集中越来越明显,从而加速了钢绞线疲劳断裂。

表1 试验梁锈蚀率、疲劳寿命及破坏形态

Table 1 Corrosion loss, fatigue life and failure modes of test beams

编号	锈蚀率/%	疲劳寿命/ 10^4	寿命降低率/%	是否为疲劳破坏	破坏形态
S1	0	200	1	否	钢绞线断裂
S2	4.6	200	1	否	混凝土压碎
S3	10.4	119.3	40.4	是	钢绞线断裂
S4	14.6	86.5	56.8	是	钢绞线断裂
S5	19.7	40.9	79.6	是	钢绞线断裂
S6	36.5	2.1	99	是	钢筋断裂

2.5 模型验证

为验证疲劳寿命预测方法的合理性,利用上述疲劳试验数据进行验证。图7为试验结果和预测结果之间的疲劳寿命对比。试验梁S6由于锈蚀前钢筋的防锈处理不当,造成钢筋锈蚀严重,使试验结果产生误差,故不进行疲劳寿命预测分析。理论预测值与试验值的平均误差为5%,两者吻合良好。当锈蚀率为19.7%时,误差最大,为8%。试验误差可能是由材料性能、疲劳加载试验及相关分析计算模型的不确定性所导致。预测结果显示,梁S1、S2在200万次重复荷载后未发生疲劳破坏,梁S2~S5的疲劳失效模式均为钢绞线断裂,与试验现象一致。

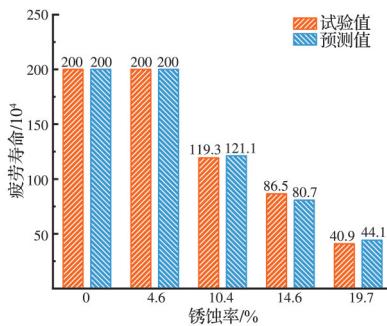


图 7 试验梁试验值与预测值对比

Fig. 7 Comparison between test value and predicted value of test beams

此外,进一步采用 Zhang 等^[2]和 Su 等^[26]开展的锈蚀 PC 梁疲劳试验结果对本文预测方法加以验证,结果见表 2。平均误差为 4%,与试验值吻合较好。由以上讨论可知,建立的理论模型可对锈蚀 PC 梁的疲劳寿命进行合理预测。

表 2 文献试验参数及预测结果

Table 2 Literature test parameters and prediction results

锈蚀率 $\eta/\%$	F_{max}/kN	F_{min}/kN	试验疲劳 寿命 $N_f/N/10^4$	预测疲劳寿 命 $N_{pre}/10^4$	参考文 献
0	85.7	14.3	196.9	190.2	0.966
1.3	85.7	14.3	109.4	106.5	0.973
4.0	81.0	13.5	25.9	25.4	0.981 Zhang
3.7	101.0	16.9	82.8	83.1	1.004 等 ^[2]
2.5	85.7	14.3	39.3	39.6	1.008
5.6	85.7	14.3	21.7	23.1	1.065
4.1	94	18.8	162.9	163.9	1.006
6.8	94	18.8	108.7	98.0	0.902 Su
8.2	94	18.8	60.0	56.4	0.940 等 ^[26]
10.8	94	18.8	40.2	42.8	1.065

3 锈蚀-疲劳界面滑移影响因素分析

预应力大小、钢绞线的锈蚀程度和应力水平高低是判断界面滑移情况的重要因素。

3.1 预应力对界面滑移的影响

图 8 反映了在预应力 $F_{pe}=0\sim0.75f_{pk}$ 、锈蚀率 $\eta=5\%\sim20\%$ 和应力水平 $S=0.5\sim0.9$ 作用下 PC 梁疲劳破坏后界面滑移情况。由图 8 可知,随着锈蚀率、应力水平的增加,构件易发生疲劳粘结滑移,而预应力的存在可有效减少界面疲劳粘结滑移的发生。从图 8 可以看出,当预应力为 0 时,钢绞线与混凝土间易发生疲劳粘结滑移,随着锈蚀率、应力水平的增加,粘结退化严重,有效粘结滑移区扩展到整个梁段。当滑移区扩展到整个梁段时,其滑移量迅速增长且数值大,并不能反映实际的滑移量,故不予量化,在图中以滑移到梁端进行标识。当预

应力增加至 $0.75f_{pk}$ 时,滑移量均减小至 0,下降明显。以锈蚀率为 15%、应力水平为 0.7 时为例,与预应力为 0 的情况相比,预应力为 $0.25f_{pk}$ 时的滑移量减少了 59.4%,当预应力继续增加至 $0.5f_{pk}$ 、 $0.75f_{pk}$ 时,均没有滑移产生。造成上述现象的原因是预应

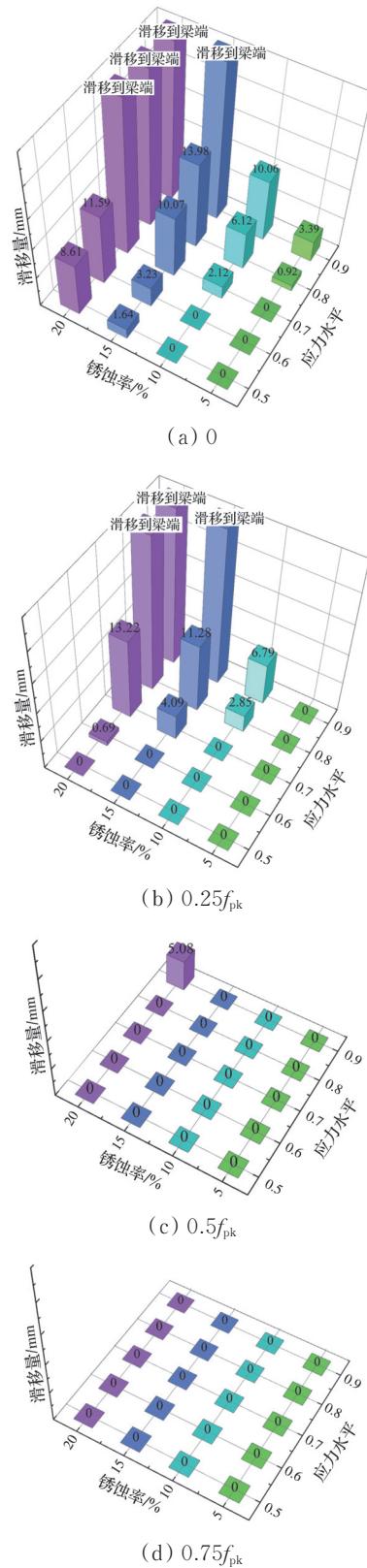


图 8 不同预应力对滑移量的影响

Fig. 8 Influence of different prestresses on slip value

力钢绞线提供了高预拉力,使得重复荷载下钢绞线所受拉力小于有效粘结力和有效预拉力之和,故没有滑移产生。

3.2 锈蚀率对界面滑移的影响

由图8可知,当预应力、应力水平一定时,滑移量随着锈蚀率的增加而增加。当锈蚀率较小时,可能没有粘结滑移发生,锈蚀率较大时则会出现滑移区扩展到整个梁段。这是因为锈蚀率较小时,有效粘结力轻微减少,整个疲劳过程中,钢绞线所受拉力一直小于其有效粘结力及预拉力之和,故钢绞线与混凝土间的滑移量很小,可以忽略不计。随着锈蚀率的增加,钢绞线与混凝土间粘结受损,有效粘结力大幅降低,疲劳过程中钢绞线所受拉力大于其有效粘结力和预拉力之和,有效粘结应力从荷载端向自由端传递,钢绞线与混凝土间粘结失效。当预应力为0、应力水平为0.8时,与锈蚀率为5%的情

况相比,锈蚀率为10%、15%的滑移量分别增加了5.7、14.2倍,锈蚀率增加至20%时,有效粘结滑移区扩展至梁端,滑移量增加明显。

3.3 应力水平对界面滑移的影响

当应力水平较小时,试件没有滑移发生,应力水平较大时,试件直接滑移到端部,图9显示了部分应力水平下滑移量的增长情况。由图9可知,预应力、锈蚀率一定时,滑移量曲线随着应力水平的增加而整体抬升,其斜率也随着应力水平的提高而增大。当应力水平为0.5、0.6时,滑移量曲线的间距较小,应力水平大于0.6时,相邻滑移量曲线的间距增大。造成上述现象的原因是应力水平越高,界面疲劳损伤越快,滑移量增长速率也随之逐渐增大,且高应力水平下更严重的应变不协调会导致更多的残余滑移,从而产生更大的滑移量。

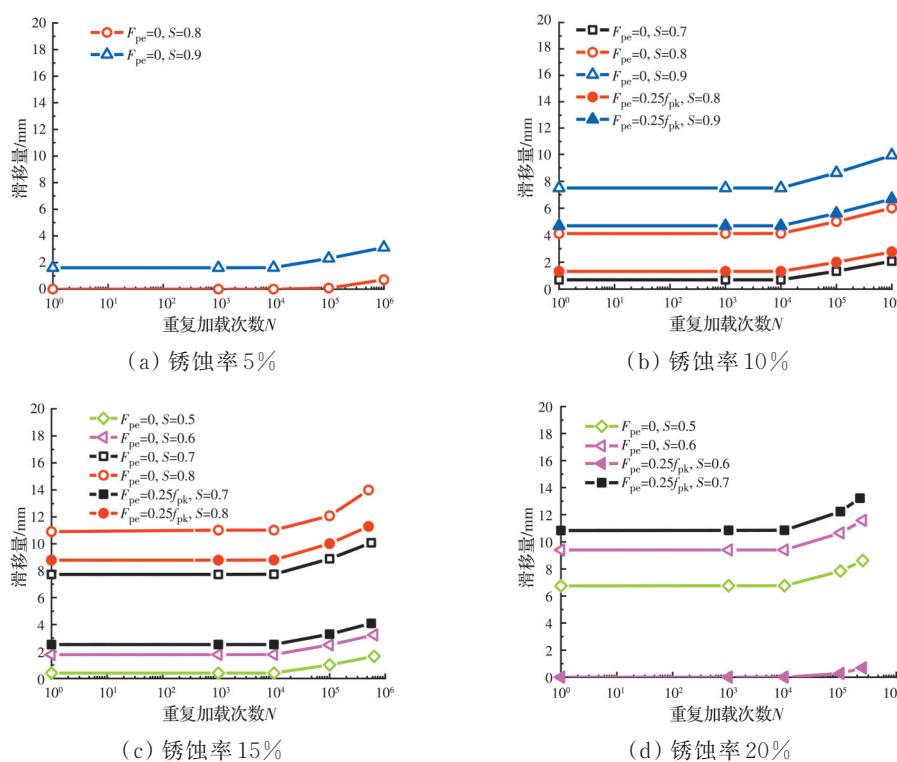


图9 部分应力水平下的滑移量

Fig. 9 Slip values at partial stress levels

4 结论

提出了考虑力筋残余应变的粘结滑移区不协调变形量化方法和锈蚀PC梁疲劳寿命预测方法。通过开展锈蚀PC梁疲劳试验验证了预测方法的合理性,并讨论了不同预应力、锈蚀程度和应力水平作用下锈蚀PC梁界面滑移情况。主要结论如下:

1)提出了一种考虑多因素共同作用的锈蚀PC梁疲劳寿命预测方法,该方法综合考虑了钢绞线疲

劳裂纹扩展、界面锈蚀疲劳粘结退化及混凝土疲劳损伤等多因素对构件应力的影响,进一步提高了锈蚀PC梁疲劳寿命预测的准确性。

2)预应力大小是影响锈蚀PC梁发生疲劳粘结滑移的重要参数,随着锈蚀率、应力水平的增加,构件易发生疲劳粘结滑移,而预应力的增加可有效减少界面疲劳粘结滑移的发生。

3)当预应力、应力水平一定时,滑移量随着锈

蚀率的增加而增加。当锈蚀率较小时,界面没有粘结滑移发生;当锈蚀率超过临界值时,界面的滑移区会扩展到整个梁段。

4) 当预应力、锈蚀率一定时,在高应力水平下,更严重的应变不协调会导致更多的残余滑移,滑移量曲线及其斜率随着应力水平的增加而整体抬升、变陡。

参考文献

- [1] 喻宣瑞, 姚国文, 范伟庆. 交变荷载和氯盐环境作用下钢绞线的腐蚀疲劳性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(20): 20087-20091.
- [2] YU X R, YAO G W, FAN W Q. Experimental on the corrosion fatigue behavior of steel strands under the couple effect of variable load and chloride environment [J]. Materials Reports, 2021, 35(20): 20087-20091. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 余芳, 贾金青, 姚大立, 等. 腐蚀预应力钢绞线的疲劳试验分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(12): 1487-1491, 1502.
- [5] YU F, JIA J Q, YAO D L, et al. Experimental analysis of fatigue properties of corroded prestressing strands [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(12): 1487-1491, 1502. (in Chinese)
- [6] DU Y X, WEI J, YUAN J, et al. Experimental research on fatigue behavior of prestressed concrete beams under constant-amplitude and variable-amplitude fatigue loading [J]. Construction and Building Materials, 2020, 259: 119852.
- [7] MOHANDOSS P, PILLAI R G, GETTU R. Determining bond strength of seven-wire strands in prestressed concrete [J]. Structures, 2021, 33: 2413-2423.
- [8] LIN H W, ZHAO Y X. Effects of confinements on the bond strength between concrete and corroded steel bars [J]. Construction and Building Materials, 2016, 118: 127-138.
- [9] 张建仁, 易驹, 张旭辉, 等. 锈胀影响下钢绞线与混凝土粘结性能研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(4): 26-34.
- [10] ZHANG J R, YI J, ZHANG X H, et al. Study on bond performance between steel strand and concrete under corrosion-induced impact [J]. Building Structure, 2017, 47(4): 26-34. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] GUO Z Z, MA Y F, WANG L, et al. Modelling guide-lines for corrosion-fatigue life prediction of concrete bridges: Considering corrosion pit as a notch or crack [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 105: 883-895.
- [13] MIARKA P, SEITL S, BÍLEK V, et al. Assessment of fatigue resistance of concrete: S-N curves to the Paris' law curves [J]. Construction and Building Materials, 2022, 341: 127811.
- [14] 牛荻涛, 苗元耀. 基于车辆荷载的锈损公路桥梁疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 1-10.
- [15] NIU D T, MIAO Y Y. Experimental study on fatigue performance of corroded highway bridges based on vehicle loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(3): 1-10. (in Chinese)
- [16] 林红威, 赵羽习, 郭彩霞, 等. 锈胀开裂钢筋混凝土粘结疲劳性能试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(1): 98-107.
- [17] LIN H W, ZHAO Y X, GUO C X, et al. Fatigue of the bond behavior of corroded reinforced concrete with corrosion-induced cracks [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(1): 98-107. (in Chinese)
- [18] LI R, MIAO C Q, FENG Z X, et al. Experimental study on the fatigue behavior of corroded steel wire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 176: 106375.
- [19] MA Y F, GUO Z Z, WANG L, et al. Probabilistic life prediction for reinforced concrete structures subjected to seasonal corrosion-fatigue damage [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(7): 04020117.
- [20] 刘浩, 巴光忠, 苗吉军, 等. 锈蚀钢筋横截面积分布规律统计分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(5): 205-216.
- [21] LIU H, BA G Z, MIAO J J, et al. Statistical analysis of cross-sectional area distribution law of corroded reinforcing steel bars [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 205-216. (in Chinese)
- [22] 李富民, 袁迎曙, 张建清. 氯盐腐蚀钢绞线的断裂抗力分布模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(6): 34-39.
- [23] LI F M, YUAN Y S, ZHANG J Q. Distribution models of the fracture resistance of steel strands corroded by chloride [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(6): 34-39. (in Chinese)
- [24] ZHENG Y Q, WANG Y. Damage evolution simulation and life prediction of high-strength steel wire under the coupling of corrosion and fatigue [J]. Corrosion Science, 2020, 164: 108368.
- [25] DONAHUE R J, CLARK H M, ATANMO P, et al. Crack opening displacement and the rate of fatigue crack growth [J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1972, 8(2): 209-219.
- [26] LIU Y M, MAHADEVAN S. Fatigue limit prediction of notched components using short crack growth theory

- and an asymptotic interpolation method [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, 76(15): 2317-2331.
- [20] CERIT M, GENEL K, EKSI S. Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16(7): 2467-2472.
- [21] WANG L, ZHANG X H, ZHANG J R, et al. Simplified model for corrosion-induced bond degradation between steel strand and concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(4): 04016257.
- [22] ZHANG J, GUO Z, MA Y, et al. Fatigue life prediction of corroded RC beams considering bond degradation [M]//Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations. Boca Raton, USA: CRC Press, 2021: 710-716.
- [23] 阎西康, 梁琳霄, 梁琛. 疲劳荷载作用下植筋锚固粘结的滑移性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(2): 149-156.
- YAN X K, LIANG L X, LIANG C. Bond slip behavior of post-installed anchorage under fatigue load [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(2): 149-156. (in Chinese)
- [24] 张丽华. 钢绞线受腐蚀的部分预应力混凝土梁疲劳性能研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2018.
- ZHANG L H. Study on fatigue performance of partially prestressed concrete beams with corroded steel strands [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [25] 卫军, 李松林, 董荣珍, 等. 考虑残余变形影响的混凝土疲劳损伤本构模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 57-61.
- WEI J, LI S L, DONG R Z, et al. Fatigue damage constitutive model of concrete considering the effect of residual deformation [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(7): 57-61. (in Chinese)
- [26] SU X C, MA Y F, WANG L, et al. Fatigue life prediction for prestressed concrete beams under corrosion deterioration process [J]. *Structures*, 2022, 43: 1704-1715.

(编辑 胡玲)