

文章编号: 1001-4888(2024)02-0248-13

模拟酸雨腐蚀预应力混凝土 T 梁重载交通疲劳性能研究*

许开成^{1,2}, 黄凌娟², 杨宏宇², 张立卿^{1,2}, 易彬², 陈梦成^{1,2}

(1. 华东交通大学 轨道基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 江西南昌 330013;

2. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西南昌 330013)

摘要: 为了研究酸雨腐蚀环境下预应力混凝土 T 梁重载交通疲劳性能, 对 6 根腐蚀预应力混凝土梁进行静载试验和等幅疲劳试验, 利用显微镜观察钢筋疲劳断裂时的破坏形态, 从而推出相应条件下钢筋破坏的几何模型。结果表明: 腐蚀预应力混凝土梁的疲劳破坏以底部钢筋发生疲劳脆性断裂为标志; 在疲劳加载过程中, 预应力混凝土梁荷载-挠度曲线、混凝土、钢筋和钢绞线荷载-挠度曲线呈现“疏-密-疏”三段式变化; 钢筋疲劳裂纹的发展规律与钢筋应变的变化相对应; 相较于未腐蚀试件, 腐蚀试件疲劳寿命降低了 32.7%; 疲劳上限值为 0.45 和 0.6 倍极限荷载时, 预应力混凝土梁疲劳寿命均小于 200 万次, 且相较于疲劳上限值为 0.3 倍极限荷载时分别下降 69.3%、85.1%。

关键词: 重载交通; 预应力混凝土梁; 酸雨腐蚀; 等幅疲劳试验; 疲劳寿命

中图分类号: TU375

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-23-083

0 引言

在我国, 高速公路普遍存在车辆超载的现象^[1], 许多车辆荷载都超过了《公路桥涵设计通用规范》^[2] (JTG D60-2015) 中的设计荷载标准。国内高速公路上的部分 T 型桥梁由于其设计荷载标准低、年代久远, 加之长期受到重载车辆的反复作用, 导致桥梁混凝土大面积出现裂缝、老化、脱落等疲劳问题^[3-7], 影响桥梁的正常使用, 因此研究桥梁在超载作用下的疲劳问题变得尤为重要。

由于重载车辆反复作用, 桥梁上部结构的荷载形式会发生较大的变化, 导致桥梁承载力大大减小, 为了满足交通运输的要求, 预应力混凝土梁不得不加固、扩建^[8]。针对预应力混凝土梁疲劳问题, 国内外学者进行了大量研究, 结果表明: 预应力混凝土梁配筋合适时, 以普通受拉钢筋为疲劳破坏特征, 混凝土和预应力筋一般不会发生疲劳破坏, 且疲劳破坏呈现“三阶段”特征^[5, 9-12]; 随着疲劳加载次数增加, 预应力混凝土梁挠度值及裂缝呈现增长趋势^[13-14], 挠度增大 10%~20%^[15]。随着世界人口的不断增加, 化石燃料的能源消耗也随之急剧增加, 这些燃料在使用过程中会产生大量的氧化物、硫和氮, 而这些成分恰好就是硫酸和硝酸的主要成分, 最后这些成分会以酸雨的形式呈现在我们的视野中^[16], 酸雨对桥梁结构的安全性带来了严重的安全隐患。众所周知, 酸雨会通过结构的裂缝进入混凝土内部, 从而导致预应力钢筋的腐蚀, 进而引起预应力混凝土结构承载力退化^[17-19]。目前, 针对高速公路桥梁服役期间所承受的酸雨环境及长期超负荷问题研究较少, 因此, 有必要对酸雨腐蚀环境中承受重载疲劳荷载作

* 收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51968021); 江西省自然科学基金项目(20224BAB204067); 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室资助项目(HJGZ2022201); 江西省研究生创新专项资金项目(YC2022-s506)

通信作者: 许开成(1973-), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 工程结构耐久性。Email: xkcxj@ecjtu.edu.cn

用的预应力混凝土梁受力性能的演变规律进行研究。

为研究酸雨腐蚀环境下预应力混凝土梁的重载交通疲劳性能,本文设计制作了 6 根后张法预应力混凝土梁试件,并基于江西酸雨腐蚀环境,首先对预应力钢绞线进行通电腐蚀;然后对梁进行静载和疲劳试验;最后采用显微镜对断裂钢筋进行观测,分析钢筋横截面变化对腐蚀梁疲劳裂缝的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验采用后张法预应力混凝土 T 型截面梁,梁长为 2080mm,受拉和受压钢筋均采用直径为 14mm 的 HRB400 螺纹钢筋,箍筋采用直径为 6mm 的 HPB300 光圆钢筋,梁内非加密区箍筋间距为 100mm,加密区箍筋间距为 80mm。钢绞线采用直径为 15.2mm 的由 1×7 股捻制而成的 1860 级低松弛钢绞线,试验梁截面尺寸及钢筋布置如图 1 所示。

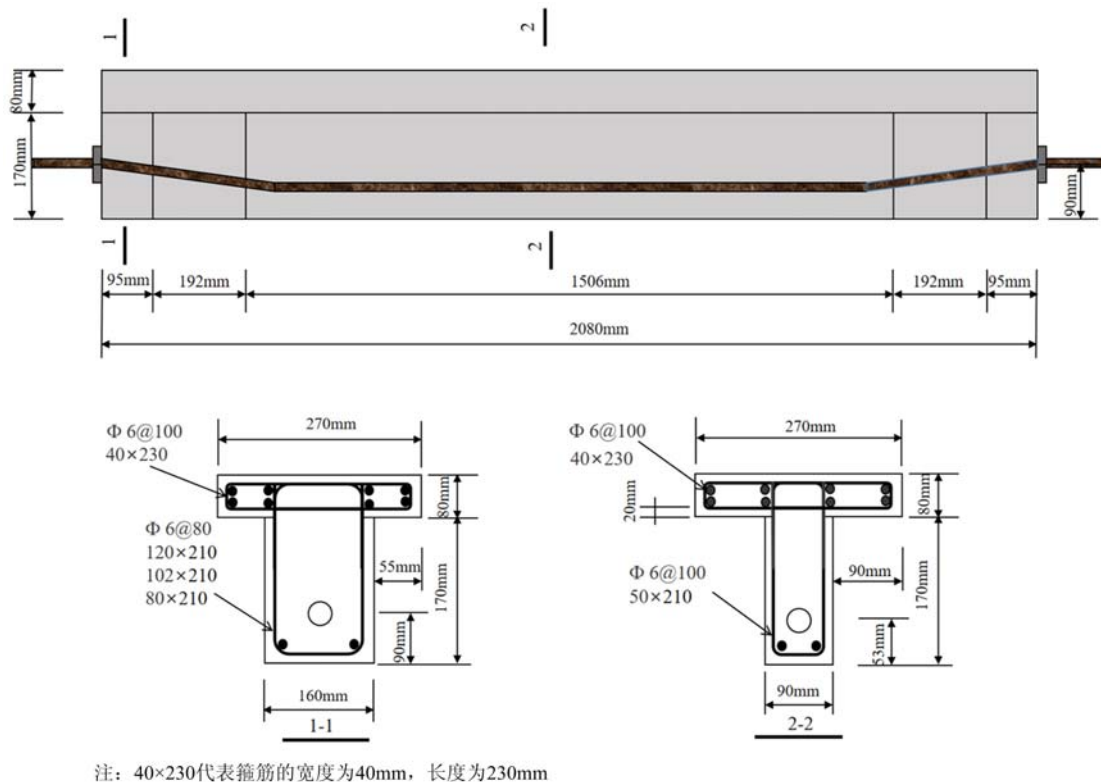


图 1 梁截面尺寸图

Fig. 1 Sectional dimension drawing of test beam

1.2 试件参数

在本研究中,共设计了 6 根试验梁,其中 2 根进行静力加载试验,4 根用于疲劳加载试验,试验梁主要参数见表 1。在表 1 中,J 代表试验梁进行静载试验,P 代表试验梁进行疲劳加载试验,编号 J-0 表示试验梁理论腐蚀率为 0,编号 P-0-0.3 表示试验梁理论腐蚀率为 0,疲劳幅值上限值为 0.3 倍极限荷载。

钢材试样由工厂加工制作,与试验所用为同一批材料。混凝土标准试块通过浇筑,与试件同条件下养护,经材性试验可得钢材及混凝土的材性数据见表 2 和表 3。

表1 试件主要参数

Tab. 1 Main parameters of the test piece

构件编号	混凝土强度 /MPa	加载方式	通电部位	理论腐蚀率 /%	实际腐蚀率 /%	疲劳幅值	
J-0	50	静载	—	0	0	—	
J-8			钢绞线	8	7.61		
P-0-0.3		疲劳	—	0	0	0.15 P_u ~ 0.30 P_u	
P-8-0.3			钢绞线	8	7.73		
P-8-0.45					6.93		0.15 P_u ~ 0.45 P_u
P-8-0.6					7.91		

注: P_u 代表极限荷载值。

表2 混凝土力学性能指标

Tab. 2 Mechanical performance index of concrete

混凝土强度等级	抗压强度		轴心抗压强度 $f_{cu,k}$ /MPa	弹性模量 E_c /MPa
	$f_{cu,7}$ /MPa	$f_{cu,28}$ /MPa		
C50	44.6	54.9	44.9	3.53×10^4

注: $f_{cu,7}$ 代表混凝土标准养护7d后的立方体抗压强度; $f_{cu,28}$ 代表混凝土标准养护28d后的立方体抗压强度; $f_{cu,k}$ 代表混凝土在标准养护7d后的轴心抗压强度; E_c 代表混凝土的弹性模量。

表3 钢筋材料性能指标

Tab. 3 Performance index of steel bar material

规格	截面面积/mm ²	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率/%	弹性模量/MPa
Φ6	28.3	370	565	30.0	2.10×10^5
Φ14	153.9	470	570	20.0	2.00×10^5
Φ15.2	140.0	1860	1945	4.0	1.95×10^5

注: Φ代表钢筋直径,例如:Φ6代表钢筋直径为6mm。Φ代表钢绞线直径,例如:Φ15.2代表钢绞线的直径为15.2mm。

1.3 通电腐蚀

根据相关文献^[20]可知,整个江西都受酸雨污染的威胁,酸雨离子的比例见表4。由表4可知, SO_4^{2-} 约占总阴离子的74%,因此江西的酸雨主要是硫酸型酸雨。江西地区过去5年的降雨数据见表5^[22],由表可知,酸雨pH值均在3以上,因此本研究最终确定溶液的pH值为3。酸雨溶液配药品用量见表6。

采用通电加速腐蚀试验方法获取钢绞线腐蚀试件,如图2所示。试验梁养护28d后以半浸泡的方式放置在pH值为3的溶液腐蚀池中进行通电加速腐蚀。将直流稳压稳流电源的正负极分别与钢筋及充当负极的铜片相连,通电电流密度确定为 $400 \mu A/cm^2$,并根据法拉第定律^[21]确定腐蚀率为8%对应的腐蚀时间为14d。

表4 酸雨离子比例

Tab. 4 Acid rain ion ratio

离子	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	NH_4^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
占比/%	73.18	21.40	3.28	27.44	54.99	2.74	6.60

表 5 2018~2022 年江西酸雨数据^[22]
Tab. 5 Acid rain data of Jiangxi province from 2018 to 2022^[22]

年份	2018	2019	2020	2021	2022
pH 值	3.21	3.47	3.70	3.81	4.02

表 6 药品用量
Tab. 6 Drug dosage

药品名称	MgSO ₄	Na ₂ SO ₄	(NH ₄) ₂ SO ₄	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	NaCl
含量/(g/L)	0.087	0.531	0.191	0.252	0.036

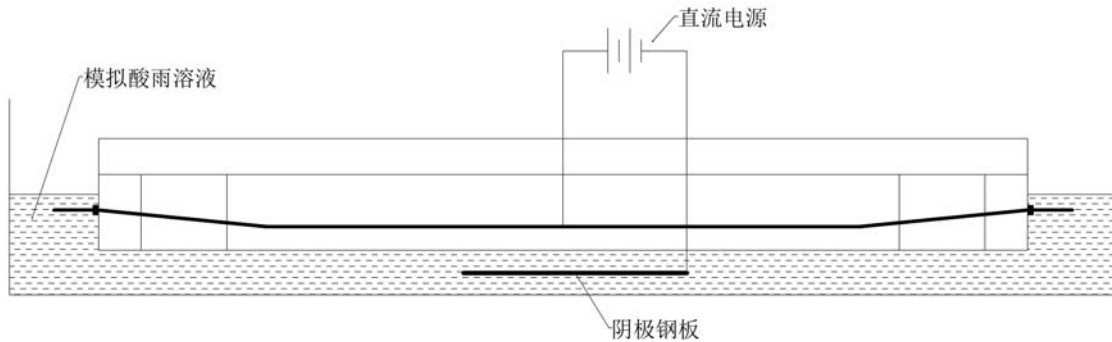


图 2 试验梁通电示意图
Fig. 2 Electrification diagram of test beam

1.4 加载装置及测点方案

静力试验采用 50t 反力架对试验梁进行三分点静力加载。疲劳加载试验采用 PMW 电液伺服脉动疲劳试验设备进行, 分别对 1 个未腐蚀构件和 3 个腐蚀构件施加等幅疲劳循环荷载, 静力及疲劳试验装置图和疲劳加载示意图分别如图 3、图 4 所示。在图 4 中, P_{max} 代表疲劳上限值, P_{min} 代表疲劳下限值。

根据疲劳试验中的“不疲不裂”^[23]的原则及当前公路桥梁超载运行的实际工况, 疲劳下限值均取为 $0.15 P_u = 40kN$, 上限值取 3 个梯度分别为 $0.3 P_u$ 、 $0.45 P_u$ 、 $0.6 P_u$ 。

在静力和疲劳试验中, 对试件的挠度、预应力筋及普通钢筋应变、混凝土应变等数据进行采集, 在试验梁三分点加载处及支座处分别布置位移计用以测量试件的挠度及竖向位移, 具体测点布置如图 5 所示。

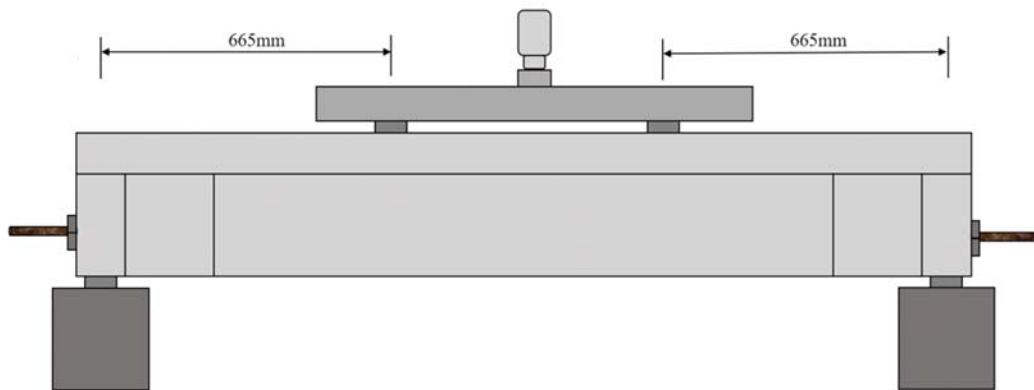


图 3 疲劳试验加载装置图
Fig. 3 Fatigue test loading device diagram

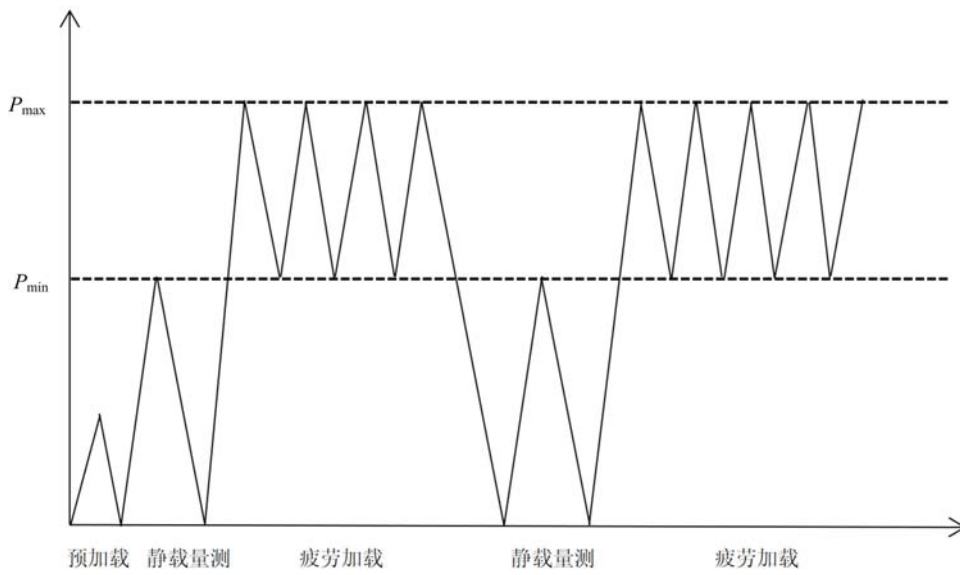
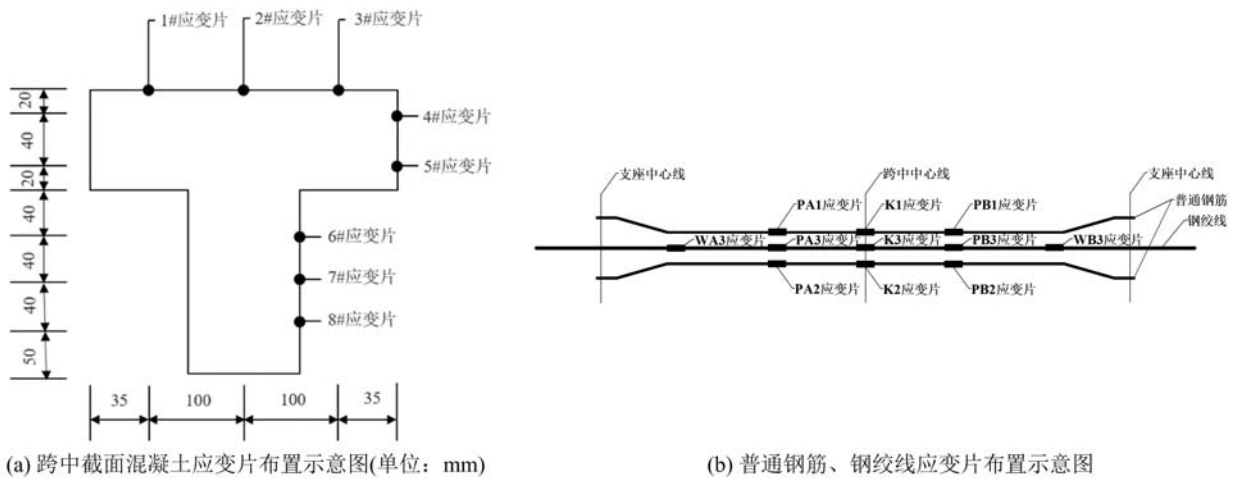


图4 疲劳加载示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fatigue loading



(a) 跨中截面混凝土应变片布置示意图(单位: mm)

(b) 普通钢筋、钢绞线应变片布置示意图

(c) 试验梁位移布置图

图5 试验梁测点布置图

Fig. 5 Layout of test beam measuring points

2 结果与分析

2.1 静载试验结果

静载试验梁的破坏形态如图6所示。在静力作用下,试验梁出现了典型的弯曲破坏,且始于受拉钢筋的屈服,最后以跨中顶部受压区混凝土被压溃为最终破坏,说明试验梁的截面配筋合适,破坏形式为适筋破坏。

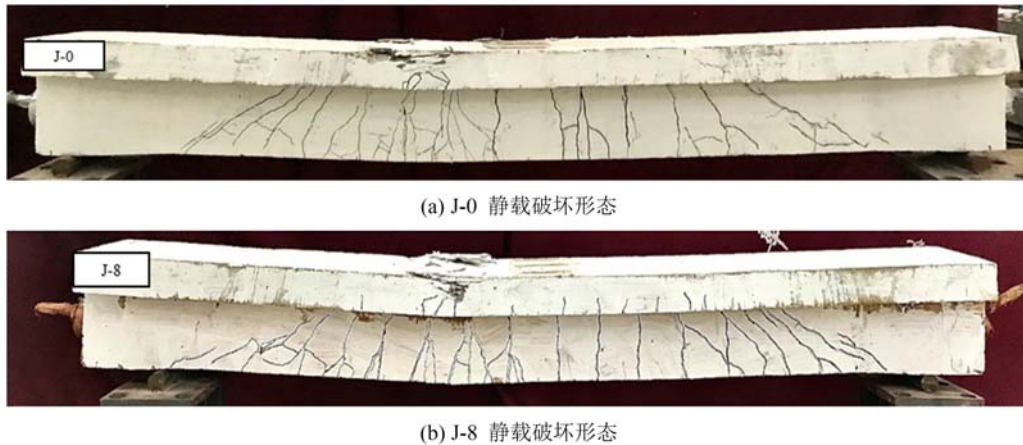


图6 静载试验梁破坏形态

Fig. 6 Failure modes of static load test beams

2.2 疲劳试验结果

2.2.1 疲劳加载下试验梁的破坏

图7为腐蚀试验梁在疲劳加载下的裂缝分布及破坏形态。所有试验梁的最终裂缝分布情况基本相同,在加载初期,试验梁的纯弯段出现竖向裂缝,随着疲劳加载循环次数的增加,竖向裂缝迅速发展,且试验梁剪弯段开始出现剪切斜裂缝和腹剪斜裂缝,并向翼缘上部延伸;疲劳循环加载后期,裂缝的扩展和延伸愈加明显,接近破坏时,主裂缝呈树枝状向周围区域扩展,底部钢筋发生疲劳断裂,混凝土脱落,P-0-0.3、P-8-0.3、P-8-0.45试验梁的跨中部位出现倒“V”字形的疲劳断口,为典型的正截面破坏,而P-8-0.6试验梁为斜截面剪切破坏。所有试验梁的疲劳断口位置接近,均位于跨中部位靠近加载点处。试验结束后,对试验梁进行破型,取出钢筋和钢绞线,发现底部钢筋出现明显的脆性断裂(断口如图7(e)所示),钢绞线出现少许塑性变形,呈不规则断口,如图7(i)所示。

2.2.2 钢筋疲劳断口形貌

图8为不同试件疲劳破坏后的钢筋断面宏观形态。4根试验梁的钢筋疲劳断面形态大体一致,分为4个区域:第1个区域为疲劳裂纹的起始发生位置即裂纹源区,一般出现在钢筋的螺纹部分,面积相对其他区域较小,断面形态比较粗糙,并且时常伴有放射状的细纹;第2个区域为裂纹发展区域,该区域相对比较平滑,随着疲劳荷载上限的增大,疲劳寿命减少,裂纹发展区域占整个断面总面积的比例越来越小;第3个区域为临界过渡区,当疲劳裂纹发展到后期,裂纹发展区开始变得粗糙,并伴有小裂纹;第4个区域为断裂区,当疲劳荷载增加至试验梁疲劳破坏时,钢筋的剩余有效面积不能承受荷载而发生断裂,形成撕裂状断裂区域,疲劳断口区域划分示意图如图9所示。通过对比不同疲劳上限值发现,裂纹发展区的粗糙程度与疲劳荷载上限值成正比,造成这一现象的原因:疲劳荷载上限值越大,钢筋的疲劳寿命越短,钢筋截面的实际应变幅值就会越高,因此,断口由于没有经历那么多次的挤压和摩擦,表面粗糙程度就会越大甚至呈现撕裂状的断裂区。

2.2.3 疲劳加载下试验梁荷载-挠度曲线分析

图10为试验梁在疲劳荷载下预定次数停止后的跨中荷载-挠度曲线。从图10可以发现,在疲劳加载作用下,随着疲劳循环次数的增加,试验梁的荷载-挠度曲线斜率逐渐减小,到疲劳后期斜率下降更为显著,整个疲劳过程呈现典型的“疏-密-疏”三阶段特征。通过腐蚀试验梁与未腐蚀试验梁比较,发现

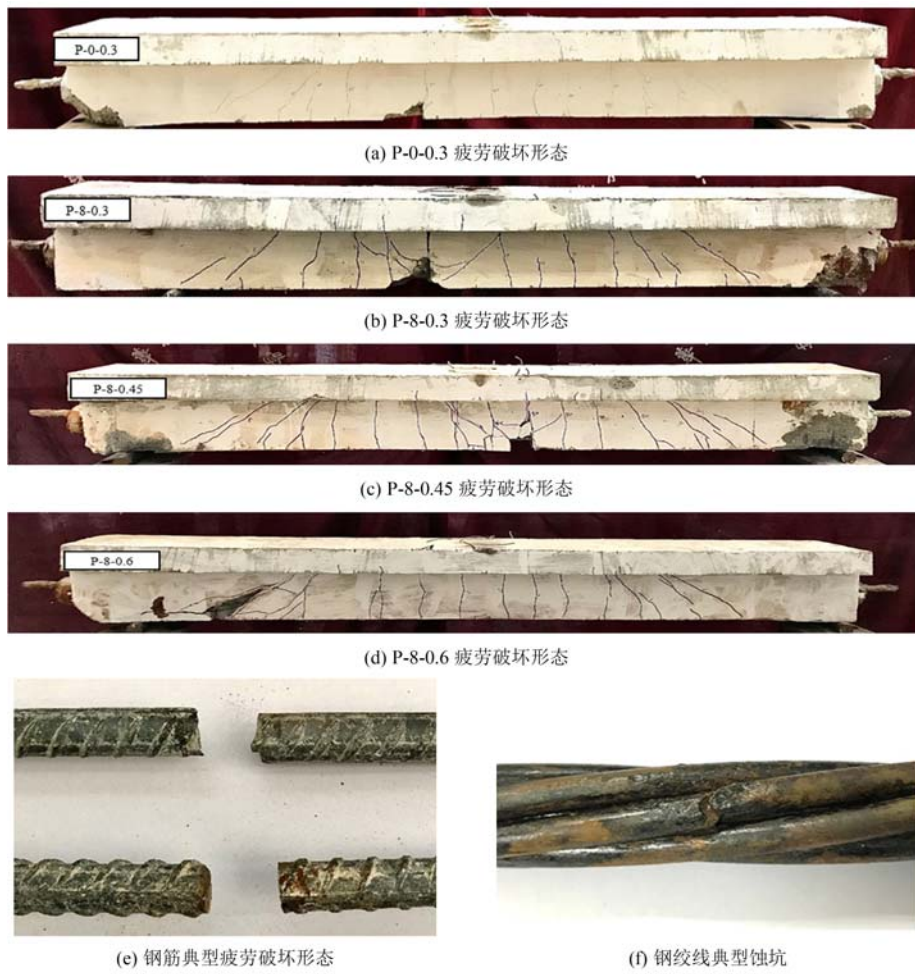


图 7 疲劳试验梁破坏形态
Fig. 7 Failure mode of fatigue test beam

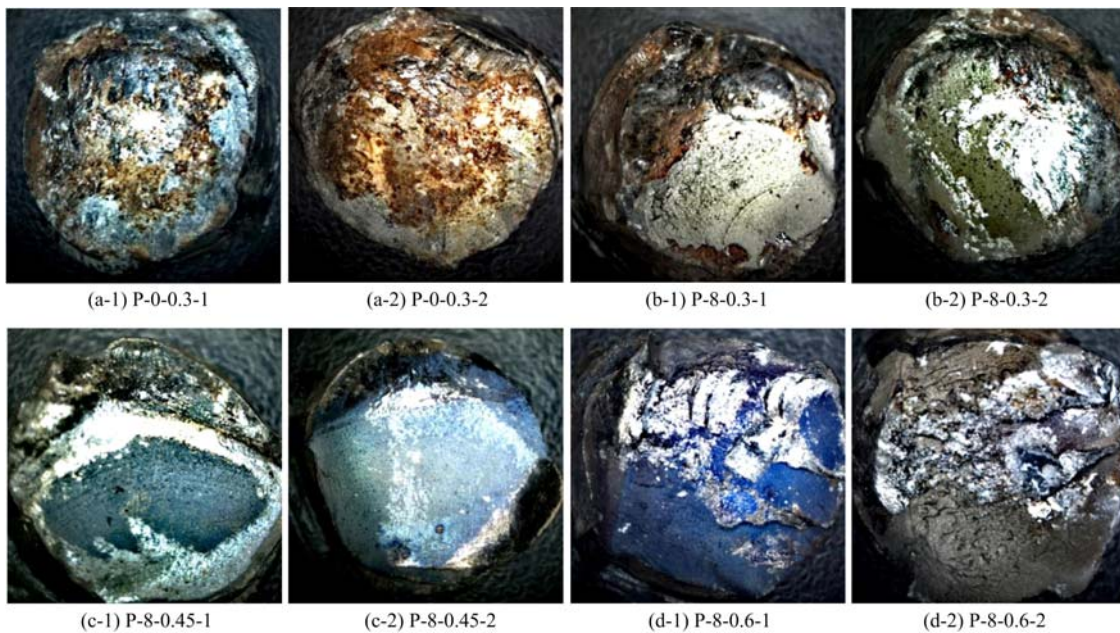


图 8 钢筋疲劳断裂面宏观形态
Fig. 8 Macromorphology of fatigue fracture surface of steel bar

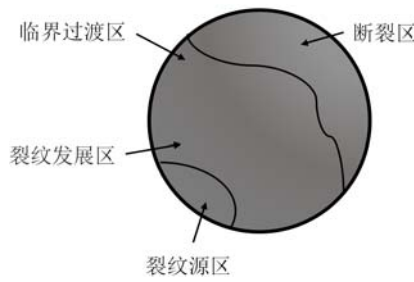


图 9 疲劳断口区域划分示意图

Fig. 9 Schematic diagram of fatigue fracture area division

随疲劳加载次数的增加, 腐蚀试验梁挠度的变化速率相较于未腐蚀构件更快, 但是增量并没有太大变化。通过对不同疲劳上限值的试验梁比较, 发现疲劳上限值越高, 位移增长速率就越快, 位移的增量也越大。

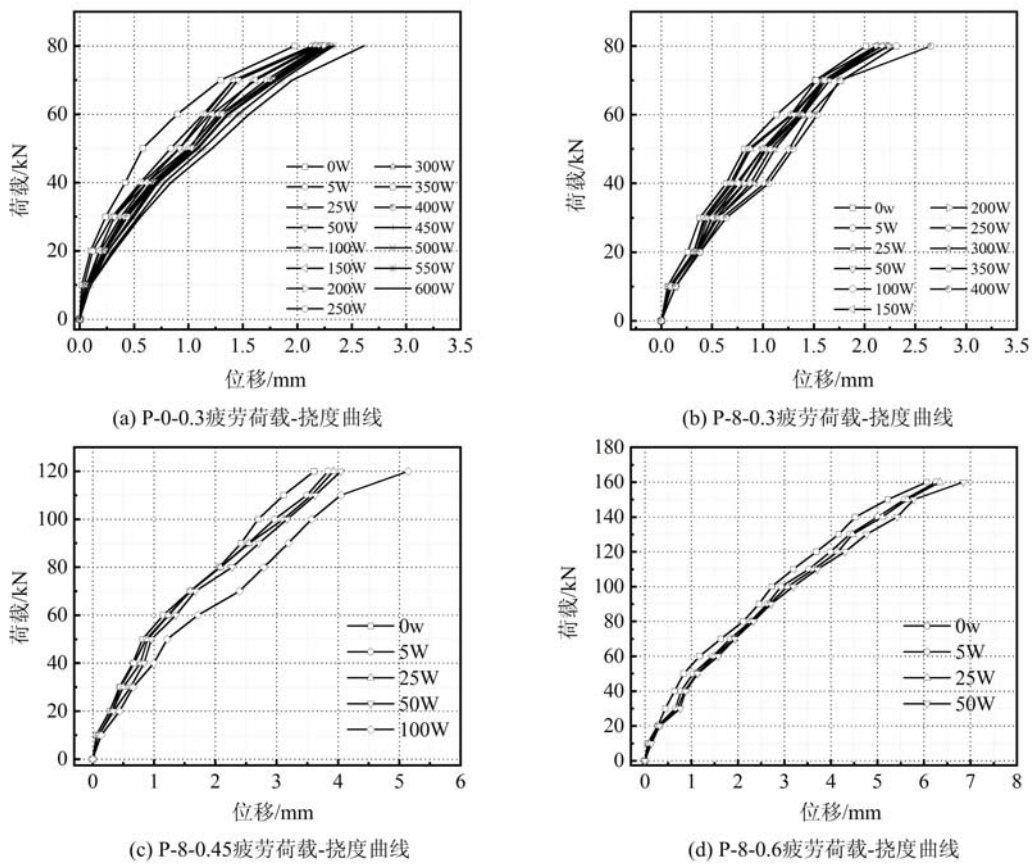


图 10 疲劳试验梁荷载-挠度曲线

Fig. 10 Fatigue test beam load-deflection curve

2.2.4 疲劳加载下试验梁混凝土荷载-应变曲线分析

图 11 为试验梁在疲劳荷载作用下的混凝土荷载-应变曲线。由图 11 可见, 在整个疲劳循环过程中, 跨中截面顶部受压区混凝土应变的变化趋势大致呈现出“疏-密-疏”的特征。当疲劳循环次数达到 100 万次后, 应变增量比初始荷载更明显, 然后逐渐趋于稳定, 应变变化较小, 在失效早期应变增量开始增加。对比不同疲劳上限值的混凝土应变发现, 随着疲劳荷载上限的增大, 梁顶受压区的应变增长率逐渐增大, 但应变增量相差不大。

2.2.5 疲劳加载下试验梁普通钢筋荷载-应变曲线分析

图 12 为疲劳荷载作用下试验梁底部受拉钢筋荷载-应变曲线(由于底部钢筋和混凝土之间的黏结在疲劳荷载下逐渐退化, 钢筋应变片受到严重损坏。仅收集有效数据进行分析)。由图 12 可见, 在整个

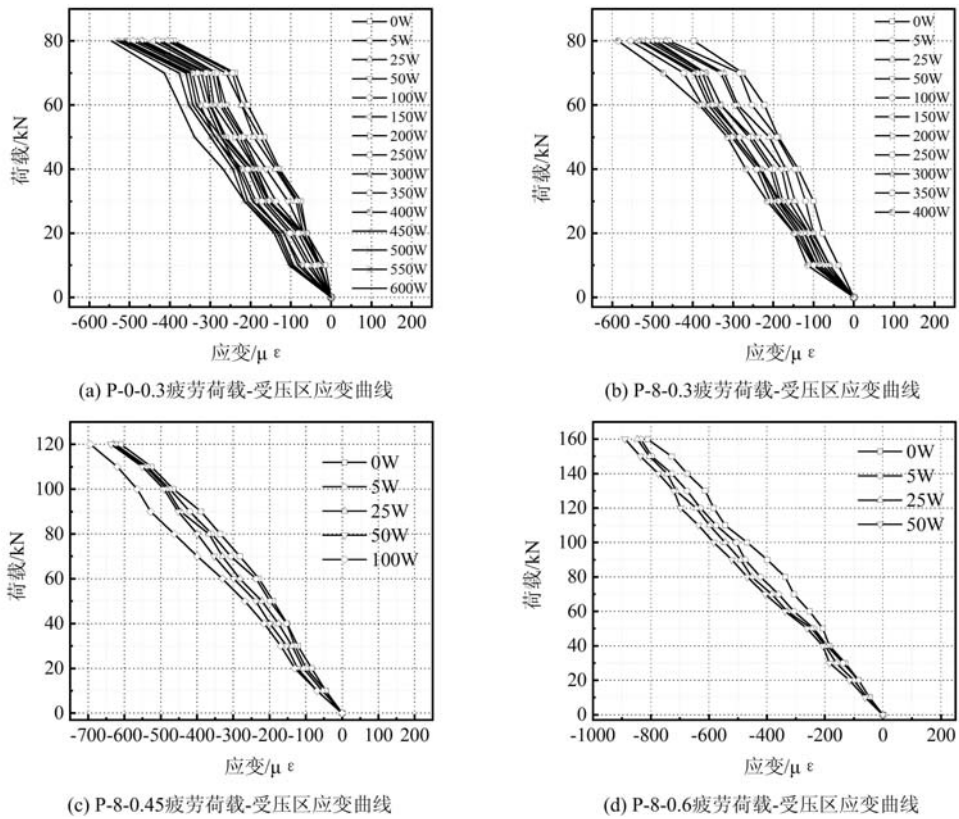


图 11 疲劳试验梁跨中顶部受压区混凝土荷载-应变曲线

Fig. 11 Load-strain curve of concrete in the compression zone at the top of the midspan of a fatigue test beam

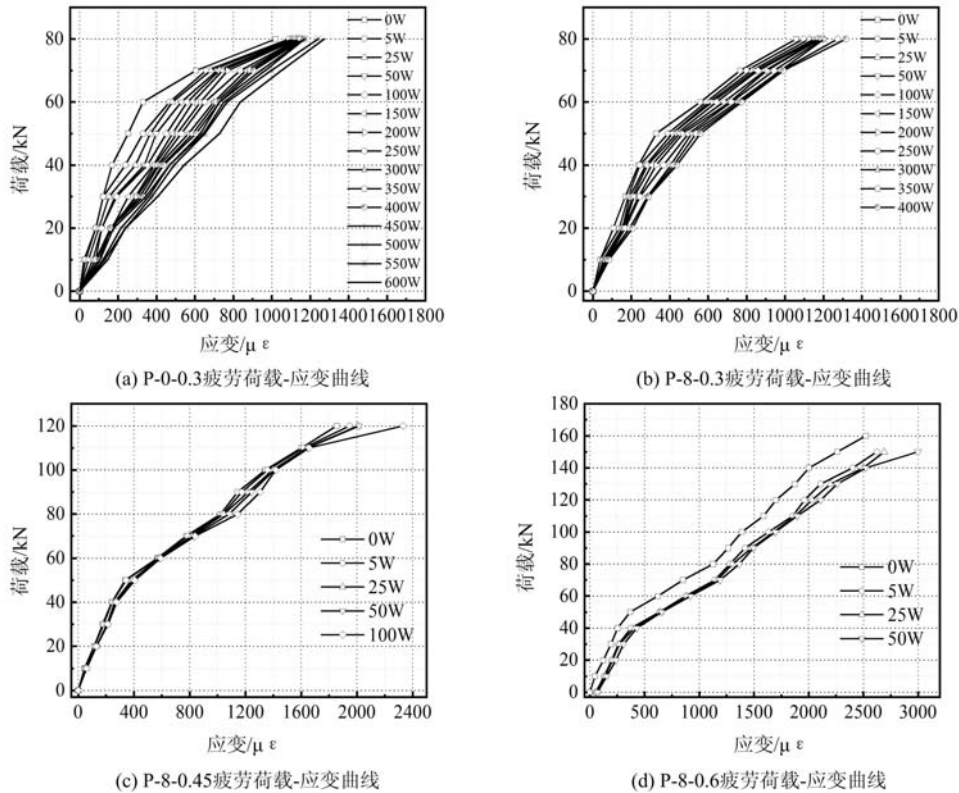


图 12 疲劳试验梁底部受拉钢筋荷载-应变曲线

Fig. 12 Load-strain curve of tensile reinforcement at the bottom of fatigue test beam

等幅疲劳循环加载过程中,所有试验梁的钢筋应变发展趋势大致相似,逐渐向拉应变增大的方向移动,且随着腐蚀率的增加而减小;受拉钢筋荷载-应变曲线和试验梁的荷载-跨中挠度曲线与疲劳荷载循环次数的曲线分布一致,呈现出了“疏-密-疏”的三阶段变化趋势。疲劳破坏前,P-8-0.3 试验梁底部钢筋应变为 $1317\mu\epsilon$, P-8-0.45 试验梁底部钢筋应变为 $2331\mu\epsilon$, P-8-0.6 试验梁底部钢筋应变为 $2998\mu\epsilon$,说明钢筋的应变值随着疲劳上限值的增大而增大。

2.2.6 疲劳加载下试验梁预应力筋荷载-应变曲线分析

图 13 为疲劳荷载作用下试验梁预应力筋荷载-应变曲线(P-0-0.3 与 P-8-0.45 试验梁在疲劳次数达到 25 万次时,由于试验梁内部环境复杂,导致钢绞线应变片失效,所以无法采集相应数据)。由图 13 可见,预应力钢绞线随疲劳循环荷载的应变发展趋势和钢筋趋势基本上一致,呈现三段式的发展规律,与钢筋不同的是,在临近破坏时预应力钢绞线应变离散性较大,这是由于预应力钢绞线是由 7 股不同钢丝捻制而成的,在试验过程中误差较大,因此,在临界破坏时无法准确地统计相关数据。对比不同疲劳上限值的钢绞线应变数据可以发现,随着疲劳上限值的增大,应变普遍增大,并且应变增长速率也更快,这点与普通钢筋应变发展规律一致。

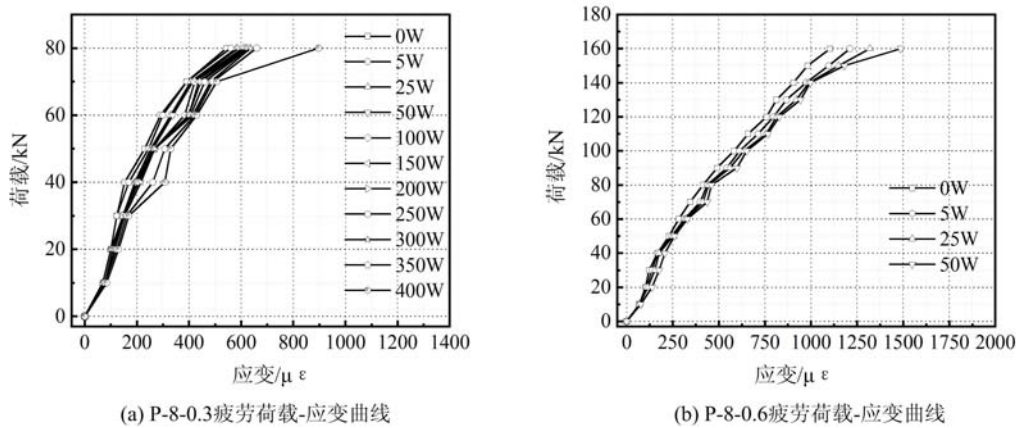


图 13 疲劳试验梁预应力筋荷载-应变曲线

Fig. 13 Load-strain curve of prestressed tendons in fatigue test beams

2.2.7 疲劳加载下试验梁寿命分析

试验梁疲劳寿命结果见表 7。由表 7 可见,未腐蚀构件的疲劳寿命达到了 6480584 次,远远超过规范要求的 200 万次;与未腐蚀试验梁相比,P-8-0.3 梁的疲劳寿命下降了 32.7%,仍能满足规范所要求的 200 万次,说明钢绞线腐蚀会对构件疲劳寿命产生影响。对比试验梁 P-8-0.3、P-8-0.45、P-8-0.6 发现,随着疲劳上限值的增大,疲劳寿命急剧降低,相对于试验梁 P-8-0.3 的疲劳寿命,试验梁 P-8-0.45、P-8-0.6 分别下降了 69.3%、85.1%,且试验梁 P-8-0.45 和 P-8-0.6 的疲劳寿命均小于 200 万次,说明不同疲劳上限值的加载对梁疲劳寿命的影响显著。

表 7 试验梁疲劳寿命结果

Tab. 7 Test beam fatigue life results

试验梁编号	加载下限值/kN	加载上限值/kN	极限疲劳寿命 N_f /次
P-0-0.3			6480584
P-8-0.3	40	80	4362685
P-8-0.45		120	1337496
P-8-0.6	40	160	650997

注:极限疲劳寿命 N_f 指预应力混凝土梁疲劳破坏(第 1 根非预应力筋断裂)时对应的荷载循环次数。

3 结论

(1) 在静载试验中,腐蚀前后试验梁的破坏均为适筋破坏,其最终破坏特征皆为跨中上部受压区混

凝土被压溃。

(2) 4根试验梁均以底部钢筋发生疲劳断裂为疲劳破坏标志,预应力筋和受压区的混凝土未出现破坏性损伤,其中试验梁 P-0-0.3、P-8-0.3、P-8-0.45 为典型的正截面弯曲破坏形态,P-8-0.6 为斜截面剪切破坏,说明高幅值重载对试验梁的跨中位移及混凝土裂缝的开展影响较大。

(3) 疲劳断裂的钢筋的截面可分为4个区域:裂纹源区、裂纹发展区、裂纹过渡区以及断裂区。疲劳裂纹一般从钢筋的缺陷处开始发展,面积相对其他区域较小,断面形态比较粗糙,并且时常伴有放射状的细纹,然后随着疲劳荷载的进行逐渐向断裂区发展;并且疲劳荷载上限值越大,疲劳寿命越短,疲劳次数越少,钢筋截面的实际应变幅值相应增加,断口没有经历太多的挤压和摩擦,表面就变得更加粗糙,甚至呈现撕裂状的断裂区。

(4) 在疲劳加载过程中,试验梁荷载-挠度曲线、混凝土荷载-应变曲线、钢筋及预应力筋荷载-应变发展趋势大致相似,呈现出“疏-密-疏”三段式变化,加载初期和疲劳后期应变发展迅速,中间发展阶段较为平稳。相对于腐蚀率为8%的试验梁,疲劳上限值对试验梁的疲劳损伤影响更为显著。

(5) 试验梁 P-8-0.3 相较于未腐蚀试验梁,疲劳寿命降低了32.7%,但仍能满足规范要求,说明腐蚀率为8%的情况下,对结构的破坏影响较小,试验梁 P-8-0.45 和 P-8-0.6 的疲劳寿命均小于200万次,说明在实际工程中需要注意重载交通对试验梁的影响。

参考文献:

- [1] 李镇,张红梅,李欣,等.重载交通对公路路面使用寿命的影响[J].交通运输研究,2011,4(12):61-65 (LI Zhen, ZHANG Hongmei, LI Xin, et al. Influence on the highway pavement life from heavy traffic[J]. Transport Research, 2011, 4(12):61-65 (in Chinese))
- [2] 公路桥涵设计通用规范:JTG D60-2015[S].北京:人民交通出版社,2015 (General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60-2015[S]. Beijing: People's Communications Press, 2015 (in Chinese))
- [3] 陈小英,李唐宁,黄音,等. CFRP 体外预应力加固钢筋混凝土 T 型梁试验[J]. 中国公路学报,2010,23(2):56-63 (CHEN Xiaoying, LI Tangning, HUANG Yin, et al. Experiment on reinforced concrete T-beams strengthened with external prestressed CFRP sheets[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(2):56-63 (in Chinese))
- [4] 肖赞,雷俊卿,张坤,等.多级变幅疲劳荷载下预应力混凝土梁刚度退化[J]. 吉林大学学报(工学版),2013,43(3):665-670 (XIAO Yun, LEI Junqing, ZHANG Kun, et al. Fatigue stiffness degradation of prestressed concrete beam under multilevel amplitude cycle loading [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(3):665-670 (in Chinese))
- [5] 李进洲,余志武,宋力.疲劳重复荷载下预应力混凝土梁的刚度退化规律[J].公路交通科技,2013,30(8):62-69 (LI Jinzhou, YU Zhiwu, SONG Li. Stiffness degradation regularity of PC beam under fatigue repeated loading [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(8):62-69 (in Chinese))
- [6] 马亚飞,齐洪鹤,苏小超,等.锈蚀疲劳耦合作用下钢筋混凝土梁性能退化试验[J].实验力学,2020,35(3):472-478 (MA Yafei, QI Honghe, SU Xiaochao, et al. Experimental study on performance degradation of reinforced concrete beams under coupled effect of corrosion and fatigue[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(3):472-478 (in Chinese))
- [7] 柳磊,吕毅刚,禹卓杰,等.疲劳荷载与氯盐耦合作用下混凝土中氯离子扩散行为的试验研究[J].实验力学,2017,32(4):517-524 (LIU Lei, LÜ Yigang, YU Zhuojie, et al. Experimental study on diffusion behavior of chlorine ion in concrete subjected to fatigue loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(4):517-524 (in Chinese))
- [8] 余志武,李进洲,宋力.重载铁路桥梁疲劳试验研究[J].土木工程学报,2012,45(12):115-126 (YU Zhiwu, LI Jinzhou, SONG Li. Experimental study on fatigue behaviors of heavy-haul railway bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(12):115-126 (in Chinese))
- [9] 韩基刚.疲劳荷载作用下部分预应力混凝土梁残余性能试验研究[J].建筑结构,2021,51(4):96-100 (HAN Jigang. Experimental study on the residual performance of partially prestressed concrete beams under fatigue loading[J]. Building Structure, 2021, 51(4):96-100 (in Chinese))

- [10] 赵少伟, 张晓彬, 郭娇, 等. 预应力 CFRP 板加固混凝土梁疲劳试验研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(7):57-61 (ZHAO Shaowei, ZHANG Xiaobin, GUO Jiao, et al. Study on fatigue test of concrete beams strengthened with prestressing CFRP plates[J]. Building Science, 2017, 33(7):57-61 (in Chinese))
- [11] ZHOU C, ZHU Z, WANG Z, et al. Deterioration of concrete fracture toughness and elastic modulus under simulated acid-sulfate environment[J]. Construction and Building Materials, 2018, 176:490-499.
- [12] BALAGURU P N. Analysis of prestressed concrete beams for fatigue loading[J]. Pci Journal, 1981, 26(3):70-94.
- [13] 何初生, 王文炜, 杨威, 等. 预应力 CFRP 布加固钢筋混凝土梁疲劳性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(4):841-847 (HE Chusheng, WANG Wenwei, YANG Wei, et al. Experimental study on fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened by prestressed CFRP sheets [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(4):841-847 (in Chinese))
- [14] 李鹏飞, 冯楚祥, 诸成烽, 等. 预应力陶粒混凝土叠合梁疲劳性能试验研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(8):103-110 (LI Pengfei, FENG Chuxiang, ZHU Chengfeng, et al. Experimental research on fatigue performance of prestressed ceramsite concrete composite beams [J]. Industrial Construction, 2022, 52(8):103-110 (in Chinese))
- [15] ZHANG W, LIU X, GU X. Fatigue behavior of corroded prestressed concrete beams[J]. Construction and Building Materials, 2016, 106:198-208.
- [16] 陈启烜, 贺瑶, 唐亚妮, 等. 南京市大气降水化学特征及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2024, 44(1):112-123 (CHEN Qixuan, HE Yao, TANG Yani, et al. Chemical characteristics and sources of atmospheric precipitation in Nanjing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(1):112-123 (in Chinese))
- [17] PAGE C L, TREADAWAY K. Aspects of the electrochemistry of steel in concrete[J]. Nature, 1982, 297(5862):109-115.
- [18] 靳红华, 任青阳, 肖宋强, 等. 模拟酸雨侵蚀环境下普通混凝土腐蚀机理及时效性能研究进展[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(6):1-14 (JIN Honghua, REN Qingyang, XIAO Songqiang, et al. Research progress on corrosion mechanism and aging performance of ordinary concrete under simulated acid rain erosion[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(6):1-14 (in Chinese))
- [19] 任青阳, 靳红华, 肖宋强, 等. 模拟酸雨侵蚀环境下钢筋混凝土结构长期性能研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(5):41-72 (REN Qingyang, JIN Honghua, XIAO Songqiang, et al. Review on long-term performance of reinforced concrete structures under simulated acid rain erosion environments [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(5):41-72 (in Chinese))
- [20] 刘云萌, 蔡哲. 南昌市酸雨变化规律分析[J]. 能源研究与管理, 2010(3):28-33 (LIU Yunmeng, CAI Zhe. Analysis on the rules of acid rain variation in Nanchang[J]. Energy Research and Management, 2010(3):28-33 (in Chinese))
- [21] 杨晓明, 吴天宇, 陈永林. 人工加速锈蚀钢筋混凝土构件中钢筋锈蚀率与锈蚀电流的关系研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(10):3410-3416 (YANG Xiaoming, WU Tianyu, CHEN Yonglin. Relationship between the current and corrosion ratio in corroded reinforced concrete component obtained by artificial accelerated corrosion method [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(10):3410-3416 (in Chinese))
- [22] 谢文琪, 钟兰岷, 曾凯. 南昌市酸雨变化特征及来源分析[J]. 中南农业科技, 2023, 44(6):166-169 (XIE Wenqi, ZHONG Landi, ZENG Kai. Analysis on the characteristics and sources of acid rain changes in Nanchang city[J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2023, 44(6):166-169 (in Chinese))
- [23] 赵川, 窦远明, 孙吉书, 等. 重载交通对预应力混凝土梁疲劳性能影响研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(6):55-59 (ZHAO Chuan, DOU Yuanming, SUN Jishu, et al. Study of heavy load traffic effect on fatigue performance of pre-stressed concrete beams[J]. Building Structure, 2017, 47(6):55-59 (in Chinese))

Experimental study on fatigue performance of prestressed concrete T-beams under heavy load traffic and simulated acid rain corrosion environment

XU Kaicheng^{1,2}, HUANG Lingjuan², YANG Hongyu²,
ZHANG Liqing^{1,2}, YI Bin², CHEN Mengcheng^{1,2}

(1. The State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: To investigate the effects of acid rain corrosion on the fatigue performance of prestressed concrete T-beams under heavy-duty traffic, six corroded beams were subjected to static load tests and constant amplitude fatigue tests. The microscopic morphology of the steel bars at the fatigue fracture locations was examined, and a geometric model of the steel bar failure under the corresponding conditions was established. The results showed that fatigue brittle fracture of the bottom steel bars was the main failure mode of all corroded prestressed concrete beams. The load-deflection curves of the prestressed concrete beams, as well as those of the concrete, steel bars, and steel strands, exhibited a three-stage variation of “sparse-dense-sparse” during the fatigue loading process. The evolution of fatigue cracks in the steel bars was consistent with the changes in steel strain. The fatigue life of the corroded beams was reduced by 32.7% compared to the uncorroded ones. When the fatigue upper limit value was 0.45 and 0.6 times the ultimate load, the fatigue life of the prestressed concrete beams was less than 2 million cycles, which was 69.3% and 85.1% lower than that when the fatigue upper limit value was 0.3 times the ultimate load, respectively.

Keywords: heavy load traffic; prestressed concrete beam; acid rain corrosion; constant amplitude fatigue experiment; fatigue life