

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022032120240461

文章编号: 1674-599X(2024)02-0088-11

引用格式: 颜东煌, 彭坤帅, 袁晟, 等. 部分预应力混凝土斜拉桥主梁带裂缝状态下疲劳性能试验研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(2): 88-98.

Citation: YAN Donghuang, PENG Kunshuai, YUAN Sheng, et al. Experimental study on fatigue performance of partially prestressed concrete cable-stayed bridge main beam with cracks[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(2): 88-98.

## 部分预应力混凝土斜拉桥主梁带裂缝状态下 疲劳性能试验研究

颜东煌, 彭坤帅, 袁晟, 郭鑫, 袁明

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:** 为研究大跨度部分预应力混凝土 (partially prestressed concrete, PPC) 斜拉桥在主梁带裂缝状态下的疲劳性能, 以双塔混凝土斜拉桥为工程依托, 制作节段缩尺模型。根据有限元计算结果调整节段缩尺模型斜拉索索力及主梁预应力, 将主梁受力调整至部分预应力状态。将节段缩尺模型预加载至一定损伤后, 开展 PPC 斜拉桥带裂缝状态下的疲劳性能试验研究。结合实桥荷载谱设计疲劳试验参数, 疲劳荷载确定为 22 ~ 34 kN, 加载频率为 1.5 Hz, 共循环加载 250 万次, 并在不同循环加载次数下对模型梁进行静载试验。试验结果表明: 在有损伤的情况下, 在疲劳试验过程中, 主梁裂缝处于“闭合-张开-闭合”的循环过程中; 随着疲劳荷载加载次数的增加, 静载试验中的主梁挠度平稳增加; 主梁  $L/4$  ( $L$  为跨径)、 $L/2$  和  $3L/4$  截面处体系刚度分别退化了 5.08%、5.19% 和 6.63%; 在不同加载次数的静载上峰值工况下, 主梁裂缝平缓发展, 裂缝宽度由 0.04 mm 扩展至 0.06 mm, 卸载后, 所有裂缝均闭合; 在静载试验中, 相同荷载作用下的索力基本不变, 斜拉索基本无损伤。综合结果表明, PPC 斜拉桥在主梁带裂缝状态下体系刚度下降缓慢, 斜拉索刚度基本无退化, 体系承载能力仍能满足正常使用情况下的要求。

**关键词:** 桥梁工程; 斜拉桥; 部分预应力混凝土; 疲劳试验; 刚度; 承载能力

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

## Experimental study on fatigue performance of partially prestressed concrete cable-stayed bridge main beam with cracks

YAN Donghuang, PENG Kunshuai, YUAN Sheng, GUO Xin, YUAN Ming

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** A segment scaled model is produced based on the double tower concrete cable-stayed bridge as the engineering foundation to study the fatigue performance of large-span partially prestressed concrete (PPC) cable-stayed bridges with cracked main beams. The cable force and prestressing force of the main beam of the segmental scaled model were adjusted to partial prestressing state based on the results of finite element calculation. The fatigue performance test research of PPC cable-stayed bridge with cracks was carried out after preloading the segmental scaled model to a certain damage. The fatigue test parameters were designed by combining the real bridge load spectrum, and the fatigue load was determined as 22-34 kN with a loading frequency of 1.5 Hz, and the cyclic loading was 2.5 million

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878073、52078054); 湖南省交通科技项目 (201932); 湖南省自然科学基金项目 (2021JJ30730); 湖南省研究生科研创新项目 (CX20200832、CX20190650)

通信作者: 袁晟 (1990—), 男, 博士研究生, 主要从事桥梁结构分析与施工控制方面的研究工作。E-mail: 1159693957@qq.com

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

times. The static load tests were carried out on the model beam under different cycle loading times. The test results indicated that the cracks of the main beam were in a "closed-open-closed" cyclic process during the fatigue loading under the condition of pre-damage. The deflection of the main beam in static load tests increased steadily with the increase of fatigue loading times. The degradation of the system stiffness at  $L/4$  ( $L$  is span),  $L/2$  and  $3L/4$  sections of the main beam was 5.08%, 5.19% and 6.63%. The cracks in the main beam developed smoothly, and the crack width expanded from 0.04 mm to 0.06 mm, and all the cracks were closed after unloading under the peak load condition of the static load with different loading times. The cable force was basically unchanged under the same load condition, and the stayed cable was basically undamaged in the static load test. In conclusion, the system stiffness of PPC cable-stayed bridge decreases slowly under the condition of main girder with cracks. There is no obvious degradation of stay cable stiffness. The bearing capacity of the system can still meet the requirements of normal use.

**Key words:** bridge engineering; cable-stayed bridge; partially prestressed concrete; fatigue test; stiffness; load capacity

混凝土斜拉桥是一种桥面体系受压、支承体系受拉的特殊桥梁结构<sup>[1]</sup>。目前,混凝土斜拉桥的主梁多采用全预应力混凝土,斜拉索体系中的水平分力为主梁大部分区域提供了体外预应力。主梁跨中区域若按照全预应力设计,易引起以下问题<sup>[2]</sup>: ① 预应力锚下混凝土开裂;② 预压区高压应力状态下混凝土收缩徐变引起的反拱过大;③ 在高应力状态下,混凝土结构易出现脆性破坏。伴随着全预应力混凝土斜拉桥问题的逐步显现,学者们发现若主桥跨中区域按部分预应力混凝土 (partially prestressed concrete, PPC) 设计,并允许此区域出现拉应力甚至未超限裂缝,这样既不影响结构的正常使用,又可有效地减少由过大的预应力引起的结构局部开裂<sup>[1-2]</sup>。因此,采用PPC作为斜拉桥主梁具有一定的工程应用价值。刘昀等<sup>[2-4]</sup>已完成了PPC斜拉桥理论上的可行性论证及相关计算,提出了混凝土斜拉桥节段缩尺相似法,完成了混凝土斜拉桥节段缩尺模型梁静载试验,并结合全桥整体有限元模型与节点局部有限元模型分析了混凝土主梁的非线性特征,验证了节段缩尺模型试验的有效性;陈羽中等<sup>[5]</sup>基于模态柔度矩阵对PPC斜拉桥有限元模型进行了进一步修正,使静载试验实测值与理论值相吻合。

现行规范中规定:对于跨径大于100 m的桥梁的主要受力构件,不宜进行部分预应力混凝土设计<sup>[6]</sup>。采用PPC结构作为斜拉桥主梁是一种处于探索阶段的设计思路,在应用到实桥设计前,要验证

结构的承载能力,也需要验证其耐久性与可靠性。目前,颜东煌等<sup>[7]</sup>对PPC斜拉桥模型梁开展了完好梁的疲劳试验,在试验过程中主梁刚度基本无退化,且主梁未出现开裂,该试验证明PPC斜拉桥具有良好的抗疲劳性能。考虑到在B类PPC结构设计中,允许主梁在活载作用下出现未超限裂缝,所以从验证结构安全性的角度出发,开展带裂缝状态下的PPC斜拉桥疲劳性能研究十分必要。

目前,主要是以控制荷载作用下受拉区混凝土的受力状态来设计PPC结构的<sup>[8]</sup>,对于B类PPC结构,还需同时控制活载作用下的结构裂缝宽度。杜进生等<sup>[9]</sup>根据正常使用极限状态和带裂缝情况下的受拉钢筋应力及最小配筋率设计了部分预应力混凝土梁。王勇强等<sup>[10]</sup>研究了PPC梁在裂缝闭合时梁底缘的预应力,提出了卸载系数,并结合卸载系数提出了PPC梁裂缝控制设计方法。但采用PPC设计的桥梁大多为梁式桥,且一般为中小跨径。

本文研究工作的难点在于PPC斜拉桥桥型结构受力复杂,且对PPC斜拉桥疲劳性能的研究成果较少。目前,关于中小跨径桥梁结构的疲劳性能试验研究较为深入。普通混凝土结构具有非线性特征,开裂后非线性特征尤为明显,在长期使用情况下其结构承载力是现阶段主要的研究方向。梁俊松等<sup>[11]</sup>结合疲劳损伤本构模型,提出用基于损伤力学的疲劳加速算法来研究混凝土结构疲劳破坏的全过程,该算法能准确反映疲劳过程中混凝土的非线性过程。刘芳平等<sup>[12]</sup>借助实时应变监测系统,获

得了钢筋混凝土梁的疲劳残余应变与剩余刚度,以判定结构所处的安全状态。朱红兵等<sup>[13]</sup>通过开展大量空心板梁及T梁的疲劳试验,根据拟合试验梁钢筋退化曲线,获得了钢筋混凝土梁刚度退化公式,以判定服役桥梁的剩余寿命。陈梦成等<sup>[14]</sup>结合地铁实际环境,模拟不同环境下预损伤开裂后的钢筋混凝土梁的疲劳性能,并建立服役环境下钢筋混凝土梁疲劳寿命的预测模型。LIU等<sup>[15-16]</sup>对钢筋混凝土梁在等幅疲劳荷载作用下结构损伤和裂缝的发展规律进行了研究。周宏宇等<sup>[17]</sup>设计了3组不同尺寸的钢筋混凝土简支梁,通过疲劳及静载试验,发现在疲劳临界状态下,尺寸越大的试件变形性能越好,裂缝发展越平缓,并得出考虑尺寸效应的极限承载力参数。ZHANG等<sup>[18]</sup>对混凝土板梁在标准车辆荷载及超限荷载循环作用下结构刚度及承载能力的变化情况进行了分析。上述研究均针对普通混凝土结构,其疲劳性能一般由受拉钢筋与混凝土决定,当受拉区混凝土开裂后,其疲劳性能主要由受拉钢筋决定。普通混凝土疲劳性能的预测过程相对简单,且预测结果相对准确。

全预应力与部分预应力混凝土结构受力的非线性特征相对复杂,因此其疲劳性能也相对复杂。目前,关于预应力混凝土结构的疲劳试验较多。周宏宇等<sup>[19]</sup>借助基频法开展了预应力混凝土箱梁多级变幅疲劳加载试验,发现箱梁在疲劳过程中最初产生的裂缝为腹板斜裂缝,并结合常用的动、静刚度分析方法对比验证了用基频法所得刚度的合理性。雷俊卿等<sup>[20]</sup>研究了在疲劳荷载作用下,预应力混凝土斜拉桥裂缝发展及刚度退化情况,结果表明在小于开裂荷载值的疲劳荷载作用下,主梁会出现裂缝,且疲劳破坏梁挠度为静载破坏梁挠度的1.2倍。冯秀峰等<sup>[21]</sup>分别采用等幅荷载与随机变幅荷载对钢筋混凝土梁进行了加载试验,结果显示在随机变幅荷载作用下试验梁的疲劳寿命低于等幅疲劳荷载作用下试验梁的疲劳寿命,采用改进的Corten-Dolan累积损伤准则预测得到的疲劳精度最高。郭蓉等<sup>[22]</sup>研究了采用高强钢筋的部分预应力混凝土构件的疲劳性能,发现配高强钢筋的PPC构件的抗疲劳性能优于配普通钢筋的PPC构件的抗疲劳性能,且其具有更好的变形恢复能力。韩基刚等<sup>[23-24]</sup>分析了疲劳荷载作用下PPC梁的残余挠度、

普通钢筋的残余应变及试验梁的残余性能,得到了非预应力钢筋疲劳黏结应力-滑移关系,设计出了PPC梁裂缝宽度计算模型,并与PPC梁疲劳试验结果进行了对比。雷兵<sup>[25]</sup>通过PPC梁疲劳破坏全过程试验,发现试验梁挠度、钢筋应变、裂缝发展均呈三阶段增长,初期和后期发展较快,中期发展较慢,并推导出了疲劳全过程总挠度的计算公式。李清鑫等<sup>[26]</sup>采用图像技术识别现有桥梁裂缝宽度等,并根据裂缝信息构建有限元模型来分析桥梁剩余承载能力。

综上可知,现有的预应力混凝土(prestressed concrete, PC)研究与PPC研究主要监测结构疲劳过程中的挠度、裂缝宽度、钢筋及混凝土应变等参数,推导结构刚度退化过程计算公式,预测结构剩余疲劳寿命,研究成果能较好地反映中小跨径桥梁服役的实际情况,但研究对象多集中在简支梁上。关于大跨径桥梁疲劳性能的研究一般采取缩尺模型进行试验<sup>[7,27]</sup>,但相关试验研究较少,该部分工作仍处于探索阶段。此外,随着桥梁服役期的增加,部分桥梁因荷载超限已存在初始损伤。因此,研究具有预损伤的混凝土结构的疲劳性能,模拟实际结构在服役一段时期后承载能力的退化过程,对评价结构的安全可靠性具有重要意义<sup>[28-29]</sup>。

基于此,本文以双塔混凝土斜拉桥为工程背景,开展PPC斜拉桥节段缩尺模型试验,通过刚度相似原理<sup>[3]</sup>计算出模型参数。模型主梁采用PPC设计,并通过预加载形成结构初始损伤,在此基础上开展疲劳试验,通过挠度、索力、裂缝宽度及截面刚度等参数来评价PPC斜拉桥体系的抗疲劳性能,以分析该体系桥梁在实际工程中应用的可行性。

## 1 试验方案

### 1.1 工程背景

本文以李家沙大桥为工程背景,该桥是一座全预应力混凝土双塔斜拉桥,桥跨布置为(38+72+220+72+38)m,桥梁全长440m,边中跨比为0.5。桥塔采用双菱形塔,通过空间四索面将上下行两个主梁锚固于主塔上,该斜拉桥布置图见图1。该桥主梁采用典型的 $\pi$ 形混凝土主梁,主梁断面尺寸如图2所示



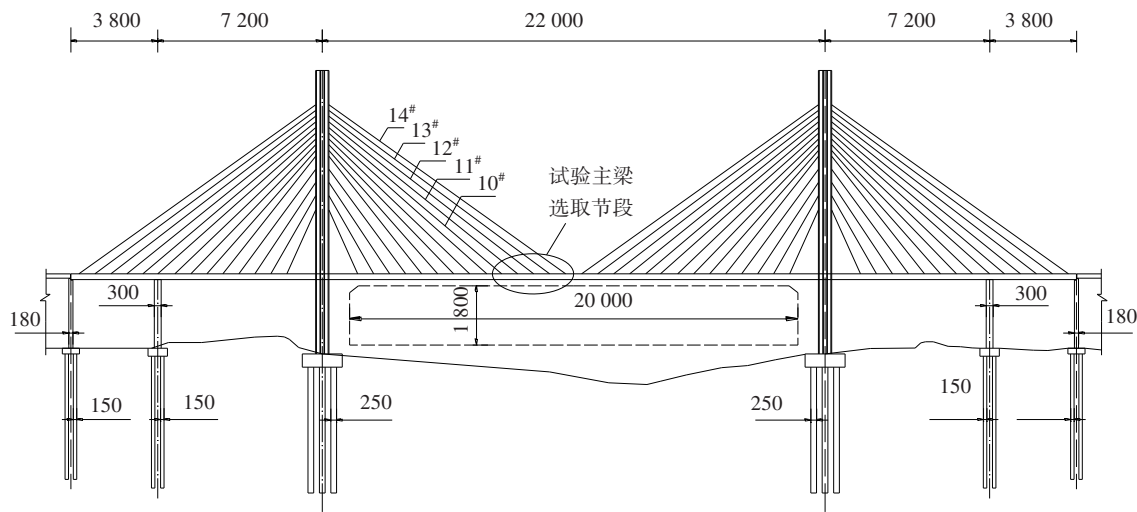


图1 双塔混凝土斜拉桥布置图(单位:cm)

Fig. 1 Layout of the double-tower concrete cable-stayed bridge (unit:cm)

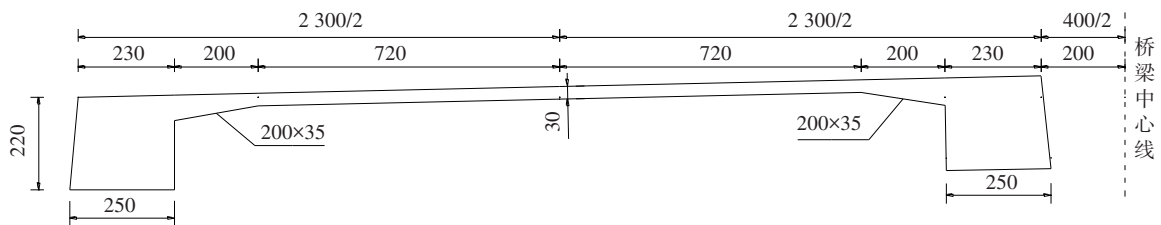


图2 主梁断面尺寸图(单位:cm)

Fig. 2 Section dimension drawing of main beam(unit:cm)

1.2 节段缩尺模型设计

原斜拉桥体系主梁为 $\pi$ 形截面,斜拉索采用平行钢丝索。考虑在预应力混凝土斜拉桥设计中,主梁压应力储备由跨中处向桥塔处递增,体系活载作用下弯矩最大位置位于跨中附近,因此本文截取单塔侧近跨中处10#~14#斜拉索及其对应梁段进行模拟。根据直径最大的斜拉索(14#)与单根 $\varnothing 15.2$  mm钢绞线的几何相似原理,斜拉索采用钢绞线模拟,构建比例为1:7.4的节段缩尺模型。模型梁采用实桥主梁横向半截面进行简化,并采用刚度相似法将其等效为T形横断面,以保证模型梁刚度与实桥主梁刚度相似<sup>[3]</sup>。模型梁横断面如图3所示。

1.3 主要材料参数

节段缩尺模型主要由主梁、斜拉索、弹性支承构成,模型试件主要材料参数见表1。主梁采用C50细骨料混凝土浇筑,其纵向受力普通钢筋采用型号为HRB335的钢筋(直径为10 mm),其余普通钢筋采用型号为HRB335的钢筋(直径为8 mm);其预应力钢筋采用4束抗拉强度标准值为1 860 MPa、直径

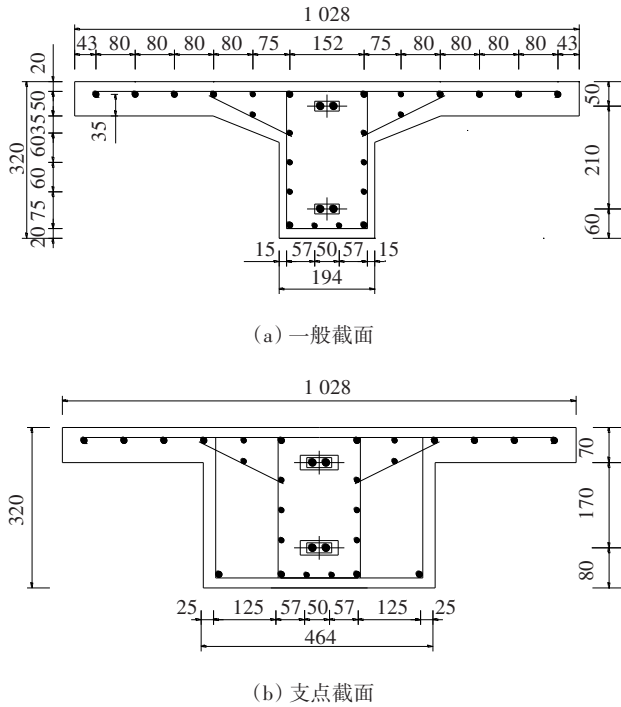


图3 PPC模型梁横断面尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 3 Cross section size and reinforcement of PPC model beam(unit:mm)

为 15.2 mm 的钢绞线(图 3)。预应力线型采用直线,分上下两处锚固,采用部分预应力设计,张拉控制

应力  $\sigma_{\text{con}}=930$  MPa。斜拉索均采用 1 束直径为 15.2 mm 的钢绞线。弹性支承采用特定刚度的弹簧。

表 1 模型试件主要材料参数

Table 1 Main material parameters of specimen model

试件	材料	长度/m	高度/mm	弹性模量/GPa	抗拉强度设计值/MPa	抗压强度设计值/MPa	刚度/(KN·mm <sup>-1</sup> )
混凝土	C50	7.196	320.0	34.5	22.4	1.83	
Ø10 mm 钢筋	HRB335	85.200		200.0	280.0	280.00	
Ø8 mm 钢筋	HRB335	301.260		200.0	280.0	280.00	
斜拉索	钢绞线	71.190		195.0	1 260.0	390.00	
预应力筋	钢绞线	28.784		195.0	1 260.0	390.00	
弹性支承(K <sub>1</sub> )	高锰含量钢		302.5	195.0			3 067
弹性支承(K <sub>2</sub> )	高锰含量钢		330.0	195.0			5 414

#### 1.4 加载方案

经计算,试验梁在自重作用下未达到成桥时结构应力的相似状态。因此,需要对模型梁施加附加均布荷载。由于附加均布荷载较大,本次试验设计了杠杆加载体系,通过多点加载模拟均布荷载。在挂篮中放置砝码,通过杠杆将砝码的重力按 1:4 的放大系数传递至主梁,杠杆体系分布如图 4 所示。



图 4 杠杆体系布置图

Fig. 4 Lever system layout

采用济南力支测试系统有限公司生产的 PMW800-2000 型电液式脉动疲劳试验机开展疲劳荷载与集中力加载试验。

节段缩尺模型通过调整成桥状态下的斜拉索索力,使模型主梁应力状态处于 B 类部分预应力状态。在模型试验中,用疲劳荷载模拟活载的疲劳作用,在模型试验中疲劳应力幅采用实桥荷载谱作用

下得出的实桥主梁底缘应力幅,幅值为 3 MPa。可通过斜拉桥模型的数值模拟计算得到该应力幅值,其对应的集中力加载幅值为 12 kN<sup>[7]</sup>,集中力加载位置如图 5 所示。

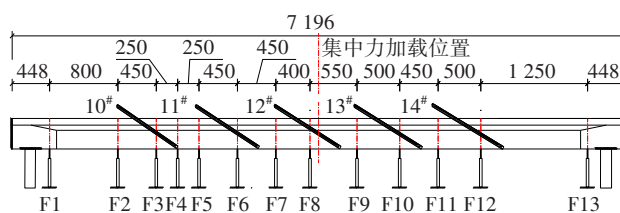


图 5 位移计布置(单位:cm)

Fig. 5 Arrangements of displacement meters(unit:cm)

在模型梁试验开始前,通过静力损伤加载使主梁在一定的车道荷载作用下,其最大裂缝宽度达到 0.2 mm,卸载后主梁裂缝均闭合,以此模拟运营期实桥在超载情况下已存在的损伤。

为研究主梁在使用过程中裂缝宽度达到部分预应力混凝土结构裂缝限宽 0.1 mm 时的疲劳性能,将疲劳上峰值设定为主梁裂缝宽度达到 0.04 mm 时对应的集中力荷载(根据几何等效原理<sup>[6]</sup>,实桥 0.1 mm 裂缝与模型梁 0.04 mm 裂缝等效),即 34 kN。疲劳下峰值按照集中力幅值 12 kN 确定,因此下峰值为 22 kN。在疲劳试验过程中,主梁受拉区混凝土在疲劳荷载作用下一直处于拉应力状态。

在疲劳试验过程中,静载试验采取分级加载方式,荷载范围为 0 kN 至疲劳荷载上峰值,每级持荷 5 min,同时进行索力、位移、裂缝和应变等测试项目

的观测。每次重复加载3次静载,加载参数见表2。

表2 疲劳加载与静载加载参数

Table 2 Parameters of fatigue loading and static loading

设计应力幅 值 $\Delta\sigma$ /MPa	疲劳加载参数		静载加载参数	
	上峰值 $F_{\max}$ /kN	下峰值 $F_{\min}$ /kN	上峰值 $F'_{\max}$ /kN	下峰值 $F'_{\min}$ /kN
3	34	22	34	0

1.5 测试装置与测点布置

1.5.1 位移计的布置

从模型梁的近塔端开始,分别在支座处、1/4跨径处( $L/4$ )、跨中处( $L/2$ )、3/4跨径处( $3L/4$ )和远塔端支座处( $L$ )布置一个静态位移计,其中, $L=6.3$  m为两端支座处位移计之间的距离。在位于斜拉索正下方的模型梁上,均布置一个静态位移计,在位移计间距较大处增加3个静态位移计。在模型梁上共布置13个位移计,位移计精度均为0.01 mm,具体布置如图5所示。为了避免模型梁振动影响位移计的精度,将位移计固定在模型梁正下方的钢管支架上,将支架锚固于地锚梁上,并在位移计附近设置百分表,以验证位移计数据的准确性。

1.5.2 索力测试

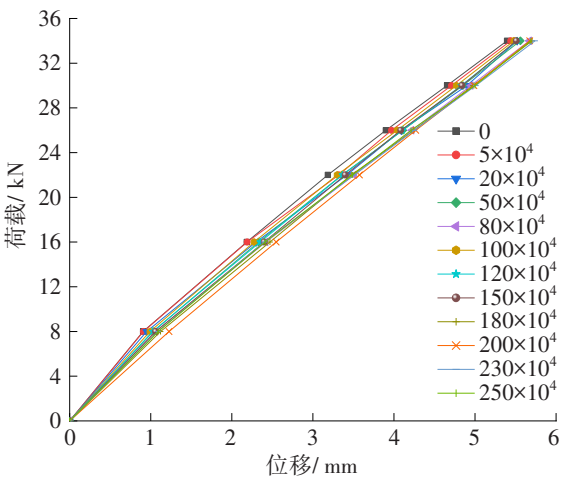
本文采用穿心式振弦锚索计对斜拉索体系的索力进行测试。在10#~14#斜拉索内均安装了锚索计,用于对斜拉索张拉索力进行控制及后续对静载斜拉索索力变化进行测量。

2 疲劳荷载下结构性能演化规律

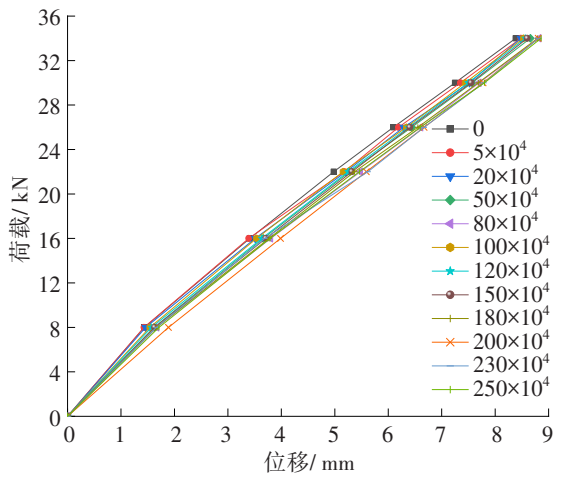
2.1 关键测点荷载-挠度曲线

在疲劳试验过程中,分别在0、5、20、50、80、100、120、150、180、200、230和250万次循环加载时采集结构响应静载位移数据(下文其他数据均同时采集),每次进行3轮循环静载试验。在主梁底板上选取3个关键点,即 $L/4$ 、 $L/2$ 和 $3L/4$ ,提取静力加载过程中关键点的荷载-位移曲线进行分析,如图6所示。

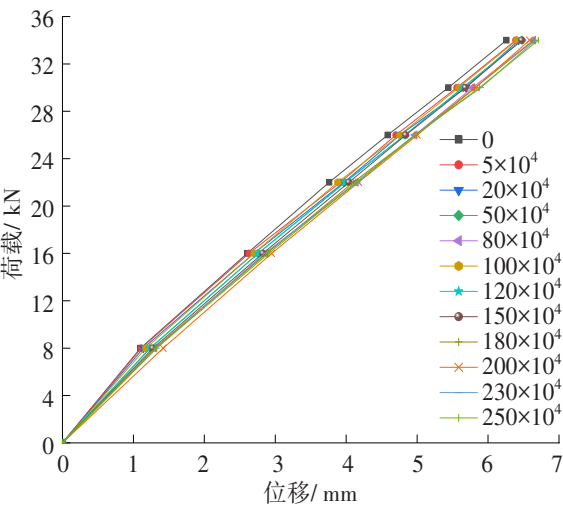
由图6可知,在250万次循环荷载作用下,主梁的静态位移随着荷载的增大而增大,荷载-位移曲线接近于直线。在疲劳试验开始前,在34 kN静载



(a)  $L/4$  截面



(b)  $L/2$  截面



(c)  $3L/4$  截面

图6 不同疲劳次数下不同测点的荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of different measuring points under different fatigue times

作用下,在  $L/4$ 、 $L/2$  和  $3L/4$  处主梁底缘初始位移分别为 5.40、8.39、6.26 mm;随着循环加载次数的增加,主梁位移逐渐增大;在疲劳试验结束时,在  $L/4$ 、 $L/2$  和  $3L/4$  处主梁底缘位移分别达到了 5.69、8.86、6.71 mm。随着循环加载次数的增加,荷载-位移曲线的斜率逐渐减小,说明结构刚度在逐步退化。

## 2.2 结构整体线型

在疲劳试验过程中,选取各循环加载次数及静载为 34 kN 工况下主梁结构的响应线型进行分析,结果如图 7 所示。由图 7 可知,随着疲劳次数的不断增加,主梁两端弹簧支座处的位移变化量较小,主梁跨中的位移变化量较大,主梁向下的弯曲幅度不断增加。主梁跨中右侧混凝土损伤量大于左侧混凝土损伤量,导致主梁跨中右侧曲线出现明显弯曲。

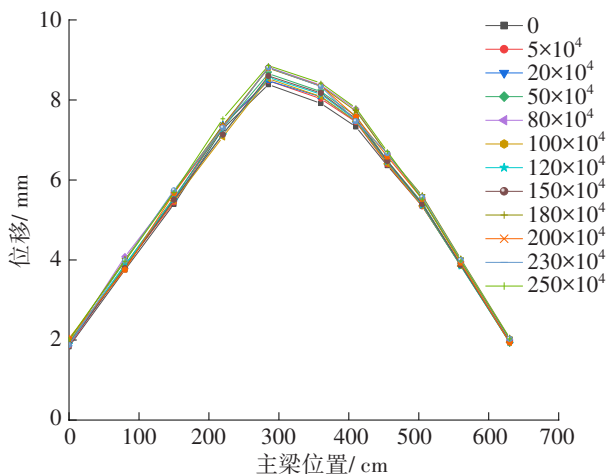


图7 主梁整体线型变化图

Fig. 7 Variation diagram of overall alignment of main beam

## 2.3 结构位移比

为了分析结构位移的变化情况,在疲劳试验中根据结构在各关键截面的静挠度  $f_n$  及初始状态下的静位移  $f_0$ ,得到静位移比  $f_n/f_0$  的演变曲线,结果如图 8 所示。由图 8 可知,主梁混凝土已经出现一定程度的初始损伤,结构位移随着疲劳次数的增加呈现出稳定增加的趋势。在第 250 万次循环时,相对于初始状态,  $L/4$ 、 $L/2$  和  $3L/4$  截面的结构静位移比值分别增加了 5.47%、5.66% 和 7.19%。在 100 万次循环加载下,实验室温度出现大幅降低,使恒载状态下斜拉索索力值有所增加,进而主梁静挠度有所减小。

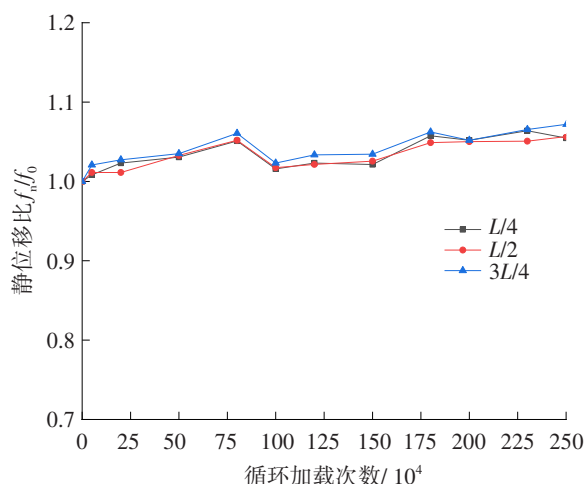


图8 主梁静位移比变化图

Fig. 8 Variation diagram of static displacement ratio of main beam

## 2.4 斜拉索索力

在疲劳试验过程中,在静载作用下,斜拉索索力的最大增量随循环加载次数的变化如图 9 所示。由图 9 可知,12#、13#斜拉索索力的最大增量较大,在 5.0 kN 附近波动;11#斜拉索索力的最大增量相对较小,在 4.0 kN 附近波动;10#、14#斜拉索位于主梁两侧,距跨中加载点较远,其索力的最大增量最小,在 3.0 kN 附近波动。总体来看,在静载试验中,斜拉索索力最大增量与对应斜拉索到跨中加载点的距离成正比,由于主梁裂缝主要集中在  $L/2$  至  $3L/4$  的区间,故位于此区间的 13#斜拉索索力的最大增量最大。

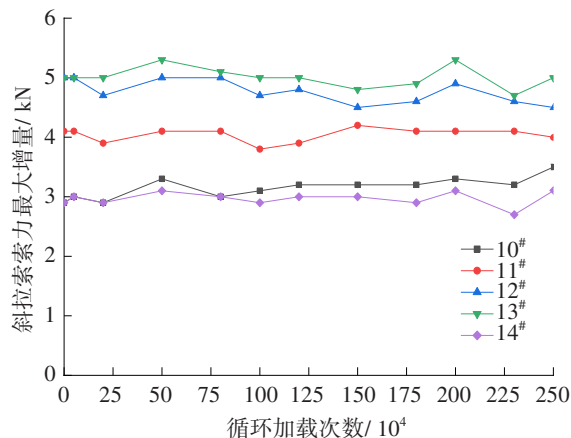


图9 静载下各斜拉索索力最大增量的变化

Fig. 9 Variation of the maximum increment of cable force of each cable under static load



在静载试验中,斜拉索索力最大值在 55 kN 以内,对应的索内应力为 392.9 MPa。在疲劳荷载作用下,斜拉索的应力幅很小,因此在疲劳试验过程中斜拉索不会产生明显损伤,各斜拉索索力增量基本不变。由此可知,在节段缩尺模型的疲劳试验过程中,斜拉索对主梁及体系刚度的影响较小,因而不考虑其对体系刚度退化的影响。

### 2.5 主梁裂缝发展情况

在疲劳荷载加载前,在 34 kN 集中力的作用下,

主梁共有 9 条裂缝张开,且均位于距离近塔端支座 250 cm 到 410 cm 的范围内,其中 300、340 cm 处的裂缝宽度达到了 0.04 mm。在疲劳试验过程中,主梁裂缝处于“闭合-张开-闭合”的循环过程中,在最大荷载作用下主梁裂缝宽度缓慢增加;在疲劳试验结束时,在 34 kN 集中力的作用下,主梁有 12 条裂缝张开,且均位于距离近塔端支座 220 cm 到 460 cm 的范围内,其中 300、340、390 cm 处的裂缝宽度达到了 0.06 mm,卸载后这些裂缝均闭合,如图 10 所示。

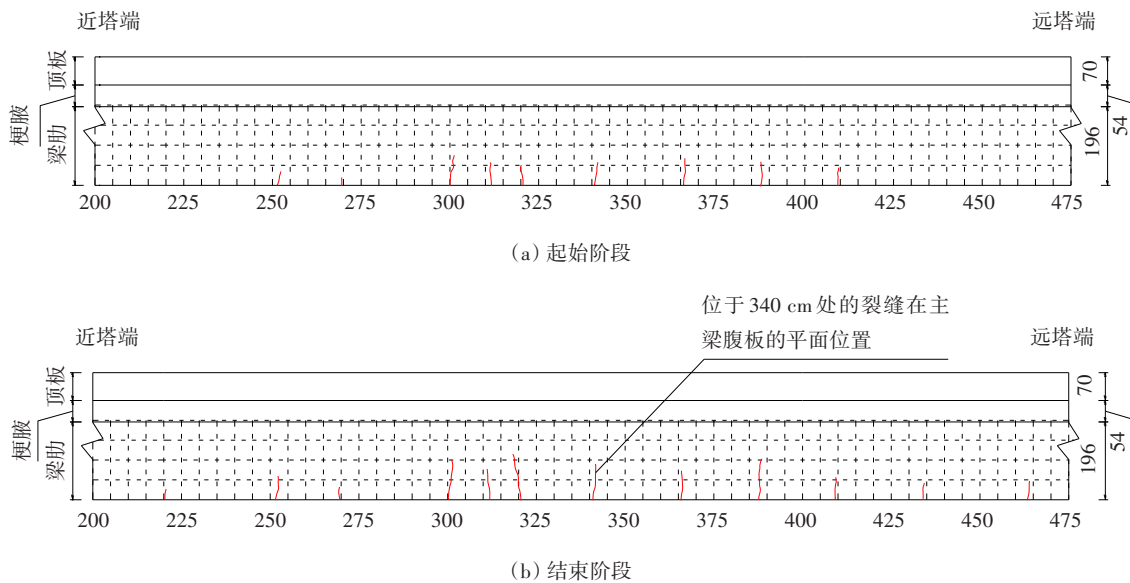


图 10 静载试验中 34 kN 荷载作用下裂缝的分布

Fig. 10 Distribution of cracks under 34 kN load in static load test

## 3 体系刚度退化规律分析

本文以静载 34 kN 工况下主梁各截面上集中力与截面位移的比值作为各截面静刚度。在整个疲劳试验过程中,结构  $L/4$ 、 $L/2$  和  $3L/4$  截面静刚度变化如图 11 所示。在疲劳试验过程中,各截面静刚度均呈现出稳定的下降趋势,主梁  $L/4$ 、 $L/2$  和  $3L/4$  处最初的截面静刚度分别为 6.30、4.05、5.43 kN/mm;在疲劳试验结束时,截面静刚度分别为 5.98、3.84、5.07 kN/mm。在整个疲劳试验过程中,主梁  $L/4$ 、 $L/2$  和  $3L/4$  截面处的截面静刚度分别退化了 5.08%、5.19% 和 6.63%。主梁裂缝主要集中在  $L/2$  至  $3L/4$  之间,因此  $3L/4$  截面静刚度退化程度最大。整体来看,在疲劳荷载作用下,斜拉桥截面静刚度逐渐退化,但退化过程较平缓,未发生大幅下降及突变情况,斜拉桥体系仍

然具有较强的承载能力。

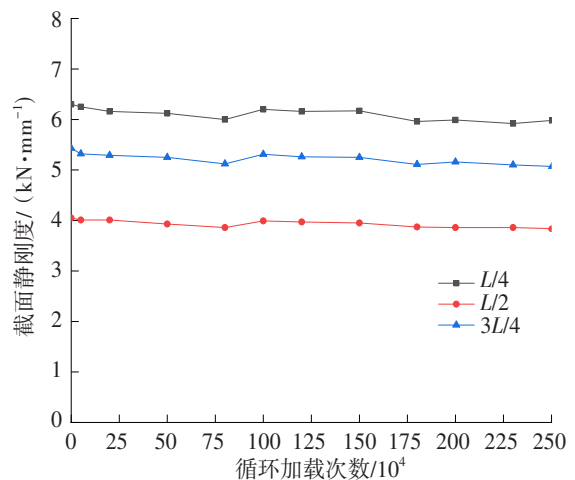


图 11 主梁截面静刚度变化图

Fig. 11 Static stiffness variation diagram of main beam section



## 4 结论

1) 在全疲劳周期内,斜拉桥体系跨中截面静刚度下降速度平缓,未出现突变情况,跨中截面静刚度变化了5.19%,3L/4截面静刚度退化程度最大,达到了6.63%。在疲劳试验完成后,斜拉桥体系承载力富余较大。

2) 在全疲劳周期内,在静载作用下,斜拉索索力的变化量基本不变。在疲劳荷载作用下,斜拉索的应力幅较小,因而不考虑其对体系刚度退化的影响。

3) 在疲劳试验过程中,在静载作用下,当疲劳荷载达到上峰值时,主梁裂缝宽度由0.04 mm扩展至0.06 mm,主梁裂缝数量由9条增加到12条。在疲劳荷载作用下,具有初始损伤的主梁裂缝进一步扩展。

4) 疲劳试验结果表明,PPC斜拉桥在带裂缝的工作状态下,其体系具有较好的抗疲劳性能。由此可见,PPC斜拉桥体系在实际工程应用中具有一定的可行性。

## 参考文献(References):

- [1] 林元培. 斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社,2004.  
LIN Yuanpei. Cable-stayed bridge [M] Beijing: China Communications Press, 2004.
- [2] 刘昀, 颜东煌. 部分预应力混凝土斜拉桥设计的合理性分析[J]. 中外公路, 2015, 35(2): 83-86. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2015.02.020.  
LIU Yun, YAN Donghuang. Rationality analysis of partially prestressed concrete cable-stayed bridge design [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(2): 83-86. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2015.02.020.
- [3] 刘昀, 袁明, 颜东煌. 大跨径混凝土斜拉桥模型试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(5): 78-87. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.05.009.  
LIU Yun, YUAN Ming, YAN Donghuang. Experimental investigation for concrete cable-stayed bridges with long-span [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(5): 78-87. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.05.009.
- [4] 刘昀. 部分预应力混凝土斜拉桥非线性性能与设计方法研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2015.

LIU Yun. Research on nonlinear performance and design method of partially prestressed concrete cable-stayed bridge [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015.

- [5] 陈羽中, 张家滨, 颜东煌. 基于静载试验的PPC斜拉桥有限元模型修正分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(4): 59-66, 100. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.007.  
CHEN Yuzhong, ZHANG Jiabin, YAN Donghuang. Finite element model updating of PPC cable-stayed bridge based on the static load experiment[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(4): 59-66, 100. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.007.
- [6] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [7] 颜东煌, 邹恺为, 袁明, 等. 采用PPC设计的斜拉桥模型疲劳试验研究[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 59-63. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.01.013.  
YAN Donghuang, ZOU Kaiwei, YUAN Ming, et al. Experimental research on fatigue model of PPC cable-stayed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1): 59-63. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.01.013.
- [8] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.  
China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [9] 杜进生, 刘玲, 冯威, 等. 基于裂缝宽度的部分预应力混凝土梁设计方法[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(2): 23-30. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2018.02.003.  
DU Jinsheng, LIU Ling, FENG Wei, et al. Design method of partially prestressed concrete beam based on crack width [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(2): 23-30. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2018.02.003.
- [10] 王勇强, 侯建国. 部分预应力混凝土梁考虑裂缝闭合性能的裂缝控制设计方法的研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008, 41(增刊1): 1-5.  
WANG Yongqiang, HOU Jianguo. Study on crack

- control design method of partially prestressed concrete beams considering crack closure performance [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, 41(sup 1): 1-5.
- [11] 梁俊松,丁兆东,李杰.混凝土结构疲劳全过程分析方法研究[J].建筑结构学报,2017,38(5):149-157. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.05.019.
- LIANG Junsong, DING Zhaodong, LI Jie. Analytical method for fatigue process of concrete structures [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(5): 149-157. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.05.019.
- [12] 刘芳平,邓勇军,易文韬,等.基于实时应变监测的钢筋混凝土梁疲劳损伤评估特征指标研究[J].建筑结构,2020,50(20):109-117. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.20.018.
- LIU Fangping, DENG Yongjun, YI Wentao, et al. Research on fatigue damage evaluation characteristic index of reinforced concrete beams based on real-time strain monitoring [J]. Building Structure, 2020, 50(20): 109-117. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.20.018.
- [13] 朱红兵,赵耀,李秀,等.疲劳荷载作用下钢筋混凝土梁的刚度退化规律及计算公式[J].土木建筑与环境工程,2014,36(2):1-5,13. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2014.02.001.
- ZHU Hongbing, ZHAO Yao, LI Xiu, et al. Reinforced concrete beam's stiffness degeneration regulation and its calculation formula under the action of fatigue load [J]. Civil Architectural and Environmental Engineering, 2014, 36(2): 1-5, 13. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2014.02.001.
- [14] 陈梦成,温清清,罗睿,等.地铁工程钢筋混凝土梁疲劳损伤演化及寿命预测模型研究[J].铁道学报,2021,43(1):160-168. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2021.01.021.
- CHEN Mengcheng, WEN Qingqing, LUO Rui, et al. Investigation on prediction models of damage evolution and fatigue lifetime for reinforced concrete beams of metros [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(1): 160-168. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2021.01.021.
- [15] LIU F P, ZHOU J T. Experimental research on fatigue damage of reinforced concrete rectangular beam [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(9): 3512-3523. DOI: 10.1007/s12205-018-1767-y.
- [16] LIU F P, ZHOU J T, YAN L. Study of stiffness and bearing capacity degradation of reinforced concrete beams under constant-amplitude fatigue [J]. PLoS One, 2018, 13(3): e0192797. DOI: 10.1371/journal.pone.0192797.
- [17] 周宏宇,袁慧,解咏平,等.钢筋混凝土梁疲劳临界剩余承载性能尺寸效应试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(6):1433-1446. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2020.06.015.
- ZHOU Hongyu, YUAN Hui, XIE Yongping, et al. Experimental study on size effect of residual capacity of RC beams under fatigue critical state [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(6): 1433-1446. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2020.06.015.
- [18] ZHANG J, LI P, MAO Y, et al. The mechanical properties of reinforced concrete plate-girders when placed under repeated simulated vehicle loads [J]. Materials (Basel), 2019, 12(11): e1831. DOI: 10.3390/ma12111831.
- [19] 周宏宇,麻全周,赵晓花,等.基于基频法的预应力混凝土箱梁疲劳刚度退化试验[J].建筑科学与工程学报,2021,38(3):62-69. DOI: 10.19815/j.jace.2019.10053.
- ZHOU Hongyu, MA Quanzhou, ZHAO Xiaohua, et al. Experiment on fatigue stiffness degradation of prestressed concrete box girder based on fundamental frequency method [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(3): 62-69. DOI: 10.19815/j.jace.2019.10053.
- [20] 雷俊卿,肖赓,张坤,等.预应力混凝土梁变幅疲劳性能试验研究[J].振动与冲击,2013,32(18):95-100. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2013.18.031.
- LEI Junqing, XIAO Yun, ZHANG Kun, et al. Test for fatigue performance of a prestressed concrete beam under variable amplitude fatigue loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(18): 95-100. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2013.18.031.
- [21] 冯秀峰,宋玉普,朱美春.随机变幅疲劳荷载下预应力混凝土梁疲劳寿命的试验研究[J].土木工程学报,2006,39(9):32-38. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2006.09.005.
- FENG Xiufeng, SONG Yupu, ZHU Meichun. An experimental study on the fatigue life of prestressed concrete beams under random-amplitude fatigue loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 32-38. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2006.09.005.
- [22] 郭蓉,郭娇,胡霖嵩.高强钢筋部分预应力混凝土梁疲劳性能研究[J].施工技术,2017,46(11):147-150.

- DOI: 10.7672/sgjs2017110147.
- GUO Rong, GUO Jiao, HU Linsong. Experimental study on fatigue behavior of partially prestressed concrete beams with high strength steel bars [J]. Construction Technology, 2017, 46 (11): 147-150. DOI: 10.7672/sgjs2017110147.
- [23] 韩基刚, 宋玉普, 常继峰. 疲劳荷载作用下部分预应力混凝土梁裂缝宽度计算模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(11): 3977-3985.
- HAN Jigang, SONG Yupu, CHANG Jifeng. Analysis model of crack width of partially prestressed concrete beams under fatigue loading[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45 (11): 3977-3985.
- [24] 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, 70. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.04.015.
- HAN Jigang. Experimental study on the residual performance of partially prestressed concrete beams under fatigue loading [J]. Building Structure, 2021, 51 (4): 96-100, 70. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.04.015.
- [25] 雷兵. 部分预应力混凝土梁疲劳性能试验研究及数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- LEI Bing. Experimental research and numerical simulation on mechanical properties of PPC beam under fatigue loading [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [26] 李清鑫, 刘小燕, 张华, 等. 裂缝宽度的提取及在桥梁承载力评估中的应用研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(1): 60-64. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.01.010.
- LI Qingxin, LIU Xiaoyan, ZHANG Hua, et al. Research on the extraction of crack width and its application in the evaluation of bridge bearing capacity [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17 (1): 60-64. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.01.010.
- [27] ZHOU L Y, ZHAO L, MAHUNON A D, et al. Experimental study on stiffness degradation of crts II ballastless track-bridge structural system under fatigue train load[J]. Construction and Building Materials, 2021, 283: 122794. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122794.
- [28] 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.
- [29] FAHAD A, AYMAN E Z, HANI S, et al. Pre-damage effect on the residual behavior of externally post-tensioned fatigued steel-concrete composite beams [J]. Structures, 2021, 32: 578-587.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:冯硕)