

引文格式:袁明,杨诒飞,刘昀,等.疲劳损伤下PPC斜拉桥主梁灌浆加固试验研究[J].建筑科学与工程学报,2025,42(1):139-147.  
YUAN Ming, YANG Yifei, LIU Yun, et al. Experimental study on grouting reinforcement of PPC cable-stayed bridge main girder under fatigue damage[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(1): 139-147.

DOI:10.19815/j.jace.2022.09113

# 疲劳损伤下PPC斜拉桥主梁灌浆加固试验研究

袁明<sup>1</sup>,杨诒飞<sup>1</sup>,刘昀<sup>2</sup>,颜东煌<sup>1</sup>,彭坤帅<sup>1</sup>,袁晟<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南长沙 410114; 2.湖南交通职业技术学院 路桥工程学院,湖南长沙 410132)

**摘要:**为研究部分预应力混凝土(PPC)斜拉桥疲劳损伤主梁采用灌浆加固后的刚度恢复效果和裂缝发展情况,以某座双塔斜拉桥为研究背景,选取跨中6个梁段,制作相似比为7.42的PPC斜拉桥节段缩尺模型,在经历了主梁具有不同初始损伤状态下的4轮疲劳试验后,对主梁开展了0.1、0.2、0.3、0.5 mm最大裂缝宽度的静载试验(对应工况1~4)。然后将主梁卸载至恒载状态,使用亲水性低黏度环氧结构胶对残余裂缝宽度 $W \geq 0.05$  mm的裂缝进行带压灌浆修复,对灌浆后主梁开展相同裂缝宽度的静载试验,对比分析灌浆前后PPC斜拉桥主梁在各工况下的挠度、索力、刚度和裂缝发展情况,并与完好主梁的初始刚度进行对比。结果表明:环氧结构胶和主梁黏结作用良好,极大地减缓了裂纹扩展的速度;在整个试验过程中,索力基本呈线性变化,斜拉索一直处于弹性阶段,使结构整体承载力有较大富余;在PPC主梁经历了0.5 mm级裂缝大损伤情况下,环氧结构胶提高了裂缝处的界面黏结强度,使灌浆后主梁刚度恢复较好,在工况1~4中均不低于灌浆前主梁的刚度,但不能恢复到完好主梁的刚度。

**关键词:**桥梁工程;刚度;裂缝灌浆;斜拉桥;部分预应力;黏结强度

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2025)01-0139-09

## Experimental study on grouting reinforcement of PPC cable-stayed bridge main girder under fatigue damage

YUAN Ming<sup>1</sup>, YANG Yifei<sup>1</sup>, LIU Yun<sup>2</sup>, YAN Donghuang<sup>1</sup>, PENG Kunshuai<sup>1</sup>, YUAN Sheng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China;

2. School of Road and Bridge Engineering, Hunan Communication Polytechnic, Changsha 410132, Hunan, China)

**Abstract:** In order to study the stiffness recovery effect and crack development of the main girder of partially prestressed concrete (PPC) cable-stayed bridge with fatigue damage after grouting reinforcement, a double-tower cable-stayed bridge was taken as the research background. Six beam sections in the middle span were selected to make a reduced scale model of PPC cable-stayed bridge with a similarity ratio of 7.42. After four rounds of fatigue tests under different initial damage states of the main girder, static load tests of 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 mm maximum crack width on the main beam before grouting (corresponding to working conditions 1-4) were carried out, and then the main beam was unloaded to the dead load state. The cracks with residual crack

收稿日期:2023-09-07

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(52078054,51878073);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)

作者简介:袁明(1980-),男,工学博士,副教授,E-mail:mingyuan@csust.edu.cn.

通信作者:刘昀(1977-),女,工学博士,副教授,E-mail:45146556@qq.com.

width  $W \geq 0.05$  mm were repaired with hydrophilic low viscosity epoxy structural adhesive under pressure, and the static load tests of the same crack width on the main beam after grouting were carried out. The deflection, cable force, stiffness and crack development of the main girder of PPC cable-stayed bridge under various working conditions before and after grouting were compared and analysed, and compared with the initial stiffness of the intact main girder. The results show that the epoxy structural adhesive and the main beam has a good synergistic effect, which greatly slows down the speed of crack propagation. During the whole test, the cable force basically changes linearly, and the stay cable is always in the elastic stage, which ensures that the bearing capacity of the main beam had greater surplus. Under the condition that the main beam experiences 0.5 mm level crack damage load, the epoxy structural adhesive improves the interface bonding strength at the crack, so that the stiffness of the main beam after grouting recovers well. In working conditions 1-4, the stiffness of the main girder is not lower than that of the main girder before grouting, but it cannot recover to the stiffness of the intact main girder.

**Key words:** bridge engineering; stiffness; crack grouting; cable-stayed bridge; partial prestress; bond strength

**Author resumes:** YUAN Ming (1980-), male, PhD, associate professor, E-mail: mingyuan@csust.edu.cn; LIU Yun (1977-), female, PhD, associate professor, E-mail: 45146556@qq.com.

## 0 引言

斜拉桥是由承压的塔、受拉的索和受弯的梁组成的超静定体系,其中斜拉索具有类似于体外预应力的效果,可以减小梁内正弯矩,分担运营期间的大部分荷载,且斜拉桥的极限承载力取决于主梁和斜拉索的材料非线性行为,并且最终由斜拉索的材料非线性控制<sup>[1]</sup>。斜拉桥采用全预应力混凝土(PC)主梁,在大跨径 PC 斜拉桥服役期间,较大的压应力会导致顶板混凝土发生脆性破坏,存在安全隐患<sup>[2]</sup>。随着部分预应力混凝土(PPC)合理设计理论的提出,学者们开始了 PPC 构件性能的探究,研究发现<sup>[3-5]</sup>:①与 PC 构件相比,PPC 构件具有更高的延性和较大的能量吸收能力,PPC 构件开裂后刚度比 PC 构件大;②PPC 主梁的破坏形式为延性破坏,而不是 PC 主梁的脆性破坏,提高了结构的安全性。目前已有学者<sup>[6-8]</sup>研究了在大跨径斜拉桥跨中区域采用 PPC 主梁的可行性和计算方法,并建立了 PPC 斜拉桥节段缩尺模型,通过静载试验的实测值与计算值比较,验证了 PPC 主梁关键截面的非线性性能。

在各类荷载、恶劣环境的长期影响下,PPC 桥梁内部钢筋与混凝土的黏结退化以及有效预应力的下降导致主梁刚度显著降低,裂缝宽度会超过限值,极易出现新裂缝,引起受拉区非预应力钢筋的断裂,存在极大的安全隐患<sup>[9-11]</sup>。为保证结构安全,必须对开裂后桥梁进行加固,常用的加固方式有粘贴钢

板法、体外预应力法和灌浆加固法<sup>[12-14]</sup>。对于钢筋混凝土结构,首先需要对裂缝进行处置,以提高结构耐久性能,再采用粘贴钢板法、体外预应力法等方法来提高主梁的刚度。刘国坤等<sup>[15]</sup>研究了强受扭损伤的 PC 斜拉桥箱梁,对比了裂缝灌浆及腹板和横隔板锚贴钢板加固前后箱型主梁的疲劳性能,结果表明,灌缝-锚钢加固梁在  $240 \times 10^5$  次疲劳作用下无新裂缝产生,加固段主梁刚度始终比原梁刚度大,说明该方法加固受扭损伤箱梁的长期效果好。颜东焯等<sup>[16]</sup>对比了 PC 斜拉桥主梁顶板混凝土压溃后采用 UHPC 及裂缝灌浆加固前后的静力性能,结果表明裂缝灌浆后的主梁刚度有所提升,但恢复不到完好主梁的刚度,同时也进一步说明了 PC 斜拉桥具有极大的承载能力,且体系最终破坏由索控制。

基于以上研究,对于主梁采用 PPC 设计的斜拉桥,当主梁经历多轮疲劳及较大静力损伤情况下,若仅采用裂缝灌浆加固,是否能有效恢复 PPC 斜拉桥刚度并改善主梁裂缝发展,还有待进一步研究。因此,本文以某双塔斜拉桥为背景,根据几何相似原理,制作了 PPC 斜拉桥节段缩尺模型,通过模拟实桥的车道荷载,对具有不同初始损伤状态的主梁进行 4 轮疲劳试验后,开展 0.1、0.2、0.3、0.5 mm 最大裂缝宽度的静载试验,然后将主梁卸载至恒载状态,使用亲水性低黏度环氧结构胶对残余裂缝宽度  $W \geq 0.05$  mm 的裂缝进行带压灌浆加固。对比灌浆加固前后 PPC 斜拉桥主梁挠度、索力、刚度等性

能,分析各工况下浆体对主梁刚度的影响,为环氧灌注结构胶在桥梁加固中的应用提供试验依据。

## 1 试验概况

### 1.1 节段缩尺模型

某三跨双塔混凝土斜拉桥跨径为 110 m+220 m+110 m,每个索塔布设 14 对斜拉索,取单幅跨中 10<sup>#</sup>~14<sup>#</sup>斜拉索及其对应的 6 个梁段(图 1)进行模拟。采用抗拉强度标准值为 1 860 MPa 的单根钢绞线模拟斜拉索,根据几何相似原理,以斜拉索面积作为控制参数,确定相似比为 7.42<sup>[8]</sup>。

实桥主梁截面为  $\pi$  型截面,如图 2 所示。模型梁取实桥横向的一半,将  $\pi$  型截面简化为 T 型截面,主梁横截面如图 3 所示,模型相似比如表 1 所示。在试验模型两端各布置一个弹簧,近塔端布置一个铰支座。设近塔端弹簧为 K1,远塔端弹簧为 K2。实桥采用 I 级公路荷载,依据相关规范<sup>[17]</sup>均布荷载标准值为 10.5 kN·m<sup>-1</sup>,集中荷载标准值为

360 kN,单向五车道,横向折减系数为 3.312,通过计算得到:实际单倍均布荷载为 34.78 kN·m<sup>-1</sup>,实际单倍集中荷载为 1 192 kN。定义单倍标准活载由单倍集中荷载和单倍均布荷载组成,基于相似比,确定单倍等效活载由 2.34 kN·m<sup>-1</sup>均布荷载和 10.82 kN 集中荷载组成。

### 1.2 材料

主梁采用 C50 混凝土;纵向受拉钢筋采用 HRB335 钢筋,直径为 10 mm;箍筋采用 HRB335 钢筋,直径为 8 mm。预应力筋采用抗拉强度标准值为 1 860 MPa 的七股钢绞线,后张法张拉。材料参数如表 2 所示。

### 1.3 试验加载方案

由于施加的均布荷载很大,本次试验设计了 1:4 的杠杆-挂篮加载系统,共 24 个挂篮,通过加减砝码来调整均布荷载。跨中处集中荷载通过 PMW800-2000 型电液式脉动疲劳试验机加载。模型梁整体组装如图 4 所示。考虑到实桥自重与桥面

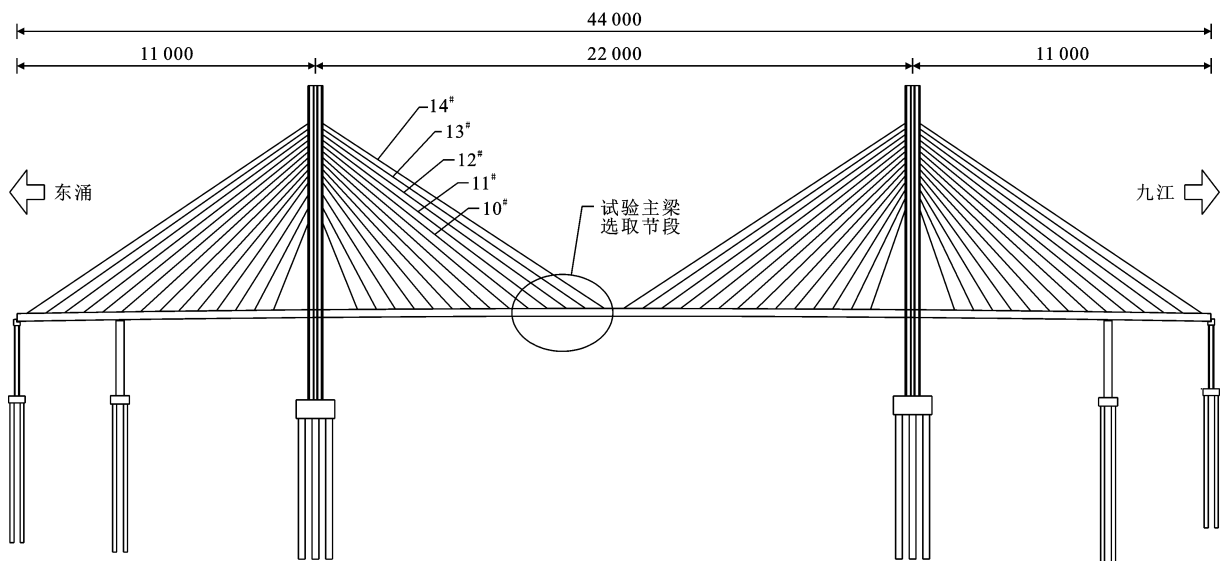


图 1 斜拉桥桥型布置(单位:cm)

Fig. 1 Layout of cable-stayed bridge (unit: cm)

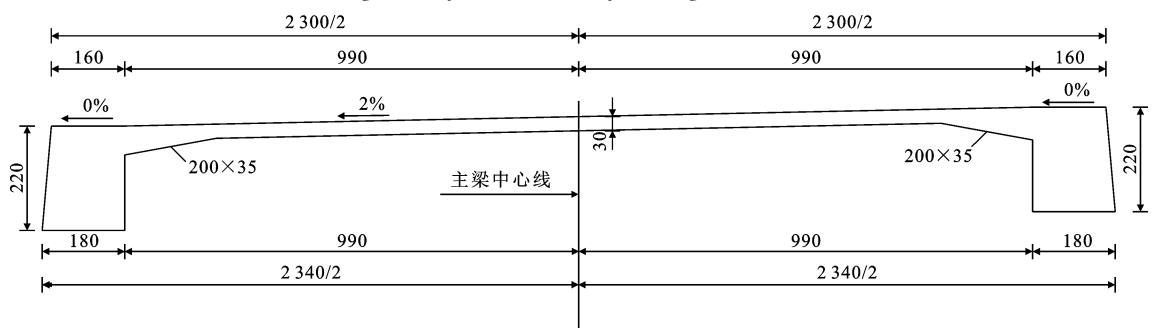


图 2 实桥跨中横截面(单位:cm)

Fig. 2 Mid-span cross section of real bridge (unit: cm)

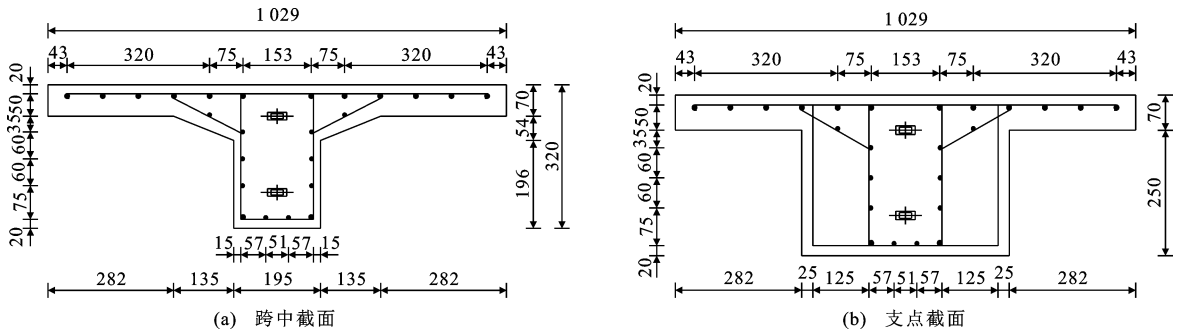


图3 模型梁横截面(单位:mm)

Fig. 3 Cross section of model beam (unit:mm)

表1 模型相似比

Table 1 Model similarity ratio

参数	节段长度/ mm	面积/m <sup>2</sup>	梁高/mm	底宽/mm	顶板厚度/ mm	$y_s$ /mm	$y_x$ /mm	桥宽/mm	单倍均布荷载/ (kN·m <sup>-1</sup> )	单倍集中 荷载/kN
实际尺寸	7 000.0	14.120 0	11 000.0	2 200	300	677.9	1 522	2 300	34.78	1 192.00
缩尺尺寸	943.1	0.128 1	1 481.9	320	195	98.3	221	1 029	2.34	10.82

注: $y_s$ 为上形心距; $y_x$ 为下形心距。

表2 材料参数

Table 2 Material parameter

参数	C50	纵向钢筋	箍筋	预应力筋	斜拉索
弹性模量/GPa	34.5	200.0	200.0	195.0	195.0
抗拉强度标准值/MPa	2.64	280.00	280.00	1 860.00	1 860.00
抗压强度设计值/MPa	32.4	280.0	280.0	390.0	390.0

表3 初始索力及预应力

Table 3 Initial cable force and prestress

斜拉索张拉索力/kN					预应力筋张拉 控制应力/MPa
10 <sup>#</sup>	11 <sup>#</sup>	12 <sup>#</sup>	13 <sup>#</sup>	14 <sup>#</sup>	
45.5	47.0	48.4	48.8	51.1	930

铺装的影响,为了保证模型梁与实际主梁应力等效,在模型梁上施加初始均布荷载和初始索力。



图4 模型梁整体组装

Fig. 4 Overall assembly of model beam

本次试验中,通过减少主梁预应力张拉荷载、调整斜拉索索力分布情况,将主梁调整至部分预应力状态,主梁初始索力和预应力如表3所示。

灌浆加固前后的静载试验通过主梁最大裂缝宽度来控制加载的活载倍数,主梁最大裂缝宽度依次加载至0.1、0.2、0.3、0.5 mm,与之对应的工况为工况1~4,具体加载工况见表4<sup>[18]</sup>。为了在保证试验人员安全条件下模拟实桥破坏状态,本次试验将

0.5 mm 裂缝下主梁荷载定为大损伤荷载。每次加载采用分级加载,每级持荷 10 min 并进行位移、挠度等测量,每次加载循环 3 次。

## 1.4 测点布置

### 1.4.1 位移计布置

模型梁一共布置 13 个静位移计,精度为 0.01 mm。位移计分别布置在 2 个支座处、2 个四分之、跨中、5 根斜拉索正下方和间距较大处,其中间距较大处布置 3 个位移计。将 13 个位移计从左到右依次命名为 J1~J13,其具体布置如图 5 所示。

### 1.4.2 索力测量

索力值采用穿心式振弦锚索计进行测试,实桥斜拉索编号从下往上依次命名为 10<sup>#</sup>~14<sup>#</sup>。各索内均安装有锚索计,用来调整成桥时的索力值和试验过程中索力变化值的测量。

## 2 主梁裂缝灌浆加固

### 2.1 灌浆前主梁的大损伤情况

在本次静载试验之前,为模拟实桥承受的长期车道荷载,主梁已经开展了 4 轮不同状态下的疲劳试验和 2 轮静载试验<sup>[19]</sup>,主梁的刚度明显退化,具体试验参数见表 5。在 7.49 倍活载作用下,主梁在

表 4 主梁加载工况

Table 4 Loading condition of main beam

工况编号	工况 1		工况 2		工况 3		工况 4	
加载目标	0.1 mm 裂缝		0.2 mm 裂缝		0.3 mm 裂缝		0.5 mm 裂缝	
主梁状态	灌浆前	灌浆后	灌浆前	灌浆后	灌浆前	灌浆后	灌浆前	灌浆后
最大活载倍数	1.79	2.50	2.86	3.92	4.28	5.35	7.49	8.20
试验依据	I 类环境钢绞线、B 类预应力混凝土构件最大裂缝限宽 <sup>[18]</sup>		钢筋混凝土构件最大裂缝限宽 <sup>[18]</sup>		较大裂缝宽度		底板受拉钢筋接近屈服	

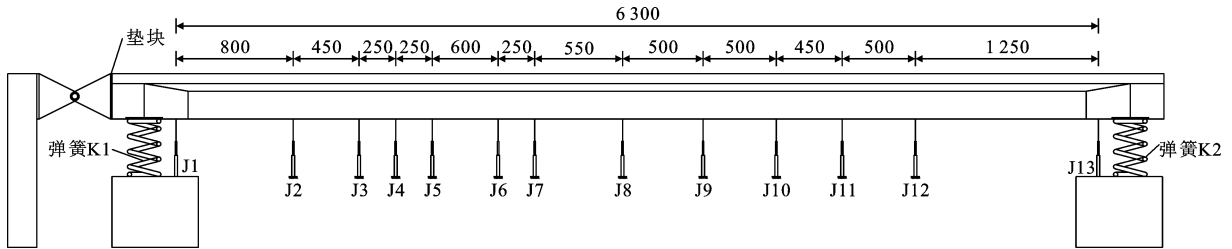


图 5 静位移计布置(单位:mm)

Fig. 5 Layout of static displacement meter (unit:mm)

320~500 cm 范围内布满大量裂缝,最大裂缝宽度达到了 0.5 mm,延展的裂缝已经到达 T 型翼板处。卸荷后,成桥状态下主梁的最大裂缝宽度为 0.1 mm,存在 7 条裂缝无法闭合,裂缝宽度均达到了 0.05 mm 以上。0.5 mm 裂缝宽度下主梁损伤状态如图 6 所示。

## 2.2 裂缝灌浆加固

考虑到主梁的安全性和耐久性,采用 YHF-QD 型亲水性低黏度环氧灌注结构胶对主梁裂缝进行带压灌浆加固,环氧灌注结构胶的性能见表 6。根据主梁的开裂情况,对成桥状态下裂缝宽

度超过 0.05 mm 的 7 条主要裂缝进行灌浆,其余裂缝采用结构胶做表面封闭处理,7 条裂缝的位置和宽度见表 7。灌浆加固的步骤为:裂纹处钻孔→放入注浆咀→采用结构胶封缝→采用小型压力机注浆→待裂缝填充饱满。灌浆过程如图 7 所示。

## 3 灌浆加固前后主梁静力性能分析

### 3.1 主梁裂缝发展情况

随着活载的增大,灌浆主梁中浆体逐渐撕裂,失去黏结效果,灌浆后主梁的裂缝分布如图 8 所示。灌浆加固前后主梁裂缝汇总如表 8 所示,由表 8 可

表 5 灌浆前 4 轮疲劳试验参数

Table 5 Parameter of four-wheel fatigue test before grouting

试验轮次	第 1 轮		第 2 轮		第 3 轮	第 4 轮
试验类型	疲劳试验	疲劳加载后的静力损伤试验	疲劳试验	疲劳加载后的静力损伤试验	疲劳试验	疲劳试验
疲劳荷载/kN	4~16		4~16		4~16	22~34
静载目标	0.1 mm 裂缝		0.2 mm 裂缝			
试验目的	模拟正常行车疲劳性能	超载下主梁最大裂缝宽度达到 0.1 mm	0.1 mm 裂缝损伤下正常行车的疲劳性能	超载下主梁最大裂缝宽度达到 0.2 mm	0.2 mm 裂缝损伤下正常行车的疲劳性能	0.2 mm 裂缝损伤下超载行车的疲劳性能
疲劳次数/ $10^5$	250		250		250	250

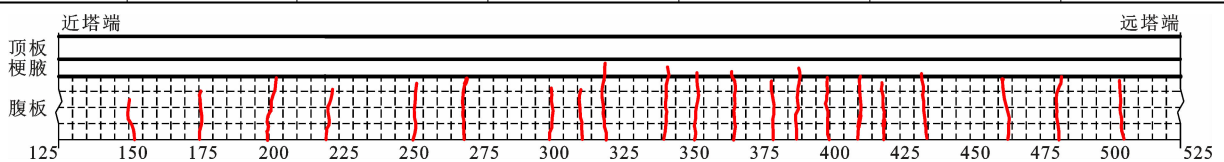


图 6 0.5 mm 裂缝宽度下灌浆前主梁损伤(单位:cm)

Fig. 6 Damage of main beam before grouting under 0.5 mm crack width (unit:cm)

表 6 灌注胶性能

Table 6 Properties of pouring glue

性能类型	性能指标	性能指标试验结果	安全性能指标 <sup>[20]</sup>
胶体性能	劈裂抗拉强度/MPa	36	≥20
	抗拉弹性模量/GPa	4.5	≥1.5
	抗弯强度/MPa	59	≥30
	抗压强度/MPa	90	≥50
黏结能力	钢-钢拉伸抗剪强度标准值/MPa	18	≥10
	与混凝土的正拉黏结强度/MPa	3.6	≥2.5(混凝土内聚破坏)
	与混凝土潮湿面黏结强度/MPa	2.7	≥2.5(混凝土内聚破坏)

表 7 灌浆裂缝宽度

Table 7 Grouting crack width

灌浆前主梁状态	不同主梁位置处的裂缝宽度/mm						
	270 cm	300 cm	320 cm	340 cm	365 cm	390 cm	435 cm
工况 4	0.20	0.30	0.50	0.49	0.38	0.15	0.30
成桥状态	0.07	0.07	0.10	0.06	0.06	0.06	0.06



图 7 灌浆过程

Fig. 7 Grouting process

知,随着活载倍数的增加,灌浆主梁产生的新裂缝条数越来越多,且裂缝分布呈现多而密的现象。

为了研究灌浆前后裂缝宽度扩展的状况,取主梁 320、340、365、390 cm 处的灌浆裂缝,其灌浆前后的活载-裂缝宽度曲线如图 9 所示。由图 9 可知,在相同活载倍数下,灌浆后主梁同一位置处的裂缝宽度明显小于灌浆前,且同一位置处裂缝灌浆后的斜率明显小于灌浆前,说明灌浆加固减缓了裂缝的张开。

### 3.2 灌浆裂缝取样

采用钻芯机对灌浆裂缝进行钻芯取样,研究浆体对裂缝内部的加固效果。取 340 cm 裂缝灌浆处样本进行分析,如图 10 所示,可以看出裂缝内部被浆体填充饱满,浆体在内部预应力管道处溢出。

沿着裂缝凿开,灌浆后裂缝二次开裂界面如图 11 所示,可以发现凝固固体增强了裂缝处混凝土的界面黏结强度,裂缝二次破坏主要为混凝土内聚破坏和浆体界面破坏。此外,在样本纵筋位置处,带压浆体也渗透到内部钢筋与混凝土界面,提高了内部钢筋与混凝土的黏结强度。

### 3.3 灌浆前后主梁挠度对比

灌浆前后不同活载倍数下的主梁挠度如图 12 所示。在 1.79 倍活载作用下,灌浆后主梁线形略低于灌浆前,说明灌浆后主梁的刚度与灌浆前主梁相

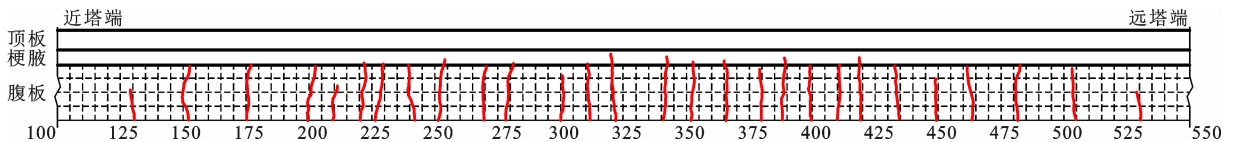


图 8 灌浆后主梁裂缝分布(单位:cm)

Fig. 8 Distribution of main beam cracks after grouting (unit:cm)

表 8 灌浆前后主梁裂缝汇总

Table 8 Summary of main beam cracks before and after grouting

活载工况	裂缝分布范围/cm		最大裂缝位置/cm		裂缝条数		
	灌浆前	灌浆后	灌浆前	灌浆后	灌浆前	灌浆后新裂缝	灌浆后修补裂缝
1	220~480	150~500	365	410	12	0	13
2	200~500	150~500	340、365、390	280	15	2	20
3	200~500	150~500	340	280	15	3	21
4	150~500	130~530	320	250	21	7	21

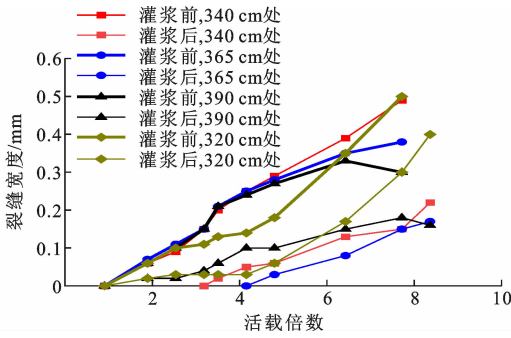


图 9 灌浆前后主梁活载-裂缝宽度对比

Fig. 9 Comparison of live load-crack width of main beam before and after grouting

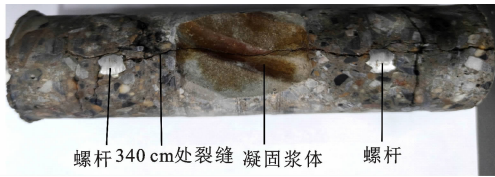
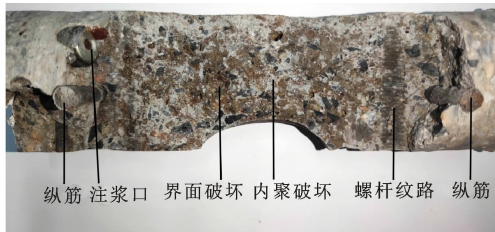


图 10 灌浆裂缝取芯样本

Fig. 10 Grouting crack coring sample



(a) 混凝土界面



(b) 钢筋界面

图 11 灌浆裂缝界面

Fig. 11 Grouting crack interface

比有所提升。在 2.86 倍和 4.28 倍活载作用下,灌浆后主梁线形与灌浆前主梁近似相同,说明灌浆后主梁的刚度与灌浆前主梁近似相等。在 7.49 倍活载作用时,灌浆后主梁线形明显低于灌浆前,说明在大荷载作用下灌浆主梁刚度有较大的提升。

### 3.4 索力变化

斜拉桥体系中,斜拉桥承受的主要荷载大部分

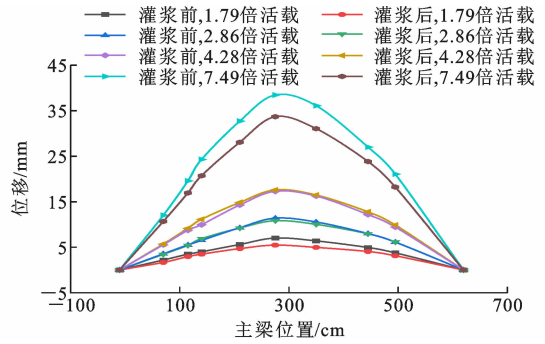


图 12 不同活载倍数下主梁挠度

Fig. 12 Deflection of main beam under different multiples of live load

是由斜拉索分担。在 5 根斜拉索中,12# 的索力变化最大,取工况 4 下灌浆前后 12# 索的索力进行对比分析,如图 13 所示。可以看出:灌浆前后 2 次加载的荷载-索力曲线较为接近,索力基本呈线性变化;2 次加载过程中最大的索力为 90.1 kN,对应的索内应力为 648.2 MPa,仅达到斜拉索抗拉强度设计值(1 860 MPa)的 51.4%,说明斜拉索仍处于弹性阶段,该结构体系承载力有较大富余。

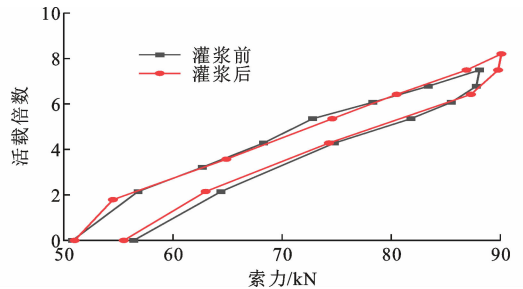


图 13 工况 4 作用下灌浆前后 12# 索索力对比

Fig. 13 Comparison of 12# cable forces before and after grouting under working condition 4

### 3.5 刚度分析

一般来说,荷载-位移曲线的斜率表示主梁的刚度,在工况 1~4 中,随着荷载的增加,结构损伤不断累积,主梁的刚度逐渐降低,主梁一直处于弹塑性变形阶段。为了便于分析主梁刚度,对灌浆前后的主梁跨中处荷载-位移曲线上上升段进行线性拟合,以拟合曲线的斜率来近似表征主梁刚度。工况 1~4 的拟合曲线如图 14 所示。

第 1 轮疲劳前后主梁刚度近似不变,以第 1 轮疲劳后 0.1 mm 静载试验的刚度为完好主梁刚度。由图 14(a)可知:工况 1 作用下,灌浆后主梁刚度有所恢复,较多轮疲劳后的灌浆前主梁刚度提升了 9.89%,恢复到完好主梁的 79.68%,但不能达到完好主梁的刚度;虽然环氧结构胶与混凝土的黏结强

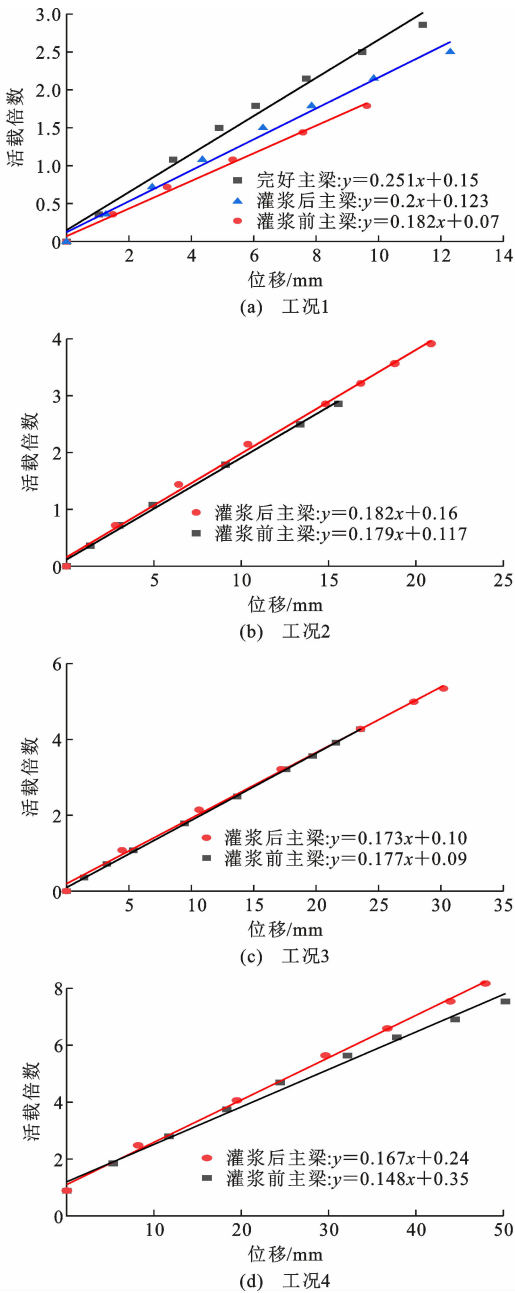


图 14 不同工况下主梁刚度对比

Fig. 14 Comparison of main beam stiffness under different working conditions

度较高,但其弹性模量远低于混凝土,两者变形协调能力存在差异,这也是造成灌浆后主梁刚度恢复不到完好状态的原因之一。

随着灌浆主梁裂缝宽度的增加,混凝土裂缝内浆体开裂,加固效果降低。由图 14(b)、(c)可知:工况 2 和工况 3 作用下灌浆前后主梁刚度近似相等;主梁经历大损伤荷载情况下,灌浆后主梁在最大裂缝宽度达到 0.2 mm 和 0.3 mm 时的主梁刚度恢复到了灌浆前主梁的水平。

工况 4 作用下,灌浆主梁损伤开裂严重,底板钢

筋近似屈服。由图 14(d)可知,灌浆后主梁刚度不减反升,是灌浆前主梁的 1.13 倍。

综上所述,采用环氧灌注结构胶填补裂缝的加固方式,可以提高裂缝处界面的黏结强度,包括混凝土间的黏结和内部钢筋与混凝土的黏结,由此提高大损伤状态混凝土主梁的刚度,有效提升 PPC 斜拉桥主梁使用阶段的工作性能。

## 4 结 语

(1)与灌浆前主梁相比,灌浆后主梁在相同活载作用下裂缝条数增多,裂缝宽度明显减小,环氧灌注结构胶的黏结作用强,能够有效延缓裂缝的扩展。

(2)通过对各工况下灌浆前后主梁刚度的分析可知,环氧灌注结构胶增大了裂缝处界面的黏结强度,使承受长期疲劳荷载下的主梁刚度有所恢复,但无法恢复到完好主梁的刚度。

(3)试验过程中,斜拉索的最大应力仅达到设计抗拉强度的 51.4%,说明该斜拉桥的承载力还有较大冗余;通过环氧灌注结构胶对 PPC 斜拉桥开裂主梁进行加固,有效提升了其使用阶段的工作性能。

## 参考文献:

### References:

- [1] 张阳山. 大跨度公路斜拉桥极限承载力分析[D]. 合肥:合肥工业大学, 2021.  
ZHANG Yangshan. Ultimate load carrying capacity analysis of long span highway cable stayed bridge [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [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.  
LIU Yun, YAN Donghuang. Rationality analysis of designing partially prestressed concrete cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(2): 83-86.
- [3] NOUR N A, VIE D, CHATEAUNEUF A, et al. Dimensioning of partially prestressed concrete beams, optimization of T-shaped section with heels[J]. Engineering Structures, 2021, 235: 112054.
- [4] KARAYANNIS C G, CHALIORIS C E. Design of partially prestressed concrete beams based on the cracking control provisions[J]. Engineering Structures, 2013, 48: 402-416.
- [5] 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.  
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.
- [6] 刘 昫. 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.
- [7] 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.
- 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.
- [8] 刘 昫, 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.
- 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.
- [9] OUKAILI N K. Serviceability and ductility of partially prestressed concrete beams under limited cycles of repeated loading[J]. *International Journal of GEOMATE*, 2019, 17(60): 9-15.
- [10] HUANG Y, WEI J, DONG R Z. Stiffness of corroded partially prestressed concrete T-beams under fatigue loading [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2020, 72(7): 325-338.
- [11] 宋玉普, 韩基刚. 疲劳荷载作用下梁内不同类型钢筋破坏关系[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(8): 96-100.
- SONG Yupu, HAN Jigang. The failure relationship between different types of steel in beams under fatigue loading[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(8): 96-100.
- [12] KIM S H, PARK J S, JUNG W T, et al. Experimental study on strengthening effect analysis of a deteriorated bridge using external prestressing method [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(6): 2478.
- [13] WANG J J, ZHOU M, NIE X, et al. Simplified design method for the shear capacity of steel plate shear-strengthened reinforced-concrete beams [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(11): 2478.
- [14] WANG Z, LI L, GUO S C, et al. Nonlinear fatigue damage of cracked cement paste after grouting enhancement[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(7): 1105.
- [15] 刘国坤, 魏曙安. 灌缝-锚钢加固箱梁抗弯疲劳性能试验研究[J]. *中外公路*, 2019, 39(5): 143-145.
- LIU Guokun, Guo Shuan. Experimental study on bending fatigue behavior of box girder bridges strengthened with caulking-steel anchor[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(5): 143-145.
- [16] 颜东煌, 张德培, 袁 明. 仅裂缝灌浆处置 PC 斜拉桥主梁模型试验研究[J]. *中外公路*, 2019, 39(6): 59-65.
- YAN Donghuang, ZHANG Depei, YUAN Ming. Experimental study on main girder models of PC cable-stayed bridge treated by crack grouting[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(6): 59-65.
- [17] 城市桥梁设计规范: CJJ 11—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Code for design of the municipal bridge: CJJ 11—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [18] 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.
- Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [19] 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.
- 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.
- [20] 公路桥梁加固设计规范: JTG/T J22—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- Specifications for strengthening design of highway bridges: JTG/T J22—2008[S]. Beijing: China Communications Press, 2008.