

引用本文: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.
ZHOU Hong-yu, MA Quan-zhou, ZHAO Xiao-hua, et al. Experiment on Fatigue Stiffness Degradation of Pre-stressed 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

基于基频法的预应力混凝土箱梁 疲劳刚度退化试验

周宏宇¹, 麻全周¹, 赵晓花², 袁 慧¹

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中国建筑技术集团有限公司, 北京 100013)

摘要:开展了基于基频法的预应力混凝土箱梁桥模型疲劳试验;详细介绍了基于基频法的疲劳多级变幅试验加载过程及疲劳加载方案和采集方案;梳理了动刚度和静刚度的基本原理、基于基频的动刚度计算方法和基于挠度的静刚度计算方法;对预应力混凝土箱梁的疲劳动刚度和静刚度退化规律进行了研究。结果表明:箱梁构件疲劳裂缝分布、裂缝走向和破坏敏感位置与矩形梁不同,模型梁均首先在腹板产生斜裂缝,腹板斜裂缝主要分布在从支座到 1/4 跨范围内,不断向顶板和底板斜向延伸;预应力混凝土箱梁疲劳动刚度和静刚度二者退化规律相同,均呈现为先快速、后平稳的 2 阶段变化规律;在疲劳初期,动刚度和静刚度退化率均在 40% 以上;疲劳荷载上限值是桥梁结构疲劳刚度退化的一个重要影响因素,疲劳荷载上限值越大,动刚度和静刚度退化幅值就越大,且疲劳剩余刚度越小;因为二者计算原理不同,所以计算的动静刚度数值也不同,但二者刚度退化规律相同,可相互对比、补充、验证,共同来探究预应力混凝土箱梁疲劳刚度的退化规律。

关键词:基频法;箱梁;动测试验;疲劳累积损伤;刚度退化

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)03-0062-08

Experiment on Fatigue Stiffness Degradation of Pre-stressed Concrete Box Girder Based on Fundamental Frequency Method

ZHOU Hong-yu¹, MA Quan-zhou¹, ZHAO Xiao-hua², YUAN Hui¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. China Building Technique Group Co., Ltd, Beijing 100013, China)

Abstract: The model fatigue test of pre-stressed concrete box girder bridge based on the fundamental frequency method was carried out. The loading process of fatigue multi-stage variable amplitude test based on the basic frequency method, as well as the fatigue loading scheme and collection scheme were introduced in detail. The basic principle of dynamic stiffness and static stiffness, the calculation method of dynamic stiffness based on the basic frequency and the calculation method of static stiffness based on deflection were combed. The degradation law of fatigue dynamic stiffness and static stiffness of pre-stressed concrete box girder was studied. The results show that the trend and sensitive position of fatigue crack of box girder are different from

收稿日期: 2020-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978012, 51378030); 北京市自然科学基金项目(J160002, 8152004)

作者简介: 周宏宇(1976-), 男, 黑龙江延寿人, 副教授, 工学博士, 博士后, E-mail: zhouhy@emails.bjut.edu.cn。

those of rectangle girder. The oblique crack of web is mainly distributed in the range from support to $1/4$ span, extending to roof and floor. The degradation laws of fatigue labor stiffness and static stiffness of pre-stressed concrete box girder are the same, both of them are fast first and then stable. In the early stage of fatigue, the degradation rate of dynamic stiffness and static stiffness is more than 40%. The upper limit value of fatigue is an important factor of fatigue stiffness degradation of bridge structure, the higher the upper limit value of fatigue, the greater the degradation amplitude of dynamic stiffness and static stiffness, the less residual stiffness. Because of their different calculation principles, the calculated dynamic and static stiffness values are also different, but their stiffness degradation laws are the same, which can be compared, supplemented and verified with each other to explore the degradation laws of fatigue stiffness of pre-stressed concrete box girder.

Key words: fundamental frequency method; box girder; dynamic test; fatigue cumulative damage; stiffness degradation

0 引言

近年来,随着国民经济的迅速发展,桥梁上车辆运输特点发生较大变化:行车速度不断提高,交通密度不断增加,车辆荷载不断加重^[1-2]。由此产生的桥梁疲劳累积损伤也更加严重。国内外学者对混凝土梁的疲劳累积损伤进行了大量研究,主要是从挠度^[3-4]、应变^[5-6]、刚度^[7-8]、裂缝^[9]等静力特性展开,研究方法较单一。此外,一些学者在疲劳刚度退化方面进行了更深入的研究,如李富民等^[10]对4根预应力混凝土矩形梁进行了疲劳试验,探究了疲劳破坏、疲劳寿命退化以及弯曲刚度退化等规律。窦远明等^[11-12]对7根预应力钢筋混凝土矩形梁进行了腐蚀、静载及疲劳试验,研究了疲劳荷载下锈蚀部分预应力混凝土梁破坏形态、疲劳寿命、刚度及跨中挠度的变化规律。

箱形截面梁因其抗弯抗扭力学性能好,被广泛应用于大跨度预应力混凝土桥梁上。相关资料显示,中国运营中的箱梁桥存在或大或小的腹板裂缝问题,甚至一些箱梁桥刚通车1年,腹板裂缝就已经非常显著。腹板裂缝直接导致了桥梁结构刚度的降低。许多学者对预应力混凝土梁的刚度退化进行了研究。胡志坚等^[13]通过对6片有黏结和无黏结预应力混凝土T形梁进行试验,分析了预应力混凝土梁的抗弯刚度退化规律,并提出了基于跨中弯矩修正系数的抗弯刚度修正公式。易伟建等^[14]对无黏结预应力混凝土梁进行了静动力试验,基于梁的8阶模态值,识别了各损伤工况下的梁动刚度损伤系数,利用静力荷载-挠度关系对梁各阶静刚度损伤系数进行了研究。Das等^[15]研究发现,结构损伤开裂

后其振型和频率会发生变化,且损伤过程中动刚度和静刚度变化速率不同。王凌波等^[16]运用材料力学和数值模拟理论,推导出混凝土梁刚度分布推算公式,并结合影响线推算出梁的刚度实际分布状态。吴晓莉等^[17]采用光纤应变测试方法获得绝对应变值,引入损伤因子定量描述混凝土梁的疲劳损伤,并提出了识别钢筋混凝土桥的疲劳累积损伤的剩余刚度法。

在桥梁动测试验中,桥梁的固有频率是最容易获取的动力特性,识别度高、容易测量,且与测量位置无关。结构频率是结构刚度和质量的函数,一般在损伤过程中结构质量不变,结构频率会随着刚度变化而变化。戴公连等^[18-19]验证了运用桥梁1阶基频可以很好地反映结构刚度的变化。本文开展了基于基频法的预应力混凝土箱梁桥模型多级变幅疲劳试验,采集不同疲劳次数下箱梁基频和挠度值,采用动刚度和静刚度基本原理计算其动刚度和静刚度值,探究预应力混凝土箱梁桥在多级变幅疲劳荷载下的刚度退化规律。

1 试验梁设计

1.1 试验梁参数

依据项目背景,选取京津城际高铁线路中使用最普遍的32m简支箱梁为试验原型梁。重点对考察的关键区段和关键截面的力学行为进行研究,依据相似理论,并综合考虑试验精度要求、模型尺寸及试验条件的可能性,采用1:11的缩尺比例,制作3个缩尺模型梁构件。上顶板宽1.21m,梁高0.275m,下底板宽0.465m,梁跨3m,采用5根 1×7 预应力钢绞线。模型梁设计如图1所示。

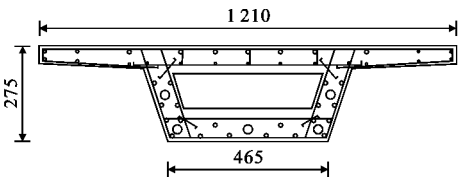


图1 模型梁设计图(单位:mm)

Fig. 1 Design Drawing of Model Beam (Unit:mm)

1.2 试件所用材料

混凝土中水泥、水、石、砂、外加剂的配合比为447:170:1138:640:4.47。粗骨料选用碎石,最大粒径不大于15mm,采用天然河砂(中砂)作为细骨料,水泥选用P.Ⅱ42.5R级硅酸盐水泥,外加剂采用铝粉和粉煤灰,掺量为 $4.47\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。水为生活饮用水。

在浇筑模型梁时预留混凝土标准立方体试块和棱柱体试块,其力学性能测试与试验梁同时进行试验。依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2016),测得混凝土立方体抗压强度为51.51 MPa,轴心抗压强度为45.1 MPa,劈裂抗拉强度为4.74 MPa。钢筋的力学性能试验按照《金属拉伸试验法》(GB 228—87)进行,钢筋力学性能实测结果如表1所示。

表1 钢筋力学性能

Tab. 1 Mechanical Properties of Steel Bars

钢筋种类	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
HRB335	14.00	402	578
HRB335	12.00	406	580
HPB300	10.00	346	440
钢绞线	15.24	1 809	1 942

2 基本原理

2.1 静刚度计算理论

简支梁跨中挠度与弯矩、轴力和扭转效应有关,但是在实际工程下轴力和扭转对挠度的贡献较小,可忽略不计。简化得到预应力混凝土等截面简支梁的刚度计算公式,由静挠度计算的刚度是梁体的整体静刚度,其计算如下

$$f = \sum \int \frac{M_0 M_P}{B} dx + \sum \int \frac{N_0 N_P}{EA} dx + \sum \int \frac{k V_0 V_P}{GA} dx$$

(1)

$$B_0 = \alpha \frac{ML^2}{f}$$

(2)

式中: B 为截面抗弯刚度; E 为材料的弹性模量; A 为截面面积; f 为结构挠度; M_0, M_P 分别为单位荷

载作用和实际荷载作用下的弯矩值; N_0, N_P 分别为单位荷载作用和实际荷载作用下的轴力值; V_0, V_P 分别为单位荷载和实际荷载作用下的剪力值; α 为结构的挠度系数,与支撑和荷载形式等有关; G 为材料的剪切模量; M 为梁跨中截面的最大弯矩; L 为梁的净跨; B_0 为静刚度; k 为截面剪应力分布不均匀修正系数。

2.2 动刚度计算理论

结构自由振动取决于其自身的固有特性,因此结构的自由振动能反映结构本身的损伤度。结构的动荷载和动位移都与结构的固有频率有关。只要获得了固有频率就可以得出结构的刚度和内力。桥梁的第一固有频率 ω_1 计算公式为^[19-20]

$$\omega_1 = \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

(3)

式中: EI 为桥梁刚度; m 为梁单位长度质量。因此,根据桥梁的固有频率,可以推算桥梁的刚度 EI 。固有频率所表达的是梁整体动刚度。

动刚度 EI_ω 计算公式为

$$EI_\omega = \frac{4mf^2L^4}{\pi^2}$$

(4)

3 试验加载和采集方案

3.1 疲劳加载及主要参数

本文试验在北京工业大学工程结构试验中心开展。对模型梁进行多级变幅疲劳加载和动测试验。疲劳加载采用PMW系列500 kN电液伺服脉动疲劳试验加载装置,如图2所示。动测试验采用电磁激振器激励模型梁,以测得在不同疲劳累积次数下模型梁的基频,如图3所示。其中疲劳加载采用正弦波、集中力加载,加载频率为5 Hz。多级变幅加载参数如表2所示,其中, P_{\min} 为疲劳荷载下限值, P_{\max} 为疲劳荷载上限值, N 为疲劳次数。由结构力学可知,简支梁的第2阶振型节点处于 $L/2$ 跨附近,因此,动测试验采用电磁激振器在试验梁跨中底部进行0~1 000 Hz的扫频激振。

3.2 数据采集及试验过程

为了采集不同疲劳次数 N 下预应力混凝土箱梁挠度的变化情况,在梁体底部中轴线上布置百分表,如图4所示。为了测试模型梁在不同疲劳阶段的基频,在梁体顶部中轴线上,沿跨中两侧对称布置加速度传感器,如图5所示。加速度信号用IMC模块集成式动态数据系统进行采集,如图6,7所示。

试验由动测试验、预加载、疲劳加载、疲劳过程



图 2 疲劳试验加载装置
Fig. 2 Fatigue Test Loading Device



图 3 动测试验加载装置
Fig. 3 Dynamic Test Loading Device

表 2 多级变幅加载参数

Tab. 2 Multi Level Luffing Loading Parameters			
梁编号	$N/10^4$	P_{\min}/kN	P_{\max}/kN
GF1	0~50	40	53
	50~100	40	66
	100~150	40	80
	150~200	40	90
GF2	0~50	40	63
	50~100	40	86
	100~150	40	109
	150~200	40	130
GF3	0~50	40	92
	50~100	40	144
	100~150	40	194
	150~200	40	250

中停机静载疲劳试验 4 个部分组成。

①动测试验:在安置分配梁之前对完好的模型进行 1 次动测,并及时对数据进行频谱分析。如果数据不好(包括异常、噪声太大等),则重新动测。动测的有效数据为 3 组,分别在疲劳加载至 5×10^4 ,

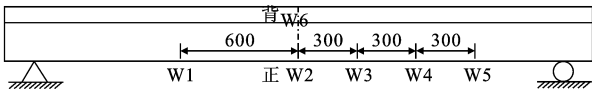


图 4 模型梁百分表布置(单位:mm)
Fig. 4 Model Beam Dial Indicators
Arrangement (Unit:mm)

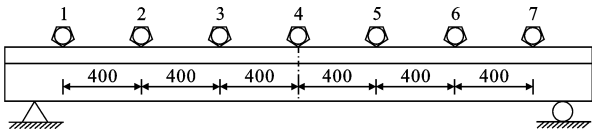


图 5 模型梁加速度传感器布置(单位:mm)
Fig. 5 Model Beam Acceleration Sensors
Arrangement (Unit:mm)

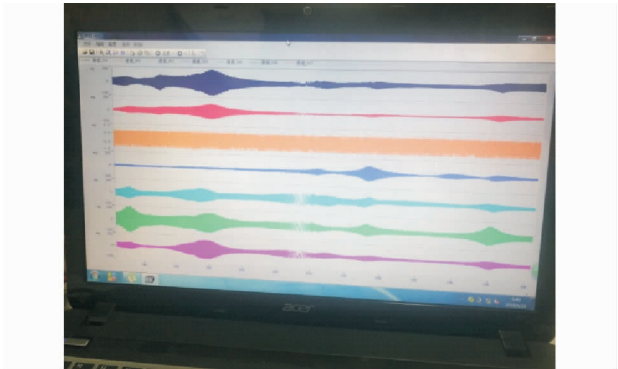


图 6 IMC 动态数据采集软件
Fig. 6 IMC Dynamic Data Acquisition Software

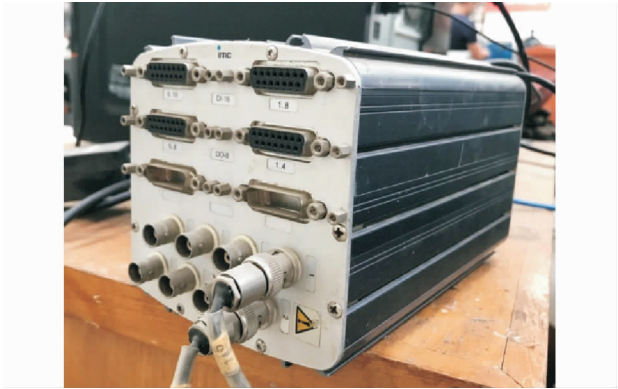


图 7 IMC 模块集成式动态数据采集模块
Fig. 7 IMC Dynamic Data Acquisition Module

10×10^4 , 30×10^4 , 50×10^4 , 100×10^4 , 150×10^4 , 200×10^4 次时停机进行动测试验。动测试验时,固定加速度传感器,连接 IMC 动态数据采集设备,采用电磁激振器在模型梁跨中底部进行 $0 \sim 1\,000\text{ Hz}$ 的扫频激振,采集加速度信号数据。

②预加载:在疲劳试验开始之前需要事先进行预加载,用以检查试验装置间的接触状况,以便消除分配梁及支座等连接件之间的接触不良,并检查各

相关试验仪器是否正常工作。

③疲劳加载:利用控制系统设置疲劳试验的疲劳荷载上、下限以及疲劳加载频率,然后对 3 根模型梁进行不同疲劳荷载上限、相同疲劳荷载下限的多级变幅加载试验,具体加载参数见表 2。

④静载疲劳试验:进行疲劳加载之前先进行 1 次静载疲劳试验,作为疲劳 0 次时的加载。同时分别在疲劳加载至 5×10^4 , 10×10^4 , 30×10^4 , 50×10^4 , 100×10^4 , 150×10^4 , 200×10^4 次时停机进行静载疲劳试验。试验过程中逐级加载至疲劳荷载上限值,再进行逐级卸载,每级荷载取疲劳荷载上限值的 20%。在不同疲劳次数下的静载疲劳试验中,进行疲劳静载挠度的采集和动测试验数据的采集。

4 试验现象描述

在疲劳加载过程中,所有模型梁均首先在腹板产生斜裂缝,并随着疲劳加载的进行,腹板斜裂缝沿支座向跨中 45° 方向延伸,裂缝宽度不断拓宽。在 $1/4$ 跨到支座范围内裂缝分布较密集。模型梁典型裂缝分布如图 8 所示。由图 8 可看出,箱梁裂缝分布、裂缝走向和破坏敏感位置均与矩形梁不同,主要是因为箱梁截面较复杂,腹板属于疲劳敏感部位。腹板斜裂缝即主拉应力裂缝,主要是因为混凝土疲劳强度不满足其主拉应力的要求而造成了腹板开裂。随着疲劳幅值的增大,斜裂缝数增多,裂缝宽度较大。模型梁 GF3 比模型梁 GF1 和 GF2 的腹板斜裂缝密集,裂缝宽度更大。

5 动测试验结果分析

根据结构的动荷载和动位移计算公式,只要获得了自振频率就可以得到结构的刚度和内力。本文通过动测试验,获取桥梁的基频,来探究桥梁在不同疲劳次数下的累积损伤规律。

5.1 模型梁未开裂测得的自振频率

桥梁结构的自振频率和结构刚度是一一对应的,混凝土结构开裂前桥梁全截面参加工作,梁体各截面刚度几乎完全相同。同时,为了验证基频法评估模型梁结构使用性能的可靠性,在疲劳荷载加载前测试了模型梁的 1 阶自振频率,并用式(3)进行理论计算,结果对比见表 3。由表 3 可知,3 个加速度传感器的测试结果基本一致,与理论计算值误差较小。

5.2 模型梁自振频率随疲劳次数的变化

结构的基频反映结构的使用性能,疲劳荷载作

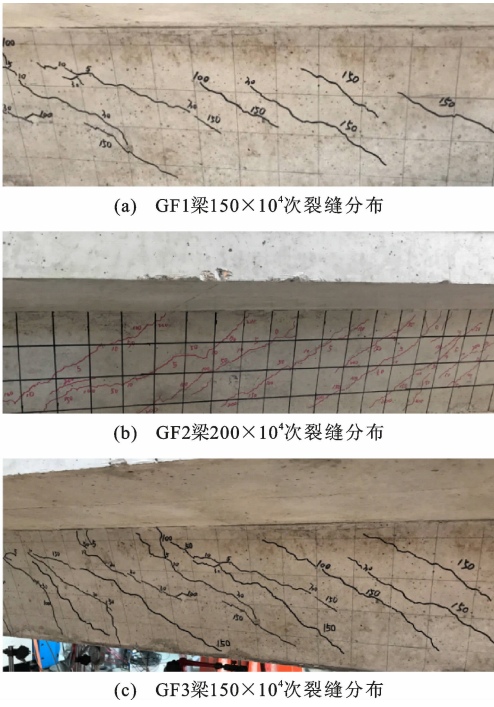


图 8 试验梁疲劳裂缝分布

Fig. 8 Fatigue Crack Distribution of Test Beam

表 3 模型箱梁未开裂基频测试结果

Tab. 3 Test Results of Basic Frequency of Model Box Girder Without Cracking

梁编号		GF1	GF2	GF3
基频实测值/Hz	传感器 4	51.71	53.36	51.03
	传感器 5	51.71	53.36	51.03
	传感器 6	51.71	53.36	51.03
基频理论计算值/Hz		52.3		

用下桥梁刚度的变化与基频变化是一一对应的。表 4 为不同疲劳次数下基频的变化。

由表 4 可知,随着疲劳次数的增加,模型梁的 1 阶频率呈现逐渐降低趋势,说明疲劳过程中模型梁刚度有所降低。其主要原因是在疲劳加载过程中,模型梁腹板裂缝不断增多、延伸、拓宽等,导致梁体不断损伤。在低幅值下的疲劳加载,模型梁 GF1 1 阶基频变化不大,说明在疲劳加载幅值较小时,桥梁满足疲劳要求。模型梁 GF3 是在较高幅值的疲劳加载工况,模型梁 1 阶频率下降较多,主要原因是腹板出现大量斜裂缝,梁体损伤较严重。在模型梁 GF2 和 GF3 中,1 阶频率数据有“波动”现象,这可能是因为支座移动或弯扭耦合振动造成的。

5.3 基于基频法的预应力混凝土箱梁疲劳刚度

桥梁结构在静载下抵抗变形的能力称为桥梁的静刚度,桥梁在动荷载下抵抗变形的能力称为桥梁的动刚度。因此,静刚度一般用桥梁结构在静载下

表 4 不同疲劳次数下基频实测值

Tab. 4 Measured Values of Fundamental Frequency Under Different Fatigue Times									
疲劳次数/ 10 ⁴	GF1 基频/Hz			GF2 基频/Hz			GF3 基频/Hz		
	传感器 4	传感器 5	传感器 6	传感器 4	传感器 5	传感器 6	传感器 4	传感器 5	传感器 6
0	51.71	51.71	51.71	53.36	53.36	53.36	51.03	51.03	51.03
5	51.48	51.48	51.48	52.94	52.94	52.94	50.51	50.51	50.51
10	51.27	51.26	51.27	52.73	52.74	52.73	50.20	50.20	50.21
30	51.14	51.14	51.15	52.59	52.60	52.59	50.06	50.06	50.06
50	51.14	51.13	51.14	52.62	52.62	52.61	49.98	49.98	49.98
100	51.09	51.09	51.10	52.60	52.59	52.59	50.12	50.12	50.12
150	51.01	51.02	51.02	52.25	52.26	52.25	49.79	49.79	49.78
200	50.69	51.70	51.69	51.88	51.88	51.87			

的静挠度来衡量,动刚度一般用结构的振动频率来衡量。静刚度是一个固定的值,而动刚度不是一个固定值,本文利用基频计算动刚度,用静挠度计算静刚度,并研究静刚度和动刚度的退化规律。

5.3.1 由基频反算动刚度

由式(3)可知,对于给定的桥梁,对应于某阶振型的结构自振频率只与结构的刚度 EI 有关。选取表 4 中加速度传感器 5 测量的数据。利用式(4),由基频反算刚度,得到预应力箱梁在不同疲劳次数下的动刚度值,见图 9。

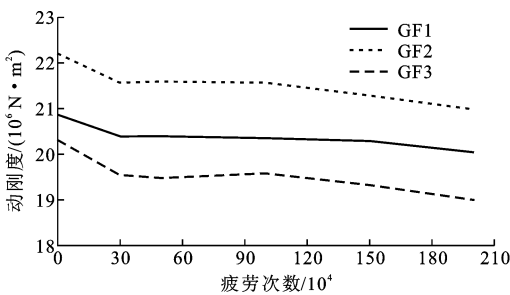


图 9 预应力混凝土箱梁动刚度损伤变化对比
Fig. 9 Comparison of Dynamic Stiffness Damage Changes of Prestressed Concrete Box Girders

预应力混凝土箱梁疲劳荷载水平不高时,模型梁均未发生钢筋疲劳断裂(图 9),预应力混凝土箱梁疲劳刚度的退化类似于混凝土疲劳损伤发展 3 个阶段的前 2 个阶段:刚度退化快速期、刚度退化稳定期^[21-22]。箱梁构件刚度退化分阶段的主要原因是混凝土在截面刚度上占主导地位,同一截面上不同高度的混凝土应力状态不同,混凝土损伤程度也不同,从而导致刚度退化出现了 2 阶段过程,并且可以推断在箱梁临近疲劳破坏时,也会出现类似于混凝土疲劳损伤的第 3 阶段:快速退化阶段。由图 9 结合试验过程可以看出,在疲劳初期,试验梁刚度有较大幅度的下降,退化率占整个退化过程的 40%~

60%。疲劳初期占整个加载时期的 10%~15%。在疲劳中期,试验梁疲劳刚度与疲劳次数呈线性关系,此阶段为刚度退化稳定期,约占整个加载周期的 80%。疲劳中期,模型梁刚度退化率占整个退化过程的 10%~40%。

对比 3 根试验梁刚度退化曲线可以得出,疲劳上限值越大,刚度退化越明显。在疲劳前期,GF3 梁表现出较大的刚度退化速率,刚度退化率达到 58%;疲劳荷载上限值较小的 GF1 梁刚度退化率约为 40%。

5.3.2 由挠度反算静刚度

由简化的预应力混凝土简支梁的刚度计算式(2),并根据本文试验的加载方案及箱梁结构加载形式, α 取为 23/216,得到挠度 f_n 对应的静刚度 B_{sn}

$$B_{\text{sn}} = \frac{23}{216} \frac{PL^3}{4f_n} = 0.524 \frac{P}{f_n} \tag{5}$$

式中: P 为挠度 f_n 对应的荷载。

可根据式(5),由不同疲劳次数下模型梁的静挠度计算出疲劳静刚度值。疲劳静挠度取静载疲劳试验中不同疲劳阶段的疲劳荷载上限值作用下的试验挠度值。由式(5)计算得到的疲劳静刚度值如图 10 所示。随着疲劳次数的增加,模型梁静刚度值不断下降,呈现先快速、后平稳 2 阶段变化规律。在疲劳初期,模型梁静刚度迅速退化;模型梁刚度退化率占其整个退化过程的 60%~70%。3 根箱梁的疲劳静刚度退化曲线趋势相似。在疲劳中期,箱梁疲劳静刚度呈线性退化规律,故也称为静刚度稳定退化期,其约占整个加载周期的 60%。对比 3 根箱梁构件的静刚度退化幅度发现,疲劳荷载上限值越大,静刚度退化幅值越大;GF1,GF2,GF3 梁 200×10^4 次疲劳加载期间,疲劳静刚度退化幅值分别为 5.14×10^7 , 5.19×10^7 , 5.84×10^7 $\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。分析其原因可能是因为疲劳荷载上限值越大,梁体开裂就越严重,

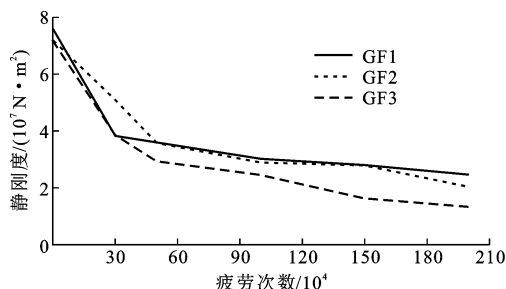


图 10 预应力混凝土箱梁动刚度损伤变化对比

Fig. 10 Comparisons of Dynamic Stiffness Damage Changes of Prestressed Concrete Box Girders

大量的裂缝会增大梁体的下挠,从而导致梁体静刚度减小。

对比梁体的疲劳静刚度和动刚度发现,二者退化规律相似:呈现先快速、后平稳 2 阶段规律。这符合卫军等^[20-22]进行的疲劳刚度退化 3 阶段过程的前 2 个阶段。

6 结 语

(1)基于多级变幅疲劳试验,对预应力混凝土箱梁进行了疲劳加载,发现箱梁构件疲劳裂缝分布、裂缝走向和破坏敏感位置与矩形梁不同。各模型梁在疲劳过程中,均首先在腹板产生斜裂缝,腹板斜裂缝主要分布在从支座到 1/4 跨范围内,不断向顶板和底板斜向延伸。腹板疲劳斜裂缝产生的主要原因是腹板混凝土斜截面承载能力不足。因此,疲劳荷载会降低混凝土斜截面的承载力,有使延性破坏变成脆性破坏的危险。

(2)预应力混凝土箱梁的疲劳动刚度和静刚度退化规律相似,均呈现先快速、后平稳 2 阶段规律。在疲劳初期,模型梁动刚度退化率占整个退化过程的 40%~60%;模型梁静刚度退化率占整个退化过程的 60%~70%。在疲劳中期,模型梁疲劳动刚度和静刚度呈线性退化,此阶段也称刚度退化稳定期。模型梁疲劳动刚度退化稳定期约占整个加载周期的 80%;模型梁疲劳静刚度退化稳定期约占整个加载周期的 60%。

(3)疲劳荷载上限值越大,动刚度退化越明显,静刚度退化幅值越大。分析其原因可能是疲劳荷载上限值越大,梁体开裂就越严重,大量的裂缝会增大梁体的下挠,从而导致梁体静刚度减小。

参考文献:

References:

[1] 谢建平. 基于京津冀城市群的城际轨道交通线网优化

研究[D]. 长沙:中南大学,2010.

XIE Jian-ping. The Inter-city Rail Transit Network Optimization Study Based on Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration[D]. Changsha: Central South University, 2010.

[2] 彭立顺. 地震作用下高速列车和桥梁的动力响应分析[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所,2018.

PENG Li-shun. Dynamic Response Analysis of High Speed Railway and Bridge Under Earthquake Action [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology of China Earthquake Administration, 2018.

[3] PATHAK P, ZHANG Y X. Nonlinear Finite Element Analyses of Fiber-reinforced Polymer-strengthened Steel-reinforced Concrete Beams Under Cyclic Loading[J]. Structural Concrete, 2017, 18(6): 929-937.

[4] 朱红兵. 公路钢筋混凝土简支梁桥疲劳试验与剩余寿命预测方法研究[D]. 长沙:中南大学,2011.

ZHU Hong-bing. Method and Experiment Research on Highway Reinforced Concrete Simply-supported Girder Bridge's Fatigue Residual Service Life Forecast [D]. Changsha: Central South University, 2011.

[5] 刘芳平, 周建庭. 基于疲劳应变演化的混凝土弯曲强度退化分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(4): 97-105. LIU Fang-ping, ZHOU Jian-ting. Concrete Bending Strength Degradation Analysis Based on Fatigue Strain Evolution[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(4): 97-105.

[6] 赵 川, 宴远明, 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 Yuan-ming, SUN Ji-shu, et al. Study of Heavy Load Traffic Effect on Fatigue Performance of Pre-stressed Concrete Beams[J]. Building Structure, 2017, 47(6): 55-59.

[7] VAN PAEPEGEM W, DEGREECK J. A New Coupled Approach of Residual Stiffness and Strength for Fatigue of Fiber-reinforced Composites[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(7): 747-762.

[8] MA Y, XIANG Y, WANG L, et al. Fatigue Life Prediction for Aging RC Beams Considering Corrosive Environments[J]. Engineering Structures, 2014, 79: 211-221.

[9] 冯秀峰. 混合配筋部分预应力混凝土梁疲劳性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2005.

FENG Xiu-feng. Study on Fatigue Behavior of P. P. C Beams with Mixed Reinforcement[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.

[10] 李富民, 杨 俊, 施小飞. 腐蚀钢绞线预应力混凝土梁

- 的弯曲疲劳性能退化特征[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(1): 22-29.
- LI Fu-min, YANG Jun, SHI Xiao-fei. Degradation Characteristics of Flexural Fatigue Property of Prestressed Concrete Beam with Corroded Steel Strand [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 22-29.
- [11] 窦远明,刁 硕,杨雨兮,等. 腐蚀和重载交通对预应力混凝土梁耐久性影响研究[J]. 施工技术, 2017, 46(15): 80-84.
- DOU Yuan-ming, DIAO Shuo, YANG Yu-xi, et al. Durability Behavior of Corroded PRC Beam Under Heavy Traffic Load [J]. Construction Technology, 2017, 46(15): 80-84.
- [12] 窦远明,杨雨兮,李岩峰,等. 疲劳荷载下锈蚀部分预应力混凝土梁挠度试验研究[J]. 施工技术, 2017, 46(9): 35-38, 70.
- DOU Yuan-ming, YANG Yu-xi, LI Yan-feng, et al. Experimental Study on Deflection of Corroded Partially Prestressed Concrete Beams Under Fatigue Loads [J]. Construction Technology, 2017, 46(9): 35-38, 70.
- [13] 胡志坚,王云阳,胡钊芳,等. 预应力混凝土梁开裂后抗弯刚度试验研究[J]. 桥梁建设, 2012, 42(5): 37-43.
- HU Zhi-jian, WANG Yun-yang, HU Zhao-fang, et al. Test Study of Flexural Stiffness of Prestressed Concrete Beams with Cracks [J]. Bridge Construction, 2012, 42(5): 37-43.
- [14] 易伟建,周 云,曹 冰. 无粘结预应力钢筋混凝土梁的静动力实验研究及刚度识别[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 71-75, 183-184.
- YI Wei-jian, ZHOU Yun, CAO Bing. Static and Dynamic Experiment Study and Stiffness Identification of an Unbonded Prestressed Concrete Beam [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(1): 71-75, 183-184.
- [15] DAS P C, OWEN J S, ECCLES B J, et al. Role of Dynamic Testing in Assessment of Bridges [J]. Transportation Research Record, 1997, 1594(1): 115-124.
- [16] 王凌波,蒋培文,马印平,等. 梁式结构刚度分布推算方法及其应用研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(1): 123-128.
- WANG Ling-bo, JIANG Pei-wen, MA Yin-ping, et al. Stiffness Distribution Prediction in Simply Supported Structure and Its Application [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(1): 123-128.
- [17] 吴晓莉,顾 彬. 识别钢筋混凝土桥面板疲劳损伤的剩余刚度法[J]. 特种结构, 2008, 25(3): 69-71.
- WU Xiao-li, GU Bin. Residual Stiffness Method to Identify Fatigue Damage of Reinforced Concrete Bridge Deck [J]. Special Structure, 2008, 25(3): 69-71.
- [18] 戴公连,吕海燕,曾庆元. 25 t 轴重下中、小混凝土桥疲劳性能评估基频法[J]. 铁道学报, 1997, 19(2): 121-125.
- DAI Gong-lian, LU Hai-yan, ZENG Qing-yuan. First-frequency Method of Estimating the Fatigue Serviceability on Small and Medium Span Railway Concrete Bridge Under 25 t-axle-weight Vehicle Load [J]. Journal of the China Railway Society, 1997, 19(2): 121-125.
- [19] 罗许国,钟新谷. 不同掺量粉煤灰高性能混凝土桥梁疲劳性能评估基频法的试验研究[J]. 湖南科技大学学报:自然科学版, 2004, 19(2): 53-56.
- LUO Xu-guo, ZHONG Xin-gu. The Experiment Study of First-frequency Method of Estimating the Fatigue Serviceability on High Performance Concrete Bridge of Different Percent Fly Ash [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2004, 19(2): 53-56.
- [20] 卫 军,杜永潇,梁曼舒. 梁结构疲劳刚度退化对模态频率的影响[J]. 浙江大学学报:工学版, 2019, 53(5): 899-909.
- WEI Jun, DU Yong-xiao, LIANG Man-shu. Influence of Fatigue Stiffness Degradation for Beam Structure on Modal Frequency [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2019, 53(5): 899-909.
- [21] 周 颖. 装配式预应力混凝土箱梁刚度退化及识别的足尺试验研究[D]. 西安:长安大学, 2017.
- ZHOU Ying. Experimental Study on Stiffness Identification and Degradation of Prestressed Concrete Box Girders [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [22] 肖 赟. 预应力混凝土梁超载疲劳刚度退化试验研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
- XIAO Yun. Experimental Study on Stiffness Degradation of Prestressed Concrete Beam Under Overload Fatigue [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.