

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202012029



内嵌光纤光栅碳纤维板对 RC 受损梁监测

吴雨佼^{1,2}, 朱万旭^{1,2}, 黄宗宁^{1,2}, 李明霞^{1,2}

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004;
2. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了评估预应力碳纤维板加固钢筋混凝土(RC)梁的健康状态,以光纤光栅(FBG)传感器为依托,对加固前、后 RC 梁的共振频率进行监测;然后,对 RC 梁进行抗弯和人工激励实验,依据共振频率变化曲线判定健康状态.结果表明:受损 RC 梁经过预应力碳纤维板加固后,RC 梁的极限承载能力与刚度均得到提升,共振频率基本提升了 28%;对于不同的激励位置,RC 梁共振频率曲线基本一致.

关键词: 预应力碳纤维板;钢筋混凝土梁;光纤光栅;共振频率

中图分类号: TU 599 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2022)02-0192-06

Monitoring of RC Damaged Beams With Carbon Fiber Board Embedded Fiber Bragg Grating

WU Yujiao^{1,2}, ZHU Wanxu^{1,2},
HUANG Zongning^{1,2}, LI Mingxia^{1,2}

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Engineering,
Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to evaluate the health status of reinforced concrete (RC) beams reinforced with prestressed carbon fiber board using fiber bragg grating (FBG) sensors as a basis to monitor the resonance frequency of the RC beams before and after reinforcement. Bending and artificial excitation experiments of RC beam were carried out, Judging health status based on the resonance frequency change curve. The results show that after the damaged RC beams are strengthened by the prestressed carbon fiber board, the ultimate bearing capacity and stiffness of RC beams are improved, and the resonance frequency is basically increased by 28%. For the different excitation positions, the resonance frequency curves are basically the same.

Keywords: prestressed carbon fiber board; reinforced concrete beam; fiber bragg grating; resonance frequency

碳纤维增强复合材料作为新型材料,具有材质轻薄、耐腐蚀、抗疲劳和施工方便等优点,在工程中得到广泛应用^[1-3]. 预应力碳纤维板加固法利用碳纤维板材良好的抗拉能力提高钢筋混凝土(RC)梁的开裂荷载,以及显著提高梁的极限荷载^[4-7]. 尚守平等^[8]利用预应力碳纤维板对 H 型 RC 梁加固,通过观

收稿日期: 2020-12-15

通信作者: 朱万旭(1972-),男,教授,博士,主要从事工程结构智慧化和新特功能材料的研究. E-mail: zhuwanxu@vip.163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51768014);国家重点研发计划项目(2017YFC0703007);广西科技计划项目(桂科 AD16380017)

测锚具滑移量和应变值评估加固效果. 张建仁等^[9]考虑材料性能、几何参数和计算模式的不确定性, 建立碳纤维板加固前、后 RC 桥梁抗力的时变模型, 发现汽车活载对可靠度指标的影响最大. Reed 等^[10]采用碳纤维板加固 RC 桥梁, 通过弯曲与剪切试验评估碳纤维板对梁的加固效果. 目前, 对碳纤维板加固 RC 梁的评估方法较为传统. 第一种方法是对混凝土梁进行抗弯试验, 通过应变值及挠度曲线评定加固效果. 第二种方法是通过人工巡检宏观判定混凝土梁工作状态. 两种方法对人力、物力的消耗较大, 因此, 需构建新型系统对损伤结构进行实时监测. 在进行结构损伤识别时, 由于固有频率具有获取容易、识别精度高的特点被广泛采用^[11-13]. 张东利等^[14]采用固有频率诊断悬臂梁损伤, 发现 RC 构件损伤与共振频率相关.

因此, 本文基于预应力碳纤维板加固梁, 利用光纤光栅灵敏度高的特点^[15-16], 在碳纤维板与钢筋内部布置光纤光栅传感器, 通过对损伤结构振动频率的动态监测构建新型监测系统.

1 试验方案

1.1 试验梁设计

试验所用的 4 根钢筋混凝土梁(对比梁 L-1 为未经加固的钢筋混凝土梁, 试验梁 L-2, L-3, L-4 为经加固的钢筋混凝土梁)采用统一尺寸和配筋, 钢筋混凝土梁尺寸为 250 mm×400 mm×4 200 mm; 净跨 $L=4\ 000$ mm; 混凝土标号为 C40; 试件配筋的底部设置 2 根 HRB335 型受拉纵筋, 受拉纵筋为 $\Phi 20$; 上部受压区设置 2 根 HPB300 型架立筋, 架立筋为 $\Phi 10$; 配置箍筋分布整根梁, 整根梁为 $\Phi 10@120$ mm; 混凝土保护层厚度为 25 mm. 光纤光栅测点布置示意图, 如图 1 所示.

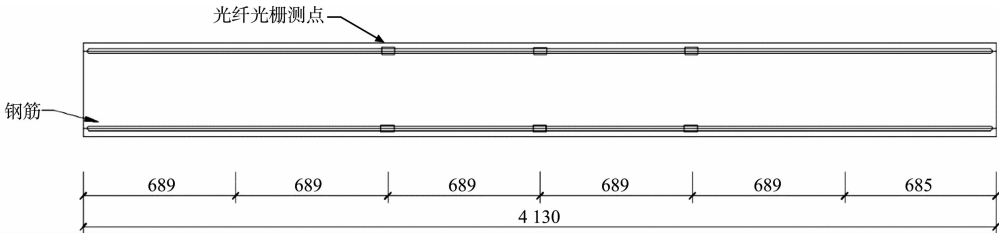


图 1 光纤光栅测点布置示意图(单位:mm)

Fig. 1 Layout schematic of measuring points for fiber bragg grating (unit: mm)

1.2 抗弯与人工激励试验

抗弯试验加载有如下 3 个过程: 1) 初始无荷载状态下人工激励; 2) 预加载至 20 kN, 检查各仪器是否正常; 3) 正式加载至 10 kN, 卸载至 0, 并进行人工激励试验, 再加载至 20 kN, 卸载至 0, 并进行人工激励试验. 试验时, 将对比梁 L-1 压至破坏, 其开裂荷载为 46 kN^[17]. 试验梁 L-2, L-3, L-4 加载至 60 kN, 上部混凝土未被破坏, 在 RC 梁跨中纯弯段下部出现裂缝, 通过裂缝测量仪读取的下部裂缝宽度为 0.02 mm, 此时, RC 梁达到受损状态. 对 RC 梁进行预应力碳纤维板加固, 并进行抗弯实验, 直到将 RC 梁压至破坏. RC 梁激励区示意图, 如图 2 所示.

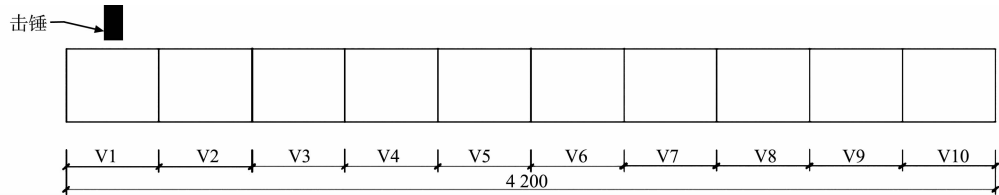


图 2 RC 梁激励区示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of RC beam excitation area (unit: mm)

图 2 中: RC 梁均分为 10 个激励区, V1~V10 分别代表 1~10 号激励区. 在激励区内用击锤对 RC 梁顶部进行 10 次人工激励, 光纤光栅解调仪记录各光栅中心的波长值, 并计算应变, 绘制振动波形图. 实验数据运用 Matlab 软件进行傅里叶变换, 绘制幅频图, 计算共振频率.

1.3 RC 梁加固方案

碳纤维板的凹槽长为 1 200 mm, 宽为 0.4 mm, 深为 0.4 mm, 如图 3 所示. 为保护栅区间的传导光

纤,传导光纤外套毛细塑料管,并将其用胶水粘在凹槽内,以保证碳纤维板安装过程中光纤光栅的存活.碳纤维板应变片与光纤光栅测点布置图,如图 4 所示.

内嵌光纤光栅的碳纤维板加固受损梁有如下 5 个步骤: 1) 清理梁底部,并用酒精擦拭,除去浮尘,在受损的梁底部放线,标记固定支承座的化学螺杆的孔位和固定压条的膨胀螺丝的孔位,如果孔位与裂缝位置冲突,需要适当调整,打孔并植入化学螺杆和膨胀螺丝;2) 依据放线的结果,切割并锚固碳

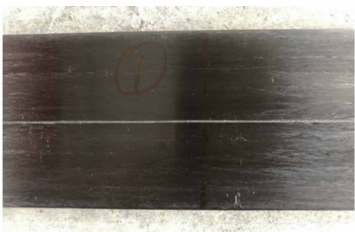


图 3 碳纤维板的凹槽
Fig. 3 Groove of carbon fiber board

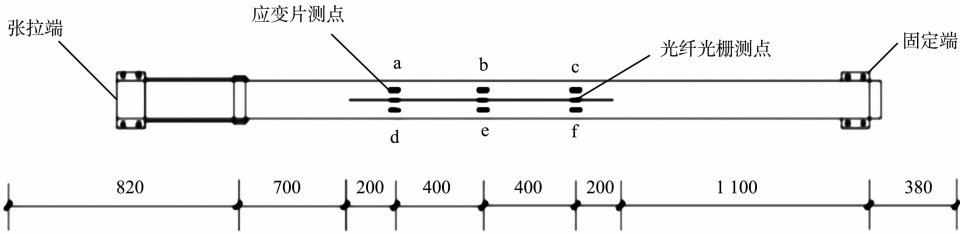


图 4 碳纤维板应变片与光纤光栅测点布置图(单位:mm)

Fig. 4 Layout diagram of carbon fiber board strain gauge and fiber grating bragg measuring points (unit: mm)
纤维板,待化学螺杆的粘结剂凝固以后,放置支承座并固定,并将锚固后的碳纤维板卡在支承座上;3) 在碳纤维板和梁底之间填充碳板胶,确保没有空洞之后,在碳板上固定压条,将碳纤维板压向梁底部,清理多余的碳板胶;4) 为碳纤维板施加预应力,采用分级加载至 146 kN,加载完成后持荷 5 min,拧紧螺栓保预应力,撤去传感器和千斤顶等设备;5) 待碳板胶凝固以后,对 RC 梁再次进行激励试验,记录加固后受损梁的共振频率.碳纤维板加固的 RC 梁,如图 5 所示.

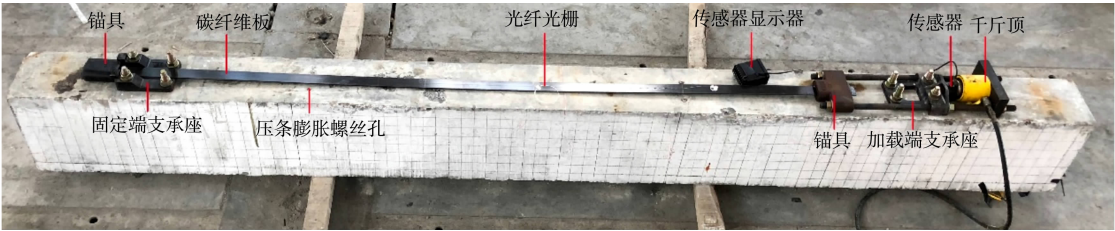


图 5 碳纤维板加固的 RC 梁
Fig. 5 RC beam of carbon fiber board

2 RC 梁加固前状态评估

为验证内嵌光纤光栅的 RC 梁共振频率的准确性,对未承受荷载下的 RC 梁进行人工激励试验,并将结果导入 Matlab 软件,可得 RC 梁初始共振频率约为 37.53 Hz.幅频图,如图 6 所示.图 6 中: f_1 为一阶共振频率; A 为振幅.

各阶共振频率的计算式为

$$f_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{E_1}{2A_s \rho_s + (A - 2A_s) \rho_c}} \quad (1)$$

式(1)中: L 为梁长度; $n=1,2,3,\cdots$; E_1 为抗弯刚度; A_s 为钢筋横截面积; ρ_s 为钢筋的密度; ρ_c 为混凝土的密度.

试验梁横向振动一阶固有频率理论计算值为 36.167 Hz,与实际监测结果基本一致,说明内嵌光纤光栅能有效、准确测出 RC 梁的共振频率值.

试验梁共振频率随荷载变化规律,如图 7 所示.图 7 中: F 为荷载.由图 7 可知:当荷载为 120 kN 时,对比梁 L-1 破坏;当荷载为 60 kN 时,试验梁 L-2,L-3 和 L-4 达到受损状态;当荷载为 0~30 kN 时,RC 梁共振频率保持稳定在 38 Hz;当荷载为 40 kN 时,梁共振频率开始下降到 35 Hz;对比梁 L-1 随着

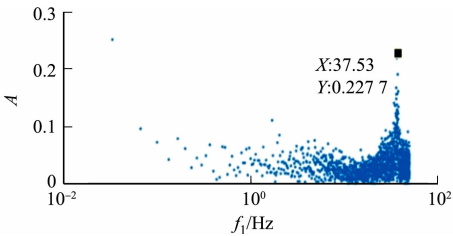


图 6 幅频图
Fig. 6 Amplitude frequency diagram

荷载持续加大裂缝不断发展,梁共振频率从受损状态下 30.5 Hz 降到完全破坏 27.4Hz;当荷载为 60 kN 时,RC 梁共振频率下降幅度大约为 17%。内嵌光纤光栅钢筋可对 RC 梁共振频率实时监测,且无中断、失效的情况发生。

3 RC 梁加固后状态评估

对比梁 L-1 及试验梁 L-2,L-3,L-4 在加载过程中均达到了极限荷载,发生弯曲破坏。

对比梁 L-1 在加载至 40 kN 时,跨中纯弯段有细微裂缝;加载至 60 kN 时,裂缝宽度为 0.02 mm;加载至 100 kN 时钢筋屈服,主裂缝开始大幅扩展,受弯段的多条裂缝均向上延伸,在最终破坏前,构件挠度大幅增长,不久受压区混凝土被压碎,极限荷载为 136 kN,对比梁 L-1 的破坏形态,如图 8 所示。

试验梁 L-2 的破坏形态,如图 9 所示。试验梁 L-2 加载至 60 kN 时混凝土开裂,加载至 220 kN 时钢筋达到屈服阶段;继续加载,受压区混凝土被压坏,导致梁破坏,极限荷载为 258 kN,碳纤维板发生部分断丝,且碳纤维板与混凝土之间出现部分剥离。试验梁 L-3 和 L-4 的破坏形态与试验梁 L-2 基本一致。

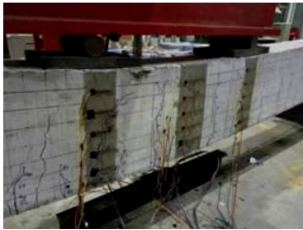


图 8 对比梁 L-1 的破坏形态

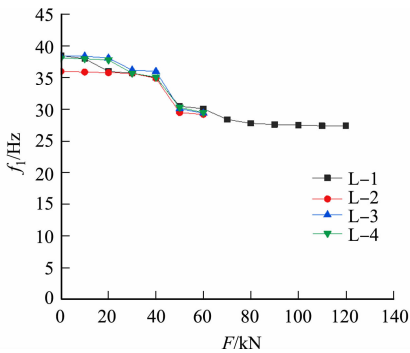


图 7 RC 梁共振频率随荷载变化规律

Fig. 7 Variation law of RC beam' resonance frequency with load



图 9 试验梁 L-2 的破坏形态

Fig. 8 Destruction pattern of contrast beam L-1

Fig. 9 Destruction pattern of test beam L-2

共振频率监测结果,如表 1 所示。表 1 中: η 为共振频率的提升率。

表 1 共振频率监测结果

Tab. 1 Summary of resonance frequency monitoring results

试验梁编号	试验梁状态	内置光纤光栅位置	f_1 /Hz	η /%
L-2	加固前	钢筋	30.413	27.92
	加固后	钢筋	38.907	
		碳板	40.013	
L-3	加固前	钢筋	30.585	28.17
	加固后	钢筋	39.201	
		碳板	40.512	
L-4	加固前	钢筋	30.519	28.14
	加固后	钢筋	39.108	
		碳板	40.421	

由表 1 可知:试验梁 L-2,L-3,L-4 经过预应力碳纤维板加固后,共振频率提升了约 28%;内嵌光纤光栅碳纤维板与内嵌光纤光栅钢筋在监测梁共振频率的结果上基本一致。

3.1 钢筋应变

RC 梁钢筋跨中荷载-应变曲线,如图 10 所示。由图 10 可知:对比梁 L-1 的极限承载力为 136 kN,钢筋曲线应变值增长较快;试验梁 L-2,L-3,L-4 的极限承载力得到极大的提高,破坏荷载约为 260 kN;试验梁 L-2,L-3,L-4 的下部拉力由钢筋和碳纤维板共同承担,与对比梁 L-1 相比较,试验梁 L-2,L-3

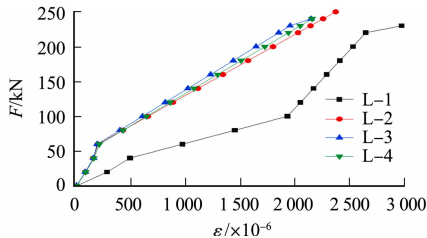


图 10 RC 梁钢筋跨中荷载-应变曲线

Fig. 10 Load-strain curves of steel bars in RC beams during mid-span

和 L-4 的应变增大较缓慢.

3.2 碳纤维板应变

试验梁钢筋与碳纤维板跨中荷载-应变(ϵ)曲线,如图 11 所示.由图 11 可知:随着荷载的增加,钢筋与碳纤维板监测到的应变也随之均匀增加,说明光纤光栅传感器可对钢筋与碳纤维板应变进行实时准确的监测,其监测结果良好.

试验梁碳纤维板跨中荷载-应变曲线,如图 12 所示.由图 12 可知:光纤光栅和应变片监测结果基本一致,应变片并没有呈现出较好的线性,且随着荷载的增大,所测应变值波动大.

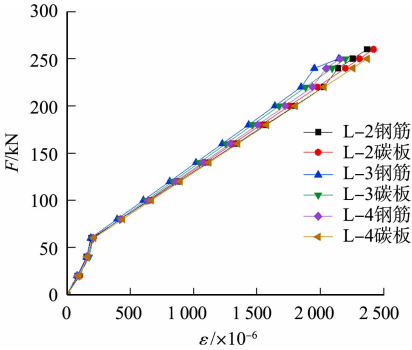


图 11 试验梁钢筋与碳纤维板跨中荷载-应变曲线
Fig. 11 Load-strain curves of steel bars and carbon fibre board in test beams during mid-span

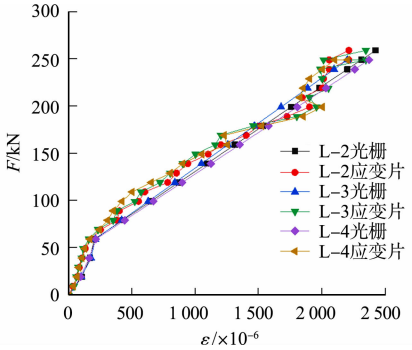


图 12 试验梁碳纤维板跨中荷载-应变曲线
Fig. 12 Load-strain curves of CFRP plates in test beams at mid-span

3.3 共振频率

不同激振位置的共振频率变化,如图 13 所示.图 13 中:V1,V4,V7,V10 对应图 2 的布置点.由图 13 可知:随着荷载对不同位置人工激励逐渐增大,所监测梁共振频率变化曲线基本一致.

当采用预应力碳纤维板加固受损 RC 梁时,各梁共振频率增加 28% 左右,预应力碳纤维板不仅提升受损 RC 梁的强度,同时也提升受损梁的共振频率.试验梁的共振频率变化趋势,如图 14 所示.由图 14 可知:共振频率有两个下降段,第一段发生在荷载为 20 kN 时,由于 RC 梁在受损情况下加固,梁内存在损伤,故在加载初期损伤增大,共振频率出现较小幅度下降;第二段发生在荷载 70 kN 时,RC 梁再次开裂,微小裂缝宽度增加,梁共振频率下降约 40%,此后,梁共振频率值波动较小;经预应力碳纤维板加固后,各受损 RC 梁的极限承载能力得到提升.

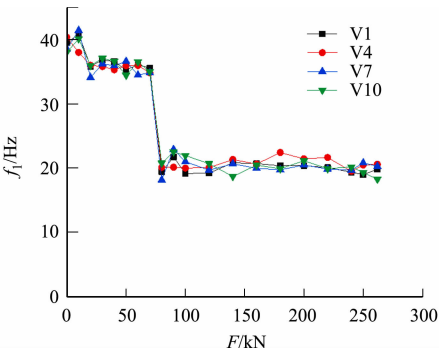


图 13 不同激振位置的共振频率变化
Fig. 13 Variation of resonance frequency at different excitation locations

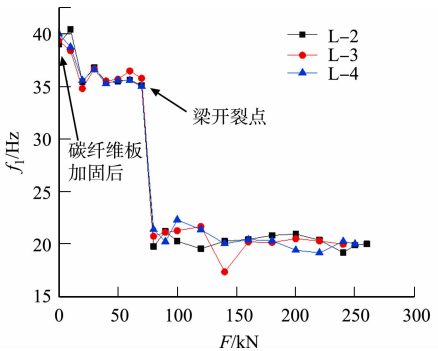


图 14 试验梁的共振频率变化趋势
Fig. 14 Trend of resonance frequency of test beam

未加固各梁随着荷载增加出现共振频率急剧下降点(图 7),将其作为 RC 梁受损状态点.在桥梁工程中,当发现混凝土梁处于受损状态时,初期产生的微裂缝应及早修补,若 RC 梁表面可观察到宽度较大的裂缝,应根据情况制定加固方案.预应力碳纤维板加固受损 RC 梁,RC 梁共振频率上升了 28% 左右,说明共振频率变化曲线能反应加固效果.加固后的受损 RC 梁抗弯试验说明,随着荷载的加大,RC 梁会再次出现共振频率下降的情况,这时应及时检查梁受损情况,并进行进一步加固.

4 结论

1) 抗弯试验中,随着荷载的增加,RC 梁共振频率也随之变化,其中,共振频率突变点可作为 RC 梁受损状态点。对于不同的激励位置,其共振频率曲线基本一致。

2) 经过预应力碳纤维板加固后,RC 梁的承载能力得到提升,共振频率提升 28% 左右,布置在碳纤维板与钢筋内部的光纤光栅传感器的共振频率监测值基本一致。

3) 光纤光栅传感器监测结果中,碳纤维板及钢筋应变之间为线性相关,表明光纤光栅传感器可对钢筋与碳纤维板应变进行实时准确的监测,监测效果良好。

参考文献:

- [1] 陆绍辉,王红伟,孟涛,等. 基于光纤光栅的预应力碳纤维板实桥加固荷载试验研究[J]. 预应力技术,2017(1):10-13. DOI:10.13211/j.cnki.pstech.2017.01.002.
- [2] 郭蓉,张敬淳,彭志会,等. 基于预警理论的预应力碳纤维增强复材抗弯加固钢筋混凝土梁试验研究[J]. 工业建筑,2020,50(5):171-176. DOI:10.13204/j.gyjz202005028.
- [3] 丁静姝,钮鹏,王晓初,等. 预应力 CFRP 板加固混凝土桥梁的研究进程[J]. 混凝土,2020(9):133-138. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2020.09.032.
- [4] 徐福泉,李东彬,赵基达,等. 预应力碳纤维板加固钢筋混凝土梁的试验研究[J]. 建筑结构,2010(增刊 2):372-375. DOI:10.19701/j.jzjg.2010.s2.110.
- [5] 龙勇,张宝静. 预应力碳纤维板加固受弯构件长期性能研究[J]. 中外公路,2012,32(3):212-215. DOI:10.3969/j.issn.1671-2579.2012.03.050.
- [6] GALALI K,MOFIDI A. Shear strengthening of RC T-beams using mechanically anchored unbonded dry carbon fiber sheets[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2010,24(1):31-39. DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000067.
- [7] TANG Chaoqing,TIAN Guiyun,LI Kongjing,*et al.* Smart compressed sensing for online evaluation of CFRP structure integrity[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2017,64(12):9608-9617. DOI:10.1109/TIE.2017.2698406.
- [8] 尚守平,张宝静,吕新飞. 预应力碳纤维板加固梁桥长期徐变性能的试验研究 [J]. 公路交通科技,2015,32(5):68-74. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2015.05.012.
- [9] 张建仁,毛杰,彭建新,等. 使用碳纤维板加固的 RC 梁桥服役过程可靠度指标分析[J]. 长沙理工大学学报,2014,11(2):25-31. DOI:10.3969/j.issn.1672-9331.2014.02.005.
- [10] REED C E,PETERMAN R J. Evaluation of prestressed concrete girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer sheets[J]. Journal of Bridge Engineering,2004,9(2):185-192. DOI:10.1061/(ASCE)1084-0702(2004)9:2(185).
- [11] GOLDFELD Y,ELAIS D. Using the exact element method and modal frequency changes to identify distributed damage in beams[J]. Engineering Structures,2013,51:60-72. DOI:10.1016/j.engstruct.2013.01.019.
- [12] GILLICH G R,PRAISACH Z L. Modal identification and damage detection in beam-like structures using the power spectrum and time-frequency analysis[J]. Signal Processing,2014,96:29-44. DOI:10.1016/j.sigpro.2013.04.027.
- [13] 张家滨,唐催,王磊,等. 基于频率变化率的结构刚度非均匀退化识别[J]. 振动、测试与诊断,2018,38(3):486-493. DOI:10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2018.03.009.
- [14] 张东利,李霆,孙锡龙. 利用固有频率特征量诊断混凝土结构损伤位置[J]. 测试技术学报,2003,17(3):265-269. DOI:10.3969/j.issn.1671-7449.2003.03.019.
- [15] 朱晓辉,俞梅. 基于光纤光栅的等截面悬臂梁固有频率研究[J]. 半导体光电,2018,39(3):93-96. DOI:10.16818/j.issn1001-5868.2018.03.020.
- [16] 朱超杰,魏鹏,李成贵. 基于光纤光栅的结构应变模态测试及参数识别[J]. 半导体光电,2019,40(1):123-128. DOI:10.16818/j.issn1001-5868.2019.01.025.
- [17] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

(责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)