

文章编号: 1000-4750(2014)02-0190-05

基于非线性振动特性的预应力混凝土梁损伤识别

曹 晖^{1,2}, 郑 星¹, 华建民^{1,2}, 胡芝茂¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045)

摘 要: 对2根后张有粘结预应力混凝土简支梁分别进行单调加载和二级等幅值疲劳加载试验, 在各级加载后对试验梁进行动测得到自由振动加速度信号, 对加速度信号进行盲源分离并进行Hilbert变换, 得到各损伤状态下梁的频率-振幅曲线簇, 分析其非线性振动特性随损伤状态的变化规律。结合裂缝开展情况和钢绞线的应力变化, 探讨梁的非线性振动特性的变化与其损伤之间的关系。结果表明非线性振动特性适合于预应力混凝土梁的损伤检测。

关键词: 预应力混凝土梁; 损伤检测; 非线性动力特性; 盲源分离; Hilbert变换

中图分类号: TU311 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.08.0611

DAMAGE DETECTION OF PRESTRESSED CONCRETE BEAMS BASED ON NONLINEAR DYNAMIC CHARACTERISTICS

CAO Hui^{1,2}, ZHENG Xing¹, HUA Jian-min^{1,2}, HU Zhi-mao¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China)

Abstract: Two post-tensioning tests for bond prestressed concrete beams were used to carry out a static test and a two-stage fatigue test respectively. Under each damage level, the beams were excited by a hammer and their acceleration signals of free vibration were recorded. Then the signals were processed by the blind source separation algorithm and Hilbert transform to obtain frequency-amplitude curves, from which the change of nonlinear dynamic characteristics of the beams with the damage level was analyzed. The strain of the prestressing strand and cracking of the beams under each damage level were utilized to investigate the relation between the change of the nonlinear dynamic characteristics and the damage of the beams. The results prove that the nonlinear dynamic characteristics can be used to detect the damage of prestressed concrete beams.

Key words: prestressed concrete beam; damage detection; nonlinear dynamic characteristics; blind source separation; Hilbert transform

预应力混凝土结构在使用期间, 由于荷载、疲劳、腐蚀、老化及其它环境条件等众多不利因素的影响, 将不可避免地产生损伤积累, 导致混凝土开裂、预应力损失, 甚至破坏等事故。因此, 在役预应力混凝土构件的工作性能评价, 是当前结构健康

监测的一个重要方面。

当混凝土构件出现裂缝后, 会产生呼吸裂缝效应^[1]。所谓呼吸裂缝, 即裂缝在振动中时张时合。振幅小的时候, 裂缝闭合, 此时结构刚度较大; 振幅大的时候, 裂缝张开, 此时结构刚度变小。随着

收稿日期: 2012-08-24; 修改日期: 2013-01-29

通讯作者: 曹 晖(1969—), 男, 四川内江市人, 教授, 博士, 博导, 从事结构抗震及结构健康监测研究(E-mail: caohui@cqu.edu.cn).

作者简介: 郑 星(1986—), 男, 湖北荆州市人, 硕士生, 从事结构健康监测研究(E-mail: zhengx_cqu@163.com);

华建民(1974—), 男, 河南商丘市人, 副教授, 博士, 从事结构工程及施工技术研究(E-mail: hjm191@163.com);

胡芝茂(1984—), 男, 四川宜宾市人, 硕士生, 从事结构健康监测研究(E-mail: hu.zm@163.com).

裂缝在振动过程中的张合, 结构刚度随振幅的变化而变化, 导致结构频率也随振幅而改变, 即呈现非线性振动特性。实际结构的动力特征通常都表现出或强或弱的非线性。

目前, 绝大部分损伤识别研究都是基于线性振动理论, 即假定结构在损伤前后的振动都是线弹性的。采用非线性振动理论对混凝土结构进行损伤识别的研究还较少。Neild^[1]、任宜春^[2]、易伟建^[3]、王利恒^[4-5]和郑晓宇等^[6]分别研究了钢筋混凝土梁和无粘结预应力混凝土梁的非线性振动特性, 并探讨了将其用于损伤检测的可行性。

本文采用 2 根后张有粘结预应力混凝土简支梁分别进行单调加载和二级等幅疲劳加载试验, 测量各损伤状态下预应力钢绞线的应力变化和梁的挠度, 并记录裂缝开展的情况, 同时进行动力测试获得梁振动加速度信号。然后采用盲源分离技术^[7]和 Hilbert 变换得到梁的频率-振幅曲线簇, 探讨其损伤与非线性振动特性的关系。

1 试验概况

1.1 构件尺寸和材料

2 根试验梁完全相同, 编号为 X 和 SZ, 分别用于单调加载和疲劳加载。如图 1 所示, 截面尺寸为 180mm×300mm, 长度为 4200mm, 计算跨径为 3900mm, 梁上、下分别配置 2Φ12 和 2Φ16, 均为 HRB335 级钢筋, 箍筋为 HPB235 级钢筋 φ6@100/200, 混凝土的强度等级为 C50, 预应力钢绞线为 1 束 7Φ_s15.2 直线型钢绞线, 张拉控制应力为 0.7f_{ptk}, 张拉后立即灌浆。梁端为铰支座。

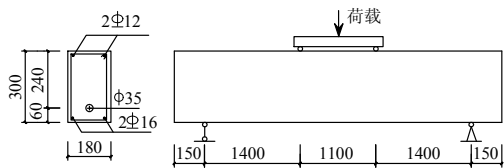


图 1 构件截面尺寸和配筋及加载图

Fig.1 Dimensions of the beams and loading arrangement

1.2 试验仪器及测点布置

采用 5 个百分表和 5 个加速度传感器均匀地分布在试验梁上, 分别采集加载过程中的挠度和动测时的加速度响应。加速度传感器的布置见图 2。在钢绞线两端支座处、跨中和两三分点处粘贴 5 片型号为 B×120-2AA 的应变片测量钢绞线的应变, 在 SZ 梁预应力张拉端的钢垫板上安置量程为 30t 的光纤光栅锚索计, 测量梁端钢绞线的拉力。

2 试验内容

2.1 单调加载

X 梁分 5 级加载至 0.8 倍的计算极限荷载^[8], 在接近开裂荷载时, 适当减小加载量, 以便较准确地找到开裂荷载。截面开裂后, 依次加载到各级荷载值并持荷 5min, 待百分表读数、裂缝发展基本稳定后, 观察并记录梁的裂缝开展情况, 采集百分表和应变片读数, 然后卸载到零。最终的裂缝开展如图 3 所示。钢绞线应变片在试验过程中的读数如表 1 所示。由于每次加载前, 应变片的读数均清零, 故表中的加载读数为持荷时钢绞线较之加载前的应变改变, 卸载后的读数为卸载后钢绞线的残余应变。

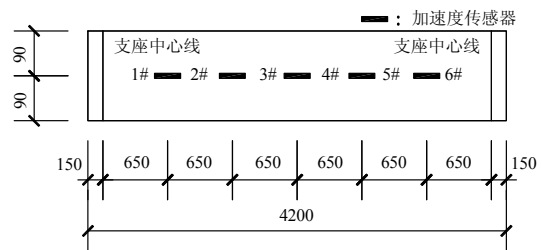


图 2 加速度传感器布置示意图

Fig.2 Acceleration sensors layout

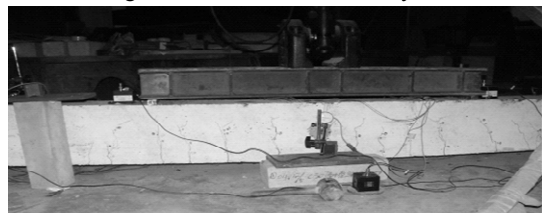


图 3 X 梁达到极限承载能力时裂缝开展情况

Fig.3 Cracking of X beam at ultimate bearing capacity

表 1 各级荷载加载前后 X 梁钢绞线的应变片读数 /με

Table 1 Steel strand strain of X beam under and after load

试验状态	jg02	jg03	jg04	jg05
加载 15kN	21	27	13	-2
卸载后	0	-15	-7	-15
加载 30kN	47	91	55	64
卸载后	3	7	8	39
加载 45kN	74	166	100	74
卸载后	-1	-85	15	7
加载 65kN	235	430	240	235
卸载后	-6	-66	24	183
加载 75kN	297	440	317	127
卸载后	-54	-163	-82	-9
加载 120kN	969	1292	1209	901
卸载后	-95	37	128	387

注: jg01-jg05 为钢绞线上从左至右的应变片, jg01 在张拉阶段已经损坏, 因此没有读数。加载 55kN 时, 应变数据明显异常, 没有填入表中。应变片值为正表明钢绞线在原有长度上伸长; 应变片值为负表明钢绞线在原有长度上回缩。

观察表 1 中的数据,可以发现梁端、三分点处的应变片读数围绕跨中基本呈对称关系。从持荷读数看,梁开裂前(45kN 前),应变片读数变化不大,稍有增长;从梁开裂到钢筋屈服前,应变片读数的增长速度明显加快;从 65kN 到 75kN,钢筋屈服,应变片读数基本保持不变;从 75kN 到 120kN,这期间应变片读数的增加速度达到最大。从卸载读数看,梁开裂前,卸载后钢绞线基本无残余应变;从梁开裂到钢筋屈服期间,卸载后钢绞线主要在跨中处发生局部回缩(跨中处的残余应变为负值);在钢筋屈服后,卸载后钢绞线整体回缩(所有残余应变都为负值);在接近梁的极限承载能力阶段,卸载后钢绞线整体伸长(所有残余应变都为正值)。

综上所述,各持荷状态下,钢绞线应变值从线性的增长,到开裂后转变为幅度明显增加的非线性增长,最后到屈服后极大的增长;卸载读数的规律,则是从基本无残余应变,到开裂后局部的回缩,再到钢筋屈服后的钢绞线整体回缩,最后到接近极限承载能力阶段的钢绞线整体伸长。

2.2 疲劳加载

疲劳试验采用最小应力和最大应力水平的等幅正弦波加载,疲劳加载下限为 $0.05P_u$ (P_u 为单调加载试验确定的极限承载力),低幅值疲劳加载上限为 $0.3P_u$,略小于 SZ 梁的开裂荷载,高幅值疲劳加载上限为 $0.55P_u$,此时梁的钢筋即将屈服。SZ 梁在加载过程中的裂缝开展情况见表 2。

表 2 SZ 梁疲劳试验中裂缝开展情况
Table 2 Cracking of SZ beam during fatigue test

损伤状态	加载情况	裂缝开展情况
SZ-1	加载前	无裂缝
SZ-2	低幅值静载后	第一条裂缝在右侧加载点处,宽 0.05mm,长 5cm
SZ-3	5 万次	加载点之间梁两侧不断出现微小裂缝
SZ-4	10 万次	加载点左侧两面出现 3 条裂缝,裂缝最宽为 0.07mm,长 9cm
SZ-5	50 万次	加载点右侧两面出现两条裂缝,其它裂缝基本不变
SZ-6	100 万次	多条裂缝宽度增加了 0.03mm,裂缝最宽 0.08mm,长 11cm
SZ-7	150 万次	裂缝发展程度较小
SZ-8	200 万次	左侧加载点与跨中出现一条裂缝,其它无明显发展
SZ-9	高幅值静载后	普通钢筋屈服,裂缝急剧发展贯通,正反两面各 12 条裂缝均匀分布在加载点之间
SZ-10	5 万次	裂缝最宽为 0.31mm,高为 18cm
SZ-11	15 万次	右侧加载点处裂缝宽达到 1.38mm,形成主裂缝
SZ-u	疲劳破坏	上部混凝土压溃,下部混凝土脱落

疲劳试验过程中,锚索计读数在 159.9kN~160.7kN 范围内波动,表明梁端部钢绞线应力变化很小。疲劳破坏后,锚索计读数增大了 3kN。这是因为梁开裂程度较大,产生较大的残余变形,强迫钢绞线伸长造成应力增大。

2.3 振动测试

试验梁做完一次加载后,抬高 MTS 作动头并移开分配梁,对梁进行动测,锤击激励,由加速度传感器记录梁的加速度信号,采样频率为 2kHz。X 梁的加速度信号编号为 X-A,其中 A 表示荷载等级(从 0kN 开始,至 75kN,依次为 1 至 7,梁达到极限承载力时为 u)。SZ 梁的加速度信号编号类似,见表 2 中的损伤状态编号。

3 试验数据分析

3.1 信号处理

首先采用小波软阈值方式对加速度信号进行去噪处理^[9]。再用二阶统计量盲辨识(SOBI)技术^[7]对去噪后的信号进行盲源分离。将分离出的梁第一阶加速度信号积分两次,并去除受端部效应影响的部分数据,得到位移信号。

3.2 时频分析

为去除端部效应的影响,先对位移信号进行镜像,再进行 Hilbert 变换,得到频率-时间曲线和振幅-时间曲线。选取频率-时间曲线上平滑的一段,即 0.5s 至各损伤状态都能衰减到的很小的振幅值所对应的时间点,与相同时间段的振幅值对应,得到频率-振幅曲线。

对每级加载后的动测信号,按上述步骤处理即得到 X 梁在各个损伤状态下的频率-振幅曲线,如图 4 所示。由图 4 可见,随着损伤的加重,梁的一阶频率逐渐减小。并且各损伤状态下,一阶频率还随振幅的增大而降低,表现出非线性振动特性。为比较各损伤状态下梁的非线性振动程度的大小,将

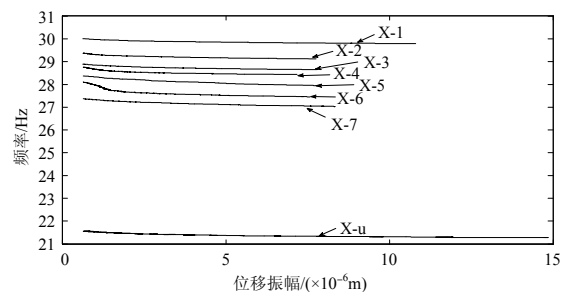


图 4 各损伤状态下 X 梁的频率-振幅曲线

Fig.4 The frequency-amplitude curves of X beam under each damage level

图 4 中各曲线的纵坐标均减去其各自的最大值(即归一化), 得图 5。

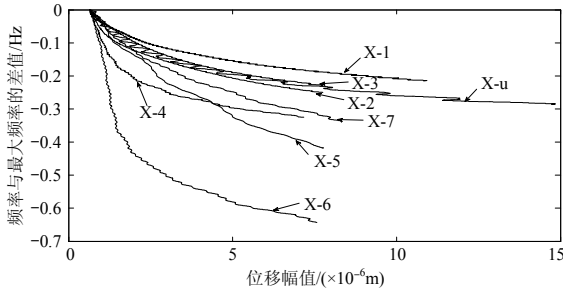


图 5 各损伤状态下 X 梁的归一化频率-振幅曲线

Fig.5 The normalized frequency-amplitude curves of X beam under each damage level

从图 5 可以看出, 随着损伤的增大, 频率-振幅曲线从平缓变得陡峭, 说明梁的非线性振动程度在增大, 到状态 X-6 时达到最大, 之后梁的非线性振动程度大幅降低。

采用前面所述方法和步骤, 得到 SZ 梁各损伤状态下的频率-振幅曲线及其归一化的结果, 如图 6 和图 7 所示。由图 6 的频率和振幅的关系来看, 在振幅较小的区间内频率变化较快, 与单调加载试验相比, 疲劳试验中的频率-振幅曲线更具不规则性, 曲线波动较为明显。虽然有相邻状态曲线非常接近的情况, 但仍然可以判断出: 加载前到 6 级加载(100 万次低幅值疲劳后), 曲线的弯曲程度逐渐增加, 6 级加载后到 10 级加载, 曲线的弯曲程度逐渐减小。11 级加载中梁发生了纵向移动, 边界条件发生了变化, 故结果未列入图中。由此可见, 随着损伤的增加, SZ 梁的非线性振动程度呈现先增强后减弱的变化趋势。

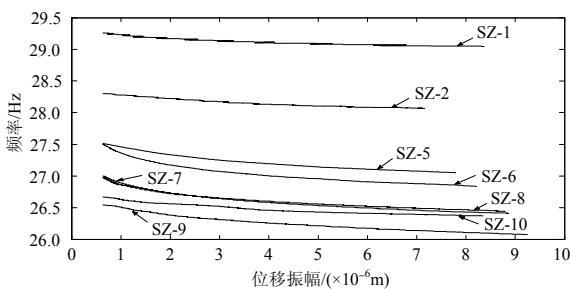


图 6 SZ 梁各损伤状态下梁的频率-振幅曲线

Fig.6 The curves of frequency vs. amplitude of SZ beam under each damage level

由图 7 可以清楚地看到: 6 级加载的归一化频率-振幅曲线弯曲程度最大, 6 级加载后, 随着损伤加重, 曲线弯曲程度开始逐渐减小, 在高幅值阶段(8 级、9 级和 10 级加载), 曲线弯曲程度持续减小, 且减小程度相比低幅值疲劳阶段更大。

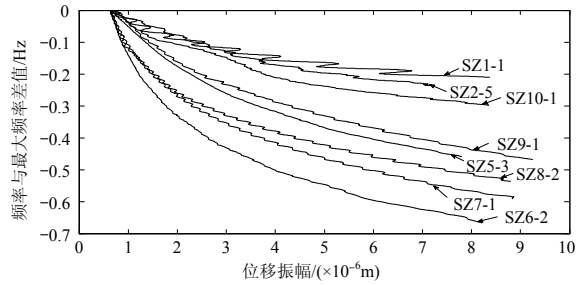


图 7 SZ 梁各损伤状态下梁的归一化频率-振幅曲线

Fig.7 The normalized curves of frequency vs. amplitude of SZ beam under each damage level

综上所述, 在低幅值疲劳加载阶段, SZ 梁随着损伤的积累, 其非线性振动程度先增强后减弱。在高幅值疲劳加载阶段, SZ 梁的非线性振动程度则呈现出单调递减的趋势。

4 预应力混凝土梁的损伤与非线性振动程度的关系

由于疲劳试验历时长, SZ 梁钢绞线上的应变片不能准确地测得其各部位应变值的变化, 梁端的锚索计读数显示梁端部的预应力在重复加载过程中没有明显变化。因此, 下面将针对 X 梁的损伤状况与非线性振动程度之间的关系进行讨论。

1) 开裂前, 随着荷载的增加, 梁的非线性振动程度小幅度增加, 主要影响因素为材料非线性和支座条件。二级加载 15kN 后, 梁与支座接触更加紧密, 支座条件的这种变化对动力非线性特性产生主要的影响。继续加载, 混凝土中的水泥凝胶体产生塑性变形, 此时临近开裂, 材料的非线性对梁的动力非线性特性产生主要影响。

2) 从开裂到 7 级加载前, 即钢筋屈服前, 挠度发展明显加快, 裂缝不断开展。但由于钢绞线对构件的预压力能够消除开裂区域的残余应变, 因此裂缝的“呼吸效应”不断加剧, 梁的非线性振动程度不断增加。

3) 7 级加载后, 钢筋屈服, 裂缝开始贯通发展, 钢绞线由局部回缩变化为整体回缩, 对梁的预压力减小, 导致开裂区域的残余应变在振动中不能被完全消除, 裂缝不能完全闭合。并且当裂缝扩大到一定大小后, 裂缝之间的骨料颗粒由于错动而阻止裂缝的闭合。因此裂缝的“呼吸效应”开始减弱, 梁的非线性振动程度开始减小。接近梁的极限承载力时, 挠度急剧增加, 卸载后裂缝也很容易看见, 梁的残余挠度以及混凝土和钢筋的残余变形都非常大, 钢绞线和构件在卸载后已不能回复原位。这时

裂缝的呼吸效应基本丧失,梁的非线性振动程度降到很低的水平。

在 X 梁的非线性振动程度达到最大时,最大裂缝宽度达到了 0.25mm,超过了文献[10]规定的一级环境类别下,裂缝控制等级为三级的预应力混凝土结构在正常使用状态下的最大裂缝控制上限值 0.2mm。这意味着预应力混凝土梁在正常使用状态下的非线性振动程度随损伤的增大单调递增,即可以用非线性振动程度检测处于正常使用状态下的预应力混凝土梁的损伤。

5 结 论

采用 2 根预应力混凝土梁分别进行单调加载和疲劳加载试验,对各损伤状态下梁的频率-振幅曲线簇进行比较。结合试验现象,利用裂缝的“呼吸效应”和钢绞线应力对裂缝开合程度的影响解释梁非线性振动特性的变化,得到如下结论:

(1) 疲劳加载和单调加载下,梁的非线性振动特性变化规律有一致性,即单调加载和低幅值疲劳加载下梁的非线性振动程度都呈现出先增强后减弱的趋势。高幅值疲劳加载阶段,梁的非线性振动程度单调递减。

(2) 随着损伤的累积,裂缝区域的残余应变增大,钢绞线应力减小,当钢绞线对混凝土产生的压应变小于裂缝区域加载导致的残余应变时,裂缝在振动中的闭合程度降低,“呼吸效应”减弱,导致梁的非线性振动程度由增强转为减弱。

(3) 非线性振动特性适合于正常使用状态下的预应力混凝土梁的损伤检测。

参考文献:

- [1] Neild S A, Williams M S, McFadden P D. Nonlinear vibration characteristic of damaged concrete beams [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(2): 260—268.
- [2] 任宜春, 易伟建. 钢筋混凝土梁的非线性振动识别研究[J]. *工程力学*, 2006, 23(8): 90—95.
- Ren Yichun, Yi Weijian. Identification of the nonlinear

vibration characteristics of reinforced concrete beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(8): 90—95. (in Chinese)

- [3] 易伟建, 段素萍. 带裂缝钢筋混凝土梁的非线性振动特征识别[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(3): 27—41.
- Yi Weijian, Duan Suping. Identification of nonlinear dynamical characteristics of cracked reinforced concrete beam [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(3): 27—41. (in Chinese)
- [4] 王利恒, 周锡元, 阎维明, 等. 钢筋混凝土梁非线性动力特性试验研究[J]. *地震研究*, 2006, 29(1): 65—71.
- Wang Liheng, Zhou Xiyuan, Yan Weiming, et al. Test study on nonlinear dynamic characteristics of reinforced concrete beams [J]. *Journal of Seismological Research*, 2006, 29(1): 65—71. (in Chinese)
- [5] 王利恒, 周锡元, 阎维明, 等. 无粘结预应力钢筋混凝土梁非线性动力特性试验研究[J]. *建筑结构*, 2008, 38(10): 62—72.
- Wang Liheng, Zhou Xiyuan, Yan Weiming, et al. Study on nonlinear dynamic characteristics of unbonded prestressed reinforced concrete beam [J]. *Building Structure*, 2008, 38(10): 62—72. (in Chinese)
- [6] 曹晖, 郑晓宇. 基于盲源分离的钢筋混凝土梁非线性振动特性分析[J]. *工程力学*, 2012, 29(12): 121—126.
- Cao Hui, Zheng Xiaoyu. Analysis of non-linear vibration of RC beams by using blind source separation [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(12): 121—126. (in Chinese)
- [7] McNeill S I, Zimmerman D C. A framework for blind modal identification using joint approximate diagonalization [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22: 1526—1548.
- [8] GB 50152-92, 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- GB 50152-92, Standard methods for testing of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992. (in Chinese)
- [9] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, 41(3): 613—626.
- [10] GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- GB 50010-2010, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)