

文章编号:1673-2049(2012)03-0068-05

桥梁损伤定位的差分曲率差值指标

王艺霖¹, 刘西拉², 方从启²

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101;

2. 上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

摘要:深入研究了差分曲率差值指标在桥梁损伤定位中的应用;在进行清晰、完整的理论分析之后,对该指标提出了一个详细实用的应用流程,并研究了测点布置的优化问题;通过 1 个斜拉桥算例验证了差分曲率差值用于桥梁多处损伤定位的有效性并与模态方法进行了对比;最后,为了提高该方法在实际应用时的鲁棒性,给出了若干具体的建议措施。结果表明:该方法具有一定的优越性。

关键词:桥梁;损伤;定位;差分曲率;位移;自振频率;鲁棒性

中图分类号:U448.34

文献标志码:A

Damage Localization in Bridges Using Differential Curvature Difference Indicator

WANG Yi-lin¹, LIU Xi-la², FANG Cong-qi²

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China;

2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Authors deeply investigated the application of differential curvature difference indicator in damage localization of bridges. Based on the foundational theory analysis, the practical and detailed application method of this indicator was proposed. The effectiveness of differential curvature difference was verified in multiple damage localizations of bridges by a cable-stayed bridge example. The comparative advantage with respect to the previous mode method was assessed. Finally, some valuable suggestions for improving its robustness were also proposed. Results show that the method has certain advantages.

Key words: bridge; damage; localization; differential curvature; displacement; self-vibration frequency; robustness

0 引言

为了确保桥梁的运行安全,避免生命财产损失,对桥梁上可能出现的损伤进行准确的定位是很有必要的。目前,这方面的研究也已成为一个热点。在基于结构动力性能的损伤识别研究中,有一个常用的指标是曲率模态,它是基于振型模态而得的二次指标,但比振型模态更具有局部性,利于损伤定位。

1991 年 Pandey 等^[1]最先发现了曲率模态指标对损伤比较敏感,而且可用来识别多处损伤。随后, Wahab 等^[2]将该研究扩展到了预应力混凝土桥梁上并引入了一个新指标——曲率损伤因子。通过该指标,各测点处的各阶曲率模态的差值可被统一为一个数值。为了进一步改进该指标的应用效果, Ratcliffe 等^[3]将缺口滤波方法引入曲率模态得到了一个损伤指标,该方法被用于混合梁中分层缺陷的识

收稿日期:2012-01-04

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2002CB412709)

作者简介:王艺霖(1981-),男,河南项城人,讲师,工学博士,E-mail:xgwang_wang@163.com。

别; Dutta 等^[4]采用自适应有限元方法提高模态参数数值的精度。此外, Sahin 等^[5]基于神经网络方法,混合频率和曲率模态来作为输入用于梁式结构的损伤识别。近年来,结构模态测量数据中的不确定性得到了研究者的重视; Tomaszewska^[6]研究了振型数据误差的影响,采用峰值法获取模态特征,考虑测量误差的统计特性,提出了“绝对损伤指标”。Chandrashekhara 等^[7]引入概率论中的全异域分析和模糊逻辑来处理这种不确定性。

这些方法大都是通过中心差分运算来从位移振型数据中得到曲率模态,主要缺陷在于需要全面的、精确的位移振型数据。另外,当结构受到多处损伤时,需要多个模态的数据来进行定位,由于实测时的传感器数量及精度限制,要获得多个模态的精确数据是很困难的。还有一种获取曲率模态的方法是直接通过应变传感器来获得测点截面处的曲率模态,先进的应变传感器(如光纤式传感器)的应用使得这种方式具有很高的精度^[8]。然而,对于高阶模态,这种测量的精度不是很高,而且它只能获得测点所在截面的曲率模态信息,对于未布置测点的截面则无法应用,在实际应用时显然无法在所有截面上都布置测点。因此,仍然需要通过进一步的研究来直接、快速、经济地实现损伤定位。鉴于以上这些基于动态的曲率模态的方法具有诸多缺陷,这里将重点转向静力方法的研究。静力方法也是一种重要的损伤识别方法,它对结构是无损的,而且在操作上比动力方法要简便很多,多年来在理论和实测设备方面都取得了长足的进步^[9-10]。但这些方法大多基于静力位移向量,在实测时也难以获得完全的数据。

本文中笔者将结构的静力响应与曲率指标结合起来,深入研究静态曲率指标在损伤定位中的应用,提出了将差分曲率差值指标用于桥梁损伤定位。

1 理论基础

桥梁结构主要承受径向载荷,弯曲变形为其主要的变形形式,变形曲率直接和结构的整体刚度分布状态有关。结构的变形曲率 $1/\rho$ 与力学性能参数的基本关系为

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (1)$$

式中: M 为截面弯矩; EI 为抗弯刚度。

由式(1)可见,如果出现了局部裂口或其他损伤,结构的局部损伤必然会使结构局部抗弯刚度 EI 降低,从而使得损伤处的曲率响应值增大。通过比

较结构各处损伤前、后的曲率差值,可在差值较大的地方发现损伤。

但要直接测定某一截面的曲率并不容易,可以通过测取应变的方式来间接获得曲率值,具体方法是:在截面的上、下表面处各布置1个应变传感器(图1),分别测取所在位置的纵向应变。

图1中, y_1, y_2 分别为上、下传感器到截面中性轴的距离, h 为截面总高度,由此可得

$$\frac{|\epsilon_1 - \epsilon_2|}{h} = \frac{M(y_1 + y_2)}{EIh} = \frac{M}{EI} = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

式中: ϵ_1, ϵ_2 分别为上、下传感器测得的应变。

根据测得的应变和式(2)可得到截面的曲率值。由此可见,只利用应变的测量就可获取曲率值,但应注意这样得到的曲率指标具有太大的局部性,只有测点所在截面内的损伤才能被发现。为此,需要考虑另外一种曲率指标——差分曲率。

2 差分曲率

目前,在模态曲率指标的应用中,已广泛采用了中心差分近似法来获取具体测点所在截面处的模态曲率。对于静态差分曲率,可以用同样的方式来获得,只不过其中位移的意义不同,其计算公式为

$$\frac{1}{\rho_i} = \frac{M_i}{K_i} = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta^2} \quad (3)$$

式中: M_i 为梁 i 截面处的弯矩; K_i 为梁 i 截面处的抗弯刚度; y_i 为梁 i 截面处的静力竖向位移; y_{i+1}, y_{i-1} 分别为与 y_i 相邻的沿梁轴向相距 Δ 的2个测点处的静力竖向位移。

相比式(1)所表示的真正曲率,式(3)所表示的曲率指标可称为差分曲率。

分析实际应用时的情况,根据式(1),如果某测点处发生了局部损伤导致该处的抗弯刚度 EI 下降,则该处的曲率会增大,差分曲率也会增大,对比各测点处在结构出现损伤前、后的差分曲率的差值,可以找到规律以用作损伤识别的依据。

例如,1个简支梁,桥长为 l ,假设损伤区域的长度为 y ,到最左端的距离为 x ,在损伤区域内局部抗弯刚度由 EI 变为 zEI , z 为系数。在跨中处加一个集中荷载 F ,见图2。测点局部放大见图3。

设测点 $i-1$ 距梁最左端的距离为 m ,不难得到

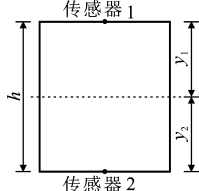


图1 通过应变获得的曲率值

Fig. 1 Curvature Values Obtained by Strain

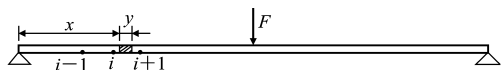


图2 简支梁分析模型

Fig. 2 Analytical Model of Simply Supported Beam

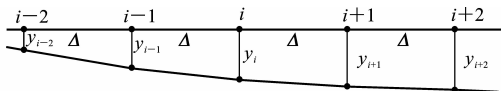


图3 测点局部放大

Fig. 3 Partial Enlargement of Measuring Points

对处于损伤状态的桥梁,各测点处的竖向位移表达式为

$$EI y_{i-1} = -Fm[24xy(x+y)(1-z) - 3l^3z - 12ly^2(1-z) + 8y^3(1-z) - 24lxy(1-z) + 4lm^2z]/(48lz) \quad (4)$$

$$EI y_i = -F(m+\Delta)[24xy(x+y) - 3l^3z - 12ly^2(1-z) + 8y^3(1-z) - 24lxy(1-z) + 4lz(\Delta^2 + m^2) - 24xyz(x+y) + 8\Delta lmz]/(48lz) \quad (5)$$

$$EI y_{i+1} = -F[16\Delta y^3(1-z) - 8y^3(l-m) - 6\Delta l^3z + 32\Delta^3lz + 4lm^3z - 3l^3mz]/(48lz) + [24xy(x+y)(2\Delta + m - l - 2z + zl - zm) + 8y^3z(l-m) + 24\Delta lm^2z(m + 2\Delta)]/(48lz) \quad (6)$$

由于一般的桥梁都不是深梁体系,剪切变形是次要因素,这里进行了忽略。

由此可得,测点 i 处的差分曲率 $1/\rho_i$ 为

$$\frac{1}{\rho_i} = -F[6\Delta y^2(1-z) + 6\Delta^2z(m+\Delta) + 3my^2(1-z) - 6xy(x+y)(1-z) - 2y^3(1-z) + 12\Delta xy(1-z) + 6mxy(1-z)]/(12z\Delta^2EI) \quad (7)$$

按同样的方法进行计算,可得在结构损伤前,测点 i 处的差分曲率 $1/\bar{\rho}_i$ 为

$$\frac{1}{\bar{\rho}_i} = \frac{-F(m+\Delta)}{2EI} \quad (8)$$

测点 $i+1$ 损伤后、前的差分曲率分别为

$$\frac{1}{\rho_{i+1}} = -F[24\Delta y(1-z)(ly - xy - x^2 + 2lx) - 8y^3(1-z)(m+\Delta) + 3l^3z(\Delta+m) + 68\Delta^3lz + 12lm(y^2 - \Delta mz - y^2z) - 4lm^3z - 24mxy(x+y - yz - xz - l - lz) + 36\Delta^2lmz]/(48lzEI\Delta^2) \quad (9)$$

$$\frac{1}{\rho_{i+1}} = \frac{-F(m+2\Delta)}{2EI} \quad (10)$$

测点 $i+2$ 损伤后、前的差分曲率值相等,为

$$\frac{1}{\rho_{i+2}} = \frac{1}{\bar{\rho}_{i+2}} = \frac{-F(m+3\Delta)}{2EI} \quad (11)$$

测点 $i+3$ 损伤后、前的差分曲率值相等,为

$$\frac{1}{\rho_{i+3}} = \frac{1}{\bar{\rho}_{i+3}} = \frac{-F(m+4\Delta)}{2EI} \quad (12)$$

测点 $i-1$ 损伤后、前的差分曲率值相等,为

$$\frac{1}{\rho_{i-1}} = \frac{1}{\bar{\rho}_{i-1}} = \frac{-Fm}{2EI} \quad (13)$$

测点 $i-2$ 损伤后、前的差分曲率值相等,为

$$\frac{1}{\rho_{i-2}} = \frac{1}{\bar{\rho}_{i-2}} = \frac{-F(m-\Delta)}{2EI} \quad (14)$$

由此可见,只有测点 i 和 $i+1$ 两点处的损伤前、后差分曲率值不一样,据此可定义一个损伤识别指标——差分曲率差值 P_i , $P_i = 1/\rho_i - 1/\bar{\rho}_i$ 。各测点处都可计算出该值,然后作图,图形上数值不为 0 的地方即为损伤位置。

然后考虑图形上数值突变的幅度,计算得

$$P_i = Fy(z-1)[12\Delta x - 2y^2 - 6x(x-m+y) + 6\Delta y + 3my]/(12z\Delta^2EI) \quad (15)$$

显然,该值越大,损伤越容易被发现,越不容易被误差掩盖。

另外,由式(7)可见,通过测量各点的竖向位移并计算差分曲率值,可以得到荷载、梁长、测点位置以及损伤信息 x, y, z 的间接信息。这是差分曲率指标和普通曲率指标以及应变指标的很大不同。各测点处的竖向位移或差分曲率值是有内部联系的。

由式(7)还可见,虽然损伤是在测点 i 处的附近,但该点处的差分曲率值中包含了未知量 x, y, z , 可以反映损伤信息。对连续梁桥和斜拉桥等,也可得到类似的结果。因此,不一定非要特别密集地布置测点,即使损伤处没有直接测点,也可以通过附近的测点数据间接地反映出损伤来,这给实际应用带来了很大的便利。

3 应用方式

3.1 测点的优化布置

虽然采用差分曲率指标可以实现较大的测点间距,但间距毕竟不会太大,对于大型桥梁,要满布位移测点也是不太现实的,所以同样需要考虑测点的优化布置问题。

先将桥梁上可能出现的损伤类型分为 2 类:一是受力引起的,主要是大应力或循环荷载作用导致的开裂;二是外界侵蚀作用造成的,主要是钢筋或构件锈蚀和混凝土碳化等。基于此考虑测点优化布置问题:

(1)对于应力超限引起的开裂,可不考虑实际桥梁正常运营的情况,因为在设计时已经充分考虑这个因素,保证了各处的局部应变不会接近限值,而且应变中大部分都是由恒载贡献的,这是无法通过应变传感器测得的。因此,这部分主要考虑活载引起的循环荷载作用下可能出现的疲劳开裂。

桥梁主要承受的活载是车辆荷载,因此可根据桥梁的有限元模型,计算其在车辆荷载下的截面弯曲正应力分布,观察弯曲正应力较大值所在的区段,作为重点监测的区段。

(2)对于外界侵蚀作用,可根据具体桥梁所在环境的具体情况,判断出哪些区段受氯离子侵蚀或有害物质作用较强,结合以上的结果来最终确定重点监测区段。

3.2 应用流程

- 差分曲率差值指标法的应用流程为:
- (1)首先根据有限元模型计算和经验判断,确定重点区段。在结构完好状态下(竣工通车前),在这些区段内布置位移测点,位移测点的间隔为 1 m。
 - (2)在桥梁上某处施加一个静态荷载,测得各测点处的竖向位移,处理得到各点的差分曲率。
 - (3)对损伤后的桥梁,在同样的位置施加同样的荷载,再次测量各测点处的位移情况,换算成差分曲率。
 - (4)对比损伤前、后的差分曲率值,得到各测点处的指标 P 的数值并作图。图形曲线上的峰值点处即指示了损伤出现的位置。

4 算例分析

下面以某斜拉桥为例来进行说明。该桥为双塔双索面稀索斜拉桥,采用五跨连续半漂浮体系,单幅混凝土索塔横向呈 H 形。索塔与主梁之间有竖向和横向约束,辅助墩与主梁之间设置竖向约束,过渡墩与主梁之间设置竖向和横向约束。斜拉桥的有限元模型如图 4 所示,主梁、横梁、主塔均采用空间梁单元模拟,斜拉索采用只受拉桁架单元模拟。全桥共 587 个节点,582 个单元。

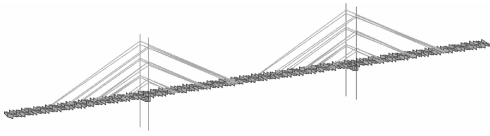


图 4 斜拉桥有限元模型

Fig. 4 Finite Element Model of Cable-stayed Bridge

(1)损伤情况设定

设定相同的损伤情况:① $x=161.25\text{ m}$, $y=0.2\text{ m}$,截面有效高度减小为 3.4 m ;② $x=296.25\text{ m}$, $y=0.1\text{ m}$,有效高度减小为 3.3 m ;③ $x=431.25\text{ m}$, $y=0.15\text{ m}$,有效高度减小为 3.4 m 。

(2)关键区段

考虑车辆荷载,计算车辆荷载下的各截面正应力分布结果,可得关键区段是主跨跨中附近和 2 个塔梁结合处附近区域。考虑到塔梁接合处区域包含 1 个支座点,位移可认为是 0,不需要布置测点,这里选定的关键区段具体范围为 $x_1 \in [155, 169] \cup [171, 185] \cup [285, 315] \cup [415, 429] \cup [431, 445]$, x_1 为所研究截面到桥梁左端的距离。这里选取竖向位移测点的间隔为 1 m。

(3)与模态方法的对比

通过有限元方法计算该桥损伤前、后的前 3 阶自振频率和振型,结果见表 1。

表 1 桥梁损伤前、后的自振频率

Damages of Bridge		Hz
阶次	损伤前	损伤后
1	0.364 075	0.364 075
2	0.445 434	0.445 434
3	0.445 440	0.445 440

可见,在设定的损伤状况下,桥梁的自振频率没有发生变化。另外,也可以得到结构的振型也没发生变化。这一结果表明,模态方法由于对小损伤不敏感,无法识别这种损伤。

(4)加载结果

在跨中 $x_1=300\text{ m}$ 处加集中荷载 $F=100\text{ kN}$,测量集中荷载作用下的各测点位移增量。根据 MIDAS/CIVIL 的模拟数据,区段 1 内的指标 P 数值如图 5(a)所示。由图 5(a)可见,峰值出现在 $x_1=161,162\text{ m}$ 处,该结果对应了损伤情况①。

区段 3 内的指标 P 数值如图 5(b)所示。由图 5(b)可见,峰值出现在 $x_1=296,297\text{ m}$ 处,结果对应了损伤情况②。

区段 5 内的指标 P 数值如图 5(c)所示。由图 5(c)可见,峰值出现在 $x_1=431,432\text{ m}$ 处,这一结果对应了损伤情况③。

对于区段 2,4,由于没有设定的损伤,曲线图上没有突变,这里不再一一列出。

可见,该方法很有效。差分曲率指标不仅可以识别测点处的损伤,也能识别测点间的损伤,而且给

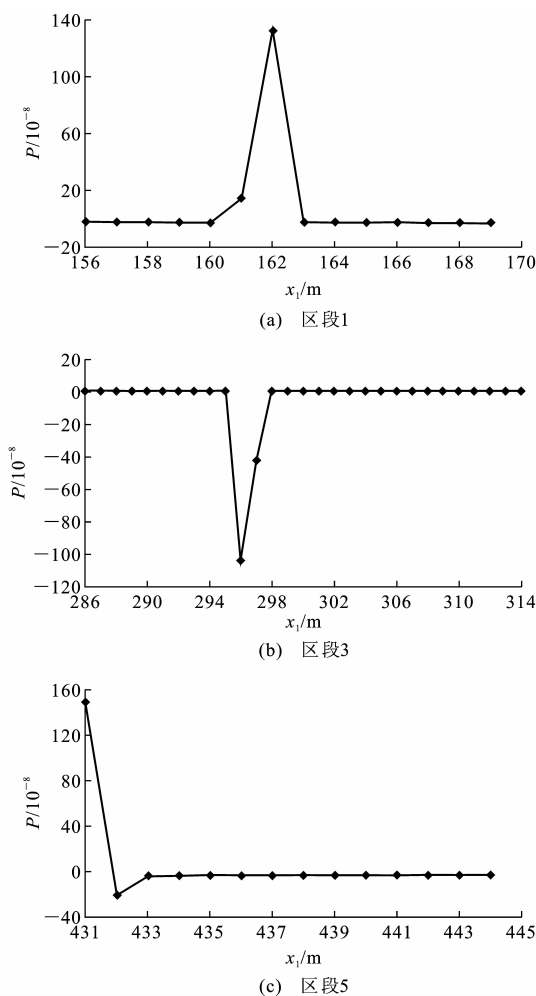


图5 各区段的指标 P 数值图

Fig. 5 Numerical Graphs of Indicator P for Each Interval

出了很具体的损伤范围。

5 提高鲁棒性的措施

为了提高该方法的鲁棒性,使其更适用于工程实际,特提出以下3点建议措施:

(1)根据式(15),位移测点布置的尽量密集,这样可以增强损伤引起的突变效应,提高稳定性。

(2)同样根据式(15),在允许的范围尽量提高集中荷载 F 的数值,使得 F 作用下各点的位移绝对值较大,差值也较大,指标值的突变效应也较明显,对测量分辨率和精度的依赖性减弱。

(3)尽量采用先进的位移测量设备,提高位移数据的测量分辨率,减小测量误差。

6 结语

本文中提出的差分曲率差值指标 P 可以有效地进行桥梁结构的损伤定位,它的主要优点包括:①可以识别出2个测点之间发生的损伤,使得测点数

目比较合理;②实施相对简便,不需要很复杂的处理过程;③对微小损伤比较灵敏。笔者给出了该指标的应用流程、测点的优化布置方式、提高鲁棒性的措施等,使得该指标的实用性得到了进一步增强。

参考文献:

References:

- [1] PANDEY A K, BISWAS M, SAMMAN M M. Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145 (2): 321-332.
- [2] WAHAB M M A, ROECK G D. Damage Detection in Bridges Using Modal Curvatures: Application to a Real Damage Scenario[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 226 (2): 217-235.
- [3] RATCLIFFE C P, BAGARIA W J. Vibration Technique for Locating Delamination in a Composite Beam [J]. AIAA Journal, 1998, 36 (6): 1074-1077.
- [4] DUTTA A, TALUKDAR S. Damage Detection in Bridges Using Accurate Modal Parameters[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2004, 40 (3): 287-304.
- [5] SAHIN M, SHENOI R A. Quantification and Localization of Damage in Beam-like Structures by Using Artificial Neural Networks with Experimental Validation[J]. Engineering Structures, 2003, 25 (14): 1785-1802.
- [6] TOMASZEWSKA A. Influence of Statistical Errors on Damage Detection Based on Structural Flexibility and Mode Shape Curvature[J]. Computers and Structures, 2010, 88 (3/4): 154-164.
- [7] CHANDRASHEKHAR M, GANGULI R. Damage Assessment of Structures with Uncertainty by Using Mode-shape Curvatures and Fuzzy Logic[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 326 (3/5): 939-957.
- [8] REYNDERS E, DE ROECK G, BAKIR P G, et al. Damage Identification on the Tilff Bridge by Vibration Monitoring Using Optical Fiber Strain Sensors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133 (2): 185-193.
- [9] SANAYEI M, ONIPEDE O. Damage Assessment of Structures Using Static Test Data[J]. AIAA Journal, 1991, 29 (7): 1156-1179.
- [10] BANNA M R, HJELMSTAD K D. Parameter Estimation of Structures from Static Response. I: Computational Aspects[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120 (11): 3243-3283.