

钢筋混凝土梁的损伤识别方法研究

常军, 白羽

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 介绍了一种利用动力实验检测桥梁破损的方法. 该方法首先建立了钢筋混凝土梁的有限元计算模型, 用以计算正常情况下梁的动力特性. 其次通过在现场布拾振设备, 采集实验数据, 利用模态分析技术, 获得病害桥墩的自振特性. 再次, 将无损模型分段, 假设各段破损计算出自振特性. 然后与实测结果比较, 判断出损伤位置. 根据系统动力方程, 推导了破损因子. 通过计算该因子, 可以判断桥墩的破损位置和破损程度, 最后, 作者介绍了一个识别例子.

关键词: 钢筋混凝土梁; 损伤识别; 应变模态

中图分类号: TU375.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2003)01-0105-03

A New Approach to Damage Detection of Reinforced Concrete Beam

CHANG Jun, BAI Yu

(Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: A new method to check bridge pier damage by dynamic experiment is introduced. First, a finite computing model is set up so as to calculate the dynamic property of the beam under normal conditions. Then, the vibration-picking devices are also built up on site to collect experimental data, and the model analysis is employed to gain natural oscillation performances of the beam. Third, the undamaged beam mode is separated. Suppose one part is damaged, its dynamic property should be calculated, and its dynamic property and the damage beam should be compared to detect the location of the damage. Finally the authors illustrate the point by giving a damage detection example.

Key words: reinforced concrete beam; damage detection; strain mode

0 引言

结构检测方法有动力法和静力法. 由于动力损伤诊断方法相对于传统的损伤检测方法(目测及外观检查、无破损或半破损试验、现场荷载试验等)而言可以从总体上把握结构的状态, 测试所需加载设备简便、测试速度快、对构件不造成新的损伤、动力诊断测试可以和静力数据形成阶段性对应关系等优点, 越来越多的学者及工程人员致力于桥梁动力损伤诊断技术的研究.

早期被用做损伤识别指标的振动模态参数(如固有频率、阻尼比和模态振型)对混凝土的破坏反应不明显, 而且无法准确定位损伤, 已较少被采用. 应力应变参数对损伤的出现、位置和大小则敏感得多, 1980年以来逐渐受到重视.

对于现场应变测量, 传统电阻应变片会受到一定制约. 例如: 构件具有局部应力集中, 稍远区域应力恢复正常的特点. 只能作点式测量的应变片需要预知损伤部位才能检测损伤, 在大型结构上很不方便, 其蠕变、老化及温度变化也会影响长期检测的可靠性. 用分布式光纤应变计可以直接检测光纤布置区域内任一点的应力应变变化, 避免了应变片单点测量的局限性. 但迄今为止, 由于维护困难、测试系统复杂等原因, 使用范围受到限制.

收稿日期: 2002-07-11; 基金项目: 云南省自然科学基金项目(项目编号: 2001E0807M).

第一作者简介: 常军(1974.7~), 男, 在读研究生; 主要研究方向: 结构损伤检测与可靠度.

这里主要研究钢筋混凝土梁的损伤检测方法.梁式结构主要承受径向载荷,以弯曲为主要变形形式,是桥梁中最为常见的结构形式.本文介绍了通过振动位移测量评估梁式结构应变模态的一种新方法.通过数值仿真揭示了以应变模态参数进行损伤识别的性能,对测量实际桥梁应变模态的手段及尚存问题进行了讨论.

1 结构损伤原理

结构损伤主要包括结构刚度的降低和质量的变化.一般可表示为

$$K_d = K_0 + \Delta K \quad (1)$$

$$M_d = M_0 + \Delta M \quad (2)$$

式中 K_0, M_0 为未损伤结构的刚度、质量矩阵, K_d, M_d 为有损结构的刚度、质量矩阵, $\Delta K, \Delta M$ 为由于损伤所引起的结构刚度、质量矩阵的变化.由于实际的损伤一般不引起结构质量变化,因此结构损伤检测的重点是研究结构刚度的降低.在建立模型时可以刚度降低来模拟损伤.

2 应变模态与曲率模态

应变是位移的一阶导数.对应于每一阶位移模态,则必有其对应的固有应变分布状态,这种与位移模态相对应的固有应变分布状态称之为应变模态.和位移模态一样,应变模态反映了结构的固有特征.曲率模态测量是一种用位移测量间接检测应力应变,避免应变片测量局限性的方法.由材料力学给出的直梁弯曲静力关系

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{M_m}{E_m I_m} \quad (3)$$

式中下标 m 指截面位置, M_m 截面处的弯矩, $E_m I_m$ 是 m 截面处梁的抗弯刚度, ρ_m 为 m 截面处梁的曲率半径, $1/\rho_m$ 为曲率.曲率 $\frac{1}{\rho}$ 由直梁弯曲的变形近似方程可得:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (4)$$

式中, x 为沿直梁长度方向坐标, y 为梁弯曲挠度.式(4)在 m 截面处写成差分方程,代入式(1),对沿梁的3个等距连续测点有

$$\frac{y_{m+1} - 2y_m + y_{m-1}}{\Delta^2} = \frac{M_m}{E_m I_m} \quad (5)$$

式中: y_m 为 m 截面处梁的弯曲挠度, y_{m+1} 和 y_{m-1} 为其相邻的沿梁相距处的两个测点处梁的弯曲挠度.此外,梁的弯曲变形和应变 ϵ 相对应,应变可表示为

$$\epsilon = -\frac{h}{\rho} = -h \cdot \frac{y_{m+1} - 2y_m + y_{m-1}}{\Delta^2} \quad (6)$$

式中 Δ 为梁上测点离中性层的距离.式(4)表明梁的曲率模态直接和应变模态相联系.

显然,在位移模态测量的基础上,由差分计算可得到曲率模态,继而评估梁的截面抗弯刚度变化,即可以确定损伤.

3 钢筋混凝土梁定位检测过程

- (1) 根据设计资料建立梁的有限元模型,称为原模型或未损模型;
- (2) 通过在现场布置拾振设备,采集实验数据,利用模态分析技术,获得病害结构的自振特性;
- (3) 将原模型进行分段,假设各段发生损坏的各种情况,计算出他们的指针特性;
- (4) 比较各段破坏的自振特性与病态结构的自振特性,找出最接近病态的那个,则损伤位置就在这一段内.

比较自振特性是采用上面提出的曲率模态,具体做法:

对于第 j 阶模态,第 i 段曲率模态的指标:

$$k_{ij} = \frac{\int_a^b [\Phi'_j(x)]^2 dx / \int_0^l [\Phi'_j(x)]^2 dx}{\int_a^b [\Phi''_j(x)]^2 dx / \int_0^l [\Phi''_j(x)]^2 dx} \quad (7)$$

其中 $\Phi_j(x)$ 为对于第 j 阶模态, x 点的曲率,可按下式近似计算:

$$\Phi_j(x) = \frac{y_{x+1} - 2y_x + y_{x-1}}{2\Delta^2} \quad (8)$$

(5) 式中平方是为了消除掉正负号的影响, $\Phi'_j(x)$ 和 $\Phi''_j(x)$ 分别为假设损伤结构的曲率与病态结构的曲率. 为了更加精确,应多取几阶振型的 Φ , 求平均值,一般取 6 阶. 则

$$k_j = \left(\sum_{i=1}^n k_{ij} \right) / n \quad (9)$$

其中: n 为所取的振型阶数; i 为所分段落号; j 为振型.

比较 k_j , 最接近与 1 的即为损伤所属的段.

4 算例

有一跨度为 6 m 的钢筋混凝土简支梁,混凝土的弹性模量 $E = 2.0 \times 10^{10} \text{ N/mm}^2$ 用 ANSYS 程序建立两个模型,并将其分为 6 段,将其中一根梁用刚度折减模拟梁损坏,梁在 1.0 m 到 2.0 m 处的两个单元混凝土弹性模量折减为无损伤梁的 50%. 对另一个模型分别假设各段破坏,取前 5 阶振型. 计算结果如表 1:

表 1 各段曲率模态指标 K_i

	一段损伤	二段损伤	三段损伤	四段损伤	五段损伤	六段损伤
第一段 k_1	0.961 261	0.893 369	0.870 719	0.506 205	0.887 161	0.870 517
第二段 k_2	3.276 63	0.936 552	0.897 712	0.753 656	1.275 758	0.945 631
第三段 k_3	1.117 06	0.965 797	1.130 028	0.579 478	0.894 097	0.913 584
第四段 k_4	1.008 036	1.017 518	3.094 143	2.488 642	1.032 897	0.905 548
第五段 k_5	1.169 021	1.075 275	1.012 461	0.728 213	3.507 363	0.932 365
第六段 k_6	0.803 577	0.886 447	0.812 318	0.563 813	1.014 061	2.714 654

从上表中不难看出,假设第二段破坏,所得的各段曲率指标都接近 1,其他情况都是至少有一段的曲率指标距 1 甚远. 所以,判断为第二段内有损伤. 而实际上,也是对第二段中的 4 个单元受损进行弹性模量折减,因此,可认为判断准确.

5 结论

采用有限元方法建立结构的模型,并通过应变模态(或曲率模态)可以检测钢筋混凝土梁的损伤位置,通过实例进一步证实了这种钢筋混凝土梁损伤识别法比较准确,可以应用. 该方法也可作为检测大型结构的方法.

参考文献:

- [1] M L Wang, G Heo, D Satpathi. A health monitoring system for large structural system[J]. Smart material Structure, 1998, (7):606 ~ 616.
- [2] Kirenidjian A S, Straefer E C, Meng T et al. Structural damage monitoring for civil Structures[C]. In: Proceedings of the International Workshop of Structural Health Monitoring. Technologic Publishing Company, 1997, 371 ~ 382.
- [3] 郝超, 强士中, 王朝晖. 大型结构的安全检测系统[J]. 国外桥梁, 2000, 2: 6 ~ 10.
- [4] 姜海波. 带边界条件的简支梁、连续梁损伤识别[R]. 湖南大学博士后出站报告, 1999.
- [5] 张德文, 魏阜旋. 模型修正与破损诊断[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 60.