

应变模态试验技术在渡槽结构损伤诊断中的应用

顾培英¹ 陈厚群² 李同春³ 邓 昌⁴

(1. 河海大学土木工程学院 江苏 南京 210098 ; 2. 中国水利水电科学研究院 北京 100044 ;
3. 河海大学水利水电工程学院 江苏 南京 210098 ; 4. 南京水利科学研究院 江苏 南京 210029)

摘要 通过简支渡槽模型试验 , 研究结构损伤程度与应变模态之间的关系 , 并根据模态节线损伤时应变模态形状不变的特点 , 重点分析纵轴线纵向非节线(即 1 阶、4 阶、6 阶应变模态) 损伤下的应变模态变化规律 . 结果表明 : 应变模态损伤突变区范围随损伤量的增加而增大 , 且低阶模态影响范围大于高阶模态影响范围 ; 1 阶应变模态对底板跨中损伤最为敏感 , 突变区外的大多数应变也都出现下降现象 , 可根据低阶应变模态的敏感性确定损伤位置和程度 .
关键词 渡槽 ; 结构损伤 ; 诊断 ; 位移模态 ; 应变模态
中图分类号 : TV32 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-1980(2006)04- 0422 - 04

基于振动理论的振动法诊断技术具有经济有效、使用安全等优点 . 位移模态参数对结构损伤欠敏感 , 应变不但对影响结构强度和寿命的局部结构变化比较敏感 , 而且电阻应变计粘贴引起的附加质量和附加刚度很小 , 因此可应用应变模态试验技术进行结构损伤诊断研究^{① [1-7]} . 本文根据简支渡槽模型试验 , 研究了槽身裂缝损伤程度与应变模态之间的关系 .

1 模型制作

在进行结构动力模型试验时 , 应根据材料动弹性模量参数确定模型相似常数 . 动弹性模量可根据测定的典型构件(如均匀悬臂梁) 的自振频率通过计算公式反推求得 .
石膏与混凝土相似 , 也属脆性材料^[8] , 其弹性模量为 1 000 ~ 5 000 MPa , 泊松比为 0.2 左右 . 用石膏制作线弹性模型 , 不但成型方便、易于加工 , 而且可通过掺加不同的外加料来改善石膏混合料力学特性和变形特性 . 因此 , 本试验以石膏作为模型材料 . 为了选择符合试验要求的动弹性模量和密度 , 分别对 4 组不同配比石膏模型材料的这 2 个常数进行了测试 , 根据测试结果并综合考虑模型尺寸、材料强度及非线性问题 , 最终选择了动弹性模量、密度分别为 1 495 MPa , 1 154 kg/m³ 的石膏模型材料 .
为简化模型 , 选择某一跨度为 20 m 的简支矩形渡槽结构 . 该结构厚 45 cm、宽 450 cm、高 270 cm , 相应模型厚 34 mm、宽 338 mm、高 200 mm、长 1 500 mm .

2 试验方法

对于每一位移模态 Φ_r , 必有一应变模态 Φ_r^ϵ 与其相对应 , 它们是同一能量平衡状态的 2 种表现形式 , 模态坐标相等^[9] . 根据 n 阶结构动力学运动微分方程 , 令 $f = Fe^{j\omega t}$, 应变可表示成

$$\epsilon = \sum_{r=1}^n \frac{\Phi_r^\epsilon \Phi_r^T}{k_r(1 - \epsilon_r^2 + j2\zeta_r\epsilon_r)} Fe^{j\omega t} \tag{1}$$

式中 : ϵ ——应变响应列向量 ; k_r ——第 r 阶模态刚度 ; ϵ_r ——第 r 阶频率比 , 即激励圆频率与第 r 阶固有频率之比 ; ζ_r ——第 r 阶模态阻尼比 ; n ——自由度数 ; Φ_r^T ——第 r 阶位移模态转置向量 ; t ——时间 ; f ——各点力向量 .

收稿日期 2005-10-18
基金项目 水利部科技创新项目(SCX2002-16)
作者简介 顾培英(1968—) , 女 , 江苏如东人 , 高级工程师 , 博士研究生 , 主要从事结构抗震、减震、振动损伤诊断研究 .
① 顾培英 , 陈厚群 , 李同春 . 模态试验技术诊断梁损伤 // 2004 年全国博士生学术论坛论文集 . 南京 : 河海大学 , 2004 .

应变模式为

$$\Phi_r^{\varepsilon}=\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}} \Phi_r$$

(2)

式中 $\boldsymbol{x}$ 为位移响应列向量.

由式(1)可知,应变模式与位移模式具有相同的模态频率、刚度、质量和阻尼比.由式(2)可知,第 r 阶应变模式振型对应于第 r 阶位移模式振型.

传统的模态试验分析方法是 (a)人为地对结构物施加一定的动态激励 (b)采集各点振动响应信号及激励力信号 (c)根据力和响应信号,利用参数识别方法获取模态参数.激励方法不同,响应识别方法也不同.

对于轻型和小阻尼结构,常用力锤作为激振器.力锤敲击结构时产生一瞬态冲击力,此冲击力相当于一个半正弦力脉冲,在一定频带范围内具有平直频谱.为增加该频带宽度,必须缩短脉冲持续时间,而脉冲持续时间则与接触面刚度及锤头质量有关,同时还需考虑冲击能量.实际应用中可通过试敲配置顶帽及锤头质量.试验时先采用单输入单输出锤击法进行位移模式试验,然后在此基础上再采用单输入多输出锤击法进行应变模式试验.

在渡槽跨中底板外侧模拟横向损伤,裂缝宽度 1 mm,裂缝深度为底板有效截面高度的 5%、10%、15%、...、85%(破坏),共进行了 17 组试验,将裂缝深度与底板有效截面高度的比值定义为损伤量.在底板及一侧板外侧的纵向(6 排)和轴向(36 排)布置 216 个测点(图 1),各测点粘贴电阻应变计,其中损伤位置附近有双向测点 96 个.为避免各部件间的干扰,更详细地比较损伤对渡槽底板、侧板的影响,采用分部件试验法,利用加速度计测量底板和侧板某测点的加速度响应.

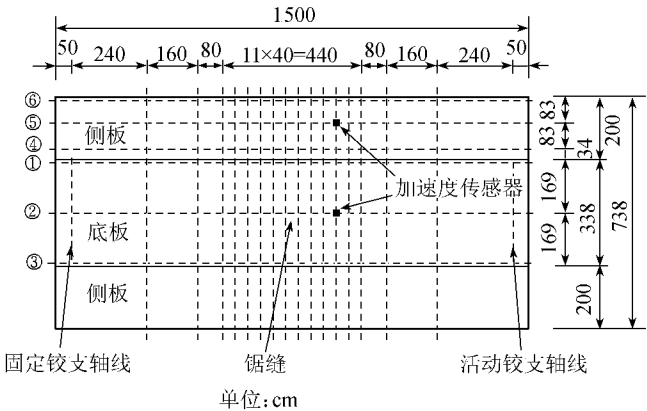


图 1 测点布置展开图

Fig.1 Distribution of monitoring points

重点分析纵轴线纵向应变模式.支座附近应变存在应力集中现象,曲线不光滑.2 阶模态主要为横向竖弯,纵向应变模式失真.由于节线损伤的应变模式的形状不发生变化,所以重点讨论非节线(即 1 阶、4 阶和 6 阶应变模式)损伤下的应变模式变化规律.部分应变模式曲线如图 2 所示.

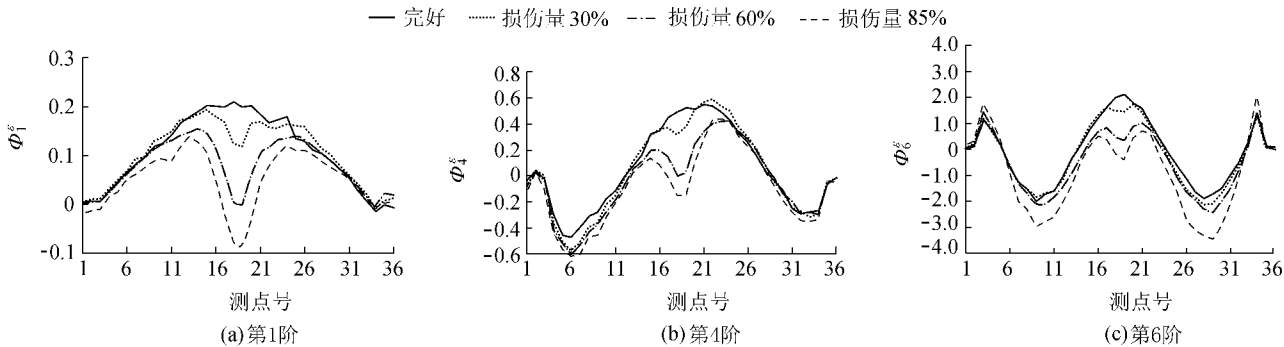


图 2 底板纵轴线前 6 阶纵向应变模式曲线

Fig.2 Strain modes of first six orders in longitudinal direction of the bottom plate

由应变模式曲线(图 2)变化趋势可知,在损伤位置附近一定范围内有一极值.若完好状态下应变模式曲线在该范围内有极值,则两极值极性相反,且损伤处同一侧的损伤应变模式曲线与完好应变模式曲线斜率符号相异,该区域称为显著影响区,变化特别明显的区域称为突变区.若完好应变模式曲线在损伤附近不存在极值点,则损伤应变模式曲线与完好应变模式曲线只在损伤处一侧斜率符号相异.将

表 1 渡槽应变突变区影响范围

Table 1 Influencing range of sharp variation zone of strain %

阶数	损伤量 30/%	损伤量 60/%	损伤量 85/%
1 阶	5.3	18.7	24.0
4 阶	5.3	10.7	13.3
6 阶	5.3	8.0	13.3

该区域延伸至另一侧,经延伸后的区域称为显著影响区.由表1可知,突变区影响范围(损伤影响长度与渡槽总长度的百分比)随着损伤量的增加而增大,且低阶模态突变区影响范围大于高阶模态突变区影响范围.

3.1 1阶应变模态

由应变模态曲线(图2a))可知,1阶应变模态对跨中损伤较为敏感,突变区外的大多数测点应变也都出现下降现象.当损伤量大于25%时,对称于损伤处,其附近29.3%范围内的应变明显降低.

显著下降区应变随损伤量的增加而降低,且离损伤处越近(即距离比越小),其降低幅度越大,甚至出现反向现象.当距离比为9.3%,损伤量达30%,60%,85%时,应变比(损伤与完好状况应变模态振型值之比)分别为94.9%,71.6%,50.2%,即应变分别降低5.1%,28.4%,49.8%;当距离比为4.0%,损伤量达30%,60%,85%时,应变比分别为83.3%,33.3%,-13.1%(出现反向应变),应变分别降低16.7%,66.7%,113.1%.如图3所示.

3.2 4阶应变模态

由4阶应变模态曲线(图2b))可知,当损伤量大于30%时,损伤处附近13.3%范围内的应变明显降低,对显著下降区外的应变影响不大.

当距离比为4.0%,损伤量达30%,60%,85%时,应变比分别为91.3%,39.6%,7.3%,应变分别降低8.7%,60.4%,92.7%.如图4所示.

3.3 6阶应变模态

由6阶应变模态曲线(图2c))可知,除2支座外,损伤应变模态曲线出现下移现象,损伤区正好处于中峰区,即中峰区成了突变区;左右两峰值区反向应变增加.当损伤量大于30%时,损伤处附近13.3%范围内的应变明显降低.

当距离比为4.0%,损伤量达30%,60%,85%时,应变比分别为98.6%,51.7%,22.9%,应变分别降低1.4%,48.3%,77.3%.左右两峰值区(平均距离比为26.7%)反向应变增加,损伤量达30%,60%,85%时,平均应变比分别为108.3%,122.2%,176.4%,应变分别增加8.3%,22.2%,76.4%.如图5所示.

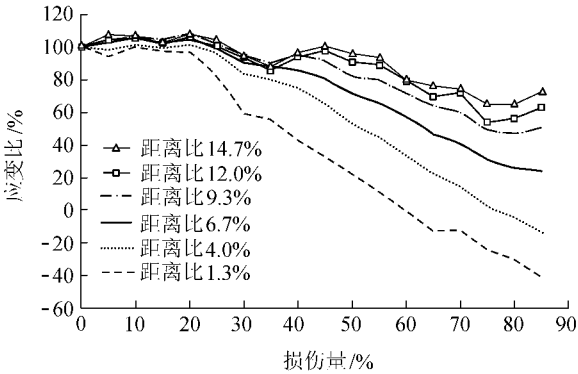


图3 1阶应变模态显著下降区应变比与损伤量的关系
Fig.3 Relationship between strain ratio and damage quantity of the first-order strain mode in sharply descending zone

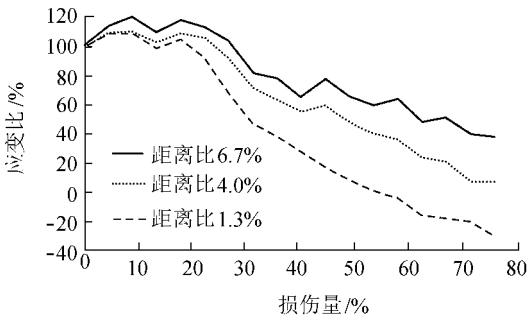


图4 4阶应变模态显著下降区应变比与损伤量的关系

Fig.4 Relationship between strain ratio and damage quantity of the fourth-order strain mode in sharply descending zone

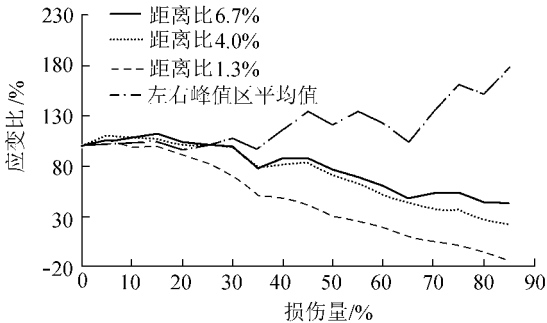


图5 6阶应变模态显著下降区及左右峰值区平均应变比与损伤量的关系

Fig.5 Relationship between strain ratio and damage quantity of the sixth-order strain mode in sharply descending zone and peak value zone

4 结 论

a. 渡槽应变模态的损伤突变区范围随损伤量的增加而增大,且低阶模态影响范围大于高阶模态影响范围.

- b. 1 阶应变模态对底板跨中损伤最为敏感,突变区外的大多数应变也都出现下降现象.当损伤量大于 25% 时,损伤处附近平均 29.3% 范围内的应变明显降低.
 - c. 当损伤量大于 30% 时 4 阶应变模态在损伤位置附近 13.3% 范围内的应变明显降低.
 - d. 损伤下的 6 阶应变模态曲线出现下移现象,损伤突变区正处于中峰区,左右两峰值区反向应变有所增加.
- 因此,可根据低阶(如第 1 阶)应变模态的敏感程度确定损伤位置和程度.

参考文献：

[1] 顾培英,丁伟农. 模态试验在梁损伤诊断中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2004, 23(3): 60-63.

[2] 李德葆. 实验应变/应力模态分析若干问题的进展评述[J]. 振动与冲击, 1996, 15(1): 13-17.

[3] 瞿伟廉,陈超,魏文辉. 基于应变模态的钢结构构件焊缝损伤定位方法的研究[J]. 世界地震工程, 2002, 18(2): 1-8.

[4] 王文静,刘志明,缪龙秀. 基于实验模态的结构应变模态分析[J]. 北方交通大学学报, 2000, 24(4): 20-23, 28.

[5] 周先雁,沈蒲生. 用应变模态对混凝土结构进行损伤识别的研究[J]. 湖南大学学报, 1997, 24(5): 69-74.

[6] 董聪,丁辉,高嵩. 结构损伤识别和定位的基本原理与方法[J]. 中国铁道科学, 1999, 20(3): 89-94.

[7] 瞿伟廉,黄东梅. 高耸塔架结构节点损伤基于神经网络的两步诊断法[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2): 143-149.

[8] 李德寅,王邦楣,林亚超. 结构模型实验[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 72-89.

[9] 李德葆,陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 216-228.

Application of strain mode test to structural damage diagnosis
of aqueducts

GU Pei-ying¹, CHEN Hou-qun², LI Tong-chun³, DENG Chang⁴

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract :Based on the model test of simply supported aqueduct, the relationship between structural damage and strain mode was studied. According to the fact that the strain mode keeps unchanged if the damage occurs on the nodal line, the variation of strain mode under the damage in longitudinal direction on the non-nodal line(i. e. the first-order, the fourth-order, and the sixth-order strain modes) was emphatically analyzed. It is concluded that the sharp variation zone of strain mode extends with the increase of damage quantity, and the influencing range of low-order modes is greater than that of the high-order modes, that the first-order strain mode is most sensitive to the damage in the middle part of bottom plate, and most strains outside the sharp variation zone obviously decrease, and that the degree and location of damages could be determined based on the sensitivity of low-order strain modes.

Key words :aqueduct; structural damage; diagnosis; displacement mode; strain mode