

# 基于结构试验的结构损伤识别方法

付韶华<sup>1</sup> 赵浩<sup>2</sup>

1 南昌市赣抚尾间水利枢纽管理中心, 江西南昌, 330009;

2 江西应用科技学院, 江西南昌, 330000;

**摘要:** 土木工程结构在使用期内难免产生损伤, 损伤改变结构的强度、刚度、受力性能, 影响结构的使用寿命。结构损伤识别的关键是结构实验理论与技术的发展和结构损伤识别理论的进步。本文总结了传统的结构损伤识别方法, 归纳了整体损伤识别方法, 重点分析了结构整体损伤识别时常用的结构试验模态分析方法。

**关键词:** 损伤识别; 结构试验; 试验模态分析

**DOI:** 10. 64216/3080-1508. 25. 02. 004

## 1 结构损伤

土木工程结构由于设计施工不当、材料质量欠佳、突遭地震等灾害性荷载作用等因素的作用, 在使用期内将不可避免地产生损伤<sup>[1]</sup>。结构中的损伤主要是由于材料中损伤的累积而造成的, 按照损伤的成因来分, 可以分为应力(应变)损伤和腐蚀损伤。应力(应变)损伤是结构中应力或者应变集中引起的局部材料损伤及其累积; 而腐蚀损伤即环境损伤是由于不利环境(如海洋性空气湿度、工业盐环境、酸雨等)造成的使结构表面受到腐蚀、材料劣化、局部产生缺陷、承载面积减小等的损伤。这两类损伤, 前者的成因是力学的, 后者的成因是化学的<sup>[2]</sup>。

结构损伤将会改变结构的强度和刚度, 改变结构的受力性能, 引发更大的结构损伤和损伤的累积, 使结构抗力衰退而影响结构的使用寿命, 甚至会导致突发事故。因此, 在工程结构的使用过程中, 尤其是当结构遭受突发灾害性荷载作用后, 正确地对结构进行损伤识别, 确定结构构件损伤的位置和程度, 进而采取加固处理措施, 这对于保证工程结构的健康、保障人民的生命财产安全是十分必要和有意义的。

## 2 传统的结构损伤识别方法

常用的传统无损检测手段用于检查结构构件特定部位的局部损伤, 如结构的裂缝位置、焊接缺陷、腐蚀磨损、松弛或失稳等。如: 目测法、染色法、发射光谱法、回弹法、超声波法、声发射法、涡流法、红外法、磁粒子法等等。不同的方法适用于不同的缺陷类型, 可以分为: 用于检测混凝土强度的方法(如回弹法)、用于检测混凝土内部缺陷的方法(如超声波法、射线法)、用于判断钢筋锈蚀情况的方法等,

不少方法已经制定出相应的技术规程(如《超声法检测混凝土缺陷技术规程》CECS 21: 2000)。

回弹法<sup>[3]</sup>是瑞士工程师施密特发明的, 所以也称施密特锤法。它是通过测定混凝土表面硬度来推算抗压强度的一种结构混凝土现场检测技术。国外对这一技术的研究和应用已有 40 多年的历史, 虽然近 20 年不少国家竞相研制了各种新型的混凝土非破损检测现代化仪器和测试方法, 但传统的回弹法仍然不失其在现场应用的优越性。其主要优点是: 仪器构造简单、测试方法易于掌握、检测效率高、费用低廉, 影响因素较少, 因而特别适用于施工现场对结构混凝土的强度进行随机的、大量的检验。回弹法被国际学术界公认为是混凝土无损检测的基本方法之一。回弹法是用一个弹簧驱动的重锤, 通过弹击杆(传力杆), 弹击混凝土表面, 并测出重锤被反弹回来的距离, 以回弹值(反弹距离与弹簧初始长度之比)作为与强度相关的指标, 来推定混凝土强度的一种方法。由于测量是在混凝土表面, 所以属于表面硬度法的一种。回弹值在一定程度上反映了混凝土的弹性性能和塑性性能, 和混凝土强度有必然的联系, 可以建立回弹值与混凝土强度的相关关系方程式, 即测强曲线。通常, 由于碳化的混凝土表面硬度增大, 使测得的回弹值偏高, 且碳化深度不同对回弹值的影响程度也不同。大量的研究和现场测试表明, 碳化深度能在相当程度上反映包括混凝土龄期和混凝土所处环境在内的综合影响, 所以应把碳化深度也作为测强曲线的另一个参数。在试验中, 由于测试龄期较短, 试件碳化很少, 故仅考虑试件回弹值和试件抗压强度, 建立相关关系方程式。

在无损检测技术中, 超声法<sup>[4]</sup>也是主要的方法

之一。在国外始于20世纪40年代末,中国于20世纪50年代后期开始进行这项技术的研究应用。特别是最近20年来,取得了相当进展,已广泛应用于水电、交通、建筑、铁道、冶金等部门的各项工程,取得了很好的技术经济效益。超声检测技术是利用频率很高的超声波(一般为10~250kHz)作为信息的载体,对混凝土构件进行探测,测量超声脉冲纵波在结构混凝土中的传播速度、首波幅度和接收信号频率等声学参数,并根据这些参数的相对变化,判定混凝土中的缺陷情况。超声波用于混凝土结构检测的优点是检测可靠,测定迅速,操作简便,便于在现场使用,对系统不改变运行状态,另外研制成的仪器设备比较便宜,可用性好,寿命长,携带方便,所以应用非常广泛。

传统检测方法有其局限性,如费时费力、测试工作量大、适用范围有限、难以测试结构的特殊部位、不能实现整体损伤检测等等,实际检测中常根据不同的需要把几种技术联合使用。

### 3 基于试验模态分析的结构整体损伤识别方法

#### 3.1 结构整体损伤识别方法

结构整体损伤识别方法用于评价结构整体的性能状态,可以间断或连续地评价结构的健康,确定损伤存在的可疑区域,特别适用于一些大型结构。任何结构都可以看作是由刚度、质量、阻尼矩阵组成的力学系统,结构一旦发生损伤,上述结构参数也随之发生改变,从而导致结构系统特定的特征参数的改变,可以运用这些变化来反推结构是否发生损伤。

当结构的特征参数的测量值与未损结构的特征参数之间出现明显差异时,就表示结构出现了损伤。因此,目前整体法识别结构损伤主要是分析结构的物理和力学特性,找出反映结构损伤特性并对结构损伤敏感的特征参数,同时对结构进行试验模态分析,即利用现场的无损传感技术,通过一系列的传感器从实际结构中得到相应数据。经过适当处理后得到对应的特征参数,对这些特征参数进行统计和分析,从而获得结构当前的损伤状况。

按照对特征参数的不同分析和处理方法,整体法识别结构损伤可以分为直接识别法、系统识别与模型修正法和智能识别方法如人工神经网络法等<sup>[5]</sup>。直接识别法利用损伤特征参数直接识别结构损伤的位置和程度,通常用实际结构的特征参数与无损伤结构的基准参数进行比较(也称比较法),有时也可以根据损伤结构的某些特征参数直接识别,而不需要基准参

数。常用的静力参数主要有:结构刚度、单元刚度、位移、应变、残余力、弹性模量、单元面积、惯性矩等等。静力测试方法虽具有较高的精度和稳定性,长期以来人们也习惯于用静力的观点考察结构的性能,同时相应的结构试验也以静力方法为主,但结构静力试验设备笨重、试验时间长、影响正常使用,还可能对结构造成新的损伤,当受损结构在特定荷载作用下变形几乎未受影响时,获得理想的识别结果很困难。结构的动力特性(频率、振型等)是结构的固有特性,结构的损伤必然引起结构动力特性的变化,因此,结构的动力特性参数(动力指纹)能从整体上反映结构的损伤状态。动力参数分析法的基本思想就是寻找与结构特性有关的动力指纹的变化。模型修正法与系统识别法的基本思路是利用动力试验数据(通常为模态参数或加速度时程记录、频响函数等),通过条件优化约束,来不断修正模型(数值分析模型)中的刚度分布,通过被检测结构中任意观测到的局部刚度下降判定损伤的位置和程度。无模型识别是人工智能(Artificial Intelligence)的识别方法,主要包括神经网络法、专家系统法、遗传算法和小波分析法等。人工智能是近20年来获得飞速发展的学科,被誉为20世纪的三大科学技术成就之一,主要研究如何用计算机来模拟人类思维活动,其核心是对大脑的模拟,包括功能模拟和结构模拟。

#### 3.2 试验模态分析

在用直接识别法和模型修正与系统识别法识别结构损伤时,必须以结构的试验模态分析为基础。试验模态分析是指通过结构试验获取实际结构固有特性的过程:对被测结构系统进行激励,通过振动测试、数据采集和信号分析,由输入和输出确定结构的动态特性。

试验模态分析的全过程包括以下几个方面<sup>[1]</sup>:

(1) 试件仿真。试验模态分析可以在结构现场进行,也可以在实验室进行,这时,实验室条件必须使结构试件的状态与真实情况尽量相符。

(2) 激振器和传感器的布置。激振就是对被测结构施加一定形式和大小的激振力,使之产生相应的振动。激振是结构动态特性测试的重要环节,直接关系到测试的精度和速度。

传感器布设的位置与数量则对试验结果起着至关重要的影响。要根据试件特点和试验分析要求选定激振和测量点的坐标位置,实现传感器的最优化布置。

用于实际结构损伤检测的静力和动力数据来自各种安装在测量结构中的传感器。对大型、复杂结构进行损伤识别,测点有成百上千个,相应的传感器数量也巨大,众多的传感器形成了传感器群。怎样在含有噪声的环境中利用尽可能少的传感器获取全面、精确的结构参数信息;怎样获得对特征参数的变化最为敏感的时程记录;怎样通过添加传感器能对感兴趣的部分参数进行数据采集等等,这些问题带来了传感器如何优化布置方面的研究。传感器的灵敏度、精确度和位置等对于损伤检测是非常重要的,获得越多的信息,损伤识别就越容易,但必须考虑成本,所以要考虑传感器最优化或者接近最优化布置。

(3) 频率响应测试。这是试验模态分析的核心,其中包括振动响应与激振力的测量与校准,数据采集与信号分析以及频率响应估计等环节。校准对于结果的精度有很大影响,通常可以采用通道校准的方法,分别对激振力和振动响应各通道校准。

(4) 模态参数识别。这是试验模态分析的另一个核心部分,可分为单模态和多模态分析。多模态分析识别的方式有两种,即单个频率响应函数拟合(局部拟合)和多个频率响应函数拟合(总体拟合)。由单个频率响应的曲线拟合,可以得到被试系统的各阶模态频率、阻尼比和对应该测点的振型值。依次对  $m$  个测点的频率响应进行拟合,可得到  $m$  组模态频率和阻尼比,以及  $m$  维振型向量的全部值,对于线性系统,模态频率和阻尼比是系统的总体参数,理论上应该不随测点而改变。实际测试和拟合中不可避免地存在误差。

(5) 结果的输出和显示。试验模态分析得到的结果—各阶模态频率、阻尼比和振型可以制成表格形式输出,注意到模态参数不仅是系统动态特性在频域的描述(如模态频率和阻尼比),也是空间域的描述(如振型),现代试验模态分析通常以动画的形式显示各阶模态参数,即空间域的振型以及对应的模态频率和阻尼比。

为了保证试验模态分析的精度,应对频率响应测试及模态参数识别的结果进行各种检验。常用的频率响应测试结果检验方法有:相干函数检验,互易性检验,重复性检验等,常用的模态参数识别结果的检验方法有:频率响应拟合检验,频率图检验,正交性检验,振型相关矩阵检验等。

在试验模态分析中,对检测到的损伤结构信号的分析和处理方法是另一个关键,实际上它就是结构损伤识别技术中敏感特征参数的提取技术。传感器采集的原始信号中,一部分可以直接利用,如位移、频率、温度等,但大部分都很难直接利用,如振动信号,虽然经过放大,由于含有噪声,一般从时域波形上很难反映问题,因此必须利用信号分析与处理技术去除噪声并把信号转化为在不同域内进行分析,才能得到更能敏感反映损伤状态的特征参数。近年来出现的数字滤波技术、自适应滤波技术、小波分析技术等大大丰富了信号处理技术的内容。信号处理中每一种技术在识别中的应用,都是对识别技术的一次重大推动。

## 4 结论

结构损伤的识别是工程上十分重要,也是比较棘手的问题,其关键是结构实验理论和技术的发展和结构损伤识别理论的进步。结构试验在损伤识别中占有十分重要的地位。可以通过传统的结构试验方法对结构局部损伤进行识别,也可以借助试验模态分析,通过结构整体损伤识别的方法进行损伤识别。结构试验理论和技术的每一次发展将推动结构损伤识别的进步。

## 参考文献

- [1] 陈长征, 罗跃纲, 白秉兰, 唐忠. 结构损伤检测与智能诊断, 北京: 科学出版社, 2001
- [2] 李义, 混凝土桥梁结构损伤及损伤加固, 合肥工业大学硕士学位论文, 2004
- [3] 姜灏, 刘海卿, 回弹法对在役钢筋混凝土结构的健康检测, 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24 (增刊): 111-113
- [4] 于世海, 陈国良, 杨绪普, 超声检测在土木工程中的应用研究, 西部探矿工程, 2005, (8): 1-3
- [5] 孙鸿敏, 李宏男, 土木工程结构健康监测研究进展, 防灾减灾工程学报, 2003, 23 (3): 92-98

作者简介: 付韶华 (1980年4月), 女, 汉族, 江西南昌人, 本科学历, 南昌市赣抚尾间水利枢纽管理中心工程师, 主要研究方向: 水利工程管理。

赵浩 (1974.9), 男, 汉族, 江西人, 本科, 江西应用科技学院高级工程师, 主要研究方向: 土木工程, 智能建造。