

基于位移的钢筋混凝土梁损伤检测及识别研究

寇晓娜 谢群丹 刘杰
湖南工业大学 土木工程学院

摘要：损伤检测及识别技术是一种针对结构内部缺陷进行检测及识别的方法，这种方法是近几十年来受到国内外研究人员的广泛关注，同时也在工程领域得到了一定的发展和应用。本文针对有损伤梁进行试验，并对试验结果进行优化处理，通过理论研究和分析，提出基于位移的钢筋混凝土损伤检测及识别研究方法，试验结果表明，基于位移的损伤识别方法具有测点少、数据直观可靠、敏感程度高、操作方便、识别精度高、成本低等优越性能特点，因此，利用位移曲线指标对结构进行损伤识别具有一定的理论及实践研究意义。

关键词：损伤梁；损伤检测；识别；位移

一、绪论

损伤识别结构损伤检测及识别技术是近三十年来根据工程实际需要而发展起来的一门综合性的学科，它从自然运营的结构或预定加载结构中获取数据，并对数据进行有效处理得到损伤识别参数。因为结构一旦出现损伤，结构系统的模态参数、静力响应、动力响应等指标就会发生改变，这些改变可视为结构损伤发生的标志，可利用结构特性参数变化来诊断和评估结构损伤或退化的程度。同时，在参数诊断和评估过程中，还需考虑环境条件变化和检测数据误差等因素的存在。目前在损伤识别领域所涉及的识别参数有频率、振型、曲率、阻尼、质量、刚度、速度、加速度、位移、应变、裂缝等，可以采用已有的破损构件或建立模型分别进行研究或二者联合进行研究。

要检测结构的健康状况，首先要识别结构是否有损伤（突然损伤和累积损伤），其次要识别有损伤结构的损伤区域或具体位置，同时还要识别损伤的程度。识别的参数指标很多，而筛选出有效的损伤识别指标至关重要。筛选指标要考虑几个前提条件：1) 对结构损伤敏感；2) 能较准确地确定损伤的位置；3) 对比相应的无损伤结构，有损伤结构在损伤区域应有明显的峰值变化；4) 技术可靠，经济可行。

二、结构损伤识别响应指标的基本理念

本文研究的是钢筋混凝土结构构件，而钢筋混凝土构件的损伤基本是以裂缝的发生、发展为起源，所以，本次研究对象主要针对有裂缝损伤梁进行研究。

我们知道，钢筋混凝土不是理想的弹塑性材料，在钢筋混凝土梁损伤后，一般会呈现出一定的静动力学特性，其材料的应力、应变分布往往会较受损伤前要复杂得多，特别是对有裂缝区域影响显著。因此，识别某裂缝截面的有效刚度至关重要。裂缝会导致构件有效截面减小，从而梁截面刚度随之降低。为了证明结构位移和截面刚度的关系，我们利用虚功原理方程：

$$\Delta = \int N_U d\delta + \int M_U d\theta + \int V_U d\lambda + \int T_U d\phi \quad (2-1)$$

式中， Δ 代表要计算的位移（可能是平移、转动或相对位移）， N_U 、 M_U 、 V_U 和 T_U 分别为对应位移 Δ 的单位载荷所引起的轴向力、弯矩、剪力和扭转力偶合力。将实际载荷引起的微段变形分别对应 $d\delta = N_P dx / EA$ 、 $d\theta = M_P dx / EI$ 、 $d\lambda = V_P dx / GA$ 和 $d\phi = T_P dx / GJ$ ，代入上式，得：

$$\Delta = \int \frac{N_U N_P dx}{EA} + \int \frac{M_U M_P dx}{EI} + \int \frac{V_U V_P dx}{GA} + \int \frac{T_U T_P dx}{GJ} \quad (2-2)$$

对于梁，弯曲变形是主要的，现忽略轴力、剪力和扭转力引起的位移的影响，可简化得到梁在单位载荷下的方程：

$$\Delta = \int \frac{M_U M_P dx}{EI} \quad (2-3)$$

根据胡克定律及虚功原理，可得到有限元基本方程：

$$[K]\{D\} = \{F\}$$

其中 $[K]$ 为刚度矩阵

$\{D\}$ 为节点位移向量

$\{F\}$ 是与荷载及边界条件有关的量

由上式可以看出，梁的位移与梁的荷载及刚度有密不可分的关系。

三、损伤检测及识别指标的提取

为了提取出有效的损伤指标，现选取结构中最基本和最常用的钢筋混凝土简支梁作为模型研究对象（取混凝土C30，混凝土弹性模量 $E=3.0 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ ，所有钢筋弹性模量 $E_s=2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ，泊松比0.2，钢筋混凝土密度为 2500kg/m^3 ），该梁计算跨径 $l=3\text{m}$ ，构件截面高度0.3m，截面宽度0.15m，符合标准梁跨高比及宽高比要求，简支梁上布置有集中荷载P。沿梁长把构件离散为若干个有限元单元体，在每单元节点处布设测点测量结构的位移参数，简支梁有限元模型示意图3.1如下。



图3.1 有限元模型示意图 (单位mm)

设结构单元抗弯刚度 B_0 ，那么，结构在均布荷载作用下，简支梁位移曲线微分方程：

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta_q}{dx^2} &= \left(\frac{qlx}{2} - \frac{qx^2}{2} \right) / B_0 \Rightarrow \Delta_q = \frac{qx}{24B_0} (l^3 - 2lx^2 + x^3) \\ \Delta'_q &= \frac{q}{24B_0} (l^3 - 6lx + 4x^3) \\ \Delta''_q &= \frac{q}{12B_0} (-3l + 6x) \end{aligned} \quad (2-4)$$

结构在集中荷载作用下，简支梁位移曲线微分方程：

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta_p}{dx^2} &= \begin{cases} -\frac{Pbx}{6B_0} & (0 \leq x \leq a) \\ \frac{6(x-a)-bx}{6B_0} P & (a \leq x \leq 3) \end{cases} \Rightarrow \Delta_p = \begin{cases} -\frac{Pbx}{18B_0} (x^2 + b^2 - 9) & (0 \leq x \leq a) \\ \frac{P}{18B_0} [3(x-a)^3 - (x^2 + b^2 - 9)bx] & (a \leq x \leq 3) \end{cases} \\ \Delta'_p &= \begin{cases} -\frac{Pb}{6B_0} x^2 & (0 \leq x \leq a) \\ \frac{P}{18B_0} [3(3-b)x^2 - 18ax + 9a^2 - b^3 + 9b] & (a \leq x \leq 3) \end{cases} \\ \Delta''_p &= \begin{cases} -\frac{Pb}{3B_0} x & (0 \leq x \leq a) \\ \frac{P}{3B_0} [(3-b)x - 3a] & (a \leq x \leq 3) \end{cases} \end{aligned} \quad (2-5)$$

设结构受损单元有效抗弯刚度 B_e ，定义损伤指标 d （度量材料内部损伤及劣化的程度，忽略质量变化）：

$$B_0 = EI = E \frac{bh^3}{12}, \quad d = 1 - \frac{B_e}{B_0} \quad (2-6)$$

当 $d=1$ ，结构无损伤，当 $0 < d < 1$ ，则对应于梁处于不同程度的损伤状态。

在梁1/4跨和跨中预设受损单元，工况（无损伤、单损伤和多损伤）、分工况、损伤部位（典型取值位置1/4跨及跨中）、损伤程度（无损伤、轻微损伤，中度损伤）及加载情况如下表3.1，并在每单元节点处布设测点测量结构的竖向位移。

表3.1 简支梁损伤工况

工况	分工况	损伤部位	损伤程度 (%)	跨中集中荷载P+结构自重DL
一	/	/	/	100kN+DL
二	a	1/4跨	5	100kN+DL
	b	跨中	15	
三	a	1/4跨和	5	100kN+DL
	b	跨中	15	

简支梁采用ansys有限元分析软件,把钢筋和混凝土作为不同的单元来处理的分离式三维实体单元模型(ansys专门为混凝土材料专门定制的单元,所有单元有8个节点,混凝土采用solid65单元,钢筋采用link8空间杆单元),solid65单元和link8单元分别被划分为足够小的单元,二者的刚度矩阵分别求解,钢筋和混凝土之间插入黏结单元模拟二者的黏结和滑移性能。网格划分如图,纵向钢筋单元(下部3根直径16mm的纵向受力筋,上部2根架立钢筋,箍筋)、箍筋配置如下图3.2。



图3.2 简支梁各工况有限元模型图

为了得到有效的识别参数,在用有限元软件分析过程中采用了如图3.3:

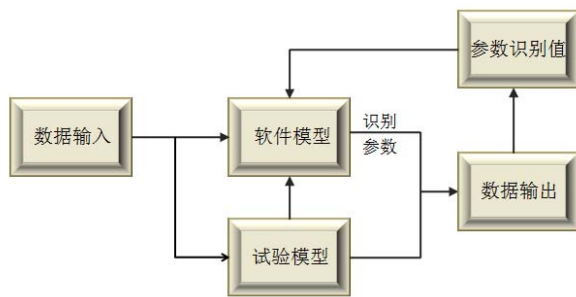


图3.3 识别研究路线

通过计算对比发现,各工况下简支梁结构单元节点位移曲线均为光滑的数值比较接近的曲线如图3.4,有损伤结构的识别结果略大于相应的无损伤的识别结果,没有比较明显和敏感地识别效果。

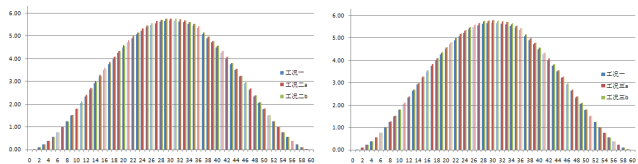


图3.4 简支梁有限元模型节点位移柱状图

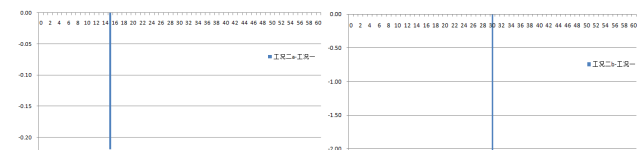


图3.5 简支梁有限元模型节点一阶位移工况二与工况一之差值柱状图

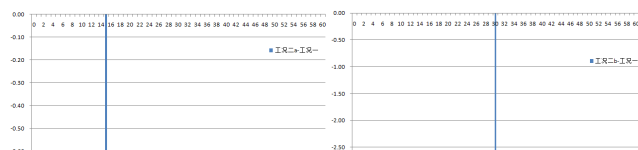


图3.6 简支梁有限元模型节点二阶位移工况二与工况一之差值柱状图

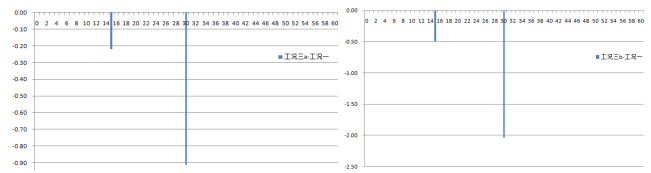


图3.7 简支梁有限元模型节点一阶(左)、二阶(右)位移工况三与工况一之差值柱状图

从图3.5~3.7可以看出,在荷载作用下,各工况下简支梁位移的一、二阶差值有较明显突变,其突变的地方正好对应预先设定的损伤位置,且损伤程度越大,数据结果差值突变越明显。所以,基于位移的损伤识别指标在受损区域有较高敏感度,这说明本文所筛选损伤指标有较好的损伤识别能力。

四、结论

本文以典型的钢筋混凝土简支梁为例,通过有限元模型及现场试验的方法,得到了简支梁结构损伤发展的某些特定特点及规律,提出了基于位移的损伤识别方法。研究结果表明,结构在某一特定的损伤状态下,存在着唯一对应的位移响应指标,且随着损伤程度的加大,位移响应曲线有较强的敏感识别度,在损伤位置曲线会出现数值差值突变,这说明本文所筛选损伤指标有较好的损伤识别能力。

参考文献

[1]龙驭球.结构力学[M].北京:高等教育出版社,2006.
 [2]刘鸿文.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2010.
 [3]《混凝土结构设计规范》2015版 JGB50010-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
 [4]何本国,ansys 土木工程应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
 [5]张启伟,范立础.利用动静力测量数据的桥梁结构损伤识别.同济大学学报,1998.
 [6]刘效尧,蔡键,刘晖.桥梁损伤诊断[M].北京:人民交通出版社,2002.
 [7]刘 钢,黄宗明,高建莉.基于损伤力影响线的静定梁损伤识别研究[J].湖南大学学报,2009.
 [8]徐有邻,顾祥林等.混凝土结构工程裂缝的判断与处理.北京:中国建筑工业出版社,2010.
 [9]邹大力.基于计算智能的结构损伤识别研究[D].大连:大连理工大学,博士研究生学位论文,2008.
 [10]崔飞,袁万成,史家钧.基于静态应变及位移测量的结构损伤识别法.同济大学学报,2001.
 [11]王均利.在役检测、可靠性分析与寿命预测.中国水利水电出版社,2005.
 [12]Hoon Sohn, Michael L Fugate, Charles R Farrar . Continuous structural health monitoring using statistical process control.Proceedings of 18th IMAC, San Antonio, Texas.2000.
 [13]W. X. Ren, H. B. Chen. Finite element model updating in structural dynamics by using response surface method. Engineering Structure. 2010.
 [14]Bagchi A, Humar J, Xu H, Noman A S. Model-based damage identification in a continuous bridge using vibration data[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities ASCE, 2010.

作者简介:

寇晓娜,女,河南漯河人,湖南工业大学讲师,硕士,主要研究方向,主要研究方向为结构设计、损伤及加固方向的研究。