

基于差分挠度曲率的两跨连续梁损伤识别方法



王艺霖*, 王宇, 温家琪

山东建筑大学土木工程学院建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 山东济南 250101

摘要: 为提高两跨连续梁损伤识别的有效性和便利性, 基于梁体在集中荷载下的挠度数据, 提出了一个以局部抗弯刚度和剪切刚度为损伤识别参数、基于相邻挠度测点的差分挠度曲率差值的损伤识别新指标 D_i 。基于 D_i 的损伤识别方法包括四个主要步骤: 在梁体上等间隔地布置竖向挠度测点并在其中一跨的跨中位置处施加集中荷载 F , 实测得到各测点处的 y_i 值后算出各差分挠度曲率值 $1/\rho_i$; 按 D_i 的定义得到具体值后以 D_i 为纵坐标、梁体纵向中轴线上各测点的位置为横坐标画出图形; 图形上的突变位置即能指示损伤出现的位置: 如果从第 j 点开始突变, 则说明损伤出现在第 $j+1$ 到 $j+2$ 测点之间的区域; 从 D_{i-1} 、 D_i 、 D_{i+1} 中任选两个取值并联立求解相应的定义式, 即可确定用局部刚度相对变化量来表征的梁体损伤程度。算例验证的结果表明本方法具有良好的损伤识别效果。

关键词: 建筑结构; 连续梁; 损伤; 挠度; 曲率

DOI: [10.57237/j.cear.2023.01.005](https://doi.org/10.57237/j.cear.2023.01.005)

Damage Detection Method of Simply Supported Beams Based on Difference of Nearby Difference Curvature Index

Wang Yi-lin*, Wang Yu, Wen Jia-qi

Key Laboratory of Building Structural Retrofitting and Underground Space Engineering of Ministry of Education, School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

Abstract: In order to improve the effectiveness and convenience of damage identification of two-span continuous beams, a new damage identification index D_i based on the deflection data of beam under concentrated load, which takes local flexural stiffness and shear stiffness as damage identification parameter, was proposed. The damage detection method based on D_i includes four main steps: arranging vertical deflection measurement points at equal intervals on the beam body and applying a concentrated load F at the mid span position of one of the spans. After measuring the y_i value at each measurement point, the differential deflection curvature value $1/\rho_i$ can be calculated; After obtaining specific values of D_i according to the definition, a graph with D_i as the vertical coordinate and the positions of each measuring point on the longitudinal axis of the beam as the horizontal coordinate can be drawn; The mutation position on the graph can

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划教育部创新团队 (IRT13075); 山东省高等学校土木结构防灾减灾协同创新中心项目 (XTP201924); 山东建筑大学博士科研基金项目 (XNBS1205).

*通信作者: 王艺霖, xgwang_wang@163.com

收稿日期: 2023-04-27; 接受日期: 2023-05-16; 在线出版日期: 2023-05-25

<http://www.cearesearch.org>

indicate the location of the damage: if the mutation starts from point j , it indicates that the damage occurs in the area between measurement points $j+1$ and $j+2$; By selecting any two values from D_{i-1} , D_i , and D_{i+1} and solving the corresponding definition equation simultaneously, the degree of beam damage characterized by the relative change in local stiffness can be determined. The results of numerical example validation indicate that this method has good damage identification performance.

Keywords: Building Structure; Continuous Beam; Damage; Deflection; Curvature

1 引言

两跨连续梁结构在实际工程中有着广泛的应用,例如连续梁桥、架空管道等。对于服役较久的两跨连续梁结构,需及时发现损伤信息以确保其安全运行。两跨连续梁上可能出现的损伤情形有多种,但在理论上一般可以局部刚度的变化来代表损伤[1-3]。在进行损伤识别时,首先选定某一结构性能指标,然后根据其在损伤前后的变化来识别损伤信息(刚度变化)。目前常用的结构性能指标包括静力性能指标与动力性能指标两大类:静力性能指标包括位移[4-6]、挠度曲率[7]、应变[8]等,动力性能指标包括频率[9]、振型[10]、曲率模态[11]、应变模态[12]等。

其中,挠度曲率是值得重点关注的指标之一,尤其是根据静力挠度数据和中心差分法得到的挠度差分曲率,可以反映出结构上由损伤出现造成的局部刚度变化,从而实现损伤识别。同时,挠度差分曲率指标值的获取过程简单,利用光纤光栅等先进传感器能达到很高的数据精度。

对于梁结构,基于挠度差分曲率的损伤识别方法首先应用于简支梁这类静定梁[7, 13-15]。后来,楚加庆[16]将其扩展到了超静定的固支梁结构,建立了曲率

与损伤程度的显示表达式,可由指标计算得到理论损伤程度。唐盛华等[17]针对三跨连续梁受均布荷载的工况,采用力法推导出了基于挠度差分曲率的损伤识别指标。

但目前有关两跨连续梁的理论推导或算例验证还很少见,而且挠度差分曲率指标对于多跨连续梁受均布荷载工况的情况容易出现损伤漏判的问题[17],需要采取专门的处理措施。为此,本文将针对两跨连续梁,提出一个基于集中加载工况与差分挠度曲率的损伤识别新指标 D_i 并建立相应的损伤识别方法,下面进行详细说明。

2 损伤识别新指标 D_i 的提出

记两跨连续梁的跨度为 $l+l$, 在梁上等间隔地布置竖向挠度测点,测点间距记为 Δ 。假设在测点 i 与 $i+1$ 之间的区域出现了损伤,测点 $i-1$ 到梁最左端的距离为 m 。

在其中一跨的跨中位置处施加集中荷载 F , F 在第 i 个测点产生的竖向挠度记为 y_i 。分析模型如图1所示:

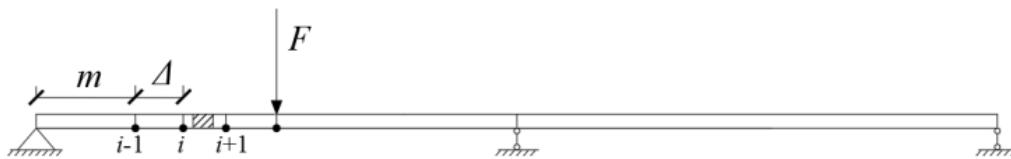


图1 两跨连续梁受集中荷载的分析模型

根据挠度曲率及差分的实际意义,测点 i 处的差分挠度曲率值可按式(1)计算:

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

(一) 只考虑弯曲变形的情况

绝大多数的实际连续梁都不是深梁,竖向挠度主要由梁体的弯曲变形引起。如果只考虑弯曲变形,可只以局部抗弯刚度的变化来代表损伤。根据测点的布置情况,可以 Δ 为单位来考虑损伤引起的局部刚度变化,即认为 Δ 范围内梁体的局部抗弯刚度由 EI 变为 ϵEI 。

然后根据虚功原理计算损伤区域附近各测点的竖向

挠度 y_i , 进而由式(1)可得各测点的差分挠度曲率为:

(3)而

$$\frac{1}{\rho_{i-3}} = \frac{-3Fm + 2X_1m}{4EI} + \frac{3F\Delta}{2EI} - \frac{X_1\Delta}{EI} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho_{i-2}} = \frac{-3Fm + 2X_1m}{4EI} + \frac{3F\Delta}{4EI} - \frac{X_1\Delta}{2EI} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho_{i-1}} = \frac{-3Fm + 2X_1m}{4EI} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\rho_i} = \frac{2X_1m - 2F\Delta - 3Fm}{8EI} + \frac{X_1\Delta}{6EI} + \frac{Fml - Fml^2}{4EI\Delta^2} + \frac{Fl - Fl^2}{2EI\Delta} + \frac{1}{zEI} \left[\frac{6Fm^2 - 3Fm^3 + 2X_1m^3}{12\Delta} + \frac{Fm}{8\Delta^2} - \frac{3Fm^2 + 2Fm\Delta}{4l} \right] \quad (5)$$

$$\frac{1}{\rho_{i+1}} = \frac{77Fml^2 + 22X_1ml^2 + 77Fl^2\Delta + 22X_1l^2\Delta}{192EI\Delta^2} - \frac{Fml + Fl\Delta}{2EI\Delta^2} + \frac{1}{zEI} \left[\frac{2X_1m^2 - 3Fm^2}{6\Delta} - \frac{5F\Delta + 7Fm}{8} + \frac{3Fm\Delta + 6Fm^2 - 2X_1m\Delta - 4X_1m^2}{12l} + \frac{7X_1m + 5X_1\Delta}{12\Delta} + \frac{3Fm^3 - 2X_1m^3}{12l\Delta} \right] \quad (6)$$

$$\frac{1}{\rho_{i+2}} = \frac{-3Fm + 2X_1m}{4EI} - \frac{9F\Delta}{4EI} + \frac{3X_1\Delta}{2EI} \quad (7)$$

$$\frac{1}{\rho_{i+3}} = \frac{-3Fm + 2X_1m}{4EI} - \frac{3F\Delta}{EI} + \frac{2X_1\Delta}{EI} \quad (8)$$

.....

其中:

$$X_1 = F \frac{\left(\frac{11l^3}{4} - 9m^2\Delta - 27m\Delta^2 - 21\Delta^3 \right) + \frac{1}{z} (15m^2\Delta + 33m\Delta^2 + 21\Delta^3)}{(4l^3 - 10m^2\Delta - 22m\Delta^2 - 14\Delta^3) + \frac{1}{z} (10m^2\Delta + 22m\Delta^2 + 14\Delta^3)} \quad (9)$$

式中: E ——弹性模量; I ——截面惯性矩。

从式(2)到(9)可见:

(1)在损伤区域的左侧:

$$\dots \frac{1}{\rho_{i-3}} - \frac{1}{\rho_{i-2}} = \frac{1}{\rho_{i-2}} - \frac{1}{\rho_{i-1}} = \frac{(3F - 2X_1)\Delta}{4EI} \quad (10)$$

(2)在损伤区域的右侧:

$$\frac{1}{\rho_{i+2}} - \frac{1}{\rho_{i+3}} = \dots = \frac{(3F - 2X_1)\Delta}{4EI} \quad (11)$$

$$\frac{1}{\rho_{i-1}} - \frac{1}{\rho_i} \neq \frac{(3F - 2X_1)\Delta}{4EI} \quad (12)$$

$$\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_{i+1}} \neq \frac{(3F - 2X_1)\Delta}{4EI} \quad (13)$$

$$\frac{1}{\rho_{i+1}} - \frac{1}{\rho_{i+2}} \neq \frac{(3F - 2X_1)\Delta}{4EI} \quad (14)$$

据此可定义一个损伤识别指标 D_i :

$$D_i = \frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_{i+1}} \quad (15)$$

可见,当损伤出现在测点 i 与 $i+1$ 之间时, D_i 在 $i-1$ 、 i 与 $i+1$ 三处的指标值 (D_{i-1} 、 D_i 、 D_{i+1}) 将与其余位置处的指标值都不同,据此可判断出损伤的出现及其位置(确定 m 值)。

如果要确定损伤程度: 根据 D_i 在 $i-1$ 、 i 与 $i+1$ 三点之外测点的指标值, 利用式(10)或(11)即可算出 X_1 值, 进而根据式(9)确定 z 值(此时 F , m , E , I , Δ 均为已知量)。

(二) 考虑剪切变形的情况

为了精确起见, 可进一步考虑梁体竖向挠度中包含的剪切变形。此时认为损伤不仅使得 Δ 范围内的局部抗弯刚度由 EI 变为 zEI , 还使其剪切刚度由 GA 变为 $z'GA$ 。

同样根据虚功原理可得到损伤区域附近各测点的剪切位移。记 i 点处的剪切位移为 q_i , 记剪切变形对测点 i 的差分曲率的影响为 $\bar{\Delta} \frac{1}{\rho_i}$, 则基于式(1)可算得:

在损伤区域左侧:

$$\bar{\Delta} \frac{1}{\rho_{i+2}} = \bar{\Delta} \frac{1}{\rho_{i+3}} = \dots = 0 \quad (16)$$

在损伤区域右侧:

$$\bar{\Delta} \frac{1}{\rho_{i-1}} = \bar{\Delta} \frac{1}{\rho_{i-2}} = \bar{\Delta} \frac{1}{\rho_{i-3}} = \dots = 0 \quad (17)$$

$$\bar{\Delta} \frac{1}{\rho_i} = \frac{k}{GA\Delta^2} \left(\frac{2X_1\Delta - 3F\Delta}{4} + \frac{3F\Delta - 2X_1\Delta}{4z'} \right) \quad (18)$$

$$\bar{\Delta} \frac{1}{\rho_{i+1}} = \frac{k}{GA\Delta^2} \left(\frac{9F\Delta^2 - 6X_i\Delta^2 + 3F\Delta l - 2X_i\Delta l}{4z'} \right) \quad (19)$$

式中: k ——截面形状系数(对矩形截面取 1.2);
 G ——剪切模量; A ——截面积。

从式(16)到(19)可见, 考虑剪切变形后只影响测点 i 和 $i+1$ 处的差分曲率值 $\frac{1}{\rho_i}$ 和 $\frac{1}{\rho_{i+1}}$ 。式(5)和(6)应分别修正为:

$$\frac{1}{\rho_i} = \frac{2X_i m - 2F\Delta - 3Fm}{8EI} + \frac{X_i \Delta}{6EI} + \frac{Fml - Fml^2}{4EI\Delta^2} + \frac{Fl - Fl^2}{2EI\Delta} + \frac{1}{zEI} \left[\frac{6Fm^2 - 3Fm^3 + 2X_i m^3}{4X_i \Delta - 5X_i m - 6F\Delta} + \frac{Fm - 3Fm^2 + 2Fm\Delta}{3X_i m^2 + 2X_i m\Delta} \right] + \frac{k}{GA\Delta^2} \left(\frac{2X_i \Delta - 3F\Delta}{4} + \frac{3F\Delta - 2X_i \Delta l}{4z'} \right) \quad (20)$$

$$\frac{1}{\rho_{i+1}} = \frac{77Fml^2 + 22X_i ml^2 + 77Fl^2\Delta + 22X_i l^2\Delta}{192EI\Delta^2} - \frac{Fml + Fl\Delta}{2EI\Delta^2} + \frac{1}{zEI} \left[\frac{2X_i m^2 - 3Fm^2 - 5F\Delta + 7Fm}{3Fm\Delta + 6Fm^2 - 2X_i m\Delta - 4X_i m^2} + \frac{7X_i m + 5X_i \Delta}{12} + \frac{3Fm^3 - 2X_i m^3}{12l\Delta} \right] + \frac{k}{GA\Delta^2} \left(\frac{9F\Delta^2 - 6X_i \Delta^2 + 3F\Delta l - 2X_i \Delta l}{4l} + \frac{9F\Delta - 6X_i \Delta}{4z'} \right) \quad (21)$$

因此, 在损伤区域的左侧, 式(10)仍然成立; 在损伤区域的右侧, 式(11)仍然成立; 而式(12)到(14)应修正为:

$$\frac{1}{\rho_{i-1}} - \frac{1}{\rho_i} = -\frac{4Fm^2 - 3Fm\Delta + 2F\Delta^2}{6EI\Delta} + \frac{3Fm + 4F\Delta}{6zEI} - \frac{k}{GA\Delta^2} \left(\frac{2X_i \Delta - 3F\Delta}{4} + \frac{3F\Delta - 2X_i \Delta}{4z'} \right) \neq \frac{(3F - 2X_i)\Delta}{4EI} \quad (22)$$

$$\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_{i+1}} = \frac{4Fm^2 + 5F\Delta^2}{6EI\Delta} + \frac{F\Delta}{zEI} + \frac{k}{GA\Delta^2} \left(\frac{4X_i \Delta - 6F\Delta l - 9F\Delta^2 + 6X_i \Delta^2}{4l} + \frac{X_i \Delta - 6F\Delta}{z' - 4z'} \right) \neq \frac{(3F - 2X_i)\Delta}{4EI} \quad (23)$$

$$\frac{1}{\rho_{i+1}} - \frac{1}{\rho_{i+2}} = \frac{3Fm + 11F\Delta}{6EI} - \frac{Fm + 5F\Delta}{2zEI} + \frac{k}{GA\Delta^2} \left(\frac{9F\Delta^2 + 3F\Delta l - 2X_i \Delta l - 6X_i \Delta^2}{4l} + \frac{9F\Delta - 6X_i \Delta}{4z'} \right) \neq \frac{(3F - 2X_i)\Delta}{4EI} \quad (24)$$

可见, 式(15)定义的指标 D_i 仍然适用: 当损伤出

现在测点 i 与 $i+1$ 之间时, D_i 在 $i-1$ 、 i 与 $i+1$ 三处的指标值 D_{i-1} 、 D_i 、 D_{i+1} 将与其余位置处的指标值都不同(分别如式(22)、(23)、(24)所示), 其余位置处的指标值均同式(10)或(11), 据此可判断出损伤的出现及其位置。如果要确定损伤程度: 从 D_{i-1} 、 D_i 、 D_{i+1} 值中任选两个, 即从式(22)到(24)中任选两个联立求解即可算出 z 和 z' 的值(此时 F , m , E , I , Δ 均为已知量)。

3 基于 D_i 的损伤识别方法

在应用时, 对两跨连续梁可按以下步骤进行基于 D_i 指标的损伤识别:

- (1) 在梁体上等间隔地布置竖向挠度测点并在其中一跨的跨中位置处施加集中荷载 F , 用挠度测量仪器实测得到各测点处的 y_i 值, 然后根据式(1)算出各差分挠度曲率值 $1/\rho_i$;
- (2) 按式(15)算出各 D_i 值, 然后以 D_i 为纵坐标、梁体纵向中轴线上各测点的位置为横坐标画出图形;
- (3) 图形上的突变位置即能指示损伤出现的位置: 如果从第 j 点开始突变, 则说明损伤出现在第 $j+1$ 到 $j+2$ 测点之间的区域, m 值得到确定;
- (4) 从 D_{i-1} 、 D_i 、 D_{i+1} 中任选两个取值, 联立求解式(22)到(24)中的对应两个, 确定损伤程度(z 和 z' 值)。

4 基于 D_i 的损伤识别方法的验证

某两跨连续钢梁, 单跨跨度 $l=2000\text{mm}$, 横截面尺寸为 $b \times h=200\text{mm} \times 50\text{mm}$, 弹性模量 $E=2.06 \times 10^5 \text{MPa}$, 泊松比 $\mu=0.3$ 。取竖向位移测点的间距为 $\Delta=50\text{mm}$, 则全梁共划分为 80 个区间。

(一) 损伤情况设定

以区间内梁截面的削减来代表损伤。这里设定两种损伤情况:

损伤情形 1: 区间 10 内(节点 10-11)出现局部损伤, 该区间内的梁截面尺寸在高度方向上经过上下对称削减为 $b \times h=200\text{mm} \times 30\text{mm}$ 。

则 $EI_{\text{无损}}=429166.67\text{N} \cdot \text{m}^2$ 、 $EI_{\text{有损伤}}=92700.00\text{N} \cdot \text{m}^2$, 可得 $z=0.216$; $GA_{\text{无损}}=792307692.30\text{N}$ 、 $GA_{\text{有损伤}}=475384615.40\text{N}$, 可得 $z'=0.600$ 。

损伤情形 2: 区间 16 内(节点 16-17)出现局部损伤, 该区间内的梁截面尺寸在高度方向上经过上下对

称削减为 $b \times h = 200\text{mm} \times 40\text{mm}$ 。

则 $EI_{\text{无损伤}} = 429166.67\text{N} \cdot \text{m}^2$ 、 $EI_{\text{有损伤}} = 219733.30\text{N} \cdot \text{m}^2$ ，

可得 $z = 0.512$ ； $GA_{\text{无损伤}} = 792307692.30\text{N}$ 、 $GA_{\text{有损伤}}$

$= 633846153.80\text{N}$ ，可得 $z' = 0.800$ 。

两跨连续梁的区间划分及损伤情形设定如图 2 所示：

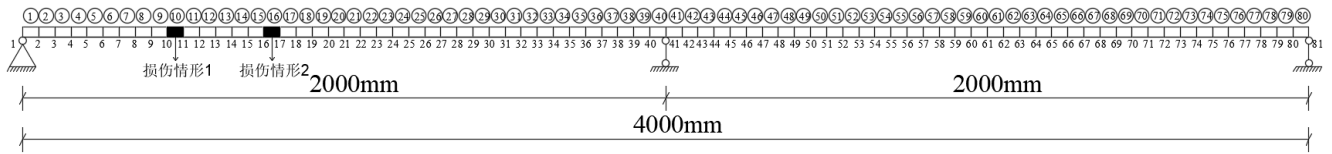


图 2 两跨连续梁的区间划分及损伤情形示意图

(二) 有限元建模

使用 ABAQUS 有限元软件建立两跨连续钢梁的模型。单元类型为三维空间梁单元 (C3D20R，二十结点二次六面体单元，减缩积分)。材料模型采用三折线应力—应变数学模型中的第一段（弹性阶段）。

对应于损伤情况 1、2 的两跨连续梁 ABAQUS 模型如图 3 所示：

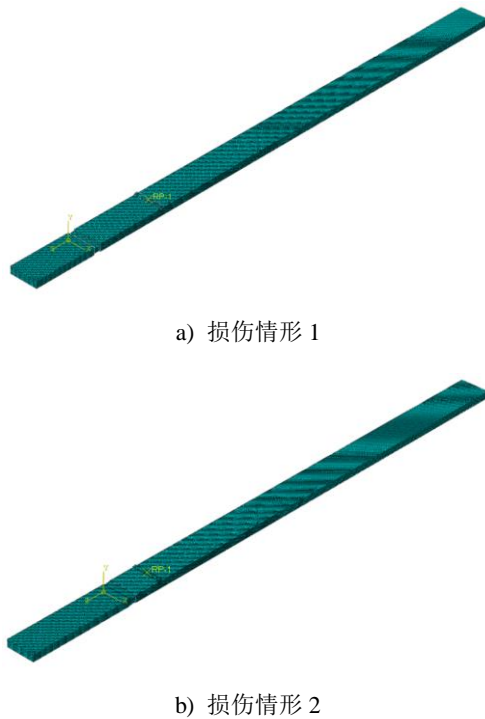


图 3 两跨连续梁 ABAQUS 有限元模型

(三) 加载

加载形式及位置：在左侧梁跨中位置（节点 21）施加集中荷载 F 。

F 值不能过大，以免钢梁发生屈服、产生人为损伤，即 F 在钢梁上产生的最大弯矩值 M_1 （根据本计算模型，为 $0.2Fl$ ）应小于钢梁发生屈服时所对应的弯矩值：

$$M_1 = 0.2Fl < M_y = W_x \cdot f_y = 16666666.68\text{N} \cdot \text{mm} \quad (25)$$

式中： W_x ——钢梁截面的抵抗矩； f_y ——钢梁的屈服强度（235MPa）。

可得 $F < 41666.67\text{N}$ 。

进而对损伤情形 1 选取 $F_1 = 20\text{kN}$ ，对损伤情形 2 选取 $F_2 = 30\text{kN}$ 。

(四) 挠度（竖向位移）云图

两跨连续钢梁对应于损伤情形 1 和 2 的挠度云图如图 4 所示：

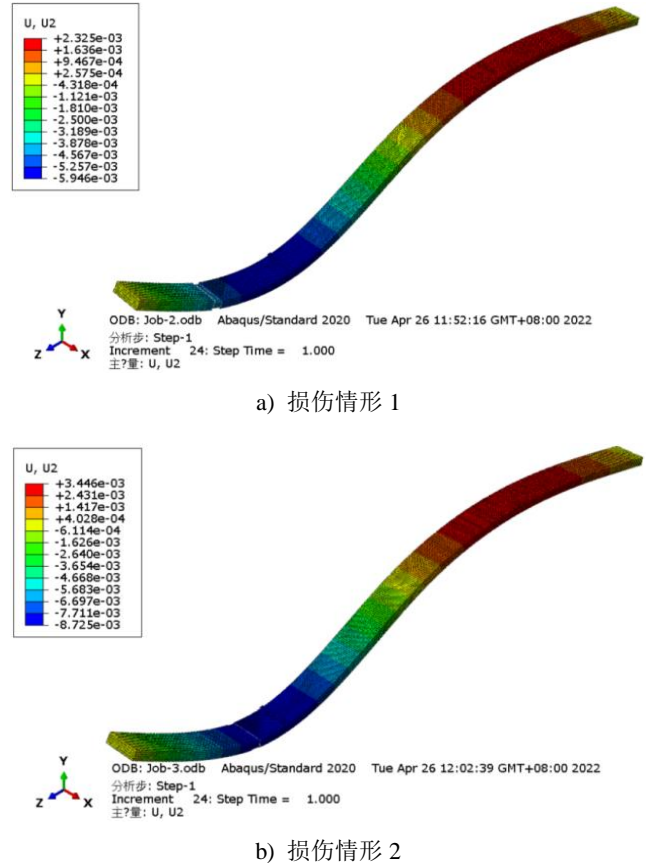


图 4 两跨连续梁挠度云图

(五) D_i 值图形及损伤识别

基于 ABAQUS 模型中得到的各测点处竖向挠度数据 y_i , 结合差分挠度曲率的计算式(1)以及 D_i 的定义式(15)可得到各测点处的 D_i 值, 进而对损伤情形 1、2 分别作出 D_i 值图形如图 5、6 所示:

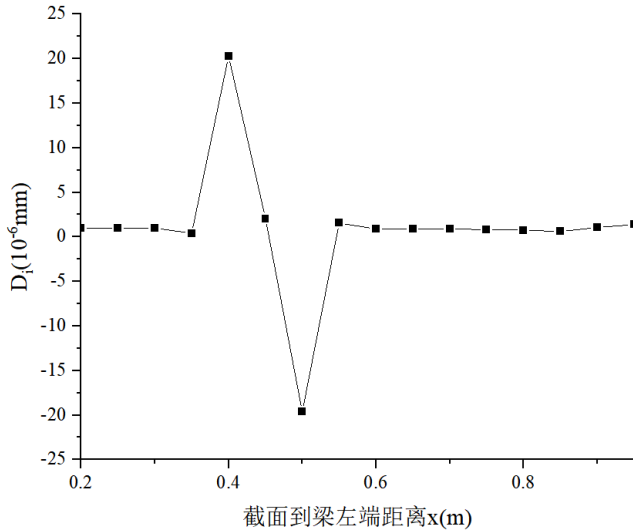


图 5 损伤情形 1 下的 D_i 值图形

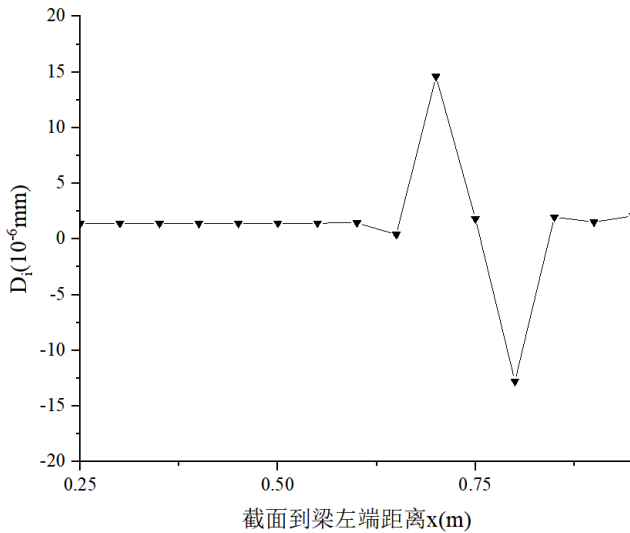


图 6 损伤情形 2 下的 D_i 值图形

(1) 损伤定位

损伤情形 1: 根据图 5, D_i 值开始突变发生在 $x=0.40\text{m}$ 处, 在 $x=0.45\text{m}$ 、 $x=0.50\text{m}$ 处 D_i 值也发生了突变, 而附近其余观测点处 D_i 无变化, 说明损伤区域出现在 $x=0.45\text{m}$ 到 $x=0.50\text{m}$ 之间, 即节点 10 和节点 11 之间, 与损伤情形一致。

损伤情形 2: 根据图 6, D_i 值开始突变发生在 $x=0.70\text{m}$ 处, 在 $x=0.75\text{m}$ 、 $x=0.80\text{m}$ 处 D_i 值也发生了突

变, 而附近其余观测点处 D_i 无变化, 说明损伤区域出现在 $x=0.75\text{m}$ 到 $x=0.80\text{m}$ 之间, 即节点 16 和节点 17 之间, 与损伤情形一致。

由此证明了 D_i 值可以精确的定位结构损伤位置。

(2) 损伤量化计算:

损伤情形 1: 将 D_{i-1} 和 D_i 带入式(22)和式(23)联立求解:

$$\begin{cases} D_{i-1} = -\frac{4Fm^2 - 3Fm\Delta + 2F\Delta^2}{6EI\Delta} + \frac{3Fm + 4F\Delta}{6zEI} - \frac{k}{GA\Delta^2} \left(\frac{2X_i\Delta - 3F\Delta}{4} + \frac{3F\Delta - 2X_i\Delta}{4z'} \right) \\ D_i = \frac{4Fm^2 + 5F\Delta^2}{6EI\Delta} + \frac{F\Delta}{zEI} + \frac{k}{GA\Delta^2} \left(\frac{4X_i\Delta - 6F\Delta l - 9F\Delta^2 + 6X_i\Delta^2}{4l} + \frac{X_i\Delta}{z} - \frac{6F\Delta}{4z'} \right) \end{cases}$$

计算得出: $z=0.216$ 、 $z'=0.600$ 。与实际损伤值相符。

损伤情形 2: 将 D_{i-1} 和 D_i 带入式(22)和式(23)联立求解同理可得: $z=0.512$ 、 $z'=0.800$ 。与实际损伤值相符。

5 结语

本文针对两跨连续梁结构, 基于集中加载和竖向挠度测定, 通过理论推导建立了一个基于差分挠度曲率差值的损伤识别新指标 D_i 及相应的损伤识别方法, 给出了确定损伤位置与程度的解析表达式。算例验证的结果表明: 基于 D_i 的损伤识别方法效果良好, 同时具有操作简便、工况简单、计算量小等优点。

参考文献

- [1] YU L C, HE S H, LIU X, et al. Engineering-oriented bridge multiple-damage detection with damage integrity using modified faster region-based convolutional neural network [J]. Multimedia Tools and Applications, 2022: 1-26.
- [2] PACHECO-CHÉRREZ J, PROBST O. Vibration-based damage detection in a wind turbine blade through operational modal analysis under wind excitation [J]. Materials Today, 2022, 56 (1): 291-297.
- [3] 王艺霖, 赵洪凯, 李广宁. 基于移动加载的简支梁损伤识别方法 [J]. 四川建筑科学研究, 2020, (4): 8-15.
- [4] WANG Y L, LIU X L, FANG C Q. Damage Detection of Bridges by Using Displacement Data of Two Symmetrical Points [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26 (3): 300-311.
- [5] NARIMAN N A, LAHMER T, KARAPPOUR P. Uncertainty quantification of stability and damage detection parameters of coupled hydrodynamic-ground motion in concrete gravity dams [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2019, 13 (2): 303-323.

- [6] 鲁溢. 基于静力测量数据和 L1 正则化的随机梁式结构损伤识别方法 [D]. 武汉理工大学, 2019.
- [7] 梁亚斌, 李东升, 李宏男. 环境温度影响下基于结构连续位移曲率组合的损伤识别方法 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2014, 030 (003): 399-407.
- [8] ZHANG S, LIU Y. Damage detection of bridges monitored within one cluster based on the residual between the cumulative distribution functions of strain monitoring data [J]. Structural Health Monitoring, 2020 (5): 147592171989595.
- [9] CGOI I H, KOO J B, SON J A, et al. Development of Equipment and Application of Machine Learning Techniques Using Frequency Response Data for Cap Damage Detection of Porcelain Insulators [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (8): 2820.
- [10] CHANG M, KIM J K, LEE J. Hierarchical neural network for damage detection using modal parameters [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2019, 70 (4): 457-466.
- [11] DAHAK M, TOUAT N, Kharoubi M. Damage detection in beam through change in measured frequency and undamaged curvature mode shape [J]. Inverse Problems in Science & Engineering, 2018, 2: 1-26.
- [12] CUI H Y, XU X, PENG W Q, et al. A damage detection method based on strain modes for structures under ambient excitation [J]. Measurement, 2018, 125: 438-446.
- [13] WANG Y L. New damage localization indicator based on curvature for single-span beams [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2014, 51 (6): 1037-1046.
- [14] 杨骁, 钱雪薇, 杨万锋. 基于曲率的静定梁两阶段损伤识别方法 [J]. 力学季刊, 2017, 4: 710-721.
- [15] 王艺霖, 赵洪凯, 李广宁. 基于临近差分曲率差值指标的简支梁损伤识别方法 [J]. 四川建筑科学研究, 2022, 48 (1): 39-47.
- [16] 楚加庆. 基于静力参数的结构损伤识别方法研究 [D]. 湘潭大学, 2019.
- [17] 唐盛华, 楚加庆, 方志, 张学兵, 罗承芳. 基于均布荷载挠度曲率的梁结构损伤识别方法 [J]. 力学季刊, 2019, 40 (03): 549-559.

作者简介

王艺霖

1981 年出生, 博士, 副教授, 硕士生导师. 研究方向为结构损伤识别、新材料与新结构.

Email: xgwang_wang@163.com