

文章编号:1673-9469(2026)04-0021-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.04.003

基于挠度影响线差的钢-混凝土组合梁损伤识别方法研究

李运生,李吉中,贾云飞,张彦玲*

(石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043)

摘要:为识别钢梁或混凝土板的截面损伤,推导了任意截面的挠度影响线的表达式,基于损伤前后挠度影响线差及其二次差分进行了损伤识别,并通过有限元分析及模型试验进行了验证,最后提出了基于运营阶段对称挠度影响线差及其二次差分的损伤识别方法。研究表明:可通过损伤前后挠度影响线差曲线的拐点或其二次差分曲线的峰值对损伤进行定位;挠度影响线差及其二次差分均随损伤程度和损伤区域长度近似呈线性增长。模型试验显示,挠度影响线差较其二次差分的损伤识别效果更好,且基于运营阶段对称挠度影响线差及其二次差分的识别方法无需损伤前的挠度数据。

关键词:钢-混凝土组合梁;损伤识别;挠度影响线;挠度影响线差;挠度影响线差二次差分

中图分类号:TU317

文献标识码:A

Research on Damage Identification Method of Steel-Concrete Composite Beam Based on Difference of Deflection Influence Line

LI Yunsheng, LI Jishen, JIA Yunfei, ZHANG Yanling*

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: To address sectional damage occurring in either the steel girder or the concrete slab, this paper derived the Deflection Influence Line (DIL) for an arbitrary cross-section. Damage identification was performed based on the difference of DIL (DDIL) before and after damage and its second-order difference, and the method was then validated through finite element analysis and model tests. Finally, a damage identification method using the symmetric DDIL and its second-order difference under service conditions was proposed. The results show that damage localization can be achieved by identifying the inflection point of the DDIL curve or the peak on its second-order difference curve. Both the DDIL and its second-order difference increase approximately linearly with increasing damage severity and damage length. Model tests indicate that the DDIL yields better damage identification performance than its second-order difference. The proposed method based solely on the symmetric DDIL and its second-order difference under service conditions does not require pre-damage deflection data.

Key words: steel-concrete composite beam; damage identification; Deflection Influence Line (DIL); Difference of Deflection Influence Line (DDIL); second-order difference of DDIL

梁截面发生损伤后,损伤位置的截面刚度会发生变化。截面曲率对这种局部刚度的变化较为敏感,但很难直接测量,因此一般通过对较易测得的挠度曲线进行二次差分获得,并据此判别梁的损伤状态。对于实际桥梁,要得到精确的挠度曲

线需布置较多测点,而这通常很难实现;相比之下,仅对某个特定截面的挠度影响线进行测试则易于实施,因此基于挠度影响线的损伤识别方法被广泛采用。

基于多测点挠度影响线差值曲率,吴贵飞^[1]

收稿日期:2024-10-15 修回日期:2025-03-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778377);中央引导地方科技发展资金项目(246Z5409G)

第一作者:李运生(1970—),男,河南洛阳人,博士,教授,研究方向:桥梁结构分析、组合结构桥梁。

*通信作者:张彦玲(1973—),女,河北沧州人,博士,教授,研究方向:桥梁结构分析、组合结构桥梁。

实现了桥梁结构损伤前初始数据未知情况下的损伤识别;王立宪等^[2-5]在基于挠度影响线的梁式结构损伤识别中考虑了非理想边界影响^[2]、局部损伤位置对跨中位移影响线的敏感性^[3],并对超静定和变刚度梁式结构影响线特征进行了分析^[4-5];陈记豪等^[6]基于荷载横向分布原理,提出了基于挠度影响线差值及其曲率的空心板局部损伤识别方法;Mustafa 等^[7-10]基于挠度影响线及其二次差分进行了组合梁桥^[7]、弯梁桥^[8-9]和拱桥^[10]的损伤识别方法研究。在实际桥梁中,通常采用离散小波变换^[11]、经验模态分解法^[12]、变分模态分解法^[13]等对车辆移动荷载下桥梁的动位移响应进行动静分离,将准静态响应作为测试截面的挠度影响线;或采用基于机器视觉和移动承重系统的方法获得挠度影响线^[14-15],再进一步构建损伤指标,完成对结构的损伤识别。

基于挠度影响线的损伤识别方法对影响线数据的测量精度要求较高,因此现有研究对该方法的理论分析和数值计算较多,而采用实际桥梁进行试验验证的较少。本文以钢-混凝土组合梁为研究对象,针对钢梁或混凝土板损伤造成的截面刚度下降,首先对损伤前后挠度影响线进行理论推导,基于损伤前后挠度影响线差及其二次差分进行损伤识别,并进行模型梁的试验验证,最后提出了无需损伤前初始数据,基于运营阶段对称挠度影响线差及其二次差分的损伤识别方法。

1 理论推导

本节对弹性阶段组合梁的挠度影响线进行推导,遵循如下假定:钢梁、钢筋和混凝土均为理想弹性体;截面变形符合初等梁理论的平截面假定;不考虑钢梁与混凝土板之间的相对滑移。

1.1 挠度影响线理论推导

图 1 为钢-混凝土简支组合梁损伤后荷载分段示意图。图中, L 为跨径, ε 为损伤区域长度, b 为损伤区域与左端支座的距离, x 为计算截面距左端支座的距离。在梁上任意位置 x_p 处作用集中荷载 P ,荷载位置分别位于损伤区域的左侧、内部和右侧。

当荷载作用在损伤区域左侧,即 $0 \leq x_p \leq b$ 时,梁的弯矩 M 表达式可用式(1)表示。

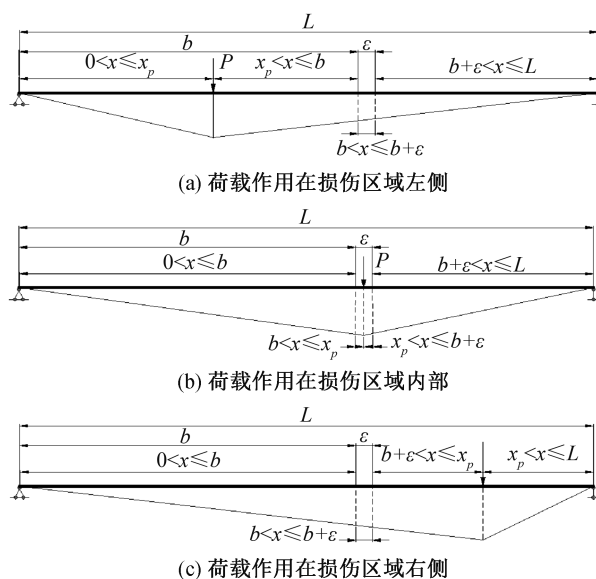


图 1 损伤后荷载分段示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of load segmentation after damage

$$\begin{cases} M_1(x, x_p) = M_3(x, x_p) = M_4(x, x_p) = \frac{Px}{L}(L - x_p) \\ (0 \leq x \leq x_p, b < x \leq b + \varepsilon, b + \varepsilon < x \leq L) \\ M_2(x, x_p) = \frac{Px_p}{L}(L - x) \quad (x_p < x \leq b) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $M_1(x, x_p)$ 、 $M_2(x, x_p)$ 、 $M_3(x, x_p)$ 、 $M_4(x, x_p)$ 分别为荷载作用点左侧区域的弯矩、荷载作用点与损伤起点之间区域的弯矩、损伤区域内的弯矩及损伤区域右侧至支座范围内的弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$ 。

采用 $W(x, x_p)$ 表示集中荷载位于 x_p 处时梁的挠度曲线,其二阶导数表示挠度曲线的曲率 $\varphi(x, x_p) = W''(x, x_p)$,通过曲率与弯矩的关系可知:

$$W''(x, x_p) = -\frac{M(x, x_p)}{EI} \quad (2)$$

式中: E 为组合梁材料的弹性模量, MPa ; I 为组合梁换算截面惯性矩, mm^4 。

将式(1)代入式(2),根据图 1 所示的荷载分段情况,对各区段分别进行二次积分,可得到包含积分常数的各段挠度通式。

结合组合梁边界条件($x=0$, 挠度 $W_1=0$; $x=L$, 挠度 $W_4=0$)以及荷载作用点 x_p 、损伤起点 a 、损伤终点 $a+\varepsilon$ 处的挠度与转角连续条件,本文共建立 8 个线性代数方程。利用 Matlab 进行运算求解,可获得荷载作用在损伤区域左侧时任意截面的挠度解析表达式。采用相同方法,可进一步推导出荷载作用在损伤区域内部及右侧时的挠度解析解。

令 $\varepsilon=0$,公式退化为无损状态下的标准分段表达式,见式(3)。

$$\begin{cases} W_1 = -\frac{P(L-x_p)}{6EI_0L}x^3 + \frac{Px_p}{6EI_0L}(2L-x_p)(L-x_p)x \\ (0 \leq x \leq x_p) \\ W_2 = -\frac{Px_p}{EI_0L}\left(\frac{x^2L}{2} - \frac{x^3}{6}\right) + \frac{Px_p}{6EI_0L}(x_p^2 + 2L^2)x + \frac{Px_p^3}{6EI_0} \\ (x_p < x \leq L) \end{cases} \quad (3)$$

式中: W_1 、 W_2 分别为集中荷载作用下组合梁在荷载左侧区段和右侧区段的挠度,mm; I_0 为无损状态下组合梁换算截面的惯性矩,mm⁴。

当 $x_p=x=L/2$ 时,由式(3)可得跨中荷载下组合梁跨中挠度 $W_{L/2}=PL^3/(48EI_0)$,说明推导结果正确。根据式(3),当 $0 \leq x_p \leq L$ 时,可以得到任意位置损伤前后任意截面的挠度影响线。将损伤前后的挠度影响线作差,可得挠度影响线差DW,其值与损伤区域与左端支座距离 b 、损伤区域长度 ε 和损伤前后的截面抗弯刚度变化有关。进一步对挠度影响线差DW进行二次差分,第 i 个计算点处DW的二次差分DWSD _{i} 计算公式如下:

$$DWSD_i = \frac{DW_{i-1} + DW_{i+1} - 2DW_i}{h_i^2} \quad (4)$$

式中: DW_{i-1} 、 DW_i 和 DW_{i+1} 分别表示组合梁在计算点 $i-1$ 、 i 和 $i+1$ 处的挠度影响线差,mm; h_i 为计算点 $i-1$ 到 i 和 i 到 $i+1$ 的距离平均值,mm。

1.2 算例分析及有限元验证

如图2所示,钢-混凝土组合梁全长为6 200 mm,计算跨径 $L=6 000$ mm。截面为箱形截面,其中混凝土板宽700 mm、厚70 mm;钢梁高180 mm,2块上翼缘板宽均为60 mm、厚均为8 mm;2块腹板高均为164 mm、厚均为8 mm;下翼缘板宽430 mm、厚8 mm。沿梁纵向均匀设置5块横隔板,隔板间

距为1 500 mm,厚度为8 mm。混凝土板与钢梁之间采用直径 d 为13 mm的栓钉进行连接,混凝土板内配置直径为6.5 mm的纵向和横向钢筋,间距分别为100、130 mm;钢梁上设置纵向间距为250 mm的栓钉。混凝土强度等级为C40,弹性模量为 3×10^4 MPa;钢材为Q235,弹性模量为 2.06×10^5 MPa。将混凝土换算为钢材,可得换算截面惯性矩 $I_0=121 668 063$ mm⁴。损伤区域设置在距梁左端支座3 600 mm处,长度设为100 mm,见图2(b)。计算时,将弹性模量降低20%以模拟损伤。

在进行理论计算时,以100 mm为间距将组合梁等分为60个单元,令集中荷载 $P(P=30$ kN)由左到右依次加载,每次荷载位置 $x_p=100i(i=0 \sim 60)$ 。利用MATLAB,每施加一次荷载计算一次目标截面的挠度,将不同荷载位置下的挠度连线,即可得到目标截面的挠度影响线。同时,利用MIDAS软件中的梁单元建立有限元模型,梁单元截面直接采用整体组合截面,不建立栓钉,即不考虑钢梁与混凝土板之间的相对滑移。计算跨径6 000 mm内共60个单元,每个单元长100 mm,与理论模型相同。为与理论加载工况一致,未采用移动加载,而是在每个单元左节点处定义一个 $P=30$ kN的集中荷载工况,共计61个工况。在有限元模型中,在距左端支座3 600~3 700 mm处设置损伤,将该单元组合截面中钢梁和混凝土的弹性模量均降低20%。

计算无损和损伤状态下各工况目标截面节点的挠度,并连线得到挠度影响线。跨中截面、1/4跨截面和3/4跨截面损伤前后挠度影响线的理论值与有限元模拟值的对比见图3。

由图3可知,在截面无损和损伤状态下,1/4跨截面挠度影响线的理论结果与MIDAS软件计算结果基本相同,跨中和3/4跨截面的有限元计算结果与理论结果相比略有误差,但整体误差小于5%,

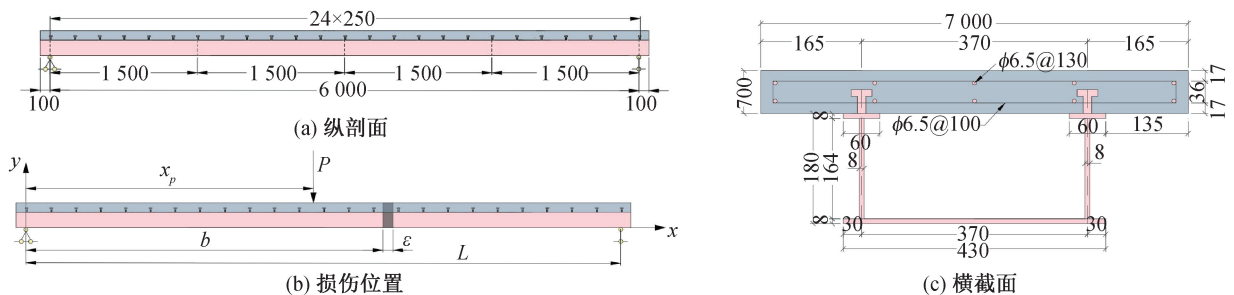


图2 钢混凝土组合梁示意图(单位:mm)

Fig.2 Schematic diagrams of steel-concrete composite beam (unit:mm)

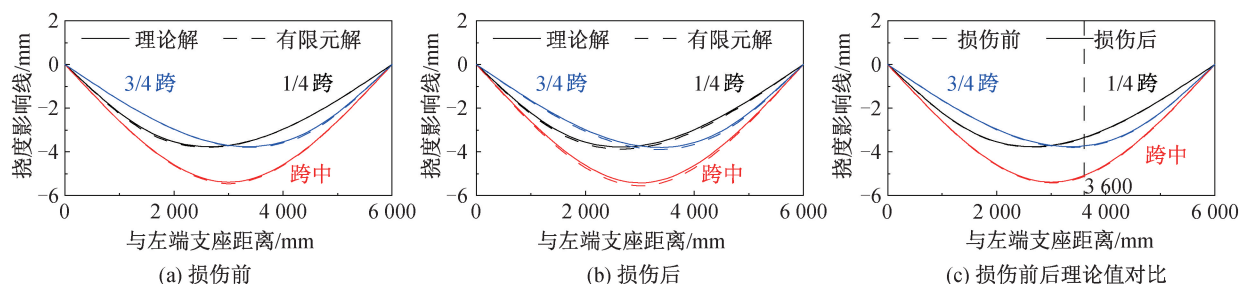


图3 截面损伤状态下不同截面挠度影响线对比结果

Fig. 3 Comparison results of DILs of different sections under section damage conditions

说明理论推导结果正确。各截面损伤后的挠度影响线均略有增加,但与损伤前相比变化不明显,且均未在损伤位置出现明显的曲线变化,说明挠度影响线反映的是整体效应,对局部的截面损伤不敏感。

2 截面损伤识别

以 1.2 节计算模型为算例,以损伤区域与左端支座距离 b 、损伤区域长度 ε 和损伤程度 d ($d=1-E_1/E_0$, E_1 、 E_0 分别为损伤前后组合梁换算截面的

弹性模量)为参数,设置损伤工况,见表 1。

2.1 截面损伤识别结果

不同损伤工况下的挠度影响线差以及损伤区域的挠度影响线差随损伤参数的变化见图 4。由图 4 可知,各损伤工况下,不同截面的挠度影响线差均在损伤区域(距左端支座 3 600 mm 处)出现明显的拐点,可以通过该拐点识别损伤位置。在工况 1 中,跨中截面挠度影响线差的识别效果相较于 1/4 跨和 3/4 跨更加明显。在工况 2 中,当损伤位置及损伤区域长度相同时,挠度影响线差随损

表 1 组合梁损伤工况表

Tab. 1 Damage conditions of composite beam

	损伤区域与左端支座距离 b /mm	损伤区域长度 ε /mm	损伤程度 d /%	影响线观察截面
工况 1	3 600	100	20	跨中、1/4 跨、3/4 跨
工况 2	3 600	100	5~90	跨中
工况 3	500、2 400、3 000、3 600、5 500	100	20	跨中
工况 4	3 600	50~200	20	跨中

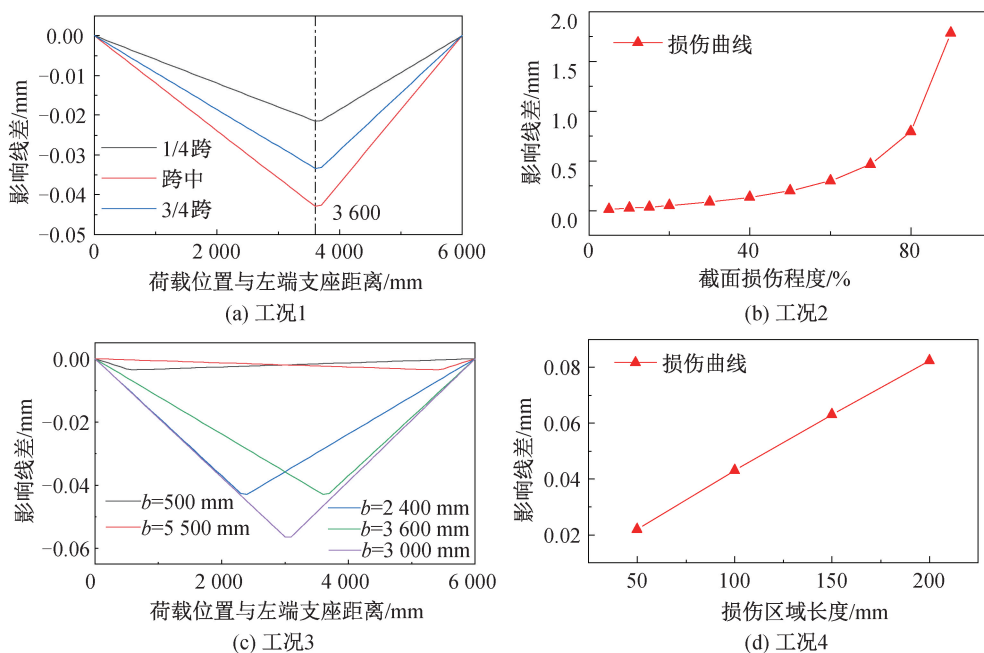


图4 不同工况下的挠度影响线差及其随损伤参数的变化

Fig. 4 DDILs and their variations with damage parameters under different conditions

伤程度 d 的增大而增大。当 d 小于 50% 时,挠度影响线差随损伤程度基本呈线性增长; d 超过 50% 后,挠度影响线差出现了非线性的快速增长趋势。在工况 3 中,当不同位置发生损伤时,挠度影响线差均在损伤区域出现峰值,并向两端支座递减,但由于损伤位置与观察截面的距离不同,影响线差分大小有所区别,总体表现为距观察截面越近,峰值越大。在工况 4 中,损伤区域长度 ε 越大,损伤区域挠度影响线差的峰值越大,二者基本呈线性增长。

2.2 截面损伤识别结果

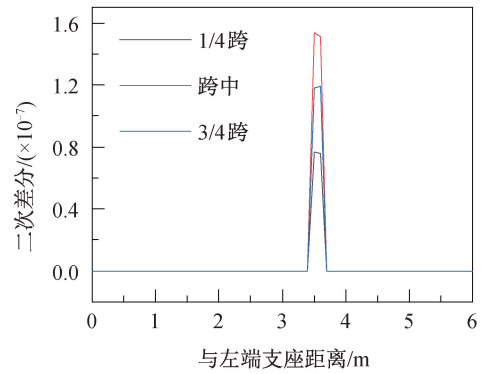
对各工况的挠度影响线差进行二次差分处理,结果如图 5 所示。由图 5 可知,未损伤区域的挠度影响线差经二次差分后的结果接近 0,在截面损伤区域出现明显峰值。在工况 1 中,相较于 1/4 跨截面,跨中截面挠度影响线差的二次差分对损伤区域的识别效果更好;相较于直接对影响线作差,经二次差分处理后的识别结果更加明显。在工况 2 中,在相同部位发生不同程度损伤时,挠度影响线差的二次差分结果随损伤程度 d 的增大而增大;损伤截面的刚度降低越多,差分结果的峰值越大。在工况 3 中,当损伤位置不同时,损伤区域越靠近跨中截面,二次差分的峰值越大。在工况 4 中,损伤区域越长,二次差分结果的范围及峰值越大。

3 损伤识别试验验证

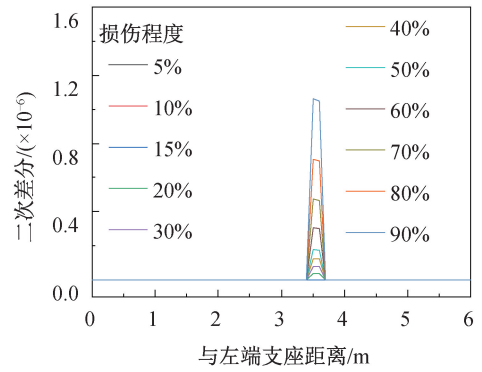
本节通过施加移动集中静载,测试损伤前后组合梁特定截面的挠度影响线,验证采用挠度影响线差及其二次差分进行损伤识别的可行性。试验梁具体设计尺寸及材料特性与 1.2 节算例相同。

3.1 加载方案及试验过程

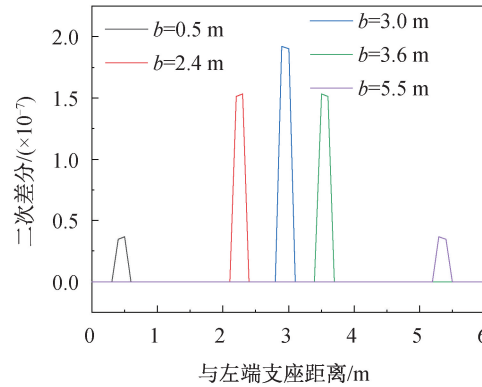
加载时采用多点施加集中荷载的方式模拟静力移动荷载,以获得特定截面的静力响应影响线。加载设备由作动器、辅助支架和分配梁组成,见图 6(a)。在作动器位置固定的情况下,先搭设与试验梁平行的辅助支架,并使作动器位置处于试验梁和辅助支架中间;在辅助支架与试验梁之间设置分配梁,令作动器正好作用在分配梁上,基于杠杆原理对试验梁进行加载;最后通过转动,改变分配梁的角度,实现试验梁的静力移动加载,见图 6(b)。受试验场地限制,本研究只进行了半跨加



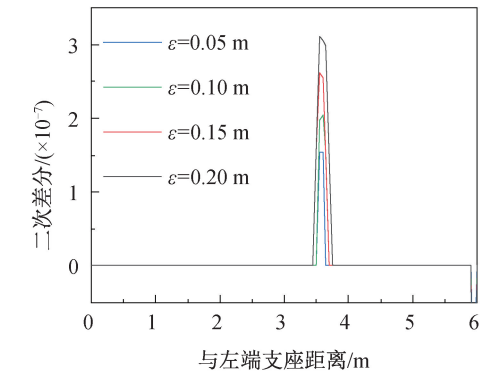
(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 工况 4

图 5 损伤前后挠度影响线差二次差分
Fig. 5 Second-order differences of DDILs
before and after damage

载,共设 15 个加载点,其中,加载点 1 位于跨中,加载点 15 位于固定铰支座端。本试验采用位移计对梁的竖向位移进行测量。在跨中、1/4 跨和 3/4 跨截面布置位移计,每个截面于腹板下布置 2 个位移计,取二者平均值作为最终数据,共使用 6 个位移计,位移计精度为 0.001 mm,具体布置如图 6(c)所示。在钢梁下翼缘距离左端支座 3 600 mm(距跨中 600 mm)的截面处采用气割法切割一条裂缝,裂缝宽度约为 3 mm,横向贯穿整个钢梁下翼缘,同时沿两侧腹板向上延伸约 20 mm,如图 6(d)所示。

在跨中位置进行 3 次 10 kN 的预加载后,首先进行无损状态测试。在加载点 1(跨中位置)缓慢施加 30 kN 的荷载,持荷 5 min,待位移计数据稳定后通过 XL2118A 静态电阻应变仪进行记录,记录完成后开始卸载,卸载后静置 5 min,直至位移计读数归 0。重复加载及卸载过程,完成从加载点 1 到加载点 15 的全部加载,获得无损状态下半跨试验梁测试截面的挠度影响线数据。钢梁设置损伤后,在相同荷载下重复无损状态的加载过程,获得半跨试验梁相同测试截面的损伤后挠度影响线数据。

3.2 试验结果分析

无损和损伤工况下各截面的半跨挠度影响线测量结果如图 7(a)所示。将损伤后各截面的挠度影响线与损伤前的试验数据作差,得到挠度影响

线差曲线,见图 7(b)。由图 7 可以看出,损伤后试验梁的挠度影响线较损伤前略大,但无法进行损伤定位。跨中和 3/4 跨截面的挠度影响线差曲线在钢梁损伤位置(3 600 mm)处出现了峰值和拐点。1/4 跨截面虽然也有峰值和拐点,但离实际损伤位置有一定偏差,说明 1/4 跨截面识别精度较跨中和 3/4 跨截面差。这是因为损伤位置位于跨中截面和 3/4 跨截面中间,而 1/4 跨截面距离损伤位置较远。也就是说,挠度影响线差的测试截面离损伤位置越近,损伤识别的精度越高。然而,在实际结构中,损伤位置并不是已知的,因此需要对多个截面进行测试,并将多个截面的挠度影响线差进行比对,进而对损伤位置进行综合判断。

对影响线差数据结果进行二次差分处理,结果如图 8 所示。由于挠度影响线差二次差分后的数值较小,对环境因素的影响较为敏感,且二次差分过程中存在误差积累,故在全梁存在不同的峰值点。该结果仅可以看出钢梁损伤区域的峰值略大于其他截面,但未能呈现理论结果中无损状态下数值为 0 的情况。因此,通过挠度影响线差二次差分对损伤进行识别困难较大。

4 运营阶段损伤识别

基于挠度影响线差及其二次差分进行截面损伤识别的方法,需要将损伤后与损伤前的数据

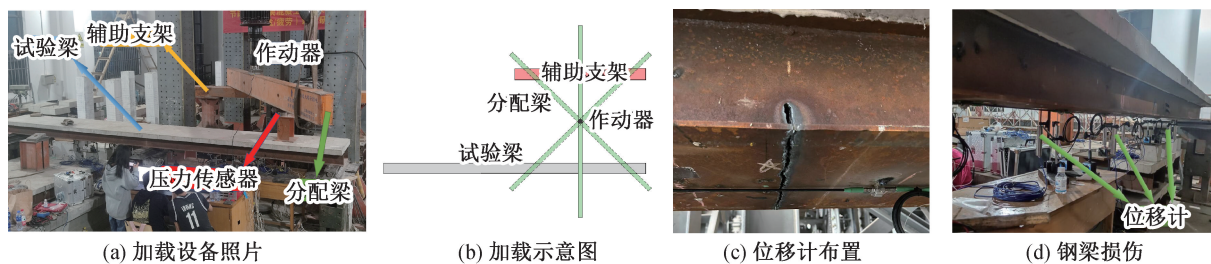


图 6 试验概况

Fig. 6 General situation of the test

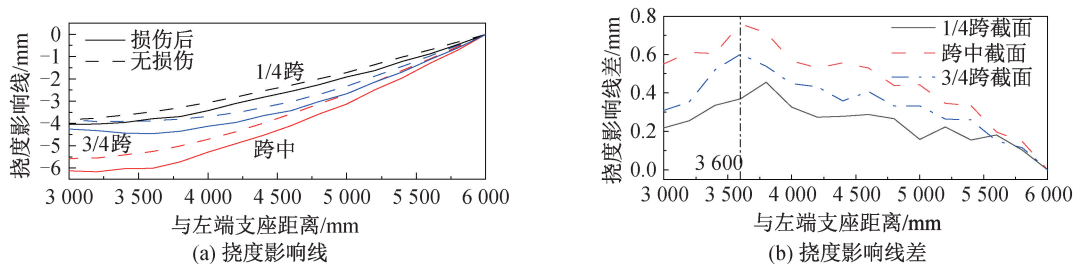


图 7 损伤前后各截面半跨挠度影响线及影响线差实测结果

Fig. 7 Measured results of DILs and DDILs of each half-span section before and after damage

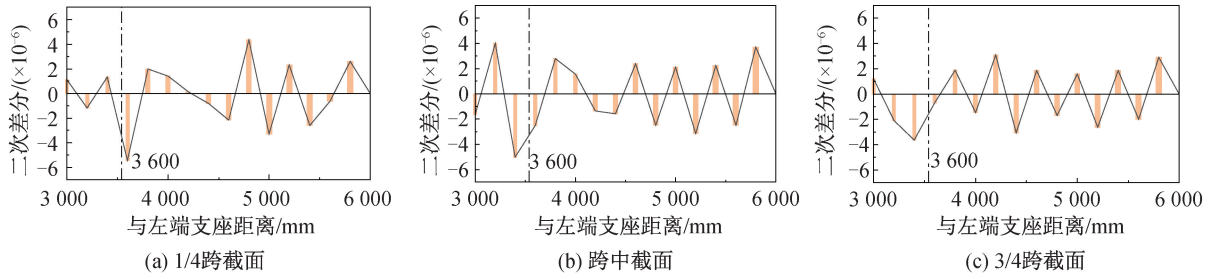


图8 挠度影响线差及二次差分结果示意图

Fig. 8 Schematic diagrams of DDIL and its second-order difference results

进行对比,但对于中小跨径桥梁,在施工过程和成桥之后很少进行实时健康监测,因此无法通过对比损伤前后实测挠度影响线数据进行损伤识别。本节针对等截面对称结构组合梁,探讨基于运营阶段的对称挠度影响线差及其二次差分来进行损伤识别的可行性。

4.1 损伤识别原理

跨中截面($x=L/2$)挠度影响线的计算公式可由式(3)改写为式(5)。

$$\begin{cases} W_1(x_p) = \frac{L^2 P(L-x_p)}{48 EI_0} - \frac{Px_p}{12EI_0}(2L-x_p)(L-x_p) \\ \quad \left(\frac{L}{2} < x_p \leq L\right) \\ W_2(x_p) = \frac{5L^2 Px_p}{48 EI_0} - \frac{Px_p}{12EI_0}(x_p^2 + 2L^2) + \frac{Px_p^3}{6EI_0} \\ \quad \left(0 \leq x_p \leq \frac{L}{2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

令 W_2 中的荷载位置 $x'_p = L - x_p$, 可得:

$$W_2(x'_p) = W_2(L - x_p) = W_1(x_p) \quad (6)$$

可见,在无损伤状态下,等截面对称结构跨中挠度影响线关于跨中左右对称。基于以上特点,针对等截面对称结构组合梁,可以只采集运营状态下跨中截面挠度影响线数据。跨中截面不同位置损伤的挠度影响线如图9所示。将跨中截面左侧和右侧对称截面的挠度影响线数值之差,定义为DSF,即 $DSF = \text{左侧 } W(x_p) - \text{右侧 } W(x'_p)$ 。同时,对DSF进行二次差分,得到SD-DSF,根据DSF及其

二次差分SD-DSF的变化特征进行损伤识别。截面未发生损伤时,DSF和SD-DSF均为0;部分位置损伤后,DSF和SD-DSF根据损伤位置的不同发生变化。下面采用1.2节的算例讨论截面损伤后DSF和SD-DSF的特征。

4.2 截面损伤状态下对称挠度影响线差及二次差分的曲线特征

当跨中截面左侧完好时,令右侧距跨中截面600 mm(距左端支座3600 mm)处发生损伤(工况1),DSF和SD-DSF的计算结果见图10(a)(b);当跨中截面右侧完好时,令左侧距左端支座500 mm处发生损伤(工况3),DSF和SD-DSF的计算结果见图10(c)(d)。

由图10可知:(1)当跨中截面左侧完好、右侧发生损伤时,右侧的挠度影响线大于左侧,故左侧减右侧的挠度影响线差 $DSF \leq 0$,但二次差分 $SD-DSF \geq 0$ 。在距左端支座2400 mm处DSF曲线出现拐点,二次差分SD-DSF出现峰值,但该截面位于跨中左侧,并不是损伤位置,而是实际损伤截面(距左端支座3600 mm处)关于跨中的对称位置;(2)当跨中截面右侧完好、左侧发生损伤时,左侧的挠度影响线大于右侧,故左侧减右侧的挠度影响线差 $DSF \geq 0$,但二次差分 $SD-DSF \leq 0$ 。距左端支座500 mm处DSF曲线出现拐点,二次差分SD-DSF出现峰值,且该截面即为实际的损伤位置。

根据以上分析可得出结论:若跨中截面挠度影响线左右对称,左侧挠度影响线减去右侧对称

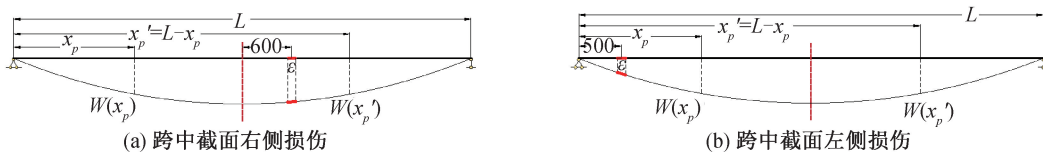


图9 不同位置损伤时的挠度影响线示意图(单位:mm)

Fig. 9 Schematic diagrams of DILs for different positions of damage (unit:mm)

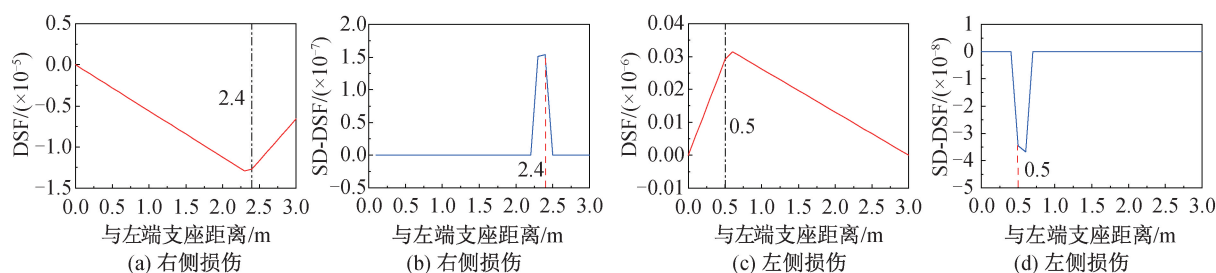


图 10 截面损伤状态下对称挠度影响线差及二次差分

Fig. 10 Symmetric DDIL and its second-order difference under section damage conditions

位置挠度影响线的差值 DSF 及其二次差分 $SD-DSF$ 均沿梁长基本为 0, 则可判断结构基本未发生截面损伤或损伤程度很小; 若 $DSF \leq 0$ 或其二次差分 $SD-DSF \geq 0$, 则可判断跨中截面左侧完好, 右侧某个位置发生损伤, 此时 DSF 曲线拐点或 $SD-DSF$ 峰值点关于跨中的对称位置发生损伤; 若 $DSF \geq 0$ 或其二次差分 $SD-DSF \leq 0$, 则可判断跨中截面右侧完好, 左侧某个位置发生损伤, 此时 DSF 曲线拐点或 $SD-DSF$ 峰值点即为发生损伤的位置。需要说明的是, 如果是跨中截面发生损伤, 则无法通过对称挠度影响线差及其二次差分进行识别, 这是使用对称挠度影响线差进行损伤识别的局限性。

5 结论

本文提出了基于挠度影响线差及其二次差分的组合梁截面损伤识别方法, 主要结论如下:

1) 不同损伤工况下, 损伤区域损伤前后的挠度影响线差均出现明显拐点, 其二次差分均出现明显峰值, 跨中截面的识别效果最明显; 挠度影响线差及其二次差分均随损伤程度 d 的增大而增大, d 小于 50% 时基本呈线性增长, d 超过 50% 后出现非线性快速增长趋势; 损伤区域距离测试截面越近, 影响线差及其二次差分越大, 且影响线差及其二次差分随损伤区域长度近似线性增长。

2) 模型试验表明, 损伤后试验梁的挠度影响线测量结果较损伤前略大, 但无法进行损伤定位; 挠度影响线差在预设钢梁损伤位置出现明显拐点, 可实现钢梁损伤定位, 但由于挠度影响线差二次差分后数值较小, 对环境影响较为敏感, 且二次差分过程中存在误差积累, 因此识别效果较差。

3) 基于运营阶段的对称挠度影响线差 DSF 及其二次差分 $SD-DSF$, 即可实现对损伤的定位识别。该方法无需损伤前的挠度数据, 在中小跨径桥梁中更具现实意义。

参考文献:

- [1] 吴贵飞. 基于实测位移影响线的桥梁结构损伤识别研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
Wu Guifei. Research on damage identification of bridge structure based on measured displacement influence line [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
- [2] 王立宪, 周宇, 狄生奎, 等. 考虑边界非理想的铁路桥梁挠度影响线分析与损伤识别[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(3): 123-132.
Wang Lixian, Zhou Yu, Di Shengkui, et al. Influence line analysis and damage detection of railway bridge deflection with non-ideal boundaries [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(3): 123-132.
- [3] Sun Ke, Zhang Yanqing. Analysis of displacement influence line characteristics of simply supported beam with local damage [J]. Advanced Materials Research, 2014, 919/920/921: 364-368.
- [4] 王宁波, 左晴, 李靖, 等. 基于当前多影响线信息的超静定梁损伤识别方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(9): 3284-3294.
Wang Ningbo, Zuo Qing, Li Jing, et al. Damage detection method for statically indeterminate bridge based on multi-influence line information in current state [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(9): 3284-3294.
- [5] 张锦程, 董军, 李国华, 等. 基于挠度差值影响线的桥梁结构模型损伤识别研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 1451-1455.
Zhang Jincheng, Dong Jun, Li Guohua, et al. Study on damage identification of continuous girder bridge structure model based on influence line [J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 1451-1455.
- [6] 陈记豪, 赵顺波, 姚继涛. 基于对称挠度差值影响线的装配式简支空心板桥上部结构损伤识别[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(2): 283-293.
Chen Jihao, Zhao Shunbo, Yao Jitao. Superstructure damage identification of existed simply-supported slab bridge based on influence line of symmetrical deflection

- differential[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(2): 283-293.
- [7] Mustafa S, Sekiya H, Hirano S. Evaluation of fatigue damage in steel girder bridges using displacement influence lines[J]. Structures, 2023, 53: 1160-1171.
- [8] 孙珂, 张延庆. 基于位移影响线曲率的小半径弯桥损伤识别[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(4): 727-734.
- Sun Ke, Zhang Yanqing. Damage identification of small-radius curved bridge based on curvature of displacement influence line[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(4): 727-734.
- [9] 李起航, 张延庆, 孙珂. 利用位移影响线对曲线桥进行损伤识别的影响因素研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(8): 115-120.
- Li Qihang, Zhang Yanqing, Sun Ke. The analysis of influencing factors to the damage identification of curved bridge using the influence line of displacement[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(8): 115-120.
- [10] Zhou Yu, Li Meng, Shi Yingdi, et al. Research on damage identification of arch bridges based on deflection influence line analytical theory[J]. Buildings, 2024, 14(1): 6.
- [11] He Wenyu, Ren Weixin, Zhu Songye. Damage detection of beam structures using quasi-static moving load induced displacement response[J]. Engineering Structures, 2017, 145: 70-82.
- [12] Zheng Xu, Yang Donghui, Yi Tinghua, et al. Bridge influence line identification from structural dynamic responses induced by a high-speed vehicle[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(7): e2544.
- [13] Chen Zhiwei, Zhao Long, Zhou Yigui, et al. Extraction of quasi-static component from vehicle-induced dynamic response using improved variational mode decomposition[J]. Smart Structures and Systems, 2023, 31(2): 155-169.
- [14] Ge Liangfu, Koo K Y, Wang Miaomin, et al. Bridge damage detection using precise vision-based displacement influence lines and weigh-in-motion devices: experimental validation[J]. Engineering Structures, 2023, 288: 116185.
- [15] Martini A, Tronci E M, Feng M Q, et al. A computer vision-based method for bridge model updating using displacement influence lines[J]. Engineering Structures, 2022, 259: 114129.
- (责任编辑 张爱丽)

(上接第20页)

- Zhang Zihong, Xu Chengshun, Yan Guanyu, et al. Experimental design for dynamic centrifuge tests on a subway station structure in liquefied interlayer site[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 879-888.
- [23] Sharma P, Sawant V A, Sharma M L. Numerical modeling of liquefaction in deep saturated sands[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2021, 6(2): 86.
- [24] 王薇, 李恒, 徐利军. 基于剪切波速的深层砂土地震液化研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(1): 93-97.
- Wang Wei, Li Heng, Xu Lijun. Study on earthquake liquefaction potential of sandy soil in deep layer based on shear wave velocity[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2019, 39(1): 93-97.
- [25] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].
- GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S].
- [26] GB/T 51336—2018 地下结构抗震设计标准[S].
- GB/T 51336—2018 Standard for seismic design of underground structures[S].
- [27] 陈国兴, 王志华, 左熹, 等. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 89-97.
- Chen Guoxing, Wang Zhihua, Zuo Xi, et al. Development of laminar shear soil container for shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 89-97.
- (责任编辑 张爱丽)