

文章编号:1671-1637(2014)06-0010-07

采用步进加载的桥梁刚度量化识别方法

牛艳伟^{1,2}, 郝景贤³, 苏英平⁴, 山尾敏孝⁵, 黄平明¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006; 3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088; 4. 西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068; 5. 熊本大学 自然科学研究科, 熊本县 熊本市 860-8555)

摘要:针对桥梁刚度识别问题,在常规桥梁荷载试验的基础上,提出一种将试验加载车沿桥梁纵向逐步前进加载进行桥梁刚度量化识别的方法。引入刚度影响因子矩阵,采用步进加载及有限元模型分别建立实测挠度变化矩阵和计算挠度变化矩阵,并建立控制偏差逼近水平从而对刚度影响因子进行识别的方法及流程。以一座系杆拱桥为例,验证了单一区域及多区域损伤的识别准确性。试验结果表明:拱脚外区域识别精度可达到6.6%;采用步进加载方法可以对混凝土桥梁的刚度进行定位与量化识别;采用多项式拟合对测量结果进行修正后,可提高识别精度,逼近水平提高18%。

关键词:桥梁工程;混凝土桥梁;步进加载;刚度;量化识别

中图分类号:U441.2

文献标志码:A

Rigidity quantitative identification method of bridge based on step-forward loading

NIU Yan-wei^{1,2}, HAO Jing-xian³, SU Ying-ping⁴, YAMAO Toshitaka⁵, HUANG Ping-ming¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shanxi Transportation Research Institute, Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region of Ministry of Transport, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 3. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China; 4. Xi'an Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710068, Shaanxi, China; 5. Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kumamoto 860-8555, Kumamoto, Japan)

Abstract: Aiming at the rigidity identification of bridge, based on general bridge loading test, a step-forward loading method was proposed for bridge rigidity quantitative identification. Rigidity effect factor matrix was introduced, measured deflection variation matrix and calculated deflection variation matrix were established by step-forward loading and finite element model respectively, then the deviation was controlled to get convergence to identify rigidity effect factor, and related analysis flow was illustrated. Based on a project of tie-arch bridge, the identification accuracies of single zone damage and multi-zone damage of bridge were verified. Test result shows that the accuracy of bridge identification is 6.6% except the zones near arch feet. The rigidity of concrete bridge can be located and quantitatively identified based on step-forward loading method. Using polynomial fitting to correct the measured data can improve the identification accuracy, and the convergence level increases by 18%. 8 figs, 20 refs.

Key words: bridge engineering; concrete bridge; step-forward loading; rigidity; quantitative identification

收稿日期:2014-06-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51208056);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放基金项目(KLTLR-Y12-7);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC173)

作者简介:牛艳伟(1981-),男,山西定襄人,长安大学讲师,工学博士,从事混凝土桥梁结构性能研究。

Author resume: NIU Yan-wei(1981-), male, lecturer, PhD, +86-29-82336336, niuyanwei@chd.edu.cn.

0 引言

桥梁的刚度识别是进行承载力评估的先决条件,准确把握桥梁的刚度分布进而对其损伤和承载力进行评估成为一个重要问题。目前,关于刚度识别主要采用基于结构动力响应的识别方法,易伟建等对混凝土梁桥振动特性进行了识别^[1];Mordini 等进行动力特性测试时,为减小边界条件的影响,梁端支承需转换为自由弹性支承后进行激振^[2-3];Ren 等通过逼近有限元计算值与实测主频及模态进行损伤识别,在对钢筋混凝土简支梁进行损伤识别时,根据实际梁的开裂特点引入了单元损伤因子,在加载使试验梁产生损伤前,需对其进行一次动力特性测试,以获得初始的基准值^[4]。相对而言,静力识别受条件干扰小,过程明确,具有较高的精度及稳定性。在工程中应用的静力方法主要作为定性判断(承载力满足要求或不满足要求),对基于静力响应数据的损伤分布、量化识别则研究较少。Choi 等利用弹性响应对简支钢梁的损伤定位进行了研究^[5];向天宇等采用跨中加载方式得到跨中及 1/4 跨位置的挠度,对一片预应力混凝土连续梁进行了损伤识别,得到了跨中及支座位置截面的损伤情况,并对不同加载力下的损伤发展进行了比较^[6],利用桥梁荷载试验中的跨中中载及偏载挠度,对一座 7 片 T 形截面梁组成的混凝土多梁桥进行了损伤识别,结果表明将每片主梁及全部横隔梁作为识别变量时,识别结果更为有效^[7];张启伟等以位移数据为主,结合一阶模态数据对一片矩形截面悬臂梁进行了数值模拟及损伤识别,并对测试自由度的缩减算法进行了研究^[8];张家弟等将一数值模拟的简支梁进行了损伤识别,结果表明随着单元数和损伤程度的增加,识别精度逐渐下降^[9]。可见,已有的静力方法识别研究的加载方式采用跨中中载或偏载方式进行加载,得到的位移数据有限^[10-11],导致识别参数的数量和精度受到限制。本文以系杆拱桥为例,提出采用试验车步进加载,形成加载位移矩阵,更新理论模型以逼近实桥加载线形,研究了识别方法的原理、识别流程,并对其识别精度进行验证。

1 识别原理

桥梁的截面损伤识别可以转化为桥梁的截面刚度识别问题,对于本文所研究的步进加载法,输入项

为桥梁待识别区域的刚度影响因子矩阵

$$\alpha = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \cdots \ \alpha_n] \quad (1)$$

式中: α 为刚度影响因子矩阵; α_n 为第 n 个待识别区域的刚度影响因子。

输出项采用测试精度较高的桥梁关键点挠度数据,待求解的影响因子数量应小于挠度数据量,即测试数据量约束不能少于待识别数据量,否则待识别的刚度损伤因子将无法逼近或者数量需要缩减。本文采用步进加载方式,保证有足够的挠度数据用于约束待识别刚度的逼近过程。

1.1 长兴港大桥概况

长兴港大桥位于浙江省湖州市,是 104 国道长兴段的一部分,于 2000 年建成通车,本文针对其主桥系杆拱桥进行研究。主桥为一座计算跨径为 50.4 m 的下承式混凝土系杆拱桥,矢高为 11.2 m,矢跨比为 1/4.5,一共 11 组吊杆,纵向间距为 4.2 m。桥面分上下游两幅,单幅桥宽为 12.0 m 行车道加 3.35 m 人行道,进行加载试验的是下游单幅。步进加载时该桥吊杆更换工程已完工,本文假设吊杆无损伤。桥梁构造见图 1。

1.2 基于挠度数据的识别原理

首先将待检测的桥梁结构人为划分成若干识别区域,这一过程将决定刚度影响因子的数量。桥梁的损伤程度通常与其各部位的受力状况有关。对于相对简单的桥梁结构,可直接按照纵向维度进行划分,这与桥梁受力后的弯矩图分布规律一致,以简支梁为例,沿轴线可划分为若干段^[12-13],或仅作为一个整体进行考虑^[14]。同样,对于较为复杂的桥梁,如系杆拱桥,其待识别损伤因子数量依旧不能太多,因此,损伤区域的划分需要结合受力分析和工程经验确定,以保证其合理性。系杆拱桥作为一种组合结构,主拱圈和系梁均是主要的受力构件,二者发挥的作用与其刚度比相关。长兴港大桥的主拱圈和系梁的截面高度分别为 130、170 cm,宽度分别为 80、90 cm,属于刚性系杆刚性拱。通过吊杆的连接,在活载作用下,主拱圈和系梁的变形和受力幅值基本一致,因此,为了提高识别的准确性,将上部结构沿纵向划分为 $z_1 \sim z_7$ 共 7 个区域(图 1)。

与常规的荷载试验方法以及已有的静力试验加载方法不同,本文使用试验车沿桥梁纵向逐步前进加载(以下简称为步进法),在各关键位置加载,并测

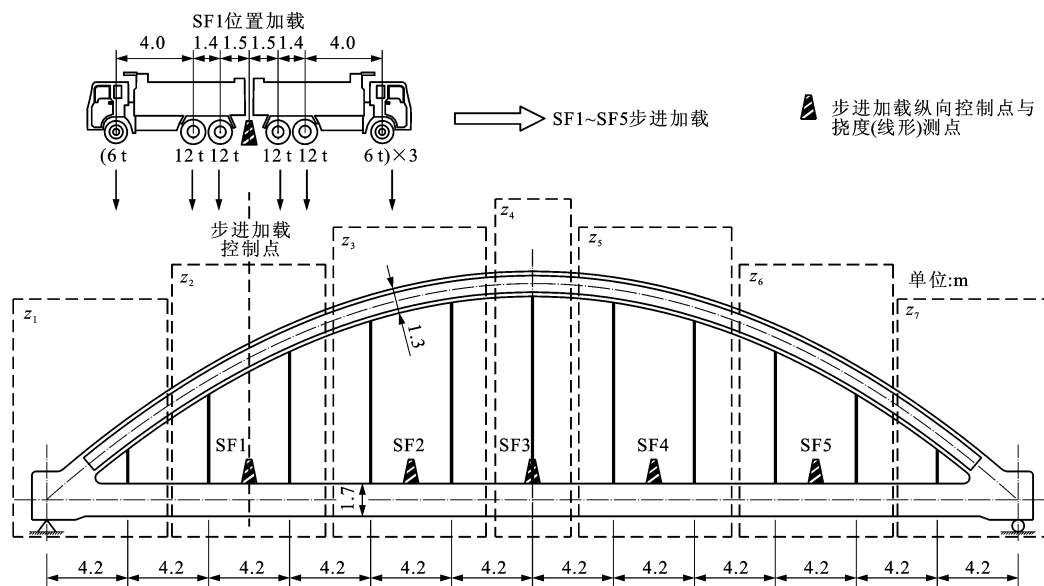


图1 长兴港大桥立面及步进加载位置

Fig. 1 Elevation and step-forward loading positions of Changxinggang Bridge

量全桥线形。这里的关键位置是指可以体现全桥各待识别区域刚度敏感性的位置,如为识别第2、3吊杆位置附近主拱圈及拱肋的刚度变化,则在两吊杆中间停靠一次,此时全桥线形的变化值与识别区域的刚度变化最为敏感。易知,采用步进法加载后,加载车停靠 n 次,则可得到 n 个线形向量,减去空载时的全桥线形后组合成加载位移矩阵。本文的挠度测点位置与加载位置相同,因此,实测挠度变化矩阵是 $n \times n$ 阶的,即

$$\mathbf{D}_s = \begin{bmatrix} d_{11}^s & d_{12}^s & \cdots & d_{1n}^s \\ d_{21}^s & d_{22}^s & \cdots & d_{2n}^s \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1}^s & d_{n2}^s & \cdots & d_{nn}^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{D}_s 为实测挠度变化矩阵; d_{ij}^s 为 i 位置步进加载时在 j 位置产生的挠度变化实测值。

与实测挠度变化矩阵相对应,通过理论计算模型的步进加载可得到计算挠度变化矩阵为

$$\mathbf{D}_c = \begin{bmatrix} d_{11}^c & d_{12}^c & \cdots & d_{1n}^c \\ d_{21}^c & d_{22}^c & \cdots & d_{2n}^c \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1}^c & d_{n2}^c & \cdots & d_{nn}^c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: d_{ij}^c 为 i 位置步进加载时在 j 位置产生的挠度变化理论值,本文采用有限元模型计算值。

为了比较理论模型参数与实测参数之间的差异,定义收敛控制值为二者累计偏差 F_d ,具体如下

$$F_d = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (d_{ij}^c - d_{ij}^s)^2 \quad (4)$$

如果理论计算模型与实际桥梁结构完全相同,则所有加载位置的挠度变化都相同, F_d 为0。实际上,由于桥梁运营多年伴随有损伤产生,而且桥梁成桥时由于土木工程的高离散性特征,结构参数已经与设计图纸(理论计算模型)存在一定偏差,导致 F_d 不为0。损伤识别的过程就是不断调整理论计算模型的结构参数(刚度影响因子)直至 F_d 逼近于0或满足一定的收敛准则($F_d < F_T$, F_T 为容许偏差),这时认为理论计算模型与实桥结构的刚度参数最为接近,进而达到桥梁结构刚度识别的目的,为桥梁受力分析和加固策略的制定提供重要参数。

本文的有限元计算过程采用外部调用ANSYS程序计算完成,整个识别过程由MATLAB控制,通过式(4)将修正参数的过程转化为单目标优化计算,整体识别流程见图2。

1.3 挠度试验加载过程

步进加载所采用的试验车荷载应在桥梁设计活载范围内,可以通过关键截面的内力对比确定^[15]。本文采用6辆30t卡车加载,每辆加载车前轴载为6t,2个后轴均为12t。横向3列沿桥中心线对称布置(图3),纵向分为2排尾对尾加载;加载位置SF1~SF5共5处,每一停车位置测量全桥各关键位置挠度(本文中与各加载位置一致),形成全桥线形(图4)。

1.4 理论计算模型

理论计算模型采用通用程序ANSYS建立,使其向实际桥梁结构逼近,从而进行刚度识别。主拱

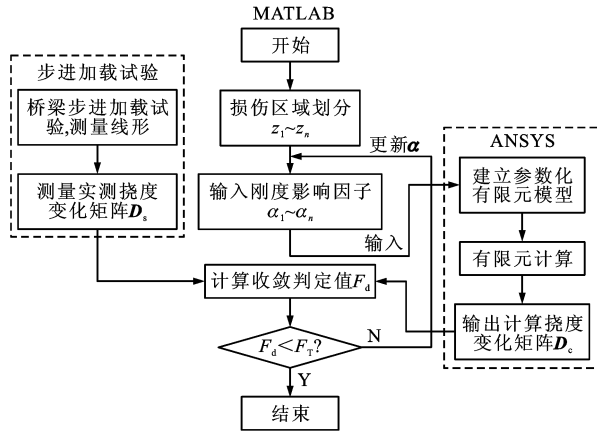


图 2 桥梁步进加载刚度识别流程

Fig. 2 Bridge rigidity identification flow based on step-forward loading



(a) 长兴港大桥

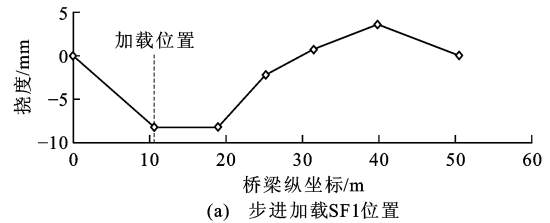


(b) 加载车横向位置

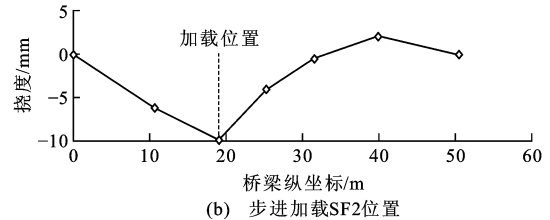
图 3 长兴港大桥与步进加载横向位置

Fig. 3 Changxinggang Bridge and step-forward loading transverse location

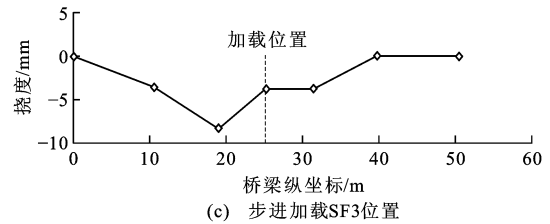
圈和系梁采用 Beam44 单元,不计入剪切变形影响;横梁是变截面的,采用 Beam189 单元,计入截面高度变化。本文主要关注桥梁结构在纵向的受力分析和识别,且挠度实测值及计算值均取自桥面横向两侧,即系梁附近,横梁对挠度的影响很小,因此,未计入横梁及横撑的刚度损失;桥面板和吊杆分别采用



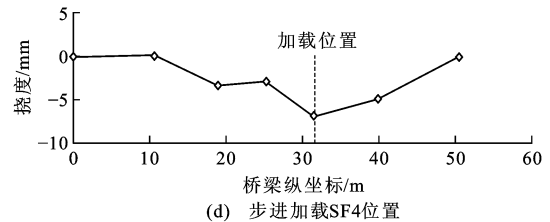
(a) 步进加载SF1位置



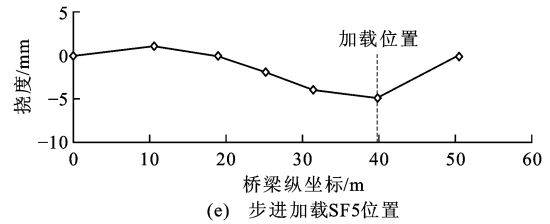
(b) 步进加载SF2位置



(c) 步进加载SF3位置



(d) 步进加载SF4位置



(e) 步进加载SF5位置

图 4 步进加载实测线形

Fig. 4 Measured deflections under step-forward loading

Shell181 和 Link8 模拟。有限元模型单元共计 1 358 个,拱肋及系梁单元大小分别取为 1.2、1.5 m,吊杆仅采用受拉单元,每根吊杆划分为 1 个单元。模型及模拟荷载见图 5。

采用荷载步进加载,按照步进加载的顺序一共有 SF1~SF5 及空载 6 个工况,将 SF1~SF5 的挠度计算结果减去恒载工况即可组合得到计算挠度变化矩阵 D_e 。计算模型按照假定的损伤区域 $z_1 \sim z_7$,采用 APDL 语言编程,将刚度影响因子矩阵 α 参数作为计算模块的输入项,本文中

$$\alpha = [\alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_7]$$

刚度由材料的弹性模量 E 和截面特性值共同决定,其对挠度和线形的影响是相同的,因此,不少

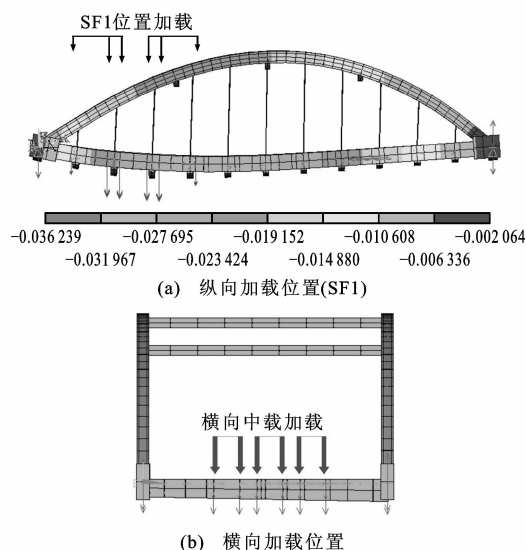


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

学者通过修正 E 来实现模型的刚度变化^[13-16], 本文也采用这种方法。同时, 应注意修正 E 时应力及应变已不具有工程意义, 不能作为收敛判定值进行计算。当优化过程满足收敛条件时, 用 α 修正模型刚度即得到最为接近实际桥梁结构的刚度参数。

1.5 参数更新

由前述识别原理可知, 当收敛判定值 F_d 不满足收敛条件时, 表明理论模型的刚度参数与实际结构相差较大, 导致各步进加载位置的线形偏差较大, 这时需要更新刚度影响因子, 直至 F_d 逼近收敛条件, 这一更新过程可以结合工程经验完成, 但通常工作量较大。此外, 有学者利用 ANSYS 程序中的优化模块(基于零阶和一阶优化算法)进行参数识别和优化设计^[17-18], 本文采用无约束单目标优化算法^[19-20], 收敛判定值 $F_d < 0.01$ 时认为逼近完成。

2 识别方法验证

为验证步进加载识别方法的有效性, 分 2 种情况对其进行验证: 单一区域刚度损失, 损伤程度不同; 多区域刚度损失, 损伤程度不同。首先排除测量误差的影响, 实测挠度变化矩阵 D_s 取自发生损伤后的理论计算值; 刚度影响因子初始值均取为 1, 识别结果若小于 1, 则表示存在刚度损失, 例如 0.8 表示相对于初始模型实际刚度为 80%, 损失了 20%, 识别结果若大于 1, 则表明实际刚度大于初始模型刚度。

2.1 单一区域损伤

分别假设损伤区域 z_2 损伤 25%, z_5 损伤 20%,

z_7 损伤 30% 等 3 种情况, 计算得到对应的挠度变化矩阵 D_1 、 D_2 、 D_3 。当识别的刚度损伤情况与实际情况越接近时, 二者由于步进加载产生的线形变化之间的差异也越小, 即 F_d 越小。识别过程见图 6, 情况 1、2 中 F_d 相对于初始值显著减小, 逼近完成时分别减小至 2.1%、2.6%。识别结果见图 7, 情况 1、2 的识别精度也较高, 分别为 0.7%、0.5%。而对于情况 3, 即拱脚区域发生损伤时, 识别误差达到 44.2%, F_d 逼近至初始值的 58.9%, 表明拱脚部位刚度变化对活载作用下的桥面线形不敏感, 识别结果误差较大。

2.2 多区域损伤

在多区域损伤识别方法验证中, 假定 $z_2 \sim z_6$ 区域分别发生刚度变化, 刚度影响因子分别为 0.7、1.2、1.3、0.8、1.1; z_1 、 z_7 区域影响因子为 1.0, 即未发生刚度变化。识别过程见图 6, 经过 148 次搜索后, F_d 逼近至初始值的 1.0%, 表明识别刚度所产生的线形已接近理想线形。识别结果见图 7, 除 z_1 、 z_7 区域外, 其余识别区域与假定值之间的平均误差为 6.6%, 识别精度较高; 拱脚位置(z_1 、 z_7 区域)的识别结果不能反映真实情况, 误差在 14.7%~25.3%之间, 已超出工程允许精度范围, 但其误差对其他区域识别精度的影响较小。

3 实桥测试

以上基于有限元计算模型对算法进行了验证, 为说明步进加载识别法的可行性, 以长兴港大桥为例进行步进加载试验, 得到实测挠度变化矩阵 D_s 为

$$D_s = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ -8.346 & -6.305 & -3.565 & 0.252 & 1.196 \\ -8.182 & -9.866 & -8.165 & -3.356 & -0.007 \\ -2.280 & -4.055 & -3.890 & -2.895 & -1.780 \\ 0.753 & -0.524 & -3.715 & -6.904 & -3.922 \\ 3.546 & 2.025 & -0.085 & -4.782 & -4.786 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$

长兴港大桥识别过程见图 8(a), 采用修正前实测矩阵进行识别, 逼近过程趋于收敛时, 累计偏差 F_d 为初始值的 57.5%, 说明无论如何修正, 得到的桥梁理论变形与实桥变形仍存在一定差异。引起偏差的主要原因有: 桥梁挠度以毫米计, 测量精度较差时引起的实测线形产生较大偏差, 导致模型不能充分逼近; 模型的识别区域划分较粗略, 导致理论线形不能充分逼近。识别误差主要受前

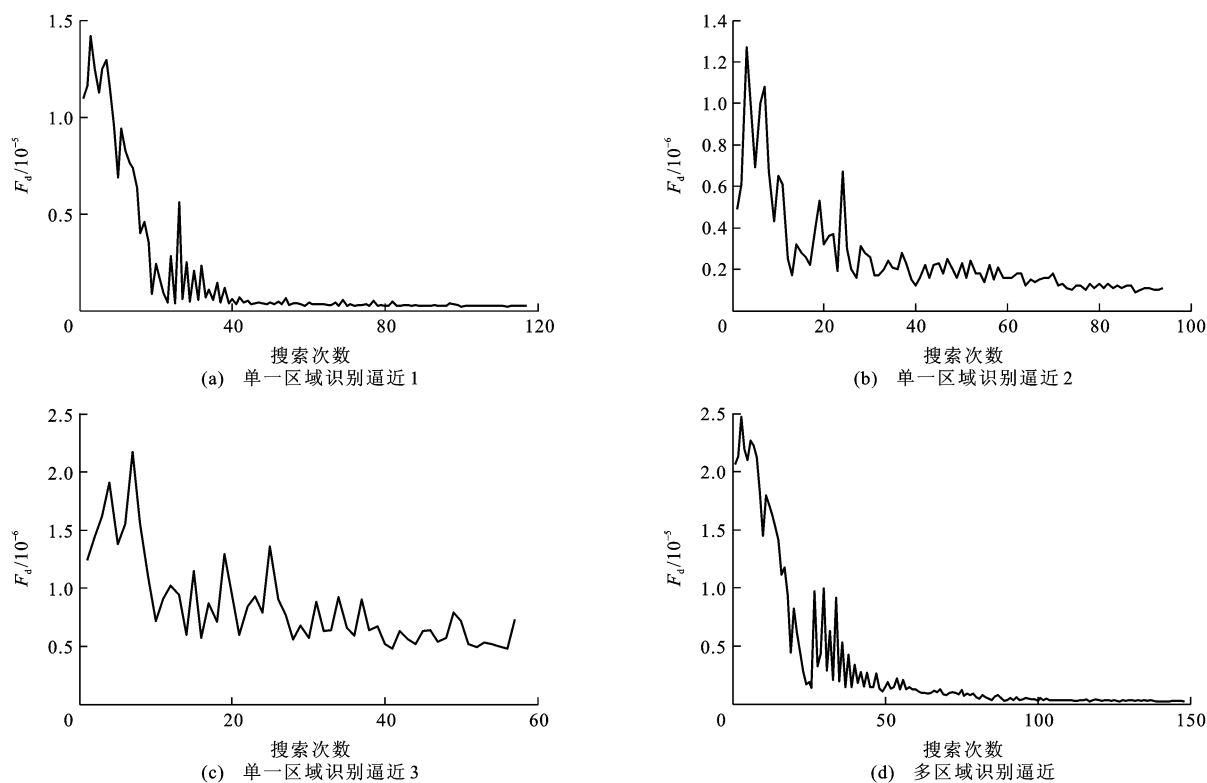


图 6 识别收敛逼近过程

Fig. 6 Convergence approximation process of identification

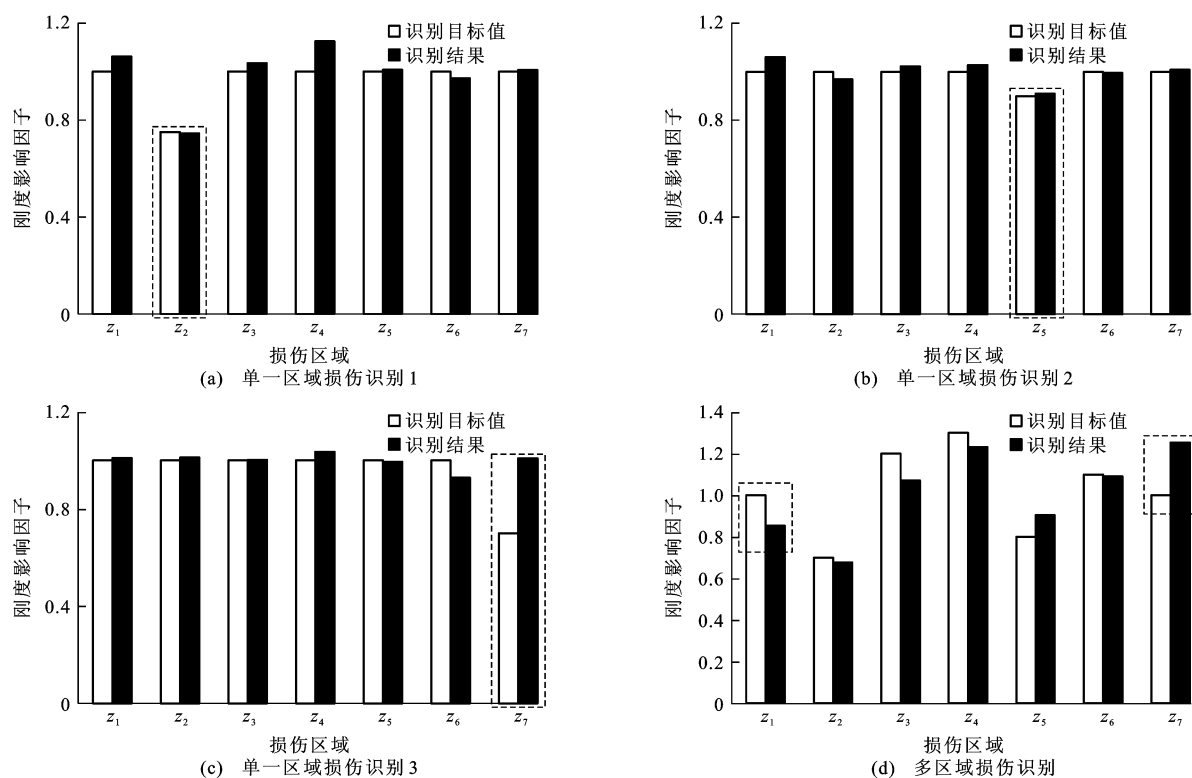


图 7 识别方法验证

Fig. 7 Verification of identification method

者的限制。

通常即使结构发生损伤,测量出的线形仍是平

滑、连续的,依此,对测试数据进行修正,如步进加载至跨中时的测试曲线,根据三次多项式拟合测量数

据(图 8(b)),对偏差较大的测点进行修正, F_d 逼近水平可提高 18%。识别完成后的刚度影响因子见图 8(c),可见沿桥梁纵向损伤较大的部位在 z_3 、 z_4 区域,刚度损失范围为 45%~55%。 z_2 、 z_5 、 z_6 区域的识别刚度为理论刚度的 1.7~1.8 倍,这主要是由于初始模型未考虑结构普通钢筋、实桥弹性模量、整体化混凝土桥面对桥梁整体刚度的有利影响。

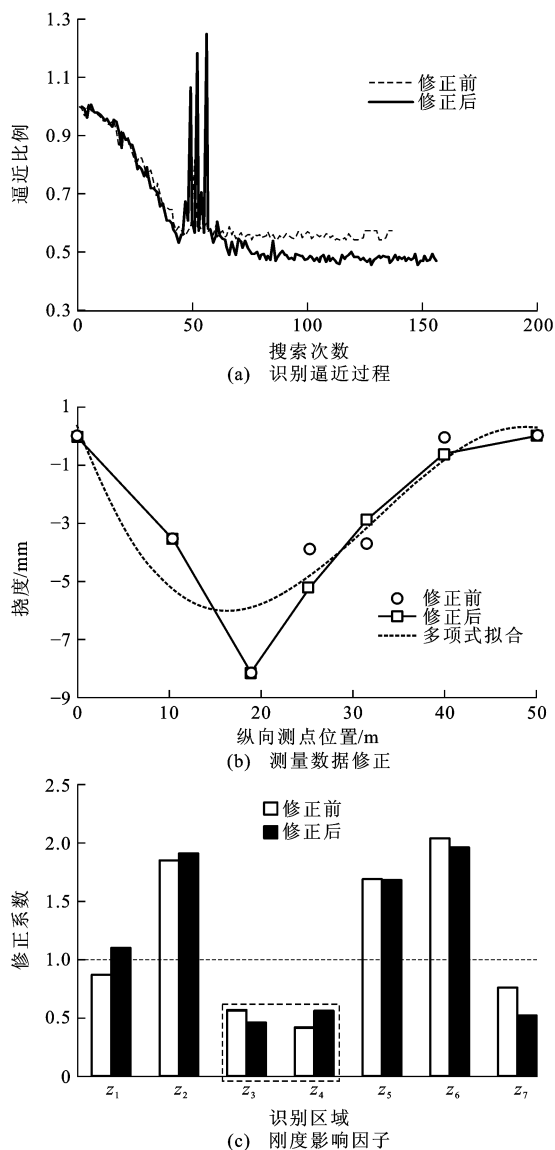


图 8 长兴港大桥刚度识别结果

Fig. 8 Rigidity identification result of Changxinggang Bridge

4 结 语

(1)采用步进加载法得到实测挠度变化矩阵,以累计偏差为收敛条件,对初始模型进行更新,可以对桥梁进行损伤识别。

(2)理论计算表明,采用基于挠度数据的混凝土桥梁识别方法可以对单一区域损伤和多区域损伤进

行损伤定位和量化识别,识别精度达到 6.6%;对拱脚位置的识别精度较差,表明拱脚对步进加载线形不敏感。

(3)实桥测试表明,线形测试水平对识别结果有较大影响,通过多项式拟合修正部分数据可提高逼近水平,更加精确的步进加载识别应保证线形的测试精度。

(4)识别得到的刚度分布数据可为结构的进一步受力分析提供量化参考指标。在下一步的研究中,将主要增加挠度测点的数量、测量精度,提高识别部位精度和量化水平。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 易伟建,段素萍.带裂缝钢筋混凝土梁的非线性振动特征识别[J].振动与冲击,2008,27(3):26-29,41.
YI Wei-jian, DUAN Su-ping. Identification of nonlinear dynamical characteristics of cracked reinforced concrete beam[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(3): 26-29, 41. (in Chinese)
- [2] MORDINI A, SAVOV K, WENZEL H. The finite element model updating: a powerful tool for structural health monitoring[J]. Structural Engineering International, 2007, 17(4): 352-358.
- [3] MAECK J. Damage assessment of civil engineering structures by vibration monitoring[D]. Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 2003.
- [4] REN Wei-xin, DE ROECK G. Structural damage identification using modal data. II: test verification[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(1): 96-104.
- [5] CHOI I Y, LEE J S, CHOI E S, et al. Development of elastic damage load theorem for damage detection in a statically determinate beam[J]. Computers and Structures, 2004, 82(29/30): 2483-2492.
- [6] 向天宇,赵人达,刘海波.基于静力测试数据的预应力混凝土连续梁结构损伤识别[J].土木工程学报,2003,36(11):79-82.
XIANG Tian-yu, ZHAO Ren-da, LIU Hai-bo. Damage detection of prestressed concrete continuous beam from static response[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11): 79-82. (in Chinese)
- [7] 向天宇,赵人达,蒲黔辉,等.基于静力测试数据的装配式混凝土简支梁有限元模型修正[J].公路交通科技,2006,23(10):79-82.
XIANG Tian-yu, ZHAO Ren-da, PU Qian-hui, et al. Updating of prefabricated simply supported beam FE model based on static measurement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(10): 79-82. (in Chinese)

(下转第 43 页)

- 2007, 7(6): 70-75. (in Chinese)
- [16] 魏永幸, 罗强, 邱延峻. 斜坡软弱地基填方工程技术研究与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
WEI Yong-xing, LUO Qiang, QIU Yan-jun. Research and Practice on Technology of Embankment over Sloped Weak Ground[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)
- [17] 黄明星. 桩网结构处治斜坡软弱地基填方工程效果的数值分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
HUANG Ming-xing. The numerical analysis of pile-net structure reinforce embankment over slope weak ground[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [18] 吴沛沛. 带系梁的桩网结构在处理斜坡软基中的应用[J]. 高速铁路技术, 2012, 3(3): 14-17.
WU Pei-pei. Application of RC pile-net structure with collar beam in soft foundation on slope[J]. High Speed Railway Technology, 2012, 3(3): 14-17. (in Chinese)
- [19] BRINKGREVE R B J. PLAXIS 2D-Version 8 Reference Manual[M]. Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 2002.
- [20] 章定文. 软土地基上高速公路扩建工程变形特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
ZHANG Ding-wen. Research on the deformation features of widening of highway on soft ground[D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese)
- (上接第16页)
- [8] 张启伟, 范立础. 利用动静力测量数据的桥梁结构损伤识别[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1998, 26(5): 528-532.
ZHANG Qi-wei, FAN Li-chu. Damage detection for bridge structures based on dynamic and static measurements[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1998, 26(5): 528-532. (in Chinese)
- [9] 张家弟, 刘军. 基于静力响应的桥梁结构损伤识别[J]. 国外建材科技, 2006, 27(2): 105-107.
ZHANG Jia-di, LIU Jun. Bridge structure damage identification based on static response[J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 2006, 27(2): 105-107. (in Chinese)
- [10] BANAN M R, HJELMSTAD K D. Parameter estimation of structures from static response. I: computational aspects[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(11): 3243-3258.
- [11] TEUGHELS A, MAECK J, DE ROECK G. Damage assessment by FE model updating using damage functions[J]. Computers and Structures, 2002, 80(25): 1869-1879.
- [12] 邓苗毅, 任伟新. 基于实测挠度、转角和曲率的细长梁分段抗弯刚度识别研究[J]. 实验力学, 2007, 22(5): 483-488.
DENG Miao-yi, REN Wei-xin. Study of threadlike beam segment flexural rigidity identification based on displacement, angular distortion & curvature response under static load tests[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(5): 483-488. (in Chinese)
- [13] 单德山, 李乔, 王玉珏. 既有多梁式桥梁的损伤识别[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(1): 5-8, 16.
SHAN De-shan, LI Qiao, WANG Yu-jue. Damage identification of existed multi-girders highway bridges[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2008, 27(1): 5-8, 16. (in Chinese)
- [14] 周敕, 贺拴海, 袁万城. RC梁桥承载力的振动测试评估方法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 62-67.
ZHOU Mi, HE Shuan-hai, YUAN Wan-cheng. Capacity evaluation of RC girder bridge with vibration testing technique[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 62-67. (in Chinese)
- [15] 张志恒, 杨晓峰. 湘江某引航道系杆拱桥静载试验研究和数值模拟[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2012, 26(2): 91-96.
ZHANG Zhi-heng, YANG Xiao-feng. Numerical simulation and static load test on tied arch bridge of approach channel[J]. Journal of University of South China: Science and Technology, 2012, 26(2): 91-96. (in Chinese)
- [16] 易伟健, 周云, 曹冰. 无粘结预应力钢筋混凝土梁的静动力实验研究及刚度识别[J]. 振动与冲击, 2008, 27(1): 71-75.
YI Wei-jian, ZHOU Yun, CAO Bing. Static and dynamic experiment study and stiffness identification of an unbonded prestressed concrete beam[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(1): 71-75. (in Chinese)
- [17] 郭彤, 李爱群, 费庆国, 等. 零阶与一阶优化算法在悬索桥模型修正中的应用对比分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(4): 35-38, 68.
GUO Tong, LI Ai-qun, FEI Qing-guo, et al. Application comparison between zero-order and first-order optimization methods in model updating of suspension bridges[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(4): 35-38, 68. (in Chinese)
- [18] 邓杨芳. 优化理论及ANSYS程序在桥梁优化设计中的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
DENG Yang-fang. Study on optimization theory and application of ANSYS program in bridge optimal design[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [19] 孙小猛, 冯新, 周晶. 基于损伤可识别性的传感器优化布置方法[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(2): 264-270.
SUN Xiao-meng, FENG Xin, ZHOU Jing. A method for optimum sensor placement based on damage identifiability[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(2): 264-270. (in Chinese)
- [20] ZORDAN T, BRISEGHIELLA B, LIU T. Finite element model updating of a tied-arch bridge using Douglas-Reid method and Rosenbrock optimization algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(4): 280-292.