

恒载作用下梁和桥梁的损伤识别研究

刘 纲^{a,b}, 黄宗明^a, 杨 溥^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院, 重庆 400030; b. 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要:提出了桥梁长期健康监测中基于恒载进行梁及桥梁损伤识别的方法。首先从正分析入手计算超静定梁仅在恒载作用下发生损伤的特征表现,通过分析不同监测参量及测点对损伤的敏感度,研究仅在恒载下监测参量选取及测点布置的特点;再从反分析出发通过改进的自适应遗传算法求解有约束的优化问题,研究仅在恒载作用下识别梁损伤的可行性,分析结果表明通过较少测点即可对梁的损伤进行识别,为基于恒载的损伤识别方法在实桥健康监测中的应用提供了理论指导。

关键词:损伤识别;恒载;有限测点;桥梁

中图分类号:U448.12 文献标志码:A 文章编号:1006-7329(2008)05-0028-04

Damage Detection for Beam and Bridge under Dead Load

LIU Gang^{a,b}, HUANG Zong-ming^a, YANG Pu^{a,b}

(a. College of Civil Engineering, Chongqing University; b. The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & System of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: We address damage detection based on dead loads in monitoring the health of beams and bridges. We discuss the damage characteristics of statically indeterminate beams under dead loads and analyze monitoring parameters and sensor placement in monitoring. We used an amended genetic algorithm to solve the optimization problem under constrained parameters. Damage in a beam was detected successfully based on dead loads with limited sensor allocations. We present a way to detect damage based on dead loads in bridge health monitoring.

Key words: damage detection; dead load; limited sensor location; bridge

静态测试具有方法成熟,精度较高等优点。不少学者对静态测试数据在结构损伤识别中的应用进行了研究。Sanayi^[1-2]采用静态应变成功识别了结构的参数,崔飞^[3]等利用静态应变及位移采用梯度法和 Monte-Carlo 法对一平面桁架的损伤进行了识别。传统的静态损伤识别思路是在结构上作用多个荷载工况,通过对比损伤前后各工况下应变或位移的变化来识别损伤部位及程度,但在桥梁长期健康监测中,作用在桥梁上的荷载大小和位置往往是未知的,所以基于加载的静态损伤识别方法在桥梁健康监测中的应用受到了一定的限制。

考虑到桥梁的运营特点,在某个时段内,比如城市桥梁在凌晨时段,其上未作用车辆荷载或车辆荷载很小,故通过对健康监测数据的分析易获得桥梁在恒载

作用下的反应。因此,本文提出仅利用恒载对梁及连续梁桥的损伤进行识别的思路。首先,对基于恒载的损伤识别原理进行了分析;然后采用正分析手段分析两端固支梁在恒载作用下发生损伤的特征表现,研究仅在恒载作用下,如何对监测参数类型进行选择及布置监测测点;再以改进的自适应遗传算法求解有约束的优化问题进行损伤识别研究,分析在稀疏测点情况下,基于恒载的损伤识别的鲁棒性问题。

1 基于恒载的损伤识别理论

结构在静力荷载作用下的方程为:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

由于并不是对桥梁所有自由度上的位移都进行测试,将式(1)分为测试自由度及未测试自由度上的刚

* 收稿日期:2008-06-11

基金项目:国家 863 计划项目(2006AA04Z433);重庆市科技攻关重大专项(7289)

作者简介:刘纲(1977-),男,讲师,博士生,主要从事桥梁健康监测研究。(E-mail)gliu@cqu.edu.cn

度、位移及力,以下标 a 表示测试自由度,下标 b 表示未测试自由度^[2],有:

$$\begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} \\ k_{ba} & k_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_a \\ F_b \end{Bmatrix} \quad (2)$$

由(2)式的第 2 个方程展开并整理可得:

$$\{u_b\} = [k_{bb}]^{-1} (\{f_b\} - [k_{ba}]\{u_a\}) \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式中的第一个方程,有:

$$\{u_a\} = [C_1]^{-1} \{F_a\} - [C_1]^{-1} [C_2] \{F_b\} \quad (4)$$

其中: $[C_1] = ([k_{aa}] - [k_{ab}][k_{bb}]^{-1}[k_{ba}])$, $[C_2] = [k_{ab}][k_{bb}]^{-1}$ 。由(4)式,当结构发生损伤时有:

$$\{u_a^D\} = [C_1^D]^{-1} \{F_a^D\} - [C_1^D]^{-1} [C_2^D] \{F_b^D\} \quad (5)$$

式(5)中上标 D 表示结构发生损伤。如果仅考虑结构自身的恒载作用,可以认为损伤前后结构的恒载不发生改变,即 $\{F_a^D\} = \{F_a\}$, $\{F_b^D\} = \{F_b\}$, (4)式减去(5)式得:

$$\begin{aligned} \{\Delta u_a\} &= \{u_a\} - \{u_a^D\} \\ &= ([C_1]^{-1} - [C_1^D]^{-1}) \{F_a\} - \\ &\quad ([C_1]^{-1} [C_2] - [C_1^D]^{-1} [C_2^D]) \{F_b\} \quad (6) \end{aligned}$$

在对结构进行损伤识别时,一般将单元弹性模量降低程度 θ 作为识别参数^[4],其定义为:

$$E_i^D = (1 - \theta_i) E_i \quad (7)$$

在式(6)中, $\{F_a\}$, $\{F_b\}$ 为常向量, $([C_1]^{-1} - [C_1^D]^{-1})$, $([C_1]^{-1} [C_2] - [C_1^D]^{-1} [C_2^D])$ 是 θ 的函数,因此(6)式可简写为:

$$\{\Delta u_a\} = F(\theta_i) \quad (8)$$

式中 $F(\cdot)$ 表示 θ_i 与 $\{\Delta u_a\}$ 的函数关系。而单元的应变与位移具有一定的函数关系,即^[5]:

$$\epsilon_i = \{B_i\} \{u_i\} \quad (9)$$

式中 B_i 为单元位移向单元应变转化的向量。因此测点处应变的变化可以表述为:

$$\{\Delta \epsilon_a\} = \{B_i\} F(\theta_i) \quad (10)$$

从式(8)、(10)可以看出,通过测试部分单元应变及位移的变化即可得知单元的损伤情况。

2 梁损伤的正分析

2.1 模型

考虑到桥梁一般为超静定结构,建立两端固支梁的有限元模型,梁长 10 m,划分为等长的 20 个单元,如图 1 所示(图中上排数字编号为节点编号,下排圆圈内的数字编号为单元编号)。截面惯性矩为 $5.4 \times 10^{-3} \text{m}^4$,面积为 0.18m^2 ,材料的弹性模量为 32.5GPa ,

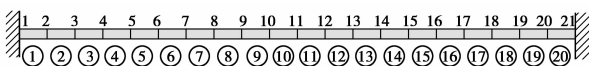
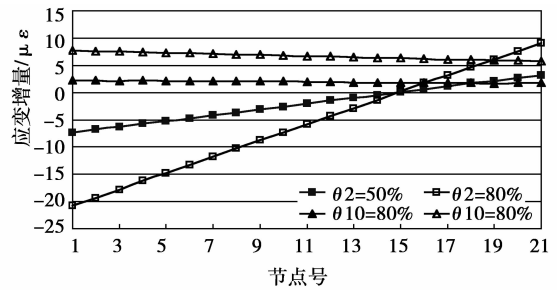


图 1 两端固支梁有限元模型

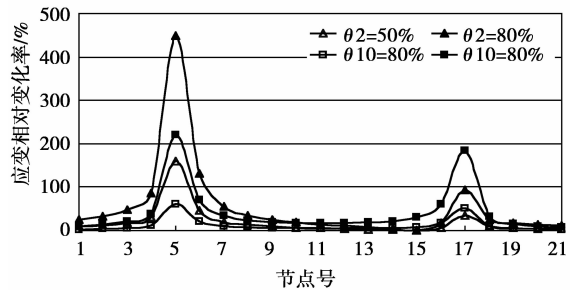
密度为 2700kg/m^3 。

2.2 恒载作用下梁损伤的特征表现

桥梁在使用过程中往往是局部首先出现不同程度的破坏,所以本文仅对梁单处及两处同时出现损伤进行分析。假设单元损伤时,该单元的弹性模量将均匀减小。为对比不同参数的敏感度,考虑实桥结构梁中最易损伤的 2 个部位:支座附近 2 号单元及跨中 10 号单元分别和同时发生 50% 及 80% 损伤共 6 种情况。单元 2、10 的损伤程度分别以 θ_2 和 θ_{10} 表示。



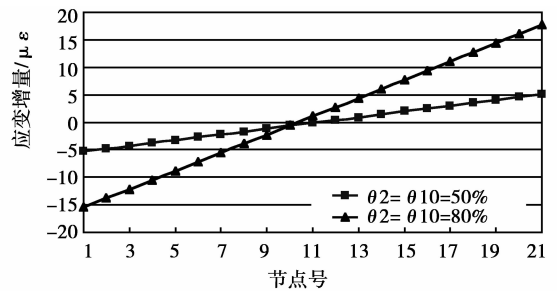
(a)应变绝对对改变量



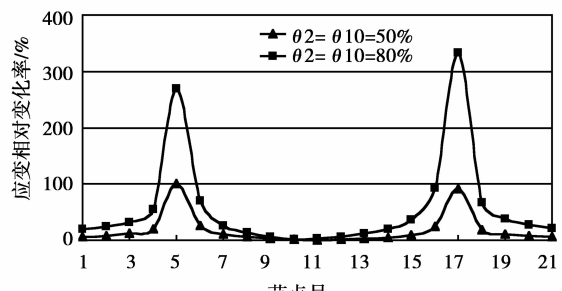
(b)应变相对改变量

图 2 单个单元损伤时节点应变变化情况

注:图中给出的应变为梁底部应变。下同。



(a)应变绝对对改变量



(b)应变相对改变量

图 3 两个单元同时损伤时节点应变变化情况

图2、3给出单元2、10发生损伤时节点的应变变化情况。计算结果表明:在反弯点附近处节点5、17的应变对单元2、10分别和同时损伤时都比较敏感。当单元2单独发生50%损伤时,节点5处的应变减小 $5\mu\epsilon$,改变率可达68%,说明应变对梁仅在恒载作用下发生的损伤比较敏感。

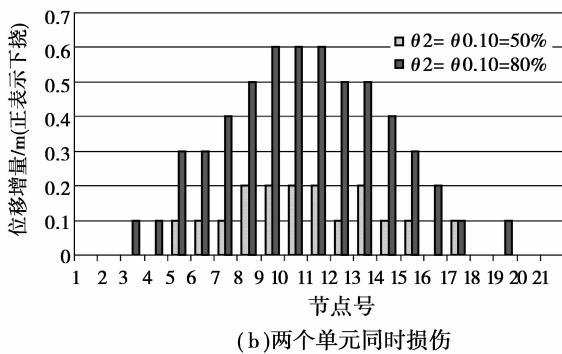
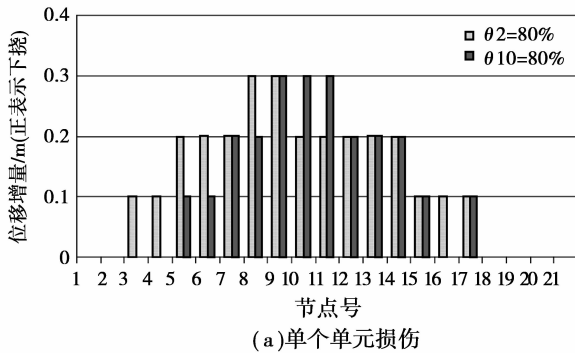


图4 单元损伤时节点位移变化情况

图4给出单元2、10发生损伤时节点的位移变化情况。结果表明,当单元2、10分别发生50%的损伤时,节点的位移增量仅为0.1 mm;即使当单元2、10同时发生80%的损伤,各节点位移增量仍小于0.6 mm,此时位移的增量很难被传感器有效地捕获,因此,对于两端固支梁,仅靠恒载作用对结构的损伤进行识别时,位移参量的敏感度较低。

从以上的分析可知,梁结构仅在恒载作用下,不同的参量及测点对梁损伤的敏感度不同,所以在确定梁的状态监测方案时,应采取基于损伤敏感度的监测参量选取及测点布置原则。对两端固支梁,应采用应变作为监测参量,测点除根据先验知识分布在易损伤单元外,可布置在对不同单元损伤都比较敏感的节点5、17处。

3 损伤识别分析

3.1 工程模型及优化方法

为检验基于恒载进行损伤识别的可行性,采用重庆市市区某三跨立交桥为研究对象,其跨度为25 m+30 m+30 m,截面如图5(a)所示。采用梁单元建立该

桥的有限元模型,并划分为等长的170个单元,模型如图5(b)所示(图中上排数字编号为支座处的节点编号,下排圆圈内的数字编号为模拟发生损伤的单元号)。通过有限元模型的正分析,该立交桥仍为应变参量较位移参量对损伤更敏感,故采用应变对该桥的损伤进行识别。应变测点布置在对各处单元损伤均较敏感的39、63、94和123节点处。

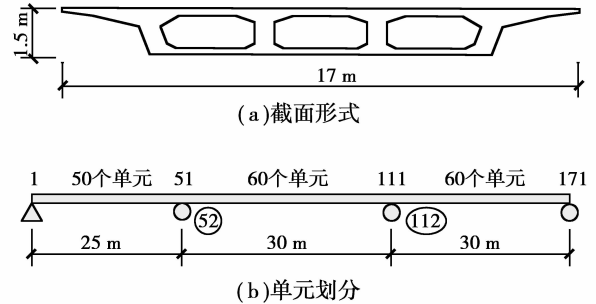


图5 三跨连续梁有限元模型

利用自适应遗传算法求解有约束的优化问题来对结构进行损伤识别。遗传算法采用随机搜索的策略,模拟生物进化规律,经过交叉、突变和选择三个过程,使子代个体的适应度高于其父代个体,从而求得最优解。但遗传算法易早熟,仅收敛到局部最优解,此时可采用自适应方法,即当父代个体的海明距离较小时,通过自适应增大变异率来保持群体的多样性,从而防止早熟^[5,8]。取遗传算法的目标函数为:

$$\text{Min}J(\theta) = \sum_{i=1}^n |(\epsilon_i - \epsilon_i^D) / \epsilon_i| \quad (11)$$

$$s. t \quad 0 \leq \theta \leq 1$$

式中 θ 为单元的损伤程度,0代表未损伤,1代表完全损伤; ϵ 代表最初观测时梁的应变值, ϵ^D 代表损伤后梁的应变值, n 为测点的个数。

考虑到结构的损伤往往出现在个别的地方,对遗传算法进行改进,在标准遗传算法上加入零变异率因子ZMRF^[5],在遗传算法的突变运算完成后,将染色体作如下运算:

$$\text{Chrom}_{\text{new}} = \text{Chrom}_{\text{old}} \cdot r$$

其中: $r = \text{rand}(N, 1)$, $r_i \in (0, 1)$

$$r_i = \begin{cases} 0, & r_i \leq \text{ZMRF} \\ 1, & r_i > \text{ZMRF} \end{cases} \quad (12)$$

式中 \otimes 表示将原染色体和向量 r 逐元相乘, N 为单元的个数。

3.2 识别结果

遗传算法采用实值编码,取交叉率为0.5,初始变异率为0.05,种群大小为40,终止准则为迭代次数小于1000次,ZMRF为0.9。因遗传算法具有随机性,因此对每种情况重复计算100次,考查其收敛于真值

的次数,计算结果如表 1 所示。

从表 1 中可看出,虽两处损伤的识别效果差于单处损伤,损伤较小时的识别效果差于损伤较大时,但收敛于真值的几率都大于 95%,所以改进的遗传算法对损伤识别具有较好的鲁棒性,说明基于恒载及有限测点下对梁及桥梁的损伤进行识别的方法是可行的。

表 1 不同损伤工况下的识别结果

损伤分类	梁类型	损伤工况		识别结果		
		单元号	损伤度 /%	单元号	损伤度 /%	收敛次数
单处损伤	两端	2	20	2	20	100
	固支梁	10	30	10	30	100
	三跨	52	30	52	30	100
	连续梁	112	20	112	20	100
多处损伤	两端	2,10	20	2,10	20	98
	固支梁	3,7	30	3,7	30	99
	三跨	52,112	20	52,112	20	97
	连续梁	52,47	30	52,47	30	95

注:当识别结果一栏中的损伤度与损伤工况一栏中的损伤度的相对误差为 3%以内即认为该次计算收敛。

4 结 语

从以上对两端固支梁及三跨连续梁的正问题和反问题分析可知:本文提出的基于恒载及有限测点下的损伤识别方法是可行的。在恒载作用下,不同测点对梁损伤的敏感程度是不同的,因此除根据先验知识将测点布置在易发生损伤处外,还应采用基于损伤敏感度分析的布点原则,将测点布置在对不同部位损伤均较为敏感处。

参考文献:

[1] SANAYEI M, SALETNIK M J. Parameter estimation of

structure from static strain measurements I: Formulation [J]. Journal of Structural Engineering. 1996, 122(5): 555-562.

[2] SANAYEI M, IMBARO G R, McCLAIN A S, et al. Structural model updating using experimental static measurements [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(6): 792-798.

[3] 崔飞,袁万城,史家钧. 基于静态应变及位移测量的结构损伤识别法[J]. 同济大学学报, 2000, 28(2): 5-8.

CUI Fei, YUAN Wan-cheng, SHI Jia-jun. Damage detection of structures based on static response [J]. Journal of Tongji University, 2000, 28(2): 5-8.

[4] X WANG, N HU, HISAO FUKUNAGA, et al. Structural damage identification using static test data and changes in frequencies[J]. Engineering Structures. 2001, 23: 610 - 621.

[5] XIAOFENG HU. Structural damage identification based on static dead load strain measurements[D]. University of Delaware, 2002.

[6] JUAN MARTIN CAICEDO. Structural health monitoring of flexible civil structures [D]. Washington university, 2003.

[7] I YEO, S SHIN, H S LEE, et al. Statistical damage assessment of framed structures from static response[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(4): 414-421

[8] 于歆杰,周根贵. 遗传算法与工程优化[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

[9] 尹涛,朱宏平,余岭. 运用改进的遗传算法进行框架结构损伤检测[J]. 振动工程学报, 2006, 19(4): 525-531.

YIN Tao, ZHU Hong-ping, YU Ling. Application study of an improved genetic algorithm for frame structure damage detection[J]. Journal of Vibration Engineering, 2006, 19(4): 525-531.

(编辑 王秀玲)