

文章编号:1673-2049(2011)02-0062-07

基于应变指标的桥梁损伤识别方法

王艺霖,刘西拉,方从启

(上海交通大学 土木工程系,上海 200240)

摘要:为了更好地实现桥梁的损伤识别、确保结构安全,探讨了应变指标(弯曲正应变和剪切应变)在桥梁损伤识别中的应用,给出了具体的应用方式,并通过多个数值模拟实例进行了验证;考虑到该指标的显著局部性,给出了测点优化布置的方法;考虑实际应用时的具体情况,分析了该方法识别结果的存在性、唯一性和稳定性问题,给出了有效的处理方法,使之有了很强的实用性。结果表明:该方法能直接发现损伤,对小损伤比较敏感,而且处理方式简单、结果可靠。

关键词:桥梁;损伤识别;应变指标;弯曲正应变;剪切应变

中图分类号:U441.4

文献标志码:A

Bridge Damage Detection Method Based on Strain Index

WANG Yi-lin, LIU Xi-la, FANG Cong-qi

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to safeguard the safety of bridges, capabilities to locate and quantify damage of strain indexes (including bending strain and shear strain) were considered as basic characteristics of the method to be investigated. The application processes of this kind of indexes were proposed and the effectiveness were demonstrated by several numerical simulation examples. The optimization manner of measurement point was also proposed to meet the requirement of actual application. Furthermore, the existence, uniqueness and stability of the detection results were analyzed and then suggestions for improvement were provided. Results show that the method based on strain index is sensitive to tiny damage and allows simple, convenient detection for bridge damages.

Key words: bridge; damage detection; strain index; bending strain; shear strain

0 引言

为了评估在役桥梁结构的实际性能、确保其安全可靠地运行,对其损伤状况进行及时准确地识别是非常重要的。在最近二三十年间,这方面的研究得到了充分的重视,取得了大量的研究成果。很多结构性能参数被用作损伤识别指标,基于指标值的变化来获取损伤信息。这类指标包括:静力位移^[1]、自振频率^[2]、振型^[3]、阻尼^[4]、曲率模态^[5]、应变模

态^[6]、频率响应函数^[7]、模态应变能^[8]等。这些方法都取得了一定的效果,但在实际应用中也暴露出一些问题,其中的2个主要问题是:①对微小损伤不太敏感^[9-10];②受环境因素(如温度)的干扰^[11]。因此,损伤识别方面的研究还有待进一步深入。

桥梁结构常见的损伤类型包括:多种因素作用下的钢材或混凝土的开裂;混凝土出现内部缺陷(空洞、离析、夹层、不密实等)、被碳化;钢构件的材料损伤;混凝土剥落破损;钢筋或钢构件的锈蚀、破损;桥

收稿日期:2011-01-13

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2002CB412709)

作者简介:王艺霖(1981-),男,河南项城人,工学博士研究生,E-mail:xgwang_wang@163.com。

面铺装的破坏等。可见,从理论分析的角度来看,大部分损伤的共同点是都会引起结构局部刚度的变化。因此,从局部刚度入手来识别损伤是目前损伤识别研究的主流方法^[12-21],以上提到的现有指标都和局部刚度有直接或间接的对应关系。

目前,还有一个很常见的指标和局部刚度密切相关却被关注的不多,那就是应变。梁截面的弯曲正应变或剪切应变指标都可以反映出局部刚度的变化,因此可用来识别损伤,而且它们是典型的局部性能指标,可识别多处损伤。

本文中笔者将对基于应变指标的损伤识别问题作深入探讨,在理论分析之后,结合若干实例分析了具体的应用方式和效果,作为典型的反问题,也考虑了对这类方法的不适定性的分析和处理。

1 方法介绍

1.1 基本原理

1.1.1 弯曲正应变

根据材料力学理论,截面上某处的弯曲正应变 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{My'}{EI} \quad (1)$$

式中: M 为弯矩; I 为惯性矩; y' 为该处到中性轴的距离; E 为弹性模量。

1.1.2 剪切应变

弯曲正应变公式普遍适用于多种截面形式的梁,而根据剪切应变的计算理论得到的简单截面(如矩形)上的剪切应变分布规律比较准确,对于一些复杂截面(如工字型、箱形),则由于剪切应变分布规律复杂、计算时用到的假设较多,精度不高。

对于矩形截面,同样根据材料力学理论,最大剪切应变 ϵ_{\max} 出现在中性轴上,其值为

$$\epsilon_{\max} = \frac{3}{2} \frac{F_s}{Ebh} \quad (2)$$

式中: F_s 为截面所受的剪力; b 、 h 分别为截面的宽度和高度。

显然,一旦截面出现几何损伤导致惯性矩 I 变化或材料损伤导致弹性模量 E 变化,则对应的弯曲正应变、剪切应变就会发生变化。

1.2 应用方式

无论是简支梁、连续梁桥还是斜拉桥,在外加集中力作用下,主梁受的都是集中力作用(外荷载、若干支座反力和索力),在每个区域内,弯矩的分布都是线性的,剪力值是个常量。

考虑弯曲正应变指标:在结构完好的情况下,具

有相等 y' 值的各截面应变分布也应该是线性的。如果某处出现了损伤,则该处的应变将发生突变,不再符合线性规律,据此可很容易地发现损伤。

因此,可在梁间距尽量小的各截面上 y' 最大处(外边缘)布置应变传感器,对桥梁在某处施加一集中荷载,考察各集中力之间各区段内的正应变数据状况,如果没有损伤,则各区段内的应变数据应符合线性规律,如果某测点的数据不符合这一线性规律,则说明该处出现了损伤。当然传感器不一定非要布置在截面外边缘表面处,对于混凝土结构桥梁,也可采用埋入式布置,只要保证各个传感器距截面中性轴的距离 y' 一致即可。

考虑剪切应变指标:如前所述,这一指标主要用于矩形截面。最大剪应力和剪切应变一般都出现在中性轴上,因此可在该处布置传感器以监测剪切应变。同样可根据外荷载作用下某区段内某点剪切应变数据相比周围测点数据的突变来判断损伤。对钢梁,可直接在截面中性轴处的外表面布置传感器,对混凝土梁,可选择表面式或埋入式布置。

对于矩形截面梁,可同时采用弯曲正应变和剪切应变这2个指标,对这2个指标进行对比分析,得到更多的损伤判别信息,具体在下面结合简支梁的实例说明。

1.3 测点的优化布置

对各种实际损伤情况又可分为2类:一是受力引起的,如大应力或循环荷载作用导致的开裂;二是外界侵蚀作用造成的,如钢筋和钢构件锈蚀或混凝土碳化等。可基于此来考虑测点的优化布置问题:

(1)对于应力超限引起的开裂情况,实际桥梁在正常运营情况下可不考虑,因为在设计时已经充分考虑了这个因素,保证了各处的局部应变不会接近限值,而且应变中大部分都是由恒载贡献的,这是无法通过应变传感器测得的,因此,这部分主要考虑活载引起的循环荷载作用下可能出现的疲劳开裂。桥梁主要承受的活载是车辆荷载,因此可根据桥梁的有限元模型,计算其在车辆荷载下的截面弯曲正应力分布情况,观察应力较大值所在的区段,对其进行重点监测。

(2)对于外界侵蚀作用,可根据桥梁所在环境的具体情况,判断出哪些区段受氯离子侵蚀和有害物质作用较强,结合以上的结果来最终确定重点监测区段。

该方法对于大型桥梁的意义更大,所以下面将以斜拉桥为例来进行具体说明。

1.4 变截面的情况

以上给出了弯曲正应变分布的线性规律作为损伤判别的标准,它有个潜在的条件是各截面的刚度一致。如果某桥梁采用了变截面的形式,则需要稍加变通处理:根据实际情况计算出某区段内的截面刚度变化规律,结合弯矩的线性规律,即可得到无损伤情况下的各截面弯曲正应变分布规律。损伤的出现破坏了这一规律,发生了突变,可据此发现损伤。

2 实例分析

2.1 矩形截面简支梁桥

考虑一跨度为 10 m 的简支梁桥,矩形截面宽 6 m,高 0.7 m,材料为 C35 混凝土,弹性模量 $E=32.5\text{ GPa}$,泊松比为 0.2,其中 x 为损伤区域到梁最左端的距离; y 为损伤区域的长度。设定 3 处损伤状况:① $x=2\text{ m}$, $y=0.2\text{ m}$,有效宽度减小为 5.5 m;② $x=6\text{ m}$, $y=0.2\text{ m}$,有效高度减小为 0.5 m;③ $x=9\text{ m}$, $y=0.2\text{ m}$, E 减小为 31 GPa。

在跨中 $x_1=5\text{ m}$ 处加集中力 $F=1\,000\text{ kN}$, x_1 为截面到梁左端的距离,得到各截面弯曲正应力增量如图 1 所示。

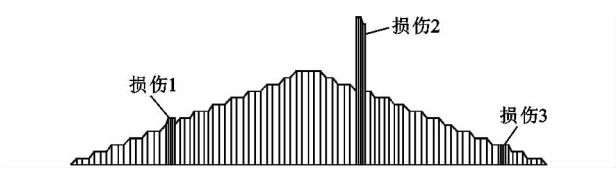


图 1 集中力作用于跨中 $x_1=5\text{ m}$ 处的弯曲正应力增量

Fig. 1 Increments of Bending Stresses when $x_1=5\text{ m}$ at Mid-span Under Concentrated Force

由图 1 可以看出:在损伤 1、2 位置处出现了明显的应力增量突变,据此可容易地发现损伤;在损伤 3 处应力没有突变,但该处弹性模量 E 变化了,换算成应变图后即可清楚地发现该处损伤。各截面的剪应力增量如图 2 所示。

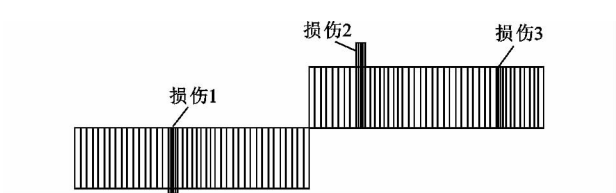


图 2 集中力作用于跨中 $x_1=5\text{ m}$ 处的剪应力增量

Fig. 2 Increments of Shear Stresses when $x_1=5\text{ m}$ at Mid-span Under Concentrated Force

由图 2 可以看出,利用剪应力增量图同样能识别出 3 处损伤。

对比图 1 和图 2 可以发现,图 2 中损伤 2 和损伤 1 造成的突变程度差别不大,而图 1 中,这种差别得到了显著放大,根据式(1)、(2)可知,这种差别代表了损伤 2 主要是截面高度的损伤。

2.2 箱形截面简支梁桥

某预应力混凝土简支梁桥长 56 m,单箱单室,梁高 3.8 m,宽 2.6 m,壁厚 0.5 m,材料为 C40 混凝土, $E=32.5\text{ GPa}$ 。设定 3 处损伤状况:① $x=10\text{ m}$, $y=0.2\text{ m}$,有效宽度减小为 2.5 m;② $x=30\text{ m}$, $y=0.2\text{ m}$,有效高度减小为 3.7 m;③ $x=45\text{ m}$, $y=0.2\text{ m}$, E 减小为 32 GPa。

为了与现有方法作对比,首先计算该桥在损伤前后的自振频率和振型。根据有限元模型的计算结果,该桥在损伤前后的前 3 阶自振频率和振型如表 1 所示。

表 1 简支梁桥前 3 阶自振频率和振型
Tab. 1 The First Three Vibration Frequencies and Vibration Modes of Simply Supported Beam Bridge

阶次	状态	自振频率/Hz	振型描述
1	损伤前	1.641 442	对称横弯
	损伤后	1.641 223	
2	损伤前	2.283 662	竖弯
	损伤后	2.283 158	
3	损伤前	6.439 196	反对称横弯
	损伤后	6.437 230	

表 1 中设定的损伤状况所造成的前 3 阶自振频率的变化不超过 10^{-3} 。前 3 阶的振型则完全没有发生变化。可见,要基于自振频率和振型指标的变化来识别出这种损伤是不现实的。

采用本文方法,在跨中 $x_1=28\text{ m}$ 处加集中力 $F=1\,000\text{ kN}$,得到对应的弯曲正应力增量如图 3 所示。

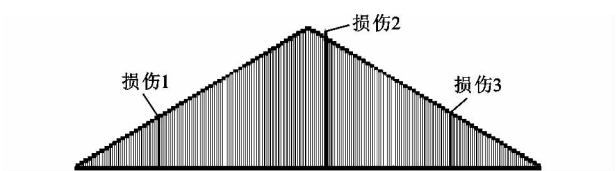


图 3 集中力作用于跨中 $x_1=28\text{ m}$ 处的弯曲正应力增量

Fig. 3 Increments of Bending Stresses when $x_1=28\text{ m}$ at Mid-span Under Concentrated Force

由图 3 可以看出,在损伤 1、2 位置处出现了明显的应力增量突变,据此可容易地发现损伤。

损伤 3 处同样是弹性模量 E 的变化,换算成应变图后即可清楚地发现。可见,本文方法对损伤的识别是很有效的。图 4 为简支梁桥损伤情形。

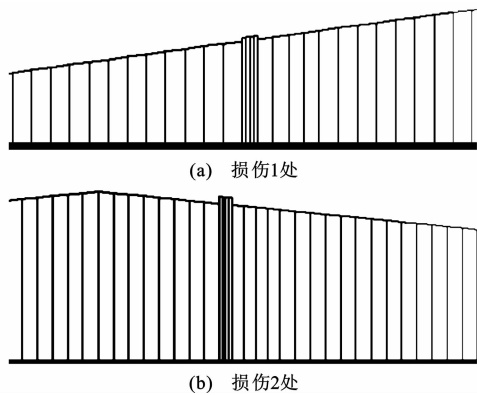


图 4 简支梁桥损伤情形

Fig. 4 Damage States of Simply Supported Beam Bridge

2.3 连续梁桥

某预应力混凝土连续梁桥(5×50 m),单箱单室,梁高 3 m,宽 6 m,壁厚 0.4 m,材料为 C40 混凝土, $E=32.5\text{ GPa}$ 。设定 4 处损伤状况:① $x=40\text{ m}$, $y=0.2\text{ m}$,有效高度减小为 2.9 m;② $x=80\text{ m}$, $y=0.2\text{ m}$,有效高度减小为 2.8 m;③ $x=125\text{ m}$, $y=0.3\text{ m}$,有效高度减小为 2.9 m;④ $x=210\text{ m}$, $y=0.2\text{ m}$,有效高度减小为 2.8 m。对比该桥在损伤前后的前 3 阶自振频率和振型可知,要基于自振频率和振型指标的变化来识别出这 4 种损伤同样是不行的。

按照本文方法,在跨中 $x_1=125\text{ m}$ 处加集中力 $F=100\text{ kN}$,得到对应的弯曲正应力增量如图 5 所示。

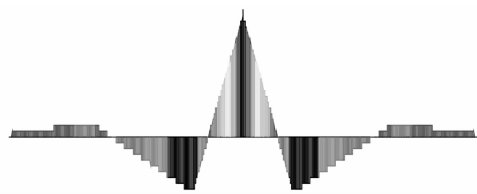


图 5 集中力作用于跨中 $x_1=125\text{ m}$ 处的弯曲正应力增量

Fig. 5 Increments of Bending Stresses when

$x_1=125\text{ m}$ at Mid-span Under Concentrated Force

图 6 为连续梁桥损伤情形。由图 6 可以看出,在 4 个损伤位置处出现了明显的应力增量突变,据此可容易地发现损伤。

2.4 斜拉桥

某双塔双索面稀索斜拉桥,采用五跨连续半漂浮体系,桥跨布置为 $80\text{ m}+90\text{ m}+260\text{ m}+90\text{ m}+80\text{ m}$,混凝土索塔横向呈 H 形。拉索弹性模量为 196 GPa ,重度为 $7.85\times10^4\text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$,截面面积有 2 种,分别为 $71.97, 58.11\text{ cm}^2$ 。主梁的弹性模量为 200 GPa ,重度为 $8.5\times10^4\text{ N}\cdot\text{m}^{-3}$,箱形截面,宽

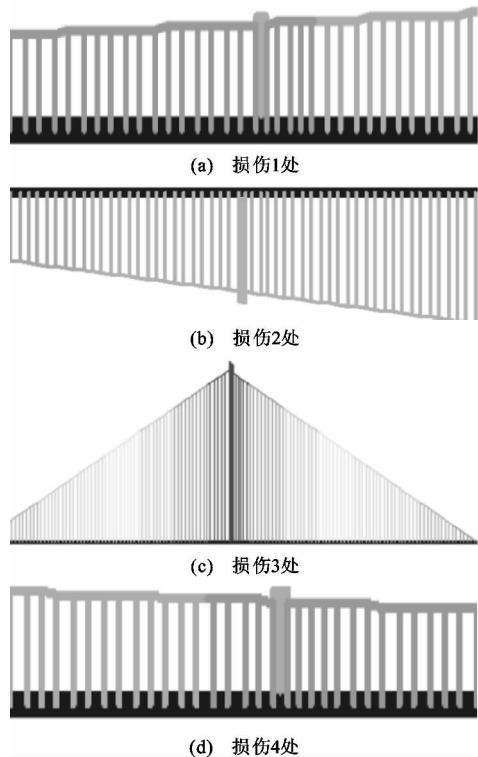


图 6 连续梁桥损伤情形

Fig. 6 Damage States of Continuous Beam Bridge

19 m,高 3.5 m,壁厚 20 mm。索塔与主梁之间有竖向和横向约束,辅助墩与主梁之间设置竖向约束,过渡墩与主梁之间设置竖向和横向约束。恒载方面除自重外考虑二期恒载,包括护墙、5 cm 厚环氧沥青铺装荷载等,按 $31\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 计入。对该桥建立有限元模型,主梁、横梁、主塔均采用空间梁单元模拟,斜拉索采用只受拉桁架单元模拟。全桥共 587 个节点,582 个单元。斜拉桥模型如图 7 所示。

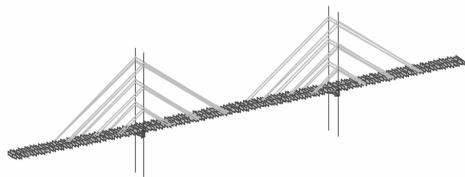


图 7 斜拉桥模型

Fig. 7 Model of Cable-stayed Bridge

重点监测区段的确定。对于这种大型桥梁,要对全桥很密集地布置应变测点是不现实的,需要关注测点的优化布置问题:

首先讨论荷载作用的情况,主要考虑的活载是车辆荷载,车辆荷载按公路-I 级车道荷载计算。桥面上有 3 个车道,行车道宽度为 11.25 m。计算车辆荷载下的最大和最小截面正应力分布后,得到最

危险的区段是主跨跨中和塔梁接合处附近区段,只需在此 3 个部分密集布置应变传感器即可。

另外,如果根据桥梁所处的具体环境判断出哪些位置区域内受到的氯离子等有害物质侵蚀作用强,也应该在这些区域密集布置应变传感器,在此不再赘述。

损伤设定和识别。假设 3 处损伤状况:① $x=161.25\text{ m}$, $y=0.2\text{ m}$,有效高度减小为 3.4 m ;② $x=296.25\text{ m}$, $y=0.1\text{ m}$,有效高度减小为 3.3 m ;③ $x=431.25\text{ m}$, $y=0.15\text{ m}$,有效高度减小为 3.4 m 。

为了作对比,首先计算该斜拉桥在损伤前后的前 3 阶自振频率和振型,如表 2 所示。

表 2 斜拉桥前 3 阶自振频率和振型

Tab. 2 The First Three Vibration Frequencies and Vibration Modes of Cable-stayed Bridge

阶次	状态	自振频率/Hz	振型描述
1	损伤前	0.364 075	对称横弯
	损伤后	0.364 075	
2	损伤前	0.445 434	竖弯
	损伤后	0.445 434	
3	损伤前	0.445 440	反对称横弯
	损伤后	0.445 440	

可见,设定的损伤情况下,该斜拉桥前 3 阶自振频率和振型完全没有变化。

图 8 为斜拉桥损伤情形。采用本文方法,在跨中 $x_1=300\text{ m}$ 处加集中力 $F=100\text{ kN}$,可得到对应的弯曲正应力增量。可以看到,在 3 个损伤位置处出现了明显的应力增量突变,据此可容易地发现损伤。

3 实用性分析与处理

以上通过数值模拟算例证明了本文方法的有效性,下面考虑实际应用的情况,对损伤识别结果的存在性、惟一性和稳定性等方面进行分析:

首先,应变指标可以灵敏地发现测点处截面的损伤。但同时应该注意到,它是一个局部性的指标,只能反映测点所在截面的状况,如果损伤出现的截面没有布置应变测点,则难以发现损伤。在实际应用时是不可能在结构各截面都布置应变传感器的,而损伤的出现位置则是各截面都有可能的,所以从这个意义上来说,该指标在用于实际时是难以保证所有识别结果的存在性的。

另外,在识别出某截面出现损伤后,同一种应变变化幅度对应一种截面的刚度变化程度,但同样的

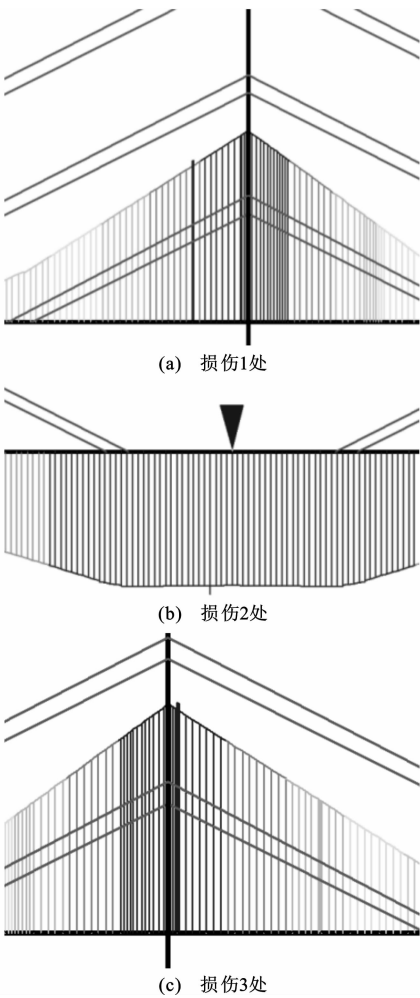


图 8 斜拉桥损伤情形

Fig. 8 Damage States of Cable-stayed Bridge

刚度变化程度则可能是由多种损伤类型所引起的。因此,单纯从理论分析上来说,结果的惟一性是能满足的,但考虑实际损伤工况,则惟一性是不满足的。

考虑应变测量数据的质量对结果稳定性的影响:首先来看应变测量的分辨率,目前对应变的测量分辨率较高,最普通的应变片也能达到 10^{-6} ,性能好的可以达到 10^{-7} ,正在研发的新型传感器分辨率可以达到 10^{-9} 。至于测量的误差程度,则没有具体的统一规律。

结合实例来进行具体分析,对斜拉桥损伤 2 处的情况,考虑 $x_1=295\text{ m}$ 到 $x_1=297\text{ m}$ 这个区段内的应变监测,假设应变片间隔为 0.1 m ,测量分辨率为 10^{-7} ,测量误差为 2×10^{-6} :

(1)如果各测点处的数据具有同样的误差幅度,即同时增大了 2×10^{-6} ,则显然这种同等分布的误差情况对识别损伤完全没有影响。

(2)如果误差幅度有离散性,考虑 2 个相邻点数

据对误差的响应为反号的情况,则得到的数据点如图9所示。

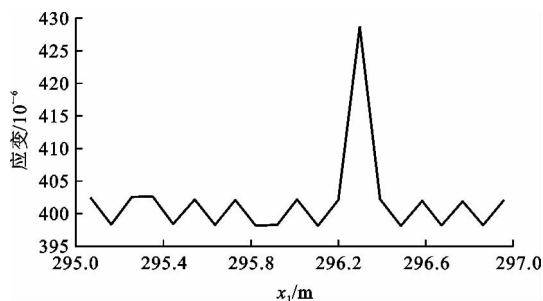


图9 数据点

Fig. 9 Graph of Data

图9中出现了多峰值的情况,这里预设的损伤由于导致的突变值比误差幅度明显大,所以还可以判断出损伤出现的位置,但也说明了如果损伤程度微小,则对应的峰值很可能混合在误差效应造成的多个峰值之中而无法识别,这就是误差效应导致结果不稳定的情形。

综上所述,本文方法的稳定性并不受误差幅度控制,而是受误差幅度的离散性控制,如果误差幅度分布均匀,则结果很稳定,误差幅度的离散性越大,则识别的结果所受干扰越大,越不稳定。

为了确保本文方法的实用性,还需要进行一些处理。经过细致分析,可得到建议的方法和措施如下:

(1)在允许的范围内,施加的静力荷载数值越大越好,使得区段内的应变值、突变值较大,对小损伤更为敏感,对测量误差的抵抗力也较强。

(2)引入测点的优化布置方法,确定重点监测区段,有选择地密集布置传感器,可减轻所需数据量不足的问题。

(3)在选择区段内布置的传感器越密越好,间隔越小,则未突变部分的数据差别越小,即使有测量误差,误差后的数据也会非常接近,从而使损伤突变部分周围的数据线尽量为平的直线,这样对出现的损伤突变比较敏感,容易发现,可以减小误差的影响。

(4)在应变测点附近布置温度补偿测点,以消除温度对测量结果的影响。

(5)发展先进的传感器技术,提高测量分辨率,降低误差及离散性。分辨率越高,误差和离散性越小,则能识别出的损伤程度越高,适用性越强。

(6)对混凝土结构的重点区段除布置表面式传感器外,还应布置埋入式传感器,可就近发现内部损伤,减轻内部小损伤在表面监测时由于太微小而难被发现或被误差所掩盖的问题,确保损伤识别的结

果更完善,还可用于测量中性轴剪切应变的情况。

对于这类传感器,必须考虑耐用性不足的问题。混凝土桥梁的使用寿命一般在50年以上,而目前最先进的光纤应变传感器的稳定性和可靠性仅能维持15年左右,由于被埋入在结构内部,难以直接进行更换,因此在传感器老化后就不能再获得有效数据。为此,笔者设计了一种新型传感器,用可更换的思路解决了这一耐用性问题,现已获得了国家发明专利授权。

4 结 语

(1)本文中基于结构正向响应的典型指标之一——应变,具体说明了其在识别桥梁损伤方面的应用。作为典型的局部性能指标,它在发现损伤和确定损伤位置方面效果不错。但它有个很大的缺陷,就是过于局部性,只有在测点处截面发生损伤才能被有效识别,这就要求在结构上非常密集地布置传感器,在实际中不现实。为此,提出结合其他信息来帮助克服这一问题,分别引入一次信息(结构在典型活载下的数值模拟响应)和二次信息(受环境不利因素影响区域的判断)来得到最可能出现损伤的区段,在此区段内局部密集布置传感器。

(2)本文方法在数据理想的情况下可以获得很好的效果,已经过了多个数值模拟实例的验证。主要优点还包括发现损伤直接、处理简单、结果可靠、对小损伤比较敏感等。考虑到实际应用时的问题,经过细致分析,给出了若干有效的处理方法和措施,可以显著地改善实用效果,适用于实际工程。

参考文献:

References:

- [1] YEO I, SHIN S. Statistical Damage Assessment of Framed Structures from Static Responses[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(4): 414-421.
- [2] MORASSI A. Damage Detection and Generalized Fourier Coefficients[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(1/2): 229-259.
- [3] HUTH O, FELTRIN G, MAECK J, et al. Damage Identification Using Modal Data: Experiences on a Prestressed Concrete Bridge[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(12): 1898-1910.
- [4] CURADELLI R O, RIERA J D, AMBROSINI D, et al. Damage Detection by Means of Structural Damping Identification[J]. Engineering Structures, 2008, 30(12): 3497-3504.
- [5] REYNDERS E, DE ROECK G, BAKIR P G, et al.

- Damage Identification on the Tilff Bridge by Vibration Monitoring Using Optical Fiber Strain Sensors[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(2): 185-193.
- [6] LI Y Y, CHENG L, YAM L H, et al. Identification of Damage Locations for Plate-like Structures Using Damage Sensitive Indices: Strain Modal Approach[J]. Composite Structures, 2002, 80(25): 1881-1894.
- [7] LIU X, LIEVEN N A J, ESCAMILLA-AMBROSIO P J. Frequency Response Function Shape-based Methods for Structural Damage Localization[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1243-1259.
- [8] HU H W, WU C B. Development of Scanning Damage Index for the Damage Detection of Plate Structures Using Modal Strain Energy Method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(2): 274-287.
- [9] CAO M S, QIAO P Z. Novel Laplacian Scheme and Multi Resolution Modal Curvatures for Structural Damage Identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1223-1242.
- [10] TRENTADUE B, MESSINA A, GIANNOCARO N I. Detecting Damage Through the Processing of Dynamic Shapes Measured by a PSD-triangular Laser Sensor[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(17): 5554-5575.
- [11] KIM J T, PARK J H, LEE B J. Vibration-based Damage Monitoring in Model Plate-girder Bridges Under Uncertain Temperature Conditions[J]. Engineering Structures, 2007, 29(7): 1354-1365.
- [12] GUO H Y, LI Z L. A Two-stage Method to Identify Structural Damage Sites and Extents by Using Evidence Theory and Micro-search Genetic Algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(3): 769-782.
- [13] CHEN H P. Application of Regularization Methods to Damage Detection in Large Scale Plane Frame Structures Using Incomplete Noisy Modal Data[J]. Engineering Structures, 2008, 30(11): 3219-3227.
- [14] PERERA R, HUERTA C, ORQUIN J M. Identification of Damage in RC Beams Using Indexes Based on Local Modal Stiffness[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(8): 1656-1667.
- [15] 张启伟, 周艳. 桥梁健康监测技术的适用性[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 54-58.
- ZHANG Qi-wei, ZHOU Yan. Applicability of Bridge Health Monitoring Technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(6): 54-58.
- [16] 向天宇, 赵人达. 结构损伤识别的双重网格算法[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 94-97.
- XIANG Tian-yu, ZHAO Ren-da. Dual Mesh Method for Structure Damage Detection[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 94-97.
- [17] 邵长江, 吴永红, 钱永久. 混凝土桥梁结构非线性地震损伤演化[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 41-45.
- SHAO Chang-jiang, WU Yong-hong, QIAN Yong-jiu. Evolution of Nonlinear Seismic Damage of Concrete Bridge Structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 41-45.
- [18] 刘义艳, 段晨东, 巨永锋, 等. 基于神经网络与特征融合的损伤诊断方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(6): 106-110.
- LIU Yi-yan, DUAN Chen-dong, JU Yong-feng, et al. Diagnosis Method of Structure Damage Using Neural Network and Feature Fusion[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 106-110.
- [19] 任更锋, 徐岳, 石利强, 等. 基于层次分析法的在役 RC 桥梁耐久性评估[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(6): 41-45, 50.
- REN Geng-feng, XU Yue, SHI Li-qiang, et al. Durability Evaluation of Existing Reinforced Concrete Bridges Based on AHP[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(6): 41-45, 50.
- [20] 郭琦, 史强, 宋一凡, 等. 在役缺损梁桥动力分析的有限条刚度修正法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 57-61.
- GUO Qi, SHI Qiang, SONG Yi-fan, et al. Finite Stripe Method of Stiffness Correction Based on Modal Parameters for Existing Beam Bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 57-61.
- [21] 王树栋, 卜建清, 娄国充. 基于过桥汽车动力响应的桥梁损伤识别[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(3): 63-67.
- WANG Shu-dong, BU Jian-qing, LOU Guo-chong. Bridge Damage Identification by Dynamic Response of Passing Vehicle[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(3): 63-67.