

文章编号: 0451-0712(2006)04-0104-04

中图分类号: U446

文献标识码: A

桥梁损伤识别数值仿真及试验研究

江阿兰, 王伟哲

(大连交通大学交通运输工程学院 大连市 116028)

摘 要: 以内蒙古赤峰市银河大桥为例进行研究, 该桥于 2000 年竣工, 2001 年 8 月该桥正式投入运行, 2001 年 12 月 13 日早晨, 一空载货车撞上 ZN-54W 吊杆(主拱桥由西向东第 8 号吊杆), 造成吊杆下部保护套严重损伤, 为大桥安全考虑, 赤峰市松山区政府提出对该桥进行测试。本文采用有限元法、模态分析及损伤识别理论对该桥进行了全面系统的结构损伤识别数值仿真研究, 并与试验结果进行比较。由于中承式拱桥的主要受力构件是拱肋及吊杆, 所以本文分别分析了拱肋 $L/2$ 截面、 $L/4$ 截面及被撞的 8 号吊杆不同损伤程度下的动力特性, 得出结构整体动力特性的变化规律, 并通过动力特性变化规律及应变模态实现了对拱肋的损伤识别; 通过动力特性变化规律及曲率模态实现了对吊杆的损伤识别。

关键词: 桥梁; 动力特性; 损伤识别; 有限元法; 模态分析; 数值仿真

1 银河大桥概况

银河大桥位于赤峰市阴河与锡伯河汇流处阴河上游 1 200 m 处, 横跨阴河, 该桥采用钢筋混凝土中承式箱形拱, 桥跨布置为 70 m + 160 m + 70 m, 主要承重构件是 2 个分离的拱肋。为增强拱肋的横向刚度和稳定拱肋采用变截面箱形断面, 拱脚处厚度加大, 拱顶处肋厚减薄。拱肋采用 C30 防水混凝土, 主拱拱轴线型为变截面悬链线, 拱轴系数 $m=1.543$, 拱厚系数 $n=0.8$ 。主拱肋几何特征值: 净跨径 $l_0=160$ m, 计算跨径 $l=163.214$ m, 净矢高 $f_0=40$ m, 计算矢高 $f=40.296$ m, 主拱肋宽度 $b=2.00$ m, 拱顶厚度 $d_s=3.60$ m, 拱脚厚度 $d_k=4.403$ m, 拱轴长度 $s=187.9$ m, 为便于施工拱肋内腔尺寸保持不变, 采用 $1.50\text{ m} \times 3.00\text{ m}$, 肋角 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$, 箱壁厚度为 0.25 m , 箱顶板和底板为变厚度。

行车道布置在两肋拱之间, 人行道布置在吊杆的外侧。悬挂桥面系的吊杆主要承受拉力, 采用 109 $\phi 5$ 高强钢丝制作的柔性吊杆, 吊杆的间距根据构造和美观的要求, 取相等的间距, 主拱 $\Delta l_{\text{主}}=6.800\ 554\text{ m}$, 边拱 $\Delta l_{\text{边}}=5.997\text{ m}$ 。桥面总宽为 24.5 m, 即 14 m(机动车道) + $2 \times 1.8\text{ m}$ (非机动车道) + $2 \times 0.2\text{ m}$ (分隔带) + $2 \times 3.25\text{ m}$ (人行道)(在拱肋和桥面相交处占去部分人行道的宽度, 需要加宽人行道部分, 加宽后桥面总宽度为 28.5 m)。

桥面板采用在横梁上密铺预制实心板。为避免桥面系受拱肋变形的影响而参与共同作用, 在桥面系与拱肋相交的地方设置断缝, 即设置在桥面系与拱肋交会处的固定横梁上及拱跨端部的桥台(墩)上。桥面横梁分为三类, 即普通横梁、加长横梁和固定横梁。银河大桥总体布置见图 1 所示。

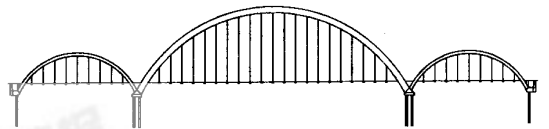


图1 银河大桥总体布置

2 银河大桥结构动力检算

由于主拱跨径比较大, 受力和构造较为复杂, 本文只对主拱进行分析。为了准确地求解银河大桥的动力特性, 采取建立结构的三维模型来对实际结构进行模拟。计算模式的模拟着重于结构的刚度、质量和边界条件的模拟, 而且应当尽可能地与实际结构相符。计算中拱肋、横梁、横撑、拱上立柱用三维实体空间梁单元 (beam4 单元) 模拟; 吊杆采用两节点杆单元 (Link10 单元) 模拟; 桥面系采用 4 个节点的壳单元 (shell63 单元) 模拟。表 1 给出了结构自振频率和振型描述。

表 1 银河大桥动力特性

阶次	频率/Hz	方向	振型描述
1	0.712	横向	拱肋面外弯曲振动,两拱肋同步
2	0.844	横向	拱肋面外弯曲振动,两拱肋异步
3	1.354	竖向	拱肋、桥面面内弯曲振动,两拱肋同步
4	1.397	横向	拱肋面外弯曲振动,两拱肋同步
5	1.854	竖向	桥面面内弯曲振动

3 银河大桥动载试验

对该桥进行动载试验,得出其动力特性见表 2、表 3。

表 2 该桥的一阶固有频率和阻尼比

断 面		一阶固有频率/Hz	阻尼比
主拱跨中	竖向	1.453	0.048
	横向	1.531	0.026
主拱 L/4 断面	竖向	1.453	0.035
边拱跨中	竖向	2.718	0.045

4 基于动力特性进行桥梁结构损伤识别仿真

为了获取有关损伤对桥梁结构的动力特性的影

表 3 冲击系数

车速 v /(km/h)	5	10	15	20	30	35	40
主拱冲击系数 $1+\mu$	1.005	1.101	1.135	1.125	1.163	1.062	1.056

响,本节采用变刚度法,即用改变刚度后的单元来与其他正常单元一起计算。由圣维南原理,损伤单元的出现只会影响其附近部分,而对远处可以不计,由于银河大桥动力检算时,为获取较精确解,单元划分十分密集,本文采用二次抛物线递减函数模拟损伤单元对周围单元的影响。基于银河大桥桥型结构,只分别模拟了拱肋和吊杆的损伤,拱肋选取了跨中和 L/4 两个截面,吊杆选取了此桥曾被撞击过的 8 号吊杆来进行分析。

4.1 拱肋跨中截面的损伤分析

模拟跨中截面单元刚度损伤 10%、20% 两种情况,即刚度(EI)降低 10%、20%。采用大型通用有限元程序 ANSYS5.7 计算结构未损伤及损伤后的自振频率,发现损伤对于整个结构的自振频率影响非常小,但振型变化较明显,限于篇幅,本文只给出部分图形,见图 2 所示。

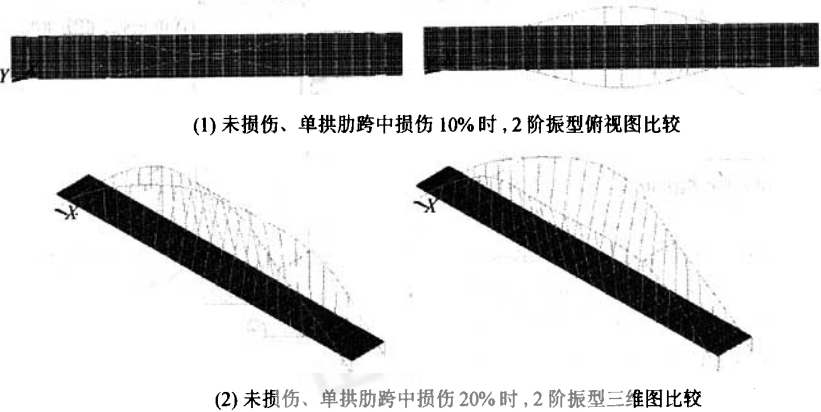


图 2 未损伤、单拱肋跨中损伤振型图比较

4.2 拱肋 L/4 截面的损伤分析

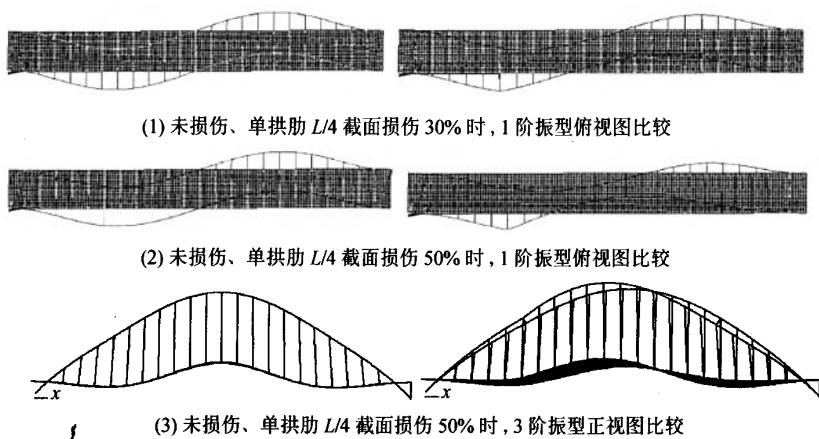
模拟拱肋 L/4 截面单元刚度损伤 30%、50% 两种情况,即刚度(EI)降低 30%、50%。计算结构未损伤及损伤后的自振频率变化不明显,部分相应振型变化见图 3 所示。

4.3 用应变模态对拱肋进行损伤识别

拱肋是整个拱桥中的关键受力部位,它的损伤将直接关系到整个拱桥的稳定及安全,对拱肋进行损伤识别具有重要的意义。以上分析表明,拱肋局部

刚度的下降,不会使整个拱桥的固有频率发生明显的变化,而应变模态却能探测结构局部的损伤,尤其是那些对结构振动参数不敏感的区域。结构发生局部损伤时,损伤区域发生内力重分布,相应的应力、应变能明显地反映这一变化,并且离损伤部位越近,变化也就越大,但由于各种约束的存在,位移对局部损伤的反映不如应变敏感,而且从数学上来看,应变是位移的一阶导数,也更能反映局部的变化。

在计算应变时,无论是单元的轴向应变还是弯

图 3 未损伤、单拱肋 $L/4$ 截面损伤振型图比较

曲应变, 都可以反映拱肋单元的损伤情况。本文根据单元的弯曲应变模态来计算, 模拟单元损伤时, 仍然不考虑单元质量的改变, 将刚度的退化归结为弹性模量的下降, 计算结果见图 4、图 5 所示。

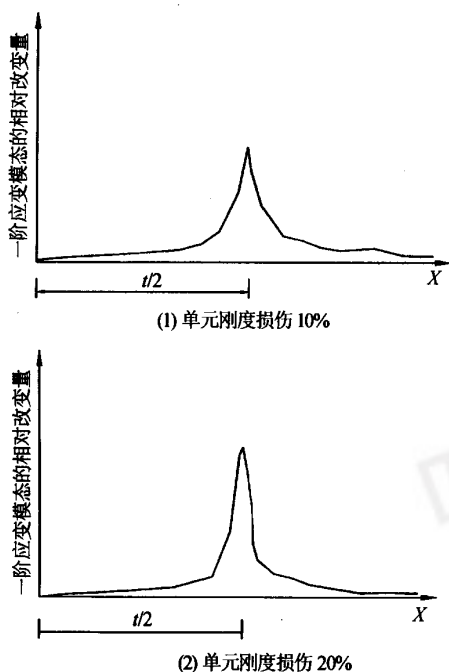
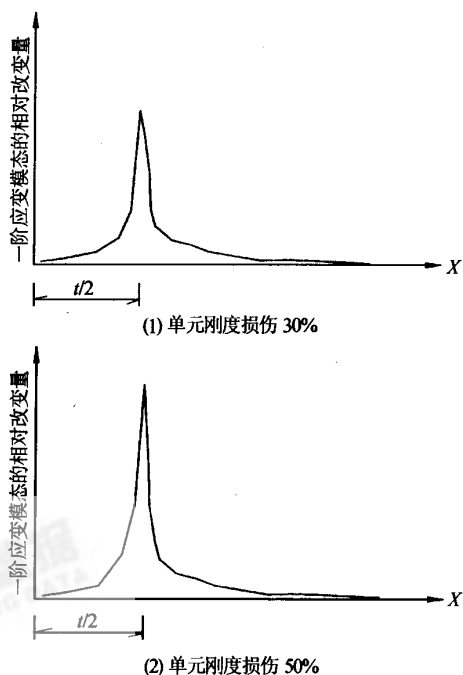


图 4 拱肋跨中截面损伤前后, 1 阶应变模态相对改变量

由图 4、图 5 可见, 结构损伤前后一阶应变模态的相对改变量在损伤处出现“尖峰”且与损伤程度成正比, 可用于拱肋损伤位置及程度的识别。

4.4 8 号吊杆的损伤分析

模拟 8 号吊杆刚度降低 20%、40% 两种情况, 计算结构未损伤及损伤后的自振频率仍然无明显变

图 5 拱肋 $L/4$ 截面损伤前后, 1 阶应变模态相对改变量

化, 相应振型变化见图 6 所示。

4.5 用曲率模态差对吊杆进行损伤识别

中承式肋拱桥的桥面系可以看作由各根吊杆为支撑点的多跨连续梁, 吊杆的损伤可以看作各支座刚度的下降, 从而有效地改变桥面系节点的振型。结构单元损伤后, 振型的变化能够反映结构的局部变化, 这一点在图 6 中充分体现出来。用曲率模态差分析桥面系损伤前后的振型, 计算结果见图 7 所示, 发现损伤单元处标准化后曲率模态差值明显出现“尖峰”, 可用于吊杆损伤位置及程度的识别。

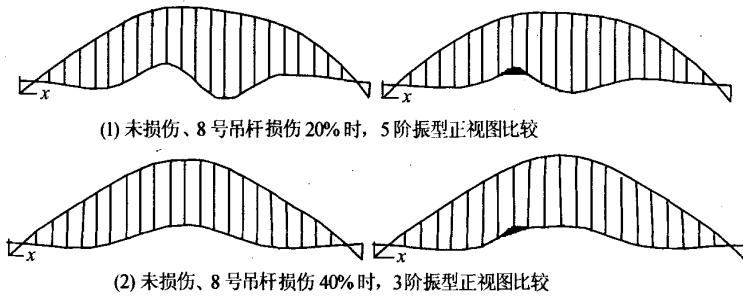


图6 未损伤、8号吊杆损伤振型图比较

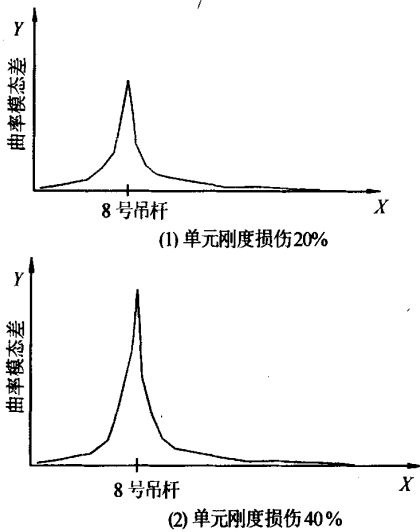


图7 8号吊杆损伤前后1阶曲率模态差值

5 结论

(1)采用有限元法对大跨径中承式肋拱桥进行动力特性分析,计算结果与实测数据相吻合,表明本文所建立的理论模型正确。银河大桥面内振动基频稍大于面外振动基频,拱肋与桥面振动在前几阶振型中基本同步,大桥属较柔性结构。

(2)对桥梁损伤识别数值仿真研究中发现:①拱肋振型的变化比频率的变化明显得多,而且不同损伤位置相互之间不存在相同阶数振型的变化,所以

可以采用振型的变化来确定损伤的位置;损伤前后一阶应变模态的相对改变量在损伤处出现“尖峰”且与损伤程度呈正比,可用于拱肋损伤位置及程度的识别;②吊杆的损伤对结构整体的频率影响不大,但振型在损伤处形成明显突点,以此可判定损伤位置;③桥面系可以看作由各根吊杆为支撑点的多跨连续梁,吊杆的损伤可以看作各支座刚度的下降,从而有效地改变桥面系节点的振型。用曲率模态差分析桥面系损伤前后的振型,发现损伤单元处也出现明显“尖峰”,可用于吊杆损伤位置及程度的识别。

参考文献:

- [1] 于天来,江阿兰. 桥梁结构检测与加固技术[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社,2004.
- [2] 唐亚鸣,张河. 大型桥梁拉索损伤与健康监测[J]. 桥梁建设,2002,145(5).
- [3] 刘志军,党志杰,罗元文,等. 振动法测定缆索张力的研究[J]. 桥梁建设,2002,142(2).
- [4] 邓焱,严普强. 梁及桥梁应变模态与损伤测量的新方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2000,40(1).
- [5] Hearn G, Testa R B. Modal Analysis for Damage Detection in Structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1991,117(10).
- [6] Hassiotis S, Jeong G D. Assessment of Structural Damage from Natural Frequency Measurement [J]. Computers and structures, 1993,49(4).

Numerical Simulation of Damage Identification of Bridges and Test

JIANG A-lan, WANG Wei-zhe

(School of Transportation Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: The damage identification of Yinhe Bridges is mainly studied. This bridge was completed in 2000, in the morning of December 13, 2001, a truck bumps against No. 8 suspension rod of the bridge. Because the main working members are the rib arch and the suspension rod, the dynamic characteristics

文章编号: 0451-0712(2006)04-0108-09

中图分类号: U446.2

文献标识码: B

桥梁健康监测中的关键性问题和损伤识别方法

郭 健, 孙炳楠

(浙江大学土木工程系 杭州市 310027)

摘 要: 针对大型桥梁结构健康监测的特点, 分析了桥梁健康监测中的关键性问题。阐述了几种传统的损伤识别方法, 并介绍了一些新兴理论在损伤识别中的应用, 分析了不同损伤识别方法的特点。最后提出基于多传感器信息融合的桥梁结构损伤识别策略, 并对桥梁健康监测中损伤识别的发展进行了展望。

关键词: 桥梁工程; 健康监测; 损伤识别方法

大型桥梁的使用期长达几十年、甚至上百年, 在环境侵蚀、材料老化、荷载的长期效应和疲劳效应、灾害因素的突变效应等共同作用下将不可避免地导致结构系统的损伤积累和抗力衰减, 极端情况下可能引发灾难性的突发事件。因此, 为了保障结构的安全性、完整性和耐久性, 已建成使用的大型桥梁急需采用有效的手段来监测和评估其损伤程度及安全状态。

随着测试手段和分析技术的提高, 国内外都开始在一些已建和在建的大型桥梁中设置结构健康监测系统, 对结构的损伤和安全状态进行监测和评估^[1,2]。本文通过分析目前桥梁健康监测中面临的关键性问题, 并结合近年来结构损伤识别发展的最新进展来探讨桥梁健康监测系统和损伤识别方法。

1 桥梁健康监测和损伤识别的重要性

虽然很早以来, 人们就意识到对桥梁进行安全监测的重要性, 但由于早期的监测手段比较落后, 所

以在应用上一直受到限制, 以致在过去发生了一些惨痛的工程事故^[3]。桥梁结构出现损伤和破坏主要有三方面的因素。

第一, 结构先天不足。在设计和施工中结构本身具有缺陷, 在后期的运营和使用中, 结构受力不合理而出现损伤和破坏。

第二, 桥梁设计荷载标准偏低, 使得在后期使用中, 实际荷载大于设计荷载, 并超龄服役使得结构发生损伤和破坏。

一个桥梁结构的安全水平不仅取决于工程设计、施工技术和管理人员的水平与素质, 而且取决于工程法规、规范所规定的安全设置水准。公路桥梁结构安全设置水准以最常用车辆(我国为汽车—超 20 级系列)作用于 30 m 跨径的简支梁桥需承受的活载效应(标准值)为例, 美国 and 英国规范分别比我国规范大 12% 和 29%; 对于活载安全系数, 我国为 1.40, 而美国为 1.75, 英国为 1.73; 对于桥梁需承受活载效应设计值, 美国 and 英国规范分别比我国规范大 40% 和 59%。对于车辆活载, 我国桥梁的设计承载能力为

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2005037821)

收稿日期: 2005-10-17

under different damage degree of $L/2$ across, $L/4$ across of the rib arch and bumped No. 8 suspension rod are analyzed, the changing regularization of the dynamic characteristics of whole structure is concluded and the damage identification to the rib arch is realized according to the dynamic characteristic changing and strain modal. The damage identification to the suspension rod is realized according to the dynamic characteristic changing and curvature modal.

Key words: bridge; dynamic characteristics; damage identification; finite element method; modal analysis; numerical simulation