

# 基于动力特性的拱桥加固效果评价

陈悦, 周建庭, 杨建喜, 孙虹微

(重庆交通大学, 重庆 400074)

**摘要:** 针对目前加固效果评价方法不太理想的状况, 结合拱桥加固处治的二次受力特性, 在依据总体挠度变化率的刚度评价方法基础上, 提出了基于动力特性频率的拱桥加固效果评价方法。根据工程实例, 利用 MIDAS/CIVIL 软件经过计算分析, 进一步证实了基于动力特性频率评价方法的全面、计算工作量少、反应较敏感的优点, 表明该方法能为除拱桥之外其它桥型的加固效果进行评价。

**关键词:** 桥梁加固; 动力特性; 拱桥; 效果评价; 频率

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)06-0852-03

## Reinforcement Effect Evaluation for Arch Bridge Based on Dynamic Characteristics

CHEN Yue, ZHOU Jian-ting, YANG Jian-xi, SUN Hong-wei

(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Due to imperfect method for reinforcement effect evaluation, strengthening effect evaluation for arch bridge was proposed according to the second load for the strengthening treatment of arch bridge, rigidity evaluation of overall deflection change rate and characteristics of dynamic frequency. According to specific projects, advantages of the evaluation method based on the frequency of dynamic characteristics were confirmed through MIDAS/CIVIL for calculation; it was demonstrated that this method could provide useful guidances for strengthening effect evaluation of other bridges.

**Key words:** bridge reinforcement; dynamic characteristics; arch bridge; effect evaluation; frequency

西部地区幅员辽阔, 因其地理形势的特殊性, 拱桥数量众多。在长期运营和环境变化等因素的影响下, 修建的不少拱桥出现了各种各样的病害, 需要进行加固处治。然而, 目前对加固效果的评价还没有形成统一的标准, 众多学者从承载能力、耐久性和最小应变能等方面进行评估, 或者运用层次分析法和可靠度理论来度量<sup>[1-4]</sup>, 这些方法对加固效果的反应均不够敏感且分析过程较为繁杂。由于加固后桥梁结构的变化, 会导致结构刚度和柔度等物理参数的变化, 进而引起结构动力特性的改变, 如: 自振频率和振型的改变<sup>[5]</sup>。同时, 动力特性分析能较方便地获得桥梁结构整体的加固效果信息, 且反应较敏感。鉴于此, 笔者在刚度分析的基础上进一步提出基于频率的拱桥加固效果评价方法, 并结合工程实例予以验证, 结果表明了频率评价方法的有效性及可行性。

## 1 基于刚度的拱桥加固效果评价方法

加固增强使得原结构成为二次受力结构, 原有

主拱圈是在已有变形基础上承担部分恒载和活载的, 在外荷载一定的情况下影响承重构件内力的主要因素有: ①偏离弯矩(恒载压力线与拱轴线偏离产生的); ②弹性压缩。因此, 为了增强拱桥的加固效果, 尽量减小恒载压力线与拱轴线偏离显得尤为重要。

在挠曲线方程一般表达形式的基础上, 结合加固处治是二次受力结构, 设主拱圈在加固后的挠曲线方程为:

$$\frac{1}{\rho} = \left| \frac{y''}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}} \right| = \frac{M_1}{EI_1} + \frac{M_2}{EI_2} \quad (1)$$

式中:  $1/\rho$  为主拱圈加固后挠曲线曲率;  $y$  为主拱圈加固后挠曲线;  $M_1$ 、 $EI_1$  为主拱圈加固前受到的弯矩(恒载产生)和平面内的抗弯刚度;  $M_2$ 、 $EI_2$  为主拱圈加固后受到的弯矩(新增部分及活载作用)和平面内的抗弯刚度。

由式(1)可知, 加固后的挠曲线与恒载压力线能否更好的重合, 与加固前后主拱圈截面弯矩和平面抗弯刚度密切相关。

收稿日期: 2010-07-12; 修订日期: 2010-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878219); 重庆市杰出青年基金项目(CSTC, 2008BA6038)

作者简介: 陈悦(1985-), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事桥梁健康监测与加固研究。E-mail: cycycd@126.com。

在实际工程中,为了能更加清楚地了解加固结构物变形情况,往往以挠度来进行度量。挠度分恒载挠度与活载挠度,前者是由结构自重引起的竖向变形;后者是由活载引起的竖向变形,活载离去后这种变形就消失。目前对于加固增强后的桥梁,依据总挠度变化率 $\beta_T$ <sup>[6-7]</sup>对评价加固的效果有重要意义,其表达式如下:

$$\beta_T = \frac{\delta_2 - \delta_0}{\delta_0} = \frac{\delta_2}{\delta_0} - 1 \quad (2)$$

式中: $\beta_T$ 为加固后某个观测点的总挠度变化率; $\delta_0$ 为加固前结构在全部荷载(含恒载和活载)作用下某个测点挠度值; $\delta_2$ 为加固后与 $\delta_0$ 对应的结构相应测点挠度代表值。

挠度评价方法中的 $\beta_T$ 是从“宏观”上分析得到的一个能清楚、直观反映加固后结构挠度变化的参数。若从刚度提高这个角度而言,一个优秀的拱桥加固工程应该满足 $\beta_T < 0$ ,即:加固后拱桥的刚度宜有所增加(或者在全部荷载作用下挠度宜有所减小)。但是,要想全面了解拱桥加固处治的效果,用来作为评价测点的数目非常多才能得到满意的结果。因此,在刚度评价基础上寻求一种方便、全面、行之有效地评价拱桥加固处治效果的方法显得尤为重要。

## 2 基于动力特性的拱桥加固效果评价原理与方法

通常工程结构体积大,构件多,且常有隐蔽部分。因此,对加固桥梁来说静态指标的评价工作量大,且只能获得结构的局部加固效果信息。而基于动力特性的分析可以弥补静态指标的不足,能较方便地获得桥梁结构整体的加固效果信息。常用的动力特性有:频率、振型、振型曲率等。在实际评价分析中,考虑到频率具有以下优点:①最易得到的结构动力特性;②依靠当前技术测量的最准确的结构动力特性。在低阻尼情况下结构动力识别的分辨率一般可达0.1%,故把频率作为本文拱桥加固效果评价的动力特性。

在实际的计算过程中,要精确求解拱的固有振型,即使对于圆弧拱或抛物线拱这类简单拱轴线形也是很困难的。但是,拱的固有振动分析是一个特征值问题,振型的近似性不会给其对应的频率(特征值)带来很大影响。瑞雷-李兹法求解拱桥频率的近似公式如下:

1) 拱在平面内振动时的位能为:

$$V = \frac{EI_x}{2} \int_0^L \left( v'' + \frac{w}{R} \right)^2 ds \quad (3)$$

式中: $EI_x$ 为拱截面在拱平面内的抗弯刚度; $v(s, t)$ 为拱轴径向位移; $w(s, t)$ 为拱轴切向位移; $L$ 为拱弧轴线的全长; $R$ 为拱轴线形。

若引入振动时拱轴线不变形的假设,即令 $\omega' - v/R = 0$ ,则式(3)可改写为:

$$V = \frac{EI_x}{2} \int_0^L \left( v'' + \frac{v}{R^2} \right)^2 ds \quad (4)$$

2) 拱在平面内振动时的动能为:

$$T = \frac{m}{2} \int_0^L (v^2 + w^2) ds \quad (5)$$

根据瑞雷法原理 $V_{\max} = T_{\max}$ ,由式(4)和式(5)得到频率计算公式:

$$\omega^2 = \frac{EI_x \int_0^L \left[ v''(s) + \frac{1}{R^2} v(s) \right]^2 ds}{m \int_0^L [v^2(s) + w^2(s)] ds} \quad (6)$$

由式(6)可知,拱桥频率 $\omega$ 是结构整体刚度和整体质量的函数,是一个整体量。

通过上述分析不难得到,经加固处治后引起拱桥某些结构刚度和质量的变化,会导致结构整体固有频率的改变,在进行效果评价时不需要大量的测点信息。同时,考虑到动力特性的分析在评价方面优于静态指标,动力特性频率拥有众多的优点,再结合频率评价方法比刚度评价方法更全面反应加固效果信息,且计算工作量少的特点,容易得出基于动力特性频率能更好的对拱桥加固效果进行评价的结论。

但值得注意的是,计算出来的频率精度跟设定的 $v(s, t)$ 拱轴径向位移和 $w(s, t)$ 拱轴切向位移有关,为了尽可能地接近精确值应减少附加约束的影响<sup>[8]</sup>。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

实例1:红旗桥位于重庆市铜梁县境内,为单跨实腹式石拱桥。桥全长20.0 m,桥跨布置为1×净10.0 m,净矢高3.25 m,矢跨比1/3,主拱圈厚度0.6 m,其宽为8.5 m。上部桥面布置为:1.8 m人行道+9 m行车道+1.8 m人行道。主拱出现一条纵向裂缝,宽度约为8~10 mm,深度约为5 cm,在纵向近似贯穿整个主拱圈,横向距最近边缘1/3拱圈宽度。

实例2:水磨大桥位于重庆市开县境内天和一矿家湾线路上,为单跨空腹式石拱桥。桥全长37.0 m;主拱圈净跨径31.0 m,净矢高5.3 m,厚度0.9 m,宽为6.7 m;腹拱圈净跨径3.25 m,净矢高1.2

m,厚度 0.25 m,其宽为 6.7 m。上部桥面布置:0.3 m 栏杆+6.1 m 行车道+0.3 m 栏杆。腹拱圈拱腹开裂严重,每跨均有 1~2 条纵向贯穿裂缝,宽度约为 7~9 mm,深度约为 3 cm,在桥梁中心线或距边缘 50 cm 处;桥面破损严重。

红旗桥与水磨大桥的加固处治方案如表 1。

表 1 桥梁的加固处治技术方案

Tab.1 Strengthening treatment technology for bridges	
加固桥梁	红旗桥 (单跨实腹式石拱桥)
加固处治方案	压力灌浆;主拱圈采用钢筋混凝土 U 型套箍加固技术;桥台前墙增设钢筋混凝土板;增设钢筋混凝土桥面铺装
	水磨大桥 (单跨空腹式石拱桥)
	压力灌浆;主拱圈:实腹段采用钢筋混凝土 U 型套箍加固技术;空腹段采用钢筋混凝土套箍加固技术;腹拱圈:采用钢筋混凝土 U 型套箍加固技术;桥台前墙增设钢筋混凝土板;重做桥面系

3.2 常规刚度评价方法

建模计算时,红旗桥与水磨大桥纵向均划分 16 个单元(即 17 个节点);加固前主拱圈开裂,根据提供的裂缝宽度和深度,采用折减后的截面特性作为建模时的截面特性;由于采用压力灌浆技术,加固后对裂缝不作特殊处理。红旗桥和水磨大桥加固前后

表 2 总挠度变化率  $\beta_T$  计算

Tab.2 Calculation of the change rate for total deflection $\beta_T$						
位置	红旗桥挠度/mm			水磨大桥挠度/mm		
	加固前	加固后	变化率/%	加固前	加固后	变化率/%
拱顶	0.889	0.513	-42.3	6.716	6.565	-2.3
3/8 L	0.677	0.356	-47.4	7.042	6.308	-10.4
1/4 L	0.347	0.157	-54.8	5.972	4.209	-29.5
1/8 L	0.088	0.036	-59.1	2.371	1.486	-37.3
拱脚	0	0	—	0	0	—

3.3 动力特性频率评价方法

为了得到频率值,加固前后均采用 MIDAS/CIVIL 结构软件建立平面梁单元模型来进行计算。红旗桥建模时,拱脚约束采用固结,且未计拱上建筑的影响,拱上建筑的恒载经过折算用梯形荷载来模拟,所有的计算分析都是在裸拱的基础上完成的;水磨大桥则是除主拱圈之外,还模拟了拱上立柱及腹拱圈,其余拱上建筑的恒载经折算同样用梯形荷载来模拟,边界支承条件均采用固结方式,立柱与主拱、腹拱与立柱之间采用刚性连接;对裂缝的处理与常规刚度方法中的相同。计算中用子空间迭代法分析特征值,迭代 20 次,收敛误差为  $1 \times e^{-10}$ ,加固前后频率值见表 3。

主拱圈各个节点的挠度绘制成曲线如图 1 和图 2。

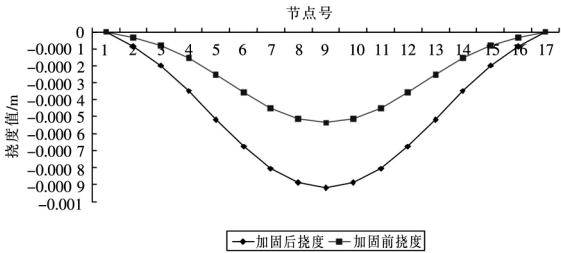


图 1 红旗桥加固前后挠度变化

Fig.1 Deflection change of the Hongqi Bridge before and after strengthening

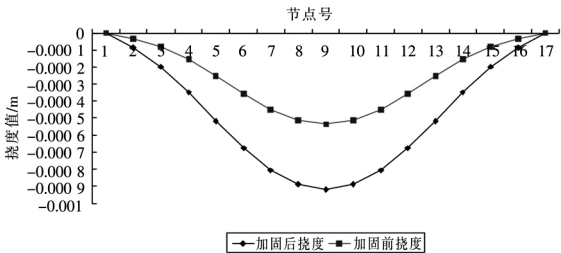


图 2 水磨大桥加固前后挠度变化

Fig.2 Deflection change of the Shuimo Bridge before and after strengthening

依据总挠度变化率  $\beta_T$  来评价加固效果(表 2)。

表 3 加固前后计算频率对照  
Tab.3 Comparison between calculated frequencies before and after strengthening

阶数	红旗桥竖向挠曲频率/Hz			水磨大桥竖向挠曲频率/Hz		
	加固前	加固后	提高/%	加固前	加固后	提高/%
第 1 阶	5.980 6	6.523 4	9.1	1.966 1	2.134 5	8.6
第 2 阶	11.602 6	12.201 2	5.2	3.125 2	3.302 7	5.7
第 3 阶	12.101 2	13.061 9	7.9	3.643 1	3.869 5	6.2

3.4 分析

由表 2 和表 3 对比分析可知,通过刚度对加固效果进行评价,只能获得局部的加固效果信息,若要全面、详细地了解拱桥结构各部分的状态变化,则计算繁琐、工作量大;然而,基于结构动力特性的频率能较方便地获得拱桥结构整体的加固效果信息,且具有反应较敏感的特点,因此证实了依据结构频率(下转第 1008 页)

## 2.6 实例应用

在乌江水域的中心处取一定体积的水样,装入事前处理好的聚乙烯塑料瓶中,加入硝酸酸化至  $\text{pH} < 2$  后,在每 L 水样中再加 0.5 g 重铬酸钾保存。分析时,取一定量水样于 250 mL 烧杯中,加入 1.0 mL 浓硫酸和 2.05%  $\text{KMnO}_4$  溶液,于电热板上加热近沸 30 min,取下冷却,边摇边滴加 10% 盐酸羟胺以破坏过剩的  $\text{KMnO}_4$  和  $\text{MnO}_2$ 。按照上述实验方法进行处理,测定其荧光强度,计算出乌江水中汞的含量,结果见表 2。

表 2 乌江水中汞的测定结果( $n=5$ )

Tab. 2 Results of the determination of Hg in Wujiang water( $n=5$ )

本底值/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ )	加标量/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ )	测得值/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ )	回收率/% (RSD/%)
0.1	0.05	0.148	96.0(1.42)
	0.1	0.194	94.0(2.12)
	0.5	0.592	98.4(1.68)
	1.0	1.058	95.8(2.24)
	5.0	4.91	96.2(2.26)

## 3 结 语

笔者探讨了汞与卤素离子和亚甲蓝生成缔合物,且该缔合物被二氯甲烷萃取后用荧光法测定痕量汞的新方法。该法结合了荧光测定法检测限低和萃取后抗干扰能力强的特点,因此具有较高的灵敏度和选择性。将本方法用于测定乌江水域中汞含量

的测定,实验表明回收率和相对标准偏差值均满足要求,结果比较满意。

## 参考文献:

- [1] 黄伟坤. 食品分析与检验[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1989: 278-279.
- [2] 吕鉴泉, 吕桂英, 周兴旺. BDAB 键合硅胶富集测定水体中痕量汞(II)的研究[J]. 环境科学, 1999(1): 95-97.
- [3] 赵会峰, 张加玲. 浊点萃取分光光度法测定水样中的痕量汞[J]. 中国卫生检验杂志, 2009, 19(2): 302-304.
- [4] 曾洪静, 涂五二, 韩素平, 等. 流动注射在线吸附预富集-冷蒸气原子荧光法测定矿泉水中的痕量无机汞[J]. 分析化学, 2009, 37(7): 1029-1032.
- [5] 赵秋华, 黄健. 氢化物发生-原子吸收光谱法测定水中汞[J]. 环境监测管理与技术, 2000, 12(4): 33.
- [6] 王晓. 萃取分离-偏振塞曼石墨炉原子吸收光谱法测定自来水中痕量汞[J]. 仪器仪表与分析监测, 2003(2): 35-36.
- [7] 周艳梅, 李丽清, 王贵方, 等. 汞-2-(3,5-二氯-2-吡啶偶氮)-5-二甲氨基苯酚-OP 显色体系的应用[J]. 冶金分析, 2000, 20(1): 38-40.
- [8] 张秋荣, 陈文宾, 陈碧珠, 等. 巯基葡聚糖凝胶分离富集二溴邻硝基偶氮肿分光光度法测定汞(II) [J]. 环境监测管理与技术, 2009, 21(1): 18-21.
- [9] 江淑英, 揭念琴. 汞-硫氰酸钠-丁基罗丹明 B 吸光光度法的研究及应用[J]. 理化检验: 化学分册, 1989, 25(5): 279-280.
- [10] [J]. 工程力学, 2008, 25(4): 5-9.
- [3] 肖巍兵, 徐德新, 陈跃庆, 等. 基于耐久性等级评定桥梁加固前与加固后的剩余使用寿命探讨[J]. 工业建筑, 2009, 39(5): 84-88.
- [4] Mohsen F, Hassan H, Abbass A. Repair and strengthening of underground structures [C]//Saudi Arabia: Riyadh, 2009: 163-175.
- [5] 王锋, 杨艳群, 郑玉芳. 基于模态应变能法的混凝土梁桥结构损伤识别研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 107-112.
- [6] 周建庭. 桥梁承载力评定与加固增强研究[D]. 重庆: 重庆交通学院, 1996.
- [7] 周小安, 刘思孟. 桥梁加固增强效果评价指标[J]. 民营科技, 2007(9): 160.
- [8] 张相庭, 王志培, 黄本才, 等. 结构振动力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2005.
- [9] Arndt R, Jalnoos F. NDE for corrosion detection in reinforced concrete structures - A benchmark approach [C]//France: Nantes, 2009: 85-90.
- [10] 徐岳, 武同乐, 张劲泉. 桥梁加固后评价方法研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(4): 91-94.

(上接第 854 页)

可以评价拱桥的加固效果,并且评价效果良好。

## 4 结 论

笔者在分析刚度评价方法的基础上,结合拱桥频率自身特点,提出基于动力特性频率来对拱桥加固效果进行评价。得到如下结论:

- 1) 基于结构动力特性的频率评价方法能全面反应结构的整体加固效果信息。
- 2) 与刚度评价方法相比较,频率评价方法具有计算工作量少、反应较敏感的特点。
- 3) 基于频率的评价方法没有刚度评价方法敏感。因此,探索出恰当的基于固有频率的动力指纹不失为以后的研究方向。

## 参考文献:

- [1] 涂齐亮. 基于多层次模糊综合评判的强夯加固效果的评价[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(4): 55-59.
- [2] 任青文, 杜小凯. 基于最小变形能原理的加固效果评价理论