

# 基于实测基频的石拱桥有限元模型修正与试验验证

郭伟, 刘泽华, 杨志军

(贵州智恒工程勘察设计咨询有限公司, 贵州 贵阳 550004)

**摘要:**石拱桥由于石材与砂浆材料性能相差较大,给桥梁整体模型模拟带来了困难,特别是在旧桥检测或加固工作中,缺乏可靠的理论数据作为支撑,给后续工作开展带来了不少困惑。为能得到匹配实际桥梁的有限元模型,从石拱桥实测基频入手,通过修正有限元模型达到理论基频与实测基频相近,进而采取加载试验测试挠度与理论挠度比较来验证修正后的有限元模型。研究表明:通过实测基频可得到匹配石拱桥的有限元模型。

**关键词:**石拱桥; 实测基频; 有限元模型修正; 试验验证

石拱桥作为一种古老桥型,在山区得到了广泛的应用,造价低、受力性能好、美观,同时也是人类璀璨文明的见证者,所以大部分危旧石拱桥除考虑资金因素外,能加固的情况下则不宜拆除,这给该类桥梁检测或加固带来了许多困惑,因为石材与砂浆材料性能相差较大,两者结合后的本构关系如弹模等如何选择成为有限元模拟的关键,关系到评判实际桥梁受力理论数据的分析,如检测中理论荷载效应或加固中原结构实际抗力等。

为探索石拱桥组合材料的本构关系,检测中常用回弹法、钻芯法进行抗压强度测试,但都存在一定缺陷,如回弹法只能测试结构表面的抗压强度,不能反映结构内在缺陷,钻芯法会损伤结构、产生不可逆的破坏。国内外很多学者采用三维实体单元及静载试验等方式进行有限元模型修正,也有采用拾取桥梁动力特性的方法进行模型修正,并提出一些经验数值。有关研究表明:基于桥梁动力特性的有限元模型修正可匹配实际结构的受力响应。

鉴于此,拾取随机环境振动下的桥梁动力特性,是一种无损测试方法,可对三维实体有限元模型进行修正,在石拱桥的检测或加固中具有实际意义和理论价值。

## 1 理论背景

从1940年秋美国Tacoma吊桥因风激扭转颤振

破坏后,国内外学者开展了大量桥梁结构振动方面的研究,特别是结构固有频率方面,因其反映了结构尺寸、类型和材料等固有动力特性,是一切动力问题的基础,计算方法有积分法、能量法、渐进法、等值梁法和有限元方法,上述方法除有限元法外,其余方法计算复杂,在工程结构中应用不便。根据文献[16],桥梁的基频宜采用有限元方法计算。对于等截面石拱桥,当无精确方法计算时,也可采用式(1)估算:

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI_c}{m_c}} \quad (1)$$

式中: $E$ 为结构材料弹性模量; $I_c$ 为主拱跨中截面惯性矩; $m_c$ 为主拱跨中处单位长度质量; $\omega_1$ 为频率系数, $\omega_1 = 105 \times \frac{5.4 + 50f^2}{16.45 + 334f^2 + 1867f^4}$  ( $f$ 为等截面主拱计算矢跨比,变截面石拱桥 $\omega_1$ 系数不在文中讨论范围); $l$ 为主拱计算跨径。

从式(1)可知:除结构弹性模量 $E$ 外,所有参数均可通过文献和现场量测获得。同时,根据文献[17],在上述量测参数和外荷载已知的情况下,关键位置的测试挠度也只与 $E$ 有关,这就为有限元模型的修正及后续试验验证搭建了桥梁,问题的核心是通过实测基频 $f_1$ 来修正弹性模量 $E$ ,即基频的公式估算法为该值的有限元精确计算方法提供了修正方向。

## 2 实测几何参数

对于某些石拱桥,由于建成年限较久、缺乏竣工资

料而无法获得结构的基本数据。同时,为进一步模拟桥梁的实际受力状况,反映结构运营后的空间状态,如结构线形、拱圈等几何参数,现场可通过全站仪、水准仪、皮尺和钢卷尺等仪器量测获取。某石拱桥,测试主拱圈线形时通过拱腹边缘免棱镜方式布设 9 个测点,其测试数据如表 1 所示。

表 1 某石拱桥主拱圈拱腹三维线形测量数据

测点编号	纵向坐标 X/m	横向坐标 Y/m	竖向坐标 Z/m
1 <sup>#</sup>	0.000 0	1.958 4	25.254 6
2 <sup>#</sup>	3.170 1	1.913 8	27.799 8
3 <sup>#</sup>	8.387 8	1.921 4	30.280 2
4 <sup>#</sup>	11.755 6	1.910 3	31.031 5
5 <sup>#</sup>	20.031 9	1.939 9	30.788 3
6 <sup>#</sup>	23.379 3	1.948 2	29.644 1
7 <sup>#</sup>	25.935 8	1.949 1	28.366 2
8 <sup>#</sup>	28.682 5	1.942 4	26.439 1
9 <sup>#</sup>	30.008 5	1.947 6	25.263 7

上述主拱圈拱腹测量数据经二次抛物曲线拟合,分析处理后拱腹竖向坐标 Z 与纵向坐标 X 的关系为  $Z=-0.027\ 2\cdot X^2+0.818\ 5\cdot X+25.325$ ,相关系数 R 为 0.998,具有很高的可信度,拟合后的拱腹线形如图 1 所示。

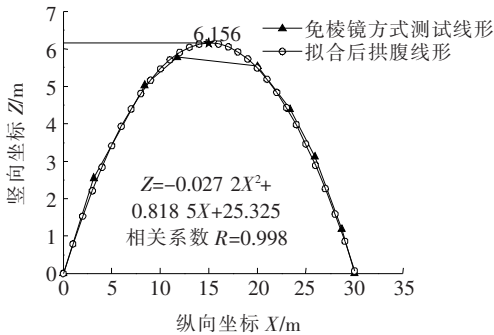


图 1 主拱圈拱腹线形

通过上述测试,可知该桥为净跨径 1×30 m 上承式空腹式石拱桥,主拱圈净矢高为 6.156 m,净矢跨比约为 1/5,主拱圈厚度为 0.8 m,宽度为 8 m。全桥共设置 4 个腹拱,腹拱净跨径为 3.5 m,矢跨比约为 1/4.5,腹拱圈厚度为 0.35 m,主、腹拱等宽。桥面布置为 2×0.3 m(护栏)+7.8 m(行车道)=8.4 m。全桥最后的立面布置如图 2 所示。

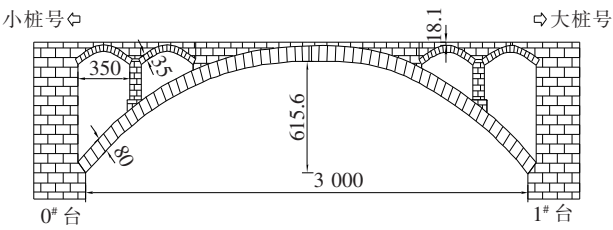


图 2 全桥立面布置图(单位:cm)

3 结构基频测试

根据桥址处风荷载、地脉动等随机荷载激振而引起的桥跨结构微小振动响应,采取频域的峰值法(PP)和时域的随机子空间法(SS1)获得结构的振动频率,实测动力特性和计算动力特性的相关程度为:

$$MAC(\phi_a,\phi_e)=\frac{|\phi_a^T\phi_e|^2}{(\phi_a^T\phi_a)(\phi_e^T\phi_e)} \tag{2}$$

式中: $\phi_a$  为计算频率; $\phi_e$  为实测频率。

为保证测试的准确性,根据有限元初始分析模型,可知该桥在第 2 腹拱靠实腹段拱脚对应主拱圈处第 1 阶动力响应最敏感,所以在该处主拱圈拱背上布设振动测点,拾取的时域信号经过快速傅里叶变换(FFT)得到频域信号,其幅频图形如图 3 所示,同时可得该桥的实测基频  $f_1=4.89\text{ Hz}$ 。

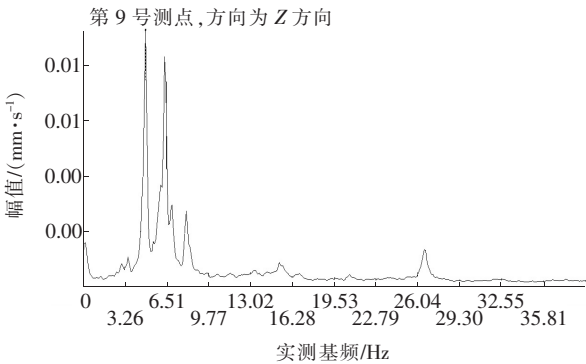


图 3 结构实测基频

4 有限元模型修正

为保证有限元分析模型的精确性,文中采用 Midas FEA 有限元分析程序建立实体单元模型,该程序是一款专门为土木工程细部分析和非线性分析提供整体解决方案的通用软件,该文主要利用其精确的细部分析。示例石拱桥共划分为 54 575 个节点,249 538 个实体单元,单元尺寸控制在 0.2 m 以内。主拱圈、

横墙、腹拱圈等承重结构初始弹性模量取 5.0 GPa,不考虑拱上填料刚度、填料与拱圈的相对滑动,只考虑其密度,所有材料的质量密度取 2 100 kg/m<sup>3</sup>,泊松比取 0.2。根据 FEA 随机子空间(SSD)算法,最后用粒子群算法(PSO)进行优化,该石拱桥初始理论基频为 5.058 98 Hz,如图 4 所示。

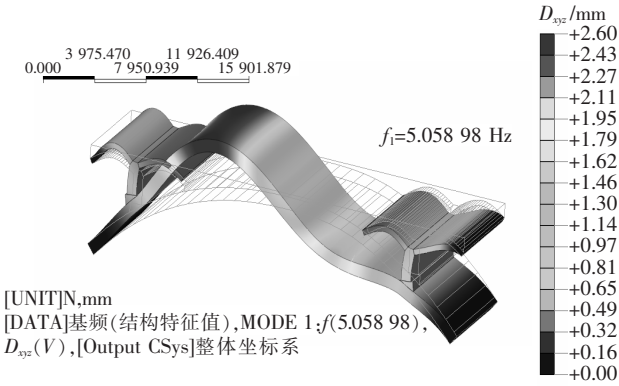


图 4 结构初始理论基频

根据最小二乘法原理,通过不断修正模型中承重结构的弹性模量进行迭代求解,当弹性模量  $E=4.668\ 9$  GPa 时,结构理论计算基频为 4.888 6 Hz,此时理论基频与实测基频的相关程度 MAC 接近 1。修正后的理论基频如图 5 所示。

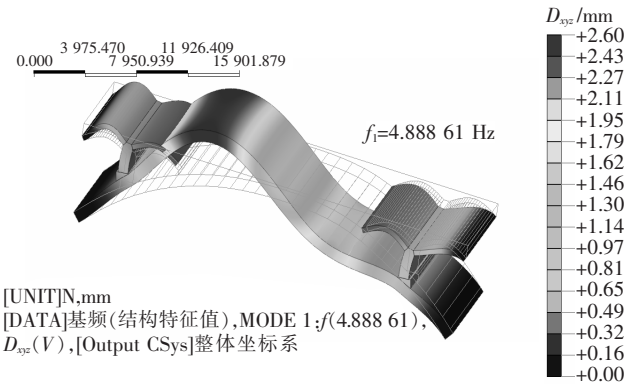


图 5 结构修正理论基频

5 有限元模型试验验证

为验证上述修正模型的正确性,并与现场交通情况相吻合,保证试验桥梁的安全性。通过调查,该桥位于两车道路路上,时常有载重 50 t 左右的大汽车通过。为确保该桥安全并得到可量测的挠度响应数据,拟选 2 辆总重各为 40 t 左右的载重汽车进行试验。

进行试验的第 1 辆载重汽车总重为 41.6 t(前轴重 10.4 t,中后轴各重 15.6 t,前轴距中轴中心距离

3.72 m,中后轴中心距离 1.53 m,横向轴间中心距离 1.82 m),第 2 辆载重汽车总重为 40.7 t(前轴重 10.175 t,中后轴各重 15.262 5 t,前轴距中轴中心距离 3.68 m,中后轴中心距离 1.51 m,横向轴间中心距离 1.79 m)。

试验时先用总重为 41.6 t 的载重汽车进行预压,挠度响应稳定后卸载,用 2 辆载重汽车同时进行试验,具体挠度测点和车辆布置如图 6 所示,实际加载试验如图 7 所示。

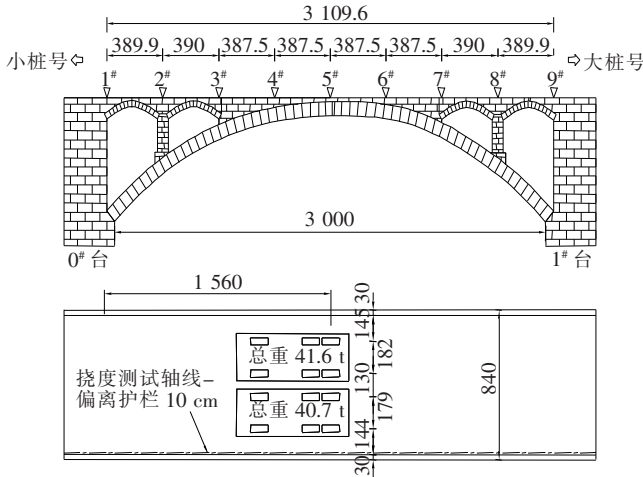


图 6 挠度测点和车辆布置图(单位:cm)

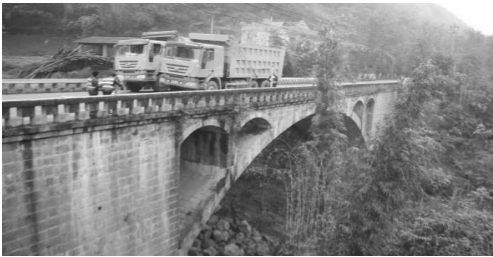


图 7 实际加载试验

根据试验车辆轴重和尺寸,通过实体单元模型可得加载试验石拱桥理论变形如图 8 所示,其跨中 5<sup>#</sup>测点理论最大下挠 3.49 mm,实测跨中下挠 3.32 mm,挠度最大响应处达到 0.95 的校验系数,同时也说明拱上填料与承重结构有一定的联合作用。各测点竖向挠度响应曲线如图 9 所示。

同时,针对石拱桥竖向挠度响应较小的结构,该示例中跨中截面最大理论下挠 3.73 mm,最小理论下挠 3.46 mm,测试点理论下挠 3.49 mm,最大最小理论值有近 8% 的数值差别,如图 10 所示。即使车辆横向对称布置,同一横截面不同位置的挠度响应数值会存在一定差别,所以工程中石拱桥应以实体单元有限元模型进行理论分析。

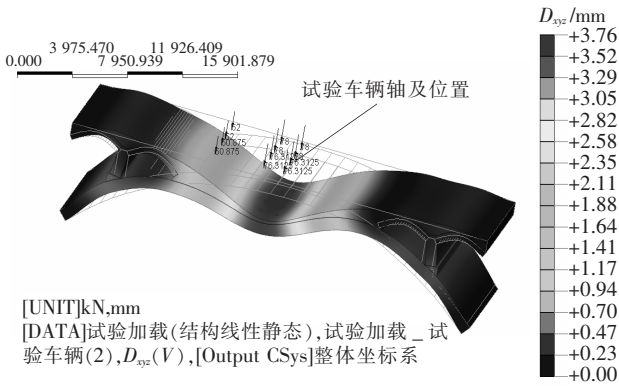


图8 试验车辆作用下结构理论变形

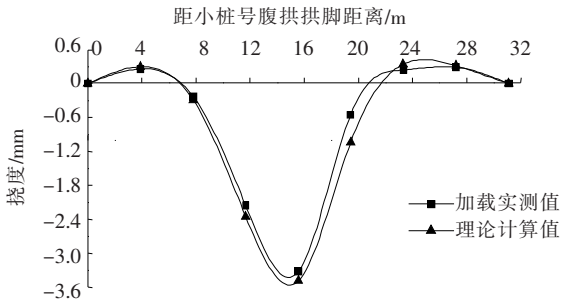


图9 各测点竖向挠度响应曲线

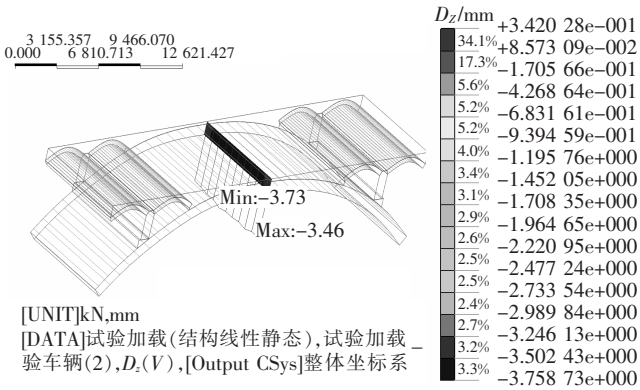


图10 跨中截面横向理论变形

上述理论分析和实测试验数据验证了修正模型的合理性,说明基于实测基频的石拱桥有限元模型修正可匹配实际结构,从实测基频的动力特性方面入手,能快速掌握整座桥梁的服役状况,可为后续的检测或加固工作提供理论参考。

6 结论

- (1) 为模拟服役石拱桥的实际受力状况,有限元分析模型应以实测几何参数为依据。
- (2) 为测试石拱桥第1阶竖向振型,拾振器不应布设在跨中振型节点上,应布设在尽可能靠近主拱圈

跨中的拱背上,具体位置以理论分析和方便拾振器安装为准。

(3) 基于实测基频的动力特性修正有限元模型,可快速掌握整座桥梁的服役状况,并与静载试验结果相互吻合。对于大部分石拱桥,主拱圈等承重结构初始弹性模量建议取5 GPa。

(4) 对竖向荷载效应较小的石拱桥,同一横截面最大最小挠度响应存在一定的数值差别,理论分析应建立有限元实体单元模型。

参考文献:

[1] 董玉. 混凝土抗压强度检测技术[J]. 无损检测, 2019(2).

[2] Fanning P J, Sobczak L, Boothby T E, et al. Load Testing and Model Simulations for a Stone Arch Bridge[J]. Bridge Structures, 2005, 1(4): 367—378.

[3] 周岑,郑凯锋,范立础. 大跨度石拱桥的全桥结构仿真分析研究[J]. 土木工程学报, 2004(3).

[4] 聂建国,樊健生. 700年石拱桥的静力加载试验与结构分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003(6).

[5] 牛东强. 石拱桥检测及承载能力修正[J]. 水利与建筑工程学报, 2016(3).

[6] 彭伟,吴成忠,郑建红. 悬链线石拱桥检测及承载能力分析[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2017(6).

[7] 石明兰,左小刚,夏樟华. 基于动力的石拱桥有限元模型修正[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2009(4).

[8] 李金海,王建中,刘静. 基于实测模态振动数据的悬索桥有限元模型修正[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016(7).

[9] 张纯,宋固全,吴光宇. 实测模态和结构模型同步修正的结构损伤识别方法[J]. 振动与冲击, 2010(9).

[10] 宗周红,阮毅,任伟新. 基于动力的预应力混凝土独塔斜拉桥承载力评估[J]. 铁道学报, 2004(6).

[11] 陈宜言,许有胜,左小刚,等. 基于静动力测试的多跨预应力连续梁桥承载力评估[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2006(4).

[12] 成凯,叶锡钧,梁伟. 大跨度异形拱桥动力特性分析[J]. 中外公路, 2019(4).

[13] 赵超,彭雄. 基于 Midas/FEA 的某大桥主墩承台水化热影响因素有限元分析[J]. 兰州工业学院学报, 2018(1).

[14] 黄海新,李振龙,方乐焱. 既有桥梁损伤状态模拟方式和判断标准的探究[J]. 河北工业大学学报, 2018(2).

[15] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社, 1992.

[16] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].

[17] JTG D61—2005 公路圬工桥涵设计规范[S].

[18] 孙宇,施洲. 石拱桥的检测试验与验算评定[J]. 铁道标准设计, 2009(3).