

环境激励下刚架拱桥模态识别与可靠度评估

杨万辉, 庞伟, 马春江, 柳生瀚, 马骏

(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 某城市道路项目在更新改造过程中, 某刚架拱桥出现显著结构损伤。以该桥为对象, 采用随机子空间法开展模态识别, 结合空间有限元法分析其动力性能, 并基于响应面法评估结构可靠度。结果表明, 桥梁实测频率略低于有限元理论值, 验证了模态参数识别的有效性, 并实现了对结构可靠性的定量评价。研究成果可为同类在役桥梁的有限元模型修正、可靠性评定及维修加固提供理论支撑。

关键词: 刚架拱桥; 模态识别; 动力试验; 响应面法; 可靠度评估

中图分类号: U446.3; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0264-04

Modal Identification and Reliability Assessment of Rigid-Frame Arch Bridge under Ambient Excitation

YANG Wanhui, PANG Wei, MA Chunjiang, LIU Shenghan, MA Jun

(China Northwest Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: During the reconstruction and upgrading of an urban road project, the significant structural damage is identified in a rigid-frame arch bridge. Taking the bridge as the object, the stochastic subspace method is used to carry out the modal identification. Its dynamic performance is analyzed in conjunction with the spatial finite element method, and based on the response surface method, the structural reliability is assessed. The results indicate that the measured bridge frequencies are slightly lower than the theoretical finite element values, validating the effectiveness of modal parameter identification and achieving a quantitative assessment of structural reliability. The research outcomes can provide theoretical support for finite element model modification, reliability evaluation and maintenance reinforcement of similar in-service bridges.

Keywords: rigid-frame arch bridge; modal identification; dynamic test; response surface method; reliability evaluation

0 引言

刚架拱桥作为一种兼具斜腿刚架与拱结构力学优势的复合桥式结构, 具有施工便捷、造型美观、地形适应性强和结构自重轻等突出特点, 在我国20世纪八九十年代的公路桥梁建设中得到广泛应用^[1]。随着服役年限增长、交通流量持续增加与荷载等级不断提高, 部分早期修建的钢筋混凝土刚架拱桥因设计标准偏低、材料性能自然退化和日常养护不及时等多重因素影响, 陆续出现结构开裂、变形等病害, 导致结构整体刚度与承载能力显著下降^[2]。

结构动力模态参数能够客观反映桥梁的整体力学性能, 其识别过程需通过采集结构响应信号, 在外部激励未知的情况下实现系统动力学特性的辨识^[3]。

目前常用的模态识别技术主要包括时域分析法、频域分析法和时频联合分析法等。通过动力测试获取桥梁结构的自振频率、振型和阻尼比等核心模态参数, 是进行结构健康监测与损伤诊断的关键基础^[4]。

因此, 基于精准环境振动试验下动力模态参数识别的老旧刚架拱桥可靠性评估技术, 已成为城市更新进程中亟待解决并不断完善的重要工程技术问题。

1 工程概况

该刚架拱桥建于20世纪90年代, 桥址位于地震基本烈度7度区。桥梁设计流量为184 m³/s, 洪水设计重现期为100年一遇。设计车辆荷载等级为汽车-超20级、挂车-120。桥面总宽度46 m, 桥梁横断面整幅对称布置, 车道划分布置为: 16.5 m 快车道+2×3.25 m 分隔带+2×6 m 慢车道+2×1.5 m 分隔带+2×4.0 m 人行道=46 m。快慢车道之间的分隔带顶部设有盖板, 支承于两侧悬臂板之上; 桥台处设置20 mm

收稿日期: 2025-12-22

作者简介: 杨万辉(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

伸缩缝(见图1)。本研究选取快车道桥作为对象,开展动载试验与有限元仿真分析,以识别其模态参数并评估结构损伤状况。

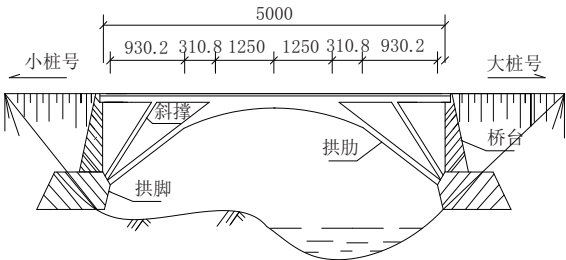


图1 桥梁立面(单位:cm)

桥梁主要构件采用预制与现浇相结合的施工工艺:拱腿、斜撑、弦杆等主要受力构件为工厂预制,现场安装;拱顶填平层、桥面板、翼缘板及各类湿接缝均为现场浇筑完成。关键连接节点,如拱腿-弦杆、拱顶接头、拱腿-实腹段等处,采用钢-混凝土组合刚性连接;其余节点则通过现浇混凝土实现整体连接。

材料选用分为以下两大部分:

(1)混凝土按部位采用不同强度等级

- a. 拱片现浇接头:C35。
- b. 拱片、微弯板、现浇填平层、翼板拱座及桥头搭板:C30。
- c. 桥面铺装:C30防水混凝土。
- d. 栏杆、扶手及防撞护栏基座:C25。
- e. 桥台侧墙、前墙及台身:C20。
- f. 桥台基础:C15。
- g. 调治构造物坡面及坡基:M7.5浆砌片石。

(2)钢筋主要采用两类

- a. HPB300(直径6~25 mm)用于箍筋、小型构件主筋及吊环。
- b. HRB400(直径≥12 mm)用作主要受力构件的受力钢筋与构造钢筋。

2 模态参数识别及分析原理

模态分析是振动控制、状态监测与故障诊断的基础。假设环境激励的功率谱密度矩阵函数为 $G_{ff}(\omega)$,响应的功率谱密度矩阵函数为 $G_{yy}(\omega)$,根据振动理论^[5-7]有:

$$G_{yy}(\omega) = H^*(\omega)G_{ff}(\omega)H^T(\omega) \quad (1)$$

$$H(\omega) = \sum_{r=1}^m \frac{\varphi_r \varphi_r^T}{k_r - \omega^2 m_r + j\omega c_r} \quad (2)$$

式中: $H(\omega)$ 为频响函数矩阵; $H^*(\omega)$ 为其共轭; m 为测点数量。将 $H(\omega)$ 中元素 $H_{ij}(\omega)$ 表示为:

$$H_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^m \frac{\varphi_{ir} \varphi_{jr}^T}{k_r - \omega^2 m_r + j\omega c_r} \quad (3)$$

式中: φ_{ir} 为第 r 阶振型在第 i 测点的分量; C_r, m_r, k_r 分别为第 r 阶模态的阻尼、质量与刚度。通常认为,振动的固有频率为功率谱密度函数曲线的峰值,再根据上述关系计算振型,完成试验模态分析。

2.1 有限元模型分析

有限元分析采用MIDAS Civil 2025软件建立全桥三维空间数值模型受力分析,全桥主要构件采用梁单元与板单元进行模拟对比,非结构质量按等效原则进行简化处理,采用非线性本构模型,混凝土弹性模量为 $3.0 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$,泊松比为0.2,容重为 25 kN/m^3 ,按实际受力情况施加拱桥所受自重、二期、温度、沉降、施工阶段荷载及移动荷载等。其中,拱腿、斜撑、实腹段及横系梁采用矩形截面梁单元,起拱段腹板与桥面微弯板采用变截面梁单元,拱脚部位按六向自由度固结约束条件处理。该有限元模型共包含434个节点、686个单元,通过特征值计算方法,得到如图2所示桥梁结构的前1~5阶振型。

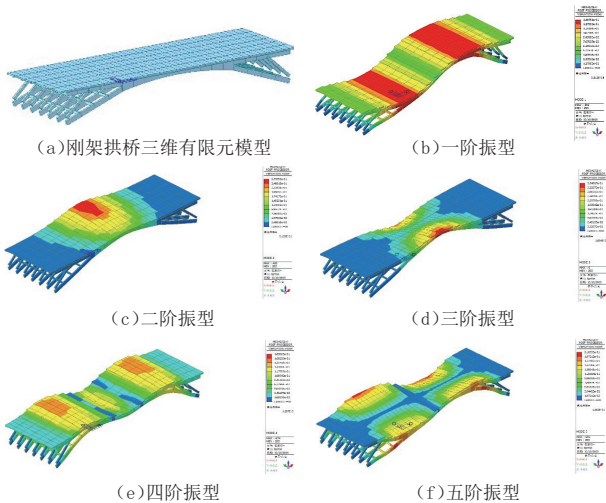


图2 刚架拱桥有限元模型和前五阶振型

2.2 环境振动试验

采用动态信号测试系统采集桥梁在环境激励下的动力响应。测点布置避开振型驻点,1号点设为参考点。传感器牢固安装于桥面,采集竖向加速度信号,设定采集频率为20 Hz/30 min。测点布置空间位置关系如图3所示。

一般情况下,使桥梁结构产生微小振动的环境激励多采用风荷载、地震动荷载、汽车荷载等外部激励来测量桥梁自振特性。通过拾振传感器采集结构振动的反应,如加速度信号、频率响应等表现形式,由放大过滤器放大,再由信号处理器采集加速度信

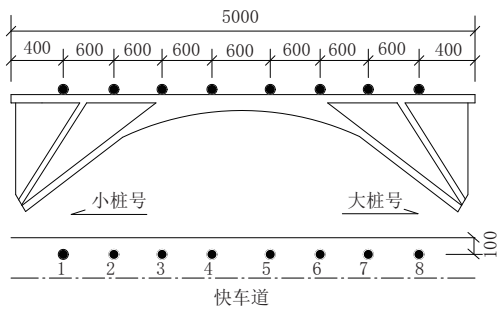


图3 桥面拾振器测点平立面布置(单位:cm)

号并进行处理^[6-8]。布置时尽量避开所有感兴趣振型的驻点位置,其中1号点为参考点。现场实测该刚架拱桥的波形图及利用峰值法确定的平均正则化功率谱密度曲线如图4所示。

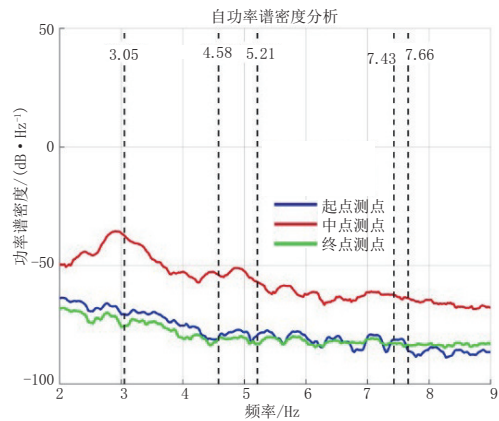


图4 自功率谱分析

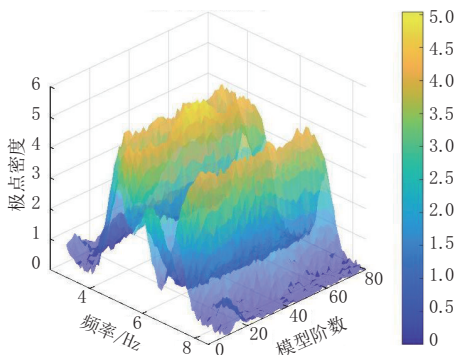
平均正则化功率谱密度函数曲线的提取可通过峰值法获得(见图4),进一步通过奇异值分解、QR分解及最小二乘法等数值模拟方法识别系统状态空间矩阵,获取频率、阻尼比与振型等动力参数。随机子空间法(SSI)可生成稳定图,提高模态识别的准确性与可靠性^[8-10]。基于试验数据的响应面分析如图5所示,有效识别了桥梁的真实模态。

采用随机子空间方法,通过模态分析和参数识别处理,得到桥梁结构各阶自振频率^[11-12]。通过动测分析,得到该刚架拱桥的理论实测频率,并结合MIDAS Civil 2025有限元分析软件计算所得的理论频率,结果如表1所示。

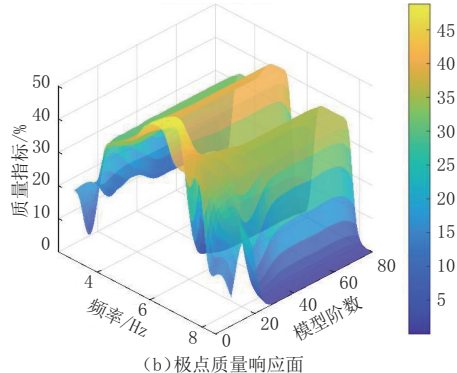
有限元频率普遍高于实测值,说明桥梁在使用过程中结构刚度有所降低,整体性能减弱。前五阶模态中较早出现扭转振型,反映横向连接薄弱,需采取加固措施。

2.3 可靠度评估

响应面法是一种高效的结构可靠度分析方法,核心思路是通过一系列有限元数值计算结果拟合构建响应面模型,以此替代复杂未知的真实功能函数



(a) 响应面与极点分布



(b) 极点质量响应面

图5 随机子空间识别法计算的响应面

表1 刚架拱桥前五阶计算频率与实测频率统计

模态	理论频率/Hz	实测频率/Hz	频率误差/%	刚度比
1阶	3.11	3.05	1.93	1.02
2阶	4.70	4.58	2.55	1.03
3阶	5.28	5.21	1.33	1.01
4阶	7.77	7.43	4.38	1.05
5阶	7.93	7.66	3.40	1.04

曲面,从而能够直接利用现有有限元分析程序开展结构可靠度计算工作^[13]。响应面法可将结构功能函数表达式近似表示为随机变量的显式关系,结合验算点法等可靠度计算方法,能够大幅提高结构可靠度的计算效率^[14-15]。

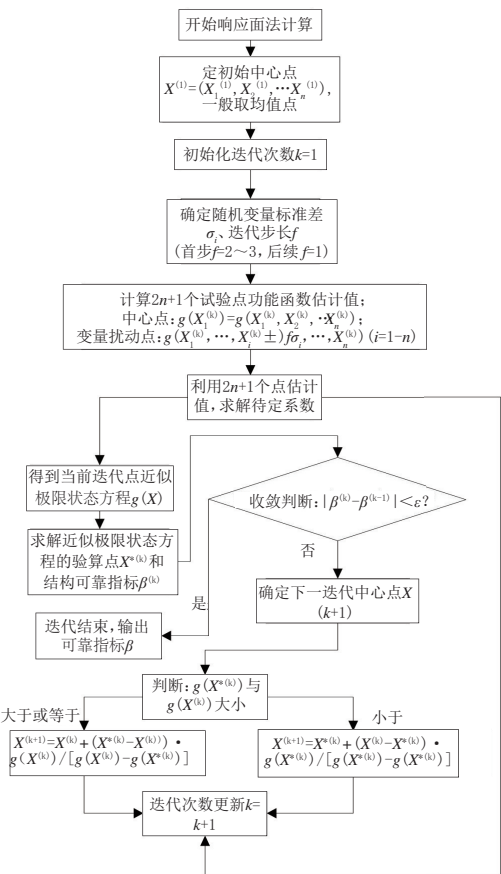
对各随机变量 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 的情况,响应面函数通常采用不含交叉项的二次多项式形式:

$$\bar{Z} = \bar{G}(X_1, X_2, \cdots, X_n) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n c_i X_i^2 \quad (4)$$

式中: $a, b_i, c_i(i = 1, 2, \cdots, n)$ 为待定系数。响应面法的计算流程如图6所示。

结构可靠度计算的响应面法能够直接依托现有有限元分析程序开展工作,在大型复杂结构工程的可靠度评估中具有重要的实用价值和理论研究意义。但需要注意的是,与JC法相结合的传统响应面法需对响应面函数进行线性化处理,这一过程会引入一定的数值计算误差^[16-17]。

各随机变量的统计参数如表2所示^[14]。



采用 MATLAB 基于响应面法编程计算可靠指标,经迭代收敛后,得到不同荷载效应比 q/g 下拱桥各关键部位裂缝可靠指标变化关系,如图 7 所示。

结果表明,可靠指标随荷载变化呈现非线性响应,存在明显的波峰和波谷区域,表明在不同荷载组合下,结构可靠性的敏感性变化情况;在正常使用状态下,随着 q/g 增大,拱顶部位的可靠指标下降幅度显著大于拱脚与斜撑,其值较后者低约 30%~40%,说明拱顶区域损伤更为严重;拱顶区域对活载变化特别敏感, q 增大时,可靠指标急剧下降,拱脚与斜撑区域对荷载变化的响应相对平缓,可靠指标下降幅度较小。在结构设计中应特别关注拱顶的承载能力和可靠性,同时应限制活载水平或优化活载分布,可

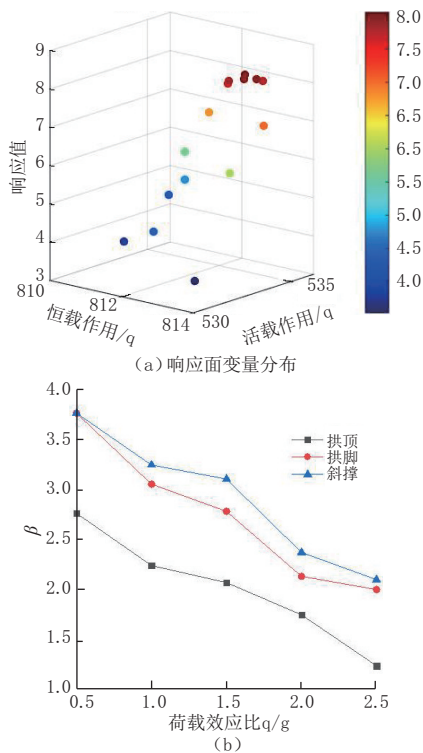


图7 同荷载效应比 q/g 下的响应面及可靠指标

显著提高拱顶可靠性。

3 结 语

- (1)在模态参数识别中,一阶反对称竖向振型的理论与实测频率误差为 1.93%,说明随机子空间法结合响应面分析能够稳定获取模态参数。
- (2)有限元结果显示第二阶起出现扭转振型,表明该桥横向连接不足、整体刚度下降,削弱了结构的协同工作能力,导致荷载横向分布效率降低是导致损伤的主因,建议进行横向加固。
- (3)结构刚度比介于 1.01~1.05 之间,理论与实测值吻合良好,验证了动力试验与有限元分析在模态识别中的有效性。通过进一步校准材料参数、边界条件与连接刚度,可进一步提升模型的预测能力,服务于结构的长期健康监测与性能维护,可为同

表2 各随机变量的统计参数					
随机变量	变量	分布类型	平均值 μ	标准差 σ	变异系数 δ
不确定性系数	γ	对数正态分布	1	0.236	0.236
钢筋弹性模量/(N·mm)	E_s	正态分布	2.1×10^5	12 000	0.060
恒载作用/kN	g	正态分布	812.6	1.06	32.332
活载作用/kN	q	极值Ⅰ型分布	535.5	1.8	56.609
截面有效高度/mm	h	正态分布	1 000	2	0.023
混凝土保护层厚/mm	c	正态分布	30	6	0.387
钢筋等效直径/mm	d	正态分布	25	0.15	0.015
混凝土轴心抗拉强度/(N·mm ⁻²)	f_{tk}	极值Ⅰ型分布	2.20	0.24	0.117

(下转第 272 页)