

# 大跨度异形拱桥动力特性分析

成凯，叶锡钧，梁伟

(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 桥梁的动力特性包括自振频率、振型和阻尼比,它是评估桥梁整体性能的重要参数。该文通过有限元分析软件 Midas 对某大跨度异形人行拱桥动力特性进行分析,得到它的频率和振型,并结合现场模态试验验证了模型的可靠性。同时分析了拱桥的自振频率影响因素,发现拱肋的弹性模量和重度对拱桥的自振频率影响最大,吊杆的弹性模量和重度对它的自振频率影响最小。

**关键词:** Midas; 钢箱梁系杆拱桥; 自振特性; 模态试验

随着现代化立体交通概念的发展,各类跨线人行桥、城市人行天桥、各种景观桥得到了迅速的发展。人行桥不仅拓展了城市交通空间,而且隔离了行人与机动车辆,同时还减少了道路通行压力和交通事故的发生。目前人行天桥正向大跨度、轻型化发展,而异形人行拱桥以其独特的造型更加受到青睐,由于它的特殊性,进行动力分析十分必要。

异形人行拱桥的动力分析主要分析其自振特性,即自振频率和振型。根据结构动力学相关知识,它们与结构的组成、刚度、质量分布及约束条件有关。该文通过建立有限元模型,用有限元分析方法,分析某异形人行拱桥的动力特性,并对桥梁进行试验模态分析,识别出桥梁结构的固有频率、模态振型等桥梁结构的动态特性参数,可用于评判结构的总体性能。同时分析拱桥的自振频率影响因素,得到各影响参数的敏感度,为模型修正和拱桥设计提供依据。

## 1 工程背景

某下承式钢箱混凝土组合系杆拱桥,全桥共有 17 对吊杆,每组吊杆间距 5 m,主拱计算跨径 90 m,矢高 21.43 m,矢跨比 1/4.2。主梁采用钢箱梁结构,端部宽 15 m,跨中宽 10 m,梁高 1.2 m。拱肋采用悬链线加圆曲线形式,悬链线部分采用等宽等高单箱单室钢箱截面,拱脚圆曲线部分采用钢—混凝土组合结构,内灌 C50 微膨胀混凝土。基础采用桩接承台的结构形式,

承台高 2.5 m,拱肋与主桥桥墩同时支撑于一个承台上,每个承台共设置 4 根 200 cm 的冲孔桩基础。该人行天桥的立面图如图 1 所示。

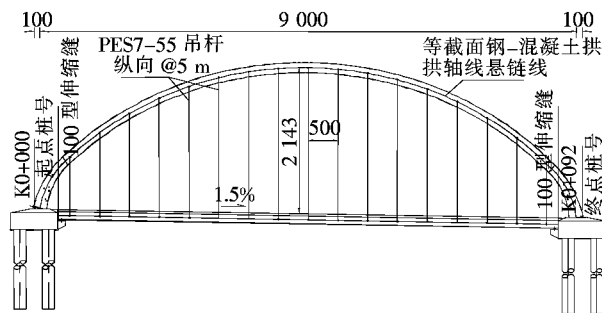


图 1 某人行拱桥立面图(单位:cm)

## 2 有限元模型建立

采用 Midas/Civil 2012 对该人行天桥进行有限元分析。共建立了 6 176 个节点, 6 533 个单元, 其中板单元 6 165 个, 桁架单元 34 个, 只受拉单元 4 个。该人行天桥的钢箱梁采用板单元模拟, 拱肋采用梁单元模拟, 吊杆用桁架单元模拟, 纵向拉杆用只受拉单元, 拱脚部分采用共节点双单元。考虑桩基的影响, 根据地质资料和“m”法建立土弹簧单元, 建立的有限元模型见图 2。

### 3 模态测试方案

由于该桥为人行天桥,不进行行车测试,仅测试桥

收稿日期:2018-10-19

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(编号:51608136);广东省公路管理局科研项目(编号:粤公研2017-1)

作者简介:成凯,男,硕士研究生.E-mail:chengkai@e.gzhu.edu.cn

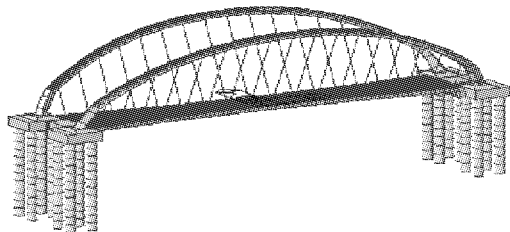


图 2 有限元模型

梁的自振特性,包括频率、阻尼比和振型模态。模态测试的振动测点布置如图 3 所示, GV 表示拱肋竖向传感器, GH 表示拱肋横向传感器, LV 表示系梁竖向传感器, LH 表示系梁横向传感器。传感器沿桥梁中心线对称布置。采样频率设置为 50 Hz,每组采样时间大于 15 min,桥梁主梁和拱肋竖向 6 个测点的加速度时程如图 4、5 所示。

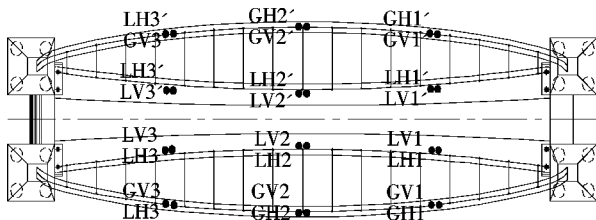


图 3 传感器布置平面

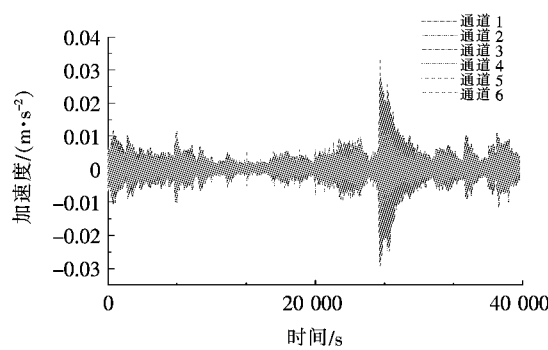


图 4 主梁竖向 6 通道加速度时程图

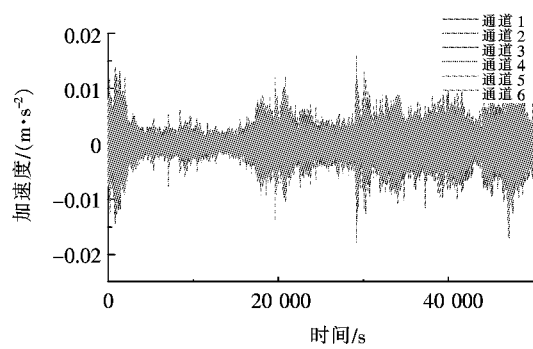


图 5 拱肋竖向 6 通道加速度时程图

4 模态分析

模态分析即结构的自振特性分析,它可以了解结构的固有频率、阻尼比和各阶模态。该文对该人行天桥的模态进行分析,得到了该桥的自振频率理论值,并通过现场模态试验(自然脉动),识别出该桥的固有频率和振型,通常仅考虑前几阶频率和振型。主桥的前几阶固有频率及模态振型如表 1 所示,部分模态振型的实测值与理论值如图 6~9 所示。主拱的前几阶固有频率及模态振型如表 2 所示,部分模态振型的实测值与理论值如图 10~13 所示。

表 1 主梁理论与试验对比分析结果

阶次	理论频率/ Hz	实测频率/ Hz	振型描述
1	2.089	2.136	竖弯 1(反对称)
2	2.549	2.350	竖弯 2(正对称)
3	4.071	4.065	扭转 1
4	4.581	4.535	竖弯 3(正对称)
5	4.071	4.077	横弯 1(正对称)
6	11.156	10.718	横弯 2(反对称)

表 2 拱肋理论与试验对比分析结果

阶次	理论频率/ Hz	实测频率/ Hz	振型描述
1	2.089	2.136	竖弯 1(反对称)
2	2.549	2.344	竖弯 2(正对称)
3	2.089	2.478	拱肋反向反对称横弯
4	4.071	4.065	扭转 1
5	4.581	4.529	竖弯 3(正对称)
6	5.665	5.054	拱肋同向正对称横弯

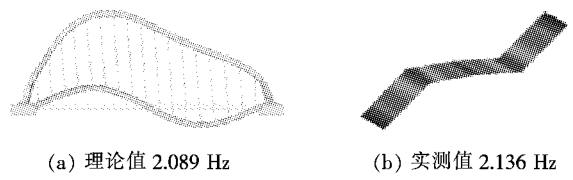


图 6 主梁 1 阶竖弯振型理论值与实测值

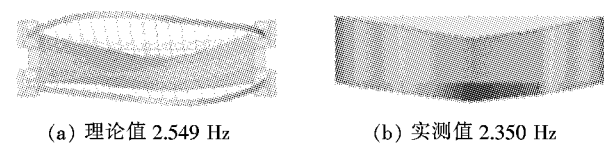


图 7 主梁 2 阶竖弯振型理论值与实测值

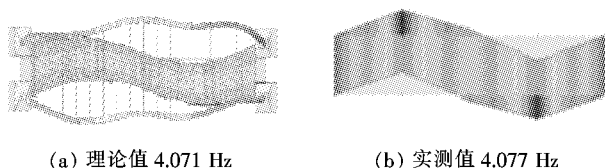


图 8 主梁 1 阶横弯振型理论值与实测值

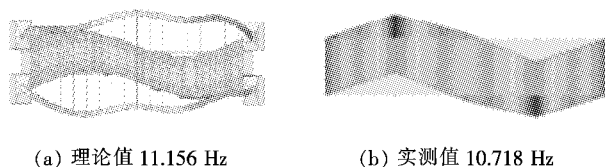


图 9 主梁 2 阶横弯振型理论值与实测值

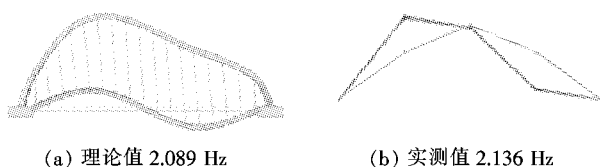


图 10 主拱 1 阶竖弯振型理论值与实测值

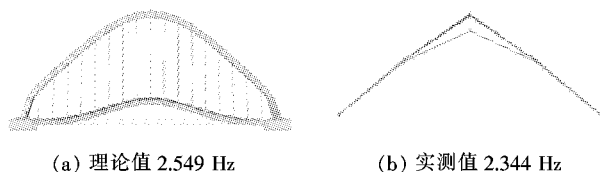


图 11 主拱 2 阶竖弯振型理论值与实测值

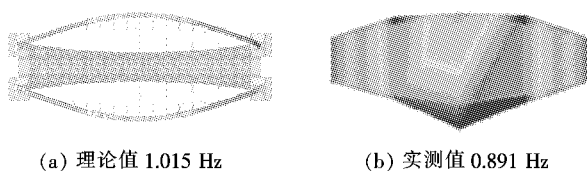


图 12 主拱 1 阶横弯振型理论值与实测值

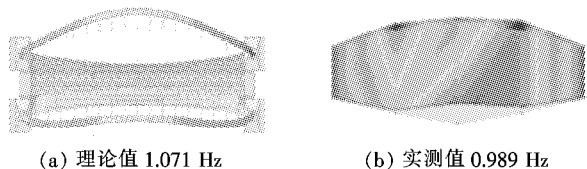


图 13 主拱 2 阶横弯振型理论值与实测值

通过理论值与实测值对比分析,发现理论值与实测值十分接近,拟合度较好,从而进一步验证了该桥计算模型的合理性。通过振动频率、振型等模态参数的比较,该桥的主梁 1 阶竖弯实测频率大于理论计算,表明该桥主梁的整体刚度满足设计要求;拱肋的 1 阶竖弯实测大于理论,1 阶横弯实测小于理论,表明其面外刚度稍小,若发生失稳,则面外先于面内失稳。

## 5 自振频率影响因素分析

影响桥梁的自振频率因素众多,有材料的特性,结构的几何参数,边界条件等。该文通过控制拱肋钢材、拱脚混凝土、桥面板混凝土、钢箱、吊杆的弹模和重度这 10 个变量,得到了各阶模态的频率。各影响因素对拱桥的自振频率敏感性分析结果见图 14。

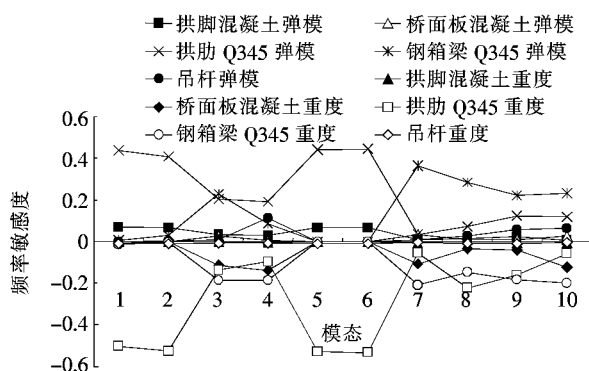


图 14 自振频率敏感性分析图

从图 14 可以看出:这 10 个参数当中,拱肋 Q345 的弹性模量和重度敏感度最大,对拱桥的自振频率最敏感,影响最大,其中 1、2、5、6 阶变化最为明显,其为拱肋横向弯曲,说明拱肋 Q345 的弹性模量和重度对自振极其敏感。而吊杆的弹性模量和重度频率敏感度较小,几乎无变化,它对拱桥的自振频率影响最小。

## 6 结论

(1) 该桥的主梁和拱肋同时出现竖向 1 阶振动,表明由于吊杆的原因,主梁、拱肋振动耦合,从而出现天桥竖向振动同步的现象。

(2) 前 2 阶振型就出现了拱肋正反对称的横弯情况,后 3 阶才出现拱肋竖弯,表明该桥拱肋的横向刚度较竖向刚度弱,易出现面外失稳,原因是拱肋横向无连接。

(3) 主梁、拱肋扭转振动同步且较晚,再次验证了吊杆是影响拱肋主梁耦合振动的主要因素。前几阶并未出现扭转振动,表明该人行天桥的整体刚度较好。

(4) 众多参数中,影响自振频率最大的因素是拱肋 Q345 的弹模和重度,可见拱肋为这类异形拱桥的重点分析对象。通过模态试验,可识别出拱桥自振频率和振型,它可用于评估拱桥的整体性能,同时为桥梁后期的监测和损伤诊断提供依据。

# 黄土冲沟区桥梁桩基受力特性现场试验研究

赵华

(山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘要:** 黄土冲沟区桥梁桩基是一种特殊的工程地质条件,为了研究黄土冲沟区桥梁桩基基础受到的水平推力、沉降、位移、桩周土含水率之间的相互关系,课题组在山西省太(原)佳(县)高速公路某桥梁桩基上安装了一套远程监测系统。通过两年的监测,得出了以下结论:① 监测点桥台(墩)桩基不同深度范围内所受桥下边坡滑移提供的水平压力均呈现出春夏季(雨季)增大而秋冬季减小的趋势;深度上的变化符合弹性嵌固桩的土压力分布规律;② 监测点桥墩的位移呈现波动式变化但量值很小,波峰处于春夏季;③ 监测点桥台(墩)桩基的差异沉降量随时间有减小的趋势,且与土压力随时间变化规律相对应;④ 监测点桥下边坡坡脚黄土的含水率与降雨密切相关。

**关键词:** 黄土冲沟区;桥梁桩基;压力;位移;含水率

## 1 前言

山西省是一个被黄土广泛覆盖的山地高原,境内山峦叠嶂,丘陵起伏,沟壑纵横,黄土冲沟分布广泛。随着高速公路建设的迅猛发展,穿越黄土冲沟的路线越来越多,路线跨越深切冲沟通常以桥梁方式通过。黄土冲沟区的桩基不仅是斜坡桩基而且是特殊岩土中桩基,其受力特性逐渐成为研究的热点。针对黄土地区桩基的受力特性研究更多的是集中在平坡地段或者是受湿陷性影响下负摩阻力对桩基的影响。冯忠居等自2005年开始在黄土冲沟桥梁桩基受力特性的研究方面做了很多科研工作,针对黄土冲沟区域地形地貌、工程地质与水文条件,利用理论方法、有限元分析、现场试验及室内模型试验对黄土冲沟区域桥梁桩基受滑坡、堆载及冲刷、地面水等影响的受力特征及桥梁结构受到的影响展开研究。但是对黄土冲沟这种特殊的地

形地质条件下桩基的受力特性、桩周土的力学特性探讨不多。

黄土冲沟区桥下边坡由于沟底水流侵蚀坡脚、坡面径流切割坡体、坡面渗流降低黄土强度等各种因素的影响使坡体产生下滑,这种下滑产生的累积效应会使其桥梁桩基产生倾斜、不均匀沉降等病害,影响桥梁乃至高速公路的运营安全。该文通过黄土冲沟区降雨量、桩周土含水率、桩基所受土压力及桩基的位移进行现场监测试验,获取它们的相互关系,以期为桥梁桩基的勘察、设计及运营期安全维护提供帮助。

## 2 监测点概况

监测点位于山西太(原)佳(县)高速公路(S104)平临段,桥址区地貌单元属黄土覆盖中低山区。该地区属温带大陆性气候。春季干旱多风少雨,夏季炎热雨量集中,秋季较为温凉湿润,冬季寒冷干燥少雪。监

### 参考文献:

- [1] 刘晶波.结构动力学[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 葛俊颖.桥梁工程软件 Midas Civil 使用指南[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [3] 项海帆.拱结构的稳定与振动[M].北京:人民交通出版

社,1991.

- [4] 张俊平.桥梁检测[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [5] 连岳泉,梁群.单拱肋外倾式钢管混凝土拱桥动力特性分析[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2012(5).
- [6] 田仲初,彭涛.佛山东平大桥静动力多层次有限元模型修正研究[J].振动与冲击,2007(6).

收稿日期:2018-10-16

基金项目:山西省交通厅科技项目(编号:2014-1-9)

作者简介:赵华,女,硕士,高级工程师.E-mail:zhaohua1634@163.com