

无风撑系杆拱桥健康监测系统设计

陈能辉^{1,2}, 杨纪鹏¹, 夏 烨¹

(1.同济大学,上海市 200092; 2.宁波市城市基础设施建设开发有限公司,浙江 宁波 315000)

摘 要:随着我国桥梁技术的不断发展以及人们对美观要求的不断提升,各种新颖桥梁被设计建造出来,针对大跨径桥梁有必要建立与其配套的健康监测系统。结合中承式无风撑系杆拱桥受力特点、振动特性、易损部位,设计监测系统硬件布置方案;该监测系统包括硬件布置、数据采集、数据传输、数据存储、状态评估以及预警信息发布。基于监测系的采集数据,可对桥梁技术状况作出分析,为后续同类桥梁设计及监测提供参考依据。

关键词:无风撑拱桥;健康监测;动力特性

中图分类号: U443.38

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)01-0083-05

0 引言

拱桥在我国具有悠久的历史,是除梁桥以外另一种常见的桥梁形式,因拱桥具有各种各样的形式,造型优美,数量众多^[1]。许多现存的古代拱桥形式为人类文明遗产的重要组成部分,拱桥相比于斜拉桥、悬索桥而言是一种最古老的桥形之一,拱桥一般受压性能好,以前受压好的材料一般以石材为主,于是就有拱桥取材很方便,经济实惠,造型优美等特点,备受人民亲睐,且具有较高的竞争优势,是不断发展的一种桥梁形式。

本课题所依托的项目为宁波市澄浪桥工程,工程主桥采用中承式无风撑内倾拱桥,造型新颖该桥造型新颖,线形流畅,别树一帜,卓尔不群,有着与众不同的特点:在宁波地区软土地基建设的中承式坦拱桥,无边跨,区别于传统中承式拱桥。主拱拱肋两片布置,向道路中心线方向内倾,且不设置风撑;主桥因地制宜的采用了斜桥的布置形式,在国内外特大拱桥中较为独特;由于本桥为坦拱桥梁,拱肋传至基础的水平力及弯矩较传统拱桥更大,拱脚受力更加不利,因此,本桥拱脚采用钢混结合形式,同时在拱脚内张拉一定数量的预应力钢束,并在承台范围内的拱脚增加 PBL 键构造,使拱脚在预应力钢束、PBL 键及剪力键的共同作用下与承台形成一个共同受力的整体,保证了结构的安全性能。因此有必要开展该类桥梁健康监测系统设计研究。

1 工程概况

1.1 桥型布置

本文方案是选择一座中承式无风撑钢箱拱肋拱桥,该拱桥横向对称布置两片拱肋,且位于人行道外侧,主拱圈向内倾斜角度设计值为 10° ,两拱轴中心距设计值为 44.7 m,拱间不设风撑。主拱拱肋形状为矩形封闭钢箱型,同时在 1/4 主跨出对称地将 1 个封闭钢箱分叉为 2 个,2 个钢箱拱肋之间用钢桁架进行横向连接。这种断面布置形式既满足了受力要求,又避免看起来显得笨重,具有良好的视觉景观效果。总体布置见图 1。

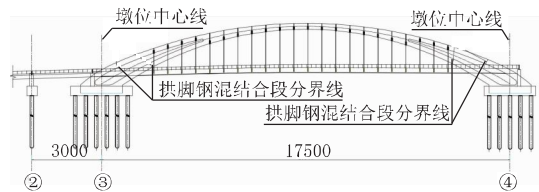


图 1 结构总体布置图(单位:cm)

该拱肋矢高为 25 m,跨径为 175 m,矢跨比为 1/7,拱轴线由多段圆弧线拟合而成。

1.2 技术指标

澄浪桥设计主要采用的技术标准:桥梁结构设计基准期为 100 a。

环境类别:主桥上部结构为 II 类,主桥下部结构为 III 类,引桥上部结构 I 类,主桥下部结构 II 类。

桥梁结构设计安全等级:一级。

主桥桥梁断面布置为:3.0 m 人行道 +13.5 m 车行道 +0.5 m 中央分隔带 +13.5 m 车行道 +3.0 m 人行道,桥面全宽 33.5 m。

根据《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011),本工程地震基本烈度为 6 度,桥梁抗震设防

收稿日期:2020-10-06

作者简介:陈能辉(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁工程研究工作。

分类:甲类,桥梁抗震措施满足7度要求。

设计车速:按照城市次干路标准建设,设计车速采用40 km/h。

横坡:激动车道横坡为1.5%,人行道横坡为1.0%。

纵坡:主桥纵坡最大为2.9%。

2 有限元模型分析

2.1 模型建立

本文利用midas建立拱桥的总体模型,所选用的单元包括梁单元、杆单元、板单元,其中在该模型桥梁的桥面板和无吊杆区域的钢箱梁底板部分均采用板单元进行模拟,根据实际情况,吊杆选用杆单元进行模拟,其余结构部分均采用梁单元进行模拟。几何模型见图2。

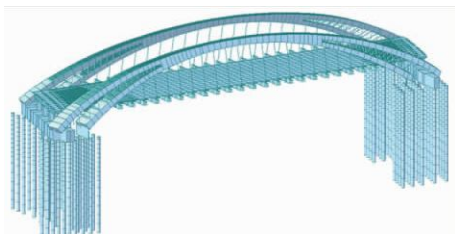


图2 全桥有限元模型

本桥的基本荷载工况为:

永久荷载(自重+二期恒载+系杆力)DL;

活载(汽车移动荷载、人群荷载、汽车制动力)LL;

风荷载(包含有车风荷载、无车风荷载及施工阶段风荷载)WL;

地震荷载EQ;

温度荷载(包含体系升降温、构件温差、梁梯度温度)TL;

基础不均匀沉降DP。

除了另有说明,本章中的荷载按照《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)和《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)的规定进行组合。

2.2 静力分析

限于篇幅,本文分布对拱肋内力及应力、主梁应力展开分析。

(1)拱肋内力分析

由图3、图4可见,由于拱肋内张拉系杆的原因,钢混结合段出现较大的竖向弯矩,其余区段拱肋弯矩较小。根据标准情况进行组合,算得拱肋最大轴向力为-156 670 kN,竖向最大弯矩为-96 772 kN·m,横向最大弯矩为57 504 kN·m,均出现在下拱肋拱脚。

由应力结果得到,在恒载(结构自重等)作用下,

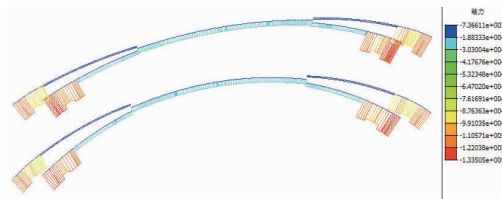


图3 拱肋轴力-恒载

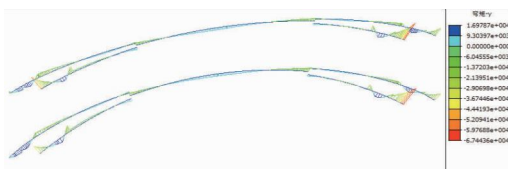


图4 拱肋竖向弯矩-恒载

拱肋应力小于86 MPa,在标准组合下,拱肋压应力的最大值出现在拱顶,大小为124 MPa,拱肋拉应力的最大值出现在与钢混结合段交界的位置,大小为71 MPa。

(2)主梁应力分析

标准组合下,主梁上缘最大拉、压应力分别为112 MPa和147 MPa;下缘为136 MPa和81 MPa;由图5、图6可见,“恒载+活载”组合下缘最大拉应力为113 MPa,参照铁路桥梁钢结构设计规范,可以满足要求。

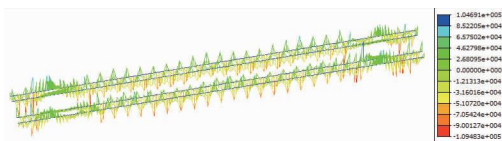


图5 主梁上缘应力一恒+活

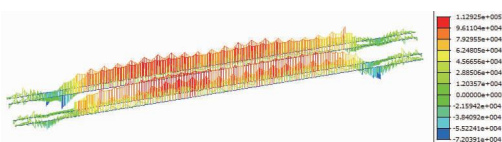


图6 主梁下缘应力一恒+活

(3)底板应力分析

由图7~图10可见,恒载下桥面板纵向应力在端横梁的中间支点、横向应力在拱肋牛腿支点处存在明显的应力集中;标准组合下,除个别位置的应力集中外,底板应力基本在100 MPa以内,其中横梁位置底板应力较大一些,设计采用Q345钢材满足要求。

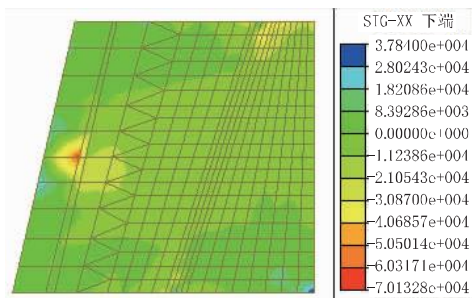


图7 底板纵桥向应力一恒载

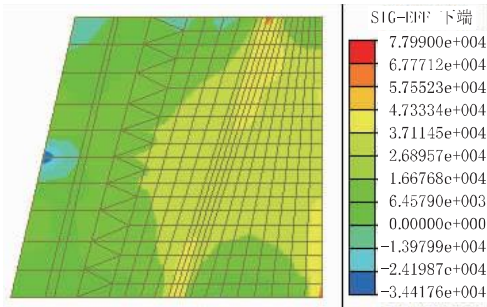


图 8 底板横桥向应力—恒载

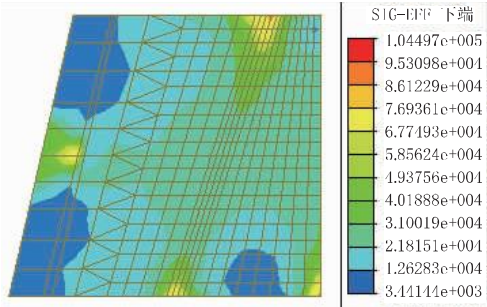


图 9 底板 Mises 应力—恒载

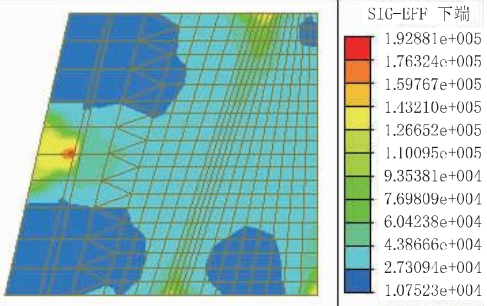


图 10 底板 Mises 应力—标准组合

2.3 动力分析

动力分析目的是获取桥梁前几阶振动频率及振型,图 11 为主桥一阶振型,结构基频为 1.138 Hz,对应振型为拱肋一阶面外侧弯。主桥前 5 阶频率及对应振型名称见表 1。

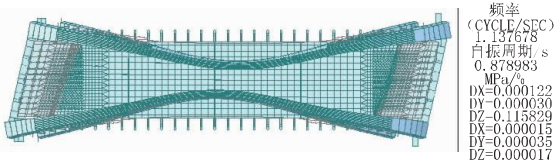


图 11 拱肋一阶面外侧弯(第 1 阶)

表 1 结构动力特性计算结果汇总表

阶次	频率 /Hz	周期 /s	振型描述
1	1.138	0.879	拱肋一阶面外侧弯
2	1.153	0.867	拱肋二阶面外侧弯
3	1.158	0.863	桥面整体侧弯
4	1.329	0.752	结构一阶整体竖弯
5	1.565	0.639	结构二阶整体竖弯

根据结构动力特性计算结果,主桥结构体系及质量、刚度均属于合理范围之内,基于此计算结果针

对主拱肋及主梁布置加速度传感器,后期基于监测数据使用模态分析方法识别结构频率、振型和阻尼比。

2.4 稳定分析

采用 MIDAS 软件,计算模型与静力计算模型相同。本文采用第一类线弹性稳定计算方法,计算方程为:

$$|[K] + \lambda [\bar{K}]| = 0$$

即将稳定问题转化为求方程的最小特征值问题。

本次分析结构稳定性主要考察运营阶段,详细的荷载工况以及组合见表 2,考虑到本桥宽跨比较小,不单独考察活载偏载情况下的结构稳定性。

表 2 荷载组合工况

工况号	荷载组合情况
1	$\lambda \times (\text{成桥恒载} + \text{活载(对应拱肋轴力最大)}) + \text{有车风}$
2	$\lambda \times (\text{成桥恒载} + \text{无车风})$

计算结果表明,运营阶段两种工况下的前三阶整体失稳模态(计算结果不考虑桥面板的局部失稳模态)基本一致,出现的情况均为拱肋的面外失稳(见表 3)。

表 3 整体稳定计算结果表

工况	阶数	稳定安全系数	失稳模态特征
1	1	25.1	拱肋一阶面外失稳
	2	27.3	拱肋二阶面外失稳
	3	32.7	拱肋三阶面外失稳
2	1	28.9	拱肋一阶面外失稳
	2	31.1	拱肋二阶面外失稳
	3	38.7	拱肋三阶面外失稳

计算结果表明,虽然前几阶失稳模式均为主拱肋面外失稳,但最小稳定安全系数也大于 25,结构有足够的安全系数。

3 监测系统设计

3.1 设计原则

澄浪桥健康监测系统设计所依据的基本原则是该系统能应对澄浪桥在施工和运营过程进行合理、有效的监测及养护管理;在保证建设和运营各个阶段相关系统的有序衔接和协调统一的条件下进行整个系统的开发;以所获取的数据为基础来提供反应结构状态情况的安全信息;基于系统的结构危险性分析和结构响应预测结构的危险状态,为结构安全和行车安全提供保障体系。

参考国内外桥梁健康监测系统设计理念方法^[2-10],结合澄浪桥的具体情况,对澄浪桥采用监测与养护管理系统并行的方案。在系统设计时应严格遵循以下原则:

(1)系统的经济性:即所采集的信息能够保证桥梁安全正常运营,同时兼顾仪器的耐久性与造价;

(2)系统的可靠性:所建立的结构安全综合管理系统具有较高的可靠性;

(3)系统的适用性:系统的主要作用在于保障结构安全和行车安全,并且可以用来指导结构的建设、运营、养护和管理;

(4)系统的前瞻性:系统具有前瞻性,充分考虑未来一段时间的技术进步,为系统的进一步开发做适当预评估;

(5)系统的全面性:除了监测监测系统的特性,还考虑人工检测、BIM以及 Benchmark 模型的读入与对接。

3.2 监测方案

系统监测项目可划分为重要环境荷载监测、结构静动力响应监测两大部分:

(1)重要环境荷载监测

包括风速风向、环境温湿度、地震、车辆荷载、结构温度。

(2)结构静动力特性监测

包括结构几何变位、应力、吊杆力、支座位移、结构振动特性等。

监测项目及监测测点数量见表4。

硬件的布置通常根据结构动力特性及静力易损部位。动力特性包括:尽可能多地识别结构模态信息;结构动力响应较大的位置;构件存在疲劳或容易失效部位;与输出相关联的位置,如承台处。静力响应包括:钢混结合段拱肋应力、混凝土应力;主

表4 实时监测项目和测点布置概况表

监测类别	序号	监测项目	设备类型	数量
环境监测	1	风速风向	三向超声风速仪	1
	2	环境温湿度	温湿度仪	3
	3	地震动	三向加速度计	2
	4	结构温度	温度计	32
	5	车辆荷载	动态称重系统	1
结构响应监测			摄像机	2
	1	主梁变形	压力变送器	16
	2	支座位移	位移计	4
	3	结构应变	应变计	32
	4	吊杆力	磁通量索力计	22
			单向加速度计	10
	5	结构振动	单向加速度计	21
总计				146

梁关键断面应力;横梁应力;吊杆应力;桥面板应力。

健康监测系统硬件总体布置见图12。

3.3 监测系统集成

澄浪桥健康监测是一个庞大的系统工程,其重要任务是获得结构的响应、局部损伤等信息,基于监测信息的评估结果老有效获取结构和行车的安全情况等信息,为提供结构的质量、安全和经济运营等卓有成效的解决方法。为了更好地完成上述任务,在系统分析的基础上,将系统核心内容分为以下5个大的子系统,详细的系统架构见图13。

(1)自动化传感测试系统。

(2)人工巡检系统。

(3)在线评估与预警系统。

(4)用户界面系统(包括BIM、Benchmark模型以及有限元模型的对接)。

(5)数据库存储管理系统。

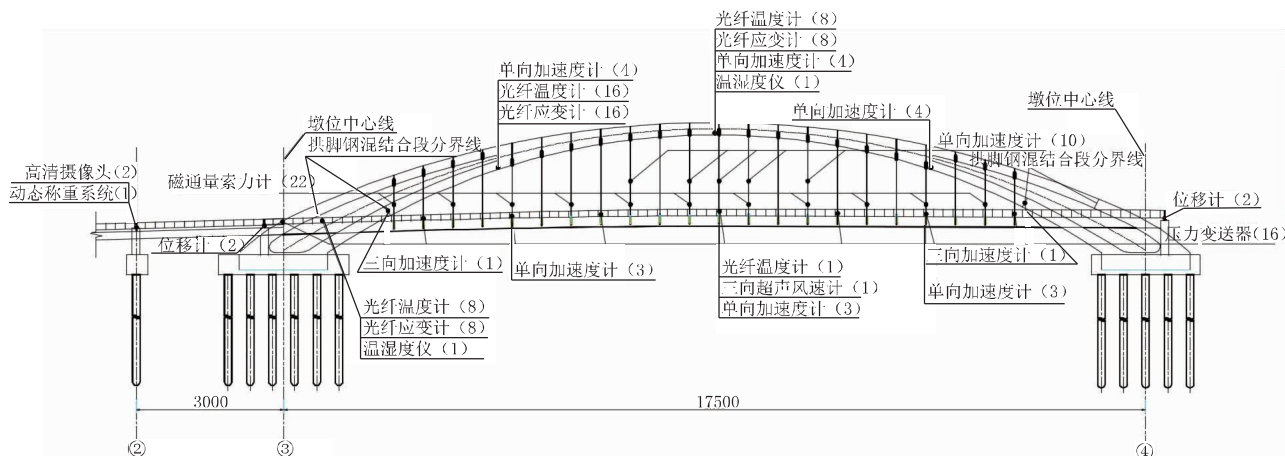


图12 传感器总体布置图(单位:cm)

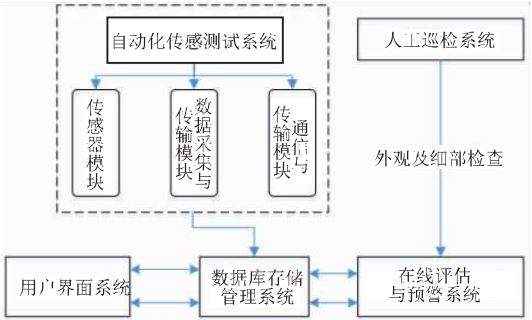


图 13 澄浪桥健康监测系统的构成要素图

4 结 论

本文通过调研国内外桥梁健康监测案例，了解最新监测技术发展现状，建立了无风撑系杆拱桥有限元模型，计算其恒载及各种组合下的静力响应，得到拱肋系、主梁、横梁及吊杆在各工况下的内力和应力，总结得到应力应变测点布置位置；计算结构动力特性，获得其主要振动频率和振型，为动力监测测点布置提供依据；通过结构稳定分析，获得其失稳系数。

在有限元分析结果基础上，将无风撑系杆拱桥健康监测系统监测内容分为环境监测和结构响应监测两大部分，该监测方案同时考虑后续 BIM 与 Benchmark 模型的接入。该方案的实施可获得桥梁正常运营技术状况，为后续同类桥梁监测系统提供

提供参考价值。

参考文献:

[1] 钱天华 / 世界文化遗产大运河之石拱桥保护实践探索[D]. 浙江杭州:浙江工业大学, 2019.

[2] 雍家林. 铁路钢管混凝土系杆拱桥施工过程监控及受力性能分析[D]. 河北石家庄:石家庄铁道大学, 2019.

[3] Bonhyun Koo,Shon Taeshik.A Structural Health Monitoring Framework Using 3D Visualization and Augmented Reality in Wireless Sensor Networks[J]. JOURNAL OF INTERNET TECHNOLOGY,2010,11(6SI):801-807.

[4] 吴小平. 复杂桥梁结构综合监测系统开发研究[D]. 浙江杭州:浙江大学, 2005.

[5] 余波, 邱洪兴, 王浩, 等. 苏通大桥结构健康监测系统设计[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4):170-177.

[6] 赵翔, 李爱群, 缪长青, 等. 润扬大桥结构健康监测传感器测点布置[J]. 工业建筑, 2005(1):82-85.

[7] 缪长青, 李爱群, 吉林, 等. 大跨缆索支承型桥梁健康监测与评估系统的设计研究[J]. 特种结构, 2009, 26(2):40-47.

[8] Ayg ü n,Bengi,Cagri Gungor V.Wireless sensor networks for structure health monitoring: recent advances and future research directions[J].Sensor Review,2011,31(3):261-276.

[9] Magalh?Es F,Cunha A,Caetano E.Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2012, 28: 212-228.

[10] Magalh?Es F,Cunha A,Caetano E.Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2012, 28: 212-228.

(上接第 70 页)

(4)一典型市政匝道桥墩分析案例表明,桥墩采用环缝式连接设计,截面尺寸为 2.2 m (横桥向)× 1.5 m (顺桥向),墩高 10 m,在超高性能混凝土壁厚 350 mm 时,连接段安全系数大于预制段,在静力、E1 地震作用和 E2 地震作用下,超高性能混凝土拉伸应变分别为 1 009 $\mu\epsilon$ 和 1 815 $\mu\epsilon$,满足预定的设计目标,构造合理。

参考文献:

[1] 王景全,王震,高玉峰,等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展:新

材料、新理念、新应用[J]. 工程力学, 2019, 36(3):1-23.

[2] 黄国斌,查义强. 上海公路桥梁桥墩预制拼装建造技术[J]. 上海公路,2014(4):1-6.

[3] 马磊,王浩,冀振龙,等. 一种预制钢筋混凝土立柱连接构造:中国,201721060948.1[P]. 2018-04-13.

[4] 马磊,王瑞龙,黄虹,等. 一种立柱与相邻构件的类承插连接结构:中国,201821070140.6[P]. 2019-03-15.

[5] 马磊,王瑞龙,赵晓梅,等. 预制立柱和相邻构件的环缝连接结构:中国,201821069556.6[P]. 2019-03-22.

[6] GRAYBEAL, B.Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete [J]. Federal Highway Administration, August 2006, pp186.