

飞燕式钢管混凝土系杆拱桥静动力特性分析

张振伟, 张伟

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 该文以飞燕式钢管混凝土系杆拱桥为研究对象, 利用有限元软件 Miads/Civil 建立空间分析计算模型, 进行静、动力特性及稳定性分析。主要研究了拱肋在正常使用极限状态和承载能力极限状态下的受力状况、系杆在各个施工阶段张拉力的确定及成桥后混凝土收缩徐变对拱肋位移的影响。分析了该桥的结构自振频率和振型特征。结果显示: 该桥的稳定系数满足规定要求。

关键词: 飞燕式系杆拱; 静动力特性; 稳定性

随着建筑材料的发展和人们对审美观念的提升, 极大地带动了拱桥形式的发展。拱桥具有造型优美、跨越能力大、结构轻巧等优点, 广泛应用于城市景观桥的建设中。其中, 飞燕式钢管混凝土系杆拱桥更是在造型上富有时代气息, 充分体现了刚与柔、力与美的完美融合。钢管混凝土的基本原理是: 利用外侧的钢管对灌注在管内的核心混凝土起到套箍作用, 使钢管内核心混凝土处于三向受压状态, 从而提高核心混凝土抗压强度的能力。但是和国外钢管混凝土结构的拱桥发展相比, 中国起步相对较晚, 还有待进行更深入的研究。该文采用大型有限元软件 Miads/Civil 2012 建立

钢管混凝土系杆拱桥结构计算分析模型, 主要对其拱肋受力及位移、系杆张拉力、混凝土收缩徐变、自振特性和稳定性进行分析。

1 工程概况

江西九江秋湖里大桥为飞燕式钢管混凝土系杆拱桥, 桥梁全长 250 m, 其主梁跨径为 (45+160+45) m, 如图 1 所示。主拱桥面以上采用钢管混凝土拱肋, 主跨矢跨比为 $F/L = 1/4$; 西侧边跨矢跨比为 $F/L = 1/9.544$, 东侧边跨矢跨比为 $F/L = 1/10$ 。主孔拱肋

检测方法。首先, 针对无人机桥梁检测工作的特点自主配置了无人机硬件平台。然后, 根据具体的桥梁检测任务和桥梁类型确定了 3 种航拍方案, 最后, 详细阐述了无人机图像预处理和三维立体重建的流程和方法。使用该文方法对昆楚二级公路某拱桥、高海高速海口大桥、观音山大桥开展实际的无人机三维建模和桥梁检测验证, 取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] 邹露鹏, 范钟倩. 微型无人机在公路桥梁养护检测工程中的应用[J]. 公路, 2017(7).
- [2] 张玉玲, 杨志强. 桥梁无人机检测及加固技术研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2017(3).
- [3] 许宏元. 无人机在桥梁检测中的应用[J]. 中国公路, 2017(10).

- [4] Morovic J, Shaw J, Sun P. A Fast Non-Iterative and Exact Histogram Matching Algorithm[J]. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(1): 127-135.
- [5] 靳珍璐, 潘泉, 赵春晖, 等. 基于局部精确直方图匹配的无人机景象匹配导航色彩恒常算法[J]. 中国惯性技术学报, 2015(5).
- [6] 张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.
- [7] 潘一凡, 张显峰, 童庆禧, 等. 公路路面质量遥感监测研究进展[J]. 遥感学报, 2017(5).
- [8] 余杰, 吕品, 郑昌文. Delaunay 三角网构建方法比较研究[J]. 中国图像图形学报, 2010(8).
- [9] 陈显龙, 陈晓龙, 赵成, 等. 无人机在路桥病害检测中的设计与实现[J]. 测绘通报, 2016(4).
- [10] 李成涛, 章世祥. 基于 BIM 技术的桥梁病害信息三维可视化研究[J]. 公路, 2017(1).

收稿日期: 2018-06-10

作者简介: 张振伟, 男, 工程师, E-mail: 1036321395@qq.com

净高3.6 m,拱肋净宽2.2 m,钢管混凝土拱肋横断面为4根钢管组成空间桁架结构,钢管直径为800 mm。4根主钢管通过横向缀条、隔板和腹杆连接(图2)。施工时先吊装钢管拱肋,然后在钢管内和两缀条间都灌注C50微膨胀混凝土。主跨桥面下拱肋高4 m,拱肋宽2.6 m;边拱肋高3 m,拱肋宽2.6 m。

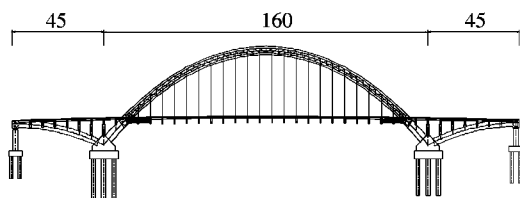


图1 系杆拱桥跨径布置图(单位:m)

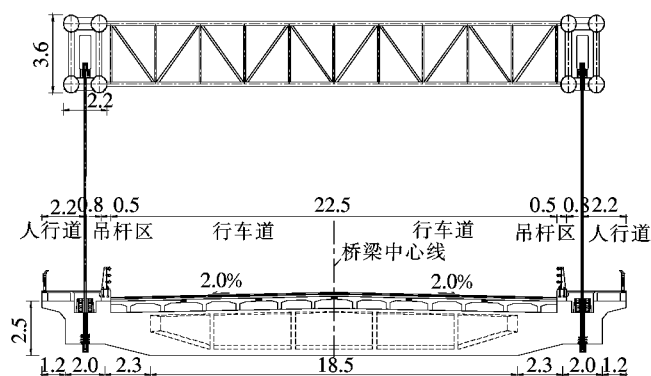


图2 系杆拱桥标准断面示意图(单位:m)

全桥共12根系杆,每个拱脚各有3层,每层有2组系杆,全桥共22对吊杆,吊杆采用工厂生产的整束

挤压钢绞线成品吊杆,型号为15-37。

2 计算模型的建立

运用 Miads/Civil 2012 有限元程序,对钢管混凝土系杆拱桥进行施工过程模拟分析。分析模型如图3所示。

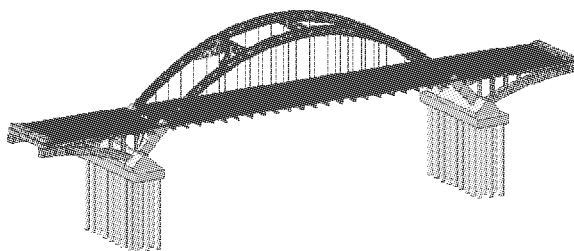


图3 系杆拱桥有限元模型图

全桥共计2 816个单元,其中梁单元2 288个,桁架单元528个。主拱肋节点及单元划分见图4。拱肋、风撑、拱上立柱、桥面系等采用梁单元模拟,吊杆、系杆、主拱腹杆采用桁架单元模拟。主拱肋的受力过程是先由钢管承担自身重力,产生一部分应力变形,再灌注管内混凝土共同参与结构受力,两种不同材料便产生应力叠加效应。故采用施工阶段联合截面功能来模拟钢管混凝土拱肋。基础底面采用固结,拱座底设弹性支撑模拟基础出口刚度,边拱端部采用弹性连接竖向支撑。

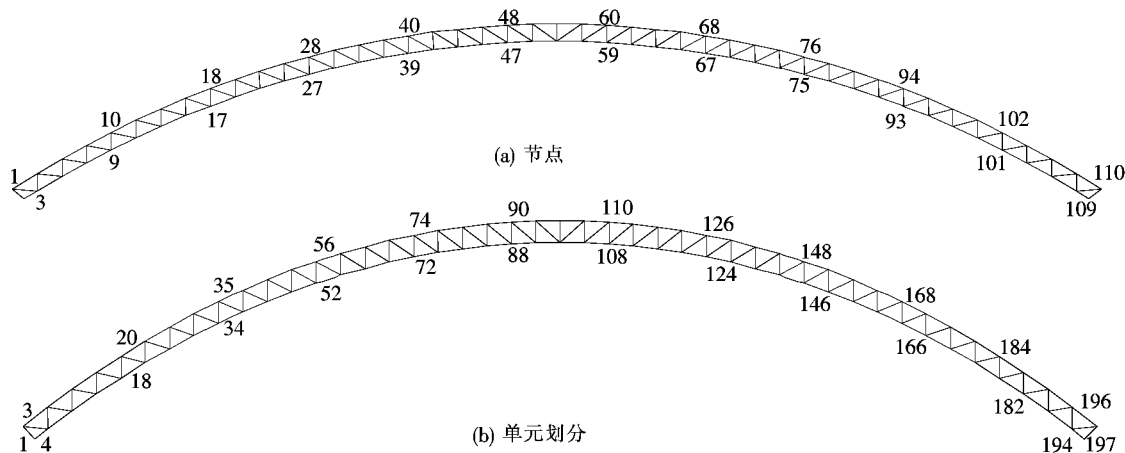


图4 主拱肋节点及单元划分图

3 静力分析

3.1 拱肋受力及位移分析

采用承载能力极限状态和正常使用极限状态的内

力组合作用对主桥拱肋的应力和位移进行分析,拱肋的应力结果如表1所示,拱肋的下挠值如图5所示。

由表1可知:在承载能力极限状态和正常使用极限状态内力组合作用下,拱肋均处于受压状态,无拉应力。在两种荷载组合作用下,主拱钢管拱脚位置最大

表 1 荷载组合作用下拱肋的最大压应力 MPa

极限状态	杆件位置	主拱肋/MPa		边拱肋/MPa
		钢管	核心混凝土	
正常使用	上缘	-174.8	-7.9	-14.7
极限状态	下缘	-186.7	-9.2	-15.6
承载能力	上缘	-189.4	-11.3	-16.9
极限状态	下缘	-193.1	-13.6	-18.2

注:负值表示压应力。

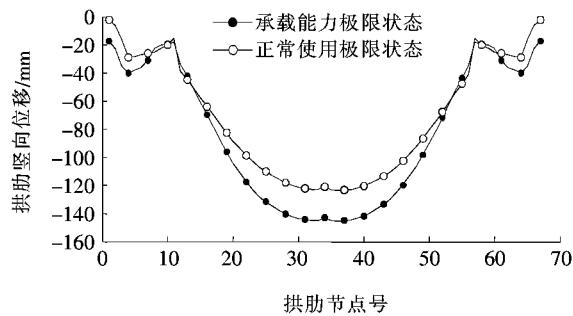


图 5 两种内力组合作用下拱肋下挠曲线

压应力为 193.1 MPa,小于允许值 210 MPa,核心混凝土最大压应力为 13.6 MPa,边拱肋靠近主拱 1/4 位置最大压应力为 18.2 MPa,小于设计值 19.4 MPa,均满足规范要求。

由图 5 可知:在承载能力极限状态组合工况下,主拱肋的最大下挠值为 145 mm,小于规范规定的 $L/600=266$ mm,满足规范要求。

3.2 系杆张力分析

钢管混凝土系杆拱的水平推力主要由拱脚和下部基础结构承担。水平推力的大小直接影响主桥的受力状况,故系杆拱桥对下部基础结构的抗推刚度有较大的要求。系杆张拉的顺序应随着上部结构荷载的加载程度而逐步进行张拉。在实际施工过程中,系杆张拉力的控制以墩顶的水平推力为主。

结合秋湖里大桥施工的实际情况,最终确定系杆分 5 次张拉。根据各阶段在恒载、活载作用下的分析结果计算出系杆张力,然后考虑基础的抗推能力确定施工阶段各批次的系杆张力,如表 2 所示。

由表 2 可知:该拱桥在各施工阶段拱脚结构所承受的最大不平衡推力值为 4 662 kN,满足主墩基础抗推能力的要求。通过计算分析得出,单根系杆成桥索力值为 4 513 kN,系杆安全系数为 3.17,满足规范要求,具有充足的安全储备。

表 2 系杆张拉力的确定

施工工况	系杆张拉力/kN	荷载推力/kN	不平衡推力/kN
边跨三角区施工及架设主拱钢管	—	824	824
系杆第 1 次张拉及拆除支架	-4 840	—	-4 016
先灌注下弦管混凝土后灌注上弦管混凝土	—	7 446	3 430
系杆第 2 次张拉	-5 286	—	-1 856
吊装边跨桥面板及跨中吊杆横梁	—	5 362	3 506
系杆第 3 次张拉	-5 720	—	-2 214
吊装跨中桥面板	—	5 688	3 474
系杆第 4 次张拉	-6 400	—	-2 966
桥面铺装混凝土	—	2 524	-442
系杆第 5 次张拉	-4 220	—	-4 662
桥面铺装沥青	—	2 397	-2 265
成桥(考虑最不利荷载组合)	—	5 829	3 564

3.3 收缩徐变分析

图 6 为主拱肋和边拱肋在成桥、成桥 10 年、成桥 30 年各阶段时拱肋的下挠曲线图。

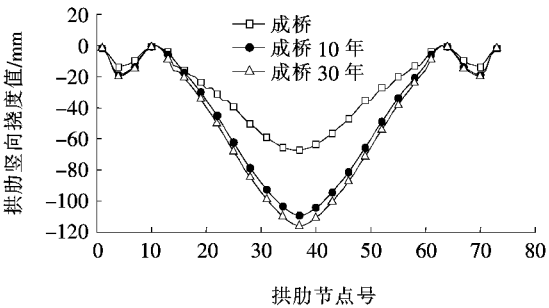


图 6 收缩徐变对拱肋的影响

由图 6 可知:收缩徐变对拱肋线形影响较大,且主跨拱肋下挠值较边跨下挠值大。成桥 10 年间收缩徐变对拱肋的下挠值影响比较大,最大下挠值为 42 mm;成桥 10 年后收缩徐变对拱肋的影响较小,成桥 10 年到 30 年间产生的下挠值不超过 8 mm,后期拱肋下挠变形缓慢。

4 结构动力分析

结构自振频率是体系固有的自振特性,是桥梁结构动力性能的重要参数,是由桥梁结构刚度和质量所决定的。故将结构自重和荷载转换为质量,以便确定桥梁结构质量在模型中的分布位置,形成质量矩阵。

利用子空间迭代方法进行求解,这种方法计算效率较高。表 3 为前 6 阶自振频率。

表 3 结构自振频率及振型分析结果

模态	频率/Hz	振型特征
1	0.434	主拱肋反对称横弯
2	0.860	主拱肋对称横弯
3	1.201	主拱肋反对称竖弯
4	1.271	主拱肋反对称横弯
5	1.784	主拱肋对称横弯
6	1.870	主拱肋反对称扭转

由表 3 可知:该桥的结构 1 阶基频为 0.434 Hz,为拱肋的横向振动。从结构模态振型看,该桥以横弯和竖弯为主要振动方式,第 6 阶模态时才出现扭转振动,说明拱桥抗扭刚度相对较大。

5 结构稳定性分析

拱桥是一种压弯构件,结构发生失稳破坏时一般没有明显的征兆,具有较大的突然性、破坏性。因此在静动力分析的基础上对其进行稳定分析是非常必要的,以避免发生结构失稳破坏。

将结构自重、桥面铺装、汽车及人群作为荷载对其进行屈曲分析,得到结构稳定性系数。一般情况下稳定性系数最小时结构发生失稳的可能性最大。由于篇幅所限,表 4 仅列出前 6 阶稳定性系数。

表 4 稳定分析结果

模态	稳定性系数	允许误差
1	7.803	3.821×10^{-65}
2	13.800	1.758×10^{-51}
3	17.234	3.079×10^{-44}
4	19.385	1.017×10^{-39}
5	21.874	3.045×10^{-37}
6	23.747	4.914×10^{-26}

由表 4 可知:该系杆拱桥的稳定性安全系数为

7.8,满足 GB 50923—2013《钢管混凝土拱桥技术规范》大于 4.0 的规定。

6 结论

结合飞燕式钢管混凝土系杆拱桥的工程背景,建立有限元计算模型,并对其进行了静力、动力及稳定性分析,得到如下结论:

(1) 在承载能力极限状态和正常使用极限状态内力组合作用下,拱肋均处于受压状态,主拱肋钢管最大压应力为 -193.1 MPa ,核心混凝土最大压应力为 -13.6 MPa ,边拱肋最大压应力为 -18.2 MPa ,满足规范要求。在承载能力极限状态组合工况下,主拱肋的最大下挠值为 145 mm,满足规范要求。

(2) 该桥在施工阶段结构所承受的最大不平衡推力值为 4 662 kN,满足主墩基础抗推能力的要求。单根系杆成桥索力值为 4 513 kN,系杆安全系数为 3.17,具有充足的安全储备。另外,在施工过程中应严格控制系杆的张拉顺序,以确保拱脚水平推力在可控范围内。

(3) 从结构模态振型上看,该桥以横弯和竖弯为主要振动方式,第 6 阶模态时才出现扭转振动,说明拱桥抗扭刚度相对较大,横向抗弯刚度相对较小。该桥的结构 1 阶基频为 0.434 Hz,对行人的舒适性会有一定影响。

(4) 该桥的稳定安全系数大于 4.0,满足《钢管混凝土拱桥技术规范》要求。

参考文献:

- [1] 罗旭,黎海堤.钢管混凝土刚架系杆拱桥静力计算分析[J].中外公路,2011(3).
- [2] 郭太军,薛瑞杰.斜靠式钢箱拱桥力学性能分析[J].公路,2012(3).
- [3] 施洲,郭俊丽,苏威风,等.新月拱桥结构静动力特性分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2013(1).
- [4] 王瑞.钢管混凝土系杆拱桥稳定性研究[J].公路交通科技:应用技术版,2015(3).
- [5] 白艳.收缩徐变对钢管混凝土系杆拱桥静力性能的影响[J].铁道建筑技术,2016(5).