

文章编号:1001-7372(2009)01-0047-06

结构参数变化对斜靠式拱桥动力特性的影响

陈 淮, 朱 倩, 李静斌, 葛素娟

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:以广东省潮州市韩江北桥主跨钢管混凝土斜靠式拱桥初步设计方案为对象,采用 ANSYS 有限元程序,并考虑边跨对主跨的弹性约束作用,建立了该中承式钢管混凝土斜靠式拱桥动力计算的整体空间有限元计算模型;探讨了 14 种不同工况条件对桥梁动力特性的影响。计算结果表明:该钢管混凝土斜靠式拱桥为柔性结构,桥梁的竖向刚度相对较强,而钢管混凝土拱肋的面外刚度相对较弱;V 撑外端约束及系杆梁抗弯刚度的变化对该桥动力特性影响较小;稳定拱拱脚横向外移以及增加吊杆虽能增大该桥拱肋的横向外刚度,但对全桥竖向及扭转刚度贡献不大;桥梁施工状态对该桥振型影响较大。

关键词:桥梁工程;斜靠式拱桥;有限元法;动力特性;结构参数

中图分类号:U448.225 **文献标志码:**A

Influence of Structural Parameter Variation on Dynamic Characteristic of Leaning-type Arch Bridge

CHEN Huai, ZHU Qian, LI Jing-bin, GE Su-juan

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: Hanjiang Northern Bridge is a concrete filled steel tubular (CFST) through leaning-type arch bridge in Chaozhou city of Guangdong Province. Regarding its main span as the research object, considering elastic restricted function of the border span to the main span, the finite element program ANSYS was used to establish a spatial finite element dynamic calculating model of it. 14 operating-condition modes were considered in the finite element method (FEM) analysis process in order to analyze the influences of different modes on dynamic characteristics of the bridge. The calculation results indicate that the CFST leaning-type arch bridge is a flexible structure. The vertical rigidity of the bridge is stronger than the out-surface rigidity of concrete arch rib. Both the out constraint of V-type brace and the flexural rigidity of tie-beam influence dynamic characteristic of the bridge weakly. If increasing transverse displacement at the toe of stable arch or adding the suspender amount, the out-surface rigidity of the arch rib will be increased obviously but the vertical and torsional rigidity won't be changed greatly. The bridge construction status influences the vibration mode greatly.

Key words: bridge engineering; leaning-type arch bridge; finite element method; dynamic characteristic; structural parameter

收稿日期:2008-04-29

基金项目:国家自然科学基金项目(50748028);河南省自然科学基金项目(072300440160)

作者简介:陈 淮(1962-),男,河南扶沟人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:chenh@zzu.edu.cn.

0 引言

斜靠式拱桥由于外形新颖美观,桥面开阔畅通,富有曲线美和力度感,在城市桥型的选择中具有明显优势,是近些年来发展起来的一种新型桥梁结构形式。特别是随着钢管混凝土结构理论不断完善,钢管混凝土斜靠式拱桥在城市桥梁中得到广泛应用。文献[1]中以江苏省昆山市玉峰大桥为工程背景,阐述了无推力斜靠式拱桥的设计过程,对此类桥型的空间效应、关键构件的局部受力、全桥的横向稳定性作了详细的分析。文献[2]中进行了湖南省益阳市康富桥(钢管混凝土斜靠式拱桥)的振动特性分析,计算表明:桥梁的竖向刚度和桥面系的水平面内刚度相对较大,而拱肋的横向刚度相对较小,桥梁低阶振型以拱肋横向振动或扭转振动为主,该文还提供了斜靠式拱桥的振动特征,这对了解这种新颖桥型的动力性能有重要参考价值。文献[3]、[4]中进行了河南省平顶山市湛河桥(混凝土斜靠式拱桥)的振动特性计算,该拱桥空间效应明显,平面模型的计算结果只能反映结构的内面受力,不能反映结构的内面受力情况;由于斜靠式拱桥内拱、稳定拱相对倾斜而形成空间三角稳定体系,提高了结构的自振频率;桥梁低阶振动以拱肋横向振动为主;桥梁振型较为密集。文献[5]中进行了广东省潮州市韩江北桥主桥初步设计方案——5跨连续中承式钢管混凝土斜靠式拱桥整桥的抗震性能计算,计算结果表明:主拱肋的轴力由横向向地震力控制,其他内力由纵向向地震力控制,地震作用对弯矩影响较大,故主拱的内力计算应考虑地震力的影响。

斜靠式拱桥是一种新型拱桥,空间效应明显,结构受力复杂,建造数量相对较少。对于这种新型拱桥,为正确进行桥梁抗震设计和维护,需要了解该桥型的动力特性。因此,研究不同设计参数对桥梁动力特性的影响,给出合理的设计参数,为该桥型的抗震设计提供参考依据是一件具有重要理论和实践意义的工作。本文中以广东省潮州市韩江北桥主桥初步设计方案为研究对象,探讨结构形式和参数变化对动力特性的影响,所得结果可直接用来评价和了解该桥初步设计方案动力特性的合理性。

1 工程概况

初步设计的广东省潮州市韩江北桥主桥是一座大跨径中承式钢管混凝土斜靠式拱桥,主桥共5跨,其跨径组成为85 m+114 m+160 m+114 m+

85 m,桥宽30 m,每跨设4片钢管混凝土拱肋(斜靠式拱肋),2片竖拱为主拱,主拱外侧向内倾斜的斜拱为稳定拱。主跨的拱肋拱轴线净跨径137.2 m,矢高29.412 m,理论矢跨比1/4.66,拱肋理论中心线为二次抛物线。主跨竖拱拱肋采用2根1 200 mm×16 mm焊接钢管,之间采用2块厚24 mm、高从560.8 mm到860.8 mm渐变、宽1 200 mm腹板焊接形成哑铃型截面,拱肋钢管内浇注50号无收缩混凝土;稳定拱采用1根1 200 mm×24 mm钢管,拱肋钢管内浇注50号无收缩混凝土。稳定拱和主拱之间在拱脚处采用2片250 mm×24 mm钢板焊接,其他部分采用2根300 mm×10 mm钢管焊接。系杆梁采用宽1.0 m、高1.39 m的钢箱型梁,横梁采用宽0.978 m、高1.4 m的工字形钢梁,系杆梁通过吊杆悬吊在钢管混凝土拱肋上。吊杆为双吊杆,中心距480 mm,每根吊杆均由61Φ7镀锌高强低松弛预应力钢丝组成,主跨设15对吊杆。桥面采用预应力空心板,二次浇注140 mm厚的50号钢筋混凝土,再加90 mm沥青混凝土桥面铺装层。主跨立面及跨中横断面布置如图1所示。

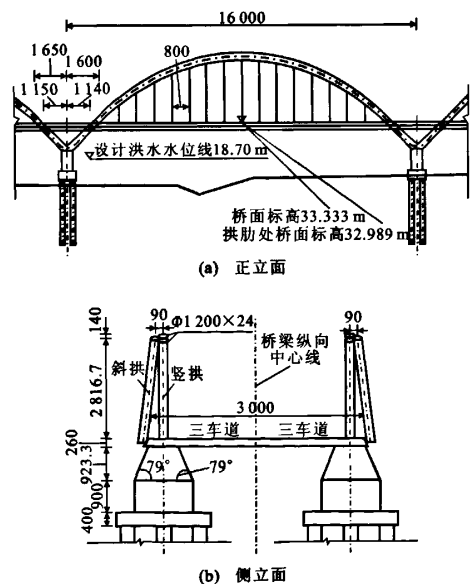


图1 主跨立面及跨中横断面布置(单位:cm)

Fig. 1 Layouts of Vertical Section and Cross-section at Mid-span of Main Span (Unit: cm)

2 桥梁有限元模型

为分析该主跨初步设计方案的动力特性,采用有限元程序 ANSYS 进行计算。该中承式钢管混凝土斜靠式拱桥由拱肋、吊杆、桥面系和 V 撑桥墩 4

个部分组成,桥面系包括水平系杆梁、纵梁、端横梁、中横梁和预制空心桥面板;拱肋由竖直的主拱和向内倾斜的稳定拱组成,主拱设有吊杆,稳定拱不设吊杆,主拱肋采用双哑铃型截面,根据文献[6]的试验结果,其横截面基本满足平截面假定,计算时可对其进行相应简化,用通过双哑铃型截面形心的梁单元模拟。在桥梁有限元建模中,根据该桥的结构特点,并结合类似工程计算经验,结构单元类型选取为:主拱、稳定拱、端横梁、中横梁、系杆梁、纵梁、V撑、桥墩、主拱与稳定拱连接杆件均采用空间梁单元(Beam4)进行模拟;主拱吊杆、主拱拉杆采用只承受拉力的空间杆单元(Link10)模拟;将预制钢筋混凝土空心桥面板和V撑桥墩所支撑的箱梁采用空间板壳单元(Shell63)模拟。

由于在该桥梁工程设计中,需要了解主跨的动力性能,而建立完整的5跨连续钢管混凝土拱桥空间计算模型过于复杂,为简化计算,本文中只建立了主跨的计算模型,根据桥梁结构分析计算的通用做法,将其他边跨对主跨的约束作用用一个等效短梁来模拟,等效短梁的计算参数由其他边跨的刚度等效确定,具体做法为:建立边跨有限元计算模型,让边跨拱脚位置分别沿横向发生单位平动和转动、沿竖向发生单位平动,计算得到所需要施加的力,由此可得出边跨对主跨的弹性约束作用,横向弹性约束刚度 $k_x=0.014\ 639\ 3\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$,竖向弹性约束刚度 $k_z=0.031\ 567\ \text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$,绕横向 x 轴转动弹性约束刚度 $k_{\theta x}=0.000\ 916\ 5\ \text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 。桥梁空间有限元计算模型如图2所示。

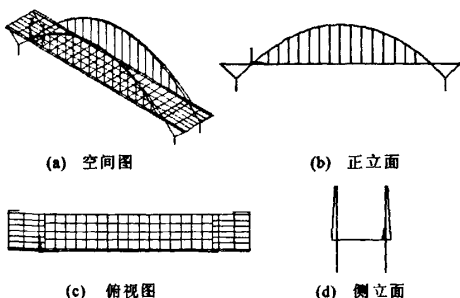


图2 桥梁空间有限元计算模型

Fig.2 Spatial Finite Element Calculation Model of Bridge

计算采用的材料参数根据桥梁设计规范确定,几何参数根据桥梁设计图纸确定,由于拱肋为钢管混凝土组合结构,拱肋以混凝土及钢材的实际用量计算其平均密度值,在计算刚度时将其等效为钢筋

混凝土材料,拱肋截面等效刚度根据文献[7]给出的计算公式确定。

3 结构形式和参数变化对动力特性的影响

桥梁结构的动力特性是进行桥梁抗震设计的基础,对桥梁结构的健康监测和维护具有十分重要的意义,结构的动力特性包括自振频率与主振型等,它们是进行结构动力分析和抗震设计的重要参数,在桥梁检定和验收规范中对桥梁竖向和横向自振频率的限值均有规定。由于在结构动力特性分析中,一般情况下结构前若干阶自振频率和振型起控制作用,因此,只需求结构的前若干阶自振频率和振型^[6],本文中给出前10阶桥梁结构的动力特性。

3.1 计算工况

(1)稳定拱与V撑箱梁固接(倾斜的稳定拱为无铰拱),可细分为以下6种工况:

工况1:成桥状态,V撑外端弹性约束(考虑边跨拱肋对主跨的弹性约束作用)。桥梁第1、2期恒载加活载,有桥面系以及桥面铺装,主拱设有吊杆。系杆梁加在V撑外端,桥面系端横梁与V撑内端牛腿通过活动铰支座连接,考虑V撑外端其他边跨拱肋对主跨的弹性约束作用。

工况2:比较工况1,V撑外端自由(不计边跨拱肋对主跨的约束作用)。系杆梁加在V撑外端,V撑外端位移无约束,桥梁其他参数同工况1。

工况3:比较工况2,V撑外端固定约束。系杆梁加在V撑内端,V撑外端位移固定约束,桥梁其他参数同工况1。

工况4:比较工况3,系杆梁抗弯刚度加大。在工况1中,将系杆梁竖向抗弯惯性矩乘以2,桥梁其他参数同工况1。

工况5:施工工况1,中间施工状态。桥面系已完成,在桥面铺装完成前进行主桥动力特性分析,此时,桥面纵横梁已形成,吊杆悬吊横梁,考虑桥面板及连续缝处的混凝土质量,不计刚度,无桥面铺装。

工况6:施工工况2,裸拱状态。裸拱支撑在V形墩上(V撑桥墩所支撑的箱梁已完成)。

(2)在工况1~6基础上按最不利工况状态,即取工况1、5、6,分别进行稳定拱为二铰拱的动力特性计算(将稳定拱两端与V撑箱梁铰接),即细分为工况7、8、9。

(3)在工况1的基础上,稳定拱的拱脚横向外移1.5 m,稳定拱两端与V撑箱梁分别按:稳定拱与V撑箱梁固接(工况10),稳定拱与V撑箱梁铰接2种工况进行动力特性计算(工况11)。

(4)在工况1的基础上,稳定拱的拱脚横向外移1.5 m,桥面不加宽,稳定拱增加7对吊杆,稳定拱两端与V撑箱梁分别按:稳定拱与V撑箱梁固接(工况12),稳定拱与V撑箱梁铰接2种工况进行动力特性计算(工况13)。

(5)工况14:在工况1基础上,将系杆梁竖向抗弯惯性矩乘以2,桥面系端横梁与V撑内端牛腿固接,桥梁其他参数同工况1。

3.2 计算结果

采用子空间迭代法计算桥梁动力特性,计算得到各工况下该桥梁前10阶频率及振型,如表1所示,前4阶振型如图3~6所示(图3~6的振型是工况1的计算结果)。工况1~4、7、10~14的桥梁振型几乎相同;工况5、6、8、9的桥梁振型有一定的变化。

表1 桥梁动力特性计算结果

Tab. 1 Calculated Results of Dynamic Characteristics of Bridge

全桥空间 振型阶次	工况1		工况2		工况3		工况4		工况5		工况6		工况7	
	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述
1	6.59×10^{-6}	SZ	3.28×10^{-5}	SZ	9.17×10^{-6}	SZ	5.34×10^{-6}	SZ	2.25×10^{-6}	SZ	0.310 04	GH1	5.75×10^{-6}	SZ
2	0.309 50	GH1	0.308 85	GH1	0.310 49	GH1	0.309 51	GH1	0.309 49	GH1	0.311 13	GH2	0.296 46	GH1
3	0.310 59	GH2	0.310 58	GH2	0.310 59	GH2	0.310 60	GH2	0.310 59	GH2	0.638 26	GN1	0.297 37	GH2
4	0.637 29	GN1	0.635 16	GN1	0.640 06	GN1	0.637 29	GN1	0.625 90	SH	0.641 43	GN2	0.617 54	GN1
5	0.640 54	GN2	0.640 52	GN2	0.640 55	GN2	0.640 54	GN2	0.637 29	GN1	1.140 80	QS1	0.620 40	GN2
6	0.826 35	QS1	0.762 78	QS1	0.832 56	QS1	0.836 59	QS1	0.640 53	GN2	1.146 40	GN3	0.820 87	QS1
7	1.063 10	QN1	1.052 50	QN1	1.066 40	QN1	1.081 90	QN1	1.103 00	QS1	1.152 60	QS2	1.055 00	QN1
8	1.144 40	GN3	1.138 70	GN3	1.150 30	GN3	1.144 40	GN3	1.144 80	GN3	1.153 10	GN4	1.121 20	GN3
9	1.151 60	GN4	1.151 60	GN4	1.151 70	GN4	1.151 60	GN4	1.151 60	GN4	1.797 50	GN5	1.128 10	GN4
10	1.346 10	QS2	1.217 60	QS2	1.368 00	QS2	1.366 20	QS2	1.171 80	QN1	1.810 10	GN6	1.337 70	QS2
全桥空间 振型阶次	工况8		工况9		工况10		工况11		工况12		工况13		工况14	
	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述	频率/Hz	振型描述
1	2.56×10^{-6}	SZ	0.296 99	GH1	3.74×10^{-5}	SZ	4.32×10^{-5}	SZ	3.62×10^{-5}	SZ	4.09×10^{-5}	SZ	7.59×10^{-6}	SZ
2	0.296 45	GH1	0.297 90	GH2	0.373 95	GH1	0.352 40	GH1	0.381 38	GH1	0.360 53	GH1	0.310 50	GH1
3	0.297 37	GH2	0.618 44	GN1	0.375 74	GH2	0.353 90	GH2	0.383 17	GH2	0.362 18	GH2	0.310 60	GH2
4	0.617 55	GN1	0.621 47	GN2	0.735 68	GN1	0.671 42	GN1	0.737 45	GN1	0.673 91	GN1	0.640 06	GN1
5	0.620 59	GN2	1.123 10	GN3	0.740 62	GN2	0.674 90	GN2	0.742 42	GN2	0.677 31	GN2	0.640 55	GN2
6	0.625 90	SH	1.129 60	GN4	0.827 03	QS1	0.821 84	QS1	0.826 67	QS1	0.821 41	QS1	0.842 96	QS1
7	1.092 80	QS1	1.129 70	QS1	1.064 60	QN1	1.056 40	QN1	1.067 20	QN1	1.058 90	QN1	1.085 40	QN1
8	1.121 60	GN3	1.141 70	QS2	1.263 40	GN3	1.138 90	GN3	1.264 80	GN3	1.140 40	GN3	1.150 30	GN3
9	1.128 10	GN4	1.760 40	GN5	1.272 70	GN4	1.145 30	GN4	1.273 60	GN4	1.146 70	GN4	1.151 70	GN4
10	1.161 20	QN1	1.772 70	GN6	1.345 50	QS2	1.337 10	QS2	1.359 80	QS2	1.350 20	QS2	1.389 30	QS2

注:SZ表示桥面系水平纵向刚体位移振型;SH表示桥面系水平横向刚体位移振型;GH表示拱肋横向振动振型;GN表示拱肋扭转振动振型;QS表示全桥竖向振动振型;QN表示全桥扭转振动振型;符号后面的数字表示该分振型的阶次。

3.3 计算结果分析

3.3.1 整体结果分析

分析表1所示计算结果可以看出,韩江北桥主跨钢管混凝土斜靠式拱桥的振型比较复杂,其动力特性规律为:

(1)该拱桥的振动主要有桥面系的刚体振动、钢管混凝土拱肋的横向面外振动和扭转振动、全桥的

竖向振动和扭转振动5种振动形式。

(2)该拱桥的桥面系通过吊杆悬吊在拱肋上,在桥梁纵向无约束,是漂浮体系,桥梁的第1阶振动模态是桥面的纵向刚体振动,符合物理概念。

(3)该钢管混凝土拱肋由竖直的主拱和向内倾斜的稳定拱组成,虽然有向内倾斜的稳定拱存在,但拱肋的面外刚度仍然相对较小,所以在桥梁振动中

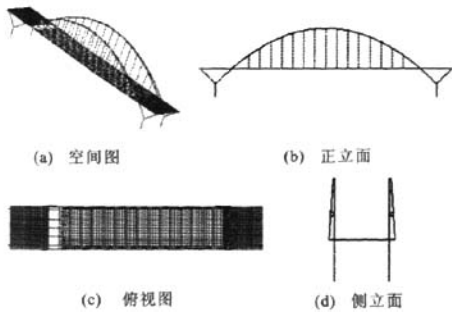


图 3 韩江北桥第 1 阶振型

Fig. 3 The First Step Vibration Modes of Hanjiang Northern Bridge

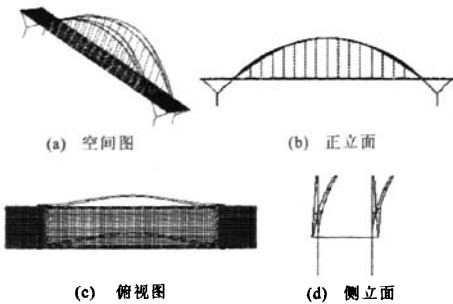


图 4 韩江北桥第 2 阶振型

Fig. 4 The Second Step Vibration Modes of Hanjiang Northern Bridge

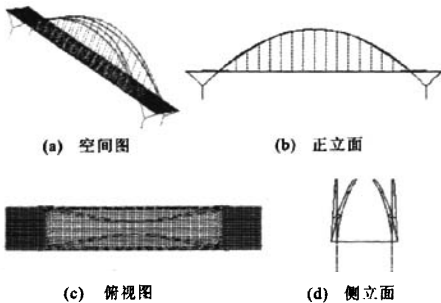


图 5 韩江北桥第 3 阶振型

Fig. 5 The Third Step Vibration Modes of Hanjiang Northern Bridge

首先出现拱肋的面外振动。在 14 种计算工况中,拱肋的横向振动和扭转振动均出现在全桥竖向振动之前,说明拱肋面外自振基频明显小于全桥竖向自振基频,表明桥梁面内外刚度相差较大,桥梁的整体竖向刚度比拱肋的横向刚度大。

(4)由于拱肋和系杆梁之间设有吊杆,桥面与拱肋在竖向呈现同步振动的特征,且全桥竖向振动第 1 阶振型为反对称,全桥竖向振动第 2 阶振型为对称振动,和一般中、下承式钢管混凝土拱桥竖向振动

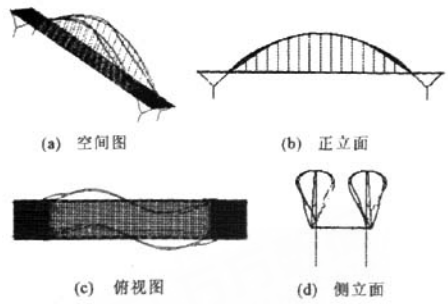


图 6 韩江北桥第 4 阶振型

Fig. 6 The Fourth Step Vibration Modes of Hanjiang Northern Bridge

规律相同。

(5)桥面系面外刚度较弱,桥梁前 10 阶振型中,出现扭转振动形式。

3.3.2 各工况比较

(1)工况 1~3 振型完全相同,并且频率值相差较小,但各阶频率值从大到小均为:工况 3、工况 1、工况 2,说明工况 3 的刚度(V 撑外端固定约束)大于工况 1 的刚度(V 撑外端弹性约束)大于工况 2 的刚度(V 撑外端自由),但效果不是很明显。工况 4 与工况 1 相比拱肋振动频率值几乎没有变化,全桥竖向及扭转频率值略有增加,说明系杆梁抗弯刚度加大能增加全桥竖向及扭转刚度,但效果不明显。

(2)2 种施工工况对该桥的动力特性影响较大。工况 5(中间施工状态)与工况 1 相比,其频率值变化较小,但在第 4 阶出现了桥面板水平横向刚体位移,这主要是由于该施工状态为中间施工状态,此时桥面纵横梁已形成,吊杆悬吊横梁,考虑桥面板及连续缝处的混凝土质量,但不计刚度,无桥面铺装,因此桥面横向刚度较小,出现了桥面板水平横向刚体位移。工况 6(裸拱施工状态)与工况 1 相比,其振型也有很大变化,由于其为裸拱状态,无桥面系,因此第 1 阶振动模态不是桥面的刚体振动,而是拱肋横向振动第 1 阶;并且前 10 阶振型中没有出现全桥扭转振型。

(3)对比分析工况 1、5、6 与工况 7、8、9 可以发现:稳定拱与 V 撑箱梁固接工况比稳定拱与 V 撑箱梁铰接工况频率都略有增大,说明稳定拱与 V 撑箱梁固接比稳定拱与 V 撑箱梁铰接刚度稍大一些;成桥状态下 2 种工况振型相同。中间施工状态下工况 8(稳定拱与 V 撑箱梁铰接)相比工况 5(稳定拱与 V 撑箱梁固接)先出现拱肋扭转振型,然后才出现桥面板水平横向刚体位移,这是由于工况 8 是稳定拱与

V撑箱梁铰接的缘故,这在一定程度上降低了拱肋整体的扭转刚度,因此拱肋扭转振型较先出现。在裸拱施工状态中也是由于铰接降低拱肋扭转刚度的原因,工况9(稳定拱与V撑箱梁铰接)相比工况6(稳定拱与V撑箱梁固接),先出现拱肋扭转振型,然后才出现全桥竖向振型。

(4)工况10、11均比工况1的拱肋横向及扭转振动频率值有一定程度增加,但全桥竖向及扭转振动频率值几乎没有变化,说明稳定拱的拱脚横向外移1.5m能增大该桥拱肋的刚度,对全桥竖向及扭转刚度贡献不大。工况10相比工况1频率值稍大,说明稳定拱与V撑箱梁固接相比稳定拱与V撑箱梁铰接刚度大。

(5)工况12、13类似于工况10、11,说明稳定拱拱脚横向外移1.5m,桥面不加宽,稳定拱增加7对吊杆可以在一定程度增大该桥拱肋的刚度,对全桥竖向及扭转刚度贡献不大;稳定拱与V撑箱梁固接相比外拱与V撑箱梁铰接刚度大。

(6)工况14与工况1相比振型相同,拱肋振动频率值几乎没有变化,全桥竖向及扭转频率略有增加,说明系杆梁竖向抗弯惯性矩加倍,并将桥面系端横梁与V撑内端牛腿固接能增加全桥竖向及扭转刚度,但效果不明显。

4 结 语

(1)广东省潮州市韩江北桥为柔性结构,桥梁的竖向刚度相对较强,而钢管混凝土拱肋的面外刚度相对较弱;V撑外端约束及系杆梁抗弯刚度的变化对该桥振动特性影响较小;稳定拱的拱脚横向外移以及增加吊杆虽能增大该桥拱肋的刚度,但对全桥竖向及扭转刚度贡献不大;桥梁施工状态对该桥振型影响较大。

(2)由于斜靠式拱桥在中国建造数量较少,对于动力特性的研究开展不多,通过本文研究,定量地讨论了桥梁不同结构形式或参数变化对斜靠式拱桥的影响程度,了解了斜靠式拱桥动力特性的变化规律;计算所得结论对了解钢管混凝土斜靠式拱桥的动力特性有较大参考价值,并已用于该桥初步设计方案的修改。

参考文献:

References:

[1] 肖汝诚,孙海涛,贾丽君,等. 昆山玉峰大桥——首座大

跨度无推力斜靠式拱桥的设计研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 78-83.

XIAO Ru-cheng, SUN Hai-tao, JIA Li-jun, et al. Kunshan Yufeng Bridge—Design of the First Long-span Leaning-type Arch Bridge Without Thrust[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(1): 78-83.

[2] 陈淮,王艳,董建华,等. 康富钢管混凝土拱桥振动特性分析[J]. 世界地震工程, 2003, 19(4): 51-56.

CHEN Huai, WANG Yan, DONG Jian-hua, et al. Dynamic Behaviour Analysis of Kangfu Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(4): 51-56.

[3] 陈淮,申哲会,胡锋,等. 斜靠式拱桥动力特性研究[J]. 郑州大学学报:工学版, 2005, 26(4): 25-28.

CHEN Huai, SHEN Zhe-hui, HU Feng, et al. Study on Dynamic Characteristics of Leaning-type Arch Bridge[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2005, 26(4): 25-28.

[4] 陈淮,张广坡,王艳,等. 中、下承式拱桥自振特性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(5): 32-36.

CHEN Huai, ZHANG Guang-po, WANG Yan, et al. Dynamic Property Analysis of Half-through and Bottom-through Arch Bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 5(5): 32-36.

[5] 李静斌,葛素娟,陈淮. 5跨连续中承式钢管混凝土拱桥抗震性能分析[J]. 世界地震工程, 2005, 21(3): 110-115.

LI Jing-bin, GE Su-juan, CHEN Huai. Seismic Behavior Analysis of a 5-span Continuous Half-through CFST Arch Bridge[J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(3): 110-115.

[6] 盛叶,陈宝春. 钢管混凝土哑铃型梁试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(增): 248-251.

SHENG Ye, CHEN Bao-chun. Experiment Research of Dumbbell Concrete-filled Steel Tube Beams[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(S): 248-251.

[7] CECS 28—90, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S]. CECS 28—90, Specification for Design and Construction of Concrete-filled Steel Tubular Structures[S].

[8] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of Structures [M]. 2nd ed. Berkeley: Computers & Structures Inc, 2004.