

矮塔斜拉桥动静力特性对结构参数敏感性影响分析

桂水荣,雷鸣宇,陈水生,卢响

(华东交通大学土木与建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要 目的 为优化矮塔斜拉桥结构设计参数,以槎马特大桥为背景,研究桥梁结构参数及结构体系对矮塔斜拉桥动、静力性能影响。方法 采用 ANSYS 及 Midas civil 软件建立全桥三维动、静力有限元模型,基于结构参数敏感性分析的摄动原理,研究各参数下关键截面静力性能的敏感性系数;改变结构构件刚度及结构体系,研究结构参数对矮塔斜拉桥动力特性影响。结果 斜拉索刚度对内力及动力特性影响均较小;墩梁支承方式对动力特性影响较小,但对内力影响较大。当主梁刚度和桥墩刚度分别增加为原刚度的 2.744 倍和 2.125 倍时,同阶自振频率最大差值均达到了 22%。结论 矮塔斜拉桥主要呈现梁桥动力特性,主梁抗弯及抗扭性能受主梁刚度和桥墩刚度影响较大。

关键词 矮塔斜拉桥;结构参数;敏感性分析;刚构体系;动力特性;有限元模型

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Analysis of Influence of Structural Parameters on Dynamic and Static Characteristics of Extradosed Cable-stayed Bridge

GUI Shuirong, LEI Mingyu, CHEN Shuisheng, LU Xiang

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013)

Abstract: In order to optimize the structural design parameters of low pylon cable-stayed bridge, the influence of bridge structural parameters and structural system on dynamic and static performance of the low pylon cable-stayed bridge was studied based on The Croumat Bridge. ANSYS and Midas Civil software were used to establish three-dimensional dynamic and static finite element models of the whole bridge. Based on the perturbation principle of sensitivity analysis of structural parameters, sensitivity coefficients of static performance of key sections under various parameters were studied. The influence of structural parameters on dynamic characteristics

收稿日期:2022-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(12062006)

作者简介:桂水荣(1979—),女,副教授,主要从事公路桥梁车桥耦合振动、桥梁结构检测及模型实验等方面研究。

of low pylon cable-stayed bridge was studied by changing structural component stiffness and structural system. The result show that the cable stiffness has little influence on the internal force and dynamic characteristics. The supporting mode of pier beam has little influence on dynamic characteristics, but has great influence on internal forces. When the stiffness of the main beam and the pier are increased to 2.744 times and 2.125 times of the original stiffness, respectively, the maximum difference between the natural frequencies of the same order reaches 22%. Low tower cable-stayed bridge mainly presents the dynamic characteristics of beam bridge; The flexural and torsional performance of the main girder is greatly affected by the stiffness of the main girder and the pier.

Key words: extradosed cable-stayed bridge; structural parameters; sensitivity analysis; igid rframe system; dynamic characteristics; finite element model

矮塔斜拉桥是一种力学性能介于连续梁桥和斜拉桥之间较为新颖的组合桥型,以其优良的力学性能、美观性和经济性成为跨径在 200 ~ 300 m 桥梁的优选桥型之一,近年来发展迅速。我国已陆续修建了许多矮塔斜拉桥,如 2000 年建成的芜湖长江大桥,2001 年建成的漳州战备大桥等^[1-2]。随着矮塔斜拉桥应用的日益广泛,国内外学者对其结构体系、静动力性能、构造方式等进行了诸多研究^[3-4]。矮塔斜拉桥为高次超静定结构,体系复杂、影响参数众多,各设计参数对结构影响深度和广度不尽相同。矮塔斜拉桥结构设计参数主要包括结构体系(塔梁固结-墩梁分离体系和刚构体系)、结构构件刚度(主梁刚度、主塔刚度、主墩刚度)和孔跨布置(边中跨比、塔跨比以及无索区长度等),结构参数选取对桥梁设计、施工的安全性和使用阶段受力性能的合理性等方面都有着举足轻重的作用。刘刚^[5]通过影响矩阵法确定矮塔斜拉桥合理索力,继而改变矮塔斜拉桥相关参数,研究了相关参数力学性能敏感性,并与设计值进行了对比分析。李进州等^[6-12]对影响矮塔斜拉桥的主要结构设计参数,如主梁、斜拉索和桥墩等结构构件进行了参数静力特性、动力特性敏感性分析。陈水生等^[13]以南昌朝阳大桥为研究对象,提出墩梁纵向约束对纵飘振型的出现产生较大影响,对主梁竖向及桥塔纵向桥型影响较小。樊小林等^[14]以矮塔斜拉桥的位移、应力、弯矩和斜拉索索

力等为目标函数,分析桥梁施工过程中结构设计参数敏感性。

矮塔斜拉桥受力特点类似于连续梁桥,但与一般的大跨度斜拉桥有很大不同。目前,矮塔斜拉桥结构参数敏感性研究大多针对静力性能,对动力特性的影响研究较少。基于此,笔者以某座双塔单索面刚构体系矮塔斜拉桥为研究对象,建立动、静力有限元模型,分析各参数对刚构体系矮塔斜拉桥力学性能影响,为今后同类桥梁的设计和施工提供参考。

1 工程概况

位于东莞市的槎马特大桥为双塔单索面密索预应力混凝土矮塔斜拉桥,采用塔、梁、墩固结-刚构体系。主桥全长 340 m,桥跨布置为 (90 + 160 + 90)m。主梁采用变高度单箱三室预应力箱梁结构,桥面宽 25.0 m,悬臂板长 5.6 m。跨中梁高 2.5 m,根部梁高 4.8 m。主塔为钢筋混凝土结构,整体外形呈纺锤形,塔墩为单肢结构,主塔高 32.7 m。桥墩横桥向宽度为 3.5 m。斜拉索布置在主梁中央分隔带处。槎马特大桥桥型布置如图 1 所示。

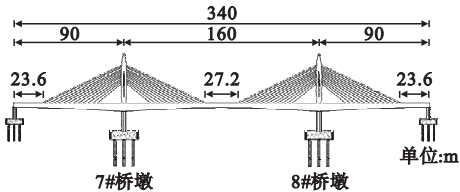


图 1 桥型布置图

Fig. 1 General arrangement of Chamate bridge

2 矮塔斜拉桥静动力特性分析

2.1 静力特性分析

运用有限元软件 Midas 建立槎马特大桥主桥有限元模型,分析其静力性能。全桥离散为 155 个节点、202 个单元,主梁、桥墩和桥塔均采用梁单元模拟,斜拉索采用仅受拉的桁架单元,主桥模型如图 2 所示。

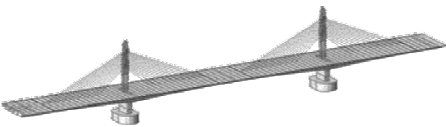


图 2 Midas civil 有限元计算模型

Fig. 2 Midas civil finite element calculation model

根据当地气候条件,升降温工况考虑均匀升温 30 ℃,均匀降温 -25 ℃。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),梯度温度工况中按 100 mm 沥青混凝土铺装层结构类型考虑竖向梯度温度。梯度升温的 $T_1 = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;梯度降温为 $T_1 = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_2 = -2.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_1 为桥面板表面最高温度, T_2 为距桥面板表面 100 mm 处温度)。汽车荷载按公路-I 车道荷载考虑,横向布置双向六车道,并按单边桥墩最大可沉降 5 mm 考虑。

根据数值结果分析,对主梁内力及变形

影响较大的荷载工况为均匀升温工况、移动荷载工况和支座沉降工况。位移控制截面取跨中、边跨和塔顶,内力控制截面取中跨跨中、边跨 1/4 L 处、塔底和墩底。使用阶段工况下,槎马特大桥各控制截面位移和内力计算结果如图 3 和表 1 所示。由图 3 可以看到,桥梁整体结构变形受均匀升温工况影响最大,变形呈中跨上挠,塔顶纵桥向偏移,位移最大绝对值分别为 55.8 mm 和 36.8 mm;移动荷载工况影响次之,结构变形呈中跨下挠,塔顶纵桥向偏移,位移最大绝对值分别为 29.97 mm 和 5.83 mm。由表 1 也可以得出类似结论,刚构体系矮塔斜拉桥的结构内力受温度作用效应影响较其他荷载工况大。

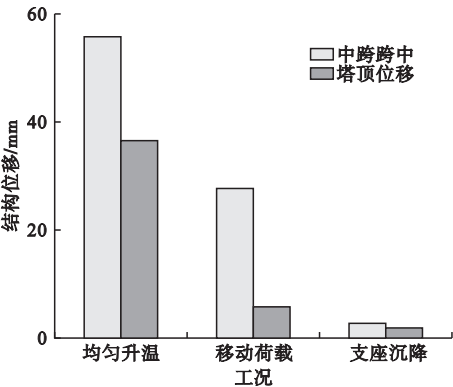


图 3 结构竖向位移图

Fig. 3 Vertical displacement diagram

表 1 结构内力计算结果

Table 1 Structural internal force calculation results

位置	均匀升温工况		移动荷载工况		支座沉降工况	
	弯矩/(kN·m)	应力/MPa	弯矩/(kN·m)	应力/MPa	弯矩/(kN·m)	应力/MPa
中跨跨中	-19 405.6	-3.01	22 638.9	-1.16	192.3	-0.02
边跨 1/4 处	42 299	2.30	15 894.3	-1.01	2 547.5	0.10
塔底	13 708.2	3.14	3 051.0	-0.95	216.0	0.01
墩顶	191 793.0	6.92	38 738.0	-1.50	1860.2	0.15

2.2 动力特性分析

运用有限元软件 ANSYS 建立槎马特大桥动力模型,分析其动力特性。全桥共离散为 416 个节点、440 个单元。主梁、桥墩和桥塔均采用梁单元 BEAM44 模拟,斜拉索采用杆单元 LINK10 模拟。斜拉索初张力通过赋予初应变实现,计算模型如图 4 所示。



图 4 ANSYS 有限元计算模型

Fig. 4 ANSYS finite element calculation model

主梁、斜拉索和桥塔之间采用共节点的方式连接,不考虑桩土作用,桥墩底部视为固结。

分别提取 ANSYS 有限元模型和 Midas civil 有限元模型前五阶自振频率和主要振型特征进行模型比对验证,计算结果见表 2。

表 2 有限元模型前五阶自振频率和振型特征比对

Table 2 Comparison of the first five natural frequencies and modes of the finite element model					
振型阶数	ANSYS 模型		Midas civil 模型		差值/%
	频率/Hz	振型特征	频率/Hz	振型特征	
1	0.805	主梁一阶正对称竖弯	0.811	主梁一阶正对称竖弯	0.7
2	0.958	主梁一阶正对称横弯 + 桥塔横弯	0.987	主梁一阶正对称横弯 + 桥塔横弯	3.0
3	1.135	主梁二阶正对称横弯 + 桥塔横弯	1.163	主梁一阶正对称竖弯 + 桥塔横弯	2.5
4	1.237	主梁一阶反对称竖弯	1.246	主梁一阶反对称竖弯	0.7
5	1.288	主梁扭转 + 桥塔异向横弯	1.248	主梁扭转 + 桥塔异向横弯	-3.1

由表 2 可以看出,两种软件的有限元模型前五阶振型特征基本相同,频率相差不超过 3.1% (第五阶频率相差 3.1%),主要振型特征基本一致,说明两个软件的有限元模型均是准确的。

由前五阶振型可得,主梁一阶竖弯、主梁一阶横弯和主梁一阶扭转分别发生在第 1 阶、第 2 阶、第 5 阶。由表 2 可以得出:

(1) 第一阶频率为竖弯振型,频率为 0.805 Hz,周期 1.242 s。一般大跨度斜拉桥周期在 2 s 以上,普通连续梁桥周期在 1 s 左右,矮塔斜拉桥自振特性更接近于连续梁桥。因塔梁墩固结体系使得全桥刚度明显增强,主梁刚度是影响全桥低阶自振频率和振型特征的主要因素之一。

(2)前五阶振型中,有 4 阶振型以主梁正反对称竖弯或者横弯为主振型特征,变形主要受主梁刚度控制,符合矮塔斜拉桥的主梁是主要受力构件的特点。

(3)桥塔与主梁之间的振型存在一定程度耦合。第 5 阶出现主梁扭转振型,但未出现弯扭耦合振型,主梁扭转刚度相对较小。

3 结构参数静力敏感性分析

3.1 静力参数敏感度分析方法

为了确定某设计参数 x_i 对目标函数敏

感性,使用控制变量法改变目标设计参数并固定其余设计参数,提取各工况下关键截面的应力、位移等各项数据并进行函数拟合, x_i 在合理的范围内摄动,计算各个设计参数的敏感性系数^[15]。

目标函数对设计变量的梯度可用下式近似计算:

$$f'(x_i) = \frac{\partial f}{\partial x_i} \approx \frac{f(X + \Delta x_i) - f(X)}{\Delta x_i}.$$

(1)

引入式(2)所示的无量纲敏感系数:

$$s_i = \frac{|\Delta f|/f}{|\Delta x_i|/x_i} = |f'(x_i)| \frac{x_i}{f}.$$

(2)

s_i 为一组无量纲的非负实数,反映了基准状态下结构的某目标函数对设计参数的敏感程度。比较 s_i 大小,可评估结构对各设计参数的敏感性。

3.2 静力参数敏感性分析

取摄动大小为 1%^[12],根据式(2)分别计算支承条件、主梁刚度、主塔刚度、斜拉索刚度等参数对结构关键位置的位移、应力敏感度系数。外荷载作用下,结构的位移受刚度影响较大,由 2.1 节可知,均匀升温对位移、内力影响最明显。各参数在均匀升温荷载工况下对跨中竖向和塔顶水平的位移敏感性系数及应力敏感性系数如图 5 所示。

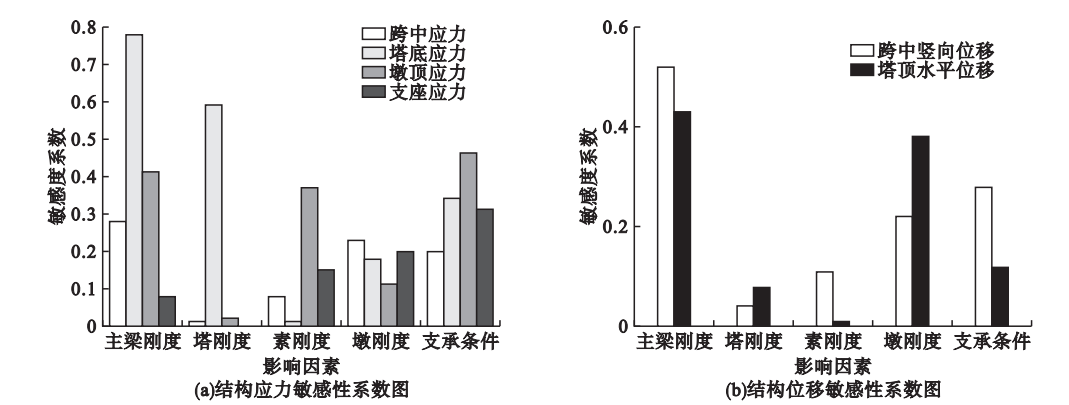


图 5 均匀升温荷载工况下结构位移、应力敏感性系数

Fig. 5 Sensitivity coefficient of structural displacement and stress under uniform heating load condition

由图 5 可以看到,跨中竖向位移和塔顶水平位移受主梁刚度、桥墩刚度及支承条件影响较大,受桥塔刚度、拉索刚度影响较小。主梁刚度对塔底、墩顶弯矩影响均较大,桥塔刚度仅对塔底弯矩影响较大,斜拉索刚度对墩顶弯矩影响较大,桥墩刚度对结构弯矩影响较小,支承条件对墩顶弯矩影响相对最大。

表 3 不同支承条件下自振振型特性

Table 3 Natural vibration characteristics under different supporting conditions

振型阶数	塔梁固结-墩梁分离体系	刚构体系
1	A	A
2	G + J	G + J
3	H + J	H + J
4	E	K + L
5	K + L	E
6	B	B
7	F	F
8	K + L	K
9	J	J
10	C	C

4 结构参数动力特性分析

4.1 支承条件影响分析

为确定塔、梁、墩约束方式对斜拉桥动力特性影响,分别建立塔梁墩固结、塔梁固结-墩梁分离 2 种结构体系 ANSYS 有限元模型,分析不同结构体系下矮塔斜拉桥自振频率和振型对比如图 6 和表 3 所示。

注:A 表示主梁一阶正对称竖弯,B 表示主梁二阶正对称竖弯,C 表示主梁三阶正对称竖弯,D 表示主梁四阶正对称竖弯,E 表示主梁一阶反对称竖弯,F 表示主梁二阶反对称竖弯,G 表示主梁一阶正对称横弯,H 表示主梁二阶正对称横弯,I 表示主梁三阶正对称横弯,J 表示桥塔同向横弯,K 表示桥塔异向横弯,L 表示主梁扭转。

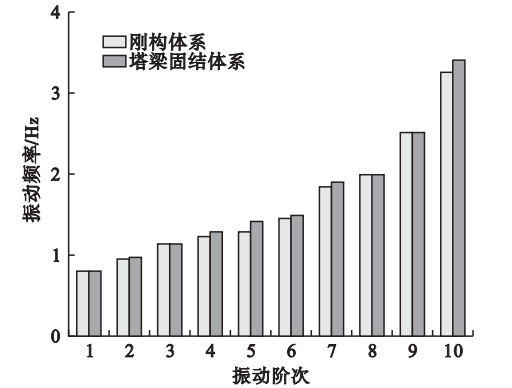


图 6 不同支承条件下的自振频率对比

Fig. 6 Comparison of natural frequencies under different supporting conditions

由图 6 和表 3 所示可以看出:

(1)刚构体系与塔梁固结-墩梁分离体系两种模型的前十阶频率相差较小,除第 5 阶频率相差 10%,其余各阶相差在 -4%~5%。但模型自振振型特征差别较大,在前十阶自振振型中,塔梁固结-墩梁分离体系模型主梁

先出现一阶反对称竖弯,同时在第8阶出现主梁扭转。

(2)墩、梁连接方式对主梁扭转振型的出现频率阶次有影响,将墩梁连接方式由刚接改为铰接,降低了主梁的抗扭能力。

(3)塔、梁、墩固结体系与塔梁固结、墩梁分离体系相比,以主梁横弯、竖弯振动为主的阶次和以桥塔振动为主的阶次在自振频率上相差较小,振型特征也相对一致。

综上分析可知:塔、梁、墩固结方式对主梁扭转振型影响较大,但对以主梁横弯、竖弯振动为主的阶次和以桥塔振动为主的振型影响较小。

4.2 结构构件刚度影响分析

4.2.1 主梁刚度

为确定主梁刚度对矮塔斜拉桥整体刚度的影响,保持主梁弹性模量不变,通过改变主梁截面高度尺寸来改变主梁刚度,将主梁跨中截面梁高调整为1.5 m、2.0 m、3.0 m和3.5 m,其他截面梁高按原桥梁底线形相同的关系递减,分别建立五种工况ANSYS有限元动力模型,计算各模型下前十阶振动频率和振型。不同主梁刚度下前十阶振动频率和振型特征对比分别如图7和表4所示。

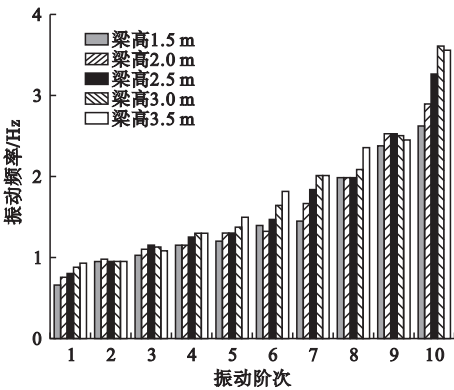


图7 不同主梁刚度下振动频率对比

Fig. 7 Comparison of vibration frequencies under different stiffness of main beams

表4 不同主梁刚度下自振特性对比

Table 4 Comparison of natural vibration characteristics under different main girder stiffness

振型阶数	振型特征				
	梁高 1.5 m	梁高 2.0 m	梁高 2.5 m	梁高 3.0 m	梁高 3.5 m
1	A	A	A	A	G
2	E	G+L	G+J	G	A
3	G+L	E	H+J	H	H
4	B	H	E	K+L	K+L
5	H	B	K+L	E	E
6	K+L	K+L	B	B	B
7	F	F	F	K+L	K+L
8	K+L	K+L	K+L	F	F
9	C	J	J	J	J
10	J	C	C	C	K+L

注:表中字母A~L表示的振型特征与表3相同。

由图7和表4可以得出:

(1)主梁刚度对全桥各阶振型影响较大,各种模型下主梁横弯和竖弯振型出现的频率阶次不同。随着梁高降低,主梁一阶反对称竖弯振型提前出现;随着梁高增加,桥塔横弯和主梁扭转振型先于主梁反对称竖弯振型出现。

(2)前十阶振型中,主梁刚度对全桥自振频率、振型特征出现阶次及振型特征向量影响较大。当梁高增大到4.5 m,即主梁刚度增加为原刚度的2.744倍时,同一阶频率,不同梁高模型的最大自振频率差值达到22%。

分析表明,矮塔斜拉桥对主梁刚度敏感度较高,在影响全桥动力特性因素中,主梁刚度起关键作用。

4.2.2 塔刚度

为确定桥塔刚度对矮塔斜拉桥整体刚度的影响,桥塔弹性模量不变,改变桥塔混凝土截面横桥向宽度,达到改变桥塔刚度,分别建立桥塔横桥宽1.5 m、2.0 m、2.5 m、3.0 m和3.5 m五种工况下ANSYS有限元动力模型,计算各种工况下前十阶自振频率和振型。不同塔刚度下前十阶自振频率和振型特征对

比如图 8 和表 5 所示。

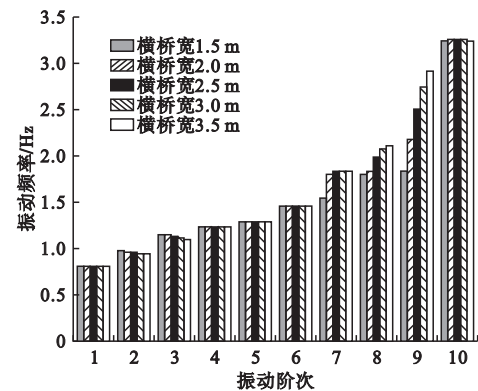


图 8 不同塔刚度下的自振频率对比

Fig. 8 Comparison of natural vibration frequencies under different tower stiffness

表 5 不同塔刚度下振型特征对比

Table 5 Comparison of mode characteristics under different tower stiffness

振型阶数	振型特征				
	横桥宽 1.5 m	横桥宽 2.0 m	横桥宽 2.5 m	横桥宽 3.0 m	横桥宽 3.5 m
1	A	A	A	A	A
2	G+J	G+J	G+J	G+J	G+J
3	H+J	H+J	H+J	H+J	H+J
4	E	E	E	E	E
5	K+L	K+L	K+L	K+L	K+L
6	B	B	B	B	B
7	K	K	F	F	F
8	J	F	K+L	K+L	K+L
9	F	J	J	J	J
10	C	C	C	C	C

由图 8 和表 5 可以得出：

(1)不同塔刚度下,自振特性变化集中体现在第7、8、9阶,频率相差幅度分别在-11%~0%、-7%~11%和-18%~13%。

(2)塔刚度的变化对前 6 阶振型影响较小,第7、8、9 阶均是以桥塔振动为主的振型,即桥塔刚度变化只对桥塔振型有影响。随着塔刚度的提高,以桥塔横弯为主的振型在第 8 阶出现,且对应频率随塔刚度提高逐渐增加。

以上分析表明,塔刚度的改变,对矮塔斜拉桥动力特性影响集中体现在桥塔,桥塔动力特性对塔刚度敏感性较高。提高桥塔刚度能提高全桥的抗扭能力,梁、塔之间的振动存在一定的耦合关系。

4. 2. 3 索刚度

为确定索刚度对矮塔斜拉桥整体结构刚度的影响,以槎马特大桥斜拉索抗拉刚度为 1.0 倍的索刚度,根据等效刚度法,修改斜拉索截面直径,分别建立 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 倍五种直径的等效索刚度 ANSYS 有限元动力模型,计算各种索刚度下前十阶自振频率和振型。不同索刚度下前十阶自振频率和振型特征对比分别如图 9 和表 6 所示。

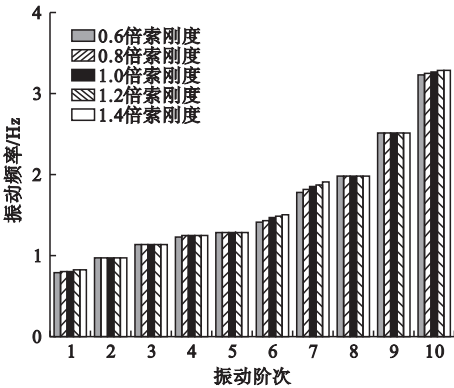


图 9 不同拉索刚度下的自振频率对比

Fig. 9 Comparison of natural vibration frequencies under different cable stiffness

表 6 不同索刚度下振型特征对比

Table 6 Comparison of mode characteristics under different cable stiffness

振型阶数	振型特征				
	0.6 倍索刚度	0.8 倍索刚度	1.0 倍索刚度	1.2 倍索刚度	1.4 倍索刚度
1	A	A	A	A	A
2	G+J	G+J	G+J	G+J	G+J
3	H+J	H+J	H+J	H+J	H+J
4	E	E	E	E	E
5	K+L	K+L	K+L	K+L	K+L
6	B	B	B	B	B
7	F	F	F	F	F
8	K+L	K+L	K+L	K+L	K+L
9	J	J	J	J	J
10	C	C	C	C	C

由图9和表6可得:

(1)不同索刚度下,矮塔斜拉桥各阶振动频率相差-4%~3%。

(2)索刚度的改变对全桥自振频率影响较小,对全桥振型特征几乎无影响。

分析表明,矮塔斜拉桥全桥刚度对索刚度敏感度较低,影响较小。

4.2.4 墩刚度

为确定桥墩刚度对矮塔斜拉桥整体结构的影响,保持桥墩弹性模量不变,通过改变桥墩截面尺寸来改变桥墩刚度,以槎马特大桥桥墩横向宽度为基准,将桥墩横桥向宽度调整为2.5 m、3.0 m、4.0 m和4.5 m,分别建立ANSYS有限元动力模型,提取各种墩刚度下前十阶自振频率和振型。不同墩刚度下

前十阶振动频率和振型特征对比如图10和表7所示。

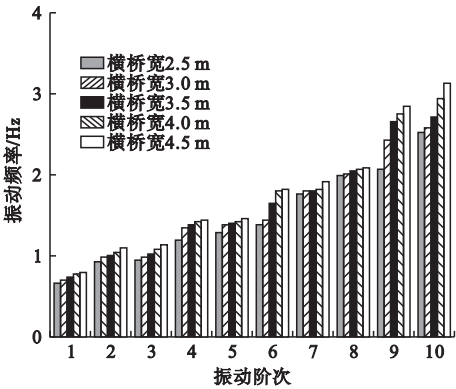


图10 不同墩刚度下的自振频率对比
Fig. 10 Comparison of natural vibration frequencies under different pier stiffness

表7 不同墩刚度下振型特征对比

Table 7 Comparison of vibration mode characteristics under different pier stiffness

振型阶数	振型特征				
	横桥宽 2.5 m	横桥宽 3.0 m	横桥宽 3.5 m	横桥宽 4.0 m	横桥宽 4.5 m
1	A	A	A	A	A
2	E	E	G + J	G + J	G + J
3	G + J	G + J	H + J	E	E
4	H	K + L	E	K + L	K + L
5	K + L	B	K + L	B	B
6	B	J	B	J	C
7	C	F	F	C	J
8	K + L	K + L	K + L	K + L	K
9	F	F	J	J	J
10	J	J	C	F	F

由图10和表7可得:

(1)5种不同墩刚度工况下,主梁一阶反对称竖弯振型和主梁一阶正对称横弯振型几乎在同一频率出现,但当桥墩横向宽增大到4.5 m,即桥墩刚度增加到原刚度的2.125倍时,五种模型第9阶频率差最大达到22%。

(2)墩刚度的改变,对各阶振型出现的频率阶次影响较大。随着墩刚度降低,主梁一阶反对称竖弯振型提前出现,主梁抗弯能力减弱;随着墩刚度提高,全桥扭转振型出现阶次有延后并且出现次数有减少趋势,即墩刚度的提高,能提高全桥抗弯及抗扭能力。提高墩刚度,对桥塔横弯振型出现,并无明显影响。

分析表明,主梁的抗扭及抗弯性能受墩

刚度影响较大。

5 结 论

(1)该桥具有连续刚构桥动力特性,第1阶振型为主梁竖弯振型,振动周期为1.242 s,接近于连续刚构桥一阶振动周期;桥塔横向刚度较弱,桥塔横弯振型出现较早,并伴随出现梁塔耦合振动特性。塔梁墩固结体系模型前十阶出现了两次扭转振型,表明塔梁墩固结体系桥梁扭转刚度相对较小,墩梁固结体系有助于改善全桥抗扭能力。

(2)桥梁结构应力参数中,主梁和桥墩刚度对矮塔斜拉桥内力、变形敏感度系数影响均较大,最大应力敏感性系数0.78,出现

在塔底位置,即塔、梁、墩连接处的应力对结构参数敏感度最高。最大变形敏感性系数0.52,出现在中跨跨中,即中跨跨中处的变形对结构参数敏感度最高。当主梁刚度和桥墩刚度分别增加为原刚度的2.744倍和2.125倍时,同阶自振频率最大差值均达到了22%。

(3) 主梁抗弯及抗扭性能受主梁刚度和桥墩刚度影响较大。斜拉索刚度对内力和全桥自振特性影响均较小。矮塔斜拉桥主要体现梁桥的静动力特性,桥梁的力学特性主要取决于主梁和桥墩刚度及主梁与桥墩之间约束方式。

参考文献

- [1] 王念. 商合杭铁路芜湖长江公铁大桥桥塔环向预应力技术[J]. 桥梁建设, 2019, 49(4): 7-12.
(WANG Nian. Hoop prestressing technique on pylons of Wuhu Changjiang river rail-cum-road bridge on Shangqiu-Hefei-Hangzhou railway [J]. Bridge construction, 2019, 49(4): 7-12.)
- [2] 王凯, 陈亨锦. 漳州战备大桥设计: 三跨连续预应力混凝土矮塔斜拉箱梁桥[J]. 桥梁建设, 2001(1): 21-23.
(WANG Kai, CHEN Hengjin. The design of low-pylon cable-stayed PC bridge in Zhangzhou [J]. Bridge construction, 2019(1): 21-23.)
- [3] JOSE A L G, IGNACIO P Z. Analysis of eduardo Torroja's Tempul aqueduct an important precursor of modern cable-stayed bridges, extradosed bridges and prestressed concrete [J]. Engineering structures, 2017, 150: 955-968.
- [4] NAZIM A N. Aerodynamic stability parameters optimization and global sensitivity analysis for a cable stayed Bridge [J]. KSCE journal of civil engineering, 2017, 21(5): 1866-1881.
- [5] 刘刚. 矮塔斜拉桥过程控制与力学性能分析[D]. 西安: 长安大学, 2016.
(LIU Gang. The monitoring of construction process and mechanical performance analysis of extra-dosed cable bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.)
- [6] 李进州, 李日臣, 夏修身. 列车荷载作用下高速铁路矮塔斜拉桥动力分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2462-2467.
(LI Jinzhou, LI Richen, XIA Xiushen. Research dynamic analysis of low cable-stayed bridge of high-speed railway under train load [J]. Science technology and engineering, 2022, 22(6): 2462-2467.)
- [7] 李振. 某矮塔斜拉桥整体设计参数敏感性分析[J]. 中外公路, 2014, 34(1): 157-159.
(LI Zhen. Sensitivity analysis of integral design parameters of a low pylon cable-stayed bridge [J]. Journal of China & foreign highway, 2014, 34(1): 157-159.)
- [8] 刘来君, 倪富陶, 张筱雨, 等. 预应力混凝土矮塔斜拉桥参数敏感性分析[J]. 中外公路, 2015, 35(4): 142-144.
(LIU Laijun, NI Futao, ZHANG Xiaoyu, et al. Parameter sensitivity analysis of prestressed extra-dosed cable-stayed bridges [J]. Journal of China & foreign highway, 2015, 35: 142-144.)
- [9] 罗如登, 刘铸, 陈立军, 等. 新型支承体系多跨矮塔斜拉桥合龙方案研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(12): 3286-3293.
(LUO Rudeng, LIU Zhu, CHEN Lijun, et al. Closure scheme study of multi-span extradosed cable-stayed bridge with new support system [J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18(12): 3286-3293.)
- [10] 陈水生, 钟汉清, 桂水荣, 等. 波形钢腹板多塔斜拉桥动力特性分析[J]. 桥梁建设, 2016, 46(2): 31-35.
(CHEN Shuisheng, ZHONG Hanqing, GUI Shuirong, et al. Analysis of dynamic characteristic of multi-pylon cable-stayed bridge with corrugated steel webs [J]. Bridge construction, 2016, 46(2): 31-35.)
- [11] 刘昊苏, 雷俊卿. 矮塔斜拉桥上部结构构件刚度敏感性研究[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(4): 122-127.
(LIU Haosu, LEI Junqing. Stiffness sensitivity study of upper structure components in extra-dosed bridges [J]. Journal of Beijing jiaotong university, 2014, 38(4): 122-127.)
- [12] 蔡小杨, 王雷, 谭卜豪. 柔梁密索体系矮塔斜拉桥敏感参数分析[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 210-214.
(CAI Xiaoyang, WANG Lei, TAN Buhao. Analysis of sensitive parameters of low pylon cable-stayed bridge with flexible girder and dense cable system [J]. Journal of China & foreign highway, 2021, 41(4): 210-214.)
- [13] 潘湘文. 高速铁路多塔矮塔斜拉桥力学性能研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(7): 98-102.
(PAN Xiangwen. Research on mechanical performance of multi-pan extra-dosed cable-stayed bridge of high-speed railway [J]. Railway standard design, 2021, 65(7): 98-102.)
- [14] 樊小林. 预应力混凝土矮塔斜拉桥施工控制与结构参数敏感性分析[D]. 西安: 长安大学, 2014.
(FAN Xiaolin. Analysis of prestressed concrete extradosed cable-stayed bridge construction control and structure parameters sensitivity [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.)
- [15] 雷忠伟. 矮塔斜拉桥结构参数敏感性分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
(LEI Zhongwei. Structure parameter sensitivity analysis for an extradosed cable-stayed bridge [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.)
- [17] 刘榕, 伍英, 丁延书, 等. 多塔矮塔斜拉桥结构参数敏感性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(5): 1224-1230.
(LIU Rong, WU Ying, DING Yanshu, et al. Analysis of structural parameters multi-span extra-dosed cable-stayed bridge [J]. Journal of railway science and engineering, 2018, 15(5): 1224-1230.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)