

文章编号: 1005-0523(2011)01-0034-04

钢管混凝土拉索拱桥结构动力分析

徐海燕, 杨宝山

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 针对钢管混凝土拉索拱桥—天子山桥, 建立空间有限元模型, 计算了该桥的动力特性, 并与实测结果进行了比较, 表明所建模型能反映原结构。在此基础上分别讨论了索力变化和弹性模量变化对桥梁结构自振特性的影响。所得结果从桥梁动力分析角度表明拉索是该桥型的重要组成部分。

关键词: 拉索拱桥; 动力特性; 有限元分析

中图分类号: U446.3

文献标识码: A

钢管混凝土拉索拱桥是在钢筋砼桁式组合拱桥的基础上将钢管砼拱桥和斜拉桥等的相应技术综合运用于一体的新桥型。文献[1]以天子山桥为背景从静力角度分析该桥型拉索对桥梁结构力学性能的影响, 表明该桥型是以钢管混凝土拱承载为主, 但可通过调整斜拉索索力来改变拱圈内力及挠度的组合结构体系。文献[2]在成桥状态下从拱圈内力角度分析了索力的优化。然而, 桥梁在使用期间车辆荷载、风荷载、地震作用等均为动力作用。因而, 进一步分析这种新桥型的动力特性, 对该桥型的设计应用是非常必要的。

1 结构分析模型及分析方法

钢管混凝土拉索拱桥结构如图1所示。

根据桥型特点及所分析问题, 假定:

1) 斜拉索为非线性材料考虑几何非线性, 其它构件均按线弹材料;

2) 桥面系按脊梁模型其刚度和质量转化到梁上;

3) 上弦为全预应力钢筋混凝土结构, 混凝土截面不开裂, 即不计任何抗弯刚度的降低;

4) 计算中不考虑承台的移动变位, 边界条件为固结。

拉索组合拱桥采用有限元软件 ANSYS 进行建模分析^[3], 所建立的空间力学建模中各构件形式分别为: 斜拉索采用空间杆单元, 单元选项中选择只作受拉选项, 当单元受压, 刚度就会消失, 以此来模拟缆索的松弛。拱圈、立柱、纵梁和横撑等均采用空间梁单元。

钢管混凝土拱肋的梁单元的力学参数取值过程中, 根据本问题特点将钢管与混凝土看作组合在一起构件, 采用下式所示的等效方式确定构件的单元力学参数。

$$\begin{aligned} A &= A_s + nA_c & I_x &= I_{xs} + nI_{xc} \\ I_y &= I_{ys} + nI_{yc} & \rho A &= \rho_s A_s + \rho_c A_c \end{aligned}$$

收稿日期: 2010-11-18

作者简介: 徐海燕(1955—), 男, 教授, 研究方向为结构工程。



图1 钢管混凝土拉索拱桥桥型示意图
Fig.1 Elevation drawing of Cable-supported concrete-filled steel tube arch bridge

式中: A, I, ρ 分别表示面积、惯性矩和密度;无下标表示等效后值,带下标 s, c 分别表示钢和混凝土对应值; n 表示混凝土与钢的弹性模量之比。

2 桥型动力特性分析

2.1 动力特性分析基本方程

结构体系的运动方程为^[5]

$$[M](\ddot{u}) + [C](\dot{u}) + [K](u) = \{F(t)\} \quad (1)$$

当作用力为0时得自由振动方程

$$[M](\ddot{u}) + [C](\dot{u}) + [K](u) = 0 \quad (2)$$

若忽略自由振动方程中的阻尼,得到无阻尼自由振动方程

$$[M](\ddot{u}) + [K](u) = 0 \quad (3)$$

假定多自由度体系自由振动是简谐运动,则式(3)的解可写为

$$(u) = [A]\sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

式中: ω_i 表示频率向量。

对式(4)取二次导数,得自由振动(简谐运动)的加速度

$$(\ddot{u}) = -\omega^2[A]\sin(\omega t + \theta) = -\omega^2(u) \quad (5)$$

将式(4)、式(5)代入(3)中,得

$$-\omega^2[M][A]\sin(\omega t + \theta) + [K][A]\sin(\omega t + \theta) = 0 \quad (6)$$

消去正弦项,式(6)可写为

$$([K] - \omega^2[M])[A] = 0 \quad (7)$$

只有当下式成立时,才可能得到有限振幅的自由振动

$$\| [K] - \omega^2[M] \| = 0 \quad (8)$$

由式(8)可求出系统的固有频率 $\omega_i, (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 。

2.2 天子山桥动力分析

通过对天子山桥建模和现场实测,得到该桥前几阶理论计算频率和实测竖弯频率^[4],见表1。振型曲线见图2。

表1 天子山桥前几阶振型特点及频率

阶次	振型特征	理论频率/Hz	实测频率/Hz
1	横弯1阶	1.011 7	—
2	横弯2阶	1.512 3	—
3	竖弯1阶	1.872 4	1.876
4	竖弯2阶	1.953 1	2.531

从表1可见竖弯1阶振动频率(1.872 Hz)与实桥实验所测值(1.876 Hz)基本吻合,表明所取模型能较好的反映实际结构。

为更全面的了解该桥型的动力特点,去除拉索将拱上建筑作为质量按钢管拱桥进行分析比较,见表2。

表2 拉索对桥梁频率与振型比较

阶次	有拉索		无拉索	
	频率/Hz	振型	频率/Hz	振型
1	1.011 7	横向弯曲	1.008 8	横向弯曲
3	1.872 4	竖向弯曲	1.195 0	竖向弯曲

从表2可看出拉索对桥梁结构横向刚度影响不大,但对竖向刚度影响较大。该桥梁因拉索作用,将立柱、梁、拱组合为一体,提高了桥梁的整体竖向刚度,构成为组合结构体系。表明将施工拉索保留并转化为永久结构索不仅对桥梁有一定的静力影响,同时也有明显有利于桥梁结构的动力性能。这也正是该桥型区别于普通钢管混凝土拱桥的最大特点。

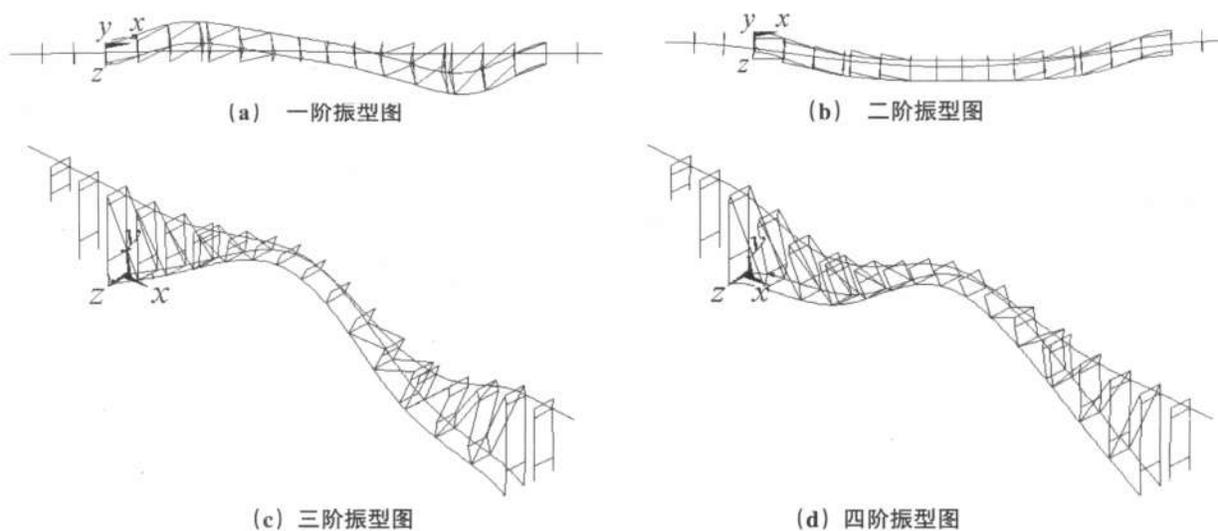


图2 振型曲线图

Fig.2 The first four main vibration mode

3 参数变化对结构动力特性影响

该桥型将施工拉索保留为永久结构索,文献[1]讨论了不同索力对桥梁结构在静载作用下的影响。文献[3]从静力分析角度对成桥状态进行了索力优化。这里以相同模型探讨不同索力对桥梁动力特性的影响。

表3给出了0.1倍施工索力、施工索力和2.5倍施工索力下的结构前几阶频率值。表3中一、二阶为横向弯曲,当索力发生改变,频率变化不大,即索力对桥梁横向刚度影响不大。三、四阶为竖向弯曲,可以看到,索力从零到施工索力变化时桥梁竖向自振频率变化明显,尤其在1.0倍施工索力范围;超过施工索力后,索力改变对桥梁竖向自振频率影响很小。文献[1,3]对该桥型静力分析认为,成桥后,为使该桥拱圈拱顶和拱趾弯矩更为合理合理,拱顶挠度减小,应在施工索力的基础上适当放松。比较索力对该桥静、动力学性能的影响,可以看到优化斜拉索拉力对于改善结构静力受力的贡献远大于改善结构动力特性的贡献。因此,对于本桥跨度的结构,成桥状态斜拉索拉力的确定应该仍以结构静力受力合理为准则。进一步考虑改变桥梁跨度发现,随着桥跨增大,索力对结构的动力影响也将增大。

表3 不同索力值对自振频率值的影响

Tab.3 Influence of various cable force on natural vibration frequency

阶次	1(横向弯曲)	2(横向弯曲)	3(竖向弯曲)	4(竖向弯曲)
0.1倍施工索力	1.008 8	1.343 4	1.425 9	1.601 4
施工索力	1.011 7	1.512 3	1.872 4	1.953 1
2.5倍施工索力	1.012 6	1.516 5	1.874 2	1.954 7

按文献[6]混凝土的弹性模量随着加载速度的提高而提高,钢管混凝土拱肋的弹性模量增加20%,竖弯1阶频率计算结果为1.924 6 Hz,与实测值更加接近。另一方面,弹性模量增加20%,频率最高的增加值为4.87%。表明混凝土弹性模量变化对结构自振特性影响不大,这也与钢管混凝土拱桥类似。

4 结论

通过以上对钢管混凝土拉索拱桥的动力分析,可以认为该桥型虽然具有钢管混凝土拱桥的动力特征,但由于拉索的作用对桥梁的静力和动力性能都有明显的影响。桥梁结构竖向刚度增大,竖向频率值提高。

斜拉索对结构静力特性影响显著,随着拉索索力改变,拱肋弯矩发生明显变化;但拉索对结构动力性能(频率)仅在一定索力值范围内有较大影响。可见拉索是该桥型的基本结构构件,作为施工状态的拉索到成桥后其索力主要以结构静力分析即拱圈内力作为索力优化调整的依据。

钢管混凝土拉索拱桥是在钢管拱桥基础上利用施工索转化为结构拉索的组合结构体系,通过拉索改善了钢管混凝土拱桥结构力学性能,为山区钢管混凝土拱桥建设提供了新的桥型。

参考文献:

- [1] 严云,徐海燕,任亮,等. 钢管混凝土拉索拱桥桥型结构特性分析[J]. 世界桥梁,2007(3):42-44.
- [2] 任亮,徐海燕,严云,等. 钢管混凝土拉索拱桥成桥索力优化研究[J]. 世界桥梁,2007(1):47-49.
- [3] 张立民. Algor、Ansys在桥梁工程中的运用[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [4] 胡柏学,方明,袁铜森,等. 天子山桁式组合拱桥荷载试验分析[J]. 中南公路工程,2004,29(4):69-73.
- [5] 克拉夫 R,彭津 J. 结构动力学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [6] 李运生,张博庆,张彦玲. 钢管混凝土拱桥空间自振特性分析[J]. 石家庄铁道学院学报,1997,10(4):21-25.

Dynamic Analysis on Structure of Cable-supported Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge

Xu Haiyan, Yang Baoshan

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

Abstract: Finite element model of the Tianzishan Bridge is erected that is a cable-supported concrete-filled steel tube arch bridge. Its dynamic characteristics are calculated. The calculating results are compared with testing result of the bridge, which shows that the model can reflect the original structure. Then the impact of the different cable and elastic modulus variation on vibration features of the bridge structure are discussed. The results indicate that the cable is an important component of the bridge type.

Key words: cable-supported arch bridge; free vibration; finite element model