

文章编号: 0451-0712(2005)11-0025-03

中图分类号: U448.271

文献标识码: B

Π 形截面混凝土斜拉桥动力特性分析

武芳文, 赵 雷

(西南交通大学土木工程学院 成都市 610031)

摘 要: 基于有限元方法, 以地维长江大桥为例, 建立空间动力计算模型。考虑 2 种不同的结构形式, 然后进行动力特性计算和分析。

关键词: 斜拉桥; 动力特性; 自振频率; 辅助墩

随着斜拉桥跨径的不断增大, 其结构刚度越来越柔, 斜拉桥在动力荷载 (如风、地震和汽车荷载等) 作用下的动力分析和结构性能倍受工程界关注。桥梁结构的动力特性包括自振频率、主振型及阻尼等, 是结构本身固有的, 反映桥梁的刚度指标, 它对于正确地进行桥梁的抗震设计及维护, 有着重要的意义。

本文以开口截面的约束扭转理论为基础, 建立 Π 形截面混凝土斜拉桥的动力模型, 考虑边跨有辅助墩和无辅助墩两种方式, 分析地维长江大桥的动力特性。

1 工程概况

地维长江大桥位于重庆市江津地区腾辉地维水泥有限公司内, 上部结构为双塔双索面漂浮体系预应力混凝土斜拉桥, 跨径布置为 141 m + 345 m + 141 m, 全长 627 m。桥面布置为 1.75 m (人行道) + 1.25 m (拉索区) + 9.00 m (机动车道) + 1.25 m (拉索区) + 1.75 m (人行道), 全宽为 15.0 m。从南岸到北岸设 1.5% 单向纵坡, 桥面双向横坡为 1.5%。主梁为肋板式结构, 梁高 1.9 m。主塔墩为塔墩固结的钢筋混凝土和部分预应力混凝土结构, 塔高 130.89 m, 呈花瓶形, 设置上中下 3 道横梁。全桥共设 168 根斜拉索和 4 根 0 号索。桥梁布置见图 1 所示。

2 动力计算模型

为了准确地求解该桥动力特性, 建立结构的三维模型, 对实际结构进行模拟。计算模式的模拟着重于结构的刚度、质量和边界条件的模拟, 而且应

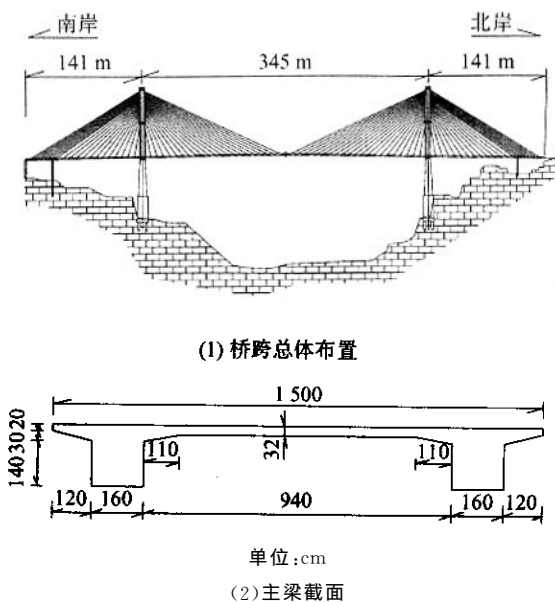


图 1 桥跨总体布置和主梁截面

当尽可能地与实际结构相符。结构的刚度模拟主要指杆件的轴向刚度、弯曲刚度、剪切刚度和扭转刚度, 对于一些更复杂的情况, 有时也包括翘曲刚度的模拟以及杆件之间的相互刚度, 如伸缩装置的模拟等。结构的质量模拟, 主要指杆件的平动质量和转动惯量的模拟。边界条件模拟应和结构的支承条件相符。

在建立动力计算有限元模型时, 对桥面系、斜拉索、主塔和基础以及支座做了简化。桥塔采用三维梁单元来模拟; 斜拉索采用空间索单元模拟, 斜拉索按修正弹性模量 Ernst 公式来考虑几何非线性的影响; 采用 Π 形模式来模拟主梁。建立开口薄壁梁单

元时,采用以下假设:(1)主梁在扭转和翘曲后,主梁截面形状不变;(2)不计弯曲与扭转、翘曲的耦合作用。

主桥基础直接放在基岩上,所以在计算时,基础作为固定端;由于主梁与辅助墩之间采用单向活动支座,相当于桥面在辅助墩顶处,除纵向平动自由度不受辅助墩的约束外,其余均受到辅助墩的约束。结构有限元模型见图2。

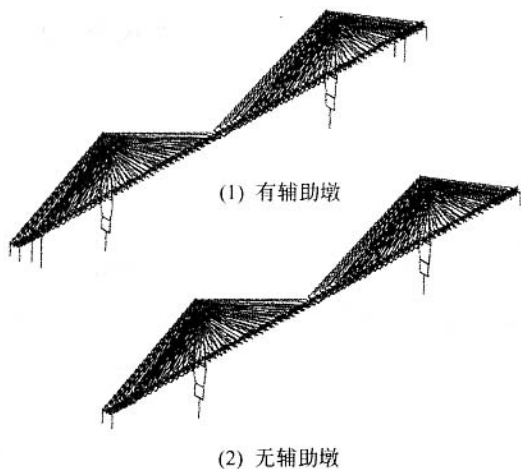


图2 有限元模型离散图

根据以上假设,梁截面的广义位移是 $U = \{u_c, v_c, w_c, \theta_x, \theta_y, \theta_z, \varphi\}^T$,截面上任意一点的轴向位移可表示为:

$$u = u_c - y\theta_z + z\theta_y + \omega\varphi \quad (1)$$

式中: u_c, v_c, w_c 分别为形心沿 X, Y, Z 方向的位移; θ_y, θ_z 分别为截面绕 Y 轴和 Z 轴的转角; θ_x 为扭角; φ 为翘曲函数; ω 为截面上任意点以扭心为极点的扇性坐标。

相应的纵向应变为:

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = w'_c - x\theta'_y + y\theta'_z - \omega\varphi' \quad (2)$$

考虑梁的横向弯曲、轴向拉压、扭转和翘曲变形后,梁单元的应变能和动能可写为:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L [EA(w'_c)^2 + EI_y(u')^2 + EI_x(v')^2 + EI_\omega\varphi'^2 + GJ\varphi'^2] dx \quad (3)$$

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L [\rho A(\dot{w}'_c)^2 + \rho A(\dot{u})^2 + \rho A(\dot{v})^2 + \rho I(\dot{\varphi})^2] dx \quad (4)$$

式(4)的4项中分别为轴向、横向、竖向及扭转动能。

按照哈密顿原理^[2]:

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V) dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta w_{DC} dt = 0 \quad (5)$$

式(5)中, T 是体系的动能, V 是体系的势能, w_{DC} 是非保守力做的功,而 δ 是指定时间 $t_1 \sim t_2$ 内的变分。然后引入梁单元的位移插值函数,轴向位移是线性变化,横向位移采用三向多项式,扭转和翘曲采用双曲函数。把以上函数代入应变能和动能的计算表达式,就可以由式(5)推导出体系的运动微分方程:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (6)$$

式中: $[M], [C], [K]$ 分别为单元的刚度、阻尼和质量矩阵。

通过以上公式得出梁单元的刚度和质量矩阵,然后通过坐标转换到总体坐标下。不考虑阻尼和外力的影响,式(6)可转化为:

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

式(7)为特征值问题,采用求解特征值的方法可求解式(7),就可以得到结构的自振频率和振型。

3 动力特性分析

由于空间斜拉索的存在,斜拉桥的侧向弯曲和扭转强烈耦合在一起,其结果是几乎不存在单纯的扭转振型,而只有侧向弯曲为主兼有扭转的振型,或者以扭转为主兼有侧向弯曲的振型,因此,对斜拉桥的动力分析,必须采用三维空间模型。采用成桥状态进行该桥的动力特性分析,斜拉索内力和结构质量均采用成桥状态时的数值,采用的边界约束条件^[3]为:(1)桥塔、辅助墩及边墩均与基础固结;(2)主梁与边墩交接处,主梁的横向线位移、竖向线位移及绕纵轴的扭转自由度由边墩约束,其余自由度均放松;(3)塔梁结合处,除主梁横向位移与塔为主从外,其余自由度均放松。考虑边跨有辅助墩和无辅助墩的两种方式,其主桥的前10阶无阻尼自振频率以及相应振型的主要特点见表1。

斜拉桥的动力特性分析是研究斜拉桥动力行为的基础,其自振特性决定其动力反应的特性。纵飘振型对桥梁的纵向地震反应的贡献占优势,对漂浮体系,纵飘振型常是最低的振型;一阶竖弯振型对桥梁的地震响应和抗风稳定性有较大的影响;一阶横弯振型对桥梁在风荷载作用下的侧向位移等影响很大;一阶扭转振型在桥梁的颤振中占主要成分,是影响桥梁空气稳定性的主要因素。由于一阶纵飘频率、一阶竖弯频率、一阶侧弯频率和一阶扭转频率对桥

表 1 前 10 阶自振频率及相应振型特点

频率序号	有辅助墩		无辅助墩	
	频率/Hz	振型特点	频率/Hz	振型特点
1	0.072 5	纵飘	0.045 7	纵飘
2	0.127 8	一阶对称侧弯	0.053 5	一阶对称侧弯
3	0.284 7	一阶对称竖弯	0.194 7	一阶对称竖弯
4	0.354 9	主塔对称横摆	0.202 1	主塔对称横摆
5	0.362 9	一阶反对称竖弯	0.261 9	一阶反对称竖弯
6	0.482 7	主塔反对称侧弯	0.416 7	主塔对称侧弯
7	0.493 8	主塔反对称横摆	0.454 3	一阶对称竖弯
8	0.516 0	一阶对称竖弯	0.488 0	主塔反对称侧弯
9	0.532 3	对称扭转	0.493 6	主塔反对称横摆
10	0.622 2	一阶反对称竖弯	0.518 2	一阶反对称竖弯

梁结构的抗震性能和抗风性能具有重要的意义。通过对地维长江大桥动力特性分析可得：

(1)地维长江大桥的一阶振动为纵向飘移,符合飘浮体系的特点。纵桥向飘移的频率(有辅助墩)为 0.072 5 Hz,属于长周期,对减小结构的地震反应是有利的,但将产生较大的梁体位移,过大的位移对过渡墩会带来不利的冲击。

(2)两种结构形式中,主梁的弯曲出现较前,该桥主梁的竖向抗弯刚度较弱,主梁的可靠性较低^[3]。

(3)由于该桥采用的双索面,提高了结构的抗扭刚度,使结构的扭转频率值相应提高,对该桥的抗风稳定性是十分有利的。

(4)从静力角度来看,边跨设置辅助墩可以提高结构的刚度,减小活载作用下塔底的内力和主梁结构的位移;从动力角度来看,边跨设置辅助墩对主梁的振动起了强大的约束作用,对于飘浮体系,有辅助墩频率高于无辅助墩频率,但由于主梁纵向可以自

由滑动,因此,辅助墩对纵飘一阶频率影响较小;辅助墩对主梁有横向约束作用,一阶横弯频率受到辅助墩影响较大。

4 结语

双塔双索面飘浮体系预应力混凝土斜拉桥,根据自身结构形式的不同,其动力特性也随之变化。当采用有限元法进行动力特性分析时,要慎重对待力学模型的侧向支承条件。由于斜拉桥的侧向弯曲变形和扭转变形强烈耦合,侧向弯曲支承条件将会影响扭转频率。其次,当采用开口截面的主梁时,必须注意考虑约束扭转刚度的有利作用^[4]。由以上分析得出:由表1 可知,地维长江大桥的前10 阶自振频率均小于 1.0 Hz,说明此大跨径混凝土斜拉桥的柔度比较大,自振周期长,固有频率低;该混凝土斜拉桥由于柔度比较大,纵飘周期长,有无辅助墩对整体振型的出现次序及对应频率影响较大,辅助墩的设置使得结构的整体刚度有较大的提高,改善了结构的动力性能;飘浮体系同塔梁固结体系相比较而言,由于塔梁隔离,减小了主梁的扭转刚度,对主梁竖向振型对应的频率有一定的影响。

参考文献:

[1] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
[2] 宋一凡. 公路桥梁动力学[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
[3] 武芳文. 混凝土斜拉桥主梁静力可靠性分析[D]. 成都:西南交通大学土木工程学院,2004.
[4] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社,2002.

Dynamic Characteristics Analysis of PC Cable-Stayed Bridges with Π-Type Cross-Section

WU Fang-wen, ZHAO Lei

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031,China)

Abstract: On the basis of the method of finite element, Diwei Yangtze River bridge in Chongqing City is taken as an example to establish space dynamic calculating models. Two different structure shapes are taken into account, then the calculation and the analysis of its dynamic characteristics are carried out.

Key words: cable-stayed bridge; dynamic characteristics; natural frequency; assistant pier