

文章编号: 1006—2106(2009)10—0037—04

# 双塔单索面部分斜拉桥模态与地震反应分析<sup>\*</sup>

朱孟君<sup>\*\*\*</sup>

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

**摘要:** 研究目的: 为研究双塔单索面部分斜拉桥的抗震性能, 对双塔单索面部分斜拉桥进行动力特性分析及地震反应时程分析。分析结果可为双塔单索面部分斜拉桥的设计提供理论指导。

**研究结论:** 通过建立双塔单索面部分斜拉桥的动力分析力学模型, 运用有限元法对部分斜拉桥进行了动力特性与地震反应时程分析。模态分析表明: 双塔单索面部分斜拉桥的第 1 振型为主梁对称竖向弯曲, 第一自振频率比漂浮体系的斜拉桥大, 因此受竖向地震、风和车辆振动的影响较大。研究了在多遇地震作用下桥结构的内力和变形规律, 分析了部分斜拉桥的抗震性能, 研究表明: 部分斜拉桥在 50 年超越概率为 10% 的多遇地震作用下满足抗震设计规范的要求。

**关键词:** 双塔单索面部分斜拉桥; 模态分析; 地震时程分析

**中图分类号:** U448.27 **文献标识码:** A

## Analyses of Modal and Earthquake Response of Twin Towers Single Cable-stayed Bridge

ZHU Meng-Jun

(China Railway Survey and Design Group Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430063, China)

**Abstract:** Research purposes: The modal and earthquake response of twin towers single cable-stayed bridge are analyzed in order to verify the seismic performances of twin towers single cable-stayed bridge and provide the theoretical guidance for the seismic design.

**Research conclusions:** Through establishing the dynamic analysis mechanic model for twin towers single cable-stayed bridge, the dynamic characteristics and temporal process of earthquake are analyzed for twin towers single cable-stayed bridge with finite element method. The modal analysis shows the first modal of twin towers single cable-stayed bridge is the vertical symmetrical bend of main beam, with bigger self-vibration frequency than the floating cable-stayed bridge, so the twin towers single cable-stayed bridge is much influenced by vertical earthquake, wind and vehicle vibration. The internal force and deformation law of the structure of the bridges encountered many earthquakes are studied, and the seismic performance of the cable-stayed bridge is analyzed. The study shows some cable-stayed bridge can meet the seismic requirement stipulated in the design code under effect of encountering many earthquakes with the transcendental possibility of 10% in 50 years.

**Key words:** twin towers single cable-stayed bridge; modal analysis; earthquake temporal analysis

近年来斜拉桥在国内外大跨度桥梁建设中所占的比重越来越大<sup>[1]</sup>。部分斜拉桥又称矮塔斜拉桥, 其独特的结构性能, 越来越显示出它的发展潜力。为此对

其进行全面系统的抗震研究与分析, 对确保桥梁在可能发生的地震作用下能安全可靠的运行十分必要<sup>[2]</sup>。

采用时程分析法可以详细了解部分斜拉桥结构在

\* 收稿日期: 2009—04—14

\*\*\* 作者简介: 朱孟君, 1972 年出生, 男, 高级工程师。

整个地震持续时间内的结构响应。时程分析法只在积分时引入了一些假设,基本上没有其它条件的限制,能处理线性和非线性问题,也可以分析一致激励和非一致激励,同时可以考虑桩—土—结构动力的相互作用。基于以上优点,时程分析法是大跨度桥梁地震响应的有力工具。因此我国有关规范明文规定:对于大跨度结构的桥梁,必须进行地震反应的时程分析<sup>[2]</sup>。

本文以广东省江门至珠海高速公路荷麻溪特大桥为例,建立双塔单索面部分斜拉桥的动力特性分析力学模型,运用有限元法对荷麻溪特大桥进行了模态分析与地震动态时程响应分析。采用实际地震波对该桥在地震激励下的响应进行了计算,分析了该桥的抗震性能。

## 1 工程概况

荷麻溪特大桥(图1)主桥为单索面部分斜拉桥,主桥孔跨为125 m+230 m+125 m。主梁为预应力混凝土结构,采用变高度单箱三室截面,斜腹板。顶板宽28.3 m,顶板悬臂长4.5 m,在支点和斜拉索锚固处设置横隔梁。斜拉索为单索面,布置在中央分隔带上,顺桥向集中布置在跨中附近,塔根附近无索区长度为44.0 m。斜拉索采用高强度镀锌钢绞线索,单根最大索力控制在2 700 kN。主塔布置在中央分隔带上,截面为双圆构成的哑铃型,塔高39.0 m,顺桥向宽5.0 m,横桥向宽2.5 m,圆柱直径为2.5 m。主墩采用实体薄壁墩结构形式,宽14.5 m,壁厚1.2 m。钻孔灌注桩基础,每墩设12桩,桩长约70 m。主墩、主梁、主塔采用固结形式,边墩除设置竖向支座外,另设横向限位当块。

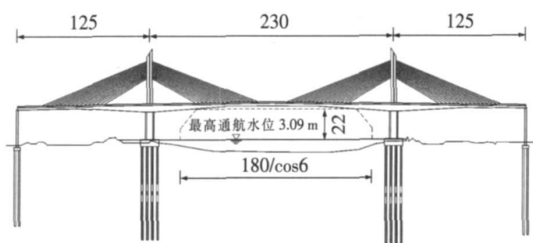


图1 荷麻溪特大桥平面布置图(单位: m)

桥位区域以人工填土、滨海相沉积土、冲积土、残积土为主。基底岩性变化多且复杂,既有软质岩石又有硬质岩石。基岩埋深变化较大。根据《广东省地震烈度区划图》(1990),本桥桥址地震基本烈度为Ⅶ度区。即水平地震系数  $K_h=0.1$  竖向地震系数  $K_v=0.05$ 。

## 2 计算理论

以桥梁结构上所有单元的节点位移为未知量,在地面加速度作用下,根据达朗贝尔原理,结构的动力平衡方程<sup>[2]</sup>为:

$$[M]\{\ddot{\delta}(t)\} + [C]\{\dot{\delta}(t)\} + [K]\{\delta(t)\} = -[M]\{\ddot{U}_0(t)\} \quad (1)$$

式中  $[M]$ ——结构体系的质量矩阵;

$[C]$ ——结构体系的阻尼矩阵;

$[K]$ ——结构体系的刚度矩阵;

$\ddot{U}_0(t)$ ——基础参考点输入点的运动位移向量。

本计算中假设阻尼矩阵  $[C]$  为  $[M]$ 、 $[K]$  的线性组合;刚度矩阵由索、梁单元刚度矩阵通过直接刚度法形成。本文中不考虑旋转运动,即  $\ddot{U}_0(t)$  为3个平动分量或其组合。

## 3 模态分析模型

由于地震发生的随机性,地震反应分析的计算模型采用空间分析模式。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。斜拉桥动力特性分析传统上采用单梁鱼骨式模型。近年来有关学者提出采用二梁式或三梁式模型以解决单梁模型不能考虑主梁约束扭转刚度对结构动力特性的影响<sup>[3-10]</sup>。荷麻溪特大桥为双塔单索面部分斜拉桥,其主梁较刚,因此本文采用单脊梁模型。斜拉桥各组成部分在动力计算模式中的模拟方式阐述如下:

(1) 荷麻溪特大桥主梁为单箱三室闭口箱梁截面,扭转刚度较大,因此选用脊梁模拟桥面系,质量和刚度系统放在各自的位置上,采用一致刚度和一致质量矩阵来描述。主梁单元采用三维梁单元,每个节点6个自由度,该单元能较好的模拟主梁的竖向、横向弯曲和扭转。主梁上斜拉索锚固位置和梁段相交处设单元的自然结点,其它节点根据需要划分。每个梁段之间的单元截面相同,即不考虑变截面梁。

(2) 斜拉索用三维杆单元模拟。每根索设为一个杆单元,通过修正弹性模量来计入索重度的影响<sup>[2]</sup>。

(3) 用三维梁单元模拟桥塔。桥上斜拉索锚固位置为单元的自然结点,其它节点根据需要划分。

(4) 桥墩用三维梁单元模拟。

(5) 不考虑桥面铺装对主梁刚度的影响,只是把桥面铺装质量以附加质量加到主梁上。

边界连接条件对斜拉桥的动力特性和地震响应有较大的影响。由于荷麻溪特大桥主塔基础是深达基岩的桩基础,因此桥墩与桥台连接处设为固定边界,边跨在主梁和桥墩连接处约束竖向和横桥向平动位移。

根据所述建立的三维有限元模型如图 2所示。

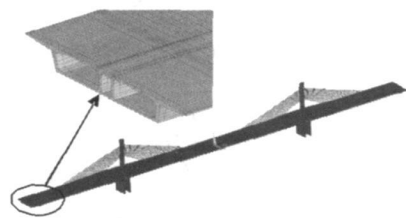


图 2 动力分析三维有限元模型

4 动力特性

采用子空间迭代法对所建立的荷麻溪特大桥有限元模型进行模态分析<sup>[11]</sup>,可得到表 1所示的自振频率及振型特点,部分典型振型如图 3~图 5所示。

表 1 荷麻溪特大桥自振频率及振型特点

振型阶数	频率 /Hz	周期 /s	振型特点
1	0.438	2.292	主梁中跨一阶对称竖弯
2	0.560	1.785	主梁纵移
3	0.788	1.269	主梁中跨一阶反对称及边跨对称竖弯
4	0.789	1.268	主塔对称横弯
5	0.790	1.266	主塔反对称横弯
6	0.854	1.171	主梁中跨一阶对称及边跨一阶对称竖弯
7	1.030	0.971	主梁中跨一阶反对称及边跨一阶对称竖弯
8	1.095	0.913	主塔一阶对称侧弯
9	1.696	0.590	主梁中跨二阶对称竖弯
10	1.873	0.534	主梁中跨对称扭转
11	2.276	0.439	主梁二阶反对称竖弯
12	2.357	0.424	主梁中跨二阶对称及边跨一阶对称竖弯
13	2.458	0.407	主梁中跨二阶侧弯边跨反对称侧弯
14	2.530	0.395	主梁边跨一阶对称侧弯
15	2.707	0.369	主梁中跨二阶反对称扭转
16	2.759	0.362	主梁中跨二阶反对称及边跨一阶反对称竖弯
17	3.279	0.305	主梁反向纵移
18	3.336	0.300	主梁边跨对称扭转
19	3.347	0.299	主梁边跨反对称扭转
20	3.650	0.274	主梁中跨反对称扭转

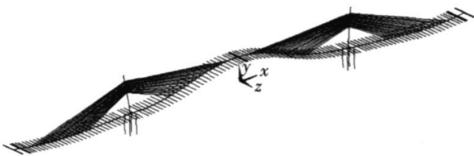


图 3 第 1阶振型(主梁中跨一阶对称竖弯)

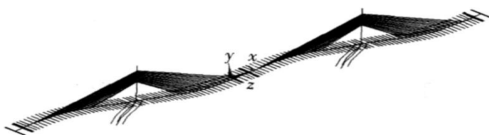


图 4 第 2阶振型(主梁纵移)



图 5 第 10阶振型(主梁中跨对称扭转)

由以上模态分析可知,特大桥的第 1阶振型为主梁中跨的对称竖向弯曲,而不是主梁纵漂。这是主梁和墩固结而具有的结构特点。大桥的第 2阶振型为纵移,即整个桥梁的纵向弯曲,在纵向地震荷载作用下,桥墩和桥台连接处将产生较大的弯矩和剪力。主梁的扭转发生在第 10阶振型,频率为 1.8 Hz左右,根据临界风速基本上与扭频成线性关系,特大桥的颤振临界风速比一般漂浮体系的斜拉桥要高。

5 地震响应时程分析

输入的地震动波形对分析结果影响较大。分析采用 EI-Centro波南北分量作为地震动的输入。根据抗震设计规范,对于抗震设防烈度 7度区,在 50年超越概率为 10%的多遇地震作用下,时程分析时所用地震加速度时程曲线的最大值取  $35\text{ m/s}^2$ 。因此对 EI-Centro波做强度修正,将地震峰值加速度按比例缩小,使其与抗震设防烈度所对应的峰值加速度相同。由于 EI-Centro波适用于中硬和中软的场地,分析不对 EI-Centro波做周期修正。竖向地震加速度峰值取水平向的 65%。用振型迭加法求解时程曲线。扩展振型为前 20阶;阻尼比取 0.05。竖向地震作用下塔、桥墩的位移和弯矩时程曲线如图 6~图 9所示。

观测以上的响应时程曲线,在纵向地震作用下,结构的响应周期基本为 2 s左右。这也说明结构的第 2振型( $T=1.795\text{ s}$ ,振型特征:纵移)起最主要作用。

表 2和表 3为输入地震作用下控制界面内力最大值。 $x,y,z$ 分别为纵向、横向和竖向坐标。

表 2 纵向和竖向地震作用下控制界面内力最大值

部位	力 /kN		弯矩 /( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )
	纵向	竖向	
墩底点	834	3 547	9 348
墩梁交接处	974	3 543	1 413
中跨中	5	4 5	2 788
塔梁交接处	357	3 516	4 014

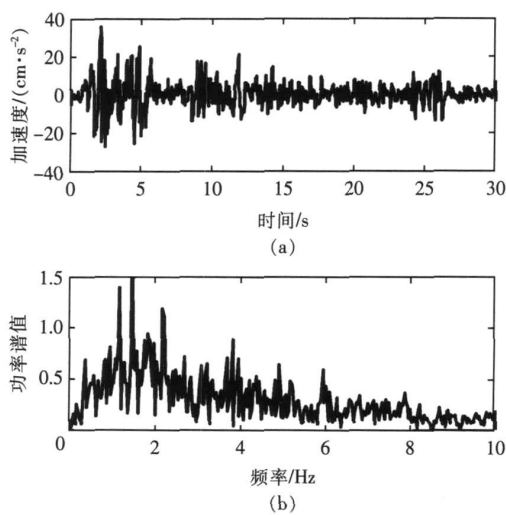


图 6 输入地震动时的时程曲线

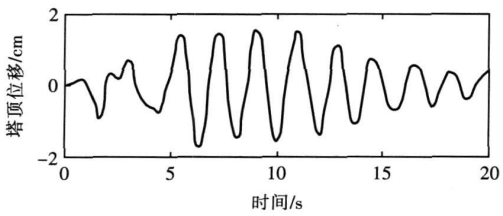


图 7 塔顶位移时程曲线

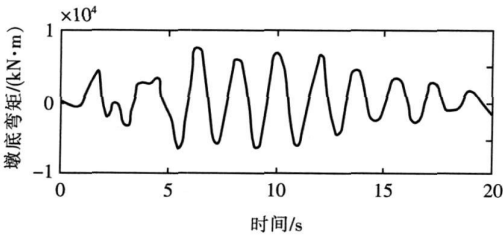


图 8 墩底弯矩时程曲线

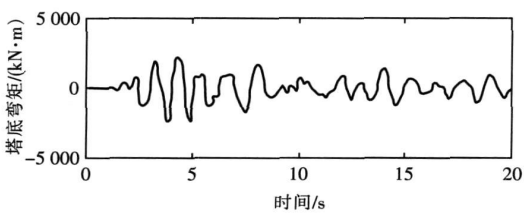


图 9 塔底弯矩时程曲线

表 3 横向和竖向地震作用下控制界面内力最大值

部位	力 / kN			弯矩 / (kN·m)		
	纵向	横向	竖向	MX	MY	MZ
墩底点	22.5	734.2	1 973	9 434	179	4 294
墩梁交点	337.5	744.8	1 982	7 699	7 169	17 682
中跨中	49.6	4.2	5.2	1.6	2 787	10 890
塔梁交点	347.5	564.5	1 973	7 737	3 995	12 794

由表 2 可知,在纵向和竖向地震作用下,桥墩的轴力较大,桥墩和主梁交点处的剪力可达 974 kN。桥墩的截面弯矩由横向和竖向地震作用控制。

6 结论

本文以荷麻溪特大桥为例,运用有限元法对双塔单索面部分斜拉桥的动力特性和地震时程响应进行了分析,可得如下结论。

(1) 部分斜拉桥的第一振型为全桥的竖向弯曲,而不像一般的斜拉桥为纵漂,因而部分斜拉桥的第一振型的自振频率比漂浮体系的斜拉桥大。荷麻溪特大桥的第一自振频率为 0.438 Hz。

(2) 荷麻溪特大桥的第一阶主振型为对称竖弯,因此受竖向地震响应和抗风稳定性的影响很大,同时对车辆振动的反应也较大。大桥的第二阶振型为纵移,即整个桥梁的纵向弯曲,在纵向地震荷载作用下,桥墩和桥台连接处将产生较大的弯矩和剪力。

(3) 在纵向和竖向地震作用下,桥墩的轴力较大,桥墩和主梁交点处的剪力可达 974 kN。桥墩的截面弯矩由横向和竖向地震作用控制。在 50 年超越概率为 10% 的多遇地震作用下,结构处于弹性工作阶段,是安全的。

参考文献:

[1] 刘士林,梁智涛,侯金龙,等.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2002

[2] 范立础.桥梁抗震[M].上海:同济大学出版社,1997

[3] 李国豪.桥梁结构稳定与振动[M].北京:中国铁道出版社,1992

[4] 朱宏平,唐家祥.斜拉桥动力分析的三维有限元模型[J].振动工程学报,1998(3):121-126

[5] 张晓亮,陈宁.斜拉桥结构的数学建模[J].国外桥梁,1998(2):52-56

[6] 杨玉民,袁万城,范立础.大跨斜拉桥横向地震反应及其分形特征[J].同济大学学报,2001(1):15-19

[7] 叶爱君,胡世德,范立础.斜拉桥抗震结构体系研究[J].桥梁建设,2002(4):1-4

[8] 苏光亚,高日,陈丽莹,曾学贵.公铁两用悬索桥自振特性分析[J].铁道工程学报,2002(3):43-47

[9] 竹晓华.连续刚构桥地震反应分析[J].铁道工程学报,2008(10):15-21

[10] 董胜利,元兴军.大跨斜拉桥减震控制分析[J].铁道工程学报,2007(7):47-51

[11] 王帽成,绍敏.有限元法基本原理和数值方法[M].北京:清华大学出版社,1995

(编辑 梅志山)