

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0137-05

不同设计参数下矮塔斜拉桥的抗震动力学分析

刘昊苏¹, 董 军¹, 杨 昀²

(1. 北京建筑工程学院土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘 要: 针对矮塔斜拉桥所具有的低塔及索少的特点, 结合龙井河大桥实际工程, 建立了计算仿真模型, 对不同设计参数下结构的动力特性进行了研究。该文选择桥梁设计半径和墩梁连接形式为参数, 着重讨论了两种参数对曲线矮塔斜拉桥的动力特性的影响; 基于 Midas/civil 三维有限元计算软件, 参照国家 08 抗震规范提供的地震反应谱数据, 采用 CQC 振型组合方法对多组模型进行了地震仿真分析, 探索了不同设计参数下此类桥梁在地震下的结构反应机理。结果表明, 该文所提出的两个设计参数均对曲线矮塔斜拉桥的动力特性有较大影响, 甚至直接影响到全桥抗震性能。研究结论不但对于实际工程有重要参考, 为此桥后续的抗震设计提供参数依据, 同时还为类似的曲线矮塔斜拉桥的抗震设计与施工建造提供了重要的理论参考。

关键词: 矮塔斜拉桥; 动力特性; 设计参数; 反应谱法; 抗震分析

中图分类号: TU318 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S017

SEISMIC RESPONSE FOR AN EXTRADOSSED CABLE-STAYED CURVED BRIDGE WITH DIFFERENT DESIGN PARAMETERS

LIU Hao-su¹, DONG Jun¹, YANG Yun²

(1. School of Civil Engineering and Traffic Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Research Institute of Highway, Ministry of Communication, Beijing 100088, China)

Abstract: The extradosed cable-stayed bridge has low towers and small number of cables. To investigate the dynamic behavior of the extradosed cable-stayed bridge, the paper established numerical model of Longjing Large-span curved bridge with varying design parameters. The two design parameters mainly considered herein were the design radius and the connection form between pier and beam. The influence of design parameters on the dynamic behaviors of the bridge were studied in this paper. Using the earthquake response spectrum data provided by National Seismic Code in 2008, the seismic behaviors of bridge models with different design parameters were investigated in the platform of Midas/civil. The results show that the two design parameters have a great influence on dynamic behaviors of extradosed cable-stayed curved bridges, especially on the overall seismic performance. This investigation can provide important reference for practical engineering and theoretical basis for seismic design of similar extradosed cable-stayed curved bridges.

Key words: extradosed cable-stayed bridge; dynamic characteristics; design parameters; response spectrum method; aseismatic analysis

自 1980 年瑞士著名的设计师 Christian Mennu 设计的 Ganter 大桥拉开了矮塔斜拉桥的序幕后, 经

多年改进, 目前矮塔斜拉桥作为一种新型的桥梁结构, 正在世界范围内被广泛地使用^[1-4]。我国虽起

收稿日期: 2012-05-15; 修改日期: 2013-02-27

基金项目: 交通运输部西部交通科技建设项目(2009318223058)

通讯作者: 董 军(1967—), 男, 山东济南人, 教授, 博士, 博导, 从事桥梁与隧道工程、结构工程研究(E-mail: jdongcg@bucea.edu.cn)。

作者简介: 刘昊苏(1988—), 男, 山东泰安人, 硕士生, 从事桥梁与隧道工程、结构工程研究(E-mail: liuhaosu@126.com);

杨 昀(1958—), 男, 北京人, 教授级高工, 硕士, 从事桥梁工程研究(E-mail: jdongcg@bucea.edu.cn);

梁 田(1988—), 女, 内蒙古人, 硕士生, 从事桥梁与隧道工程、结构工程研究(E-mail: sansu@sina.com)。

步较晚,到2000年才建造了第1座公铁两用的钢桁架矮塔斜拉桥,但是表现出较高的技术与施工起点。近年来,矮塔斜拉桥的静动力特性及抗震性能逐渐得到了国内外学者的关注和研究。目前所建成的矮塔斜拉桥多与连续刚构桥和连续梁桥结构形式类似,所以矮塔斜拉桥的静动力特性及抗震性能偏向于上述两种桥型,但其进一步的结构静动力学机理存在什么差异和特点,还不十分清楚^[2-4]。本文依托在建龙井河特大桥工程背景,针对一类双塔单索面整体式曲线矮塔斜拉桥模型,考虑不同的桥梁设计半径及墩梁的连接形式,采用反应谱分析方法对其抗震动力学行为进行了数值模拟研究;并将结果与类似跨径的普通连续刚构桥与连续梁桥结果进行了对比分析,较为深入地揭示了矮塔斜拉桥的静动力学特性。研究结论对于在建实际工程及类似的曲线矮塔斜拉桥的抗震设计与施工建造有重要的理论参考。

1 理论分析

1.1 桥梁抗震动力微分方程模型

在桥梁抗震设计与动力分析中,可采用多质点体系运动微分方程,即:

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = -MI\ddot{\delta}_g(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 和 K 分别为 n 质点体系的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\delta = \delta(t)$ 为质点对地面的相对位移矢量; I 为惯性力影响矩阵; $\ddot{\delta}_g(t)$ 为地震动加速度时程列向量。

1.2 微分方程模型的反应谱分析

目前用于桥梁结构进行地震反应分析计算的方法主要有反应谱分析、功率谱分析和时程分析等方法,这里不妨采用反应谱分析方法。利用广义坐标,将质点位移列矢量分解为:

$$\delta(t) = \sum_{i=1}^n \phi_i Y_i(t) = \phi Y(t) \quad (2)$$

式中: $\phi = [\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \cdots \ \phi_n]$ 为振型矩阵, ϕ_i 为第 i 振型列矢量; $Y_i(t)$ 是不同的时间函数,称为振型坐标,即广义坐标。令 ω_i 及 ϕ_i 分别为无阻尼多质点体系的第 i 阶圆频率及其相应的振型,将式(2)代入式(1)中再以 ϕ^T 左乘,利用振型正交条件得到一系列独立的振动方程:

$$\ddot{Y}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{Y}_i(t) + \omega_i^2 Y_i(t) = -r_i \ddot{\delta}_g(t) \quad (3)$$

式中, $r_i = \phi_i^T M \cdot I = [r_{ix} \ r_{iy} \ r_{iz}]$, r_{ix} 、 r_{iy} 、 r_{iz} 分别

为 x 、 y 、 z 方向的第 i 阶振型的振型参与系数,其表达式分别:

$$r_{ik} = \frac{\phi_i^T M I_k}{\phi_i^T M \phi_i}, \quad k = x, y, z \quad (4)$$

根据单自由度反应谱理论,由 x 、 y 、 z 方向地震输入引起的 i 阶振型广义位移最大值为:

$$\bar{Y}_{ik} = \frac{S_{ki} \cdot r_{ki}}{\omega_i^2}, \quad k = x, y, z \quad (5)$$

式中, S_{ki} ($k = x, y, z$) 分别为第 i 阶振型对应的 x 、 y 、 z 方向的地震加速度反应谱谱值。则3个方向地震各自输入产生的第 i 阶振型结构位移最大值为:

$$\bar{\delta}_{ik} = \phi_i \bar{Y}_{ik}, \quad k = x, y, z \quad (6)$$

在多方向地震动作用下,利用反应谱方法计算结构的地震反应涉及两种组合问题——振型组合和空间组合。振型组合指的是每一方向地震输入时各个振型反应的组合,目前此问题解决常用方法为 CQC 与 SRSS 两种方法。

2 矮塔斜拉桥的抗震动力学分析

2.1 计算模型及参数选取

以在建贵州省龙井河大桥为基准模型。该桥为双塔三跨双索面曲线矮塔斜拉桥,跨度为 86m+160m+86m,墩塔梁固结体系。桥面宽 28m,设计半径 850m,采用 4° 横向坡度。主梁采用单箱三室边高度箱形截面,墩顶处梁高 6.5m,跨中梁高 3.0m。桥墩为双薄壁矩形墩,墩高 60m,塔柱采用实心矩形截面,塔高 28m。桥塔两侧各布置 6 对平行斜拉索,塔上间距 1m,梁上间距 4m。文中采用变换墩梁连接形式和变换设计半径的方式来对比两种结构形式及不同半径下的桥梁动力响应,共建立墩塔梁固结和墩梁分离两大类计算模型。墩梁分离结构中其支座假定采用板式橡胶支座。此两类模型的建立主要用于对比两种结构体系在地震动力下的响应不同。在每个分类模型中,分别按设计半径 250m、400m、550m、700m、850m 及直桥桥形建立 6 个仿真模型。此 6 种桥型主要用于对比不同半径下各仿真模型的动力响应。本文基准模型采用大型结构有限元计算软件 Midas/civil 2010 进行仿真分析,如图 1 所示。全桥主梁、索塔和桥墩使用梁单元进行模拟,共离散梁单元 200 个。全桥共计 48 根斜拉索,根据斜拉索只受拉并带有初张力的特性,采用桁架单元模拟,共建立桁架单元 48 个。

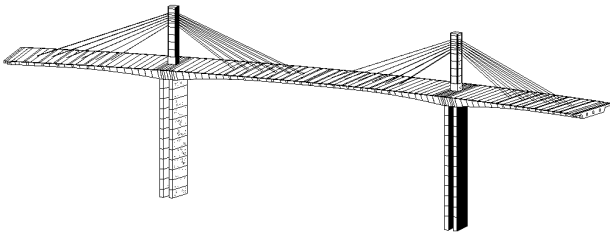


图 1 全桥几何仿真模型

Fig.1 The numerical geometrical model of whole bridge

针对上述基准模型，按不同墩梁连接及变化半径等设计参数，建立 12 种仿真模型。所有模型均采用大型有限元分析软件 Midas/civil 2010 建立全桥空间有限元模型。对于墩梁分离类型的桥型，其墩梁支座处采用弹性连接模拟，其顺桥向、横桥向及竖向刚度取值分别为 50000kN/m、25000kN/m、50000kN/m。为保证除连接方式及半径外的其他设计参数一致，所有模型均包括节点 423 个，单元 394 个。所有模型在边跨支座处均释放顺桥向位移和纵向弯曲两个约束来模拟实际边界条件。

2.2 地震动参数的确定

根据文献[2-4]，设定桥梁类型为 A 类，场地抗震设防烈度为 7 度，水平向设计基本地震加速度峰值为 0.1g，场地类别为 I 类，设定的特性周期为 0.35s。采用 E1 地震作用下设计反应谱作为地震动输入。由于本文涉及曲线桥，故分别沿两桥墩连线方向及垂直于连线方向和竖向输入地震动，因场地设置在基岩上，竖向地震系数取水平地震系数的 0.65 倍。对于该桥位设计的反应谱计算，地表的反应谱对应的阻尼比 $\xi = 0.05$ ，水平设计加速度反应谱最大值 S_{max} 由下式确定：

$$S_{max} = 2.25C_i C_s C_d A \quad (7)$$

其中： C_i 为抗震重要性系数，此处为 1.0； C_s 为场地系数，此处为 1.0； C_d 为阻尼调整系数，此处为 1.0； A 为水平向设计基本地震动加速度峰值，此处为 0.1g。经计算， $S_{max}=2.205m/s^2$ 。所以水平向设计加速度反应谱为：

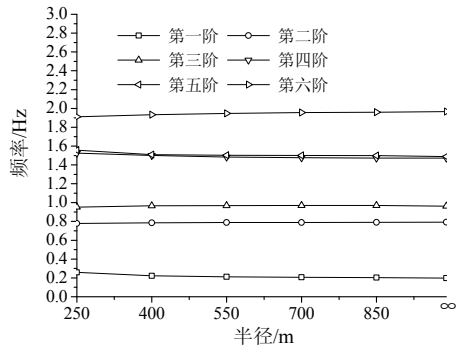
$$S = \begin{cases} 2.293 \times (5.5T + 0.45), & T < 0.1s \\ 2.293, & 0.1s \leq T \leq T_g \\ 2.293 \times (T_g / T), & T \geq T_g \end{cases} \quad (8)$$

式中： S 为水平向设计加速度反应谱； T 为结构自振周期； T_g 为特征周期。

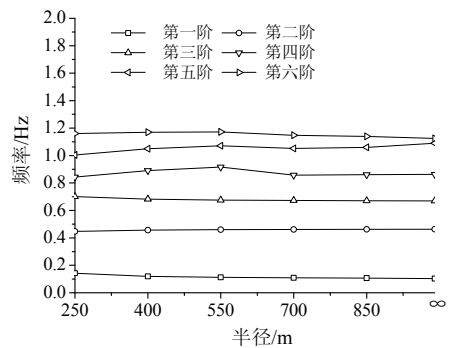
2.3 不同模型的自振动力学特性分析

考虑到结构只有前几阶自振频率和振型起控制作用，不妨采用分块 Lanczos 法对桥梁模态进行

了计算分析。分块 Lanczos 法特征求解器采用的是 Lanczos 算法，用一组矢量来实现 Lanczos 递归计算。这种方法与子空间迭代法同样精确，但计算速度相对更快。当计算某系统特征值所包含一定范围的固有频率时，采用分块兰索斯法提取模态较为有效，此法适用于大型对称特征值的求解问题^[4-6]。这里计算模态的数量取前 20 阶，限于篇幅仅对各类模型下的前 6 阶自振频率进行对比分析，如图 2 所示。



(a) 墩塔梁固结模型前六阶振型频率对比



(b) 墩梁分离模型前六阶振型频率对比

图 2 两类模型前 6 阶自振频率

Fig.2 The first six order natural frequencies for two kinds of models

从计算结果可以看出，两类模型前几阶模态的振型特点基本相同，从而说明支座及桥梁的设计半径并不能改变矮塔斜拉桥的自振形式，且对低阶及高阶模态的频率影响较小。两类模型的基频均较大，基本周期大约在 3s~4s，远小于普通大跨度斜拉桥的周期，但较相同跨度的连续刚构和连续梁桥的基本周期要大，从这一点也体现了矮塔斜拉桥刚度介于普通斜拉桥和连续梁(刚构)桥的特点^[2-4]。从图 2(a)、图 2(b)两图的对比可以看出，墩梁固结体系的矮塔斜拉桥的基频较墩梁分离体系较大，这就表明墩梁结合处的支座各方向的刚度直接影响全桥的刚度，这也可以成为矮塔斜拉桥调整刚度的一种途径。

2.4 结构的抗震动力学特性分析

地震动力响应不妨采用振型分解反应谱方法分析各种体系参数变化对矮塔斜拉桥地震反应的影响。经计算分析,各模型自振周期相隔较近,即结构模态组合系数 ρ_{ij} 值较大,故采用基于随机振动理论的 CQC 方法。为保证计算精度,取前 50 阶振型进行组合,但并不考虑方向组合。在地震作用下,矮塔斜拉桥较为重要的截面一般为桥塔、桥墩这 2 个部位。选取所有模型的左侧半桥为研究对象,则 2 个部位受纵向地震力作用下的部分弯矩如图 3~图 4 所示。

数值分析结果表明,采用墩梁分离结构形式的矮塔斜拉桥由于在纵桥向与横桥向约束大大减弱,所以纵向与横向地震作用引起的桥墩弯矩明显较墩梁固结结构体系要小得多。但由于支座约束较弱,地震作用下 2 个方向的位移也明显增大。随着设计半径的增大,2 种结构体系的墩底弯矩呈增加趋势,这主要是因为当地震作用为水平方向时,曲线矮塔斜拉桥的曲率刚好使主梁在地震力作用方向有了平面拱的作用,主梁上的部分弯矩由主梁的水平轴力所抵消,相对曲线矮塔斜拉桥而言,直线

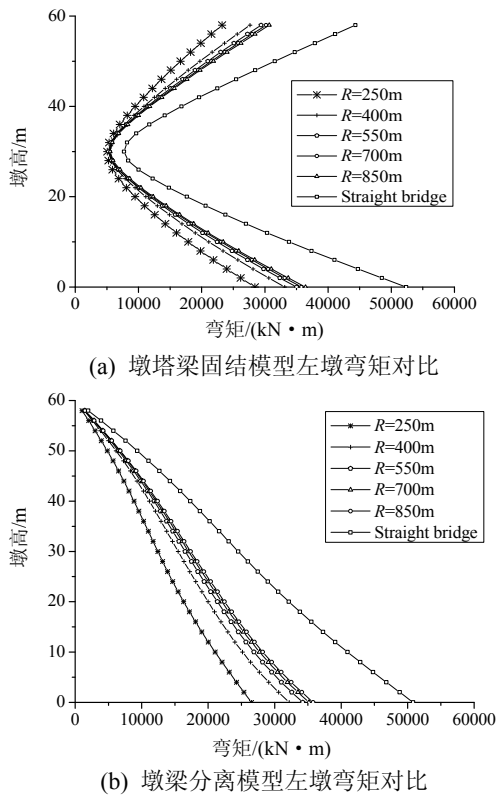
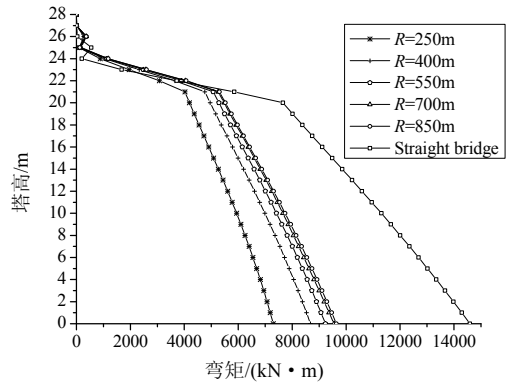
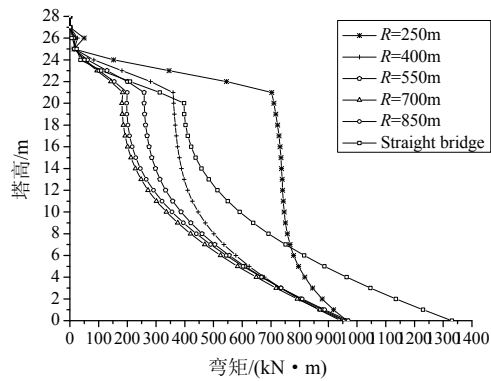


图3 纵向地震力作用下墩梁固结与分离左墩弯矩图(a)与(b)
Fig.3 Bending moment (a)/(b) of the left pier for the bridge with the fixed/separate joint between beam and pier when it suffered longitudinal earthquake



(a) 墩塔梁固结模型左索塔弯矩对比



(b) 墩梁分离模型左索塔弯矩对比

图4 纵向地震力作用下墩梁固结与分离左塔弯矩图(a)与(b)
Fig.4 Bending moment (a)/(b) of the left tower for the bridge with the fixed/separate joint between beam and pier when it suffered longitudinal earthquake

型桥型因无此部分类似于拱的作用效应,使全桥在地震作用下内力增大,墩底所承受弯矩也同时提高。对于桥塔,由于主梁刚度较大且可以承受一定的弯矩,加之斜拉索的牵引,使主塔在纵向地震作用下所产生的弯矩较小,且在无索区与有索区呈现不同的弯矩增长趋势;而当地震作用为横向输入时,索力所引起的弯矩变化不明显,故桥塔弯矩沿塔高呈近似抛物线形式增长。

3 结论

综上所述,对具有不同设计半径及不同墩梁支撑方式的矮塔斜拉桥有如下主要结论:与传统的斜拉桥及连续刚构(梁)桥相比较,矮塔斜拉桥在抗震性能方面具有一定的优势;总结设计参数的变化规律,可以发现桥梁的设计半径主要影响矮塔斜拉桥桥墩根部的抗震性能;墩梁之间的连接形式十分重要,其将直接关系到桥梁地震作用下的位移。建议在进一步矮塔斜拉桥设计中可结合半径及墩梁连接方式所引起地震响应的不同机理,加强抗震设计

来减小矮塔斜拉桥地震反应。

参考文献:

- [1] 林元培. 斜拉桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001: 156—158.
Lin Yuanpei. Cable-stayed bridge [M]. Beijing: People Transport Press, 2001: 156—158. (in Chinese)
- [2] 周翔. 矮塔斜拉桥结构行为研究与设计实践[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
Zhou Xiang. Structural behaviors and design of extradosed cable-stayed bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [3] 陈从春. 矮塔斜拉桥设计理论核心问题研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
Chen Congchun. Study on major problems for design theory of extradosed cable-stayed bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese)
- [4] Saad F A. Extradosed bridges [R]. Egypt: Ain Shmas University, 2004.
- [5] Guna Hong, Chen Yinjun. Bridge topology optimization with stress, displacement and frequency constraints [J]. Computers and Structures, 2003, 8: 131—145.
- [6] Chopra A K. Elastic response spectrum: A historical note [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36: 3—12.
- [7] 朱孟君, 彭卫国, 崔铁万, 薛照钧. 江珠高速公路荷麻溪大桥设计[J]. 桥梁建设, 2007, 38(4): 38—41.
Zhu Mengjun, Peng Weiguo, Cui Tiewan, Xue Zhaojun. Design of Hemaxi Bridge on Jiangmen-Zhuhai Express way [J]. Bridge Construction, 2007, 38(4): 38—41. (in Chinese)
- [8] 朱小秀. 部分斜拉桥的发展及静力性能分析[J]. 有色冶金设计与研究, 2006, 27(6): 48—51.
Zhu Xiaoxiu. Development and static performance analysis of partly cable-stayed bridge [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2006, 27(6): 48—51. (in Chinese)
- [9] 张帅. 基于纤维模型的矮塔斜拉桥抗震性能分析[J]. 铁道标准设计, 2011, 85(11): 85—88.
Zhang Shuai. Analysis on the earthquake resistant capability of low tower cable-stayed bridge by fiber model [J]. Railway Standard Design, 2011, 85(11): 85—88. (in Chinese)
- [10] 孙文会. 单索面宽幅矮塔斜拉桥受力特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
Sun Wenhui. Stress Characteristic analysis of wide girder of extradosed cable-stayed bridge with single plane [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)

(上接第 136 页)

- [8] 李英民, 刘立平, 赖明. 工程地震动随机功率谱模型的分析与改进[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 43—48.
Li Yingmin, Liu Liping, Lai Ming. Analysis and improvement of power random spectra of strong ground motions for engineering purpose [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 43—48. (in Chinese)
- [9] 杜修力, 陈厚群. 地震动随机模拟及其参数确定方法[J]. 地震工程与工程振动, 1994, 14(4): 1—5.
Du Xiuli, Chen Houqun. Random simulation and its parameter determination method of earthquake ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1994, 14(4): 1—5. (in Chinese)
- [10] Hao H. Arch response to correlated multiple excitations. Earthquake engineering and structural dynamics [J]. 1993, 22: 389—404.
- [12] Thráinsson H, Kiremidjian A S. Simulation of digital earthquake accelerograms using the inverse discrete Fourier transform [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31: 2023—2048.
- [13] 屈铁军, 王前信. 空间相关的多点地震动合成(I)基本公式[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(1): 8—15.
Qu Tiejun, Wang Qianxin. Simulation of spatial correlative time histories of multi point ground motion, part I: fundamental formulas [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(1): 8—15. (in Chinese)