

独塔斜拉与连续刚构组合桥梁动力特性 及参数影响分析

冯东明¹, 李爱群¹, 李建慧¹, 杨 光²

(1. 东南大学 土木工程学院 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096

2 铁道第四勘察设计院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 为分析国内首座独塔斜拉连续刚构组合结构体系铁路桥梁的动力特性, 以 Midas / Civil 2006 为平台, 介绍其空间有限元模型的建模策略; 采用子空间迭代法对这种独特的组合体系进行动力特性分析, 给出了前 10 阶频率和相应的振型; 同时, 分别计算了恒载集度和弹性模量 2 种主要结构参数变化对动力特性的影响, 并对其规律作出了讨论分析。计算结果表明: 斜拉刚构组合结构振动特性兼有斜拉桥和刚构桥的特点, 受恒载集度和弹性模量等结构参数变化影响较大。

关键词: 独塔斜拉; 连续刚构; 组合体系; 有限元模型; 动力特性

中图分类号: U448.25 U443.38

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)03-0329-04

Research on Dynamic Behavior and Parameter Influence of Single Pylon Cable-Stayed and Continuous Rigid-Frame Composite Bridge

FENG Dongming¹, LI Aiqun¹, LI Jianhui¹, YANG Guang²

(1. School of Civil Engineering Key Laboratory for Concrete & Prestressed Concrete Structures of Education Ministry
Southeast University Nanjing 210096 Jiangsu China

2. The 4th Survey & Design Institute of China Railways Wuhan 430063 Hubei China)

Abstract: The dynamic characteristics of the first single pylon cable-stayed and continuous rigid-frame hybrid girder bridge in China are analyzed on the basis of Midas / Civil 2006. The strategies of modeling 3D FEM model in simulating process are introduced. The self-vibration behavior of this unique bridge is analyzed by adopting the subspace iteration method. The first 10 order frequencies and corresponding vibration modes are also given. Meanwhile, different structural parameters, such as dead load intensity and elastic modulus, which have influence on dynamic characteristics, are calculated respectively. Furthermore, its rule is discussed and analyzed. The calculating results indicate that the cable-stayed continuous rigid-frame hybrid bridge possesses both features of the cable-stayed bridge and the continuous rigid-frame bridge, and the hybrid bridge is greatly influenced by dead load intensity and elastic modulus. The analysis results mentioned above provide reference for natural vibration analysis and earthquake-resistance design of this hybrid bridge.

Key words: single pylon cable-stayed bridge; continuous rigid-frame bridge; combination system structure; finite element model; dynamic characteristic

由于铁路桥梁的列车荷载大、行车安全性和旅客舒适度要求高等原因, 斜拉桥在铁路桥梁的应用中受到很大的限制。同时, 许多预应力混凝土连续刚构桥受混凝土收缩、徐变以及荷载等因素影响, 在运营中不同程度地出现了跨中下挠的问题^[1-2]。独塔斜拉与连续刚构组合结构体系铁路桥正是在这一背景下应运而生。把斜拉桥作用于连续刚构上, 较

好地克服了单纯斜拉桥体系和单纯连续刚构桥体系在铁路桥梁应用上的限制与不足, 使得大跨度预应力混凝土连续刚构桥的梁体截面和边跨长度均有所减小。斜拉索仅在跨中梁高较矮的一定范围内布置, 数量较少, 作为安全储备, 对结构整体“刚度保持”起重要作用, 改善了连续刚构尤其是下部结构后期收缩徐变和温度力影响的受力状况, 是解决大

收稿日期: 2010-01-22 修订日期: 2010-03-09

基金项目: 国家杰出青年基金项目(50725828); 国家自然科学基金重点资助项目(50538020)

作者简介: 冯东明(1985-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事大跨度桥梁结构分析。E-mail: feng200111@163.com

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

跨连续刚构桥长期运营荷载作用下主梁下挠的有效途径^[3-4]。

独塔斜拉和连续刚构两种不同的刚度特性和受力特性,使得组合结构体系的动力特性与传统的斜拉桥、刚构桥相比均有所不同,而组合结构的固有振动特性的研究又是其抗风、抗震及车辆所致的振动效应的研究基础,因此,对该类组合桥型的动力特性进行分析和研究具有十分重要的意义。以广珠城际轻轨西江特大桥独塔斜拉连续刚构组合体系为背景,通过建立空间杆系有限元模型,分析其动力特性,同时分别计算了恒载集度和弹性模量这两类主要结构参数变化对斜拉刚构组合结构体系的动力特性的影响,并对其影响规律作了详细的讨论。

1 工程背景

广珠城际快速轨道交通工程是珠三角地区快速轨道交通网络的重要组成部分,西江特大桥是该工程江门支线上的重要桥梁,主桥横跨西江,采用(100+2×210+100)m独塔斜拉连续刚构组合结构,系铁路桥梁首次采用,全长 620 m 有碴道轨桥面,主桥两端各 5 m 为有碴一无碴道轨过渡区。主梁采用单箱双室截面,桥面宽 11.6 m 中支点处梁高 11.0 m 端支点及中跨中处梁高 4.5 m 梁底曲线为二次抛物线。索塔采用曲线钻石形桥塔,桥面以上塔高 70.0 m 桥面以上塔的高跨比为 1/3 斜拉索(C01~C13)采用空间双索面体系,最长约 139 m,最短约 68 m 张拉端设置在塔内。图 1 为西江特大桥主桥示意。

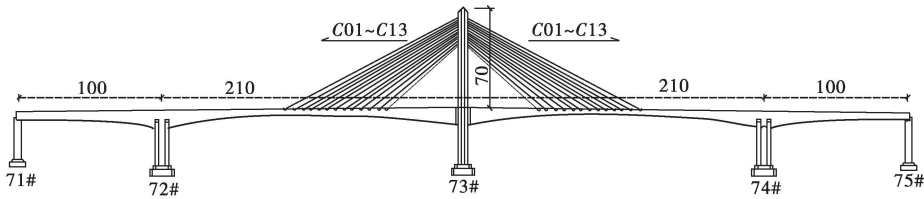


图 1 西江特大桥示意(单位: m)

Fig 1 Overall schematic representation of Xijiang River Bridge

2 动力计算模型的建立

在斜拉桥的抗风、抗震等动力分析中,由于荷载方向的随机性,其结构行为表现出较强的耦合性,尤其是扭转和横向弯曲振型经常强烈耦合,其计算模式必须采用空间模型^[5]。一般斜拉桥的三维有限元模型有两种,一种为空间杆系模型,另一种为空间板壳、块体和梁单元的组合模型。虽然后者在理论上更接近于真实结构,但计算量过大,对于动力问题而言与前者差异不大,在国内文献资料中,斜拉桥的动力特性多采用空间杆件有限元模型予以计算分析。

2.1 建模策略

本文计算采用桥梁专用空间有限元计算程序 Midas / Civil 2006。组合结构的主要受力构件有梁、索、塔、墩等,计算模型着重于结构刚度、质量和边界条件的模拟,使其尽量和实际结构相符。

1) 桥面系的模拟。常用的模式有脊骨模型、双主梁模型、三主梁模型等。动力特性分析中,考虑到本桥采用的闭口截面混凝土箱梁的抗扭刚度较大,即使不能正确地考虑翘曲刚度,影响也不大,故采用脊骨梁模式建模。利用空间梁单元模拟主梁,主梁截面采用和实际一致的形式,把桥面系的刚度和质量都集中在中间节点上。

2) 塔柱、塔墩及斜拉索模拟。塔柱、塔墩及桩

基同样采用空间梁单元进行模拟。由于单元划分的粗细决定塔上堆聚质量的分布、振型的形状和地震力的分布,主塔单元的划分不宜过粗。考虑和斜拉索锚固位置的连接,斜拉索锚固区约 1.5 m 一个单元,无索区 6 m 一个单元划分即已满足分析精度。斜拉索采用只受拉桁架单元,索的弹性模量考虑垂度效应采用 Emst 公式进行修正。

3) 质量转化与初拉力的考虑。考虑到有碴轨道桥面几乎不参与结构受力,但却影响结构振动特性,在建模时仅模拟二期恒载的质量,而不模拟其刚度,二期恒载按均布荷载 160 kN/m 加载到主梁单元,然后将荷载转化为质量。在高应力的缆索中,结构的面外刚度要大大的受到结构缆索的面内应力状态的影响,这种面内应力和横向刚度之间的耦合,即为通常意义上的应力刚化^[6]。Midas 数值模拟中,将拉索索力加到对应的桁架单元,转化为初始刚度矩阵,加到主刚度矩阵上。

4) 边界条件处理。大量研究表明,考虑土—桩—结构相互作用使得体系的动力特性与刚性基础上有所不同,主要表现为自振频率降低、阻尼增加、内力及位移反应改变等。对于桩基础,此处地质条件较复杂,为精确模拟“桩—土”作用,单元划分较细,基本契合地质变化。采用 m 法^[7]计算得到土弹簧刚

度,在桩单元节点上加上节点弹性支撑,全桥共有 576 个节点弹性支撑。塔墩梁固结、索梁连接等均通过建立刚性连接来模拟,全桥两端的支座采用释放水平约束的活动支座模拟。

2.2 全桥空间有限元模型

通过对桥梁所有构件及边界条件的模拟,建立了西江特大桥完整的全桥空间组合有限元模型,如图 2。全桥模型共计节点 905 个,单元 860 个(其中梁单元和桁架单元分别为 808 和 52 个),节点弹性支撑 576 个,刚性连接 61 个。

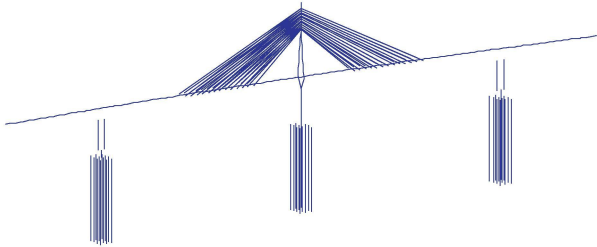


图 2 全桥空间有限元模型
Fig 2 Spatial finite element model

3 动力特性分析

3.1 组合体系动力分析计算理论

对西江特大桥组合结构桥梁的动力分析来说,其基本思想和动力分析原理与普通的斜拉桥或刚构桥大体上是一致的。根据有限元的基本原理进行单元划分,求出各部件空间梁单元的刚度矩阵和相应的质量矩阵,将其转换到总体坐标系中,集成总体刚度矩阵和总体质量矩阵,分别记为 K 和 M ,则组合体系的无阻尼自由振动方程^[8]为:

$$(K - \omega^2 M)\{\delta\} = \{0\} \tag{1}$$

即, $(M^{-1}K - \omega^2 I)\{\delta\} = \{0\}$,令 $M^{-1}K = P$, 则有: $(P - \omega^2 I)\{\delta\} = \{0\}$,这是一个求解特征值的问题,该方程有非 0 解的充要条件是其行列式为 0 即:

$$\begin{vmatrix} p_{11} - \omega^2 & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} - \omega^2 & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} - \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \tag{2}$$

式(2)称为方阵 P 的特征方程。 ω_j^2 ($j=1, 2, 3, \cdots, n$) 称为方阵 P 的特征值或特征根。

3.2 主要自振频率与振型

采用子空间迭代法求出了该桥前 50 阶自振频率和振型,限于篇幅,表 1 只列出了前 10 阶频率与振型,图 3 给出了几种典型的振型图。

表 1 西江特大桥自振频率和周期

Tab 1 Self-vibration behavior of Xijiang River Bridge

阶次	频率 /Hz	周期 /s	振型主要特性
1	0.393	2.541	主梁反对称侧弯
2	0.433	2.311	主梁对称侧弯
3	0.610	1.638	主梁反对称竖弯+主墩塔面内侧弯+全桥纵飘
4	0.686	1.457	主梁反对称侧弯与扭转耦合+主塔扭转
5	0.707	1.414	主塔侧倾+主梁对称侧弯
6	0.902	1.109	主梁反对称竖弯+主墩塔面内侧弯+全桥纵飘
7	0.934	1.071	主塔侧倾+主梁对称侧弯
8	1.011	0.989	主梁对称竖弯
9	1.363	0.734	主梁反对称侧弯与扭转耦合+主塔扭转
10	1.543	0.648	主塔侧倾+主梁对称侧弯

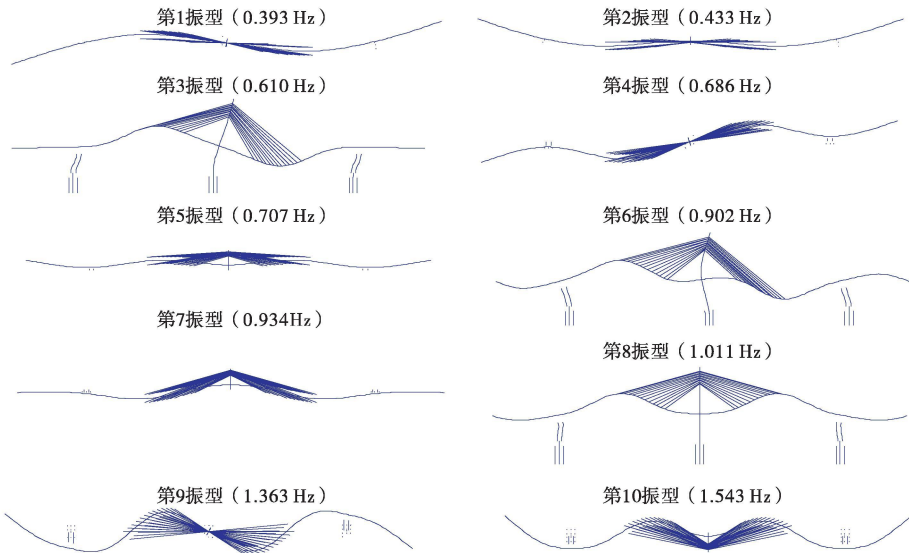


图 3 前 10 阶振型图

Fig 3 First 10 order typical vibration shapes

从动力计算结果可以看出,该斜拉刚构组合结构桥振型表现出明显的三维性和相互耦合性,墩、塔、梁、索的振动相互影响。总体看来,桥梁低阶振型主要表现为全桥的面外振动和面内振动,该桥的振型具有以下特点:

1)1阶振动频率为 0.393 Hz 周期为 2.541 s ($T<5\text{ s}$),属于短周期范畴;而一般的大跨度斜拉桥属于柔性体系,自振周期较长 ($T>5\text{ s}$)^[9]。说明该组合桥由于连续刚构的力学特性使得整个组合体系刚度明显加强,主梁的刚度是影响全桥自振频率和振动特性的主要原因。

2)在前 10 阶振型中,有包括前 2 阶在内的 7 阶振型是以桥面系面外振动为主的振型,表明该桥面外低阶频率小于面内低阶频率,即该桥横向刚度较小,这主要是由桥梁的横向桥宽较小所决定的。面外振型对主桥的横桥向地震反应起控制作用,在地震反应分析时必须考虑横向地震动的输入。

3)振型较为密集。从 0.393~1.543 Hz 之间分布了前 10 阶振型,这种组合体系保留了传统普通斜拉桥的特点,在这样一个较窄的频带上,振型密集,因此建议对类似的组合体系在地震反应分析时应考虑较多的振型数。

4)不存在纯扭转的振型。虽然箱梁本身的扭转刚度较大,但由于双薄壁墩和斜拉索的影响,使侧向弯曲和扭转强烈地耦合在一起,只有侧向弯曲为主兼有扭转的振型。

5)该组合桥在第 3、第 6 阶出现了纵飘振型成分,主要的原因是尽管西江特大桥的墩塔梁全部固结,但在全桥两端采用释放水平约束的活动支座,从而使得结构体系在顺桥向可以发生位移。

4 动力特性主要影响因素分析

对该桥动力特性做进一步分析,考虑了恒载集度、混凝土弹性模量这两类主要结构参数变化对组合体系自振频率的影响。每次只改变上述结构参数中的一项,其它参数不变,同样采用子空间迭代法进行计算,以参数的原设计值作为基准,比较各种情况下典型自振频率的变化,从中总结出一些有参考价值的结论。

4.1 恒载变化对动力特性的影响

当恒载按 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 2.0 倍率发生变化时,计算了西江特大桥组合体系的 1 阶反对称侧弯、对称侧弯、反对称竖弯及对称竖弯等振型的变化规律,见图 4。当恒载逐渐增大时,侧向与竖向频率都在减小,竖向振动频率减小幅度较大。恒载倍率由 1.0 增大到 2.0,反对称竖弯频率由 0.610 Hz 减小到 0.462 Hz 对称竖弯频率由 1.011 Hz 减

小到 0.784 Hz 说明恒载集度变化对动力特性的影响比较明显。

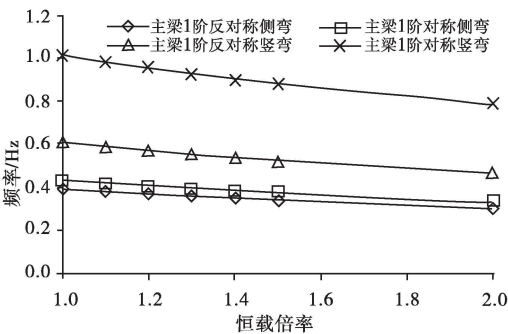


图 4 恒载集度变化对动力特性的影响

Fig 4 Variation of dead load intensity to influence of self-vibration behavior

4.2 混凝土弹性模量变化对动力特性的影响

根据有关文献,斜拉桥动力特性研究应考虑混凝土动态弹性模量的影响^[10]。为了研究动力特性与混凝土弹性模量的关系,分别计算 E_c 按 1.0~1.5 倍率发生变化时,一阶反对称侧弯、对称侧弯、反对称竖弯及对称竖弯的变化规律,见图 5。随着弹性模量的逐渐变大,侧向与竖向频率都随之增大,竖向振动频率增大幅度较大。弹性模量倍率由 1.1 增大到 1.5 倍,反对称竖弯频率由 0.61 Hz 增大到 0.73 Hz 对称竖弯频率由 1.011 Hz 增大到 1.159 Hz

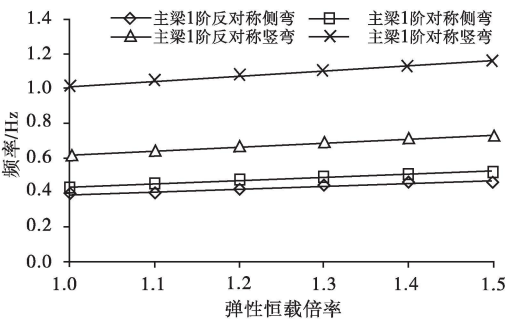


图 5 恒载集度变化对动力特性的影响

Fig 5 Variation of elastic modulus to influence of self-vibration behavior

5 结 论

作为动力分析的有限元模型应着重于结构刚度、质量和边界条件的模拟,使其尽量和实际结构相符,通过有限元模型模拟和计算分析,得出以下结论:

1)西江特大桥组合结构体系的动力特性与传统的斜拉桥、刚构桥相比均有所不同。由于刚构的协作作用,体系的整体刚度比普通斜拉桥大大提高,进而自振频率变大;同时,组合体系又保留了传统普通斜拉桥的部分特点,比如包含纵飘振型成分,振型

(下转第 357 页)

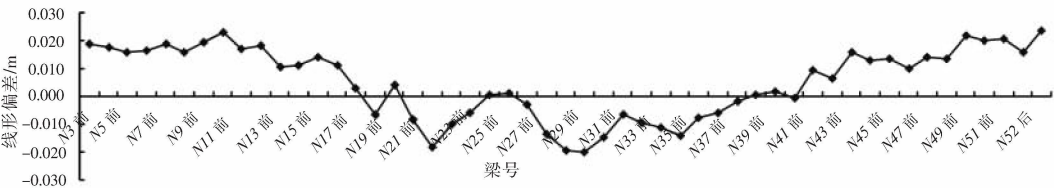


图 17 下沙侧右幅顶推到位后理论线形和实测线形对比

Fig 17 Contrast diagram of theoretical alignment and test alignment of xiasha at the right side after incremental launching

4 结论和建议

通过对江东大桥顶推钢箱梁的局部应力分析可知:

1)在临时墩支反力较大和梁体局部转角位移较大时,钢箱梁各构件的等效应力值都可能出现较大值,且明显高于其他典型工况下的应力值,因此临时墩支反力和转角位移是影响钢箱梁受力的两个关键因素,并且两者相互影响。

2)中腹板作为主要受力构件,它的等效应力最大值会明显地高于其他构件。

3)从以上各工况对比看出:减少转角位移和临时墩支反力都可以改善钢箱梁的受力,若能同时减少这两个因素的数值,对钢箱梁受力是非常有利的。

(4)合理的导梁设置和上墩控制对梁体受力也是非常有利的。

因此,为了避免局部应力过大,产生塑性变形而危及结构安全,在顶推施工中应尽量采取有效施工措施减少临时墩的支反力和梁体的局部转角位移,并优化设计避免构件的应力集中。通过在滑道梁下设置特制的橡胶垫块和适时的标高调整措施,能很

好地满足梁体无应力线形为变曲率竖曲线顶推施工的特殊要求,确保了钢箱梁竖向局部稳定^[9]。

参考文献:

[1] 董启军. 连续钢箱梁顶推施工[J]. 施工技术, 2005 34(5): 20—22

[2] 王福敏. 预应力混凝土曲线连续梁顶推施工技术; 日本横向 1 号桥施工介绍[J]. 重庆交通学院学报, 1990 9(2): 83—90

[3] 贺锡林, 黄元群, 张建新. 长沙市湘江三汊矶大桥大型钢箱梁顶推施工技术[J]. 湖南交通科技, 2009 35(3): 113—116

[4] 杨义东, 胡定成. 俄罗斯 的顶推架设钢桥技术[J]. 国外桥梁, 1997(2): 59—61

[5] 唐杰林. 桥梁顶推施工时滑道与滑板的改进方案[J]. 湖南交通科技, 2004 30(3): 86—88

[6] 上海市市政工程设计研究院. 杭州市江东大桥通航孔自锚式悬索桥顶推施工设计计算原则与工艺要求[R]. 上海: 上海市市政工程设计研究院, 2008

[7] 杜平安, 甘娥忠, 于亚婷. 有限元法: 原理、建模及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004

[8] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

[9] 周叶飞, 董创文, 张玉平, 等. 江东大桥顶推钢箱梁局部受力分析[J]. 中外公路, 2010 30(1): 126—130

(上接第 332 页)

较为密集, 扭转和横向弯曲振型耦合等。

2)参数变化影响规律分析表明, 振动特性特别是竖向振动受恒载集度变化影响较大, 其自振频率随恒载集度的增大而减小; 同时, 随着混凝土弹性模量逐渐变大, 结构频率亦随之增大。在桥梁的设计、分析中应充分考虑诸如此类参数变化的影响。

3)由于结构中的不确定性和建模误差, 有限元分析得到的动力特性与实测结果可能不一致。基于成桥后环境振动试验结果进行模型修正, 将是行之有效的办法。

参考文献:

[1] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2000

[2] 彭凯, 李建中, 朱宇, 等. 独柱双层高架桥墩柱振动台试验研究(I). 结构动力特性[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版,

2009 28(2): 161—167

[3] 罗世东, 刘振标, 陈勇, 等. 广珠城际西江特大桥主桥方案设计研究[J]. 桥梁建设, 2006(增刊 2): 36—39.

[4] 李建慧, 李爱群, 罗世东, 等. 广珠城际西江特大桥主桥空间受力分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009 39(1): 96—100.

[5] 张为, 赵星, 刘明高, 等. 斜拉桥有限元建模和动力特性分析[J]. 铁道建筑, 2006(3): 8—10.

[6] 余报楚, 张哲, 朱巍志, 等. 大跨度斜拉桥与 T 构协作体系的动力特性分析[J]. 公路交通科技, 2007 24(4): 84—88 98

[7] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.

[8] [美] 克拉夫 R W, 彭津 J 结构动力学[M]. 王光远, 译. 北京: 高等教育出版社, 2000

[9] 桂勇, 杜彦良, 李延强, 等. 高墩独塔部分斜拉桥动力特性分析[J]. 岩土工程界, 2008 11(1): 27—29

[10] 李世光, 颜志华. 部分斜拉桥的动力性能分析[J]. 铁道标准设计, 2005(2): 41—42