高墩独塔部分斜拉桥动力特性分析

桂 勇 杜彦良 李延强 薛晓辉
(石家庄铁道学院)

摘 要 以某高墩独塔部分斜拉桥为研究对象,以有限元软件 ANSYS为分析平台,对该桥的主梁、桥墩、主塔、斜拉索等结构部件和边界条件进行了具体的模拟,在此基础上对该桥进行了动力计算,并分析总结了该桥的振动特性。计算结果表明:对于墩、梁、塔全部固结的部分斜拉桥结构,高墩对全桥振型具有重要影响,可为同类型桥梁的设计、施工过程中的动力分析提供参考价值,为进一步的桥梁抗风、抗震分析提供依据。

关键词 部分斜拉桥 动力分析 有限元模型 高墩 模态

预应力混凝土桥梁中,根据设计细则及预应力损失,预应力筋的容许应力可以达到其极限应力的 60%～70%;而在斜拉桥中,斜拉索的设计应力只能达到其极限应力的 40%～45%。于是,在斜拉桥中,工程师们设想用预应力筋来取代斜拉索,通过低矮的桥塔将预应力筋拉出梁体,形式上很像斜拉桥,部分斜拉桥便由此而生,它是介于连续梁桥和常规斜拉桥之间的一种新桥型。

部分斜拉桥的设计思想最早由法国工程师 J. Mathivat提出,1994年日本建成了世界上第一座部分斜拉桥 ——小田原港桥;在国内,部分斜拉桥的起步较晚,该桥型的建设始于 2000年芜湖长江大桥。

目前,国内外对部分斜拉桥的动力性能的研究较少,至于系统性的研究还是空白。因此有必要对部分斜拉桥结构进行动力特性分析,以便了解其动力性质,从而为进一步研究斜拉桥结构在风荷载、地震荷载等动荷载作用下的力学行为打基础。

本文以在建高墩部分斜拉桥 —仙神河斜拉桥为研究对象,以 ANSYS大型有限元软件为分析平台,建立了该桥的动力分析模型,进行了动力特性计算,并对计算结构进行了分析、讨论,研究了高墩对斜拉桥结构动力特性的影响,得出了高墩独塔斜拉桥的一些动力特点,对同类型桥的设计和施工具有一定的参考价值。

1 仙神河斜拉桥概况

仙神河斜拉桥位于山西省和河南省的交界处,是太原 —澳门高速公路晋城 —济源段的控制性工程,预计 2008年竣工。仙神河斜拉桥为两跨高墩独塔单索面 (双股)钢筋混凝土部分斜拉桥,墩高 150.07m,建成后将成为同类桥型的“亚洲第一高墩”;桥全长 331m,跨径布置为 64m (引桥) +131m +136m,桥总体布置如图 1所示。

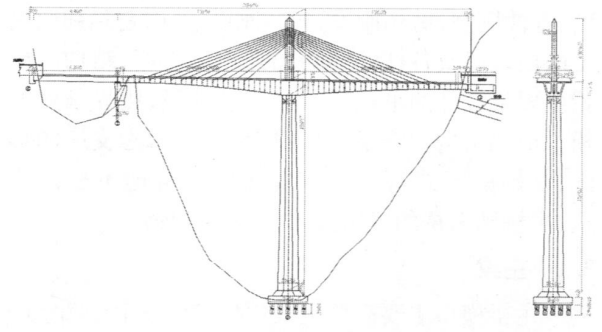


图 1 仙神河斜拉桥总体布置图

主梁采用 C55预应力钢筋混凝土,为单箱三室斜腹板变截面梁,根部梁高 11m,端部等截面梁段高 4m,梁高按 1.75次抛物线变化,变截面梁段长 109.5m。箱梁顶宽 26m,底宽 10～14.086m,悬臂板长 5m,顶板厚 30cm,底板由由跨中 30cm逐渐加大到根部的 150cm。

主墩采用 C50钢筋混凝土,从承台以上到主梁 0号块以下高 150.07m,横截面采用正八边形空心变截面形式,截面内切圆直径为墩顶 10.04m,墩底 16m,线性变化,壁厚 1.2m。

主塔采用 C55钢筋混凝土,从主梁往上高 49m,采用矩形倒角实心断面,截面尺寸为 6m ×3.5m。

斜拉索采用平行钢绞线拉索,对称分布,共 2 × 11对。每根索分两股,布置在中央分隔带内,梁上

收稿日期〕 2007 - 5 - 28

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

横向索距 1.5m,纵向索距 8m,塔上横向索距 1.5m,纵向索距 1.2m。梁索锚固处设计了箱梁横隔板。

承台采用 C30混凝土,为 30×30×6(m^3)的大体积混凝土。承台与桥墩之间采用了一个 4m高的过度段。承台下为 5×5(根)直径 2m、长 29m的桩基础。基础场地土为 I类土。

2 斜拉桥有限元模型建立[1]

计算模型是结构数学和物理的代表,是结构分析的基础,故模型是否能真实反映结构的特点和受力特性直接关系到计算结果的精确与否[2]。建模总的原则是结构的抽象和简化应保持结构的刚度和质量的等效性及其空间分布,支承条件要较真实地反映结构的工作行为[3]。对动力模型而言这三方面直接决定了结构的动力特征,而桥梁结构的动力特性是车桥耦合振动及桥梁抗震、抗风计算分析的基础,故桥梁建模时对上述三点的处理是否恰当至关重要。这其中结构的刚度主要为杆件的轴向刚度,弯曲刚度,剪切刚度,扭转刚度,有时包括翘曲刚度的模拟以及各杆件间的相互连接刚度,结构的质量主要指杆件的平动质量和转动惯量,边界条件的模拟应和结构的支承条件符合,主要考虑支座的形式,基础的形式等[4]。本桥建模只考虑主桥的模型,主桥和引桥的链接按边界条件处理。

2.1 主梁

主梁模型主要有单主梁、双主梁、三主梁和空间板壳、梁板模型等。本桥采用三维梁单元 BEAM88模拟[5]的单主梁"脊梁骨"模型,其特点是主梁的刚度与质量系统是正确的,单元数较少,但不能考虑主梁约束扭转刚度的影响,适用于扭转刚度较大的全封闭箱梁(单室或多室)结构。采用自定义梁截面,单元长度为 0.5m,每一段都近似为等截面梁。

由于本斜拉桥采用墩梁塔固结体系,在 0号块形成了一个刚性节点区,在使用 BEAM188杆系单元模拟时会产生刚度失真,可使用刚性材料法进行修正[2,6]。本模型将节点区的弹性模量扩大 1000倍,同时垂直桥平面的抗弯惯性矩缩小 1000倍,以模拟刚性区的工作状态。

2.2 横梁

箱梁中在斜拉索锚固点处、梁端头处、零号块两侧设有横梁,横梁也采用 BEAM188单元模拟,采取刚臂形式,按横梁实际尺寸定义刚臂截面,但容重置零,横梁的质量采用点质量单元 MASS21加在主梁的节点上。

2.3 墩塔

塔单元的划分不宜太粗,因为单元划分的粗细决定了堆聚质量的分布、振型的形状和地震力的分布[7]。断面变化处,索锚固点都作为自然的单元节点。本桥主墩和主塔均采用 BEAM188单元模拟,其变截面处理和建模过程与主梁类似。桥墩顶部有 5m高的实心段,采用 MASS21质量单元来模拟。

2.4 斜拉索

斜拉索就采用 LINK10单元模拟,每一根索(双股)为一个单元,共 22个单元。为了保证斜拉索的空间位置(角度和长度)正确,梁索锚固点与主梁节点并不重合,而是另外选取节点,再使用自由度耦合模拟斜拉索节点与主梁锚固处节点相连。斜拉索采用了 Ernst公式修正的弹性模量,并计入了初应变的实常数。

2.5 边界条件

本桥基础呈刚性,为简单起见直接固定墩底单元。主梁两边使用了 D160型钢伸缩缝,采用一维弹簧单元 COMBIN14来模拟,弹簧的初始刚度确定如下:参照汕头海湾大桥的资料,取伸缩缝每延米的抗推刚度为 450kN·m^{-1},本桥宽 26m,故整个伸缩缝的刚度 K = 450 kN·m^{-2} ×26m = 11700kN·m^{-1}。综上所述,本桥有限元动力模型如图 2所示。

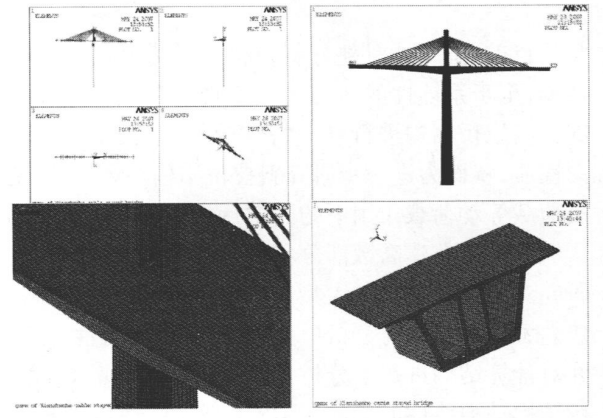


图 2 仙神河斜拉桥有限元模型

3 计算结果

在以上建模的基础上,进行了全桥动力特性的计算分析。全桥前 10阶频率结果见表 1,限于篇幅,本文只附上了一些较典型的振型(图 3)。

从计算分析结果可以看出,仙神河斜拉桥的动力特性具有以下的特点:

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 全桥前 10阶自振频率及相应振型特点

序号	频率 /Hz	振型描述
1	0.41318	全桥面外 1阶对称侧弯
2	0.78907	全桥面外 1阶反对称侧弯
3	0.85377	主梁 2阶反对称竖弯 +主墩塔面内 1阶侧弯
4	1.7688	主梁 2阶侧弯与对称扭转耦合 +墩塔面外 2阶侧弯
5	1.7966	主梁 2阶侧弯与反对称扭转耦合 +墩塔面外 2阶侧弯
6	1.8166	主梁 3阶对称竖弯 +墩塔竖向拉压
7	2.0235	主梁 4阶面内反对称竖弯 +墩塔面内 2阶侧弯 +全桥面内纵飘
8	2.7355	主梁 2阶面外侧弯扭转耦合 +墩塔面外 3阶侧弯
9	3.0115	主梁 4阶面内反对称竖弯 +墩塔面内 3阶侧弯 +全桥面内纵飘
10	3.0305	主梁 2阶面外反对称侧弯扭转组合 +墩塔面外 3阶侧弯

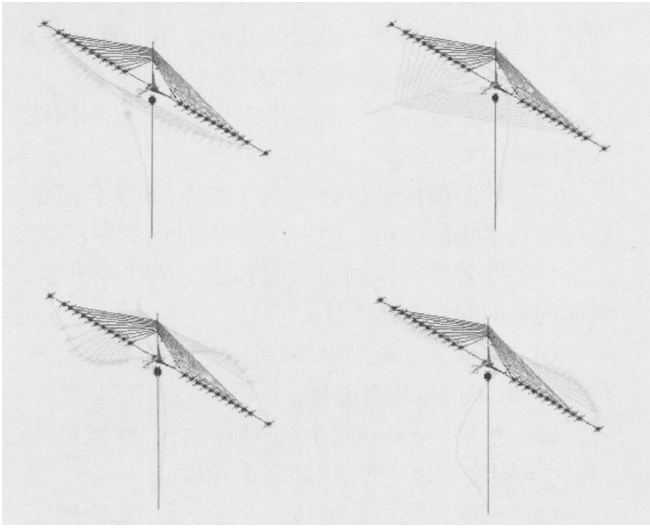


图 3 全桥前四阶振型

(1) 全桥第一阶频率为 0.41318Hz,即周期为 2.42s(<5s),属于短周期范畴;第一阶振型表现为全桥侧弯。而一般的大跨度斜拉桥属于柔性体系,自振周期较长 (T > 5s)。可见,部分斜拉桥的自振特性与一般的斜拉桥有明显的不同,并向连续梁桥 (刚构)靠拢,这是由它本身的结构和受力特点决定的。

(2) 此桥第一阶振型表现为全桥侧弯,这主要是由桥梁的结构形式所决定的:本桥为高墩独塔固结体系,墩身高,墩身刚度相对于主梁和主塔较小,因而第一振型表现为高墩侧弯,从而引起全桥侧弯。由此也可以看出对于高墩桥梁体系而言,高墩的柔性对全桥的振型具有很大的影响。这一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,应考虑横向地震动的输入。

(3) 从振型特点可以看出,此桥自振特性表现出明显的三维性和相互耦合性,墩、梁、塔、索的振动互相影响。由于高墩参与振动耦合,因此,在桥梁的车桥耦合分析、抗风、抗震分析中,应充分考虑该墩的影响。

(4) 扭转振型出现较早,并且次数也比较多,第四阶振型即含有扭转成分,前十五阶振型中就有七阶振型包含扭转,这是因为虽然箱梁本身的扭转刚度较大,但由于高墩的影响,箱梁的扭转振型与其面外侧弯、墩塔的面外振动强烈耦合,并不存在纯扭转的情况。

(5) 本斜拉桥在第 7、9和 11阶出现了纵飘振型成分,主要的原因是尽管仙神河斜拉桥的高墩、矮塔和主梁全部固结,但在主梁两端采用了 D160型钢伸缩缝,从而使得桥梁结构体系在顺桥向可以发生位移的缘故。

4 结论

结构的自振频率是结构本身一个基本而重要的参数,结构的模态分析是后续结构动力分析 (如抗风、抗震等)的基础。本文以仙神河部分斜拉桥为研究对象,运用 ANSYS有限元软件对其进行了模态分析,指出:部分斜拉桥的基本振型属于短周期范畴,更接近连续梁桥;在固结体系中高墩对全桥振型,尤其是对一阶振型具有较大影响。本文可为该桥后续的抗震、抗风分析提供参考,同时也为同类型桥梁的设计和施工计算提供参考。

参 考 文 献

[1] 谭长建,等. ANSYS高级工程应用实例分析与二次开发 [M]. 北京:电子工业出版社, 2006: 57 - 110.

[2] 周毅姝,杜喜凯,等. 大跨度斜拉桥三维动力有限元建模方法的研究 [J]. 河北:河北农业大学学报, 2005, 28(2): 112 - 115.

[3] 公路桥梁抗风设计指南编写组. 公路桥梁抗风设计指南 [M]. 北京:人民交通出版社, 1996.

[4] 范立础. 桥梁抗震 [M]. 上海:同济大学出版社, 1997.

[5] 胡晓伦,陈艾荣. 用 BEAM18x单元替代三主梁力学模型 [J]. 交通与计算机, 2006(3): 52 - 56.

[6] 杨咏昕,等. 桥梁结构动力分析中节点刚性区问题的处理 [J]. 土木工程学报, 2001, 34(1): 14 - 18.

[7] 尹晓明,朱益民,等. 斜拉桥动力模型分析 [J]. 铁道标准设计, 2003(10): 38 - 39.

第一作者通讯地址:石家庄市北二环东路 17号石家庄铁道学院研 30#信箱 **邮编**: 050043

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net