

文章编号: 1005—0523(2005)04—0017—05

斜拉桥结构仿真分析

陈 晔¹, 郭圣栋²

(1. 长安大学, 陕西 西安 710064; 2. 江西省交通设计院, 江西 南昌 33002)

摘要:介绍了斜拉桥的结构的特点, 阐明了对其建立数学模型进行仿真计算的方法, 并且分析了在对结构建立模型时应注意的事项.

关 键 词:斜拉桥; 结构; 数学模型; 仿真计算

中图分类号: TB12

文献标识码: A

1 前 言

斜拉桥外型轻巧美观, 其不但能适应交通的需要而且往往能够成为一种景观, 在最近一段时期, 全国各地都能见到已建或在建的斜拉桥的踪影, 但斜拉桥作为一种超静定结构, 它的结构设计计算和分析, 十分繁琐和复杂.

斜拉桥作为由塔、梁、索组成的组合体系, 进行设计时必须综合考虑塔、梁、索三者之间的相互关系. 在桥跨布置、主梁断面形式、索塔形式、索塔高度及支承体系确定之后, 设计人员应拟定主梁高度以及索塔截面尺寸, 并根据其受力及构造要求初拟各部尺寸, 然后用平面杆系程序进行计算试算. 在试算中, 应保证以下几点要求.

- 1) 应控制斜拉索应力幅度, 并且应使拉索受力均匀;
- 2) 边跨配重应使结构在恒载作用下边墩支座不产生拉力, 且控制在运营期间边墩支座的拉力不要过大;
- 3) 一般而言, 索塔混凝土最大压应力小于 17MPa, 最小压力不小于 1.5MPa, 以保证结构安全可靠;

4) 控制主梁恒载弯矩在容许范围内, 且结构体系刚度满足要求, 主梁在汽车荷载作用下的挠度小于规范规定;

5) 保证斜拉索及梁塔的动力稳定性.

6) 如为悬臂施工, 还应尽量减少梁段类型以方便悬臂施工.

2 结构的计算

大跨斜拉桥结构计算通常划分成 3 类:

1) 全桥结构总体分析, 即建立由索、梁、塔各主要关键构件组成的模型进行计算, 它能代表全桥的主要结构行为, 其综合研究上部结构、下部结构和基础的受力情况.

2) 对主要构件进行结构分析, 例如主梁、塔柱及桥墩等构件的计算分析, 包括常见的梁结构的计算, 考虑梁段应力和桥面作用效应在内;

3) 对复杂细节或局部构造的结构计算, 如斜拉桥的索梁锚固构造计算、索塔锚固构造计算等.

一般采用杆系结构有限元来进行斜拉桥的全桥分析, 而为更好的了解斜拉桥的工作性能, 可用二维平面单元或三维空间体元来进行斜拉桥的局部构件的验算及复核, 二维仿真分析可把握结构总

收稿日期: 2005—01—13

作者简介: 陈 晔(1976—), 男, 江西进贤人, 工程师, 现为长安大学硕士研究生.

体的变形与应力,而三维仿真分析则可对结构的各个局部进行较为详尽的分析.二维与三维仿真分析的计算结果总体上的一致,但局部上存在一定的差异.

一般而言,应先用先对全桥进行平面整体分析,在了解桥梁整体受力特点的基础上,再运用有限元程序对局部复杂区域建立空间三维局部模型,引入相应的外力边界条件,计算求解,即可得到局部区域的空间受力结果.也可先用较稀的网格对结构进行分析,再单独对所关心的局部进行细化分析,这时应采用较密的网格进行单元划分,该单独分析的局部结构的边界采用上一次较稀网格分析的结果作为此次的边界条件.但在进行动力分析时,必须建立空间单元模型.

在有限元建模中,常用空间梁单元来仿真桥塔和桥面,用空间杆单元仿真拉索.分析中应考虑混凝土的收缩徐变及斜拉索的非线性,导致斜拉桥几何非线性的因素主要有三种:拉索弯曲,梁柱效应,大位移效应.一般采用有限位移理论来分析梁柱效应引起的几何非线性,运用空间稳定函数的方法考虑弯曲对轴向刚度的影响,轴力对弯曲刚度的影响.

大跨斜拉桥中最重要的非线性问题之一就是斜拉索由于垂度引起的非线性问题,相对有效的处理方法有:

1) 用多段直杆(索)模拟垂度较小的斜拉索;

2) 用一个或多个曲线单元(包括悬链线单元)来模拟相对较长的斜拉索,其中,单元刚度矩阵由多项式或拉格朗日插值函数通过考虑斜拉索位移和可能变位在共同结点的连续性而形成,既采用空间 3 节点等参单元来模拟拉索;

3) 相对粗略的方法可采用等效弹性模量,通过采 Ernst 公式采用直弦杆的折减弹性模量来代替曲线索的弹性模量.

在考虑斜拉索几何形状改变的非线性问题时,通常采用牛顿-辛普森迭代法,使用完全的和修改的拉格朗日公式形成索单元的特征列阵.完全的拉格朗日公式法采用初始形状作为变形参量;而修改的拉格朗日公式法则采用上一次变形后的形状作为变形参量.

3 结构仿真分析

中国知网 <https://www.cnki.net>

现今常用的进行结构仿真分析计算的有限元

程序有 ANSYS, SAP, ALGOR 及 Midas, 平面杆系程序有桥梁博士, GQJX 等. 现以 ANSYS 举例说明, 用 ANSYS 程序建立空间单元分析模型时, 由于结构复杂, 可作以下假设和近似:

1) 所有的索一端铰接在桥塔上, 另一端铰接在主梁上;

2) 索的预加力可用初应变来考虑;

3) 钢主梁与混凝土面板之间的剪力键用共同的节点来模拟钢梁和混凝土板的共同作用;

4) 忽略桥面板的横向坡度的影响.

斜拉桥的模型仿真主要是质量的仿真, 刚度的仿真和约束的仿真. 质量的仿真是指平动质量和转动惯量的模拟; 刚度的仿真是指结构的轴向刚度, 弯曲刚度, 扭转刚度, 剪切刚度和翘曲刚度的模拟; 约束的模拟是指模拟结构的边界支撑条件.

在结构分析中应将钢筋混凝土视为匀质材料, 其应采用换算弹性模量 E 和换算容重 Q .

$$E = E_{\text{砼}} + \rho E_{\text{钢}}, \quad Q = Q_{\text{砼}} + \rho Q_{\text{钢}} (\rho \text{ 为配筋率})$$

因各部位的配筋率不尽相同, 故各部位有着不同的换算弹性模量 E 和换算容重 Q , 另外由于混凝土收缩徐变的影响结构的换算弹性模量在随时间的变化而变化.

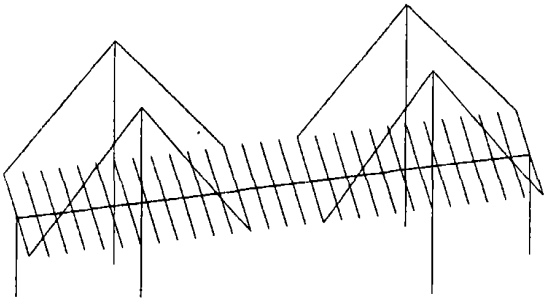
在结构仿真分析的最好采用 6 节点或 8 节点的实体三维实体单元来进行模拟计算, 也可利用空间梁单元和 8 节点空间实体单元来模拟主塔和各种特殊部位(如拉索锚固部位的局部分析); 预应力筋采用杆单元来模拟, 其预加力可用杆单元的温度下降来模拟, 但应注意在预加力作用下结构的弹性压缩会导致部分预加力的损失, 故应在降温时适当的提高降温数值; 对叠合梁斜拉桥而言, 其钢梁可采用 BEAM24 单元, 索可采用只受拉不受压的 LINK10 单元, 变截面混凝土桥塔可采用 BEAM24 单元, 桥面板可采用 SHELL63 单元. 采用三维实体单元来进行模拟地基和基础, 对于地基不同的层性可用不同的材料特性进行模拟. 利用主从自由度的方法如拉索的空间刚臂单元来模拟拉索与梁及塔的偏心 and 刚性区域, 利用弹簧单元来模拟各种非刚性支撑. 可用空间杆单元来模拟只受拉或压等施工临时设施.

通常斜拉桥有三种空间离散的方法:

1) 鱼骨式

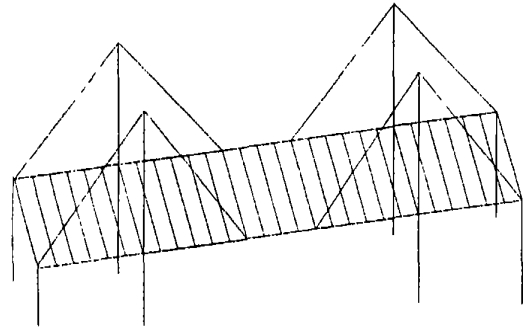
将主梁的刚度(竖向弯曲刚度, 横向弯曲刚度, 扭转刚度)和质量都集中在主梁的中心轴线上, 主梁单元的节点通过与主梁纵轴垂直的两根刚度较大的横鱼骨与索单元相连接; 横向构件的端节点与

斜拉索在主梁上的连接点间采用刚臂连接或采用主从关系处理.其质量分布可采用实际的分布质量模拟,也可通过加集中质量于主梁单元的两节点来模拟;此模式主梁的刚度系统是正确的,但横梁刚度和主梁翘曲刚度不能模拟,并且若将拉索着力点与横向构件端点间的刚臂单独作为一个构件处理,则其单元数增加,使得计算工作量加大.



2) 双主梁模式

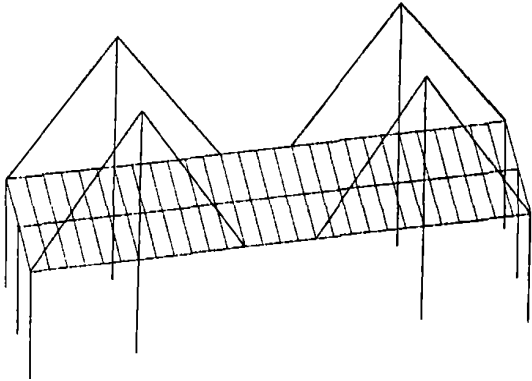
由两片主梁组成,中间用横系梁联系,主梁间距取两索在梁上的锚固点间的距离,而横梁距离则取索的间距.每片主梁的面积和竖向弯曲刚度取全断面的一半,横向弯曲刚度则采用挠度相等原理进行计算,横梁刚度采用包括桥面共同作用部分的实际刚度.主梁质量分布在主梁及横梁上,应使其质量分布符合实际的情况.该模式横梁刚度与实际较符合,且两侧主梁可提供部分翘曲刚度,其节点和单元较少,但该模式的主梁在侧向是剪切式结构,难于保证桥面侧向刚度的等效性,且因主梁采用的是等代刚度,故在横向力作用下参与受力的部分不明确,而且调整主梁的质量分布较烦琐.



3) 三主梁模式

顾名思义,三主梁模式是由三片主梁组成的,三片主梁间通过刚性横梁或节点的主从关系连接,该模式适用于自由扭转刚度较小的主梁截面,其能考虑主梁约束扭转刚度的贡献.但不适合具有全闭口主梁截面或自由扭转刚度较大的开口截面和体系本身具有较大抗扭刚度如双索面斜拉桥,但因其

单元,节点数较多故对于自由扭转刚度较大的斜拉桥不适用,该模型很适合大跨径斜拉桥的抗风计算.



全桥结构仿真分析与传统桥梁分析计算的主要区别有如下 3 个方面:

- 1) 全桥结构仿真分析采用统一结构来分析体系的全桥结构数学模型,其能精确模拟结构的实际连接,而传统计算通常不能做到这一点,其只能近似的对结构进行模拟.
- 2) 传统计算通常不能考虑如箱形结构的纵向隔板和横向隔板、加劲肋等构件等某些复杂的细部构造,且难以考虑横截面畸变、局部屈曲和剪力滞后等二次效应影响,而全桥结构仿真分析则能够真实模拟所有这些受力部件.
- 3) 全桥结构仿真分析无需简化荷载模型,可以直接对模型进行准确的加载计算.

斜拉桥结构实体应力仿真分析,消除了以往杆系有限元模型的各种假定(如:平截面假定、连接形式的假定、模型边界条件的假定等)所带来的不足,其实质就是依据是实际设计的结构建立了结构所有承载构件详细数学模型,再据此数学模型进行分析计算.混凝土斜拉桥的承载构件一般包括预应力混凝土、普通钢筋混凝土、预应力钢束及斜拉索等材料.因此,在结构仿真分析中,模型主要采用了三维实体和索单元相组合的形式.建立混凝土斜拉桥仿真计算模型主要考虑如下原则:

- 1) 尽量再现结构原形,如实反映结构形状变化(包括构件的长度、宽度和厚度变化等)的要求,尤其是要反映那些受力复杂的部位(如:主塔中横梁及下横梁与主塔结合部位,主梁和索塔的锚固部位);
- 2) 注意如:弹模,容重,泊松比,温胀系数等材料特性的变化.
- 3) 尽量保证问题求解精度,在建模过程中尽量

减少病态单元的出现;

4) 在保证求解精度及速度的前提下,取用合理的数学模型,不要过分强调精度而导致模型单元过多,以至难以计算.

在结构进行建模仿真分析中应注意节点刚性区的问题,节点刚性区的问题是指实际结构中的几个构件在节点交汇时,因交汇节点附近区域因构造原因而形成个刚度很大的区域,若在此区域还采用一般的力学模型就无法真实的模拟此区域的力学特征,从而发生模拟失真.或当结构的某个构件在一个截面分成两个以上构件时,造成在该截面处几根杆件的轴线没交于一点,使得对应的杆系力学模型的单元在此不能首尾相连而失真.如果不考虑节点刚性区的问题则所建的力学模型就低估了结构的刚度,我们可采用主从节点法处理,但此法将节点的转动也约束,故又高估了结构的刚度.也可用刚性材料法,其只提高节点刚性区内单元的桥塔平面内即横桥向的抗弯刚度和轴向刚度,而不提高平面外即顺桥向的抗弯刚度和轴向刚度

通过应用全桥结构仿真,可以构造各种结构体系或者各种体系的不同形式构件组成的桥梁,能模拟相应的荷载工况进行分析.全桥仿真分析的数学模型复杂、仿真分析计算的工作量巨大,但是其分析结果精确,还可以得到常规结构计算、结构试验难以得到的结果.

4 斜拉桥的静、动力分析

一般而言,斜拉桥静、动力分析首先要确定合理的成桥状态,再进行施工过程计算,通过控制施工过程中每根拉索的安装索力来确保实现预定的合理成桥状态.所谓合理的成桥状态是指斜拉桥在施工完成后,在所有恒载作用下,受力满足某种理想状态,如:合理成桥状态的确定通常可以不考虑施工过程,只根据成桥状态运营时的受力图式来计算,而合理施工状态是指为了按拟定的施工工序施工成桥后达到合理成桥状态的施工状态,其主要控制参数为斜拉索张拉索力和主梁立模标高.

合理的成桥状态确定之后,就可对结构进行静力分析计算.静力分析的主要内容有:结构按设计的施工流程在各阶段的应力和变形情况;以及成桥运营状态下,各截面的应力和变形.静力计算的主要荷载类型有恒载、预应力、活载、温度效应、混凝土徐变、地震荷载、风荷载及相应阶段的施工荷载

等.在对斜拉桥主梁进行静力计算不要忘记还要对索塔进行计算,其主要有以下内容:

(1) 截面强度计算;主要是计算各种可能的荷载组合下,顺横桥向的应力,以及角点按顺横桥方向可能出现的荷载组合作用下的最大最小应力的迭加.混凝土的应力应控制在安全范围内,塔身各截面在顺横桥向均应处于小偏心受压状态.

(2) 索塔稳定性计算(包括弹性稳定性计算,弯压稳定性计算);进行弹性稳定性计算应计算裸塔状态和成桥状态的索塔纵、横向稳定性.裸塔状态按一端固定,另一端自由的压杆计算.而成桥状态按一端固定一端铰接计算.弯压稳定性计算主要是计算塔柱截面轴向力对截面中性轴的偏心距增大系数,

(3) 主梁、索塔锚固区局部应力计算;

(4) 横系梁计算.

1) 斜拉桥的静力特点:

(1) 斜拉索的索力是可调的,其对成桥恒载状态有很大的影响.

(2) 成桥恒载索力的大小能显著的影响主梁的恒载内力状态,但对主梁在设计恒载作用下的内力包络图的大小没影响,仅影响包络图的上下平移.

(3) 由于斜拉索的垂度,梁塔的梁柱效应,以及结构的大变形影响,结构体系的几何非线性对主梁内力影响较大.

(4) 影响施工过程中结构受力和变形的因素很多,各因素具有随机性,因此,控制好桥梁各施工状态使成桥后的受力和变形符合理论值,是斜拉桥施工控制的主要问题.

(5) 大跨度的斜拉桥由于主梁需承受巨大的轴力,而主梁一般较为轻柔,因此,主梁的屈曲稳定性问题较突出.

2) 斜拉桥的动力特点:

斜拉桥的动力分析主要是应注意其质量分布和刚度分布,其动力特性包括了结构的自振频率和振型.斜拉桥的动力分析的主要目的是对结构进行抗风和抗震计算,两者的动力特性却不尽相同.抗风动力稳定性分析是研究斜拉桥的一阶竖弯,一阶扭转和一阶侧弯;抗震动力稳定性分析是研究一阶反对称纵漂振型和一阶反对称竖弯振型.

5 举 例

五河口斜拉桥为位于宿淮高速跨越京杭运河

和盐河的重要桥梁,主桥为 152 米+370 米+152 米预应力混凝土双塔双索面全漂浮体系,H 型索塔,边中跨比为 0.4108,桥宽为 38.6 米,双向六车道,桥塔各布置 31 对斜拉索,主梁拉索间距为 6 米和 2.5 米,在塔上间距按 1.5 米和 2 米布置.主梁采用双边箱断面,中心梁高 3.2 米,采用前支点挂篮悬臂浇注法施工.

该桥宽度达 38.6 米,是目前国内最宽的混凝土斜拉桥,为了保证五河口斜拉桥的安全可靠,采用空间有限元程序 ANSYS 对该桥进行了结构横向空间受力分析,其中采用空间体单元模拟钢筋混凝土,杆单元模拟体外斜拉索和体内预应力钢绞线,单向受压杆单元以模拟模板的作用.通过耦合节点自由度使得钢绞线和混凝土整体受力,通过施加杆单元的初应变引入预应力.

由于本桥在空间上存在对称性,故可只建立全桥的 1/4 模型进行分析,在模型中忽略箱梁的倒角作用,如果在倒角处出现较大的混凝土拉应力,可引入子模型将此处结构取出进行局部分析.具体方法就是从整体模型中取出与子模型相关的位移结果作为子模型的位移边界条件,施加到该有限元子模型中.引入子模型的目的在于细划单元以提高计算精度.子模型法与结构力学中的求解节点力的隔离法相类似,只不过在子模型法中使用位移边界条件,而结构力学求解节点力使用的是力边界条件.

通过仿真模拟分析,发现:

1) 在各个计算工况中,横梁顶,底缘的主拉,压应力均处于安全范围内,但是在横梁边箱人孔却存在有较大的主拉应力和横向正应力,通过分析横梁单元的应力云图建议将边箱人孔向外侧移动以减小人孔周围的最大拉应力和横向正应力.

2) 在进行主梁标准梁段施工时,与当前施工节段相邻的节段所受影响最大,且在当前节段刚浇注完混凝土时对其受影响最大.在此时,相邻节段的

横梁在纵桥向对称轴底部存在不超过安全范围的混凝土主拉应力,而在当前节段预应力施工完成后拉应力消失,出现压应力.

3) 对于正在施工的节段,最不利情况发生在横梁预应力张拉后及挂兰前移前,此时混凝土的主拉应力和主压应力(在锚固区出现应力集中现象)均较大,但除锚固区外,其它位置的混凝土的应力皆处于安全状态.

6 尾 言

随着科技的日新月异,计算机技术在近十年中有了很大的飞跃,而计算机技术的高速发展使得桥梁结构仿真分析变得更加切实可行,对桥梁进行结构仿真计算不再受到计算机的硬件和软件的限制,使得我们可以将单元划分的更加详细,结果更加精确.但是,我们应注意不要陷入“分析必用有限元”的怪圈里,在有些问题中,用有限元分析并不一定比用平面杆系分析的结果精确,在大多数工程结构分析中完全可用平面杆系程序进行计算就能满足精度要求,而无需使用有限元程序,这就要求我们根据待分析问题的具体要求来选择恰当的程序,以恰当的方法来求解问题,这可让我们以最少的工作量在最短的时间达到结构仿真分析的目的.

参考文献:

[1] 陈明宪.斜拉桥的建造技术[M].北京:人民交通出版社,2003.

[2] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,1995.

[3] 张晓亮,等.斜拉桥的数学建模[J].国外桥梁,1998,(2) 52—56.

[4] 李 春,等.谈斜拉式桥设计计算分析[J].黑龙江交通科技,2001,(6)41~42.

[5] 郑凯锋,陈 宁,张晓翹.桥梁结构仿真分析技术研究[J].桥梁建设,1998,(2):10~15.

Structural Simulation of Cable-stayed Bridge

CHEN Ye¹, GUO Sheng-dong²

(1. Chang 'an University, Xi 'an, 710064;2. Communications Design Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330002, China)

Abstract: This paper described the structural characteristics of cable-stayed bridges, its simulation method formulating mathematic model and the attentions needed

Key words: cable-stayed bridge; structure; mathematic model; simulation calculation