

文章编号: 1002-0268 (2007) 01-0060-05

五河口预应力混凝土斜拉桥施工过程中计算分析

张建民¹, 肖汝诚²

(1. 广州市市政工程安全质量监督站, 广东 广州 510050; 2. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要: 斜拉桥安装、张拉、起拱等系统的施工全过程分析和控制技术是一项涉及斜拉桥质量和安全的关键技术问题。采用空间非线性有限元模拟了五河口斜拉桥的主梁悬臂施工过程, 根据该桥实际划分的施工时段, 结合有限元步进法、1 阶分析法和按龄期调整的有效模量法, 并考虑了几何非线性因素的影响和预应力钢筋的作用, 计算了桥梁从施工到成桥任一时刻主梁和主塔受力和变形状态, 编制了相应的计算程序, 从理论上预测出结构在每个施工过程中的受力和变形状态。结果表明, 采用该方法来确定斜拉桥的合理施工状态是可行的, 结果是合理的, 为该桥的施工控制提供了依据。

关键词: 斜拉桥; 施工过程; 仿真计算

中图分类号: U448.43

文献标识码: A

Construction Process Calculation Analysis for a Prestressed Concrete Cable-stayed Bridge at Wuhekou

ZHANG Jian-min¹, XIAO Ru-cheng²

(1. Guangzhou Municipal Engineering Quality and Safety Supervision Station, Guangdong Guangzhou 510050, China;

2. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Because of the increased span of concrete cable-stayed bridge, the construction simulation recently becomes more focused on both the design and construction. A prestressed concrete cable-stayed bridge is designed to be a double-rib box-shaped girder with 370m main span and 38.6m girder width, which will be the widest girder cable-stayed bridge in China. Using spatial nonlinear FEM, the cantilever construction process of a prestressed concrete cable-stayed bridge is investigated. According to the step by step finite element method, first order optimization method and the age adjusted effective modulus method, a computing program is presented. As for the prestressed concrete main beam, we consider its structural feature, predict every image of the stress and deformation of the structure during every construction stage ideally, and provide basis of control over construction. The method takes account of the effect of geometrical nonlinearity characteristic of longspan cable-stayed bridge as well as the additional bending moments due to the vertical profile of the bridge deck.

Key words: cable-stayed bridge; cantilever construction process; computing emulation

1 工程概况

五河口大桥是宿淮高速公路上的一座特大型桥梁, 位于宿淮高速公路、宁淮高速公路及淮安西环的共线段上。主桥桥型为双塔双索面预应力混凝土斜拉桥, 跨径 152 m+ 370 m+ 152 m= 674 m, 采用全漂浮

体系。桥梁设计等级为汽-超 20、挂-120, 双向 6 车道高速公路。

主梁采用双边箱断面, 中心高 3.2 m, 宽 38.6 m, 是目前国内最宽的预应力混凝土斜拉桥。主梁采用前支点挂篮现浇施工, 边跨密索区、端横梁采用支架现浇施工。索塔呈 H 形, 采用预应力钢筋混凝土

收稿日期: 2005-10-26

基金项目: 广州市科技攻关计划资助项目 (2006Z2-10041)

作者简介: 张建民 (1968-), 男, 广西桂林人, 博士后, 高级工程师, 从事大跨度桥梁施工控制和风险分析研究. (dauglas@21cn.com)

结构, 塔高分别为 142.1 m 和 137.1 m。

斜拉索采用 OVM250 系列环氧涂层钢绞线拉索及相应的锚具, 标准强度为 1 860 MPa, 全桥共设 4×31 对拉索。斜拉索在主梁上的标准索距为 6 m, 边跨端部附近的索距为 2.5 m, 在索塔上的标准索距为 1.5 m 和 2 m。桥梁的总体布置如图 1 所示。

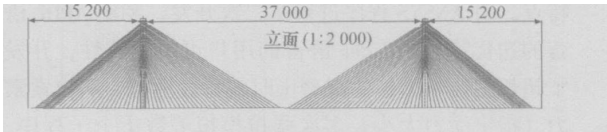


图 1 某预应力混凝土斜拉桥立面图

Fig 1 The general view of a prestressed concrete cable-stayed bridge

本桥为超大跨度斜拉桥, 在施工过程开始之前, 必须对全桥进行施工全过程仿真分析, 以确定每一步施工过程的标高目标、关键结构部位的控制应力指标。以往桥梁的分析一般是按平面杆系进行的, 但是, 对于双索面的斜拉桥, 由于斜拉索抵抗扭转的关系和主梁中横梁的影响, 在横向风荷载、汽车偏载以及其他空间荷载作用下, 主桥的结构分析必须作空间分析^[1]。目前设计、科研院所等进行桥梁空间分析时大都采用一些商业平面计算软件进行分析, 但此类软件对于桥梁的特殊问题, 如: 斜拉索的垂度效应、曲线预应力作用、结构体系随施工过程的进行而不断变化等, 都不是很方便, 甚至没有这样的功能^[2]。本文采用一种高精度的组合式模型单元来模拟双肋平板主梁, 进行本桥的空间分析, 以求达到准确模拟主桥工作状态, 提高局部应力分析能力, 同时避免如采用空间体元时单元划分要细、节点过多的不足, 为主桥在施工、运营等阶段的安全服务。

2 分析方法

2.1 结构计算模型

斜拉桥主梁结构常用的计算模型主要有单梁法、双梁法和三梁法。根据本桥桥面板的形状特点, 这里采用双主梁模式。这种模式认为主梁由 2 片主梁组成, 中间用横隔梁联系, 主梁间距取两截面形心的距离。每片主梁的面积和竖向弯曲惯性矩分别取全断面值的 1/2, 横梁的刚度采用实际刚度。主梁和横隔梁均采用三维组合梁单元来模拟; 主梁与斜拉索的联系通过主梁横向伸出的准刚性梁单元与斜拉索单元的连接来模拟, 计算模式如图 2 所示。

采用大型有限元软件 ANSYS 建立三维模型, 主梁架设采用前支点挂篮现浇法进行施工, 跨中和边跨

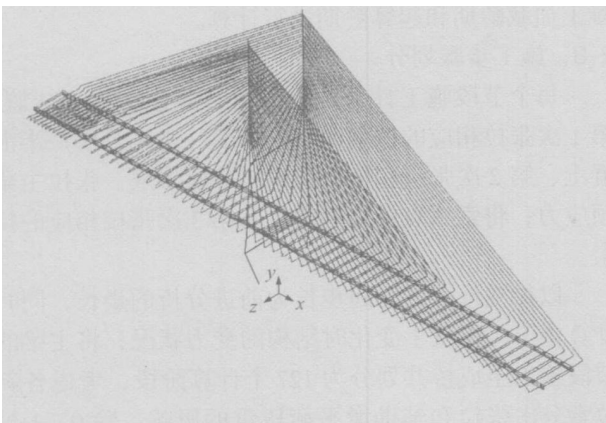


图 2 结构离散图

Fig 2 Structural model

各为 32 个节段。考虑到模型几何和荷载的对称性, 计算模型取结构的 1/2 进行分析。按照桥梁节段施工设计图, 在构件交接处设置空间节点, 共有 2 594 个节点, 划分为 6 063 个单元。其中主梁划分为 225 个单元, 主塔划分为 110 个单元; 索塔和主梁均采用高精度的组合梁单元 (ANSYS 中的 Beam188 非线性梁单元) 来模拟。斜拉索用索单元来模拟, 划分为 121 个单元。

挂篮用一个准刚性框架式组合梁单元来模拟, 在施工过程中, 它可根据施工进度的需要, 而进行移动; 挂篮参与结构整体受力, 挂篮纵梁用 12 个单元模拟, 另外用 8 个单元分别模拟与斜拉索、水平止推座、中挂点、后锚点等的连接。挂篮中各纵梁的材料密度根据需要进行了调整, 以便使挂篮在后支点的作用力为 -90 t, 在中支点的作用力为 310 t, 而整个挂篮的重量为 220 t。

每组预应力钢筋和钢绞线分别用不同的索单元来模拟, 根据桥梁施工进度需要, 分别进行张拉。预应力钢筋或钢绞线与主梁之间通过无重刚臂来连接。计算中, 考虑了每组钢绞线的预应力损失。

2.2 非线性模拟

(1) 索的垂度影响。采用 Emst 公式修正索的弹性模量来考虑斜拉索自重垂度的影响。

(2) 梁柱效应。采用稳定函数表示的几何非线性刚度矩阵来计入这一效应^[3]。

(3) 大位移效应。采用大位移刚度矩阵或基于 U. L 列式的有限位移理论计入这一效应。

(4) 混凝土的徐变特性。采用按龄期调整的有效弹性模量法来模拟^[4]。对于不同的施工阶段, 由于桥梁的结构体系不同, 各部分的加载龄期及起算龄期也各不相同, 所以应根据具体的施工顺序, 以实际的混

凝土加载龄期和起算龄期进行计算。

2.3 施工步骤划分

每个节段施工计算4个工况,即移动施工挂篮、第1次张拉相应的拉索为第1工况;浇筑节段一半混凝土、第2次张拉相应的拉索;节段形成、张拉主梁预应力;将索锚点转移至梁上、第3次张拉相应的拉索。

以徐变计算的时间步长为前进分析的步长,同时计算施工工况发生变化时结构的受力状况,将主梁的节段施工至成桥共划分为127个计算阶段,考虑各斜拉索分次张拉和辅助墩平衡压重的影响,除0、1号索外,各索通过3次张拉来实现。预应力钢筋或钢绞线也根据实际施工步骤进行张拉。

2.4 程序设计

考虑到斜拉桥施工状态分析的特殊性,在设计计算机仿真分析程序时,采取了相应的一些措施,以模拟实际的施工过程。

(1) 整个桥梁的施工分成若干阶段,各阶段的分析内容一次性输入计算机,将所有单元虚拟化,一次性输入各控制点初始坐标及材料、截面物理特性,一次性计算出各节点初始坐标。

(2) 在每一施工阶段中,新拼装的杆件用激活该杆件两端节点信息来模拟;支座的增加、主梁间临时铰的安装和拆除均可用激活和放松对应节点约束信息来模拟;新拼装单元自重、施工机具荷载用单元荷载和节点荷载模拟。

(3) 新拼装单元两端节点的坐标,应由前一阶段分析的结果决定,而不应取初始状态下相应节点的坐标,因为在结构分析中,节点坐标在不断变化。

(4) 在计算中考虑结构的几何非线性的影响,按应力叠加法来进行计算。斜拉索的第1、2次张拉采用在主梁相应位置施加大小和方向相同的集中力来模拟,第3次张拉采用给斜拉索施加初应变并激活相应索单元的方法来进行模拟。

根据以上思路,针对预应力混凝土斜拉桥的施工特点,对ANSYS程序进行了二次开发,利用APDL语言的迭代算法和UPFs语言的用户可编程特性,开发了超长斜拉索模拟、混凝土时效特性模拟、斜拉索索力(指定受力大小)多次张拉模拟等数十个子程序。运用编制的计算机仿真分析程序,对该桥在施工过程中的受力和变形状态进行分析。

3 计算结果分析

3.1 施工中的索力优化和线形控制

在进行斜拉桥施工过程仿真分析前,首先要确定桥梁的合理施工状态。对混凝土斜拉桥而言,由于混凝土容许应力水平低,应力调整范围小。而用悬臂法施工时,可以通过立模标高实现对梁端标高与转角的较大调整。因此,混凝土斜拉桥施工时应以应力控制为主,确保结构内力不超限,同时兼顾主梁线形^[5]。

根据这一施工控制原则,将斜拉桥成桥后的线形和主梁与主塔的应力包络图设为目标函数,各主梁节段的预抛高值和施工中斜拉索的张拉力设为设计变量,通过附加必要的约束条件,利用多目标最优化计算方法来确定斜拉桥各施工节段的预抬高以及对应的张拉索力^[6,7],以确保成桥后主梁的线形不偏离理论基准线,且主梁和主塔的各组合应力满足规范要求。计算结果如图3所示。

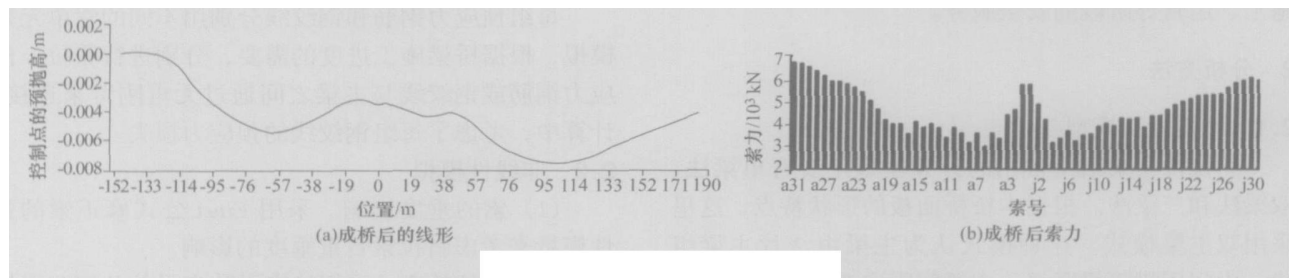


图3 成桥后的索力和线形

Fig 3 Cable forces and the linetype of girders in the finished dead state

计算结果显示,在斜拉桥悬臂施工过程中,主梁的标高变化幅度非常大,节段的预抛高值最大可达到0.40 m,而主跨合拢并施加二期恒载后(第127个施工步骤),各控制点的理论标高与设计线形的竖向向误差不超过0.8 cm。考虑到每个主梁节段的长度为6 m,因此这些竖向误差完全可以通过调整桥面铺装层

的厚度来予以消除。

3.2 结构强度验算

桥梁施工控制的要求首先是确保施工中结构的安全,其次是保证结构的内力合理和外型美观。为了达到上述目的,施工过程中还必须对桥梁各部分的应力进行控制。将最优化分析中获得的节段预抛高值和斜

拉索张力用于主梁悬臂浇注计算中, 得到不同施工阶段主梁和主塔的应力图如图 4、图 5 所示。

在施工阶段, 主梁各计算截面最大压应力均控制在 20.7 MPa 以内, 拉应力控制在 1.5 MPa 以内。主

梁采用 C60 混凝土, 在施工阶段, 混凝土的容许压应力值为 31.5 MPa, 容许拉应力值为 2.4 MPa, 因而未超过容许值。

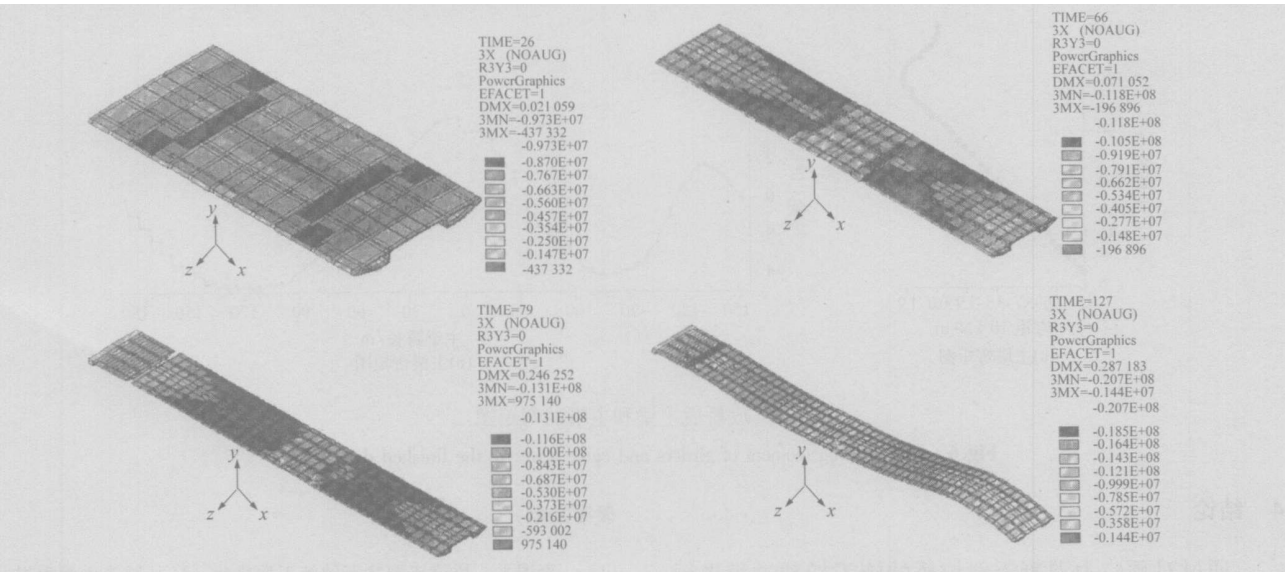


图 4 各施工阶段主梁的轴向应力图

Fig 4 Axial stress of girders during construction

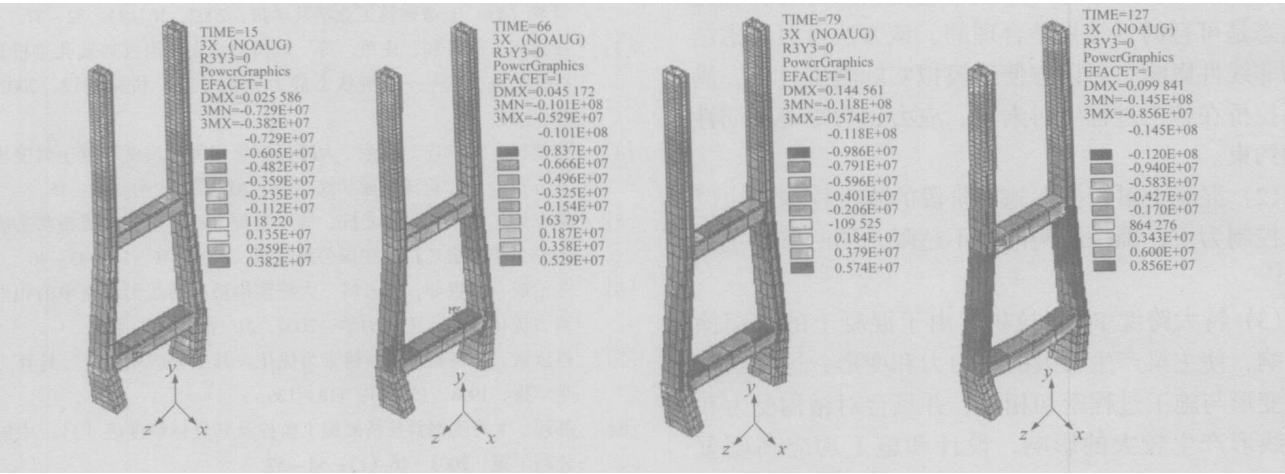


图 5 各施工阶段主塔的轴向应力图

Fig 5 Axial stress of cable tower during construction

施工过程中, 主塔法向压应力控制在 14.9 MPa 以内, 塔身无法向拉应力出现; 主塔横联最大法向拉应力为 8.57 MPa, 可通过配置预应力钢筋来予以消除。主塔采用 C50 混凝土, 在施工阶段, 混凝土的容许压应力值为 26.3 MPa, 容许拉应力值为 2.1 MPa。因此, 角点最大压应力均控制在混凝土容许压应力之内, 塔身各计算截面顺桥向和横桥向均处于小偏心受压状态。

在施工各阶段, 斜拉索的应力控制在 693 MPa 以内。根据《公路斜拉桥设计规范》(JTJ027-96) 中的

有关规定, 拉索应力应满足 $\sigma \leq [\sigma] = 0.4R^b$ 。钢绞线设计的容许应力为 1 860 MPa, 故本阶段容许应力值按 $0.4 \times 1\,860 = 744$ MPa 控制, 因而未超过容许值。

3.3 内力和变形验算

计算还对施工过程中钢箱梁的阶段内力和累积位移、塔顶水平位移和临时及永久支座反力进行了跟踪。一般情况下, 本次斜拉索的张力仅对前 4~5 个梁段的竖向位移及索力产生一定的影响, 之后则影响甚微。在施工阶段, 主梁累积位移最大为 0.40 m, 最小为 -0.12 m; 塔顶在施工过程的水平位移为

-17.97~13.32 cm, 竖直位移为-1.43~9.48 cm, 满足规范对结构变形的要求。

成桥后主梁的最大弯矩为 $4.78 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 主塔的最大弯矩为 $9.06 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。为使各塔的江侧应力

和岸侧应力在最不利组合下尽量接近, 从而塔的受力达到最优, 需将2个塔的成桥恒载状态均向岸侧有一定的预偏。经过试算, 塔顶宜向岸侧水平预偏2.5 cm。成桥后主梁和主塔的弯矩见图6。

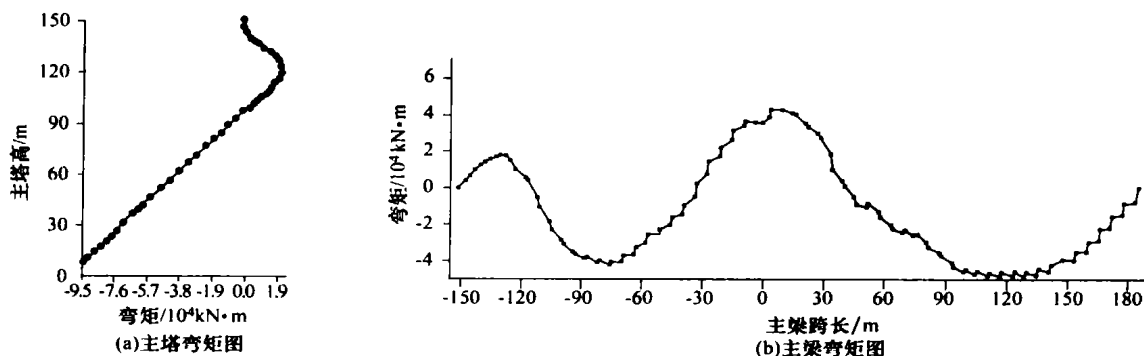


图6 成桥后主梁和主塔的弯矩图

Fig. 6 The bending moment of girders and cable tower in the finished dead state

4 结论

通过对预应力混凝土斜拉桥的施工加载过程进行空间非线性静力仿真分析, 得到以下主要结论:

(1) 采用最优化计算方法来确定斜拉桥的合理施工状态是可行的, 结果是合理的。该方法可以考虑结构的非线性影响, 可以方便地模拟实际施工过程, 满足斜拉桥在施工过程中对索力、应力、弯矩等不同性态的约束。

(2) 混凝土斜拉桥在施工阶段的施工控制, 应以应力控制为主, 确保结构内力不超限, 同时兼顾主梁线形^[8]。

(3) 特大跨度 PC 斜拉桥, 由于混凝土的收缩徐变影响, 使主梁产生较大的次内力和变形, 这种次内力和变形与施工过程密切相关, 并且会对结构受力和成桥线形产生较大的影响, 设计和施工均应高度重视。

参考文献:

- [1] 李国平. 桥梁成型状态的施工期优化 [J]. 同济大学学报, 1999, 27 (1): 20-24.
- [2] 韩富庆, 胡可, 寇明国. 安庆长江公路大桥主桥施工控制仿真计算 [J]. 安徽建筑工业学院学报, 2002, 10 (3): 32-37.
- [3] 汪正兴, 陈开利, 庄苗, 等. 荆州长江大桥南汉通航孔主桥非线性仿真分析——成桥状态静力分析 [J]. 桥梁建设, 2002, (6): 11-15.
- [4] 张建民, 郑皆连, 秦荣. 大跨径钢管混凝土拱桥混凝土时变模式分析 [J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20 (4): 11-15.
- [5] 颜东煌, 李学文, 刘光栋, 等. 混凝土斜拉桥合理成桥状态确定的分步算法 [J]. 中国公路学报, 2003, 16 (1): 43-46.
- [6] 张治成, 叶贵如, 王云峰. 大跨度拱桥拱肋线形调整中的扣索索力优化 [J]. 工程力学, 2004, 21 (6): 187-192.
- [7] 肖汝诚, 项海帆. 斜拉桥索力优化及其工程应用 [J]. 计算力学学报, 1998, 15 (1): 118-126.
- [8] 郝超. 大跨度钢斜拉桥的施工监控及其目标精度值 [J]. 中国公路学报, 2003, 16 (1): 54-57.