

预应力混凝土斜拉桥施工过程中的力学行为研究

张建民¹, 肖汝诚²

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

[摘要] 斜拉桥施工过程中的力学行为研究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某大跨度预应力混凝土斜拉桥主梁的悬臂浇筑过程, 引入一阶最优化计算方法来确定斜拉桥的合理施工状态, 求出各施工阶段的斜拉索张拉索力和主梁的预抛高值, 并讨论了物理非线性和几何非线性等因素对桥梁施工的影响, 提出了减小非线性影响的措施。

[关键词] 斜拉桥; 一阶分析法; 合理施工状态; 非线性

[中图分类号] U443.38 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)05-0036-06

1 引言

斜拉桥具有独特的、与梁式桥不同的结构特点: 跨度大、梁高小、斜拉索长, 变形较大, 属于柔性结构, 因此, 各种非线性影响比较显著。大跨度预应力混凝土斜拉桥的施工一般为节段施工法, 其过程较复杂, 认识斜拉桥中各种非线性影响因素和作用机理, 分析各施工状态的非线性力学行为, 是斜拉桥施工控制中的一项十分重要的工作^[1]。

目前, 国内外学者对斜拉桥在施工过程中的力学行为研究主要集中在两个方面: 确定桥梁合理施工状态的方法研究和非线性因素的影响研究^[2]。倒拆法和正装迭代法是确定斜拉桥主梁合理施工状态的两个主要方法。倒拆法在拆除合拢段时, 常有不平衡杆端力的影响; 由于结构的非线性效应, 当施工步骤比较复杂时, 几乎难以求得较为精确的解。正装迭代法采用大循环的顺装分析来确定桥梁的合理施工线形^[3], 克服了倒拆法的弊端, 但由于没有对施工中的一些不利因素(如应力、变形)进行约束, 当设计变量较多或假定的初始值不合理时, 会出现迭代不收敛的现象。

在力学中, 给定物体的形状、材料性质和外

载, 求物体的变形属于力学的正问题; 现在是预知期望的物体变形求索力, 属于工程力学的反问题, 解决力学反问题的最好办法是优化方法^[4]。笔者尝试采用一阶分析法来研究某大跨度预应力混凝土斜拉桥施工过程中的静力行为。以成桥结构的内力和主梁的线形为目标, 将斜拉索索力、节段的预抛高值同施工过程中的梁塔受力结合起来进行优化。利用施工优化的原理, 直接建立施工期结构状态可测变量与成桥状态目标函数之间的关系, 通过对目标函数的最优化处理, 求出各施工阶段的斜拉索索力和主梁的预抛高值, 并详细分析结构几何非线性、混凝土时效特性等因素对桥梁施工控制的影响。

2 计算模型

2.1 结构计算模型

某预应力混凝土斜拉桥是宿淮高速公路上的一座特大型双塔双索面桥梁, 主桥跨径 $152\text{ m}+370\text{ m}+152\text{ m}=674\text{ m}$, 采用全漂浮体系。主梁采用双边箱断面, 中心高 3.2 m , 宽 38.6 m 。索塔呈 H 形, 塔高分别为 142.1 m 和 137.1 m 。全桥共设 4×31 对拉索。图 1 为该桥的结构离散图。

根据桥面板的形状特点, 主梁采用双主梁模式

[收稿日期] 2005-08-15; 修回日期 2006-06-23

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50408037); 广州市科技计划攻关资助项目

[作者简介] 张建民(1968-), 男, 广西桂林市人, 广州市市政工程安全质量监督站高级工程师, 博士后

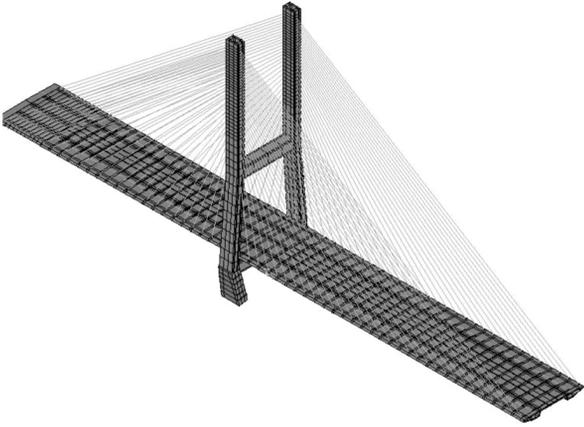


图1 结构离散图

Fig.1 Structural mode

模拟，并采用前支点挂篮现浇法施工，跨中和边跨各为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，在构件交接处共设置2 594个空间结点，划分为6 063个单元。索塔和主梁采用高精度的组合梁单元来模拟，斜拉索用索单元来模拟。

挂篮用一个准刚性框架式组合梁单元来模拟，在施工过程可根据施工进度的需要移动；挂篮参与结构整体受力，其纵梁用12个单元模拟，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。挂篮各纵梁的材料密度根据需要做了调整，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，挂篮的总质量为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，根据桥梁施工进度的需要分别进行张拉。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

预应力混凝土斜拉桥非线性的主要来源有^[5]：

1) 索的垂度影响。斜拉索作为柔性构件，在自重和轴力的作用下呈悬链线形，斜拉索的刚度随垂度的变化而改变，而斜拉索的垂度又决定于斜拉索的张力，因此，斜拉索的轴力与其变形之间呈非线性。笔者采用 Ernst 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。斜拉桥主梁、主塔工作在压弯状态，引起了梁柱效应。用梁单元分析时，可用稳定函数表示的几何非线性刚度矩阵或一般的几何刚度矩阵计入这一效应。

3) 大位移效应。由于斜拉桥具有柔性结构特征，外荷载作用下结构变形较大，平衡方程必须建立在变形后的位置上。可以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。混凝土的徐变特性研究涉及到徐变系数和计算方法。由于规范给出的徐变系数计算方式以图形曲线及表格形式出现，不便于计算机分析，文献 [6] 将其表达成适于电算的公式，计算方法采用按龄期调整的有效弹性模量法，其 t 时刻的应力应变关系为

$$\epsilon_s(t) = \frac{\sigma(\tau_0)}{E} \varphi(t, \tau_0) + \frac{\sigma_s(t)}{E_\varphi} \quad (1)$$

式中 $E_\varphi = \frac{E}{1 + \rho \varphi(t, \tau_0)}$ 为按龄期调整的有效弹性模量，其中 $\rho = \frac{1}{1 - e^{-\rho(t, \tau_0)}} - \frac{1}{\varphi(t, \tau_0)}$ 。

2.3 施工步骤划分

每个节段施工计算4个工况：移动施工挂篮、第一次张拉相应的拉索；浇筑节段一半混凝土、第二次张拉相应的拉索；节段形成、张拉主梁预应力；索锚点转移至梁上、第三次张拉相应的拉索。

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号、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。

3 施工过程的内力与线形控制

3.1 优化的数学模型

斜拉桥主梁的施工存在主梁标高与索力的控制问题，即所谓“双控”问题。由于混凝土容许应力水平低，应力调整范围小，并且在用悬臂浇注法施工时，可以通过调整节段的立模标高来控制主梁的线形，因此，混凝土斜拉桥施工主要以应力控制为主，确保结构内力不超限，同时兼顾主梁线形。

根据该施工控制原则，可将斜拉桥成桥后的线形和主梁与主塔的最小弯曲应变能设为目标函数，根据其重要程度给予不同的加权系数，这是一个多目标函数优化问题。若成桥后的线形函数为 $Q_1(\mathbf{H})$ ，成桥后的弯曲应变能为 $Q_2(\mathbf{F})$ ，则由 $Q_1(\mathbf{H})$ 和 $Q_2(\mathbf{F})$ 构成的广义目标函数可写成

$$\Phi(\mathbf{H}, \mathbf{F}) = Q_1(\mathbf{H})/Q_1(0) + \alpha Q_2(\mathbf{F})/Q_2(0) \quad (2)$$

式中 α 为加权系数，反映这两个特征在结构评价

中的分量: $\mathbf{H} = [h_1, h_2, \dots, h_{m_1}]$, $\mathbf{F} = [f_1, f_2, \dots, f_{m_2}]$ 。

若大桥合拢时设计主梁控制点坐标为 $g(h_i)$, ($i=1, 2, \dots, m_1$), h_i 为主梁第 i 号控制点的预抛高值, m_1 为主梁标高控制点的总数; 吊装到最后一段时, 计算所得的主梁控制点坐标为 $f(h_i)$, 则令

线形函数 $Q_1(\mathbf{H}) = \sum_{i=1}^{m_1} [f(h_i) - g(h_i)]^2$; $Q_1(0)$ 为不考虑每段的预抛高时主梁的线形函数。

成桥后, 主梁与主塔的弯曲应变能为 $Q_2(\mathbf{F}) = \sum_{j=1}^p \int_s \frac{M(\mathbf{F})}{EI} ds$, f_j 为第 j 号斜拉索的初始张拉力, m_2 为斜拉索的总数, p 为主梁和主塔弯曲应变能计算构件数; $M(f_j)$ 为在 f_j 初始张拉力作用下成桥后的构件弯矩; I 为构件组合截面的抗弯惯性矩, E 为材料的压弯弹性模量; $Q_2(0)$ 为斜拉索无初始张拉力时主梁与主塔的弯曲应变能。

上述工程问题表述为如下有约束的极小问题:

$$\left. \begin{array}{l} \min \quad \Phi(\mathbf{H}, \mathbf{F}) \\ \text{s.t.} \quad \left. \begin{array}{l} \underline{h}_i \leq h_i \leq \bar{h}_i \quad (i=1, 2, \dots, m_1) \\ \underline{f}_j \leq f_j \leq \bar{f}_j \quad (j=1, 2, \dots, m_2) \\ \underline{\sigma}_k \leq \sigma_k \leq \bar{\sigma}_k \quad (k=1, 2, \dots, m_3) \end{array} \right\} \end{array} \right) \quad (3)$$

式中 \underline{h}_i 和 \bar{h}_i 为主梁第 i 号控制点预抛高值允许偏差上下限, \underline{f}_j 和 \bar{f}_j 为第 j 号斜拉索初始张拉力允许偏差上下限, $\underline{\sigma}_k$, $\bar{\sigma}_k$ 和 σ_k 为主梁或主塔第 k 号控制点的应力和容许应力, m_3 为应力控制点总数。

对斜拉桥进行施工过程优化计算时, 理论上总会存在一组最合理的主梁预抛高值 h_i 和一组最合理的初始张拉力 f_j , 使得成桥后桥梁的目标函数 $\Phi(\mathbf{H}, \mathbf{F})$ 降到最小。笔者采用一阶分析法进行优化计算^[7], 将真实的有限元结果最小化, 而不是对逼近数值进行操作, 提高了优化结果的精度。

3.2 优化模型的参数选择

3.2.1 设计变量 计算中共有 51+62 个设计变量, 其中主梁的预抛高值 h_i 有 51 个 (中跨 31 个, 边跨 20 个, 边跨中有 11 个梁段采用支架法施工), 斜拉索索力 f_j 有 62 个 (中跨和边跨拉索各 31 个)。给 h_i 施加的约束条件为 $-1^\circ \leq h_i/L_i \leq 1.5^\circ$ ($i=1, 2, \dots, 51$), 其中 L_i 为第 i 段主梁的长度; 给 f_j

施加的约束条件为 $1\,000 \text{ kN} \leq f_j \leq 7\,000 \text{ kN}$ ($j=1, 2, \dots, m_2$)。

3.2.2 状态变量 在主梁施工加载过程中, 主塔和主梁关键控制点的应力均是欲约束的变量, 可以将它们设置为状态变量, 给控制点应力施加的约束条件为 $0 \leq \sigma_k \leq 20 \text{ MPa}$ ($k=1, 2, \dots, m_3$)。

3.3 优化结果及分析

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, 运用编制的计算机仿真分析程序, 对各施工阶段斜拉索的初始张拉力和主梁节段的立模标高进行分析。

首先一次性全部建立所有涉及到的单元, 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。将各主梁的结点坐标用设计变量 h_i 的函数式表示, 以便通过有限元求解建立目标函数与设计变量的函数关系。根据线形函数与弯曲应变能函数的重要性, 加权系数取 $\alpha=0.5$ 。按照斜拉桥的实际施工步骤, 激活新浇筑的单元及其两端节点, 支座的增加或拆除均可用激活和放松对应节点约束信息来模拟。为了准确模拟拼装过程, 必须在进行下一架设步骤拼装之前, 根据已浇筑的主梁节点位移, 修正新浇筑构件上的节点坐标、转角等。对设计变量采用一阶分析法进行搜索计算, 从头到尾反复试算直到目标函数收敛为止^[5]。一般经过 10~14 次迭代即可使目标函数收敛。将最优化分析中获得的设计变量用于主梁悬臂拼装计算, 成桥后主梁的线形见图 2。

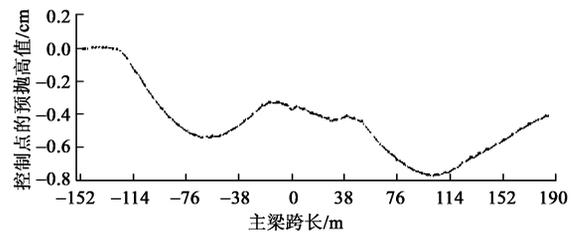


图 2 成桥后主梁的线形曲线

Fig.2 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 0.40 m, 主跨合拢并施加二期恒载后, 各控制点的理论标高与设计线形的竖直向误差不超过 0.8 cm。鉴于每个主梁节段的长度为 6 m, 该竖直误差完全可以通过调整桥面铺装层的厚度来消除。

4 非线性因素的影响

4.1 几何非线性对结构内力的影响

对桥的施工过程进行线性和非线性仿真分析，选取成桥状态下结构的内力状况，对比两种结果得到几何非线性对各构件的影响见图 3 至图 5。

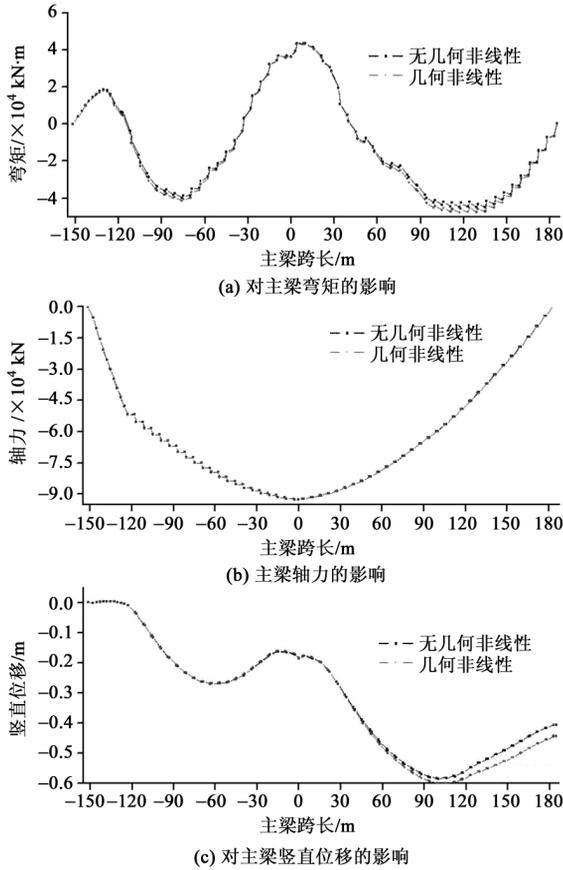


图 3 几何非线性对主梁内力的影响

Fig.3 Influence of geometric nonlinear on internal force of girders

从线性和非线性分析结果看（图 3），考虑几何非线性因素的影响，主梁正弯矩将最多减少 1.05%，发生在主跨主梁和主塔交界处；负弯矩将最多增大 7.8%，发生在中跨 1/4 附近；几何非线性使主梁竖直位移最多增大 9.5%，发生在主梁跨中。几何非线性影响使索力增大 1%~2%（图 4）。

考虑几何非线性因素的影响（图 5），主塔正弯矩将最多增大 4.7%，发生在主塔横联处；负弯矩将最多减少 3.1%，发生在主塔根部；主塔轴力最多增大 0.5%；主塔水平位移最多增大 90.7%，发生在主塔顶部。

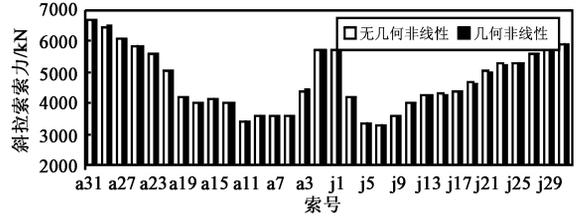


图 4 几何非线性对斜拉索力的影响

Fig.4 Influence of geometric nonlinear on cables force

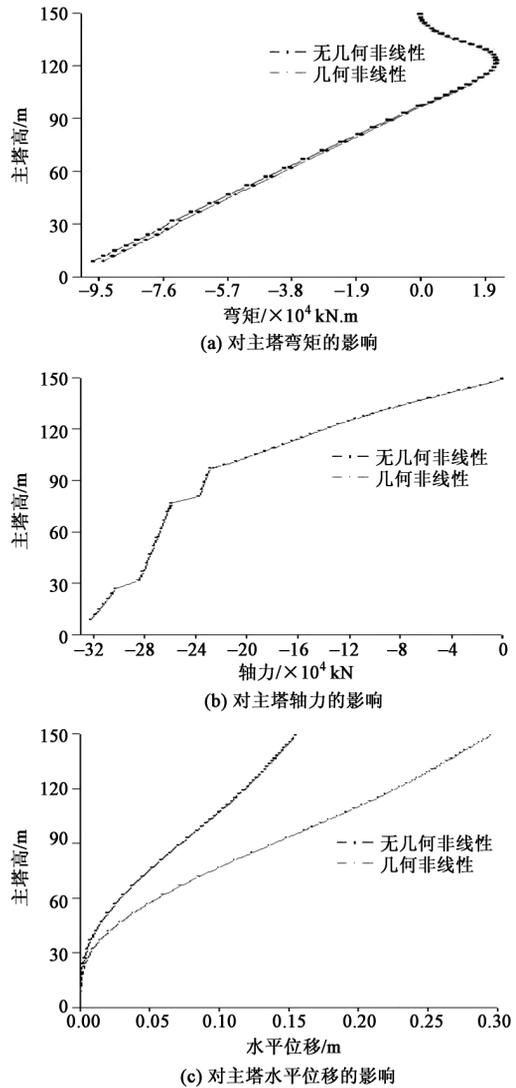


图 5 几何非线性对主塔内力的影响

Fig.5 Influence of geometric nonlinear on internal force of cable tower

4.2 混凝土时效特性对索力优化的影响

对正常使用阶段的斜拉桥，一般不允许出现塑性变形，因此，斜拉桥的物理非线性影响主要指混

混凝土在长期荷载下的徐变影响。通过对该桥梁施工过程进行线性和非线性仿真分析,选取成桥状态下结构的内力状况,对比两种结果得到混凝土时效特性对各构件的影响,计算结果见图 6 至图 8。

如图 6 所示,考虑混凝土时效特性的影响,主梁正弯矩将最多增大 37.5%,发生在主跨主梁和主塔交界处;负弯矩将最多减少 34.4%,发生在中跨 1/4 附近。混凝土时效特性对主梁轴力的影响在 $-0.8\% \sim 0.8\%$ 之间,使主梁竖直位移最多增大 250.1%,发生在主梁 1/4 处。

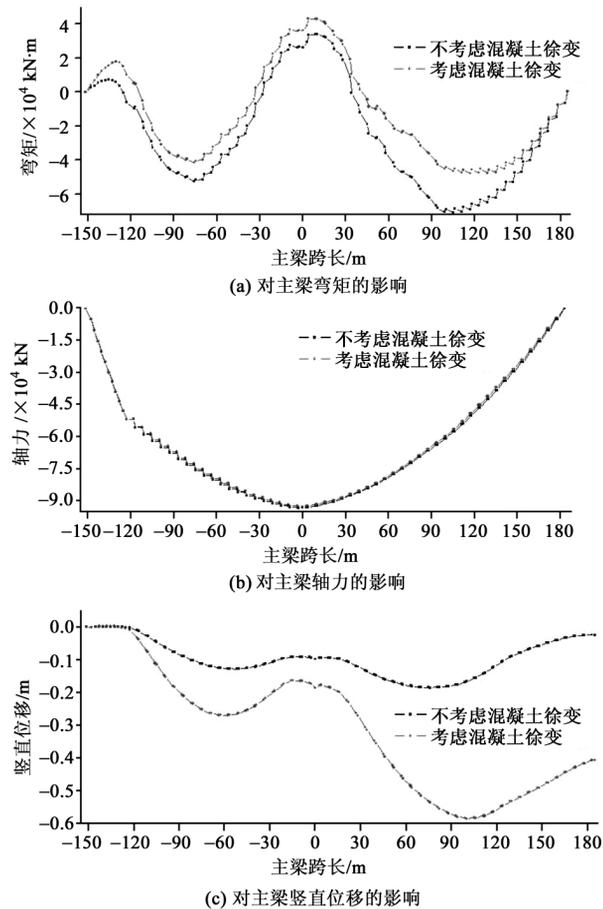


图 6 混凝土时效特性对主梁内力的影响
Fig.6 Influence of concrete aging characteristic on internal force of girders

从线性和非线性分析的结果看(图 7),混凝土时效特性的影响使索力增大 $1\% \sim 2\%$ 。

考虑混凝土时效特性的影响(图 8),主塔正弯矩将最多增大 69.6%,发生在主塔横联附近;负弯矩将最多增大 288.2%,发生在主塔根部。混凝土时效特性使主塔轴力最多减少 0.7%,使主塔的水平位移增大 3 729.3%,发生在主塔顶部。

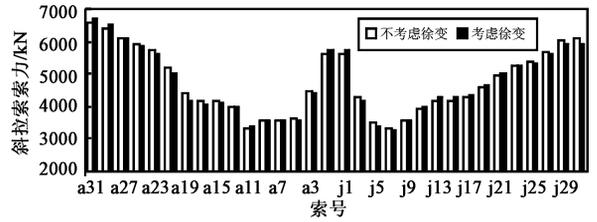


图 7 混凝土时效特性对斜拉索力的影响
Fig.7 Influence of concrete aging characteristic on cables force

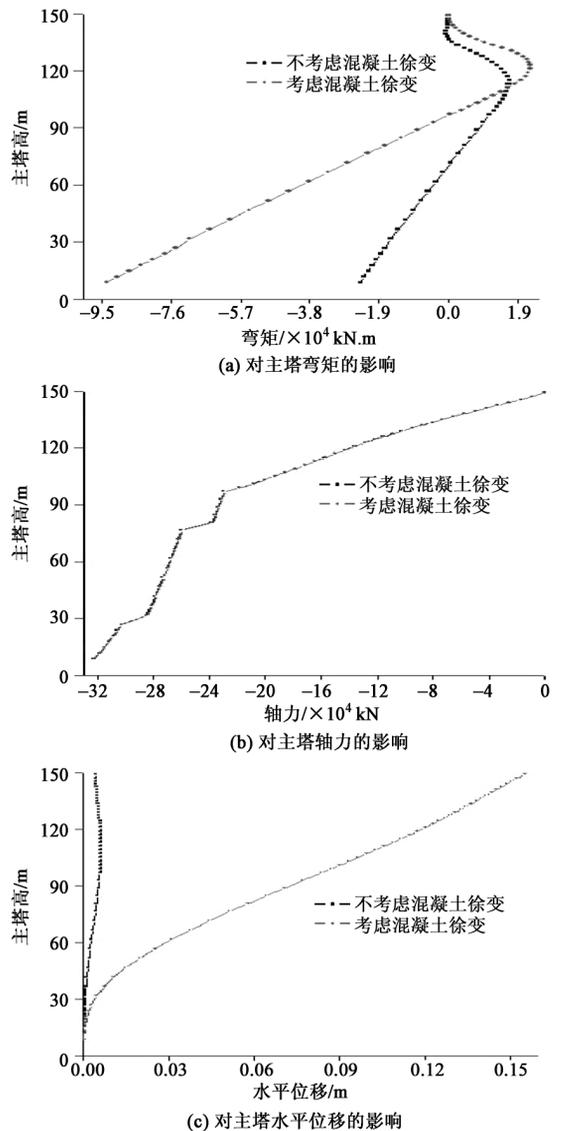


图 8 混凝土时效特性对主塔内力的影响
Fig.8 Influence of concrete aging characteristic on internal force of cable tower

4.3 施工阶段减小非线性影响的措施

在恒载确定的情况下,斜拉桥成桥受力状态是由拉索索力、支座反力和结构构形决定的,称为成

桥状态三要素。如果能保证成桥构形、成桥索力和支座反力与设计一致, 结构成桥状态就不会受非线性因素的影响。

桥梁构形、拉索索力和支座反力是施工过程中逐阶段形成的, 要使成桥状态三要素达到设计状态, 必须确定好施工张拉力, 做好拼装线性, 并严格按照非线性进行施工仿真分析, 在施工中对主梁的位移进行控制, 减小各种偏差对成桥三要素的影响, 从而减小施工进程中的非线性影响。

5 结论

1) 将斜拉桥成桥后主梁的线形和梁塔的弯曲应变能设为目标函数, 根据其重要程度, 给出不同的加权系数。通过对目标函数的最优化处理, 求出各施工阶段斜拉索的初始张拉力和主梁节段的立模标高, 并在桥梁施工中实施, 该方法能够将成桥后结构的内力和主梁的线形同时控制在精度范围内。

2) 对于主梁刚度相对较大的混凝土斜拉桥, 悬臂节段的施工应以应力控制为主, 兼顾主梁线形。为此, 必须在施工过程中建立预警机制, 当预计应力或线形有可能超过限制值时发出警报。

3) 在初始张拉索力相同的情况下, 各种非线性因素都会改变结构的受力状态。同时计入索的垂度效应、梁柱效应和大位移效应比单项计入非线性因素对结构非线性的影响大, 忽略其中任何一项都会带来较大的计算误差, 导致内力和应力的失真。

4) 在恒载确定的情况下, 斜拉桥成桥受力状态是由成桥状态三要素决定的。成桥三要素是施工过程中逐阶段形成的。确定好施工张拉力, 做好拼装线性, 并严格按照非线性进行施工仿真分析来迎合设计的成桥状态三要素, 并在施工中对主梁的位移进行控制, 减小各种偏差对成桥三要素的影响, 可以减小施工过程中的非线性影响。

参考文献

- [1] 杨琪, 李乔. 斜拉桥的静力行为影响参数及其静力分析[J]. 国外桥梁, 1999, (4): 31~44
- [2] 方志, 郭棋武, 刘光栋. 混凝土斜拉桥施工及运营阶段的非线性影响分析[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 200~205
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 张建民, 肖汝诚. 千米级斜拉桥空间非线性合理恒载索力分析[J]. 中国工程科学, 2004, 6(12): 37~42
- [6] 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
- [7] Wang S Y, Sun Y B, Gallagher R H. Sensitivity analysis in shape optimization of continuum structures [J]. Computer & Structures, 1985, 20(5): 582~593

Study on Mechanical Behavior of a Prestressed Concrete Cable-stayed Bridge in Construction State

Zhang Jianmin¹, Xiao Rucheng²

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

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

[Abstract] Because of the increasing span of concrete cable-stayed bridge, the construction simulation recently becomes more focusing on both the design and construction. This paper introduces the optimization theory and method into the calculation of cantilever construction of girders. The example bridge is a long-span prestressed concrete cable-stayed bridge with a 370 m central span length under construction in China. Using spatial nonlinear FEM, the actual cantilever construction process of concrete box-shaped girders is simulated, the tensioning force of cables as well as the prearranged height of girders in construction state is obtained. At the same time, the influence of structural geometric nonlinear characteristics and physics nonlinear characteristics in the cable force optimum are investigated, the measures to reduce the influence are put forward.

[Key words] cable-stayed bridge; first order optimization method; the rational construction state; nonlinear characteristic