

大跨度斜拉桥施工过程中索力和线形双控研究

谭红霞¹ ,张建民²

(1.湘潭大学土木工程与力学学院 ,湖南 湘潭 411105 ;2.广州市市政工程安全质量监督站 ,广东 广州 510050)

摘要 :为了使斜拉桥在成桥后达到合理状态 ,必须拟定合理的施工状态 ,即在施工过程中使斜拉索力和结构位形同时达到理想状态 .采用一阶最优化计算方法 ,以成桥后结构的弯曲应变能和主梁的线形为目标函数 ,以斜拉索的初始张拉力和主梁节段的预抛高值为设计变量 ,建立了斜拉桥施工控制的空间非线性有限元分析模型 ,并以某大跨度预应力混凝土斜拉桥为例 ,模拟了混凝土主梁的悬臂浇筑过程 .结果表明 ,该方法可使成桥后主梁的线形和结构的内力得到合理控制 ,从而可有效地确定斜拉桥的合理施工状态 .

关键词 斜拉桥 ;一阶分析法 ;索力 ;线形

中图分类号 :U443.38 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2008)01-0097-05

在斜拉桥的设计中 ,通常先要确定一个合理的成桥状态 ,然后根据拟定的施工工序确定合理的施工状态^[1-4] .而合理施工状态的主要控制参数为斜拉索张拉索力和主梁线形 .大跨度预应力混凝土斜拉桥一般采用悬臂浇筑法施工 ,其过程比较复杂 ,如何确定各施工状态的安装索力和主梁的预定线形成为斜拉桥施工控制中的一个十分关键的问题 .

本文采用一阶分析法来确定各施工状态斜拉桥的安装索力和主梁的线形 .在对结构进行空间非线性有限元施工过程模拟计算的基础上 ,通过设置不同的目标函数 ,约束设计变量和状态变量 ,分别迭代优化出最佳的初始张拉索力和主梁线形的预抛高值^[5] ,从而使成桥后主梁的线形和结构的内力达到合理状态 .

1 斜拉索初始张拉力的确定

斜拉桥主梁与主塔的弯曲应变能为

$$Q(F)=\sum_{i=1}^p\int_s\frac{M(F_i)^2}{EI}ds\quad(i=1,2,\dots,m_1)$$

式中 : F_i ——第 i 号斜拉索的初始张拉力 ; m_1 ——斜拉索的总数 ; p ——主梁和主塔弯曲应变能计算构件数 ; $M(F_i)$ ——在初始张拉力 F_i 作用下 ,成桥后的构件弯矩 ; I ——构件组合截面的抗弯惯性矩 ; E ——材料的压弯弹性模量 ; s ——梁与塔变形后的弧长 .在对斜拉桥进行施工过程索力优化时 ,总存在一组最为合理的初始张拉索力 F_i ,使得成桥后结构的弯曲应变能 $Q(F)$ 降到最小 .设约束目标函数为

$$\begin{cases} \min Q(F) \\ \text{s.t.} \quad \underline{F}_i \leq F_i \leq \bar{F}_i & (i=1,2,\dots,m_1) \\ \underline{\sigma}_j \leq \sigma_j \leq \bar{\sigma}_j & (j=1,2,\dots,m_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中 : $\bar{F}_i$, $\underline{F}_i$ ——第 i 号斜拉索初始张拉力允许偏差的上下限 ; $\bar{\sigma}_j$, $\underline{\sigma}_j$, σ_j ——主梁或主塔第 j 号控制点的应力和容许应力 ; m_2 ——应力控制点的总数 .

使用一阶分析法^[6-8]将有约束的多变量非线性规划问题变成无约束的非线性规划问题 ,即将原目标函数 $Q(F)$ 增广为一个新的函数 :

$$\Phi(F,q_n)=\frac{Q(F)}{Q(0)}+q_n\left[\sum_{i=1}^{m_1}P_F(F_i)+\sum_{j=1}^{m_2}P_\sigma(\sigma_j)\right] \quad (2)$$

收稿日期 2007-03-21
基金项目 国家自然科学基金(50408037) ;中国博士后科学基金(2003034279)
作者简介 谭红霞(1969—) ,女 ,湖南湘潭人 ,博士研究生 ,主要从事桥梁检测和结构理论研究 .

式中: Φ ——无约束目标函数,无量纲; P_F ——设计变量 F_i 约束的罚函数; P_σ ——状态变量 σ_j 约束的罚函数; q_n ——惩罚因子,它决定了函数约束的满意程度; $Q(0)$ ——斜拉索无初始张力时,主梁与主塔的弯曲应变能。

对于具有上下限约束的设计变量和状态变量,它们的罚函数各取为下列形式:

$$P_F(F_i) = \left(\frac{F_i}{\underline{F}_i - \alpha_i} \right)^{2\lambda} + \left(\frac{F_i}{\bar{F}_i + \alpha_i} \right)^{2\lambda} \quad (3)$$

其中

$$\lambda = \begin{cases} 10^6 & (F_i < \underline{F}_i \text{ 或 } F_i > \bar{F}_i) \\ 10^{-6} & (\underline{F}_i \leq F_i \leq \bar{F}_i) \end{cases}$$

$$P_\sigma(\sigma_j) = \left(\frac{\sigma_j}{\underline{\sigma}_j - \beta_j} \right)^{2\lambda} + \left(\frac{\sigma_j}{\bar{\sigma}_j + \beta_j} \right)^{2\lambda} \quad (4)$$

其中

$$\lambda = \begin{cases} 10^6 & (\sigma_j < \underline{\sigma}_j \text{ 或 } \sigma_j > \bar{\sigma}_j) \\ 10^{-6} & (\underline{\sigma}_j \leq \sigma_j \leq \bar{\sigma}_j) \end{cases}$$

式(3)(4)中 α_i 和 β_j 为约束的容许误差。

为了加快计算的收敛速度,罚系数 q_n 在 $0.1 \sim 1.0$ 内取值,而且满足 $q_1 < q_2 < \dots < q_n$ 。

采用共轭方向法来确定设计变量的搜索方向,取初始值 F^0 的负梯度 $-\nabla \Phi(F^0, q_0)$ 作为初始共轭向量 d^0 ,则第 n 个迭代点的共轭方向由下式确定^[9-11]:

$$d^n = -\nabla \Phi(F^n, q_n) + r^{n-1} d^{n-1} \quad (5)$$

式中: F^n ——由一维搜索按最优步长获得的迭代点; $-\nabla \Phi(F^n, q_n)$ —— F^n 处的负梯度; r^{n-1} ——组合系数。获得搜索方向后,就可通过一维线性搜索找到下一个迭代点:

$$F^{n+1} = F^n + \lambda_n d^n \quad (0 \leq \lambda_n \leq \frac{\lambda_{\max}}{100} \lambda_n^*) \quad (6)$$

式中: λ_n ——线搜索步长; $\lambda_{\max}$ ——最大的迭代次数; λ_n^* ——最大可能的子迭代数。

F^{n+1} 求得后即可判断该点是否为合理点,判断准则如下:

$$|Q(F^{n+1}) - Q(F^n)| \leq \tau \quad (7)$$

并且满足 $\underline{F}_i \leq F_i^{n+1} \leq \bar{F}_i$, $\underline{\sigma}_j \leq \sigma_j^{n+1} \leq \bar{\sigma}_j$ 。其中 τ 为收敛公差。

若不满足收敛条件,则得到一个新的搜索方向 d^n ,进行下一轮的迭代计算,直到收敛为止。

2 主梁线形的确定

采用上述斜拉索的初始张力进行悬臂安装时还应确保成桥后的主梁线形符合设计期望。

设成桥后的设计曲线函数为 $g(h_k)$ ($k=1, 2, \dots, m_3$) 其中 h_k 为主梁第 k 个控制点的预抛高值, m_3 为主梁标高控制点的总数;吊装到最后一段时,计算所得的主梁设计曲线函数为 $f(h_{ki})$,则令线形函数

$$P(H) = \sum_{k_i=i}^{m_3} [f(h_k) - g(h_k)]^2$$

同样,采用一阶分析法进行优化计算。从理论上讲,总存在一组最为合理的主梁预抛高值 h_k ,使得成桥后主梁的线形函数 $P(H)$ 降到最小。设约束目标函数为

$$\begin{cases} \min P(H) \\ \text{s.t. } \underline{h}_k \leq h_k \leq \bar{h}_k \quad (k=1, 2, \dots, m_3) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $\bar{h}_k$ 和 $\underline{h}_k$ 为主梁第 k 号控制点预抛高值允许偏差的上下限。

用一阶分析法将 $P(H)$ 增广为一个无约束的非线性规划函数:

$$\Psi(H, q_n) = \frac{P(H)}{P(0)} + q_n \left(\sum_{k=1}^{m_3} P_k(h_k) \right) \quad (9)$$

式中: Ψ ——无约束目标函数; $P(0)$ ——不考虑每段的预抛高时主梁的线形函数; P_h ——设计变量 h_i 约束的罚函数,取为下列形式:

$$P_h(h_k) = \left(\frac{h_k}{\underline{h}_k - \gamma_k}\right)^{2\lambda} + \left(\frac{h_k}{\bar{h}_k + \gamma_k}\right)^{2\lambda} \tag{10}$$

其中
$$\lambda = \begin{cases} 10^6 & (h_k < \underline{h}_k \text{ 或 } h_k > \bar{h}_k) \\ 10^{-6} & (\underline{h}_k \leq h_k \leq \bar{h}_k) \end{cases}$$

式中 γ_k 为约束的容许误差.最优化计算的搜索方向及收敛准则同上节.

3 工程应用

3.1 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桥梁,该桥为双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,计算模式如图 1 所示.

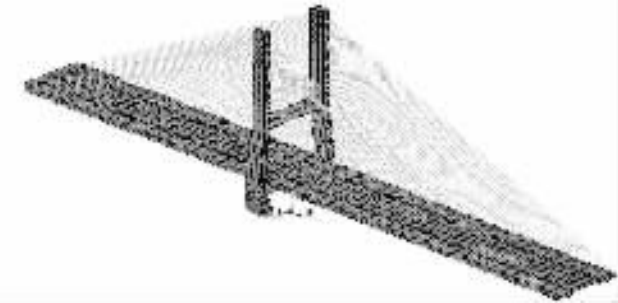


图 1 结构离散图

Fig.1 Finite element map of structure

3.2 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工况 1;浇注节段一半混凝土、第 2 次张拉相应的拉索为工况 2(图 2a));节段形成、张拉主梁预应力为工况 3;将索锚点转移至梁上、第 3 次张拉相应的拉索为工况 4(图 2b)).

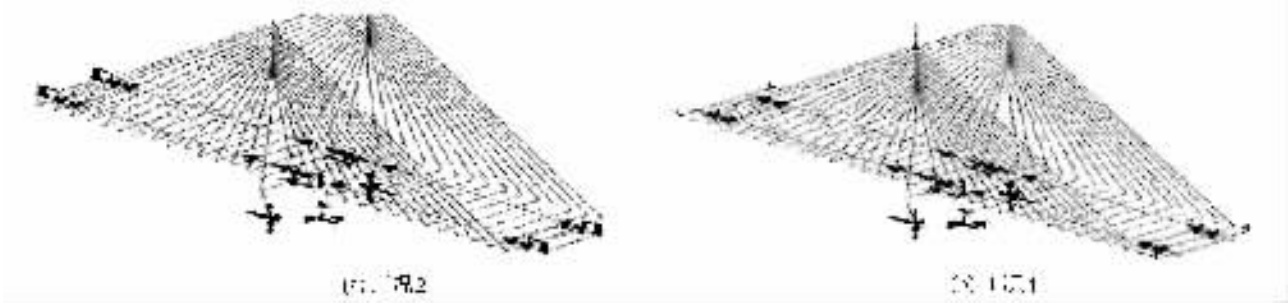


图 2 主梁节段标准施工步骤

Fig.2 Standard construction steps of main girder sections

3.3 参数选择

3.3.1 设计变量

斜拉索初始张拉力通过 3 次张拉到位,将斜拉索的第 3 次张拉索力 F_i 设置为设计变量,给 F_i 施加的约束条件为 $2000\text{ kN} \leq F_i \leq 6000\text{ kN}$ ($i = 1, 2, \dots, m_1$).斜拉索的第 1 次、第 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模拟.将主梁各控制点的预抛高值 h_k 也设为设计变量,给 h_i 施加的约束条件为 $-1^\circ \leq \arctan(h_i/L_i) \leq 2^\circ$ ($i = 1, 2, \dots, m_3$),其中 L_i 为第 i 段主梁的长度.

3.3.2 状态变量

在主梁的施工加载过程中,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 $0 \leq \sigma_j \leq 25\text{ MPa}$ ($j = 1, 2, \dots, m_2$).

3.4 结果分析

预先假设施工过程中各斜拉索的初始张拉力为 0,各主梁节段的预抛高值为 0,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.部分计算结果如图 3~5 所示.

计算结果显示,在斜拉桥悬臂施工过程中,主梁的线形变化幅度非常大,节段的预抛高值从 -0.5 m 到 0.42 m ,但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 0.7 cm .成桥后主梁的最大弯矩为 $4.8 \times 10^4\text{ kN}\cdot\text{m}$,主塔的最大弯矩为 $9.1 \times 10^4\text{ kN}\cdot\text{m}$,单根最大恒载索力为 6500 kN ,单根最小恒载索力为 2400 kN .最大拉力发生在边跨端点处与跨中附近.

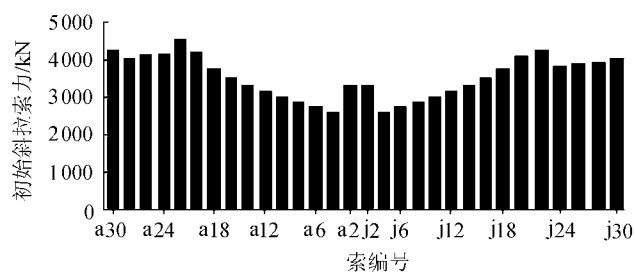


图 3 初始张拉索力
Fig.3 Initial cable prestress

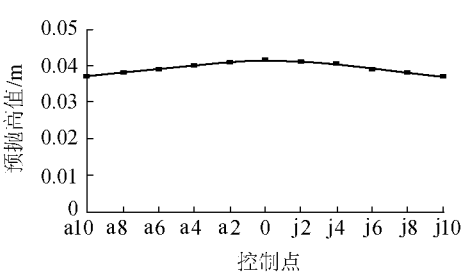
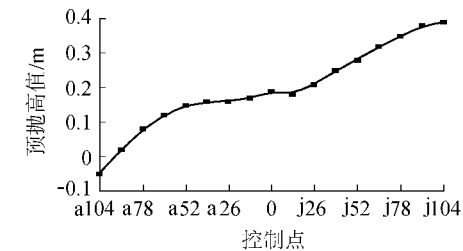
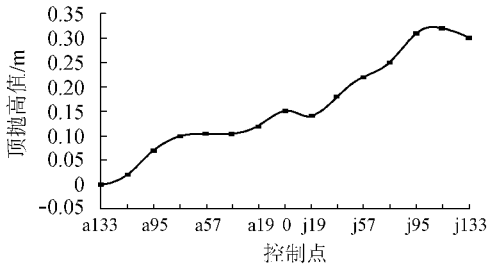
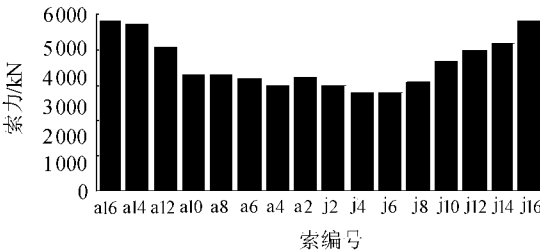


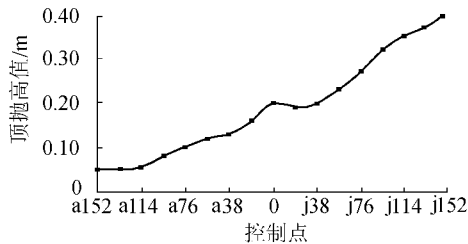
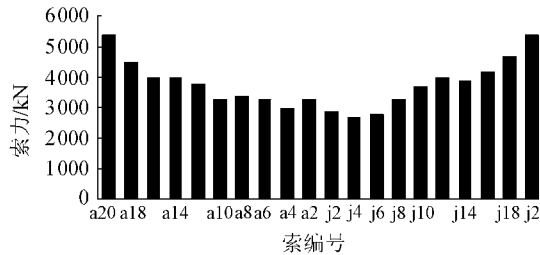
图 4 第 3 个施工步骤控制点的预抛高值
Fig.4 Prearranged heights for control points at the third construction steps



(a) 第 67 个施工步骤



(b) 第 88 个施工步骤



(c) 第 123 个施工步骤

图 5 不同施工步骤的线形与索力

Fig.5 Alignment and cable prestress for different construction steps

4 结 论

- a. 特大跨度 PC 斜拉桥 ,由于混凝土的收缩徐变影响 ,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影响 ,施工过程中应予以控制。
- b. 采用一阶分析法可使成桥后主梁的线形和结构的内力状况均得到合理的控制 ,且迭代收敛速度快 ,这表明一阶分析法用于确定斜拉桥的合理施工状态是有效的。
- c. 将此方法应用于某大跨度混凝土斜拉桥的施工控制 ,应用结果表明 ,该方法计算精度高 ,具有很高的应用价值。
- d. 对于主梁刚度相对较大的混凝土斜拉桥 ,施工悬臂阶段应重视结构的内力控制和线形控制。为了达

到这一目标,必须建立施工过程的预警机制,当预计应力或线形有可能超过限制值时即可提前发出警报。

参考文献:

- [1] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2001:282-294.
- [2] WANG Pao-hsui ,TANG Tzu-yang ,ZHENG Hou-nong. Analysis of cable-stayed bridges during construction by cantilever method[J]. Computers & Structures ,2004 ,82(4):329-346.
- [3] 陈德伟,许俊.预应力混凝土斜拉桥施工控制新进展[J].同济大学学报:自然科学版,2001,29(1):99-103.
- [4] 肖汝城,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.
- [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] 施笃铮,汪劲丰,项贻强,等.斜拉桥施工过程中的索力控制与优化研究[J].中国公路学报,2002,15(2):57-60.
- [8] WANG Shu-yu ,SUN Yan-bing ,GALLAGHER R H. Sensitivity analysis in shape optimization of continuum structures[J]. Computer & Structures ,1985 ,20(5):582-593.
- [9] 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.
- [10] 陈常松,詹建辉.大跨度预应力混凝土斜拉桥施工控制系统研究[J].世界桥梁,2003(4):45-48.
- [11] 张佐安.PC 斜拉桥施工控制索长的确定[J].公路交通科技,2003(4):40-42.

Cable prestress and alignment double control during construction of large-span cable-stayed bridges

TAN Hong-xia¹ , ZHANG Jian-min²

(1. College of Civil Engineering and Mechanics , Xiangtan University , Xiangtan 411105 , China ;

2. Guangzhou Municipal Engineering Quality and Safety Supervision Station , Guangzhou 510050 , China)

Abstract: Rational construction state , i. e. the cable prestress and structure alignment reach perfect condition simultaneously , should be defined , so that the cable-stayed bridge can reach rational state after the bridge construction. By use of the first order optimization calculation method , a nonlinear spatial finite element model for cable-stayed bridge construction control was developed with the bending strain energy of the bridge structure after construction and the alignment of the main girder taken as the objective functions and the initial tensile force of stayed cables and the prearranged height of main girder sections taken as the design variables. A case study was performed on a large-span cable-stayed prestressed concrete bridge , and the simulation of the pouring process of the cantilever of main concrete girders with the method shows that the method can effectively control the alignment of the main girders and the internal force of the bridge structure after the bridge construction , and thus it can efficiently determine the rational construction state of the cable-stayed bridge.

Key words: cable-stayed bridge ; the first order analysis method ; cable force ; alignment