

确定斜拉桥施工索力的正装倒拆优化法

符 强, 李延强

(石家庄铁道大学 工程力学系, 河北 石家庄 050043)

摘要:以实验室独塔斜拉桥为研究对象,提出了确定斜拉桥合理施工索力的正装倒拆计算方法,该方法按照施工顺序,在正装优化的基础上,对各节段进行倒拆计算,得到各斜拉索的基础索力,然后再通过正装迭代计算,求得各个调索阶段斜拉索的初始张拉索力和主梁的预抬量,从而避免了传统的倒拆法中难以考虑结构本身的非线性问题与正装法无法保证计算过程中一些索力设置大小的合理性等问题。本方法已经在独塔斜拉桥模型实验中成功应用。通过实验验证了该方法的有效性和可靠性,具有一定的理论价值和重要的应用价值。

关键词:正装倒拆优化法;斜拉桥;施工索力

中图分类号:TU448 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-0373(2012)03-0033-05

斜拉桥的一个重要特点是设计和施工的高度耦合,斜拉桥的成桥状态是各施工状态的累积结果^[1],研究斜拉桥的施工状态,不但为施工提供依据,还可以更准确地把握成桥时的结构构形和内力。斜拉索作为斜拉桥结构的主要受力构件,其施工索力的确定长期以来一直是重点和难点问题。目前在工程中应用比较多的是倒拆法,其次是倒拆-正装迭代法与正装法,但这三种方法均存在许多不足之处^[2-5]。正装倒拆优化法^[6-7]是在正装优化的基础上,对各节段进行倒拆计算,得到各斜拉索的基础索力,然后再通过正装迭代计算,求得各个调索阶段斜拉索的初始张拉索力和主梁的预抬量。对结构进行正装倒拆优化法完成“索力-预抬量”计算,需要解决确立正装优化数学模型、选取结构状态的倒拆起点及确定倒拆过程中结构非线性效应分析和结构状态参数等问题。将正装倒拆优化法与 ANSYS 软件相结合,通过对模型斜拉桥成桥过程进行正装倒拆优化计算,确定了模型斜拉桥的施工索力,并利用计算结果完成了模型斜拉桥成桥状态的调试过程。

1 正装倒拆优化法

1.1 正装优化的数学模型

确定模型的设计变量、状态变量和目标函数是建立正装优化数学模型的前提。其中,目标函数必须保证是设计中极小化的变量参数,且必须为设计变量的函数。本模型桥实验索力计算,极小化变量选取成桥状态下主梁及桥塔各测控点位移,选取成桥状态下斜拉索索力作为设计变量,主梁应力作为状态变量。

由于位移对应的工况是成桥状态下,而索力对应的工况是最大悬臂状态,所以“索力-位移”的显形函数无法写出,索力与主梁观察点位移的函数表达式

$$u_i = f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中, u_i 为主梁观察点 i 在成桥状态下的位移; m 为主梁观察点数; f_j 为第 j 组拉索索力; n 为拉索的组数。应用最小二乘法,得

$$U = \sum_{i=1}^m U_i^2 = \sum_{i=1}^m f_i^2(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^m f_i^2(X) \quad (2)$$

收稿日期:2012-03-23

作者简介:符强 男 1984 年出生 硕士研究生

基金项目:河北省科学技术研究与发展计划(11215611D);河北省人力资源和社会保障厅项目(436018)

式中, $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 。优化数学模型为

$$\begin{cases} \min U(X) \\ |\sigma|_{\max} < \sigma_{cr} \\ \sigma_{\max}' K < \sigma_{cr}' \end{cases} \quad (3)$$

式中, σ 为状态变量, 表示主梁材料应力水平; $\sigma_{\max}'$ 为最大拉索应力; σ_{cr} 为主梁材料容许应力; σ_{cr}' 为拉索极限应力; K 为拉索安全系数。采用式(4)来检验最优化计算的收敛性。

$$|U_{(x)}^i - U_{(x)}^{i+1}| \leq \tau \quad (4)$$

式中, τ 为优化设计的公差。

1.2 索力调整

不论是拆除与安装, 其对有限元分析而言, 都是修改了构件的刚度。拆除过程相当于将一个很小的修正系数作为因子与已有构件的单元刚度相乘, 从而使这些单元的刚度接近于零, 而安装过程则是将这些单元的刚度进行了恢复。实际工程中, 由于整个结构处于弹性阶段, “拆除”和“安装”前后, 结构变形理论上完全相同, 可以认为结构处于同种状态。然而, 在此过程中, 由于受到刚度修正误差、数值截断误差等因素影响, 前后两次分析所得到的结构状态不完全一致。大型结构的施工步骤复杂、单元数量众多, 误差累计会更多, 因此, 为了提高施工精度, 这些误差必须消除。对倒拆计算引入罚系数, 对各节段进行修正。利用“索力-位移”在弹性阶段的线性关系, 将节段小误差安装标高问题归结为寻求此节段的索力的大小问题。令

$$T_i^{j'} = T_i^j(obj) - \gamma T_i^j(obj) \quad (5)$$

式中, $T_i^{j'}$ 为修正后斜拉索的索力; $T_i^j(obj)$ 为倒拆初始状态下的索力; γ 为罚系数; i 为当前拆除的节段序号; j 为此时已有的节段序号。由于“拆除”和“安装”同一单元时所产生的误差为同一误差, 本文仅修正“拆除”或“安装”单元所产生的误差即可。因此式中 $i = j$, 式(5)可改写为

$$T_i^{i'} = T_i^i(obj) - \gamma T_i^i(obj) \quad (6)$$

根据“索力-位移”关系可知

$$U_i^{i'} = F(T_i^{i'}) \quad (7)$$

又由“正装倒拆”的非线性关系

$$U_i^i(obj) = G[T_i^i(obj)] \quad (8)$$

则

$$\Delta = U_i^i(obj) - U_i^{i'} \quad (9)$$

式中, Δ 为微量误差。然而对于多节段安装的结构而言, 个数增加误差总量逐渐积累增大, 因此不能忽略。令

$$\gamma = \Delta / U_i^i(obj) \quad (10)$$

式中, γ 为罚系数。则

$$F(T_i^{i'}) = G[T_i^i(obj)] - \gamma G[T_i^i(obj)] \quad (11)$$

由式(11)得

$$\gamma = (G - F) / G \quad (12)$$

由式(5)、式(12)得

$$T_i^{j'} = T_i^j(obj) - (G - F) T_i^j(obj) / G \quad (13)$$

由式(5)、式(13)反复调整拆除某节段时索力, 直到斜拉桥模型的第一节段调整完成。索力与预抬量分别由式(13)、式(7)计算得到。

1.3 施工阶段索力确定

依据上述过程进行正装倒拆优化计算, 在计算过程中, 不断提取主梁及桥塔各观察点的位移, 依据计算结果判断是否满足成桥状态要求。满足, 则计算完成, 否则, 重新修正倒拆所得各节段主梁预抬量, 直至主梁和桥塔的位移达到成桥要求。依此循环。图 1 为模型桥索力计算的流程图。

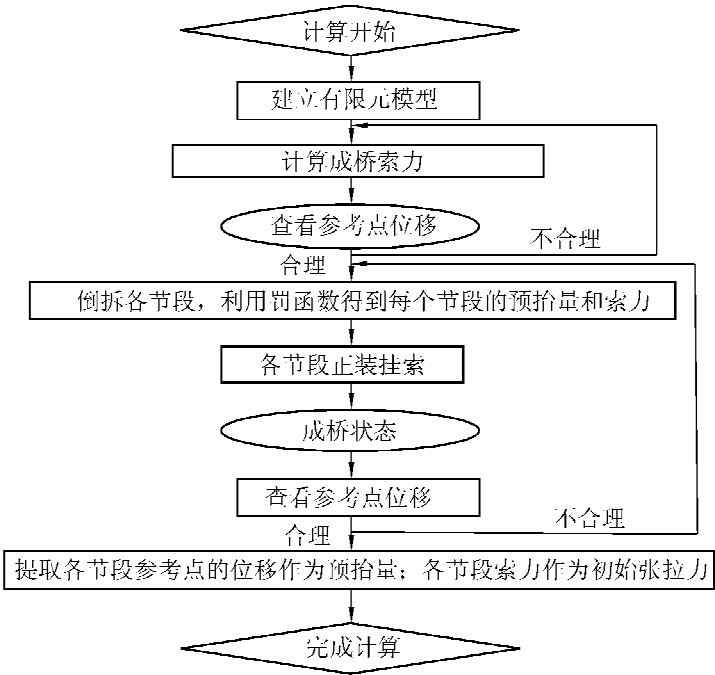


图 1 计算流程

通过以上步骤,利用 ANSYS 计算得出调索各阶段施工索力计算结果如表 1 所示。

表 1 模型桥调索各阶段拉索施工索力 N

节段	工况									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S1	827	684	587	533	503	488	482	478	471	526
S2		822	571	401	283	211	174	152	140	281
S3			938	638	412	261	175	125	97	310
S4				102	695	466	328	242	195	445
S5					1 215	921	736	616	548	803
S6						1 358	1 138	991	905	1 138
S7							1 359	1 195	1 096	1 287
S8								1 548	1 445	1 579
S9									1 904	1 944

注:表中 1~9 节段表示模型桥分别挂 S1~S9 号索;节段 10 表示 60% 加载工况;节段 11 表示成桥状态工况。

2 实验验证与应用

模型实验桥全长 5.2 m,主梁板材最厚处为 6 mm,最薄处为 2.75 mm。模型斜拉桥箱梁采用螺栓拼接方式连接,主梁采用铝合金材料,箱形截面;主塔采用型钢制作,模型斜拉桥全桥示意图如图 2 所示。有限元分析基于 ANSYS 建立空间板壳模式进行模拟,主梁和索塔全部采用 SHELL63 壳单元模拟,斜拉索采用 LINK10 单元模拟。拉索和边主梁的连接采用主从约束方法,全三维斜拉桥模型如图 3 所示。

斜拉桥模型拉索共 9 组 36 根,利用 ANSYS 生死单元技术模拟施工过程,全桥分 11 个阶段完成,节段 1 到节段 9 分别为挂 S1 到 S9 号索,节段 10 为加载 60%,节段 11 为加载 100%,完成整个阶段后模型桥即达到成桥状态。

依据上述计算得到的各施工阶段索力,对模型桥进行各施工阶段的索力安装,调试。在安装调试过程中,对各拉索索力及主梁位移进行监测。索力则对 36 根拉索全部进行监测,位移测点选取对应挂索截面横桥向中心。索力监测采用压力环传感器,位移监测采用百分表。限于篇幅,只给出最终成桥状态一种工况下索力实测与理论计算对比如图 4 所示,位移实测与理论计算对比曲线如图 5 所示。

从图 4 可以看出,模型桥各调索阶段实测索力与理论值吻合较好,两者最大误差均未超过 5%,调索

效果总体良好。



图2 模型斜拉桥全桥示意图

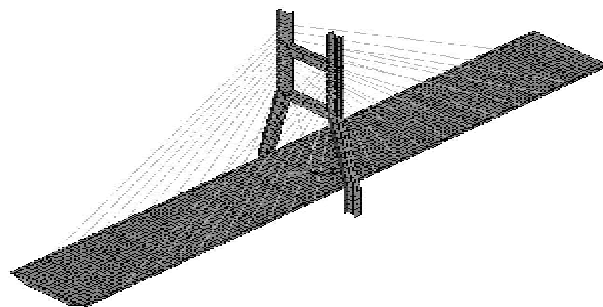


图3 全三维斜拉桥模型图

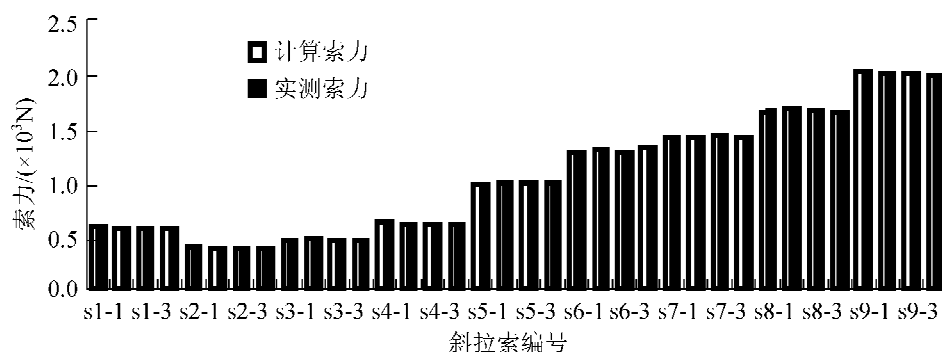


图4 成桥工况下各索计算索力与实测索力对比

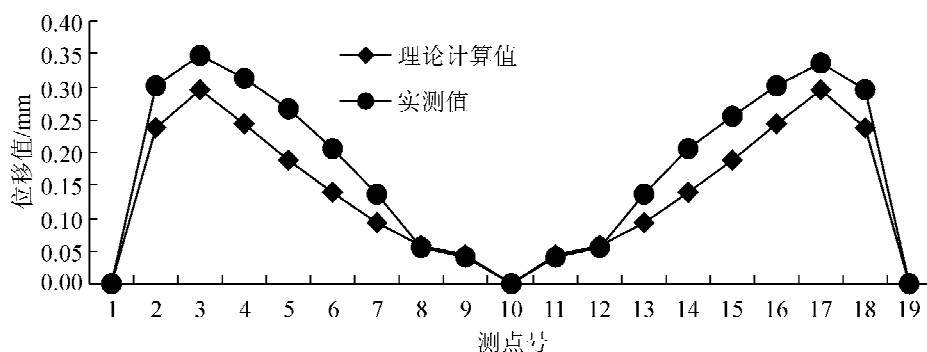


图5 成桥工况下主梁位移对比曲线

从图5中可以看出,理论计算位移曲线与实测位移曲线变化规律相同,吻合程度较好。最大位移均出现在主梁2/3截面处,其位移值大小为0.349 mm,这与正装倒拆优化法计算位移结果存在一定误差,主要是由于模型试验中加载并非严格意义上的均布加载,而模型计算中是按均布面荷载施加的,这就导致加载点周围的实测位移较理论计算值偏大。但由于本模型桥跨度为5.2 m,最大变形量与跨度的比值为 $6.7\text{e}-5$,可以认为斜拉桥模型“零位移”,桥梁结构“塔直梁平”,达到控制成桥状态的目的。

3 结语

采用正装倒拆优化法确定斜拉桥结构施工索力,计算原理明确,结合ANSYS优化功能,计算过程简捷易行,通过实验室模拟实验验证,计算的施工索力合理,以此为依据可以得到斜拉桥结构理想的成桥状态。该方法解决了传统的倒拆法、倒拆正装法中难以考虑结构本身的非线性问题与无法保证计算过程中一些索力设置大小的合理性等问题,计算过程简捷,结果可靠。本方法在实际斜拉桥结构施工索力的确定及调索等方面具有一定的理论价值和应用价值。

参 考 文 献

- [1] 李传习,夏桂云. 大跨度桥梁结构计算理论[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [2] 陆楸. 斜拉桥最优索力的探讨[J]. 中国公路学报,1990,13(1):38-48.
- [3] 杜国华. 斜拉桥的合理索力及其施工张拉力[J]. 桥梁建设,1989(3):11-17.
- [4] 黄侨,吴红林,李志波. 确定斜拉桥施工索力的正装算法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2004,36(12):1702-1704.
- [5] 薛成凤,白延芳,赵雷. 大跨度混凝土斜拉桥施工控制正装和倒拆仿真分析[J]. 铁道建筑,2009,8(1):1003-1005.
- [6] 李乔,单德山,卜一之,等. 大跨度桥梁施工控制倒拆分析法的闭合条件[C]//第十七届全国桥梁学术会论文集. 重庆:人民交通出版社,2006:624-628.
- [7] 秦顺全,林国雄. 斜拉桥安装计算——倒拆法与无应力状态控制评述[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第九届年会论文集. 武汉:同济大学出版社,1992.

Forward-back Optimization Method for Determining Construction Cable Force of Cable-stayed Bridge

Fu Qiang, Li Yanqiang

(Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Taking a single tower cable-stayed bridge test model as research object, the forward-back optimization method to determine construction cable force of cable-stayed bridge is proposed in this paper. According to the construction steps, the forward optimization analysis is done firstly for a cable-stayed bridge in this method and the back analysis is executed secondly and the basic cable forces are obtained. At last, the forward iterative analysis is finished to gain the construction cable forces and the elevation of the main girder. The disadvantages such as nonlinear analysis of shrinkage and creep in concrete in the traditional back method can be avoided easily, and the problems of the rationality of the cable forces in forward method are eliminated by using this method. This method has been applied successfully in a single tower cable-stayed bridge test model. The analysis results show that the method is accurate and effective and can be referenced in similar engineering projects.

Key words: forward-back optimization method; cable-stayed bridge; construction cable force

(责任编辑 车轩玉)