

# 正装迭代法求解矮塔斜拉桥初张索力研究

黄春亮

(中交通力建设股份有限公司 湖南分公司, 湖南 长沙 410009)

**摘要:** 作为一种高次超静定结构,矮塔斜拉桥的斜拉索索力随施工阶段的递进不断发生变化。文中以湖南省永州市城南大桥为工程背景,在确定其合理成桥状态后,以设计成桥索力为目标,采用正装迭代法通过计算斜拉索索力差值分析求解得出斜拉索的初始张拉索力,以满足设计精度和指导施工的需求。

**关键词:** 桥梁;矮塔斜拉桥;正装迭代法;初张索力

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2017)01-0144-03

矮塔斜拉桥以其优异的结构性能和多变的外观造型,近年来在国内 100~300 m 跨度桥梁建设中得到广泛应用。矮塔斜拉桥与常规斜拉桥一样具有明显的空间特征,但在整个结构受力体系中,斜拉索分担荷载占比不大,斜拉索大部分是一次张拉到位,不作二次调整,故选择何种方法确定斜拉索的初张索力尤为关键。

求解各施工阶段初始张拉索力的常用方法主要有正装迭代法、倒装法、无应力控制法和影响矩阵法。其中:倒装法最常用,它通过虚拟结构倒拆施工工序来反向计算各施工阶段的初始张拉索力,但在模拟施工逆过程中无法计入材料的非线性、砼的收缩徐变、结构约束条件的变化等影响;无应力状态法和倒拆法类似,结构内力不闭合的问题没有得到有效控制,依然存在;影响矩阵法不满足弹性叠加的原理,求解精度稍差;正装迭代法能模拟矮塔斜拉桥实际施工加载的过程,克服上述方法的不足,利用最小二乘法原理,通过索力差值迭代,得到与设计桥梁最终状态相对应的斜拉索初始张拉索力。

## 1 正装迭代法的原理

正装迭代法以桥梁结构预设的合理成桥状态下的最终索力值  $\{F\}$  为设计目标,计算原理清晰、简单,能将不确定因素对整体计算分析过程的影响降到最低,将各施工阶段的结构受力状态较为真实地模拟出来,便于实际工程操作应用。

通过拟定的一组施工阶段初始张拉索力值  $\{T\}$ ,按照正装工序施工至成桥状态,得到一组新的成桥索力  $\{F_n\}$ ;将新的成桥索力  $\{F_n\}$  和控制目标索力  $\{F\}$  比较,得到其差值变量  $\{X\} = \{F_n\} - \{F\}$ 。

为了将成桥索力与目标索力的差值收敛到合理范围,利用最小二乘法原理进行控制参数匹配拟合。将控制参数差值变量  $\{X\}$  带入  $\{\Delta T\} = \{T\} - \{X\}$ ,得出修正后的初始张拉索力  $\{\Delta T\}$ ,再将  $\{\Delta T\}$  重新带入正装施工分析中进行下一轮迭代计算。重复上述步骤进行循环计算,直到各次迭代控制精度变化趋于平缓,并满足  $\{X\}/\{\Delta T\} \leq 0.5\%$  为止。

大量工程实践证明,为快速收敛得到初始张拉索力,初次拟定的初始张拉索力以合理成桥状态下的最终索力  $\{F\}$  为最佳,且在利用桥梁有限元软件进行正装迭代计算时,短索的精度收敛速度优于长索。因此,在下轮正装迭代分析计算中,将上轮已经在控制精度范围内的斜拉索初始张拉索力维持原索力值不作调整。

## 2 工程实例分析

### 2.1 工程概况

城南大桥(长丰二桥)是湖南省永州市对接零陵与冷水滩两区的城市主干道——城南大道上跨湘江的特大型桥梁,桥面全宽 34 m,桥梁全长 1 183.56 m。主桥为三塔中央单索面预应力砼矮塔斜拉桥,跨径布置为(70+120+120+70) m。10<sup>#</sup>桥墩采用塔、梁、墩固结体系,8<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>、11<sup>#</sup>、12<sup>#</sup>桥墩采用塔梁固结、墩梁分离的结构体系。设计汽车荷载等级为城-A 级。桥梁总体布置见图 1。

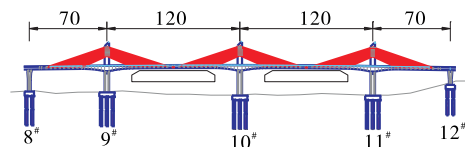


图 1 城南大桥主桥布置示意图(单位:m)

主桥桥塔塔高均为 21 m,采用实心矩形独柱式截面。主桥每座桥塔布设 18 对规格为  $43\phi_s 15.2$  斜拉索,全桥共设 54 对,均采用单索面双排索在索塔上部呈扇形布置,搭配单根可换式分丝管鞍座抗滑锚固鞍座。斜拉索布置见图 2。

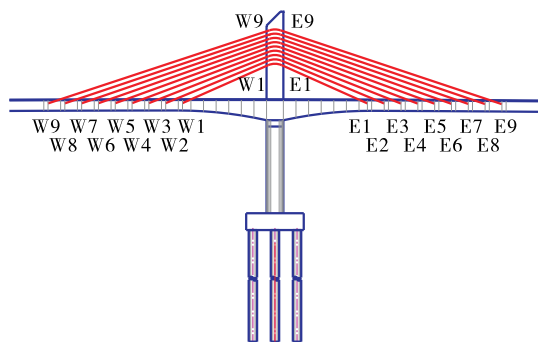


图 2 城南大桥斜拉索体系布置示意图

主梁采用变高度、直腹板单箱五室整幅式预应力钢筋砼箱梁。箱梁顶板与桥面同宽,均为 34 m,标准梁段长 4 m。主墩采用圆端形空心花瓶墩配承台桩基础。

2.2 结构有限元分析

采用 MIDAS/Civil 按设计施工工序建立该桥三维空间模型进行模拟正装迭代分析,结构材料、永久作用、可变作用、偶然作用均按现行规范取值。建模过程中,除斜拉索采用桁架单元模拟外,其余结构均采用梁单元模拟。整个模型共设置 602 个节点、499 个单元,其中桁架单元 108 个、梁单元 391 个。主桥划分为 22 个施工阶段(见表 1)。

表 1 主桥施工顺序

施工阶段	施工内容	工序时间/d
1	施工桩基、承台、桥墩	120
2	施工 0# 块、墩梁临时固结、桥塔	60
3	悬浇 1# 块	10
4	悬浇 2# 块	10
5	悬浇 3# 块	10
6	悬浇 4# 块	10
7	悬浇 5# 块	10
8	悬浇 6# 块,张拉 1# 拉索	10
9	悬浇 7# 块,张拉 2# 拉索	10
10	悬浇 8# 块,张拉 3# 拉索	10
11	悬浇 9# 块,张拉 4# 拉索	10
12	悬浇 10# 块,张拉 5# 拉索	10
13	悬浇 11# 块,张拉 6# 拉索	10
14	悬浇 12# 块,张拉 7# 拉索	10

续表 1

施工阶段	施工内容	工序时间/d
15	悬浇 13# 块,张拉 8# 拉索	10
16	悬浇 14# 块,张拉 9# 拉索	10
17	悬浇 15# 块、边跨支架现浇段	10
18	吊架浇筑边跨合龙段	10
19	中跨合龙吊架	10
20	吊架浇筑中跨合龙段	10
21	施工桥面系、附属工程	30
22	成桥运营	3 650

该桥主塔采用爬模或翻模施工;主梁 0# 块梁段采用在主墩附近搭设临时支架施工,1# ~ 15# 块梁段采用对称挂篮悬浇施工,边跨现浇段采用搭设满堂支架施工,中、边跨合龙段采用吊架施工。悬浇挂篮及模板重量按 1 000 kN 计算。正装主要节点施工阶段模拟见图 3。

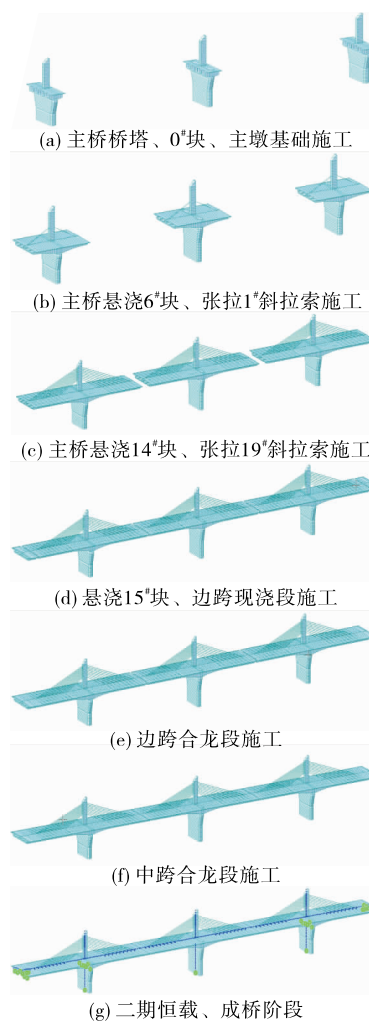


图 3 正装主要节点施工阶段模拟

由于矮塔斜拉桥主梁箱室内配有大量预应力钢束,斜拉索仅作为辅助结构用于改善桥塔及主梁的受力状态,以塔、梁的应力、位移和索、梁受力分担比列作为结构控制参数,通过将最小弯曲应变能法与零位移法组合搭配,求解得出在合理成桥状态下的斜拉索力(见图4)。从中可见,合理成桥状态下斜拉索力呈现短索索力小、长索索力大、索力均匀变化的趋势。

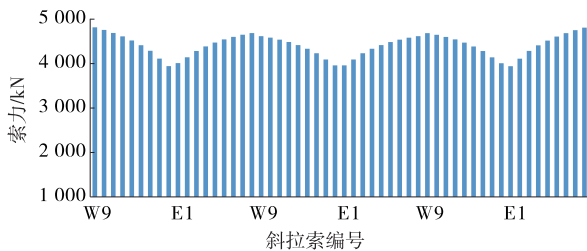


图4 设计成桥索力

### 2.3 结果分析

根据正装迭代法的原理,在已知成桥索力、塔梁内力的条件下,正装分析按照主桥拟定的施工工序进行模拟,收敛差值变量,求解得到斜拉索在各施工阶段的初始张拉力。

#### 2.3.1 正装迭代分析计算

各次迭代数据见图5。由图5可知:进行到第5次索力正装分析时,迭代成桥索力与目标索力的差值变化幅度逐渐趋于平稳;经过7轮正装迭代分析后,索力精度为0.2%,迭代成桥索力与目标索力的差值小于1 kN,误差在合理范围内。

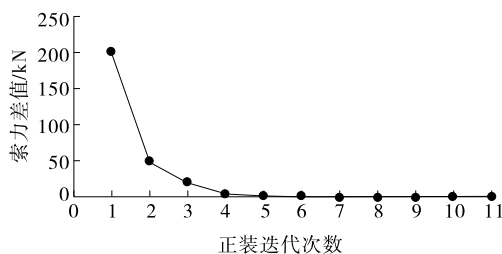


图5 成桥索力差值迭代收敛图

#### 2.3.2 斜拉索初始张拉力计算

9#、10#、11# 桥塔处斜拉索的初始张拉力计算结果见表2。由表2可知:通过11轮分析计算,迭代成桥索力与设计目标索力的差值趋近于零,已完全满足设计和指导施工的要求。

#### 2.3.3 成桥状态匹配分析

将正装迭代法求解得到的斜拉索初始张拉力带入正装施工分析模型中再次进行分析计算,所得

表2 斜拉索初始张拉力计算结果

斜拉索编号	斜拉索初张力/kN	斜拉索编号	斜拉索初张力/kN
W1/E1	4 350/4 350	W6/E6	4 350/4 350
W2/E2	4 350/4 350	W7/E7	4 350/4 350
W3/E3	4 350/4 350	W8/E8	4 350/4 350
W4/E4	4 350/4 350	W9/E9	4 350/4 350
W5/E5	4 350/4 350		

成桥状态下的斜拉索索力、拉索安全系数、桥塔和主梁内力、位移变形等数据均与合理成桥状态下的设计目标数据相吻合。可见,通过正装迭代法求解的斜拉索初始张拉力在施工阶段的应用是合理的。

### 3 结语

采用正装迭代法求解矮塔斜拉桥的初始张拉力,不仅能充分利用现有桥梁有限元结构分析软件的计算性能,不需重新建立倒拆分析模型或编写专用程序,减少工作时间,便于提高设计效率,且具有索力收敛匹配速度快、精度高的特点。正装分析中考虑了实际施工过程中的荷载加载顺序、材料的非线性变形、边界约束条件的不断变换等控制因素,与实际工程施工状态高度吻合,是一种精准、科学、高效地控制斜拉索索力和设计计算初始张拉力的理论方法。

#### 参考文献:

- [1] 颜东煌,刘光栋.确定斜拉桥合理施工状态的正装迭代法[J].中国公路学报,1999,12(2).
- [2] 李启乾,李光波,邬晓光.结合影响矩阵的正装迭代法在优化施工索力中的应用[J].交通标准化,2008(4).
- [3] JTG D62—2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土设计规范[S].
- [4] JTG/T D65—01—2007,公路斜拉桥设计细则[S].
- [5] 林桢楷.差值法确定矮塔斜拉桥的初张索力[J].科学技术与工程,2010(16).
- [6] 杜蓬娟,张哲,谭素杰,等.斜拉桥施工阶段索力确定的优化方法[J].大连民族学院学报,2006(5).
- [7] 梁志广,李建中,石现峰.斜拉桥施工初始索力的确定[J].工程力学,2000,17(3).
- [8] 张元凯,肖汝诚.基于正装迭代法的斜拉桥合理索力优化方法[A].第十七届全国桥梁学术会议论文集(下册)[C].2006.