

复杂空间多段索异形塔斜拉桥施工阶段索力计算

董宇航¹, 周迅¹, 罗书舟¹, 孙仕¹, 林阳², 李龙刚¹

(1.中国市政工程中南设计研究总院有限公司,湖北 武汉 430010; 2.中交第二公路勘察设计研究院有限公司,湖北 武汉 430000)

摘要:复杂空间多段索异形塔斜拉桥的造型奇特、结构复杂,由于空间多段索的相互影响,施工阶段索力求解一直是该类桥梁设计施工的重难点,为了解决该问题,以随州市灞水一桥的主桥为工程背景,结合基于差值法的正装迭代法,应用MIDAS Civil有限元分析软件,建立全桥施工阶段模型并计算分析。结果表明,运用基于差值法的正装迭代法计算的成桥索力值与设计索力值最大误差值为0.3%符合计算精度要求,且张拉过程中索力值均在设计范围内。

关键词:斜拉桥;施工阶段;索力计算;差值法;空间多段索

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)03-0068-04

0 引言

斜拉桥的施工方法有许多种,不管采用何种施工方法,最终的目标是使斜拉桥达到合理成桥状态。斜拉桥的施工过程一般较为繁杂,且斜拉索张拉施工无疑是全桥施工过程中的重、难点,除了施工工艺较难以控制,更为关键的是斜拉桥施工过程中索力的确定,在确定的施工工序下,只有准确的计算出斜拉桥施工过程中索力值,才能确保该桥在施工完成后达到设计索力。随着我国桥梁建设的发展,较多的学者都开展了对斜拉桥阶段索力计算的研究,颜东煌^[1]以一对称的混凝土独塔斜拉桥为例,基于最小二乘法原理,运用确定斜拉桥合理施工状态的正装迭代法,有效的解决了该桥结构非线性问题;杨焯^[2]以龟韭沟大桥,一座独塔双索面斜拉桥为例,通过差值法,解决了一次张拉斜拉桥施工阶段拉索初张力的求解问题;刘耀东^[3]以吉安市新井冈山大桥为研究对象,运用差值迭代法求解出独塔双索面斜拉桥的施工阶段初张索力;李月富^[4]以差值迭代法计算某独塔双索面埃塔斜拉桥合理施工索力,并求得不同状态参数对索力的影响。综上可知,对于简单索面的常规桥塔斜拉桥施工阶段索力计算方法的研究较多,而对于复杂空间多段索异形塔斜拉桥的研究较少。因此本文以一类复杂空间多段索异形塔斜拉桥为研究对象,结合基于差值法的正装迭代法,应用

MIDAS Civil有限元分析软件,建立全桥施工阶段模型并计算分析。

1 基于差值法的正装迭代法基本原理

假设需要张拉的拉索总次数 n ,首先选定一组张拉索力 $\{T_1\}$,一般可将成桥设计索力值作为 $\{T_1\}$,按已拟定的施工顺序正装计算至成桥状态,得到该状态下的成桥索力值 $\{F_1\}$ 。假定通过某种方法确定的合理成桥状态的索力值为 $\{N\}$,则计算索力值 $\{F_1\}$ 和目标索力值 $\{N\}$ 之间会存在一个差值为:

$$\{\Delta X_1\} = \{N\} - \{F_1\} \quad (1)$$

为了消除这一差值 $\{\Delta X_1\}$,在下一轮的正装分析中,使施工张拉力为:

$$\{T_2\} = \{T_1\} + \{\Delta X_1\} \quad (2)$$

以 $\{T_2\}$ 索力进行正装计算,开始第一次迭代,拉索内力在 $\{T_2\}$ 作用下计算到成桥状态时,拉索索力为 $\{F_2\}$,则 $\{F_2\}$ 与 $\{N\}$ 之间的差值为:

$$\{\Delta X_2\} = \{N\} - \{F_2\} \quad (3)$$

此时 $\{\Delta X_2\}$ 将小于 $\{\Delta X_1\}$ 。按照该方法循环迭代计算,直至结果收敛。其收敛准则为:

$$p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\Delta F_i|}{T_i} < [p] \quad (4)$$

式中: $[p]$ 一般取为0.005^[5-6]。

通过以上理论推导,差值法的基本思路可见图1。

2 工程概况

2.1 工程背景简介

本文以随州市灞水一桥的主桥为研究背景,该主

收稿日期: 2023-03-14

作者简介:董宇航(1994—),男,硕士,工程师,从事道路桥梁设计工作。

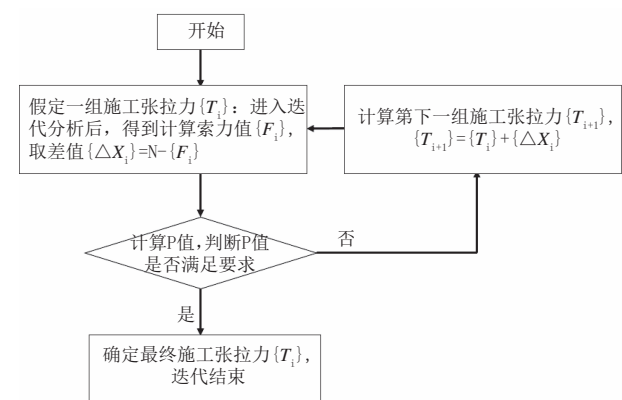


图 1 差值法流程图

桥是一座复杂空间多段索异形塔斜拉桥,全桥为钢结构,采用半漂浮体系,塔墩固结^[7-8],塔梁分离,桥塔分为主、副塔,斜拉索采用多段索布置,主梁支撑于桥墩处伸牛腿之上。主桥全长 180 m,采用 90 m+90 m 的对称双跨布置形式,桥梁立面见图 2。

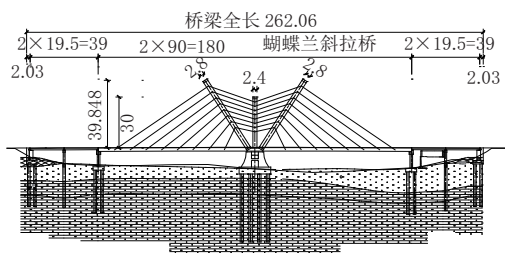


图 2 桥梁立面图(单位:m)

2.2 桥梁结构特点

灞水一桥主桥的结构特点较为突出,结合该桥主要构件设计资料,将其主要结构特点归纳如下:

(1)桥塔构造奇特。该桥采用单墩多塔的拱形桥塔结构形式,桥塔分为主塔和副塔,两侧主塔向外倾斜,对称分布,中间副塔为竖直布置,主塔与副塔由拉索连接,其根部均焊接于拱塔结合部。桥塔一般布置见图 3。

(2)拉索布置复杂。该桥斜拉索采用空间索面,在横桥向和纵桥向均对称布置,分为塔间索 T 与塔梁索 S 两类,塔间索连接主塔与副塔,塔梁索连接主塔与主梁,两类斜拉索分段布置,相互影响。拉索的布置形式见图 4。

2.3 施工过程简述

灞水一桥主桥主要施工过程可以分为下部结构施工、主梁施工、桥塔施工和斜拉索张拉施工四个阶段。由于下部结构施工方法较为常规,本节主要对该桥后三种施工方法进行简单分析。

(1)主梁焊接拼装施工

灞水一桥主桥采用先梁后塔的顺序进行施工,钢主梁采用工厂分段制作好后运输至现场进行拼装焊

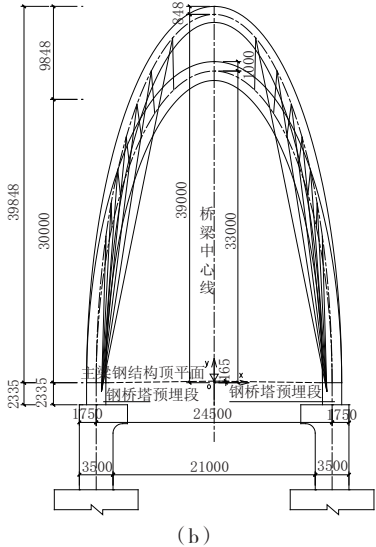
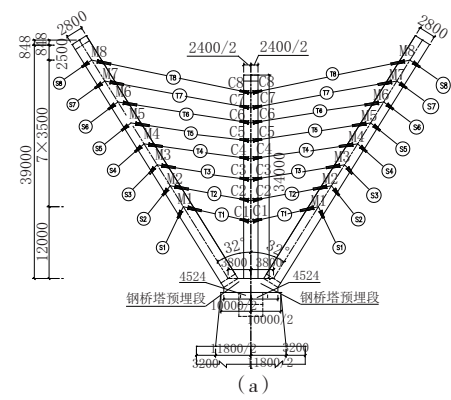


图 3 桥塔一般布置图(单位:mm)

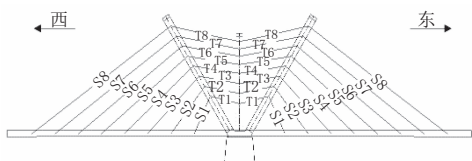


图 4 桥型布置图

接。由于主桥较宽,吊装施工难度较大,钢主梁采用钢管支架钢导轨滑移顶推施工,钢主梁在架设前,在其下搭设钢管支架并设置导轨,再将钢主梁分段接长形成滑移单元,然后开始顶推。依次组装、依次顶推、直至完成全部梁段的组装与顶推。顶推过程中,以钢主梁的底板作为上滑道,下滑道安装于钢平台之上。主梁滑移顶推施工示意图见图 5。

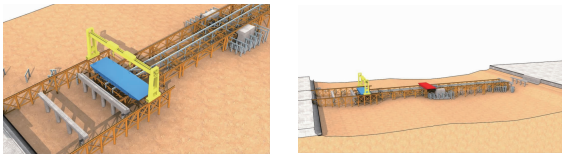


图 5 主梁滑移顶推施工示意

(2)桥塔原位吊装施工

灞水一桥主桥采用原位吊装的施工方式^[9],在钢主梁顶推到位且整体焊接完成之后进行。拱塔分为主塔和副塔,分别于工厂加工至相应节段,然后运至施工现场完成吊装焊接工作。桥塔原位吊装施工示

意见图 6

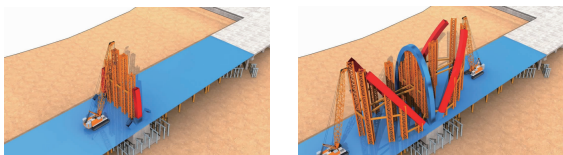


图 6 桥塔原位吊装施工示意

(3)斜拉索施工

灞水一桥主桥斜拉索挂索张拉前,主梁和主塔均落于支架上,边界条件较多,主梁和主塔受力不明确,采用一次张拉,无法准确计算出施工张拉索力。基于桥梁的结构形式和主梁、主塔的施工方式,并结合现场实际施工条件,为使主梁、主塔受力条件明确,故采用二次张拉施工方案见图 7。

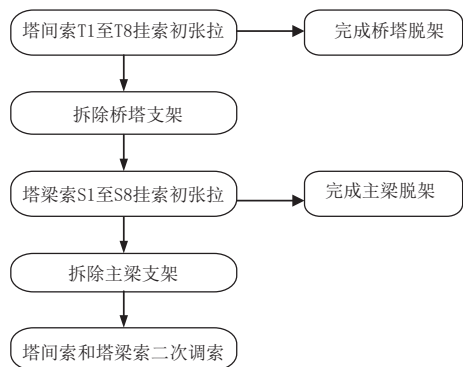


图 7 拉索张拉施工流程图

在以上拉索张拉施工方案中,首先对塔间索和塔梁索初张拉,完成下部支架脱离和拆除工作,使桥梁边界条件清晰,受力明确,其次再对两类拉索进行二次调索。二次调索采用塔间索和塔梁索依次交换张拉的方式进行。

3 有限元建模

结合灞水一桥主桥施工工序,应用 MIDAS Civil 有限元软件建立了该桥施工阶段模型。由于桥梁施工阶段索力计算仅对桥梁上部结构进行计算研究,且桩基对上部结构影响较小,故在建模分析之前做了以下假定:桥梁基础对整个结构效应不做考虑,仅模拟桥墩及以上结构^[10-12]。基于以上假定,对该桥结构进行离散,全桥共划分为 246 个单元和 232 个节点,其中梁单元 182 个,桁架单元 64 个,依据灞水一桥主桥主要施工工序,全桥共建立 39 个施工阶段,全面模拟桥梁拉索施工全过程。空间有限元模型见图 8。

4 索力计算

结合基于差值法的正装迭代法求解合理施工过程中索力的理论,现对灞水一桥主桥的施工过程中

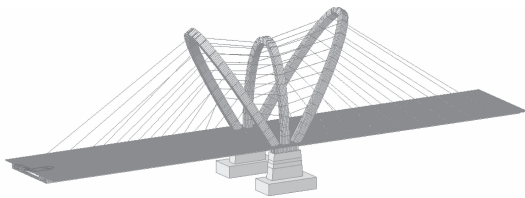


图 8 灞水一桥主桥施工阶段模型

索力进行计算分析。由于该桥拉索施工采取二次张拉的方式,故索力计算分为初张拉索力计算和终张拉索力计算两部分。

4.1 初始张拉索力计算

为了保证斜拉索在终张拉时,结构的主要边界条件为成桥边界条件,需要在终张拉之前拆除桥塔和主梁下的临时支架,故在终张拉施工之前采取初张拉的方式将桥塔和主梁拉起脱架,并且保证脱架后桥梁主要构件受力安全。能满足以上条件的初始张拉索力有许多种,本文基于以上条件,并且综合考虑塔、梁脱架后主梁二期恒载的作用效应和张拉索力分布均匀的特点,计算得一组初始张拉力值见表 1。

表 1 塔间索和塔梁索初始索力值

拉索编号	索力值 /kN	拉索编号	索力值 /kN
S ₁	1 432	T ₁	718
S ₂	1 648	T ₂	639
S ₃	1 820	T ₃	702
S ₄	1 957	T ₄	745
S ₅	2 061	T ₅	789
S ₆	2 141	T ₆	822
S ₇	2 208	T ₇	865
S ₈	2 263	T ₈	922

4.3 终张拉索力计算

将塔间索和塔梁索初始张拉索力按图 7 的施工顺序施加于有限元模型中,得到该桥脱架之后的状态。在此基础之上,运用基于差值法的正装迭代法可以快速求解出塔间索和塔梁索的终张拉索力值。

由于结构的受力状态与成桥索力一一对应,当成桥索力达到设计索力,则全桥各构件的内力状态和变形都会达到合理成桥状态。因此仅用成桥索力作为控制参数可以大大简化计算过程。为了使迭代分析能快速收敛,取目标索力作为初始索力值 $\{T_1\}$ 。根据施工阶段划分情况可知,塔间索 T₁ 至 T₈ 与塔梁索 S₁ 至 S₈ 交替张拉,终张拉过程中张拉总次数为 16 次,故 $n=16$,将初始索力值 $\{T_1\}$ 代入模型中可计算得 $\{F_1\}$,利用收敛准则公式(4)计算可得 P_1 ,并与控制精度 $[p]=0.005$ 进行比较。当不满足收敛控制精度时,便求解下一组施工张拉索力值重新新建迭代,利

用公式(1)可计算得差值 $\{\Delta X_1\}$,再利用公式(2)计算得施工张拉索力值 $\{T_2\}$,同上进行迭代计算,可求得 P_1 至 P_{10} 绘制成曲线图见图9。

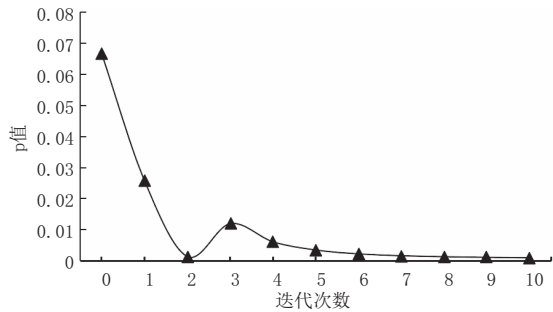


图9 前十次迭代 p 值图

通过图9可以看出,随着迭代次数增加, P 值逐渐减小,趋近于0。通过第3次迭代结果可以看出,采用基于差值法的正装迭代法,在迭代前期会出现假性收敛,因此,需要增加迭代次数,从而确保收敛值的正确性。取第10次迭代时代入计算的索力值为该桥合理施工状态的张拉索力值,故塔间索和塔梁索张拉索力值见表2。

表2 塔间索和塔梁索终张拉索力值

拉索编号	索力值/kN	拉索编号	索力值/kN
S_1	2 199	T_1	3 554
S_2	2 452	T_2	3 517
S_3	2 594	T_3	3 918
S_4	2 828	T_4	3 796
S_5	2 843	T_5	3 737
S_6	2 732	T_6	3 625
S_7	2 855	T_7	3 688
S_8	2 856	T_8	3 968

将表2中塔间索和塔梁索终张拉索力值施加于有限元模型中,通过正装计算可得成桥状态下的索力计算值,将该索力计算值与设计索力值进行对比,对比结果见表3。

通过表3中可看出,将复杂空间多段索异形塔斜拉桥运用基于差值法的正装迭代法计算得到得施工过程中的张拉索力值进行正装计算,得到的成桥索力计算值与成桥设计索力值基本相当,最大误差值为0.3%,符合计算和施工精度要求。

5 结 语

(1)灞水一桥主桥的计算成桥索力值与设计索力值基本相当,最大误差为0.3%,符合计算精度要求。表明应用基于差值法的正装迭代法可以解决复杂空间多段索异形塔斜拉桥的施工过程中索力求解问题。

表3 成桥索力计算值与设计索力值对比表

拉索编号	计算索力值/kN	设计索力值/kN	误差值
S_1	1 922	1 927	-0.003
S_2	2 083	2 087	-0.002
S_3	2 188	2 191	-0.002
S_4	2 428	2 431	-0.001
S_5	2 556	2 558	-0.001
S_6	2 563	2 565	-0.001
S_7	2 792	2 793	0.000
S_8	2 862	2 863	0.000
T_1	2 754	2 752	0.001
T_2	2 745	2 742	0.001
T_3	3 110	3 107	0.001
T_4	3 279	3 276	0.001
T_5	3 518	3 515	0.001
T_6	3 641	3 638	0.001
T_7	3 825	3 822	0.001
T_8	3 966	3 966	0.000

(2)基于差值法的正装迭代法应用于复杂空间多段索异形塔斜拉桥的施工过程中索力求解,计算过程简便,结果收敛速度快。

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): 61-66 .
[2] 杨焯,周水兴.斜拉桥施工阶段初张索力计算方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(1): 32-36.
[3] 刘耀东,聂闯,唐齐.基于差值迭代法的斜拉桥初张索力计算方法[J].湖北工业大学学报,2018,33(1):98-100.
[4] 李月富,张清旭,宁晓骏,等.基于差值迭代法的矮塔斜拉桥施工索力计算和影响因素研究[J].工业安全与环保,2022,48(5):82-86.
[5] Chen D W. Determination of initial cable forces in prestressed concrete cable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibrium method [J]. Computers & Structures, 2000, 74(1): 1-9.
[6] 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.
[7] 董宇航,张谢东,郭子会,等.蝴蝶兰异形拱塔斜拉桥受力研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(3):520-524.
[8] 曹强凤,张仲勇.塔梁固结体系斜拉桥索力温度效应分析与研究[J].公路,2022(6):146-150.
[9] 孙靖雨.斜塔斜拉桥原位节段吊装施工技术[J].北方交通,2022,67(6):146-150.
[10] 刘梦伟.双拱塔斜拉桥结构分析与参数优化研究[D].西安:长安大学,2016.
[11] 刘桂良.某异形独塔斜拉桥的力学性能分析[D].大连:大连理工大学,2015.
[12] 李忠三,雷俊卿,林道锦.多塔斜拉桥力学特性分析[J].世界桥梁,2014,42(1):40-44.