

独塔钢斜拉桥成桥索力及施工索力计算分析

孙朝辉

[林同棧国际工程咨询(中国)有限公司武汉分公司,湖北 武汉 430020]

摘 要:以某单塔中央双索面钢斜拉桥为研究背景,采用 MIDAS Civil 有限元程序进行建模计算,采用恒载平衡法初步拟定成桥索力,根据设置的控制目标,以初拟索力为基础进行多次调整以达到预期的成桥状态从而求得合理成桥索力。采用正装迭代法对斜拉索施工阶段进行模拟,经过多次迭代计算,得到施工索力。结果表明,成桥索力较为合理,按照施工索力能够满足斜拉桥合理成桥状态要求。对独塔钢斜拉桥合理成桥索力和施工张拉索力的确定提供借鉴和参考。

关键词:独塔钢斜拉桥;索力;正装迭代法;恒载平衡法;有限元分析;桥梁设计

中图分类号:U442

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2022)10-0104-04

0 引 言

独塔斜拉桥是一种常用的斜拉桥布置方式,由于它的主孔跨径一般比双塔三跨式的主孔跨径小,因此特别适用于跨越中小河流、谷地及作为跨线桥^[1]。1981 年,我国建成了第一座独塔斜拉桥——四川金州县曾达桥,采用平转法施工。虽然独塔斜拉桥的发展稍滞后于双塔斜拉桥,但之后的发展还比较迅速。据不完全统计,我国已建独塔斜拉桥大体为斜拉桥总座数的 1/3 强^[2]。

斜拉桥是一种高次超静定结构,斜拉索的拉力对结构体系的内力分布有很大影响。恒载作用下,斜拉索作为弹性支承的同时可通过千斤顶主动施加初拉力,从而改变主梁的受力条件。活载作用时,斜拉索对主梁提供了弹性支承,使主梁相当于弹性支承的连续梁。因此,就斜拉桥而言,斜拉索的索力分析是非常重要的^[1]。

斜拉桥的计算工作通常分两步进行,合理成桥状态索力的确定和施工阶段索力的确定^[3]。颜东煌提出了以主梁应力为控制目标的斜拉桥合理成桥状态确定的分步算法和确定合理施工状态的正装迭代法^[4]。范伟强通过对独塔双索面混合梁斜拉桥的实际工程进行计算分析得出:采用最小弯曲能量法进行成桥索力优化是可行的,采用无应力状态法进行施工索力调整效果最好,其次是正装迭代法,倒拆—正装法效果最差^[3]。杨炎炎、王安东以某混合梁斜拉

桥为研究背景,利用改进的零位移法确定斜拉桥合理索力,根据正装迭代法进行施工模拟分析得到成桥状态索力值^[5]。戴杰、秦凤江等系统回顾斜拉桥成桥索力优化方法的研究进展与代表性研究成果,对各种索力优化方法的特点、适用范围、局限性进行了阐述^[6]。但是,目前对于独塔钢斜拉桥合理成桥状态索力和施工索力的研究较少。

为了了解独塔钢斜拉桥合理成桥状态索力和施工索力的分析方法,现依托青岛墨水河大桥项目,对独塔钢斜拉桥合理成桥索力和施工索力的设计计算过程进行介绍,以期对类似工程提供借鉴和参考。

1 工程概况

1.1 桥梁总体设计

墨水河大桥全长 313 m,主桥为 2×90 m 单塔中央双索面钢斜拉桥。桥梁上跨墨水河,桥梁轴线与水流方向夹角 $60^\circ \sim 76^\circ$ 。根据项目防洪评价报告要求,主墩采用圆台式桥墩,主桥过渡墩斜交布置,斜交角度分别为 67° 和 72° 。钢箱梁采用分体式箱形截面,桥梁中心线处梁高 3 m,单幅桥宽 17.25 m,联系横梁长 5 m,桥梁总宽 39.5 m。桥塔采用“人”字形钢结构塔,桥面以上塔高 48.6 m。结构体系采用塔梁墩固结体系。全桥共布置 18 对斜拉索,呈扇形布置。桥梁效果图如图 1 所示,桥梁总体布置如图 2 所示。

1.2 斜拉索设计

斜拉桥采用密索体系,对称布置 18 对共 36 根斜拉索。斜拉索采用中央双索面扇形布置,梁端间距 9 m,塔端采用不等间距布置,间距 $2.2 \sim 2.628$ m。斜

收稿日期:2022-01-16

作者简介:孙朝辉(1978—),男,本科,高级工程师,从事桥梁设计研究工作。



图 1 桥梁效果图

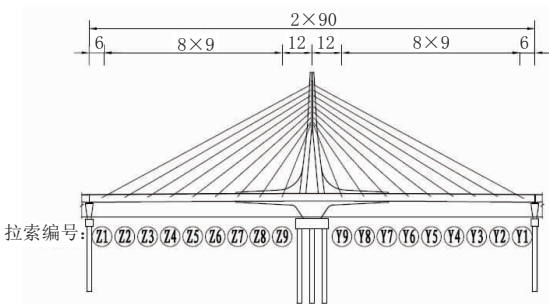


图 2 桥梁总体布置图(单位:m)

拉索采用 PES.E 7-127 环氧喷涂钢丝拉索。

1.3 施工方法

斜拉桥钢箱梁采用支架法拼装。钢塔结构采用节段吊装拼装的方法,主塔施工完后,再进行斜拉索挂设,张拉顺序为先短索后长索。

1.4 计算荷载

- (1)一期恒载:钢材容重按 78.5 kN/m³,钢塔和钢箱梁按实际截面计算。
- (2)二期恒载:包含桥面铺装、人行道板、栏杆,单幅桥合计为 50.4 kN/m。
- (3)汽车荷载:按城-A 级,横向按 6 车道布置,不同车道数组合时考虑横向折减系数。
- (4)体系温差:整体升温 37.9℃,整体降温-17.9℃。
- (5)主梁竖向温度梯度:按《城市轨道交通桥梁设计规范》(GB/T 51234—2017)第 5.2.14 条取值。
- (6)索塔梯度温度:±5℃。
- (7)构件间温差:斜拉索与主梁间温差采用±10℃。

2 合理成桥索力计算分析

2.1 计算模型

采用空间有限元软件 MIDAS Civil 进行结构静力计算,采用梁单元模拟主梁、桥塔,采用桁架单元模拟斜拉索,主梁按梁格单元进行模拟。主梁和桥塔采用刚臂连接。全桥有限元计算模型如图 3 所示。模型考虑了结构自重、二期恒载、斜拉索索力、汽车荷载等。

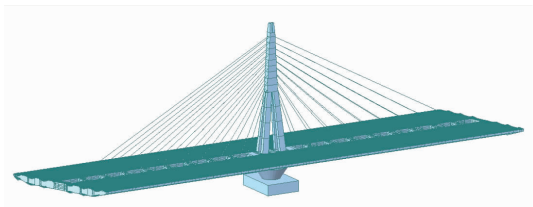


图 3 计算模型

2.2 确定合理成桥索力

确定斜拉桥合理成桥索力的方法主要包括刚性支承连续梁法、零位移法、最小弯曲能法和影响矩阵法。根据本桥的结构特点,在目前常用方法的基础上,索力采用恒载平衡法初步拟定,根据设置的控制目标,以初拟索力为基础进行多次调整索力以达到预期的成桥状态^[7]。

具体计算方法为:先计算出每根斜拉索所对应梁段长度范围内的恒载重量,再根据拉索与铅垂线的夹角关系求出每根斜拉索的索力,将其作为初始索力(见表 1)。

表 1 初始索力表

拉索编号	索力/kN	拉索编号	索力/kN
Z1	2 910	Y1	2 910
Z2	2 767	Y2	2 767
Z3	2 617	Y3	2 617
Z4	2 453	Y4	2 453
Z5	2 275	Y5	2 275
Z6	2 080	Y6	2 080
Z7	1 877	Y7	1 877
Z8	1 675	Y8	1 675
Z9	1 491	Y9	1 491

在初始索力状态下,桥梁结构的内力状态并不合理,需要对索力进行优化调整。结合本桥特点,确定合理成桥索力需考虑如下问题。

- (1)索力要分布均匀,同时要有较大的灵活性。一般情况下,长索索力大,短索索力小,呈递增趋势。
- (2)该桥主梁刚度较大,主塔刚度较小,可按“强梁弱塔”的思路进行设计,适当减小索力。控制主梁、主塔变形在合理的限值内,构件应力满足设计要求。
- (3)保证主塔在恒载作用下不发生偏位,即主塔两侧索力对称。
- (4)边墩支座在最不利荷载组合下处于受压状态,并有一定的压力储备。

根据以上原则经过反复调整,得到合理成桥索力(见表 2)。

3 成桥状态下结构内力及变形

成桥状态下斜拉桥索力分布图如图 4 所示,由

表2 优化后合理成桥索力表

拉索编号	索力/kN	拉索编号	索力/kN
Z1	813	Y1	813
Z2	855	Y2	855
Z3	1 914	Y3	1 914
Z4	2 158	Y4	2 158
Z5	2 047	Y5	2 047
Z6	1 872	Y6	1 872
Z7	1 791	Y7	1 791
Z8	1 691	Y8	1 691
Z9	1 506	Y9	1 506

图4可知,除端部2根拉索因为调整梁端支座反力的需要数值较小外,其他索力分布较为均匀。

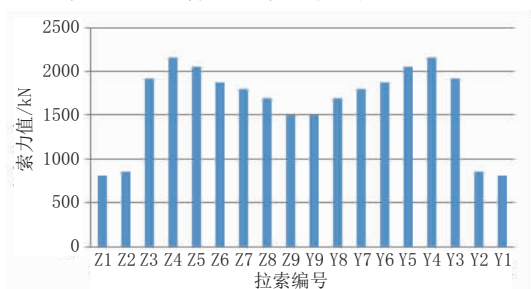


图4 成桥状态斜拉索索力

根据表2索力建立一次落架成桥计算模型,可得到成桥状态下结构内力及变形情况。如图5~8所示。基本组合最小支座反力如图9所示。

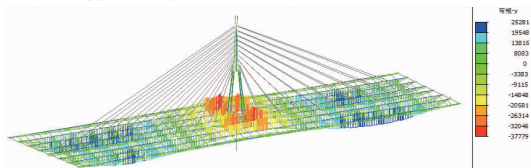


图5 成桥状态结构弯矩包络图(单位:kN·m)

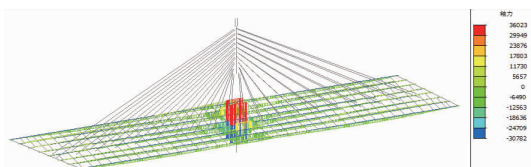


图6 成桥状态纵梁轴力图(单位:kN)

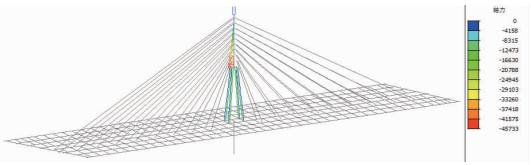


图7 成桥状态钢塔轴力图(单位:kN)

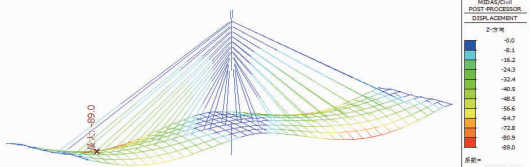


图8 活载作用下主梁位移包络图(单位:mm)

根据图5~9可知:

(1)主梁轴力主要由斜拉索产生,因此主梁轴力

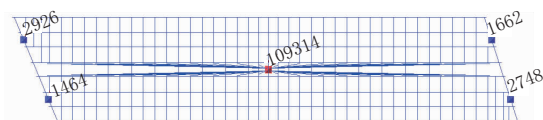


图9 基本组合最小支座反力图(单位:kN)

由两侧到主塔逐步增大。

(2)活载作用下,主梁最大竖向位移为89 mm。塔顶纵向位移为12 mm,结构刚度满足规范^[8]要求。

(3)边墩支座最小反力为1 464 kN,支座始终处于受压状态。

(4)根据验算,主塔、主梁应力均满足规范要求。

故该斜拉桥在成桥状态下结构受力较为合理,基本达到了设计目标。

4 施工索力计算分析

4.1 确定施工索力的方法

施工索力求解的方法通常包括倒拆法、正装-倒拆迭代法、无应力状态法、正装迭代法。本文采用正装迭代法进行求解。该方法的基本步骤如下:

(1)先假定一个张拉索力,以此为初始状态进行正装计算,得到一个成桥状态;

(2)将该成桥状态与事先确定的合理成桥状态比较,求出差值。利用索力影响矩阵,根据最小二乘法原理,通过使两个成桥状态的控制量差值最小来计算索力的调整量,得到新的索力;

(3)再进行新一轮正装计算,直至收敛为止。

4.2 施工阶段划分

根据桥梁施工方案划分施工阶段,该桥有限元模型共分为13个计算阶段。施工阶段划分见表3。

表3 施工阶段划分

施工阶段号	施工内容
1	主梁施工
2	主塔施工
3	张拉斜拉索 Z9、Y9
4	张拉斜拉索 Z8、Y8
5	张拉斜拉索 Z7、Y7
6	张拉斜拉索 Z6、Y6
7	张拉斜拉索 Z5、Y5
8	张拉斜拉索 Z4、Y4
9	张拉斜拉索 Z3、Y3
10	张拉斜拉索 Z2、Y2
11	张拉斜拉索 Z1、Y1
12	拆除临时支架
13	施工桥面铺装护栏等附属设施

4.3 施工索力的确定

第一次正装计算的索力选取灵活性很大,但采用合理成桥状态的恒载索力会减小迭代次数,较为

理想^[4]。该桥以合理成桥状态索力作为第一次正装计算的索力,根据正装迭代法,通过计算分析得到合理成桥状态下的索力值。正装迭代计算索力见表 4。得到的成桥索力与合理成桥状态索力进行比较,随着迭代次数的增加,误差越来越小。经过 3 次迭代计算后,施工索力趋于收敛(见表 5),由表 5 可知计算成桥索力和合理成桥索力最大绝对误差为 26 kN,相对误差仅为 1.4%。综上所述,按照上述施工工序和索力值进行张拉,可以使该桥的成桥索力状态满足设计要求。

表 4 正装迭代计算索力

拉索编号	初始索力 /kN	第 1 次迭代计算采用的索力 /kN	第 2 次迭代计算采用的索力 /kN	第 3 次迭代计算采用的索力 /kN
Z1	813	766	762	763
Z2	855	682	683	687
Z3	1 914	1 606	1 610	1 617
Z4	2 158	1 722	1 757	1 771
Z5	2 047	1 514	1 558	1 576
Z6	1 872	1 299	1 327	1 347
Z7	1 791	1 267	1 313	1 331
Z8	1 691	1 334	1 454	1 469
Z9	1 506	1 420	1 604	1 615
Y9	1 506	1 400	1 582	1 594
Y8	1 691	1 285	1 401	1 418
Y7	1 791	1 210	1 251	1 271
Y6	1 872	1 240	1 265	1 286
Y5	2 047	1 459	1 502	1 521
Y4	2 158	1 673	1 709	1 722
Y3	1 914	1 564	1 568	1 575
Y2	855	649	648	652
Y1	813	741	736	738

5 结 论

本文以墨水河大桥为工程背景,通过建模计算分析,确定了合理成桥状态斜拉索索力和施工索力。并得出以下结论:

(1)合理成桥索力采用恒载平衡法初步拟定,根据设置的控制目标,以初拟索力为基础进行多次调整索力以达到预期的成桥状态从而求得合理成桥索力。

表 5 第 3 次迭代计算施工索力

拉索编号	计算成桥索力 /kN	合理成桥索力 /kN	差值 /kN	误差
Z1	811	813	-1	-0.2%
Z2	850	855	-5	-0.6%
Z3	1 903	1 914	-11	-0.6%
Z4	2 141	2 158	-17	-0.8%
Z5	2 024	2 047	-24	-1.1%
Z6	1 846	1 872	-26	-1.4%
Z7	1 767	1 791	-24	-1.3%
Z8	1 674	1 691	-17	-1.0%
Z9	1 500	1 506	-6	-0.4%
Y9	1 500	1 506	-5	-0.4%
Y8	1 676	1 691	-15	-0.9%
Y7	1 768	1 791	-22	-1.2%
Y6	1 847	1 872	-25	-1.3%
Y5	2 025	2 047	-23	-1.1%
Y4	2 140	2 158	-18	-0.8%
Y3	1 903	1 914	-11	-0.6%
Y2	849	855	-6	-0.7%
Y1	812	813	-1	-0.1%

(2)施工索力采用正装迭代法进行求解,以合理成桥状态索力作为第一次正装计算的索力,经过多次迭代计算,施工索力趋于收敛,从而得到施工索力。

(3)对正装计算得到的成桥状态与合理成桥状态进行比较,结果显示两者状态非常接近,为斜拉桥达到合理成桥状态提供了有效保障。

参考文献:

[1] 刘士林,王似舜.斜拉桥设计[M].北京:人民交通出版社,2006.
[2] 杨征宇,宋桂峰,楼庄鸿.我国独塔斜拉桥[J].预应力技术,2007,62(3):7-17.
[3] 范伟强.独塔曲线混合梁斜拉桥索力优化及索力调整研究[D].长沙:中南林业科技大学,2021.
[4] 颜东煌.斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D].长沙:湖南大学,2001.
[5] 杨炎炎,王安东.混合梁斜拉桥合理索力及施工索力计算分析[J].兰州工业学院学报,2021,28(3):17-20.
[6] 戴杰,秦凤江,狄谨,等.斜拉桥成桥索力优化方法研究综述[J].中国公路学报,2019,32(5):17-37.
[7] 金山.大跨度独塔混合梁斜拉桥施工控制计算分析[D].成都:西南交通大学,2018.
[8] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].