

斜拉法施工张拉模拟技术研究

段力^{1,2}, 李元松², 高学文³

(1. 武汉市规划设计有限公司, 湖北 武汉 430073; 2. 武汉工程大学 土木与建筑工程学院;
3. 中国铁建大桥工程局集团有限公司)

摘要:为解决斜拉法施工大范围分级张拉工序复杂、受桥面临时荷载影响大等实际问题,依托“先斜拉—后悬索”工艺施工的某大跨度桥梁,详细计算张拉过程中斜拉索的引出量,并利用无应力状态法和传统计算中的预应力模拟分级张拉。研究表明:影响矩阵法计算张拉引出量精度较高且操作简单;“等效温差法”和“单元生死法”以无应力索长为控制指标,张拉模拟无需参照传统方法计算各施工阶段张拉索力,同时减少桥面临时荷载移动、相邻索力调整对目标索力的影响;鉴于分级张拉中间过程的无应力索长调整量未知,直接以“体外力”模拟分级张拉避免单一调整无应力索长而反复试算;结合二者的优势,以调整无应力索长模拟张拉为主、“体外力”控制分级张拉为辅进行大范围分级张拉模拟,验证了该模拟技术的可行性与优越性。

关键词:斜拉—悬索;张拉模拟;体外力;无应力状态法

随着中国社会经济的快速发展,基础设施建设日新月异,桥梁建设技术不断提高,缆索承重桥因跨越能力突出,广泛应用于跨越河流峡谷及近海工程。以缆索为主要受力构件的柔性结构,其优点在于调整索力可改善结构的受力状态,使其受力性能指标达到最优。因此,大跨度缆索承重桥为达到理想状态需反复张拉调索,给张拉施工模拟增加巨大的难度。

当前缆索承重桥的张拉模拟技术主要有两大类:① 索力控制;② 无应力索长控制。以索力作为张拉控制指标的传统方法无法区分拉索索力被动变化(外部因素)与主动变化(调整索长)带来的影响,也很难实现对桥面临时荷载、温差等外部因素的严格控制,因此大范围调索实现起来较困难;无应力状态法以无应力

索长作为控制指标,可减少外部因素对目标索力的影响,很好地弥补了上述问题而广泛应用于模拟计算。然而,实际工程多采用分级张拉,中间过程每次的无应力索长张拉量未知,且整个张拉过程中无应力索长不唯一,因此模拟计算过程繁琐。

该文基于影响矩阵法原理计算斜拉索张拉的引出量,并用等效温差和单元生死的方法结合“体外力”模拟大范围分级张拉。通过工程实例论证以调整无应力索长模拟张拉为主、“体外力”模拟分级张拉为辅技术的可行性与优越性。结合二者的优势,既可避免施工中临时荷载、温差等外部因素对目标索力的影响,同时便于计算分级张拉不同级别索力对应的无应力长度改变量。

[5] 陈志军,刘洋,杨立飞,等.基于粒子群优化算法的独塔斜拉桥成桥索力优化[J].桥梁建设,2016(3).

[6] 李鸿波,祝孝成.基于量子粒子群算法的矮塔斜拉桥索力优化[J].公路交通科技,2017(8).

[7] 李爱国,覃征,鲍复民,等.粒子群优化算法[J].计算机工程与应用,2002(21).

[8] 颜东煌,李学文,刘光栋.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(1).

[9] 周银,张雪松.基于最小弯曲能的结合梁斜拉桥恒载索力优化计算方法[J].中外公路,2018(4).

[10] 何旭辉,杨贤康,朱伟.钢桁梁斜拉桥成桥索力优化的实用算法[J].铁道学报,2014(6).

[11] 汪定伟,等.智能优化方法[M].北京:高等教育出版社,2007.

[12] 张晓菲,张火明.基于连续函数优化的禁忌搜索算法[J].中国计量学院院报,2010(3).

1 工程背景

1.1 工程概况

某大跨度桥梁为双塔五跨双索面自锚式悬索桥,主桥跨径布置为(50+210+600+210+50) m,全桥共 61 对吊索;主塔为门形,东塔高 157.63 m,西塔高 151.63 m,塔顶高程均为 321.630 m。限于桥位所处地形条件的特殊性,首次将斜拉法应用于自锚式悬索桥施工。

临时斜拉桥共 64 对斜拉索,平行索面按扇形布置;临时钢塔高度为 42.15 m。全桥主梁为钢—混组合梁,标准节段为加劲钢箱梁,边跨锚固段采用预应力混凝土箱梁结构。

1.2 斜拉法施工

斜拉桥结构是施工过程中的临时过渡结构,但斜拉桥目标线形的确定是体系转换的关键。

斜拉法“先梁后缆”的特点,主缆空缆状态与成桥状态竖向高差大(约 5.0 m),直接进行体系转换需要大量的接长杆且张拉力大。综合考虑经济性与安全性,补张斜拉索提升主梁线形至二期恒载位置(约 1.4 m)(图 1),再进行吊杆张拉完成体系转换。施工方案如下:

(1) 边跨顶推施工,利用临时钢塔和斜拉索悬拼中跨钢箱梁。斜拉桥合龙后,补张斜拉索提升主梁 1.4 m。

(2) 架设主缆、安装索夹吊索进行张拉;体系转换完成后拆除斜拉索及临时钢塔。

(3) 施工桥面系,安装附属设施悬索桥成桥(图 2)。

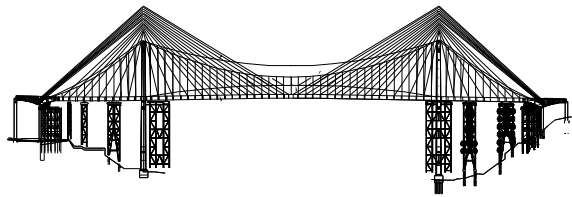


图 1 主梁目标线形(提升 1.4 m)

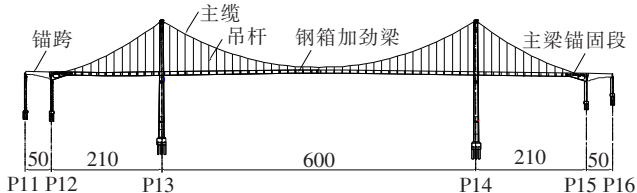


图 2 悬索桥成桥(单位:m)

2 计算模型

采用有限元软件 Midas/Civil 建立正装模型(图 3),计算模型由 1 050 个单元和 1 035 个节点组成。主塔和主梁采用空间梁单元模拟;斜拉索、主缆及吊索为柔性受力构件,采用只受拉索单元模拟,塔底固结;主梁两端锚固点:转角三向约束,横桥向、顺桥向自由,竖桥向约束;塔梁交点:塔梁弹性约束,纵桥向释放;索与主梁均采用刚性连接。索夹自重、桥面系铺装分别用节点荷载、均布荷载模拟。

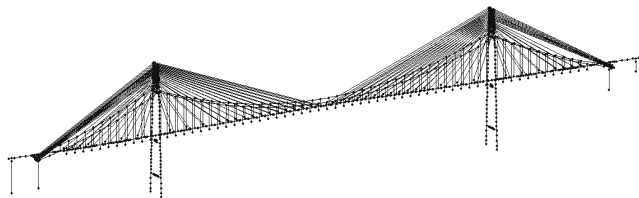


图 3 有限元模型

3 张拉引出量计算

斜拉桥成桥后拉索补张,提升主梁线形使其接近目标线形,同时要避免梁和索出现超应力的情况。利用上述有限元模型计算结构的影响矩阵,可调参数为 WM16~EM16 共 64 对拉索无应力索长,结合 Excel 规划求解功能计算斜拉索引出量。

3.1 基本思想

(1) 采用 Midas/Civil 未知荷载系数法进行成桥分析,计算主梁线形与目标线形存在的偏差,进行斜拉索精调。

(2) 斜拉索引出量为被调向量,WM16~EM16 共 64 对索,被调向量为 $\{X\} = [x_1, x_2, \dots, x_{64}]^T$,式中: x_i 为斜拉索引出量。

(3) 主梁顶面高程为调值向量,调值向量 $\{D\} = [d_1, d_2, \dots, d_{64}]^T$,式中: d_i 为主梁高程偏差。

(4) 被调向量 $\{X\}$ 中第 i 个元素改变单位量,引起调值向量 $\{D\}$ 的变化量即为影响矩阵 $[A]$ 。结构响应方程: $[A]\{X\} = \{D\}$,问题归结为已知影响矩阵 $[A]$ 和调整向量 $\{D\}$,求解斜拉索的引出量 x_i 。

引出量求解流程见图 4。

3.2 实际算例

边跨锚固段为预应力混凝土箱梁,自重大,荷载集中在锚跨支架及边跨支墩上,整个张拉过程对边跨线形的影响很小。主梁线形与目标线形存在的偏差:

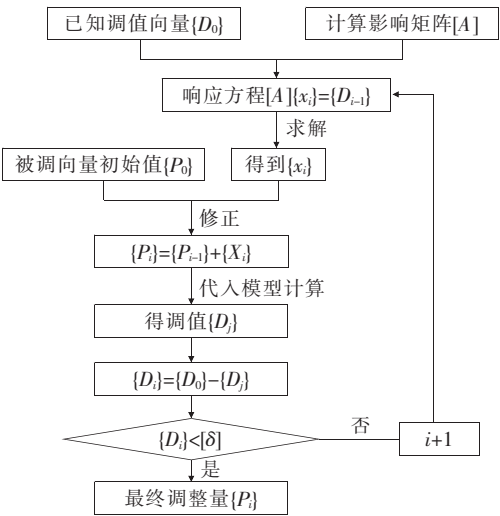


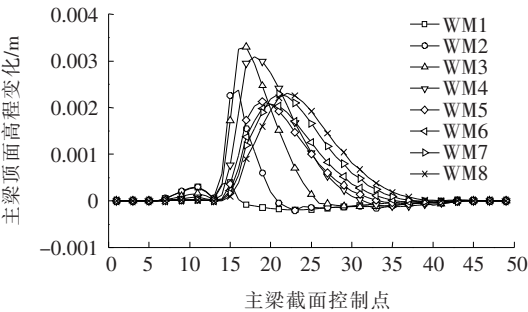
图4 引出量求解流程

$\{D\} = \{ \dots, -0.083, -0.094, -0.099, -0.104, -0.108, -0.115, -0.117, -0.118, -0.119, -0.119, -0.118, -0.116, -0.114, -0.111, -0.107, -0.103, -0.099, -0.094,$

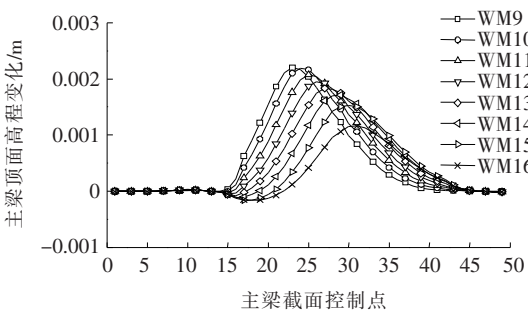
$-0.089, \dots \}$ 。
在保证其他斜拉索无应力索长不变的前提下,调整第1对索单位索长0.01 m,计算主梁顶面各点高程影响向量:
 $\{A_1\} = \{ \dots, 0.00005, 0.00013, 0.00020, 0.00026, 0.00029, 0.00002, 0.00006, 0.00036, 0.00040, 0.00003, 0.00008, 0.00011, 0.00014, \dots \}$ 。

以W岸中跨16对索为例,引出量0.01 m引起主梁顶面各点高程的变化曲线如图5所示。

以同样的方式,依次调整计算模型中64对索,得到64个影响向量 $[A]=[\{A_1\}, \{A_2\}, \dots, \{A_{64}\}]$,即为影响矩阵。结构响应方程 $[A]\{X\}=\{D\}$ 结合Excel规划求解功能,求解被调向量 $\{X\}$ 后,修正模型中原索无应力长度重新计算,得到主梁高程的调整量。大跨度柔性结构受几何非线性的影响显著,参照图4流程多次迭代计算。最终提升主梁至目标线形的计算索力与设计索力的相对误差不超过4%(表1),确定斜拉引出量后进行张拉过程的模拟计算。



(a) WM1-WM8 斜拉索



(b) WM9-WM16 斜拉索

图5 主梁顶面高程变化曲线

表1 斜拉索张拉索力

索编号	设计索力/kN	计算索力/kN	误差/%	索编号	设计索力/kN	计算索力/kN	误差/%
WM1	4 201	4 098	2.45	EM1	4 328	4 285	1.01
WM2	6 468	6 381	1.35	EM2	6 130	6 144	0.24
WM3	6 214	6 199	0.24	EM3	6 717	6 915	2.94
WM4	6 454	6 433	0.32	EM4	5 881	5 886	0.09
WM5	4 489	4 394	2.12	EM5	4 227	4 169	1.37
WM6	4 329	4 227	2.36	EM6	4 328	4 257	1.65
WM7	4 853	4 777	1.58	EM7	4 551	4 500	1.13
WM8	4 895	4 835	1.23	EM8	4 865	4 810	1.13
WM9	4 864	4 803	1.24	EM9	4 708	4 640	1.46
WM10	5 183	5 126	1.09	EM10	4 971	4 902	1.38
WM11	5 391	5 304	1.62	EM11	5 221	5 139	1.57
WM12	5 879	5 815	1.10	EM12	5 812	5 732	1.37

续表 1

索编号	设计索力/kN	计算索力/kN	误差/%	索编号	设计索力/kN	计算索力/kN	误差/%
WM13	6 419	6 320	1.54	EM13	6 296	6 200	1.52
WM14	6 764	6 677	1.28	EM14	6 577	6 590	0.19
WM15	6 765	6 656	1.61	EM15	6 452	6 387	1.00
WM16	5 975	6 004	0.49	EM16	5 623	5 670	0.84

3.3 张拉方案

考虑到成桥后临时结构便于拆除,临时斜拉索采用耳板式索梁锚固(图 6),因此拉索只能在塔端张拉。虽然斜拉索是该桥施工过程中的临时过渡结构,但在斜拉索张拉过程中仍需满足最基本要求:① 加劲梁弯矩合理,在可行域范围内;② 临时塔塔底弯矩在允许范围内;③ 斜拉索始终保持紧绷,且索力不超限。



图 6 耳板式索梁锚固(塔端锚头张拉)

张拉方案:以合龙后线形为基础,调整1#~16#

斜拉索索力使主梁接近目标线形,依次从主塔向跨中对称张拉,在满足上述基本要求的情况下尽可能一次张拉到位,对于部分斜拉索索力超限则分级张拉。经计算依次对 1#~16# 索补张,随后二次补张 2#~4# 索完成终张。得到斜拉索引出量见表 2。

4 张拉模拟方法

4.1 等效温差法

温差的改变会导致温度应变的产生从而改变拉索的张力,利用斜拉索的张拉过程与索单元降温在力学状态上存在对应的关系,即张拉某一根斜拉索使索力由 F_1 调整到 F_2 的过程,等效于该索的虚拟温度由 T_1 变化为 T_2 的过程。

表 2 斜拉索引出量

单位:m

第 1# 索(一次张拉)	第 2# 索(需补张拉)	第 3# 索(需补张拉)	第 4# 索(需补张拉)	第 5# 索(一次张拉)
WS1/WM1:0/0.076	WS2/WM2:0/0.099	WS3/WM3:0/0.158	WS4/WM4:0/0.167	WS5/WM5:0/0.309
EM1/ES1:0.052/0.067	EM2/ES2:0.028/0.123	EM3/ES3:0.114/0.134	EM4/ES4:0.103/0.165	EM5/ES5:0.252/0.170
第 6#~16# 索(一次张拉)	第 2# 索(补张拉)	第 3# 索(补张拉)	第 4# 索(补张拉)	
...	WS2/WM2:0/0.076	WS3/WM3:0/0.131	WS4/WM4:0/0.120	
	EM2/ES2:0.076/0	EM3/ES3:0.131/0	EM4/ES4:0.115/0	

温度荷载: $\Delta T = \Delta L / \alpha \times L_0$ 。(1)
式中: ΔL 为每次张拉斜拉索时的拔出量; L_0 为单元初始状态下无应力的长度; α 为线膨胀系数,一般斜拉索取 $1.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$; ΔT 为单元的等效温差。

张拉模拟赋予索单元温度荷载即可,温度的取值只是一个数学目标,最终还是通过索单元降温将其建模长度调整至无应力索长所对应的状态。以跨中 WM3 斜拉索为例,由表 2 可知:两次拔出量分别为 0.158 m/0.131 m,利用式(1)计算温差 ΔT 赋予位置 WM3 索单元 $-139 \text{ } ^\circ\text{C}/-116 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的温度荷载,在张拉阶段激活相应工况用以模拟张拉过程(图 7)。

4.2 单元生死法

张拉过程在模拟计算中也可理解为换索的过程,即不改变单元特性情况下替换无应力索长,有限元计算中采用单元生死进行处理,即对于未参与结构工作

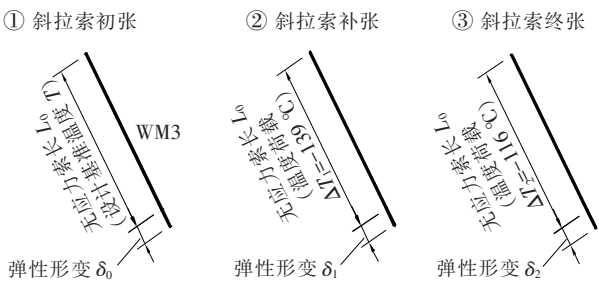


图 7 等效温差法张拉模拟

的索,将该索的刚度矩阵乘以一个很小的因子将其钝化,同时该单元的质量、内力等一切对计算有影响的参数设为 0 值。与之相反,在该索参与结构工作时,恢复该索的刚度激活矩阵索单元。

采用 Midas/Civil 定义施工阶段时利用激活一钝化功能模拟张拉。在同一位置建立多根相同特性的索

单元,模拟分级张拉激活新单元 L_1 同时钝化索前一个单元 L_0 ($L_1 < L_0$),二者无应力索长差值 $L_0 - L_1$ 即为调整量(引出量)。以跨中第 3# 斜拉索为算例,WM3 两次拔出量分别为 0.158 m/0.131 m,在 WM3 位置处建立 3 根索单元,无应力索长分别为 113.34 m (初张无应力索长 L_0)/113.182 m/(补张无应力索长 L_1)/113.051 m(成桥无应力索长 L_2),灵活运用 Maxis/Civil 施工模拟阶段中生死单元法进行张拉模拟,如图 8 所示。

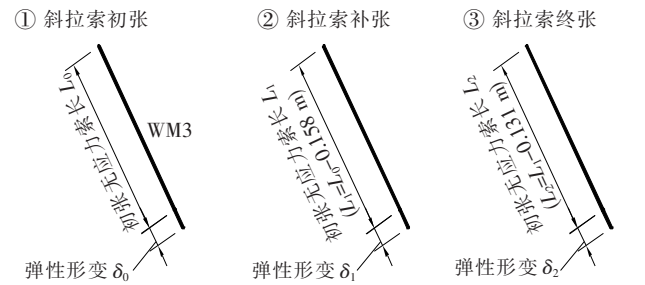


图 8 单元生死张拉模拟

4.3 体外力分级张拉

以“体外力”模拟分级张拉,主要目的是计算分级张拉对应的无应力索长。尽管成桥状态的无应力索长已知,但分级张拉中间过程每次的无应力索长调整量未知,且整个张拉过程中无应力索长不唯一。因此,如果单一使用无应力索长控制另需计算。

实际施工中分级张拉控制参数为索力,因此张拉模拟直接将分级张拉的索力以“体外力”形式赋予给索单元,反算出索力对应的无应力长度 L_1 。最后一次主动调索(到位张拉)再激活成桥状态的无应力长度 L_2 ,即可减少斜拉索初张到完成终张中间过程试算的工作量,如图 9 所示。

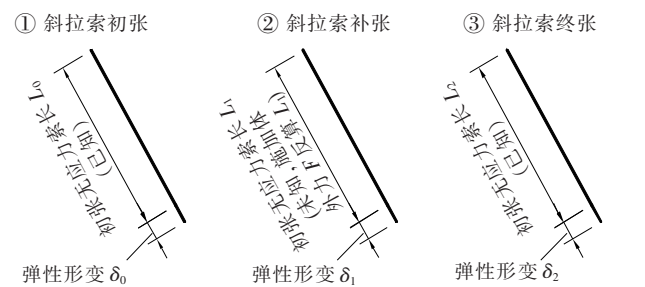


图 9 体外力张拉模拟

有限元计算常规以“初张力”模拟张拉往往默认为“体内力”。而实际施工以液压千斤顶进行锚头引出,测得索力应为“体外力”。二者区别:① 体内力:结构会因受到索力作用索协同变形,索力本身因结构变形而进一步影响索力;② 体外力:张拉前先在拉索的位置施加一对与张拉索力相同的外力,使结构预先发生

变形,因此不会影响索力的变化。该情况更符合实际施工中液压千斤顶张拉,索力作为张拉控制指标用“体外力”模拟更准确。

5 张拉模拟计算

为论证上述方法的可行性与优越性,计算中斜拉桥补张选取等效温差法模拟,后续体系转换吊索张拉用单元生死法模拟,过程中的分级张拉结合“体外力”模拟。图 10 中两组对比索力分别为斜拉索实测索力,吊索力为设计值(还未统测)。相比而言,吊索模拟直接用单元生死法效果更理想,计算索力与目标索力最大误差不超过 200 kN,误差控制在 4% 以内。斜拉桥补张完成后的线形(表 3)与现场实测结果基本吻合。

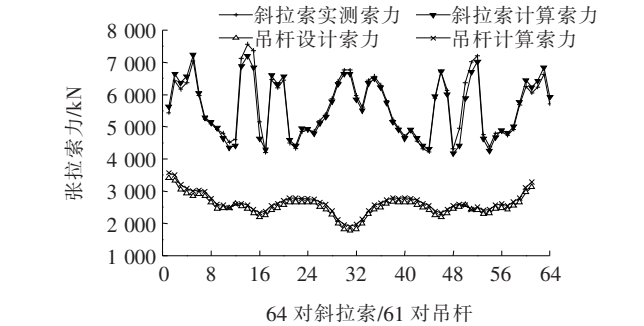


图 10 张拉模拟结果

表 3 斜拉桥补张后线形实测
(环境温度 28℃、梁体温度 31.8℃)

测点编号	主梁坐标 测量值/m	计算坐标值/ m	误差绝对值/ m
MCL	260.543 0	260.504 9	0.038
WS11	255.592 5	255.538 4	0.054
EM16	260.049 7	260.055 7	0.006
WS8	255.249 0	255.216 8	0.032
EM12	258.711 2	258.672 7	0.038
WS4	255.303 6	255.331 0	0.027
EM8	257.610 9	257.597 5	0.013
WT0	255.945 3	255.928 5	0.017
EM4	256.615 0	256.641 1	0.026
WM4	256.627 2	256.685 1	0.058
ET0	255.945 2	255.924 6	0.021
WM8	257.646 9	257.657 0	0.010
ES4	255.632 3	255.593 5	0.039
WM12	258.716 1	258.757 6	0.042
ES8	254.714 2	254.708 0	0.006
WM16	260.013 3	259.973 2	0.040
ES11	254.293 6	254.249 3	0.044

图 11~13 反映整个张拉过程中结构的响应,斜拉索索力控制为 4 000~7 000 kN、吊索力在 3 000 kN 上下波动;施工阶段钢箱梁最大应力约为 130 MPa(控制值为 265 MPa),恒载作用下钢箱梁成桥应力约为 95 MPa;前期斜拉索补张临时钢塔弯矩较大,随着后期吊索张拉钢塔内力有所改善,全过程最大弯矩约为 49 000 kN·m(控制值为 60 000 kN·m);斜拉索张拉过程中最大塔顶偏位为 10 cm,吊索张拉过程中最大塔顶偏位为 18 cm(控制值为 30 cm);主梁线形、成桥索力、塔顶偏位满足设计要求。总体而言,该张拉方案施工过程中各项安全控制指标均满足要求且具有足够的安全储备。图 11~13 中:1~19 阶段为斜拉索补张;20~37 阶段为吊索张拉;38 阶段为拆除斜拉索;39 阶段为二期铺装成桥。

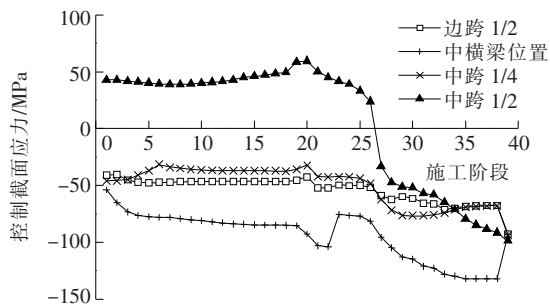


图 11 主梁控制截面应力

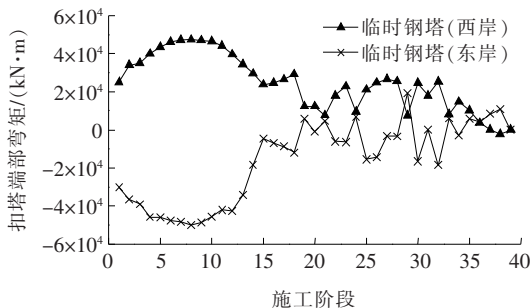


图 12 临时钢塔底弯矩

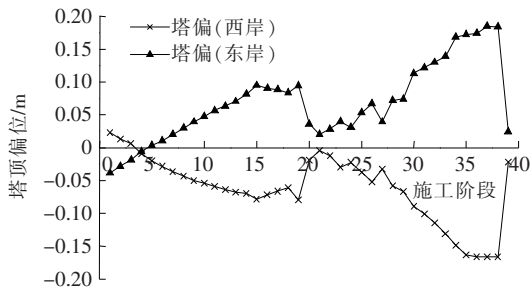


图 13 主塔顶偏位

6 结论

针对斜拉法施工大范围张拉调索工序复杂的实际问题,以等效温差和单元生死的方法结合“体外力”模拟分级张拉,有效地指导了现场施工,具有现实的工程意义。得到以下结论:

(1) 基于影响矩阵原理,计算斜拉索张拉的引出量,有效地调整了主梁线形及结构受力,该方法操作简单实用。

(2) “等效温差法”和“单元生死法”模拟张拉可提高建模计算效率。两种方法均以无应力索长作为控制指标,张拉模拟无需参照传统方法确定各施工状态下的张拉索力,同时避免桥面临时荷载移动、相邻索力调整而影响目标张拉索力。

(3) “体外力”模拟分级张拉,便于计算张拉中间过程每次的斜拉索引出量。结合“等效温差法和单元生死法”,以调整无应力索长模拟张拉为主、“体外力”控制分级张拉为辅,可精确高效地模拟张拉。

参考文献:

- [1] 周广盼,李爱群.自锚式悬索桥体系转换张拉力与标记线双控方法研究[J].中外公路,2016(6).
- [2] 祁超.大跨径自锚式悬索桥吊索张拉方案研究[D].武汉大学硕士学位论文,2017.
- [3] 刘新洲.基于正装迭代法的异形独塔钢箱梁斜拉桥计算分析[D].武汉理工大学硕士学位论文,2013.
- [4] 李枝军.独塔自锚式悬索桥吊杆张拉及其模拟方法[J].南京工业大学学报(自然科学版),2015(3).
- [5] 杜蓬娟,张哲,刘春城,等.斜拉桥索力张拉过程的最优控制[J].计算力学学报,2005(3).
- [6] 吴朴,邹黎琼.无应力长度参数正装迭代法工程应用[J].中外公路,2018(2).
- [7] 秦顺全.分阶段施工桥梁的无应力状态控制法[J].桥梁建设,2008(1).
- [8] 万淑敏.无应力状态控制法在斜拉桥并行作业中的应用[J].世界桥梁,2012(4).
- [9] 徐林,刘琪.基于无应力状态控制法的斜拉桥安装计算方法研究[J].中外公路,2019(1).
- [10] 牛登辉.自锚式悬索桥体系转换过程的无应力状态控制法[J].重庆交通大学学报,2014(1).