

基于无应力状态控制法的斜拉桥安装计算方法研究

徐林, 刘琪

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 根据无应力状态控制法的基本理论,以某斜拉桥为例,由成桥最终状态求解施工中间状态,并计算出合理成桥状态的斜拉索无应力长度,以无应力索长作为控制量进行施工正装计算,对比合理成桥状态和施工正装最终状态。结果表明:无应力状态控制法应用于斜拉桥的正装计算结果精确,能确保合理成桥目标状态的实现。

关键词: 无应力状态控制法; 无应力长度; 无应力曲率; 斜拉桥; 施工安装计算

1 前言

对于具有高次超静定特点大跨径斜拉桥而言,混凝土主梁一般采用分节段悬臂浇筑,而钢主梁一般采用悬臂拼装的施工方法。设计之初不必考虑施工过程,而是首先确定结构最终形成的合理成桥状态,然后以该成桥状态为目标来倒推各施工安装阶段理想状态,保证结构按预先拟定的施工工序成桥后,内力及线形与合理成桥状态吻合。国内外对确定斜拉桥合理成桥状态经过长期的理论研究和实践,总结的方法主要有指定受力或者位移状态的刚性支承连续梁法、弯曲能量最小法、影响矩阵法等。由于斜拉桥的内力、线形与施工过程密切相关,斜拉桥施工过程中除恒载外,还布置有用于施工的临时荷载,施工临时荷载的控制直接影响到斜拉桥最终的成桥状态,再加上混凝土的收缩徐变,使问题更加复杂。所以设计过程中的关键环节在于确定各施工阶段的拉索张力。

倒拆分析法是斜拉桥计算中的一种常用方法,该方法是一种逆序施工计算方法,以合理成桥状态为计算原点(一般以二期恒载加载完起算),按结构杆件以及拉索的安装顺序、施工临时荷载的加载顺序逐步倒

拆单元和荷载,可计算出各施工阶段的拉索力,再进行正装分析。倒拆分析法不能适应结构体系及外荷载的变化,若外荷载的加载时间、空间有变,则应重新进行倒拆—正装的循环分析直至闭合。文献[1]提出的正装迭代法脱离了对结构的倒拆计算分析工作,该方法不需要倒拆,只做正装计算。其计算原理是先任取一组自定义的控制索力,模拟完整的施工计算最后得到成桥状态,运用最小二乘法的原理使该状态与优化的合理成桥状态相差趋于最小,对施工阶段的张拉控制索力进行更新后再进行下一轮的正装计算,到收敛为止。正装迭代法在施工方案或施工临时荷载发生变化时,同样需要再次进行计算,以至于需要在后续施工过程中反复张拉斜拉索。

无应力状态控制法由秦顺全院士提出,是一种基于分阶段施工的理论方法。该方法深入研究了结构的初始状态和分阶段最终成形状态的联系,揭示了当外界条件一定时,无应力状态量(构造单元的无应力长度和无应力曲率)的变化才是最终导致结构内力、位移发生变化的原因,通过这个贯穿结构体系施工全过程并且维持不变的结构固有特性,直接求解出斜拉桥张拉到位的索力,可以处理施工阶段大量同步施工作业的问题,提高了施工效率。无应力状态控制法已运用到

- *****
- [6] 张大斌,李宇峙,张平.钢桥面铺装粘结剂的高温稳定性能[J].中外公路,2012(4).
- [7] 王建伟,沈家林,钱振东.国产环氧沥青混合料施工控制[J].东南大学学报:自然科学版,2009(6).
- [8] 陈志一.大跨径正交异性钢桥面铺装防水粘结层研究

- [D].长安大学硕士学位论文,2008(5).
- [9] 王民,高博,郝增恒.钢桥面沥青铺装压实工艺智能控制技术[J].公路,2015(4).
- [10] 王勤福,张伟.京杭运河特大桥钢桥面环氧沥青铺装设计与施工[J].交通科技,2013(10).

收稿日期:2018-03-18

作者简介:徐林,男,硕士,高级工程师,E-mail:9937965@qq.com

中国 20 多座混凝土斜拉桥、钢箱梁斜拉桥、混合梁斜拉桥和钢桁梁斜拉桥,均取得了良好的效果。

该文以一座跨径布置为 $(3 \times 75 + 820 + 300 + 100)$ m 的混合梁斜拉桥为工程背景,建立全桥有限元计算模型,采用无应力状态控制法进行施工正装计算分析,以验证无应力状态控制法在斜拉桥施工安装计算中的可行性,并提出应该注意的事项。

2 无应力状态控制法的基本原理

对于一座已经建成的斜拉桥来说,设想先将斜拉桥的所有外荷载卸载,并将其解体,斜拉桥的塔、梁、索各单元处于零应力状态,此时各单元的长度和曲率称为无应力长度和无应力曲率。如果要将解体后的结构单元重新拼装成完整的斜拉桥,只要保证塔、梁、索的无应力长度和无应力曲率与解体前相同,则无论是按塔梁同步施工,还是先塔后梁施工,塔、梁、索的施工顺序并不会影响最终的结构内力和线形。

考虑施工阶段的桥梁结构力学平衡方程如下:

$$[K]\{\delta\} = \{P\} + \{L_0\} \quad (1)$$

图 1 所示为斜拉桥施工过程中的两个工序。

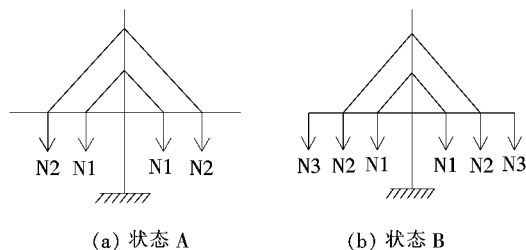


图 1 斜拉桥施工中间状态

状态 A 和状态 B 根据分阶段成形结构的力学平衡方程,图 1 结构状态 A、B 的平衡方程为:

$$[K]\{\delta_1\} = \{p_1\} + \{l_{o1}\} \quad (2)$$

$$[K]\{\delta_2\} = \{p_2\} + \{l_{o2}\} \quad (3)$$

$$[K]\{\delta_2 - \delta_1\} = \{p_2 - p_1\} + \{l_{o2} - l_{o1}\} \quad (4)$$

由式(1)的平衡方程及式(3)–(2)可以看出:分阶段施工的桥梁结构成桥时的内力和位移 $\{\delta\}$,不仅与结构所受的外荷载 $\{P\}$ 、结构的体系构成和边界条件 $[K]$ 有关,还与组成结构的单元无应力状态量(无应力曲率和无应力长度) $\{L_0\}$ 有关, $\{L_0\}$ 的物理意义可理解为由于施工形成的过程不同,而导致成桥结构单元的无应力状态量不同,产生的附加广义荷载,对于一次成形的结构: $\{L_0\} = 0$ 。

将该原理运用到斜拉桥计算中的调索问题,以下

是斜拉桥结构无应力索长变化与索力的关系。如图 2 所示,结构状态 A:斜拉索的几何长度为 S_1 ,无应力长度 S_{10} ,面积 A ,弹性模量 E ,索力 T_1 ;经过张拉斜拉索后变化为结构状态 B:斜拉索的几何长度为 S_2 ,无应力长度为 S_{20} ,索力 $T_2 = T_1 + \Delta T_{12}$ 。

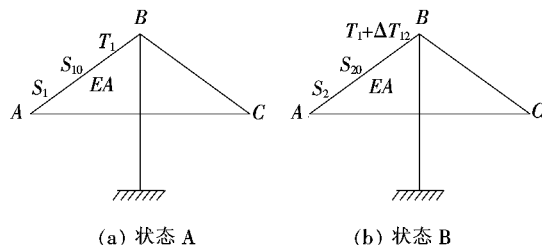


图 2 斜拉桥调索

$$\text{状态 A: } S_1 = S_{10} + T_1 \cdot S_{10} / (EA) \quad (5)$$

$$\text{状态 B: } S_2 = S_{20} + T_2 \cdot S_{20} / (EA) \quad (6)$$

式(6)–式(5)并忽略二阶量,得:

$$S_2 - S_1 = S_{20} - S_{10} + \Delta T_{12} \cdot S_{20} / (EA) \quad (7)$$

设想将斜拉索 AB 在中间剪开,并在 A、B 两点用一对反向力替代索拉力,A、B 两点沿 AB 方向的几何位置变化设为 ϵ ,则:

$$S_{20} - S_{10} + \Delta T_{12} \cdot S_{20} / (EA) = \Delta T_{12} \cdot \epsilon$$

$$\Delta T_{12} = (S_{20} - S_{10}) / [\epsilon - S_{20} / (EA)] \quad (8)$$

由式(8)可以得到,只要结构外荷载和基本体系没有变化,无应力索长与索力的调整必然存在一一对应关系。在施工过程中,调整斜拉索 AB 的张拉力,使其增加 ΔT_{12} ,对结构的效应相当于使斜拉索 AB 的无应力长度从 S_{10} 变化到 S_{20} 。

在实际应用中,按图 3 所示流程实现斜拉桥安装施工过程的无应力状态控制法控制。

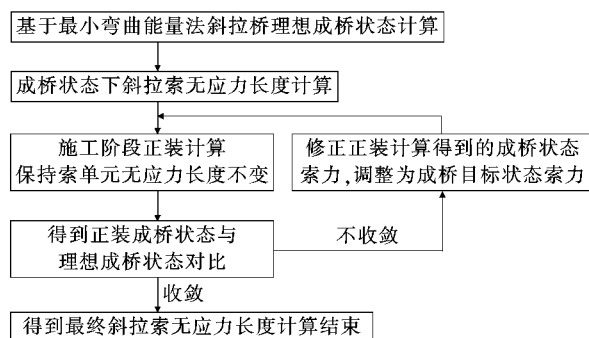


图 3 基于无应力状态控制法的施工安装步骤

3 工程概况

某桥为双索面混合梁斜拉桥,半漂浮体系,主桥长

1 445 m,主跨 820 m,采用不对称布置(图 4),纵坡 1.626%,桥跨布置为 $(3 \times 75) \text{ m} + 820 \text{ m} + (300 + 100) \text{ m}$,桥面全宽 38.5 m,主梁采用钢主梁和混凝土主梁(图 5),结合位置距主塔中心线 26.5 m,采用分离式双边箱的 PK 梁断面,梁高 3.8 m;索塔采用倒 Y 形造型,索塔总高 220 m,上塔柱高 70 m,中塔柱高 120 m,下塔柱高 30 m,塔柱采用空心箱形单箱单室断面,上塔柱横向尺寸由 9 m 变化到 12 m,顺桥向尺寸为 8.5 m。主跨钢箱梁顺桥向标准节段拉索间距为 15 m,边跨混凝土箱梁段标准节段拉索间距为 7.5 m,边跨钢箱梁标准节段拉索间距为 12 m。斜拉索按扇形布置,每个索面共 26 对,采用高强度平行钢丝,全桥共 4×26 对斜拉索。北岸边跨侧斜拉索编号为 NA1~NA26,北岸主跨侧斜拉索编号为 NJ1~NJ26;南岸边跨侧斜拉索编号为 SA1~SA26,南岸主跨侧斜拉索编号为 SJ1~SJ26,斜拉索弹性模量 $E=200 \text{ GPa}$ 。该桥 NA 侧边跨混凝土箱梁采用支架现浇,SA 侧尾索区钢箱梁采用搭设支架吊装,NJ、SJ 侧主跨及 SA 侧边跨钢箱梁采用悬臂拼装法施工。

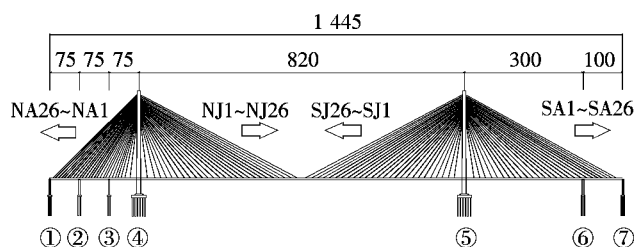


图4 斜拉桥总体布置图(单位:m)

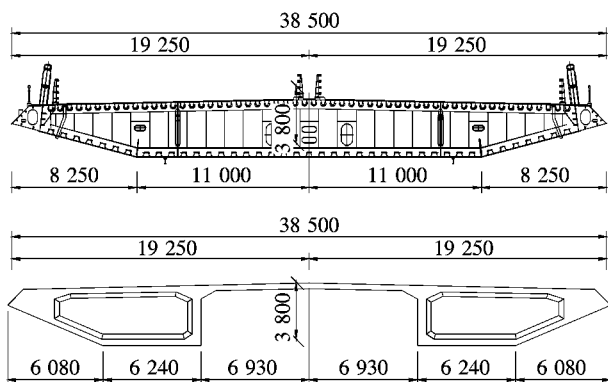


图5 主梁横断面布置示意(单位:mm)

4 计算与分析

4.1 有限元分析模型建立

采用有限元分析软件 Midas/Civil 2015 建立模

型,主梁与拉索连接采用“鱼脊骨”模式,采用刚性连接,主塔、主梁采用空间梁单元模拟,斜拉索采用索单元模拟,用等效弹性模量来考虑斜拉索的垂度效应产生的几何非线性。支座采用考虑实际支座刚度的弹性连接实现。全桥共计 2 988 个节点,2 760 个单元。结构离散图如图 6 所示。

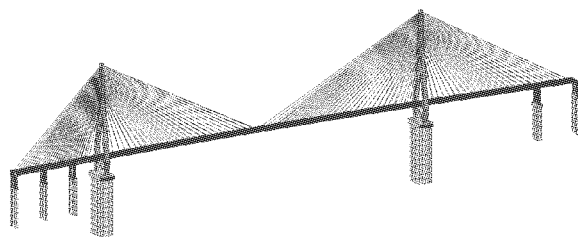


图6 全桥有限元模型

4.2 斜拉桥合理成桥状态确定

目前常用的合理成桥状态下的斜拉桥索力优化方法,主要有:刚性支承连续梁法、零位移法、最小弯曲能量法、影响矩阵法等。

刚性支承连续梁法的求解目标是使斜拉桥在恒载作用下,主梁成桥弯矩与刚性支承连续梁一致,但是当主梁有纵坡时,则会影响斜拉索索力与刚性支承反力的对应关系,同时,由于靠近主塔中心线处 26.5 m 范围内采用混凝土梁,求解出的第一对斜拉索索力过大,第二对斜拉索索力过小,因此,刚性支承连续梁法不适合该桥。零位移法的目标状态是使斜拉桥结构在恒载作用下,斜拉索和主梁的锚固点竖向位移为零,这种方法对于小跨径、主梁刚度较大的结构比较适用,对于跨度较大的斜拉桥,很难求解到目标状态,且施工时常采用预拱度来保证成桥线形,所以零位移状态在大跨度斜拉桥上并不适用。最小弯曲能量法以斜拉桥主塔、主梁结构的弯曲应变能的大小为目标函数,求得使结构弯曲应变能最小时对应的斜拉桥索力值。根据最小弯曲能量法理论,将有限元模型中塔、梁单元抗弯刚度取 $1/1\,000$,施加结构自重和二期、压重等外荷载,按照一次施工成桥计算,调整压重以及局部支座刚度等参数,反复计算,直到结构塔、梁受力趋近目标状态,此时各恒载作用组合下的索力就是对应弯曲能量最小的优化索力,所得的内力就是弯曲能量最小时的成桥内力。影响矩阵法可以综合以上几种方法,不以单一的参数作为目标函数,而是通过不同的目标函数和加权方法,得到最终一组合理的成桥索力值,最终该桥采用最小弯曲能量法初步求解出一组成桥索力后,并以主塔和主梁的最大位移为最小目标,兼顾主塔、主梁、斜拉索

的内力,采用影响矩阵法确定合理成桥状态下的斜拉索无应力长度以及成桥优化状态的主梁弯矩、钢箱梁应力如图 7~11 所示。

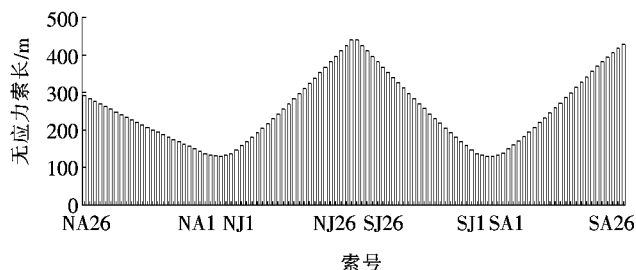


图 7 斜拉索无应力长度分布图

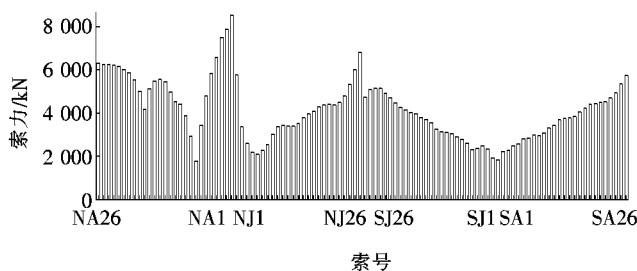


图 8 斜拉索索力分布图

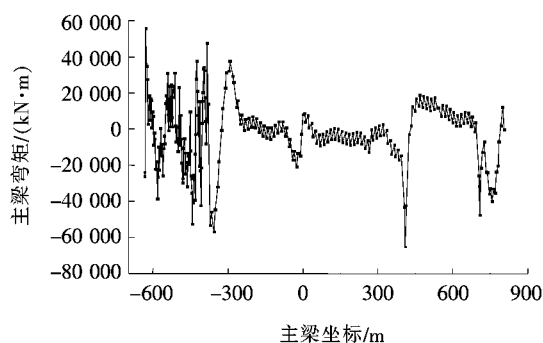


图 9 成桥优化状态主梁弯矩图

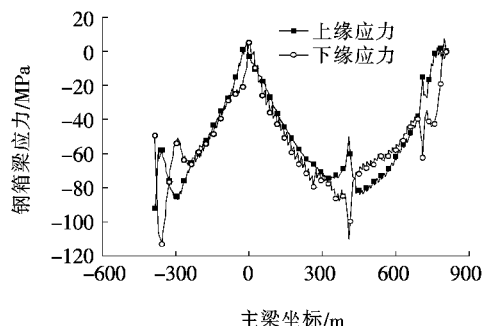


图 10 成桥优化状态钢主梁应力图

图 8 为一次落架成桥状态的索力图,由图 8 可见:索力分布较均匀,短索索力小,长索索力大,呈递增趋势,但在辅助墩及主塔处有部分突变。北岸 NA、NJ 侧靠近主塔中心线 1~2 对斜拉索由于主梁采用混凝

土主梁,自重较大,最大索力达到 8 485.6 kN,NJ 侧中跨 SJ26 号索最大索力 7 879.0 kN,SJ、SA 侧主梁全部为钢箱梁,整体索力较均匀。从图 9 可以看出:主梁在塔根支座处负弯矩值最大为 $-65\,283\text{ kN}\cdot\text{m}$,主梁弯矩分布较好,NA 侧混凝土梁为预应力结构,主梁弯矩均在可行范围。由图 10 可知:钢主梁下缘压应力最大为 114 MPa,除钢混结合位置及主塔根部,其余位置应力变化均匀,且边墩及辅助墩反力均有富余。由图 11 可知:边跨预应力混凝土主梁全截面受压,上缘最小压应力为 4.2 MPa,下缘最小压应力为 2.4 MPa,保证了在运营阶段各恒、活载组合下混凝土主梁均处于受压状态并有一定的应力储备。

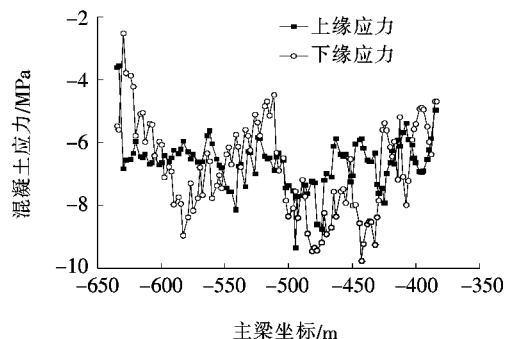


图 11 成桥优化状态混凝土主梁应力图

4.3 施工正装分析计算

采用前进分析法进行施工过程分析计算,按照设计文件的施工程序安排,在前段钢箱梁拼装结束、斜拉索安装完成后,先进行第一次张拉,然后桥面吊机移动到已拼装完成梁段前端,对当前斜拉索进行二次张拉,二次张拉的索力值直接采用合理成桥状态下的无应力索长进行控制。与混凝土主梁相比钢材的允许应力较大,故大跨径钢箱梁在悬臂拼装施工过程中主梁应力不是控制因素;而边跨混凝土在支架上现浇张拉预应力,再进行安装斜拉索,中跨合龙前才将临时支架拆除,混凝土主梁由于施加预应力有足够的应力储备,故施工方案确定实施斜拉索“二次到位”张拉方案。施工过程的模拟包括了主塔与混凝土梁之间的临时约束、浇筑混凝土梁的临时支撑、施工吊机的移位、临时荷载等。具体施工顺序为:

(1) 搭设 NA 侧混凝土梁支架,现浇混凝土梁,张拉预应力。

(2) 搭设 SA 侧尾索区钢箱梁支架,分节段起吊钢箱梁。

(3) 浇筑 NA 侧混凝土梁与钢箱梁结合段,拼装 SJ 侧桥面吊机。

(4) 起吊 SA 侧主塔区钢箱梁,拼装 SA、SJ 侧桥面吊机。

(5) 设置主塔与主梁临时约束,SJ 侧向跨中单悬臂拼装钢箱梁,第一次张拉斜拉索,SA 侧同步释放混凝土梁与临时支撑之间的约束;SA、SJ 侧对称悬臂吊装钢箱梁,第一次张拉斜拉索。

(6) 前移桥面吊机,第二次张拉斜拉索;按标准梁段的架设步骤进行。

(7) 精确测量 SA 侧合龙段长度,合龙 SA 侧钢箱梁,解除 SA 侧钢箱梁临时支撑。

(8) NJ、SA 侧向主跨单悬臂拼装,直至主跨合龙。

(9) 成桥上二期恒载。

施工正装分析计算在程序中实现时,应注意单元的无应力长度及无应力曲率与一次成桥状态一致。索单元的无应力长度,可通过建立双单元,即在斜拉索塔上锚固节点与梁上锚固节点之间,建立相同的两个单元,在分析时开启大位移非线性分析选项,斜拉索在初张拉时采用体外力的方式实现,采用双单元激活替换的方式保证在终张拉阶段无应力索长为成桥时的无应力索长。斜拉桥悬臂施工边、中跨合龙阶段,应保证合龙后单元的弹性曲线连续性,在合龙前将最大悬臂单元与成桥状态进行对比,通过配重、顶推的方式改变合龙节点在合龙前的位移和转角,使其趋于一次落架的成桥状态。斜拉索张拉阶段的施工控制总体原则是以索力控制为主,并尽量做到索力、塔柱和主梁内力等在结构安全范围内。施工阶段主塔应力包络图、钢箱梁应力包络图如图 12~14 所示;施工正装分析与成桥状态的索力对比、主梁成桥弯矩对比、钢箱梁应力对比如图 15~17 所示。

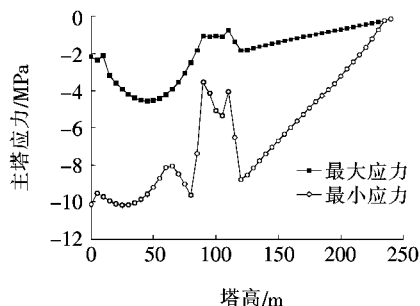


图 12 施工阶段主塔应力包络图

由图 12 可见:斜拉索施工期间采用二次张拉到位的施工方式,主塔最大压应力为 10.2 MPa,最小压应力为 0.27 MPa,在各施工阶段均没有出现拉应力,压应力也在规范允许的范围内。图 13、14 表明:采用该

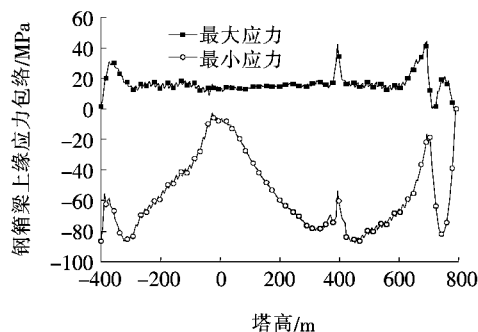


图 13 施工阶段钢箱梁上缘应力包络图

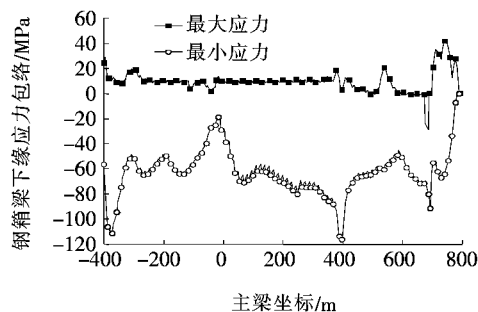


图 14 施工阶段钢箱梁下缘应力包络图

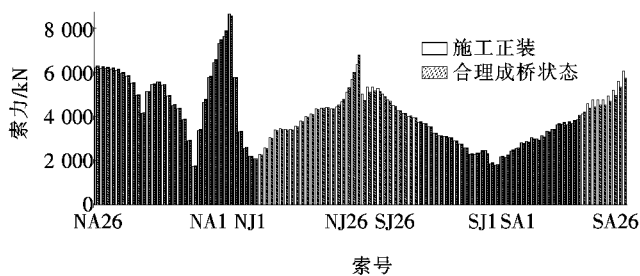


图 15 斜拉索索力对比图

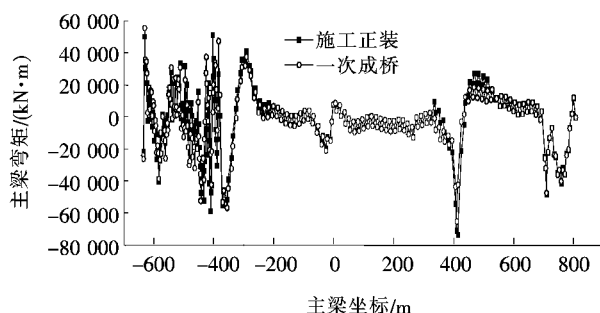


图 16 主梁成桥弯矩对比图

施工方式钢箱梁上缘最大压应力为 92.3 MPa,最大拉应力为 40.5 MPa;钢箱梁下缘最大压应力为 119.2 MPa,最大拉应力 42.1 MPa,钢箱梁在施工时应力未超限。预应力混凝土主梁采用支架现浇施工,混凝土强度及弹性模量达到要求后张拉预应力,直至中跨合龙前拆除支架,故斜拉索的张拉对施工期间的预应力

混凝土梁没有影响。

由图 15 可见:按控制最终安装斜拉索无应力长度的施工正装成桥状态,斜拉索成桥索力与一次成桥状态下的索力吻合度较好,SA20~SA26 号索力最大相差 5.2%,混凝土箱梁边跨段索力最大相差 4.5%,原因在于施工正装计算的时间历程,使混凝土主梁单元的无应力长度由于收缩、徐变而改变,通过 2~3 次的迭代后,误差进一步降低。靠近合龙段的 NJ24~

NJ26、SJ24~SJ26 号拉索索力,主梁弯矩相差较大,原因在于进行施工正装分析时,斜拉索的无应力长度容易控制,但合龙单元的无应力曲率通过压重改变合龙单元梁端转角的方式不能完全有效地解决合龙时单元的弹性曲线不连续性问题。由图 17 可见钢箱梁的上、下缘应力在一次成桥和施工正装两种情况下结果相近,无应力长度满足要求的情况下,索力和主梁应力仍会有偏差,只要满足目标要求即可。

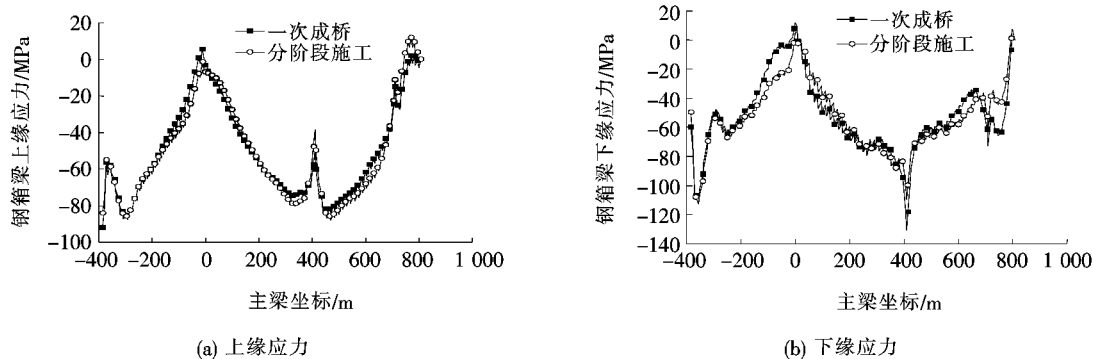


图 17 钢箱梁应力对比图

5 结语

无应力状态控制法从理论到工程实际应用已形成了一套完整的体系,建立了分阶段施工桥梁的力学平衡方程,但由于种种原因,部分工程师在该方法的应用上认识不足,比如运用无应力状态控制法时,在实桥上不可能精确测量无应力状态量,实际上可以通过测量无应力索长差来解决这个问题;另一个认识误区是混凝土收缩徐变的影响,桥梁构件的内力、线形等与施工时间相关,则必然与过程相关,对于这个问题换而言之,收缩徐变本身也带来了混凝土构件无应力状态量的改变。这些误解也制约着该方法的推广使用,该文通过一个既有混凝土主梁也有钢主梁的混合梁斜拉桥工程实例,证明该方法是可行而且有效的,能消除临时施工荷载变动带来的影响,避免多次正装倒拆迭代计算,通过抓住构件的无应力长度和无应力曲率两个无应力状态控制法的核心,使得以往受施工期间温度变化、混凝土收缩徐变等复杂情况带来的正装计算问题

迎刃而解。

参考文献:

- [1] 颜东煌.斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D].湖南大学博士学位论文,2001.
- [2] 秦顺全.斜拉桥安装无应力状态控制法[J].桥梁建设,2003(2).
- [3] 秦顺全.无应力状态控制法——斜拉桥安装计算的应用[J].桥梁建设,2008(2).
- [4] 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).
- [5] 巩春领,陶海,吴文明,等.斜拉桥合理成桥状态确定的序列二次规划法[J].力学季刊,2005(2).
- [6] 梁鹏,肖汝诚,张雪松.斜拉桥索力优化实用方法[J].同济大学学报:自然科学版,2003(11).
- [7] 李丽琳,王楚杰.矮塔斜拉桥负弯矩区箱梁应力状态研究[J].中外公路,2017(S1).
- [8] 姜宏维,郭建明,孙海波.中渡长江大桥主缆无应力长度分析及影响因素研究[J].中外公路,2017(4).
- [9] 刘新华,高凡丁,李秋.计入边箱约束刚度的斜拉桥主梁索区横隔梁简化计算方法[J].中外公路,2017(2).