

叠合梁施工工艺调整对斜拉桥施工索力的影响

肖军^{1,2}, 李松^{2,3}, 刘永健^{1*}, 张永水⁴

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中交第二公路工程局有限公司;
3. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司; 4. 重庆交通大学 土木工程学院)

摘要:该文以钢—混凝土叠合梁斜拉桥施工工艺调整为背景,分析单节段循环浇筑湿接缝和滞后一个节段进行湿接缝浇筑对于施工监控的影响,包括对钢梁恒载切线累计位移、制造线形、成桥索力影响等;以施工工艺调整前所确定的钢梁制造线形和成桥索力为目标,允许施工索力在一定区间变化,基于线性规划方法进行了施工索力调整计算。研究结果表明:①叠合工艺调整影响了叠合梁刚度形成过程,如果工艺调整后不进行施工索力调整,则控制点切线累计位移偏差显著,对实例桥梁而言最大达到2.2 m;②如果限定施工索力只在较小的区间变化,则施工索力难以适应原制造线形和成桥索力;如果放松施工索力调整区间,则可以较好地适应;③采用线性规划的方法进行施工索力调整计算,可以较好地兼顾控制点切线累计位移和拉索成桥索力等优化目标。

关键词:钢—混凝土叠合梁; 工序调整; 恒载位移; 线性规划

钢主梁斜拉桥的主梁制造线形与施工全过程的恒载切线累计位移密切相关,而分阶段成形的叠合梁(下部为钢梁,上部为预制混凝土桥面板),其叠合时机直接影响截面刚度的形成过程进而影响结构施工及成桥状态受力以及钢梁的制造线形。胡俊针对叠合梁斜拉桥混凝土桥面板叠合时机开展了研究,结果表明滞后1个节段及滞后2个节段后浇筑湿接缝,桥面板几乎不出现拉应力,且桥面板湿接缝越是滞后浇筑,钢梁的压应力显著增大,合理的滞后浇筑时机为滞后1个节段;易云焜等也指出主梁施工工序对叠合梁斜拉桥施工阶段、成桥阶段内力都有显著的影响,且不合理的叠合时机是造成桥面板开裂的主要原因之一;赵彦峰针对叠合梁斜拉桥悬拼施工的主梁制造线形、安装线形等进行了研究。在斜拉桥合理施工状态计算方面,最早是由德国F. Leonhardt教授提出的倒退分析法,而后发展了倒拆—正装迭代法、正装迭代法、无应力状态法等方法。

已有关于不同叠合梁工艺的研究主要关注桥面板(接缝)受力,未见有针对叠合梁工艺调整对施工索力调整计算方面的研究。施工过程中如果由于具体的施工工艺,例如叠合时机调整,会对斜拉桥的施工过程变

形和受力产生直接影响,如何使得施工索力适应按照原方案确定的钢梁制造线形及目标成桥受力状态是监控单位需要在监控过程中予以重点考虑的问题。该文以某叠合梁斜拉桥为例,针对施工过程中发生的方案调整引起的施工索力方案与钢梁制造线形和成桥受力状态不一致的情况,基于线性规划方法进行重新调整计算,使新的施工索力方案能适应原目标成桥状态。

1 桥梁设计、施工及监控三者关系

桥梁设计通常包括合理成桥状态设计和合理施工状态设计,合理成桥状态设计包括成桥线形和成桥受力状态的确定,而合理成桥状态是进行结构成桥状态验算的基础。随着桥梁施工技术的发展,同样的桥型发展出了不同的施工工法(工艺)。这些具体的施工方法或工艺会直接影响桥梁结构的成桥内力状态,反过来又会影响结构构件的设计或者配筋设计等。与施工方法(工艺)相对应的是合理施工状态的设计,合理施工状态是合理成桥状态的前提,桥梁结构通过合理施工状态,其线形和内力状态可以逐步地演化到合理成桥状态。对于设计而言,合理成桥状态和合理施工状

收稿日期:2020-02-29

基金项目:中国交建特大研发项目(编号:2019-ZJKJ-07)

作者简介:肖军,男,博士(后)。

* 通信作者:刘永健,男,教授。

态是封闭的。但是通常由于施工单位资源、工期等限制,其实际施工方案与设计拟定的施工方案会存在一定的偏差,导致其施工过程与成桥目标受力状态不是封闭的。在这种情况下,设计的后期阶段以及监控单位会对合理的施工状态进行适当调整,这种调整以合理成桥状态为目标(或者作出适当调整),使得合理施工状态与合理成桥状态封闭,如图 1 所示。

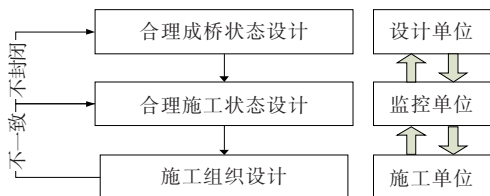


图 1 设计、施工及监控三者关系

2 叠合梁斜拉桥施工工序调整及其影响

2.1 工程概况

江西鄱阳湖二桥为主跨 420 m 叠合梁斜拉桥,大桥共有 72 对斜拉索(上下游布置),边跨设置辅助墩,桥梁立面布置如图 2 所示。

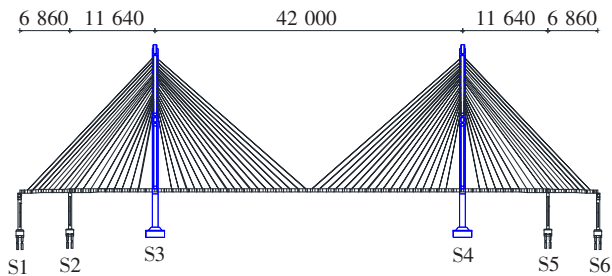


图 2 鄱阳湖二桥立面布置示意图(单位:cm)

大桥为叠合梁形式,下层为分离式主梁,上层为预制桥面板+后浇筑湿接缝。标准节段主梁下层由 2 个 10.8 m 长、2.64 m 高的工字钢、3 道横梁及多道小纵梁构成,上层为预制桥面板。

设计采用单节段循环叠合的施工工艺,即按照钢梁安装、拉索一张、预制桥面板、湿接缝浇筑、预应力张拉、拉索二张、吊机前移的工序循环叠合施工。

2.2 工序调整及其影响

出于工期及桥面板受力优化考虑,在主梁施工到 2 号节段后进行了施工工艺调整,即将原设计的单节段循环叠合的工艺调整为滞后一个节段进行叠合的工艺。对于叠合梁而言,只有当湿接缝浇筑并达到强度后,才以叠合梁组合断面参与受力,未叠合前预制桥面

板仅作为荷载。施工工艺调整后改变了叠合梁的叠合时机,使得原桥面板参与受力的时机滞后了,这样对于桥面板(含湿接缝)受力更有利,同时由于两节段叠合显著减小了湿接缝后浇筑等强时间,对于工期也有利。然而,尽管工艺调整带来了有利的效果,但同时也给监控单位带来了更大的监控难度,主要体现在以下方面:

(1) 拉索施工索力方案由原方案所确定,已经不适应调整后的方案,如果不调整施工索力,则主梁制造线形存在显著差异,反映到钢梁控制点切线累计位移差异显著,该桥最大切线累计位移偏差达到 2.2 m。

(2) 新的索力方案应与原监控目标,即成桥目标线形和成桥受力状态相适应,由于钢梁制造线形不能调整(部分钢梁已加工),导致新的索力方案确定较为困难。

3 基于线性规划的施工索力调整计算

在斜拉桥施工张拉力计算方面,目前比较普遍采用的方法包括倒拆法、正装迭代法以及无应力状态法等。该文施工索力调整的背景是钢梁已经部分加工而施工方案(钢梁叠合时机)发生了较大调整,新的施工索力方案需要适应原来的钢梁制造线形,同时兼顾成桥受力状态。如果仅从成桥受力状态考虑,可利用斜拉索恒定无应力索长原理重新确定施工张拉力,且利用斜拉索索长相等计算调整后的拉索张拉力,概念明确且效率较高,但是这样不能很好地兼顾钢梁的制造线形,为此该文提出基于线性规划的方法进行施工索力调整计算。

3.1 线性规划基本原理

线性规划(Linear Programming 简记 LP)是运筹学中数学规划的一个重要分支。自从求解线性规划的单纯形法被提出以来,线性规划在理论上已趋向成熟,且通过大量的实践目前已经可实现成千上万个约束条件和决策变量的线性规划问题求解。

线性规划问题的目标函数及约束条件均为线性函数,如式(1)、(2)所示。目标函数可以是求最大值,也可以是求最小值,约束条件的不等号可以是小于号也可以是大于号。LP 的标准形式为:

$$\text{Max} Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i, i=1, 2, \dots, m \\ x_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2)$$

满足约束条件式(2)的解 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 称为线性规划问题的可行解,而使目标函数式(1)达到最大值的可行解叫最优解。该文采用 Matlab 中的 linprog 函数进行线性规划求解。

3.2 基于线性规划的施工索力调整计算

由于该桥工序调整时,部分节段钢主梁已按照原工序所确定的制造线形进行加工,因而在进行施工索力调整计算时,必须确保钢梁的制造线形一致或者在一定偏差范围内,同时确保成桥状态受力合理。为此,该文以 72 根拉索施工张拉力为可调变量,以各控制点累计切线位移及拉索成桥索力为被调整量,通过限制可调变量在一定范围变化,使得被调整量也在一定范围内变化,也即将该工程问题转换为数学中的线性规划问题进行求解。

首先通过调整单根索的索力,提取其对各控制节点(控制点编号由拉索在钢梁上的锚点位置确定)的施工累计位移的影响量,形成考虑施工阶段累计位移的拉索索力增量对控制点累计位移增量的影响矩阵。一共 72 根拉索,则形成 72 阶影响矩阵,如式(3)所示:

$$K = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,i} & \cdots & r_{1,72} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,i} & \cdots & r_{2,72} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{i,1} & r_{i,2} & \cdots & r_{i,i} & \cdots & r_{i,72} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{72,1} & r_{72,2} & \cdots & r_{72,i} & \cdots & r_{72,72} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,影响矩阵中 $r_{i,j}$ 表示调整第 j 号拉索对第 i 控制节点的累计位移影响量 $\delta\omega_i$ 。利用式(4)方程组即可求解得到索力调整量 $\{\delta\tilde{F}\}$,使得在原索力基础上叠加 $\{\delta\tilde{F}\}$,各节点的施工累计位移将能够与工序调整前的累计位移相一致。

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,i} & \cdots & r_{1,72} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,i} & \cdots & r_{2,72} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{i,1} & r_{i,2} & \cdots & r_{i,i} & \cdots & r_{i,72} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{72,1} & r_{72,2} & \cdots & r_{72,i} & \cdots & r_{72,72} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta F_1 \\ \delta F_2 \\ \cdots \\ \delta F_i \\ \cdots \\ \delta F_{72} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta\omega_1 \\ \delta\omega_2 \\ \cdots \\ \delta\omega_i \\ \cdots \\ \delta\omega_{72} \end{bmatrix} \quad (4)$$

每一根拉索二张索力增加 100 kN,得到张拉各拉索后对控制节点位移增量的影响关系曲线,为考察张拉对称位置处拉索影响矩阵的对称性,将第 i 号拉索及第 $73-i$ 号拉索张拉的影响曲线放在一起对比,以 1[#] 拉索和 72[#] 拉索为例示意,如图 3 所示。

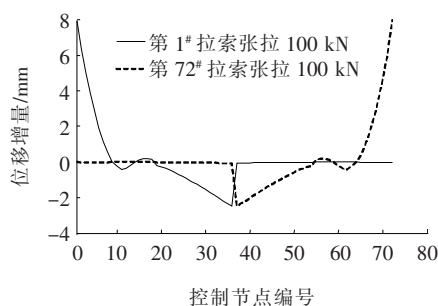


图3 拉索索力调整对控制点位移影响示意图

根据项目实际情况,设定索力增量 $\{\delta\tilde{F}\}$ 在 $[\{l_b\}, \{l_u\}]$ 区间变化,满足累计位移增量偏差在区间 $[\{\delta\tilde{w}_b\}, \{\delta\tilde{w}_u\}]$ 之间。

为此,针对索力增量构造如下约束条件:

$$\{l_b\} \leq \{\delta\tilde{F}\} \leq \{l_u\} \quad (5)$$

针对位移增量构造如下约束条件:

$$\{\delta\tilde{w}_b\} \leq \{r\} \{\delta\tilde{F}\} \leq \{\delta\tilde{w}_u\} \quad (6)$$

显然,如果将索力调整量限定在较小的区间范围,则位移调整量将存在较大的偏差。反之,如果允许索力调整量在更大的范围进行调整,则位移偏差可以调整到更小的范围。该文采用后一种思路进行优化求解,即限定索力增量在一定范围内,最小化累计位移偏差来进行求解。对比如下 3 种索力调整方案。

方案 1:限定所有拉索索力增量在 $[-100 \text{ kN}, 100 \text{ kN}]$ 间调整。

方案 2:限定所有拉索索力增量在 $[-200 \text{ kN}, 200 \text{ kN}]$ 间调整。

方案 3:限定所有拉索索力增量在 $[-300 \text{ kN}, 300 \text{ kN}]$ 间调整。

图 4 为不同拉索施工索力调整方案下,控制点的切线累计位移偏差曲线。

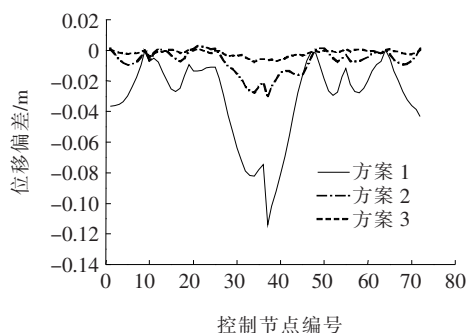


图4 不同施工索力方案下的累计位移偏差曲线

从图 4 可见:不同的施工索力调整方案导致控制

点切线累计位移存在较大的区别,其中方案 2 位移偏差超过 3 cm。不同方案下的施工索力增量如图 5 所示。

方案 2 下拉索成桥索力偏差如图 6 所示。

从图 6 可见:方案 2 施工索力调整量在 $[-200 \text{ kN}, 200 \text{ kN}]$ 区间,成桥后索力增量大多数也是在该区间,仅少数几根拉索成桥索力变化达到 400 kN,经设计确认该调整对于成桥状态可接受;同时,由于叠合梁施工滞后一个节段,桥面板的受力得到了显著的改善(从最终实施效果看桥面板基本无开裂),综合考虑最终采用该调整方案。

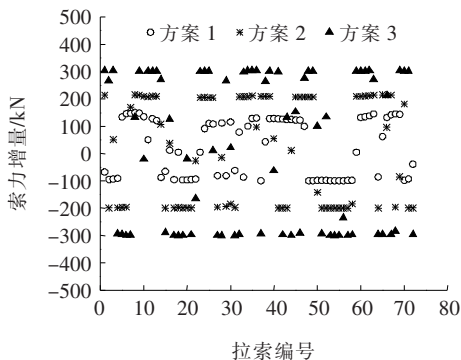


图 5 不同方案下各拉索的施工索力增量

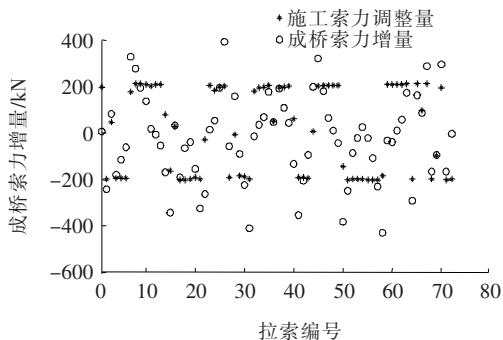


图 6 方案 2 下的成桥索力偏差

4 结论

叠合梁斜拉桥由于施工过程工序繁多,施工过程中可能存在较多的调整,有的调整会改变钢梁的加工制造线形并最终影响成桥线形和成桥受力状态,如果工序调整发生在钢梁加工前,则经设计对成桥受力状态予以确认后即可按照新的施工索力方案进行实施。但是,如果钢梁已经加工,则工序调整后需要重新进行

施工索力计算以适应原制造线形和成桥受力状态。该文针对叠合梁斜拉桥由单节段循环调整为双节段循环的工艺调整,采用线性规划方法重新计算了施工索力。得到以下结论:

(1) 如果工艺调整后不调整施工索力,则控制点切线累计位移偏差显著,对该桥而言最大达到 2.2 m。

(2) 如果限定施工索力在较小的区间变化,则控制点切线累计位移将偏差较大,而如果放松施工索力调整区间,则可以较好地控制控制点切线累计位移,使得调整后的施工索力方案适应原制造线形。

(3) 采用线性规划的方法进行施工索力调整计算,可以较好地兼顾控制点切线累计位移和拉索成桥索力等优化目标。

参考文献:

- [1] 李乔,唐亮.悬臂拼装桥梁制造与安装线形的确定[C].第十六届全国桥梁学术会议论文集(上册),2004.
- [2] 胡俊,曾一峰,贾俊峰.叠合梁斜拉桥混凝土桥面板滞后浇筑湿接缝的工序研究[J].铁道建筑,2016(4).
- [3] 易云焜,岳青,严和仲.叠合梁斜拉桥主梁施工工序方案比选[J].公路,2012(12).
- [4] 赵彦峰.悬拼施工的叠合梁斜拉桥线形控制与分析[D].西南交通大学硕士学位论文,2016.
- [5] F. Leonhardt. Die Spannbeton - Schrag - Kabel Bruken uber den Columbia River Zwischen Paseo und Kennawick im Etaat Washington[J]. U. S. A. Beton und Stahllelonban,1980,75(2):29-36.
- [6] 陈德伟.斜拉桥的非线性分析及工程控制[D].同济大学博士学位论文,1991.
- [7] 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.
- [8] 秦顺全,林国雄.斜拉桥安装计算——倒拆法与无应力状态控制法评述[C].全国桥梁结构学术大会论文集(上册),1992.
- [9] 秦顺全.斜拉桥安装无应力状态控制法[J].桥梁建设,2003(2).
- [10] 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).
- [11] 王晟,颜东煌,宁平华,等.确定钢桁梁斜拉桥合理施工阶段索力的索长迭代法[J].中外公路,2019(3).
- [12] 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).