

自锚式悬索桥施工中吊索张拉方法研究

邱文亮*, 张哲

(大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对自锚式悬索桥施工中体系转换的关键问题——张拉吊索使主梁脱离支架的复杂非线性过程, 考虑结构承载能力和张拉设备能力等约束条件, 研究了主梁脱离支架状态的确定方法、张拉次数和接长杆数量的优化方法. 对万新大桥计算表明, 利用该方法, 通过4次张拉吊索可以达到理想的主梁脱离支架状态, 通过3次张拉吊索可以达到满足要求的实际主梁脱离支架状态, 优化后的接长杆数量为全桥吊索数量的27%.

关键词: 自锚式悬索桥; 施工控制; 非线性; 吊索张拉

中图分类号: U 448 25 **文献标识码:** A

0 引言

由于自锚式悬索桥主梁要承担主缆的水平分力^[1,2], 自锚式悬索桥施工与地锚式悬索桥不同, 主梁必须在主缆架设之前先连续为整体, 并支承于支架上, 然后才能架设主缆, 主缆架设后张拉吊索使主梁脱离支架^[3]. 主缆的空缆线形与成桥线形相差很大, 可达1~2m, 而全连续的主梁制作初始位置与成桥状态基本在同一位置. 因此, 已制作好的吊索的长度多数小于空缆状态时索夹耳板到主梁的距离, 即在张拉过程中吊索需要接长. 再者, 由于各种条件限制, 如吊索的承载力、张拉设备的数量和能力、主梁和主塔的承载力等, 全桥的吊索不可能通过一次张拉完成, 必须多次逐步

张拉, 才能达到设计值, 期间还要对塔顶索鞍进行多次顶推. 吊索张拉的次数、索鞍顶推的次数、接长杆的数量和长度将对施工工作量、工期及施工费用有较大影响. 因此, 如何在多种约束条件下, 采用合理的张拉方案, 用尽量少的反复张拉吊索次数使全桥的吊索拉力达到设计状态是施工控制需要研究的一个问题.

本文以抚顺万新大桥为例, 利用有限元方法, 对自锚式悬索桥主梁体系转换进行研究, 以供同类桥梁施工参考.

1 主梁脱架状态的确定

万新大桥结构图见图1

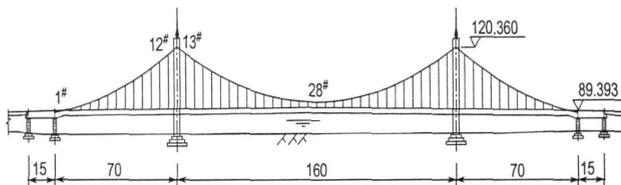


图1 万新大桥主桥(单位:m)

Fig. 1 Wanxin bridge (unit m)

收稿日期: 2005-12-20 修回日期: 2007-05-10

作者简介: 邱文亮* (1972-), 男, 博士, 副教授; 张哲 (1944-), 男, 教授, 博士生导师.

张拉吊索使主梁脱离支架 (以下简称脱架) 是自锚式悬索桥施工控制重点解决的问题, 在解决吊索张拉方法之前, 应首先确定脱架目标状态, 包括主缆线形、主梁线形、索鞍位置、吊索拉力等。主梁脱架有如下两种方法可以选择:

(1) 使主梁各处恰好脱离支架, 即全部支架的支反力为零, 并且主梁与支架之间间隙为零。

(2) 使部分主梁脱离支架, 出现一定间隙, 其余部分尚由支架支承, 但支承载力很小, 强行拆除后不影响结构安全。

这两种方法均可以达到拆除支架的目的, 但各有优缺点, 方法 (1) 可以做到拆除支架对结构无任何影响, 而且在理论上这一状态是惟一的; 但由于存在主梁的自重等各方面的参数误差, 实际上很难达到这一临界状态, 并在实际操作中很难判断这一状态是否已达到。方法 (2) 的缺点是拆除支架对结构有影响, 而且该状态不是惟一的; 但其优点是可以直观地判断主梁与支架间是否脱离。

本文采用方法 (2) 控制, 即当全桥吊索拉力达到某一拉力值 T_d 时, 部分主梁脱离支架, 最大间隙为 f_{max} , 此时支承反力最大值为 R_{max} , 如果此时拆除边跨支架, 结构安全, 即结构应力控制在允许范围内, 则该状态是可以选择的脱架状态。为了使拆除支架对结构影响最小, 希望 R_{max} 最小; 为了脱架状态更易于直观判断, f_{max} 应尽量大。这种状态的表述如下:

$$\min \{R_{max}(T_d)\} \quad (1)$$

$$\text{s t } \begin{cases} R_s > [R_s] & \text{支座压力控制条件} \\ \leq [e] & \text{结构应力控制条件} \\ f_{max} > [f] & \text{间隙控制条件} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $[f]$ 为可观测的最小间隙; $[R_s]$ 为支座的最小允许压力, 以保证支座不被拉坏。

虽然这是一个最优求解问题, 由于实际上存在各种不可避免的施工误差因素, 最优解的意义并不大, 本文采用逼近于最优解的近似解。

根据上述思想, 取主梁拉应力 $[e] = 1.0 \text{ MPa}$ 塔柱拉应力 $[e_t] = 1.0 \text{ MPa}$ $[R_s] = 1.000 \text{ kN}$, 得到万新大桥的主梁脱架状态, 即当 $T_d = 3.243.6 \text{ kN}$ 时, $R_{max} = 814.3 \text{ kN}$, $R_s = 2.399.5$

kN , $f_{max} = 10.7 \text{ cm}$ 。确定了脱架状态后, 可计算出脱架状态时吊索的有效长度 (本文吊索有效长度是指沿吊索方向主缆中心到主梁底吊索锚固点之间的距离), 将作为脱架张拉的控制目标。

2 吊索张拉方案的探索

吊索张拉使主梁脱架是自锚式悬索桥施工的关键过程, 是施工计算的重要内容。采用合理的张拉方案, 尽量减少反复张拉和顶推次数, 减少接长杆的数量和长度, 是施工控制计算需要研究的问题。

以万新大桥为例, 为了尽量减少接长杆的数量, 可采取两个措施: 第一, 使塔顶索鞍预偏量在满足索股架设的情况下, 尽量取较大值, 使边跨主缆垂度增加, 空缆状态时边跨 1[#] ~ 12[#] 吊索的下端冷铸锚杯穿过主梁, 并可以使其锚环完全拧上, 如图 2(b)。对于中跨, 13[#] 吊索的锚杯可以做到“安装戴帽状态”, 其余吊索 (14[#] ~ 28[#]) 则或伸出太短, 或没有露出梁底, 这时, 应对其接长张拉。第二, 在安排张拉顺序时, 先从 14[#] 吊索开始向跨中对称张拉, 由于没有中间吊索的约束, 主缆变形较大, 可以满足 14[#] ~ 20[#] 吊索达到“张拉戴帽状态”, 如图 2(c) 所示; 而 21[#] ~ 28[#] 则由于此时中部主缆几乎平坦并受张拉力最大值限制, 无法做到“张拉戴帽状态”, 需由接长杆接长后固定为“张拉接长状态”, 如图 2(d)。这样, 全桥需要接长的吊索数量只有 30 根。

以上过程完成了吊索安装的第一遍张拉, 可称之为“安装张拉”。此后的吊索张拉应以主梁脱架为目标, 由于吊索数量很多, 不可能同时张拉到脱架状态时的拉力, 而结构又是非线性的, 并且张拉吊索至该状态所需的张拉方案又不能明确下来, 是不能通过拉力控制达到的, 必须寻找一个可以控制的参数。考虑到脱架状态下, 吊索的有效长度是一定的, 因此可以将脱架状态吊索的有效长度 $L_{di} (i = 1, 2, \dots, n)$ 作为张拉的控制目标。则张拉条件可以表达为

吊索张拉的约束条件

$$\begin{cases} L_i \geq L_{d,i} \text{ (吊索长度控制条件)} \\ T_i \leq [T] \text{ (张拉力控制条件)} \\ \sigma \leq [\sigma] \text{ (主梁和索塔应力控制条件)} \end{cases} \quad (3)$$

最终目标

$$L_i = L_{d,i} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

在计算过程中,按上述约束条件,采用给定的张拉顺序对全桥吊索反复张拉,最终全部吊索将满足目标 $L_i = L_{d,i}$,且吊索的拉力也达到脱架拉力 $T_{d,i}$ 。至于需要经过多少遍张拉达到目标,需要在下面的研究中解决。

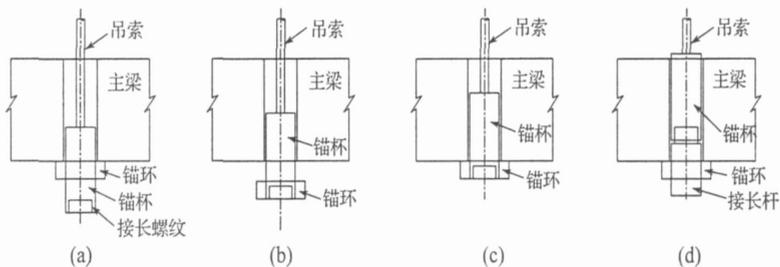


图 2 吊索锚固状态示意图 (单位: cm)

Fig 2 State of anchorage of hanger (unit: cm)

3 吊索张拉过程研究

根据前面的分析可知,吊索张拉可分为安装张拉和脱架张拉两个过程,分别以减少接长杆数量和使主梁脱离支架为目的。

3.1 吊索的安装张拉 (第一次张拉)

在进行吊索张拉施工计算之前,首先应计算出空缆状态下各索夹中心到梁底吊索锚固点距离 d_{ec} 、主梁脱架状态的吊索长度 L_d 以及吊索戴帽状态的长度 L_w 。从图 3 可知,对于 $1^{\#} \sim 13^{\#}$ 吊索,由于 $L_w > d_{ec}$,可以达到安装戴帽状态,而其余吊索均长度不足,张拉时需要接长。如果此时安装吊索,需要接长的吊索数量为 58 根,最长的接长杆为 1.678 m。

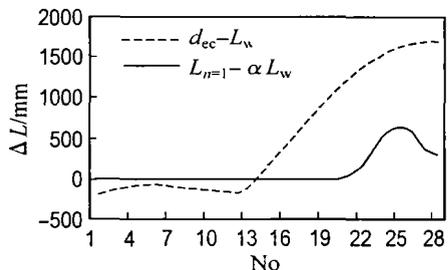


图 3 吊索长度

Fig 3 Length of hangers

一次张拉的计算过程如下:

(1) 在程序中输入成桥吊索长度 $L_{b,i}$,并由此计算 L_w 。

(2) 对 $1^{\#} \sim 28^{\#}$ 吊索进行张拉,对于第 i 号吊索张拉时的有效长度 L_i ,如果 $L_i < L_{w,i}$,则使该吊索的长度值为 $L_{w,i}$,其拉力为 0。当 $L_i > L_{w,i}$ 时,张拉吊索,使其长度达到 $L_{w,i}$,如果拉力 $T < [T]$,则该吊索长度值为 $L_{w,i}$,拉力为 T ;如果拉力 $T = [T]$ 时, $L_i > L_{w,i}$,则吊索需要接长,接长杆的长度为 $L_i - L_{w,i}$,而拉力为 $[T]$ 。

(3) 在 (2) 的过程中,要确保结构各处应力不大于其允许值,否则程序应报警,或自动调整张拉力,特别在索塔应力过大时,需顶推索鞍,放松主缆不平衡水平力。

考虑到吊索、悬臂横梁、张拉机具的承载力,确定约束条件为 $[T] = 2750 \text{ kN}$ (两根吊索拉力和),主梁拉应力 $[\sigma] = 1.0 \text{ MPa}$,塔柱拉应力 $[\sigma] = 1.0 \text{ MPa}$ 。另外,计算模型中吊索采用索单元,只能受拉,不能受压。

按照前面的计算过程,进行了第一次张拉计算,完成了吊索安装张拉,并得到了 $21^{\#} \sim 28^{\#}$ 吊索的接长杆长度,见图 3。接长杆长度 $L_m = L_{n=1} - \overline{L}_{w,i}$,其中 $L_{n=1}$ 为第一次张拉后吊索有效长度, $\overline{L}_{w,i}$ 为 $L_{w,i}$ 考虑受拉伸长后的长度,接长杆最大值为 0.647 m。

3.2 吊索的脱架张拉

吊索安装张拉完毕后,应继续张拉使结构达到预定脱架状态,吊索的张拉过程采用前面给出的张拉方案和张拉约束条件,张拉过程叙述如下:

(1) 对程序赋予吊索长度的目标值 L_d 、张拉力限值 $[T]$ 、主梁和索塔应力限值 $[e]$ 等约束条件。

(2) 按照一定的张拉顺序对各吊索张拉, 并满足约束条件。

(3) 张拉过程中, 程序自动记录张拉后的吊索有效长度 L_e , 并在张拉其他吊索时, 检查拉力为零的吊索, 如果主缆中心到梁底吊索锚固点距离大于 L_e , 则该吊索应参与受力并加入到结构中, 否则拉力仍为零; 如果索塔拉应力大于规定的允许值, 需顶推索鞍。

(4) 直至各吊索有效长度 $L_e = L_d + X$ 其中 X 为给定的允许误差值。

对万新大桥的张拉过程进行计算表明, 当全桥吊索张拉完第 4 次 (包括第一次吊索安装张拉), 即张拉次数 $n = 4$ 时, 结构恰好达到脱架目标状态。但从计算结果来看, 当 $n = 3$ 时, 全部吊索的有效长度基本接近脱架目标长度, 而主梁跨中竖向挠度 $f_{max} = 68.4 \text{ mm}$, 支墩的最大反力 $R_{max} = 1707.4 \text{ kN}$, 如此时拆除支架产生的主梁变形为向上 4.8 mm , 塔柱变形为向边跨 1.7 mm , 塔柱产生拉应力为 0.17 MPa , 结构安全。因此, 在不考虑误差因素影响的情况下, 可以将 $n = 3$ 所达到的状态认定为实际脱架状态。图 4~ 8 分别给出了 3 次张拉完毕时的主缆变形 d 、主梁竖向挠度 f 、吊索拉力 T 、吊索长度 L 、支架反力 R 。

索均需要张拉 4 次, 相当部分吊索只需张拉 2 次。

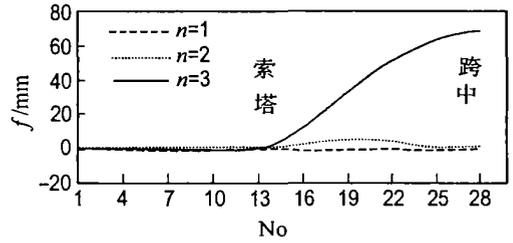


图 5 主梁竖向挠度

Fig. 5 Vertical deformation of main girder

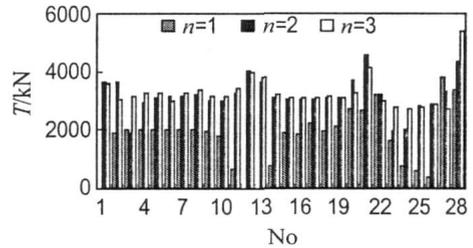


图 6 吊索拉力

Fig. 6 Force of hangers

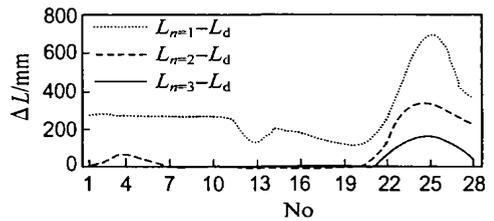


图 7 吊索长度

Fig. 7 Length of hangers

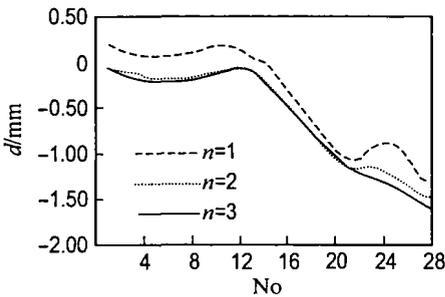


图 4 主缆变形

Fig. 4 Deformation of main cable

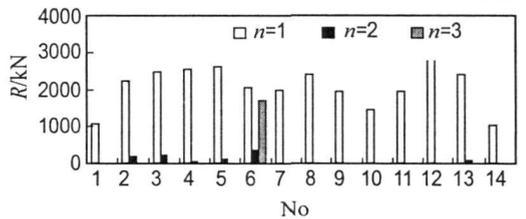


图 8 支架反力

Fig. 8 Force of temporary brackets

分析计算结果, 可以得出以下结论:

(1) 采用本文给出的张拉方案和约束条件, 在总体上, 可以通过 4 次全桥吊索的张拉, 使结构达到理想的脱架状态, 但张拉过程中并非全部吊

(2) 第 1 次张拉: 主缆产生变形很大, 主缆各处变形很不均匀, 中跨均为向下变形, 最大值为 1.349 m , 边跨均为向上变形; 主梁没有产生明显的竖向变形, 整体上还是由自重压缩支架引起的

向下变形;全桥吊索拉力极不均匀,部分吊索拉力为零.

(3) 第 2 次张拉:主缆各处变形较为均匀,整个主缆均向下变形;中跨已有部分主梁出现向上的挠度,最大挠度值为 4.6 mm,说明此时吊索拉力总和已接近主梁的总体重量,表明主梁已接近脱架状态.全桥吊索已接近于第 3 次张拉后的拉力,但仍不均匀,相差较大;6[#] ~ 20[#] 吊索长度已达到目标值;支架反力已很小.

(4) 第 3 次张拉:只对 1[#] ~ 5[#]、21[#] ~ 28[#] 吊索进行了张拉,主缆变形基本发生在中跨中部和边跨端附近;主梁产生了很大的变形,中跨主梁均已离开支墩,最大变形达到 68.4 mm;只有 6[#] 支墩反力为 1 707.4 kN,其余支墩反力均为零;全桥吊索拉力更趋于均匀.因此,第 3 次张拉是对第 2 次张拉后主缆线形、吊索长度、结构受力不均匀性的进一步调整,使吊索拉力在整体上承受了主梁的全部自重,结构达到了安全脱架的状态,同时产生了较大变形.

4 结 语

针对吊索张拉这一复杂的非线性过程,研究了在结构承载力和张拉设备能力等约束条件下吊索反复张拉次数和接长杆数量的优化方法,以及自锚式悬索桥脱架状态的确定方法.对万新大桥计算表明,利用该方法,可以通过 4 次张拉达到理想的脱架状态,3 次张拉可以达到满足要求的实际脱架状态,优化后的接长杆数量为 30 根,是全桥吊索数量的 27%.

参考文献:

- [1] OCHSENDORF J A, BILLITON D P. Self-anchored suspension bridge [J]. *J Bridge Eng*, 1999, 4(3): 151-156.
- [2] 邱文亮. 自锚式悬索桥非线性分析与试验研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2004.
- [3] 魏 华, 陈妙统, 徐 栋. 国内最大跨径钢筋混凝土主梁自锚式悬索桥——永康市溪心桥施工控制 [J]. *结构工程师*, 2004(3): 77-82.

Study of scheme of tensing hangers in construction of self-anchored suspension bridge

QIU Wen-liang*, ZHANG Zhe

(School of Civil and Hydraul Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract Tensing hangers to raise the main girder to leave the brackets is a complicated nonlinear process in construction of self-anchored suspension bridge. Considering bearing capacity of the structure and tensing facilities, the method of determination of state of girder leaving brackets, the optimal scheme of reduction of times of tensing and number of stretching bars are studied. Using this method in construction of Wanxin bridge, the ideal state of main girder leaving brackets can be achieved after four times of tensing and the practical state can be achieved after three times. The optimal number of stretching bars is 27% of all of the hangers.

Key words self-anchored suspension bridge; construction control; nonlinearity; tension of hangers