

大跨度斜拉桥施工过程中的索力控制方法

闫维明, 张 志, 陈彦江, 杨小森

(北京工业大学 工程抗振与结构理论北京市重点实验室, 北京 100124)

摘 要:针对平行钢绞线斜拉索施工过程中的索力控制问题,根据逐根张拉的斜拉索施工工艺,建立了张拉过程中索-梁-塔的力学模型;并以斜拉索索力均匀为目标,按正装分析法推导了挂索时单根钢绞线的张拉力计算公式。在此基础上结合等值张拉法,消除了挂索期间温度变化对钢绞线张拉力的影响,并给出了施工和运营过程中的索力测量方法。北方某斜拉桥的工程实践表明:根据该方法确定的单根钢绞线张拉力进行张拉,能够得到较均匀的索力;不论单根钢绞线拉力还是总索力,误差都在 5% 以内,均能满足施工控制的精度要求;该方法可供同类型斜拉索施工参考。

关键词:斜拉桥;正装分析;索力控制;单根张拉;索力均匀

中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)05-0130-05

Method of Cable Tension Controlling in the Long-span Cable-stayed Bridge Construction

YAN Wei-ming, ZHANG Zhi, CHEN Yan-jiang, YANG Xiao-sen

(Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: In allusion to the cable tension controlling problem in the parallel strand stayed-cable construction, on the basis of construction techniques of applying tension loads one by one, the mechanical model of the cable-girder-tower in the process of construction was established. With the equal cable tension as a goal, the formula was deduced with the method of forward-analysis, which could be used to calculate the initial tension of each strand in construction. The effect of temperature variations on the initial tension could be eliminated by using the formula with the method of equivalent tension. Moreover, a method was proposed to measure the cable tension in the processes of construction and performing the function. Finally, the practice in one cable-stayed bridge in the north indicated that 1) the uniform cable tension could be obtained by the proposed method; 2) the tension error range of whether a single strand or the whole stayed-cable was within 5%, and the result could meet the needs in construction control; 3) the method could provide reference for the similar stayed-cable construction.

Key words: cable-stayed bridge; forward-analysis; cable tension controlling; applying tension loads one by one; uniform cable tension;

大跨度斜拉桥体系的外形优美、跨越能力强,因而被广泛应用于实际工程^[1]。斜拉索是斜拉桥非常

重要的受力构件,平行钢绞线斜拉索是目前设计中使用较多的 1 种斜拉索结构形式。该类型斜拉索在

收稿日期:2010-02-15

基金项目:北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ200910005002)

作者简介:闫维明(1960-),男,教授,博士生导师,主要从事工程抗震、减震与结构健康监测研究,
(E-mail) yanwm@bjut.edu.cn.

施工时常采用单根张拉的斜拉索挂索工艺,即调整为零,集束成索,将制索、挂索与初张拉合而为一^[2]。利用小型卷扬机和小吨位千斤顶即可完成挂索,施工便利、快捷,在高空的桥塔上施工尤其具有优势。因此,在实际工程中应用十分广泛。

由于平行钢绞线斜拉索采用单根挂索单根张拉,若各根钢绞线的初始张拉力不均匀,在荷载作用下,会导致一部分钢绞线的拉力小而另一部分钢绞线的拉力可能超过极限强度,造成个别钢绞线被拉断,在不确定车辆荷载或其它偶然荷载的作用下,成桥后这种情况会更突出^[3]。所以,在斜拉桥施工过程中,如何保证平行钢绞线张拉的均匀性与索力测量的准确性是斜拉桥施工控制的重点和难点。

目前,有关整根斜拉索索力控制与调整的研究和对单根张拉的斜拉索挂索工艺的介绍^[4-7]已很多,但对同一斜拉索中单根钢绞线张拉力控制的研究却很少。周正茂^[8]等通过倒退分析法得到了挂索过程中单根钢绞线张拉力的相互关系,并实现了索力均匀的目标,但每确定一根钢绞线张拉力,就需进行一次结构分析。文章^[9]根据等值张拉法,通过挂索过程中结构变形的几何关系确定了各根钢绞线的张拉力,也取得了较好的效果。

根据斜拉索单根张拉的施工工艺,以每根钢绞线张拉力均匀为目标,按照正装分析法推导了斜拉索张拉过程中每根钢绞线的张拉力计算公式,并给出了后续各工况及运营中的索力测量方法。该方法思路清晰、形式简单且无需大量计算。该文还以北方某斜拉桥的挂索、调索和索力测量为例,验证了该张拉力计算公式和索力测量方法的精度。

1 斜拉索张拉过程中的力学模型的建立

1.1 悬臂施工阶段的斜拉索张拉力计算公式

挂索时在的两侧对称张拉,如图 1 所示。

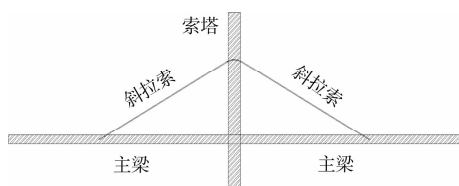


图 1 对移张拉示意图

假设钢绞线的一端固结在塔上,塔梁连接处固结。将主梁对钢绞线的约束等效为沿索方向刚度为 k_0 的弹簧。在挂索过程中,当张拉某一钢绞线时,主梁将产生变形,斜拉索两锚固点会相对靠近,这一变形使已张拉完毕钢绞线的拉力以同一变化值减小。

根据此过程,当张拉第 2 根钢绞线时,其力学模型简化如图 2 所示。

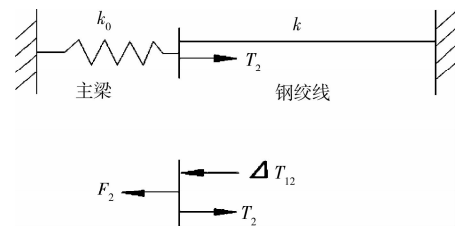


图 2 张拉第 2 根钢绞线时的力学模型

据平衡条件和变形协调条件得:

$$\Delta T_{12} = \frac{T_2}{1 + \frac{k_0}{k}} = \frac{T_2}{1 + \alpha} \quad (1)$$

其中: T_2 为第 2 根钢绞线张拉完成后的拉力; k_0 为主梁等效刚度,由施工过程的仿真计算得出; k 为单根钢绞线的刚度; ΔT_{12} 为张拉第 2 根钢绞线后第 1 根钢绞线的拉力变化值。

在下面的推导中, T_i 为第 i 根钢绞线张拉完后的拉力; ΔT_{ij} 为张拉第 j 根钢绞线后第 i 根钢绞线的拉力变化值。

同理当张拉第 3 根钢绞线时,其力学模型简化如图 3 所示

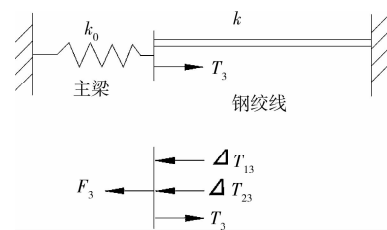


图 3 张拉第 3 根钢绞线时的力学模型

同样由平衡条件和变形协调条件得:

$$\Delta T_{13} = \Delta T_{23} = \frac{T_3}{2 + \alpha} \quad (2)$$

依次类推可得第 n 根钢绞线张拉完成后,前 $n-1$ 根钢绞线拉力的变化值为

$$\Delta T_{1n} = \dots = \Delta T_{(n-1)n} = \frac{T_n}{n - 1 + \alpha} \quad (3)$$

斜拉索初张拉的目标为各钢绞线累积索力达到该索的设计索力,且各钢绞线拉力应均匀一致。所以,当 n 根钢绞线全部张拉完成后,各钢绞线的最终拉力都应等于 T_n ,其值由式 $T_n = \frac{F}{n}$ 确定,其中 F 为初张拉设计索力。

由张拉的逆过程可得各根钢绞线的张拉力:

$$T_i = \Delta T_{i(i+1)} + \dots + \Delta T_{in} + T_n = \frac{n + \alpha}{i + \alpha} T_n \quad (4)$$

按上式确定的张拉力进行张拉能保证初张拉完毕后索力的均匀性。在实际张拉时,应在式(4)的基础上叠加夹片回缩造成的索力损失,损失值根据施工经验确定。

1.2 全桥合拢后的斜拉索张拉力计算公式

全桥合拢后结构体系已发生变化,如图 4 所示。

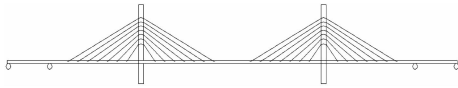


图 4 合拢后的结构示意图

斜拉索张拉时塔的两侧仍是对称张拉,但两侧的主梁等效刚度 k_0 不再相同。由于张拉工艺相同,各钢绞线的张拉力仍然为:

$$T_i = \frac{n + \frac{k'_0}{k}}{i + \frac{k'_0}{k}} = \frac{n + \alpha' T_n}{i + \alpha'} \quad (5)$$

此时,式(5)中的 k'_0 应取为合拢后结构对应部分的等效刚度。

2 温度对斜拉索张拉力的影响

挂索是一个复杂的过程且历时较长,期间的温度变化对结构的影响^[10-14]不可忽略,特别是对主梁的变位影响较大。在施工中一般采用避免温度变化和消除温度影响相结合的办法控制温度影响。近年来人们根据晚上无日照,温度变化小的特点,认为此时结构各部分温度基本接近,而且因温差及其它外力因素引起的滞后变形也已产生。因此建议现场索力测试及索力调整应选择夜间或清晨气温比较平稳时,其效果较理想^[15]。

在前面的推导过程中,没有考虑温度变化对斜拉索张拉力的影响。所以,在温度较稳定的时段,按式(4)确定的张拉力进行张拉能够实现索力均匀的目标。如果挂索期间温度变化较大,索塔及主梁将产生较大的变形,已张拉完毕的钢绞线拉力将会发生较大变化。如果此时继续按照式(4)确定的张拉力进行张拉,必将造成很大的误差。

为减小斜拉索施工期间温度变化对索力的影响,可以将该文的方法与等值张拉法结合起来使用。具体操作过程如下:

1) 当第 1 根钢绞线提升到位后,在其上安装单孔测力传感器 A。第 1 根钢绞线张拉力按照该文方法确定,当其张拉到位后进行临时锚固。

2) 在第 2 根钢绞线上安装单孔测力传感器 B。对第 2 根钢绞线进行张拉,当传感器 B 的读数为传

感器 A 的读数与夹片回缩造成的拉力损失值之和时,停止张拉并锚固,最后拆除传感器 B。

3) 重复步骤 2),张拉完全部钢绞线。

4) 最后拆除传感器 A,并对第 1 根钢绞线进行补张拉,当张拉到张拉最后一根钢绞线时 B 传感器显示的张拉力时,停止张拉并锚固。

按上述方法进行张拉,既能实现索力均匀的目标,又可以消除温度变化对索力的影响。

3 索力测量方法

斜拉索的索力对桥梁结构安全至关重要,所以索力的测量将贯穿整个施工过程及运营过程中。在初张拉完毕后斜拉索始终处在弹性范围内工作,随工况的改变,同一斜拉索的各钢绞线拉力按同一差值 ΔT 变化。由此可得:

某 1 钢绞线当前工况下的拉力:

$$T''_i = T'_i + \Delta T \quad (6)$$

斜拉索当前工况下的总索力:

$$F'' = F' + \Delta T * n \quad (7)$$

其中: T'_i 、 T''_i 分别为前 1 工况和当前工况下第 i 根钢绞线拉力; ΔT 为单根钢绞线在两相邻工况下的拉力差值; F' 、 F'' 分别为前 1 工况和当前工况下的总索力。因此,以前一次的测量结果为基础,式(6)、式(7)便可用于初张拉完毕后各工况及运营期间索力的测量。

4 工程实例

北方某斜拉桥全长 606.8 m,主桥为 30+60+120+60+30 m 预应力混凝土双塔双索面斜拉桥,桥宽 12.5 m,塔的每侧有 7 对斜拉索,全桥共 56 根斜拉索。斜拉索采用 OVM250 AT-61 环氧涂层钢绞线(斜拉索横断面如图 5),

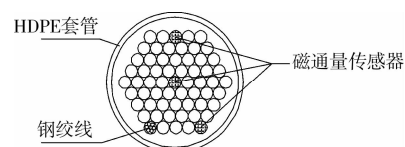


图 5 斜拉索断面图

塔上锚固方式为贯通锚固(分丝管)。为便于施工和运营过程中及时测量索力,需在每根斜拉索安装索力传感器。穿心式压力传感器虽然可方便地测量总索力,但价格昂贵。所以在该桥上选用性价比更高的小型磁通量索力传感器,安装在每根斜拉索的第 31 根钢绞线上。在主跨 7 号索、边跨 4 号索这 2 个关键位置,为提高索力测量的准确性,在第 3、61

根钢绞线上再添装 2 个磁通量传感器。下面取 8 号塔的斜拉索为研究对象,通过实测值与理论值的对比来验证所提方法的正确性及精度。

4.1 初张拉完成后单根钢绞线的拉力

初张拉完成后,各钢绞线拉力的实测结果如表 1。

表 1 单根钢绞线拉力均匀性分析

传感器位置	编号	T/kN	f/kN	$\epsilon/\%$
边跨上游 4# 索	03	56.02	55.04	+1.78
	31	53.34	55.04	-3.09
	61	54.12	55.04	-1.66
边跨下游 4# 索	03	56.26	55.04	+2.22
	31	54.02	55.04	-1.85
	61	55.43	55.04	+0.71
主跨上游 7# 索	03	56.64	56.56	+0.14
	31	54.46	56.56	-3.71
	61	55.74	56.56	-1.45
主跨下游 7# 索	03	54.77	56.56	-3.16
	31	55.68	56.56	-1.56
	61	55.37	56.56	-2.10

注: T 为初张拉完成后单根钢绞线实测拉力; f 为初张拉完成后单根钢绞线目标拉力; ϵ 为单根钢绞线拉力误差

从表 1 可以看出,初张拉完成后索力均匀性较好。所取 4 根斜拉索中,同索单根钢绞线拉力最大误差为 3.71%,同索各钢绞线最大相对误差为 4.87%。这样的结果可以满足施工控制的精度要求。

4.2 初张拉完成后各工况下的总索力

以初张拉完成后的相邻 4 个工况为例,由式(7)计算的总索力结果如图 6。可以看出,以 1 次总索力为基础运用式(7)计算的总索力 F_1 与相应工况下理论值 F_2 基本一致,误差都在 5% 以内。

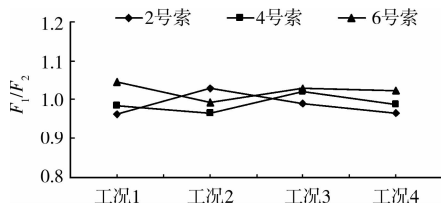


图 6 总索力的计算值与理论值的比较

5 结论

通过对平行钢绞线斜拉索的施工工艺进行仔细研究,按正装分析法推导了单根钢绞线的张拉力计算公式,并给出了各工况下的索力测量方法。北方

某斜拉桥的工程实践表明,该文中所推导索力公式不仅形式简单而且具有较高的精度。不论单根钢绞线拉力还是总索力,其误差基本在 5% 之内,较好地满足了工程要求,为施工控制的顺利进行和后期索力监测提供了必要的基础。

参考文献:

[1] YONG ZHU, YU-MEI FU, WEI-MING CHEN, et al. Health monitoring system for Dafosi cable-stayed bridge [C]//Proceedings of the SPIE -The International Society for Optical Engineering, SPIE-Int. Soc. Opt. Eng, 2003,5057:289-297.

[2] 唐明翰,李义. 现代斜拉索[J]. 桥梁建设,1997(4):1-8.
TANG MING-HAN, LI YI. Modern stayed -cable[J]. Bridge Construction,1997 (4):1-8.

[3] 刘扬,王徐力,杨继. 钢绞线式斜拉索施工阶段的索力测试[J]. 公路与汽运,2007(2):89-91.
LIU YANG, WANG XU-LI, YANG JI. Measurement of cable tension in the parallel strand stayed-cable construction [J]. Highways & Automotive Applications, 2007(2):89-91.

[4] YONG-AN WANG , ZHU-SHENG JIANG SHI-TONG LIU, et al. Construction techniques for the wuhekou cable-stayed bridge[C]//Transportation and Development Innovative Best Practices 2008 - Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation and Development Innovative Best Practices 2008, TDIBP 2008. American Society of Civil Engineers, 2008:438-443.

[5] 冷雪浩,林乐强,黄伟东. 平行钢绞线斜拉索单根钢绞线张拉过程中的索力控制[J]. 北方交通. 2008(1):83-84.
LENG XUE-HAO, LIN LE-QIANG, HUANG WEI-DONG. Control of cable force in the process of stretching the single strand of parallel strand stayed-cable[J]. Northern Communications, 2008(1):83-84.

[6] 陈林. 平行钢绞线斜拉索施工技术[J]. 公路交通技术, 2008,(5):66-69.
CHEN LIN. Construction technique of parallel steel stranded wire stay cable[J]. Technology of Highway and Transport, 2008(5):66-69.

[7] 唐顶峰,陈双庆. 安康七里沟汉江大桥环氧钢绞线斜拉索安装工艺[J]. 预应力技术:施工技术版,2009(2):23-27.
TANG DING-FENG, CHEN SHUANG-QING. Installing technology of epoxy-coated strand stayed-cable in ankang qiligou hanjiang bridge[J]. Prestress Technology: Construction Technique Edition, 2009 (2):23-27.

- [8] 周正茂, 龚振球, 王素娟. 倒退分析法确定拉索中钢绞线的张拉力[J]. 公路交通科技, 2009, 26(4):73-77.
ZHOU ZHENG-MAO, GONG ZHEN-QIU, WANG SU-JUAN. Tension control for strands in cables based on reverse analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(4):73-77.
- [9] 张育智, 李乔, 唐亮. 宜宾中坝金沙江大桥索力控制研究[J]. 铁道标准设计, 2005(8):27-30.
ZHANG YU-ZHI, LI QIAO, TANG LIANG. Research of tension control in yi bin zhong ba jin sha jiang bridge[J]. Railway Standard Design, 2005(8):27-30.
- [10] 陈常松, 颜东煌, 程海浅, 等. 大跨度 PC 斜拉桥施工控制中的温度效应分析[J]. 公路交通科技, 2002, 19(6):84-87.
CHEN CHANG-SONG, YAN DONG-HUANG, CHEN HAI-QIAN, et al. Analysis of temperature influence on long-span prestressed concrete cable-stayed bridge construction control[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(6):84-87.
- [11] ELBADRY M M, GHALI A. Temperature variations in concrete bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(10):2355-2374.
- [12] 李盼到, 朱巍志, 郭慧乾. 大跨度混凝土斜拉桥温度效应的研究与分析[J]. 特种结构, 2007, 24(1):76-80.
LI PAN-DAO, ZHU WEI-ZHI, GUO HUI-QIAN. Study and analysis of temperature effects on long-span concrete cable-stayed bridge[J]. Special Structures, 2007, 24(1):76-80.
- [13] ZHAO-DONG XU, ZHI-SHENG WU. Simulation of the effect temperature variation on damage detection in a long-span cable-stayed bridge[J]. Structural Health Monitoring, 2007, 6(3):177-189.
- [14] BARR P J, STANTON J F, EBERHARD M O. Effects of temperature variations on precast, prestressed concrete bridge girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(2):186-194.
- [15] 周天宇, 陈双庆. 矮塔斜拉桥环氧钢绞线拉索张拉施工技术[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2009, (2):127-130.
ZHOU TIAN-YU, CHEN SHUANG-QING. Tensile construction technique of Epoxy-coated Strand Stayed-Cable in Extradosed Cable-stayed bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technology Edition, 2009, (2):127-130.

(编辑 胡玲)

(上接第 96 页)

- [7] 韩相奎, 叶长兵, 林年丰, 等. 异波折板高效水解酸化废水的处理技术[J]. 中国环境科学, 2004, 24(3):360-363.
HAN XIANG-KUI, YE CHANG-BING, LIN NIAN-FENG, et al. The treatment technology of wastewater treatment by high efficient hydrolysis-acidogenesis of anaerobic baffled reaction (ABR) [J]. China Environmental Science, 2004, 24(3):360-363.
- [8] KRISHNA G G, KUMAR P, KUMAR P. Treatment of low strength complex wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR) [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(17):8193-8200.
- [9] 郭永福, 郭维华. 内循环式水解酸化反应器的动态实验研究[J]. 苏州科技学院学报:工程技术版, 2003, 16(4):11-15.
GUO YONG-FU, GUO WEI-HUA. A dynamic experiment on the internal-circulation hydrolytic-acidification reactor[J]. J. of University of Science and Technology of Suzhou: Engineering and Technology, 2003, 16(4):11-15.
- [10] AHAV O, LOEWENTHAL R E. Measurement of VFA in anaerobic digestion; the five-point titration method revisited[J]. Water S. A., 2000, 26(3):389-392.
- [11] 许传珍, 孙村宝, 郝二成, 等. 5 点 pH 值滴定法测定 VFA 方法的研究[J]. 市政技术, 2007, 25(1):54-56.
XU CHUAN-ZHEN, SUN CHUN-BAO, HAO ER-CHENG, et al. Research of measuring VFA by titration of pH value in 5 points [J]. Municipal Engineering Technology, 2007, 25(1):54-56.
- [12] WANG X Y, ZENG G M, ZHU J L. Treatment of jean-wash wastewater by combined coagulation, hydrolysis/acidification and Fenton oxidation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 153(1/2):810-816.
- [13] 喻学敏, 白永刚, 刘伟京, 等. ABR 反应器预处理综合印染废水的研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(6):981-984.
YU XUE-MIN, BAI YONG-GANG, LIU WEI-JING, et al. Study on pretreatment of printing and dyeing wastewater by ABR [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(6):981-984.

(编辑 胡玲)