

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.05.037

某地锚式悬索桥施工监控研究

黄祖华

(福建省建筑科学研究院, 福建 福州 350025)

摘要:以某地锚式悬索桥为工程背景,通过建立悬索桥整体有限元模型及施工过程中现场监测,对工程背景悬索桥的主缆施工及钢箱梁吊装施工过程的控制方法进行了研究。研究表明:悬索桥的几何非线性对于悬索桥的找形分析影响显著。所建立的悬索桥有限元模型可以较为准确的模拟工程背景悬索桥的施工过程。施工现场监测结果与有限元计算结果较为吻合,较好的指导了工程背景桥的施工。

关键词:地锚式悬索桥;施工监控;有限元模型;钢箱梁吊装

中图分类号:U448.25

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2016)05-0193-05

Construction Control Method of Ground – Anchored Suspension Bridge

HUANG Zuhua

(Fujian Academy of Building Research, Fuzhou, Fujian 350025, China)

Abstract: A ground-anchored suspension bridge was selected as an example to study the construction control method of ground anchored suspension bridge. Based on the finite element model of suspension bridge and site monitoring of construction process, the construction control method of main cable construction and the steel box girder hoisting of suspension bridge was discussed. The conclusions are the finite element model of suspension bridge can accurately simulate the construction process of suspension bridge. The monitoring results of the site are in good agreement with the finite element calculation results, which can guide the construction of the project.

Keywords: ground-anchored suspension bridge; construction monitoring; finite element model; steel box girder hoisting

悬索桥由于其外形美观,造价经济,近年来较多的应用于城市桥梁建设,而其中地锚式悬索桥的应用最为广泛。由于悬索桥是一个由多种构件组成的复杂结构体系,同时还是一种柔性结构^[1-2],在正常使用荷载作用下,即使材料没有超过弹性范围。其荷载也呈现明显的非线性效应^[3-5]。其非线性效应包括缆索在自重作用下具有一定的垂度;荷载作用下结构的大位移;结构的初始内力影响;混凝土收缩徐变等诸多因素^[6-7]。因此与其他类型桥梁相比,悬索桥施工过程中的结构几何形状较难控制和管理,容易产生各种施工误差^[8-9]。在悬索桥施工过程中,通过施工监控对施工过程实施有效的控制是悬索桥成功施工的关键^[10-11]。

本文以跨径 150 m 的地锚式悬索桥为对象,通过施工监控对其施工过程进行控制,希望使得各施工阶段的实际状态最大限度的接近理想状态,确保

成桥后的内力状态和几何线形符合设计要求。并希望通过本文所述的监控方法为其他类似桥型悬索桥的施工监控提供借鉴作用。

1 工程背景

某地锚式悬索桥全长 247.5 m,主跨 150 m,矢跨比 1/10,桥面宽 4.5 m,主梁为浅加劲钢筋混凝土桁架,梁高 1.08 m,钢筋混凝土塔高 22.7 m,为人行桥,如图 1 所示。由于该桥停用较长时间,且缺乏必要的定期养护,因此需对此悬索桥进行彻底的提升改造。具体提升改造方案为采用钢箱梁方案更换人行桥主梁,梁高 1.1 m,宽 4.7 m。废除旧桥主缆,采用跟旧主缆一样的高强钢丝绳,主缆计算跨度与原设计保持一致。主塔和鞍座仅需更换部分零件,不需完全更换。

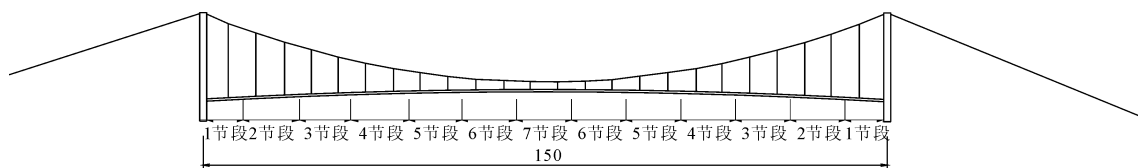


图 1 工程背景悬索桥总体布置图(单位:m)

针对以上的悬索桥提升改造方案,工程背景悬索桥的基本施工程序如图 2 所示,先拆除旧桥主缆和混凝土桁架,然后架主缆、挂吊索,最后安装加劲梁和铺设桥面系等。其中,主缆架设和加劲梁的吊装是施工关键环节。在施工过程中,索塔和主缆上的荷载在不断变化,主缆的线形也随之变化,从承受自重的悬链线变为承受全部荷载的近似抛物线的曲线。因此,为了使得悬索桥改造完成后其加劲梁和主缆均能达到设计线形,主要的施工监控内容有:对主缆的控制;对索塔上主鞍预偏控制、吊装箱梁线形的控制等。

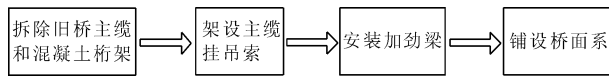


图 2 工程背景悬索桥施工流程

2 施工监控过程数值模拟

2.1 有限元计算模型

施工过程的模拟计算主要是通过建立悬索桥的有限元模型对施工过程中各关键工序的控制值进行计算,通过计算了解悬索桥施工过程中悬索桥各种荷载状况下的索塔鞍座位移,主缆线形等理论值,并作为施工监控过程中的控制目标。

本文采用的计算软件为 MIDAS/Civil 软件。首先将大桥进行有限元离散,钢箱梁和塔柱采用梁单元模拟,主缆和吊杆采用柔索单元模拟。所建立的工程背景悬索桥有限元模型严格按照设计图纸的几何尺寸建模,索塔以及混凝土横梁弹性模量 $E = 2.8 \times 10^{10}$ Pa,泊松比为 0.2;主缆弹性模量 $E = 1.099 \times 10^{11}$ Pa,泊松比为 0.3,并在模型中设置为只拉状态;吊杆弹性模量 $E = 1.95 \times 10^{11}$ Pa,泊松比为 0.3,同样为只拉状态,塔柱底部为固结。在整体模型中,鞍座和主塔采用节点耦合方式连接。同时有限元模型还通过实测的索力以及环境振动测试结果进行了修正,使得所建立的模型与实际结构更为接近。所建立的平面计算模型离散图如图 3 所示。

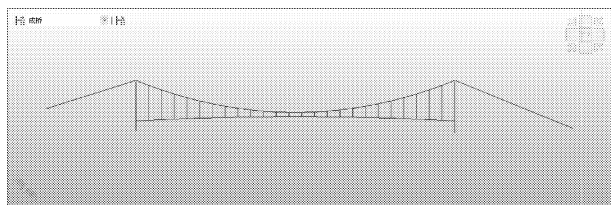


图 3 平面计算有限元模型离散图

2.2 计算流程

施工过程模拟计算分析主要包括以下内容:成桥目标状态计算;空缆状态分析;箱梁吊装过程计算等。采用倒退分析和前进分析结合的方法。首先,迭代调整计算模型的主缆水平力和单元节点坐标,建立符合设计目标的计算模型;然后,倒推分析得到空缆状态和裸塔状态;然后再按照实际的施工过程模拟主缆架设和箱梁吊装过程进行前进分析。由于塔柱附近吊杆的拉力分布与箱梁的吊装和合龙过程有关,因此,倒退分析也需要用到前进分析的成果,前进分析与倒退分析应综合进行并能够闭合。通过模拟施工过程进行计算分析,得到施工过程中的一些重要的控制参数,各关键工况的理想目标状态和轨迹。表 1 为施工过程中基于所建立的有限元模型的计算内容。

表 1 施工过程中主要模拟计算内容

施工阶段	施工内容	模拟计算内容
主缆索股安装施工	索股制造;基准索股安装;一般索股安装;预紧缆;正式紧缆	索股制造长度;基准索线形控制参数;一般索股架设顺序;索股张拉力
索夹吊索安装	索夹安装;吊索制造	索夹放样控制参数;吊索长度
箱梁安装	吊装箱梁	箱梁吊装过程中结构的内力和变形状态
二期施工	主缆缠丝;桥面附属设施安装;路面铺装	结构内力和变形

3 主缆施工控制

3.1 空缆线形

悬索桥施工控制最为关键的即是如何计算主缆空缆的线形,只有了解了空缆线形才能在其基础上

确定主缆的无应力长度。首先以设计线形为基准,采用分段悬链线方法计算成桥状态下的主缆线形;进而采用倒退分析法,将成桥状态作为初始状态,按照与实际施工假设顺序完全相反的施工过程对结构进行倒退施工。卸去桥面铺装,然后再逐一拆去加劲梁段,只剩下主缆、鞍座及主塔,求出每一个阶段的平衡状态,得到悬索桥的空缆线形。基于倒退分析得到的空缆线形,进行正常施工工序的前进分析,将分析结果与之前一致的成桥状体进行核对,校核其准确性。然而由于悬索桥的强烈几何非线性因素,其前进和倒退分析得到的结果往往不完全一致,且随着悬索桥跨径的增大,其误差也越大,因此需要在计算中进行前进分析与倒退分析的交互迭代,直到其误差达到精度要求才能较为准确的确定空缆线形。

图4为计算过程中迭代次数及误差的关系图,图4所示由于悬索桥几何非线性的影响,第一次前进分析与倒退分析结束后主缆跨中点的高程误差达到143 mm,随着迭代次数的增加,高程的误差逐渐减小,最终经过25次迭代后,设计主缆跨中高程与计算主缆跨中高程的误差为0.4 mm,符合工程背景悬索桥的精度要求。

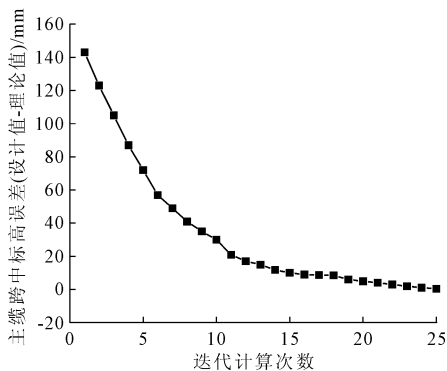


图4 主缆跨中标高计算次数及误差

3.2 主缆无应力长度

主缆索股的无应力长度直接关系到主缆假设线形,需要在缆索制造前提供。主缆各索股的无应力索长按式(1)计算。

$$\sum L_0 = \sum L_i \times (1 - F_i/AE) \quad (1)$$

其中: L_0 为主缆单元的无应力索长; L_i 为主缆单元有应力索长; F_i 为主缆单元轴力; A 为主缆截面面积; E 为主缆的弹性模量。

3.3 基准索股控制

主缆的线形控制是悬索桥施工控制的重点环节,包括基准索股线形控制和一般索股的线形控制。

其中基准索股的线形是基准值,一般索股是根据若即若离的原则控制与基准索股相对高差来安装。因此,大跨度悬索桥主缆安装过程中,基准索股的施工控制是关键。

为方便施工,本桥索股跨中控制点采用固定理论跨中里程位置的方法确定。通过比较该里程索股顶面标高与目标值的差别判断垂度调整量。基准索股的标准状态是指20℃,塔顶偏位为零时,基准索股的线形。通过收集到的资料和测量数据修正设计参数,重新计算成桥状态,并根据主缆无应力长度不变的原则可以确定主缆空缆状态。然后,由基准索股到主缆中心点的距离(应充分考虑一般索股安装时0~+5 mm相对偏差)及主缆的切角,可计算出标准状态(20℃)时基准索股空缆状态各跨中控制点坐标。一方面,由于存在塔柱的初始偏位、鞍座安装偏差、外荷载(风、猫道)和温度效应等影响,索股架设时实际跨度和理想状态有一定差别;另一方面,基准索股安装时的实际温度与标准状态(20℃)不一致。这两个方面对各跨索股矢高的影响不能忽略,精确控制实际索股架设线形时,可以根据实测温度场和塔顶变形进行温度和跨度修正。基准股在架设过程中,中跨跨中高程最大误差为2 mm,小于设计要求(-10 mm~+25 mm),中跨上、下游基准索股相对偏差为0,小于设计要求(≤ 10 mm),边跨最大误差为-48 mm,略大于设计要求(-15 mm~+25 mm)。

一般索股采用控制与基准索股/相对基准索股的相对高差进行架设。全部主缆索股架设完成并紧缆后,对主缆线形、塔顶坐标、锚碇坐标进行全面的测量,并根据实测温度场进行修正。该桥一般索股架设完成后,主缆中跨线形最大误差为-40 mm,略大于设计要求(-15 mm~+35 mm)。

3.4 索夹定位和安装

为了消除塔顶偏位测量误差对索夹放样精度的影响,采用相对坐标法进行索夹的放样,即将仪器置于塔顶鞍座处,通过里程确定索夹位置。为了避免误差累计,取两主鞍座的中心点作为坐标原点,从中间向两侧进行放样。放样过程中根据实测的温度和跨度变化进行修正。

3.5 吊索索长调整

在前面的计算分析中,已得到吊索索长和索力。

为保证桥面的线形与设计一致,按实际的空缆线形,对吊索的设计长度进行修正。此时,重新计算实际结构的重量及分布,包括索夹、钢箱梁、桥面铺装等,以实测主缆线形为基础,反算吊索的实际下料

长度。计算得到的本桥吊杆下料长度如表 2 所示。

表 2 吊索下料长度

吊索编号	下料长度/m	吊索编号	下料长度/m	吊索编号	下料长度/m	吊索编号	下料长度/m
1	16.735	7	5.608	13	2.337	19	6.916
2	14.334	8	4.517	14	2.555	20	8.443
3	12.152	9	3.645	15	2.991	21	10.188
4	10.188	10	2.991	16	3.645	22	12.152
5	8.443	11	2.555	17	4.518	23	14.334
6	6.916	12	2.337	18	5.608	24	16.735

4 箱梁吊装控制

当空缆已定,箱梁施工过程主要是各施工阶段的主缆位移增量、吊杆索力变化、桥面标高等的比较。

4.1 主缆鞍座位移和线形

本桥吊装施工为先吊装中跨跨中节段,再由中间往两边依次吊装,在临近桥塔位置,先吊装靠近桥

塔位置的节段,最后吊装合龙段。节段编号:中间节段编号为 1 节段,由中间往两边进行编号,编号依次递增。全桥共 13 个节段,编号为 1#~7#,详见图 5。

在箱梁吊装控制分析中,按照实际的荷载和施工顺序,计算出各个吊装阶段箱梁线形和鞍座位移。在每个施工阶段,测量实际箱梁线形和鞍座位移,并与计算预测值进行比较,确定下一施工阶段的修正调整值。

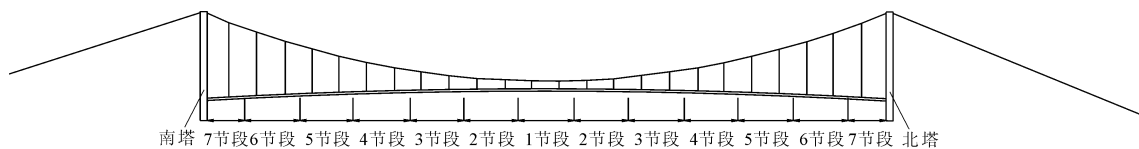


图 5 箱梁节段编号图

表 3 为箱梁吊装期间南北塔鞍座纵桥向位移实测值与理论值的对比,由表 3 可以看出,实测值与理论计算值吻合较好。

表 4 为箱梁吊装期间主缆跨中测量值与理论值的对比,结果表明实测变形的趋势和规律与理论值

吻合较好,吊装完成后最大偏差为 3.0 cm,主缆线形始终控制在较好的状态下。

在钢梁吊装焊接完成后,对桥面的线形进行了测量,测量结果,最大偏差为 22 mm,在规范^[10-11]要求之内。

表 3 箱梁吊装主要施工工况南北塔鞍座纵桥向位移值

施工阶段	北塔鞍座纵桥向位移/m			南塔鞍座纵桥向位移/m		
	理论值	上游侧实测值	下游侧实测值	理论值	上游侧实测值	下游侧实测值
吊装 1 节段	0.094	0.075	0.079	0.045	0.033	0.029
吊装 4 节段	0.180	0.184	0.188	0.097	0.095	0.075
吊装 6 节段	0.201	0.211	0.214	0.111	0.100	0.101

表 4 主缆线形测量 单位:m

施工阶段	线形测量值			线形测量值与理论值偏差	
	上游	下游	理论标高	上游	下游
初始状态	15.446	15.440	15.300	0.146	0.140
吊装 1 节段	13.873	13.870	13.589	0.284	0.281
吊装 4 节段	13.828	13.821	13.755	0.073	0.066
箱梁吊装完成	14.258	14.256	14.228	0.030	0.028

4.2 桥面线形

表 5 为吊装完成后设计与实测桥面线形的比较情况,通过比较可知:吊装到位后,设计与实测桥面线形最大误差为 82 mm,上下游最大高差为 20 mm,精度符合设计要求。

5 结 论

(1) 本文以一跨径为 150 m 的地锚式悬索桥为

背景,通过考虑几何非线性的找形分析和迭代分析,得到了悬索桥的空缆线形,说明悬索桥的几何非线

性对悬索桥的找形分析具有显著影响,需要多次迭代提高精度。

表5 吊装完成桥面线形测量结果

里程	上游侧(距离箱梁中心线 2.05 m) 线形测量值/m		差值 1/mm	下游侧(距离箱梁中心线 2.05 m) 线形测量值/m		差值 2/mm	上下游 高差/mm
	设计	实测		设计	实测		
K0+006	10.576	10.585	9	10.576	10.594	18	9
K0+012	10.836	10.876	40	10.836	10.881	45	5
K0+018	11.081	11.122	41	11.081	11.111	30	11
K0+024	11.301	11.337	36	11.301	11.339	38	2
K0+030	11.495	11.522	27	11.495	11.523	28	1
K0+036	11.666	11.705	39	11.666	11.696	30	9
K0+042	11.814	11.841	27	11.814	11.835	21	6
K0+048	11.937	11.958	21	11.937	11.976	39	18
K0+054	12.034	12.059	25	12.034	12.074	40	15
K0+060	12.109	12.146	37	12.109	12.151	42	5
K0+066	12.158	12.190	32	12.158	12.196	38	6
K0+072	12.183	12.222	39	12.183	12.218	35	4
K0+078	12.183	12.219	36	12.183	12.218	35	1
K0+084	12.158	12.192	34	12.158	12.191	33	1
K0+090	12.109	12.145	36	12.109	12.143	34	2
K0+096	12.034	12.067	33	12.034	12.063	29	4
K0+102	11.937	11.964	27	11.937	11.958	21	6
K0+108	11.814	11.847	33	11.814	11.832	18	15
K0+114	11.666	11.705	39	11.666	11.701	35	4
K0+120	11.495	11.556	61	11.495	11.536	41	20
K0+124	11.301	11.374	73	11.301	11.363	62	11
K0+132	11.081	11.118	37	11.081	11.113	32	5
K0+138	10.836	10.918	82	10.836	10.906	70	12
K0+144	10.576	10.620	44	10.576	10.614	38	6

(2) 本文所建立的工程背景悬索桥离散化有限元模型较好的模拟了悬索桥施工过程,为工程背景悬索桥施工监控提供了可靠的依据。

(3) 通过对工程背景悬索桥提升改造过程中的主缆线形、主梁标高等的监控测量与理论值的比较,说明工程背景悬索桥监测值与理论值吻合的比较,较好的指导了该桥的施工进程。

参考文献:

- [1] 梁智圭,田瑞忠,陈土通.自锚式悬索桥施工监控研究[J].城市道路与防洪,2005,3(2):84-86.
- [2] 谭红梅,刘晓鑫,肖汝诚,等.悬索桥施工监控典型问题及其解答[J].结构工程师,2008,24(3):155-158.
- [3] 郭福,乔卫华.悬索桥基准索股架设若干影响因素分析与控制[J].桥隧施工与机械,2013:71-73.
- [4] 顾安邦,张永水.桥梁施工监测与控制[M].北京:机械

工业出版社,2005.

- [5] 夏咏明,吴存泓,周志清,等.南京六合白果桥施工监控[J].现代交通技术,2009,6(6):59-63.
- [6] 张志国,邹振祝,赵玉成,等.悬索桥主缆线形解析方程解及应用[J].工程力学,2005,22(3):172-176.
- [7] 占维.基于解析理论的悬索桥主缆线形的迭代算法[J].山西建筑,2010,36(22):338-340.
- [8] Brotton D M. A general computer program for the solution of suspension bridge problem[J]. Structural Engineering, 1966, 44(5):161-167.
- [9] McDonald Brain M, Peyrot Alain H. Analysis of cables suspended in sheaves[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(3):693-706.
- [10] 中华人民共和国交通部.公路桥涵设计通用规范:JTG D60-2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [11] 中华人民共和国交通部.公路桥涵施工技术规范:JTG/T F50-2001[S].北京:人民交通出版社,2001.