

嘉鱼长江公路大桥索塔应力及线形施工控制

裴山¹, 陈常松²

(1. 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 长沙理工大学 土木工程学院)

摘要: 嘉鱼长江公路大桥为主跨 920 m 的非对称钢混组合斜拉桥, 南北索塔高度大于 230 m, 其应力及线形控制成为施工难点。由于嘉鱼桥下塔柱具有粗短的特点, 在施工过程中出现张拉下横梁预应力束导致塔柱根部外侧产生较大拉应力; 中塔柱横撑顶推力温度及焊缝收缩影响会削弱顶推效果; 超高索塔结构夏季高温下施工立模位置受温度影响大。该文以嘉鱼长江公路大桥北索塔为例, 对其应力和线形进行有效控制, 通过有限元计算软件 Midas 和 BDCMS 对索塔施工阶段的应力位移分析, 采取低温合龙下横梁并减少第一批预应力张拉束以改善下塔柱应力; 从计算和控制方法上保证顶推力施加到位; 塔柱在夏季施工高峰期, 采用双棱镜法对主塔进行立模定位控制, 结果显示基于双棱镜法施工塔柱浇筑成品线形控制良好。

关键词: 索塔; 低温合龙; 主动横撑; 双棱镜法追踪

1 工程概述

嘉鱼长江公路大桥是武汉城市圈环线高速公路西环孝感~仙桃~咸宁段的控制性工程, 桥梁全长 4 660 m, 嘉鱼长江公路大桥主桥为主跨 920 m 的混合梁斜拉桥, 跨度组合为 (70+85+72+73) m+920 m+(330+100) m, 主桥北边跨采用预应力混凝土箱梁, 长 312.5 m, 中跨和南边跨采用钢箱梁, 钢混结合段在北塔江心侧 12.5 m 处, 钢混结合段长度为 8.5 m, 全桥共 120 对斜拉索, 南塔高 251.41 m, 北塔高 235 m, 总体布置图如图 1 所示。

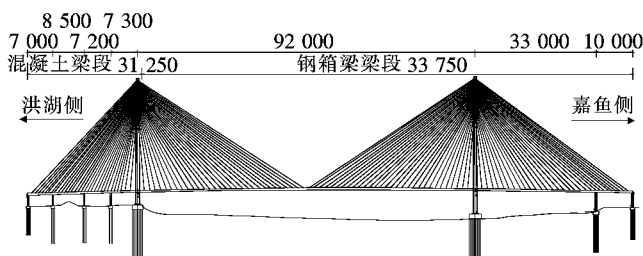


图1 嘉鱼桥总体布置图(单位:cm)

北索塔上塔柱高度 79 m, 中上塔柱结合段高度 26.45 m, 中塔柱高度 98.395, 中下塔柱结合段高度 21.265 m, 下塔柱高度 7.9 m, 如图 2 所示。桥塔采用 C50 混凝土, 除下横梁为全预应力混凝土构件外, 其余

部分均为钢筋混凝土构件。中上塔柱采用液压爬模施工, 下塔柱采用塔梁异步施工, 横梁浇筑完成中下塔柱连接段施工并张拉第一批预应力, 中塔柱每施工 4 个节段后安装主动横撑, 上塔柱按 4.5 m 节段施工并安装钢锚梁。

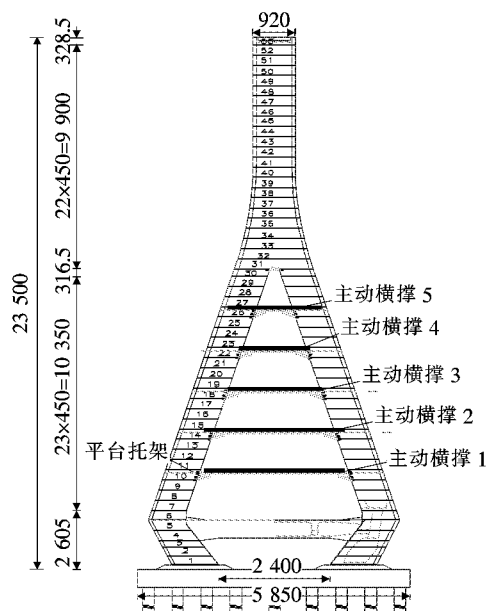


图2 北索塔立面图(单位:cm)

对于超高索塔结构有效地控制应力和线形尤为重要。为了有效降低嘉鱼桥北塔下塔柱根部外侧在张拉

收稿日期:2019-11-30(修改稿)

作者简介:裴山,男,硕士,E-mail:2454634864@qq.com

第一批下横梁预应力束产生过大的拉应力,采用了低温合龙索塔下横梁的方法,目前这种方法在同类索塔施工中鲜有应用;主动横撑安装过程中计入温度及焊缝收缩影响,有效解决了主动横撑顶推不到位的问题;采用双棱镜法对温度影响量进行修正,为索塔全天候施工放样提供条件。

2 有限元模型建立

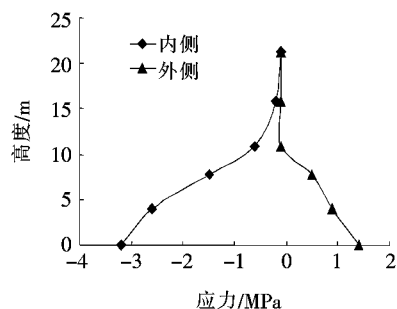
利用 Midas 和 BDCMS 有限元软件建立嘉鱼长江公路大桥北塔索塔结构施工模型,节段划分高度与实际施工节段一致,标准节段高度 4.5 m。索塔模型均采用梁单元进行模拟,主动横撑按照实际刚度考虑,约束条件为:主动横撑与塔柱之间采用刚性连接。基础固结,基础与承台、中塔柱与上塔柱均为刚性连接,支架用弹性连接中仅受压约束方式。下横梁与中下塔柱结合段连接采用带刚臂单元进行模拟,避免了普通梁单元模拟的不准确性。主动横撑的轴力以温度荷载的形式施加,避免顶推力以集中力施加在塔柱上。分阶段施工模型中计入爬模荷载、收缩徐变等作用。全索塔模型中共划分 131 个节点,136 个单元。

3 索塔应力及线形施工控制

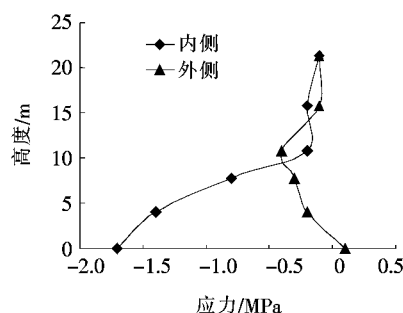
3.1 下塔柱施工过程中的应力

通过有限元 Midas 计算分析,在张拉索塔下横梁第一批预应力束后下塔柱根部外侧拉应力为 4.2 MPa,远超安全允许值。针对下塔柱根部外侧应力过大情况,同类型的索塔下塔柱施工中采用了设置横向拉杆方法,但由于嘉鱼桥索塔下横梁支架在设计初期并未考虑横向拉杆的布设空间,在设置上存在一定困难且操作复杂。基于施工方便与结构安全的考虑,采用减少第一批索塔下横梁预应力束,并在低温条件下合龙索塔下横梁的方法。对下塔柱施工工序进行调整,待 5~6 节段浇筑完成后,在 0 °C 条件进行索塔下横梁合龙,然后张拉第一批一半的预应力束。设计基准温度为 15 °C,模型计算中采用降温 15 °C 后进行索塔下横梁合龙,再张拉预应力束,调整后的下塔柱应力如图 3 所示。

由图 3 可知:预应力束仅张拉一半后,下塔柱根部外侧的最大拉应力从原来的 4.2 MPa 减少至 1.5 MPa,虽有效地减少了下塔柱根部应力偏大的情况,但结构偏不安全。若北索塔下横梁采用低温合龙后再张



(a) 仅减少预应力束



(b) 低温合龙后张拉

图 3 下塔柱应力图

拉预应力束,塔柱根部外侧拉应力进一步减少,由 1.5 MPa 减少至 0.1 MPa,根部外侧应力维持在较低的水平,有足够的安全储备。低温合龙下横梁利用在温度较低的情况下进行下横梁连接而气温升高进行预应力的张拉,结构在升温过程中将产生伸缩或轴向变形产生附加内力。对塔壁有向外的轴力能部分抵消第一批预应力束张拉产生的向内侧的轴力;另一方面,低温条件充分释放混凝土收缩徐变对下塔柱根部的约束,从而增加塔柱根部外侧的压应力储备。现场施工时选择温度较低的 1 月份进行下横梁的连接合龙,嘉鱼桥所处地区此时间段温度为 0 °C 左右,故选择气温回升的 3 月份,温度为 15 °C 左右的有日照中午进行第一批预应力的张拉。嘉鱼桥索塔已于 2018 年 7 月完工,结果显示北索塔下塔柱根部受力性能良好,表面无明显裂缝产生。

3.2 主动横撑的安装

对于双向倾斜的钻石形索塔,在施工过程中索塔截面受力最不利位置受到已浇筑节段的自重作用和施工荷载法向分力弯矩叠加导致截面产生过大的拉应力。为保证索塔结构在施工中的安全性和可靠性,在上下游塔柱之间安装临时横撑并施加一定的顶推力。对中塔柱应力控制关键在于主动横撑的安装,由于对中塔柱应力监测存在困难,所以对主动横撑的安装控

制重点是精细化计算和可靠的施工措施,以确保施加的力顶推到位。

应用影响矩阵法确定各道主动横撑最优顶推力,由于主动横撑连接过程中会受到温度的影响,需要计入温度因素。在安装主动横撑工况对结构进行升温 10℃和降温 10℃的分阶段模型计算中,可求单位升降温对施加主动顶撑力大小的影响从而确定温度系数。横撑顶推采用液压顶推控制,为了解决液压方式工作期间油压千斤顶持力效果不理想的问题,在顶撑力施加到目标值后,将主动横撑与预埋板间进行焊接,但焊接过程中会出现焊缝收缩等状况,需对焊缝收缩影响顶推力进行补偿,在地面进行焊接试板试验得到焊缝收缩量。计入温度焊缝收缩后最终预顶力计算公式如下:

$$F = F_1 + \Delta F_1 + \Delta F_2 = F_1 + k \Delta T + \frac{EA \cdot \Delta L}{L} \quad (1)$$

式中: ΔL 为焊接变形长度; L 为横撑长度; ΔF 为超顶力; EA 为轴向刚度; k 为温度修正系数。

依此方法可以确定第 1~5 道主动横撑实际需要施加的顶推力分别为 4 060、4 200、3 750、1 930、2 120 kN。主动横撑安装时需保证上下游塔柱施工到同一节段,避免主动横撑顶推后塔柱产生不均匀的内力。在施力过程中如果发现力值有下降的情况,应适当施加部分顶推力。主动横撑预顶力施加完成后,须在同一均匀温度场中立即将主动横撑与上下游塔柱连接。如果环境温度偏离 15℃,则实际预顶力需要按式(1)进行修正。主动横撑施加顶推力和焊接工作选择在均匀温度场进行。为了缩短主动横撑与塔壁焊接的时间,应先将主动横撑一端与塔壁先行焊接好,另一端自由,一旦预顶力施加到位后,再将主动横撑的自由端与塔壁焊接,完成主动横撑与索塔两塔肢的快速可靠连接。主动横撑安装过程中关键截面的应力及轴力变化见表 1。

表 1 主动横撑安装应力变化

工况	关键位置应力/MPa				
	中塔柱根部	第 1 道横撑位置	第 2 道横撑位置	第 3 道横撑位置	第 4 道横撑位置
安装 1 号横撑前后	0.6→-0.1				
安装 2 号横撑前后	0.7→-0.3	0.5→-0.4			
安装 3 号横撑前后	0→-0.4	0.1→-0.8	0.5→-0.4		
安装 4 号横撑前后	-0.4→-0.6	-0.7→-0.9	0→-0.4	0.5→0.1	
安装 5 号横撑前后	-0.8→-0.8	-1.3→-1.4	-0.5→-0.7	0.4→-0.1	0.5→-0.1

注:“→”前、后数据为未安装横撑、安装横撑后该位置的应力大小;应力拉为正,压为负。

由表 1 可知:安装 5 道主动横撑过程中,关键截面的拉应力均小于 1 MPa,最大值为 0.7 MPa,出现在第 2 道主动横撑安装后中塔柱底部截面外侧,索塔施工过程中的危险状态出现在索塔节段施工最大悬臂状态。在第 5 道主动横撑安装后,关键截面处于全面受压状态,索塔结构具有足够的安全保证。值得注意的是,主动横撑在安装过程中最大轴力出现在下一道主动横撑安装前,此时塔柱处于最大悬臂状态。

3.3 主塔线形控制

夏季施工温度对立模位置的影响较大,特别是太阳直射造成日照温差的影响尤为明显。由于塔身温度场变化(相对于设计基准温度)导致塔身空间位置发生偏移,这种偏移随塔身高度的增大而增大。嘉鱼长江公路大桥主塔高度超过 200 m,温度变化的影响不能忽视。嘉鱼长江大桥主塔 6~11 月份施工高峰期,根

据当地气象资料显示:10 月份最高气温仍然高达 34℃,最低气温为 18℃,昼夜温差大。如果选择回避温度方法,模板的放样只能在晚上进行。基于节约工期和施工精度的考虑,嘉鱼桥主塔施工过程中选择了双棱镜追踪的方法。

3.3.1 追踪棱镜方法

在塔柱相邻节段或相近节段预埋件适当位置焊接安装两个追踪棱镜,传统方法安装的都是单个棱镜,但是对于空间坐标仅靠一个点确定预偏量是否准确有待商榷,以棱镜点坐标变化来替代立模坐标是不准确的,因为棱镜点与立模点间存在一定的高差,选择两个棱镜观测点可以确定一条平面直线,通过两点坐标反算实际立模点的预偏值对立模点控制坐标进行修正。追踪棱镜法的流程是:在塔柱爬模系统爬升后次日凌晨时段或温度影响较小时段对两个棱镜观测点进行测

量确定基准点位置,具体到模板放样时再次测量两个追踪棱镜并对偏位进行实时修正,获得实时模板放样目标点的放样坐标,具体流程如图4所示。

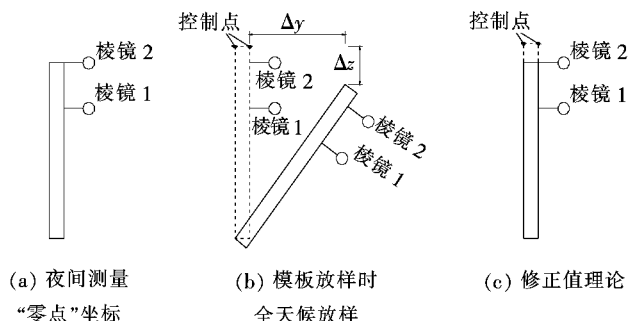


图4 追踪棱镜法流程图

3.3.2 索塔线形控制成果

为了了解塔柱在温度影响下的偏位情况,在中塔柱上布置棱镜测点,进行24 h观测,观测结果如图5所示。用追踪棱镜法模板放样工作在全天都可以进行,但为了保证施工控制的可靠性,模板验收依旧选择夜间进行(或无温差影响时),对于成品验收也需要采用追踪棱镜的方法进行温度影响修正。应用追踪棱镜法后索塔偏位如图6所示。

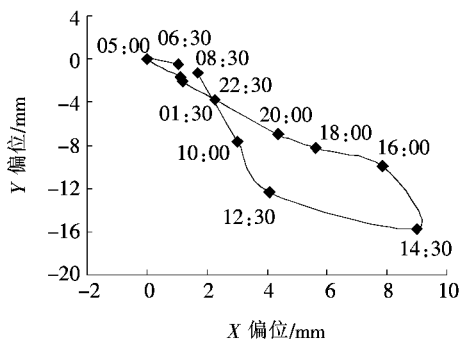


图5 测点24 h内偏位变化

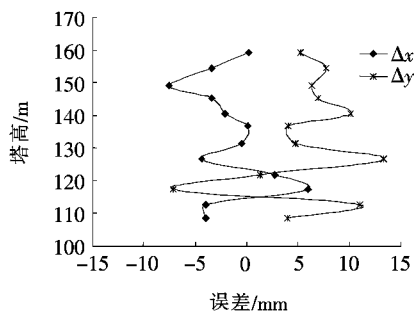


图6 索塔偏位

由图5可知:塔柱在温度影响作用下发生较大偏移,最大偏移量达到16 mm,出现在下午14:30左右,并且索塔高度越高,温度场变化越剧烈,变形量越大,在凌晨03:00~07:00影响较小基本可以忽略,温度影

响表现出一定的滞后性,在该时段立模放样可以不进行温度修正,成品验收在非忽略时段和模板放样一样也要进行温度修正。由图6可知:使用追踪棱镜法后塔柱成品偏位大部分控制在10 mm以内(Δx 表示顺桥向偏位, Δy 表示横桥向偏位),最大偏移量出现在横桥向,最大值为13 mm。应用双棱镜追踪法,能够有效地控制索塔温度影响偏位,索塔节段绝大多数成品误差控制在1 cm以内。

4 结论

以嘉鱼长江公路大桥北塔为工程背景,对索塔应力及线形进行施工计算分析与控制,得出以下结论:

(1) 由于下塔柱在张拉第一批预应力后外侧拉应力过大,采取了减少第一批预应力张拉束并采用低温下合龙索塔下横梁的技术,下塔柱根部外侧应力水平降低,有效地控制了应力水平。

(2) 主动横撑安装过程中温度和焊缝收缩对顶推力影响明显,通过精细化计算和可靠的施工措施以确保施加的力顶推到位,结果表明中塔柱应力控制在安全水平。

(3) 温度对塔柱的偏位影响在下午14:00时最大,在凌晨03:00~07:00影响较小,可以忽略,应用双棱镜追踪法能够很好地消除因温度影响造成立模控制点的偏位,嘉鱼桥索塔节段绝大多数成品误差控制在1 cm以内,索塔线形控制较好,目前嘉鱼桥索塔于2018年7月施工完成,结构线形控制满足规范要求。

参考文献:

- [1] 詹建辉,廖原,王成启. 嘉鱼长江大桥总体设计[J]. 中外公路,2017(3).
- [2] 霰建平,李松,王北辰,等. 鄂东长江公路大桥桥塔拉杆及支撑系统设计与施工[J]. 桥梁建设,2009(3).
- [3] 刘龄嘉. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [4] 辛酉阳,王庆峰,郑瑞杰. 赤石大桥索塔施工过程仿真分析[J]. 施工技术,2015(11).
- [5] 焉学永,张念来,欧阳钢,等. 安庆长江大桥索塔中塔柱施工技术[J]. 中外公路,2004(6).
- [6] 徐登云,孙小猛,赵飞,等. 超高钻石型索塔拉杆一撑杆优化设计方法研究[J]. 铁道标准设计,2015(4).
- [7] 李源,王凌波,刘鹏,等. 港珠澳大桥青州航道桥索塔结形撑安装精细化分析[J]. 中国公路学报,2016(12).
- [8] 罗显平,翁方文,郑建新. 大跨斜拉桥索塔施工及控制技术[J]. 公路,2017(5).

湖北省干线公路桥梁现状调查与分析

彭松, 章恒

(中南安全环境技术研究院股份有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要:干线公路桥梁对于保障国省干线交通的贯通及周边地区经济的发展有着重要的意义。为了了解湖北省国省干线桥梁的安全可靠性现状,在湖北省普通公路桥梁2015—2017年桥梁病害情况调查的基础上,对各种类型桥梁及主要病害进行了归纳分析,并详细列举了桥梁安全隐患及安全通行措施。

关键词:国省干线;桥梁;调查;分析

1 现状概述

湖北省位于中国中部地区,紧靠长江,交通优势明显,在中国的发展历史中占据重要地位,第一座跨长江的大桥就坐落于此。全省等级公路比重约占93.82%,全省行政村通村公路占比约98.67%。随着湖北省经济的快速发展,普通国、省干线公路车流量大增,部分线路的交通量趋于饱和,甚至已大大超过公路设计交通量,特别是大比重的大型、特大型重载货车对公路设施损害很大,公路桥梁已变成公路交通最大的安全隐患。部分设计标准低、通车年限长的桥梁承载能力遭受严峻考验,同时衍生出桥梁不同类型的病害,影响桥梁结构的安全性及耐久性。该文以湖北省国省干线桥梁为例,通过2015—2017年的桥梁检测,对其现状进行较全面的调查,对桥梁出现的典型病害进行总结和分析,并详细列举其桥梁安全隐患及安全通行措施,可为后续工作的开展提供支撑。

2 国省干线公路桥梁调查统计

根据JTG H11—2004《公路桥涵养护规范》以及

JTG/T H21—2011《公路桥梁技术状况评定标准》的规定,桥梁技术状况等级分为1~5类。

1类桥:桥梁呈全新状态,整体功能良好。

2类桥:桥梁有局部病害,对其整体使用功能不产生影响。

3类桥:桥梁存在较多缺陷,整体功能不理想,但桥梁可以使用。

4类桥:重点构件有较大缺陷,桥梁整体功能受到很大影响,桥梁状况较差,承载能力降低,导致正常使用功能得不到保障。

5类桥:重点构件存在缺陷影响结构安全,桥梁整体状况较危险。

2015—2017年全省17个市州检测并参与评定的桥梁共计4203座,根据检测结果进行技术状况评定得到湖北省干线桥梁技术状况等级分布如图1所示。

由图1可得:4类桥梁占13.82%,5类桥梁占0.86%。大多数桥梁评定等级为1~3类,其桥梁使用结构功能可以得到基本保障,约占85.32%。湖北省干线公路桥梁通过“十二五”的公路交通发展战略机遇,部分桥梁使用状况得到了明显改善,但是,由于全省干线桥梁基数庞大,危病桥只能逐一处治。在近3年的检测过程中发现,4、5类桥梁仍占较大比例,其中

[9] 李毅.斜拉桥双向倾斜桥塔主动横撑设计及施工控制[J].桥梁建设,2013(3).

[10] 胡明义,黄冰释,余俊林,等.鄂东长江公路大桥设计关键技术[J].桥梁建设,2011(5).

[11] 傅琼阁,肖文福,胡国,等.苏通大桥超高塔施工控制技

术[J].中外公路,2008(5).

[12] 游庆仲,董学武,张雄文.苏通大桥挑战与创新[J].东南大学学报(自然科学版),2006(11).

[13] 颜东煌,宋志仕,涂光亚,等.混凝土厚壁箱形截面日照温度场有限元分析[J].中外公路,2015(6).

收稿日期:2019-10-31

作者简介:彭松,男,硕士,E-mail:553787571@qq.com