

A形索塔开口式下牛腿施工技术研究

李福友

(中铁建大桥工程局集团第一工程有限公司, 辽宁 大连 116033)

摘要:半漂浮体系斜拉桥索塔一般设置下横梁构造, 该文综合武穴长江公路大桥南索塔下塔柱较短, 受力条件复杂等情况, 索塔采用A形, 并设置开口式下牛腿支撑主梁体系。以往索塔下横梁施工工艺主要分为塔梁同步、塔梁异步。此索塔下牛腿构造产生水平分力大, 下牛腿塔柱龄期、应变幅度控制要求高, 而且分两次浇筑, 需重点考虑第二次浇筑对第一次已浇筑混凝土加载影响等因素; 综合上述因素, 比选后, 选择塔梁同步施工方案, 采用落地钢管支架, 而且设置水平横撑, 同步对称浇筑混凝土施工; 通过合理安排施工顺序, 择优施工工艺, 圆满完成下牛腿施工。工程实践表明: 该施工工艺可为下牛腿安全、高效、优质完成施工提供可靠保障。

关键词:A形索塔; 开口式; 下牛腿; 同步施工; 水平分力; 对称施工

随着中国社会、经济的高速发展, 基础设施建设正在大力推进, 桥梁施工技术要求也在相应地提高。如何快速、安全地施工, 确保达到设计目的正在成为桥梁施工领域的一项重要任务。

斜拉桥建设施工中, 索塔下横梁一般为连续大跨度箱形断面的预应力混凝土结构。若索塔下部为分离式箱形多室断面的预应力混凝土下牛腿, 根据以往的施工方法, 多采用下牛腿与塔身异步施工的工序, 先行利用模板施工主塔塔身至高出下牛腿一定高度, 再利用支架浇筑下牛腿。此种方法中塔柱与下牛腿结合处混凝土龄期不同, 应变幅度不一致, 结合处本身受力非常大, 结构存在缺陷, 会对桥梁在服役周期产生不利影响。同时在后期施工每个单侧下牛腿时, 由于下牛腿呈倒三角形, 浇筑时产生的水平力较大, 导致支架规模很大。

1 工程概况

武穴长江大桥主桥为双塔六跨连续不对称混合梁斜拉桥, 主桥长 1 403 m, 桥跨布置为: (80+290) m (北边跨)+808 m (主跨)+(75+75+75) m (南边跨)。

南索塔采用A形结构, 索塔总高 233.6 m, 包括

上塔柱(81.0 m)、上横梁、中塔柱(131.0 m)、下塔柱(21.6 m)和下牛腿。

下牛腿(图1)设在主梁下方, 采用单箱双室断面, 横桥向为预应力混凝土结构, 牛腿根部高 7.31 m, 端部高 4.0 m, 宽 9.5 m, 腹板厚 1.0 m, 顶底板厚 1.0 m。牛腿顶板布置 16 束 15—19 预应力钢绞线。采用单端张拉, 锚固段位于塔壁, 张拉端位于内侧牛腿顶面。预应力管道采用金属波纹管、智能循环压浆工艺。

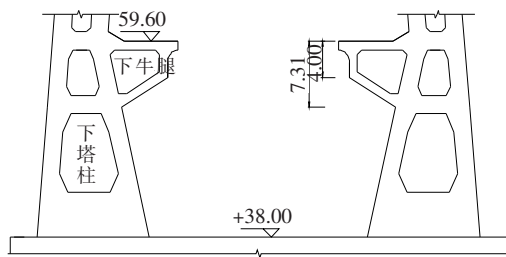


图1 索塔下牛腿构造(单位:m)

2 施工方案比选

参照世界各国同类大桥方案, 索塔类桥塔梁施工方案有两种, 即塔梁同步施工和塔梁异步施工, 根据以往施工经验及武穴长江公路大桥南主塔的施工特点, 对两种方案进行了比选, 结果如表1所示。

表 1 下牛腿施工方案比选

施工方案	优点	缺点
塔梁同步施工	① 塔梁连接部位的预应力管道、钢筋不需要预埋, 施工简单;不需要设置接头,利于保障施工质量;② 塔梁为一个整体,塔梁接触部位无施工缝	① 塔柱液压爬模系统需要改造,且增加安拆次数及施工投入;② 下横梁制约塔柱施工进度,不利于工期控制
塔梁异步施工	① 塔柱施工液压爬模系统不需要反复安拆,减少施工投入;② 塔柱与下横梁可同步施工,能有效压缩施工时间	① 塔梁连接部位需要设置较多接头,且接头预埋时精度控制难度较大;② 塔梁连接部位产生施工缝,增加质量控制难度

通过最终比选,基于节点工期和经济性要求,且下牛腿施工质量可通过管理措施得到保障,因此选择塔梁同步施工方案。

3 下塔柱及下牛腿施工流程

下牛腿分两层与塔柱第 4、5 节同步浇筑施工,分节高度为 4.21 m+3.1 m(图 2)。

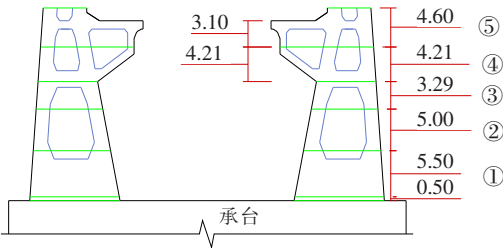


图 2 下塔柱与牛腿分节布置图(单位:m)

下塔柱①~③节段施工利用爬模模板及部分爬架,提升法施工。下牛腿与④、⑤节段同步施工,除牛腿内侧外,其余三侧进行爬模施工。施工流程:步骤 1[图 3(a)]:用爬模模板及上平台施工塔柱第①节段,并预埋爬锥。步骤 2[图 3(b)]:安装爬模承重系统,进行第②节塔柱施工。步骤 3[图 3(c)]:安装爬模下操作系统完成整个爬模系统拼装,进行塔柱第③节段施工。步骤 4[图 3(d)]:① 拆除横桥向内侧爬模,塔设牛腿支架;② 两侧同步对称浇筑塔柱第④节与牛腿第一层混凝土,严格控制浇筑速度与数量。步骤 5[图 3(e)]:继续向上对称施工,同步完成塔柱第⑤节段与下牛腿第二层浇筑。

4 下牛腿支架设计及施工

4.1 支架设计

根据下牛腿结构特点,采用落地钢管贝雷梁支架,

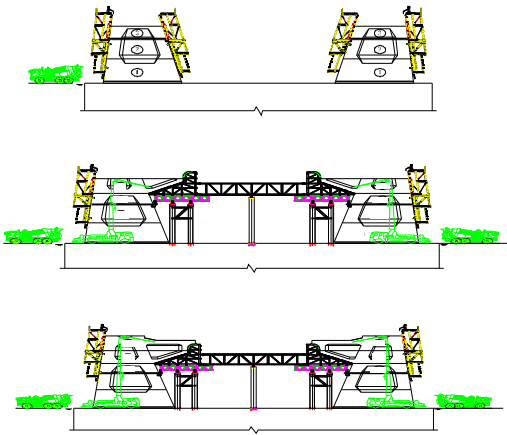


图 3 下塔柱及下牛腿施工流程

并设置排架系统,同时考虑牛腿施工水平分力,设置横向支撑系统,通过控制混凝土同步对称浇筑施工抵消水平分力影响。

支架立柱采用 $\phi 1\,000\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 钢管,连接系采用 $\phi 325\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 钢管。立柱顺桥向布置 3 排,横桥向布置 5 排,钢管立柱顶设置钢楔块及双拼 I56a 工字钢分配梁,分配梁顶横桥向铺设贝雷梁;在第③节塔柱上下游内侧各预埋 5 个牛腿,牛腿采用 20 mm 钢板制作,塔柱施工时设置 $\phi 50\text{ mm}$ 预留孔,牛腿安装完成后,穿设 $\phi 32\text{ mm}$ 精轧螺纹钢筋,并施加 10.3 t 预拉力。

下牛腿斜底板模板系统采用 13 片排架结构,主要由 I28b 和 I16b 型钢组成;同时考虑下牛腿施工期间

产生水平分力,在上下游排架间设置桁架系统,共布置 5 排,横撑采用 $\phi 325\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 钢管,连接系采用 $\phi 219\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 钢管。支架布置如图 4 所示。

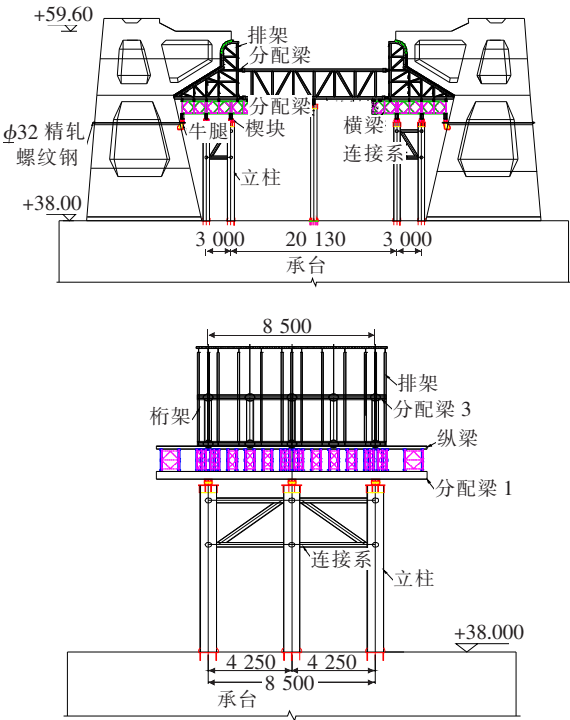


图 4 下牛腿支架布置图(除标高单位为 m 外,其余: mm)

4.2 结构验算

4.2.1 第二层浇筑混凝土对第一层荷载的影响

下牛腿分两次进行浇筑,第一层浇筑 4.21 m,第二层浇筑 3.1 m,第二层混凝土荷载直接作用在第一层已经浇筑的混凝土上,采用模型(图 5)进行验算。

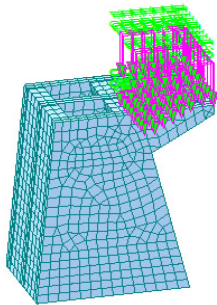


图 5 第二层浇筑工况模型图

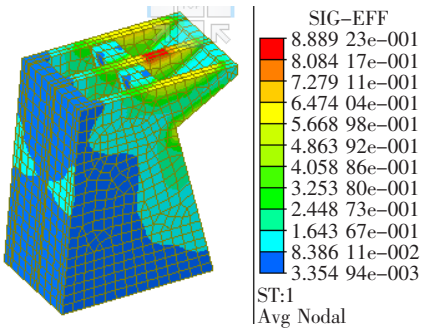


图 6 应力计算结果(单位: MPa)

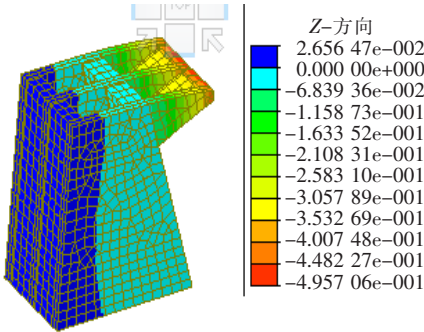


图 7 变形计算结果(单位: mm)

下牛腿第一层混凝土最大变形为 0.5 mm。

经过计算,第二层混凝土荷载传递至现浇支架的荷载很小,所以下牛腿支架设计荷载仅考虑第一次混凝土浇筑最不利荷载情况。

4.2.2 支架计算

采用 Midas/Civil 2016 建立模型(图 8),具体计算结果见表 2。

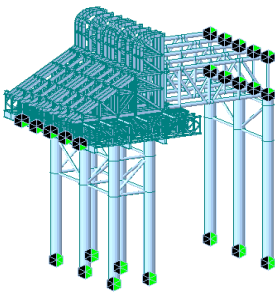


图 8 支架模型图

经计算,支架系统各杆件强度、刚度、稳定性均满足规范要求。

4.3 支架施工

在下塔柱施工时,同步进行支架搭设,在承台施工时,埋设相关预埋件,第③节塔柱施工完成后,拆除内侧爬模系统安装塔柱牛腿预埋件,并穿设精轧螺纹钢进行预张拉。

(1) 应力计算

应力计算结果如图 6 所示。

下牛腿第一层最大受力为: $\sigma=0.89\text{ MPa}$,满足规范要求。

(2) 变形计算

变形计算结果如图 7 所示。

表 2 支架验算结果统计

部位	受力情况	稳定性
排架	$\sigma_{\max}=42.2\text{ MPa}<[\sigma]=190\text{ MPa}$ $\tau_{\max}=59\text{ MPa}<[\tau]=110\text{ MPa}$	应力较小,稳定性不进行计算
贝雷梁	弦杆:轴力 $27\text{ kN}<560\text{ kN}$ (容许承载力) 竖杆:轴力 $86\text{ kN}<210\text{ kN}$ (容许承载力) 斜杆:轴力 $39\text{ kN}<172\text{ kN}$ (容许承载力)	
立柱顶分配梁	$\sigma_{\max}=75\text{ MPa}<[\sigma]=190\text{ MPa}$ $\tau_{\max}=40\text{ MPa}<[\tau]=110\text{ MPa}$ $f_{\max}=3.8\text{ mm}<l/400=10.63\text{ mm}$	
桁架	$\sigma_{\max}=94.8\text{ MPa}<[\sigma]=190\text{ MPa}$ $\tau_{\max}=14\text{ MPa}<[\tau]=110\text{ MPa}$	$\sigma=\frac{N}{\varphi_x A}=44\text{ MPa}<[\sigma]=190\text{ MPa}$
钢管立柱	$N_{\text{FK max}}=1\ 130\text{ kN}, M_{\text{FK max}}=30\text{ kN}\cdot\text{m}$	$\sigma=\frac{N}{\varphi_x A}+\frac{\beta m x M x}{\gamma_x W_x\left(1-0.8\frac{N}{N' E x}\right)}=39.2\text{ MPa}<[\sigma]=190\text{ MPa}$

由于支架系统支撑于承台上,基础无沉降,钢结构弹性变形可通过计算得出准确数据,故该工程无需进行预压施工。

支架总体按照由下至上的施工顺序进行安装,各构件在后场进行精确下料加工,集中运输至现场进行安装,各杆件间采用焊接连接,焊接时现场技术人员必须检查构件的尺寸及焊缝质量,确保满足设计要求,支架施工工艺流程如图 9 所示。

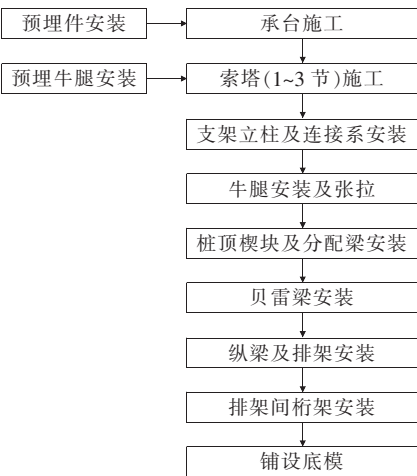


图 9 支架施工工艺流程图

在牛腿混凝土浇筑过程中,安排专人进行巡查,并在主要受力部位安装应变计,在浇筑过程中进行应力

监测,同时测量人员对支架变形情况进行持续观测,发现异常情况,必须马上放缓或暂停混凝土的浇筑,经检查分析原因并判断支架结构安全后,方可继续进行混凝土浇筑作业施工。

5 下牛腿施工

5.1 模板施工

底模采用方木+竹胶板,铺设前先根据弹性变形计算结果调整分配梁顶标高,达到设计要求后将底模铺设在排架上,底模拼装时注意接缝严密,底模根据现场实际情况将标准模板进行修改,使模板尺寸及拼缝符合要求。

侧模采用大块整体式钢模,标准模板尺寸为 $2.0\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 。面板厚度为 6 mm ,横竖向背肋为 10 mm 扁钢,间距为 50 cm ,连接螺栓为 M18。牛腿内模倒角较多,且箱室高度变化较大,采用木模板进行施工,采用碗扣支架及方木进行支撑。

5.2 钢筋施工

下牛腿钢筋主要包含 5 种规格,主筋型号为直径 32 mm 螺纹钢筋,采用机械连接,其余钢筋采用焊接和绑扎形式。钢筋在标准化加工厂集中进行下料加工,分批、分规格运输至现场;下牛腿与下塔柱钢筋同步进行安装施工。牛腿主筋采用滚轧直螺纹接头连

接,为确保钢筋的全断面连接质量,滚轧直螺纹采用一级接头。钢筋施工工艺流程如图 10 所示。

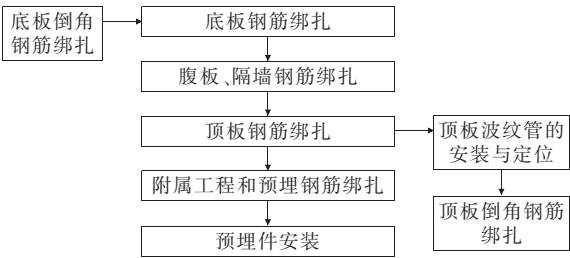


图 10 钢筋施工工艺流程

下牛腿预应力采用深埋锚工艺,即锚垫板栓接一段套筒。锚垫板应按要求对螺栓孔进行攻丝,施工塔柱时预先用泡沫塑料封堵套筒,防止施工时混凝土进入套筒内。预应力张拉时使用特制的工具式过渡板在牛腿外侧进行张拉。

波纹管安装时由钢筋定位架定位,定位间距为 1 m,以防止浇筑混凝土时上浮。接头管两端以胶带缠包,以防漏浆。波纹管的安装误差满足设计和规范要求。下牛腿预埋件主要包括:混凝土箱梁支架预埋件、附属工程预埋件、防雷扁铁、通风孔、电梯、检修通道、支座垫石、阻尼器、挡块等。所有外漏预埋件使用前进行防锈处理,施工前进行汇总,安装完成进行消项检查,避免遗漏。

5.3 混凝土施工

5.3.1 混凝土配合比设计

C50 高性能混凝土配合比从原材料选择、高工作性、高抗裂能力、高体积稳定性方面考虑,同时还应具备良好的耐久性。通过比选优化设计,最终确定 C50 混凝土配合比如表 3 所示。

表 3 C50 混凝土配合比

配合比/(kg·m ⁻³)							水灰比
水	水泥	砂	碎石	外加剂	矿粉	粉煤灰	
149	346	783	1037	4.81	63	72	0.31

5.3.2 混凝土施工

混凝土浇筑时为了减小混凝土自由落体高度,采用串筒下料进行混凝土浇筑,保证混凝土自由落体高度不大于 2.0 m。

混凝土浇筑时,严格控制两塔肢同步浇筑(包括混凝土浇筑速度、部位),以保证牛腿混凝土产生的水平分力通过排架间设置的桁架进行抵消,确保支架整体

稳定性。第一层浇筑时,先浇筑底板,然后对称浇筑腹板及隔墙;第二层混凝土浇筑时,先对称浇筑腹板及隔墙,然后浇筑顶板。

(1) 混凝土布料。混凝土采用 2 台汽车泵进行浇筑,按照先浇筑塔柱与牛腿下层混凝土,待混凝土浇筑高度与牛腿悬臂侧高度一致后,由牛腿外侧向塔柱一侧对称下料、分层布料原则施工,采取分区域作业形式。混凝土采用从中间分层对称浇筑,分层厚度为 30 cm,布料间距不超过 1.5 m,沿水平方向逐渐推进。底板及下倒角浇筑后等待一段时间,防止翻浆,同时设置压脚板。

(2) 混凝土振捣。下牛腿隔墙及倒角位置钢筋较密,现场配备 $\phi 30$ mm 振捣棒,对圆弧倒角区域及其他钢筋密集区域振捣施工,确保混凝土振捣密实。混凝土浇筑施工时,分区定块、定员作业,振捣时快插慢拔,严格控制棒头插入混凝土的间距、深度与作用时间,密切观察振捣情况,混凝土表面泛浆、不再冒出气泡视为混凝土振捣密实,防止混凝土表面出现蜂窝、麻面,甚至空洞等缺陷。混凝土振捣间距小于 40 cm,振捣上层混凝土时要插入下层混凝土 5 cm 以上。每个振动点振捣时间控制为 35~45 s,采用 $\phi 30$ mm 振捣棒施工时减小振捣间距(控制为 20 cm 左右),并适当延长振捣时间。

(3) 混凝土养护。混凝土侧面采用带模养护,顶面覆盖土工布洒水养护,养护时间不小于 14 d。

5.4 预应力施工

预应力钢束采用 $\phi 15-19$ 钢绞线,单个牛腿 16 束。标准强度为 1 860 MPa,每束张拉力为 4 557 kN,牛腿顶板钢束采用单端张拉,锚固段位于塔壁,张拉端位于牛腿内侧顶面。预应力管道采用金属波纹管、智能循环压浆工艺。预应力布置如图 11 所示。

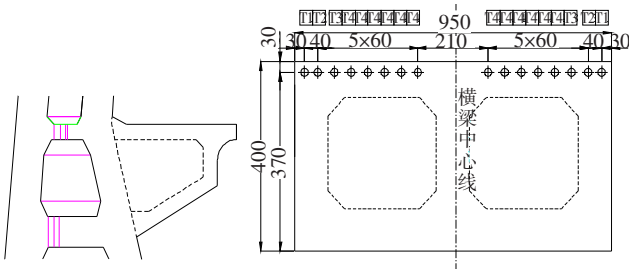


图 11 预应力布置(单位:cm)

5.4.1 管道成孔

预应力管道采用内径 100 mm 金属波纹管成孔,

为防止管道漏浆堵孔,所有中间连接处均采用胶带包扎严密。波纹管安装时采用“#”字形钢筋定位,并在节段管口连接处适当加密。波纹管安装过程中,预应力锚具与塔柱竖向钢筋相干扰时,将主筋向预埋套筒两侧移动,以保证波纹管的位置正确、线形平滑。

5.4.2 钢绞线下料、穿束

下料长度=理论长度+千斤顶工作长度+预留长度。钢绞线下料时采用砂轮切割机进行切割,禁止使用电焊及割枪进行切割。

穿束前采用空气压缩机清除管道杂质。为防止钢绞线锈蚀,所有预应力束均采取后穿法,即在张拉前穿束。钢绞线穿设时,先将钢绞线分组,并在其头部套接“子弹头”型钢套筒(或缠绕多层胶带),然后边转动钢绞线盘放松钢绞线,由人工将其送入孔道内。在已完成穿设的管道两端贴上标签号。

5.4.3 预应力张拉

(1) 预应力张拉顺序及要求。第二层混凝土达到设计强度的90%以上且养护7 d以上,由中间向两侧对称进行张拉施工。

(2) 预应力张拉施工。张拉时以张拉力与伸长量进行双控,以应力控制为主,伸长量控制为辅。

(3) 智能循环压浆。张拉后48 h内进行管道压浆,压浆采用智能循环压浆工艺。循环智能压浆系统通过无线电指令控制智能压浆台车进行压浆,使浆液在循环管道内满管路持续循环,排尽管道内空气。系统利用计算机智能技术,在压浆过程中进行压力、流量、水胶比三参数控制。保证浆液质量、压力大小、稳压时间等重要指标符合规范要求,确保压浆饱满和密实。浆体配制时应保证水泥浆的性质,降低水灰比,减少孔隙、泌水现象,防止水泥浆离析,保证水泥浆的稠度及强度。改善浆体孔隙结构,增强抗渗能力,减少和补偿水泥浆在凝结硬化过程中的收缩变形,浆体采用M50浆液。孔道压浆连续进行一次压完,以免孔道漏浆将临近孔道堵塞。压力为0.5~0.7 MPa,压浆充盈度应达到孔道另一端饱满且排气孔排出与规定流动度相同的水泥浆为止,关闭出浆口后,保持一个不小于0.5 MPa的稳压期,稳压期保持时间3~5 min。

(4) 封锚。张拉锚固完成后,将多余的钢绞线用砂轮机切除,钢绞线外露长度3~5 cm。压浆结束后,及时采用C50微膨胀混凝土进行锚头端部封堵,并加强养护,防止裂纹产生。

6 结语

武穴长江公路大桥南索塔下牛腿于2018年8月15日开始浇筑第一层混凝土(与索塔第④节同步浇筑)至2018年9月5日第二层混凝土(与索塔第⑤节同步浇筑)施工完成。采用上述方法进行施工,支架结构安全稳定,监控显示支架状态良好,混凝土质量控制较好,未产生有害裂缝,达到预期质量控制目标。

通过该施工技术研究,索塔两侧下牛腿在施工过程中产生的水平力依靠支架的横撑结构互相抵消,使下牛腿落地支架只承受竖向力,两侧结构内力及线形得到较好控制,改善了下牛腿与塔柱结合处结构受力情况,混凝土浇筑成型效果好。减小了支架的规模,降低了施工过程中安全风险,加快了施工进度。

目前,武穴长江公路大桥南索塔已成功封顶,各项检测结果均符合设计及规范要求。

参考文献:

- [1] 彭晓彬,詹建辉,常英,等.武穴长江公路大桥总体设计[J].中外公路,2019(3).
- [2] 李春江.石首长江公路大桥主塔下横梁施工技术[J].铁道建筑技术,2019(6).
- [3] 陈杏枝,赵金霞,黄继旺.襄樊江汉三桥索塔设计及施工技术分析[J].公路与汽运,2011(5).
- [4] 任霄.超高空心薄壁墩液压爬模施工技术[J].铁道建筑技术,2011(S1).
- [5] 解江浩.114米混凝土斜拉桥主塔机械化施工质量控制研究[D].长安大学硕士学位论文,2013.
- [6] 李升华.悬浇梁挂篮施工质量控制[J].交通世界,2018(Z1).
- [7] 陈阳.先张法板梁预制工艺简介[J].科技创业月刊,2010(12).
- [8] 董文武,唐正光,刘一波.智能系统在预制T梁施工技术中的运用[J].中国水运(下半月),2019(9).
- [9] 刘勇峰.浅谈预应力管道真空辅助压浆施工方法[J].山西建筑,2011(26).
- [10] 涂志翔,李斌.预应力技术在桥梁施工中的应用实例[J].交通世界,2019(7).
- [11] 李美玉.中塔下塔柱及下横梁施工技术[J].科技风,2015(22).
- [12] 刘峥嵘.浅谈斜拉桥主塔施工控制技术[J].黑龙江科技信息,2014(22).