

神农湖独塔斜拉桥设计分析

牛伟迪

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要:以神农湖大桥为背景,对大桥的方案构思、总体设计,以及索塔、主梁、斜拉索、锚固构造等主要结构进行介绍。接着,介绍了基于CATIA的索塔BIM正向设计过程,包括:索塔外形、锚固构造在设计过程中对参数化的运用,并简要说明了三维空间索塔结构二维图纸的表达方法。然后,对桥梁结构进行了整体静力分析和局部分析。结果表明,桥梁结构设计合理,验算结果满足要求。最后,介绍了该桥的施工方案。其研究成果可为同类桥梁的设计、计算提供建议和参考。

关键词:独塔斜拉桥;空间曲面;BIM正向设计;计算分析

中图分类号:U442.5

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2021)06-0079-06

0 引言

随着社会的发展,人们对精神层面的审美要求不断提高,城市桥梁不仅需要满足基本的交通功能,对其建筑景观功能也提出了更高的要求。因此,桥梁的景观造型往往成为方案设计的重要考虑因素。斜拉桥以其结构受力性能良好、索塔造型丰富、景观表现手法多样等优点而被设计师青睐^[1]。现以山西省长治市神农湖大桥为背景,介绍其主要设计过程,为类似桥梁设计提供借鉴。

神农湖大桥位于山西省长治市漳泽水库国家湿地公园滨湖景观大道,道路等级为城市主干路,设计车速为60 km/h。大桥全长520.98 m,其中,主桥为独塔双索面斜拉桥,两侧连接道路的引桥为PC连续梁;跨径布置为 $(4 \times 32.5)\text{m} + (2 \times 130)\text{m} + (4 \times 32.5)\text{m}$ 。

主要技术标准如下:

(1)汽车荷载:城—A级。

(2)主桥平面位于直线段;主桥立面位于竖曲线 $R=11\,000\text{ m}$ 的凸曲线上,前坡、后坡为 $\pm 0.5\%$ 。

(3)抗震设防要求:地震基本烈度7度;地震动峰值加速度 $0.10g$;桥梁抗震设防分类:主桥为甲类,引桥为乙类。

(4)水务标准:航道等级不通航;测时水位:900.17~900.25 m;100 a一遇最高洪水位:903.61 m。

收稿日期:2021-02-24

作者简介:牛伟迪(1990—),男,工学硕士,工程师,从事桥梁工程设计工作。

1 结构设计

1.1 总体设计

该项目在方案设计阶段定位为地标性的景观建筑,主桥方案以“风帆”为主题,提取其造型特点,结合斜拉桥的索塔与拉索,形成该桥的最终方案(见图1、图2)。

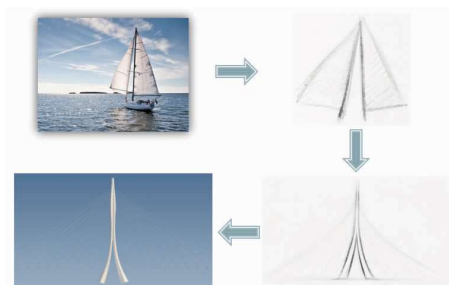


图1 神农湖大桥索塔造型方案图



图2 神农湖大桥鸟瞰效果图

主桥采用塔梁墩固结体系—独塔钢结构斜拉桥;跨径布置 $(2 \times 130)\text{m}$;索塔总高109 m;主梁采用分离式双边箱钢箱梁,中心梁高3.5 m;斜拉索为空间双索面密索体系,梁上标准索间距9 m,塔上索间距2.75~3.15 m;索塔基础为钻孔灌注桩,桩径1.8 m(见图3)。

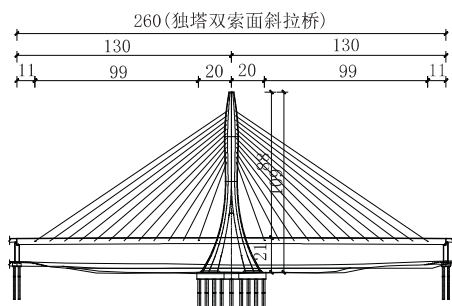


图3 主桥立面布置图(单位:m)

桥梁标准宽度:0.3 m(栏杆)+2.7 m(人行道)+3.5 m(非机动车道)+2.5 m(锚索区)+11 m(机动车道)+0.5 m(防撞护栏)+6 m(索塔区)+0.5 m(防撞护栏)+11 m(机动车道)+2.5 m(锚索区)+3.5 m(非机动车道)+2.7 m(人行道)+0.3 m(栏杆)=47 m(见图4)。

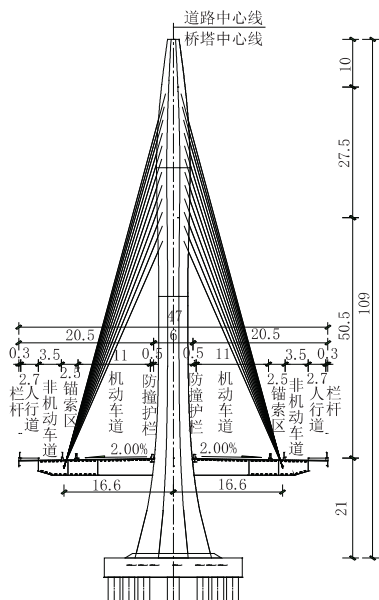


图4 索塔处横断面图(单位:m)

1.2 索塔设计

1.2.1 索塔外形

该桥索塔总高109 m,桥面以上塔高88 m。关于道路中心线和分孔线对称布置,顺桥向呈“人”字造型,立面从下至上由双塔柱按照样条曲线合并为独塔柱,索塔塔壁均为空间曲面。

1.2.2 塔柱总体布置

索塔从下至上共分为12个节段,见图5所示。

节段1为预应力混凝土塔柱节段,采用单箱双室截面,外轮廓尺寸为六边形截面,塔壁厚度为1.2 m,中腹板厚度为1.0 m。

节段2为钢混结合段,采用双端板承压的传力方式,实现钢塔柱与混凝土塔柱之间的有效传力。混凝土塔柱钢筋在两层端板上分批锚固,上层承压端板板厚46 mm;下层端板钢板厚度40 mm。同时,为

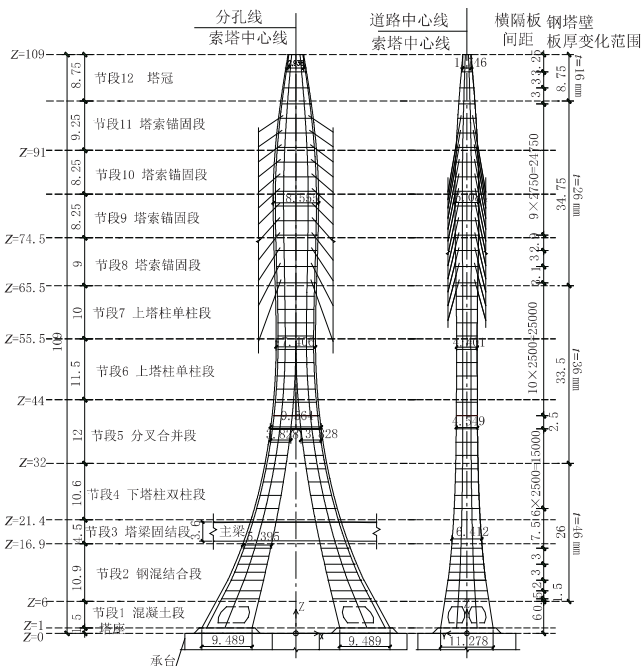


图5 索塔总体布置图(单位:m)

保证钢结构与混凝土的结合,采用PBL钢筋与剪力钉组合的结合方式^[2]。

节段3~节段12为钢塔柱段,其壁板厚度根据总体计算沿塔高变化;根据壁板厚度及截面尺寸采用塔壁采用T型和板式两种加劲形式;横隔板沿塔柱水平布置。节段3为塔梁固结段,实现索塔与主梁的固结体系,索塔塔壁与主梁顶底板焊接,并增加两道腹板加强受力;节段4为上塔柱双柱段;节段5、节段6为分叉合并段,索塔在该段由双柱合并为单柱;节段8~节段11为索塔锚固段,对称布置24对拉索锚固结构,节段12为索塔塔冠。

1.2.3 索塔截面

索塔采用多边形截面,其双塔柱段主受力截面为6边形截面,合并后单塔柱主受力截面为10边形;钢塔柱顺桥向两侧采用圆弧板进行装饰。索塔特征截面见图6~图8所示。

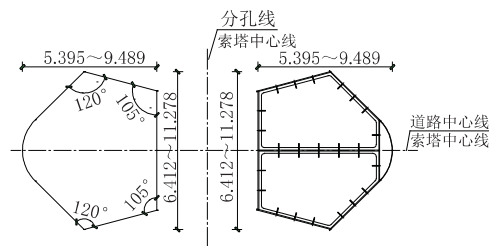


图6 索塔混凝土及钢混结合段断面图(单位:m)

1.2.4 索塔锚固构造

索塔锚固结构采用钢锚管形式锚固斜拉索;在拉索平面内设置上下两道锚板用于辅助锚管传力,分别与壁板和隔板焊接;锚板设置翼缘板。锚管端部

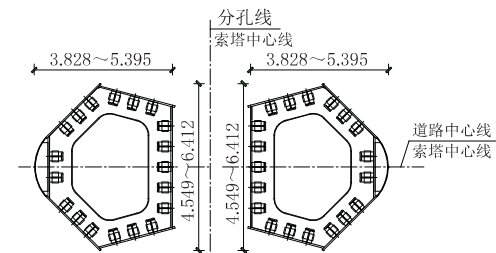


图7 索塔钢结构双柱段断面图(单位:m)

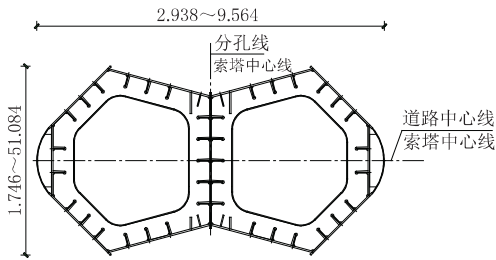


图8 索塔钢结构单柱段断面图(单位:m)

设置两块矩形承压板。锚固隔板间距根据斜拉索安装空间需求,采用不等间距布置(见图9)。

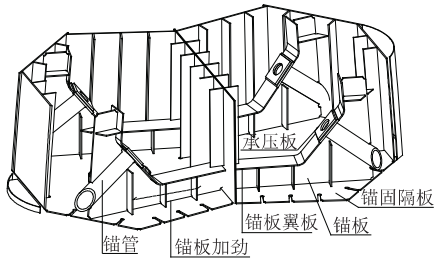


图9 锚固构造轴侧示意图

1.3 主梁设计

1.3.1 主梁结构

主梁总宽 47 m,采用双边箱及横梁组成的 π 型断面,两侧边箱为单箱双室截面,主梁整体关于索塔中心线对称布置。主梁中心梁高 3.5 m;两侧边箱宽度均为 9 m,边箱中心距为 32 m;挑臂长 3m。主梁顶、底板箱室内均采用 U 型加劲肋;顶板悬臂位置采用平钢板加劲肋;主梁顶板靠近索塔处设置一道倒 T 小纵梁(见图 10)。

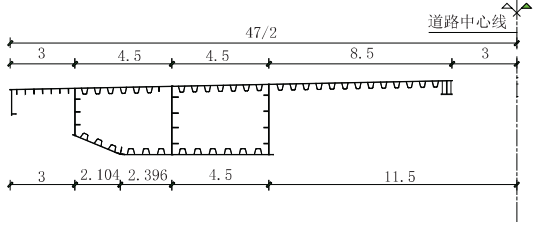


图10 主梁标准段截面图(单位:m)

1.3.2 主梁节段划分及主要尺寸

主梁由索塔至梁端划分为 A、B、C1~3、D、E 共 7 种类型,节段划分如图 11 所示。

1.3.3 主梁锚固构造

主梁采用锚箱式锚固,锚箱安装在主梁中腹板

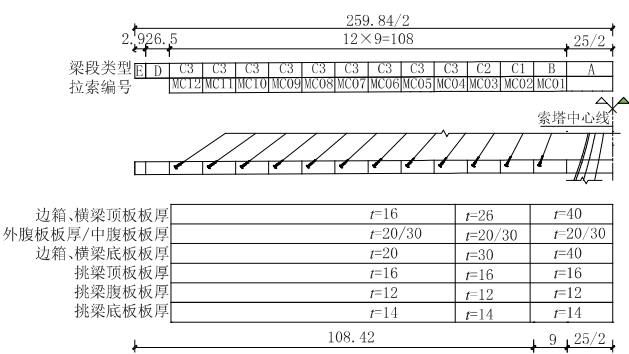


图11 主梁节段划分图(节段尺寸单位:m;板厚单位:mm)

外侧,并与其焊成一体。斜拉索拉力通过锚箱的锚固板传递给主梁腹板,主梁腹板和承压板内侧均设置了补强板,以利于锚固处的应力合理分散到主梁上。

1.4 斜拉索

主桥采用密索体系,共对称布置设置 24 对斜拉索,斜拉索梁端间距为 11×9 m;塔端根据张拉斜拉索角度和张拉空间等因素,采用不等间距布置,间距由下至上为 $(3.1+3+2.9+8 \times 2.75)$ m;斜拉索采用规格为 PES7-121 的平行钢丝斜拉索,标准强度 1 770 MPa;全桥共 48 根。

2 基于 CATIA 的索塔 BIM 正向设计

主桥索塔设计过程具有以下难点:

- (1)方案到施工图阶段,索塔造型尺寸需在受力和外观两方面进行协调;
- (2)索塔为三维空间曲面异形塔造型,设计放样难度较大;
- (3)索塔锚固构造由于空间曲面和斜拉索角度不同,导致其构造设计复杂;
- (4)塔内各细部构件相互关联、容易发生碰撞。

采用基于 CATIA 的索塔 BIM 正向设计可以解决上述难点,有效地降低设计难度^[3]。

2.1 索塔外形设计

初步设计阶段,索塔尺寸拟定时需兼顾结构受力和整体造型的需要。因此,在设计过程中,存在根据计算和景观效果对索塔尺寸进行调整的反复过程。采用参数化设计,桥塔尺寸可根据计算结果及时调整且整体效果随时可见,使得优化过程方便快捷有效,保证索塔的设计效果。塔壁空间曲面可在模型中直接生成(见图 12)。

2.2 锚固构造参数化设计

索塔锚固构造采用钢锚管+锚板的结构形式。由于索塔为空间曲面异形塔,因此全桥共 12 组(M1~M12)构造相似但尺寸和角度均不同的锚固构造。

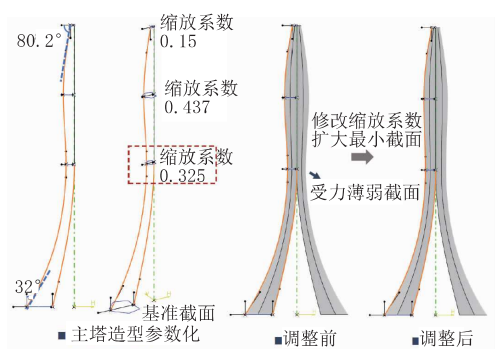


图 12 索塔外形设计图

在该项目设计过程中,以最长索 M12 锚固构造为模板,设置斜拉索角度、出索点位置等为基础参数,通过调整基础参数批量生成其余锚固构造。由于角度关系,M1、M2 锚固构造无法采用标准模板生成,故只能进行单独设计(见图 13~图 15)。

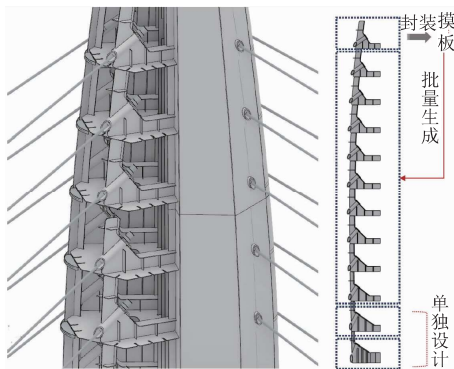


图 13 索塔锚固构造总体模型

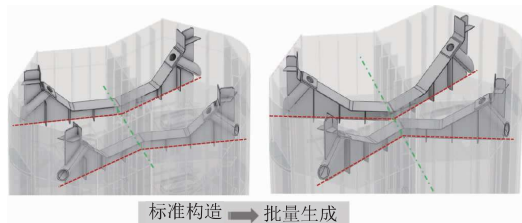


图 14 索塔锚固构造标准模型

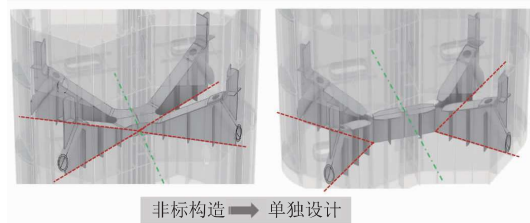


图 15 索塔锚固构造特殊模型

同时,在设计过程中,可直观检查发现塔内构件是否相互碰撞,进而通过修改参数即可调整各构件的空间关系,有效地避免构件发生碰撞,避免出现设计错误。

2.3 索塔二维表达

为了更好地将三维空间结构进行二维图纸表达,该桥索塔外形及构造在绘图时以控制点三维坐

标为基础,并根据索塔壁板、横隔板、加劲肋、锚固结构等构造参数进行定位放样。

索塔控制点局部坐标系定义如下:(1)原点在道路中心线与主桥分孔线交点且 85 国家高程系统为 +897.777 处;(2)X 轴为顺桥水平方向,正向指向大桩号方向;(3)Y 轴为横桥水平方向,向西为正;(4)Z 轴为竖向,向上为正(见图 16)。

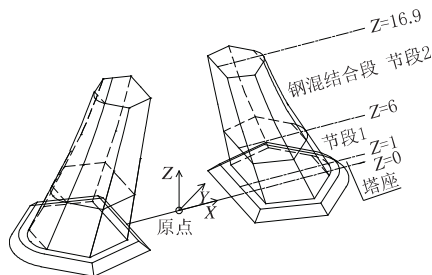


图 16 索塔局部坐标系示意图

节段 1~节段 4 以控制点 0~4 为基础进行放样,节段 5~节段 6 以控制点 0~8 为基础放样;节段 7~节段 12 以控制点 0~2、7~8、5~6 为基础放样。索塔三维坐标可由 CATIA 软件直接导出(见图 17)。

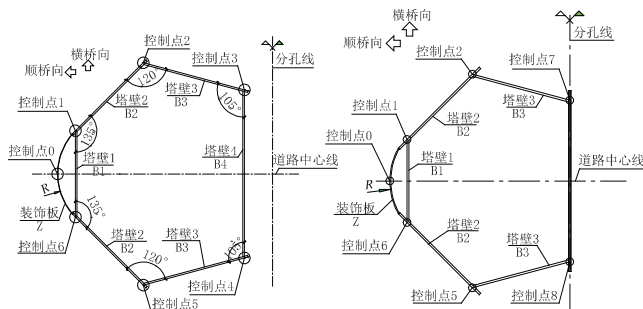


图 17 索塔节段控制点位置图

索塔主受力截面的控制点为:索塔断面相邻壁板外边线延长线的虚交点,共计控制点 1~8;索塔装饰板的控制点 0 为装饰圆弧板的顶点。控制点大样见图 18 所示。

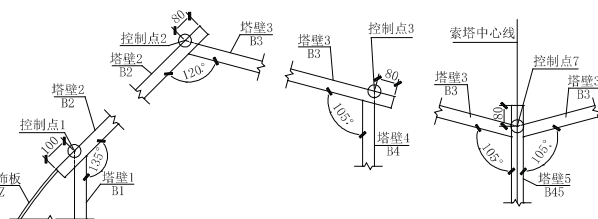


图 18 索塔控制点大样图

结合索塔的构造特点和三维模型正向设计的优势,索塔节段图纸采用“总体定位+三维控制点坐标+轴侧示意图+板件投影图+特征截面”的表达方式(见图 19),不仅可以使读图者方便直观地理解三维结构,同时索塔的控制点三维坐标可保证板件制作安装时的精度要求。

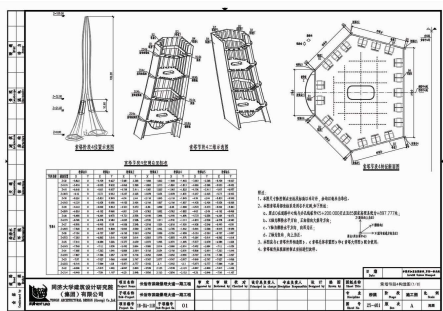


图 19 索塔节段图

3 结构分析

3.1 总体计算概况

主桥整体结构静力计算采用 Midas/Civil 空间杆系有限元方法进行计算,建立包括:主梁、索塔、斜拉索和基础在内的全桥有限元模型。其中:主梁、索塔采用空间梁单元,斜拉索采用只受拉桁架单元,并计入由于垂度效应引起的弹性模量折减。主梁采用双主梁模型,并计入小纵梁对横向刚度的影响,主梁通过横向刚臂与拉索节点连接。有限元计算模型见图 20 所示。

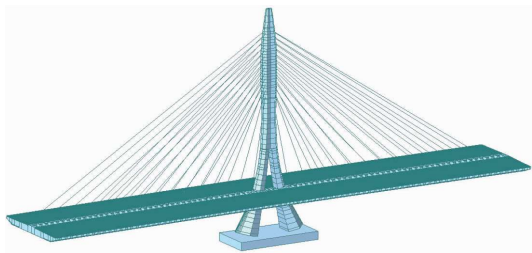


图 20 主桥整体计算模型

3.2 总体静力计算

计算荷载考虑了永久作用包括结构自重、二期恒载、基础变位、混凝土收缩徐变,以及可变作用包括:车道荷载、人群荷载、风荷载、温度荷载。总体静力计算对以下方面进行了验算,结果表明,受力满足规范要求^[4-5]:

- (1)主梁、主塔承载能力极限状态验算;
- (2)主梁、主塔正常使用状态验算;
- (3)主梁疲劳验算;
- (4)斜拉索承载能力及疲劳应力幅;
- (5)腹板、加劲肋等构件局部稳定验算;
- (6)整体稳定验算;
- (7)短暂工况施工阶段及换索工况验算;
- (8)断索偶然工况验算;
- (9)施工阶段主桥验算。

3.3 索塔局部分析

索塔分叉合并段及塔梁固结段构造复杂(见图

21),有必要对其受力特性进行具体分析。

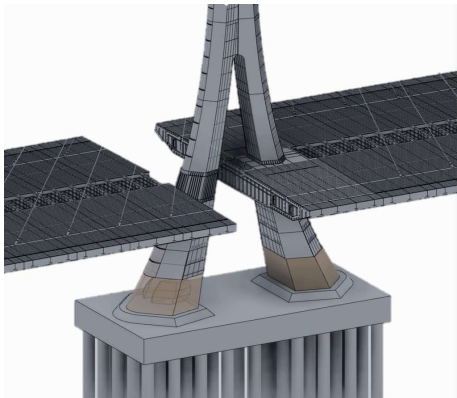


图 21 索塔三维示意图

采用有限元软件 ANSYS 建立节段局部模型,为减小边界效应的影响,对塔柱节段 3(塔梁固结段)、节段 4(下塔柱双柱段)、节段 5(分叉合并段)、节段 6(合并段)及部分主梁进行建模;采用自底向上的建模方式,利用 BIM 三维模型导出索塔的高精度三维坐标生成关键点,再进一步连成线并生成索塔平面,形成几何模型,采用三角形网格划分模型生成有限元模型进行验算;模型采用弹性壳单元(shell63)和质量单元(Mass21)。

在索塔顶端和梁端,利用主从节点形成刚性面,根据总体计算的结果,选取最不利工况将结构内力施加于主节点处;在塔梁固结段底部的节点施加全固结约束。索塔局部三维模型见图 22 所示。

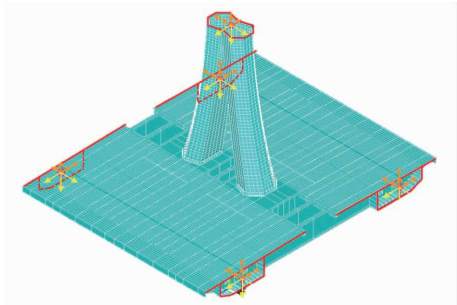


图 22 索塔局部有限元模型

根据计算,除节段 3 塔壁壁板与主梁上下底板连接处、节段 5 的塔壁中间拐角处,以及横隔板与塔壁连接处,局部出现应力集中现象外,节段 3(塔梁固结段)构件等效应力小于 225 MPa,节段 5(分叉合并段)构件等效应力小于 200 MPa;索塔节段 3(塔梁固结段)和节段 5(分叉合并段)受力安全可靠。

4 桥梁施工

主塔利用塔吊采用节段拼装施工,主梁采用支架+吊装施工,待主塔和主梁施工完成后进行拉索安装及张拉,实施二期荷载后进行调索,使成桥内力

和线形等满足设计要求。施工步骤如下:

(1)人工筑岛+栈桥施工;场地整平、支架范围平整、硬化。

(2)索塔基础处进行钢板桩围堰,施工桩基、承台;塔吊基础施工。

(3)主墩承台搭设下塔柱支架并预压;利用履带吊开始拼装塔吊。

(4)施工索塔塔座、下塔柱混凝土段和钢-混凝土结合段;利用履带吊拼装塔吊至独立高度。

(5)由履带吊配合塔吊、吊装拼接索塔钢结构部分;同步搭设主梁支架并预压。

(6)由履带吊配合塔吊,支架吊装拼接主梁阶段;分块浇筑桥面 UHPC。

(7)由索塔至梁端方向依次对称安装斜拉索并张拉;由索塔至梁端依次对称拆除主梁支架;施工除沥青混凝土铺装以外所有的二期附属工程。

(8)由索塔至梁端方向依次对称调节索力;施工沥青铺装;拆除塔吊等施工设施,河道恢复;全桥贯通,准备通车。

5 结 语

本文以山西省长治市神农湖大桥为背景,对大桥的方案构思、总体设计,以及对索塔、主梁、斜拉索、锚固构造等主要结构进行介绍;接着,介绍了基于 CATIA 的索塔 BIM 正向设计过程,包括索塔外形、锚固构造在设计过程中对参数化的运用,并简要说明了三维空间索塔结构二维图纸的表达方法;然后,对桥梁结构进行了整体静力分析和局部分析,结果表明,桥梁结构设计合理,验算结果满足要求;最后,介绍了该桥的施工方案。其研究成果可为同类桥梁的设计、计算提供建议和参考。

参考文献:

- [1] 周孟波.斜拉桥手册[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 万杰龙,曾明根,吴冲,孙旭霞.摄乐大桥桥塔钢混结合段受力分析.城市道桥与防洪[J],2017(3):97-101.
- [3] 杨京鹏,袁胜强,顾民杰.宁波梅山春晓大桥 BIM 应用[J].土木工程信息技术,2017,9(1):14-20.
- [4] JTG/T 3365-01—2020,公路斜拉桥设计规范[S].
- [5] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com