

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2024.10.015

钢结构斜塔斜拉桥创新设计与结构力学行为

李松

(成都高新未来科技城建设开发有限公司, 四川 成都 610208)

摘要:斜塔斜拉桥因其造型优美、视觉效果优良等特点常应用于市政桥梁中。以成都天府国际空港新城北部北一线道路工程上的跨绛溪河钢结构斜塔斜拉桥为工程背景,该桥具有桥面较宽、单根背索、桥塔空间异形程度大等特点。基于此,为便于人车通行及结构布置,采用超宽渐变桥面,受超宽渐变桥面影响,所有主次横梁按均不等长设计;桥塔单侧设置 1 根背索,在塔顶和背索下锚处分散锚固。桥塔为空间异形结构,桥塔采用八边形断面形式,朝主跨的一个面设置凹槽造型,横向整体内倾 12° ,顺桥向为无规则弧形,为优化桥塔受力,在桥塔顶部节点设置 4 道桥塔系梁;鉴于该桥结构受力的复杂性,考虑几何非线性,基于有限元软件建立三维空间有限元模型,对最不利荷载下结构力学行为进行分析,分析表明:该桥强度、刚度和拉索疲劳等均满足要求;其中受力最不利点位于背索梁端锚固处,建议对此处进行加强优化设计。

关键词:斜塔斜拉桥;钢箱梁;钢结构;单根背索;创新设计;结构力学行为

中图分类号:U448.27

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)10-0069-07

1 工程概况

1.1 桥梁概况

北一线道路工程位于成都天府国际空港新城北部,总长约 19 km,等级为城市主干路,红线宽 45 m,设计时速 40 km/h,主线双向 6 车道规模。北一线跨绛溪河大桥是该线的关键控制性桥梁工程,该桥为主跨 147 m 钢结构斜塔斜拉桥。该桥 2023 年完成主体建设,2024 年建成通车。为进一步完善城市交通体系,加快推进葫芦坝片区规划建设,作为成都市重点项目——绛溪河大桥正在加紧建设中。

该桥全长为 287 m,桥塔高度为 56 m,桥梁宽度为 45.0~47.8 m 变宽,以满足配合背索锚固和桥塔处的车行道净空需求。桥梁两端桥台后各 40 m 的道路段需对中分带宽度进行调整,用于中分带宽度渐变过渡。这是该桥的技术创新点之一,该桥效果见图 1。

1.2 技术标准

道路功能定位为城市快速路,双向按 6 车道布置,设计车速为 40 km/h。采用城—A 级汽车荷载,在桥台位置和桥塔位置处桥面宽度分别为 45 m 和 47.8 m,期间渐变过渡。设计基本地震加速度值为 $0.05g$,场地特征周期 0.45 s;抗震设防类别为甲类,



图 1 北一线跨绛溪河大桥效果图

提高一度采取抗震措施。设计基本风速:25.6 m/s,采用 200 a 一遇的设计洪水频率,无通航等级要求,但有游船通行需求,桥下净空不小于 6 m。

2 桥型总体布置

跨径布置为 $(28.5+28.5+147.0+52.0+24.0)$ m,主跨跨径 147 m,为钢梁钢塔独塔斜拉桥,桥梁总长 280 m。桥型布置见图 2。

主跨内对称布置 10 对斜拉索,斜拉索呈竖琴形布置,梁上顺桥向索距 13.36 m。桥塔单侧设置 1 根背索,单根背索由 7 根 85 股预应力钢绞线拉索组成,7 根 85 股预应力钢绞线拉索在塔顶和背索下锚处分散锚固。

3 结构设计^[1-9]

3.1 桥面板结构设计

桥面系采用纵横梁形式布置。全桥共设 4 道纵向主梁,内侧纵梁与外侧纵梁之间设横梁进行连接。第

收稿日期:2023-10-20

作者简介:李松(1984—),男,硕士,高级工程师,从事工程建设管理工作。

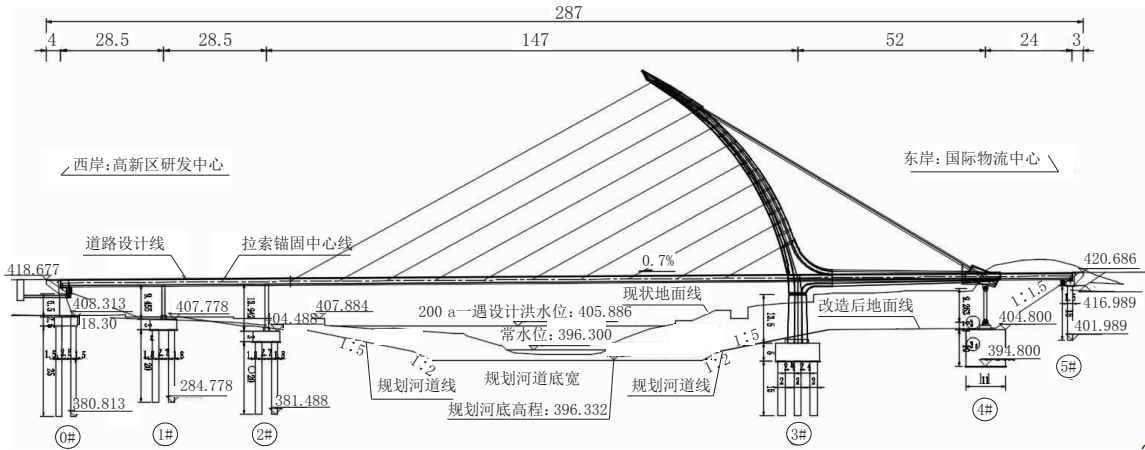


图2 桥型布置图(单位:m)

一跨、第二跨在跨中各设1道主横梁;第三跨(主跨)在每个斜拉索锚固点间设一道主横梁,间距13.36m,共设10道主横梁;第四跨跨中设3道主横梁,间距13m,第五跨在跨中设1道主横梁;在两侧桥台位置分别设置一道端横梁,在1号、2号、4号桥墩处分别

设置一道桥墩横梁,在3号墩桥塔位置处设置一道桥塔横梁。在相邻两道主横梁之间等距离布置3道次横梁,每隔一道次横梁设置一道悬挑梁连接外侧纵梁以及人行道和非机动车道箱梁,桥梁横断面布置见图3。

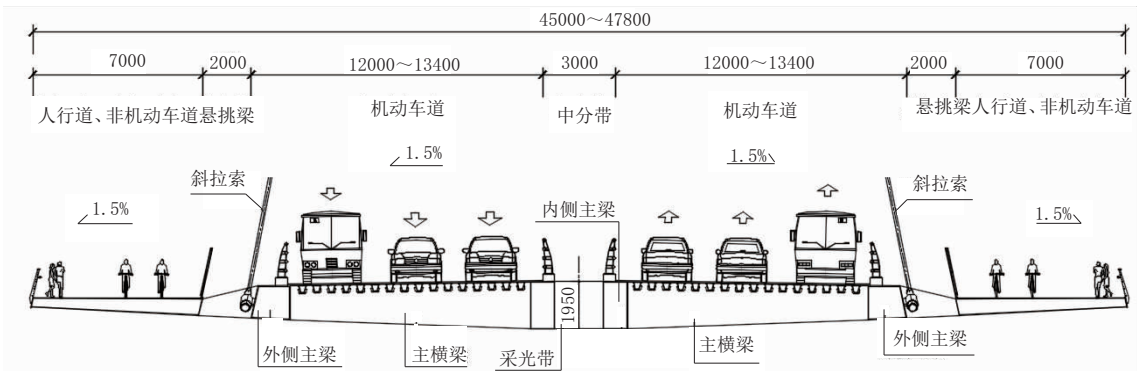


图3 桥梁横断面布置(单位:mm)

3.1.1 外侧主纵梁

外侧纵梁采用梯形断面形式,标准段外侧纵梁梁高1420mm。顶板设1.5%横坡,与桥面板对接熔透焊,顶板宽1320mm;底板斜向布置设5%反坡,底板宽1600mm。内侧腹板垂直布置,外侧腹板与竖直面呈约12°夹角布置,见图4。

外侧纵梁第三跨、第四跨由于斜拉索、背索作用为受压、弯、剪、扭作用,有斜拉索锚固的外围扭矩很大,且距桥塔越近扭矩与压力越大。根据其受力设计板厚。顶、底板板厚24~40mm,腹板厚24~40mm。顶、底板加劲肋厚度18~30mm、高度160~200mm,顶、底板分别在中心位置布置3道加劲肋。腹板加劲肋厚度18~30mm、高度160~200mm,单侧布置5道加劲肋。

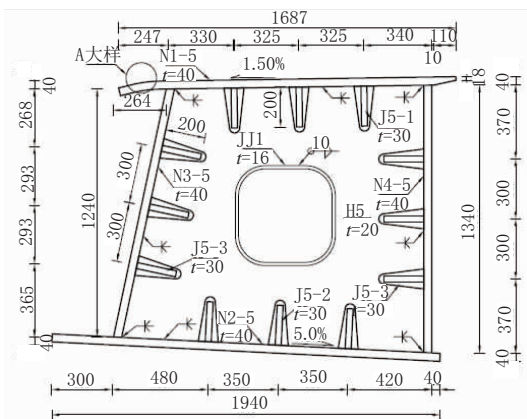


图4 外侧纵梁断面图(单位:mm)

3.1.2 内侧主纵梁

内侧纵梁采用矩形断面形式,梁高1950mm,顶、底板宽度均为1000mm,内侧纵梁第一跨、第二跨、第五跨顶、底板板厚20mm,腹板厚16mm(见图5)。顶、底板加劲肋厚度12mm、高度120mm,顶、底板分别在中心位置布置3道加劲肋。腹板加劲肋厚度12mm、高度120mm,单侧布置2道加劲肋。

内侧纵梁第三跨、第四跨由于斜拉索、背索作用为受压、弯、剪、扭作用,且距桥塔越近压力越大。根

主跨内对称布置 10 对斜拉索, 斜拉索呈竖琴形布置, 梁上顺桥向索距 13.36 m。1~10 号斜拉索索体直径 154 mm, 拉索角度及工作长度见表 1, 型号均为 PES.E(C)7-253。

表 1 斜拉索参数表

拉索编号	与水平面夹角 $I(^{\circ})$	与铅垂面夹角 $J(^{\circ})$	工作长度 /m
1	28.59	6.1	115.048
2	28.80	6.16	106.682
3	28.80	6.17	97.624
4	28.80	6.18	87.989
5	28.79	6.19	77.750
6	28.79	6.21	66.944
7	28.79	6.23	55.586
8	28.78	6.27	43.688
9	28.77	6.35	31.264
10	28.73	6.55	18.326

(2) 塔上锚固

斜拉索塔上锚固采用叉耳式锚头连接, 桥塔腹板 FB3 在斜拉索锚固处伸出桥塔壁板作为耳板 (见图 9)。斜拉索锚固耳板与腹板 FB3 采用一整块 120 mm 钢板。耳板上下对称布置四块加劲肋, 加劲肋采用 Q420qDZ25, 厚度 40 mm。



图 9 斜拉索塔上锚固三维图

(3) 梁上锚固

斜拉索梁上锚固采用一块伸出外纵梁的外伸板连接承压管的外锚管构造。

斜拉索承压管采用 20MnMoNb 钢锭锻造, 直径 435 mm, 壁厚 40 mm。外伸板采用 Q420QdZ35, 厚度 80 mm。外伸板上下与外纵梁顶底板熔透焊接, 将外纵梁外腹板划分成斜向两块, 外纵梁被外伸板划分的上下外腹板熔透焊接在外伸板上。承压管与外伸板采用熔透焊接。

斜拉索张拉端设置一块厚度 60 mm 的 Q420QDZ25 承压板, 承压管与承压钢板接触面刨平顶紧, 采用围焊连接。承压钢板与外伸板和外纵梁腹板熔透焊接。

塔梁固结节点平面见图 10。

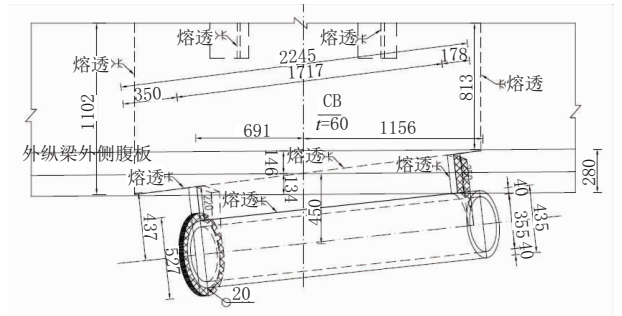


图 10 塔梁固结节点平面图(单位:mm)

3.2.2 背索及其锚固

(1) 背索设计

桥塔单侧设置 1 根背索, 单根背索由 7 根 85 股预应力钢绞线拉索组成, 背索与水平面夹角 30.7° , 与纵桥向铅垂面夹角 6.51° , 7 根 85 股预应力钢绞线拉索在塔顶和背索下锚处分散锚固, 见图 11。背索索体直径 635 mm, 采用直径 800 mm 壁厚 25 mm 的 HDPE 外护套管。背索在塔顶固定, 梁底张拉。

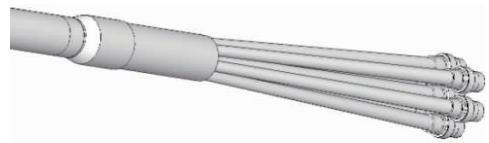


图 11 背索梁底散索三维示意图

(2) 塔顶锚固

背索在塔顶锚固 (见图 12), 背索锚垫板外轮廓同塔顶形状为不规则八边形, 厚度 350 mm, 采用 20MnMoNb 钢锭锻造, 背索锚垫板根据背索锚固空间要求布置开孔, 开 7 个直径 371 mm 的孔, 孔道垂直于锚垫板, 四周六个孔围绕中心孔环向均匀布置。锚垫板和桥塔壁板连接采用熔透焊接。

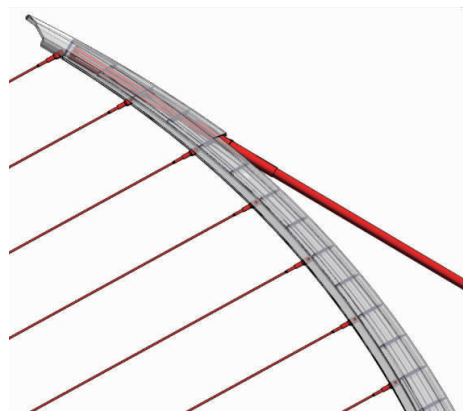


图 12 桥塔背索塔顶锚固三维图

(3) 梁上锚固

背索在梁底张拉锚固, 此处构造几何复杂, 受力集中, 为全桥的关键节点, 综合考虑本结构采用 ZG300-500H 铸造。铸钢件根据背索散索空间开锥

形孔,上端直径 915 mm,下端直径 1 590 mm。在距背索张拉面垂直 700 mm 设置 7 个直径 430 mm 的穿索孔。4 号受拉墩上耳板厚度 150 mm 同节点一起铸造,见图 13。

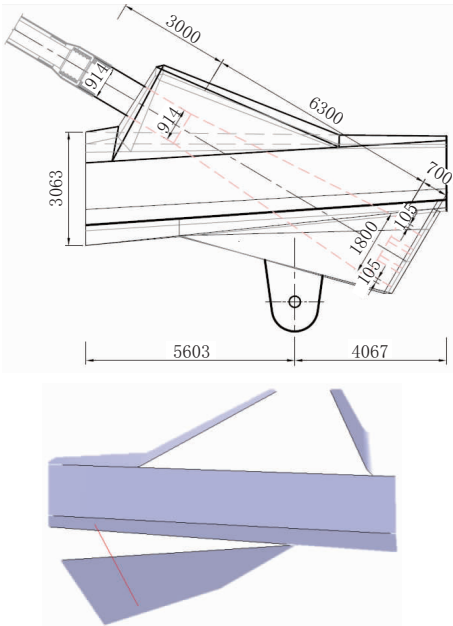


图 13 背索锚固钢铸件立面图(单位:mm)

纵向前端与受压大梁采用熔透焊接连接,受压大梁中腹板和加劲肋伸入铸钢件内与铸钢件采用熔透焊接。纵向后端与外纵梁采用熔透焊接连接,外纵梁外腹板、顶板与其劲肋伸入铸钢件内与铸钢件采用熔透焊接。

3.3 桥塔与受压大梁结构设计

3.3.1 桥塔

桥塔为空间异形结构,桥塔采用八边形断面形式,朝主跨的一个面设置凹槽造型,用于布置斜拉索同时为造型设计。桥塔截面为带凹槽的异形八边形,塔底截面大,塔顶截面小,横向整体内倾 12°,顺桥向为无规则弧形,整个桥塔几何造型非常复杂。

桥塔由上至下分为桥塔顶部节点、桥塔标准段和桥塔根部节点三部分,其中在桥塔顶部节点设置 4 道桥塔系梁。桥塔顶部节点是背索上锚点和 1# 斜拉索 ~3# 斜拉索的锚固区,塔顶装饰段设检修人孔,便于检查背索锚固端锚头;桥塔标准段主要锚固 4# 斜拉索 ~10# 斜拉索;桥塔根部节点主要承受桥塔大部分的弯矩和轴力,并将整个桥塔与受压大梁和背索形成一个稳定的结构受力体系,同时桥塔根部节点底部与 3 号墩墩顶为混结合段连接,将桥塔的轴力传递给基础。

桥塔全高 61.293 m(含塔梁结合段),其中桥塔顶部节点(含塔顶装饰部分)高 10.858 m,桥塔根部

节点高度 13.61 m,桥塔标准段高度 36.825 m。桥塔与竖直面夹角为 12°,桥塔截面为变截面,其中横向宽度由塔顶 1.766 m 渐变至塔底 3.481 m、纵向宽度由塔顶 1.868 m 渐变至塔底 4.709 m,见图 14。

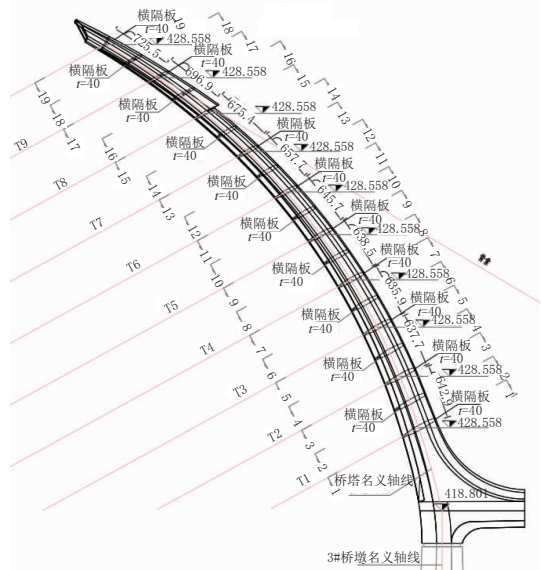


图 14 桥塔立面图

3.3.2 受压大梁

受压大梁长 36.647 m,受压大梁两端分别与塔梁固结节点和背索下锚固节点连接,主要传递背索索力产生的轴向压力和弯矩。受压大梁为八边形断面形式,受压大梁截面为变截面形式,其中横向宽度由桥塔根部 3.089 m 渐变至背索下锚固节点 2.282 m,竖向高度由桥塔根部 4.383 m 渐变至背索下锚固节点 3.053 m,受压大梁板厚为 60 mm,见图 15。

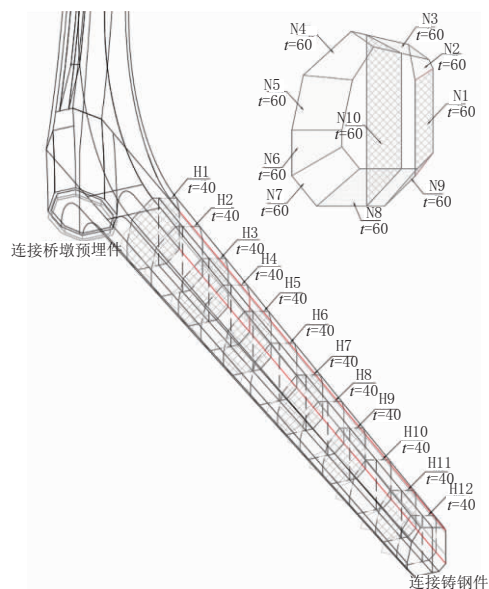


图 15 受压大梁轴视图

受压大梁主要为压弯构件,壁板厚度为 60 mm,设置中腹板,壁板厚度为 60 mm。在连接横梁腹板位

置对应布置横隔板,板厚为 40 mm。连接桥面板与横梁一侧设置一个竖着平面,在桥面板、横梁底板连接处设置纵向加劲肋。受压大梁中腹板在每两个横隔板中间设置检修孔。

3.3.3 塔梁固结节点

塔梁固结节点为桥塔、外侧主梁、桥墩、桥塔横梁交汇点(见图 16),其受力大,构造复杂。桥塔上端与桥塔标准段相接、下端与 3 号墩相接、前端与受压大梁相接、后端与外侧主梁相接。桥塔根部节点顺桥向长 14.7 m、横向宽度 3.08 m、竖向高度 14.5 m。塔梁固结节点采用钢混混合结构。

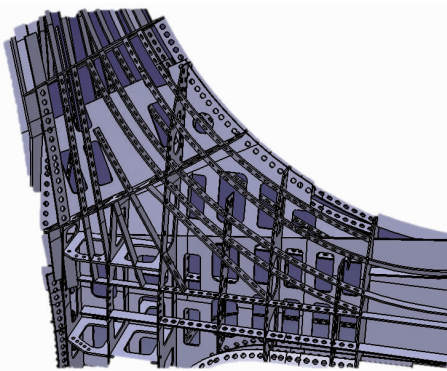


图 16 塔梁固结节点板件及开孔图

通过在塔梁固结节点内部设置 1 道竖向中腹板,厚度 60 mm,上接桥塔中腹板,后接受压大梁中腹板,使整节点与桥塔、受压大梁刚度逐渐过渡且加强整体性;沿梁方向设置 5 道横隔板与连接的次横梁腹板、3 号端横梁腹板对齐,沿塔方向设置 2 道横隔板。

4 结构力学行为分析

4.1 有限元模型

基于有限元软件,结合该桥几何参数、材料特性、约束情况等建立该桥三维空间有限元模型,并考虑施工阶段中非线性以及斜拉索的几何非线性因素,其有限元模型见图 17。

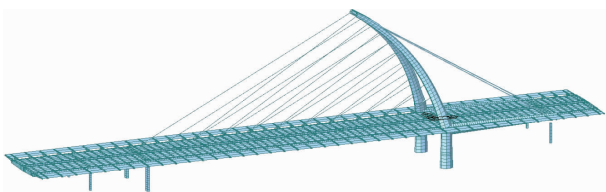


图 17 有限元模型

4.2 力学行为分析

从结构内力、应力以及变形等角度,探究该桥的主梁、桥塔和拉索关键构件在恒载 + 活载最不利组合下的结构力学行为分析。

(1) 结构内力

在恒载 + 活载最不利作用下弯矩、轴力和剪力见图 18。

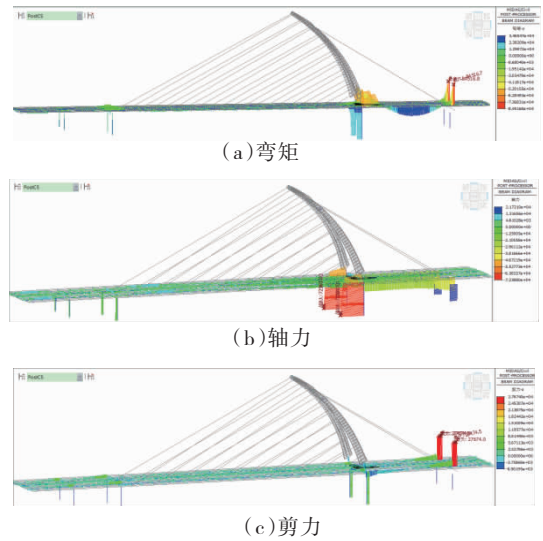


图 18 结构内力

分析图 18 可知:

剪力和弯矩最大值均发生在背索梁端锚固点处,最大值分别为 2.77×10^4 kN 和 8.45×10^4 kN·m。全桥轴力最大值发生在塔底截面,主梁轴力最大值发生在背索梁端锚固点处,最大值分别为 7.24×10^4 kN 和 3.10×10^4 kN。

(2) 结构应力

在恒载 + 活载最不利作用下梁墩塔组合应力和拉索轴向应力见图 19。

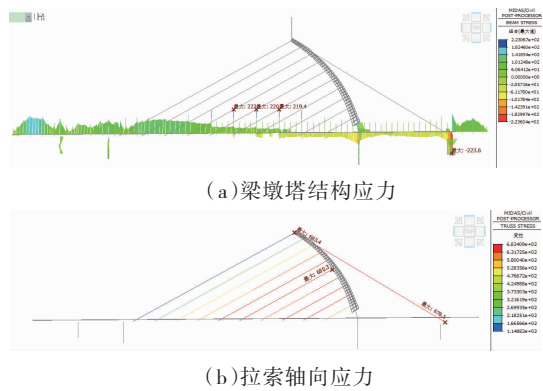


图 19 结构应力

分析图 19 可知:

梁墩塔组合应力最大值发生背索梁端锚固点对应的钢主梁截面处,最大值为 223.6 MPa。钢主梁采用 Q420 钢材,板厚 16~40 mm 的强度设计值为 360 MPa,故恒载 + 活载最不利组合下梁墩塔强度满足要求。

拉索轴向应力最大值为 683.41 MPa,发生在桥塔单侧背索处,背索抗拉强度为 1 960 MPa,抗疲劳

应力性能的应力上限值为抗拉强度的 0.45 倍, 也即 882 MPa, 故该桥拉索结构疲劳性能满足要求。

(3) 结构变形

在恒载 + 活载最不利作用下全桥竖向挠度见图 20。分析图 20 可知, 该桥最大挠度发生在主跨跨中处, 最大值为 121.9 mm。小于该桥主跨计算跨径的 1/400, 也即 367.5 mm, 故该桥刚度满足要求。

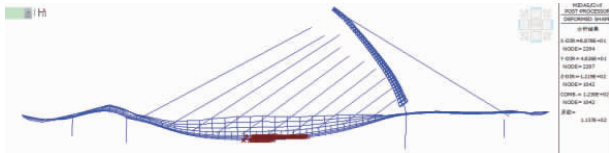


图 20 结构变形

5 结 语

主要结论如下:

(1) 北一线跨绛溪河大桥主桥采用钢结构斜塔斜拉桥, 采用纵横梁形式桥面系, 为增加景观效果, 每隔一道次横梁设置一道悬挑梁连接外侧纵梁以及人行道和非机动车道箱梁。

(2) 由于桥面较宽, 采用长度均不相等的 16 道主横梁和 63 道次横梁来保证横断面的强度和刚度。并通过采用向主跨侧微弯倾斜式桥塔和八边形变截面受压大梁来传递背索索力产生的轴向压力和弯

矩。

(3) 该桥结构体系新颖, 构造极其复杂, 技术难度大, 基于施工阶段和营运阶段最不利荷载组合, 对该桥关键构件进行结构力学行为分析, 经分析该桥强度、刚度和拉索疲劳等均满足要求。根据计算结果对塔梁结合节点等进行优化设计, 确保该桥施工和营运节段结构受力的安全。

参考文献:

[1] 张维, 付坤, 王维民. 超宽幅主梁扭背索独塔斜拉桥总体设计[J]. 桥梁建设, 2023, 53(增刊 1): 98-104.

[2] 郑纪研, 周彦锋, 孟原菲. 南京三环路跨沪宁高速独塔斜拉桥总体设计[J]. 中国市政工程, 2022(6): 29-33, 119-120.

[3] 侯满, 张志强, 范振伟. 三亚海棠湾人行景观斜拉桥总体设计[J]. 世界桥梁, 2021, 49(3): 1-6.

[4] 李鑫. 混凝土斜塔斜拉桥的设计[J]. 安徽建筑, 2021, 28(2): 158-159.

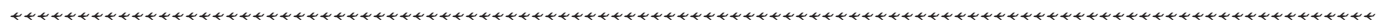
[5] 任宏业. 大悬臂宽梁独塔斜拉桥的总体设计与创新[J]. 城市道桥与防洪, 2019(10): 43-45, 49.

[6] 施文杰, 梅应华, 郭庆超. 超宽预应力混凝土独塔斜拉桥总体设计[J]. 工程与建设, 2015, 29(6): 777-779.

[7] 姜凤连. 空间双索面无背索斜塔斜拉桥结构设计[J]. 山东交通科技, 2011(6): 28-29, 33.

[8] 刘钟仁. 某斜塔斜拉-梁拱组合桥设计[J]. 城市道桥与防洪, 2011(7): 103-104, 123.

[9] 李章峰. 南昌市洪都大桥总体设计[J]. 中国市政工程, 2007(6): 12-14.



(上接第 46 页)

沉管隧道因其覆土浅, 与水域两岸交通衔接更便利灵活, 结构形式有很大的研究空间。本项目紧邻现状的广船片区船坞, 从环评与节省投资的角度出发, 同时考虑降低后期沉管隧道在城市建成区实施时选取干坞场地和河道清淤的难度, 本项目对沉管

隧道结构进行了创新型研究, 相关成果将在后续提炼总结。

参考文献:

[1] 广东省建筑设计研究院. 城市快捷路二期(东沙-石岗隧道)可行性研究报告[R]. 广州: 广东省建筑设计研究院, 2019.