

# 白马乌江大桥钢管混凝土拱桥总体设计

田飞龙, 史召锋, 尹邦武

(长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 为研究场内交通大跨度钢管混凝土桥梁的设计特点, 以白马乌江大桥为例, 从桥梁的总体布置、结构设计及计算、桥梁施工方案等几个方面进行了详细介绍。为解决该桥荷载重、桥面窄、地质条件复杂等难题, 设计中选用了桁架式钢管混凝土截面、优化的拱肋横撑构造、轻型的钢-混凝土组合桥面系及带桩基的拱座基础; 为减少对临近隧道施工的干扰, 保障桥梁的顺利实施, 施工时采用了不设置索塔及现场拼装平台的缆索吊装施工方案。所介绍的设计和施工关键技术细节可为类似桥梁建设提供重要的工程参考。

**关键词:** 钢管混凝土拱桥; 桥梁设计; 场内交通; 缆索吊装工艺

**中图分类号:** U443; TU997

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2026)04-0186-05

## Overall Design of Baima Wujiang River Bridge with Concrete-Filled Steel Tube Arch

TIAN Feilong, SHI Zhaofeng, YIN Bangwu

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** To study the design characteristics of onsite traffic long-span concrete-filled steel tube bridges, taking Baima Wujiang River Bridge as the research object, the design characteristics of the bridge are introduced in detail from several aspects such as overall layout, structural design and calculation, and construction scheme of the bridge. To solve the problems of the bridge such as heavy load, narrow bridge deck and complicated geological conditions, the truss-type concrete filled steel tube section, optimized arch rib transverse brace, light steel-concrete composite bridge deck, and arch abutment with pile foundation are adopted in bridge design. To reduce the interference to the construction of adjacent tunnel and ensure the smooth implementation of the bridge, the cable hoisting construction scheme without cable pylon and on-site assembly platform is adopted during construction. The key technical details of design and construction introduced can provide important engineering reference for the construction of similar bridges.

**Keywords:** concrete-filled steel tube arch bridge; bridge design; onsite traffic; cable hoisting process

## 0 引言

钢管混凝土拱桥因具备承载力高、跨越能力大、施工简便、景观效果好等优点而在我国尤其是山区得到了广泛的应用。广西平南三桥(主跨575 m)、贵州德余乌江特大桥(主跨504 m)、重庆奉节梅溪河大桥(主跨504 m)等均代表了我国钢管混凝土拱桥的设计建造最高水平。据统计,截至2021年10月,我国在建或已建成的钢管混凝土拱桥不少于458座<sup>[1]</sup>, 钢管混凝土拱桥为我国交通建设作出了重要贡献。

白马乌江大桥作为重庆乌江白马航电枢纽工程的一部分,位于坝址下游约800 m,大桥桥位处为

“V”型峡谷,地质条件复杂,需1跨跨越乌江,因此采用钢管混凝土拱桥具有很好的比较优势<sup>[2]</sup>。本文从白马乌江大桥桥梁总体布置、结构设计及计算、桥梁施工方案等方面详细介绍了该桥的关键技术细节,可为同类桥梁的建设提供重要的工程参考。

## 1 工程概况

白马乌江大桥位于重庆市武隆区白马镇,根据重庆乌江白马航电枢纽工程施工总布置规划,在坝址下游800 m左右兴建白马乌江大桥以沟通左右两岸交通。白马乌江大桥兼具白马航电枢纽施工期间作为施工桥梁及后期作为地方公路桥梁的作用,因此对于改善当地交通、保障工程总体建设至关重要。

桥址处为“V”形峡谷,两岸岸坡基本对称。桥址左岸地表主要为第四系崩坡积层( $Q^{col+dl}$ )、冲洪积层

收稿日期: 2025-11-02

基金项目: 长江设计集团自主科研项目(CX2024Z26-2)

作者简介: 田飞龙(1988—),男,博士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

( $Q^{al+pl}$ ),下伏基岩为三叠系下统嘉陵江组第三段上部( $T_{ij}^{3-2}$ )灰岩、白云质灰岩等。右岸地表出露三叠系下统嘉陵江组第四段下部( $T_{ij}^{4-1}$ )白云岩、灰质白云岩,下部为( $T_{ij}^{3-2}$ )层灰岩、白云质灰岩,由于断层影响,断层下盘揭示( $T_{ij}^{4-1}$ )层岩溶角砾岩。

大桥采用的主要技术标准如下:

- (1)公路等级:近期规划为场内一级道路,远期规划为二级公路。
- (2)车道数:双向2车道。
- (3)设计行车速度:40 km/h(受地形、地质等条件限制)。
- (4)桥面宽度:1.0 m(检修道)+9.0 m(行车道)+1.0 m(检修道)=11.0 m。
- (5)通航等级:内河Ⅲ级航道。
- (6)设计洪水频率:1/100。

2 总体设计

大桥桥跨及桥型布置的选择应结合水文地质条件、景观、施工、经济、养护等因素综合确定<sup>[3-4]</sup>。白马乌江大桥位于三峡库区,所在水域水面宽度变化较大,高水位时水面宽度约200 m,低水位时水面宽度约100 m,结合施工难度、全年通航和1/100洪水水位行洪宽度、两岸桥台填土高度等因素,大桥主跨约200 m。

白马乌江大桥左岸接319国道、右岸接过坝交通洞。为保证与两岸顺接,桥面起点高程202.380 m,终点高程202.328 m;结合主跨长度要求,结构形式选择中承式拱桥,具体可选劲性骨架拱桥或钢管混凝土拱桥。经比较,劲性骨架拱桥一般需要先吊装拼接拱架,合龙后再施工外包混凝土形成主拱<sup>[5]</sup>,施工风险大、工期长,对乌江白马航电枢纽整体工程进度影响较大,因此采用施工更为简便快捷的中承式钢管混凝土拱桥方案。

白马乌江大桥全长263.2 m,主跨跨径230 m,主拱拱轴线采用悬链线,矢高46 m,矢跨比1/5,拱轴系数1.5。大桥桥面系采用钢纵横梁+混凝土桥面板,立柱采用钢立柱,拱座采用桩基础,桥梁的总体布置见图1。

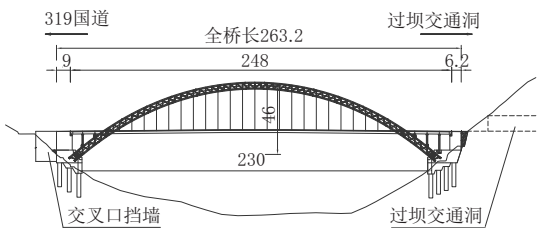


图1 白马乌江大桥立面布置图(单位:m)

3 结构设计

3.1 主拱

考虑结构的经济性、力学性能及不同类型截面形式的适用性,该桥主拱采用桁架结构<sup>[4-5]</sup>,单片拱肋桁架高4.72 m,宽2.8 m(见图2)。2幅桁架中心间距13.9 m。拱肋上下弦杆钢管外径 $\phi 920$  mm。腹杆、平联采用 $\phi 560$ 、 $\phi 426$  mm钢管。吊杆处拱肋竖向平面采用 $\phi 168$  mm钢管进行加强(见图3),吊杆上预埋 $\phi 219$  mm钢管。上下弦杆、吊杆处平联钢管内灌注C55混凝土,弦杆钢管采用Q345qD钢材,其余钢管采用Q355C热轧无缝钢管。

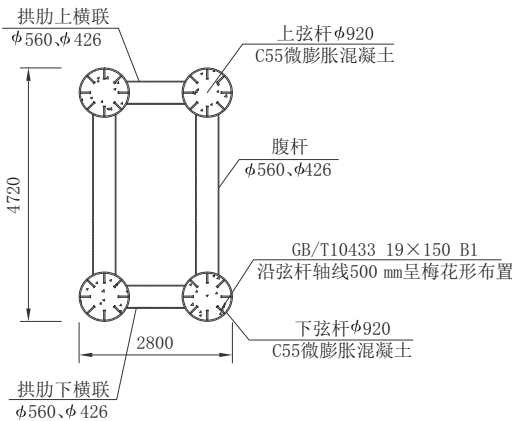


图2 主拱标准断面(单位:mm)

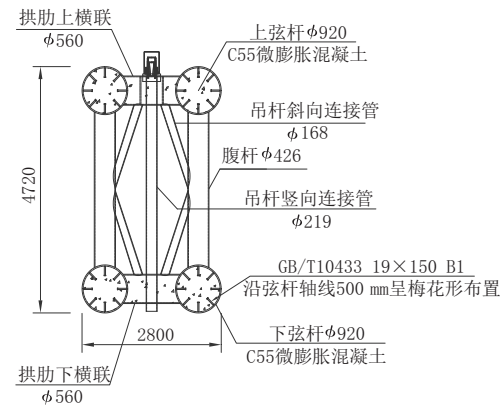


图3 吊杆处主拱断面(单位:mm)

为保证结构稳定性,拱肋横撑共设置12道。其中第1、第2号拱上立柱处横撑采用2道一字撑以支撑相应位置立柱,横撑弦杆及腹杆均采用钢管,直径分别为 $\phi 630$ 、 $\phi 560$  mm;其他横撑均采用“ $\Delta + I$ ”型组合式横撑(见图4)以节约材料、增强桥梁景观效果,横撑弦杆采用 $\phi 630$  mm钢管,腹杆、斜管采用 $\phi 377$  mm钢管。横撑钢管均采用Q355C热轧无缝钢管。

3.2 桥面系

混凝土梁及钢-混凝土组合梁在中承式钢管混

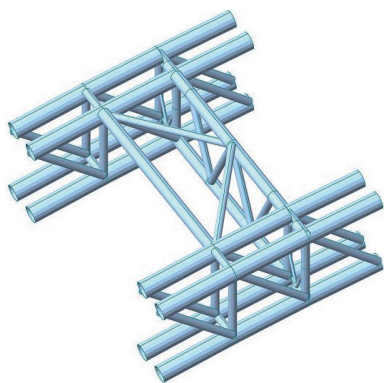


图4 横撑构造图

凝土拱桥桥面系中均较为常用<sup>[6-9]</sup>。考虑到工期和施工便捷性,该桥桥面系采用钢-混凝土组合梁,钢梁采用纵横梁,钢梁顶采用混凝土桥面板。

根据位置不同,钢横梁分为吊杆横梁(见图5)、支点横梁和端横梁,全桥共设置吊杆横梁23道,支点横梁7道,端横梁2道。吊杆横梁、支点横联均采用工字型截面,根据位置不同,长度分别为14.9、11.0 m,高1.5 m;端横梁采用箱形截面,长度11.0 m,高1.5 m。

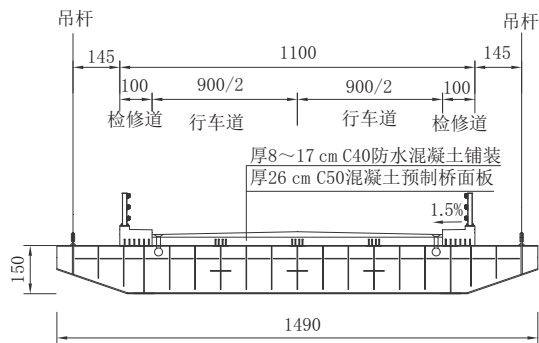


图5 桥面系吊杆横梁断面图(单位:cm)

桥面横向共设置5道钢纵梁,其中外侧2根纵梁梁高1.5 m,中间3根纵梁梁高0.8 m,纵梁横桥向间距2.375 m,均采用焊接工字形截面。

桥面板采用预制混凝土结构,厚26 cm,吊装就位后,在纵横梁顶部现浇湿接混凝土形成整体。现浇接缝混凝土采用C55自密实补偿收缩混凝土。桥面板安装时,预制桥面板与钢梁间接触面两侧采用厚20 mm密封橡胶垫块填充。

3.3 吊杆

吊杆采用高强平行钢丝成品索,钢丝抗拉强度标准值 $f_{pk}=1\,770\text{ MPa}$ ;吊杆纵桥向间距为8.0 m,型号分别为 $\phi 7-91$ 、 $\phi 7-85$ ;全桥共设46根吊杆。吊杆顶底部分别采用冷铸锚和销接式叉耳锚固于拱肋平联和桥面横梁吊耳上。所有吊杆拱端均设置减震器,梁端设置防水罩。

3.4 拱上立柱

由于该桥位于乌江峡谷地区,为有效减轻峡谷风荷载对结构的影响,拱上立柱采用阻力系数较小的圆管柱,立柱设置在2道拱肋中间连接横撑上,立柱钢管直径 $\phi 920\text{ mm}$ ,横向间距9.5 m,立柱圆管柱内灌C55补偿收缩混凝土以增强立柱的稳定性和受力性能。为增强立柱稳定性,立柱间设置钢管横撑进行连接,横撑高3.0 m,弦杆采用 $\phi 630\text{ mm}$ 钢管,腹杆采用 $\phi 377\text{ mm}$ 钢管。拱上立柱构造见图6。

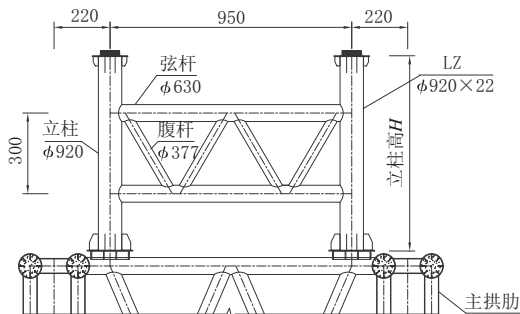


图6 拱上立柱构造图(单位:cm)

3.5 拱座

拱座采用整体式结构,底面设置为阶梯型。319国道侧拱座尺寸为24.0 m(横向宽) $\times$ 16.579 m(纵向宽) $\times$ 15.5 m(高);过坝交通洞侧拱座尺寸为24.0 m(横向宽) $\times$ 21.779 m(纵向宽) $\times$ 16.0 m(高)。为保证拱座与主拱拱脚之间可靠传力,拱座设置预留槽,待主拱封铰时采用CF55钢纤维混凝土(钢纤维掺量为 $60.0\text{ kg/m}^3$ )浇筑密实,拱座其余部位混凝土采用C40。由于桥位处溶洞发育,且拱座底部存在强度较低的岩溶角砾岩,为保障拱座基础承载力,拱座底部配置桩基础,319国道侧拱座配置15根 $\phi 2.5\text{ m}$ 桩基,过坝交通洞侧拱座配置16根 $\phi 2.5\text{ m}$ 桩基,桩长均采用16 m,桩基混凝土强度等级C35。

3.6 钢结构涂装方案

该桥采用冷喷锌防腐工艺。此工艺具有优异耐久性和易操作性,近年来已在钢结构上得到越来越多的应用<sup>[10-11]</sup>。该桥钢拱肋、钢桥面系的冷喷锌涂装体系如表1所示,相关技术要求依据《桥梁钢结构冷喷锌防腐技术条件》(JT/T 1266—2019)执行,同时应满足相关现行技术规范和标准的规定和要求。

表1 钢结构冷喷锌涂装方案

| 防护方案   | 道数 | 每道厚度/ $\mu\text{m}$ | 总干膜厚度(涂层)/ $\mu\text{m}$ |
|--------|----|---------------------|--------------------------|
| 冷喷锌    | 2  | $\geq 40$           |                          |
| 冷喷锌封闭剂 | 2  | $\geq 50$           | $\geq 260$               |
| 氟碳面漆   | 2  | $\geq 40$           |                          |

## 4 结构计算

### 4.1 有限元模型

采用MIDAS Civil建立全桥整体分析模型。其中,主拱弦杆采用梁单元(施工联合截面)、吊杆采用杆单元、混凝土板采用板单元,其他杆件采用梁单元。本模型共计1 640个节点、3 341个单元,如图7所示。



图7 有限元模型

分析考虑主要荷载如下。

(1)结构自重:按截面的毛面积自动计算,混凝土容重取 $25\text{ kN/m}^3$ ,钢结构容重取 $78.5\text{ kN/m}^3$ ;(2)桥面二期恒载:共计 $56.3\text{ kN/m}$ ;拱肋检修道荷载: $0.6\text{ kN/m}$ ;(3)钢管混凝土徐变:按主拱降温 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 考虑;(4)汽车荷载:采用双车道公路-I级及单车道汽-60;人群荷载:按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)第4.3.6条取值;(5)温度作用:整体升温取 $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,整体降温取 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ ;桥面板温度梯度根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)第4.3.12条取值, $T_1=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_2=6.7\text{ }^\circ\text{C}$ ,负温差 $T_1=-12.5\text{ }^\circ\text{C}$ , $T_2=-3.35\text{ }^\circ\text{C}$ ;主拱上下弦杆温差按 $\pm 8\text{ }^\circ\text{C}$ 取值;(6)静风荷载:按《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)计算,其中基本风速 $U_{10}=26.5\text{ m/s}$ 。

### 4.2 静力计算结果

主拱圈上下弦杆钢管在标准组合下的最大压应力为 $166.8\text{ MPa}$ ,小于0.8倍钢材的屈服强度;管内混凝土最大压应力为 $23.4\text{ MPa}$ ,小于混凝土应力限值 $37.4\text{ MPa}$ ,满足《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG D65-06—2015)的要求。

主拱圈各主要截面单管轴心受压承载力及四肢钢管作为组合构件的组合受压承载力均大于其基本组合轴压力,满足上述规范要求;主拱圈横联、腹杆等钢构件基本组合最大拉应力为 $115.8\text{ MPa}$ ,最大压应力为 $152.7\text{ MPa}$ ,均满足上述规范要求;横撑、立柱等钢构件基本组合最大拉应力为 $171.8\text{ MPa}$ ,最大压应力为 $184.9\text{ MPa}$ ,均满足上述规范要求。

桥面系钢纵横梁最大拉应力为 $238.0\text{ MPa}$ ,最大压应力为 $217.9\text{ MPa}$ ,均满足上述规范要求。

### 4.3 稳定性分析结果

根据《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG D65-06—2015),进行主拱稳定性分析时,对于跨径大于 $300\text{ m}$ 的钢管混凝土拱桥,使用阶段应计入几何、材料非线性影响。该桥主跨跨径 $230\text{ m}$ ,因此仅采用弹性分析方法进行稳定性分析。

(1)施工阶段稳定性分析。在主拱施工最大悬臂状态、裸拱灌注混凝土状态等不利状况下的1阶失稳稳定系数分别为19.9、7.7,大于4,满足上述规范要求。

(2)使用阶段整体稳定性分析。考虑自重、二期恒载、汽车人群活载、风荷载等静力荷载作为可变荷载,计算得到该桥各阶失稳模态,如图8所示。

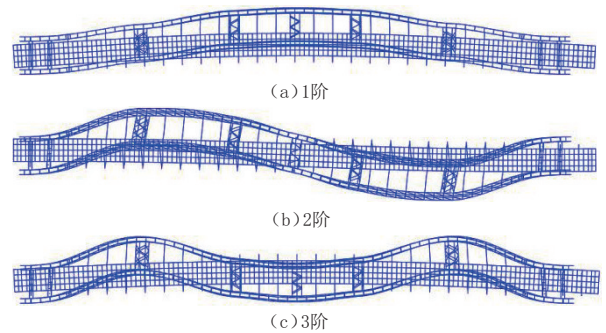


图8 该桥前3阶失稳模态

由图8可以看出,该桥前3阶模态均表现为主拱横桥向失稳。主要原因为该桥宽度较窄,横向稳定性最差。经计算,该桥前3阶失稳模态对应的稳定系数分别为6.3、6.5和8.1,均大于4,满足上述规范要求。

## 5 施工方案

该桥采用缆索吊装施工工艺,它是大跨径钢管混凝土拱桥的首选施工方法<sup>[12-16]</sup>。由于现场地形受限,该桥钢结构在加工厂组拼成吊装节段后通过船舶运输至桥位主索下方进行起吊安装,不设置现场拼装平台。另外,为减少对隧道施工的干扰,本方案不设置缆索系统塔架,仅利用两岸锚碇直接锚固承重索。该桥缆索吊装系统包含锚碇系统、缆索运输系统、扣锚索系统及风揽系统等,其布置见图9。

主索锚碇、工作索锚碇及扣索锚碇均采用岩锚系统,每岸锚碇对称于桥轴线设置2个分离式的锚碇结构。锚索采用 $\phi 15.2$ 钢绞线,进入中风化岩层深度不小于 $30\text{ m}$ 。另外,每岸上下游各设置2个风揽锚碇,用于调整拱肋横轴线和确保拱肋安装过程中的稳定性。

由于未设置现场拼装平台,为方便节段运输及

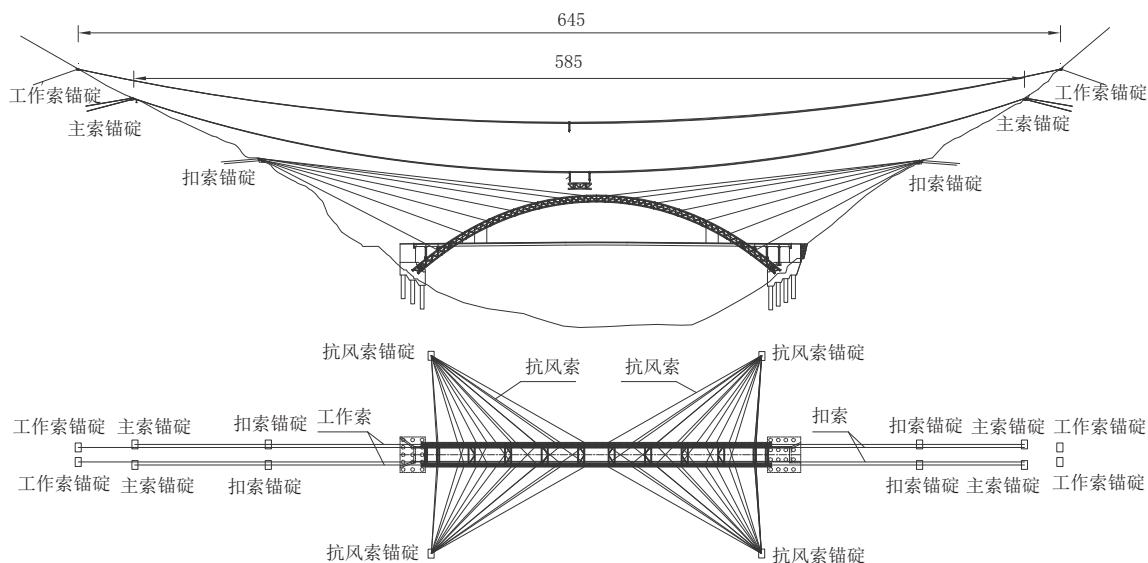


图9 缆索吊装施工布置图(单位:m)

吊装,上下游侧拱肋均分成15个节段(不含拱脚预埋段)制作安装,最大节段长度约18 m,最大节段吊装重量约61.3 t。拱肋横撑、钢立柱、桥面钢纵横梁、桥面板等均采用缆索系统进行吊装施工,其中,横撑最大吊装重量26.2 t,立柱最大吊装节段重量约24.4 t,桥面钢纵横梁重大吊装重量约18.8 t,混凝土桥面板最大吊装重量约10.0 t。因此,缆索吊设计最大吊装重量为63 t,以满足各构件的吊装需求。

全桥总体施工工序为:(1)吊装拱肋,拱肋从拱脚至拱顶两岸及上下游对称吊装施工,至拱顶合龙。相邻上下游拱肋节段安装完成后,应进行该段上下游拱肋间横撑的安装,横撑安装完成后,再进行下一节段的安装,以确保安装过程中拱肋的横向稳定性。为确保合拢前拱肋的横向稳定,同时便于调整拱肋横轴线,每段拱肋在上下游分别设置1道钢丝绳风缆,第3段拱肋安装完成后,前面的风缆可间隔拆除。(2)灌注钢管内混凝土,灌注工序为:外侧下弦杆→内侧下弦杆→外侧上弦杆→内侧上弦杆。(3)吊装拱上立柱、立柱横撑、灌注立柱内混凝土。(4)两岸对称吊装钢纵横梁,张拉吊杆。(5)两岸对称吊装混凝土桥面板,浇筑湿接缝,形成整体。(6)附属结构施工。

## 6 结 语

白马乌江大桥是跨越山区地形及河谷的大型桥梁,该桥的建设为重庆乌江白马航电枢纽工程建设及当地交通出行作出了重要贡献。本文从桥梁的总体布置、结构设计计算、桥梁施工方案等方面进行了分析探讨。该桥具备荷载重(施工期间行驶场内重载车辆)、桥面窄(桥面宽跨比仅为1/22.5)、地质条件复

杂等特点,因此通过选用合适的钢管拱截面形式及尺寸、优化的拱肋横撑布置、轻型的桥面系及可靠的拱座基础等保证了桥梁的使用性能。该桥于2022年初开工,2023年底建成通车。该桥的设计及施工关键技术细节可为同类桥梁建设提供重要的工程参考。

### 参考文献:

- [1] 韦建刚,陈宝春,刘永键,等.近十年我国桥梁组合结构研究与应用进展[J].福建理工大学学报,2025,23(1):1-32.
- [2] 韦登鹤.大跨度钢管混凝土拱桥设计参数研究[J].工程技术研究,2025,10(3):199-201.
- [3] 夏豪,徐晖,余勇继.德余高速乌江特大桥主桥设计[J].世界桥梁,2023,51(5):14-21.
- [4] 刘旭锴,谢斌,闰旭.交旅融合理念在龙里河特大桥方案设计中的应用[J].城市道桥与防洪,2023(9):25-29.
- [5] 陈克坚,陈建峰,张志勇.跨度430 m铁路钢管混凝土拱桥主拱设计[J].中国铁路,2021(9):46-52.
- [6] 张科乾.130 m跨钢管混凝土拱桥设计[J].城市道桥与防洪,2019(6):79-83.
- [7] 章铁军,范桂莲.乌江王沱大桥设计关键技术问题研究[J].人民长江,2011,42(20):19-21.
- [8] 苏巨峰,周广进,张文涛,等.主跨390 m钢管混凝土提篮拱桥设计研究[J].公路,2024(10):192-200.
- [9] 冯明友.钢管混凝土拱桥设计[J].城市道桥与防洪,2017(11):81-83.
- [10] 戴润达.冷喷锌涂料在梅山春晓跨海大桥上的应用[J].湖南水利水电,2017(6):36-39.
- [11] 张鹏,黄彬,廖有为.冷喷锌在水利水电工程钢结构防腐领域的应用[J].涂料技术与文摘,2016,37(8):15-18.
- [12] 周咏凯.山区超大跨径拱桥缆索吊装系统设计研究[J].城市道桥与防洪,2023(8):228-231.
- [13] 黄勃竣,袁胜彬,程果,等.大跨径中承式拱桥缆索吊装系统施工技术[J].山西建筑,2024,50(7):170-173.
- [14] 王庆贵.拱桥缆索吊装施工关键技术研究[J].现代交通技术,2014,11(1):36-39.
- [15] 田军伟.大跨度钢管混凝土拱桥拱肋吊装施工控制[J].公路与汽运,2012(1):164-166.
- [16] 张春新,苏辉,杨齐海.秭归青干河大桥主桥钢管拱桁架节段吊装施工[J].桥梁建设,2001(4):38-40.