

环湖绿道红星坪悬索桥总体设计

黄文龙,徐叶明,高毅,张姚

(中国联合工程有限公司,浙江杭州310052)

摘要: 红星坪悬索桥桥梁总长232 m,主桥为双塔单跨悬索桥,主跨为222 m,垂跨比1/10.2;桥面宽度6 m,净宽4.8 m。索塔采用钢筋混凝土塔柱;主缆及抗风缆锚碇采用重力锚;加劲梁采用分离式钢箱梁,上、下游设置抗风缆。通过详细阐述人行悬索桥的总体设计要点,结构设计关键节点,为后续类似项目提供指导。

关键词: 人行悬索桥;刚性吊杆;中央扣;索塔

中图分类号: U448.25

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)05-0076-05

0 引言

随着我国桥梁建设技术的日益成熟,人们对建筑美学及桥梁景观性的要求也越来越高。悬索桥跨越能力较强,具有结构轻柔、线型优美的特点,在同等跨径的桥型中优势较明显,而人行悬索桥主要承受人群荷载,宽跨比非常小,与常规的车行悬索桥在设计时有较大区别。目前人行悬索桥的设计指导规范较少。因此,有必要对桥梁的设计要点进行总结,为后续项目提供指导。

现以环湖绿道红星坪悬索桥为例,详细介绍其桥型设计及结构设计要点,力求为同类桥型的设计提供一些借鉴。

1 工程概况

该项目位于丽水市遂昌县,为湖山环湖绿道精品一期工程珠村畈标段,包含一座主跨222 m悬索桥和一座10 m简支钢箱梁引桥,桥梁总长232 m,桥面宽度6.0 m。总体效果图如图1所示。



图1 红星坪悬索桥总体效果图

收稿日期:2023-05-16

作者简介:黄文龙(1988—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁工程设计工作。

2 桥梁设计思路及比选

2.1 设计思路

桥梁建设遵循“安全、耐久、适用、美观、经济”的原则,桥梁的总体设计应与绿道设计相互融合,从点到线,再到面的整体统筹设计。

2.2 方案比选

考虑到跨水库桥梁工程的重要程度及特殊性,对跨库区桥梁进行方案比选。桥梁结构总体设计应在贯彻安全可靠、经济合理、因地制宜的基础上,加强桥梁建筑外形的美感,做到艺术与技术的和谐统一,充分展示“以人为本”的设计理念和要求。

综合比较梁桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥等几大桥型的特点,考虑到桥址建设条件的局限性,跨越水库时无法立墩,且两侧无相关配跨,基础条件较好,业主要求对环境影响最小等综合因素,最终确定采用地锚式悬索桥方案。悬索桥本身具有柔美的线条,纤细的主梁,良好的通透性和视觉效果,主缆的抛物线形态与山体形成良好呼应,景观效果突出,与当地文化理念相符。

3 技术标准

(1)设计安全等级:一级。

(2)桥梁用途:人行桥。

(3)设计基准期:100 a。

(4)设计使用年限:主体结构100 a,吊索20 a,支座及伸缩缝15 a。

(5)荷载等级:人群荷载2.625 kPa,并按小车专用道进行验算。

(6)桥面宽度:0.6 m(吊索 + 栏杆)+4.8 m(人行道)+0.6 m(栏杆 + 吊索)=6.0 m。

(7)设计风速:按《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T-3360-01—2018)取值。

(8)抗震烈度:地震基本烈度为6度,设计基本地震加速度值为0.05g。

4 桥梁总体布置

主桥采用双塔单跨人行悬索桥方案,桥梁跨径布置为1×222 m。主缆跨径布置为60 m+222 m+35 m,主缆垂跨比1/10.2,主缆中心距5.78 m。立面布置图如图2所示。

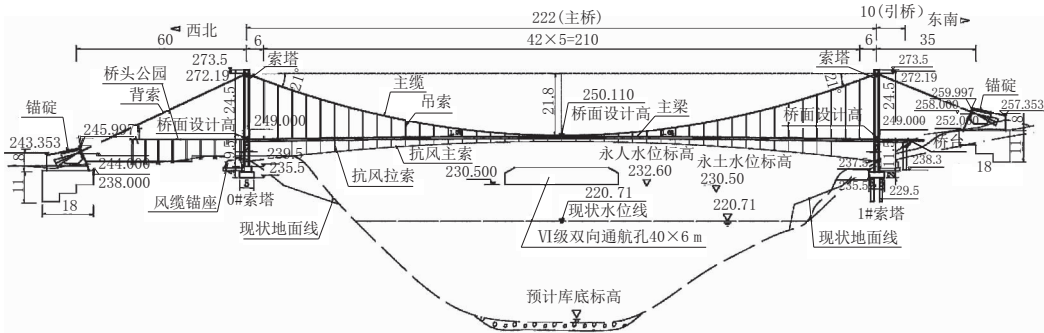


图2 悬索桥立面布置图(单位:m)

悬索桥加劲梁采用纵横梁方案,纵梁采用分离式钢箱梁,横梁采用工形截面钢板梁。桥面宽度6 m,面层铺设8 cm 混凝土+4 cm 彩色沥青混凝土,桥梁由跨中向两侧设置双向1%纵坡,加劲梁横向设双向0.8%横坡,横坡由铺装层实现。

索塔采用钢筋混凝土塔柱,横梁采用钢结构桁架式剪刀撑,索塔断面见图3所示;主缆锚碇及抗风缆锚碇采用重力锚;加劲梁上下游设置抗风缆索系统。典型断面图见图4所示。

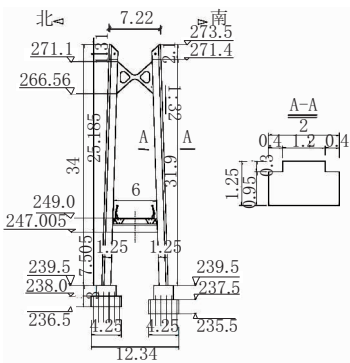


图3 索塔断面图(单位:m)

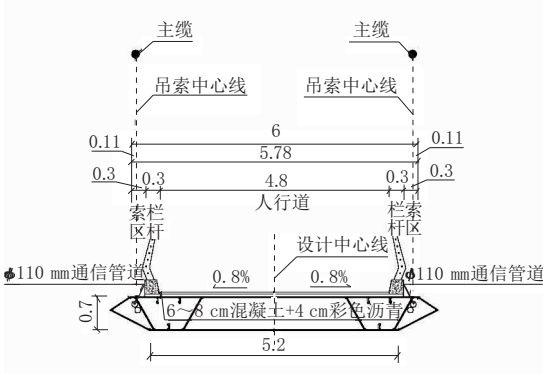


图4 典型断面图(单位:m)

引桥布置:西侧桥头设置观景平台,观景平台采用钢筋混凝土框架结构,东侧主桥外设置一跨引桥与绿道系统衔接,引桥采用1×10 m 简支钢箱梁结构。

5 桥梁结构设计

5.1 主缆设计

主缆采用1/10.2的垂跨比,主跨主缆计算跨径222 m,西侧边跨主缆计算跨径60 m,东侧边跨主缆计算跨径35 m。全桥主缆共两根,横桥向中心距5.78 m,每根主缆由7股索股组成,采用平行钢丝索股,每股由127根直径为5.1 mm的镀锌高强钢丝组成,钢丝的标准抗拉强度不小于1 770 MPa。主缆索股断面图如图5所示。

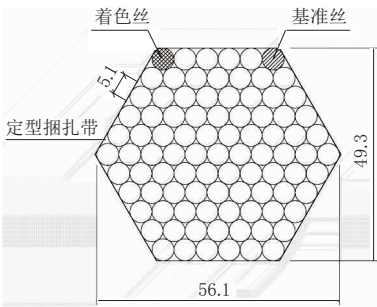


图5 索股断面图(单位:mm)

主缆在架设时竖向排列成近似正六边形,紧缆后主缆为圆形,索夹内空隙率为18%,索夹外空隙率20%。主缆在紧缆完成后,及时安装索夹,待桥面附属设施施工完成后,主缆表面采用防锈腻子勾缝涂抹,再在外采用φ4.0 mm 镀锌低碳圆钢丝缠绕,最后涂刷后续各道防护涂层。

5.2 抗风缆设计

北侧抗风主索计算跨径 217 m,垂跨比 1/24;南侧抗风主索计算跨径 226 m,垂跨比 1/21,抗风主索平面与水平面夹角为 45° 。抗风主索采用带叉耳式锚头的成品索,两端均设置调节器,调节范围为 ± 1 m。抗风拉索与主梁采用耳板式连接,与抗风主索采用绳夹连接。抗风缆为永久结构,风缆设计如图 6 所示。

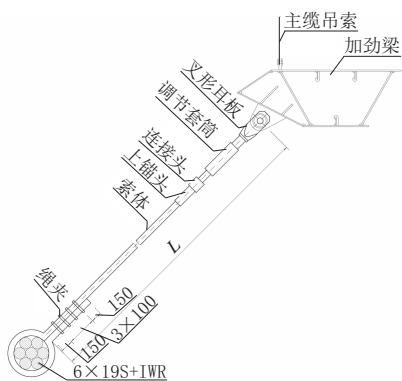


图 6 抗风缆设计图(单位:mm)

5.3 吊索、索夹及散索套设计

5.3.1 吊索

采用带锚头成品钢丝绳吊索。具体为密封钢丝绳 26Zn-WSC+n1Z+n2Z-1670Z,n1、n2 为相应层别 Z 形钢丝的根数。

吊索均采用耳板销接式,吊索缆端通过单耳板与索夹进行连接,加劲梁一端通过叉形耳板与吊点处的耳板连接。吊索材料综合考虑材料本身性能是否良好,产品安装是否便捷,是否利于后期维护更换等等因素,选用性能较佳的密封钢丝绳吊索,每个吊点设置一根吊索。吊索及连接设计如图 7 所示。

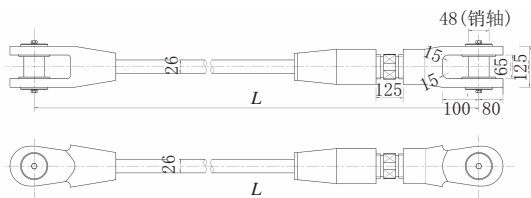


图 7 吊索连接图(单位:mm)

跨中位置多根短吊索长度小于 1 m,采用创新设计的不锈钢刚性吊杆^[1],刚性吊杆不可调节索长。单根吊索由两块整体铸造的不锈钢板组成,两块不锈钢板通过销轴与索夹及梁上吊耳连接。刚性吊杆采用创新的加工及安装方法^[2],吊杆设计图如图 8 所示。

5.3.2 索夹

全桥索夹包括吊索索夹、紧固索夹以及中央扣索夹。

吊索索夹与吊索对应,采用销接式连接。根据不同的索夹倾角,吊索索夹采用 5 种不同的规格,索夹

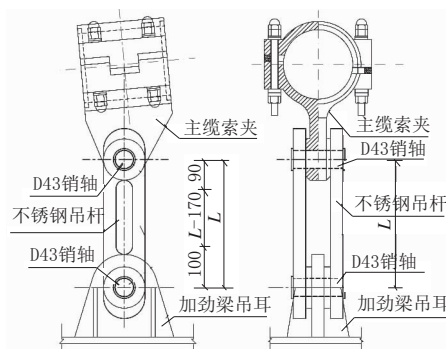


图 8 刚性吊杆设计图(单位:mm)

壁厚均 20 mm。索夹耳板厚 40 mm。

紧箍索夹位于边跨无吊索区,起紧固主缆的作用,索夹壁厚 20 mm。

中央扣索夹采用双耳板式,每块耳板厚 30 mm,间距 95 mm,索夹壁厚 20 mm。索夹均采用铸钢铸造,上下对合型结构形式。

5.3.3 散索套

该桥散索套采用上下对合型结构形式,通过高强螺栓连接紧固,确保预紧高强螺杆作用下摩阻套箍能紧紧箍住主缆,在两半散索套间留有适当的缝隙,并于接缝内填入防水材料。

5.4 中央扣设计

该桥采用刚性中央扣设计^[3],中央扣索夹采用双耳板式。为有效限制主缆以及加劲梁的纵桥向水平位移,提高结构抗风性能,在主缆跨中区域设置三对刚性中央扣,中央扣采用两块 30 mm 钢板与索夹及加劲梁顶板焊接。

5.5 加劲梁设计

加劲梁宽 6.0 m,主横梁标准间距 5.0 m,相邻主横梁之间设两道次横梁,次横梁标准间距 1.5 m,次横梁之间用次纵梁连接。吊索在纵桥向为每 5.0 m 一道,与横梁位置一一对应。

加劲梁采用纵、横钢梁结构形式,梁高 0.7 m,横桥向两侧设置风嘴,单侧风嘴宽度 0.42 m。纵梁等宽且沿纵桥向通长设置,断面形式为箱形,顶板全宽 1.6 m,悬臂长度 0.1 m;底板全宽 0.8 m,悬臂长度 0.08 m。

主横梁纵桥向间距为 5.0 m,断面形式为箱型,横梁宽 0.5 m,横梁高 0.7 m。次横梁纵桥向间距为 1.5 m,次横梁间设一道次纵梁连接,次纵横梁均采用 HW175×175 热轧 H 形断面。

吊索吊点在纵桥向间距为 5.0 m,与横梁位置保持一致,横桥向间距 5.78 m,吊点采用耳板式结构,底缘焊接在顶板上,并通过顶板与纵梁外侧腹板相连。

该桥采用压型钢板作为桥面混凝土铺装层模板,永久置于结构内。压型钢板型号采用 0.8 mm 厚 YX35-125-750 型,横向布置 4 片,纵横向均采用焊接连接,压型钢板与钢梁顶板采用剪力钉固定连接。

加劲梁断面及平面图如图 9 至图 11 所示。

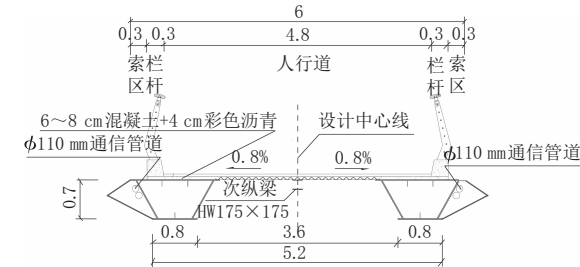


图 9 加劲梁断面图(仅次纵梁处)(单位:m)

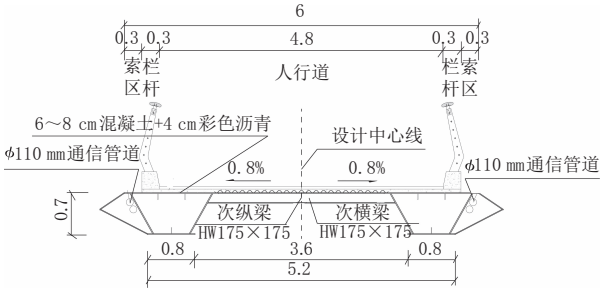


图 10 加劲梁断面图(次纵横梁处)(单位:m)

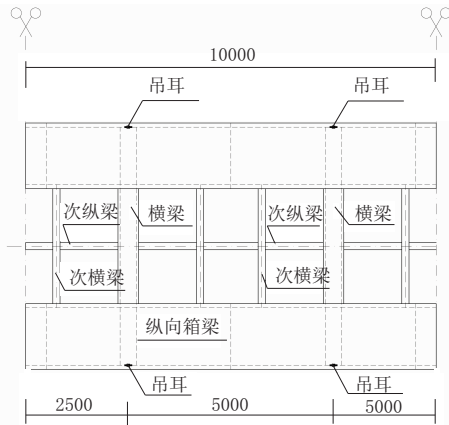


图 11 加劲梁(标准段)平面图(单位:m)

5.5 索塔设计

索塔为钢筋混凝土框架结构,塔柱高度约 35 m。其中桥面以上塔柱高度 24.5 m,索塔断面为 2.0 m × 1.25 m,带切角矩形,切角尺寸为 0.3 m × 0.4 m。塔顶设置钢结构塔冠,塔冠为箱型断面,塔冠高 2.1 m,板厚 12 mm;塔冠焊接在索鞍底座板上进行固定,塔冠腹板预留主缆套管孔,主缆钢套管与塔冠腹板焊接固定。上塔柱联结系采用异形剪刀撑形式。索塔塔冠如图 12 所示。

5.6 锚固体系设计

5.6.1 锚体结构

该桥东西侧锚碇均采用重力式,根据地质情况

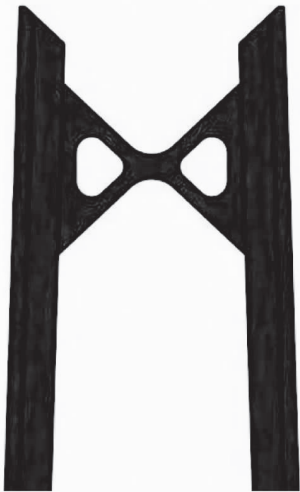


图 12 索塔塔冠模型

及锚体设计需要,采用扩大基础,锚碇基础持力层为中风化凝灰岩。为增加抗滑安全度,节约基础混凝土数量及开挖量,通过优化结构尺寸,采用阶梯式,锚碇如图 13 所示。

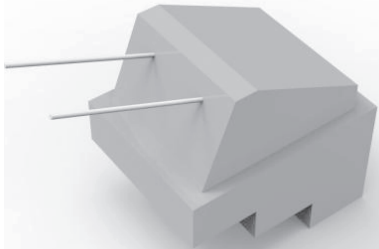


图 13 锚碇三维图

5.6.2 锚固系统

该桥主缆采用预应力锚固系统,预应力钢束锚固于后锚面,散索长度 5 m,锚固长度 3 m。

锚固系统由索股锚固联结器和预应力钢束构造组成。

索股锚固联结器由连接器和两根拉杆共同组成,单根主缆由 7 套索股锚固单元,全桥共计 28 套索股锚固单元。单套索股锚固单元为 15-16 预应力钢绞线锚固,预应力钢束张拉控制应力为 $0.65R_{yh}$,标准强度 $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$ 。

5.7 索鞍设计

塔顶主索鞍座采用全铸式结构,鞍头和鞍身一体式铸造^[4]。为减轻顶推摩阻力,底座板设置 5 mm 油槽,以适应施工中索鞍顶推作业。

5.8 支座及阻尼器设计

悬索桥在每个桥塔横梁处各设置两个抗拉压支座,同时为确保加劲梁顺桥向位移量控制在 8 cm 以内,全桥设置 4 个纵向限位-动力阻尼黏滞阻尼器,如图 14 所示。阻尼器纵向最大限位力为 2 280 kN,阻尼刚度为 $3 \times 10^4\text{ kN/m}$ 。

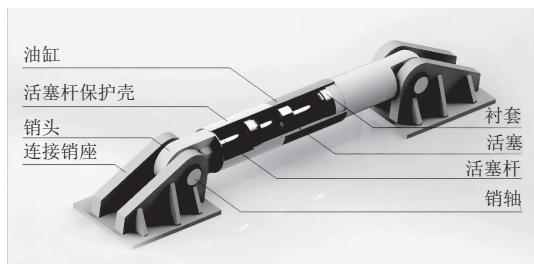


图 14 限位 - 动力阻尼黏滞阻尼器

6 结 语

湖山环湖绿道红星坪悬索桥主桥桥型合理,索塔采用造型美观的剪刀撑塔冠设计造型,该桥目前已经竣工,运营状况良好。在设计中包含以下特点。

(1)该桥作为马拉松赛道的一部分,在满足交通功能和结构安全的基础上,兼顾环湖景观效果及运动员的舒适度要求,选取合适的结构体系及悬索桥垂跨比,使得桥梁结构力与美的相互融合,并通过对舒适度进行分析及控制。

(2)该桥虽设计为人行桥,但应业主及各方要求,考虑小车按管控要求在应急状态下通行,故设计荷载按小车专用道进行同步验算,故全桥索力偏大,结

构刚度也较常规人行桥偏大。

(3)该桥以柔性吊杆为主,仅在跨中位置短吊杆处采用不锈钢刚性吊杆,刚性吊杆不可调节索长。每根吊杆由两块整体铸造的不锈钢板组成,两块不锈钢板通过销轴与索夹及梁上吊耳连接。

(4)为合理控制桥梁水平位移,在桥塔横梁处设置支座的同时,在梁底及横梁侧面设置纵向限位 - 动力阻尼黏滞阻尼器。

本文通过详细阐述人行悬索桥的总体设计要点,结构设计关键节点,力求为同类桥型的设计提供一些借鉴。

参考文献:

- [1] 张姚,张坤,黄文龙,等.人行悬索桥刚性吊杆:中国,202021757446.6[P].2021.6.29.
- [2] 张姚,张坤,黄文龙,等.人行悬索桥刚性吊杆的加工及安装方法:中国,202010845717.1[P].2021.8.17.
- [3] 彭旺虎,邵旭东.设置中央扣悬索桥的扭转自振分析[J].中国公路学报,2013(5):76-87.
- [4] 袁毅,易伦雄.武汉古田桥——自锚式悬索桥设计及关键技术[J].桥梁建设,2019,49(2):80-85.

(上接第 65 页)

参考文献:

- [1] 上海市交通委. G15 沈海高速嘉浏段拓宽改建工程有新进展[EB/OL].(2022-01-14) [2023-03-03].<https://www.shanghai.gov.cn/nw31406/20220117/e0b39d41c949443e9aa50b03d011b9e1.html>.

- [2] 上海市交通委员会. 2020 上海市交通运行年报[R].上海:上海市交通委员会,2021.

- [3] 上海市人民政府.上海市城市总体规划(2017—2035)[M].上海:上海科学技术出版社,2018.