

斜拉索辅助人行悬索桥总体设计

乔耀星¹, 张红喜¹, 刘世明^{2,3*}

(1. 河南省城乡建筑设计院有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 华北水利水电大学 土木与交通学院, 河南 郑州 450045;

3. 华北水利水电大学 河南省生态建材工程国际联合实验室, 河南 郑州 450045)

摘要:宁德市人行悬索桥计算跨径为 311.5 m, 采用斜拉索辅助桥面主缆受力结构体系。斜拉索主塔纵桥向间距 191 m, 横桥向采用外圆内方造型。桥面系通过纵向主缆与纵、横梁联合受力, 纵、横梁固定在主缆上。人行道板采用防腐木板。桥梁施工顺序为锚碇及主塔基础及塔身、主缆、纵横梁、风缆、桥面防腐木及栏杆, 然后斜拉索施工。考虑施工过程, 采用桥梁专用有限元软件 Midas/Civil 2019, 构建了全桥计算分析模型。计算结果表明: 桥梁结构整体刚度大, 各构件受力合理, 应力与活载下变形均满足相关规范规程要求。

关键词:人行悬索桥; 斜拉索; 防腐木桥面; 有限元分析; 桥面主缆; 地锚

1 工程概况

宁德市人行悬索桥位于福建省宁德市寿宁县大安乡银山花田景区, 起于炭山村, 跨越犀溪, 接南岸溪乾村东侧山头, 桥梁两端锚碇间距为 337.54 m。整个场地地形起伏较大, 南北两岸均为山地、森林, 植被茂盛, 地势较高, 中间穿越犀溪, 地势较底, 场地起伏标高为 709.0~817.5 m。

桥梁总宽度 3.3 m, 主体结构设计使用寿命 100 年, 设计安全等级为一级。人群荷载为 3 kN/m², 基本风压为 0.45 kN/m², 温度变化范围为 -5.7~35.8℃。工程区地震动峰值加速度为 0.05g, 场地类别为 II 类, 特征周期 0.05 s, 对应地震基本烈度为 VI 度, 按 VII 度抗震设防。

桥址沿线主要为山地、森林、河道等, 两岸为低山地貌, 中间河道位置为冲洪积地貌。区内地形切割强烈, 沟谷发育。地形坡度多为 20°~50°, 局部形成的陡坎可达 70°。场地未发现断裂构造及新构造活动迹象, 属于相对稳定地块的较稳定区域。岩石类型为砂土状强风化凝灰岩、碎块状强风化凝灰岩、中—微风化

凝灰岩等。初见地下水埋深 1.8~2.1 m, 稳定地下水位深 2.4~3.5 m, 主要表现为上层滞水和风化岩中的孔隙裂隙水及下部基岩构造裂隙水, 地下水水位年变化幅度一般为 3.0 m 左右。地下水水质良好, 无侵蚀性, 场地环境类型属 II 类。

综合考虑施工方便和工程经济性, 并适当突出人行桥梁的景观效果, 宁德市人行桥采用桥面主缆支承的地锚式悬索桥^[1-3], 计算跨径 311.5 m, 矢高 12 m, 矢跨比为 0.038 5, 并辅以斜拉索受力^[4-6], 斜拉索主塔纵桥向间距为 191 m, 桥梁结构总宽度为 3.3 m, 桥型布置如图 1 所示。

2 结构构造设计

2.1 桥面系构造

桥面系主要受力构件包括 21 根主缆和纵横梁, 其中主缆为直径 64 mm 的钢纤维芯 B 级镀锌钢丝绳^[7-8], 断面构造形式为 6×37S+IWR, 设计抗拉强度 1 770 MPa, 8 根布置于横梁下方, 9 根布置于横梁上方, 横向间距分为 150、160、180 和 200 mm, 其余 4 根对称布置于两侧栏杆位置处, 竖向间距为 840 mm,

收稿日期: 2021-12-16(修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51508189); 长安大学实验室开放基金资助项目(编号: 2014G1502007); 河南省科技攻关计划项目(编号: 162102210234); 河南省高等学校重点科研项目(编号: 19A560013); 国家留学基金委资助项目(编号: 201808410438)

作者简介: 乔耀星, 男, 大学本科, 工程师, E-mail: 274410576@qq.com

* 通信作者: 刘世明, 男, 硕士, 副教授, E-mail: sokd_0@163.com

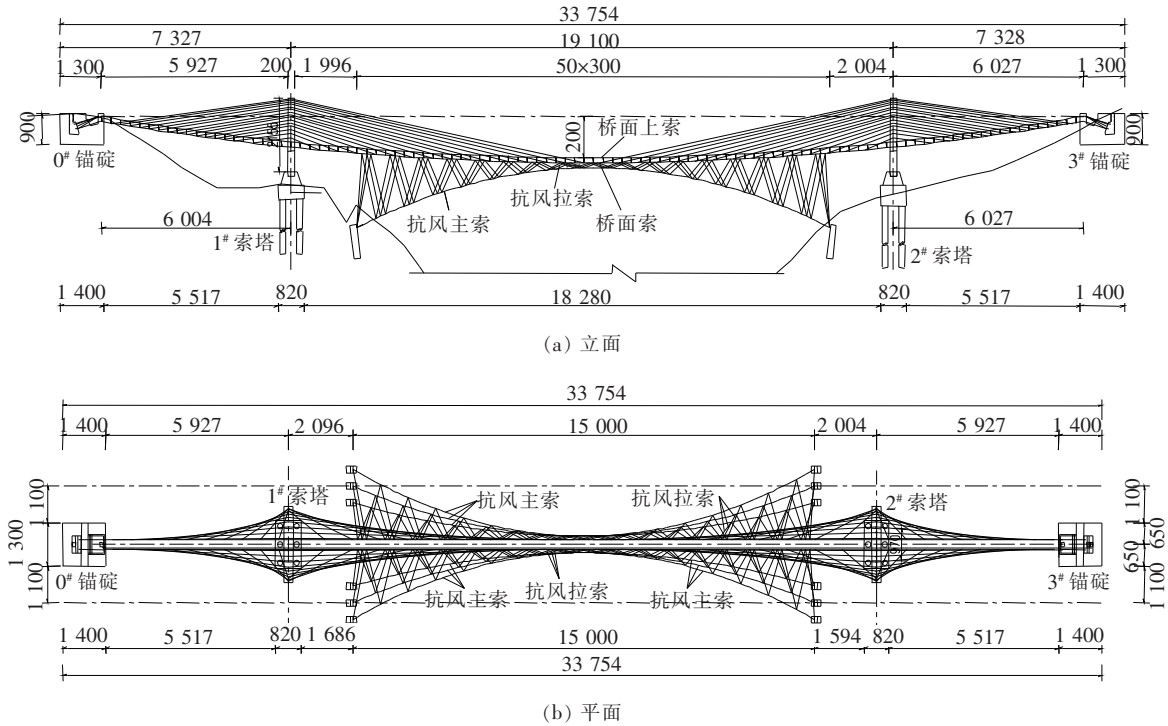


图 1 宁德市人行悬索桥桥型图(单位:cm)

横向间距为 2 000 mm。纵梁布置于横梁端部,用于承担斜拉索产生的顺桥向水平力,采用窄翼缘 HN 型钢,型号为 400 mm×150 mm×8 mm×13 mm,单根长 1 942 mm,横桥向间距为 3 310 mm。横梁型号同纵梁,单根长 3 500 mm,纵桥向间距为 1 500 mm,两侧外挂耳板与抗风拉索连接,上部耳板与斜拉索相连,桥面系布置如图 2 所示。桥面采用厚 60 mm、宽

150 mm 的防腐木,通过沉头螺栓固定于横梁顶面主钢丝绳绳上,并外刷木油 3 遍以增强其耐久性。栏杆立柱布置于横梁上,宽 50 mm、厚 4 mm 的拉丝面不锈钢板制作中间采用直径 18 mm 圆钢拉力筋定位,内侧通过直径为 8 mm 的外包 PVC 层钢丝绳卡箍固定,竖向间距为 120 mm。

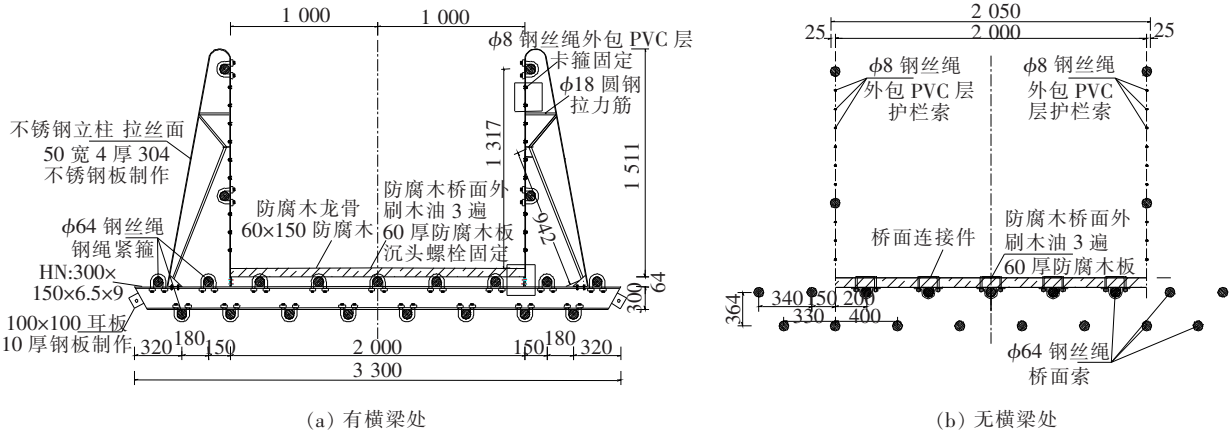


图 2 桥面系布置图(单位:mm)

2.2 斜拉索与抗风索设计

为突出桥面主缆受力,斜拉索采用弹性模量远小于主缆材料的聚丙烯芯钢丝绳,纵桥向间距为 3 m,其弹性模量不大于 7.3×10^4 MPa,直径为 12 mm,设计

抗拉强度为 1 960 MPa,设计初张力值不超过 5 kN,斜拉索及抗风索锚固构造见图 3。为突出桥梁的景观效果,斜拉索外包直径 60 mm 的 PE 彩色护套。

因该桥跨径较大且桥面较窄,为增加主梁的结构

稳定性,在主梁下方两侧设置抗风索。抗风主索采用 6 根公称直径为 50 mm 的镀锌钢芯钢丝绳。抗风主索上、下端均采用锚头锚固,并通过抗风锚固桩与基础相连。抗风拉索将抗风主索和主梁联系在一起,不仅提高主梁抗风能力,同时也增加了结构的刚度。抗风拉索采用公称直径为 22 mm 的镀锌钢芯钢丝绳。抗风拉索上、下端锚头均采用鸡心扣打结,铝套禁锢形成环形扣与 U 形吊扣连接。抗风主索及拉索的截面构成形式和公称抗拉强度与桥面主缆保持一致。

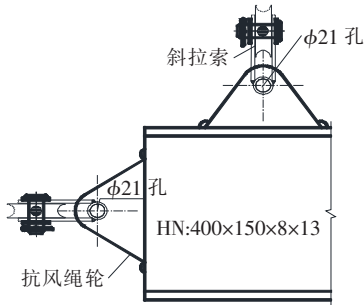


图 3 斜拉索及抗风索锚固构造图(单位:mm)

2.3 锚碇设计

地锚式悬索桥的锚碇是结构受力的关键构件,对结构安全和工程造价影响较大^[9-11]。锚碇的长度和宽度均为 13 m,厚度为 9 m,属于大体积混凝土结构。为减少温度应力的影响,防止出现温度裂缝,锚碇采用分层浇筑,并在每层混凝土中设置冷却水管,浇筑混凝土过程中通水冷却。同时,锚碇混凝土采用低水化热水泥,充分考虑掺入粉煤灰后混凝土的后期活性。另外,锚碇各部分的永久外露表面钢筋保护层内均设一层直径 6 mm、间距为 100 mm×100 mm 的带肋钢筋焊网片,以提高混凝土的表面抗裂性能。

2.4 索塔设计

索塔塔身采用钢结构,索塔钢结构总高度为 21.55 m,纵桥向宽度为 2 m。为突出景观效果,横截面整体造型采用外圆内方形式,截面为箱形,桥面从方形空心穿过^[12-13],如图 4 所示。塔座和承台厚度均为 4 m,单个桥塔采用 6 根嵌岩桩基础。

2.5 附属设施设计

索塔塔身采用避雷针做接闪器,塔内做引下线,塔身基础内主筋做接地极,避雷针与塔顶引线钢筋采用焊接,塔身主筋与承台及桩基内主筋可靠焊接,形成可靠电器通路。要求接地电阻值不大于 10 Ω,实测不满足时应增补人工接地极。

2.6 桥梁施工顺序

桥梁主要施工顺序是先施工锚碇、桥塔基础及桥

塔,然后施工桥面系主缆、纵横梁,再施工抗风索,最后施工斜拉索。关键工序施工流程见图 5。

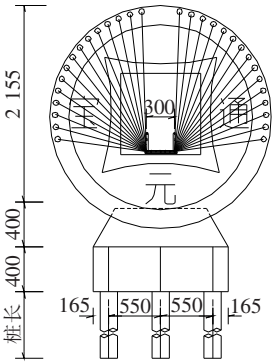


图 4 桥塔横断面图(单位:cm)

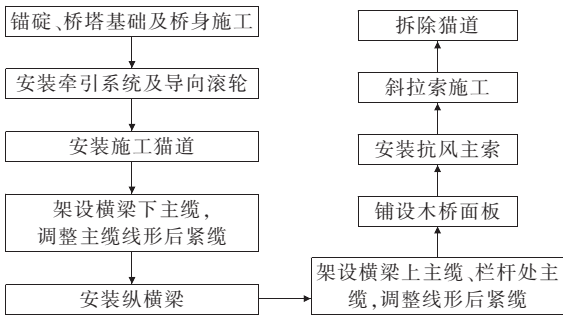


图 5 关键工序施工流程图

3 主桥结构安全分析

考虑桥梁施工顺序,采用桥梁专用分析软件 Midas/Civil 2019 的悬索桥建模助手,构建桥梁计算分析模型,并根据桥塔、斜拉索、风缆、纵横梁等布置情况,进行了索力的调整与优化分析,形成完整的桥梁计算分析模型,如图 6 所示。全桥共 9 837 个节点,11 158 个单元,计算模型中桥塔、纵、横梁采用梁单元模拟,主缆、风缆和斜拉索按只受拉桁架单元模拟。钢材自重考虑 5% 的焊接及附属构件重量,热膨胀系数和温度梯度均按照文献[14]选用。边界条件共 3 676 个,将锚碇和桥塔基础视为刚体,主缆在散索鞍处为固结,主缆在塔顶主索鞍中心处与主索鞍按永不脱离考虑,实际计算中按同位移进行考虑,纵梁与横梁固结,横梁与主缆采用弹性连接模拟。对主要受力构件开展承载能力极限状态下的应力验算和人群及风荷载作用下变形验算。

计算结果表明:在承载能力极限状态下,桥面主缆最大应力值为 550.8 MPa,对应安全系数为 3.2,大于

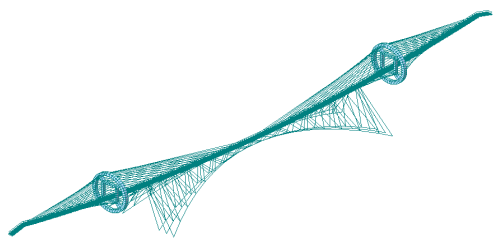


图6 整桥 Midas/Civil 计算模型

3;风缆主索及拉索的最大应力值为 404.6 MPa,对应安全系数为 4.1,大于 3;斜拉索最大应力值为 658.8 MPa,对应安全系数为 2.98,大于 2.5;主缆、风缆主索及拉索、斜拉索应力均满足规范要求。纵横梁最大组合应力和剪应力极值分别为 261.1 和 22.7 MPa,均小于 Q345 钢材对应的组合应力和剪应力设计值 275 MPa 和 160 MPa,横梁应力满足规范要求。主塔组合应力极值为 72.6 MPa,整体应力水平较低,不控制设计。在半跨人群荷载作用下,主缆最大竖向位移为 645 mm,位于 1/4 跨径附近,为对应计算跨径的 1/483,小于 JTG D64—2005《公路钢结构桥梁设计规范》^[15]容许值 $l/150$ (l 为计算跨径);静风荷载下最大横向位移为 847 mm,为对应计算跨径的 1/368,小于 JTG/T D65—05—2015《公路悬索桥设计规范》^[16]容许值 $l/150$,桥梁结构整体刚度满足规范要求。

4 结语

宁德市人行悬索桥采用斜拉索辅助桥面主缆受力结构体系,结构整体受力与构造复杂。在设计过程中,充分考虑结构安全、施工方便和工程经济性,并兼顾桥梁景观与造型。该项目已于 2019 年 5 月完成施工图设计,后续桥梁施工有序进行。

参考文献:

- [1] 李世伟,杨永清,谢宏伟,等.巽他海峡大桥悬索桥结构体系矢跨比优化设计研究[J].中外公路,2018,38(6):144—147.
- [2] 王志诚.棋盘洲长江公路大桥主桥约束体系研究[J].中外公路,2018,38(1):176—179.
- [3] 赵春发,石虎强,牛亚洲.大跨度悬索桥加劲梁缆索吊系统创新技术与应用[J].公路,2018,63(2):92—99.
- [4] 李中培,袁明军,刘孝武,等.自锚式斜拉—悬索协作体系桥的合理成桥状态分析[J].公路,2018,63(7):132—137.
- [5] 徐科英,肖海珠.缆索协作体系桥梁静力特性研究[J].世界桥梁,2018,46(3):50—55.
- [6] 张永涛,李京,闫勇,等.斜拉—悬索协作体系桥梁关键阶段研究[J].中外公路,2018,38(2):129—134.
- [7] 李成林,方海,崔剑峰,等.悬索桥新型柔性缠包带主缆防护系统的开发及应用[J].中外公路,2019,39(4):171—175.
- [8] 张兴,杜斌,张玉涛,等.笋溪河特大桥主缆线形影响参数分析[J].公路,2017,62(11):91—95.
- [9] 贾立峰,王子相.分布传力式主缆锚固系统设计关键技术[J].公路,2018,63(7):235—238.
- [10] 苏强,吴东明,谢正元.多股成品索锚碇锚固系统关键技术研究[J].中外公路,2018,38(4):197—200.
- [11] 余军思,吴骏,李红霞.抵母河大跨悬索桥锚碇设计分析[J].中外公路,2017,37(5):141—144.
- [12] 叶雨清,王昌将,马碧波.三塔双层悬索桥中塔结构选型研究[J].公路,2018,63(11):120—127.
- [13] 王帆,赖亚平,乔云强,等.合川渠江景观大桥三角拱形桥塔设计研究[J].中外公路,2018,38(2):109—112.
- [14] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [15] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [16] JTG/T D65—05—2015 公路悬索桥设计规范[S].