

山地城市双层钢桁梁斜拉桥集约化设计研究

昂 婧, 史建朋, 张尧情, 刘松蕊

(重庆设计集团有限公司市政设计研究院, 重庆市 401120)

摘要: 山地城市地形复杂, 建筑密集, 桥梁建设面临空间制约等挑战。以白居寺长江大桥为背景, 研究复杂地形下双层钢桁梁斜拉桥的集约化策略, 对桥位、桥型等总体布局以及主梁结构、索梁锚固的关键技术行对比分析。研究表明, 规划桥位与桥型方案适应地形限制, 采用双层桥面及桥站融合布局, 实现了交通空间集约化。主梁选用倒梯形三角形桁架断面, 能高效适配公轨复合交通需求, 断面利用率高, 用钢量较少, 结构受力合理, 施工安装便捷; 索梁锚固采用双锚拉板锚箱式, 传力明确且便于维护。白居寺长江大桥的集约化设计研究, 可为同类山地城市公轨双层斜拉桥设计提供技术借鉴和工程范例。

关键词: 山地城市; 白居寺长江大桥; 双层桥面; 空间节约; 倒梯形三角桁断面

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0180-07

Research on Intensive Design of Double-deck Steel Truss Girder Cable-stayed Bridge in Mountainous City

ANG Jing, SHI Jianpeng, ZHANG Yaoqing, LIU Songrui

(Chongqing Design Group Co., Ltd. Municipal Design and Research Institute, Chongqing 401120, China)

Abstract: The mountainous city has complex terrain and dense buildings, and the bridge construction faces challenges such as spatial constraints. Based on Baijusi Yangtze River Bridge, the intensive strategy of double-deck steel truss girder cable-stayed bridge under complex terrain is studied, and compares and analyzes the overall layout of bridge location and bridge type, as well as the key technologies of main girder structure and cable-girder anchorage. The research shows that the planned bridge location and bridge type scheme adapt to the terrain constraints, and the integrated layout of double deck and bridge station is adopted to realize the intensification of traffic space. The main girder adopts inverted trapezoidal triangular truss section, which can efficiently adapt to the demand of road-rail composite traffic. The section utilization rate is high, the steel consumption is small, the structural stress is reasonable, and the construction and installation are convenient. The cable-girder anchorage adopts double anchor plate anchor box type, which has clear force transmission and is easy to maintain. The intensive design research of Baijusi Yangtze River Bridge can provide technical reference and engineering example for the design of highway-rail double-deck cable-stayed bridge in similar mountainous cities.

Keywords: mountain city; Baijusi Yangtze River Bridge; double deck; space saving; inverted trapezoidal triangular truss section

0 引言

随着山地城市以重庆为典型代表, 其地形地貌复杂、城区建筑密集、土地资源稀缺, 对城市交通基础设施建设提出了严峻挑战^[1]。山地城市桥梁克服地理限制, 穿越密集建筑, 成为连接交通要道的基础设施。随着山地城市发展, 对公路和轨道交通的需求与日俱增, 传统平面桥梁布局模式在山地环

境中常显局促。山地城市桥梁需要突破空间维度的限制, 进行高效布局, 提升交通效率。

双层钢桁梁结构凭借竖向空间叠加能力, 可实现公轨共建, 有效节约土地资源^[2]。该结构具有轻量化、高强度特性, 利于跨越陡峭地形。结合工业化预制技术, 可以提升施工效率与质量, 减少对山地生态环境的影响, 契合山地建设对高效、集约、环保的要求。然而, 目前双层钢桁梁在山地城市桥梁中的应用研究仍相对较少, 尤其是在空间与经济的集约化层面缺乏系统性探索。

本文以白居寺长江大桥为工程背景, 深入剖析

收稿日期: 2025-07-11

作者简介: 昂婧(1999—), 女, 硕士, 助理工程师, 从事桥梁设计工作。

其总体布局与关键技术方案,从空间节约、经济优化等多维度进行对比分析,开展双层钢桁梁斜拉桥在山地城市中的集约化设计研究。

1 工程概况

重庆快速路五横线由快速路七纵线至渝湘立交,为主城区南部重要的东西向快速通道。白居寺长江大桥为主跨 660 m 的双塔双索面斜拉桥,是五横线跨越长江的重要控制性工程^[3],于 2022 年 1 月 24 日正式通车运行。

2 总体布局设计

2.1 桥位选择

2.1.1 公轨共建需求

该项目区位的轨道 18 号线有远景过江需求。因长江主桥跨径大,单独建设轨道桥困难且不经济,规划与五横线共走廊,采用轨道与公路同桥共建过江的方式,实现空间资源高效利用。

2.1.2 桥位比选

桥位选择需要契合区域地理条件与建设需求。白居寺长江大桥主要考虑桥位对码头及锚定地的影响^[4],结合两端固定的接线进行比选,比选桥位方案见图 1。

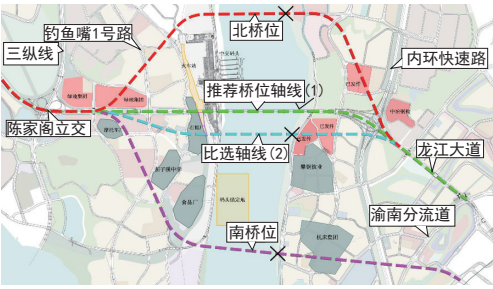


图 1 比选桥位

北桥位位于中交码头下游 440 m 外,南桥位绕避中交码头,位于锚定地上游 240 m 外,两端绕行远,与城市规划冲突大,交通功能不合理,征地拆迁大,工程费用高,不利于路轨共建。比选轴线(2)位于规划线位南侧 260 m,距离码头稍远,线形标准差,与规划路网衔接差,用地矛盾大。

桥位选定轴线(1),该桥位具备多重优势:与用地规划高度契合,避免大规模拆迁,降低社会影响与工程成本;对中交码头、茄子溪锚定地等既有构筑物影响最小,保障区域物流功能正常运转;两岸线形平顺,与现状及规划路网自然衔接,优化交通转换效率;尤其利于公轨空间协同布局,为轨道与道路共建

提供理想载体,兼顾工程经济性、功能合理性与建设可行性。

2.2 桥型比选

大桥附近过往船舶十分频繁,航运发达,通航环境较为复杂^[5],河段航道等级为国家 I-(2)级航道标准。依据航道通航行洪论证,大桥通航净高应 ≥ 24 m,明确主跨为 660 m。

本桥桥型选择需考虑通航和桥跨需求。经初步比选:梁桥受限于跨度能力无法满足要求;拱桥虽技术上可行,但需突破当时世界纪录(552 m)达 100 m 以上,技术风险与工程造价显著增加,在该桥位竞争力不足;斜拉桥、悬索桥可满足 660 m 通航跨径需求,属适宜桥型,两方案的效果图见图 2,综合对比如表 1 所示。

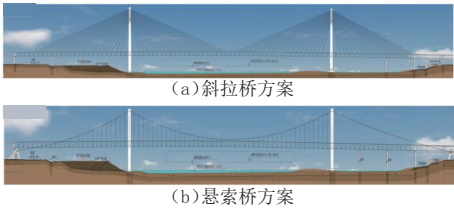


图 2 适宜方案效果图

表 1 适宜桥型方案对比

类别	斜拉桥	悬索桥
总体布置	双塔五跨钢桁梁斜拉桥	双塔两跨悬吊体系,钢桁梁连续结构
结构刚度	结构刚度大、行车舒适性好	结构刚度较大、行车舒适性较好
后期维护	钢桁梁采用涂装防护,全寿命周期内需更换斜拉索	钢桁梁采用涂装防护;主缆采用综合防腐涂装体系;全寿命周期内需要更换吊杆
施工难度	施工技术成熟,运输、吊装条件好	施工技术成熟,边跨运输条件受限,工艺要求高;锚碇施工难度较大;
工期/月	44	54
建安费/亿元	18.6	22.8

由于悬索桥投资较高、施工难度较大,工期相对较长,主缆锚碇占地面积大,最终采用双塔五跨钢桁梁斜拉桥方案,桥跨布置为 107 m+255 m+660 m+255 m+107 m=1 384 m^[6]。结合双层钢桁结构,上层为城市快速路,下层为轨道交通。

2.3 纵断面设计

白居寺长江大桥纵断面布置图如图 3 所示。大桥西侧起点接顺中坝路纵坡 4%,最后与规划龙江大道纵坡 3.85% 相接。全线共设纵坡 8 段,最大纵坡为 4.8%,最小纵坡为 0.5%,凹形竖曲线最小半径 2 860 m,凸形竖曲线最小半径 1 200 m。

大桥通过精细的纵坡设计和紧凑的竖曲线控

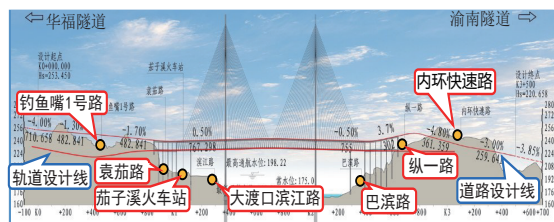


图3 白居寺长江大桥纵断面布置

制,在复杂山地地形中实现东西岸高差衔接,同时以28 m净空精准跨越铁路站场,最大限度减少土地占用和对既有设施扰动,实现空间集约设计,同时节约建设成本。

2.4 车道宽度

基于白居寺长江大桥2039年远期交通量预测和服务水平评价,确定主线标准段车行道规模采用双向8车道,单向设置2条小车道,各宽3.5 m,2条大车道,各宽3.75 m,以及两侧各0.5 m的路缘石。为便于两端接线,8线汽车需同布上层。下层2线轨道加检修道需约12.5 m宽度。

通过上下分层及整体式桥面布置车道,在有限桥面宽度内实现高效空间利用,较分离式断面减少用地,适应山地城市的空间限制。

2.5 站台衔接

白居寺长江大桥基于下层轨道交通的需求,将茄子溪站与巴滨路湿地公园站(原简家槽站)分别嵌入西、东引桥下方空间,通过整合桥体跨江交通与桥下轨道换乘空间资源,进行桥-站交通融合,优化了山地城市交通路网。

3 主梁关键技术

3.1 初步比选

白居寺大桥主桥为钢桁梁斜拉桥,结合斜拉桥结构形式及钢桁梁的构造特点,对主桁的桁形、桁片数量、主梁断面进行设计比选。

(1) 桁形

在桁梁结构选型中,主要考虑三角形桁架、华伦桁架及N形桁架。相较于N形桁架,三角形桁架在材料经济性与构造简洁性方面优势显著,其腹杆内力分布更为均匀,有利于降低用钢量;同时,仅连接4根杆件,节点构造最为简化,降低了制造难度。华伦桁架在三角形桁架基础上增设了竖腹杆,虽使节点杆件数量增加至5根,竖腹杆受力相对较小,但有效降低了斜腹杆内力,并为断面内布置撑杆提供了便利,有助于优化横梁受力状态。综合考量材料效

率、制造工艺及受力性能,主桁结构初步选定三角形桁架方案,并将华伦桁架作为重要的比选方案进行深入论证。

(2) 桁片数量

两主桁结构虽主桁杆件及横梁受力较大、桥面系与横梁用钢量稍高,但相比三主桁主桁受力复杂、施工难度大的特点,其索力、主桁杆件受力分配明确,受力体系简洁,便于施工,且从成本维度考虑未有明显劣势,综合考虑,宜选用两主桁。

(3) 主桁断面形式

按照双层桥面宽度布置拟定3种断面形式进行比选:梯形直桁断面;梯形斜桁断面;矩形直桁断面。方案比选如表2所示。

表2 主桁断面形式比选

比选项	梯形直桁 断面方案	梯形斜桁 断面方案	矩形直桁 断面方案
用钢量	较小	大	较大
横断面 空间	空间紧凑	空间相对紧凑	断面构件较多,但有较大的远期预留空间
对辅助墩 区压重的 适宜性	压重结构布置 相对较难	压重结构布置 相对较难	压重结构及压重物易于布置
腹杆受力	横向框架作用 引起的腹杆面 外弯矩较小	横向框架作用 引起的腹杆面 外弯矩较大	V撑布置改善了腹杆 面外受力,减小了腹 杆面外弯矩
工厂制造、 现场安装	制造工艺简单	工艺最复杂	制造工艺简单

对比可知,梯形斜桁断面方案,用钢量大、工艺复杂,不利于工业化建造,既不能充分利用断面也不足以预留远期空间,在“空间-成本-施工”三个维度均不具优势,不予考虑。推荐比选梯形直桁断面、矩形直桁断面。

3.2 方案比选

结合上述比选结果,白居寺大桥初步设计阶段主桁设计对三角形桁架+倒梯形断面、华伦形桁架+矩形断面两种方案进行设计比选。桥面系结构均采用正交异性钢桥面板。

(1) 三角形桁架+倒梯形断面

三角形桁架+倒梯形断面(方案一)如图4所示。标准段桁间距18 m,桁高12.606 m,节间长度15 m^[7]。桁架外侧设置边纵梁,边纵梁与主梁中心距7.5 m,节段划分采用倒三角形式。主桁系统中各构件截面尺寸如表3所示,主桁平均节段重量为530 t,杆件间均采用高强螺栓连接^[8]。

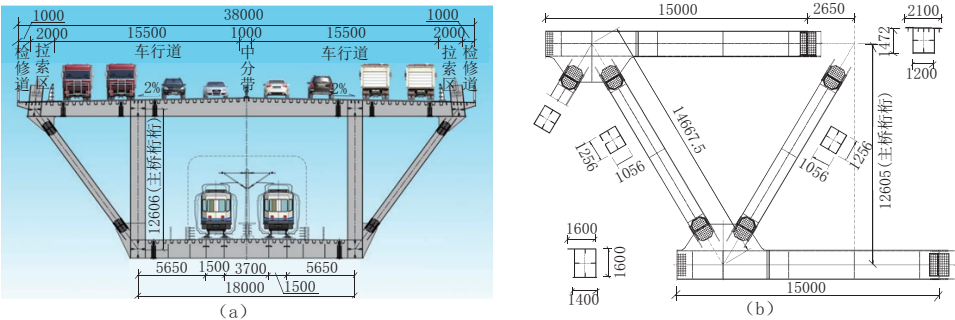


图4 三角形桁架+倒梯形断面

表3 方案一主桁系统构件截面尺寸

位置	上弦杆	下弦杆	边纵梁	腹杆	斜杆
截面形状					
尺寸/(mm×mm)	1 200×1 400	1 200×1 600	1 000×1 250	1 200×1 000	760×870
板厚/mm	24 ~ 36	24 ~ 40	24 ~ 36	24 ~ 32	28 ~ 30

上层桥面由桥面板纵肋、横梁及桥面板组成。如图5所示,桥面板厚16 mm,下设U形纵向加劲肋和板肋,U形肋间距600 mm,高300 mm,板厚8 mm;板肋位于防撞护栏位置处,厚16 mm,高200 mm;上横梁间距均为3.75 m,横梁分为拉索节间大横梁和其余节点、节间小横梁两种,均为倒T形截面。桥面板与纵肋、横梁焊为一体出厂,桥面板分块制造和安装,每节间的桥面板横桥向分为3块,最大的桥面板块重约115 t。

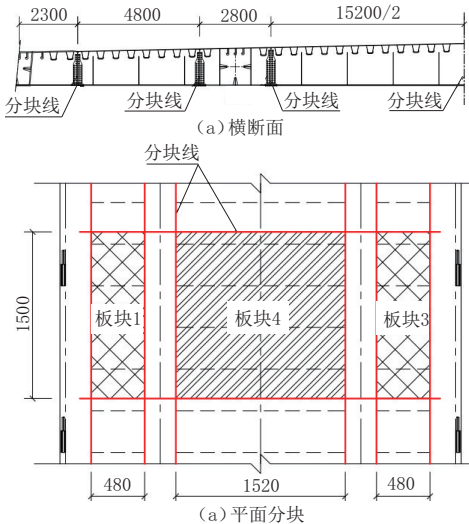


图5 方案一上层桥面板

下层桥面由桥面板U形纵肋、轨道纵梁、横梁及桥面板组成。如图6所示,桥面板厚16 mm,下设“U”形纵向加劲肋,间距350 mm,“U”形肋高200 mm,板厚16 mm;下横梁间距均为3.75 m。桥面板与纵梁、轨道梁、横梁焊为一体出厂,桥面板分块制造和安

装,每节间的桥面板为1块,桥面板块重约110 t。

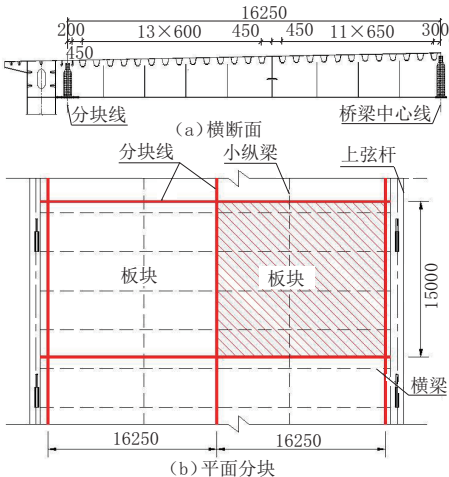


图6 方案一下层桥面板

(2)华伦形桁架+矩形断面

华伦形桁架+矩形断面(方案二)如图7所示。标准段桁间距34.8 m,桁高12.433 m,节间长度15 m,节段划分采用倒三角形形式。主桁系统中各构件截面尺寸如表4所示,主桁平均节段重量为560 t,杆件间均采用高强螺栓连接。

上层桥面由纵肋、桥面系纵梁、横梁及桥面板组成。如图8所示,桥面板厚16 mm,下设U形纵向加劲肋,间距600 mm,U形肋高280 mm,板厚8 mm;每半幅桥设1道桥面系纵梁;上横梁间距均为3.75 m。桥面板与纵梁、横梁焊为一体出厂,桥面板分块制造和安装,每节间的桥面板横桥向分为2块,桥面板块重约103 t。

下层桥面由纵肋、桥面系纵梁、轨道纵梁、横梁及桥面板组成。如图9所示,桥面板厚16 mm,下设

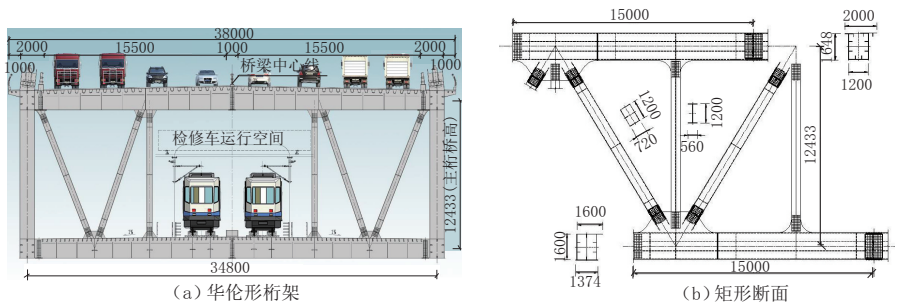


图7 华伦形桁架+矩形断面(单位:mm)

表4 方案二主桁系统构件截面尺寸

位置	上弦杆	下弦杆	斜腹杆	竖腹杆	横梁撑杆
截面形状					
尺寸/(mm×mm)	1 200×1 600	12 00×1 600	1 200×720	1 200×560	560×500
板厚/mm	24 ~ 40	24 ~ 40	24 ~ 32	24	24

“I”形纵向加劲肋,标准间距 350 mm,“I”形肋高 200 mm,板厚 16 mm;每半幅桥面宽范围内设 4 道桥面系纵梁;下横梁间距均为 3.75 m。桥面板与纵梁、轨道梁、横梁焊为一体出厂,桥面板分块制造和安装,每节间的桥面板横桥向分为 2 块,最大的桥面板块重约 105 t。

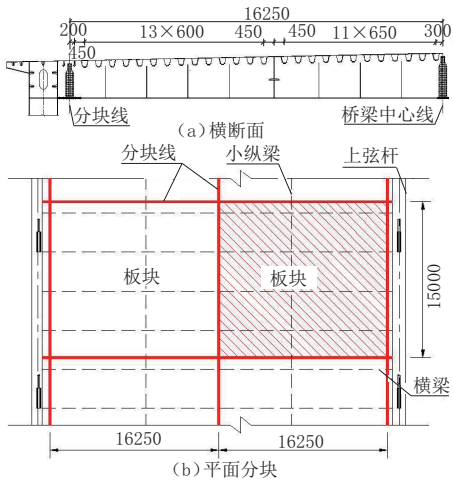


图8 方案二上层桥面板(单位:mm)

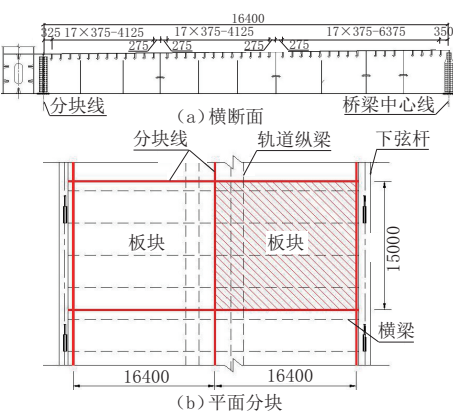


图9 方案二下层桥面板(单位:mm)

(3)桁梁方案比选

结合两方案,从成本和施工角度对比,由表 5 可见,三角形桁架+倒梯形断面方案杆件数量相对少,制作安装工序相对少,便于施工,且主桁(含桥面板)钢量较少,更为经济,故而选用方案一。

表5 桁梁方案比选

比选项	方案一	方案二
	三角形桁架+倒梯形断面	华伦形桁架+矩形断面
结构体系	结构成熟可靠,为斜拉桥常用的主梁结构形式	结构成熟可靠,为斜拉桥常用的主梁结构形式
制作安装	杆件数量相对少,制安工序相对少	杆件数量相对多,制安工序相对多
主桁(含桥面板)用钢量/t	47 200	53 000

4 索梁锚固

在大跨度钢箱梁斜拉桥中,常见锚固形式包括锚箱式、单锚拉板式、耳板式及锚管式连接^[9]。而对于主梁采用双层钢桁梁的斜拉桥,锚固结构通常集成于主桁节点处,以利用既有节点板。因此白居寺大桥,即对适用的双锚拉板锚箱式、双锚拉板锚管式及承压式锚箱连接三种方案进行了详细比选设计。

(1)双锚拉板锚箱式

双锚拉板锚箱式结构由双锚拉板和锚箱两部分组成,结构构造如图 10 所示^[9]。双锚拉板布置在桥面板以上,边纵梁上方。两块锚拉板与边纵梁腹板对应,采用全熔透焊缝与边纵梁顶板连接。锚压板前端设置锚垫板,形成“井”字结构箱体。在锚压板上设置加劲肋,加强其稳定性以及均衡锚垫板受力。锚压板与锚拉板之间由 4 条熔透剪力焊缝连接,并

通过锚拉板预偏一定角度,减小锚拉板面外弯矩。

该锚固结构的传力路径为:斜拉索索力通过锚垫板施加至锚压板,将力传递到两侧锚拉板上,再由锚拉板直接传递到边纵梁、斜杆、主桁上。

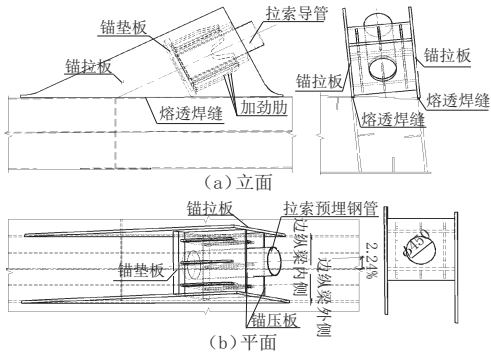


图 10 双锚拉板锚箱式结构构造

该构造实现了拉索中心与边纵梁中心基本重合,传力路径明确;其敞开式设计(钢锚箱置于桥面以上)便于检修维护。然而,关键传力部位集中于锚压板与锚拉板的连接焊缝以及锚拉板与边纵梁顶板的焊缝,且在锚拉板与承压板焊缝根部存在应力集中问题,故对边纵梁顶板及锚拉板的Z向性能要求严格。空间布局方面,锚拉板虽位于桥面以上且高度较高,但因布置于车行道防撞栏杆(1.5 m 高)外侧,多数位置与栏杆齐平,对行车视线影响较小。

(2)双拉板锚管式

双锚拉板锚管式结构构造(见图 11)基本与双锚拉板锚箱方案一致,主要差别在于由 2 块锚压板变为 4 块传力板,拉索锚固于锚管端部的锚垫板上,锚管直接与锚拉板进行焊接和加劲。

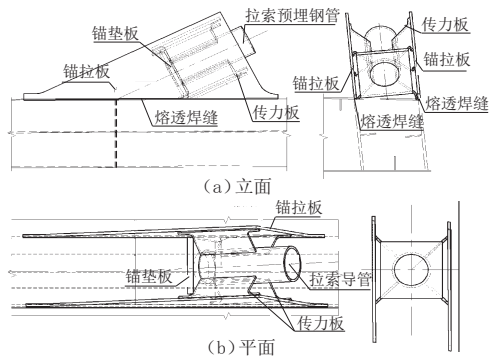


图 11 双锚拉板锚管式结构构造

该锚固结构的传力路径为:斜拉索索力通过锚垫板施加至锚管,经 4 块传力板将力传递到两侧锚拉板上,再由锚拉板直接传递到边纵梁、斜杆、主桁上。

该构造特点与双拉板锚箱式基本一致。板件数量和焊缝数量更少,但是传力板与锚拉板为锐角斜交,施焊空间小。

(3)锚箱式(承压式)

由于边纵梁高度较小,其空间无法满足焊缝长度及安装锚具要求。受其限制,锚箱无法设置在边纵梁箱室内。锚固结构设置于边纵梁外侧腹板外侧,桥面以下。锚箱式结构构造见图 12。斜拉索水平分力由锚箱锚压板传递扩散至边纵梁,竖向分力通过纵梁传递给大横梁及斜杆。

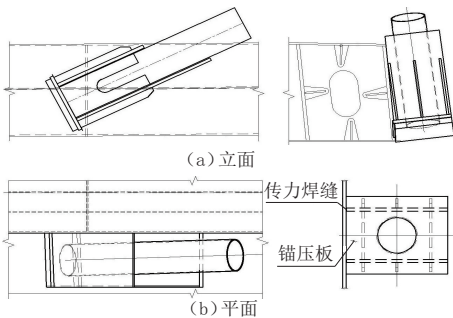


图 12 锚箱式结构构造

该构造拉索中心与边纵梁中心不相交,拉索对边纵梁存在较大偏心距;在锚垫板、锚压板与边纵梁焊缝相交区域附近存在明显的应力集中现象;锚压板因受限于仅能单侧设置焊缝,导致其长度增大,用钢量相对较多。此外,锚箱内部空间狭窄,施焊条件差,焊缝纵横交错,显著增加了制造与安装的难度。同时,箱内构件密集也使得后续的监护、检查及维修工作较为困难。在空间布局方面,该形式虽不影响桥面行车和行人视线,但其外置的锚箱体量庞大——尤其靠近桥塔处,因拉索角度增大导致焊缝长度需求增加,进而使锚箱竖向高度尤为显著,通常需增设外装饰措施进行遮挡。

由以上 3 个方案的研究分析可知,锚箱式(承压式)连接方案,传力为单侧焊缝,导致锚压板较长,用钢量相对较多。同时锚箱位于桥面侧下方,且须采取外装饰遮挡,检修维护难度相对大。双拉板锚管式连接传力直接,板件及焊缝数量最少,但作为重要的受力焊缝,传力板与锚拉板之间的夹角较小,施焊空间小,焊缝质量相对不容易保障。经综合比选,初步设计拟选双拉板锚箱式连接方案为推荐方案。

5 结 语

本文以白居寺长江大桥为依托,从空间节约与经济优化等集约角度,对山地城市复杂条件下双层钢桁梁斜拉桥的总体布局、主梁、索梁锚固等关键环节展开设计分析。主要结论如下:

(1)规划桥位与桥型方案能最大限度契合山地城市限制条件,实现空间资源高效利用。选定桥位

避开既有设施,按远期交通量优化采用上层8车道快速路与下层轨道交通的双层桥面布局,较分离式断面显著减少用地。将轨道站嵌入引桥下方空间形成桥-站融合,同时通过精细纵坡设计衔接东西岸高差,最终达成复杂地形下交通空间的集约化目标。

(2)主梁结构经多方案比选后采用倒梯形三角形桁架断面形式,空间利用率高,能高效适配双层交通需求,结构受力合理,杆件数量少,用钢量降低,制作安装工序简单,经济性突出。

(3)索梁锚固采用双锚拉板锚箱式连接方案,传力路径明确,敞开式设计便于检修。

白居寺长江大桥的成功建设,为山地城市大跨度公轨两用桥梁设计积累了宝贵经验,其集约化设计研究成果,可为后续类似工程提供重要的技术借鉴与范例,对推动山地城市可持续交通基础设施建设具有显著意义。

参考文献:

- [1] 杨晋苏.山地城市街区空间紧凑发展研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [2] 易辉,孙军举.山地城市公轨两用悬索桥设计与创新[C]//2023世界交通运输大会(WTC2023)论文集(上册).北京:中国科学技术协会,交通运输部,中国工程院,湖北省人民政府:2023:528-532
- [3] 杜春林,周倩,邓宇,等.重庆白居寺长江大桥主桥设计[J].桥梁建设,2025,55(3):126-133.
- [4] 黄荣超.白居寺长江大桥施工期通航安全维护管理探讨[J].中国水运,2021(11):45-48.
- [5] 母德伟,刘明俊,韩述,等.船舶失控漂移模型在重庆白居寺长江大桥通航安全影响论证中的应用研究[J].交通科技,2014(5):155-158.
- [6] 周浩,黄灿,郑建新.重庆白居寺长江大桥主梁合龙施工控制关键技术[J].世界桥梁,2023,51(4):43-49.
- [7] 杜春林,史建朋.大跨径钢桁梁斜拉桥节点受力分析[J].重庆建筑,2016,15(7):43-45.
- [8] 李明涛.白居寺长江大桥钢桁梁制造及精度控制关键技术研究[J].工程技术研究,2024,9(10):76-78.
- [9] 曾永平,陈克坚,袁明,等.双锚拉板-锚箱索梁锚固结构设计研究及疲劳试验[J].桥梁建设,2013,43(6):45-50.

《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

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

