

乐西高速苏坝特大桥主桥设计关键技术

周海波, 蒋建军, 田 波

(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 乐西高速苏坝特大桥主桥为净跨350 m上承式钢筋混凝土劲性骨架拱桥。主拱采用拱座+桩基的组合式基础。主拱为等截面悬链线无铰拱, 拱圈采用单箱双室截面的双拱肋形式。主拱采用强劲骨架法施工, 劲性骨架为型钢与钢管混凝土组成的桁架结构, 骨架钢管内灌C120超高强补偿收缩自密实混凝土。劲性骨架采用斜拉扣挂体系拼装合龙后连续泵送灌注管内混凝土, 拱圈外包C55混凝土结合结构受力采用两环、分段浇筑, 有效节约了施工工期。吊装系统及扣挂体系采用引桥桩基础+岩锚组合式锚碇。桥区地处高烈度地震区, 桥梁除考虑结构轻型化外创新设计了由可联动多向防落梁装置、设置纵向变刚度支座及黏滞阻尼器多种抗震措施组成的拱桥结构抗震体系。

关键词: 上承式拱桥; 强劲骨架; 两环浇筑; 扣挂体系; 高烈度; 防落梁装置; 组合式锚碇

中图分类号: U448.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)03-0099-05

Key Design Technology for Main Bridge of Suba Bridge in Leshan-Xichang Expressway

ZHOU Haibo, JIANG Jianjun, TIAN Bo

(Sichuan Highway Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: The main bridge of Suba Bridge in Leshan-Xichang Expressway is a net span-350 m deck-type reinforced concrete stiff-skeleton arch bridge. The combined foundation of arch support and pile foundation is used for the main arch. The main arch is an equal-section catenary hingeless arch. And the form of a double-arch rib with a single-box double-chamber section is used for the arch ring. The main arch is constructed by a strong stiff skeleton method. The stiff skeleton is a truss structure composed of section steel and concrete filled steel tube. The skeleton steel tube is filled with C120 ultra-high strength compensated shrinkage self-compacting concrete. The stiff skeleton is continuously pumped with the concrete inside pipe after assembled and closed by cable-stayed buckle system. The arch ring outer C55 concrete combined structure is loaded with two rings and segmented pouring, which effectively saves the construction period. The approach pile foundation + rock anchor combined anchorage is used for the hoisting system and the buckle hanging system. The bridge area is located in a high-intensity seismic zone. Therefore, in addition to considering the lightweight structure of the bridge, an anti-seismic system of arch bridge structure is innovatively designed, which is composed of multi-directional anti-falling beam device, longitudinal variable stiffness support and viscous damper.

Keywords: deck-type arch bridge; stiff skeleton; two-ring pouring; buckle hanging system; high intensity; anti-dropping beam device; combined anchorage

0 引言

随着高速公路向崇山峻岭延伸,大量跨越深切峡谷的桥梁出现在偏远山区,面临坡陡谷深、交通运输不便等问题,当峡谷宽度为200~400 m时,钢筋混凝土劲性骨架拱桥具有施工便利、受力合理、造价节约、后期维护成本低等优势^[1]。本文以乐西高速净

跨350 m的苏坝特大桥为工程依托,开展了桥型选择、结构设计、桥梁抗震等方面的研究,为类似工程提供技术参考。

1 工程概况

乐西高速苏坝特大桥位于马边县苏坝乡,为跨越马边河及省道103而设,是乐西高速公路主要控制性工程之一。主桥为净跨350 m的上承式钢筋混凝土劲性骨架拱桥,见图1,桥面行车道梁为13孔28.5 m预应力混凝土简支小箱梁^[2]。

收稿日期: 2024-03-14

作者简介: 周海波(1986—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

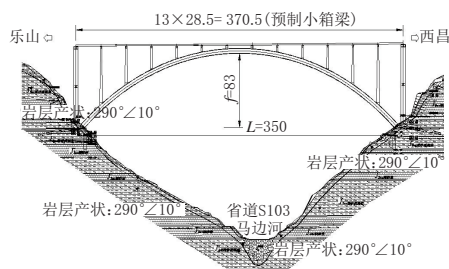


图1 苏坝特大桥主桥桥型布置图(单位:m)

乐西高速为标准宽度 25.5 m 的双向 4 车道高速公路;为方便苏坝乡两岸群众出行,苏坝特大桥两侧增设人行道,增加人行道后该桥桥面标准宽度为 28 m,见图 2。

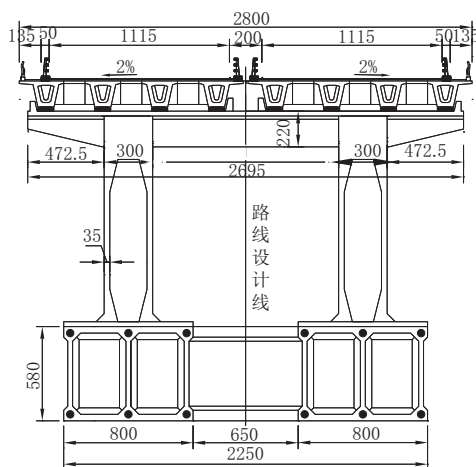


图2 主桥标准横断面图(单位:cm)

桥址处于青藏高原的南侧,跨越的马边河由 S 向 N 沿路线右侧通过。大桥桥面距离谷底超 220 m,场地为深切高山峡谷地形。区内山体近桌状,驼状,桥轴线大角度与河谷相交。桥址经勘察揭露地层为新生界第四系全新统崩坡积层、坡残积层、近代河流冲积层、上更新统二级阶地堆积层及中生界侏罗系中统沙溪庙组(见图 1)。

桥址处于中强地震区,场地地震动峰值加速度为 0.20g,地震动反应谱特征周期为 0.40 s,场地对应地震基本烈度为Ⅷ度。

2 设计关键技术

2.1 组合式拱座基础设计

桥位两岸基岩大面积裸露,拱座上方存在强卸荷裂隙带和凹腔等不良地质。强卸荷带宽约 14~16 m,长约 80 m,高约 30~35 m。卸荷裂隙带沿垂直桥梁轴线方向展布,岩体受宽张裂隙影响松动变形强烈,岩体失稳后可能会撞击桥墩及主拱,一旦发生危岩坠落,将对桥梁产生极其严重破坏。本桥对该处危岩处治进行了专项防护设计,主要包括对下

部凹腔进行衬砌,对上部砂岩进行锚固,以保证桥梁的安全。

若拱座基础采用扩大基础,开挖量巨大且对上方陡崖扰动较大,对桥梁安全不利。结合桥位地质、地貌及受力特点,本桥主拱采用拱座+桩基的组合式基础^[3],拱座采用左右幅分幅设置。桩基础由斜桩和竖桩两部分组成,斜桩截面由半圆弧+矩形组合而成,斜桩设计长度为 15 m。斜桩开挖前采用管棚进行超前支护;斜桩开挖时设置导拱,以保证斜拱开挖的洞口稳定性。斜桩开挖初期支护主要由钢拱架、锚杆、钢筋网片、C30 喷射混凝土组成。竖桩为边长 4 m 的方桩,横桥向中心间距 7.5 m。斜桩和竖桩均按嵌岩桩设计。

2.2 主拱圈构造设计

主拱净跨 350 m,矢跨比为 1/4.2,拱轴系数为 2.1。主拱采用等截面悬链线无铰拱。主拱为双拱肋,两拱肋间以箱形或 I 形横联连接。

如图 3 所示每个主拱均为单箱双室结构,拱肋横向宽 8 m、高 5.8 m。除拱脚实心段及过渡段外拱圈顶板、底板均厚 0.4 m,腹板厚 0.3 m。两岸拱脚设 2 m 实心段;拱圈顶、底板厚度分两次渐变,由 0.8 m 线性渐变至 0.4 m,渐变段长 2 m;边腹板厚度由 0.55 m 一次渐变至 0.3 m,渐变段长度均为 4.5 m,中腹板厚度不渐变。拱圈采用 C55 混凝土浇筑,拱脚段混凝土掺加钢纤维。

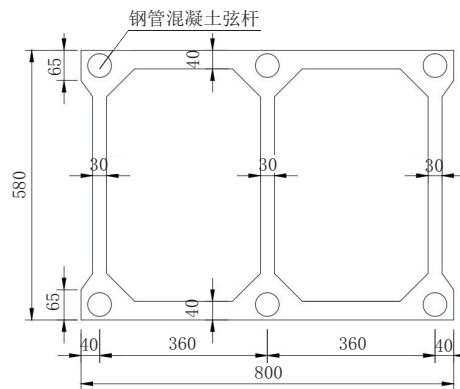


图3 主拱肋标准断面示意图(单位:cm)

2.3 主拱圈强劲骨架设计

拱圈施工采用强劲骨架法施工^[1],劲性骨架由钢管混凝土与角钢组成,如图 4 所示,每肋上、下共 6 根主钢管,钢管直径为 $\phi 508$ mm,壁厚共 3 种(14、18、22 mm),钢管通过横联角钢和竖向角钢连接而构成型钢-钢管桁架,在拱肋横联应位置设交叉撑,加强横向连接^[4]。腹杆及平联与弦杆均采用焊接连接。骨架节段合龙后主钢管内浇筑 C120 混凝土形

成强劲骨架。

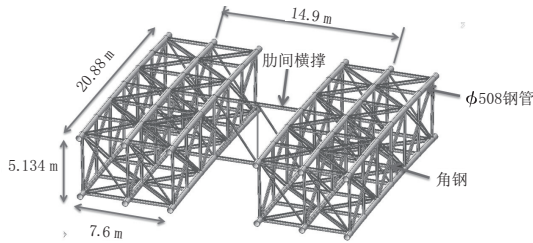


图4 强劲骨架节段示意图(单位:m)

本桥采用的强劲骨架可使拱圈外包混凝土仅分成两环浇筑;第一环浇筑时荷载依靠劲性骨架进行承担,第二环浇筑时荷载由劲性骨架和已浇筑的拱圈共同承担。施工阶段劲性骨架主要作为拱圈施工的支架使用,成桥后劲性骨架作为受力结构与钢筋混凝土拱圈形成整体共同承担所有荷载,运营阶段拱圈主要截面劲性骨架承担比例见表1;从表1中可以看出成桥后劲性骨架承担了相当高比例的荷载,劲性骨架的作用得到了充分发挥,有效减小了拱圈截面。

表1 运营阶段拱圈主要截面劲性骨架荷载承担比例

部位	拱脚	L/8	L/4	3L/8	拱顶	5L/8	3L/4	7L/8	拱脚
比例/%	22.1	24.3	23.9	27.0	31.2	27.0	23.6	24.4	22.9

采用C120混凝土灌注主钢管极大的提高了骨架的强度和刚度,在骨架高度不变或主管规格不变的前提下,采用C100或以下标号的混凝土,拱圈外包需采用三环或更多分环次数施工,多环施工将使拱圈外包工期大大延长;因此提高管内混凝土的标号相对采用提高钢管直径或壁厚或增加骨架高度等方法造价更低、工期更短,性价比较高。

2.4 主桥交界墩和拱上结构设计

(1)主桥交界墩

交界墩施工期可作为扣锚系统的扣塔基础,可有效降低扣塔高度,降低施工措施费;同时运营期可辅助主桥抗震;因此需要具有足够的刚度和强度。

交界墩为双柱薄壁空心墩,横桥向墩宽 3.8 m,纵桥向顶宽 5.5 m,壁厚为 40 cm。交界墩盖梁采用单箱双室空心结构,盖梁高 3 m,宽 5.5 m。盖梁采用空心结构,既节约了材料成本,同是可有效降低盖梁施工用模板和托架等用量,降低施工成本。

(2)拱上立柱、盖梁

拱上排架由拱上立柱及盖梁组成。立柱空心墩柱壁厚仅 35 cm,立柱均设钢内模,钢内模钢板厚 8 mm,钢内模混凝土侧焊接焊钉,焊钉竖向间距 20 cm,水平向间距 30 cm。钢内模内侧设置横、竖向

加劲肋;钢内模竖向分段,最长节段长度 4.5 m。钢内模的使用大大降低了模板系统,大大提高了施工效率和安全性;且钢内模使用后不拆除,内模参与结构受力,可有效减小墩柱壁厚。

针对交接墩及立柱盖梁施工困难的问题提出了“一种高桥墩盖梁无支架现浇结构”专利,盖梁内设置参与受力的劲性骨架,采用无支架施工可有效提高盖梁施工效率和施工安全性,节约施工成本,见图5。

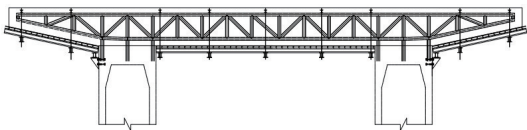


图5 盖梁劲性骨架构造示意图

(3)主桥行车道梁

上部构造采用 28.5 m 预应力混凝土小箱梁,每孔横向 8 片梁,梁高 160 cm。小箱梁通过调整预应力设置,优化顶底板、腹板厚度,自重较同跨径常规混凝土小箱梁轻。拱上结构轻型化有利于提高桥梁抗震能力。

2.5 主桥抗震设计

苏坝特大桥地处高烈度区,地震烈度高、墩高差异大等因素导致结构地震效应大,桥梁防震减灾难度大。本桥抗震设计思路主要有以下几方面:

- (1)上、下部结构轻型化;通过优化上部结构小箱梁壁厚、拱上立柱尺寸及壁厚等降低结构自重;
- (2)采用抗震支座等减隔震技术;提升桥梁的抗震性能,提高高烈度区桥梁的品质与防灾能力;
- (3)根据墩高差异大的地形特点,通过抗震计算细致分析桥梁的地震效应,充分发挥下部结构各墩抗震作用,充分利用交界墩既有构造提高拱上立柱抗震性能,节约材料减少工程造价。

具体减隔震措施如下。

2.5.1 变刚度支座

根据立柱刚度不同匹配剪切刚度不同的支座(通过调整支座橡胶厚度、橡胶层间钢板厚度及层数实现,见图6),调整每个立柱的地震响应,使地震力分配更加均匀,更加有利于提高下部构造抗震性能。相对采用普通板式支座,立柱承载力安全系数提高 20% 以上,且各立柱承载力安全系数较均匀。

2.5.2 阻尼器

在主桥两端交界墩上,分别布置四个黏滞阻尼器,阻尼器一端设置在小箱梁边梁底部,一端设置在交界墩盖梁上。阻尼器设置后,主梁相对墩顶最大

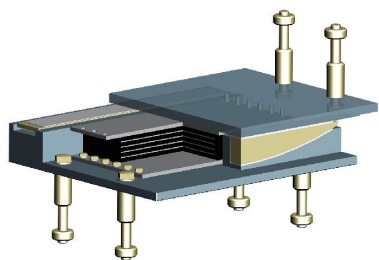


图6 变刚度支座构造示意图

纵桥向位移由 28.6 cm 减小到 7.6 cm,减震效果明显。

2.5.3 防落梁及抗震构造

小箱梁边梁外侧均设置横向混凝土防震挡块。小箱梁梁端横隔板位置设置钢挡块,钢挡块采用预埋螺栓锚固于盖梁上,钢挡块采用柔性钢拉杆相连,钢拉杆为带 PE 护套的钢绞线;主桥交界墩及立柱盖梁上均设置四套钢挡块;本项目经技术研究开发了“一种简支桥梁可联动多向防落梁装置”专利,可联动多向防落梁装置可有效约束小箱梁的纵、横、竖向位移,防止落梁发生。

3 结构计算分析主要结论

采用有限元分析软件 MIDAS Civil 建立主桥总体分析有限元模型,模型中桥梁所有部位都进行准确的反映,包括拱圈、立柱、盖梁、小箱梁,结构刚度和截面特性、结构质量和非结构质量等,以便合理分析出结构系统实际力学行为。该模型中,所有杆件采用梁单元模拟。

3.1 主拱圈及劲性骨架静力主要结论

3.1.1 主桥运营阶段计算主要结论

(1)主拱承载能力验算最不利位置为 $7L/8$ 处,压弯承载力安全系数为 1.41,满足规范要求。

(2)持久状况拱圈最小压应力储备为 5.16 MPa,出现在拱脚截面上缘;无拉应力。

(3)一阶弹性稳定系数为 $9.09 > 4$,为拱圈纵向失稳,满足要求。

3.1.2 主桥混凝土拱圈施工阶段计算主要结论

(1)劲性骨架主弦杆承载能力验算最小安全系数为 1.16,出现在外包拱圈第 1 环第 12 段时第 1 工作面第 12 段。

(2)钢构件最大应力 129.3 MPa,设计强度为 275 MPa,安全系数为 2.13,满足要求。

(3)混凝土拱圈最大拉应力 -2.95 MPa,小于容许值 2.99 MPa;最大压应力 9.44 MPa,小于容许值 24.85 MPa,均满足要求。

(4)劲性骨架考虑静风荷载,施工阶段最小弹性

稳定系数 5.54,满足要求。

3.2 主桥抗震计算主要结论

动力特性分析表明:该桥自振频率处于合理范围,能保证结构正常使用,前 5 阶振型见表 2。

表2 基本动力特性

编号	周期/s	频率/Hz	模态
1	5.48	0.18	主拱侧弯
2	3.40	0.29	拱上建筑横向弯曲
3	3.29	0.30	主拱纵向弯曲
4	3.23	0.31	拱上建筑横向弯曲
5	2.99	0.33	主拱反向侧弯

主拱圈两拱肋间前三道立柱位置采用箱型横向联系;地震组合下,主拱圈横、纵向承载力最小安全系数分别为 1.10、1.12,均处于拱脚位置。

地震作用下,立柱压弯承载力最小安全系数 1.08,交界墩压弯承载力最小安全系数 1.15。

4 主桥指导性施工方案

4.1 主桥劲性骨架施工方案

劲性骨架的加工由专业钢结构加工商负责完成,加工质量按照规范要求进行自检和抽检。由于本桥地处山区,大阶段钢结构运输困难;主钢管及相应的节点板在后场加工基地完成焊接,经检查满足要求后运输至桥位进行安装。

劲性骨架节段安装采用斜拉扣挂式无支架缆索吊装系统施工^[4],后锚碇为“引桥桩基础+岩锚组合式”结构^[5],两岸对称悬拼(见图 7)。上、下游骨架每岸均分为十个吊装节段,跨中设一个合拢段(吊装节段最重约 65.6 t)。每两个吊段为一个扣段,每个扣段中,前一吊段采用临时扣索扣住,待后一吊段就位后张拉正式扣索,同时拆除临时扣索。临时扣索采用钢丝绳,每岸每肋各设两组,各扣段交换使用。节段为单肋安装,单肋节段安装就位后,应拉抗风索,确保横向稳定。每一扣段的吊装节段就位后,应调整扣索力,使拱肋轴线位于设计标高,当安装误差满足规定要求后,即可栓接弦杆接头^[6]。

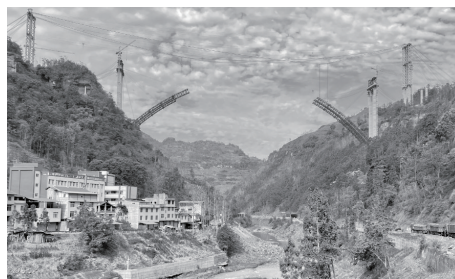


图7 劲性骨架节段吊装过程照片

劲性骨架合龙后,管内灌注 C120 超高强补偿收缩自密实混凝土形成强劲骨架。管内混凝土易出现保塑性能差、黏度大、易脱空等问题,需要对管内混凝土制备工艺展开专题研究;本项目管内混凝土主要工作性能要求如下:坍落度不小于 260 mm,扩展度不小于 680 mm,主要力学性能要求:28 d 轴心抗压强度不小于 132 MPa,轴心抗拉强度不小于 72.3 MPa。

4.2 主拱圈外包施工方案

强劲骨架法使拱圈的浇筑可采用两环浇筑,即采用“先底板+边腹板(第一环),再顶板+中腹板(第二环)”的两环浇筑方式,大大缩短了施工工期。如图 8 所示,每环混凝土浇筑均分 10 个工作面,每个工作面均分为 12 个节段。先按上、下游对称且两岸对称方式分 10 个工作面第一环外包混凝土直至合龙,然后再按同样方式分十个工作面浇筑第二环外包混凝土及箱内横隔板;最后浇注肋间横联混凝土。

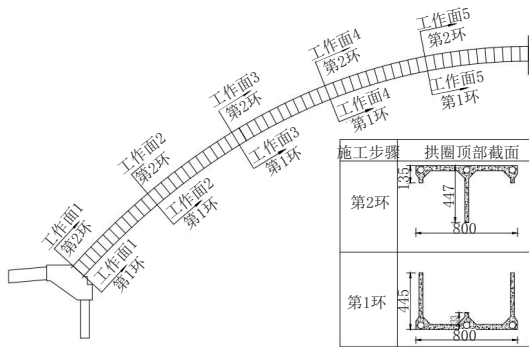


图8 骨架节段划分及分环示意图

4.3 拱上立柱及桥面梁施工方案

拱上立柱采用爬模法施工,立柱设钢内模简化

施工工序,也有利于提供墩柱耐久性。桥面小箱梁现场采用架桥机双条带法架设安装。

5 结 语

苏坝特大桥为西部山区跨越深切高山峡谷地形大型桥梁,设计中提出的新结构、新材料、新工艺等成果支撑了大桥的顺利建设。大桥劲性骨架主管采用 C120 超高强补偿收缩自密实混凝土灌注,形成的强劲骨架支撑主拱圈外包过程可采用两环施工,大大节约了工期;由可联动多向防落梁装置、设置纵向变刚度支座及黏滞阻尼器多种抗震措施组成的拱桥结构抗震体系,大大提高了桥梁的抗震、减震性能。该桥于 2020 年底开工建设,2024 年底建成通车。本桥的结构设计可为山区拱桥设计积累设计经验,并提供了工程参考。

参考文献:

[1] 康玲,牟廷敏,梁健,等.特大跨钢筋混凝土肋拱桥建造技术[J].山西建筑,2023(3):6-9.
[2] 四川省公路规划勘察设计院有限公司.乐山至西昌高速公路马边至昭觉段苏坝特大桥施工图设计[Z].成都:四川省公路规划勘察设计院有限公司,2020.
[3] 宋随弟,陈克坚,赵启华,等.郑万铁路大宁河大桥设计关键技术[J].桥梁建设,2021(4):96-102.
[4] 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.
[5] 严德余.大吨位钢管拱吊装扣锚系统组合式桩基承台锚施工技术研[J].铁道建筑技术,2017(6):72-74.
[6] 梁健,肖雨,郑旭峰.凉山州金阳县金沙江溜索改桥设计技术进步[J].四川建筑,2018(5):173-176.

(上接第 98 页)

条件构思设计的矮塔斜拉桥和连续钢箱梁方案进行了充分比选,选择了更为经济和美观的机非分离、双层通行的矮塔斜拉桥作为推荐的最终方案,同时对推荐的矮塔斜拉桥总体设计和结构构造设计进行了介绍。对该桥结构进行的计算分析结果表明:本桥静力计算各项指标和抗震分析结果均满足相关规范要求。目前,大桥已竣工通车 1 a 多,反响良好。本桥主桥方案新颖独特,总体布置和结构设计合理,计算安全可靠,可为类似现场受限和有一定景观要求的桥梁设计提供参考。

参考文献:

[1] CJJ 37—2012,城市道路工程设计规范[S].2016 年版.
[2] CJJ 11—2011,城市桥梁设计规范[S].2019 年版.
[3] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
[4] 项海帆.桥梁概念设计[M].北京:人民交通出版社,2011.
[5] 陈从春.矮塔斜拉桥[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
[6] JTG/T 3365-01—2020,公路斜拉桥设计规范[S].
[7] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
[8] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
[9] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].