

文章编号:1004-2954(2024)09-0001-09

大瑞铁路澜沧江大桥设计及关键技术研究

任为东, 徐升桥, 魏宇, 金正凯

(中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055)

摘要:大瑞铁路澜沧江特大桥为双线铁路桥梁, 大桥跨越澜沧江峡谷。结合桥位处的地质、地形及运输条件, 经过方案比选, 最终确定主桥结构为342 m上承式混凝土提篮拱桥, 拱肋箱形混凝土截面由钢管混凝土桁架作为劲性骨架。围绕大桥的设计和施工技术开展一系列研究, 采取梁-板单元模拟拱肋复合截面, 对全桥进行静力、动力分析, 确保全桥结构在列车活载、风荷载和地震荷载作用下受力安全; 采取实体元建立拱肋内填外包钢管混凝土复合截面短柱模型, 以全桥计算截面内力做外部荷载进行分级加载, 最终确定拱肋拱顶复合截面受力安全系数为2.98, 大于2.0; 研发二次竖转的新型钢拱肋施工工艺, 充分适应陡峭的地势, 减少拱肋钢劲性骨架施工期间空中大悬臂状态时间。2022年7月22日, 澜沧江大桥开通运营, 围绕其开展的系列研究成果得以验证。研究成果中钢管混凝土参数体系与分析方法纳入《铁路桥梁钢管混凝土结构设计规范》; 研发拱桥拱肋二次竖转施工新工艺, 确保澜沧江大桥每岸质量2500 t的拱肋钢劲性骨架通过二次竖转实现合龙, 为后期拱肋混凝土及桥面系的施工奠定基础。

关键词:铁路桥; 混凝土提篮拱桥; 钢管混凝土; 劲性骨架; 短柱模型; 二次竖转

中图分类号:U24; U448.22 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202307100005

Design and Key Technology Research of Lancang River Bridge on Dali-Ruili Railway

REN Weidong, XU Shengqiao, WEI Yu, JIN Zhengkai

(China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: The Lancang River Grand Bridge on Dali-Ruili Railway is a double-track railway bridge that spans the Lancang River Valley. Considering the geological, topographical, and transportation conditions at the bridge site, a 342 m concrete basket arch bridge with a deck above the arch was selected as the main bridge structure after scheme comparison. The box-shaped concrete cross-section of the arch rib was reinforced by a concrete truss made of concrete-filled steel tubes as the stiff skeleton. A series of studies on the design and construction techniques of the bridge were carried out. Beam-slab elements were used to simulate the arch rib composite section, and static and dynamic analyses were performed on the entire bridge to ensure structural safety under train live load, wind load, and seismic load. A short column model of the composite section, consisting of inner-filled and outer-encased concrete-filled steel tubes, was established using solid elements. By applying the external forces incrementally based on the internal forces calculated for the entire bridge, the final safety factor of the composite section at the top of the arch rib was determined to be 2.98, greater than 2.0. A new construction technique involving secondary vertical rotation of the steel arch ribs was developed to fully adapt to the steep terrain and reduce the duration of suspension during the construction of the steel stiff skeleton of the arch ribs. On July 22,

2022, the Lancang River Bridge was opened for operation, validating a series of research results.

The parameters and analysis methods for the concrete-filled steel tubes developed in the study were written into the *Code for Design of*

收稿日期:2023-07-10; 修回日期:2023-09-15; 网络首发日期:2023-11-02

基金项目:铁道部科技研究开发计划课题(2008G023-C); 中国中铁股份有限公司科技开发计划课题(重点-03-2011)

作者简介:任为东(1971—),男,正高级工程师,1996年毕业于西南交通大学桥梁工程专业,工学硕士,主要从事桥梁工程设计研究工作, E-mail: rwd_lll@126.com。

Concrete-filled Steel Tubular Structures of Railway Bridge. The newly developed secondary vertical rotation technique for arch ribs ensures the successful closure of 2 500 ton steel stiff skeleton on each bank of the Lancang River Bridge, laying the foundation for subsequent construction of arch rib concrete and bridge deck system.

Key words: railway bridge; concrete basket arch bridge; concrete-filled steel tube; stiff skeleton; short column model; secondary vertical rotation

1 项目概况

澜沧江特大桥是新建大理至瑞丽铁路大保段的“咽喉”工程,大桥横跨澜沧江两岸,衔接两岸的大理和保山两市,位于我国地形最为复杂的横断山脉西段。桥址河床狭窄,地势险峻,两岸山坡角度约 60°,局部岩面达 90°。峡谷内全年季风时间占一半以上,风速最大超过 26 m/s,桥面距离江面超过 270 m;桥位处地形、地质条件复杂,施工便道条件困难,施工平整场地狭小,这些条件给大桥的建造带来极大挑战。大理至瑞丽铁路澜沧江特大桥连续梁于 2019 年 6 月完成混凝土浇筑,实现桥面合龙,标志着大桥主体工程完工,为大桥后续附属设施建设和铺轨创造了有利条件^[1]。

2 主要技术标准

- (1) 铁路等级: I 级干线。
- (2) 正线数目: 双线。
- (3) 设计行车速度: 160 km/h。
- (4) 线间距: 4.4 m。
- (5) 设计活载: 列车, 中-活载; 人群活载, 4 kN/m²。

- (6) 牵引种类: 电力。
- (7) 桥上按设站设计, 桥面宽度 14.5 m。
- (8) 风荷载:
主桥成桥风速按 100 年一遇计, 设计基准风速为 25 m/s; 施工风速按 10 年一遇计, 为成桥阶段的 0.84 倍。
- (9) 地震荷载
地震动峰值加速度根据“澜沧江大桥安评报告”取 0.17g, 场地类别为 I 级, 地震动反应谱特征周期为 0.4 s, 抗震设防基本烈度按Ⅷ度考虑。

3 总体设计

澜沧江特大桥桥跨布置为 (1-32 m+2-24 m+1-32 m) 简支箱梁+363 m 上承式拱桥+1-32 m 简支箱梁, 桥梁全长 528.1 m, 桥面设置有车站站台, 桥面宽度为 14.5 m。澜沧江特大桥主桥计算跨径为 342 m, 为上承式劲性骨架钢筋混凝土提篮拱桥。桥梁立面示意图 1。

桥址附近两岸山体坡脚最大超过 80°, 局部接近直立, 施工难度较大^[2-3]。

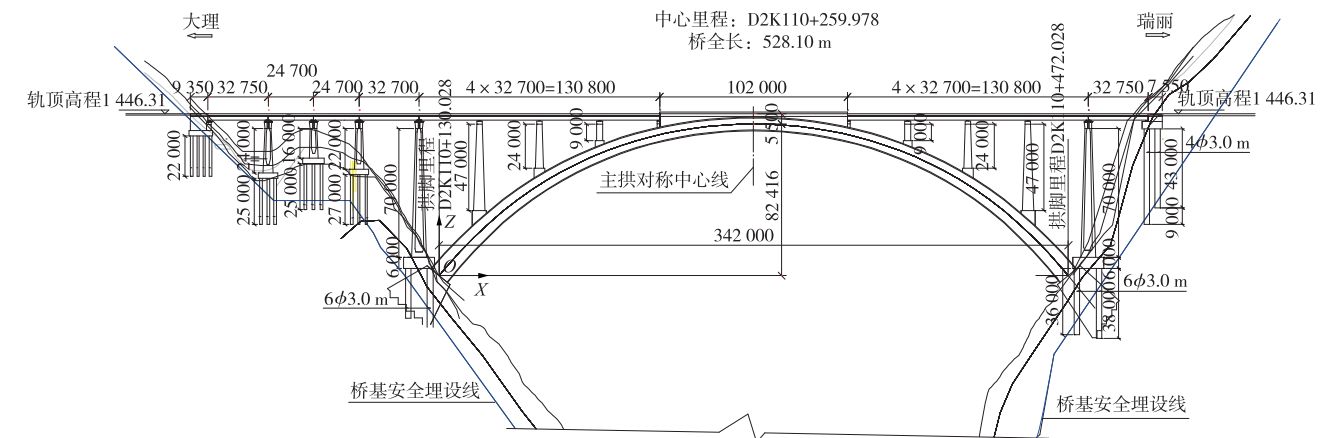


图 1 澜沧江特大桥桥梁立面示意 (单位: 高程单位为 m, 其余 mm)
Fig. 1 Elevation view of Lancang River Grand Bridge (unit: elevation in m, others in mm)

3.1 结构方案比选

在方案研究阶段,结合桥址周边地质条件、施工条件及景观环境等综合因素,对澜沧江特大桥主桥桥型进行多种方案比较,包括刚构方案、矮塔斜拉桥方案、斜腿刚构方案和上承式拱桥方案等 4 个桥型方案,见

图 2。

由于连续刚构及矮塔斜拉桥方案其主墩基础不论是采用扩大基础还是桩基础都难以适应桥址处的地形条件,基础施工过程中会对山体造成很大破坏;成桥后基础以竖向反力为主,对边坡稳定不利,同时也会受到

滑坡、坍塌等地质灾害的威胁。

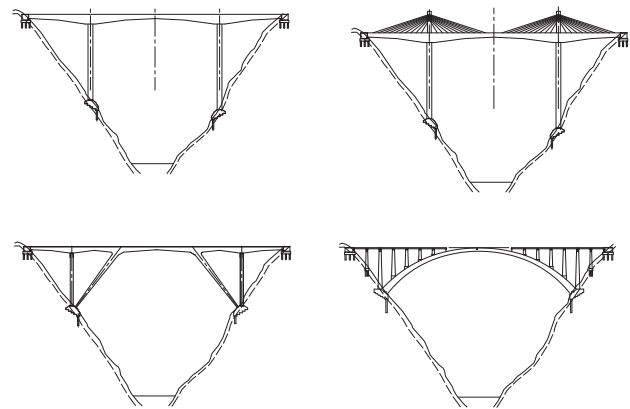


图 2 澜沧江特大桥桥梁结构方案比选
Fig. 2 Comparison and selection of Lancang River Grand Bridge structure schemes

斜腿刚构方案斜腿基础反力同拱桥基础相似,但是两斜腿与中跨主梁近似构成一“折线拱式结构”,结构压力线偏离构件形心线较大,截面会产生较大弯矩。因此仅就受力性质而言,斜腿刚构不如拱桥优越。本桥跨度为 363 m,对于承受铁路荷载的桥梁,结构设计难度较大^[4]。

拱桥方案正好与两岸岩体条件相吻合,巨大的拱推力有利于基岩稳定,另外拱桥结构的受力能力也可以充分胜任澜沧江特大桥的跨越需求。为减小拱桥跨度,结合地形条件,采用上承式拱桥方案。考虑到现场

的运输条件、安装条件、后期养护需求以及投资等综合因素,最终确定采用内含钢劲性骨架的钢筋混凝土箱形拱肋^[5]。

3.2 拱肋劲性骨架施工方案比选

主桥拱肋施工方案先施工拱肋钢劲性骨架,然后以钢劲性骨架为支撑结构进行拱肋外包混凝土施工。比较本桥拱肋钢劲性骨架的施工方案——斜拉扣挂法和竖转法^[6-10],经过对现场实际调查,本桥桥位处无既有道路,地势陡峭,施工临时便道的运输能力仅能保证最大载重 10 t,运输杆件长度<10 m;桥位处无建设钢结构拼装场的条件;桥位位于峡谷中,峡谷风影响大、周期长。综合上述因素,对上述 2 种施工方案比选,最终确定采用竖转法施工方案。竖转法安装拱肋钢劲性骨架时可以采用小节段杆件在支架上拼装;桥位不需要设置钢结构预拼场;减少拱肋大悬臂施工阶段时间,大幅提高施工的安全性;对起重设施要求比较灵活,既可以采用缆索吊,也可以采用起重塔吊(车)。

对竖转法施工进行深入研究,结合现场的地形条件,为进一步降低竖转施工的拱肋安装难度和风险,将最初的一次竖转法优化为二次竖转法施工。充分利用两岸山体提供支撑条件,大幅降低拱肋安装的重心位置,提高施工期间的安全保证^[11-13]。为了确保二次竖转实施,研制出拱肋二次竖转的中间转铰、承受牵引拉索拉力的拱肋拉压杆等临时构件。拱肋二次竖转施工布置示意图 3。

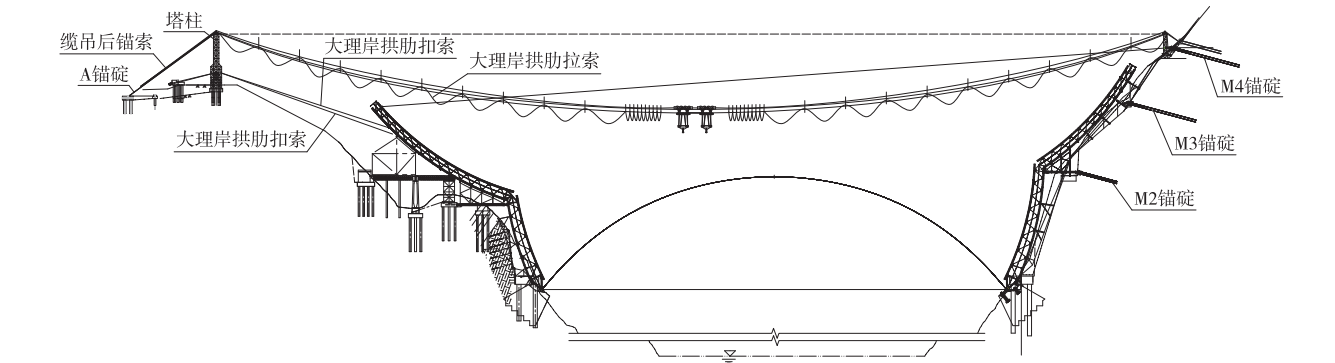


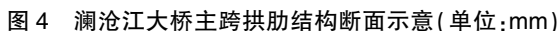
图 3 拱肋二次竖转施工布置示意
Fig. 3 Schematic of secondary vertical rotation arrangement of arch ribs

4 主体结构设计

4.1 拱肋结构

澜沧江大桥全长 528.1 m,主跨为上承式劲性骨架钢筋混凝土拱桥。拱肋为计算跨径 342 m、矢高 82.416 m(矢跨比为 $1/4.15$)、拱轴系数为 3.4 的悬链线拱。两条拱肋内倾角度为 6.8° ,以适应拱顶刚架墩及桥面系布置。每条拱肋为单个混凝土箱形截面,箱

宽 4.4 m,内包 4 管式桁架式钢劲性骨架。拱顶处拱肋混凝土箱截面高 6.9 m,劲性骨架桁架高 5.5 m;拱脚混凝土箱形截面径向高 10.9 m,劲性骨架桁架高 9.5 m。钢劲性骨架上、下弦管的钢管外径为 1.0 m,壁厚根据受力部位的不同分别为 26,36,42,46 mm。澜沧江大桥主跨拱肋结构断面示意图 4。拱肋及劲性骨架平、立面示意图 5。



Technical drawing of the upper part of a bridge structure, showing dimensions in millimeters. The drawing includes a top view and a side view. The top view shows a total width of 7250 mm, with a central section of 3950 mm and two side sections of 1650 mm each. The side view shows a total height of 3788 mm, with a central section of 2916 mm and two side sections of 2874 mm each. Other dimensions include 500 mm, 302 mm, 5250 mm, 200 mm, and 913 mm.

Fig.6 Cross-section of π -shaped rigid frame beam at arch top (unit: mm)

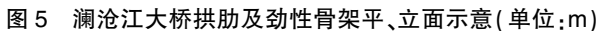
[illegible]

Fig. 7 Cross-section of continuous box beam of Lancang River Bridge (unit: mm)

拱顶 π 形刚架梁纵向共长 102 m, 分为 10 节段, 每段间留 3 cm 间隙做伸缩缝。 π 形刚架梁顶板宽 14.5 m, 顶板跨中厚 0.4 m, 斜腹板厚 0.6 m, 横隔板间距 2.5 m, 厚 0.3 m, 顶板设置挑臂, 挑臂顶面作为桥上车站站台。拱顶 π 形刚架梁横截面示意图 6。

大理侧 0 号桥台至 4 号墩柱间为 $2 \times 24 \text{ m}$ 和 $2 \times 32 \text{ m}$ 箱形简支梁, 4 号墩柱至 π 形刚架梁处为 $4 \times 32 \text{ m}$ 箱形连续梁, π 形刚架梁至保山(瑞丽)侧 5 号墩柱为 $4 \times 32 \text{ m}$ 箱形连续梁, 5 号墩柱至 6 号桥台为 $1-32 \text{ m}$ 箱形简支梁, 简支梁的固定墩都设置在对应侧桥台方向的墩柱(台)上, 拱上连续梁固定墩设在拱上立柱 B、C 顶。各跨箱梁外轮廓相同。连续梁箱梁横截面示意图 7。

4.3 拱上立柱

每岸半拱拱肋上从拱脚到拱顶方向设置由高到矮 A、B、C、D 共 4 个立柱,均为钢筋混凝土结构,拱上 B 号立柱结构形式示意如图 8 所示。每个立柱由 2 条斜腿及之间的撑杆组成空间结构,斜腿顶部截面形式为空心截面,截面尺寸为 $3.0\text{ m}\times 3.0\text{ m}$,壁厚 0.5 m ,斜腿的倾斜角度为 6.8° ,与拱肋内倾角度保持一致,斜腿截面纵桥向按 $30:1$ 向下放坡,壁厚保持不变。横撑截面形式为矩形空心截面,平面尺寸为 $1.2\text{ m}\times 1.5\text{ m}$,壁厚 0.2 m 。斜撑截面形式为空心截面,平面尺寸为 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$,壁厚 0.2 m 。4 个立柱墩身高度分别为 $46.963, 24.752, 9.48, 1.892\text{ m}$,其中 A、B、C 墩斜腿底通过设置钢筋混凝土实体基座与拱肋相连,D 墩直接与拱肋相连。在 B、C 拱上立柱顶设置连续梁的固定支座,其余立柱顶为纵向活动支座。

为了加强立柱同拱肋的连接,A、B、C 立柱斜腿基座内的拱肋钢管上焊接连接钢板,并进行钢-混过渡段设计,同时将墩身内的钢筋伸入拱肋混凝土内。

4.4 下部结构

桥位处下伏基岩为三叠上统上段灰岩,岸坡总体趋于稳定。0~6号桥墩基础均采用挖孔桩基础。大理侧0~3号墩(台)基础因为穿过地震断裂带,地质较为破碎,按摩擦桩设计;4~6号墩(台)桩基础按嵌岩桩设计。0号台为12根 $\phi 1.25\text{ m}$ 的桩,1号墩基础为

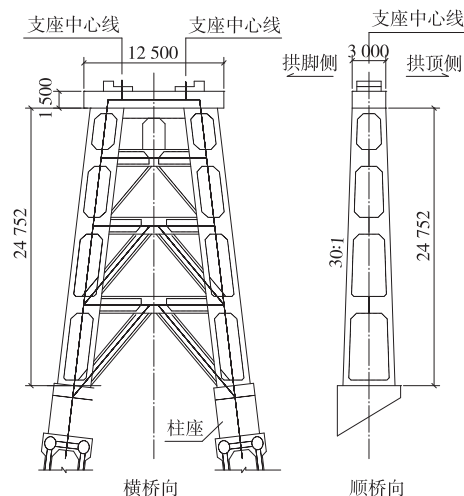


图 8 拱上 B 号立柱结构示意图(单位:mm)

Fig. 8 Structure of B column on arch (unit: mm)

9 根 $\phi 1.5\text{ m}$ 的桩,2 号墩基础为 9 根 $\phi 1.25\text{ m}$ 的桩,3 号墩基础为 10 根 $\phi 1.25\text{ m}$ 的桩,4 号、5 号边墩基础为 6 根 $\phi 3.0\text{ m}$ 的桩,6 号桥台为 4 根 $\phi 3.0\text{ m}$ 的挖孔桩。主拱拱座为贯入式扩大基础,基底分别嵌入桥基安全埋设线以下一定距离,以保证基础受力可靠。大理岸上游侧拱座基础见图 9。

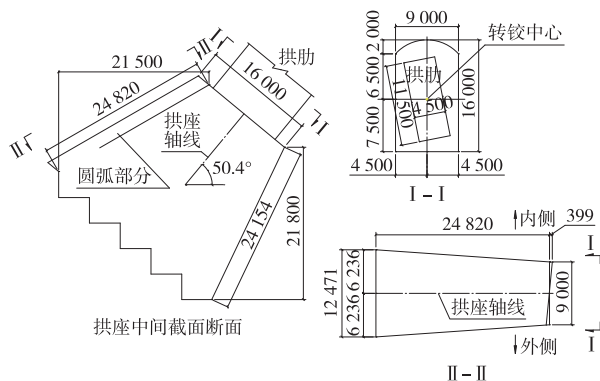


图 9 大理岸上游侧拱座基础(单位:mm)

Fig. 9 Foundation of arch seat on upstream side of Dali bank (unit: mm)

5 静力计算分析

本桥结构型式复杂,施工工况及体系转换次数多,为了准确模拟外包混凝土的分段分环浇筑过程,拱肋钢管混凝土劲性骨架杆件采用梁单元,外包混凝土采用板单元建立空间计算模型,模拟全桥的施工及运营过程。在计算中拱肋外包混凝土浇筑采用四环浇筑完成。即底板、下腹板、上腹板、顶板,每一环浇筑分多个工作面进行,以保证施工中拱肋钢结构受力均匀。通过计算确定模型中板壳元同实际的结构刚度、质量保持一致。

5.1 钢管混凝土内力

荷载组合工况下关键截面钢管混凝土弦管轴力如表 1 所示。

表 1 荷载组合工况下关键截面钢管混凝土弦管轴力 kN
Tab. 1 Axial forces of concrete-filled steel tube chords in key sections under combined load conditions

荷载组合工况	弦杆	拱脚	L/8	2L/8	3L/8	拱顶
恒载	上弦	-18 811	-16 781	-21 417	-34 293	-36 286
	下弦	-30 463	-37 233	-25 853	-18 597	-11 276
恒载+	上弦	-21 583	-17 155	-22 897	-36 671	-38 388
	下弦	-33 004	-39 353	-27 049	-20 362	-11 874
恒载+活载	上弦	-18 983	-15 838	-22 126	-36 373	-38 288
	下弦	-33 855	-39 173	-25 961	-18 986	-10 248

注:轴力受压为负。

钢管混凝土的承载力计算公式^[14]

$$KN \leq N_u = A_s f_s + C_2 A_c f_c \tag{1}$$

式中, K 为强度安全系数; N 为计算轴向力; N_u 为轴压承载力; f_s 为钢材屈服强度; f_c 为混凝土轴心抗压极限强度; A_s 为钢管截面面积; A_c 为钢管内混凝土截面面积; $C_2 = (1 + \alpha) C_0 - \xi$, $C_0 = 1.14 + 1.02\xi$; 钢管混凝土截面的套箍系数为 $\xi = \alpha\beta$, $\alpha = A_s/A_c$, $\beta = f_s/f_c$ 。

按上式计算不同壁厚的 N_u 值见表 2。

表 2 钢管混凝土轴压承载力

Tab. 2 Axial compressive bearing capacity of concrete-filled steel tubes

1 m 钢管壁厚/mm	N_u /kN
26	66 966
36	80 364
46	94 658

各控制截面钢管混凝土的安全系数 K 均大于 2。

5.2 外包混凝土应力

拱肋外包混凝土截面正应力如表 3 所示。

表 3 拱肋外包混凝土截面正应力 MPa

Tab. 3 Normal stress of arch rib wrapping concrete section

荷载组合工况	位置	拱脚	L/8	2L/8	3L/8	拱顶
恒载	上缘	-0.95	-3.20	-4.48	-2.72	-3.16
	下缘	-10.60	-10.80	-6.76	-5.52	-5.11
恒+活载 max	上缘	0.98	-2.45	-3.10	-1.40	-2.81
	下缘	-7.94	-10.50	-5.49	-3.56	-3.53
恒+活载 min	上缘	-4.30	-3.76	-6.57	-5.26	-5.47
	下缘	-13.20	-12.70	-8.80	-7.85	-5.88
恒+活载 max+升温	上缘	-1.51	-3.10	-2.83	-0.39	-1.62
	下缘	-7.76	-9.61	-5.40	-4.35	-4.61
恒+活载 max+降温	上缘	3.48	-1.80	-3.38	-2.41	-4.00
	下缘	-8.13	-11.40	-5.58	-2.78	-2.45
恒+活载 min+升温	上缘	-6.79	-4.41	-6.29	-4.25	-4.29
	下缘	-13.00	-11.80	-8.71	-8.64	-6.96
恒+活载 min+降温	上缘	-1.81	-3.12	-6.84	-6.26	-6.66
	下缘	-13.40	-13.60	-8.90	-7.06	-4.81

注:负值表示压应力。

5.3 内填外包钢管混凝土短柱承载力

为分析拱肋外包混凝土的钢管混凝土截面承载能力,选取拱顶截面构造内填外包钢管混凝土直杆短柱构件,采用有限元软件,分析该短柱构件在承受拱顶实际内力情况下的极限承载力,并以此来评判本工程的承载力水平和安全度。拱肋拱顶构件单元划分见图 10。

分析中遵循如下计算假定:①不考虑普通钢筋对承载力的影响;②混凝土和钢管之间无相对滑移;③位移场始终连续。

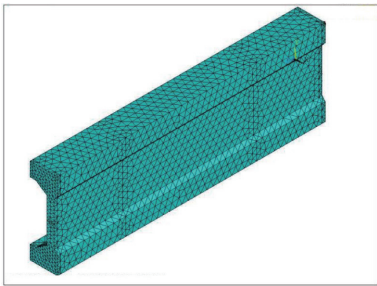


图 10 拱肋拱顶构件单元划分

Fig. 10 Element division diagram of components at top of arch rib

由于拱肋拱顶截面处于小偏心受压状态,因此,仅分析构件承受小偏心压力荷载作用下的构件极限承载力。

截面内力采用全桥梁单元模型的计算结果,拱顶截面内力如表 4 所示。

表 4 拱顶截面内力

Tab. 4 Internal forces of section at arch top

截面内力	恒载	活载 max	活载 min	恒载+活载 max
轴力/kN	163 931	6 461	2 745	170 392
弯矩/(kN·m)	100 013	56 054	14 697	156 067

计算中采用“恒载+活载最大轴力”组合计算,对应的偏心距 e 如下

$$e = \frac{M}{N} = \frac{156\,067}{170\,392} = 0.916\text{ m} \quad (2)$$

有限元计算中采用 λN 和 e 模式进行计算,其中 λ 为荷载系数。

上、下缘荷载集度分别为

$$\sigma = \lambda N \left(\frac{1}{A} \pm \frac{e}{I} \frac{H}{2} \right) \quad (3)$$

式中, A 、 I 分别为拱肋截面的面积和惯性矩; H 为拱肋截面高度。

有限元计算中采用面加载方式实现荷载的加载,构件自由端面作为加载面。

采用分级加载模式,每次加载时设置 50 个荷载子步,记录每一荷载子步的计算结果。非线性分析选用完全牛顿-拉普森处理方法,在这种处理方法中,每进行一次平衡迭代修改刚度矩阵一次。计算过程中的收敛性判断采用位移准则。

通过分级加载对短柱截面极限承载能力进行分析,结论如下。

(1)最终极限状态 $\lambda = 2.981\,5$,即该构件的安全系数为 2.981 25,此时对应的外包混凝土最大正应力 $\sigma_c = 34.235\text{ MPa}$,对应的内填混凝土最大正应力 $\sigma_c = 35.033\text{ MPa}$,钢管最大正应力为 $\sigma_s = 345.22\text{ MPa}$ 。

(2)极限状态下外包混凝土最大应力并非发生在构件边缘,而是靠近边缘的截面内部。混凝土开裂现象分布规律显示,外包混凝土仍是该类构件承载力最主要的制约因素,所以导致内填混凝土未明显表现出纯钢管混凝土的套箍效应。

5.4 拱肋位移

整个施工过程中拱肋关键节点的位移见表 5。

表 5 施工过程中拱肋位移 mm

Tab. 5 Arch rib displacement in construction process

施工完成阶段	$L/8$	$2L/8$	拱顶
劲性骨架	-1	-23	-81
管内混凝土	2	-51	-188
外包混凝土底板	13	-79	-320
外包混凝土腹板	5	-103	-378
外包混凝土顶板	4	-116	-426
横撑混凝土	-5	-128	-429
立柱与 π 梁	-13	-140	-466
箱梁	-25	-160	-455
二期	-26	-167	-475
收缩徐变 1 500 d	-34	-184	-499

注:负值为方向向下。

拱肋关键节点荷载工况下的位移见表 6。

表 6 各工况拱肋位移 mm

Tab. 6 Arch rib displacement under various working conditions

荷载工况	$L/8$	$2L/8$	拱顶
收缩徐变 1 500 d	-34	-184	-499
双线活载 max	14	28	5
双线活载 min	-13	-32	-29
升温 15 $^{\circ}\text{C}$	17	41	69
降温 15 $^{\circ}\text{C}$	-17	-41	-69

注:负值为方向向下。

中活载作用下,拱肋 1/4 跨处,最大正负挠度绝对值之和为 0.06 m,挠跨比为 1/5 700;拱顶处位移为

0.029 m, 挠跨比为 1/11 793, 满足规范要求。

6 动力分析

6.1 动力特性计算

采用大型有限元软件 MIDAS 建立桥梁有限元分析模型,全部采用梁单元进行模拟。在拱肋与桥面 π 形梁相交区域采用刚性连接,墩梁间支座的约束条件通过主从节点处理,考虑墩部结构的影响。

二期恒载箱梁取 175 kN/m, π 形梁取 145 kN/m, 作为均布质量分配到桥面板对应的单元中。

前 3 阶自振频率计算结果见表 7。

表 7 澜沧江特大桥自振频率汇总 Hz

Tab. 7 Summary of natural vibration frequencies of Lancang River Grand Bridge

阶数	振型形状	频率
1	拱肋对称横弯	0.435
2	拱肋反对称竖弯	0.464
3	拱肋反对称横弯	0.772

6.2 抗震分析

根据澜沧江大桥的工程场地地震安全性评价报告,地震基本烈度为Ⅷ度,工程场地的基岩峰值加速度及设计地震系数如表 8 所示。

表 8 工程场地设计基岩峰值加速度和设计地震系数

Tab. 8 Peak acceleration and design seismic coefficient of bedrock for engineering site design

参数	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 3%
A_m/gal	69	166	275	91	212	298
K	0.07	0.17	0.27	0.09	0.21	0.30

主桥的抗震设防标准取 50 年各超越概率下的峰值加速度作为抗震设防标准。小震、中震、大震的设防标准^[11]见表 9。

表 9 抗震设防标准

Tab. 9 Seismic fortification criteria

参数	小震	中震	大震
	50 年 63% (多遇地震)	50 年 10% (设计地震)	50 年 2% (罕遇地震)
A_m/gal	69	166	275
K	0.07	0.17	0.27

多遇地震的基本加速度为 0.07g, 考虑重要性系数取 1.4。采用反应谱法,分别计算横桥向、纵桥向的拱肋拱脚内力及拱肋上刚架墩底内力值,如表 10 所示。

罕遇地震的基本加速度按设防标准取 0.27g。采用《大瑞铁路澜沧江大桥工程场地地震安全性评价报告》(2007)中给出的拟合地震时程曲线作为地震动输入进行罕遇地震时程反应分析。关键截面罕遇地震荷载内力值见表 11。

表 10 关键截面多遇地震荷载内力值

Tab. 10 Internal forces in key sections under frequent seismic loads

方向	截面位置	轴力 /kN	面内弯矩 / (kN · m)	面外弯矩 / (kN · m)
纵向反应谱	拱脚	-289 010	643 204	46 963
	立柱 A 底	-23 577	35 302	2 886
	立柱 B 底	-15 664	21 438	2 066
	立柱 C 底	-13 101	38 826	1 193
横向反应谱	拱脚	-312 596	492 256	115 700
	立柱 A 底	-24 353	7 173	4 202
	立柱 B 底	-17 117	10 789	2 997
	立柱 C 底	-12 745	17 435	1 807

注:轴力受压为负。

表 11 关键截面罕遇地震荷载内力值

Tab. 11 Internal forces in key sections under rare seismic loads

方向	截面位置	轴力/kN	面内弯矩 / (kN · m)	面外弯矩 / (kN · m)
纵向地震	拱脚	-336 811	1 132 359	87 504
	立柱 A 底	-27 567	91 609	3 246
	立柱 B 底	-19 965	44 398	2 487
	立柱 C 底	-15 738	111 686	1 248
横向地震	拱脚	-403 544	675 009	245 869
	立柱 A 底	-29 593	19 852	8 575
	立柱 B 底	-22 201	23 733	5 443
	立柱 C 底	-15 115	39 919	4 622

注:轴力受压为负。

根据 GB 50111—2006《铁路工程抗震设计规范》(2009 年版)的要求:在多遇地震作用下,结构不损坏或轻微损坏,能保持其正常使用功能;罕遇地震作用下可能产生较大破坏,但不出现整体倒塌,经抢修后可限速通车的原则。

采用条带法进行截面弯矩-曲率(考虑相应轴力)分析,在多遇地震作用下,拱上刚架墩截面和拱脚截面要求其在地震作用下的截面弯矩应小于截面初始屈服弯矩(考虑轴力) M_y ;罕遇地震作用下,拱上刚架墩及拱脚截面按《铁路工程抗震设计规范》^[15]验算延性,要求其地震作用下截面弯矩应小于极限弯矩 M_u (考虑轴力)。控制截面初始屈服弯矩、等效屈服弯矩、极限弯矩见表 12。

由表 12 可知,多遇地震下各关键截面的地震反应

内力均小于截面的初始屈服弯矩;罕遇地震下拱脚及立柱 A、B 柱脚截面的地震反应内力均小于相应的截面等效屈服弯矩,立柱 C 的柱脚截面地震反应内力略大于截面等效屈服弯矩,均处于弹性工作状态。结果表明,本桥的抗震性能良好,满足抗震受力需要。

表 12 控制截面初始屈服弯矩、等效屈服弯矩、极限弯矩
Tab. 12 Initial yield bending moments, equivalent yield bending moments, and ultimate bending moments in controlled sections

内力	截面位置	恒载轴力 /kN	初始屈服弯矩 /(kN·m)	等效屈服弯矩 /(kN·m)	极限弯矩 /(kN·m)
面内弯矩	拱脚	-263 025	1 711 000	2 112 000	2 332 000
	立柱 A 底	-21 228	154 000	203 200	231 800
	立柱 B 底	-13 699	84 260	104 200	118 800
	立柱 C 底	-11 633	89 390	107 600	124 700
	拱脚	-263 025	618 400	752 700	840 900
面外弯矩	立柱 A 底	-21 228	80 280	99 200	113 000
	立柱 B 底	-13 699	50 550	65 760	74 720
	立柱 C 底	-11 633	58 930	82 950	94 830

注:轴力受压为负。

6.3 抗风分析

澜沧江大桥桥址位于深沟峡谷中,主桥跨度大,结构复杂,施工周期长,结构的抗风性能研究是一项重点工作。为此,采用数值分析的方法对大桥施工过程及运营阶段的风荷载影响进行分析,共分析施工及成桥状态 8 种工况的风致响应。考虑到峡谷地形特点,在成桥状态只考虑横桥向的风振响应。在大桥风振响应分析中,采用时域的方法进行随机风振响应计算,采用谐波合成法模拟脉动风场时程,脉动风谱采用 Kaimal 谱。抗风分析工况见表 13。

表 13 抗风分析工况
Tab. 13 Working conditions for wind resistance analysis

分析阶段	流场	工况
施工阶段	均匀流场	竖转临界状态横桥向
		竖转临界状态顺桥向
		竖转合龙状态横桥向
		竖转合龙状态顺桥向
		竖转合龙状态横桥向
成桥阶段	紊流场	竖转合龙状态顺桥向
	均匀流场	横桥向激励
	紊流场	横桥向激励

全桥抗风分析主要结论如下。

(1) 竖转临界状态

①横桥向平均风载,即 20 m 高度处风速 24.17 m/s;自重作用下,拱顶最大侧向位移为 0.344 m,拱结

构最大应力响应为压应力 93 MPa。②顺桥向平均风载+自重作用下,拱结构最大纵向位移为 0.159 m,拱结构最大应力响应为压应力 78 MPa;设计风速下转轴连杆最大应力,当不设置拱肋浪风索时压应力为 204 MPa,设置浪风索时为 93 MPa,浪风索会极大改善结构的抗风受力性能。

(2) 竖转合龙状态

顺桥向、横桥向平均风荷载作用+自重作用下,结构各构件强度均满足要求,最大横向风致位移为 0.202 m。无浪风索时,结构抖振响应会引起转轴连杆高达 176.28 MPa 的应力脉动量,不能满足设计要求,因此设置浪风索很有必要。

(3) 成桥状态

平均风载,即 20 m 高度处风速为 30.98 m/s,轨顶风速为 39 m/s,对拱肋应力的最大贡献为 2.1 MPa,对拱上立柱和拱肋横撑的应力贡献都不控制设计。拱肋及立柱等构件内力以及应力抖振响应幅值均较小,表明成桥状态结构具有良好的刚度与抗风性能。

6.4 车桥耦合分析

计算中列车编组及行车速度工况如表 14 所示。

表 14 列车编组及计算速度
Tab. 14 Train formation and calculation speed

列车类型	编组情况	速度等级/(km/h)
SS9 牵引的 YZ25B 客车	1 动 12 拖	100、120、140、160
SS3 牵引的 C62 货车	1 动 2×(5 重 5 空)	50、60、70、80
SS3B 牵引的 C62 货车	2 动 2×(10 重 10 空)	

采用德国低干扰谱转换的时域不平顺样本(截至波长 80 m)、美国五级谱分别作为客车和货车轨道不平顺激励开展动力分析。

车桥耦合分析结论如下。

(1)SS9 牵引的 YZ25B 客车以 100~160 km/h 通过桥梁时,满足桥梁安全性、列车安全性要求,车辆舒适性为良。

(2)SS3 牵引的 C62 货车、SS3B 牵引的 C62 货车以 50~90 km/h 通过桥梁时,满足桥梁安全性、列车安全性要求,车辆平稳性为良。

(3)各工况下拱顶竖、横向最大位移分别为 6.78 mm 和 3.10 mm。与同类跨度拱桥相比,该桥梁具有较大的整体刚度及良好的车桥动力性能。

7 结论

主跨 342 m 的澜沧江铁路特大桥在设计时是国内最大跨度的铁路混凝土拱桥,围绕大桥的设计和施工技术开展一系列科学研究,最终研究成果在澜沧江大桥的建设中得到成功应用,取得以下主要成果。

(1)针对拱肋的钢管混凝土劲性骨架开展钢管混凝土受力性能研究,构建铁路桥梁钢管混凝土结构参数体系与分析方法,计算方法纳入TB10127—2020《铁路桥梁钢管混凝土结构设计规范》。

(2)对拱肋截面受力情况进行研究,建立内填外包钢管混凝土短柱分析模型,通过有限元分析法,对内填外包钢管混凝土小偏心受压构件的极限承载力及其结构的安全性进行研究,确保大桥拱肋截面受力安全。

(3)研发陡峭峡谷地区修建拱桥的拱肋二次竖转施工新工艺,并研制出新型竖转铰、连接上、下段拱肋的中间转铰、拱肋拉压杆以及牵引扣索的锚碇锚固装置等全套二次竖转施工设备,确保每岸质量达2500 t拱肋钢劲性骨架顺利实现二次竖转合龙。

参考文献:

- [1] 谭湛友,熊旺平.大瑞铁路澜沧江特大桥主体工程完工[J].世界桥梁,2020,48(4):97-98.
TAN Songyou, XIONG Wangping. The Main Project of Lancang River Bridge on Darui Railway was Completed[J]. World Bridges, 2020, 48(4):97-98.
- [2] 赵前进.大瑞铁路澜沧江特大桥岸坡稳定性分析[J].铁道标准设计,2017,61(11):47-50.
ZHAO Qianjin. Stability Analysis of Bank Slope of Lancang River Super Major Bridge on Dali-Ruili Railway[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(11):47-50.
- [3] 金正凯,徐升桥.大瑞铁路澜沧江特大桥施工监控与分析[J].铁道标准设计,2021,65(11):189-193.
JIN Zhengkai, XU Shengqiao. Construction Monitoring and Analysis of the Lancang River Bridge of Dali-Ruili Railway[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(11):189-193.
- [4] 安蕊梅,刘维华,牛润明.斜腿刚构桥几何布局的优化设计[J].石家庄铁道学院学报,2005(4):22-25.
AN Ruimei, LIU Weihua, NIU Running. Optimum Design for the Layout of Slant Legged Rigid Frame Bridge[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2005(4):22-25.
- [5] 陈克坚.水柏铁路北盘江大桥主桥设计特色[J].铁道标准设计,2004(6):40-43,118.
CHEN Kejian. Design Characteristics of Beipanjiang River Bridge on Shuibai Railway[J]. Railway Standard Design, 2004(6):40-43,118.
- [6] 徐升桥,任为东,李艳明,等.丫髻沙大桥主桥施工关键技术研究[J].铁道标准设计,2001(6):8-12.
XU Shengqiao, REN Weidong, LI Yanming, et al. Research on Key Construction Techniques of Yajisha Bridge's Main Bridge[J]. Railway Standard Design, 2001(6):8-12.
- [7] 王广周.高速铁路大跨连续梁-拱现浇支架体系力学特性分析及线形控制[J].铁道勘察,2022,48(1):75-80.
WANG Guangzhou. Mechanical Characteristics Analysis and Linear Control of Cast-in-place Support System of Continuous Beam Arch Bridge for High-speed Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(1):75-80.
- [8] 袁长春.主跨270 m提篮式钢管混凝土拱桥拼装施工技术[J].铁道标准设计,2007(1):46-49.
YUAN Changchun. Construction Technology for Assembling Inverted Arch Type of Steel Pipe Concrete Arch Bridge with 270 m Main Span[J]. Railway Standard Design, 2007(1):46-49.
- [9] 刘杰文,辛斌.重庆菜园坝长江大桥主桥上部结构施工方案[J].桥梁建设,2004(2):46-49.
LIU Jiewen, XIN Bin. Construction Schemes for Main Bridge Superstructure of Caiyuanba Changjiang River Bridge in Chongqing[J]. Bridge Construction, 2004(2):46-49.
- [10] 李文琪.万县长江公路大桥的施工[C]//第一届全国公路科技创新高层论坛论文集公路设计与施工卷.北京:外文出版社,2002:629-633.
- [11] 张爱花.澜沧江特大桥提篮拱竖转施工方案比选[J].桥梁建设,2010(3):79-82.
ZHANG Aihua. Comparison and Selection of Construction Schemes for Vertical Rotation of Basket Handle Arch of Lancang River Bridge[J]. Bridge Construction, 2010(3):79-82.
- [12] 任为东.大瑞铁路澜沧江特大桥施工关键技术研究[J].铁道标准设计,2021,65(4):82-88.
REN Weidong. Research on the Key Construction Technology of the Lancang River Super Major Bridge on Dali-Ruili Railway[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(4):82-88.
- [13] 陈金州,刘兴宇.大瑞铁路澜沧江特大桥钢拱“二次转体”合龙[J].世界桥梁,2016,44(6):96.
CHEN Jinzhou, LIU Xingyu. Steel Arch “Second Turn” Closure of Lancang River Bridge on Darui Railway[J]. World Bridges, 2016, 44(6):96.
- [14] 徐升桥.铁路桥梁钢管混凝土结构理论与设计[M].北京:人民交通出版社,2014:43-44.
- [15] 中华人民共和国建设部.铁路工程抗震设计规范(2009年版):GB50111—2006[S].北京:中国计划出版社,2009.

(编辑:夏梦然)