

文章编号: 1674—8247(2023)01—0086—05

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2023.01.016

沪昆高速铁路克地坝陵河特大桥设计优化

岳强 谢海清 何庭国

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:沪昆高速铁路跨越坝陵河大峡谷处拟设克地坝陵河特大桥,大桥设计中遭遇了桥址处复杂不良地质、桥位选择难度大、桥梁设计控制因素多、梁体和基础设计施工难度大等难题。经多方案比选,选取了较为合理的克地桥位方案,桥式方案采用大跨度预应力混凝土连续刚构。大跨度刚构具有经济合理、养护维修方便、养护工作量少、成本低等优点,在山区跨越深沟大壑或河流中被广泛采用。克地坝陵河特大桥结构构造合理,墩、梁线条简洁明快,与两岸陡峭地形相契合,充分发挥了连续刚构的结构优点。本文研究成果可为高速铁路大跨度刚构和高墩桥梁设计提供参考。

关键词:沪昆高速铁路;高墩大跨刚构;桥梁结构

中图分类号:U448.23

文献标识码:A

Design Optimization of Balinghe Super Major Bridge at Kedi on Shanghai-Kunming High-speed Railway

YUE Qiang XIE Haiqing HE Tingguo

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: For the design of the Balinghe Super Major Bridge at Kedi where Shanghai-Kunming High-speed Railway crosses the Baling River Grand Canyon, many difficulties were encountered, such as complex and unfavorable geological conditions at the bridge site, difficulty in location selection, too many control factors for bridge design, and difficulty in design and construction of girder body and foundation. Through the comparison of multiple optional schemes, a more reasonable bridge location at Kedi was selected, and a long-span prestressed concrete continuous rigid frame was applied for the bridge structure. The large-span rigid frame has the advantages of economic rationality, convenient maintenance, less maintenance workload, and low cost, and is widely used for bridges crossing deep gullies or rivers in mountainous areas. The structure of Balinghe Super Major Bridge at Kedi is reasonable, and the lines of piers and girders are simple and forthright, which is in line with the steep terrain on both banks, giving full play to the structural advantages of continuous rigid frame. The results of this paper can provide a reference for the design of long-span rigid frame and high pier bridges of high-speed railways.

Key words: Shanghai-Kunming High-speed Railway; large-span rigid frame with high piers; bridge structure

1 工程概况

沪昆高速铁路是我国东西向线路里程最长、速度

等级最高、经过省份最多的高速铁路。该铁路在贵州省安顺市关岭县跨越坝陵河大峡谷和六盘水至黄果树公路,拟设克地坝陵河特大桥。桥址两岸地势陡峻,

收稿日期:2021-10-29

作者简介:岳强(1976-),男,高级工程师。

引文格式:岳强,谢海清,何庭国. 沪昆高速铁路克地坝陵河特大桥设计优化[J]. 高速铁路技术,2023,14(1):86-90.

YUE Qiang, XIE Haiqing, HE Tingguo. Design Optimization of Balinghe Super Major Bridge at Kedi on Shanghai-Kunming High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2023,14(1):86-90.

为 U 型河谷地貌,落差超过 200 m。桥址处不良地质发育,主要有岩溶、滑坡、岩堆及危岩落石。大桥全长 525.7 m,桥跨布置为 $1 \times 32 \text{ m} + (88 + 168 + 88) \text{ m}$ 预应力混凝土连续刚构 + $4 \times 32 \text{ m}$,设计最高行车速度 350 km/h,桥上铺设无砟轨道。

该桥设计中存在线路运营速度高,大桥桥位选择难度大、地质情况复杂、设计控制因素多、梁体及基础设计和施工难度大等难题。经过详细研究和多方案比选,该桥最终采用了预应力混凝土连续刚构,避免了大跨度钢管混凝土拱桥^[1]或钢结构桥梁^[2]。克地坝陵河特大桥与两岸陡峭地形相契合,充分发挥了连续刚构的结构优点,成为沪昆高速铁路上一道亮丽的风景线,是艰险山区高速铁路标志性桥梁工程。大桥采用的预应力混凝土连续刚构桥式方案经济合理,养护维修方便,养护工作量少、成本低;同时,大跨度混凝土刚构桥的徐变得到了很好的控制^[3]。

克地坝陵河特大桥于 2016 年 12 月交付运营,运营至今大桥行车平稳、舒适,结构安全可靠,运营状态良好。

2 桥梁特点

(1) 主桥采用主跨 168 m 的连续刚构跨越坝陵河峡谷,为目前世界最大跨度的高速铁路预应力混凝土刚构桥。

(2) 主墩墩高分别为 92.5 m 和 104 m,为目前国内设计速度 350 km/h 高速铁路最高桥墩。

(3) 主墩采用 21 根直径为 2.5 m 的钻孔桩基础,为国内首次在喀斯特地貌区高速铁路建设中采用的大孔径深桩基的超高墩。

(4) 小里程侧水黄公路从大桥 1 号墩和 2 号主墩之间刚构桥边跨穿过,水黄公路是水城至黄果树的主要交通要道,在公路上方设置钢筋混凝土永久防护棚洞结构,保证了施工和运营期间桥下公路的行车安全。

3 桥位及桥式方案比选

3.1 桥位方案比选

大桥位于珠江水系北盘江支流,河谷深切宽缓,河床宽约 6~20 m,水深不足 1 m,河谷沿岸两侧不良地质发育,主要为岩溶、滑坡、岩堆及危岩落石。桥位两端接隧道,受岩溶水等不良地质影响,线路方案很难完全绕避不良地质。线位走低可采用常规跨度和墩高桥梁,但隧道风险较高,线位抬高后桥梁采用大跨高墩桥跨形式。

桥位受北盘江桥位、关岭站位、地形及地质控制。桥位越向上游,河底标高越高,桥梁规模越小。根据河谷两岸地形、地质及工程情况,在其河谷上、下游 20 多公里范围进行了多个桥位方案比选,

克地桥位上游以上选择桥位,关岭站位将退至山里,设站条件非常困难,而且克地桥位以上数公里范围连绵分布有标志明显的滑坡体;野羊坡桥位下游坝凌河谷敞开宽度急剧放大,若实施跨越桥梁规模则很大。考虑以上因素,桥位比选范围被限制在克地桥位(最上游桥位)至野羊坡桥位(最下游桥位)约 1 km 范围内,3 个桥位由上而下分别为克地、马冲和野羊坡桥位,各桥位及桥式方案如表 1 所示。

表 1 坝陵河特大桥主要桥位及桥式方案表

线路方案	桥名	孔跨式样
马冲桥位方案	坝陵河马冲桥位	1-32 m 简支梁 + 2-60 m 预应力混凝土 T 构 + (60 + 2-110 + 60) m 人字形桥
野羊坡桥位方案	坝陵河野羊坡桥位	2-24 m 简支梁 + (72 + 2-136 + 72) m 预应力混凝土人字形桥 + 1-32 m 简支梁 + 2-24 m 简支梁
克地桥位方案	坝陵河克地桥位	2-32 m + (88 + 168 + 88) m 连续刚构 + 2-32 m + 2-24 m

经综合比较,推荐线路走行于克地 1 号滑坡边缘、昆明端桥台位于陡崖边缘、大桥规模相对较小、地质条件相对较好、施工难度及风险相对较低的克地桥位方案。详细勘测后发现大里程桥台临近危岩落石,综合比较各种不利因素,结合现场踏勘比选后,选择对克地桥位进行局部优化。

结合坝陵河昆明端危岩落石、克地 1 号滑坡及在建工程的情况,进行了原位整治方案、完全绕避危岩落石方案及偏移方案的综合研究比选。考虑绕避危岩落石和大桥正穿滑坡主轴(滑体厚约 33 m),经过滑坡整治工程量比较,综合考虑各方案地质条件、工程性质规模、危岩落石处理及滑坡处理,对 3 种方案优缺点进行了分析。原位整治方案危岩落石处理费用高,且存在安全风险;完全绕避危岩落石方案滑坡治理存在安全风险,且对在建工程影响较大,不应采用;采用偏移 60 m 方案进行危岩落石及滑坡整治后,桥梁为曲线桥,安全度最高,施工难度最低,工程投资最省。

综合地形、地质条件和桥梁规模、施工难度及风险等,选用了桥梁规模相对较小,施工难度及风险较低的克地桥位。

3.2 桥式方案比选

大桥设计思路从过去的静力设计转化为动力设计,综合考虑列车-轨道-结构的共同作用,在满足

行车安全性与舒适性的前提下确定合理的铁路桥梁刚度。应用 MSC. PATRAN、MSC. NASTRAN 和 MSC. ADAMS/RAIL 分别建立列车、桥梁的空间振动分析模型,采用数值模拟对坝陵河特大桥进行车桥耦合动力响应分析检算。根据列车行车安全性、乘坐舒适性和平稳运行的评估标准,研究正常运营中的桥梁的横向刚度和列车平稳性。随后,采用有限元模型对结构应力、强度、变形等各项指标按规范要求进行检算,使其满足行车安全要求。

通过综合比选,采用主跨(88+168+88)m 预应力混凝土连续刚构结构设计可满足梁桥梁乘坐舒适性和平稳运行的要求^[4]。

4 桥梁设计优化

4.1 梁部设计

主桥为(88+168+88)m 预应力混凝土刚构,梁体采用单箱单室、变高度、变截面箱梁,梁体全长 345.8 m,梁体变高梁段,梁底曲线为二次抛物线。梁体截面桥面宽 12.0 m,箱宽 8.0 m,梁高 6.0~12.0 m,中支点处梁高为 12 m,梁体采用 C55 混凝土,按全预应力结构设计,纵向、横向、竖向均设预应力,纵向预应力采用 19-15.2 高强度低松弛钢绞线,金属波纹管成孔。克地坝陵河特大桥跨中截面构造如图 1 所示。

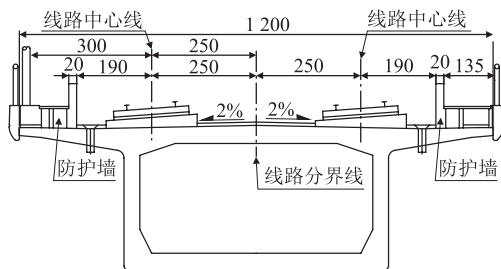


图1 跨中截面构造图(mm)

4.2 高墩设计

主墩采用矩形空心墩,最大墩高为 104 m,墩顶处横桥向宽 9 m,壁厚为 1.1 m;纵桥向宽 10 m,壁厚为 1.3 m,主墩纵桥向内外坡均采用直坡,在墩顶和墩底分别设置实体段。为有效增加墩身横向刚度,同时得到较好的外观效果,主墩横桥向采用直线二次放坡,墩顶以下 75 m 范围横桥向外坡为 15:1,下接直线二次放坡,横桥向外坡变为 10:1,主墩横桥向内坡均为 35:1。主墩基础均为钻孔群桩基础,桩径 2.5 m 行列式布置。大桥主墩构造如图 2 所示。

主墩采用爬模法施工,材料通过缆索吊结合塔吊运输,刚构梁部采用挂篮对称悬臂灌注法施工,引桥

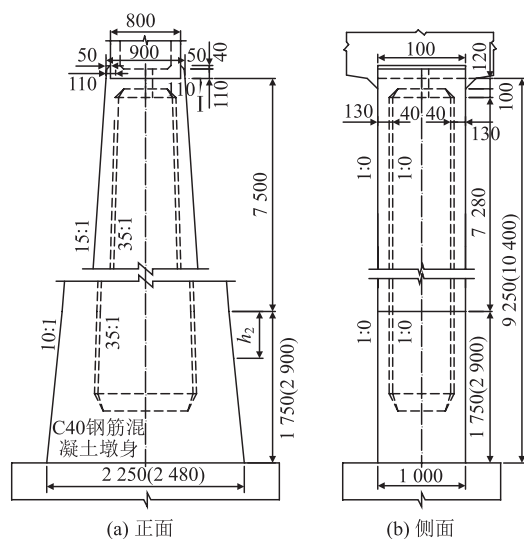


图2 主墩构造图(mm)

简支箱梁采用预制架设法施工^[5]。

4.3 桥墩刚度控制

结构刚度是高墩大跨预应力混凝土铁路桥设计的重要控制因素,选择合适的墩柱刚度是其中的重要内容。

采用 Midas Civil 软件建模计算,梁体为预应力混凝土变高度单箱单室截面梁,墩身为钢筋混凝土矩形空心墩。梁体墩身采用梁单元模拟,桩基础按刚度等效方法简化为门式杆件结构,分别按纵向和横向进行简化。箱梁边墩顶支座约束为纵向活动,主墩顶与梁采用刚连接,桥面二期恒载根据桥面轨道结构取值。

克地坝陵河特大桥对横向刚度控制进行了深入的比较研究。首先,拟定主墩不同结构尺寸,为提高横向刚度及节省圬工数量,主墩墩身横向采用二次变坡,构造尺寸根据计算调整,比较不同尺寸时主桥自振周期的影响。选定合理的墩身尺寸后计算自振周期,自振周期分别取 $T_1 = 1.7$ s、 $T_2 = 1.8$ s 和 $T_3 = 1.98$ s,随后进行车-桥耦合动力分析,最终确定合理的横向周期。通过优化计算,该大桥自振周期采用 1.98 s,较传统控制值 1.7 s,优化了墩身尺寸。相比同类型大跨连续刚构桥墩,本工程中混凝土减少 3 800 m³,达 23%,节省造价约 340 万元。

4.4 桥上无砟轨道的铺设平顺度控制

轨道铺设后,桥梁徐变下挠值为 8.7 mm,小于规范^[6]规定值 20 mm。

大跨度梁式桥桥面竖向变形受残余徐变上拱、二期恒载、温度和活载联合影响。为提高桥上无砟轨道的铺设平顺度,在大跨度梁桥桥面采用“水箱平衡加

载法”进行无砟轨道的铺设,消除了二期恒载变形对桥面平顺性的影响。

桥面铺设 CRTS I 型双块式无砟轨道,施工控制难点为轨排标高精度调整。克地坝陵河特大桥跨度大、相邻墩高差异大,轨面标高受实际合龙条件、混凝土温度变化引起的桥墩差异沉降以及梁部结构后期徐变等因素影响较大。桥梁采用水箱预压技术模拟无砟轨道结构恒载加载,提前消除加载后连续梁中部的挠曲变化和 CP III 变化对轨道精调的不利影响。无砟轨道铺设示意图如图 3 所示。

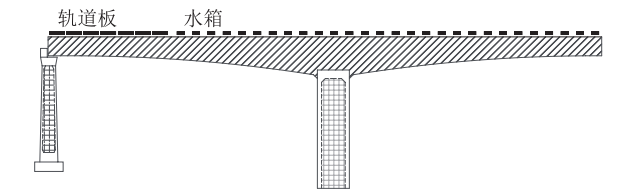


图 3 无砟轨道铺设示意图

无砟轨道铺设从一端开始,梁体在铺设过程中会连续发生变形,导致桥面平顺度差。本桥采取水箱平衡加载法在铺设前在梁面预压重量,重量与无砟轨道结构重量相同。铺设过程中根据无砟轨道铺设重量逐步放同等重量的水,直到全桥无砟轨道铺设完成。水箱平衡加载法的使用提高了轨道精调的精度,提高了桥面平顺度。

桥面铺设无砟轨道措施,采用水箱压重平衡桥面无砟轨道重量,保证在施工过程中梁体较小变形,与完全铺设后桥面线形一致。此外,因中跨和边跨铺过程受力变化,梁体变形复杂,需多次精调无砟轨道桥面,本方案有效解决无砟轨道铺设中变形问题。

5 桥梁综合实验

对克地坝陵河特大桥进行测试,试验动车组为 CRH380AJ-0202 综合检测列车,测点布置如图 4 所示。

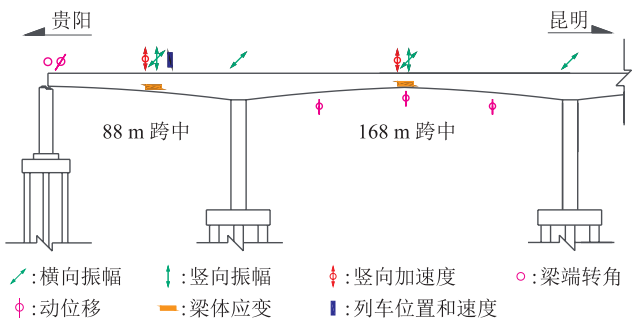


图 4 连续刚构桥测点布置图

综合检测列车通过检测桥梁时,实测梁体横向振幅最大值汇总如表 2 所示。梁体跨中横向振幅最大值满足《高速铁路桥梁运营性能检定规定(试行)》规定的通常值要求。

表 2 梁体横向振幅最大值及对应速度汇总表

测试梁型	测试位置	实测值	通常值
(88 + 168 + 88) m 连续刚构	88 m 跨中	0.02(321.4 km/h)	0.08
	168 m 跨中	0.04(297.5 km/h)	

实测各检测桥梁梁体横向振幅与行车速度的关系如图 5 和图 6 所示。在试验车速范围内,各检测桥梁跨中横向振幅数值均较小。

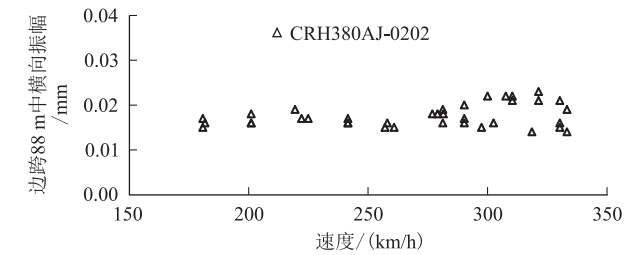


图 5 刚构 88 m 边跨中横向振幅与行车速度关系图

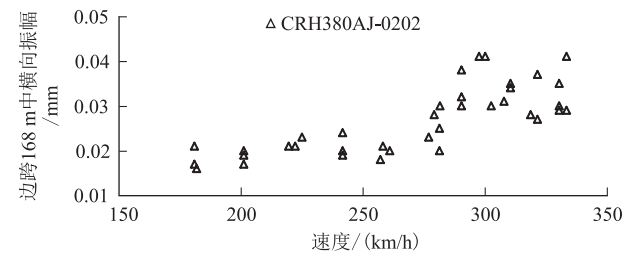


图 6 连续刚构中跨横向振幅与行车速度关系图

墩顶横向振幅最大值及对应速度如表 3 所示。从表 3 可知,实测墩顶横向振幅最大值均较小,满足《高速铁路桥梁运营性能检定规定(试行)》规定的通常值要求。

表 3 实测墩顶横向振幅最大值及对应速度汇总表

测试位置	桥墩特征	实测值	通常值
2 号墩顶梁面	矩形薄壁墩、墩全高 99 m、横向平均宽度 15.75 m、嵌岩桩	0.02 (241.6 km/h)	0.08
3 号墩顶梁面	矩形薄壁墩、墩全高 110 m、横向平均宽度 16.9 m、嵌岩桩	0.03 (321.4 km/h)	

综合检测列车通过各检测桥梁时,实测无砟轨道相邻梁端两侧的钢轨支点横向相对位移数值如表 4 所示。实测梁端横向相对位移满足《高速铁路工程动态验收技术规范》规定的限值要求,也满足《高速铁路桥梁运营性能检定规定(试行)》规定的通常值要求。

表 4 实测梁端两侧钢轨支点横向位移(mm)

测试位置	实测值	限值	通常值
贵阳侧 88 m 与 32 m 简支箱梁梁缝	0.24 ~ 0.35	1.00	0.50

综合克地坝陵河特大桥(88 + 168 + 88)m 连续刚构的检测结果可知:

(1) 桥梁竖向自振频率、竖向挠跨比和梁端竖向转角均满足《高速铁路工程动态验收技术规范》规定的限值要求,同时满足设计值和《高速铁路桥梁运营性能检定规定(试行)》规定的通常值要求。

(2) 梁体跨中竖向振幅最大值为 0.25 mm,梁体跨中横向振幅最大值为 0.09 mm,墩顶横向振幅最大值为 0.04 mm,满足《高速铁路桥梁运营性能检定规定(试行)》规定的通常值要求。

(3) 无砟轨道相邻梁端两侧的钢轨支点横向相对位移最大值为 0.35 mm,满足《高速铁路工程动态验收技术规范》规定的限值要求;桥梁活动支座的横向动位移最大值为 0.07 mm,均满足《高速铁路桥梁运营性能检定规定(试行)》的通常值要求。桥梁动力性能满足动车组以 300 km/h 及以下速度运行时的相关标准要求。

6 结束语

克地坝陵河特大桥主跨 168 m 连续梁刚构桥梁是目前最大跨度高速铁路梁桥,本文中的桥型方案研究对山区超大跨度铁路梁桥设计和选型有借鉴意义。

参考文献:

[1] 范静涛. 艰险山区单线大跨度钢管混凝土拱桥结构分析与方案比选[J]. 铁道建筑技术, 2018(1): 72 – 76.
FAN Jingtao. Structural Analysis and Scheme Comparison of Large Span Single-Track Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridge in Complicated Mountain Area [J]. Railway Construction Technology, 2018(1): 72 – 76.

[2] JTG/TD 65 – 06 – 2015 公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
JTG/TD 65 – 06 – 2015 Specifications for Design of Highway Concrete-Filled Steel Tubular Arch Bridges [S].

[3] 陈良江,周勇政. 我国高速铁路桥梁技术的发展与实践[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 27 – 32.
CHEN Liangjiang, ZHOU Yongzheng. Development and Practice of High-Speed Railway Bridge Technology in China [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 27 – 32.

[4] 周勇政,陈良江,高策. 我国高速铁路桥梁设计技术及探索[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 11 – 15.
ZHOU Yongzheng, CHEN Liangjiang, GAO Ce. Design Techniques and Exploration of High-Speed Railway Bridges in China [J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 11 – 15.

[5] 乔健,陈良江. 铁路预应力混凝土桥梁收缩徐变控制技术探索[J]. 铁道标准设计, 2007, 51(6): 1 – 4, 7.
QIAO Jian, CHEN Liangjiang. Research on Shrinkage and Creep Control Technology of Railway Prestressed Concrete Bridge [J]. Railway Standard Design, 2007, 51(6): 1 – 4, 7.

[6] TB 10621 – 2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621 – 2014 Code for Design of High Speed Railway [S].

(上接第 85 页)

MAO Bangyan, JIANG Liangwen, WANG Ke, et al. Research on the Risk Assessment of High-Speed Rail Passing through Large Karst Cavern [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(2): 21 – 26, 32.

[4] 铁道部第二勘测设计院. 岩溶工程地质[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
Ministry of Railways No.2 Survey and Design Institute. Karst Engineering Geology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984.

[5] 薛禹群,朱学愚. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1979.

XUE Yuqun, ZHU Xueyu. Groundwater Hydraulics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979.

[6] 任美镠,刘振中. 岩溶学概论[M]. 北京: 商务印书馆, 1983.
REN Meie, LIU Zhenzhong. Introduction to Karst Science [M]. Beijing: The Commercial Press, 1983.

[7] 陈明浩,邓宏科,张广泽,等. 昭通隧道岩溶水文地质特征及突涌水危险性评价[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 34 – 39.
CHEN Minghao, DENG Hongke, ZHANG Guangze, et al. Analysis of Karst Hydrogeological Characteristics and Risk Assessment of Water Inrush for the Zhaotong Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 34 – 39.