

超大跨径上承式钢管混凝土拱桥设计

武电坤,杨兴,冯鹏程

(中交第二公路勘察设计院有限公司,湖北 武汉 430056)

摘要:大小井特大桥主桥为计算跨径达 450 m 的上承式钢管混凝土拱桥。主拱肋选用变高四肢桁架形截面,为加强其稳定性,设置了较为强劲的横向连接系基本形成桁架箱形结构,腹杆等构件利用短接头连接和栓焊节点等方式保障了施工质量;拱上立柱采用部分钢管混凝土平缀杆格构柱配一体化箱形钢盖梁,结构新颖,传力明确;桥面系确定为双主梁钢—混组合梁形式,桥面板全宽预制装配化程度更高。采用有限元程序对该桥静动力及局部分析表明,结构设计基本合理。

关键词:上承式;钢管混凝土;拱肋;平缀杆;双主梁;全宽预制

随着中国逐步由桥梁大国迈向桥梁强国,拱桥的设计施工技术相应得到较大发展,其中钢管混凝土拱桥为体现其发展的突出桥型之一。在省国道等公路工程中,自 2005 年建成主跨 460 m 的巫山长江大桥以来,于 2013 年又建成 530 m 跨的合江长江一桥,到目前在建的 575 m 跨广西平南三桥,均表明桥梁规模在不断扩大、建设技术全面提升。技术方面,也提出了多项创新,如贵州总溪河大桥和香火岩特大桥,主拱圈弦管与腹杆、斜撑采用新型的“栓焊结合”节点,主弦管内壁通过设置栓钉来增强钢—混结构组合效应;广西平南三桥将地连墙基础应用于拱桥,解决了地质情况较差地段拱座基础承载力问题。但是,上承式钢管混凝土拱桥规模自 2009 年支井河大桥跨度达 430 m 后,多年一直没有突破。大小井特大桥的建设,总结了近几年类似结构设计和装配化应用经验,结合桥址处的地形、地质条件,推动了此类桥型的发展。

1 工程概况

大小井特大桥为平罗高速公路一项控制性工程。该桥横跨坝王河,地面自然标高为 425~650 m,地形呈典型的扩口式“U”字形,谷顶宽约 610 m,两侧岸坡按缓—陡—缓的趋势分布。适应此地形的桥型较多,综合地质条件、经济性、美观性及风险评估等多方面对比分析,主桥确定为上承式钢管混凝土拱桥方案。桥跨布置分为 7 联,由 9×40 m(T 梁) + 15×31.6 m(桥面系组合梁) + 16×40 m(T 梁) 组成,其中主桥计算

跨径为 450 m,桥型布置图见图 1。

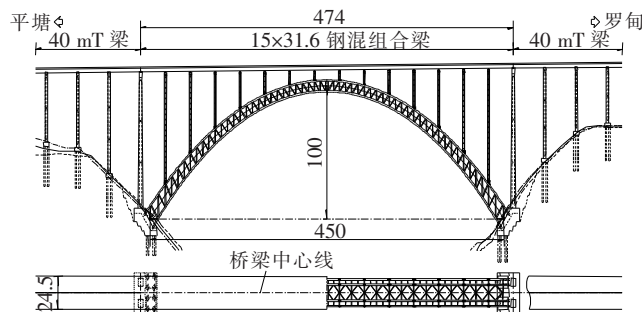


图 1 桥型总体布置图(单位:m)

桥位属亚热带季风湿润气候区,季节较明确,全年气温平均为 17℃,极端最低、最高气温为-7.7、38.1℃。跨越河流为珠江流域西江干流红水河段支流,常水位为 428 m,计算洪水位为 433.13 m。通过电磁波 CT 等物探技术,查明两岸拱座处岩体局部软硬不均,裂隙发育程度不一,需对基座的变形严加控制,其中罗甸侧拱座处局部存在溶洞,但有填充物且相对独立。

主要技术标准:汽车荷载采用公路—I 级;桥宽 24.5 m,按双向四车道设计,主桥桥面系和引桥分幅考虑;桥址处地震动峰值加速度为 0.05g,结构抗震设防烈度 7 度。

2 结构设计

JTG/T D65—06—2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》建议,钢管混凝土拱桥跨径大于 300 m 时建议采用变截面桁架结构,经统计拱肋断面大多采用“四

肢”格构形截面,部分采用“六肢”格构形截面。对比两种拱肋截面,发现相同的主拱圈宽度和应力控制下,后一种截面并不能有效提高结构稳定性,反而增加了杆件数量,因此该桥选择了计算跨径为 450 m 的等宽变高双四肢式拱肋桁架拱,拱轴线采用悬链线,拱轴线系数 $m=1.55$,矢高 $h=100$ m,矢跨比为 $1/4.5$ 。

2.1 主拱圈

主拱圈共分 14 节段,其中 1~4 节段弦杆采用 Q390D 钢材,其余均为 Q345D 钢材。拱顶到拱脚截面高度由 8 m 变化至 14 m,拱肋中心宽 4 m,两肋之间设置竖联和平联,横桥向外钢管中心总宽 20 m(图 2)。拱肋间横联形式对主拱圈桁架结构的稳定性、抗扭性能都有较强的敏感性。该桥主拱圈跨宽比接近 21,横向稳定性是首要解决的问题。根据文献[9]的研究,上、下弦管设置 26 道米字形和 4 道 K 字形平联,并在立柱位置增设竖向连接杆件,基本形成了桁架箱形结构。单片拱肋内部纵向每隔 7.9 m 设置了腹杆、横撑和 K 字形剪力撑,大大提高了主拱圈刚度。

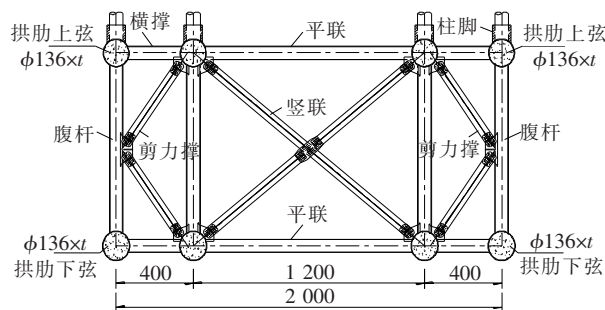


图 2 主拱圈标准断面(单位:cm)

由底至顶,拱肋上弦管壁厚为 35—28—32 mm,下弦管壁厚为 35—32—28 mm,外径均为 1 360 mm。为减小横桥向的风荷载效应,拱肋腹杆全采用钢管,尺寸分别为($\phi 900 \times 24$) mm、($\phi 700 \times 24$) mm 和($\phi 700 \times 18$) mm;横撑采用($\phi 700 \times 16$) mm 钢管,平联横撑采用($\phi 900 \times 20$) mm、($\phi 700 \times 16$) mm 或($\phi 600 \times 16$) mm 钢管。而竖联和拱肋剪力撑为 I500 mm×532 mm 的型钢,以减少现场焊接节点。弦管、与铰相连的斜腹杆及销轴钢管内灌注 C60 自密实微膨胀混凝土。为使钢—混组合结构更好地协同受力,降低管内壁局部脱空的风险,在腹杆相连位置的弦管内布置了剪力钉,并在立柱对应的位置增设了开孔加劲钢板,以利于应力扩散,增强钢管和混凝土的黏结效果。

该桥另一个技术难点为杆件尺寸大,受山区运输条件的限制,需要将桁架节段拆分为散件进场,为避免因管件相连采用的相关焊接带来的现场施焊条件差、

定位精度低、节点数量多、质量较难保障等问题,设计采用短接头连接(图 3)和栓焊节点方式解决。

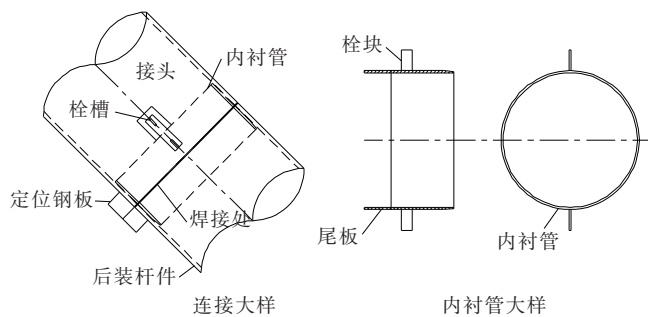


图 3 短接头连接示意图

2.2 立柱和帽梁

拱上建筑是桥面荷载的主要传力结构,其设计是主拱圈受力合理与否的关键。立柱和盖梁是拱上建筑重要组成部分,目前中国大跨上承式钢管混凝土拱桥主要采用矩形截面钢箱结构、平斜缀杆格构柱配钢箱盖梁或钢筋混凝土盖梁。由于该桥立柱高度为 83.742~6.357 m,相差较大,边立柱稳定性问题尤其重要,经计算发现同质量同外形尺寸下,圆管式格构柱的稳定性要明显优于钢箱结构,且可以大幅度降低风荷载效应。根据文献[10]等的研究,并考虑分段制作、加工、吊装的便利性,该桥立柱选定为圆管式平缀杆格构柱排架结构(图 4)。依据结构受力需求,立柱柱肢采用两种钢管规格(即 $\phi 700$ mm×16 mm 和 $\phi 600$ mm×16 mm),其顺桥向中心距取 2.2、2.0 或 1.6 m,同时并排的立柱之间设置必要的 X 形桁架横撑增强稳定性,并在边三处高立柱部分灌注自密实微膨胀混凝土形成组合结构。

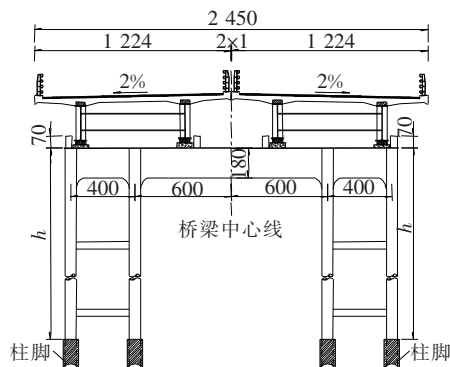


图 4 拱上建筑构造图(单位:cm)

帽梁采用空心矩形薄壁等截面钢箱结构,腹板直接焊接到相应的立柱钢管壁上,顶板对应立柱顶围焊连接,与立柱形成一体化整体结构,对应主拱肋处底板检修口,受力明确,更加便于安装和后期维护。帽梁截面高 1.8 m,横向尺寸与立柱中心距相对应。

2.3 桥面系

相比标准化混凝土T梁和小箱梁,钢-混组合梁自重减轻约30%,双主梁形更加节约钢材,该桥桥面系最终采用了跨径31.6 m。其中钢纵梁设计高2.1 m,单幅横向间距6.5 m,上翼缘板厚度为30或45 mm,宽700 mm;下翼缘板厚度为30、40或50 mm,宽800 mm。沿桥向每3.95 m间距设一处工字形截面横梁,为减少汽车冲击效应对伸缩缝的破坏,在该处设置为较强的混凝土横梁。

桥面板宽12.24 m,悬臂长2.87 m,钢梁顶处厚45 cm,跨中厚30 cm,全宽预制,与防撞护栏座一起浇注形成整体,通过设置预留暗槽,同钢纵梁采用均布剪力钉连接保障共同受力,规避了集束式钉群受力不均问题,减少了空中施工难度。桥面板纵桥向按普通钢筋混凝土结构设计,但为防止负弯矩区开裂,支点处板采用先张工艺添加部分预应力钢绞线;横桥向按45 cm间距布置 $\phi^{*}15.2-3$ 钢绞线,可达到B类预应力混凝土构件要求。

2.4 拱座部位

主、引桥交界墩置于拱座上,高分别为102.023、104.867 m,综合考虑刚度和强度要求,选择为“门”式框架箱形变截面空心薄壁墩,单肢横桥向宽6 m,顺桥向自顶部4 m宽向下按照1:100坡比变宽,帽梁采用普通钢筋混凝土结构。

拱座结构尺寸为30 m \times 28.7 m \times 20.649 m,配台阶状基底的扩大基础,要求嵌入稳定、完整的中风化岩层。由于该区存在地质溶蚀以及软弱的地质夹层,需对地基进行加固处理,因此在两岸拱座处均配置了8根直径3.5 m的基桩。拱座与其基础采用C40和C30两种标号混凝土。拱肋弦杆、铰轴连接腹杆在施工、运营阶段容易引起应力集中问题,因此在与拱座连接处增设了外包混凝土,且拱肋上下弦杆横向增加了缀板-混凝土组合结构连接(图5)。

3 结构分析

利用计算软件Midas/Civil 2012建立大小井特大桥的三维空间模型,按实际结构尺寸将其主拱圈、拱上立柱、帽梁及桥面系纵横梁等主要受力结构离散为空间有限元杆件。依据该桥在施工阶段以及成桥状态下的不同荷载组合对其进行静力、动力及稳定性分析。并通过有限元软件Ansys对立柱与弦杆相接位置、拱座和桥面板吊装进行局部分析。

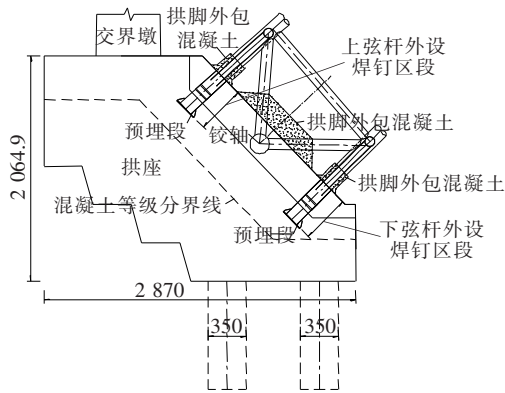


图5 拱座构造图(单位:cm)

3.1 全桥计算

边界条件:桥面系钢纵梁和帽梁通过弹性连接模拟约束关系,刚度由板式橡胶支座相关参数确定。

施工顺序:拱肋吊装至合龙,灌注自密实微膨胀混凝土,拆除扣索并完成立柱和帽梁的安装,最后施工桥面系及护栏等,计算时计入混凝土收缩、徐变效应。

静力计算荷载包括恒载、收缩徐变、汽车活载、温度作用、风荷载和基础不均匀沉降,其中钢护栏挡风高度参阅欧洲规范(BS EN1991-1-4:2005)8.3.1条款取值,其他荷载均按照中国相关现行规范执行。荷载组合按规范要求的最不利效应考虑,主要结果如下:

(1) 在施工过程中,拱肋未出现拉应力,灌注混凝土前拱肋最大压应力为-68.8 MPa;成桥收缩徐变10年后,混凝土最大压应力为-10.42 MPa,弦管最大压应力虽达到-246.7 MPa,但满足相关要求,其他杆件应力水平也均在合理范围内。

(2) 在汽车活载作用下,该桥的主拱圈正负挠度绝对值之和为122 mm,远小于 $L/1\,000$ 的限值。

(3) 在考虑稳定折减、脱空、钢管初始应力等影响因素后,主拱圈上下弦杆单管和组合截面承载力均满足规范要求,且最小富余4.48%;桥面系按照组合前后内力的叠加,可满足强度要求。

(4) 标准值组合下,主拱弦杆(指采用Q390D钢部分)最大压应力为-270 MPa,内部灌注的混凝土最大压应力-19.3 MPa;竖联、平联的最大压应力为-118 MPa,最大拉应力为68.5 MPa;腹杆最大压应力为-152 MPa,最大拉应力为127 MPa;桥面系钢梁最大压应力为-137 MPa;立柱的最大压应力为-175 MPa。各项指标均满足规范要求。

(5) 采用弹性稳定性特征值分析方法计算该桥稳定性,其第1阶模态表现为立柱纵向失稳,稳定系数为5.73;第2阶模态为主拱对称侧向失稳,稳定系数为

6.95,大桥的稳定性满足规范要求。

在计入交界墩影响的前提下开展该桥的抗震计算,计算采用反应谱和时程分析两种方法,依据 JTJ/T B02-01-2008《公路桥梁抗震设计细则》相关规定进行。动力分析结果显示:该桥第 1 阶模态周期为 5.72 s,结构有很好的自身耗能能力。在 E1 地震动作用下,交界墩、主拱肋承载能力满足结构不受损伤,可继续使用的抗震性能目标;E2 纵向地震动作用下,主拱肋及其他构件仍处于弹性状态,交界墩墩底虽进入塑性状态,但处于可修复状态。

3.2 局部计算

3.2.1 拱座

两岸拱座地质条件比较特殊,存在软弱夹层,结合地质勘察资料提供的岩土参数,利用 Ansys 通用软件建立拱座实体模型,进行局部分析。

分析结果表明:增加桩基础切实减少了周围岩土的应力水平和位移量,岩土最大竖向压缩变形为 2.2 mm;最大竖向压应力为 -660 kPa。而拱座与拱肋相接触位置最大主压应力为 -6.0 MPa;扩大基础最大主压应力为 -4.4 MPa;桩基最大剪应力为 0.5 MPa,主拉应力为 0.7 MPa,主压应力为 -3.3 MPa,可满足地基承载力和结构强度要求。

3.2.2 柱脚

柱脚弦杆、腹杆、立柱及横撑交汇的位置,受力比较复杂。通过实体模型分析发现,柱脚通过设置外包钢筋混凝土,有效分散了集中应力,弦杆最大 Mises 应力为 -214 MPa;腹杆局部点最大 Mises 应力为 -239 MPa;立柱最大 Mises 应力为 -135 MPa,均在合理范围内。

3.2.3 桥面板

暗槽的存在对桥面板截面在吊装过程中有很大的削弱,需要合理设置吊点和确定到边纵向的距离。经计算,推荐 8 吊点方案,吊点布置在距板端纵向距离 1.5 m,横向倒角处。这时板的最大变形值仅 1.6 mm,主拉应力不超过 1.8 MPa,槽口处连通的普通钢筋应力最大为 1.44 MPa,均满足要求。

4 施工特点

该桥采用常用的无支架斜拉扣挂缆索吊装系统施工,主拱圈拱肋桁架、立柱及桥面系等分为多个节段安装,体现出几个特点:①山区缆索吊装质量更大,最大重量约 160 t;②装配化程度更高,钢盖梁整体对接安装,桥面板全宽预制;③为保障安全,在拱肋悬拼至第

8 节段(共 14 节段)时,拱脚临时铰封固,后施工段通过扣索和智能监控达到控制标高和内力的目标。

5 结论

大小井特大桥计算跨径达 450 m,是继支井河大桥在上承式钢管混凝土拱桥类型中又一创举,大小井特大桥于 2019 年 6 月建成。该桥整体轻柔美观,与附近大山的巍峨相得益彰,有较好的景观效果。结构设计方面可总结以下几方面供参考:

(1)对于等宽钢管混凝土拱桥,加强横向连接可有效提高结构稳定性,若地质条件允许建议适当加大矢跨比,增强主拱圈轴向刚度,减小立柱高度。

(2)合理利用平缀杆格构形立柱的用钢指标及与混凝土的组合效应,采用一体化帽梁的设计理念,既可以减轻拱上建筑的重量也可满足稳定性的要求。

(3)建议大跨拱桥桥面系采用少主梁钢-混组合梁,可有效减轻结构重量和降低造价,方便提高装配化程度。

参考文献:

- [1] 牟廷敏.巫山县巫峡长江大桥技术进步研究[J].西南公路,2006(3).
- [2] 韩玉,秦大燕,冯智.合江长江一桥施工关键技术及创新[J].公路,2013(3).
- [3] 杜海龙,韩玉,秦大燕,等.平南三桥地下连续墙施工关键技术研究[J].公路,2019(8).
- [4] 刘新华,师少辉,彭元诚.总溪河大桥主桥结构设计[J].桥梁建设,2016(5).
- [5] 张振伟,张伟.飞燕式钢管混凝土系杆拱桥静动力特性分析[J].中外公路,2019(1).
- [6] 李毅谦,季文刚.支井河大桥设计技术创新与施工方案研究[J].公路,2013(1).
- [7] JTJ/T D65-06-2015 公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
- [8] 赵河清,徐亮,杨惠林,等.大跨度上承式钢管混凝土拱桥的稳定性分析[J].公路交通科技,2006(11).
- [9] 陈宝春,杨亚林.钢管混凝土上承式拱桥桥型分析[J].公路,2006(2).
- [10] 孙利亚,卫建军,周文亮,等.钢管混凝土格构式柱受力性能研究[J].中国安全生产科学技术,2011(12).
- [11] 何奇钦,刘一飞,蔡正东.钢管混凝土拱桥拱肋吊装方案比选[J].世界桥梁,2013(6).
- [12] 涂光亚,袁航.大跨度钢管混凝土拱桥成桥状态钢管应力优化研究[J].中外公路,2020(2).