中承式钢管砼拱桥设计

张翔[1,2]，张立兴[1,2]
（1.陕西省交通规划设计研究院有限公司，陕西 西安 710065；2.长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室，陕西 西安 710064）

摘要：以广西南宁市武鸣河大桥为工程背景，介绍中承式钢管砼拱桥的设计过程，阐述拱肋、横撑、横梁、桥面系等主要构件的设计及结构计算；采用通用有限元软件 MIDAS/Civil 进行全桥结构施工、运行阶段静力分析，结果表明结构设计满足规范要求。

关键词：桥梁；中承式钢管砼拱桥；拱肋；拱上横梁；桥面系；静力分析
中图分类号：U442.5 **文献标志码**：A **文章编号**：1671－2668(2021)05－0114－04

钢管砼拱桥外形优美且较传统圬工拱桥具有更大的跨越能力。随着跨径的增大和公路等级的提高，桁式拱肋因其较好的纵、横向抗弯刚度，在结构设计中得到青睐。然而拱肋本身的稳定性和强健性仅是结构强健性的一部分。中国钢管砼拱桥发展过程中，因强健性重视不够产生了一系列不良后果。GB 50923—2013《钢管混凝土拱桥技术规范》要求钢管砼拱桥的吊杆与系杆索必须具有可检查、可更换的构造与措施，中承式和下承式拱桥的悬吊桥面系应采用整体性结构，以横梁受力为主的悬吊桥面系必须设置加劲纵梁，并具有一根横梁两端相对应的吊索失效后不落梁的能力。可见桥面系的整体化、连续化、轻型化是拱桥的一个发展趋势。该文以广西南宁市武鸣河大桥为工程背景，研究中承式钢管砼拱桥设计。

1 工程概况

武鸣河大桥位于广西南宁市武鸣区，为天峨—北海公路平果至南宁段高速公路的重点控制工程，跨径布置为 1－140 m（中承式钢管砼拱桥），桥梁全长立面布置见图 1。

桥位处与河流流向呈右偏120°斜交，最大桥高

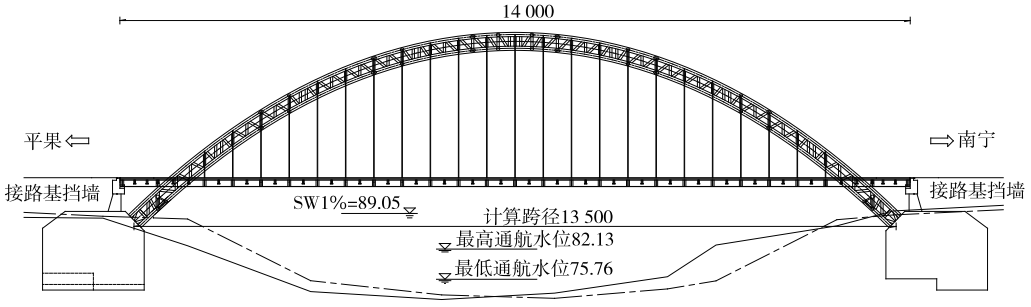

图 1 武鸣河大桥立面布置（单位：标高为 m，其他为 cm）

18.5 m。桥址区河道较弯曲，河岸规则，水面宽度约 65 m，水流速度平缓。武鸣河流域属南亚热带湿润气候区，桥址处设计最高通航水位 82.13 m，最低通航水位 75.76 m，设计洪水位 89.05 m。

2 主桥结构设计

2.1 总体设计

国内近年已建类似跨径钢管砼拱桥的截面形式和尺寸见表 1。通过结构计算，确定该桥设计方案如下：主桥计算跨径 135 m，采用悬链线作为拱轴线，拱轴系数取 1.543，计算矢高为 32.143 m，矢跨比 1/4.2。拱圈分左右两幅拱肋，单幅拱肋为四肢桁式钢管砼截面，横桥向拱肋相互平行，两幅拱肋间中心距 19.35 m。

2.2 拱肋

拱肋采用等截面设计，断面高 3.2 m，横向宽 1.8 m。单幅拱肋由 4 根 ϕ750×16 mm 钢管组成，拱肋上下弦钢管由腹杆相连，腹杆采用 ϕ402×12 mm

表 1　拱肋截面统计

桥名	年份	跨径/m	截面形式	拱肋高度/m	管径×壁厚/mm	桥面宽度/m	行车道宽度/m
绍兴袍江大桥主桥	2011	40＋3×185＋40	横哑铃桁式	4.0	ϕ900×20	45.0	32.0
秋湖里大桥	2012	45＋160＋45	四肢桁式	3.6	ϕ800×14	29.5	22.5
浙江义乌兴隆大桥	2015	120	横哑铃桁式	3.4	ϕ750×16	25.0	22.0
贵州清镇职教城龙凤大桥	2017	190	四肢桁式	4.6	ϕ900×20～25	35.0	23.0
湖州市环漾大桥	2018	130	哑铃形	3.2	ϕ1 400×20～25	37.6	21.0
信阳市春晓路跨狮河大桥	2020	142＋61	四肢桁式	3.0	ϕ750×24	37.5	24.0

钢管。横桥向弦管之间通过横联连接，平联采用 ϕ500×12 mm 钢管，其中吊杆处平联采用 ϕ500×16 mm 钢管（见图 2）。主管内均灌注 C50 自密实微膨胀砼，拱肋砼从拱脚到拱顶一次性连续泵送顶升，并采用真空辅助灌浆技术，抽走主弦管内的空气和砼当中的气泡，减少管内砼脱黏现象。为降低拱肋吊装施工难度，保证工程质量，拱肋节段拼接处采用双腹杆设计。

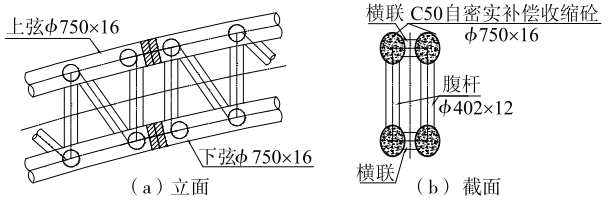

图 2　拱肋一般构造图（单位：mm）

2.3　拱脚

主拱与拱座的连接是拱桥的关键部位。该桥拱脚段上下弦钢管插入拱座预埋，预埋管与主拱节段采用焊接对接接头。主管预埋深度 1.5 m，预埋钢管底部设承压板，下设 4 层钢筋网片。在预埋段钢管周边设螺旋钢筋加强锚固，承压板与钢管外侧设置加劲板（见图 3）。

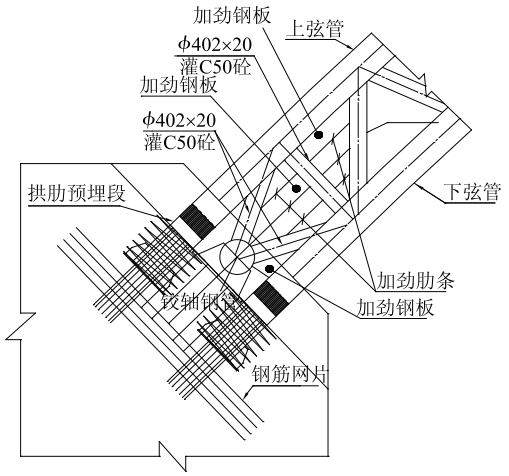

图 3　拱脚预埋件（单位：mm）

主拱施工中，为便于主拱圈在吊装中调整标高和线形，在主拱肋合龙前，拱脚为临时铰连接，临时铰采用转轴铰。主拱肋合龙完成后，浇筑拱座预留槽砼，封固拱脚临时铰。

2.4　拱上横梁和横撑

全桥共设 6 道 K 字撑，2 道拱上横梁。横撑间距为 20 m，横撑平联采用 ϕ600×16 和 ϕ500×16 mm 钢管，竖撑采用 ϕ299×12 mm 钢管。拱上横梁采用三角桁架形式（见图 4），拱上横梁平联采用 ϕ500×20 和 ϕ500×16 mm 钢管，并在上平联内灌注 C50 砼，保证拱上横梁局部承压稳定。该处腹杆采用 ϕ500×20 mm 钢管，并灌注 C50 砼，加强主拱肋与拱上横梁相交处刚度。在主拱肋施工中，拱上横梁充当横撑作用，成桥后传递桥面系及车辆荷载。

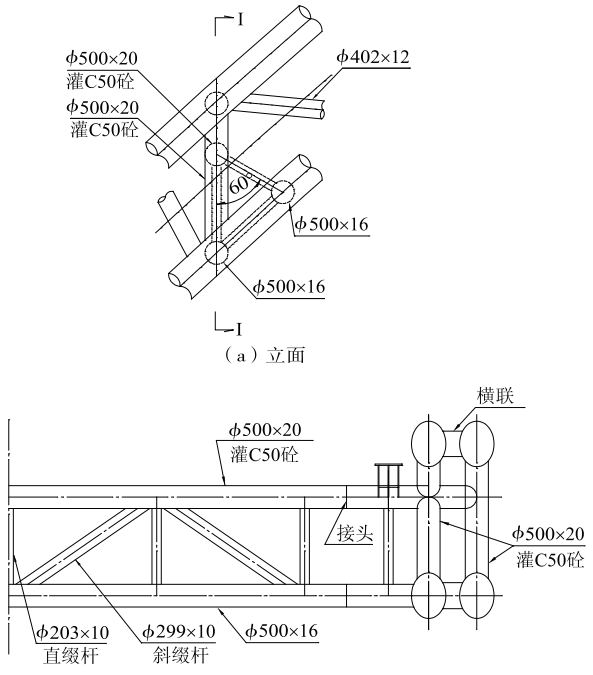

图 4　拱上横梁设计（单位：mm）

2.5　桥面系设计

中国中承式、下承式钢管砼拱桥通常采用悬吊

式桥面系，根据结构形式分为三类，其构造、受力特点见表 2。

表 2 悬吊式桥面系分类

类别	构造特点	受力特点	强健性
一类	吊杆吊住纵梁或横梁，纵横梁和桥面板组成整体	桥面系整体受力	较好
二类	吊杆吊住横梁，桥面板支撑于横梁上，有加劲纵梁	横梁受力较大	较差
三类	吊杆吊住横梁，桥面板支撑于横梁上，无加劲纵梁	横梁受力较大	最差

第三类桥面系横梁之间无加劲纵梁，一旦断索，极易发生横梁桥面板落梁现象，强健性较差。随着对桥面系强健性的深入研究，当采用以横梁受力为主的桥面系时，多采用第二类桥面系。第一类桥面系为整体性结构，近年来逐渐被广泛应用。该桥桥面系采用钢－砼组合梁、组合桥面结构，组合梁为钢格子梁，主、次纵横梁均采用工字形截面（见图 5）。格子梁上满铺 8 mm 厚钢板，通过焊接在钢板上的 PBL 剪力键与砼锚固连接，形成总厚度 19 cm 的桥面板，再铺装 10 cm 厚沥青砼，在水泥砼和沥青砼之间设置防水层。桥面板结构见图 6、图 7。

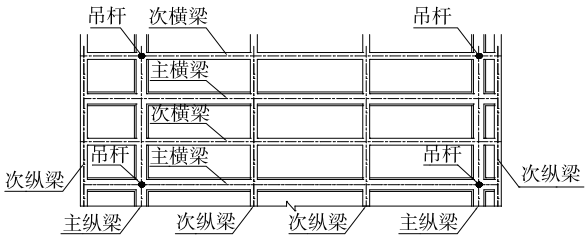

图 5 桥面系格子梁的一般构造

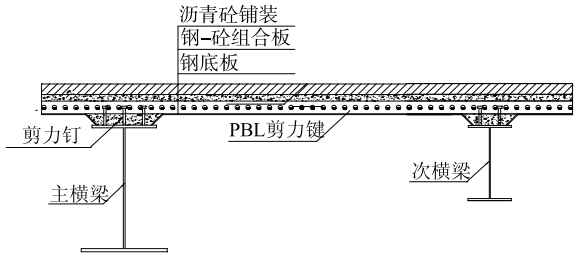

图 6 桥面板的横向布置

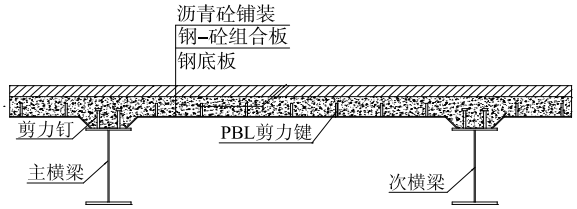

图 7 桥面板的纵向布置

2.6 基础设计

根据钻探地质资料，该桥拱座基础位于强风化灰岩上，地基基本承载力为 1 500～2 000 kPa，岩层坡面平缓，且小桩号侧存在地裂缝。综合考虑地形、地质情况，拱座基础采用扩大基础，由基础与基底的摩擦力平衡主拱肋的侧向水平推力，拱座基础设计成台阶式，与岩层紧密贴合。基础尺寸横向 23.15 m，纵向长 18 m，高 13 m。

3 静力分析

3.1 有限元模型

采用 MIDAS/Civil 建立三维杆系计算模型（见图 8），模型共 1 274 个节点、3 590 个单元。钢管砼、格子梁采用联合截面模拟，吊杆采用桁架单元模拟，其余单元采用梁单元模拟。

图 8 桥梁有限元模型

3.2 特征值计算

根据 JTG/T D65－06—2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》，拱肋所形成的结构体系需验算其稳定性。该桥稳定性验算结果见表 3，满足规范要求。

表 3 桥梁稳定性验算结果

结构状态	稳定系数	
	验算结果	规范限值
主拱肋灌注砼（未形成强度）	6.92	4
主拱肋灌注砼（砼形成强度）	11.41	4
成桥状态	5.88	4

3.3 拱肋承载能力验算

承载能力极限状态下拱肋控制截面内力及抗荷比见表 4、表 5。拱肋截面最小抗荷比产生于拱顶，为 1.49，满足规范要求。

表 4 拱肋截面内力验算结果

截面位置	最大弯矩 M_{max} 下内力		最大轴力 N_{max} 下内力	
	M/(kN·m)	N/kN	M/(kN·m)	N/kN
拱脚	9 599.8	－37 511.1	4 887.1	－38 306.7
$L/4$	－7 754.3	－13 255.4	－3 748.9	－27 992.6
拱顶	－16 646.2	－12 637.8	－8 717.6	－24 390.3

注：M_{max}、N_{max} 为绝对值最大，下同。

表 5　拱肋截面抗荷比

截面位置	抗荷比	
	最大弯矩 M_{max}	最大轴力 N_{max}
拱脚	2.12	1.49
$L/4$	3.21	2.03
拱顶	2.40	2.00

3.4　拱肋应力验算

分别计算持久状况荷载组合下拱肋控制截面应力，计算结果见表 6。

表 6　持久状况下拱肋弦杆应力值　　MPa

截面位置	钢管应力 σ_s	钢管内砼应力 σ_c
拱顶	−130.50	−14.78
$L/4$	−98.25	−10.46
拱脚	−130.40	−13.43

根据 JTG/T D65－06—2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》，拱肋采用 Q345qC 钢材，厚度 16 mm Q345qC 钢材的屈服强度 f_y 为 345 MPa。钢管应力均小于 $0.8f_y=276$ MPa，砼应力小于 $(K_1/K_2)f_{ck}=33.23$ MPa，满足规范要求。

3.5　挠度验算

主拱、桥面系在短期效应组合下消除结构自重产生的长期挠度见图 9、图 10。主拱在短期效应组合下消除结构自重产生的长期挠度为 0.118 m＜$L/1\,000=0.135$ m，桥面系挠度为 0.031 m＜$L/800=0.168$ m，均满足规范要求。

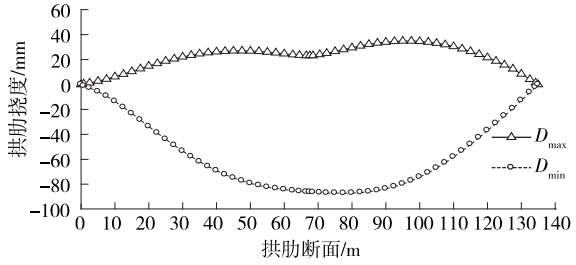

图 9　拱肋挠度曲线

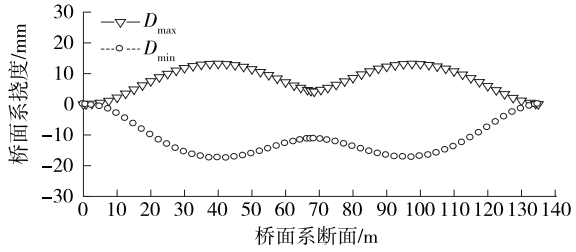

图 10　桥面系挠度曲线

4　结语

武鸣河大桥主拱计算跨径 135 m，主拱采用悬链线形，拱肋采用四肢桁式断面，拱肋截面径向高 3.2 m、横向宽 1.8 m。拱上横梁采用三角桁式断面，桥面系采用钢－砼组合梁、组合板结构。主拱肋采用双腹杆设计，桥面系采用强健性较好的整体结构，计算结果满足规范要求，结构受力可靠。桥梁结构设计合理，可为同类桥梁设计、计算提供参考。

参考文献：

[1] 陈宝春，刘君平.世界拱桥建设与技术发展综述[J].交通运输工程学报，2020，20(1)：27－41.

[2] 陈宝春，韦建刚，周俊，等.我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J].土木工程学报，2017，50(6)：50－61.

[3] 陈宝春.钢管混凝土拱桥[M].3 版.北京：人民交通出版社股份有限公司，2016.

[4] 陈宝春，范冰辉，余印根，等.钢管混凝土拱桥强健性设计[J].桥梁建设，2016，46(6)：88－93.

[5] 福州大学，中建海峡建设发展有限公司.钢管混凝土拱桥技术规范：GB 50923—2013[S].北京：中国计划出版社，2013.

[6] 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院.公路钢管混凝土拱桥设计规范：JTG/T D65－06—2015[S].北京：人民交通出版社股份有限公司，2015.

[7] 朱运宗.浅谈钢管混凝土填充灌注施工技术[J].中国高新技术企业，2015(10)：124－126.

[8] 冯明友.钢管混凝土拱桥设计[J].城市道桥与防洪，2017(11)：81－83＋11.

[9] 涂杨志.(142＋61) m 不对称跨度混合承式有推力钢管混凝土拱桥设计[J].铁道标准设计，2018，62(6)：88－92.

[10] 蔡若红.绍兴袍江大桥主桥设计[J].桥梁建设，2019，49(4)：91－95.

[11] 黄金文，梁家心，吴刚刚.钢管混凝土拱桥整体钢桥面格子梁加工技术[J].西部交通科技，2014(7)：41－43＋80.

[12] 卢小锋，田波，宋路兵，等.宜宾市金沙江南门大桥加固维修改造设计[J].西南公路，2018，147(3)：20－26＋35.

[13] 陈冠桦，邓晓红，万麟.大跨度上承式钢管混凝土拱桥设计[J].世界桥梁，2016，44(6)：7－11.

[14] 郭红雨.南村黄河特大桥主桥总体设计[J].公路与汽运，2020(2)：103－107.

[15] 陈冠桦，邓晓红，万麟.大跨度中承式钢管混凝土拱桥设计[J].公路交通科技(应用技术版)，2016(4)：195－197.

收稿日期：2021－05－10