

龙屯路立交钢管混凝土筒支系杆拱桥主桥设计研究

杜士杰¹ 宋宏祥²

(1.北京交通大学 北京 100044 2.铁道第五勘察设计院哈尔滨分院 哈尔滨 150006)

摘要:柳州龙屯路立交桥主桥结构形式为跨径92.5m下承式筒支系杆钢管混凝土拱桥,通过分析结构体系的温度敏感性,本桥接近同类结构形式的极限跨度。主要介绍该桥的结构设计和结构静力计算情况,并对结构的合理拱轴系数进行分析研究。

关键词:钢管混凝土 筒支系杆拱桥 设计

1. 概述

柳州龙屯立交主桥采用跨径92.5m下承式筒支系杆钢管混凝土拱桥,矢高19.79m,矢跨比1/4.5,拱轴线采用等截面悬链线,拱轴系数 $m=1.2$;桥面宽度为24m,吊杆采用钢丝束,间距5m;系杆采用每肋12束钢绞线成品束;下部结构采用双柱墩桩基础。如图1所示。

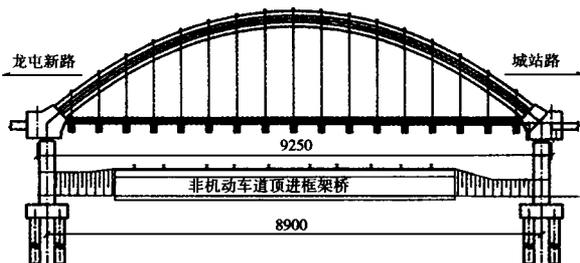


图1 拱桥立面布置(单位:cm)

此桥位于柳州站场内,桥下有7条既有股道,由西向东分别为西1线、西2线、湘桂线、车3线、安全线、车2线、车1线,西侧预留两股道,东侧预留一股道,最低轨顶面至框架顶面的距离为87.6cm,道路与铁路的交角为 $70^{\circ}11'32''$ 。与主桥同时实施的是下穿铁路的非机动车道框架桥。

2. 技术标准

道路等级:城市主干道I级。

计算行车速度:主路50km/h,辅路30km/h。

设计荷载:城-A级,人群 3.5kN/m^2 。

桥梁纵坡:0.3%。

桥面宽度:净17m+2×0.5m(防护栏)+2×3m

(检修通道),全宽24m。

设计年限:道路交通量达到饱和状态设计年限20年。

混凝土路面设计使用年限:30年。

桥下净空:跨铁路线不小于7.8m。

抗震设防要求:主桥按地震基本烈度7度设防,其余按6度考虑。

3. 桥位气象、水文及地质概况

3.1 地形、地貌

桥址处地区属柳江Ⅱ级阶地,古地貌为坡丘地形,并有零星水塘分布,后因建筑施工的填挖较为平坦,呈西高东低之势,自西向东地面高程为101.10~87.25m。在铁路线与既有南站路之间,有一古水塘的洼地,塘底高程为87.46~84.44m。

3.2 工程地质

据钻探揭示,桥址所处范围内地层主要由第四系土层和石炭系中统大埔组(C2d)白云岩组成。覆盖层多为硬塑状态土,承载力基本值较高;次生红黏土层厚达12m左右;下伏白云岩虽多见溶蚀现象,但以溶蚀蜂窝状小孔及溶蚀裂隙居多,强风化-中等风化岩层厚度12m,微风化的白云岩埋深为22m,岩石完整性较好,承载力较高。

3.3 水文地质

据钻探揭示,桥址处地下水位较浅,距地表5.5m,桥址处白云岩组较富水。因该场地地下水位浅,在基础设计时,应考虑地下水位的影响,

建议采用钻孔灌注桩进行施工。

3.4 气象

桥址所在地区属亚热带气候,年平均气温 20.5°C ,年平均风速 2.5m/s ,主导风冬季北风,夏季南风。

4. 主要材料

主拱肋弦杆及腹板内灌注C50混凝土,中横梁及端横梁采用C50混凝土,预制桥面板采用C40混凝土,桥面板现浇层采用C40铣削钢纤维混凝土,桥面板现浇层钢纤维采用Ⅲ型(剪切型)钢纤维,钢纤维长度 $25\sim 50\text{mm}$,直径(等效直径) $0.3\sim 0.8\text{mm}$,长径比 $40\sim 100$ 。主拱肋弦杆、腹板采用Q345qc钢材,钢管横撑均采用Q235qc。

5. 结构设计

5.1 钢管混凝土拱肋

拱肋共2片,其截面为哑铃形,由上、下钢管与连接两钢管的钢腹板构成,截面总高度 2.2m ,钢管直径为 900mm ,厚 20mm ,材质Q345q,在钢管中每隔 $3.6\sim 3.8\text{m}$ 设置一道角钢加劲箍,以增加钢管的刚度。钢管内填充C50微胀混凝土,待混凝土达到设计强度后形成钢管混凝土组合结构材料,共同承担桥梁荷载。

上、下钢管间用厚度 12mm 的16Mn钢板连接,腹板内灌注C50微胀混凝土。在吊杆处用隔板对腹板进行加劲。

5.2 吊杆

每边拱肋设17根吊杆,吊杆间距为 5.0m ,每根吊杆采用PE热挤镀锌高强钢丝PES(C)7-91/139,钢丝的标准强度为 1670MPa 。吊杆锚头采用OVMSD(K)7-91型锚具。

5.3 系杆

每片拱肋下设4束钢绞线成品拉索体系,外包双层HDPE防护,系杆采用平行钢绞线索,钢绞线的标准强度为 1860MPa ,两端配备OVMXG.T15-19可换索式锚具。

5.4 桥面结构

桥面结构由预应力混凝土横梁、钢筋混凝土桥面板组成。预应力混凝土横梁采用工形截面,跨中梁高 1.83m 。钢筋混凝土桥面板预制板采用 $5.85\text{m}\times 4.5\text{m}\times 0.24\text{m}$,桥面纵横湿接缝宽度为 0.5

m ,预制板上现浇C40铣削钢纤维混凝土厚 8cm ,采用888-1防水层,行车道桥面沥青混凝土铺装厚 8cm 。桥面板采用先简支后连续体系。在端横梁处桥面板与横梁固接。中横梁及端横梁均为预应力混凝土结构。

5.5 风撑

两拱肋间对称设2道K形横撑,在跨中拱顶设米字横撑,以增加横向稳定。横撑采用2根直径 $600\text{mm}\times 16\text{mm}$ 钢管,斜撑采用两根直径 $500\text{mm}\times 14\text{mm}$ 钢管,考虑两钢管间距较小,仅设直径 $299\text{mm}\times 8\text{mm}$ 直腹钢管。直腹杆间距 2m 。

5.6 中横梁

中横梁采用C50预应力混凝土工形梁,梁高 1.7m ,上翼缘宽 1.2m ,下翼缘宽 1.0m ,腹板厚度 0.5m ,吊杆左右各 1m 范围采用矩形断面。

5.7 端横梁

端横梁采用梁高 3.1m 、宽 4.7m 的矩形预应力混凝土梁,能为拱肋提供较大的横向刚度,见图2。系杆在拱脚段的布置见图3。

6. 结构计算

对柔性系杆刚性拱桥计算分析做了如下的基本假定:

(1) 系杆只承受拱肋的推力。即截面中只有拉力;

(2) 拱肋作为主要承重构件,由于其刚度比系杆大得多,其截面承受弯矩、轴力和剪力;

(3) 尽管桥面板与端横梁通过湿接缝固结了,并布置了部分纵向预应力筋,但桥面系刚度不参与系杆作用;

(4) 在应用平面杆系有限元程序求解时,计算图式为一带拉杆的两铰拱,所有吊杆均视做链杆;

(5) 钢管混凝土柔性系杆简支拱在施工时需不断张拉系杆来平衡恒载的作用,本桥设计考虑不平衡力小于 500kN 。

6.1 拱肋拱轴系数的确定

悬链线拱拱轴系数 m 是根据实腹拱的恒载分布推导出来的,其压力线与拱轴线可以达到完全吻合。但对于空腹式拱桥其恒载分布是不规律的,通过各种线型方案的比较,一般情况下仍以悬链线为优,在求空腹式悬链线拱的 m 系数时,

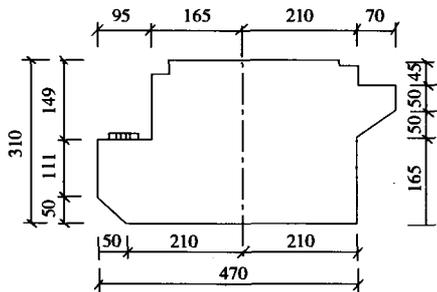


图2 端横梁跨中截面 (单位: cm)

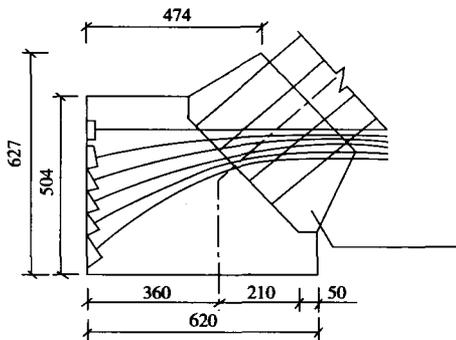


图3 端横梁端部截面 (单位: cm)

要求主拱圈的5个控制截面,即拱顶、两拱脚和两个四分点达到压力线与拱轴线必须重合,这样可保证各拱圈截面不产生过大的弯矩峰值。设计中,根据恒载分布情况,m取值范围1.1~2.0,对柔性系杆拱的拱轴系数进行了分析比较,钢管混凝土拱肋钢管上下缘应力与m的关系见图4和图5,可得出结论:m值小于1.4时,拱的上下缘应力分布比较合理。设计取用了拱轴系数1.2。

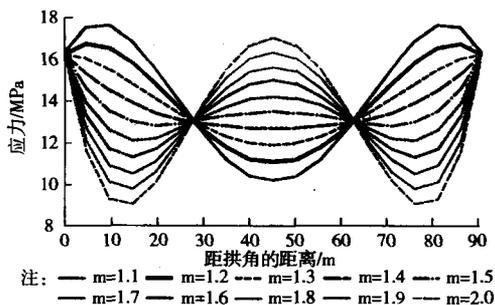


图4 不同拱轴系数时拱肋钢管上缘应力分布

6.2 计算内容

利用桥梁结构有限元分析软件GQJS对主桥的各施工阶段进行了计算分析,主要包括结构形变分析;控制截面结构应变应力及内力计算;吊杆和系杆内力计算;支座反力。

6.3 计算模型

有限元计算模型、单元划分及主要控制节点如

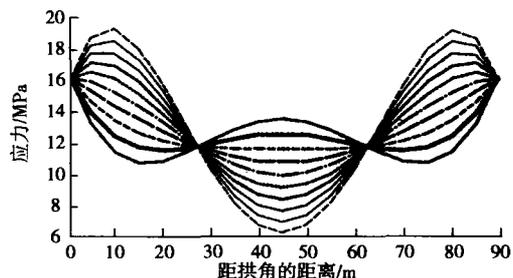


图5 不同拱轴系数时拱肋钢管下缘应力分布

图6所示,图中圆圈内数字表示吊杆单元编号,其他数字表示控制节点编号,控制节点坐标见表1。

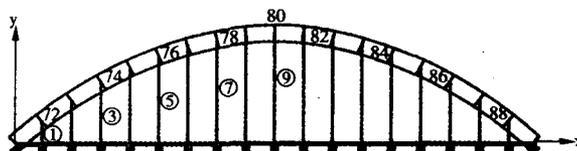


图6 柳州龙屯立交主桥有限元计算模型

主要控制点水平坐标 表1

节点	72	74	76	78	80	82	84	86	88
x坐标/m	4.5	14.5	24.5	34.5	44.5	54.5	64.5	74.5	84.5

6.4 参数取值

柳州龙屯立交主桥主要计算参数取值情况见表2。

6.5 截荷情况

除钢管拱肋、管内混凝土和桥面板自身重量由程序自动计算外,13cm厚桥面混凝土、沥青混凝土和防撞墙等二期恒载按均匀荷载加载。

6.6 施工阶段划分情况 (表3)

6.7 结果分析

(1) 在施工过程中,柳州龙屯立交主桥拱肋钢管所受到的应力最大值为100MPa左右,混凝土压应力最大值为14MPa左右。混凝土的拉应力最大值将在浇筑拱肋内混凝土时出现,此时是施工中最关键的阶段,需要特别注意,应加强应力的监测。

(2) 浇筑下拱肋混凝土是整个施工过程中拱肋纵向水平位移和铅垂位移最大的阶段,要加强变形观测,并与应力测量结果一起进行施工状态的分析。

(3) 系杆和桥面钢束与管道之间的摩擦系数是影响拱肋应力储备和挠度的关键因素之一,本计算取值为0.35,成桥时,拱顶将有7cm左右的挠度。摩擦系数的实际值需要在获得各阶段应力和挠度以及系杆的拉力测试结果后,通过反算求取,并用于调整后续施工阶段的计算结果。

柳州龙屯立交桥主要计算参数取值

表2

名称	弹性模量/Pa	质量密度/(kg/m ³)	长度重量/(kN/m)	单肋截面积/m ²	单肋截面惯性矩/m ⁴	单肋重量/kN	备注
钢管拱肋	2.06E11	7850		0.1503	0.1448	1 190	自重由程序自动计算
管内混凝土	3.55E10	2500		1.7654	1.4142	4400	自重由程序自动计算
钢管横撑等						600	按1200kN计, 均布荷载
桥面板	3.55E10	2650				8 050	桥面板厚29cm, 自重由程序自动计算
桥面混凝土	3.55E10	2650	82.68			3 680	桥面混凝土厚13cm以均布荷载加载
中横梁	3.55E10	2650				7 170	海根中横梁重843kN程序自动计算
沥青混凝土		2300	36.8				以均布荷载加载
防撞墙			15				以均布荷载加载
沥青混凝土和防撞墙等			60			2700	含路灯等设施重量
吊杆	1.90E11	7850					A类139-47, BC类91-47
系杆	1.90E11	7850					19-745
合计						29700	

施工阶段划分情况

表3

计算阶段	阶段施工内容	计算阶段	阶段施工内容
1	吊装第1节段拱肋	2	吊装第2节段拱肋
3	吊装第3节段拱肋, 合龙	4	连接横撑, 形成无铰拱
5	简支体系(拆除临时支撑), 张拉系杆P1-1, 1111kN	6	浇筑拱肋内一半混凝土
7	张拉系杆P2-1, 1149kN	8	浇筑拱肋内另外一半混凝土
9	张拉系杆P1-2, 1133kN, P2-2, 1073kN	10	安装吊杆D9和中横梁
11	张拉系杆P1-3, 460kN	12	安装吊杆D5、D13和中横梁
13	张拉系杆P2-3, 690kN	14	安装吊杆D7、D11和中横梁
15	张拉系杆P1-4, 836kN	16	安装吊杆D3、D15和中横梁
17	张拉系杆P2-4, 446kN	18	安装吊杆D8、D10和中横梁
19	张拉系杆P1-5, 809 kN	20	安装吊杆D6、D12和中横梁
21	张拉系杆P2-5, 539kN	22	安装吊杆D4、D14和中横梁
23	张拉系杆P1-6, 509kN	24	安装吊杆D1、D2、D16、D17和中横梁
25	张拉系杆P1-2, 632kN, 合计1765kN	26	安装1/3桥面板(施加等代集中荷载)
27	张拉系杆P2-1, 741kN, 合计1890kN 张拉系杆P2-5, 1057kN, 合计1596kN	28	安装1/3桥面板(施加等代集中荷载)
29	张拉系杆P1-1, 779kN, 合计1890kN 张拉系杆P1-6, 998, 合计1508kN	30	安装1/3桥面板, 张拉钢束(5束)
31	张拉系杆P2-2, 692kN, 合计1765kN 张拉系杆P2-3, 1 012kN, 合计1702kN	32	浇筑中间29m段13cm桥面混凝土, 以81.12kN/m均布荷载加载
33	张拉系杆P1-3, 1242kN, 合计1702kN	34	浇筑13cm桥面混凝土剩余段(两端各30m), 以81.12kN/m均布荷载加载
35	张拉系杆P2-4, 1204kN, 合计1650kN	36	浇筑中间29m段沥青混凝土和防撞墙等, 以60kN/m均布荷载加载
37	张拉系杆P1-4, 814kN, 合计1650kN	38	浇筑剩余段(两端各30m)沥青混凝土和防撞墙等, 以60kN/m均布荷载加载
39	张拉系杆P1-5, 787kN, 合计1 596kN	40	3个月徐变

(4) 由于结构体系敏感, 考虑尽可能地减少系杆的反复张拉次数, 设计时根据加载情况, 仔细划分了施工阶段。

7. 结语

(1) 本桥设计的最大特点是采用柔性系杆, 桥面板与端横梁固结, 桥面板设计采用部分预应力混凝土结构, 可有效降低结构对温度的敏感性。钢绞线系杆在温度变化时, 系杆内的永存应力发生变化, 使拱桥的水平推力发生变化。桥面板内布置的预应力钢绞线应力随温度变化要小, 可使桥面板始终处于受压状态。另外, 桥面板与端横梁固结, 增加了结构的整体性。

(2) 由于钢管混凝土在作为柱子时是纯受压的状态, 混凝土的套箍作用明显。钢管混凝土作为拱肋, 是压弯构件, 在弹性设计阶段, 套箍作

用不明显, 不能充分发挥钢管混凝土的优点。一般仍采用钢筋混凝土拱肋设计原理来设计。

(3) 本设计采用了6层系杆, 施工时发现张拉顺序应先行张拉顶层系杆, 否则上面的系杆会压着下层系杆, 影响系杆力的准确施加。

(4) 本桥宽24m, 施工监测发现日照温差明显, 南侧的拱肋在日照的影响下活动端的水平位移值较北侧拱肋大10mm, 结构的4个支点呈梯形布置。

参考文献

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000
- [2] 孙潮, 陈宝春, 张伟中, 等. 钢管混凝土拱梁组合桥拱脚节点应力分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 195-200.
- [3] 颜全胜, 徐升桥. 大跨度钢管混凝土拱桥的稳定承载力分析[J]. 铁道标准设计, 2003(7).
- [4] 李宏江, 朱才明, 于刚勤, 等. 钢管混凝土柔性系杆拱桥施工阶段的静力计算分析[J]. 铁道标准设计, 2005(5).
- [5] 公路桥涵设计规范(合订本)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [6] 李志能. 钢管混凝土系杆拱桥设计及施工的几点看法[J]. 公路, 1995(4).