

700 m级钢管混凝土拱桥设计与建造可行性研究

郑皆连¹, 王建军², 牟廷敏³, 冯智², 韩玉², 秦大燕²

(1. 广西壮族自治区交通运输厅, 南宁 530012; 2. 广西壮族自治区公路桥梁工程总公司, 南宁 530011;
3. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 成都 610041)

[摘要] 以500 m级钢管混凝土拱桥的设计和成套施工技术为基础,对700 m级钢管混凝土拱桥的设计和建造技术进行可行性研究,确定总体设计和施工方案,较为详细地研究了拱肋制造和安装、管内混凝土灌注等关键技术。研究表明,建造700 m级的钢管混凝土拱桥已不存在技术门槛,综合考虑经济、安全等因素,是该跨径级别的强力竞争桥型之一,应尽早进行工程实践和推广。

[关键词] 桥梁工程;700 m跨径级别;钢管混凝土拱桥;设计;建造

[中图分类号] U442.1;U445.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)08-0033-05

1 前言

特大跨径钢管混凝土拱桥具有造价低廉、施工快速、后期维护费用低、抗风抗震性能好等优点。2013年建成的主跨530 m世界最大跨径钢管混凝土拱桥——合江长江一桥(波司登大桥),解决了大跨径钢管混凝土拱桥设计中的关键问题,积累了真空灌注钢管内混凝土、主拱桁高精度制造、斜拉扣挂安装等施工经验,形成了500 m级钢管混凝土拱桥的成套施工技术,并且其工程造价相比同桥址悬索桥比较方案节约达9 200多万元,比同属沪渝高速公路的另一座跨长江的斜拉桥少1.1亿元,经济性非常显著,随着跨径的增大,钢管混凝土拱桥的经济优势更大,因此开展更大跨径钢管混凝土拱桥的可行性研究十分必要。

2 试设计

2.1 总体设计

以四川某高速公路的一处桥位为背景,开展

700 m级钢管混凝土拱桥的试设计。

根据地形地质情况,主孔净跨径设计为650 m,全桥跨径组合为32 m×21 m,全桥长为693 m;主跨主拱为钢管混凝土桁式结构;桥面主梁为“工”型格子梁,格子梁上设置为钢-混凝土组合桥面板,主桥吊杆采用环氧喷涂钢绞线,吊杆间距为21 m。桥跨总体布置图见图1。

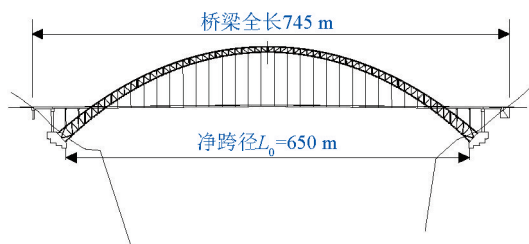


图1 桥跨总体布置图

Fig. 1 General span arrangement

2.2 主拱设计

主孔净跨径为650 m的悬链线主拱,净矢跨比

[收稿日期] 2014-04-27

[作者简介] 郑皆连,1941年出生,男,四川内江市人,中国工程院院士,研究方向为大跨径拱桥;E-mail: zhengjielien@163.com

为1/4,拱轴系数为1.75,拱脚截面高为20.0 m,拱顶截面高为10.0 m。主拱每肋为桁式矩形截面,主拱上下弦杆采用1 500 mm×28 mm的钢管,拱脚下弦段采用1 500 mm×34 mm的钢管,主拱上下弦钢管内灌注C80自密实高性能混凝土;腹杆采用750 mm×16 mm的钢管,腹杆与弦管采用相贯焊缝连接。拱上吊杆和立柱间距均为21.0 m。拱肋中距为29.0 m。两肋间桥面上的拱桁上弦平面设置“K”形钢管横撑,每根吊杆处设置竖向钢管桁架横撑,桥面以下的拱脚段设置径向钢管混凝土桁架横撑。主拱弦管和腹管采用Q345钢材。

桥面梁由两道主纵梁(靠近吊杆处)、三道次纵梁、吊杆处主横梁、吊杆主横梁间设置的四道次横梁组成格子桥面梁;主、次纵横梁均采用“工”形截面。格子梁上桥面板采用钢-混凝土组合结构,桥面底面钢板厚8 mm,桥面板总体厚度为15 cm,桥面铺装为5 cm厚的改性沥青混凝土。

桥梁格子梁的受力钢结构、主拱弦管和腹管采用Q345钢材。

两岸的拱座设计为分离式的钢筋混凝土拱座,基础置于稳定的、完整的弱风化基岩上,要求地基允许应力不小于2.8 MPa。引桥和桥台基础置于完整的基础上,要求地基容许应力大于0.6 MPa。

主拱钢管在工厂加工完成后运至工地,采用斜拉扣挂法安装合龙成拱,安装体系由扣索体系和吊装体系组成,其中扣索体系由锚固点、索鞍、扣塔、张拉端及扣索五大结构部分组成。主拱钢管内C80混凝土采用抽真空辅助灌注工艺完成。

2.3 主拱计算

1)静力计算成果。钢管混凝土承载能力计算,按内力叠加法计算主拱桁单肢柱内力及承载力计算成果如表1所示(最不利荷载组合)。

按照单肢主拱和桁式主拱分别进行截面抗力计算,按照交通运输部《公路钢管混凝土桥梁设计细则》(报批稿)进行承载力验算,表明单肢主拱和桁式主拱最小极限承载力安全系数为1.27。按照交通运输部《公路钢管混凝土桥梁设计细则》(报批稿)的应力法验算,钢管混凝土的最大应力为49.7 MPa,小于容许值65.3 MPa,同时,腹管等钢结构最大应力为169 MPa,满足Q345钢材容许应力要求。

2)稳定计算成果。主桥主拱一阶弹性稳定安全系数为5.77,为侧向整体失稳;主桥主拱一阶双重

表1 主拱内力表

Table 1 Inner forces of main arch ribs

截面	位置	内力类别	恒载	持久极限组合
拱脚	上弦	$N_{\max}(\times 10^3 \text{ kN})$	141	237
		$M(\text{kN}\cdot\text{m})$	-2.630	-9.447
	下弦	$N_{\max}(\times 10^3 \text{ kN})$	163	259
		$M(\text{kN}\cdot\text{m})$	-6.075	-13.180
1/4L	上弦	$N_{\max}(\times 10^3 \text{ kN})$	112	175
		$M(\text{kN}\cdot\text{m})$	-1.570	-2.820
	下弦	$N_{\max}(\times 10^3 \text{ kN})$	147	226
		$M(\text{kN}\cdot\text{m})$	-0.940	-4.240
拱顶	上弦	$N_{\max}(\times 10^3 \text{ kN})$	158	249
		$M(\text{kN}\cdot\text{m})$	3.728	7.060
		$N_{\max}(\times 10^3 \text{ kN})$	72	131
		$M(\text{kN}\cdot\text{m})$	2.656	6.629

非线性稳定安全系数为2.07,为侧向整体失稳。局部构件失稳的弹性稳定安全系数为12.43,为第九阶。

3)动力性能。全桥动力性能,主梁第一阶自震频率为0.12 Hz,如果设置纵向阻尼器,主梁第一阶自震频率达0.23 Hz。主拱第一阶自震频率为0.18 Hz。

3 关键施工技术

3.1 拱桁加工制造

700 m级钢管混凝土拱桥试设计与500 m级合江长江一桥相比较,弦杆钢管直径由1 320 mm增大至1 500 mm,钢管的最大壁厚(34 mm)并未增加,拱桁制造难度没有明显增加,现有的钢管构件的制造工艺是满足要求的。

700 m级钢管拱的拱桁截面高度由16 m增加至20 m,可能会增加立式拼装制作的难度,但从合江长江一桥的制造经验来看(见图2、图3),拱肋卧拼制作精度只要达到一定范围内,可不立拼,合江长江一桥1/3拱桁节段只卧拼,完全满足了安装合龙的需要,因此700 m级钢管拱的拱桁制造采用卧拼就可以了。

3.2 拱桁安装

3.2.1 拱桁吊装

通过合江长江一桥的实践,200 t级的缆索吊机实现了500 m级钢管混凝土拱桥的缆索吊装施工,如要实现700 m级钢管混凝土拱桥的缆索吊装施工,可以采取两种方式,一种是增多拱桁安装节段数量,另一种是增大缆索吊机的吊重能力。



图2 拱桁立式拼装

Fig. 2 Vertical assembly of arch trusses



图3 拱桁卧式拼装

Fig. 3 Horizontal assembly of arch trusses

从国内桥梁施工的应用来看,缆索吊机不论是增大索跨还是增大吊重能力均是可行的。例如,重庆鹅公岩长江大桥(悬索桥)安装加劲梁的缆索吊机,工作索跨600 m,吊重3 000 kN;四渡河大桥(悬索桥)安装加劲梁的缆索吊机,索跨900 m,吊重1 000 kN;宁波明州大桥(钢箱拱),缆索吊机索跨450 m,吊重4 000 kN。但因700 m级钢管混凝土拱桥的工作索跨度很大,增大缆索吊机的吊重能力会对缆索系统提出更高的要求,因此建议以增加拱桁安装节段数量为主,适当考虑增大缆索吊机的吊重能力。

通过增加拱桁安装节段数量,将拱桁节段质量控制控制在2 000 kN以内,那么,目前2 000 kN级缆索吊机仅是工作索跨的增大,700 m级钢管混凝土拱桥的缆索吊机的工作索跨预计在800 m左右即可满足要求,在合江长江一桥缆索吊机的基础上,再增加4根主索基本可以满足要求,经济性较优。

笔者首创的钢绞线斜拉扣挂合龙索索技术,通

过千斤顶张拉和放松很容易实现对扣索力的调整,从而实现对拱肋安装标高的调整,并且可以实现无应力状态下合龙,使合龙的难度与拱肋分段吊装的段数无关^[1]。从目前的实践来看,拱桁段数增多,并未造成任何对施工和安装质量的影响,巫山长江大桥,拱桁(单肋吊装)共分22段,单段最大质量1 280 kN;合江长江一桥,拱桁(单肋吊装)共分18段,单段最大质量1 940 kN;云桂铁路南盘江特大桥的钢管混凝土劲性骨架(见图4),拱桁(双肋吊装)共分38段,单段最大质量1 300 kN,均实现了拱桁高精度合龙。



图4 云桂铁路南盘江特大桥的钢管混凝土劲性骨架

Fig. 4 Concrete filled steel tubular (CFST) stiff skeleton of Nanpan River Bridge on Yungui Railway

经试设计估算,700 m级钢管混凝土拱桥拱桁钢结构约12 000 t,拱桁(单肋吊装)分32节段,可控制单段最大质量在2 000 kN以内。

3.2.2 扣塔和吊塔设计

随着拱桁跨度的增大,斜拉扣挂体系扣塔的高度也可能会增大,特别是受地形条件的影响,会造成塔架系统的高度较高,不利于缆索吊机的布置,解决该问题可以采用吊扣合一的方式。从试设计的情况来看,合理的地形条件下,并不会引起塔架系统的明显增高,合江长江一桥的塔架系统总高约180 m,该高度也基本满足前面试设计的700 m级拱桁安装的施工。

吊塔与扣塔合一的方式通常有两种,一种是将吊塔置于扣塔顶部,吊塔塔脚为铰结,需要在扣塔顶部设置钢梁来支承吊塔塔脚,如合江长江一桥的方式。另一种方式是将扣塔直接加高,将缆索吊机的索鞍布置于扣塔顶部,如南宁大桥的方式(见图5)。两种方式都具有可行性。



图5 南宁大桥“吊扣合一”塔架

Fig. 5 Hoisting-staying integrated tower of Nanning Bridge

3.3 拱肋管内混凝土灌注

合江长江一桥500 m级钢管混凝土拱桥的单根钢管混凝土约800 m³,拱桁净矢高111 m,采用三级连续真空辅助泵送(抽真空设备为4台2BEA-252型水环式真空泵),其选用的混凝土泵机为三一HBT80泵,输送压力高压为16 MPa,理论高压输送量为45 m³/h,共灌注约12 h,实际泵机的平均每小时输送量约为30.8 m³,其工作效率约为0.685。

试设计的700 m级钢管混凝土拱桥的单根钢管混凝土约1 300 m³,拱桁净矢高162.5 m。如选用三一HBT120混凝土输送泵,基本能满足分级连续顶升灌注的要求,该输送泵输入压力高压为21 MPa,理论高压输送量为75 m³/h,考虑工作效率为0.65,单台泵机的有效输送能力约为49 m³/h,两台泵机两岸对称泵送,1 300 m³混凝土约13 h即可灌注完成。用笔者首创的技术^[2],扣挂在拱骨架1/6跨径附近的两组拉力随管内混凝土浇注过程而变化的斜拉索调载,就能把钢管拱骨架在施工中应力和变形控制在预设范围内。

施工上仍采用真空辅助分级连续灌注工艺,抽真空设备只需增加1~2台同类型真空泵即可;分级上可以按混凝土供应能力、泵送能力、缓凝时间、运输能力等综合考虑,采用三级或四级泵送即可完成。

4 结语

在500 m级钢管混凝土拱桥——合江长江一桥的设计和建造基础上,对700 m级钢管混凝土拱桥的设计和建造进行了可行性研究,得到如下结论。

1)在实际桥位上按照现场地形和地质情况试设计的700 m级钢管混凝土拱桥,其静力、动力和稳定性都满足规范的要求。

2)700 m级钢管混凝土拱桥的拱桁制造仍可通过现有工艺完成,难度没有明显增加,卧拼工艺可以达到规范规定的安装精度要求。

3)通过增加拱桁安装节段数量的方式控制吊重,结合钢绞线斜拉扣挂合龙索技术,以现有的工艺即可完成拱桁吊运及悬拼施工并达到相应的精度控制要求。

4)扣塔和吊塔设计为吊扣合一的方式,既具有较高的经济性,也具有可行性,用合江长江一桥开发使用的摇臂抱杆系统安、拆高塔既方便又经济。

5)采用真空辅助分级连续灌注管内混凝土工艺,可以高质、快速地完成700 m级钢管混凝土拱桥拱肋管内混凝土灌注,利用不断变换索力的斜拉扣索调载,可以把从拱脚至拱顶连续灌注管内混凝土产生的瞬时应力和变形控制在安全范围内。

以500 m级钢管混凝土拱桥的设计与建造技术为基础,进行适度的改造和深化,将之应用到700 m级钢管混凝土拱桥的建设中去,不会有大的技术门槛。考虑到在良好地质或山岭重丘地区修建拱桥的巨大经济优势,应尽早进行700 m级钢管混凝土拱桥的工程实践和推广,为该跨径级别的桥梁修建提供更多、更好的选择。

参考文献

- [1] 郑皆连. 特大跨径RC拱桥悬拼合拢技术的探讨[J]. 中国公路学报,1999(1):42-49.
- [2] 郑皆连. 在劲性拱骨架上实现混凝土连续浇注的探讨[J]. 重庆交通大学学报自然科学版,2011,30(s2):1009-1016.

Feasibility study on design and construction of concrete filled steel tubular arch bridge with a span of 700 m

Zheng Jielian¹, Wang Jianjun², Mou Tingmin³,
Feng Zhi², Han Yu², Qin Dayan²

(1. Guangxi Zhuang Autonomous Region Transportation Department, Nanning 530012, China; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Road and Bridge Engineering Company, Nanning 530011, China; 3. Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Chengdu 610041, China)

[Abstract] Based on the design and complete construction techniques of 500 m-span concrete filled steel tubular (CFST) arch bridge, a feasibility study on design and construction techniques of 700 m-span CFST arch bridge was conducted. The general design and construction schemes were figured out, and key techniques were detailed studied such as manufactory and installation of arch ribs, concrete grouting in tube, etc. The results showed that there are no technical hurdles to build 700 m-span CFST arch bridges. Considering economical efficiency, safety and other factors, CFST arch bridge is a strong competitor when building a 700 m-span bridge and should be put on engineering practice and spread as soon as possible.

[Key words] bridge engineering; the span of 700 m grade; CFST arch bridge; design; construction