

DOI: 10.7672/sgjs2022060001

# 新建川藏铁路拉林段藏木雅鲁藏布江 特大桥施工关键技术\*

周文<sup>1,2</sup>, 朱志钢<sup>2</sup>

(1.中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075; 2.中铁广州工程局集团有限公司, 广东广州 511457)

[摘要] 新建川藏铁路拉林段藏木雅鲁藏布江特大桥位于西藏桑加峡谷内, 峡谷内有达12级大风, 昼夜温差大, 两侧山势陡峭, 山体表面为强风化花岗岩, 桥下为水深达66m的雅鲁藏布江, 施工环境和地质条件差。针对本桥施工环境艰险恶劣、无施工场地及拱肋吊重大等困难, 研究拱座基础、钢管拱肋、钢管混凝土及混凝土主梁等施工关键技术, 解决了高原峡谷、陡峭地形等艰险受限条件下的铁路430m跨中承式提篮钢管混凝土拱桥施工难题, 总结了创新技术。

[关键词] 桥梁工程; 钢管混凝土拱桥; 高原峡谷; 拱座基础; 钢管拱肋; 施工技术

[中图分类号] U445.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2022)06-0001-08

## Key Construction Technology of Zangmu Yarlung Zangbo River Bridge in Lalin Section of New Sichuan-Tibet Railway

ZHOU Wen<sup>1,2</sup>, ZHU Zhigang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

2. China Railway Guangzhou Engineering Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511457, China)

**Abstract:** The new Lalin section of Sichuan-Tibet Railway is located in Sangjia Canyon of Tibet. There is a strong wind of force 12 in the canyon, with large temperature difference between day and night, steep mountains on both sides, strongly weathered granite on the surface of the mountain, and Yarlung Zangbo River with a water depth of 66m under the bridge. The construction environment and geological conditions are poor. In view of the difficult and dangerous construction environment, no construction site and major difficulties of arch rib hoisting of the bridge, this paper studies the key construction technologies such as arch seat foundation, steel pipe arch rib erection, concrete-filled steel pipe jacking and concrete box girder, which solves the construction problems of the concrete-filled steel tube arch bridge with 430m long-span half through basket under the difficult and limited conditions such as plateau canyon and steep terrain, and summarizes the innovative technologies.

**Keywords:** bridges; concrete-filled steel tube arch bridges; plateau canyon; arch seat foundation; steel pipe arch rib; construction

### 1 工程概况

藏木雅鲁藏布江双线特大桥(以下简称“藏木特大桥”)位于西藏自治区加查县桑加峡谷内, 为新建川藏铁路拉萨—林芝段的重要控制性工程。藏

木特大桥为中承式提篮钢管混凝土拱桥, 主跨为430m, 矢高112m, 矢跨比1:3.84, 拱肋结构采用悬链线形式, 拱轴系数2.1、内倾角4.609 1°。藏木特大桥桥式布置如图1所示。

除拉萨岸拱座右幅基础采用斜向整体嵌固式基础外, 其余拱座基础均采用斜、竖桩基础。0号台及1, 2号墩设计为桩+承台基础, 3号台不设置基础。0号台采用双线T形空心桥台, 1, 2号墩采用混凝土圆端形墩身, 3号台伸入隧道内其台座与隧道

\* 中国铁路总公司科技研究开发计划课题: 桥梁工程建设技术研究——拉林铁路重点桥隧工程建造关键技术研究(2017G006-B); 中国中铁股份有限公司科技开发计划课题: 拉林铁路藏木雅鲁藏布江特大桥430m中承式钢管拱桥施工技术研究(2016-重点-03)  
[作者简介] 周文, 教授级高级工程师, E-mail: wzhou33@163.com  
[收稿日期] 2021-08-21

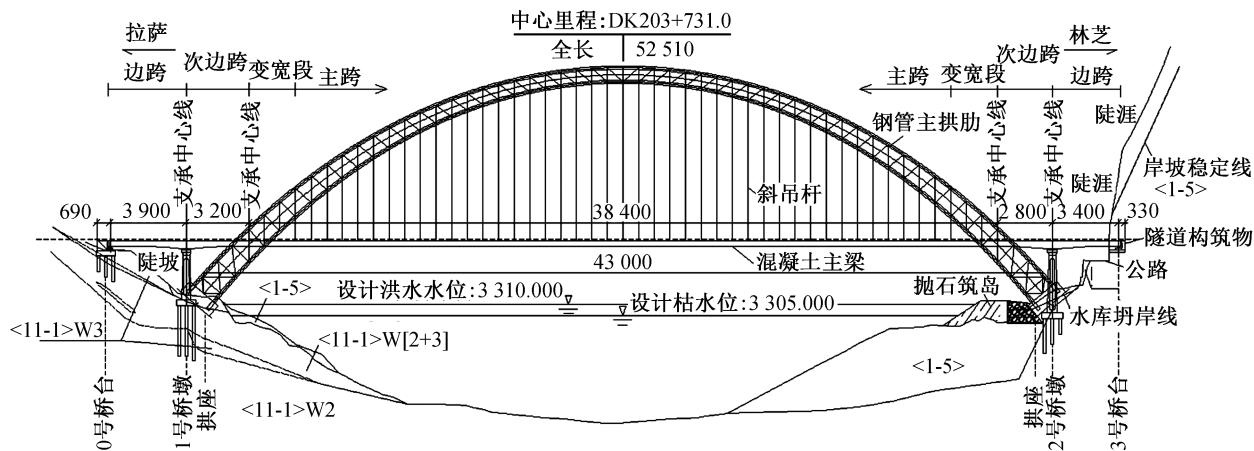


图1 藏木特大桥桥式布置(单位:cm)

底板连为一体。

拱肋由下而上采用 1.8~1.6m 变管径、52~24mm 变厚度的耐候钢管,4 肢桁式变桁高截面,每隔 8m 设平联杆横向连接,上下钢管组合截面按悬链线方程变高度设计,拱顶和拱脚桁高分别为 8.8,15m,拱肋在拱顶中心距为 7m,拱脚中心距为 25m。全拱分 56 个拱肋节段、2 个合龙段、2 个支撑横梁及多种“—”“N”“K”及“米”字形相结合的横撑等,最大节段吊重 250t。

其主梁为单箱双室、斜腹板截面的预应力混凝土连续箱梁,全长 518.8m。其主跨为等截面箱梁,梁高 3m,顶板宽 18m,底板宽 12m;边跨及次边跨为变截面箱梁,梁底按二次抛物线变化,顶板宽 12m,底板宽 5.816~6.4m;主跨从中支点起 23.55m 范围为变宽度箱梁,顶板和底板宽均呈线性变化。梁体支座及吊杆横梁处设横隔板。

吊杆采用无黏结的平行环氧喷涂钢绞线;全桥对称设置 43 对吊杆,顺桥向设置间距为 8m。

桥址位于藏木水电站大坝上游 1.2km 位置,跨越水深达 66m 的藏木雅鲁藏布江,桥下水流湍急,河床下切较深,两岸地形复杂,山体花岗岩风化严重且破碎,多向顺层卸荷裂隙发育,多条宽大冲沟深切谷底。拉萨岸拱座左幅位于雅鲁藏布江中,且水下边坡陡斜;拱座右幅斜向嵌固式基础位于裂隙发育的山体花岗岩内。林芝岸拱座位于填石筑岛区,基岩裂隙发育。

桥位处风向多与河谷走向一致,10 月下旬至次年 5 月为大风季节,一般每天 14:00 开始,风力平均 8~9 级,最大可达 11~12 级。桥址区降雨量为 450~1 000mm,大部分集中在 5—10 月,尤以 7—8 月为甚,当年 9 月至次年 4 月为旱季。年平均气温 9.3℃,极端最低温度 -12℃,存在年温差小而日温

差大、阴坡与阳坡温差较大特点。

## 2 施工难点

1) 拱座基础施工难度大 拉萨岸拱座左幅基础位于水下,岩质边坡陡峭,且在水电站库区不能放坡筑岛做施工场地,施工困难;右幅整体嵌固式基础斜向角度大,断面大,基岩裂隙发育,渗水严重;林芝侧拱座位于隧道洞渣筑岛区域,且下部基岩裂隙发育,基坑开挖防水困难;直径 2.8m 桩基础下部基岩为完整微风化花岗岩,施工非常困难。

2) 钢管拱肋施工难度大 桥址位于峡谷内,无拱肋制造拼装场地,且每天下午有 8 级左右大风,最大可达 11~12 级,昼夜温差大,最大约 30℃。在高原地区艰险地形,恶劣气候工况下施工大跨度提篮拱桥拱肋难度大,且架设线形控制尤为困难。

3) 钢管混凝土施工难度大 拱肋钢管混凝土为 C60,钢管直径为 1.8~1.6m,顶升高度和跨度分别为 112,210m,单根钢管混凝土方量约为 1 022m<sup>3</sup>,管内设置内法兰和剪力钉,高原存在材料缺乏、品质差,设备降效严重、施工场地狭小等状况,在高原地区一次顶升超千方高强度高性能混凝土的难度非常大,且防止管壁脱粘也非常重要。

4) 主梁现浇施工难度大 主跨混凝土箱梁分节段悬浇,最大质量为 300t。其现浇挂篮要利用永久吊杆作为承力结构,吊杆上部锚固在呈提篮状的钢管拱肋上,其空间角度均在变化,使箱梁悬浇挂篮施工和线形控制困难。变宽段箱梁面积大、方量大,且要一次浇筑完成,施工难度大。

针对藏木特大桥施工难点,开展了多项课题研究,实施取得良好效果。本文分别对本桥的拱座基础、钢管拱肋、钢管混凝土、混凝土主梁等施工中的关键技术进行介绍。

### 3 拱座基础施工

#### 3.1 水下陡峭边坡筑岛施工技术

拉萨岸拱座右幅基础在常水位以下,水下边坡陡峭,不能自然放坡筑岛作为施工平台。经研究,用隧道开挖的洞碴进行小范围筑岛,同时用地质钻机配钢套管垂直钻入陡峭边坡的基岩以下2m,将钢套管保留在基岩内,插入4根直径32mm通长钢筋,高压注入水泥-水玻璃双液浆,形成小型复合桩抵抗新填筑的岛体下滑。重复向外侧填筑洞碴、施工小型复合桩至完成整个筑岛平台。

#### 3.2 大直径挖孔桩施工技术

两岸拱座桩基础大部分位于洞碴筑岛区,少数桩基础位于原有山体内,但其上部的山体花岗岩受风化影响较破碎,渗水严重;桩基下部又落在完整花岗岩内,岩石强度非常高,采用冲击钻机施工直径2.8m桩基础非常慢,大型回旋钻机进场又非常困难。经研究,渗水严重的筑岛区和上部破碎岩层区的桩基础均采用外侧帷幕注浆和底部封底注浆相结合的止水技术和人工挖孔技术进行施工<sup>[1]</sup>。每桩外设6个帷幕注浆孔,桩中心设1个封底注浆孔,注入水泥-水玻璃双液浆止水。水玻璃掺量控制在12%~18%,注浆压力控制在1~3MPa。桩基础开挖进行了专门的爆破设计,桩中心用掏槽孔,桩周围圈用隔离孔,其余位置用松动孔,不同孔眼的装药量和装药方式均不同,并采用毫秒微差定向爆破,每天平均开挖1.6m,最大可达2.2m。

#### 3.3 斜向整体嵌固式基础施工技术

拉萨岸拱座右幅为斜向整体嵌固式基础,基础尺寸为20.2m×8m×25m,水平夹角50.208°,纵立面内倾角4.609°,断面大、深度大、斜度大,且拱座基础处于常水位以下,水位高差19.2m。

1) 竖向洞门及斜向导向墙施工 嵌固式基础位置山体接近70°坡度,表面岩体破碎,要在此70°陡坡上进洞,且洞门上方有250t缆索起重机塔架施工,施工风险大。经比较,采用竖向C20混凝土洞门及斜向导向墙做防护进洞。斜向导向墙在基础开挖轮廓线外紧贴施作,导向墙内采用6片I20b型钢做定位架,型钢间焊接粗螺纹钢成整体,在型钢定位架弧形顶面焊接孔口管,立模浇筑竖向洞门及斜向导向墙混凝土。

2) 大管棚施工 嵌固式基础顶部施作大管棚,管棚长27m,管径108mm,以外插角1°~3°插入洞顶基岩中,利用潜孔钻机钻孔后将钻有小孔的钢管插入孔中,高压注入高强水泥浆<sup>[2]</sup>。

3) 嵌固式基础隧洞开挖施工 嵌固式基础隧

洞采用机械辅以人工按四台阶法开挖,第1~3级台阶开挖高度均为5.0m,第4级台阶为5.42m,方便机械施工及出渣。所谓四台阶法开挖,即首先开挖第1台阶,进尺11m后开挖第2台阶,第1台阶每进尺4榀钢拱架后进行钢套拱支护;第2台阶进尺8m后开挖第3台阶,第2台阶每开挖1榀后对第1台阶钢套拱支护进行接长,生根至坚硬的岩石并安装锁脚锚杆;第3台阶进尺6m后开挖第4台阶,对第2台阶钢套拱支护进行接长;第4台阶随开挖接长钢套拱,开挖4m后基础形成稳定坚固的台阶。按上述方法依次循环开挖至设计位置。四台阶法开挖时需垫石碴铺路减缓坡度方便挖掘机出碴,角落位置洞碴用挖掘机转运,装到吊斗里出渣。

4) 初期支护施工 嵌固式基础沿洞身方向每隔0.8m布置1榀钢拱架,钢拱架采用I20b分段制作,接头用螺栓连接,在松散破碎岩层地带布置I20b型钢横撑在钢拱架中部加强。喷锚混凝土采用直径8mm钢筋网,网格间距20cm×20cm,湿喷厚度22cm。

#### 3.4 拱座基坑开挖技术

拉萨岸拱座右幅基础和林芝侧拱座基础开挖前,在拱座基坑采用外部3层帷幕注浆与在基坑内部封底注浆相结合的注浆止水技术。注浆时遵循先帷幕注浆后封底注浆,先外后内、先深后浅的原则。3层帷幕注浆采用分区、分序、分段注浆工艺。

拱座基坑开挖采用混凝土支护+换撑逆作法施工。基坑每层开挖100cm,采用C30钢筋混凝土支护,每层支护顶面厚度80cm、底部厚度70cm、高为100cm。基坑每层开挖后,立模浇筑支护混凝土,安装水平型钢支撑;再开挖下层,浇筑下层支护混凝土,安装下层水平型钢支撑,并用千斤顶施加向基坑外的顶力,再将上层钢支撑用千斤顶卸载拆除后倒用到后续层混凝土支护,正好安装在设计标高的钢支撑则保持在原位置。重复上述施工完成基坑开挖。

### 4 钢管拱肋施工

#### 4.1 钢管拱肋制造及节段拼装

钢管拱肋采用强度420MPa的E级耐候钢,4肢桁式截面,钢管直径从1.8m变化至1.6m,板材厚52~24mm,拱肋腹杆为H形或箱形杆件。拱肋钢管与腹杆间通过节点板和螺栓连接,螺栓为10.9级M30耐候钢材质的高强度螺栓。

##### 4.1.1 钢管拱肋制造

1) 拱肋钢管卷制 弧形拱肋采用“以折代曲”工艺<sup>[3]</sup>,即将各直线钢管节焊接接长为折线形式的

拱肋弦管,折点处于拱肋轴线上,钢管直段长为1.8~2.8m。钢管采用数控液压三辊卷板机卷制,长度控制在2.8m以内,离纵缝位置200~300mm一次卷制成型,厚钢板采用二次回圆技术保证圆顺度。钢管纵缝采用埋弧自动焊机焊接。

2)腹杆及节点板加工 腹杆制造流程为:零件下料→变形矫正→隔板边缘加工→箱形组装→箱形焊接→焊缝检测→焊接变形矫正→画钻孔基准线→螺栓孔钻制→除锈及涂装。板件下料用数控机床火焰切割,预留加工余量。

3)钢管拼装焊接 拱肋制造前期进行制造规则评审和焊接工艺评定。工厂焊缝采用拱上台车埋弧自动焊机焊接,焊接时要注意焊接温度控制,焊完1道后自然降温,再焊下一道。现场低气温焊接时要防风,并预热焊接区以保证焊接区温度和焊道间温度,同时还应做好缓冷保温措施。

#### 4.1.2 钢管拱肋节段拼装

1)工厂片状哑铃形长段拼装 工厂设置预拼装胎架,钢管单元件拼装成片状哑铃形节段,按钢管拱肋的拼装线形测放出对应节段拼装控制点,管件拼装后定位焊,再按制造规则要求焊接成片状哑铃形长段,通过汽车运输至工地拼装场。

2)现场拼装场节段拼装 桥址位于加查县桑加峡谷内,拱肋在现场无拼装场地。经比选,将上游7.5km的峡谷顶岩堆平整后作为拱肋拼装场,场内设拱肋片状哑铃形长段和单元件存放区、拼装区、拱肋存放区、下河吊机吊装区等。拼装区按“2+1”卧拼模式设置2幅胎架,每幅胎架长60m、宽16m、高1.3m。2台门式起重机沿轨道拼装4肢桁式拱肋节段,验收后转至拱肋存放区存放<sup>[1]</sup>。拱肋现场拼装场布置如图2所示。

#### 4.2 拱肋节段翻身及下河

拱肋节段空间尺寸无法经过公路隧道,经研究后决定建造船舶在雅鲁藏布江中运输拱肋。拱肋节段用平车从存放区移运至下河吊机下方,起吊后移走平车,采取下河吊机用两钩翻身法将拱肋节段由卧式翻身为立式,吊运下河至船舶甲板固定。下河吊机如图3所示。



图3 下河吊机

拱肋翻身区地面建成2级台阶式,高台阶在河侧,高差为30cm。在台阶分界处往拼装场方向30cm位置设翻身底座,底座由横向呈一条直线安装的前、后2组圆弧形钢板组成,高1m,圆弧半径为1.0m,在底座和高台阶上铺设厚橡胶,防止下弦管硬接触损伤。拱肋卧躺喂到下河吊机下方,下河吊机起重横梁的2个吊钩各拴2根 $\phi 56$ 钢丝绳捆绑在上弦2肢钢管的两端,吊机提升至靠地面的单肢钢管两端上2根钢丝绳先受力,继续提升2个吊钩拎起拱肋节段直到将其转动至接近竖立状,节段重心达到下弦翻身底座转轴中心位置,至此“两心”平衡。起重横梁整体向河中方向行走至与拱肋翻身完成时重心对应的位置后停止,此时稍微起升吊钩,使拱肋节段重心越过支点,依靠自身重力完成节段翻身。拱肋节段越过重心后一直在上方悬空的下弦管压在高台阶上顶住,此时拱肋节段变为立

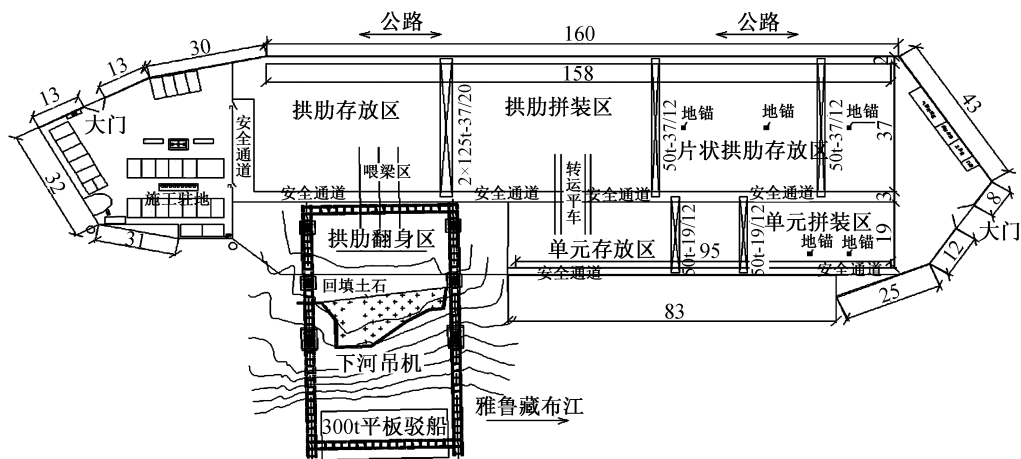


图2 拱肋现场拼装场布置(单位:m)

式完成拱肋节段翻身。重新调整 4 根钢丝绳位置,起重横梁提升使 4 根钢丝绳共同受力,下河吊机的起重横梁走行至纵向主梁的前端,下放到船舶甲板上固定。

#### 4.3 拱肋江中运输

拱肋设计采用垂直竖向分段,造成节段上、下弦管错位极大。运输最不利工况为第 2 节段,节段尺寸为  $24.72\text{m}\times 14.63\text{m}$ ,重 230t,且节段的上弦长、下弦短、重心较高,结构稳定性差。

拱肋节段采用拖轮拖动自行建造的驳船运输。驳船( $32\text{m}\times 14\text{m}\times 2.4\text{m}$ )空载吃水 1.3m、满载吃水 1.5m,最大载重 300t;拖轮( $26.3\text{m}\times 6.24\text{m}\times 6\text{m}$ )空载吃水 1.25m、满载吃水 1.4m,主机额定功率为  $2\times 176\text{kW}$ (双驱动),满载航速为  $10\text{km/h}$ ,空载航速为  $15\text{km/h}$ 。拱肋节段采用限位架硬加固和缆风绳软加固的软硬固定技术固定,针对拱肋异形上弦管悬臂长的情况,设置竖向支撑保证拱肋上弦管长悬臂的结构稳定。实测雅鲁藏布江水深,选择船舶航线运输拱肋。

#### 4.4 钢管拱肋架设

钢管拱肋分 58 个吊装节段,采用缆索起重机吊装、扣索斜拉扣挂法架设<sup>[4]</sup>。

##### 4.4.1 缆索起重机建造

桥位处地形环境复杂、山体花岗岩风化严重且破碎、宽大冲沟密集、悬崖陡斜,且两岸拱脚附近施工场地极为狭小受限,以及桥位峡谷内有 12 级大风、昼夜最大温差达  $30^\circ\text{C}$  的恶劣天气,在此不利条件下,钢管拱肋架设十分困难。为解决施工难题,因地制宜设计建造出一种特殊的最大控制吊重为 250t 的缆索起重机进行钢管拱节段悬臂扣挂法架设。

根据实测地形和方案比选,本桥的特殊缆索起

重机采用不对称、不等边跨、不等高塔架、同一侧塔架使用高低腿、扣缆塔合一型、缆索在塔顶后锚双横移的布置形式。缆索起重机主要由基础体系、塔架体系、索结构体系、扣锚索体系、缆风索及压塔索体系等组成<sup>[5]</sup>。缆索起重机林芝岸塔架布置在远离拱座的陡峻山顶上,拉萨岸塔架布置在拱座后方不远处,布置跨度为  $(165+610+89)\text{m}$ ,设计控制质量为 250t,采用  $2\times 125\text{t}$  缆索吊钩(共 4 个吊钩)进行抬吊。缆索起重机设计跨度  $L=610\text{m}$ ,设计控制垂度为  $L/12$ <sup>[6]</sup>。缆索起重机总体布置如图 4 所示。

##### 4.4.2 钢管拱肋节段架设

根据拱肋节段架设位置,提前调整缆索起重机承重索鞍座及主锚钢锚梁至设计位置。驳船运输拱肋节段至安装位置下方,抛锚、绞锚使船停泊至精确位置。根据吊点位置及拱肋节段安装角度采用不同长度的吊重钢丝绳,钢丝绳与吊点间用 110t 卡环连接<sup>[7]</sup>。

缆索起重机 4 吊钩落钩用钢丝绳拴牢拱肋节段 2 肢上弦管,4 个吊钩同时均匀起钩,提升拱肋离船,继续向上提升至距安装位置 5m 时停止,拱肋节段后端的 2 个吊钩落钩,再将拱肋外侧的 2 个吊钩落钩,调整拱肋节段至适合安装的空中角度后,缆索起重机牵引绳收绳牵引使拱肋节段水平移动,将节段与已架高节段顶部的内法兰盘对位,收紧倒链使两内法兰盘贴紧,用 1 根前端带尖锥的铁棍穿入两法兰孔眼中,初调拱肋节段到位,在法兰盘上呈直角线先打入 4 根冲钉,按设计要求安装高强度螺栓,并退出冲钉换用高强度螺栓。初步拧紧内法兰螺栓(根据实际情况抄垫法兰间隙,微调角度),缆索起重机后面 2 吊钩缓慢松钩,使内法兰螺栓受力,进行扣索安装。

缆索起重机扣塔上牵引设备将扣索牵引至扣

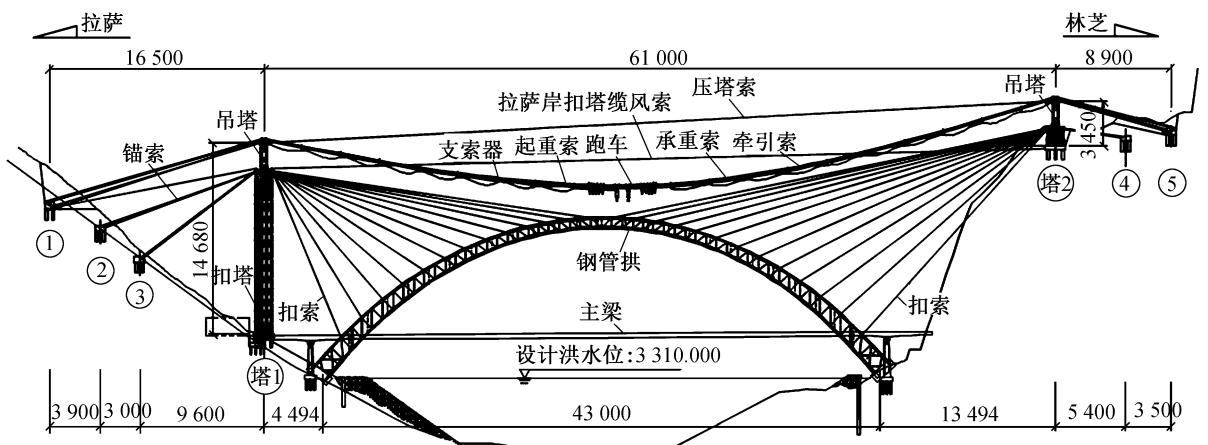


图 4 缆索起重机总体布置(单位:cm)

塔顶锚梁位置,安装拱肋节段上的扣索前端钢绞线 P 锚,安装锚索至后锚点,收紧扣索、锚索钢绞线。扣、锚索张拉端均设在扣塔平台顶面,扣、锚索张拉要同步分级对称施工。扣索一边张拉时,一边缓慢松缆索起重机前面的 2 吊钩,同时也要张拉锚索,过程中还要监测节段坐标,千斤顶调整横向偏位,通过多次调整扣索索力和横向偏位直到将拱肋节段调至设计位置。终拧内法兰所有螺栓。

钢管拱完成上、下游幅的相同节段架设后,及时安装横撑连接系。横撑连接系根据现场实际量测尺寸配切下料,先装竖向正向连接系,再补充安装横向小管。

#### 4.4.3 钢管拱肋合龙

拱肋合龙在 9 月下旬,昼夜温差最大达  $17^{\circ}\text{C}$ ,拱肋白天阴、阳面温差高达  $27^{\circ}\text{C}$ 。水平跨度  $>210\text{m}$  的全钢拱肋对温度变化极敏感,合龙锁定结构所受内力大,且会随着结构温度的变化而变化。提前 48h 不间断按小时观测环境温度,测量合龙口长度变化,绘出环境温度、合龙口长度之间一一对应的曲线图。经研究发现,0:00—4:00 环境温度最低,合龙口长度基本不变化,故选择该时段进行拱肋合龙。

拱肋合龙时上、下游拱肋同步进行,单幅拱肋合龙口两侧用锁定结构快速锁定,快速焊装嵌补段。每根拱肋均安装 4 组合龙锁定结构。单组合龙锁定结构包括 2 个反力座、钢桁架、抄垫钢板以及高强度螺栓。反力座提前焊接在钢管外竖向、水平方向,钢桁架提前安装在一侧反力座上。合龙施工具体如下:1:00 开始进行合龙锁定,在钢桁架与另一

侧反力座间快速插入抄垫钢板,安装高强度螺栓拧紧即完成合龙锁定。配切合龙段钢管并沿圆截面中轴线切割成两半,周边开焊接坡口,分别吊装半圆管就位,精调后用临时码板固定后焊接。

#### 5 拱肋混凝土顶升施工

拱肋至拱脚往上 15m 段为 C60 钢纤维混凝土,采用从上往下灌注方法施工;再往上为自密实补偿收缩 C60 混凝土,采用泵送顶升工艺施工。钢管混凝土采用超高压混泥土泵顶升,并遵循纵桥向两岸对称、横桥向上下游均衡的原则,按下弦内管→上弦内管→下弦外管→上弦外管的顺序(即①→②→③→④→⑤→⑥→⑦→⑧)顺序,见图 5)进行施工。钢管混凝土单岸纵桥向采用真空辅助、9 级接力、10 段泵送顶升工艺进行灌注。拱肋钢管混凝土顶升灌注布置如图 5 所示。每灌注 1 根钢管后,待其管内混凝土达到设计要求或混凝土龄期  $>3\text{d}$  后再灌注序号大一号的钢管内混凝土。

#### 5.1 拱肋钢管混凝土配合比设计

钢管 C60 自密实混凝土设计除了要求高强、早期强度、良好的泵送性外,还需良好的自密实性能和补偿收缩性能<sup>[8]</sup>。通过反复对比减水剂不同比例配伍情况和多种膨胀剂掺加的补偿收缩效果,混凝土中掺加新型醚类 PCA-I 型聚羧酸减水剂和 HME-II 新型高性能混凝土复合膨胀剂,从减水、降黏、保坍方面可较大程度提升混凝土工作性能的稳定,减少各种材料、气温等波动带来的影响,最大限度适应环境温差大、顶升方量大、泵送摩阻力大等施工特点,使混凝土具有低泡、大流动性、不泌

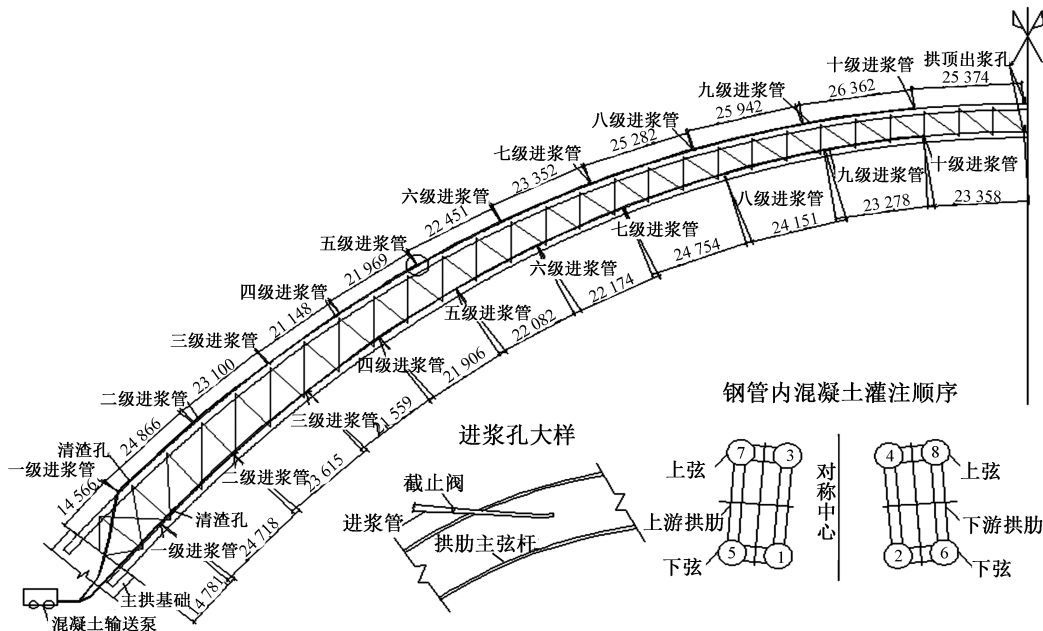


图 5 拱肋钢管内混凝土顶升灌注布置

表1 钢管 C60 混凝土主要性能控制指标

工作性能					90d 设计抗压 强度(力学性能)/MPa	体积稳定性			
坍落扩展度/mm	T50 扩展时间/s	J 环扩展度/mm	出机含气量/%	初凝时间/h		自收缩率/%		限制膨胀率/%	
						3d	90d	水中(14d)	空气中(28d)
初始 650±50, 4h 后 ≥500	2~5	0~25	≥2	≥20	≥60	≥0.020	≥0	≥0.03	≥-0.01

水、不分层、黏度低、黏聚性好、自密实性优良的施工性能,既保证力学性能要求又有良好的体积稳定性。钢管 C60 混凝土材料用量为:水:水泥:粉煤灰:矿粉:砂:石:膨胀剂:外加剂=170:370:50:85:765:925:55:5.6(单位:kg/m<sup>3</sup>),其主要性能控制指标如表1所示。

### 5.2 拱肋钢管混凝土模拟顶升

为保证实桥混凝土顶升一次成功,选取最易脱粘脱空的拱顶至边跨方向的一段 75m 长拱肋节段,加工足尺模型进行顶升模拟试验,拱高 11.25m,直径 1.6m,壁厚 16mm,内部设 9 个法兰盘、5 道内加劲环板和 9 处剪力钉群。试验选择 ZLJ5180THBE 型高压混凝土输送地泵配直径 125mm 泵管,采取增加泵管水平长度模拟实桥拱肋弧度倾斜向上的远距离输送工况,查阅施工规范取直径 125mm 输送泵管的水平管与垂直管换算长度关系为 4:1<sup>[8]</sup>,经计算泵管水平段长度为 550m。

试验顶升采用二级顶升泵送工艺,第 1,2 级长度分别为 25,50m,拱脚设置一级进浆管,25m 处设置二级进浆管,拱顶设置 1m 高垂直出浆管。顶升模拟试验顺利,显示了高原地区真空辅助进行大直径钢管 C60 混凝土顶升的可行性,且验证了无收缩自密实 C60 混凝土在高寒地区大温差环境下配合比设计合理性和高稳健的工作性能<sup>[9]</sup>,无损检测结果无脱粘、脱空面积占总面积的 96%以上。

### 5.3 拱肋钢管混凝土实桥顶升

#### 5.3.1 现场布置

混凝土输送泵选择 ZLJ5180THBE 型高压地泵 4 台(2 台备用),理论输送量 105m<sup>3</sup>/h,最大输送泵压为 28MPa。真空泵系统选用 ZKB2500 型真空泵,抽气速率 2 500m<sup>3</sup>/h。上、下游拱肋各布置 2 套泵管(1 套备用),且尽量减少 90°及以上角度的弯管布置,设计定制进入角度变化的输入进浆泵管,泵管尾部伸到拱肋钢管中心且带有斜向上弯管以减小混凝土泵送入管内的阻力。

#### 5.3.2 拱肋钢管混凝土实桥顶升施工

由于场地小造成泵管布设难度大,加上输送泵管直径小(125mm),主管直径大(1.8~1.6m),泵压难以控制。经研究,在高压地泵上加装动态控制系

统,可有效调整泵机泵送压力,以维护泵管内的混凝土泵送压力呈线性稳定增长,达到混凝土顶升平顺的目的。

1)清理钢管内壁及杂物 拱肋钢管在拱脚下部开设清渣孔,人工清理拱脚残渣、杂物等,浇水湿润后封闭清渣孔。

2)灌注拱脚段钢纤维混凝土和第 1 段管内混凝土 地泵泵入清水润滑泵管,检查泵管密封后,使用地泵向泵管内泵入水泥砂浆润滑泵管,再泵入 C60 钢纤维混凝土至泵管前端接入口出浆,再通过阀门和拱肋上的进浆管顺次连接,泵送钢纤维混凝土从上往下灌注,钢纤维混凝土依靠自重及后续顶升混凝土重力下压密实。拱脚钢纤维混凝土灌注后,使用进浆孔作为第 1 级进浆孔,泵送第 1 级混凝土。

3)泵送第 2 段混凝土 由于钢管拱肋直径大、混凝土顶升方量大,造成单位长度钢管顶升时间长,混凝土性能又受温度影响大,泵压受内部管壁摩阻力逐渐增大,造成管内混凝土顶升越来越困难。为降低泵管摩阻力,经比较选用新型润管剂,比选用常规水泥浆润管方便快捷,且不易堵管。当第 1 级混凝土泵送至顶面离第 2 级进浆孔 0.5m 时,停止泵送,改接第 2 级进浆孔,掏出管内混凝土 50cm 左右,将润管剂倒入泵管中,接好接头并加固泵管后,继续顶升第 2 级管内混凝土。

4)泵送第 3~10 段混凝土 按同样的方法,依次泵送第 3~10 级混凝土,当混凝土泵送到拱顶出浆孔出浆,继续泵送将浮浆排尽,出现良好混凝土时暂停泵送,静置 5min,然后再泵送两下,再静置 5min,当出浆孔无明显气泡或浮浆后,关闭第 10 级进浆管阀门,完成整管泵送。

## 6 混凝土主梁施工

混凝土主梁按从远端到跨中分为边跨、次边跨、变宽段、主跨。边跨、次边跨采用挂篮对称悬浇施工,边跨直线段采用支架现浇施工<sup>[10]</sup>。两岸的挂篮、边跨直线段与变宽段同步施工,挂篮施工完成后合龙边跨,待变宽段完成后合龙次边跨,最后两岸相对施工主跨至跨中合龙。

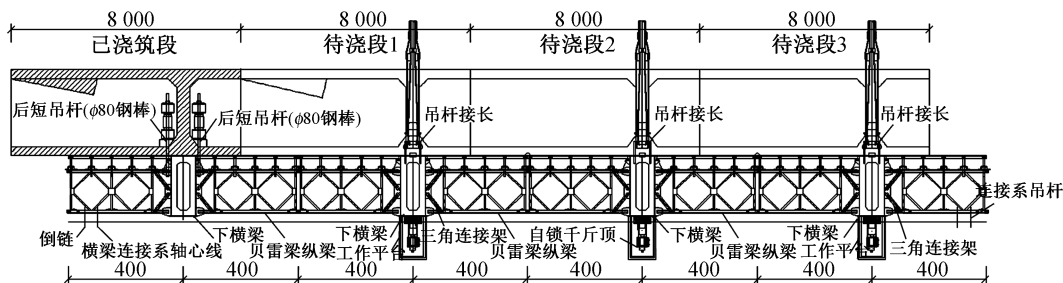


图6 主跨箱梁3孔现浇吊架

### 6.1 变宽段箱梁施工

变宽段箱梁连接次边跨箱梁和主跨箱梁,长24m,采取现浇吊架一次浇筑。变宽段现浇吊架结构由下桁架梁、贝雷梁纵梁、模板系统、吊杆系统等组成。现浇吊架共设4组吊杆结构(每组2根),从次边跨往跨中方向分别为1组 $\phi 32$ 精轧螺纹钢吊杆、2组钢绞线吊杆、1组永-临结合吊杆(由桥梁永久吊杆、转换头及接长钢棒组成),每组吊杆顶部均可通过千斤顶调节标高。现浇吊架至拱肋下方的船舶甲板面拼成整体,提升就位,再预压荷载、绑扎钢筋、安装内模,最后浇筑混凝土。

### 6.2 主跨箱梁施工

主跨箱梁两岸分别采用3孔吊架相向对称、循环分段、平行作业施工,即在本孔吊架混凝土等强度期间,可在前2孔上分别进行内模安装、钢筋绑扎施工,改单孔吊架流水作业为3孔吊架平行作业,从而同时出现3个工作面作业。现浇吊架主要由下横梁、贝雷梁纵梁、模板系统、吊杆系统等组成。吊架共设4组吊杆结构,最后排下横梁通过8根直径80mm钢棒吊杆锚固在已浇筑箱梁横隔板两侧底板上,前面3排下横梁分别通过3组永-临结合吊杆(每组2根)悬挂承受施工荷载。主跨混凝土箱梁3孔现浇吊架如图6所示。

借鉴模块化设计思路,将3孔吊架分成4块可循环装拆的吊装单元,利用既有缆索起重机进行单元拆装,两单元间通过上、下层销轴相连。当前一孔箱梁的纵向预应力筋张拉后,拆除最后方的吊装单元,并循环前移到吊架最前方连接。

## 7 结语

藏木特大桥是新建川藏铁路拉林段的重点控制性工程,其技术复杂,施工时又面临高原环境艰险恶劣、施工场地狭窄受限及拱肋节段吊重大等诸多困难,施工难度大。藏木特大桥施工时采用了多项新技术和新方法:拱座基础施工应用了水下陡峭

边坡筑岛,坑内、坑外双重帷幕注浆止水,拱座基坑支护+换撑逆作开挖法等;钢管拱肋架设因地制宜设计采用了不对称、不等高、不等边跨大跨度扣缆塔合一型双横移式缆索起重机,开创了高原缆索起重机建造架设拱肋的先河,并研发了下河码头起重机吊运下河,首创在雅鲁藏布江库区内使用船舶动力运输拱肋节段;超千方1.6~1.8m大直径钢管混凝土顶升采用真空辅助9级接力10级顶升技术,并通过应用泵送剂新材料以减少混凝土堵塞输送管道;混凝土主梁主跨施工采用永-临结合吊杆承力,将3孔现浇吊架前后循环倒用平行作业增加工作面,加快施工速度。这些新技术和新工法的成功应用,保证了高原峡谷、陡峭地形等艰险受限条件下的铁路430m跨中承式提篮钢管混凝土拱桥的顺利完工,为高原同类型拱桥施工提供了借鉴。

### 参考文献:

- [1] 中铁广州工程局集团有限公司.新建拉林铁路藏木雅鲁藏布江特大桥实施性施工组织设计[Z].2014.
- [2] 许志城.桩基础导向墙长管棚联合支护技术在软弱围岩隧道进洞施工中的应用[J].施工技术,2017,46(S1):729-732.
- [3] 李明.大跨度提篮拱桥双曲线钢管桁架拱肋加工制造技术[J].施工技术,2019,48(23):42-45,58.
- [4] 李艳哲.成贵铁路鸭池河特大桥主桥施工技术[J].桥梁建设,2020,50(5):16-21.
- [5] 国家电力公司水电施工设备质量检验检测中心.缆索起重机:GB/T 28756—2012[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [6] 中铁广州工程局集团有限公司.藏木雅鲁藏布江特大桥缆索起重机施工设计图[Z].2015.
- [7] 张俊娟,李旭.复杂空间位置大尺寸拱肋节段直接起吊方法[J].施工技术,2015,44(17):29-32.
- [8] 中国建筑科学研究院,浙江省二建建设集团有限公司.混凝土泵送施工技术规程:JGJ/T 10—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [9] 汪泉庆,杨俊平,唐剑.汉江特大桥拱肋自密实补偿收缩混凝土顶升技术[J].施工技术,2020,49(15):28-30,34.
- [10] 郭文锋,万海瑞,康乐,等.桥梁工程现浇预应力箱梁施工关键技术[J].施工技术,2020,49(16):66-69.