

# 水柏铁路北盘江大桥设计

马庭林 徐勇 何庭国 陈克坚 郭建勋 李慧君

(铁道部第二勘测设计院 成都 610031)

**摘要:** 水柏铁路北盘江大桥主桥桥型为上承式钢管混凝土拱桥, 跨度236m, 施工所采用的单铰平面转体重量达104000kN。本文介绍该主桥的结构设计和采用的转体施工方法。

**关键词:** 铁路桥 钢管混凝土 拱桥 转体法架桥

## 1. 大桥概况

北盘江大桥位于贵州省六盘水市境内的崇山峻岭地区, 为水柏铁路(六盘水至柏果)全线重点控制工程。桥位处大桥与北盘江约呈 $80^\circ$ 交角。河谷深切呈“V”形, 六盘水岸崖高约158m, 呈直立状, 崖底约有3m倒悬; 柏果岸陡壁约 $71^\circ$ 倾角, 高约177m, 无倒悬。六盘水岸基岩零星出露, 柏果岸顶桥址基岩裸露, 两岸及谷底有零星块石、漂石。桥址远离公路, 交通极为不便。

北盘江属珠江水系, 在黔桂交界处与南盘江汇合注入红水河, 属山区剧烈下切河流, 纵坡陡, 河水湍急, 含砂量较大, 河水常年浑浊, 多含煤粒。桥位处最大流量 $2540\text{m}^3/\text{s}$ , 最小流量 $20.4\text{m}^3/\text{s}$ , 大气降水沿坡面及溶蚀裂隙流向陡崖, 汇入北盘江中。由于线路较高, 桥梁工程不受水文影响。六盘水市冬春干燥寒冷, 夏季潮湿, 冬季多冷冻, 年平均气温为 $18.8^\circ\text{C}$ , 年平均降水量 $1119.7\text{mm}$ , 盛行东南或东东南季风。

北盘江大桥在线路标高 $1143.91\text{m}$ (全线最低点)横跨北盘江, 从1994年全线可行性研究开始, 先后进行了十多个桥型方案的比选。经过多

次专家论证与审查, 确定北盘江大桥主桥桥型为上承式钢管混凝土拱。根据勘测资料并考虑两岸岩溶发育的分布状况和两岸基础埋深及岸坡稳定等因素, 其桥跨布置为:  $3\times 24\text{mPC}$ 简支梁+ $236\text{m}$ 上承式X形(提篮形)钢管混凝土拱+ $5\times 24\text{mPC}$ 简支梁, 桥全长 $468.20\text{m}$ 。全桥布置见图1。

## 2. 主桥结构

### 2.1 主桥拱圈结构

主桥结构为上承式X形(提篮形)钢管混凝土拱, 拱趾中心跨度 $236\text{m}$ , 其拱圈由2条拱肋与横向联接系构成, 拱肋横向内倾 $6.5^\circ$ 。拱肋拱趾处中心距 $19.6\text{m}$ , 拱顶中心距 $6.156\text{m}$ , 主拱立面投影拱轴线为悬链线, 拱轴系数 $m=3.2$ , 矢跨比 $1/4$ 。拱肋高 $5.4\text{m}$ , 宽 $2.5\text{m}$ , 每肋由4肢 $\phi 1000\times 16\text{mm}$ 钢管构成, 其上下弦各由2肢钢管与其间的2块 $12\text{mm}$ 厚钢板联结呈哑铃形, 在拱肋的全长上均为等截面; 从拱趾起2跨 $16\text{m}$ 梁范围的钢管拱肋上下弦之间各由2块 $12\text{mm}$ 厚钢板联结, 构成实腹段, 使拱肋断面呈箱形; 为加强混凝土与钢板的连接, 在钢板上布置一定数量的栓钉。为防止在灌注混凝土时钢板受侧向压力而涨鼓变

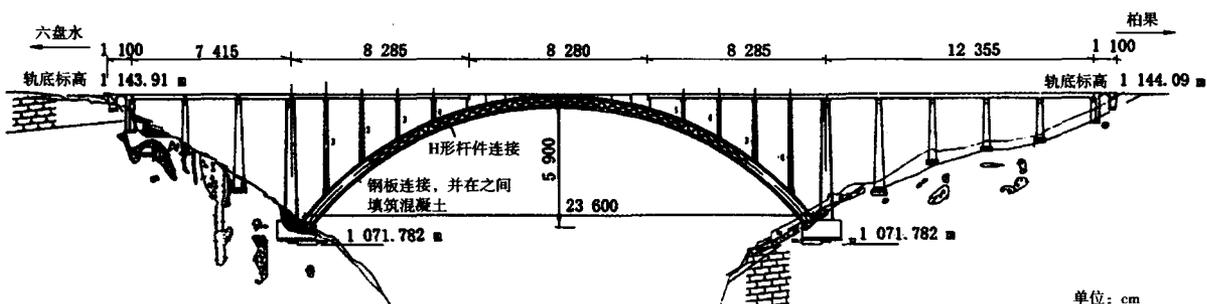


图1 北盘江大桥立面布置

形,在上下弦盖板及拱肋腹板的2块钢板间设一定数量的螺杆加强。拱肋的中部其上下弦之间通过H形杆件,通过焊接在上下弦钢管的节点板由高强度螺栓连接形成桁架式连接,拱肋上下弦及实腹段内均灌注C50微膨胀混凝土。

2条拱肋之间其上下弦采用 $\phi 600 \times 14 \text{mm}$ 和 $\phi 800 \times 14 \text{mm}$ 钢管组成的多道“X”字形和“N”字形的平联连接;上下弦平联之间采用 $\phi 450 \times 14 \text{mm}$ 钢管斜向连接,以此组成拱肋横向联接系。主桥拱肋及横向联接采用Q345d钢材。主桥拱圈断面结构见图2。

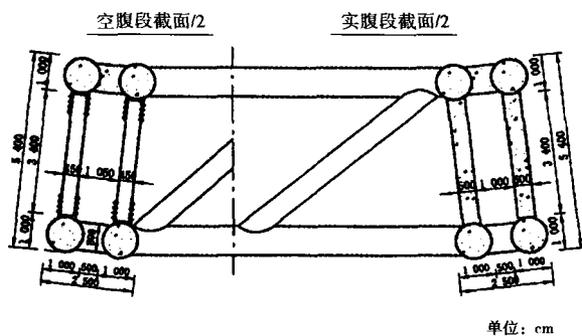


图2 主桥拱圈断面结构

## 2.2 拱上结构

拱上结构为:5x16m超低高度PPC筒支梁+82m拱顶 $\Pi$ 形刚架+5x16m超低高度PPC筒支梁。通过固定支座使3号交界墩与拱上①号墩柱、4号交界墩与拱上⑧号墩柱分别组成一联,拱上②、③、④号墩柱与拱顶 $\Pi$ 形刚架I号段组成一联,⑤、⑥、⑦号墩柱与拱顶 $\Pi$ 形刚架VII号段组成一联。梁上制动(牵引)力由上述结构共同承受。

刚架墩墩柱为钢筋混凝土矩形空心墩,墩柱间采用钢筋混凝土K形撑连接,以增强刚架墩的横向刚度。墩柱横向内倾 $6.5^\circ$ ,与拱肋倾角一致。拱上①、⑧号墩柱高40.84 m,②、⑤号墩柱高26.22 m,③、⑥号墩柱高15.34 m,④、⑦号墩柱高7.339 m。墩柱顶部空心截面横向宽度为200cm,纵向宽度140cm,纵、横向壁厚均为30cm,①、②、⑦、⑧号墩柱纵向内外壁1:100放坡,壁厚不变。墩柱间K形撑为矩形空心截面,K撑的水平杆截面高120cm,宽100cm,

壁厚15cm;斜杆截面高80cm,宽100cm,壁厚15cm。墩柱与K撑均采用C30混凝土。刚架墩结构见图3。

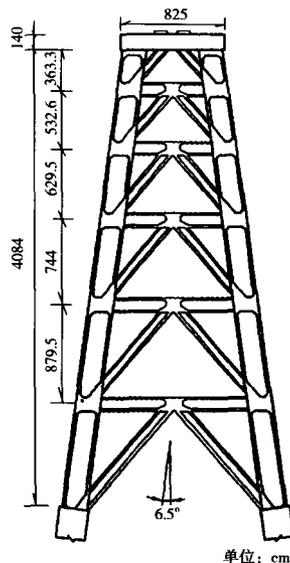


图3 拱上刚架墩

拱顶 $\Pi$ 形刚架纵向分为7个节段(7.9+2x9+30.82+2x9+7.9)m,每段间留3cm伸缩缝。 $\Pi$ 形刚架顶板宽7.0m,厚度25cm,除中间30.82m段腹板厚度为60cm外,其它节段腹板厚度均为20cm。腹板横向倾斜 $6.5^\circ$ ,与拱肋倾斜一致。 $\Pi$ 形刚架纵向每2.7~3m设置1道厚度为20cm的横隔板,横隔板下部掏空,呈 $\Pi$ 形。拱顶 $\Pi$ 形刚架结构见图4。

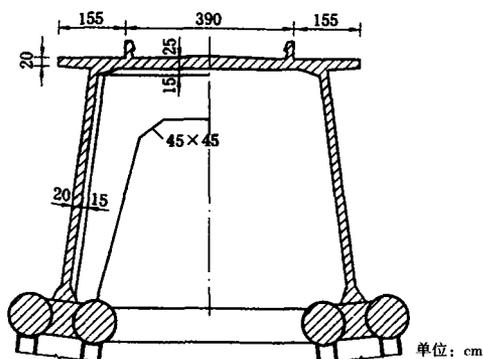


图4 拱顶 $\Pi$ 形刚架

拱上刚架墩底部设置加劲的钢箱墩座与拱肋连接,钢箱底部与拱肋上弦焊接,墩柱钢筋插入钢箱混凝土内连接; $\Pi$ 形刚架腹板底部设置2道10mm厚钢板,腹板钢筋端部与钢板焊接,钢板

与拱肋上弦盖板焊接,中间30.82m节段腹板底部除采取钢板连接外,增设了波浪形剪力钢筋,以加强与拱肋上弦的连接。Π形刚架横隔板内均设置1道门形钢板,门形钢板的2个支腿与拱顶上弦钢板焊接。

## 2.3 主桥结构计算

### 2.3.1 全桥整体动力分析

全桥横向刚度控制设计中,对于自振周期,按横向第一自振周期不大于1.65s控制设计,同时进行横向振动分析和车桥耦合动力计算,其脱轨系数、横向振幅、舒适度等计算值,都满足有关规定。

主桥计算最大横向自振周期为1.54s,满足控制设计要求。机车与车辆脱轨系数在0.5以下,行车安全性能可以得到保证;行车舒适性能在竖向及横向达到“良好”级别;货车80km/h通过时,桥梁各梁跨最大挠度冲击系数为1.117,最大横向水平位移为6.46mm,最大竖向位移为24.6mm,最大横向加速度为0.246g,最大竖向加速度为0.152g,都在允许范围内。

### 2.3.2 结构稳定性

按铁路桥规进行施工阶段拱圈及运营阶段全桥的稳定性计算,采用多个结构程序予以计算,并相互印证,满足铁路桥规的要求。

### 2.3.3 常规计算

一期、二期恒载按施工过程拱肋加载的实际历程进行结构计算和内力、位移的叠加,得到成桥结构内力和位移。拱肋混凝土收缩按降温15℃考虑。

拱圈钢结构预拱度按拱圈实际位移设置,该位移包括:一期恒载位移、二期恒载位移、混凝土收缩位移(按降温15℃考虑)及50%静活载的结构位移。

活载计算采用ANSYS结构分析程序计算内力影响线,ALGOR程序(SAP93)计算校核。采用专用程序进行影响线加载得到结构活载内力。活载作用下跨中最大竖向挠度为1.95cm。

### 2.3.4 疲劳检算

主桥拱圈疲劳强度控制的部位是拱肋腹杆节点板焊接根部和横联管管相贯焊接处。“H”形腹杆与上下弦钢管的焊接连接,依据《铁路桥梁钢结构设计规范》(TB10002.2-99)验算疲劳强度。横联管管相贯接头疲劳强度参考美国国家标准《钢结构焊接规范》ANSI/AWSD1.1-98进行检算;另外参考欧洲钢结构协会《钢结构疲劳设计规范》对接头疲劳强度进行核算;由于该细节超越了“铁路桥规”的范畴,采用做试件进行疲劳试验,验证一些管管相贯处的容许疲劳应力幅值。

## 2.4 主桥检查设备

根据技术设计批复意见,全桥应设计有相应必要的检查设施。拱圈部分检查设备按检查人员能较易到达拱肋任何位置的原则进行设计。拱肋检查设备共设3层通道。上层通道位于拱肋上弦顶面,全拱肋贯通;坡度较陡的位置,设钢筋梯;在墩座和Π形刚架位置,可绕行通过。中层通道位于拱肋下弦顶面,全拱肋贯通。下层通道悬吊于拱肋下弦上,通道宽度149cm,净高180cm,全钢结构;行走道板为扩张金属网,横梁槽钢设在扩张金属网之上,兼作踏步梯。在4号墩柱位置左右设置1对上下通道,通道上方接刚架墩顶帽围栏,向下一直延伸到下层通道。

## 2.5 钢结构涂装

桥址环境无工业污染源,处于大气环境中,按使用要求对该桥进行长效防腐设计,要求防腐年 $T \geq 30$ (第一次维修寿命 $T_1 \geq 20$ 年)。拱圈钢结构表面采用热喷涂复合涂层体系,涂层类型为电弧热喷铝合金+封闭+涂装,标号为AL160LQB。铝合金材料为5A02(GB/T3190),涂层标准厚度160 $\mu\text{m}$ 。封闭涂料为H06-19锌黄环氧树脂底漆(ZBG51095-81),涂层标准厚度为40-50 $\mu\text{m}$ 。外涂装层采用厚浆型氯化橡胶面漆(QJ/DQ02-246-89),涂层标准厚度为150 $\mu\text{m}$ (两度)。

## 3. 转体施工设计

主拱肋采用单铰平转法施工,六盘水岸平转

135°, 柏果岸平转180°。整个转体系统由上盘、下盘、球铰、交界墩、扣索和背索、牵转系统等组成, 转体结构立面示意图5。上盘预应力束、背索、扣索均采用1860MPa级 $\phi 15.24$ 钢绞线。转体时半拱钢结构自重约为12014kN, 重心距拱脚临时铰中心水平距离48.86m, 施工转体实际总重为104000kN。

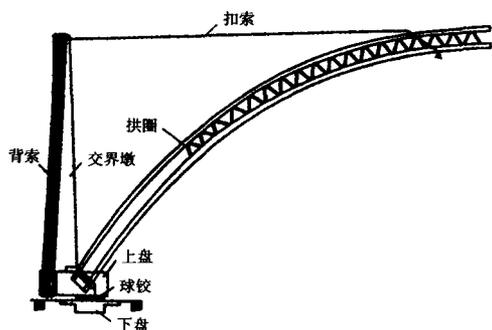


图5 转体结构立面示意

### 3.1 上盘

上盘平面呈“十”字形, 横向最大宽度26 m, 纵向最大长度20.03 m, 球铰支撑部位纵向向前突出3.5m, 上盘厚度6m, 上盘底部透视见图6, 上盘与交界墩构造见图7。上盘为三向预应力混凝土结构, 施工时上盘预应力施加与扣索和背索张拉交替进行。上盘纵向预应力束采用48束19 $\phi 15.24$ 钢绞线, 锚下控制应力为 $0.75f_{pk}$ , 沿上盘底布置成2层。上盘横向预应力采用13束12 $\phi 15.24$ 钢绞线布置在球铰区上盘顶面, 在背索锚固端附近、交界墩底的上盘顶面、底面及拱脚承压斜面下的横向拉应力较大区域布置59束4 $\phi 15.24$ 钢绞线。上盘的交界墩前后剪应力和主拉应力较大区域, 布置了680根 $\phi 32$ 冷拉IV级钢筋。横向、竖向预应力张拉锚下控制应力均为 $0.70f_{pk}$ 。

上盘底面距球铰中心3.5m半径的圆周上, 等距离设6根保险腿撑脚。每根撑脚由2根 $\phi 1000 \times 14$ 的钢管混凝土连接而成。下盘表面设滑道与之配合。撑脚与下盘滑道表面留5mm间隙。

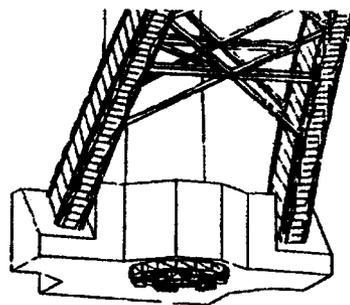


图6 上盘透视结构

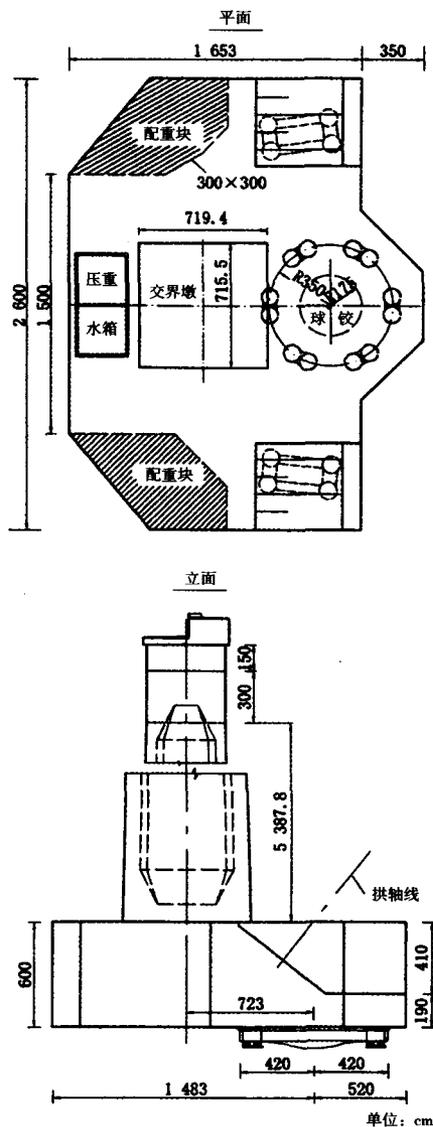


图7 上盘及交界墩结构

### 3.2 下盘

下盘为转体结构的基础, 转体完成后, 与上盘共同形成主拱基础。其上附设保险腿滑道、牵

引反力座等。针对基坑溶洞、溶槽及溶缝发育情况,对3号墩基坑底及坑壁进行全面压浆整治。4号墩基坑基础以球铰为中心 $9\text{m}\times 13\text{m}$ 范围基础加深 $4\text{m}$ ,开挖过程中遇溶缝、溶隙或溶洞采用混凝土灌注和压浆处理。基底其余部分局部发育的溶缝和溶隙采用局部压浆处理;对于较宽大溶槽在将软弱层清除后,用C20混凝土回填。

### 3.3 球铰

球铰传递转体重量,兼作转体定位轴,结构示意图见图8,其中心位于交界墩中心前方 $7.23\text{m}$ 处。转体球铰由上下2个球面组成,球面半径 $R=8\text{m}$ ,采用 $25\text{mm}$ 厚钢板压制而成。上球面位于上盘底部,为凸面,下球面位于转体下盘上,为凹面,球铰直径 $3.5\text{m}$ 。为防止在加工、运输过程中变形,同时为加强上下盘混凝土的连接,其背部设肋条。在下球面钢板上镶嵌聚四氟乙烯片,以减小上下球面之间的摩擦系数。下球铰周围灌注C40混凝土,上球铰周围填充C60混凝土。球铰中心设 $\phi 210\text{mm}$ 钢定位轴,定位轴套筒穿透上盘,必要时可取出定位轴。

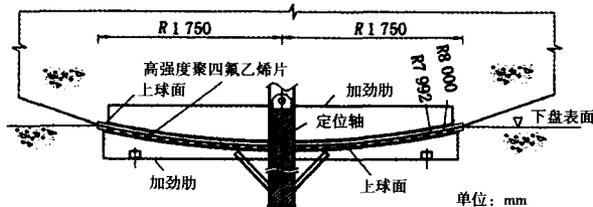


图8 球铰构造

### 3.4 交界墩

转体施工时交界墩为主要的受力构件,兼作为转体平衡压重,见图7。其结构为矩形空心墩,位于上盘顶面,墩高为 $53.878\text{m}$ ,墩身采用C30混凝土,托盘及顶帽采用C40混凝土。由于转体扣索和背索均锚固于其顶帽上,设计对顶帽进行了加强,顶帽厚度 $4\text{m}$ ,纵向宽度 $4.5\text{m}$ ,横向宽度 $7.2\text{m}$ 。顶帽设4层一共28束 $12\phi 15.24$ 的横向预应力钢绞线,锚下控制应力为 $0.75f_{pk}$ 。墩顶截面横向壁厚 $60\text{cm}$ ,纵向壁厚 $65\text{cm}$ ;墩身纵横两个方向放坡,纵向外坡 $40:1$ ,内坡 $50:1$ ;横向外坡

$50:1$ ,内坡 $55:1$ 。

### 3.5 扣索和背索

转体时拱肋通过扣索悬吊于交界墩顶端,拱肋转体到位后在合龙前可通过扣索来调整拱肋标高。扣索采用8束 $12\phi 15.24$ 钢绞线作为承力索,设计总拉力为 $9501\text{kN}$ ,钢绞线工作应力为 $0.38f_{pk}$ 。采取单端张拉,主拱上的扣点设为固定端,交界墩顶为张拉端。

背索用于平衡交界墩上扣索拉力。背索采用42束 $19\phi 15.24$ 钢绞线。上端锚固于交界墩顶帽,纵向与交界墩中心夹角为 $5.021^\circ$ 。采取单端张拉,张拉端设在墩顶,钢绞线工作应力为 $0.462f_{pk}$ ,背索总拉力为 $96000\text{kN}$ 。

### 3.6 牵转系统

牵转系统由牵引索、反力座和连续顶推千斤顶三部分组成。根据国内外有关测试结果,钢与聚四氟乙烯滑动摩擦系数一般为:静摩擦系数 $\mu_{静}=0.07-0.08$ ,动摩擦系数 $\mu_{动}=0.04-0.05$ 。设计静摩擦系数按 $0.1$ 控制,动摩擦系数按 $0.06$ 计算。按球铰承重面均匀受力,承重力 $P=120000\text{kN}$ ,计算启动时牵转力约为 $T_1=1532.5\text{kN}$ ,启动后牵转力约为 $T_2=919.5\text{kN}$ 。牵引索为2对(4束) $12-\phi 15.24$ 钢绞线,张拉系统采用ZTD2000-250型连续牵引千斤顶及相应的ZTDB油泵。牵引反力座设于下盘之上,共4个。

### 3.7 拱脚临时转动铰

为在拱肋合龙前能调整拱肋线形,保证拱肋精确地合龙,拱脚设置了临时转动铰。在拱肋合龙后,临时转动铰灌注混凝土封闭。

### 3.8 转体结构计算

将转体上盘、交界墩整体离散为块体单元模型,将交界墩背索拉力、拱肋扣索拉力及上盘预应力等模拟为结构外力,根据转体施工步骤逐步施加到结构上,采用ALGOR结构分析软件对上盘和交界墩整体分析计算。

## 4. 主桥主要施工步骤

(1) 浇注下盘混凝土,安装下球铰,制作

(下转第24页)

求,降低了不可靠因素,可以提供更大的锚固力。

4.3 压力分散型锚索采用了涂有建筑油脂的钢绞线,外面敷裹着高密度聚乙烯(PE)防护套,这种无粘结钢绞线具有很好的防腐性能。

4.4 压力分散型锚索可以缩短锚索长度,节省工程材料。注浆工序一次完成,不需要区分锚固端和张拉自由段,减少了施工工序,大大缩短施工工期,降低工程造价。

4.5 随着锚固技术的不断完善和发展,在复杂边

坡特别是在一些软岩地层加固中,压力分散型预应力锚索将越来越广泛。

#### 参考文献

- [1] 赵明阶等. 边坡工程处治技术[M]. 北京,人民交通出版社,2003.
- [2] 顾金才等. 预应力锚索内锚固段受力特点现场试验研究[J]. 岩土锚固新技术 北京 人民交通出版社,2000.
- [3] 段振西. 锚杆支护技术新发展[J]. 岩土锚固新技术 北京 人民交通出版社,2000.
- [4] 程良奎编著. 岩土加固适用技术[M]. 北京 地震出版社,1995
- [5] 中华人民共和国国家标准,锚杆喷射混凝土支护技术规范(GBJ86-85)[S].北京 中国建筑工业出版社

(上接第14页)

保险腿滑道,浇注牵引反力座、千斤顶底座等;现场拼装钢管拱桁。

(2) 安装上球铰,并做转动试验;在砂箱上立模施工上盘,注意在上盘尾部纵向1 m范围设硬支承,但在背索锚固区不能设硬支承。

(3) 张拉上盘全部横向、竖向预应力钢束。张拉第一批纵向预应力钢束,此时上盘中央向上微拱,上盘自重大部分转移到尾部的硬支承和球铰上面,上盘纵向呈简支状态。

(4) 在上盘上修建交界墩,修建交界墩过程中上盘不再施加预应力。

(5) 张拉上盘第二批纵向预应力钢束。

(6) 根据平衡的需要,在上盘堆放平衡重物。

(7) 拆除上盘模板及砂箱,为张拉背索提供操作空间。

(8) 按设计步骤,交替、分级张拉扣索、背索和上盘纵向预应力束。此阶段须监测上盘、交界墩、球铰、扣索及背索等重要部位的应力状况,监测交界墩顶的位移及上盘的变形情况等。

(9) 在钢管拱桁脱架之前,再一次核实平衡重的重量和位置;拱圈脱架,此时全部的转体重心应转移到球铰上面。

(10) 拆除上盘尾部的硬支承,清理场地,清除转体障碍物。

(11) 实施转体。

(12) 调整拱肋线形,合龙拱肋。

(13) 连接上下盘间的钢筋,混凝土封闭上下盘间的空隙,采用混凝土回填上盘周围的基坑,注意回填的混凝土不能妨碍上盘纵向预应力的拆除。

(14) 混凝土封闭拱脚临时转动铰。

(15) 交替、分级拆除扣索、背索和大部分上盘纵向预应力。

(16) 按下述顺序并按两岸对称及上下游对称的原则分段压注拱肋混凝土:上外侧钢管—上内侧钢管—下外侧钢管—下内侧钢管—上盖板—下盖板—外侧腹板—内侧腹板。

(17) 施工拱上墩柱和拱顶T形结构。

(18) 采用缆索吊架设16m梁,施工主桥检查设备。

#### 5. 结语

水柏铁路北盘江大桥为中国第一座铁路钢管混凝土拱桥,也是目前世界上最大跨度的上承式铁路钢管混凝土拱桥。桥面距江面高差达280m,为目前中国最高铁路桥梁;拱圈施工采用两岸半拱平转法合龙,其单铰平面转体重量达104000kN。该桥结构新颖,施工难度极大。经大桥设计、施工、制造、监理、监测和科研人员卓有成效的辛勤劳动,主拱肋于2001年1月20日顺利转体合龙,拱肋混凝土于4月灌注完毕,拱上结构于2001年7月完成,全桥8月铺轨通过。