

李子沟特大桥

专题技术方案

中铁十八局

目 录

第一节 基础施工技术	1
一、超深挖孔施工技术	1
二、承台大体积混凝土施工技术	2
第二节 百米高墩施工技术	5
一、工程简介	5
二、抗风液压自升式平台翻模的构造组成、特点及工作原理	5
三、工艺流程及施工方法	6
四、墩身冬期施工措施	10
五、取得的效果	10
第三节 主桥梁部施工技术	11
一、梁部结构简介	11
二、梁部施工技术	11
第四节 测量技术	27
一、控制测量施工技术	27
二、高墩变形、日照变形及合龙段施工变形观测	33
第五节 11号墩边坡防护预应力锚索施工技术	35
一、边坡加固方案概述	35
二、锚索作用原理及结构形式	35
三、锚索施工工艺	36
四、施工效果	39
第六节 混凝土施工技术研究	40
一、李子沟特大桥混凝土情况	40
二、大体积流态混凝土施工技术	40
三、高强度等级混凝土施工技术	47
四、混凝土冬季施工技术	49
第七节 施工机械配备	53
一、快速施工机械设备配套技术	53
二、TC5023塔机安装、使用与维护技术	58

第一节 基础施工技术

一、超深挖孔施工技术

(一) 工程概况

李子沟特大桥主跨设计为钻孔灌注桩基础，桩径为 150cm，桩长为 28~40m，其中 7 号和 8 号分别布置 16 根桩，8 号和 9 号墩布置 45 根桩，10 号和 11 号墩布置 50 根桩，根据地质、地形、水文、尤其是工期的要求，除在 10 号墩采用钻孔桩施工，其余均采用挖孔灌注桩施工。

(二) 施工方法

1. 严格按测放的桩位和挖孔孔径进行开挖，挖深 90cm 起进行井口护壁，井口混凝土比地面高出 20~30cm，以防止地表水流入孔内。

2. 撤模后在混凝土面上设定桩纵横轴十字线点，测定高程。

3. 4 人力绞车出渣，弃渣要随时运至坑外临时弃土场，不得堆在孔口附近。临时弃土场堆不下，及时用汽车运至永久弃土场。

4. 每次挖深比护壁高度大 20~30cm，便于灌注护壁混凝土。孔径控制：孔深在 15m 以内采用 185cm；在 15~30m 以内采用 195cm；在 31~40m 以内采用 205cm。

5. 挖孔质量控制：严格控制孔径，保证护壁混凝土厚度。误差要求：土层孔径误差不得大于 4cm，弱风化岩层孔径误差不得大于 8cm。检测方法：采用十字线交心悬挂线坠，钢卷尺丈量。检测频率：在每一节开挖过程中进行 2~3 次校核，防止超挖、欠挖和倾斜。

6. 人员上下利用在孔壁悬挂的钢筋软梯，在孔口要预留两根钢管作为软梯的固定接点。

7. 排水：桩孔内渗水量不大时，进行人工排水。渗水量较大时，用潜水泵排水。

8. 护壁支撑：本桥挖孔全采用混凝土护壁支撑。护壁厚度，从上往下计，孔深 15m 以内采用 15cm；15~30m 采用 20cm；31~40m 采用 25cm。混凝土强度等级采用 C20。在支立护壁混凝土模板前，必须由值班技术人员检查验孔，达到质量要求后才能立模。设计净孔尺寸为 155cm。模板组装后要严格校核其几何尺寸，保证护壁内孔径不小于 152cm。护壁模板落在孔底开挖面上，模板顶边距上节护壁混凝土底端 20~30cm。混凝土入孔采用串筒，孔底铺铁皮存放混凝土，人工铲运入模。采用 30mm 的捣固棒进行震捣，保证混凝土密实。各节护壁间间隙在拆模后用干硬性的混凝土塞严、抹顺。每隔 4~5 节在混凝土间隙打入两根 $\Phi 22$ mm 的钢筋，以固定人员上下用的钢筋软梯，预留的钢筋要在同一垂线上。混凝土的拆模时间根据气温决定，一般在 10h 可以拆出，为了赶工期可以适量掺加速凝剂或早强剂，拆出时间由试验确定。为节约时间，可以在灌筑完上一节后继续开挖下节的中间部分，但开挖时不得扰动护壁混凝土。混凝土拆模以后，要及时检查护壁的内孔径是否满足上述 3---5 标准，否则及时修正至符合要求。

9. 孔底挖至设计标高后，凿平孔底，将碎渣及泥土全部清理干净。

10. 终孔验收

验收程序：由施工小组先行自检，后报队专业工程师检查和主管工程师复检，填写呈检单报指挥部质检工程师检查，最后报请监理工程师终检签证。质量标准：孔的中轴线偏斜不得大于孔深的千分之五，截面尺寸必须满足设计要求，孔口平面位置与设计桩位偏差不得大于 5cm。

11. 钢筋笼加工和安装

按桩长分 2~3 节加工，用缆索吊机吊至各墩旁，再用缆索或汽车吊配合在各孔口施以焊接接长入孔，质量满足规范要求。

12. 灌注桩基混凝土

成孔后，视孔内涌水大小确定灌注方法。实测孔内涌水高度每分钟小于 6mm 者采用空气中灌注混凝土，每分钟大于 6mm 者则采用导管法灌注水中混凝土。空气中混凝土采用挂串筒，机械振捣方法施工。串筒下口离混凝土面高差不得大于 2m，一根桩要连续灌注。

(二) 安全防护措施、

1. 在基坑上口四周设置排水沟并将地面整平压实。基坑内四周进行浆砌片石防护，防止边坡坍塌。

2. 在基坑内四周设排水沟，直接将水排出坑外；或者在坑角设积水坑，用抽水机将水排出。

3. 设立安全警示标示牌。

4. 及时护壁，挖深控制在 60cm。

5. 开挖不宜放炮，遇到较大的块石宜采用打楔眼破碎；遇到质硬而破碎的岩层宜采用风镐开挖；遇到大的孤石和完整性较好的岩层可以采用爆破，但在爆破时应严格控制药量。

6. 通风和防毒，本桥桩基岩层主要为碳质页岩，孔内产生二氧化碳气体相对较多，孔到一定深度后，单靠自然通风排出非常缓慢，影响施工，必须采用压风机向孔底压风。孔深到达 15m 以后，正常情况每 2h 利用 25m³/min 的风机向孔底压风一次，每次 4~6 分钟；孔深到达 30m 以后，每次通风时间 8~10 分钟。配备检测二氧化碳的仪器，经常检查孔内混和气体中二氧化碳的浓度，如超过 3%，必须加强通风；如超过 5%，禁止人员下孔，并进行通风，直至符合要求。

7. 每墩都要设专职安全员一人，负责安全警戒和安全检查。作业人员必须戴好安全帽。经常检查绞绳、绞车、软梯等易磨损件，及时进行处理，确保安全。经常检查二氧化碳的浓度，作好通风防中毒工作。

二、承台大体积混凝土施工技术

(一) 承台工程概况

李子沟特大桥主跨承台工程量见承台混凝土数量表 2-1-1-1，

表 2-1-1-1 承台混凝土数量表

承台编号	结构尺寸	混凝土方量	施工方法
7, 12	14.2×14.2×4	807	采用 50m ³ /h 拌和站拌制混凝土，混凝土罐车运输，人工配合由一端往另一端顺序灌注，机械捣固。
8~9	18.1×33.7×5	3050	
10~11	18.1×37.6×5	3403	

(二) 大体积混凝土施工技术

1. 大体积混凝土开裂原因分析

大体积混凝土施工中，由于圬工量大，水泥的水化热热量大，混凝土内外散热不均匀，造成内外温差大，在混凝土内部产生较大的温度应力，导致混凝土发生开裂。因此大体积混凝土施工中的温度控制是防止混凝土开裂的关键。

2. 施工方法和施工控制

(1) 控制温度升降速度，防止出现过大的温度应力

1) 选用低水化热水泥，降低混凝土内部热量：选用“水钢”矿渣 32.5 号水泥，28d 水化热 335KJ/kg，比普通水泥低 42KJ/kg。

2) 掺加缓凝剂，推迟水化热的峰值：掺加 HE-2 型缓凝剂 1%，混凝土缓凝时间可推迟 8~10h，从而延缓水泥的水化速度。

3) 掺加粉煤灰，降低水泥用量，减少水泥水化热：承台混凝土设计强度等级为 C18，通过多次试验，最后选定 1 组水泥用量最少的配合比，水泥用量为 271kg/m³，比一般配比低约 30kg。

4) 降低混凝土的入模温度：混凝土的入模温度一般控制在 15~20℃。7 号~9 号承台是在夏季施工，采取用地下水浇撒砂石进行降温，地下水温比砂石低约 3℃。本桥址为高原气候，昼夜温差大，但因混凝土量大，无法避免白天高温时施工，采取白天减缓施工速度和夜间加快施工的方法。

施工中选用“水钢”矿渣 32.5 号水泥，水泥用量 $Q=271\text{kg/m}^3$ ，水化热取 $Q_0=335\text{KJ/kg}$ ，粉煤灰掺量 $F=100\text{kg/m}^3$ ，7 号~9 号承台混凝土入模温度 $T_0=20^\circ\text{C}$ ，10 号~11 号承台混凝土入模温度 $T_0=15^\circ\text{C}$ ，则计算混凝土内部绝热温升最高温度： $T_{\max}=T_0+Q/10+Q_0/50$ ，7 号~9 号承台 $T_{\max}=49.1^\circ\text{C}$ ，10 号~11 号承台 $T_{\max}=44.1^\circ\text{C}$ 。混凝土最高温度峰值出现在混凝土浇注后的第 3d，混凝土实际温升要考虑浇注块厚度(5m)的降温系数 $\xi_{\tau=3\text{d}}=0.77$ ，则 7 号~9 号、10 号~11 号承台实际温升最高温度为 $T_{\max}=T_0+T_{\max} \times \xi_{\tau}=57.8^\circ\text{C}$ 和 49°C 。

通过采取以上措施，浇注的混凝土比普通混凝土的最高温度(约为 55~60℃)低 5~10℃左右。

(2) “内排外保”，减少混凝土内外温差

根据国内外经验，大体积混凝土内外温差控制在 25℃ 以内，可避免混凝土出现温度收缩裂缝，为此采取了以下措施：

1) “内排”：尽快排出混凝土内部热量，降低混凝土内部温度。在混凝土浇注以前，预先在混凝土内按间距 $a=2\text{m}$ 放置 $\Phi=150\text{mm}$ 的钢管作散热管，混凝土灌注中和灌注后每隔 2h 换冷水循环散热一次，可降低混凝土内部温度 5~8℃，待混凝土内外温差降至 25℃ 以下可停止换水，混凝土达 28d 后用同强度等级混凝土将散热管灌实。

2) “外保”：在混凝土表面采取保温措施措施，控制混凝土内外温差及混凝土表面与空气温差，避免出现深层裂纹和表面裂纹。全部承台四周采用浆砌或混凝土圪工作外模，既可保温又可增加其抗裂外约束条件，同时在混凝土顶面采取两种保温措施：一是 7 号~9 号承台在夏季施工，散热管内水温较高，一般超过 40℃，在承台四周筑堤，待混凝土终凝后将抽换的热水覆盖混凝土表面 20cm 深，既可保温，又作养生；二是 10 号~11 号承台在 11 月份施工，大气温度较低，在表面覆盖厚 5cm 的草袋或水泥袋。

(3) 改善混凝土的性能和施工工艺，提高混凝土抗裂能力

1) 采用干净的砂、石料，含泥量分别控制在 3% 和 1% 以下，并用人工进行冲洗。

2) 掺加 HE-2 缓凝高效减水剂和 UZF-2B 早强高效减水剂，配制自密实流态混凝土，既减少混凝土用水量，又能延缓终凝时间，同时增加混凝土前期强度，防止混凝土在温升最大时发生开裂。

3) 掺加一定粉煤灰，除减少水泥用量外还能增加混凝土的抗渗、抗裂能力。

4) 优化施工工艺，提高混凝土抗裂性能。采用全面分层的方法浇注，每层厚度控制在 0.5m，浇注顺序由一端往另一端进行，混凝土连续浇注。加强混凝土的捣固，增加混凝土密实度。

3. 效果

通过降低水化热，增加缓凝时间，“内排外保”减少温差，同时增大混凝土流动性，降低工人的劳动强度，保证混凝土的连续生产和运输，加强混凝土振捣作业，分块、分层连续灌注，确保混凝土灌注连续和整体性，避免大体积混凝土开裂。通过采取以上措施，主桥全部承台施工的 14520m³ 混凝土没有发生任何开裂现象，取得了预期的效果。

第二节 百米高墩施工技术

一、工程简介

内昆铁路李子沟特大桥由 2 台 19 个墩组成，全桥墩高在 50m 以上的有 8 个，80m 以上有 3 个，最高墩达 107m。主桥墩身为横向弧端型内外收坡变截面空心墩，混凝土圬工总量 28911m³。

主桥高墩施工采用抗风液压自升式平台翻模施工，该法以我集团公司“高墩液压自升平台式翻模施工工法”为基础进一步完善，增加了抗风施工措施，具有施工速度快、劳动强度低、工艺先进、具有较强抗风能力等特点。

二、抗风液压自升式平台翻模的构造组成、特点及工作原理

（一）构造组成

该系统由液压提升设备、工作平台、抗风柱、内外吊架、顶杆和套管、模板系统等组成。

1. 液压提升设备

由 40~50 个 GYD60 型单作用穿心式千斤顶，YKT-56 型液压控制台，高压输油管及分油阀等组成，是工作平台提升、调平纠偏的动力设备。

2. 工作平台

由槽钢组成的纵梁和横梁栓接而成，千斤顶固定于纵梁提供动力，上铺木板，四周设围栏挂安全网，是安放机具，堆放材料，混凝土浇注，施工人员作业的主要场地。

3. 内外吊架

由角钢吊杆、木步板和围栏等组成，安装固定在平台纵横梁上，随工作平台上升同步提升，是施工人员拆立模板的场所。

4. 顶杆和套管

顶杆采用 $\Phi 48\text{mm}$ 钢管，长 1.5~2.5m，两端加工成内外丝扣形式，便于续接，是供千斤顶爬升和支撑工作平台的重要部件。套管采用 $\Phi 60\text{mm}$ 钢管，长 2.4~2.6m，安装在平台纵梁下缘，随平台提升而上升，埋于混凝土内约 60~80cm，在初凝后的混凝土内形成孔洞，以阻止顶杆与混凝土粘接，便于顶杆抽换倒用，同时起加强顶杆和平台的稳定作用。

5. 模板系统

由内外模板组成，内模采用组合模板，外模采用 4mm 厚钢板定制加工的大块组合模板。外模根据结构形式和收坡变化进行排版，分弧端固定模板，直线段固定模板、斜角模板、大小抽换调节模板等四种。模板采用栓接，模板缝采取公母榫接避免混凝土漏浆和错台等质量通病，外用双槽钢围带箍紧，钩头螺栓和拉杆固定。

6. 抗风柱

由槽钢组焊而成，用螺栓固定在已灌筑完混凝土的模板和混凝土上，每套模板共四套，分内外抗风柱，通过固定在平台横纵梁上的导向轮控制平台的滑升方向，抵抗平台

的水平力。抗风柱随模板的翻升而翻升。

（二）结构特点

该套翻板模较以往高墩翻板模相比具有如下结构上的特点

（1）平台面积达到 300m²，结构庞大，直接采取横纵梁交叉栓接，加工简单。

（2）采取倒换顶杆和千斤顶的位置的办法收坡，千斤顶与平台之间进行直接连接，增加了平台的整体稳定性。

（3）设计有抗风架，使模板具有了抗风能力，增强了对自然环境的适应性。

（三）工作原理

利用顶杆将工作平台支撑于达一定强度的墩身混凝土上，以液压千斤顶作动力提升工作平台，达到一定高度后平台上悬挂吊架，施工人员在吊架上进行模板拆卸、提升、安装、绑扎钢筋等作业。混凝土的灌注、捣固、吊架内移等作业则在工作平台上进行。内外模板各设三层，当第三层模板混凝土浇注完毕后，提升工作平台，拆卸并用倒链提升第一层模板至第三层上，进行安装校正，然后灌注混凝土，就此周而复始，直至墩顶。抗风柱对混凝土和模板进行固结，抵抗平台承受的风荷载和控制平台的偏斜。采用全站仪进行中线测量。

三、工艺流程及施工方法

（一）工艺流程

翻模组装流程见图 2-1-2-1。

液压翻模循环施工工艺流程见图 2-1-2-2。

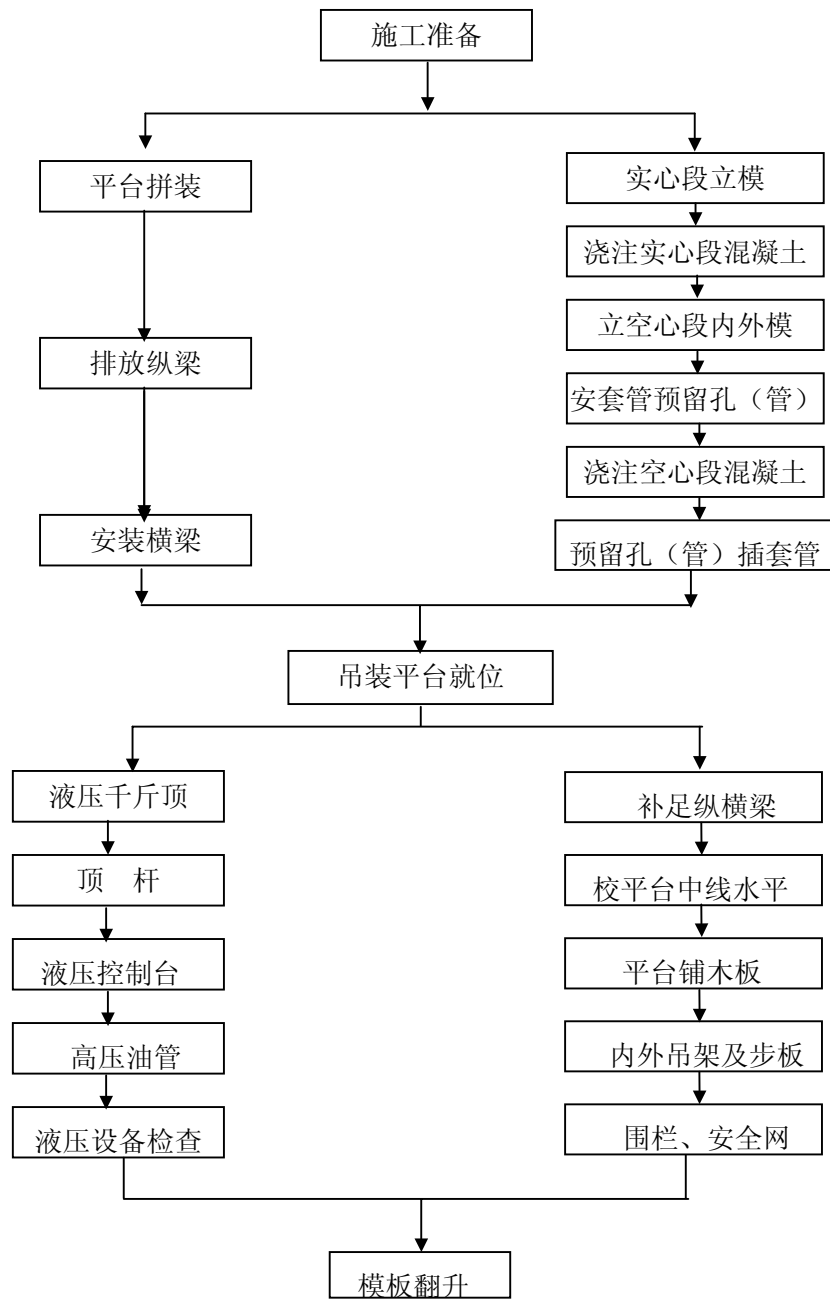


图 2-1-2-1 墩身液压翻模组装流程图

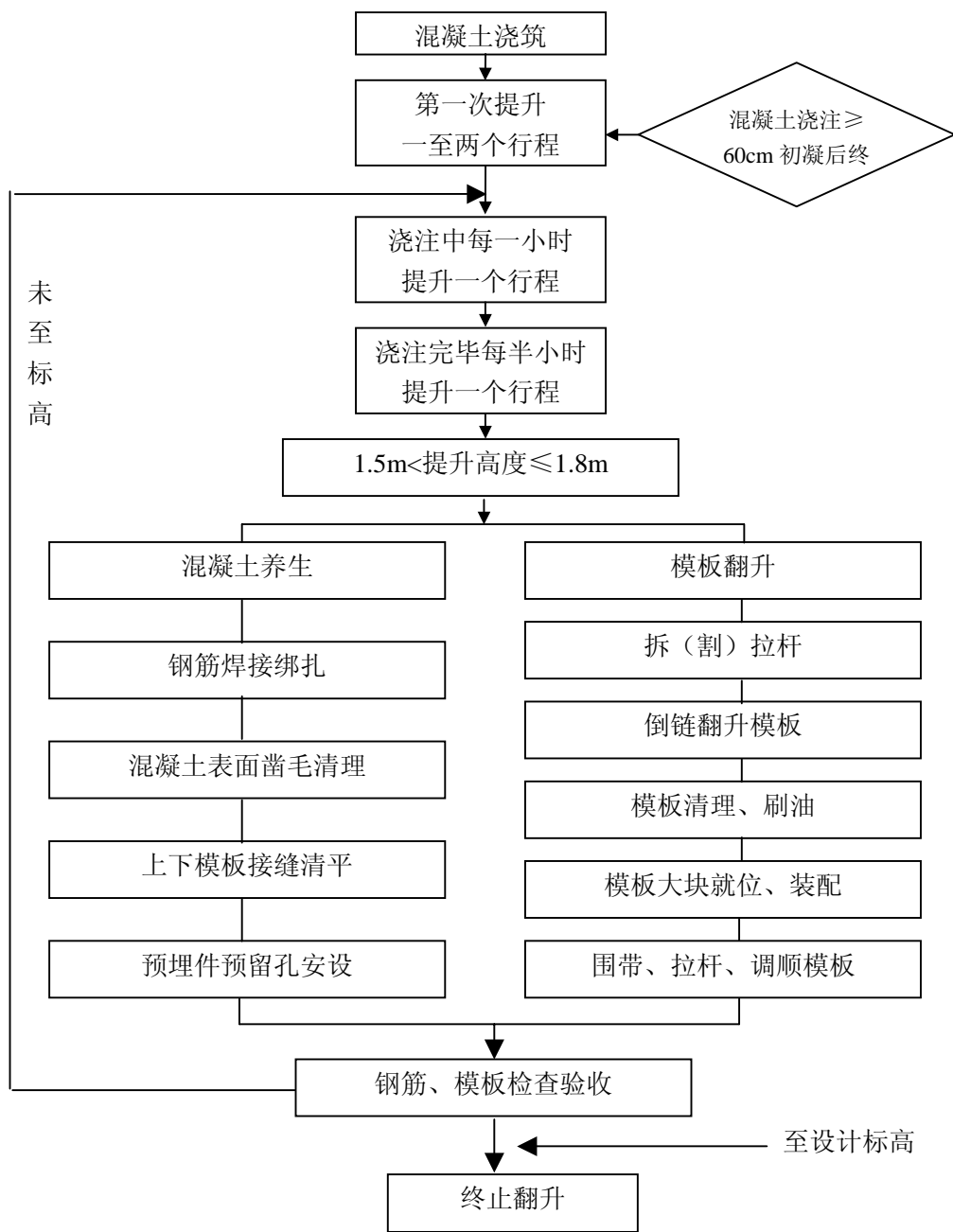


图 2-1-2-2 墩身液压翻模循环施工工艺流程图

(二) 施工方法

1. 混凝土浇筑

(1) 采用 $25\text{m}^3/\text{h}$ 和 $50\text{m}^3/\text{h}$ 自动计量拌合站各 1 台拌制混凝土，4 台混凝土运输车运输，塔吊和缆索吊进行吊装灌注。

(2) 混凝土对称均匀分层浇筑，每层厚度 30cm，通过掺加高效减水剂，增加混凝土和易性，便于人工摊平和减少混凝土的冷缝、色差。

(3) 混凝土捣固采取定人、定岗、定责方法，不漏捣、不过捣，确保混凝土捣固

密实。

2. 工作平台提升

(1) 第一次提升工作平台应在混凝土初凝后终凝前进行为宜。提升高度为千斤顶1~2个行程(3~6cm)。

(2) 在浇筑过程中每一小时提升一次，每次提升千斤顶一个行程(3cm)。

(3) 浇注完毕后继续提升工作平台，每隔半小时提升千斤顶一个行程。

(4) 提升工作平台的总高度以能满足一节模板(1.5m)组装高度即可($1.5\text{m} < h \leq 1.8\text{m}$)。

(5) 当混凝土终凝且又不需要提升工作平台高度时，终止提升平台，进行模板和抗风柱的翻升。

3. 模板和抗风柱的翻升顺序

(1) 将底节抗风柱解体，利用塔吊整体翻升至抗风柱顶面，并连接固定。

(2) 底层模板脱离、解体：拆除拉杆剥离模板后，将模板及其围带解体成每4~10m一个单元，分别通过悬挂在纵梁上的多个倒链提升模板到安装位置。

(3) 模板装配：弧端模板和直线段固定模板直接提升至原位安装，斜角模板和抽换模板根据预先排好的排板图进行调整，保证模板上口周长与墩身设计截面周长相吻合。模板装配按照由中心向两端顺序对称进行合龙。

(4) 固定抗风柱：利用拆除的对拉螺栓将抗风柱与混凝土固定。

4. 千斤顶移位和顶杆的回收倒用

(1) 千斤顶移位：当墩身收坡使最外一排千斤顶离模板距离小于20cm时，需将千斤顶向内侧纵横梁移位，在移位前一板的混凝土中预埋 $\Phi 80\text{mm}$ 钢管作套管的预留孔。

(2) 顶杆的回收倒用：当顶杆接长到20m左右，拆下千斤顶将顶杆拔出逐节卸掉，进行回收利用，再在浇注的混凝土中预埋 $\Phi 80\text{mm}$ 钢管作套管的预留孔，下一板混凝土浇注前安装顶杆和千斤顶。顶杆回收必须分批进行，每批不超过10%，各根之间至少间隔3根顶杆，以保证平台能稳定提升。

(3) 顶杆移位和回收后的孔洞采用与墩身同强度等级混凝土或砂浆灌注。

5. 百米高墩线性控制

利用全站仪进行墩身十字线的测量，每板进行，确保墩中线位置正确。

6. 安全、质量检查和验收

按照《铁路混凝土与砌体工程施工及验收规范》(TB10210-97)和《铁路桥涵工程质量检验评定标准》(TB10415-98)进行质量检查和验收，每一板混凝土灌注均经现场监理工程师进行检查验收。同时增加对平台的检查内容。

(1) 工作平台必须对中整平，对角线一致，不得偏扭，平台上的设备、材料要均匀布置。

(2) 液压设备按照产品技术要求进行安装和调试。

(3) 平台铺板、吊架步板和安全网必须全封闭安装，保证作业人员安全。

(4) 检查抗风柱是否工作正常。

四、墩身冬期施工措施

因工期要求，本桥 10 号、11 号墩进行冬季施工，主要采取以下措施：

(1) 砂石料加热：安装一台 0.5m^3 的蒸汽锅炉对拌合机内的砂石料进行加热，保证混凝土入模温度不低于 10°C 。

(2) 墩身保温措施：用铁皮将外吊架密封至平台以上 1.2m ，吊架内安放煤炉进行加热升温，同时进行温度观测，确保模板外温度不低于 5°C 。平台下混凝土表面采用彩条布和棉被覆盖，其覆盖范围根据混凝土的强度，混凝土的内温情况确定，以保证混凝土的内温和环境温差在 25°C 以内。

(3) 加强温度观测，及时为施工提供数据：施工过程中在混凝土内部安放测温孔，加强对混凝土的内温和环境温度的观测，及时为施工提供数据，随时改变施工方案。

五、取得的效果

采用液压自升平台式翻模进行高墩施工，最快速度达到 $2\text{d} 3\text{板}$ (4.5m)，创造一个月完成墩身 52m 的记录，百 m 高墩施工不超过三个月。墩身达到了弧端圆顺，大面平整，棱角分明，基本消除了混凝土冷缝和色差。

第三节 主桥梁部施工技术

一、梁部结构简介

李子沟特大桥主桥包括 7~12 号墩及五跨（72+3×128+72m）一联 529.4m 的刚构-连续组合梁。全桥由 8 号~11 号墩的 4 个 T 构组成，8 号墩顶设活动支座，其他均为刚构。每个 T 构梁段划分为 0 号段、1 号~16 号段、17 号合龙段及边跨的 18 号、19 号段，全联共分为 141 个施工梁段。梁体为单箱单室、变高度、变截面、三向预应力箱形结构，支墩处梁高 8.8m，跨中 34m 直线段及边跨端部 25.7m 直线段梁高 4.4m，顶板宽 8.1m，箱宽 6.1m，梁部混凝土圬工 7452.8m³。

二、梁部施工技术

该桥梁部施工的关键技术包括 0 号梁段竖向预应力筋安装、0 号梁段混凝土灌注、挂篮方案、张拉工艺、合龙顺序设计、合龙段施工、预应力施工技术、抗风施工技术等。

（一）0 号梁段施工技术

1. 0 号梁段竖向预应力筋安装

0 号段竖向预应力筋高达 12m，要求一次性安装到位，不允许采用连接器连接。以往施工都是在地面和普通钢筋一起绑扎定位，然后整体吊装至 0 号段。本桥利用墩身液压平台，在其上搭设钢管架安装和定位竖向预应力筋，并在墩身周边混凝土内埋设[16 槽钢作劲性骨架来架立和固定竖向预应力筋。待预应力筋埋入墩身一段混凝土后，分解和拆除墩身液压平台，钢筋仍然以钢管架支撑。

2. 0 号梁段膺架安装

0 号梁段在膺架上进行现浇施工，本桥刚构墩梁结合部不设墩顶实心过渡段，箱梁底板即为墩身封顶，因此 0 号段施工须设置内外膺架。

（1）内部膺架：在墩顶混凝土内设置钢牛腿，牛腿上安装纵横梁和模架，模架上铺设模板，并在封顶混凝土内设置吊环，用以拆除膺架。

（2）外部膺架：外部膺架是利用在墩顶墩身预埋螺栓套组焊的预埋件，安装由型钢加工的三角架，承受施工荷载。三角架与螺栓套采用 $\Phi 22$ 螺栓连接，工程完成后直接卸掉螺栓，并用砂浆抹平即可。外部膺架见图 2-1-3-1，图 2-1-3-2。

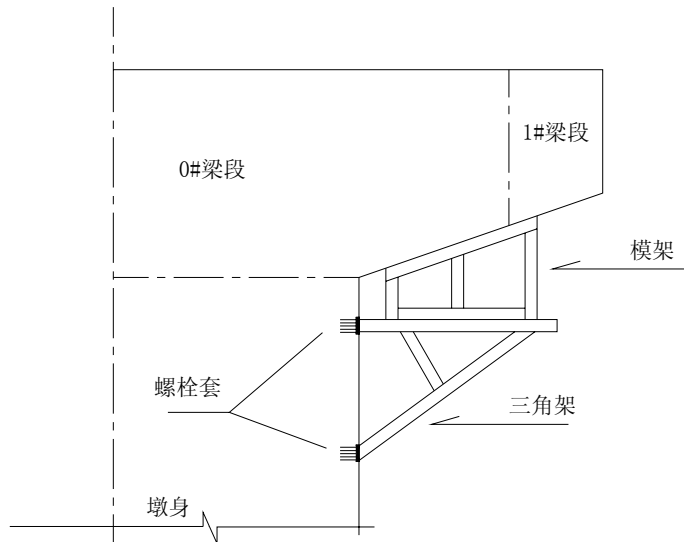


图 2-1-3-1 0 号段施工正面膺架示意图

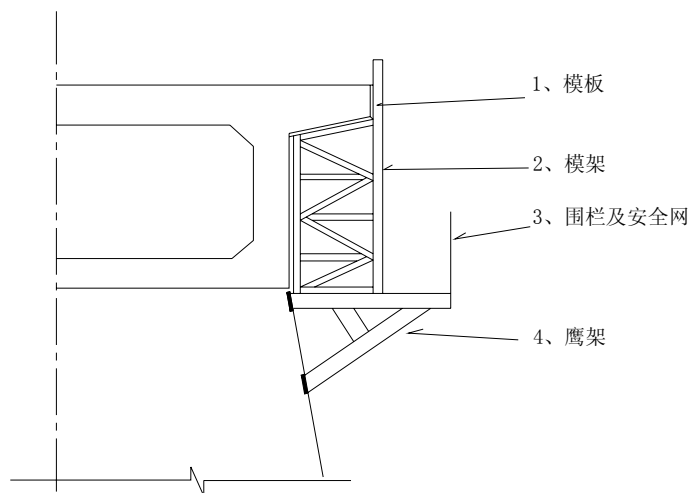


图 2-1-3-2 0 号梁段施工侧面膺架示意图

3. 0 号梁段混凝土施工

(1) 混凝土的拌制

采用 5~30mm 连续级配的碎石和含泥量低于 1% 的中粗河砂，通过掺加高效减水剂，根据不同的灌注部位和气温情况制成塌落度 12~18cm 的流态混凝土。

(2) 混凝土灌注

混凝土采用单钩起吊能力 10T 的双组缆索吊和 1250kNm 的塔吊进行灌注。在腹板、顶板和隔板位置开洞 9 处，安放串筒，保证混凝土直达灌注部位，人员进入结构内部进行捣固。

4. 0 号梁段抗风措施

当地最高风速达到 33m/s，相当于 10 级台风的风力，故抗风施工是本桥 0 号梁段施工的关键技术。

(1) 风荷载计算

$$W=k_1 \times k_2 \times k_3 \times w_0$$

取 $k_1=1.4$, $k_2=1.56$, $k_3=1.3$,

$$w_0=V^2/1.6, W=1932\text{Pa},$$

对于 0 号梁段模板产生的水平力为: $P=12 \times 9.6 \times 1932=22.2\text{t}$

(2) 施工措施

在施工中采取如下措施进行施工

- 1) 现场安装测风器, 加强对风速的观测。
- 2) 吊装时避免强风天气。
- 3) 模板由模架和面板组成, 模板于地面拼装后进行整体吊装。就位后及时进行加固, 模板外模架与膺架焊接, 上下游模架进行刚性连接, 经过计算能达到抗风的要求。

(3) 效果

在施工过程中发生的最大风速为 16m/s, 事后观测模板未产生位移。

(二) 箱梁悬灌施工技术

1. 挂篮的设计

(1) 采用自锚桁架式三角形挂篮进行悬灌施工, 内外模板和主构架可以一次走行到位, 根据现场的施工情况和施工习惯, 内模也可以两次走行, 外模只能与主桁架一次走行到位。

(2) 挂篮组成: 本桥采用三角形桁架式挂篮, 由吊架部分、锚固部分、模板部分、走行部分及附属部分组成。

(3) 主要技术指标: 挂篮自重 59t, 适应最大梁段长度 4m, 适用最大梁段重量 200t, 挂篮实际测量变形 13mm, 一般梁段施工时预留沉落值 5~10mm, 设计安全系数为 2.5, 导链牵引, 前支座安放聚四氟乙烯滑板, 后支座设滚轮。

(4) 挂篮设计不同之处在于挂篮的走行部分, 在走行时外模板坐落于底模纵向走行梁上, 较以前依翼缘板下的走行梁走行更为安全和平稳。

2. 挂篮刚度及变形试验

挂篮在工厂进行了刚度和变形试验。挂篮分级加载、卸载, 通过实验测定挂篮的弹性变形和非弹性变形值, 检验各部件的连接情况, 测定施工数据, 为安装挂篮预留沉落量提供依据, 具体的实验方法如下:

- (1) 场内制作挂篮加载实验台;
- (2) 场内拼装挂篮主桁架;
- (3) 主桁架前端分级加载, 进行挂篮实际变形观测, 做好记录;
- (4) 在实验台上分别对锚、吊结构进行加载实验, 安全系数要大于 2。

通过加载实验测定挂篮在满载时的弹性变形值为 13mm, 非弹性变形值为 11mm, 强度和刚度符合施工规范和钢结构设计规范要求。

3. 挂篮安装

挂篮安装在 0 号段完成并安装完底板后进行，先安装滑轨和锚轮组，并利用竖向预应力筋锚固滑轨。然后吊装主桁架部分，主桁架在地面组装后用缆索吊吊装到位，最后安装前横梁和其他部件。

挂篮安装采用缆索吊分部整体吊装施工，具体施工步骤如下：

- (1) 安装挂篮底模板，并利用竖向预应力筋锚固挂篮轨道。
- (2) 主桁架在地面整体组装后用缆索吊吊装到位，锚固于挂篮轨道。
- (3) 安装前横梁及前吊带，悬吊底模板，解除斜拉底模的钢丝绳。
- (4) 0 号梁段外模解体，利用缆索吊单侧吊钩移动就位，置于底模外侧走行纵梁上，上端临时固定于主桁架上。
- (5) 安装外模吊梁和吊杆悬吊外模。
- (6) 安装内吊梁，吊杆和内模架，内模板。
- (7) 安装其他部件。
- (8) 安全检查。

安装前对有关尺寸进行检查，如吊带孔位置，锚固钢筋间距，吊耳间距等，发现问题及时处理，避免影响安装进度。

4. 挂篮的使用

施工时为进行有效的线性控制工作，减少挂篮在灌注混凝土过程中的变形调整，挂篮前端应预留沉落量，沉落量的确定是根据挂篮实验时的变形和现场施工前 1—2 个梁段灌注过程中的变形观测结果来确定的，具体办法如下：

- (1) 首次使用挂篮前按照实验数据对挂篮前端预留沉落值。
- (2) 灌注混凝土前于挂篮前横梁和吊带上设定观测点。
- (3) 根据混凝土的灌注过程分级对观测点的标高进行观测，当观测结果与预留沉落值相差超过施工规范要求的 5mm 时，对挂篮前吊带进行调整
- (4) 对观测结果进行分析，确定挂篮的底模板和主桁架的变形。

该桥挂篮的预留沉落值根据实验和前期的观测结果设定为 1~5 号梁段 8mm，5~11 号梁段 5mm，11~17 号梁段 8mm。该变形值在进行挂篮标高设定时一次完成。

在挂篮的使用过程中坚持对挂篮的吊挂系统进行检查，避免发生安全事故。

5. 挂篮行走

梁段混凝土达到 80% 后，进行张拉压浆，后将挂篮前移。前移步骤为：

- (1) 接长并锚固挂篮轨道，在轨道表面放置镀锌铁皮，并涂润滑油；
- (2) 拆下底模后吊带、内外模前后锚杆，并确认模板已经和混凝土脱离，内模和内模架落于降低的内滑梁上，外模板落于底模走行纵梁上；拆除主桁架的后锚杆让后支座受力，放松底模前吊带，使底模离开梁体 100mm 左右；
- (3) 进行走行前的安全检查，重点检查部位为挂篮两轨道是否相对水平和与桥轴线平行，轨道锚固和支垫情况，挂篮前后支座，挂篮上是否有人在作业；

(4) 每片主桁架各用一个 10t 的倒链牵引，带动挂篮底模、侧模和内模同步前移，滑行时及时对接缝和混凝土表面缺陷进行处理，尤其是对拉杆头进行处理，防止锈水污染混凝土表面，进行修补和处理时挂篮不能移动；

(5) 到位后及时安装底模后吊带，内外滑梁吊杆和挂篮主桁架后锚固装置，将临时受力状态变为永久受力状态，确保施工安全。

(三) 箱梁线性控制施工技术

为保证梁体在竣工后线性符合设计，满足运营要求，在施工中必须对梁体进行线性控制。

1. 线型控制原理

考虑箱梁在悬灌阶段的不同状态时影响线型的因素（包括混凝土的徐变，预应力等因素的影响），运用计算机进行变形计算，将其结果与现场实测结果进行比较，通过调整梁段的立模标高来达到设计要求。

2. 线型控制所做的工作

(1) 精确测定梁部混凝土的弹性模量，干容重；保证混凝土强度符合设计要求；合理安排工期，使实际施工工期与设计相符；按照设计的合龙顺序和合龙温度进行合龙。

(2) 施工阶段的梁段进行分阶段的变形观测。通过观测的实际数据与计算结果对照，经过计算确定下一阶段的混凝土立模高程。进行高程测量时采用三角高程测量技术，同时应用了 TTM 理论，确保高程测量的准确。

(3) 为更有效地精确计算，现场分别进行墩身沉降观测和日照温差对位移影响观测。

(四) 梁部混凝土施工技术

1. 混凝土的质量指标

(1) 混凝土的设计强度 C48 要求 3d 的强度达到 80% 以上，龄期强度按照配合比设计要求达到 120% 以上。

(2) 混凝土的弹性模量不小于 $3.5 \times 10^6 \text{GPa}$

(3) 混凝土的干容重小于 2.60t/m^3

(4) 混凝土外观无缺陷，颜色一至，棱角分明。

(5) 混凝土坍落度要求达到 120~180cm，便于混凝土捣固作业。

2. 混凝土原材料的选用

(1) 水泥：使用 42.5 号普通硅酸盐水泥，其品质指标应符合现行国家水泥标准。

(2) 砂子：悬灌梁 C48 混凝土采用广西订购的优质砂，砂中含泥量在 1% 以下，砂的其他技术指标应符合 GB/T14684—93《建筑用砂》质量标准。

(3) 石子：采用碎石 5~31.5mm 连续级配，碎石中细粉含量 $\gt 1\%$ ，其他技术指标符合 GB/T14685—93《建筑用卵石、碎石》质量标准。

(4) 外加剂：梁部 C48 混凝土选用广东湛江产 FDN—3000 高效减水剂，掺量 $c \times$

0.5%。

3. 混凝土的质量控制

(1) 混凝土的拌合施工

1) 混凝土采用自动计量拌和站进行集中拌和，混凝土生产能力为 $25\text{m}^3/\text{h}$ ，施工前混凝土拌和人员在试验人员的监督下将试验室所开的配合比输入电脑，确认无差错后方可开盘。

搅拌时间不少于 45 秒。

混凝土拌制的干湿度。梁部混凝土底板坍落度控制在 $160\sim 180\text{mm}$ ，墙部混凝土坍落度控制在 $120\sim 140\text{mm}$ ，顶部混凝土坍落度控制在 $80\sim 100\text{mm}$ 。

(2) 混凝土的运输

混凝土水平运输采用混凝土运输车，垂直运输采用缆索吊和塔吊。在进行梁段施工中，每小时可完成从拌和楼至作业面的运送混凝土 15m^3 。满足混凝土的灌注需要。

(3) 混凝土的灌注

1) 混凝土采用插入式振动器捣固密实，每个梁段配备 4—6 台插入式振动器；根据梁段的高度确定振动棒的长度。

2) 混凝土从拌合楼拌出至入模时间为 $30\sim 40$ 分钟，保证混凝土在初凝前入模。

3) 控制混凝土入模温度在 $17\sim 30$ 度之间，确保高强度等级混凝土的整体质量和早期强度，如达不到，原材料需进行降温和升温处理。

4) 混凝土进行分层浇注，每层厚度控制在 30cm 左右，接缝、预埋件、钢筋密集处，加强振捣。

(4) 混凝土的养生

混凝土的养生质量直接影响到混凝土的强度和混凝土的表观质量。根据环境的温度变化情况制定混凝土养生措施如下：

混凝土灌注完，混凝土表面用彩条布覆盖，并洒水养护。待同等条件养护的混凝土试件其抗压强度达到梁部混凝土设计强度的 90%，还需洒水继续养护 5d，保持混凝土表面湿润，同时进行底面和侧面的养生。

(5) 混凝土的表面和接缝修整

混凝土表面要进行一次性修整，对拉筋外漏部分磨平，并涂水泥浆；对施工临时预埋件的表面亦采取同样的方法处理，防止锈水污染混凝土表面；对于混凝土的接缝要一次性处理，凿除错台，尽可能避免混凝土表面出现的质量通病。

(五) 预应力施工技术

根据设计，该桥采用三向全预应力体系，纵向张拉力分别为 2220kN 、 2253kN 、 2414kN ，竖向张拉控制力为 330kN ，横向张拉控制力为 5250kN 、 5171kN 。钢束只设竖向弯曲（部分）而不设水平弯曲，也无连通长钢束，最长钢束为 127.4m 。

1. 预应力材料

(1) 纵向及横向预应力材料

纵向采用 12-7 Φ 5 钢绞线束作为预应力材料，横向采用 4-7 Φ 5 的钢绞线束作为预应力材料。钢绞线均采用购于天津钢绞线一厂生产的 II 级低松弛钢绞线，质量符合 GBT524-1995 标准，相关参数如下表 2-1-3-1:

表 2-1-3-1 预应力钢绞线参数

项 目	设计参数	实测参数
公称直径 (mm)	15. 24	15. 2
公称截面积 (mm ²)	139. 98	140. 0
每 m 重量 (Kg/m)	1. 11	1. 11
抗拉强度 (MPa)	1570	1670
(R _{yjy}) 极限预应力强度 (MPa)	1860	1948. 7
弹性模量 (MPa)	195 \times 10 ⁹	202. 5 \times 10 ⁹

(2) 竖向预应力材料

竖向预应力材料设计采用鞍钢生产的 Φ 25 精轧螺纹钢筋，R_{yj}=850MPa，厂家附有权威机构出示的物理力学性能报告。现场实验结果如下表 2-1-3-2，2-1-3-3:

表 2-1-3-2- 弹性模量实验数据

试件编号	公称直径 (mm)	公称截面积 (mm ²)	弹性模量 (GPa)	备注
1	25	490. 0	206	合格
2	25	490. 0	209	
3	25	490. 0	215	

表 2-1-3-3 强度实验数据

试件编号	公称直径 (mm)	公称截面积 (mm ²)	抗拉强度 (MPa)	伸长率 (%)	屈服点 (MPa)	备注
1	25	490. 0	1160	14	990	合格
2	25	490. 0	1170	12	980	
3	25	490. 0	1175	10	980	

(3) 锚具

纵、横向预应力束的锚具均采用上海生产 STM 系列锚具，锚口摩阻损失为张拉控制力的 3%。钢束锚固时锚具的变形和钢绞线的回缩值为：(采用自锚式千斤顶) 6mm。竖向采用轧丝锚 (由新津预应力厂家负责加工)，所有锚下螺旋钢筋由现场按规范卷制。横向锚具固定端挡板由现场根据设计图纸加工。锚具型号：

纵向：STM15-12 型锚具。

横向锚固端：STBM15P-4 锚具。

横向张拉端：STM15B-4 扁锚

竖向精轧螺纹钢张拉端及锚固端：JLM25 螺母锚固。

2. 预应力孔道

预应力孔道采用波纹管成孔，波纹管由现场按不同的规格卷制，原材料为江苏生产的钢带。

3. 预应力设备

根据李子沟特大桥预应力体系的要求，其所需张拉设备如表 2-1-3-4：

表 2-1-3-4 预应力张拉设备一览表

名称	规格、型号	用途
张拉千斤顶	YCW-250	纵向张拉 12-7Φ5 钢绞线
张拉千斤顶	YG-70	竖向精轧螺纹钢张拉
张拉千斤顶	YDC240Q	张拉横向束
油泵	ZB4-500	三向预应力张拉
高压油管	60MPa	连接
拌浆机	柳州	拌浆
压浆泵	柳州	压浆
其他配套的工具锚夹具、铜板尺、张拉工作平台等	标准	

4. 油表的校正与千斤顶的标定

定期检查压力表、张拉千斤顶等计量设备并建立卡片备查。压力表选用防震型，表面最大读数为纵向 100 MPa，精度 1.5 级；横向和竖向为 60 MPa，精度 1.5 级。校验的有效期为一周。张拉千斤顶的摩擦阻力不大于张拉吨位的 5%。建立油压力与千斤顶张拉 $P-N$ 标定曲线。

(1) 千斤顶的标定方法

1) 顶压法（纵向、横向和部分竖向千斤顶）

委托云南工业大学材料力学实验室对千斤顶进行标定。标定时千斤顶主动供油，压力机处于被动受力状态，由压力机的读盘上读出千斤顶的顶力，并记录顶力和千斤顶油表读数，连续进行两次，取两次的平均值得出 $N-P_A$ 曲线，千斤顶的磨阻符合规范要求。同时在标定时直接标定张拉的吨位和油表的读数，现场直接查用。 $N-P_A$ 曲线作为千斤顶个别情况下使用依据。

2) 媒介千斤顶法（部分竖向千斤顶）

由现场实验室进行，首先选用一台经过标定过的千斤顶 A，作为媒介千斤顶，当校验千斤顶 B 时，只要该千斤顶进油推动媒介千斤顶 A，读出与 P_A 相应的 P_B 的数值，就可得出 $N-P_A$ 曲线。

(2) 标定频率

在下列情况下进行千斤顶标定：

- 1) 出厂后初次使用前；
- 2) 张拉完一个悬臂梁段且不超过 100 束预应力筋；
- 3) 检验后经过一个月；
- 4) 千斤顶经过拆开检修后；

5) 震动、损伤呈油压锐减及其他异常情况。

在下列情况须对油表重作校正：

- 1) 使用超过三个月；
- 2) 张拉完一个悬臂梁段或 100 束预应力筋；
- 3) 在使用中发现超过允许误差或发生故障检修后；
- 4) 在运输、存放和使用过程中应防止日晒、受潮和震动，否则须校正。

5. 施工操作

(1) 钢绞线及预应力粗钢筋的下料

钢绞线于现场下料。钢绞线的切割必须用砂轮机，不允许出现破散现象。钢绞线下料够一束的数量后以梳筋板梳理后用细铁丝绑，每间隔 2~3m 绑一道，以便运输和穿束。钢绞线下料的数量以满足梁段施工为准，一般为梁段长度加千斤顶的工作长度加钢绞线穿束时的焊接长度加富余长度 10cm（柳州产千斤顶的工作长度为 60cm）。精轧螺纹钢长度根据配料单进行下料，注意材料的搭配使用。

(2) 波纹管的加工及孔道布置

本桥三向预应力孔道均以波纹管成孔，波纹管于现场加工。纵向波纹管孔道以钢筋网片固定，一般情况钢筋网片为 0.5m 一片，以确保孔道直顺、位置正确。横、竖向均为波纹管与钢束（筋）同时安装，以型钢或钢筋固定钢束及锚板的正确位置和标高。在孔道布置中要做到：不死弯；不压、挤、踩、踏防损伤；发现波纹管损伤，及时以接头管封堵，严防漏浆；平立面布置准确，固定；孔道中心线误差在 5mm 以内。

(3) 孔道接长

纵向预应力孔道以较孔道波纹管直径大 5mm 的接头管进行接头，接长后以胶带纸包裹，以防漏浆。接头管除特殊情况均采用外接头，防止接头管被破坏产生堵孔。

(4) 锚垫板的安装

锚垫板安放时保持板面与孔道垂直，压浆嘴向上，波纹管穿入锚垫板内部，且在锚垫板口部以海棉封堵孔道端口，外裹胶带，避免漏浆堵孔。竖向预应力筋在锚固端及张拉端分别加工了成套设施（以锚板、薄壁钢管、钢筋焊成的连通管和压浆嘴），便于安装和定位。

(5) 防堵孔措施

除以上的措施外，在纵向预应力孔道内于灌注混凝土前穿入较孔道孔径小 10mm 的塑料管，在混凝土初凝前抽动，终凝后抽出以防漏浆堵孔，此塑料管可多次倒用。

(6) P 型锚挤压

将下料的钢绞线首先进行复核，确认无误后将其放入有弹簧的挤压套内，开动油泵，使其通过挤压模，要求油泵升压要缓慢平稳。对弹簧数量少或弹簧外漏量大于 3 圈的 P 锚要坚决弃用。

(7) 穿束

本桥采用人工穿短束及人工配合卷扬机穿长束的方法穿束。穿束前将前端安放引导头，将钢束表面污物清洗干净，导引头采用电焊焊接，焊接时于导引头端搭火，钢绞线不许扰动，防止中间某一位置因搭火击伤钢绞线。

(8) 横向预应力钢束和竖向预应力筋的安装

1) 横竖向预应力筋安装时应以基本点为准逐根进行丈量定位，钢筋加固保证孔道的线型正确，尤其防止出现横向预应力反向施加现象。

2) 特殊情况的处理

本桥竖向和横向预应力钢筋与普通钢筋在施工时有干扰现象，纵向腹板钢束 48 号、49 号与竖向、横向预应力筋及普通钢筋有干扰现象。在施工中采取“纵向优先，横向、竖向次之，普通钢筋避让”的原则进行处理。在纵向腹板钢束 48 号、49 号张拉槽口处，为避让张拉要求，普通钢筋做了截断处理，张拉后又以焊接接长。

(9) 张拉及锚固

预应力有关参数的含义解释

1) 锚下控制力：

锚下控制力=设计的锚下控制应力×设计取定的预应力筋断面积

该桥的锚下控制应力分别为：

纵向 1 13950MPa，纵向 2 13020MPa，纵向 3 12834MPa

设计取定的钢绞线断面积为 1.40cm²，弹性模量为 202.5GPa

锚下控制力计算如下：

纵向 1 13950×1.4×12=2343.6kN

纵向 2 13020×1.4×12=2187.36kN

纵向 3 12834×1.4×12=2156.1kN

2) 张拉控制力

张拉控制力即千斤顶的顶力，应计算锚口的摩阻损失 3%，所以

张拉控制力=锚下控制力×(1+3%)

理论伸长值计算：

设计中给定了钢绞线的伸长值，但实际取值理想化，现场根据实测参数按照如下公式进行计算

纵向和横向钢绞线伸长值计算公式

$$\Delta l = \frac{PL}{EA} \left[\frac{1 - e^{-(kL + \mu\theta)}}{(kL + \mu\theta)} \right] \text{-----纵向和横向计算公式}$$

其中：

P 为千斤顶的顶力

L 为孔道实际的长度

E 为钢绞线的实测弹性模量

A 钢绞线的实测断面积

μ 孔道偏摆系数

θ 孔道偏角，以弧度计

k 孔道摩阻系数

竖向钢筋伸长值计算公式

$$\Delta l = \frac{PL}{EA} \text{-----竖向计算公式}$$

3) 张拉工艺

纵向预应力筋采用一次张拉的工艺，其步骤为：

0 → 初应力 → δ_k (持续 15 分钟) 锚固

横向钢绞线的张拉：

单端张拉，0 → 初应力 → $1.05 \delta_k$ → 锚固

竖向钢筋的张拉

单端张拉，0 → 初应力 → $1.05 \delta_k$ → 锚固

4) 伸长值的量测方法

设定初张力，当张拉力达到初张力后，量测千斤顶的活塞外露长度 L_1 ，然后供油达到设计吨位的油压值（或超张 1.05 倍的锚下控制应力的油压值），量测活塞的外露长度 L_2 ，两者的差值除以所占的张力百分比。

5) 孔道压浆

预应力孔道采用一次压浆工艺，为保证压浆密实，在压浆施工中坚持拌浆和压浆连续进行。待出浆口阀门出浓浆后关闭阀门，压力上升至 0.6~0.7MPa，持荷 2 分钟或足够的保压时间，当无零碎漏水、漏浆时关闭（压力可达到 1.5 MPa 以上）。在压浆顺利的前提下，可适当加大水泥浆浓度。实验室应做好检查试件，测定水泥净浆收缩值。

(10) 张拉施工注意事项

采用张拉力与伸长值双控，张拉力以千斤顶标定为主，伸长值与设计值的误差控制在+10%到-6%之间。在伸长值的计算中，计算应扣除千斤顶长度部分的伸长量。根据现场实测，此部分长度为 58cm，伸长值为 4.4mm，故实际测量后的伸长值应扣除 4.4mm（单端张拉）或 8.8mm（双端张拉）。当实测伸长值与计算伸长值误差小于-6%时，可适当增加顶力，但不超过 1MPa。

整个张拉过程应随时注意避免滑丝和断丝现象的发生。

(11) 影响伸长值的原因分析

- 1) 张拉力大小
- 2) 预应力材料的断面面积误差
- 3) 预应力材料的弹性模量误差
- 4) 孔道的偏摆影响

5) 量测误差

(六) 合龙施工技术

1. 合龙顺序

本桥共有 5 个合龙段，为适应施工的需要，其实际合龙顺序与原设计中的有所不同（实际合龙时内力亦经过设计单位计算），实际合龙顺序为：8~9 号 T 构的合龙段→7~8 号合龙段→10~11 号合龙段→9~10 号合龙段→11 号~12 号合龙段。

2. 合龙施工的关键技术

根据设计要求和现场施工情况确定合龙顺序，计算梁部混凝土的长期收缩和徐变变形，本着减小墩身和梁体的次应力为目的的计算顶梁施工的吨位和墩顶的反向位移。顶梁施工能否达到要求，对于高墩多跨刚构结构的桥梁尤为重要。

(1) 合龙施工工序安排

1) 拆除一端挂篮，以道碴代替挂篮的重量加载，要求在挂篮拆除前观测梁端的高程，加载时以高程控制为主。

2) 移动另一端挂篮至合龙段作为施工吊架，内模暂不滑出。

3) 观测两梁端的高程，以翼缘板底相同位置的高程为准，此高程作为评定合龙精度高程，同时应与梁端观测点高程进行联测，以便以后观测方便。梁端高程达到合龙精度要求后即可进行下步施工，否则需采取加载或减载的办法进行高程调整。顶梁施工前后对梁端的高程变化进行观测。

4) 绑扎钢筋，安装预应力孔道和横、竖向预应力钢筋。为减小顶梁施工的摩阻，底板和腹板纵向钢筋单端进行焊接，波纹管单端连接并预留另端活接头，注意结构尺寸。

5) 分级加载进行顶梁施工，同时对梁部的位移和观测点的高程进行观测。顶梁施工过程中按照加载阶段对两 T 构 0 号梁段纵向水平位移进行观测，对合龙段的空隙进行量测。10 号~11 号合龙段实施顶梁施工，置镜点在 10 号墩中心，后视 9 号墩转点，前视 11 号墩中心。10 号~9 号合龙段顶梁施工时，置镜点在 10 号墩中心，后视 12 号墩转点，前视 9 号墩中心。

6) 锁定顶撑，进行波纹管和钢筋的作业，穿钢绞线，梁端对称增加配重（合龙段混凝土的重量）。视环境温度和日照情况决定 T（II）构的 0 号段之间是否进行洒水降温，减少温差变形影响。

7) 钢筋通过检查后，滑出内模板并加固模板，张拉临时锁定钢束。

8) 选择温度和时间灌注混凝土，对上述位置继续进行观测，同时进行对称卸载。

(2) 合龙温度和时间选择

在合龙施工前对温度和混凝土的内温进行观测，观测结果见表 2-1-3-5。根据计算确定合龙温度在 20 度可进行。通过观测看出，气温变化对混凝土内部温度影响在顶板部位较大，在底板部位不大。晚 8 时至次日上午 9 时这一时间段温度相对较稳定，可在此时间进行锁定和混凝土灌注施工。

表 2-1-3-5

合龙前后温度测量记录表

2000年8月15日				
时间	环境温度	箱内环境温度	顶板混凝土温度	底板混凝土温度
7: 00	14.0	17.5	14.0	19.0
9: 00	16.0	19.0	16.0	19.0
11: 00	17.5	20.5	17.5	19.0
14: 00	21.0	21.5	20.0	19.0
17: 00	19.5	19.0	18.0	19.0
22: 00	17.0	18.5	18.0	19.0
2000年8月16日				
7: 00	15.0	18.0	15.0	19.0
9: 00	17.5	20.0	17.5	19.5
11: 00	18.5	19.5	18.5	19.5
15: 00	24.5	20.5	22.0	19.5
16: 30	25.0	21.0	22.5	20.0
18: 00	25.0	20.5	22.5	20.0
22: 00	18.0	21.0	19.0	20.0
2000年8月17日				
7: 00	17.0	19.5	17.5	20.5
9: 00	19.0	19.5	17.5	21.0
11: 00	22.0	20.3	17.5	20.5
14: 00	22.5	20.5	19.5	20.5
16: 00	23.0	21.0	20.5	20.5
18: 00	21.5	20.5	20.0	20.5

(3) 顶梁施工技术

设计顶撑及施工方案，制定减小阻力措施，加强施工监测，达到减小（消除）因墩身和梁体的收缩和徐变产生的次应力对墩顶造成的位移。在上午 9 时前完成顶梁施工，此时箱梁混凝土内温相对稳定，对测量影响不大。顶梁施工时分级加载，对两 T（Ⅱ）构的 0 号梁段进行纵向位移量测和两 T（Ⅱ）构梁端相对位移量测，最终应达到以下要求：对于 10 号和 11 号两 T 构合龙段的顶力 100t，10 号 T 构 0 号梁段向内方位移 28mm，11 号 T 构向昆方位移 26mm，梁端相对位移 54mm。对于 10 号~11 号Ⅱ构和 8 号~9 号Ⅱ构合龙段的顶力为 150t，10 号墩中心向昆方位移 14mm，9 号墩中心向内方位移 8mm，梁端相对位移 22mm。施工时以位移控制，此位移值按照混凝土长期收缩徐变的 1/2 反方向预留。

(4) 合龙段混凝土施工

混凝土灌注前观测混凝土的内温，考虑温度的变化规律，确定合龙时间。合龙段混凝土在低温时灌注，要求快速施工，在 4h 之内完成，升温时混凝土处于凝固状态。

3. 施工效果

(1) 顶梁施工结果

通过采取上述措施，顶梁施工进行顺利，不但保证了施工安全也达到了设计要求，结果如表 2-1-3-6，2-1-3-7：

表 2-1-3-6 10 号——11 号合龙段顶梁施工位移

顶板顶力(kN)	200	280	340	420	500	520	560	560
底板顶力(kN)	200	280	340	420	500	520	560	600
顶板上游间距变化(mm)	17	27	32	41	46	49	53	53
顶板中间间距变化(mm)	17	24	31	38	45	47	51	51
顶板下游间距变化(mm)	17	25	32	39	45	48	51	51
底板上游间距变化(mm)	15	23	29	35	39	43	46	46
底板下游间距变化(mm)	15	22	28	36	40	44	47	47
10 号墩 0 号位移(mm)	8	13	16	20	22	24	26	26
11 号墩 0 号位移(mm)	7	11	14	17	20	22	23	24

表 2-1-3-7 10 号——9 号合龙段顶梁施工位移

顶板顶力 kN	340	500	640	700	780	820	1000
底板顶力	340	500	640	700	780	820	1000
顶板上游间距变化	7	10	13	15	17	20	22
顶板下游间距变化	7	11	14	16	17	21	23
底板上游间距变化	6	8	11	13	15	18	21
底板下游间距变化	6	9	12	13	15	19	21
10 号墩 0 号位移	4	6	8	9	10	13	14
9 号墩 0 号位移	2	3	4	5	7	7	8

(2) 合龙段的高程情况

表 2-1-3-8 合龙段高程变化记录表

部位 序号		项目	1) 2) 3) 4)			
			1)	2)	3)	4)
8~9	合龙段锁定前悬臂梁端高程与设计高程之差 mm	+1	+3	+9	+2	
	合龙前（锁定前）两悬臂端相对高差 mm	2		7		
7~8	合龙段锁定前悬臂梁端高程与设计高程之差 mm	+9	+1	+6	+12	
	合龙前（锁定前）两悬臂端相对高差 mm	8		6		
10~11	合龙段锁定前悬臂梁端高程与设计高程之差 mm	+6	+6	+4	+3	
	合龙前（锁定前）两悬臂端相对高差 mm	0		1		
	顶梁前后的高程变化 mm	+21	+19	+19	+19	
9~10	合龙段锁定前悬臂梁端高程与设计高程之差 mm	+8	+6	+8	+4	
	合龙前（锁定前）两悬臂端相对高差 mm	2		4		
	顶梁前后的高程变化 mm	0	0	0	0	
11~12	合龙段锁定前悬臂梁端高程与设计高程之差 mm	+3	+6	+2	+3	
	合龙前（锁定前）两悬臂端相对高差 mm	3		1		

分析数据可见，在两个 T 构合龙时，梁端的高程变化较大，在两个 II 构合龙时，梁端的高程变化非常小。

(3) 关于预压和临时束张拉

在合龙段混凝土的灌注过程中，除采取临时锁定梁端的办法确保合龙梁段的相对位置不发生变化外，通常还采取预加载和同步卸载的办法来确保梁端的高程稳定，以达到对合龙段新灌注混凝土的保护，但视具体情况可以减少预加载和卸载的程序，同样可以达到上述目的。比如在本桥施工时采取了如下措施避免了预加载和卸载的程序：

1) 提高混凝土的灌注速度，使混凝土在初凝前全部灌注完毕，然后在混凝土施工接缝处进行一次彻底的捣固，避免梁端高程的变化影响新灌注混凝土的质量。

2) 增加对梁端高程的高程观测，通过张拉纵向预应力底板钢束调整梁端的高程（临时锁定的钢束分多次张拉），使梁端高程在混凝土的灌注过程中保持相对不变。

工程实例：9 号~10 号合龙段施工于 8 月 31 日晚 9 时开始施工，采用缆索吊运输混凝土，计划混凝土灌注时间为 3 个小时，混凝土的初凝时间为 4h，但在混凝土施工过程中出现机械故障，影响混凝土灌注达 1h 之久，施工中未进行预加载，但通过采取上述措施确保了合龙段混凝土的质量，实际测量观测结果如下表：

表 2-1-3-9 9 号~10 号合龙段实测高程、温度记录表

	时间	环境温度	混凝土内温	9 号上游	9 号下游	10 号上游	10 号下游
混凝土灌注前	21' 00	18℃	20℃	2181.140	2181.146	2181.153	2181.123
混凝土灌注中顶板张拉	22' 00	16℃	18℃	2181.139	2181.145	2181.154	2181.122
混凝土灌注中底板张拉	24' 00	15℃	18℃	2181.140	2181.144	2181.156	2181.123
混凝土灌注后高程	0' 40	14℃	17℃	2181.138	2181.144	2181.154	2181.122

(七) 梁部冬期施工措施

由于工期需要，本桥 8 号墩、9 号墩两个 T 构的 1 号、2 号梁段必须采取冬期施工。根据计算，在混凝土的入模温度在 10~15℃，环境温度不低于 15℃的条件下能保证混凝土 3d 强度达到 80%，可以进行张拉作业，同时能确保混凝土不产生开裂现象。在施工时采取如下技术措施。

1) 混凝土作业面采取保温措施。将外模架、底板外侧用铁皮全部封闭，箱梁端部采用彩条布和棉被封死，在混凝土浇注完毕后，混凝土表面覆盖两层彩条布和一层棉被保温，混凝土表面温度可达 25~30℃，模板外空气温度达 15~20℃，达到保温的目的。

2) 提高环境温度。外模架内放置 6 个蜂窝煤炉，按上中下三层分别放置 1. 2. 3 个。底板内放置 12 个碘钨灯。箱梁内安放 5 个煤炉，提高新灌混凝土的环境温度。

3) 原材料加热。采用蒸汽锅炉对混凝土拌和用水进行加热，通过实验确定合适的水温，达到混凝土的入模温度不低于 10℃，不高于 15℃。

4) 加强混凝土的内温观测，为保温提供数据

第四节 测量技术

一、控制测量施工技术

集团公司标段内江方向接十四局李子沟中桥和站场，昆明向方与二十局共分朱嘎隧道。李子沟特大桥距朱嘎隧道进口仅有 47m，李子沟特大桥主桥由第二工程公司组织施工，引桥由建筑工程公司负责。为保证桥梁顺利合龙和隧道精确贯通，总公司内昆指要求集团公司内昆指，集团公司内昆指要求第二工程公司负责复测工作。

(一) 李子沟特大桥平面及高程控制

1. 平面控制

(1) 平面控制网的布设

由于三家单位管段线路较长，山高沟深，且设计院所给的定测控制点部分有被破坏的痕迹，为保证桥隧的精度，特选定十四局（内江相临标段）与二十局（昆明端相临标段）管段内的 ZD424-2、JD432-1、ZD433-12 和 DZD434 四个定测控制点作为基准点，中间联测 ZD432-2，形成导线环。

(2) 施测采用仪器及要求精度

复测线路长约 6Km，按《新建铁路测量规范》要求，复测选用三等导线，测角精度为 $1.8''$ ，边长相对中误差为 $1/10000$ 。施测采用仪器为瑞士产徕卡 TC905L 型全站仪，该仪器主要技术指标为测角精度 $\pm 2''$ ，测距精度 $\pm 2+2\text{ppm}$ 。

(3) 控制网施测

水平角观测采用 8 个测回，分别观测其左角和右角各 4 各测回后取平均值；导线边采用对向观测各 3 个测回，按规定改正后取平均值。

复测网分为主副两条导线，且相应主副点距离较近，约为 3~6m，观测时仪器支立在主副点时，前后视的反光镜也相应的立在主副点上，减少测量时间。水平角测量时，由于观测点仅为两个，测回法无须归零；测距时正镜和倒镜为一测回。当方向超过 3 个时，例如在副导 7 时，就需要归零。控制网观测时，仪器由专人观测，前后视的反光镜也由专人负责，有阳光时支立遮阳伞，读数和记录人员及时进行口核，防止出现错误数据，这样可认为观测是同精度的，利于平差。

(4) 平差计算

1) 控制网平差。导线测量计算坐标假定以定测点 JD432 之 HZ 点为 $X=1000\text{m}$ ， $Y=5000\text{m}$ ，以该点和定测点 ZD432-1 为 $0^\circ 00' 00.0''$ 方向。

导线环各点计算采用 PC-E500 机，全国优秀测量严密平差程序计算，其精度评定为：

导线闭和环限差为：

$W_{\text{允}} = \pm 2 \times 1.8 \sqrt{13} = 13'' > 9.5''$ （合格）

导线环测角中误差：

$$m_{\beta} = \sqrt{\frac{f_b^2 n}{N}} = \sqrt{\frac{5.5^2 / 13}{1}} = 1.53'' < 1.8'' \text{--- (合格)}$$

严密平差测角中误差:

$$U = \sqrt{\left(\frac{Vb^2(I)}{Mb^2} + \frac{Vs^2}{Ms^2} \right) \div 3} = 1.038'' < 1.8'' \text{--- (合格)}$$

导线闭坐标精度为:

经严密平差计算, 纵横坐标闭合差为: $f_x=22.25\text{mm}$, $f_y=76.11\text{mm}$, 绝对闭合差为 $f_s=79.34\text{mm}$, 相对误差为 $f_s/m_s=1/161992 < 1/10000$ (合格)。导线测量成果详见表 2-1-4-1。

表 2-1-4-1 导线测量成果表

测点	观测角 ° ' "	边长 (m)	平差后坐标		
			方位角 ° ' "	X (m)	Y (m)
HZ				1000	5000
ZD432-1	148-33-38.4	75.5218	0-00-0.00	1758.5215	5000.0000
副导 3	214-41-19.7	1104.5688	328-33-37.8	2700.9301	4423.8591
副导 4	177-58-24.0	966.8167	3-14-59.3	3666.1920	4478.6675
副导 5	164-37-49.1	1809.7545	1-13-24.4	5475.5339	4517.3085
副导 6	160-58-37.0	1130.3765	345-51-13.5	6571.6318	4241.0469
副导 7	0-32-34.2	1039.7590	326-49-51.4	7441.9723	3672.1829
主导 6	198-52-09.4	1028.5690	147-22-28.9	6575.6968	4226.7287
主导 5	194-27-42.6	1136.7560	166-14-39.2	5471.5452	4497.0310
主导 4	182-31-42.4	1805.7301	180-42-21.9	3665.9522	4474.7789
主导 3	146-11-16.5	968.9371	183-14-04.4	2698.5587	4420.1081
主导 2	212-57-53.8	1099.0843	149-25-20.7	1752.3117	4979.2171
主导 1	169-50-17.4	460.2242	182-23-10.6	1292.4866	4960.0553
HZ	7-46-36.5	295.2016	172-13-23.7	1000	5000
ZD432-1			0-00-0.00		
Σ	1979-59-54.5				

2) 墩台线路中心放样坐标计算。按复测成果计算各个墩台线路中心坐标, 见表 2-1-4-2。施工时墩台按极坐标法放样。在现场, 根据控制点坐标, 利用卡西欧 4500P 或 4800P 计算器编制的程序现场计算, 方向均按坐标方位角对点和放样。由于墩台定位准确与否直接关系到下一步的工作能否顺利进行, 在墩台放样之后, 仪器转立线路点上, 进行墩位距离复合, 见表 2-1-4-3, 以及进行曲线上墩台基础实际中心的测设。曲线墩台实际中心见表 2-1-4-4。

6 号、7 号、8 号、9 号、10 号、11 号各墩的放样数据见表 2-1-4-5。

表 2-1-4-2 墩台线路中心坐标

墩台号 或曲线要素 点	里程	X (m)	Y (m)	墩台号 或曲线要素 点	里程	X (m)	Y (m)
JD432HZ	441+754.786	1000.7187	5000.0794	13号墩	442+553.58	1799.9965	5000.0264
0号台尾	441+756.65	1003.0365	5000.0793	14号墩	442+586.28	1832.6965	5000.0242
0号台胸	441+762.17	1008.5865	5000.0789	JD433ZH	442+594.8347	1841.2511	5000.0235
1号墩	441+794.82	1041.3365	5000.0767	15号墩	442+618.99	1865.4064	4999.9884
2号墩	441+827.62	1074.0365	5000.0746	16号墩	442+651.73	1898.1434	4999.5813
3号墩	441+860.32	1106.7365	5000.0724	17号墩	442+684.50	1930.8868	4998.3016
4号墩	441+893.02	1139.4365	5000.0702	HY	442+694.7347	1941.2000	4997.6369
5号墩	441+925.72	1172.1365	5000.0681	18号墩	442+717.29	1963.5684	4995.6739
6号墩	441+958.42	1204.8365	5000.0659	QZ	442+725.5674	1971.7961	4994.7694
7号墩	441+991.12	1237.5365	5000.0637	19号墩	442+750.09	1996.1012	4991.5198
8号墩	442+064.00	1310.4165	5000.0589	YH	442+756.30	2002.2369	4990.5619
9号墩	442+192.00	1438.4165	5000.0504	20台胸	442+782.93	2028.4513	4985.8827
10号墩	442+320.00	1566.4165	5000.0419	20台尾	442+788.48	2033.8960	4984.8067
11号墩	442+448.00	1694.4165	5000.0334	朱嘎进口	442+836.00	2080.3148	4974.6446
12号墩	442+520.88	1767.2965	5000.0285	JD433HZ	442+856.30	2100.0813	4970.0215

表 2-1-4-3 墩距复合整理表

墩号	设计长	实测长	墩号	设计长	实测长	墩号	设计长	实测长
0号~1号	32.75	32.75	8号~9号	128	128.001	15号~16号	32.74	32.742
2号~3号	32.70	32.701	9号~10号	128	128.002	16号~17号	32.77	32.767
3号~4号	32.70	32.70	10号~11号	128	127.998	17号~18号	32.79	32.793
4号~5号	32.70	32.701	11号~12号	72.88	72.879	18号~19号	32.80	32.80
5号~6号	32.70	32.699	12号~13号	32.70	32.798	19号~20号胸	32.84	32.842
6号~7号	32.70	32.702	13号~14号	32.70	32.70	$\Delta = 9\text{mm}$ $0.009/1020.76=1/110000$		
7号~8号	72.88	72.881	14号~15号	32.71	32.713			

表 2-1-4-4 曲线墩台线路与实际中心坐标

墩号	里程	线路中心		基础中心	
		X	Y	X	Y
15 号	442+618.99	1865.4064	4999.9884		
16 号	442+651.73	1898.1434	4999.5813		
17 号	442+684.50	1930.8868	4998.3016		
18 号	442.717.29	1963.5684	4995.6739		
19 号	442.+750.09	1996.1012	4991.5198		
20 号台胸	442+782.93	2028.4513	4985.8827		
20 号台尾	442+788.48	2033.8960	4984.8067		

表 2-1-4-5 极坐标放样数据（以主导 1 为例）

后视点	测站点	前视点	里程	坐标		坐标方位角 ° ' "	距离 m
				X (m)	Y (m)		
HZ	主导 1	HZ	441+754.786	1000.7187	5000.0793	172-11-20.5	294.500
		6 号	441+958.42	1204.8365	5000.0659	155-27-51.1	96.350
		7 号	441+991.12	1237.5365	5000.0637	143-56-31.7	67.972
		8 号	442+064.00	1310.4165	5000.0589	65-51-27.7	43.838
		9 号	442+192.00	1438.4165	5000.0504	15-19-36.2	151.311
		10 号	442+320.00	1566.4165	5000.0419	08-18-18.0	276.833
		11 号	442+448.00	1694.4165	5000.0334	05-40-48.9	403.913

2. 高程控制测量

由于复测线路长，且山高沟深，几何水准测量难以实施，所以考虑采用三角高程测量。在施测之前，比较两种方法的精度。选取相距约 500m 的两个点，用 DS3 水平仪进行几何水准测量往返三次，取平均值作为两个点高差的真值，然后采用 TC905L 全站仪进行三角高程测量，观测三组，每组六个测回，对向观测，距离加气象、气压、地球曲率改正，分别在早晨、中午、下午各观测一组，观测成果列于表 2-1-4-6。从表中可以看出，几何水准与三角高程成果接近，故采用三角高程进行高程控制是可行的。

表 2-1-4-6 几何水准与三角高程比较

次序	几何水准高差 (m)	三角高程高差			备注
		高差 (m)	差值 (mm)	平均高差	
1	78.255	78.251	-4	78.259	12L =8.5>4
2		78.265	10		
3		78.263	8		

定测所给高程控制点有大桥附近的 BM12-1. BM12-2 及朱嘎隧道出口端的 BM12-8. BM12-8-1。在进行三角高程测量过程中，注意使前后视距离大致相等，视距在 300-700m 之间，随时防止阳光直射仪器，及时注意温度、气压变化，观测倾角及斜距，输入仪器进行改正，三角测量成果见表 2-1-4-7。

表 2-1-4-7 三角高程表

测点	定测高程 m	复测高程 m	不符值 (mm)	备注
BM12-1	2214.442	2214.442	8	精度: $20\sqrt{R}=20\sqrt{7.5}$ $=54.8>8$ 故采用定测点高程
BM12-2	2137.258	2137.265		
BM12-8	2207.634	2207.638		
BM12-8-1	2194.969	2194.977		

(二) 施工过程测量控制

1. 基坑开挖及孔桩施工测量

该桥主桥基础承台较大，其中 7 号、12 号墩为 14.1m×14.1m×5m，8 号、9 号墩为 33.6m×18.1m×5m，10 号、11 号墩为 37.6m×18.1m×5m，且埋深最深的 10 号墩基坑达 17m。主桥 6 各墩共有 222 根钻孔桩，其中 7 号墩 16 根，8 号墩 45 根，9 号墩 45 根，10 号墩 50 根，11 号墩 50 根，12 号墩 16 根，这种群桩扩大基础的开挖工作比较烦琐，且要保证每一个孔位准确，就需要采用特殊的方法进行测量。

(1) 基坑开挖施工测量

由于扩大基础覆盖层深，又受地形限制，设在基坑四周的基坑开挖控制点容易移位，现以 10 号墩为例具体说明基坑开挖测量。

10 号墩基础承台为 37.6m×18.1m，基坑深 17m，桩深 40m，周边土质松软极易坍塌，设在基坑周边的基坑控制点容易滑动。在这种情况下，采用极坐标方法进行基坑四角定位，仪器置在 11 号上，后视其他线路中心点，测出每个点的三维坐标，同时利用计算器程序，结合测得的数据放出边坡外缘

10 号墩承台四角放样数据见表 2-1-4-8（独立坐标系）

表 2-1-4-8 10 号墩承台定位数据

后视点	后视角	测站点	放样点坐标			前视角 ° ' "	距离 (m)
			放样点号	坐标 (m)			
				X	Y		
ZD5	0-00-0.0	ZD432-2	1	118.95	-18.8	351-01-07	120.427
			2	137.05	-18.8	252-11-21	138.333
			3	137.05	18.8	7-48-39	138.333
			4	118.95	18.8	8-58-53	120.427

在基坑开挖过程中，要随时检查开挖情况，包括承台尺寸、边坡位置、开挖深度等。由于基坑开挖精度要求较低，无须正倒镜观测，但要保证操作正确。基坑开挖的深度直接利用三角高程测量，碎部利用水平仪配合。

(2) 桩孔定位测量

由于主桥 6 个墩均属于群桩基础，虽桩孔定位及孔护桩测设无较高的技术，但测量过程较为繁琐，稍不注意就有可能出错。首先定出各排孔桩的线路中心点，然后仪器分别架设在各个中心点上，拨转 90 度，定出各排桩位。

由于各孔桩开挖先后顺序不同，对于各个孔的第一板护壁混凝土利用极坐标法检查

护壁模板，当混凝土凝固后，再在护壁上定出护桩。定护桩与定孔位方法相同。

2. 墩身施工测量

薄壁空心高墩的线形控制是很重要的。为保证墩身的垂直度，不偏不扭，现在比较先进的方法是使用激光铅直仪，但其他常规或非常规的方法也有其独特的一面。在承台灌注完混凝土后，及时利用控制点恢复墩中心，并检查墩距。在未购买激光铅直仪的情况下，决定利用十字形护桩来控制墩身的线形。利用测设的墩中心前视线路方向，正到镜拨转 90 度先定出线左线右各一个护桩，然后利用压点方法向两边延伸，每边 2-4 个护桩。

此方法虽然是常规的方法，但比较实用。

(1) 人员使用少。在墩身灌注几板之后把后视方向做在墩身上，这样一个人负责一台仪器即可。

(2) 占用时间少。由于有经纬仪和全站仪两套仪器，分别由一个人负责，加上墩身上一个人做点，三个人最快用半个小时即可做好点调模工作。

(3) 不占用工作时间。墩上四边模板分别调模，用仪器直接调模时不耽误其他人员工作，在李子沟特大桥工期比较紧张的情况下，这一点非常重要。

当然这种方法受地形、气候及日照的影响，一般在早 10 点以前做好此项工作。

这种方法还有一个缺点，就是当倾角较大时，视准轴的旋转平面不一定在同一个竖直面。针对于此，必须精确调平仪器，并且调好模板后利用倒镜再检查一次。经过多次检查，在 300m 附近正倒镜偏差不超过 3mm。

墩身的高程利用三角高程控制。

纵观几个墩身的实际误差，最大为 5mm，小于设计要求。

3. 梁部施工测量控制

李子沟特大桥主桥六墩五孔共计 141 个梁段，除已灌注完混凝土的 0 号段外，其他各段均需要调整中线和标高，即进行梁部线形控制。梁部线形施工控制是一个动态变化的不可逆过程，如果测控工作不及时、不准确，或数据丢失、失效，将无法进行下步施工，因此在梁段施工之前，与设计、监理研究制定测控方案，包括测量精度要求、方法、时间、布点数量、测点位置、观测次数等，做好充分的准备。具体做法是：

1) 由测量人员负责组织实施测，各队有关技术人员及施工人员配合，按要求做好测点的定点定位工作；

2) 灌注混凝土前精调模板，灌注混凝土后及在张拉后和移出挂篮后三次观测线控点，并提供给设计院现场代表，由其提供标高修正值，指导下一梁段施工；

3) 观测过程要注意观测方法，确保数据准确无误，观测时间在每天上午 10 点以前。

(1) 中线控制

梁体中线控制对梁体外形质量及合龙误差影响极大。为保证梁体线形不偏不扭，在首先完成的 7 号墩上利用控制点恢复墩中心，并利用护桩检查，确认无误后，作为中线控制点。由于 0 号台至 13 号墩各墩台在一直线上，对于其他墩上的中线控制点，利用 7

号墩上点与 0 号台上的中心点向前延伸，并且每个墩上 0 号段中心利用护桩符合，保证墩距。随着梁段向前延伸，每隔 20~30m 定出一个里程控制中线点，可以控制各种预埋件位置及梁段端头里程。具体操作时，仪器支立在墩上，后视本墩上的点，进行本墩的调模工作，这种方法可以避免由于墩身受日照影响偏位致使线形偏扭。如果后视另一个墩上的点，当墩身温度较高时，梁部变化不一致影响梁部线形。但为保证连续梁的顺直，每隔一个月，进行一次中线联测，联测时间均在上午 8 点以前，这时候的墩身基本没有变形，能反映中线控制点的真实位置。

(2) 梁部高程测量

主桥各墩较高，几何水准测量难以实施，针对于此，采用全站仪三角高程，把标高引测到各个墩的 0 号段上，把该点作为线形控制的基准标高点。该点会受到两个 T 构墩身压缩下沉的影响，但下沉的值一般都很小，在操作时注意及时加以修正，可以保证高程点的绝对值。

高程引测时，由于受地形限制，仪器未架立在已知点上，而是支立在适合的任意点上，分别观测已知点和待测点的高差，最后计算出待测点的高程。观测时，仪器保持不动，已知点和待测点上的反光镜统一高度，并且每一方向均观测 1.3m 和 2.15m 两个高度反光镜的高差，用来自检，这样可以消除量仪高和镜高的误差

按设计院现场代表的要求，把线控点布设在每一梁段端头距中心 1.95m 的挡碴槽处。测点用钢筋加工，在灌注混凝土之前焊接在顶板钢筋上，测点顶部用砂轮机打磨平滑。

具体观测时，把仪器置于梁上，后视 0 号段的高程点进行控制。此种方法简便易行，不受地形限制，在任何条件下均可采用，但要注意的是观测必须在上午 10 点以前进行。如果采用其他方法，将仪器置于梁上或地面，一般来说墩距地面较高，难以实施，另外，地面点虽不动而墩是变化的，当仪器置于梁上，用不变的点为准来测定变化的梁部，是无法准确得出梁部相对变化的，所以采用第一种方法，实际证明也是可行的。

二、高墩变形、日照变形及合龙段施工变形观测

为积累资料，指导施工，在施工过程中，对很多项目进行了测量监控或加密测量，例如墩身沉降、墩身徐变、日照温度对墩身的影响、合龙段加密测量等。

(一) 墩身沉降与徐变观测

主桥墩身高，自重大，在墩身混凝土施工过程中，由于自重墩身会有所沉降，为监测墩身沉降量及判定墩身是否达到稳定，在 8 号、9 号、10 号、11 号四个墩承台四角或墩身的线左线右方向做沉降观测点，间隔 10d 到 30d 进行一次观测。观测仪器为 DS3 水平仪，区格式 5m 铝合金塔尺。观测用水准点用全站仪测设到各墩附近的稳定岩石上。

墩身的徐变主要是由于梁部混凝土的重量及墩身自重的影响，徐变观测点利用各个墩 0 号段上的基准点，利用三角高程观测。结果见附表 2-1-4-9。

表 2-1-4-9 承台、0 号梁沉降观测记录表

墩号	基础下沉量 mm	0号梁段标高下沉量 mm	备注
7	4	0	
8	8	8	
9	8.5	11	
10	19.8	9	
11	9.5	9	
12	2	0	

（二）梁体受日照影响监测

梁体未合龙前是刚构体，根据热胀冷缩的原理，日光照射面墩身温度高于未被照射面，墩身倾斜，从而使梁体倾斜。为掌握第一手资料用于以指导施工及总结经验，在李子沟特大桥 10 号墩进行连续监测。首先选择合适的观测点及稳定的后视方向，由于只要相对值，没有于控制网联测。其次是布点，在 0 号段中心、内方昆方的 7 号段中心及线左线右各 3.8m 处共定出 7 个点作为观测点。

选择日照条件充足的一天，从早晨 6 点开始，一直观测到晚上 8 点，两个小时观测一次，观测内容包括水平角、斜距、平距、倾角，每次每个方向观测 3 个测回，观测时进行斜距加气压、温度改正以保证测量精度。

（三）合龙段施工变形观测

详见本部分第三节“主桥梁部施工技术”之“二、梁部施工技术”。

第五节 11号墩边坡防护预应力锚索施工技术

11号墩边坡塌坍后，经过数次方案论证，最终确定采用锚索、土钉墙及挂网喷浆综合防护的边坡加固方案。

一、边坡加固方案概述

依据设计，预应力锚索共计有14排，每排11~19根（“加1排”至“加4排”锚索每排3~7根），共4852.4m/172根，每根锚索长度16~47m，采用6×15.24mm的高强度低松弛（ $R_y^j=1860\text{MPa}$ ）预应力钢绞线，锚索级别均为800kN。另该岸坡钻土钉孔4527孔，设置 $\Phi 25$ 土钉30664m，并在坡面挂扎 $\Phi 8$ 钢筋网12339.6m²，喷射C20混凝土及M25水泥砂浆厚15cm。

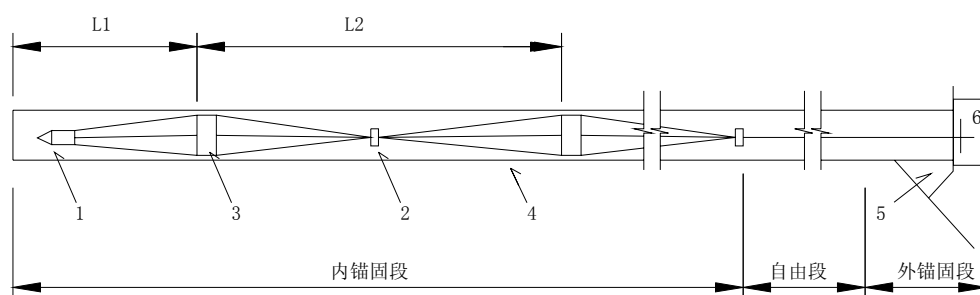
二、锚索作用原理及结构形式

（一）作用原理

预应力锚索一端锚固于稳定的岩层内提供锚固力，另一端固定于坡面。通过对锚索施加预应力，对滑移不稳定的边坡产生一个主动压力，从而增加滑移面上的抗滑阻力提高边坡岩体的整体性。

（二）结构形式

由内锚固段、自由段和外锚固段组成，见图2-1-5-1。

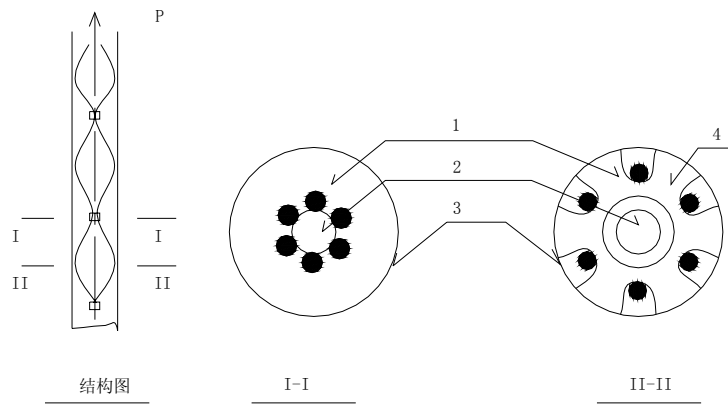


1-导向帽；2-金属箍环；3-扩张环；4-聚乙烯套管；5-垫墩

6-锚头部分(锚具、垫板、混凝土封头)

图2-1-5-1 锚索结构示意图

内锚固段：简称内锚段、锚固段，又称锚根，位于孔底部稳定的岩层内，本工程点设计内锚段长度为10m，内锚段用以提供锚固力，一般采用胶结型式锚固。有直列式和波纹式（或称枣核状）两种常用形式，其中波纹式为最佳结构（见图2-1-5-2），因为当锚索张拉时各根钢绞线企图调直，对周围砂浆和岩壁产生挤压力，发生摩擦效应，而且拉力越大摩擦力越大，对锚索锚固非常有利，本工程点即采用此种形式。



1-钢绞线；2-注浆管；3-孔壁；4-隔离架及箍环位置

图 2-1-5-2 锚索波纹式结构及截面图

自由段：张拉预施应力段，可自由伸长，需做防锈、防腐、隔离处理，起到保护锚索的作用。

外锚固段：简称外锚段，由垫墩、钢垫板和锚具组成，是实现锚索张拉和锁定的部件，张拉、注浆完毕后用混凝土封锚。

三、锚索施工工艺

(一) 工艺流程

预应力锚索施工工艺流程见图 2-1-5-3

(二) 设备及材料

1. 设备

动力设备：上海英格索兰 20m³ 及 17m³ 空压机 3 台，柳州空压机厂内燃 12m³ 空压机 2 台。

钻孔设备：MD-50 钻机 3 台，MGJ-50 钻机 3 台，QZJ-100 钻机 4 台。

注浆设备：HP-013 砂浆泵 3 台。

张拉设备：DQYCN1500 千斤顶 1 台及 YCW-100 千斤顶 1 台，ZB2×2-500 及 OVM-YCW100-200 高压油泵各 1 台

2. 材料

锚索为 6×15.24mm 钢绞线，公称抗拉强度 1860MPa，聚乙烯塑料套管和注浆管，成都祥和磷化工有限公司生产的 A、B 防腐涂料，早强减水剂，膨胀剂，水钢乌蒙山 42.5 号普通硅酸盐水泥，水钢 Φ22、Φ16 钢筋及洁净饮用水。



图 2-1-5-3 锚索施工工艺流程图

(三) 钻孔

钻孔工艺流程如图 2-1-5-4

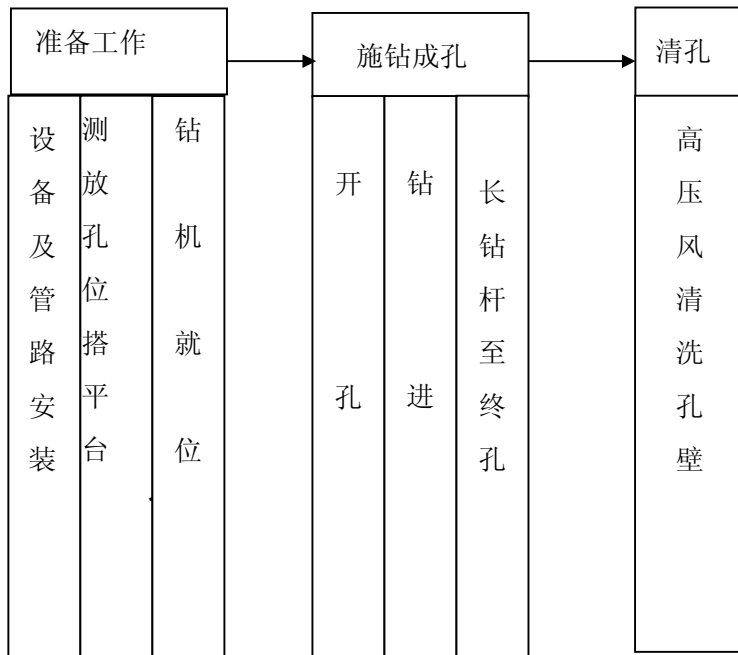


图 2-1-5-4 钻孔工艺流程

按照设计孔位布孔，并按照设计倾斜角（下倾角或外偏角）进行施钻，钻进过程观察出碴、出风情况，并作好钻孔和地质情况记录，防止出现塌孔和卡钻现象。设计孔径为 110mm，实际成孔 114mm。孔位偏差不超过 100mm，倾斜角偏差不超过 $\pm 1^\circ$ ，方向偏差不超过 $\pm 1^\circ$ ，孔深一般超钻 300~500mm。

（四）锚索制作与安装

锚索制做安装流程见图 2-1-5-5



图 2-1-5-5 锚索制安流程图

1. 检查并剔除有磨损、锈蚀严重、松散等有质量问题的钢绞线，将合格钢绞线按照施工下料长度截断，量出内锚固段和自由段长度，对自由段进行防腐、隔离处理，其他段作防锈处理。

施工下料长度为设计孔深加预留长度，预留长度为 1.5~2m，与垫墩尺寸、波纹节状(枣核节状)数量及张拉锚具型号等有关。

自由段防腐、隔离处理步骤：

- (1) 置钢绞线于操作台上，进行除锈；
- (2) 涂刷 A 防腐漆两层；
- (3) 涂刷 B 防腐漆两层；
- (4) 涂抹黄油；
- (5) 用聚乙烯塑料管作套管，进行隔离。

2. 把处理过的 6 根钢绞线理顺放齐，并在中间放置与钢绞线等长的聚乙烯注浆管（底部约 1/3 内锚段长度作成花管），自内锚固段一端开始，距端部 0.5m，将钢绞线围绕注浆管用钢箍环捆扎成束。

内锚固段每隔 0.8m 放置一个隔离架，配合钢质箍环捆扎，使整个内锚段成枣核状。自由段每隔 1m 用箍环绑扎一道。整个锚索钢绞线必须顺直、不得交叉。

3. 在内锚段端部焊接导向帽（或称导向锥）。

4. 将预制好的锚索进行孔位、长度编号。

5. 人工将锚索放置入孔底，并采取保证锚索处于孔中央的措施，确保锚索周围灌浆均匀。

（五）注浆

注浆工作分制浆和注浆两个步骤。水泥砂浆强度等级不小于 M35，必要时掺入外加剂，掺量为：早强减水剂 2%，膨胀剂 5%，水灰比 0.5。如果岩质破碎导致漏浆严重，可采用分次注浆，待前次凝固堵塞裂隙后继续灌注，直至孔口返浆为止。本工点因岩溶发育，地层破碎，锚孔补注浆最多达 6 次。

（六）垫层浇注

注浆完毕后，绑扎垫层钢筋，安放一节 $\Phi 110\text{mm}$ ，长为 700mm 的薄壁钢管顺孔位方向插入孔口内，孔外部分正好到垫层混凝土顶面，然后立模浇注 C20 垫层混凝土。

（七）预应力张拉

当砂浆和垫层混凝土强度达到 75%后方可开始张拉。首先对单根按 10%设计应力进行预张拉(若其他工点钢绞线根数较多时，为提高受力均匀性和施工速度，可分组单根张拉)。然后分二次四级整体张拉，最后一级超张拉 20%，预应力分别为 240kN、480kN、720kN、960kN，每级张拉均需持荷 10min。最后一次张拉在砂浆和垫层强度达到设计强度 90%以上时方能进行。张拉采用张拉力和伸长值校核双控制，伸长值控制在设计+10%~-5%之间，超出时应立即停止张拉，查明原因后再行张拉。

（八）补偿张拉

位于 12 号墩胸坡有 7 排左右及中心各 4 根锚索，设计中要求在 12 号墩基础施工完成后补张拉及封锚，其目的是防止因 12 号墩基础施工造成锚索的松弛，以及岩层、垫层和锚具的徐变等引起有效预应力损失。补偿张拉应力采用最后一级张拉力。

（九）封锚

割除多余钢绞线，钢绞线外露 150~170mm，用 C15 混凝土包裹外露钢绞线及锚具部分，进行封锚。

四、施工效果

按照以上方法，克服了雨季影响和险情不断的困难，自 1999 年 8 月 7 日至 11 月 19 日，顺利完成整个边坡锚索施工，为 11 号墩及 12 号墩安全施工创造了条件。

第六节 混凝土施工技术研究

一、李子沟特大桥混凝土情况

全桥混凝土数量为：10.5 万 m³，其中主桥桩基 C18 混凝土为 2 万 m³，承台为 1.5 万 m³，墩身 C28 混凝土为 3 万 m³，梁部 C48 混凝土为 7452.8m³，

二、大体积流态混凝土施工技术

(一) 施工要求

1. 根据工程情况，为加快施工进度和便于施工人员操作，要求墩身实现混凝土流态化施工，混凝土坍落度控制在 160~200mm 之间。

2. 在 6~10 月李子沟环境气温 20~39.5℃，温度高、混凝土凝固快，要求混凝土终凝时间控制在 6~8h。在 1~5 月和 10~12 月李子沟环境气温在-10~15℃，温度低、混凝土凝固慢，要求混凝土的终凝时间在 4~5h。

3. 由于液压自升平台的负载及墩身快速施工等原因，要求墩身早期强度在 16h 达 6~8MPa。

(二) 优化设计配合比找出影响混凝土功能的相关因素，确定混凝土施工配合比。

1. 原材料选择

(1) 水泥，乌蒙山普通硅酸盐 42.5 号，经检测：胶砂强度 R3. R28d 分别达 24.6MPa、58.1 MPa，凝结时间 3 时 20 分，其他指标符合现行标准要求。

(2) 外加剂选用 HE-2 缓凝高效减水剂和 UZF-2B 早强高效减水剂。经检验性能指标如表 2-1-6-1。

表 2-1-6-1 HE-2. UZF-2B 减水剂性能指标

	减水率 %	泌水率比 %	流动度 mm	凝结时间差 终凝
HE-2	8~12	≤95	140~150	≤+210
UZF-2B	10~15	≤95	150~160	-60~+90

(3) 砂、石料

粗骨料用得胜坡石场生产，粒径 5~40mm，级配合格，含泥量 1%；细骨料用牛街机制砂厂，级配合格，石粉含量≤10%，细度模数 3.15。

2. 试验方案及测试结果

确定因素位级表 2-1-6-2，选择 L₉ (3⁴) 正交表。

表 2-1-6-2 L₉ (3⁴) 因素位级表

极级位	因素				
	A		B 水泥用量 kg	C 水灰比	D 砂率 %
	HE-2 %	UZF-2B %			
1	0.6	0.6	340	0.54	40
2	0.7	0.7	350	0.56	43
3	0.8	0.8	360	0.58	46

考核指标为：混凝土标准养护 16h、28d 的混凝土抗压强度，在 20℃ 条件下的混凝土坍落度与凝结时间。试验方案与计算结果见表 2-1-6-3。

表 2-1-6-3 试验方案与结果

	A	B	C	D	结果				
					强度 MPa		坍落度 mm	终凝时间 小时	
					16 时 6-8	28d 35.4			
掺缓凝减水剂	1	1	1	3	2	4.1	29.9	201	7.4
	2	2	1	1	1	9.4	39.9	140	5.1
	3	3	1	2	3	5.8	34.4	146	8.0
	4	1	2	2	1	6.6	35.4	170	5.7
	5	2	2	3	3	2.8	30.9	210	8.8
	6	3	2	1	2	10.6	40.1	166	6.0
	7	1	3	1	3	7.8	36.1	141	5.8
	8	2	3	2	2	8.0	38.8	180	7.8
	9	3	3	3	1	6.2	34.9	188	8.6
掺早强减水剂	1	1	1	3	2	4.6	31.4	158	4.4
	2	2	1	1	1	10.6	40.3	150	3.4
	3	3	1	2	3	8.1	35.8	178	5.2
	4	1	2	2	1	8.7	36.4	144	3.8
	5	2	2	3	3	3.9	31.2	171	4.5
	6	3	2	1	2	12.0	41.2	138	3.1
	7	1	3	1	3	9.8	39.1	130	3.4
	8	2	3	2	2	8.7	38.0	171	5.3
	9	3	3	3	1	7.3	35.2	172	5.5

3. 试验结果分析

(1) 对掺 HE-2 高效缓凝减水剂的试验结果进行直观分析，序号 6、8 符合施工要求。从混凝土的流动性与凝结时间比较，序号 8 更有利于施工。其组合条件为：A2、B3、C2、D2，即 HE-2 掺量 0.7%、水泥用量 360kg/m³ 水灰比 0.58、砂率 43%。相应的试验结果：混凝土强度 16h8.0MPa，R_{28d}38.8MPa，坍落度 180mm，混凝土终凝

时间 7.8h。

(2) 掺 UZF-2B 高效早强减水剂的试验结果直观分析, 序号 3. 8. 9 均符合施工的要求。从混凝土的强度来考核, 序号 8 更优于序号 3. 9。其组合条件为: A2. B3. C2. D2, 相应的试验结果: 混凝土强度 16h 8.7MPa, R28d 38.0MPa, 坍落度 171mm, 混凝土终凝时间 5.3h。

(3) 掺 HE-2 型与掺 UZF-2B 型的两种试验, 其结果, 从表 2-1-6-4, 极差分析得知, 影响混凝土强度与流动性的主要因素均相同。

主次顺序为: 水灰比 C→砂率 D→外加剂 A→水泥用量 B。影响混凝土凝结时间的条件亦相同。主次顺序为: 水灰比 C→外加剂 A→水泥用量 B→砂率 D

表 2-1-6-4 试验结果分析

		A	B	c	D			A	B	c	D
		HE-2	水泥用量	水灰比	砂率			UZF-2B	水泥用量	水灰比	砂率
16 小时	I	18.5	19.3	13.1	23.6	16 小时	I	23.1	23.3	15.8	25.3
	II	21.1	20.0	27.8	22.2		II	23.2	24.6	32.4	26.6
	III	22.6	22.9	21.3	16.4		III	27.4	25.8	25.5	21.8
	R	4.6	3.6	14.7	7.2		R	4.3	2.5	16.6	10.8
28 d	I	101.4	104.2	95.7	106.8	28 d	I	106.9	107.5	97.8	111
	II	107.6	106.4	116.1	110.2		II	109.9	108.8	120.6	111.9
	III	109.4	107.8	106.6	101.4		III	112.2	112.7	110.6	106.1
	R	8	3.6	20.4	8.8		R	5.3	5.2	22.8	5.8
坍 落 度	I	512	518	599	547	坍 落 度	I	432	486	511	467
	II	531	526	448	499		II	492	453	418	441
	III	530	529	526	527		III	498	483	493	514
	R	19	11	151	48		R	66	33	93	73
凝 结 时 间	I	19.8	20.5	24.8	21.2	凝 结 时 间	I	11.6	13.0	14.4	12.8
	II	21.7	20.5	16.9	20.4		II	13.2	11.8	9.9	12.7
	III	22.6	22.2	21.5	21.6		III	13.8	13.8	14.3	13.1
	R	3.7	1.7	7.9	1.2		R	2.2	2.0	4.5	0.4

(4) 配合比的选定

- 1) 若环境气温在 20℃以上, 可采用掺 HE-2 型试验中序号 8 的组合条件进行施工。
- 2) 若环境气温在 -10~20℃, 可选用掺 UZF-2B 型试验中第 8 号的组合条件进行施工。

(三) 建立系统的早期强度关系式

1. 用快速养护法建立强度关系式

(1) 根据选定的配合比, 制取试件 20 对组。其中 20 组标准养护 28d, 另 20 组采用 80℃热水法进行加速养护。取其两者的抗压强度值。标准养护与快速养护的强度值见表 2-1-6-5。

表 2-1-6-5 标准养护与快速养护的强度值

序号	Rj	R28	序号	Rj	R28
1	9.4	28.8	11	7.9	28.9
2	10.6	33.0	12	10.6	36.8
3	12.6	41.0	13	12.1	41.0
4	9.1	31.8	14	10.1	36.4
5	11.0	38.4	15	9.0	32.4
6	11.6	39.0	16	10.8	37.1
7	8.9	32.8	17	8.4	30.6
8	9.5	34.2	18	11.6	39.1
9	12.6	42.0	19	10.1	35.9
10	9.1	33.0	20	8.4	30.6

(2) 计算

根据强度关系式： $R=A+B R_j$ ，按照表 2-1-6-6 数据计算如下：

表 2-1-6-6

序号	Rj	R28	Rj ²	R28 ²	Rj · R28
1	9.4	28.8	88.4	829.4	270.7
2	10.6	33.0	112.4	1089	349.8
...
...
...
...
...
...
...
...
...
...
20	8.4	30.6	70.5	936.36	257.0
Σ	203.4	702.8	2107.4	25016	7252.3

$$A = \frac{R_{28} \cdot n}{\sum R_j} = \frac{702.8}{20} = 35.1 \quad R_j = \frac{\sum R_j}{n} = \frac{203.4}{20} = 10.17$$

$$B = \frac{R_{28} \cdot \sum R_j - 0.05 \cdot (\sum R_j)^2}{\sum R_j^2 - 0.05 \cdot (\sum R_j)^2} = \frac{7252.3 - 0.05 \cdot 203.4 \cdot 702.8}{2107.4 - 0.05 \cdot 203.4^2} = 2.699 \quad A = 35.1 - 2.699 \cdot 10.17 = 7.69$$

得混凝土强度关系式： $R_{28} = 7.69 + 2.699 R_j$

关系式相关系数 r 和剩余的标准差 S 的计算：

$$r = \frac{R_{28} \cdot \sum R_j - 0.05 \cdot (\sum R_j)^2}{\sqrt{(\sum R_{28}^2 - 0.05 \cdot (\sum R_{28})^2) \cdot (\sum R_j^2 - 0.05 \cdot (\sum R_j)^2)}} = 0.93975$$

$$S = \sqrt{\frac{(1-0.9397^2)(25016-0.05 \times 702.8^2)}{20-2}} = 1.44$$

$$r=0.939 > 0.85$$

$$S/R28 = (1.44/35.1) \times 100\% = 4.1\% < 10\%$$

依据 JGJ15-83 标准中第 4.4 条规定：相关系数不少于 0.85，关系式标准差应不大于标准养护 28d 强度平均值的 10%。因此，所建立的关系式可用于推定标准养护 28d 强度。

2. 建立 16h 强度关系式

(1) 制取混凝土试件 18 对组，其中 18 组标准养护 16h，另 18 组标准养护 28d。

(2) 根据试验数据，建立强度关系式： $R28=26.132107+1.30259 \cdot R16h$

相关系数： $r=0.9694 > 0.85$ 标准差： $S=1.04$

$$S/R28 = (1.04/35.9) \times 100\% = 2.9\% < 10\%$$

该 16h 强度关系式可用于推定标准养护 28d 混凝土强度

3. 建立混凝土标养强度与本体混凝土强度关系式

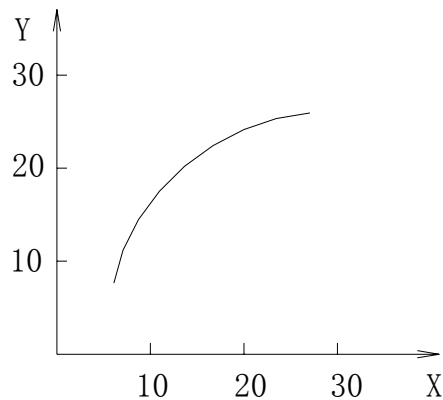
(1) 制取混凝土试件，模拟本体混凝土温度进行试验。

在试验室制取数次 10 对组试件，其中 10 组放入快速养护箱，模拟结构本体温度在不同的时间内进行养护。另 10 组放入标准养护室作对应试验。其试验数据见表 2-1-6-7

表 2-1-6-7 混凝土试件标准养护与模拟本体混凝土温度养护的对应强度值

数据	标养不同龄期的强度 (MPa)						模拟本体混凝土温度 30℃ 的不同龄期的强度值 (MPa)					
	16h	1d	3d	5d	6d	7d	16h	1d	3d	5d	6d	7d
N1	6.3	8.0	20.0	25.4	26.7	28.0	9.4	10.9	22.4	27.1	28.4	29.0
N2	7.6	10.3	18.6	23.8	25.8	26.6	8.6	12.4	23.8	27.4	26.9	28.1
N3	6.9	9.0	19.5	24.4	25.5	25.9	8.8	11.8	24.8	26.7	27.2	27.7
N4	7.7	8.8	17.7	24.8	24.9	27.0	7.9	12.0	21.1	26.5	27.5	27.9
N5	6.6	9.6	18.8	25.0	26.6	26.6	8.4	11.8	24.4	27.7	26.6	28.0
N6	7.5	10.1	19.2	26.0	24.4	26.0	9.3	10.8	23.0	27.0	27.7	28.6
N7	6.9	9.3	18.5	23.9	25.6	27.4	8.1	11.4	23.8	25.8	27.9	27.9
N8	6.4	8.4	20.6	24.6	26.8	25.6	9.7	13.1	24.5	26.4	28.0	28.8
N9	7.9	8.5	21.3	25.8	26.3	28.1	10.4	11.3	21.2	27.4	26.9	27.6
N10	8.2	9.0	19.8	24.3	27.4	27.9	9.0	10.5	22.0	27.0	27.0	27.4
均值	7.2	9.1	19.4	24.8	26.0	26.9	8.8	11.6	23.1	26.9	27.5	28.1

(2) 根据表 2-1-6-7 数据用回归方程建立强度关系式，并绘出标养与本体强度回归对应曲线。



标养与本体强度回归曲线

X—标养强度 MPa Y—本体混凝土强度 MPa

对数回归对应强度关系式： $Y = -20.775 + 14.8238 \ln x$

推算 R7d 本体强度关系式： $R7 = 14.588 + 1.8888 R16h$

4. 三个强度关系式的关系

(1) 快速养护强度在严格的试验条件下，能在短时间内准确判定 28d 混凝土强度是否合格。此关系式受试验仪器条件的限制和人的因素影响，有时产生的数据误差很大，无法判定混凝土的质量，而现场的混凝土施工不能停止，所以需要建立 16h 强度关系式，以进一步验证和判断混凝土的质量。16h 强度关系式操作简便，误差机率小，但由于原材料的变化或人为的因素，有时造成标养的试件强度偏低。在这种情况下，很难判定混凝土合格与否。针对这一问题，根据混凝土的水化热在混凝土内部产生温度的机理，以温度为纽带，建立混凝土标养与本体强度关系式。

(2) 三种强度关系式互为补充，相互验证，全部起用，能准确判定混凝土质量，及时有效杜绝混凝土的质量事故。

(四) 现场混凝土质量的试验控制

1. 混凝土凝结时间控制

7 月底，9 号墩身进入实心段施工，混凝土浇筑量一模 560m^3 ，环境气温 39°C ，由于受机械和场地限制，每浇筑一层混凝土在 30~40 分钟。根据施工条件，选掺 HE-2 型高效缓凝减水剂，试验中序号 8 的组合条件进行施工。按照配合比，严格控制水灰比，认真调配外加剂溶液。经现场抽检，混凝土坍落度 186mm，终凝时间 6 时 30 分。所浇筑混凝土色泽一致，消除了混凝土施工中的冷缝、色差。

10~12 月间，日平均气温在 $5\sim 15^\circ\text{C}$ 。由于环境温度低，混凝土终凝时间长，影响施工进度。为此选用掺 UZF-2B 早强减水剂，试验中第 8 号的组合条件进行施工。根据影响混凝土凝结时间的主要因素：水灰比与外加剂，在现场抽查、试验，严格掌握混凝土拌和物的主要控制指标。如 8 号墩身第 57 板，混凝土浇筑量 186m^3 ，当时环境气温 6.5°C ，仅用 4 个半小时混凝土浇筑完毕。经现场试验，混凝土坍落度 168mm，凝结时间 5

时 25 分，混凝土强度合格，满足了施工的要求。

2. 混凝土坍落度控制

混凝土施工时的坍落度，一定要符合配合比的要求。若坍落度偏大，混凝土泌水增大，凝结时间延长，强度降低；若坍落度偏小，混凝土不能自动流动，增加施工困难，影响施工进度。除此以外还要根据气候温度与每板混凝土浇筑量适时调整：

(1) 环境温度在 20℃ 以上，坍落度控制在 180~200mm，在混凝土浇筑到每一板的四分之三时，将坍落度调整为 140mm，以缩短混凝土的凝结时间，提高模板的周转率，加快施工进度。

(2) 环境气温在 5℃ 至 20℃，坍落度控制在 140~170mm。在混凝土浇筑到每一板的三分之二时，调整混凝土坍落度为 100~140mm，减少拌合用水量，缩短凝固时间，增加混凝土的早期强度。

(3) 坍落度的调整应根据试验结果的极差分析，影响混凝土流动性的主要因素进行。

3. 混凝土的早期强度控制

为了消除因早期强度低带来的混凝土弊端，及时准确掌握早期强度数据，在混凝土的施工中，三个强度关系式全部起用。如 9 号墩身混凝土施工 46m 处，环境温度 15℃、混凝土浇筑量 198m³，仅用 4 时 10 分就浇筑完毕。现场抽样检查试验数据见表 2-1-6-8、2-1-6-9。

表 2-1-6-8 现场抽样试验数据

混凝土坍落度	170mm	凝结时间	5 时 05 分
混凝土入模温度	19.6℃	16h 混凝土内部温度 (测温记录见表 2-1-6-10)	30.5℃
快速养护强度	9.8MPa	推算标养 28d 混凝土强度	34.1MPa
16 时标养强度	6.5 MPa	推算标养 28d 混凝土强度	34.6 MPa
		推算混凝土结构本体强度	7.3 MPa
		推算 7d 结构本体混凝土强度	26.9 MPa

表 2-1-6-9

时间 h	环境温度℃	混凝土内温度℃	墩内温度℃
16	15	30	20
24	18	40	23
48	14	45	23
72	17	46	25
96	16	46	25

以上数据均符合试验控制的要求，满足了施工的需要。

(五) 结束语

1. 混凝土实行流态化，降低了劳动强度，加快了施工进度。但其早期强度低，混凝土不能及时脱膜，施工人员不能在液压平台上操作。否则液压平台、机具及施工

人员产生的力将破坏强度低的混凝土结构，造成混凝土外表出现脱皮现象，严重影响施工进度与外观质量。若有快速施工和规定期限强度的要求，必须建立一套系统的早期强度控制手段，以及时、准确掌握混凝土的早期强度数据，发现问题随时修正施工配合比，杜绝发生混凝土强度质量事故。因此试验控制工作风险较大。

2. 墩身混凝土流态化，要根据气候、温度随时调整。尤其是每板的最后二层混凝土要减少拌合用水量，以加速混凝土凝固，提高早期强度与模板使用周转率。

3. 由于掌握了混凝土强度增长规律，建立了比较实用的早期强度关系式，不仅达到了好施工的目的，而且保证了混凝土的早期强度。在本桥施工中我单位创造了二天三模的施工记录，杜绝了混凝土的色差、冷缝、蜂窝、麻面，达到了混凝土外观光洁、颜色一致、内实外美的标准。

三、高强度等级混凝土施工技术

(一) 混凝土原材料的选用和质量控制

水泥：使用 42.5 号普通硅酸盐水泥，其品质指标应符合现行国家水泥标准。

砂子：采用广西订购的河砂，砂中含泥量控制在 1% 以下，含泥量超标应提前安排冲洗，砂的其他技术指标符合 GB/T14684—93《建筑用砂》质量标准。

石子：采用碎石 5~31.5mm 连续级配，碎石中细粉含量 $\geq 1\%$ ，其他技术指标符合 GB/T14685—93《建筑用卵石、碎石》质量标准。

外加剂：选用广东湛江产 FDN—3000 高效减水剂，掺量 = $C \times 0.5\%$ 。缓凝剂为

(二) 混凝土配合比

试验室根据工程实际用的水泥、砂、石、水和外加剂进行配合比及强度试验，确定混凝土的理论配合比为：1:1.179:2.625:0.35:0.008

水泥用量为 480kg，混凝土坍落度为 160~180mm。

(三) 混凝土施工质量控制

1. 混凝土的拌制

采用自动计量拌和站进行集中拌和，混凝土生产能力为 25m³/h，施工前混凝土拌和人员在试验人员的监督下将试验室所开的配合比输入电脑，确认无差错方后开盘。搅拌时间，梁部混凝土 45 秒。混凝土拌制的干湿湿度。梁部混凝土底板坍落度控制在 160~180mm，腹板混凝土坍落度控制在 120~140 mm，顶部混凝土坍落度控制在 80~100 mm。在施工过程中配合比的调整，均必须经过试验室的同意，并有试验人员在场，施工配料允许偏差见表 2-1-6-10。

表 2-1-6-10 施工配料允许偏差表 (%)

混凝土等级	水 泥	砂 石	拌 合 水	外 加 剂
C28~C48	1	3	1	1

2. 混凝土的运输

按照混凝土施工有关管理规定办理

3. 混凝土的灌注

(1) 混凝土施工所用机械提前进行保养维修，保证混凝土的顺利灌注。混凝土采用插入式振动器捣固密实，每个梁段应配备 4—6 台插入式振动器，根据梁段的高度确定振动棒的长度。

(2) 混凝土从拌合楼拌出至入模时间不得大于 40 分钟(冬季混凝土施工另行规定)，发现混凝土入模前水化热过大时，应及时汇报处理。

(3) 混凝土入模温度必须满足 17℃ 以上，如达不到，各种原材料需按冬季混凝土施工要求进行。

(4) 混凝土应进行分层浇注，每层厚度宜控制在 30cm 左右，接缝、预埋件、钢筋密集处，加强振动。

4. 混凝土养生

混凝土的养生质量直接影响到混凝土的强度，影响到混凝土的表观质量，派专人负责此项工作。根据环境的温度变化情况制定混凝土养生措施如下：

(1) 环境温度在 5 度以上 10 度以下，混凝土灌注完，混凝土表面用彩条布覆盖，待同等条件养护的混凝土试件其抗压强度达到梁部混凝土设计强度的 90%，但还需洒水继续养护 5d，始终保持混凝土表面润湿。

(2) 环境温度在 0 度以上 5 度以下，混凝土灌注完，立即用彩条布覆盖混凝土表面，再加 2 层草垫，钢模板外用彩条布裹起来，待同等条件养护的混凝土试件其抗压强度达到梁部混凝土设计强度的 95%，方可拆除。

(3) 环境温度在 -10 度以上 0 度以下，混凝土灌注完，立即用彩条布覆盖混凝土表面，加一层棉被，再加 2 层草垫，钢模板外用一层棉被一层彩条布裹起来，如达不到所规定的要求，再用电热毯全方位通电加热养护混凝土。待同等条件养护的混凝土试件其抗压强度达到梁部混凝土设计强度的 100%，方可拆除。

(四) 混凝土质量评定

1. 3d 强度达到 80% 以上满足张拉施工
2. 龄期强度达到 120% 以上满足设计要求
3. 外观颜色一致，混凝土表面无缺陷
4. 弹性模量符合设计要求
5. 混凝土容重符合设计要求

(五) 体会

1. 通过本桥施工对混凝土的研究发现，在利用普通水泥拌制梁部 C50 级混凝土施工中，其强度达到 C60 级以上，并且其强度稳定，在设计时可以考虑提高梁部混凝土的强度等级达到 C60 级具有可能性。

2. 利用机制砂拌制墩身 C30 级混凝土时，其强度达到 C40 级，并且其强度稳定，机制砂拌和混凝土的强度可以提高到 C40 级具有可能性。

3. 通过对 C50 级混凝土施工用原材料的质量控制，可以降低每 m³ 混凝土水泥用量

到 475kg。

四、混凝土冬季施工技术

根据全桥的施工进度情况,冬期必须完成 10 号和 11 号的墩身 50m 才能确保总工期的要求,否则将影响铺架总工期。

(一) 混凝土冬季施工的技术要求

1. 保证混凝土的内在质量和外观质量,即混凝土不受冻、不开裂。
2. 混凝土的早期强度应满足施工进度的要求,速度要快,否则就失去冬季施工确保工期的目的。具体要求是达到墩身施工速度每天平均 1.0m,悬灌梁施工 10d 一个梁段。

(二) 混凝土配合比的设计

1. 混凝土原材料

水泥:使用乌蒙山牌普通硅酸盐 42.5 号 R 水泥,其品质指标符合现行国家水泥标准。

砂子:梁部施工采用广西订购的河砂,表现密度 2.60,细度模量 2.70,含泥量控制在 1% 以下。墩身采用现场机制砂,粉尘含量小于 10%。砂的其他技术指标符合 GB/T14684—93《建筑用砂》质量标准。

碎石:梁部采用 5~31.5mm 连续级配的碎石,墩身采用 30~60mm 连续级配的碎石,碎石中细粉含量 $\geq 1\%$,其他技术指标符合 GB/T14685—93《建筑用卵石、碎石》质量标准。

外加剂:梁部选用 FDN—3000 高效减水剂,掺量=C \times 0.6%。墩身采用 UZF-2B 早强剂,掺量=C \times 0.8%。其对混凝土强度的影响见下表 2-6-11

表 2-6-11 外加剂对混凝土强度的影响

外加剂名称及掺量 (%)	水灰比 (W/c)	坍落度 (mm)	混凝土抗压强度 MPa			备注	
			R1	R1	R1		
FDN	0	0.41	100~140	12.8/100	32.6/100	42.1/100	同水泥用量、同坍落度
	0.6	0.35	100~140	19.8/165	41.8/178	69.0/161	
UZF	0	0.62	80~120	6.1/100	15.2/100	20.2/100	
	0.8	0.56	80~120	10.8/162	21.4/171	34.8/158	

从上述数据得知:掺外加剂比不掺外加剂的混凝土强度提高 60%~70%。

2. 混凝土配合比

经过对比优化实验,确定混凝土的理论配合比各项控制指标与相应的强度如下表 2-1-6-12。

表 2-1-6-12 混凝土配合比与强度对应表

部位	水泥用量 (Kg/m)	水灰比	砂率 (%)	外加剂掺量 (%)	坍落度 (mm)	混凝土抗压强度 (MPa)		
						R1	R1	R1
梁部	480	0.34	32	0.7	100~140	20.5	45.0	69.5
墩身	360	0.54	39	0.9	80~120	11.4	22.6	35.6

(三) 施工方案

针对经验不足，聘请了混凝土施工专家进行现场授课，讲解混凝土冬季施工的有关技术要求，结合现场的实际情况召开技术研讨会制定施工方案和施工措施。

配合比是按照常温情况下施工进行考虑的，所以在冬季施工应以改善混凝土施工的小环境着手制定施工方案。

(1) 对环境温度情况和原材料温度进行调查，分析确定混凝土入模时温度。掺加早强减水剂，减小水灰比，达到混凝土的早期强度要求。经过热工计算，当材料温度达到表 2-1-6-13 的要求时即能满足混凝土的早期强度要求，并且有利于达到施工要求。

表 2-1-6-13 早期强度对原材料温度要求

环境温度℃	-10		-5	
施工部位	梁部	墩身	梁部	墩身
原材料温度℃	砂 1	砂 1	砂 1	砂 1
	碎石 1	碎石 1	碎石 1	碎石 1
	水泥 6	水泥 6	水泥 6	水泥 6
水温℃	60	50	46	30
混凝土入模板温度℃	9	6.1	9	6

(2) 加强对混凝土内温和环境温度观测，及时反馈温度信息，采取增加环境温度的措施，确保混凝土的内外温差保持在规范要求 25℃之内，防止结构开裂。

(3) 加快水化热散发，大体积混凝土施工尤其注意，确保最低养护时间。埋设散热孔，循环水散热，

(4) 利用循环水进行混凝土养生，增加混凝土表面环境的含水率，增强混凝土强度。

(四) 施工措施

1. 材料保管

水泥存放库房内，混凝土拌和前 30 分钟运出库；粗骨料、细骨料提前用高压水冲洗干净，干燥后用草袋和塑料布覆盖，避免雨雪积留结冰。

2. 材料加热

购置蒸汽锅炉，对混凝土施工用水加热。现场测定水温和原材料温度，进行热工计算，保证混凝土的入模温度在 9℃以上。但入模温度不能高于 15℃，否则会增加混凝土的内温，给保温工作带来负担。

3. 混凝土作业面小环境进行保温和升温

混凝土灌注前对混凝土灌注作业面搭设暖棚，具体做法是，将作业空间以铁皮和彩条布进行全封闭，内部生火炉和电暖气进行升温，保证小环境温度在 15℃以上，并且温度均衡。墩身施工速度较快，由于混凝土拆模不利于保温，采取平台外延长围裙的办法进行保温，其长度为保证混凝土外露后其内温与最低环境温度之差小于 25℃。

4. 混凝土灌注

根据混凝土的灌注速度，确定混凝土的最佳拌和时间；尽量缩短混凝土运输时间，

避免混凝土的热量在运输过程中损失；在混凝土灌注区实测混凝土的温度，调整混凝土的拌和水温度，保证混凝土温度在允许范围内；同时在墩壁中心向墩壁间隔 1.5m 布置测温孔，梁体在底板、腹板和顶板布置测温孔；混凝土的捣固作业同普通混凝土的施工。

5. 混凝土养护和散热

混凝土外露部分采取覆盖掩护，保持温度和湿度，根据环境温度的情况可以温水进行表面养生。通过测温孔观测混凝土的内部温度（见表 2-1-6-14）和大、小环境温度的观测，计算温差决定混凝土的养护环境温度和保温时间（见表 2-1-6-15）。墩壁结构尺寸较大，个别阶段属于大体积混凝土，则采取在墩壁埋设散热孔，加循环水进行散热，缩短混凝土的保温时间。

表 2-1-6-14 测内温结果

从灌注起算 时间 (h)	温度℃	
	梁部	墩身
0	9	6
8	25	16
16	36	28
24	38	31
48	31	42
72	20	46

表 2-1-6-15 混凝土最高升温、养护温度、养护时间

部位	混凝土内最高升温℃	养护温度℃	养护时间 (d)
梁部	40	13	6
墩身实心段	55	16	19
墩身空心段	49	14	12

(五) 混凝土质量评定

1. 混凝土的早期强度情况

通过对同条件养护的混凝土试件 3d 强度检查，墩身混凝土的 3d 强度达到设计强度的 60%，7d 达到 80% 以上，梁体 3d 的强度达到设计强度的 80%-90%，达到了预期的强度要求。

2. 冬季施工混凝土的强度验收和评定

混凝土强度以同一工程部位、同一混凝土强度等级、同一施工配合比、同一龄期进行验收和评定。按照 TB10425-94 标准中的 4.2 标准差未知方法进行

(1) 梁部、墩身冬季施工期间的混凝土强度值

表 2-1-6-16

强度代表值

每组试件强度代表值 (MPa)										
梁部	66.4	59.8	71.0	65.6	63.8	69.0	60.8	68.8	68.8	65.5
	70.8	62.8	58.8	61.9	57.4	69.4	74.1	65.6	70.1	62.9
墩身	31.8	34.4	29.9	35.1	29.0	36.1	32.3	34.8	35.5	28.8
	32.6	34.9	36.6	35.4	35.0	29.8	30.6	33.6	35.6	29.0
	32.8	35.8	32.3	36.4	35.8	31.4	36.2			

(2) 计算标准差梁部: $S=4.76$ 墩身: $S=2.58$ **(3) 计算混凝土验收界限值**梁部: $(m2f_{cu})=f_{cuk}+0.95s_{fcu}=48+0.95\times 4.76=52.5\text{MPa}$ $f_{2cu, \min}=f_{cu}-A\times B=48-1.2\times 5.5=41.4\text{MPa}$ 墩身: $(m2f_{cu})=f_{cuk}+0.95s_{fcu}=28+0.95\times 2.58=30.4\text{MPa}$ $f_{2cu, \min}=f_{cu}-A\times B=28-1.2\times 4.5=22.6\text{MPa}$ **(4) 混凝土强度评定**梁部: $m2f_{cu}=65.2$ $f_{2cu, \min}=57.4\text{MPa}$ $m2f_{cu} > (m2f_{cu})$ $f_{2cu, \min} > (f_{2cu, \min})$ 墩身: $m2f_{cu}=33.4$ $f_{2cu, \min}=28.8\text{MPa}$ $m2f_{cu} > (m2f_{cu})$ $f_{2cu, \min} > (f_{2cu, \min})$

以上混凝土强度评定均合格

通过对冬季施工墩身和梁部结构进行检查, 未出现温度裂纹, 混凝土表面位未出现受冻。

(六) 施工体会

混凝土的早期强度与温度关系密切, 在冬季施工时主要解决早期强度要求和环境温度的矛盾, 混凝土内温与环境温度的相对平衡的矛盾以达到混凝土结构安全的目的。

第七节 施工机械配备

一、快速施工机械设备配套技术

(一) 概况

李子沟特大桥横跨李子沟峡谷，峡谷相对高差 50~400m，自然坡度 35~60 度。该桥共有 21 个墩台，设计圬工达 10.2 万 m³，其中梁部悬灌 C48 号混凝土 7640m³，土石方开挖达 22.8 万 m³，比著名的“南昆四桥”圬工总和还要多。总工期却仅有 21 个月，而期间还要跨越两个雨季和两个冬季，实际有效工期不足 16 个月。该地区属云贵高原多雨严寒地区，常年云雾缭绕。每年五月至十月阴雨连绵，年降雨量达 962.3mm，春季缺水。冬季 12 月~3 月间气温较低，最低达-15.3℃，经常出现雪天封路。最大风速达 33m/s，相当于 10 级以上台风。要在如此恶劣的气候条件下和这么短的时间内完成如此浩大的工程，深入研究深基、群桩、高墩、大跨、长联刚构--连续组合梁施工机械设备配套技术，解决机械设备的科学选型，合理配置和配套管理等系列问题，形成机械设备综合生产能力，发挥其最大效能是至关重要的。

(二) 施工机械配套技术研究的主要内容

1. 机械配套目标及原则

根据李子沟特大桥施工所面临的严峻的工期形势，结合地质、地形情况及气候条件，以“保工期、保安全、保质量、创国优”为目标，确定机械配套的原则。它们是：选型适配，功能适用，不盲目追求单件设备的先进性，而是合理地配置，追求系统的先进性；充分发挥每一件设备的能力，以满足工程技术条件为前提，综合分析各种机械设备的技术参数，强化综合保障能力和相关机械设备的能力匹配；结合工程特点，全面研究设备的适用性；依机械设备的需要量作为计算依据，突出重点，兼顾一般，适度确定机械设备的配置数量；依最不利因素为检算条件，依机电设备的总功率控制外供电源及备用电源容量，确保设备正常运转；强调劳力保障功能，人体机不休，充分发扬设备能力；结合工程及地形条件，合理布置机械设备并适时调整，实行动态管理，加强运输能力，确保供给，形成整体保障能力。

2. 施工机械设备配套考虑的主要因素

(1) 工程技术控制条件

李子沟特大桥全长 1031.86m，21 个墩台，基础钻、挖孔桩计 9887m，主跨最大基础为 50 根桩径 1.5m 长度 40m 的钻孔灌注桩，承台尺寸为 37.6m×18.1m×5m，体积为 3403m³。最高墩身高度 107m。刚构--连续梁长 529.4m，结构形式为 (72+3×128+72)m，混凝土总量为 10.2 万 m³。工期 16 个月，平均每天需生产混凝土 230m³，施工高峰期每天需灌混凝土 1000 余 m³。

(2) 工序控制条件

由于工期缩短，施工方案被迫调整为主跨墩平行作业，引桥高墩亦需同时施工，在 1000 多 m 范围内全面开花，机械设备配置必须保证重点的主跨施工，又要兼故引桥施

工。

(3) 地形控制条件

本桥主桥座落于李子沟峡谷谷底，其基础与两端引桥基础高差 100 余 m，地势陡峻，施工场地狭窄，圻工量主要集中在主桥，因此，在主桥设固定式混凝土拌合站，两端引桥设活动式混凝土拌合站，以减少输送距离。

(4) 气候控制条件

本桥所处地施工环境极为恶劣，施工机械选型、能力计算必须充分考虑这些因素，加大能力保证系数。

(5) 当地资源制约条件

由于桥址所处地为国家级贫困县，资源匮乏，必须充分考虑备用能源和砂石料生产能力。

(6) 机械设备的经济性、适用性和可操作性

在机械选型时，在选择机械设备先进性的基础上，尽量采用经济合理、适用性强、性能可靠又易于操作的设备。

3. 施工机械设备配套

(1) 机械设备的选型

根据施工控制条件和目前桥梁施工设备发展现状及已有的设备情况，确定李子沟特大桥施工主要机械设备为：冲击钻与旋转钻机、电动凿岩机、内燃压风机、通风机、液压平台式爬模、单笼附着式工业电梯、三角型挂篮、混凝土自动计量拌合站、混凝土输送泵、附着式塔式起重机、700m 跨简易缆索吊车、罐式混凝土运输车、碎石机、磨砂机、大功率发电机组、大容量变压器以及土石方施工机械和材料运输机械设备。

(2) 主要设备需求量计算

1) 基础施工方法及设备选择

主桥每个桥墩基础 50 根钻孔桩桩，面积 681 多 m^2 ，间隔钻孔，每台钻机的占地面积（含排泥浆水沟，机械进入通道）约为 $13.6m^2$ ，一个基础可以最多放 13 台钻机。根据基坑地质为洪积土、碳质页岩和泥灰岩，部分穿过灰岩，通过试验及以往经验，一根桩需要 20d 以上才能完成，完成一个基础施工需用要 120d。根据施组基础仅有 120d，若平行作业，仅主桥必须有 4 个基础同时施工，需要 50 台钻机，加引桥 10 台钻机，共需 60 台钻机，每台钻机额定功率为 50kW，共需电源至少 3000kW 以上，而三个局施工用外供电源为 3000kW，所以这种配置方案不可行。而循环作业又无法保证工期，所以仅 10 号墩全部采用钻孔而其余墩采用挖孔与钻孔相结合，共上场钻机 20 台，4 台 $20m^3/min$ 内燃空压机，40 台手持式风动凿岩机，2 台 $25m^3/min$ 轴流风机。

2) 混凝土拌合设备配置

(A) 按平均生产能力计算

根据施组要求，全部 21 个墩台基础必须在 8 个月内完成，且完成主桥全部墩身及

$$q = \frac{Q}{kT}$$

引桥墩台身 30%，共计混凝土 57000m³，按公式

其中 T 为混凝土生产时间， $T=t_1t_2t_3$ ，单位小时

t_1 混凝土实际生产月数，一般按实际施工月数的 1/3 时间计算，即 8/3 月

t_2 每月实际生产天数，一般按 25d/月计

t_3 每天生产时间，取 24h

K 为时间利用系数，一般取 0.8~0.9，本桥计算时取 0.85

q 每小时混凝土生产能力，则

$$q = \frac{57000}{0.85 \times \frac{8}{3} \times 25 \times 24} = 42m^3/h$$

(B) 按个别墩集中灌注混凝土计算

主桥承台尺寸为 18.1m×37.6m×5m，共计混凝土 3403m³。

若施工时按 0.3m 一层，每层的混凝土量为 206m³。混凝土的初凝时间为 2h，若掺入缓凝剂，一般应控制在 4~6h 左右，即浇一层 0.3m 不宜超过 6h。则每小时生产能力最小 q_{\max}

$$q_{\max} = \frac{Q_1}{t}$$

Q_1 为混凝土每层的圪工量 $Q_1=206m^3$

t 为浇注一层所需用时间 $t=5$

q_{\max} 最大生产能力

$$q_{\max} = \frac{206}{4} = 51m^3/h$$

本桥选择一台 50 m³/h 和一台 25 m³/h 自动拌合站，每小时额定生产能力为 75 m³/h，实际生产能力一般为额定能力的 0.70~0.80，本桥取 0.75，即实际生产能力为 56.25 m³/h> $q_{\max}=51 m^3/h>42 m^3/h$ ，故所选设备合适。

3) 混凝土运输车选择

全桥要求连续一次灌注成型的最大混凝土量为 3403m³ 的承台，混凝土运输车的配置以此为控制条件，通过计算配 6 台 6m³ 混凝土运输车（1 台备用）。计算依据为：每台车从装料出料及运行到位共需 25 分钟，每小时每台车运料 2.4 趟，车和运量利用率均按总量 0.9 倍计算，则每小时运量 $5 \times 2.4 \times 6 \times 0.9 \times 0.9 = 58 m^3/h > 51 m^3/h$ ，满足供混凝土最大能力要求。

4) 混凝土输送泵选择

本桥共上了三台 60m³/h “三一”牌混凝土输送泵，在主桥基础施工完成后，9 号、10 号、11 号墩各安装一台，与塔吊和缆索吊配合施工墩身及梁部。

5) 施工电源与设备总功率匹配检算。

施工常用电源为 10kV 供电线路，采用 1 台 800kVA、2 台 400kVA、2 台 315kVA 和 1 台 200kVA 变压器各一台，合计 2430kVA。考虑供电不正常因素，备用 4 台 250kW 内燃发电机组。

电动机械设备的总容量乘以相应的综合性同时用电系数即为总计算负荷。

$$P_p = \sum P_d \times K_c$$

式中 P_d ——计算负荷 (kW)，本桥取 3200kW。

K_c ——综合性同期用电系数，一般路基和桥涵取 0.6~0.65，隧道取 0.65~0.7，根据本桥的实际情况取 0.55。

P_p ——单项工程或电动设备总容量 (kW)。

则 $P_p = 3200 \times 0.55 = 1760$ (kW)

如果取功率因子为 0.8，则实际功率 $S = 1760 \div 0.8 = 2200$ kW

当采用常备电源时，设备保证系数 $n = 2430 \div 2200 \times 100\% = 110.5\%$

当采用备用电源时，只考虑部分机械设备的运转。 $\sum P_d = 1000$ kW

则 $P_p = 1000 \times 0.65 = 650$ (kW) $n = 1000 \div 650 \times 0.8 = 123\%$

(3) 全桥机械能力保证系数

全桥机械能力保证系数如表 2-1-7-1

表 2-1-7-1 全桥机械能力保证系数表

序号	机械设备名称	数量 (台、套)	能力保证系数 (%)
1	缆索吊机	2	120
2	塔吊	4	150
3	工业电梯	5	90
4	混凝土运输车	6	130
5	混凝土输送泵	3	300
6	常用电源 (变压器)	5	113.64
7	备用电源 (发电机)	4	123
8	高扬程水站	1	200
9	土石方施工机械	20	180
10	混凝土自动搅拌站	3	125
11	加工制配机械	16	150
12	基础钻孔机械	20	110

(4) 机械设备布置及技术性能

1) 混凝土拌合设备

本桥 10 号墩附近配置一台 50m³/h 和一台 25m³/h 自动计量混凝土搅拌站，专门负责主桥混凝土的生产，在 3 号墩和 16 号墩附近各布置一台 25m³/h 活动式搅拌站，分别承

担内江侧及昆明侧引桥混凝土的生产。

2) 塔吊

5号、9号、10号和11号墩各设一台塔吊，其中5号墩塔吊负责4号、5号和6号高墩墩身施工，其余负责其临近的墩身和梁部的部分材料竖直提升。塔吊塔基坐落在墩基承台上，塔身与墩身采用附着式联接，第一层附墙架距离承台顶38m，以后每隔24m设置一道，保证了塔吊的稳定。其吊装最大回转半径50m，最大提升高度120m。

3) 工业电梯

工业电梯布置在施工时间长，人员上下往复频繁的主桥7号、8号、9号、10号和11号高墩上。梯架用附墙杆与墩身相联，附墙杆间距为3m，除7号墩电梯设置在横桥方向外，其余均设在顺桥方向上，以缩短附墙架的长度，增强电梯的稳定性。

4) 缆索吊车

700m跨双组缆索吊布置在3号~14号墩间，其缆索中心与桥中心一致，涵盖主桥，主要承担主桥桩基础钢筋笼、墩身液压平台、悬灌梁施工挂篮等大型件的吊装和墩梁材料、混凝土的提升。单组设计吊重10t，双向牵引，单端控制，矢跨比1:20，承载索为3 ϕ 47.5钢丝绳，塔高分别为96m和86m。

5) 砂石料生产场

本桥共有混凝土圬工10.2万 m^3 ，需要砂石料10万 m^3 ，其中8万 m^3 要在10个月内完成，平均每月完成12000 m^3 ，每天完成480 m^3 ，高峰期每天需生产750 m^3 ，仅靠地方生产供应不足，决定自建砂石料场补给。在距现场10km的地方建大型石料厂一个，共安装大型碎石机和打砂机各4台，组织昼夜施工。

4. 机械设备综合配套的管理

李子沟特大桥施工中共投入大中型机械设备100多台(套)，为使各种机械多而不乱，井然有序地运转，从全局范围调集精兵强将，选派责任心强、懂技术、会管理、工作经验丰富的专业技术人员负责特大桥机械设备的管理工作。在施工现场设机械设备总调度长，负责组织全桥机械设备的选配、采购和统一调拨；设立机运室，负责机械设备的日常管理、维修和技术指导；组建了桥梁施工机械专业队，负责机械设备的操作和维护修理。各级管理人员职责明确，分工合作，密切配合，层层把关，形成了从上而下的保障体系和统一指挥机构，为充分发挥机械效能，奠定了组织上的保障。

加强技术培训，培养一批技术过硬的操作人员。高技术设备需要有高素质的人员来驾驭，大型机械设备的安装、调试、运行、维修必须有一批精通业务、技术熟练的人员来操作。针对李子沟特大桥机械设备多、技术熟练的操作人员需求量大的实际，一方面从各单位抽调技术能手，另一方面，适时地抓好岗位技术培训，先后有近百名非专业人员经过培训，考试合格后，持证上岗，使用机械设备人员持证上岗率达到100%，同时还聘请科研院所及机械设备供货厂家的技术人员组织专家组进驻工地现场指导，使职工的技术素质和操作水平有了明显提高，为机械设备的配套管理提供了技术保障。

为规范李子沟特大桥机械设备配套技术的管理，以贯彻 ISO9002 标准为切入点，从设备的选型、采购到安装调试，运行都严格按程序运作，建立机械设备台帐，坚持开箱检验制度和定期保养维修，及时做好机械设备安装、调试和运行情况记录，积累技术资料，研究内在规律，大力推行机械设备操作的标准化作业，杜绝了违规、违章操作，使机械设备配套技术的管理实现了标准化和规范化。

坚持定期检查和实施“三检”制度是机械设备配套技术管理的重要环节，有了管理制度和动作程序，关键要抓好落实，把操作人员的普遍性检查和专业技术人员的重点抽查有机地结合起来，力争早发现问题，及时处理，把事故苗头和潜在机械故障消灭在萌芽状态。有效地保证了设备的完好率和安全高效运转。全桥施工过程中未发生一起重大机械安全事故和由于机械设备故障而引起的重大停工事件。

（三）应用效果评价

该桥共投入 4000 万元购置大中型机械设备 100 余套，由于机械设备的选型适当，配套合理，加上科学的管理，机械性能得到了充分发挥。该桥设计工期 30 个月，实际施工仅用了 16 个月，96h 即灌注承台 3403m³ 混凝土，创造了我单位施工史上混凝土浇注速度的记录，工程质量显著提高。全桥机械化作业程度达 90% 以上，施工中未发生由于机械设备配套不合理造成的重大停工事件，机械设备的运转正常率达 95%，未出现由于机械设备配置不当而造成机械设备闲置浪费，取得了良好的技术经济效益和社会效益。

本桥施工投入主要机械设备见附录七机械、试验设备配备表

二、TC5023塔机安装、使用与维护技术

（一）概述

内昆铁路李子沟特大桥采用中联塔机共 4 部，其中 TC5023 附着固定塔机 3 部，TC5023/38 附着固定式两用塔机 1 部，塔身高度为 120m。每部附着撑杆五道（第一道高 38m，第二、三、四道间距为 16.8m，第五道间距 16m）。塔机主要任务是吊装钢材、混凝土及桥梁所需辅助材料。

（二）塔机基础及固定支腿的安装

1. 地基基础

- （1）本塔机基础利用桥墩承台整体钢筋混凝土。
- （2）混凝土强度等级为 C28，混凝土基础的承压力大于 $1.38 \times 10^5 \text{Pa}$ 。
- （3）混凝土基础深度为 5m。
- （4）混凝土基础表面平整度误差小于 1/500。

2. 固定支腿安装

- （1）将 4 只固定支腿与一个加强标准节装配在一起。
- （2）用 4 根直径为 100mm，长 4000mm 的钢管和 4 块 350mm×350mm×20mm 的铁板制成一个 1800mm×1800mm 的正方形支撑架预埋件。

(3) 在桥墩横向承台中心钢筋网上, 根据附着撑杆长度和支撑架预埋件尺寸放样, 并割开钢筋预埋位置。

(4) 将支撑架预埋件吊入钢筋网内, 用水平仪调平预埋件, 埋件下端与承台底层钢筋网焊接, 四根钢管立柱与四周混凝土散热管焊接牢固。

(5) 当混凝土浇注到支撑架 2/3 时, 将装配好的固定支腿和加强标准节整体吊入钢筋网内支撑架预埋件上, 用测量水平仪调平加强节(标准节中心线与水平面的垂直度 $\leq 1.5\%$), 然后将四只支腿与预埋件焊接牢固(焊缝高度为 10mm)。

(6) 补齐钢筋网上被割开的钢筋, 浇注混凝土。

(7) 固定支腿埋入混凝土深度 $\geq 1000\text{mm}$, 四周混凝土充填密实。

(三) 立塔

1. 立塔顺序

(1) 安装加强标准节 3 节。(2) 吊装爬升架。(3) 安装回转支撑总成。(4) 安装回转塔身总成(含起重限制器)。(5) 安装塔顶。(6) 安装平衡臂总成。(7) 安装平衡臂拉杆。(8) 吊装一块 2.4t 重的平衡重。(9) 安装司机室。(10) 安装起重臂总成。(11) 安装起重臂拉杆。(12) 配装余下的平衡重(13.05t)。(13) 穿绕起升机构钢丝绳。(14) 安装电缆及电器。(15) 调试各行程限位器和荷载限制器。(16) 顶升加强节和普通标准节。(17) 安装附着撑杆。

2. 立塔注意事项

(1) 塔机最高处风速 $\leq 8\text{m/s}$ 。

(2) 必须遵循立塔顺序。

(3) 注意吊点的选择, 应根据吊装部件选用长度适当, 质量可靠的吊具。

(4) 塔机各部件所有可拆的销轴, 塔身连接螺栓、螺母均是专用特制零件, 不得随意更换。

(5) 在安装起重臂之前, 必须先平衡臂上安装一块 2.4t 的平衡重, 严禁超过此重量。

(6) 平衡臂上未装够规定的平衡重前, 严禁起重臂吊载。

(7) 标准节的安装不得任意更换方位, 否则无法顶升。

(8) 必须装完 7 节塔身加强节后, 才能安装普通节。

(9) 安全位置必须保证塔机的最大旋转部分与周围建筑物的距离 $\geq 1.5\text{m}$, 与架空电线的安全距离应符合规定。

(10) 顶升前应将小车开到顶升平衡位置(能吊一节普通标准节), 起重臂转到引进横梁的正前方, 然后将塔机回转锁紧。

(11) 顶升过程中严禁旋转起重臂及使吊钩起升和放下。

(12) 标准节起升(放下), 必须尽可能靠近塔身。

(13) 整机安装完毕后, 在无风状态下, 塔身轴线的垂直度允许误差在 4‰范围内。

(14) 立塔时需用一台 25t 吊车, 同时准备好枕木、索具、绳扣等常用工具。

（四）拆塔

1. 拆塔顺序

- （1）降塔身标准节。
- （2）拆附着撑杆。
- （3）拆卸平衡臂配重（保留一块 2.4t）。
- （4）拆卸起重臂。
- （5）拆卸平衡臂。
- （6）拆卸司机室。
- （7）拆卸塔顶。
- （8）拆卸回转塔身。
- （9）拆卸回转总成。
- （10）拆卸套架及塔身加强节。

2. 拆塔应注意的事项

- （1）拆塔之前，必须对顶升机构进行保养和试运转。
- （2）有目的地对限位器、回转机构的制动器等进行可靠性检查。
- （3）严格遵循拆塔顺序。
- （4）标准节已拆除，但下支座与塔身未用 m36 高强螺栓连接好之前，严禁使用回转、牵引和起升机构。
- （5）拆卸中要经常对顶升机构的主要受力件和各相对运动件的相对位置要进行检查。如套架在上升时，套架与塔身之间发生偏斜，应立即停止顶升，并下降。
- （6）拆塔时风速应小于 8m/s。

（五）塔机的使用与维护

1. 塔机的使用

- （1）塔机使用前应做如下工作：
 - 1) 对塔机各部件进行一系列试运转和全面地检查是否符合规定要求。
 - 2) 检查整机安全防护装置的安装位置及调试是否准确。
 - 3) 按规定作塔机组装试验（即：空载试验、静态超载试验、超载动态试验）。
 - 4) 检查减速器、滑轮、轴承座及换倍率器等处润滑是否良好。
- （2）使用注意事项
 - 1) 按启动按钮时，各操作手柄必须归零位。
 - 2) 严格按本塔机技术性能和起重特性表操作，严禁超载运行。
 - 3) 起升机构设有五种速度，实现轻载高速，重载低速，决不允许长时间使用 1. 1 档（不得持续 15 秒）。
 - 4) 小车变幅采用变频方案，工作时根据需要进行适当的速度。
 - 5) 回转采用变频调速机构 2 台，既有平稳的启动，又有较快的回转速度，严禁回

转的反转制动和紧急刹车。

6) 顶升时严禁回转、变幅和起升。

7) 各机构操作动作要柔和，由低速到高速逐步转换，不得将操作手柄从静止（或低速）向中速或高速位置推进。

8) 不准随便调整控制箱内延时继电器、过流继电器。

9) 发现塔机有异常现象时，应立即停机切断电源，待查清并排除故障后再使用。

10) 在遇大雷雨、暴雨、浓雾或塔机最高处风速超过 13m/s 时，一律停止起重作业。操作时，严禁起重吊钩着地，以防引起卷筒钢丝绳排列不齐而遭损坏。每班作业完毕后，必须将起重臂转到与建筑物平行的方向，吊钩升高至超过周围最高障碍物的高度，载重小车应在最小幅度处，回转制动器处于松开状态，切断总电源方可离去。

2. 塔机的维护

1) 经常保持整机清洁，及时清扫。

2) 检查减速器、滑轮、轴承座及换倍率器等处的油量，及时加油。

3) 注意检查各部件钢丝绳有无松动、断丝、磨损等现象，如超过规定必须及时更换。

4) 检查各安全装置的灵敏度及可靠性。

5) 检查各部销轴、螺栓连接处，尤其塔身标准节连接螺栓，当每使用一段时间后，必须重新进行紧固。

6) 起升钢丝绳经过一段时间使用磨损拉长后，需对高度限位器重新按规定进行调整。

7) 检查换倍率装置及吊钩的防脱绳装置是否安全可靠。

8) 观察各电器触点是否氧化或烧损，若有接触不良应及时修复或更换。

9) 各限位开关和按钮不得失灵，零件若有生锈或损坏，应及时更换。

10) 检查各电器元件紧固螺栓是否松动，电缆及其他导线是否破裂，若有应及时排除。