

十四、柘溪大坝加固工程施工组织设计

(一)工程概况

柘溪水电站位于湖南省资水中游安化县境内,电站装机容量为 44.75 万 kW,年发电量为 21.7 亿 kW/h,为湘中电网骨干电站。

大坝支墩空腔为全封闭结构,在未加固施工时,气温稳定,一般气温在 20℃左右,有冬暖夏凉之感。

大坝加固工程主要实物工程量如下:

- (1)排除腔内积水 14 万 m³,并作持续 4 年施工期排水。
- (2)清除腔底淤泥、石渣、腐木烂铁 0.72 万 m³。
- (3)清除风化基岩 0.35 万 m³。
- (4)钻排水孔 0.14 万 m,基础锚筋锚杆 20t。
- (5)新老混凝土凿毛 3.59 万 m²。
- (6)埋设蛇形冷却钢管 2.25 万 m。
- (7)加工埋设止浆片 0.86 万 m。
- (8)埋设大坝观测仪器 300 多台件,仪器电缆 8000m。
- (9)浇筑加固体混凝土 10.69 万 m³。
- (10)大坝接缝灌浆 1.70m²。

(二)迎水面裂缝状况和发展

柘溪大坝全长 330m,最大坝高 104m,坝顶宽 15m,最大坝底宽度为 102m,大坝溢流面长度为 146m,由 8 垮各宽为 16m 的单支墩大头坝和 2 垮各宽 9m 的宽缝重力坝组成。左岸非溢流段由 5 个各宽为 15m 的宽缝重力坝段组成,右岸由 6 个各宽为 15m 的进水口及 15m 宽的电梯井坝段组成。单支墩大头坝其大头形状为钻石形,支墩从上到下为梯形断面,最薄处 5.52m,最厚处为 8m(图 2.3.14(1))。

大坝迎水面在施工期间曾出现较多的表面裂缝(见图 2.3.14(2)),在蓄水前作过处理,但不彻底。运行近十年后,1 号和 2 号支墩靠近支墩中心线附近的一条裂缝,在缝水压力作用下,相继发展成为大面积裂缝,严重威胁了大坝的安全。

对大坝裂缝曾进行了堵、排、预应力钢索锚固、加混凝土三角塞等技术处理措施,暂时保证了大坝的安全运行。

后经电子计算机分析计算,大坝裂缝有可能发展成为 1 号、2 号支墩的大面积裂缝,甚至更为危险,那样就会严重威胁下游千百万人民生命财产安全。故能源部 1977 年将柘溪大坝定为险坝,限期进行加固处理。

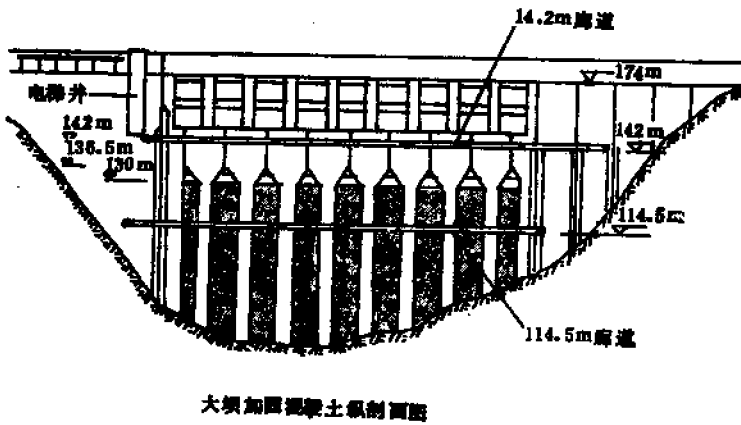
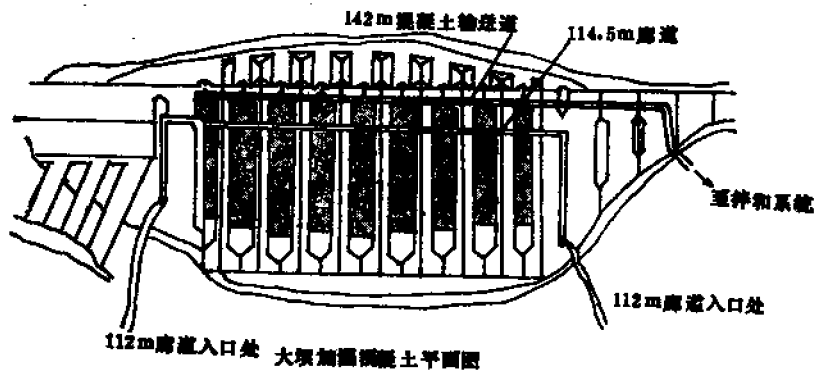


图 2.3.14(1) 柘溪大坝加固工程示意图

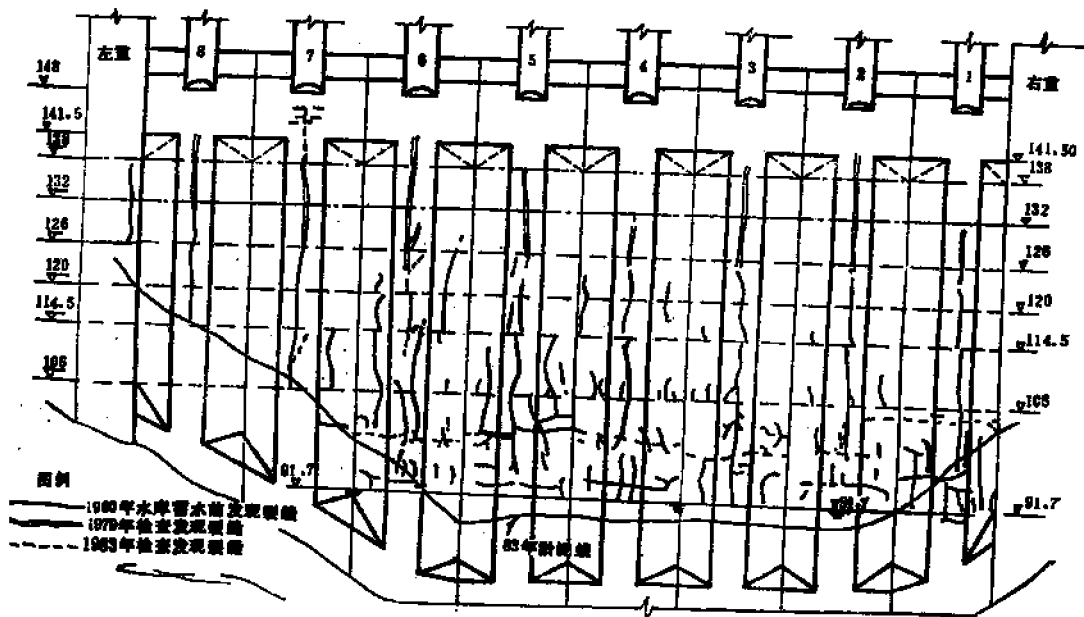


图 2.3.14(2) 柘溪大坝迎水面裂缝分布及发展示意图

迎水面裂缝的发生、发展,经中南勘测设计院、建设单位、原施工单位水电八局分析有以下几条原因:

(1)施工期间昼夜温差大,同时混凝土拆模过早而又无适当的保温措施,温控措施不得力,因而产生了很多表面裂缝。

(2)大坝混凝土为贫混凝土,早期强度很低,抗拉强度仅为抗压强度的 6%~8%,施工混凝土离差系数大,弹性模量较高,因而混凝土抗裂性能较差。

(3)在大坝混凝土中掺有 20%~30% 的烧粘土,使混凝土干缩率更大。

(三)大坝加固方案的确定

根据大坝模拟试验和电子计算机计算成果分析,前阶段采用的堵、排、混凝土三角塞、大头处预应力钢索锚固等处理,对保证 1 号、2 号支墩安全运行都起了一定作用。但柘溪大坝 8 个支墩迎水面均存在裂缝,从潜水模缝检查,这些裂缝均有发展的趋势,从石膏模型试验破坏的情况来看,最危险的开裂是在裂缝偏离中心线较多的情况沿大头悬臂处开裂,从而导致整个大坝崩溃,严重威胁大坝下游(洞庭湖地区)数以万计人民的生命财产安全。因此大坝加固处理要慎之又慎,经专家教授权威论证研究决定,大坝加固处理采用堵、排、空腔加固等综合加固措施。同时在确保电站正常发电、水库满蓄、船只通航的三个条件下对大坝进行紧急彻底的加固措施。

1. 堵缝

迎水面裂缝采用环氧树脂堵缝。1 号支墩迎水面堵漏进行两次,第一次用瓷土堵漏,但耐久性差,没堵多久漏水量又有增加,后来采用水下环氧树脂粘结堵漏,效果较显著。

2. 排水

大坝支墩对称钻取排水孔(见图 2.3.14(3)),孔距 1.5m 两侧交叉排列(即每一侧孔距为 3m),排水孔布置范围从高程 93m~高程 127m,排水孔径为 $\phi 50\text{mm}$ 。其作用主要是减少缝内渗水压力,使裂缝不致向纵深发展。

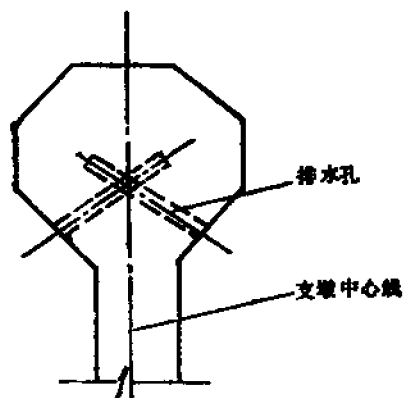


图 2.3.14(3) 排水孔示意图

3. 预应力高强钢丝索锚固

在裂缝范围和靠近裂缝边缘,为了使在裂缝渗水时承受部分渗水压力,对 1 号支墩进行预应力锚固。锚固孔大部分布置在坝下 20m 范围内,锚固孔纵横间距为 2m,即每 4m^2 一孔,每个锚固孔装 18 $\phi 5\text{mm}$ 高强度钢丝(极限强度 170MPa),每孔加预应力 400kN。

2[#]支墩共计布置 103 孔,每孔装 24 $\phi 5$ 高强度钢丝,每孔加预应力 530kN,锚固孔用环氧树脂封堵。

4. 混凝土三角塞加固

混凝土三角塞是阻止迎水面缝水压力作用下的变形,改善坝体应力的有效措施。混凝土三角塞浇筑量为 300m^3 ,为了减少混凝土收缩,在水泥中掺入 1% 水泥重

量的铝粉。对三角塞混凝土与坝体接缝进行测量,一般接缝开度均小于 0.05mm。

5. 大坝空腔内重力式加固措施

大坝经过前堵、后排及预应力钢丝索锚固和混凝土三角塞加固,保证了大坝运行,但为了彻底加固坝体还必须采取重力式大体积混凝土空腔加固措施。

重力式大体积混凝土空腔加固的优点:

堵、排、预应力锚固及混凝土三角塞加固措施,虽然起到改善坝体应力,减少缝面渗水压力,保证了大坝短期安全运行的作用,但迎水面的裂缝仍在继续恶化扩大。在大坝空腔内用大体积混凝土填筑,即使大头悬臂部分断裂后,由新浇筑的混凝土与基岩的摩擦力来抵御来自上游的迎水面水压力,这样就可保护大坝支墩大头“耳朵”不至裂掉,也增加了坝体抗群动,抗倾覆的安全度。同时因为重力式加固方案受力简单明了,安全度比拱撑墙方案和预应力锚固方案大得多。其缺点是混凝土体积大,散热条件差,温控措施要求高,但具有安全可靠,一劳永逸等优点。重力式大体积混凝土加固体横剖面图见图 2.3.14(4)。

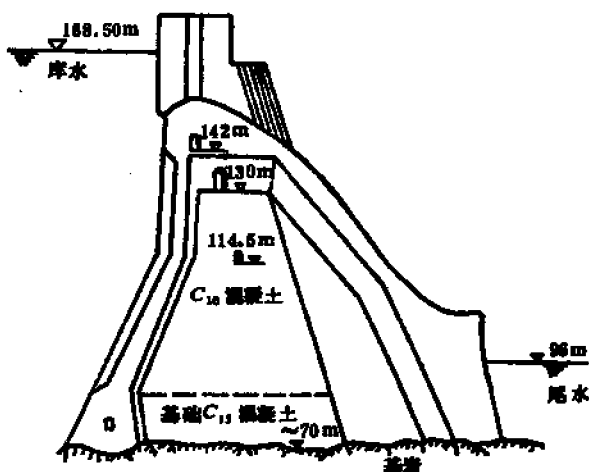


图 2.3.14(4) 重力式大体积混凝土加固体横剖面图

(四) 施工准备工作

柘溪水电站是湖南省的骨干电站,同时又是湖南省电力调峰的主要电站,在湖南省工农业生产和国民经济发展中占有举足轻重的地位。根据要求,柘溪大坝加固工程一定要保证在电站满发、水库满蓄、资江通航前提下,保证工程质量前提下尽快完成加固工程。

大坝加固工程是在特定时间、特定环境、特定条件下进行的,施工的难度和困难都是很大的。加固工程分布在 9 个坝腔中,各坝腔为全封闭结构,仅在各坝墩半腰面有一个 1.5m × 2.3m 的孔洞,孔洞间横跨坝腔以钢栈桥连接,形成贯通的 114.5m 高程的交通廊道,廊道的两端在 1 号、9 号腔有高差的阶梯栈桥连接再往左右导墙边侧的转折,才能与 112m 高程处通过孔门与左右岸交通便道相接。原来的钢栈桥仅供大坝观测班作业交通用,在钢栈桥上往下望黑洞洞形同深渊(深达 45m,积水深达 20 余 m),四面环望,坝腔如梭形狭长,两坝支墩臂陡直,往下看有 35m 高悬封穹顶,雾气濛濛渗水哗哗如水帘洞。坝内常年湿雾弥漫,相对湿度达 95% 以上,温度常年在 20℃ 左右,因气流不通,污浊空气沉积,人在内稍动就会大汗淋漓湿透衬衣,感到憋气难熬。坝内施工音响回声高达 107 分贝,施工条件极为恶劣。

大坝右岸是电站厂房,左岸是航船和木材过坝滑道设施,施工期间均不允许与之干扰。因此施工用的机具、材料及混凝土拌和系统的设置只能设在距大坝 500mm 以外的甘沟及相距 1km 以上的下游河边斜山坡上。

主体工程混凝土所需砂石料,指定在下游 15km 远的东坪料场双洲滩利用挖砂船开采

筛洗,然后用 12t 载重汽车运至甘沟砂石料仓。施工用电用水及生活设施尚有一定条件,不过还需自己重新布置架设。

另外施工临时变电站、混凝土拌和系统、制冰站、中心试验室、机修间、空压机房、木材加工厂、钢筋加工棚、施工大型临时设施均要我们自行设计、自行施工,混凝土拌和系统(包括制冰站)除设计、施工外,还需自行调试生产。

加固工程与大坝新建工程相比工程量不算大,但因在坝内外不利环境中进行,又受到满蓄、满发、通航条件制约,混凝土施工质量要求高,工期要求紧迫,这就使施工难度倍增。在施工准备期间,为改造施工环境条件,使之便于施工,而又不危及电站发电及大坝安全,特地组织技术骨干会战攻关,对四十余个施工难题,都逐一编制施工方案和技术措施。

现将施工准备工作中的几大施工难题列举如下:

施工队伍的组建(土建队伍和土石方队伍的配合);坝内进出口交通条件的改造;坝腔内人员垂直上下及施工机具、材料等垂直运输;坝腔内排水、清渣、清基的施工方法;混凝土原材料的选择和质量要求;混凝土进坝水平运输和每个坝腔内的垂直运输;混凝土的浇灌用提升操作脚手平台设计与实施;中心试验室(适应水工混凝土 5 项试验项目)的组建培训。

现将属于施工准备工作中的几个大问题详述如下。

1. 施工队伍组建

1980 年 4 月我局与电站签订大坝加固工程施工合同,确定由中建五局二公司和土石方五公司联合成立工程指挥部,并隶属二公司统一管理。

指挥部在册职工 885 人及合同工 200 余人,施工高峰期间人数达到 1059 人,施工正常阶段一般保持在 900 人左右。

指挥部下设生产组、技术组、质监组、安全组、中心试验室、动力组、财务组、保卫组、行政卫生组、办公室及机运队和第一、第四施工队。

2. 坝内及进出口交通条件的改善

(1) $\nabla 114.5\text{m}$ 高程交通廊道的改造: $\nabla 114.5\text{m}$ 高程是清基、清渣、出渣、模板、钢筋、施工器材、各种动力管线敷设和施工人员出入的必经廊道,廊道断面为 $1.5\text{m} \times 2.25\text{m}$,要出入成万吨施工器材显得格外拥挤。但大坝加固工程严禁开凿原有坝墩,在不动坝墩孔洞前提下,唯有在坝腔内加宽和加固原有钢筋混凝土栈桥,使桥上有交会车辆和吊运施工器材的立足点,我们在 2~8 号坝腔中原有跨度为 9.8m 的钢筋混凝土梁下,采取加型钢八字斜撑及拉紧螺栓措施(见图 2.3.14(5)),同时在钢筋混凝土桥一侧加设一榀型钢桁梁,在原有钢筋混凝土桥面和钢桁梁上加铺 $[12$ 槽钢和 8cm 厚杉木架板,使新旧结构连成一个整体,使桥面宽度由 1.50m 扩宽至 3.0m,扩宽的桥面作为出渣提升以及堆料会车的地方。尽管坝墩处廊道宽度仍为 1.5m,但由于桥面加宽,其通过能力近似增加一倍,起到双车道的运输能力。

在 $\nabla 114.5\text{m}$ 高程廊道左右端(1 号和 9 号坝腔)因廊道有 2.5m 高差,在原有斜桥旁增设一榀跨度为 7.5m 的钢桁架,采用钢牛腿承重,上铺 $[12$ 槽钢和杉木板,再在杉木板上铺设轻便钢轨,轻轨两侧复钉木方防滑条,使左右两端斜桥成为出渣缆车和行人过道的两用桥。 $\nabla 114.5\text{m}$ 廊道改造还包括左右岸进出坝腔口的扩宽(凿大)以及出口处的边栈桥的加固,这样可以运进 5m 长的建材和周转材料以及单件 800kg 以下的物品,同时坝内各种动力管线均布置在 $\nabla 114.5\text{m}$ 廊道内,基本解决了坝内外及进出口交通运输问题。

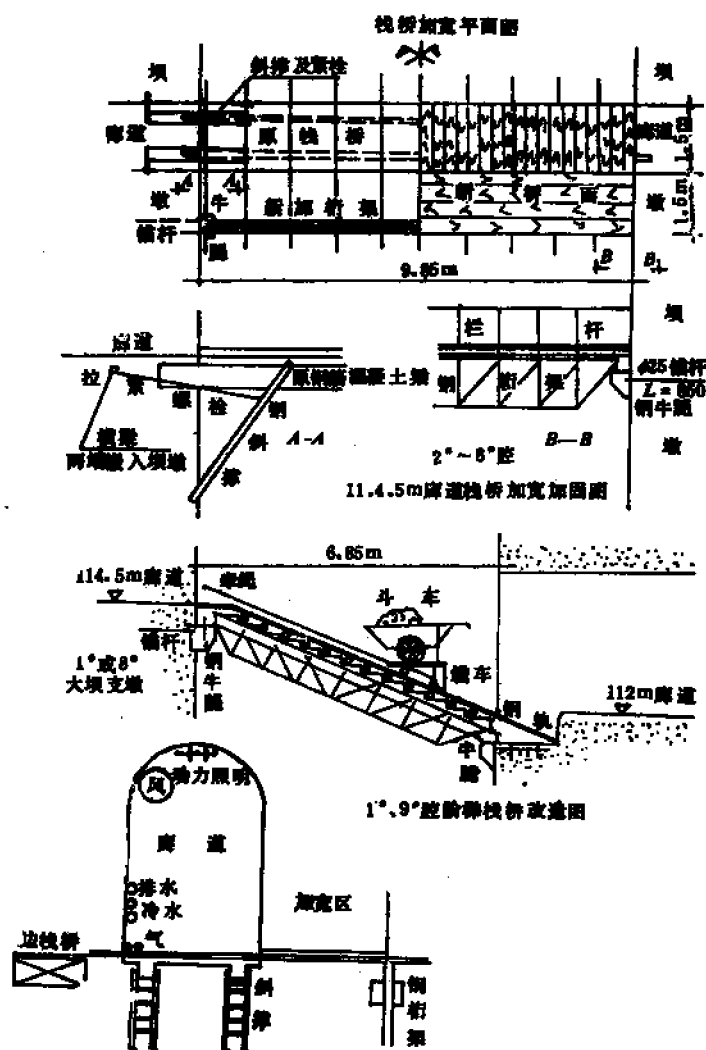


图 2.3.14(5) 114.5m 廊道栈桥加宽示意图

(2) 坝腔内施工人员上下及施工机具、材料起重和垂直运输的完善。

施工人员要从▽114.5m 高程廊道面下到垂直深度有 30~45m 不等的每个腔底部。在整个清基清渣及浇筑混凝土施工中人员上下频繁,而且比较笨重的施工器材均要靠此通道下到腔底,如果仍然靠原有坝腔的垂直钢爬梯解决长时间垂直运输问题,肯定既不可能又不安全。为了解决这一问题,我们设想了几个方案,最后决定采用在坝下游架设钢管垂直通道的施工方案。

具体做法:用 $\phi 48$ 钢管在每个坝腔加固混凝土边缘线下游以外 2m (一般坐标定于坝下 40m 处)、垂直搭设对折双通道,马道采用 30% 的坡度,上密铺竹脚手板并加扎防滑木条,马道两侧加设钢管防护栏杆(见图 2.3.14(6))。

因钢管脚手架垂直通道垂直高度达 45m,为防止其纵向失稳倾覆,在坝墩壁上,竖向每隔 6~8m 钻孔布置锚筋或插入短钢管,并与通道用扣件连接形成牢固的横向支点,同时每节水平钢管及斜拉钢管均与支墩壁抵紧。用支墩有 2% 的竖向坡度,也能产生一部分附加支

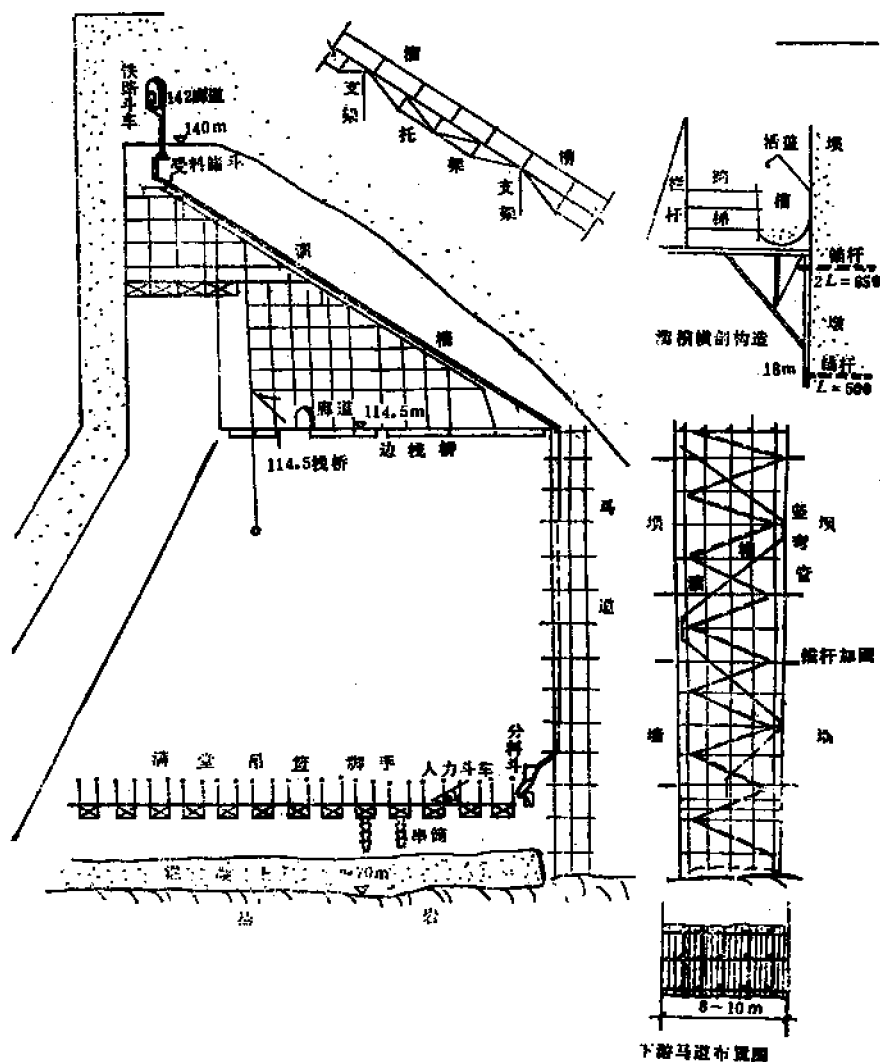


图 2.3.14(6) 坝内混凝土垂直运输工艺流程图

承力。交通道上又铺设混凝土垂直交叉运输溜槽和转向垂直跌落管。同时混凝土加固体中冷却钢管的干管和阀门均依托此通道进行安装操作,坝体接缝灌浆施工操作平台也是利用该通道架子改造后形成,一举三得,经济效益显著。

坝内清基、清渣有近 1 万多立方米渣石杂物要清出坝外,我们从实地考虑后采用架设钢索吊篮和 0.5t 的摇头扒杆,扒杆钢管直径 $\phi 140\text{mm}$,每台扒杆配备 1t 卷场机 1 台(功率 3kW,垂直升降速度 0.29m/s),并在扒杆顶端配置安全用电行程开关。

钢索吊篮设置在 $\nabla 114.5\text{m}$ 高程交通栈桥加宽部分,用 $\angle 50 \times 5$ 角钢焊成容纳一辆手推车的吊篮,四周设有钢管栏杆,利用 2 根 $5/8"$ 钢索作为垂直导向装置,导向钢索底部预先清至坚实基岩,利用 $\phi 30$ 钢筋锚杆锚于基岩,同时在 $\nabla 117\text{m}$ 高程支墩壁用型钢焊成承重三角挑架,用以支承吊篮载索和导向钢丝绳,导向钢丝绳的松紧利用花篮螺栓调节。经过试运行垂直提升效果较好。但由于吊篮固定在一处,加之坝腔底部基岩高低不平,双轮手推车水平

运输很费力,施工速度较慢,比不上 0.5t 摇头扒杆来得灵活。用摇头扒杆回转半径达 7m,在其回转半径范围内随意起吊,既能吊运出渣双轮小车,又能吊运钢筋、模板、止浆片、灌浆管等超长(10m 左右)施工器具至坝腔施工仓面,且扒杆制作安装简单,又操作方便,不易损坏。故实际使用中,摇头扒杆的垂直运输量占 2/3~3/4 以上,钢索吊篮只完成垂直运输量的 1/4~1/3。

3. 坝腔内排水、清渣的施工方法

(1)坝腔内排水。

因大坝裂缝迎水面渗漏水严重且在各支墩下游部位均有连通孔,腔内均有积水,总量达 14 万 m³。因积水深达近 30m,确定利用 4 个汽油桶焊接成浮筏,在浮筏上固定 7.5~17kW 清水泵,并在坝腔壁和坝下游垂直交通道空隙位置安装抽水胶管,连续抽水,边抽水边在腔底挖排水沟和集水坑。所有坝腔积水由水泵经排水管轴至▽114.5m 高程主廊道,再由▽112m 高程右廊道口排出坝外尾水区域。坝内水泵平面布置见图 2.3.14(7)。

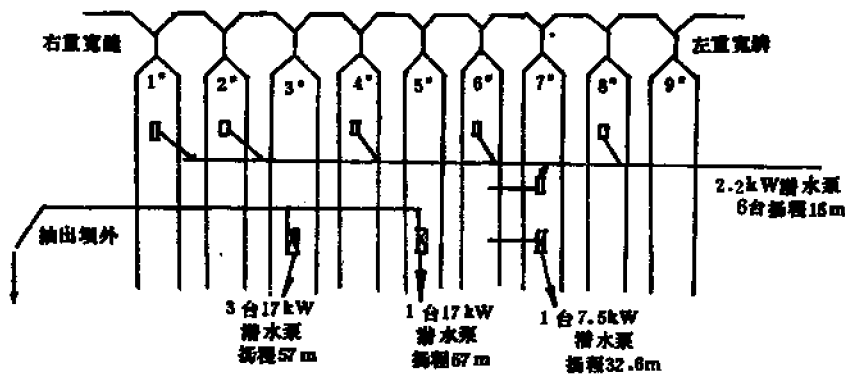


图 2.3.14(7) 坝内水泵平面布置图

(2)清渣、清基。

坝内污泥、渣石、杂物为 0.72 万 m³,风化基岩约 0.35 万 m³,量大又有腐朽气味。为了预防工人在坝底工作中中毒,在▽112m 高程左右廊道口安装两台离心式通风机(8-18ND5A 型),同时又利用▽174m 高程坝顶面 20m³ 电动空压机强制送风至工作面,以确保工人身体健康。

因坝内严禁爆破,故清渣、清基均用人工挖掘清除,风化基岩只准用风镐凿孔,用钢钎或钢楔子胀破,人工撬碎成小块后运出至坝下 40m 以外,留作砌筑下游面挡渣墙。

垂直运输靠钢索吊篮和 0.5t 摇头扒杆来进行。清渣、清基劳动强度大,噪音高达 107 分贝(风镐噪声),空气中粉尘含量超标,工作条件极差。坝内工作按 6 小时一个台班考虑,清渣进度每天按 120m³,清基进度按每班 30m³ 考虑,2[#]、3[#]、4[#]、5[#] 坝腔先开始进行清渣、清基,为 1982 年元月大体积混凝土浇筑创造条件。

4. 混凝土原材料的选择和质量控制要求

(1)砂石料的试验和砂石料场的确定:经研究选定双洲滩作为砂石料场开采,运距 15km。双洲滩料场曾在 1957 年经过“B 级”勘探,查明砂石料储量约 44 万 m³(其中砂料 11 万 m³)。砂石天然级配及岩情分类见表 2.3.14(1)和 2.3.14(2)。

表 2.3.14(1) 东坪双洲滩料场天然级配一览表

含 量	规 格	砂 子	小 石	中 石	大 石	特大石	超特大石
		<5mm	5~20mm	20~40mm	40~80mm	80~120mm	>120mm
重量百分率/%		25.40	17.24	16.17	14.19	16	11

表 2.3.14(2) 东坪双洲滩料场骨料岩情分类情况表

产地	岩情鉴定/%								
	坚硬砂岩	石灰石	花岗岩	板岩	燧石岩	炭质页岩	强风化岩	软弱岩石	其他
双洲滩	78.10	0.90	0.3	2.10	11.6	0.2	3.1	3.1	0.6

因为水工混凝土对温控要求特别严格,所以对水泥用量控制很紧,C10混凝土纯水泥用量控制在 $130\text{kg}/\text{m}^3$ 以下;C15混凝土,纯水泥用量控制在 $160\text{kg}/\text{m}^3$ 以下;为了确保混凝土的强度和混凝土容重($\geq 240\text{kg}/\text{m}^3$),需采用4级配并进行混凝土试配得出最佳级配数据。东坪砂石料场物理性能试验结果见表2.3.14(3)。经试验大石、特大石逊径在10%左右,对混凝土质量指标影响甚微。如逊径在40%~50%,则C10混凝土强度会降低20%左右,但由于双洲滩料场开采工艺的限制,骨料逊径均超出规范要求($<10\%$),中心试验室在砂石大料仓,根据骨料逊径情况调整骨料级配以保证工程质量。

表 2.3.14(3) 双洲滩砂石物理性能试验成果表

项 目	细度模数	含泥量 %	小石 含量/%	比重	容重 kg/m^3	空隙率 %	吸水率 %	有机质含量	SO ₃ 含量/%	云母 含量/%
数据										
规范要求	2.50~3.19	≤ 3	≤ 8	>2.55	>150	≤ 40	≤ 2.5	浅于标准色	≤ 1	$\leq 1-3$
试验次数	117	43	64	41	41	2	9	1	9	1
平均值	3.04	0.34	13.58	2.63	1512	42.50	2.13	合 格		

水工混凝土对卵石含泥要求严格,土建规范规定骨料含泥量不得大于3%;但水工混凝土规范则规定不得大于1%;东坪料场经多次监测,骨料含泥量指标均能满足规范要求。在甘沟混凝土拌和系统骨料大料仓,夏天进行库底低温水喷淋降温,喷淋后粗骨料表面泥土均冲刷到料仓底部,骨料含泥量明显增加;经试验,建立了卵石含泥量与混凝土强度下降值的关系式:

$$\text{抗压强度下降率}(\%) = \frac{\hat{Y}_i - \hat{Y}_0}{\hat{Y}_0}$$

$$Y_{\text{抗压}} = 112.2399 - 7.9038X_1 \quad (\text{kg/cm}^2), \text{相关系数 } r = -0.85$$

式中 X_1 ——为卵石加权平均值含泥量百分率；

Y_1 ——为相应含泥量百分率计算出的强度值；

Y_0 ——为不含泥的强度值。

实验证明,当骨料加权平均含泥量 $>2\%$ 以上,每增加 1% 含泥量则混凝土抗压强度降低 7% 左右。所以在混凝土拌和系统,外场组试验人员每班检查两次骨料的含泥量,以确保混凝土强度的质量。

表 2.3.14(4) 双洲滩粗骨料物理性能试验成果表

类别	项目	比重	容重 kg/m ³	吸水率 %	针片状 %	含泥量 %	超径 %	逊径 %	软弱颗粒 %	空隙率 %	有机质含量 %	SO ₃ 含量/%
小石	试验次数	40	42	24	84	41	116	116	2	4	1	1
	平均值	2.58	1527.8	1.85	6.53	0.34	9.0	4.92	5.03	40.8	合格	无
中石	试验次数	41	42	24	87	40	120	120	2	5	1	1
	平均值	2.60	1494	1.41	7.7	0.28	4.57	13.4	4.59	42.6	合格	无
大石	试验次数	39	37	24	85	40	119	118	2	4	1	1
	平均值	2.63	1478	0.91	6.4	0.32	5.84	16.72	6.8	43.74	合格	无
特大石	试验次数	39	38	21	78	41	115	117	2	4	1	1
	平均值	2.63	1435	0.60	2.72	0.22	10.9	13.2	13.23	45.4	合格	无
规范要求		>2.60	>1600	≤ 2.5	≤ 15	≤ 2	≤ 5	≤ 10	$\leq 5 \sim 10$	≤ 45	浅于标准色	≤ 0.5

双洲滩砂石料的空隙率比较稳定,而且粗骨料的空隙率均未大于 45% ,能满足规范要求(表 2.3.14(4))。

砂石骨料除应满足规范要求外,设计上还提出以下几点要求:

1)对天然砂的要求:砂料应质地坚硬、清洁、级配良好,在堆放前必须冲洗干净。砂料生产过程中砂子细度模数应控制在 2.8 ± 0.2 范围内。

2)对粗骨料的要求:各种级配砾石中,严禁混杂粘土团块、蛋白石(碱性骨料)和混仓;针片状物质含量不得超过 15% (以重量计);卵石中软弱颗粒含量不得超过 $5\% \sim 10\%$;堆存前必须冲洗干净,含泥量 $\leq 1\%$ 。

(2)水泥:大坝加固混凝土设计要求,离基础 10m 范围内混凝土标号为C15,抗渗标号S4,其余部位混凝土标号为C10,抗渗标号S2;三角塞及坝下楼梯混凝土C20,两岸空缝压力坝撑墙混凝土标号C15。设计要求水泥7天水化热不超过 248.4J/g ,故根据湖南水泥货源情况,选用湘乡水泥厂的525#和425#矿渣水泥和升华水泥厂的425#水泥,水化热前者为 245.95J/g ,后者为 238.05J/g 。

水泥水化热指标是大体积混凝土温控重要指标之一,该项试验委托330工程局等单位试验,所得结果作为试配的依据。

(3)外加剂(减水剂):本工程选用两种减水剂,广西贵县糖厂的“TF”糖蜜型减水剂和湖

南湘潭红新农场生产的潭建牌减水剂。以上两种减水剂对混凝土中减少水泥用量,增加和易性,提高混凝土早期强度,改善混凝土密实性均起一定作用。

本工程使用的两种减水剂。“TF”糖蜜减水剂掺量为水泥用量的 0.2%,减水效果为 5%~6%;节约水泥 5%左右,提高混凝土强度 10%左右;但对水泥有适应性,只适应湘矿 425# 水泥,其他品种水泥不适应。而潭建减水剂适应性强,任何品种水泥都可使用,最佳掺量为 0.5%~1.0%。我工地采用 0.5%掺量。

试验证明其减水率达 15%;节约水泥 10%~15%,混凝土强度增加 20%,pH 值 7~9 偏碱性,对水泥有缓凝作用。

(4)粉煤灰:掺合料原状粉煤灰由株州电厂综合厂供应。该厂采用湿法回收粉煤灰,二氧化硅含量、烧失量、细度、SO₃ 含量均符合国家规定,硅氧化物含量 90%以上。因采用湿法回收,粉煤灰细度不够均匀,波动较大。

粉煤灰细度对混凝土强度影响较大。当粉煤灰细度为 4900 孔/cm²,筛余量超过 12%,每超过 1%则混凝土强度下降 4%左右;为了保证大坝混凝土质量必须控制进工地粉煤灰细度。我们在株州电厂配备一名监测细度试验员,以确保细度全部符合设计要求。株州电厂粉煤灰物理性能见表 2.3.14(5)。

表 2.3.14(5) 株州电厂粉煤灰物理性能表

项 目	比 重	容重/(kg/m ³)	比表面积/ (cm ² /g)	细度 4900 孔筛余量	标准细度 需水量/ml
数 据	2.19	786	3790	6.67	114.0

粉煤灰细度对混凝土标号的影响如表 2.3.14(6)所示,对水泥胶砂强度的影响列于表 2.3.14(7)。

同时为了确定粉煤灰的最佳掺量,我们先后做了 39 组试验。试验结果:单掺粉煤灰 25%掺量,3 天水化热降低约 27%;7 天降低 23%;双掺(粉煤灰 25%+潭建减水剂 0.5%)3 天水化热降低 58%;7 天降低 26%,与设计院、建设单位商定,混凝土中掺加粉煤灰量为 20%~25%。

表 2.3.14(6) 粉煤灰细度对混凝土标号的影响

粉煤灰细度 4900 孔/cm ² 筛余量/%	粉煤灰 掺量/%	水泥用量/ (kg/m ³)	粉煤灰用量/ (kg/m ³)	混凝土抗压强度 MPa	
				28 天	90 天
4	30	227	97	34.6	46.8
8	30	227	97	31.7	43.9
12	30	227	97	29.1	41.9
16	30	227	97	24.2	36.2
20	30	227	97	19.3	31.1

表 2.3.14(7)

粉煤灰细度对水泥胶砂强度的影响

粉煤灰细度 4900 孔/cm ² 筛余量/%	粉煤灰 掺量/%	28 天胶砂强度/MPa		备 注
		抗折	抗压	
12	25	7.9	48.3	使用新矿 425 [#] 水泥 水泥软试验法
16	25	7.4	45.2	
20	25	7.0	39.1	

由于株州电厂粉煤灰的硅铝氧化物含量高达 90% 以上,经试验证明掺粉煤灰后混凝土抗裂指标比不掺粉煤灰的混凝土提高 20% 左右。

5. 混凝土进坝水平运输和进入每个坝腔的垂直运输方案的确定

我们反复研究原大坝设计图纸和多次进坝实地踏勘,根据大坝现有条件,决定在 142m 高程灌浆,检查廊道,进行改造,作为大坝加固混凝土的输送廊道。该廊道外于各坝腔的顶部,离坝腔穹顶混凝土厚度只有 3m,此廊道在 1 号、8 号大头支墩及 2 号宽缝重力坝墩有 5 处直接转折,另在 3 号宽缝重力坝墩处需向下游左岸边开凿 9m 长隧洞,加上廊道向下各腔需开凿竖直漏斗孔洞,共有 15 处需动(开凿)坝体结构,经改造后可以安排混凝土运输线,因以上所说的开凿量小,又分散,又不在大坝要害处,经设计院作水工结构电算复核认可后,用人工风镐开凿。只用了两个月时间就将▽142m 高程混凝土输送道完成。

▽142m 高程廊道在右岸 3 号廊处出坝与右岸山坡交会,但与甘沟搅拌站系统还相隔一座山脊(水平距离约 330m),若按原方案绕山而过,距离弯远,而且还与过山航船滑道冲突。经反复研究,决定改为开凿 142m 高程穿山混凝土运输隧洞直达甘沟,使 142m 高程廊道改造工程与 142m 高程穿山运输隧洞接连成共 630m 长混凝土专用轻便钢轨运输线,实行单线运输,在全线中点附近设 50m 长复线会车道。该穿山隧洞全长 300m,由混凝土拌和机出料口,穿过大坝公路和过航船滑道底部,至大坝 3 号右重坝段运输洞,断面为 2.6m×3.3m,局部 50m 考虑运输车辆会车交会处扩大至 4m×3.30m,运输洞施工中由于石方开挖量大,故开挖石方时采用控制爆破,其震速一般为 0.013~0.24cm/s,最大为 0.4cm/s,相当于地震烈度 I 度,对混凝土坝体和帷幕灌浆以及对航船滑道和坝体填方段均无影响。

混凝土运输洞形成后,采用 20HP 柴油机车及 XK2.5 电瓶机车牵引,柴油机车在运输隧洞牵引至交会处,坝内运输线由电瓶机车牵引至各坝腔顶部下料口,因为柴油机车废气污染对施工人员影响甚大。每 20 分钟一趟,每列车分别牵引 6 列 0.9m³ 混凝土罐,昼夜三班作业,日运输混凝土量可达 340~380m³,满足混凝土浇筑高峰的需要。

6. 混凝土垂直运输方案的确定

先后提出 5 个垂直运输方案,最后选定溜槽输送方案。该方案经一系列论证、试验及技术设计,克服了混凝土在输送过程中发生堵塞的现象,使混凝土外溢及混凝土在输送过程中的分层离析问题得到了解决。经过实践证明,该输送方案在混凝土大坝建设中起到了先导作用,得到能源部专家和设计院设计人员的充分肯定。

该方案中混凝土经 142m 高程廊道输送至每个坝腔下料口,依靠混凝土自重向下运动,首先穿过竖管(φ380mm 长度为 3m)进入受料储斗,经过缓动及调节下料速率再进入附着在

坝壁上的溜槽(见图 2.3.14(6)),此时混凝土已降落 6m,其下滑速率大约有 4m/s,溜槽顶标高 137m 沿 37°的坡度(经试验该坡度为最佳下溜坡度)向下游溜滑至 114.5m 高程,降落 22m 高度,因溜槽摩擦及混凝土粘滞力作用,运动速度降低至 1m/s 左右,然后进入坐标为坝下 40m 的马道转折竖弯跌落串筒中。经在竖向跌落串筒的跌落,混凝土在竖向跌落管中来回撞击,类似二次搅拌作用,又整流进入马道段溜槽(坡度 41°~43°,溜滑速度增加至 3m/s 左右)并经过多次重复回折过程,最后到达设置在吊篮脚手平台上的分料储斗内,混凝土凭藉自重溜滑运动,全程落差最大达 62m。

溜槽输送方法的优点如下:

(1)因地制宜、因势利导,利用大坝腔壁设置钢板溜槽和利用坝下游钢管脚手马道上设置竖向转折跌落串筒和斜溜槽,节省了大量的设备投资;

(2)不需动力和机械,制作方便,费用低廉,可以连续输送满足浇筑强度,可以与泵送混凝土相媲美;

(3)混凝土经溜槽输送后,其抗压、抗折强度有所提高(数百组试块统计平均强度提高 10%左右)。

两年多来的施工实践证明:溜槽中混凝土堵塞、外溢现象很少发生,即使发生,因备有预防措施(有益、有梯级横杆二道防线并在溜槽两侧,每隔 10m 左右附贴一台平板震捣器,有巡视清理人员),从未发生过高空坠落伤人事故。实践证明,溜槽输送混凝土是一个成功的创举。创造了水工建设史奇迹,该项成果得到能源部科技委员会的嘉奖。

7. 混凝土的浇灌用满堂提升吊篮脚手平台的实施

在坝腔内浇灌混凝土,不具备新建大坝中采用的“缆机吊大吊罐加机械平仓”的施工条件,只能采用满堂脚手,人力推车布料的手工操作方法。设计院拟用 200mm×200mm 钢筋混凝土支柱排架脚手方案,我们经计算单钢筋混凝土预制柱 9 个腔需预制 4~6m 长柱子 2570m³,造价近 60 万元。同时每次搭拆满堂脚手架费时费工,而且▽114.5m 廊道狭窄,钢筋混凝土立柱运入坝内非常困难,垂直运输困难也很多。同时因加固体混凝土中每 2m 要布置一层蛇形冷却钢管,如果用钢筋混凝土立柱方案则会使仓面上密如森林,给埋设蛇形冷却钢管、支模板和绑钢筋带来很多困难。

我们反复研究,开科技攻关会,决定根据土建工程中的提升式钢脚手平台的工艺,利用每个坝腔坝壁,对支墩壁用风镐钻 φ50、深 300~350mm 的孔,并与墩壁有 30°的角度,在孔内插长 500mmφ48 的钢管,下吊提升钢平台。

具体实施方法如下:

(1)9 个坝腔根据每个空腔实际情况,各制作一个钢桁架大平台,最大平台面积为 8m×45m=360m²,每个平台由 10 榀以上(最多 15 榀)吊篮钢桁架组成,采用“单体提升,联片使用”、“水涨船高,逐步上升”的方式来满足浇筑混凝土工艺需要。

(2)吊篮脚手平台(包括脚手板)为全钢结构,以两榀钢桁架为主架在支墩壁上钻 φ50mm 孔,插入 φ48mm 长 500mm 的钢管。钢管外露 150~200mm,桁架两端通过配有花篮螺栓的钢筋布杆悬挂于钢管上。钢桁架顶面按 1m 间距布置,[10 槽钢横楞及横向剪刀撑,垂直方向也布置剪刀撑和水平撑,形成空间结构,再在横楞上铺设压型钢架板及在提升平台上悬挂混凝土漏斗和串筒,每个吊篮铺板面积为 3m×8m、其中布置 8 个串筒,布料半径为 1.

5m。

(3)因坝壁垂直方向有 1 : 0.02 的坡度(坝腔空间跨度随着高程升高而跨度增大),为了适应空间尺寸的变化,钢桁架设计两端为伸缩可变式,同时在靠上游三角区地带设计成异形钢桁架。经坝外模拟试验,使用性能良好,安全可靠,对加快混凝土施工进度起到保证作用。

(4)吊篮平台的安装及每次提升,对水平度及吊篮的间隙均有调节装置,能保证平台平整和稳定,吊篮平台每 3~5m 提升一次,提升工具采用 4 个 2t 倒链四角均匀上升,墩壁上钢管插孔是在特别的工具式钢管高架上。

满堂提升钢平台构造详见图 2.3.14(6)。

(五)大坝加固体混凝土的施工

1. 混凝土设计要求及配合比的选择

(1)混凝土设计标号:根据设计,要求大头坝坝段:大体积混凝土标号离基础 10m 范围内为 C15,抗掺标号 S4;大体积混凝土标号离基础 10m 范围以外为 C10,抗掺标号为 S2;三角塞及楼梯混凝土为 C20,两岸宽缝重力坝混凝土总量为 11 万 m³。

(2)容许温差:混凝土最高温度与稳定温度之差不得大于 12℃,但必须同时满足浇筑温度不得高于稳定温度 4℃。

(3)混凝土配合比确定:为满足大坝加固混凝土的设计要求,试配了 204 次,共计 1175 组试块,采用正交法设计混凝土配合比。工程中常用的 5 个混凝土配合比汇总于表 2.3.14(8)。

2. 混凝土拌和系统

混凝土搅拌机采用 2 台郑州水工机械厂生产的 1.50m³ 双锥形搅拌机,该搅拌机单机产量为 20m³/h;每台班(按 7 小时)140m³;每天 3 个台班 420m³,完全能满足设计的混凝土浇筑强度(每昼夜最高 380m³)。为使在浇筑时不致产生冷缝,在最大浇筑面积 150m²、浇筑厚度 0.3m 的情况下,允许间歇时间 3 小时,每小时入仓混凝土不小于(150×0.3)m³÷3=15m³,能够满足要求。混凝土拌和系统工艺流程见图 2.3.14(8)。

3. 混凝土浇筑和振捣要求

表 2.3.14(8) 柘溪大坝加固混凝土常用施工配合比汇总表

混凝土 设计标 号	水泥品 种、标号	水 灰 比	砂 率 %	坍 落 度	粉煤灰 掺量/%	每 m ³ 混凝土材料用量/(kg/m ³)						混凝土和易性评定				
						水	水泥	粉煤灰	减水剂	砂	卵石	外观	含 砂	离 析	棍 度	泌 水 情 况
C15	荆矿 425m [#]	0.55	25	5~7	20	110	160	40	TF0.40	538	1612	优	中	无	上	稍许
C15	荆矿 425m [#]	0.61	27	5~7	25	122	150	50	0	578	1562	优	中	无	上	稍许
C10	荆矿 425m [#]	0.68	28	5~7	25	118	130	43	0	606	1555	优	中	无	上	稍许
C10	荆矿 425m [#]	0.55	26	5~7	25	96	130.5	43.5	潭建 0.65	567	1618	优	中	无	上	稍许
C10	荆矿 425m [#]	0.50	25	5~7	25	100	150	50	潭建 0.75	538	1614	优	中	无	上	稍许

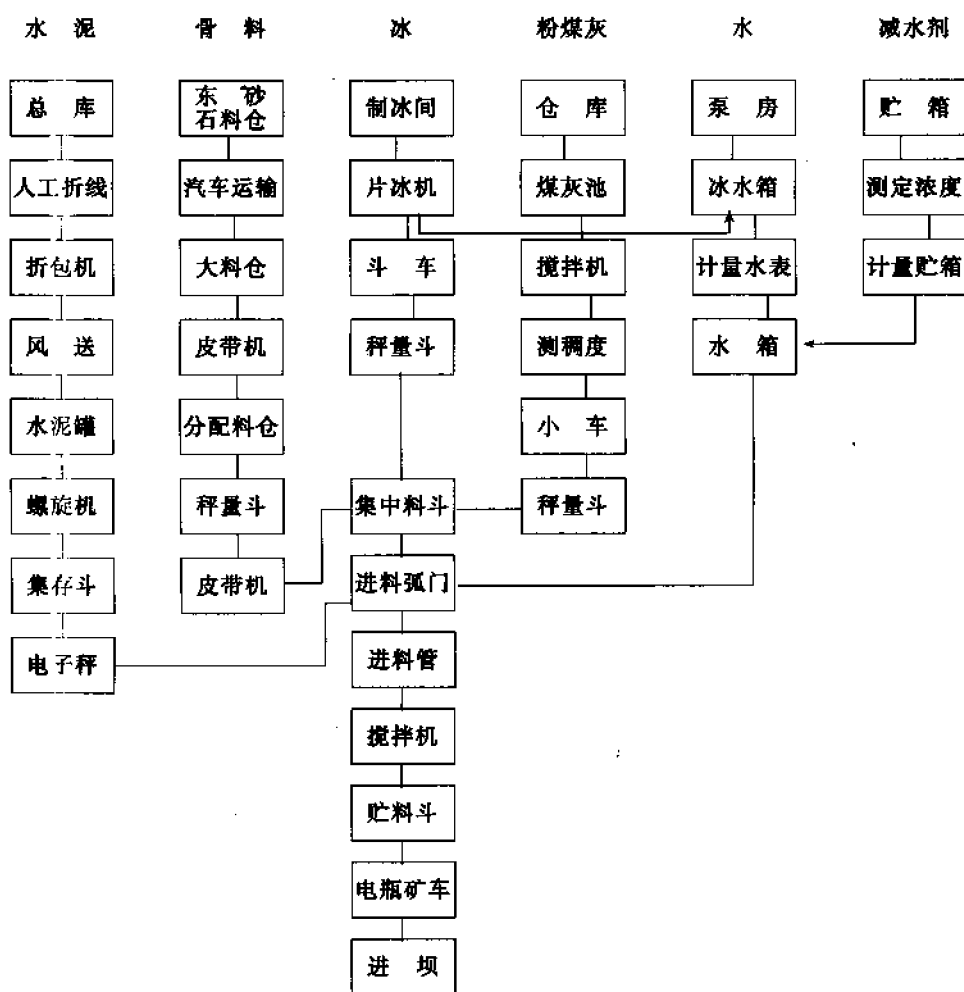


图2.3.14(8) 混凝土拌和系统工艺流程图

(1)混凝土分层分块。根据加固工程结构物特点和温控要求以及浇筑条件等确定每一坝腔充填混凝土时,设置横缝、纵缝,将其分成四块。原则上底部每次的浇筑面积一般控制在 $100\sim 150\text{m}^2$,以防面积过大浇筑能力不及而出现冷缝。混凝土浇筑分层厚度离基础 10m 范围内为 1m ,离基础 10m 外为 $1\sim 2.0\text{m}$,冬季低温季节可适当加厚些。

(2)离基础 10m 范围内的混凝土原则上要求在低温季节浇筑或根据温控的实际情况而适当调整浇筑的具体时间(7月、8月两月不允许浇基础混凝土)。

(3)相邻块间隔时间不少于3天,上下层不少于7~10天,但不大于15天。

(4)空腔内深槽应先行回填并安装接触面(混凝土与岩面)的灌浆设施。

(5)平仓由人力进行,分层浇筑厚度一般为 0.3m ,使用N-86型插入式震捣器振捣。

(6)浇筑前对空腔两壁(或称支墩两壁)新混凝土接触面需进行凿毛和冲洗干净以利新老混凝土结合。

(7)大头部位亦需凿毛和冲洗,以利灌浆材料的粘结。

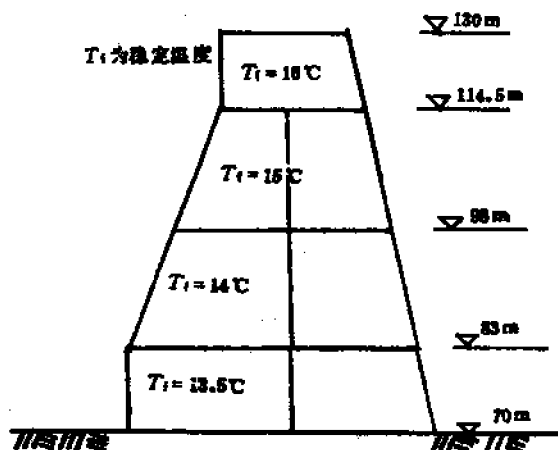
4. 混凝土养护及施工缝处理

混凝土浇筑后 12~18 小时,即进行浇水养护,非露面的养护时间应不少于 2 天。所有水平施工缝均需进行冲毛或凿毛处理。连续浇筑的混凝土水平表面,在混凝土初凝后数小时用 0.506625~0.60795MPa 压力水进行冲洗清除乳皮或砂浆,使粗骨料露出,冲洗干净再铺上一层 2~3cm 厚的同标号水泥砂浆,砂浆的水灰比,不得高于所浇混凝土的水灰比,纵横缝亦需冲洗干净,以加强结构缝灌浆材料的胶结和减少灌浆阻力。

5. 混凝土的温度控制

设计要求新老混凝土必须结合良好,起整体作用。为不使因加固体混凝土温度变化而影响大头部位拉应力的增加,不使受到基岩和老混凝土的双向约束而在新混凝土中产生有害拉应力,对新浇混凝土的温度控制提出了更为严格的要求。新浇混凝土应在预定时间内降至稳定温度,以便进行接缝灌浆。但因大坝空腔封闭,新浇混凝土自然散热慢,所以在加固混凝土中必须采取行之有效的后期冷却降温措施,将新混凝土温度控制在规定范围内。

(1)混凝土加固体稳定温度 T_t 的确定:大坝加固混凝土在空腔内回填混凝土,使坝体变成类似重力坝的结构型式,最大底宽 44m,高 60m。根据坝体边界条件,在上游处于水温、下游处于气温、底面处于地温的作用下经综合分析,用有限元法计算得到大坝加固后的分区稳定温度(见图 2.3.14(9))。



2.3.14(9) 混凝土加固体稳定温度和接缝灌浆温度

(2)容许温差的确定:加固混凝土分一道纵缝和一道横缝,浇筑块尺寸靠近基础部位约为 20m×4m(长×宽)。支墩老混凝土在基础部位厚度为 8~10m,新浇筑混凝土冷却时受基岩和老混凝土双向约束,截取高度 $H=L=20\text{m}$ 的混凝土柱状块体,按应力影响线法和约束系数法计算其温度应力。加固混凝土各种试验数据按表 2.3.14(9)取值。

1)温度应力计算:设计要求每个坝腔加固体设置横缝、纵缝各一条,将加固体分成四块柱状浇筑块,其最大尺寸约为 20m×4m(长×宽),支墩老混凝土厚度 8~10m,基础 10m 范围内,浇筑层厚度为 1m;离基础 10m 以上浇筑层厚度 2m;间隔时间为 7 天,由均布温差 $T_p - T_t$ (混凝土浇筑温度—混凝土稳定温度)所产生的温度应力(σ_1)及由非均布水化热温升(T_s)所产生的温度应力(σ_2),两者之和为混凝土的温度应力(σ_x)。

表 2.3.14(9)

加固体混凝土物理力学热学性能表

序 号	物理力学性能指标	基础部位	基础 10m 以上部位
1	混凝土设计标号(28)天/MPa	C15	C10
2	容重 $\gamma/(\text{t}/\text{m}^3)$	2.4	2.4
3	混凝土抗拉极限强度/MPa	1.3	1.0
4	混凝土极限拉伸值 $\sum P$	$\geq 0.75 \times 10^{-4}$	$\geq 0.65 \times 10^{-4}$
5	混凝土弹性模量 E_n/MPa	2.3×10^4	1.8×10^4
6	徐变松弛系数 k_p	0.55	0.55
7	早期压应力折减系数 k_q	0.8	0.8
8	混凝土泊桑比 μ	1/6	1/6
9	混凝土线膨胀系数 α	0.00001/°C	0.00001/°C
10	基础约束系数 k	0.85	—
11	混凝土抗裂安全系数 K	1.50	1.50
12	混凝土比热 $C/(\text{J}/\text{kg})$	0.22	0.22
13	混凝土导温系数 $a(\text{m}^2/\text{h})$	0.0035	0.0025
14	混凝土导热系数 $\lambda/(\text{J}/\text{h} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	1.85	1.85
15	混凝土热交换系数 $\beta/(\text{J}/\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	5	5

T_p 、 T_i 和 T_r 均采用 1° 计算,以便选择容许温差, $T_r=1^\circ$ 的水化热分布曲线是按层高 1m 间歇 7 天,用单向差分法计算得出真正的 T_r ,然后按比例折算得出来的。计算所用图表均参考朱伯芳等著《水工混凝土结构的温度应力与温度控制》。计算成果见表 2.3.14(10)。

表 2.3.14(10)

加固体混凝土温度应力计算成果表

浇筑部位		基础混凝土 C15					基础 10m 以上混凝土 C10		
浇筑层厚度/m		1.0					2.0		
水化热绝热温升/°C		21.20					17.70		
浇筑块平均最高温升/°C		13.80					15.10		
均布温差/°C		4					4		
温度应力 (σ_x)	H/L	0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
	均布温差应力 σ_1	5.16	4.644	4.128	3.096	2.064	1.456	1.456	1.456
	非均布温差应力 σ_2	4.168	6.951	8.82	9.54	8.40	7.64	7.06	7.40
	$\sigma_x = \sigma_1 + \sigma_2$	9.328	11.595	12.948	12.636	10.464	9.096	9.516	8.856
混凝土容许拉应力 $[\sigma] = \sum P \cdot E_b / k$		11.50					7.8		

2)容许温差和混凝土控制温度的确定:本工程在老混凝土包围的空腔内浇筑混凝土,腔内气温常年在 $17.5 \sim 20^\circ\text{C}$ 左右,相对湿度在 95% 以上,对混凝土养护十分有利,既无夏季温度倒罐,也不存在冬季寒流影响,且每腔分成四块,对角两块为一组,先后轮流浇筑上升,基本上无长时间间隔影响,因此内外温差、上下层温差容易满足设计要求,起控制作用的是基

础温差和新老混凝土温差。

综合上述计算分析确定,加固体混凝土的最高温度与稳定温度之差不大于 12℃;并同时满足浇筑温度不得高于坝体稳定温度 4℃。加固体各高程控制温度见表 2.3.14(11)。

表 2.3.14(11) 加固体混凝土各高程控制温度明细表

混凝土浇筑高程	▽73~▽83m	▽83~▽98m	▽98~▽114.5m	▽114.5~▽130m
容许最高温度/℃	25.50	26.0	27.0	28.0
容许浇筑温度/℃	17.50	18.0	19.0	20.0

(3)初期(一期)温度控制措施:混凝土初期温度控制就是控制其混凝土最高温度,可从降低混凝土浇筑温度和减少水泥水化热(降低水泥用量)两方面着手,结合工程特点采用以下温控措施:

1)减少混凝土发热量:混凝土温升主要由水泥水化热引起,因此在保证混凝土强度和离差系数的前提下,尽量采用水化热较低的水泥,并在施工现场掺加 20%~25%的株州粉煤灰和潭建减水剂,并利用 4 级配骨料,将混凝土纯水泥用量控制在 160kg/m³(C15 混凝土)和 130kg/m³(C10 混凝土)以下。

2)控制浇筑块厚度和间歇时间:采用薄层浇筑,利用浇筑间歇期从顶面散热,是本工程控制温度的主要措施之一。基础部位浇筑厚度控制在 1.0m 以下,其他部位控制在 2.0m 以下,冬季可酌情放宽,浇筑间歇时间不少于 7 天。

3)降低浇筑块表面温度:混凝土终凝后,洒水养护。在上下层间歇期内,利用库底低温水(夏季水温 21~23℃)从混凝土表面流过,以降低混凝土表面温度,加速顶面散热效果。

4)蛇形冷却管冷却:设计要求埋设蛇形冷却水管,在初期通水冷却,可削减浇筑块中心的混凝土最高温度,经实地测量一般可降低 2~3℃。

5)改善骨料储存条件:甘沟大料仓储采用地坑皮带机送料。在大料仓上方搭设大凉棚遮阳隔热,并用低温水进行喷淋降温,保持骨料温度不高于月平均气温。

6)加冰拌和:片冰在溶化过程中要吸收大量潜热(344.4J/g),利用它降温效果较好。高温季节混凝土出机温度一般可控制在 16℃左右,仓面浇筑温度均可控制在 18℃以下。

7)在分配料仓和混凝土输送中,均搭凉棚,在整个拌和系统夏季均用库底低温水(21℃左右)进行大面积喷淋,降低拌和温度。同时混凝土水平运输是在▽142m 高程运输隧洞中进行(夏天洞中气温在 21℃左右),故水平运输过程中混凝土温度基本没有回升。

8)合理安排施工进度,充分利用低温季节及低温时段浇筑基础部位混凝土,在酷热夏季少浇或停浇混凝土。

9)混凝土浇筑应均匀全面上升,加强施工质量管理,严格控制施工质量,强度保证率不得低于 80%,混凝土离差系数(C_v值)不得大于 0.15,以提高混凝土抗裂性能。

(4)加固体混凝土后期(二期)冷却措施:由于加固体混凝土是采用分缝分块浇筑的,需待混凝土冷却至坝体稳定温度后再进行纵横缝灌浆,使加固体混凝土和老混凝土结合成为整体,发挥共同作用。但加固体混凝土三面受老混凝土包裹,异热性能差,坝腔内气温变幅小,这样的环境要使混凝土的温度在短期内(几个月时间)自然冷却到稳定温度(灌浆温度)

是不可能的。所以必须进行二期通水强迫冷却。经计算,确定用 $\phi 25\text{mm}$ 白铁管取垂直间距 2m , 水平间距 $2.0\sim 2.5\text{m}$, 立面呈方形, 平面上垂直坝轴线方向布置, 每个空腔四个浇筑块的蛇形管串联一起, 成为一个独立的体系, 称为一盘水管。管圈展开长度为 $70\sim 158\text{m}$, 在低温时段(12月~3月)通库底温水冷却, 水温为 $9.8\sim 14.8^{\circ}\text{C}$, 流量保持 $1.0\text{m}^3/\text{h}$ 左右, 连续通水 $30\sim 70$ 天即能使混凝土冷却至稳定温度。平均每 m^3 混凝土耗用钢管 0.23m , 共需埋设蛇形钢管总长为 2.50 万 m 。

库底低温水从电梯井坝段原先预留的 $\nabla 138\text{m}$ 取水引出水库水, 进水口为 116m 高程, 在坝下游面 138m 高程处用 15cm 钢管接至 142m 高程廊道内, 经电梯井坝腔引入 114.5m 高程廊道, 再引入各空腔的横向廊道外, 用三道分设 50mm 支管, 给各腔内蛇形钢管供水, 并用同样方式设置一套回水管线, 回水管路经电梯井坝段右边空腔(2 $^{\circ}$ 宽缝重力坝段)通至坝外弃于尾水。

为了提高冷却效果, 使混凝土均匀下降, 须经常交换水流方向, 因此在进回水管上装置水流换向阀门, 即各安装一叉管, 用四只阀门控制进回水管上的两只阀为一对, 叉管上的两只为一对, 利用两对阀门开关定期改变冷却水流方向。图 2.3.14(10a)、(10b)所示为冷却系统平面图和布置图。

根据设计提出的温控要求, 为了对新浇筑的混凝土温度进行有效的监测和控制。我们以 3 $^{\circ}$ 和 5 $^{\circ}$ 坝腔为观测基面, 布置了近 300 台件观测仪器, 它们是应变计、应力计、渗压计、测缝仪、电阻温度计等等。按照设计要求布置在一定的应力观测点上, 这些应力观测点均布置成网格。上述仪器用于测量大坝加固混凝土的温度变化和应力、应变、施工缝面张开度及监视支墩劈头裂缝的变化, 同时为了准确预报混凝土的浇筑温度和最高温升, 随时了解新浇混凝土的温度变化情况。在每一个浇筑块中埋设临时电阻温度计进行温度控制观测, 保证温控要求, 确保混凝土浇筑进度。

大坝内各种仪器埋设技术要求如下:

(1) 仪器埋设平面位置, 高程误差要求小于 10mm , 并记录实际埋设点的位置(桩号、高程)。

(2) 仪器率定要求: 要求仪器绝缘电阻大于 $500\text{M}\Omega$ 。温度率定(零度电阻、温度灵敏系数的率定)折算温度与标准温度误差要求小于 0.3°C 。

(3) 每只仪器接线后, 必须用铝牌编有能指明该仪控的型号、桩号、高程、方向的编号, 每隔 $5\sim 10\text{m}$ 有一组埋设编号和出厂编号, 两端处还需加密。

(4) 观测要求:

① 仪器在埋设前和覆盖混凝土后, 必须用比例电桥进行校测。

② 仪器埋设后, 每天测三次, 直至测得最高温度。

③ 混凝土最高温度出现后, 每天测一次。

④ 仪器埋设 1 个月后, 在施工期间每星期测两次。

⑤ 在特殊情况下, 洪水、枯水、低温季节根据资料需要, 应加密观测。

⑥ 一切原始记录资料和观测资料不得丢失。

⑦ 详细记录现场施工情况, 如混凝土浇筑高程上升、拆模、冷却、灌浆、换电桥等等。

⑧ 临时浇筑块施工测温孔, 一般要布置在混凝土浇筑块形心处, 深度大于浇筑块厚度的 $1/2$, 以测得混凝土最高温度值。

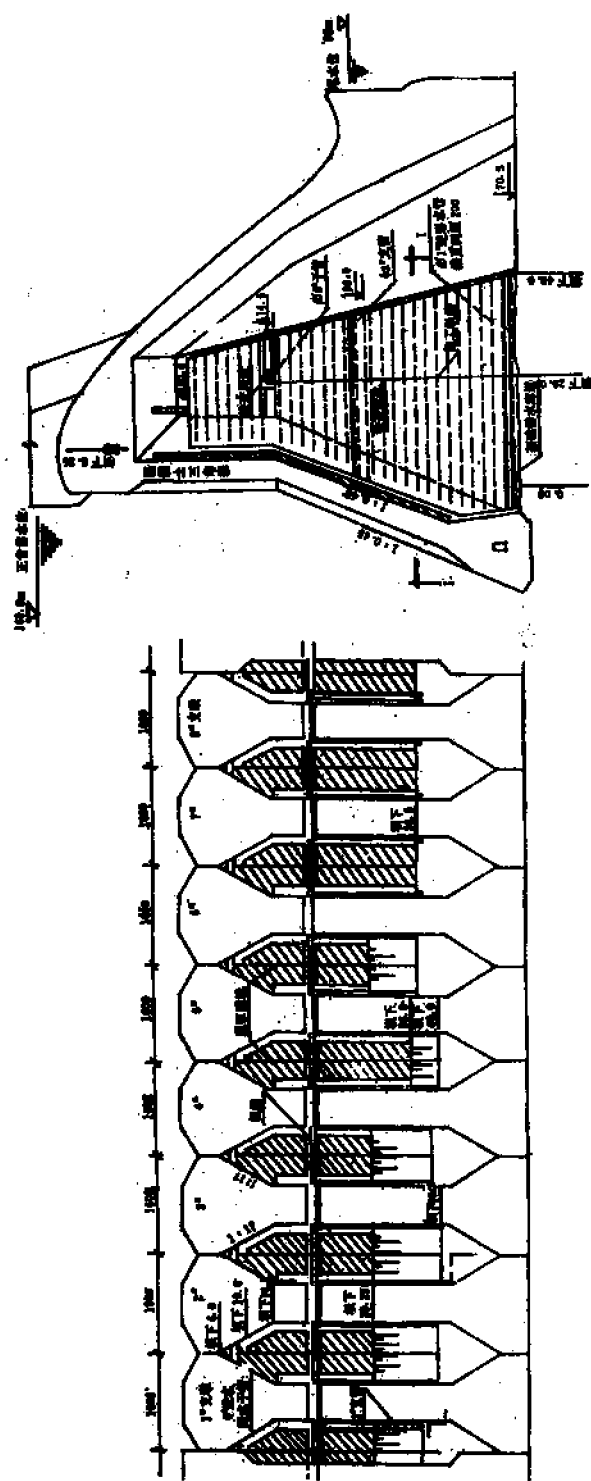


图 2.3.14(10)a 冷却管系统平面图

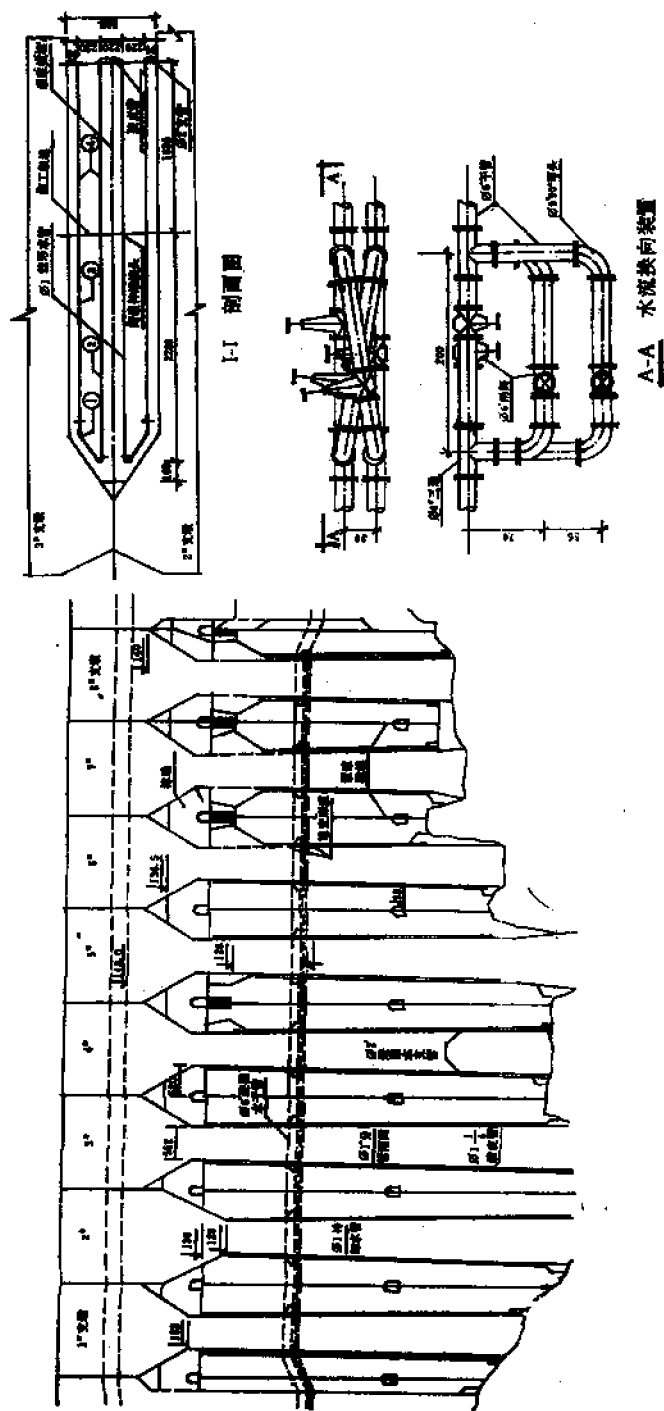


图 2.3.14(10)b 混凝土加固体内冷却水管系统布置图

6. 模板工程

模板设计、制作、安装是加固混凝土工程的一个主要分项工程。

(1) 模板型式的选择: 根据结构分缝分层分块特点, 设计选用了定型钢模板和钢筋混凝土模板, 同时考虑局部施工困难和埋设灌浆管需要, 以及一些非标准尺寸部位, 使用少量木模板, 配合钢模组装, 木模板一律采用刨光清水模板。

横缝键槽模板原设计为梯形, 为简化钢模板的制作加工, 与设计院协商将键槽长度减少至以 2.5m 和 3.0m 为主, 采用钢模板; 少量键槽长度为 1.40m 和 2.20m 的键槽改为木模板。

(2) 纵横缝模板安装与常规土建模板相同。见图 2.3.14(11)。

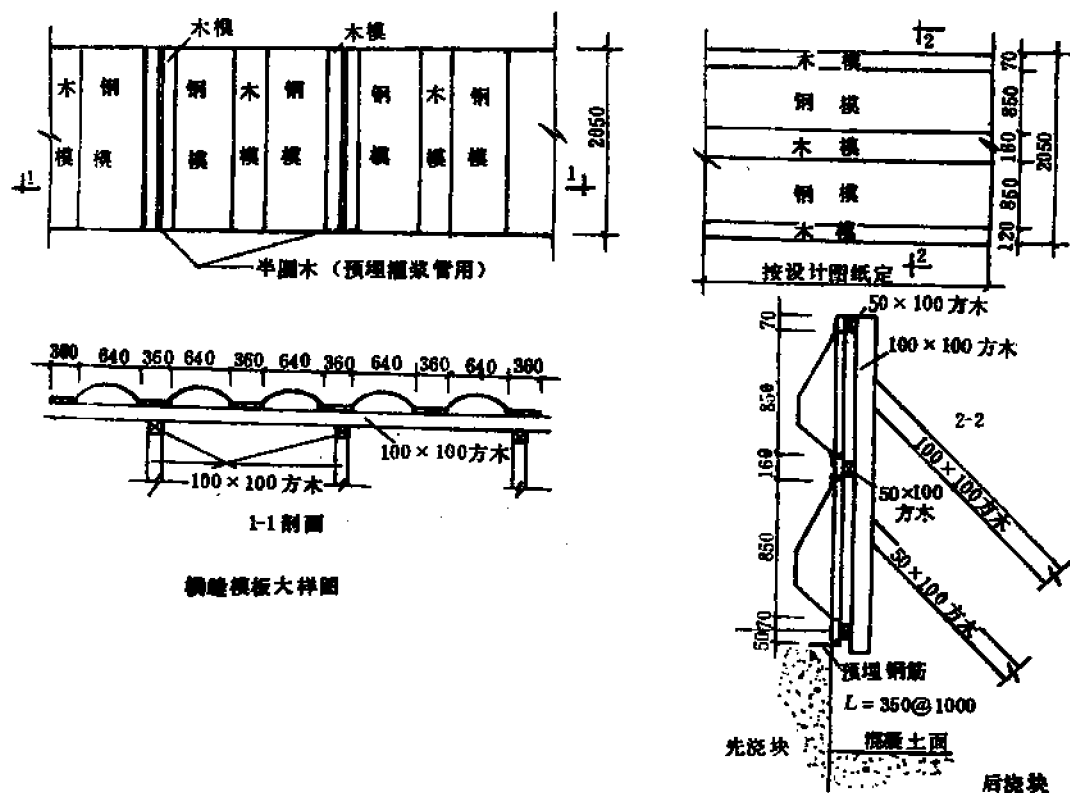


图 2.3.14(11) 纵缝、横缝模板安装示意图

(3) 下游面模板采用定型钢模板, 钢模板尺寸为 360mm × 2000mm, 安装方法详见图 2.3.14(12)。

(4) 廊道模板: 114.5m 纵向廊道和 98m 高程灌浆廊道, 采用预制钢筋混凝土拱圈模板; 114.5m 边廊道及 70~77m 高程基础排水廊道均采用预制钢筋混凝土平板模板; 114.5 高程纵向廊道与边廊道交接处采用木模板现场拼装制作, 见图 2.3.14(13)。

混凝土三角塞、排水井模板用木模板支模, 每次可支 4m。为了安全起见, 在供人上下的洞口临时用 50mm 厚木板隔断以防高空坠落。

(5) 左右两岸宽缝重力坝混凝土撑墙模板: 设计要求在左右两岸宽缝重力坝空腔内各设

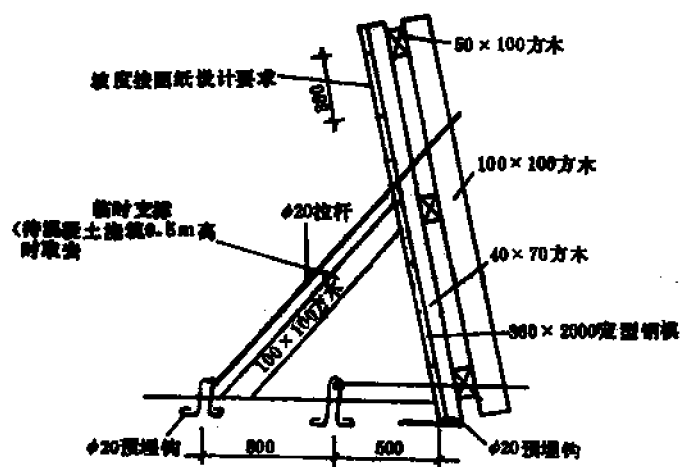


图 2.3.14(12) 下游面钢模安装示意图

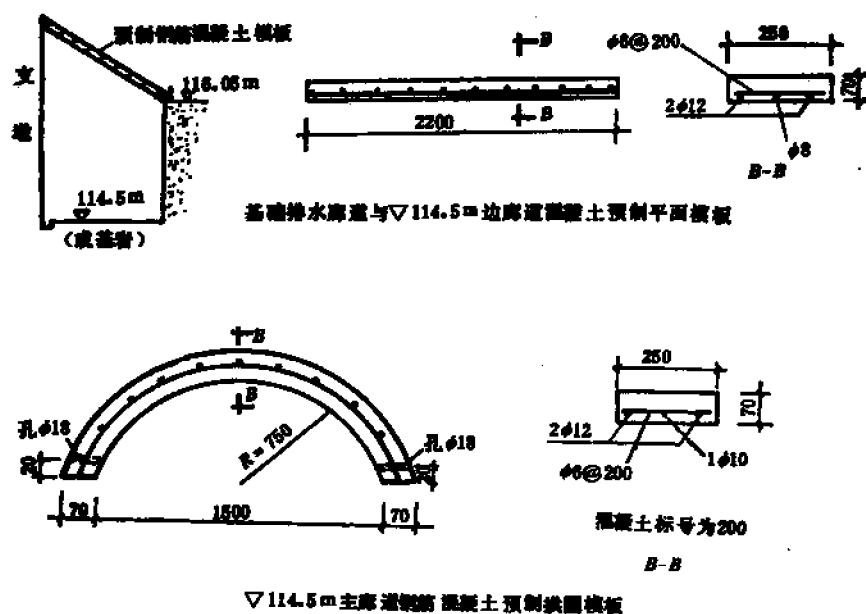


图 2.3.14(13) 114.5m 廊道模板大样图

置两道厚度 1~2m 混凝土撑墙。该混凝土撑墙 97m 高程以下厚度为 2m, 97m 高程以下厚度为 1m。在混凝土撑墙施工中我们采用土建中常用的倒链提升滑动模板, 一道撑墙高达 40m。我们利用宽缝重力坝顶钻孔埋设 $\phi 25\text{mm}$ 吊环(混凝土膨胀螺栓), 内穿 5mm 钢丝绳, 在钢丝绳上挂 2t 手动葫芦, 提升开字架和钢模板制作安装见图 2.3.14(14)。

7. 钢筋工程

加固工程共需钢筋与铁件近 1000t, 其中结构用钢筋近 500t。

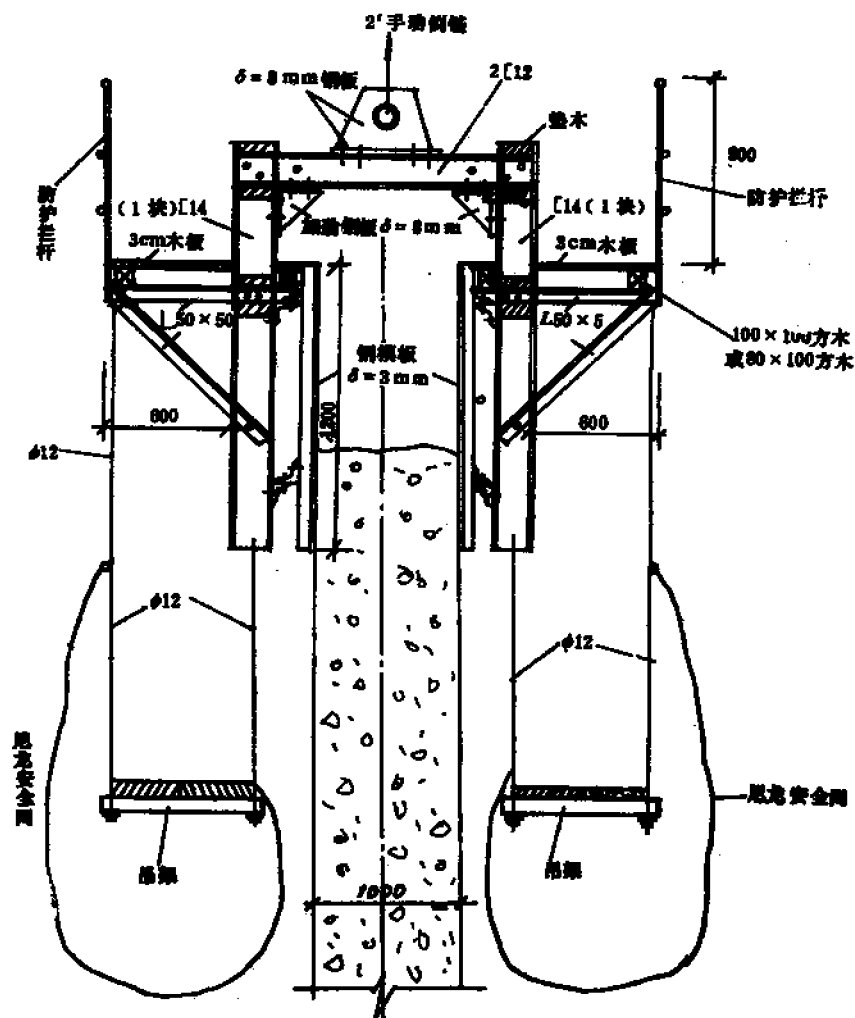


图 2.3.14(14) 混凝土挡墙滑模施工详图

(六) 大坝混凝土全面质量管理

为确保“满蓄、满发、保证通航”的要求,严格遵守“水工规范”和设计要求,抓住水工混凝土质量控制的主要环节,分工把关,各司其责,以确保优质混凝土目标实现。优质水工混凝土把关环节参见图 2.3.14(15)。

建立了能适应水工混凝土施工的中心试验室,同时,在施工全过程中实行全面质量管理,并遵循 PDCA 工作程序,一步一个脚印确保省部级优质工程目标的实现。具体做法如下:

(1) 技术培训和建立能适应水工混凝土施工的中心试验室。

(2) 建立健全质量保证体系:从大坝加固工程实际出发,制订质量方针目标管理,确定大坝加固工程质量,确保达到省部级优质工程,力争国优工程。分项工程合格率 100%,优良率 80%以上,混凝土强度保证率大于 95%(设计要求大于 80%);混凝土离差系数 $C_v \leq 0.14$ (设计要求 $C_v < 0.15$);混凝土容重合格率 100%,混凝土抽芯试验强度标号合格率 100%

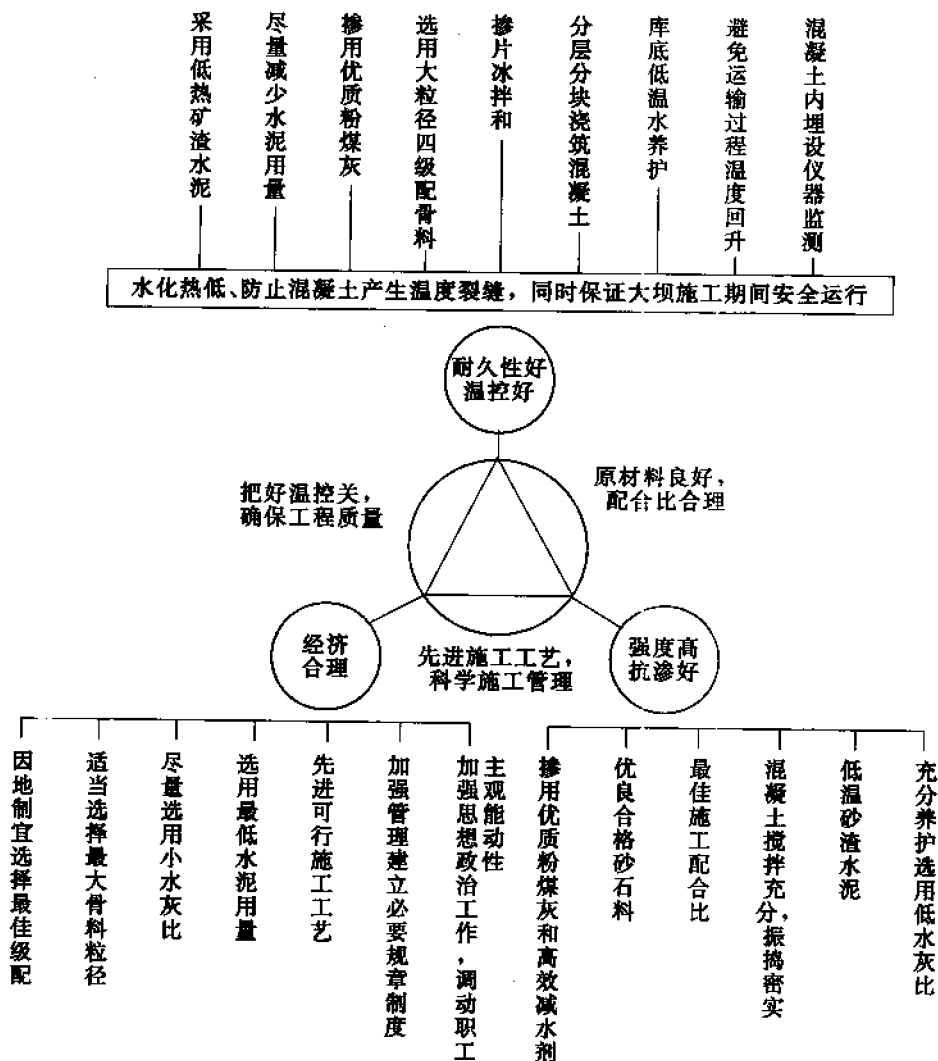


图2.3.14(15) 优质水工混凝土把关环节图

(设计要求 $\geq 90\%$),混凝土钻孔压力试验单位吸水小于 $0.01\text{L}/\text{min}\cdot\text{m}$,混凝土温度控制要求必须达到设计要求。

(3)制订可行的技术管理制度和各级岗位质量责任制:从大坝加固工程实际出发,除设计提出混凝土施工技术要求,蛇形冷却水管安装和通水冷却技术要求,大坝接缝灌浆技术要求等外,指挥部还制订了技术管理实施办法,中心试验室管理条例,施工质量检查验证制度,施工质量评定办法,混凝土浇筑许可证制度,各级岗位质量责任制等等,使全体施工人员有章可循。

(4)抓好工作质量管理:工序是施工过程中的基本环节,工序的质量好坏最终决定加固工程的质量好坏。为提高各工种各工序操作者的自控能力,改变事后检查的做法,制订了“工程班组质量管理条例”,大力推行三定(定人、定员、定位),三保(保质、保量、保节约),三检(自检、互检、交接检),三会(班前会、分析会、班后会),三图(排列图、因果图、控制图),三个标准(质量标准、操作标准、检查标准),使工序质量有明显提高和进步。

(5)强化质量监督体系的权威,严格执行奖优、罚劣的奖罚制度;指挥部成立以技术副指挥长为首的质监体系,并按 10% 配备质监干部。指挥长授予质监组三权,即否决权、停工权、处罚权。施工过程中必须做到“三个服从”即“施工进度服从质量,消耗服从质量,生产管理部门服从质监管理部门”。在施工中对生产工人实行优质优价,凡工序质量达到合格者只发基本工资不嘉奖,凡达到优良者每工日增加 0.50 元奖励。

(6)坚持 PDCA 循环方法,不断解决施工质量中的新问题;按照 PDCA 的四个阶段、八大步骤进行提高混凝土施工质量的管理活动。利用施工中的大量数据和信息,并运用数理统计方法,普遍采用“二图一表”,即排列图、因果分析图及对策表。对混凝土施工质量进行监控,及时处理解决施工中出现的问题,并且建立“一证一卡”,“一证”就是混凝土浇灌许可证,“一卡”就是工序移交反馈卡。由于工序之间做到合理穿插,加强成品保护,减少干返工活,促进了各道工序一次成优。大坝混凝土质量控制工作循环图见图 2.3.14(16)。

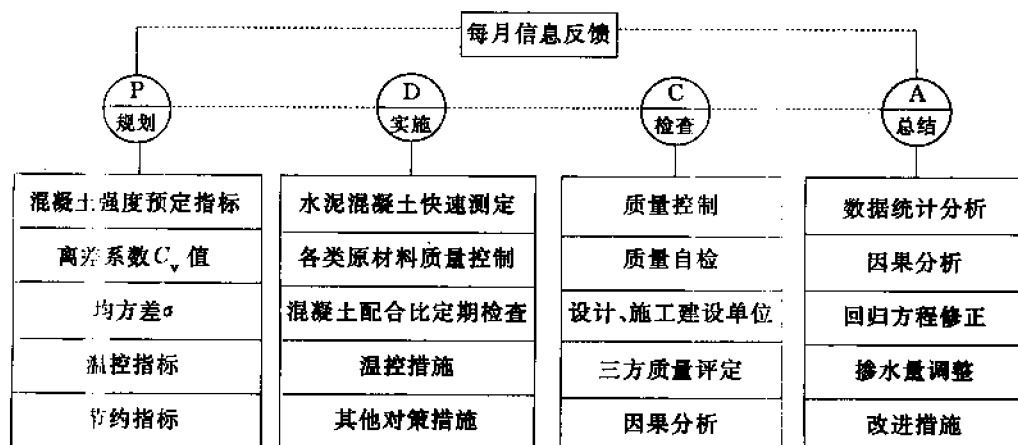


图2.3.14(16) 大坝混凝土质量控制工作循环图

(七)混凝土加固体接缝灌浆

大坝加固混凝土共有 9 个空腔,在回填混凝土施工过程中,为了不使对原大头坝产生不利的温度应力,在每个空腔加固体内设置纵横缝和大头接触面接缝灌浆系统,待混凝土达到稳定温度后,再进行接缝水泥灌浆,使新老混凝土连成整体共同受力。接缝灌浆设计共分 4 个灌浆层 134 个灌区,总面积为 18088m²,其中大头缝 3392.1m²,横缝 11268.1m²,纵缝 2428.9m²,灌层高度一般为 14~16.5m,灌区面积一般小于 300m²,最大一区达 400m²,但大于 300m² 的灌区只占 10%。

接缝灌浆施工分两期进行。设计要求第一期灌浆于 1984 年 3 月~5 月完成;第二期灌浆于 1985 年 2 月~4 月完成。第一期灌浆从基础灌至 98m 高程,两个灌浆层;第二期灌浆从 68m 高程至 130m,两个灌浆段,共计灌浆面积 17088m²(122 灌区)。大坝加固混凝土纵缝、横缝、大头缝接缝灌浆工艺布置见图 2.3.14(17)。

1. 接缝灌浆技术要求和通水检查

(1)接缝灌浆技术要求:大坝混凝土温度必须降至设计要求的稳定温度(见图 2.3.14(9))

接缝灌浆时间安排在低温季节,接缝张开度应大于 0.5mm,其混凝土龄期必须在 6 个月以上。如果接缝张开度小于 0.5mm,则按细缝灌浆施工。

(2) 通水检查:灌浆前必须对各灌层灌区逐个进行通水检查,通水检查的目的主要是测定缝面容积,同时对灌浆埋设系统进行检查,查是否畅通,有无串层串通,以确保每个缝面灌浆质量优良。

通水检查方法有三种:敞开式通水,单开式通水,封闭式通水,根据具体情况而定。经过通水检查,灌区封闭情况和缝面及灌浆管路系统通畅情况,单开流量大于 20L/s 就视为畅通;外漏量大于 10L/s 视为串层串区,外漏量小于 10L/s 视为封闭。如施工过程中发现排气管不通或灌区封闭程度差,外漏呈射水的灌区均要通过设计院、建设单位共同研究处理方法,处理妥善后再进行接缝灌浆。

2. 接缝灌浆施工顺序

(1) 灌浆程序:从河床最低坝腔(即 3[#]腔)开始灌浆,向左右两岸推进,自下而上逐层进行灌浆,各腔同一灌浆层,先灌大头缝后灌纵缝,最后灌横缝并采取隔腔灌注。

(2) 灌浆时间间隔:同层相邻缝间歇时间为 3~6 天,下一层灌区全部灌完后停歇 14 天后再灌上一层浆。

3. 接缝灌浆施工

(1) 接缝灌浆的准备工作。首先做好技术准备和劳动力组合,组织施工人员对技术操作规程,大坝接缝灌浆规范进行全面学习讨论,并派班组长去正在进行接缝灌浆的大坝工地培训学习。同时通过通水检查灌区通水情况,分析了解灌区情况、孔口位置,熟悉施工工艺流程,制订接缝灌浆岗位责任制,每次灌浆前均向机长交待任务和质量要求,以确保灌浆质量。根据工地实际情况,灌浆小组劳动力组合每组 30 人,共 3 组分 3 班作业。

(2) 灌浆材料:因接缝缝面张开度大多小于 0.5mm,属细缝灌浆,所以选用超细度普通硅酸盐 525[#]水泥,水泥细度为通过 6400 孔/cm²(相当于 0.070mm 方孔)筛的筛余量小于 1.8%,水泥存放期不得超过 3 个月,并且严禁使用结块受潮水泥。

(3) 灌浆机具:灌浆机采用 BW250/50 型卧式双缸泥浆泵,最大排浆量为 250L/min,最大工作压力为 5MPa,每个机房配备 2 台,共计 6 台灌浆机,因各腔密封,因大坝屏闭作用,用步话机对讲机无法工作,所以采用 10 门直通自动电话机,在 114.5m 高程架设电缆线,各腔入口处设置电话插座,使各工作部位均可通讯联络。

同时还要准备专用器材如千分表、油活塞、压力表、水泥比重计和各种球阀,还要准备备用的水玻璃、棉絮、麻丝等堵漏材料。

(4) 接缝灌浆:灌浆前用水和压缩空气将缝内污物杂质等冲洗干净,其方法是用 0.4MPa 的压力水、气从进浆管口输入,其他管口均打开,用肉眼观察水质清洁程度,当进水与孔口出水一般清澈时即为合格。每一个灌区在灌浆前一天均要充满水浸泡缝面 24 小时,使缝面保持连续潮湿状态。

待灌区通水冲洗湿润后,灌浆前用压缩空气将缝内积水全部排除。同时对灌浆机具进行全面检查,检查合格后,用设计灌浆压力水从进浆管进水,测量各管口单开流量和压力情况,借以掌握灌浆过程中可能发生的变化情况,一一记录灌浆原始记录资料并保存好。用 0.5~0.6MPa 压缩空气再次吹干缝面和管路积水(一般吹 15 分钟即可)。

待通水检查全部合格后,即可进行接缝灌浆。灌浆压力一般以设计层顶排气管处的压力 0.2~0.3MPa 为控制压力,同时还要考虑路管及高差压力损耗,换算成进浆压力,一般以 0.2MPa 开始再逐步以 0.05MPa 的压力递增,以保持浆液在缝面流动和排浆正常为宜,更换浓浆液时要相应增加 0.1MPa 压力。若排浆不好,可视情况适当增加 0.1~0.2MPa 压力猛冲一下,但要严密监视跨缝千分表读数变化情况,以灌区层顶压力张开度不超过 0.5mm 来校正压力,一般进浆压力值控制在 1MPa 左右。

接缝灌浆时必须随时控制浆液稠度变化。根据设计要求浆液水灰比一般分三级,初级为 5:1 或 4:1;中间级为 1:1;最终级为 0.5:1 或 0.4:1。

浆液细度选定,视其缝面张开度和管路缝面畅通情况分析后再决定。通常大头缝和纵缝以 5:1,横缝以 4:1 开始,待排浆比重和进浆比重相同后,则更换中间级 1:1;直至最终级采用 0.5:1 或 0.4:1。

灌浆结束标准:当排气管的排浆稠度等于进浆管最终级浆液稠度,排气管口压力已达到设计压力,继续灌注时,缝面吸浆率等于 0 或少于 0.4l/min,持续 20 分钟即结束该区灌浆工作。同时待灌浆完毕后(一般停歇 6~8 小时),相邻灌区缝面必须用 0.2MPa 压力水冲洗管路,直至出清水为止,以免相邻未灌区管路堵塞。

接缝灌浆质量检查和评定。

每期灌浆结束后,即组织施工和设计、建设单位的技术人员根据现场灌浆情况和原始记录资料,进行统计分析,逐区进行质量评定。初步评定后选择有代表性的灌区委托中南勘测设计院勘测队进行接缝混凝土岩芯钻探取样、孔内压水试验、孔内探缝照明、缝面凿槽直观等,检验灌浆效果。如发现个别灌区灌浆质量不理想,则需采用排气管倒灌的措施进行补灌浆,尽力使灌区质量得到保证。

经中南勘测设计院勘测队和水电八局质检处的实地抽样检查,接缝灌浆质量完全符合设计要求。

(八)施工总进度安排

由于大坝加固工程全在坝腔内施工,进入坝腔通道已有 114.5m 高程廊道和 142m 高程混凝土运输道,两个廊道断面仅为 1.50m×2.25m,经对各施工工序和施工条件及大体积混凝土温控要求等综合分析,认为总工期控制在四年半左右为宜。由于对混凝土干缩和大坝稳定温度的要求,第一期接缝灌浆完成后,设计要求中间停歇 9 个月再进行第二期接缝灌浆。图 2.3.14(18)为大坝加固工程施工总进度计划。大坝加固工程工作内容列于表 2.3.14(12)。

(九)主要施工机械需用计划

工程所需主要施工机械列于表 2.3.14(13)。

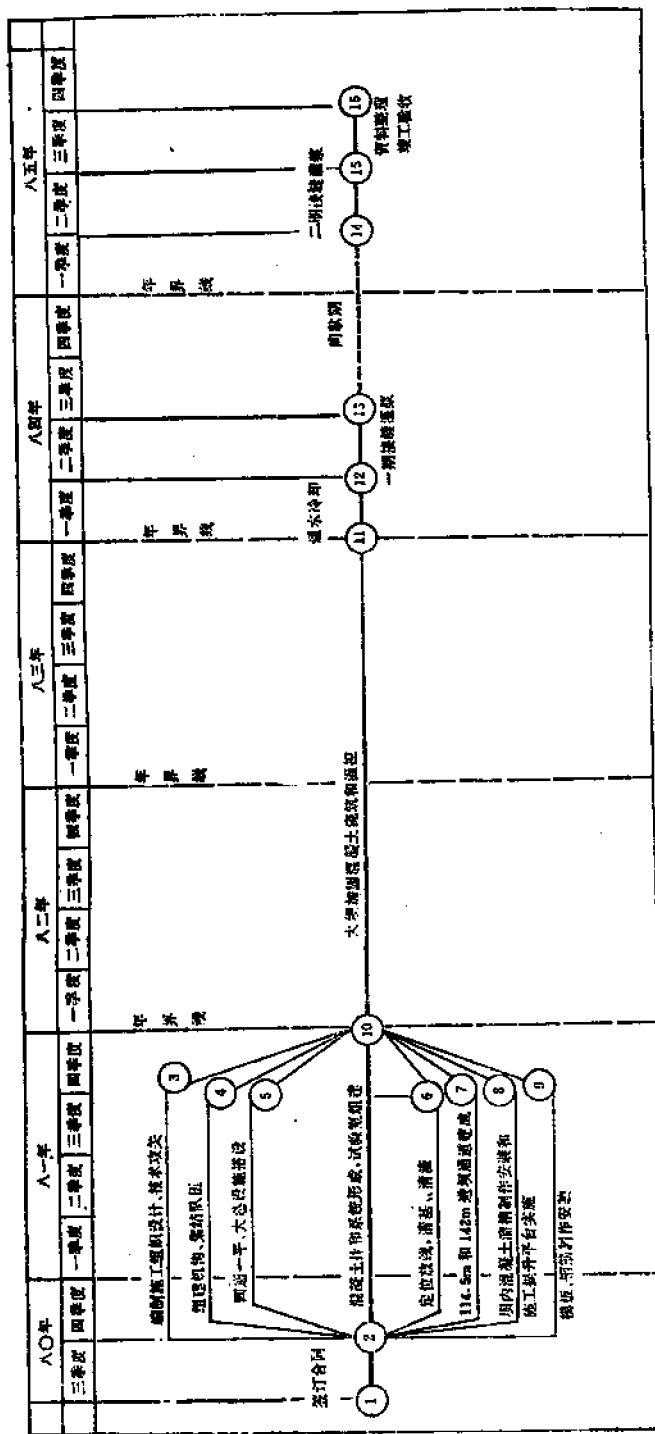


图 2.3.11(18) 大坝加固工程施工总进度计划

表 2.3.14(12)

大坝加固工程工作项目内容表

序号	工作编号	工 作 名 称	网络图中简称	持续时间/月
1	1—2	与建设单位签订施工合同,与安化县建材公司签订砂石料供货合同	签订合同	3
2	2—3	图纸交底会审,编制施工组织总设计和技术难题攻关论证	编制组织设计和技术攻关	12
3	2—4	组建机构,集结队伍;施工机具材料采购订货;制订各种规章制度,建立岗位责任制	组建机构集结队伍	2
4	2—5	现场水、电、道路、通讯等四通一平,生活大临设施的搭设	四通一平,大临设施搭设	12
5	2—3	测量定位放线,坝内清基清渣及基础锚固安装	定位放线 清基清渣	15
6	2—7	114.5m 高程交通廊道改造和 142m 高程混凝土运输道开凿、砌建	114.5m 和 142m 进坝交通线建成	15
7	2—8	坝内混凝土输送溜槽制作安装和施工操作提升平台实施	坝内混凝土溜槽制安,提升平台实施	12
8	2—9	模板、钢筋、蛇形冷却水管、止浆片、构件及半成品的加工制作订货	模板钢筋制安	12
9	2—10	混凝土拌和系统、制冰站设计、施工、安装调试,中心试验室组建和培训达标	混凝土拌和系统形成,试验室组建	15
10	10—11	大坝加固混凝土浇筑和大体积混凝土温控	大坝加固混凝土浇筑和温控	24
11	11—12	大坝加固混凝土一期和二期通水冷却	通水冷却	3
12	12—13	大坝加固混凝土 98m 高程以下两个灌浆层接缝灌浆	一期接缝灌浆	2
13	13—14	因混凝土稳定温度要求,设计规定间歇期坝内廊道恢复工作	间歇期	9
14	14—15	大坝加固混凝土 98m 高程以上两个灌浆层接缝灌浆	二期接缝灌浆	2
15	15—16	大坝加固混凝土抽样试验,质量评定,整理工程技术档案,写出技术总结和竣工报告,由能源部组织国家验收	整理资料,竣工验收	5

表 2.3.14(13)

主要施工机械汇总明细表

序 号	设备名称	规 格	单位	数量	备 注
1	自卸汽车	12t 太脱拉	辆	12	
2	载重汽车	8t 黄河 JN150	辆	4	
3	载重汽车	5t 东风或解放	辆	8	
4	载重汽车	2t 北京 130	辆	2	
5	汽车吊	8t 武陵吊	辆	1	
6	汽车吊	5t 解放吊	辆	1	
7	轮式装载机	KLd65Z(厦门)	辆	2	
8	推土机	100~140 马力	辆	2	
9	油罐车	CA10B	辆	1	
10	内燃机车	20 马力轨距	辆	2	
11	电瓶机车	XK2.5	辆	2	
12	混凝土“U”罐车	“U”型 0.9m ³ 轨距 600mm	辆	15	
13	机车翻斗车	1t	辆	5	
14	卷扬机	1tJJK-1	台	14	
15	卷扬机	3tJJK-3	台	5	
16	救护车		辆	1	
17	混凝土搅拌机	150tL7.5kW	台	2	
18	皮带机	800mm 宽,总长 221m	台	7	
19	螺旋输送机	φ300×10m 5.5kW	台	2	
20	空压机	20m ³ 130kW	台	2	
21	空压机	12m ³ 柴油	台	1	
22	氨压机	4VA-17	台	2	
23	片冰机	PBW-75 型	台	10	
24	拌和系统,计量设备		套	1	
25	罐浆机	双缸卧式 BW250/50	套	3	
26	灰浆机	HJ-200	台	3	
27	通风机	轴流式、离心式	台	6	各 2 台
28	各种水泵	D80-30×30SC10×5 3BA-3.4BA-12	台	16	各种规格 各 4 台
29	潜孔钻		台	8	
30	风 镐	03-11	台	20	
31	手风钻	01-30	台	20	
32	钢筋加工机械		套	1	

续表

序 号	设备名称	规 格	单位	数量	备 注
33	木材加工机械		套	1	
34	各种车床、刨床、铣床、 钻床、锻钎机	C620、C318、C630 B666×60W CK-50	台	6	各种规格 1 台
35	交直流电焊机	BS-33021kW10kW	台	8	各 4 台
36	氧焊设备		套	4	
37	硅整流充电机	75V30A	台	2	
38	变压器	SJ-560/1056kV	台	1	
39	电话总机	50 门	台	1	
40	地磅秤	25t	台	1	
41	电讯设备		套	1	
42	大坝观测仪器	应变计、测缝计、应力计、渗压 计、电阻温度计、比例电桥	台 件	354	

(十)劳动力需用计划

各个施工阶段主要劳动力需用计划列于表 2.3.14(14)。

表 2.3.14(14) 各个施工阶段主要劳动力需用计划表

工 种	施工准备阶段		大坝混凝土浇筑阶段		接缝灌浆阶段	
	班 组	人 数	班 组	人 数	班 组	人 数
瓦工	10	150	1	20	1	15
木工	2	35	4	70	1	15
钢筋工	2	35	3	52		5
混凝土工	1	15	4	60	1	15
抹灰工	2	30	1	15	1	10
油漆工	1	5		0	1	5
起重工	1	8	2	16	1	8
电焊工	1	8	1	8		2
电工	2	20	3	30	1	0
钳工		4		4		2
通风工		8		8		0
石工	3	50	2	30		5
车工		4	1	8		2
普工	10	200	13	250		50

续表

工 种	施工准备阶段		大坝混凝土浇筑阶段		接缝灌浆阶段	
	班 组	人 数	班 组	人 数	班 组	人 数
凿岩工	4	60	2	40		4
爆破工		8		2		0
汽车司机	2	20	4	40		4
汽修工	1	12	2	24		1
试验工		3	4	50		2
小计		679		731		156

(十一)主要材料需用计划

工程主要材料需用量列于表 2.3.14(15)

表 2.3.14(15) 主要材料需用量计划表

材料名称	规 格	单 位	数 量	备 注
水泥	湘矿 425#,新矿 425#,湘矿 525#	t	22200	
水泥	湘普 525#特细	t	2000	接缝灌浆用
钢材	线材、型材、板材	t	1300	
粉煤灰	株洲电厂	t	44900	
减水剂	TF 糖蜜减水剂	t	150	
减水剂	潭建蔡系减水剂	t	1100	
木材	杉木	m ³	3284	
砂石料	四级配	m ³	150000	
油料	各种汽油、柴油	t	3850	

(十二)施工总平面布置图

因柘溪大坝加固工程地处山区,建设单位要求结合电站总体布置考虑,柘溪大坝加固工程施工总平面布置见图 2.3.14(19)。

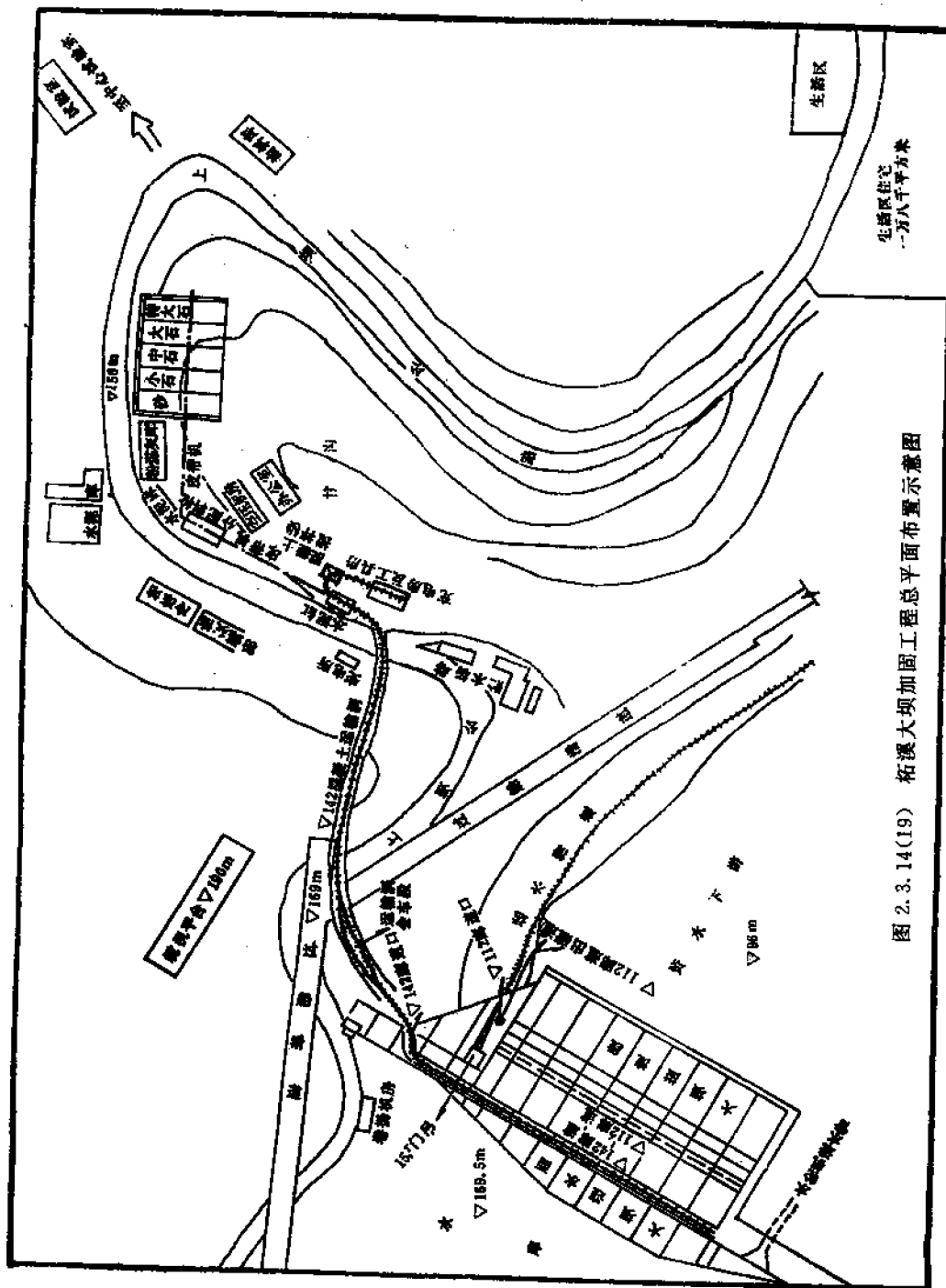


图 2.3.14(19) 柘溪大坝加固工程总平面布置示意图

(执笔 李瑞华 徐宗华)