

# 浅析大型导流洞群混凝土快速衬砌关键技术

杨勇, 周红祖, 李洪伟

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川成都 610081)

**摘要:**白鹤滩水电站是目前世界上在建的最大的水电站工程,其导流洞工程规模在同类工程中名列前茅。白鹤滩水电站左岸大型导流洞群工程量大,地质条件差,质量要求高,工期紧张,履约压力大。在混凝土施工阶段,通过施工方案的比选、底板采用半幅施工、连仓浇筑、增大台车衬砌分仓长度、缩短单仓循环作业时间等快速衬砌措施,最终成功地抢回了工期,为工程履约做出了巨大贡献。对该关键技术进行了总结,仅供参考。

**关键词:**白鹤滩水电站;左岸导流洞;混凝土;快速衬砌;关键技术

中图分类号:TV7;TV554;TV52

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2014)增1-0080-05

## 1 工程概述

白鹤滩水电站位于云南省巧家县大寨镇与四川省凉山彝族自治州宁南县六城镇交界的白鹤滩,其上游主要有锦屏、二滩、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉、乌东德等水电站,下游主要有溪洛渡、向家坝等水电站,是金沙江下游河段四个梯级开发中的第二级。

该工程施工导流共布置5条导流洞,总长度达8 980.26 m,其中左岸布置3条,从左至右依次编号为1#、2#、3#,长度达5 383.76 m;右岸布置2条,编号为4#、5#,长度达3 596.5 m。导流洞为城门洞型,衬砌后净断面尺寸为:17.5 m × 22 m (宽×高),单洞过水面积为359.64 m<sup>2</sup>。导流洞导流设计标准为全年50 a一遇,进口最大水头达70 m,单洞最大过流量达5 731 m<sup>3</sup>/s,设计总流量达28 700 m<sup>3</sup>/s,洞内最大流速达15.94 m/s。导流洞底板衬砌厚度为1.1~2.5 m,边顶拱衬砌厚度为0.98~2.5 m。底板采用C9040F150W10钢筋混凝土衬砌;边顶拱采用C9030F150W10钢筋混凝土衬砌。左岸3条导流洞洞身混凝土总量约49.2万m<sup>3</sup>,钢筋总量约4.73万t,底板插筋为2.53万根。

## 2 施工方案比选

### 2.1 底板混凝土分块施工方案比选

底板混凝土施工方案的比选主要是全幅与半幅施工的选择。底板全幅浇筑比半幅浇筑要经济,但会影响施工通道。导流洞开挖支护于2013

年8月底结束,底板首仓混凝土于2013年5月初浇筑,边顶拱首仓混凝土于2013年7月初开仓,开挖支护与混凝土施工存在交叉干扰。开挖支护完成前,底板混凝土只能采用半幅浇筑,另外半幅作为通道。开挖支护完成后,每条导流洞均布置4台钢模台车、4台钢筋台车及4台灌浆台车进行施工,3条导流洞共有36台台车运行,与之相关工作所需的通道纵横交错,交通干扰较大。因此,保证施工通道的畅通是混凝土快速施工的前提条件。经过经济、工期比较,在交通单一的部位(如导流洞出口)采用全幅浇筑;在交通交叉的部位(如导流洞洞身)采用半幅浇筑,另外半幅作为交通通道,以减少交通压力。

### 2.2 转弯段台车方案比选

在转弯段,台车均采用“以折代曲”方式进行施工。以15 m台车为例,可有“5 m+5 m+5 m组合型”和“7.5 m+7.5 m组合型”两种方案。经过理论计算,“5 m+5 m+5 m组合型”与“7.5 m+7.5 m组合型”误差对比见表1,简图见图1。

分析上述数据可知,无论哪种组合形式,在转弯段均将出现“内超外欠”现象。“5 m+5 m+5 m组合型”台车的理论误差明显比“7.5 m+7.5 m组合型”台车的小,对于转弯段体型控制更有利。但是,“7.5 m+7.5 m组合型”台车虽然最大偏差达到5 cm,但是将内超外欠综合后,过流断面变化不大,不影响导流洞过流能力。另外,“5 m+5 m+5 m组合型”台车中间需要增加两块楔形模板,从工期及资源投入方面来讲,“7.5 m+

收稿日期:2014-06-28

表 1 15 m 台车不同分节长度理论误差对比表

序号	项目名称	5 m+5 m+5 m 组合型		7.5 m+7.5 m 组合型	
		R=150 m	R=200 m	R=150 m	R=200 m
1	端部楔形模板大头尺寸 /mm	423	338	578	453
2	端部楔形模板小头尺寸 /mm	100	100	100	100
3	中间楔形模板大头尺寸 /mm	845	676	1 155	905
4	中间楔形模板小头尺寸 /mm	200	200	200	200
5	外弧总长 /m	17.4	16.9	16.7	16.4
6	轴线弧长 /m	16.6	16.3	16	15.8
7	内弧总长 /m	15.5	15.5	15.3	15.3
8	外弧外欠值 /mm	19.7	15	44.8	33.7
9	内弧内超值 /mm	22.1	16.3	50.1	36.8

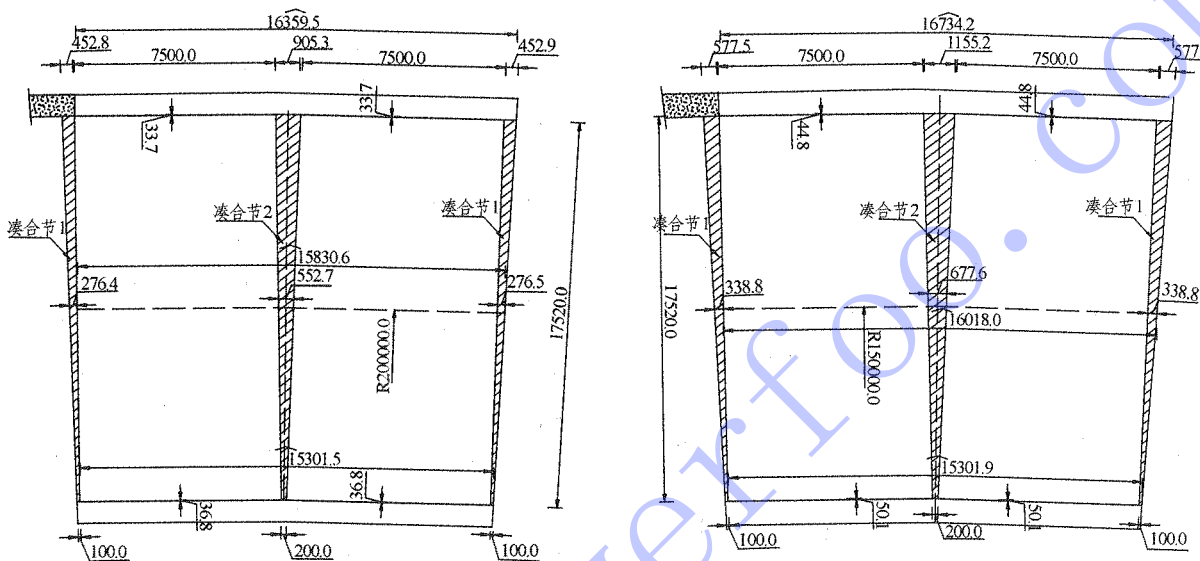


图 1 7.5 m + 7.5 m 组合型台车衬砌误差示意图 (单位: mm)

7.5 m 组合型”台车更为有利。经综合比较后得知,“7.5 m + 7.5 m 组合型”台车更有利于混凝土快速施工。

### 3 主要施工方案

#### 3.1 主要施工步骤

左岸导流洞洞身混凝土施工主要分为七个步骤:底板清基施工→底板垫层混凝土施工→底板锚筋施工→底板钢筋绑扎→底板混凝土浇筑→边顶拱钢筋绑扎→边顶拱混凝土浇筑。具体步骤详见图 2。

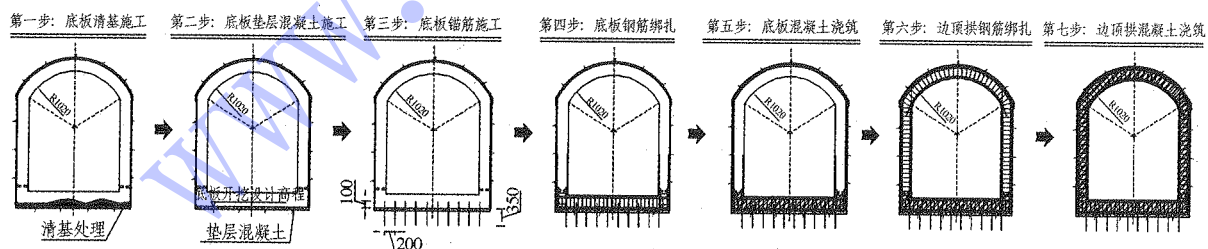


图 2 洞身混凝土施工步骤示意图

#### 3.2 分层、分块

左岸导流洞衬砌混凝土按“先底板及 60 cm 矮边墙,再边顶拱”的顺序分两层进行施工,两层接触面上均设置有水平键槽,在矮边墙水平面上按照 1 m 的净间距布置。标准段按照 15 m 进行

分仓,在平面转弯段按照 15.831 m(半径  $R=200$  m)及 16.018 m(半径  $R=150$  m)进行分仓,对于衬砌厚度突变以及进出口等结合部分,根据结构缝的位置进行分仓。据此,1#导流洞共分为 134 个衬砌段,2#导流洞共分为 119 个衬砌段,3#导流

洞共分为108个衬砌段,总计361仓。

底板采用半幅浇筑时,纵缝偏离洞轴线1 m,半幅分为7.75 m和9.75 m,具体施工时按照一定距离左右半幅交替推进,保证一侧作为交通通道。边顶拱采用钢模台车一次成型浇筑方式施工。分层、分块情况详见图3。

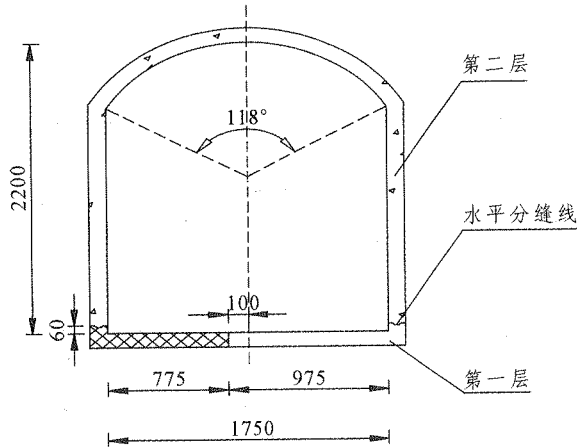


图3 洞身混凝土分层、分块示意图(单位:cm)

### 3.3 混凝土施工方案

底板混凝土采用TB110布料机入仓,6 m<sup>3</sup>/9 m<sup>3</sup>混凝土罐车替代平板车运输混凝土,人工使用φ100、φ50振捣器进行振捣。底板混凝土半幅浇筑时,顺水流方向分4个台阶浇筑,分层厚度为40~50 cm,台阶宽度为350 cm左右;底板混凝土全幅浇筑时,垂直水流方向分4个台阶浇筑,分层厚度为40~50 cm,台阶宽度为450 cm左右。底板混凝土模板主要采用P3015、P1015钢模组合,60 cm高矮边墙采用P6015整块大模板立模,防翻浆压模采用P4015钢模,边墙浇筑完成或不再翻浆时将压模拆除进行底板抹压面。

边顶拱混凝土主要采用“7.5 m+7.5 m钢模台车+泵送”入仓,6 m<sup>3</sup>/9 m<sup>3</sup>混凝土罐车运输混凝土。直线段采用两节7.5 m钢模台车拼接形成整体或者15 m整体台车进行衬砌施工,衬砌长度为15 m。转弯段将台车拆分成7.5 m+7.5 m台车,并在台车两端和中间增加楔形模块进行衬砌施工。边墙混凝土通过钢模台车上预留的进料窗口泵送入仓,顶拱混凝土通过钢模台车顶拱上预留的封拱器及冲天管泵送入仓,顶拱上预留排气孔。边墙混凝土主要由人工采用振捣器振捣,顶拱混凝土除人工振捣外,还采用安装在钢模台车

顶拱内侧的附着式振捣器振捣。

## 4 快速衬砌施工关键技术

在合同文件中,左岸导流洞边顶拱混凝土衬砌工期为11个月,但受其它因素影响,实施阶段实际施工工期仅为9个月。因此,为了实现混凝土衬砌的节点目标,必须采取一定的赶工措施,加快混凝土衬砌施工。

### 4.1 底板混凝土连续备仓,连仓浇筑

底板钢筋主要为直条型和“L”型两种,形式单一,钢筋安装速度快,底板混凝土浇筑速度远赶不上钢筋绑扎速度。从时间上讲,底板具备连续备仓条件。底板混凝土采用TB110布料机入仓,TB110布料机水平极限施工距离达32 m,刚好能覆盖两仓连续备仓的长度30 m。另外,底板混凝土采用半幅浇筑,两个半幅仓连续浇筑的混凝土量与一个全幅仓方量持平,TB110布料机生产能力可满足施工强度要求。从施工设备方面讲,底板具备连仓浇筑的条件。两个连续浇筑的仓号间施工缝位置采用1 cm厚的木板间隔开,木板高出底板混凝土结构线1~2 cm。木板分上下两半,中间安设橡胶止水带,木板采用与底板插筋相连的拉丝固定。混凝土浇筑时,木板两侧对称下料,尽量保证木板两侧混凝土侧压力平衡。底板连仓浇筑混凝土可减少一道端头模板的安装及拆除,还可减少验仓次数及施工设备就位次数等,有利于混凝土快速施工。

### 4.2 增大台车衬砌分仓长度

按照以往类似工程经验,洞室衬砌分段长度大多按照9 m设计,很少出现超过12 m的设计方案。但是,白鹤滩水电站左岸导流洞断面高度达22 m,宽度达17.5 m,如果采用9 m或者12 m的分仓长度,钢模台车自身体型高宽比不协调,行走过程中容易倾倒。另外,对9 m、12 m及15 m长分仓进行比较,左岸三条导流洞总长度为5 383.76 m,按照15 m分仓设计的平均仓数比按照12 m划分的要少约90仓,比按照9 m划分的要少约239仓。按照15 m分仓设计,浇筑仓大大减少,对洞身混凝土快速衬砌有利。采用15 m台车浇筑转弯段边顶拱,虽然最大偏差达到5 cm,但是将内超外欠综合后,过流断面变化不大,不影响导流洞的过流能力。

### 4.3 缩短边顶拱单仓循环时间



对导流洞开挖支护向混凝土浇筑转序条件进行分析,1#导流洞第二台钢模台车最先具备浇筑条件,共浇筑46仓。单仓循环正常浇筑时间按照7 d/仓(转弯段按照8 d/仓)计算,11个月的工期刚好合适。但是,实施阶段仅有9个月的工期,排除其它因素的影响,只有将单仓循环正常浇筑时间控制在5 d内,工期才有保障。为了达到这个

目标,我们采取了以下措施。

#### (1)减少顶拱混凝土待强时间。

白鹤滩水电站导流洞工程为了控制温度裂缝,采用低热水泥以减少水化热。但是,低热水泥早期强度低,而且强度增长速度慢,不利于顶拱脱模。试验仓现场同步试验数据见表2。

表2 试验仓现场同步试验测定成果表

时间	抗压强度 /MPa				凝结时间 /h:min	
	12 h	24 h	36 h	3 d	初凝	终凝
第一仓	5.5	8.7	10.6	12.9	7:57	9:15
第二仓	4.9	6.5	8	10.1	5:37	7:50
第三仓	5.1	7.3	9.4	11.8	6:14	8:25

由上述数据可知,严格按照规范要求的时间拆顶拱模板基本上不现实。为了确定顶拱拆模时间,现场进行了顶拱浇筑完成后18 h、24 h及36 h拆模试验,拆模后顶拱均没有出现异常情况。但是,考虑到低热水泥的特性,最终选择顶拱在浇筑完成24 h后才允许顶拱脱模。此方案较原计划时间大大缩减。

#### (2)提前备仓,压缩备仓时间。

备仓阶段,占直线工期的工序主要是端头模板的安装。两侧直边墙的挡头模板可以借助绑扎好的钢筋提前安装,该部分不占直线工期。但是,顶拱部位的挡头模板需要在台车就位并调校后借助台车最上层的操作平台进行安装,其占直线工期。其它工序:边模补缝、冷却水管铺设、灌浆管埋设等均可穿插其中进行。边墙挡头模板提前备仓,可节省单仓循环时间。

另外,还可通过取消钢筋过缝、取消矮边墙键槽、取消环向施工缝的凿毛等措施加快备仓速度。

#### (3)增加台车刚度,提高混凝土的入仓速度。

边顶拱采用“钢模台车+泵送”入仓,最初钢模台车面板设计厚度为10 mm,混凝土浇筑上升速度控制在0.5 m/h以内,两侧边墙允许浇筑高差不超过1 m。实施阶段台车面板设计厚度增加至12 mm后,面板背后的肋板加密,使面板刚度增加,混凝土浇筑上升速度可放宽至0.8~1 m/h。

#### (4)调整转弯段台车行走方式。

按照设计方案,台车在转弯段时,先在两节7.5 m台车中间及两端安装楔形模板,使两节台车及楔形模板连接为一个整体进行浇筑。由于单

节台车长度达到7.5 m,两节拼装组合形成一个整体,无法直接在转弯段行走。因此,台车浇筑完一仓后需从中间楔形模板处拆分开,台车分为上下两节分别行走至下一仓浇筑位置,再次进行合拼、连接、紧固、调试工作。照此实施,最顺利的情况下需要7 d一个循环,远超过5 d一个循环的目标。鉴于此,我们总结了以往的工作经验并经过多次试验,最终提出了台车整体在转弯段的行走方案,从而节约了台车中途拆拼和调整面板的时间,大大缩减了台车在转弯段单仓循环的时间。

要使台车整体行走的关键是解决台车四个主驱动同步电机与转弯段内外弧长短不一致的矛盾。为达到此目的,首先取消了内弧上的一台同步驱动电机,其它三台保持不变,台车行走时,外弧上两台同步驱动电机行走速度快于内弧上的一台同步驱动电机,从而产生了自然转弯。但是,这样仅仅是缓解了台车在内外弧上行走的速度匹配问题,而台车车轮与轨道间仍会产生摩擦。对于此,我们把台车下方的行走大梁从中间拆开,解除了两节7.5 m长台车的底部大梁约束,台车行走时,两节7.5 m长台车就会产生微小的调整变形,产生弹性,轮子和轨道就不会硬碰硬的摩擦,从而避免了车轮跳轨或者轮子和轨道的破坏。为了防止台车行走过程中轨道变形移位,在转弯段轨道铺设时,经测量放线、校核、定位后,每隔2 m打一根插筋固定轨道。

经过以上各种方式进行处理后,边顶拱混凝土浇筑单仓循环时间被控制在120 h内。各施工工序时间:混凝土浇筑 $\leq 35$  h,顶拱台车脱模时间24 h,台车行走调校 $\leq 25$  h,备仓及验收 $\leq 35$  h。

