

# 锦屏二级水电站引水隧洞开挖控制测量的探索与实践

李兵

(四川二滩国际工程咨询有限责任公司,四川成都 611130)

摘要:介绍了锦屏二级水电站超长大型引水隧洞开挖控制测量的探索与实践,并对其控制测量进行了一定的理论探讨。

关键词:隧洞控制测量;间隔时段2倍控制测量方法;探索与实践;锦屏二级水电站

中图分类号:TV7;TV523;TV554;TV53+8.4;TV221.1 文献标识码: B 文章编号:1001-2184(2015)增2-0038-04

## 1 概述

锦屏二级水电站利用雅砻江下游河段150 km长大河湾的天然落差,通过四条平行的引水隧洞(单条洞长度约16.67 km),截弯取直,获得水头约310 m,隧洞最大埋深2 525 m,开挖直径为12.4~13 m,工程地质和水文地质条件复杂,被公认为世界上开发难度最大的工程之一。

根据原定的隧洞开挖施工方案,对1#和3#引水隧洞的开挖采用直径12.4 m的大型TBM由东端向西端(即从隧洞下游朝上游方向)掘进与隧洞进口段钻爆开挖洞段贯通;对2#和4#引水隧洞的开挖采用分层钻爆法开挖。锦屏二级水电站引水隧洞开挖具有施工型式多样性及施工工艺复杂性在全国乃至世界均罕见。施工实践证明:1~4#引水隧洞内施工环境恶劣、烟雾粉尘浓度高、排出困难、能见度低且持续时间长、地下涌水量大、岩爆发生量级高且频繁,都印证了锦屏二级水电站的开发难度。

对工程测量来说,在如此罕见、恶劣的自然环境及施工条件下,如何保证开挖控制测量的顺利进行、实现引水隧洞开挖按照合同要求的贯通误差值顺利贯通,如何设计和实施其控制测量方案是工程施工的难点。

## 2 控制测量网型的设计与选用

面对锦屏二级水电站超长大型引水隧洞开挖贯通的控制测量难题,引水隧洞开挖控制测量网的初期设计由施工单位按照闭合导线形式在东引2#施工支洞及1~4#引水隧洞内分段闭合推进

的方式设计,导线的平面和高程测设等级为Ⅱ等。

业主对指导引水隧洞开挖的控制测量方案非常重视,于2008年7月下旬召开了测量专家咨询会,形成了锦屏二级水电站《引水隧洞施工测量控制网设计方案及技术纲要》,即:洞外布置B级GPS平面控制网和一等水准网,洞内在东引2#施工支洞(图1)布设二等精密导线,在1#、3#TBM施工引水隧洞内布置双导线,同时在引水隧洞每掘进3~5 km时加测陀螺方位等技术方案(TBM前进方向由东端向西端掘进),并建议在东端施工支洞Ⅱ等导线的短边处构成大地四边形,以增强导线的图形强度。

初期测量控制网方案及技术纲要对洞外和洞内的控制测量网的设计应该说在理论上是可行的,在方法上是科学的,在技术手段上是先进的,但是,在其实施过程中,遇到了洞内相当恶劣的自然环境和施工环境,地下涌水量大、岩爆等突发因素多且量大,烟雾粉尘浓度高、能见度低且持续时间长等施工干扰,直接造成洞内初期控制测量方案的实施困难重重,主要体现在下述5个方面:

- (1)导线视线通视不畅,有效可视距离短(50~200 m),测量控制点选位难且易被破坏。
- (2)经常无法测出测距,测量资源耗费大、收效小,测量时间难以持续保证。
- (3)测量周期长、效率不高,测量报告不能按施工进度及时跟进提交。
- (4)负责开挖的施工单位多,各单位测量人员技术水平高低不齐以及没有足够的精密控制测量网的观测经验,测量闭合差很难符合要求。

收稿日期:2015-07-20

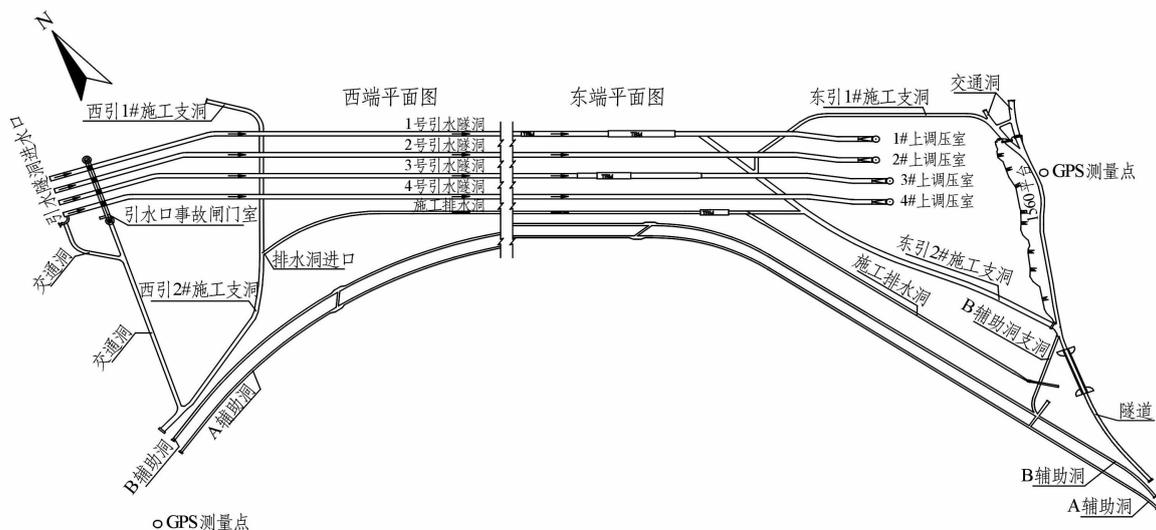


图1 锦屏二级水电站引水隧洞枢纽平面示意图

(5) 平差计算结果难以达到 II 等设计精度的要求。

为了更好地解决实际控制测量中遇到的困难和问题,提高测量效率,保证控制测量及时指导开挖的顺利进行,确保引水隧洞开挖的测量放样质量,监理工程师根据工程施工环境情况,结合测量学理论以及积累的控制测量技术知识和操作经验,通过测量误差分析与计算机模拟研究,创新提出了“间隔时段 2 倍控制测量方法”作为保证锦屏二级水电站引水隧洞开挖工程质量的控制测量方案。

### 3 “间隔时段 2 倍控制测量方法”的测量方式与构想

#### 3.1 “间隔时段 2 倍控制测量方法”的测量方式

“间隔时段 2 倍控制测量方法”的测量方式,即:采用 II 等精密导线,把支导线作为布置控制测量网点的基本形式(对于无连通条件的、相对独立的隧洞以支导线布置为主;对于在各个隧洞之间有横通道连接的隧洞,组成环形闭合导线;对于有开挖支洞的隧洞则组成附合导线),并强调采用不同间隔时段对同一基本线路的 200% 的测量结果延伸推进形成各类控制测量导线。

#### 3.2 “间隔时段 2 倍控制测量方法”的构想

“间隔时段 2 倍控制测量方法”是对传统超长大型隧洞开挖控制测量方法的创新运用,其实是充分尊重各测量元素,而不是过分依赖测量学科中的测量平差计算理论,因为在测绘学科中,精度其实就是单纯的精密度的概念,是测量结果

对其数学期望的离散程度的描述,不涉及真值,不包含准确度的概念,其表述方式就是标准差。

所以,我们认为传统的测绘学科中的精度实际上只是测量成果的随机误差甚至是对部分随机误差特性的描述,更多的是对测量过程的部分精度损失量的估计,而不是对测量成果的绝对误差范围的描述,它更适用于洞外控制测量网或大坝、桥梁等建筑物局部测量控制网的测设以及测量方案的设计等。而超长大型隧洞开挖的洞内控制测量是一个不同于洞外控制测量的测量事件,其不可预见因素和客观要求要比洞外丰富得多。如果要保证隧洞开挖的顺利贯通,首要问题必然是要解决隧洞开挖绝对位置的相对正确性问题(在假设洞外控制测量网可靠的情况下),这在实际测量工作中唯一可控和能够做到的就是对各测量元素的精细追求,在隧洞开挖未贯通前,测量误差精度的分析只是停留在纸上的理论期望,唯有在控制测量元素可靠的情况下这个纸上的理论期望才会实现,而“间隔时段 2 倍控制测量方法”就是我们尝试并规范解决这个问题的一种方法。

### 4 “间隔时段 2 倍控制测量方法”的优越性

实践证明,“间隔时段 2 倍控制测量方法”与上述初期按传统思维设计的洞内控制测量方案比较相对较灵活、适用、具有较强的可操作性,总结起来有下述优点:

(1) 可减少埋设测量控制墩标的个数为总数的 40% ~ 50%,达到了节省测量资源,减少土建成本及测量工作量、提高测量效率、有利于控制测

量及时跟进开挖进度的目的。

(2)有利于观测经验不足的测量人员操作,提高测量的成功率,及时提交测量报告,及时跟进施工放样的进度需要,从而保证开挖质量。

(3)由于支导线不同于双导线或其它网型导线,只考虑单点通视,因此,在狭小的引水隧洞内测量控制点的选位相对较灵活,有利于规避洞内的施工干扰,在不影响施工的情况下仍能正常开展测量工作。

(4)出现测量问题时,通过两次间隔时段测量结果的对比容易发现问题,返工过程简单,分析问题的元素单调,具有针对性。

(5)由于采用不同间隔时段对同一线路进行200%的测量,容易发现测量控制点的收敛和位移,进而及时排除不可靠的测量点或测量结果,进行动态复测纠正。

(6)不过分进行测量平差计算,而是更加强调整各测量元素的准确度,并把握好测量过程中的

误差分析,因此其计算简单。

## 5 “间隔时段2倍控制测量方法”的实际运用与技术规范

锦屏二级水电站引水隧洞开挖的控制测量对“间隔时段2倍控制测量方法”实践与技术规范的主要内容有以下几个方面。

### 5.1 贯通误差

锦屏二级水电站引水隧洞开挖合同对贯通误差的要求见表1。

表1 合同要求的贯通测量限差表

相向开挖长度 (含支洞在内) /km	限差 /mm		
	横向	纵向	竖向
10~20	±250	±250	±50

### 5.2 贯通误差的分配

锦屏二级水电站引水隧洞开挖“间隔时段2倍控制测量方法”的贯通误差分配原则依据施工合同制定,详见表2。

表2 贯通中误差分配原则表

相向开挖长度 (含支洞在内) /km	中误差 /mm								
	横向			纵向			竖向		
	洞外	洞内	贯通面	洞外	洞内	贯通面	洞外	洞内	贯通面
10~20	±50	±150	±250	±50	±150	±250	±10	±30	±50

### 5.3 测量控制点的形式

“间隔时段2倍控制测量方法”对测量控制点的形式要求有采用强制对中板地面混凝土墩标和侧墙混凝土墩标两种形式埋设。实践证明:采用强制对中板混凝土墩标,既能有效保证测量仪器和棱镜的对中精度,又能提高观测数据的可靠性,是开挖顺利贯通控制测量较好的保证措施之一,对超长大型隧洞的开挖尤为重要。

### 5.4 贯通误差的估算

锦屏二级水电站“间隔时段2倍控制测量方法”贯通误差的估算采用一端开挖独头掘进的方式按支导线至贯通面,并初步确定满足合同要求的贯通误差值对导线平均边长度的要求。

贯通误差估算是隧洞开挖贯通前控制测量方案设计中的一项重要的技术保证措施,其既可以预估“间隔时段2倍控制测量方法”在现有条件下能否达到和满足合同要求的引水隧洞开挖的贯通精度,又可以逆向验证所选用的测量技术指标的合理性。

贯通误差估算的具体算法和公式可参见《水电水利工程施工测量规范》DL/T5173—2003第112页中的贯通误差估算事例。

### 5.5 确定“间隔时段2倍控制测量方法”的间隔时间

对同一导线线路进行间隔时段200%独立测量时,两次测量间隔时间的确定主要根据施工进度、洞内环境、施工干扰、提交测量报告的时间等因素确定。在锦屏二级水电站的实践中有1d、3d、7d甚至15d或1个月等时间间隔。

实践证明:时间间隔的确定是保证控制测量成果可靠性的又一重要因素。时间间隔过短,测量成果相对较易闭合,但不利于及时发现因沉陷、收敛、位移、施工扰动等因素带来的测量控制点的变化;时间间隔过长,虽然易于发现测量控制点的位置收敛和变化,但往往又会因为上述因素的影响而使得测量成果不易闭合,增加测量时间,不利于导线的及时延伸跟进施工进度需要。因此,根据实际施工情况选用适当的间隔时间进行第二

次测量很有必要。

5.6 测量技术指标及要求

锦屏二级水电站引水隧洞开挖“间隔时段 2 (表 3~7)。

表 3 三角高程导线测量技术要求表

等级	仪器标称精度		斜距			天顶距		仪器高棱镜高丈量精度/mm	对向观测高差较差/mm	分段导线间隔时段测量较差/mm
	测距精度 mm/km	测角精度 /"	测回数	测回差 /mm	测回数	指标差较差/"	测回差 /"			
II 等	±2	±1	4	3	6	8	4	±2	±25√S	±12√L
	±5	±2	4	7	6					

注:(1)S 为斜距,km;L 为分段导线线路长度,km。斜距观测一测回为照准一次,测距离 4 次;(2)天顶距观测采用中丝法进行;(3)√L 表示 L 的平方根。

表 4 水平角方向观测法技术要求表

等级	水平角测回数		测角中误差 /"	归零差 /"	一测回中 2C 较差 /"	同方向值各测回互差 /"
	1"级	2"级				
II 等	9	12	±1.8	6	9	6

注:(1)水平角观测采用左角和右角按方向观测法进行;(2)左角+右角-360°的差值不应超过测角中误差的 2 倍。

表 5 水准测量技术要求表

等级	偶然中误差 MΔ	全中误差 mw (mm/km)	仪器标称精度	水准标尺类型	观测方法	观测顺序		往返测较差 平丘地
						往测	返测	
II 等	±1	±2	±0.5 ±1	因瓦尺	测微法	奇数站: 后前前后 偶数站: 前前后后	奇数站: 前后后前 偶数站: 后前前后	±4√k

注:(1)k 为水准线路长度,km;√k 表示 k 的平方根;(2)仪器标称精度为每 km 水准测量高差中数的偶然中误差。

表 6 全站仪测距作业技术要求表

等级	测距限差			气象数据			
	一测回读数较差/mm	测回间较差/mm	往返或光段较差/mm	温度最小读数/℃	气压最小读数/Pa	测定时间间隔	数据取用
II 等	2	3	2 × √2(a + bS)	0.2	50	每边观测始末	每边两端平均值

注:(1)a 为固定误差,mm;b 为比例误差,mm/km;S 为斜距,km;(2)测距时可直接将温度、气压输入全站仪进行测距气象改正。

表 7 测量控制内业计算数字取位要求表

等级	方向观测值、方向改正数、方位角值 /"	边长值、长度改正数、坐标值 /mm
II 等	0.01	0.1

5.7 外业观测数据的判定与取用

“间隔时段 2 倍控制测量方法”除了按照表 3~7 的测量技术指标和要求判定外业观测数据的合理性外,还依据对间隔时段两次独立观测的同一路段的同一测量点的水平角、导线边长、坐标和高程的对比结果,从而进一步判定计算结果的可靠性并决定是否复测或取用。在锦屏二级水电站各引水隧洞开挖控制测量的实践运用中是按照下述标准执行的:

(1)间隔时段两次独立测得的同一测量点的水平角较差应不大于 ±4 s。

(2)间隔时段两次独立测得的同一导线边的相对精度视导线边的长短而定,应达到 1/5 万 ~

倍控制测量方法”主要的测量技术指标和要求是根据测量理论和实践经验并参考测量规范制定的

1/20 万。

(3)间隔时段两次独立测得的同一测量点的三角高程较差应不大于 ±12√L, mm。

(4)三角高程与水准测量高程的较差应不大于 ±20√L, mm。

如果“间隔时段 2 倍控制测量方法”测得的分段测量结果不能满足上述 4 条的要求,则必须进行技术分析并找出原因,还需对单一测量元素进行有针对性的复测,直至问题解决。

5.8 计算

“间隔时段 2 倍控制测量方法”的主要测量计算步骤包括:

(1)斜距计算,考虑加常数和乘常数改正。

(2)边长投影计算,边长投影至测区平均高程面。

(下转第 54 页)

相比较于一般洞段,边顶拱洞段主要存以下特点:包括(1)引(4)13+485.1~16+300洞段最早开始浇筑,前期浇筑混凝土配合比还不够成熟,水泥采用了早强水泥,粗骨料裹粉较严重。(2)在进行混凝土浇筑时,周边洞段还在进行开挖施工,不可避免地会产生一些爆破震动;同时,作为公共交通通道,重型机械通行频繁,引起震动,这些均可能会诱发裂缝的产生与发展。(3)开挖完成12个月后才开始浇筑混凝土,围岩的变形收敛还没有完成,也可能造成裂缝的发展。(4)边顶拱先行没有形成完整的混凝土衬砌拱圈,边顶拱混凝土自身重力荷载加速裂缝的发展。

在后期引(4)9+969.8~11+016.1段边顶拱先行衬砌混凝土施工时,要求承包商将底板及小边墙混凝土施工及时跟上,形成完整的拱圈。

(上接第41页)

(3)三角高程计算,考虑球差、气差对高差的影响。

(4)平面坐标计算。

(5)水准高程计算。既可以用专业程序计算,也可以采用计算器、Excel电子表格等计算。

### 5.9 确定计算结果

“间隔时段2倍控制测量方法”测量计算的两组导线独立坐标值的较差不得大于导线端点横向中误差的 $2\sqrt{2}$ ,mm;合格后取两组坐标的平均值

同时,开挖完成时间长,周边其他施工基本完成,相应的裂缝发展水平同普通洞段相近并略小。

## 6 结语

在锦屏二级水电站4#引水隧洞衬砌施工中,对于先边顶拱后底板施工这一浇筑顺序,采取合理的管控措施,针对重点部位、工序进行加强控制后,可以确保工程质量。同时,在边顶拱混凝土施工过程中,也能解决交通通行问题,对工程施工组织管理提供了解决交通的新方案,既保证了整个引水隧洞群施工组织的正常进行,同时也保证了4#引水隧洞按期实现充水目标。

作者简介:

高红松(1986-),男,四川眉山人,助理工程师,从事水利水电工程建设监理工作。

(责任编辑:李燕辉)

为最终成果。高程成果的取用原则上以水准高程为主,三角高程检核;三角高程取间隔时段两次测量结果的算术平均值作为最终计算结果。

## 6 “间隔时段2倍控制测量方法”在锦屏二级水电站中运用得到的结论

锦屏二级水电站引水隧洞开挖的控制测量,从2008年9月下旬开始实践运用“间隔时段2倍控制测量方法”,至2011年11月下旬1~4#引水隧洞开挖的全线贯通,取得了较好的贯通效果,实测贯通误差数据见表8。

表8 实测贯通误差值表

隧洞号	1#引水隧洞			2#引水隧洞			3#引水隧洞			4#引水隧洞			贯通导线全长/km
	横向/mm	纵向/mm	竖向/mm										
1#	197	96	31										18.2
2#				210	65	44							18.2
3#							168	52	13				18.1
4#										136	29	16	18.1

由表8可见,实测的1#、2#、3#、4#引水隧洞开挖贯通误差值全部满足锦屏二级水电站合同对引水隧洞开挖贯通精度的要求(合同要求见表1)。因此,实践运用验证了“间隔时段2倍控制测量方法”对超长大型引水隧洞开挖控制测量的适用性和可靠性。

尽管“间隔时段2倍控制测量方法”在锦屏

二级水电站超长大型引水隧洞开挖的控制测量中取得了成功,其操作细则与技术规范仍有待进一步提高与完善。

作者简介:

李兵(1963-),男,四川成都人,工程师,从事水利水电工程建设监理工作。

(责任编辑:李燕辉)