

# 浅析驮英水库超长隧洞精准贯通要点

武 义

中国水电建设集团十五工程局有限公司 陕西 西安 710065

**【摘 要】**：隧洞工程是施工中的重难点任务，其不可预见因素较多，施工条件受限，施工难度大。对于长隧洞一般采取分段施工，在隧洞中部增加支洞，缩短施工工期，为此采用 GNSS 进行洞外控制网布设，建立首级控制网，统一坐标系。再由首级控制网进行分级布控，将地面控制网引入隧洞，确保隧洞精准贯通。

**【关键词】**：超长隧道；精准；要点

DOI:10.12417/2705-0998.25.19.028

## 1 工程概况

本工程位于广西崇左市宁明县那堪乡垌中村上上游约 6km 的珠江流域西江水系明江支流公安河上游河段。隧洞工程处于十万大山末端，地形复杂，植被茂密作业环境异常恶劣，个隧洞口条件有限，控制网布设困难。无法采用全站仪、经纬仪等一般测量仪器进行控制网测量，只能采用 GNSS 进行静态控制网布设施测。

隧洞工程全长 16km，已知控制点 11 个（平面三等，高程二等共用同一点位），由于外界因素影响，扰动控制点 3 个，有效控制点 8 个。无法满足施工要求，因此我部采用 GNSS 进行三等平面控制网测量及水准仪进行三等水准网测量。

## 2 隧道工程控制测量内容

### 2.1 洞外总体概况

由于工程地处亚热带地区，植被茂密，且该地区海拔较低，平均海拔 200m，对 GNSS 控制网测量有一定影响。为减少外界环境对施测控制网的干扰，对控制网的网形进行了优化，结合与各施工作业面的距离及相关控制点的形成的角度进行布置。

### 2.2 控制网布设形式

根据《SL 197-2013 水利水电工程测量规范》要求，其相邻点最小距离不宜小于平均距离的 1/3，最大距离不宜大于平均间距的 3 倍；各控制点至少与两个及以上控制点通视，其控制网施测采用边连式。各洞口控制点按至少三个进行布置，且各个控制点间相互通视条件良好，控制点坚实牢固，不宜被扰动。

### 2.3 GNSS 控制网施测

GPS 施测三等控制网时应满足《水利水电工程施工测量规范》SL52—2015 中要求：表 2-1 GNSS 测量作业的基本技术要求

项目		等级
		三等
静态测量	卫星高度角 (°)	≥15

同时观测有效卫星数	≥4
观测时段时间 (min)	≥60
观测时段数	≥1.6
两次观测的数据采样间隔 (S)	10~30
PDOP 或 GDOP	≤6

根据《GBT18314-2009 全球定位系统（GPS）测量规范》要求，GPS 测量前按要求进行仪器常规检校和光学对中器检校。GPS 作业时天线定向标志线指向正北；对中误差小于 1mm，每个时段观测前、后各量天线高一次，两次较差值小于 2mm，取均值作为最后成果。观测过程中仪器 10m 范围内严禁使用对讲机、手机等电子设备。在同一时段观测过程中禁止出现以下操作：接收机重新启动，进行自测试，改变卫星截止高度角，改变数据采样间隔，改变天线位置，按动关闭文件和删除文件等功能键。

### 2.4 基线解算

基线解算采用广播星历，采用 HGO 软件按静态相对定位模式进行。外业观测结束后首先对观测基线进行处理和质量分析，检查基线质量是否符合规范要求。删除工作状态不佳的卫星数据，在卫星残差图上观察某个卫星在某段时间内的残差是否过大且有明显的系统误差，删除该时间段，不让其参与平差。对所有基线进行解算并进行精度分析，约束平差时对基线进行选取，形成独立环进行平差。

基线向量独立环闭合差是检验基线向量网质量的一项重要技术指标，当满足限差要求时，说明组成基线向量网的所有基线解算质量合格、成果可靠。按《水利水电工程测量规范》要求 GPS 控制基线向量网所有独立环闭合差应符合下式规定：

①同一时段观测值的数据剔除率宜小于 10%；

②有若干条独立基线边组成的独立环和附和路线各坐标分量 (W<sub>x</sub>, W<sub>y</sub>, W<sub>z</sub>) 及全长 W<sub>s</sub> 闭合差应满足下式的规定：

$$W_x \leq 3\sqrt{n}\sigma, W_y \leq 3\sqrt{n}\sigma$$

$$W_z \leq 3\sqrt{n}\sigma, W_s \leq 3\sqrt{3n}\sigma$$

式中：n--闭合环边数

$W_x$ 、 $W_y$ 、 $W_z$ --坐标分量闭合差

$W$ --环的全长闭合差

—标准差,  $\sigma = \sqrt{a^2 + (b * d)^2}$ ,  $a$  为固定误差,  $b$  为比

例误差,  $d$  为弦长、单位为  $km$ , 其中  $a$  取  $10mm$ ,  $b$  取  $1ppm$ 。

由平差报告中附后的基线向量独立环闭合差统计数据可知: 平面控制网测量基线向量所有独立环闭合差均满足限差要求, 所有基线质量合格。

重复基线差按《水利水电工程测量规范》要求, 同一边不同观测时段基线较差应满足  $ds \leq 2\sqrt{2} \sigma mm$ 。

式中:  $ds$ --基线较差,  $mm$ ;

$\sigma$ --相应基线长度中误差,  $mm$ ;

由平差报告的重复观测基线较差计算表可知: 平面控制网测量所有重复观测基线向量较差均满足规范限差要求, 基线解算成果可靠。

## 2.5 数据平差

平差软件采用 HGO 后处理软件进行平差处理, 平差数据采用基线向量的双差固定解。

### 2.5.1 三维无约束平差

首先对所需的基线解进行选择, 形成的基线向量文件, 即三维向量网平差所需要的基线向量, 进行 GPS 三维向量网的无约束平差, 作用是在西安 1980 坐标系下进行三维向量网平差, 检查 GPS 基线向量网自身的内符合精度, 并剔除含有粗差的基线边。对经检验的合格基线, 选取独立基线构成 GPS 基线向量网, 进行网的平差计算, 且要满足《GBT18314-2009 全球定位系统 (GPS) 测量规范》规定:

GPS 网三维无约束平差中基线向量各分量的改正数绝对值应满足式:

$$V\Delta x \leq 3\sigma$$

$$V\Delta y \leq 3\sigma$$

$$V\Delta z \leq 3\sigma$$

$\sigma$ —标准差,  $\sigma = \sqrt{a^2 + (b * d)^2}$ ,  $a$  为固定误差,  $b$

为比例误差,  $d$  为弦长、单位为  $km$ , 其中  $a$  取  $5mm$ ,  $b$  取  $1ppm$ 。

由平面控制网三维无约束平差精度统计数据可知: 异步环分量闭合差限差  $w_x \setminus w_y \setminus w_z \setminus w$  均满足要求, 无约束平差基线改正数绝对值不大于  $10.0mm (3\sigma)$ , 满足要求, 加密点平面控制网的基线向量自身的内符合精度高, 基线向量没有明显系统误差和粗差, 基线向量的质量是可靠的, 在此基础上可以进行二维约束平差。

### 2.5.2 二维约束平差

三维无约束平差后确认数据精度满足要求后, 即可进行二维约束平差, 平面控制网附和到附近的控制点上, 以已知控制点  $D1$ 、 $D2$ 、 $D4$ 、 $D5$ 、 $D11$ 、 $D12$  坐标为起算数据, 对平面控制网进行二维约束平差。

二维约束平差后, 加密点平面控制网, 控制点间基线最弱边精度为  $1/61466$ , 基线向量精度完全满足《水利水电工程测量规范》中平面控制最弱边相对中误差  $\leq 1/40000$  的精度要求。

## 3 洞内分级控制

### 3.1 平面控制布设

洞内由洞外首级控制网进行引测, 从而建立洞内控制网。该项目是输水工程隧洞, 洞内空间狭小、地质条件复杂、出水量大、通视条件差, 对控制网的建立影响较大。控制点的间距、角度、埋设, 严格执行《SL 52-2015 水利水电施工测量规范》的三等控制网布设要求进行布设及制作。

### 3.2 洞内控制网施测

#### 3.2.1 平面观测

洞内与洞外平面控制网联测, 使用徕卡(TS09PLUS)1" 全站仪进行平面闭合导线测量。控制网平均边长  $400m$ , 测距仪等级不小于 II 级, 边长往返各两测绘, 水平角 6 测回, 天顶距 3 测回。

在观测过程中, 现场计算各项限差, 并检验是否满足规范要求, 对超限观测值按照规范要求进行重测或返测。

半测回归零差或零方向  $2C$  差超限时, 该测回应立即重测, 且改组数据不计入有效测回数中。同测回  $2C$  较差或各测回同一方向值较差超限, 可重测超限方向 (应连测原零方向)。一测回中, 中重测方向数超过测站方向总数的  $1/3$  时, 该测回重测。因测错方向、读数、记错、气泡中心位置偏移超过一格或个别方向临时被挡, 均可随时重测。重测应在全部测回数测完后进行。当重测测回数超过该站测绘总数的  $1/3$  时, 该站应全部重测。

#### 3.2.2 控制网平差

根据三等控制网闭合导线要求, 方位角闭合差限差  $\pm 3.6 \sqrt{n}''$ , 测角中误差限差  $\pm 1.8''$ , 测距中误差限差  $\pm 5mm$ , 全长相对闭合差限差  $1: 55000$ 。

导线各项限差满足要求后进行平差计算,  $n$  边形闭合导线内角和理论闭合差为:  $\Sigma \beta_{理} = (n-2) * 180^\circ$  ( $n$  为边导线边数)

由于观测角不可避免地包含有测量误差, 实测的内角之和  $\Sigma \beta_{测}$  不等于理论值  $[\Sigma \beta_{理} = (n-2) * 180^\circ]$ , 而产生角度闭合差 ( $f_\beta$ ):

$$f\beta = \sum \beta_{\text{测}} - \sum \beta_{\text{理}}$$

三等导线角度闭合差 $f\beta$ 允为 $\pm 3.6\sqrt{n}''$ ，若 $f\beta > f\beta_{\text{允}}$ 则说明所测角度不符合要求，应重新检测导线各转角观测值是否正确。若 $f\beta \leq f\beta_{\text{允}}$ ，则进行角度闭合差的调整。由于各转角是等精度观测的，可按“闭合差反符号平均分配”的原则，计算个角度改正数 $v_i$ 。 $v_i = -f\beta/n$

然后将 $v_i$ 加至各观测角上，求出改正后的角值。

$$\beta_i \text{改} = \beta_i + v_i$$

改正后的内角之和应为： $f\beta = \sum \beta_i \text{改} - \sum \beta_{\text{理}} = 0$

修正内角后进行方位角计算，计算每个点的坐标增量 $\Delta X$ ， $\Delta Y$ ，并进行改正计算，从而计算出平差后坐标。

### 3.3 高程控制

#### 3.3.1 高程控制网复测作业方法

按照国家三等水准测量要求施测，使用精度为0.3mm/km电子水准仪（天宝DINI03）配3m钢瓦条码水准尺及尺垫。水准仪与水准尺在使用前校检合格后投入实际使用。采用单路线往返观测，一条路线的往返测使用同一类型仪器和转点尺垫，沿同一路线进行，每一测段完成后即时进行往返测高差不符值检验。观测时，按奇数站后-前-前-后、偶数站前-后-后-前的顺序进行，每一测段均为偶数测站。一组往返测安排在不同的时间段进行；由往测转向返测时，互换前后尺再进行观测；晴天观测时应给仪器打伞，避免阳光直射；扶尺时应借助尺撑，使标尺上的气泡居中，标尺垂直。

#### 3.3.2 高程控制网复测技术要求

根据《国家三、四等水准测量规范》GB/T 12897—2006中要求，三等水准测量主要限差要求见表3-1。

表 3-1 三等水准测量主要限差要求（mm）

水准测量等级	每千米水准测量偶然中误差	限差		
		检测已测段高差之差	测段、区段、路线往返测高差不符值	
			平原	山区
三等	$\leq 3.0$	$\pm 20\sqrt{R}$	$\pm 12\sqrt{K}$	$\pm 15\sqrt{N}$

注：表中 $R$ 为检测测段长度， $L$ 为附和路线长度， $K$ 为测段、区段或线路长度； $N$ 为测站数。

观测成果的重测和取舍按《国家三、四等水准测量规范》（GB/T 12898-2009）有关要求应符合以下标准：

①凡经检验超出规定限差均需重测；②往返测高差不符值

超限时，首先对可靠性较小的往测或返测进行整段重测；③2组单程观测高差不符值超限时，先重测一个单程，并与原测结果中符合限差的一个单程取中数作为采用值；当重测结果与原测2个单程均符合限差要求时，则取3个单程结果的中数作为采用值；当重测结果与原测2个单程结果均超限时，则进行原因分析，组织重测2个单程，直到符合限差要求为止；④当2组单程观测高差不符值计算的每千米水准测量的偶然中误差 $M_{\Delta}$ 超限时，重测测段高差不符值较大的测段，直到符合要求为止。

#### 3.3.3 高程数据平差处理

三等水准每天外业观测结束后，均需及时将观测数据传输至电脑，利用随机软件进行数据传输和预处理，并进行数据分离，对水准测量进行高差不符值检验，并计算测段间高差平均值，每一测段的往返测高差不符值均需满足《国家三、四等水准测量规范》GB/T12898-2009规定的限差要求，根据全部测段往返测不符值计算的每千米高差偶然中误差须满足小于3mm的要求。

水准网平差采用武汉大学的“科傻地面控制网测量数据处理系统”（COSAWIN），进行严密平差。

## 4 控制网建立完成后工作内容

### 4.1 控制网的保护

平面及高程控制网建立完成后，对控制点进行标识并做相应的保护措施。定期进行控制网复测，一般间隔不少于1年进行一次控制网复核，对于偏差较大的控制点进行二次复核，确认是否扰动并及时进行补点复测，使控制网区域内控制点满足相应的规范要求。

### 4.2 资料上报

平面及高程控制点测量计算完成后，及时整理汇总，并履行内部审核制度，确认无误后报相关单位进行审核备案，经有关单位批准后，控制点方可投入使用。

## 5 结语

针对驮英水库16km隧洞，采用洞外GNSS与洞内闭合导线相结合进行控制网的建立。充分发挥了GNSS的技术应用和高精度全站仪、水准仪测量精度，为超长隧洞的贯通奠定了一定基础。也为今后GNSS在低海拔灌木林的作业提供一定的可行性数据。该隧洞的精准贯通验证了控制网的在不同空间的转换可以达到一定的精度，对后期应用提供一定见解。

## 参考文献：

- [1] 刘攀峰.特长隧道独立控制网的建立及贯通误差预计分析.建筑科学,2025-08.
- [2] 王新尧.水利工程长隧洞贯通测量方法研究.建筑设计及理论,2018-12.