

双护盾TBM工法长距离引水隧洞平面控制测量技术研究

李开俊

中铁二局集团有限公司

摘要: 随着世界对水资源的深度开发,越来越多的引水隧道项目不断推进,由于引水隧道多处于跨水系通水地区,其距离长、施工环境复杂的特点较为突出。双护盾TBM(隧道掘进机)工法作为一种先进的隧道开挖技术,被广泛应用于引水隧洞的施工中,在实际应用中,双护盾TBM工法引水隧洞的控制测量技术极为重要。本文主要依托尼泊尔巴瑞巴贝引水隧道工程,对双护盾TBM工法长距离引水隧洞的施工控制测量技术的优化和应用展开分析。

关键词: 双护盾TBM工法; 引水隧洞控制测量技术; 优化与应用

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6288.2023.10.240

一、双护盾TBM工法的概念

双护盾TBM工法是一种隧道掘进机(TBM)施工方法,其特点在于设有双重反作用力系统,即撑靴盾和尾盾。常规地质环境下,由撑靴盾提供掘进反作用力,特殊地质环境下由尾盾提供掘进反作用力,这种设计使得双护盾TBM工法能够适应不同地质条件下的隧道施工,提高施工的安全性和效率^[1]。

二、工程简介

尼泊尔巴瑞巴贝引水隧道工程项目TBM隧道全长12.2km,采用TBM掘进机单向掘进工法施工。隧道平面线型为:直线+圆曲线+直线+圆曲线+直线,圆曲线半径分别为700m和1050m,隧道设计纵坡从TBM入口至出口的顺序分别为+6.6%、+3%和+3.1%,工程设计要求隧道横向贯通误差为±500mm,垂直贯通误差为±100mm,与现行的SL197-2013版《水利水电工程测量规范》中的二等控制测量精度等级接近。

由于TBM工法属于单向掘进工法,且隧道长度为12.2km,表明隧道的平面控制网中误差的精度比普通“分段贯通”工法隧道平面控制网中误差精度高出一倍。

尼泊尔引水隧道工程项目TBM隧道衬砌成形的内径为4.2m。TBM隧道掘进施工期间,施工工序循环紧凑;洞内水平运输车辆、通风管道占用空间大;设备维修保养产生的烟尘大;隧道内温度及湿度差异大;这些因素在无形中影响着控制测量的精度。针对TBM工法的这些特点,开展长距离TBM工法隧道控制测量技术研究,显得尤为重要。

三、平面控制测量参数设计

(一) 隧道内导线贯通估算

尼泊尔巴瑞巴贝引水隧道全长12.2Km,隧道设计横向贯通误差为±500mm,规模属于该国大型工程。根据我国2015年8月15日颁布实施的规范SL52-2015《水利水电工程施工测量规范》中关于平面控制测量等级的划分标准,尼泊尔巴瑞巴贝引水隧道工程的首级平面控制网应按照国家二等平面控制网的标准执行。

隧道内导线贯通误差估算公式如下:

$$m_{Y\beta} = \pm \frac{m_{\beta}}{\rho''} \sqrt{\sum R_{X_i}^2}$$

$$m_{YL} = \pm \frac{m_L}{L} \sqrt{\sum d_{Y_i}^2}$$

$$M_Y = \pm \sqrt{\frac{m_{X_i}^2 + m_{Y_L}^2}{n_g}}$$

式中: $m_{Y\beta}$: 由于测角中误差所产生的在贯通面上的横向中误差,单位:m; m_{β} : 测角中误差,单位:"; ρ'' : 206265"; $R_{X_i}^2$: 导线点至贯通面的距离,单位:m; m_{YL} : 由于测边中误差所产生的在贯通面上的横向中误差,单位:m; $\frac{m_L}{L}$: 导线边相对中误差; $d_{Y_i}^2$: 导线边在贯通面上的投影长度,单位:m; M_Y : 洞内导线测量在贯通面上所产生的总的横向中误差,单位:m; n_g : 导线组数。

根据隧道内导线贯通误差估算公式,计算所得的贯通误差估算值为±438mm,满足设计贯通误差±500mm。

(二) 进洞导线参数设计

洞外GNSS平面控制网的布设,充分考虑了项目洞口联系边方位角中误差小于0.8"的要求。洞外GNSS平面控制网的平均边长为964.8m,洞口联系边的平均边长为1495.8m。洞外GNSS平面控制网的网形,隧道始发端选用两个平面稳定性最强的三角形组成,隧道接收端由一个三角形组成,详见下图。

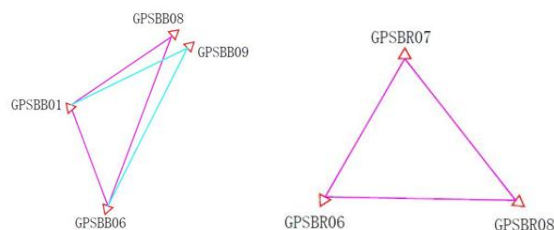


图 始发端GNSS控制网 图 接收端GNSS控制网

洞外GNSS平面控制网点均为地面强制对中点,强制对点为钢筋混凝土结构,底部尺寸为1000mm×1000mm,顶部尺寸为400mm×400mm,整体高度为1.8m,露出地面部分为1.2m,嵌入地下部分为0.6m,如下图所示。

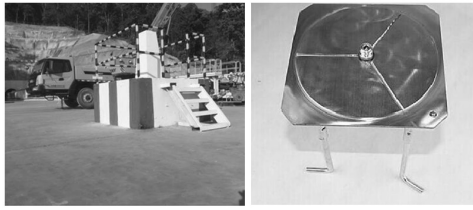


图 地面强制对中点外观

洞外独立GNSS平面控制网，选用Everest作为参考椭球，投影方式选择GNSS平面控制测量中的Mercator projection，投影高程选择隧道中部设计流水面高程430.000m。

独立坐标系的参考椭球参数确定完以后，结合水利水电工程测量规范中二等GNSS大地平面控制网技术标准，确认GNSS平面控制网外业测量及平差计算所需的参数，详见下表。

表 GNSS平面控制网主要技术参数

固定误差a (mm)	比例误差系数b (mm/km)	相邻点边长相 对中误差	洞口联系边的方 向中误差(″)
≤10	≤2	1/150000	0.8

控制网基线长度中误差计算公式为： $\delta = \sqrt{a^2 + (b \cdot d)^2}$ 。其中“d”为基线或环的平均边长。

洞口联系边的方向中误差选择0.8″的主要原因有两点：第一点，洞口联系边的方向中误差对于洞内控制测量精度影响大；第二点，洞口联系边的方向中误差对于隧道贯通精度的影响较大，且项目承包合同中对隧道贯通精度的要求较高；综合以上两个方面的原因，最终选定洞口联系边的方向中误差为0.8″。

(三) 洞内控制网布设

洞内平面控制网的布设，紧跟隧道的掘进进度，隧道每掘进400m，加密一组洞内平面控制网点。洞内平面控制网为等边直伸形支导线网，导线网平均边长为300m（隧道起始段及贯通段的圆曲线范围内平均边长为180m），每组导线点分布于隧道的左右两侧，项目共计布设有38组洞内平面控制网点。洞内导线点均为强制对中点，导线点距离衬砌面0.5m，网点采用的是国内暗挖隧道专利产品。洞内平面控制网点布设时，须远离渗漏水地段、远离高压电变频设备、与隧道循环水管道保持一定距离。洞内平面控制网示意图如下图所示。

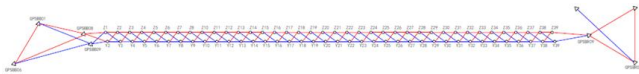


图 洞内平面控制网示意图

洞内平面控制网的参数设计，充分与洞外GNSS平面控制网参数相协调，结合隧道的贯通精度，参照水利水电工程测量规范技术标准，最终确定如下。

表 洞内平面控制网参数设计值

边长 (m)	导线全长相 对闭合差	测角中误 差(″)	方位角闭合差 (″)	DJ1全站仪 测回数
200~400	1/110000	±1	±2√n	9

(四) 导线测量实施细则

项目导线测量采用Leica TS15A R400+型全站仪，配备多测回测角系统，导线测量过程中的按照以下要求全

过程执行。

(1) 导线测量采用全圆测回法进行观测，观测测回数9，观测过程中的各项指标差均按照二等导线的标准执行。测角过程中应遵循导线测量的基本原则，即为：正镜顺时针转动水平度盘，倒镜逆时针转动水平度盘。

(2) 单个测站在观测开始前和观测结束后，必须检查仪器和棱镜的对中整平情况。

(3) 单个测站，每个测回都需要测量水平角、竖直角和斜距。

(4) 测量过程中，测站和观测点上的人员均采用对讲机进行联系。

(5) 测量过程中，TBM停止掘进。

(6) 每次测量成果均采用平差软件进行严密平差。

四、作业过程中提高测量精度的技术措施

(一) 测量前的技术准备

(1) 控制测量工作开始前，对所有参与测量的技术人员进行专门的技术培训，包括对中整平，仪器各项性能指标等，让所有参与人员认识到测量工作的重要性，培养测量人员严谨的工作态度和高度责任心。

(2) 用于测量的仪器，以及测量用的配套设备进行一次系统性的人工校准，保证仪器的使用性能处于最佳状态，避免由于仪器自身的偏差对测量结果造成一定程度的影响。

(3) 各测量点位稳定性检查，主要检查各个强制对中点的连接杆件是否牢固，有无出现松动、锈蚀、破坏或变形等。

(4) 排除通视干扰源：项目地处尼泊尔国家森林公园（苏尔凯特国家森林公园）范围内，树木茂密，杂草丛生。控制测量开始前，测量人员需对影响测点间通视条件的干扰源逐一清除，包括树枝、杂草等，减少外部环境的影响。

(5) 消除洞内渗漏水点，是为了减少导线测量过程中，全站仪测距激光在不同介质中传递时间不同导致的误差影响。呈线状的漏水点必须清除，清除方式可选用引排、堵水等方式。

(二) 仪器设备的优化

(1) 长距离独头掘进隧道的横向贯通误差主要受测角误差的影响，所以必须配备高精度的测角仪器，项目选用了Leica TS15A R400型全站仪，标称测角精度±1″通，测距精度±2ppm，并在仪器操作系统中加载多测回测角功能。Leica多测回测角功能可以实现仪器自动搜索目标的功能，可以减少由于观测人员的视准误差导致的测角误差累计。同时，多测回测角系统可以人为设定观测限差，当测回间同一方向观测角度超出规范标准时，仪器可以实现自动识别，并增加测回数。

(2) 洞内平面控制网点均采用强制对中观测台。强制对中观测台可以从一定程度上解决因视准误差的不同导致的对中误差，减少对中误差的累计。

(三) 其他技术措施

(1) 进洞边的高差：隧道进口圆心设计标高为411.983，洞口点GPSBB08，GPSBB09点高程分别为

411.5815和411.5743, GPSBB06高程为405.0842, 隧道出口设计圆心标高为452.172, 平面控制测量投影面高程按照隧道中部高程430进行设计。选择430作为控制测量投影面的原因, 主要是为了减少由于垂线偏差对观测结果的影响。垂线偏差对观测方向的影响公式如下

$$\delta = -(\xi'' \sin A_{12} - \eta'' \cos A_{12}) \tan \alpha_{12}$$

式中: ξ 和 η 为测站垂线偏差的子午分量和卯酉分量;

A_{12} 照准方向的方位角

α_{12} 为找准点的高度角

通过上表可以看出, 垂直角基本接近 90° , 垂线偏

点号	X(m)	Y(m)	Z(m)	边长(m)	照准点高度角(° ' ")
GPSBB08	3137970.6500	570831.3804	411.5815	1495.3573	89 45 06
GPSBB06	3136621.8628	570185.7283	405.0842		
GPSBB09	3137971.1452	570832.0374	411.5743	1496.0877	89 45 04

差的影响相对较低。

(2) 洞口温差: 尼泊尔地区的气候主要分雨季和旱季, 雨季主要集中在每年的6月至10月, 平均气温为 35°C ; 旱季主要集中在每年的11月至次年的5月, 平均气温 20°C 。隧道内平均气温 30°C 。洞口温差雨季期间相对较低, 旱季期间相对较高。为了减少温差对测量结果的影响, 洞口测量主要安排在温差相对较小的时候, 雨季测量时间安排在上午7点或傍晚8点; 旱季测量时间安排在正午12点。

(3) 通风时长: 隧道掘进过程中, 开挖面会产生大量的粉尘、水平运输设备会产生大量的油烟、机械设备维修与保养会产生烟尘等, 为了确保测量过程中隧道内的环境处于平稳状态, 洞内平面控制测量前, 应保证停机后的通风时间满足进风与出风的时间平衡。

隧道采用的是压入式通风方式, 风道直径为1.4m, 通风备用参数为1.2, 最小风速 $15\text{m}/\text{min}$, 风阻系数0.0025, 通风长度按照完成衬砌长度的2倍计算, 风机的功率 $26.2\text{m}^3/\text{s}$, 隧道衬砌内径4.2m, 结合上述参数, 可以计算出循环风的到达开挖面的时间h。

1公里衬砌长度, 循环风到达开挖面的时间 $h=1000/(26.2/(\pi*0.7^2))\approx 1$ 分钟。循环风从开挖面回流的速度远小于压入风的速度。

导线测量前, 隧道停机通风的时间为8小时,

(4) 控制点加密测量: 隧道每掘进15天停工进行控制网联测, 相邻两次导线测量按照搭接5组控制点执行。

(5) 联系测量: 地面与洞内控制网的联系测量, 按照3km/次执行。

五、贯通测量

采用双护盾TBM工法的尼泊尔巴瑞巴贝引水隧道工程, 累计掘进17个月贯通, 最终贯通测量的横向贯通误差为36cm, 36cm(贯通误差) $< 43.8\text{cm}$ (横向贯通误差估算值) $< 50\text{cm}$ (设计贯通误差)。

六、经验总结

双护盾TBM工法在尼泊尔巴瑞巴贝引水隧道的实施属本公司首例, 该隧道的顺利贯通为公司在长距离TBM工法隧道的控制测量技术奠定了坚实的基础, 综合上述测量技术方案的实施过程, 平面控制测量技术还需要在以下几个方面进一步提升。

(1) 测量准备工作应充分, 在每项施工任务作业前, 应充分掌握该项施工作业在相应的行业中, 有哪些规范可以参照, 参照的标准通过什么样的形式得以实现, 比如说平面控制网点的布设位置、平面控制网点间的高差、平面控制网点间的间距, 进洞边的角度等。

本技术方案中, 平面控制网进洞边的角度稍大, 进洞边的高度角稍大, 若遇到类似的项目, 应尽量将进洞边的高度调整至隧道的设计轴线高程。

(2) 测量计算过程及计算方式应有据可依, 科学合理, 计算结果稳定可靠。比如说本项目隧道预计贯通误差的计算, 依据的是控制网边的长度, 边角网测角中误差取值的而来。

(3) 控制测量采用的方式方法应尽可能的多样化, 不同的方式方法的使用, 可以对同一测量结果进行相互检核。比如说本项目洞内平面控制网数据采集的方式, 既采用了常规的边角网测量方式、又采用了新技术中的“虚拟双导线”边角网测量方式, 两者相互对洞内平面控制网进行测量, 且得出的结果基本一致。

同时, 在遇到类似的工程时, 可以考虑适当减少部分控制网点的组数, 加长隧道内导线边的长度。例如采用第一组点与第三组点组网, 第二组点与第四组点组网的方式。逐步推进至开挖面, 并以这种测量的结果与顺序测量各组导线点的结果进行比较, 以此找出更优的布网方式。

(4) 测量仪器设备应科技化配备, 既能提高控制测量精度, 也能提高工作效率。比如说本项目配备了双星(俄罗斯卫星和美国卫星)GPS卫星信号接收设备和“Leica全站仪多测回测角系统”, 科技化设备的投入, 提高了洞外GNSS平面控制网的精度, 同时不同设备间的测量结果也能相互检核, “Leica全站仪多测回测角系统”的工作时效远大于常规边角网人工观测效率。

(5) 合理安排测量外业工作的时间, 不但能够保证正常的施工生产, 而且还能有效的提高测量工作的成效。比如说本项目洞内控制网加密测量, 均选择在隧道作业班组每月白夜班转班期间(每月15号和月底两天), 这样既不影响隧道的正常掘进施工, 同时还能有效的减少洞内烟尘、温差、通风环境、湿度等因素对控制网加密测量精度的影响。提高测量工作成效。

参考文献

- [1] 汪华东. 双护盾TBM工法及其管片防排水技术探讨[J]. 绿色环保建材, 2021, (08): 154-155.
- [2] 高鑫, 王文娟, 李清菲等. 双护盾TBM步进过站路径研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(05): 56-64+72.
- [3] 张贺强. 深埋隧道双护盾TBM掘进条件下喷锚支护技术研究[D]. 西南交通大学, 2021.
- [4] 朱益海, 张磊, 赵林. 双护盾TBM工法及其管片防排水技术探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2020, (12): 69-73.
- [5] 余娜. 基于深圳地铁隧道的双护盾TBM施工参数地质适应性研究[D]. 东南大学, 2020.