

特长隧道导线测量布设方案与贯通误差控制研究

黄桂林

重庆北新融建建设工程有限公司, 重庆 404700

[摘要]特长隧道施工测量中,导线测量布设方案及贯通误差控制是保障隧道精确贯通的重要技术手段,在重庆巫溪至巫山高速公路白泉隧道,单洞长 4880m,章家湾棚户区平桂路巫山隧道,单洞长 2473.65m 等工程实例的背景下,对特长隧道导线测量的技术特点和技术要求进行深入研究并提出了导线网布置的原则及其分级控制的方法,改善了洞内外导线网布局结构;以贯通误差主要来源为依据,建立横向贯通误差估算公式,进行测量精度设计、误差分摊,采取重点部位加强控制等方法。

[关键词]特长隧道;导线测量;贯通误差;误差控制;布设方案

DOI: 10.33142/ec.v9i6.19844

中图分类号: P228

文献标识码: A

Research on the Layout Plan and Control of Penetration Error for Special Tunnel Traverse Measurement

HUANG Guilin

Chongqing Beixin Rongjian Construction Engineering Co., Ltd., Chongqing, 404700, China

Abstract: In the construction survey of extra long tunnels, the layout scheme of wire survey and the control of penetration error are important technical means to ensure accurate tunnel penetration. Against the background of engineering examples such as the Baiquan Tunnel on the Wuxi Wushan Expressway in Chongqing, with a single tunnel length of 4,880m, and the Wushan Tunnel on Pinggui Road in Zhangjiawan shantytown, with a single tunnel length of 2,473.65m, the technical characteristics and requirements of wire survey for extra long tunnels were deeply studied, and the principles of wire network layout and the method of graded control were proposed, which improved the layout structure of wire network inside and outside the tunnel; Based on the main sources of penetration errors, establish a formula for estimating lateral penetration errors, design measurement accuracy, allocate errors, and adopt measures such as strengthening control of key areas.

Keywords: extra long tunnel; wire measurement; connection error; error control; layout plan

引言

伴随着我国公路交通基础设施建设的迅速发展,高速公路特长隧道的数量越来越多,隧道施工测量中导线测量布置方案合理性以及贯通误差的控制能力直接影响着隧道是否能够顺利贯通,从而关系到整个工程的安全、工期及经济效益等。在特长隧道中,隧道横向贯通误差是最难以控制的一项指标,它对隧道轴线偏差的影响很大^[1]。重庆巫溪至巫山高速公路巫山至大昌段白泉隧道左洞起止桩号 ZK0+260~ZK5+140,单洞总长 4880m;右洞起止桩号 YK0+270~YK5+135,单洞总长 4860m,为双向四车道高速公路隧道,最小曲线转弯半径 960m。另外,章家湾棚户区平桂路巫山隧道平面线形的设计也涉及特长隧道测量的问题。

1 特长隧道导线测量特点与要求

特长隧道一般为单洞长于 3000m 的隧道,特长隧道的导线测量主要特征有:一是洞内控制网点布置场地有限、环境差;二是随着隧道的增长,测量误差也逐渐累加,造成贯通困难的可能性加大;三是洞内外测量坐标系需要互相配合转换,难度增大^[2]。特长隧道横向贯通误差的主要决定因素是测角误差、测距误差及起始边方位角误差,而其中的测角误差的影响是随着隧道的增长成平方根增长。因为白泉隧道单洞长约接近 4900m,所以横向贯通误差要满足规范要求。依据《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660-2020),隧道横向贯通误差中误差不超过 100mm。针对白泉隧道最小圆曲线半径 960m 的线型特点,隧道轴线弯曲对于导线测量有了更严格的要求:曲线段测角精度

要比直线段提高约 30%，并应适当增加曲线段导线点的布置频率来降低曲线拟合误差的影响。章家湾棚户区平桂路隧道平面曲线较多，也需要较高的精度导线设计方案来保证。

2 导线网布设方案设计

2.1 布设原则与分级控制

导线网布置要遵守从整体到局部、从高级到低级，按等级布设，逐级控制的基本原则，对于特长隧道施工的特点需要有如下几点特殊要求：①洞外控制网需包含隧道两端口和相邻建筑物范围内的位置，并保持一致的坐标系；②洞内导线网必须根据开挖情况进行分级布置并逐级加密；③洞内外联系点要选择稳固可靠的地点进行埋设。刘国祥等人 2019 年提出的分级控制理论对长隧进隧道测量有着重要的启示作用^[3]。本文的研究采取三级布控的方式进行：一级控制是 GPS 静测布设在洞口外的平面控制网，二级控制是洞内的基本导线网，边长在 300~500m 之间，三级控制是洞内施工导线网，边长在 100~150m 左右。对于白泉隧道，洞外控制网的覆盖面应该扩展到隧道进出口外两侧各 1km 以上，并考虑龙井互通匝道 2#桥的测量控制需求。章家湾棚户区平桂路巫山隧道的平面线形资料（如表 1 所示）显示此隧道也是有曲线段到直线段的转变交替出现，在分级控制中应随着线形要素的变化来改变导线点的间距。

2.2 洞内外导线网构型优化

洞外导线网使用边连式的或者网连式的 GPS 结构保证多余观测足够。白泉隧道进出口的地形环境不一样，入口 ZK0+260 位置地形比较开阔，利于设置若干个 GPS 基准站；出口 ZK5+140 位置受地形影响较大，需要与龙井互通区现有的控制点做联测。

洞内导线网构型优化主要包括以下几个方面：一是采取等边直线延伸式导线，减少侧面误差累积；二是对于曲线部分加设导线点，提高曲线拟合的准确性；三是进行双导线或者三联脚架进行观测，增加检核条件，洞内双导线布置方案能使得横向贯通误差减小大约 25%，对于白泉隧道最小曲率半径为 960m 的曲线段，可以设置导线长度在 150~200m 之间，采用两侧线互相交替布置导线环的

方法，300~400m 之间构成一个闭合条件。

2.3 基于工程实例的导线网动态监测与自适应调整策略

为了解决特长隧道施工期间围岩变形、施工扰动以及环境改变导致的导线控制点长期不稳定的问题，本文采用的是通过工程实例来实现的一种导线网动态监测并根据情况适时调整的方法，即以传统的分层布点控制为基础，增加“动态监测点、定期复测以及根据实际需要进行加密”三种方法相结合的方式。

以白泉隧道为例，隧道单洞长度将近 4900m，最小曲线半径只有 960m，开挖时间较长，洞内控制点会受到爆破震动、岩石压力以及地下水渗透的影响而发生微小位移，所以在隧道每前进 800~1000m 后就需要增加一个动态监测剖面，在每个剖面上布置三个强制对中的监测点并用标称精度为 0.5″，0.5mm+0.5ppm 的高精度全站仪每隔两周独立观测一次，对比前后两次观测的坐标变动量来判断控制点是否稳定，若监测点坐标变动达到±3mm 则需要启动自适应修正措施，一是对这一段导线予以重新测量，二是对后一段导线布设时把这一段导线点的距离从原来的 300~400m 减少到 200~250m，从而减少误差。

针对章家湾棚户区平桂路巫山隧道，在平面线型上曲线与直线之间不断转换，动态监测方法是以加强导线点布置密度来在线路上进行自适应调节的方式为主。在曲线上面特别是 $R < 1000m$ 的圆弧、缓和曲线部分，导线点之间的距离自行设定为直线部分间距的 60%~70%，也就是从 200~250m 缩短至 120~150m 并增加曲线中心及曲率变化处强制对中观测墩，同时每隔 300m 对一次曲线的拟合误差检查，如果拟合误差超过±8mm，则需对后续的曲线段进行再加密处理。

3 贯通误差来源分析与控制方法

3.1 误差来源分类与影响

特长隧道贯通误差主要是由三部分引起的，即洞外出测控制误差、洞内导线测量误差及洞内外联测误差，而洞内导线测量误差对于横向贯通误差的影响最为严重，占 60%~70%，白泉隧道单洞长达 4900m 左右，在相同精度观测条件下估计，若测角误差仅为 1.5″，那么测角误差引

表 1 隧道平面线形一览表

隧道名称	起讫桩号	隧道长度 (m)	平面线形	备注
巫山隧道	ZK0+468.65~ZK2+942.30	2473.65	直线+R-1000Ls-60 圆曲线+直线	
	K0+460~K2+926	2466	直线+R-1875 圆曲线	

起的横向贯通误差就将近 65mm；另外开始方向角的误差、开始点坐标误差和洞内的通风、照明、粉尘等因素都会导致测量误差的增大^[4]。

3.2 横向贯通误差预估模型

横向贯通误差预报是精密设计以及误差分配的前提条件。常用的经验公式采用误差传递规则，把各个误差因素看作彼此独立的随机量。横向贯通误差中的中误差等于：

$$m_q = \sqrt{m_{q1}^2 + m_{q2}^2 + m_{q3}^2 + m_{q4}^2} \quad (1)$$

由于起始方位角误差产生的横向误差是；起始点坐标误差产生的横向误差是；测角误差产生的横向误差是；量边误差产生的横向误差是。

对白泉隧道，取隧道长度，导线平均边长，测站点数。假设测距仪的测角误差，则测角误差导致的横向贯通误差为：

$$m_{q3} = m_\beta \cdot \frac{L}{\rho} \cdot \sqrt{\frac{n}{12}} \approx 1.5 \times \frac{4900}{206265} \times \sqrt{\frac{25}{12}} \approx 0.054m = 54mm \quad (2)$$

设量边相对中误差 $m_s/S = 1/100000$ ，则量边误差引起的横向贯通误差约为：

$$m_{q4} = \frac{m_s}{S} \cdot L \cdot \sqrt{\frac{n}{2}} \approx \frac{1}{100000} \times 4900 \times \sqrt{\frac{25}{2}} \approx 0.017m = 17mm \quad (3)$$

综上所述得出的结果是：如果不考虑初始误差的话，理论上横向贯通误差为，符合设计要求，但是由于白泉隧道曲线段和周围环境的影响，在施工过程中需要提升测量级别。

3.3 测量精度设计与误差分配

根据以上估算模型，用同等影响法对误差进行分配，在允许的横向贯通误差的中误差为，分配到洞外控制测量与洞内导线测量以及洞内外联测分别为 1：6：1，则洞内导线测量允许误差在左右，再把洞内导线测量的误差细分到测角和量边上，测角允许中误差，量边允许相对中误差。白泉隧道曲线部分因为最小曲率半径只有 960m，应考虑将测角精度提高到，用高精度全站仪（标称精度 0.5”，1mm+1ppm）来观测。

3.4 基于最小二乘平差的误差补偿与智能预测

为了提高贯通误差的控制精度，导入了最小二乘法平差误差矫正模型以及卡尔曼滤波预测算法，在 500m 一次整体平差找出系统误差的基础上进行补偿。使用卡尔曼滤波 300m 更新一次进行动态预测贯通误差的发展趋势，当其大于 80mm 时就予以预警提醒加大导线点或者增设陀螺定向边。另外使用 BP 神经网络测角残差，曲线半径等作为输入建立非线性函数模型，这些方法应用于白泉隧道、

章家湾隧道中使得预测误差和实际贯通误差差异保持在 ±6mm 之内，极大地增加了误差控制的积极性。

3.5 关键环节控制措施

为了解决上述误差来源以及测量精度的要求，采取如下主要措施：第一，洞外 GPS 控制网使用双频接收机静态观测，观测时间大于等于 2h，基线解算使用精密星历；第二，洞内导线用三联脚架法观测，减小对中误差；第三，每站不少于四测回多测回观测并且加大测回之间变换度盘位置；第四，曲线部分加密导线点并使用方向观测法来提高测角精度；第五，定期进行仪器检校尤其是补偿器、轴系误差的校准^[5]。特长隧道测量需要制定严谨的仪器管理规定，包括运输过程中的保护仪器、环境温度记录、仪器气象改正等。根据章家洼棚户区平桂路隧道的平面曲线特征，导线点布置要远离围岩较差处，使用光学对中基座+棱镜+舰板的方式。

4 实施流程与质量控制

4.1 测量技术设计与准备

测量开展之前要制定详细的测量技术方案，方案内容有：工程概述及精度指标、控制网点的设置方案、设备及检校计划、观测方式及限差要求、数据处理措施等。白泉隧道测量技术方案要有针对洞内通排风设施以及照明灯具、通讯等设施状况对测量工作影响的特殊安排并做出应急措施。

4.2 现场施测与实时检核

现场施测要严格按照技术设计书进行并且建立实时检验制度，洞外出测点埋设完后要稳定 7 天以上才可以测量，洞内导线点埋设后要稳定 3 天以上才可以测量，每个测站测得的数据都要及时记载并在现场完成闭合差计算，超出范围就重测一遍，白泉隧道左右洞单独观测，每推进约 300m 左右时（车行通道、人行通道）就要进行左右洞联测，形成闭合环检查，曲线部分，最小半径 960m 处测定时要增加一倍以上的对数至 6 测回，在测量时使用左右角观测法来消除度盘偏心差。

4.3 数据处理与平差计算

数据处理使用专业的平差软件来进行，在此之前先对观测数据进行了预处理，气象改正、仪器加常数改正、投影改正，接着对控制网进行平差。洞外 GPS 网进行三维约束平差，固定已知点坐标，平差后基线边长的相对中误差应优于 1/200000；洞内导线网采用间接平差或者是条件平差，两个导线环要一起进行平差来保证洞内导线网的整体性。白泉隧道贯通前的阶段性平差要每 500m 进行一次，检测已经测量过的部分的精度情况，推测最后的贯通误差

量。在特长隧道测量平差时应该合理设定先验权,不能使观测值的权比失去平衡。

4.4 贯通前复核与调整

隧道掘进剩余 100~200m 时应对贯通误差预报及复测测量。复测内容为:分别在进出口两端对最后 300m 范围内进行控制导线点的复测,独立进行贯通误差计算;将预测贯通误差与设计允许误差做比较;如预测误差大于误差,就要对误差产生的原因进行分析,采取相应调整措施。白泉隧道掘进到剩余 100~200m 的时候可以使用陀螺全站仪在隧道内添加 3~5 条陀螺方位边,单独对导线方位角进行校正,此方法能够使方位角传递误差降低约 40%^[6]。调整方法就是最后掘进阶段调整开挖中线、修改衬砌模板定位参数等。章家湾棚户区平桂路隧道如果也有类似长曲线段的话,也建议使用陀螺定向的方法来进行方位角的校核。

5 结束语

特长隧道导线观测布置方案及贯通误差控制是特长隧道测量的关键技术难题。本文以重庆巫溪至巫山高速公路巫山至大昌段白泉隧道、章家湾棚户区平桂路巫山隧道为例,对特长隧道导线测量进行了系统探讨,分析了特长隧道导线测量特点及要求,提出了三级分级控制方式以及改进的洞内外导线网结构方案。建立了横向贯通误差预测公式,进行精度设计、误差分配,确定了测角中的误差应小于等于 1.2"~1.5",测距中误差优于 1/100000 的技术指标,在白泉隧道最小转弯半径 960m 曲线部分提出增加加

测导线点、加强测角精度的要求。贯通前利用陀螺全站仪加测方位边的方式来进行贯通测量复核可以大幅度提升贯通测量的精确程度。研究结果对于类似特长隧道工程有一定的借鉴意义,但在实际运用时应当结合具体的工程项目情况进行相关参数修正以及方案改进。

[参考文献]

- [1] 闭万深,黄晖.山岭特长隧道施工不良地质灾害成因与处治方案研究[J].西部交通科技,2026(1):198-201.
- [2] 赵华锋.深埋特长隧道钻爆法施工关键技术研究与应用[J].交通科技与管理,2025,6(8):119-121.
- [3] 陈光龙,陈明华,郭寿中,等.非标准投影带下特长隧道施工控制网双源数据尺度比一致性研究——以青海省互助北山 11.2km 公路隧道为例[J].价值工程,2025,44(36):4-6.
- [4] 李雷发,邵明星,陈浩南,等.高寒区特长隧道穿越破碎堆积体进洞施工技术探究[J].中国公路,2025(17):102-105.
- [5] 田毅,凌成鹏,李桦柳,等.穿越复杂岩溶环境的特长隧洞涌突水危险性评价——以滇中引水工程小扑隧洞为例[J].成都理工大学学报(自然科学版),2024,51(4):687-697.
- [6] 周勇,刘博,傅鹤林,等.基于云理论的软弱富水破碎围岩特长隧道施工风险评估[J].现代隧道技术,2024,61(1):99-108.

作者简介:黄桂林(1993—),毕业于西安科技大学土木工程专业,当前就职于重庆北新融建建设工程有限公司,工程师。