

银西线黄土隧道综合超前地质预报方法研究

王小安

陕西铁道工程勘察有限公司, 陕西 西安 710043

DOI:10.61369/ERA.2026070033

摘 要 : 新建铁路银川至西安线隧道多为黏质黄土、砂质黄土隧道, 工程地点涉及的特殊岩土主要有湿陷性黄土、膨胀土、及松软土。本文针对黄土隧道的这些特点, 提出了黄土隧道施工过程中的综合超前地质预报方法, 提高黄土隧道超前地质预报准确性, 为黄土隧道安全施工提供了参考依据。

关 键 词 : 黄土隧道; 超前地质预报; 综合物探

Study on Comprehensive Advanced Geological Prediction Method of Loess Tunnel in Yinxi Line

Wang Xiao'an

Shaanxi Railway Engineering Survey Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043

Abstract : The tunnels of Yinchuan-Xi'an new railway line are mostly cohesive loess and sandy loess tunnels, and the special rock and soil involved in the project site mainly include collapsible loess, expansive soil and soft soil. In view of these characteristics of loess tunnel, this paper puts forward a comprehensive advanced geological prediction method in the construction process of loess tunnel, which improves the accuracy of advanced geological prediction of loess tunnel and provides a reference for the safe construction of loess tunnel.

Keywords : loess tunnel; advanced geological forecasting; integrated geophysical exploration

一、概述

近些年, 铁路施工建设速度越来越快, 截止2025年末, 我国铁路营业里程达到16.5万公里, 其中高速铁路里程超5万公里^[1], 随着西北地区铁路建设的快速发展, 黄土隧道所占比例越来越高^[2], 铁路建设不可避免的要与黄土隧道打交道, 黄土隧道具有湿陷性、膨胀性及松软的特点, 施工时易发生坍塌、冒顶等安全事故。本文通过介绍银西线超前地质预报过程中使用的综合超前预报方法, 提高了隧道超前预报准确性, 降低了安全事故的发生率, 产生了良好的社会经济效应。

二、地质概况及工程地质问题

(一) 地质概况

新建铁路银西线主要经过了渭北、陇东黄土塬及梁峁沟壑区, 毛乌素沙漠西南边缘和银川黄河冲积平原等区域, 隧道经过的地层从第四系、第三系、白垩系、侏罗系、三叠系、奥陶系地层均有出露。泾河河谷及支沟沟谷地段主要出露第四系全新统和上更新统冲洪积粉质黏土、粉土、砂(黏)质黄土、砂类土、碎石类土, 局部出露中更新统及下更新统砂类土和碎石类土^[3]。

(二) 工程地质问题

根据土力学基础理论, 就黄土而言, 由于不同的地质时代, 土的性质会发生变化, 主要表现在土的非饱和含水量、密实度、均匀性、稳定性, 以及湿陷性等方面。由于它的一些地质特性,

如多孔性, 垂直节理发育, 层理不明显, 透水性较强, 沉陷性, 易形成黄土陷穴, 沉降很大, 如湿陷性黄土^[4]。土的非饱和含水量越低, 或土的孔隙率越大, 土质越松散, 湿陷性越强; 反之, 土质越密实, 湿陷性越弱^[5-7]。

三、综合超前地质预报方法的实施过程

(一) 超前地质预报四个结合的方法

1. 地质物探结合

要提高隧道超前地质预报的准确性, 就必须将地质调查方法与多种物探方法结合起来, 对地质物探资料进行系统处理和综合分析, 工作方法和内容主要有以下几点。

(1) 收集、熟悉地质资料

(2) 施工地质素描

地质素描法是根据地表调查、隧洞内以及隧洞掌子面地质调查结果进行超前地质预报, 即以实际开挖面的真实围岩情况为基础信息(包括岩体的坚硬程度、完整程度、风化程度、节理组数、主要结构面类型、掌子面水量大小等)对隧道掌子面前方地质情况作出预判^[8]。

(3) 地球物理探测

(4) 地质物探综合分析

2. 洞内洞外结合

在地质预报过程中发现前方存在不良地质现象, 可去看看洞外隧道中轴线附近的地质情况, 多数问题就会迎刃而解, 所以, 做隧

作者简介: 王小安(1985-), 男, 陕西扶风人, 学历: 工学学位, 职称: 高级工程师, 研究方向: 铁路物探勘察工作。

道超前地质预报工作，要多思考、多走走，做到洞内洞外相结合。

3. 长短结合

地质预报方法，分为长期预报、短期预报，从目前国内外情况看，多看重中、短距离超前地质预报的研究，而对长距离超前地质预报的指导作用、临兆预报的迫切性研究不够^[9]。为此我们使用长短结合的预报方法，可以有效的解决黄土隧道的这些问题。方法如下。

（1）地质分析

通过地质分析，可对隧道围岩稳定性、赋水性、围岩完整性、围岩岩性有一个大致的了解，这属于长期预报。

（2）TSP 长距离预报

由于在黄土隧道中地震波能量损失较快，预报距离受到影响。通过 tsp 预报后，可得到更为精细的结论，tsp 法对隧道破碎软弱带反映灵敏，对地下水也有较为明显的反映。通过地质分析而后再进行 tsp 法分析，可进一步确定黄土隧道中的土石分界面及含水率高的段落范围。

（3）地质雷达短距离预报

经过以上两个步骤，可大致确定隧道围岩较差的段落和含水段落，随后使用地质雷达进行更为短距离的预报，地质雷达对地下水的反应灵敏，当电磁波通过电导率高低不同的两个界面，就会在地质雷达测量系统中有明显的反应。

通过以上三个步骤，从大到小一步步确定异常，并可以渐进式的定位水体位置或土石分界面的位置。

4. 多种物探方法结合

多方法结合是利用地质分析、tsp 法、地质雷达等方法，对同一个认为存在异常的段落进行预报，并对预报结果进行分析，画出共同的异常范围，达到解决问题的目的。

（二）改进 tsp 法在黄土隧道超前地质预报中的数据采集和处理方法

（1）针对黄土隧道松软，炮孔难以布置及炮孔易坍塌提出的解决措施。

其一，是打孔后第一时间将炸药装入孔中，在施工现场，提前准备好炸药，等钻机打好一个孔后，就先装填炸药和进行孔深倾角等的测量，这样即使后续孔位坍塌，依然可以对已经装填的炸药进行引爆，从而采集到合格的数据。其二，针对孔位易坍塌，采用了钻孔后在孔中及时放置 pvc 管的方法，既能保证钻孔完整不坍塌，又满足了钻孔深度要求。

（2）针对黄土隧道容易坍塌、掉块，二衬跟进距离较近的解决措施。

黄土隧道容易坍塌、掉块等，为了施工安全起见，二衬跟进距离一般保持在 50 米之内，tsp 法推荐的施工距离是 55 米，无法满足条件。为此采取的措施是减少最小偏移距，正常要求是 20 米，可将其减少到 15m，通过实践发现，这样不但能提高超前地质预报的预报长度，也可以减少装填的炸药量，确保 tsp 施作起来更加的安全。

（3）黄土隧道 tsp 数据处理参数优化设置

在 tsp 数据处理过程中，为了减少空间假频的问题，道间距越

大，就要插入更多的内插道；频率越高也需要更多的内插道，黄土隧道由于黄土的特性是波在其中传播时，频率越高的能量衰减越快，有效波的频率就越低，为此，我们将 tsp 处理中的内插道数设置为 1 或者 2 就能取得更好的处理效果。

对于 tspwin 数据处理中，软件默认的最大增益数值为 25DB，通过多次 tsp 数据处理得到的结论是对于完整的硬质岩来说最大增益可适当增大，这样可以恢复更长的时间序列；而对于软质岩，这个数值可以小一些，恢复的时间序列短一些。

（三）改进地质雷达法在黄土隧道中数据处理方式

地质雷达在数据采集过程中难免受到隧道各种因素的影响，特别是电力线路的影响，为了去除电力线路对地质雷达数据的影响，我们对地质雷达数据进行了更为精细的处理，首先对数据进行峰值分析，以便确定主要影响因素的频率范围，而后对数据进行处理，处理后较为明显的同相轴异常变弱，而后进一步对数据进行 $f \sim k$ 滤波， $f \sim k$ 滤波是通过二维傅立叶变换，将 $t \sim x$ 域数据变换到频率域数据，进而利用干扰波与有效波视速度的差异进行滤波。然后利用预测反褶积滤波，消除震荡产生的多次波。再次利用 $f \sim k$ 进行滤波。最后进行小波分析。通过这一系列步骤的处理，有效降低了因电力线路存在而引起的明显干扰，提高了数据处理结果的准确性。

四、综合分析案例解析

（一）长短结合永平隧道明洞小里程土石分界面确定

永平隧道明洞小里程开挖至 DK109+300 左右时，掌子面由原来的黏质黄土逐渐变为砂岩，施工单位需要进行钻爆法施工，钻爆法施工需要统计所需炸药量，计算通过该段的工期，因此需要确定该段落的具体长度，也就是再次出现黏质黄土的里程。在这里我们运用了长短结合的方法循序渐进地确定了基岩段的分布长度和分界面的位置。

（1）地质分析

永平隧道位于黄土梁塬边沟壑区。地面高程 1040m ~ 1180m，相对高差约 140m，整体呈北高南低，梁面凹凸相间，高程 1050 ~ 1170m，塬面经受强烈剥蚀，隧道 DK109+850 ~ +950 段通过一大型冲沟，冲沟宽约 40m，沟心有常年流水。隧道范围内地层主要为第四系全新统冲积黏质黄土、细圆砾土，上更新统风积黏质黄土，冲积粉质黏土及粗圆砾土，中更新统风积黏质黄土，下伏三叠系上统砂岩。隧道区地下水类型为第四系孔隙潜水，地下水位埋深大，洞身多处于水位以上，局部土石分界线处于水位以下。从掌子面地质素描资料来看，掌子面 DK109+302.6 干燥，故该段土石分界面处于地下水位以上，土石分界面地下水发育情况较弱。另外砂岩下伏于黏质黄土，由此可知在该地质情况下，砂岩存在的段落长度有限。

（2）tsp 长距离预报

通过地质分析得出大概的结论之后，在里程 DK109+296.6 这个位置的掌子面施作了一次 tsp 预报。

从预报结论来看我们分析土石分界面的位置在 DK109+222 ~

DK109+200之间，这就确定了基岩的分布范围大概为100m左右，为施工单位施工备料等提供了有效依据。同时也将土石分界面的位置卡在了这二十多米之间，进一步缩小了确定位置的范围。

（3）地质雷达短距离预报

已经大概确定了土石分界面的位置之后，等待施工即将到达我们预报的土石分界面附近时，再次施作地质雷达探测，进一步确定土石分界面较为准确的范围。

由已施做的两次雷达报告可以分析得出，在第一次的地质雷达报告中整个预报段落前方仍为基岩，这是因为上导位置过小，导致测线长度不够，故此在掌子面的中导进行了本次地质雷达的测量，因此对处于上导位置的黏质黄土没有反映。结论中提出黄土和砂岩都会向下移动，但在地质雷达图像上未有明确反应，因此推测土石

分界面在 DK109+221.6之后。从第二次预报分析可以得出，黄土位置进一步下移，已经到达中导位置上部，而地质雷达测量在中导位置中部，由此可见离土石分界面只有一步之遥，然后再次根据基岩的产状分析土石分界面大概在 DK109+217附近。

由此通过长短结合的方法，我们循序渐进的定位了土石分界面的位置，后期的掌子面地质素描也证实了这一点。

五、总结

银西铁路黄土隧道具有湿陷性、结构疏松，地表水下渗严重影响围岩自身稳定性，坍塌、冒顶风险极大，施工风险极大。通过再施工实践中建立了一套针对黄土隧道超前地质预报的方法体系，显著的提高了预报结果，对现场施工产生了积极有效的指导意义。

参考文献

[1] 央视网：记者1月4日从国铁集团获悉，截至2025年底，全国铁路营业里程达16.5万公里，其中高铁超5万公里. <https://news.cctv.cn/2026/01/04/ARTImelvsZ3KX3JEIA3zdCC9260104.shtml>.

[2] 梁树文. 宝兰客运专线黄土隧道超前地质预报方法的研究 [J]. 铁道标准设计, 2015, 59(3): 87-89.

[3] 中铁第一勘察设计院集团有限公司. 新建铁路银川至西安线隧道超前地质预报方案 [R]. 西安: 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 2016.

[4] 徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007(7): 1298-1303.

[5] 李智毅, 杨裕云. 工程地质学概论 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2003: 44-48.

[6] 叶为民, 崔玉军, 黄雨, 等. 黄土的湿陷性及其评价准则 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006(3): 551-555.

[7] 邵生俊, 杨春鸣, 焦阳阳等. 湿陷性黄土隧道的工程性质分析 [J]. 岩土工程学报, 2013(9): 1582-1589.

[8] 花荣, 浅谈隧道超前地质预报的技术方法 [J]. 建筑工程与技术, 2016(4): 2988-2989.

[9] 戎凯. 试论隧道工程综合超前地质预报技术体系的构建与实践 [J]. 现代隧道技术, 2008(6), 45(3): 14-21.