

文章编号: 1674—8247(2022)04—0082—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.04.013

## 综合超前预报技术在复杂地质隧道中的应用

王凯 牟元存 李星

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**综合超前地质预报技术能弥补单一预报方法的不足,有效提高预报精度,是复杂地质隧道施工中规避风险的重要手段。本文以拉林铁路某隧道为例,展示综合超前预报技术的实际应用效果。文章首先介绍了TSP、地质雷达、超前钻探等单一方法的预报情况,之后对各方法的预报成果进行对比分析和判识,进行综合超前地质预报,查明了冰水堆积层的分布位置与性质。隧道开挖结果表明,现场地质情况与综合分析结论吻合,综合超前地质预报技术能有效提高预报准确率,为施工方案的调整提供了依据,对指导现场施工,降低施工盲目性、保障施工安全起到了积极作用。

**关键词:**隧道;综合超前地质预报;TSP;地质雷达;超前钻探;冰水堆积体

中图分类号:U456.3<sup>+</sup>3 文献标志码:A

## Application of Comprehensive Prediction Technology in Tunnels with Complex Geological Conditions

WANG Kai MU Yuancun LI Xing

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The comprehensive geological prediction technology can make up for the shortcomings of a single prediction method and effectively improve the prediction accuracy. It is an important means to avoid risks in complex geological tunnel construction. This paper takes a tunnel of the Lhasa-Nyingchi Railway as an example to show the practical application effect of comprehensive prediction technology. This paper firstly introduces the predictions of single methods such as TSP, ground penetrating radar, and exploration drilling in advance, and then compares, analyzes, and identifies the prediction results of each method, and carries out comprehensive geological prediction to identify the distribution location and nature of the outwash accumulation layer. The tunnel excavation results show that the on-site geological conditions match the conclusion of the comprehensive analysis, and the comprehensive geological prediction technology can effectively improve the prediction accuracy, provide a basis for the adjustment of the construction plan, and play a positive role in guiding the on-site construction, reducing construction blindness and ensuring construction safety.

**Key words:** tunnel; comprehensive geological prediction; TSP; ground penetrating radar; drilling in advance; outwash accumulation body

在地下工程的前期勘探中,由于资金投入不足、技术方法的局限或自然条件限制等因素,有时会造成勘探精度不足,无法提供足够详尽的地质资料指导施

工<sup>[1]</sup>。此时,超前地质预报就可以发挥其独特的优势,在施工过程中进一步查清开挖工作面前方的工程地质和水文地质条件,详细探查隐伏不良地质,降低地

收稿日期:2021-02-24

作者简介:王凯(1988-),男,工程师。

引文格式:王凯,牟元存,李星.综合超前预报技术在复杂地质隧道中的应用[J].高速铁路技术,2022,13(4):82-86.

WANG Kai, MU Yuancun, LI Xing. Application of Comprehensive Prediction Technology in Tunnels with Complex Geological Conditions[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4):82-86.

质灾害的发生几率和危害程度。超前地质预报对降低施工成本、保障施工安全有着十分重要的作用<sup>[2]</sup>。

常用的超前地质预报方法包括地质调查法、物探法(如地震波反射法、地质雷达法、瞬变电磁法等)、钻探法、超前导坑法等<sup>[3]</sup>,但考虑到预报技术的发展水平和各方法的局限性,采用单一方法难以保证足够的预报精度<sup>[4-5]</sup>。因此,对于地质条件复杂的隧道,采用物探、钻探等多种手段相结合的综合超前地质预报技术,可有效提高预报精度,对优化隧道施工组织,指导工程设计变更,调整和优化隧道设计参数及防护措施,规避地质风险,保障施工安全,有着极其重要的意义<sup>[6]</sup>。

本文以某铁路隧道为例,展示综合超前地质预报技术在复杂地质隧道施工中的实际应用效果,详细阐述了综合超前地质预报技术在探明致灾软弱地层与基岩分界面和不良地质问题处理过程中的作用。

## 1 工程地质及设计概况

某铁路隧道位于青念青唐古拉山与喜马拉雅山之间的藏南谷地高山区,山高谷深,气候极端恶劣。测区范围内覆盖层主要为第四系全新统坡残积层的碎石土、冲积层的细砂、滑坡堆积层的碎石土及上更新统冰水堆积层的卵石土、漂石土。下覆基岩为新元古-中元古界念青唐古拉岩群八拉岩组片麻岩、糜棱岩及碳酸盐岩块。测区基岩大部分覆盖,局部裸露,区内发育五条断裂:达希-大莫谷热断裂、力底断裂及三条性质不明断层,节理裂隙发育。其中,D2K 387 + 305 ~ D2K 387 + 795 段隧道穿越第四系上更新统冰水堆积体,堆积物厚度大于 200 m,物质成份为卵石土和漂石土,该段地下水丰富,工程地质条件较差。

根据前期勘探成果,D2K 387 + 305 ~ D2K 387 + 795 段设计采用地质调查法、地震波反射法、地质雷达法及超前钻探法进行超前地质预报,探明冰水堆积体的具体位置;施工时采用超前帷幕注浆堵水,衬砌类型采用 Vd 型复合衬砌,拱部设  $\phi 89$  超前管棚,环向间距 0.4 m,每环 27 根,纵向间距 6.4 m,单根长 10 m,采用台阶法+临时横撑施工。

## 2 超前地质预报实施

设计资料中冰水堆积体段落长度达 490 m,其中存在最大的潜在安全风险施工段是由基岩进入富水堆积体的段落,若未查清掌子面前方地质条件而盲目施工,极易造成突泥涌水、坍塌等工程地质问题,带来不可估量的损失。预报报告表明 D2K 387 + 795 ~ D2K 387 + 786 段为片麻岩,施工风险相对较低,因此,

本文重点介绍在 D2K 387 + 786 ~ D2K 387 + 706 段内,采用综合预报技术探明基岩与冰水堆积体分界面的情况。

施工过程中,在地质调查的基础上,采用物探、钻探相结合的综合超前地质预报方法,依据“宏观指导微观预报、长距离预报指导中短距离预报、微观预报验证宏观预报、中短距离预报验证长距离预报”的工作思路开展超前地质预报工作,先后开展了 TSP 法、地质雷达法和超前钻探法等分项预报工作,并对各种方法的预报成果进行综合分析,提高预报工作的准确性和对施工现场的指导作用。

### 2.1 地震波反射法(TSP)

#### (1) 观测系统布置及数据采集

在该隧道 D2K 387 + 830 里程处的左边墙和右边墙分别布置 1 个地震波信息接收孔,孔径为 50 mm,孔深分别为 1.78 m 和 1.70 m,孔高分别为 1.46 m 和 1.57 m,每个接收孔各埋设 1 支三分量检波器。在 D2K 387 + 817 ~ D2K 387 + 794 段的左边墙布置 22 个炮孔激发地震波,炮孔平均间距约为 1.0 m,孔径约 40 mm,孔深约 1.3 m,每个激发孔向下倾斜约 10°;第 1 ~ 22 号激发孔装填的药量 60 g。按顺序逐个引爆药包人工激发地震波,地震信号由检波器接收并传至仪器记录单元,形成地震记录。

#### (2) 数据处理及解译

对 TSP203 Plus 仪器采集的数据利用 TSPwin 软件进行处理,通过频率域滤波、初至拾取、反射波提取、速度分析和反射界面提取等步骤<sup>[7]</sup>,获得隧道掌子面前方的 P 波、SH 波和 SV 波的时间剖面、深度偏移剖面、岩石的反射层位、物理力学参数、各反射层能量大小等成果资料<sup>[8]</sup>。

根据岩石力学参数的变化特征、反射界面分布情况以及现场勘察情况分析,解译得到前方 120 m<sup>[9]</sup>范围内的地质情况。

根据 TSP 法二维成果图,D2K 387 + 786 ~ D2K 387 + 755 段弹性参数无明显变化,表明该段地质情况与掌子面情况基本一致,围岩整体破碎,局部极破碎,节理、裂隙很发育,强度低,中等富水,局部存在软弱夹层;D2K 387 + 755 ~ D2K 387 + 735 段波速、泊松比、杨氏模量等参数存在波动,反射界面较为密集,表明该段不均匀性增强,推测该段受冰水堆积层的影响,为基岩向冰水堆积层卵石土过渡段,围岩极破碎,局部为卵石土,中等~强富水;D2K 387 + 735 ~ D2K 387 + 666 段波速、杨氏模量等参数曲线下降,表明该段围岩强度降低,结合已有地质资料,推测该段为卵石土,土质稍密~密实,中等~强富水。

2.2 地质雷达法

地质雷达法是一种电磁波反射法,该方法通过发射天线向地下发射电磁波,并通过接收天线接收来自不同介质界面和目标地质体的反射电磁波,反射波的幅度、形状、频率等特征随地下介质的不同而变化,通过分析反射电磁波的特征即可判识地下地质体的分布情况与物性特征等<sup>[10]</sup>。地质雷达法探测以地下介质的介电常数差异为基础。

开展地质雷达法预报工作时,在隧道开挖面上

水平布置测线,采用 100 MHz 天线对掌子面前方的地质情况进行探测。随后对原始数据进行文件编辑、水平均衡、零点归位、数字滤波、时深转换等处理步骤后,输出雷达深度剖面图,作为资料解释的基本图件。

在开展 TSP 法预报的同时,在 D2K 387 + 786 ~ D2K 387 + 706 段连续开展了 3 次地质雷达法预报,用来验证 TSP 预报成果的异常,进一步查明冰水堆积体的准确位置,得到的雷达探测图如图 1 所示。

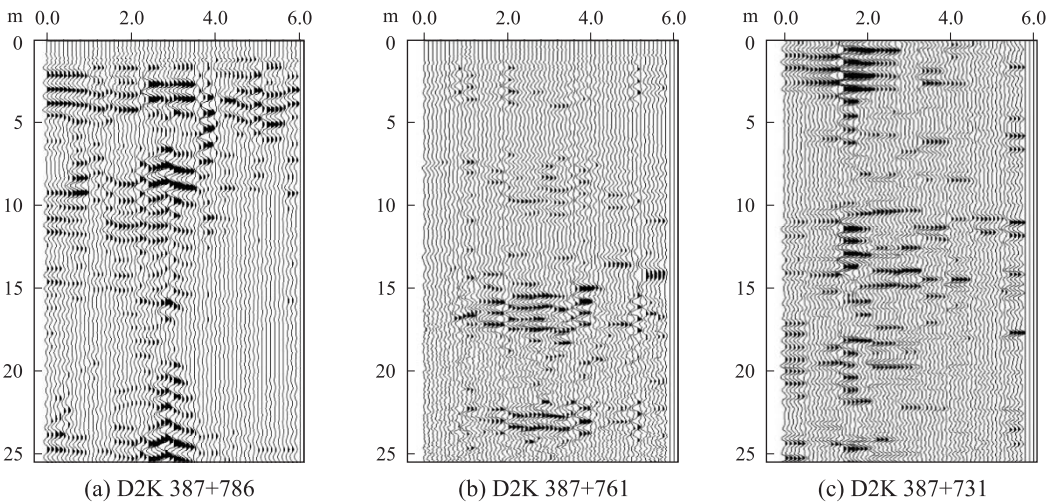


图1 雷达探测图

由图 1 可知:

- (1) D2K 387 + 786 ~ D2K 387 + 761 段电磁波反射信号强,同相轴连续性差,推测该段为片麻岩,围岩整体破碎,节理、裂隙很发育,中等富水,稳定性差。
- (2) D2K 387 + 761 ~ D2K 387 + 731 段电磁波反射信号整体较强,同相轴连续性差,波形较为杂乱,其中 D2K 387 + 744 ~ D2K 387 + 740 段及 D2K 387 + 735 ~ D2K 387 + 733 段反射波能量明显增强,表明该段围岩整体破碎,局部极破碎,存在软弱夹层(如 D2K 387 + 744 ~ D2K 387 + 740 段及 D2K 387 + 735 ~ D2K 387 + 733 段),节理裂隙很发育,中等富水,稳定性差 ~ 极差。

(3) D2K 387 + 731 ~ D2K 387 + 706 段电磁波反射信号整体较强,同相轴连续性差,波形较为杂乱,特别是 D2K 387 + 721 ~ D2K 387 + 706 段,反射信号能量明显增强。结合地质资料及现场揭示情况,推测 D2K 387 + 731 ~ D2K 387 + 721 段围岩整体破碎,局部极破碎,节理裂隙很发育, D2K 387 + 721 ~ D2K 387 + 706 段为冰水堆积层卵(碎)石土,中等富水,稳定性差 ~ 极差。

2.3 超前钻探法

根据 TSP 法、地质雷达法等前期预报成果,为验

证物探法划分的异常段落,进一步详细探明冰水堆积体的详细位置,先于掌子面 D2K 387 + 755 处布设 5 个超前钻孔进行探测,后施工至 D2K 387 + 748.6 时,再次在掌子面布设了 5 个超前钻孔对掌子面前方地质情况作了进一步探测。钻孔参数如表 1 和表 2 所示,钻孔布如图 2 所示。

表 1 D2K 387 + 755 段钻孔参数表

孔号	孔深/m	孔位	方向
1 号孔	40	距右拱腰 1.3 m,拱顶下 1.8 m	水平向前
2 号孔	40	距右拱腰 1.5 m,拱顶下 2.8 m	水平向前
3 号孔	33.6	距左拱腰 1.2 m,拱顶下 1.8 m	水平向前
4 号孔	36.8	距左拱腰 1.4 m,拱顶下 2.8 m	水平向前
5 号孔	18	拱顶正下方 0.8 m	水平向前

表 2 D2K 387 + 748.6 段钻孔参数表

孔号	孔深/m	孔位	方向
1 号孔	30	拱顶正下方 2.5 m	水平向前
2 号孔	40	距右拱腰 1.2 m,拱顶下 2.5 m	水平向前
3 号孔	40	距右拱腰 1.0 m,拱顶下 1.5 m	水平向前
4 号孔	27	拱顶正下方 1.5 m	水平向前
5 号孔	40	距左拱腰 1.2 m,拱顶下 1.5 m	水平向前

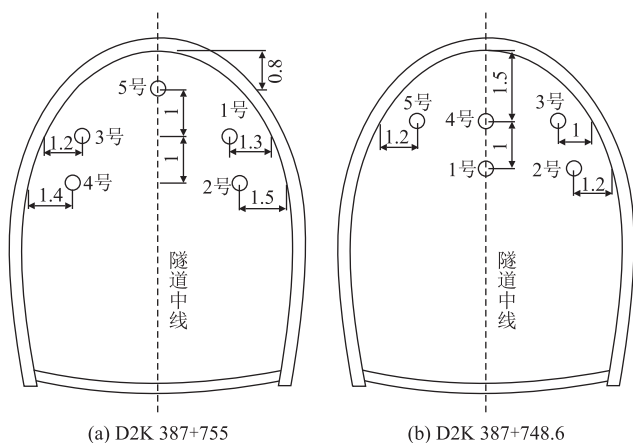


图2 钻孔布置图(m)

钻探结果表明,D2K 387 + 755 ~ D2K 387 + 731 段围岩主体岩性为片麻岩,弱风化夹强风化,局部夹全风化软夹层,节理裂隙很发育,岩体极破碎,裂隙水发育,掌子面前方围岩存在较多软岩层段落,极易掉块、坍塌,总体围岩自稳能力差 ~ 极差;D2K 387 + 731 ~ D2K 387 + 724 段岩性为片麻岩,强风化,局部夹全风化夹层,节理裂隙很发育,岩体极破碎,裂隙水发育,存在较多软岩层,极易掉块、坍塌,自稳能力差 ~ 极差;D2K 387 + 724 ~ D2K 387 + 708 段完全进入冰碛层中,主要为卵石土夹漂石土,地下水很发育,自稳能力极差。

#### 2.4 综合地质分析法

各单一方法预报成果能够相互印证,结论基本吻合。

为更准确判断冰水堆积体的位置与性质,对物探法与钻探法超前地质预报成果进行综合分析判断,并结合其他相关地质勘探资料,得出了综合地质分析结论,主要包括:

(1)D2K 387 + 786 ~ D2K 387 + 731 段内主要为片麻岩,围岩整体破碎,局部极破碎,强度低,节理裂隙很发育,中等富水,稳定性差 ~ 极差,围岩级别为V级。

(2)D2K 387 + 731 ~ D2K 387 + 724 段为强风化片麻岩,强风化夹少部分全风化状,受地质构造影响极严重,节理很发育,整体呈碎石状压碎结构,地下水发育,存在较多软弱夹层,有突泥涌水的风险,围岩整体稳定性差 ~ 很差,围岩级别为V级。

(3)D2K 387 + 724 ~ D2K 387 + 706 段主要为冰水堆积层的卵石土夹漂石及细砂,密实,饱和状。地下水很发育,有突泥涌水的风险,整体围岩稳定性很差,围岩级别为V级。

### 3 开挖验证情况及处理方案

#### 3.1 开挖揭示情况

(1)开挖揭示 D2K 387 + 786 ~ D2K 387 + 733 段岩性为片麻岩,灰褐色 ~ 灰黄色,弱风化夹强风化状,受地质构造影响极严重,节理很发育,节理面锈染现象严重,围岩整体破碎,呈碎石状压碎结构,基岩裂隙水呈“股状”发育特征,无水压。岩体风化强烈加之地下水作用,开挖后拱部及两侧拱腰部位岩体易产生掉块、坍塌等不良地质现象,整体围岩稳定性差。

(2)开挖至 D2K 387 + 733 时,掌子面左侧拱脚至拱顶岩性为冰水堆积的碎石土层,掌子面右侧为强风化状片麻岩,拱部及掌子面左侧拱腰股状出水。

(3)开挖至 D2K 387 + 723.4 时,掌子面岩性为第四系上更新统冰水堆积层之卵(碎)石土夹漂(块)石土及细砂,密实状,饱和状。其中卵(碎)石约占 80%,粒径石土约占 5%,粒径 200 ~ 300 mm,其余为细砂、粉土填充。地下水呈“股状”发育特征,围岩稳定性极差。

综合以上分析结果,开挖揭示围岩情况与综合预报结论吻合。

#### 3.2 施工方案调整

采用综合超前地质预报技术,基本查明了本段的地质情况,施工现场以预报结论为参考依据,对施工方案进行了优化调整,主要包括:

(1)D2K 387 + 786 ~ D2K 387 + 741 段采用 Vc 型复合衬砌,采用全环 II18 型钢架,间距 0.8 m/榀,拱部设  $\phi 42$  超前小导管,环向间距 0.4 m,每环 27 根,纵向间距 2.4 m,单根长 3.5 m,采用台阶法施工。为保证施工安全,D2K 387 + 748.6 ~ D2K 387 + 736.5 段留存部分基岩作为止浆盘,D2K 387 + 741 开始施作帷幕注浆。

(2)D2K 387 + 741 处拱部设一环  $\phi 89$  管棚超前支护,环向间距 0.4 m,每环 27 根,单根长 25 m;D2K 387 + 741 ~ D2K 387 + 721 段开挖工法、初支及二衬维持原设计。

(3)D2K 387 + 723.4 ~ D2K 387 + 721.4 段设置 2 m 厚止浆墙,D2K 387 + 721.4 ~ D2K 387 + 706 段采用全断面超前帷幕注浆加固围岩,D2K 387 + 723.4 ~ D2K 387 + 706 段开挖工法、初支及二衬维持原设计。

通过以上措施的调整,有效防止了坍塌、突泥涌水等地质灾害及工程地质问题的发生,为保障人员、设备安全,节约工程费用起到了重要作用。

4 结论

(1)超前地质预报是规避施工风险的重要手段,单一的预报方法能初步探测不良地质体的位置,划分其范围,为实施超前钻探法提供靶区,为综合预报提供基础资料。

(2)采用物探、钻探等多种手段的综合超前地质预报方法,不仅能够约束物探的多解性,还能降低钻探“一孔之见”的局限性,利用各单一方法的探测结果,相互验证,取长补短,提高预报精度。

(3)综合超前地质预报有效探明了冰水堆积层等软弱富水不良地质体的位置,为变更设计和施工方案的调整提供依据,指导现场施工,降低施工盲目性,保障施工安全。

参考文献:

[1] 史柏生. TSP203 地质超前预报系统简介及其应用[J]. 铁道工程学报, 2004, 21(4): 27-30.  
SHI Baisheng. TSP203 Geologic Advance Prediction System and Its Application [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004, 21(4): 27-30.

[2] 吕志强. 时变高截滤波在隧道地震波预报数据处理中的应用[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(1): 24-28.  
LV Zhiqiang. Time Variant Highcut Filtering Applied in Data Processing of Tunnel Seismic Wave Prediction [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(1): 24-28.

[3] 刘阳飞. 超特长隧道综合超前地质预报工法研究与应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.  
LIU Yangfei. Comprehensive Advanced Geological Prediction Method for Super Long Tunnel and Its Application [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.

[4] 刘国, 李焯均, 沈卫东. 综合超前地质预报在长乐山隧道施工中的应用[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(1): 123-127.

LIU Guo, LI Zhuojun, SHEN Weidong. Integrated Advance Geologic Prediction Applied in Changleshan Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(1): 123-127.

[5] 张庆松, 李术才, 孙克国, 等. 公路隧道超前地质预报应用现状与技术分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(4): 766-771.  
ZHANG Qingsong, LI Shucai, SUN Keguo, et al. Analysis and Present State of Advanced Geological Forecast Technology of Highway Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(4): 766-771.

[6] 周轮, 李术才, 许振浩, 等. 隧道综合超前地质预报技术及其工程应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(2): 55-62.  
ZHOU Lun, LI Shucai, XU Zhenhao, et al. Integrated Advanced Geological Prediction Technology of Tunnel and Its Engineering Application[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2017, 47(2): 55-62.

[7] 牟元存, 王光权, 李星, 等. 提高 TSP 法预报效果的数据处理技巧[J]. 铁道勘察, 2017, 43(5): 76-78.  
MU Yuancun, WANG Guangquan, LI Xing, et al. Discussion on Data Processing Skills of Improving Forecast Effect of TSP Method [J]. Railway Investigation and Surveying, 2017, 43(5): 76-78.

[8] 王树栋. TSP 系统在隧道超前地质预报中的问题及其改善处理[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(3): 129-135.  
WANG Shudong. Problems with and Improvements to the TSP System for Advance Geological Forecasting in Tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(3): 129-135.

[9] 王凯. 基于模型正反演的 TSP 有效预报距离研究[J]. 铁道勘察, 2019, 45(6): 59-63.  
WANG Kai. Research on Detection Range of TSP Method Based on Forward Modeling and Inversion [J]. Railway Investigation and Surveying, 2019, 45(6): 59-63.

[10] 朱劲. 超前地质预报新技术在铜锣山隧道的应用及综合分析研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.  
ZHU Jin. New Technique Application and Comprehensive Analysis of Fore Geological Forecast in Tongluoshan Tunnel [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.