

文章编号: 1674—8247(2022)05—0042—07

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2022. 05. 009

综合超前地质预报在玉磨铁路复杂地质隧道的运用

陈伟^{1,2} 杜宇本¹ 蒋良文²

(1. 西南交通大学, 成都 610034; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:玉磨铁路长大地质复杂隧道施工中采用了地质调查法、物探法、钻探法等多种手段进行超前地质预报工作。本文详细阐述了前震旦系昆阳群围岩突水突泥段、岩溶区、岩盐段、弱胶结砂岩段、有害气体段的超前地质预报探测路线、方案、模式及侧重点,并列举实例进行具体说明。结果表明:(1)总结提出长大地质复杂隧道的超前预报应采用多种手段相结合、相互印证的模式开展预报工作;(2)地质调查法是基础,综合分析工作是重点;动态调整地质复杂程度分级;动态调整探测手段和技术要求;(3)超前地质预报工作不仅要探明不良地质体降低施工风险,为隧道开挖确定围岩级别、设计参数、工程措施提供依据,而且也要为全隧施工组织优化和确保工期提供有利支撑等观点。

关键词:铁路隧道;超前地质预报;综合分析;突水突泥;岩溶

中图分类号: U452.1⁺1 **文献标识码:** A

Application of Comprehensive Advance Geological Prediction in Tunnels with Complex Geological Conditions of Yuxi-Mohan Railway

CHEN Wei^{1,2} DU Yuben¹ JIANG Liangwen²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

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

Abstract: In the construction of long and large tunnels with complex geological conditions of Yuxi-Mohan Railway, the advance geological prediction was carried out by applying the geological survey method, geophysical exploration method, drilling method, etc. This paper elaborates in detail the exploration route, scheme, mode and key points of advance geological prediction for the section with water and mud inrush from surrounding rock, karst area, rock salt section, weakly consolidated sand sandstone section and section with harmful gases in Presinian System Kunyang group, and gives examples for explanation in detail. The results show that: (1) The advance geological prediction for long and large tunnels with complex geological conditions should be carried in a mode that combines multiple methods mutually corroborating each other. (2) The geological survey method is the foundation, and the comprehensive analysis is the key point. The classification of geological complexity, detection methods and technical requirements should be dynamically adjusted. (3) The advance geological prediction should identify the unfavorable geologic bodies to reduce construction risks, provide basis for determining the surrounding rock classification, design parameters and engineering measures for tunnel excavation, and provide favorable support for the optimization of tunnel construction organization and ensuring the construction period.

Key words: railway tunnel; advance geological prediction; comprehensive analysis; water and mud inrush; karst

收稿日期: 2021-05-07

作者简介: 陈伟(1981-),男,高级工程师。

基金项目: 国家自然科学基金(51418008);昆明铁路局科技项目重点课题(K17G43)

引文格式: 陈伟,杜宇本,蒋良文. 综合超前地质预报在玉磨铁路复杂地质隧道的运用[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 42-48.

CHEN Wei, DU Yuben, JIANG Liangwen. Application of Comprehensive Advance Geological Prediction in Tunnels with Complex Geological Conditions of Yuxi-Mohan Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 42-48.

玉磨铁路全长 508.54 km,新建隧道 91 座,隧道总长 395.24 km,占路线全长的 77.7%。隧道施工中遇到的主要地质问题包括涌水、突泥(砂)、岩溶、岩盐、有害气体、大变形、活动断裂、高地温等。目前,尽管在隧道勘察阶段就得到了大量细致的地质资料,但受限于自然界地质条件的复杂性,现有地质资料不能完全反映工程地质条件具体情况,更不能准确地预见施工中可能出现的地质问题^[1]。因此,复杂地质长大隧道施工期间超前地质预报工作显得尤为重要。

经过多年发展,隧道超前地质预报已由单一探测手段发展为多种探测手段的综合探测技术体系^[2]。本文基于玉磨铁路超前地质预报中采用的技术手段,总结长大地质复杂隧道不同地质条件下运用的综合超前地质预报技术,以期解决施工中遇到的地质问题。

1 采用的隧道超前地质预报手段

目前,超前地质预报技术中还未有能预报所有地质问题的技术手段^[3]。玉磨铁路长大地质复杂隧道施工过程中采用了地质调查法、物探法、钻探法、超前导坑法、综合分析等超前地质预报手段,其中以地质调查法为基础,综合分析为主导贯穿整个施工全过程。实施过程中遵循了宏观指导微观、长距离指导中短距离预报,微观验证宏观、中短距离验证长距离的思路,采用了“长短结合、前后比对、不同方法互补印证”的准则开展综合超前地质预报工作,充分发挥了平导超前探明地质条件的作用,合理搭配用好各种技术手段。

1.1 地质调查法

采用地表补充地质调查、隧道洞身和掌子面地质素描等手段,对地层岩性、地层层序、地质界线、不良地质体、特殊岩土等地质条件进行对比、相关性分析、趋势分析,预报开挖工作面前方的地质条件。现场所调查的成果资料是超前地质预报综合分析工作最重要的依据。

1.2 物探法

1.2.1 地震波反射法(TSP)

地震波反射法利用人工激发的地震波来预报隧道开挖工作面前方的地质情况^[4]。地震波反射可探测掌子面前方 100~120 m 范围内的构造、节理裂隙密集带、软弱破碎带、岩脉等在隧道内的大致位置和规模。地震波反射法对规模较大的不良地质体特别是与隧道轴线大角度相交的具有明显弹性差异的岩土体间接接触界面(如断层、软弱夹层、可溶岩与非可溶

岩接触带、软硬岩分界面等)探测效果较好。然而,地震波反射法也存在定位不准确、探测结果不可靠等局限性。

1.2.2 电磁波反射法(GRP)

地质雷达利用电磁波在隧道开挖工作面前方岩体中的传播速度和反射脉冲波走时进行超前地质预报^[5]。地质雷达对存在电导率与介电常数差异的岩土体预报效果较好,一般探测前方距离 10~30 m,适用于探测溶洞、软弱岩体(带)、富水带等不良地质的空间位置与分布,对隧道施工干扰小、探测时间短。

1.2.3 瞬变电磁法(TEM)

瞬变电磁法采用阶跃波形电磁脉冲激发,测量介质产生的感应二次场随时间的变化进行预报^[6-7]。瞬变电磁法适用于任何地层中存在的地下水体、断层破碎带、溶洞、溶隙、暗河等探测。瞬变电磁法探测深度一般在 60~100 m,但探测前方存在不同长度范围盲区。

1.3 钻探法

钻探法主要采用超前水平钻、竖向钻及加深炮孔等。玉磨铁路施工中超前水平钻探主要应用于富水软弱地层及构造带、富水岩溶发育区、煤层瓦斯发育区、重大物探异常区等,探测距离为 30~50 m。地面竖向钻探为宏观超前预报分析的辅助手段,可在需要时采用;加深炮孔主要作为超前水平钻的重要补充,在岩溶区、有害气体和富水区域效果明显。

1.4 超前导坑法

结合辅助坑道设置特点,以超前平导揭示地质特征,通过地质理论和作图法预报正洞地质条件。

1.5 综合分析

根据玉磨铁路隧道地质条件复杂程度分级结果,在长大地质条件复杂隧道施工中,由专业地质人员对复杂、较复杂段落采取以地质调查法为基础,超前钻探法为主,结合多种预报手段,定性与定量分析相结合,遵循工程地质类比法、优劣对比法、决策分析法等思路,开展超前地质预报综合分析,从而提高预报精度。

2 不同地质条件下的超前地质预报

施工前根据既有地质资料确定隧道地质复杂程度预分级,根据现场开挖及探测成果动态调整复杂程度分级,确定超前地质预报实施方案,用以指导隧道开挖。超前地质预报的详细技术路线如图 1 所示。

2.1 一般地段的预报

一般地段的超前地质预报以地质调查法为主,地震波发射法和少量的钻探为辅,重点预报围岩破碎程

度和含水特征。

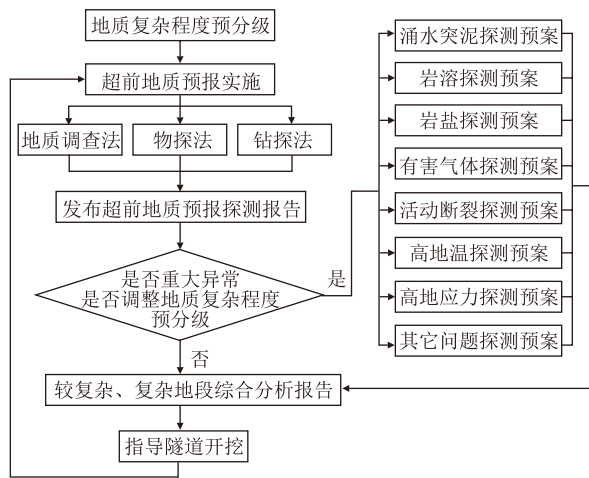


图 1 超前地质预报技术路线图

2.2 前震旦系昆阳群围岩突水突泥段的预报

前震旦系昆阳群地层分布于玉溪至元江约 100 km 范围内,围岩受构造影响极为严重,具有时代古老、破碎、结合差、含水丰富特点,隧道施工极易发生突水突泥危害。

前震旦系昆阳群围岩超前地质预报主要以突水突泥预报为重点,采用地质调查法、地震波反射法、超前钻孔法和瞬变电磁法等方法进行。钻孔探测是涌水突泥预报的最直接的方法,实施钻孔必须有防突装置。对涌水、突泥异常区采用超前水平钻探(3~8 孔)验证,综合分析确定是否存在突水突泥风险。

根据前期施工教训总结本地区隧道掌子面前方突水突泥预判标准为:物探推测前方存在较长段落的软弱夹层或破碎带,超前钻孔存在卡钻、突进等现象,有浑浊水流出,单孔水量大于 2 L/s、总出水量大于 6 L/s 时,涌水突泥概率极高;物探推测前方局部存在物探异常区,超前钻孔存在卡钻、突进等现象,伴有浑浊水流出,探孔总水量 2~6 L/s 时,掌子面前方局部失稳溜坍、突水突泥概率较高。

2.3 岩溶区的预报

玉磨铁路岩溶段落分布较长,隧道岩溶区超前地质预报重点为探明岩溶形态在隧道洞身分布位置、规模、充填、岩溶水等特征。

岩溶弱~中等发育地段超前地质预报以地质调查法为基础,以超前水平钻及加深炮孔为主进行探测。超前水平钻孔 1 孔贯通施做,根据单双线情况采用加深炮孔 3~5 孔探测,物探法采用地震波反射法结合地质雷达法。

岩溶强烈发育地段、可溶岩与非可溶岩接触带、可溶岩断层破碎带、溶蚀破碎带等地段超前地质预报

应加强地表补充调查,加密施做超前水平钻孔或加深炮孔,物探法则增加瞬变电磁法探测岩溶水发育特征。

掌子面前方超前地质预报与隧道周边及隧底隐伏岩溶探测结合,提高功效^[8]。

2.4 岩盐地段的预报

玉磨铁路地处滇南地区,多套地层含岩盐(NaCl)和石膏(CaSO₄·2H₂O)。

岩盐地段的超前地质预报重点为探明膏盐空间分布范围、接触带特征、校核岩土水腐蚀性。以地质调查法为基础,采用掌子面前方、洞身周边及隧底取芯钻探为主进行探测。掌子面前方水平钻探采取不小于 30 m 的长距离钻探,周边及隧底采取 5~25 m 取芯钻探。钻探同时采取岩土水样进行侵蚀性分析,物探法探测主要以地震波发射法为主。

2.5 弱胶结砂岩段的预报

玉磨铁路弱胶结砂岩主要分布于第三系地层内,呈松散粉细砂状,饱水,施工难度大,安全风险高。

弱胶结粉细砂岩段超前地质预报以探测其详细分布段落范围含水特征为重点,为优化施工组织、确保工期提供依据。预报手段以地质调查法为基础,开展洞内及地表取芯钻探为主,结合地震波反射法、瞬变电磁法等物探方法。

2.6 对于有害气体段的预报

有害气体主要分为煤层瓦斯有害气体及非煤层有害气体两大类。

煤层瓦斯有害气体主要分布于含煤地层内,超前地质预报主要采用地震波发射法、电磁波反射法确定煤层在隧道内大致位置,采用地表补充调查、洞内地质素描作图分析煤层里程位置;利用超前钻探确定煤层准确位置,并采取样品测试,预报重点是判断煤层自燃性、粉尘爆炸性及瓦斯突出危险。

玉磨铁路沿线地热异常较突出,非煤层有害气体与地热异常区关系密切。根据非煤层有害气体危险性等级划分,由地质调查法、物探法确定异常区域,采用钻探法标定有害气体准确位置并采取样品测试。预报重点是对有害气体的危险性评价。

3 应用实例

3.1 新平隧道6号横洞涌水突泥预报

3.1.1 工程概况

H6DK 0+513~+485 段隧道围岩为前震旦系昆阳群板岩夹砂岩,围岩受构造影响严重,地下水发育。地质复杂程度预分级为复杂,按涌水突泥预案探测,重点是对前方涌突风险的判断。

3.1.2 地质调查法

根据地表补充地质调查及洞内地质素描, H6DK 0 + 513 ~ + 485 段岩性为黄褐色砂岩, 强风化~全风化, 节理裂隙发育, 裂隙宽度 3 ~ 5 mm, 破碎且结合差, 局部夹有泥质夹层, 掌子面整体湿润、渗水。

3.1.3 物探法

(1) 地震波反射法, 推测 HDK 0 + 601 ~ + 500 围岩破碎~局部极破碎, 岩质软, 节理裂隙发育~很发育, 渗水~局部弱富水, 其中 HD6K 0 + 601 ~ + 585、HD6K 0 + 577 ~ + 543 和 HD6K 0 + 537 ~ + 510 段存在软弱层及裂隙, 裂隙水量增大, 如图 2 所示。

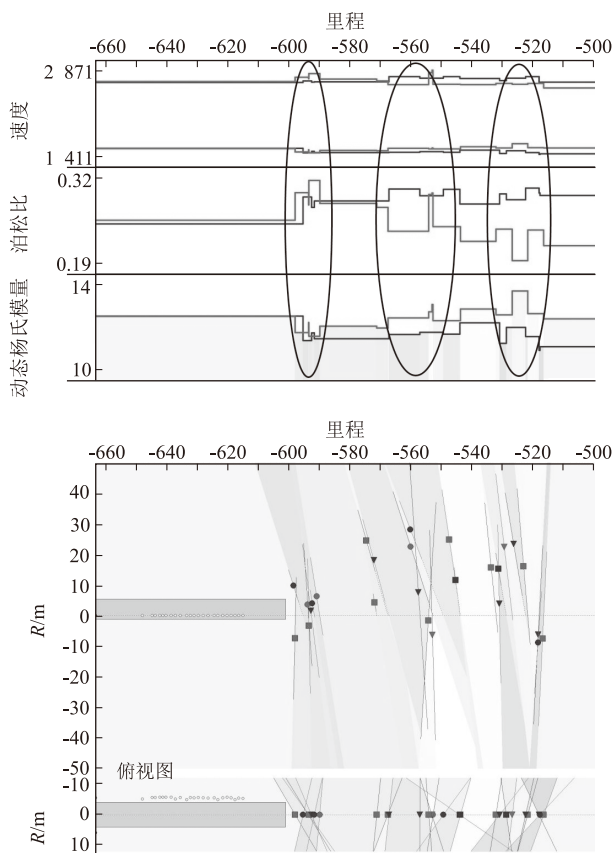


图2 HDK 0 + 601 ~ + 500 段 TSP 探测成果图

(2) 瞬变电磁法, 推测 HD6K 0 + 535 ~ + 495 段围岩破碎~局部极破碎, 节理裂隙发育~很发育, 渗水, 前方、中上方低阻异常明显, 富水, 存在较多夹层及裂隙, 如图 3 所示。

3.1.4 钻探法

超前地质钻探 3 孔及加深炮孔 5 孔探测, 根据钻进速率和返碴返水情况, 判定 H6DK 0 + 515 ~ H6DK 0 + 485 岩体破碎~极破碎, 钻孔单孔出水量 0.8 ~ 2.5 L/s, 水质较清, 总汇水量约 6 L/s。

3.1.5 综合分析

H6DK 0 + 513 ~ + 485 段为砂岩, 黄褐色, 强风

化~全风化, 节理裂隙发育, 岩体破碎, 局部极破碎, 结合差, 局部夹泥质夹层, 地下水发育, 水量约 6 L/s。全段溜坍风险较大, 其中 H6DK 0 + 513 ~ + 495 段上部存在局部突涌风险。

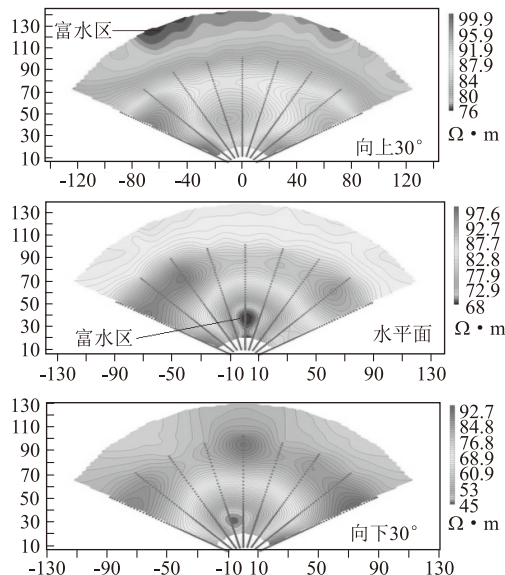


图3 HDK 0 + 601 ~ + 500 段 TEM 探测成果图

3.1.6 开挖揭示

隧道施工至 H6DK 0 + 503.4 时, 掌子面左上部超前钻孔水量增大, 钻孔中有浑浊泥浆涌出, 现场人员及时安全撤离; 随后涌突由钻孔处发生, 围岩破坏, 涌突物以砂岩质碎石和角砾为主, 携带大量泥质, 涌突物约 400 m³; 开挖地质情况与综合分析结论相符。

3.2 曼么二号隧道岩溶涌水预报

3.2.1 工程概况

曼么二号隧道斜交二叠系下统栖霞组(P_{1q})灰岩, 长约 420 m, 地质复杂程度预分级为中等复杂。隧道开挖至 D1K 406 + 183 处时, 上台阶掌子面中间靠右侧拱腰及边墙 3 处炮孔中有股状水呈抛物线喷出, 喷射 5 ~ 7 m 远, 实测汇总出水量 3 ~ 4 m³/min, 水质清澈。该隧道地质复杂程度分级调整为较复杂, 按岩溶预案进行探测, 重点是查明岩溶涌水类型、位置、与地表水联系等特征及其危害程度。

3.2.2 地质调查法

D1K 406 + 183 处洞内地质素描显示, 围岩为灰岩, 岩硬, 层理不明显, 岩体较破碎, 节理裂隙较发育, 地下水很发育。

地表补充地质调查显示, 隧道洞顶地表发育一冲沟, 与线路斜交, 常年流水, 水量较大。经沿冲沟上、下游 1 km 范围进行调查, 沟内水流湍急, 沟内及河沟两侧未见明显漏水、落水洞、漩涡等现象。在上下游

选取5处相对较规则的断面进行沟水流量实测,结果表明,流量无明显变化,推断隧道洞内涌水与地表水无明显关系。

3.2.3 物探法

(1)地震波反射法, DK 406 + 183 ~ DK 406 + 218 段纵波出现2组强P波反射和4组强S波反射,岩体P/S波速比值在该段明显增加,推测该区间围岩岩体节理裂隙发育且分布集中,并富含裂隙水,如图4所示。

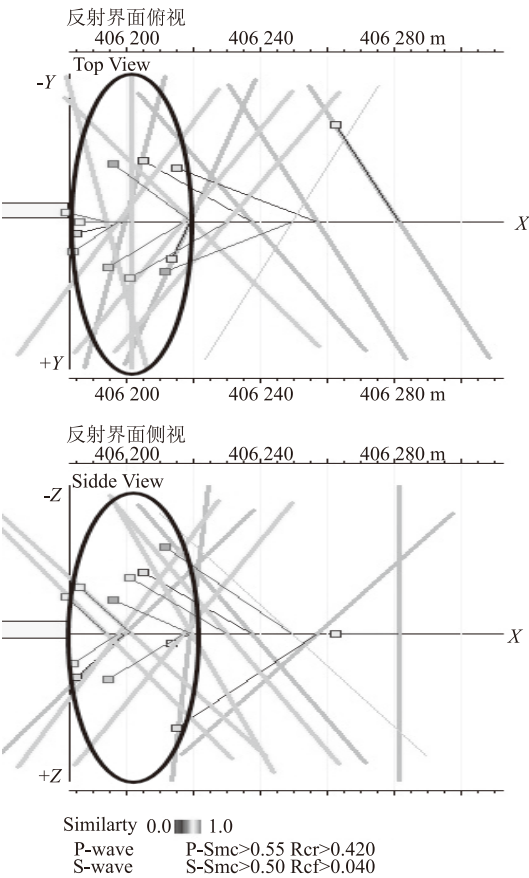


图4 DK 406 + 183 ~ + 313 段 TSP 探测成果图

(2)地质雷达,推测上台阶前方偏左5~40 m (D1K 406 + 188 ~ D1K 406 + 230)间有一与隧道走向近平行的破碎带,富水,延伸较远,如图5所示。

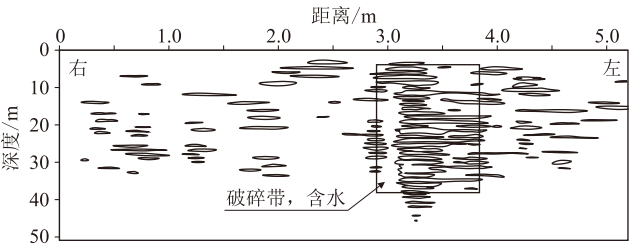


图5 地质雷达探测成果图(图像反转)

3.2.4 钻探法

根据地质调查及物探成果,布置水平钻8孔,实际施作14孔,孔深24~30 m,外插角0~15°,钻孔布置如图6所示。钻探结果表明,其中9孔出水,5号、8号孔分别钻进至4 m、7 m时有水喷出,其余孔出水在10~15 m深度,各孔出水初始浑浊,含细砂,13~49 h后清澈。钻进中5号孔在DK 406 + 184时有10 cm突进,其余钻孔钻进过程中均无突进现象,但存在局部卡钻现象。钻孔观测总时长为16 d,期间水量无衰减趋势,9孔累计水量520~580 m³/h。

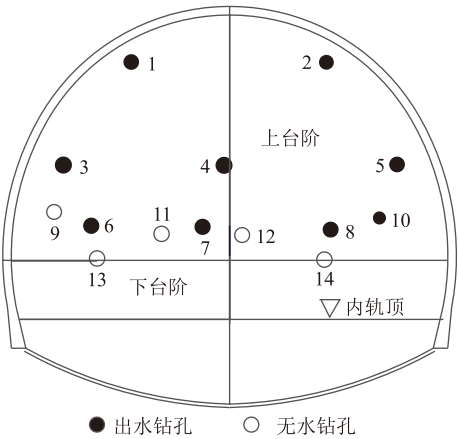


图6 水平钻孔布置示意图

3.2.5 综合分析

曼么二号隧道 DK 406 + 183 掌子面前方3~9 m 范围内为栖霞组灰岩,岩质较硬,节理裂隙较发育。推测前方3~9 m (DK 406 + 186 ~ + 192 段以后)围岩强度较低、岩质偏软,节理与裂隙发育,或为裂隙密集带,富水,存在较大涌水风险,DK 406 + 184 处存在一小型空洞或溶蚀裂隙,岩溶中等发育。

3.2.6 开挖揭示

曼么二号隧道 DK 406 + 183 ~ + 223 段采取超前加固、泄水处治措施后,开挖出渣均为栖霞组灰岩,岩体破碎,主要存在3组发育溶蚀裂隙,走向不规则,以陡倾为主,间距约0.8~0.2 m,无充填,溶蚀面起伏不平,呈棕黄色;围岩受裂隙切割呈块状结构,局部为碎石状压碎状结构,地下水主要为岩溶裂隙水,开挖过程未见明显溶蚀空洞及岩溶管道。开挖地质情况与综合分析结论相符。

3.3 太达村隧道弱胶结砂岩

3.3.1 工程概况

太达村隧道全长5 815 m,主要穿越下第三系渐新至始新统(E2 - 3)泥岩、炭质泥岩、砾岩、砂岩,

IV级围岩,地质复杂程度预分级为简单。斜井工区正洞小里程施工至DK 241+784遇弱胶结砂岩,地质复杂程度分级调为复杂,按其它预案中第四系松散富水围岩探测,重点为探测弱胶结砂岩分布段落和我含水特征,为优化施工组织和确定处治方案提供依据。

3.3.2 地质调查法

该隧道施工至DK 241+784时,上台阶掌子面左侧出碴后出现少量渗水,紧接着出现持续掉块,形成小塌腔;在初喷无效的情况下,掌子面拱部持续坍塌,作业台车被后推5 m,坍塌物堆满掌子面。堆积物呈粉砂状,浅灰色,手捏无强度,块体可见沉积层理,掌子面拱部及左侧未见渗水,右侧碴体下方见渗水痕迹,坍塌物累计约300 m³。

地表补充地质调查,洞内坍塌段地表及附近未见明显变形、开裂、沉降。

3.3.3 物探法

(1)地震波发射法,推测DK 241+780~DK 241+764段节理裂隙发育,岩体破碎,地下水较发育;DK 241+764~DK 241+722段节理裂隙较发育~发育,岩体较破碎~破碎,地下水局部较发育。

(2)地质雷达探测,推测前方7~23 m可能为软弱夹层或泥砂、富水填充,前方1~3 m段波形反射较强,围岩较破碎,节理裂隙较发育。

(3)瞬变电磁法,采用洞内地表沿线路纵向对未开挖段探测,综合反演推测沿隧道纵断面DK 241+280~+320、DK 241+500~+630和DK 241+710~+784段存在较大的相对低阻区,推测为极破碎、极软弱或富水岩体。

3.3.4 钻探法

采用洞内水平钻孔及地表沿线路中心两侧交替布置垂直钻孔,对物探法异常区域进行钻探验证。

3.3.5 综合分析

综合物探及钻探法结果,推测DK 241+500~+630、DK 241+710~+784为弱胶结砂岩,松散粉砂状,饱水时呈流沙状,为VI级围岩,其余段落以砾岩、砂岩、炭质泥岩为主,为V级围岩。

3.3.6 开挖揭示

弱胶结砂岩段经过洞内与地表注浆、管棚、泄水等措施超前加固处理后,施工得以进行,未开挖段落经过进口、斜井同时增加平导超前施工,使得该隧道工期得以保证。开挖揭示弱胶结砂岩分布于DK 241+504~DK 241+594、DK 241+694~DK 241+784段,与超前地质预报综合分析成果基本相符,如

图7所示。

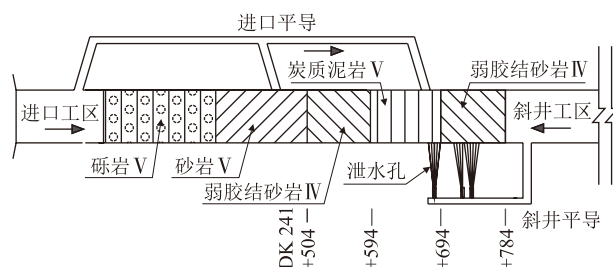


图7 太达村隧道施工组调整后的施工示意图

4 结论

本文通过研究综合超前地质预报在玉磨铁路复杂地质隧道的应用,总结得出以下主要结论:

(1)针对长大地质复杂隧道的超前预报,应采用多种手段相互结合、相互印证的模式开展预报工作。地质调查法是基础,不仅需要开展洞内地质素描,也包括地表补充地质调查,综合分析工作是重点。

(2)隧道开挖过程中,应根据揭示工程地质与水文地质条件、地质因素对隧道影响程度及诱发环境问题的程度,动态调整地质复杂程度分级。

(3)对隧道开挖中可能出现的各类不良地质,如突水突泥、岩溶、岩盐、弱胶结砂岩、有害气体等,应采用不同的探测手段组合,编制针对性的超前地质预报探测预案,根据地质复杂程度分级,动态调整探测手段和技术要求。

(4)超前地质预报工作不仅要探明不良地质体降低施工风险,为隧道开挖确定围岩级别、设计参数和工程措施提供依据,而且也要为全隧施工组织优化、确保工期提供有利支撑。

参考文献:

- [1] TB 10012-2019 铁路工程地质勘察规范[S]. TB 10012-2019 Code for Geology Investigation of Railway Engineering [S].
- [2] 齐传生. 隧道及地下工程超前地质预报技术[J]. 隧道建设, 2005, 25(3): 9-11. QI Chuansheng. Advance Geological Prediction Technology of Tunnel and Underground Engineering [J]. Tunnel Construction, 2005, 25(3): 9-11.
- [3] Q/CR 9217-2015 铁路隧道超前地质预报技术规程[S]. Q/CR 9217-2015 Technical Specification For Geology Forecast of Railway Tunnel [S].
- [4] 杨峰, 李志华, 史建林. TSP超前预报在隧道工程中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(2): 76-80. YANG Feng, LI Zhihua, SHI Jianlin. Study on Application of TSP

Advanced Forecast in Tunnel Construction [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(2): 76–80.

[5] 刘新荣, 刘永权, 杨忠平, 等. 基于地质雷达的隧道综合超前预报技术[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S2): 51–56.

LIU Xinrong, LIU Yongquan, YANG Zhongping, et al. Synthetic Advanced Geological Prediction Technology for Tunnels Based on GPR [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 51–56.

[6] 李貅, 武军杰, 曹大明, 等. 一种隧道水体不良地质体超前地质预报方法: 瞬变电磁法[J]. 工程勘察, 2006, 34(3): 70–75.

LI Xiu, WU Junjie, CAO Daming, et al. Advanced Geologic Forecasting for Unfavorable Geological Body with Water-Transient Electromagnetic Method [J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006, 34(3): 70–75.

[7] 汪文强. 瞬变电磁法探测花岗岩蚀变囊状水体应用研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 19–23.

WANG Wenqiang. Application Research on Detection of Capsule Water Body Causing in Granite Alteration by Transient Electromagnetic Method [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 19–23.

[8] 何省, 余大龙, 康芮. 隧道施工大型岩溶整治探讨[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(3): 10–15.

HE Xing, YU Dalong, KANG Rui. Discussion on Large-Scale Karst Treatment in Tunnel Construction [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(3): 10–15.

(上接第35页)

参考文献:

[1] Bhattacharya A, Sen A, Das S. An Investigation on the Anti-loosening Characteristics of Threaded Fasteners under Vibratory Conditions [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(8), 1215–1225.

[2] 侯圣杰, 刘先恺, 汤凯谊, 等. 高速磁浮交通环境与灾害监测预警系统方案研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 7–11.

HOU Shengjie, LIU Xiankai, TANG Kaiyi, et al. Study on Plan of High-Speed Maglev Traffic Environment and Disaster Monitoring and Early Warning System [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 7–11.

[3] 曾楚琦, 潘自立, 莫宏愿, 等. 基于光纤光栅的高速铁路钢轨损伤识别技术[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(5): 79–83.

ZENG Chuqi, PAN Zili, MO Hongyuan, et al. Technologies of Damage Identification for High-Speed Rail Based on Fiber Grating [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5): 79–83.

[4] 房芳, 郑辉, 汪玉, 等. 机械结构健康监测综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 269–292.

FANG Fang, ZHENG Hui, WANG Yu, et al. Mechanical Structural Health Monitoring: a Review [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 269–292.

[5] Alnuaimi H., Amjad U., Russo P., et al. Monitoring Damage in Composite Plates from Crack Initiation to Macro-crack Propagation Combining Linear and Nonlinear Ultrasonic Techniques [J]. Structural Health Monitoring, 20(1): 139–150.

[6] 屈文忠, 张梦阳, 周俊宇, 等. 螺栓松动损伤的亚谐波共振识别方法[J]. 振动测试与诊断, 2017, 37(2): 279–283.

QU Wenzhong, ZHANG Mengyang, ZHOU Junyu, et al. Using Sub-Harmonic Resonance to Detect Bolted Joint Looseness [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(2): 279–283.

[7] Liu Shaopeng, Li Yourong, Wang Tao, et al. A piezoelectric Active Sensing Method for Detection of Bolt Load Loss [J]. Sensor Review, 2014, 34(4): 337–342.

[8] Gao G, Li D, Shi D, et al. Detection on Fatigue Crack of Aluminum Alloy Plate based on Modulation Nonlinear Lamb Waves and Time Reversal Method [J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 1373–1377.

[9] Biwa S, Hiraiwa S, Matsumoto E. Experimental and Theoretical Study of Harmonic Generation at Contacting Interface [J]. Ultrasonics, 2006, 44: 1319–1322.

[10] 肖宏, 杨霞, 陈泽军, 等. 赫兹接触理论在采用边界元法分析轧机轴承载荷中的应用[J]. 中国机械工程, 2010, 21(21): 2532–2535.

XIAO Hong, YANG Xia, CHEN Zejun, et al. Application of Hertz Contact Theory in Analyzing Load Distribution of Mill Roller Bearing with Boundary Element Method [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(21): 2532–2535.

[11] 韦代平. 兰姆波在含微损伤铝板中的非线性特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

WEI Daiping. Study on Nonlinear Characteristics of Lamb Waves in Aluminum Plates with Micro Damage [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.