

地质雷达在隧道掌子面及基底岩溶探测中的应用

谭涛, 李川, 权强

重庆交通大学土木工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年4月27日; 发布日期: 2026年5月8日

摘要

隧道施工进入复杂围岩段后, 掌子面前方围岩条件和基底稳定性往往变化较快, 若判断不及时, 容易引发掉块、局部失稳、渗水等问题。地质雷达具有无损、快速、分辨率较高和现场操作灵活等特点, 近年来在隧道短距离超前地质预报中应用较多。本文依托天水至陇南铁路的马街隧道3号横洞小里程段, 结合现场掌子面超前探测、基底岩溶探测及掌子面地质素描资料, 对地质雷达在两个不同应用场景中的使用效果进行了分析。结果表明, 地质雷达能够较敏感地反映围岩破碎、节理裂隙发育及局部含水异常等信息, 对基底浅部异常区也具有较好的识别能力。工程应用表明, 将地质雷达用于掌子面超前预报和基底岩溶排查, 能够为施工中的短进尺开挖、初期支护加强和截排水措施调整提供较直接的依据, 具有较大的推广应用价值。

关键词

地质雷达, 隧道施工, 超前地质预报, 掌子面, 基底岩溶

Application of Ground Penetrating Radar in Tunnel Heading Face and Karst Detection at the Base

Tao Tan, Chuan Li, Qiang Quan

School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

Received: April 7, 2026; accepted: April 27, 2026; published: May 8, 2026

Abstract

After tunneling enters a complex surrounding rock section, the geological conditions of the rock

mass ahead of the heading face and the stability of the base often change rapidly. If these changes are not promptly identified, issues such as rock falls, local instability, and water seepage may occur. Ground Penetrating Radar (GPR) is characterized by being non-destructive, fast, having high resolution, and offering flexible on-site operation. In recent years, it has been widely applied in short-range advanced geological forecasting in tunneling. This paper, based on the small mileage section of the No. 3 cross tunnel of the Majie Tunnel on the Tianshui-Longnan Railway, analyzes the effectiveness of GPR in two different application scenarios by integrating on-site advanced detection at the heading face, karst detection at the base, and geological mapping data from the face. The results show that GPR can sensitively reflect information on rock mass fragmentation, the development of joints and fissures, and local water content anomalies. It also demonstrates good capability in identifying shallow abnormal zones at the base. Engineering applications indicate that using GPR for advanced forecasting at the heading face and for karst investigation at the base can provide direct evidence for short-step excavation, reinforcement of primary support, and adjustment of interception and drainage measures during construction. This approach holds significant potential for broader application and promotion.

Keywords

Ground Penetrating Radar, Tunnel Construction, Advanced Geological Forecast, Heading Face, Karst at the Base

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

隧道施工所害怕的最大问题不是由于地质复杂这个原因造成的,而是由于前方地质情况具有很大的未知性,尤其在深埋、长大、构造发育或岩溶较明显的区段,掌子面前方一旦出现破碎带、富水裂隙、软弱夹层或局部空洞,施工风险往往会迅速放大,也正因为如此,超前地质预报已经成为隧道施工中的常规技术手段[1]-[3]。现有超前预报方法很多,像地质分析、超前钻探、TSP、红外探测和地质雷达等都有各自的适用范围。相比之下,地质雷达的优势在于做近距离、精细化的探测,其对围岩电性变化比较敏感,碰到裂隙发育、破碎带、含水异常或者岩溶空腔时,波形和能量变化通常会比较明显,因此在掌子面前方短距离预报中应用较为普遍[4]-[6]。但地质雷达这种手段也存在一些缺点,其探测距离比较有限,图像解释有时还会受到围岩介电性质、现场环境和施工条件的影响,所以在实际工程中,通常还是要把现场揭示、地质素描甚至钻探资料结合起来一起判断。

已有文章多数把注意力放在掌子面超前预报上,而把掌子面和基底两个场景放在同一篇文章里讨论的并不算多。天水至陇南铁路的马街隧道3号横洞小里程段同时做了这两方面的工作:一方面工作人员做了掌子面前方地质雷达预报,另一方面又做了基底岩溶专项探测,同时还保留了掌子面地质素描记录,工程条件比较完整。掌子面素描记录中提到掌子面为白龙江板岩夹炭质板岩,节理较发育、岩体较破碎,开挖扰动后拱顶及边墙易出现掉块,这也为后文的工程分析提供了现场地质依据。基于此,本文尝试把这两个场景放在同一个工程实例中讨论,从一个更贴近施工现场的角度,分析地质雷达在隧道施工中的应用价值。

2. 地质雷达

2.1. 探测原理

地质雷达本质上是一种电磁波探测方法,工作时通过发射天线向前方介质发射高频电磁脉冲,当电

磁波遇到不同介质的分界面时，由于介电常数和电导率存在差异，会产生反射、折射和散射，接收天线将返回信号采集下来，再通过处理软件形成波形图或灰度图，进而识别前方异常体的位置、规模和性质[7][8]。总结来说，其是通过不同介质对电磁波响应的差异，去推测前方地质条件的变化。

从工程使用效果看，地质雷达最大的优点是快和细，其不需要太复杂的现场准备，并且设备相对轻便，探测结果也比较直观，特别适合掌子面前方近距离范围内的精细探查。但地质雷达的不足也很明显，探测距离一般不算长，更适合短距离预报，还需要注意的是复杂围岩下的波形往往不是单一地质体的简单反映，而是多种因素叠加的结果，因此解释前方地质情况时必须结合地质背景和现场情况，不能只通过一张数据图下结论。

2.2. 典型波形特征

已有研究对不同异常体的雷达响应总结得比较清楚。一般来说，完整岩体多表现为中高频、同相轴较连续、波形相对均一；破碎带则常见中低频信号增强、波形杂乱、同相轴错断；裂隙密集带往往表现为频率变化较快、连续性较差；富水带则通常具有强反射、低频增强和能量快速衰减等特点；岩溶异常在图像上则更容易出现不规则强反射或局部紊乱反射[9]。这类经验特征虽然不能机械照搬，但对现场解译非常有帮助。

另外，从岩溶隧道的应用经验看，地质雷达对空洞和水体比较敏感，在岩溶发育区通常能取得较好的探测效果。但当围岩与异常体介电性质接近时，仍可能出现误判，因此在喀斯特地段最好配合超前钻探或其他手段进行复核，这一点对本文后面基底岩溶探测结果的理解也很重要。

3. 工程实例

3.1. 工程概况

本文依托工程为天水至陇南铁路的马街隧道3号横洞小里程段，如图1所示。根据马街隧道设计图纸资料，隧址区构造条件较为复杂，地下水类型以孔隙水和基岩裂隙水为主，局部还存在岩落、高地应力和软岩大变形等工程地质问题，隧道最大埋深较大，施工环境整体比较复杂。另外在设计资料中可以看出，3号横洞作为辅助坑道之一，相关区段还存在较明显的软岩大变形风险，这也说明在该区域开展施工期超前探测是有现实必要的。

从现场揭示情况看，研究段围岩主要为志留系白龙江板岩夹炭质板岩，节理裂隙较发育，岩体较破碎，开挖扰动后拱顶及边墙局部有掉块现象，围岩整体稳定性偏弱。因为上述情况，项目先后开展了掌子面超前预报和基底岩溶探测，希望把前方围岩变化和底部异常情况都提前解释清楚。

3.2. 探测实施

掌子面探测采用地质雷达设备对开挖面前方进行短距离预报，重点识别围岩完整性、裂隙发育及地下水异常情况，现场检测如图2所示，基底探测则采用3条纵向测线，对隧道底部局部异常和岩溶发育情况进行排查，如图3所示，这样的布线思路比较符合地质雷达在隧道中的常见做法，也就是根据掌子面断面条件和施工空间，尽量兼顾代表性和可操作性[10]。

从其他研究人员的文章来看，地质雷达在隧道掌子面上的测线布置通常会根据开挖方式、掌子面尺寸和重点部位进行调整，常见的是横向、纵向结合，或者围绕拱腰、墙腰、拱脚和中线布设测线，其目的并不是把掌子面全部扫一遍，而是在有限时间里尽量抓住最容易反映异常的部位，对于马街隧道这样的现场应用来说，这种做法也更符合施工节奏。

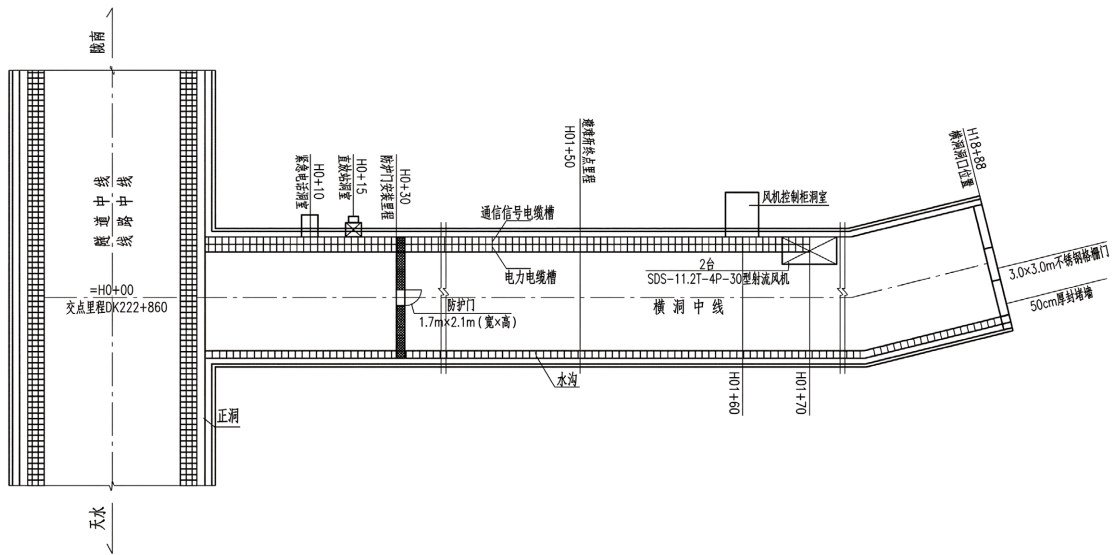


Figure 1. Location schematic diagram of Ma Street Tunnel No. 3 cross passage and main tunnel

图 1. 马街隧道 3 号横洞与正洞位置示意图



Figure 2. On-site GPR testing image

图 2. 地质雷达现场检测图

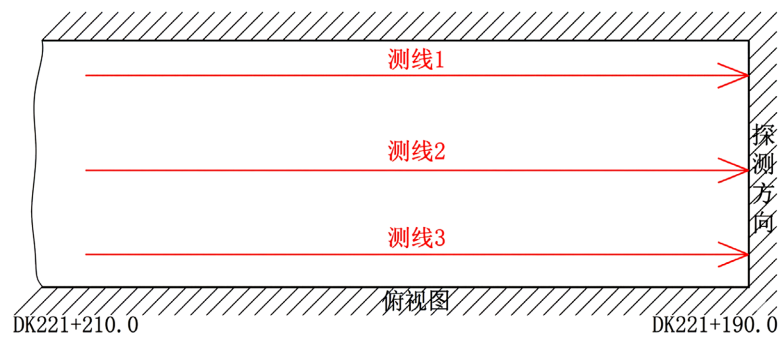


Figure 3. Layout diagram for basal karst detection survey lines

图 3. 基底岩溶探测测线布置图

3.3. 掌子面探测结果分析

从掌子面探测结果看,如图4所示,前方一定范围内雷达反射信号较强,局部波幅变化较大,同相轴连续性一般,个别区段波形较杂乱,结合现场掌子面地质素描判断,可以认为前方围岩整体完整性偏差,裂隙较发育,局部还存在地下水异常和掉块风险。总结的说,这一段最主要的问题是围岩破碎、节理发育和渗流隐患叠加带来的施工风险,这种判断和已有文献总结的波形特征是基本一致的。林志等[4]认为断层破碎带多表现为中低频、波形杂乱、同相轴错断;节理裂隙密集带常表现为信号较乱、振幅较强;富水带则往往有强反射和多次震荡。刘鑫等[6]也指出富水带通常会强烈振幅反射和高频成分衰减,探测距离也会因此减小。从马街隧道掌子面的探测图像看,前方围岩条件确实更接近“破碎围岩 + 裂隙发育 + 局部渗水风险”这一类情况。

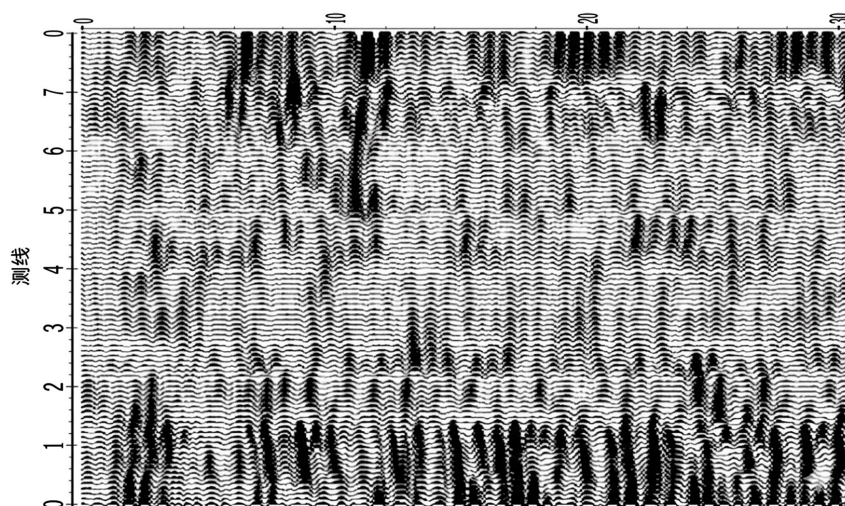


Figure 4. Radar waveform chart of the working face
图4. 掌子面雷达波形图

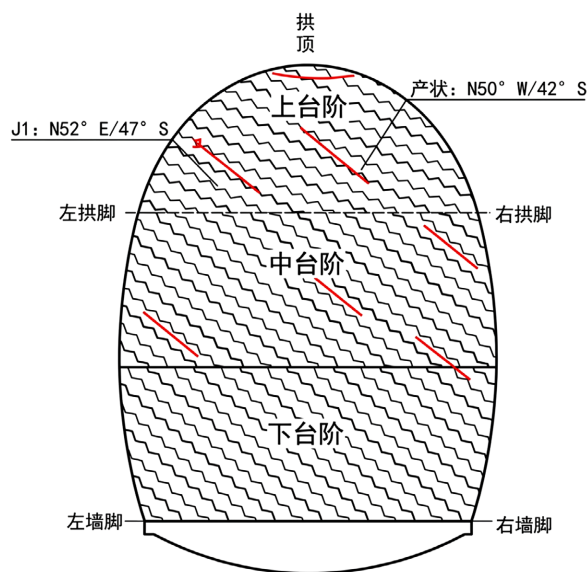
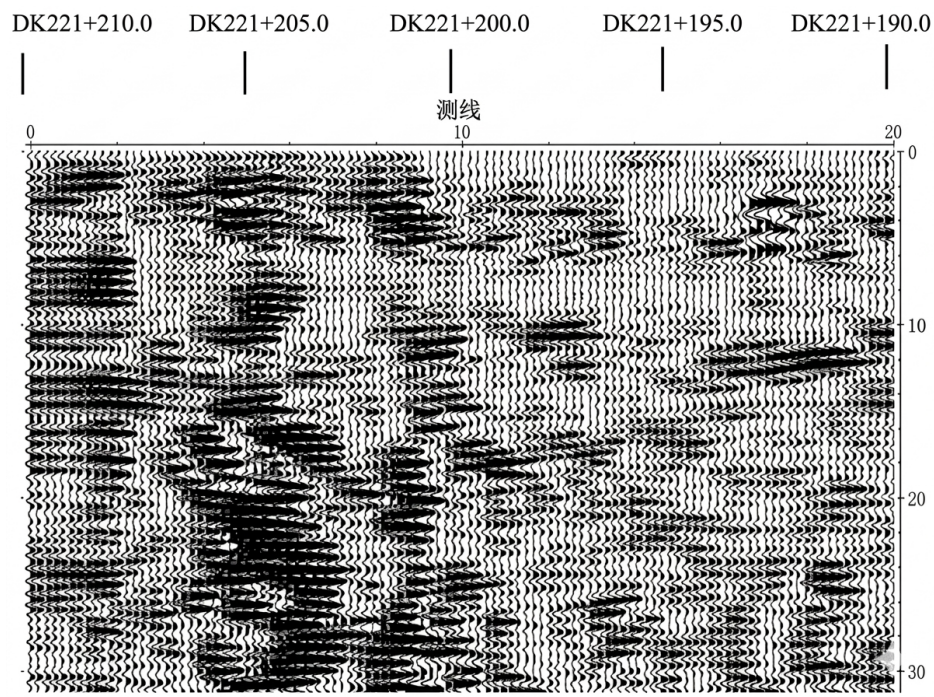


Figure 5. Geological sketch map of the working face
图5. 掌子面地质素描图



Figure 6. On-site view of the working face
图 6. 掌子面现场图

对施工来说，这样的结果已经足够有用，因为施工最需要的，不一定是特别复杂的地质分区图，而是知道前面是不是更破碎、会不会掉块、有没有渗水苗头。根据本次探测结果，现场采取短进尺、勤支护、早封闭并加强截排水，是比较稳妥的处理思路，这一点也和相关研究中“探测结果要尽快转化为施工措施”的思路是一致的[11]。此外，掌子面地质素描图和现场照片也能对雷达解释形成补充说明，如图 5 所示，素描记录表显示该掌子面板理较发育，岩质较软，节理较发育，岩体较破碎，局部破碎，围岩整体稳定性较差，如图 6 所示，现场照片则直观显示出围岩表面结构面发育、掌子面整体较碎裂的状态，这些信息与雷达预报结果在宏观上是一致的，也增强了文章中工程实例的完整性。



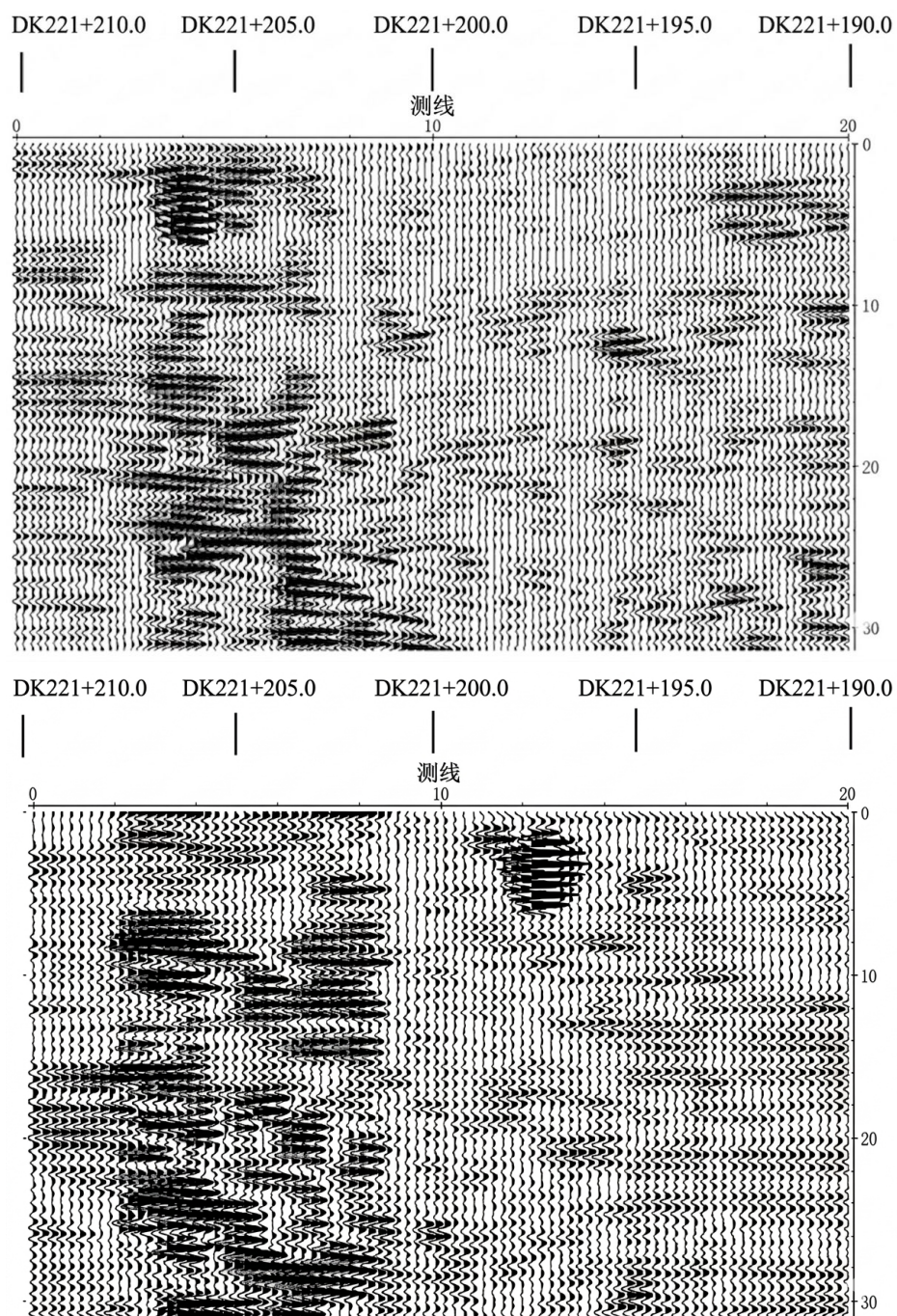


Figure 7. Radar image of three survey lines at the base
图 7. 基底三条测线雷达影像图

3.4. 基底岩溶探测结果分析

与掌子面探测相比，基底岩溶探测的关注点稍有不同，其更看重的是底部浅层范围内有没有明显异常、有没有岩溶发育迹象，以及这些异常会不会影响下台阶和后续施工。现场 3 条测线的综合结果表明，如图 7 所示，基底局部浅部范围内存在一定异常响应，说明该部位裂隙较发育、岩体完整性一般，但从整体来看并没有发现特别典型、连续的大规模溶蚀发育区。专项探测的价值重点在于排除了什么问题，

对本段基底来说,探测结果说明局部浅部受开挖扰动影响较明显,但整体没有出现强烈的岩溶发育迹象,这意味着后续施工可以在保持警惕的前提下按既定方案推进。类似的认识在岩溶隧道相关研究中也比较常见,地质雷达对空洞和水体更敏感,对局部异常排查有效,但要把异常最终解释成何种地质体,还得结合现场地质条件综合判断[12]。

从本文这个案例看,掌子面探测更偏向于对前方风险的提前识别,而基底探测则更偏向于对底部隐患的专项排查,两者一起正好构成了一个较完整的施工期地质雷达应用场景,这也是这篇文章相较于单一掌子面预报案例更有意义的地方。

3.5. 工程应用讨论

从现场应用效果看,地质雷达在马街隧道3号横洞小里程段的作用主要体现在两个方面:一是对掌子面前方近距离异常的快速识别,二是对基底浅部异常及岩溶发育迹象的专项排查,其优点在于探测快捷、分辨率较高、现场适应性较强,适合施工期短距离精细探测,不足之处在于探测距离有限,且解译结果易受围岩条件和现场环境影响[13]。其次本案例具有一定特殊性,研究段围岩为白龙江板岩夹炭质板岩,节理裂隙较发育、岩体较破碎,且局部存在含水影响,受片理构造、炭质成分及裂隙水共同作用,雷达信号容易出现衰减较快、同相轴连续性变差和局部波形紊乱等现象。因此,在该类地层中,雷达异常往往并非单一因素所致,解译时必须结合掌子面地质素描和现场揭示综合判断。此外,隧道内金属网、锚杆及施工设备等也会对雷达信号产生一定干扰,造成局部强反射或浅部图像失真,对此,现场应尽量减少可移动金属体干扰,优化测线布置,并结合数据预处理和多测线对比提高解译可靠性。

掌子面探测与基底探测在原理上具有一致性,但应用重点有所不同,掌子面探测更注重前方围岩完整性变化、裂隙发育及局部含水异常,服务于施工风险预警,基底探测则更关注浅部异常范围及岩溶发育迹象,服务于底部隐患排查。总体来看,本案例表明地质雷达适合作为复杂围岩隧道施工中的短距离精细探测手段,但应始终与地质素描、现场揭示等资料结合使用,以提高解释精度和工程适用性。

4. 结论

天水至陇南铁路马街隧道3号横洞小里程段围岩以白龙江板岩夹炭质板岩为主,节理裂隙较发育,岩体较破碎,施工中存在掉块、局部失稳及渗水风险,具备开展掌子面超前预报和基底专项探测的实际需求。地质雷达探测结果表明,其能够较敏感地反映掌子面前方围岩完整性变化、裂隙发育及局部含水异常,也能够识别基底浅部局部异常区,对施工期短距离精细探测具有较好的适用性。

本案例表明,板岩夹炭质板岩地层中地质雷达信号易受片理构造、炭质成分及裂隙水影响,表现出衰减较快、连续性较差和局部波形紊乱等特点。因此,在该类地层条件下,雷达异常解译应结合掌子面素描、现场揭示等资料综合判断,避免孤立解译。同时,掌子面附近金属网、锚杆及施工设备等会对雷达信号产生一定干扰,需通过优化现场布置、加强数据分析和多测线对比分析提高结果可靠性。掌子面探测与基底探测虽原理一致,但前者侧重前方风险预警,后者侧重底部异常排查。总体而言,地质雷达可作为复杂围岩隧道施工中掌子面和基底短距离探测的有效手段,但应与其他现场资料联合判定,以更好服务施工决策。

参考文献

- [1] 许锦权, 杨国恒, 康元茂, 等. 超前地质预报技术在隧道施工安全风险识别与防范中的应用[J]. 交通节能与环保, 2024, 20(S2): 211-214.
- [2] 关瑞士, 郑仕跃, 彭文彬, 等. 综合超前地质预报技术在隧道探测中的应用[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(19): 72-73.

-
- [3] 陈善林. 地质雷达法在某公路隧道超前地质预报中的应用[J]. 四川建筑, 2024, 44(3): 77-78, 82.
- [4] 林志, 冯森, 范国宇, 等. 地质雷达在某隧道超前地质预报中的应用[J]. 勘察科学技术, 2021(3): 47-51, 64.
- [5] 张二锋. 探地雷达在岩溶隧道超前地质预报中的应用[J]. 工程与建设, 2024, 38(5): 1016-1018.
- [6] 刘鑫, 孙治国, 高杉. 地质雷达在隧道超前预报中的应用[J]. 地质装备, 2025, 26(5): 34-39.
- [7] 谢代纯. 地质雷达在公路隧道超前地质预报中的应用研究[J]. 福建建材, 2022(12): 37-39, 74.
- [8] 吴海, 郑航飞. 地质雷达勘探方法在隧道地质超前预报中的应用[J]. 四川水泥, 2024(2): 242-244, 248.
- [9] 董伟伟, 麦燕午. 地质雷达法在隧道超前地质预报中的应用[J]. 建材世界, 2022, 43(4): 96-98.
- [10] 杨刚. 综合超前地质预报在隧道项目中的应用研究[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(15): 98-100.
- [11] 朱贵方. 综合超前地质预报在隧道施工中的应用研究[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(12): 89-92.
- [12] 喻海军, 李云. 地质雷达 GPR 技术在公路隧道超前地质预报中的应用分析[J]. 福建交通科技, 2022(2): 56-62.
- [13] 刘荣国, 陶川溢. 地质雷达在高速公路隧道地质超前预报中的应用[J]. 中国科技信息, 2022(21): 75-79.