

TGS360Pro 超前地质预报技术的数据处理分析 及其在突涌水不良地质体识别中的应用

王 开 华, 母 丽 程, 谢 平, 尹 秀, 周 路 明

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

摘 要:近年来,随着我国隧道及地下工程的飞速发展,突涌水等不良地质条件逐渐成为制约地下空间发展的重要因素,采用 TGS360Pro 超前地质预报技术(tunnel geology survey, 简称 TGS)提前探测掌子面前方的富水不良地质体,对于保证隧道及地下工程的安全开挖具有重要的意义。介绍了 TGS360Pro 超前地质预报技术的原理及数据采集方式;分析了 TGS360Pro 超前地质预报技术的数据处理及其对预报结果的影响;阐述了对滇中某隧道超前地质预报结果进行的数据处理与分析,准确地预报出该隧道掌子面前方拱顶的突水不良地质情况;证明了 TGS360Pro 超前地质预报技术对突涌水不良地质情况具有很强的识别能力,旨在为今后 TGS360Pro 超前地质预报方法在突涌水不良地质情况预报中的应用借鉴。

关键词: TGS360Pro; 数据处理; 超前地质预报; 突涌水不良地质情况

中图分类号: TV7; TV522; TV554+.16; TV554+.3

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)06-0001-05

Data Processing and Analysis of TGS360Pro Technology and Its Application in the Identification of Geological Anomalies in Sudden Water Inrush

WANG Kaihua, MU Licheng, XIE Ping, YIN Xiu, ZHOU Luming

(Sinohydro Bureau 7 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610213)

Abstract: In recent years, with the rapid development of tunnels and underground projects in China, adverse geological conditions such as sudden water inrush have gradually become an important factor restricting the development of underground space. The use of TGS360Pro Tunnel Geology Survey (TGS) to detect water-rich and geological anomalies in front of the tunnel palm face in advance is of great significance for ensuring the safe excavation of tunnels and underground projects. This paper introduces the principle and data acquisition method of TGS360Pro technology, analyzes the parameters that affect the processing of TGS360Pro data and their impact on the prediction results, selects the advanced geological prediction results of a tunnel in central Yunnan for data processing and analysis, accurately predicts the geological anomalies of water inrush from the arch in front of the tunnel palm face, and proves that TGS360Pro technology has strong recognition ability for geological anomalies in sudden water inrush, intends to provide reference for the application of TGS360Pro method in predicting adverse geological conditions caused by sudden water inrush in the future.

Key words: TGS360Pro; Data processing; Geological forecast; Geological anomalies in sudden water inrush

0 引 言

在水利水电工程建设中,不可避免地会进行地下洞室的施工。但在地下洞室的施工过程中,由于作业面前方的地质条件不可预见,容易遇到因不良地质构造导致的地质灾害发生而造成人员伤亡和经济损失。据不完全统计,由突涌水不良地质情况引发的事故约占地下洞室安全事故的 75%,突涌水不良地质情况已成为制约地下空间

建设的瓶颈问题^[1-2]。近几年,我国从俄罗斯引入的 TGS360Pro 超前地质预报系统,由于具有预报距离长、施工干扰小、智能化程度高及预报结果丰富等显著特点,可利用地震反射波信号特征的走时、频率、相位、振幅等参数形成一套流体预测解译机制,在突涌水等不良地质情况的超前地质预报中得到了广泛应用。徐磊对 TGS360Pro 超前地质预报技术开展了相关的理论研究工作,并与 TSP 技术进行了对比试验研究,证明了

收稿日期: 2023-12-10

TGS360Pro 技术的有效性及其与 TSP 技术的一致性^[3];张明财通过充水溶洞模型算例验证了 TGS360Pro 在隧道掌子面前方赋水体探测的合理性与有效性^[4];张杰通过对 TGS360Pro 预报结果与现场开挖后的地质情况进行跟踪调查,证明了 TGS360Pro 对于不良地质构造具有较强的探测能力^[5];李钰强在工程应用中测试了 TGS360Pro 具有的超前地质预报能力,通过对预报段开挖的跟踪编录以及对预报成果进行的对比分析,证明了 TGS360Pro 系统得到的数据在超前地质预报中具有较强的适用性^[6];颜英军针对同一掌子面同时应用 TGS360Pro 和 TRT7000 两种预报系统进行了测试与对比分析,实时跟踪围岩的开挖情况,所得到的 TGS360Pro 超前地质预报结果与实际开挖情况基本相符^[7]。许明亮采用 TGS360Pro 技术对温泉隧道进行了探测与解译,通过与现场开挖揭露的情况进行对比验证,表明 TGS360Pro 技术能较为精确地探测出岩溶空腔位置^[8]。

笔者从 TGS360Pro 的技术原理出发,通过分析研究其数据处理过程中参数的选取对预报结果的影响程度,确定出波速是影响数据处理结果的主要参数,提出了 TGS360Pro 数据理解译应遵循的参数选取原则,并将 TGS360Pro 超前地质预报技术应用于滇中某引水隧道的地质预报工作,通过将预报解译结果与现场开挖揭露的情况进行对比验证,表明 TGS360Pro 超前地质预报技术能较为精确地探测出掌子面前方的突涌水不良地质情况。

1 TGS360Pro 超前地质预报技术

TGS360Pro 超前地质预报技术是利用地震反射波原理,基于不同极化反射地震波记录的地震波信号,预报隧道掌子面前方及其周围不良地质体或岩性变化带等地质状况的一种方法。采用的震源种类有大锤、液压锤和炸药,其中锤击震源在合适的地质条件下能够达到 200 m 的探测范围;炸药震源可以达到几百米。数据采集系统预设了三分量检波器,可以将这些检波器布置在隧道壁或掌子面上,其参数为 6 ~ 8 个^[9]。TGS360Pro 技术的探测原理见图 1。

2 数据处理

2.1 数据处理理论

TGS360Pro超前地质预报技术的三维正演

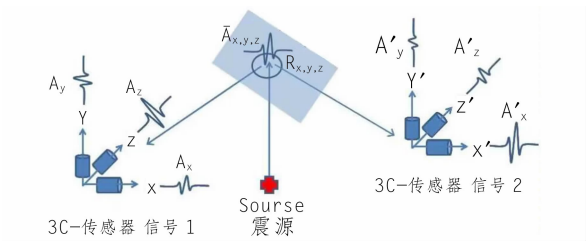


图 1 TGS360Pro 技术探测原理图

模拟,首先根据三维模型的模拟要求,选取大小合适的网格尺寸对模型的网格进行剖分,将函数定义域分解为众多相邻但不重合的子区域,网格剖分的交点即为节点;利用有限差分原理对地震波的波动方程进行求解,得到每个节点的波场参数;根据岩石力学公式计算并获得掌子面前方的应力梯度、含水概率、泊松比、波速等参数,从而实现对掌子面前方的地质预报^[10]。在弹性波正演三维波动方程中,波速、密度、含水率等参数均会参与 TGS360Pro 技术的正反演过程,不同的初始模型可能会影响到 TGS360Pro 技术预报结果的准确性。因此,进行数据处理过程中的参数分析研究,确定出波速、密度、含水率参数初始模型对 TGS360Pro 技术预报结果的影响十分重要。

2.2 数据处理参数分析

在生产实践中针对 TGS360Pro 超前地质预报的处理结果,重点围绕围岩应力梯度、含水概率、纵波速度等参数的特征,对掌子面前方不良地质情况进行预报。

(1) 不同密度参数对 TGS360Pro 技术数据处理结果的影响。隧道围岩以工程地质三大岩(沉积岩、变质岩、岩浆岩)以及第四纪的松散堆积体为主。根据所调研的岩石密度值,选取了一组密度参数为 1.6、2.3、3.0 g/cm³ 进行研究,密度参数对波速反演结果的影响程度见图 2。

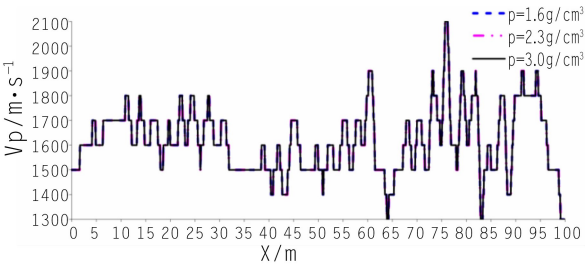
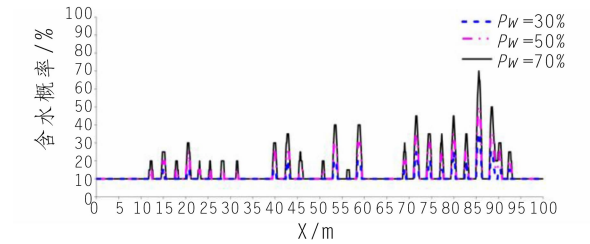


图 2 不同密度参数模型纵波速度反演结果曲线对比图

图 2 中的不同密度参数反演的波速结果范

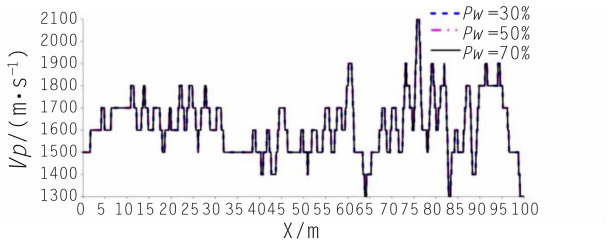
围均在 1 300~2 100 m/s 之间,采用不同的初始密度参数模型进行 TGS360Pro 超前地质预报,其反演结果几乎无差异。因此,在该技术的数据处理过程中可以忽略密度参数对预报结果的影响。

(2) 不同含水概率参数对 TGS360Pro 技术数据处理结果的影响。含水率参数值会影响到弹



(a) 含水概率

性波的波速值,而波速是 TGS360Pro 超前地质预报正反演过程中的重要参数之一,其含水率参数的选取会对预报结果产生一定的影响。因此,研究时选取了一组含水概率参数,分别为 30%、50%、70%进行研究。不同含水率参数模型反演结果曲线对比情况见图 3。



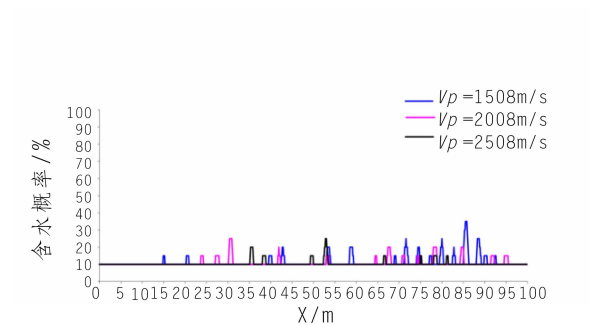
(b) 纵波速度

图 3 不同含水率参数模型反演结果曲线对比图

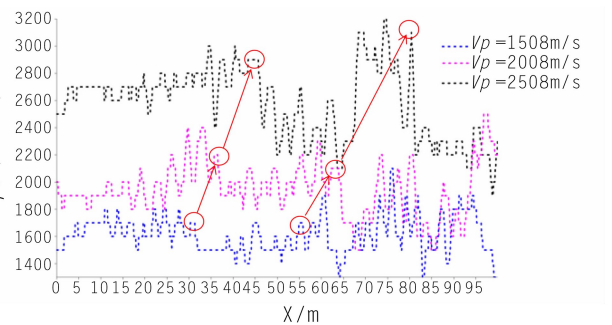
图 3(b)揭露出不同含水概率对纵波速度预报结果无影响。图 3(a)为不同含水概率模型参数影响含水概率结果的峰值,其初始含水概率模型越大,富水体的发育程度越高;但不同含水概率参数模型不影响含水异常体的位置分布。因此,在进行 TGS360Pro 超前地质预报数据处理过程中,当遇到富水地质体异常时,则需结合地勘资料、掌子面揭露的地质情况以及超前钻孔等综合资料确定初始含水概

率参数模型,以便更准确地预报富水体的严重程度及致灾特性。

(3) 不同纵波速度参数对 TGS360Pro 技术数据处理结果的影响。波速是直接参与 TGS360Pro 超前地质预报正反演过程的参数,对预报结果肯定会产生影响。因此,研究选取的不同初始波速 V_p 模型分别为 1 508、2 008、2 508 m/s,用于分析其反演结果曲线的特征。不同初始波速模型的反演结果曲线对比情况见图 4。



(a) 含水概率



(b) 纵波速度

图 4 不同初始波速模型的反演结果曲线对比图

图 4(a)显示了不同的初始速度模型进行数据处理,所预报的含水概率曲线显示富水体的位置和规模均发生改变。图 4(b)中,随着初始速度模型增大,所揭露的预报异常体的位置逐渐后移,当预报里程较远时,由于隧洞岩体的不均匀性,异常体的相对位置差异性特征比较模糊;围岩的结构及地质特征对异常体预报结果的影响将会随着预报距离的增加进行叠加,即与实际波速偏离的初始波速模型随着预报里程的增加异常体位置的

偏差会变大。

2.3 数据处理参数的选取

笔者通过对 TGS360Pro 超前地质预报的原理、数据处理及参数对预报结果的影响进行分析后,提出了该技术在数据处理过程参数选取的原则:(1)初始密度模型的值对预报结果的影响可以忽略,在数据处理过程中不予考虑;(2)初始含水概率参数模型的值对于富水体的判识及判定具有重要影响,在设置初始含水概率参数时需要结合

掌子面揭露的地质特征、勘察资料及超前钻孔资料综合确定;(3)鉴于初始波速模型值直接决定TGS360Pro 超前地质预报技术对不良地质体的位置判识,进而影响到预报结果的准确性,在进行数据处理过程中需要结合多种手段慎重选择初始速度模型。

3 TGS360Pro 超前地质预报技术在工程中的应用

3.1 工程概况

某引水隧洞项目位于云南省大理市,该工区包括 8 个隧洞暗涵,桩号范围为 DLⅡ 50+057~DLⅡ 72+730,输水线路的长度为 22.673 km。区内盆地山岭相间,河流沟谷发育,隧洞段全长为 19.878 km,全洞段围岩以砂岩、泥页、页岩等完整性差、较破碎的Ⅳ级、Ⅴ级岩体为主,隧洞沿线断层、褶皱发育。隧洞共穿越 8 条断层,且穿越大营镇岩溶水系统(DLⅡ-1-9)、断裂带含水体、毕马村D1k 白云质灰岩岩溶高水位段及断层深埋段。磨盘山隧洞段的长度约为 1.42 km,该段围岩呈中等透水状,岩溶发育且

隧洞沿线穿越何家箐水库下游库首,地下水丰富,涌水、突泥风险等级高,极易引发地下泥石流和高压大涌水,隧洞开挖过程中突涌水安全风险极高。

所要预报的洞段桩号为 DLⅡ 63+470,揭露的岩性主要为砂岩、钙质泥岩,呈灰黑色、浅灰色,中等风化,裂隙呈块状或中厚层状结构,岩体较破碎,节理裂隙较发育,掌子面潮湿。根据以上地质素描结果,地质人员建议该掌子面围岩等级分类为Ⅳ级。

3.2 测线的布置

预报过程中,采用掌子面预报观测系统,在隧道 DLⅡ 63+470 掌子面位置布置了 6 个水平状的地震波信息接收孔(检波点),上下共两排,各 3 个,两端传感器间隔 4.0 m;上排检波器距离隧道底部 1.7 m,下排检波器距离隧道底部 0.5 m;孔径为 50 mm,震源锤击点共 8 个,布置于检波点中间及上下两排检波点的两端。掌子面测线布置情况见图 5。

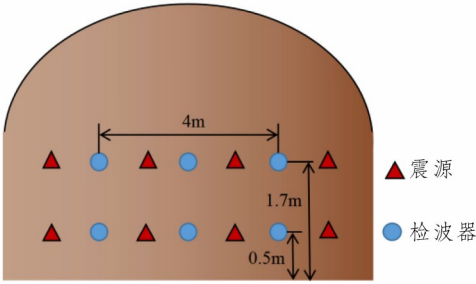


图 5 掌子面测线布置示意图



3.3 解译结果

利用 TGS360Pro 超前地质预报技术对该隧洞桩号 DLⅡ 63+470~DLⅡ 63+320 段进行了探测,其有效预报长度为 150 m。在进行数据处理过程中,将密度模型参数选取为 2.32 g/cm³。根据掌子面揭露的特征及地勘资料综合确定其含水率值为 50%。笔者通过对 TGS360Pro 系统采集到的数据进行处理分析,得到掌子面前方应力梯度、含水概率及纵波速度成果图。TGS360Pro 超前地质预报解译结果见图 6。根据现场地质情况和预报解译结果图对掌子面前方探测到的 150 m 距离进行了预报和解译,结果如下:

桩号 DLⅡ 63+470~DLⅡ 63+455:此段岩体较破碎,节理裂隙较发育,发育有泥质夹层,存

在渗水的可能。推测主体围岩为Ⅳ类围岩。

桩号 DLⅡ 63+455~DLⅡ 63+420:此段围岩破碎,节理裂隙发育,岩体危险等级高。推测主体围岩为Ⅴ类围岩。其中桩号 DLⅡ 63+440~DLⅡ 63+435 段推测存在溶腔积水,可能会发生突涌水状况。

桩号 DLⅡ 63+420~DLⅡ 63+375:此段围岩岩体较破碎,裂隙较发育,危险等级较高,推测主体围岩为Ⅳ类围岩。其中桩号 DLⅡ 63+380~DLⅡ 63+375 段存在渗水滴水的可能。

桩号 DLⅡ 63+375~DLⅡ 63+320:此段围岩岩体相对较完整,夹层发育,存在渗水的可能性小,局部围岩危险等级较高,推测主体围岩为Ⅳ类围岩。

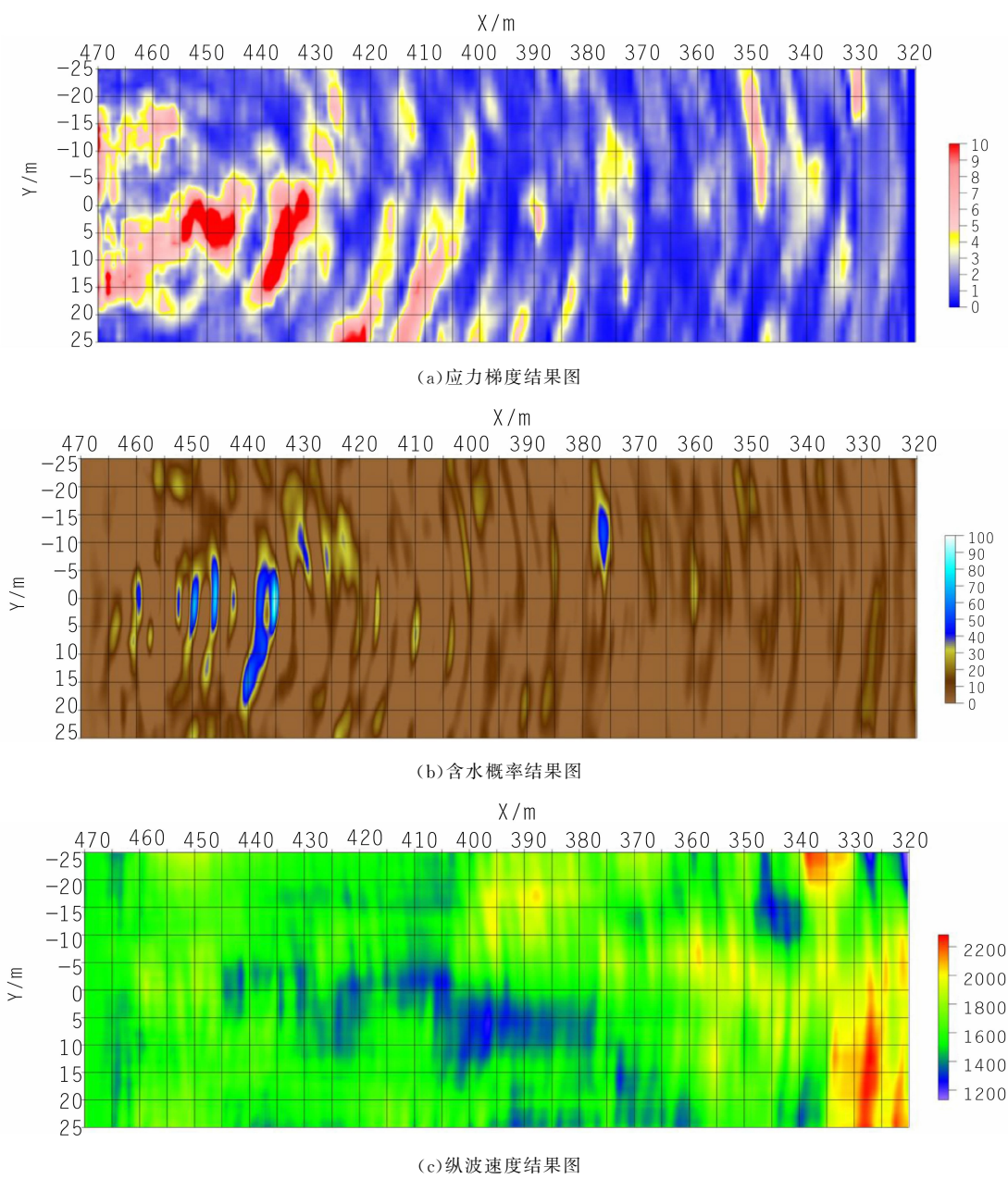


图 6 TGS360Pro 超前地质预报解译结果图

3.4 施工开挖验证

在该引水隧洞开挖过程中,DLⅡ 63+470~DLⅡ 63+455 里程段掌子面潮湿,拱顶存在渗水情况。可见 TGS360Pro 超前地质预报技术对富水体的预报与实际揭露的情况比较吻合。施工开挖至桩号 DLⅡ 63+439 处开始出现突涌水状况,其实际涌水位置与 TGS360Pro 系统预报解译的突涌水位置相差 1 m,突涌水预报结果与实际情况基本一致。开挖结果充分证明了 TGS360Pro 系统对突涌水等富水不良地质情况具有很好的探

测准确度。现场开挖突涌水情况见图 7。

4 结 语

TGS360Pro 超前地质预报技术依据地震波反射原理实现了对不同地质构造异常的探测,并基于岩体动力学流体解译理论形成了一套流体预测的解译机制,实现了对富水体的有效识别。笔者通过对 TGS360Pro 超前地质预报技术数据处理分析进行的研究,确定出波速是影响数据处理的重要参数,制定出其数据处理过程中参数选取

(下转第 14 页)

内施工安全、有序地开展开挖、支护以及二衬工作。因此,在选用加固措施时必须以保证洞内施工为主要目的,选用适宜的施工参数和设备,而不应增加冗余施工措施,如加密注浆孔的间、排距,增大注浆压力等,否则将会增加施工成本并造成工期不可控,甚至对掌子面造成一定的影响。另外,如施工过程中采取的措施不当,可能会对已加固的地层造成破坏,得不偿失。

参考文献:

[1] 穆腾虎. 下穿石油管道浅埋黄土隧道施工变形控制技术研究[D]. 兰州交通大学, 2021.

[2] 范军胜. 软弱膨胀性泥岩隧道变形控制技术研究[J]. 四川水力发电, 2021, 40(6): 11-15, 32.

[3] 冯存志, 杨朝帅, 孙浩泽. 太谷隧道不良地质段地表注浆效

果评定研究[J]. 低温建筑技术, 2020, 44(3): 74-78.

[4] 龚翼, 杨尚鑫, 范军胜. 火山堆积层浅埋偏压地段隧道进洞施工技术研究[J]. 四川水力发电, 2021, 40(6): 54-57.

[5] 金煜皓. 裂隙泥岩渗透注浆浆液失水效应与扩散特性研究[D]. 中国矿业大学, 2020.

[6] 高军. 高铁隧道Ⅳ级Ⅴ级围岩全断面机械化施工掌子面高压注浆工艺试验研究[J]. 铁道技术监督, 2020, 48(1): 50-55.

作者简介:

张 杰(1979-),男,四川南部人,分公司质量管理部主任,副高级工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工
卢立春(1975-),男,四川自贡人,水电七局国际二级职业经理人,副高级工程师,学士,从事水利水电工程基础处理技术与管理工

(编辑:李燕辉)

(上接第 5 页)



图 7 突涌水照片

的原则,并将该方法用于滇中某隧洞超前地质预报工作。通过对所预报的作业面前方 150 m 处的地质情况进行处理及成果解译,成功预报了掌子面前方的突涌水不良地质体。对现场开挖后地质情况跟踪调查取得的结果表明:TGS360Pro 超前地质预报技术对于突涌水不良地质体具有较强的探测能力。该项探测技术具有快捷、高效、准确的特点,对类似工程具有重要的参考价值。

参考文献:

[1] 黄勳,杜风华,叶文. 超前地质预报技术在地铁隧道不良地质体中的应用[J]. 建筑安全, 2019, 33(7): 68-71.

[2] 袁晨瀚. 基于 TGS360Pro 和 GPR 的岩溶隧道富水段判别方法研究[D]. 成都理工大学, 2019.

[3] 徐磊,尹剑,张建清,等. TGS360Pro 技术三维正演及其与 TSP 技术对比试验研究[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(3): 1321-1329.

[4] 张明财,巨广宏,熊章强,等. TGS360Pro 超前地质预报地下水的地震波场正演模拟分析—以岩溶模型为例[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(3): 1-8.

[5] 张杰,王海胜,吴俊杰,等. TGS360Pro 超前地质预报在不良地质体识别中的应用[J]. 中国水运, 2022, 22(3): 98-100.

[6] 李钰强,颜英军,巨广宏. TGS360Pro 三维地质预报技术[J]. 西北水电, 2021, 37(6): 57-60.

[7] 颜英军,李钰强,王海涛. TGS360Pro 和 TRT7000 在某隧道施工超前地质预报中的应用对比[J]. 工程地球物理学报, 2021, 18(1): 60-63.

[8] 许明亮,姚海波,肖剑,等. TGS360Pro 在岩溶隧道不良地质体识别中的应用[J]. 科技创新与应用, 2020, 10(9): 182-183.

[9] 母丽程,周继中,杨森,等. TGS360Pro 数据处理中波速对预报结果的影响及其改进措施[J]. 四川水力发电, 2023, 42(增刊 1): 60-65.

[10] 王俊,史亚龙,刘杰,等. TGS360Pro 超前地质预报正演模拟及应用[J]. 物探化探计算技术, 2020, 10(6): 690-693.

作者简介:

王开华(1985-),男,四川雅安人,副高级工程师,博士,从事工程无损检测技术研究工
母丽程(1995-),女,湖北襄阳人,工程师,硕士,从事超前地质预报、工程无损检测技术研究工
谢 平(1996-),男,四川自贡人,助理工程师,从事超前地质预报与工程实体无损检测工
尹 秀(1979-),女,四川绵阳人,工程师,从事水电工程施工技术与管理工
周路明(1996-),男,四川南充人,助理工程师,从事超前地质预报与工程实体无损检测工

(编辑:李燕辉)