

8-25-2019

Detection accuracy analysis of TSP and its application in a river-crossing tunnel construction

LI Junjie

Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China

ZHANG Honggang

Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China

HE Jianshe

Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

LI Junjie, ZHANG Honggang, HE Jianshe, et al. (2019) "Detection accuracy analysis of TSP and its application in a river-crossing tunnel construction," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 47: Iss. 4, Article 30. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.029

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol47/iss4/30>

This Coal Geophysical Exploration, Mine Geophysical Exploration is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

Detection accuracy analysis of TSP and its application in a river-crossing tunnel construction

Authors

LI Junjie, ZHANG Honggang, HE Jianshe, RONG Xin, LI Jianqiang, and GUO Jiahao

文章编号: 1001-1986(2019)04-0193-08

TSP 探测精度分析及其在过江隧洞超前预报中的应用

李俊杰, 张红纲, 何建设, 荣鑫, 李剑强, 郭佳豪

(浙江省水利水电勘测设计院, 浙江 杭州 310002)

摘要: 针对 TSP 预报工作耗时长、经验依赖性强等问题, 以提高 TSP 探测精度与效率为目标, 分析了影响 TSP 数据采集与处理精度的关键因素, 总结了提高 TSP 探测效率的经验。结合千岛湖配水工程某过江隧洞段地质超前预报工程, 在 TSP 探测分辨率下降的区域开展 TSP 跟踪预报或地质雷达探测工作, 对物探异常区辅以钻探验证。结果表明: 岩体完整性差地段的 TSP 纵波波速、密度及各力学模量值偏低, TSP 对破碎带探测较敏感, 对基岩裂隙水识别能力相对较弱, 纵、横波波速均偏低的区域岩体富水的概率更大; 岩体破碎含水区段雷达电磁异常特征表现为反射波振幅强, 同相轴错断, 主频偏低。综合预报成果发挥了各种预报方法优势互补的作用, 为隧洞支护及超前注浆方案的优化提供了重要参考。

关键词: TSP; 地质雷达; 超前钻探; 过江隧洞; 综合预报

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.029



Detection accuracy analysis of TSP and its application in a river-crossing tunnel construction

LI Junjie, ZHANG Honggang, HE Jianshe, RONG Xin, LI Jianqiang, GUO Jiahao

(Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hangzhou 310002, China)

Abstract: Aiming at the problems of TSP such as long detection time and strong experience-dependence, in order to improve the accuracy and the efficiency of TSP detection, we analyzed the key factors which affect data acquisition and processing accuracy of TSP and summarized the experiences of improving the detection efficiency of TSP. In combination with the TSP advanced geological prediction work in a river-crossing tunnel for water distribution project in Qiandaohu lake, the TSP tracing prediction or GPR detection in the area where the TSP resolution decreases were carried out and the geophysical abnormal area was verified by drilling. The results show that in the section with poor integrity of rock mass the values of longitudinal wave velocity, density and various mechanics modulus were low, TSP was sensitive to the detection of fracture zone but its identification ability of bedrock fracture water was relatively weak, the rock mass in the area where both longitudinal wave and shear wave velocities were lower had higher water-bearing probability, the GPR anomaly in the section of fractured water-bearing rock mass was characterized by strong reflection amplitude, event dislocation and lower dominant frequency. In the comprehensive prediction results, the advantages of various detection methods were complementary to each other, which provides important reference for the optimization of tunnel support and advance grouting scheme.

Keywords: TSP; ground penetrating radar; advance drilling; river-crossing tunnel; comprehensive prediction

常用隧洞超前预报技术主要有 TSP^[1](Tunnel Seismic Prediction)、TGP^[2](Tunnel Geological Prediction)、TST^[3](Tunnel Seismic Tomography)、TRT^[4](Tunnel Reflection Tomography)等弹性波法, 和

GPR^[5-6](Ground Penetrating Radar)、TEM^[7-8](Transient Electromagnetic Method)等电磁法两类。弹性波法有效探测距离多大于 100 m, 对断层破碎带反映较灵敏, 抗干扰能力强, 但工作效率偏低, 它们在

收稿日期: 2018-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41641040); 浙江省水利厅科技基金项目(RC1729)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(41641040); Technology Project of Water Resources Department of Zhejiang Province(RC1729)

第一作者简介: 李俊杰, 1989 年生, 男, 江西上饶人, 工程师, 硕士, 从事地球物理电磁法正演及工程物探方法研究。E-mail: lijunjiesu@163.com

引用格式: 李俊杰, 张红纲, 何建设, 等. TSP 探测精度分析及其在过江隧洞超前预报中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 193-200.

LI Junjie, ZHANG Honggang, HE Jianshe, et al. Detection accuracy analysis of TSP and its application in a river-crossing tunnel construction[J].

Coal Geology & Exploration, 2019, 47(4): 193-200.

激发方式、观测系统布置或数据处理流程上存在一定差异,其中 TSP 数据处理与解释技术相对更成熟,在基岩裂隙水^[9-10]、断层破碎带^[1,11]、大型溶洞探测^[12-13]、岩爆预测^[14]及岩体质量等级分类^[15]等方面均取得了一定的效果;电磁法探测效率较高,但易受到邻近障碍物(如水泵、台车、挖掘机、铲车)或交流电缆线的干扰,其中 TEM 对含水水体较敏感,其探测距离多小于 80 m^[16],而 GPR 可准确圈定完整性差的围岩(如节理裂隙发育、岩体破碎)分布区域,且对空洞的探测效果好,是隧洞短距离预报(小于 30 m)的主流方法。

千岛湖配水工程通过输水隧洞将优质湖水引至杭州闲林水库,途中兼顾建德、桐庐及富阳等县市的供水。输水线路总长约 112 km,设计流量 38.8 m³/s,为浙江省重点大型水利工程。分水江江底隧洞位于桐庐县横村镇附近,前期地质钻探资料表明:过江隧洞段处于侏罗系亚构造层南侧边缘附近,输水隧洞要穿越分水江河床部位近 200 m 长度范围内的上覆岩体其厚度薄、断裂构造发育、岩石破碎,左岸坡及坡脚受断层影响,地下水补给丰富,隧洞存在开挖洞段大面积渗水、突泥及因渗水造成掌子面坍塌的安全隐患。开展隧洞超前预报工作,可提前了解掌子面前方不良地质情况,为隧洞安全施工提供保障。

本文以千岛湖配水工程沿线不同地质条件 TSP 预报经验为依托,讨论了提高 TSP 预报精度与探测效率的方法,统计了不同质量级别下熔结凝灰岩的 TSP 常见速度区间。将研究成果用于分水江江底隧洞段的 TSP 数据采集与分析,剖析了江底断层破碎带对应的 TSP 异常特征,并制定相应的超前钻探方案,研究成果可为隧洞工程 TSP 高效精细化探测提供参考。

1 TSP 方法

TSP 属于纵、横波三分量地震反射技术,在设计于洞壁的炮孔内用少量炸药(如 100 g)激发地震波,地震波遭遇岩体波阻抗差异界面时(如断层、节理密集带、破碎带)将发生反射,部分反射信息被高灵敏度检波器接收,将采集数据用 TSPwin 软件处理,便可分析掌子面前方地质体的规模与性质。TSP 的 4 个接收器需要在隧洞两侧对称布置,R2、R4 接收器距 S24 号炮孔分别为 15 m 与 20 m(图 1),其钻孔直径大于 50 mm,呈 10° 向上倾斜,孔深 2 m;爆破时为便于灌水,减小声波干扰,炮孔宜向下 20° 倾斜,孔深与孔间距均为 1.5 m,28 个钻孔尽量保持在同一平面,约高出隧洞底部 1.0~1.5 m。TSP 直接成果为岩体视波速值及其变化特征,密度、泊松比及各种

力学模量均由视波速换算而来。纵波波速、密度及杨氏模量值越低对应岩体完整性越差,横波速度低、泊松比高的岩体多含水。

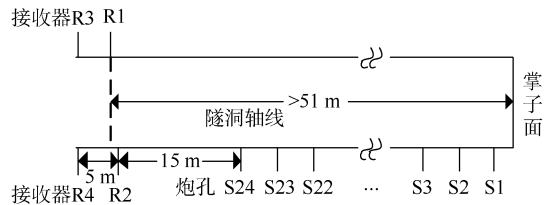


图 1 TSP303 观测系统

Fig.1 The observation system of TSP303

2 影响 TSP 探测精度因素

高信噪比数据与适宜的计算参数为 TSP 预报质量的基础,依据千岛湖配水工程预报经验,从数据采集与处理两方面讨论影响 TSP 探测精度的因素。

2.1 数据采集影响因素

a. 观测系统布置偏离标准。如炮孔呈水平状或接收孔下倾,孔深过浅或过深,孔间距或孔高差异较大。水平或角度微上倾的炮孔无法灌水,炸药在空气中激发将产生强烈声波干扰;接收孔下倾易导致孔内积水积泥,降低锚固剂与检波器的耦合效果;孔深不足(如炮孔深度小于 1.0 m 或接收孔深度小于 1.5 m)易导致掌子面附近反射波缺失。此外,由于套管长度固定为 2.13 m,接收孔深度超标多采用锚固剂填堵,检波器前方易存在较大间隙,降低耦合效果;炮孔与接收孔不在同一高度,TSP 计算将产生近似误差。

b. 炮孔布置洞段含避车洞或空腔,易导致反射波缺失,若空腔超过一定规模,对炮孔一侧检波器 TSPwin 软件将无法计算偏移距。

c. 掌子面向后 56 m 范围内围岩类别显著变化或存在岩性分界(如 II 类灰岩过渡为 IV 类泥质粉砂岩),此时炮孔不应只布置于单一岩性上。因掌子面前方岩体波速以炮孔布置洞段的初至波波速为参考,岩体质量好对应的纵波波速与参考值差异一般小于 1 000 m/s,间接导致 TSP 成果各参数显著偏高或偏低,不利于异常区岩体完整性的定量分析。

笔者统计了千岛湖配水工程不同质量级别岩性对应的 TSP 指标常见区间(表 1)。近掌子面 23 m 范围为钢拱架支护的 III₂ 或 IV 类泥质粉砂岩,为造孔便利,钻孔实际置于素喷混凝土的灰岩段。S1 号炮孔距掌子面约 25 m,实际开挖证实 200 m 预报范围内 90% 为完整性或稳定性差的 IV-III₂ 类围岩。如表 1 所示,TSP 波速与各力学模量值显著偏高,远超 IV-III₂ 类泥质粉砂岩,甚至优于 III₁-II 类灰岩。

表 1 千岛湖配水工程不同围岩类别相关性对应的 TSP 指标

Table 1 TSP index corresponding to different types of surrounding rocks in the water distribution project of Qiandaohu lake

岩性	围岩类别	纵波波速/(m·s ⁻¹)	横波波速/(m·s ⁻¹)	密度/(g·cm ⁻³)	静弹性模量/GPa	动弹性模量/GPa	剪切模量/GPa
泥质粉砂岩(莲花)	IV-III ₂	5 500~6 500	3 367~3 650	2.94~3.05	80~120	80~105	33~41
灰岩	III ₁ -II	5 200~6 200	3 100~3 600	2.76~3.00	56~90	66~91	27~38
泥质粉砂岩	IV-III ₂	3 699~4 912	2 081~2 755	2.32~2.63	12~34	27~49	10~20
熔结凝灰岩	IV-III ₂	4 038~5 100	2 548~2 800	2.46~2.65	22~38	38~55	16~21
	III ₁ -II	5 200~6 200	3 000~3 450	2.71~2.92	45~82	58~89	25~36

d. 隧洞岩体破碎区段易超挖, 由于施工成本、进度等原因, 超挖部分有时未回填而直接立钢拱架喷混凝土, 装药时炸药易掉入钢拱架与岩体间的空隙, 可采用细钢筋插入乳化炸药旁送入炮孔底部。此外, 因孔壁粗糙, 装药不宜用力过猛以致将炸药捅散, 有效爆破能量将显著降低, 同时产生强烈声波干扰。

e. 初至波延时出错。常见于采用延时电雷管或断路导线未固定于雷管前端, 爆破过程产生的电火花可能先将断路导线炸断, 造成延时出错。

f. 合理分配炸药量。炮孔布设位置岩体条件若不同, 炸药量应相应调整, 以免信号过载。对硬质岩 50~100 g 炸药即可获得较好的激发效果, 软岩中药量宜适当增加(如 75~150 g)。因乳化炸药一支固定为 200 g, 为兼顾爆破效率, 可将 24 个炮孔分为 3 组, 近掌子面组药量设为 2/3 支, 近接收器组为 1/3 支, 其余炮孔半支。

2.2 数据处理影响因素

TSPwin 处理参数多采用默认值, 其中带通滤波、初至波拾取、反射波提取等需手动调节参数, 对预报成果有重要影响。

带通滤波应保证截取的频带有足够的信噪比, 完整性好的硬质岩(如 II 类熔结凝灰岩)中 TSP 数据主频偏高, 频带较宽; 相反, 完整性差的软质沉积岩(如 IV 类泥岩、泥质粉砂岩)高频截点不宜超过 2 000 Hz^[18-19], 低频截点一般在默认值 50 Hz 及 TSPwin 软件计算值中取极小值, 若数据存在频率小于 333 Hz 的低频强声波干扰, 宜采用软件计算值。

初至波拾取可获得直达波波速, 处理时截距应尽量归零且要保留足够多的地震反射数据, 每次爆破激发检波器将接收至一个单道反射波形(建议保留道数大于实际激发总数的 1/3)。此外, 两检波器拾取的直达波波速应相近, 对观测系统布设严重超标的 TSP 数据截距偏大且难以调零。

反射波提取要求输入最大增益(振幅增益限制)及 Q 值(岩石的质量因子), 此步骤旨在恢复地震波在岩体传播过程中损失的部分高频信号, 以达到提高探测分辨率的目的。较高的振幅增益限制(如最大增益为 20 dB)可在提升有效信号的同时避免背景噪声的放大。

TSP 数据处理参数的设置原则在于兼顾波形的平滑度与分辨率(反射层数量的识别), 图 2 为最大增益与 Q 值组合值为(20, 20)时的反射波提取结果, 类似标注 1、2、3 形态的反射层能清晰识别, 对采集质量差的数据 TSPwin 提供的默认值多无法采用, 经验表明两参数在 15~25 范围取值预报效果较好。

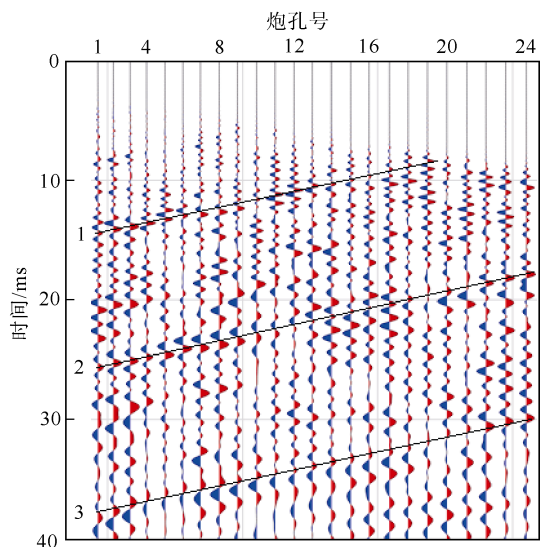


图 2 最大增益与 Q 值均取 20 时的反射波提取结果
Fig.2 The result of reflected wave extraction when Max. gain and Q-factor are both twenty

3 提高 TSP 探测效率方法

TSP 在铁路系统应用广泛, 但水利工程隧洞施工单位对 TSP 预报必要性认识不足, 实施过程常见观测系统布设随意、钻孔规格不达标、爆破不顺利等问题。以千岛湖引水工程预报经验为依据, 总结出提高 TSP 探测效率的建议。

a. 排查 TSP 工作开展的不利因素(如隧洞大角度向上、向下或转弯掘进, 观测系统布置洞段存在大型避车洞等)。TSP 预报方向为炮孔连线的延伸, 非直线水平开挖时应根据洞轴线修正炮孔与接收孔的位置及深度; 空腔易造成 TSP 反射信号缺失, 炮孔应避免布设于避车洞一侧。若隧洞积水积泥严重, 拱顶或边墙大量涌渗水, 可提前准备防水油布, 必要时搭建简易平台摆放仪器。

b. TSP 前期造孔规范化。钻孔位置确定后用红漆标记，近掌子面炮孔与两侧接收孔边注明孔径、倾斜方向及角度，标记位置若存在钢拱架，孔位可向四周微调，跨度小于 0.1 m，完工后检查孔深是否达标，有无堵孔现象，并冲洗两侧接收孔，对于岩体完整性差的隧洞宜尽快开展 TSP 工作，避免掌子面爆破过程将孔内碎石振落二次堵孔。

c. TSP 实施过程优化。建议配置爆破员 3 名，TSP 操作员及民工各 2 名，进洞前检查起爆装置(起爆针、起爆器电池、起爆线)的有效性，洞内 TSP 操作员分工协作，前者负责炮孔规格复测及与爆破人员衔接，后者进行检波器安置及仪器的连接，当孔深严重超标(炮孔深小于 1.0 m 或接收孔孔径小于 1.5 m)时应补打或疏通。爆破过程由 2 人负责接线与孔内灌水，起爆器置于 TSP 主机附近。此外，隧洞底板多含碎石垫层，爆破过程来回接线易使炮线表皮磨损，隧洞积水时炮线将处于短路状态，仪器无法接收数据，故炮线尽量沿边墙布设或挂于边墙上。接线完毕后可先预触发(将触发线一端与触发单元断开)，检验仪器有无异常。

4 工程实例

分水江江底隧洞位于桐庐县横村镇附近，河床

宽度约 220 m，输水线路与分水江近乎垂直，设计分水江 1 号主洞下游及分水江 2 号主洞上游 2 个掌子面向江底掘进。前期地质钻探成果表明：过江段基岩以灰色晶屑或熔结凝灰岩为主，分水江 1 号主洞下游岩体较完整，未见明显断裂构造迹象，仅发育少量中陡倾角节理；分水江 2 号主洞上游段岩体完整性总体较差，节理发育，以中陡倾角为主，节理面一般铁锰质渲染或方解石脉充填。其中，桩号 K55+930~K56+130 区段(字母 K 代表公里标记，K 与+号之间的数字对应掌子面公里数，+号之后的数字为米数，即 K55+930 表示掌子面与隧洞进口相距 55 930 m)为江底断层影响带，主要为 IV-III 类围岩，施工风险大，是全线的重点，故在桩号 K56+129 位置首先实施了 TSP 预报，每次预报 TSP 观测系统均采用如图 1 所示的方式布置。

4.1 TSP 成果与解释(K56+129~K55+999)

图 3 为分水江 2 号主洞桩号 K56+129~K55+999 区段 TSP 探测结果，对比表 1 可知，围岩以 III 类为主。其中桩号 K56+089~K56+045 区段纵波波速、密度及各力学模量值多呈现极小值(图 3)，推测此区段岩体完整性差，局部较破碎—破碎，地下水不发育，围岩以 III₂ 类为主。

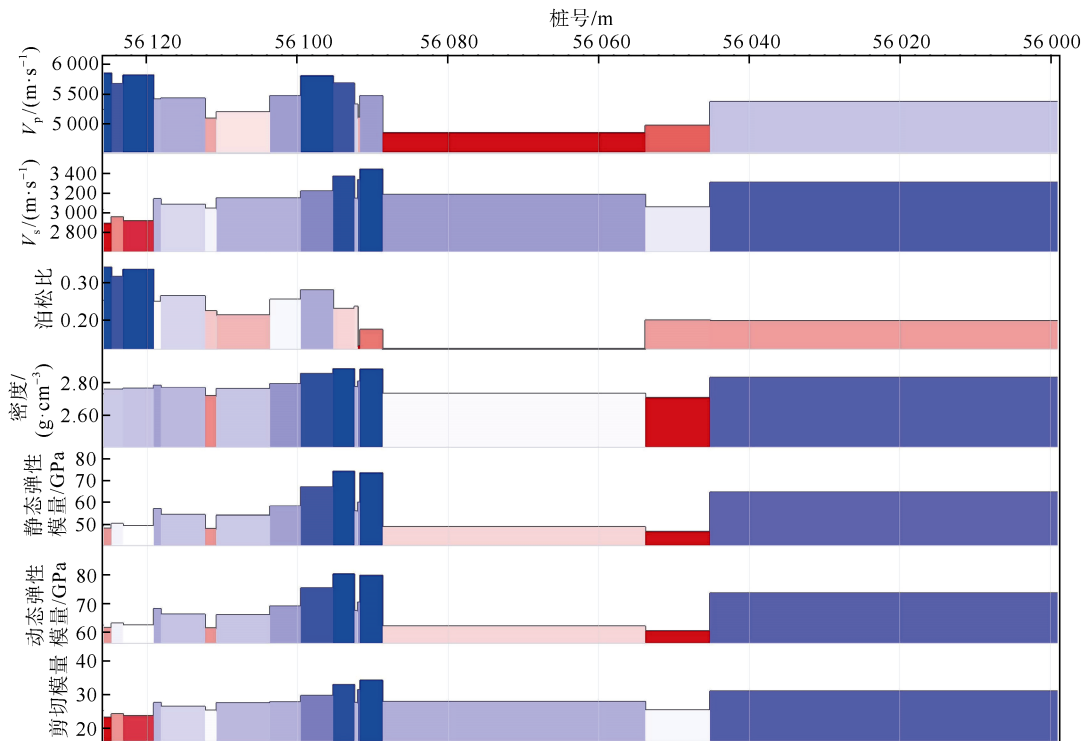


图 3 分水江 2 号主洞桩号 K56+129~K55+999 区段 TSP 探测结果

Fig.3 Detection results of TSP detection at stakes K56+129~K55+999 in Fenshuijiang No2 main tunnel

根据 TSP 探测结果，在分水江 2 号主洞桩号 K56+100.2~K56+059.93 区段开展超前钻孔取心工作，钻探结果表明：全孔岩心均为灰—青灰色英安

玢岩，微风化，岩心以破碎—较破碎为主，且存在蚀变现象。其中 K56+093~K56+061 区段岩体呈图 4 所示的破碎状，全孔未见地下水出露，8 段压水试

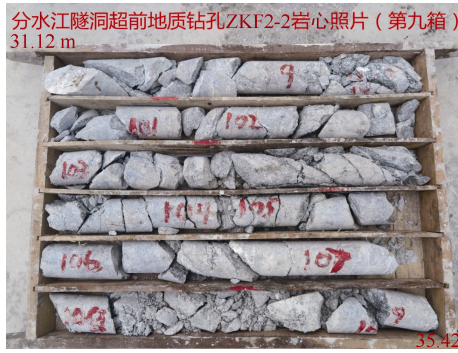


图 4 桩号 K56+069~K56+065 区段超前钻孔岩心

Fig.4 Cores of advance drilling at stakes K56+069~K56+065

验成果显示岩石透水率为 0.3~0.7 Lu, 为微透水岩体。TSP 异常区与超前钻探成果吻合, 准确反映了岩体破碎区域的分布。

4.2 TSP 成果与解释(K56+062~K55+950)

江底断层影响带首次 TSP 探测时 K56+129~K56+107 区段为缓倾角下坡段, 且自桩号 K56+045 起各参数指标不再变化(图 3), 为提高预报精度, 在掌子面 K56+062 位置开展 TSP 补充预报工作。图 5 为分水江 2 号主洞桩号 K56+062~K55+950 区段 TSP 探测结果, 对比表 1 可知, 各物理力学指标普遍较差, 推测围岩以 III₂ 类为主, 局部 IV 类。如图 5 所示, 桩号 K56+024~K56+010 区段横波波速偏低, 泊松比局部偏高, 推测岩体含裂隙水。其中, K56+020.2~

K56+017 区段波速、密度及各力学模量值多呈现极小值, 推测此区段岩体破碎, 地下水发育, 推测围岩为 IV 类; K56+010~K56+006 区段纵波波速相对偏低, 横波波速未见显著偏低, 推测岩体破碎, 含裂隙水。依据 TSP 成果, 在桩号 K56+062~K56+024.4 及 K56+037~K56+004.85 区段实施超前钻探工作, 钻孔编号分别为 ZKF2-3、ZKF2-4。

超前钻探成果表明 K56+062~K56+046.4 区段为英安玢岩(图 6a), 岩体破碎; K56+45.5~K56+004.9 区段为熔结凝灰岩(图 6b), 岩体节理裂隙发育; K56+046.4~K56+045.5 区段为岩性接触带, 岩心挤压呈碎块状。其中, ZKF2-3 号超前钻孔在桩号 K56+025.5 揭露地下水, 初始流量 50 L/min, 至 K56+024.4 时稳定流量为 65 L/min。ZKF2-4 号超前孔在 K56+020.3~K56+018.8 区段出水, 水量约 53 L/min; 钻进至 K56+012.9 时孔内出水量加大, 水量约 65 L/min, 随后进行了水泥灌浆处理, 后恢复钻进至 K56+008.3~K56+006.9 区段孔内出水, 水量约 15 L/min。

前文分析表明, TSP 异常解释与超前钻探成果基本吻合, K56+062~K56+040 区段横波波速偏低, 泊松比偏高, 但纵波波速未见显著偏低且变化相对均匀(图 5), 超前钻探成果表明此区段岩体不含裂隙水, TSP 对基岩裂隙水探测精度相对较低, 易出现误报。

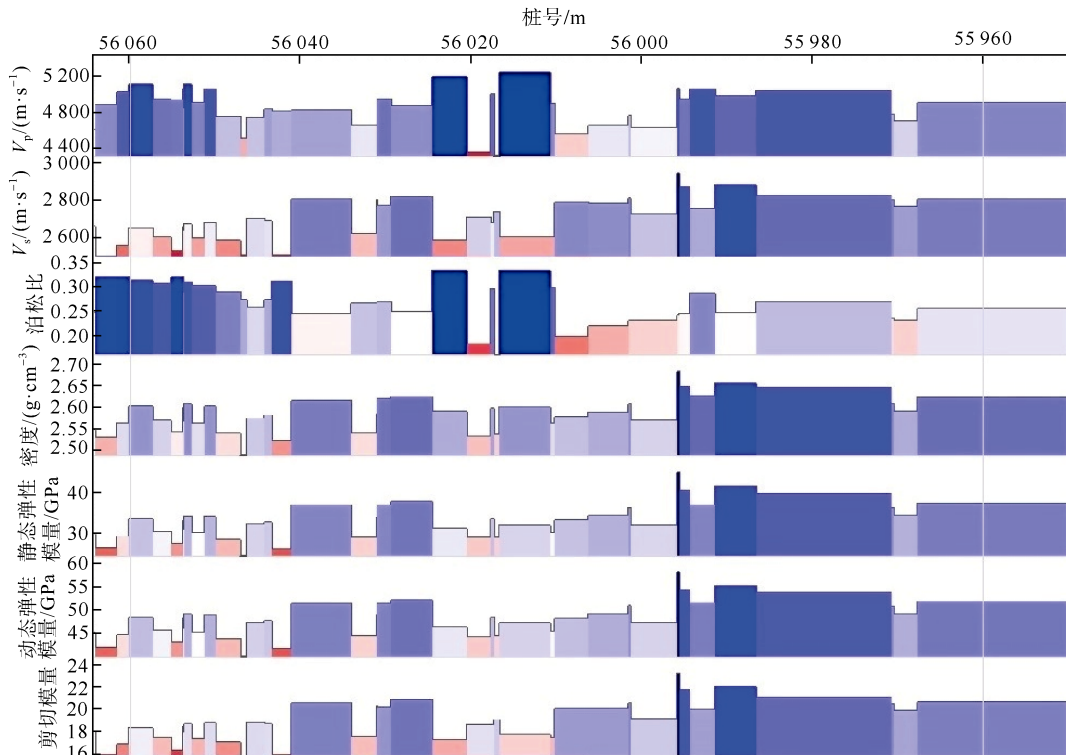


图 5 分水江 2 号主洞桩号 K56+062~K55+950 区段 TSP 探测结果

Fig.5 Detection results of TSP detection at stakes K56+062~K55+950 in Fenshuijiang No.2 main tunnel

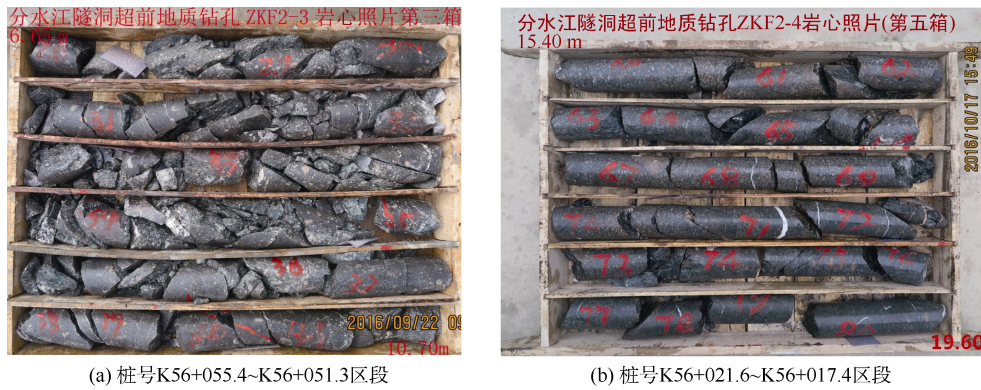


图 6 桩号 K56+062~K56+004.9 区段超前钻探部分岩心

Fig.6 Some cores of advanced drilling at stakes K56+062~K56+004.9

分水江 2 号主洞掘进至桩号 K56+004 岩体完整性变好, 围岩介于 III₁-II 类之间, 掌子面附近局部仅有少量滴渗水, 同时分水江 1 号主洞下游掘进至桩号 K55+957, K56+062~K55+950 区段 TSP 探测成果显示自桩号 K55+996 起反射层面显著减少(图 5), 分辨率降低, 为此在掌子面 K56+004 位置开展地质雷达预报工作。

4.3 雷达探测成果与解释(K56+004~K55+974)

地质雷达超前预报多采用 100 MHz 屏蔽天线, 考虑隧洞不良作业环境影响(如粉尘、洞壁渗水、底板积水积泥), 为减小仪器损耗, 雷达系统各部件间的连接口应尽量少。千岛湖配水工程选用仅含天线-电缆、电缆-主机两个连接口的 SIR-4000 雷

达探测系统。此外, 水工隧洞洞径偏小且掌子面平整度较差, 为保证一定的数据采集量, 同时提高信噪比, 采用点测模式, 道间距控制在 0.1~0.2 m, 采集道数大于 60。

图 7 为分水江 2 号主洞桩号 K56+004~K55+974 区段地质雷达剖面及典型单道时间-频率谱。如图 7a 所示, 雷达异常区域集中于桩号 K55+974~K55+986 区段, 其反射波振幅强、波形杂乱、同相轴局部错断, 图 7a 椭圆框标注异常区主频为 50~160 MHz, 局部偏低, 推测岩体节理裂隙发育或较破碎, 多含裂隙水。此外, K55+994~K55+987 区段掌子面左侧反射信号稍强, 频率以中高频为主, 推测岩体完整性较差。

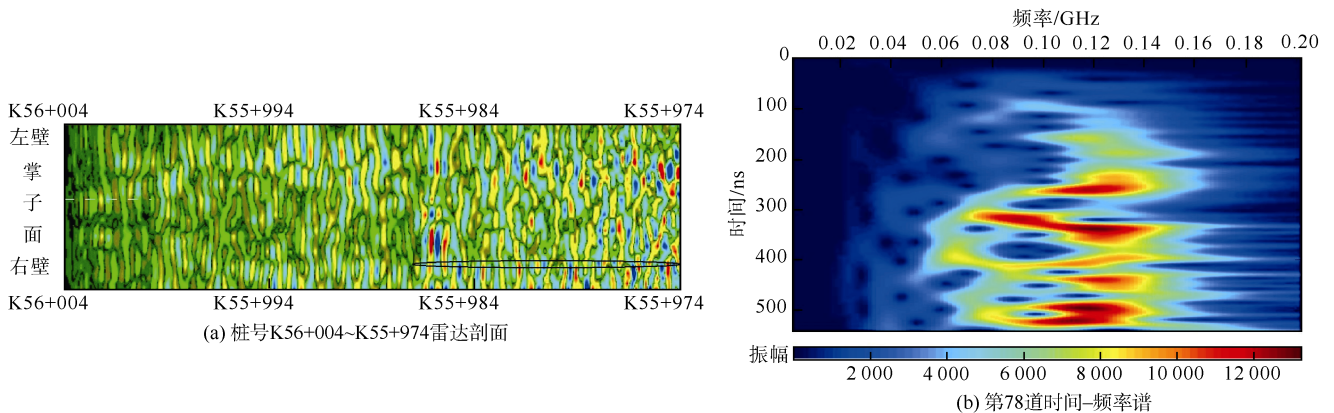


图 7 分水江 2 号主洞地质雷达剖面及典型单道时间-频率谱

Fig.7 GPR profiles and typical time-frequency spectrum of single-trace of Fenshuijiang No.2 main tunnel

依据雷达预报结果, 超前钻探置于桩号 K55+957.3~K55+994.7 区段, 钻探成果表明: 岩心为灰-灰黑色熔结凝灰岩, 微风化-新鲜为主, K55+957.3~972.5 区段岩体完整, 地下水不发育; K55+972.5~985.6 区段岩体完整性差-破碎, 地下水较发育, 其中 K55+978.7~980.2 处揭露一宽约 1.5 m 的节理密集带(图 8) 张开为主, 倾角大于 45°, K55+985.6~994.7 区段岩体较破碎, 地下水不发育。雷达预报成果准

确反映了岩体含水破碎区域的分布。

分水江过江隧洞段预报成果表明以 TSP 预报为先导, 在 TSP 探测分辨率下降的桩号附近开展 TSP 二次预报工作并辅以超前钻探验证的综合预报体系可有效揭露出隧洞前方不良地质体的性质及分布规律, 当隧洞剩余长度较小时, 亦可采用基于频谱分析技术的地质雷达探测方法来圈定掌子面前方含水破碎岩体的范围。

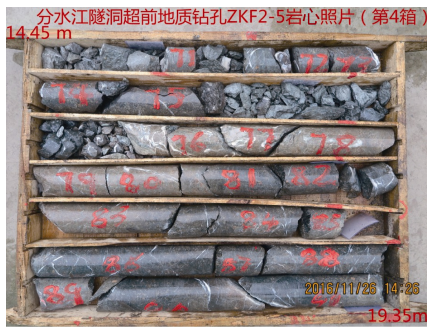


图 8 桩号 K55+980.3~K55+975.4 区段超前
钻探部分岩心

Fig.8 Some cores of advanced drilling at stakes
K55+980.3~K55+975.4

5 结论

a. 为获得高质量的地震反射数据, TSP 观测系统应规范布置, 炮孔布设区段不宜有大型空腔, 注意断路导线与雷管的连接、固定, 提高装药水平, 保证炮孔内灌水效果。

b. TSP 反射波提取宜多次调试获得相对优化的计算参数, 最大增益与 Q 值建议在 15~25 区间取值。

c. TSP 对破碎带的探测灵敏度较基岩裂隙水高, 岩体含水破碎区域对应 TSP 成果表现为波速、密度及力学模量值偏低, 在雷达电磁异常中表现为反射波振幅强, 同相轴局部错断, 主频偏低。

d. 综合超前预报技术可有效探测出掌子面前方不良地质体的分布与性质, 提高了预报精度, 弥补了单一预报方法的不足, 为隧洞超前支护方案的优化提供了重要参考。

参考文献

- [1] ALIMORADI A, MORADZADEH A, NADERI R, et al. Prediction of geological hazardous zones in front of a tunnel face using TSP-203 and artificial neural networks[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23(6): 711-717.
- [2] 陈中学, 胡百万, 刘彦波. TGP 超前预报系统在岩溶隧道中的实践应用[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(增刊 1): 1621-1625.
CHEN Zhongxue, HU Baiwan, LIU Yanbo. Application of TGP advance prediction system to tunnel in karst areas[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(S1): 1621-1625.
- [3] ZHAO Yonggui, JIANG Hui, ZHAO Xiaopeng. Tunnel seismic tomography method for geological prediction and its application[J]. Applied Geophysics, 2006, 3(2): 69-74.
- [4] 白明洲, 田岗, 王成亮, 等. 基于 TRT 系统的地质构造三维成像技术及其改进方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(7): 2684-2693.
BAI Mingzhou, TIAN Gang, WANG Chengliang, et al. The three-dimensional imaging technology and its improvement for geological structure based on the TRT system[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(7): 2684-2693.
- [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(增刊 2): 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] 王振宇, 程围峰, 刘越, 等. 基于掌子面编录和地质雷达的综合超前预报技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3549-3557.
WANG Zhenyu, CHENG Weifeng, LIU Yue, et al. Synthetic advanced forecast technique based on geological logging for tunnel face and ground penetrating radar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3549-3557.
- [7] 李术才, 孙怀凤, 李貅, 等. 隧道瞬变电磁超前预报平行磁场响应探测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1309-1318.
LI Shucai, SUN Huaifeng, LI Xiu, et al. Advanced geology prediction with parallel transient electromagnetic detection in tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(7): 1309-1318.
- [8] 陈玲霞, 张利民, 王志荣, 等. 瞬变电磁法在岩溶隧道超前地质预报中的应用: 以七家营隧道为例[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2014, 33(3): 20-24.
CHEN Lingxia, ZHANG Limin, WANG Zhirong, et al. The application of transient electromagnetic method in karst tunnel geological prediction[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2014, 33(3): 20-24.
- [9] 袁永才, 李术才, 李利平, 等. 尚家湾强岩溶隧道突水突泥伴生灾害源综合分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 203-211.
YUAN Yongcai, LI Shucai, LI Liping, et al. Comprehensive analysis on disaster associated by water inrush and mud gushing in Shangjiawan karst tunnel[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(1): 203-211.
- [10] 刘人太, 李术才, 张庆松, 等. 岩溶裂隙水探查方法优化与工程治理研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1095-1100.
LIU Rentai, LI Shucai, ZHANG Qingsong, et al. Research on optimization of karst fissure water exploration methods and engineering counter measures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1095-1100.
- [11] 贾金晓, 李天斌, 孟陆波, 等. 千枚岩隧道破碎带 TSP 超前预报解译标志[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(6): 751-756.
JIA Jinxiao, LI Tianbin, MENG Lubo, et al. Study of seismic wave reflection characteristics of unfavorable geological bodies in phyllite tunnel[J]. Journal of ChengDu University of Technology(Science and Technology Edition), 2016, 43(6): 751-756.

- [12] 袁永才,李术才,李利平,等. 岩溶隧道施工过程中大型溶洞的综合预报及治理方案研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(2): 192-197.
YUAN Yongcai, LI Shucai, LI Liping, et al. Comprehensive geological prediction and a relevant treatment scheme for a large karst cave in tunnel construction[J]. Modern Tunneling Technology, 2015, 52(2): 192-197.
- [13] LI Shucai, ZHOU Zongqing, LI Liping, et al. Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 116(5): 247-257.
- [14] 邱道宏,李术才,张乐文,等. 基于隧洞超前地质探测和地应力场反演的岩爆预测研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 2034-2040.
QIU Daohong, LI Shucai, ZHANG Lewen, et al. Rockburst prediction based on tunnel geological exploration and ground stress field inverse analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 2034-2040.
- [15] 周宗青,李术才,李利平,等. 岩体质量等级分类预测方法及其工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(4): 1049-1056.
ZHOU Zongqing, LI Shucai, LI Liping, et al. Classification method of rock mass quality and its engineering application[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017, 48(4): 1049-1056.
- [16] 李术才,刘斌,孙怀凤,等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.
LI Shucai, LIU Bin, SUN Huaifeng, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [17] IRVING J, KNIGHT R. Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB[J]. Computers and Geosciences, 2006, 32(9): 1247-1258.
- [18] 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 Tunneling Technology, 2013, 50(3): 129-135.
- [19] 刘阳飞,李天斌,孟陆波,等. 提高 TSP 预报准确率及资料快速分析方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 159-166.
LIU Yangfei, LI Tianbin, MENG Lubo, et al. Methods to improve TSP forecast accuracy and to data rapid analysis[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016, 43(2): 159-166.

(责任编辑 聂爱兰)