

文章编号: 1000-7598 (2011) 08-2416-07

隧道施工期超前地质预报实施方法研究

薛翊国^{1,2}, 李术才¹, 苏茂鑫¹, 李树忱¹, 张庆松¹, 赵 岩¹, 李为腾¹

(1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 地质信息采集、超前预报与数据解译是隧道超前地质预报中的 3 个重要环节, 首先讨论了超前开挖隧道的地质编录的工作方法, 包括风险靶段分级、掌子面地质素描, 进而绘制平面地质图, 建立三维地质模型, 计算不良地质体及含水体在相邻未开挖隧道的出露位置。在此基础上, 详细讨论了仪器配合的关键问题, 并开发了隧道超前地质预报自动选择程序, 可以帮助操作人员从中选择不同岩性地区、不同构造发育特点、不同地下水文条件下需要选择的预报方法, 并建议了特殊地段的预报方法选择, 最后结合工程实例讨论了几种常用的预报方法的数据解译过程中应注意的问题及典型不良地质体的判据。其结果对于隧道超前地质预报工作具有一定的借鉴与指导意义。

关 键 词: 隧道; 超前地质预报; 地质优先; 仪器搭配; 数据解译

中图分类号: P 642; U 45

文献标识码: A

Study of geological prediction implementation method in tunnel construction

XUE Yi-guo^{1,2}, LI Shu-cai¹, SU Mao-xin¹, LI Shu-chen¹, ZHANG Qing-song¹, ZHAO Yan¹, LI Wei-teng¹

(1. Research Center of Geotechnical & Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Geological information acquisition, geophysical prediction and data interpretation are three major links of tunnel geological prediction. In this article the methods of geological logging were firstly discussed, including tunnel risk classification, geological sketching on tunnel face, then the geological plane map was plotted and the three-dimensional geological model was built. The location of the defective geological karst-fractured groundwater in adjacent tunnel could be calculated from the geological model. Based on this situation the key issues of instruments were discussed in detail, and developed the tunnel geological prediction automatic selection system, which could help the operators choose proper methods for zones with different rock characters, structure development characters and underground hydrological features, and make suggestion for special geological zones. At last the criterions on data analysis of staple prediction methods of typical adverse geological bodies were given, which had a certain reference to tunnel advanced geological prediction.

Key words: tunnel; geological prediction; geological priority; instrument collocation; data interpretation

1 引 言

近年来, 隧道超前地质预报技术发展很快, 主要依托地质分析(断层参数法、地质体投影法及地质编录)、物探预报(弹性波法、电法、磁法等)与钻探分析(超前钻探与钻孔取芯)开展, 此外还有红外探水法及钻孔摄像技术。在物探预报方法中, 物探设备就不下十几种, 如地质雷达、TSP(Tunnel seismic prediction)、陆地声纳、瞬变电磁等、TST

(Tunnel seismic tomography)、TRT(True reflection tomography)在工程中得到了应用^[1-7]。许多科研单位、高等院校都相继开展了隧道超前地质预报方法的研究, 如李术才等^[8]开展了综合超前地质预报技术的研究, 提出了地质预报“三结合”原则; 刘志刚等^[9]基于地质分析提出了“断层参数法”; 李貅等^[10]在瞬变电磁隧道探测方面也做了大量研究工作。有些施工单位也购置了超前预报仪器开展超前预报工作。目前, 大多数隧道工程, 尤其是一些重大、超

收稿日期: 2010-03-31

基金项目: 港、澳青年学者合作研究基金资助项目(No. 50729904); 国家自然科学基金项目(No. 40902084, 50908134); 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金(No. Z010905)。

第一作者简介: 薛翊国, 男, 1976年生, 博士, 副教授, 主要从事环境地质与工程地质及地质灾害超前预报与防治方面的教学与科研工作。

E-mail: xieagle@sdu.edu.cn

长隧道及输水隧洞等基本做到了“先预报后开挖”，在一定程度上有效减少了隧道施工地质灾害，如塌方、突水事故的发生，对于施工具有一定的指导意义。但是每年仍有一些隧道在开展超前预报后发生了误报、漏报现象，仍然发生了突水突泥、塌方冒顶等灾害事故，造成了重大人员伤亡及经济损失^[11]。这种情况的发生一方面有仪器本身的原因，目前的技术条件下，物探的多解性无法完全消除；另一方面也有一些人为因素，包括对地质、物探设备性能以及数据解译的认识等。

本文将基于近年来在锦屏二级水电站辅助洞、湖北沪蓉西高速公路沿线隧道以及青岛胶州湾海底隧道所做的科研工作，结合典型长大隧道工程，提出隧道超前地质预报实施方法及程序，探讨在实际工作中开展的隧道施工期超前地质预报工作。主要包括地质信息的现场采集与编录、地质资料的分析与平面地质图以及三维地质模型的构建；物探方法的性能、特点以及物探设备自动选择系统的开发；数据解译过程中应注意的问题以及典型不良地质体的判据等。期望此项研究对于隧道现场施工期的超前地质预报工作具有一定的借鉴意义。

2 地质先行

地质工作是隧道超前预报工作的基础，探明隧址区的地质条件是开展预报的首要问题。根据前期勘察资料，通过补充地质调查对隧址区的地质岩性、地质构造、水文地质条件等有总体的认识。隧道超前地质预报的地质工作主要包括隧道风险靶段分级、超前开挖隧道的地质编录及隧道三维地质模型构建等。

2.1 隧道风险靶段分级

根据地层岩性、地质构造、水文地质条件、岩体透水性、风化程度、隧道埋深、断面大小、涌水量预测等因素对隧道风险等级进行划分，划分的目的是细化隧道可能发生地质灾害的范围，以便采取有效地预报手段，建立相应的预警机制和防范措施，确保施工安全。按照风险靶段分级的原则，将隧道由高风险到低风险划分为I~IV级（其中I级为突水、突泥的最高风险等级）。

2.2 超前开挖隧道的地质编录

隧道开挖过程中一般总有一个隧道是超前的，超前开挖隧道是探明隧道地质条件最直观、最有效的手段，其对地质现象的揭露远高于物探或钻探等手段。通过已开挖隧道的地质编录可探明不良地质以及含水体的产状、规模，进而绘制平面地质图。

地质编录主要内容如下^[8]：

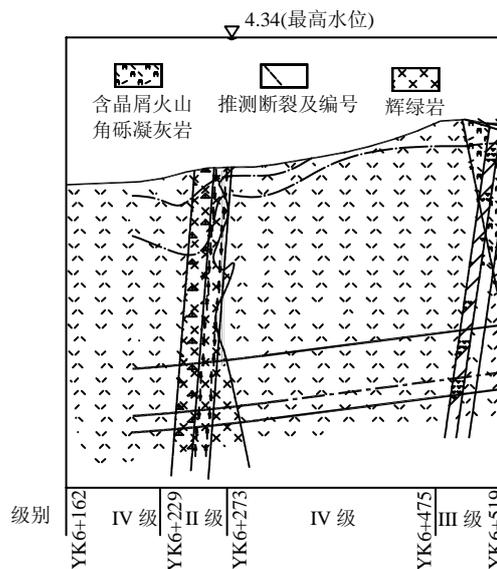


图1 隧道风险靶段分级图

Fig.1 The risk target classification of tunnel

(1) 作好超前开挖洞内地层、岩性的划分和描述；核对地层岩性、断层构造等主要地质界线在隧道洞身的实际位置；进一步确定各断带及其主、次断层（包括影响带）的位置、产状，断层带的物质组成、宽度、富水程度以及工程性质。

(2) 对洞壁岩体主要结构面（断层、层理、节理、裂隙等）进行定性及定量统计量测，查明主要结构面的产状、性质、延伸长度、张开宽度、粗糙程度、蚀变情况、密度、地下水及充填情况等，并分析优势结构面对围岩稳定性的影响。

(3) 对岩体受构造影响程度、节理发育程度、岩体完整程度、富水程度及围岩稳定状态等进行详细编录，据此，对围岩级别及其他地质参数进行修正。

(4) 对重点地段，如断层带、节理密集带、岩性接触带、地下水富集带、岩性变化频繁或软硬相间及掌子面地质情况与地面调绘出入较大等重点地段进行核对和详细地调查与分析评价。

(5) 通过对掌子面和边墙的地质素描，提前发现不良地质体出现的前兆信息，通过进一步理论和经验分析对即将出现的不良地质体进行定性判断。

图2为该断层掌子面地质素描，图3为该断层在掌子面的数码照片，图4为针对图2和图3所绘制的该断层在左、右隧道及服务洞出露区围岩等级图，根据已开挖隧道，可以推测该断层在其他两条隧道出露位置。

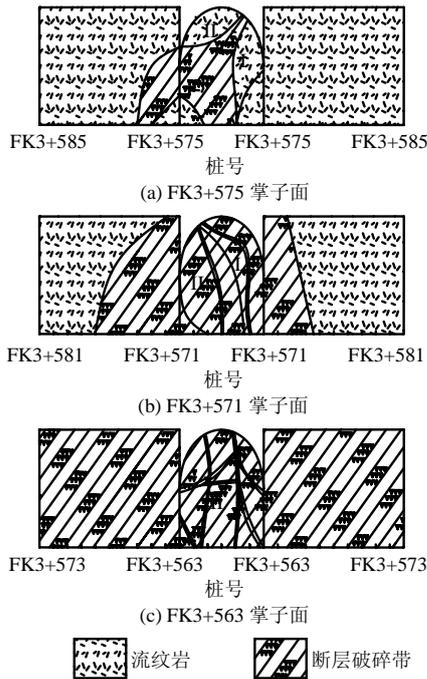


图2 隧道掌子面地质素描
Fig.2 Geology weaves record in tunnel working face

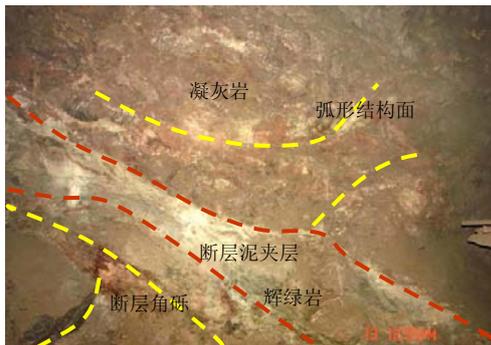
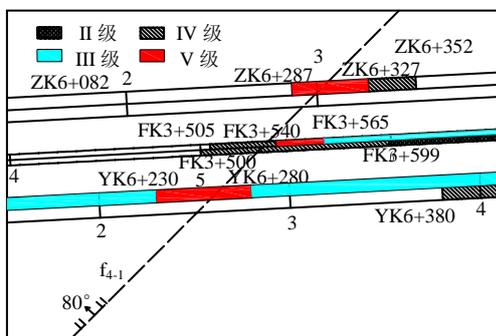


图3 地质编录照片
Fig.3 Photo of geological logging



注：路线上方标注为设计围岩等级，路线下方标注为施工围岩等级。

图4 隧道开挖围岩等级图
Fig.4 The surrounding rock grade

2.3 建立隧道三维地质模型

根据地质编录的绘制平面地质图建立三维地质

模型，在三维地质模型中将不良地质体或断层破碎带按产状关系延伸，计算不良地质体在未开挖隧道的出露位置（见图5），这对于物探的准确预报具有重要意义。

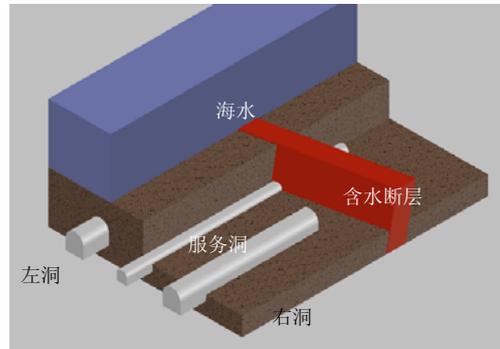


图5 三维地质模型
Fig.5 Three-dimensional geological model

3 仪器配合

3.1 超前预报方法智能选择系统

根据作者近年来在沉积岩、变质岩与火成岩地区的研究成果，包括不同岩性与构造发育特点与水文地质条件等，结合不同预报方法的技术原理、预报距离、抗干扰设计及预报内容特长等，开发了隧道施工期地质灾害超前预报专家系统，其子系统之一即为超前地质预报方法智能选择系统（见图6）。系统操作员可以从中选择不同岩性地区、构造发育特点、地下水文条件下需要选择的预报方法，提高预报的准确度。



图6 隧道超前预报方法选择系统
Fig.6 Tunnel geological prediction methods selection system

(1) 在湖北沪蓉西齐岳山隧道，隧址区为灰岩、白云岩发育区，地下水位以下岩溶发育，构

造，根据地表调查，存在大面积汇水区，易形成大的溶洞、暗河系统。因此，该系统给出的方案如下：全程 TSP 预报，在隧道进口、入口处采用陆地声纳预报干溶洞，根据前期勘察，断层发育区采用地质雷达预报含水层，在隧道上部地表大面积汇水区采用瞬变电磁预报含水溶洞。

(2) 在四川锦屏二级水电站，隧址区大理岩发育，2 000 多米的深埋隧道，高压岩溶裂隙水发育，在隧道两侧入口靠近河岸处，河水水位季节变化，交替溶蚀，在入口近处如断层或卸荷裂隙发育，也可形成较大溶洞，建议采用陆地声纳或 TSP 预报，隧道中部多为溶蚀裂隙，但水头较高，且水量大，采用瞬变电磁或地质雷达预报。

(3) 青岛胶州湾海底隧道隧址区、隧道两端为花岗岩，中间为凝灰岩，局部发育有侵入辉绿岩，断裂构造发育，岩体风化深，存在突水、突泥的高风险，建议采用 TSP 全程预报，断层发育处采用地质雷达或瞬变电磁预报，海域段做好全程的超前探孔，局部钻孔取芯。

3.2 特殊区域预报方法的选择

在隧道开口处，需采用陆地声纳、地质雷达等仪器预报，因为 TSP 预报需要 50 m 以上的已开挖区域，在 IV、V 级围岩施做 TSP 时，又有破碎带的影响，信号衰减严重，将影响预报距离。可采取其他手段搭接过渡到 III 级围岩再施作 TSP 预报其效果更好。在 TSP 信号采集过程中，要尽量做到“孔合格，精测量，水封堵，无噪声”。

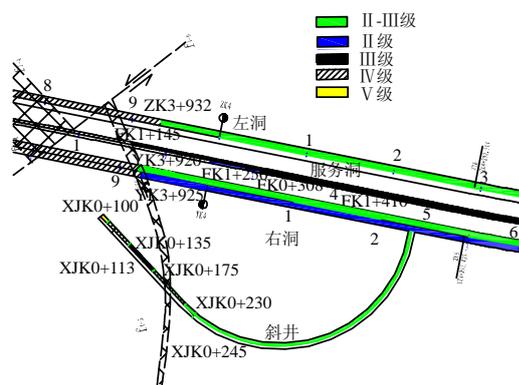


图 7 小曲率半径的斜井隧道

Fig.7 Inclined tunnel of small curvature radius

在弯道处(曲率半径小于 200 m)，虽然地震波是以球面波的形式传播，但 TSP 的软件中只能看到 $R=50\text{ m}$ 的范围。因此，需要采用预报距离近的仪器，如地质雷达等(见图 7)。对于立钢拱架的 IV、

V 级围岩，在掌子面施做地质雷达预报时，要考虑边墙钢拱架的干扰。

4 数据解译

现场采集的信号通过数据处理系统进行处理及图像分析，能否结合地质分析，准确解译是预报的关键。本文在地质分析的基础上，对 TSP、地质雷达及瞬变电磁法数据解译分别进行讨论。

4.1 TSP 方法

TSP 方法是预报断层破碎带、大型溶洞的有效手段，对不良地质体的解译主要依据以下判视标准^[10-13]。

4.1.1 TSP 方法数据解译判据

(1) 断层破碎带解译判据：纵波反射较强，深度偏移多以强烈的负反射开始，以强烈的正反射结束，反射带内正、负反射层多而杂乱，纵横波速总体下降，但高低变化频繁。

(2) 富水带解译判据：横波遇富水层反射强，视岩层结构的不同纵波反射也不同，且横波反射明显较纵波反射强。横波深度偏移以强烈的负反射开始，以强烈的正反射结束。若节理裂隙发育，则反射带内正、负反射层多，以负反射为主；若节理裂隙不发育，则反射带内正、负反射层少，以负反射为主。纵波深度偏移以强烈的负反射开始，以强烈的正反射结束。若节理裂隙发育，则反射带内正、负反射层较多，以负反射为主。

(3) 地下水充填型溶洞解译判据：纵横反射都较强，但横波反射明显，较纵波反射强。横波深度偏移以强烈的负反射开始，以正反射结束，纵波深度偏移以强烈的负反射开始，以强烈的正反射结束，地下水充填型溶洞内纵横波速都大幅下降，且内部波速变化较小。

4.1.2 TSP 预报隧道含水断层破碎带实例

应用 TSP 对青岛胶州湾海底隧道进行了预报，如图 8 所示，其中， v 为波速 (m/s)， v_p 为纵波波速 (m/s)， v_s 为横波波速 (m/s)， μ 为泊松比， ρ 为密度 (g/cm^3)， E 为弹性模量 (GPa)。根据图 8 可以推断，在 ZK7+290~ZK7+248 区间内裂隙发育，反射带内、正负反射层多而杂乱，纵横波速总体下降，但高低变化频繁，为断层破碎带发育区。在 ZK7+248~ZK7+206 区间内整体强度及密度降低，为强风化的断层泥、断层角砾发育区。开挖后揭露的断层破碎带照片见图 9。

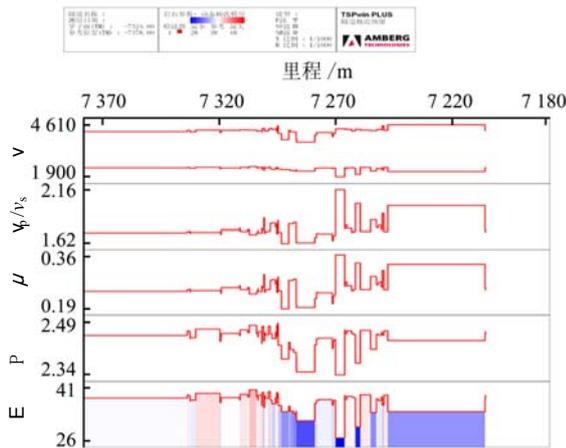


图 8 含水断层破碎带 TSP 预报结果
Fig.8 Prediction results of TSP on water-bearing fault



图 9 TSP 探测断层破碎带照片
Fig.9 TSP detection fault fracture zone photo

4.2 地质雷达方法

水的电导率远高于岩石，因而探地雷达对水特别敏感，地质雷达是目前探测隧道含水体的有效手段^[14]。

4.2.1 地质雷达方法探测含水体的判据

①雷达波通过含水体后，高频成分被吸收，反射波的优势频率降低；②雷达波对水和含水率高的介质的反射强烈，反射波强度大；③从含水层反射的雷达波，相对于入射波，其相位会反相。

4.2.2 地质雷达探测含水裂隙实例

在锦屏二级电站辅助洞出口段 A 洞 AK12+900 前后左边墙，用地质雷达探测含水裂隙，主要依据是强反射和反射波正半轴在前，与雷达入射子波负半轴在前相反。从图 10 可见，掌子面前方 17~20 m 处发育有一组含水裂隙带，其中在掌子面前方中部 17~18 m 处的强反射反映了裂隙水集中处。在该处反射能量（振幅）增强、主频降低、同相轴异常、相位反转 180°，由此可判断该处为含水构造，开挖验证的照片见图 11。

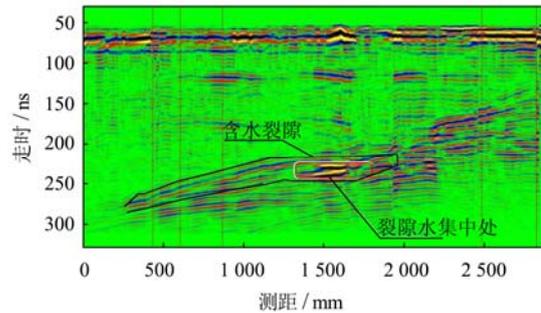


图 10 地质雷达探测成果
Fig.10 Results of GPR detecting water



图 11 雷达探测含水裂隙带出水照片
Fig.11 Radar detection water flowing fractured zone photo

4.3 瞬变电磁方法数据解译

瞬变电磁测深法是一种时间域电磁法，它是利用阶跃波形电磁脉冲激发，不接地回线向地下发射一次场，在一次场断电后，测量由地下介质产生的感应二次场随时间的变化来达到寻找各种地质目标的一种地球物理勘探方法^[10]。

4.3.1 成像方法

由于隧道内全空间的环境不同于地面的半空间情况，因此，隧道中的探测方法不能照搬地面方法，必须采用全空间条件下的理论和方法。目前在瞬变电磁法中等效导电平面法是建立在全空间理论基础上的。另外，视纵向电导对低阻导电薄层反应灵敏，有利于探测低阻充水断层。隧道内充水断层、裂隙电阻率会呈现低阻，因此，地电模型可以等效为低阻薄层。

4.3.2 瞬变电磁探测含水裂隙实例

在锦屏二级电站辅助洞出口段 A 洞掌子面 AK11+598，用瞬变电磁预报了掌子面前方的含水体。图 12 为视电阻率断面等值线图，反映了前方岩石的视电阻率变化情况。由图可知，在 5~15 m 与 35~46 m 处，出现了 6 个低阻等值线异常带，其视电阻率等值线数值由 200~400 Ω·m 减至 40~80 Ω·m，根据低阻等值线异常带的形态，解译为在掌子面前方 5~15 m 与 35~46 m，发育有 6 组近竖直的导水裂隙带。隧洞开挖后，在 5~15 m 预报

段发育有 2 组导水裂隙带，并有线状流水，水量为 320 L/h，在掌子面前方 35~46 m 段发育有 5 组导水裂隙带，第 5 组导水裂隙带水量为 3 400 L/h，如图 13 所示。

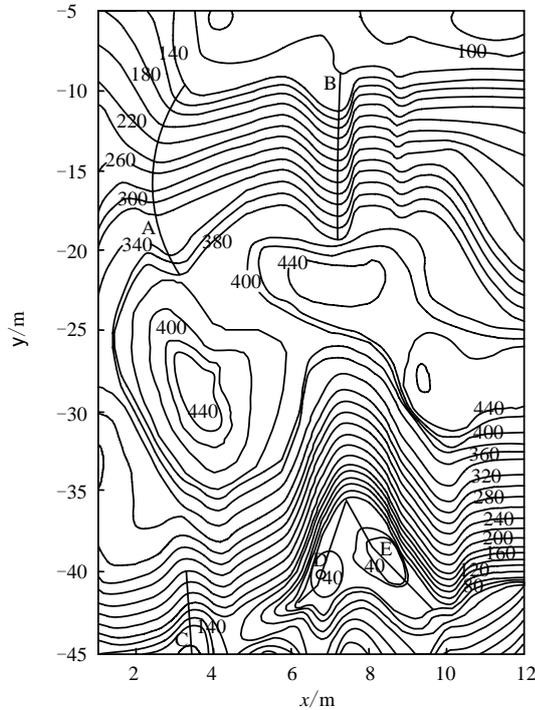


图 12 瞬变电磁视电阻率等值线图 (单位: $\Omega \cdot m$)
Fig.12 Contour map of transient electromagnetic apparent resistivity (unit: $\Omega \cdot m$)



图 13 瞬变电磁探测导水裂隙带照片
Fig.13 TEM detection water flowing fractured zone photo

5 结 论

(1) 隧道超前地质预报是隧道施工中的一个重要环节，地质工作是隧道超前预报工作的基础，探明隧址区的地质条件是开展预报的首要问题，而超前开挖隧道是探明隧道地质条件最直观、最有效的手段，其对地质现象的揭露远高于物探或钻探等手段。隧道施工期地质工作主要包括风险靶段分级、掌子面素描、高清数码照相、平面地质图绘制、三

维地质模型构建等。

(2) 隧道超前地质预报手段有多种，预报方法的选择要根据各种预报仪器的特点及现场的地质、工程条件进行优化选择，在此基础上开发的超前地质预报方法智能选择系统可以帮助操作员从中选择不同岩性地区、构造发育特点、地下水文条件下需要选择的预报方法，提高预报准确度。

(3) 现场采集的信号通过数据处理系统进行处理及图像分析，能否正确解译是准确预报的关键。数据解译是隧道超前地质预报的核心工作，物探的多解性也是影响准确性的一个重要因素，如何有效地与地质工作相结合，提高解译的准确率，降低多解性带来的不利影响，本文总结前人研究成果，给出了几种常用的物探方法，如 TSP、地质雷达、瞬变电磁判断断层破碎带、含水体的判据，对于隧道超前地质预报具有一定的借鉴意义。

致谢：本文的研究工作得到了二滩水电开发有限责任公司、湖北沪蓉西高速公路建设指挥部、青岛国信胶州湾交通有限公司的大力支持，在此表示衷心的感谢！

参 考 文 献

[1] 王梦恕. 对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见[J]. 铁道勘察, 2004, (1): 7-10.
WAGN Meng-shu. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the karst district[J]. **Railway Investigation and Surveying**, 2004, (1): 7-10.

[2] 李利平, 李术才, 张庆松. 岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 523-528.
LI Li-ping, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song. Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(2): 523-528.

[3] 钟世航, 孙宏志, 王荣. 陆地声纳法在隧道施工时预报断层、溶洞的效果[J]. 隧道建设, 2007, (增刊): 21-25.
ZHONG Shi-hang, SUN Hong-zhi, WAGN Rong. Research on survey effects of faults and karst caves using Land-Sonar in tunnel construction[J]. **Tunnel Construction**, 2007, (Supp.): 21-25.

[4] 赵永贵, 刘浩, 孙宇, 等. 隧道地质超前预报研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 460-464.
ZHAO Yong-gui, LIU Hao, SUN Yu, et al. Research progress in tunnel geological prediction[J]. **Progress in Geophysics**, 2003, 18(3): 460-464.

[5] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 复信号分析技术在地质雷达预报岩溶裂隙水中的应用研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2191-2196.
LIU Bin, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. Study of

- application of complex signal analysis to predicting karst-fractured ground water with GPR[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(7): 2191-2196.
- [6] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [7] 何发亮, 李苍松. 隧道施工期地质超前预报技术的发展[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(3): 12-15.
HE Fa-liang, LI Cang-song. The development of geological forecast in tunnel construction[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2001, 38(3): 12-15.
- [8] 李术才, 薛翊国, 张庆松, 等. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1297-1307.
LI Shu-cai, XUE Yi-guo, ZHANG Qing-song, et al. Key technology study comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(7): 1297-1307.
- [9] 刘志刚, 赵勇. 隧道隧洞施工地质技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [10] 李貅, 郭文波, 李毓茂. 瞬变电磁法在煤田矿井涌水通道勘察中的应用[J]. 西安工程学院学报, 2000, 22(3): 35-38.
LI Xiu, GUO Wen-bo, LI Yu-mao. Application of TEM to exploration of water gushing channel way in coal field[J]. **Journal of Xi'an Engineering University**, 2000, 22(3): 35-38.
- [11] 钟世航. TSP作隧道掌子面前方地质预报几例失误原因分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊1): 2443-2446.
ZHONG Shi-hang. Analysis the failure reasons in survey forward from working face of tunnels by means of TSP[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(Supp.1): 2443-2446.
- [12] 薛翊国, 李术才, 张庆松, 等. 隧道信息化施工岩溶裂隙水超前地质预报[J]. 岩石力学, 2008, 29(12): 3360-3364.
XUE Yi-guo, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Geological prediction of karst-fractured groundwater in tunnel informational construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3360-3364.
- [13] 肖书安, 吴世林. 复杂地质条件下的隧道地质超前探测技术[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(2): 159-165.
XIAO Shu-an, WU Shi-lin. Geological prediction technique for tunnel construction under complex geological conditions[J]. **Chinese Journal of Engineering Geophysics**, 2004, 1(2): 159-165.
- [14] 刘传孝. 地质雷达探测关键岩层分析断层参数的研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(2): 21-23.
LIU Chuan-xiao. Research and application of geological radar to predict key strata and to analyze fault parameters[J]. **Coal Science and Technology**, 2005, 33(2): 21-23.

《岩土力学》2011年第4期被EI收录论文(53篇, 收录率100%)(1)

序号	论文题名	作者	页码
1	Research for time-temperature equivalence effect of rock (II): Experimental research	ZHU Yuan-guang, LIU Quan-sheng	961-966
2	饱和层状砂土液化特性的动三轴试验研究	周 健, 陈小亮, 杨永香, 等	967-972
3	两种膨润土的土-水特征曲线	孙德安, 孟德林, 孙文静, 等	973-978
4	石灰改性膨胀土击实曲线的双峰特性研究	程 钰, 石名磊	979-983
5	超软土真空预压室内模型试验研究	孙立强, 闫澍旺, 李 伟, 等	984-990
6	双圆盾构隧道施工引起的地面沉降预测	魏 纲, 陈伟军, 魏新江	991-996
7	拉剪应力状态下岩体裂隙扩展的断裂力学机制及物理模型试验	黄 达, 金华辉, 黄润秋	997-1002
8	DX 桩群桩现场试验研究	陈立宏, 唐松涛, 贺德新	1003-1007
9	重锤夯实抛石基床的有效加固深度试验研究	叶 锋, 童新春, 张功新, 等	1008-1012
10	含孔岩石加载过程的热辐射温度场变化特征	张艳博, 刘善军	1013-1017
11	软土物理力学性质指标与微结构参数的灰色关联-神经网络模型	刘勇健, 李彰明	1018-1024
12	非饱和黏土的冻胀融沉过程分析	吴礼舟, 许 强, 黄润秋	1025-1028
13	各向异性砂土主动侧土压力计算方法	宋 飞, 张建民	1029-1034
14	地质力学电磁场模型试验相似理论研究	罗先启, 程圣国, 张振华, 等	1035-1039
15	黏土-结构接触面大剪切变形后渗流特性试验研究	雷红军, 刘中阁, 于玉贞, 等	1040-1044
16	不同卸荷速度条件下灰岩力学特性的试验研究	王在泉, 张黎明, 孙 辉, 等	1045-1050
17	以强度增长率评价麦秸秆加筋盐渍土的加筋效果	李 敏, 柴寿喜, 王晓燕, 等	1051-1056
18	模拟月壤地面力学性质试验研究	邹 猛, 李建桥, 刘国敏, 等	1057-1061
19	隧道单层衬砌设计方法研究及应用	龚彦峰, 张俊儒	1062-1068
20	基于实例推理系统的滑坡预警判据研究	李 聪, 姜清辉, 周创兵, 等	1069-1076

(未完, 见第2516页)