

文章编号:1000-582X(2009)10-1174-06

超前地质预报在大相岭隧道施工中的应用

王晓川, 卢义玉, 夏彬伟, 葛兆龙, 左伟芹

(重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400030)

摘要:深埋长大隧道工程地质条件复杂多变,盲目施工易造成突水、突泥和塌方等安全事故。超前地质预报技术作为隧道勘察结果的进一步详实,在隧道施工减灾、防灾方面发挥着重要的作用。以大相岭隧道为工程背景,针对该隧道复杂的地质条件,采用 TGP206 超前地质预系统及宏观微观相结合的预报分析方法,可以有效地提高对不良地质体的预报效果,通过预报结果与实际揭露的对比分析,其预测精度达到 95% 以上,有效地指导了隧道的安全施工,为同类工程提供技术资料和经验借鉴。

关键词:地质预报;隧道;不良地质体;安全施工

中图分类号:U455

文献标志码:A

Application of geologic prediction ahead in Daxiangling tunnel

WANG Xiao-chuan, LU Yi-yu, XIA Bin-wei, GE Zhao-long, ZUO Wei-qin

(1. College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: The deep buried large tunnel, which is complicated in the geologic condition. The unplanned construction often causes accidents, such as water flush, mud inrush, collapse, etc. Geological prediction is important to prevent disasters. Taking the Daxiangling tunnel as the example, the paper predicts the complex geology in the tunnel by the TGP206 and analyzes the geology at the macro and micro levels. The results show that this way can improve the prediction effect for unfavorable geology and the precision can reach to 95% by comparing to the real condition. Then, the way provides a new idea for the safety of the tunnel construction, and technical information and the experience to the similar projects.

Key words: geological prediction; tunnel; unfavorable geology; construction safety

近年来,随着隧道建设逐渐向“长、大、深、群”方向发展,施工中有可能出现如岩石破碎带、富水区、溶洞、断层等地质灾害的,单靠传统的预测预报手段已经难以满足需要。在隧道勘察设计阶段,勘察单位一般都是通过区域地质资料、地表测绘和少量钻孔等手段获得隧道和地下工程的工程地质资料,鉴于隧道处于不同深度,其工程地质环境和水文地质条件千差万别,并且由于技术、经济以及人们的认识水平等原因,仅靠勘察资料进行施工,具有不确定

性,工作精度也只能在总体上满足设计要求,不可能详尽地了解隧道中所有的工程地质问题。为了避免或者减少隧道施工地质灾害问题的发生,更好的实现快速安全施工,工程物探手段进行超前地质预报应运而生^[1-3]。

中国隧道施工地质超前预报研究始于 20 世纪 50 年代,但真正应用于隧道及其它地下工程建设是在 70 年代,隧道施工地质超前预报要解决的问题主要包括断裂、溶洞、破碎带等不良地质现象的性质、

收稿日期:2009-05-17

基金项目:国家自然科学基金委专项创新研究群体基金项目(50621403);重庆市杰出青年基金(CSTC2009BA6047)

作者简介:王晓川(1983-),男,重庆大学博士研究生,主要从事高压水射流技术在地质灾害防治方面研究,

(E-mail) wangxiaochuan6106@163.com。

规模的判定以及不良地质体位置、产状的确定,超前地质预报不仅是施工安全的需要,又可为即将开挖的不良地质体的超前支护提供科学依据,从而为动态设计提供理论性指导^[4-12]。

1 隧道超前地质预报概况与主要技术手段

1.1 隧道超前地质预报概念

隧道超前地质预报包括广义隧道超前地质预报和狭义隧道超前地质预报:广义的超前预报包括隧道设计初期地勘单位提供的粗勘资料和动态施工中得到更详细的物探资料,狭义的超前预报仅仅是指施工时物探到的隧道洞体不良地质体预报资料^[13]。

广义隧道超前地质预报,主要包括隧道所在地区不良地质的宏观预报(即粗勘资料)、隧道洞体不良地质体超前预报(即狭义隧道超前地质预报)和隧道洞体施工地质灾害警报。一般说来,平时所讲到的地质超前预报都是指狭义的地质超前预报,狭义的地质超前预报按照预报距离的远近又可以分为长期(长距离)超前地质预报和短期(短距离)超前地质预报。长期超前地质预报是在隧道所在地区不良地质分析和宏观预报的基础上进行的,其主要任务是较准确地预报掌子面前方 100 m 或更远距离范围内的主要不良地质体的性质、位置和规模,粗略地预报围岩的级别和地下水的情况。短期超前地质预报是在长期超前预报的基础上进一步开展的预报工作,所以短期超前地质预报的主要任务是在掌子面前方 15~20 m、最多 30 m 范围内更准确地预报可能出现的岩层、已经临近的不良地质体的性质、地下水体的可能性质、掌子面及其附近实见的不良地质体向掌子面前方延伸的情况和围岩的级别,其精确度较高^[13-15]。

1.2 隧道超前地质预报的技术手段

目前,常用的隧道长期(长距离)超前地质预报方法主要有地面地质调查法,断层参数预报法和 TRT、TSP、TGP、HSP 等仪器探测方法;常用的隧道短期(短距离)超前地质预报的方法主要有掌子面编录预测法,不良地质前兆法和地质雷达、红外线超前探水等仪器探测法及超前钻探法。各种预报手段和方法都有其各自的适用范围和特点,其中 TSP 与 TGP 超前探测是目前预报距离最长、适用范围最广、预报效果最好的超前预报手段和方法,但对于地质灾害比较严重的,预报精度要求比较高的特殊地段,这两种物探手段就暴露出不足之处,如都可以预报富水带的存在,但不能预报地下水体的性质;可以

预报围岩的相对好坏,但不能准确预报围岩的级别。对于短期预报就不存在这些问题了,由于预报距离较短,一般为掌子面前方 15~20 m 以内,最大距离也不超过 30 m,国内普遍使用的地质雷达、红外线超前探水仪和超前钻孔等手段可以解决上述问题。所以在预报实践中,以长期预报为主,辅以短期预报手段,要 2 种或 2 种以上方法和手段综合运用,以达到取长补短、相互验证、提高预报效果的目的^[15-17]。

2 工程概况

大相岭隧道位于四川省雅安市荣经县与汉源县交界处,是雅泸高速路上关键性控制工程,隧道左洞长 9 962 m,右洞长 10 007 m,设有 2 个通风斜井,左线斜井长 1 496 m,右线斜井 1 511 m,是目前亚洲第二长的公路隧道,隧道最大埋深近 1 700 m,是国内罕见的大埋深公路隧道,隧址区位于四川盆地与青藏高原过渡的盆地边缘山区,位于大渡河与青衣江两大水系的分水岭地带,地貌分区属于峨眉山~大相岭深切高中山区,横穿大相岭背斜。隧址区位于大相岭背斜近 SN 向的中段。背斜核部大面积出露下震旦统苏雄组火山岩构造,构成大相岭背斜主体。大相岭背斜是一个核部隆起高、出露宽,两翼变形强烈、倒转、出露狭窄,并且被保凤断裂和曹大坪断裂切割并限定的背冲式“Ω”形隔挡式翻卷褶皱(见图 1)。

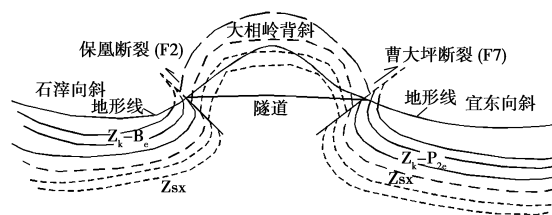


图 1 大相岭背斜的构造形式

隧址区地处四川盆地,属亚热带季风湿润气候与青藏高原大陆性干冷气候的交界地带,该地区的降水非常的丰富,大相岭迎风面也成为全国降水最多的地方,据设计地勘资料显示整个隧道正常涌水量 26 600 m³/d。受地质构造的影响,大相岭背斜核部两侧的保凤断裂和曹大坪断裂附近是强变形集中带,地貌形态明显受构造和岩性控制,具带状展布特征,以褶皱构造为骨架,形成北东向山脉和纵向河谷相间,兼有岩溶洼地和峡谷地貌景观,河流峡谷切割较深,相对高差达 2 100 m,受背斜构造和大埋深的影响,隧道经过区域内发育较多横张断裂,局部岩石风化极为严重,裂隙发育,在大埋深地段伴有岩爆,

加上隧区内降水丰富,涌水、突泥、岩溶等地质灾害遍布全区,做好超前地质预报是一项很重要的任务。

3 TGP206 工作原理及方法

3.1 工作原理

探测使用 TGP206 (Tunnel Geology Prediction)隧道地质超前预报系统是北京市水电物探研究所专门为隧道及地下工程施工超前地质预报研制开发的系统设备, TGP206 隧道超前地质预报系统由仪器主机、配件和处理软件 3 部分组成。探测原理是利用地震波的反射原理。地震波由小药量炸药激发产生。地震波在岩石中以球面波形式传播,当地震波遇到弹性波阻抗差异界面时,例如断层、岩体破碎带、岩性变化或岩溶发育带等,一部分地震信号透射进入前方介质继续传播,一部分地震信号反射回来,反射的地震信号被高灵敏度的地震检波器接收。根据信号返回的时间和方向,通过专用数据处理软件就可以得到清晰的反射波图像。通过对反射波特征的分析,如发射与反射之间的时间差、相位差、反射信号强弱、纵波与横波的比率等,并结合区域地质资料、跟踪观测地质资料就可以确定隧洞前方及周围区域地质构造的位置和特性。系统工作原理见图 2。

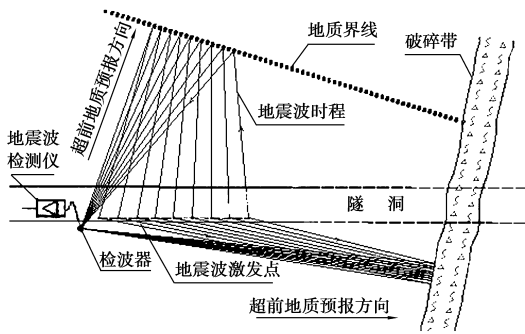


图 2 隧道地震反射波探测原理

3.2 测线布置

预报检测时在隧道左或右壁(一般是按左线靠左,右线靠右的原则布置)的同一水平线上从掌子面向外布置 24 个炮孔和 2 个检波器钻孔,一般距掌子面 10 m 左右开始布炮孔,炮孔间距 2.0 m,炮孔高度 1.2 m,孔深 1.5 m,略向下倾斜 10°,以保证注入的水不外泄;然后与炮孔最近距离 20 m 处两壁布置预报接收检波器孔,接收孔深度一般为 2.0 m,孔径 50 mm,接收孔距掌子面 76 m 左右,安装检波器时向接收孔底部注入适量的黄油,便于检波器与孔壁较好耦合,并用黄油将孔口密封,减少噪声的影

响。检测时应准备 50~70 g 炸药 24 段,电雷管 24 枚,起爆器 1 个,注水胶管 1 条,起爆电缆 50 m。布置形式见图 3。

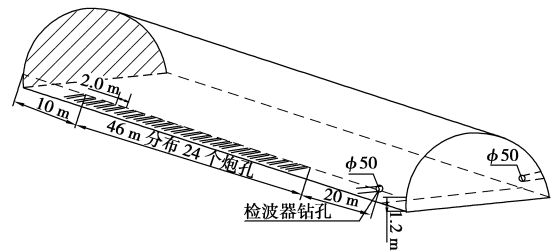


图 3 TGP 型隧道地质超前预报探孔测布置

3.3 工作方法

准备工作完成后,将炮线及触发线与主机连接,派有经验的炮工将制作的小药卷送至探测孔底(炸药选用防水的硝胺炸药,将每管切 2 段,每段插入瞬发电雷管,并用透明胶带将其裹实粘牢),然后注水灌满炮孔,再将电雷管与起爆器连接起爆采集数据,数据存盘后完成一次数据采集。按照上述操作步骤从里至外依次进行采集。在采集数据时,详细记录采集炮孔的爆破质量(包括未爆炮孔的数量及位置),并对测线布置段至隧道掌子面间的隧道围岩进行详细记录。将采集完的数据进行整理后,通过数据分析软件进行数据处理。处理流程见图 4

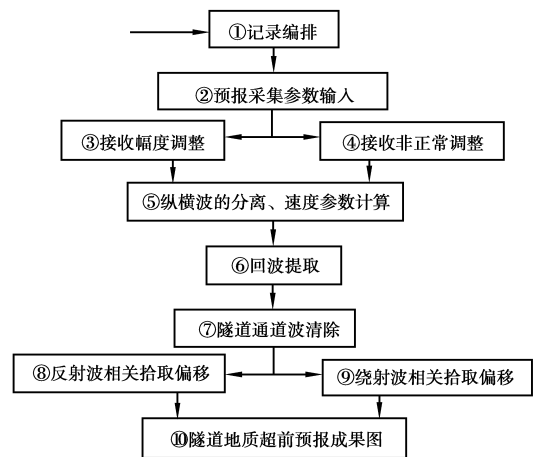


图 4 数据处理过程

4 工程实例

以大相岭隧道右线进口 YK54+574~YK54+724 段为例,进行预测分析。该地段位于大相岭背斜东翼,岩层走向近南北向,位于 F3 断层的破碎带上,上盘苏雄组流纹岩及安山岩;下盘为澄江期中粗粒似斑状钾长花岗岩和苏雄组流纹岩及安山岩。上下盘岩层均向东倾。断层碎粉带宽 2~5 m,发育劈

(片)理化构造角砾岩和初碎裂岩,结构较松散,劈(片)理产状(倾角)较陡,与主断面斜交。上下盘断层影响带宽 20~30 m,发育破裂岩或破裂岩化岩石。本次预报地段掌子面位于右线 YK54+574 里程处,严格按照上述布孔方式进行布孔和数据采集,实际放炮 23 炮,报废 1 炮,采集到数据的 22 炮,采集波形清晰,有效波形超过最低限,此次采集有效。

数据解译是超前地质预报的最后一步,也是最核心的一步,解译的准确与否直接关系到预报的质量。解译技术是实现高水平超前地质预报的最关键技术,也是难度最大的技术。一方面要求解译人员具有丰富的解释经验,另一方面要求解译人员具有丰富的地质工作经验。笔者所在实验室从事超前预报研究工作多年,摸索出一套比较高效可行的方法。前面提到超前地质预报详细的划分可以分为广义预报和狭义预报,鉴于纯粹的数据分析不容易宏观把握,预报效果也不好,笔者建议在进行解译时从广义预报的角度来综合考虑,首先通过设计初期的地勘资料对隧址区内的地质构造和大的断层从宏观上进行把握,然后对采集到的信息进行微观处理,采用宏观和微观相结合的分析方法。下面通过上述方法对大相岭隧道右线进口 YK54+574~YK54+724 段进行解译,通过软件综合分析处理得到隧道同侧、对侧 P、SH、SV 波形图(见图 5、图 6),以及同、对侧三分量偏移综合图(见图 7、图 8)、构造面的同、对侧反射纵波偏移与衰减成果图(见图 9、图 10)。

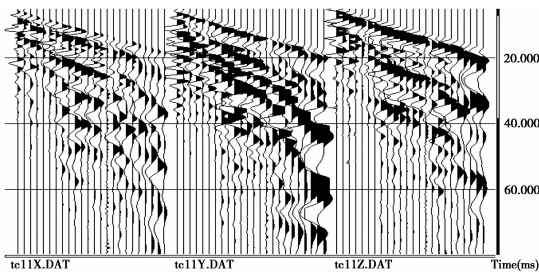


图 5 同侧 P、SH、SV 波形图(与炮孔同侧)

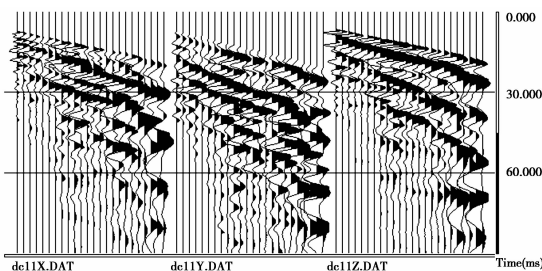


图 6 对侧 P、SH、SV 波形图(与炮孔对侧)

通过地勘资料和开挖地质素描可以了解到该地段位于大相岭背斜东翼,岩层走向近南北向,位于

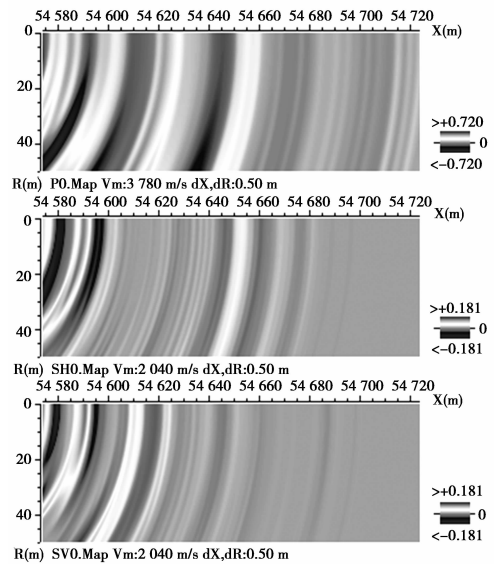


图 7 同侧三分量偏移综合图

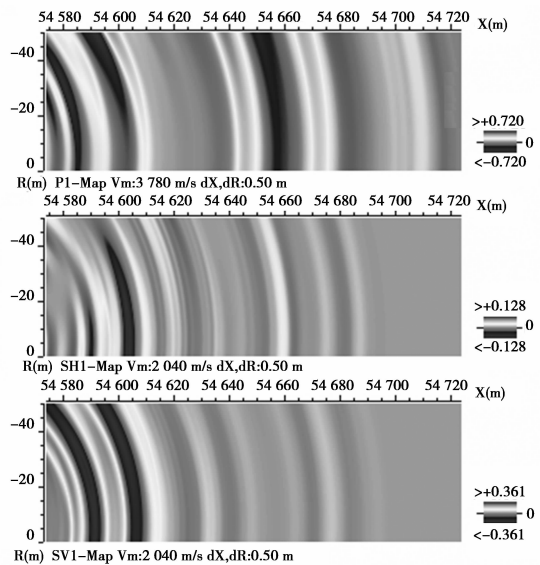


图 8 对侧三分量偏移综合图

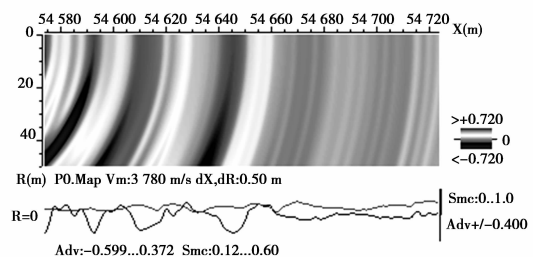


图 9 同侧纵波偏移与衰减成果图

F3 断层的破碎带上,受 F3 断层的影响,初步判断该地段的次级小断层及破碎带较多,从对 YK54+574 以前开挖的情况来看,该范围内地质条件较差,开挖出来的破碎带出现滴水,渗水的区域较多,故初步估

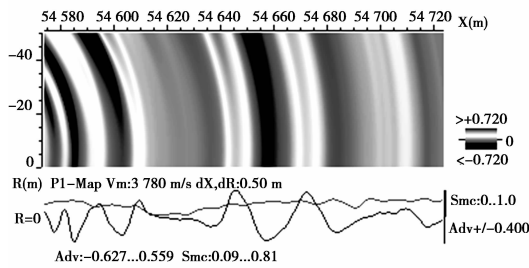


图 10 对侧纵波偏移与衰减成果图

计该地段整体围岩情况在 VI 级以下,这就从宏观上对该段围岩进行了定性,下面的工作就是对预报区域的详细预报了,这就要借助于以上处理好的图像。图像的解译遵循以下准则:

- 1) 正反射振幅表明硬岩层,负反射振幅表明软岩层。
- 2) 若 S 波反射较 P 波强,则表明岩层含水。
- 3) 以 P 波剖面资料为主,结合横波资料综合解释综合分析隧道同、对侧原始记录,分离后的纵、横波(P、SH、SV)记录,以及 P 波、SH 波、SV 波的相关偏移归位剖面图可以看出在 YK54+585~

YK54+594, YK54+605~YK54+615, YK54+650~YK54+660, YK54+680~YK54+690, YK54+650~YK54+660, YK54+715~YK54+720 反射比较强烈,纵波衰减比较强烈,存在构造异常带。为了便于读者进行全面了解,笔者将预报的结果和地质勘察及实际开挖进行了对比(见表 1)。基于预报结论对施工具有指导作用,提出以下建议:

- 1) 在 YK54+585~YK54+594, YK54+605~YK54+615, YK54+650~YK54+660, YK54+680~YK54+690, YK54+650~YK54+660, YK54+715~YK54+720 段施工时特别注意做好初期支护,注意拱顶掉块和坍塌,并及时施作超前支护和初期支护。
- 2) 由于物探方法的间接性,在隧道施工期间针对地质超前预报结论,做好施工地质工作,详细记录隧道围岩和掌子面岩体的地质变化,以地质方法为基础,及时修正预报结论指导施工,不可冒进,根据开挖情况必要时采用地质雷达做短期预报。
- 3) 建议在破碎地段施工时采用短进尺、弱爆破、强支护、勤量测、快循环的施工原则,以确保隧道施工安全。

表 1 预报结果与实际结果对比表

里程桩号	地质勘察	超前预报	实际开挖
YK54+584~YK54+594	岩体较完整,节理发育,局部有滴水	围岩较差,裂隙与地下水均较发育,存在断层破碎带,并可能存在有股状涌水,总体估计为 V 级围岩。	围岩属强风化岩石,处于构造破碎带,右侧出现小股涌水,围岩 V 级。
YK54+605~YK54+615	岩体较完整,节理发育,局部有滴水	围岩较差,裂隙与地下水均较发育,存在断层破碎带,并可能存在有股状涌水,总体估计为 V 级围岩。	围岩弱风化,节理发育,岩体呈碎块状,在 YK54+608~YK54+610 存在淋雨带,围岩 V 级。
YK54+620~YK54+640	岩体较完整,节理发育,局部有滴水	岩石较坚硬,但含有较多隐含裂隙,局部含次级断裂和节理密集带,少数地段有线状滴水,总体估计为 IV 级围岩	岩体较完整,属于简单构造区,围岩围岩较好,比较完整,节理发育,围岩 IV 级。
YK54+650~YK54+660	构造带,岩石较风化,呈块状,局部有滴水。	存在较长的构造破碎带,岩体呈碎块状,裂隙水较发育,局部沿裂隙通道可能产生股状涌水,总体估计为 V 级围岩。	构造破碎带,在 YK54+658 处极为破碎,岩石风化呈粉状,稳定性极差,岩石呈饱水状,但未出现涌水,围岩 V 级。

续表

里程桩号	地质勘察	超前预报	实际开挖
YK54+670~YK54+680	构造带,岩石较风化,呈块状,局部有滴水。	围岩较好,属于简单构造区,局部节理发育,岩石比较坚硬,总体估计为Ⅳ级围岩	岩体较完整,呈层状,层间岩石以安山岩石和流纹为主,稳定性好,开挖比预期要快,围岩Ⅳ级
YK54+680~YK54+690	构造带,岩石较风化,呈块状,局部有滴水。	构造带,岩石比较破碎,裂隙水较发育,总体估计为Ⅴ级围岩。	构造带,岩石比较破碎,主要以风化的安山岩为主,层间夹少量的霏细岩,在 YK54+685 处出现帘状滴水,围岩Ⅴ级
YK54+690~YK54+724	微风化岩石,岩体含较多隐含裂隙,岩石呈块状或块碎镶嵌结构,地下水呈滴水状	围岩较好,属于简单构造区,局部节理发育,岩石稳定性好,在 YK54+715 附近存在局部破碎带,总体估计为Ⅳ级围岩	岩石较完整,呈层状结构,主要以安山岩为主,在 YK54+716~YK54+720 处存在小的破碎带,并有线状滴水,围岩Ⅳ级

通过以上对比可看出大相岭隧道超前地质预报精度很高:

1) 预报不良地质体性质的准确性,达到基本正确~正确。

2) 预报不良地质体位置和规模的精度,达到 95% 以上。

同时从也反应出了 TGP206 存在的不足:

1) TGP206 预报系统虽然能够预测预报破碎带的位置,但是对水的反映准确性比较差,一般只能大致反映有没有水,然而水量的大小、规模程度无法定性,所以对于预测地段发现有溶洞的地区需采用地质雷达进行探水。

2) 由于地震波在传播时存在衰减,特别是围岩较差的地方,波衰减的更快,虽然该系统理论上可以预测 400 m,为了提高预报准确性,实际预测不宜超过 200 m。

实践证明以上预报精度完全可以满足动态施工要求,为隧道工程的安全快速掘进、支护材料的提前准备以及灾害事故的有效预防,提供了可靠的地质资料与信息,同时也为变更设计赢得了宝贵的时间,避免了开挖后与设计不符所造成的停工。

5 结束语

通过在大相岭隧道中应用超前地质预报的工程实践,得出以下结论。

1) 隧道地质超前预报是一项相对比较可靠的探测技术,在不良地质隧道施工中,可以及时有效地避

免不良地质给施工带来的危害,最大限度地保证工人的人身安全,体现人性化施工。

2) TGP206 系统是一种发展中的技术,是一种间接的探测手段,其精度不可能达到百分之百准确,在特殊地段宜采用多种探测手段相结合的方法,将不同探测手段得到的结果进行比较分析,提高预报的准确性。

3) 对采集的数据进行解译时,要从广义的超前地质预报概念去理解,采用宏观和微观相结合的方法进行解译,可以提高预报的准确性,切忌孤立从图像进行解译。

参考文献:

- [1] 李术才,李树忱,张庆松,等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(2):217-225.
LI SHU-CAI, LI SHU-CHEN, ZHANG QING-SONG, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 217-225.
- [2] 叶志华,韩行瑞,张高朝,等. 隧道岩溶涌水专家评判系统在朱家岩隧道涌水预报中的应用[J]. 中国岩溶,2006,25(2):139-145.
YE ZHI-HUA, HAN XING-RUI, ZHANG GAO-CHAO, et al. Application of experts judging system to predicting karst water bursting in Zhujiayan tunnel[J]. Carsological Sinica,2006,25(2):139-145.
- [3] 曲海峰,刘志刚,朱合华. 隧道信息化施工中综合地质

- 预报技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 241-1 251.
- QU HAI-FENG, LIU ZHI-GANG, ZHU HE-HUA. Technique of synthetic geologic prediction ahead in tunnel informational construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 241-1 251.
- [4] 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):7-9.
- WANG MENG-SHU. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the karsts district[J]. Railway Investigation and Surveying, 2004(1):7-9.
- [5] 徐国峰, 杨建峰, 陈侃福. 台缙高速公路苍岭隧道水文地质勘察与涌水量预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2):5531-5542.
- XU GUO-FENG, YANG JIAN-FENG, CHEN KAN-FU. Surveying of hydrogeology condition and forecasting of water inflow in Cangling tunnel Taizhou-Jinyun highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp. 2):5531-5542.
- [6] CHRISTIAN D. Klose fuzzy rule2 based expert system for short range seismic prediction [J]. Computers and Geosciences, 2002, 28(3):377-386.
- [7] BUTTON E, BRETTREBNER H, SCHWAB P. The application of TRT-true reflection tomography at the Unterwald tunnel in Felsbau[J]. Geophysics, 2002, 20(2):51-56.
- [8] SHOU K J. A three-dimensional hybrid boundary element method for nonlinear analysis of a weak plane near an underground excavation [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 15(2):215-226.
- [9] FLEMMING JE RGENSEN, HOLGER LYKKE-ANDERSEN, PENTER B E, et al. Geophysical investigations of buried Quaternary valley sin Denmark; an integrated application of transient electromagnetic soundings, reflection seismic surveys and exploratory drillings[J]. Journal of Applied Geophysics, 2003, (53):215-228.
- [10] CREMER F, DE JONG W. Klamer schutte fusion of polarimetric infrared features and GPR features for landmine [C]. The International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). Delft, Netherlands:[s. n.], 2003:1-6.
- [11] BROOKS J W. Applications of GPR technology to humanitarian demising operations in Cambodia; some lessons learned [R]. [S. l.]: Brooks Enterprises International, Inc, 1996:1-9.
- [12] ALVIN K. BENSON. Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards; examples of groundwater contamination, faults, cavities [J]. Applied Geophysics, 1995:177-193.
- [13] 王锦山, 王力, 曹志刚, 等. 厦门海底隧道综合超前地质预报实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2309-2317.
- WANG JIN-SHAN, WANG LI, CAO ZHI-GANG, et al. Practice on synthetic geological prediction ahead of Xiamen sub sea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11):2309-2317.
- [14] ANDISHEH ALIMORADI, ALIMORADZADEH, REZA NADERI, et al. Prediction of geological hazardous zones in front of a tunnel face using TSP 203 and artificial neural net works, Tunnel [C]. Underg Space Technol, 2008,
- [15] J A. DOOL ITTLE, B JENKINSON, D HOPH INS, et al. Hydropedological investigations with ground - penetrateing radar (GPR) : Estimating water - table depths and local groundwater flow pattern in areas of coarse - textured soils[J]. Geoderma, 2006:317-329.
- [16] 宋先海, 顾汉明, 肖柏勋. 我国隧道地质超前预报技术述评[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2):605-615.
- SONG XIAN-HAI, GU HAN-MING, XIAO BO-XUN. Overview of tunnel geological advanced prediction in China [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2):605-615.
- [17] 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 Technology, 2005, 33(2):21-23.

(编辑 陈移峰)