

国内外隧道超前预报技术评析与推介

赵永贵

(中国科学院地质与地球物理所, 北京 100029)

摘 要 国内外的隧道地质超前预报技术正在发展之中, 目前应用的真视速度法, 水平剖面法, TSP、TGP 等技术, 由于观测方式和资料处理方法比较简单, 不能准确确定掌子面前方围岩的波速, 从而致使地质界面定位不准确, 围岩工程类别划分缺乏依据, 亟待改进。TRT 与 TST 技术采用空间观测方式和偏移成像方法, 技术比较先进, 能解决了掌子面前方围岩速度结构可靠分析的问题, 实现了隧道围岩地质结构的精确成像, 适合复杂地质条件下的地质超前预报应用。目前的超前预报过于依赖地震方法, 实际上地震方法对于解决构造问题比较有效, 解决含水性问题不如电磁方法, 高密度电法和瞬变电磁方法在超前预报领域会有广阔的应用前景。实际预报工作中要取得好的预报结果, 必须提倡综合方法, 提倡地质分析与工程物探相结合, 地震方法与地磁方法相结合, 共同解决不良地质构造、含水构造、含瓦斯气构造的超前预报问题。

关键词 隧道地质超前预报, 速度分析, 地震偏移成像, 不良地质构造, 含水构造

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)04-1344-09

Analysis and recommendation of tunnel prediction techniques at home and abroad

ZHAO Yonggui

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract Current typical techniques of tunnel geological prediction at home and abroad is under developing, including negative apparent velocity, horizontal section profile(HSP) and TSP method etc. Considering simpler observation way and data process, it is hard to accurately determine the seismic wave velocity of wall rock in the front of tunnel face. Therefore, from these defective methods, geological interface may be inaccurate, which will not provide sufficient evidences for classifying wall rock Characteristics. The TRT and TST methods with spatial observation arrange and data process of migration image can solve the problems of analyzing velocity structure of wall rock in the front of tunnel face and realize accurate image of geological framework of tunnel wall rock. At present, tunnel prediction technology study pays more attention on seismic techniques. However, seismic technique can solve geological structure problems, but it is not powerfully to solve water bearing problem as electromagnetic techniques. Such Electric Resistivity and TEM methods maybe have wide application in the future. To obtain good results in prediction practices, it is necessary to recommend synthetical methods, such as combining of geological analysis and geophysical examination, of seismic and electromagnetic methods, to meet the prediction of geological structure, water and gas bearing problems.

Keywords tunnel geological prediction, seismic wave velocity analysis, seismic migration image, harm geological structure, water bearing structure

0 引 言

隧道施工中的地质超前预报是一个国际前沿课

题,也是一个难题,各国都在研究之中。欧洲开始的较早(1980年代),美洲稍晚些(1990年代),中国在1990年代初也开始了超前预报技术研究。因为该项

收稿日期 2007-03-10; 修回日期 2007-06-20.

作者简介 赵永贵,男,1943年生,辽宁新民人,1970年毕业于北京大学地球物理学系,现为中国科学院地质与地球物理研究所研究员,博士生导师,中国地球物理学会工程地球物理专业委员会主任,主要从事工程地球物理学方法研究。(E-mail: zhaoyonggui@263.net)

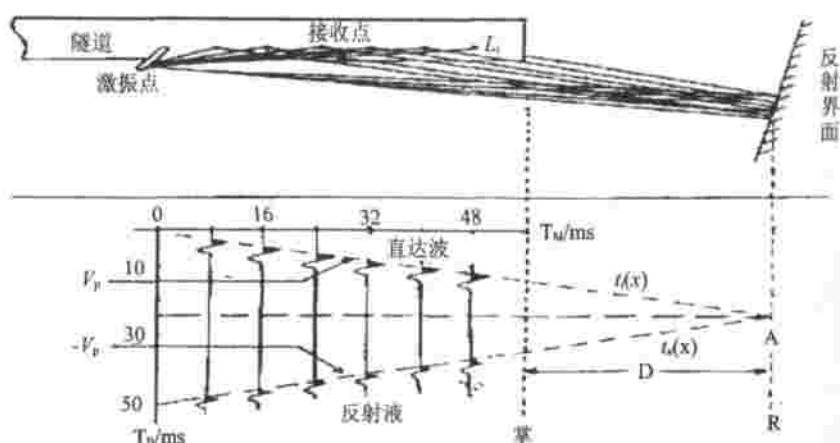


图1 负视速度法观测与资料处理原理示意图

Fig.1 The observation way and data process pattern of negative apparent velocity method

技术的应用关系到工程的安全、质量、进度和经费等重要问题,因而倍受关注.特别是在地质条件复杂地段和采用TBM现代施工技术的情况下,地质超前预报工作更显得尤为重要.例如在奥地利横穿阿尔卑斯山的Unterwaler隧道施工中全程使用了地质超前预报^[3].我国西部为多山地区,地质条件复杂,造山带、断裂带发育,地下水丰富,隧道开挖中的坍塌、冒顶、岩溶、涌水等地质灾害经常发生.因而在公路、铁路和水电工程的地下隧道施工中也普遍开展了地质超前预报工作.

隧道地质超前预报因为要求高、技术难度大而成为疑难问题.隧道超前预报关心的地质问题包括构造软弱带、含水性、岩体工程类别、岩溶、瓦斯气等问题,特别是对于含水断裂、含水溶洞、含水松散体等不良地质对象的预报,对工程物探来说都是疑难的问题.

隧道内的观测空间很有限,反射波孔径小,这对提高地震反射资料的速度分析、反射面定位精度和岩体工程类别的划分增加了难度.

不同地质对象表现出的物性特征是各不相同的.岩体的构造特性、围岩的完整程度、破碎状态等主要表现在力学性质的差异上,而含水性则主要表现在电导率、介电常数等电磁特性差异上.目前应用的任何一种物探方法都很难涵盖这两种物性的变化.地震方法主要探测力学性质的变化,预报隧道前方围岩的岩性、构造、结构特征等与力学强度有关的地质要素,对断裂带、破碎带敏感,对围岩的含水性不敏感,不能预报含水地段,因而很多突水事件发生漏报,造成重大的经济损失.高密度电法用于探测围岩的电阻率分

布,对围岩含水性敏感,可通过探测电性的变化预报围岩的富水地段,发现引发地质工程病害的含水破碎构造.为取得完美的预报结果,在隧道超前预报工作中应强调地震方法与电阻率方法相结合,物探与地质研究相结合,以便提高超前预报的可靠性.

1 目前国内外超前预报技术现状

目前国内外隧道地质超前预报研究的总体水平还处于发展之中,不完全成熟,需要进一步改进和完善,预报的准确性和可靠性还有待提高.现阶段使用的隧道超前预报技术主要是以各种反射地震技术为主,地质雷达为辅,高密度电法的应用还不普遍.地质雷达对含水构造敏感,但预报的距离较短,在20~30 m以内.反射地震的预报距离可以超过100 m.

在隧道内使用反射地震进行超前预报时,观测空间有限,同时隧道围岩不同方向都可能形成反射,使之在解释与判别方面存在很大的困难.为了有效地使用反射地震信号预报隧道掌子面前方的地质情况,在观测方式和处理方法方面形成了几种不同的专门技术,其中包括负视速度法、水平剖面法(HSP)、TSP、TRT和TST等预报技术,这些技术都属反射地震预报技术,代表了不同的研究阶段和技术特点,现分别对这几种地震预报方法的特点进行分析与比较.

负视速度法是由我国铁道系统在上世纪90年代初开始研发的反射地震隧道超前预报方法,曾昭璜等(1994)有关隧道地震反射法超前预报方面的研究成果具有代表性,近年来何振起等人也发表了类

似的工作成果. 该方法的观测是在隧道一个侧壁打孔布置检波器和炮点, 检波器和炮点在一条平行隧道轴的直线上, 利用直达波速估计前方围岩的波速, 利用反射波走时曲线与直达波走时曲线的交点推测前方构造界面的位置. 其观测与分析方法与地震测井的垂直剖面方法有很多相似之处, 所以有时也称“垂直剖面法”. 对于前方规模较大的不良地质体可做出预报. 数据处理是利用反射波走时确定反射界面位置, 处理主要反射界面, 缺乏商业化软件, 目前仅局限于铁路系统少数单位使用.

水平地震剖面法(HSP)的观测方式与负视速度法略有不同, 激发点和接收点布置在隧道两侧. 在隧道的一个侧壁上规则设置检波点, 另一侧壁上规则布置炮点, 接收掌子面前方的反射信号, 从而确定前方不良地质体的位置. 资料处理过程与负视速度法基本相同, 将反射记录按规律重排, 读取反射波走时数据, 计算反射界面位置. 与负视速度法相比, 水平剖面法的观测系统的横向展布较大, 有利于提高速度分析和定位的精度. 有一定的直观性, 能确定主要反射界面, 对于复杂地质条件的多反射界面处理较困难. 缺乏商业化软件, 在西南铁路系统中有一定应用, 在台湾和日本有一些应用实例.

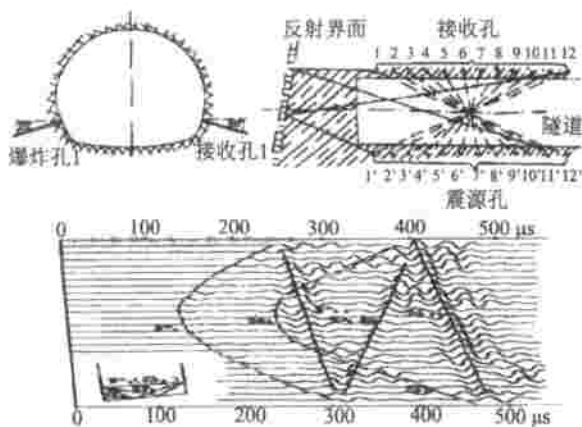


图2 水平地震剖面法(HSP)观测与资料处理示意图

Fig. 2 The observation way and data process pattern of HSP method

TSP超前预报方法(Tunnel Seismic Prediction)是由瑞士Amberg测量技术公司上世纪90年代初开发的用于隧道超前预报的技术. 该方法在欧洲、亚洲有很多应用, 中国先后引进了该公司的TSP202、TSP203等超前预报系统, 特别是铁路系统引进数量较大, 是TSP的最大用户. TSP的观测是

由一个三分量检波器承担, 埋入隧道侧壁岩体中1~1.5 m, 炮点设于隧道同侧边墙岩体内, 等间距排列, 与接收点在一条平行隧道走向的直线上, 观测方式与国内的“负视速度法”的观测方式基本相同. TSP方法与“负视速度法”的主要区别是在资料处理方法上, 它不是采用走时反演方法, 而是采用地震资料处理中的深度偏移成像方法. 在偏移成像之前进行二维Radon变换, 利用视速度的差异, 消除与隧道走向近乎平行界面的反射波. 该方法的分析软件名称为TSPWIN. 在铁路、公路系统有很多应用, 有的成功, 有的失败. 随着近年来在中国的应用, 发现TSP存在很多技术缺陷, 主要是在观测方式和软件处理方法缺乏严谨的物理基础, 臆造性较大, 与真实地质情况不符, 造成了很多漏报、误报和工程事故, 后文将对TSP的技术缺陷进行深入地分析.

TRT技术的全称是True Reflection Tomography, 意为“真正的反射层析成像”, 是由美国NSA工程公司在上世纪末本世纪初开发的, 在欧洲、亚洲开始应用. TRT技术的突出特点是在观测方式实现了空间观测. 资料处理方法上采用地震偏移成像. 检波器和激发炮点布置在隧道两侧和掌子面上, 最大限度地扩展横向展布, 以充分获得空间波场信息, 提高波速分析和不良地质体的定位精度, 较TSP和负视速度法有明显的改进. TRT技术在欧洲隧道超前预报中有成功地应用, 如Blisadona隧道、奥地利的过阿尔卑斯山的铁路双线隧道等, 预报长度可达100~150 m, 在软弱土层和破碎岩体地段也可预报60~90 m. 近年来NSA公司发生体制变动, 目前TRT技术处于封存状态.

TGP206型隧道超前地质预报仪是北京水电物探研究所与北京华安恒业科技有限公司最近联合推出的一款最新型仪器, 由北京华安恒业科技有限公司代理销售. 仪器包括三分量输入通道2个, 数转换(A/D)20bit; 采样率为30微秒、60微秒、90微秒和120微秒; 频带宽度10Hz~50Hz. 观测方式与TSP基本相同, 资料处理的详细技术情况尚不清楚, 但从宣传传资料看与TSP的处理方式基本相似.

TST技术(Tunnel Seismic Tomography)是隧道地震CT成像技术的简称, 是由中科院与云南航天合作开发的, 从上世纪末开始开发到2003年完成的. 其观测系统是采用空间布置, 接收与激发系统布置在隧道两侧围岩中, 也可布置在掌子面上, 扩大横向展布. 资料处理采用速度扫描、偏移成像、构造方

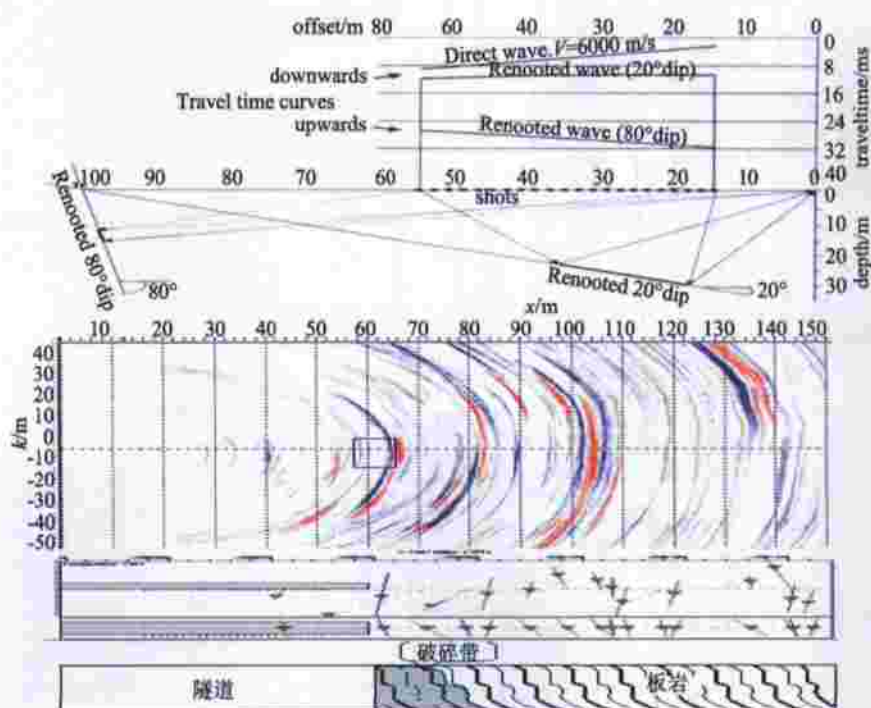


图3 TSP观测方式和处理结果

Fig.3 The observation way and processing result of TSP method

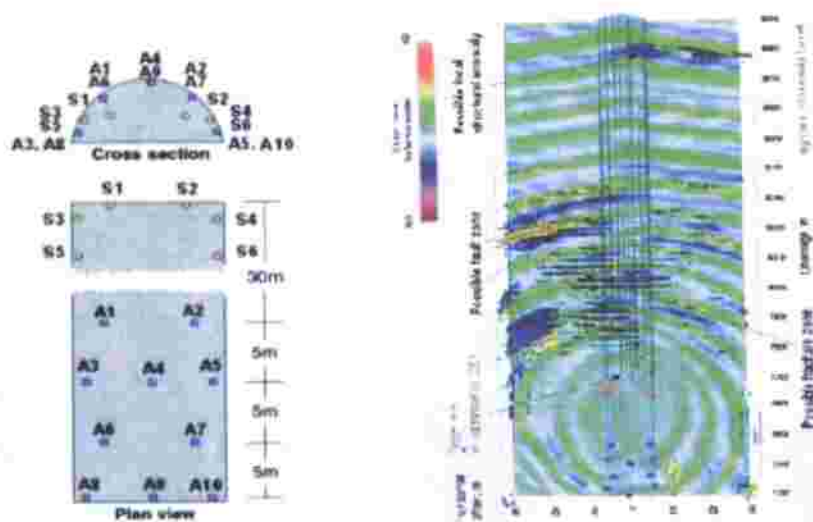


图4 TRT观测方式与地震偏移图像(Richard, 2002)

Fig.4 The observation way and seismic migration image of TRT method (Richard, 2002)

向分析、走时反演成像等多种成像方法。TST技术与TRT技术有相似之处,但是同步独立开发的,功能超出了TSP和TRT,提高了速度分析和偏移定位精度,图像直观,特别适合于地质构造复杂地区的隧道超前预报。在云南和重庆的高速公路隧道建设

中有很多成功的应用实例,代表了国内隧道超前预报研究的最新成果。下图是在重庆高速公路隧道超前预报中应用的实例。隧道宽18m,12道检波器接收,每侧6道,间距4m,检波器埋深1.5~2m,横向展布22m。在速度分析精度10%的范围内,预报长

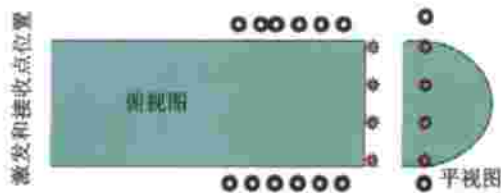


图 5 TST 隧道超前预报观测示意图

Fig. 5 The observation way of TST method



图 6 重庆玉峰山隧道 TST 观测布置图

Fig. 6 The observation way of TST method in Chongqing Yufengshan tunnel

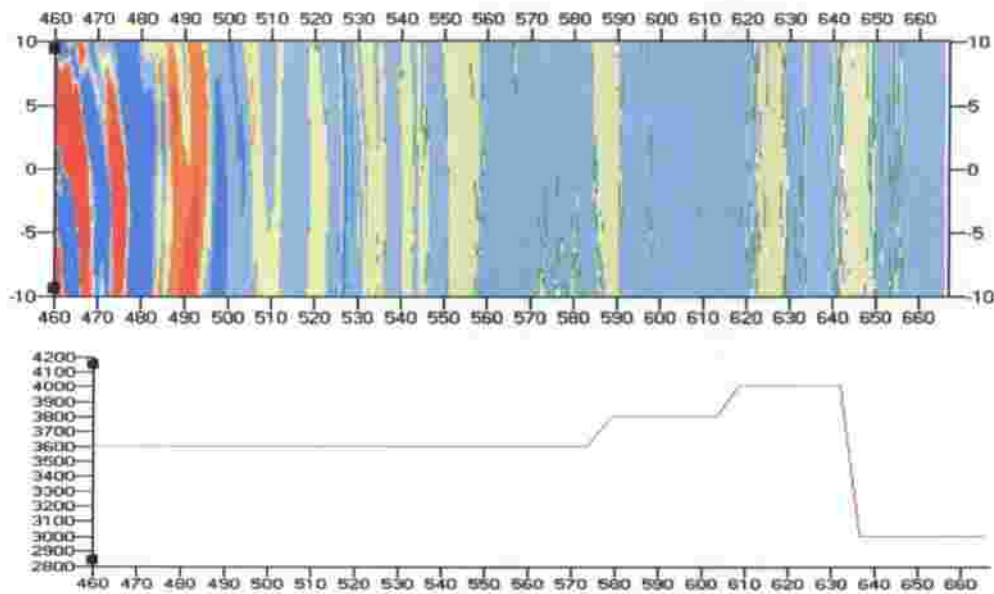


图 7 重庆玉峰山隧道围岩 TST 偏移图像和波速分布(m/s)

Fig. 7 The seismic migration image and velocity distribution of wall rock in Yufengshan tunnel by TST method

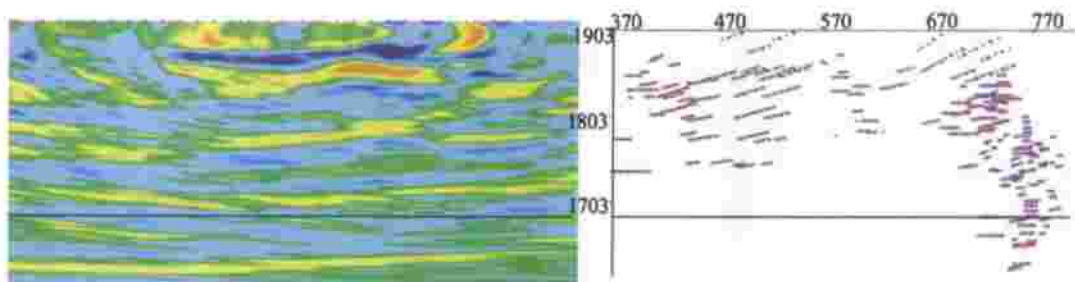


图 8 TST 在地表沿隧道轴线的偏移成像和反射界面成像

Fig. 8 The seismic migration and reflector images by TST method with observation on the ground

度为展布宽度的 10 倍,可预报掌子面前方 220 m 的地质情况.图中展现了地质构造的位置和围岩波速的分布.偏移图像中红色、黄色线条代表围岩由软变硬的界面,蓝色线条代表围岩由硬变软的界面.先先后后红线条的组合代表断裂破碎带,图像直观.

TST 超前预报方法除了可在隧道内观测之外,还可采用多道地震仪在地面沿隧道轴线进行探测,获得地震偏移图像和地质界面图像.下图就是在明珠隧道地面试验的实例.预报深度 400 m,长 1 km.

3 国内外反射地震超前预报技术特点分析

从国内外目前应用的各种隧道预报方法可以看出,反射地震隧道超前预报技术可以按观测方式和资料处理方式进行分类。

观测方式上有两类,一类是直线布置,一类是空间布置。负视速度法、TSP属于前者,水平剖面法、TRT、TST属于后者。空间布置的观测系统比直线布置的观测系统优越,能获得可靠的速度分布结果,提高地质体的定位精度和岩体工程类别划分的可靠性。

资料处理方法上也有两类,一类是走时反演计算,一类是偏移成像。负视速度法、水平剖面法属于前者,TSP、TRT、TST属于后者。偏移成像处理技术比走时反演方法更优越,可以同时利用运动学(走时)和动力学(幅值、极性)信息,图像更直观,能提供岩体力学性质变化和构造组合特征等丰富的资料。TRT和TST技术是建立在空间观测和偏移成像基础上的,技术上比负视速度法和TSP更先进,具有更加广泛的应用前景。

4 TSP技术缺陷分析

目前国内TSP的用户很多,作者从2002年开始也使用TSP203,对TSP技术有比较清楚的了解,

对它的技术缺陷及改进办法做了深入的研究。TSP设备在现场采集中有很多缺点,在锚固方式、耗材、触发同步等方面都有问题,但是更主要的问题还不在于这些方面,而是在观测方式、资料处理方法和处理软件方面的技术缺陷给预报带来的风险。TSPWIN软件中隐藏着很多虚假处理,缺乏严谨的物理基础和科学依据,提供虚假的结果,误导使用者,从而造成漏报、错报,酿成工程事故。

需要对TSP的技术缺陷进行深入的分析,以便提醒使用者避免被误导。首先,目前TSP采用直线观测方式,从理论上讲是无法确定掌子面前方围岩波速的,但是TSP软件在没有科学的算法情况下,给出虚假的波速的分布,这一波速的分布于开挖出来的围岩的类别相差很大,波速不准确导致由时间域向空间域转换的深度偏移结果不可靠,因而作为TSP预报最重要结果的深度偏移剖面失去真实性。

实际上TSP观测得到的数据延拓到最前端观测面上,是一组接近零偏移距反射道集。零偏移距道集反射道集不能同时确定反射面深度和围岩波速两个变量,波速扫描没有最优值,无法确定波速。因为波速不真实,导致反射面位置不真实,用波速判定围岩类别不可靠等一系列结有问题。下图和所列公式是对此问题的理论分析。

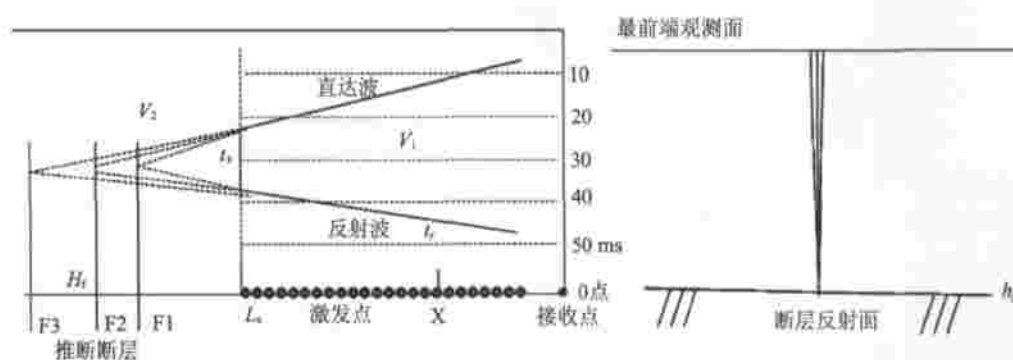


图9 直线排列观测与零偏移距道集示意图

Fig. 9 The linear arrangement observation way and its zero offset gather of the reflects

在这种观测方式下,反射波走时 t_r 的方程为:

$$t_r = 2(H_f - L_s)/V_2 - (2L_s - x)/V_1 \\ = t_s + t_x$$

其中 t_s 是地震波由剖点出发到最前端观测面再返回接收点的走时: $t_s = (2L_s - x)/V_1$,该式中时间 t_s 是观测到的,各炮对应的 t_x 不同,几何位置是已知的,由此可确定观测点范围内的围岩波速 V_1 ,数值

与直达波速相同。 t_s 是最前端观测面到反射面的往返时间, $t_s = 2(H_f - L_s)/V_2$,对于零偏移距道集中的各炮 t_s 是相同的,是零偏移距的走时,式中包含反射面深度 H_f 和前方围岩波速 V_2 两个变量,由此式无法确定反射面的位置和前方围岩的波速,因而在进行波速分析时,无法通过波速扫描确定最优波速。

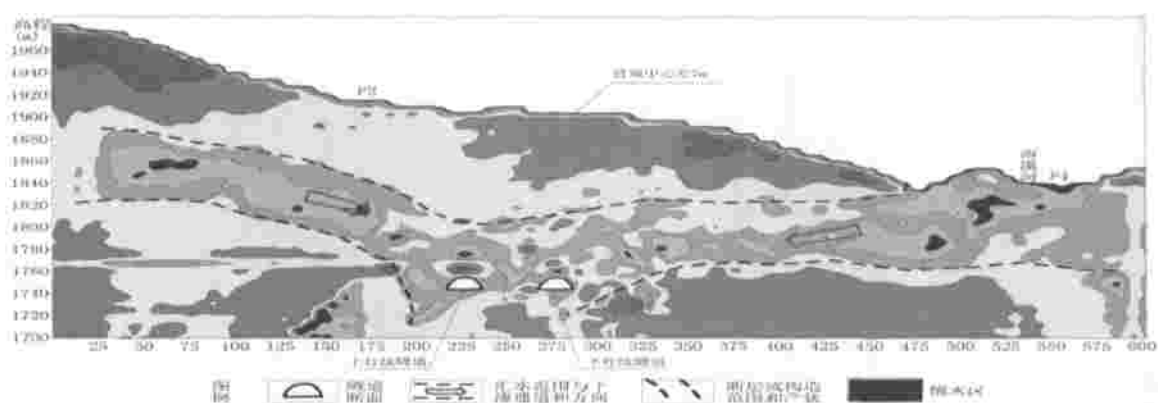


图 11 大风垭口隧道地下水流场的高密度电法剖面

Fig. 11 High density electrical section of the under water field in Dafengyakou tunnel

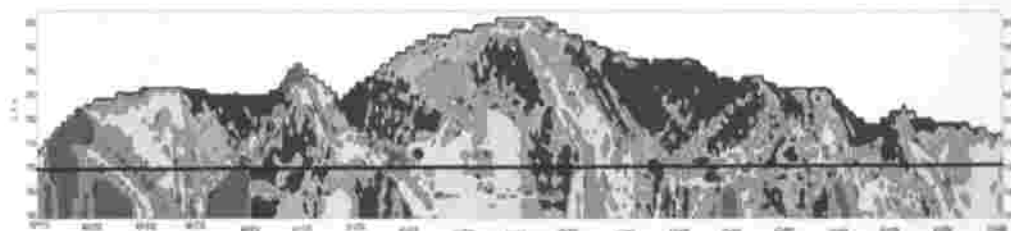


图 12 明珠隧道高密度电法地质超前预报剖面

Fig. 12 High density electrical section of prediction at home and abroad in Mingzhu tunnel

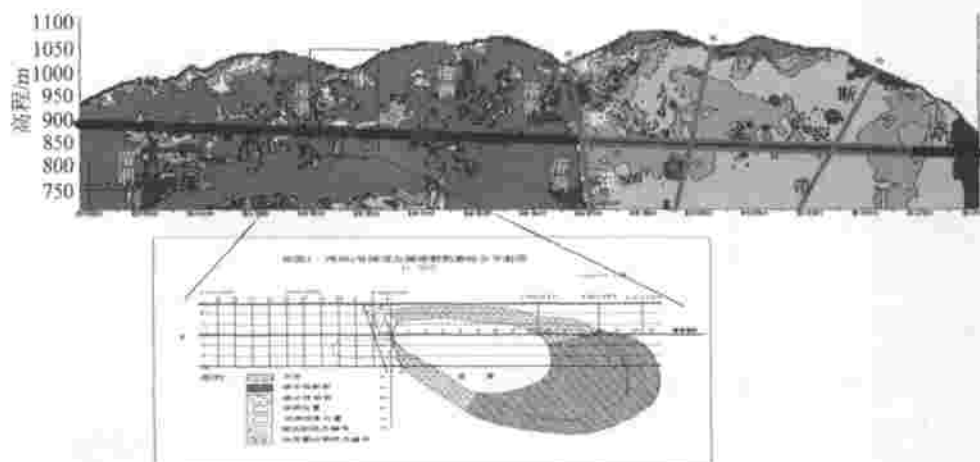


图 13 湾田 3 号隧道岩溶探测剖面

Fig. 13 Karst prospecting section of the Wantian NO. 3

埋深超过 200m, 构造复杂, 岩溶特别发育. 应用高密度电法, 发现隐伏溶洞十余处, 最大的溶洞高 60m, 横截面 30m×20m. 隧道开挖中出现洞中洞奇观, 架桥通过. 下列电阻率图像中红色区代表视电阻率较高的完整致密围岩, 蓝色代表电阻率较低的破碎岩体、断裂带、含水带、充填松散物含水的岩溶. 隧道超前预报中特别注意低阻的位置, 这往往是隧道发生

病害的部位.

6 瞬变电磁超前预报技术

瞬变电磁原为金属矿勘查的常用方法, 它不使用接地电极, 使用供电线圈在地下岩体中产生磁场, 通过断续变化供电电流和它的磁场, 在岩体中感应

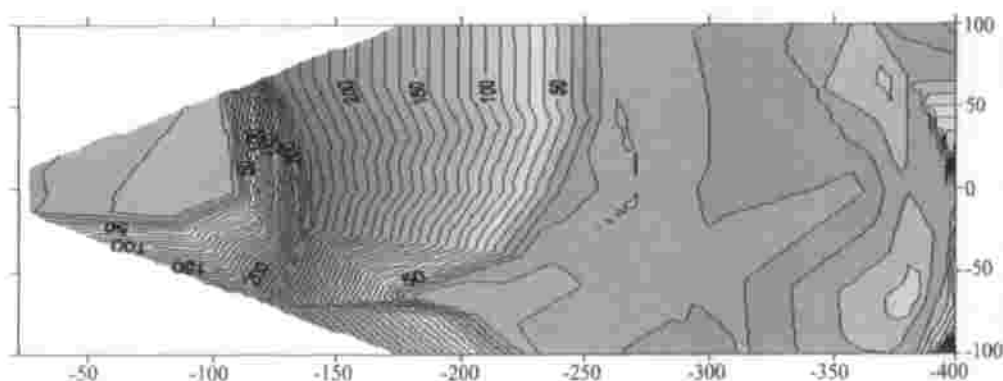


图 14 瞬变电磁在贵州高速公路隧道超前预报剖面

Fig. 14 The transient electromagnetic section of prediction at home and abroad at Guizhou freeway

涡流和二次电磁场,接收二次磁场的强度和随时间的变化,研究岩体电导率的分布,岩体导电性强二次场强度大,岩体导电性差二次场弱。早期的二次场反映浅部岩体的导电性,晚期的二次场反映深部岩体的导电性。瞬变电磁因为不使用接地电极,适合表层为高阻地区勘探,勘测深度可达千米,对高导体分布比较敏感,因而可用于隧道含水性的预报。

瞬变电磁用于隧道内掌子面的地质超前预报已有了一些试验,采用小线圈大电流,取得了地定效果,但采用的接收线圈自感、互感较大,近场特性需要改进。下图是在应用瞬变电磁在贵州高速公路隧道地质超前预报中的实验结果,图中红色代表高阻体,不含水,蓝色代表低阻体,岩体破碎含水。掌子面附近的蓝色是线圈互感影响。探测试验结果与实际开挖吻合较好,应用前景是喜人的。瞬变电磁若要在隧道超前预报中取得好的效果,还必须进一步提高分辨率、改进近场特性,在仪器软硬件方面下功夫。

7 综合隧道超前预报技术

隧道超前预报工作要求高、难度大,责任重,风险大,直接关系到工程的进度、成本、质量和安全。目前的超前预报盲目性较大,工作很不深入,特别是 TSP 技术‘智能化’的误导,照猫画虎,预报的准确性较差,远不能满足工程的需要,亟待改进。要取得可靠的超前预报效果必须采取综合方法,地震方法与电磁方法相结合,物探方法与地质调查相结合。地震方法运用地震波的运动学和动力学特性,能可靠地确定围岩的波速分布、反射面的位置、界面两侧围岩力学特性的差异,为分析确定岩性界面、构造位置、岩体的工程类别等工程地质问题提供可靠依据。电磁方法提供的电导率、电阻率剖面能很好地反映地下水的赋存状态,富水带往往与断裂破碎带、岩溶带有关,破碎含水带

是超前预报最关心问题,它是工程事故的诱因。物探方法要解决的是地质问题,只有通过与地质分析的紧密结合,掌握地质现象的规律,了解区域地质构造走向、产状特征,物探结果的解释才能合理性、可靠性,这就是综合预报方法的核心内容。

8 结 语

隧道超前预报技术正在不断地发展与完善,地震观测与处理方法的改进对于提高超前预报的准确性与可靠性具有重要意义。推进地震方法与电磁方法的结合、物探方法与地质分析的紧密结合,发挥综合预报的长处,是改进隧道超前预报工作、提高超前预报水平应采取的技术路线。

参 考 文 献 (References):

- [1] 曹昭瑛. 隧道地震反射法超前预报[J]. 地球物理学报, 1994, 37 (2): 218~ 230.
- [2] 李忠. TSP-202 探测系统在新保纳隧道地质超前预报中的应用研究[J]. 地质与勘探, 2002, 38(1): 86~ 89.
- [3] Richard O, Edward B. Helfried Bretterehner and Peter Schwab. The Application of TRT-Ture Reflection Tomography-at the Unterwald Tunnel[J]. Geophysics, 2002, 2: 51~ 56.
- [4] 赵永贵, 刘浩, 孙宇, 肖宽怀. 隧道超前预报研究进展[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 460~ 464.
- [5] 温树林, 吴世林. TSP203 在云南元磨高速公路隧道超前地质预报中的应用[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 465~ 471.
- [6] 赵永贵. 中国工程地球物理研究的进展与未来[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 301~ 304.
- [7] 赵永贵. 围岩含水性的超前预报技术[J]. 地球与环境, 2005, 33 (3): 29~ 35.
- [8] 何振起, 李海, 梁彦忠. 利用地震反射法进行隧道施工地质超前预报[J]. 铁道工程学报, 2000, 4: 81~ 85.