

文章编号: 1672—7940(2008) 03—0266—08

TSP 203超前预报技术的缺陷 与 TST 技术的应用

赵永贵, 蒋 辉, 赵晓鹏
(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 TSP203 技术在中国的用户较多, 它采用一维观测系统, 获得的地震资料是零偏移距反射道集, 不能准确确定掌子面前方围岩的波速分布, 也不能准确推定反射地质界面的位置和力学性状, 造成很多漏报和误报, 亟待改进。作为改进对策, TST 隧道超前预报技术采用二维和三维观测系统和偏移成像处理技术, 利用不同偏移距的共散射点道集, 同时利用走时和振幅等运动学和动力学信息, 准确确定掌子面前方围岩速度分布、反射地质构造的准确位置和界面两侧围岩力学性状的差异, 具有坚实的物理基础, 克服了 TSP203 技术的缺陷, 大大地提高了超前预报的准确性和可靠性, 降低了预报的风险。

关键词: 隧道超前预报; TSP203 技术; 零偏移距道集; TST; 波速分析; 偏移成像

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

收稿日期: 2008—01—26

The Technical Bug of TSP203 and Application of TST Technique

Zhao Yonggui, Jiang Hui, Zhao Xiaopeng
(Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China)

Abstract: Current methods of tunnel geological prediction are developing at home and abroad. By TSP 203 method, the observation is made along a line, and only zero off-set seismic data are obtained, so it is hard to accurately determine the seismic velocity distribution of wall rock, to find the accurate position of geological interface, and to recognize the mechanical difference between two side rocks of the reflector. Therefore, from these defective techniques, this paper proposes TST method with 2D and/or 3D observation and data process of migration image and travel time inversion image, which solves the problem of analyzing velocity structure of wall rock in the front of tunnel face and realizes accurate image of geological framework of tunnel wall rock. This method is fit for geological prediction under complex geological condition.

Key words: tunnel geological prediction; TSP203; zero off-set gather; TST technology; seismic velocity analysis; seismic migration image

1 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,反射波孔径较小,这对提高地震反射资料的速度分析和反射面定位精度及岩体工程类别的划分的可靠性增加了难度。

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状的差异上,而含水性则主要表现在电导率、介电常数等电磁特性的差异上。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、结构特征等与力学性状有关的地质要素,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。

目前的隧道超前预报技术中仍以反射地震方法为主,因为地震方法具有测深度大,分辨率高,图像直观,操作方便等优点。隧道内的电磁方法在观测方式和解释方法上还有很多问题有待解决,正在研究之中,不久将会产生一些实用的方法。

反射地震隧道超前预报方法中先后出现过

“负视速度法”^[1]、“水平剖面法(HSP)”、TSP203^[2,5]、TGP206、TRT^[3]和 TST^[9]等多种方法。

各种反射地震预报方法从观测方式上可以分为两类,一类是一维观测方式,另一类是二维和三维观测方式。采用一维观测方式时将检波器和炮点布置在隧道一侧平行隧道轴线的直线上,观测中得到的地震记录是近乎零偏移的反射道集。从理论上讲,使用零偏移距资料无法准确确定掌子面前方围岩的波速分布,偏移中使用隧道内观测段的直达波速来代表前方围岩的波速,这就无法准确推定掌子面前方地质构造的位置,这是早期的比较落后的观测方式。采用这类观测方式的方法有“负视速度法”、TSP203 和 TGP206 等方法。相比之下,采用二维和三维观测方式要科学得多。它是将检波器和炮点布置成空间分布,既有纵向分布,又有横向扩展。获得的地震资料是具有不同偏移距的散射道集,可以对掌子面前方围岩的波速进行准确的分析。横向展布越宽,波速分析精度越高,地质构造位置越准确。采用该种观测方式的有 TST 和 TRT 技术。水平剖面法介于这两者之间。

地震预报方法从资料处理技术上分又可分为两种类型,一类是走时反演,另一类是偏移成像,这是两类不同的资料处理技术。走时反演技术的要点是首先读取反射震相的走时,然后根据给定波速确定反射面位置。这种方法仅能处理少数主要反射界面,仅使用地震波的运动学信息,不能分辨围岩强度等力学性状的分布和复杂的构造组合。“负视速度法”、“水平剖面法”都是属于这种处理技术。偏移成像方法是地震资料处理中的新技术。它不需要读取走时,利用地震波的运动学和动力学信息,即地震反射记录的波形和时程,通过速度分析和偏移成像,同时确定围岩的波速分布、反射面位置和反射面两侧围岩力学性状的差异。特别适合复杂构造背景下围岩工程类别、构造组合的预测研究。TSP203、TGP206、TRT 和 TST 技术都是建立在偏移成像技术之上的。偏移成像结果的可靠性取决于资料的可靠性,TSP203 和 TGP206 虽然在资料处理技术上采用了偏移成像技术,但是由于它使用零偏移距资料,在波速分析时无法确定最优波速,因而无法准确确定波速和反射面位置,围岩工程类别的划分也是虚假的。

这些方法代表了超前预报技术发展的不同阶段,早期的技术在观测方式和资料处理技术上比较落后,物理基础不够严谨。随着观测技术和计算技术的发展,特别是超前预报理论研究的深入,发现了早期方法中的一些理论问题,及时进行了改进,发展起目前的 TSP 技术,它代表了地震超前预报研究的最新成果。下边对于 TSP203 技术特点及缺陷进行深入的理论分析。

2 TSP203 隧道超前预报技术的特点

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专用技术。TSP202、TSP203 等超前预报系统从 90 年代中后期进入中国,先后进入铁路和公路系统,铁路系统引进数量最大,已成为 TSP 的最大用户。在铁路和高速公路隧道的一些招标文件中竟公然指定 TSP203 为唯一的超前预报投标设备,对超前预报技术的发展起了误导作用。在 TSP 技术引入的初期,多数用户只是使用,缺乏研究,对 TSP203 的技术缺陷未曾觉察,只是发现预报的结果与开挖的地质情况存在较大的出入,经常发生误报和漏报。预报的速度与围岩类别的分布对应不上,反射构造面的位置相差较大。

TSP203 的接收是由一个三分量检波器承担,埋入隧道侧壁岩体中,深 1~ 1.5m。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轴线的直线上。这种观测方式称作一维观测系统,与国内的‘负视速度法’基本相同。这样的观测方式只能获得零偏移距的反射地震资料,不能用来确定掌子面前方的围岩波速。TSP203 的资料处理采用的是地震偏移成像技术,这是石油勘探领域的资料处理新技术。TSP 的分析软件名称为 TSPWIN,软件设置 11 个处理步骤,自动完成处理过程。TSP203 设备虽然提供了可以在隧道两侧同时观测的检波器,但是处理软件只能处理单侧的一维观测资料,将两侧的地震记录资料分别处理,不能合成二维资料处理,只是增加了工作量,对预报效果改进不大,因而实际工作中很少两侧都接收。

TS203 技术将偏移成像技术引入到隧道超前预报领域,是对超前预报技术的提升。偏移图像能反映反射界面的位置、性质、先后顺序及构造组合关系,非常直观,便于构造分析。但是 TSP 在采用偏移成像处理技术的时候,忘记了偏移成像技术对地震数据的要求,它要求使用的地震数据具有不同的横向偏移距,具有共深度点(CDP)或共中心点(CMP)性质的道集资料,否则不能确定围岩波速。而 TSP 使用的是具有不同的纵向偏移距、横向偏移距为零的地震数据,这不符合偏移

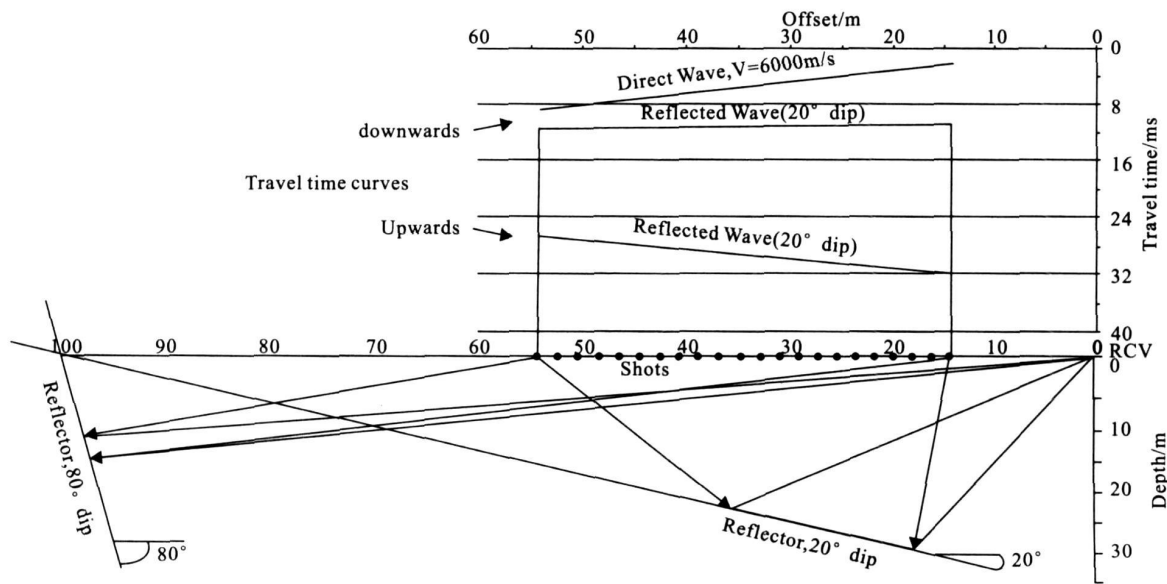


图 1 TSP 的观测方式与走时曲线示意图

Fig. 1 Observation mode of TSP and travel time

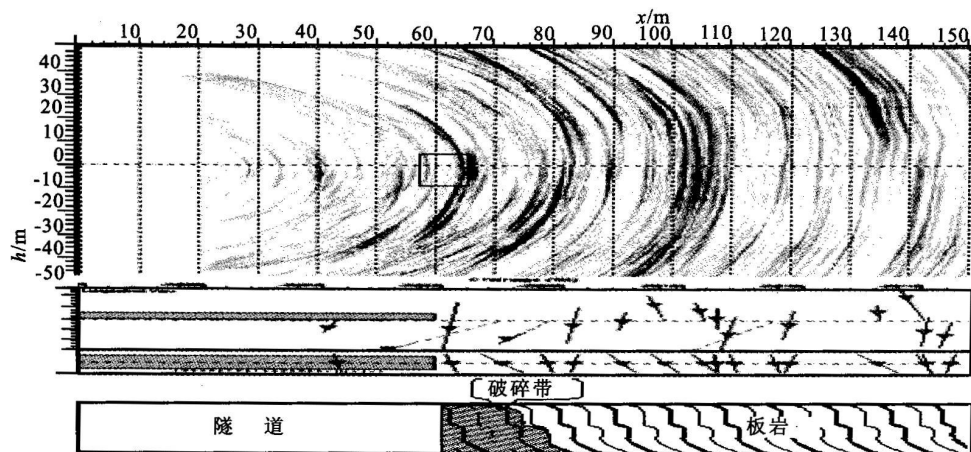


图 2 TSP 偏移图像与地质解释(里程/m)

Fig. 2 Image of TSP and geological interpretation

成像的技术要求。因而偏移成像的速度扫描分析中找不到最优速度, 偏移的位置也是不可靠的。这就误用了偏移成像技术。

图 1 是 TSP203 观测与地震波走时资料示意。图 2 是地震偏移成像结果, 图中浅色条纹代表一组正反射, 表示该位置存在一个由软变硬的地质界面, 深色条纹是一组负反射, 表示存在一个由硬变软的地质界面, 先深后浅条纹的组合表示存在一个软弱岩夹层或断裂带、破碎带; 反射越强说明岩体的力学性质差异越大, 多组反射界面集中的地段预示着可能存在较大的断裂构造, 这是偏移图像解释的共同特点。因为 TSP 技术中波速分析不真实, 导致偏移图像中反射界面的位置不准确, 但图中反射层的先后次序和组合关系是基本可靠的。

3 TSP203 的技术缺陷分析与改进对策

目前国内 TSP203 的用户很多, 笔者从 2002 年开始也使用 TSP203。随着 TSP203 的应用, 对 TSP203 技术的分析研究也逐渐深入, 发现 TSP203 在数据采集方式和资料处理方法上存在一些重要的理论问题和技术缺陷。

TSP203 的技术缺陷源于一维布置的直线观测方式和只能处理一维数据的软件。一维观测只能获得零偏移距反射道集, 从理论上讲用这样的地震资料无法确定掌子面前方围岩的波速。但是 TSP203 软件通过‘自动处理’掩盖了这一理论问

题, 给出了虚假的围岩的速度分布剖面。这种虚假的波速分布与开挖揭露出来的围岩地质剖面不符合。虚假的波速导致深度偏移中由时间向深度转换结果不可靠, 因而作为 TSP203 预报最重要结果的深度偏移剖面失去真实性, 反射面的位置与开挖结果不一致。波速的虚假也导致纵横波分离的虚假, 由纵横波求得的泊松比有很大的臆造成分。

实际上 TSP203 观测得到的数据延拓到掌子面上, 是一组只有纵向偏移、横向偏移距接近零的反射道集(图 3), 对于道集中所有地震记录, 掌子面与反射面之间的往返走时都是相同的, 反射面深度和围岩波速两个变量不能用一个走时数据来确定, 因而波速扫描没有最优值, 无法确定真实波速, TSP 的‘自动分析’得到的是虚假的波速。

在这种观测方式下, 由炮点出发经掌子面前方构造反射回接收点的地震波走时 t_r 的方程为:

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

式中 H_f 是反射点到接收点距离, L_s 是掌子面到接收点的距离, x 是炮点到接收点的距离, V_1 、 V_2 分别是掌子面后与掌子前围岩的平均波速。

反射地震波的走时可以掌子面为界分成两段, 一段是掌子面之后的走时 t_x , 另一段是掌子面之前的走时 t_s , 总的地震波走时 t_r 是这两段走时之和。

其中掌子面之后的走时 t_x 是地震波由炮点出

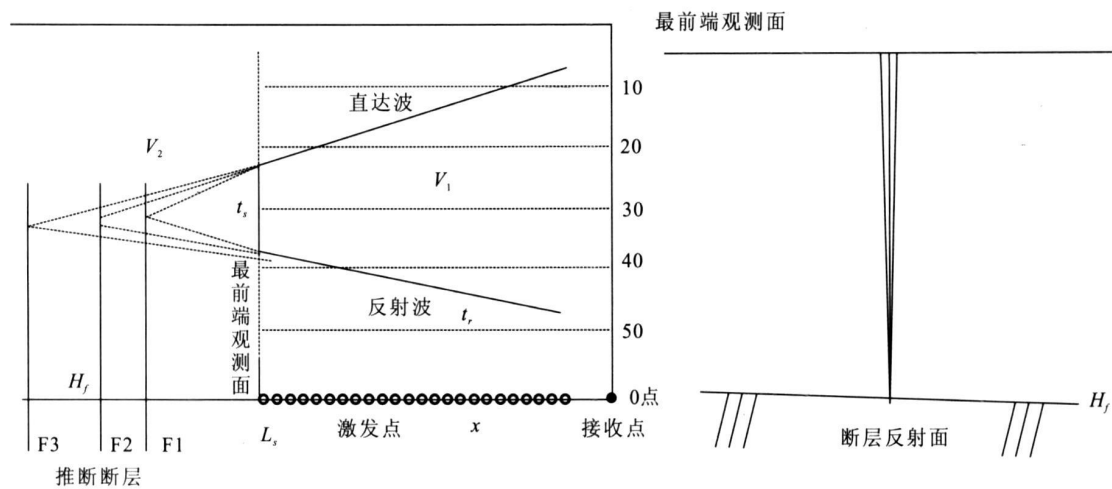


图 3 TSP203 观测方式与零偏移距道集(横座标/m,纵座标/ms)
Fig.3 Observation mode of TSP and its zero offset gather data

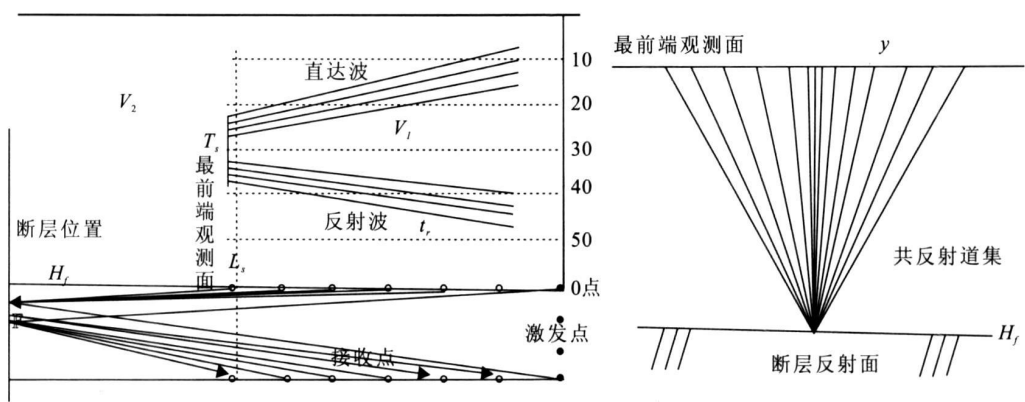


图 4 二维观测方式及共散射点道集(横座标/m,纵座标/ms)
Fig.4 2-D observation mode and CSP gather data

发到掌子面再返回接收点的走时, 可表示为:

$$t_x = \frac{2L_s - x}{V_1}$$

由于炮点位置不同, 对应的走时 t_x 也不同, 总走时曲线 t_r 和掌子面后的走时 t_s 的斜率是相同的, 说明总走时曲线中的视速度就是掌子面后方围岩的速度, 由此可确定观测点范围内的波速 V_1 。

掌子面之前的走时 t_s 是掌子面到反射面之间的往返走时, 可表示为:

$$t_s = \frac{2(H_f - L_s)}{V_2}$$

对于仅有纵向偏移, 没有横向偏移的各炮记录, 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, 一个走时数据无法确定反射面位置和围岩波速两个变

量。因而在波速分析时, 无法通过波速扫描最优确定真实波速。

若要改进 TSP 的这一技术缺陷, 就要在观测方式和资料处理软件技术上进行改革, 将一维观测方式改为二维或三维观测方式, 将仅能处理一维数据的软件改成二维和三维软件。

不失一般性, 在二维观测方式下(图 4), 反射波的总走时仍可表为掌子面前的走时 t_s 和掌子面后的走时 t_x 之和的形式:

$$t_r = t_s + t_x$$

此时, 掌子面后方的走时方程 t_x 由炮点到掌子面与掌子面到接收点的走时之和组成。此段走时表示为:

$$t_x = \frac{\sqrt{(L - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2}}{V_1}$$

+ \frac{\sqrt{(L-x_r)^2+(y_2-y_r)^2}}{V_1}

式中 $(L, y_1), (L, y_2)$ 分别为掌子面上地震波入射点和出射点的坐标, (x_s, y_s) 为炮点坐标, (x_r, y_r) 为接收点的坐标。 V_1 为观测段的平均波速。

掌子面前方的走时 t_s 方程此时可表示为:

t_s = \frac{2\sqrt{H_f^2+(y_1-y_2)^2}}{V_2}

式中包含掌子面上的横向偏移距 (y_1-y_2) , 对于不同的接收点和炮点横向偏移距不同, 走时亦不同。方程中的未知量 H_f 和波速 V_2 , 当地震射线数目大于变量数目时, 获得最优解。通过速度扫描和偏移成像获得围岩的波速分布和地质构造的可靠图像。由上述分析可知, 只要 TSP 的观测方式与处理软件作相应的改进, 不难获得可靠结果。

4 TST 隧道超前预报技术及应用

TST 技术(Tunnel Seismic Tomography) 是隧道地震 CT 成像技术的简称, 是对 TSP203 技术缺陷进行改进的基础上发展起来的, 可以作为 TSP203 的更新换代技术。TST 的观测方式采用二维或三维布置(图 5), 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, 尽量扩大横向展布。资料处理采用速度扫描、偏移成像、构造方向分析、反射面反演成像等多种成像方法, 较 TSP203 和 TRT 技术的成像功能有重要改进。TST 技术提高了围岩速度分析精度和地质构造的定位精度, 可靠地区分围岩力学性状的差异; 同时还开发了用于主要构造的快速分析和递进预报功能, 可以在掌子面向前方探测, 也可以沿隧道向侧面探测, 或沿地表向下探测。处理软件采用中文 Windows 界面, 图像直观, 使用方便, 特别适合于复杂地质构造地区的隧道超前预报。TST 的接收系统采用具有内置放大器的专用 IC 检波器, 大大地提高了信噪比, 加大了探测能力。代表了国内隧道超前预报研究的最新成果。

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, 下图是应用的实例。

TST 技术用于重庆绕城高速公路隧道的超前预报, 取得了预期效果。该隧道宽 18m, 使用 GEOPEN-TST-12 地震仪作记录器, 12 支拉

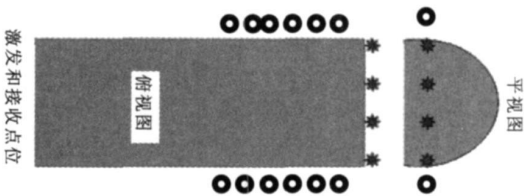


图 5 TST 超前预报系统观测方式平面示意图
圆圈代表接收点位置, 星号代表激发点位置

Fig. 5 Observation mode of TST technique

埋式 IC 加速度检波器接收, 隧道每侧围岩内布置 6 支, 间距 4m, 检波器埋深 1.5~ 2m。炮点布置在接近掌子面的两侧围岩中, 共 4 个炮点, 每侧 2 个, 炮点距 4m, 埋深 2m。炮点与接收点最小距离 10m, 横向展布 22m (图 6)。在速度分析精度 10% 的范围内, 预报长度为展布宽度的 10 倍, 可预报掌子面前方 220m 的地质情况。图 7 中展现了地质构造的偏移成像结果, 图 8 展现了掌子面前方围岩波速的分布, 可依此对围岩的工程类别进行划分。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, 先蓝后红线条的组合代表断裂破碎带。本次预报距离 200m, 结果表明掌子面附近 30m 范围内构造发育, 最后 20m 内岩体强度变软, 中间部位岩体坚硬, 构造不发育。偏移图像中的构造组合、岩性变化界面非常直观, 开挖与预报结果相当符合。

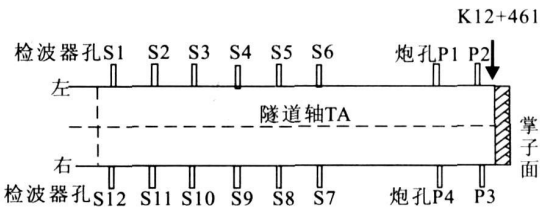


图 6 重庆绕城高速公路隧道 TST 超前预报观测位置
Fig. 6 Observation system in Chongqing tunnel prediction

TST 技术除了在掌子面超前探测之外, 还可以沿隧道向侧面或沿地表向下方探测。此时, 观测系统沿隧道侧壁或地表横向排开, 横向偏移距很大, 成像精度高, 探测效果更好, 可同时完成深度偏移和反射面成像。图 9 是在云南公路明珠隧道沿地表向下的探测结果, 剖面长度 450m, 探测深度 300m。图中偏移图像和主要反射面成像展现了地质界面与构造的位置、形态以及围岩的力学形状。图中反射面集中区推定为断裂带。

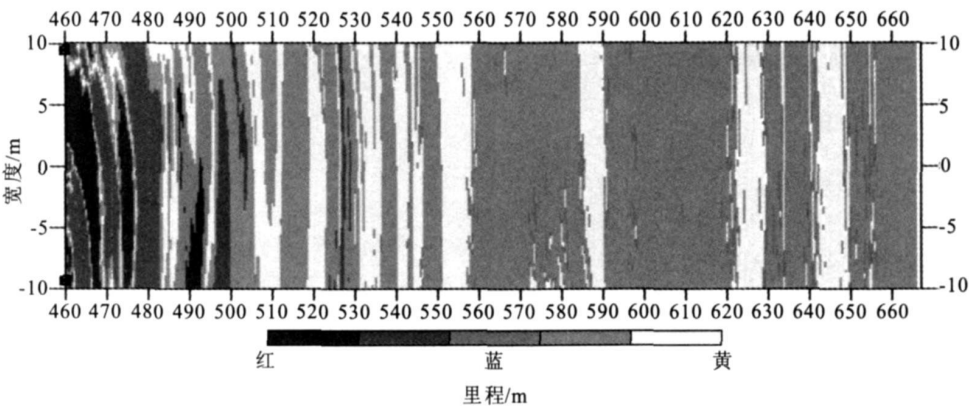


图 7 重庆绕城高速公路隧道围岩构造超前预报偏移图像
Fig.7 Image of TST for geological structure in Chongqing tunnel

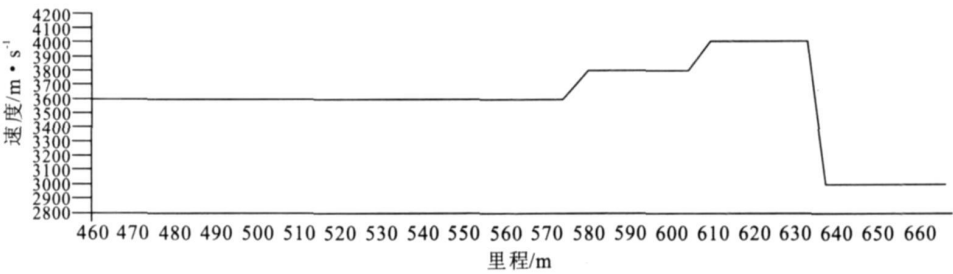


图 8 重庆绕城高速公路隧道围岩波速分布
Fig.8 Seismic velocity distribution of Chongqing tunnel rock

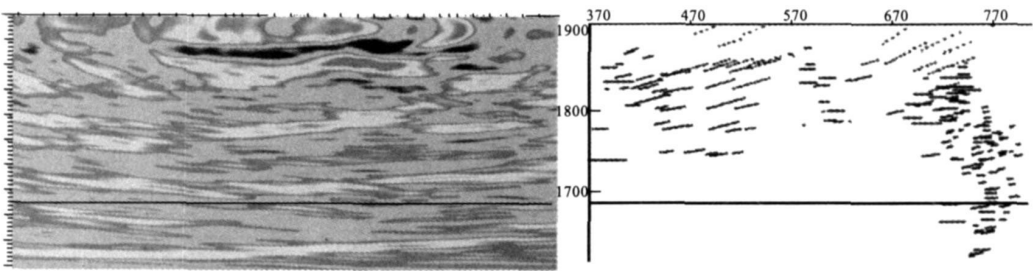


图 9 TST 沿地表向下探测的偏移图像和主要反射面图像(横坐标里程/m,纵坐标深度/m)
Fig.9 Images of TST by observation along surface

5 隧道综合超前预报技术

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。目前的国内进行的超前预报工作盲目性较大, 特别是 TSP 技术‘智能化’的误导, 使得预报工作照猫画虎, 工作很不深入, 预报的准确性较差, 常发生漏报和误报, 象湘渝铁路园梁山隧道那样造成了严重的事故和损失, 远不能满足工程的

需要, 亟待改进。

目前的隧道超前预报主要以地震方法为主, 要取得可靠的超前预报效果仅依靠地震方法是不够的, 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剖面能很好地反映地下水

的赋存状态,富水带位置,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。物探方法的研究对象是地质问题,只有通过与地质分析的紧密结合,掌握地质现象的规律,了解区域地质构造特点,构造的走向、产状等特征,物探结果的解释才能更加合理、可靠。这就是综合预报方法的核心内容。

5 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、提高超前预报水平的必由之路。

参考文献:

[1] 曾昭璜. 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 Otto, Edward Button, Helfried Bretterb-
ner, et al. The Application of TRT- True Reflection
Tomography at the Unterwald Tunnel [J]. *Geophys-
ics*, 2002, 67(2): 51~ 56.

[4] 赵永贵, 刘浩, 孙宇, 等. 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.

[9] 赵永贵, 蒋辉, 赵晓鹏. TST 隧道地震 CT 地质超前
预报技术及应用[J]. 应用地球物理(英文版), 2006,
02: 1~ 7.