

文章编号: 1006 - 2106 (2008) 01 - 0037 - 04

# 复杂铁路隧道施工地质超前预报中 TSP探测 技术应用研究

周黎明 刘天佑 刘江平 肖国强<sup>\*\*</sup>

(中国地质大学, 武汉 430074)

**摘要:**研究目的:铁路隧洞施工中,由于地质情况不明,经常出现塌方、涌水、冒顶等地质灾害,十分需要开展地质超前预报方法研究。TSP203系统作为地质预报的主要方法,对其基本原理和工程应用进行研究十分必要。

**研究结论:**建议当前隧道超前预报工作中应以 TSP203超前预报系统为主,配合其它物探方法以及地质详细素描、超前水平钻探等非物探方法进行相互补充,相互印证。

**关键词:**施工地质;超前预报;TSP203系统;地质灾害

**中图分类号:**U456 **文献标识码:**A

## Research on Application of TSP Detection Technology in Geological Forecast in Advance for Construction of Railway Tunnel

ZHOUL i - m ing, L IU T à n - y ou, L IU J i à n g - p í n g, XIAO Guo - q i à n g

(China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract: Research purposes:** The geological disasters of collapse, water bursting and roof falling often occur in construction of railway tunnel because of unclear geological condition, so it is very necessary to do the researches on the methods of geological forecast in advance and on the basic principle and engineering application of TSP203 System that is one of main means for geological forecast

**Research conclusions:** It is proposed that in the geological forecast in advance for tunnel, TSP203 System should be taken as principal means along with other geophysical prospecting methods, geological sketch in details and level drilling in advance for supplementing and verifying each other

**Key words:** engineering geology; forecast in advance; TSP203 System; geological disaster

隧道施工开挖工作掌子面前方地质情况预报是国内外工程地质和隧道工程界关注的问题。通过超前预报可以避免塌方、冒顶、涌水等意外事故发生。预测隧道掘进方向的地质情况包括:断层构造及断层破碎带,煤层、瓦斯、天然气、硫化氢赋存条件,采空区状况,岩

溶、空洞、裂隙及其规模和充填情况,地下水赋存状态及可能突水、涌水的位置以及水量的大小和软弱围岩及不同类别围岩的界面等。

近年来,随着我国公路、铁路、水利、矿山及其他工程建设的飞速发展,作为隐蔽工程的公路隧道、铁路隧

\* 收稿日期: 2007 - 09 - 29

基金项目:国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金重点项目(50639090);水利部岩土力学与工程重点实验室 2007年度开放研究基金(G07 - 12)

\*\* 作者简介:周黎明,1977年出生,男,工程师。

道、矿山隧道、输水隧道等大量出现,在它们的施工过程中,由于前方地质情况不明,经常会因遇到断层、破碎带、暗河、高地应力等不良地质体而导致塌方、泥石流、涌水、突水、岩爆冒顶等地质灾害发生,给施工单位、国家和人民带来严重的经济损失。目前在铁路隧道施工中,国内外多采用地质分析与地球物理方法相结合来实现超前预报。TSP203系统是专门为隧道超前预报所设计,它能长距离预报隧道施工前方的地质变化,如断层破碎带、软弱岩层及其他不良地质地段,对掌子面及前方围岩进行分级,为隧道施工方提供可靠的地质资料,对施工安全起到了积极的作用<sup>[1-2]</sup>。

本文介绍了 TSP203系统基本原理和工程应用实例,其中以 TSP203系统在宜万铁路某复杂隧道施工地质超前预报工作中的资料采集、处理、解释过程为重点,分析了该方法的优点和局限性,将 TSP203在实际应用中的预报结果与水平超前钻孔资料进行了对比分析,验证了结果的有效性。

## 1 TSP203系统基本原理

TSP203系统属于多波多分量高分辨率地震反射法,其基本原理是利用地震波在不均匀地质体中产生的反射波特性和来预报隧道掘进面前方及周围临近区域地质状况的<sup>[5]</sup>。TSP203系统通过在掘进面后方一定距离内的钻孔中施以微型爆破来发射信号的,爆破引发的地震波在岩体中以球面的形式向四周传播,其中一部分向隧道前方传播,经隧道前方的界面反射回来,反射信号经接收传感器转换成电信号并放大。从起爆到发射信号被接收的这段时间是与反射面的距离成比例的。通过反射时间与地震波传播速度的换算就可以将反射面的位置、与隧道轴线的夹角以及与隧道掘进面的距离确定下来,同时还可以将隧道中存在的岩性变化带的位置探测出来(图 1)<sup>[3-4]</sup>。

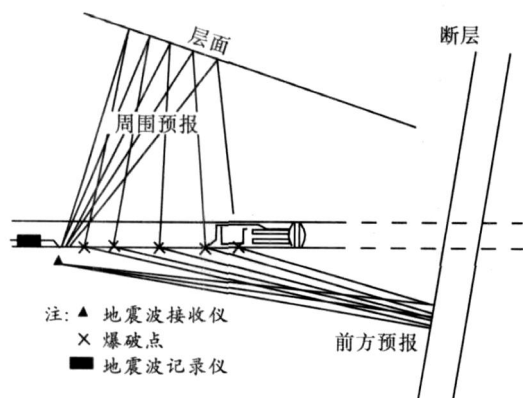


图 1 TSP系统原理图

## 2 TSP203系统数据处理和解释

### 2.1 数据处理

采集的 TSP 数据,通过 TSPwin 软件进行处理。TSPwin 软件处理流程包括 11 个主要步骤,即:数据设置 带通滤波 初至拾取 拾取处理 炮能量均衡 Q 估计 反射波提取 P-S 波分离 速度分析 深度偏移 提取反射层。通过速度分析,可以将反射信号的传播时间转换为距离(深度)。处理结果,可以用与隧道轴的交角及隧道工作面的距离来确定反射层所对应的地质界面的空间位置,并根据反射波的组合特征及其动力学特征解释地质体的性质。

通过 TSPwin 软件处理,可以获得 P 波、SH 波、SV 波的时间剖面、深度偏移剖面、提取的反射层、岩石物理力学参数、各反射层能量大小等成果,以及反射层在探测范围内的 2D 或 3D 空间分布<sup>[5-6]</sup>。

### 2.2 TSP203 的解译准则

TSP203 系统处理成果的解译遵循下述准则:

- (1) 反射振幅越高,反射系数和波阻抗的差别越大,当出现较高的反射振幅、较大的反射系数和较小的弹性阻抗,表示反射界面的岩石密度和波速较高;
- (2) 波形中间出现正反射振幅(红色)表明正的反射系数,也就是刚性岩层;负反射振幅(蓝色)表明负的反射系数,指向软弱岩层(图 2);

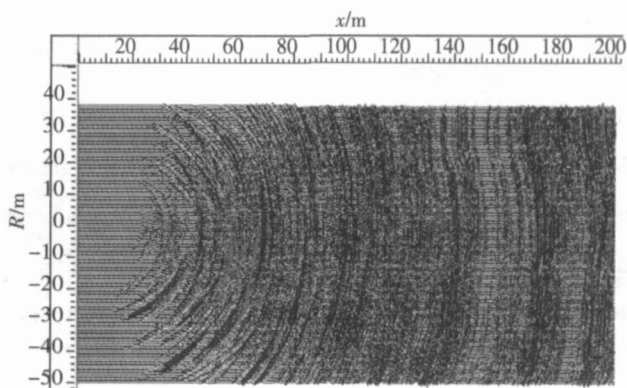


图 2 RI 深度偏移剖面

- (3) 因为 S 波不能通过水这种介质传播,而纵波在水中传播过程中能量损耗减少,所以若 S 波反射较 P 波强,表明岩层富含水;

- (4)  $V_p/V_s$  增加或泊松比突然增大,常常由于流体的存在而引起;

- (5) 若  $V_p$  下降,则表明裂隙或孔隙度增加。

### 3 工程实例

#### 3.1 工程概况

TSP203 系统工程应用以宜万铁路某隧道的施工地质超前预报工作为例。该隧道线路里程 DK 403 + 048 ~ DK 406 + 769, 全长 3 721 m; 进口标高 549.99 m, 出口标高 502.73 m, 呈单面坡排水, 洞身最大埋深 530 m, 无辅助坑道。该隧道按地质结构、水动力类型划分为为缓倾箱型背斜 背斜山地 (台原) 补给、断层槽谷汇聚、越轴径流、翼部管道流排泄型。

主要工程地质问题包括: 在隧道出口附近发育有 2 条支管道穿越隧道, 发育深度在隧道洞身附近。在隧道开挖时可能引起岩溶地下水回流, 形成特大型突水突泥。F1 断裂带沿岩层走向发育, 在隧道地表的出露位置为 DK 404 + 400 ~ + 440, 走向约 50°; 倾向约 140°; 倾角约 65°~75°; 厚度约 40 m, 对应隧道洞身里程为 DK 25 + 245 ~ + 290。地下水丰富, 涌水量大, 补给来源充足, 富水性好; 隧道区可能存在浅层裂缝性天然气的影响, 应进行天然气监测; 侏罗系珍珠冲组和和三叠系上统须家河组为含煤系地层, 应进行瓦斯监测; 煤系地层须进行地下水侵蚀性监测; 嘉陵江二段、四段地层局部可能含膏盐, 应进行地下水侵蚀性监测。

#### 3.2 仪器与测线布置

根据该隧道工程施工进展情况, 结合前期勘察设计资料和隧道围岩地质条件, 我们采用 TSP203 隧道超前预报系统, 它的组成包括:

3.2.1 记录单元: 12 道, 24 位 A/D 转换, 采样间隔 62.5 μs 和 125 μs, 最大记录长度为 1 808.5 ms, 动态范围 120 dB。

3.2.2 接收器 (检波器): 三分量加速度地震检波器, 灵敏度为 1 000 mV/g ±5%, 频率范围为 0.5 ~ 5 000 Hz, 共振频率 9 000 Hz, 横向灵敏度 >1%, 操作温度 0 ~ 65 °。

3.2.3 TSPwin 软件: 数据采集和处理集于一体。

测线布置包括: 在隧道的 DK 406 + 379 位置安装接收器, 掌子面位置为 DK 406 + 326, 设计为 24 炮, 2 个接收器同时接收。通过试验, 确定采用药量为 75 克乳化炸药。数据采集时采用 X - Y - Z 三分量接收, 采样间隔 62.5 μs, 记录长度 451.125 ms (7218 采样数)。

因钻炮孔过程中塌孔严重, 成孔 22 个, 实际激发 22 炮, 所记录的 22 炮全部合格, 可用于数据解释。

#### 3.3 探测结果

探测结果经数据处理后的示意图如图 2、图 3 所

示。根据参数计算可以准确推断掌子面 DK 406 ~ 326 向小里程方向 147 m 范围内, 围岩纵波平均速度为 2 908 m/s, 密度为 2.39 ~ 2.46 g/cm<sup>3</sup>, 纵横波波速比为 1.36 ~ 1.54。

并从深度偏移剖面图 (图 2) 和反射层提取结果图 (图 3) 中可以看出, 围岩稳定性总体较好, 但在局部出现的软岩层及节理裂隙较发育的地段, 围岩稳定性会有所变差。在本次探测段 DK 406 + 326 ~ DK 406 + 179 范围内, 围岩为三叠系下统嘉陵江组的地层。具体探测结果为: 在 DK 406 + 326 ~ DK 406 + 288 段内, 围岩强度变硬, 结构较完整, 局部节理裂隙发育, 含少量地下水; 在 DK 406 + 288 ~ DK 406 + 252 段内, 围岩强度变弱, 节理裂隙发育, 此段灰岩泥质含量增多, 含软弱夹层, 在 DK 406 + 252 附近地下水发育; 在 DK 406 + 252 ~ DK 406 + 179 段内, 围岩强度变硬, 结构较完整, DK 406 + 197 附近存在含水构造。

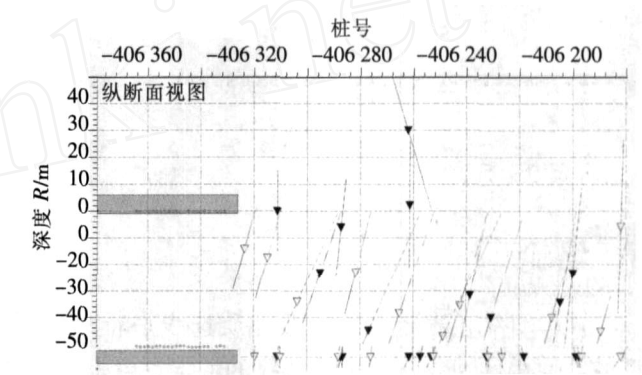


图 3 2D 反射层提取结果显示

#### 3.4 探测结果验证

在本次 TSP 探测的掌子面上, 同时进行了水平超前钻孔工作。钻孔结果表明, 在 DK 406 + 326 ~ 288 段岩芯较完整; 在 DK 406 + 288 ~ 252 段岩芯为夹泥灰岩, 有少量水溢出; DK 406 + 252 ~ DK 406 + 179 段内, 岩芯为较完整灰岩, DK 406 + 197 附近岩芯含水。具体情况见表 1 超前水平钻孔结果表。

表 1 超前水平钻孔结果一览表

钻杆编号	里程	探测结果
1 ~ 37	DK 406 + 326 ~ 288	岩芯较完整, 为灰岩夹少量泥
37 ~ 73	DK 406 + 288 ~ 252	灰岩夹少量泥, 有水溢出
74 ~ 143	DK 406 + 252 ~ 179	岩芯较完整, 灰岩夹少量泥

超前水平钻孔结果与 TSP 探测结果相吻合, 验证了本次 TSP 超前预报结果的准确性。

## 4 结论

TSP203系统是目前施工地质超前预报距离最长,提供资料需要时间最短的方法,适用范围广,包括极软岩至极硬岩的任何地质情况,是目前国内最先进的地质预报方法。但由于无法准确获取隧道掌子面前方岩石的真实波速,在解释时只能事先假定一个平均波速,所以 TSP法主要是预报长距离范围内的几何构造轮廓。

通过研究 TSP203系统的基本原理和数据处理与解释方法,利用超前水平钻孔法验证和分析其在工程实例应用中的预报效果,建议当前隧道超前预报中应以 TSP203超前预报系统为主,配合其他物探方法(如地质雷达法、陆地声纳法、水平声波剖面法、地震负视速度法等),以及地质详细素描、超前水平钻探等非物

探方法进行相互补充,相互印证。

## 参考文献:

- [1] 王兴泰. 工程与环境物探 [M]. 北京:地质出版社, 1993.
- [2] 陈建峰. 隧道施工地质超前预报技术比较 [J]. 地下空间, 2003, 23(1): 5 - 16.
- [3] 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.
- [4] 曾昭璜. 隧道地震反射法超前预报 [J]. 地球物理学报, 1994, 37(2): 268 - 271.
- [5] Amberg Measuring Technique Ltd. Operation Manual B. 61 [M]. June. 2001.
- [6] Amberg Measuring Technique Ltd. Software Manual B. 62 [M]. June. 2001.

(编辑 慕成娟)

(上接第 25 页)

## 6 结论

从拉日线色麦至大竹卡段地质选线来看,具有典型的高原山区河谷铁路地质选线的特点。由于独特的自然地理环境和气候特征,使线路方案具有特殊的考虑因素,因此,我们把此次地质选线研究称为高原山区河谷铁路地质选线研究。随着我国铁路建设的快速发展,这条钢铁巨龙将越来越多地向广大西部地区延伸。拉日线色麦至大竹卡段地质选线研究的方法,将对以后此类地区的地质选线有一定的借鉴作用。

## 参考文献:

- [1] 铁道第一勘察设计院. 拉萨至日喀则线色麦至大竹卡峡谷地段断裂构造调查专题研究报告 [R]. 兰州:铁道第一勘察设计院, 2006.
- [2] GB 50090—2006,铁路线路设计规范 [S].
- [3] 编委会. 新编铁路工程设计规范应用手册 [K]. 北京:中国知识出版社, 2006.
- [4] TB 10012—2001,铁路工程地质勘察规范 [S].
- [5] 铁道第一勘察设计院, 铁路工程地质手册 [K]. 北京:中国铁道出版社, 1999.

(编辑 慕成娟)