

文章编号: 1672-7940(2009)02-0196-07

TST技术在石棉隧道超前地质预报中的应用

谯勉江¹, 莫裕科¹, 刘洪炼¹, 蒋辉²

(1. 四川省地矿局 华地建设工程有限责任公司物探所, 成都 610081;
2. 北京同度工程物探技术有限公司, 北京 100029)

摘要: 石棉隧道位于雅安-西昌高速公路中段, 断裂发育, 地质构造复杂, 岩体破碎。施工中为减少和避免地质灾害发生采用了TST超前预报技术。应用结果表明TST技术采用空间观测系统有效地提高了速度分析精度和构造定位精度, 应用二维滤波技术有效地消除了面波和侧向回波, 成功地解决了断层、破碎带、含水带的超前预报问题。

关键词: 石棉隧道; 超前预报; TST技术; 速度分析; 二维滤波

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

收稿日期: 2008-12-16

The Application of TST to Shimian Tunnel Advanced Prediction

Qiao Mianjiang¹, Mo Yuke¹, Liu Honglian¹, Jiang hui²

(1. Sichuan Huadi Building Engineering Co. Ltd, Chengdu 610081, China;

2. Beijing Tongdu Engineering Geophysics Technology Limited Company, Beijing 100029, China)

Abstract: Shimian Tunnel is located in the middle of Yaan-Xichang highway, where its faults are well developed, geological structure is complex, and rock is very fragmented. In order to avoid or decrease the geological hazard in construction, the advanced prediction technology of TST is applied. The result shows that TST can successfully predict the faults, fractured zone and water-bearing zone based on the spatial observation and $F-K$ filtering technology. The spatial observation of TST can effectively improve the precision of the velocity analysis and structure location. The $F-K$ filtering of TST can effectively filter the surface wave and sidewise echo wave.

Key words: Shimian tunnel; advanced prediction; TST; velocity analysis; 2-D filtering

1 引言

石棉隧道位于雅安-西昌高速公路石棉县境内, 隧道左线长 1458m, 右线长 1343m, 隧道单幅

洞宽 12.5m, 最大埋深 251m。区内主要出露三叠系砂岩、泥岩及震旦系安山岩、英安岩, 局部砂岩夹煤线。受安宁河断裂、黑水河断裂、汉源-甘洛断裂的影响, 隧道区域内次级断裂发育, 岩体破碎, 节理、裂隙、断裂的走向以北北西向和南北向

作者简介: 谯勉江(1972-), 男, 四川达县人, 工程师, 四川省地矿局华地建设工程有限责任公司物探所, 主要从事地球物理探测及岩土工程勘察、设计、施工等工作。E-mail: hdzgbqmj101@126.com

莫裕科(1966-), 男, 四川营山人, 高级工程师, 四川省地矿局华地建设工程有限责任公司, 主要从事应用地球物理方法研究及水文地质、工程地质勘察、设计等工作。E-mail: hdzgb@126.com

为主,区域地质背景如图 1 所示。由于石棉隧道地质条件复杂,岩体破碎,地下水较丰富,施工中可能引发工程灾害,因而开展地质超前预报,以便采取有效的工程治理预防措施。

石棉隧道右幅入口里程 K111+ 580,本次超前预报从掌子面 K111+ 653.35 向前方预报 100 ~ 200m。隧道设计地质剖面如图 2,设计资料推

定 K111+ 686~ 720 段内为断层带,宽 34m。岩层主要为动力变质断层角砾岩,母岩成份为砂岩、粉砂质泥岩,断面倾角较大,推测为正断层。

超前预报的主要目的是探明隧道掌子面前方断层影响带及软弱岩层的分布范围,推断可能的含水带及突泥涌水的部位,分析其对施工的影响程度,并提出预防措施建议。



图 1 雅安-西昌高速公路地质构造略图

Fig. 1 Geological structure of Yaan - Xichang Highway

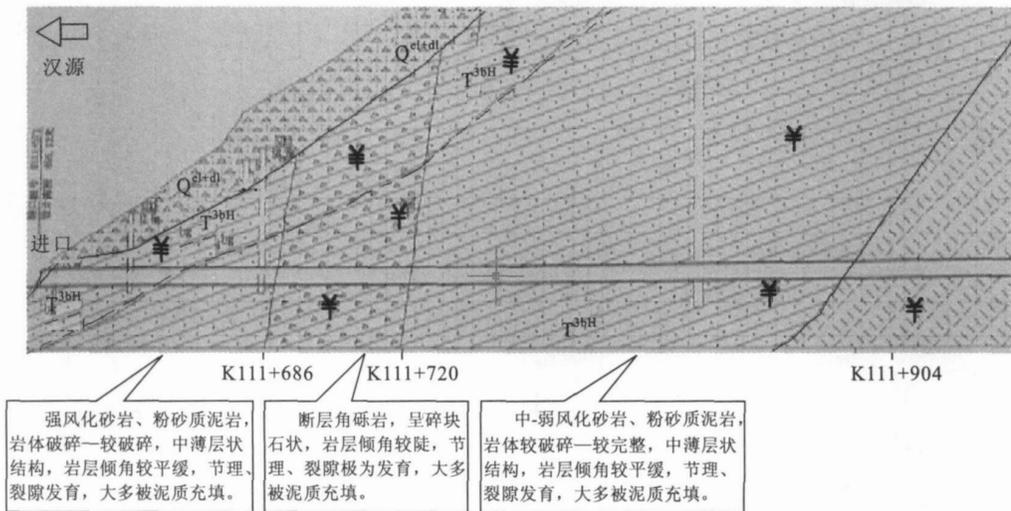


图 2 石棉隧道入口段地质剖面示意图

Fig. 2 Geologic section of Shimian tunnel entrance

2 超前预报方法的选择和 TST 超前预报方法的技术特点

隧道地质超前预报可以预测隧道施工中的不良地质问题,对预防地质灾害、保证工程安全具有重要意义,因而在隧道施工和地下采矿工程中变得十分重要^[1]。目前应用的超前预报技术有负视速度法^[2,3]、水平剖面 HSP (Horizontal Section Profile)^[4]、TSP203 (TSP: Tunnel Seismic Prediction)^[5-7]、TRT (True Reflection Tomography)^[8] 和 TST (Tunnel Seismic Tomography)^[9] 等,这些技术都属反射波地震预报技术。在地震超前预报技术发展的早期,主要的注意力集中在如何获取隧道前方的地震波信息,对于预报方法的理论基础和科学技术方法的严谨性等问题重视不够。为确保预报的准确性、可靠性,减少误报和漏报,因此,提高超前预报方法的科学性和可靠性已迫在眉睫。

目前应用的地震超前预报技术在观测方式上分为两类:一类是沿隧道一侧壁直线布置,另一类是沿隧道两侧空间布置。负视速度法、TSP203 等属于前者,这类观测系统仅能获得横向零偏移距的地震数据,不能确定前方围岩波速。水平剖面法、TRT、TST 等属于后者,该观测系统比直线布置的观测系统优越,能获得不同横向偏移距的资料,能可靠地确定前方围岩的速度分布,提高地质体的定位精度,保证偏移图像位置的真实性和可靠性。

依据资料处理技术的不同,超前预报技术又可分两类:一类是走时分析,另一类是偏移成像。早期开发的超前预报技术如负视速度法、水平剖面法的资料处理都是属于走时分析,以反射波走

时曲线分析为主,仅使用反射地震波的运动学信息,难于处理复杂的多震相资料,技术比较落后。近期开发的 TSP203、TRT、TST 等都是应用偏移成像技术,充分地运用了反射地震波的走时、幅值、极性等运动学和动力学信息,图像直观,便于构造组合分析,技术更为先进。应该特别注意,应用偏移成像技术的前提是必须有掌子面前方围岩波速的可靠分析,以保证地震资料由时间域到空间域转换的可靠性。而 TSP203 技术由于观测方式和软件功能的限制,缺乏对围岩速度的分析功能,不能保证偏移图像空间位置的真实可靠。

应用地震方法进行隧道地质超前预报,有一个关键问题必须首先解决,就是如何在复杂的三维波场中有效地识别不同方向的回波,剔除侧向回波和面波,保留前方有用的回波,以保证速度分析和掌子面前方偏移成像结果的真实可靠。要解决这一问题必须在观测方式和资料处理技术上采取特殊的对策。目前应用的负视速度法、水平剖面法、TSP203 和 TRT 等技术都还没有关注和解决不同方向回波的识别和滤波问题,只有 TST 技术率先解决了这一问题。TST 技术率先将二维方向滤波技术引入到隧道超前预报领域,并按二维滤波技术的要求设计观测系统,有效地解决了三维波场的识别、分离和滤波问题。

综上所述,本项隧道地质超前预报物探工作采用最先进的 TST 技术。

3 TST 的观测方式与石棉隧道的观测系统

TST 隧道超前预报技术的观测方式是根据波速分析和二维视速度滤波的要求设计的,它是

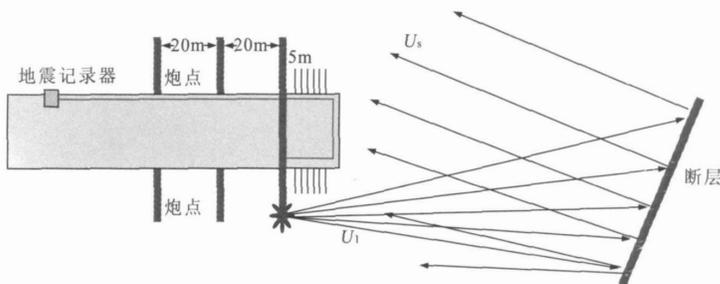


图 3 TST 掌子面附近观测布置

Fig. 3 The TST observation arrangement near the tunnel face

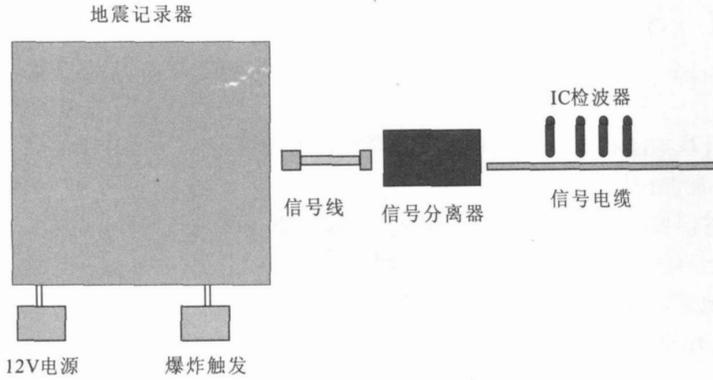


图 4 TST 系统硬件组成与连接

Fig. 4 TST's hardware structure and connection

一个长 40~ 60m, 宽 10~ 20m 的空间布置的观测系统。根据围岩波速分析的要求, 观测布置应尽量扩大横向展布, 检波器和炮点沿隧道两侧壁布置, 两侧壁检波器间的横向距离应尽量大, 至少大于预报长度的十分之一。实际超前预报中预报长度多为 100~ 200m, 据此两侧检波器间的横向距离应大于 10~ 20m。根据二维视速度滤波的要求, 为保证有效地识别不同方向的回波, 滤除侧面回波和面波, 观测系统沿隧道侧壁布置的纵向排列的长度要大于 2~ 3 个波长, 检波器的间距应小于 1/4 波长。实际的超前预报中使用的地震主频在 100~ 200Hz 范围, 波速在 2.0~ 5.0km/s 之间, 地震波长为 20~ 40m。据此检波器间距应设计为 4~ 6m, 沿隧道侧壁布置的排列长度设计为 40~ 60m, 典型的观测布置示意图如图 3, 这些参数在现场观测中是容易实现的。实际观测中可以使用 12 道或 24 道地震仪, 在隧道两侧对称布置, 检波器埋入深度 1.5~ 2.0m, 4~ 6 个爆炸震源,

药量 0.5~ 1.0kg。

本次超前预报使用的 TST 硬件系统主要由地震记录器、信号分离器、IC 检波器、信号电缆组成。地震记录器采用骄鹏生产的 TST24 道地震仪, 信号分离器承担检波器直流供电和交直流信号分离的作用, IC 检波器是具有内置放大器的压电晶体检波器, 传输距离可达 250m, 根据需要可配置 12、24 支。两段电缆线将检波器、信号分离器和地震记录器连接在一起。爆炸作为地震波信号震源。各部件装置连接如图 4。

根据 TST 技术的要求, 石棉隧道超前预报的现场采集布置如图 5。观测系统沿隧道两侧壁布置, 每侧壁 6 只检波器, 间距 5.0m, 埋深 1.8~ 2.0m, 位置见 S1~ S12; 爆炸震源 4 个, 分布在两个侧壁内, 每侧 2 个, 间距 30.0 m, 埋深 1.8~ 2.0m, 位置见 P1~ P4; 炸药量 500g, 单发毫秒雷管, 采用启爆器控制爆炸, 炸药爆炸触发采集器。检波器与炸药埋设采用 $\varnothing 50$ 风钻成孔。

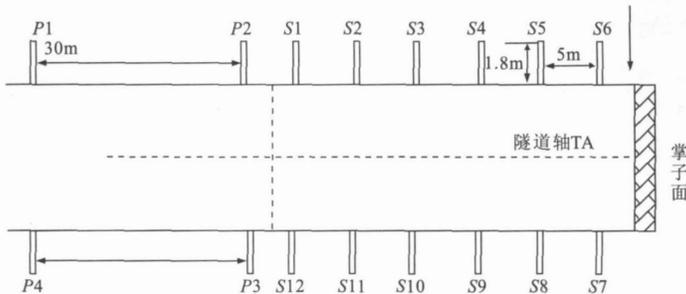


图 5 石棉隧道 TST 观测系统现场布置

Fig. 5 TST arrangement in Shimian tunnel

4 石棉隧道 TST 超前预报结果及地质解释

TST 超前预报技术能有效地进行三维波场识别和消除侧向回波和面波,能准确地确定围岩波速分布,保证偏移图像的真实可靠,这是该技术最突出的特点。TST 软件功能主要模块包括地震观测系统编辑、地震资料预处理、二维视速度滤波、围岩波速分析、地质结构的偏移成像等功能。其中最关键的技术是围岩波速分析、波场的三维识别与方向滤波和构造偏移成像三部分。TST 的预报结果包含构造偏移图像和围岩波速分布图像两部分内容,便于构造分析和围岩类别划分等应用。资料处理流程包括以下步骤:地震数据导入、带通滤波、干扰信号消除、坏道剔出、观测坐标编辑、二维方向滤波、围岩波速扫描、地质构造深度偏移成像等。最后的预报结果包括围岩波速分布和深度偏移图像两部分,相互印证,便于综合地质解释。图 6 是二维滤波前后的对比图,图 7 是 TST 构造深度偏移成像,图 8 是围岩速度沿里程的分布曲线,预报距离 150m,里程 K111+ 654~ + 804。

TST 的波速图像与偏移图像的地质解释遵从如下原理。波速的分布可用于掌子面前方岩体的力学性状的推断,岩体波速高表示岩体结构完整致密,弹性模量高;波速低代表岩体破碎,裂隙含水;构造偏移图像表示地质结构的组合图像和地层性质的变化。图中桩号里程 674 处(红色)线条代表正的波速异常,表示波速由低变高,岩体由软变硬的界面,图中桩号里程 664 处(蓝色)线条代表负的波速异常,表示波速由高变低、岩体由硬变软的界面;先蓝后红线条的组合代表存在一个断裂带。从偏移图像中可以清楚地看到断裂构造、岩性界面的组合关系和地质结构图像。

根据石棉隧道超前预报偏移图像和波速分布的基本特征,可以将预报区内的地质特征分为三段。

第一段:断裂影响带,里程 K111+ 654~ K111+ 714,长约 60m,为断裂影响带,岩体破碎,岩体纵波波速(V_P)在 1800~ 2500m/s,其中断裂的位置在 K111+ 664~ K111+ 674 位置,断裂宽度 10m;隧道设计资料中断裂位置是 K111+ 686 ~ + 720,宽 34m。预报的断裂宽度比设计小 24m,但影响带宽度比设计资料宽 26m。断裂及影响带的位置比设计资料提前了约 10m。

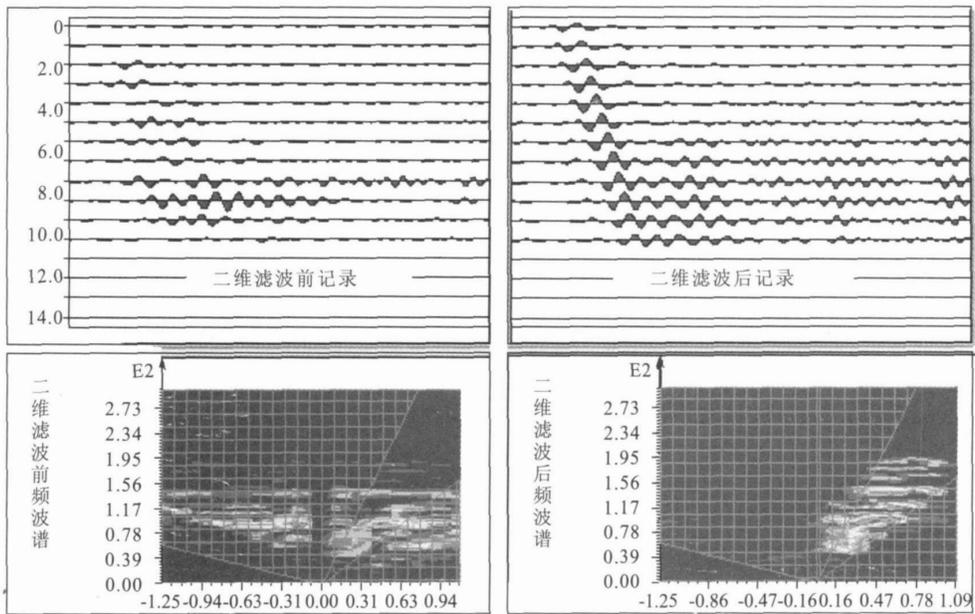


图 6 二维 FK 滤波在石棉隧道中的应用

Fig. 6 The application of FK filtering in Shimian tunnel

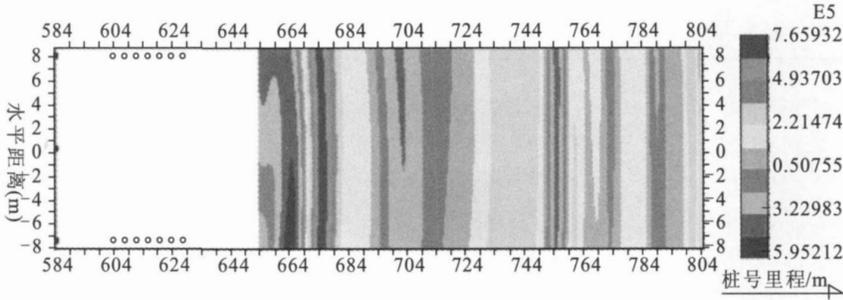


图 7 石棉隧道 K111+654~+804 段地质构造偏移成像

Fig. 7 Seismic migration imaging of Shimian tunnel K111+654~+804

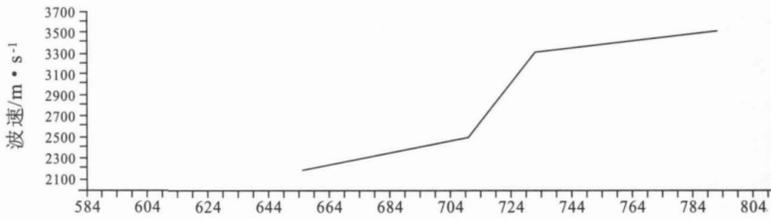


图 8 石棉隧道 K111+654~+804 段围岩速度分布

Fig. 8 Velocity distribution of Shimian tunnel K111+654~+804

第二段: 岩体完整性变化带, 里程 K111+ 714 ~ K111+ 740, 长约 26m, 岩体完整性逐渐变好, 岩体波速逐渐增加, 从 2400 上升到 3400m/s。

第三段: 里程 K111+ 740~ K111+ 814, 长约 40m, 岩体完整性较好, 岩体纵波波速在 3400~ 3600m/s, 岩体力学性质变化不大, 较均匀。

综上所述, 隧道在 K111+ 654~ K111+ 714 为断裂影响段, 其中 K111+ 664~ K111+ 674 段的 10m 宽的部位为断裂位置。区内地下水较丰

富, 隧道标高在地下水位之下, 断裂影响带岩体破碎、裂隙发育, 为含水构造, 隧道开挖中可能发生坍塌和突泥涌水, 应引起特别注意, 采取预防措施。预报区内无岩溶发育, 局部地段夹煤线, 所以不排除有极低瓦斯气体的存在。

根据岩体波速的分布可对隧道围岩的工程类别做出更详细的推断, 结合区内工程地质、水文地质特征, 对含水性、围岩物理力学参数、处治方案提出建议, 供施工中参考使用(表 1 和表 2)。

表 1 围岩物理力学性状及治理方案措施

Table 1 Surrounding rock's physical mechanical properties and treatment scheme

桩号里程	K 111+ 654~ K111+ 714	K111+ 714~ K111+ 740	K 111+ 740~ K111+ 804
长度/ m	60	26	64
围岩级别	V	IV	IV(III)
含水性	较弱~ 较强	较弱	较弱
波速 $V_p/m \cdot s^{-1}$	1800~ 2500	2500~ 3500	3000~ 3500
治理方案	系统锚杆、小管棚或超前中导管	钢架支撑、系统锚杆加钢筋网、喷混凝土并浇筑混凝土衬砌	

注: IV(III) 表示局部围岩段可达 III 级左右。

表2 V、IV、III级围岩物理力学参数建议值

Table 2 The V, IV, III surrounding rock's physical mechanical properties parameter

围岩级别	内摩擦角	粘聚力	变形模量	泊松比	岩体纵波波速/ $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	岩体完整性指标
V	22~ 26	0.15~ 0.2	1.1~ 1.3	0.34~ 0.36	1.6~ 2.5	0.20~ 0.30
IV	28~ 35	0.30~ 0.45	1.8~ 3.5	0.28~ 0.33	2.2~ 3.5	0.25~ 0.35
III	40~ 48	0.6~ 1.1	6~ 12	0.24~ 0.29	3.0~ 4.5	0.35~ 0.45

5 结论与展望

本次隧道超前预报采用 TST 技术,基本查明了预报范围内的地质情况,探明了隧道掌子面前方断层、软弱岩层的分布范围和规模以及节理裂隙发育情况,推断出了地层含水状态,预报的结果与开挖的结果非常一致,为施工方提前采取支护措施提供了准确的地质依据,避免了不必要的工程事故的发生。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 赵永贵. 隧道围岩含水性的超前预报技术[J]. 地球与环境, 2005, 33(3): 29~ 35.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李忠. TSP-202 探测系统在新堡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.
- [8] Richard Otto, Edward Button, Helfried Bretterbner, et al. The Application of TRT- True Reflection Tomography- at the Unterwald Tunnel[J]. *Geophysics*, 2002, 67(2): 51~ 56.
- [9] 赵永贵, 蒋辉. TSP203 超前预报技术的缺陷与 TST 技术的应用[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(3): 266~ 273.