

# 地震波法隧道三维超前地质预报技术及应用

孙志涛, 娄国充, 满令聪

(石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:**长距离超前地质预报是新建隧道施工工程中的重要工序。目前国内外采用的长距离地震波法超前探测技术数据采集方式单一,工程适应性差,工作效率较低,预报效果差。在地震波波动理论的基础上,结合隧道施工空间情况,提出了三维地质预报技术,建立了隧道三维预报观测系统,选取锤击法作为激振方式,并结合实际工程进行了应用。为隧道、地铁等工程安全施工提供了技术保障。

**关键词:**地震波法;三维地质预报;隧道

**中图分类号:** P631 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)03-0092-05

## 1 概述

近年来,随着铁路公路、交通工程、市政工程等基础工程的发展,目前我国已成为隧道建设规模最大的国家。由于地表勘察手段有限,加之断层、溶洞、破碎带等施工不良地质又具有较强的隐蔽性,很难准确判断隧道沿线的不良地质情况。为了更加有效地掌握隧道施工期间掌子面前方的地质情况,实现减少或杜绝施工期地质灾害、保障生产安全的目的,从 20 世纪 70 年代开始国内外研究者们已经研发了多种隧道施工环境下的地质预测方法,按照预报原理来分,主要包括地震波方法和电磁类方法等。地震波超前探测方法以其较远的探测距离与较好的界面识别效果,成为隧道超前探测中最常用的地球物理方法。地震波超前探测方法的物性基础是岩性弹性差异,目前已经形成了几种不同的专门技术,主要有负视速度法、陆地声纳法、瑞雷波方法、水平剖面法、TSP、TRT、TGP 和 TST 等预报技术,其中只有真反射层析成像(TRT)法为三维地质预报<sup>[1-4]</sup>。地震探测方法对断裂破碎带构造的预报比较准确,但是对岩性不良地质对象定位精度不高,解决含水性问题也不如电磁方法,主要是由于目前地质预报方法观测系统及分析处理信息方式比较简单<sup>[5-6]</sup>。因此,如果想取得比较准确的预报结果,必须完善观测系统,充分利用隧道空间,并通过综合解释,才能提高超前预报的可靠性。

在分析研究超前探测与预报技术的基础上,建立了隧道三维超前地质预报系统,并通过现场实例对比分析,验证了该系统在定位和预报不良地质的优越性和准确性。

## 2 观测系统设计

### 2.1 震源和检波器布置

目前国内的地震波法隧道超前地质预报震源和检波器的布置方式主要为直线布置方式和空间布置方式。直线布置方式为震源和检波器布置在隧道侧壁的同一直线上,该布置方式无横向偏移距,无法获得较准确的速度分析结果<sup>[7]</sup>;空间布置方式以真反射层析成像(TRT)技术采用较多,即在隧道全空间将震源点和检波器进行三维布置,由于该观测方式检波器及震源点均布置在初期支护上,检波器容易受到侧向反射波干扰,如若遇到地质情况较差工程由于格栅钢架或钢拱架的存在,其观测方式的布置和信号的质量受到很大的影响。

鉴于以上 2 种方式的优缺点,结合三维地震波勘探原理和隧道施工空间情况,该三维地质预报系统采用

收稿日期:2019-04-25 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20190073

作者简介:孙志涛(1994—),男,硕士研究生,研究方向为岩土工程稳定性及变形控制。E-mail:sunzt@stdu.edu.cn

孙志涛,娄国充,满令聪.地震波法隧道三维超前地质预报技术及应用[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(3):92-96.

了一种具有横向和垂直偏移距的三维超前地质预报观测方式,如图1所示。该观测方式布置于隧道掌子面中部,根据空间尺寸,震源点可选8~12个,对应检波器6~10个,道间距和炮间距一般为2 m左右。三维预报能够利用隧道空间进行多点激发地震波和多点接收,可以较充分地获取隧道开挖前方空间场波信息,减少了侧向波的干扰,免于受初期支护中格栅钢架、钢拱架对地震波的激发和采集的干扰。

## 2.2 震源方式选取

目前国内地震波法隧道超前地质预报震源方式主要为炸药和锤击,采用炸药的预报方法有隧道反射波超前预测系统(TSP)、隧道地震波层析成像法(TST)、隧道超前地质预报(TGP)。炸药作为震源产生的地震波能量强、频率高,传播距离远,但也有遇硬岩阻抗强、软岩耗散大的特点,较大影响预报效果。另外炸药激发地震波时会对周围的围岩产生扰动形成塑性带及破坏圈,同时炸药在国内管控严格,需要专人操作和一定的审批流程,且具有较大的安全隐患。采用锤击震源的预报方法有真反射层析成像(TRT),锤击产生震源的特点在于频率低、信号单一,干扰波少,其对硬岩和软岩更具穿透性,另外其施工成本低、效率高、安全环保、可重复操作、且对围岩扰动小,但是在工程地质不良的隧道中,锤击产生的能量较弱,探测距离减小<sup>[8]</sup>。为了提高工作效率,减少对围岩的扰动,本系统采用锤击作为人工震源。

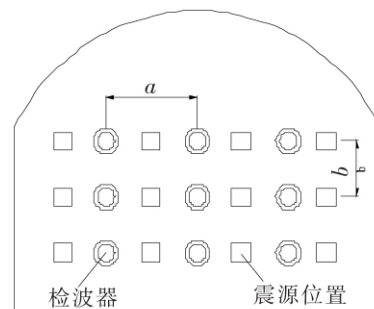


图1 检波器和震源位置布置图

## 3 数据采集及解译

### 3.1 数据采集

根据隧道掌子面空间尺寸,检波器按2行均匀等距布置在掌子面中间位置,震源点等距布置于检波器两侧,如图1所示。选用专用电缆将检波器串联并与地震波采集仪连接,采集仪通过锤源同步系统连接震源锤,如图2所示。人工持锤均匀敲击震源点,地震波采集仪采集地震波反射信号,检查信号质量,选取质量好的数据保存,如图3所示。每个震源点敲击8次,共采集384~960组地震波反射数据。

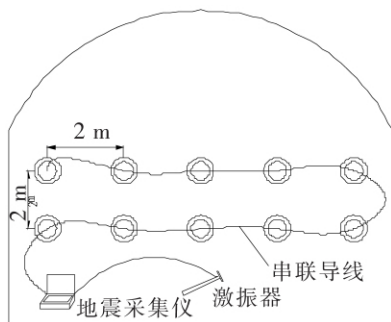


图2 测试系统连接图

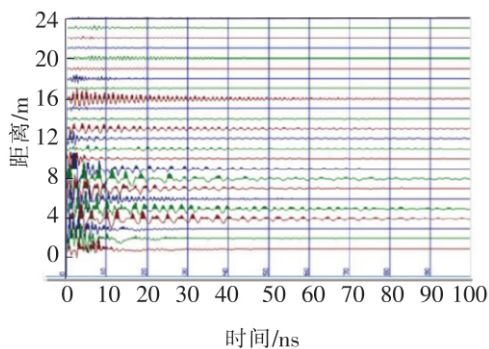


图3 静校正后地震波反射信号

### 3.2 数据解译

由于布置在隧道掌子面上三维预报观测系统具有规则的多检波器和多个震源点,由锤击震源点产生多个规则的地震波传入掌子面前方围岩,遇到岩性变化会发生反射,并由多个检波器接收,获得隧道掌子面前方的三维地震波反射信号。三维地质预报数据处理流程如图4所示。三维数据体可以采用三维可视化软件进行解译和分析。

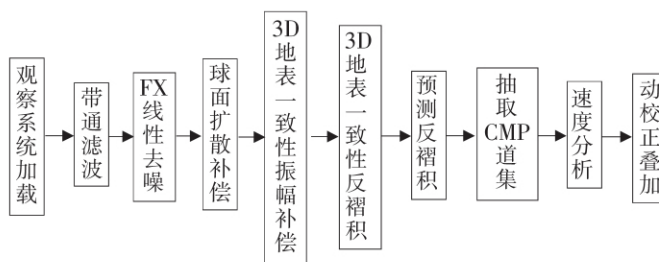


图4 三维地质预报数据处理流程

为了有效预报和确定围岩内部地下水的分布情况,俄罗斯地质学家 Viadimir 在双相介质波动理论的基础上,建立了地震波传播过程中产生的应力梯度与振幅和频率的关系<sup>[9]</sup>

$$G_s(t_i) = \left[ \frac{A_s(t_i)}{\bar{A}(t_i)} \right]^n \left[ \frac{\bar{F}(t_i)}{F_s(t_i)} \right]^m \quad (1)$$

式中,  $G_s(t_i)$  为围岩应力梯度;  $A_s(t_i)$ 、 $F_s(t_i)$  分别为反射波信号的瞬时振幅和频率值;  $\bar{A}(t_i)$ 、 $\bar{F}(t_i)$  分别为瞬时振幅和瞬态频率的平均值。将应力梯度分布图与三维地震波图谱相结合,可以有效确定隧道掌子面前方不良地质体的位置和区域。

## 4 工程应用实例

### 4.1 工程概况

某城际铁路隧道位于华南地区某市的北缘区域,隧道全长 380 m,埋深 10~35 m。隧址区域属于构造盆地,线路范围内上覆全新第四系全新人工堆积层( $Q_{el}^{ml}$ )、第四系洪积层( $Q_{el}^4$ ),下覆基岩为石炭系中上统壶天群( $C_{2+3ht}$ )灰岩,石炭系下统大唐阶梓门桥组( $C_{1dz}$ )砂岩,石炭系下统大唐阶测税组( $C_{1dc}$ )泥质粉砂岩、炭质页岩、石英砂岩,石炭系大唐阶石碇子组( $C_{1ds}$ )灰岩、炭质灰岩。隧道穿越的地层中全风化岩体较多,岩体较破碎,地下水丰富,区域内存在较多溶洞、塌落洞、软泥夹层及水囊等,施工过程中可能发生大规模突水突泥,隧道采用三台阶九步的 CRD 工法施工。

### 4.2 数据采集

三维预报里程 DK46+690 为明挖和暗挖结合部,依据三维观测系统设计原则,结合现场实际情况,震源点及检波器布置在隧道出口的地下连续墙上。设计 8 个检波器,分为 2 行,每行 4 个,布置在隧道掌子面上,相邻检波器间距 1.5~2.0 m,行间距 2.0 m;在隧道掌子面上布置 10 个人工震源点,等距离分布于每个检波器的左右两侧,如图 5 所示。

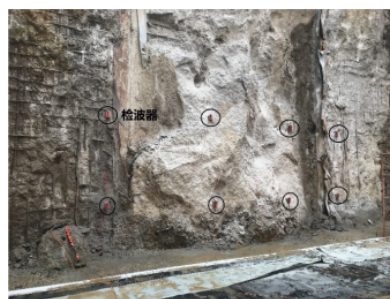


图 5 现场检波器布置图

### 4.3 数据分析及解译

2018 年 1 月 14 日进行数据采集并采用专业软件对三维地震反射波信号数据进行分析 and 可视化成图,得到掌子面前方 100 m 范围内的三维地质情况图谱,如图 6 所示,主要包括含水量概率切片图、应力梯度切片图和危险等级概率切片图,根据三维地质图谱,结合勘察地质资料综合分析,得到掌子面 DK46+690 前方 100 m 范围内的地质超前预报成果,如表 1 所示。

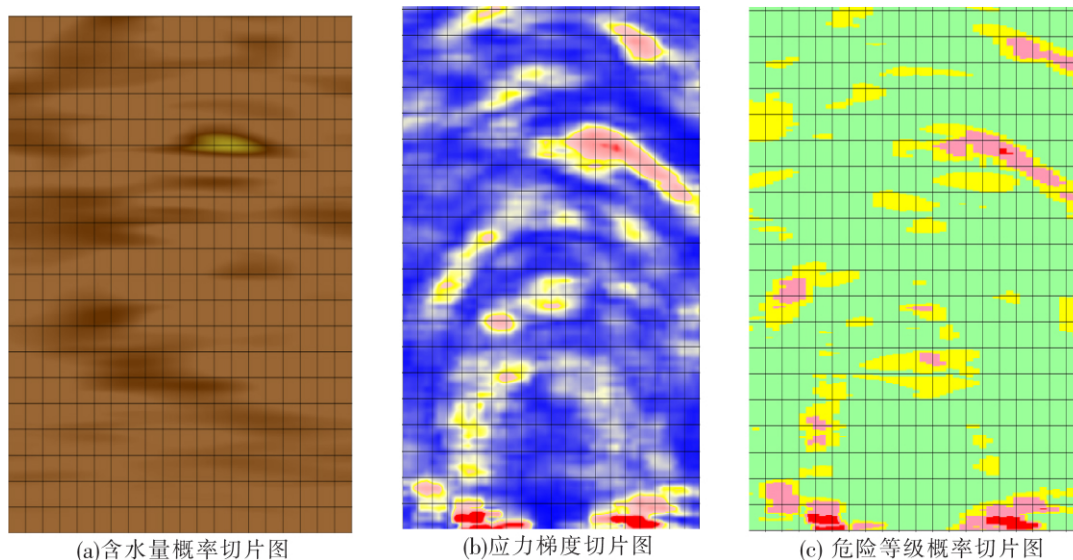


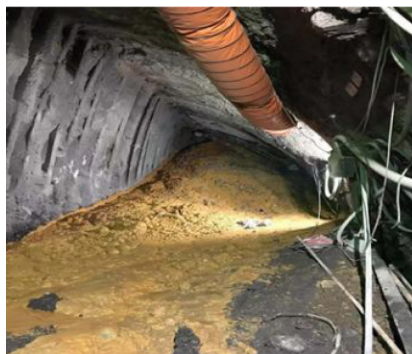
图 6 地质预报图谱

表 1 解译结果

序号	里程	长度/km	地质解译内容
1	DK46+690~635	55	岩体纵波波速为 3 000~3 200 m/s,为全-强风化粉砂岩,局部强风灰岩。岩体构造发育,节理破碎,软硬不均,富水。其中在里程 DK46+685~675 区间掌子面左侧横波波速降低明显,可能存在软泥夹层;DK46+665~645 区段中、右上部存在稍破碎或者断层区域,DK46+663~655 区段含水信号明显,可能含少量地下水或软泥夹层。主体推测为 V 级围岩,围岩强度低,自稳能力差。
2	DK46+635~610	25	岩体纵波波速为 3 200~3 400 m/s,为强-弱风化砂岩、炭质页岩。岩体构造发育,节理较破碎,其中 DK46+623~613 右侧含水信号明显,可能存在水囊或软泥夹层。主体推测为 V 级围岩,围岩强度低,自稳能力较差。
3	DK46+610~590	20	岩体纵波波速为 2 650~2 800 m/s,为全-强风化炭质页岩。岩体构造发育,节理破碎,掌子面左侧强度较低,局部渗水,易塌方掉块,主体推测为 V 级围岩,围岩强度低,自稳能力差。

#### 4.4 开挖验证

隧道于 2018 年 1 月 15 日开始施工,采用三台阶九步 CRD 法机械掘进开挖,于 2018 年 10 月 22 日开挖至 DK46+620.5 处,在掌子面右上方洞内揭示出较大溶腔,内部充填软泥土和水,黄褐色,流塑状,无强度,如图 7 所示。



(a)突泥突水实况



(b)突泥突水状态

图 7 DK46+620.5 突泥突水发育情况

## 5 结语

在分析目前国内地震波法超前地质预报的基础上,基于目前国内外三维地质预报的发展,应用了新的三维地质预报系统及其现场工作的技术方法,验证了其对隧道前方不良地质预报的准确性,且操作简单,工作效率高,为我国铁路、公路、市政工程提供有力的技术保障。

## 参 考 文 献

- [1]李术才,刘斌,孙怀凤,等.隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090-1113.
- [2]赵永贵.国内外隧道超前预报技术评析与推介[J].地球物理学进展,2007(4):1344-1352.
- [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(3):460-464.
- [4]刘志刚,刘秀峰.TSP(隧道地震勘探)在隧道隧洞超前预报中的应用与发展[J].岩石力学与工程学报,2003(8):1399-1402.
- [5]林君,蒋川东,段清明,等.复杂条件下地下水磁共振探测与灾害水源探查研究进展[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(5):1560-1570.
- [6]王梦倩,岳建华,刘盛东.反射波超前成像预报系统及其应用[J].地球物理学进展,2014,29(3):1439-1444.
- [7]宋杰.隧道施工不良地质三维地震波超前探测方法及其工程应用[D].济南:山东大学,2016.
- [8]程路明.隧道超前地质预报三维成像技术研究[D].郑州:郑州大学,2016.
- [9]Viadimir B Pisetski. Method for determining the presence of fluids in a subterranean formation;U. S.5796678[P].1998-08-18.



## Three-Dimensional Advanced Geological Prediction Technology for Tunnel Seismic Wave Method and Its Application

Sun Zhitao, Lou Guochong, Man Lingcong

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Long-distance advanced geological prediction is the key step in the construction of new tunnels. At present, the long-distance seismic wave method advanced detection technology adopted in the world has a single way to collect data, and it also has poor engineering adaptability, low work efficiency and poor forecasting effect. In short, this paper proposed a three-dimensional geological prediction technology based on the theory of seismic wave fluctuation and combined with the tunnel construction space, establishing a three-dimensional prediction observation system for tunnels which was applied into practical engineering selecting the hammering method as the excitation method, and these technologies provided technical support for the safe construction of tunnels, subways and other projects.

**Key words:** seismic wave method; three-dimensional geological prediction; tunnel

(上接第 91 页)

## DFB Fiber Laser for High-resolution Acoustic Emission Detection Technique Based on Beat Frequency Interrogation

Jia Qing<sup>1</sup>, Ma Huaixiang<sup>1</sup>, Zhang Wentao<sup>2</sup>, Huang Wenzhu<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Semiconductor Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A compact detection system based on distributed feedback (DFB) fiber laser using beat frequency interrogation was proposed, the detection system can reach a high strain resolution of  $6.4 \times 10^{-3} \mu\epsilon$ . And the dynamic range of the demodulation system can reach 400 MHz. The strain resolution of DFB beat frequency demodulation technique based on fiber laser is higher than that based on matched grating, linear filter and arrayed waveguide grating filter. The dynamic range is greater than the phase-shifted fiber Bragg grating intensity demodulation technique based on tunable laser and the fiber laser phase demodulation technique based on fiber interferometer. The two lasers of the whole system beat frequency each other to get the beat frequency signal. Then the signal acquisition and processing system based on virtual instrument developed by the Research Group is processed. Data are collected by a high sampling rate data acquisition card, and the spectrum of beat frequency signal is obtained by signal analysis based on LabVIEW software system. The bandwidth of beat frequency signal is obtained from the spectrum diagram, and the strain resolution of the demodulation system is obtained according to the relationship between wavelength and frequency, the sensitivity of DFB fiber laser. The dynamic range of the demodulation system is obtained according to the sampling rate of NI data acquisition card, and the strain resolution is improved by the time-frequency analysis method of short-time Fourier transform. The acoustic emission detection technique based on beat frequency demodulation of DFB fiber laser can detect high frequency acoustic emission signals caused by wear or fracture with high strain resolution.

**Key words:** distributed feedback fiber laser; demodulation; beat frequency; LabVIEW; time-frequency analysis; acoustic emission