

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2014.03.001

铁路隧道 TGP 超前地质预报系统应用探讨

黄建华, 赵玉龙

(福建工程学院 土木工程学院, 岩土工程研究所, 福建 福州 350118)

摘要: 通过京福铁路客运专线闽赣 IV 隧道工程实例, 阐述了 TGP 地震反射波法的基本原理和过程, 并分析其特点和优越性。通过工程应用研究, 对 TGP206 系统的工作原理、数据处理、解释技术和等级分析等进行系统探讨, 剖析了 TGP 系统进行隧道围岩类别识别及其有效性等相关问题, 验证了预报结果的准确性。

关键词: 超前地质预报; 隧道; 围岩等级; 地震波速

中图分类号: TU471.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2014)03-0205-06

Discussions on applications of advanced tunnel geology prediction system-TGP in railway tunnel engineering

Huang Jianhua, Zhao Yulong

(College of Civil Engineering/Geotechnic Institute, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: With the improvement of engineering grades and the increasing complication of geological environment in tunnel excavation, advanced geology prediction becomes more and more important. TGP206 is one of the most advanced intelligent systems of geological prediction, which has the advantages of convenience, high discrimination, stable and reliable performance and high signal to noise ratio. The fundamental principle and implementing process of TGP seismic-reflection method was expounded, the features and advantages of which were illustrated via the engineering example of the Fujian-Jiangxi Tunnel IV in Beijing-Fuzhou railway passenger line. Furthermore, data acquisition and processing, interpretation technique and rock classification in TGP206 system were researched via engineering applications. Rock classification identification and its reliability as well as its relevant issues were discussed. The accuracy of the prediction was verified. The research outcomes may play some positive roles in promoting the development and application of the tunnel geological prediction technology.

Keywords: advanced geology prediction; tunnel; rock classification; seismic wave velocity

Tunnel Geology Prediction System (简称 TGP 系统), 即隧道地震波超前地质预报技术。TGP206 超前地质预报系统是一种新型的地质超前预报仪, 根据地震反射波预报原理判断掌子面

前方的围岩地质状况, 系统包括三分量地震检波器、乳化炸药震源产生纵横波能量、数据接收处理系统, 便于对不良地质体的性质、类型、位置和规模进行分析, 由此对复杂地质条件进行预报、解释

收稿日期: 2014-04-30

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2012J01188); 福建省教育厅产学研重点资助科技项目(JT2012ZD008); 福建工程学院科研资助项目(2011J036)

第一作者简介: 黄建华(1969-), 男(汉), 福建莆田人, 博士后, 教授, 高级工程师, 注册岩土工程师, 注册监理工程师, 主要从事地下围护与结构、岩土与环境工程科研。

和推断等^[1-4]。

在瑞士、英国、法国和日本等发达国家隧道隧洞施工中,普遍采用 TSP (tunnel seismic prediction) 进行超前地质预报工作,我国应用 TGP 技术于乌鞘岭、秦岭、株六、渝怀等特长铁路隧道中, TGP 较准确预报了破碎带、涌水、断层和富水砂岩层等。公路隧道工程的应用包括云南元墨高速公路、山西雁门关特长公路等隧道,较准确预测隧道前方软弱岩层、断层、破碎带、溶洞、含水岩层以及岩石裂隙发育情况等。确保了隧道工程安全,但目前应用 TGP 地质超前预报的隧道还不是很多^[5-9]。

本文通过京福铁路客专线闽赣 IV 隧道工程实例,阐述 TGP 地震反射波法的基本原理和过程,分析其特点和优越性,通过工程应用研究,对 TGP206 系统的原理、数据处理、解释技术和等级分析、震源药量影响等进行系统探讨,通过对比分析 TGP 判断隧道围岩类别及其预测有效性和准确性、震源药量影响等相关问题,验证了 TGP206 系统预报结果的准确性,为促进隧道超前预报技术的发展和工程应用提供理论基础。

1 TGP206 探测原理与方法

1.1 TGP 探测原理

隧道地震波超前地质预报是利用地震波在岩体传播过程中的反射波和绕射波原理,对隧道掌子面前方的地质条件进行探测。由震源产生的地震波向隧道前方传播的过程中,遇到阻抗大的岩体界面产生反射波,遇到阻抗小的岩体界面产生绕射波。采集上述地震回波,通过相关处理系统进行数据处理,提取产生回波界面的位置、空间分布、回波极性和回波能量等信息,结合隧道地质勘察资料进行综合分析,实现对隧道前方地质条件的推断,达到地质超前预报的目的^[10]。工作布置示意图如图 1。

1.2 TGP 探测方法

TGP206 隧道地质超前预报探测系统由 4 大部分组成: TGP 隧道地质预报检测仪主机、高灵敏度三分量速度型接收检波器、数据处理设备及工程地质图像记录设备、TGPWIN 隧道地震波处理分析软件包。

数据接收使用三分量地震检波器来采集地震回波,定向安置孔中并采用黄油耦合;记录接收器

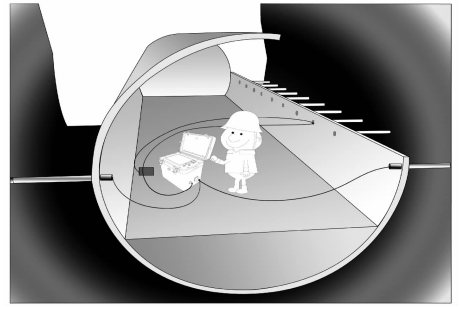


图 1 TGP 工作布置示意图

Fig. 1 Layout diagram of TGP

孔、距离接收器最近的炮孔和隧道掌子面的里程桩号,以及各炮孔间的距离;震源使用乳化炸药置于孔底并在注水条件下激发,产生较强的纵横波能量;处理系统以清晰分离的纵横波为基础,进行多波多分量的全波震相分析,提取 2D 和 3D 界面的偏移归位成果图,通过地震回波的极化计算确定回波位置与分布,回波性质、能量和岩体估算速度曲线等资料^[11]。TGP 整体工作流程如图 2 所示。

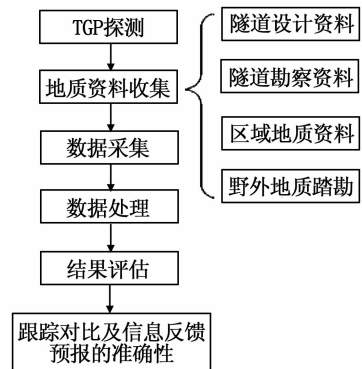


图 2 TGP 工作流程图

Fig. 2 Work flowchart of TGP

1.3 测试数据分析原则

采集的 TGP 数据,通过 TGPWIN 软件进行处理,获得 P 波、SH 波、SV 波的时间剖面、相关偏移归位剖面等成果。在成果分析中:以 P 波、SH 波、SV 波的原始记录分析测段岩体的地质条件;以相关偏移归位剖面预报前方岩体地质条件,预报分析推断以 P 波剖面资料为主,结合横波资料综合解释。解释中遵循以下准则:(1)若 S 波反射较 P 波强,则表明岩层含水;(2)左右洞壁对比,以激发和接收在同一侧的资料为主的原则;(3)纵横波的资料对比,以纵波资料为主的原则。

2 TGP206 现场工程探测

2.1 工程概况

闽赣 IV 隧道是京福铁路福建段的一条长大隧道,为单洞双线隧道,最大埋深 782.14 m,里程范围为 DK535 + 141.94 ~ DK542 + 913.5,隧道长 7 471.56 m。TGP206 系统测试段隧道位于剥蚀低山地貌,地形起伏较大,山体自然边坡 $15^{\circ} \sim 35^{\circ}$,地面标高 70 ~ 510 m,其最大埋深 450 m 左右。山体植被发育,局部山坡及山间谷地被辟为水田、李子果园。隧道设置长涧源斜井一座,斜井斜长 1 181.42 m,综合纵坡 4.772%,采用无轨运输单车道断面。

隧址区内构造主要以新华夏系北东向构造为主,受区域构造影响,隧道进口附近断裂构造发育,岩体节理裂隙发育。经地表调绘和岩土勘探测试等综合分析,隧道测区内未发现新华夏系北东走向一级断层、其余勘探结果均为次级构造,但仍具一定规模的断层和节理密集带,与隧道有关断层主要为 F_1 断层, F_1 断层产于中元古界松原组 (Pt_1s) 中,震探低速异常,产状 235° ,宽度约 50 m,断层与线路相交约 35° ,为压扭性断层。断层两盘节理裂隙发育,岩体破碎,常见糜棱岩,蚀变较强烈。与隧道轴线呈约 55° ,斜交于 DK542 + 385 附近。

2.2 TGP 工程预探测

目前隧道设计中没有明确将 TGP206 系统作为强制的超前地质预报方法,TGP 探测只在有断层等不良地质体时才进行,给探测数据处理及资料解释带来很多的不确定的因素,本项目采用预探测方法解决,对 F_1 断层提前 50 m 进行预探测其具体位置和规模,为后期探测修正积累经验。根据隧道地质构造及区域地质资料及纵断面确定每段预探测的里程如表 1。

提高超长距离准确探测预报一般从延长系统采样时间和提高传播速度两方面进行,因此探测时扩大采样间隔,提高采样数目,延长采样时间。本项目采样间隔 $\Delta t = 62.5 \mu s$ (采样频率 3 2 倍最高频率 (Nyquist 尼奎斯特频率)); 采样数目 $N = 4\ 400$; 相对应的采样时间 $T = \Delta t \times N$, 即 $T = 275\ 000 \mu s = 275 \text{ ms}$, 激发孔沿直线布设在隧道洞壁同一侧,距掌子面 5 ~ 10 m 布设第一个激发孔,而后等间距 1.5 ~ 2 m 布设。软岩岩体波速低选

择 1.5 m,硬岩岩体波速高选择 2 m。

表 1 预探测里程及围岩等级情况

Tab. 1 Pre-detection mileage and grade of surrounding rock

序号	里程	围岩类别
1	DK541 + 735 ~ DK541 + 785	II
2	DK541 + 785 ~ DK541 + 835	IV
3	DK541 + 835 ~ DK541 + 885	IV
4	DK541 + 885 ~ DK542 + 080	II
5	DK542 + 080 ~ DK542 + 180	III
6	DK542 + 180 ~ DK542 + 580	V

接收孔布设在激发炮孔的后方(以面向掌子面为前进方向),接收孔与最近的激发孔的距离一般为 20 m 左右,该距离短则预报距离短。一般接收孔为左右洞壁对称布设。接收孔与激发孔的布设方式详见图 3 和图 4。每个接收孔探头内均有 X、Y、Z 三个分量的检波器,三分量检波器有利于纵波(P 波)、横波(SH 波)和横波(SV 波)的接收,有利于处理工作中纵横波的提取和分离。

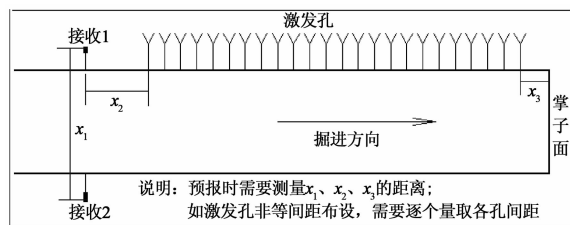


图 3 TGP 接收孔与激发孔的布设方式图

Fig. 3 Layout of receiving and stimulating hole in TGP

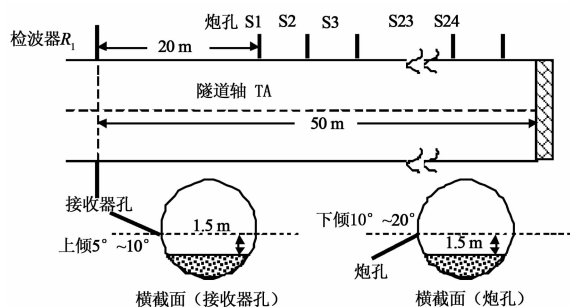


图 4 TGP 孔位设计示意图

Fig. 4 Sketch of holes in TGP

炸药卷的回路线与仪器的触发信号线用电缆连接,电雷管线通过起爆连接器与起爆器连接(见图 5)。接收探头分别通过连接电缆与主机相连,将接收到的地震波信号送至 TGP 主机。

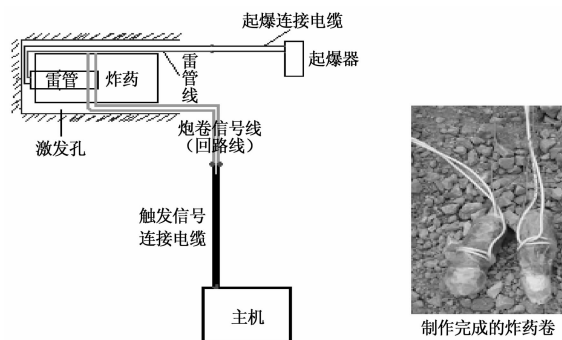


图 5 TGP 激发与接收连接示意图

Fig. 5 Connection diagram of exciter and receiver in TGP

2.3 震源药量选择与控制

在地震勘探中通常需要强能量、高频率的反射波,因此,要求炸药爆炸后弹性能量要强,特别是高频能量损失要小。再者,TGP206 响应频率为 5 000 Hz 以下,所以要求药量不可能无限小,且由于大地滤波作用改变频谱成分,使频谱变窄,为保证足够的频谱宽度,也要求药量在一定范围。TGP 系统探测采用乳化炸药量,爆速 $\geq 4\ 000\ \text{m/s}$,据现场数据统计,随着药量增多所接收的频带宽度反而减小,以其中 DK492 + 016 ~ DK492 + 063 段为例:当药量 30 ~ 50 g 时,频带宽度为 50 ~ 3 510 Hz;当药量 40 ~ 67 g 时,频带宽度为 50 ~ 2 990 Hz;当药量 67 ~ 100 g 时,频带宽度为 50 ~ 2 540 Hz。总的来看,使用药量为 40 ~ 67 g 时预报相对准确率较高。

根据现场岩石性质及实际需要,选取乳化炸药药卷长度分别为 150 mm 和 200 mm。结合围岩特点,所使用的药量如表 2。药量必须用天平准确称量,并做好标记。药包装入炮孔后,往炮孔内注水,使装药与炮孔孔壁处于水耦合状态。用炮泥对炮孔进行封堵,并保证足够的填充长度,以抑制爆破噪音和爆破冲击波信号对地震波信号的干扰。

表 2 不同孔所使用的药量

Tab. 2 Dosage of explosives for different holes

孔号	距离/m	药量/g		
1 ~ 5	20 ~ 26	30	40	50
6 ~ 16	27.5 ~ 42.5	40	50	67
17 ~ 24	44 ~ 53.5	50	67	100

2.4 TGP 现场数据采集

所采集的地震信号将直接影响到超前地质预报的结果,所以地震信号采集过程中要注意:①在探测系统线路连接牢固,保证数据通讯良好;②数据传输线松弛放置地面上,尽量避免悬空拉线;③数据传输线远离高压电缆和大功率用电设备,避免电磁场干扰采集信号;④严格控制地震信号采集过程的背景噪音强度,必要时应切断干扰源。

地震波传播过程遇到节理、断层、层理或不同性质岩石交界面等结构面时,一部分波从结构面反射回来,另一部分则透射过结构面进入第二种介质继续向前传递。且地震波反射时又再派生成纵波和横波。因此要有效准确接收远距离能量微弱的反射纵波(P 波),传感器须具有极高灵敏度,且探测过程传感器还须处于最佳接受方式和展布角度,须利用构造地质学和波的传播理论,确定传感器正确位置和接受角度。

在接收孔中安装好接收探头、在激发孔中安装好带回路信号线的炸药并灌满水、连接好起爆电缆和触发信号电缆。仪器站避开滴漏水和易掉块地段并放置在减震箱上,避免隧道地面潮湿杂散漏电影响。打开仪器,将接收探头电缆与仪器输入通道相连,要保证接收孔 1 和接受孔 2 的电缆连接无误,触发信号线插头与仪器面板上的触发孔相连,接好电源接线。采集系统主界面和地震数据采集窗口见图 6 和图 7。测试采集过程包括:数据设置与归零—带通滤波与梯形高通滤波设置—初至拾取—反射波提取—P-S 波分离—地震波速度分析—反射界面深度偏移修正—地震波反射界面提取,最终结果解析。

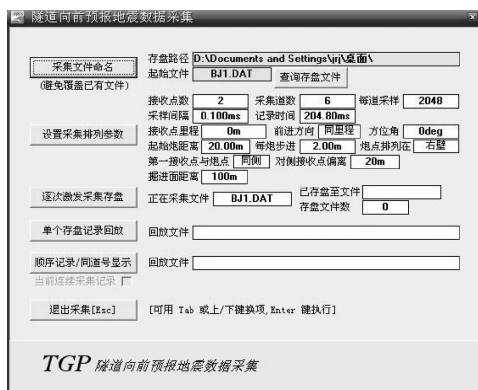


图 6 采集系统主界面

Fig. 6 Main interface of acquisition system

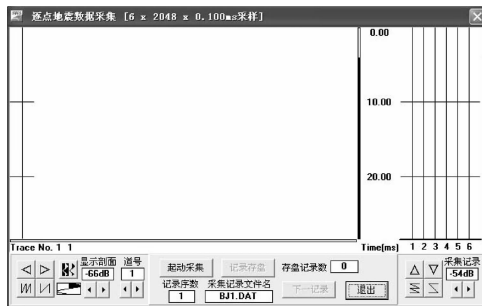


图7 地震数据采集窗口

Fig.7 Acquisition window of seismic data

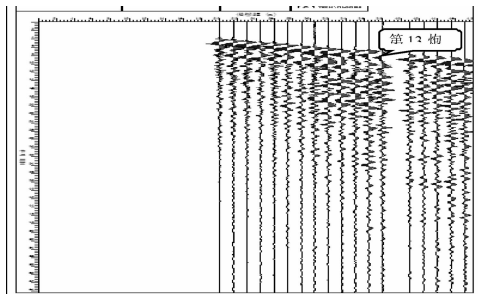


图8 地震波原始采集图

Fig.8 The original acquisition of seismic wave

3 TGP 实测成果分析应用

3.1 TGP 探测成果分析

铁路客运专线的中长大隧道埋深大、工程地质条件复杂,隧道施工期间的超前地质预报工作可较详尽查明隧道不良地质情况,TGP 系统可探查较大范围内地质体的物理性质资料并取得了良好效果。TGP 数据处理流程为: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。TGP 数据处理和波形分析采用影像处理和结果列表提取主要的纵波和横波反射界面,包括 P 波反射界面的提取、SH 波反射界面的提取和 SV 波反射界面的提取。地震波原始采集图见图 8,波形处理后的效果图如图 9。

GP206 系统对断层破碎带等具有较强的探明

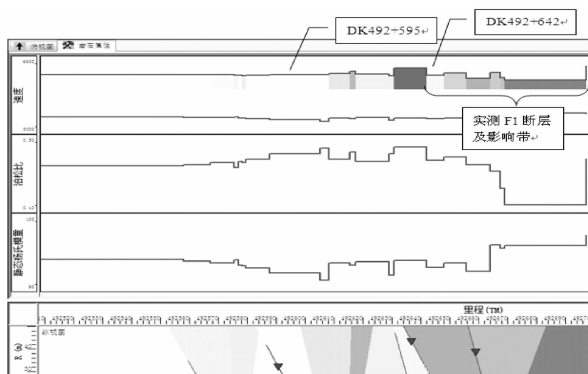


图9 波形处理后的 2D 效果图

Fig.9 2D effect diagram of wave-data process

能力,施工预警能力好,因此在隧道超前地质预报中有效,而预探测技术在利用 TGP 进行超前地质预报时也十分有必要。预测掌子面前方围岩等级情况与原设计开挖情况的对比如表 3。

表3 围岩等级预测与开挖对比情况表

Tab.3 Data of surrounding rock grade comparison between prediction and excavation

里程	原设计	V_{p2}	V_{p1}	探测情况	实际情况	结论
DK541 + 755 ~ DK541 + 805	III	4 980	3 212	III	III	相符
DK541 + 805 ~ DK541 + 855	II	5 058	3 388	III	III	相符
DK541 + 855 ~ DK541 + 905	IV	4 789	2 799	IV	IV	相符
DK541 + 905 ~ DK541 + 955	V	4 812	2 847	IV	IV	部分相符
DK541 + 955 ~ DK542 + 005	V	5 431	4 294	V	V	相符
DK542 + 005 ~ DK542 + 055	V	4 657	2 529	IV	IV	相符
DK542 + 055 ~ DK542 + 105	IV	3 987	1 342	V	V	部分相符
DK542 + 105 ~ DK542 + 155	V	3 872	1 168	V	V	相符

4 结语

探讨了 TGP 超前地质预报系统在京福铁路客专线闽赣 IV 隧道超前地质预报中的成功有效

应用,系统阐述了 TGP206 工作流程,包括数据采集、分析处理等,利用反射波衰减参数与偏移图进行综合对比分析的功能,估算测量段岩体(即炮孔布置段岩体)速度参数,并结合构造面产状的

分布综合分析,对隧道进行分段地质评价,具有相对直观性和参照性。测试简便,效率高,不影响施工,能及时提供有关隧道前方地质条件的变化信息。通过准确超前预报,可以减少隧道施工过程中的盲目性,避免隧道施工过程中可能的重大不

良地质灾害发生。在实际施工中,根据现场预报结果实施信息化管理,及时调整或修正围岩级别、设计参数和施工方法,正确指导施工,减少施工中的盲目性和事故发生率,使施工快速、安全、经济合理。

参考文献:

- [1] Sattle G, Frey P, Amberg R. Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods – pilot project in Ceneovalli Tunnel [J]. First Break, 1992, 10(1): 19 – 25.
- [2] Zang C W, Huang H W. Forecasting the strata condition of a long road tunnel by using fuzzy synthetic judgment [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2004. 41(3): 406 – 407.
- [3] 何发亮,李苍松. 隧道施工期地质超前预报技术的发展[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(3): 12 – 15.
- [4] 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.
- [5] 齐传生. TSP202 隧道地震波超前地质预报系统的应用[J]. 世界隧道, 1999(1): 36 – 40.
- [6] 张勇,张子新. TSP 超前地质预报在公路隧道中的应用[J]. 西部探矿工程, 2001, 13(5): 71 – 72.
- [7] 刘志刚,刘秀峰. TSP 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, 22(8): 1399 – 1402.
- [8] 周黎明,刘天佑,刘江平,等. 复杂铁路隧道施工地质超前预报中 TSP 探测技术应用研究[J]. 铁道工程学报, 2008(1): 76 – 79.
- [9] 王丙堤. TSP203 在隧道施工中的应用[J]. 铁道工程学报, 2010(1): 73 – 76, 81.
- [10] 何荷. TGP2206 地质超前预报仪应用简析[J]. 山西科技, 2010, 25(4): 76 – 79.
- [11] 刘云祯. TGP2206 型隧道地质预报系统操作使用手册[Z]. 2006.

(责任编辑:陈雯)