

TSP 在软、硬岩地层中的应用效果分析

袁明生, 陈建平, 廖俊

(中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:介绍了 TSP 超前预报系统实现预报的基本原理。从基本原理出发分析了 TSP 对不同岩性地层的适应性问题;通过实例分析了 TSP 在不同地层中的预测效果。结果表明当围岩中没有大的不良地质体时, TSP 在软岩中的预测效果较差,而在硬岩中预测效果好。

关键词: TSP 超前预报系统; 软岩; 硬岩; 围岩质量; 应用效果

中图分类号: P631.4⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2008)02-0155-04

Analysis on Application Efficiency of TSP Method Applied in Soft and Hard Rock Strata

YUAN Ming-sheng, CHEN Jian-ping, LIAO Jun

(Engineering Institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The basic principles of the TSP advanced forecast system are introduced first, and then the flexibility issues of the TSP system when applied to different lithology strata are analyzed based on the basic principles. The forecast efficiency of TSP in different strata is also analyzed through practical examples. The results indicate that the forecast efficiency of TSP in soft rock is worse than hard rock when there are not large size ill geological objects in strata.

Key words: TSP advanced forecast system; Soft rock; Hard rock; Surrounding rock quality; Application efficiency

0 引言

由于地质条件的复杂性,以及前期勘察精度的限制,隧道会出现围岩类别与设计不一致的情况,掌子面前方可能会出现不良地质现象,由此而造成事故的工程不在少数。因此隧道地质超前预报的重要性已被许多隧道工程人员和管理者所重视。目前常用的隧道超前预报主要有长期预报和短期预报两大类,其中长期预报的方法主要有地面地质调查法,断层参数预测法、TSP 和 HSP 等;短期预报的方法主要有掌子面编录预测法、不良地质前兆预测法和地质雷达等探测方法。各种预报方法都有其各自的适用范围和特点。目前最先进、预报效果最好的就是 TSP 超前预报法^[1]。

TSP 预报的效果受很多因素的限制,主要有地质条件、TSP 解译水平、探测准备工作(钻孔质量、炮

检距、其它干扰等)等。不少学者从 TSP 系统本身或借助其他预报方法辅助 TSP 来提高预报准确率。如何刚等^[2]通过改进 TSP 数据采集系统,有效地提高了 TSP 的勘探深度和精度;冯永等^[3]在大水井隧道根据工程地质调查的结论确定合理的 TSP 探测方案,提高了 TSP 的预报效果。但很少有人研究在软、硬岩等不同地质条件下 TSP 的预报效果,本文将从基本理论和实例中分析验证 TSP 在软硬岩地层中的预报效果。

1 TSP 的探测原理

1.1 理论基础

TSP 是采用浅孔微型爆破作为震源,激发的地震波以直达波和反射波的形式传到传感器。与反射波相比,直达波的传播时间明显偏小^[4],因此传感

器可以根据接收到的直达波的时间来计算地震波的速度;在已知地震波传播速度的情况下,通过测得的反射波传播时间推导出反射界面与接收传感器之间的距离及其在隧道前方的位置^[5]。

产生反射波是因为介质的物性发生了变化。当地震波在传播过程中遇到波阻抗差异面,一部分地震波在波阻抗分界面处便被反射回来。反射波的能量大小与反射界面的反射系数有关;反射系数的大小是由界面两侧波阻抗的差值决定的:

$$r = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_2 v_2 + \rho_1 v_1} \quad (1)$$

式中: r 为界面的反射系数; ρ_1, ρ_2 为反射界面两侧介质的密度; v_1, v_2 为反射界面两侧介质的地震波速度。

由式(1)可以看出,若两侧介质波阻抗差值的绝对值越大,则反射系数 r 就越大,反射波的能量也就越大;反之则反射信号就弱。当形成负反射时($r < 0$),表明地震波将要穿越较疏松的介质(如软岩、破碎带);形成正反射时($r > 0$),此时表示地震波将要入射到致密介质中(如硬岩)。

1.2 探测原理

TSP 探测的原理主要为:在 A_1, A_2, A_3 等位置激发震源(图1),产生的地震波遇不良地质界面发生反射而被 Q_1 位置的传感器接收。利用波的可逆性,认为是由 Q_1 位置发出的地震波经不良地质界面反射而传到 A_1, A_2, A_3 等点,这时也可认为波是从像点 $IP(Q_1)$ 发出而直接传到 A_1, A_2, A_3 等点,此时的 Q_1 和 $IP(Q_1)$ 是关于反射面对称的。由于 Q_1, A_1, A_2, A_3 点的空间坐标是已知的,由联立方程可求出像点 $IP(Q_1)$ 的空间坐标,进而由点 Q_1 和 $IP(Q_1)$ 的空间坐标求出两点所在直线的空间直线方程。由于不良地质界面是线段 $Q_1 IP(Q_1)$ 的中垂面,故可求出该不良地质界面相对于坐标原点 Q_1 的空间方程,进一步可求出不良地质界面的空间位置^[6]。

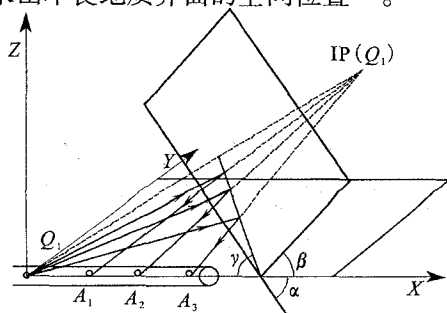


图1 TSP 探测原理

Fig. 1 Exploration principle of TSP.

2 TSP 在不同地层中的探测效果分析

TSP 根据反射回来的地震波的速度、延迟时间、波形、强度等来确定反射面的空间位置、性质、产状和规模等^[7-8]。但是,由于地质条件的复杂性,反射波的各种特征都会受到围岩岩性、结构构造等多种因素的影响,这就为反射波的识别、提取和分析增加了难度,也就对预测结果和探测精度产生了影响。

围岩岩性对 TSP 探测精度有较大的影响。地震波在介质中传播时,其能量是不断衰减的。由于实际的岩土体介质是不均匀的,在受外力作用下会出现弹性粘滞性,由此而造成地震波能量被吸收。介质对波吸收系数的大小主要取决于岩石的粘滞性,在同样的外力条件作用下疏松岩石的粘滞性能一般要比致密岩石明显,所以松散、破碎岩层的吸收系数大于致密、固结岩层,在风化层和断裂带内的吸收系数很大;另外岩体的吸收系数还与地震波的频率有关,地层相当于一个低通滤波器,对波的高频成分吸收较大,致密坚固介质的吸收系数与频率成线性关系,而疏松介质的吸收系数与频率的平方成正比。随着传播距离的增加,高频成分很快被吸收,因此也降低了地震波的分辨率^[9]。因此,软岩等围岩质量差的地层对地震波的吸收较大,造成较多的能量损失,从而会使离接收器较远位置的探测效果不好。

另一方面,地质体的规模对 TSP 探测精度也有较大的影响。规模较大的断层、破碎带等,带内波速很低,可以形成很强的反射波信号,不管是在软岩或硬岩中都能探测清楚。而当当地层中不良地质体规模较小时,TSP 在软、硬岩中的探测效果就不同:同样规模和分布状况的不良地质体,存在于质量较差的软岩中时由于软岩本身的波阻抗较小,与不良地质体的波阻抗差别不大。因此在软岩中不良地质带对波的反射相对较弱,在解译时容易造成误判或精度损失;致密的硬岩的波阻抗大,与不良地质带的波阻抗差别很大,反射的信号就强,解译时对反射波的提取、识别就准确,预测不良地质体的精度就高。

3 应用实例

3.1 TSP 在软岩中的应用实例

十漫高速公路火车岭隧道穿越的地层岩性主要为绢云母石英片岩,局部为白云钠长石英片岩和绿泥钠长石英片岩,一般为弱风化~强风化,单轴抗压强度都小于 20 MPa,属于软岩。隧道南侧是与其平

行的两郟断裂带,受其影响,岩层陡立,岩性、地层产状多变,节理裂隙发育,岩体挤压扭曲变形严重,围岩破碎,整体稳定性差。

为了了解掌子面前方岩性和岩体节理裂隙发育

情况,确定围岩类别。特对火车岭隧道左线 ZK54 + 904 ~ ZK54 + 684,右线 YK54 + 442 ~ YK54 + 642 段进行了 TSP203 超前预报,并取得一定的成果(见表 1)。

表 1 火车岭隧道 TSP203 超前预报结果和开挖实际

桩号	长度 /m	TSP 预测结果		实际开挖	
		描述	类别	描述	类别
YK54 + 442 ~ YK54 + 472	30	片岩,节理发育,局部破碎,风化较强烈,少量裂隙渗水。	II	片岩,强风化,节理较发育,局部揉皱,局部有渗水。	II
YK54 + 472 ~ YK54 + 605	133	片岩,节理较发育,块状镶嵌结构,少量裂隙渗水。	III	片岩,强风化,节理发育,局部挤压明显,局部渗水。	II
YK54 + 605 ~ YK54 + 642	37	片岩,间夹软弱夹层,节理发育,呈块状镶嵌结构,裂隙水较发育。	III	片岩,强~弱风化,岩体破碎,局部有软弱夹层的存在,局部有渗水。	II
ZK54 + 904 ~ ZK54 + 885	19	片岩,风化不均,节理发育,碎块状镶嵌结构,含有少量裂隙水。	II	片岩,中~强风化,褶皱发育,结构面发育,岩面较潮湿。	II
ZK54 + 885 ~ ZK54 + 715	170	片岩,节理较发育,岩体呈块状镶嵌结构,含有少量裂隙渗水。	III	片岩,含夹层,扭曲明显,节理发育,局部渗水。	II
ZK54 + 715 ~ ZK54 + 684	31	片岩,节理较发育,块状镶嵌结构,裂隙水较发育。	III	片岩,中~强风化,含夹层,节理发育,局部渗水。	III

注:本表使用的是公路隧道设计规范(JTJ026—90),其 I ~ VI 类分别对应于新的公路隧道设计规范(JTG D70—2004)的 VI - I 级。

从表 1 中可以明显看出,TSP 超前预报的结果与开挖的实际情况有较大的出入,预测的围岩类别大多较实际的要高一个级别。分析其原因主要有以下几点:

一是该地段的片岩属于软岩,地质条件比较复杂,受两郟断裂的影响岩层受挤压作用明显,但是并没有大的断层、破碎带等不良地质体。地震波在石英片岩中的传播速度较低,其波阻抗较小,而破碎带、节理带的波阻抗也小,二者差距不是很大。虽然岩层受挤压作用,石英片岩的波速有所提高。但发育的结构面由于受挤压作用裂隙闭合,节理密集带的密度和波速都增加了,这样节理带的波阻抗和周围岩体的波阻抗差值减小,反射系数大为降低。

二是 TSP 判断围岩类别指标单一。在评价围岩质量时应综合考虑多种指标和影响因素,而 TSP 在确定围岩类别时主要是根据地震波速来确定的,这一个指标并不能反应所有影响围岩类别的因素。

三是预测距离过大。考虑到干扰波的影响,TSP 的有效预报距离在 150 m 以内^[10]。若在软岩中,还应减小预报距离才能保证精度,而本次 TSP 预测了 200 m 的距离,超出了软岩地层的有效预报距离,造成与实际有一定的差异。

3.2 TSP 在硬岩中的应用实例

天马山隧道是厦门市岛外快速路的主要组成部分,为双向六车道大断面公路隧道。隧道所在区为微丘地形,主要岩性为花岗岩和凝灰熔岩。花岗岩主要分布在进口段,其余地段为凝灰熔岩。隧道沿

线构造发育不甚强烈,对隧道影响较大的主要是 F4 断层从垭口中穿过,其余断层和大部分岩脉都分布在进口段。

目前隧道已经采用全断面开挖,开挖的掌子面为微~弱风化凝灰熔岩,其单轴抗压强度高,大于 80 MPa。对出口 KB11 + 138 ~ KB11 + 030 段进行了 TSP 探测(图 2),可以看出探测段凝灰熔岩的纵、横波速都相对较高,纵波速大于 5 000 m/s,横波速大于 3 000 m/s。在 KB11 + 080 ~ 054 段,纵波速几乎没有变化,横波速有所下降, v_p/v_s 增大,泊松比增大,表明该段岩体中含有裂隙水;KB11 + 054 ~ 043 段,纵、横波速, v_p/v_s 以及泊松比都降低了,纵波波速比横波速度降低幅度大,表明该段岩体裂隙或孔隙度增加,节理较为发育;其余段为岩体较完整,地下水不发育。

表 2 为 TSP203 预测结果与实际开挖对比,可见此次 TSP 的探测结果比较准确,探测结果与实际开挖一致,由此能说明 TSP 超前预报在围岩质量好的硬岩中预报的实用性。此次 TSP 的成功预报有以下几方面的原因:

一是被探测地段围岩整体质量好。弱风化和微风化凝灰熔岩抗压强度很高,大于 80 MPa,岩石致密,对波的吸收较小,波速很高,纵波速度在 5 000 m/s 以上。因此较完整凝灰熔岩的波阻抗较大;岩体中的节理带即是地震波的反射界面,围岩与节理带的波阻抗差较大,反射信号强。

二是预测区构造简单。在采取 TSP 探测预报之

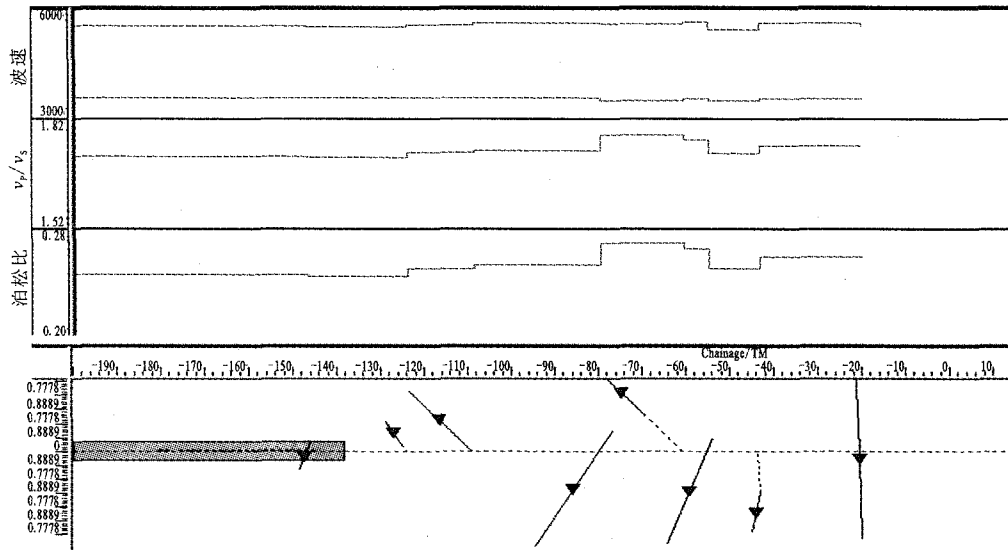


图2 天马山隧道 TSP 超前预报二维成果图

Fig.2 2-D production fig of TSP advanced forecast in Tianmashan tunnel.

表2 天马山隧道 TSP203 超前预报结果和开挖实际

序号	桩号	长度 /m	预测结果		实际开挖	
			描述	类别	描述	类别
1	BK11+138 ~ BK11+110	28	岩体轻微破碎,地下水不发育。	III	大块砌体结构,地下水不发育。	III
2	BK11+110 ~ BK11+80	30	岩体较完整,局部滴水。	III	大块砌体结构,少量地下水。	III
3	BK11+080 ~ BK11+044	36	岩体较破碎,节理裂隙相对发育,局部渗水。	IV	岩体呈碎块状,局部有渗水。	IV
4	BK11+044 ~ BK11+030	14	岩体较完整,地下水不发育。	III	大块砌体结构,少量地下水。	III

注:此表使用的是公路隧道设计规范(JTG D70—2004)中的围岩级别。

前,已对地表作了地质调查,由于构造简单,地表地推测能与实际较接近,这为 TSP 的解译提供参考依据。

三是探测距离短。TSP 的有效探测距离可达 150 m,在围岩质量好的地段可达 300 m。

4 结论

TSP 超前预报是利用人工激发的微型爆炸震源产生地震波,当地震波遇到前方的不良地质体时会产生反射波,根据反射波的延迟时间推算不良地质体的位置。反射波信号的强弱取决于界面两侧介质的波阻抗差值。软岩岩体与不良地质体的波阻抗差别相对较小,反射波信号较弱,TSP 的探测精度就会下降。尤其是在没有大规模不良地质体的软岩中,其预报精度较差。当波在质量好的硬岩中传播,围岩与不良地质体的波阻抗差别相对较大,反射波信号强,解译的结果也就相对准确。总之,TSP 在质量较好的硬岩地层中的预报效果要好于质量差的地层。

TSP 是目前较好的一种长期超前预报方式,有利于隧道的快速化施工。要提高其预报效果,尤其是在软岩中的应用效果,应结合其他预报方式进行

综合超前预报,这样才能为施工提供更加准确的信息。

[参考文献]

- [1] 马亢,徐进,王兰生. TSP 超前地质预报系统及其在雪峰山隧道的应用[J]. 华东公路, 2006, (5): 62-64.
- [2] 何刚,沙椿,丁陈奉,等. TSP-203 系统数据采集的改进方案[J]. 地球物理学进展, 2006, 21 (4):1332-1337.
- [3] 冯永,李永鸿,杜文哲. TSP 在隧道超前地质预报的应用研究[J]. 西北地震学报, 2006, 21(4):348-351.
- [4] 仵军胜. 地震波超前预报系统解译技术应用研究[J]. 国防交通工程与技术, 2005, (3): 65-69.
- [5] 孙兆来,罗琼,焦苍. 客运专线铁路大断面隧道地质超前预报原理及应用[J]. 隧道建设, 2007, 27 (1): 13-16.
- [6] 刘秀峰,刘志刚. TSP 解译及其功能扩展时应注意几个问题的探讨[J]. 石家庄铁道学院学报, 2003, 16 (1): 91-93.
- [7] 王齐人,杨天春. 隧道地质灾害超前预报的地震反射法[J]. 地球物理学进展, 2006, 21 (2): 643-649.
- [8] 肖书安,吴世林. 复杂地质条件下的隧道地质超前探测技术[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1 (2):159-165.
- [9] 单娜琳,程志平,刘云祯. 工程地震勘探[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [10] 刘志刚. 隧道隧洞施工地质技术[M]. 北京:中国铁道出版社, 2001.