

TSP超前预报数值模拟及其在山西某隧道中的应用研究

马瑞涛

廊坊市中铁物探勘察有限公司, 河北 廊坊

收稿日期: 2021年11月25日; 录用日期: 2021年12月9日; 发布日期: 2021年12月27日

摘要

在隧道开挖的过程中, 利用地震弹性波反射波法(Tunnel Seismic Prediction, TSP)对掌子面前方围岩的状况进行预报, 可以有效地防止事故的发生, 加快工程进度, 降低成本, 因此合理运用TSP超前预报系统对于隧道的安全施工具有重要意义。本文在介绍了TSP的基本原理的基础上, 开展了隧道前方含低速异常体的TSP超前预报数值模拟, 分析了异常体的地震波场响应特征, 随后总结归纳了波速的影响因素。随后以山西某隧道TSP超前探测为例, 推断了隧道前方的围岩情况, 并通过现场开挖情况分析了该方法的应用效果, 研究成果为该隧道以及类似隧道的安全施工提供有力保障。

关键词

TSP, 超前地质预报, 解释参数, 数据处理板

Numerical Simulation of TSP Advanced Forecast and Its Application in a Tunnel in Shanxi Province

Ruitao Ma

China Railway Langfang Geophysical Prospecting Co., Ltd., Langfang Hebei

Received: Nov. 25th, 2021; accepted: Dec. 9th, 2021; published: Dec. 27th, 2021

Abstract

In the process of tunnel excavation, Tunnel Seismic Prediction (TSP) is used to forecast the surrounding rock in front of the face, which can effectively prevent the occurrence of accidents, acce-

lerate the progress of the project, and reduce the cost. Therefore, the reasonable application of TSP advanced prediction system is of great significance to the safe construction of tunnels. On the basis of introducing the basic principle of TSP, this paper carries out numerical simulation of TSP advanced prediction with low velocity abnormal body in front of tunnel, analyzes the characteristics of seismic wave field response of abnormal body, and then summarizes the influencing factors of wave velocity. Then, taking the TSP advanced detection of a tunnel in Shanxi Province as an example, the surrounding rock situation in front of the tunnel is inferred, and the application effect of the method is analyzed through the field excavation. The research results provide a strong guarantee for the safe construction of the tunnel and similar tunnels.

Keywords

TSP, Advanced Geological Prediction, Interpretation Parameters, The Data Processing

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国基础建设的不断推进,在公路以及铁路修建过程中,隧道工程项目越来越多。而在隧道施工建设过程中,由于地形地质条件复杂,导致前期勘察准确度较低,施工过程中的塌方、大变事故频发。所以采用准确、快速的方法进行超前预报,获得隧道开挖前方的围岩情况,对隧道的安全施工具有重要意义。现阶段,常用的隧道超前预报方法有弹性波法(包括 TSP、TRT、TST 以及 TGP)以及电磁法(GPR 和 TEM)两大类[1]。弹性波法探测距离较大(一般大于 100 m),且对断层、裂隙等构造反映灵敏,其中 TSP 法数据处理和解释相对其他方法更加成熟,应用更加广泛。袁永才等利用 TSP 法准确预报了尚家湾隧道突水突泥等灾害源的规模与空间位置[2];贾金晓等在千枚岩隧道地区探讨了 TSP 法超前预报的特征以及解释标志[3];张杨等对 TSP 法在隧道超前预报过程中常见的干扰进行研究,并分析总结不同干扰因素在成果中的反映特征[4];李俊杰等分析了 TSP 法的探测精度,随后将其用于千岛湖配水工程灰岩地区隧洞超前预报中[5];吴小川采用 TSP 法和地质雷达相结合的超前预报技术成功地对万寿山隧道右线出口围岩等级进行划分[6];蔡盛分别在张吉怀铁路新华山隧道以及张吉怀铁路永顺隧道利用 TSP 法开展超前预报工作[7],以上研究工作和成果都为我国隧道施工安全提供了有力的保障。

尽管该方法已经广泛应用到全国范围内的隧道超前预报中,但实际上在隧道地质预报过程中,仍然存在一部分技术人员在为如何提高 TSP 法的准确性而大费周折,有时会出现数据处理解释准确性较差的问题,这就导致行业内认为 TSP 法的准确性距离要求还有差距,究其原因是多方面的[8]。首先,从 TSP 法的理论入手分析,大部分非专业人员对 TSP 法原理掌握的不够透彻,所以会盲目地提出一些较为苛刻的要求,比如要求探测岩溶的形状以及探测富水区含水量的大小等。但是由于方法局限性以及解释的多解性,TSP 法对于异常体的富水性探测能力较弱,所以需要正确的理论去指导超前预报工作。本文详细介绍了 TSP 法的基本原理,对于隧道前方存在低速异常体时,开展了有限差分数值模拟,结合波场快照以及地震记录分析了其地震波场响应特征,为 TSP 法超前预报实际工作中岩溶等异常体的识别提供了理论依据。在其基础上总结归纳了波速的影响因素,并以山西某隧道超前预报为例进行工程实例研究,以期能够对今后 TSP 法隧道超前预报工作提供一定的参考价值。

2. TSP 法的基本原理

TSP 法实质上就是地震反射波法, 其与普通的地震方法主要区别在于施工空间[9]。普通地震方法在地面施工, 是均匀的半空间模型, 目标体在测线的下方, 其主要反射信号来自地下; TSP 法在隧道中施工, 是不完全的均匀全空间模型, 这导致反射信号来自四面八方, TSP 法的目标体在测线的正前方, 在处理过程中要拾取掌子面前方的有用信号, 排除其他方向的干扰信号, 增加了处理与解释的难度。在实际 TSP 法施工过程中, 需要在掌子面后方隧道侧帮上布置一系列激发孔(一般是 24 个), 在隧道后方 50~55 m 范围内侧帮上对称布置接收孔。当在激发孔人工激发地震波后, 地震波会在隧道全空间地层中以球面波的形式传播, 当传播过程中遇到断层、陷落柱或者岩性分界面时, 介质的波阻抗会发生改变, 地震波会发生反射[10]。此时, 在接收孔中利用接收器就可以接收到由此产生的地震反射波, 如图 1 所示。

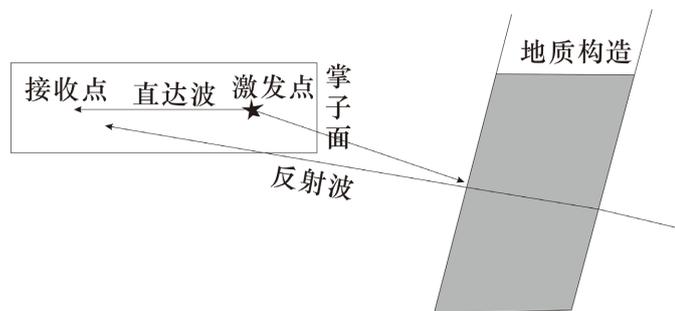


Figure 1. Operating principle of TSP system
图 1. TSP 系统工作原理

3. Tsp 法超前预报数值模拟

3.1. 弹性波有限差分方程

地震波场常用的数值模拟方法有射线追踪法、积分方程法、有限单元法以及有限差分法。其中有限差分法具有计算速度快、精度高、适合复杂模型等优点, 被广泛应用于求解波动方程[11]。因此, 本文采用有限差分法开展 TSP 法超前预报数值模拟, 该方法是利用差分近似的代替微分, 对波动方程进行离散处理, 得到任意时刻不同节点处的波场。对于二维情况, 速度 - 应力弹性波方程为[12]:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \end{cases} \quad (1)$$

其中, v_x 和 v_z 分别为 x 方向和 z 方向上的速度分量, ρ 为岩体的密度, λ 和 μ 为拉梅系数, t 为采集时间, τ_{xx} 、 τ_{zz} 和 τ_{xz} 分别为应力分量。

采用交错网格有限差分对上式进行离散, 计算时分别将速度和应力放在交错网格的节点上, 在分析了频散和稳定性条件之后, 在边界出采用吸收边界条件, 最终得到有限差分迭代公式[13]。

3.2. 数值模型及模拟结果分析

建立隧道前方存在低速异常体模型，二维模型尺寸为 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ ，隧道底板位于 105 m 位置处，高度为 10 m ，即顶板在 95 m 位置处；隧道长度为 80 m ，以模型边界为起点，掌子面位于横向 80 m 处。垂直低速异常体与掌子面的距离为 40 m ，该异常在二维剖面的横向位置为 $120\sim 140\text{ m}$ 、纵向位置为 $60\sim 140\text{ m}$ ，即低速异常体的宽为 20 m ，高 80 m ，如图 2 所示。围岩的具体物性参数如下：纵波速度为 4000 m/s ，横波速度为 2000 m/s ，密度为 1800 kg/m^3 ；隧道的物性参数如下：纵波速度为 340 m/s ，横波速度为 0 m/s ，密度为 1 kg/m^3 ；垂直低速异常体的物性参数如下：纵波速度为 1500 m/s ，横波速度为 600 m/s ，密度为 540 kg/m^3 。观测系统为：震源采用 300 Hz 雷克子波，采样长度为 0.02 s ，采样点数为 4000 ，采样间隔为 0.05 ms 。检波器和震源埋深在底板 2 m 深度处，偏移距为 15 m ，道间距 1.5 m ，检波器个数 24 个。

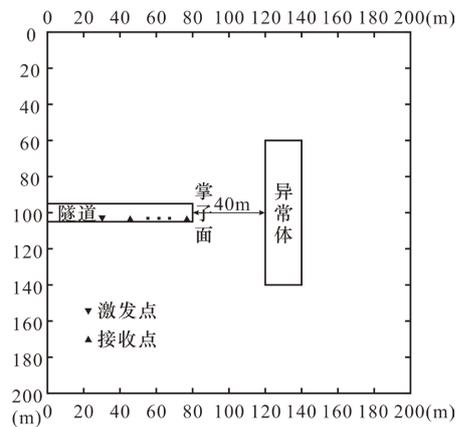
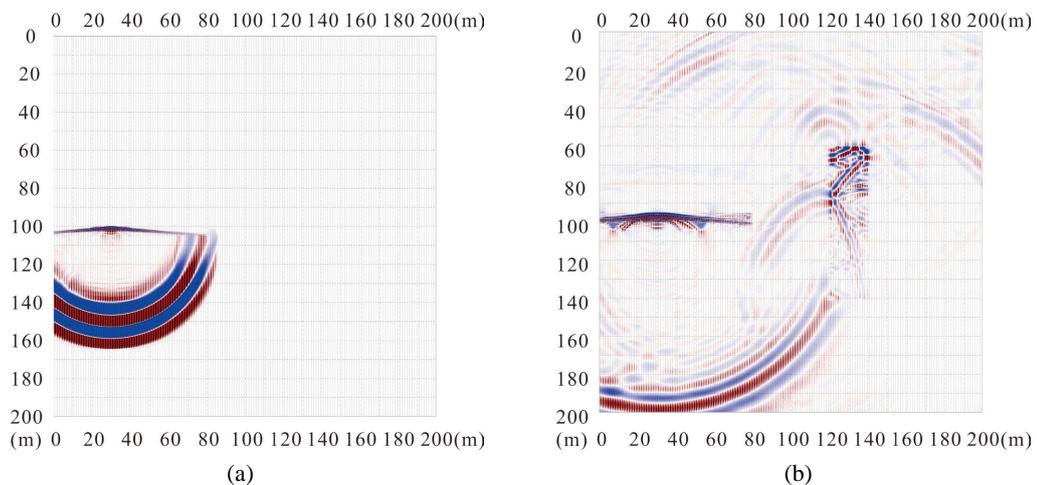


Figure 2. Schematic diagram of advanced forecast model
图 2. 超前预报模型示意图

通过数值模拟可以得到不同时刻波场快照 ($t = 0.01\text{ s}$ 、 0.026 s 、 0.05 s 和 0.08 s)，如图 3 所示。从图中可以看出，当地震波没有传播到异常体时 (图 3(a))，不会产生反射波，而随着地震波的传播到异常体时 (图 3(b))，在异常体处会出现反射波、透射波以及绕射波，且随着波的传播，会出现多次反射波 (图 3(c)、图 3(d))。图 4 所示为地震单炮记录，与波场快照显示一致，从地震记录中可以看到在 0.026 s 之前没有发现发射波，即地震波没有传播到异常体位置，随着采样时间增加，出现反射波以及多次波。对于隧道前方存在异常时的地震波场传播特征，可以为实际超前预报工作提供理论依据。



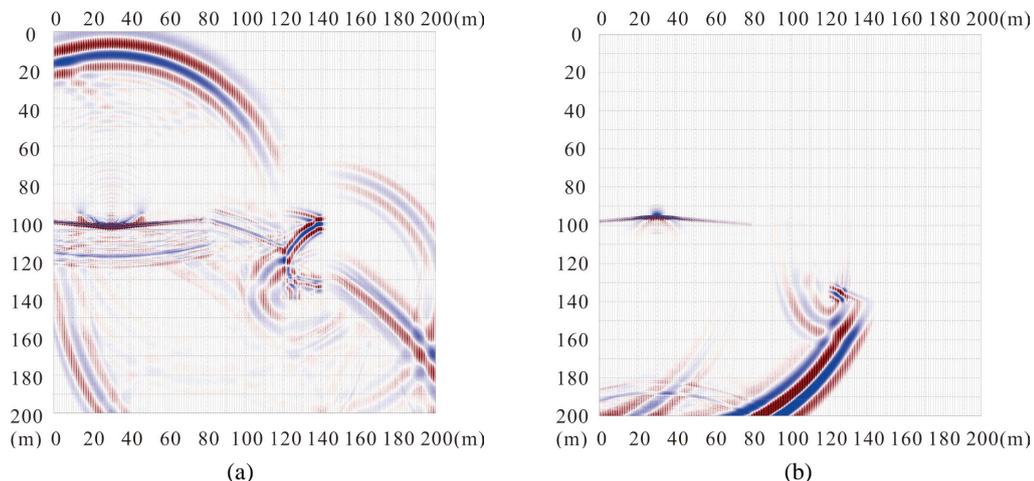


Figure 3. Wave field snapshot. (a) Wave field snapshot at 0.01 s; (b) Wave field snapshot at 0.026 s; (c) Wave field snapshot at 0.05 s; (d) Wave field snapshot at 0.08 s

图 3. 波场快照。(a) 0.01 s 时刻波场快照；(b) 0.026 s 时刻波场快照；(c) 0.05 s 时刻波场快照；(d) 0.08 s 时刻波场快照

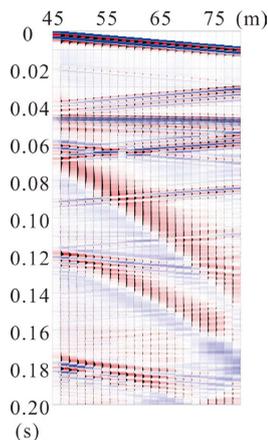


Figure 4. Seismic record

图 4. 地震记录

4. TSP 法超前预报影响参数分析

从上文数值模拟中可以发现，TSP 法最直观的参数就是波速，包括纵波速度和横波速度，如果定义纵横波波速比为 $A = v_p/v_s$ ，根据 TSP 法之间参数之间的关系，可以得到[14]：

$$\left\{ \begin{aligned} E &= \rho \cdot v_p^2 \cdot \frac{3 \cdot A^2 - 4}{A^2 \cdot (A^2 - 1)} \\ \sigma &= \frac{A^2 - 2}{2 \cdot (A^2 - 1)} \\ k &= \rho \cdot v_p^2 \cdot \frac{3 \cdot A^2 - 4}{3 \cdot A^2} \quad v_s \\ \mu &= \rho \cdot v_p^2 \cdot \frac{1}{A^2} \\ \lambda &= \rho \cdot v_p^2 \cdot \frac{A^2 - 2}{A^2} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中, E 为杨氏模量, ρ 为岩体的密度, v_p 和 v_s 分别是纵波速度和横波速度, σ 为泊松比, k 为弹性模量, μ 为剪切模量, λ 为拉梅系数。

从上式中可以发现其它参数包括泊松比、密度、动态杨氏模量等都是通过纵、横波速换算过来的, 所以波速准确与否非常重要, 如果波速不准确, 其他的参数也不准确了, 因此解释的基础参数应该还是纵波和横波的波速。而影响波速的因素较多, 本文从岩性、孔隙度、岩石的密度、岩石的地质年代、地层的埋深以及初至波波速六个方面对地震波波速的影响进行总结归纳, 为后续 TSP 法的数据解释提供理论依据, 具体见表 1。

Table 1. Summary of factors affecting seismic wave velocity

表 1. 影响地震波波速的因素总结

序号	影响因素	影响效果分析
1	岩性	对于不同的岩石来讲, 由于物性不同, 导致地震波波速也不同。 ① 不同成因的岩石波速不同: 火成岩和变质岩的波速要大于沉积岩的波速; ② 相同成因的岩石波速也不同: 几种常见的沉积岩波速从大到小依次为石灰岩、页岩、砂岩。 ③ 同一种岩石的波速并不固定: 受岩石的节理发育程度、风化程度、岩体的完整性以及强度等因素的影响, 会导致同一种岩石的波速发生改变。
2	孔隙度	由于岩石的波速大于水中和空气中的速度, 所以当岩石中的孔隙充填水或者是空气时, 其波速会减小。岩石的孔隙度越大, 地震波波速越小, 即地震波波速与岩石的孔隙度成反比。除此之外, 由于地震波在水中的速度要大于在空气中的速度, 所以当孔隙度一定时, 充填的空气越多时, 波速越小。
3	岩石的密度	岩石的密度与孔隙度有一定的联系, 当孔隙度越小, 即密度越大, 那么岩石的波速也就越大。通常情况, 采用如下的经验公式来描述岩石密度与地震波波速之间的关系: $\rho = 0.31 \cdot v_p^{0.25}$ 。
4	岩石的地质年代	通常情况下, 岩石的地质年代对地震波波速的影响如下: 地质年代越老, 波速越大。除此之外, 地震波波速还与构造运动有关: 在挤压力作用下形成的褶皱区具有较大的速度, 而在张力作用下形成的张性断裂则具有较小的速度。
5	地层的埋深	地层埋深实质是与岩石的密度呈正比, 因为随着地层埋深的增加, 受到上覆地层的重力作用下, 岩石的密度越大, 地震波波速也就越大。
6	初至波波速	由于在波速解释分析中, 往往参照初至波波速(炮孔段波速)对该段数据进行分析解释, 所以初至波波速的大小往往对后方探测的波速大小影响很大。因此, 在探测后方数据的处理解释过程中, 要注意不因波速的绝对值大小去判断, 重点参照波速的相对变化趋势去判断前方地层变化。

5. 工程实例

5.1. 工程概况

山西某隧道 2 斜 11+94.0~2 斜 10+58.0 段主要地层为黑云角闪斜长片麻岩, 局部花岗岩脉, 弱风化, 节理裂隙很发育, 岩体破碎, 呈碎石状压碎结构, 设计围岩级别为 IV 级。在隧道施工过程中, 发现掌子面局部呈雨滴状出水, 围岩稳定性差, 易掉块、坍塌, 所以采用 TSP 法对其进行超前预报工作, 查明该段范围内的工程地质及水文地质情况, 提供隧道施工建议, 保证本段工程合理顺利的施工。

5.2. 观测系统设计

在布置激发孔时, 只需要根据隧道内岩层的走向选择掌子面后方的左侧帮或者右侧帮一侧即可, 激发孔的布置角度为斜向底板方向 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$, 孔位高度为底板以上 1.5 m, 布置孔深为 1.5 m, 激发孔孔距为 1.5 m, 共 24 个。在距离掌子面最外侧的一个激发孔后方 15~20 m 位置处, 分别在左、右两侧帮对称布置一个接收孔, 孔位高度与激发孔一致, 布置孔深为 2 m, 观测系统布置如图 5 和图 6 所示。

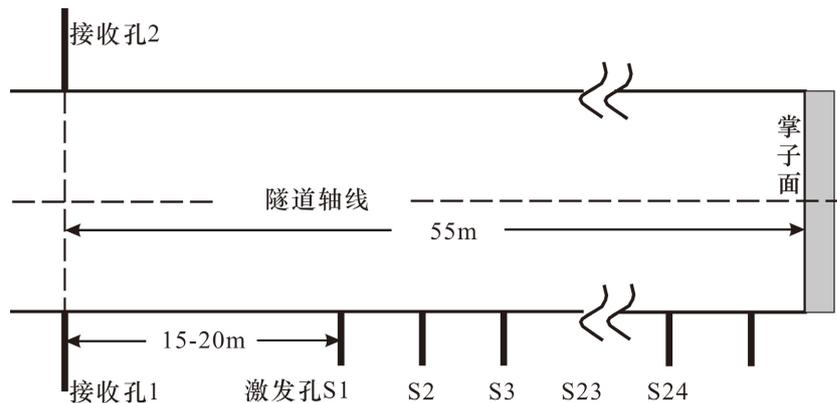


Figure 5. Layout of receiving hole and excitation hole
图 5. 接收孔和激发孔平面布置图

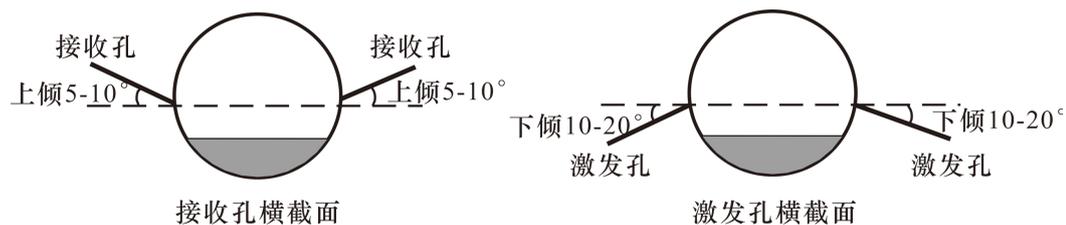


Figure 6. Section diagram of receiving and excitation holes
图 6. 接收孔和激发孔的截面图

5.3. 数据采集

在隧道 2 斜 12+53.76 的左、右边墙位置分别布置一个地震波信息接收孔, 孔径约为 50 mm, 孔深均为 1.92 m, 孔高分别为 1.05 m、0.95 m。在 2 斜 12+04.40~2 斜 12+39.56 段的左边墙, 按约 1.53 m 的间距布置 24 个激发孔分别激发地震波, 孔径约 40 mm, 孔深约为 0.75~1.90 m; 孔高约为 1.05 m, 每个激发孔装填的药量约 150 g。

5.4. TSP 法超前预报成果

图 7 所示为 Z 分量地震原始记录, 图 8 所示为 TSP 超前预报结果, 从图中可以看到: 1) 2 斜 11+94~2 斜 11+52 段纵波速度和泊松比呈上升趋势, 横波速度和动态杨氏模量呈下降趋势。推测该段围岩岩体破碎, 局部较破碎, 节理裂隙发育, 围岩稳定性差。2) 2 斜 11+52~2 斜 11+07 段纵波速度和泊松比呈下降-上升-下降趋势, 横波速度和动态杨氏模量呈上升-下降-上升趋势。推测该段围岩岩体破碎, 节理裂隙发育, 围岩稳定性差。3) 2 斜 11+07~2 斜 10+58 段纵横波速度和泊松比及动态杨氏模量均呈下降趋势。推测该段围岩岩体破碎, 节理裂隙发育, 局部节理裂隙很发育, 围岩稳定性差。

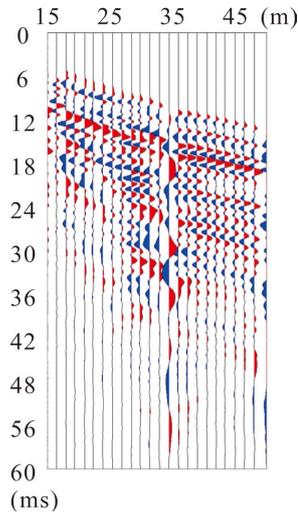


Figure 7. Measured seismic record
图 7. 实测地震记录

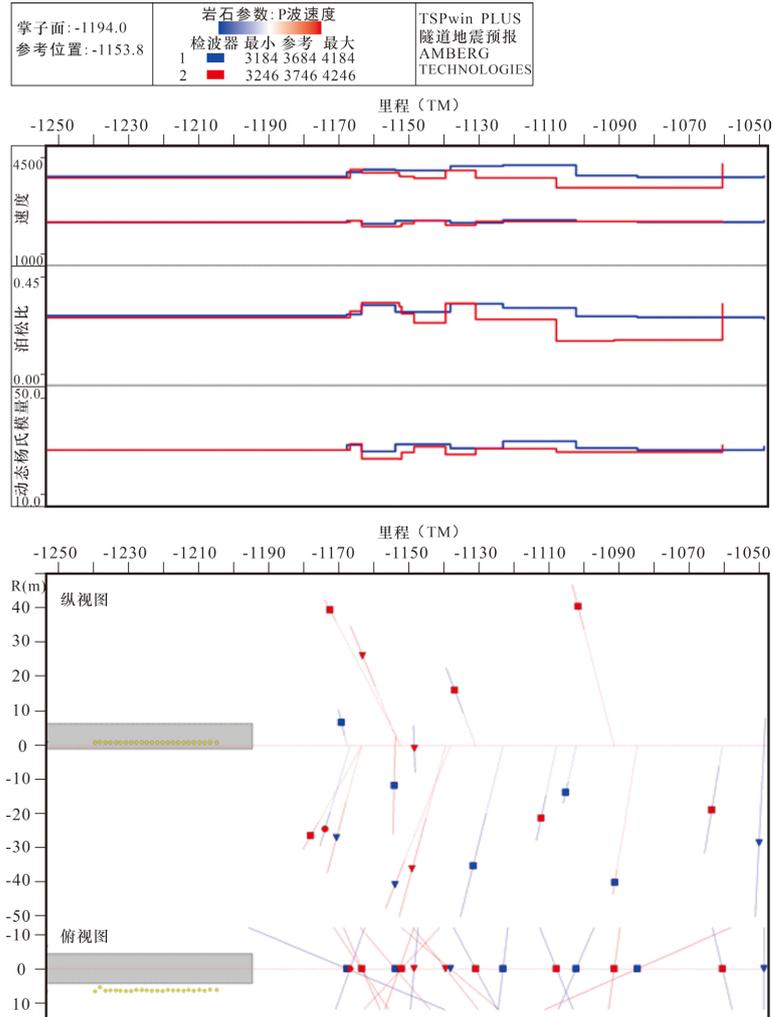


Figure 8. The forecast results of TSP
图 8. TSP 法超前预报成果图

5.5. 现场开挖验证情况

对于 2 斜 11+94~2 斜 11+52 段, 开挖揭示围岩为黑云角闪斜长片麻岩, 节理裂隙发育~很发育, 岩体破碎; 2 斜 11+52~2 斜 11+07 段, 开挖揭示围岩为黑云角闪斜长片麻岩, 节理裂隙很发育, 岩体破碎; 2 斜 11+07~2 斜 10+58 段, 当前开挖段落为黑云角闪斜长片麻岩, 节理裂隙很发育, 岩体破碎, 其中 2 斜 11+02 出现塌方。现场验证情况与解释成果基本一致, 表明本次超前预报结果准确。

6. 结论

通过介绍 TSP 法的基本原理和数值模拟, 总结了影响波速的因素, 结合工程实例可以得到以下结论。

1) 对比不同时刻的波场快照可以看到地震波在空间的传播特征, 以及由异常体引起的反射波和绕射波, 为 TSP 法在超前预报实际工作中的异常识别提供了理论依据。

2) 由于其他弹性参数包括泊松比、密度、动态杨氏模量等都是通过纵、横波速换算过来的, 所以解释的最基础的参数是纵波和横波的波速。而由于地域及岩性的差异, 同样的信号可能导致不同的解释结果。所以需要结合现场实际地质情况进行分析推断, 只有不断地将地震波的岩石力学参数与地质知识有机地结合起来, 才能更好地提高 TSP 探测的准确性。

3) 利用 TSP 法预报了山西某隧道 2 斜 11+94.0~2 斜 10+58.0 段的围岩情况, 并通过了现场开挖证明, 说明该方法可以准确预报出掌子面前方围岩破碎以及含水异常体, 对于类似隧道超前预报工作具有重要的借鉴意义。

参考文献

- [1] 李俊杰, 张红纲, 何建设, 等. TSP 探测精度分析及其在过江隧洞超前预报中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(4): 193-200.
- [2] 袁永才, 李术才, 李利平, 等. 尚家湾强岩溶隧道突水突泥伴生灾害源综合分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(1): 203-211.
- [3] 贾金晓, 李天斌, 孟陆波, 等. 千枚岩隧道破碎带 TSP 超前预报解译标志[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(6): 751-756.
- [4] 张杨, 杨君, 周黎明, 等. TSP 在隧道工程施工中的常见干扰和对岩体裂隙水及软弱夹层等的预报研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 892-899.
- [5] 李俊杰, 张红纲, 王伟, 等. 综合物探技术在灰岩地区隧洞超前预报中的应用[J]. 地质与勘探, 2019, 55(6): 1452-1462.
- [6] 吴小川. 综合超前地质预报技术在万寿山隧道施工中的应用[J]. 勘察科学技术, 2019(4): 58-61.
- [7] 蔡盛. 张吉怀铁路隧道超前预报技术应用研究[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1275-1280.
- [8] 吴回获, 侯小军, 曹小军. 提高 TSP 超前地质预报准确性的研究与对策[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(2): 484-490.
- [9] 樊一平. TSP 技术在隧道超前地质预报中的应用[J]. 水科学与工程技术, 2019(5): 75-77.
- [10] 周轮, 李术才, 许振浩, 李利平, 黄鑫, 何树江, 李国豪. 隧道综合超前地质预报技术及其工程应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2017, 47(2): 55-62.
- [11] 杨尚琴. 地震正演数值模拟仿真计算的并行优化设计方法[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 1290-1296.
- [12] 查欣洁, 高星, 王伟, 等. 隧道工程勘察中的超前预报成像方法研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(3): 1150-1156.
- [13] 谢守东, 史宏海, 王伟. 黄土隧道超前预报数值模拟与应用研究[J]. 公路, 2020, 65(11): 390-394.
- [14] 朱海龙. 影响 TSP203 隧道超前地质预报系统探测准确度的因素研究[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 82-87.