

客运专线铁路大断面隧道 TSP地质超前预报原理及应用

孙兆远, 罗琼, 焦苍, 李波, 刘建平, 何剑

(中铁隧道集团有限公司, 河南 洛阳 471009)

摘要: 介绍了 TSP超前地质预报的原理,结合客运专线合武铁路红石岩隧道,介绍了 TSP203超前地质预报的方法过程,并对预测结果进行分析。说明了 TSP超前预报技术在客运专线铁路隧道大断面开挖信息化施工、确保施工安全中的重要性 and 实用性。该项技术在合武铁路客运专线建设中取得了良好的效果并得到了广泛的应用。

关键词: 客运专线; 铁路隧道; TSP; 地质预报

中图分类号: U456 文献标识码: B

Principle of TSP Geology Prediction and Its Application in Construction of Large Cross-section Tunnels on Passenger-dedicated Railways

SUN Zhao-yuan, LUO Qiong, JIAO Cang, LI Bo, LU Jian-ping, HE Jian

(China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang 471009, Henan, China)

Abstract: The authors present the principle of TSP geology prediction system in the paper. On basis of the application of TSP 203 system in the construction of Hongshiyuan tunnel on Hefei-Wuhan passenger-dedicated railway, the authors describe the method and process of TSP 203 geology prediction and make analysis on the prediction results. It is demonstrated that TSP geology prediction technology has great importance and practicability in the information-aided construction of the large cross-section tunnels on passenger-dedicated railways so as to guarantee construction safety. TSP geology prediction technology has been widely used in the construction of Hefei-Wuhan passenger-dedicated railway and satisfactory results have been achieved.

Key words: passenger-dedicated railway; railway tunnel; TSP; geology prediction

0 引言

TSP超前预报方法 (Tunnel Seismic Prediction)是瑞士 Amberg工程技术公司最新研制并拥有专利的隧道地质超前预报探测系统。该系统从数据采集、处理和成果评估高度智能化,相对于其他地质超前预报手段具有适用范围广、预报距离长、对施工干扰小、提交资料及时、预报费用更低等优点。该技术的原理是一种隧道内反射地震方法,但处理方法有独到之处,设计时考虑到了可能的影响因素。由此限定的探测的理想测距为 100m。

文献 [1]中明确指出在客运专线铁路隧道施工中超前地质预测、预报是隧道信息化施工的重要组成部分,施工阶段应将超前地质预测、预报纳入正常的施工工序中,根据地质、水文变化及时调整施工方法和采取相应的技术措施。

由于我国的隧道大多处于地质条件复杂多变的区域,加上 TSP203对于我国的隧道施工是一种新的物

探仪器,还处于摸索和初步运用阶段,因此有必要对 TSP203的超前预报原理以及探测精度的提高途径作一介绍和探讨。

1 TSP203系统探测原理

1.1 理论基础

微型爆破引发的地震信号分别沿不同的途径以直达波和反射波的形式到达传感器,与直达波相比,反射波需要的传播时间较长^[2]。TSP203系统由测得的从震源直接到达传感器的纵波传播时间换算成地震波传播速度:

$$V_p = X_1 / T_1$$

式中: X_1 为爆破孔到传感器的距离, m; T_1 为直达波的传播时间。

在已知地震波的传播速度下,就可以通过测得的反射波传播时间推导出反射界面与接受传感器的距离以及在隧道断面的距离。其理论公式为:

收稿日期: 2006 - 04 - 20

作者简介: 孙兆远 (1969 -), 高级工程师,主要从事隧道及地下工程施工技术管理工作。

$$T_2 = (X_2 + X_3) / V_p = (2X_2 + X_1) / V_p$$

式中： T_2 为反射波传播时间； X_2 为爆破孔与反射界面的距离； X_3 为传感器与反射界面的距离。

地震反射波的振幅与反射界面的发射系数有关。在简单情况下,当平面简谐波垂直入射到平面反射面上时,其上的反射波振幅和透射波振幅分别为：

$$\frac{A_r}{A_i} = \frac{2V_2 - 1V_1}{2V_2 + 1V_1} = r$$

$$\frac{A_t}{A_i} = \frac{21V_1}{2V_2 + 1V_1} = 1 - r$$

式中： A_i 为入射波振幅； A_r 、 A_t 为反射波和透射波振幅； V_1 、 V_2 为反射界面两侧介质的速度； 1 、 2 为反射界面两侧介质的密度； r 为界面的反射系数。

当入射波振幅 A_i 一定时,反射波振幅 A_r 与反射系数 r 成正比。而反射系数与反射界面两侧介质的波阻抗 (V) 有关,且主要由界面两侧介质的波阻抗差决定。波阻抗差的绝对值越大,则反射波振幅 A_r 就越大。当介质 的波阻抗大于介质 的波阻抗,即地震波从较为疏松的介质传播到较为致密的介质时,反射系数 $r > 0$,此时,反射波振幅和入射波振幅的符号相同。发射波和入射波具有相同的极性。反之如果地震波从较为致密的介质传播到较为疏松的介质,即时,反射系数 $r < 0$,此时反射波振幅和入射波振幅符号相反,因此反射波和入射波的极性是相反的。从而清楚地判断地质体性质的变化。

TSP测量系统中采用高灵敏度的具有良好三维动态响应特性的传感器和 24位的 A/D 转换器保证该测量系统具有很宽的地震波的记录范围,从而可以预报很大范围内的地质条件。

1.2 反射界面的确定以及不良地质体规模的确定

TSP方法属于多波多分量高分辨率地震反射法。地震波在设计震源点 (通常在隧道的左或右边墙,大约 24 个炮点) 用小量炸药激发产生。当地震波遇到岩石波阻抗差异界面 (如断层、破碎带和岩性变化等) 时,一部分地震信号反射回来,一部分信号透射进入前方介质。反射的地震信号将被高灵敏度的地震检波器接收。数据通过 TSPwin 软件处理,便可了解隧道工作面前方不良地质体的性质 (软弱带、破碎带、断层、含水等) 和位置及规模。

其原理见图 1。

在点 A_1 、 A_2 、 A_3 等位置激发震源, 为不良地质体的俯角,即真倾角, 为不良地质体的走向与隧道前进方向的夹角, 为空间角即隧道轴线与不良地质体界面的夹角。产生的地震波遇到不良地质体界面 (波阻抗面) 发生反射而被 Q_1 位置的传感器接受,在计算时,利用波的可逆性,可以认为 Q_1 位置发出的地震波

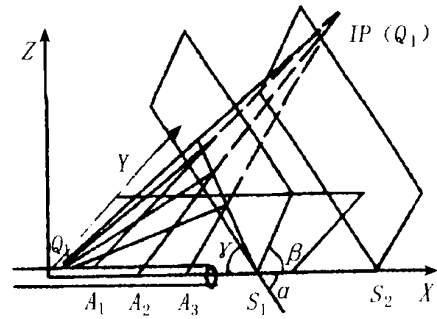


图 1 反射界面的确定和不良地质体规模的确定

Fig 1 Determination of reflection interface and scale of poor geological body

经过不良地质界面反射而传到 A_1 、 A_2 、 A_3 等点,这是可认为波是从像点 $IP(Q_1)$ 发出而直接传到 A_1 、 A_2 、 A_3 等点的。此时的 Q_1 和 $IP(Q_1)$ 是关于不良地质界面 (波阻抗面) 对称的。由于 Q_1 、 A_1 、 A_2 、 A_3 的几何点的空间坐标已知,由联立方程可得像点 $IP(Q_1)$ 的空间坐标。由 Q_1 和 $IP(Q_1)$ 的空间坐标求出两点所在直线的空间方程,由于不良地质界面是线段 $Q_1 IP(Q_1)$ 的中垂面,所以可以求出该不良地质界面相对于原点 Q_1 的空间方程,进一步可以求出不良地质界面与隧道轴线的交点和隧道轴线与不良地质界面的交角。通过求出的不良地质体两个反射面在隧道中轴线上的坐标 S_1 和 S_2 ,从而求出不良地质体的规模。

$$S = / S_2 - S_1 /$$

总之,TSP - 203 探测是根据地震波,人工制造一系列有规则排列的轻微震源,形成一个地震源断面,同时,三维地震波接收器在计算机的监控下采集这些震源所发出地震波沿隧道前方及四周区域传播而遭遇不良地质体 (如地层层面、节理面,特别是断层破碎带界面和溶洞、暗河等) 被反射返回的地震波数据。这些回波信号的传播速度、延迟时间、波形、强度和方向是与相应的不良地质体的性质和分布状况紧密相关的。在一定间隔距离内连续多次采用上述方法,可以得到前方地层的地质力学参数,如杨氏模量和横向变形系数等,如图 2 所示。

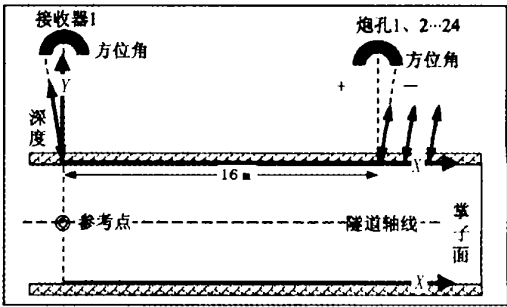


图 2 TSP - 203测线布置示意图

Fig 2 Arrangement of TSP-203 geology p prediction system

2 工程概况

新建铁路合肥至武汉站前工程第三标段位于安徽金寨县及湖北麻城境内,里程范围为 DK163 + 000 ~ DK212 + 300,正线长 49.3 km。其中红石岩隧道工程位于安徽金寨县境内天堂寨至墩义堂区间,起讫里程为 DK181 + 373 ~ DK189 + 230。全长 7 857 m,是合武铁路的控制性工程。

红石岩隧道地层主要为 Anczf 前石炭纪佛子岭群诸佛庵岩组, Dgn 新元古代斑竹园片麻岩套东湾组, Qgn 新元古代斑竹园片麻岩套桥口组, Qgn 大别变质表壳组合。岩层主要为碎石土,角闪斜长片麻岩,二长片麻岩,二长变粒岩。

3 超前地质预报的应用

3.1 钻孔注意事项

钻孔前,必须用测量仪器测定检波器孔和炮孔的位置,检波器孔和炮孔在同一水平面上,并用红油漆作标记。炮点要标记序号。

严格按设计要求(距离、孔深、倾角等)钻孔。

若测定的位置无法钻孔,可在以测点为圆心,半径 20 cm 的范围内钻孔。

注意选择检波器孔的位置,不能在松散围岩中,可在以设计接收点为中心左右 1.0 m 的范围内钻孔。检波器孔身要直。孔内岩屑和泥浆要用水冲出孔外。

注意保护炮孔,成孔条件好的,孔内岩屑和泥浆要用水冲出孔外,以免药包放置不到位。成孔条件差的,完钻后要将柱状物(锚杆等)留在孔中,防止围岩掉块。

3.2 探测过程

于 2006 年 4 月 13 日 17:00 时在红石岩隧道正洞出口进行 TSP 超前地质预报做准备工作,布置炮孔和接收器孔,18:00 开始采集数据,于 20:30 时结束。

接收器位置在 DK188 + 484,掌子面位置为 DK188 + 433,设计为 24 炮,2 个接收器同时接收。通过试验,确定采用药量为 30 ~ 75 g 乳化炸药。数据采集时采用 X - Y - Z 三分量接收,采样间隔 62.5 μs,记录长度 451.125 ms(7 218 采样数)。

实际激发 28 炮,所记录的有 24 炮合格,可用于数据处理和解释。

3.3 预报结果分析处理

接收到的信号经过处理得到不同形式图,图 3、4 是由软件处理后的结果。

由图 3、4 可以看出,红石岩隧道掌子面前方(DK188 + 433 ~ + 283 段)围岩整体较完整,但存在大约 10 条地质裂隙缝,DK188 + 420 ~ + 370 段,裂隙缝较为密集约为七条,预计该段在开挖过程中可能会有

局部涌水。

由图 4 还可以形象直观地看出裂隙缝的位置和走向,以及裂隙与隧道的相对关系,为下一步隧道开挖工作提供了可以参考的依据。

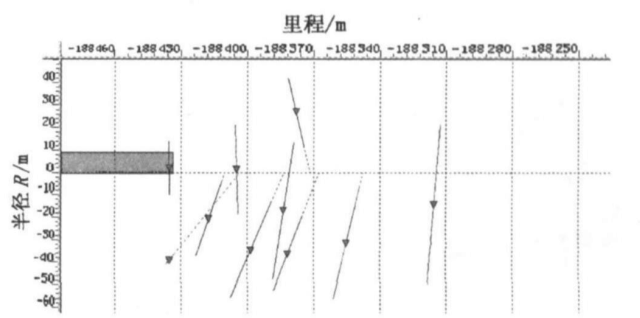


图 3 超前预报二维结果图

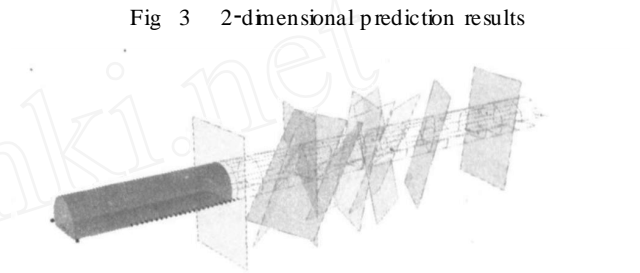


图 4 超前预报三维结果图

探测物理参数见表 1。由表 1 可以看出,TSP 地质超前预报能够提供围岩的岩弹性纵波传播速度、泊松比、密度、剪切模量、弹性模量等相关的围岩物理参数,较为详细地体现了前方围岩的物理属性,为隧道动态设计提供参考依据。

表 1 探测物理参数

Table 1 Physical parameters of surrounding rock mass obtained by TSP prediction

序号	波类型	里程 /m	传播速度 / (m/s)	泊松比	密度 / (g/cm ³)	剪切模量 / GPa	弹性模量 / GPa
1	P	- 188 435.1	6 200	0.24	3.04	40	85
2	P	- 188 404.8	6 205	0.25	3.02	39	83
3	P	- 188 367.7	6 414	0.24	3.10	44	94
4	P	- 188 314.4	6 303	0.24	3.07	42	90

由表 1 可以看出,DK188 + 435.1 ~ + 314.4 段(长约 120.7 m)的隧道围岩各项物理参数,由传播速度可以得出,该段围岩弹性纵波传播速度最低为 6 200 m/s,远远大于文献[1]所规定的Ⅱ级围岩的岩弹性纵波传播速度 4 500 m/s,表明该段隧道围岩为Ⅱ级。

4 结论

在超前预报中使用 TSP - 203 时,要注意避开各种震动干扰,以保证获得第一手资料的可靠性。

在数据处理及解译过程中,必须结合前期勘察资料,工程中的使用已证实 TSP - 203 的较好的预报效

果。同时由于地质体本身的复杂性,要准确确定地质体类型还需要提高仪器精度并配以其他物探方法相互印证,做到“长短结合、以短为主”。

TSP - 203可以预报隧道掌子面前方 20 ~ 100 m 范围的地层状况,它具有预报距离远,分辨率高等优点,最适合长期,长距离隧道开挖超前地质预报。

隧道开挖过程中,必须采用超前预报、超前地质探孔等方法,以确保隧道通过不良地质段的安全。

参考文献:

[1] 中铁一局集团有限公司. 客运专线铁路隧道工程施工技

术指南 [M]. 北京:中铁铁道出版社, 2005.

[2] 肖宽怀. 隧道地质超前预报研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2003, 18 (3): 460 - 464.

[3] 刘秀峰. 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 - 94.

[4] 温树林. TSP 203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.

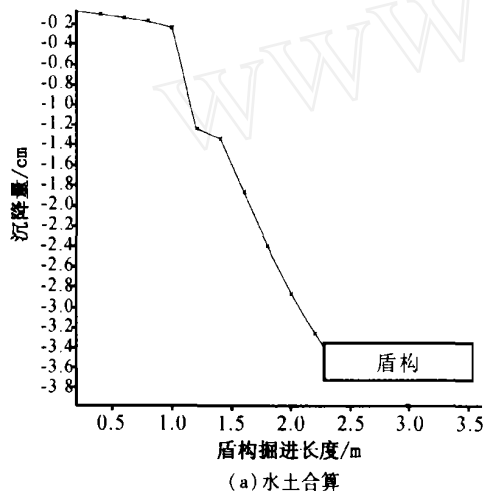
[5] 曾昭璜. 隧道地震反射法超前预报 [J]. 地球物理学报, 1994, 37 (2): 218 - 230.

[6] 李忠. 提高 TSP - 202超前预报系统探测距离的技术措施的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (3): 472 - 475.

(上接 12页)

4m,开挖面泥水压力按加固地层取值明显偏小,其泥水压力设定应考虑非加固地层的影响,其取值最好按非加固地层计算,以减小地表沉降。

受加固区与地面建筑影响,盾构始发段地层应



力状态非常复杂,而泥水压力设定采用简单理论计算值,与实际地层压力分布差别较大。在进行开挖面压力管理时,必须根据地表沉降监测决定管理值,并及时进行调整。

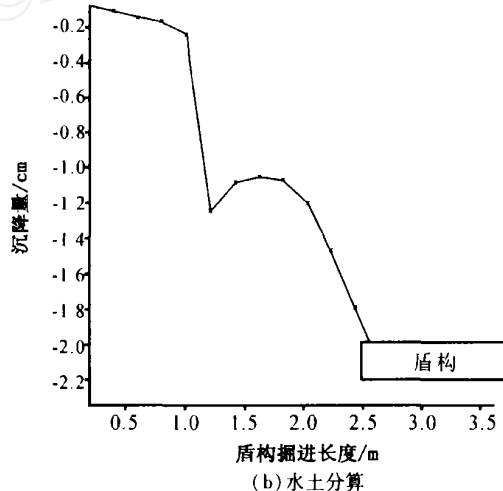


图 9 24m处地表沉降历程曲线

Fig 9 Time-dependent curves of surface settlement 24m away from launching shaft

对于泥水盾构而言,在黏土地层施工时,黏土极易在刀盘底部沉积,堵塞排泥浆口或排浆管,引起泥水舱压力不正常上升,泥水压力非常难以控制与调整。施工过程中必须采用相应的对策,但一定要控制泥水压力上限值不要超过采用水土分算所得到的值。泥水压力一旦超过黏土的被动土压值,引起地层破坏,极易产生地层冒浆,引起较大的地表沉降,危及周边建筑物安全。

加强壁后注浆管理,控制地基变形。最好是使用有早期强度的壁后注浆材料,采用同步注浆方式进

行施工。

参考文献:

[1] [日]土木学会. 盾构标准规范(盾构篇)及解说 [M]. 朱伟,译. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.

[2] 张凤祥. 盾构隧道 [M]. 北京:人民交通出版社, 2004.

[3] 张云. 盾构法隧道的位移反分析及其工程应用 [J]. 南京大学学报(自然科学), 2001, 37 (3): 334 - 341.