

南水北调西线工程深埋隧道地质超前预报系统研究的思考

薛云峰^{1,2}, 何继善¹, 郭玉松²

(1. 中南大学信息物理工程学院, 长沙 410083; 2. 水利部黄河勘测规划设计有限公司, 郑州 450003)

摘要 深埋长隧道是南水北调西线工程施工中的难点, 隧道地质超前地质预报可分为施工前地质预报和施工阶段地质预报, 目前施工前地质预报应用的可控源音频大地电磁法及施工阶段应用的地质雷达、TSP、红外辐射测温技术有一定的效果, 但是针对南水北调西线工程这样复杂的岩层, 必须对现有的预报方法进行改进。

关键词 南水北调西线工程, 深埋隧道, 地质预报系统

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2006)03-0993-05

Advance Geological Prediction System Research Used in Deeply Buried Tunnel Project of South-to-North Transfer Water

XUE Yun-feng^{1,2}, HE Jj-shan¹, GUO Yu-song²

(1. School of Info-physic and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Huanghe Design Ltd. Zhengzhou 450003, China)

Abstract The construction of deeply buried tunnel is a difficult problem in west line project of south-to-north transfer water. Geological prediction is divided into two stages: predictions before construction and under construction. The techniques used now include CSAMT, GPR, TSP. The infrared ray are efficient in some cases. But they need to be improved in order to fit complicated rock stratum of the west line project of south-to-north water transfer.

Keywords west line project of south-to-north water transfer, deeply buried tunnel, geological prediction system

1 南水北调西线工程特点

南水北调西线工程, 是从位于青藏高原的大渡河、雅砻江、通天河向黄河中上游地区调水的宏大工程, 是解决我国西北六省区用水和黄河生态用水的重大举措。与国内外已经实施和正在规划研究的跨流域调水工程相比, 南水北调西线工程可谓当今世界上规模最大的调水工程, 具有调水量最大、水源点最多、调水线路最长、受水区最广、配套工程建设任务最重的特点。特殊的地理、气候条件及地质条件的复杂性也决定了南水北调西线工程是当今世界上难度最大的调水工程; 调水区的低气压、缺氧和寒冷构

成了调水区的气候特点, 使得工程的勘察、规划、设计和施工工作困难重重; 调水工作区的陡倾角岩层、褶皱、断层的异常发育, 以及多年冻土和季节性冻土的普遍存在, 将会给工程带来一系列棘手的问题。尤其是深埋隧道的高温、高地应力、断层破碎带、涌水、有害气体问题等, 仅第一期工程隧洞总长 244.10 km, 分为 7 段, 其中最长洞段为 73 km, 最大埋深 1100 m, 由此可见, 深埋深、长隧道的施工是第一期工作中的难点, 也是跨流域调水工程必须面对的问题^[1]。

收稿日期 2005-07-10; 修回日期 2005-08-20.

基金项目 水利部“948”项目资助。

作者简介 薛云峰(1967—), 男, 高级工程师, 中南大学博士研究生。1989 年至今在黄河勘测规划设计公司从事工程地球物理生产和科研工作, 发表论文 10 余篇。

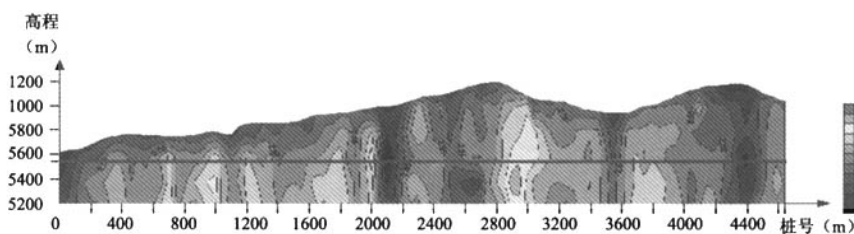


图1 南水北调西线工程 CSAMT 法推断解释断面图

Fig. 1 Explained and deduced section used CSAMT of west line project of south-to-north water transfer

2 施工前地质预报的作用及方法分析

隧道设计与施工之前,要对拟建隧道的工程地质条件进行详细勘察,有关地质资料是在地表利用地面勘探、地质调查、地球物理方法获取,称为施工前地质预报,这是隧道选线避开大的区域地质构造、查明主要断层构造的宽度和走向、并对构造的赋水性进行初步评价的有效手段,也是地球物理在该阶段地质预报的主要内容。

施工前地质预报值得推崇的地球物理方法是可控源音频大地电磁法(CSAMT)。该方法是20世纪80年代兴起的一种电磁勘探技术,它使用可控制的人工场源,测量参数为电场与磁场之比得出的卡尼亚电阻率;同时,基于电磁波的趋肤深度原理,利用改变频率进行不同深度的电测深。20世纪80年代末,加拿大凤凰公司根据这一理论研究制造了CSAMT的测量仪器并向全球推广应用。目前,这一技术领域的理论方法、仪器设备、野外数据的采集、室内资料的处理和解释等方面已取得了大量的研究成果,并在地下水资源勘查、地热勘查、工程物探、油气的直接检测、金属矿勘查、煤田地质灾害预测等领域的实际应用中取得了显著的成果^[2~5]。近几年,结合南水北调西线工程调水线路隧洞的探测,就应用可控源音频大地电磁测深(CSAMT)技术进行断层深部特征的探测问题进行了分析和研究,取得了80km长的电阻率拟断面图,图1为南水北调西线工程深埋隧道CSAMT法推断解释断面图。研究表明,可控源音频大地电磁测深法在进行岩性分类、探测断层深部发育情况、指导深部钻孔布置等方面发挥了较大作用。尽管如此,但是对于南水北调西线工程这样沟谷深切、断崖纵横、地质构造复杂、地层陡倾角的高原地区,解决1000 m以内的构造、岩溶、岩层划分等问题,可控源音频大地电磁法仍存在

一些技术难题,比如近场效应、各向异性、静态效应、分辨能力、探测深度等难题。

(1) 近场效应

CSAMT是人工场源频率测深,其场源是人为可控的,因此,必然引出可控范围的有限性。当收发距 r ,工作频率固定,非均匀的电导率将改变电磁波传播的场区范围,并且是预先不好预测的,往往在野外高、中频数据较有规律,到了低频数据质量明显受到影响,是一种不满足波区条件的非平面波影响。如何判断信号已进入近区、过渡带,目前还没有明确界定的办法,需要根据岩层的电特征性作深入研究。另外该方法的场源与接收之间受5倍以上趋肤深度的约束,在地形复杂多变的山区,有的地方很难找到合适的场地布置场源。

(2) 各向异性

所谓各向异性介质,是指同一测深点沿不同方向具有不同导电性的大地介质,这对于南水北调西线工程这样高倾角的砂板岩互层地区是普遍存在的。然而CSAMT电磁测深最基本的公式是在均匀各向同性大地介质条件下推导出的地面电磁测量与大地电阻率的关系。这与实际的地质模型相差甚大,如在野外实际工作中,经常遇到的地质问题是背斜或向斜构造,以及断层等问题,它们的电性分布沿走向和倾向两个方向变化,其地质模型属于二维,更一般模型是电性沿任何方向都不均匀的三维地质模型,这就需要从各向异性介质中大地电磁场入手,引出导电率张量和阻抗张量的概念,再进一步研究水平不均匀介质中大地电磁测深的理论。

(3) 静态效应

静态效应主要是局部电性不均匀体引起的集流效应或是不均匀体上产生的附加稳定电场。由于南水北调西线工程处于地形起伏大、浅部电性不均匀的山区,这样CSAMT在应用中所受到的静态效应

的影响要大得多,如果在资料的处理和解释中不加分析和消除,将会得到错误的结论.如何在资料的处理过程中,识别、压制和消除静态效应一直是大地电磁测深法资料处理人员的一个棘手问题,到目前为止,可以说仍没有一个广泛实用、能完全消除静态效应的方法,这就需要进一步认识静态效应的物理实质及特点,研究静态效应的识别、消除新方法.

(4) 分辨能力

CSAMT 分辨能力系指对探测的目标体在横向和垂向上可识别的能力.分辨能力的大小受多种因素的影响,对于垂向分辨率:它与待测目标体的横向几何尺寸、厚度、埋深,目标体与围岩之间电性差异,以及工作频率等诸多因素有关;二维与三维目标体的横向分辨率与待测目标体大小,深度和电导率有关,且还是电场偶极距和方向的函数,当目标体相对电场偶极距要大时,其分辨率相当于一个等效层,反之,当目标体比电场偶极距小时,由于测深是目标体与围岩的总体平均值,则分辨率将明显下降;还有一种情况,若目标体导电性相当好,尽管电场偶极距比它大,仍然可以探测到它的反映,但不能确定它的位置.针对高倾角非均匀的岩层,如何用定量的方法去描述分辨率,进一步分析影响分辨率的相关因素,确定有效地质预报要求选择偶极的尺寸与所预期的最小目标的尺寸,对于提高探测效果具有十分重要的意义.

探测深度:根据电磁波的趋肤深度的定义式

$$\delta = 502 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (m), \quad (1)$$

可知: δ 与电磁波在大地介质中穿透的深度有关,但是,它并不代表实际的有效探测深度.应该说,探测深度 D 是比较模糊的概念,它泛指某种探测方法的体积平均探测深度.目前电磁测深中,引用探测深度较多,且较好的经验公式为

$$D = \frac{\delta}{\sqrt{2}} = 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (m). \quad (2)$$

该式说明,有效探测深度取决于两个参数:大地电阻率和使用的工作频率.从理论上而言,给定某一地区的大地介质的电阻率,便可以确定要达到给定目标体所要求的探测深度的工作频率范围.实际上并非如此,有效探测深度还与观测系统、噪声条件、大地电阻率等诸因素有关.观测系统主要从两方面影响探测深度:其一是频率范围,例如 V-6 系统的人工源的频率范围是 0.25~8192 Hz,当电阻率为 100 $\Omega \cdot m$,其最大探测深度在 5.1 KM,最小探测深度

39 米,事实上,还有场源到测线的距离制约 CSAMT 的探测深度;其二是最小可分辨信号的大小,探测微弱信号的能力越强,则探测深度愈大;另外趋肤深度定义式是在均匀半空间条件下推导出来的,对非均匀各向异性介质条件,探测深度将是一个“模糊概念”.所以,在实际工作中,对资料进行反演求出的深度就会产生偏差,如在高阻目标体上,推测的深度往往偏大,对低阻目标体,推测的深度往往会偏小.

3 施工阶段地质预报的作用及方法分析^[6~12]

由于岩体的复杂性,使得隧道施工前地质预报所获得的资料与隧道开挖后实际揭露出来的情况可能会有较大的出入,施工中经常出现预料不到的塌方、冒顶、涌水等事故,这些事故一旦发生,轻则影响工期,增加工程投资,重则砸毁机械设备,甚至造成人员伤亡,如何解决这一难题,备受世界各国隧道工程界的关注,隧道施工地质超前预报正是在这种情况下提出的.隧洞施工地质超前预报,就是利用一定的技术和手段收集隧道所在岩体的有关资料,并运用相应的理论和规律对这些资料进行分析、研究,从而对施工掌子面前方岩体情况或成灾可能性做出预报.其内容主要为:断层构造及断层破碎带,岩溶、空洞、裂隙及其规模和充填情况,地下水赋存状态及可能突水、涌水的位置以及水量的大小,软弱围岩及不同类别围岩的界面等.

目前施工阶段地质预报常见的地球物理方法可归为电磁波反射法、地震波反射法、红外辐射测温等.地质雷达 (Ground Penetrating Radar, 简称 GPR) 是基于地下介质的电性差异,向隧道掌子面前方发射高频电磁波(主频为数十兆到数百兆赫兹),当其在传播过程中遇到不同目标体(断层、溶洞、裂隙等)的电性界面时,就会有部分电磁波能量被反射接收,通过对各测点的连续观测,经过数据处理得到地质雷达剖面图像,根据反射波组的波形、强度及反射时间,确定目标体的性质及位置,从而对隧道掌子面前方的地质灾害进行预报.其优点为分辨率高、无损伤、探测和数据处理速度快、可对隧道一定范围内进行全方位探测;但是影响其预报结果的因素也比较多,如天线的布置方向、工作的频率、介质的物理性质、电磁波的散射、鉴别图像的经验与能力等.一般情况下只能预报掌子面前方 40—50m 处的工程地质、水文地质条件,而较准确预报的距离

只有十几米。TSP 法 (Tunnel Seismic Prediction) 是由瑞士安伯格测量技术公司为隧道及地下工程施工期地质预报研制开发的一套超前预报系统,它是利用地震波在不均匀地质体中产生的反射波特性和来预报隧道掘进面前方及周围邻近区域不良的地质状况,它是在掌子面后方边墙上一定范围内布置一排爆破点,依次进行微弱爆破,爆破引发的地震波在岩体中以球面波的形式向四周传播,遇到隧道前方的地质界面时,将有部分波从界面处反射回来,TSP 测量系统用一对接收传感器对这些信号进行采集和记录,并通过专用的软件对其分析评价。其优点为:适用范围广,即适用于极软岩至极硬岩的任何地质情况;预报距离长,理论上能预报掌子面前方 500 m,考虑地震波干扰等因素能准确预报掌子面前 100~350 m;对隧道施工干扰小,探测时间短,提交资料及时。由于 TSP 有如上诸多优点,所以它的出现解决了工程界对超前预报的诸多难题,从而代表了当今世界隧道施工超前预报的最先进技术。图 2 为 TSP 对某隧道的预报结果图。红外辐射测温预报含水层的物性基础为地球上部岩体的温度主要受地球地热场的影响,在一定深度上的水平方向上,地热场的平均变化微小,因此,在隧道开挖的水平方向上可视为均匀温度场,温度变化为零(正常场)。但当开挖掌子面前方存在含水地层(溶洞、裂隙水等),且该含水层与岩体存在温差时,岩体中将产生热传导和对流作用,温度场不再为恒温场,而将产生温度异常场,在一定的距离和观测精度条件下,掌子面上存在着温度差异,利用红外辐射测温方法测定这种温度变化差异,可为含水层的超前预报提供依据。因此,研究岩体中含水层温差引起的温度异常场的分布规律,对该方法的探测能力、资料解释都是极其重要的。目前该方法仅能定性预报隧道掌子面前方短距离(30 m)含水的可能性,仍需进一步深入其理论基础的研究,改进探测手段,以满足长大隧道施工中要求定量或半定量预报含水量的需求。

实际工作中,由于隧道内供观测的空间位置有限、干扰因素较多、研究的目标体复杂、数据处理简单,因而要准确和可靠性地达到预报的要求难度还较大。针对南水北调西线工程这样复杂的岩性,要想提高超前预报的精度,必须对现有的超前预报方法进行改进,特别是观测方法上要扩大观测的有效方位角,获得三维空间波阵面数据、提高定位精度;在资料分析处理上,要建立不同地质界面的特征识别模式,提供更可靠的岩体类别识别和量化指标,提

高判别准确性;综合使用多种超前地质预报方法,利用各种方法的优点,从不同的物性特征研究不同类型的地质灾害,提高预报的可靠性;以地质超前预报实际数据为基础,设计超前地质预报管理信息系统,充分利用好各种预报结果并及时、准确、方便的处理预报过程中的大量数据,做出科学的预报决策。

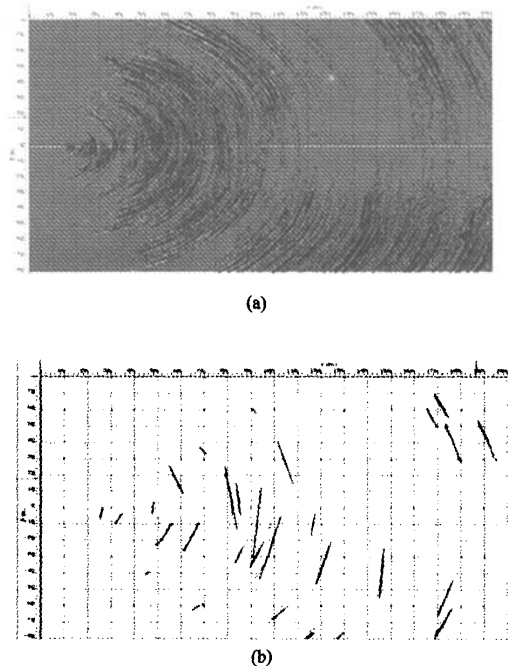


图 2 TSP 对某隧道预报结果

(a)P 波深度偏移剖面;(b)提取的反射界面

Fig. 2 Forecast result used TSP of a certain tunnel

(a)Migrated depth section of P wave; (b)extracted reflection interface

4 南水北调西线工程深埋隧道地质预报系统研究的基本思路

(1)南水北调西线工程深埋隧道区域地质调查和资料的搜集,初步进行隧道隧洞所在地区不良地质的宏观预报,预报洞体施工可能遇到的不良地质类型、规模、大约位置和方向,施工地质灾害的类型和发生的可能性。

(2)收集分析隧道所在区的地震、电法、硐室及综合测井资料,分析归纳出不同岩性的物理参数,同一岩性不同类别的物理参数,提出开展隧道超前地质预报的有利和不利条件。

(3)施工前地质预报方法的试验研究,主要是 CSAMT 方法的理论分析、现场观测系统的设计、静

态效应近场效应的分析及改正软件的编制,高倾角各向异性地层地电场的理论研究、探测深度及分辨能力的研究,地层的岩性、断层破碎带、地层的富水性、与电性参数之间关系的研究。

(4)施工期地质预报各种地球物理方法的理论、观测系统、及资料处理方法的研究,分析各种方法的优缺点,优化选择一套适合西线南水北调深埋隧道施工阶段地质预报的方法技术,并对这些方法作深入研究。

(5)以地质超前预报实际数据为基础,设计超前地质预报管理信息系统,建立专门的数据库,借助现代化的计算机和网络技术,对超前预报数据进行信息管理,实现数据的共享。

(6)查阅、研究、搜集国内外有关深埋隧道超前地质预报的方法技术及工程经验,结合工程实例及验证资料,从理论和方法技术上分析各种方法的优缺点,并对存在的问题提出独到的见解和改进方法,通过现场试验、资料分析及实际验证,优化选择一套适合西线南水北调深埋隧道地质预报的系统方法。

参 考 文 献 (References):

[1] 胡鑫凡.南水北调西线第一期工程施工设计[J].人民黄河,

2001,23(10):14~15.

- [2] 丁恩保. 隧道工程地质预报探讨[J]. 工程地质学报. 1995,3(1):28~34.
- [3] 李金都,王学潮. CSAMT 新技术探测南水北调西线工程区断层研究. 2004,26(1):42~43
- [4] 吴路萍,石昆法. 可控源音频大地电磁法在地下水勘察中的应用研究[J]. 地球物理学报,1996,39(5):712~717.
- [5] 底青云,王妙月,石昆法,等. 高分辨率 V6 系统在矿山顶板漏水隐患中的应用研究[J]地球物理学报,2002,45(5):744~748.
- [6] 赵永贵,刘浩,孙宇,等. 隧道地质超前预报进展[J]. 地球物理学进展. 2003,18(3):460~464.
- [7] 温树林,吴世林. TSP203 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
- [8] 陈建峰. 隧道施工地质超前预报技术比较[J]. 地下空间. 2003,23(1).
- [9] 吴俊,毛海和,应松,等. 地质雷达在公路隧道短期地质超前预报中的应用[J]. 岩土力学. 2003,24(10),增
- [10] 朱宝龙,陈强,魏有仪,等. TSP 超前地质预报在圆梁山隧道施工中的应用[J]. 水文地质工程地质. 2003,1:81~83.
- [11] 王洪勇,张继奎,李志辉. 长大隧道红外辐射测温超前预报含水体方法研究与应用实例分析[J]. 物探化探计算技术. 2003,25(1):11~17.
- [12] 时永阡,王连俊,白明州. 超前地质预报管理信息系统[J]. 勘察科学技术. 2003. 6:12~15.