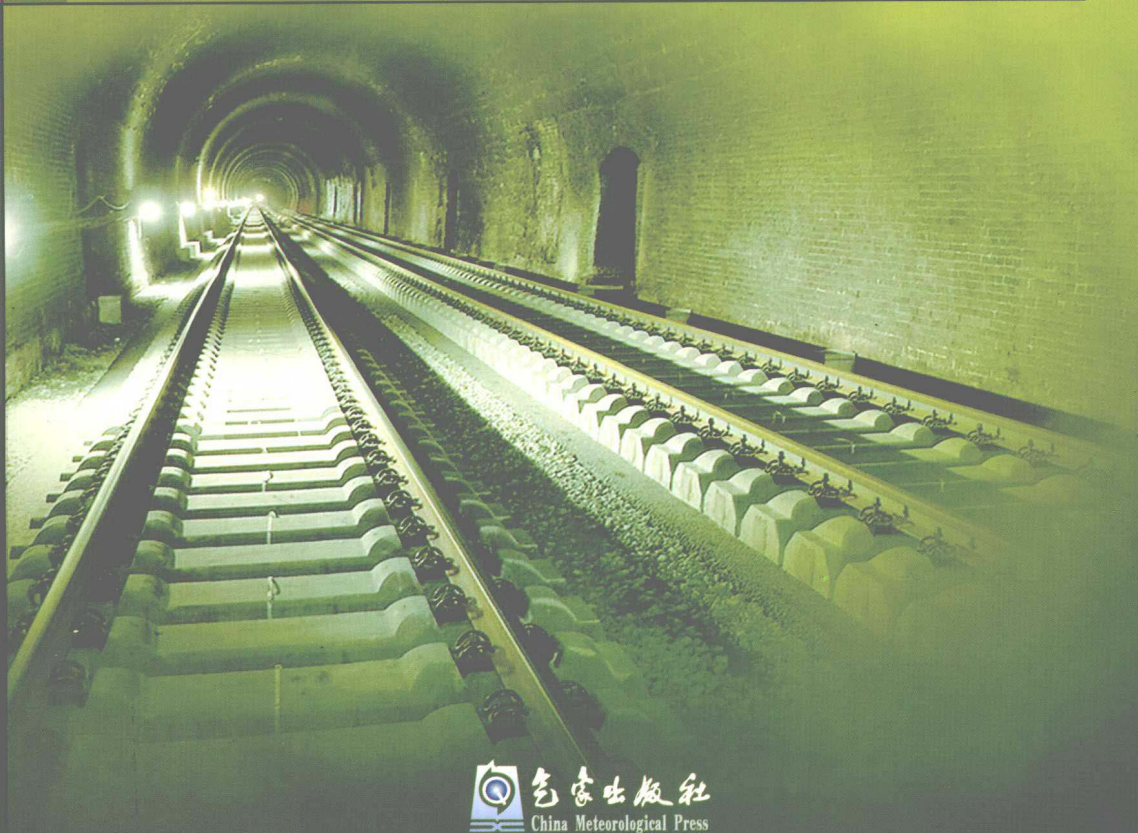


SUIDAO DIZHI

隧道地质


超前预报技术与应用

齐甦 ○ 编著



隧道地质超前预报技术与应用

齐 甦 编著

 气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

本书主要介绍了目前常用的隧道地质超前预报技术与应用,共8章,分别阐述了隧道地质超前预报的意义和内容、隧道地质特点和隧道主要工程地质问题、隧道地质超前预报工作方法、超前水平钻探法进行隧道地质超前预报的技术应用、地震映像法进行隧道地质超前预报的技术应用、TSP在隧道地质超前预报中的技术应用、地质雷达在超前预报中的技术应用和TRT在隧道地质超前预报中的技术应用。这些技术对我国的地下建筑施工是非常有帮助的。

本书可作为从事隧道或隧洞工程研究、施工的技术人员和从事相关技术工作的管理人员,高等院校师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

隧道地质超前预报技术与应用/齐甦编著. —北京:气象出版社,
2010.12

ISBN 978-7-5029-5083-5

I. ①隧… II. ①齐… III. ①隧道工程-工程地质-预报
IV. ①U452.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第221119号

隧道地质超前预报技术与应用

齐甦 编著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街46号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:彭淑凡

封面设计:博雅思企划

责任校对:赵 瑗

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:232千字

版 次:2010年12月第1版

定 价:28.00元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:黄润恒

责任技编:吴庭芳

印 张:11.5

印 次:2010年12月第1次印刷

前 言

随着我国经济实力不断增强,交通基础设施的建设规模逐渐扩大,尤其是西部大开发等宏观发展战略的不断深入,公路、铁路等交通建设工程日益增多。根据交通部“九五”计划和2010年长远规划,在最近的十多年间,我国的公路里程将大幅度增加,新增公路15万公里以上,尤其是高速公路的建设将跨上一个新台阶。

我国地域宽广,特别是在山区地形地质环境条件恶劣,新构造运动活跃,已建或在建的隧道在施工过程中,普遍遇到了断层、破碎带、软弱地层等不良地质段引起的塌方、落石、涌水、突泥和冒顶等现象,给国家带来了人员伤亡和经济损失。采用隧道地质超前预报的措施,可以提前让工程技术人员掌握隧道掌子面前方的地质状况,有针对性地采取设计和施工的措施,避免隧道在施工过程中由于地质方面的原因,造成人员伤亡和经济损失。因此,有必要将常用的隧道地质超前预报技术进行总结,介绍给相关的工程技术人员。

本书共8章内容,第1章介绍了隧道地质超前预报的意义和内容;第2章介绍了隧道地质特点和隧道主要工程地质问题;第3章阐述了隧道地质超前预报工作方法;第4章阐述了超前水平钻探法进行隧道地质超前预报的应用技术;第5章阐述了地震映像法进行隧道地质超前预报的应用技术;第6章阐述了TSP在隧道地质超前预报中的应用技术;第7章阐述了地质雷达在超前预报中的应用技术;第8章阐述了TRT在超前预报中的应用技术。

在本书的编写和出版过程中,得到了中国地质大学(武汉)殷坤龙教授、陈建平教授、吴立教授、徐光黎教授,武汉理工大学彭少民教授,湖北省交通规范设计院岩土工程分院高级工程师王国斌和工程师利奕年的大力支持,在此向他们表示衷心感谢!另外,在本书的撰写过程中,鲁伟娜、刘念、丁大明、明磊、江松柏、周德军、陈星星、唐文俊、何金星、杨家凯等研究生协助做了大量的工作,为本书的编撰出版付出了辛勤的劳动,在此向他们表示感谢!

由于笔者学术水平有限,写书过程中虽然已经反复修改,难免书中还有错误和不足之处,希望读者批评指正。

作者

2010年9月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
§ 1.1 隧道地质超前预报的定义	(1)
§ 1.2 隧道地质超前预报的目的与意义	(1)
§ 1.3 隧道地质超前预报的内容	(2)
§ 1.4 隧道地质超前预报的方法	(2)
1.4.1 工程地质调查与推断、分析方法	(2)
1.4.2 超前导坑法、水平钻机超前探测法	(5)
1.4.3 地质雷达检测方法	(5)
1.4.4 隧道内反射地震预报方法	(5)
1.4.5 TSP 超前预报技术	(6)
1.4.6 TRT 反射地震层析成像方法	(6)
1.4.7 地震负视速度法	(7)
1.4.8 水平声波反射法(HSP)	(7)
1.4.9 陆地声纳法(高频地震反射法)	(7)
1.4.10 红外探水法	(8)
§ 1.5 隧道地质超前预报的方法比较	(8)
§ 1.6 隧道地质超前预报的形式	(9)
§ 1.7 隧道地质超前预报的时间安排	(9)
§ 1.8 隧道地质超前预报的发展	(9)
参考文献	(14)
第 2 章 隧道地质	(15)
§ 2.1 岩类	(15)
2.1.1 沉积岩	(15)
2.1.2 火成岩	(16)
2.1.3 变质岩	(16)
§ 2.2 地层	(17)
§ 2.3 地质构造	(18)

§ 2.4	地下水	(20)
§ 2.5	特殊岩类及其工程地质特性	(20)
2.5.1	构造岩	(20)
2.5.2	软岩	(21)
2.5.3	膨胀岩土	(21)
2.5.4	盐溶角砾岩、喀斯特角砾岩	(21)
2.5.5	煤层	(21)
§ 2.6	岩层、节理面、断层产状	(21)
§ 2.7	不同结构类型岩体水文地质特征、变形破坏特征及主要工程地质问题	(22)
§ 2.8	不同地质构造与隧道组合的主要工程地质问题	(24)
2.8.1	水平岩层中的隧道工程	(24)
2.8.2	倾斜岩层中的隧道工程地质问题	(24)
2.8.3	断层中的隧道工程地质问题	(25)
2.8.4	节理裂隙等结构面的不利组合及节理密集带的工程地质问题	(27)
2.8.5	向斜构造中的隧道工程地质问题	(28)
§ 2.9	特殊工程地质问题	(29)
2.9.1	岩溶工程地质问题	(29)
2.9.2	在采及废弃矿巷问题	(34)
2.9.3	煤层、瓦斯及软夹层问题	(34)
	参考文献	(35)
第3章	隧道地质超前预报工作方法	(36)
§ 3.1	资料收集与整理	(36)
3.1.1	预可研和可行性研究阶段资料收集	(36)
3.1.2	勘察成果整理分析	(36)
3.1.3	熟悉设计文件、资料和图纸	(37)
§ 3.2	补充地质调查	(37)
§ 3.3	洞内地质调查和掌子面地质素描	(38)
3.3.1	洞内地质调查	(38)
3.3.2	掌子面地质素描	(39)
§ 3.4	物探方法的选择和现场实施掌子面探测	(39)
3.4.1	物探方法的选择	(40)
3.4.2	掌子面探测	(42)
§ 3.5	探测成果分析	(43)
3.5.1	界面距探测掌子面距离的确定	(43)

3.5.2 界面性质的确定·····	(47)
§ 3.6 隧道工程岩体分级·····	(47)
§ 3.7 预报报告的内容及报告的提交·····	(50)
3.7.1 预报报告的内容·····	(50)
3.7.2 报告的提交·····	(50)
§ 3.8 验证·····	(50)
参考文献·····	(51)
第4章 超前水平钻探法的应用技术 ·····	(52)
§ 4.1 超前水平钻探法研究·····	(52)
4.1.1 超前水平钻探法的基本原理与介绍·····	(52)
4.1.2 超前水平钻探法的优缺点·····	(53)
§ 4.2 超前水平钻探法施工技术·····	(54)
4.2.1 施工流程·····	(55)
4.2.2 主要技术要求·····	(55)
4.2.3 施工准备·····	(55)
4.2.4 钻机就位·····	(56)
4.2.5 施钻·····	(56)
4.2.6 地质分析判断、成果报告·····	(58)
§ 4.3 RPD-150C 型钻机的概况·····	(60)
4.3.1 RPD-150C 钻机·····	(60)
4.3.2 现场钻进技术指标·····	(61)
§ 4.4 工程实例·····	(63)
4.4.1 隧道地质概况·····	(63)
4.4.2 把水寺隧道钻探孔资料·····	(64)
4.4.3 结论与建议·····	(65)
参考文献·····	(66)
第5章 地震映像法的应用技术 ·····	(67)
§ 5.1 概述·····	(67)
5.1.1 地震映像法原理·····	(67)
5.1.2 地震映像法的分类·····	(73)
5.1.3 地震映像法数据采集要点·····	(73)
§ 5.2 野外数据采集的方法及技术·····	(75)
5.2.1 工作仪器和方法·····	(76)
5.2.2 野外工作方法试验·····	(82)
5.2.3 地震映像法在不同地质条件下的应用·····	(83)

5.2.4	地震映像解释方法	(84)
§ 5.3	工程实例	(85)
5.3.1	工程简介	(85)
5.3.2	隧道地质概况	(85)
5.3.3	工作方法	(86)
5.3.4	ZK269+393~ZK269+443 段调查测试结果及分析	(87)
	参考文献	(91)
第 6 章	TSP 在隧道地质超前预报中的应用技术	(93)
§ 6.1	TSP203 的工作原理和组成	(93)
6.1.1	TSP203 预报原理	(93)
6.1.2	TSP203 测量方法的原理基础	(94)
6.1.3	TSP203 系统的仪器组成	(95)
6.1.4	TSP203 系统的优势	(97)
§ 6.2	野外信号数据采集	(98)
6.2.1	TSP203 野外信号数据采集	(98)
6.2.2	原始记录注意事项	(101)
§ 6.3	数据处理流程	(102)
6.3.1	原始数据编辑	(102)
6.3.2	初至波拾取	(103)
6.3.3	选择时窗长度	(103)
6.3.4	带通滤波	(104)
6.3.5	道能量均衡	(105)
6.3.6	计算品质因子 Q	(106)
6.3.7	反射波提取	(106)
6.3.8	纵横波分离	(107)
6.3.9	速度分析	(109)
6.3.10	深度偏移成像	(109)
6.3.11	反射界面提取	(112)
§ 6.4	TSP 技术的资料分析原则	(113)
6.4.1	反射系数	(113)
6.4.2	横波与纵波的速度比	(114)
6.4.3	横波分裂与裂隙发育带	(114)
§ 6.5	工程实例	(115)
6.5.1	TSP 技术在擦罗 2 号隧道中的应用	(115)
6.5.2	TSP 技术在明月峡隧道地质超前预报中的应用	(120)

参考文献	(122)
第 7 章 地质雷达在超前预报中的应用技术	(123)
§ 7.1 引言	(123)
§ 7.2 地质雷达的基本原理	(125)
7.2.1 电磁波的传播与波速	(125)
7.2.2 电磁波的反射与折射	(126)
7.2.3 地质雷达的组成及工作原理	(127)
§ 7.3 地质雷达进行超前预报的技术与方法	(127)
7.3.1 地质雷达的技术参数	(127)
7.3.2 地质雷达测量参数的选取	(131)
7.3.3 地质雷达的测量方式和信号触发方式	(133)
7.3.4 地质雷达的探测方法	(137)
§ 7.4 地质雷达的数据处理技术	(138)
7.4.1 地质雷达的数据文件编辑	(138)
7.4.2 波速估计	(139)
7.4.3 数字滤波	(139)
7.4.4 反褶积	(139)
7.4.5 偏移归位处理	(140)
§ 7.5 地质雷达的数据解释技术	(141)
7.5.1 地质雷达地质超前预报适宜性评价	(141)
7.5.2 地质雷达解译图件	(142)
7.5.3 后期解译方法及其规范化	(143)
7.5.4 提高解译精度的途径与方式	(144)
7.5.5 解译标志的初步建立	(145)
§ 7.6 工程实例	(146)
7.6.1 工程概况	(146)
7.6.2 探测依据及方法	(147)
7.6.3 现场探测	(148)
7.6.4 数据处理	(148)
7.6.5 探测结果	(149)
参考文献	(150)
第 8 章 TRT 地质超前预报法	(151)
§ 8.1 TRT 技术原理与仪器应用方法	(151)
8.1.1 TRT 方法原理	(151)
8.1.2 TRT 技术原理	(152)

§ 8.2	TRT 工作流程	(154)
§ 8.3	数据处理	(157)
8.3.1	TRT 数据处理流程	(157)
8.3.2	具体操作	(157)
§ 8.4	TRT 技术的优点及存在的问题	(168)
§ 8.5	工程实例	(169)
8.5.1	地质概况	(169)
8.5.2	探测方法及结论	(169)
8.5.3	建议	(170)

第 1 章

绪 论

§ 1.1 隧道地质超前预报的定义

近些年来,我国国民经济发展迅速,高速铁路、高速公路、城市轨道交通等工程大规模地建设,长大隧道数量也越来越多,隧道施工进度经常成为控制整个工程进展的瓶颈。这就对怎样能够解决加快隧道开挖、掘进的速度提出了新的课题,而掌子面前方地质环境、工程地质条件、水文地质条件等控制着掘进的速度,如何获取掌子面前方的地质信息成为关键,隧道地质超前预报就是解决该难题的方法。

隧道地质超前预报(Geological Prediction/Prospecting)是指在隧道开挖时,对掌子面前方的围岩与地层情况做出超前预报。

§ 1.2 隧道地质超前预报的目的与意义

随着公路、铁路、水利、矿山及其他工程建设的飞速发展,我国的施工隧道已大量地出现。截至 1999 年,我国仅铁路隧道就已达 6876 个,总长度为 3670 km,为世界第一。作为隐蔽工程的公路隧道、铁路隧道、矿山隧道、输水隧道等在施工过程中,由于前方地质情况不明,经常会因遇到断层、破碎带、暗河、高地应力等不良地质体而导致塌方、泥石流、涌水、岩爆冒顶等地质灾害发生。这些灾害的出现,往往会影响施工进度,造成人员伤亡,给施工单位、国家和人民带来严重的经济损失。如 1994 年在尖山工程建设中,由于对前方地质灾害掌握不清,结果出现了塌方、涌水并伴随着大量泥石流出现,大大影响了工程进度,给尖山工程建设带来了严重的经济损失;天生桥二级水电站 3 条引水隧洞以及太平驿引水隧洞在施工过程中均多处发生过岩爆现象,类似的地质灾害在许多中小型工程和大型隧道工程中都出现过。此外,有些隧道不仅延伸很长,而且往往深埋于山体之中。对于这些埋藏很深的长隧道,由于其前期的地勘工作受到技术水平和经费的限制,因而在施工前不可能查清隧道围岩的地质情况。随着隧道工程施工的逐步深入,其安全隐患会一一暴露出来。这时需要在施

工过程中采取有效方法,对前方不良地质灾害进行准确的超前预报,以便及时地修正开挖和支护设计方案,避免施工事故发生。

隧道施工前对地质情况的了解,对于隧道建设有十分重要的作用。通过隧道地质超前预报,及时发现异常情况,预报掌子面前方不良地质体的位置、产状及其围岩结构的完整性与含水的可能性,从而为隧道施工单位优化施工方案提供依据,为预防隧道突水、突泥、塌方和落石等可能形成的灾害性事故及时提供信息,使工程单位提前做好施工准备。通过预报,可以了解掌子面前方短距离内的工程地质条件、围岩类别,为施工单位正确选择开挖断面、支护设计参数和施工方法提供依据。所以隧道地质超前预报对于安全科学施工、提高施工效率、缩短施工周期、避免事故损失,具有重大的社会效益和经济效益。

§ 1.3 隧道地质超前预报的内容

隧道地质超前预报主要是预报掌子面前方的不良地质状况,它的内容包括以下几个方面:

1. 不良地质预报及灾害地质预报

预报掌子面前方 15~100 m 范围内有无突水、突泥、坍塌、有害气体等灾害地质,并查明其范围、规模、性质,提出施工措施意见。

2. 水文地质预报

预报洞内涌水量大小及其变化规律,并评价其对环境地质、水文地质的影响。

3. 断层及其破碎带的预报

主要预报断层的位置、宽度、产状、性质、充填物的状态,是否为充水断层,并判断其稳定性程度,提出施工对策。

4. 围岩类别及其稳定性的预报

预报开挖面前方的围岩类别与设计是否吻合,并判断其稳定性,随时提出修改设计、调整支护类型、确定二次衬砌时间的意见,报专家组审批。

5. 查明并预测隧道内有害气体含量、成分及动态变化。

6. 查明并预测膨胀岩的膨胀力、膨胀量及主要矿物成分,为工程防治提供可靠依据。

§ 1.4 隧道地质超前预报的方法

1.4.1 工程地质调查与推断、分析方法

首先应搜集区域地质资料,对地质构造及不良地质特点进行分析研究,并对历次隧道的勘测设计资料进行系统的分析探讨,建立标准地质剖面,然后根据隧道工程地

质特点划分重点灾害性地段;针对隧道的水文地质特点划分可能引起突水突泥的地段;对隧道通过地区附近村庄的井泉建立长期观察记录;制定系统工作计划、方法及应对措施。

工程地质调查与推断是隧道超前预报中使用最早的方法。通过地表和隧道内的工程地质调查与分析,了解隧道所处地段的地质结构特征,推断前方的地质情况。其调查的内容包括地层与岩性的产出特征、断裂构造与节理的发育规律、岩溶带发育的部位、走向、形态等,预测隧道掌子面前方的不良地质现象可能的类型、部位、规模,以便隧道施工中采取合理的工艺与措施,避免事故。在隧道埋深较浅、构造不太复杂的情况下,这种预报方法有很高的准确性,目前这种方法仍在使用。该方法与其他物探方法相结合,可以取得更好的效果。但是在构造比较复杂地区和深埋隧道的情况下,该方法工作难度较大,准确性难以保证。

1. 地面地质调查法

预报小组对隧道范围内进行大规模详细的地质调绘,确定各岩组的地层层序、厚度、标志层位置,结合沉积韵律,建立标准地层剖面。对地质构造进行追踪调查后,根据施工进展情况,展开有针对性的地质调绘,详尽地核对细化勘测设计资料。在不同位置实测构造面产状,获取构造的性质、规模、范围等第一手资料,经过施工单位联测在图上对构造位置定位,利用地质作图法,把构造投影到洞身位置。在作图过程中考虑构造面的变化规律进行修正。具体作法如下:根据构造线产状将其放到洞顶,将真倾角换算成视倾角,通过计算获取在洞身出露里程。

采用公式:
$$x = h \times \text{ctg}\alpha \quad (1-1)$$

式中 α ——为构造线在隧道方向的视倾角;

h ——为构造线洞顶地面位置点下隧道的埋深;

x ——预测的距离。

通过计算,获得构造线在隧道某一位置的具体里程、范围及延伸方向。

2. 地质素描法

地质素描法是利用地质理论和作图法,将隧道所揭露的地层岩性、地质构造、结构面产状、地下水出露点位置及出水状态、出水量等准确记录下来并绘制成图表,结合已有勘测资料,进行隧道开挖面前方地质条件的预测预报。其主要包括基础地质资料、地表地质调查资料及掌子面地质素描。

地质素描法理论基础牢固,设备简单,操作方便,不占用或很少占用隧道施工时间,提交资料及时,成本低。它对操作人员地质知识水平要求较高,一般要求地质专业人员来完成。

另外,地质素描法是靠有限之“见”,所以其预报范围有限,特别是在地层岩性变化极为复杂的隧道中预报的准确率更是如此。

断层及微构造在掌子面出现,实测产状后分析断层、微构造的产出规律,据其在

掌子面的部位、构造走向与隧道轴向的关系作出地质预报图。

3. 利用节理裂隙统计分析进行预测

隧道通过区地层受构造运动的影响,形成了较多的节理、裂隙及断层,而节理、裂隙与断层的发展变化是有一定规律的。通过长期的量测、分析,统计其节理产状、间距、贯通性等情况,得出了节理、裂隙、断层的发展渐变规律,可据此预报预测掌子面前方是否发育断层及微构造。

4. 水文地质条件的预测

洞外井、泉量测的方法根据隧道范围内村庄居民、民用的水井及泉点分布情况,确定井、泉是否直接影响居民的用水和牲畜饮水问题。对这些井、泉的水量动态变化进行长期系统的动态量测,建立规范的记录档案。对民用水井采用长期的量测水位。对泉采用长期量测水量,一般采用容量法、三角堰法、流速法等,每月量测2~4次,据施工进展和季节变化加密观测,绘制水位及流量的动态变化曲线,分析隧道洞内涌水的补给来源、影响范围,确定洞内涌水与地表井泉是否存在水力联系,分析研究井、泉水位发现异常的原因,及时提出工程处理措施,从而保证了隧道影响范围内居民的生活用水及生态环境。

洞内水文地质预报的方法是:在熟悉既有勘测设计资料、岩组层序及地质构造特点的基础上,通过对洞内单掌子面涌水量动态变化的长期观测记录,掌握地下水初期涌水量、衰减涌水量和稳定涌水量的变化规律,综合分析地层、断层、线性构造等特点,结合基岩裂隙水的运移特点,查明地下水的补给、径流及排泄途径,对未开挖段开展水文预报工作;采用容量法、三角堰法、梯形堰法、规则断面流速法、水泵抽水量法等获取掌子面附近涌水量的实际数据;分析地质素描资料,针对岩层组合的含水性、节理裂隙的张开程度及充填情况等特点,得出地下水的局部补给来源、涌水条件及影响范围,从而预报施工前方常规地段的水文地质条件。

根据隧道范围内的断层性质、断层破碎带规模及成分、结构特征和胶结程度,以及断层两侧一定范围影响带内节理裂隙情况、贯通性等特征,对地下水水量、贮存条件及连通关系进行综合分析,从而对断层破碎带和断层影响带内地下水水量进行预报。

通过分析既有的水文地质、气象资料及一些钻孔的抽提水试验资料,根据施工前方的地层岩性、地质构造、节理裂隙情况,再结合洞内长期实测水量的综合分析对比,对掌子面前方每延米涌水量进行预测,取得了良好的效果。在隧道的开挖过程中对洞内涌水量进行了连续实测工作,根据其地层岩性、地质构造、岩石的节理、裂隙的发育程度及充填情况等特征,对掌子面前方涌水量进行定性定量的预测,与开挖实际涌水量对比反分析。由于洞内涌水量的大小与施工部位、方法、速度等关系密切,涌水量遵循由大变小的变化规律。

5. 钻速测试法

运用钻孔台车打眼时,根据钻进速度的变化、岩粉的鉴定和泥浆的颜色变化来预

测打眼深度范围内的地质情况。首先长期记录钻孔台车在不同围岩内打眼的情况,进行积累统计,建立不同岩质的钻速、岩粉、泥浆颜色、地下水情况的积累统计对照表,而后根据岩石钻速范围值及泥浆颜色变化和岩粉鉴定,通过对比分析,推测前方打眼深度范围内的地质情况。该方法宜在接近断层时采用,也可以探测前方地下水情况。

隧道地质超前预报除了对掌子面前方的围岩情况进行调查、分析外,还要考虑有害气体的预测。

有些隧道通过区的地层为煤系地层,为了使施工顺利安全进行,采用沼气——氧气两用报警仪,在隧道内进行长期跟踪量测,采集数据,进行预报。根据数据的积累统计分析,对掌子面前方的有害气体进行预测,为隧道安全施工提供科学依据。

在坑道开挖时,工作面上瓦斯量超过 1.0%,就不准放炮;超过 2.0%,人员就要全部撤出工作面。一般主风流处瓦斯含量不得超过 0.5%,总回风风流处不得超过 0.75%。

1.4.2 超前导坑法、水平钻机超前探测法

超前导坑法比较直观,精确度高。采用上导坑开挖地段也较多,因此在上导坑进行预报工作是十分重要的,在上导坑采用地质素描、地质作图等手段,在图解分析的基础上对小掌子面及全断面前方的地层、岩性地质构造、水文地质情况进行地质超前预测。

小导坑出露的地质情况,通过编录、作图、计算等正确预报大断面的地质情况,使施工单位可在主隧道开挖断面达到不良地段之前采取相应的支护措施。

水平钻机超前探测法,通过水平钻机在掌子面进行钻探、采取岩芯等工作,了解前方地质条件。但对施工干扰较大,适用于探测前方严重的突水突泥段。

1.4.3 地质雷达检测方法

地质雷达是目前分辨率最高的工程地球物理方法,在工程质量检测、场地勘察中广泛采用,近年来也用于隧道超前预报工作。地质雷达能发现掌子面前方地层的变化,对于断裂带特别是含水带、破碎带有较高的识别能力。在深埋隧道和富水地层以及溶洞发育地区,地质雷达是一个很好的预测手段。但是地质雷达目前探测的距离较短,大约在 20~30 m 以内。对于长距离隧道的预报只能分段进行,同时雷达记录易受洞内机器干扰,探测分析中要特别注意波相识别,排除干扰。隧道超前预报中雷达探测记录,围岩中的裂隙水含水带对电磁波有强烈的反射,从反射图像中可圈定含水带位置。

1.4.4 隧道内反射地震预报方法

反射地震是工程物探中最可靠的方法之一,但用于隧道超前预报工作由于观测条件的限制以及岩体内不同方向都可能形成反射,使之在解释与判别方面遇到了很

大的困难。为了用反射地震信号探测隧道掌子面前方的地质情况,从观测方式和处理方法方面进行了专门的研究,并形成了几种不同的技术。我国是较早开展反射地震隧道超前预报方法的国家之一。铁道系统在 20 世纪 90 年代初就开始设题进行专门研究工作。比较有代表性的工作有铁道部第一勘测设计院的曾昭璜等,1994 年在《地球物理学报》上发表他们的研究成果,文章的题目为“隧道地震反射法超前预报”。何振起等在《铁道工程学报》上也发表了类似的工作成果。目前这种方法在国内被称为“负视速度法”。该方法的观测是在隧道侧壁打孔布置检波器和炮点,检波器和炮点在同一条平行隧道轴的直线上,利用直达波估计岩体波速,利用反射波走时曲线与直达波走时曲线的交点推测前方反射界面的位置。观测和分析方法与垂直地震测井方法有很多相似之处,所以有时也称“垂直剖面法”。检波器和炮点埋入隧道侧壁岩体中 1~1.5 m,有效地避免了面波和隧道驻波的干扰,提高了信噪比,应用结果表明在很多情况下,这种方法是很有有效的。对于前方规模较大的不良地质体能可靠地预报,但是对于不良地质体性质的判别和定位等方面还更多地依赖于经验和对于周围地质条件的了解。该方法很难对前方岩体工程类别的变化提供更可靠的信息。反射地震方法在宝中线颧河隧道、老爷岭隧道和侯月线云台山隧道、朔黄铁路的长梁山隧道以及福州飞鸾岭公路隧道等施工中都有成功的应用。

1.4.5 TSP 超前预报技术

TSP 超前预报方法(Tunnel Seismic Prediction)是由瑞士 Amberg 测量技术公司开发的用于隧道超前预报的先进技术。其工作原理也是隧道内反射地震方法,但处理方法有独到之处。该方法在欧洲、亚洲各国广泛的应用,中国也先后引进了该公司的 TSP202、TSP203 等超前预报系统。TSP 的观测是由一个三分量检波器承担,埋入隧道侧壁岩体中 1~1.5 m,炮点设在侧壁岩体内等间距排列,与接收点在同一条平行隧道走向的直线上,这与国内采用“负视速度法”的观测方式基本相同。TSP 方法与国内“负视速度法”的主要区别是在资料处理方法上,TSP 不采用走时曲线分析方法,而是采用深度偏移成像方法,在偏移成像之前进行二维 Radon 变换,利用视速度的差异,消除隧道走向近乎平行的反射界面。该方法对纵波、横波、P 波、SV 波和 SH 波分别进行处理。应该说 TSP 技术在隧道反射地震方面是做得比较好的,有较好的实用性。但是由于 TSP 的观测方式的限制,不可能对断层的产状、位置和岩体波速等参量同时给出准确的结果,因而在定位精度和岩体类别划分方面还不尽如人意。

1.4.6 TRT 反射地震层析成像方法

TRT 技术的全称是“真正反射层析成像”(True Reflection Tomography),是由美国 NSA 工程公司近年来开发的,在欧洲、亚洲开始应用。应用 TRT 技术进行超前预报的第一个例子是在 Blisadona 隧道。该隧道的实验表明在坚硬的结晶岩地段,TRT 技术可预报长度 100~150 m,在软弱土层和破碎岩体地段可预报 60~90

m。另一成功的例子是奥地利的过阿尔卑斯山的铁路双线隧道,隧道长 1076 m,断面积 100 m²。施工中进行了全程的超前预报,对于岩性变化界面和断裂破碎带进行了预报,其结果与施工揭露的地质情况基本一致。TRT 方法在观测方式和资料处理方法上与 TSP 和“负视速度法”有很大不同。在观测上,虽然 TRT 也是利用反射地震波,但它采用的是空间多点接收和激发。检波器和激发的炮点呈空间分布,以充分获得空间波场信息,以提高不良地质体的定位精度。这与垂直剖面法的观测方式明显不同。TRT 资料处理方法的重要关键技术是速度扫描和偏移成像,不需要读走时。这种方法对岩体中反射界面位置的确定、岩体波速和工程类别的划分等都有较高的精度,应该说较 TSP 方法有较大的改进。

1.4.7 地震负视速度法

地震负视速度法是将常规地震勘探中的钻孔垂直地震剖面法(VSP)应用于水平状态的隧道中,其基本原理是:在隧道掌子面的前方一定距离,沿边墙布置一激振点和一系列接收点,激发时产生的地震波信号在围岩中传播,当有断层和岩层变化的界面时产生反射波,返回的信号被接收点的检波器接受,由此即可确定反射界面的位置;纵、横波共同分析还可了解反射界面两侧的岩性、密实程度的变化。地震负视速度法具有明显的方向特征,可以有效地将开挖面前方反射信息与周围干扰相区分,提高了识别不良地质体界面的精确度,能对其进行准确定位,预报距离可达 100 m 以上。预报探测时不占用开挖工作面,对施工干扰很小,是常用的预报方法之一。在渝怀铁路圆梁山隧道正洞、平导和迂回导坑施工中,采用负视速度法,沿隧道壁布置 12 个检波器,间距为 3~4 m;震源炮孔间距 5~8 m;数据采集系统为美国 EGG 公司制造的 R24 型工程地震仪;预报掌子面前方约 100 m 范围内的不良地质体的位置和规模性质。在已完成的 13 次预报中,11 次比较准确,与施工开挖揭示情况基本一致。

1.4.8 水平声波反射法(HSP)

探测时不占用掌子面,沿巷道两侧分别布置激发点——检波点的观测系统。这种方法的特点是各检测点所接收的反射波路径相等,因此反射波组合形态与反射界面形态相同,图像直观。直达波是双曲线形态,反射波是直线形,很容易区分。这种方法的另一优点是对反射界面倾角没有限制,适用的范围较负视速度法广泛。在渝怀铁路圆梁山隧道 DK354+461.5 掌子面挖出溶洞,为探测溶洞的发育规模,采用 ZGS1610 智能工程探测声波仪,探测前方边界位置为 DK354+498。实际开挖结果:DK354+461.5~DK354+490 为溶洞发育段,预报比较准确。

1.4.9 陆地声纳法(高频地震反射法)

在隧道掌子面上采用极小偏移距,单点采集高频地震反射信号形成连续剖面,通过十字形观测系统和宽频带脉冲接收技术,预报掌子面前方断层及其他地质界面的位置和产状。该方法的优点是分辨率高,缺点是需占用掌子面。当需要短距离较高