

隧道现场 超前地质预报及工程应用

张成良 刘 磊 王国华 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

隧道现场 超前地质预报及工程应用

张成良 刘 磊 王国华 著



冶金工业出版社

2013

内 容 提 要

全书共分 11 章,第 1~4 章主要介绍隧道超前地质预报所需的地质学知识和影响隧道岩体稳定性的因素及相关的地质特征。第 5~8 章通过比较各种超前预报方法及理论分析研究,建立了综合预报体系,详细论述了综合超前预报的现场测线布置、数据采集和图像解译。第 9 章是针对综合预报体系的隧道工程运用。第 10、11 章是超前预报方法在相关行业的延伸应用。

本书可供从事隧道超前地质预报的科研人员、工程技术人员及管理人员借鉴和参考。

图书在版编目(CIP)数据

隧道现场超前地质预报及工程应用/张成良,刘磊,王国华著. —
北京:冶金工业出版社,2013.8

ISBN 978-7-5024-6368-7

I. ①隧… II. ①张… ②刘… ③王… 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(2013)第 199879 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨秋奎 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6368-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京慧美印刷有限公司印刷

2013 年 8 月第 1 版,2013 年 8 月第 1 次印刷

169mm×239mm;12.25 印张;235 千字;180 页

39.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

本书编写人员

张成良	刘 磊	王国华	王汝兴	王 春
李明银	赵 东	李任琼	陈代莲	孙 宇
邵 方	高加传	赵晓霞	杨绪祥	张全全
王 斌	郭运华	杨 溢	王永康	王喜雨

序

随着我国高等级公路、铁路及地下工程建设步伐的加快，山岭高速公路、铁路建设工程越来越多，水利水电、矿山的地下工程规模也越来越大，隧道在这些基础工程建设中发挥着越来越重要的作用。

众多工程实践表明，在隧道施工过程中，要穿越不同的地层，遇到各种地质条件，如软弱岩层、断层破碎带、膨胀土地层，以及岩爆、岩溶等地质灾害体等。不同的地质条件会影响隧道建设的进度，其中地质灾害体更是影响施工安全的关键因素。尤其是长大和深埋隧道极易发生地质灾害，主要是因为赋存环境下岩体的复杂力学行为比较突出，随之而来的工程地质问题比较多。因此，在隧道施工过程中必须对地质条件开展预测预报工作，这项工作对隧道的正常施工和顺利贯通发挥着十分重要的作用。

隧道现场超前地质预报正是在隧道开挖施工过程中开展的地质超前探测与预报工作，通过探测掌子面前方的地质构造、地层岩性、地下水和不良地质体的性质、范围、规模和位置等，以便及时掌握和反馈隧道地质条件信息，为调整和优化隧道设计参数和防护措施、优化隧道施工组织、制订施工安全应急预案、控制工程变更设计等提供依据。做好隧道现场超前地质预报工作，可有效预防和防止各类突发性地质灾害的发生，降低工程建设风险，实现工程质量、安全、工期、环境和投资等的综合性目标。

该书作者根据多年从事超前地质预报的工作经验和学术研究成果，对超前地质预报理论做了系统地阐述，明确了地质学知识在超前地质预报工作中的重要性，提倡地质知识和物探解译并重，同步发展、相

辅相成的观念,提出以地质学为基础“长、中、短”相结合的综合预报体系,并已经在工程实践中进行了大量的应用,预报结果比较准确可靠,能够为相关科研人员和现场工作人提供借鉴和指导意义,具有很高的学术价值和广泛的应用前景。目前,我国的隧道超前地质预报技术正处于发展阶段,许多技术的掌握和提高尚需一个过程。相信本书的出版将会对提升我国隧道超前地质预报技术水平、防范突发性地质灾害、促进隧道开挖和基础设施建设的安全施工和质量管理起到积极的作用。故为之序。

中国工程院院士



2013年7月4日

前 言

从整个岩土工程的发展史来看,19 世纪是长大桥梁发展的时代,20 世纪是高层建筑发展的时代,21 世纪将是大力开发利用地下空间的时代,隧道工程将会起着越来越重要的作用。随着我国经济的快速发展和西部大开发的推进,我国公路等级与规模不断提高,且高等级公路建设已呈现由平原地区向山岭地区推进、由东部向中西部发展的趋势,因此在公路特别是高速公路修建过程中隧道工程众多。截至 2005 年年底,我国隧道总数已达 9370 座,总长度 5200km,分别是改革开放之初的 22.7 倍和 908 倍,是世界上公路隧道最多的国家。

随着修建隧道的数量越来越多、规模越来越大、长度越来越长,如何“安全、快速、优质”地完成隧道建设工作是当前亟待解决的问题。隧道超前地质预报可以摸清和预测掌子面前方的水文地质和工程地质条件,是隧道施工必不可少的环节,也是“安全、快速、优质”地完成隧道施工的关键。

隧道超前地质预报所涉及的知识非常广泛,要求的专业技术水平较高。鉴于我国的隧道超前地质预报研究起步较晚,不仅要求从事隧道超前地质预报的工作人员有良好的物探专业知识,还要求具备良好的地质学知识,只有这样隧道超前地质预报结果才更可靠、精度才更高。但事实上,我国从事物探专业的人员综合专业基础知识比较薄弱,大多缺乏系统的理论指导和实践经验,应快速有效地提高物探专业的技术水平、提高超前预报的精度。本书着重于隧道超前地质预报所必备的地质学知识和超前地质预报理论与方法,结合从事超前预报工作所完成的工程实践,系统地阐述了隧道超前预报所需的知识和理论体

系，并具体介绍隧道超前预报现场操作、信号采集和数据解译的工程应用，以期达到易学、易懂、易用的目的。

本书吸取了众多国内外超前地质预报研究的优点，提出了以地质为基础，“长、中、短”相结合的综合预报体系，实践证明该预报体系准确可靠。希望隧道超前地质预报的从业人员通过阅读本书，能够对隧道工程地质问题进行分析，能够掌握隧道超前地质预报的基本理论与方法，能够对隧道掌子面前方的不良地质体进行准确的预测预报。

本书在撰写过程中，得到了武汉理工大学李新平教授、梁开水教授，昆明理工大学杨溢教授，云南路电工程检测技术有限公司总经理孙宇、王汝兴高级工程师的指导，以及云南路电工程检测技术有限公司技术人员的支持和帮助，在此表示感谢。

作者参考了大量相关文献资料，在此谨向这些文献资料的作者致以真诚的谢意！

由于作者水平所限，书中不妥之处，恳请读者批评、指正。

作者于昆明
2013. 6. 8

目 录

1 绪 论	1
1.1 引言	1
1.2 研究进展	2
1.2.1 国外隧道超前预报的方法及研究进展	2
1.2.2 国内隧道超前预报的方法及研究进展	4
1.3 存在的问题	5
2 隧道超前地质预报所需的地质学基础	7
2.1 地壳岩石的分类	7
2.1.1 岩浆岩	7
2.1.2 沉积岩	15
2.1.3 变质岩	21
2.1.4 三大类岩石的外观鉴别	25
2.2 地质构造及其对工程的影响	27
2.2.1 单斜构造	28
2.2.2 褶皱构造	30
2.2.3 断裂构造	34
2.3 地形地貌	39
2.3.1 地形地貌的形成和发展	39
2.3.2 地形地貌分类	40
3 岩体结构对岩体稳定性的影响及控制	43
3.1 岩体结构	43
3.1.1 岩体的结构面	43
3.1.2 岩体的结构体	47
3.1.3 岩体结构的类型及特征	47
3.2 岩体结构控制论	48
3.2.1 岩体变形机制	49

3.2.2 岩体的破坏机制	49
3.2.3 岩体结构对岩体稳定性的控制作用	50
3.3 影响岩体稳定性的岩体结构要素	50
3.3.1 节理发育程度	50
3.3.2 岩体的完整程度	51
3.3.3 软弱夹层	52
3.3.4 结构面结合程度与结构面组合形式	52
3.4 隧道围岩级别的判定	55
4 影响隧道稳定性的常见不良地质	58
4.1 岩爆	58
4.1.1 岩爆的定义与特征	58
4.1.2 岩爆的影响因素	58
4.2 断层	60
4.2.1 断层的定义与特征	60
4.2.2 断层对隧道施工的影响	60
4.3 岩溶	60
4.3.1 岩溶的定义与特征	60
4.3.2 岩溶对隧道施工的影响	61
4.4 涌水	61
4.4.1 涌水的定义与特征	61
4.4.2 隧道涌水的主要来源	62
4.4.3 涌水对隧道施工的影响	62
4.4.4 隧道涌水的影响因素	63
4.5 塌方	64
4.5.1 塌方的定义与特征	64
4.5.2 塌方的类型	64
4.5.3 隧道塌方的原因	64
4.6 偏压	65
4.6.1 偏压的定义与特征	65
4.6.2 偏压隧道成因	65
4.6.3 隧道偏压的影响因素	65
5 隧道超前地质预报的理论及常用方法	67
5.1 隧道超前地质预报的理论	67

5.1.1 隧道超前地质预报的定义	67
5.1.2 隧道超前地质预报的主要内容	67
5.1.3 隧道超前地质预报方法的分类	68
5.1.4 隧道超前地质预报	68
5.1.5 隧道超前地质预报的特点	70
5.2 隧道超前地质预报的常用方法	71
5.2.1 地质分析预报法	71
5.2.2 地球物理探测法	75
5.2.3 超前钻探预报法	102
6 隧道地质灾害综合预报体系的建立	105
6.1 综合预报体系建立的基础	105
6.1.1 隧道介质的物性差异	105
6.1.2 隧道超前预报方法的应用范围与适用条件	106
6.1.3 隧道超前预报方法的选择	106
6.2 综合预报体系建立	107
6.2.1 综合预报体系建立的原则	108
6.2.2 “长中短”结合的综合预报体系	108
7 隧道超前地质预报常用物探方法的现场操作	110
7.1 高密度电法的现场操作	110
7.1.1 采集工作	110
7.1.2 现场工作布置	111
7.1.3 现场测试	113
7.2 TSP 的现场操作	114
7.2.1 现场准备工作	114
7.2.2 现场工作布置	115
7.2.3 现场测试	118
7.3 地质雷达的现场操作	120
7.3.1 现场准备工作	120
7.3.2 现场工作布置	120
7.3.3 现场测试	121
8 隧道超前地质预报常用物探方法的数据处理与解译	123
8.1 高密度电法的数据处理与解译	123

8.1.1 高密度电法的数据处理过程	123
8.1.2 高密度电法的成果解译	126
8.2 TSP 数据处理及解译	126
8.2.1 TSP 数据处理过程	127
8.2.2 TSP 数据解译过程	129
8.2.3 TSP 数据处理和解译的关键技术	131
8.3 探地雷达的数据处理与解译	131
8.3.1 探地雷达的数据处理过程	131
8.3.2 探地雷达的数据解译过程	133
8.3.3 常见地质现象的探地雷达图像特征识别	135
9 马道地隧道综合超前地质预报实例	142
9.1 马道地隧道工程概况	142
9.2 长距离预报	142
9.2.1 地面地质调查	142
9.2.2 高密度电法探测	144
9.2.3 掌子面地质调查	147
9.2.4 长距离预报的结论和建议	148
9.3 中距离预报	149
9.3.1 掌子面地质调查	149
9.3.2 TSP 法探测	150
9.3.3 中距离预报的结论和建议	153
9.4 短距离预报	153
9.4.1 掌子面地质调查	153
9.4.2 探地雷达法探测	155
9.4.3 短距离预报的结论与建议	156
10 平川隧道超前地质预报及灾害体探测	157
10.1 平川隧道工程概况	157
10.2 超前地质综合预报	157
10.2.1 地面地质调查	157
10.2.2 TSP 探测	159
10.2.3 GPR 探测	162
10.3 公路隧道开挖二次灾害的发生与诊断	163
10.3.1 灾害发生情况	163

10.3.2 灾害诊断	165
10.3.3 灾害治理	167
11 地下采空区探测	170
11.1 工程概况	170
11.1.1 探测内容	171
11.1.2 探测的任务和目的	171
11.2 不良地质体探测的方法和仪器	171
11.2.1 探测方法的确定	171
11.2.2 探测所用仪器设备	171
11.3 不良地质体的综合探测	171
11.3.1 地面地质调查	171
11.3.2 地质雷达探测	172
11.3.3 综合探测结果和建议	175
参考文献	177

1 绪 论

1.1 引言

从土木工程的发展史来看,19世纪是长大桥梁发展的时代,20世纪是高层建筑发展的时代,21世纪将是长大隧道工程发展、大力开发利用地下空间的时代,隧道工程和地下工程在国民经济建设中发挥着越来越重要的作用。隧道在山岭地区可用做克服地形或高程障碍,缩短里程,改善线形,提高车速,节省时间,减少对植被的破坏,保护生态环境,同时可避免落石、坍方、雪崩等危害;在城市建设中可减少用地,构成立体交叉,解决交叉路口的拥挤堵塞,疏导交通;在江河、海峡、港湾地区,不影响水路通航;许多水电工程需修建大规模的隧洞工程用于引水发电。在经济可持续发展的战略中,隧道与地下工程将占据重要地位,其规模将日益壮大。

隧道工程是一项隐蔽工程,前方的地质情况变化多样,经常会遇到断层、破碎带、暗河、溶洞等不良地质体,而导致塌方、涌水和突水、岩溶塌陷、洞体缩径、山体变形和泥石流、岩爆及大变形等地质灾害发生。这些灾害的发生导致设备损坏、人员伤亡,影响施工进度,甚至导致整个工程的失败,造成严重的经济损失。如日本于1984~1997年间在隧道施工中死亡220人,其中因崩塌死亡的占26%。在日本的青函隧道(53.8km)施工过程中遇到 $115200\text{m}^3/\text{d}$ 的突水,共死亡34人、伤残1300余人,经过5个多月的工程处置措施才控制住隧道突水,总工期比预期推迟十年之久。意大利和瑞士之间的勒奇山隧道(14.6km)施工过程中因坍塌死亡25人。

我国川黔线凉风垭隧道(4.3km)因围岩遇水膨胀导致拱顶大量塌方,压裂拱圈和边墙,推迟工程达半年之久。成昆线红庙隧道因大量涌水和严重塌方被迫改线。成昆线沙木拉达隧道(6.4km)曾发生 $52000\text{m}^3/\text{d}$ 的多次突水,造成停工32天,通车后严重漏水,多年的整治耗资近千万元。

王梦恕院士指出:“快速施工是我国21世纪隧道修建的主攻方向,消除施工中的地质灾害是快速施工的关键,而要消除隧道施工中的地质灾害,关键是要加强施工地质工作,其中主要就是地质灾害预测预报工作。”在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,围岩工程地质、水文地质条件、可能变形破坏模式、规模和自稳时间的正确预报和判断,是快速施工的关键。

隧道施工超前地质预报由来已久,在隧道施工过程中为了避免和减少地质灾害的发生,英、法、日、德等国家均将此列为隧道工程建设的重要研究内容。从我国根据矿山巷道掌子面揭露的围岩特性成功预报矿山巷道掌子面前方将遇到不良地质体引发巷道塌方开始,隧道施工超前地质预报的研究和应用由此展开。

随着隧道施工技术的提高,工程建设对隧道施工超前地质预报提出了更高的要求。受地质勘察精度、经费等条件的限制,设计与实际不符的情况时有发生。通过超前地质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、类型及其围岩结构的完整性与突水的可能性,为隧道施工方案优化提供依据;为预防隧道突水、突泥、突气等可能造成的地质灾害及时提供信息,使施工单位提前做好施工准备。超前地质预报可以了解掌子面前方的工程地质条件及围岩类别,进而为施工单位选择合理的开挖断面、支护参数和施工方法提供理论依据。隧道超前地质预报可以为隧道施工提供技术支持,保障隧道施工安全,提高施工效率,缩短施工周期,减少或避免事故损失,具有重大的社会效益和经济效益。

1.2 研究进展

1.2.1 国外隧道超前预报的方法及研究进展

世界各国在 19 世纪 70 年代开始了隧道施工地质预报工作,方法多为通过导坑来了解前方不良地质地段,有的则通过超前水平钻孔进行预报。瑞士、日本等国十分重视隧道施工地质预报,许多施工单位配有专门的隧道施工地质工程技术人员,或由业主提供专业的施工地质队伍。超前导坑或平行导坑和超前水平钻孔都是比较直观的预报手段,原理基本一致,都是通过揭露沿隧道轴线方向的地质情况来进行地质预报,只是两者揭露的断面大小有差异而已,可以认为超前水平钻孔是小比例的超前导坑。超前水平钻孔相对于导坑来讲,耗时较少且经济性能较好,但需要超前水平钻机等重型设备,设备的一次投入成本可能较高。还可以通过在超前水平钻探施工过程中,对钻速、回水量等的记录分析、钻孔岩芯的识别、钻孔冲洗液的颜色变化等来确定前方围岩的地质情况,进而确定围岩级别。在曲线地段、纵坡坡度较大地段超前水平钻孔法有一定的应用局限。

地质雷达探测方法是目前分辨率最高的工程地球物理探测方法,该法源于欧美的航天探空雷达技术。1910 年德国的 G. Leimbach 和 H. Lowy 就提出了利用雷达原理探测地下物质,但 20 世纪 70 年代以后,探地雷达的实际应用范围才得以扩大。地质雷达法是交流电法的一种,其基本原理是由发射机发射脉冲电磁波,其中一部分是沿着掌子面传播的直达波,经过时间 t_1 后到达接收机;另一部分电磁波传入岩体中,若在波的传播过程中遇到电性不同的岩体(如破碎岩体、含水岩体等),电磁波就发生反射,经过时间 t_2 后到达接收机,然后根据两种波传播

时间的差值来确定掌子面前方不同岩体的具体位置。地质雷达的使用前提是掌子面前方探测范围内的岩体的电性与掌子面岩体有差异,而且差异越大越好。

20 世纪 50 年代,苏联学者开始研究将直流电法用于煤矿井下探测。直流电法包括电阻率法(电剖面法、电测深法)、充电法、自然电场法、激发极化法等。其中电阻率法是依靠人工建立直流电场,在掌子面测量某点垂直方向的电阻率变化,以此来推测掌子面前方的地质体情况。该法可以确定不同的岩性、进行地层的划分,探测褶皱、断层等构造体的产状,探查含水体的分布情况等。20 世纪 70 年代末期,德国、英国提取与利用槽波的埃里相探测巷道工作面前方的地质构造。

20 世纪 80 年代以来许多国家都将地质预报问题列为重点研究课题。澳大利亚研究隧道掌子面前方地质情况预报,联邦德国进行掌子面前方地层动态的详细调查研究,法国主要研究在不降低掘进速度前提下的勘察方法,但都未取得可供推广的研究成果。日本主要研究掌子面前方地质预报,在青函隧道施工过程中,一方面开挖超前导洞,另一方面在导洞中沿隧道轴线打超前水平钻孔进行地质预报,这种方法取得了一定的效果,接着又开始了应用地球物理探测方法进行超前地质预报的研究。

20 世纪 90 年代初,瑞士安伯格(Amberg)技术公司研发了一套超前预报系统设备——TSP(tunnel seismic prediction)即隧道地震预报系统。该系统采用地震波反射原理,地震波由 24 个爆破点上的小剂量炸药爆炸产生,当爆炸产生的地震入射波遇到岩体结构有变化的岩层时,在不同介质的分界面上,部分入射波被反射,采用电子传感器接收。因地震波在岩体中以固定的速度传播,所以反射波的到达时间和入射波到达不同岩体分界面的距离成正比,故能间接测量地质变化带和测点之间的距离,预测隧道掌子面前方的地质结构及围岩地质状况,同时还可对围岩力学参数(包括动态杨氏模量、静态杨氏模量、泊松比、纵波速度、密度、纵横波速比等)进行评估。其优点是探测距离远(可达掌子面前方 100 ~ 300m)、分辨率高、抗干扰能力强、资料解译速度快、对施工影响小等。TSP 在瑞士、法国、德国、奥地利、意大利、日本等国的隧道施工中得到了广泛的应用。利用 TSP 进行超前地质预报,是施工决策过程中不可缺少的一道工序。日本学者将 TSP 用于日本的多条隧道,并且改进开发了 C-TSP(continuous-TSP)系统,该系统不是为了做 TSP 专门爆破而产生地震波,而是利用隧道开挖时的每一次爆破,对前方地质情况进行预测,探测距离最长可达 150m。

2000 年左右,美国 NSA 工程公司开发出 TRT(true reflection tomography),即空间层析成像技术,并在欧洲、亚洲开始应用。TRT 技术在欧洲隧道地质预报中应用较成功,如波利山隧道、奥地利穿越阿尔卑斯山脉的铁路双线隧道等。该方法的突出特点是在观测方式上实现了空间三维观测,资料处理手段采用地震偏

移成像方法。该方法将检波器和激发炮点布置在隧道边墙和掌子面上,最大限度地扩展横向展布,以充分获得空间波场信息,提高波速分析和不良地质体的定位精度,较 TSP 法有明显的改进。理论预报长度为 100 ~ 300m, 软弱破碎地段为 60 ~ 90m。

近年来,德国 GeohydraulikData 公司开发出了 BEAM (bore—tunnelling electrical ahead monitoring), 即隧道电法超前探测技术,是目前唯一的隧道电法超前地质预报方法。该方法是一种聚焦电流频率域的激发极化方法,其最大特点是通过在外围的环状电极发射一个屏蔽电流和在内部发射一个测量电流,使电流聚集进入要探测的岩体中,通过获得与岩体中空隙有关的电能储存能力参数 PFE (percentage frequency effect) 的变化,预测掌子面前方岩体的完整性和含水性。其另一个特点是可以将装置安装在盾构法施工的盾构掘进机的刀头(测量电极)和外侧护盾(屏蔽电极)上,也可安装在钻爆法施工的钻头前方(测量电极)和两侧钢架(屏蔽电极)上,随着隧道的掘进,连续不断地获得数据,并实时处理得到的 PFE 曲线,从 PFE 曲线即可推断掌子面前方不良地质体的性质。该项技术在欧洲许多国家已经开始使用。

1.2.2 国内隧道超前预报的方法及研究进展

我国隧道施工期超前预报研究工作始于 20 世纪 50 年代。铁二院地质工程师陈成宗先生在川黔铁路凉风垭隧道依据掌子面的地质情况,结合地质素描和丰富的地质工作经验,开展隧道掌子面超前地质预报工作,实现了对地质情况的短距离预测,预报距离为 30m 左右。

70 年代,谷德振教授等根据掌子面地质性状和矿巷施工进度成功的预测了矿巷前方将会遇到断层并引发塌方,开启了我国隧道施工期超前预报研究和应用的序幕。对掌子面地质特征的分析主要是通过掌子面素描实现的,具体包括掌子面地层岩性、产状、节理面发育特征、受地质构造影响程度、地下水发育情况等。根据掌子面岩层的倾角,确定层位,采用相应公式计算软弱夹层在隧道洞身的位置,判断其稳定性,提出施工预防措施。该方法适用于预报范围内岩层产状变化不大的情况下,隧道开挖后,根据掌子面的地质条件,预测分析掌子面前方的地质情况。

此后,我国在大秦线军都山隧道、朔黄线长梁山隧道、西康线秦岭隧道、渝怀线圆梁山隧道、大运高速公路雁门关隧道等项目施工中陆续开展了超前地质预报工作,并贯穿于隧道全过程,取得了较好的效果。这个阶段为我国隧道施工超前地质预报的起步阶段,主要是侧重于单一方法预报和引进国外仪器设备及技术方法进行预报。伴随着我国隧道建设项目的增多,对隧道施工期的超前预报工作予以了极大重视,并将此列为隧道工程建设重点研究内容之一。有些施工单位配