

公路隧道施工 监测检测技术及实践

□ 王 斌 编著



北京交通大学出版社

公路隧道施工监测检测 技术及实践

王斌 编著

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书在系统介绍了高速公路隧道施工方法的基础上,重点介绍了隧道施工监测与检测理论及方法,并结合作者的工程实践,介绍了各种监测及检测内容的具体应用方法。

全书共分为7章。第1章为概述,主要介绍了目前公路隧道发展现状、监测及检测发展现状、目的和意义;第2章详细系统地介绍了公路隧道的施工方法,重点介绍了新奥法施工;第3章介绍了公路隧道施工监测内容、原理与技术方案;第4章介绍了公路隧道施工检测内容、原理与技术方案,重点介绍了无损检测方法;第5章~第6章为作者的工程实践,详细系统地介绍了隧道各种监测与检测方法的具体应用;第7章介绍了公路隧道监测信息处理信息系统及具体实际应用。

本书通俗易懂,所介绍的内容和方法均来自于工程实践,可作为高等院校岩土工程类研究生和高年级本科生的教学参考书,也可作为现场施工监测及检测技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

公路隧道施工监测检测技术及实践/王斌编著. —北京:北京交通大学出版社,2010.8
ISBN 978-7-5121-0236-1

I. ①公… II. ①王… III. ①公路隧道-隧道工程-工程施工-监督管理 IV. ①U459.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第155313号

责任编辑:谭文芳 特邀编辑:高振宇

出版发行:北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414 <http://press.bjtu.edu.cn>

印刷者:北京瑞达方舟印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:12.75 字数:323千字

版 次:2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-0236-1/U·56

印 数:1~1000册 定价:27.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

近些年来,我国道路交通事业飞速发展,公路等级不断提高。2001年年底,全国国道里程12.2万千米,高速公路19437千米;到2009年年底,全国公路总里程达386.08万千米,高速公路里程则达到6.51万千米,公路建设已经成为拉动国民经济增长的支柱产业和带动地方经济发展的龙头。在山区和越江过河的公路建设中,隧道方案以能缩短行车里程,提高线型标准,保障运营安全,保护生态环境等优点,得到普遍应用,并且越修越长,规模越来越大。2001年年底,全国共有公路隧道1782处、70.5万延米,其中特长隧道18处、6.6万延米,长隧道155处、24.2万延米。到2009年年底,全国公路隧道为6139处、394.20万米,其中特长隧道190处、82.11万米,长隧道905处、150.07万米。

许多特长、长隧道相继建成,但由于隧道工程具有建设管理较为复杂、不可预见因素多、工程风险性大、隐蔽工程多、施工时效性强、施工环境恶劣等特点,在隧道建设过程中存在诸如工程可行性研究不深入、考虑因素不周全、管理制度的不完善和对隧道建设中的关键技术研究系统深入程度不够等问题,造成工程质量后期工程建设管理困难,甚至造成很大的浪费。

隧道监控量测与检测作为隧道施工的重要组成部分,对确保隧道安全施工和保证施工质量起着至关重要的作用。本书作者及其团队在隧道方面先后承担多条高速公路隧道建设、管理与施工监控量测与检测工作,积累了丰富的现场监控量测与检测经验。本书正是基于上述科研工作和成果,并结合隧道施工特性及现场需求总结而成的。

在本书相关研究和撰写过程中,作者参考了大量国内外文献资料,这些国内外专家、学者们在相关领域的研究成果构成了本书相关研究的重要基础,在此,向相关作者致以谢意。由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,望读者给予批评与指正。

编 者
2010年8月

目 录

第1章 概述	1
1.1 公路隧道工程主要特点	1
1.1.1 公路隧道发展现状	1
1.1.2 公路隧道的特点	3
1.2 国内外公路隧道施工监测及检测现状	4
1.2.1 国内外公路隧道施工监测研究现状	4
1.2.2 国内外公路隧道施工检测研究现状	5
1.3 监测及检测的意义	6
1.3.1 隧道工程的特殊性	6
1.3.2 隧道工程施工检测的重要性	7
1.3.3 现场量测在隧道工程中的地位	7
1.4 监测及检测的目的与任务	9
1.4.1 隧道施工监测的目的与任务	9
1.4.2 隧道施工检测的目的与任务	11
第2章 山岭公路隧道施工	12
2.1 隧道施工基本方法	12
2.1.1 隧道工程设计与施工理论	12
2.1.2 山岭公路隧道施工方法	13
2.2 山岭公路隧道新奥法施工	14
2.2.1 隧道新奥法施工程序与原则	14
2.2.2 新奥法基本施工方法	16
2.2.3 不良地质条件下隧道施工	21
2.3 山岭公路隧道开挖方法	23
2.3.1 炮眼布置和周边眼的控制爆破	23
2.3.2 炮眼参数	27
2.3.3 电爆破网络	29
2.3.4 塑料导爆管非电起爆网络	31
2.3.5 装药及起爆	32
第3章 山岭公路隧道施工监测原理与技术施工方案	35
3.1 公路隧道施工监测项目内容与技术实施	35
3.1.1 监测设计原则	35
3.1.2 监测项目内容	35
3.1.3 监测技术实施	37

3.2 公路隧道监测仪器要求与原理	48
3.2.1 监测仪器基本要求	48
3.2.2 监测仪器原理	48
3.2.3 围岩内部位移量测	53
第4章 山岭公路隧道施工检测原理与技术施工方案	57
4.1 公路隧道施工检测项目内容与技术实施	57
4.1.1 检测项目内容	57
4.1.2 检测技术实施	58
4.2 公路隧道施工检测仪器与原理	60
4.2.1 隧道开挖质量检测仪器与原理	60
4.2.2 隧道衬砌质量检测仪器与原理	65
第5章 山岭公路隧道施工监测工程实例应用与分析	79
5.1 工程概述	79
5.1.1 隧址区自然条件	80
5.1.2 隧址区工程地质与水文地质条件	80
5.1.3 隧道围岩级别划分	82
5.1.4 隧道主体工程设计	83
5.1.5 隧道施工方法	84
5.2 监测结果概述	85
5.2.1 2006年度监控工作概略反馈	86
5.2.2 2007年度监控工作概略反馈	88
5.2.3 2008年度监控工作概略反馈	90
5.2.4 监控工作量汇总	93
5.3 监测实例应用与分析	94
5.3.1 蝴蝶谷隧道左线 LK 68+016 断面监测情况	94
5.3.2 明铺隧道左线 LK 68+670 断面监测情况	97
5.3.3 岔道2隧道 K 71+216 中隔墙断面监测情况	100
5.3.4 岔道1隧道左洞 K 70+703 断面监测情况	101
5.3.5 岔道2隧道左洞 K 71+237 断面监测情况	103
5.3.6 黑石岭隧道右线 RK 73+142 断面监测情况	107
5.3.7 黑石岭隧道左线 LK 76+496 断面监测情况	109
5.3.8 拱顶下沉和周边位移	112
5.3.9 黑石岭隧道围岩松动圈监测结果分析	113
5.3.10 爆破振动监测	116
第6章 山岭公路隧道施工检测工程实例应用与分析	118
6.1 工程概述	118
6.1.1 张承高速项目概况	118
6.1.2 自然条件	118
6.1.3 工程地质与水文地质条件	119

6.1.4 隧道工程地质评价	122
6.1.5 隧道施工方法	124
6.2 监测与检测结果概述	125
6.2.1 监测工作总结	125
6.2.2 检测工作总结	127
6.3 检测实例应用与分析	127
6.3.1 隧道超前地质预报检测	127
6.3.2 东山隧道右线进口锚杆拉拔试验分析	136
6.3.3 张承高速公路隧道衬砌质量评价	138
第7章 山岭公路隧道监测信息处理系统	149
7.1 信息化施工理论与方法	149
7.1.1 信息化施工的基本概念	149
7.1.2 工程地质调查与测试方法	150
7.1.3 监测目的与范围	151
7.1.4 监控量测项目及测点埋设	152
7.1.5 监测数据整理理论	154
7.1.6 回归分析	156
7.1.7 监测数据的信息化管理及信息反馈	158
7.2 系统分析与总体设计	161
7.2.1 系统分析	161
7.2.2 总界面设计	164
7.2.3 数据库概念模型	165
7.3 围岩监测必测项目子系统开发	166
7.3.1 掌子面地质及支护状况观察	166
7.3.2 拱顶沉降监控量测	169
7.3.3 周边收敛监控量测	170
7.4 围岩监测选测项目子系统开发	172
7.4.1 地表沉降监控量测	173
7.4.2 围岩内部位移	173
7.4.3 锚杆轴力	177
7.4.4 围岩与初期支护间接接触压力量测	179
7.4.5 初期支护及二次衬砌混凝土应力量测	180
7.4.6 锚杆抗拔力	183
7.4.7 爆破振动量测	184
7.5 工程应用实例	185
参考文献	192

第1章 概述

随着国民经济的飞速发展,我国加大了对基础设施尤其是高等级公路的建设力度,掀起了一股高速公路建设热潮,公路隧道的建设规模越来越大。我国的西南、西北等地有大面积山区,在这些地区修建高速公路时,公路隧道和桥梁占很大比重,而且隧道往往是整条高速公路建设的控制性工程。

由于隧道是隐蔽工程,其自然地质环境的复杂多变性和难以预测性的工程特点,使隧道围岩和支护结构稳定性的评价成为制约隧道建设的关键问题。自20世纪50年代以来,国际上就开始通过对隧道工程量测来监视围岩和支护结构的稳定性,并逐渐应用现场量测结果来校正和修改设计。近年来,现场量测与力学计算紧密配合,已形成了一整套监控设计的原理与方法。这些原理与方法适应隧道工程的特点,能结合现场量测技术、计算机技术及岩土力学理论,在铁路隧道、公路隧道和军事隧道工程等工程领域得到了广泛的应用。

隧道的建设是百年大计,保证工程质量是进行工程施工建设的基本要求。检测技术作为质量管理的重要手段越来越为人们所重视。

本书在总结国内外公路隧道工程施工与开挖方法的基础上,根据施工的需求对隧道施工过程中监测和检测原理与技术实践进行了详细介绍,并结合工程实例对监测及检测信息化管理、监测与检测结果综合应用进行了深入分析。

1.1 公路隧道工程主要特点

1.1.1 公路隧道发展现状

在20世纪80年代前,我国公路建设很少设计长大公路隧道。改革开放以后,公路建设步入快车道,为实现截弯、降坡,避免翻山越岭,相继修建了一批长大公路隧道。据不完全统计,截至2003年年底我国已建成公路隧道2175座,总长度1001 km,其中特长隧道27座,总长度99.72 km,长隧道242座,长度385.6 km,中、短隧道746座,长度38.7 km。仅2002—2003年在建和已建的3000 m以上的特长隧道26座,1500 m以上3车道隧道5座。2004年12月13日贯通的秦岭终南山公路隧道全长18.02 km,目前在世界公路隧道中列为第二长,同时也是中国和亚洲最长的公路隧道。2005年年底仅次于终南山隧道的大坪里特长隧道(全长12.3 km)开工。截至2006年年底中国已建成千米以上的公路隧道达一百四十余座。2007年11月6日中国交通部总工程师凤懋润在国际隧道研讨会上表示,随着中国高等级公路向西部延伸,21世纪前十年中,中国将有总长150 km以上的公路隧道投入建设。同时,中国还有许多特长隧道正在研究中,如贯穿中国沿海大走廊的渤海海峡隧道与琼州海峡隧道、修建连接台湾与大陆的台湾海峡隧道等。2008年年底,我国高速公路6.03万千米,全国公路隧道为5426处、318.64万延米,比上年末增加753处、63.09万延米。其

中特长隧道 120 处、52.57 万延米，长隧道 743 处、122.62 万延米。到 2009 年年底，全国高速公路 6.51 万公里，公路隧道为 6139 处、394.20 万米，比上年末增加 713 处、75.56 万米。其中特长隧道 190 处、82.11 万米，长隧道 905 处、150.07 万米。

图 1-1 ~ 图 1-3 为 2001—2009 年 10 年间我国高速公路和隧道的统计分析对比图。

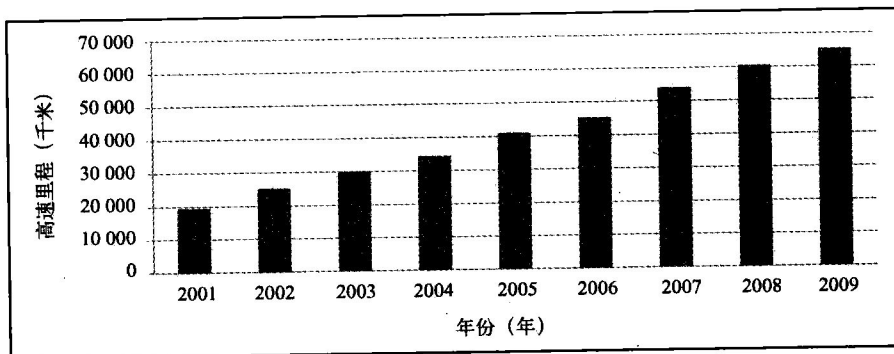


图 1-1 2001—2009 年我国高速公路建设里程统计图

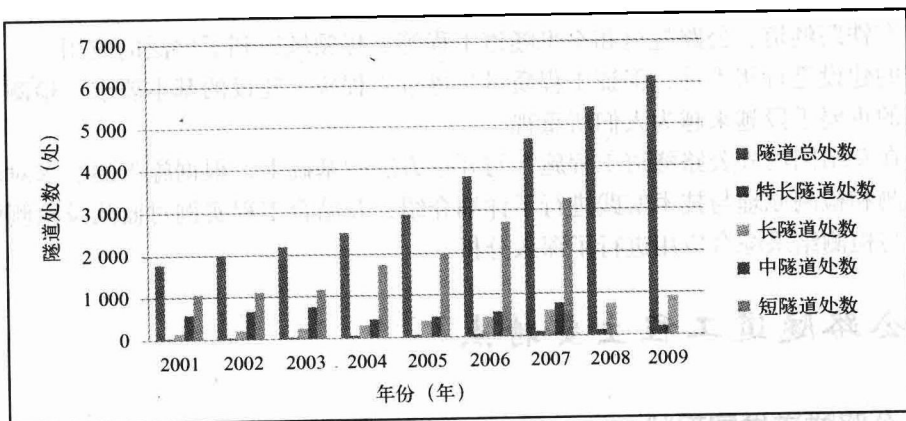


图 1-2 2001—2009 年我国隧道建设数目统计图

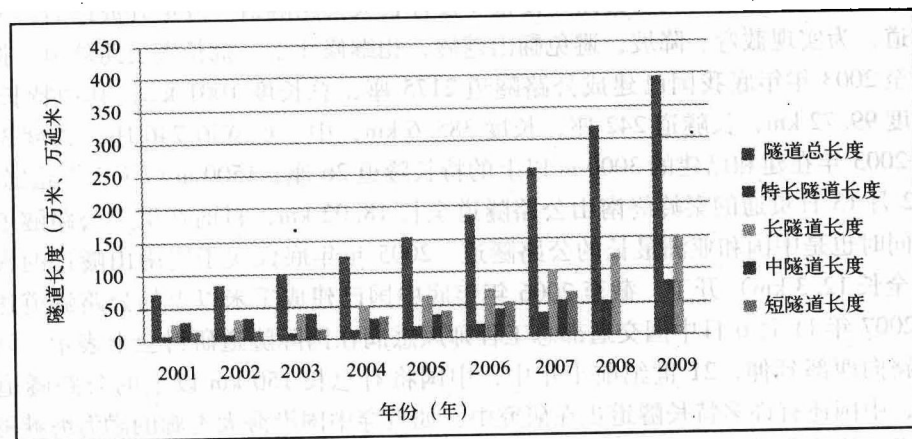


图 1-3 2001—2009 年我国不同类型隧道长度统计图

19 世纪是桥梁的世纪, 20 世纪是高层建筑的世纪, 21 世纪的今天, 交通建设已经进入隧道的时代。“多、大、长、深、群”将是 21 世纪隧道发展的总趋势。

在隧道施工建设中, 尤其是在推广新奥法 (New Austrian Tunneling Method) 以来, 我国修建隧道的长度、段面与难度都是空前的, 基本解决了长大隧道的通风、供电、运输及穿越复杂地层等技术难关, 达到了世界先进水平。在岩石隧道施工中, 光面爆破与锚喷支护技术仍是首选的工艺技术, 复合式衬砌是普及性的支护工艺, 监控量测与信息反馈改变了人们设计与施工理念, 并越来越重视信息化设计与施工, 并已成为今后隧道施工发展的方向。在新奥法推广的基础上, 人们开始重视挪威法技术, 相信今后在中硬岩以上的岩体中将得到推广和普及。

随着新技术、新工艺的推广应用, 钻爆法机械化作业已得到普及, 其中装运及衬砌机械化作业线已广泛应用。但是钻孔工艺还处于半机械化作业阶段, 全液压凿岩台车还未广泛使用, 钻爆法仍是 21 世纪岩石隧道主要的施工方法, 所以钻爆法全机械化作业线必然是今后的发展方向。

1.1.2 公路隧道的特点

1. 断面面积大

一般来说, 公路隧道与铁路隧道、水工隧洞相比其断面较大, 双车道公路隧道的断面可达 80 m^2 左右。因此, 公路隧道围岩受到扰动的范围较大, 其轮廓对围岩块体的不利切割增多, 围岩的拉伸区与塑性区加大, 导致施工难度增大。若公路隧道位于土层和软弱岩体内, 施工难度更大, 通常需要采用特殊的施工方法来建造。

2. 断面形状扁平

在满足使用功能和施工安全的前提下, 尽可能地降低工程造价是隧道设计和施工的基本要求。由于公路隧道的建筑界限基本上是一个宽度大于高度的截角矩形断面, 在设计开挖断面、衬砌结构时, 总是在保证施工安全和结构长期稳定的条件下, 尽量围绕建筑界限设计开挖断面和净断面, 因此公路隧道的断面常设计为形状扁平的。

扁平断面的受力性能不好, 容易在拱顶围岩内出现拉伸。由于岩土之类天然材料抗拉强度较低, 因此在施工中隧道顶部容易崩落, 威胁人身安全。

3. 营运通风

机动车辆通过隧道时, 将不断地向隧道内排放尾气。特别对于那些较长及特长隧道, 必须采用适当的通风方式, 将新鲜空气随风流一起送入隧道, 淡化有害气体, 使其浓度降至安全指标之内。

4. 运营照明设备

高速行驶的车辆在白天接近并穿过隧道时, 行车环境要经历一个“亮—暗—亮”的变化过程, 司机的视觉在此过程中也要发生微妙的变化以适应环境。为了减轻通过隧道时司机的生理和心理压力, 消除车辆进洞时的黑框和黑洞效应, 消除出洞的眩光现象, 高等级公路上的隧道一般都根据具体条件, 对隧道进行合理有效的照明。

5. 防水要求高

在高等级公路上, 车辆行驶速度比较快, 如果隧道内出现渗漏或路面溢水, 则会造成路面湿滑, 不利于安全行车。特别是在严寒地区, 冬季隧道内的渗漏水会在路面上形成冰湖,

诱发交通事故。根据公路隧道目前的发展情况来看,对防水工程的要求会越来越高。

1.2 国内外公路隧道施工监测及检测现状

1.2.1 国内外公路隧道施工监测研究现状

自20世纪60年代新奥法出现以来,隧道施工的监控量测在欧洲及美国、日本等许多隧道工程中得到迅速的发展。在中国的公路隧道方面的应用,是从20世纪80年代才开始的,在国内经过了30多年的发展,虽然在量测方法上有了很大的进步,但目前,公路隧道施工的监控量测相对应施工与设计还没有实现真正意义上的融合,在施工中的监控量测不仅要能及时准确地反映出施工中出现的問題,也要对隧道施工中即将遇到的问题给以必要的信息,以便能指导施工。并通过类比的方法,对一个地区或有着同样围岩特征的隧道提供一套相对完善的量化模式,以便使以后的隧道施工和设计更为合理,实现真正意义上的信息化施工,将监测的信息及时地反馈到施工与设计之中。

自20世纪70年代起,随着计算机技术的飞速发展,涌现了很多学者对岩土计算理论尤其是岩土工程反演理论的研究并取得了较多的成果。日本的櫻井(S. Sakurai)提出的位移-应变反馈确定初始地应力与地层弹性参数值的有限元法,结合工程实践提出了确定围岩极限张应变值的原理和方法,以及评估隧道稳定性的方法和标准(Hazard Warning Level),大家正幸在提出的位移预报法中涉及了初始应力的反演确定,对圆形洞室的弹黏性问题提出了解析解法。美国学者古德曼(R. E. Goodman),在20世纪70年代出版的岩石力学专著中已提到可依据位移量反算初始地应力,意大利学者(G. Gioda)提出了可同时确定初始地应力和地层特性参数的优化反演分析理论。中国铁道科学研究院发表的方法是根据圆形洞室的洞周位移进行平面应变问题初始地应力反分析计算的复变函数法,西安空军工程学院发表的是引入数理统计原理的二维弹塑性問題位移法分析计算的边界单元法,能源部成勘院发表的方法是可考虑松动圈影响的弹塑性問題双介质位移反分析数值及算法。这些研究不仅促进了岩土力学的发展,有利地带动了隧道施工现场监控量测和信息反馈的发展。

近10年来,针对公路隧道建设的现状,我国交通部门每年投入大量科研经费,围绕隧道工程的实际问题展开了科学研究,如“公路隧道CAD技术研究”、“公路长大隧道纵向通风研究”、“公路隧道施工技术规范编制”、“公路隧道通风技术研究”、“沉管隧道修筑技术研究”、“特长公路隧道修筑技术研究”、“联拱隧道建设关键技术研究”、“隧道路面结构与材料的研究”等,在隧道的施工、管理、通风、照明、监控、防灾、维护等领域取得了针对性成果,这些研究成果有力地支持了我国公路隧道的建设。

世界上许多经济发达国家和地区都非常重视公路隧道的建设及研究,特别是北欧国家和日本由于其自身地形和地貌条件,在大力发展公路交通和长大公路隧道建设和科学研究中积累了大量经验和研究成果,在国际上处于领先地位。相比之下,我国公路隧道工程界在这方面起步较晚,工程实例不多,对于隧道开挖时围岩的变形及支护衬砌和围岩内应力变化的研究不多,而研究公路隧道围岩稳定及支护衬砌设计技术将在公路隧道的经济建设和安全生产方面产生极大效益。

在国外发达国家,就隧道建设而言,已经形成了一套完整体系,并且不同国家都各具特

色,如日本、美国、欧洲等。目前国外公路隧道科研主要针对已经发生的几次长大公路隧道的火灾情况展开,内容集中在通风、防灾方面,研究突出以人为本的特色,依托研究成果,其在隧道的建设、改建等方面都提出了改善措施,大幅度提高了通风、消防救灾系统的投资比重。

我国隧道建设技术与国外先进水平相比,目前尚存在一定的差距,具体表现在:一是新技术应用率较低,建设费用和维修费用相当高;二是超长公路隧道的关键技术问题,如通风问题还没有完全解决,制约了高等级公路的发展;三是我国公路隧道在照明、通风、防灾、消防和报警及火灾自动监测系统、紧急电话系统、隧道通信系统、电视监控系统、交通监测控制系统等方面还不符合标准规范的有关要求。

1.2.2 国内外公路隧道施工检测研究现状

最早的隧道检测手段是用钻孔探测衬砌的厚度和空洞,这种方法比较直观,但可能对隧道壁造成损伤,甚至使隧道衬砌的防水系统遭到破坏,造成严重后果。而且这种检测方法速度慢,一般都是凭感觉判断,容易造成误差,只能少量抽样,不能反映隧道衬砌结构的整体质量。

由于破损检测手段存在的弊端太多,人们开始了无损检测技术的探索与研究,于是多种方法的无损检测开始用于隧道的施工质量检测。这些方法概括起来说就是利用声、光、电、磁和射线等方法,检测的目的是推定混凝土强度、密实度、均匀度及存在的缺陷等。与破损检测相比,无损检测具有仪器简单、操作方便、费用较低、不破坏结构、可进行重复测试等优点。无损检测方法包括回弹法、垂直反射法、浅层地震法、超声波法和这些年发展起来并得到广泛应用的探地雷达法。每种方法都有各自的优势,同时也有各自的不足,现分述如下。

1. 回弹法

回弹法是在混凝土侧面或顶面(底面)均匀布置一定数量的测点,利用回弹仪测得混凝土的回弹值,并根据已知的测强曲线,以及混凝土抗压强度与混凝土表面回弹值之间存在的统计相关关系,通过换算求得混凝土当前状态和强度,用以检测混凝土的质量和抗压强度。其优点在于:仪器构造简单,方法易于掌握;检测工作有较好的灵活性,可以在结构物的任何部位进行检测;适用于施工现场对混凝土强度进行随机的、大量的检测。但是,回弹法反映的仅是混凝土表面10~15 cm厚度范围内的质量,即只用于检测混凝土表面的质量。

2. 垂直反射法

垂直反射法是极小偏移距离(收发距离)的反射方法,其工作原理是由发射探头向混凝土块发射脉冲波,在波传播过程中遇到波阻抗有明显差异(如脱空、蜂窝等)时将产生反射波而返回到混凝土表面被接收传感器接收。通过对记录下的弹性波信号的振幅、相位、频率等进行分析,即可判断出混凝土中的缺陷。这种方法可在混凝土表面进行,当向被探测对象激发一纵波时,传感器所接收到的反射信号中只有纵波,不含横波等其他类型的转换波,记录波形的成分单一,资料分析十分简单,该项技术已广泛应用于桩基检测工作。该方法的不足就是反射震源和接收检波器必须具有短余震特性,并要解决好高频与大功率之间的矛盾。

3. 浅层地震法

浅层地震法是以测量对象的弹性差异为物理前提的。其基本工作方法是在某一条测线上或浅井中用炸药或重锤作震源激发地震波,当地震波向下传播遇到弹性不同的分界面时,就

会发生反射、透射和折射,再沿测线的不同位置用专门的地震勘探仪器记录这些地震波。根据波的振幅、速度等参数就可推断测量对象的性质。地震法能探测到隧道围岩中较远的范围,其最大的不足就是工作效率太低。

4. 超声波法

超声波法是在结构的表面或钻孔内布置一定数量的测点,利用低频超声波测出混凝土的波速,将测得的波速与标准状态的波速对照从而求得混凝土的质量和强度。这种方法可以在结构的表面、相向的两对侧面进行对测,还可以对钻孔进行单孔或跨孔测量(桩基检测中的声波透射法)。其优点是测试时超声脉冲穿透混凝土的全部厚度或较深的内部混凝土,试验结果能够较好地反映被测结构物的质量;测试工作有较好的灵活性,可以在同一部位进行多次重复测试;无需钻孔检测混凝土结构内部缺陷。20世纪40年代后期,超声波技术开始应用于混凝土的无损检测,1949年,加拿大的莱斯利(Leslie)、切斯曼(Chessman)和英国的琼斯(Jons)、加特费尔德(Gatfield)首先把超声波检测技术用于结构混凝土的检测,开创了混凝土超声技术无损检测的新领域。我国是从20世纪50年代开始开展这项技术的研究工作的,在60年代初即已应用于工程检测,并研制和生产出了第一代国产超声仪。随着我国建筑业和公路铁道的迅速发展,超声波技术作为无损检测的一种方法得到了广泛应用,取得了显著的成效。该项无损检测技术主要应用于金属探伤、桩基检测等领域。在混凝土强度、均匀性及混凝土内部缺陷的检测方面已广泛为人们所认可。超声波检测混凝土是逐点进行观测,其工作效率不适合大面积的隧道检测工作。

5. 探地雷达法

探地雷达法(简称GPR)是利用高频电磁波以宽频带短脉冲形式,由地面通过发射天线定向送入地下,经过存在电性差异的介质反射后返回地面,被接收天线接收。电磁波在介质中传播时,其路径、电磁场强度与波形将随所通过混凝土的电性与状态而变化。当发射与接收天线以固定的间距沿测线同步移动时,就可以得到反映测线以下介质的雷达图像。在进行隧道衬砌检测时,介质为混凝土。当混凝土均一性差时(如存在蜂窝、架空等),这部分区域与周围混凝土电性差异增大,反射波增强;当其完整致密时,混凝土性质相对均一,反射波减弱。该方法可根据波形记录直接分析混凝土内部缺陷的分布和形态,具有可视性;可根据探测深度、分辨率的要求选用不同频率的天线。该方法可在结构物表面进行,灵活性较好,在同一部位可进行多次重复测试。该方法具有很快的检测速度(最高可达到每小时80 km),并且可以连续检测,适合大面积的混凝土检测工作。本书中将主要介绍探地雷达法在隧道衬砌无损检测中的应用。

1.3 监测及检测的意义

1.3.1 隧道工程的特殊性

隧道工程是在地下开挖出的空间中修建结构物,即地下结构是处在周围介质(地层)之中,因此隧道工程从结构角度、所处环境条件等方面与地面工程是全然不同的。

隧道工程的一个重要特点是空间效应和时间效应非常突出。隧道工程与周围环境密切相关,必将受到周围围岩的物理、力学、构造特性、围岩压力的时间效应的影响;支护结构参与

工作的时间,采用的施工方法及支护方式,地面建筑物、构筑物、地下各种管线等的影响。在施工过程中,其荷载、变形及安全度是动态的,不像地面工程那样,基本上是固定的。

隧道工程的一个重要的力学特性是:隧道工程是修筑在应力岩体之中。岩石既是承载结构的一个重要组成部分,也是构成承载结构的基本建筑材料;它既是承受一定荷载的结构体,又是造成荷载的主要来源。这种三维(荷载、材料、承载单元)一体的特征与地面工程是极其不同的,特别是岩体的应力和变形,因受多种因素影响,是非常复杂的。尽管目前的数值计算方法得到迅速发展,但是至今,地下结构的计算理论仍很不完善,计算结果与实际之间仍存在一定的差别。正因为这样,长期以来隧道工程在很大程度上是凭经验设计、施工的。而这些大量的,丰富的经验都是从实践基础上得来的,许多是符合科学、有一定理论基础的。比如,锚喷支护、新奥法施工、隧道工程监测和信息化设计技术等,就是从实践基础上发展起来,已成为国内外学术界及岩土工程界所公认的设计、施工方法。实际上,隧道工程已成为一门经验性很强的科学。事实证明:单独地、孤立地使用力学计算方法或经验方法都不能取得较好的效果。隧道工程设计的正确途径,应该是一方面使经验方法科学化,另一方面使设计中的力学计算具有实际背景。为了做到这一点,测试与监控技术在隧道工程中的作用就显示出了特别重要的意义。随着大型洞室隧道、地铁等隧道工程的兴建,岩体力学及围岩量测支护技术得到了迅速发展,量测监控已逐步成为隧道工程的先导技术,成为安全施工与科学管理不可缺少的重要手段,有些部门已把测试、监控技术工作作为合同文件中所需确定的工程量的一部分。

1.3.2 隧道工程施工检测的重要性

公路隧道在山区公路中占很大比重,其位置的特殊性决定了隧道是高速公路建设和工后安全运营的控制性工程。因此,公路隧道的建设是百年大计,保证质量就成了工程的突出重点,而隧道检测技术作为质量管理的重要手段体现了其在隧道工程施工质量检测中的重要性。

1.3.3 现场量测在隧道工程中的地位

在隧道开挖的过程中,使用各种类型的仪表和工具,对围岩和支护系统的力学行为及它们之间的力学关系进行量测。这类量测常被称为“现场量测”,也称“原位观测”。

与一般工程测试相比,隧道工程中的现场量测具有特殊重要的作用。而这一点并没有被所有人认识到。诚如著名岩石力学专家米勒(L. Muller)所说:“在岩土工程,特别是在隧道工程中变形量测的重要性尚未被很多人所认识。有些人把很重要的监测过程看成是仅仅为了满足科研的奢望偶尔使用一下的时髦。同这种观点相反,对岩土结构,特别是对隧道的形态所进行的量测已被证明,其重要性犹如对钢结构和混凝土结构所进行的静力计算一样。”

地面结构工程的修建一般采用较为单纯的“调查—设计—施工”流程。而设计的主要手段则是从“荷载—结构物”模型出发而进行的力学计算。

在隧道工程中,支护系统同围岩之间呈现着错综复杂的关系,这种关系并不总是能用“荷载—结构物”这样一种力学模型加以概括的。特别是在采用与围岩紧密结合的锚喷支护、按新奥法原则修建隧道的情况下,“荷载—结构物”模型显然不能正确地描述围岩和支护系统之间的相互关系。

国际隧协(ITA)隧道结构设计模型工作组曾针对不同条件的隧道工程把设计支护系统

时所采用的力学计算模型归纳为以下 3 种。

(1) “荷载 - 反力”模型。我国自 20 世纪 50 年代以来在衬砌计算中大多采用这种模型。

(2) “连续体”模型。这种模型把支护手段视为岩石介质的某种力学边界条件。有限元、边界元一类数值方法在岩土工程计算中的推行为采用这种模型创造了条件。

(3) “收敛 - 约束”模型。这种模型根据围岩和支护系统的变形特征 (特征曲线), 通过三者变形的协调条件来对围岩稳定性和支护系统的静力工作条件进行计算。

在很多情况下, 要确定采取以上模型中的哪一种较为合适并不容易。而一旦计算模型确定以后, 计算所需的各项输入信息的确定 (如岩体本构关系及特性参数、初始地应力、支护特性参数等) 就成为问题的关键。输入信息不正确会使计算得出同实际不相符合的结论。围岩是一种处于形形色色地质背景中的、多相的、不连续的复杂介质。力学计算所需的输入信息的获得仅仅依靠施工前的一般地质调查和室内岩石力学试验是难以做到的。这就使得仅仅依靠力学计算来设计支护在很多情况下成为不可能。

事实证明, 单独孤立地使用力学计算方法或经验方法都不能取得较好的效果。片面强调其中某一种手段而排斥另一种也是不正确的。为了选择一条隧道工程设计的正确途径, 一方面要使经验方法科学化; 另一方面则要使设计中所进行的力学计算具有实际背景。

为了做到这一点, 现场量测就起到特别重要的作用。可以把隧道开挖后围岩和支护系统力学性态的变化动态作为判断围岩稳定性和支护系统可靠性的依据, 把施工监测所获得的信息加以处理, 与工程类比的经验方法相结合, 建立一些必要的判断准则, 借以直接利用量测结果 (经处理) 及时地调整、确定支护参数或进行施工决策。

实现量测信息对隧道设计和施工的反馈的另一条途径, 是利用力学计算作为媒介。

一般来说, 如果表征某一系统力学属性的各项初始参数是确定的, 那么该系统的力学行为也随之确定。反之, 如果能通过现场量测获得反映该系统力学行为的某些物理量, 那么从理论上说, 可以通过力学计算反推该系统的各项初始参数。即岩土参数的“反分析”技术。利用反分析技术有可能根据对试验段或试验洞进行现场量测所得到的数据 (如围岩表面某些测点上的位移值或在某一基线上的净空变化值) 推算表征围岩性态及其地质背景的初始参数, 将其作为对该隧道围岩稳定性进行分析、对支护系统进行设计计算时的输入信息。

显然, 用反分析技术所得到的这种参数, 与隧道施工前的一般地质调查和有限的室内岩土力学试验所提供的结果相比较, 更能全面、真实、概括地反映围岩性态, 据以进行力学计算则容易得出较为接近实际的结果。

图 1-4 中描述了以施工监测、力学计算及经验方法相结合的隧道工程特有的修建程序。与地面工程不同, 在隧道工程修建过程中, 调查、设计、施工等诸环节允许有交叉、反复。在初步地质调查的基础上根据经验方法或通过力学计算进行预设计, 初步选定支护参数。然后, 还须在施工过程中根据监测所获得的关于围岩稳定性和支护系统静力工作状态的信息, 对施工过程和支护参数进行必要的调整。施工实例表明, 对于设计所作的这种调整和修改是十分必要和有效的。以施作及时、同围岩结合紧密并具有一定柔性的锚杆、喷混凝土支护的使用为技术背景所发展起来的“隧道工程新奥地利法” (NATM) 的主要原则是: 隧道修建过程中安全条件的获得、隧道在使用中安全度与工程质量的保证, 主要应立足于围岩自身通过应力调整所建立的平衡。支护系统的作用则在于提供一个适当的力学边界条件, 促使这种

应力调整过程的完成和平衡的建立。

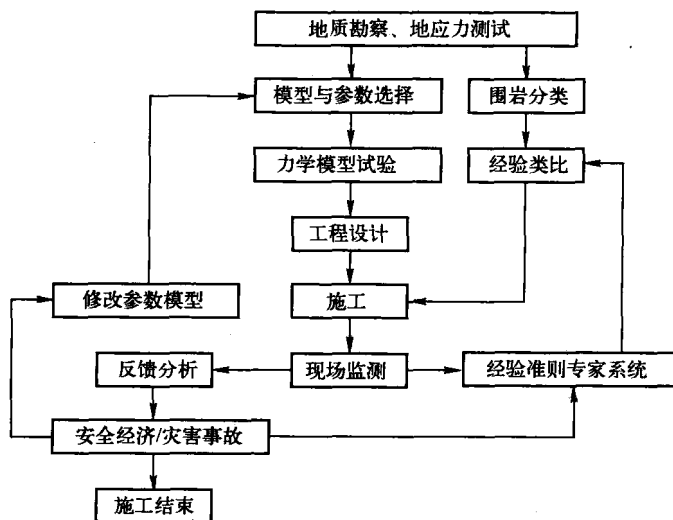


图 1-4 施工监测和信息化设计流程图

因此，采用新奥法原则修建隧道时，施工中对围岩应力调整过程和围岩变形情况进行监测是必不可少的。事实上，开挖方法的确定、锚杆的布置、锚喷支护参数的确定、二次支护施作时间的选择都有赖于施工监测。因此，一般把施工监测和锚杆、喷混凝土称为新奥法“三要素”。

新奥法量测工作是伴随着施工过程同时进行的，是新奥法构筑隧道中十分重要的部分，它既监视围岩是否安全稳定，又检验支护结构是否合理。因此，量测工作是监视工程设计与施工是否正确的指针。大量工程实践证明，量测手段配合其他量测工作，能使设计、施工达到更满意的效果，对提高工效、降低成本、保证安全均有非常重要的作用。

1.4 监测及检测的目的与任务

1.4.1 隧道施工监测的目的与任务

现场监测是监控设计中的重要环节，也是目前国际上流行的新奥法施工中的重要内容。归结起来，量测的目的与任务是掌握围岩动态和支护结构的工作状态信息，利用量测结果修改设计、指导施工；预见事故险情，以便及时采取措施，防患于未然；积累资料，为以后设计提供类比依据；为确保隧道安全提供可靠信息，为二次衬砌提供合理的支护时机，并为进一步深化理论研究提供原始数据。具体来说，有如下几点。

1. 提供监控设计的依据和信息

建设隧道工程，必须事前查明工程所在地的岩体的产状、性状及物理力学性质，为工程设计提供必要的依据和信息，这就是工程勘察的目的。但隧道工程是埋入地层中的结构物，而地层岩体的变化往往又千差万别，因此仅仅靠事前的露头调查及有限的钻孔来预测其变

化,常常不能充分反映岩体的产状和性状。此外,目前工程勘察中分析岩体力学性质的常规方法是用岩样进行室内物理力学试验。而岩块的力学指标与岩体的力学指标有很大不同,因此必须结合工程,进行现场岩体力学性态的测试,或者通过围岩与支护的变位与应力量测反演岩体的力学参数,为工程设计提供可靠依据。当然,现场的变位与应力量测不只是为了提供岩体力学参数,它还能提供地应力大小、围岩的稳定度与支护的安全度等信息,为监控设计提供合理依据和计算参数。

2. 指导施工,预报险情

在新奥法施工过程中,通过现场量测可以判断围岩稳定性,预报施工的安全程度,发现异常情况后可以及时采取措施,因而能保证安全施工。对那些地质条件复杂的地层,如塑性流变岩体、膨胀性岩体、明显偏压地层等,由于不能采用以经验作为设计基准的惯用设计方法,所以施工期间须通过现场测试和监视,以确保施工安全,此外在拟建工程附近有已建工程时,为了查清并控制施工的影响,有必要在施工期间对地表及附近已建工程进行测试,以确保已建工程安全。

近20年来,随着新奥法的推广,在软弱岩体中现场测试更成为工程施工中一个不可缺少的内容。除了预见险情外,它还是指导施工作业、控制施工进程的必要手段。如应根据量测结果来确定二次支护的时间、仰拱的施作与否及其支护时间、隧道工程开挖方案等。这些施工作业原则上都应通过现场量测信息加以确定和调整。

3. 超前预测

我国不少研究单位、高等院校和设计部门的专家学者,在数值分析和理论研究方法上进行了积极探讨,汇集了现场施工与实测的诸多经验,应用有限元法(FEM)、边界元法(BEM)、离散元法(DEM)等开发出了不同类型的数值分析程序,例如,西安矿业学院的刘怀恒教授在1978年开发出“岩石力学平面非线性有限元分析程序NCAP-2D”;同济大学的黄伟、杨林德教授于20世纪80年代初期开发了“锚喷支护地下洞室非线性有限元分析程序”;中国人民解放军总参工程兵第四设计研究所的李世辉于1985年开发出“典型工程类比隧道力学分析边界元程序BMP-84”,现已升级到BMP2000;同济大学的朱合华教授于1997年推出了“隧道工程施工模拟通用正反分析计算软件”;东北大学的于泳磊、刘连峰开发了“3D离散元软件TRUDEC”。为监测信息的综合利用提供了计算手段。

目前对位移量测的数据可以用指数函数、对数函数及双曲线函数通过回归分析推测出最终变形量与围岩的稳定状态,也可用灰色理论及人工神经网络的方法来预测隧道围岩的最终变形量和围岩的状态。由于目前在现场直接测试岩体力学性质的有关参数和初始应力状态费用较高,比较困难,而且难以反映整个工程范围内的真实情况,所以现在更多的是进行围岩变形的量测,然后用反分析方法来反算岩体的某些参数及原岩应力,再利用正分析对围岩或支护的安全度做出超前预测,并预测隧道围岩最终状态是否稳定。

4. 作为工程运营时的监视手段

通过一些耐久的现场测试设备,可对已运营的工程进行安全监视,这样可对接近危险值的区段或整个工程及时地进行补强、改建,或采取其他措施,以保证工程安全运营,这是一个在更大范围内受到重视和被采用的现场测试内容。例如,我国一些矿山井巷中利用测杆或滑尺来测顶板的相对下沉,当顶板相对位移达到危险值时,电路系统立即自动报警。