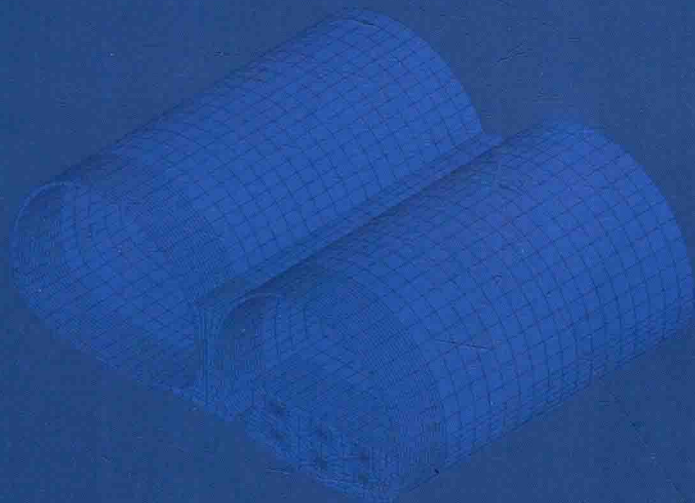


隧道工艺力学

邵珠山 著



科学出版社

隧道工艺力学

邵珠山 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

工艺力学是把科学和生产工艺联系起来的一门科学,是指用力学指导生产工艺。本书针对隧道建设的主要工艺过程,从力学与建设工艺相结合的角度,建立相应的数学模型,通过对隧道建设过程中力学规律的认识,给出解决某些工艺问题的科学途径。全书分五章,除了对隧道工程的发展做了简单的综述外,重点介绍了软岩隧道的变形控制、坡积土隧道进出洞技术、隧道岩爆的预测与防治、隧道施工中的爆破振动控制等问题的力学建模与模拟技术。

本书可作为土木工程专业和交通工程专业隧道工程方向的教学用书,也可作为铁道工程、公路工程、水利工程、城市地下工程、岩土工程、矿建工程等领域的设计、施工、科研人员提供技术借鉴和理论参考。

图书在版编目(CIP)数据

隧道工艺力学/邵珠山著. —北京:科学出版社,2015. 11

ISBN 978-7-03-046465-1

I. ①隧… II. ①邵… III. ①隧道施工-施工力学 IV. ①U455

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 282635 号

责任编辑:杨向萍 亢列梅 乔丽维 / 责任校对:彭珍珍

责任印制:赵 博 / 封面设计:红叶图文

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张:19 1/4 插页:3

字数:388 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

工艺力学是钱学森先生率先提出的概念,属于技术科学的范畴。这一提法反映了科技转化为生产力的客观过程,即从理论发展技术、从技术发展工艺。首先,它不同于自然科学,自然科学是以理解和认识客观世界的规律为核心,而技术科学是以为工程技术服务为宗旨;其次,它不同于工程技术,它研究工程技术中带有共性的东西,意在使工程设计摆脱传统上依靠经验为主的局限性。从这个层面上讲,工艺力学是把科学和生产工艺联系起来的一门科学,是用力学的基本理论和最新成果指导生产工艺。

20 世纪 90 年代初期,我大学毕业后在陕西飞机制造公司从事飞机强度设计工作,零部件加工、热处理、装配等生产工艺中产生的问题给了我深刻的印象,作为一名力学专业的大学生,我当时对工艺力学产生了初步的概念。在随后的航天工程、海洋工程等领域的科研中,我对于生产工艺对生产效率和产品质量的影响,有了更加深刻的认识,也萌生了利用力学基本理论和研究成果去服务生产的冲动。

我首次接触地下工程领域大概是在 2007 年 8 月,那时候,我在新加坡南洋理工大学国家防护工程中心工作,与石根华先生、马国伟教授和周迎新教授一起去马来西亚的巴贡水电站考察,地下厂房、大坝、边坡等工程的宏伟场面深深地打动了我,从那时起,我就下定决心从事地下工程领域的科研与工程技术服务工作,用所学的力学知识为地下工程建设做些力所能及的事情。在随后几年的隧道工程技术服务中,我尝试着把力学与隧道建设工艺联系起来,并对隧道工艺力学有了初步的认知。

在隧道开挖过程中,影响隧道建设的因素很多,包括地质条件、开挖工艺、支护参数、大气环境、工程机械以及工程人员等。对于如此之多的影响因素,依靠力学建模,从力学与工艺相结合的角度来寻找隧道建设中的共性东西,给出解决这些问题的力学途径是非常困难的。纪卓尚教授的《船舶制造工艺力学》一书,给了我一些启发。我开始关注隧道开挖过程中的变形控制、爆破振动控制等具体的工程技术问题,将其中的力学问题抽取出来,具体分析,给出解决这些问题的力学途径。

隧道建设过程中的工艺力学问题很多,结合我所经历的具体工程技术问题,本书仅仅讨论软岩隧道的大变形控制、钻爆开挖中的爆破振动控制、岩爆的预测与控制以及隧道进出洞技术中的工艺力学问题,内容涵盖了我的几个研究生的科研成果,包括王新宇、乔汝佳、李晓照、杨洪武、熊阳阳、达晓伟、范艳国。王新宇、李晓照和乔汝佳继续在我的指导下攻读博士学位,其余的学生都奔赴了各自的工作岗位。

隧道工艺力学是一门把力学与隧道建造工艺联系起来的学科,其内容远不止本书所涉及的有限的几个问题。尽管涉猎有限,作者希望能借此抛砖引玉,引起工程与科研领域对隧道工艺力学的关注,并希望能有更多卓越之士来推动这一领域的发展。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

孙继山

2015年7月21日
于西安建筑科技大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 我国隧道建设的发展	1
1.2 隧道施工中的几个问题	3
1.2.1 软岩隧道的变形控制	3
1.2.2 隧道洞口边仰坡的稳定控制	5
1.2.3 岩爆问题	7
1.2.4 隧道爆破的振动控制	9
第 2 章 软岩隧道的变形控制	11
2.1 工程背景	11
2.2 基本理论	13
2.2.1 变形理论	13
2.2.2 控制理论	22
2.3 工程案例分析	27
2.3.1 象山隧道——挤压破碎带大变形控制	27
2.3.2 旗下营隧道——冲沟影响	54
2.3.3 西安地铁隧道	78
参考文献	96
第 3 章 坡积土隧道进出洞技术	97
3.1 工程背景	97
3.2 研究现状	97
3.2.1 边坡稳定性研究方法与发展	97
3.2.2 隧道洞口边坡稳定性研究现状	102
3.3 工程实例	104
3.3.1 隧道洞口边仰坡稳定性分析与边仰坡治理研究	104
3.3.2 不同隧道开挖工艺对隧道洞口段稳定性的影响研究	143
参考文献	177
第 4 章 隧道岩爆的预测及防治	181
4.1 隧洞岩爆研究现状	181
4.1.1 岩爆现象及发生条件	182

4.1.2	岩爆机理	183
4.1.3	岩爆判别指标	184
4.1.4	岩爆倾向性判别指标	185
4.1.5	岩爆防治措施研究现状	186
4.2	秦岭翠华山隧道工程地质条件	186
4.2.1	工程概况	186
4.2.2	工程地质条件	187
4.2.3	水文地质条件	192
4.2.4	隧道所在区域地应力	195
4.3	秦岭翠华山隧道岩爆预测与防治措施研究	205
4.3.1	隧道岩爆预测	205
4.3.2	岩爆防治措施研究	208
4.4	翠华山隧道现场岩爆情况及防治措施	211
4.4.1	现场岩爆试验	211
4.4.2	现场岩爆试验总结	212
4.4.3	岩爆防治方案	214
4.4.4	隧道现场岩爆情况	215
	参考文献	219
第5章	隧道施工中的爆破振动控制	222
5.1	工程背景	222
5.2	基本理论	222
5.2.1	爆破地震波概述	223
5.2.2	爆破地震波分类及简介	224
5.2.3	爆破地震波的波速	225
5.2.4	爆炸动力荷载计算模型	227
5.2.5	爆破地震波波动方程	229
5.2.6	柱面波波动方程	230
5.2.7	波的叠加	231
5.3	工程实例	232
5.3.1	双连拱隧道爆破振动响应	232
5.3.2	下穿隧道爆破振动响应	274
5.3.3	小净距隧道爆破振动响应	284
	参考文献	300

第 1 章 绪 论

1.1 我国隧道建设的发展

人类修建和利用隧道的历史十分久远,早在古代就有不少国家和地区为了农业灌溉和生活用水而开挖隧道,但这些隧道的规模通常都比较小。直到 1826 年英国开始修建长 770m 的泰勒山隧道,供大型车辆通行的现代交通隧道才首次出现。20 世纪 80 年代,国际隧道协会提出“大力发展地下空间,开始人类新的穴居时代”的倡议。地下空间开发利用成为解决人口、资源、环境三大难题的重大举措之一,而交通隧道作为地下空间的主要利用形式,在穿越障碍、解决城市交通压力、节约城市用地等方面发挥了重要的作用,因而在世界各国得到迅速发展。

我国山地、丘陵区面积约占国土总面积的 69%。过去受资金和技术的限制,隧道建设规模小,技术落后,运营效益差。以公路隧道为例,公路多以盘山公路为主。20 世纪 50 年代,我国仅有 30 多座隧道,总长约 2.5km。即使到 1979 年,我国公路隧道里程也仅为 52km,数量为 374 座。改革开放后,随着经济的发展和技术的进步,特别是国家对交通基础建设的高度重视,我国各类隧道的建设均有了长足的进步。2002 年 11 月,在中华人民共和国交通运输部(简称交通部)和世界道路协会(PIARC)于北京联合召开的国际隧道研讨会上,时任交通部副部长胡希捷向 770 多名中外专家宣布,中国已成为世界上隧道最多、最复杂、发展最快的国家。

在铁路建设方面,在数量不断增加的同时,原有的单洞隧道长度也不断被打破。20 世纪 80 年代末在京广线上建成的大瑶山隧道,长度达 14.295km,突破长大隧道设计与施工中的许多技术难题,为后续特长隧道的建设积累了丰富的经验。2001 年建成通车的西康铁路秦岭隧道长达 18.2km。之后兰新线上的乌鞘岭隧道长度达 20.5km,取代秦岭隧道而成为我国第一条长隧道。随着青藏铁路西格二线上的新关角隧道的修建(全长 32.605km),铁路隧道的长度又一次被刷新。继大瑶山隧道之后,大断面的复线隧道也开始在铁路隧道建设中大量应用。在秦岭特长隧道施工中,铁路系统还首次在我国应用 TBM 技术进行隧道开挖并取得了可喜的成绩,使我国施工技术水平上了一个新台阶。

在公路隧道建设中,20 世纪 80 年代建设的深圳梧桐山隧道使我国公路隧道单洞长度超过了 2km。90 年代初建成的重庆中梁山隧道长度超过 3km,2000 年建成的四川二郎山隧道长度超过 4km,2003 年建成的山西雁门关隧道长度超过 5km,2008 年建成通车的秦岭终南山隧道长度突破 18km,成为亚洲第一长公路隧

道。在长度被不断刷新的同时,单洞隧洞的跨度也不断增加。单洞 3 车道隧道已在多条交通量较大线路上出现。其中沈阳至大连高速公路改扩建中的韩家岭隧道,长 460m,为单向 4 车道隧道,净宽 19.24m,高 10.39m,其开挖宽度达 21.24m,开挖高度达 15.52m,成为我国当时断面最大的隧道,为我国大断面隧道的设计和施工积累了宝贵的经验。

我国是一个多山的国家,地质条件异常复杂。随着我国隧道建设的不断发展,隧道在修建过程中必将遇到危及施工安全的特殊地质地段,如断层破碎带、软弱围岩、高地应力、岩爆、高地温、岩溶、黄土、松散地层、膨胀性围岩、泥石流、瓦斯地层、含放射性物质底层、高水压底层、富水地层、冻土层等近 20 种不良地质条件,给隧道的施工建设带来很大的威胁。与此同时,受地质条件和线路设计的限制,隧道的结构形式也在不断变化,不仅有单洞隧道,还有连拱隧道、小净距隧道、标准间距分离式隧道、分岔隧道和螺旋状隧道。同时隧道的位置不仅在山岭地区,越江隧道、海底隧道等修建于水中或水下的隧道也都相继完成了施工,并为以后的隧道建设提供了宝贵的经验。

中国城市公交协会的研究表明,地铁的运输能力要比地面公共汽车大 7~8 倍,单向每小时可运送 3 万~7 万人次,且地铁的行驶最高速度可达 10km/h,修建地铁可以大大减轻城市的交通压力。在铁路隧道建设方面,1969 年 10 月我国第一条地铁——北京地铁一期工程建成通车,全长 23.6km。在北京继续扩建通车线路的同时,上海第一条地铁线路于 1994 年全线开通,并在施工中引进了软土隧道盾构施工技术,解决了我国在软土中建造地铁隧道的技术难题。20 世纪 90 年代末,广州也开始了地铁建设,并在 1999 年成为我国第三个拥有地铁运营线路的大城市。在此之后,我国多座城市也开始了地铁或轨道交通的建设,据悉到 2020 年,全国地铁总里程可达 3000km。

总的来讲,我国隧道建设从 20 世纪 80 年代开始突飞猛进,在勘测设计、施工、运营、科研等方面都有许多重大成就和创新。可以说,我国已经成为世界上隧道数量最多、技术发展最快、地质条件和隧道结构最为复杂的国家,也是引领隧道修建技术的世界强国。随着我国经济建设的快速发展,地下工程发展有了更为广阔的前景。随着城市人口密度的加大和工程化进程的加快,为缓解或从根本上解决由此带来的城市交通压力,修建公路、铁路、地下铁道等交通工程已成为世界各国解决上述问题的主要途径。可以预见,在不断完善交通基础建设的同时,将会修建越来越多的隧道,其地质条件将会越来越复杂,施工过程中遇到的问题也将越来越难解决。

1.2 隧道施工中的几个问题

近年来,尽管我国在隧道建设方面取得了可喜的成绩,在隧道设计理念和施工技术等方面有了长足的进步,但仍有一些隧道工程在建设过程中存在不容忽视的安全问题、质量问题等。山岭隧道在我国的隧道总量中占的比例最大,在路网形成中地位十分重要。然而在山岭隧道的建设过程中,遇到的问题较多且较复杂。尤其是,近几年隧道工程向长、大、深埋方向发展,其地质条件越来越复杂,遇到的问题也越来越难以解决。

1.2.1 软岩隧道的变形控制

由于软岩具有强度低、变形大和遇水软化等特点,给隧道的设计、施工乃至衬砌结构的长期稳定都带来了一定的困难。在隧道勘察设计阶段,由于不易把握软岩的物理力学性质以及地应力水平,隧道支护、衬砌结构形式和设计参数经常不能与实际的工程条件相适应;在施工阶段,若施工方法或施工时机不当,则可能造成围岩变形失控或酿成塌方事故;软岩通常具有流变性,围岩中的应力及围岩与隧道结构间的相互作用会随时间发生变化,随时间不断增加的围岩压力将会对隧道结构的稳定产生不利作用。鉴于软岩隧道工程的复杂性及软岩变形压力失控的严重性,软弱围岩隧道的稳定性及变形控制一直是界内关注的焦点之一。

在软弱地层中,隧道变形达到一定量值,则会引发洞室失稳、支护结构破坏,甚至隧道坍塌等现象,变形大是软岩隧道工程的特点之一。世界上首例报道发生大变形的隧道是1906年竣工的辛普伦I线隧道,历时18个月才完成了42m洞段的施工;1970~1975年修建于奥地利的陶恩(Tauern)隧道,全长6400m,埋深600~1000m。该隧道施工中发生了大变形,变形量达到500~1200mm,最大变形速度达200mm/d,是世界上知名的大变形隧道之一。紧接着陶恩隧道之后开工的阿尔贝格隧道(1974~1979年),全长13980m,设计时吸收了陶恩隧道的经验教训,施工较为顺利。但在局部地质较坏的地段,仍产生了200~350mm的支护位移,变形初速度达到40~60mm/d,最大达115mm/d。在增加了9~12m的长锚杆后,使变形初速度降为50mm/d。位于日本中央公路两宫线上的惠那山隧道,为了满足交通需求,先后修建了I号和II号两座隧道,这两座隧道平行,通过的地层相同,其中400m的长平泽断层带非常软弱。值得一提的是,为通过这一条断层,I号隧道采用刚性支护,而II号隧道采用新奥法的柔性支护,其施工控制效果大为不同。I号隧道主洞开挖时先设置了间距为0.8m的重型钢架(H250),并辅以衬板,先后浇筑了两层模筑混凝土。施工过程中,由于变形很快并且量值较大,钢架被大量破坏,因此,在浇筑第二层混凝土时又补充了间距为0.8m的H200钢架。尽管模筑

混凝土衬砌的总厚达 1.2m,且设置了大量的重型钢架,衬砌仍然发生了大规模的开裂,最后不得不采用钢纤维加筋混凝土进行反复修补。Ⅱ号隧道采用了柔性初期支护,其具体参数为:长 6m 的系统锚杆(施工中加长到 9~13.5m);预留变形量(上半部为 500mm,下半部为 300mm),厚 250mm 的钢纤维喷混凝土及可缩式钢架;素混凝土二次衬砌,厚 450mm。最终发生的初期支护位移为 200~250mm,最大 560mm,说明长锚杆发挥了作用。

在我国,隧道围岩发生大变形的问题也越来越严重,如南昆铁路线上的家竹箐隧道,以高瓦斯、高地应力、大涌水而著称。由于煤系地层区段围岩软弱(1.7MPa),且地应力相对较高(16.09MPa),在 390m 长的地段内产生了大变形,水平收敛 600~800mm(最大达 1600mm),拱顶沉降接近 1000mm,延误铺轨达 4 个半月之久。乌鞘岭特长隧道是兰新铁路兰州至武威段增建二线工程的关键枢纽,乌鞘岭隧道在通过宽达 820m 的 F7 断层带时,围岩在 20MPa 的高地应力作用下发生大变形,水平收敛达 1m 以上,支护严重侵限,给施工安全带来极大的困难。中国台湾北部第二高速公路木栅隧道,全长 1875m。当隧道通过 75m 宽的潭湾大断层时,发生了大变形,大变形地段长 205m,拱顶下沉 1500mm 以上,边墙收敛 1400mm。发生大变形的隧道还有青藏线上的关角隧道、宝中线上的堡子梁隧道、国道 317 线鹫鸪山公路隧道以及张集铁路旧堡隧道、大丽铁路禾洛山隧道、襄渝二线新蜀河隧道、太中银铁路兴旺岭隧道、北同蒲四线雁门关隧道、兰渝铁路桃树坪隧道、兰新第二双线铁路小平关隧道及铁山隧道等,这些工程均出现了不同形式和不同程度的围岩大变形问题,给工程建设造成了极大的困难。

图 1.1~图 1.3 是西商高速小黄川隧道初期支护大变形、钢管扭曲及二衬开裂的病害图片。隧道围岩主要由云母、石英、泥炭质灰岩、长石组成的片岩和千枚岩构成,在出口进洞的 160m 处发育有 F5 断层,影响长度为 60~80m。隧道围岩风化严重,岩体破碎,强度低,施工中,拱顶下沉侵限达 514mm。

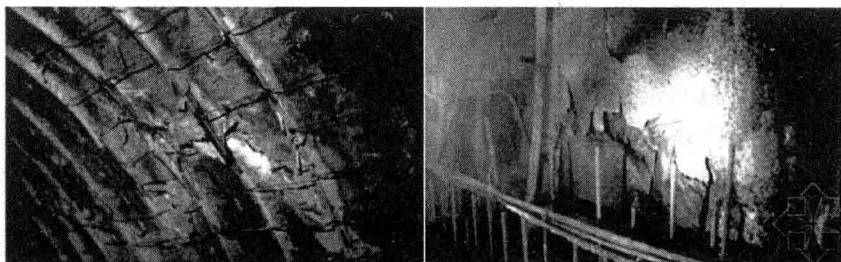


图 1.1 小黄川隧道初期支护大变形

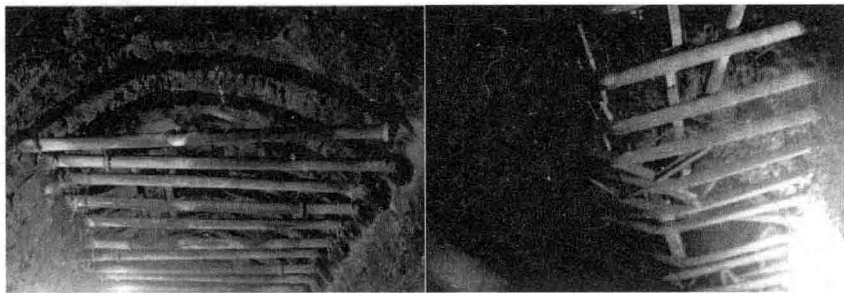


图 1.2 隧道大变形造成钢管弯曲

随着长大深埋隧道的逐步增多,软弱围岩区段隧道大变形灾害问题日益突出,主要表现为变形侵限、喷层脱落掉块、支护开裂、钢架扭曲、拱脚失稳、底板隆起,甚至局部地段发生塌方或二衬开裂现象,不仅严重影响了施工安全和施工质量,同时也对建设工期和投资造成不利影响。与日益增多的隧道建设需求相比,关于软弱围岩隧道大变形问题的研究却相对滞后。目前,关于深埋软弱围岩隧道的变形特征、变形机理、隧道稳定性判别技术以及变形控制技术等方面的研究尚处于探索阶段,为了解决软岩隧道支护与衬砌结构的设计和施工问题,首先需要了解围岩的物理力学性质,认识软岩隧道围岩的变形规律,建立科学的支护理论,并在此基础上制定相应的工程对策。



图 1.3 隧道变形致使衬砌开裂

1.2.2 隧道洞口边仰坡的稳定控制

隧道洞口的安全稳定是隧道能否顺利进洞并进行安全施工的关键,在隧道修建过程中,隧道洞口历来就是施工的难点。常有“进洞难”的说法,这主要是因为:①山岭隧道设计一般要穿越山体表层,而大部分山体表层岩石强度很低,整体稳定性较差。传统的进洞施工会对洞口处边、仰坡进行大挖大刷,将山体原来的平衡状态打破,频频出现滑坡病害。②大部分洞口段埋深较浅,浅埋段的围岩由于风化较为严重,处于破碎、松散状态,在开挖过程中围岩成拱难,稍有不慎就会导致围岩塌方。③现场施工环境危险,工作人员及机械的安全风险大,且隧道进洞施工作业受地形、地质条件的影响较大。④隧道洞口处围岩的稳定性受地表水下渗的影响。⑤当隧道中心轴线与山体走向斜交并存在较大角度时,洞口处会产生偏压影响。

传统的隧道进洞方法过多地从经济上考虑,认为压缩隧道的整体长度就可以减少工程投资,以至于洞口设计在山体内很深的位置,边、仰坡很高,明堑土石方量

很大,并且在施工时容易发生塌方事故。在隧道后期的运营中可能有滚石掉落,又不得不通过修砌明洞确保安全。因此没有实现节约成本的目的,于是,有人提出了“早进洞晚出洞”的进洞理念。然而由于施工方法落后、施工管理不当等原因,并没有产生实质性的效果。2007年,为响应国家全面建设“和谐社会”的号召,实现隧道工程与自然和谐发展的目标,首次提出了环保的隧道进洞技术——“零开挖”。“零开挖”的设计理念是为了使山体保持稳定、保护洞口处的原生植被和自然生态平衡,在洞口施工阶段,采取一定的辅助工程措施或改变施工方法等手段,尽一切可能少开挖山体,确保隧道整体施工完毕后的安全运营,达到工程经济与保护生态环境双赢的目的。图1.4和图1.5是两个“零开挖”隧道。

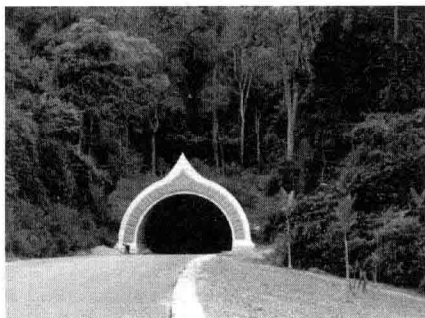


图 1.4 零开挖进洞



图 1.5 重庆高速开窗隧道

虽然进洞技术不断发展,但由于工程地质条件、水文地质条件及人为等因素的影响,在隧道施工过程中仍然容易出现各种各样的地质灾害,隧道洞口边仰坡产生破坏的形式有:①滑坡,斜坡上岩(土)体在重力作用下,沿一定软弱面缓慢整体向下移动,称为滑坡,图1.6是某公路隧道洞口山体滑坡的现场;斜坡沿岩(土)体内较陡的结构面整体下错位移,称为错落;而组成斜坡的岩(土)体常不发展为连续滑动面,而顺斜坡方向发生塑性变形,称为倾倒。②崩塌,整体岩(土)块体脱离母体,突然从较陡的斜坡上崩落下来,并顺坡猛烈翻转、跳跃,最后堆落在坡脚,称为崩塌,又叫塌方,图1.7是高阳寨隧道岩体崩塌的现场图片。③剥落,边仰坡表层岩(土)遭受风化,在冲刷或重力作用下,岩(土)块、屑不断沿斜坡滑落,堆在坡脚,称为剥落。根据洞口段发生破坏的特点,设计施工时需要引起注意和处理的地层有:软弱围岩浅埋段、偏压地层、滑坡和顺层滑坍岩层、岩堆、泥石流沟谷、堆积层、厚层碎石土、地表可能储水或雨后积水的沟槽地貌。

目前,隧道洞口段边坡稳定性的研究方法主要还是沿用工程地质中边坡稳定的研究方法。长期以来,在隧道设计和施工中多采用极限平衡理论和有限元数值模拟计算分析洞门边坡的稳定性。隧道洞口段边坡的稳定性与隧道洞口段施工方法、洞门的结构形式、位置、埋深、地层岩性等众多因素有关,而且由于岩土体的复

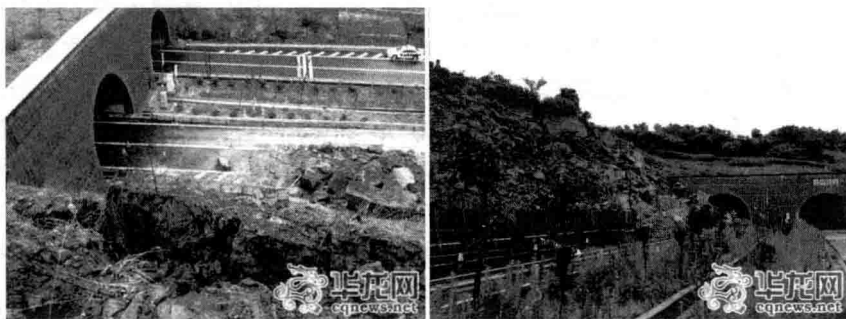


图 1.6 高速公路隧道洞口处山体滑坡

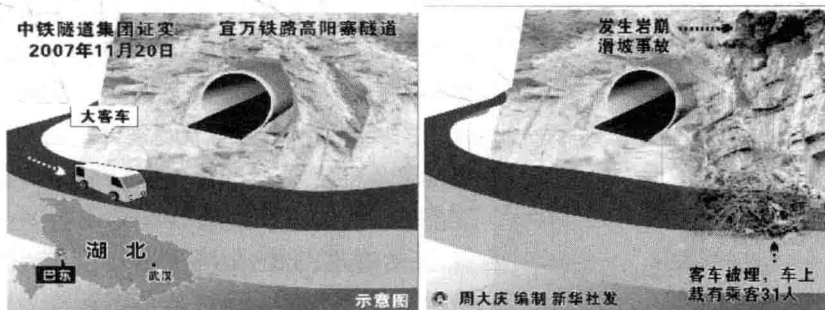


图 1.7 湖北宜万铁路高阳寨隧道发生岩崩滑坡事故

杂性,岩土力学尚具有半经验半理论的特点,在特殊地质条件下岩土体的变形机理仍不清楚,隧道边仰坡的破坏模式和破坏发展阶段等仍不十分明了。如今,在隧道边仰坡研究领域,随着数值方法的成熟,数值计算的结果可信度提高,应用有限元法计算边坡内部的应力,然后假定滑动面,考虑了土的应力-应变关系,开辟了边坡稳定分析的新途径。

1.2.3 岩爆问题

岩爆是高地应力条件下地下工程开挖过程中,硬脆性围岩因开挖卸载导致洞壁应力分异,储存于岩体中的弹性应变能突然释放而产生爆破松脱、剥落、弹射甚至抛掷现象的一种动力破坏地质灾害。

自 1738 年英国锡矿岩爆现象首次报道至今,世界范围内约有 20 多个国家和地区存在不同程度的岩爆问题。例如,加拿大的 Sudbury 镍矿、印度 Kamataka 洲的 Kolar 金矿(目前开采深度已超过 3200m)、美国爱达荷北部的科达尔地区的铅锌矿等都是世界上较著名的硬岩开采有岩爆危害的矿山;作为世界上开采深度最大的南非金矿(南非约翰内斯堡地区的 Witwatersrand 矿区的深井金矿开采深度

已超过 3500m), 平均开采深度在 2000m 以上, 自 1987 年以来每年的采矿事故中, 因岩爆引起的伤亡事故占 1/4 以上。中国最早的岩爆(冲击地压)记录是 1933 年发生于抚顺胜利煤田。我国的煤炭资源丰富, 煤矿众多, 随着开采深度的增加, 岩爆频数剧增。从 1949 年以来, 有 40 多个矿井存在不同程度的岩爆问题, 抚顺老虎台矿的煤爆极其严重, 2002 年该矿发生各类冲击地压 6127 次, 其中大于 3 级的有 21 次, 平均每天发生冲击地压 17 次, 严重威胁煤矿安全生产和城市的公共安全。在我国金属矿山、地下水电的开采过程中岩爆灾害也时有发生, 其中红透山铜矿、冬瓜山铜矿、二道沟金矿、玲珑金矿等深部矿山开采工程相继发生岩爆灾害。天生桥水电站引水隧洞、太平驿电站引水隧洞、锦屏二级水电站施工排水洞和引水隧洞、下坂地水利枢纽工程引水发电洞等水工隧洞相继发生严重岩爆, 造成了巨大的



图 1.8 雅西路隧道出口局部岩爆

经济损失。随着社会经济的极大进步, 为了满足人们生产生活出行的需求, 越来越多公路、铁路隧道在西部山岭地区修建。其面临的大埋深、高地应力等复杂地质条件给岩爆的发生提供了条件。在我国, 秦岭铁路特长隧道、川藏公路二郎山隧道、秦岭终南山特长公路隧道、苍岭隧道、泥巴山隧道出口段及九华山公路隧道等诸多长大深埋隧道工程均发生中等至强岩爆灾害, 严重威胁机械和人员安全。图 1.8 是雅西路隧道的岩爆图。

综合大量的资料, 可以发现岩爆的发生与隧道的埋深、所处地质区域围岩力学性质以及初始地应力等有密切关系。从大量岩爆隧道内观察到的现象, 可以总结出岩爆发生的一些规律。

(1) 岩爆发生在高原岩应力条件下的脆性岩石中。当岩石的原始应力较高时, 构造和开挖次生应力叠加后容易超过脆性岩体强度而发生岩爆。含水率高的岩石较少发生岩爆。

(2) 岩爆岩石一般为岩浆岩或变质岩, 沉积岩较少发生岩爆。含有硅质(特别是石英)或其他坚硬矿物的岩石发生岩爆较多。

(3) 高强岩爆一般发生在背斜轴部以及断层和弹性模量有突然变化的地层夹层(坚硬岩层或软弱岩层)附近。这是因为背斜轴部一般是高地应力区。在断层和岩体弹性模量突发变化的岩层附近施工时, 开挖次生应力将导致断层或刚度突变面剪切应力加大, 发生剪切或断层滑移型岩爆。

(4) 岩爆发生前, 掌子面推进时常会出现岩粉颗粒变大和岩粉量增多、岩石表面有玻璃光泽、钻孔时发生非塌孔原因的卡钻等现象。岩爆前出现的岩粉变粗、岩粉量增多、卡钻和玻璃光泽等现象促使开挖次生应力增大和岩体发生微型破坏的

结果,是开挖次生高应力的表现。

(5) 隧道岩爆最常发生时间为爆破后 2~4h;爆破振动产生的瞬间,动应力与岩爆处岩石本来承受的较高应力叠加,超过了岩体强度导致岩石破坏,因此开挖爆破是岩爆的直接诱因。

(6) 在同一岩爆隧道,岩爆发生的频率和强度均与隧洞的埋深有关。与地震类似,强岩爆发生后短时期内还会发生几次强度较小的岩爆。

岩爆对隧道工程的最大威胁源于岩爆的突发性。岩爆灾害不仅严重威胁施工安全、影响施工进度,还会造成超挖、初期支护失效,严重时还会诱发地震,已经成为硬岩隧道勘测设计及施工组织中必须考虑的重要问题之一,并受到世界各国相关学者的广泛关注。

岩爆问题如此严重,国内外的学者试图从各个角度观察和认识岩爆,探讨岩爆发生机理:从岩爆发生现场的碎屑特征、岩体性质、岩层结构、岩体地应力状态、岩体走向、人为开挖扰动等方面考虑岩爆的成因;从岩爆产生规模的大小、岩爆发生部位和主要应力来源对岩爆进行分类;从能量、强度、灾变与失稳及分形理论等方面研究岩爆机理;从岩爆室内实验来模拟现场岩爆的过程并根据实验数据分析岩爆成因、观察岩爆发生规模大小、分析岩爆机理,为岩爆机理研究提供基础数据;利用声发射等无损检测技术预测岩爆;从强化围岩和弱化围岩两种角度进行现场的岩爆支护并日趋完善。综上所述,各位学者从各方面都做了很多工作,为我们以后的研究奠定了坚实的基础。但总的来说,岩爆的形成机理还在研究之中,对岩爆的认识还有待进一步的深入。

1.2.4 隧道爆破的振动控制

隧道具有改善线型、提高行车舒适性、降低工程造价、保护生态环境等诸多优点,在交通建设中得到了广泛的应用。隧道的形式有很多种,在一些特殊的地段,分离式隧道布线比较困难,在这种情况下,采用小净距或者连拱隧道就成了可行的方案。

目前,钻爆法仍然是山区隧道施工过程中经常采用的方法。由于连拱隧道(图 1.9)本身结构的特殊性,具有左右洞间隔近、围岩自稳能力差、中隔墙受力集中且紧邻爆源等特点。在连拱隧道爆破开挖过程中,爆破振动必然会对中隔墙及二衬产生较大的影响,当爆破振动达到一定程度时可对其造成破坏。由于中隔墙和二衬是隧道的重要构件,并且中隔墙起着承受隧道上部围岩自重的作用,中隔墙和二衬的损伤直接影响隧道的质量安全。因此,研究如何降低爆破振动对连拱隧道结构的冲击响应有着重要的现实意义。

而对于小净距隧道(图 1.10),由于地形地质的限制,新建隧道与既有隧道之间的设计距离往往较小。其中增建的宝成复线与既有隧道间的中墙厚度为 1.902~

2.323m;襄渝二线新大成隧道与既有线最小净距仅为3.73m。招宝山隧道是一座新建双线公路隧道,两隧道之间的设计净距仅为2.98~4.20m。厦门市仙岳山隧道为小间距城市双洞4车道隧道,其岩柱净宽为19m。内昆线青山隧道两隧道净距仅为2.76~12.8m。刚刚贯通的西康二线翠华山隧道,与既有小峪隧道最小垂直净间距仅为8m。广州地铁二期工程(以越秀公园车站为例)主隧道与斜通道间的净距均不足3m。株六铁路关寨1#复线隧道平行于既有隧道,两隧道内边墙的最小距离为7m。新杨柳湾隧道与既有电气化贵昆线杨柳湾隧道中间隔墙的最小宽度仅为4m。小净距条件下,新建隧道的爆破施工所产生的爆破振动效应很大程度上影响了既有线的正常运营,并威胁既有隧道的结构安全。



图 1.9 连拱隧道

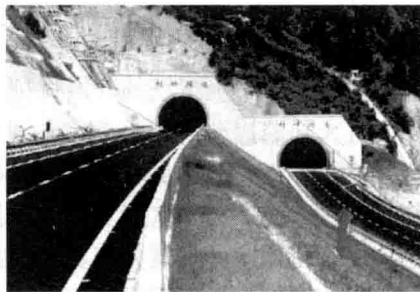


图 1.10 小净距隧道

实际工程爆破时,爆破参数往往采用经验公式计算来确定。但是,由于连拱隧道、小净距隧道结构的特殊性和复杂性,由经验公式得到的爆破参数往往具有一定的局限性,已经不能满足实际工程的需要。同时,数值模拟具有适用性强、周期短、成本低等优点,在爆破振动控制研究方面具有较大的优势。因此,采用数值模拟方法,优化爆破参数,就成了切实可行的措施。

隧道建设是百年大计,确保隧道的设计、施工安全可靠,采用高科技设备、选择切实可行的监测手段,确保既有隧道结构的正常使用和拟建隧道的顺利开挖,对我国交通建设工程和地下空间的利用开发具有重要的现实意义,其在实际工程中将会创造巨大的社会及经济效益。因此,近距离钻爆施工过程中,必须采取合理有效的爆破方案,以控制爆破振动效应的危害,同时,加强对已开挖隧道的实时监控量测、分析及采取合理的加固措施,以确保隧道的结构及运营安全。