

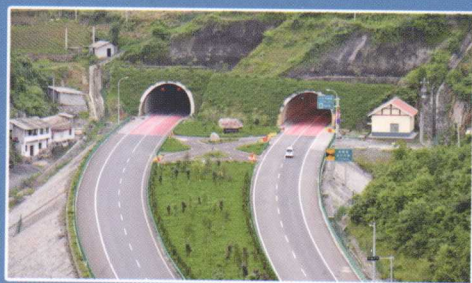


“十二五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

SPECIAL TUNNEL ENGINEERINGS

特殊隧道工程

吕康成 著



人民交通出版社
China Communications Press

013046813



“十二五”国家重点图书出版规划项目
中国隧道及地下工程修建关键技术研究书系

U45
11

特殊隧道工程

SPECIAL TUNNEL ENGINEERINGS



北航

C1652542

U45/11



人民交通出版社
China Communications Press

018000810

内 容 提 要

本书根据目前我国隧道建设中存在的问题,结合作者多年的研究成果以及现场处理特殊工程问题的经验编写而成。

本书内容丰富,涵盖了特殊隧道的基本类型,每章最后附有工程实例。本书分为十二章,主要包括:绪论;偏压隧道;软岩隧道;黄土隧道;岩爆隧道;岩溶隧道;瓦斯隧道;寒区隧道;水下隧道;连拱隧道;通风竖井;通风斜井。

本书可供从事隧道与地下工程的技术人员参考,也可供相关专业的本科、研究生学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

特殊隧道工程/吕康成编著. —北京:人民交通出版社, 2013. 5

ISBN 978-7-114-10596-8

I. ①特… II. ①吕… III. ①隧道工程—设计②隧道工程—工程施工 IV. ①U45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 092371 号

书 名: 特殊隧道工程

著 作 者: 吕康成

责任编辑: 王 霞 付宇斌

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 30.5

字 数: 700 千

版 次: 2013 年 5 月 第 1 版

印 次: 2013 年 5 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10596-8

定 价: 78.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



特殊隧道工程

导 读

三个原因促成了本书的编撰。一是希望对工程中未受重视的若干问题进行讨论。论文篇幅有限,还受期刊的种种限制,有时不能像书籍一样,可用大篇幅比较系统、自由地阐述新观点,探讨新问题。二是希望将一些现场处理特殊工程问题的经验提供给年轻的工程技术人员。工程技术人员工作中感到棘手的往往是比较特殊的工程技术问题,些许的类似工程经验可能对分析与解决具体问题提供新思路,促成工程难题的顺利解决。三是希望给隧道与地下工程相关专业的研究生提供教学参考书。研究生教学中缺少参考书的现象相当普遍,本书在内容组织上注意到研究生需要开阔视野,需要“知其所以然”,需要对“不确定和未知”进行不断探索。

所谓特殊隧道工程,是指较之普通山岭隧道而言,设计与施工比较困难的隧道工程,即在开挖、支护、防排水和衬砌等正常施工之外,尚需采取种种其他工程措施才能保证施工安全和工程质量的隧道工程。这些特殊隧道工程,有的源于不良地质地压条件,如偏压隧道、软岩隧道、黄土隧道、岩爆隧道、岩溶隧道和瓦斯隧道;有的因为隧道处于特殊的自然环境,如寒区隧道和水下隧道;还有的由于工程结构特殊,如连拱隧道、通风竖井和通风斜井。

在三十余年的教学与科研实践中,作者对隧道与地下工程领域的一些难题进行过长期研究或深入思考。部分研究成果已录入本书相应章节,希望这些经过工程实践检验的成果能给年轻的隧道工作者提供借鉴,为我国的隧道建设做出贡献。还有一些新近开发的实用技术,也通过本书介绍给同行,希望有机会尝试用新方法解决老问题,在实践中探索、完善解决工程问题的有效途径。在教学与其他工作中,经常发现一些工程设计或施工存在问题,或相关规范的规定不尽合理,对于此类问题作者也在书中提出了建议与看法,抛砖引玉,希望工程界能对有关问题予以重视。

作者希望通过书中新颖的内容,能实现作者与读者的高效交流,所以在内容的选取上,尽量吸取相关方面的最新成果。为了尽可能避免简单重复引用文献,书中除水下隧道一章由参考资料整理而成外,其余各章均有作者的研究成果与观点。考虑到可能作为研究生教学参考书,在内容的选取上还注意到使之系统

全面。

在偏压隧道一章,书中指出了偏压隧道的困难之处在于同时要解决边坡稳定与隧道稳定双重难题。为了讨论问题方便,将隧道所在边坡分为顺层边坡、半软边坡和匀质边坡。在边坡内开挖隧道,顺层边坡容易出现沿层面滑动,导致隧道支护与衬砌结构严重偏压,进而发展为结构开裂乃至失稳。半软边坡在设计时应注意软硬分界面对围岩压力的影响,地层结构面可能成为决定隧道围岩压力的重要因素;施工时隧道横断面内的硬岩爆破必须严格控制,因为爆破震动与飞石可能破坏既有的支护结构。匀质边坡相对容易施工。

容易出现大变形是软岩隧道的突出特点。在软岩隧道一章,作者开发了激光隧道位移实时监测系统,可用于隧道变形的实时监测。该系统的优点是:①可以实时监测,位移监测系统一经安装调试,电源开启后便会自动采集数据,传递信息,计算位移并实时绘制位移—时间曲线;②操作简便,监测仪及其基准激光器的安装与拆卸随施工进行,监测人员的日常工作是在监控室的计算机上观察位移—时间关系曲线的发展;③数据可靠,监测系统位移直接由计算机读出,数据准确、客观。经在浙江、安徽、陕西的数座隧道和宁夏数座煤矿大变形巷道内的实际应用,该系统的上述优点得到充分验证,特别是在陕西的酉水3、4号两隧道的抢险施工中,更是发挥出其他方法无法替代的重要作用。

黄土隧道常因拱架锁脚失效而出现上部大幅沉降或垮塌。在黄土隧道一章,作者提出了两条解决拱架锁脚失效的途径。一是在上部拱架上加型钢纵梁、钢格构或钢筋混凝土梁。其力学机制是,当隧道下部开挖使局部的上部拱架下脚悬空时,先前施作的纵向钢梁等构件便在纵向两端的稳固支承下发挥承载梁的作用,从而使上部拱架接长(腿)过程中仍能稳定。二是上部拱架锁脚宜用型钢,如槽钢或工字钢。因为上部拱架受力时,需要锁脚构件具有较大的抗弯能力和抗剪能力,型钢与工程上常用的钢管相比,显然在单位长度用钢量相同的情况下,型钢的抗弯能力要大于钢管。此外,通过调整型钢安装时的钻孔孔径和型钢的规格,还可使型钢与孔周土体紧密配合,会使型钢的锚固效果更好。当然在工程实践中,最好是将设拱架纵梁和型钢锁脚联合使用,若此,黄土隧道修建中的锁脚失效与上部下沉垮塌问题会大为减少。

在岩爆隧道一章,作者提出了分析岩爆形成过程的力学模型——三簧模型。该模型将可能弹射的岩片与母岩之间用三根弹簧相连,其中两根为压簧,一根为拉簧。当母岩与岩片受压变形时,在母岩与岩片内部逐渐积蓄了弹性变形能,岩片内的部分压缩变形能汇集于两压簧上,部分拉伸变形能汇集于拉簧上。当围岩表层单向受压破裂时,连接母岩与岩片的拉簧断裂,岩片在压簧的作用下可能会向外弹射。用该模型可解释以下岩爆现象:①弹射岩爆弹射的是岩片,而非岩块;②弹射岩爆发生在横断面两侧起拱线稍上部位。根据三簧模型对最具危害的弹射岩爆的解释,弹射岩爆的防范区域和防范思路变得比较清楚。

大量充水溶洞与地下暗河对岩溶发育地区的隧道修建影响很大。在岩溶隧

道一章,通过对已知溶洞的实验探测,表明了地质雷达法等物探方法的局限性,认识到对探测成果,即影像图的准确判识,要求从业者具有较高的技术素养。探测得到的雷达影像图不仅与所探测的地质体的物理性质有关,还在很大程度上受使用方法的影响。不同的探测倾角、表面的凹凸程度、天线的移动速度等都会直接改变探测成果。因此,建议在岩溶隧道超前地质预报中,注意加强钻探,特别是结合爆破孔与锚杆孔的钻进,探测充水溶洞与地下暗河。另外,在降水量较大的岩溶地区修建隧道时,可尝试短时间在隧道内停止所有机械与人工作业并关闭风机,在洞内无噪声的情况下,监听隧道围岩与掌子面前方有无流水声,借以判断地下暗河等不利水文地质状况。

地层中的瓦斯对隧道工程的影响主要体现在隧道施工过程中,对已投入运营的隧道难以构成威胁。在瓦斯隧道一章,针对一些现行规范对隧道衬砌气密性的要求,从地层瓦斯的赋存规律、隧道施工过程中和隧道建成后地层瓦斯的逸出规律等方面,论证隧道穿越瓦斯地层时对衬砌混凝土气密性的特殊要求意义不大,强调应将瓦斯防范重点放在隧道施工过程中。

在寒区隧道一章,作者根据一维热传导方程,导出了地层温度随时间和深度变化的一个解析解,可用于寒冷地区地层冻结深度的计算;在温度测试的基础上,分析了寒区隧道春融期渗漏与冰冻的成因;通过隧道防水层工后力学性态试验,指出喷射混凝土表面的粗糙度对防水层的长期完好性有至关重要的影响;开发了夹片法隧道防水层铺设技术,为提高防水层铺设质量提供了一条新途径;针对隧道衬砌施工缝防水这一工程难题,先后开发了中埋式可排水止水带、蝶形中埋式止水带和梯形背贴式排水止水带。其中蝶形中埋式止水带和梯形背贴式排水止水带均很好地解决了安装工艺问题,为提高隧道与地下工程施工缝防水质量创造了条件。为了保证背贴式排水止水带在隧道顶部及其周围的密实性,开发了背贴式排出止水带人工假顶辅助安装技术。关于衬砌施工缝防水,还研发了止水带无中接头安装工艺;提出了环向排水管应直通隧道中央排水管,纵向排水管向环向排水管汇水、纵向排水管呈局部加大坡度的波形等寒区隧道排水系统优化措施;提出了“严密防水、妥善排水、酌情保温、急时供热”的寒区隧道防冻思路,强调了防水的重要性,排水是为防水创造条件,而保温与供热是为排水创造条件,不主张盲目地对隧道设大面积的保温层;提出了沿环向排水管设条带层和隧道应急供热融冰方案;将隧道冻胀分为衬砌内部冻胀(细观冻胀和微观冻胀)和衬砌外部冻胀(宏观冻胀),衬砌内部冻胀对衬砌混凝土有危害,衬砌外部冻胀对衬砌结构几无影响,不必在寒区隧道衬砌设计时另外考虑冻胀荷载。

连拱隧道优点突出,缺点明显,修建的关键在于中隔墙的构造设计与施工工艺。在连拱隧道一章,作者将中隔墙横向三层构造(复合式中隔墙)的中间部分称为中墙核,并针对中墙核顶部混凝土浇筑不易密实的问题,提出了在中导洞顶部喷混凝土凸梁的中墙核构造与相应浇筑工艺。若中导洞的顶部不做特殊处理,在几何上洞顶是上凸的,中墙核浇筑时,由于作业空间狭小等原因,中墙核的

顶部混凝土极难紧贴洞顶。中墙核与中导洞顶部的空洞会诱发连拱隧道的多种病害。若在中墙核浇筑前,在中导洞的顶部,通过挂网锚喷等技术措施,形成一道横断面呈凸透镜状的混凝土梁,则中墙核混凝土浇筑至顶部时,现浇混凝土与先前的喷混凝土之间容易密实。通过锚杆与中墙核钢筋的焊接,喷混凝土下凸梁还能进一步增加中墙核的稳定性,减少连拱隧道的中墙病害。

特长隧道为了运营通风常设通风竖井。通风竖井在设计理论和施工方法上与隧道有很大的区别。在通风竖井一章,考虑到通风竖井常被一分为二形成排风井和送风井,为了减少通风阻力,提高通风效率,作者建议通风竖井应采用椭圆形断面或非圆形断面。就单个排风井或送风井来说,其断面愈接近圆形通风阻力愈小。圆形断面竖井被分割后,常使排风井或送风井或两者同时与圆形断面相去甚远。若从通风竖井的功能高效发挥出发,将通风竖井的断面调整为适宜的非圆形断面,则不仅可降低隧道长期运营的能耗,而且,还可能方便通风竖井施工和降低工程造价。

特长隧道的通风井有时为斜井,通风斜井除在断面设计与分割时应注意排风道与送风道独立断面的近圆形之外,减少通风斜井的长度,即减少风流的沿程阻力亦十分重要。在通风斜井一章,作者指出设计时注意采用大倾角斜井,同时强调通风斜井宜采用反井法施工。采用反井法施工通风斜井,一则可以减少山上井口施工便道的辅助工程,减少大量的设备运输及安装费用,降低工程造价;二则可避免或减少对山上井口自然环境和植被的破坏。因此,除非特殊情况,应充分利用隧道自身提供的有利条件,采用反井法施工通风斜井。斜井施工的难点之一是排渣。当斜井倾角小于 13° 时,可用常规的载重柴油车运渣。若通风斜井一直采用此角度通至地表,势必斜井很长。设计斜井时,应注意采用大倾角斜井,即倾角在 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间的整体斜井或斜井(段)。当用反井法施工大倾角斜井段时,可采用矿山常用的自溜排渣方式使岩渣落至该段的底部,然后再装载运输。实用中可将大倾角斜井段与小倾角斜井段结合使用,以调节井口与井底的位置,从而取得理想的技术经济效益。

本书在编写过程中,参考引用了大量的文献资料,在此对原作者表示感谢。特别是对未被列入参考文献的一些资料的原创作者致歉并致谢。研究生吉哲、马超超、许鹏、刘卡和郭亮等协助附图清绘和校对,也顺表谢意。

受种种条件所限,书中错误在所难免,敬请读者批评指正。

吕康成

2013年1月

特殊隧道工程

目 录

第一章 绪论	1
第一节 我国隧道建设的发展	1
第二节 隧道建设中存在的问题	3
第三节 特殊隧道工程的基本内容	7
参考文献	12
第二章 偏压隧道	13
第一节 偏压隧道围岩压力	13
第二节 偏压隧道设计	18
第三节 偏压隧道施工	23
第四节 偏压隧道工程实例	25
参考文献	32
第三章 软岩隧道	33
第一节 软岩分类与性质	33
第二节 软岩隧道变形与支护	37
第三节 膨胀性围岩隧道设计与施工	45
第四节 软岩隧道变形实时监测	53
第五节 软岩隧道工程实例	58
参考文献	66
第四章 黄土隧道	67
第一节 黄土的特征与性质	67
第二节 黄土隧道围岩压力	74
第三节 黄土隧道设计	80
第四节 黄土隧道施工方法的数值模拟	90
第五节 黄土隧道施工	96
第六节 黄土隧道工程实例	101
参考文献	108

第五章 岩爆隧道	110
第一节 隧道岩爆特点与形成机理.....	110
第二节 岩爆隧道设计.....	128
第三节 岩爆隧道的施工.....	135
第四节 岩爆隧道工程实例.....	141
参考文献.....	147
第六章 岩溶隧道	148
第一节 岩溶地下水.....	148
第二节 岩溶地下水对隧道工程的影响.....	150
第三节 岩溶隧道涌水超前地质预报.....	158
第四节 岩溶隧道防排水.....	168
第五节 岩溶隧道工程实例.....	172
第六节 岩溶隧道渗漏水微创处治技术.....	180
参考文献.....	187
第七章 瓦斯隧道	188
第一节 瓦斯的组成及性质.....	188
第二节 瓦斯隧道设计.....	193
第三节 瓦斯检测与施工通风.....	199
第四节 瓦斯隧道的施工.....	203
第五节 瓦斯隧道工程实例.....	209
参考文献.....	214
第八章 寒区隧道	215
第一节 寒区隧道温度场和渗流场.....	215
第二节 寒区隧道春融期渗漏水原因及预防.....	232
第三节 寒区隧道冻融问题.....	235
第四节 隧道衬砌裂缝成因及预防.....	241
第五节 寒区隧道防水.....	249
第六节 寒区隧道排水.....	272
第七节 寒区隧道保温与供热.....	279
第八节 寒区隧道防冻设计指南.....	288
参考文献.....	292
第九章 水下隧道	293
第一节 水下隧道基本施工方法与特点.....	293
第二节 盾构隧道设计与施工.....	298
第三节 盾构水下隧道工程实例.....	308
第四节 沉管法隧道设计与施工.....	334
第五节 沉管隧道工程实例.....	356
第六节 钻爆法施工水下隧道工程实例.....	359

第七节 水下隧道若干技术问题·····	365
参考文献·····	368
第十章 连拱隧道 ·····	369
第一节 连拱隧道的分类与特点·····	369
第二节 复合式中墙连拱隧道设计·····	380
第三节 复合式中墙连拱隧道防排水·····	385
第四节 复合式中墙连拱隧道施工·····	389
第五节 连拱隧道软基处理·····	395
第六节 偏压连拱隧道稳定分析与加固·····	400
参考文献·····	410
第十一章 通风竖井 ·····	411
第一节 竖井分类与断面形式·····	411
第二节 通风竖井设计·····	413
第三节 竖井常用施工方法·····	416
第四节 竖井井筒施工设备·····	419
第五节 竖井基岩段施工·····	425
第六节 竖井施工辅助作业·····	431
第七节 竖井表土段施工·····	435
第八节 竖井衬砌滑模施工·····	440
第九节 通风竖井工程实例·····	446
参考文献·····	454
第十二章 通风斜井 ·····	455
第一节 隧道通风斜井设计·····	455
第二节 通风斜井施工方法·····	458
第三节 隧道通风井方案选择·····	461
第四节 通风斜井工程实例·····	463
参考文献·····	475



第一章 绪论

第一节 我国隧道建设的发展

隧道是用于交通的地下通道。按通行车辆的种类,隧道可分为铁路隧道、公路隧道和地铁隧道;按所处的地理位置,隧道可分为山岭隧道、水下隧道和城市隧道;按施工方法,隧道可分为暗挖隧道、明挖隧道、盾构隧道、机掘(TBM)隧道和沉管隧道等。

改革开放之前,由于经济、技术和指导思想等方面的原因,我国的隧道建设规模小,技术落后,运营效益差。当时的一些越岭铁路线上,有为数不多的铁路隧道,这些隧道绝大多数是长度小于1km的中短隧道,且都是单线隧道。据统计,1979年全国共有公路隧道374座,累计长度52km。这些公路隧道也多是长度从几十米到几百米的短隧道,隧道断面小,其内部不设置任何运营设施。到20世纪70年代末,在全国的大城市中,仅北京有里程有限的地铁线路,修筑地铁隧道的施工方法也十分落后。在我国大陆,当时水下隧道的建设尚属空白。

改革开放之后,随着经济的发展和科技进步,特别是国家对交通基础设施建设的高度重视,我国各类隧道的建设均取得了长足的进步。我国的隧道建设规模已位居世界前列,我国的隧道设计、施工和运营管理技术正在接近世界先进水平。

在铁路隧道建设中,首先是原有的单洞隧道长度纪录不断被打破。20世纪80年代末在京广线上建成的大瑶山隧道^[1],长度达14.295km,突破了长大铁路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度达18.2km。之后兰新线上的乌梢岭隧道长度达20.5km,取代秦岭隧道而成为中国第一长隧。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,技术上的进步使铁路隧道的建设投资与运营费用大为降低。在秦岭特长隧道施工中,铁道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,使我国隧道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。2007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^[2]。超长隧道带来的问题主要是通风问题。

秦岭终南山隧道在施工中,利用临近的既有铁路隧道通过联络通道形成通风网络,有效地解决了该隧道施工期间的通风问题。关于运营期通风,秦岭终南山隧道采用“三井四段”送排组合纵向通风技术,成功地实现了超长隧道的优质高效运营通风,该隧道是国内公路隧道建设规模最大的,在运营设施方面其设置规格也是最高的,创造了许多国内第一。在隧道长度纪录不断被突破的同时,单洞隧道的跨度也不断增加。单洞三车道隧道已在多条交通量较大的线路上出现。值得一提的是,沈(阳)大(连)高速公路改扩建工程中的韩家岭隧道^[3],长460m,为单向四车道隧道,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公路隧道。该隧道的建成为之后我国大断面隧道的设计施工积累了宝贵经验。

随着我国公路建设规模的不断扩大,隧道的地形地质情况越来越复杂,一些隧道同时存在岩溶突水、突泥、煤层瓦斯、采空区、断层破碎带等多种不良地质现象。在318国道上,首次采用的分岔隧道形式^[4],分岔段总长约500m,断面形式由四车道大拱逐渐过渡到连拱、小净距及标准间距分离式,其中最大单洞开挖宽度超过26m。宜昌至恩施(沪蓉西)高速公路建设中,八字岭隧道、庙垭隧道和漆树槽隧道也采用了分岔隧道方案,并对分岔隧道施工量测和爆破施工技术、隧道通风设计等进行了专题研究^[5],为分岔隧道的推广应用奠定了基础。

螺旋状隧道是继分岔隧道后的又一新型公路隧道。雅(安)西(昌)高速公路有两座螺旋形隧道,一座叫干海子隧道,左洞全长1713m,右洞全长1798m;另一座叫铁寨子1号隧道,左洞全长2792m,右洞全长2940m。两座隧道中间相距5.687km。该路段地质条件十分复杂,特别在两座隧道之间,就有安宁河断裂东支和铁寨子—曹谷两条断裂带经过,季节性的冰冻与积雪问题更加剧了该路段的复杂性,设计时必须考虑到使车辆安全、顺利地爬坡。这段路线的起点与终点之间的直线距离仅为12.35km,但海拔高度却从1649m爬升至2362m,高差达713m。如果按传统的缓冲坡度方法,驾驶员稍有不慎,就可能发生侧翻;其次,如果直接修路通过,则坡度太大,修盘山路路线又太长。设计中创造性地采用双螺旋形隧道,汽车通过隧道时,不到10min就可完成326.79m高度的爬升。

水下隧道完全位于水体之下,防水的重要性对水下隧道不言而喻。1994年建成通车的广州珠江隧道^[6],除了管段本身采用自防水结构外,该隧道重点做好了管段柔性接头的防水。具体解决了以下几个关键问题:Ω橡胶止水带的安装与堵漏;硅酸铝防火毡的制作与安装;填塞遇水膨胀橡胶条和弹性密封胶;钢水平剪切键与垂直剪切键的制作与焊装;钢连接板与Ω钢板的加工与焊装。在此基础上,该隧道采用注沙回填后,结合稳定性水泥浆回填和EAA浆材封孔抗渗处理,配以适宜的施工工艺,使该隧道取得了较好的防水效果。之后建成的上海黄浦江隧道的防水技术更为完备,防水效果更好。

翔安隧道是我国内地第一条海底隧道^[7]。翔安隧道工程全长8.695km,其中海底段隧道长6.05km,最深处位于海平面下约70m。从构成上看,翔安隧道分上下部分,上部为检修车通道、逃生通道;下部为市政管廊,用于布排供水管、高压电缆、通信光缆等。服务通道与两个行车主洞之间(左右线隧道)有12条人行横通道、5个行车横通道,在抢险救援逃生时会发挥重要作用。翔安隧道从保护厦门白海豚生存环境以及保护海洋生态环境、海洋珍稀鱼类、海床现状及弃渣利用考虑,放弃沉管法而采用钻爆法。翔安隧道主洞开挖宽13.5m、高5m,最大开挖断面达170.7m²,使其一跃而成为世界上断面最大的海底隧道。该隧道在建设中,攻克了一



系列技术难题,因此也成为我国隧道建设史上的又一里程碑。

地铁隧道建设方面,在北京继续扩展通车线路的同时,上海第一条地铁线路于1994年全线开通,并且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。90年代末,在借鉴了上海隧道建设经验的基础上,广州也主要采用盾构法建设地铁隧道,并在1999年成为我国大陆第三座拥有运营地铁线路的大城市。在此之后,全国多座城市相继开始了地铁或轨道交通建设。值得一提的是,重庆轨道交通的临江门地下车站,其最大开挖断面面积达 420m^2 ,采用复杂的分部开挖法施工并达到了预期的施工效果,为我国大断面岩石隧道施工积累了宝贵经验。

我国幅员辽阔,山多水多,经济健康快速发展,在未来的铁路和公路建设中,还将有更多更艰难的各种隧道需要建设。我国正在全面建设小康社会,人口城镇化成为一种必然趋势,我国的许多大城市都需要建设发达先进的轨道交通系统,为此需要修建大量的地铁隧道。总之,我国的各类隧道建设方兴未艾。

第二节 隧道建设中存在的问题

近年来,尽管我国在隧道建设方面取得了可喜的成绩,在隧道设计理论和施工技术等方面取得了长足的进步,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、质量问题和经济问题。只有对诸多问题产生的原因进行分析研究,提出切实可行的应对措施,才能使我国隧道建设健康持续发展。

一、安全问题

山岭隧道在我国的隧道总量中占比很大,在路网形成中地位十分重要。然而,在山岭隧道建设中安全问题比较突出。施工中对生命财产构成威胁的事故主要有围岩坍塌、涌水涌泥、瓦斯爆炸和弹射岩爆等。

(一)围岩坍塌

隧道开挖改变了围岩的受力状态,如果围岩自稳性好或支护妥当,则隧道施工会顺利进行,否则,围岩会发生坍塌。在一些特殊地质条件下,坍塌发生的几率较高,在突发的状况下危害更大。例如偏压隧道在修建中,有时会遇到维持隧道稳定和维护边坡稳定都十分困难的状况,稍有疏忽便可能因边坡失稳而致隧道局部区段完全垮塌,造成人员伤亡或封堵于隧道内的严重事故。再如,黄土隧道和软岩隧道施工中,经常出现顶部支护结构与上方土(岩)柱突然塌方事故,危害极大。究其原因,有的因为设计不当,有的由于施工欠佳。

(二)涌水涌泥

突发性的大量涌水涌泥是隧道建设中的灾害性事故,常常会造成重大人员伤亡和经济损失,需重点防范。隧道涌水涌泥主要发生在岩溶地区,岩溶主要发育在碳酸盐岩内,我国近 $1/3$ 的国土被碳酸盐岩沉积物覆盖。分布面积大而且范围广。所以,不断提高我国岩溶隧道的修建技术,特别是总结岩溶隧道涌水规律、研究有效的预测方法和可靠的防治措施,是工程界的一项重要任务。我国一些隧道的岩溶灾害见表1-1。

我国一些隧道的岩溶灾害^[8]表 1-1

序 号	隧 道 名 称	所 属 线 路	危 害 情 况	危 害 原 因
1	圆梁山隧道	渝怀线	阻止隧道施工正常进行	多次发生涌水、涌泥
2	南岭隧道	衡广铁路复线	井泉干枯,工期延长,损失达2570 万元	地下水涌升、涌泥、涌水
3	大瑶山隧道	京广复线	发生涌泥 250m ³ ,淹没轨道,中断行车	地下水涌升、涌水、涌泥
4	歌乐山隧道	渝怀线	对隧道周边环境造成了危害	洞内出现严重涌水,地表失水
5	试刀山隧道	合肥至芜湖高等级公路	溶洞内充满堆积物,坍塌高度达 40m 以上,大量堆积物从拱部塌落堆满掌子面,堆体千余方,被迫停工	溶洞内涌泥且发生堆积物塌落
6	田家坡隧道	达万铁路	溶洞大部分已坍塌堆积,左侧长 200 余米。纵向 40 余米,严重影响了施工进度,增加了成本	溶洞溶蚀严重,洞内有渗水,堆积体较厚
7	噶多隧道	贵州水柏铁路	地表梯田出现数条与路线平行的裂缝,最长 39m,最宽 30cm。给施工及当地人民的财产造成极大的危害	涌泥特别严重
8	岩脚寨隧道	贵昆线	造成机具冲毁,人员伤亡严重	岩溶洞穴及管道大量涌水
9	新水花隧道	株六复线	围岩稳定性下降,边墙及拱部均出现塌方,拱部格栅和护拱出现下沉、毁坏。给施工的安全造成一定危害	溶洞处出现股状涌水,受岩溶水浸渍严重
10	武隆隧道	渝怀铁路	造成洞口场地冲毁,矿车等设备被冲走,施工严重受阻,施工进度受到影响	隧道施工中多次揭露溶洞,暗河,多次发生涌水
11	野三关隧道	宜万铁路	造成机具冲毁,多名施工人员伤亡	突水,伴有大量泥沙、块石涌出
12	云雾山隧道	宜万铁路	对隧道施工和周边环境造成了危害	掌子面超前探孔时发生突水涌砂

(三)瓦斯爆炸

隧道建设中有时需穿越煤系地层,煤系地层经常富含瓦斯。瓦斯是煤系地层中以甲烷为主的可燃与有毒气体的总称,有时专指甲烷。如果隧道内空气中的瓦斯浓度处在一个危险的浓度范围内,若再遇火,则会发生瓦斯爆炸。所以,瓦斯隧道在施工中要特别注意防范瓦斯爆炸。我国煤炭资源丰富,分布范围广,隧道建设中常常需穿越煤系地层。在这种情况下,隧道建设不得不面对瓦斯带来的种种威胁。由于经验不足,早期隧道的瓦斯问题未受到足够重视,导致个别隧道发生了瓦斯事故。随着隧道工程界对瓦斯认识的加深和防范技术的不断进步,我国已有许多隧道成功穿越富含瓦斯的煤系地层和采空塌陷区。

(四)岩爆

我国的隧道建设有向长大化发展的趋势。一般说来,隧道越长,其最大埋深越大,地应力也越大。在高应力坚硬的岩体内开挖隧道时,常常会有岩块(片)从开挖壁面突然弹射出来,这种现象被称为岩爆。岩爆会破坏已建成的隧道结构和机械设备,直接威胁施工人员的生命安全。岩爆现象在矿山出现较早。例如加拿大的一些深埋硬岩矿山经常发生岩爆,对矿山的安全与生产构成很大威胁,20世纪50年代美国纽约的引水隧洞施工时曾发生岩片弹射现象。60年代挪威赫古拉公路隧道和瑞典的维斯塔引水隧洞也曾发生过岩爆。成昆铁路线上的关村坝隧道是我国隧道建设中发生岩爆较早的隧道,之后,在二郎山隧道、穿越秦岭的数座隧道施工中也都不程度地发生过岩爆。岩爆对隧道工程的最大威胁源于岩爆的突发性。目前,关于隧道岩爆的形成机理还在研究之中,对隧道岩爆的认识有待进一步深化。

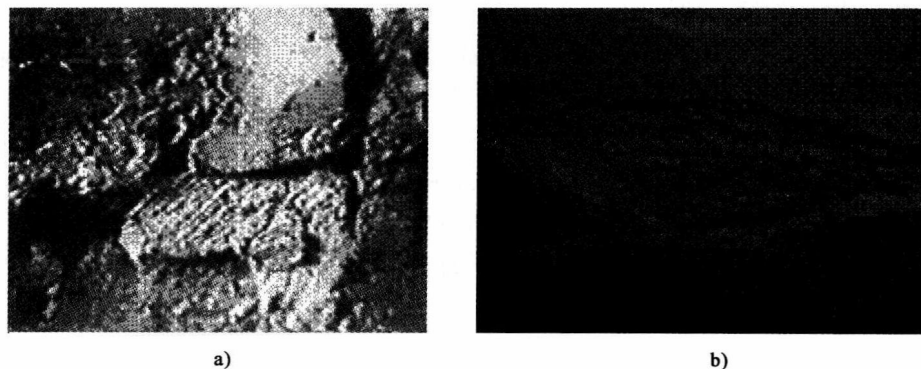
二、质量问题

山岭隧道的质量问题也不容忽视,由于地质条件、地形条件、气候条件以及设计和施工过程中各种因素的影响,许多隧道在建成后不久便出现严重质量问题。常见的质量问题主要有衬砌坍塌、衬砌开裂、渗水漏水和路面破损等。

(一)衬砌坍塌

在役隧道衬砌坍塌是极为严重的质量问题,可能给安全行车带来巨大威胁。日本的铁路隧道相继发生数起重大的混凝土掉块事故,引起日本运输省的高度重视^[9]。1999年6月27日,山阳新干线福冈隧道发生衬砌混凝土剥落,造成列车破损重大事故;10月9日,山阳新干线北九州隧道的边墙上端又发生混凝土剥落事故;11月28日,室兰本线礼文宾隧道发生重达2t的拱部衬砌混凝土剥落,造成货物列车脱轨事故。

近些年,我国也出现了隧道衬砌掉块甚至坍塌的严重事故。312国道上一隧道,在即将通车前发生衬砌坍塌,事故处治期长达一年之久,经济损失巨大。在浙江、四川等省市也曾出现过因拱后空洞,围压异常或其他未预见的原因,而导致已建成的隧道主体失稳及至严重坍塌的重大事故^[10]。另外,在我国的多个省份,都曾经出现过隧道衬砌剥落掉块现象(图1-1)。



a)

b)

图1-1 隧道衬砌剥落掉块现象

a)隧道衬砌剥落掉块1;b)隧道衬砌剥落掉块2

(二) 衬砌开裂

隧道衬砌开裂现象相当普遍。作用在隧道衬砌结构上的压力,与隧道围岩的性质、地应力的 大小以及施工方法等因素有关。由于受技术和资金条件的限制,一些因素在设计前是难以 确定的,所以在隧道衬砌结构设计中常常带有一定的不确定性,导致结构强度不够或与围岩压 力不协调,造成衬砌结构开裂、破坏。然而,工程上出现的衬砌开裂则更多的是由于施工管理 不当造成的,或是因为衬砌厚度不足,或是因为混凝土强度不够。如宁夏某隧道,由于种种原 因,隧道建成后衬砌出现了大量裂缝。在 1500m 范围内,有 5 段裂缝发育区,其中一条连续纵 向裂缝长达 33m,裂缝的最大宽度达 20mm,最大水平错距达 40mm。西部一小间距隧道,存 在地形偏压,由于隧道基底处理与边坡加固存在问题,在隧道通车前山体蠕动,衬砌出现大量 裂缝(图 1-2、图 1-3),不得不投巨资加固整治。



图 1-2 偏压致隧道衬砌开裂



图 1-3 洞内衬砌裂缝

(三) 渗水漏水

隧道在施工期间和建成后一直受地下水的影响,特别是建成后的隧道,更是长期处在地下 水的包围之中。地下水无孔不入,当水压较大,防水工程质量欠佳时,地下水会通过一定的通 道渗入或流入隧道内部,对行车安全和衬砌结构的稳定构成威胁。一些岩溶发育地区的隧道, 由于防排水工程存在问题,雨季隧道内漏水如注,路面漫水,车轮使水花四溅。在寒冷地区, 渗漏水使洞周挂冰柱,使路面成冰面,行车十分危险。如辽宁的八盘岭隧道、吉林的密江隧道都 是在建成后不久,隧道内便出现大量渗漏水,夏秋两季隧道变成了“水帘洞”,春融期隧道成“冰 湖”。由于反复冻融,造成衬砌结构严重开裂,为了不使结构遭致进一步的破坏,防止隧道渗 漏,两隧道均不得不提前大修,在原衬砌内再衬一层混凝土。河北的梯子岭隧道、重庆的大垭 口隧道等也因渗漏水严重而套衬加固。目前,我国绝大多数在役隧道都不同程度地存在渗漏 水现象,其中,在寒冷地区和岩溶地区问题尤为突出。因此,在科学设计隧道防排水体系并精 细组织隧道防排水施工方面,我国隧道界还有很长的路要走。

(四) 路面破损

隧道内路面破损主要源于隧道底鼓和溢水渗水。黄土隧道和一些隧道的软岩区段,由于 没设仰拱或仰拱失效,在围岩压力或地层渗水的作用下,常出现底鼓现象。隧道底鼓破坏路面 结构,使路面处于不合理的受力状态,导致路面断裂破碎,形成坑槽(图 1-4)。有的隧道路面

中央鼓起两边下沉,路面横断面形成显著的人字坡,以致较高的车辆沿一侧车道行驶时,车辆的上侧经常擦划隧道衬砌(图 1-5),威胁安全行车,破坏洞内设施。岩溶发育地区,隧道围岩内常有承压水,有的隧道未设中央排水管,隧道路面下的承压水经常无法正常排出。当承压水的压力达到一定程度时,承压水便会自下而上破坏路面结构。有的隧道局部渗漏水严重,造成部分路面长期处于浸水状态,路面在浸水与车辆轮压的共同作用下逐渐破损。

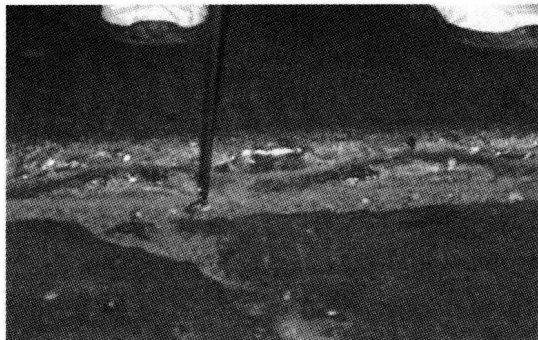


图 1-4 隧道路面坑槽

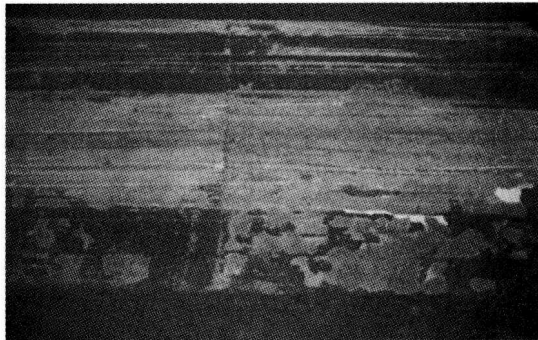


图 1-5 隧道衬砌划痕

三、经济问题

可持续发展和建设节约型社会要求隧道建设也要厉行节约,不计成本去解决一项工程难题是不可取的。隧道工程的单位里程造价比较高,设计施工是否合理对工程造价影响很大。有些工程设计偏于保守,使工程结构安全系数偏大;有些工程措施相当盲目,实施后意义不大。特别是一些相对少见的特殊工程,防范过度的现象十分严重。例如,瓦斯隧道修建过程中,施工时已将地层可能逸向隧道空间的瓦斯几乎全部排出,待衬砌完成后,地层中不会再有大量的瓦斯逸向隧道,所以,一些规范对二次衬砌的气密性提出种种要求完全没有必要。再如,特长隧道的通风井,其施工方案的合理选择,不仅会影响工程造价,而且可能影响井筒的重要设计参数,乃至井底井口的位置,一些隧道在此方面未做到最佳。

第三节 特殊隧道工程的基本内容

本书所谓的特殊隧道工程,是指建设过程中容易出现问题的隧道工程。根据工程的特殊性,可将特殊隧道工程分为特殊地质隧道工程、特殊环境隧道工程和特殊结构隧道工程三大类。其中,特殊地质隧道工程包括偏压隧道、软岩隧道、黄土隧道、岩爆隧道、岩溶隧道、瓦斯隧道;特殊环境隧道工程包括寒区隧道和 underwater 隧道;特殊结构隧道工程包括连拱隧道、通风竖井、通风斜井。

关于各种隧道工程的称谓,书中借用了工程界的习惯简称。例如,将修建于黄土体内的隧道称为黄土隧道,将穿越含瓦斯地层的隧道称为瓦斯隧道,将建成后可能会受冻害影响的隧道称为寒区隧道等。

本书按照特殊地质隧道工程、特殊环境隧道工程和特殊结构隧道工程的顺序安排章次。在每类特殊隧道工程的相应章节内,首先强调该类隧道工程容易出现的问题,然后介绍相关基