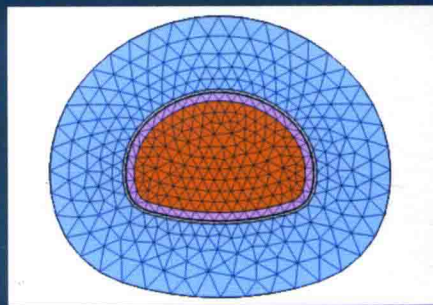
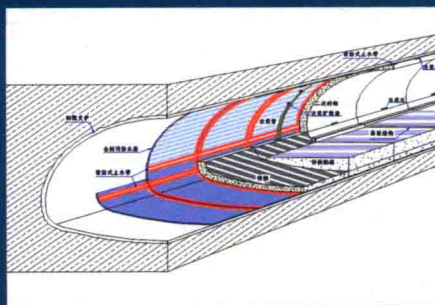


地下工程

水环境变化与控制

Change and Control
of Water Environment in Underground Engineering

姚光华 廖云平 彭海游 杨 乐 著
李少荣 文光菊 马 磊 陈 思



校外借



科学出版社

重庆市国土资源和房屋管理局 2011 年度市级地质灾害防治专项
资金项目（120301）资助

地下工程水环境变化与控制

姚光华 廖云平 彭海游 杨 乐 著
李少荣 文光菊 马 磊 陈 思

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以重庆市岩溶地质条件为背景,采用理论研究、调查评价、数值分析、室内实验等多种手段研究地下工程水环境变化规律和控制技术。在全面调查重庆市隧道工程地下水环境影响基础上,采用理论分析和数值方法研究了重庆市典型隧道地下水输降范围和影响规律,并对重庆市中梁山华岩隧道地下水环境进行了预测研究;采用模糊评价方法建立了地下工程水环境影响评价体系,并将其应用于对重庆市绕城高速玉峰山隧道和渝湘高速武隆隧道的研究;通过理论研究和数值方法,提出了基于环境保护型隧道工程地下水的排放标准和确定方法,并整合提炼了隧道工程地下水控制技术。

本书可供从事地下工程勘察、设计、施工、管理、科研的人员和工程技术人员参考,也可供相应学科专业的研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程水环境变化与控制/姚光华等著. —北京:科学出版社, 2018.5
ISBN 978-7-03-055816-9

I. ①地… II. ①姚… III. ①地下工程—建筑防水—研究 IV. ①TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第301006号

责任编辑:韩卫军/责任校对:王 瑞
责任印制:罗 科/封面设计:墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年5月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:267 000

定价:120.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着我国经济不断增长,地铁、公路和铁路隧道等地下工程日益增多。截至 2015 年年底,我国已建成通车公路隧道 14006 处,长 1268.39 万 m。其中,特长隧道 744 处,长 329.98 万 m;长隧道 3138 处,长 537.68 万 m。城市轨道交通飞速发展,全国累计 25 个城市建成投运城轨线路 105 条,运营线路长度 3195.4 km。其中,地铁 2722.7 km,占线路总长度的 85.2%,大部分采用隧道结构形式。随着我国西部大开发战略的实施及国家基础设施大建设的进行,越来越多的隧道工程将开工建设,给沿线生态地质环境带来严峻考验,其诱发的地表水和地下水漏失、地面塌陷、地面沉降等地质环境问题,致灾作用强烈,严重影响了当地居民的生命财产安全。例如,重庆市主城区已建特长隧道 50 余条,其建设诱发的地表水和地下水漏失等地质环境问题点多面广。显然,协调好地下工程建设与地质环境保护两者之间的关系,加强地下工程地质环境的保护,成为我国地质灾害防治和地质环境保护的新问题。研究地下工程水环境变化与控制是地下工程建设和运营时亟待解决的重要科学问题。

本书的研究团队数年来以重庆市岩溶地质条件为背景,采用理论研究、调查评价、数值分析、室内实验等多种手段研究地下工程水环境变化规律和控制技术。在全面调查重庆市隧道工程地下水环境影响基础上,采用理论分析和数值方法研究了重庆市典型隧道地下水输降范围和影响规律,并对重庆市中梁山华岩隧道地下水环境进行了预测研究;采用模糊评价方法建立了地下工程水环境影响评价体系,并将其应用于对重庆市绕城高速玉峰山隧道和渝湘高速武隆隧道的研究;通过理论研究和数值方法,提出基于环境保护型隧道工程地下水的排放标准和确定方法,并整合提炼了隧道工程地下水控制技术。全书包括 6 章,分工如下:第 1 章由姚光华、廖云平和马磊承担;第 2 章由廖云平、文光菊、杜严飞和陈思承担;第 3 章由彭海游、杨乐、李少荣和任务文承担;第 4 章由彭海游、杨乐承担;第 5 章由姚光华、杨乐和郭军承担;第 6 章由廖云平、郭军和吴梦军承担。全书由姚光华、彭海游、廖云平统稿,文光菊、彭海游、谢晓彤和董平校核了全书。

本书得到重庆市国土资源和房屋管理局 2011 年度市级地质灾害防治专项资金项目资助。由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请各位同行批评指正。



2017 年 6 月 1 日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	3
1.2.1 隧道水文地质及生态环境评价	3
1.2.2 隧道地下水限量排采	4
1.3 研究内容	6
1.3.1 地下工程水环境问题调查研究	6
1.3.2 隧道工程地质环境负效应评价体系研究	6
1.3.3 隧道工程建设地下水环境负效应研究	7
1.3.4 基于环境保护的隧道工程地下水排放量标准与确定方法研究	7
1.3.5 隧道工程地下水控制排放技术	7
第 2 章 地下工程水环境问题调查研究——重庆市隧道工程	8
2.1 重庆市岩溶水文地质条件	8
2.1.1 区域自然地理条件	8
2.1.2 区域岩溶水文地质条件特征	8
2.2 典型隧道工程地下水环境调查	10
2.2.1 调查概况	10
2.2.2 地下水环境问题时空分布规律	12
2.2.3 地下水环境问题影响要素分析	14
第 3 章 隧道工程地质环境负效应评价体系研究	18
3.1 隧道工程地质环境负效应评价体系构建	18
3.1.1 隧道工程地质环境负效应评价指标体系	18
3.1.2 隧道工程地质环境负效应评价方法	25
3.1.3 隧道工程地质环境负效应评价系统实现	31
3.2 隧道工程地质环境负效应评价——以重庆市绕城高速玉峰山隧道为例	32
3.2.1 工程概况及区域地质环境	32
3.2.2 玉峰山隧道地质环境负效应评价	38
3.2.3 玉峰山隧道地质环境评价调查验证	44
3.3 隧道工程地质环境负效应评价——以渝湘高速武隆隧道为例	50
3.3.1 工程概况及区域地质环境	50
3.3.2 武隆隧道地质环境负效应评价	54
3.3.3 武隆隧道地质环境评价调查验证	59

第4章 隧道工程建设地下水环境负效应研究	66
4.1 水环境负效应及其特征.....	66
4.1.1 水环境负效应.....	66
4.1.2 地下水环境评价类别、等级与要求.....	67
4.1.3 隧道施工涌水量预测.....	69
4.1.4 地下水影响范围预测.....	73
4.1.5 岩溶山区水文地质数值模型.....	73
4.1.6 岩溶地下水环境变化引起的次生地质灾害及预测评价.....	75
4.2 隧道地下水环境效应分析——以重庆市中梁山华岩隧道为例.....	75
4.2.1 华岩隧道水文地质条件概况.....	75
4.2.2 华岩隧道数值分析模型建立.....	77
4.2.3 既有隧道条件下拟建隧道地下水渗流场.....	82
4.2.4 临近采矿下修建隧道地下水渗流场.....	85
4.2.5 华岩隧道地下水预测分析.....	88
4.2.6 隧道地下水降落漏斗演化规律.....	89
4.3 隧道地下水环境效应特征.....	91
4.3.1 隧道水文地质模式.....	91
4.3.2 单斜构造山过山隧道地下水影响研究.....	93
4.3.3 川东隔挡式构造山过山隧道渗地下水影响研究.....	97
4.3.4 隧址区地下水渗流场时间效应.....	104
4.4 隧道地下水环境变化规律与勘察评价建议.....	109
4.4.1 隧道涌水量分析.....	110
4.4.2 地下水影响范围.....	111
4.4.3 地下水影响时间.....	114
4.4.4 隧道埋深、堵排水力与地下水环境.....	114
4.4.5 隧道地下水环境勘察评价建议.....	117
第5章 基于环境保护的隧道工程地下水排放量标准与确定方法	119
5.1 隧道工程限量排放解析模型及参数敏感性分析.....	119
5.1.1 控制型防排水技术方案.....	119
5.1.2 限量排放解析模型.....	119
5.1.3 衬砌水压力折减系数敏感度.....	122
5.2 隧道工程限量排放的标准及确定方法.....	126
5.2.1 限量排放的概念.....	126
5.2.2 限量排放的确定方法.....	126
5.3 地下水限量排放的应用.....	130
5.3.1 工程概况.....	130
5.3.2 水文地质.....	131

5.3.3 设计与施工方案	132
5.3.4 隧道限排量计算	132
第 6 章 隧道工程地下水控制排放技术	142
6.1 分类与设置原则	142
6.1.1 隧道防排水技术的分类	142
6.1.2 控制排放技术的设置原则	143
6.2 注浆堵水技术	143
6.2.1 围岩注浆的作用	143
6.2.2 注浆堵水总体原则	145
6.2.3 注浆材料的选择	146
6.2.4 注浆参数选定	148
6.2.5 注浆施工流程	150
6.2.6 注浆方式的选择	150
6.2.7 超前注浆实施方案	151
6.2.8 后注浆实施方案	154
6.2.9 注浆效果评估	155
6.3 抗水压补砌	156
6.3.1 外水压力的确定方法	156
6.3.2 抗水压衬砌结构的优化选型	159
6.4 洞内疏导技术	163
6.4.1 暗管与涵洞疏导	163
6.4.2 拱桥跨越	164
6.5 其他控制排放技术	164
6.5.1 地表控制技术	165
6.5.2 地裂缝控制	168
主要参考文献	169

第1章 绪 论

1.1 研究背景

近年来,我国交通事业取得了突飞猛进的发展。截至2015年年底,我国已建成通车公路隧道14006处,长1268.39万m。其中,特长隧道744处,长329.98万m;长隧道3138处,长537.68万m。城市轨道交通飞速发展,全国累计25个城市建成投运城轨线路105条,运营线路长度为3195.4km。其中,地铁长2722.7km,占运营线路总长度的85.2%,地铁大部分采用隧道结构形式。全国铁路营业里程达到12.1万km。其中,高铁营业里程超过1.9万km。随着我国西部大开发战略的实施及国家基础设施大建设的进行,越来越多的隧道工程将开工建设,给沿线生态地质环境带来严峻考验。

重庆市是一座山城,境内隧道多于其他城市,目前仅主城歌乐山地区已有6座隧道先后贯通。

随着交通线不断向山区特别是向生态保护区、岩溶地区延伸,隧道建设对生态环境的影响日益受到社会的关注。表观和明显的现象如下:隧道洞口、洞身开挖将不可避免地在地表植被造成干扰和破坏,并产生大量隧道弃渣等。影响巨大而又隐蔽的是山岭隧道开挖会在很大程度上改变隧址区地下水的补给、径流和排泄条件,形成新的地下水转移通道,并可能不断恶化场区的水文环境,导致隧道区域局部地下水水位下降、地表植被枯萎甚至死亡,使隧址区居民和野生动植物的生存环境恶化。在城市区域,隧道排水引起的地下水水位下降还将导致地面沉降、开裂、塌陷、海水入侵、加重污染等一系列生态环境问题及效应。隧道洞内地下水排放如图1-1、图1-2所示。

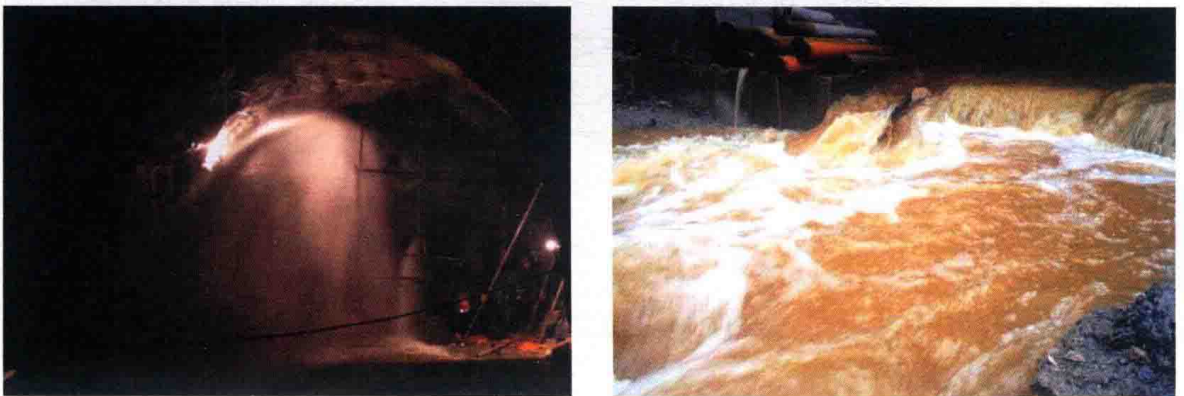


图 1-1 隧道洞内地下水排放

穿越六盘山国家级自然保护区(实验区)的国道312线西兰公路宁夏六盘山隧道(单洞双车道、延长2385m)在建设过程中穿越一个宽约20m的导水性断层,隧道内最大涌水量达 $780\text{m}^3/\text{h}$,淹没隧道300m,引发了掌子面塌方和泥石流等事故。由于水量较大,



图 1-2 隧道洞内地下水排放

最终采取了正洞注浆堵水,向导坑排水的处治措施,从施工和工程安全上讲,取得了成功。但是,由于隧道的长期泄水作用,地下水渗流场发生改变,隧道区附近山间原有的小溪流逐渐变细、消失。到了冬季,自然保护区内在山上高处可以饮水的麋鹿和獐鹿,不得已成群下山饮水,受到居民的威胁。至于泄水引起的地下水水位下降对当地林区植物生长产生的影响以及对当地小气候的影响,则没有得到应有的重视与研究。

成渝高速中梁山隧道最初采取“以排为主”的治水技术,隧道运营后出现严重灾害,涌水量由原来的 $18000\text{m}^3/\text{d}$,变为 $54000\text{m}^3/\text{d}$,大量泥沙涌进隧道,施工时已处理过的塌陷再次复活,同时隧址周围出现了许多新的塌陷,严重影响了当地居民的生产生活安全。

大瑶山隧道 F9 断层在堵水无效的情况下进行排放,致使一个村民组的生活用水及生产用水严重短缺,造成了极大的经济损失和不良的政治影响。

重庆市广泛分布可溶性灰岩,可溶性灰岩是产生岩溶不良地质问题的主要地层岩性。在潮湿、大气降水丰富、地下水能够充分补给、水的来源充沛的地区,岩溶易发育。此外,由于地下水动力条件改变,受区域内大断裂构造的影响,岩石裂隙极其发育和裂隙交汇处也是岩溶易发地区。复杂岩溶地区的隧道,特别是长大隧道,可能出现岩溶塌陷、涌水、突水等地质灾害,会造成极严重的后果。甚至会引发岩溶大泉枯竭、地下水水质恶化、地表水体污染、地表水土流失、地表塌陷等一系列次生灾害或生态环境问题。

长期以来,由于缺乏可持续发展的理念,保护环境意识淡薄,在隧道等大规模工程的勘察设计、施工和运营使用阶段,未足够重视环境保护。隧道建设无限制排水对隧道建设区自然环境、社会环境的恶劣影响给了我们很多经验教训,值得工程界深刻反思和关注,必须在隧道工程建设全过程中,充分考虑、评价无限制排放地下水带来的环境影响和危害。

过去以排为主的隧道设计理念主要考虑:①建设观念因素,人们对地下水任意排放引起的环境问题没有引起正确认识和足够重视,当然也缺少相应的深入研究。②造价因素,隧道如果采用围岩注浆防水,注浆费用较高且数量难以有效监控;如果采用衬砌完全抵抗水压力,在高承压水地区,衬砌厚度将大大增加各种工程费用。③技术因素,由于隧道水文地质条件多变,对于经验不足的施工队伍,无法做到“石变我变”及采取相应应对措施,注浆堵水达不到预期效果。

就既有隧道而言,若防排水系统失效,隧道衬砌背后地下水水位的升高,衬砌承受压力不断增加,且地下水的长期浸泡,会降低隧道衬砌混凝土的力学强度。这两方面的因素

均直接影响隧道工程的安全性,导致隧道衬砌裂损、腐蚀,地下水渗漏,以及混凝土中的钢筋锈蚀、基床翻浆冒泥和隧底吊空等隧道病害。

《中华人民共和国环境保护法》和《中华人民共和国水资源保护法》指出,开采矿藏或者兴建地下工程,因疏干排水导致地下水水位下降、枯竭或者地面塌陷,对其他单位或个人的生活和生产造成损失的,采矿单位或者建设单位应当采取补救措施,赔偿损失。目前铁路和公路的环评标准还未就隧道工程建设对环境影响评价作出专门规定。在总结前人经验和教训的基础上,通过近年来的研究,本书认为在新建隧道工程及其他地下工程项目的建设使用整个过程中,要把隧道工程-环境水文地质-生态环境影响作为一个系统工程来考虑,把稳定原有隧道水文地质环境和保护生态环境作为环境影响评估的重点。

因此,“以排为主”的无限制排水原则已不能适应我国经济和社会发展的需要。为改变过去“以排为主、防排结合”隧道防排水建设理念,公路和铁路隧道设计规范均对隧道防排水做了如下规定:“隧道防排水应遵循防、排、截、堵结合,因地制宜,综合治理原则,保证隧道结构物和营运设备的正常使用和行车安全。隧道防排水设计应对地表水、地下水妥善处理,洞内外应形成一个完整通畅的防排水系统。”

综上所述,我们得到这样的认识:①既立足于结构安全的角度,又站在保护环境的高度,富水地区的隧道与一般地区隧道的防排水措施的根本区别是前者更应注重“以堵为主、限量排放”的设计理念。②可以通过预注浆、后注浆、补注浆等施工措施,来实现控制排放的理念。尽管这些认识与手段在上述实际工程的应用中取得了一定的效果,但也暴露出一些不足和缺陷:一是怎样实现“以堵为主、控制排放”的理念;二是注浆是涌水处治的有效手段,但针对隧道实际环境条件,需要结合前人的研究成果,开展现场试验,选取合适的注浆方式及相关工艺等;三是对于富水带,应如何考虑注浆后的水荷载的作用;四是如何进行抗水压的支护结构设计,应从哪些关键指标进行施工控制。

因此,研究隧道水文地质及生态环境影响评价方法,明确隧道地下水排放对环境的影响程度,为达到环境保护和结构安全的目标研究新建隧道和既有隧道地下水处治技术,建立地下水限量排放设计方法,对明确完善隧道建设环境评价标准及隧道设计施工规范的不足,促进隧道建设切实落实环境保护、资源节约的建设理念,具有十分重要的作用。

1.2 研究现状

1.2.1 隧道水文地质及生态环境评价

回顾1985年以前的有关规范、规定,几乎都未把隧道工程建设与环境工程作为一个系统来考虑,没有关于隧道开挖对生态环境影响评价的专门规范和规定。在以前的隧道设计规范中,对隧道防排水提出“以排为主,排、截、堵相结合”的原则,在实施中,由于突出了以排为主,大多数隧道工程(特别是山区隧道),不论涌水、渗水的补给来源及水量大小如何,施工中多不作预处理,因而隧道成为泄水洞,其把周围大量的地下水吸夺过来,破坏了原有的水文地质环境。同时,由于设计、施工阶段对隧道涌漏水的处理方案和措施不合理或不完善,运营期间仍存在涌漏水灾害,恶化了隧道内的环境。由于水的长期

作用,隧道结构物遭到损坏,这对隧道工程的长期稳定及行车安全构成极大威胁。隧道长期排放地下水,也造成了地表生态环境的恶化。为此,相关部门每年都要花费大量的人力、物力来治理隧道水害和保护地表生态环境。

20世纪90年代以后,标准规范逐步重视隧道工程建设对环境的影响问题,增加了专门的条款,即“当工程施工排出地下水对周围环境有较大影响时,应对影响的情况、程度和范围进行评价,并提出了有关补救措施或相应的对策建议”。此外,对隧道排水原则也作了修改,提出“以防、截、排、堵相结合,因地制宜综合治理”的原则。1993年,铁道部专门发布了《铁路工程建设项目环境影响评价技术标准》(TB 10502—1993)提出了有关工作的原则、方法、程序和要求。该技术标准是为了贯彻《中华人民共和国环境保护法》和《建设项目环境保护管理办法》,提高铁路环境影响工程质量和水平而制定的。该技术标准可用来指导环境影响评价,但未就隧道工程建设对环境的影响作出专门的规定。

就生态环境而言,目前对隧道建设生态环境影响的评价工作基本沿用对公路生态环境影响评价的方法,主要侧重于以下方面:①对生物个体的影响。从目前的生态环境影响评价看,普遍对公路隧道建设破坏动植物个体数量进行了统计,把对生物个体的影响作为一个评价重点。②对生物多样性的影响。主要是根据岛屿生物地理学理论讨论生态隔离对生物多样性的影响。③对生态系统平衡的影响。多是定性研究,尚未形成系统的评价体系。现有的研究多从生态系统的营养结构入手,针对公路隧道建设开展生态环境影响评价。隧道建设对生态系统的影响开始于隧道对各种无机环境因子的改变从而破坏生态系统生物组成或者对生物的直接破坏,生物的破坏改变系统的营养结构,系统营养结构的改变导致系统功能的变化,从而破坏原有的生态平衡。

然而,造成隧道生态环境破坏的首要因素是地下水流失。目前,国内外关于地下水引起的生态效应模型大体可分为两类:①统计模型、模糊综合评判模型。这类模型的优点是简单易行;缺点是没有耦合机理模型,其预警功能不强,地下水状态考虑不够。②包气带水盐运移模型。这类模型的特点是主要考虑包气带,或是将地下水与包气带水分或盐分进行耦合研究,没有对地下水与包气带水盐运移模型同时考虑。这些模型尚未在公路隧道建设中得以应用。

总体而言,虽有学者在生态环境影响综合评价方面做过一些工作,但由于生态环境的时间和空间差异十分明显且缺少统一的定量标准,故对其的综合评价仍处于初始阶段。

1.2.2 隧道地下水限量排采

当前国内外针对富水围岩,一般采取帷幕注浆、管棚、超前导管、超前钻孔注浆、超前锚杆、注浆加固、护拱等措施。针对我国当前地质环境保护型隧道,其主要关键技术问题在于立足于结构安全和保护环境的双重角度,通过采用何种注浆方式、何种防排水措施和抗水压支护结构,以确保隧道的施工运营安全与保护环境。

隧道发生涌水时,以往的工程经验多采用“宁疏勿堵”的原则,排水处理主要通过暗沟、管道、涵洞、泄水洞、明渠、渗沟、拱桥或增加辅助导坑截流排除地下水。经验证明,地下水处理“以排为主”,隧道施工过程及隧道运营期长期排放地下水,致使大多数隧道

存在不同程度的水害,且逐年发展,影响衬砌结构和行车安全。环境方面造成工程地区含水层被疏干,生态环境恶化,主要表现如下:地表水和泉、井枯竭;生活、工农业用水缺乏;地表沉降、土壤沙化、水土流失等。它们严重影响了人们的生活和生产建设。

(1)地下水通过隧道大量流失,围岩中的地下水通道(岩层节理裂隙或岩溶管道)的充填物被水冲走,贯通性越来越好,致使洞内流量不断增大。贵昆线棵纳隧道通车后涌水频率逐年提高,开始是数年一次,后来是每年一次,近年来是一年数次。渝怀线武隆隧道2002年最大涌水量为 $200 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,而2003年涌水量猛增到 $780 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,为我国历史上所罕见,而2004年6月一次普通的降雨就造成了 $740 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 的涌水量。中梁山隧道最初采取“以排为主”的原则处理涌水,运营以后出现严重病害,涌水量由原来的 $18000 \text{m}^3/\text{d}$,变为 $54000 \text{m}^3/\text{d}$,大量泥沙涌进隧道,施工时处理过的塌陷复活,同时又出现了许多新的塌陷。

(2)随着隧道内涌水量的增加,各种病害如衬砌渗漏变形、路面翻浆冒泥、排水沟淤塞漫流等将逐年加重。大瑶山隧道建成后,1990年5月的一次涌水产生了 200m^3 流沙,流沙埋没轨道使行车中断。在岩溶地区,岩溶管道涌水由于经常带有大量泥沙,故直接影响行车安全,危害特别严重。

(3)隧道地下水如果以排为主,施工中一般不再采取封堵措施,则地下水往往严重影响施工的正常进行。武隆隧道的历次特大涌水都对施工场地造成严重毁坏,大量机械设备被冲到洞外的乌江中,隧道内泥沙堆积厚达 1m 多,在相当大的程度上影响了施工的正常进行。此外,南岭隧道(衡广复线)、梅花山隧道(贵昆线)、平关隧道(盘西线)等,都曾因洞内大量涌水而施工受到严重影响。

(4)地下水长期通过隧道大量排走,使地下水水位降低,这是洞顶地表失水并发生沉降变形的主要原因。例如,京通线桃山隧道施工中的大量涌水使地表“四道沟”所有泉水干枯,截断了该沟下游发电用的水源和农业用水,造成严重后果。根据盘西线平关隧道和大瑶山隧道岩溶涌水观测统计,只要地表降雨 $7 \sim 8 \text{h}$,洞内涌水量立即增加,一遇暴雨,灾害立起。大瑶山隧道从施工到运营先后发生塌坑数百个,影响范围数平方千米。

“以排为主”将对洞顶地表生态环境产生长期的不良影响和破坏,这是我国当前法律所禁止的。随着人们环保意识和法制观念的增强,听任地下水大量流失的现象越来越少,因此,无限制排水原则不能适应我国经济发展和社会进步的要求。

这些年来隧道工程界进行了多方面的试验研究,对隧道涌水的治理原则和方法有了重新认识和新的想法,而且研究了新的技术,并根据不同的环境条件,逐渐形成了三种不同类型的防排水技术。

当前,隧道防排水技术主要有三种类型:一是从围岩、结构和附加防水层入手,体现以防为主的全封闭式防水;二是从疏水、泄水着手,体现以排为主的泄水型或引流自排型防水,又称半封闭式防水;三是采取有效措施,实现防排结合的控制型限量排放防排水。

全封闭式防水适用于对保护地下水环境、限制地层沉降要求高的工程,可以为隧道结构的耐久性提供极为重要的环境条件,也可以为隧道安全运营提供极为重要的环境条件。但其直接造价较高,并且在很多条件下靠现有技术是不可行的。

半封闭式防水适用于对保护地下水环境、限制地层沉降没有严格要求的工程,结合其

他必要的辅助措施和设备,也可以为隧道结构的耐久性以及安全运营提供良好环境条件。这种方式直接造价相对不高,但运营维护成本相对较高。

控制型限量排放防排水,是近年来为降低全封闭式防水的成本,又要满足地下水环境保护,限制地层沉降和保护环境而出现的一种新型的隧道防水措施。在半封闭式防水的基础上,可以根据对水位和地层变形的监测数据,及时自动或半自动地调整排水量,达到既降低了一次性造价,又维持了地下水平衡的目的。

关于控制型限量排放防排水技术,其根本的特色在于:控制地下水的排放,以达到安全可靠、技术可行、经济合理的目标,而且将隧道运营的长期安全性放在首要位置。当前,对于地下工程中实现控制型排放的主要措施有两种:一种是在排水管上加闸阀,通过调节闸阀开关达到控制排放量的目的;另一种则是注浆。

因此,控制型限量排放防排水原则,是在相关堵水技术的支持下,适量排放地下水,将作用在衬砌上的水压力减小到可以承受的水平,同时做到保持地下水水位的动态稳定,尽量减少(避免)对地下水环境的影响,从而实现隧道周围地下水环境的可持续发展。

但是,一方面由于现行规范和技术标准均未明确规定如何贯彻“控制限量排放”原则,因此,其工程实施也出现了一些问题:采用何种方式来实施堵水?堵水后,如何认识地下水所产生的衬砌外水荷载?衬砌承受外水压力后,其力学特性有何特点,等等。另一方面,一些隧道开展并实现了“控制限量排放”的工程实践。这些问题和现象的存在,对推广实施“控制限量排放”造成了障碍,所以控制排放的隧道防排水技术亟待深入研究。

1.3 研究内容

1.3.1 地下工程水环境问题调查研究

通过对重庆市水文地质条件概况的分析,本书研究了重庆市典型岩溶类型,总结了适用于岩溶山区隧道工程水文地质调查与地下水环境影响评价的内容和方法,提出了地下工程水文地质调查范围;以歌乐山地区华岩隧道为依托,对隧道开挖对影响区的水文地质及影响的现状进行调查评估,建立了水环境影响概化模型,并对其发展趋势进行预测评价。

1.3.2 隧道工程地质环境负效应评价体系研究

在借鉴国内外地质环境影响评价相关研究成果的基础上,按照指标体系的构建原则、构建方法和构建作用,提出重庆市隧道工程地质环境负效应评价指标体系,并给出各指标的简要说明、量化方法和评价标准。采用编程软件,开发隧道工程地质环境负效应评价系统,主要包括指标体系建立、指标权重计算、评价过程实现以及相关验证程序。选择重庆市典型隧道工程实例,采用本书构建的隧道工程地质环境评价体系进行评价,并结合研究区的现场调查和长观孔监测资料,分析评价结果的可信性,验证指标体系结构的合理性。

1.3.3 隧道工程建设地下水环境负效应研究

以重庆市中梁山华岩隧道为例,通过对华岩隧道水文地质、工程地质分析,建立地下水概化模型,研究临近采矿区、临近已建隧道条件下地下水渗流场特征的二次影响,预测地下水影响程度和影响范围。以重庆市典型单斜构造和川东隔挡式构造条件下的过山隧道为研究对象,研究不同隧道埋深、不同堵排水条件以及不同地质条件下隧址区地下水环境变化规律。将隧道地下水影响模拟结果与调查结果进行综合对比,分析隧道建设对隧址地下水影响规律及特征,总结地下水影响范围与影响时间等经验值或参考值,提出隧道地下水勘察评价范围以及其他指标参数。

1.3.4 基于环境保护的隧道工程地下水排放量标准与确定方法研究

从控制型防排水技术方案入手,本书建立了轴对称条件下的限量排放的解析模型,并分析了其各参数的敏感性。该模型主要基于围岩注浆固结堵水圈、二次衬砌而组成复合防排水结构,可用作地下工程地下水排放量的确定方法,并用于注浆参数控制。本书还对地下工程地下水场进行了数值分析,提出了地下工程排放量确定的工程类比法、理论分析法、解析数值法、渗流计算法、监测反馈法等,并在重庆市歌乐山地区进行了分析应用。

1.3.5 隧道工程地下水控制排放技术

本书介绍了限量排放标准下的隧道防排水技术。包括技术分类及设置原则、注浆堵水技术和抗水压衬砌、地表控制技术,以及洞内疏导技术等。

第2章 地下工程水环境问题调查研究——重庆市 隧道工程

2.1 重庆市岩溶水文地质条件

2.1.1 区域自然地理条件

重庆市位于我国西南部，属于中亚热带湿润季风气候，具有冬暖夏热、空气湿润、降水丰沛、无霜期长等特点，多年平均温度为 $16\sim 18^{\circ}\text{C}$ 。重庆市年平均降水量较丰富，大部分地区降水量在 $1000\sim 1350\text{mm}$ ，降水多集中在 $5\sim 9$ 月，占全年总降水量的 70% 左右。重庆市的年降水量自东南向西北逐渐减少，山地一般多于盆地。岩溶地下水主要接受大气降水的补给，往往在发生强降雨过程后会发生岩溶地下水水量与水位的暴涨。

重庆市内水系以过境河流长江及其支流嘉陵江为主，主要支流包括渠江、涪江、御临河、龙溪河、乌江等。长江、嘉陵江分别在西南、西北两侧流入，至重庆市汇合后向东出境，沿途切穿川东褶皱带形成的诸多峡谷，如嘉陵江横穿的沥鼻峡、温塘峡、观音峡，长江切穿的铜锣峡、明月峡等。区内河流流量丰沛，除了大量接纳外区径流量外，还与区内丰沛的降雨及丰富的岩溶地下水排泄有关。

重庆市地势起伏大，层状地貌明显，东部、东南部和南部地势高，海拔多在 1500m 以上，为中高山区；西部地势低，大多为海拔 $300\sim 400\text{m}$ 的丘陵。重庆市喀斯特地貌分布广泛。在东部、东南部地区及西部背斜山核部可溶岩出露处，喀斯特地貌大量集中分布，地下水和地表喀斯特形态发育较好。在背斜条形山地中发育了渝东地区特有的喀斯特槽谷奇观。在东部和东南部的喀斯特山区分布着典型的石林、峰林、洼地、浅丘、落水洞、溶洞、暗河、峡谷等喀斯特景观。

2.1.2 区域岩溶水文地质条件特征

1. 岩溶含水岩组及其分布特征

震旦系—第四系地层在重庆市均有分布，含水岩组包括松散岩类孔隙水含水岩组、碎屑岩类孔隙水裂隙水含水岩组、碳酸盐岩类裂隙溶洞水含水岩组，以及基岩裂隙水含水岩组。各类含水岩组包括的地层及平面空间分布特征见表 2-1。

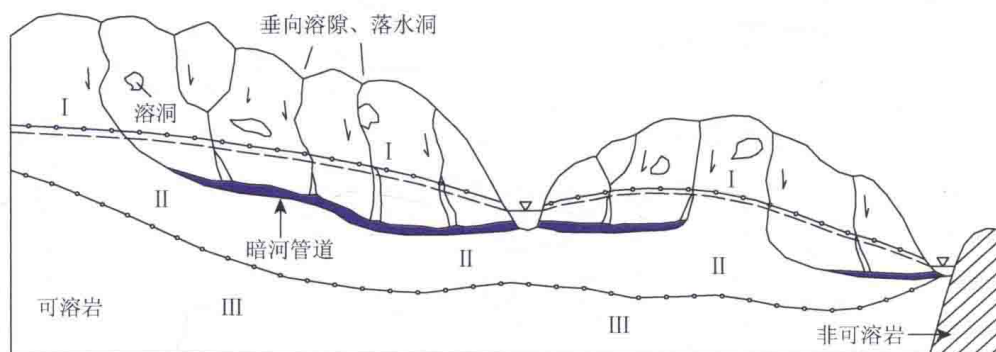
表 2-1 重庆市地下水类型与含水岩组分布特征

地下水类型		含水层代号	主要分布地区
类	亚类		
松散岩类孔隙水	孔隙潜水	Q_h	开县、巫溪山间平坝
		$Q_h、Q_p$	酉阳等山间平坝及长江、嘉陵江、涪江沿岸阶地

续表

地下水类型		含水层代号	主要分布地区
类	亚类		
松散岩类孔隙水	孔隙承压水	Qh	梁平、沙河镇、垫江普顺场、潼南姚家坝
碎屑岩类孔隙裂隙水	层间承压自流水	T _{3xj} 、TJx	沥鼻峡、温塘峡、西山背斜两翼，明月峡西翼、方斗山、七曜山北段的缓翼巫山向斜，各背斜北西翼（缓翼），各背斜南东翼（陡翼）、七曜山背斜南段
	红层承压水	J _{2x} 、J _{2s} 、J _{1z} 、J _{1zl}	各向斜盆地缓翼红层丘陵区，各向斜陡翼
碳酸盐岩类裂隙溶洞水	碳酸盐岩裂隙溶洞水	T _{1f-j} 、T _{2l} 、T _{1d-j}	大巴山、西、秀、黔、彭、奉节及西部各背斜轴部
		C ₂₊₃ 、Zb、O ₁ 、P ₂ 、P ₃	大巴山、彭水、涪陵、华盖山背斜等地段
	碳酸盐岩类夹碎岩裂隙溶洞水	T _{2b} 、T _{2l} 、P ₂ 、P ₃ 、C、O、D	大巴山、奉节以东、彭水、酉阳、秀山等地段
基岩裂隙水	构造裂隙水	C ₁ 、Z _a 、K ₂ 、E、Q _b 、N _h	酉阳官庄坝、楠木、秀山、大巴山城口等地
	风化带网状裂隙水	J _{3p} 、J _{3sn} 、γ	渝中部、西部各向斜轴部

在岩溶强烈发育地区，岩溶含水介质的发育在垂向空间上有明显的分带性。由上至下可分为垂直渗流带、水平径流带和岩溶裂隙水带，如图 2-1 所示。



图例 ——— 地下水水位线 ——— 岩溶分带界线 I 垂直渗流带 II 水平流动带 III 岩溶裂隙水带

图 2-1 岩溶发育垂向分带示意图

2. 重庆市典型岩溶蓄水构造

重庆市岩溶分布区大致分为扬子准地台重庆市台拗内的以埋藏型为主的岩溶区，以及上扬子台拗、大巴山台缘拗陷和北大巴山冒地槽内的裸露型岩溶区。

重庆市的裸露型岩溶区地下水的补给、径流、排泄具有一般裸露岩溶地区的普遍性规律。处于川东渝西的埋藏型岩溶区在岩性组合及独特的隔挡式构造的共同作用下，形成了重庆市典型的可溶岩背斜岩溶蓄水构造。

重庆市隔挡式构造包含数十条 NE-SW 走向的狭长背斜，背斜核部通常交替出露于可溶岩和非可溶岩地层，可溶岩的渗透系数值为非可溶岩的 10 倍以上，且可溶岩常被非可溶岩所夹持及间隔。作为主要含水层的可溶岩地层，其地下水具有显著的顺层径流特征，

在经深切冲沟及河流切割后进行排泄。重庆市隔挡式构造中，背斜核部出露于 $J_{1-2}Z^{5+3}$ 、 T_2l 及其上部可溶岩地层中，其两端和中间为非可溶岩所隔离的背斜构造，即为重庆市典型的可溶岩背斜岩溶蓄水构造（图 2-2）。图 2-3 为过沥鼻峡背斜—温塘峡背斜—观音峡背斜的背斜蓄水构造实例剖面。

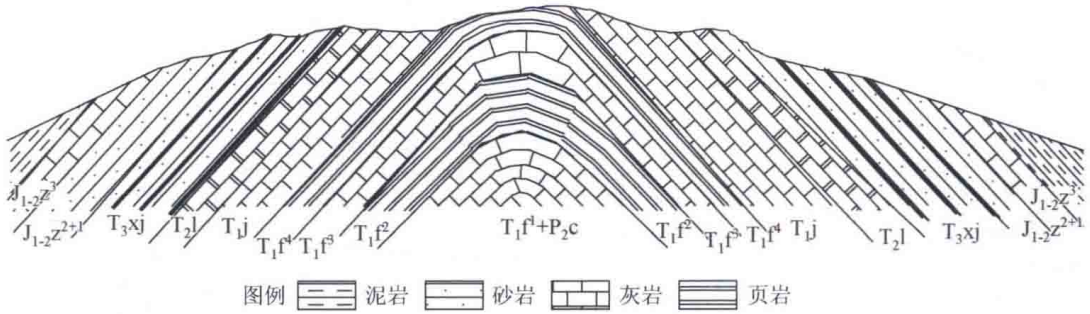


图 2-2 重庆市典型背斜岩溶蓄水构造及岩性组合示意图

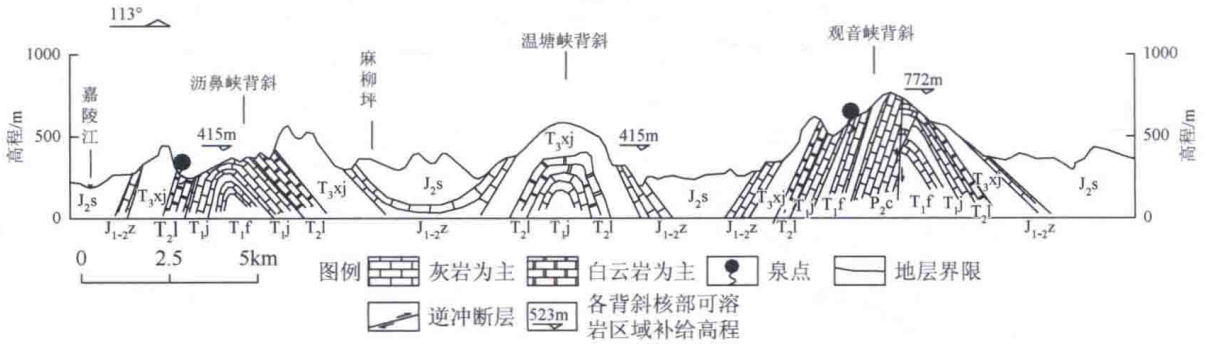


图 2-3 重庆市典型背斜岩溶蓄水构造实例剖面

2.2 典型隧道工程地下水环境调查

2.2.1 调查概况

自成为直辖市以来，重庆市交通运输业得到快速发展，公路隧道、铁路隧道的数量日益增多。据不完全统计，截至 2012 年年底，仅重庆市主城“四山”地区就已建成隧道 54 条，并规划在建 6 条穿山隧道，隧道已成为重庆市交通运输的重要组成部分。隧道工程的修建在促进交通运输业发展的同时，也引起了地表水、地下水漏失等一系列水环境问题。本书对重庆市 32 个隧道工程进行了水环境专项调查，调查点 447 个（表 2-2），遍布重庆市主城区及周边区县。

表 2-2 典型隧道工程地质环境专项调查统计表

序号	隧道名称	长度/m	地质环境调查点数	所在位置
1	大学城隧道	3853	11	重庆市主城区
2	轻轨六号线中梁山隧道	4664	24	