

国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB036003)资助
国家自然科学基金面上项目(50978018,51778215)资助

岩溶隧道

防突层安全厚度研究

郭佳奇 著



中国矿业大学出版社

国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB036003)资助

国家自然科学基金面上项目(50978018,51778215)资助

岩溶隧道防突层安全厚度研究

郭佳奇 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了山岭隧道岩溶发育特征、分布规律及形态,提出了四种隧道—岩溶系统概化模型。研究了自然与饱水状态下岩溶灰岩的力学性质及能量特征与损伤机制。在此基础上,针对可简化为两端固定梁模型的大尺度隐伏溶腔与隧道间防突层,给出了防突层最小安全厚度计算公式。针对隧道周边任意分布的中小尺度隐伏高压富水溶腔,采用Schwarz交替法结合格里菲斯强度准则建立了防突层稳定性评价方法。分析了高压岩溶水作用下裂隙的扩展机理,建立了基于临界水压力的工作面非完整防突岩墙安全厚度计算公式。

本书可供从事岩溶隧道设计、施工的技术人员参考,亦可供高等院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩溶隧道防突层安全厚度研究/郭佳奇著. —徐州:

中国矿业大学出版社, 2017. 10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3293 - 9

I. ①岩… II. ①郭… III. ①岩溶—隧道工程—安全技术—研究 IV. ①U458.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 239328 号

书 名 岩溶隧道防突层安全厚度研究

著 者 郭佳奇

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏淮阴新华印刷厂

开 本 787×1092 1/16 印张 9.25 字数 230 千字

版次/印次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着我国西部大开发战略的快速推进及“一带一路”伟大战略的实施,交通和水利水电工程建设重心明显向地形地质条件极端复杂的西部山区和岩溶地区转移,上万公里的交通隧道工程和世界级的大型水利水电工程正在或即将投入建设,将出现一批具有“大埋深、高应力、强岩溶、高水压、大流量”等显著特点的高风险深长岩溶隧道工程。岩溶隧道修建过程中经常遇到突水、涌泥等地质灾害,轻则冲毁器具,贻误工期,重则造成人员伤亡和重大经济损失,因此研究岩溶隧道防突层稳定性、合理确定防突层安全厚度,规避岩溶突水涌泥风险、保证围岩和结构的稳定成为岩溶隧道工程施工中面临的重大技术问题,具有重要的理论意义和工程应用价值。

本书主要在山岭隧道—岩溶系统概化模型、岩溶隧道突水机理,隧道与隐伏溶腔间防突层稳定性及岩溶隧道工作面防突岩墙安全厚度等方面开展研究,取得了如下研究成果:① 分析了山岭隧道岩溶发育特征、分布规律及形态,提出了四种隧道—岩溶系统概化。② 通过室内试验对自然与饱水状态下岩溶灰岩的力学性质、声波特征及能量机制及破坏过程进行了深入研究。基于霍克—布朗强度理论和地质力学强度指标给出了岩溶灰岩岩体的力学参数。③ 从微、宏观层面分析了岩溶隧道防突层突水灾变机理,指出围岩二次应力重分布和高水头岩溶水压力共同作用下的综合破坏型突水是岩溶隧道突水的主要类型。④ 针对大尺度隐伏溶腔,将防突层简化为两端固定梁,建立了防突层最小安全厚度计算方法;针对隧道周边任意分布的中小尺度隐伏溶腔,采用 Schwarz 交替法结合格里菲斯强度准则建立了防突层突水失稳的评价方法;针对裂隙导通突水模式,采用最小拉应力理论研究了隐伏断层活化突水方向和防突层最小安全厚度。⑤ 研究了高压岩溶水作用下裂隙的扩展机理和岩溶隧道工作面突水的滞后效应和扩径效应。提出了工作面突水是由开挖扰动降低了水压劈裂的临界水压力导致的观点,建立了基于临界水压力的工作面非完整岩墙安全厚度计算公式。

本书是作者最近时期对岩溶隧道防突层稳定性及防突安全厚度研究的总结。主要研究内容得到了博士研究生导师北京交通大学乔春生教授、博士后合

作导师长安大学陈建勋教授及河南理工大学刘希亮教授的指导和支持。书中文字校对工作和部分插图由作者指导的研究生李宏飞、陈帆、贺振宇完成。本书的顺利完成得到了河南理工大学土木工程学院秦本东副教授、王光勇副教授、任连伟副教授及陈峰宾老师的帮助与支持,铁道部宜万铁路指挥部提供了大量现场资料,在此一并表示感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2016 年 8 月

目 录

1 绪论	1
1.1 选题背景及研究意义	1
1.2 国内外研究现状与发展动态	2
1.3 需进一步研究的问题	5
1.4 主要研究内容	6
2 山岭隧道岩溶特征及概化模型	8
2.1 岩溶发育基本特征分析	8
2.2 岩溶类型及形态特征	14
2.3 岩溶隧道及其与地下岩溶的位置关系	16
2.4 岩溶隧道主要灾害形式	23
2.5 山岭隧道—岩溶系统概化模型	25
2.6 小结	27
3 自然与饱水状态下岩溶区灰岩力学性质	29
3.1 岩溶灰岩力学性质试验研究现状	29
3.2 试验设备及岩溶灰岩试样	30
3.3 自然与饱水状态下岩溶灰岩单轴压缩试验	33
3.4 自然与饱水状态下岩溶灰岩三轴压缩试验	43
3.5 自然与饱水状态下岩溶灰岩劈裂试验	52
3.6 自然与饱水状态下岩溶灰岩超声波试验	55
3.7 岩溶区灰岩岩体力学参数	56
3.8 小结	63
4 自然与饱水状态下岩溶区灰岩力学性质	65
4.1 岩溶区隧道水害	65
4.2 岩溶隧道突水影响因素	68
4.3 岩溶隧道突水机理	70
4.4 防突岩层破裂突水过程的数值分析	74
4.5 小结	80
5 隧道与周边隐伏溶腔间防突岩层安全厚度	81
5.1 隧道与大尺度隐伏溶腔间防突层安全厚度	81

5.2	隧道与中小尺度隐伏溶腔间岩层防突厚度	87
5.3	隧道与远端岩溶储水构造间岩层防突厚度	104
5.4	小结	107
6	岩溶隧道工作面前方岩墙防突厚度	109
6.1	工作面岩墙安全厚度的经验确定	109
6.2	较完整岩体工作面岩墙安全厚度	111
6.3	非完整岩体工作面岩墙突水机制	118
6.4	非完整岩体工作面岩墙安全厚度	123
6.5	小结	129
	参考文献	130

1 绪 论

1.1 选题背景及研究意义

岩溶(又称喀斯特, Karst)是铁路、公路、水利水电、矿山巷道等地下工程建设中常见的地质灾害之一。资料显示^[1-10], 地球上约有 15% 的地形是喀斯特地貌, 许多国家每年都因不同程度的隧道(洞)或矿山巷道岩溶灾害而造成巨大的经济损失和人员伤亡。我国幅员辽阔, 有 70% 为山区, 地理地质条件十分复杂, 是世界上岩溶分布最广的国家, 遍及全国各省、自治区和直辖市, 按可溶地层分布计算, 分布面积可达 $3.443 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约占我国国土面积的 1/3; 按碳酸岩的出露面积计算, 分布面积为 $0.907 \times 10^6 \text{ km}^2$, 接近我国国土面积的 1/10, 其中, 贵州、广西、云南、四川、重庆西南五省市岩溶分布最为广泛。西部已建和在建隧道中位于岩溶地区的占相当大比例^[11], 在这些隧道中, 由于岩溶不良地质灾害的发生给隧道的施工和运营造成了极为严重的威胁。在我国西南和中南地区已建的 17 座岩溶中长大铁路隧道中, 也有近 50% 发生过岩溶灾害, 如圆梁山隧道、武隆隧道、歌乐山隧道等^[7-10]。渝怀线圆梁山隧道在施工中, 先后遇到了 5 个深埋充填型溶洞, 受高压、富水、岩溶等诱导因素的影响, 突发了多次大规模的涌水、涌砂和涌泥等工程地质灾害, 给工程的安全施工造成了严重的影响^[12]。显然, 突水等灾害已经成为我国岩溶地区隧道修建中最严重、最常见的地质灾害之一。大规模的突水、涌泥不但危及隧道施工安全, 影响施工进度, 一旦措施不当, 还常会使隧道建成后运营环境恶劣, 地表生态恶化, 给人们的生产和生活造成重大损失。

作为沪—汉—蓉快速通道重要组成部分的宜万铁路全线工程地质条件非常复杂, 岩溶极其发育, 岩溶隧道多达 92 座, 总里程 247 km, 占全线隧道总数的 57.2%, 总长的 74%, 隧道施工中岩溶突水突泥风险巨大^[13]: 2006 年 1 月 21 日凌晨 6 点, 马鹿箐隧道出口平导反坡施工到 PDK255+978; 上午 10:50 洞内施工人员正准备出碴作业时, 工作面拱顶突然开始突水崩溃, 有压岩溶水相继从平导、正洞涌出, 大水封闭了整个平导、正洞, 并将洞外施工场地冲毁, 最大涌水量 $300 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右, 突涌水过程中除正洞 2 人被水冲出洞外生还外, 其余作业人员全部遇难; 2007 年 8 月 4 日 21 时, 野三关隧道出口方向 I 线施工到 DK124+602, 工作面爆破后, 经过排烟、排危等工序, 检查无异常, 进入出碴工序。8 月 5 日凌晨 00:57, 出碴接近尾声时, 突然发现工作面右侧向上涌水, 翻滚上涨, 最初 30 min, 瞬间最大涌水量达 $15.1 \text{ 万 m}^3/\text{h}$, 突水造成大量机械设备损坏和多名施工人员伤亡; 2004 年 9 月 11 日, 别岩槽隧道出口上半断面开挖到 DK406+422, 隧道工作面炮眼孔出水量增大。12 点 30 分, 工作面爆开, 突发大规模涌水, 突水洪峰流量 $36\,000 \text{ m}^3/\text{h}$, 洞口涌水高度达 1.8 m, 涌水持续 40 min 后稳定为 $500 \text{ m}^3/\text{h}$ 。该次突水规模大、流量急, 洞内材料和设备被突水席卷而出。同时, 突水将隧道外施工场地 10 m 宽度范围冲垮, 并冲毁下游稻田, 淤塞河道, 造成重大经济损失。突水后, 出口线路右侧庙坪暗河断流。另外, 云雾山、齐岳山、八字岭等一、二级风险

隧道也多次发生严重的突水、突泥岩溶地质,有的甚至导致隧道施工停止一年以上,造成了重大的人员伤亡和巨大的经济损失。

高风险岩溶隧道是岩溶区交通基础设施的控制性工程,由于大型静储量或动储量岩溶水体及其衍生含导水构造的存在,岩溶隧道在施工和运营中存在巨大的突水、涌泥风险。在隧道施工过程中因开挖而揭露出来的充填溶腔,即施工出露溶腔,可事先采取措施加固、防突;在注浆、冻结等常规处理方法存在安全性难以保证、不够经济或工期较长等诸多不足的形势下,我国工程人员创造性地提出了“释能降压法”新工法^[13]。在使用释能降压法处理工作面前方溶腔时,当隧道即将揭穿溶腔的最后一个循环时,要保留一定厚度的岩塞防止溶腔内高压水压溃岩塞,涌入隧道,造成工程事故。科学地确定岩塞厚度,确保一炮崩开溶洞是释能降压施工技术成功的关键。另外,对于一般规模和水压的充填溶腔采用常规方式处理时,也需在工作面距前方含水水体一定距离时改换施工方案;再则在施工中对工作面前方进行超前地质预报时,也存在最小预测预报距离,这些距离原则上说和释能降压法预留岩塞的最小防突厚度类似,本书提出的计算岩塞安全厚度方法亦适用于上述两种情况。

岩溶隧道施工中未揭露的但处于隧道施工影响范围内的溶腔称为隐伏溶腔^[14]。在岩溶隧道灾害中,隐伏溶洞因工程上不能事先采取安全措施,易遭受到猝不及防的突水、涌泥等岩溶灾害,给隧道施工和运行造成的安全隐患和危害性极其严重,是一个岩溶区隧道施工中亟待解决的问题。该问题中隧道与周边隐伏溶腔间岩层的稳定与否直接关系到隧道能否顺利通过高压富水岩溶的影响范围,合理确定中间的岩层安全厚度(最小防突厚度)是十分关键的,安全厚度太小则工程造价低,但岩层容易垮塌,发生突水突泥事故,造成灾难性的后果;安全厚度太大则不经济,且大部分情况下线路也不允许改线绕行,因此有必要对岩溶隧道与周边隐伏水压充填溶腔间岩层安全厚度进行深入研究。

在我国深入实施西部大开发战略、西部加速融入“一带一路”伟大战略布局的背景下,我国交通和水利水电工程建设重心明显向地形地质条件极端复杂的西部山区和岩溶地区转移,上万公里的交通隧道工程和 20 余个世界级的大型水利水电工程正在或即将投入建设,将出现一批具有“大埋深、高应力、强岩溶、高水压、大流量”等显著特点的高风险深长岩溶隧道工程。由于岩溶发育的复杂性、岩溶水害的高危性,因此研究岩溶隧道突水突泥机理、合理确定防突层安全厚度,规避岩溶风险、保证围岩和结构的稳定成为岩溶隧道及其他岩溶区地下工程施工中面临的重大技术问题,具有重要的理论意义和工程应用价值。

1.2 国内外研究现状与发展动态

1.2.1 隧道与周边隐伏溶腔间防突层安全厚度研究现状

任美锷等^[15]认为,岩溶对隧道工程的危害主要表现为隧道突然涌水;隧道遇地下洞穴时的悬空;隧道顶部溶洞充填物的塌陷以及隧道底板洞穴塌陷等问题。铁道部第二勘测设计院科学技术研究所鲍鹤龄^[8]分析了我国西南、中南岩溶地区铁路隧道建设中溶洞引起的隧道失稳和隧道岩溶灾害典型案例,认为在开挖中未揭露出来的溶洞因工程上未能事先采取安全措施,易遭受到猝不及防的破坏,对隧道施工的危害性大。邹成杰^[11]总结了我国西南地区水工隧洞岩溶灾害,认为在施工中被直接揭露出来的溶洞,其稳定性一般易于分析和

评价,但对于隧道周边在施工中未出露的溶洞,其稳定性的分析要复杂得多,且其引起的隧道灾害具有一定的隐蔽性,危害性更大。邹成杰^[16]以鲁布革水电站为依托工程,分析了不同洞径的圆形隐伏溶洞对隧道围岩位移的影响;认为近水平向的隐伏溶洞对隧道围岩周边位移的影响最为不利。李彪、梁富清^[7]结合京珠高速公路石门坳隧道的施工,认为隧道周边溶洞将使得隧道围岩变形增加,造成隧道因变形过大而失稳;由于溶洞的出现,隧道开挖中易出现局部围岩坍塌、掉块和落石,危及施工人员和设备安全。吴梦军等^[17-18]利用公路隧道结构与围岩综合实验系统和有限元程序对岩溶区公路隧道围岩稳定性进行了一系列的大型相似模型试验和数值模拟研究,探讨了溶洞大小、位置对围岩稳定性的影响。赵明阶等^[19-23]以朝东岩隧道为工程背景,采用模型试验和数值模拟方法研究了隧道周边不同大小、不同距离的溶洞分布对隧道围岩周边变形的影响和应力的影响,提出了岩溶区全断面开挖隧道围岩变形时空曲线的一般模式,并建立了岩溶区隧道围岩稳定性判别标准。陈成宗、何发亮^[24]对我国岩溶地区 26 座(截至 1998 年底)铁路长隧道岩溶灾害的调查表明,溶洞引起的隧道围岩大变形和支护结构破坏是岩溶隧道的主要灾害之一。资料分析进一步表明隐伏溶洞在施工时发生的突破型岩溶灾害因其发生时间的不可预见性,危害性将更大。王勇、乔春生等^[25-27]从施工安全角度出发,针对溶洞位于隧道正下方、正侧方和正上方时的三种特殊情况,充分考虑各主要影响因素及其耦合作用,分别基于多元回归分析和支持向量机人工智能技术获得了隧道与其周边隐伏溶洞间安全距离的两种预测模型。史世雍等^[28]结合崇遵高速夏家庙隧道实际工程,运用 ANSYS 有限元软件研究了隧道顶部不同大小、不同距离的溶洞分布对隧道围岩稳定性的影响,数值模拟结果与现场监测数据基本吻合。宋战平^[14]对较大尺度溶洞引起的隧道失稳机理进行可分析,推导了溶洞位于隧道顶、底板时的中间岩层最小安全厚度计算公式,并对工程中常见的中、小尺度溶洞对隧道围岩和支护结构性态的影响进行了系统数值分析。刘招伟等^[29]采用 FLAC 渗流分析模块分别就溶管位于隧道上侧位和下侧位两种情况进行了分析,通过分析防突层厚度与隧道涌水量、隧道围岩最大位移量的关系,认为防突层安全厚度可取 2.5~3 m。臧守杰等^[30]采用弹性理论建立了隐伏溶腔位于隧道底板时中间岩层的最小安全厚度的理论公式,为施工期岩溶隧道底板岩层的安全性评价提供了依据。綦彦波^[31]以新建宜(昌)万(州)铁路金子山隧道为依托工程,通过现场实测和数值试验等方法较全面研究了单线铁路隧道施工中不同空间位置和尺度的既有溶洞对隧道施工的影响,提出了穿越既有溶洞区铁路隧道设计、施工和支护的设计原则。莫阳春等^[32-33]以达(州)成(都)高速铁路宝石岩隧道为工程背景,对底部和侧部含有隐伏溶洞的隧道围岩变形进行了数值模拟研究,溶洞与隧道间岩柱(防突层)向两个相反的方向变形,防突层成为最危险区域,并将数值计算结果与现场监测结果进行比较分析。李利平^[34]基于防突层思想,借助传统的岩梁结构理论,建立了不同性质防突层失稳的突变力学模型,根据其系统控制参数演化路径的分析提出了突水防治措施,并从宏观尺度上给出了具有一定安全系数的防突层突水判据与最小防突厚度计算公式。莫阳春^[35]假定隧道底部有高压充水溶洞,根据充水溶洞的大小关系,将溶洞顶板简化为四周固支的大变形椭圆形板、矩形板和两端固定梁三种模型,通过研究隧道底板系统能量的失稳,建立了预测隧道底板突水的尖点突变模型,导出了系统失稳时受力的临界值和突变失稳判据。曹茜^[36]采用数值模拟方法研究了不同位置的隐伏溶洞(顶部、侧部和底部)对隧道围岩稳定性的影响规律,并进行了多因素影响下的数值正交试验,依据试验结果建立了防突层安全厚度的多元回归计算

公式。张锋等^[37]以纳溪高速公路叙岭关特长隧道为背景,以方形溶洞为例,运用三维有限元方法分析隧道侧部溶洞对隧道围岩稳定性的影响。赖永标^[38]基于能量突变理论,采用数值模拟方法研究了防突层的稳定性,并提出了基于 SVM 的岩溶隧道与溶洞间防突层安全距离的预测方法。刘记^[39]以新建贵广铁路某特长高风险岩溶隧道为依托工程,针对溶洞位于隧道上部的情况,采用有限差分数值方法对隧道与溶洞间最小防突厚度进行了正交试验,得到了围岩级别、围岩侧压力系数、溶洞跨度、溶洞内水压和隧道埋深五个影响因素对最小防突厚度的影响规律,并通过多元线性回归方法建立了最小防突厚度的数学预测模型。王国斌^[40]以湖北沪蓉西高速乌池坝隧道为研究对象,通过 FLAC^{3D}数值模拟结合正交试验方案,对上覆型、下伏型及侧伏型岩溶隧道与溶洞间的安全距离进行分析,得到围岩级别、岩体侧压力系数、溶洞跨度、溶洞高跨比和隧道埋深五个影响因素对安全距离的影响程度和影响规律。宋战平等^[41]针对隧洞侧边不同位置的中、小尺度溶洞对城门洞型水工隧洞围岩应力、变形、塑性区以及隧洞支护结构受力特征的影响,采用有限元数值模拟方法进行了系统的数值试验。谢举^[42]利用数值模拟方法研究了三种类型岩溶隧道(即顶部岩溶、底部岩溶及侧部岩溶)在不同影响因素(即岩溶与隧道间距、岩溶大小、岩溶水压)条件下的隧道围岩及其结构的力学及稳定性规律。贾媛媛^[43]以某地铁区间岩溶区盾构隧道修建为工程依托,对隧道三维动态盾构施工过程进行弹塑性数值模拟,分析盾构隧道施工时,溶洞尺寸以及溶洞与隧道间净距对隧道围岩变形及应力等的影响规律。范占锋^[44]通过数值模拟对比分析了隧道顶部正侧和上方侧向存在充水溶洞时对隧道开挖围岩稳定性的影响,给出了安全岩墙预留安全厚度值的范围。刘江昊^[45]利用离散元数值模拟软件,建立不同节理几何分布特征的概化模型,分别对隧道及隐伏溶洞周围不同倾角、不同间距以及不同组合关系下围岩变形问题进行了研究。郭明^[46]利用 COMSOL Multiphysics 数值模拟软件研究了不同类型和分布形态的隐伏溶洞影响下隧道围岩渗流场、应力场及位移场的变化规律,揭示了含隐伏溶洞隧道围岩失稳机理。周栋梁等^[47]基于岩石剪切、冲切破坏的莫尔判据和格里菲斯判据,考虑溶洞平面投影边缘处的弯拉破坏和剪切破坏、中隔墙底部岩层的冲切破坏和剪切破坏破坏模式,分别建立这四种破坏模式下岩溶区分岔隧道底板安全厚度预测公式。雷霆^[48]利用 FLAC^{3D}软件渗流模式进行隧道开挖收敛计算,通过数值计算揭示了隧道围岩力学信息在充水溶洞的赋存情况下随开挖的变化规律,同时也获得了溶洞与隧道间最小安全厚度。熊战辉^[49]针对隧道拱顶遭遇充填溶腔时的岩塞安全厚度问题,基于极限分析原理构建合理的破坏模式,推导出优化过程,并用该方法得到了 I~V 级围岩条件下对应的岩塞安全厚度。齐俊^[50]结合贵瓷高速建中隧道,采用数值分析方法隧道周边不同位置和距离的岩溶空洞对隧道变形及衬砌内力的影响规律。刘波^[51]提出了基于 Morris 全局敏感性分析的静荷载下隧道下伏溶洞顶板安全厚度的 BP 神经网络计算方法。苏海健^[53]基于有限差分软件,建立了同时考虑水的渗透及渗透作用下岩体软化的耦合计算方法,并以六盘山隧道为依托工程,重点考察了承压水压力、保护层厚度及含水层厚度对隧道围岩位移场、主应力分布及塑性区分布的影响规律。

1.2.2 岩溶隧道工作面前方岩墙安全厚度研究现状

尹尚先等^[53]将采动工作面与岩溶陷落柱间的防突煤柱划分为采动破坏带、关键隔水层、陷落柱塑性变形带三部分,在陷落柱水压已知的情况下可求得临界安全厚度或者在厚度

一定的情况下反求临界水压力。刘招伟^[12]借助 FLAC^{2D}研究了岩溶隧道工作面向前掘进逐渐靠近岩溶管道而引发突水的过程和机理,分别构建了纵向断面交叉突水模式的两种计算模型,认为在模拟工况下工作面临界距离应取 2.0~3.5 m。干昆蓉等^[54]针对具体工程,基于施工经验,综合考虑钻爆对周围岩体的扰动深度,隧道开挖后围岩的松弛厚度,含水裂隙在高水压条件下的扩展作用,岩体地应力状态及量值,并保证有一定安全储备的情况下,最后确定岩塞安全厚度为 5~6 m,但未建立岩塞厚度的具体计算公式。张炜等^[55]采用数值模拟方法分析了厚度为 3~12 m,直径为 4.5 m 的Ⅲ级围岩工作面岩塞在 3 MPa 水压作用下的受力特点,以工作面中心线上的点的应力状态作为判断岩塞是否失稳的依据,得出预留 5 m 厚岩塞是合理的。李利平等^[56]认为岩溶裂隙水的高水头压力的主作用面与隧道工作面突水临空面之间的岩体由施工开挖引起的围岩松弛区、安全厚度区和裂隙带区三部分组成,从而构成最小岩石保护厚度区,基于此推导了隧道最小岩石保护厚度半解析表达式。王卫军等^[57]结合湖南七一煤矿石坝井岩溶突水、突泥实例,运用损伤力学及岩体流体力学理论,得出 3 m 左右的岩柱厚度是巷道工作面岩溶突水的临界距离。杨寅静^[58]将岩溶隧道工作面突水破坏简化为柱型剪切破坏类型,根据平衡条件建立了工作面岩体失稳判据。资谊等^[59]利用薄板理论得到了工作面整体失稳时最危险点的应力状态与防突岩体力学参数和溶腔承压水压力之间的关系。孙谋^[60]等建立了完整性较好的工作面失稳的折叠突变模型,通过对系统势能函数的分析,推导了隧道工作面最小安全厚度计算公式。李志义等^[61]以宜万铁路齐岳山隧道工程为背景,应用三维有限元分析方法,在隧道工作面前方的溶洞规模大于、等于和小于隧道工作面规模的 3 种情况下,模拟分析了不同岩体厚度、不同岩溶水压力时隧道工作面的变形破坏规律。王媛等^[62]认为突水临界水压力和临界突水距离是隧道工作面突水、突泥预防中两个重要的临界特征参数,并基于颗粒流数值模拟结果分析了工作面岩体裂隙密度和产状对上述两个参数的影响规律。刘超群等^[63]通过数值模拟和理论分析建立了预测岩溶隧道工作面前方岩盘安全厚度的计算方法及计算图式。赵延林等^[64]基于流固耦合—强度折减联动分析方法研究了防水岩柱安全系数与溶洞内压、岩柱厚度的关系,提出了巷道工作面前伏水压充填溶洞的防水岩柱工程留设厚度设计方法。Peng Jun 等^[65]基于 FLAC^{2D}的模拟结果,给出了不同水压和不同围岩级别的岩溶隧道工作面防突岩体安全厚度。李术才等^[66]推导了合理反映爆破开挖扰动与水压作用下的岩溶隧道工作面裂纹岩体最小安全厚度计算公式。于琳茗等^[67]基于莫尔—库仑准则和极限平衡法,推导出了隧道前伏碎屑流时岩墙安全距离的计算公式,并分析了各参数的影响。

1.3 需进一步研究的问题

如前所述,尽管众多学者围绕隧道与周边隐伏溶腔间防突层稳定性及其安全厚度、岩溶隧道工作面前方岩墙稳定性及其安全厚度开展了大量研究工作,取得了诸多具有重要理论意义和工程应用价值的成果,有力指导了岩溶地区隧道的设计与施工,对防止隧道突水突泥等岩溶地质灾害的发生,提高岩溶区隧道工程的预见性和效率具有直接的推动作用。

随着我国中东部岩溶地区地下空间的持续开发利用及西部交通、水利等基础设施建设的迅猛发展和大量的铁(公)路隧道、水工隧洞及城市地铁隧道已经或即将在岩溶地区修建(或在建),其规模、数量及岩溶灾害的处治难度为国内外所罕见。由于岩溶发育的复杂性、

岩溶水害的高危性,因此研究岩溶隧道防突层突水致灾机理及其安全厚度、规避岩溶风险、保证隧道围岩和结构的稳定成为岩溶区隧道及其他地下工程施工中面临的重大技术问题,迫切需要解决。目前形势下有必要就以下问题开展进一步的研究和分析:

① 目前隧道周边隐伏溶腔对隧道围岩稳定性影响的研究均是结合具体依托工程开展的,所得结论缺乏系统性、规律性,使得研究成果的适用范围受到限制,究其主要原因除岩溶系统本身的复杂性外,缺乏岩溶隧道突水突泥典型致灾构造及隧道—岩溶系统概化模型的研究也是关键因素。

② 目前采用理论分析计算隧道与隐伏溶腔间防突层安全厚度时,常笼统地将其简化为弹性梁板模型,然后通过结构力学或突变理论按一定准则导出安全厚度的计算公式,忽略了隧道与中小尺度隐伏溶腔间岩层简化为弹性梁、板的合理性。另外,大多数情况下将隧道周边隐伏溶腔简化为无任何充填物的干溶腔处理也是值得讨论的。基本上只讨论处于隧道顶、底板及边墙外的隐伏溶腔,而缺乏研究非常规位置(非上述三种位置)隐伏溶腔与隧道间防突层的稳定性。

③ 岩溶隧道工作面前方岩墙安全厚度目前多借助于经验总结或不加区分工作面岩体的完整程度采用弹性板弯曲或整体剪切破坏准则建立力学模型,针对含裂隙缺陷的工作面岩体,目前还没有一个能反映断裂韧度值、裂纹面劈裂参数等较为精确的力学模型。

④ 针对有含地质缺陷的岩溶隧道围岩,目前大多数通过断裂力学的手段进行讨论,给出了很多情况下发生劈裂破坏的临界水压力计算方法,但这些理论公式如何用于指导岩溶隧道施工依然值得进一步研究。另外,对岩溶隧道突水机理的认识也需要进一步提升。

1.4 主要研究内容

本书在国家自然科学基金面上项目(50978018)“隐伏溶洞与新建山岭隧道间安全距离预测模型及工程应用研究”和面上项目(51778215)“爆破与开挖瞬态御荷双重动力扰动下岩溶隧道掌子面突水灾变机理研究”及国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB036003)课题“深长隧道突水突泥灾变演化及失稳机理”资助下,广泛调研和收集隧道工程突水突泥等突发性地质灾害的工程与研究资料,明确了深部大型岩溶发育分布的基本规律,总结了不同岩溶形态的地质灾害及风险,将隧道与岩溶系统概化成不同的理论模型。从微观和宏观层面上分析岩溶隧道突水机理,针对不同的隧道—岩溶系统概化模型,依据不同的理论确定隧道与周边隐伏溶腔间防突岩层安全厚度、工作面与前方含水岩溶构造间岩墙安全厚度。主要研究内容如下:

① 隧道—岩溶系统概化模型研究。鉴于宜万铁路岩溶发育的广泛性、岩溶灾害的严峻性、岩溶隧道施工经验的丰富性,本书以宜万铁路为主研究分析山岭隧道岩溶的发育特征、分布规律、分布形态,通过总结不同岩溶形态的地质灾害及风险,以及其与岩溶隧道的位置关系,将隧道—岩溶系统概化为合理的力学模型,为定量研究提供基础。

② 岩溶区灰岩基本力学性质研究。通过室内单轴压缩试验、三轴压缩试验、巴西劈裂试验研究岩溶区灰岩的变形和强度特征,重点探讨岩溶区灰岩在自然含水状态和饱水状态下力学性质和能量机制的差异。结合现场地质调查的有关资料,运用霍克—布朗的岩体强度理论,通过 Roclab 软件确定岩体力学参数,为相关计算提供必要的力学参数。

③ 岩溶隧道突水机制研究。结合岩溶区隧道发生突涌水的岩溶构造形态的差异,对岩溶隧道突水类型进行分类,并从微观和宏观两个层面分析岩溶隧道突水的机理。以边墙外赋存有高压富水溶腔的山岭隧道为背景,通过离散元程序分析在地应力和高水头岩溶水压力的作用下,防突岩层破坏突水的过程。为确定防突厚度提供理论依据。

④ 隧道与周边隐伏溶腔间岩层防突厚度研究。在隧道—岩溶概化模型的基础上,依据隐伏溶腔与隧道间岩层力学特征的不同以及突水机理的差异,将隧道周边隐伏岩溶构造分为大尺度溶腔、中小尺度溶腔以及地质缺陷体导通突水岩溶构造,分别采用弹性梁板模型、双孔洞力学模型以及裂隙导升模型分析防突层的稳定性,并建立防突层最小安全厚度的计算方法。

⑤ 岩溶隧道工作面前方岩墙安全厚度研究。在隧道—岩溶系统概化模型研究的基础上,视前伏高压富水岩溶构造隧道工作面岩墙岩体的完整程度,依据岩溶区隧道的突水机制判定其破坏突水的模式;针对完整岩体采用弹性厚板模型,基于抗拉和抗剪破坏准则推导岩墙安全厚度公式;针对含裂隙的岩溶隧道工作面岩体,基于临界水压力建立安全厚度计算模型,并讨论岩溶隧道工作面突水的滞后效应和冲刷扩径效应。

2 山岭隧道岩溶特征及概化模型

在岩溶地区修建的交通隧道及水工隧洞等地下工程越来越多,这些工程均遇到了不同程度的岩溶工程地质灾害问题,如沪蓉西高速公路的乌池坝隧道和齐岳山隧道、尊崇高速公路的夏家庙隧道、渝遂高速公路的梨树湾隧道、永武高速公路的古石背隧道、广渝高速公路的华蓥山隧道;渝怀铁路的圆梁山隧道、武隆隧道、歌乐山隧道,宜万线的野三关、大支坪、马鹿箐等隧道,武广客运专线的方田冲隧道,石太客运专线的太行山隧道;乌江渡、鲁布革、天生桥、东风等工程的水工隧道等,大量岩溶隧道的修建实践为分析山岭隧道岩溶特征和概化模型提供了条件。其中宜万铁路行经贵高原东北麓,地势陡峻、河谷深切、地形条件极其困难,70%地段位于岩溶地区,区内岩溶强烈发育,构造十分复杂,补给水源丰富,其主要表现为:富水构造、岩溶管道(暗河)、大型充水溶腔、大规模充填溶腔、高压裂隙水等几乎涵盖了所有岩溶形态,其规模、数量及工程处理难度为国内外罕见,被国内外专家和同行公认为世界级难题,视为“筑路禁区”。鉴于宜万铁路沿线岩溶发育的广泛性、岩溶灾害的严峻性、岩溶隧道施工经验的丰富性、岩溶资料收集的翔实性和时新性,本书以宜万铁路为主研究分析山岭隧道岩溶的发育特征、分布规律、分布形态以及隧道一岩溶形态的概化模型。

2.1 岩溶发育基本特征分析

2.1.1 岩溶发育的地理位置特点

宜万铁路位于我国云贵高原东北麓,见图 2-1,为我国东部新华夏系第三隆起带中南段和长江中下游东西向构造西段延伸部分,以及两者的交接和复合部位,具体为江汉平原沉降带、长阳东西向构造带、新华夏系构造,地质构造极其复杂,是我国目前已建和在建的地质条件最复杂的铁路工程。西部以齐岳山为界,进入四川盆地,东部则向江汉平原过渡。宜万线宜昌至土城段约 30 km 为长江中下游平原的构造侵蚀丘陵区;土城至齐岳山段约 300 km 线路走行于清江流域与长江的分水岭靠北侧地带,为构造溶蚀侵蚀中低山区,河谷深切、地势陡峻,碳酸盐岩广泛分布,岩溶地貌发育。齐岳山至万州段约 50 km,线路穿越齐岳山脉后,进入川东红层的构造侵蚀、剥蚀中、低山区,地势由东向西逐渐减低,宜万铁路线路走向见图 2-1。由于线路经过区域气温温暖,降雨丰富,碳酸岩分布广泛,全线区域岩溶发育强烈。例如野三关隧道,通过对岩溶洼地等岩溶负地形统计,平均达 1.43 个/ km^2 ,去除深切河谷地带,补给区洼地平均密度高达 $2\sim 3$ 个/ km^2 ,在齐岳背斜 DK361+597~DK362+277 长 680 m 区段内,共发育 6 个规模较大的岩溶,平均岩溶间距不到 300 m,岩溶发育频度极高。

2.1.2 岩溶发育的高层分带特点

岩溶发育在高程分布上,除岩性、构造影响外,主要受水流循环强度和深度的控制。一

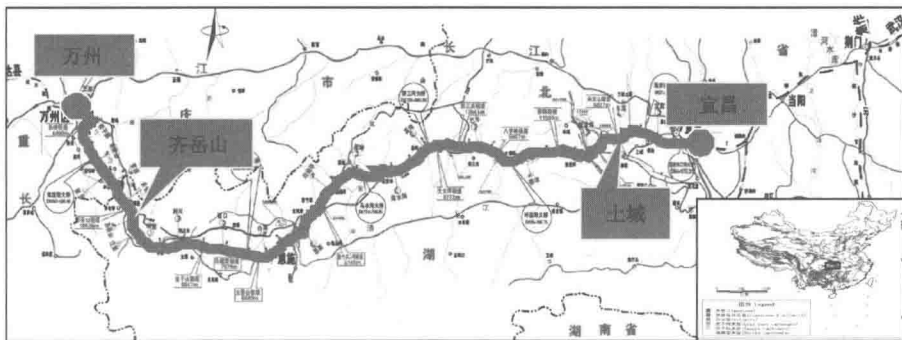


图 2-1 宜万铁路线路平面图及其在我国碳酸盐分布图中的位置

般情况下,岩溶发育程度随着深度增加而减弱,因为受水动力条件和地质构造的控制,岩溶发育程度与规模随着深度增加而减弱。根据宜万线区域岩溶发育特征,一般分为以下四个分带,由上向下划分为:表层岩溶带、垂向渗滤带、水平径流带、深部循环带。

表层岩溶带为强烈岩溶化的包气带表层部分,发育厚度一般为 5~30 m,因其处于岩石圈、大气圈、生物圈、水圈四大圈层的交汇部位,岩溶的动力作用强烈。表层岩溶带发育有许多分散的流量较小的泉水,成为山区人畜用水和分散农田灌溉的重要水源。表层岩溶泉与饱水带之间没有直接水力联系,对隧道不构成直接涌水威胁,隧道工程排水也不会造成其水源枯竭。

垂向渗滤带位于地表以下、丰水期潜水面以上。岩溶以垂直形态及早期岩溶为主,偶有悬挂泉。岩体中的垂直岩溶形态一般无水,地下水以垂直运动为主。垂向渗滤带为包气带的主体,补给区厚度大,排泄厚度小,一般为 30~350 m。为较强岩溶发育带,以垂向型岩溶为主,如竖井、落水洞、垂向溶缝等。

水平径流带为饱水带的主体,区内发育厚度为 100~200 m。为强岩溶发育带,以水平渗流型岩溶为主,如岩溶地下河、溶蚀缝洞等。

水平径流带包括地下水位季节变化的范围(通常所说的季节变动带范围)。它的上限是丰水期的潜水面或暗河的最高水位,下限一般为枯水期潜水面,水平径流带,为水力梯度减小的平缓层流带,水的溶蚀能力减弱,碳酸盐岩含水介质岩溶化减弱,向深部由岩溶管道—溶隙介质转变为溶隙—裂隙介质,上部岩溶发育强,下部发育中等。

深部循环带为饱水带的下部,埋藏深度较大,测区内埋深大于 200~500 m,水动力循环微弱,岩溶发育程度差,岩溶形态以溶蚀孔缝为主,规模较小。

2.1.3 岩溶发育的地层分布特点

不同岩溶层组类型的岩溶水动力条件不同,表现出的岩溶地貌形态及其规模也不同。宜万线出露震旦系、寒武系、奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系以及古近系、新近系、第四系地层,其中主要为滨海至浅海相的碳酸盐类岩石,该类可溶性岩层约占全线总长度的 70%,因此决定了全线岩溶极其发育。

宜万线地区的可溶岩主要为碳酸盐岩系。根据野外调查表明,该区域岩溶发育规律主

要表现为以下几个方面:

① 从碳酸盐岩的结构来说,一般晶粒越粗,溶解度就越大,岩溶发育也就越强烈,粗粒结构的岩石空隙大,岩石的吸水率高,抗侵蚀能力弱,有利于溶蚀。

② 从碳酸盐岩的成层构造而言,一般岩层越厚,岩溶就越发育。这是由于厚层碳酸盐岩含不溶物较少,溶解度较大;薄层碳酸盐岩常含较多泥质,溶解度小,故岩溶化程度较弱。

③ 对于单一状岩层,即是指全部由单一的碳酸盐岩所组成的岩溶地层,或碳酸盐岩中所夹非碳酸盐岩地层厚度很小(一般不超过 10%)且变化不稳定的岩溶地层。此类岩层组合多以质纯的厚层块状灰岩或白云岩为主,局部亦夹有少量的薄至中厚层泥质、白云质灰岩或泥质白云岩。一般来说,岩溶最发育的是全部以纯碳酸盐岩组成的岩层组合,如中三叠统关岭组灰岩、下二叠统阳新灰岩及中、上石炭统马平、威宁统灰岩等皆是。对于间互状的岩层组合即是指碳酸盐岩与非碳酸盐岩组成互层(非碳酸盐岩占 40%~60%)或夹层(非碳酸盐岩占 10%~40%或 60%以上)的岩溶地层。这一类岩层组合中,岩溶化程度随着非可溶性岩层的增多而减弱。

2.1.4 岩溶发育的地质构造特点

地质构造与岩溶发育的关系极为密切,实践证明,它不仅控制着岩溶发育的方向,而且还影响岩溶发育的规模和大小。宜万铁路地质构造是我国东部的新华夏系第三隆起带的中南段和长江中下游东西向构造西段延伸部分,以及两者的复合部位,构造较为复杂,具体为江汉平原沉降带、长阳东西向构造带、新华夏系构造,见图 2-2。

比较图 2-1 和图 2-2 可以看出地质构造复杂地段和岩溶隧道分布密集地段具有一致性,间接说明了地质构造和岩溶发育的密切关系。地质构造对岩溶发育特征的控制作用以具体岩溶隧道为例说明:云雾山隧道斜穿白果坝背斜,岩溶集中发育于背斜近核部地带和岩相变化带附近,构造对岩溶的控制作用表现在所有单体岩溶形态主要发育方向与岩层走向基本一致,呈 NE 向。一般情况下岩溶洞穴或岩溶洼地的长轴方向与岩层走向平行,规模的大小和形态特征则又与构造裂隙组合切割密切相关;野三关隧道主要穿越二溪河向斜和石马坝背斜,石马坝背斜位于隧道中部,地势较高,且核部为阻水地层,造成本区地下水向两侧分流,决定了本区地下水流动及岩溶发育的总体格局,背斜轴部覆盖有 P_{1m} 、 P_{1q} 灰岩,受褶皱影响易产生张性裂隙,有利于岩溶管道的形成。二溪河向斜位于柳山拐一带,花坪向斜位于苦桃溪至支井河一带,均属于宽缓向斜,有利于岩溶水富集和岩溶均匀发育。向斜轴部尤其是花天河向斜轴部易相对富水,往往具备一定规模的地下水静态储量;马麓青隧道位于金子山复向斜中四方洞向斜南东翼的单斜地层中,构造运动使碳酸盐岩体发生破裂形成裂隙为岩溶作用的进行提供先决条件。各种岩溶负形态(如洼地、消水洞等)的发育主要与层间裂隙、构造裂隙(包括断层)有关,特别是层间裂隙、构造裂隙(断层)密集和交汇处更是岩溶负形态形成的有利部位。褶皱构造核部及转折端也是岩溶发育有利部位(洼地、消水洞分布较多)。

宜万铁路主要岩溶隧道与地质构造关系见表 2-1。