



# 郑万铁路岩溶隧道

# 突水力学机理及处治措施研究

张桥 王明慧 编著



西南交通大学出版社



-----  
图书在版编目 ( C I P ) 数据

郑万铁路岩溶隧道突水力学机理及处治措施研究 /  
张桥, 王明慧编著. —成都: 西南交通大学出版社,  
2020.6  
ISBN 978-7-5643-7487-7

I. ①郑… II. ①张… ②王… III. ①岩溶区—铁路  
隧道—隧道施工—突水—研究—中国 IV. ①U459.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 ( 2020 ) 第 107364 号  
-----

Zheng-Wan Tielu Yanrong Suidao Tushui Lixue Jili ji Chuzhi Cuoshi Yanjiu  
**郑万铁路岩溶隧道突水力学机理及处治措施研究**

张 桥 王明慧 编著

---

责任编辑 姜锡伟

封面设计 何东琳设计工作室

---

出版发行 西南交通大学出版社  
( 四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号  
西南交通大学创新大厦 21 楼 )

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

印刷 成都蜀通印务有限责任公司

---

成品尺寸 170 mm × 230 mm

印张 11.25

字数 162 千

版次 2020 年 6 月第 1 版

印次 2020 年 6 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-7487-7

定价 98.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 序

郑万高速铁路，简称郑万铁路，是郑渝高速铁路的重要组成部分，同时也是联系华北、华中地区和西南地区的主要高速客运通道。郑万铁路全线建筑长度 818 km，估算总投资 1 180 亿元人民币，是国家完善快速铁路网布局的重要环节，对国家经济发展战略布局有着重大意义。郑万铁路重庆段穿越云阳、奉节、巫山三处岩溶发育地区。岩溶富水区的突泥突水问题对铁路隧道建设影响极大，施工措施采取不当可能造成人身伤亡、地表塌陷、水资源损失、地下水污染等工程灾害。为了防止岩溶隧道突水突泥引发严重的工程事故，本书以郑万铁路重庆段里程最长、岩溶发育的小三峡隧道为背景，采用数值模拟和理论分析相结合的方法，开展小三峡岩溶隧道突水机理和防治措施研究。主要研究成果如下：

(1) 根据小三峡隧道前期地质勘察工程地质和水文地质资料，总结了小三峡隧道围岩岩体结构特点和隧道沿线的岩溶发育特征，在此基础上提出了岩溶隧道围岩岩体结构的概化模型，为后续研究岩溶隧道突水机理奠定了基础。

(2) 在岩溶隧道围岩岩体结构概化模型的基础上采用离散元 3DEC 软件建立了小三峡隧道围岩岩体水力模型，针对小三峡隧道围岩周围存在隐伏空溶洞、隐伏充水溶洞的情况，考虑溶洞与隧道的空间位置不同，设置了 6 种典型工况，

计算了溶洞与隧道间存在不同间距时隧道围岩的位移和应力变化规律；然后在此基础上考虑围岩渗流场的影响，计算了隧道围岩位移、应力和岩体孔隙水压力规律，为后续分析岩溶隧道突水判据奠定了基础。

(3) 在分析岩溶隧道典型突水机理的基础上，针对小三峡隧道围岩节理发育的特点，提出了小三峡隧道围岩突水的剪切破坏和劈裂破坏机理，并采用断裂力学研究方法提出了基于剪切破坏和劈裂破坏机理的临界水压力计算公式；然后在此基础上，采用有限元方法建立岩溶隧道平面应变模型，研究了当岩溶位于隧道拱顶、掌子面前方和隧道底部时，避免岩溶隧道围岩突水的最小防突层厚度，为指导小三峡隧道施工提供了技术支持。

(4) 在介绍岩溶隧道突水防治的基础上，针对小三峡隧道的特点，开展了小三峡隧道突水预防超前地质预报方法和注浆防治措施研究，研究成果可为小三峡隧道施工中的岩溶突水灾害提供技术指导。

# Contents

## 目 录

1	绪 论	1
1.1	研究背景与意义	1
1.2	国内外研究现状	2
1.3	本书主要研究内容	25
2	工程概况	27
2.1	工程项目自然特征	27
2.2	项目工程特点	31
2.3	小三峡隧道工程地质和水文地质条件	33
3	小三峡岩溶隧道围岩岩体结构概化模型研究	44
3.1	小三峡岩溶隧道围岩岩体结构概化概述	44
3.2	小三峡隧道围岩结构特点	45
3.3	小三峡隧道沿线岩溶分析	46
3.4	隧道围岩岩体结构概化模型	49
3.5	本章小结	52
4	小三峡岩溶隧道围岩岩体水力模型研究	53
4.1	小三峡岩溶隧道围岩岩体水力情况概述	53
4.2	岩溶隧道围岩岩体水力分析模型	53
4.3	岩溶隧道隐伏空溶洞的围岩力学特性	62
4.4	岩溶隧道隐伏充水溶洞的围岩力学特性	78
4.5	考虑渗流场和隐伏充水溶洞的岩溶隧道围岩力学特性	102

4.6	本章小结	112
5	小三峡岩溶隧道突水评价判据及防突层计算研究	113
5.1	突水评价判据概述	113
5.2	岩溶隧道突水机理分析	113
5.3	考虑渗流影响的隧道围岩失稳突水力学判据	114
5.4	岩溶隧道最小防突层厚度计算	117
5.5	本章小结	131
6	小三峡岩溶隧道突水灾害注浆防治措施研究	132
6.1	岩溶隧道突水灾害注浆防治概述	132
6.2	岩溶隧道突水防治原则	132
6.3	岩溶隧道突水注浆封堵措施	136
6.4	本章小结	152
7	结    论	154
	附录	156
	附录一  隐伏空溶洞对隧道围岩应力和位移影响的计算结果	156
	附录二  隐伏充水溶洞对隧道围岩应力和位移影响的计算结果	160
	附录三  考虑渗流影响的隧道围岩应力、位移和孔压计算结果	164
	参考文献	167

# 绪论

我国岩溶地区分布广泛,可溶岩层分布面积约占国土总面积的 1/3,其中以西南部云、贵、桂和川、鄂、湘部分地区岩溶最为发育。随着我国西部大开发建设的蓬勃发展,在岩溶地区修建隧道、水电站、跨流域调水以及深部矿井等地下工程中不断遇到岩爆、塌方、瓦斯突出、涌泥等大型地质灾害,其中以岩溶突水最为严重。从目前国内外隧道施工现状及发展趋势来看,岩溶地区富水地段修建长大深埋隧道的技术尚不成熟,开展岩溶地区突水机理与防治对策的研究,有效遏制突水、涌泥等灾害事故的发生,保障地下工程的安全施工,已成为目前岩石力学与工程领域亟需解决的关键科学技术难题<sup>[1]</sup>。

## 1.1 研究背景与意义

随着我国隧道、矿山、水利以及其他地下工程建设的迅猛发展,所遇到的工程地质条件日趋复杂,面临的问题也越来越具有挑战性,高压突水、涌泥地质灾害屡有发生,地下深埋工程施工处在各种突发性灾害的巨大威胁之中,尤其是高压、富水区高埋深岩溶隧道面临高压突水、涌泥的危险。据相关资料统计,仅 20 世纪 80 年代,我国长岩溶隧道就有 26 座,约占隧道总数的 40%,其中西南、中南地区 17 座,占岩溶隧道数量的 65% 左右,且在施工过程中均遭受到不同程度岩溶水的侵害,其中 10 座发生了较大岩溶突水地质灾害。据西部已建和在建隧道的不完全统计,位于岩溶地区的隧道占 50%,且多条隧道发生了大型突水、涌泥地质灾害<sup>[2]</sup>。

本书以新建郑(州)万(州)铁路重庆段为研究背景,结合国内外相关研究现状及其发展趋势,采用离散元软件建立小三峡隧道三维岩体结构概化模型,研究小三峡岩溶隧道的突水机理;采用有限元软件建立数值计算模型对预防岩溶突水的防突层最小厚度进行计算,为小三峡隧道安全施工提供技术支撑。同时,针对小三峡隧道的特点,本书还研究小三峡隧道的突水预防超前地质预报方法和注浆防治措施,为小三峡隧道施工中的岩溶突水灾害提供技术指导。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 岩溶突水机理研究现状

岩溶涌(突)水通道形成具有两种形式:一种是完整岩体裂隙演化导致产生突水通道,即没有明显地质缺陷;另一种是地质缺陷式涌(突)水通道,诸如断层破碎带以及岩溶管道等等。对于第一种类型突水通道,若不考虑外力干扰影响,裂隙岩体形成通道演化过程受岩石类材料本身裂纹演化影响,一般表现为水力劈裂现象,实质上是高水头作用下岩体断续裂隙发生扩展,直至相互贯通后再进一步张开所致。而对于第二种涌(突)水通道,其形成、演化与发展过程除了与岩溶通道本身有一定关系外,还与水压、地应力以及爆破等外界因素密切相关<sup>[3]</sup>。刘招伟<sup>[2]</sup>初步揭示了圆梁山隧道岩溶突水机理,根据水压力作用在隧道工程不同部位情况,进行了板柱型突水、拱梁型突水和岩梁型突水三种突水类型力学分析。资谊和马士伟<sup>[4]</sup>利用薄板理论、剪切破坏理论对岩溶隧道涌突水地质灾害破坏机理和行为特征进行了研究,并明确地指出薄板理论适用于隧道跨度较大、隔水岩板完整性好并且较薄的情况,剪切破坏理论适用于隧道跨度较小、隔水岩板较厚并且破碎的情况。

突水通道形成机理主要取决于突水条件和突水模式。在数值模拟方

面,突水机理研究重点集中在渗流-损伤耦合作用上,即基于有限差分法、离散单元法、真实破裂过程分析(RFPA)等商业程序,借助于弹塑性、断裂和损伤数值模型,引入介质断裂、损伤判断准则,以此来研究岩体突水过程渗流-损伤耦合行为<sup>[5-7]</sup>。此外,还有人通过判断塑性区或变形引起渗透性改变可以定义突水通道,他们借助于断裂力学理论数值分析模型,有效地分析和研究了隧道开挖、矿山开采中的水力劈裂现象,分析了水压力对裂纹扩展影响的力学机制<sup>[8-9]</sup>; 件彦卿先后提出了考虑温度场岩体渗流场与应力场耦合分析等效连续介质模型、改进等效连续介质模型、狭义和广义双重介质模型以及裂隙网络介质模型<sup>[10]</sup>。黄涛和杨立中<sup>[11]</sup>提出了渗流与应力耦合环境下以及渗流场、应力场与温度场耦合环境下,裂隙围岩特长大埋深隧道涌水量预测计算确定性数学模型,并用隧道实例进行计算验证。岩溶隧道由于更易发生涌水灾难而成为山区隧道水文地质学的研究关注点。

## 1.2.2 岩溶隧道突水模型研究现状

针对岩溶突水问题,研究初期国内外学者主要采用经验分析和工程类比法对岩溶隧道突水进行分析,受主观因素影响导致分析结果存在较大误差,对于实际指导隧道施工还有待进一步研究。近年来,很多学者采用数值计算的方法,在揭示溶洞对隧道影响规律方面做了大量研究。目前关于岩溶隧道的数值模拟方法主要分为三类:有限元法、离散元法、Modflow 渗流法。

### (1) 有限元法。

张宪堂等<sup>[12]</sup>运用 FLAC<sup>3D</sup> 软件在分析研究区地质条件的基础上,采用半无限空间的水文地质计算模型(图 1.1),以典型剖面模拟计算为例阐述了其在海底隧道涌水量预测中的应用,并指出数值模拟方法相较于经验解析法更适合复杂地质条件和边界条件下海底隧道涌水量的计算(表 1.1)。

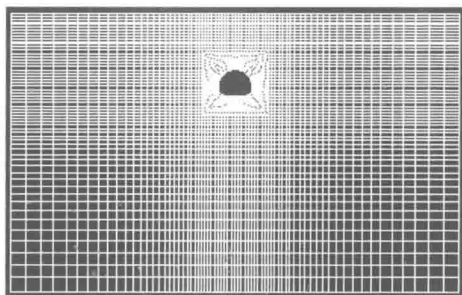
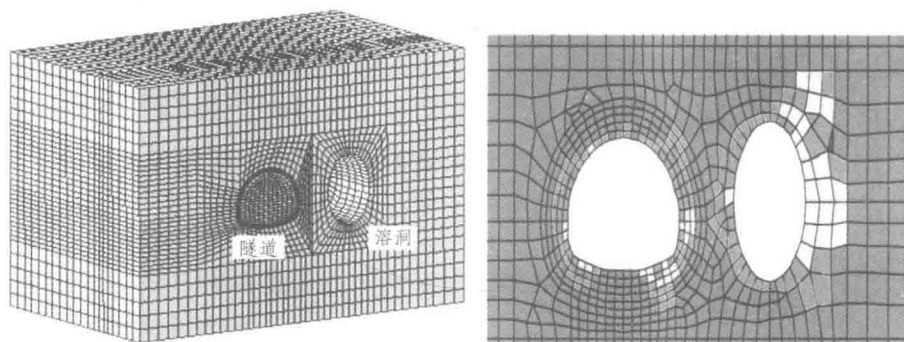

 图 1.1 FLAC<sup>3D</sup> 计算模型<sup>[12]</sup>

表 1.1 隧道涌水量计算结果

典型剖面	围岩类型	渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	用水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )	
			马卡斯特	数值模拟
K30+100	熔结凝灰岩	$7.0 \times 10^{-7}$	0.168	0.171

郭伟<sup>[13]</sup>采用 FLAC<sup>3D</sup> 对侧部水压充填型岩溶隧道施工过程中的围岩位移、塑性区、应力、锚杆轴力和喷混凝土层力学特性进行了数值模拟研究,通过和实际测量相对比发现 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟能比较准确地反映现场情况(图 1.2)。


 图 1.2 隧道计算模型及围岩塑性区<sup>[13]</sup>

谭代明等<sup>[14]</sup>结合忠垫高速公路岩溶隧道施工过程,利用有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 对侧部含有溶洞的隧道围岩稳定性进行了数值模拟研究,并将数值计算结果与现场监测结果进行比较分析。研究表明:隧道开挖后,围岩分别向溶洞内和隧道内变形,溶洞与隧道之间的围岩向两个

相反的方向变形, 是较危险区域, 且围岩塑性区主要集中在隧道的周围和溶洞的左右侧部, 溶洞的顶部和底部处塑性区较少 (图 1.3)。

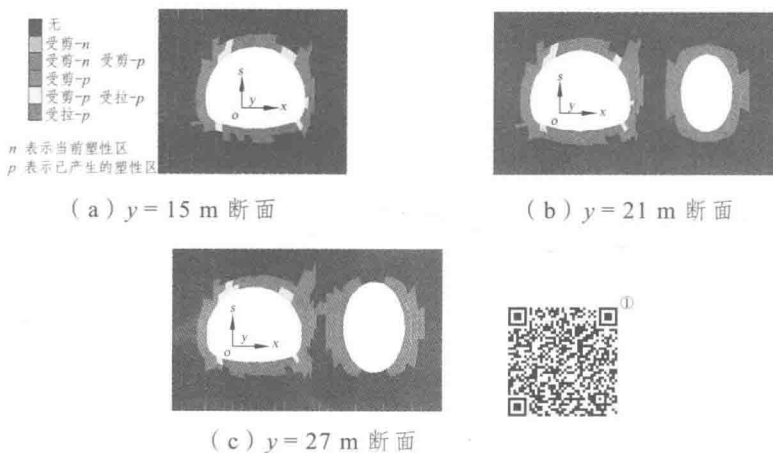


图 1.3 典型断面围岩塑性区<sup>[14]</sup>

莫阳春<sup>[15]</sup>用 FLAC<sup>3D</sup> 建立隧道掌子面前部和拱顶部存在高压充水溶洞的三维隧道模型, 采用三维快速 Lagrange 法, 对隧道全断面开挖与支护过程中的力学行为进行研究, 获得了高水压充填型岩溶隧道在动态分步开挖、分步支护情况下围岩位移、应力和围岩塑性区的分布规律及支护结构的受力和变形特征。

安文生<sup>[16]</sup>利用 FLAC<sup>3D</sup> 的分析方法, 建立了三维数值模型分析不同充填厚度对隧洞的影响, 通过对比周围塑性区和内部位移变化, 表明随着充填物厚度的增加, 隧洞发生突水涌泥的概率会愈来愈小 (图 1.4)。

刘继国等<sup>[17]</sup>用 FLAC<sup>3D</sup> 软件对厦门海底隧道 F4 风化深槽的涌水情况进行了流固耦合分析。建模过程采用有限元软件 ANSYS, 然后导入 FLAC<sup>3D</sup>, 最后用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟计算隧道施工三个阶段的涌水量。研究表明: 在隧道开始开挖阶段, 涌水量较大, 之后逐渐趋于稳定; 左右侧导坑开挖时, 涌水量逐渐增大; 隧道中间部分开挖后, 涌水量有所降低 (图 1.5)。且该文预测的隧道最大涌水量与勘察报告中理论计算涌水量十分接近, 可对整个隧道的涌水量进行预测。

① 本书中所有二维码内容均为相应图片的彩图。

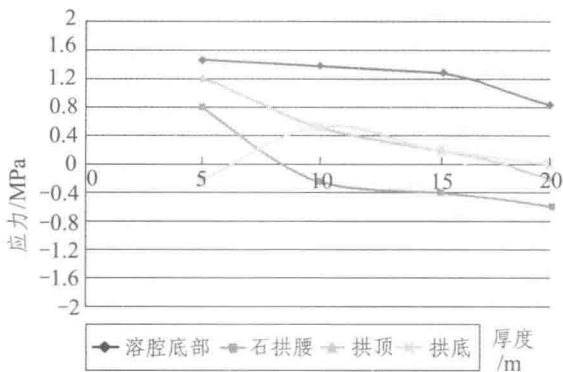
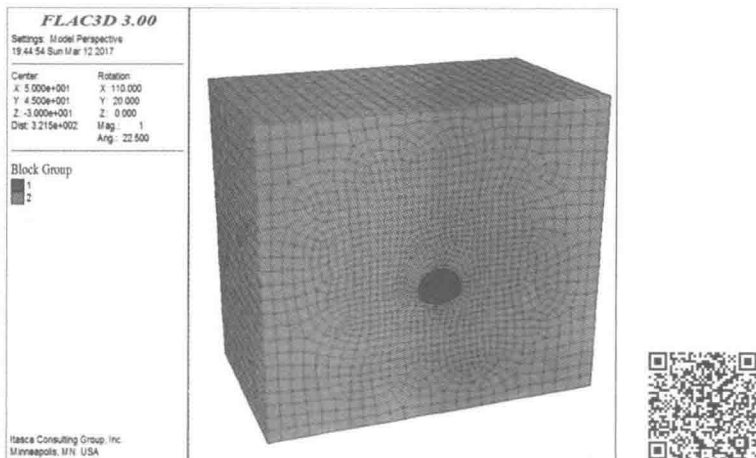


图 1.4 三维数值模型及主应力随充填厚度的变化<sup>[16]</sup>

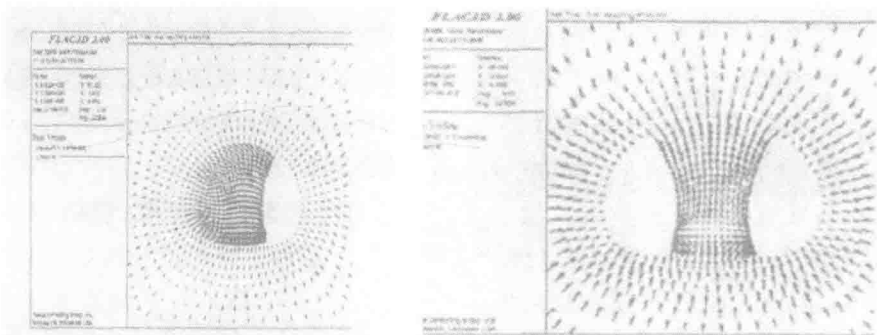
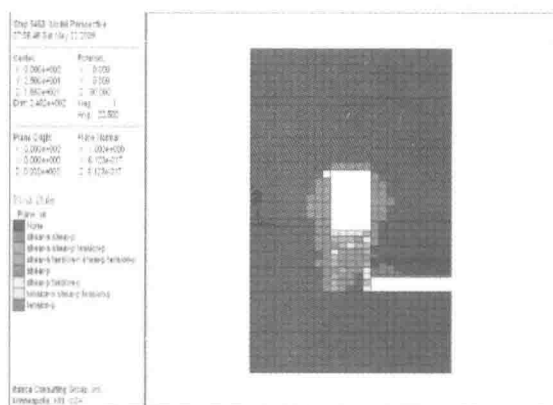
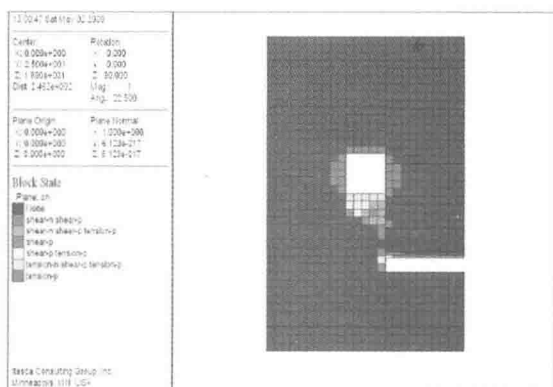


图 1.5 隧道左右导坑开挖流体矢量图<sup>[17]</sup>

张旭东<sup>[18]</sup>运用 FLAC<sup>3D</sup> 有限差分软件对有充水溶洞下填充物不同厚度、不同水压力和不同开挖宽度时的围岩稳定性进行了模拟分析。研究表明：隧道开挖宽度及溶腔水压一定时，溶腔沉积层厚度越大，溶腔与隧道之间塑性区的贯穿可能性越小，掌子面的法向位移随着沉积层厚度的增加而减小；溶腔沉积层厚度和溶腔水压一定时，随着隧道开挖宽度的增大，最大主应力中压应力最大值也增大，主要分布在模型的底部和沉积层与隧道交叉部位掌子面前方一定距离处；溶腔沉积层厚度和隧道开挖宽度一定时，溶腔水压力越大围岩最大主应力最大值越大；溶腔水压力越大，隧道掌子面的法向位移越大，溶腔与隧道之间塑性区的贯穿可能性越大，越容易发生溃水（图 1.6）。



(a) 沉积层厚度为 15 m 时塑性区开展情况



(b) 沉积层厚度为 20 m 时塑性区开展情况

图 1.6 不同沉积层厚度围岩塑性区分布<sup>[18]</sup>



石少帅<sup>[19]</sup>以三峡翻坝高速公路季家坡隧道为背景,通过有限差分软件 FLAC<sup>3D</sup> 程序模拟分析在地应力和高水头岩溶水压力的应力环境中,隧道开挖扰动、丰水期诱发的突水失稳过程,探讨了充填型裂隙突水突泥失稳机理(图 1.7)。研究表明:裂隙失稳突水涌泥是开挖扰动和高地下水水位作用下渗流诱发充填体渗透失稳的结果,开挖初期,裂隙内部的充填物和周围岩体的应力、位移以及渗流等多元信息均平稳增长;当开挖面越过裂隙时,充填物局部产生微小通道,水压作用下微小通道扩展、慢慢贯通,形成微渗流通道,并逐渐具备涌水特征,裂隙充填物的多场信息进入快速增长阶段,此时表现为小型的点滴状涌水;随着开挖面的持续推进,裂隙充填物的微渗流通道逐渐扩径,形成大通道,充填物中的泥沙伴随涌水慢慢涌出,此时表现为连续涌水,且涌水量和速度随时间慢慢增大;当达到临界值时,充填物内突水管道形成,裂隙充填物的多场信息集体发生突跳,大量泥沙和水突涌而出,充填物瞬间失稳,发生突水涌泥。

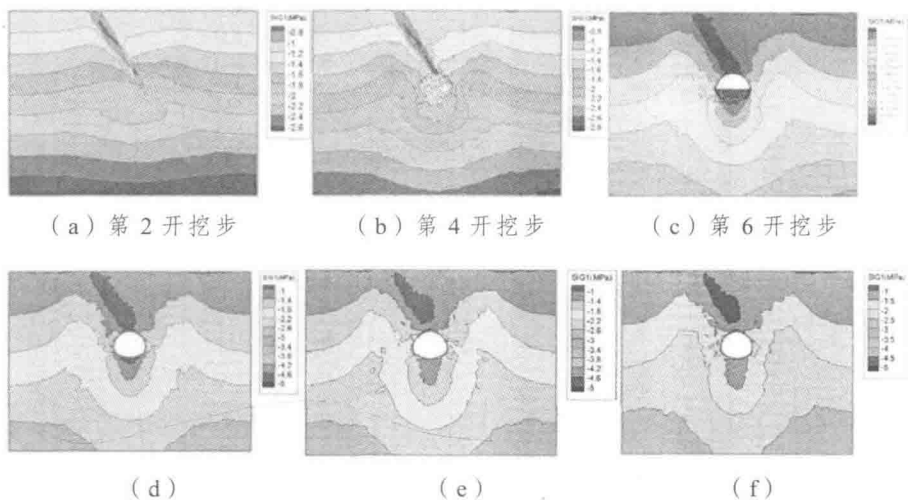


图 1.7 开挖过程中横剖面竖向位移应力云图<sup>[19]</sup>

庄旭峰等<sup>[20]</sup>借助大地电磁解译和 MIDAS-GTS 程序计算模拟岩溶水压下隧道二衬的内力与位移,分析了隧道建成后岩溶水对隧道的影响。研究表明:减压泄水是岩溶隧道工程的关键,修筑集水廊道、疏通

岩溶管道是根治此类病害的较好选择（图 1.8）。

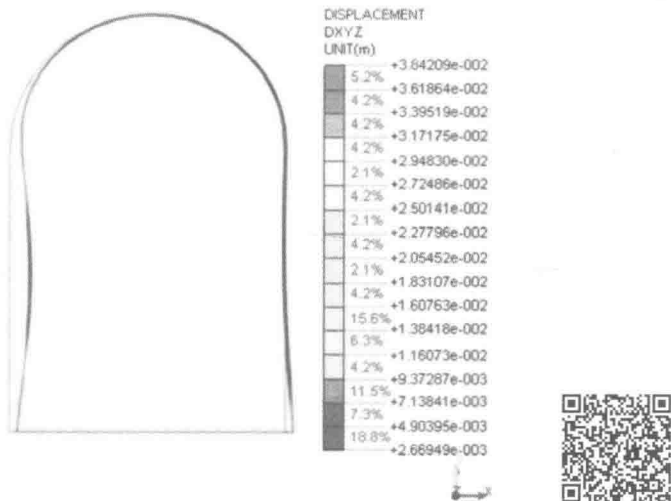


图 1.8 水压后竖向衬砌变形图<sup>[20]</sup>

高浩钧<sup>[21]</sup>根据实际工程，采用有限元软件 ANSYS 建模，然后导入 FLAC<sup>3D</sup>，隧道计算模型如图 1.9 所示，利用 FLAC<sup>3D</sup> 研究了水压充填型溶腔对隧道稳定性的影响。研究表明：随着隧道围岩等级的降低，发生突水灾害时，掌子面附近围岩所能承受的水压也就越低，同等水压条件下，所需要预留的安全厚度越大。

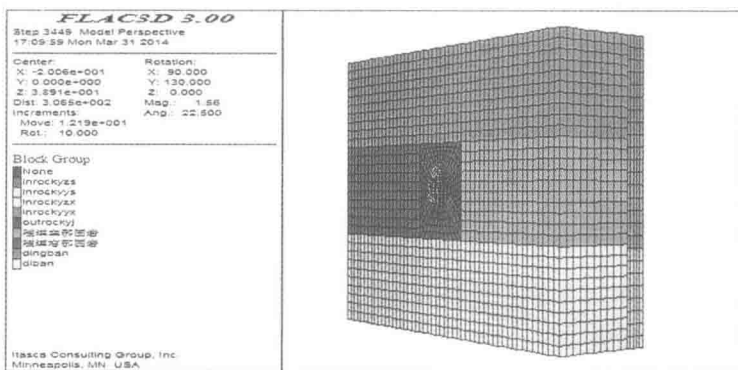
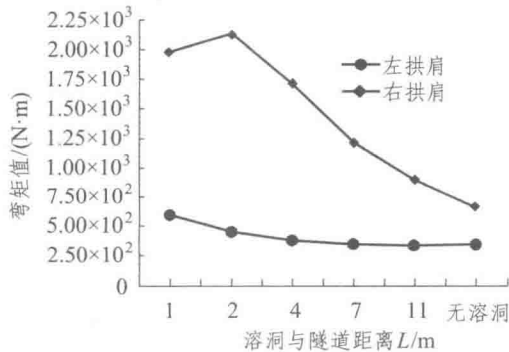
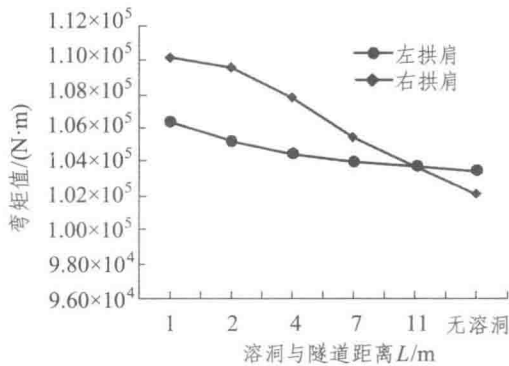


图 1.9 隧道计算模型<sup>[21]</sup>

聂志凌<sup>[22]</sup>通过建立 FLAC<sup>3D</sup> 有限元模型模拟初始地应力, 计算了不同形态岩溶对隧道结构的影响。研究表明: 溶洞直径越大, 距离隧道越近, 溶洞内水压越大, 对隧道围岩及衬砌越不利; 溶洞对隧道靠近溶洞的一侧影响相对较大; 顶部溶洞与底部溶洞对隧道围岩及隧道衬砌的影响规律有相似性, 如图 1.10 所示。



(a) 左右拱肩弯矩



(b) 左右拱脚变矩

图 1.10 测点弯矩随溶洞距离的变化趋势<sup>[22]</sup>

周毅<sup>[23]</sup>应用 FLAC<sup>3D</sup> 建立三维数值模型, 模拟工程突水的主要致灾构造。他通过开挖和水压加载, 系统研究了施工扰动和渗透作用下, 岩溶管道充填介质渗透灾变演化过程和突水前兆规律。研究表明: 施工过程中充填型岩溶管道突水是开挖扰动和高地下水位高渗透力作用诱发充填物渗透失稳的结果; 充填物对开挖及水压作用的响应比围岩更加

强烈；突水的灾变演化过程经历四个阶段——形成离散的微小裂隙、裂隙连通形成导水通道、在渗流作用下导水通道扩展延伸、导水通道贯通形成突水路径，其中前两个阶段主要受开挖扰动影响，后两个阶段与高水位高水压的渗流作用密切相关。

张尔品<sup>[24]</sup>运用 MIDAS-GTS 软件对隧道隔水隔泥岩土盘破坏规律进行了分析。研究表明：双裂隙岩盘的变形破坏是由中间岩石块体向外整体滑移造成的剪裂破坏；裂隙黏土充填的节理裂隙化岩盘在渗流作用下的变形破坏方式，即裂隙间黏土在渗流作用下强度降低后，岩盘中部岩石块体沿裂隙向临空面整体滑动导致的剪裂破坏。其计算模型及裂隙土层位移如图 1.11 所示。

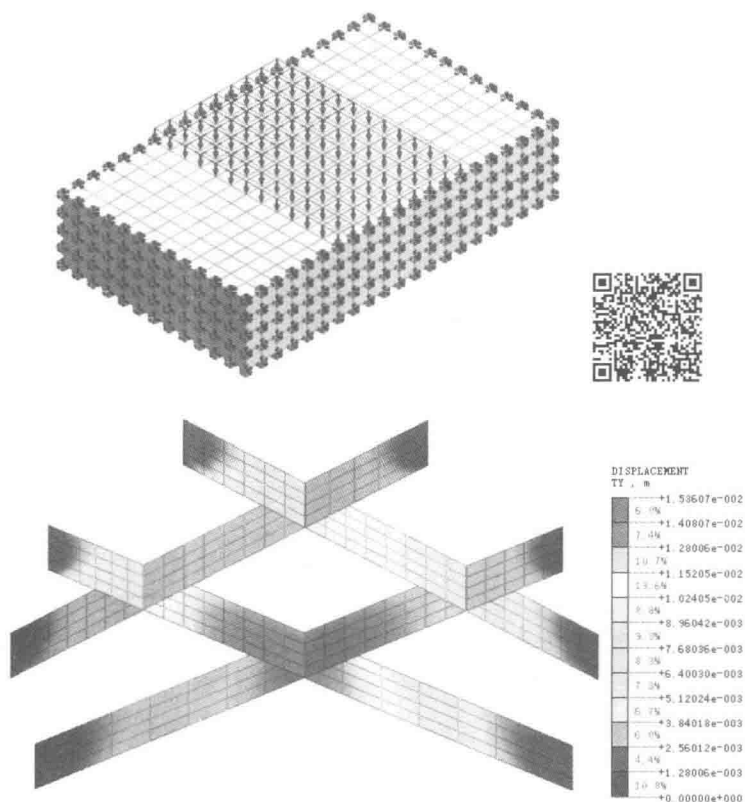


图 1.11 计算模型及裂隙土层位移<sup>[24]</sup>