

1

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^[1]。

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，约占隧道总数量的 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^[2]。

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^[3]。刘招伟^[2]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^[4]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^[5-7]。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^[8-9]; 仵彦卿先后提出了考虑温度场岩体渗流场与应力场耦合等效连续介质模型、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^[10]。黄涛和杨立中^[11]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^[12]运用 FLAC^{3D} 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)。

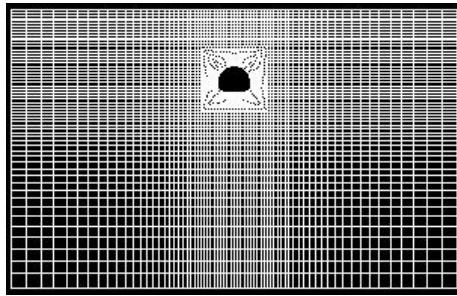


图 1.1 FLAC^{3D} 计算模型^[12]

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	7.0×10^{-7}	0.168	0.171

郭伟^[13]采用 FLAC^{3D} 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^{3D} 数值模拟能比较准确地反映现场情况（图 1.2）。

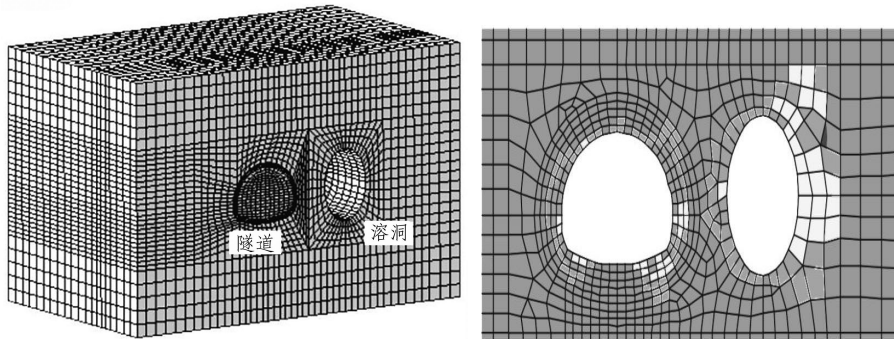


图 1.2 隧道计算模型及围岩塑性区^[13]

谭代明等^[14]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^{3D} 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）。

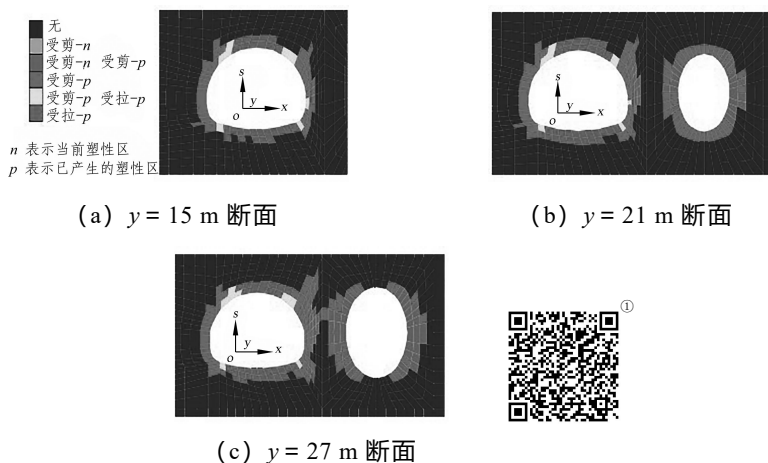


图 1.3 典型断面围岩塑性区^[14]

莫阳春^[15]用 FLAC^{3D} 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^[16]利用 FLAC^{3D} 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^[17]用 FLAC^{3D} 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^{3D}，最后用 FLAC^{3D} 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。

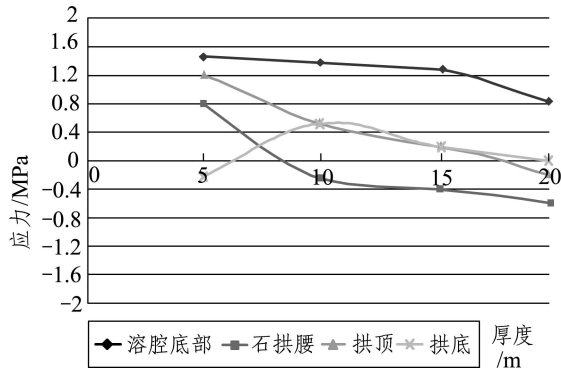
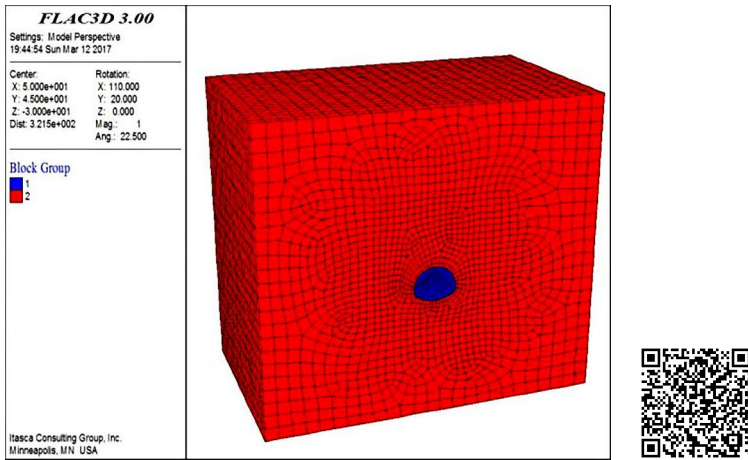


图 1.4 三维数值模型及主应力随充填厚度的变化^[16]

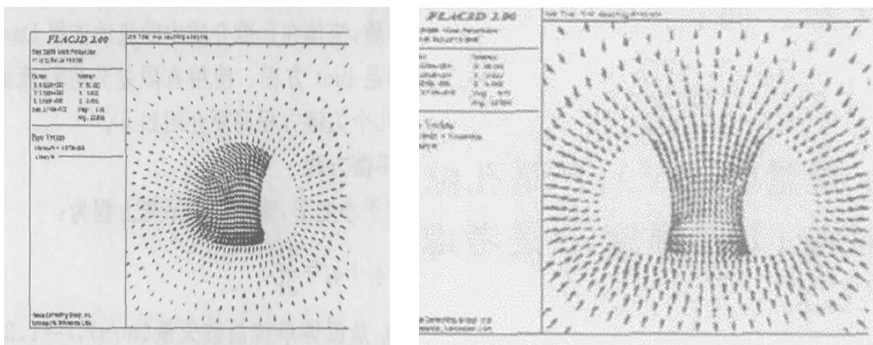
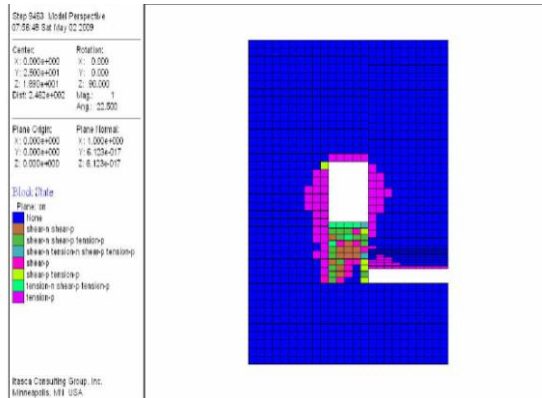


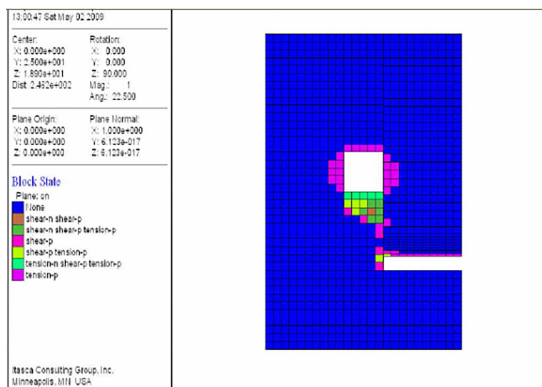
图 1.5 隧道左右导坑开挖流体矢量图^[17]

1 绪论

张旭东^[18]运用 FLAC^{3D} 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^[18]

石少帅^[19]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^{3D} 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。

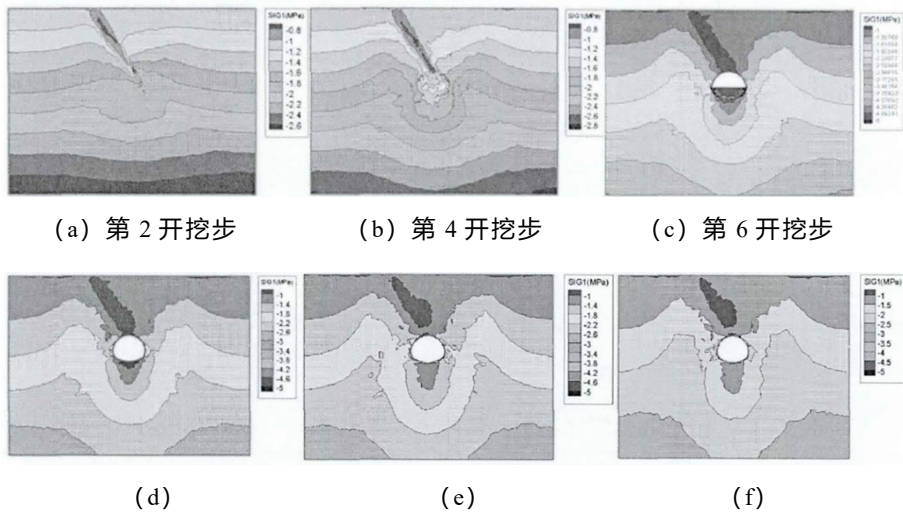


图 1.7 开挖过程中横剖面竖向位移应力云图^[19]

庄旭峰等^[20]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。

1 绪论

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）。

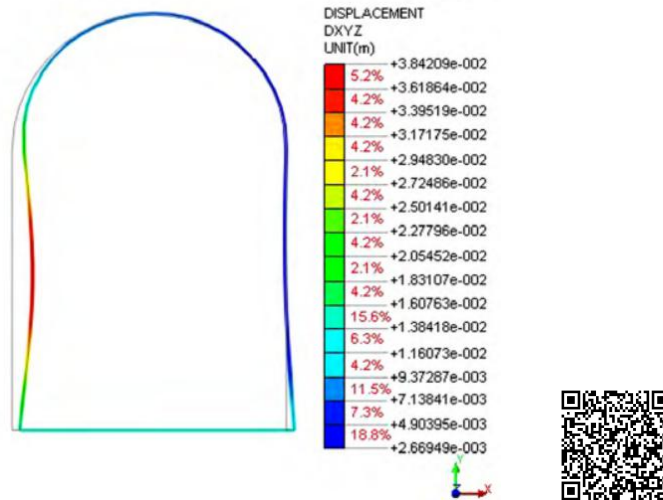


图 1.8 水压后竖向衬砌变形图^[20]

高浩钧^[21]根据实际工程，采用有限元软件 ANSYS 建模，然后导入 FLAC^{3D}，隧道计算模型如图 1.9 所示，利用 FLAC^{3D} 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。

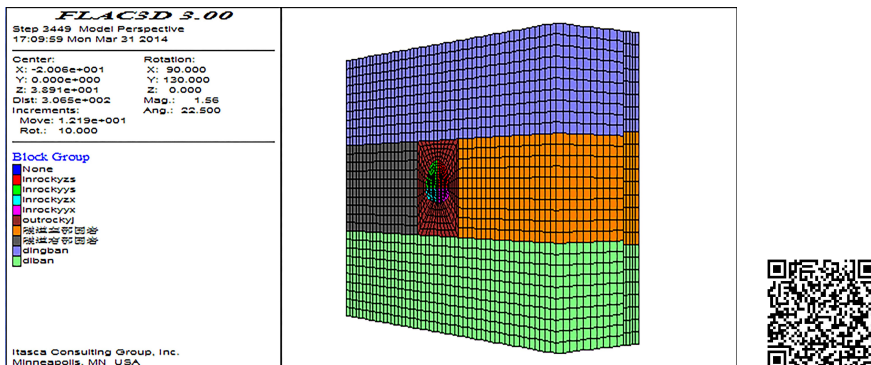
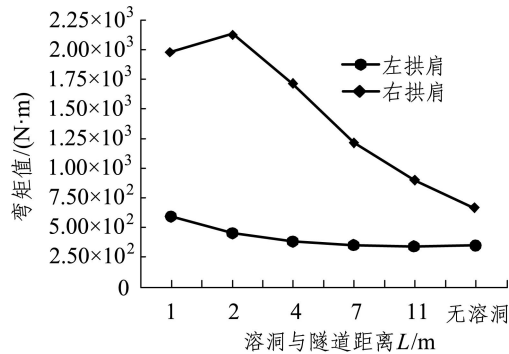
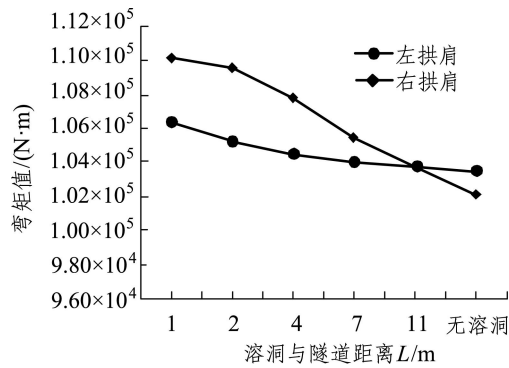


图 1.9 隧道计算模型^[21]

聂志凌^[22]通过建立 FLAC^{3D} 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^[22]

周毅^[23]应用 FLAC^{3D} 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^[24]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，岩盘中上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。

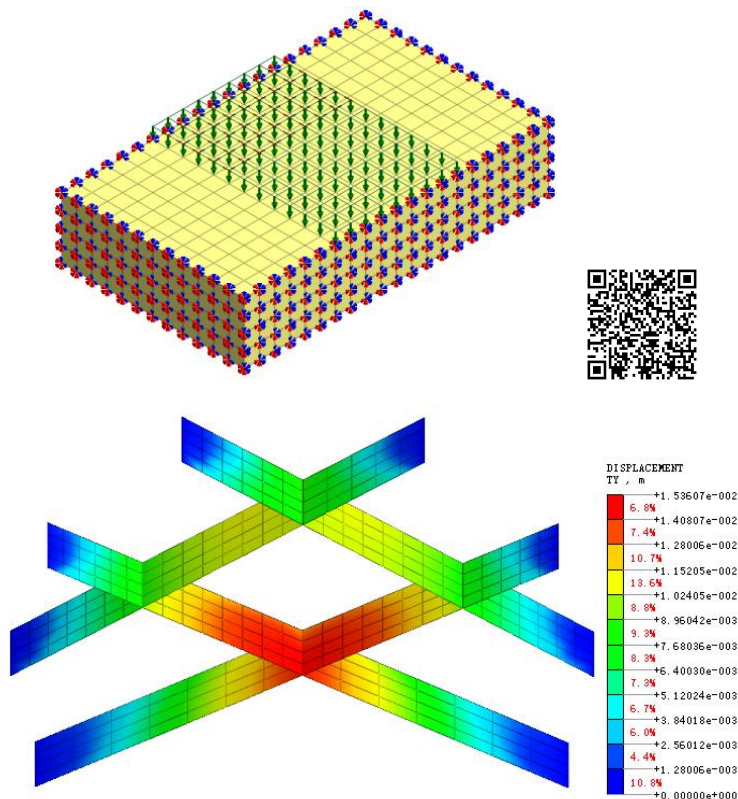


图 1.11 计算模型及裂隙土层位移^[24]

刘记^[25]应用 FLAC^{3D} 建立三维数值模型，将隧道溶洞均简化为圆形，通过改变溶洞直径、溶洞水压、溶洞隧道间距来研究溶洞直径、水压、间距对隧道的影响。研究表明：溶洞直径的变化对隧道结构力学行为产生重要影响，尤其是洞径较小或较大时，使得支护结构上不同部位间的内力值相差较大；溶洞内存在水压时对隧道的安全性影响更为不利，随着溶洞内水压力增加，隧道拱顶部位的内力增幅最大，而拱肩和拱腰部位内力值不增反降；溶洞与隧道间距越小，对隧道的影响越明显，隧道各部位对距离的变化响应也越显著。其三维模型及测点竖向位移随水压的变化如图 1.12 所示。

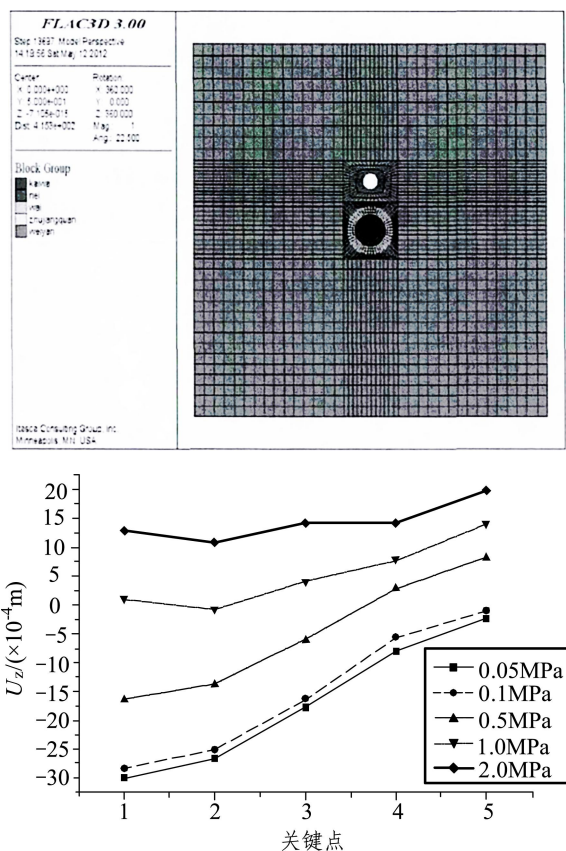


图 1.12 三维计算模型及测点竖向位移随水压的变化^[25]

刘招伟^[2]采用 FLAC^{2D} 软件构建岩溶突水的计算模型（图 1.13），对岩溶突水规律进行了模拟分析。研究表明：岩溶管道周围的塑性区和隧道开挖周围所形成的塑性区直接沟通是发生岩溶突水突泥的充要条件；不同突水模式具有相似的突水机理，受不同空间位置的影响，各种突水模式产生的最大涌水量和位移是不同的，产生突水的临界距离也不同，因此突水防治的难度和侧重点也应有不同。

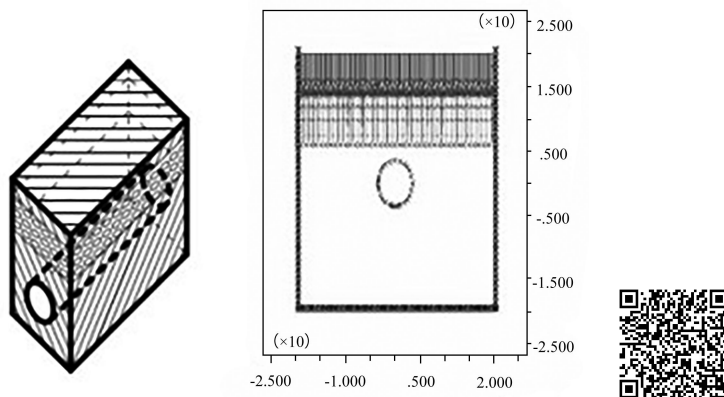


图 1.13 岩溶隧道 FLAC^{2D} 模型^[2]

（2）离散元法。

郭佳奇^[26]采用 UDEC 离散元分析软件，建立了岩溶隧道计算模型，如图 1.14 所示，分析了岩溶区非完整岩体中新建山岭隧道与侧部隐伏高压富水充填溶腔间防突岩层破裂突水过程，通过分析将岩溶突水划分为高压裂隙突水、富水溶腔突水、地下暗河或岩溶管道突水及断层突水，并探讨了岩溶隧道突水的影响因素，将其分为地质因素和非地质因素两种情况。

高杨^[27]采用 UDEC 软件建立计算模型，对德江隧道开挖裂隙扩张高度进行了离散元数值模拟。研究结果指出德江隧道开挖形成的导水裂隙高度大于弱透水顶板厚度，导水裂隙将波及高压含水层，所以顶板小于 45 m 的情况下隧道开挖形成的导水裂隙都将波及上覆含水层，对实际工程的施工具有重要参考价值。

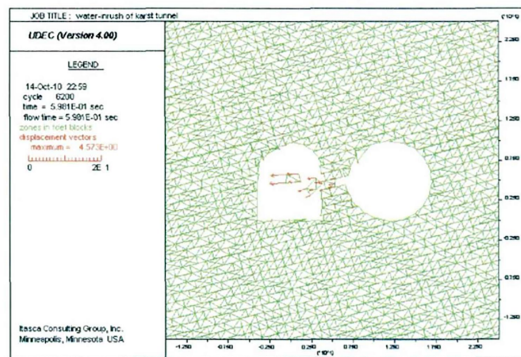
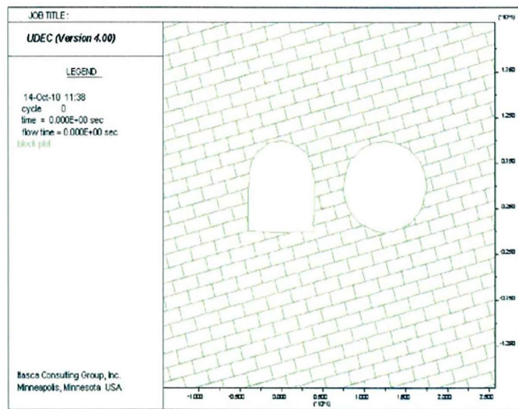


图 1.14 岩溶隧道突水模型及突水位移场分布^[26]

孙玉杰等^[28]采用 UDEC 离散单元法中关于裂隙岩体开挖模拟及水力全耦合分析模型，分析了裂隙岩体洞室开挖后围岩应力与水力耦合作用导致的裂隙隙宽变化及渗流变化的过程。结果表明：洞室开挖完成后，在围岩渗流与应力耦合作用下，围岩中裂隙隙宽、裂隙中水压及其渗透流量的变化是一个动态过程，且相互作用并相互依赖；裂隙的闭合使得结构面水力梯度变大，作用在裂缝上的渗透压力增大，促进导水裂缝扩展，裂隙连通性增加；裂缝张开度增大，渗透能力增强，渗流量增大，其渗流压力相应降低；由于围岩中裂隙隙宽、压力和渗透流量的动态依赖性，在一定条件下，裂隙隙宽的改变可导致局部水力通道的形成，高压水头从局部涌出，从而促进突水灾害的形成，如图 1.15 所示。

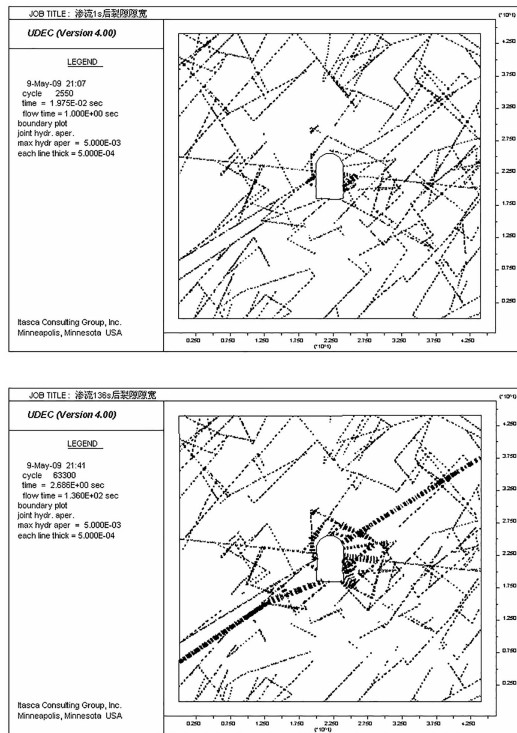


图 1.15 岩溶隧道渗流裂隙隙宽变化 (UDEC) [28]

王艳丽^[29]采用 UDEC 离散单元法建立了裂隙岩体渗流场与应力场耦合的数值模型，并对其进行了算例分析。研究表明：渗流场和应力场在一定条件下相互影响很大，不考虑耦合的结果是偏于不安全的（图 1.16、图 1.17）。

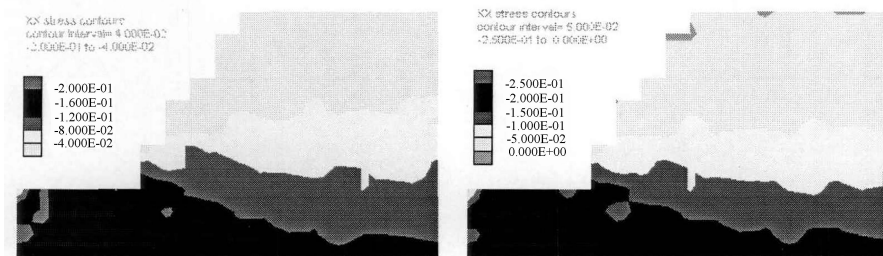


图 1.16 非耦合应力场和耦合应力场 (UDEC) [29]

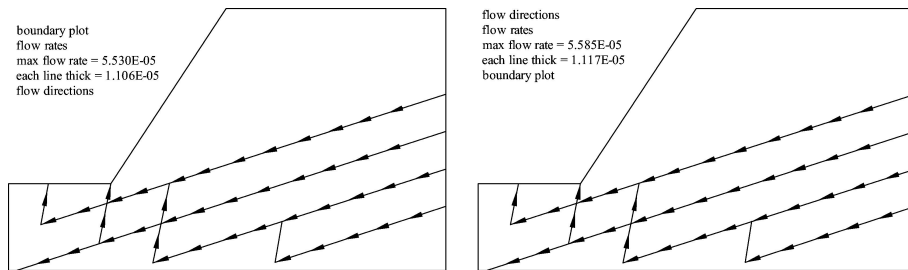


图 1.17 岩非耦合渗流场和耦合渗流场 (UDEc) [29]

张志强^[30]通过 UDEC 离散元程序,研究了节理岩体隧道失稳模式及量化的稳定性判定指标,探讨了细观结构机制和宏观力学行为关系。结果表明:结构面极大地削弱了岩体力学性质及其稳定性,结构面变形与强度性质对于隧道稳定性起着关键控制性作用;节理岩体隧道扰动区可划分为脱落区、张开区和剪切转移区,其中脱落区表征围岩失稳模式,张开区围岩处于脱落临界状态,即塌方潜在区域;剪切转移区是诱发围岩发生渐进性破坏的主因,提出将剪切转移区作为节理岩体隧道稳定性判定指标具有严格力学依据,可以量化评价围岩稳定程度。

熊子正^[31]应用 3DEC 离散单元法模拟柱状节理岩体应力渗流耦合,分析了柱状节理岩体模型耦合算法与非耦合算法计算结果的差异及耦合算法下柱状节理孔应力与流量的变化。研究发现采用耦合算法所得最大应力与位移均大于非耦合算法,在耦合算法下,裂隙渗流产生的渗流力改变了应力场的分布,而应力场的变化使得裂隙岩体的渗透系数发生变化,从而导致岩体渗流场的重新分布。

高峰等^[32]以子尹隧道塌方事故为工程背景,采用 UDEC 法对该隧道塌方过程进行了模拟,通过与实际塌方情况对比,验证了 UDEC 离散元法模拟隧道塌方的正确性,并通过 UDEC 离散元法分别模拟了不同埋深、不同岩体结构和不同围岩级别的隧道塌方过程,分析了隧道塌方特征。研究表明:埋深主要影响拱顶塌方的范围;岩体结构(如节理裂隙)较大程度地影响塌方的形式;围岩参数同时影响塌方范围和塌方形式。

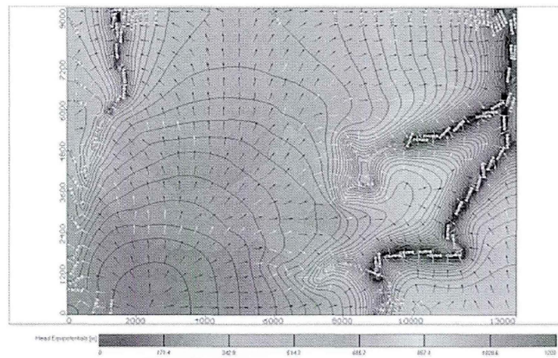
(3) Modflow 渗流法。

贾金生等^[33]应用 Visual Modflow 软件,进行了地下水污染数值模拟,

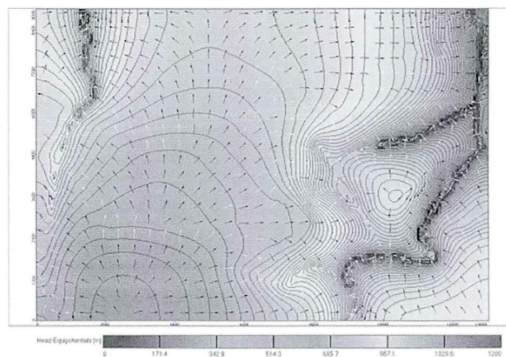
1 绪论

通过将计算观测孔所在单元的水头和实测的水头进行对比，从而反求有关的水文地质参数，进而模拟了河北省栾城县的地下水流动情况，并指出 Visual Modflow 数值模拟方法在实际地下水环境影响评价中具有较高的科学性和可操作性。

廖晓超^[34]应用 Visual Modflow 软件建立了研究区岩溶水系统的地下水三维渗流场模型，从隧道开挖未揭露暗河、揭露暗河、地下水恢复三个阶段进行了分析。研究表明：在未揭露暗河下施工一年，隧道附近地下水位最大降深约 25 m，影响范围约 1.1 km；揭露暗河时，地下水位最大降深约 70 m，影响范围约 4.6km；封堵两年后，地下水位恢复至与天然状态基本相同，如图 1.18 所示。



(a) 未揭露暗河工况下半年渗流场



(b) 揭露暗河工况下半年渗流场

图 1.18 未揭露暗河和揭露暗河半年渗流场分布^[34]

陈英姿^[35]采用 Visual Modflow 软件建立以灰岩、砂岩为主的隧址区地下水渗流三维数值计算模型模拟了天然状态、隧道开挖后完全排水条件下地下水渗流、隧道开挖后完全排水条件下涌水量模拟预测以及隧道完全封堵条件下的地下水渗流场恢复情况。

毛邦燕^[36]通过对区内复杂岩溶介质的空间结构、模型的时间离散以及模型边界条件的研究，最后建立了符合实际情况的三维地下水流模型并利用有限差分数值模拟方法，利用 Modflow 程序成功地实现了煤田区未来在开采状况下各矿井下涌水量的模拟，得到了煤田区各矿井不同时间段、不同开采水平的井下涌水量值（图 1.19）。

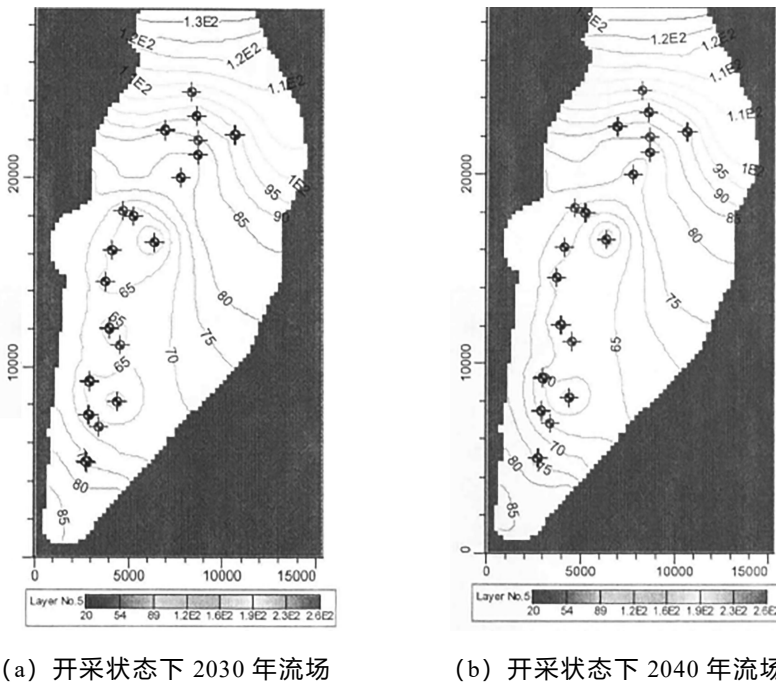


图 1.19 开采状态下渗流场预测^[36]

唐起^[37]利用 Modflow 软件对龙门山隧道进行涌水量计算，计算结果表明岩溶地区涌突水灾害的发生具有随机性，大多数岩溶隧道的涌突水主要发生在隧道揭穿的溶隙、溶孔、溶洞位置。

王国斌^[38]采用 Visual Modflow 三维渗流模拟和常规经验公式对乌池坝隧道涌水量进行预测，并对其结果进行对比分析，确保了预测结果的可靠性。又通过 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，得到了围岩级别、岩体侧压力系数、溶洞跨度、溶洞高跨比和隧道埋深 5 个影响因素对安全距离的影响程度和影响规律（图 1.20）。

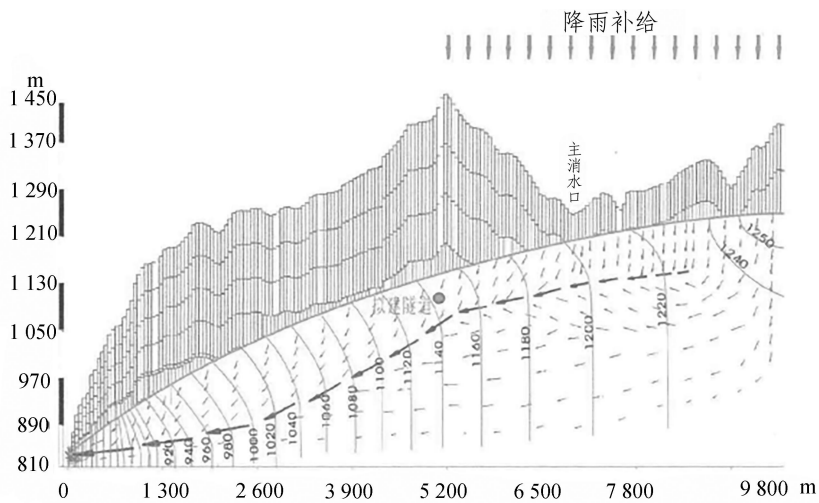


图 1.20 天然流态下地下渗流纵剖面图^[38]

1.2.3 岩溶突水防治方法研究现状

1.2.3.1 岩溶突水预测与监测理论研究

早在 20 世纪初国外就率先开展了突水预测的研究工作。我国在 20 世纪中期才引入苏联的斯列萨烈夫理论进行煤矿突水预测，起步相对较晚。随着我国煤矿突水灾害事故的日益严重，20 世纪 60 年代我国学者在总结大量突水案例的基础上，提出了“突水系数”的概念，并推广到煤矿应用。20 世纪 70 年代，煤科总院西安分院对突水系数公式进行了进一步完善，将矿压对底板的破坏作用考虑进去^[39]。随着非线性科学的

迅速发展，20 世纪 80 年代，突水预测与监测研究领域迎来了崭新的一页，包括统计学、神经网络、模糊数学以及 GIS 技术等在内的先进理论得到广泛应用^[40-44]。80 年代中后期，中国矿业大学在国内率先开展了基于 GIS 和多源信息复合叠加处理方法的矿井突水评价与预测研究，随后武强在此基础上发展了三图-双预测法等方法^[45]。目前应用较多的突水预测方法主要包括条件分析法和模型拟合法两种，前者侧重于定性分析，依据水文地质条件分析突水的可能性，后者则在不同程度上具有定量的特点，可预测整个区域存在的突水点。在突水水源识别与判别中，多元统计分析方法、模糊聚类分析方法、灰色系统理论等已应用至工程实践，并取得了良好的效果。

1.2.3.2 岩溶突水探测与治理方法研究

岩溶突水防治研究最早起始于煤矿行业，国外很早就对煤矿超前探测技术开展了大量研究，诸如美国斯坦福大学等广泛利用地理信息系统进行矿井突水的诊断和预测。近年来，国外研制开发了大量应用于煤矿、隧道等地下工程的物化探测仪器设备，如美国、瑞士等国家研究和开发的 TSP、地质雷达等探测技术和设备，匈牙利等国研究和开发的脉冲干扰试验和钻孔试验技术，澳大利亚研究和开发的单孔多含水层综合水文地质参数测试技术，等等，在很大程度上促进了突水防治技术的发展^[46-50]。

目前，国内主要应用物探、化探技术，如槽波地震、地质雷达、井下电法以及连通性试验、同位素测试等方法发现“地质异常体”，辨别地下水通道和水源性质。对岩溶水的识别则主要依靠抗地干扰的瞬变电磁仪、三维高分辨率地震勘探仪、综合物探和超前钻探法等综合方法进行探测，并取得了不错的效果。在隧道地质超前探测方面，我国的相关研究具有鲜明的特色^[51-54]。国内从 20 世纪 50 年代开始，先后采用超前地质导坑、水平钻探等方法进行地质预报，但存在预报距离短、操作不便等问题。

20 世纪 80 年代初，我国首先提出用物探手段对隧道进行超前预报，并在大瑶山隧道首次开展试验。近些年来，许多大专院校、科研院所和

工程单位应用 TSP202、TSP203、地质雷达和陆地声呐等设备结合工程地质法对国内的圆梁山隧道、齐岳山隧道、乌池坝隧道、龙潭隧道以及宜万铁路等多处隧道进行了超前预报工作，以此来分析突水通道的存在形式和潜在风险。对岩体含水情况的探测则主要采用水文地质法、地质雷达技术和瞬变电磁法等等。其中，水文地质法从地质角度分析研究岩溶地下水的储水、径流通道，认为向斜盆地、背斜轴部、断层破碎带、地层不整合面以及已发育岩溶管道等地质条件下易涌水^[55]。地质雷达对水比较敏感，是目前预报隧道掌子面前方水体的较好办法，但其探查距离短（<30m），数据处理和资料解释难点较多，且容易受隧道内金属物的干扰而影响探测精度^[56]。红外线技术是一种辅助探水方法，可探测 15 m 范围内的含水水体，但由于掌子面温度的干扰因素太多，探测效果不甚理想。瞬变电磁法是远距离探水的有效手段，适用在狭小的掌子面上探测前方 40~60 m 范围，但该方法目前处于试验研究阶段，在理论实践、技术方法以及资料处理软件等方面还需进一步的完善^[57]。激发极化法是探测富水区的有效工具，多用于地面探水，应用到地下则难以确定三维空间水体的确切位置，并且岩溶地区隧道自然电场很难稳定下来，甚至会出现一些周期性变化的自然电场，给预报精度带来一些误差。此外，还有电磁成像法、高速钻孔法等。但由于岩溶发育的复杂性，近年来综合探测法逐渐成为一种趋势，即根据隧道水文地质环境、地形地貌特征和岩溶发育特征等因素而采取多种方法结合对隧道施工前方水体进行探测的方法，在应用上讲究因地制宜、详尽地做好地质工作，避免多种物探手段的盲目叠加和交叉使用。

1.2.4 隧道涌水防灾安全距离研究现状

目前，对于岩溶地区隧道与溶洞之间安全距离的研究，主要研究方法有定性分析、半定量分析和定量计算^[58-59]，但针对岩溶突涌水防灾安全距离的研究并不多见。通过定性分析可以得到临界距离与各影响因素之间的规律性结论，从而为半定量计算和定量计算提供理论依据；然而，

定性分析本身并不能指导工程实践；半定量计算将复杂围岩应力应变条件简化为简单力学模型，使用方便，可以为实际工程施工提供参考依据。

实际上，岩溶裂隙水突涌是水-岩长期相互作用，并在施工外力干扰下引发岩体发生破裂突水的一种动力现象。岩溶裂隙水高水头压力主作用面与隧道突水临空面岩体包括三部分过渡区，即施工开挖引起的松弛厚度区、安全厚度区和裂隙带区。已有研究结果大多侧重于岩溶水对裂隙岩体的劈裂作用^[60]，而忽视了突水前后水岩相互作用机制。基于前述三部分过渡区考虑，李利平等推导了隧道最小岩石保护厚度半解析表达式^[60]，并通过实例进行了验证。

岩溶突水有 4 种常见机理，包括止水岩柱受拉破坏、裂隙面受剪破坏、裂隙水力扩张、关键岩块失稳。曹茜^[61]利用 UDEC 软件考虑了岩溶水在岩体内节理中的渗流和劈裂作用，但没考虑裂隙水力扩张。模拟结果表明：溶腔内水压力对围岩同时起到支撑作用与渗流劈裂作用。当水压相对较小时，支撑作用为主导；而水压相对较大时，则渗流与劈裂作用为主导。当水压力起到不同主导作用时，围岩失稳机理也不同。此外，随着隧道埋深增大，水压力支撑作用逐渐减小；随着结构面强度增加，水压力渗流劈裂引起涌突水灾害不断减小。郭佳奇等^[62]针对常见中、小尺度侧部高压富水溶腔，在综合考虑安全厚度影响因素前提下，以隧道周围塑性区和溶洞周围高渗透带贯通与否作为中间岩柱稳定判断标准为基础，建立了中间岩柱安全厚度力学预测模型。

刘招伟等^[63]将各类岩溶对隧道工程的安全威胁抽象为岩溶水压力荷载，根据水压力作用在隧道工程不同部位的情况，完成了板柱型突水、拱梁型突水和岩梁型突水三种突水类型力学分析。但是，简单力学分析往往不能反映岩柱渐进破坏变化过程，不能反映出岩溶突水过程中围岩应力场、变形场、破坏场和渗流场相互耦合作用过程，也不能揭示出围岩垮塌或者岩溶突水灾变关键部位。

基于数值模拟定量计算作为半定量计算的补充和完善，可以弥补上述缺陷。针对隧道掌子面发生破断突水突变特征，孙谋和刘维宁^[64]采用数值模拟技术方法，建立了掌子面失稳折叠突变模型，通过对系统势能函数

进行分析，推导了隧道掌子面发生破断突水条件和最小安全厚度计算公式。然而，现有数值模拟计算存在很多亟待改进的地方，例如数值模拟计算按照连续介质力学方法进行计算与分析，而不考虑岩体结构特征以及节理裂隙等不连续面。实际上，大部分岩溶地层中石灰岩都具有明显的层理构造特征，而且往往还存在一组与层理近乎正交的节理。凡是发生严重突水、突泥地质灾害的隧道，大部分都处于褶皱、断层等构造带附近。因此，针对溶洞隧道安全距离计算不能忽视各种节理岩体特性的影响。

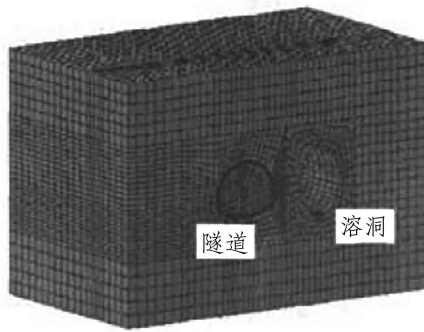
1.2.5 岩溶对隧道稳定性影响研究现状

稳定性评价研究是在岩溶区修建隧道的重大技术难题之一。对于岩溶隧道来说，溶洞的尺寸、溶洞和隧道间的相对距离，以及由于岩溶的发育，破坏了岩体的完整性，降低了岩石强度，同时为地下水的流动以及进一步溶蚀创造了条件，对隧道的稳定性构成了极大的危害。许多学者、专家研究溶洞尺寸（注：为研究方便，将溶洞简化为球形，其半径为 r ）、溶洞距隧道距离（ L ）及就溶洞空间分布对隧道稳定性的影响进行了定量分析，并取得了大量成就。

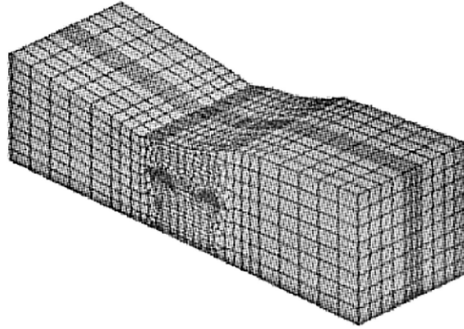
美国学者 Ralphj. Hodek、Thomas M. Tharp，俄罗斯学者 A.V.Anikeev 及英国诺丁汉大学 Lu ZhengXin 教授分别采用了物理相似模拟试验、数值模拟试验（包括有限元法和有限差分方法）研究了荷载、溶洞尺寸及顶板安全厚度间的内在联系^[65-68]。

国内的一些专家、学者在这方面也做了不少研究，取得了丰硕的成果。

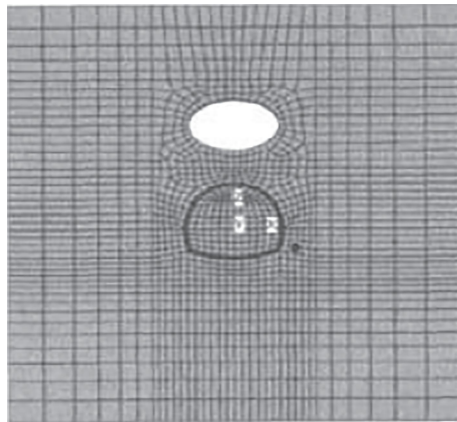
（1）侧部岩溶稳定性研究：谭代明等^[69]利用 FLAC^{3D} 软件研究了岩溶位于隧道正侧部的情况下，在溶洞距隧道距离（ L ）不变时，溶洞尺寸（ r ）的变化对隧道稳定性的影响，忠垫高速公路隧道计算模型如图 1.21（a）所示；赵明阶等^[70]研究了岩溶位于隧道侧部不同空间方位时，不同的溶洞尺寸（ r ）、溶洞距隧道距离（ L ）组合的情况下隧道的位移及稳定性变化情况；宋战平等^[71]以数值试验为手段，研究了溶洞的存在与隧道位移释放的关系。



(a) 忠垫高速公路隧道计算模型^[69]



(b) 夏家庙隧道计算模型^[74]



(c) 宜(昌)万(州)铁路某岩溶隧道计算模型^[78]

图 1.21 隧道数值模拟计算模型

(2) 顶部岩溶隧道稳定性研究：宋战平等^[72]利用数值模拟方法研究了隧道稳定性及变形与溶洞尺寸 (r)，溶洞距隧道距离 (L) 间的相关关系；谭志宏等^[73]利用 RFPA-Slope 软件研究了隧道稳定性与溶洞尺寸 (r)、溶洞距隧道距离 (L) 的关系，指出在溶洞尺寸 (r) 和溶洞距隧道距离 (L) 一定的情况下，分别存在一个最危险距离；史世雍等^[74]以 ANSYS 软件为手段，研究了溶洞尺寸 (r) 和溶洞距隧道距离 (L) 对隧道稳定性的影响，并和实测数据进行了比较，夏家庙隧道计算模型如图 1.21 (b) 所示；赵明阶等^[75]利用相关设备进行物理模拟实验，研究了在溶洞尺寸 (r) 一定的情况下，隧道稳定性与溶洞距隧道距离 (L) 的关系，指出开挖后总位移、瞬间位移以及流变位移均随溶洞距隧道距离 (L) 的增加而减小；赵明阶等^[76]利用二维的弹塑性模型，研究了隧道稳定性及位移释放量与溶洞尺寸 (r)、溶洞距隧道距离 (L) 间的相关关系；黎斌等^[77]利用有限元方法，研究了溶洞尺寸 (r)、溶洞距隧道距离 (L) 与桩设计荷载间的关系。

(3) 底部岩溶隧道稳定性研究：蒋颖^[78]利用 FLAC^{3D} 软件，定量研究了溶洞在不同空间位置下围岩的破坏机理，并以宜（昌）万（州）铁路工程为例，得出侧部岩溶对隧道围岩的稳定性最为不利的结论，宜万铁路某岩溶隧道计算模型如图 1.21 (c) 所示；赵明阶等^[79]在弹塑性条件下，用数值模拟试验研究了溶洞空间分布对隧道的影响。

1.3 本书主要研究内容

本书针对郑万铁路重庆段沿线存在岩溶不良地质非常发育的特点，以代表性控制工程小三峡隧道为研究对象，采用离散元数值模拟方法，对岩溶隧道突水机理和防治措施展开了研究。本书主要研究内容如下：

1.3.1 小三峡隧道围岩岩体结构概化模型研究

根据小三峡隧道隧址区地层岩性和地质构造特征、水文地质特征及

岩溶分布情况，考虑隧址区控制性节理组、岩溶分布情况，采用有限元方法建立小三峡隧道三维岩体结构概化模型，为后续分析岩溶隧道突水机理奠定基础。

1.3.2 小三峡岩溶隧道围岩岩体水力模型研究

在建立小三峡隧道三维岩体结构概化模型的基础上，根据小三峡隧道隧址区的水文地质条件，建立隧道围岩岩体水力模型，分析岩溶隧道围岩在存在空溶洞、充水溶洞和地下水渗流等情况下的位移、应力和渗流场规律，为岩溶隧道突水预测和评价奠定理论基础。

1.3.3 小三峡岩溶隧道突水评价判据及防突层计算研究

在分析渗流对隧道围岩稳定性影响的基础上，建立考虑渗流影响的岩溶隧道围岩失稳突水的力学判据，并根据小三峡隧道的围岩结构特点和岩溶情况，对预防突水灾害的防突层最小安全厚度进行计算，为岩溶隧道安全施工提供技术支撑。

1.3.4 小三峡岩溶隧道突水灾害注浆防治措施研究

在对小三峡隧道岩溶突水进行力学机理分析的基础上，根据小三峡隧道隧址区前期工程地质勘查资料，确定隧道施工影响范围内大型岩溶和导水裂隙的分布情况，然后在此基础上研究小三峡隧道突水注浆防治措施，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，同时也可作为郑万铁路重庆段其他岩溶隧道施工提供借鉴。