

复杂岩溶地区隧道涌水预测方法研究

林传年^{1,2}, 李利平³, 韩行瑞⁴

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 湖北沪蓉西高速公路建设指挥部, 湖北 恩施 445000;
3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 4. 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 岩溶地区隧道地下水涌水预测方法和理论是长期以来难以突破的水文地质难题。基于我国岩溶地区隧道突(涌)水实例分析, 从岩溶蓄水模式角度揭示岩溶区易发生涌水的构造机制, 指出当前地质超前预报手段在涌水预报方面存在的问题。就岩溶地区隧道涌水量的预测理论研究现状, 系统分析各预测方法的优缺点和适用条件。对不同含水地质构造的岩溶区进行划分, 提出相应较合理的隧道涌水量预测方法, 并结合工程实例验证其可行性。所得结论可为岩溶隧道涌水的预测研究提供借鉴。

关键词: 隧道工程; 岩溶地区; 地质预报; 涌水量; 预测方法

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)07 - 1469 - 08

RESEARCH ON FORECAST METHOD OF TUNNEL WATER INRUSH IN COMPLEX KARST AREAS

LIN Chuannian^{1,2}, LI Liping³, HAN Xingrui⁴

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. West Section of Shanghai—Chengdu Expressway Construction Headquarters of Hubei Province, Enshi, Hubei 445000, China;
3. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;
4. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: The prediction theory and forecast method of tunnel water gushing in karst areas have long been a difficult hydrogeological problem. Based on analyzing karst tunnel water gushing examples in recent years in China, the mechanism of geologic structure for water gushing has been explained through analyzing different karst hydrogeological storage structures; and the existing problems of tunnel geological forecast instruments have been pointed out. In order to find accurate calculation method of water inflow, detailed analysis has been done for the advantages and disadvantages of different calculation methods, as well as its applicable condition. According to different hydrogeological conditions of aquifers, a reasonable and accurate calculation method is put forward. This division system has been further proven in its application of field test.

Key words: tunnelling engineering; karst area; geological forecast; water inflow; forecast method

1 引言

岩溶的发生是在岩体内外力双重驱动下, 可溶岩成岩物发生对流和扩散迁移, 从而不断导致次生

孔、缝、洞和沉积物产生的过程, 这一基本演化过程引起可溶岩体和系统的不断分异。在岩溶的发生过程中, 同时发生着侵蚀、潜蚀、冲蚀、崩塌、塌陷与滑移等地质现象以及化学和物理的风化、搬运、堆积与沉积作用, 从而导致岩溶发育的多相、多形

收稿日期: 2008 - 01 - 09; **修回日期:** 2008 - 02 - 22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)课题(2007CB209407); 国家自然科学基金资助项目(50539080); 国家自然科学基金仪器专项基金项目(50727904)

作者简介: 林传年(1966 -), 男, 博士, 2007年于兰州大学获博士学位, 现为北京交通大学隧道中心在站博士后, 主要从事隧道工程和地质工程方面的研究工作。E-mail: lin.cn@163.com

和多态特征。岩溶的发育规律与可溶岩的分布、纯度、可溶岩与非可溶岩的接触关系、地质构造的发育分布规律、地下水动力条件(诸如溶蚀、溶解、冲刷、赋存运移规律)密切相关,导致岩溶蓄水形式的探测困难重重,对岩溶地区涌水量的预测也尚未形成行之有效的理论体系^[1~6]。

关于隧道涌水量的估算研究已近半个多世纪之久。最初的涌水预测定性研究,仅通过查明隧道含水层围岩中地下水的分布及赋存规律,分析隧道开挖的水文地质及工程地质条件,依据物探、钻探、水化学及同位素分析、水温测定等手段,确定地下水的富集带或富集区以及断裂构造带、裂隙密集带等可能的地下水涌水通道,并采用均衡法估计隧道涌水量的大小。随着技术水平和施工条件的提高,基于定性分析的隧道涌水预测研究,开始向定量评价和计算方向发展。基于地下水水文地质条件、围岩蓄水形式以及降水条件等因素的不同,先后出现了隧道涌水量计算的确定性数学模型和随机性数学模型两大类方法。其中确定性数学模型方式是利用水力学、解析法等方面的理论,通过数学演绎、推导出隧道涌水量与环境地下水位、围岩渗透性、地下水补给范围以及补给时间等不同因素的定量关系,得出一系列理论或经验解析公式,以预测计算隧道的涌水量。最近 30 a,隧道涌水量预测研究取得了较大进展,出现了多种计算方法和模型^[7~13],比如比拟法、评分法、同位素(T)法,以及一些研究单位提出的有限元数值模型、渗流-应力耦合模型等,在很大程度上促进了隧道涌水预测理论研究的发展。

然而,对于岩溶地区隧道涌水预测的研究,由于岩溶蓄水结构的多样性和复杂性,对含水水体性质的探测以及涌水量预测尚且存在诸多问题。本文针对上述问题,通过分析涌水实例探讨了岩溶地区的主要蓄水形式,详解了目前物探手段的探测水体的优缺点,并基于岩溶区水文地质的差异,提出相应合理的涌水量预测方法,并为工程实例所验证。

2 岩溶蓄水形式特征

岩溶地区隧道涌水量预测方法大多建立在岩溶水文地质条件研究的基础上。岩溶化的岩体广义上为多重含水介质,其中既有岩块中的孔隙、分割岩块的裂隙,又有孔隙受岩溶化改造形成的溶孔、溶穴,裂隙溶蚀而成的溶隙,甚至形成宏观巨大的岩

溶管道网络、溶潭、地下暗河和大厅等,都构成了不同规模大小的岩溶蓄水形式。从隧道施工期发生的大规模突水涌泥事件来看,岩溶区易发生涌水的蓄水形式^[14, 15]主要分为以下几类:

(1) 裂隙岩溶蓄水形式

地下水沿可溶岩层面裂隙和节理裂隙流动产生溶蚀作用,裂隙的宽度被逐渐拓宽,从而形成裂隙岩溶蓄水形式,使得可溶岩岩层具有较高的透水性和富水性。在岩层的拗折部位、向斜背斜构造的轴部、或褶皱部位容易形成局部富水构造。如渝怀线圆梁山隧道通过的毛坝向斜段便为裂隙岩溶蓄水形式;成昆线穿越米市向斜的 5 条隧道均发生了不同程度的涌水灾害。

(2) 溶腔溶潭蓄水形式

在强岩溶发育地区,潜藏的溶腔溶潭往往储蓄大量的静态水,若与附近有水力联系,如地表水流、暗河等,则形成庞大的水流补给系统。如宜万线马鹿箐隧道平导施工上覆溶腔水体压裂拱部围岩,发生特大涌水,由于与溶腔连通的暗河流域广、汇水面积大,先后发生了 5 次较大的突水涌泥地质灾害。

(3) 断层岩溶蓄水形式

断层面两侧岩石比较破碎,不仅具有一定蓄水空间,也是汇集附近岩体孔隙水、裂隙水和岩溶水的通道,尤其是活动性断层,其未胶结构造带和派生构造带常形成断层含水构造。如京广复线大瑶山隧道通过 F₉ 断层,多次发生涌水灾害;南岭隧道在施工中揭穿岩溶断层也发生大型突水涌泥灾害。

(4) 地下河及岩溶管道蓄水形式

在混流带,岩层的层面和破碎带在地下水的溶蚀和侵蚀作用下,经过漫长的地质年代可以形成规模巨大的岩溶管道网络和地下河蓄水形式。如广渝线华盖山隧道穿越碳酸岩底层的岩溶管道,局部被施工揭露后大量岩溶管道水涌入隧道;渝怀线武陵隧道在施工中揭穿了 3 条特大暗河,导致特大涌水灾害事故。

(5) 层间岩溶蓄水形式

层间岩溶蓄水类似于断层分隔型蓄水形式,主要由层间岩溶溶蚀而形成一定的蓄水空间结构。这种构造层间可溶岩的厚度有限,隔水岩石大多为页岩、砂岩和灰岩等,附近容易形成富水地带。如京通线桃山隧道穿越灰岩与片麻岩、糜棱岩接触带发生涌水;南昆铁路通过岩溶中山区碳酸盐与碎屑岩交接部位有大量岩溶泉出露,极易发生涌水灾害。

(6) 组合型蓄水形式

在岩溶地区, 地下河及岩溶管道蓄水形式、隐伏岩腔溶潭蓄水形式较多, 一旦发生涌水灾害, 往往具有高发性、突发性、富水性和富泥沙特征。由于地下水系统呈网状分布, 各蓄水形式之间互相存在水力联系, 涌水的主导蓄水形式并不明朗, 而以组合型的涌水动力源出现。此外, 在岩溶隧道具体施工中还会出现一些其他类型蓄水形式, 不再赘述。

3 岩溶水探测技术

由于岩溶地区蓄水形式的多样性, 使得岩溶地区水体探测技术及其解译工作具有相当的难度, 对隧道施工前方含水情况探测准确度不够。目前, 对岩溶地区水体探测行之有效的办法主要有: 水文地质法、地质雷达技术、红外线技术、瞬变电磁法、激发极化法以及综合探测法等^[16, 17]。

3.1 常用探测手段

水文地质法从地质角度分析研究岩溶地下水的补给、径流排泄通道, 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发生涌水。从岩溶地区蓄水形式的角度来考虑, 水文地质法可以充分解释隧道突水的地质条件, 宏观上具有很高的可信度。

地质雷达是探测地下水体的有效工具, 基于隧道隐伏水体介电参数、电导率以及其附近多介质介电参数的突变, 雷达的电磁波在振幅、主频以及相位变化上体现出一定的变化规律, 具有一定的预报准确度。但地质雷达探测距离较短($<30\text{ m}$), 受金属(台车、钢拱架等)干扰比较严重, 给数据处理和资料解译带来一定困难, 影响掌子面前方水体的预报位置和精度。

红外线技术是一种辅助探水方法, 根据掌子面温度受前方水体的影响, 可探测 15 m 范围以内的水体。但由于掌子面温度的干扰因素太多, 同时隧道内的金属结构也对探测效果造成较大的影响, 使其适用范围大大缩减。

3.2 新型探测手段

瞬变电磁法是远距离探水的有效手段, 该法利用阶跃波形电磁脉冲激法, 通过不接地回线向地下发射一次场, 测量地下介质产生的感应二次场随时间的变化。在探测深度上, 瞬变电磁法可利用“烟圈”效应, 在较小的场地探测大于发射场地 10 倍以上的深度, 适用于在狭小的掌子面上探测较远的深

度, 可能达到掌子面前方 $40\sim 60\text{ m}$ 或更远的探测范围。目前该方法在隧道中探测掌子面前方含水水体还处于试验阶段, 缺乏大量的试验研究。同时在理论实践、技术方法以及资料处理软件等方面还需要进一步的完善。

激发极化法是探测富水区的有效工具, 在外加电场作用下, 含水层具有相对较强的激发极化效应, 可以引起极化率异常, 据此可以识别含水层并确定水层顶界的埋深。在同一地质单元条件下, 含水区的极化电位衰减慢, 而在无水区则衰减较快。极化净异常越高, 富水程度就越高。但激发极化法多用于地面探水, 应用到隧道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。

3.3 实用探测手段

EH4 电磁成像系统属于部分可控源与天然源相结合的一种大地电磁测深系统, 具有双源型电磁法数据自动采集和处理功能, 能提供高分辨率的电阻率成像, 比较准确地区分含水介质和其他电阻率与之接近的介质, 是一种有效的找水方法, 具有探测深度大、分辨率高、携带轻便以及测量速度快等优点。该方法对环境要求较高, 且提供的参数较少, 同其他物探方法一样局部存在多解性。

高速钻孔探测具有速度快、见效快以及准确率高等特点, 在其他物探手段探明异常却又无法定论的地段, 可启用高速钻孔对掌子面进行多点深长距离钻孔探测, 以确定隧道前方潜在水体性质。该法的缺点是耗时长、耗资大, 同时由于钻孔范围的局限性, 仅对掌子面附近范围的水体探测有效, 且存在漏钻的可能, 需开发钻头的物探功能, 以增强其实用性和全面性。

综合探测法是根据隧道的水文地质环境、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含水水体进行探测的方法, 在应用中讲究因地制宜、详尽地质工作, 避免物探手段的盲目叠加和交叉使用。

4 岩溶地区涌水量预测方法

国内岩溶隧道涌水量预测研究多为结合个别工程实例作简要零碎的地质描述, 与隧道所处的岩溶水动力分带结合和分析研究的相对较少。岩溶地区隧道涌水量的预测计算是水文地质学科中的一个重

要的理论问题，迄今为止尚无成熟的理论和公认
准确计算方法。

4.1 涌水量预测原则与方法

4.1.1 涌水量预测原则

目前，岩溶隧道涌水量预测方法很不成熟，概
念混乱。基于笔者多年工程实践经验以及对国内已
有研究成果^[18]的分析总结，提出如下几点涌水量预
测原则：

(1) 通过水文地质概化模型把握隧道涌水量预
测。首先在水文地质专题研究的基础上分析隧道洞
身岩溶地段涌水的可能性、涌水性质，然后综合判
断其涌水的规模及数量级，最后借助观测资料确立
涌水量预测概化模型。

(2) 明确隧道洞身段所处的岩溶水动力分带。
涌水量预测首先要考虑隧道洞身岩溶地段所处的垂
直及水平水动力分带位置，从而优选预测方法。

(3) 探明岩溶发育特征和边界条件。对隧道岩
溶段的岩溶发育程度及区域岩溶发育特征进行深入
调查分析，最后借助观测实验资料以确立预测方法
所涉及的计算参数。

(4) 掌握岩溶隧道涌水的本质特征。岩溶地区
隧道涌水最本质的特点是时空变化大，如在垂直下
渗带，只在雨季产生暂时下贯式涌泥、涌水；在季
节变化带则在雨季随区域地下水上升而产生周期性
动储量涌水；在浅饱水带和压力饱水带，在隧道揭
露溶洞或溶隙初期，涌水来自静储量，即使在枯水
季节也造成大量的突水突泥。尤其在压力较大的压
力饱水带，冲溃型突水往往造成巨大灾害。

4.1.2 岩溶水动力分带模式

在岩溶地区，实质上岩溶水动力分带与隧道涌
水预测有密切的关系，也是预测方法选择成败的关
键因素。在选择涌水量预测方法时，必须有合理的
岩溶水动力分带模式，在此基础上分析不同水文地
质条件下计算方法的适用性，为此提出岩溶水垂向
和横向动力分带模式。

(1) 岩溶水动力垂向分带

岩溶水动力垂向分 6 个特征带，即表层岩溶
带、包气带、季节交替带、浅饱水带、压力饱水带
和深部缓流带(见图 1)。表层岩溶带是岩溶山区储
存于可溶岩地表强岩溶化的溶隙及溶孔中的岩溶
水，表层岩溶泉与饱水带之间没有直接水力联系，
但与包气带有一定关系；包气带即垂直下渗带，位

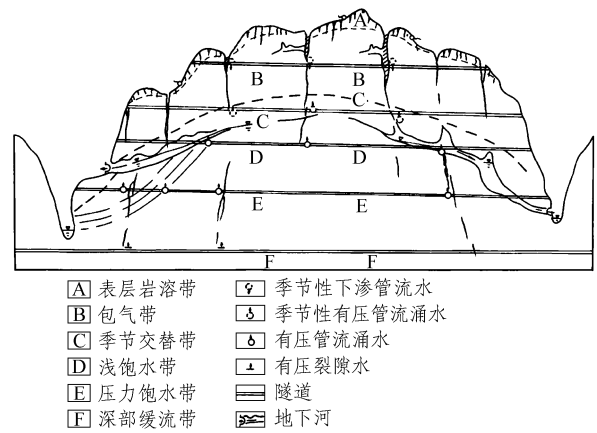


图 1 岩溶水动力垂向分带与隧道涌水
Fig.1 Vertical dynamic zone of karst water and tunnel gushing

于表层岩溶带以下、丰水期区域地下水位以上的地
带；季节交替带又称过渡带，由于季节变化而引起
的地下水位升降波动的地带，位于包气带与饱水带
之间；浅饱水带又称为水平管道循环带，指枯水期
地下水位以下，地下河排泄口影响带以上的饱和含
水带；压力饱水带在浅饱水带以下，即暗河口排水
面以下和当地主要河流排水基准面影响带以上的含
水。人们往往误认为在暗河口以下的含水层岩溶发
育微弱，属于“深部缓流带”，不会产生严重的溶洞
涌水。事实上，这部分含水层不属于“深部缓流带”，
而是受到当地主要河流排水基准控制的岩溶水循环
带；深部缓流带是在饱水带之下，不受当地排水基
准面影响并向远方缓慢运动的岩溶水带。一般情况
下，深部缓流带的岩溶发育较弱，但在大的构造断
裂带处亦可形成溶洞或溶蚀断裂带。

(2) 岩溶水动力水平分带

在岩溶水动力分带中，由于垂向分带与隧道涌
水存在直接关系，往往忽略其水平动力分带，从而
导致涌水量预测与实际发生较大误差。一般情况
下，岩溶水动力水平分带通常自河间地段的分水岭
至河谷分为补给区、补给径流区和排泄区。岩溶水
动力水平分带应将隧道里程外大范围的水文地质区
域考虑在内。

原则上应该将隧道放在一个完整边界的水文地
质单元内来考虑，才能准确划分其岩溶水水平和垂
向分带。显然，隧道洞身处于不同分带要采用不
同的涌水量计算模型。

4.1.3 涌水量预测方法优选

岩溶地区隧道涌水量估算需在区域岩溶水动力

分带等水文地质分析基础上进行方法优选, 以确保计算的准确度。首先要明确隧道岩溶水动力垂向分带与水平分带对涌水量估算的影响, 通常情况下前者处于主导地位, 可分如下几种情况分析:

(1) 处于包气带的岩溶隧道, 一般通过溶隙、溶蚀管道、竖井与地表的洼地、漏斗、槽谷相通, 可将大气降水及地表水导入地下。因此, 适宜采用洼地入渗法计算涌水量。

(2) 处于季节变化带的岩溶隧道, 当雨季潜水面升高时, 构成饱水带的一部分, 旱季潜水面下降, 则成为包气带的一部分, 季节变化厚度可达几十米。因此, 适宜采用均衡法并结合地下水动力学方法计算雨季特别是大雨时段的涌水量。

(3) 处于浅饱水带的岩溶隧道, 高程位于岩溶含水层的上部, 岩溶强烈发育, 一些水平的洞穴和地下河主通道常发育于此带。此处一些大的充水溶洞、宽大溶缝、深潭和地下湖等均发育在此带, 对隧道威胁很大, 一般为有压突水和突泥。因此, 适宜采用均衡法计算分别计算枯水季节静储量涌水量、动储量涌水量及洪水期涌水量。

(4) 处于弱岩溶或弱透水岩层地段的岩溶隧道, 在岩溶发育比较均匀的一定流域内, 其补给条件一般比较相近。故只要求出流域的地下径流模数和圈出拟建隧洞的集水面积, 把通过的拟建隧道等同于暗河, 即可求出通过该流域隧道的地下水涌水量。

(5) 处于断层或碎屑岩层附近的岩溶隧道, 在存在裂隙水的地段可采用地下水动力学方法求解隧道涌水量。地下水动力学方法又称解析法, 是根据地下水动力学原理用数学解析的方法对给定边界条件和初值条件下的地下水运动建立解析式, 从而达到预测隧道涌水量的目的。

岩溶水动力水平分带主要影响垂向分带的划分及其厚度变化。例如沪蓉西高速公路乌池坝隧道与宜万铁路马鹿箐隧道相距不远, 同处一个水文地质单元, 虽然均有洞身处于饱水带, 但由于马鹿箐隧道更靠近清江为水平径流区, 其涌水影响相对较大。乌池坝隧道涌水量如果仅按岩溶动力垂向分带的饱水带来估算便会导致与实际很大的误差。

4.2 涌水量预测实例分析

4.2.1 朱家岩隧道岩溶涌水量预测

朱家岩隧道位于宜昌市长阳县, 隧道中部处于岩溶地下水季节变化带, 枯水期地下水位降至隧道底板以下, 雨季特别是特大降水时段, 由于区域性

地下水位上升, 使隧道处于地下水位以下, 会发生有压涌水。该部位岩溶涌水量估算分为静储量涌水和动储量涌水两部分。

(1) 静储量涌水预测

季节变化带的静储量在水资源分类上称为调节储量。隧道掘进过程中, 因疏干排水, 水位降至底板, 可按式(1)求解影响半径:

$$R = 2s\sqrt{HK} \tag{1}$$

式中: s 为水位降深, 取 $s = 35 \text{ m}$; H 为从隧道底板算起的含水层厚度, 采用地下水位坡度法作图求得, 取 $H = 35 \text{ m}$; K 为渗透系数, 引地质勘察资料, 取 $K = 1.40 \text{ m/d}$ 。由此可知: $R = 490 \text{ m}$ 。

同时, 采用水力坡度相似的方法作图进行求值大小对比, 见图 2(图中: R_1 为隧道右侧影响半径或补给带宽度, R_2 为隧道左侧影响半径或补给带宽度), 可求得影响半径为 500 m , 与式(1)所求得的影响半径相差不大。

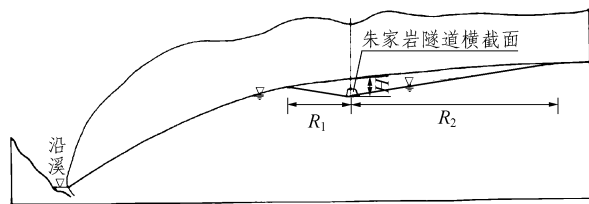


图 2 静储量计算模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of calculation model for static reserve

因此, 可取 $R = 500 \text{ m}$ 计算排水疏干体积。因隧道为狭长型, 影响半径可视为隧道的补给带宽度, 则疏干体积及静储量计算如下:

① 右侧疏干体积 V_1 :

$$V_1 = \frac{LRH}{2} \tag{2}$$

式中: L 为岩溶隧道处于季节化带的长度, 取 $L = 846 \text{ m}$ 。

由 $R_1 = 500, H = 35 \text{ m}$, 则有 $V_1 = 7\,402\,500 \text{ m}^3$ 。

② 左侧疏干体积 V_2 :

由 $R_2 = 170 \text{ m}$, 其他参数同上, 则有 $V_2 = 251\,680 \text{ m}^3$ 。

③ 总疏干体积 V :

$$V = V_1 + V_2 \tag{3}$$

由式(3)可知: $V = 9\,919\,350 \text{ m}^3$ 。按给水度 $u =$

0.002, 则静储量 $Q_v = V_u = 19\ 839\ \text{m}^3$ 。

静储量对隧道涌水量的大小影响, 与掘进速度有关, 掘进快则涌水量大, 掘进慢则涌水量小。朱家岩隧道处于季节变化带的洞身长约 800 m, 而影响半径为 500 m 以上, 掘进初期, 即可影响季节变化带全段洞身。基于上述考虑, 取疏干时间 $T = 5\ \text{d}$ 。每天的静储量的涌水量为

$$Q_{\text{静}} = \frac{Q_v}{T} \quad (4)$$

由此可知: $Q_{\text{静}} = 3\ 968\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

(2) 动储量涌水预测

动储量涌水预测可按式^[10]计算:

$$Q_{\text{动}} = \frac{NaAF}{T} \quad (5)$$

式中: N 为隧道涌水系数, 取 $N = 0.8$; a 为入渗系数, 取 $a = 0.65$; A 为降雨量, 有 2 个取值, 即 $A_1 = 150\ \text{mm}$, $A_2 = 100\ \text{mm}$; T 为降雨周期, 取 $T = 48\ \text{h}$; F 为补给面积, 由 1/10 000 岩溶水文地质图量取为 $1.21\ \text{km}^2$, 该面积不包括沟坡地带以及地下水可能向两侧沟溪排泄地带。则有 $Q_{\text{动}A_1} = 4.72 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 和 $Q_{\text{动}A_2} = 3.15 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

由 $Q_{\text{动}A_1}$ 和 $Q_{\text{动}A_2}$, 在大降雨期隧道涌水量为

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{总}A_1} &= Q_{\text{静}} + Q_{\text{动}A_1} \\ Q_{\text{总}A_2} &= Q_{\text{静}} + Q_{\text{动}A_2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由此可知: $Q_{\text{总}A_1} = 5.09 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$, $Q_{\text{总}A_2} = 3.49 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

以上隧道涌水量计算, 均为雨季大雨期间, 降雨周期为 2 d, 降雨量在 150 和 100 mm 情况下的涌水量。在雨季非雨期或平常降雨量时, 隧道涌水量会成倍减少。降雨停止后, 涌水量逐渐减少。隧道涌水滞后降雨 12~24 h, 一般最大涌水延续 5 d 左右。在极端情况下, 当降雨量超过 150 mm 时, 涌水量成倍增加。

4.2.2 野三关隧道岩溶涌水量预测

野三关隧道出口位于恩施州三斗坪村, 该段处于岩溶地下水的浅饱水带, 隧道岩溶涌水需考虑静储量、非洪水期正常涌水和洪水期涌水。

(1) 静储量涌水预测

静储量涌水具有突发性, 是初始涌水量的主要部分, 静储量涌水与水源主要是隧道工程以上岩溶含水层中储存的岩溶水量, 按下式^[18]估算:

$$Q_s = \frac{N\mu HF}{T} \quad (7)$$

在 YK106+765~YK104+500 段, 取 $H = 40\ \text{m}$; 取 $F = 2\ 100\ \text{m} \times 2\ 220\ \text{m} = 466.2 \times 10^4\ \text{m}^2$, $T = 5\ \text{d}$, $N = 0.8$, $\mu = 0.004$ 。由此可知: $Q_s = 11.93 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

(2) 平水期动储量涌水预测

在没有大的降水情况下, 暗河系统的平常流量即是非洪水期动储量。一般只要隧道揭露中小型管道就可以将暗河平常流量输进隧道内。高丝洞—白岩洞地下河平常流量约 50 L/s, 本段为其补给径流区, 约占其补给面积的 70%, 其流量约为 35 L/s, 再考虑龙洞槽一带小型管道水的涌水量, 则非洪水期动储量涌水量约 38 L/s, 即 $3\ 280\ \text{m}^3/\text{d}$ 。该流量在 40 m 水头压力下, 直径为 25~30 cm 的岩溶管道即可输送到隧道内。

(3) 洪水期动储量涌水预测

洪水期动储量涌水可按下式^[10]计算:

$$Q_f = \frac{NaAF}{T} \quad (8)$$

这里, 取 $N = 0.8$; $a = 0.65$; $A_1 = 150\ \text{mm}$; $A_2 = 100\ \text{mm}$; $T = 48\ \text{h}$; $F = 5.2\ \text{km}^2$ 。由此可知: $Q_{fA_1} = 20.28 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$, $Q_{fA_2} = 13.52 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

4.2.3 夹活岩隧道岩溶涌水量预测

夹活岩隧道进口位于宜昌长阳县魏家洲村, 其中桩号 YK49+630~YK49+710 附近穿越 F_5 断层。据详勘资料 F_5 断层倾向 NEE, 与隧道近于直交, 断层上盘为石牌页岩, 下盘水井沱组炭质灰岩, 均为隔水层及弱含水层, 其破碎带宽达 80 m, 为角砾岩且有溶蚀现象。断层在隧道上方切穿了 ϵ_{2qn} 及 ϵ_{1sl} 岩溶含水层, 地下水位在洞身底板之上约 150 m。施工时断层附近的地下水会沿破碎带贯入隧道, 视为正常区域水文地质条件下的隧洞涌水, 可采用地下水动力学计算方法估算涌水量 Q , 计算公式如下:

$$Q = q_0 L \quad (9)$$

式中: L 为隧道长度, 取 $L = 80\ \text{m}$; q_0 为单位长度隧道的正常涌水量, 可按下式^[10]计算:

$$q_0 = \frac{0.444\ 3K\theta H_1}{\lg \frac{R}{r}} \quad (10)$$

式中: H_1 为隧道底板以上含水段厚度, 取 150 m; $R = 2H_1\sqrt{H_1 K}$; r 为隧道半径, 取 $r = 4.9\ \text{m}$; $\theta = \alpha + \pi/2$, 取 $\theta = 2.35$; $K = 1.4\ \text{m/d}$ 。潜水含水层概化模

型如图 3 所示。

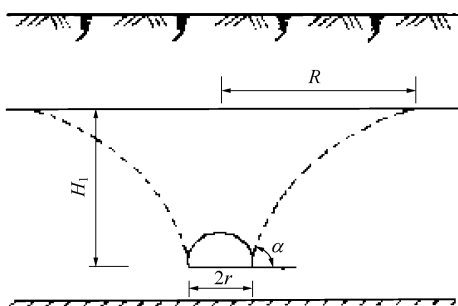


图 3 潜水含水层概化模型

Fig.3 Schematic model of unconfined aquifer

由此可求得本段单位长度涌水量 $q_0 = 73.84 \text{ m}^3/\text{d}$, 将其代入式(9)可求得 $Q = 5\ 907 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

上述工程实例^[18]分析是依据隧道所处的不同岩溶水动力分带选择合理的计算方法, 进行施工前隧道岩溶涌水评价与分析, 所得结论可直接用来指导施工。

4.3 隧道涌水施工验证

朱家岩隧道东段在施工过程中多次发生不同规模的涌水。隧道左洞施工至 ZK52+053 处, 遇一斜交溶隙。2005 年 4 月 29 日降雨量约 21.65 mm, 30 日降雨量约 20.20 mm, 溶隙涌水量为 1 500~2 000 m^3/d , 掌子面水深 1.3 m。右洞在 YK52+216 及 YK52+166~YK52+080 附近, 出露有宽 1~2 m 且与隧道斜交的溶隙。在左洞涌水同时, 右洞的溶隙也同时发生涌水, 涌水量大约 1 200 m^3/d 。2005 年 5 月 30 日, 该区降雨量约 31.5 mm, 发生初始涌水量为 1 900~2 400 m^3/d 的股状涌水, 涌水喷距约 1 m; 7 月 10 日该区降雨约 131 mm, 涌水量达 3 400 m^3/d , 并伴有泥沙, 与计算结果较为接近。

5 结 论

岩溶地区隧道施工具有高风险、多灾害特征, 基于其复杂的岩溶水文地质条件, 岩溶隧道涌水及涌水量预测尚未形成统一的理论体系。本文结合岩溶蓄水形式特征及当前物探技术水平现状, 从岩溶水动力分带角度提出了岩溶隧道涌水量预测的合理方法, 主要包括如下几点:

(1) 岩溶地区蓄水构造存在多种形式, 依据国内工程突水实例分析, 容易导致大型岩溶隧道突水的蓄水形式主要为岩溶水静储量蓄水构造, 主要包

括裂隙岩溶蓄水形式、溶腔溶潭蓄水形式、断层岩溶蓄水形式、层间岩溶蓄水形式以及地下河及岩溶管道蓄水形式。

(2) 由于岩溶蓄水形式的多样性及当前物探技术水平, 岩溶隧道水体探测准确度和精确度并不理想, 较其他常规探水仪器, 瞬变电磁法在远距离探水方面具有一定优势, 激发激化法则是探测富水区的有效方向, EH4 和高速钻孔具有很高的实用价值。

(3) 从岩溶水动力分带角度, 对不同带区的岩溶隧道提出了相应合理的涌水量预测方法。基于隧道所处完整水文地质单元的岩溶水补径排条件, 提出综合考虑垂向分带和水平分带影响的涌水量估算概念模型, 以提高涌水量预测精度。

(4) 分析了岩溶隧道涌水的水文地质特征, 结合岩溶水动力分带方法, 对湖北沪蓉西高速公路 3 条岩溶隧道进行施工前隧道的涌水评估分析, 与施工开挖实况吻合较好, 涌水量计算结果可直接指导施工。

参考文献(References):

- [1] 张之淦. 岩溶发生学[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2006. (ZHANG Zhigan. Origin of karst[M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2006.(in Chinese))
- [2] 徐国峰, 杨建峰, 陈侃福. 台缙高速公路苍岭隧道水文地质勘察与涌水量预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 2): 5 531 - 5 542.(XU Guofeng, YANG Jianfeng, CHEN Kanfu. Surveying of hydrogeology condition and forecasting of water inflow in Cangling tunnel Taizhou - Jinyun highway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.2): 5 531 - 5 542.(in Chinese))
- [3] 王 媛, 秦 峰, 李冬田. 南水北调西线工程区地下径流模数、岩体透水性及隧洞涌水量预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3 673 - 3 678.(WANG Yuan, QIN Feng, LI Dongtian. Groundwater runoff modulus, rock permeability and prediction of water quantities of tunnel in West Route of South-To-North Water Transfer Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3 673 - 3 678.(in Chinese))
- [4] 李兴高, 刘维宁, 张昀青. 隧道渗涌水量的随机模型预测[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(4): 60 - 64.(LI Xinggao, LIU Weining, ZHANG Yunqing. Predicting the amount of water inflow in tunnel by stationary random model[J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(4): 60 - 64.(in Chinese))
- [5] 李树忱, 李术才, 隋 斌, 等. 节理岩体渗流的无网格与有限元耦

- 合方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 75 - 80.(LI Shuchen, LI Shucui, SUI Bin, et al. Coupling meshless method and finite element method for seepage of jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 75 - 80.(in Chinese))
- [6] 叶志华, 韩行瑞, 张高朝, 等. 隧道岩溶涌水专家评判系统在朱家岩隧道涌水预报中的应用[J]. 中国岩溶, 2006, 25(2): 139 - 145.(YE Zhihua, HAN Xingrui, ZHANG Gaochao, et al. Application of expert's judging system to predicting karst water bursting in Zhujiayan tunnel[J]. Carsologica Sinica, 2006, 25(2): 139 - 145.(in Chinese))
- [7] 杜红梅. 水中氡测试在山岭隧道涌水量预测中的应用[J]. 铁道工程学报, 2004, (1): 69 - 72, 68.(DU Hongmei. Study on the tritium test for water gushing capacity forecast put into Qingling's full-length tunnel of Xi'an Ankang railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2004, (1): 69 - 72, 68.(in Chinese))
- [8] 李保珠, 李峰, 薛传东, 等. 有限单元法在涌水量预测中的应用[J]. 矿业工程, 2003, (5): 56 - 58.(LI Baozhu, LI Feng, XUE Chuandong, et al. Water inrush prediction using finite element method[J]. Mining Engineering, 2003, (5): 56 - 58.(in Chinese))
- [9] 黄涛, 杨立中. 渗流与应力耦合环境下裂隙围岩隧道涌水量的预测研究[J]. 铁道学报, 1999, 21(6): 75 - 80.(HUANG Tao, YANG Lizhong. A prediction study of water-gush yield in fractured tunnels under coupling between seepage and stress[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(6): 75 - 80.(in Chinese))
- [10] 张雷, 赵剑, 张和平. 隧道涌水量预测的计算方法研究[J]. 公路交通科技, 2007, (1): 121 - 123.(ZHANG Lei, ZHAO Jian, ZHANG Heping. Study on calculation method for tunnel seepage prediction[J]. Technology of Highway and Transport, 2007, (1): 121 - 123.(in Chinese))
- [11] 邓百洪, 方建勤. 隧道涌水量预测方法研究[J]. 公路交通科技, 2005, (3): 161 - 163.(DENG Baihong, FANG Jianqin. Study on forecast method for water gush of tunnels[J]. Technology of Highway and Transport, 2005, (3): 161 - 163.(in Chinese))
- [12] 陈崇希. 岩溶管道 - 裂隙 - 孔隙三重空隙介质地下水流模型及模拟方法研究[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(4): 361 - 366.(CHEN Chongxi. Groundwater flow model and simulation method in triple media of karstic tube-fissure-pore[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(4): 361 - 366.(in Chinese))
- [13] 王建秀, 杨立中, 何静. 深埋隧道涌水量数值计算中的试算流量法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1776 - 1780.(WANG Jianxiu, YANG Lizhong, HE Jing. Trial method for simulating tunnel discharge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1776 - 1780.(in Chinese))
- [14] 蒙彦, 雷明堂. 岩溶区隧道涌水研究现状及建议[J]. 中国岩溶, 2003, 22(4): 287 - 292.(MENG Yan, LEI Mingtang. The advance and suggestion for the study on discharge rate in karst tunnel gushing[J]. Carsologica Sinica, 2003, 22(4): 287 - 292.(in Chinese))
- [15] 王建秀, 杨立中, 何静. 大型地下工程岩溶涌(突)水模式的水文地质分析及其工程应用[J]. 水文地质工程地质, 2001, (4): 49 - 52.(WANG Jianxiu, YANG Lizhong, HE Jing. The hydro-geological analysis of karst groundwater's blow in large-scale underground engineering[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2001, (4): 49 - 52.(in Chinese))
- [16] 李术才, 李树忱, 张庆松, 等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 217 - 225.(LI Shucui, LI Shuchen, ZHANG Qingsong, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 217 - 225.(in Chinese))
- [17] 曲海峰, 刘志刚, 朱合华. 隧道信息化施工中综合地质预报技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1241 - 1251.(QU Haifeng, LIU Zhigang, ZHU Hehua. Technique of synthetic geologic prediction ahead in tunnel informational construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1241 - 1251.(in Chinese))
- [18] 韩行瑞. 湖北沪蓉西高速公路隧道岩溶水文地质专题研究[R]. 桂林: 中国地质科学院岩溶地质研究所, 2004.(HAN Xingrui. The special hydrogeology study on karst tunnels for West Section of Shanghai—Chengdu Highway[R]. Guilin: Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 2004.(in Chinese))