

渝湘复线彭水隧道施工期涌水量受岩溶溶腔分布特征影响分析

李宗治

中铁十二局集团第三工程有限公司, 太原 030024

摘要: 隧道突水突泥是岩溶地区隧道建设的重要工程灾害问题, 研究岩溶区地下水系统在隧道工程扰动下的响应是十分必要的。文章以渝湘复线彭水隧道为例, 分析隧址区水文地质条件, 建立地下水渗流模型, 分析溶腔规模对截面流量变化的影响。结果表明: 截面流量随溶腔增大而增大; 溶腔大小对隧洞水头等势线和最大水力梯度的影响显著; 随着溶腔体积增大, 水头等势线和最大水力梯度均有向下偏移的趋势。文章得出的溶腔周围水头分布特征, 获得不同溶腔大小下截面流量, 可为西南岩溶地区隧道施工提供技术借鉴和支撑。

关键词: 彭水隧道; 岩溶隧道; 溶腔大小; 截面流量

中图分类号: P642; U455 **文献标识码:** A

Analysis of Influence of Karst Cavity Distribution Characteristics on Water Inflow During Construction Period of Pengshui Tunnel on Chongqing-Hunan Expressway Double-Line

LI Zongzhi

China Railway 12th Bureau Group Third Engineering Co., LTD, Taiyuan 030024, China

Abstract: Water and mud inrush in tunnels is a critical engineering hazard during tunnel construction in karst areas. It is imperative to investigate the response of groundwater systems in karst regions to tunnel construction disturbances. Taking Pengshui Tunnel of the Chongqing-Hunan Expressway Double-Line as an example, this study focuses on analyzing the hydrogeological conditions of the tunnel site and establishing a groundwater seepage model to evaluate the impact of karst cavity scale on cross-sectional flow rate variations. The results indicate that: (1) The cross-sectional flow rate increases proportionally with the enlargement of karst cavities; (2) The size of karst cavities significantly influences the distribution of water head equipotential lines and the maximum hydraulic gradient within the tunnel; (3) As the cavity volume increases, both the water head equipotential lines and the maximum hydraulic gradient exhibit a downward migration trend. The derived characteristics of water head distribution around karst cavities and the quantified cross-sectional flow rates under varying cavity sizes provide technical insights and support for

收稿日期: 2024-09-20 改回日期: 2024-10-24

基金项目: 四川省重点研发项目(2024YFFK0112)

作者简介: 李宗治(1985—), 男, 工程师, 主要从事岩土工程勘察研究工作。E-mail: 425332995@qq.com

引文格式: 李宗治. 渝湘复线彭水隧道施工期涌水量受岩溶溶腔分布特征影响分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2025, 36(1): 47-53.

LI Zongzhi. Analysis of influence of karst cavity distribution characteristics on water inflow during construction period of pengshui Tunnel on Chongqing-Hunan Expressway Double-Line[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2025, 36(1): 47-53.

tunnel construction in karst regions of southwestern China.

Key words: Pengshui tunnel; Karst tunnel; Karst cavity size; Cross-sectional flow rate

0 引言

在岩溶区修建隧道时常面临突水突泥灾害,其具有隐蔽性和突发性等特点^[1]。岩溶隧道突水突泥赋存地质条件和成因机制复杂,一旦发生将引起大量的人员伤亡和财产损失,甚至导致不可逆的水环境灾变^[2]。岩溶隧道地下水灾害问题十分突出,对隧道建设的安全性会产生不利影响^[3-4]。因此,在隧道开挖前预测和计算岩溶隧道涌水量对预防和控制岩溶灾害是十分重要的^[5-9]。

为确保隧洞施工的工程安全和生态经济效益,预测和计算涌水量在隧道开挖前至关重要。过去,学者主要使用水文地质比拟法和水平衡法来预测隧道的涌水量^[10]。然而,水均衡法仅适用于地质结构简单的地区,而水文地质类比的预测精度则依赖于两个工程之间的相似性。岩溶地区的地质结构复杂,并且每个地区的岩溶发育情况各不相同,因此以上两种方法在大多数情况下并不适用。随着计算机技术的进步,数值法在隧道涌水量预测方面得到了广泛应用。肖丹等^[11]结合了模糊数学理论和故障树分析方法,对矿井水灾的潜在风险进行评估,获得了可能导致水灾发生的关键因素和路径,并采取相应的防控措施,以提高矿井的安全性和环保性。毛邦燕^[12]通过分析岩溶地区矿井的地质特征和水文地质条件,建立了复杂岩溶介质中矿井涌水量的三维数值模型。该模型基于流体力学理论和数值计算方法,考虑了岩溶介质的非均匀性和多孔介质的渗透性,能够较准确地模拟和预测矿井的涌水情况。王红梅^[13]等提出了一种模糊水文地质比拟法来预测矿坑涌水量。该方法基于模糊数学理论和水文地质参数的比拟分析,将矿坑涌水量预测问题转化为模糊关系的建立和模糊推理的求解过程。王东^[14]详细说明了灰色控制理论在隧道涌水问题上的应用,列举了一些具体的案例,说明了如何利用灰色控制理论来预测和控制隧道涌水量。通过收集和分析历史数据,并建立灰色模型,可以预测隧道施工过程中的涌水量,并采取相应的措施来控制涌水。刘玮^[15]基于BP神经网络的深长隧道突水预测分析方法,列举了一些实际案例,并利用采集到的数据进行训练和测试。通过将隧道的地质和水文参数作为输入,突水情况作为输出,建立了BP神经网络模型,并进行了预测和分析水量。王纯祥^[16]等利用地理

信息系统和三维快速拉格朗日有限差分法对日本九州地区新干线筑紫隧道涌水及其对地下水水位的影响进行分析。

基于彭水隧道工程案例,结合现场调查和数值计算等手段,分析了溶腔大小对隧道施工期涌水量的影响。本文得出了岩溶溶腔大小对施工期涌水量的影响规律,为西南岩溶地区隧道施工提供了重要的技术支持。

1 工程概况

1.1 工程概况

彭水隧道位于渝湘复线高速巴(南)彭(水)段,为双线分离式隧道,是渝湘复线的控制性工程(图1)。隧道向北东凸出的微弧线展布,隧道整体走向约 113° 。左线隧道起讫桩号 ZK 147+647~ZK 158+782,总长 11 135 m,隧道最大埋深约 850 m;右线隧道起讫桩号 YK 147+698~YK 158+790,总长 11 094 m,隧道最大埋深约 830 m。隧道主洞岩性主要为白云岩、灰岩、泥岩、页岩及粉砂岩,隧道施工穿越 3 条断层、2 段煤系地层、4 条接触带、3 处物探异常低阻区,可能遭遇较大规模隧道涌水突泥灾害。

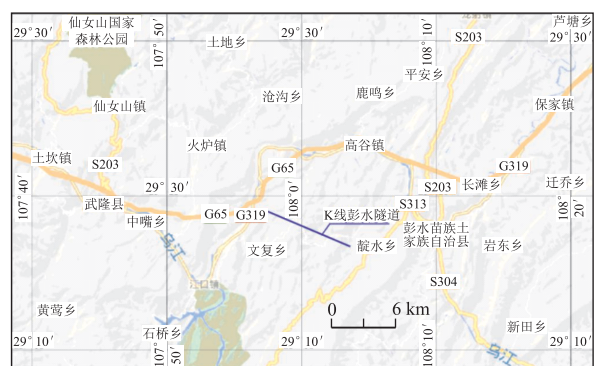


图1 彭水隧道交通位置示意图

勘察报告显示隧道平水期预计涌水量 $58\ 240\ \text{m}^3/\text{d}$,雨季最大涌水量高达 $223\ 280\ \text{m}^3/\text{d}$ 。此外,彭水隧道隧址区有茂云山县级野生动物自然保护区,隧址区生态环境敏感,隧道涌水突泥伴随围岩塌方,可导致地表塌陷、水系断流,进而导致地表植被破坏、威胁当地居民生产生活等严重的生态环境灾变问题。

1.2 工程地质条件

彭水隧址区主要位于重庆市武隆区和彭水县,

属于渝东南部岩溶山区,海拔高程一般为 200~1 500 m,相对切割深度一般在 100~1 000 m,普遍为中山或低中山地形,山脉延伸方向多与构造线一致,呈南西-北东向。隧址区溶丘洼地发育,洼地四周高出邻区 150~700 m,垂直岩溶形态较为发育,岩溶个体形态主要为落水洞、漏斗、天窗等(图 2)。洼地内无常年性水流,地下河、岩溶泉较为发育,岩溶地下水较丰富。总体上地形工作区中部(重点调查区南侧边界)为地势最高位置,向南北两侧逐渐降低,最高点位于重点工作区南西侧边界的关山,标高 1 670 m,区域侵蚀基准面为乌江,在彭水城区一带,高程约 215 m,最低处为银盘电站下游,标高 180 m,最大高差为 1 490 m。依据地貌成因划分类型,区内地貌主要分为溶蚀地貌(I)、溶蚀-侵蚀河谷地貌(II)、构造-溶蚀中低山地貌(III)3 大类型(图 3)。



图 2 火石垭洼地现场照片

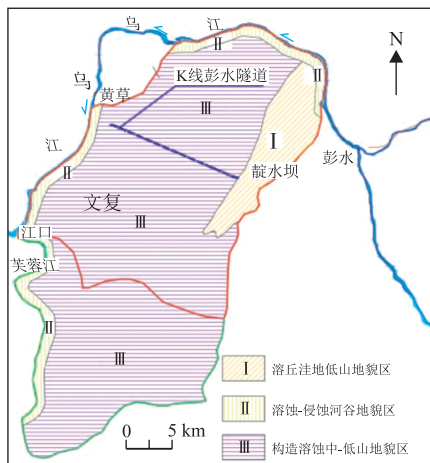


图 3 研究区地貌分区示意图

隧址区的构造基本为北东向的构造线及伴生的断裂(图 4)。北东向褶皱轴向一般北 10°~35°东,一般倾角 35°~50°。轴部多为寒武系地层。向斜多宽阔,局部不对称,两翼产状一般 25°~50°,轴部地层多为三迭系地层。隧址区出露地层岩性为第四系、三迭系雷口坡组(T₂l)、嘉陵江组(T₁j)、飞仙关组(T₁f),二迭系长兴组(P₃c)、龙潭组(P₃l)、茅口组(P₂m)、栖霞组(P₂q)、梁山组(P₁l),志留系(S),奥陶系(O),寒武系(Є)。受沉积相原因本区缺失泥盆系及石炭系地层,由于区内龙洋逆断层影响,局部

地层出露不连续。

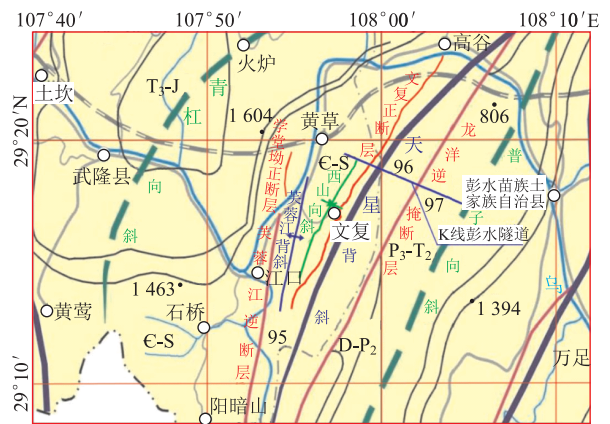


图 4 研究区构造纲要图

彭水县属四川盆地东部暖湿性亚热带季风气候,季风交替,四季分明,气候温暖,雨量较多,日照偏少。据彭水县气象局 1952—2004 年 53 a 降水系列资料计算:多年平均降水量 1 258.6 mm。降水量最多为 1952 年,达到 1 990.0 mm,最少为 2001 年,为 747.3 mm,历年日最大降雨量 139 mm(1998 年 7 月 21 日)。隧址区地表水系发育,河网密布,河流纵横,河流、溪涧切割深,落差大,高低悬殊,呈枝状分布,所有河流都属长江水系。区内分布的主要河流有乌江、芙蓉江(图 5)。彭水隧道 K 154+650 南侧约 5.7 km 文复乡高隆村分布有一处在建沙坝水库,库容 110×10⁴ m³,建成后可供文复乡约 2 000 人生活用水。



图 5 彭水隧道研究区水系图

2 施工涌水量分析

2.1 渗流基本理论

(1) 运动方程

地下水运动所受力包括表面力与体积力两类,

引用流体力学中最一般的运动方程——纳维-司托克斯方程,可得到不可压缩流体在不变形多孔介质中的纳维-司托克斯方程:

$$\frac{1}{ng} \frac{\partial \underline{v}}{\partial t} = -gradh - \frac{\underline{v}}{k} \quad (1)$$

式中, \underline{v} 表示流速; $gradh$ 表示重力梯度; k 表示渗透系数。

上式(1)为地下水运动方程。如果式(1)不随时间变化的稳定渗流,可简化为重力和阻力控制的达西流动,即:

$$\underline{v} = -k \times gradh \quad (2)$$

(2) 连续性方程

连续性方程是质量守恒定律在渗流问题中的具体应用。一般情况下,三维渗流的连续性方程可表示为:

$$-\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] \\ \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\partial \rho}{\partial t} [n \Delta x \Delta y \Delta z] \quad (3)$$

式中, v_x, v_y, v_z 表示流体在3个方向上的流速; ρ 表示流体的密度。

假定水为不可压缩均质液体,密度 ρ 为常数,同时假设含水层骨架不可压缩,则可得到不可压缩流体在刚体介质中流动的连续性方程,即:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

(3) 稳定渗流微分方程

将达西定律式代入式(4),则得稳定渗流微分方程式:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

式中, k_x, k_y, k_z 表示流体在3个方向上的渗透系数。

(4) 定解条件

每一流动过程都是在限定的空间渗流场内发生,沿这些流场边界起支配作用的条件,称为边界条件;而在研究开始时流场内的整个流动状态或流动支配条件,称之为初始条件。边界条件和初始条件统称为定解条件。求解稳定渗流场时,只需列出边界条件,此时的定解问题常称为边值问题。从描述渗流的数学模型看,边界条件有下面三类:

第一类边界条件(Dirichlet条件)为边界上给定势函数或水头的分布,或称水头边界条件。考虑与时间 t 有关系的非稳定渗流边界,非稳定渗流边界条件为:

$$h|_{r_1} = f(x, y, z, t) \quad (6)$$

式中: $h|_{r_1}$ 表示第一类边界条件(Dirichlet条件)为

边界上给定位势函数。

第二类边界条件(Neumann条件)为边界上给出势函数或水头的法向导数,或称流量边界条件。考虑到与时间 t 有关的边界时,此已知边界条件可写为:

$$\frac{\partial h}{\partial n} |_{r_2} = \frac{-v_n}{k} = f(x, y, z, t) \quad (7)$$

第三类边界条件为混合边界条件,是指含水层边界的内外水头差和交换的流量之间保持一定的线性关系,即:

$$h + \alpha \frac{\partial h}{\partial n} = \beta \quad (8)$$

式中, α 为正常数,它和 β 都是此类边界各点的已知数。在解题时需以迭代法去满足边界水头 h 与 $\partial h / \partial n$ 间的已知关系。

2.2 计算模型

应用有限元数值模拟分析软件 Geo-Studio 中的“Seep”模块,分析不同溶腔大小的渗流场分布和涌水量差异性。通过在隧道上方建立5个不同大小的溶腔来研究溶腔大小对隧道涌水量的影响,其中溶腔长轴按8 m(5#)、6 m(4#)、4 m(3#)、2 m(2#)、1 m(1#)此5种情况进行分析讨论,如图6(a)所示。模型现在 Auto-CAD 生成面域,然后导入 Geo-Studio 进行网格划分,划分后网格如图6(b)。

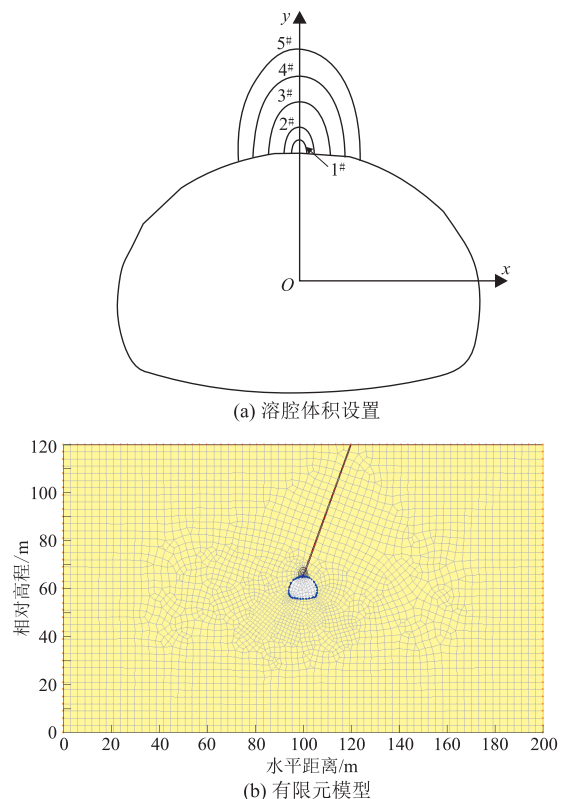


图6 横剖面计算模型示意图

计算模型建立后,根据不同材料性质的差异,分别添加相应材料,并赋予相关属性。本次渗流分析将岩体简化为均质材料,岩体及水力通道的透水率 q 和水力饱和传导率(渗透系数)综合参考《水文地质手册》《水文地质学原理》中常见岩土体材料的经验取值,其中水力通道的透水率取 150 lv ,岩体的透水率介于 $0.1 \text{ lv} \sim 1.0 \text{ lv}$ 之间,溶腔考虑为极端的无充填情况。顶部压力水头取为 120 m 、岩体透水率为 0.4 lv 。

隧道断面形状采用渝湘复线彭水隧道实际断

面。由于开挖瞬间的涌水量与溶腔早期实际储水量密切相关,本次敏感性分析主要针对开挖后的稳定渗流场,因此计算模型的上、侧边界分别施加与实际相应的定水头边界,开挖面及溶腔边界假定其自由出流,设置为零压力水头边界。

2.3 计算结果

(1) 水头计算结果

根据 2.2 节中所建模型,分别计算得出了横剖面在不同溶腔大小影响下的隧洞水头等势线如图 7 和图 8 所示。

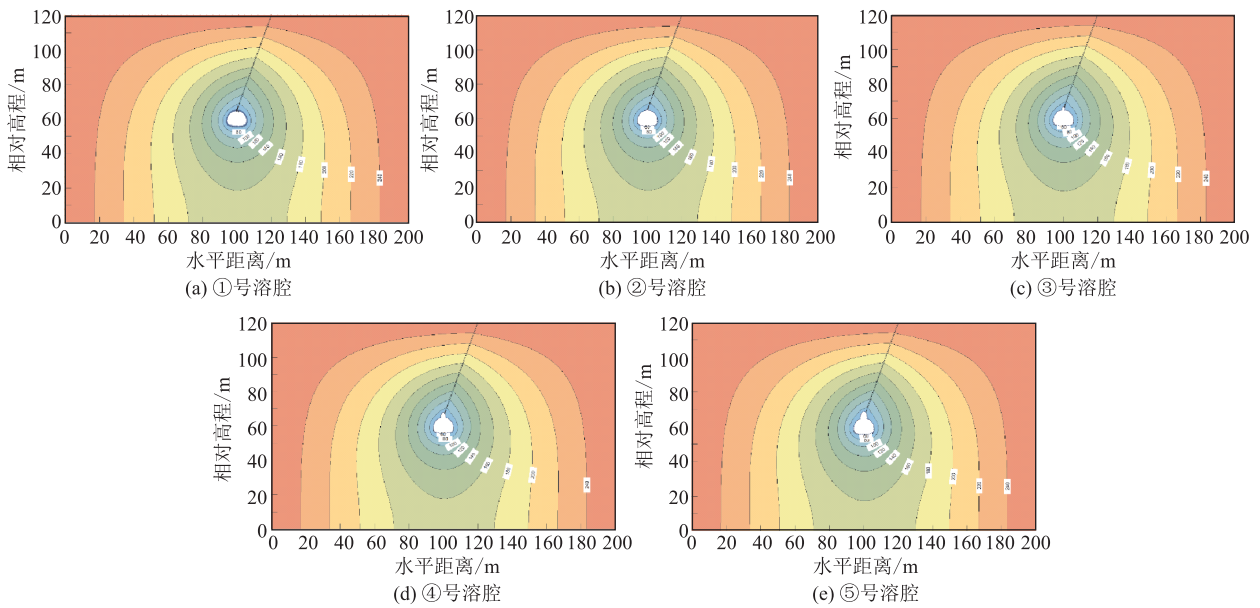


图 7 90°溶腔渗流场总水头变化图

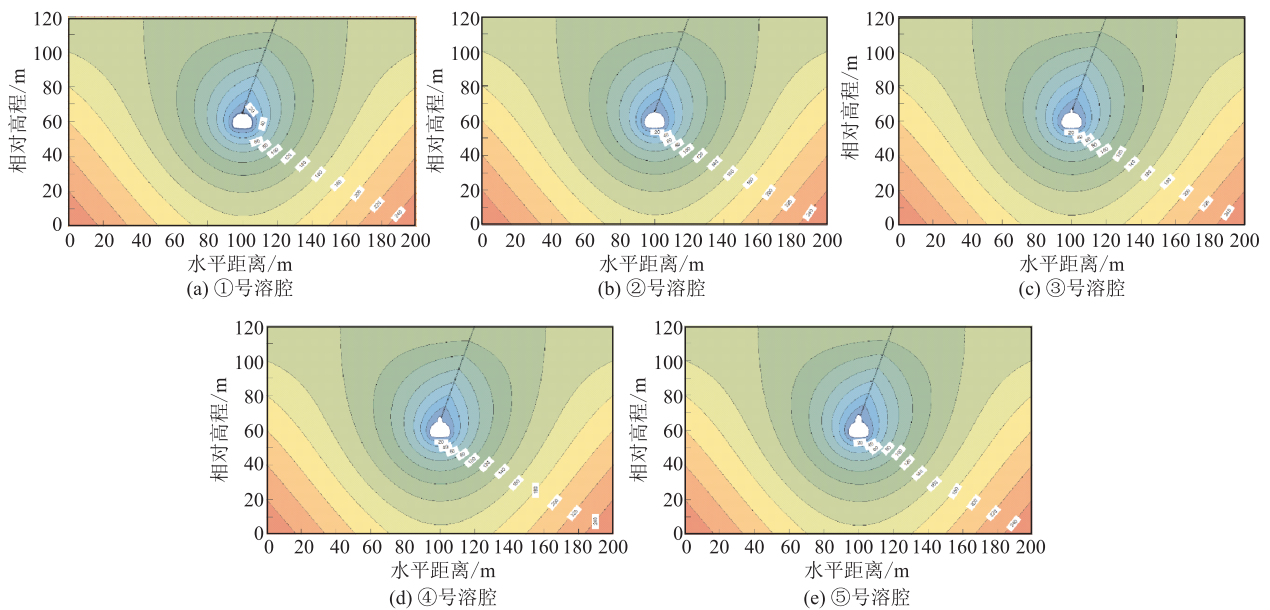


图 8 90°溶腔渗流场压力水头变化图

在开挖区域,总水头和压力水头的分布形态受到多种因素的影响。在开挖区上部,由于距离潜水

位较远,未出现大范围下凹形降水漏斗,而是呈现总水头等势线向上凸起、压力水头等势线向上凸起的情况。在开挖区下部,水头等势线向下凹陷,总水头明显降低,而压力水头的降低程度稍小。隧洞周围的总水头和压力水头呈现近似环状降低,而优势水力通道处的水头降低更为明显,使得总水头和压力水头的等势线产生显著外突。

通过对比不同溶腔大小条件下的总水头和压力水头等势线,可以发现随着溶腔体积的增大,总水头和压力水头等势线都有向下偏移的趋势。特别是在开挖区下部,这种偏移更为明显,而开挖区上部的偏移主要集中在优势水力通道附近。这是因为优势水力通道的存在显著改变了周围的渗流场,导致了这种现象的发生。

(2) 最大水力梯度计算结果

溶腔大小会显著影响隧洞边界附近水力梯度的变化。表 1 列举了在不同溶腔大小条件下,隧洞周围、溶腔附近以及优势水力联系通道部位(即软弱断层)出现的最大水力梯度变化情况。

研究发现隧洞的最大水力梯度主要分布在下部两侧,大致稳定在 13 左右,溶腔大小变化的影响较小。然而,溶腔开挖后地下水补给渗流场的影响使得溶腔附近部位的最大水力梯度更加明显受到影响,特别是溶腔方位的影响。当溶腔增大时,溶腔附近部位的最大水力梯度也相应增大。在一定程度上,随着溶腔增大,溶腔部位的最大水力梯度反而有所降低,可能是由于溶腔输水能力的提升所致。在优势水力联系通道处,最大水力梯度相对稳定在 4~5 之间,但仍高于允许水力梯度,可能会导致潜在的突泥等渗透破坏。

表 1 最大水力梯度统计表

隧洞周围最大水力梯度	溶腔编号	1	2	3	4	5
水力梯度	水力梯度	13	13	13	13	13
溶腔附近最大水力梯度	溶腔编号	1	2	3	4	5
水力梯度	水力梯度	5	7	9	9	9
优势水力联系通道最大水力梯度	溶腔编号	1	2	3	4	5
水力梯度	水力梯度	4	5	5	5	5

(3) 溶腔大小敏感性分析

流量与溶腔规模之间的关系如图 9 和图 10 所示。可以观察到,随着溶腔规模的增大,溶腔流量也呈现持续增加的趋势。以具有最大流量的溶腔为例,其长轴与 X 轴正方向夹角为 30°,随着溶腔规模从①号增加至⑤号,截面流量由 2.93E-05 m³/s 增加至 3.17E-05 m³/s。

通过对比全截面和溶腔处的流量变化,我们发

现在溶腔方位相同的情况下,溶腔处的流量变化幅度更大。这表明随着溶腔规模的增大,溶腔处的流量增加,而隧洞其他部位的流量反而减少。进一步分析这种现象的原因是:随着溶腔体积的增大,溶腔周围地下水的排泄面积增大,排泄条件变得更好。同时,受到优势水力联系通道的影响,溶腔周围地下水的补给条件也变得更好。因此,溶腔附近部位的流量随着排泄面积的增大而增加。然而,更多地下水从溶腔处流出,改变了原有的渗流场,导致其他部位的地下水补给减少,进而使其他部位的流量减小。

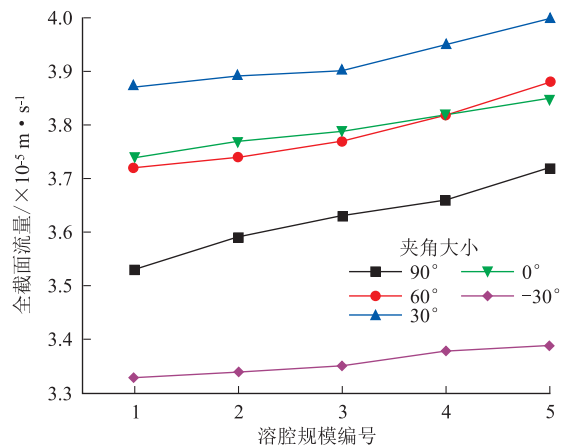


图 9 溶腔规模与全截面流量关系曲线

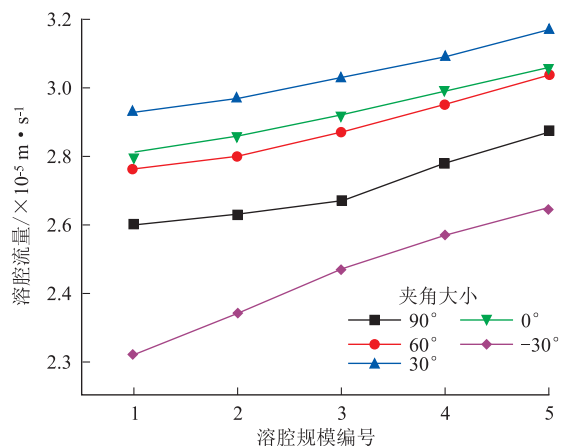


图 10 溶腔规模与溶腔流量关系曲线

3 主要结论

基于渝湘复线彭水隧道案例,采用 Geo-Studio 软件,分析了溶腔规模对岩溶隧道周围渗流场、水力梯度、涌水量等影响,主要结论如下:

(1) 随着溶腔变大,截面流量变化呈现出随溶腔增大而持续增大的变化趋势,隧洞其他部位的流量逐渐减少。溶腔大小对隧洞水头等势线和最大水

力梯度的影响显著,随着溶腔位置下移和溶腔体积增大,水头等势线和最大水力梯度均有向下偏移的趋势。

(2) 溶腔流量变化规律主要受到洞室开挖后补给渗流场特征的影响,同时优势水力联系通道的位置变化也对渗流场产生一定的改变作用。

(3) 隧洞最大水力梯度主要分布在下部两侧,溶腔规模的增大反而会使溶腔部位的最大水力梯度降低。然而,在优势水力联系通道处,最大水力梯度可能会超过允许水力梯度,存在潜在的渗透破坏风险。

参考文献

- [1] 李术才,许振浩,黄鑫,等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [2] 周宗青,李术才,李利平,等. 岩溶隧道突涌水危险性评价的属性识别模型及其工程应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 818-826.
- [3] 李术才,王康,李利平,等. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 29-37.
- [4] 杨艳娜. 西南山区岩溶隧道涌突水灾害危险性评价系统研究[D]. 成都:成都理工大学, 2009.
- [5] 李利平. 高风险岩溶隧道突水灾变演化机理及其应用研究[D]. 济南:山东大学, 2009.
- [6] 李术才,王康,李利平,等. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 22-30.
- [7] 左乾坤. 达陕高速公路隧道涌突水机制及防治措施研究[D]. 成都:成都理工大学, 2001.
- [8] 林传年,李利平,韩行瑞. 复杂岩溶地区隧道涌水预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1469-1476.
- [9] 何发亮,张玉川. 隧道施工地质灾害与不良地质体及其预报[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2001.
- [10] 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): 38-43.
- [11] 肖丹,秦文贵,邸志强. 模糊故障树分析法及其在矿井水灾评价中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(5): 43-45.
- [12] 毛邦燕. 复杂岩溶介质矿井涌水量的三维数值模拟研究[D]. 成都:成都理工大学, 2005.
- [13] 王红梅,黄勇. 长汀矿区矿坑涌水量模糊水文地质比拟法预测[J]. 金属矿山, 2017, 52(3): 178-182.
- [14] 王东. 灰色控制理论在隧道涌水中的应用[J]. 路基工程, 2008, 26(6): 148-149.
- [15] 刘玮. 基于BP神经网络下的深长隧道突水预测分析与数值模拟研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.
- [16] 王纯祥,蒋宇静,徐帮树. 复杂条件下长大隧道涌水预测及其对环境的影响评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2411-2417.