

## 深埋圆拱形隧洞围岩流场及涌水流速分布的解析研究

卫云波, 王锦国, 陈舟, 郑克勋

### Analytical study of groundwater flow field and inrush flux distribution for deeply-buried circular arched tunnels

WEI Yunbo, WANG Jinguo, CHEN Zhou, and ZHENG Kexun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312024>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 渗流作用下黄土含水率变化特征及对隧道工程的影响

Characteristics of moisture content variation of loess under seepage and its influence on tunnel engineering

张晓宇, 毕焕军, 曹峰, 夏万云 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 41-47

#### 富水隧道幕墙堵水技术研究

Research on water blocking technology of curtain walls in water-rich tunnels

吴祖松, 侯秋萍, 马君伟, 刘琦, 肖缔, 李松 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 65-71

#### 基于蒸渗仪和解析法估算毛乌素沙地潜水蒸发量

Estimation of groundwater evaporation based on lysimeter experiment and analytical solution in the Mu Us sandy land

王文科, 尹红美, 黄金廷, 李俊亭 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 1-6

#### 深埋顺层偏压隧道围岩破坏机理及规律研究——以郑万线某隧道为例

A study of the mechanism and regularity of failures in the surrounding rock of a deep buried bias tunnel embedded in geologically bedding strata: taking one tunnel of the Zhengwan line as an example

胡炜, 谭信荣, 蒋尧, 毛坚强 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 60-68

#### 基于砂槽模型研究不同水流密度下盆地地下水水流系统

A study of the characteristics of groundwater flow system of a basin under variable density condition based on a physical sand box model

易磊, 漆继红, 许模, 吴明亮, 李潇, 岑鑫雨 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 40-40

#### 鸿图嶂隧道突涌水预测及防治措施

Prediction and prevention of sudden water gushing in the Hongtuzhang tunnel

罗依珍, 成国文, 尹利君, 邓皇适, 谭宁, 刘真真 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 64-72



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312024

卫云波, 王锦国, 陈舟, 等. 深埋圆拱形隧洞围岩流场及涌水流速分布的解析研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 18-24.  
WEI Yunbo, WANG Jinguo, CHEN Zhou, et al. Analytical study of groundwater flow field and inrush flux distribution for deeply-buried circular arched tunnels[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 18-24.

## 深埋圆拱形隧洞围岩流场及涌水流速分布的解析研究

卫云波<sup>1</sup>, 王锦国<sup>1</sup>, 陈舟<sup>1</sup>, 郑克勋<sup>2</sup>

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210046;

2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 近年来, 随着我国交通工程、采掘工程、地下空间工程以及长距离引调水工程建设的不断发展, 隧洞突涌水灾害发生越来越频繁。但是目前针对圆拱形隧洞围岩流场的解析研究较少, 使用保角变换方法求解圆拱形深埋隧洞涌水量及围岩流场的解析解, 探讨了圆拱形隧洞洞壁涌水流速的分布规律。研究发现: 在圆拱形隧洞洞壁附近, 地下水流场受隧洞形状影响较为明显, 而在远离洞壁处, 隧洞形状对地下水流场的影响可等效为圆形隧洞; 圆拱形隧洞洞壁涌水流速的最大值出现在底板左右两端的转折点(即洞底脚)附近, 而流速最小值位于底板中心点; 洞底脚流速可达底板中心点流速的 3 倍以上; 隧洞截面形状越接近于圆形, 洞壁各点涌水流速的相对差距越小。研究成果可为圆拱形隧洞涌水量预测及围岩地下水流场刻画提供理论依据, 为隧洞施工方案设计以及防渗/排水措施设计提供有力支撑。

**关键词:** 保角映射; 隧洞; 地下水; 突涌水; 渗流; 解析法

中图分类号: P641.2; TU46

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0018-07

## Analytical study of groundwater flow field and inrush flux distribution for deeply-buried circular arched tunnels

WEI Yunbo<sup>1</sup>, WANG Jinguo<sup>1</sup>, CHEN Zhou<sup>1</sup>, ZHENG Kexun<sup>2</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210046, China;

2. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China)

**Abstract:** With the development of transportation engineering, mining engineering, underground space engineering, and long-distance water diversion projects in China, the occurrence of tunnel water inrush disasters has become increasingly frequent. Due to the limited analytical study on the flow field of circular arched tunnels, an analytical solution for the water inrush and the flow field in the surrounding rock around a deep-buried circular arched tunnel was obtained using the conformal transformation method. Then the distribution of water inrush around the tunnel circumference was explored. The results reveal that the groundwater flow field near the tunnel is significantly influenced by the tunnel shape, while its influence on the groundwater flow field further away from the tunnel can be approximated as that of a tunnel with a circular cross-section. The maximum flow velocity around the circular arched tunnel occurs near the inflection points (i.e., the corners of the tunnel bottom), while the

收稿日期: 2023-12-10; 修订日期: 2024-01-21

投稿网址: [www.swdzcgdz.com](http://www.swdzcgdz.com)

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42102282); 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2022]一般212); 贵州省科技平台及人才团队建设计划项目(黔科合平台人才[2021]5635); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK2021041973)

第一作者: 卫云波(1993—), 男, 博士, 讲师, 主要从事水文地质研究工作。E-mail: [ybwei@hhu.edu.cn](mailto:ybwei@hhu.edu.cn)

通讯作者: 郑克勋(1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事水文地质研究工作。E-mail: [479670439@qq.com](mailto:479670439@qq.com)

minimum flow velocity is located at the center of the tunnel floor. The flow velocity at the corners of the tunnel bottom can exceed three times the flow velocity at the center of the tunnel floor. As the tunnel shape approaches a circle, the relative differences of flow velocities at various points around the tunnel circumference gradually decrease. This study can provide a theoretical basis for estimating the water inrush flux and characterizing the groundwater flow field in the surrounding rock around circular arched tunnels, and support for tunnel construction planning and the design for tunnel groundwater seepage/drainage.

**Keywords:** conformal mapping; tunnel; groundwater; groundwater inrush; seepage flow; analytic method

近年来,随着我国交通工程、采掘工程、地下空间工程以及长距离引调水工程建设的不断发展,隧洞开挖越来越多,且呈现“大埋深、长洞线、高应力、强岩溶、高水压、构造复杂、灾害频发”的发展趋势,隧洞突涌水灾害日趋严重。由于深埋隧洞本身面临的复杂地质条件和工程条件<sup>[1-2]</sup>,准确评估各种条件下的隧洞涌水量仍然是一项具有挑战性的任务。

为了预测和计算隧洞涌水量及围岩流场,有针对性地设计防渗/排水工程以预防可能发生的突涌水灾害,前人已经对隧洞涌水过程进行了大量的研究。所用方法涉及解析法、经验回归法、数值模拟法、机器学习法等。使用解析法求解隧洞的突涌水过程通常需要对问题进行概化。具体地,通过将隧洞概化为“点汇”,Goodman 等<sup>[3]</sup>使用镜像法推导出了当前应用最广泛的深埋隧洞涌水量计算公式。在 Goodman 公式的基础上,大量学者进行了修改扩展,扩大了该公式的适用范围<sup>[4-7]</sup>。通过使用保角变换, Park 等<sup>[8]</sup>推导出了半无限含水层圆形隧洞涌水量的精确解析解。随后,针对围岩、衬砌和注浆圈等工程结构进一步发展保角变换方法在隧洞突涌水问题中的应用<sup>[9-13]</sup>。然而,由于隧洞涌水过程非常复杂,现有的解析方法多局限于求解具有规则断面形状隧洞的突涌水过程,如圆形、椭圆形、正方形截面隧洞。而对于洞壁形状更为复杂的圆拱形、马蹄形等隧洞断面,实际工程中更多会采用回归方法、数值模拟法及机器学习法预测其涌水量。

回归法和机器学习法虽然常被用来快速预估隧洞涌水量,但尚难以准确刻画围岩流场,且其适用范围和适用条件还有待进一步讨论<sup>[14]</sup>。数值模拟方法虽然可以计算围岩流场,但是在处理复杂隧洞断面问题时也会面临洞壁形状精细刻画带来的计算成本大幅上升、模拟计算区边界选取及边界条件难以准确界定等问题。若隧洞与模型外部边界之间距离过小,隧洞涌水计算结果容易偏大(定水头边界)或偏小(隔水边

界),且围岩流场会明显受到模型外部边界形状影响<sup>[15]</sup>。根据 Butscher<sup>[16]</sup>和周亚峰<sup>[17]</sup>的研究结果,隧洞突涌水模型模拟范围以取距离隧洞中心不小于 20 倍洞径为宜。而在此模型范围下,精细刻画隧洞断面形状,会造成计算成本明显上升。

因此对于不规则断面的隧洞,有必要进一步研究其涌水流场的解析解,以降低涌水量计算评估成本,协助快速构建隧洞形状与涌水量/流场分布的准确关系,更好地指导隧洞开挖排水/防渗工程方案设计。

本文使用保角变换方法求解了圆拱形深埋隧洞围岩流场及涌水量的解析解。基于求得的解析解,探讨了圆拱隧洞围岩流场及洞壁涌水流速的分布规律。通过改变隧洞圆拱半径,研究了隧洞形状对于围岩流场的影响。

## 1 研究方法

### 1.1 条件概化

为了得到圆拱形隧洞围岩流场的解析解,首先需要对问题进行概化。

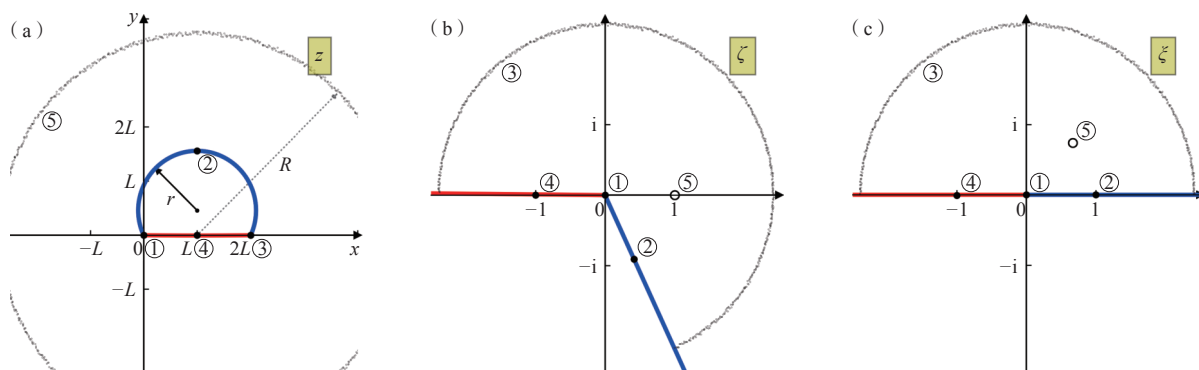
(1)地下水处于层流状态,地下水运动服从达西定律;隧洞涌水有稳定的补给来源,即该问题可被视作稳定流问题,地下水流动满足拉普拉斯方程。

(2)隧洞为直线长隧洞,可取一垂向二维截面分析围岩流场,即该问题可简化为平面二维流问题。

(3)隧洞所处含水层为均质各向同性含水层,且隧洞埋深足够深,即隧洞排水影响半径( $R$ )内的含水层渗透系数处处相等,且隧洞排水影响半径足够大(远大于洞径)。

(4)洞壁导排水系统工作良好,从洞壁各点流向洞内集中排水沟的水头损失相对含水层中的水头损失可忽略不计,即洞壁水头可视为处处相等。

对于满足上述概化条件的涌水问题,假设隧洞圆拱的底部弦长为  $2L$ ,上部圆弧半径为  $r$  ( $L < r < R$ ),隧洞断面形状如图 1(a)所示。

图 1 原域 ( $z$  平面) 与映射域 ( $\zeta$  平面及  $\xi$  平面) 上的洞壁形状Fig. 1 Shape of tunnel circumference on the original domain ( $z$ -plane) and mapping domain ( $\zeta$ -plane and  $\xi$ -plane)

## 1.2 保角变换

为了求解围岩流场,通过保角变换将圆拱形隧洞洞壁(图 1a)变换到映射域的实轴成为一条直线边界(图 1c)。需经过两步变换。

(1)对洞壁做 Möbius 变换,即对于洞壁所在的复平面上任意一点  $z$  映射变换:

$$\zeta = \frac{z}{z-2L} \quad (1)$$

此变换将洞壁的上部圆弧和底部直线弦分别映射成为  $\zeta$  平面上的 2 条射线,如图 1(b)所示。物理平面上的点①(原点)经过映射后位置不变,圆弧与弦的另一交点③ $z_3 = 2L + 0i$ 经过映射后成为  $\zeta$  平面上的无限远点。而原本影响半径边界上的任意一点⑤ $z_5 = L + Re^{i\theta}$  ( $0 < \theta \leq 2\pi$ ) 经过式(1)映射成为了  $\zeta$  平面上的点  $\zeta_5 = 1 + 2L/(Re^{i\theta} - L)$ 。将圆弧的中点②及弦的中点④代入式(1),2 条射线的辐角分别为:

$$\begin{cases} \alpha_2 = -\arctan \frac{1}{\sqrt{(r/L)^2 - 1}} \\ \alpha_4 = \pi \end{cases} \quad (2)$$

其中,由于  $r > L$ , 因此  $\alpha_2 \in (-\pi/2, 0)$ 。 $r$  越接近  $L$ ,  $\alpha_2$  越接近  $-\pi/2$ ; 在  $r \gg L$  时,  $\alpha_2 \rightarrow 0$ 。

(2)将  $\zeta$  平面上的 2 条射线经过旋转缩放变换到实轴上,即对于  $\zeta$  平面上的任意一点映射变换:

$$\xi = (\zeta e^{-i\alpha_2})^{\pi/(\pi-\alpha_2)} \quad (3)$$

此变换将  $\zeta$  平面上的 2 条射线分别映射到  $\xi$  平面实轴的正半轴和负半轴(图 1c),即将围岩流场映射为上半平面。从式(3)知,经过此次映射后点①原点位置依然不变,而影响半径边界上的点⑤经过式(3)映射成为  $\xi$  平面上的点:

$$\xi_5 = e^{i\pi\alpha_2/(\alpha_2-\pi)} \left( 1 + \frac{2L/R}{e^{i\theta} - L/R} \right)^{\pi/(\pi-\alpha_2)} \quad (4)$$

由于影响半径  $R$  远大于隧洞半弦长( $L$ ),即  $\eta = L/R \rightarrow 0$ , 因此可对式(4)做泰勒展开,并舍弃高阶小量:

$$\lim_{\eta \rightarrow 0} \xi_5 = \lim_{\eta \rightarrow 0} e^{i\pi\alpha_2/(\alpha_2-\pi)} \left[ 1 + \frac{2\pi\eta}{(\pi-\alpha_2)(e^{i\theta}-\eta)} + O(\eta^2) \right] = e^{i\pi\alpha_2/(\alpha_2-\pi)} + \frac{2\pi\eta}{(\pi-\alpha_2)} e^{i\pi\alpha_2/(\alpha_2-\pi)-i\theta} \quad (5)$$

由式(5)可知, $z$  平面上的影响半径边界映射到  $\xi$  平面后,可看作是以点  $e^{i\pi\alpha_2/(\alpha_2-\pi)}$  为圆心  $r_w$  为井径的等效注水井:

$$r_w = \frac{2\pi\eta}{\pi-\alpha_2} \quad (6)$$

由于  $\alpha_2 \in (-\pi/2, 0)$ , 因此  $r_w \in (4\eta/3, 2\eta)$ 。

## 1.3 圆拱隧洞围岩流场解析解

在  $\xi$  平面上,圆拱形隧洞排水问题可视作  $\xi_5$  处的等效注水井向位于实轴的直线定水头边界排水问题,该问题的流场解析解为<sup>[18]</sup>:

$$\Omega(\xi) = -\frac{Q}{2\pi} \ln \frac{\xi - \xi_5}{\xi - \bar{\xi}_5} \quad (7)$$

其中,  $\Omega$  为流场复势,其实部为流场势函数,虚部为流函数,以直线定水头边界为参考面/零势面;  $\bar{\xi}_5$  为  $\xi_5$  的共轭点,即  $\xi_5$  与  $\bar{\xi}_5$  关于实轴对称(图 2a);  $Q$  为单位长度隧洞的涌/排水量,在  $\xi$  平面上可通过直线边界井流公式计算流量:

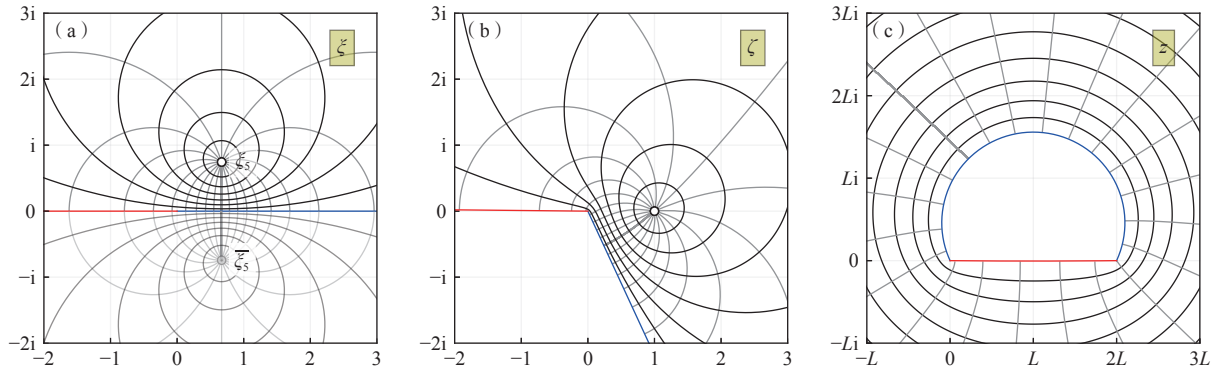
$$Q = \frac{2\pi K(H-h)}{\ln \frac{2a}{r_w}} \quad (8)$$

$$a = \sin \left( \frac{\pi\alpha_2}{\alpha_2-\pi} \right) \quad (9)$$

式中:  $K$ ——含水层渗透系数;

$H$ ——隧洞影响半径外的含水层水头,即含水层初始水头;



图 2  $\xi$  平面、 $\zeta$  平面及  $z$  平面上的流场解析结果Fig. 2 Analytical solution of flow field on  $\xi$ -plane,  $\zeta$ -plane and  $z$ -plane

$h$ ——洞壁水头;

$a$ —— $\xi$  平面上的等效注水井到实轴的距离。

由于  $\alpha_2 \in (-\pi/2, 0)$ , 因此  $a \in (0, \sqrt{3}/2)$ 。其中,  $r$  越接近  $L$ ,  $a$  越接近  $\sqrt{3}/2$ ; 在  $r \gg L$  时,  $a \rightarrow 0$ 。

将式(1)(3)(5)代入式(7), 并舍弃高阶小量  $O(\eta)$ , 可得到物理平面( $z$  平面)上的流场(图 2c):

$$\Omega(z) = -\frac{Q}{2\pi} \ln \frac{\left(\frac{z}{z-2L}\right)^{\pi/(\pi-\alpha_2)} - 1}{\left(\frac{z}{z-2L}\right)^{\pi/(\pi-\alpha_2)} - e^{i2\pi\alpha_2/(\pi-\alpha_2)}} \quad (10)$$

## 2 围岩流场及涌水速度解析结果

### 2.1 圆拱形隧洞围岩地下水流速分布

为分析圆拱形隧洞流速分布的一般性规律, 分别构造无量纲量:

$$z^* = x^* + iy^* = \frac{x}{L} + i\frac{y}{L} \quad (11)$$

$$r^* = \frac{r}{L} \quad (12)$$

$$\Omega^* = \Omega/Q \quad (13)$$

$$v^* = \left| \frac{d\Omega^*}{dz^*} \right| \quad (14)$$

式中:  $z^*$ ——隧洞半弦长为单位长度的无量纲复坐标;

$r^*$ ——以隧洞半弦长为单位长度的圆拱无量纲半径;

$\Omega^*$ ——单位涌/排水量产生的无量纲复势;

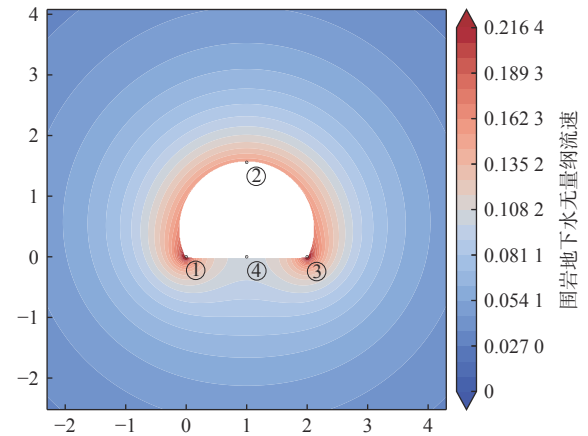
$v^*$ ——以隧洞半弦长为单位长度, 单位涌/排水量产生的围岩地下水无量纲流速。

将式(11)一(13)代入式(2)及式(10)可得:

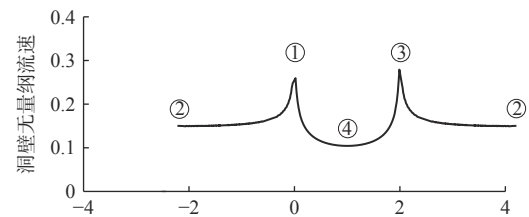
$$\alpha_2 = \arctan \frac{1}{\sqrt{r^{*2} - 1}} \quad (15)$$

$$\Omega^*(z^*) = -\frac{1}{2\pi} \ln \frac{\left(\frac{x^* + y^*i}{x^* - 2 + y^*i}\right)^{\pi/(\pi-\alpha_2)} - 1}{\left(\frac{x^* + y^*i}{x^* - 2 + y^*i}\right)^{\pi/(\pi-\alpha_2)} - e^{i2\pi\alpha_2/(\pi-\alpha_2)}} \quad (16)$$

根据式(14)及式(16), 任取一大于 1 的圆拱无量纲半径(如  $r^*=1.10$ ), 计算该半径下的围岩地下水流速及围岩流场/流速分布情况, 如图 3 所示。



(a) 地下水流速



(b) 洞壁涌水速度

图 3 围岩地下水流速及洞壁涌水速度分布情况

Fig. 3 Distributions of groundwater flux around the tunnel and at the tunnel circumference

从图 3(a)可以看出, 地下水从四周向隧洞汇集排泄, 越接近隧洞, 地下水流速越大。随着距隧洞距离

由远及近,地下水流速等值线也从外围的接近圆形,逐渐过渡为具有直线底边的圆拱形,最终在洞壁附近变为底边向隧洞底板凹陷的近圆拱形等值线。上述现象说明,前人研究中将复杂隧洞断面视作等效圆形断面的做法有一定合理性——在距离隧洞较远的地方,隧洞断面形状对于地下水流场的影响可以忽略。然而,需要注意的是,在接近洞壁的地方,隧洞断面形状仍然会对地下水流场有明显影响。

图 3(b)显示了洞壁各点涌水流速的具体数值。洞壁圆弧拱顶的流速约为 0.15,而底板的流速仅为 0.10,两部位流速相差约 50%。洞壁流速的最大值出现在底板左右两端的转折点(即洞底脚)附近,流速可达 0.30,约为拱顶流速的 2 倍。

## 2.2 圆拱形隧洞形状对围岩流场影响

为进一步讨论隧洞形状对于地下水流速分布的影响,改变圆拱半径( $r^*$ ),计算不同圆拱半径( $r^*=1.01, 1.20, 1.50, 2.00, 4.00$ )下的流速分布结果,并加以对比。计算结果如图 4 所示,其中图 4(a)(b)分别表示  $r^*=1.01, 4.00$  条件下的围岩地下水流速分布。对比

图 4(a)(b)可以发现,由于  $r^*=4.00$  洞壁形状接近圆形,围岩中的流速等值线也更接近圆形分布。而  $r^*=1.01$  洞壁形状接近半圆形,围岩中的流速等值线受隧洞形状影响也更接近半圆形。

图 4(c)显示了不同圆拱半径下的洞壁涌水流速分布情况。随着圆拱半径增加,洞壁涌水流速整体呈下降趋势。这是因为随着圆拱半径增加,洞壁周长随之增加,因此洞壁各点的涌水流速会相应下降。值得注意的是,随着圆拱半径增加,洞壁各点流速的相对差距不断减小——当  $r^*=1.01$  时,洞底脚流速(点①③)约为底板中心点流速(点④)的 3 倍;当  $r^*=4.00$  时,洞底脚流速仅为底板中心点流速的 1.4 倍。出现上述现象的原因是:随着圆拱半径  $r^*$  从 1.01 增加到 4.00,隧洞形状从一开始的接近半圆形逐渐向接近圆形变化,洞壁在洞底脚附近的转折也越来越不明显,从而导致洞底脚与其他部分的流速相对差距逐渐减小。可以预见,当  $r^*$  继续增大,洞壁的形状会越来越接近正圆,此时在圆形洞壁上将不会有洞底脚的转折段,洞壁各点的涌水流速也会趋于一致。

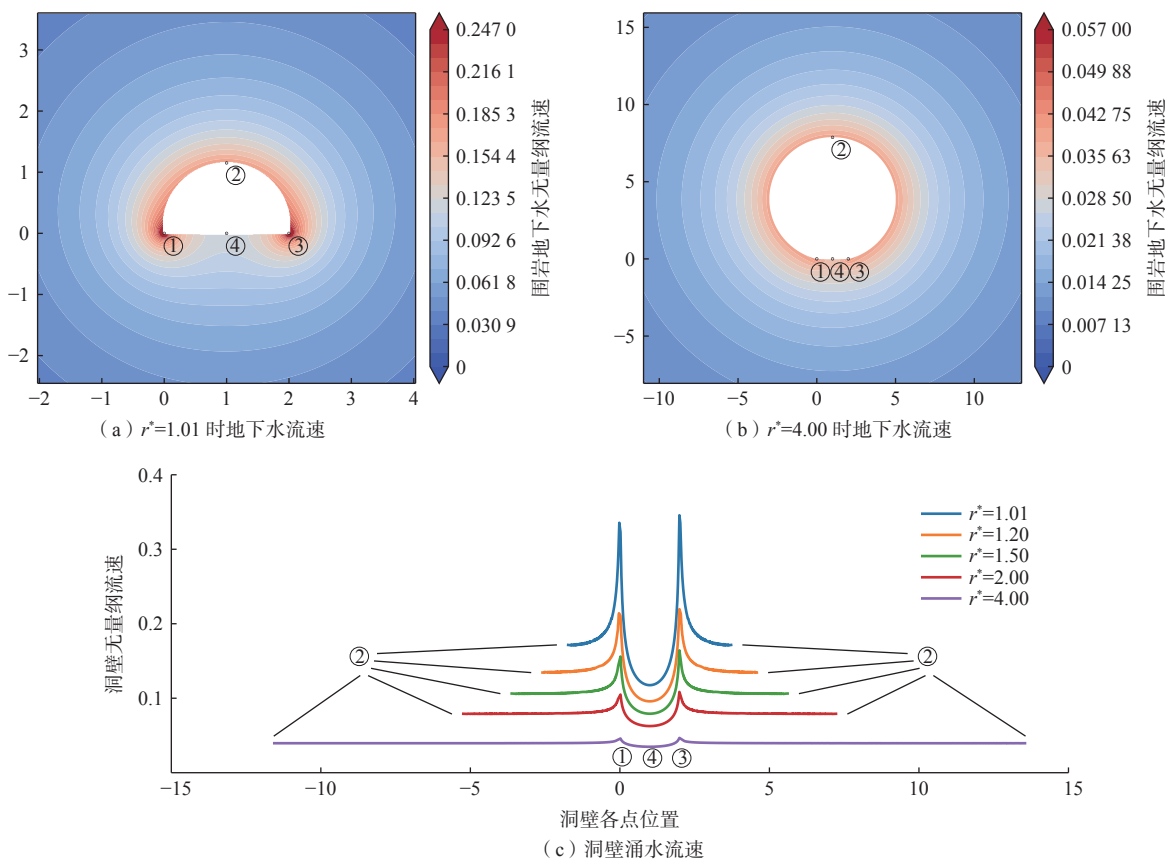


图 4 不同圆拱半径下的围岩地下水流速分布及洞壁涌水流速分布情况

Fig. 4 Distributions of groundwater flux around the tunnel and at the tunnel circumference under different arch radius

注: 横坐标为以点①为原点, 以隧洞半弦长为单位长度。

### 3 讨论

#### 3.1 计算结果误差及适用条件分析

由于实际工程的边界条件较为复杂,在隧洞拱径较大或洞壁排水措施受限时,不一定能满足本文的概化条件3,即洞壁水头无法视作处处相等。此时,应取一等效洞壁水头( $h_0$ )代入式(8),以计算得到准确的隧洞涌水量( $Q_0$ )。该等效洞壁水头的取值难以准确求得,但根据式(8)易知该等效洞壁水头小于洞壁最大水头( $h_{\max}$ ),且大于洞壁最小水头( $h_{\min}$ ),即集中排水沟处水头。若取洞壁任意一点处水头(如集中排水沟处水头  $h_{\min}$ )代入式(8)计算出相应隧洞排水量( $Q$ ),则引入的相对误差( $E_1$ )为:

$$E_1 = \frac{Q - Q_0}{Q_0} = \frac{2\pi K(H - h_{\min}) - 2\pi K(H - h_0)}{2\pi K(H - h_0)} = \frac{h_0 - h_{\min}}{H - h_0} \quad (17)$$

由式(17)可以看出,洞壁水头波动带来的相对误差的大小主要取决于洞壁-排水沟水头差( $h_0 - h_{\min}$ )与影响边界-洞壁水头差( $H - h_0$ )之间的比值大小。洞壁-排水沟水头差大小主要取决于隧洞拱径( $r$ ),在围岩渗透系数等条件不变且满足达西流的情况下,( $h_0 - h_{\min}$ )可近似看作与  $r$  成正比;影响边界(即含水层初始水头)与洞壁(接近大气压边界)之间的水头差与隧洞埋深( $D$ )接近正比关系。对于大部分深埋隧洞而言,影响边界-洞壁水头差通常远大于洞壁-排水沟水头差。因此在深埋隧洞条件下( $r \ll D$ ),洞壁水头波动带来的相对误差整体可控,其值可近似看作与  $r/D$  成正比。

在推导隧洞涌水量  $Q$  的解析解(式8)时,对映射域上的等效排水井井径( $r_w$ )做了一定程度的近似,省略了高阶小量  $O(\eta^2)$ 。这一近似是本文解析误差的另一来源,此相对误差( $E_2$ )为:

$$E_2 = \lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{Q - Q_0}{Q_0} = \lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{\ln \frac{2a}{r_w + O(\eta^2)}}{\ln \frac{2a}{r_w}} - 1 = \lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{O(\eta)}{\ln \frac{2a}{r_w}} \quad (18)$$

由式(18)可以看出,由于分子量级固定为  $O(\eta)$ ,相对误差的大小主要取决于分母的大小,尤其是在  $2a \rightarrow r_w$  时,相对误差会迅速增大。由于  $r_w \in (4\eta/3, 2\eta)$  即  $r_w \rightarrow 0$ , 因此  $2a \rightarrow r_w$  意味着  $a \rightarrow 0$ 。根据式(9),只有在时,  $r \gg L$  才能达到  $a \rightarrow 0$  的条件。因此本文的解析解仅适用于圆拱半径( $r$ )与隧洞半弦长( $L$ )的长度不存在数量级差距的情况。经试算,若  $r > 10L$ , 则  $a < 0.1$ , 随着  $r$  相对于  $L$  进一步增大,式(18)的分母会进一步趋向于零,无法保证相对误差足够小。幸运的是,在  $r \geq 10L$  条

件下,洞壁形状已经十分接近正圆形,完全可以采用圆形隧洞涌水量公式进行计算。在  $L < r < 10L$  条件下,  $a > 0.1 \gg L/R$ , 相对误差整体可控,可使用式(8)计算该圆拱形隧洞的涌水量。

#### 3.2 隧洞形状对流速及防渗措施的影响

关于洞壁地下水流速分布规律,前人数值模型研究中也有部分结果可供相互印证。李永新等<sup>[19]</sup>构建了某深埋隧洞( $D/L > 50$ )的数值模拟模型,发现隧洞围岩最大水力坡度集中出现在隧洞的洞底脚部分,且范围很小,洞底脚水力坡度可达其他部位水力坡度的2倍以上(洞底脚水力坡度为5.94,而其他部分水力坡度小于等于3.00)。需注意的是,李永新等<sup>[19]</sup>研究表明,虽然隧洞影响范围的边界被断层截断,但由于其边界断层距离隧洞足够远( $R/L > 1\,000$ ),因此边界形状对洞周流场影响较小,洞周一定距离处的等水头线呈现同心圆状分布,与本文的解析结果有一定可比性。因此本文的计算结果与其呈现类似的规律,即洞底脚水力坡度普遍大于洞壁其他部位;而洞壁水力坡度最小的部位出现在点④,即拱顶部位。

本文通过解析对比发现,洞底脚与洞壁其他部分的流速差异与隧洞形状密切相关,随着隧洞从半圆拱形逐渐变化为正圆形,洞壁不同部位处流速差异逐渐减小。因此,在设计圆拱形隧洞防渗排水措施时,需综合考虑洞壁形状因素,补强洞底脚的防渗措施。

### 4 结论

(1)随着距隧洞距离由远及近,地下水等水头线和流速等值线从接近圆形逐渐过渡为近圆拱形等值线,地下水流速受隧洞形状的影响逐渐增强。

(2)洞壁流速的最大值出现在洞底脚附近,洞壁流速最小值位于底板中心点;洞底脚流速可达底板中心点流速的3倍以上。

(3)随着圆拱半径相对于底边长度不断增加,洞壁形状越接近于圆形,洞壁各点涌水流速的大小也逐渐趋于一致。

在满足深埋( $r \ll D$ )圆拱形( $L < r < 10L$ )隧洞的前提下,本文所推求的涌水量公式误差整体可控,可为圆拱形隧洞涌水量预测及围岩流场刻画提供理论依据,从而为隧洞施工方案设计以及防渗/排水措施设计提供有力支撑。

#### 参考文献 (References):

- [1] 刘琛尧,晏启祥,孙润方,等.基于三维离散-连续耦合的岩溶隧道突水破坏模式研究[J].水文地质工程地

- 质, 2024, 51(2): 163 – 171. [LIU Chenyao, YAN Qixiang, SUN Runfang, et al. Study on water inrush failure mode of Karst tunnel based on three-dimensional discrete-continuous coupling[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(2): 163 – 171. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 全永威, 王军, 熊永润, 等. 爆破扰动下 TBM 隧洞时滞型岩爆特征及影响机制研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(1): 94 – 103. [QUAN Yongwei, WANG Jun, XIONG Yongrun, et al. A study of the characteristics and influence mechanism of time delayed rockburst in a TBM tunnel under the blasting disturbance[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(1): 94 – 103. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] GOODMAN R E, MOYE D G, SCHALKWYK A, et al. Ground water inflows during tunnel driving[J]. *Engineering Geology*, 1965, 2(1): 29 – 56.
- [ 4 ] LEI Shizhong. An analytical solution for steady flow into a tunnel[J]. *Groundwater*, 1999, 37(1): 23 – 26.
- [ 5 ] RAYMER J. Groundwater inflow into hard rock tunnels[J]. *Tunnels & Tunnelling International*, 2005, 33(9): 50 – 53.
- [ 6 ] KOLYMBAS D, WAGNER P. Groundwater ingress to tunnels—The exact analytical solution[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, 22(1): 23 – 27.
- [ 7 ] 应宏伟, 朱成伟, 龚晓南. 考虑注浆圈作用水下隧道渗流场解析解 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2016, 50(6): 1018 – 1023. [YING Hongwei, ZHU Chengwei, GONG Xiaonan. Analytic solution on seepage field of underwater tunnel considering grouting circle[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2016, 50(6): 1018 – 1023. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] PARK K H, OWATSIRIWONG A, LEE J G. Analytical solution for steady-state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi-infinite aquifer: A revisit[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(2): 206 – 209.
- [ 9 ] 杜朝伟, 王梦恕, 谭忠盛. 水下隧道渗流场解析解及其应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(增刊 2): 3567 – 3573. [DU Zhaowei, WANG Mengshu, TAN Zhongsheng. Analytic solution for seepage field of subsea tunnel and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(Sup 2): 3567 – 3573. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 朱成伟, 应宏伟, 龚晓南. 任意埋深水下隧道渗流场解析解 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(11): 1984 – 1991. [ZHU Chengwei, YING Hongwei, GONG Xiaonan. Analytical solutions for seepage fields of underwater tunnels with arbitrary burial depth[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(11): 1984 – 1991. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] YING Hongwei, ZHU Chengwei, SHEN Huawei, et al. Semi-analytical solution for groundwater ingress into lined tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 76: 43 – 47.
- [ 12 ] JIANG Chong, HAN Haixia, XIE Hansong, et al. Karst aquifer water inflow into tunnels: An analytical solution[J]. *Geofluids*, 2021, 2021: 6672878.
- [ 13 ] 李嘉诚, 王渭明, 吕显州, 等. 爆破振动下海底隧道涌水量预测研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(4): 127 – 136. [LI Jiacheng, WANG Weiming, LV Xianzhou, et al. Research on the prediction method of water gushing volume under the blasting vibration effect of a sub-sea tunnel[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(4): 127 – 136. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] FRENELUS W, PENG Hui, ZHANG Jingyu. Evaluation methods for groundwater inflows into rock tunnels: A state-of-the-art review[J]. *International Journal of Hydrology*, 2021, 5(4): 152 – 168.
- [ 15 ] 吴建, 周志芳, 李鸣威, 等. 隧洞涌水量预测计算方法研究进展 [J]. *工程地质学报*, 2019, 27(4): 890 – 902. [WU Jian, ZHOU Zhifang, LI Mingwei, et al. Advance on the methods for predicting water inflow into tunnels[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(4): 890 – 902. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] BUTSCHER C. Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 32: 158 – 167.
- [ 17 ] 周亚峰. 水工隧洞渗流—应力—损伤/开裂耦合理论及方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2016. [ZHOU Yafeng. Study on seepage-stress-damage/crack coupling theory and method for hydraulic tunnel[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] STRACK O D L. *Groundwater mechanics*[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989.
- [ 19 ] 李永新, 李向峰, 鲁琴. 小浪底北岸灌区某隧洞 F<sub>29</sub> 断层承压水涌水数值模拟分析 [J]. *资源环境与工程*, 2016, 30(3): 519 – 523. [LI Yongxin, LI Xiangfeng, LU Qin. Numerical simulation analysis on the north bank of the Xiaolangdi Dam irrigation area of F<sub>29</sub> fault confined water gushing[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2016, 30(3): 519 – 523. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 张若琳