

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2026.01.014

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:王睿,周雨松,邓祥辉,侯懿航,王平安,朱豪洋.地下水作用下隧道围岩松动圈分析[J].西安理工大学学报,2026,42(1):141-150.

Wang Rui,Zhou Yusong,Deng Xianghui,Hou Yihang,Wang Pingan,Zhu Haoyang. Analysis of tunnel surrounding rock loose circle in the action of groundwater[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2026,42(1):141-150.

## 地下水作用下隧道围岩松动圈分析

王睿<sup>1,2</sup>,周雨松<sup>1</sup>,邓祥辉<sup>1,2</sup>,侯懿航<sup>1</sup>,王平安<sup>3</sup>,朱豪洋<sup>3</sup>

(1.西安工业大学建筑工程学院,陕西西安710021;2.西安工业大学西安市军民两用土木工程测试技术与毁损分析重点实验室,陕西西安710021;3.中铁二十局集团有限公司,陕西西安710016)

**摘要:**隧道穿越富水地层时由于地下水作用围岩强度降低、稳定性减弱。基于Drucker-Prager强度准则,考虑地下水的渗流应力和岩石浸水软化效应,在平面应变条件下分析了隧道开挖后围岩弹性区、塑性软化区和塑性残余区的应力,得到了考虑渗流应力和浸水软化效应的隧道围岩松动圈半径理论计算公式,并在工程实例中采用理论计算和数值模拟相结合的方法揭示了渗流应力、浸水软化和支护反力对围岩松动圈半径的影响规律。结果表明:①随着渗流应力的增加,围岩松动圈逐渐增大;②浸水软化效应会使围岩力学特性劣化,使松动圈的半径增大,围岩稳定性降低;③提高支护反力可增强对围岩变形的约束能力,使围岩松动圈半径减小。研究结果可为富水隧道围岩稳定性分析提供理论依据。

**关键词:**隧道围岩松动圈;渗流应力;浸水软化;D-P强度准则;支护反力

中图分类号:TU457

文献标志码:A

文章编号:1006-4710(2026)01-0141-10

### Analysis of tunnel surrounding rock loose circle in the action of groundwater

Wang Rui<sup>1,2</sup>, Zhou Yusong<sup>1</sup>, Deng Xianghui<sup>1,2</sup>, Hou Yihang<sup>1</sup>, Wang Pingan<sup>3</sup>, Zhu Haoyang<sup>3</sup>

(1. School of Architecture and Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Civil Engineering Testing and Destruction Analysis on

Military-Civil Dual Use Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

3. China Railway 20th Bureau Group Corporation Limited, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** When the tunnel passes through the water-rich stratum, the strength of the surrounding rock decreases and the stability weakens due to the action of groundwater. According to the Drucker-Prager strength criterion, considering the seepage stress of groundwater and the softening effect of rock immersion, the stress of elastic zone, plastic softening zone and plastic residual zone of surrounding rock after tunnel excavation is analyzed under the plane strain condition. The theoretical calculation formula for the radius of tunnel surrounding rock loose circle considering seepage stress and softening effect of immersion is obtained, with the influence of seepage stress, softening effect of immersion and support reaction on the radius of tunnel surrounding rock loose circle revealed by combining theoretical calculation with numerical simulation in an engineering example. The results show that: ① With the increase of seepage stress, the loose circle of sur-

收稿日期:2024-09-24;网络首发日期:2025-01-27

网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/61.1294.N.20250126.1731.004>

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划自主资助项目(2023-JC-YB-327);陕西省教育厅服务地方专项计划资助项目(22JC040)

第一作者:王睿,男,博士,副教授,研究方向为岩土与隧道工程。E-mail:wangrui@xatu.edu.cn

通信作者:周雨松,男,硕士生,研究方向为隧道工程。E-mail:764277207@qq.com

rounding rock gradually increases. ②The softening effect of water immersion will deteriorate the mechanical properties of surrounding rock, increase the radius of loose circle and reduce the stability of surrounding rock. ③Increasing the support reaction force can enhance the constraint ability of surrounding rock deformation and reduce the radius of surrounding rock loose circle. The research results can provide a theoretical basis for the stability analysis of surrounding rock of water-rich tunnel.

**Key words:** tunnel surrounding rock loose circle; seepage stress; immersion softening; D-P strength criterion; support reaction force

隧道穿越富水地层时经常遭遇渗水、涌水等问题,地下水对岩体的影响主要可以分为物理作用、化学作用和力学作用三个方面<sup>[1]</sup>。其中物理作用主要体现在岩体的膨胀、溶解和润滑等方面,化学作用则涉及离子交换、溶解、水化、氧化还原等反应,力学作用则主要与渗流水压力、溶蚀-潜蚀作用相关。这些作用导致隧道围岩强度降低、稳定性减弱<sup>[2]</sup>,因此研究受地下水作用下的隧道围岩应力状态和松动圈的变化规律,对提高围岩稳定性,确保施工安全有重要意义。

地下水在围岩中流动时会产生渗流现象,这种渗透体积力会改变围岩内部原有的应力状态。潘继良等<sup>[3]</sup>基于 4 种岩石强度准则,建立了受孔隙水压力作用的深埋圆形巷道理想弹塑性模型,推导了渗流作用下围岩应力场、位移场和塑性区半径的统一解析解。Gu 等<sup>[4]</sup>将围岩支护反力和渗流力转化为圆形隧道轴对称径向体积力并作用于应力场,得到围岩塑性区半径的表达式隧道。Luo 等<sup>[5]</sup>考虑平面外应力和渗透力,基于 M-C 和广义 H-B 强度准则,改进了求解应力、位移和塑性区半径的应力增量法,得到了考虑渗流应力的围岩应力解析解。张治国等<sup>[6]</sup>基于 M-C 强度准则,提出考虑渗流应力下的围岩和衬砌结构相互作用的非线性弹塑性解。刘宇奋等<sup>[7]</sup>基于 D-P 屈服准则,推导得出围岩塑性区半径与孔隙水压力之间的关系式,并确定了围岩失稳的判别准则。Zhao 等<sup>[8]</sup>将渗透系数纳入渗流方程,提出水力-力学耦合半解析新方法。

同时,围岩经地下水长期浸泡后,力学特性会出现退化。Qiao 等<sup>[9]</sup>通过对页岩进行浸泡实验,测试了页岩在酸性、中性和碱性溶液浸泡 15 天至 12 个月后的力学性能,发现浸泡 12 个月页岩的强度和弹性模量在碱性溶液中下降更快速。Han 等<sup>[10]</sup>对砂岩长期浸泡力学特性及损伤机理进行了研究,发现砂岩长期浸泡后抗压强度和声发射计数大幅下降,塑性特征逐渐增强。Zhang 等<sup>[11]</sup>同样以砂岩为研究对象,发现在相同荷载下,岩样的损伤程度随着浸水时间的增加而增大。黄宏伟等<sup>[12]</sup>测定在天然

状态、泡水 8 h、24 h、48 h 和 228 h 条件下泥岩的微观结构,发现浸水时间越长,泥岩中的矿物颗粒间的连接被破坏得越严重,力学性能的降低越明显。周翠英等<sup>[13]</sup>通过对各种软岩在饱水条件下的力学性能进行分析,发现软岩在饱和条件下强度随浸水时间延长而降低。可见,地下水对隧道围岩力学强度的影响不仅取决于水溶液的组成和性质,还受到浸水时长的影响。

现有研究主要是建立弹塑性模型或采用数值模拟分析渗流应力对围岩应力场和塑性区分布的作用,且这些研究大多忽略了地下水浸泡引起的岩体力学性能的动态变化规律,缺乏系统性和深入性地开展对渗流水压力与浸水软化效应耦合作用下围岩稳定性的研究。因此,本文基于弹塑性理论,建立考虑地下水渗流应力与浸水软化效应耦合作用下围岩应力分析模型,得到围岩松动圈半径的理论计算公式,并结合算例,分析浸水时间和渗流水压力对松动圈半径的影响规律,研究成果对富水隧道支护结构设计具有一定的工程指导价值。

## 1 围岩渗流场分析

假设隧道无限长,围岩为各向同性的均质岩体,岩体内各向渗透系数相同;隧道内径为  $r_0$ ,内壁处水头为 0,距离隧道  $R_0$  范围外,外水水头与原始渗流场外水水头  $h_0$  相同。渗流水为单相不可压缩的牛顿液体,渗流方向以径向为主。忽略计算区域内水及岩体自重的影响,深埋隧道围岩渗流场可简化为受到渗流水压力作用内半径为  $r_0$ ,外半径为  $R_0$  的厚壁圆筒问题,计算模型见图 1。

渗流连续微分方程见式(1)<sup>[14]</sup>,边界条件见式(2)和式(3):

$$\frac{\partial^2 H(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H(r)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

$$H(r)_{r=r_0} = 0 \quad (2)$$

$$H(r)_{r \rightarrow R_0} = h_0 \quad (3)$$

式中: $r$  为围岩任意一点到圆心的距离; $H(r)$  为半径为  $r$  处的水头。

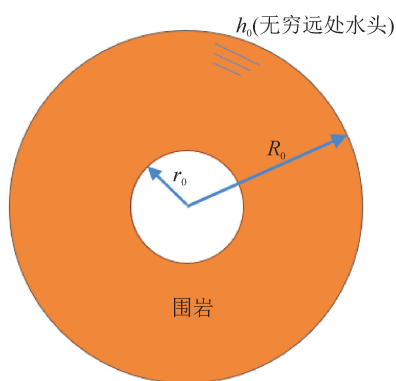


图1 渗流计算模型图

Fig.1 Flow calculation model diagram

将边界条件式(2)和式(3)代入式(1),可求得渗流微分方程解答为:

$$H(r) = h_0 \frac{\ln(r/r_0)}{\ln(R_0/r_0)} \quad (4)$$

## 2 围岩浸水软化特性分析

根据强度的不同,围岩一般分为坚硬围岩和软弱围岩(简称“软岩”)。隧道开挖后,地下水在重力作用下沿着渗流路径向隧道开挖区域渗流,此时软岩在地下水的浸泡下会出现软化,导致强度发生退化。这个过程除了受岩体的岩性、矿物组成、孔隙结构、地下水的成分等因素影响,还与岩石的浸水时间有关。不同种类的岩石在地下水的作用下随时间变化的软化规律明显不同,表1总结了部分典型岩石黏聚力  $C$  和内摩擦角  $\varphi$  与饱水时间  $t$  的函数关系。

表1 岩石饱水强度软化规律  
Tab.1 Softening law of rock saturated strength

文献来源	岩石种类	强度指标	时间
陈孟婷 <sup>[15]</sup>	页岩	$C = 18.69e^{-0.024t}$ $\varphi = 22.014e^{-0.039t}$	d
胡云鹏等 <sup>[16]</sup>	泥岩	$C = -0.00002t^2 - 0.0007t + 0.5237$ $\varphi = -0.0006t^2 + 0.011t + 35.165$	h
周翠英等 <sup>[17]</sup>	炭质泥岩	$C = 57.666e^{0.008/t}$ $\varphi = 18.015e^{0.0103/t}$	h
宋勇军等 <sup>[18]</sup>	炭质板岩	$C = 0.003t^2 - 0.3546t + 36.391$ $\varphi = 0.0007t^2 - 0.0285t + 0.5608$	d
蔡国军等 <sup>[19]</sup>	千枚岩	$C = 0.0014t^2 - 0.0828t + 1.8078$ $\varphi = 0.0229t^2 - 0.9777t + 48.871$	d
赵建军等 <sup>[20]</sup>	千枚岩	$C = -0.0015t^2 - 0.2618t + 23.124$ $\varphi = 0.0027t^2 - 0.3927t + 44.217$	d
范浩 <sup>[21]</sup>	煤岩	$C = 3.938 + 1.727 \times 0.766^t$ $\varphi = 28.058 + 7.047 \times 0.804^t$	d

由表1可见,软岩在地下水中浸泡一定时间后软化速度逐渐变缓,这可近似看作围岩强度变化达到饱和值,此时刻状态被称为软岩工程特性变异达到稳定的临界时刻<sup>[21]</sup>,其宏观表现为软岩抗压、抗拉与抗剪强度退化已趋于稳定。因此,在进行围岩浸水软化特性分析时,应重点考虑岩体的临界时刻。

## 3 力学分析模型

理想弹塑性应力状态下隧道开挖后围岩应力重分布后形成塑性区和弹性区,见图2。靠近隧道开挖边界的塑性区内圈,围岩切向应力小于初始应力,称为塑性残余区,即松动圈。靠近弹性区的塑性区

外圈,围岩切向应力高于初始应力,称为塑性软化区<sup>[22]</sup>。

由于岩体是一种结构十分复杂的材料,难以用统一的本构方程来描述其力学行为,为了能较为准确的进行弹塑性理论分析,给出如下几点假设及应用条件:

- 1) 岩体是连续、均质、各向同性的弹塑性材料;
- 2) 假设隧道无限长,可作平面应变问题处理;
- 3) 围岩屈服前为微小变形;
- 4) 忽略围岩自重对屈服的影响;
- 5) 隧道为深埋圆形承受各向等压。

在力学模型中, $\sigma_\theta$ 为围岩的切向应力, $\sigma_r$ 为围岩

的径向应力,  $\sigma_z$  为隧道围岩的轴向应力,  $P_0$  为初始地应力,  $P_i$  为支护抗力,  $R_p$  为塑性软化区半径,  $R$  为塑性残余区半径(松动圈半径), 选取与原始渗流场外水水头  $h_0$  相同的半径  $R_0$  处为计算区域, 计算区域外保持原始地应力场状态, 初始地应力为  $P_0$ 。

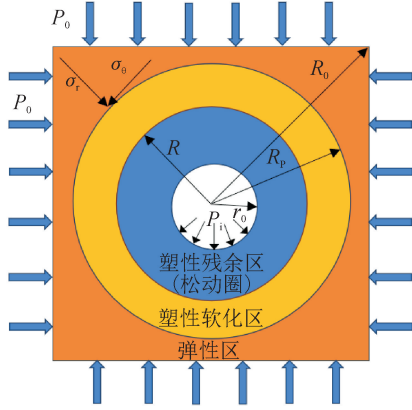


图2 围岩力学模型

Fig. 2 Surrounding rock mechanics model

#### 4 地下水作用下围岩弹塑性分析

假定隧道开挖后处于塑性区范围内围岩符合 Drucker-Prager 强度准则(简称 D-P 准则):

$$f(I_1, \sqrt{J_2}) = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0 \quad (5)$$

式中:  $I_1$  为第一应力不变量, 其表达式为:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (6)$$

$J_2$  为第二应力偏量不变量, 其表达式为:

$$J_2 = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2] / 6 \quad (7)$$

$\alpha, k$  为 Drucker-Prager 准则系数, 与岩石的黏聚力  $C$ 、内摩擦角  $\varphi$  有关。

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  分别为最大主应力、中间主应力、最小主应力。D-P 准则中应力以压为正, 拉为负。在平面应变条件下, 假定隧道围岩侧压力系数为 1, 围岩的径向应力  $\sigma_r$  为最大主应力  $\sigma_1$ , 切向应力  $\sigma_\theta$  为最小主应力  $\sigma_3$ , 由于径向应力、轴向应力、切向应力相互正交, 则可认为轴向应力  $\sigma_z$  等于中间主应力  $\sigma_2$ 。岩体塑性变形时, 中间主应力可以近似取径向应力与切向应力的平均值, 因此在塑性状态下应力满足以下关系<sup>[23]</sup>:

$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (8)$$

将隧道施工过程简化成为平面应变问题, 则  $\alpha, k$  可采用平面应变条件下的非关联流动法则确定, 即:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2\varphi}} \\ k = \frac{\sqrt{3}c\cos\varphi}{\sqrt{3 + \sin^2\varphi}} \end{cases} \quad (9)$$

考虑到岩石浸水软化的特性, 围岩的物理力学指标会随着浸水时间发生变化, 假设黏聚力  $C$ 、内摩擦角  $\varphi$  随时间变化的规律为  $C(t), \varphi(t)$ , 带入式(9)可得:

$$\begin{cases} \alpha(t) = \frac{\sin\varphi(t)}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2\varphi(t)}} \\ k(t) = \frac{\sqrt{3}c(t)\cos\varphi(t)}{\sqrt{3 + \sin^2\varphi(t)}} \end{cases} \quad (10)$$

#### 4.1 基本方程

在轴对称条件下, 不考虑体积力时, 岩体中单元体应满足的平衡微分方程为:

$$\frac{\partial\sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (11)$$

在平面应变条件下, 渗透水压力为体积力, 其表达式为<sup>[24]</sup>:

$$f_r = \frac{dP_w(r)}{dr} = \xi\gamma_w \frac{dH(r)}{dr} = \xi\gamma_w \frac{h_0}{\ln(R_0/r_0)} \frac{1}{r} \quad (12)$$

式中:  $f_r$  为渗透体积力;  $P_w(r)$  为半径为  $r$  处的孔隙水压力;  $\gamma_w$  为水的容重;  $\xi$  为岩石等效孔隙水压力系数, 由于岩石的孔隙特性不同于松散体介质, 根据太沙基的有效孔隙应力原理修正, 故此引入该系数。

由于渗透水压力中浮力部分占的比重较小, 暂不考虑渗透水压力中的浮力部分, 此时, 考虑渗透体积力的平衡微分方程为:

$$\frac{\partial\sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + f_r = 0 \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)可得

$$\frac{\partial\sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \xi\gamma_w \frac{h_0}{\ln(R_0/r_0)} \frac{1}{r} = 0 \quad (14)$$

几何方程为:

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr}; \epsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (15)$$

式中:  $\epsilon_r$  为隧道径向应变,  $\epsilon_\theta$  为隧道切向应变;  $u$  为径向位移。

本构方程(平面应变)为:

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{1-\mu^2}{E} \left( \sigma_r - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_\theta \right) \\ \epsilon_\theta = \frac{1-\mu^2}{E} \left( \sigma_\theta - \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_r \right) \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\mu$  为 Poisson 比;  $E$  为弹性模量。

#### 4.2 弹性区应力分析

围岩弹性区不受渗流场作用时, 其应力解为著

名的 Lamé 解答。在渗流场的作用下,考虑弹性岩体中的有效应力原理,即在有效弹性解的基础上考虑孔隙水压力作用下,结合应力边界条件:

$$\begin{cases} \sigma_r | (r = R_p) = \sigma_R \\ \sigma_r | (r \rightarrow R_0) = P_0 + \xi P_w \end{cases} \quad (17)$$

可以求得弹性区的应力状态:

$$\begin{cases} \sigma_r^e = P_0 \left(1 - \frac{R_p^2}{r^2}\right) + \sigma_R \frac{R_p^2}{r^2} + \xi P_w \\ \sigma_\theta^e = P_0 \left(1 + \frac{R_p^2}{r^2}\right) - \sigma_R \frac{R_p^2}{r^2} + \xi P_w \end{cases} \quad (18)$$

且在弹性区始终满足关系式:

$$\sigma_\theta^e + \sigma_r^e = 2(P_0 + \xi P_w) \quad (19)$$

式中: $\sigma_r^e$ 和 $\sigma_\theta^e$ 分别为弹性区的径向应力和切向应力; $\sigma_R$ 为弹塑性界面处径向应力。

### 4.3 塑性区应力分析

将式(8)和式(10)带入屈服强度准则式(5)可得:

$$\sigma_\theta = \frac{2k(t)}{1-3\alpha(t)} + \frac{1+3\alpha(t)}{1-3\alpha(t)}\sigma_r \quad (20)$$

将式(20)代入式(14),得考虑岩体渗流应力和浸水软化效应的平衡微分方程:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{6\alpha(t)}{1-3\alpha(t)} \left( \sigma_r + \frac{k(t)}{3\alpha(t)} + \frac{1-3\alpha(t)}{6\alpha(t)} \frac{\gamma_w \xi h_0}{\ln(R_0/r_0)} \right) \frac{1}{r} = 0 \quad (21)$$

为了方便计算,记:

$$A = \frac{k(t)}{3\alpha(t)} - \frac{1-3\alpha(t)}{6\alpha(t)} \frac{\gamma_w \xi h_0}{\ln(R_0/r_0)} \quad (22)$$

则式(21)可以简化为:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{6\alpha(t)}{1-3\alpha(t)} \frac{(\sigma_r + A)}{r} = 0 \quad (23)$$

式(23)两边同时积分可得:

$$\sigma_r = C_1 r^{\frac{6\alpha(t)}{1-3\alpha(t)}} - A \quad (24)$$

式中: $C_1$ 为积分常数。由边界条件 $r=r_0$ 时 $\sigma_r = P_i$ ,可以求得:

$$R = r_0 \left[ \frac{\left( P_0 + \frac{k(t)}{3\alpha(t)} - \frac{1+3\alpha(t)}{6\alpha(t)} \frac{\gamma_w \xi h_0}{\ln(R_0/r_0)} \right) (1-3\alpha(t))}{\left( P_i + \frac{k(t)}{3\alpha(t)} - \frac{1-3\alpha(t)}{6\alpha(t)} \frac{\gamma_w \xi h_0}{\ln(R_0/r_0)} \right) (1+3\alpha(t))} \right]^{\frac{1-3\alpha(t)}{6\alpha(t)}} \quad (30)$$

当不考虑渗流作用影响时,松动圈半径计算公式为:

$$R = r_0 \left[ \frac{\left( P_0 + \frac{k(t)}{3\alpha(t)} \right) (1-3\alpha(t))}{\left( P_i + \frac{k(t)}{3\alpha(t)} \right) (1+3\alpha(t))} \right]^{\frac{1-3\alpha(t)}{6\alpha(t)}} \quad (31)$$

$$C_1 = (P_i + A) r_0^{-\frac{6\alpha(t)}{1-3\alpha(t)}} \quad (25)$$

式中: $P_i$ 为隧道表面的支护抗力。

将式(25)代入到式(24),可求得:

$$\sigma_r^p = (P_i + A) \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\frac{6\alpha(t)}{1-3\alpha(t)}} - A \quad (26)$$

将式(26)代入到式(20),可求得:

$$\sigma_\theta^p = \frac{2k(t)}{1-3\alpha(t)} - \frac{1+3\alpha(t)}{1-3\alpha(t)} \left( A - (P_i + A) \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\frac{6\alpha(t)}{1-3\alpha(t)}} \right) \quad (27)$$

式(26)和式(27)分别为隧道围岩塑性区径向应力和切向应力表达式。

### 4.4 塑性软化区半径和松动圈半径计算

在弹性区和塑性软化区交界面( $r=R_p$ )上, $\sigma_r$ 和 $\sigma_\theta$ 同时满足弹性区和塑性区应力表达式,即 $\sigma_\theta^e = \sigma_\theta^p$ , $\sigma_r^e = \sigma_r^p$ ,将式(26)~(27)代入式(19),可计算得到塑性软化区半径:

$$\frac{k(t)}{1-3\alpha(t)} - \frac{2}{1-3\alpha(t)} \left( A - (P_i + A) \left( \frac{R_p}{r_0} \right)^{\frac{6\alpha(t)}{1-3\alpha(t)}} \right) = P_0 + \xi \gamma_w h_0 \frac{\ln(R_p/r_0)}{\ln(R_0/r_0)} \quad (28)$$

式(28)为超越方程,通过进行迭代求解可得到塑性软化区半径的表达式。

根据松动圈的定义可知:塑性区内切向应力小于或等于初始应力的区域称作松动区<sup>[25]</sup>,则松动圈的半径可利用在松动区边界上,围岩的切向应力等于初始地应力进行求解,故由式(27)可得:

$$\sigma_\theta^p = \frac{2k(t)}{1-3\alpha(t)} - \frac{1+3\alpha(t)}{1-3\alpha(t)} \left( A - (P_i + A) \left( \frac{r}{r_0} \right)^{\frac{6\alpha(t)}{1-3\alpha(t)}} \right) = P_0 \quad (29)$$

对式(29)求解并代入式(22)可得松动圈半径 $R$ :

由式(30)可知,影响围岩松动圈半径的主要因素有:初始地应力 $P_0$ 、黏聚力 $C$ 、内摩擦角 $\varphi$ 、渗透水压力 $h_0$ 、隧道开挖半径 $r_0$ 、支护反力 $P_i$ 。

## 5 算例分析

### 5.1 计算参数

以某隧道工程为例,分析在施工过程中受到地下水侵蚀后渗透水压力  $h_0$ 、支护反力  $P_i$ 、浸水软化等因素对围岩松动圈半径的影响。

该隧道岩性大多为强风化中风化千枚岩,围岩以 V 级为主,强度较低、节理发育、遇水软化、稳定性较差。根据工程资料知隧道开挖半径  $r_0$  为 6 m,初始地应力  $P_0$  为 7.6 MPa,围岩压力为 500 kPa,渗流应力计算区域半径  $R_0$  取 30 倍隧道开挖半径,岩体有效孔隙水压力系数  $\xi=1$ 。

在隧道内取千枚岩岩样,制作成标准试件后在地下水中浸泡,见图 3,并分别在 1 d、7 d、14 d、21 d 和 28 d 时采用 WDT-1500 微机控制三轴仪试验机进行围压 4 MPa、8 MPa、12 MPa、16 MPa、20 MPa 的岩石常规三轴压缩试验,见图 4,得到相应的力学参数,见表 2。

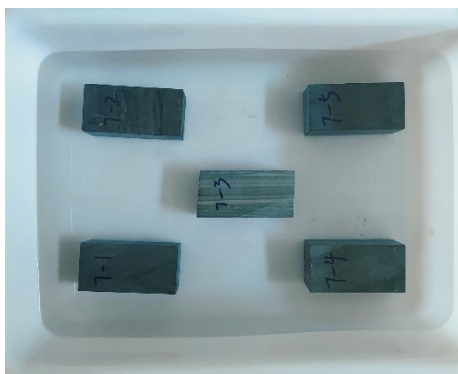


图 3 岩石试样浸泡图

Fig. 3 Immersion diagram of rock sample



图 4 岩石三轴压缩试验图

Fig. 4 Triaxial compression test diagram of rock

表 2 不同浸水时间下的千枚岩力学参数表  
Tab. 2 Table of mechanical parameters for phyllite at different water immersion times

浸水时间/d	黏聚力 $C$ /kPa	内摩擦角 $\varphi$ ( $^\circ$ )
0	586	47.87
1	553	46.52
7	443	42.36
14	362	39.52
21	308	36.73
28	275	35.48

由表 2 可见,千枚岩强度随着浸水时间的增加显著降低,且强度退化呈现阶段性特征。在浸泡初期(7 d 内),强度快速下降,随着浸泡时间进一步增加,强度衰减趋于平缓,30 d 时岩体强度基本达到稳定的临界时刻时,而在 30 d 后随着浸水时间的增加岩体的力学特性变化缓慢,可以忽略不计。对表 2 中的数据进行拟合得到黏聚力  $C$  和内摩擦角  $\varphi$  随浸水时间的拟合公式:

$$\begin{cases} C(t) = 0.3502t^2 - 20.494t + 577.83 \\ \varphi(t) = 0.012t^2 - 0.7637t + 47.512 \end{cases} \quad (32)$$

### 5.2 松动圈影响因素理论分析

#### 5.2.1 渗流应力和支护反力的影响

采用式(30),分别计算不同渗流应力( $h_0=0$  m, 50 m, 100 m, 150 m, 200 m),不同支护反力  $P_i$  (取围岩压力的 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%)下的隧道围岩松动圈半径,并将结果绘制曲线见图 5。

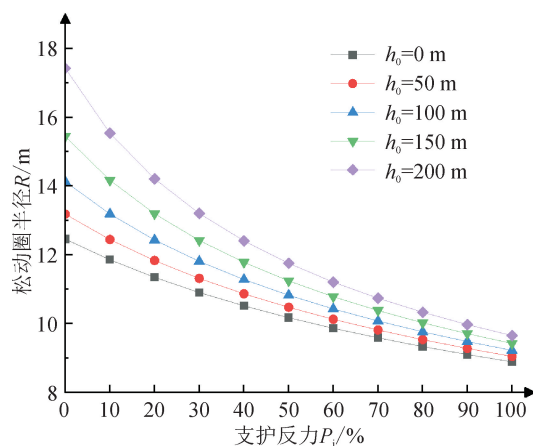


图 5 支护反力对围岩松动圈半径的影响图

Fig. 5 The influence diagram of support reaction force on the radius of surrounding rock loose circle

由图 5 可知如下结论。

1) 考虑地下水渗流应力的影响,隧道围岩松动圈半径会增大,且在支护反力较小时,随着渗流应力的增大,松动圈半径增大较快;而当支护反力较大时,松动圈受到的渗流应力的影响明显变小。

2) 渗流应力不变时,随着支护反力增大,对围岩变形的约束能力增加,隧道围岩松动圈半径近似线性减少;当支护反力一定时,渗流应力的增大会使隧道围岩松动圈的半径增大。

### 5.2.2 浸水软化的影响

根据前期研究,千枚岩隧道初期支护施作完毕围岩应力释放约为 70% 左右<sup>[26]</sup>,因此在支护反力取围岩压力的 70% 的基础上,计算不同渗流应力下、不同浸水时间时,隧道围岩松动圈半径,并绘制隧道围岩松动圈半径随浸水时间的变化曲线,见图 6。

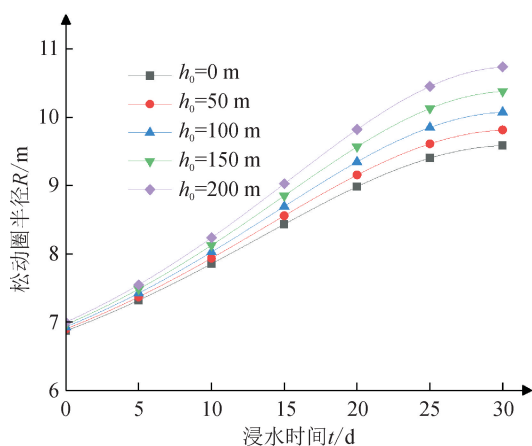


图 6 浸水时间对围岩松动圈半径的影响图

Fig. 6 The influence diagram of water immersion time on the radius of surrounding rock loose circle

由图 6 可知如下结论。

1) 由于千枚岩的浸水软化特性,隧道围岩松动圈半径随浸水时间的增长而逐渐增大,并在岩石强度达到临界点后趋于稳定。

2) 地下水对围岩浸水软化同时,考虑渗流水压力的影响,隧道围岩松动圈半径会进一步增大,且随着渗流水压力的增加,松动圈半径将加速增大。

## 5.3 松动圈影响因素数值模拟

### 5.3.1 模型建立

采用 COMSOL Multiphysics 软件,基于弹塑性力学的 Drucker-Prager 强度准则,建立隧道施工的二维平面应变模型,分析在地下水渗流应力和浸水软化效应作用下围岩松动圈变化规律。

模型尺寸取宽 180 m、高 180 m,见图 7,将整个计算区域划分成由 5 269 个四面体组成的单元,总节点数 2 134,围岩的物理力学参数见表 3。

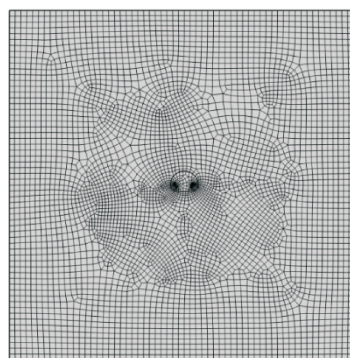


图 7 有限元二维分析模型

Fig. 7 Finite element two-dimensional analysis model

表 3 围岩的物理力学参数

Tab. 3 Physical and mechanical parameters for the rock mass

重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	孔隙 率/%	渗透系 数/( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )	弹性模 量/GPa	Possion 比
17.4	0.2	0.1	4.59	0.34

假定围岩各向同性、均质,下边界设置为固定约束,侧边施加水平方向位移约束,模型顶部为自由面,可以发生变形。隧道开挖前直接设置围岩的初始地应力为 7.6 MPa,侧压力系数为 1,开挖后在隧道的边界处以均布加载的方式施加支护反力。假设隧道在开挖前不产生渗流,模型侧边和底部设为不透水边界,在隧道开挖后在上边界设置不同水头值,结合围岩的内摩擦角、粘聚力等力学参数随浸水时间发生的软化,分析不同水头梯度下渗流力对松动圈半径的影响。

### 5.3.2 模拟结果分析

松动圈是隧道开挖时围岩发生应力重分布,导致局部围岩拉应力超过岩体抗拉强度而产生受拉破坏形成的。故以围岩拉应变达到岩体极限拉应变开始产生破坏作为判断松动圈的依据<sup>[27]</sup>。本隧道中中风化千枚岩围岩单轴抗压强度为 14.2 MPa,弹性模量为 4.59 GPa,岩体极限拉应变约为  $192\mu\epsilon$ 。

支护反力取围岩压力 70% 的情况下,对不同水头下隧道施工进行模拟,得到浸水 30 d 后的围岩拉应变等值线图,见图 8,绘制不同水头下隧道围岩松动圈横断面分布图,见图 9,并与理论计算值对比,见图 10。

模拟  $h_0 = 100$  m 时的隧道施工过程,得到黏聚力和内摩擦角在地水浸泡下随时间而下降的过程中不同阶段(0 d、5 d、10 d、15 d、20 d、25 d、30 d)隧道围岩松动圈,见图 11,并与理论计算结果对比,见图 12。

由图 9~12 可得,随着水头的增大,围岩松动圈半径持续增加,随着浸水时间增加松动圈半径先增大,30d 后趋于稳定;且弹塑性理论解与数值解不仅变化趋势一致,数值也较为接近,说明理论计算是可靠的。

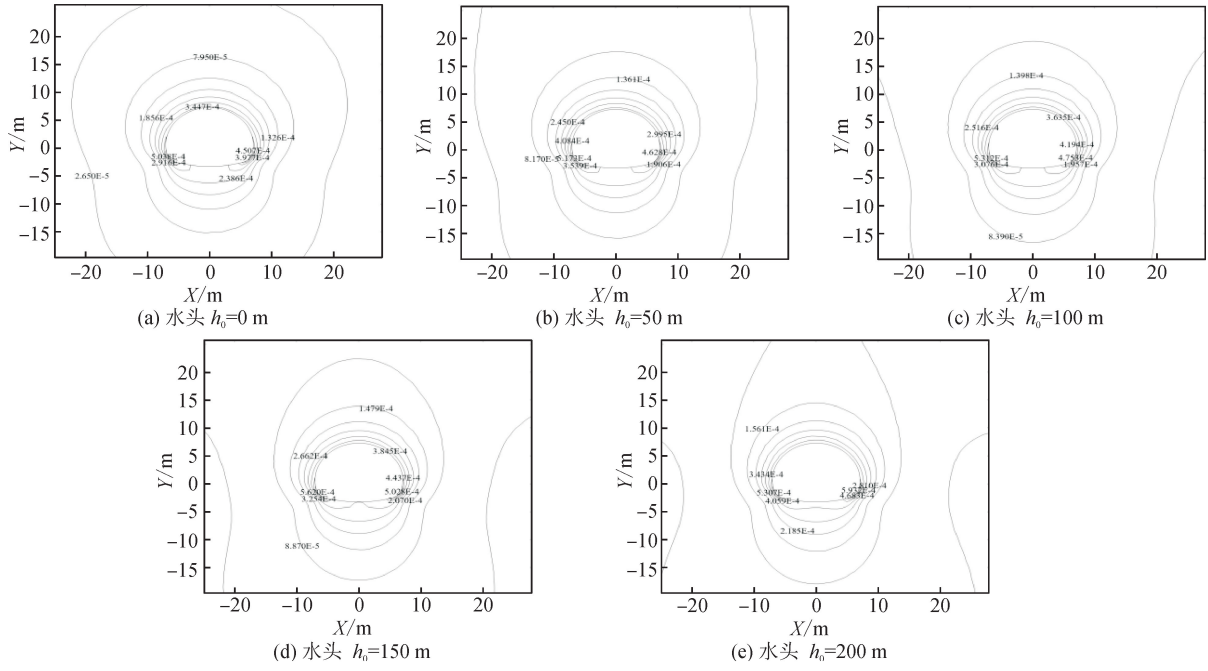


图 8 不同水头下围岩拉应变等值线

Fig. 8 The isoline of tensile strain of surrounding rock with different water heads

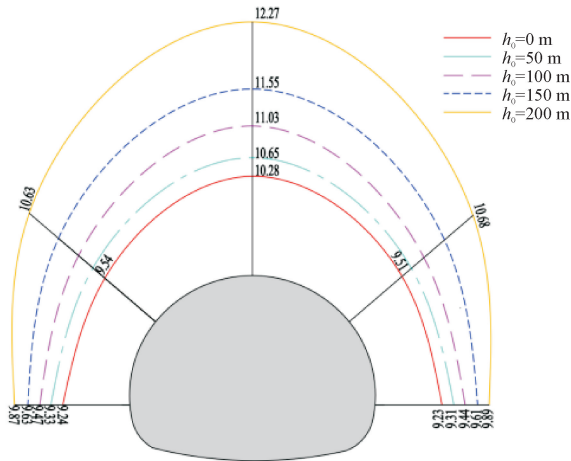


图 9 不同水头下围岩松动圈半径

Fig. 9 Radius of surrounding rock loose circle with different water heads

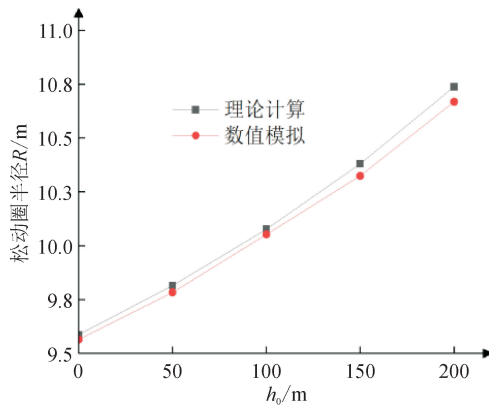


图 10 不同水头下围岩松动圈半径对比

Fig. 10 Comparison of radius of surrounding rock loose circle with different water heads

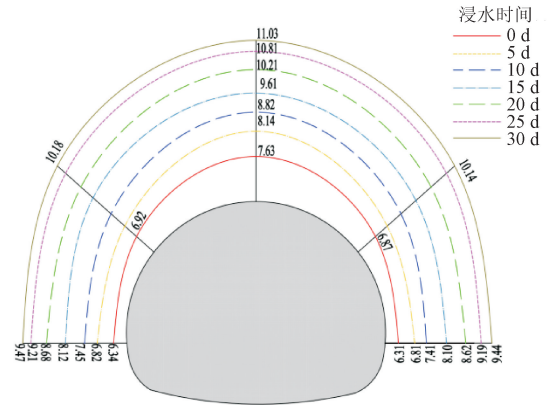


图 11 不同浸水时间下围岩松动圈半径

Fig. 11 Radius of surrounding rock loose circle at different water immersion times

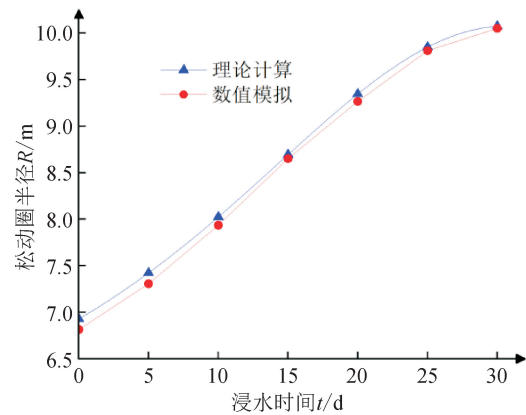


图 12 不同浸水时间下围岩松动圈半径对比

Fig. 12 Comparison of radius of surrounding rock loose circle at different water immersion times

## 6 结 论

本研究基于 Drucker-Prager 强度准则,建立了考虑地下水渗流应力和浸水软化效应的围岩弹塑性理论模型,推导了隧道围岩松动圈计算公式,并通过工程实例分析了渗透水压力、支护反力、浸水软化等因素对围岩松动圈半径的影响,得出如下结论。

1) 分析了地下水作用下隧道围岩渗流应力场和岩体浸水软化特性,并基于 Drucker-Prager 强度准则建立了考虑地下水渗流应力和浸水软化效应的围岩弹塑性理论模型,得到隧道围岩松动圈理论计算公式。

2) 地下水的渗流和软化作用均会使围岩松动圈半径增大,且随着渗流应力的增加松动圈半径持续增大,随着软化时间增加松动圈半径先增大后趋于稳定,而软化和渗流作用同时考虑时松动圈半径会进一步增大。因此富水隧道设计与施工中应综合考虑浸水软化、渗流应力和支护措施的相互作用,合理优化设计参数和施工方案,以控制围岩松动圈半径,确保围岩的长期稳定性和施工安全。

3) 支护反力增大,对围岩变形的约束能力增加,隧道围岩松动圈半径将减小。故提高支护结构刚度、优化支护结构施作时机可提高围岩稳定性。

### 参考文献:

- [1] 李昊禹,孟陆波,李天斌,等. 不同含水状态砂岩的单轴循环荷载微观损伤机制研究[J]. 中国测试,2023,49(10):163-171.  
Li Haoyu, Meng Lubo, Li Tianbin, et al. Study on microscopic damage mechanism of sandstone under uniaxial cyclic loading in different water-bearing states [J]. China Measurement & Test, 2023, 49(10): 163-171.
- [2] 薛山,杨东升,邓祥辉,等. 地表水入渗对浅埋黄土隧道稳定性影响分析[J]. 西安工业大学学报,2017,37(8):600-606.  
Xue Shan, Yang Dongsheng, Deng Xianghui, et al. Influence of surface water infiltration on stability of shallow buried loess tunnel [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2017, 37(8): 600-606.
- [3] 潘继良,郭奇峰,任奋华,等. 渗流作用下深埋岩石巷道不同强度准则对比分析[J]. 煤炭学报,2019,44(11):3369-3378.  
Pan Jiliang, Guo Qifeng, Ren Fenghua, et al. Comparative analysis of different strength criteria of deep buried rock roadway under seepage action [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(11): 3369-3378.
- [4] Gu Shuancheng, Li Xiaodong, Hu Xiaokai, et al. Elastoplastic analysis of anchored tunnel under seepage [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(3): 032039.
- [5] Luo Wei, Zou Jinfeng, An Wei. Solution for a circular tunnel in strain-softening rock with seepage forces [J]. Geomechanics And Engineering, 2020, 22(6): 553-564.
- [6] 张治国,程志翔,汪嘉程,等. 考虑渗流影响的深埋隧道围岩-衬砌相互作用研究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(增刊1):108-121.  
Zhang Zhiguo, Cheng Zhixiang, Wang Jiacheng, et al. Interaction between surrounding rock and lining of deep-buried tunnel considering influence of seepage [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S1): 108-121.
- [7] 刘宇奋,荣传新,王彬,等. 考虑中间主应力与渗流作用的巷道稳定理论解[J]. 科学技术与工程,2023,23(34):14525-14531.  
Liu Yufen, Rong Chuanxin, Wang Bin, et al. Theoretical solution of roadway stability considering intermediate principal stress and seepage [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(34): 14525-14531.
- [8] Zhao Yu, Wei Tao, Wang Chaolin, et al. A new close-form solution for elastoplastic seepage-induced stresses to circular tunnel with considering intermediate principal stress [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(9): 6545-6557.
- [9] Qiao L Y, Wang K X, Hu C G, et al. Experimental study on the mechanical properties of shale after long-term of immersion in fracturing fluids with different pH [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022: 5047-5061.
- [10] Han Penghua, Zhang Cun, Wang Xiaojie, et al. Study of mechanical characteristics and damage mechanism of sandstone under long-term immersion [J]. Engineering Geology, 2023, 315.
- [11] Zhang Guohua, Zhang Bowen, Zou Junpeng, et al. An Empirical study on water-induced shear weakening behaviors of rough-walled sandstone joints [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(5): 3475-3497.
- [12] 黄宏伟,车平. 泥岩遇水软化微观机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007,35(7):866-870.  
Huang Hongwei, Che Ping. Study on the microscopic mechanism of mudstone by water softening [J]. Journal of Tongji University (Natural Science). 2007, 35(7): 866-870.
- [13] 周翠英,朱凤贤,张磊. 软岩饱水试验与软化临界现象研究[J]. 岩土力学,2010,31(6):1709-1715.  
Zhou Cuiying, Zhu Fengxian, Zhang Lei. Research on saturation test and softening critical phenomena of soft rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1709-1715.
- [14] 高召宁,孟祥瑞,付志亮. 考虑渗流、应变软化和扩容的巷道围岩弹塑性分析[J]. 重庆大学学报,2014,37(1):96-101.

- Gao Zhaoning, Meng Xiangrui, Fu Zhiliang. Elastoplastic analysis on surrounding rock of roadways based on seepage, strain softening and dilatancy[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(1):96-101.
- [15] 陈孟婷. 水化作用下页岩力学软化特性研究[D]. 南充:西南石油大学, 2018.  
CHEN Mengting. Study on mechanical softening characteristics of shale under hydration[D]. Nanchong: Southwest Petroleum University, 2018.
- [16] 胡云鹏, 冯文凯, 杨少帅, 等. 三溪村红层水岩作用的时效性试验研究与应用[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(22):235-239.  
Hu Yunpeng, Feng Wenkai, Yang Shaoshuai, et al. Experimental research and application on the time effect of the red beds rock-water interaction in Sanxicun[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(22):235-239.
- [17] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶, 等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(1):33-38.  
ZHOU Cuiying, Deng Yimei, TAN Xiangshao, et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(1):33-38.
- [18] 宋勇军, 雷胜友, 毛正君, 等. 干燥和饱水状态下炭质板岩力学特性试验[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(10):48-52.  
Song Yongjun, Lei Shengyou, Mao Zhengjun, et al. Testing study on mechanical property of carbonaceous slate under dry and saturated states[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10):48-52.
- [19] 蔡国军, 程宇航, 仲闯, 等. 千枚岩饱水状态下软化效应试验分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8):3032-3038.  
Cai Guojun, Cheng Yuhang, Zhong Chuang, et al. Experimental on softening effect of phyllite in saturated water[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(8):3032-3038.
- [20] 赵建军, 解明礼, 李涛, 等. 饱水条件下千枚岩软化效应试验分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6):1449-1454.  
Zhao Jianjun, Xie Mingli, Li Tao, et al. Softening effect of phyllite with water saturation[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6):1449-1454.
- [21] 范浩. 富水煤层巷道围岩变形破坏特征及控制机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2021.
- FAN Hao, et al. Study on deformation and failure characteristics and control mechanism of surrounding rock in water-rich coal seam roadway[D]. Xuzhou: China Mining University, 2021.
- [22] 徐强, 刘勇, 宋玉香, 等. 基于松动圈理论深埋黄土隧道围岩压力计算方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(23):10054.  
Xu Qiang, Liu Yong, Song Yuxiang, et al. A method for calculating surrounding rock pressure of deep loess tunnel based on loose broken rock zone theory[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23):10054.
- [23] 王卫军, 董恩远, 袁超. 非等压圆形巷道围岩塑性区边界方程及应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1):105.  
Wang Weijun, Dong Enyuan, Yuan Chao. Boundary equation of plastic zone of circular roadway in non-axisymmetric stress and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1):105.
- [24] 王睢, 钟祖良, 刘新荣. 基于D-P屈服准则考虑渗流影响的深埋有压圆形隧洞弹塑性解[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(1):39-46.  
Wang Sui, Zhong Zuliang, Liu Xinrong, et al. D-P yield criterion based elastoplastic solution for a deep-buried and pressured circular tunnel considering seepage effect[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(1):39-46.
- [25] Wang Rui, Zhang Zhengyu, Deng Xianghui, et al. Calculation method of loose circle of tunnel surrounding rock considering strain softening effect[J]. International Journal of Geomechanics, 2024(10):9669, .
- [26] 王睿, 张煜, 黄晓东, 等. 基于松动圈理论的软岩大变形隧道锚杆支护优化研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(4):74-82.  
Wang Rui, Zhang Yu, Huang Xiaodong, et al. Optimization of bolt support for soft rock large deformation tunnel based on the theory of loose circle[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(4):74-82.
- [27] 王睿, 党发宁, 王靖媛, 等. 基于松动圈理论的隧道初期支护时机分析[J]. 人民长江, 2021, 52(7):141-147.  
WANG Rui, DANG Fanning, WANG Jingyuan, et al. Analysis on primary support timing of tunnel based on loose circle theory[J]. Yangtze River, 2021, 52(7):141-147.

(责任编辑 王绪迪)