

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.03.002

考虑衬砌作用下的软岩巷道弹塑性解

刘俊杰, 杨自友, 贺 杨

(安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 考虑衬砌作用下的软岩巷道, 基于统一强度理论准则, 结合围岩变形三分区模型和三阶段应变软化模型, 分析中间主应力、黏聚力、衬砌等因素的影响, 推导巷道围岩应力、塑性区大小、塑性区径向位移的解析解, 结合工程实例, 分析围岩变形各因素影响规律。结果表明: 中间主应力等各因素对巷道围岩塑性区均具有重要影响, 在一定范围内控制黏聚力大小、提高中间主应力和衬砌弹性模量均能够有效地控制围岩的变形和塑性区的发展。

关键词: 统一强度理论; 软岩巷道; 衬砌; 分区破坏

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2025)03-0008-08

引文格式: 刘俊杰, 杨自友, 贺 杨. 考虑衬砌作用下的软岩巷道弹塑性解 [J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(3): 8-15.

An Elastoplastic Solution of Soft Rock Roadway with Lining Effect Taken into Consideration

LIU Junjie, YANG Ziyu, HE Yang

(School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Considering the soft rock roadway under the lining effect, based on the unified strength theory criteria, combined with the three-zone model of surrounding rock deformation and the three-stage strain softening model, an analysis has been made of the influence of such factors as intermediate principal stress, cohesion, and lining effect, with analytical solutions for stress, plastic zone size, and radial displacement of roadway surrounding rock derived, followed by an analysis of the influence of various factors on surrounding rock deformation through engineering examples. The results indicate that various factors such as the intermediate principal stress have a significant impact on the plastic zone of the surrounding rock in the tunnel, controlling the magnitude of cohesion, increasing the intermediate principal stress, and improving the elastic modulus of the lining can effectively control the deformation of the surrounding rock and the development of the plastic zone within a certain range.

Keywords: unified strength theory; soft rock roadway; lining; partition destruction

随着巷道稳定性研究愈发深入, 软岩巷道的围岩弹塑性研究尤为重要。巷道的开挖会使软岩巷道周边的围岩产生应力重分布。在过去, 大多数巷道弹塑性分析都采用 Mohr-Coulomb (以下简称 MC) 屈服准

则或 Hoek-Brown (以下简称 H-B) 屈服准则。其中张常光等^[1]归纳出 8 种岩土常用强度准则的围岩应力位移新解, 并利用统一强度理论推导了有衬砌的圆形水压隧洞平面应变状态下的统一强度理论方程,

收稿日期: 2024-04-17

基金项目: 安徽省高校自然科学基金资助重点项目 (KJ2021A0610)

作者简介: 刘俊杰, 男, 安徽建筑大学硕士生, 主要研究方向为岩土工程和防护减灾, E-mail: 1695200550@qq.com

得出不同工程状况下初始屈服面和后继屈服面的表达式。付大喜等^[2]基于 H-B 强度准则推出了深埋圆形隧洞弹塑性区应力位移公式。姚琪能等^[3]针对不同性质的岩体,分析了在不同支护反力影响下塑性区半径的变化规律,通过用 H-B 屈服准则得到的塑性区半径解析公式,分析轴对称的圆形巷道塑性区大小。王明斌等^[4]基于 MC 准则,考虑衬砌-围岩边界处以及围岩弹塑性区交界处上的边界条件,得到当弹塑性交界处位于衬砌内,屈服条件中的第一主应力需分类讨论的解答。任青文等^[5]根据不同的工况、地应力条件,推导衬砌和围岩的屈服范围和应力计算公式,提出 MC 准则第一、二临界压力的概念,并给出屈服区和应力计算公式的适用范围。曾开华等^[6]基于统一强度理论准则,根据衬砌不同屈服状态和不同工况下不同的应力状态,正确选择第一主应力,推导出了考虑衬砌屈服的深埋水工隧洞应力解析解。鉴于此,本文在前人研究基础上,采用三阶段应变软化模型和统一强度理论,利用将巷道围岩划分成弹性区、塑性软化区、破裂区的三区破坏模型,得出了考虑衬砌作用下的软岩巷道围岩应力、塑性区大小、塑性区位移统一解,结合实例分析中间主应力参数、黏聚力、衬砌弹性模量等因素对软岩巷道塑性区大小、围岩应力、塑性区径向位移的影响规律。

1 理论分析模型

1.1 力学模型

巷道力学模型如图 1 所示。有衬砌支护的巷道围岩,在变形稳定后出现弹性区、塑性软化区、破裂区,为便于简化研究分析,进行如下假设:

- 1) 围岩为连续、均质、各向同性材料,巷道开挖断面为圆形,初始地应力为两向等压均布载荷;
- 2) 巷道埋深大于 20 倍隧道半径,长度无限大,可按照平面应变问题对待;
- 3) 原岩应力为 q , 衬砌支护力为 P_i , 围岩衬砌外半径为 R_i , 内半径为 R_a , 破裂区半径为 R_b , 塑性软化区半径为 R_s , R_s 远大于 R_i 。

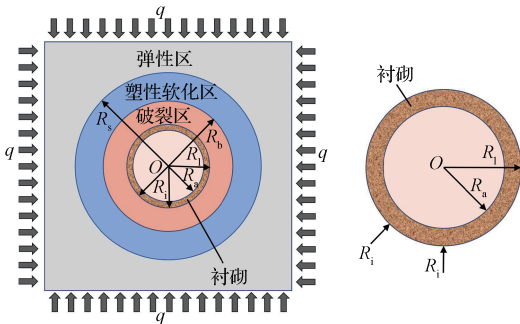


图 1 巷道与衬砌受力模型

Fig. 1 Stress model of tunnel and lining

1.2 统一强度理论

俞茂宏^[7]考虑各应力分量和岩石破坏程度用双剪理论发展出了统一强度理论,充分考虑了中间主应力效应及其区间性对材料变形的影响。用黏聚力 c 和内摩擦角 φ 作为材料的强度参数,可得如下强度理论表达式:

当 $\sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$ 时,表达式为

$$\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \sigma_1 - \frac{b \sigma_2 + \sigma_3}{1 + b} = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}; \quad (1)$$

当 $\sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \varphi$ 时,表达式为

$$\frac{(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 + b \sigma_2)}{(1 + b)(1 + \sin \varphi)} - \sigma_3 = \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}. \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_2 和 σ_3 分别为第一、二、三主应力, MPa; c 为岩石黏聚力, MPa; φ 为岩石内摩擦角; b 为中间主应力参数,反映中间主应力的影响程度,取值 $[0, 1]$ 。

本例中,第一主应力为环向应力 σ_θ ,第三主应力为径向应力 σ_r ,第二主应力为纵向应力 σ_z ;且 σ_2 满足判别式 (2),得到统一强度理论表达式为

$$\sigma_\theta = A \sigma_r + B. \quad (3)$$

式中: $A = \frac{(2+b) + (2+3b) \sin \varphi}{(2+b)(1 - \sin \varphi)}$; $B = \frac{4(1+b)c \cos \varphi}{(2+b)(1 - \sin \varphi)}$ 。

1.3 应变软化模型

大量岩石试验结果^[8]表明,岩石在破坏过程中,其强度不是由峰值强度瞬间降至残余强度,而是一个逐步弱化的过程,图 2 的三阶段应变软化模型能够很好地解释这种现象。

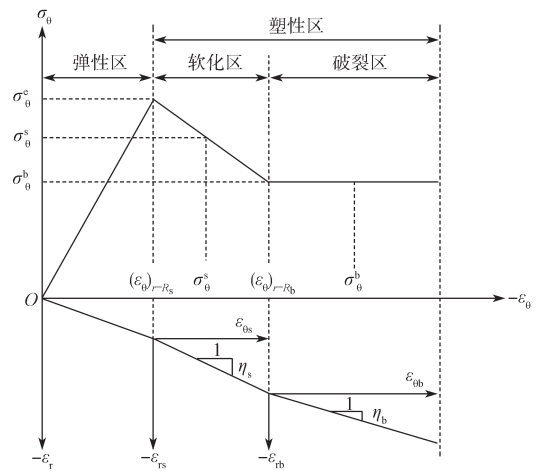


图 2 三阶段应变软化模型

Fig. 2 Three-stage strain softening model

对于塑性阶段的围岩,塑性软化区围岩和破碎区围岩都满足岩体扩容流动法则,即

$$\begin{cases} \eta_s \varepsilon_{\theta s} + \varepsilon_{rs} = 0, \\ \eta_b \varepsilon_{\theta b} + \varepsilon_{rb} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_{\theta s}$ 和 ε_{rs} 为塑性软化区围岩塑性切向应变和塑性径向应变; $\varepsilon_{\theta b}$ 和 ε_{rb} 为破裂区围岩塑性切向应变和塑性径向应变; η_s 为塑性软化区扩容系数, 且 $\eta_s = (1 + \sin \psi) / (1 - \sin \psi)$, 其中 ψ 为塑性软化区岩石膨胀角, 可用岩石内摩擦角 φ 替代; η_b 为破裂区扩容系数, 其值为 1.3~1.5^[9]。

文献 [10] 中关于岩石峰后特性研究成果表明, 岩石破坏后内摩擦角近似不变, 黏聚力由围岩长期强度确定, 其黏聚力软化模型如图 3 所示。

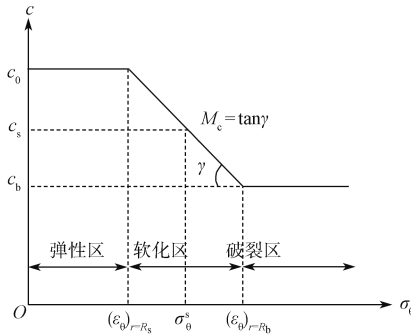


图 3 黏聚力软化模型

Fig. 3 Cohesive softening model

塑性软化区围岩黏聚力及软化模量表达式如下:

$$c_s = c_0 - M_c (\varepsilon_{\theta s} - \varepsilon_{\theta} |_{r=R_s}), \quad (5)$$

$$M_c = \frac{c_0 - c_b}{(\varepsilon_{\theta})_{r=R_b} - (\varepsilon_{\theta})_{r=R_s}}. \quad (6)$$

式中: c_0 为围岩初始黏聚力; c_s 为塑性软化区初始黏聚力; c_b 为破裂区残余黏聚力。

2 巷道围岩-衬砌弹塑性解

本例中巷道围岩变形问题可简化成轴对称平面应变问题^[11-16], 其平衡微分方程和几何方程如下:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} = 0, \quad (7)$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_{\theta} = \frac{u}{r}. \quad (8)$$

式 (7) (8) 中: σ_r 和 σ_{θ} 为围岩的径向、环向应力; ε_r 和 ε_{θ} 为围岩的径向、环向应变; u 为围岩径向位移。

2.1 弹性区围岩应力位移解

根据弹性力学理论, 弹性区应力、位移表达式为

$$\begin{cases} \sigma_r^e = q \left[1 - \left(\frac{R_s}{r} \right)^2 \right] + \sigma_{R_s} \left(\frac{R_s}{r} \right)^2, \\ \sigma_{\theta}^e = q \left[1 + \left(\frac{R_s}{r} \right)^2 \right] - \sigma_{R_s} \left(\frac{R_s}{r} \right)^2, \\ u^e = \frac{(1+\nu)(\sigma_{R_s} - q)R_s^2}{Er}. \end{cases} \quad (9)$$

式中: σ_r^e 、 σ_{θ}^e 为弹性区围岩径向应力和环向应力; u^e 为弹性区围岩径向位移; E 为弹性模量; ν 为岩石泊松比; σ_{R_s} 为弹性区与塑性软化区交界处径向应力, 可由 $\sigma_r + \sigma_{\theta} = 2q$ 和 $\sigma_{\theta} = A\sigma_r + B$ 联立求得 $\sigma_{R_s} = (2q - B) / (1 + A)$ 。

当 $r = R_s$ 时, 弹塑性交界面处径向位移和应变为

$$\begin{cases} u^e = \frac{(1+\nu)(\sigma_{R_s} - q)R_s}{E}, \\ \varepsilon_r^e = -\varepsilon_{\theta}^e = -\frac{(1+\nu)(\sigma_{R_s} - q)}{E}. \end{cases} \quad (10)$$

2.2 塑性软化区围岩应力位移解

塑性软化区应力满足统一强度表达式 (3) 和平衡微分方程 (7), 代入塑性软化区的应力边界条件 $\sigma_r^s|_{r=R_s} = \sigma_r^e|_{r=R_s}$, 可以得出塑性软化区的围岩应力解析式为

$$\begin{cases} \sigma_r^s = \left(\sigma_{R_s} + \frac{B_s}{A-1} \right) \left(\frac{r}{R_s} \right)^{A-1} - \frac{B_s}{A-1}, \\ \sigma_{\theta}^s = A \left(\sigma_{R_s} + \frac{B_s}{A-1} \right) \left(\frac{r}{R_s} \right)^{A-1} - \frac{B_s}{A-1}. \end{cases} \quad (11)$$

式中: σ_r^s 、 σ_{θ}^s 为塑性软化区围岩径向应力和环向应力;

$$B_s = \frac{4(1+b)c_s \cos \varphi}{(2+b)(1-\sin \varphi)}.$$

塑性软化区的塑性总应变满足

$$\begin{cases} \varepsilon_r^s = \varepsilon_r^e|_{r=R_s} + \varepsilon_{rs}, \\ \varepsilon_{\theta}^s = \varepsilon_{\theta}^e|_{r=R_s} + \varepsilon_{\theta s}. \end{cases} \quad (12)$$

联立式 (4) (8) (10) 和式 (12), 可得

$$\frac{du}{dr} + \eta_s \frac{u}{r} = (\eta_s - 1) \frac{(1+\nu)(\sigma_{R_s} - q)}{E}. \quad (13)$$

结合弹性区和塑性软化区的位移边界条件

$u_r^s|_{r=R_s} = u_r^e|_{r=R_s}$, 可得出塑性软化区的围岩位移、应变解析式为

$$\begin{cases} u_r^s = \frac{r(1+\nu)(\sigma_{R_s} - q)}{E} \left[\frac{2}{1+\eta_s} \left(\frac{R_s}{r} \right)^{1+\eta_s} + \frac{1-\eta_s}{1+\eta_s} \right], \\ \varepsilon_r^s = \frac{(1+\nu)(\sigma_{R_s} - q)}{E} \left[\frac{-2\eta_s}{1+\eta_s} \left(\frac{R_s}{r} \right)^{1+\eta_s} + \frac{1-\eta_s}{1+\eta_s} \right], \\ \varepsilon_{\theta}^s = \frac{(1+\nu)(\sigma_{R_s} - q)}{E} \left[\frac{2}{1+\eta_s} \left(\frac{R_s}{r} \right)^{1+\eta_s} + \frac{1-\eta_s}{1+\eta_s} \right]. \end{cases} \quad (14)$$

2.3 破裂区围岩应力位移解

破裂区应力满足统一强度理论表达式 (3) 和平衡微分方程 (7), 当 $r = R_1$ 时, 结合破裂区的应力边界条件 $\sigma_r^b|_{r=R_1} = P_1$, 可得出破裂区围岩应力解析式为

$$\begin{cases} \sigma_r^b = \left(P_i + \frac{B_b}{A-1} \right) \left(\frac{r}{R_i} \right)^{A-1} - \frac{B_b}{A-1}, \\ \sigma_\theta^b = A \left(P_i + \frac{B_b}{A-1} \right) \left(\frac{r}{R_i} \right)^{A-1} - \frac{B_b}{A-1}. \end{cases} \quad (15)$$

式中: σ_r^b 、 σ_θ^b 为破裂区围岩径向、环向应力; P_i 为衬砌支护力; $B_b = \frac{4(1+b)c_b \cos \varphi}{(2+b)(1-\sin \varphi)}$ 。

破裂区的塑性总应变可以表示为

$$\begin{cases} \varepsilon_r^b = \varepsilon_r^s|_{r=R_b} + \varepsilon_{rb}, \\ \varepsilon_\theta^b = \varepsilon_\theta^s|_{r=R_b} + \varepsilon_{\theta b}. \end{cases} \quad (16)$$

联立式(4)(8)(16), 可得

$$\frac{du}{dr} + \eta_b \frac{u}{r} = 0. \quad (17)$$

结合软化区和破裂区的位移边界条件

$u_r^b|_{r=R_b} = u_r^s|_{r=R_b}$, 可以得出破裂区围岩位移、应变解析式为

$$\begin{cases} u_r^b = \frac{r(1+\nu)(\sigma_{R_s} - q)}{E} \left[\frac{2}{1+\eta_s} \left(\frac{R_s}{R_b} \right)^{1+\eta_s} \left(\frac{R_b}{r} \right)^{1+\eta_b} + \frac{1-\eta_s}{1+\eta_s} \right], \\ \varepsilon_r^s = \frac{(1+\nu)(\sigma_{R_s} - q)}{E} \left[\frac{-2\eta_b}{1+\eta_s} \left(\frac{R_s}{R_b} \right)^{1+\eta_s} \left(\frac{R_b}{r} \right)^{1+\eta_b} + \frac{1-\eta_s}{1+\eta_s} \right], \\ \varepsilon_\theta^s = \frac{(1+\nu)(\sigma_{R_s} - q)}{E} \left[\frac{2}{1+\eta_s} \left(\frac{R_s}{R_b} \right)^{1+\eta_s} \left(\frac{R_b}{r} \right)^{1+\eta_b} + \frac{1-\eta_s}{1+\eta_s} \right]. \end{cases} \quad (18)$$

2.4 巷道各分区范围确定

根据交界面处径向位移连续, 由塑性软化区与破裂区交界面处边界条件^[17] $\varepsilon_r^s|_{r=R_b} = \varepsilon_r^b|_{r=R_b}$, 联立式(14)和式(18), 可得出塑性软化区半径和破裂区半径关系式为

$$\frac{R_s}{R_b} = \left[\frac{(\eta_s - 1)(\eta_b + 1)}{2(\eta_s - \eta_b)} \right]^{\frac{1}{1+\eta_s}}. \quad (19)$$

当围压的扩容系数一定时, 此半径比值为固定值常数。

根据塑性软化区与破裂区交界面处应力连续条件 $\sigma_r^s|_{r=R_b} = \sigma_r^b|_{r=R_b}$, 且当 $r=R_b$ 时, $c_s=c_b$, 即 $B_s=B_b$, 联立式(11)和式(15), 可得出塑性软化区半径和衬砌外半径关系式为

$$\frac{R_s}{R_i} = \left[\frac{B_b + (A-1)\sigma_{R_s}}{B_b + (A-1)P_i} \right]^{\frac{1}{A-1}}. \quad (20)$$

将式(19)代入式(20)中, 可以得出破裂区半径与衬砌外半径的关系式:

$$\frac{R_b}{R_i} = \left[\frac{B_b + (A-1)\sigma_{R_s}}{B_b + (A-1)P_i} \right]^{\frac{1}{A-1}} \left[\frac{2(\eta_s - \eta_b)}{(\eta_s - 1)(\eta_b + 1)} \right]^{\frac{1}{1+\eta_s}}. \quad (21)$$

2.5 应力位移解

由厚壁圆筒结构理论进行计算, 可求得衬砌区的应力、位移解析式为

$$\begin{cases} \sigma_r^l = \frac{R_i^2(r^2 - R_a^2)}{r^2(R_i^2 - R_a^2)} P_i, \\ \sigma_\theta^l = \frac{R_i^2(r^2 + R_a^2)}{r^2(R_i^2 - R_a^2)} P_i. \end{cases} \quad (22)$$

式中: σ_r^l 、 σ_θ^l 为衬砌区径向应力、环向应力; P_i 为衬砌支护力; R_i 为围岩衬砌外半径; R_a 为围岩衬砌内半径。

衬砌径向位移表达式为

$$u_r^l = \frac{P_i(1+\nu)}{E_i} \frac{R_i^2(r^2 + R_a^2 - 2\nu r^2)}{r(R_i^2 - R_a^2)}. \quad (23)$$

式中: u_r^l 为衬砌径向位移; E_i 为衬砌弹性模量。

当 $r=R_i$ 时, 结合破裂区与衬砌间的应力、位移连续边界条件可得

$$\begin{cases} \sigma_r^b|_{r=R_i} = \sigma_r^l|_{r=R_i} = P_i, \\ u_r^b|_{r=R_i} = u_r^l|_{r=R_i} = u_r^l. \end{cases} \quad (24)$$

联立式(18)~(21)和(23)以及上述边界条件, 可解出塑性软化区半径、破裂区半径和衬砌支护力 P_i 。上述解析式多为超越方程式, 本文采用 Matlab 进行数值计算。

3 算例参数和影响因素分析

具有衬砌的软岩巷道, 巷道衬砌内半径 $R_a=4.9$ m, 衬砌外半径 $R_i=5$ m, 初始地应力 $q=20$ MPa, 围岩材料参数 $E=2$ GPa, $\nu=0.25$, $c_0=1$ MPa, $c_b=0.7$ MPa, $\eta_b=1.3$, $\varphi=30$, 衬砌材料参数 $E_i=20$ GPa。采用控制变量法分析出中间主应力参数 b 、残余黏聚力 c_b 、衬砌弹性模量 E_i 等因素对围岩应力、位移、塑性区半径的影响。

3.1 中间主应力对塑性区半径大小、围岩应力、塑性区径向位移的影响

通过调整中间主应力参数 b 的大小分析其对中间主应力 σ_2 产生的影响, 进而分析中间主应力参数的不同大小对塑性区半径大小、围岩应力、塑性区径向位移的影响(取 $c_b=0.7$ MPa, 衬砌材料参数 $E_i=20$ GPa)。

图4反映了中间主应力对塑性区半径的影响, 取 b 为 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0。随着

b 从 0 增加到 1.0, 塑性区半径从 7.392 m 减少到 7.002 m, 减少了 5.28%; 破裂区半径从 6.854 m 减少到 6.482 m, 减少了 5.43%; 这说明考虑中间主应力 σ_2 的影响, 可以限制围岩塑性区的发展。

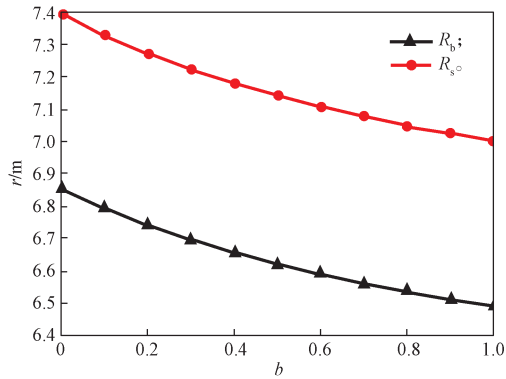


图 4 中间主应力参数 b 对塑性区半径的影响曲线

Fig. 4 Effect curves of intermediate principal stress parameter b on the radius of the plastic zone

中间主应力参数对围岩应力的影响结果如图 5 所示, 为了分析中间主应力对围岩应力、塑性区径向位移的影响, 选取中间主应力参数 $b=0$ (不考虑中间主应力的影响)、 $b=0.5$ (部分考虑中间主应力的影响)、 $b=1.0$ (完全考虑中间主应力的影响)。由图 5 可以看出, 中间主应力的增大会改变围岩应力的峰值大小, 且距巷道中心相同距离处的塑性区环向应力、径向应力都随着 b 的增大而增大, 直至弹塑性交界面处, 弹性区环向应力随着半径增大而逐渐减小; 随着 b 从 0 增加到 1.0, 围岩峰值应力 σ_θ 从 30.555 MPa 增加到 31.700 MPa。

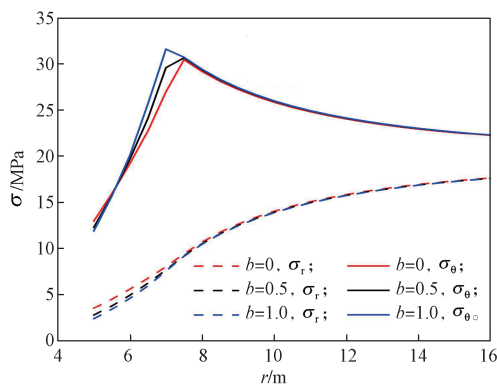


图 5 中间主应力参数对围岩应力的影响曲线

Fig. 5 Effect curves of intermediate principal stress parameter on surrounding rock stress

图 6 反映了中间主应力参数对塑性区径向位移的影响, 由图中曲线可以看出, 围岩径向位移最大处位于衬砌和围岩交界处, 并随着半径的增大而减小; 相同位置处的 b 值越大, 围岩塑性区径向位移越小;

随着 b 从 0 增加到 1.0, 塑性区径向位移减小幅度约为 6.56%, 且位移减小幅度随着半径增加而变化到 78.2%; 这说明中间主应力大小变化对塑性区位移影响明显, b 的增大导致塑性区径向位移明显减小。

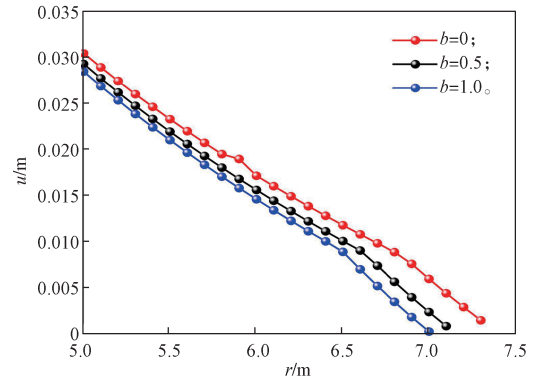


图 6 中间主应力参数对塑性区径向位移的影响

Fig. 6 Effect curves of intermediate principal stress parameter on radial displacement of the plastic zone

3.2 残余黏聚力对围岩应力、塑性区半径、塑性区围岩位移的影响

巷道围岩软化后内摩擦角近似不变, 所以软化程度主要和黏聚力相关, 在此主要讨论初始黏聚力下降多少, 即残余黏聚力 c_b 大小, 对塑性区半径、围岩应力和塑性区径向位移的影响 (取 $b=0$, 衬砌材料参数 $E_t=20$ GPa)。

图 7 反映了残余黏聚力对塑性区半径的影响。由图 7 可看出, 随着 c_b 从 0.4 MPa 增加到 0.8 MPa, 塑性区半径从 7.304 m 增加到 7.420 m, 约增加了 1.59%; 破裂区半径从 6.772 m 增加到 6.880 m, 约增加了 1.59%; 这说明残余黏聚力的大小, 可以影响围岩塑性区的发展。

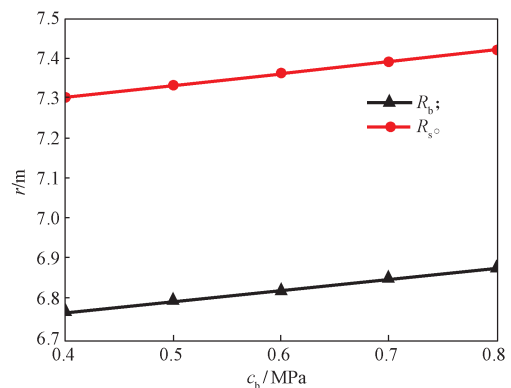


图 7 残余黏聚力对塑性区半径的影响曲线

Fig. 7 Effect curves of residual cohesion on the radius of plastic zone

图 8 为残余黏聚力对围岩应力的影响结果。从图 8 中可以看出, 围岩塑性区应力都会随着残余黏聚力

的改变而发生细小变化。当残余黏聚力从 0.4 MPa 增加至 0.8 MPa 时,塑性区围岩应力随着残余黏聚力增加而略有减小,而弹性区围岩应力会随着围岩半径的增大而趋于一致;且残余黏聚力的改变不会对围岩的峰值应力有很大影响。

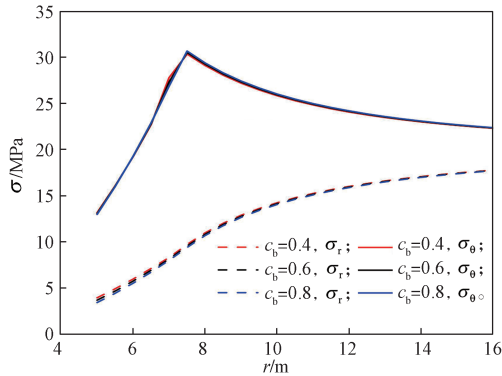


图8 残余黏聚力对围岩应力的影响曲线

Fig. 8 Effect curves of residual cohesion on the surrounding rock stress

图9为不同大小的残余黏聚力对塑性区径向位移的影响曲线。由图9中曲线可以看出,随着残余黏聚力增大,塑性区径向位移不断增加,当残余黏聚力从 0.4 MPa 增加到 0.8 MPa 时,巷道塑性区径向位移从 2.917 mm 增加到 3.089 mm,增加了约 5.9%;随着巷道半径增加,相同半径处的塑性区径向位移差值趋于一致。

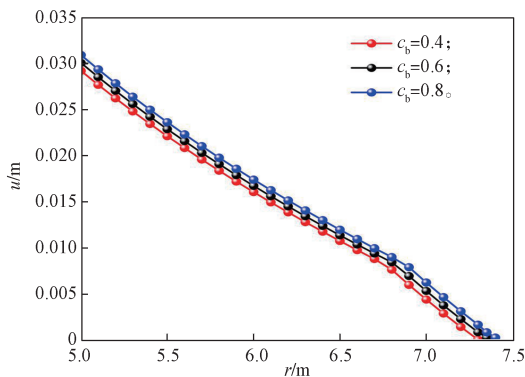


图9 残余黏聚力对塑性区径向位移的影响曲线

Fig. 9 Effect curves of residual cohesion on radial displacement in the plastic zone

3.3 衬砌弹性模量对围岩应力、塑性区半径、塑性区围岩位移的影响

巷道衬砌的支护作用不仅与衬砌厚度有关,还与衬砌的弹性模量 E_l 相关,通过控制衬砌弹性模量大小来分析衬砌弹性模量 E_l 对塑性区半径、围岩应力和塑性区径向位移的影响(取 $b=0$,残余黏聚力 $c_b=0.7$)。

图10为衬砌弹性模量对塑性区半径的影响结果。

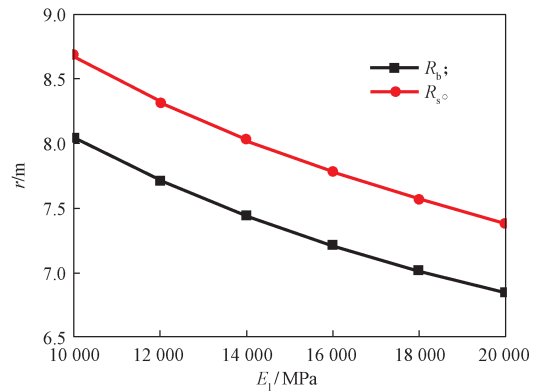


图10 衬砌弹性模量对塑性区半径的影响曲线

Fig. 10 Effect curves of lining elastic modulus on the plastic zone radius

由图10可以得知,当 E_l 从 10 000 MPa 增加到 20 000 MPa,塑性区半径从 8.685 m 减少到 7.392 m,减小幅度约为 14.89%;破裂区半径从 8.053 m 减少到 6.854 m,减少了约 14.89%。这一模拟结果说明,衬砌弹性模量的增大,可以限制围岩塑性区和破裂区的扩展。

图11为衬砌弹性模量对围岩应力的影响结果。从图中可以看出,塑性区围岩应力随衬砌弹性模量的增加而增加,直至弹塑性交界面处,弹性区环向应力随着半径增大而逐渐减小;同时,塑性区半径增加,但围岩环向峰值应力基本不变。

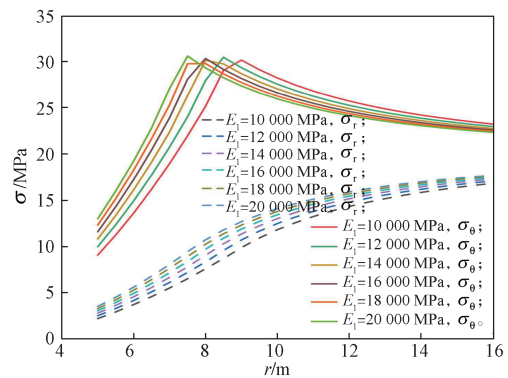


图11 衬砌弹性模量对围岩应力的影响曲线

Fig. 11 Effect of lining elastic modulus on the surrounding rock stress

图12为衬砌弹性模量对塑性区径向位移的影响结果。从图12中可以看出,塑性区径向位移最大处位于衬砌和围岩的交界处,并且塑性区径向位移随着半径的增大而减小;且随着衬砌弹性模量的增加,围岩塑性区径向位移减小;随着 E_l 从 10 000 MPa 增加到 20 000 MPa,塑性区径向位移减小幅度约为 41.14%,这说明衬砌弹性模量对塑性区径向位移影响明显,可以非常有效地限制塑性区扩展。

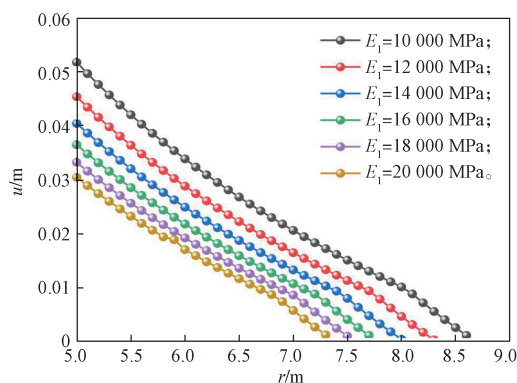


图 12 衬砌弹性模量对塑性区径向位移的影响曲线

Fig. 12 Effect curves of lining elastic modulus on radial displacement in the plastic zone

4 结论

本文基于统一强度理论准则推导出了在衬砌作用下的软岩巷道弹塑性解析解,分析了中间主应力、残余黏聚力、衬砌弹性模量等因素对围岩应力、塑性区大小、塑性区径向位移的影响,并对所得解进行对比分析,得出如下结论:

1) 随着中间主应力参数 b 的增大,巷道围岩塑性区大小和塑性区径向位移明显减小,且围岩径向位移最大处位于衬砌和围岩交界处;塑性区环向应力、径向应力都随着 b 的增大而增大,直至弹塑性界面处,弹性区径向应力随着半径增大而继续增大,而环向应力随着半径增大而逐渐减小,直至无穷远处,两个应力都趋近于原岩应力; b 的增大抑制了塑性区的发展。

2) 随着残余黏聚力的增加,塑性区半径、塑性区径向位移都增加,说明残余黏聚力会影响围岩塑性区的发展;塑性区围岩应力随着残余黏聚力增加而略有减小,而弹性区围岩应力会随着围岩半径的增大而趋于一致,残余黏聚力的改变不会对围岩的峰值应力产生很大影响。

3) 衬砌弹性模量增大,围岩塑性区半径明显减小,而塑性区径向位移随着半径的增大而减小;塑性区围岩应力随着半径的增大而增大,直至超过弹塑性界面处之后,弹性区环向应力随着半径增大而逐渐减小;同时塑性区半径增加,但围岩环向峰值应力基本不变。说明衬砌弹性模量对塑性区径向位移影响明显,可有效限制塑性区扩展。

参考文献:

[1] 张常光,张成林,周菲,等.圆形隧道弹塑性分析的强度理论效应研究[J].岩土工程学报,2018,

40(8): 1449-1456.

ZHANG Changguang, ZHANG Chenglin, ZHOU Fei, et al. Effect of Strength Theory in Elastic-Plastic Analysis of a Circular Tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1449-1456.

[2] 付大喜,王小伟,翁效林.基于Hoek-Brown准则的隧道围岩塑性变形研究[J].水利与建筑工程学报,2022,20(3): 76-83.

FU Daxi, WANG Xiaowei, WENG Xiaolin. Plastic Zone Analysis of Tunnel Surrounding Rock Based on Hoek-Brown Criterion[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022, 20(3): 76-83.

[3] 姚琪能,詹琦.圆形巷道围岩塑性区大小分析[J].煤炭技术,2019,38(12): 26-28.

YAO Qineng, ZHAN Qi. Plastic Zone Size Analysis of Surrounding Rock on Circular Roadway[J]. Coal Technology, 2019, 38(12): 26-28.

[4] 王明斌,李术才.含衬砌圆形压力隧洞弹塑性新解[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增刊2): 3770-3775.

WANG Mingbin, LI Shucui. New Elastoplastic Solutions to Circular Pressured Tunnel with Lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 3770-3775.

[5] 任青文,邱颖.具有衬砌圆形隧洞的弹塑性解[J].工程力学,2005,22(2): 212-217.

REN Qingwen, QIU Ying. Elastic-Plastic Solution of Circular Tunnel with Lining[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 212-217.

[6] 曾开华,黎剑华,许家雄,等.考虑衬砌屈服的深埋水工隧洞应力解析解[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(3): 1131-1137.

ZENG Kaihua, LI Jianhua, XU Jiaxiong, et al. Analytical Solution for Stresses of Deep Hydraulic Tunnel Considering Linear Yielding[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(3): 1131-1137.

[7] 俞茂宏.岩土类材料的统一强度理论及其应用[J].岩土工程学报,1994,16(2): 1-10.

YU Maohong. Unified Strength Theory for Geomaterials and Its Applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 1-10.

[8] 陈国庆,赵聪,魏涛,等.基于全应力-应变曲线及起裂应力的岩石脆性特征评价方法[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1): 51-59.

CHEN Guoqing, ZHAO Cong, WEI Tao, et al. Evaluation Method of Brittle Characteristics of Rock Based on Full Stress-Strain Curve and Crack Initiation Stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 51-59.

[9] 姚国圣,李镜培,谷拴成.考虑岩体扩容和塑性软化

- 的软岩巷道变形解析[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 463-467.
- YAO Guosheng, LI Jingpei, GU Shuancheng. Analytic Solution to Deformation of Soft Rock Tunnel Considering Dilatancy and Plastic Softening of Rock Mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 463-467.
- [10] 经纬. 圆形巷道围岩变形分区的理论与试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- JING Wei. Theoretical and Experimental Study on Deformation Zoning of Surrounding Rock in Circular Roadway[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017.
- [11] 刘波, 刘璐璐, 徐薇, 等. 基于统一强度理论的TBM斜井围岩弹塑性解[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, 33(5): 819-826.
- LIU Bo, LIU Lulu, XU Wei, et al. Elastic-Plastic Analytical Solution of TBM Inclined Shaft Based on Unified Strength Criterion[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(5): 819-826.
- [12] 王睢, 钟祖良, 刘新荣, 等. 基于D-P准则有压圆形衬砌隧洞弹塑性解[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 74-80.
- WANG Sui, ZHONG Zuliang, LIU Xinrong, et al. D-P Yield Criterion Based Elastoplastic Solution of the Circular Pressure Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(4): 74-80.
- [13] 经纬, 薛维培, 姚直书. 巷道围岩塑性软化区岩石内摩擦角与黏聚力变化规律[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2203-2210.
- JING Wei, XUE Weipei, YAO Zhishu. Variation of the Internal Friction Angle and Cohesion of the Plastic Softening Zone Rock in Roadway Surrounding Rock[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2203-2210.
- [14] 吴奎, 邵珠山, 李成龙, 等. 考虑施工中断影响的隧道力学响应解析模型研究[J]. 工程力学, 2024, 41(10): 169-179.
- WU Kui, SHAO Zhushan, LI Chenglong, et al. Study on Analytical Model of Tunnel Mechanical Response Considering Construction Interruption[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(10): 169-179.
- [15] 经来旺, 陈飞宇, 经纬, 等. 蠕变和中间主应力影响下围岩变形分区弹塑性分析[J]. 煤炭工程, 2021, 53(4): 93-98.
- JING Laiwang, CHEN Feiyu, JING Wei, et al. Elastoplastic Analysis of Surrounding Rock Deformation Zones with Creepage and Intermediate Principal Stress[J]. Coal Engineering, 2021, 53(4): 93-98.
- [16] 刘璐璐. 基于统一强度理论的TBM斜井围岩弹塑性解及试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- LIU Lulu. Elastoplastic Solution and Experimental Study of Surrounding Rock of TBM Inclined Shaft Based on Unified Strength Theory[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2017.
- [17] 蒋斌松, 张强, 贺永年, 等. 深部圆形巷道破裂围岩的弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 982-986.
- JIANG Binsong, ZHANG Qiang, HE Yongnian, et al. Elastoplastic Analysis of Cracked Surrounding Rocks in Deep Circular Openings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 982-986.

(责任编辑: 申剑)