

骆开静,董海龙,高全臣. 考虑流变和中间主应力的巷道围岩变形分区[J]. 煤炭学报,2017,42(S2):331-337. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1231

LUO Kaijing, DONG Hailong, GAO Quanchen. Deformation division for surrounding rock of circular roadway by considering rheology and the intermediate principal stress[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S2): 331-337. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1231

考虑流变和中间主应力的巷道围岩变形分区

骆开静,董海龙,高全臣

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要:考虑流变特性,将巷道围岩分为弹性区、塑性硬化区、塑性软化区和塑性流动区,并考虑围岩峰前应变硬化、峰后应变软化、扩容特性及中间主应力的影响;基于 Drucker-Prager 准则推导了各分区应力、位移和半径的封闭解析解,然后以实例为基础分析了围岩变形的影响因素。研究结果表明:中间主应力和围岩流变特性对巷道围岩位移和塑性区的大小均具有重要影响且中间主应力表现出强烈的区间性,在一定范围内提高中间主应力能够有效控制巷道变形和塑性区的扩展。理论研究及工程实际中,若忽视围岩流变特性则无形中“高估”了围岩岩性,不利于巷道长期稳定性评估及支护设计参数的确定;合理运用中间主应力的 Drucker-Prager 准则,较 Mohr-Coulumb 准则更能保证工程实践的安全性。研究结果可为巷道围岩相关理论研究和工程设计提供借鉴。

关键词:巷道围岩;流变;中间主应力;Drucker-Prager 准则

中图分类号:TD313

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)S2-331-07

Deformation division for surrounding rock of circular roadway by considering rheology and the intermediate principal stress

LUO Kaijing, DONG Hailong, GAO Quanchen

(School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing) Beijing 100083, China)

Abstract: With consideration to rheological behavior, surrounding rock mass in roadway is divided into elastic zone, plastic hardening zone, plastic softening zone and plastic flowing zone. And the paper derives the stress, displacement and radius of each area based on the Drucker-Prager criterion by considering the influences of pre-peak strain hardening, post-peak strain softening, dilatancy property and the intermediate principal stress. Then discusses the influences of surrounding rock deforming on the basis of a case study. Study results show that both the intermediate principal stress and surrounding rock's rheology have great impact on plastic zone and displacement and the former has a significant interval effect. It can control roadway deforming and plastic zone extending effectively to enhance the intermediate principal stress in a specific range. In theoretical research and engineering practice, ignoring the influences of surrounding rock's rheological behavior is actually overrating the feature of surrounding rock. It is bad for long-term stability evaluation and supporting quantitative design of surrounding rock. And in consideration of the intermediate principal stress, the Drucker-Prager criterion can ensure the safety of engineering better than the Mohr-Coulumb criterion to some extent. This study can provide some theoretical reference for related theoretical research and engineering de-

收稿日期:2017-09-07 修回日期:2017-12-14 责任编辑:常明然

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2010YL01)

作者简介:骆开静(1986—),女,贵州遵义人,博士研究生。E-mail:kaijing_luo@hotmail.com。通讯作者:董海龙(1988—),男,江西乐安人,博士研究生。E-mail:824426446@qq.com

sign in roadway.

Key words: roadway surrounding rock; rheology; intermediate principal stress; Drucker-Prager criterion

巷道围岩变形分区是巷道稳定性评估及其支护设计可靠性定量的重要参考依据之一^[1]。国内外对该课题的研究由来已久,较早的如 1938 年芬纳·塔罗勃(Fenner-Talobre)基于 Mohr-Coulumb(M-C)准则的理想弹塑性模型,不考虑破坏后岩石的体积变化,提出了“弹性区+塑性区”的 2 分区模型^[2]。但随着煤炭开采深度的不断增加,显现出许多新问题,巷道围岩变形分区的研究须进一步完善。在以往的围岩变形分区的研究理论中,鲜有考虑岩土类材料具有流变性这一重要特性,无形中“高估”了巷道围岩岩性,对巷道长期稳定性评估及支护设计参数的确定不利。文献[1]基于蠕变上下阈值概念及其确定方法较为系统地分析了围岩流变特性对巷道围岩应力及变形的影响,并提出了 4 阶段应变软化新模型,相关的研究成果对该领域的进一步完善与发展起到了很大的作用。然而,该领域的研究还存在着两大研究体系,即不考虑中间主应力^[3-6]的研究体系和考虑中间主应力^[7-10]的研究体系。文献[1]的研究是基于 M-C 准则不考虑中间主应力的研究体系,对考虑中间主应力的体系则没有进行研究。为了弥补不足,本文基于 D-P 准则,将中间主应力对围岩变形分区的影响进行了较深入的研究,研究从文献[1]的 4 阶段应变软化新模型出发,引入 Lode 参数,考虑了中间主应力的影响,得出一些重要的结论。

1 理论分析模型

据文献[1]的研究,稳定后的巷道围岩最多可分为弹性区(e区)、塑性硬化区(h区)、塑性软化区(s区)和塑性流动区(w区),相应的巷道围岩变形力学模型也如图 1 中的 OAD_1FG 折线所示(4 阶段应变软化新模型),以此为基础,为了较大程度的简化理论分析过程,现针对上述 4 分区围岩做如下基本假设:

- (1) 巷道围岩为连续、均质且各向同性岩体;
- (2) 巷道水平布置,断面为圆形,长度无限大,且巷道所处深度大于其半径的 20 倍;
- (3) 初始地应力为均布荷载,侧压系数为 1。

此外,对模型的基本参数也做出如下相应的规定:巷道半径为 R_0 ,围岩质点到巷道中心的距离为 r ,支护荷载为 P_i ,原岩应力为 P_0 , ε_r 与 ε_θ 为围岩径向和切向应变, $\Delta\varepsilon_r^p$ 与 $\Delta\varepsilon_\theta^p$ 为围岩径向和切向塑性应变增量, σ_e 、 σ_∞ 分别为围岩在一定围压(二者围压不等)下的蠕变下阈值和蠕变上阈值(长期强度), u 为

径向位移, E 为围岩弹性模量, μ 为泊松比。为方便,弹性区、塑性硬化区、塑性软化区和塑性流动区相关参数用下标 $i(i=e, h, s, w)$ 区分表示。

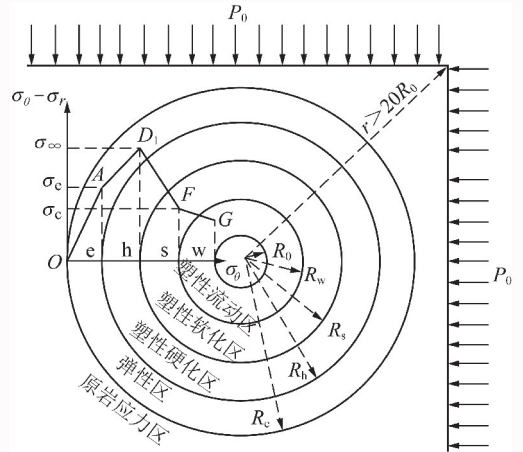


图 1 巷道力学模型

Fig. 1 Roadway mechanical model

1.1 扩容模型

考虑巷道围岩峰后扩容特性,以围岩达到一定围压下的长期强度为扩容起点^[11],扩容模型如图 2 所示。

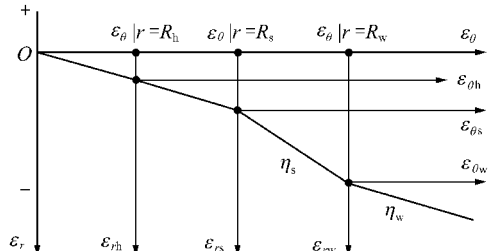


图 2 巷道围岩扩容特性模型

Fig. 2 Expansion feature model of roadway surrounding rock

(1) 塑性软化区扩容模型

根据图 2,塑性软化区总应变可表示为

$$\varepsilon_{rs} = \varepsilon_{rh} |_{r=R_s} + \Delta\varepsilon_{rs}^p, \varepsilon_{\theta s} = \varepsilon_{\theta h} |_{r=R_s} + \Delta\varepsilon_{\theta s}^p \quad (1)$$

在塑性软化区考虑扩容的流动法则^[4]为

$$\Delta\varepsilon_{rs}^p + \eta_s \Delta\varepsilon_{\theta s}^p = 0 \quad (2)$$

式中, $\eta_s = (1 + \sin \psi) / (1 - \sin \psi)$,为塑性软化区扩容系数; ψ 为塑性软化区内岩石膨胀角,依照文献[4],可用岩石内摩擦角近似替代。

(2) 塑性流动区扩容模型

在塑性流动区考虑扩容的流动法则^[4]为

$$\Delta\varepsilon_{rw}^p + \eta_w \Delta\varepsilon_{\theta w}^p = 0 \quad (3)$$

式中, $\eta_w = 1 + \varphi$,为塑性流动区扩容系数; φ 多介于 0.3 ~ 0.5,因此, η_w 的取值一般为 1.3 ~ 1.5。

1.2 软化及残余模型

内摩擦角和黏聚力(C)是影响围岩应力分布规律的两个内在本质因素,董方庭、郑颖人等著名学者认为岩石破裂后,黏聚力下降明显,而内摩擦角变化不大^[12-13]。因此,可认为内摩擦角不变,计算时取平均值;而初始黏聚力 C_0 由围岩长期强度确定^[1],且黏聚力软化模型如图3所示。

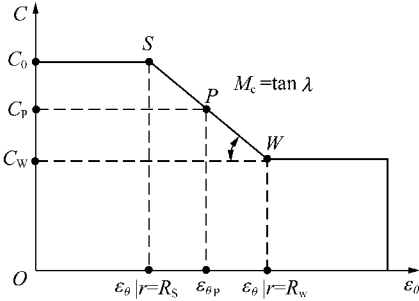


图3 黏聚力软化模型

Fig.3 Cohesion softening model

由图3可知,塑性软化区岩体黏聚力可表示为

$$C_p = C_0 - M_c (\varepsilon_{\theta p} - \varepsilon_{\theta} |_{r=R_s}) \quad (4)$$

式中, $M_c = (C_0 - C_w) / (\varepsilon_{\theta} |_{r=R_s} - \varepsilon_{\theta} |_{r=R_w})$, 为黏聚力软化模量; $\varepsilon_{\theta p}$ 为围岩塑性软化区切向应变, 等同于 $\varepsilon_{\theta s}$ 。

将下文相应切向应变的表达式代入 M_c 和式(4), 化简后可得

$$C_p = C_0 - \frac{(R_s/r)^{\eta_s+1} - 1}{1 - (R_s/R_w)^{\eta_s+1}} (C_0 - C_w)$$

M_c 表现为常量特性: 由下文可知 $R_s/R_w = N$, 其大小与 r 的取值无关, 令 $\xi_r = (R_s/r)^{\eta_s+1}$, 则 C_p 与 ξ_r 呈线性关系, 设 $C_p = a_1 + b_1 \xi_r$; 同理, 由式(18)可知 $\varepsilon_{\theta p} = T_2 [D_1 + D_2 (R_s/r)^{\eta_s+1}]$, 与 ξ_r 也呈线性关系, 设 $\varepsilon_{\theta p} = a_2 + b_2 \xi_r$; 由式(18)可得 $\varepsilon_{\theta} |_{r=R_s} = T_2 (D_1 + D_2)$, 与 r 的取值无关, 令为 c 。将上述线性式代入式(4), 有 $a_1 + b_1 \xi_r = C_0 - M_c (a_2 + b_2 \xi_r - c)$, 整理后由待定系数法可求得 $M_c = \frac{C_0 - C_w}{T_2 D_2 (1 - N^{\eta_s+1})}$, 其大小与 r 无关。

1.3 D-P 准则

1952年, Drucker 和 Prager 在平面应变状态下应用关联流动法则与 M-C 公式对比, 考虑了中间主应力和静水压力的影响, 提出了 Drucker-Prager (D-P) 屈服准则^[14], 其表达式为

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

其中, I_1 为应力张量第1不变量, $I_1 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$; J_2 为应力偏张量第2不变量, $J_2 = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] / 6$; α 和 k_i 为 D-P 准则材料常数,

与围岩内摩擦角 φ 和黏聚力 C_i 之间的关系为(平面应变关联法则下的 M-C 条件)

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi}}; k_i = \frac{3 C_i \cos \varphi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi}}$$

引入 Lode 参数 $\mu_\sigma = (2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$, 则有^[10]

$$f = (\sqrt{3\mu_\sigma^2 + 9} - 9\alpha - 3\alpha\mu_\sigma)\sigma_1 - (\sqrt{3\mu_\sigma^2 + 9} + 9\alpha - 3\alpha\mu_\sigma)\sigma_3 - 6k_i = 0 \quad (6)$$

$$\text{令 } A = \frac{\sqrt{3\mu_\sigma^2 + 9} + 9\alpha - 3\alpha\mu_\sigma}{\sqrt{3\mu_\sigma^2 + 9} - 9\alpha - 3\alpha\mu_\sigma}, B_i = \frac{6k_i}{\sqrt{3\mu_\sigma^2 + 9} - 9\alpha - 3\alpha\mu_\sigma}, \text{ 代入式(6)将其简化为}$$

$$f = \sigma_1 - A\sigma_3 - B_i = 0 \quad (7)$$

一般地, 巷道围岩切向应力 σ_θ 为最大主应力, 径向应力 σ_r 为最小主应力, 而轴向应力 σ_z 为中间主应力, 因此有:

$$f = \sigma_\theta - A\sigma_r - B_i = 0 \quad (8)$$

2 巷道围岩弹塑性解析

本文将所研究问题简化为如图1所示的轴对称平面应变问题, 其极坐标下的平衡微分方程为

$$r d\sigma_r / dr + \sigma_r - \sigma_\theta = 0 \quad (9)$$

式中, σ_θ 为围岩切向应力; σ_r 为围岩径向应力。

几何方程为

$$\varepsilon_r = du/dr; \varepsilon_\theta = u/r \quad (10)$$

2.1 弹性区分析

(1) 弹性区应力

塑性硬化区岩体发生稳定蠕变, 其应力状态不变, 仍可按弹性方法求解。故弹性区与塑性硬化区围岩的应力分布规律均可表示为

$$\begin{cases} \sigma_{re}(\sigma_{rh}) = P_0 \left(1 - \frac{R_s^2}{r^2}\right) + \sigma_r |_{r=R_s} \frac{R_s^2}{r^2} \\ \sigma_{\theta e}(\sigma_{\theta h}) = P_0 \left(1 + \frac{R_s^2}{r^2}\right) - \sigma_r |_{r=R_s} \frac{R_s^2}{r^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\sigma_r |_{r=R_s}$ 为塑性软化区外边界处的径向应力。

$r = R_s$ 时围岩应力满足 D-P 准则方程, 故将 $r = R_s$ 代入上式并联立式(8)得

$$\sigma_r |_{r=R_s} = (2P_0 - B_s |_{r=R_s}) / (A + 1) \quad (12)$$

(2) 弹性区应变及位移

位移及弹性区应变较容易得到^[4]

$$u_e = T_1 \frac{R_h^2}{r}; \varepsilon_{re} = -T_1 \frac{R_h^2}{r^2}; \varepsilon_{\theta e} = T_1 \frac{R_h^2}{r^2} \quad (13)$$

式中, $T_1 = (1 + \mu)(\sigma_r |_{r=R_s} - P_0) / E_0$ 。

2.2 塑性硬化区分析

(1) 塑性硬化区应力

应力分布规律见式(11)。

(2) 塑性硬化区应变及位移

塑性硬化区蠕变为稳定蠕变,其时效位移可用 Laplace 变换法求解^[15];西原模型能够很好地反映岩土材料的蠕变特性^[14]。因此,基于西原模型采用 Laplace 方法可求得塑性硬化区的时效位移为

$$u_h(t) = (1 + \mu)(\sigma_r|_{r=R_s} - P_0) \left[\frac{1}{E} + \frac{1}{E_K} (1 - e^{-\frac{t}{\eta_K}}) \right] \frac{R_s^2}{r} \quad (14)$$

式中, t 为时间; E_K 为西原体黏弹性模量; η_K 为黏滞系数。

令式(14)中的 $t \rightarrow \infty$ 即为稳定后的巷道围岩塑性硬化区位移,再结合几何方程得

$$u_h = T_2 \frac{R_s^2}{r}; \varepsilon_{rh} = -T_2 \frac{R_s^2}{r^2}; \varepsilon_{\theta h} = T_2 \frac{R_s^2}{r^2} \quad (15)$$

其中, $T_2 = (1 + \mu)(\sigma_r|_{r=R_s} - P_0) \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{E_K} \right)$ 。

2.3 塑性软化区分析

(1) 塑性软化区应力

塑性软化区围岩受力满足平衡条件和 D-P 准则方程,联立式(8)和(9)并结合应力接触条件 $\sigma_{rh}|_{r=R_s} = \sigma_{rs}|_{r=R_s}$ 可得其应力分布

$$\begin{cases} \sigma_{rs} = M_s + (\sigma_r|_{r=R_s} - M_s) \left(\frac{r}{R_s} \right)^{A-1} \\ \sigma_{\theta s} = M_s + A(\sigma_r|_{r=R_s} - M_s) \left(\frac{r}{R_s} \right)^{A-1} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $M_s = B_s/(1-A) = -k_s/3a_0$ 。

(2) 塑性软化区应变及位移

联立扩容模型式(1),(2)与几何方程式(10)并结合式(15)可得塑性软化区位移的协调方程为

$$du_s/dr + \eta_s u_s/r = (\eta_s - 1)T_2 \quad (17)$$

解之并结合位移连续条件 $u_s|_{r=R_s} = u_h|_{r=R_s}$ 及几何方程可得

$$\begin{cases} u_s = T_2 \left[D_1 + D_2 \left(\frac{R_s}{r} \right)^{1+\eta_s} \right] r \\ \varepsilon_{rs} = T_2 \left[D_1 - \eta_s D_2 \left(\frac{R_s}{r} \right)^{1+\eta_s} \right] \\ \varepsilon_{\theta s} = T_2 \left[D_1 + D_2 \left(\frac{R_s}{r} \right)^{1+\eta_s} \right] \end{cases} \quad (18)$$

式中, $D_1 = (\eta_s - 1)/(\eta_s + 1)$, $D_2 = 2/(\eta_s + 1)$ 。

2.4 塑性流动区分析

(1) 塑性流动区应力

塑性流动区应力分布满足平衡方程与 D-P 准则

方程,联立式(8)和(9)并结合应力边界条件 $\sigma_{rw}|_{r=R_0} = P_i$, 可得其应力分布

$$\begin{cases} \sigma_{rw} = M_w + (P_i - M_w) \left(\frac{r}{R_0} \right)^{A-1} \\ \sigma_{\theta w} = M_w + A(P_i - M_w) \left(\frac{r}{R_0} \right)^{A-1} \end{cases} \quad (19)$$

其中 $M_w = B_w/(1-A) = -k_w/3a_0$ 。

(2) 塑性流动区应变及位移

假定塑性流动区总应变仅由塑性应变组成,结合塑性流动区扩容模型式(3)与几何方程可得^[8]

$$du_w/dr + \eta_w u_w/r = 0 \quad (20)$$

解之并联立位移边界条件 $u_w|_{r=R_w} = u_s|_{r=R_w}$ 和几何方程得

$$\begin{cases} u_w = T_2 \left[D_1 \left(\frac{R_w}{r} \right)^{1+\eta_w} + D_2 \left(\frac{R_s}{R_w} \right)^{1+\eta_s} \left(\frac{R_w}{r} \right)^{1+\eta_w} \right] r \\ \varepsilon_{rw} = -T_2 \eta_w \left[D_1 \left(\frac{R_w}{r} \right)^{1+\eta_w} + D_2 \left(\frac{R_s}{R_w} \right)^{1+\eta_s} \left(\frac{R_w}{r} \right)^{1+\eta_w} \right] \\ \varepsilon_{\theta w} = T_2 \left[D_1 \left(\frac{R_w}{r} \right)^{1+\eta_w} + D_2 \left(\frac{R_s}{R_w} \right)^{1+\eta_s} \left(\frac{R_w}{r} \right)^{1+\eta_w} \right] \end{cases} \quad (21)$$

将 $r = R_0$ 代入上式第 1 式即得巷道围岩内边界位移为

$$u_0 = T_2 \left[D_1 \left(\frac{R_w}{R_0} \right)^{1+\eta_w} + D_2 \left(\frac{R_s}{R_w} \right)^{1+\eta_s} \left(\frac{R_w}{R_0} \right)^{1+\eta_w} \right] R_0 \quad (22)$$

2.5 分区范围的确定

首先,根据边界条件 $u_e|_{r=R_h} = u_h|_{r=R_h}$, 可得

$$R_s/R_h = \sqrt{T_1/T_2} \quad (23)$$

其次,蒋斌松等^[16]认为塑性软化区与塑性流动区交界处的径向应变应满足塑性出现破裂的临界变形条件,即 $\varepsilon_{rw}|_{r=R_w} = \varepsilon_{rs}|_{r=R_w}$ 。由此可得

$$\frac{R_s}{R_w} = \left[\frac{(\eta_w + 1)D_1}{(\eta_s - \eta_w)D_2} \right]^{\frac{1}{1+\eta_s}} = N \quad (24)$$

然后,根据应力接触条件 $\sigma_{rw}|_{r=R_w} = \sigma_{rs}|_{r=R_w}$, 可得

$$R_w = R_0$$

$$\left[\frac{M_s|_{r=R_w} - M_w + (\sigma_r|_{r=R_s} - M_s|_{r=R_w})N^{1-A}}{P_i - M_w} \right]^{\frac{1}{A-1}}$$

最后,将上式代入式(24)和(23)即可分别求得 R_s 和 R_h 。

3 算例分析

3.1 算例参数

算例取安徽淮南矿区某千米深井-848 m 充电整

流洞室为研究对象^[1],巷道等效开挖半径 $R_0 = 2.95$ m,初始地应力 $P_0 = 21.861$ MPa,支护荷载 $P_i = 0.75$ MPa,围岩弹性模量 $E = 4.01$ GPa,泊松比 $\mu = 0.25$,围岩内摩擦角 $\varphi = 27.830^\circ$,考虑围岩流变特性时的初始黏聚力 $C_0 = 5.578$ MPa,残余黏聚力 $C_w = 0.724$ MPa。

上述参数是文献[1]基于M-C准则不考虑中间主应力情况下的主要参数,由于本文计入了中间主应力的影响,故某些参数需要进行相应调整,具体如下:

体现中间主应力大小的Lode参数根据文献^[1]的地应力测试结果可求得,为 $\mu_\sigma = 0.4743$;不考虑围岩流变特性时的初始黏聚力根据文献^[1]岩石全应力-应变曲线峰值强度的拟合直线求得,为 $C = 11.753$ MPa;西原蠕变模型的瞬时弹性模量 E_H 视应力水平而定,其余参数可取平均值,黏弹性模量为 $E_K \approx 12.327$ GPa,黏滞系数为 $\eta_K \approx 219.132$ GPa·h。图4表明,所取西原模型参数值对蠕变试验曲线拟合效果较好,基本反映了试验岩石的蠕变特性。

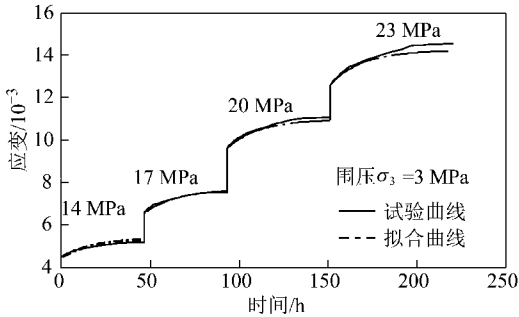


图4 蠕变数据处理示意

Fig. 4 Disposal of creep data

将上述参数代入第2节相应关系式即可分别求出相应的巷道围岩理论数值解。

3.2 计算结果及其影响因素分析

3.2.1 计算结果分析

图5为考虑流变与否以及考虑中间主应力与否的对比计算结果。结果表明,若不考虑围岩的流变特性,视岩石试件全应力-应变曲线峰值强度为巷道围岩最大应力,则围岩几乎仅存有弹性区(曲线3)。这无疑是“高估”了巷道围岩岩性,与文献[1]工程实际不相符且安全性低。因此,在巷道围岩长期稳定性评估及相应支护设计中,不可不考虑围岩的流变特性。

如图5所示,在同一工程条件下,文献[1]采用M-C准则计算得到的 R_w 、 R_s 和 R_h 分别为4.910、5.342和6.767 m。而本文考虑中间主应力效应,基

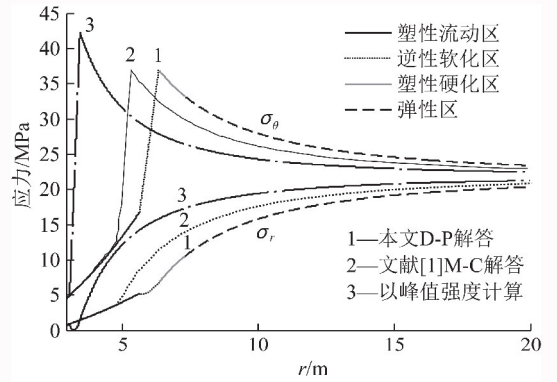


图5 对比计算结果

Fig. 5 Results of contrast calculation

于D-P准则计算得到的各分区半径分别为5.637、6.342和7.301 m,均大于采用M-C准则计算时的相应半径。由此可见,合理选用D-P准则将更能保证工程实际的安全性,有利于工程实际的应用。

3.2.2 影响因素分析

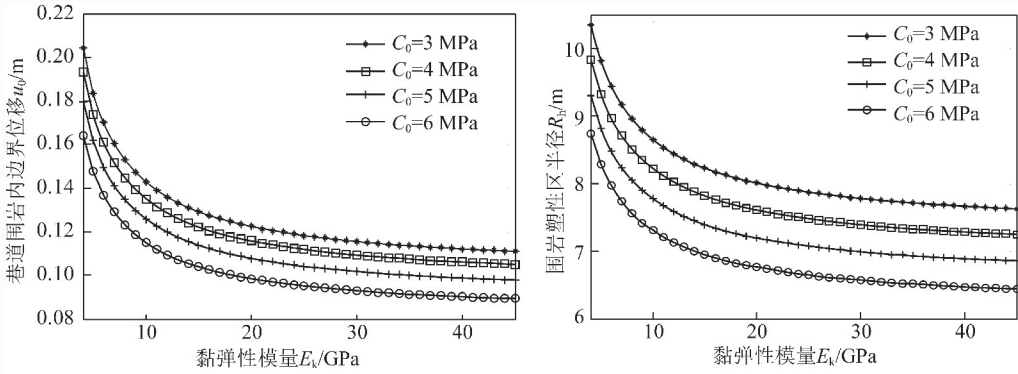
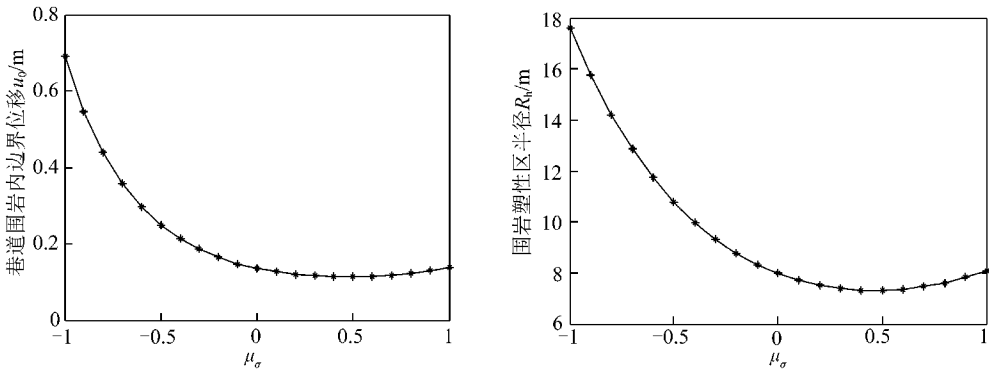
本文主要通过长期强度和黏弹性模量 E_K 等客观参量来体现围岩流变特性对巷道围岩变形及塑性区扩展的影响,而长期强度又最终体现于围岩初始黏聚力 C_0 的大小。中间主应力的大小则由Lode参数 μ_σ 体现。因此,下面就 C_0 、 E_K 及 μ_σ 对巷道围岩内边界位移及塑性区大小的影响展开分析。

(1) 围岩流变特性的影响

如上述, E_K 和 C_0 的大小最终取决于巷道围岩的流变特性,因此,巷道内边界位移 u_0 和围岩塑性区半径 R_h 受 E_K 和 C_0 的影响均可归结于围岩流变特性的影响。如图6所示,巷道围岩的变形及塑性区扩展受 E_K 和 C_0 的影响都比较明显,亦即,受围岩流变特性的影响较为显著。这在一定程度上再一次说明了文献[1]在巷道围岩长期稳定性分析中考虑围岩流变特性的合理性与必要性。

(2) 中间主应力的影响

本文用Lode参数 μ_σ 描述中间主应力大小,如图7所示,在 μ_σ 的有效取值区间内,巷道内边界位移的变动区间为[0.113 m, 0.692 m];巷道围岩塑性区半径的变动区间为[7.30 m, 17.60 m]。二者的变动范围都较大,由此可知,中间主应力对巷道围岩变形及塑性区扩展的影响比较显著。并且, $\mu_\sigma = 0.4$ 时, u_0 和 R_h 近似最小; $-1 \leq \mu_\sigma < 0$ 时, u_0 和 R_h 受 μ_σ 的影响非常显著;而 $0 \leq \mu_\sigma \leq 1$ 时, u_0 与其最小值非常接近, R_h 与其最小值也相差不大,二者受 μ_σ 的影响都很小。可见,中间主应力的影响还表现出强烈的区间效应。总而言之,中间主应力对巷道围岩位移及塑性区

图6 E_k 和 C_0 的影响Fig. 6 Impacts of E_k and C_0 图7 μ_σ 的影响Fig. 7 Impacts of μ_σ

的大小具有非常重要的影响,且表现出强烈的区间性,在一定范围内提高中间主应力可有效控制围岩变形及塑性区的扩展。

另外,巷道开挖半径、残余黏聚力、内摩擦角、支护荷载、初始地应力及扩容系数等亦为影响巷道变形之因素,已有不少文献^[3-10]作了相关研究,此处不再赘述。

4 结 论

(1)沿用文献[1]对围岩流变特性的处理,考虑岩体峰值强度前后的应变硬化和软化特性将巷道围岩分成弹性区+塑性硬化区+塑性软化区+塑性流动区;基于D-P准则标准,用Lode参数描述中间主应力大小,经过力学与数学推导,得到了圆形巷道围岩各分区应力、应变、位移和半径的解析表达式,对相关理论研究和工程设计具有一定参考意义。

(2)在实例分析的基础上,说明了在巷道围岩长期稳定性分析中考虑围岩流变特性的必要性;揭示了考虑中间主应力对巷道围岩变形及塑性区扩展影响的重要性,及其影响表现出的强烈区间性;证实了合理考虑中间主应力的影响将更有利于保证工程实践

的安全性。

参考文献 (References):

- [1] 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 research on deformation partition of circular roadway[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017.
- [2] 塔罗勃 J. 岩石力学[M]. 林天健,等译. 北京:工业出版社,1965.
- [3] 袁超,王卫军,赵延林,等. 考虑岩体塑性硬化与软化特性的巷道围岩变形理论分析[J]. 煤炭学报,2015,40(S2):311-319.
YUAN Chao, WANG Weijun, ZHAO Yanlin, et al. Theoretical analysis on roadway surrounding rock deformation based on the properties of rock plastic hardening and softening [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 311-319.
- [4] 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.
- [5] 赵光明,张小波,王超,等. 软弱破碎巷道围岩深浅承载结构力学分析及数值模拟[J]. 煤炭学报,2016,41(7):1632-1642.
ZHAO Guangming, ZHANG Xiaobo, WANG Chao, et al. Mechanical

- analysis and numerical simulation for deep and shallow bearing structures of soft and broken roadway surrounding rock [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(7): 1632-1642.
- [6] 温森, 杨圣奇. 基于 Hoek-Brown 准则的隧洞围岩变形研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(1): 63-69.
WEN Sen, YANG Shengqi. Study of deformations of surrounding rock of tunnel based on Hoek-Brown criterion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 63-69.
- [7] 张小波, 赵光明, 孟祥瑞. 基于 Drucker-Prager 屈服准则的圆形巷道围岩弹塑性分析 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(S1): 30-37.
ZHANG Xiaobo, ZHAO Guangming, MENG Xiangrui. Elastoplastic analysis of surrounding rock on circular roadway based on Drucker-Prager yield criterion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(S1): 30-37.
- [8] 陈梁, 茅献彪, 李明, 等. 基于 Drucker-Prager 准则的深部巷道破裂围岩弹塑性分析 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(2): 485-490.
CHEN Liang, MAO Xianbiao, LI Ming, et al. Elastoplastic analysis of cracked surrounding rock in deep roadway based on Drucker-Prager criterion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 485-490.
- [9] 侯公羽, 牛晓松. 基于 Levy-Mises 本构关系及 D-P 屈服准则的轴对称圆巷理想弹塑性解 [J]. *岩土力学*, 2009, 30(6): 1555-1562.
HOU Gongyu, NIU Xiaosong. Perfect elastoplastic solution of axisymmetric circular openings in rock mass based on Levy-Mises constitutive relation and D-P yield criterion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(6): 1555-1562.
- [10] 曾开华, 鞠海燕, 盛国君, 等. 巷道围岩弹塑性解析解及工程应用 [J]. *煤炭学报*, 2011, 36(5): 752-755.
ZENG Kaihua, JU Haiyan, SHENG Guojun, et al. Elastic-plastic analytical solutions for surrounding rocks of tunnels and its engineering applications [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(5): 752-755.
- [11] 侯文诗, 李守定, 李晓, 等. 岩石扩容起始特性与峰值特性的比较 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(8): 1478-1485.
HOU Wenshi, LI Shouding, LI Xiao, et al. Comparison between dilatancy onset and peak of different rocks [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8): 1478-1485.
- [12] 董方庭. 巷道围岩松动圈支护理论及应用技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
DONG Fangting. Loose zone support theory & application for roadway surrounding rock [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2001.
- [13] 郑颖人. 地下工程锚喷支护设计指南 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988.
ZHENG Yingren. Guideline for bolt-shotcrete support design in underground engineering [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988.
- [14] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕, 等. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan, et al. Rock mechanics and engineering [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [15] 郭兴文, 赵骞, 顾水涛, 等. 基于黏弹性接触的颗粒材料蠕变特性研究 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(S2): 105-112.
GUO Xingwen, ZHAO Qian, GU Shuitao, et al. Creep property of granular materials based on viscoelastic interface between micro structural granular [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S2): 105-112.
- [16] 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 rock in deep circular openings [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(5): 982-986.