

文章编号: 1001-1986(2019)05-0032-08

考虑渗流和剪胀的圆形巷道围岩广义 SMP 准则解

潘继良^{1,2,3}, 任奋华^{1,2,3}

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学城市与地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083; 3. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 本文基于广义 SMP 准则, 综合考虑中间主应力、孔隙水压力和围岩的剪胀特性, 建立了巷道围岩的理想弹塑性模型。根据弹塑性理论, 推导了渗流作用下的围岩应力场、位移场和塑性区半径的统一解析解。结合具体算例对 SMP 准则计算得到的围岩应力分布和塑性区半径与 Mohr-Coulomb(M-C)准则进行了对比, 并对孔隙水压力和围岩剪胀角等影响因素进行了分析。研究表明: SMP 准则计算得到的塑性区半径小于 M-C 准则, 说明 M-C 准则相较于 SMP 准则更为保守; 孔隙水压力对巷道围岩的位移场具有很大的影响, 表现为孔隙水压力越大, 巷道洞壁附近围岩位移量越大, 且围岩塑性区半径和弹塑性交界面处的峰值切向应力与孔隙水压力成正比; 采用相关联流动法则会低估围岩的强度, 不考虑剪胀则会低估围岩的实际变形。

关键词: 圆形巷道; 渗流; 剪胀性; 中间主应力; 弹塑性分析

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2019.05.005



Analytical solution for surrounding rock of circular roadway based on generalized SMP criterion considering seepage and dilatancy

PAN Jiliang^{1,2,3}, REN Fenhua^{1,2,3}

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering(University of Science and Technology Beijing), Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines(University of Science and Technology Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the generalized spatially mobilized plane(SMP) criterion, considering intermediate principal stress, pore water pressure and dilatancy characteristics of surrounding rock, an ideal elastic-plastic model of roadway surrounding rock is established. According to the elastic-plastic theory, the unified analytical solutions of stress field, displacement field and radius of plastic zone under seepage flow are obtained. Then, the stress distribution of surrounding rock and the radius of plastic zone calculated by SMP criterion are compared with those calculated by Mohr-Coulomb(M-C) criterion, and the influencing factors such as pore water pressure and dilatancy angle of surrounding rock are analyzed. It is shown that the radius of plastic zone based on the SMP criterion are smaller than that of the M-C criterion, and the calculation results of M-C criterion are more conservative than those of generalized SMP criterion. The pore water pressure has a great influence on the displacement field of the roadway surrounding rock. The increase of displacement near roadway wall is influenced by the larger pore water pressure. Meanwhile, the change of radius of plastic zone of surrounding rock and the peak tangential stress variations at elastic-plastic interface are proportional to the pore water pressure. The strength of the surrounding rock will be underestimated by using the correlation flow rule, and the actual deformation of the surrounding rock will be underestimated without considering the dilatancy.

Keywords: circular roadway; seepage; dilatancy; intermediate principal stress; elastic-plastic analysis

收稿日期: 2019-03-23

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2017YFC0804101)

Foundation item: National Key R&D Program of China(2017YFC0804101)

第一作者简介: 潘继良, 1994 年生, 男, 安徽寿县人, 博士研究生, 从事岩石力学与工程方面的研究工作. E-mail: panjiliang2015@163.com

通信作者: 任奋华, 1969 年生, 男, 江苏金坛人, 博士, 副教授, 从事工程地质灾害分析预测与防治方面的工作. E-mail: renfh_2001@163.com

引用格式: 潘继良, 任奋华. 考虑渗流和剪胀的圆形巷道围岩广义 SMP 准则解[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5): 32-39.

PAN Jiliang, REN Fenhua. Analytical solution for surrounding rock of circular roadway based on generalized SMP criterion considering seepage and dilatancy[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(5): 32-39.

在水资源丰富的地区开挖巷道, 巷道围岩的应力分布不仅受开挖扰动的影响, 而且还会受到地下水的的作用, 体现在渗流过程中的外水压力和作用在围岩上的渗流体积力^[1]。在渗流和开挖扰动的共同作用下导致的应力重分布将会引起应力集中, 当应力值超过巷道围岩的极限强度时, 岩体的力学性质便从弹性转变为塑性^[2]。

通过理论计算, 对受渗流影响的地下巷道围岩的应力和位移进行预测, 在地下工程中具有重要的指导意义。李宗利等^[3]基于 Mohr-Coulomb(M-C)准则求解了渗流作用下隧洞围岩的应力场和位移场分布, 相较于不考虑渗流, 其认为在对围岩进行弹塑性分析时, 不应忽视渗流场的影响; 黄阜等^[4]基于 Hoek-Brown(H-B)准则推导了渗透力作用下圆形洞室的弹塑性解析解, 并与 M-C 准则的计算结果进行了对比分析; 王睢等^[5]基于 Drucker-Prager(D-P)准则推导了深埋有压圆形隧洞弹塑性解, 并分析了施工和运营阶段的地下水渗流作用规律; 张常光等^[6-7]基于统一强度理论推导了圆形水工隧洞围岩的应力解和位移解, 并对多种影响因素进行了探讨。

可以看出, 现有的关于地下圆形渗流巷道围岩弹塑性解析解多是基于无法反映中间主应力效应的 M-C 准则和 H-B 准则提出的, 或是根据可考虑中间主应力的 D-P 准则和统一强度理论计算所得, 而 D-P 准则在偏平面内具有拉压强度相等性, 同时夸大了中间主应力的作用, 而统一强度理论公式较为繁琐, 在实际求解过程中存在诸多不便^[8-9]。H. Matsuoka 和 T. Nakai 于 1974 年提出了针对无黏性土的空间滑动面理论(Spatially Mobilized Plane), 简称 SMP 准则^[10]。SMP 准则不仅克服了偏平面内 M-C 准则的奇异性和 D-P 准则的拉压强度相等性, 而且还可反映中间主应力的影响, 相较于统一强度理论更加简洁, 同时还可以很好地匹配 M-C 准则。广义 SMP 准则可以适用于黏性材料, 使 SMP 准则应用范围变得更广。吴创周等^[11]基于广义 SMP 准则, 计算分析了圆形隧洞围岩的应力和位移, 并将得到的弹脆塑性解析解与卡斯特纳解进行了对比; 吕彩忠等^[12]基于广义 SMP 准则对软岩硐室的最优支护力和围岩允许的最大位移进行了理论求解; 朱建明等^[13]利用广义 SMP 准则推导出围岩抗力系数的计算公式, 并且较好地反映了中间主应力的影响。

综上所述, 现有的关于圆形渗流巷道的研究多是忽略或夸大了中间主应力的作用, 或是没有考虑巷道围岩自身的剪胀特性, 因此所计算出的理论结果与实际情况存在较大差异。广义 SMP 准则逐渐被应用于围岩的弹塑性分析, 但目前尚未有文献将其

用于分析地下圆形渗流巷道, 因此, 本文基于广义 SMP 准则, 综合考虑中间主应力、孔隙水压力和巷道围岩的剪胀特性, 建立巷道围岩的理想弹塑性模型。根据弹塑性理论, 对渗流作用下的围岩应力场、位移场和塑性区半径的统一解进行推导, 结合具体算例对计算得到的围岩应力分布和塑性区半径与 M-C 准则计算结果进行对比, 并讨论了巷道围岩塑性区孔隙水压力和剪胀角等参数的敏感性。

1 广义 SMP 准则

H. Matsuoka 通过引入黏结应力 σ_0 对 SMP 准则进行了修正^[14-15], 将 SMP 准则进一步推广应用于包含黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 的黏性岩土材料。SMP 准则在 π 平面上的极限轨迹为外接 M-C 准则极限面 6 个顶点的光滑曲线, 如图 1 所示^[16]。

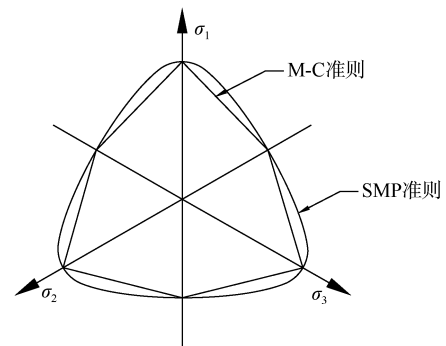


图 1 M-C 准则与 SMP 准则在 π 平面上的相互关系
Fig.1 Relationship between the M-C criterion and SMP criterion in the π -plane

应力不变量表示的广义 SMP 准则表达式为^[17]

$$\frac{\tilde{I}_1 \tilde{I}_2}{\tilde{I}_3} = 8 \tan^2 \phi + 9 = K_{\text{SMP}} \quad (1)$$

式中 K_{SMP} 为材料常数; \tilde{I}_1 、 \tilde{I}_2 、 \tilde{I}_3 分别为广义的应力一阶、二阶、三阶不变量, 即

$$\begin{aligned} \tilde{I}_1 &= (\sigma_1 + \sigma') + (\sigma_2 + \sigma') + (\sigma_3 + \sigma') \\ \tilde{I}_2 &= (\sigma_1 + \sigma')(\sigma_2 + \sigma') + (\sigma_2 + \sigma')(\sigma_3 + \sigma') + \\ &\quad (\sigma_3 + \sigma')(\sigma_1 + \sigma') \\ \tilde{I}_3 &= (\sigma_1 + \sigma')(\sigma_2 + \sigma')(\sigma_3 + \sigma') \end{aligned}$$

由相关联流动法则和广义 SMP 准则可求出平面应变条件下 3 个主应力之间的关系式^[18]

$$\sigma_2 + \sigma' = \sqrt{(\sigma_1 + \sigma')(\sigma_3 + \sigma')} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 求得平面应变状态下广义 SMP 准则的表达式

$$\frac{\sigma_1 + \sigma'}{\sigma_3 + \sigma'} = \frac{1}{4} \left[\sqrt{K_{\text{SMP}} - 1} + \sqrt{(\sqrt{K_{\text{SMP}} - 1})^2 - 4} \right]^2 \quad (3)$$

巷道切向应力 σ_θ 、径向应力 σ_r 和轴向应力 σ_z 相互正交, 当侧向压力系数 $\lambda=1$ 时, 应力 σ_θ , σ_r 和 σ_z 可看作为圆形巷道围岩的 3 个主应力, 即 $\sigma_1=\sigma_\theta$, $\sigma_3=\sigma_r$ 和 $\sigma_2=\sigma_z$, 式(3)可写成:

$$f = \sigma_\theta - M\sigma_r - N = 0 \quad (4)$$

其中,

$$M = \frac{1}{4} \left[\sqrt{8 \tan^2 \phi + 9} - 1 + \sqrt{(\sqrt{8 \tan^2 \phi + 9} - 1)^2 - 4} \right]^2,$$

$$N = (M - 1)c \cot \phi.$$

2 渗流场计算

假设巷道围岩均质且各向同性, 长度无限长, 地下水在岩体内为层流, 距离巷道无穷远处水头为 p_0 , 巷道壁处水头为 0, 巷道半径小于内外水头差。忽略计算区域水及岩土体自重的影响, 将问题简化为轴对称恒定渗流平面应变问题。令 r_0 为巷道半径, R_s 为塑性区半径, R_0 为计算区域半径, σ_0 为初始地应力, p_i 为巷道支护力, 建立的力学计算模型如图 2 所示。

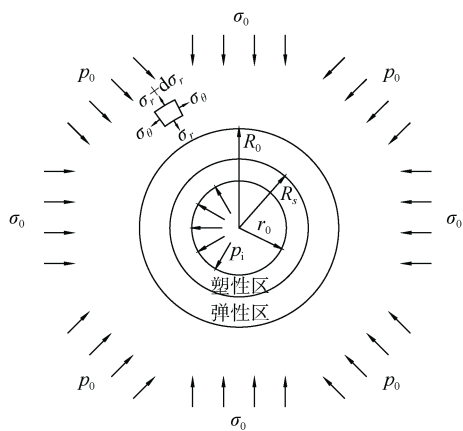


图 2 渗流圆形巷道力学模型

Fig.2 Mechanical model of circular roadway under seepage

在均匀应力场条件下, 由 Darcy 定律得渗流连续微分方程为^[3]:

$$\frac{\partial^2 p_w(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_w(r)}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

式中 $p_w(r)$ 为半径 r 处的孔隙水压力, MPa。

选取与原始渗流场外水压力 p_0 相同的半径 R_0 处为计算区域, 计算区域外保持初始地应力场状态, 可知渗流场内、外边界条件为:

$$p_w(r)_{r=r_0} = 0, \quad p_w(r)_{r=R_0} = p_0 \quad (6)$$

求得孔隙水压力沿巷道壁向外径向分布规律为:

$$p_w(r) = s \ln \frac{r_0}{r} \quad (7)$$

式中 $s = p_0 / (\ln r_0 / R_0)$, 为常数。

3 巷道围岩弹塑性统一解

3.1 基本方程

渗透水压力为体积力, 不考虑渗透体积力中的浮力部分, 建立考虑渗流影响的平衡微分方程为^[19]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \eta \frac{dp_w(r)}{dr} = 0 \quad (8)$$

式中 η 为岩石等效孔隙水压力系数。

几何方程:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (9)$$

式中 ε_r 为径向应变; ε_θ 为切向应变; u 为巷道围岩径向位移。

为了反映围岩的剪胀特性, 文献[20]通过建立塑性势函数, 结合塑性位势理论和非关联流动法则, 利用塑性应变增量求得围岩剪胀系数表达式为:

$$\chi = \frac{\Delta \varepsilon_r^p}{\Delta \varepsilon_\theta^p} = M^* \quad (10)$$

式中 $\Delta \varepsilon_r^p$ 为径向塑性应变增量; $\Delta \varepsilon_\theta^p$ 为切向塑性应变增量; M^* 为将内摩擦角替换为剪胀角(小于等于内摩擦角)后的 M 。

3.2 弹性区分析

根据广义胡克定律, 平面应变问题本构方程为^[21]:

$$\begin{cases} \sigma_r^e = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\frac{1-\nu}{\nu} \varepsilon_r^e + \varepsilon_\theta^e \right) \\ \sigma_\theta^e = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left(\frac{1-\nu}{\nu} \varepsilon_\theta^e + \varepsilon_r^e \right) \end{cases} \quad (11)$$

式中 E 为弹性模量; ν 为泊松比; σ_r^e 、 σ_θ^e 分别为弹性区的径向应力与切向应力; ε_r^e 、 ε_θ^e 分别为弹性区的径向应变与切向应变。

式(11)联立式(8)和式(9)求得

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = C_0 \frac{1}{r} \quad (12)$$

式中 $C_0 = \eta s \frac{\nu}{\lambda(1-\nu)}$, 为常数; $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$,

为一阶 Lamé 常数。

求解式(12)得到弹性区总位移表达式

$$u^e = C_1 r + \frac{C_2}{r} + \frac{C_0}{2} r \ln r \quad (13)$$

式中 C_1 、 C_2 均为待定常数。

式(13)代入式(9), 求得弹性区总应变表达式

$$\begin{cases} \varepsilon_r^{es} = C_1 - \frac{C_2}{r^2} + \frac{C_0}{2} (1 + \ln r) \\ \varepsilon_\theta^{es} = C_1 + \frac{C_2}{r^2} + \frac{C_0}{2} \ln r \end{cases} \quad (14)$$

式中 ε_r^{es} 、 ε_θ^{es} 分别为弹性区的总径向应变与总切向

应变。

边界条件：

$$\begin{cases} \sigma_r^e|_{r=R_0} = \sigma_0 + \eta p_0 \\ \sigma_r^e|_{r=R_s} = \sigma_r^{e-p} \end{cases} \quad (15)$$

式中 σ_r^{e-p} 为弹性区与塑性区交界处的径向应力。

由于在弹性区始终满足关系式

$$\sigma_r^e + \sigma_\theta^e = 2(\sigma_0 + \eta p_0) \quad (16)$$

在弹塑性界面 $r=R_s$ 处，有

$$\sigma_r^{e-p} = \frac{2(\sigma_0 + \eta p_0) - N}{1 + M} \quad (17)$$

式(17)结合边界条件式(15)，求得待定常数 C_1 、 C_2 的表达式为：

$$\begin{cases} C_1 = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E}(\sigma_0 + \eta p_0) + \frac{1-2\nu}{R_0^2} C_2 - \frac{C_0}{2}[(1-\nu) + \ln R_0] \\ C_2 = \frac{1+\nu}{E} \frac{R_0^2 R_s^2}{R_0^2 - R_s^2} (\sigma_0 + \eta p_0 - \sigma_r^{e-p}) + \frac{C_0}{2(1-2\nu)} \frac{R_0^2 R_s^2}{R_0^2 - R_s^2} \ln \frac{R_s}{R_0} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)代入本构方程式(11)，求得弹性区应力场分布表达式为：

$$\begin{cases} \sigma_r^e = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} C_1 - \frac{E}{1+\nu} \frac{C_2}{r^2} + \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{C_0}{2} [(1-\nu) + \ln r] \\ \sigma_\theta^e = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} C_1 + \frac{E}{1+\nu} \frac{C_2}{r^2} + \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \frac{C_0}{2} (\nu + \ln r) \end{cases} \quad (19)$$

弹性区的实际位移应忽略巷道开挖前地应力所引起的变形，因此，弹性区的真实应变为：

$$\begin{cases} \varepsilon_r^e = \frac{1-\nu^2}{E} [(\sigma_r^e - \sigma_0) - \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_\theta^e - \sigma_0)] \\ \varepsilon_\theta^e = \frac{1-\nu^2}{E} [(\sigma_\theta^e - \sigma_0) - \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_r^e - \sigma_0)] \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)代入几何方程式(9)，即可求得弹性区的真实位移 u^{e*} 。

3.3 塑性区分析

根据弹塑性理论，塑性区应变由弹性应变和塑性应变两部分构成^[22]，即：

$$\begin{cases} \varepsilon_r^s = \varepsilon_r^{se} + \varepsilon_r^{sp} \\ \varepsilon_\theta^s = \varepsilon_\theta^{se} + \varepsilon_\theta^{sp} \end{cases} \quad (21)$$

式中 ε_r^s 、 ε_θ^s 分别为塑性区的径向应变与切向应变；

上标 se 表示塑性区内的弹性部分，sp 表示塑性区内的塑性部分；令

$$f(r) = \varepsilon_r^s + \chi \varepsilon_\theta^s \quad (22)$$

将式(21)代入式(22)，求得

$$f(r) = (\varepsilon_r^{se} + \chi \varepsilon_\theta^{se}) + (\varepsilon_r^{sp} + \chi \varepsilon_\theta^{sp}) = \varepsilon_r^{se} + \chi \varepsilon_\theta^{se} \quad (23)$$

式(23)代入几何方程(9)，有

$$f(r) = \varepsilon_r^{se} + \chi \varepsilon_\theta^{se} = \frac{du^s}{dr} + \chi \frac{u^s}{r} \quad (24)$$

结合弹塑性界面处边界条件： $r=R_s$ 时，

$u^s = u^{e-p}$ ，积分得塑性区位移表达式

$$u^s = \frac{1}{r^\chi} \int_{R_s}^r r^\chi f(r) dr + u^{e-p} \left(\frac{R_s}{r}\right)^\chi \quad (25)$$

不考虑巷道开挖前地应力作用产生的位移，利用广义胡克定律计算塑性区内弹性应变，即

$$\begin{cases} \varepsilon_r^{se} = \frac{1-\nu^2}{E} [(\sigma_r^s - \sigma_0) - \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_\theta^s - \sigma_0)] \\ \varepsilon_\theta^{se} = \frac{1-\nu^2}{E} [(\sigma_\theta^s - \sigma_0) - \frac{\nu}{1-\nu} (\sigma_r^s - \sigma_0)] \end{cases} \quad (26)$$

结合弹塑性界面处的边界条件： $r=R_s$ 时，

$\sigma_r^e = \sigma_r^{e-p}$ ，求得塑性区重分布应力为：

$$\begin{cases} \sigma_r^s = (\sigma_r^{e-p} - \frac{\eta s + N}{1-M}) \left(\frac{R_s}{r}\right)^{1-M} + \frac{\eta s + N}{1-M} \\ \sigma_\theta^s = M(\sigma_r^{e-p} - \frac{\eta s + N}{1-M}) \left(\frac{R_s}{r}\right)^{1-M} + \frac{M\eta s + N}{1-M} \end{cases} \quad (27)$$

将式(27)代入式(26)，联立式(23)求得

$$f(r) = \frac{1+\nu}{E} [D_1 \sigma_r^s + D_2 \sigma_\theta^s - D_3 \sigma_0] \quad (28)$$

将式(28)代入式(25)求得塑性区位移表达式

$$u^s = r \frac{1+\nu}{E} \left\{ \frac{D_1 + MD_2}{M + \chi} (\sigma_r^{e-p} - \frac{\eta s + N}{1-M}) \left[\left(\frac{R_s}{r}\right)^{1-M} - \left(\frac{R_s}{r}\right)^{1+\chi}\right] + \left[\frac{D_1(\eta s + N) + D_2(M\eta s + N)}{(1+\chi)(1-M)} - \frac{D_3 \sigma_0}{1+\chi} \right] \right. \\ \left. \left[1 - \left(\frac{R_s}{r}\right)^{1+\chi} \right] \right\} + u^{e-p} \left(\frac{R_s}{r}\right)^\chi$$

把 $r=r_0$ 代入式(29)即可求出巷道洞壁处的位移。

3.4 塑性区半径

结合边界条件 $r=r_0$ 时， $\sigma_r^e = p_1$ ，有

$$\begin{cases} \sigma_r^s = (p_1 - \frac{\eta s + N}{1-M}) \left(\frac{r_0}{r}\right)^{1-M} + \frac{\eta s + N}{1-M} \\ \sigma_\theta^s = M(p_1 - \frac{\eta s + N}{1-M}) \left(\frac{r_0}{r}\right)^{1-M} + \frac{M\eta s + N}{1-M} \end{cases} \quad (30)$$

联立式(27)，求得塑性区半径 R_s 与巷道半径 r_0

之比表达式为：

$$\frac{R_s}{r_0} = \sqrt[1-M]{\frac{(1-M)p_1 - (\eta s + N)}{(1-M)\sigma_r^{e-p} - (\eta s + N)}} \quad (31)$$

4 算例分析

为了讨论巷道围岩塑性区内孔隙水压力和剪胀角等参数的敏感性，下面通过算例进行分析。选取深埋圆形巷道半径 $r_0=3\text{ m}$ ，计算区域半径 $R_0=20r_0=60\text{ m}$ ，认为计算区域外为原岩应力场状态，同时认为该处也处于原始渗流场状态。地下水在围岩内的流动以径向为主，属于层流且符合 Darcy 定律。围岩剪胀角取值小于等于内摩擦角，不考虑巷道支护力作用，基于以上条件，选取的巷道围岩力学参数见表 1。

表 1 围岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock

参数	取值
弹性模量 E/GPa	2.0
泊松比 ν	0.25
黏聚力 c/MPa	2.8
内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	24
剪胀角 $\psi/(\text{°})$	10
初始地应力 σ_0/MPa	30.0
孔隙水压力系数 η	1
外水压力 p_0/MPa	2
支护力 p_i/MPa	0

4.1 与 M-C 准则对比

M-C 准则是目前岩土工程中最常用的强度准则之一，在巷道围岩弹塑性分析中，平面应变条件下的 M-C 准则表达式为^[23]：

$$\sigma_\theta = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_r + \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (32)$$

SMP 准则和 M-C 准则下的围岩应力分布如图 3 所示，可以看出 SMP 准则与 M-C 准则具有不同的径向应力分布和切向应力分布。径向应力随着半径的增大而增大，但增长速率逐渐放缓。切向应力在塑性区内随着半径的增大而增大，在弹塑性界面处达到最大值，之后随着半径的增大而减小。径向应力和切向应力最终都将接近于原岩应力。此外，从图 3 中还可看出，SMP 准则计算得到的塑性区半径比 M-C 准则小，说明 M-C 准则相较于 SMP 准则更为保守。

4.2 孔隙水压力影响

为了分析孔隙水压力对巷道围岩变形和应力分布的影响，选取孔隙水压力 p_0 分别为 0、2、6、10 MPa

进行对比分析，得到的围岩塑性区半径及位移变化如图 4 所示，围岩应力分布如图 5 所示。

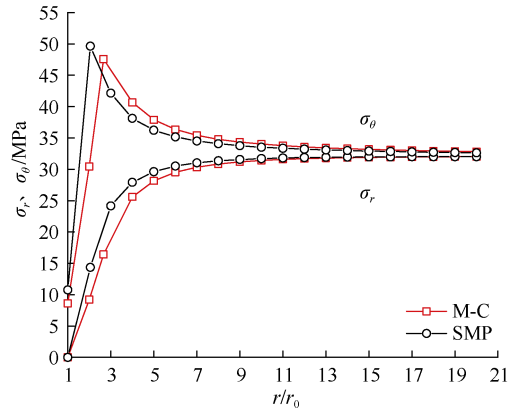


图 3 M-C 准则和 SMP 准则围岩应力分布

Fig.3 Stress distribution of surrounding rock under M-C criterion and SMP criterion

从图 4 可以看出，孔隙水压力对巷道围岩位移的影响十分明显。不考虑孔隙水压力时，洞壁处的位移为 267 mm，当孔隙水压力为 10 MPa 时，巷道洞壁处的位移为 680 mm，为不考虑孔隙水压力时洞壁位移的 2.55 倍，整体表现为孔隙水压力越大，巷道洞壁附近围岩位移量越大的变化趋势；孔隙水压力也影响围岩塑性区的范围，孔隙水压力越大，围岩塑性区半径越大，孔隙水压力为 0 时，塑性区半径为 5.83 m，当孔隙水压力为 10 MPa 时，塑性区半径为 7.96 m，塑性区范围扩大了 36.5%。图 5 可以看出，在塑性区范围内，随着孔隙水压力的增大，围岩的径向应力变化和切向应力变化并不明显。孔隙水压力越大，弹塑性界面处的峰值切向应力越大。孔隙水压力为 10 MPa 时，最大切向应力为 61.33 MPa，孔隙水压力为 0 时，最大切向应力为 46.72 MPa。

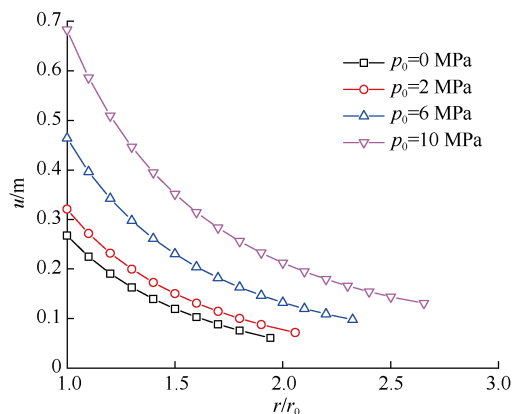


图 4 孔隙水压力对塑性区半径和位移的影响

Fig.4 Influence of pore water pressure on plastic zone radius and displacements

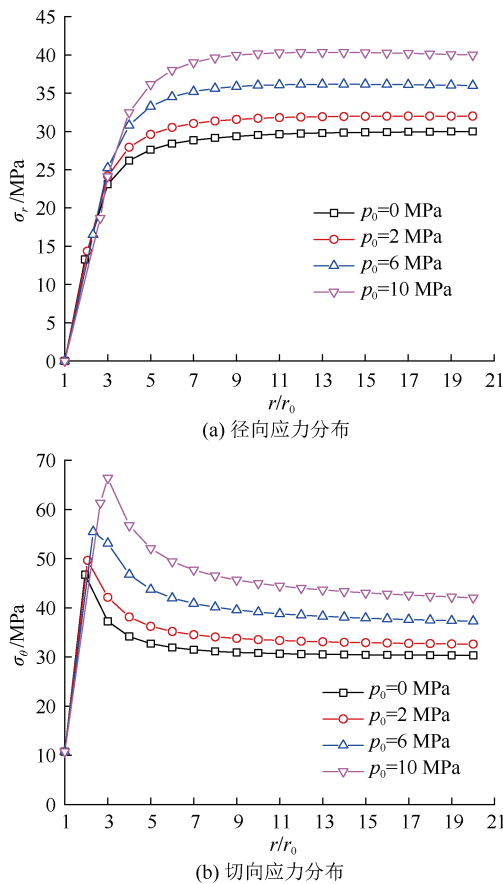


图 5 孔隙水压力对围岩应力分布的影响

Fig.5 Influence of pore water pressure on stress distribution of surrounding rock

4.3 剪胀的影响

巷道围岩的剪胀性质主要通过剪胀角 ψ 和塑性势函数来体现。本文针对关联流动法则($\psi=\phi$)，非关联流动法则($\psi\neq\phi$)和不考虑剪胀($\psi=0$)3 种情况，求出相应的剪胀系数 χ 的值，并对不同剪胀角所对应的塑性区半径和位移分布进行对比分析，计算结果如图 6 所示。可以看出，剪胀角的变化并不会改变围岩塑性区半径，但剪胀角对围岩塑性区位移的影响较为明显，关联流动法则($\psi=\phi=24^\circ$)计算得到的洞壁位移量为 751 mm，非关联流动法则($\psi=10^\circ$)计算得到的洞壁位移量是非关联流动法则的 2.34 倍。不考虑剪胀($\psi=0$)计算得到的洞壁位移量为 225 mm，是非关联流动法则计算结果的 70.1%。也就是说，关联流动法则过多地考虑了剪胀的影响，而不考虑剪胀则会低估围岩的实际变形。

5 结论

a. 基于广义 SMP 准则推导了深埋圆形巷道围岩的弹塑性统一解，发现 SMP 准则计算得到的径向应力普遍大于传统的 M-C 准则，但塑性区半径却相

对较小，说明 M-C 准则相较于广义 SMP 准则更为保守。

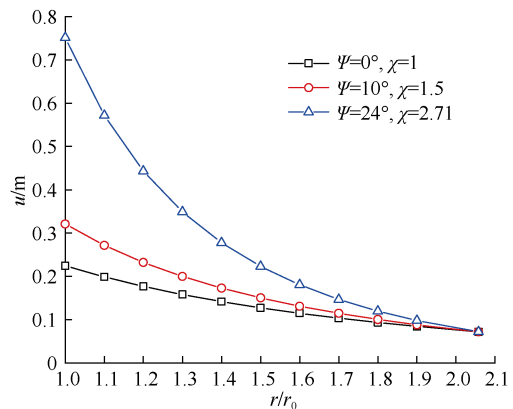


图 6 剪胀对塑性区半径和位移的影响

Fig.6 Influence of dilatancy on plastic zone radius and displacements

b. 孔隙水压力对巷道围岩位移的影响十分明显，孔隙水压力越大，巷道洞壁附近围岩位移量越大，孔隙水压力为 10 MPa 时位移量是不考虑孔隙水压力时的 2.55 倍；此外，孔隙水压力也会影响到围岩塑性区的范围，且两者之间成正比；相较于不考虑孔隙水压力，孔隙水压力为 10 MPa 时塑性区范围扩大了 36.5%；在塑性区内，随着孔隙水压力的增大，围岩的径向和切向应力变化并不明显；孔隙水压力越大，弹塑性交界面处的峰值切向应力越大。

c. 关联流动法则计算得到的洞壁位移量是非关联流动法则的 2.34 倍，而不考虑剪胀计算得到的位移量仅为非关联流动法则的 70.1%，采用相关联流动法则会低估围岩的强度，而不考虑剪胀则会低估围岩的实际变形，故应采用考虑剪胀的非关联流动法则对围岩塑性区应变进行分析。

参考文献

- [1] 刘成学, 杨林德, 李鹏. 考虑应力重分布的深埋圆形透水隧道弹塑性解[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 16-20.
LIU Chengxue, YANG Linde, LI Peng. Elastic-plastic analytical solution of deep buried circle tunnel considering stress redistribution[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2): 16-20.
- [2] 荣传新, 程桦. 地下水渗流对巷道围岩稳定性影响的理论解[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 741-744.
RONG Chuanxin, CHENG Hua. Stability analysis of rocks around tunnel with ground water permeation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 741-744.
- [3] 李宗利, 任青文, 王亚红. 考虑渗流场影响深埋圆形隧道的弹塑性解[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8):

- 1291–1295.
- LI Zongli, REN Qingwen, WANG Yahong. Elasto-plastic analytical solution of deep-buried circle tunnel considering fluid flow field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1291–1295.
- [4] 黄阜, 杨小礼. 考虑渗透力和原始 Hoek-Brown 屈服准则时圆形洞室解析解[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1627–1632.
- HUANG Fu, YANG Xiaoli. Analytical solution of circular openings subjected to seepage in Hoek-Brown media[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1627–1632.
- [5] 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. 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.
- [6] 张常光, 胡云世, 赵均海, 等. 深埋圆形水工隧洞弹塑性应力和位移统一解[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1738–1745.
- ZHANG Changguang, HU Yunshi, ZHAO Junhai, et al. Elastic-plastic unified solutions for stresses and displacements of a deep buried circular hydraulic tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1738–1745.
- [7] 张常光, 张庆贺, 赵均海. 考虑应变软化、剪胀和渗流的水工隧洞解析解[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1941–1946.
- ZHANG Changguang, ZHANG Qinghe, ZHAO Junhai. Analytical solutions of hydraulic tunnels considering strain softening, shear dilation and seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1941–1946.
- [8] 张常光, 赵均海, 杜文超. 岩石中间主应力效应及强度理论研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 6–19.
- ZHANG Changguang, ZHAO Junhai, DU Wenchao. Advances in rock for intermediate principal stress effect and strength theory[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 6–19.
- [9] 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.
- [10] MATSUOKA H, NAKAI T. Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stresses[C]// Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan: Japan Society of Civil Engineers, 1974, 232: 59–70.
- [11] 吴创周, 杨林德, 李秋实. 弹脆塑性围岩应力和位移的广义 SMP 准则解[J]. 工程力学, 2013, 30(8): 223–228.
- WU Chuangzhou, YANG Linde, LI Qiushi. Perfect elastic-brittle-plastic solution of axisymmetric circular openings in rock mass on extended SMP criterion[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 223–228.
- [12] 吕彩忠, 孙亚丽. 软岩洞室最优支护的广义 SMP 准则解与对比研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1956–1962.
- LYU Caizhong, SUN Yali. A generalized SMP criterion for the optimal support of soft rock tunnel and its comparative analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1956–1962.
- [13] 朱建明, 程海峰, 姚仰平. 基于 SMP 强度准则的岩石残余应力与围压的关系[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增刊 1): 43–48.
- ZHU Jianming, CHENG Haifeng, YAO Yangping. Relationship between the residual stress and the surrounding rock pressure based on SMP failure criterion[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 43–48.
- [14] MATSUOKA H, YAO Y, ICHIMURA M. A transformed stress based on extended SMP criterion and its application to elastoplastic model for geomaterials[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2001, 2001(680): 211–224.
- [15] MATSUOKA H, YAO Y, SUN D. The Cam-clay models revised by the SMP criterion[J]. Soils and Foundations, 1999, 39(1): 81–95.
- [16] 朱建明, 吴则祥, 张宏涛, 等. 基于 Lade-Duncan 和 SMP 两种强度准则的岩石残余应力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1715–1720.
- ZHU Jianming, WU Zexiang, ZHANG Hongtao, et al. Study of residual stress of rock based on Lade-Duncan and SMP strength criteria[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1715–1720.
- [17] 罗汀, 姚仰平, MATSUOKA H. 基于 SMP 准则的土的平面应变强度公式[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 390–393.
- LUO Ting, YAO Yangping, MATSUOKA H. Soil strength equation in plane strain based on SMP[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 390–393.
- [18] 郝冬雪, 陈榕, 许成顺, 等. 基于广义 SMP 准则及应力路径法的柱孔扩张分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2781–2789.
- HAO Dongxue, CHEN Rong, XU Chengshun, et al. Analysis of cylindrical cavity expansion based on extended SMP criterion and stress path approach[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2781–2789.

- [19] 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. Elasto-plastic analysis on surrounding rock of roadways based on seepage, strain softening and dilatancy[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(1): 96–101.
- [20] 潘继良, 高召宁, 任奋华. 考虑应变软化和扩容的圆形巷道围岩强度准则效应[J]. 煤炭学报, 2018, 43(12): 3293–3301.
PAN Jiliang, GAO Zhaoning, REN Fenhua. Effect of strength criteria on surrounding rock of circular roadway considering strain softening and dilatancy[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3293–3301.
- [21] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [22] 潘继良, 高召宁, 郑志伟, 等. 考虑损伤与剪胀及中间主应力的巷道围岩弹塑性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(2): 40–45.
PAN Jiliang, GAO Zhaoning, ZHENG Zhiwei, et al. Elasto-plastic analysis on surrounding rock of roadway considering damage, shear dilation and intermediate principal stress[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(2): 40–45.
- [23] 王云飞, 郑晓娟, 焦华喆, 等. 砂岩试验强度与强度准则预测结果对比分析[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(5): 122–125.
WANG Yunfei, ZHENG Xiaojuan, JIAO Huazhe, et al. Comparative analysis of sandstone experiment strength and different strength criteria prediction results[J]. Coal Geology and Exploration, 2016, 44(5): 122–125.

(责任编辑 周建军)