

一种确定双重孔隙介质黏聚力与内摩擦角的方法及其有限元分析

张玉军^①, 杨超帅^②, 琚晓冬^{①③*}

① 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

② 中铁隧道集团有限公司技术中心, 洛阳 471009;

③ 河南理工大学土木工程学院, 焦作 454000

* E-mail: juxiaodong@hpu.edu.cn

收稿日期: 2013-06-02; 接受日期: 2013-11-19

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2010CB732101)和国家自然科学基金(批准号: 51079145, 51379201)资助项目

摘要 对于双重孔隙-裂隙介质岩体, 考虑裂隙对孔隙基质强度的弱化作用, 提出了一种确定此种岩体表征单元中任一平面上黏聚力 c_N 及内摩擦角 φ_N 的方法, 通过本方法得到计算结果与 Attewell 法所得岩体强度各向异性变化曲线基本一致, 证明了所建立的 c_N 、 φ_N 值计算式是合理的. 将上述求 c_N 、 φ_N 的方法引入所研制的二维弹塑性有限元程序中, 针对岩体中不同裂隙状态的一个矩形地下洞室, 对 3 种不同工况进行计算与分析, 结果显示: 随着裂隙组数的增加, 岩体的黏聚力和内摩擦角减小, 围岩中应力、位移的量值及分布发生明显变化, 且塑性区的面积非线性急剧增长.

关键词

双重孔隙介质
黏聚力
内摩擦角
有限元分析

对于双重孔隙-裂隙介质中存在的温度场、应力场、渗流场和核素迁移的相互耦合过程, 涉及处置库的承载能力及稳定性问题, 这其中就有如何给出围岩是处于弹性阶段还是进入塑性区的判别准则. 国内外一些学者已就其中若干场的耦合情况进行了研究. 然而在这些研究中, 虽然涉及材料中的损伤、塑性及破坏现象, 但要么是只考虑水-力耦合的单一裂隙岩体^[1~7], 要么是只考虑热-水-力(-化学)耦合的单一孔隙介质^[8~12], 或没有计入温度场的影响且不区别岩块和裂隙对强度的不同“贡献”^[13]. 对于现在一般的双重孔隙-裂隙介质模型而言, 在应力平衡方程中, 是将岩块和裂隙按一定方式排列组合成一种混合介质, 其可体现岩块的弹性模量、泊松比以及裂隙的组

数、间距、方向、连通率和刚度对本构关系的影响. 以此类推, 混合介质的总体强度也应考虑基质强度和裂隙强度的组合构成, 且在热-水-力-化学耦合条件下还应计入温度, 孔隙水压力和溶质浓度对混合介质强度的影响, 然而到目前为止还没有人提出过这样的混合介质强度模型. 故随着岩体力学研究的深入及其精细化和科学化, 需要发展和建立新的热-水-力-化学耦合条件下的双重孔隙-裂隙介质的强度准则. 不言而喻, 这是一项难度颇大的工作.

作为该项研究的第一步, 本文作者暂不考虑热、水及化学因素, 而仅计入裂隙对原岩的弱化作用, 基于摩尔-库伦准则, 提出了一种求解双重孔隙-裂隙介质的黏聚力及内摩擦角的方法. 并将其引入本文作

引用格式: 张玉军, 杨超帅, 琚晓冬. 一种确定双重孔隙介质黏聚力与内摩擦角的方法及其有限元分析. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 182-188
Zhang Y J, Yang C S, Ju X D. A method for determining cohesion and internal friction angle of dual-pore-fracture medium and the relative FEM analyses (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 182-188, doi: 10.1360/092013-660

者所研制的二维弹塑性有限元程序中, 针对一个矩形地下洞室的3种工况: 1) 均质岩体; 2) 赋存一组倾斜裂隙的岩体; 3) 具有二组倾斜裂隙的岩体, 计算了围岩中的应力、位移及塑性区, 并进行分析与对比, 得出了相关具有指导意义的结论.

1 双重孔隙-裂隙介质的强度值

图1为双重孔隙-裂隙介质岩体表征单元(REV)示意图, 其中赋存有 n 组裂隙, 从而有

$$r_R + r_J = r_R + \sum_{i=1}^n r_{Ji} = 1, \quad (1)$$

$$\frac{V_R}{V_Z} = r_R, \quad \frac{V_{Ji}}{V_Z} = r_{Ji}, \quad \frac{V_J}{V_Z} = r_J, \quad (2)$$

$$V_J = \sum_{i=1}^n V_{Ji}, \quad (3)$$

$$V_R + V_J = V_Z, \quad (4)$$

其中 V_Z, V_R, V_J, V_{Ji} 依次为表征岩体单元, 该单元中孔隙基质, 总的裂隙及单组裂隙(包括强度影响带)的体积; r_R, r_{Ji}, r_J 分别为岩体孔隙基质, 单组裂隙(包括强度影响带)及总裂隙的体积与表征单元体积之比.

对于裂隙强度影响带的各种特性, 目前还未见到有全面的相关研究成果. 华若丹^[14]曾提出过预测断层强度降低带宽度的经验公式:

$$B_s = 8H + 2.09, \quad (5)$$

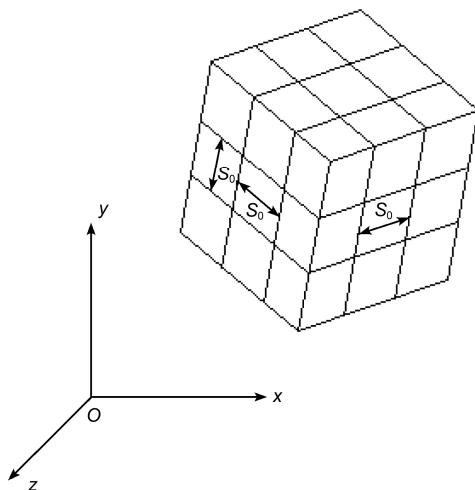


图1 双重孔隙-裂隙介质岩体表征单元

其中 B_s 为断层带及其强度降低带的宽度; H 为断层裂距.

本文作者借用(5)式的函数形式作为裂隙体积的计算依据, 且暂取 B_s 为 $5H$. 故有

$$V_{Ji} = V_{Ji1} + V_{Ji2} = 6V_{Ji1}, \quad (6)$$

其中 V_{Ji1}, V_{Ji2} 分别为表征单元中单组裂隙及其强度降低带的体积.

由于双重孔隙-裂隙介质岩体呈现出力学性质各向异性的特点^[15], 本文中裂隙的黏聚力及内摩擦角当成矢量看待, 即其具有大小和方向, 并且可以分解, 由此给出

$$c_i \cos \alpha_i = c_{ix}, \quad c_i \cos \beta_i = c_{iy}, \quad c_i \cos \gamma_i = c_{iz}, \quad (7)$$

$$\varphi_i \cos \alpha_i = \varphi_{ix}, \quad \varphi_i \cos \beta_i = \varphi_{iy}, \quad \varphi_i \cos \gamma_i = \varphi_{iz}, \quad (8)$$

其中 c_i, φ_i 分别为单组裂隙的黏聚力及内摩擦角; $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 依次为单组裂隙面法线与坐标轴 x, y, z 夹角的余弦; c_{ix}, c_{iy}, c_{iz} 和 $\varphi_{ix}, \varphi_{iy}, \varphi_{iz}$ 分别为 c_i, φ_i 在3个坐标轴方向的分量.

根据混合材料强度的概念^[16], 作者假定: 双重孔隙-裂隙介质的总体强度值等于孔隙基质及裂隙的相应强度值与各自体积比的乘积之和, 从而得到

$$r_R c_R + \sum_{i=1}^n r_{Ji} c_{ik} = c_k, \quad (9-1)$$

$$r_R \varphi_R + \sum_{i=1}^n r_{Ji} \varphi_{ik} = \varphi_k, \quad (9-2)$$

其中 $k = x, y, z$; c_R, φ_R 分别为岩体孔隙基质的黏聚力和内摩擦角; c_k, φ_k 分别为双重孔隙-裂隙介质岩体在 k 轴方向的黏聚力和内摩擦角.

对于(9-1)和(9-2)式, 对于单一孔隙岩体, 即 $r_{Ji} = 0$, 则 $r_R = 1$, 此时有 $c_k = c_R, \varphi_k = \varphi_R$.

借助于弹性力学中由作用在一点上的3个主应力分量求过该点任一平面上正应力的方法^[17], 因双重孔隙-裂隙介质岩体在 x, y, z 轴方向的黏聚力和内摩擦角分别为 c_x, c_y, c_z 和 $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$, 则在其表征单元中任一平面上有

$$c_N = l^2 c_x + m^2 c_y + s^2 c_z, \quad (10-1)$$

$$\varphi_N = l^2 \varphi_x + m^2 \varphi_y + s^2 \varphi_z, \quad (10-2)$$

其中 c_N, φ_N 分别为这一平面上的黏聚力和内摩擦角; l, m, s 为该平面法线的方向余弦.

2 双重介质强度值各向异性的表现

当岩体表征单元简化为平面中的问题时, 若设为 x - y 平面, 则有 $s=0$, (10)式变为

$$c_N = l^2 c_x + m^2 c_y, \quad (11-1)$$

$$\varphi_N = l^2 \varphi_x + m^2 \varphi_y. \quad (11-2)$$

如图 2 所示, Attewell 对一种 Penrhyn 板岩试件, 通过改变板岩层面相对于最大主应力 σ_1 的倾角 β , 在普通三向应力加载条件下, 得出了试件在不同 β 角时的 c , φ 值. Attewell 和 Sandford^[18]给出的 c , φ 的经验公式形式为

$$c = c_1 - c_2 \cos 2(\gamma - \beta), \quad (12-1)$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \cos 2(\delta - \beta), \quad (12-2)$$

其中 c_1 , c_2 及 φ_1 , φ_2 为常数, γ , δ 为所求 c , φ 值的面与最大主应力 σ_1 方向的夹角.

一般来说, 层状岩体的抗剪强度 S 沿着层面方向具有最小值 S_{\min} , 而在垂直于层面方向上具有最大值 S_{\max} , 其间随着与层面夹角 θ 方向的变化而按某种规律变化(图 3), 作为一种近似, 本文作者对此提出了一种 c , φ 值的表达式^[19]:

$$\begin{aligned} c &= \frac{2\theta}{\pi}(c_{\max} - c_{\min}) + c_{\min}, \\ \varphi &= \frac{2\theta}{\pi}(\varphi_{\max} - \varphi_{\min}) + \varphi_{\min}, \end{aligned} \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad (13)$$

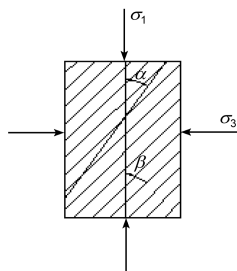


图 2 层面与破坏面相对方位图

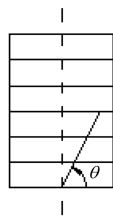


图 3 计算面与层面相对关系

其中 c_{\min} , φ_{\min} 及 c_{\max} , φ_{\max} 分别是沿着岩体层面方向和垂直与层面方向的黏聚力和内摩擦角.

根据文献[20]的研究成果, 令(12)式中的 $c_1=4.30$ MPa, $c_2=2.28$ MPa, $\varphi_1=39.5^\circ$, $\varphi_2=11.3^\circ$.

从而可得

$$c_{\min} = c_1 - c_2 = 2.20 \text{ MPa},$$

$$c_{\max} = c_1 + c_2 = 6.58 \text{ MPa},$$

$$\varphi_{\min} = \varphi_1 - \varphi_2 = 28.2^\circ,$$

$$\varphi_{\max} = \varphi_1 + \varphi_2 = 50.8^\circ.$$

设双重孔隙-裂隙介质岩体沿着 x , y 方向亦分别具有最小强度值和最大值, 即

$$c_x = c_{\min}, \quad c_y = c_{\max},$$

$$\varphi_x = \varphi_{\min}, \quad \varphi_y = \varphi_{\max}.$$

令 $\beta = \pi/2$, 即岩体层面与最大主应力 σ_1 的方向垂直, 使(12)和(13)式中的 γ , δ 及 θ 从 0° 变化到 90° , 并使(11)式中的 l , m 相应地在 $0 \sim 1$ 变动, 所求得的相关方向上的 c , φ 值见图 3. 可知(11)和(12)式所得强度随与夹角 θ 的变化曲线是一致的, 二者与(13)式所得结果的趋势亦吻合. 这表明, 本文作者所提出的

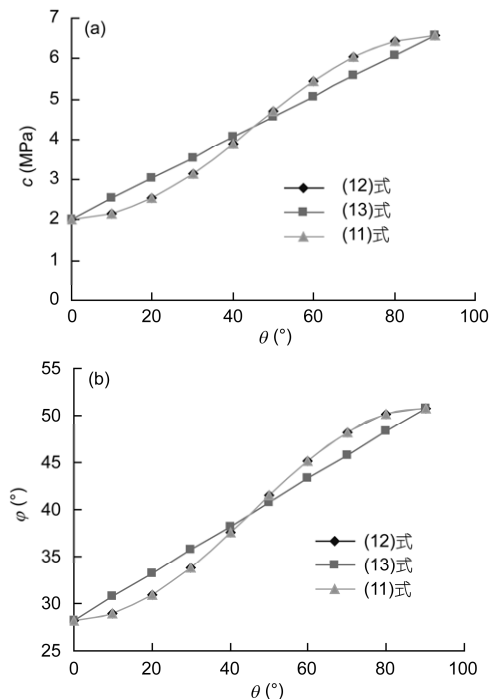


图 4 剪切参数与夹角的关系曲线
(a) 黏聚力; (b) 内摩擦角

双重孔隙-裂隙介质岩体表征单元中任一平面上 c_N , φ_N 值的计算(10)式是合理的.

3 双重介质的应力-应变关系

若孔隙岩体中发育有 n 组裂隙, 则在整体坐标系中有^[21]

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C}\boldsymbol{\sigma}, \quad (14)$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_R + \mathbf{C}_J = \mathbf{C}_R + \sum_{i=1}^n \mathbf{C}_{J_i}, \quad (15)$$

其中 $\boldsymbol{\varepsilon}$, $\boldsymbol{\sigma}$, \mathbf{C} 依次为应变矢量, 总应力矢量和柔度矩阵; \mathbf{C}_R , \mathbf{C}_J 分别为孔隙岩体和裂隙对柔度矩阵的“贡献”; \mathbf{C}_{J_i} 为第 i 组裂隙的柔度矩阵.

对于平面应变问题, 有

$$\mathbf{C}_R = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1-\mu^2 & -\mu(1+\mu) & 0 \\ -\mu(1+\mu) & 1-\mu^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\mathbf{C}_{J_i} = \mathbf{L}_i \mathbf{C}'_{J_i} \mathbf{L}_i^T, \quad (17)$$

$$\mathbf{C}'_{J_i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_i / (K_{ni} S_i) & 0 \\ 0 & 0 & l_i / (K_{si} S_i) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\mathbf{L}_i = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_i & \sin^2 \theta_i & -2 \sin \theta_i \cos \theta_i \\ \sin^2 \theta_i & \cos^2 \theta_i & 2 \sin \theta_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \theta_i & \cos^2 \theta_i - \sin^2 \theta_i \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中 E , μ 分别孔隙岩体的弹性模量和泊松比; \mathbf{C}'_{J_i} 为局部坐标系中的裂隙柔度矩阵; \mathbf{L}_i 为坐标变换矩阵; K_{ni} , K_{si} , l_i , S_i 依次为裂隙的法向刚度、切向刚度、连通率和间距; θ_i 为裂隙面法线与整体坐标系中 Y 轴的夹角.

而刚度矩阵与柔度矩阵的关系为

$$\mathbf{D} = \mathbf{C}^{-1}. \quad (20)$$

4 算例

设在 x - y 坐标系中有一平面计算域, 其尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, 左右侧面的水平方向及底面的垂直方向进行法向位移约束, 顶面为位移自由. 域中有一个

$20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的矩形洞室, 其埋深为 40 m . 岩体中发育有二组裂隙, 其倾角分别为 20° 和 70° (裂隙面与水平面 (x 轴正向) 的夹角), 裂隙开度, 间距分别均为 1.0 cm 和 0.3 m . 岩体孔隙基质及二组裂隙的黏聚力和内摩擦角分别为: $c_R = 84.0 \text{ kPa}$, $\varphi_R = 35.5^\circ$, $c_1 = 13.0 \text{ kPa}$, $\varphi_1 = 0.0^\circ$; $c_2 = 59.3 \text{ kPa}$, $\varphi_2 = 20.1^\circ$. 取表征单元的体积为 1 m^3 , 从而有 $r_R = 0.6$, $r_{J1} = r_{J2} = 0.2$, $r_J = r_{J1} + r_{J2} = 0.4$, 因此可得 $c_x = 570 \text{ kPa}$, $c_y = 62.0 \text{ kPa}$, $\varphi_x = 22.7^\circ$, $\varphi_y = 25.1^\circ$.

岩体孔隙基质的弹性模量和泊松比分别为 $E = 4000.0 \text{ MPa}$, $\mu = 0.3$, 二组裂隙的法向刚度和切向刚度分别为: $k_{n1} = 2000.0 \text{ MPa/m}$, $k_{s1} = 1000.0 \text{ MPa/m}$, $k_{n2} = 1000.0 \text{ MPa/m}$, $k_{s2} = 500.0 \text{ MPa/m}$.

对于 3 种工况: 1) 均质岩体; 2) 仅赋存倾角 20° 裂隙组的岩体; 3) 具有二组裂隙的岩体, 使用 Drucker-Prager 屈服准则, 进行弹塑性计算, 计算结果如下.

计算终了时 3 种工况洞室附近围岩中位移矢量, 主应力等值线, 塑性区的分布见图 5~7, 洞室周边 4 个特征点 (分别位于左、右边墙及底板和顶拱的中点) 的位移值, 主应力值及塑性区面积见表 1.

从计算结果可以看到, 在洞室周边, 工况 1: 最大主应力为 $-0.28 \sim -0.52 \text{ MPa}$, 最小主应力为 $-0.72 \sim -1.56 \text{ MPa}$; 水平位移绝对值为 $0.0 \sim 0.21 \text{ mm}$,

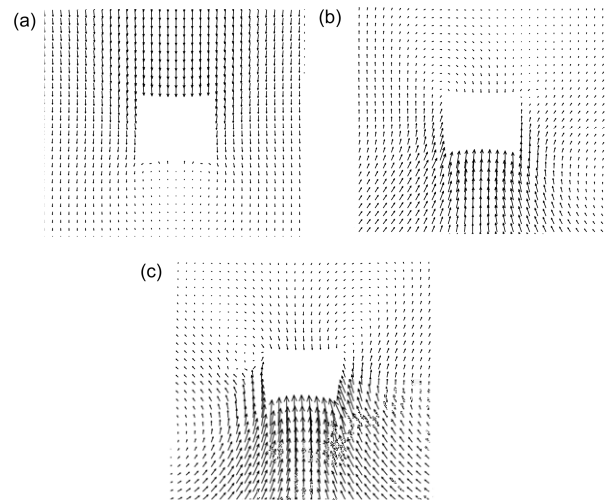


图 5 岩体中位移矢量
(a) 均质岩体; (b) 一组裂隙; (c) 二组裂隙

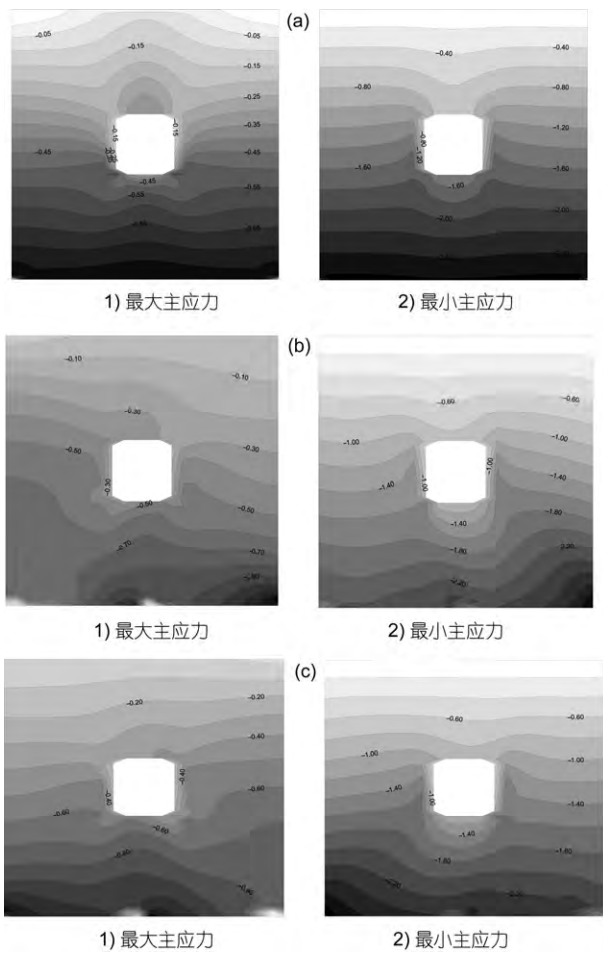


图6 岩体中主应力等值线(MPa)
(a) 均质岩体; (b) 一组裂隙; (c) 二组裂隙

垂直位移绝对值为 0.01~3.30 mm, 塑性区面积为 72 m². 工况 2: 最大主应力为-0.35~-0.45 MPa, 最小主

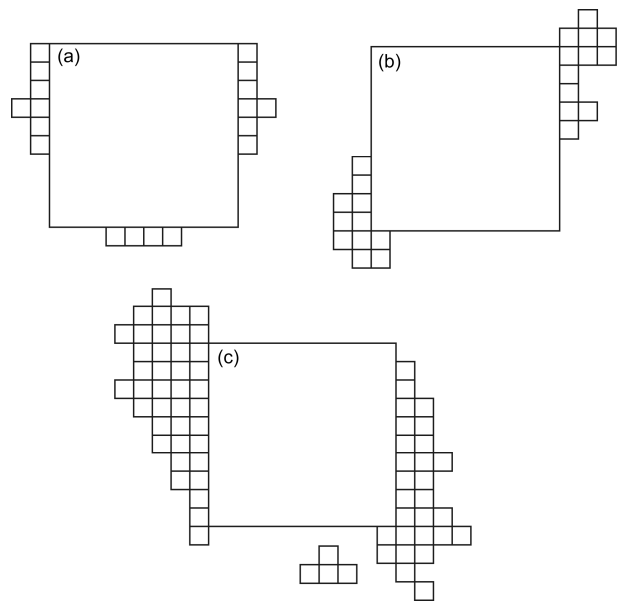


图7 岩体中塑性区
(a) 均质岩体; (b) 一组裂隙; (c) 二组裂隙

应力为-0.87~-1.67 MPa; 水平位移绝对值为 0.01~0.31 mm, 垂直位移绝对值为 0.74~4.65 mm, 塑性区面积为 92m². 工况 3: 最大主应力为-0.38~-0.52 MPa, 最小主应力为-0.90~-1.61 MPa; 水平位移绝对值为 0.07~0.81 mm, 垂直位移绝对值为 1.28~7.39 mm, 塑性区面积为 272 m². 围岩中位移矢量, 主应力等值线, 塑性区的分布也有明显不同. 并可知, 随着裂隙组数的增加, 塑性区面积急剧上升, 以均质岩体时的塑性区面积为 1, 则具有一组, 二组裂隙时岩体的塑性区面积分别为 1.28 和 3.78. 这显示, 裂隙组数的增加使得岩体破碎程度增大, 其强度指标(黏聚力和内摩擦

表1 洞室周边3个特征点的若干计算值

工况及位置		水平位移 U_x (mm)	垂直位移 U_y (mm)	最大/最小主应力 σ_1/σ_3 (MPa)	塑性区面积 (m ²)
均质岩体	底板中点	0.00	0.01	-0.37/-1.56	72
	左墙中点	0.21	-1.62	-0.28/-1.43	
	右墙中点	-0.21	-1.62	-0.28/-1.43	
	顶板中点	0.00	-3.30	-0.33/-0.72	
一组裂隙	底板中点	0.31	4.65	-0.45/-1.05	92
	左墙中点	0.11	1.66	-0.42/-1.67	
	右墙中点	-0.21	-1.62	-0.41/-1.64	
	顶板中点	0.01	-0.74	-0.35/-0.87	
二组裂隙	底板中点	-0.47	7.39	-0.52/-1.05	272
	左墙中点	-0.07	3.08	-0.48/-1.61	
	右墙中点	-0.81	2.23	-0.42/-1.44	
	顶板中点	0.16	-1.28	-0.38/-0.90	

注: 水平位移向右为正, 垂直位移向上为正, 负的主应力为压性

角)减小, 因而围岩的稳定性变差.

5 结论

对于双重孔隙-裂隙介质岩体, 考虑裂隙对孔隙基质强度的弱化效应, 且暂时不计热, 水及化学因素的作用, 基于摩尔-库伦准则, 提出了一种确定此种岩体表征单元中任一平面上黏聚力 c_N 及内摩擦角 φ_N 的方法. 使用该方法与 Attewell 方法中求解 c_N , φ_N 的公式进行对比计算, 看到二者所得岩体强度各

向异性的变化曲线是一致的, 这表明本文作者所建立的 c_N , φ_N 值计算式是合理的. 将该 c_N , φ_N 值计算式引入本文作者所研制的二维弹塑性有限元程序中, 设定一个存在不同裂隙状态的矩形地下洞室, 对3种不同工况进行计算与分析, 并对比围岩中的应力, 位移及塑性区. 其结果显示: 随着裂隙组数的增加, 岩体破碎程度增大, 其黏聚力和内摩擦角减小, 围岩中应力, 位移的量值及分布发生明显变化, 塑性区的分布由对称变为不对称, 并且其面积呈非线性急剧增长模式.

参考文献

- 1 杨天鸿, 唐春安, 梁正召, 等. 脆性岩石破裂过程损伤与渗流耦合数值模型研究. 力学学报, 2003, 35: 533-541
- 2 唐春安, 马天辉, 李连崇, 等. 高放废料地质处置中多场耦合作用下的岩石破裂问题. 岩石力学与工程学报, 2007, 26: 3932-3938
- 3 郑少河, 朱维申. 裂隙岩体渗流损伤耦合模型的理论分析. 岩石力学与工程学报, 2001, 20: 156-159
- 4 朱珍德, 孙钧. 裂隙岩体非稳态渗流场与损伤场耦合分析模型. 四川联合大学学报(工程科学版), 1999, 3: 73-80
- 5 王媛, 徐志英, 速宝玉. 复杂裂隙岩体渗流与应力弹塑性全耦合分析. 岩石力学与工程学报, 2000, 19: 177-181
- 6 盛金昌, 速宝玉, 王媛, 等. 裂隙岩体渗流-弹塑性应力耦合分析. 岩石力学与工程学报, 2000, 19: 304-309
- 7 杨延毅, 周维垣. 裂隙岩体的渗流-损伤耦合分析模型及其工程应用. 水利学报, 1991, 5: 19-27
- 8 刘泽佳, 李锡夔. 非饱和多孔介质中混合元法的化学-热-渗流-力学耦合的本构模拟. 计算力学学报, 2007, 24: 397-402
- 9 刘泽佳, 李锡夔, 武文华. 多孔介质中化学-热-水力-力学耦合过程本构模型和数值模拟. 岩土工程学报, 2004, 26: 797-803
- 10 李荣涛, 李锡夔. 高温下混凝土化学塑性-损伤耦合本构模拟及破坏分析. 应用力学学报, 2008, 25: 51-56
- 11 Wu W H, Li X K, Charlier R, et al. A thermo-hydro-mechanical constitutive model and its numerical modeling for unsaturated soils. Comput Geotech, 2004, 31: 155-167
- 12 Hueckel T, Pellegrini R, Olmo C. A constitutive study of thermo-elasto-plasticity of deep carbonatic clays. Int J Numer Anal Meth Geomech, 1998, 22: 549-574
- 13 黎水泉. 弹脆塑性双重孔隙介质油藏流固耦合数值模拟. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2000
- 14 华若丹. 利用隐伏断层定量预测公式确定断层的延展范围. 江苏煤炭, 1996, 4: 41-42
- 15 Elsworth D, Mao B. Flow-deformation response of dual-porosity media. J Geotech Eng, 1992, 118: 107-124
- 16 沈观林, 胡更开. 复合材料力学. 北京: 清华大学出版社, 2006
- 17 徐芝纶. 弹性力学(上册). 北京: 人民教育出版社, 1980
- 18 Attewell B, Sandford R. Intrinsic shear strength of a brittle, anisotropic rock-I: Experimental and mechanical interpretation. Int J Rock Mech Min Sci, 1974, 11: 423-430
- 19 张玉军, 唐仪兴. 考虑层状岩体强度异向性的地下洞室平面有限元分析. 岩土工程学报, 1999, 21: 307-310
- 20 张玉军, 刘谊平. 层状岩体抗剪强度的方向性及剪切破坏面的确定. 岩土力学, 2001, 22: 254-257
- 21 张玉军. 遍有节理岩体的双重孔隙-裂隙介质热-水-应力耦合模型及有限元分析. 岩石力学与工程学报, 2009, 28: 947-955

A method for determining cohesion and internal friction angle of dual-pore-fracture medium and the relative FEM analyses

ZHANG YuJun¹, YANG ChaoShuai² & JU XiaoDong^{1,3}

¹ *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;*

² *Technical Centre, China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang 471009, China;*

³ *Civil Engineering School, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China*

For dual-pore-fracture rock mass, by considering the effect of fracture weakening, a method for determining the cohesion c_N and internal friction angle ϕ_N of arbitrary plane in a representative element was suggested. It was proven to be reasonable for the coordination of the anisotropy variation curves of rock mass strength obtained by this and Attewell's methods. Introducing the method for the solving of c_N and ϕ_N into the elastic-plastic FEM code developed by the authors, aimed at a rectangular underground cave, three cases with different fracture states were computed. The results show that with the increasing of fracture set number, the cohesion and internal friction angle of rock mass and the plasticity zone decreased and sharply, nonlinearly grew respectively, and the magnitude and distribution of stress and displacement in the surrounding rock mass changed obviously.

dual-pore-fracture medium, cohesion, internal friction angle, FEM analysis

doi: 10.1360/092013-660