

# 锚固的双重孔隙 - 裂隙岩体流变模型及其 地下洞室二维有限元分析

张玉军<sup>1</sup>, 张维庆<sup>2</sup>

(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, 湖北 武汉 430071; 2. 中铁隧道勘测设计院有限公司, 天津 300133)

**摘要:** 针对所提出的双重孔隙 - 裂隙介质西原流变模型, 建立相应的锚固体模型, 给出将锚杆材料的弹性模量、抗剪强度等效均化到锚固体中的数学表达式。模拟一个假定的矩形地下洞室, 就毛洞、使用不同厚度的锚固单元和杆单元的工况, 进行二维有限元计算, 分析、对比围岩中的位移、应力及塑性区。其结果显示: 系统锚杆对洞周位移有一定约束作用, 但不与其长度成正比, 与杆单元相比锚固单元对位移的约束作用要明显; 锚固区有明显的应力集中现象, 而随锚杆长度的增加围岩中应力分布及量值也有一定的变化; 系统锚杆使得围岩中的塑性区明显减小, 但其作用也不与其长度成正比; 而对同样长度锚杆分别使用锚固单元和杆单元时, 所得的塑性区面积接近, 但分布形状有所不同。

**关键词:** 数值分析; 双重孔隙 - 裂隙岩体; 黏弹塑性; 锚固体模型; 地下洞室; 有限元分析

**中图分类号:** O 241

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2018)增 1 - 3300 - 10

## A bolted rheological model for dual-pore-fracture rock mass and 2D FEM analyses for underground cavern

ZHANG Yujun<sup>1</sup>, ZHANG Weiqing<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. China Railway Tunnel Survey and Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300133, China)

**Abstract:** Aiming at Nishihara model to describe the rheological characteristics of dual-pore-fracture media suggested by the author, a corresponding bolted body model was established, and the mathematical expressions were given for distributing uniformly the elastic modulus and shearing strength of bolt material into the bolted body. Simulating a hypothetical rectangular underground cavern, the 2D FEM analysis were carried out on the cases of cavern without bolting and with bolted body elements as well as with bar elements, respectively, and the displacements, stresses and plastic zones in the surrounding rock mass were analyzed and compared. The results show that the systematic bolting has certain restriction on the displacements of cavern boundary, but this effect is not proportional to the bolt length, and it is more obvious for the case with bolted body elements than for that with bar elements; there are obvious stress concentration phenomena in the bolted zones, and the distributions and values of stresses in the surrounding rock also have some changes with increase of the bolt length; the systematic bolting makes the plastic zones in the surrounding rock decrease obviously, but this effect also is not proportional

**收稿日期:** 2017 - 06 - 08; **修回日期:** 2017 - 07 - 25

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51379201); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB732101)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51379201) and National Program on Key Basic Research Project of China(973 Program)(Grant No. 2010CB732101)

**作者简介:** 张玉军(1956 -), 男, 博士, 1982年毕业于西南交通大学隧道及地下铁道专业, 现任研究员, 主要从事岩石力学与工程方面的研究工作。

E-mail: yjzhang@whrsm.ac.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0734

to the bolt length; using bolted body elements and bar elements for the bolts with same length respectively, the areas of plastic zones obtained are close to each other, but the distribution shapes have some differences.

**Key words:** numerical analysis; dual-pore-fracture medium; viscoelastic-viscoplasticity; bolted body model; underground cavern; finite element method(FEM) analysis

## 1 引言

对于地下洞室工程中的系统全长黏结型锚杆支护,在数值计算中有两种模拟方法:一是将其处理成一维杆单元<sup>[1-3]</sup>,这可较直观地反映每根锚杆的受力及变形情况,但当锚杆数量众多和空间分布复杂时,数据准备工作量大且繁琐;二是等效锚固体化<sup>[4-6]</sup>(在相应的解析方法中也是如此),即不再使用杆单元,而将锚杆的力学性质(弹性模量、抗剪强度等)按一定方式均化到所施作范围内的岩体中,这既可明显减小数据准备的难度,又能较好地体现锚杆的加固作用,但无力表现单根锚杆的承载动态,且均化的力学性质指标的确定具有一定的经验性。

在等效锚固体化的发展中,林世胜和朱维申<sup>[7]</sup>经过简化得到围岩(包括锚固区)的应力状态表达式,其可以反映出锚固时间、锚杆间距、锚固预应力及锚杆长度等参数的影响。张玉军和孙钧<sup>[8]</sup>根据试验结果给出了锚固体黏聚力、内摩擦角的经验公式,推导出具有锚固环的圆形洞室围岩应力黏弹性解析解,并对锚固体提出 6 种黏弹 - 黏塑性数值模型。陈胜宏等<sup>[9]</sup>考虑锚固件在节理面上的局部行为,提出了一种新的加锚节理岩体流变模型,并推导和编制了对应的弹黏塑性本构关系及三维有限元程序。A. Bobet<sup>[10]</sup>将地下深埋圆形洞室的锚固区、原岩区分别当作环向各向异性体和各向同性体,在侧压力系数不为 1 的条件下推导出围岩应力及位移的弹性解。王华宁等<sup>[11]</sup>用圆柱型正交各向异性体体现锚杆对径向刚度加强,用强度指标的增强体现锚注的加固作用,分别对锚注区完全弹性和部分达到塑性的情况导出了锚注和衬砌支护阶段应力、位移的解答。然而上述等效锚固体尚没有针对具有各向异性及流变性的双重孔隙 - 裂隙介质而建立。众所周知,当岩体由岩块、成组节理构成时(即双重孔隙 - 裂隙介质),岩块和节理对流变效应的贡献是不同的,如果使用系统锚杆支护,则其加固具有不同于各向同性的单一介质的特点。为了更好地进行相应的工程设计和施工,有必要使用等效锚固体模型对双重孔隙 - 裂隙介质的流变效应进行研究。

符贵军等<sup>[12]</sup>曾用西原模型描述双重孔隙 - 裂隙介质的流变特性,但其中的瞬弹、黏弹及黏塑性元件由岩块和节理的成分构成,建立了该模型的平面有限元求解格式并编制了相应的计算程序。现在在此基础上,引入一种改进的加锚固岩体流变模型:可考虑在平行和垂直于锚杆轴线方向上锚杆对所加固岩体的弹性模量、抗剪强度的“贡献”不同,即体现锚杆加固作用各向异性效应。从而针对一个假定的位于双重孔隙 - 裂隙介质中的地下矩形洞室,以锚固岩体单元模拟成组锚杆的支护作用,其中设置了无、有锚杆、改变锚杆长度和使用杆单元等几种情况,进行有限元分析、考察围岩中的变形发展、应力分布及屈服状态,由此得出相应的认识。

## 2 瞬弹 - 黏弹 - 黏塑性模型

设对应于双重孔隙 - 裂隙介质的原岩体及锚固岩体的流变特性可分别用西原模型和修正的西原模型来描述<sup>[8, 12]</sup>,见图 1。在材料性质的 3 个主方向上,存在瞬时弹性应变  $\epsilon_{ei}$ 、黏弹性应变  $\epsilon_{vei}$  及黏塑性应变  $\epsilon_{vpi}$  三个阶段。

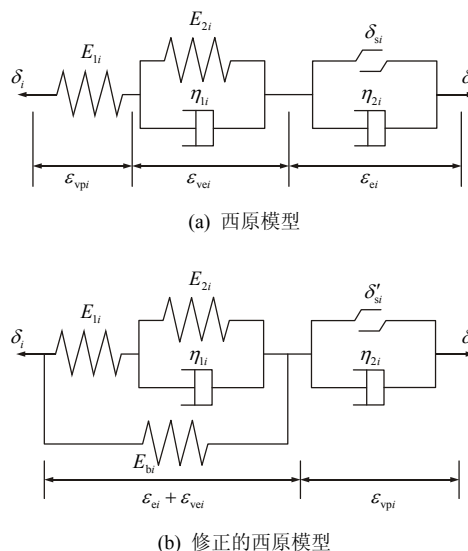


图 1 西原流变模型

Fig.1 Nishihara rheological model

模型中各流变元件由岩块和节理的相应成分串联组成,因此可得



$$\gamma_{ve, xy, t+\Delta t} = \gamma_{ve, xy, t} \exp\left(-\frac{G_{2xy}}{\eta_{1xy}} \Delta t\right) + \left[\frac{2(1+\mu_R)}{E_{R2}} + \frac{1}{S_{Jy}K_{J2ys}} + \frac{1}{S_{Jx}K_{J2xs}}\right] \tau_{xy} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{2xy}}{\eta_{1xy}} \Delta t\right)\right] \quad (5c)$$

从而可得黏弹性应变增量为

$$\{\Delta \varepsilon_{ve}\}_{\Delta t} = \{\varepsilon_{ve}\}_{t+\Delta t} - \{\varepsilon_{ve}\}_t \quad (6)$$

### 2.3 黏塑性状态

屈服函数  $F \geq 0$ ，因此有<sup>[14]</sup>：

$$\{\dot{\varepsilon}_{vp}\}_i = \frac{1}{\eta_{2i}} \left\langle \frac{F}{F_0} \right\rangle \frac{\partial Q}{\partial \{\sigma\}}, \quad (i = x, y, z) \quad (7)$$

式中： $\{\dot{\varepsilon}_{vp}\}_i$  为黏塑性应变增量对时间的导数； $\eta_{2i}$  为黏塑性系数； $F$ ， $Q$  分别为屈服函数和塑性势； $F_0$  为使系数无量纲化而采用的任意值。本文取相关联的流动法则，即  $F = Q$ ，并使用 Drucker-Prager 屈服准则<sup>[15]</sup>，即

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k' = 0 \quad (8)$$

其中，

$$\alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi)}} \\ k' = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi)}}$$

式中： $I_1$ ， $J_2$  分别为应力第一不变量和应力偏量第二不变量； $c$ ， $\varphi$  分别为双重介质的黏聚力及内摩擦角。

根据微结构 - 无迹张量理论<sup>[16]</sup>，则有

$$c = c_0(1 + \Omega_x^c l_x^2 + \Omega_y^c l_y^2 + \Omega_z^c l_z^2) \quad (9a)$$

$$\varphi = \varphi_0(1 + \Omega_x^\varphi l_x^2 + \Omega_y^\varphi l_y^2 + \Omega_z^\varphi l_z^2) \quad (9b)$$

其中，

$$\Omega_x + \Omega_y + \Omega_z = 0 \quad (9c)$$

$$l_x^2 + l_y^2 + l_z^2 = 1 \quad (9d)$$

式中： $l_x$ ， $l_y$  和  $l_z$  为加载方向单位矢量； $\Omega_x$ ， $\Omega_y$  和  $\Omega_z$  为无迹对称张量的分量； $c_0$ ， $\varphi_0$  为强度指标的初值。上述各变量的确定方法见符贵军等<sup>[12]</sup>的研究。

对于锚固岩体，应计入锚杆体抗剪强度对原岩体  $c$ ， $\varphi$  值的“贡献”。而根据张玉军和朱维中<sup>[17]</sup>的研究，本文假定：

$$c_{m0} = c_0 + c_B = c_0 + \eta \frac{\tau_B s_B}{l_a l_b} \quad (10a)$$

$$\varphi_{m0} = \varphi_0 \quad (10b)$$

式中： $c_{m0}$ ， $\varphi_{m0}$  分别为锚固岩体指标的初值； $\tau_B$ ， $s_B$ ， $l_a$  及  $l_b$  分别为锚杆体的抗剪强度、截面积、纵向及横向间距； $\eta$  为经验系数，本文取  $\eta = 1$  (在参考张玉军和朱维中<sup>[17]</sup>的研究中建议  $\eta$  取值 2~5，现取值 1 是偏于安全的)。有限元分析步骤见符贵军等<sup>[12]</sup>的研究。

### 3 算例

如图 2 所示，设  $z$  轴垂直于纸面，则岩体计算域位于  $x$ - $y$  坐标面内 ( $x$ ， $y$  分别为水平和垂直坐标轴，方向依此向右、向上为正，其原点在计算域的左下角点处)，定其尺寸为 50 m×50 m，域中有一个 10 m×10 m 的矩形坑道，假设全断面开挖和系统锚杆施作瞬间同时一次完成，其洞室中心的埋深为 135 m。该域左、右侧面的水平方向及底面的垂直方向位移约束，顶面为位移自由。岩体中发育有 3 组裂隙  $J_1$ ， $J_2$ ， $J_3$ ，其依次沿着与  $x$ ， $y$ ， $z$  轴向正交的方向展布。裂隙组的几何及抗剪强度指标见表 1。没开挖前有限元网格中共有 2 500 个四边形单元，2 601 个节点。

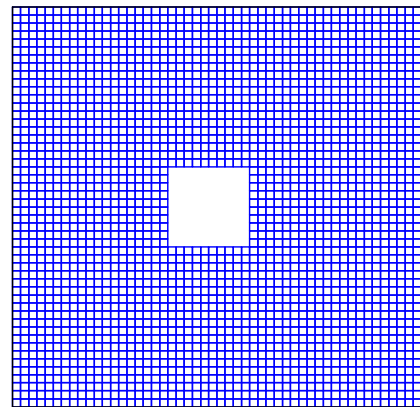


图 2 有限元网格  
Fig.2 FEM mesh

表 1 裂隙组几何及力学参数

Table 1 Geometrical and mechanical parameters of fracture sets

裂隙组	开度/cm	间距/cm	强度降低带宽度/cm	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
$J_1$	1	10	5	0.15	7.6
$J_2$	1	20	8	0.34	16.9
$J_3$	1	30	6	0.40	19.7

岩体孔隙基质的  $c_R = 1.1 \text{ MPa}$  ,  $\varphi_R = 54.3^\circ$  。根据周创兵和於三大<sup>[18]</sup>的研究,在本文中3组裂隙间距的条件下,取表征单元的体积为  $1 \text{ m}^3$  是合适的。并令  $\Omega_i^c = \Omega_i^p$  ( $i = x, y, z$ ) ,则根据符贵军等<sup>[12]</sup>中的式(13), (14),由岩体孔隙基质及3组裂隙的黏聚力、内摩擦角及方向余弦可求得  $c_0 = 0.8 \text{ MPa}$  ,  $\varphi_0 = 39.5^\circ$  ,  $\Omega_x^c = \Omega_x^p = 0.2$  ,  $\Omega_y^c = \Omega_y^p = -0.1$  ,  $\Omega_z^c = \Omega_z^p = -0.1$  。

岩体为双重孔隙-裂隙介质,用西原流变模型来描述其力学特性。岩体孔隙基质及裂隙组的弹性模量、法向刚度、切向刚度、黏滞系数等见表2。

系统锚杆垂直于洞室周边布置,其直径为  $d_b = 2.5 \text{ cm}$ (截面积  $s_b \approx 4.91 \text{ cm}^2$ ) ,间距  $l_a = l_b = 1.0 \text{ m}$  ,杆材的抗剪强度  $\tau_b = 340.0 \text{ MPa}$  。

设在瞬弹、黏弹阶段3组裂隙的法向刚度和切向刚度保持不变。因此可由前述有关各式求得原岩体及锚固岩体的参数  $E_{1i}$  ,  $E_{2i}$  ,  $\eta_{1i}$  ,  $\eta_{2i}$  (取  $\eta'_{2i} = \eta_{2i}$ ) 及  $c_{m0}$  ,  $\varphi_{m0}$  等。令岩体的泊松比和容重分别为  $\mu = 0.3$  ,  $\gamma = 26.0 \text{ kN/m}^3$  。

共模拟了5种工况:(1)无锚杆支护;(2)具有3m长锚杆的锚固体(见图3);(3)具有4m长锚杆的锚固体;(4)具有5m长锚杆的锚固体;(4)具有3m长锚杆的杆单元(见图3)。进行黏弹塑性分析,计算时间为5a。所得结果如下:

(1) 围岩的位移

取洞周底板中点、右边墙中点、顶板中点为3个特征点。图4为该三点的绝对位移值随时间的发展曲线。在表3显示了计算终了时3个特征点的水平、垂直方向的位移值,图5则为对3m长锚杆分别使用锚固单元和杆单元,计算终了时围岩面上的位移矢量分布(4,5m锚固单元的计算结果类似)。从而看出:洞周位移在开初的约1a时间内增长较快,在2a左右绝大部分完成,之后其发展缓慢;相对于无锚杆的工况而言,施作系统锚杆后,洞周位移得到较明显的约束,如以无锚洞室的顶板中点下沉值为1,则有锚洞室的对应值相应于3,4,5m锚固单元和3m杆单元的工况依次为:0.87,0.86,

0.81和0.93;随着锚杆长度的增加,对位移约束有所加大,但增强作用不明显,如以3m锚固单元洞室的顶板中点下沉值为1,则4,5m锚固单元工况的对应值分别为0.99,0.93,这再次表明锚杆对位移的约束作用并不与其长度成正比;比较3m长度的杆单元和锚固单元的工况,若以前者的洞室顶板中点下沉值为1,则后者的对应值为0.94,其显示出在同样的锚杆参数(长度、间距、截面积等)的条件下,使用锚固单元比使用杆单元对位移的约束作用要明显一些。

(2) 围岩中的应力

计算终了时洞周3个特征点的主应力值见表3,而此时各种工况的围岩中主应力分布见图6,看到在锚固区有明显的应力集中现象,这是由于该区刚度较大的缘故(锚杆体弹性模量的贡献)。由表1可知:对于底板中点,相对于毛洞,使用锚固单元后  $\sigma_1$  变化不大,均为拉应力,但  $\sigma_3$  有明显减小,为毛洞时值的49%~59%,均为压应力,且随锚杆长度的增加  $\sigma_3$  也有所上升,而使用杆单元后  $\sigma_1$  由拉性改为压性,但  $\sigma_3$  仍为压应力,其约变为毛洞时值的2倍;对于右边墙中点,  $\sigma_1$  ,  $\sigma_3$  均为压应力,相对于毛洞,使用锚固单元后  $\sigma_1$  有所减小,为毛洞时值的71%~76%,但  $\sigma_3$  有较明显的增长,为毛洞时值的1.38~1.44倍,且随锚杆长度的增加  $\sigma_3$  也呈下降趋势,而使用杆单元后  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  均较毛洞时的值变大,其分别增长到1.85和1.01倍;对于顶板中点,  $\sigma_1$  ,  $\sigma_3$  分别拉应力和为压应力,相对于毛洞,使用锚固单元后  $\sigma_1$  有所减小,为毛洞时值的13%~51%,但  $\sigma_3$  有明显的增长,为毛洞时值的2.06~3.11倍,且随锚杆长度的增加  $\sigma_3$  也表现出下降趋势,而使用杆单元后  $\sigma_1$  ,  $\sigma_3$  仍为拉应力和压应力,但二者分别变为毛洞时值的0.04和2.06倍。比较3m长锚杆的锚固单元和杆单元的工况:在底板中点的  $\sigma_1$  由“正”变为“负”,但绝对值变化不大,  $\sigma_3$  上升到4.37倍;在右边墙中点和顶板中点,  $\sigma_1$  ,  $\sigma_3$  的性质不变,但分别增长或减少到2.42,0.70倍和0.33,0.66倍。总的来看,就洞周应力分布及量值而言,相对于毛洞,

表2 岩体基质和裂隙组的弹性及流变参数

Table 2 Elastic and rheological parameters of rock matrix and fracture sets

$E_{R1} / \text{MPa}$	$E_{R2} / \text{MPa}$	$\eta_{R1} / (\text{MPa} \cdot \text{day})$	$\eta_{R2} / (\text{MPa} \cdot \text{day})$	$k_{n1} / (\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1})$	$k_{s1} / (\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1})$
3 000	500	1 825	2 865	2 000	1 000
$k_{n2} / (\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1})$	$k_{s2} / (\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1})$	$k_{n3} / (\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1})$	$k_{s3} / (\text{MPa} \cdot \text{cm}^{-1})$	$\eta_1 / L / (\text{MPa} \cdot \text{d} \cdot \text{cm}^{-1})$	$\eta_2 / L / (\text{MPa} \cdot \text{d} \cdot \text{cm}^{-1})$
4 000	2 000	6 000	3 000	1 460	1 460

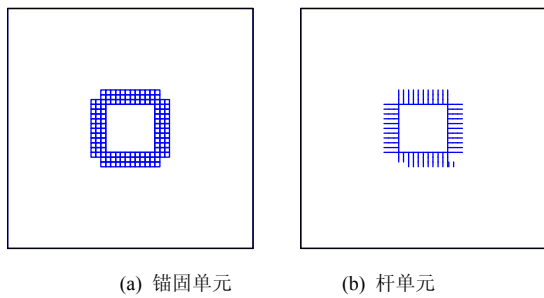


图 3 3 m 长锚杆布置  
Fig.3 Arrangement of 3m long bolts

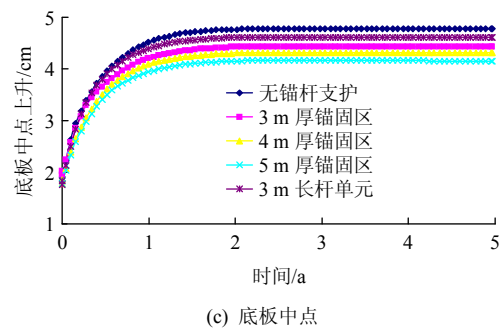
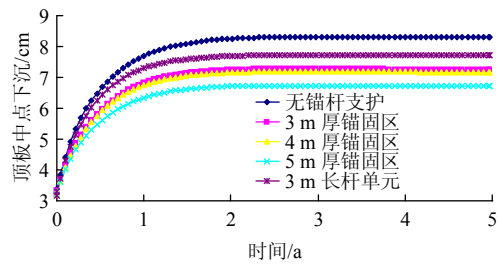
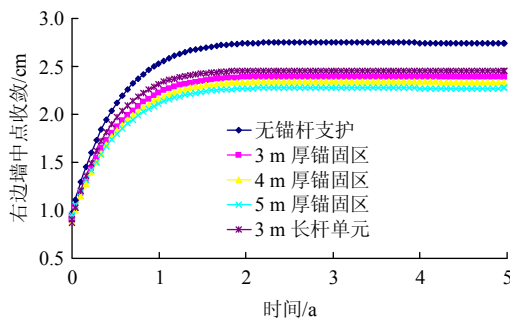


图 4 位移 - 时间曲线  
Fig.4 Displacements versus time at some nodes



(a) 顶板中点



(b) 右边墙中点

实施系统锚杆支护后有明显不同，且随锚杆长度的增加，各锚固单元的工况亦产生一定的变化，而对于同样 3 m 长度的锚杆，分别使用锚固单元和杆单元时也有较明显的差异。其原因在于：杆单元的刚度集中在杆直径的小面积内，而锚固单元是将杆单元的刚度分布在其所分摊支护的大面积内，使得刚度高的杆单元在原岩体单元的节点上约束其变形、以及靠平均在原岩体中的强度值抑制原岩体的劣化，而锚固单元则变成了刚度和强度高于原岩体单元的加固介质，凭借其提高的刚度和强度阻止本身和临近围岩的变形和承载能力下降。

(3) 围岩中的塑性区

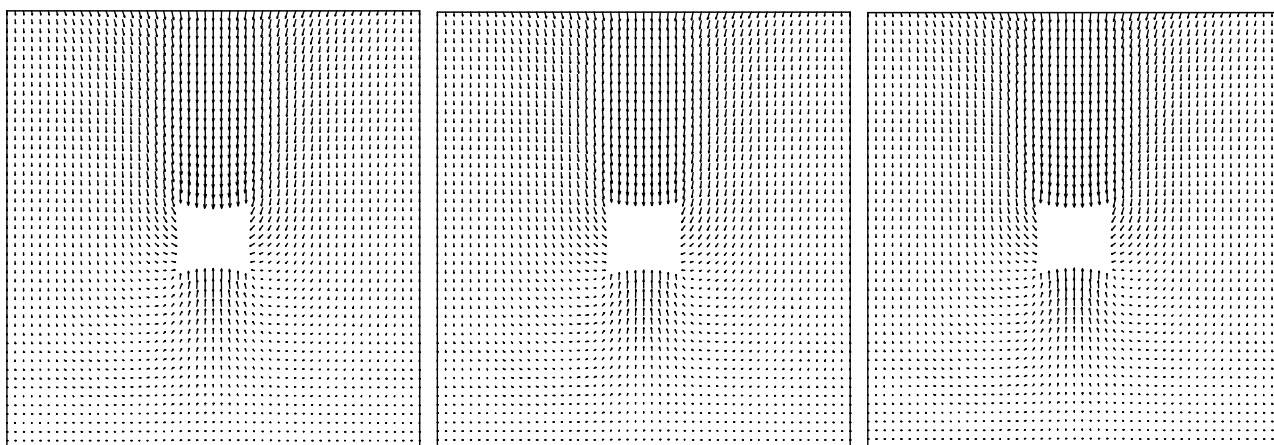
计算终了时 5 种工况的围岩中塑性区的分布及面积分别见图 7 与表 3。从中看到，各工况的塑性区基本是在左、右边墙对称出现，在毛洞的 4 个角

表 3 洞室周边三个特征点的若干计算值

Table 3 Some computation values at three special points on drift boundary

工况	位置	x 轴向位移 $U_x/cm$	y 轴向位移 $U_y/cm$	最大主应力 $\sigma_1/MPa$	最小主应力 $\sigma_3/MPa$	塑性区面积/ $m^2$
毛洞	底板中点	0.00	4.77	0.16	-0.88	82
	右墙中点	-2.23	-1.59	-0.71	-5.21	
	顶板中点	0.00	-8.30	0.47	-0.35	
3 m 厚锚固单元	底板中点	0.00	4.42	0.10	-0.43	50
	右墙中点	-1.84	-1.51	-0.54	-7.54	
	顶板中点	0.00	-7.26	0.06	-1.09	
4 m 厚锚固单元	底板中点	0.00	4.31	0.17	-0.48	36
	右墙中点	-1.83	-1.45	-0.51	-7.27	
	顶板中点	0.00	-7.17	0.22	-0.79	
5 m 厚锚固单元	底板中点	0.00	4.16	0.16	-0.52	32
	右墙中点	-1.73	-1.47	-0.54	-7.19	
	顶板中点	0.00	-6.72	0.24	-0.72	
3 m 长锚杆单元	底板中点	0.00	4.61	-0.18	-1.88	54
	右墙中点	-1.87	-1.57	-1.31	-5.28	
	顶板中点	0.00	-7.69	0.02	-1.62	

注：水平位移向右为正，垂直位移向上为正；负的正应力为压性。



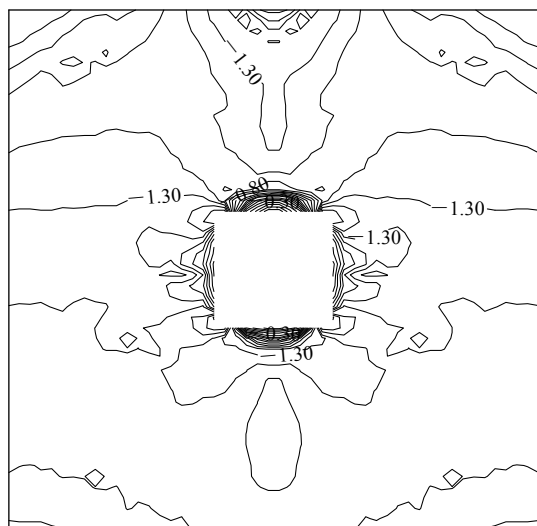
(a) 毛洞

(b) 3 m 厚锚固单元

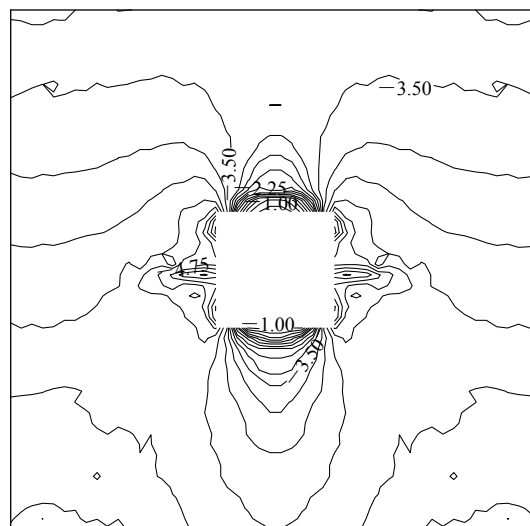
(c) 3 m 长锚杆单元

图 5 岩体中位移矢量

Fig.5 Displacement vectors in rock mass

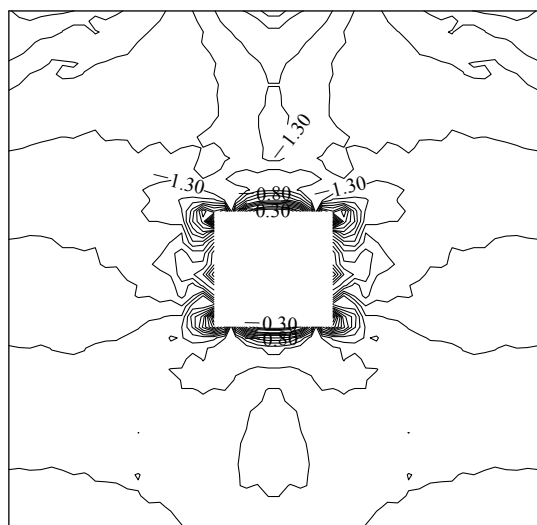


$\sigma_1$

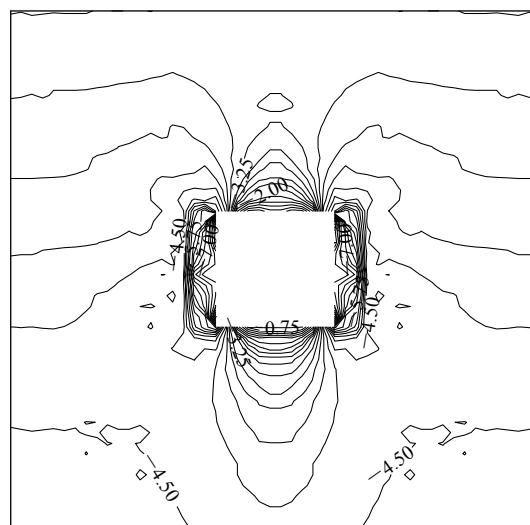


$\sigma_3$

(a) 毛洞



$\sigma_1$



$\sigma_3$

(b) 3 m 厚锚固单元

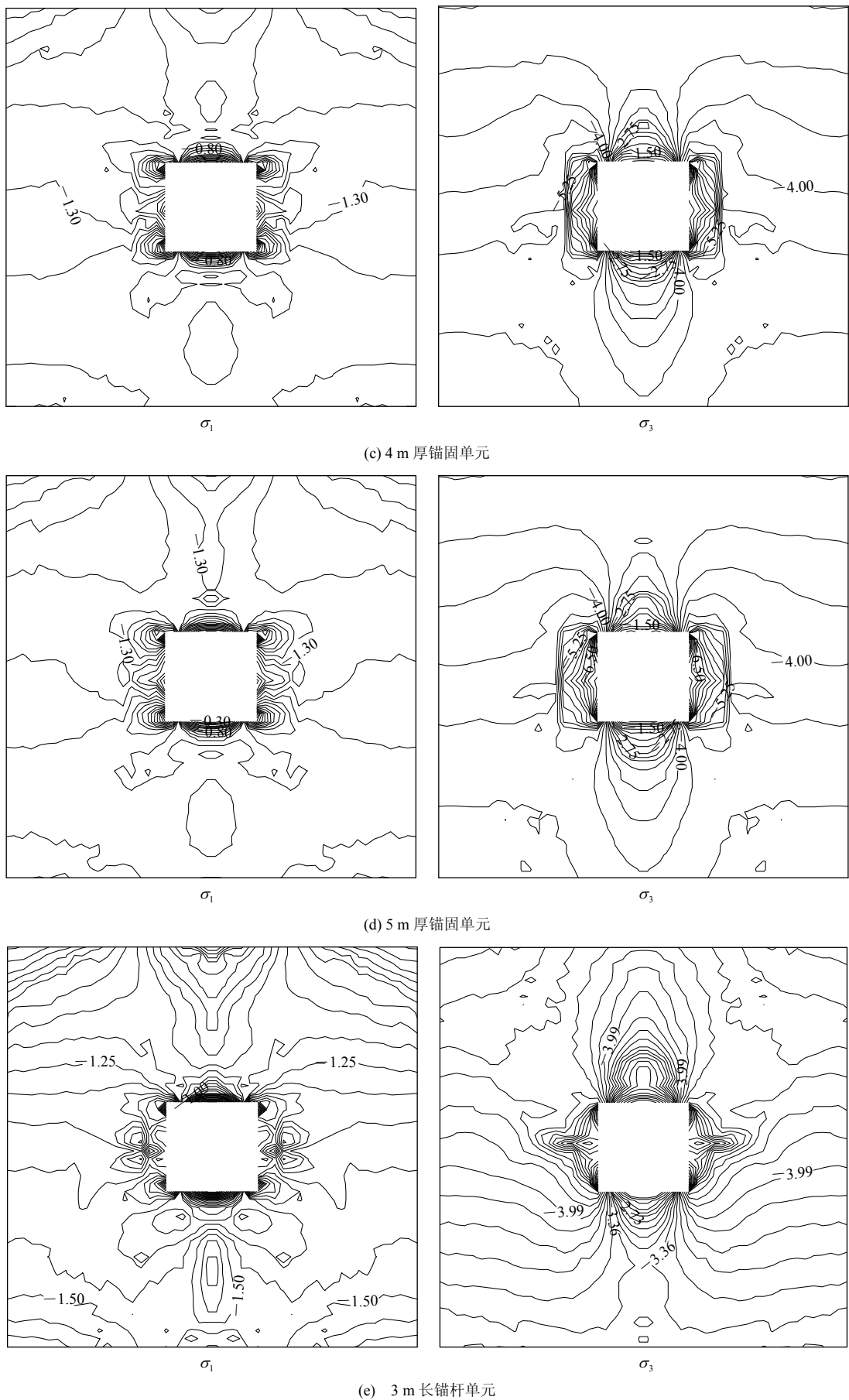


图 6 岩体中主应力等值线(单位: MPa)

Fig.6 Principal stress contours in rock mass(unit: MPa)



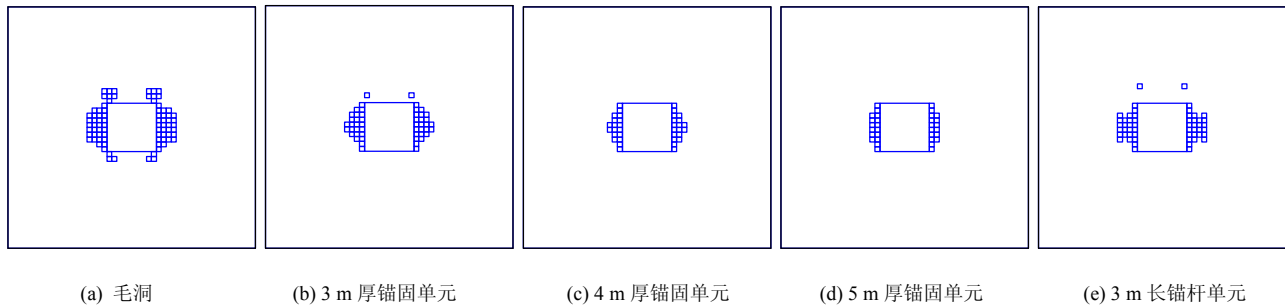


图7 岩体中塑性区

Fig.7 Plastic zones in rock mass

隅向上方向也有局部的塑性区；在施作系统锚杆支护后，相对于毛洞，边墙的塑性区明显减小，4个角隅处的塑性区除3 m长锚杆的工况还有零星存在外，其他工况已消除；随锚杆长度的增加，塑性区减小的幅度也越大，对于3, 4, 5 m厚的锚固单元工况，围岩中塑性区面积依次为毛洞时的61%，44%和39%，而使用杆单元时的相应值为66%；比较4, 5 m厚锚固单元的工况，二者对塑性区的减小效果差别不太大，也表明锚杆对塑性区的控制作用不与其长度成正比；再对比3 m长锚杆分别使用锚固单元和杆单元的工况，二者的塑性区面积接近，但分布形状有一定差别。

## 4 结 论

针对所提出的双重孔隙-裂隙介质西原流变模型，建立了相应的锚固体模型，给出了将锚杆材料的弹性模量、抗剪强度等效均化到锚固体中的数学表达式，以及有限元方法中对锚固体单元的瞬弹-黏弹-黏塑性求解格式。模拟一个假定的矩形地下洞室，就毛洞、使用不同厚度的锚固单元和杆单元的工况，进行二维有限元计算。其结果显示：系统锚杆对洞周位移有一定约束作用，但其抑止效应并不与锚杆长度成正比，对同样长度的锚杆分别使用锚固单元和杆单元相比较，前者对位移的约束作用要明显；锚固区有明显的应力集中现象，且随锚杆长度的增加，洞周应力分布及量值亦产生一定的变化，而分别使用锚固单元和杆单元时也有一定的差异，其原因在于锚固单元和杆单元对原岩体刚度和强度的不同“贡献”方式；系统锚杆使得围岩中的塑性区明显减小，但这一控制作用也不与其长度成正比，而分别使用锚固单元和杆单元时，所得的塑性区面积接近，但分布形状有所不同。

## 参考文献(References):

- [1] 于学馥, 郑颖人, 刘怀恒, 等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983: 554 - 619.(YU Xuefu, ZHENG Yingren, LIU Huaiheng, et al. Stability analysis of surrounding rock in underground engineering[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1988: 554 - 619.(in Chinese))
- [2] Itasca Consulting Group, Inc.. Manual of FLAC<sup>3D</sup> version 3.0[M]. Minneapolis, USA: [s. n.], 2005: 61 - 80.
- [3] Itasca Consulting Group, Inc. Manual of 3DEC version 5.0[M]. Minneapolis, USA: [s. n.], 2013: 15 - 28.
- [4] 肖明, 叶超, 傅志浩. 地下隧洞开挖和支护的三维数值分析计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2 501 - 2 505.(XIAO Ming, YE Chao, FU Zhihao. Three-dimensional numerical simulation and analysis of excavation and support in underground tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2 501 - 2 505.(in Chinese))
- [5] 李新平, 王涛, 宋桂红, 等. 锚固层状岩体的复合加固理论与数值模拟试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3 654 - 3 660.(LI Xinping, WANG Tao, SONG Guihong, et al. Study on composite anchoring theory and numerical simulation test on layered rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 3 654 - 3 660.(in Chinese))
- [6] 张玉军, 刘谊平. 锚固正交各向异性岩体的三维弹塑性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1 115 - 1 119.(ZHANG Yujun, LIU Yiping. 3D elasto-plastic FEM analysis for bolted orthotropic rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1 115 - 1 119.(in Chinese))
- [7] 林世胜, 朱维申. 锚杆对洞周黏弹岩体应力状态的影响[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(3): 12 - 27.(LIN Shisheng, ZHU Weishen. The effects of bolts on the stress-state in visco-elastic rock masses around an excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(3): 12 - 27.(in Chinese))

- [8] 张玉军, 孙 钧. 锚固岩体的流变模型及计算方法[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 34 - 45.(ZHANG Yujun, SUN Jun. Rheological models and calculation methods for bolted rock masses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(3): 34 - 45.(in Chinese))
- [9] 陈胜宏, EGGER P, 熊文林. 加锚节理岩体流变模型及三维弹黏塑性有限元分析[J]. 水利学报, 1998, (9): 41 - 47.(CHEN Shenghong, EGGER P, XIONG Wenlin. Rheological model and three dimensional elasto-viscoplastic finite element analysis of jointed rock masses reinforced by bolts[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (9): 41 - 47.(in Chinese))
- [10] BOBET A. Elastic solution for deep tunnel. Application to excavation damage zone and rockbolt support[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42(2): 147 - 174.
- [11] 王华宁, 曾广尚, 蒋明镜. 黏弹 - 塑性岩体中锚注与衬砌联合支护的解析解[J]. 工程力学, 2016, 33(4): 176 - 187.(WANG Huaning, ZENG Guangshang, JIANG Mingjing. Analytical solutions for combined bolt-grouting and lining supporting in viscoelastic-plastic rock mass[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 176 - 187.(in Chinese))
- [12] 符贵军, 张思渊, 张玉军. 一种双重孔隙 - 裂隙岩体流变模型及其在地下洞室有限元分析中的应用[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 601 - 609.(FU Guijun, ZHANG Siyuan, ZHANG Yujun. A rheological model for dual-pore-fracture rock mass and its application to finite element analysis of underground caverns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(2): 601 - 609.
- [13] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1990: 116 - 119.(ZHOU Weiyuan. Advanced rock mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 1990: 116 - 119.(in Chinese))
- [14] 孙 钧, 汪炳鑑. 地下结构有限元法解析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1988: 167 - 171.(SUN Jun, WANG Bingjian. Finite element analysis of underground structure[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1988: 167 - 171.(in Chinese))
- [15] OWEN D, HINTON E. Finite element in plasticity: theory and practice[M]. Swansea U. K.: Pineridge Press Limited, 1980: 220 - 221.
- [16] LADE P. Modeling failure in cross-anisotropic frictional materials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(16): 5 146 - 5 162.
- [17] 张玉军, 朱维申. 三峡工程船闸高边坡锚固方案的平面有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1): 70 - 74.(ZHANG Yujun, ZHU Weishen. 2D finite element calculation of anchorage scheme for shiplock high slope of Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1): 70 - 74.(in Chinese))
- [18] 周创兵, 於三大. 论岩体表征单元体积 REV—岩体力学参数取值的一个基本问题[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4): 332 - 336.(ZHOU Chuangbing, YU Sanda. Representative elementary volume REV—a fundamental problem for selecting the mechanical parameters of jointed rock mass[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(4): 332 - 336.(in Chinese))