

文章编号:1000-7598- (2002)03-0278-06

正交各向异性岩体中地下洞室稳定的粘弹-粘塑性三维有限元分析

张玉军¹, 刘谊平²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071 ;

2. 中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 建立了一种正交各向异性岩体的粘弹-粘塑性模型, 推导和描述了相应的数值计算表达式和有限元分析的步骤, 并使用所编制的三维有限元程序, 以在层状岩体 (横观各向同性介质) 中的地下洞室开挖为算例, 考察了围岩的流变动态, 得出了几点结论。

关 键 词: 正交各向异性岩体; 粘弹-粘塑性模型; 三维有限元法; 稳定分析

中图分类号: TU 45 文献标识码: A

3D viscoelastic-viscoplastic FEM analysis for stability of underground opening in orthotropic rockmass

ZHANG Yu-jun¹, LIU Yi-ping²

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Institute of physics and mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: A kind of viscoelastic-viscoplastic model for orthotropic rockmass is established; and the relevant numerical calculation expressions and the finite element analysis procedures are derived and described respectively. Taking an underground opening in a layered rockmass (transversely isotropic medium) as a computation example, the three-dimensional finite element analysis code developed by the authors is used to investigate the rheological state of the surrounding rockmass; and some conclusions are given.

Key words: orthotropic rockmass; viscoelastic-viscoplastic model; 3D FEM; stability analysis

1 引 言

在地下和边坡工程的稳定分析中, 岩体的流变特性及其力学模型与计算方法一直是一个很重要的研究课题^[1-5]。但到目前为止, 当人们考虑岩体的时间效应时, 一般是将其当成各向同性的流变介质来处理, 这种作法对某些质地较为均匀的岩体 (如火成岩等) 可具有工程所要求的精度, 但对另一些力学性质呈明显的各向异性的岩体, 如层状的沉积岩等就不适用了。对后一种情况, 必须建立相应各向异性的流变模型及计算方法。为此, 作者尝试对正交各向异性体 (横观各向同性体和各向同性体是其特例) 建立一种粘

弹-粘塑性模型, 并编制了相应的三维有限元程序, 以在层状岩体 (横观各向同性介质) 中的地下洞室开挖为算例, 考察了围岩的流变动态, 得出了几点结论。

2 粘弹-粘塑性模型

对于图 1 所示的正交各向异性体, 其每一点都存在相互垂直的弹性对称面, 这时有 3 个正交的弹性主轴。设局部坐标面 $x'y'$ 与弹性对称面一致, 则局部坐标轴 z' 即成为材料的主轴。设材料主方向上的流变特性均可用西原模型来描述, 见图 2。其中表明了弹性、粘弹性及粘塑性 3 个阶段, 下面依次说明。

收稿日期: 2001-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (69879027)

作者简介: 张玉军, 男, 1960 年生, 博士, 副研究员, 主要从事岩石力学与数值计算分析研究工作。

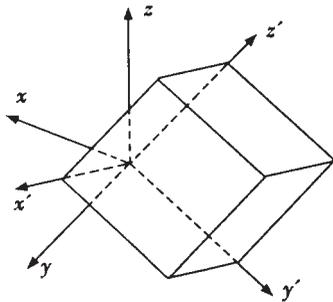


图 1 正交各向异性体与坐标系
Fig.1 Representative element for orthotropic rockmass and coordinate systems

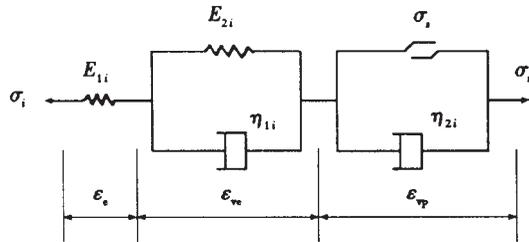


图 2 西原流变模型
Fig.2 Nishihara rheological model

2.1 弹性阶段

此时弹性常数共有 9 个,本构关系可表示为^[6]

$$\begin{Bmatrix} \epsilon'_x \\ \epsilon'_y \\ \epsilon'_z \\ \gamma'_{yz} \\ \gamma'_{xz} \\ \gamma'_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\mu_{yx}}{E_y} & -\frac{\mu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\mu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{zx}}{E_z} & -\frac{\mu_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma'_x \\ \sigma'_y \\ \sigma'_z \\ \tau'_{yz} \\ \tau'_{xz} \\ \tau'_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\epsilon'_x, \epsilon'_y, \dots, \gamma'_{xy}$ 和 $\sigma'_x, \sigma'_y, \dots, \tau'_{xy}$ 表示在材料主方向上的应变与应力分量; E_x, E_y, \dots, G_{xy} 是材料的主弹性模量,根据弹性系数矩阵的对称性有:

$$E_x \mu_{yx} = E_y \mu_{xy}, E_y \mu_{zy} = E_z \mu_{yz}, E_z \mu_{xz} = E_x \mu_{zx}$$

式(1)可简写为

$$\{\epsilon'\} = [C'] \{\sigma'\} \quad (2)$$

而 $\{\sigma'\} = [D'] \{\epsilon'\} \quad (3)$

式中刚度矩阵 $[D']$ 与柔度矩阵 $[C']$ 的关系为

$$[D'] = [C']^{-1} \quad (4)$$

应力、应变由局部坐标系 $x'y'z'$ 转换到整体坐标系 xyz 中,有

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} \quad (5)$$

式中 $[D] = [L] \{D'\} [L]^T$

$$[L] =$$

$$\begin{bmatrix} l_1^2 & l_2^2 & l_3^2 & 2l_1l_2 & 2l_2l_3 & 2l_3l_1 \\ m_1^2 & m_2^2 & m_3^2 & 2m_1m_2 & 2m_2m_3 & 2m_3m_1 \\ n_1^2 & n_2^2 & n_3^2 & 2n_1n_2 & 2n_2n_3 & 2n_3n_1 \\ l_1m_1 & l_2m_2 & l_3m_3 & l_1m_2 + l_2m_1 & l_2m_3 + l_3m_2 & l_3m_1 + l_1m_3 \\ m_1n_1 & m_2n_2 & m_3n_3 & m_1n_2 + m_2n_1 & m_2n_3 + m_3n_2 & m_3n_1 + m_1n_3 \\ n_1l_1 & n_2l_2 & n_3l_3 & n_1l_2 + n_2l_1 & n_2l_3 + n_3l_2 & n_3l_1 + n_1l_3 \end{bmatrix}$$

而 l_i, m_i, n_i 为局部坐标轴与整体坐标轴之间夹角的余弦 $i = 1, 2, 3$ 。

2.2 粘弹性阶段

此时屈服函数 $F < 0$ 。参照对各向同性流变模型所使用的计算方法^[1],设从 t 到 $t + \Delta t$ 时步内,应力 σ 保持不变,则有粘弹性应变:

$$\{\epsilon_{ve}\}_{t+\Delta t} = \{\epsilon_{ve}\}_t \exp\left(-\frac{q_{0i}}{q_{1i}} \Delta t\right) + [A] \{\sigma\} \left[1 - \exp\left(-\frac{q_{0i}}{q_{1i}} \Delta t\right)\right] \quad (6)$$

式中 $[A]$ 即为式(2)中的 $[C']$; 而 $q_{0i} = \frac{E_{1i}E_{2i}}{E_{1i} + E_{2i}}$;

$$q_{1i} = \frac{E_{1i}\eta_{1i}}{E_{1i} + E_{2i}} \quad i = x, y, z。$$

将式(6)展开得:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{ve,x,t+\Delta t} &= \epsilon_{ve,x,t} \exp\left(-\frac{E_{2x}}{\eta_{1x}} \Delta t\right) + \left(\frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\mu_{yx}}{E_y} \sigma_y - \frac{\mu_{zx}}{E_z} \sigma_z\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{E_{2x}}{\eta_{1x}} \Delta t\right)\right] \\ \epsilon_{ve,y,t+\Delta t} &= \epsilon_{ve,y,t} \exp\left(-\frac{E_{2y}}{\eta_{1y}} \Delta t\right) + \left(\frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\mu_{yx}}{E_y} \sigma_x - \frac{\mu_{zy}}{E_z} \sigma_z\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{E_{2y}}{\eta_{1y}} \Delta t\right)\right] \\ \epsilon_{ve,z,t+\Delta t} &= \epsilon_{ve,z,t} \exp\left(-\frac{E_{2z}}{\eta_{1z}} \Delta t\right) + \left(\frac{\sigma_z}{E_z} - \frac{\mu_{zx}}{E_z} \sigma_x - \frac{\mu_{zy}}{E_z} \sigma_y\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{E_{2z}}{\eta_{1z}} \Delta t\right)\right] \\ \nu_{ve,xy,t+\Delta t} &= \nu_{ve,xy,t} \exp\left(-\frac{G_{2xy}}{\eta_{1xy}} \Delta t\right) + \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{2xy}}{\eta_{1xy}} \Delta t\right)\right] \\ \nu_{ve,yz,t+\Delta t} &= \nu_{ve,yz,t} \exp\left(-\frac{G_{2yz}}{\eta_{1yz}} \Delta t\right) + \frac{\tau_{yz}}{G_{yz}} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{2yz}}{\eta_{1yz}} \Delta t\right)\right] \\ \nu_{ve,xz,t+\Delta t} &= \nu_{ve,xz,t} \exp\left(-\frac{G_{2xz}}{\eta_{1xz}} \Delta t\right) + \frac{\tau_{xz}}{G_{xz}} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_{2xz}}{\eta_{1xz}} \Delta t\right)\right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

而粘弹性应变增量

$$\{\Delta\varepsilon_{ve}\}_{\Delta t} = \{\varepsilon_{ve}\}_{t+\Delta t} - \{\varepsilon_{ve}\}_t \quad (8)$$

2.3 粘塑性阶段

(1) 屈服准则 对于正交各向异性体, Hoffman 提出了一种破坏准则,其特点是可以考虑材料的拉伸强度和压缩强度的不同,即^[7]

$$C_1(\sigma_y - \sigma_z)^2 + C_2(\sigma_z - \sigma_x)^2 + C_3(\sigma_x - \sigma_y)^2 + C_4\sigma_x + C_5\sigma_y + C_6\sigma_z + C_7\tau_{yz}^2 + C_8\tau_{zx}^2 + C_9\tau_{xy}^2 = 1 \quad (9)$$

式中 C_1, C_2, \dots, C_9 是 9 个基本强度数据,即 3 个单向拉伸强度 F_{tx}, F_{ty}, F_{tz} 和 3 个单向压缩强度 F_{cx}, F_{cy}, F_{cz} 及 3 个剪切强度 $F_{syz}, F_{syz}, F_{syz}$, 它们是有相同意义下确定的 9 个材料常数。列式为

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{2} [(F_{ty}F_{cy})^{-1} + (F_{tz}F_{cz})^{-1} + (F_{tx}F_{cx})^{-1}] \\ C_2, C_3 &\text{可由 } x, y, z \text{ 的循环而得到} \\ C_4 &= (F_{tx})^{-1} - (F_{cx})^{-1} \\ C_5, C_6 &\text{可由 } x, y, z \text{ 的循环而得到} \\ C_7 &= (F_{syz})^{-2} \\ C_8, C_9 &\text{可由 } x, y, z \text{ 的循环而得到} \end{aligned} \right\} (10)$$

顺便指出,根据直线型的 Mohr-Coulomb 准则,岩体的抗拉强度 F_t 、抗压强度 F_c 与其 c, ϕ 值之间有如下关系^[8]:

$$\left. \begin{aligned} F_t &= \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \\ F_c &= \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \end{aligned} \right\} (11)$$

因此在式 (10) 中也用岩体主方向上的 c, ϕ 值来表示 F_t, F_c 参与计算。

(2) 粘塑性应变增量 取屈服函数:

$$F = [C_1(\sigma_y - \sigma_z)^2 + C_2(\sigma_z - \sigma_x)^2 + C_3(\sigma_x - \sigma_y)^2 + C_4\sigma_x + C_5\sigma_y + C_6\sigma_z + C_7\tau_{yz}^2 + C_8\tau_{zx}^2 + C_9\tau_{xy}^2]^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (12)$$

当 $F = 0$ 时,材料屈服。使用相关联的流动法则,故材料主方向上的粘弹性应变率为^[1]

$$\{\dot{\varepsilon}_{vp}\} = \frac{1}{\eta_{2i}} \left(\frac{F}{F_0} \right) \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \quad (13)$$

式中 F_0 是使系数变为无量纲而采用的任意值,而

$$\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} = \frac{1}{2(F+1)} \left[\begin{array}{c} 2C_3(\sigma_x - \sigma_y) - 2C_2(\sigma_z - \sigma_x) + C_4 \\ 2C_1(\sigma_y - \sigma_z) - 2C_3(\sigma_x - \sigma_y) + C_5 \\ 2C_2(\sigma_z - \sigma_x) - 2C_1(\sigma_y - \sigma_z) + C_6 \\ 2C_9\tau_{xy} \\ 2C_7\tau_{yz} \\ 2C_8\tau_{zx} \end{array} \right]^T$$

假设在 t 到 $t + \Delta t$ 的时步内, $\{\dot{\varepsilon}_{vp}\}_{t+\Delta t}$ 为常值,则 $t + \Delta t$ 时刻的粘塑性应变增量 (向前一次差分) 为

$$\{\Delta\varepsilon_{ve}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{\varepsilon}_{vp}\}_t \Delta t \quad (14)$$

展开得

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varepsilon_{vp\ x} &= \frac{A}{\eta_{2x}} [2C_3(\sigma_x - \sigma_y) - 2C_2(\sigma_z - \sigma_x) + C_4] \\ \Delta\varepsilon_{vp\ y} &= \frac{A}{\eta_{2y}} [2C_1(\sigma_y - \sigma_z) - 2C_3(\sigma_x - \sigma_y) + C_5] \\ \Delta\varepsilon_{vp\ z} &= \frac{A}{\eta_{2z}} [2C_2(\sigma_z - \sigma_x) - 2C_1(\sigma_y - \sigma_z) + C_6] \\ \Delta v_{vp\ xy} &= \frac{2AC_9}{\eta_{2xy}} \tau_{xy} \\ \Delta v_{vp\ yz} &= \frac{2AC_7}{\eta_{2yz}} \tau_{yz} \\ \Delta v_{vp\ xz} &= \frac{2AC_8}{\eta_{2xz}} \tau_{xz} \end{aligned} \right\} (15)$$

式中 $A = \frac{1}{2(F+1)} \frac{F}{F_0}$

3 有限元分析步骤

使用上述模型于地下工程的稳定分析时,其步骤为^[9]:

(1) 开挖阶段 设当步开挖在瞬间完成,粘性变形还来不及开展,此时有

$$[K]_n \{\Delta\delta\}_n = \{\Delta F\}_n \quad (16)$$

式中 $[K]_n$ 为第 n 次开挖时的整体刚度矩阵; $\{\Delta\delta\}_n$ 为第 n 次开挖时引起的位移增量; $\{\Delta F\}_n$ 为第 n 次开挖产生的释放荷载增量。然后:

$$\{\Delta\sigma\}_n = [D][B]\{\Delta\delta\}_n \quad (17)$$

式中 $[D] = [L][D'][L]^T$ 为弹性矩阵; $[B]$ 为几何矩阵。

算出上述本次开挖引起的应力增量后,叠加到总应力中去,有

$$\{\sigma\}_{n+1} = \{\sigma\}_n + \{\Delta\sigma\}_n \quad (18)$$

(2) 判定阶段 依次对每一个单元,将其在整体坐标系中的应力 $\{\sigma\}$ 转换到局部坐标系中得 $\{\sigma'\}$,然后将 $\{\sigma'\}$ 代入屈服函数 F 并判断 F 是否小于 0。若 $F < 0$,则该单元属粘弹性阶段,否则为粘塑性阶段。

(3) 粘弹性阶段 假设在从 t_{i-1} 到 t_i 的时步 Δt 内, $\{\sigma'\}_{i-1}$ 保持不变,可求出该时步内的 $\{\Delta\varepsilon'_{ve}\}_i$ 并转

换到整体坐标系中得 $\{\Delta\varepsilon_{ve}\}_i$, 从而有

$$\{\Delta F_{ve}\}_i = \int_{\Omega} [B]^T [D] \{\Delta\varepsilon_{ve}\}_i d\Omega \quad (19)$$

式中 $\{\Delta F_{ve}\}_i$ 为在 Δt 时步内因粘弹性应变引起的附加结点力。于是有

$$[K]_n \{\Delta\delta\}_i = \{\Delta F_{ve}\}_i \quad (20)$$

式中 $\{\Delta\delta\}_i$ 为在 Δt 时步内因粘弹性应变引起的位移。从而有

$$\{\Delta\varepsilon\}_i = [B] \{\Delta\delta\}_i \quad (21)$$

$$\{\Delta\sigma\}_i = [D] (\{\Delta\varepsilon\}_i - \{\Delta\varepsilon_{ve}\}_i) \quad (22)$$

$$\{\sigma\}_i = \{\sigma\}_{i-1} + \{\Delta\sigma\}_i \quad (23)$$

在进行下一个时步计算前, 仍要作 F 值的判断。

(4) 粘塑性阶段 设在 t_{i-1} 时刻, 某一单元的屈服函数 $F \geq 0$, 表明该单元已经进入粘塑性阶段了, 故在 Δt 时步内, 在局部坐标系中的粘塑性应变增量为

$$\{\Delta\varepsilon'_{ve}\}_i = \{\varepsilon'_{ve}\}_{i-1} \Delta t \quad (24)$$

将 $\{\Delta\varepsilon'_{ve}\}_i$ 转换到整体坐标系中得 $\{\Delta\varepsilon_{ve}\}_i$, 于是有

$$\{\Delta F_{vp}\}_i = \int_{\Omega} [B]^T [D] \{\Delta\varepsilon_{vp}\}_i d\Omega \quad (25)$$

式中 $\{\Delta F_{vp}\}_i$ 为在 t_i 时步因粘塑性应变引起的附加结点力。从而有

$$[K]_n \{\Delta\delta\}_i = \{\Delta F_{vp}\}_i \quad (26)$$

$$\{\Delta\varepsilon\}_i = [B] \{\Delta\delta\}_i \quad (27)$$

$$\{\Delta\sigma\}_i = [D] (\{\Delta\varepsilon\}_i - \{\Delta\varepsilon_{vp}\}_i) \quad (28)$$

$$\{\sigma\}_i = \{\sigma\}_{i-1} + \{\Delta\sigma\}_i \quad (29)$$

采用 Hoffman 屈服准则时, 对时步增量的限制尚无规定。作者这里借用了 Drucker-Prager 准则对时步增量的要求, 即^[1]:

$$\Delta t \leq \frac{4(1+\mu)\sqrt{3}\eta\bar{\sigma}F_0}{3EF} \quad (30)$$

和
$$\Delta t \leq \frac{(1+\mu)(1-2\mu)\eta F_0}{E}$$

$$\frac{(3-\sin\phi)^2}{4(1-2\mu)(3-\sin\phi)^2+6(1+\mu)\sin^2\phi} \quad (31)$$

在计算中将材料 3 个主方向上的相应值代入式 (30), (31) 并比较 Δt 应取其中的最小值。

4 三维有限元算例

假定一隧洞纵轴 (即整体坐标 z 轴) 的方位角为 β_0 , 岩层面方位角 (即走向) 为 β , 层面的倾角为 α , 则可得^[10]

$$l_1 = \sin(\beta - \beta_0), m_1 = 0, n_1 = -\cos(\beta - \beta_0)$$

$$l_2 = \cos(\beta - \beta_0)\sqrt{1 - \sin^2\alpha}, m_2 = \sin\alpha,$$

$$n_2 = \sin(\beta - \beta_0)\sqrt{1 - \sin^2\alpha}$$

$$l_2 = \cos(\beta - \beta_0)\sqrt{1 - \cos^2\alpha}, m_2 = \cos\alpha,$$

$$n_2 = \sin(\beta - \beta_0)\sqrt{1 - \cos^2\alpha}$$

洞室的断面为矩形, 其尺寸为 10 m × 10 m, 埋深 100 m。

岩体为横观各向同性体, 即此时在式 (1), (10) 中有 $E_1 = E_x = E_y, E_2 = E_z, \mu_1 = \mu_{xy}, \mu_2 = \mu_{xz} = \mu_{yz}, G = G_{yz} = G_{xz}, G_{xy} = \frac{E_1}{2(1+\mu_1)}, F_{tx} = F_{ty} = F_{t1}, F_{cx} = F_{cy} = F_{c1}, F_{tz} = F_{t2}, F_{cz} = F_{c2}, F_{sxy} = F_{s1}, F_{tzy} = F_{s2}$, 并假设在粘弹-粘塑性阶段岩体各主方向上的 E_{2i}, η_{1i} 及 η_{2i} 均相同。岩体力学参数见表 1, 有限元网格见图 3。

计算分为两种情况。

(1) 岩体层面为水平方向, 取 $\beta_0 = 0^\circ, \beta = 90^\circ, \alpha = 0^\circ$;

(2) 岩体层面为倾斜方向, 取 $\beta_0 = 0^\circ, \beta = 45^\circ, \alpha = 45^\circ$ 。

计算时间为 100 d, 此时围岩位移、塑性区及 σ_x, σ_y 等值线见表 2 和图 4、5。洞周 4 个特征点 (表 2 中) 的位移-时间曲线见图 6。从这些表、图看到, 在特征点的计算条件下, 洞室围岩中的位移、塑性区的大小、分

表 1 岩体力学参数
Table 1 Mechanical parameters of rockmass

弹性模量			泊松比		剪切模量	粘性系数		容重	抗拉强度		抗压强度		抗剪强度	
E_1	E_2	E_{2i}	μ_1	μ_2	G	η_{1i}	η_{2i}	γ	F_{t1}	F_{t2}	F_{c1}	F_{c2}	F_{s1}	F_{s2}
/MPa	/MPa	/MPa			/MPa	/MPa·D	/MPa·D	/kN·m ⁻³	/MPa	/MPa	/MPa	/MPa	/MPa	/MPa
200.0	100.0	400.0	0.4	0.2	40.0	6 000.0	40 000.0	25.0	0.075	0.035	0.75	0.35	0.10	0.30

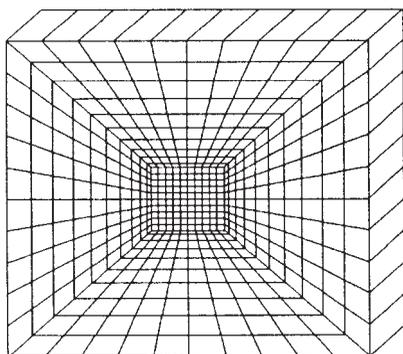


图3 有限元网格
Fig.3 FEM mesh

表2 洞周若干点的位移值 (t = 100 d)

Table 2 Displacements at some points on opening boundary (time = 100 d)

岩层状态	洞顶中点		洞底中点		左边墙中点		右边墙中点		
	u_x	u_y	u_x	u_y	u_x	u_y	u_x	u_y	
水平	0.0	-45.5	0.0	27.5	15.6	-11.5	-15.6	-11.5	
倾斜	前表面	-2.6	-58.7	1.3	32.8	29.3	-9.6	-29.4	-16.3
	后表面	-0.2	-55.3	3.2	34.9	34.5	-14.1	-29.4	-20.5

注 u_x 为水平方向位移, 向左为正, u_y 为垂直方向位移, 向上为正。

分布随着岩体层面的方位角和倾角不同及时间的推移而有明显的变化。大约在 60 d 左右时, 位移发展 (反映了围岩的动态) 基本趋于稳定。

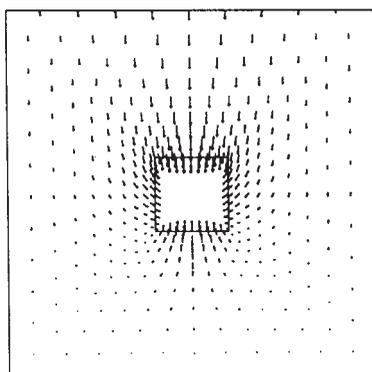
5 结 语

(1) 本文假定正交各向异性岩体主方向上的流变特性均可用西原模型来描述, 建立了相应的粘弹-粘塑性模型, 其中使用了 Hoffman 屈服准则和相关联的流动法则。

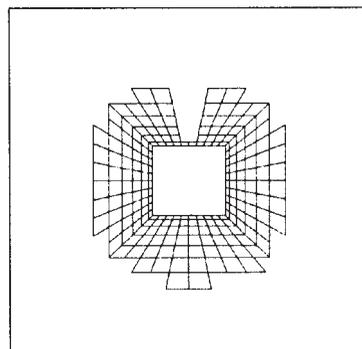
(2) 推导了所建力学模型的数值计算式和描述了有限元法分析时的步骤, 研制了相应的三维有限元程序。

(3) 以地下洞室开挖为算例说明: 各向异性围岩的位移、应力及塑性区的大小、分布随着岩层产状 (方位和倾角) 和时间推移而有明显变化。

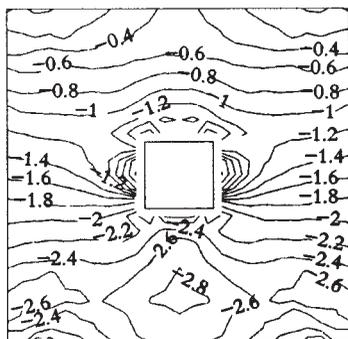
(4) 与均质岩体相比, 各向异性岩体的力学动态更复杂, 这就要求我们在理论研究中充分考虑这一特点, 建立和完善相应的力学模型、计算方法, 以更好地为工程建设服务。



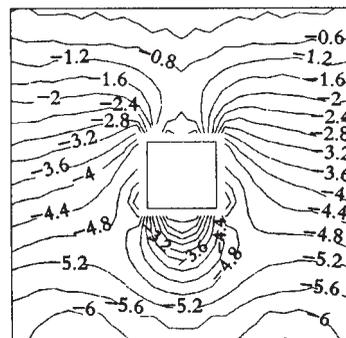
a) 位移矢量



b) 塑性区



c) σ_x 等值线 / MPa



d) σ_y 等值线 / MPa

图4 岩体层面水平时的计算结果 (t = 100 d)

Fig.4 Calculation results for the case with horizontal foliated planes (time = 100 d)

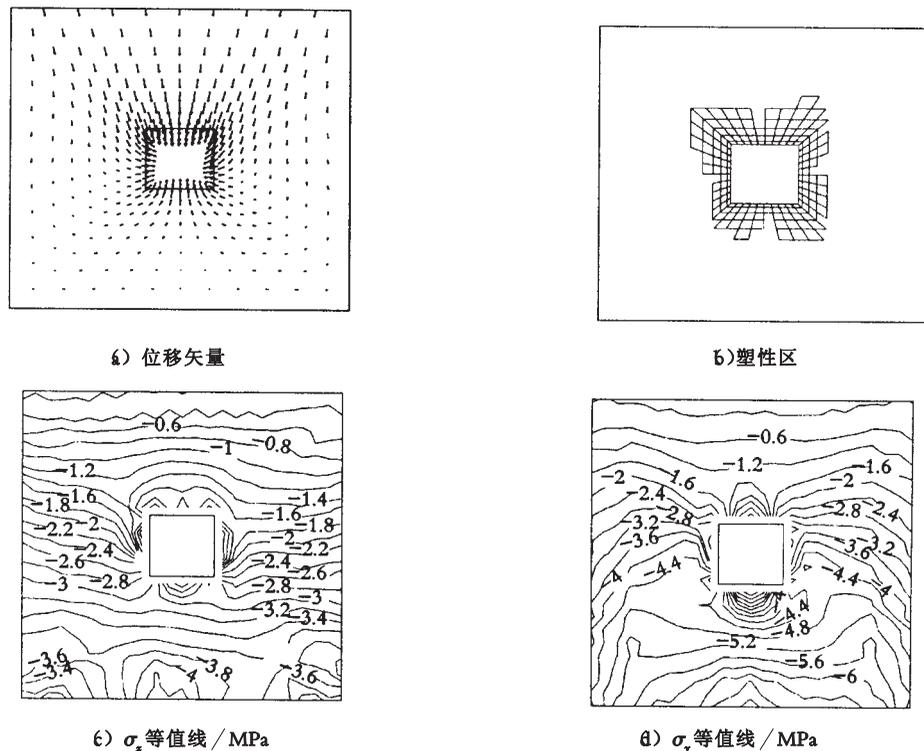


图 5 岩体层面倾斜时的计算结果 $t = 100 \text{ d}$

Fig.5 Calculation results for the case with inclined foliated planes (time = 100 d)

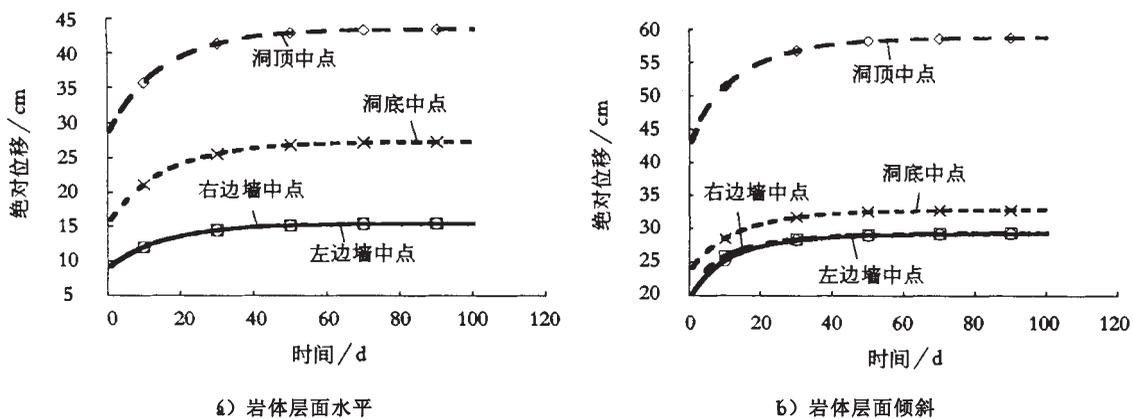


图 6 洞周 4 个特征点的绝对位移-时间曲线 (洞顶、底中点为垂直方向,边墙中点为水平方向)

Fig.6 Curves of absolute displacement-time of 4 character points on opening boundary

参 考 文 献

[1] 孙钧,汪炳鉴. 地下结构有限元法解析[M]. 上海:同济大学出版社, 1988. 163-289.

[2] 张玉军,孙钧. 锚固岩体的流变模型和计算方法[J]. 岩土工程学报, 1994, 16 (3): 33-45.

[3] 唐仪兴,张玉军. 近距离双洞隧道开挖与支护结构稳定性的平面粘弹塑有限元计算[J]. 岩土力学, 1999, 20 (1): 87-92.

[4] 夏熙伦,徐平,丁秀丽. 岩石流变特性及高边坡稳定性流变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15 (4): 312-322.

[5] 徐平,周火明. 岩体边坡开挖卸荷效应的流变分析. 流变学进展[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1999. 382-387.

[6] 罗祖道,李思简. 各向异性材料力学[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1994. 12-14.

[7] 赵渠森. 复合材料[M]. 北京:国防工业出版社, 1979. 147-151.

[8] Brady B H G, Brown E T. 地下采矿岩石力学[M]. 冯树仁等译. 北京:煤炭工业出版社, 1990. 77-79.

[9] 张玉军. 锚固岩体流变特性的模型试验与理论研究[博士论文 D]. 上海:同济大学, 1992.

[10] 于学馥,郑颖人,刘怀恒等. 地下工程围岩稳定分析[M]. 煤炭工业出版社, 1983. 505-508.