

同济曙光

岩土及地下工程设计与施工分析软件 GeoFBA[®]

有限元正反分析软件

用户手册



同 济 大 学
上海同岩土木工程科技有限公司

2007 年 5 月

目 录

前言.....	1
第一章 有限元计算基础知识.....	3
1.1 岩土工程有限元分析方法	3
1.2 有限元计算步骤	4
第二章 曙光正反分析软件计算流程.....	7
2.1 熟悉 GEOFBA2D®的界面	7
2.2 建立几何模型	8
2.3 定义材料	10
2.4 设置施工步	11
2.5 锚固、喷层和衬砌模拟	12
2.6 设定约束条件	16
2.7 全自动生成网格	16
2.8 手动添加单元结点网格	17
2.9 保存	18
2.10 开始分析	19
2.11 查看结果	19
第三章 曙光有限元正分析计算原理.....	20
3.1 概述	20
3.2 初始地应力的计算	21
3.2.1 自重应力	21
3.2.2 构造应力	21
3.3 分步施工模拟	21
3.3.1 一般表达式	21
3.3.2 开挖	22
3.3.3 填筑	24
3.3.4 结构的施作与拆除	24
3.3.5 增量荷载的施加	24
第四章 曙光有限元反分析计算原理.....	25
4.1 概述	25
4.2 量测信息的种类及表达式	25
4.2.1 位移量测信息	25
4.2.2 内力量测信息	26
4.2.3 压力量测信息	26
4.2.4 应变量测信息	26
4.3 目标函数和适应性函数	26
4.3.1 目标函数	26
4.3.2 适应性函数	26
4.4 优化方法	26
4.4.1 单纯形法	27
4.4.2 阻尼最小二乘法	28
4.4.3 遗传算法	30
4.4.4 遗传模拟退火算法	31

4.4.5 混合遗传算法	32
4.5 关于优化方法对比以及参数的选取	32
第五章 正反分析模块功能介绍	34
5.1 文件	34
5.2 编辑	35
5.3 查看	36
5.4 绘制	36
5.5 修改	37
5.6 格式	38
5.7 工具	39
5.8 正分析模型建立	39
5.8.1 设置施工步与增量步	40
5.8.2 定义材料	40
5.8.3 作图	40
5.8.4 将材料赋给封闭面、曲线	41
5.8.5 添加边界条件	41
5.8.6 开挖	41
5.8.7 生成网格	42
5.8.8 设定有限元控制参数	42
5.8.9 控制有限元模型的显示	42
5.9 反分析模型建立	43
5.9.1 定义测线与测点	43
5.9.2 反分析目标	46
5.9.3 反分析方法	49
5.9.4 反分析计算	51
第六章 查看计算结果	53
6.1 概述	53
6.2 显示位移图	53
6.3 显示应力图	54
6.4 显示内力	54
6.5 显示介质-结构作用力	54
6.6 查询单元属性	55
第七章 例题解说	57
7.1 隧道的荷载—结构建模实例	57
7.2 洞室开挖反分析	62
7.3 连拱隧道开挖分析	71
7.4 设计建议及常用问题解答	88
7.4.1 导入 DXF 图形的绘制要求	88
7.4.2 可能出现的错误及注意事项	89

前言

同济曙光岩土及地下工程设计与施工分析软件是一套岩土及地下工程领域的通用有限元分析与设计平台。主要功能包括岩土及地下工程的有限元施工动态模拟分析系统，可考虑施工过程的全量和增量反演分析系统，及盾构、公路隧道等设计计算及配筋模块。

该软件自 80 年代中期开始研制并投入使用，是在朱合华、丁文其、李晓军、蔡永昌、杨林德、刘学增等主持下，通过地下系数十位教授、博士和硕士多年共同的努力，在完成 30 多项纵向基金和横向应用技术科研项目中，总结科研经验而完成开发，它又作为完成科研和工程项目的主要工具，并不断得到检验、完善和发展。其成果在解决重大的岩土工程问题中发挥了重要作用，已成功用于广州抽水蓄能电站、宜兴抽水蓄能电站和龙滩水电站等大型地下厂房，上海、广州、日本大阪地铁盾构区间隧道、上海合流污水顶管工程、云南元磨高速公路隧道，以及润扬大桥基坑工程等的设计、施工模拟、施工反馈和预报分析。

本软件已有 200 多家用户，主要为从事岩土及地下工程的设计、施工、科研、教学及相关人员，广泛适用于岩土及地下工程的各个领域。成果获 1994 年原教育部科技进步三等奖，1997 年上海市土木工程学会及 1998、1999 年中国土木工程学会优秀论文奖，1998 年度建设部科技进步二等奖，1999 年上海市科技进步三等奖，2000 年上海市市政局科技进步一等奖 2 项。该软件 2002 年 7 月 26 日通过上海市科学技术委员会组织的鉴定，达到国际先进水平，部分功能达到了国际领先水平，获 2002 年度教育部科技进步二等奖。**有限元正分析、反分析设计模块**是同济曙光岩土工程设计与施工分析软件的两个重要模块。

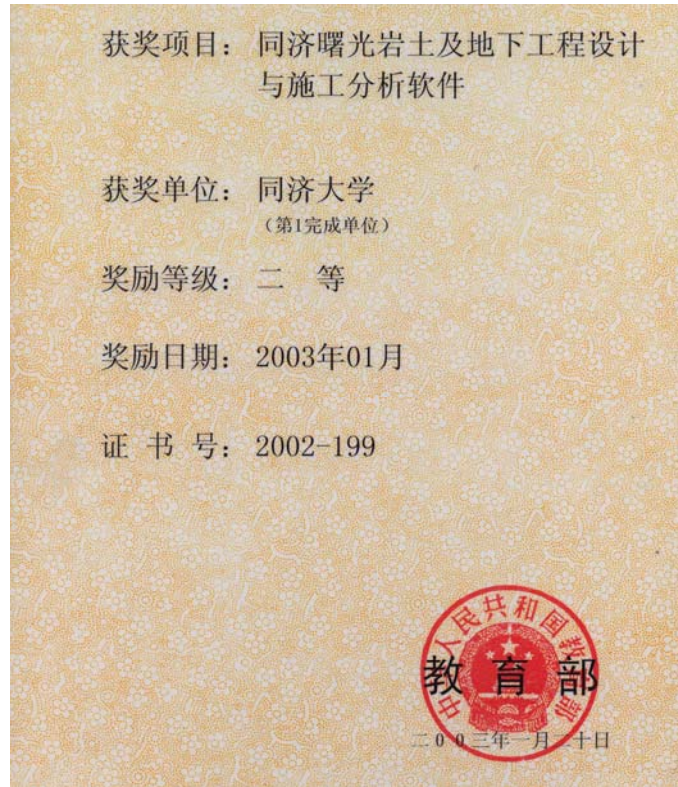
GeoFBA2D[®] 全称为 Forward and Backward Analysis software for 2D Geotechnical problem. 该软件为平面应力、平面应变和轴对称问题的岩土及地下结构静力分析程序，用于计算岩土及地下工程施工前后地层的应力场和位移场以及支护结构内力，适用于地下开挖推进过程中的施工模拟。软件由 *GeoFBA2D*[®] 主程序（前、后处理）和 *GeoFBA2D*[®] 计算程序组成。

GeoFBA2D[®] 主程序包含了前、后处理的所有功能，用户从建立计算模型到分析以及查看计算结果均在 *GeoFBA2D*[®] 主程序中进行。其中前处理功能用于根据用户输入的数据建立有限元分析模型。计算程序（嵌于主程序中，不能被单独使用）用于对模型数据进行有限元分析，并输出相应的计算结果。后处理功能则用于将计算结果用直观的方式显示出来。通过使用 *GeoFBA2D*[®]，用户只须将设计图、材料信息、荷载、边界条件等参数以及填土、挖掘、支护等施工相关数据直接输入，就可从获得变形图、等值线、应力分布曲线及内力图等易于理解的直观结果，用户不必关心与有限元理论相关的中间处理过程。

在早期的版本中（*GeoFBA2D*[®] V2.3 以前的版本），前处理和后处理是分为两个单独的可执行程序，后处理可以被单独启动。在新版本中，单独的后处理程序依然可以使用，但在新版本 *GeoFBA2D*[®] 程序中已包含后处理的所有功能，保留它的目的是为了兼容性考虑的。

众所周知，有限元的前处理是制约有限元方法推广和使用的一个瓶颈问题。有限元前处理软件的好坏也是衡量有限元软件好坏的重要指标。*GeoFBA2D*[®] 的开发目标就是要提供一个方便快捷且功能强大的有限元工具，使从事岩土工程的广大工程技术人员和科研人员基本上不需要有限元的专业知识，也可以方便地用有限元方法对实际问题进行分析、设计和判断。为此，我们在 Windows 95/98/NT 操作系统环境下，采用

最新的软件设计方法，实现了达到上述目标的有限元软件——GeoFBA2D[®]。考虑到 AutoCAD 的使用在广大的用户中较为普遍，因此 GeoFBA2D[®]的软件在风格上与之基本类似，这样做的目的是为了最大程度地减少用户的学习时间以及方便用户的使用。特别是在程序已有的绘图功能上，我们尽量保持与 AutoCAD 一致，以使熟悉 AutoCAD 的用户非常平滑地过渡到 GeoFBA2D[®]中来。需要提出的是，我们无意使功能与 AutoCAD 完全相同，更不是在开发 AutoCAD 或类似的产品，我们的目标是让用户以最方便、最快捷的手段建立起有限元模型并对之进行分析。



教育部科技进步二等奖证明



有限元正反分析软件著作权登记证明

第一章 有限元计算基础知识

按支护结构与地层相互作用考虑方式的不同,地下结构的计算方法可大致区分为两类:荷载结构法和地层结构法。因为大量岩土工程实际问题目前仅有数值解,因而数值方法常被视为与解析解不同的另一类计算法。然而如从支护结构与地层相互作用方式差异的角度区分,封闭解析解与数值计算法都可分别归属于荷载结构法与地层结构法。

认为地层对结构的作用只是产生作用在地下结构上的荷载(包括主动地层压力和被动地层抗力),以计算支护结构在荷载作用下产生的内力和变形的的方法称为荷载结构法。早年常用的弹性连续框架(含拱形)法、假定抗力法和弹性地基梁(含曲梁和圆环)法等都可归属于荷载结构法。其中,假定抗力法和弹性地基梁法都形成了一些经典计算方法,而弹性地基梁法又可按采用的地层变形理论的不同分为局部变形理论计算法和共同变形理论计算法。

认为支护结构与地层一起构成受力变形的整体,并可按连续介质力学原理计算衬砌和周边地层的计算方法称为地层结构法。20世纪70年代以来获得较多成果的关于圆形衬砌的弹性解、粘弹性解和弹塑性解等都属于地层结构法。

荷载结构法和地层结构法都可按数值解计算。因为数值计算法可对许多复杂岩土工程问题求得近似解,这类方法越来越受到人们的重视。有限单元法、有限差分法、离散单元法、加权残值法和边界单元法等都属于数值计算法。由于复杂的边界条件、材料和几何非线性、节理和其它不连续特征以及开挖效应等许多复杂的工程因素在有限单元法中都得到适当的反映和考虑,有限单元法在岩土工程和地下结构问题中近年来发展迅速并被广泛应用。

1.1 岩土工程有限元分析方法

荷载结构法是迄今为止最常采用的一类地下结构计算方法。在荷载结构法中,衬砌结构所承受的荷载主要是洞室开挖后由松动岩土的自重产生的地层压力和自重。计算过程中需先确定地层压力的分布与量值,然后计算衬砌结构在地层压力及其它荷载作用下的内力。这一方法与计算地面结构时习惯采用的结构力学方法相一致,其特点主要是需考虑发生变形时可能受到的周围地层介质对衬砌结构的约束作用。

地层压力常是地下结构承受的主要荷载。在土质地层中,地层压力即为土压力,而在岩石地层中,地层压力则为围岩压力。由于影响围岩压力的分布、大小和性质的因素甚多,长期以来人们对其主要是根据大量地下工程的实践,通过观察洞室的坍落规律,并在作出某些简化假定后推导出便于应用的围岩压力计算式。

早年在国际上较有影响的普氏理论和泰沙基理论,根据松散体假设导出地层压力的计算式。人们在采用这两种理论进行工程设计和施工实践中,发现它们都还存在不少缺点。近几十年来,人们通过大量的试验与统计确定影响地层压力的因素,认为应按围岩分类给出相应的荷载计算式。应当指出,在围岩分类确定围岩压力的研究中,工程类比法起着不容忽视的作用。

地层结构法是近30年来获得较大发展,且在公路隧道设计计算中已逐步推广采用的计算方法。与荷

载结构法不同,地层结构法认为地下结构周围的地层不仅将对衬砌结构产生荷载,而且自身也能承受荷载,地下结构是否安全可靠,首先取决于周围地层的稳定状态。由此,衬砌结构的作用是在洞室周围地层应力重分布的过程中参与地层的变形,对地层提供必要的支承抗力,并与地层一起组成共同受力的整体,以保持洞室的稳定。

地层结构法进行内力计算的特点是,不仅计算衬砌结构的内力,而且计算洞室周围地层的应力。在计算过程中,通过位移协调条件使地层应力与衬砌结构的内力保持平衡。按地层结构法进行截面设计的特点,是验算衬砌结构的强度时要求综合考虑地层稳定性的影响。

1.2 有限元计算步骤

有限单元法的基本思想是将连续的求解区域离散为一组有限个、且按一定方式相互联结在一起的单元的组合体,如图 1.1 所示的二维离散域。有限单元法作为数值分析方法的一个重要特点是利用在每一个单元内假设的近似函数来分片的表示全求解域上待求的未知场函数。单元内的近似函数通常由未知场函数或其导数在单元的各个结点的数值和其插值函数来表示。这样一来,在一个问题的有限元分析中,未知场函数或其导数在各个结点上的数值就成为新的未知量(也即自由度),从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。一经求解出这些未知量,就可以通过插值函数计算出各个单元内场函数的近似值,从而得到整个求解域上的近似解。

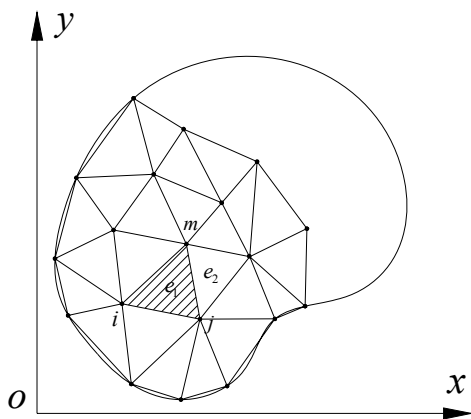


图 1.1 二维域离散

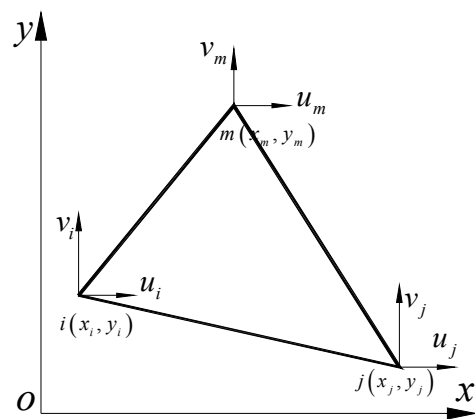


图 1.2 结点三角形单元

以结点位移为基本未知量、并基于最小位能原理建立的有限单元称为位移元,它是有限单元法中最常用的单元。我们将以平面问题 3 结点三角形单元(如图 1.2 所示)为例,对有限单元法的基本步骤进行简要回顾。有限元分析基本可分为 6 步:

第一步:定义形函数 $N(x, y)$, 进而可将位移函数 $u(x, y)$ 表示成结点位移 a^e 的函数。

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_m & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} IN_i & IN_j & IN_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_i \\ a_j \\ a_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_m \end{bmatrix} \mathbf{a}^e = \mathbf{N} \mathbf{a}^e \quad (1.1)$$

其中

$$\mathbf{a}^e = \begin{Bmatrix} a_i \\ a_j \\ a_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} u_i & v_i & u_j & v_j & u_m & v_m \end{bmatrix}^T \quad (1.2)$$

$$N_i = \frac{1}{2A} (a_i + b_i x + c_i y) \quad (i, j, m) \quad (1.3)$$

其中

$$A = \frac{1}{2} D = \frac{1}{2} (a_i + a_j + a_m) = \frac{1}{2} (b_i c_j - b_j c_i) \quad (1.4)$$

$$a_i = x_j y_m - x_m y_j$$

$$b_i = y_j - y_m$$

$$c_i = -x_j + x_m \quad (1.5)$$

上式中 (i, j, m) 表示下标轮换, 如 $i \rightarrow j$, $j \rightarrow m$, $m \rightarrow i$ 。

第二步: 以单元结点位移 \mathbf{a}^e 表示单元应力和应变。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \mathbf{L} \mathbf{u} = \mathbf{L} \mathbf{N} \mathbf{a}^e = \mathbf{L} \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_m \end{bmatrix} \mathbf{a}^e$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{B}_i & \mathbf{B}_j & \mathbf{B}_m \end{bmatrix} \mathbf{a}^e = \mathbf{B} \mathbf{a}^e \quad (1.6)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D} \mathbf{B} \mathbf{a}^e = \mathbf{S} \mathbf{a}^e \quad (1.7)$$

其中 \mathbf{B} 称为应变矩阵, \mathbf{L} 是平面问题的微分算子。

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{L}\mathbf{N}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_i & 0 \\ 0 & N_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & 0 \\ 0 & c_i \\ c_i & b_i \end{bmatrix} \quad (i, j, m) \quad (1.8)$$

\mathbf{S} 称为应力矩阵，其分块矩阵为：

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{D}\mathbf{B}_i = \frac{E_0}{2(1-\nu_0^2)A} \begin{bmatrix} b_i & \nu_0 c_i \\ \nu_0 b_i & c_i \\ \frac{1-\nu_0}{2} c_i & \frac{1-\nu_0}{2} b_i \end{bmatrix} \quad (i, j, m) \quad (1.9)$$

第三步：利用最小位能原理建立有限元方程。

$$\mathbf{K}^e \mathbf{a}^e = \mathbf{P}^e \quad (1.10)$$

其中 \mathbf{K}^e 称为单元刚度矩阵， $\mathbf{K}^e = \int_{\Omega^e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} t dx dy$

\mathbf{P}^e 称为单元等效结点荷载列阵， $\mathbf{P}^e = \mathbf{P}_b^e + \mathbf{P}_s^e = \int_{\Omega^e} \mathbf{N}^T \mathbf{f} t dx dy + \int_{S_s^e} \mathbf{N}^T \mathbf{T} t dS$

第四步：集成。将覆盖结构全域的所以单元的刚度矩阵和结点外力对平衡的贡献集成，建立整体结构的平衡方程。

$$\mathbf{K} = \sum_e \mathbf{G}^T \mathbf{K}^e \mathbf{G} \quad (1.11)$$

$$\mathbf{P} = \sum_e \mathbf{G}^T \mathbf{P}^e \quad (1.12)$$

$$\mathbf{K} \mathbf{a} = \mathbf{P} \quad (1.13)$$

式中 \mathbf{G} 为单元结点转换矩阵。但是通常这个集成过程不是采用上述的矩阵相乘法进行的，在计算得到 \mathbf{K}^e ， \mathbf{P}^e 的各元素后，只需要按照单元的结点自由度编码，“对号入座”的叠加到结构刚度矩阵和结构荷载列阵的相应位置上即可实现。

第五步：求解平衡方程。在有限单元法中通常几何边界条件（变分问题中就是强制边界条件）的形式是在若干个结点上给定场函数的值，即

$$a_j = \bar{a}_j \quad (1.14)$$

\bar{a}_j 可以是零值或非零值。可以采用以下方法引入强制边界条件，进而求得结构的结点位移 \mathbf{a} 。

- (1) 直接代入法
- (2) 对角元素改 1 法
- (3) 对角元素乘大数法

第六步：回代。根据计算出的结点变量，代入第二步的表达式中，获得单元应变和应力等值。

第二章 曙光正反分析软件计算流程

为了对 *GeoFBA2D* 系统有一个基本了解，让我们首先体验性地使用一下 *GeoFBA2D*。如果您的微机已正确地安装了 *GeoFBA2D*，从 *Windows* 开始菜单中的程序中选择 *GeoFBA2D*，便可以将程序启动（如下图所示）。

2.1 熟悉 *GeoFBA2D*[®]的界面

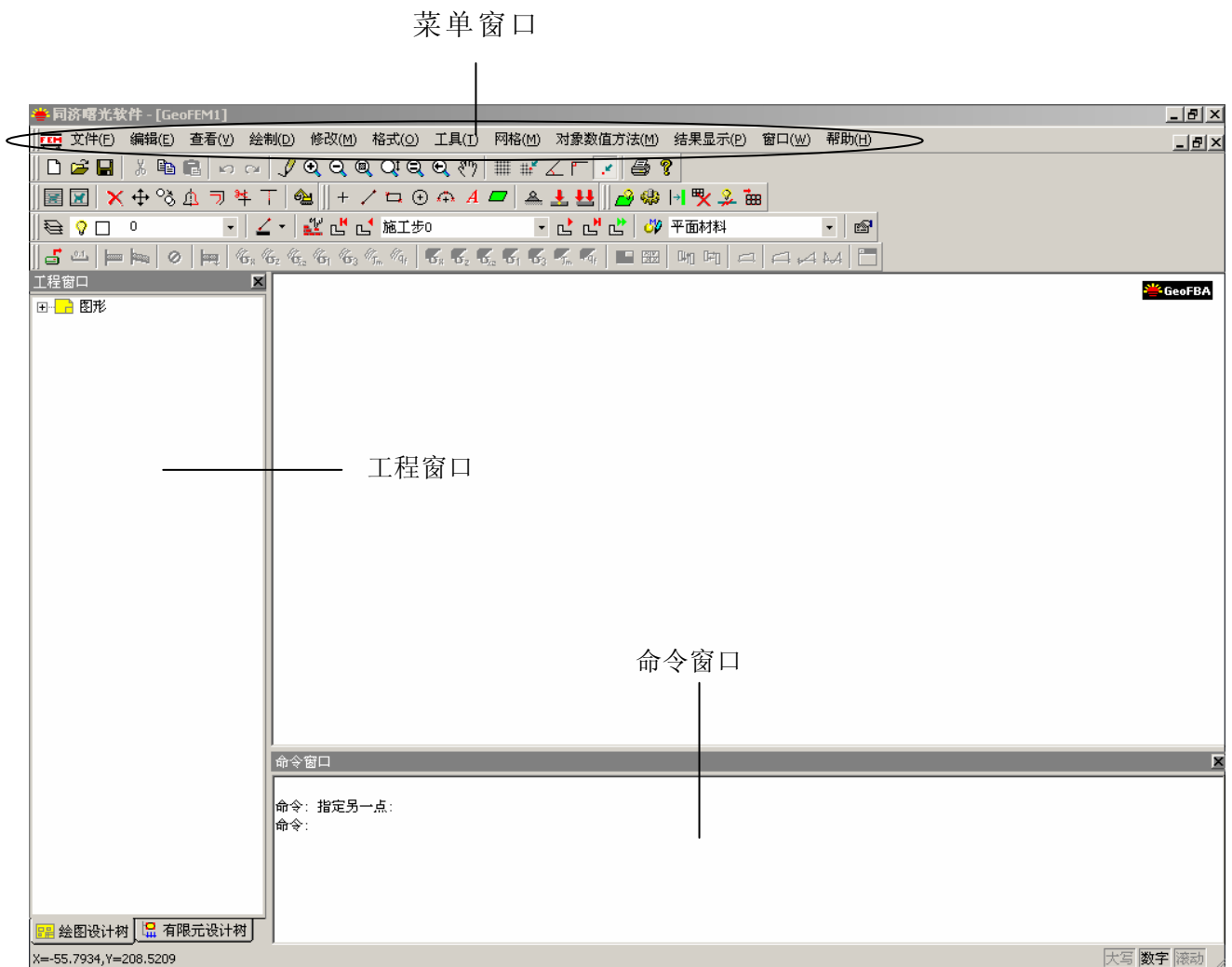


图 2.1 *GeoFBA2D* 界面

当你第一次启动 *GeoFBA2D*[®]时，屏幕的最上方有菜单，最下方有状态栏，中间是绘图窗口、命令窗口、对象窗口及几个工具条。每个工具条上的一个图标代表了一个命令。

(1) 工具条

工具条上包含有用图标表示的工具，每个图标代表了一个命令，当鼠标移动到一个图标上时，会有关于此工具的简短说明出现。

工具条有两种显示方式，即“停靠”和“浮动”方式。停靠的工具条在绘图窗口的边上，和其它窗口不会

相互重叠。浮动的工具条可以在屏幕上任意移动，并且可以改变工具条的大小。

- 如何显示和关闭工具条
从查看菜单中，选择要显示的工具条。已显示的工具条的左侧有一个标记“V”。
- 如何在“停靠”和“浮动”方式切换
用鼠标拖动工具条就可以在停靠和浮动方式来回切换。

(2) 菜单

菜单条在程序主窗口的最上方，可以有以下两种方式选择菜单：

- 用鼠标点击菜单名称，从中选择菜单选项
- 按下 ALT 键不动，输入菜单中下划线的字母。例如，要新建一个文件，按下 ALT 键的同时按下 F (ALT + F) 打开文件菜单，然后按下 ENTER 选择高亮显示的新建选项。

(3) 命令窗口

命令窗口也是一个可以“停靠”或“浮动”的窗口，双击命令窗口，就可以将它停靠在主窗口的任何位置或让它浮动在屏幕上。

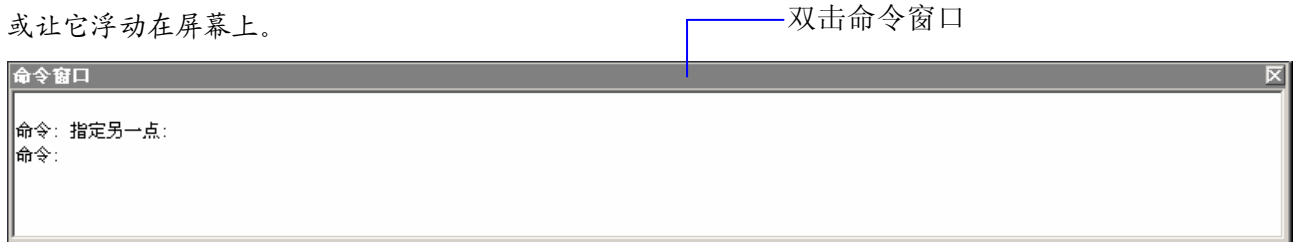


图 2.2 双击命令窗口

命令窗口是输入命令的地方，同时也是 *GeoFBA2D*[®] 反馈信息的地方。用户可以通过调节分隔条来动态调整命令窗口的大小，这样用户就可以控制命令窗口所占屏幕的区域。

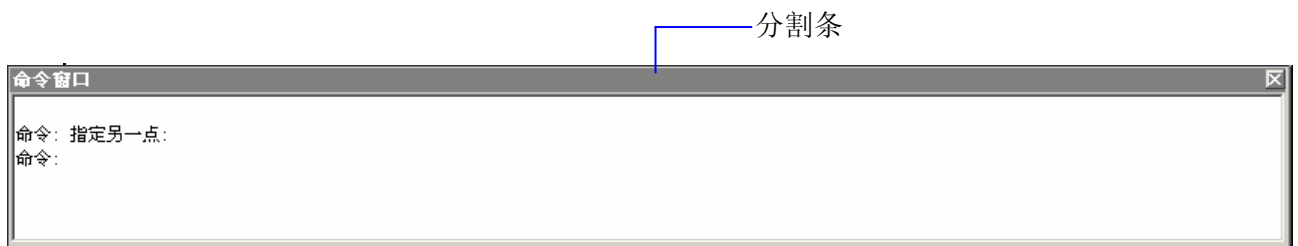


图 2.3 分割条

(4) 鼠标使用约定

对于一个两键鼠标来说，左键是选择键，用来在屏幕上指定点。右键是回车键，按下右键相当于按下键盘上的回车键 ENTER。

2.2 建立几何模型

现在我们利用前处理定义分析对象的几何信息。

A. 组织模型

- 菜单中选择: <格式> - <图形范围>

- 输入图形范围为 200×200 ->>
- 按<确定>按钮关闭此对话框->>

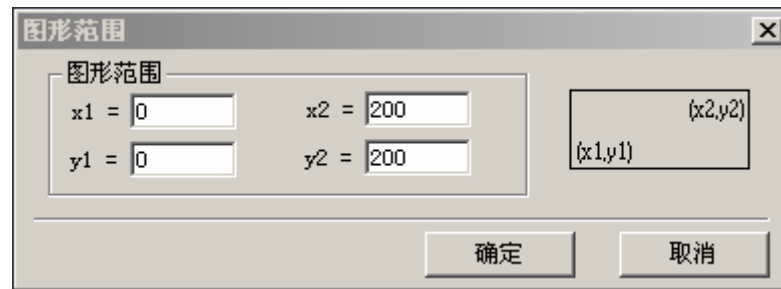


图 2.4 图形范围设定

B. 作图

首先从工具菜单中选择绘图辅助工具<栅格和捕捉>等功能，接下来设置<对象捕捉>设置功能，例如打开<端点捕捉>、<交点捕捉>等功能。设置好这些辅助工具将有利于我们方便而准确地作图。

接下来用画<矩形>、<直线>和<圆弧>命令，完成以下图形，其具体做法如下：

★ 首先，从绘图工具栏中单击  按钮。

- 输入第一点坐标 0, 0
- 输入第二点坐标 120, 90

★ 单击  按钮。

- 输入第一点坐标 48, 54
- 输入下一点坐标 48, 40
- 输入下一点坐标 66, 40
- 输入下一点坐标 66, 54

★ 单击  按钮。

- 输入圆弧的起点坐标 66, 54
- 输入圆弧的第二点坐标 57, 60
- 输入圆弧的终点坐标 48, 54

这样便可以得到以上图形。

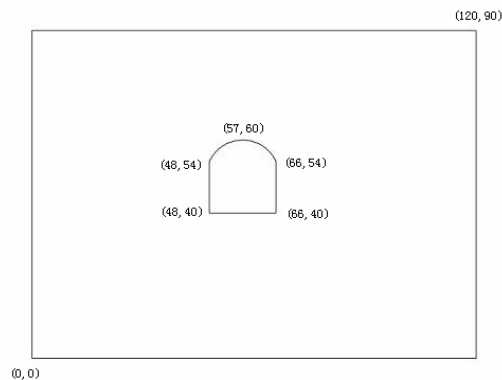



图 2.5 建立几何模型

★ 在生成计算网格之前，还需将图中的曲线整理为一些封闭的区域(即封闭面)。从<网格>菜单中选择<自动寻找封闭面>的命令，或在网格工具栏中单击  按钮。自动寻找得到的封闭面如下图所示(用鼠标单击区域后的图形)。

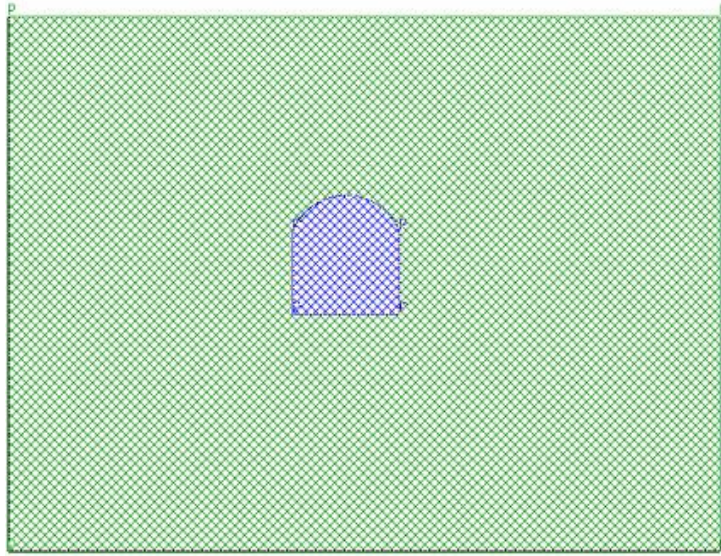



图 2.6 生成封闭面

2.3 定义材料

从<对象数值分析方法>菜单中选择<材料>，或者从属性工具栏中单击 。在定义材料对话框中，单击“添加”按钮。选择材料类型为各向同性体，输入材料参数，如下图所示。

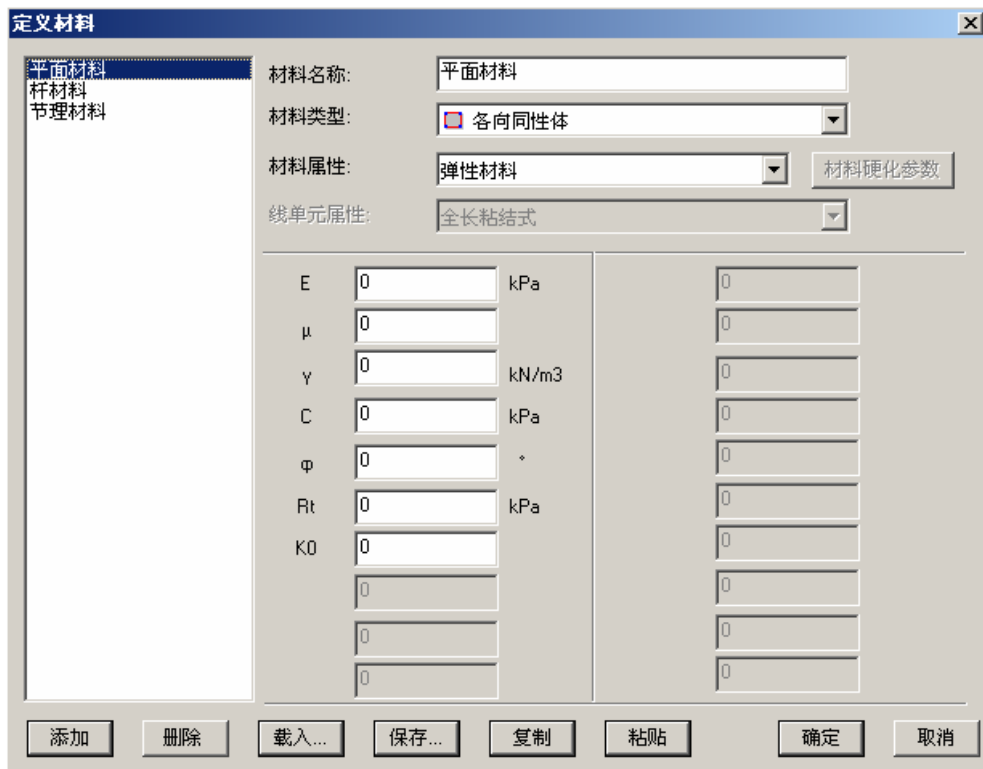


图 2.7 材料定义

在材料对话框里有三种基本类型材料：平面材料、杆材料、节理材料，后面的过程将分别说明各种材料的用法。点击“添加”按钮，定义本例所需的材料及各材料的参数，如下图所示（注意各种材料的属性，比如杆、梁材料有全长粘结式和点锚式两种）

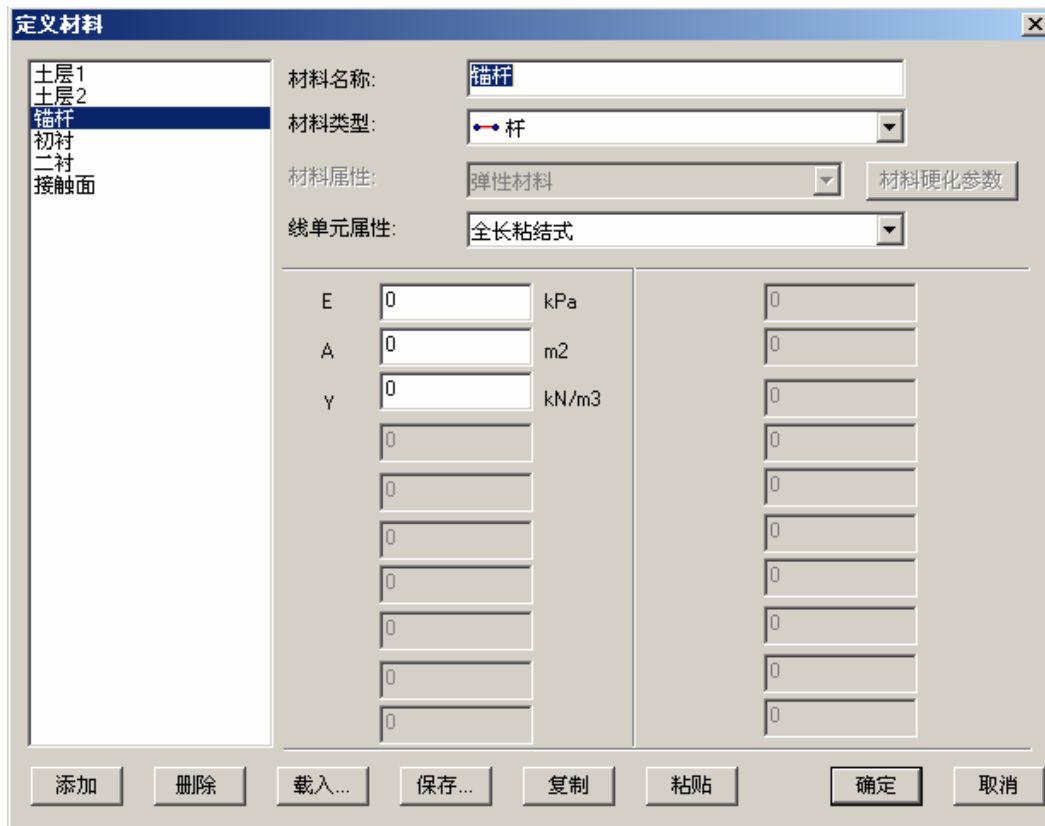


图 2.8 材料添加

定义材料之后，下一步将材料赋给各封闭面。从绘图窗口用鼠标选中某封闭面，再从工具栏的“材料类型”组合框中（见下图）选择该封闭面的单元所应赋予的材料，如给选中的“封闭面 2”赋材料“土层 2”。

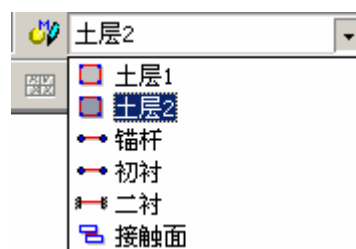




图 2.9 赋予材料

也可以在网格全部生成后，用上述同样的过程给所有的单元赋材料。

注：先选中对象，从〈修改〉菜单中选择〈属性〉，或单击按钮，可以看到所选中对象（曲线、面或单元）的材料、施工步等信息。

2.4 设置施工步

下面我们在该例中增加 2 个新的施工步，具体方法如下：

- 从〈格式〉菜单中选择〈施工步/增量步〉，或从属性工具栏中单击.

- 在弹出的设置“**施工步 / 增量步**”对话框中，将总施工步数设定为 2。
- 单击“**确定**”按钮返回程序中。

此时，系统中有 4 个施工步，分别是施工步 0（对应于初始状态）、施工步 1 和施工步 2。用户可以通过属性工具栏上的“**上一个施工步**”、“**下一个施工步**”等按钮在不同的施工步之间切换，也可以在施工步下拉列表框中直接选择不同的施工步，见下图。

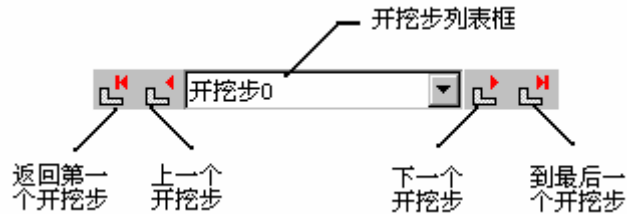



图 2.10 施工步设置

2.5 锚固、喷层和衬砌模拟

接下来，我们按施工顺序设置开挖及支护过程。

A. 开挖

- 单击“**下一个施工步**”按钮，切换至施工步 1。
- 用鼠标选择下图所示的需要挖去的封闭面，从〈**修改**〉菜单中选择〈**挖去**〉命令，或单击工具栏上的按钮。

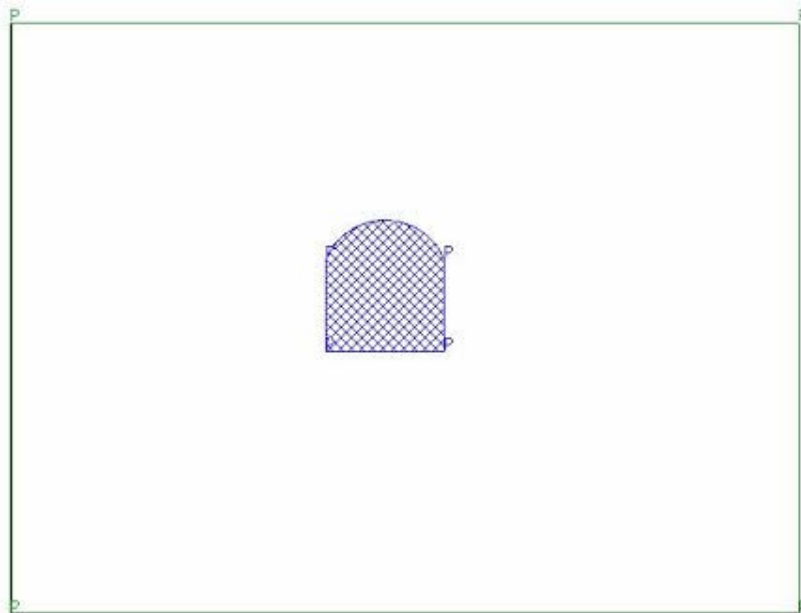


图 2.11 开挖设置

B. 支护

- 从工具栏的“**材料类型**”组合框中，选择“**锚杆材料**”；
- 根据需要，在开挖后的隧洞上施加锚喷支护(用〈**绘制**〉-〈**直线**〉命令)如下图所示。

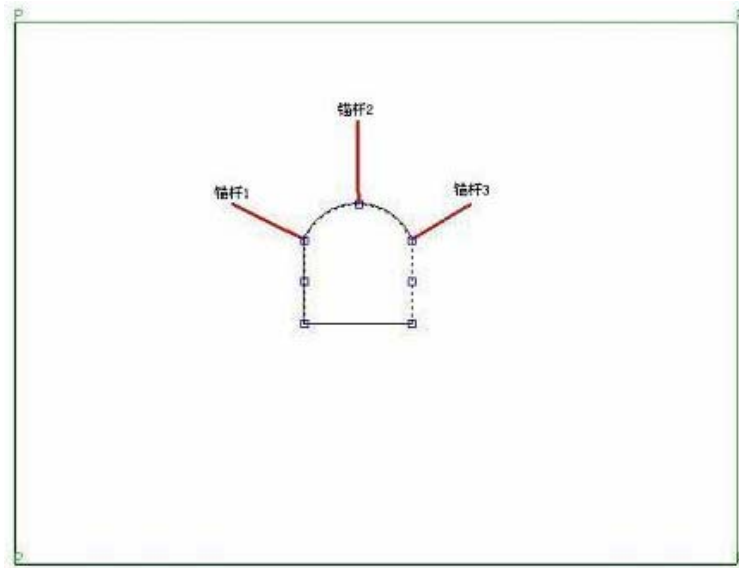



图 2.12 锚杆绘制

- 在当步(即施工步 1)选取上图所示的高亮显示曲线。从〈网格〉菜单中选择〈复制为线材料〉命令，或在工具栏上单击按钮，弹出如下对话框：

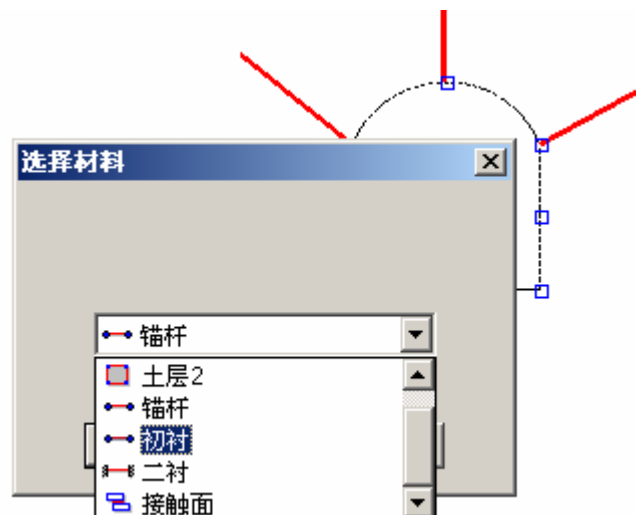


图 2.13 初衬绘制

从组合对话框中选择“初衬”材料，再单击“确定”按钮。则在当步复制了一层初衬材料。

- 单击“下一个施工步”按钮，切换至施工步 2。

考虑到二衬和一衬之间有滑动，从〈网格〉菜单中选择〈指定组合梁〉命令如下图所示〈指定组合梁〉和〈指定接触面〉命令可以分别定义结构-结构和结构-土体之间的接触。

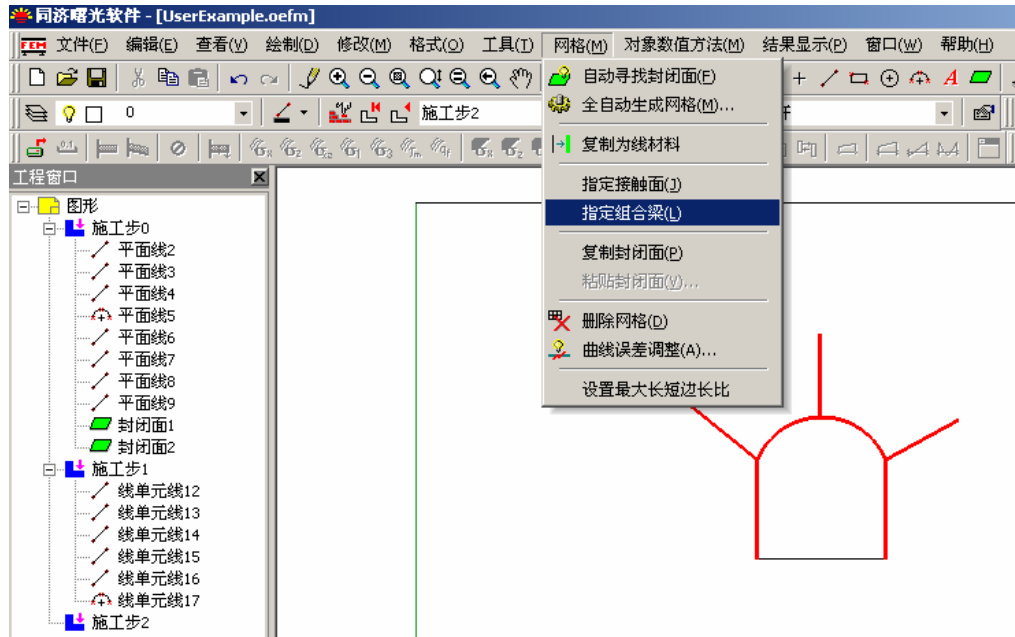


图 2.14 指定组合梁

选择需要指定接触面和组合二衬的初衬曲线，按屏幕提示定义所需的材料如下图所示：

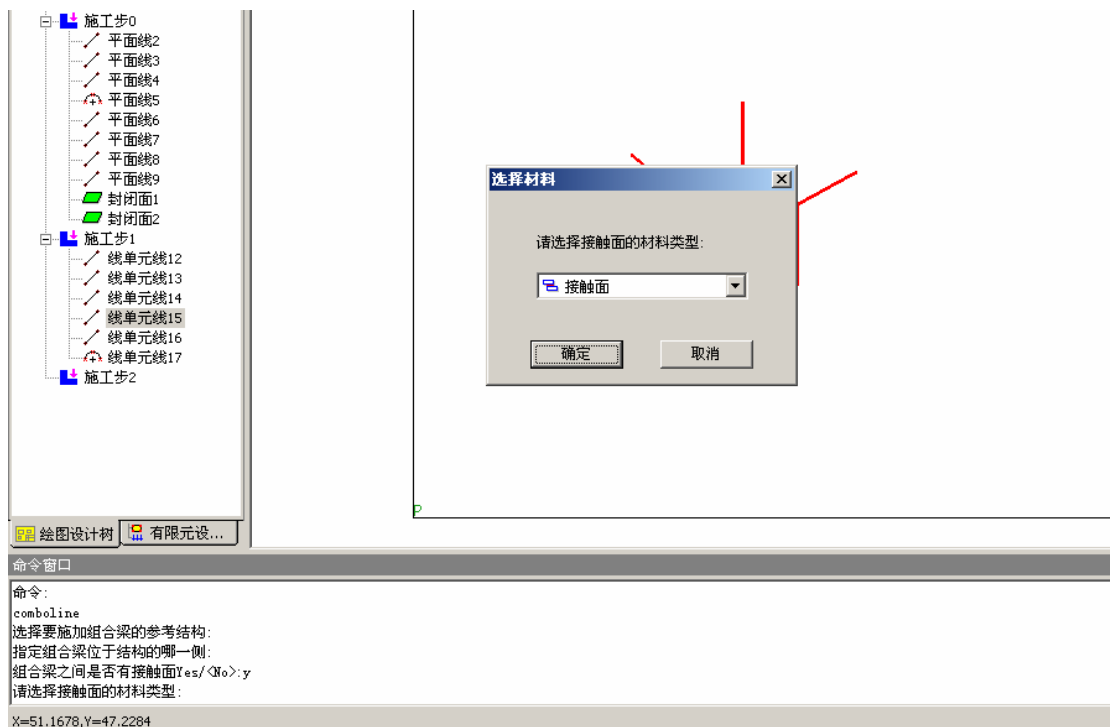


图 2.15 接触面设置

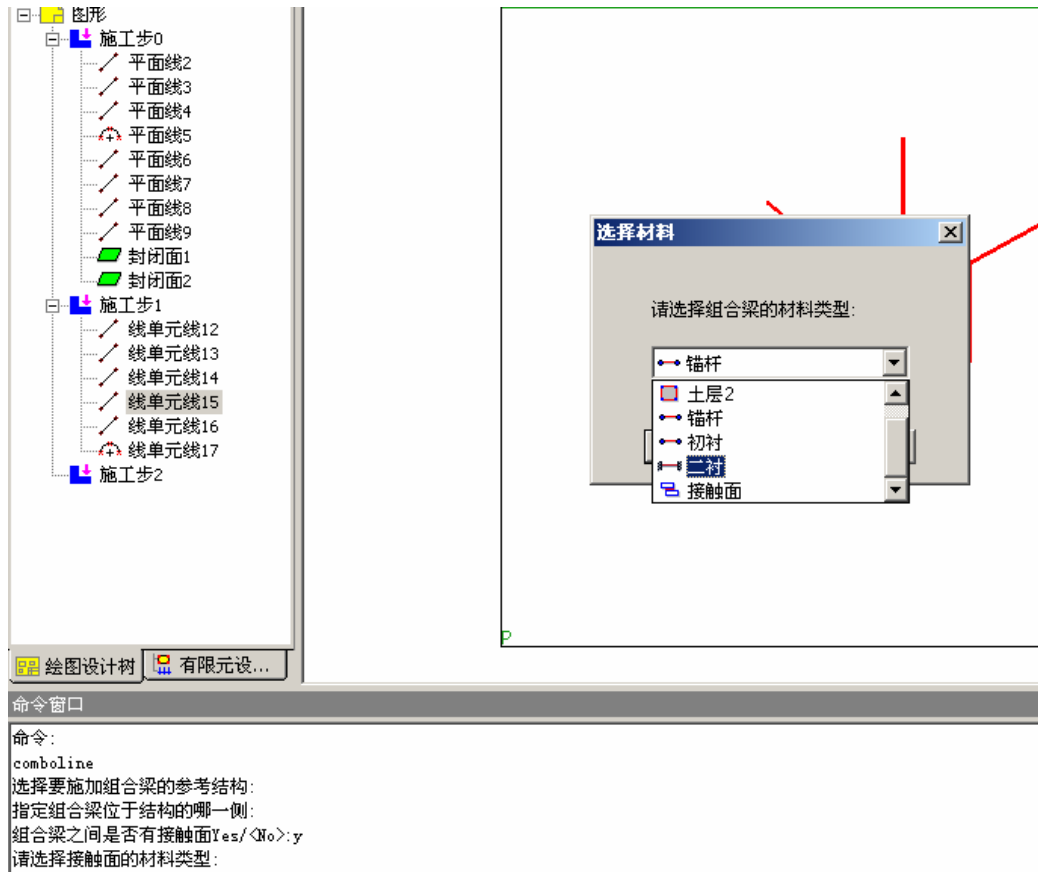


图 2.16 选择二次衬砌

定义完二衬和接触面的模型如图 2.17 所示:

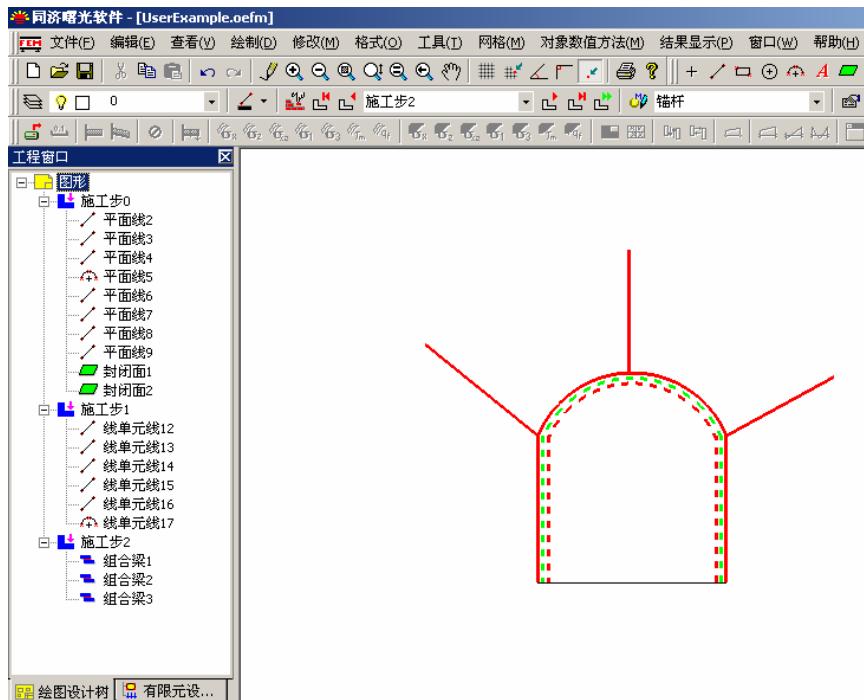




图 2.17 完整的支护形式

上面的步骤，建立了隧道的支护模型。可以在图上“对象”窗口里对所有的对象的材料类型、施加及

开挖地施工步进行检查。

2.6 设定约束条件

在此例中，我们将为矩形的两侧及底边施加约束条件。具体方法如下：

- 从<绘制>菜单中选择<位移约束>，或从绘制工具栏中单击 。
- 用鼠标框选或点选左右两侧的直线，选中的直线会被蓝色的框框住。
- 按下回车键或鼠标右键。
- 从弹出的施加位移约束对话框中选择 X 方向约束，按下“确定”按钮。
- 重复以上命令，从<绘制>工具栏中单击 。
- 用鼠标框选或点选所有的底部直线。
- 按下回车键或鼠标右键。
- 选择施加 Y 方向约束，按下“确定”按钮。

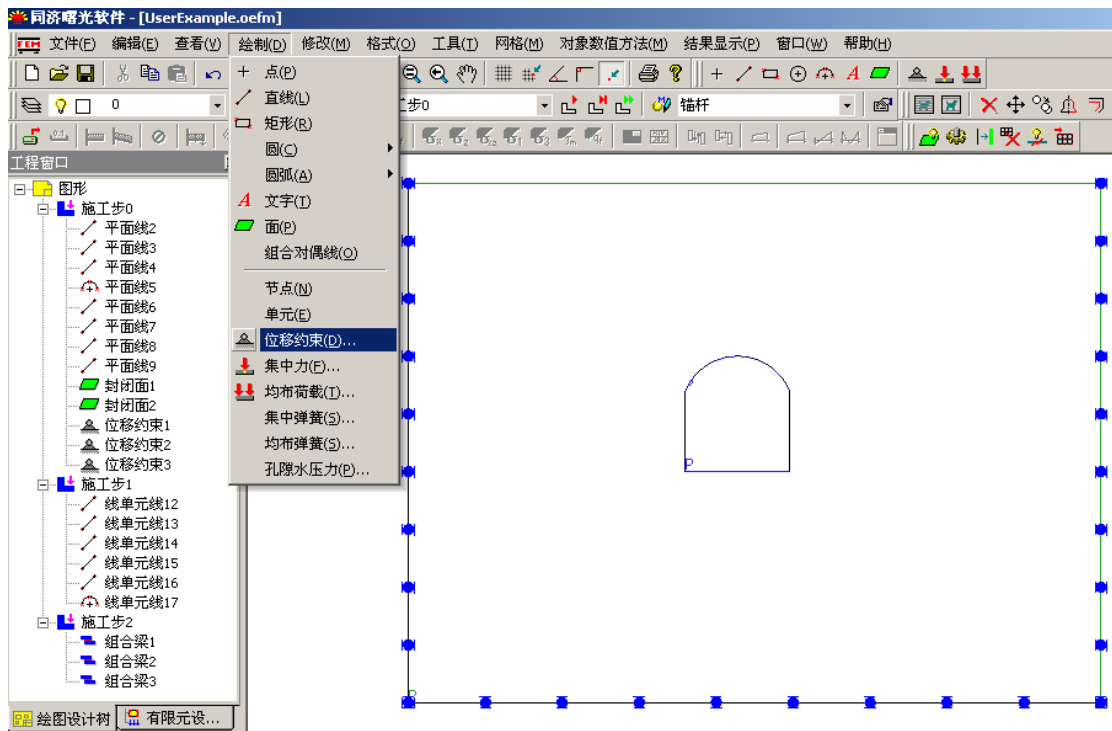


图 2.18 边界条件设置

2.7 全自动生成网格

- 从<网格>菜单中选择<全自动生成网格>命令，或在工具栏上单击  按钮，弹出如下对话框

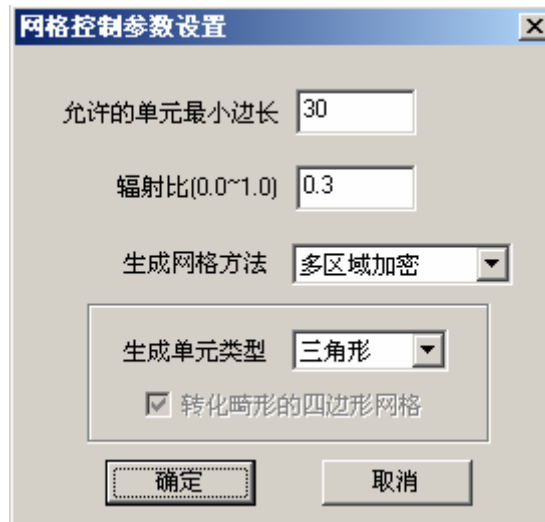


图 2.19 网格参数设置

设定好单元边长、辐射比和单元类型等参数，或使用默认参数，直接单击<确定>按钮，即可全自动生成有限元模型。调整单元边长、辐射比可以对网格的疏密程度进行控制，以获得自己满意的网格。

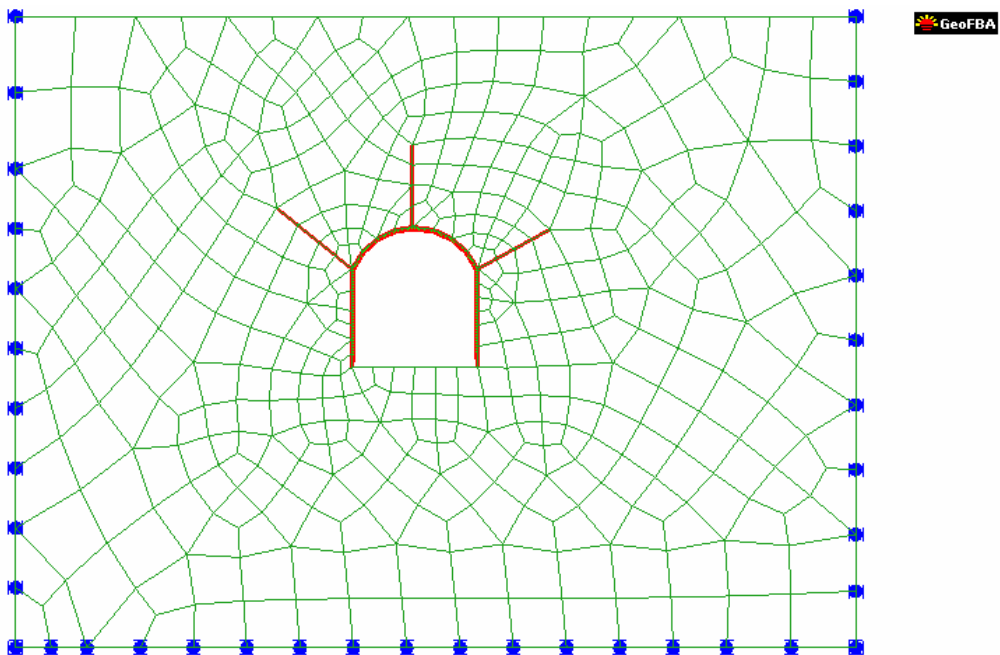


图 2.20 二维有限元模型

2.8 手动添加单元结点网格

与以前的版本一致，在“曙光 V4.0”里，也可用手工添加结点、单元。这可作为有些情况全自动生成网格存在局限的一种补足手段。更重要的是，在全自动生成的网格基础上，还可以用手工对已有的网格添加和修改。

- 从“工具”菜单中选择“图形/有限元对象显示切换”菜单，显示出有限元的所有对象（结点、单元）
- 从<绘制>菜单选择<结点>命令，绘制如下图所示的新增结点(如填土过程)

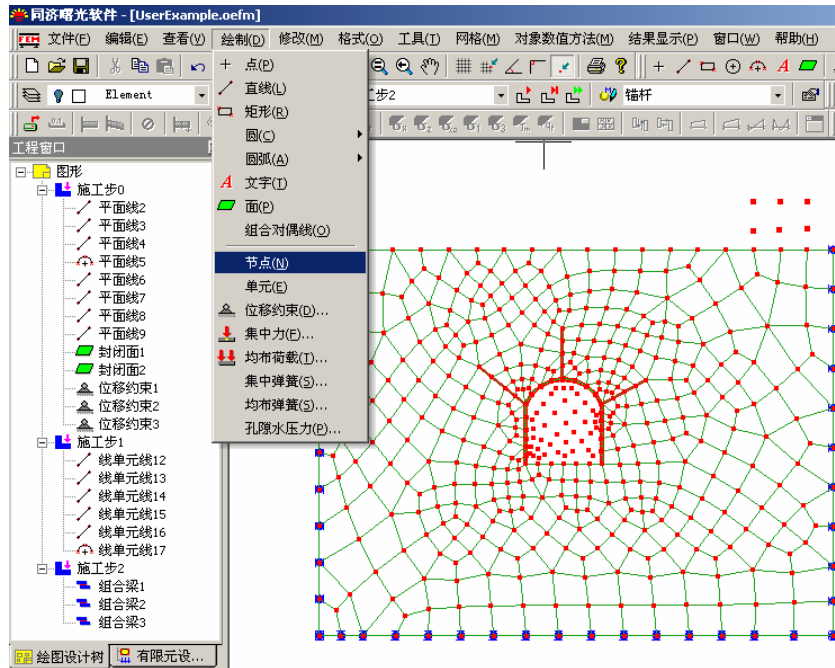


图 2.21 手动添加结点

从<绘制>菜单选择<单元>命令，可将结点连成下图所示的单元

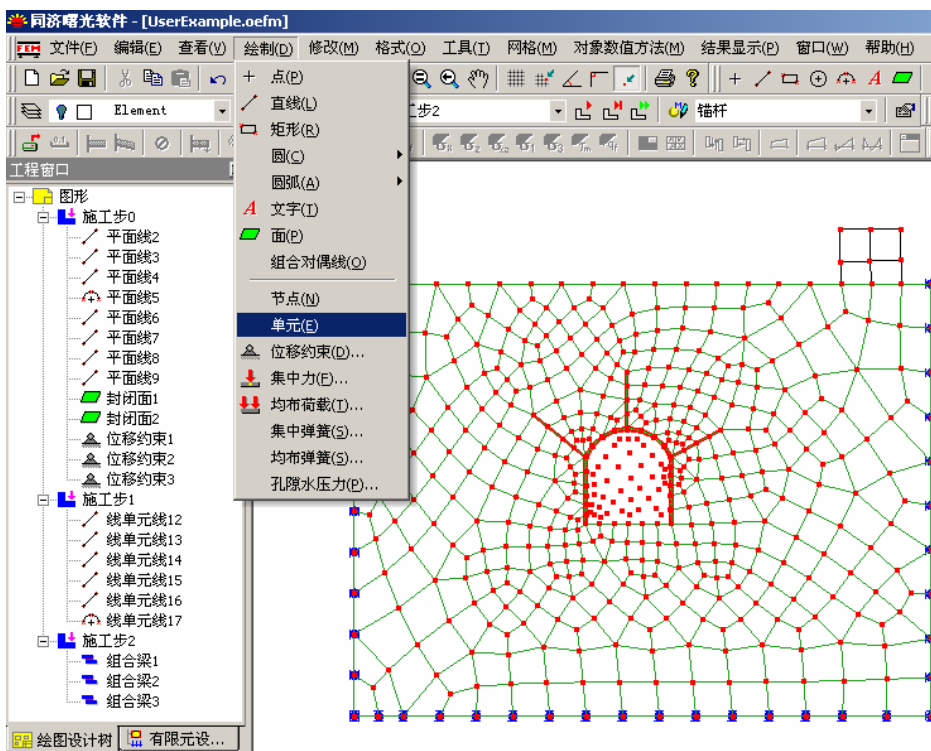



图 2.22 手动添加单元

2.9 保存

下面我们将此模型存盘。

- 从<文件>菜单中选择<另存为>，或从工具栏中单击。

- 在保存为对话框中指定文件名后单击“确定”按钮。

2.10 开始分析

- 从<对象数值方法>菜单中选择<分析求解>。

计算完成后，计算结果会自动读入并显示出后处理工具栏，用户可以利用后处理工具栏查看感兴趣的结果。

2.11 查看结果

详细说明请参见“第六章 查看计算结果”。

第三章 曙光有限元正分析计算原理

3.1 概述

同济曙光岩土及地下工程设计与施工分析软件(以下简称同济曙光软件)正分析模块为根据输入的已知参数对岩土工程施工过程进行动态模拟计算,得到或预报各施工阶段岩土体及结构的位移、内力等,适用于设计和施工阶段的施工全过程力学性态分析。具体包括:

(1) 可供模拟的静力计算问题有:

- ◆ 一维弹性地基梁和平面框架结构
- ◆ 平面应力、平面应变和轴对称
- ◆ 准三维问题

(2) 可供模拟的材料介质模型有:

- ◆ 弹性和非线性地层弹簧体
- ◆ 各向同性线弹性体和非线性弹性体(邓肯—张模型)
- ◆ 各向同性弹塑性体、受拉非线性体
- ◆ 横观各向同性、正交各向异性线弹性体
- ◆ 节理面、接触面的弹塑性体及非线性体

(3) 可供模拟的单元模式有:

- ◆ 平面三角形、四边形单元
- ◆ 节理、接触面单元
- ◆ 桁架元或杆元
- ◆ 直梁元、曲梁元(轴对称壳体元)
- ◆ 直(曲)梁—接头连续元及直(曲)梁—接头不连续元
- ◆ 弹簧元
- ◆ 锚杆元

(4) 可供模拟的对象主要有:

- ◆ 岩石地下结构,如新奥法、矿山法隧道、地下厂房等;
- ◆ 软土地下结构,如具有特殊结构的盾构法、顶管法和沉管隧道
- ◆ 基坑工程(弹塑性法,平面有限元法;如搅拌桩围护、土钉挡墙、地下连续墙或钻孔灌注桩加支撑或土锚的围护结构等)
- ◆ 边坡工程、坝体工程、桩基工程及高层建筑与地基共同作用

(5) 可供模拟的施工过程有:

- ◆ 分步加载和卸载,分别由施工荷载引起和开挖面向前推进引起

- ◆ 分步开挖，指不同的开挖方式，如上下台阶法、侧壁导洞法、CD 法等不同开挖方法；
- ◆ 填筑，可模拟不同施工阶段的填方；
- ◆ 分步支护，指不同的支护时机，如支撑、锚杆、喷层、二次衬砌及地层注浆、超前支护等；
- ◆ 分步拆除，可模拟在不同施工阶段对支护（支撑等）的拆除。

3.2 初始地应力的计算

3.2.1 自重应力

自重应力可采用有限元方法计算或采用设定水平侧压力系数法计算。

1. 有限元法

自重地应力由有限元法计算，即将自重荷载转化为等效结点荷载计算初始地应力场。

2. 设定水平侧压力系数法

对软土地层，初始地应力常与由有限元计算法得出的结果不符。需根据地质勘察报告给出水平侧压力系数 K_0 ，据以计算初始地应力。计算式为

$$\sigma_z^s = \sum \gamma_i H_i, \quad \sigma_x^s = K_0 \cdot (\sigma_z - P_w) + P_w \quad (3.1)$$

式中 σ_z^s 、 σ_x^s 分别为竖向和水平向初始自重地应力， γ_i 为计算点以上第 i 层土的容重， H_i 为相应的厚度， P_w 为计算点的孔隙水压力。在不考虑地下水头变化的条件下， P_w 由计算点的静水压力确定，即 $P_w = \gamma_w H_w$ (γ_w 为地下水的容重， H_w 为地下水水位差)。

计算程序中考虑到有的情形不能按土层厚度计算竖向地应力， σ_z^s 、 τ_{xz}^s 由有限元计算得到， σ_x^s 则按式 (3.1) 求得。

3.2.2 构造应力

构造地应力可假设为均布或线性分布，并直接叠加在自重地应力上得到初始地应力，计算式为

$$\sigma_x^s = a_1 + a_4 z \quad \sigma_z^s = a_2 + a_5 z \quad \tau_{xz}^s = a_3 \quad (3.2)$$

式中， a_1 、 a_2 、 a_3 为常系数， z 为纵向坐标。

3.3 分步施工模拟

3.3.1 一般表达式

岩土工程和地下工程的施工大多是分步进行的，例如分步开挖，分步支护，分步加卸载等等。同济曙光软件采用施工步和增量步来模拟分步施工过程。

施工步是指一个相对完整的施工阶段，例如某基坑工程分三次开挖，则每一次开挖过程就是一个施工步。每一个施工步包含若干个增量步，该施工步产生的开挖释放荷载在所包含的增量步中逐步释放（若选择跨施工步释放，也可以在下一施工步中释放，详见用户使用手册），每一增量步释放量由释放系数控制。

对各施工阶段的状态，有限元分析的表达式为：

$$[K]_i \{\Delta\delta\}_i = \{\Delta F_r\}_i + \{\Delta F_g\}_i + \{\Delta F_p\}_i \quad (i=1, L) \quad (3.3)$$

式中 L 为施工步数；设 $[K]_0$ 为岩土体和结构(施工开始前存在时)的初始总刚度矩阵；

$[K]_i = [K]_0 + \sum_{\lambda=1}^i [\Delta K]_{\lambda}$ ($i \geq 1$) 为第 i 施工步岩土体和结构总刚度矩阵； $[\Delta K]_{\lambda}$ 为施工过程中，第 λ 施工步的岩土体和结构刚度的增量或减量，用以体现岩土体单元的挖除、填筑及结构单元的施作或拆除；

$\{\Delta F_r\}_i$ 为第 i 施工步开挖边界上的释放荷载的等效结点力； $\{\Delta F_g\}_i$ 为第 i 施工步新增自重等的等效结点力； $\{\Delta F_p\}_i$ 为第 i 施工步增量荷载的等效结点力； $\{\Delta\delta\}_i$ 为第 i 施工步的结点位移增量。

对每个施工步，增量加载过程的有限元分析的表达式为：

$$[K]_{ij} \{\Delta\delta\}_{ij} = \{\Delta F_r\}_i \cdot \alpha_{ij} + \{\Delta F_a\}_{ij} + \{\Delta F_p\}_{ij} \quad (i=1, L; j=1, M) \quad (3.4)$$

式中 M 为各施工步增量加载的次数； $[K]_{ij} = [K]_{i-1} + \sum_{\xi=1}^j [\Delta K]_{i\xi}$ 为第 i 施工步中施加第 j 增量步时的

刚度矩阵； α_{ij} 为第 i 施工步第 j 增量步的开挖边界释放荷载系数，开挖边界荷载完全释放时有 $\sum_{j=1}^M \alpha_{ij} = 1$ ；

$\{\Delta F_g\}_{ij}$ 为第 i 施工步第 j 增量步新增自重等的等效结点力； $\{\Delta\delta\}_{ij}$ 为第 i 施工步第 j 增量步的结点位移增量； $\{\Delta F_p\}_{ij}$ 为第 i 施工步第 j 增量步增量荷载的等效结点力。

3.3.2 开挖

岩土工程开挖效应一般通过在开挖基坑、隧道或洞室内部边界上设置释放荷载，并将其转化为等效结点力模拟。有限元表达式描述如下：

$$[K - \Delta K] \{\delta\} = \{P\} \quad (3.5)$$

式中 K 为开挖前的系统刚度， ΔK 为开挖部分的刚度， $\{P\}$ 为开挖释放荷载的等效结点力。

同济曙光软件对开挖释放荷载采用单元应力法和 Mana 法两种计算方法。比较起来，Mana 法是根据单元的应变矩阵在多个高斯积分点与单元应力的乘积而得到，相对于单元应力法更为精确。

(1) 单元应力法

单元应力法先根据初始地应力或前一步开挖相应的应力场求得预计开挖边界上各结点的应力，并假定各结点间应力呈线性分布，然后反转开挖边界上各结点应力的方向(改变其符号)，据以求得释放荷载，如图 3.1 所示。

开挖边界上的分布荷载还需转化为等效结点力：

$$P_x^i = \frac{1}{6} [2\sigma_x^i (b_1 + b_2) + \sigma_x^{i+1} b_2 + \sigma_x^{i-1} b_1 + 2\tau_{xz}^i (a_1 + a_2) + \tau_{xz}^{i+1} a_2 + \tau_{xy}^{i-1} a_1] \quad (3.6)$$

$$P_z^i = \frac{1}{6} [2\sigma_z^i (a_1 + a_2) + \sigma_z^{i+1} a_2 + \sigma_z^{i-1} a_1 + 2\tau_{xz}^i (b_1 + b_2) + \tau_{xz}^{i+1} b_2 + \tau_{xy}^{i-1} b_1] \quad (3.7)$$

式中 $a_1 = x_{i-1} - x_i$

$a_2 = x_i - x_{i+1}$

$b_1 = z_i - z_{i-1}$

$b_2 = z_{i+1} - z_i$

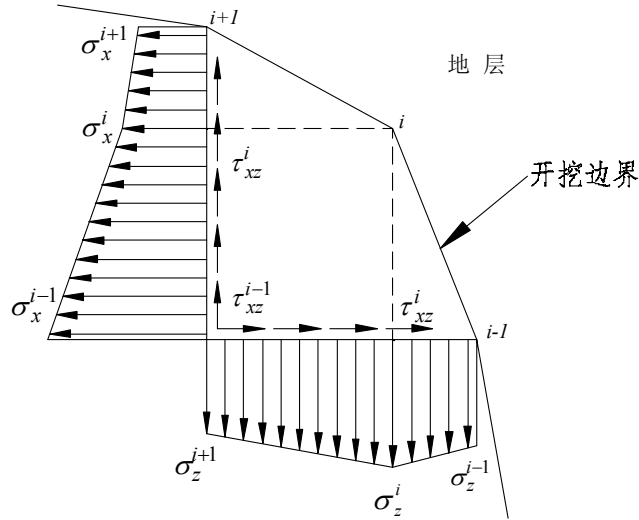


图 3.1 释放荷载计算模型

(2) Mana 法

对于大多数岩土工程问题，初始地应力场含重力场，第 j 级开挖时的开挖释放荷载为：

$$\{P\}_j = \sum_{i=1}^{M_j} \int_{V_i} [B]^T \{\sigma\}_{j-1} dV - \sum_{i=1}^{M_j} \int_{V_i} [N]^T \{\gamma\} dV \quad (3.8)$$

式中： M_j —第 j 步开挖被挖去的单元数； $[B]$ —单元应变矩阵； $\{\sigma\}_j$ —单元应力； $[N]$ —单元位移形函数矩阵； $\{\gamma\}$ —该步开挖被挖去的单元的体力；

第一步开挖时的开挖释放荷载为：

$$\{P\}_1 = \sum_{i=1}^{M_1} \int_{V_i} [B]^T \{\sigma\}_0 dV - \sum_{i=1}^{M_1} \int_{V_i} [N]^T \{\gamma\} dV \quad (3.9)$$

式中： $\{\sigma\}_0$ —初始地应力，假设该开挖步被挖去单元数为 M_1 。

计算得到第一步开挖的位移增量 $\{\Delta\delta\}_1$ ，进而计算得到应力 $\{\Delta\sigma\}_1$ 。

则第一步开挖时的应力和位移为：

$$\{\sigma\}_1 = \{\sigma\}_0 + \{\Delta\sigma\}_1 \quad (3.10)$$

$$\{\delta\}_1 = \{\Delta\delta\}_1 \quad (3.11)$$

注意，未施工前由初始地应力产生的位移不予计入。

3.3.3 填筑

填筑效应的力学模拟包含两个部分：其一为整体刚度的改变,其二为新增实体单元自重荷载的增加,采用有限元计算公式可描述如下:

$$[K + \Delta K]\{\delta\} = \{\Delta F_g\} \quad (3.12)$$

式中 K 为填筑前的系统刚度, ΔK 为新增实体单元的刚度, $\{\Delta F_g\}$ 为新增实体单元自重的等效结点荷载。

3.3.4 结构的施作与拆除

(1) 结构的施作

结构施作的力学模拟主要体现为整体刚度的增加以及施作结构自重对系统的影响,采用有限元计算公式可描述如下:

$$[K + \Delta K]\{\delta\} = \{\Delta F_g^s\} \quad (3.13)$$

式中 K 为结构施作前的系统刚度, ΔK 为施作结构的刚度, $\{\Delta F_g^s\}$ 为施作结构自重的等效结点荷载。

(2) 结构的拆除

结构的拆除的力学模拟包含两个部分:其一为整体刚度的减小,其二为支撑内力的释放,即通过施加一反向内力来实现。采用有限元计算公式可具体描述过程如下:

$$[K - \Delta K]\{\delta\} = -\{F\} \quad (3.14)$$

式中 K 为结构施作前的系统刚度, ΔK 为拆除结构的刚度, $\{F\}$ 为拆除结构内力的等效结点力。

3.3.5 增量荷载的施加

在施工过程中可能还要施加外荷载,则在相应的增量步中可以施加增量荷载,有限元表达式描述如下:

$$[K]\{\delta\} = \{F\} \quad (3.15)$$

式中 K 为增量荷载施加前的系统刚度, $\{F\}$ 施加的增量荷载的等效结点力。

第四章 曙光有限元反分析计算原理

4.1 概述

地下工程开挖过程中,岩土体性态、水土压力 and 支护结构的受力状态都在不断变化,采用确定不变的力学参数分析不断变化的体系的力学状态,显然不可能得到预想的效果。软件提供的反分析方法以现场位移或内力增量量测值等为依据,借助优化反分析方法确定地层性态参数值,并将可使以这些参数值为输入量算得的测点位移计算值与实测值相比误差为最小的量作为优化反分析解,尔后将其用作预测计算分析的依据。

位移反分析方法可分为正反分析法和逆反分析法两类。后者为正分析的逆过程,计算过程简单,但须先建立求逆公式和编制相应的程序,适用性差。前者为正分析计算的优化逼近过程,一般通过不断修正未知数的试算值逼近和求得优化解,计算机运作时间虽长,但可利用原有正算程序进行计算,便于处理各种类型的反分析问题,并可用于各类非线性问题的分析,适用性强。本软件采用的方法为正反分析法。

地下结构的施工常采用分步开挖、分步支护的方式,其位移、结构内力及岩土层应力等随着施工阶段的变化呈现出一种动态响应过程。因此,有必要将常规的反演分析法与施工模拟过程结合起来,建立一种施工动态反演分析方法。在相同工程及地层条件下,通过利用当前施工阶段量测到的全量或增量信息,来反求地层性态参数和初始地应力参数,进而达到准确预测相继施工阶段的岩土介质和结构的力学状态响应,为施工监控设计提供指导性依据。

4.2 量测信息的种类及表达式

在建立的反演分析算法中,现场量测信息一般用作建立反演计算方程的输入量,因而通常是进行反演计算的主要依据。岩土体在工程施工过程中受到扰动后发生的现象,主要是继续变形和破坏,如果归诸于力学原理,则是岩土体的应力场、应变场、位移场和稳定状态在受到扰动的过程中发生了变化。鉴于受力物体的变形、内力、应力和荷载之间存在依存关系,可以推理如能取得岩土体在受到扰动的过程中发生的应力、应变、内力或位移变化值的量测信息,则可望通过正演计算的逆过程得出初始地应力的量值和作用方向,以及用于描述岩土介质的受力变形性态的特性参数。

4.2.1 位移量测信息

围岩地层中位移量测分为洞周表面各点的收敛位移量测如拱顶下沉、洞周收敛变形、地表沉降、盾构管片接头相对位移等和围岩域内各点的位移量测,主要为围岩径向多点位移、地表深层沉降、水平位移等。

在软土岩土工程中,位移量测主要有地表沉降、围护结构的水平位移、垂直位移、土体测斜、周围建筑物、道路和管线的沉降及水平位移等。

位移量又分为绝对位移(相对于不动点)和相对位移(相对于同一测线上的基准测点)两种。

4.2.2 内力量测信息

内力量测信息包括扰动应力即由开挖等引起的岩土体应力的变化量和构件（支撑、围护、锚杆及衬砌结构等）轴力、弯矩。其中扰动应力为将来扩展反演量测信息。

4.2.3 压力量测信息

压力量测信息包括岩土体内部土压力和结构（喷射混凝土、衬砌、围护结构）与岩土体之间的接触压力两种，为将来扩展反演量测信息。

4.2.4 应变量测信息

有开挖引起的应变可分为在洞室壁面上发生的应变和在岩土体内部发生的应变两类。前者称为表面应变，后者称为域内应变。在应变量测中常用的是电阻应变片和千分表，其中前者对量测表面应变和域内应变都适用，后者仅适用于量测表面应变。

4.3 目标函数和适应性函数

4.3.1 目标函数

隧道及地下结构施工动态反演过程的量测信息拟采用结构变形、内力及地层水平和垂直变形等，待求未知参数 X 可设定为各地层弹性模量和初始地应力参数。关于待求未知量 X 的最小二乘目标函数为

$$F(X) = \sum_{i=1}^K w_i \frac{F_i}{F_{i0}} \quad (4.1)$$

式中： K 为量测信息种类，包括绝对位移、相对位移、结构轴力、弯矩等；

$$F_i = \sum_{j=1}^{K_i} (\Delta F_j - \Delta F_j^*)^2, \quad F_{i0} = \sum_{j=1}^{K_i} (\Delta F_j^*)^2 \quad (4.2)$$

其中： $\Delta F_j, \Delta F_j^*$ —任意两施工阶段测点处对应绝对位移、相对位移、结构轴力或弯矩等的计算值和实测值增量； K_i —第 i 种量测信息种类的测点个数； w_i —加权常数，一般取 $w_i=1$ 。

4.3.2 适应性函数

对于岩土工程的位移优化反分析，在应用遗传算法时，由于目标函数比较小，采用适应性函数

$$fitness(x) = \frac{1}{F(X)} \quad (4.3)$$

4.4 优化方法

反演分析中，优化方法和初始值的选择十分重要，这关系到反演最终能否获得成功（即获得正确合理的反演结果）。同济曙光软件提供多种优化方法供用户选择。

4.4.1 单纯形法

单纯形法的思想是通过对 n 维空间上 $n+1$ 顶点的函数值进行比较, 通过反射、收缩、延伸来排除函数值最大的点, 找到函数值最小的点, 并形成新的单纯形, 这样逐步逼近极小值点。

单纯形是 n 维空间中 $n+1$ 个点构成的体积不为零的多面体, 这 $n+1$ 个点称为该单纯形的顶点。顶点的位置由 n 维空间中的坐标给出, 目标函数 $f(X)$ 定义于 n 维空间中。给定顶点的初值 X_1, X_2, \dots, X_{n+1} 后, 可求得顶点处的目标函数值 $f(X_i)$ 。单纯形形心处的坐标为

$$\bar{X} = \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} X_i \quad (4.4)$$

令 X_h, X_l 分别为目标函数值取最大和最小的顶点, 单纯形法就是要寻找一个具有较小目标函数值的点来取代顶点 X_h , 方法是通过三种运算: 反射, 收缩和延伸。

在反射运算中, 新顶点坐标为

$$X_\mu = \bar{X} + \alpha(\bar{X} - X_h) \quad (4.5)$$

式中, α 称为反射系数。

在计算目标函数后, 如有

$$f(X_l) < f(X_\mu) < f(X_h)$$

则以 X_μ 替代 X_h 构成新的单纯形。如有

$$f(X_\mu) < f(X_l)$$

则可以扩大步长, 进一步寻找更好的点 X_v

$$X_v = \bar{X} + \beta(X_\mu - \bar{X}) \quad (4.6)$$

式中 β 称为扩张系数。这时, 对于 X_v 点, 如有

$$f(X_v) < f(X_\mu)$$

则以 X_v 置换 X_h , 并构成新的单纯形。但是如果有

$$f(X_v) > f(X_\mu)$$

则以 X_μ 置换 X_h 并构成新的单纯形。

如果对于反射后得到的点 X_μ , 有

$$f(X_\mu) > f(X_i), \quad i \neq h$$

则新的 X_h 将是相应于目标函数 $f(X_h)$ 和 $f(X_\mu)$ 中较低者。设该点为 X_h' , 用收缩算法寻找新点

$$X_c = \bar{X} + \gamma(X_h' - \bar{X}) \quad (4.7)$$

式中, γ 为收缩系数。如有

$$f(X_c) < f(X_h')$$

则以 X_c 置换 X_h' 构成新的单纯形。若

$$f(X_c) > f(X_h')$$

则以下式取代单纯形的全部顶点

$$X_i = X_i + \frac{1}{2}(X_l - X_i), \quad i=0, 1, \dots, n \quad (4.8)$$

得到新的单纯形。上式实际上是缩小原来的单纯形，并使最好点仍为缩小后的单纯形的一个顶点。

重复上述单纯形的算法，单纯形的尺寸将会不断缩小，直至缩小到指定的精度范围以内。

4.4.2 阻尼最小二乘法

阻尼最小二乘法在给定参数初值的领域内，把函数通过泰勒级数展开，通过反复迭代逐渐逼近目标函数的极小值，得到参数的最优解，增加阻尼因子，大大改善了系数矩阵的求逆条件，为了进一步减少初始参数的影响、增加解的稳定性以及收敛速度，具体过程和算法如下：

假设原方程为：

$$Gx = d \quad (4.9)$$

式中： G 、 x 、 d 分别为系数矩阵、参数矩阵和实测数据阵。

目标函数：

$$F(x) = (d - Gx)(d - Gx) = \sum_{i=1}^n f_i^2(x) = \sum_{i=1}^n (u_i - u_i^*)^2 \quad (4.10)$$

式中： u_i^* 、 u_i 分别为位移实测值和有限元计算值； $u_i = u(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ； n 为实测值的个数；

$X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ ， m 为参数个数。

$$\min F(x) = \min f^T(x)f(x) = \min \|f(x)\|^2 \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial F(x)}{\partial x_j} = 2 \sum_{i=1}^n f_i(x) \frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \nabla F(x) &= \begin{Bmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x_1} \\ x_1 \\ \frac{\partial F(x)}{\partial x_2} \\ x_2 \\ \vdots \\ \frac{\partial F(x)}{\partial x_m} \\ x_m \end{Bmatrix} = 2 \begin{Bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} \\ x_1 & x_1 & \dots & x_1 \\ \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} \\ x_2 & x_2 & \dots & x_2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_m} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_m} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_m} \\ x_m & x_m & \dots & x_m \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{Bmatrix} \\ &= 2J(x)^T f(x) \end{aligned} \quad (4.13)$$

矩阵 $J(x)$ 为 $f(x)$ 在 x 处的Jacobi矩阵。

将 $f_i(x)$ 在点 $x^{(k)}$ 处Taylor展开到一次项：

$$f_i(x) \approx f_i(x^{(k)}) + \nabla f_i(x^{(k)})(x - x^{(k)}) \quad (4.14)$$

$$f(x) = \begin{Bmatrix} f_1(x^{(k)}) \\ f_2(x^{(k)}) \\ \vdots \\ f_n(x^{(k)}) \end{Bmatrix} + J(x)_{x^{(k)}} \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \end{Bmatrix} = f(x^{(k)}) + J(x)\delta \quad (4.15)$$

$$\nabla F(x) = J(x^{(k)})^T \{f(x^{(k)}) + J(x^{(k)})\delta^{(k)}\} = 0 \quad (4.16)$$

得迭代公式:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - \{J(x^{(k)})^T J(x^{(k)})\}^{-1} J(x^{(k)})^T f(x^{(k)}) = x^{(k)} - p^{(k)} \quad (4.17)$$

为了保证收敛于最优解, 减少初值的影响, 对(4.17)式进行了改进, 增加步长因子得迭代方程:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha^{(k)} p^{(k)} \quad (4.18)$$

使得 $F(x^{(k)} + \alpha^{(k)} p^{(k)}) < F(x^{(k)})$

同时不断地调整 α 以改变搜索步长, 增加解的稳定性和收敛速度。

在(4.17)式中, 要求对称半正定矩阵 $J(x^{(k)})^T J(x^{(k)})$ 是非奇异的, 由于 $f_i(x)$ 的复杂的非线性, 这一要求并不总能满足, 造成 $J(x^{(k)})^T J(x^{(k)})$ 是病态的或接近病态的, 导致收敛速度极慢或计算终止, 为此, 进行了改进, 增加阻尼因子, 增大矩阵 $J(x^{(k)})^T J(x^{(k)})$ 的主对角线元素, 迭代方程为:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha^{(k)} \{J(x^{(k)})^T J(x^{(k)}) + \mu I\}^{-1} J(x^{(k)})^T f(x^{(k)}) \quad (4.19)$$

Jacobi 矩阵元素的求解, 用有限差分代替一阶导数:

$$\left(\frac{\partial f_i(x)}{\partial x_j} \right)_{x^{(k)}} = \frac{f_i(x^{(k)}_j + \Delta x^{(k)}_j) - f_i(x^{(k)}_j)}{\Delta x^{(k)}_j} \quad (4.20)$$

根据对称矩阵 $J(x^{(k)})^T J(x^{(k)})$ 的正交分解, 可以分解为:

$$J(x^{(k)})^T J(x^{(k)}) = R\Lambda R^T \quad (4.21)$$

Λ 为 $J(x^{(k)})^T J(x^{(k)})$ 的特征值构成的对角线矩阵, 而 R 为 $J(x^{(k)})^T J(x^{(k)})$ 的特征向量矩阵, 且满足

$$R^T R = R R^T = I \quad (4.22)$$

$$[J(x^{(k)})^T J(x^{(k)}) + \mu I] = [R\Lambda R^T + \mu I] = R\Lambda' R^T \quad (4.23)$$

$$\Lambda' = \begin{bmatrix} \lambda_1 + \mu & & & \\ & \lambda_2 + \mu & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \lambda_r + \mu \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

λ_i 为 $J(x^{(k)})^T J(x^{(k)})$ 的特征值, 矩阵 $[J(x^{(k)})^T J(x^{(k)}) + \mu I]$ 的条件数为:

$$\text{cond}[J(x^{(k)})^T J(x^{(k)}) + \mu I] = \frac{\lambda^{\max} + \mu}{\lambda^{\min} + \mu} < \frac{\lambda^{\max}}{\lambda^{\min}} = \text{cond}[J(x^{(k)})^T J(x^{(k)})] \quad (4.25)$$

4.4.3 遗传算法

遗传算法是模拟自然进化过程搜索全局最优解的方法。遗传算法的优越性主要表现在它在搜索过程中不容易陷入局部最优解,即使在所定义的适应函数是不连续的、非规则的或有噪声的情况下,它也能以很大的概率找到全局最优解。

遗传算法象撒网一洋,在参变量空间中进行搜索,由串组成的群体在遗传算子的作用下,同时对空间中不同的区域进行采样计算,从而构成一个不断变化的群体序列。

为了避免陷入局部最优,在遗传算法中还引入了变异,一方面可以在当前解附近找到更好的解;另一方面而还可以保持群体的多样性,确保群体继续进化。

为了寻找最优解,传统方法是用启发式策略,在单个猜测解的邻域探寻,即使算法中允许偶尔地跳到解空间中更远的部分,这些启发式算法也往往趋向于陷入局部最优。通过保持在解空间不同区域中多个点的搜索,遗传算法以很大概率找到全局最优解。

遗传算法中,控制参数的不同对遗传算法的性能产生很大的影响,要想得到遗传算法执行的最优性能,必须确定最优的参数设置。

(1) 群体规模 $npopsiz$

群体规模影响到遗传算法的最终性能和效率。当规模太小时,造成群体的样本量不足,得到的结果不佳;群体规模较大时,可以阻止早熟而收敛局部最优解,但是计算量大大增加,导致收敛速度过慢。

(2) 杂交率 p_c

杂交概率控制杂交算子的应用的频率,在每代新的群体中,有 $p_c \cdot npopsiz$ 个串进行杂交。杂交率越高,群体中串的更新就越快。如果杂交率过高,相对选择能够产生的改进而言,高性能的串被破坏得要更快,特别是小群体种群,致使过早收敛到局部最优解。如果杂交率过低,搜索会由于太小新的探索点而停滞不前。最优杂交率与群体规模有关系,对于中等规模得群体(30到90),随着群体规模得增加,最优杂交率出现减小得现象。在群体规模为30的所有遗传算法中,最优杂交率在0.88左右;当群体规模在50时,最优杂交率在0.50左右;当群体规模在80时,最优杂交率在0.30左右。

(3) 变异率 p_m

变异是增加群体多样性的搜索算子,每次选择之后,新的群体中的每个串的每一位以变异率 p_m 进行变异,从而每代大约发生 $p_m \cdot npopsiz \cdot l$ 次变异, l 为串长。一个低水平的变异率足以防止整个群体中任一位保持永远收敛到单一值。高水平的变异率产生的实质是随机搜索;适当的变异率有助于过早收敛到局部最优。

针对岩土工程优化反演的特点,本程序算法设计如下:

- (1) 采用二进制编码;
- (2) 初始群体规模根据需反演的个数而定,随反演参数的增加而增大;
- (3) 采用锦标赛选择;并采用最优保留算法;
- (4) 原始目标函数为实测值与计算值的平方和,属于极小化问题;采用非线性对适应值加速;

(5) 杂交算子, 提供两种杂交方式, 单点杂交和均匀杂交; 杂交概率根据种群规模以及杂交方式而定, 一般单点杂交概率为 0.9, 均匀杂交率 0.5, 按照锦标赛法选取两个父本进行杂交;

(6) 变异算子, 采用了突变变异方式; 变异概率随种群规模的增加而减少;

(7) 算法停止规则, 在给定最大迭代代数的前提下, 连续代最优值没有进化, 算法终止, 但具体多少代也可根据具体情况而定; 当 $gen \geq \max gen$, 算法终止。

4.4.4 遗传模拟退火算法

模拟退火 (simulated annealing) 算法是局部搜索算法地扩展。它不同于局部搜索之处是以一定地概率选择领域中适应值较好的解空间, 因此, 在理论上是全局优化方法。模拟退火算法的核心在于模仿热力学中液体的冻结与结晶或金属熔液的冷却与退火过程。在高温状态下, 液体的分子彼此之间可以自由运动。如果液体徐徐冷却, 它的分子就会丧失由于温度而引起的流动性。这时原子就会排列起来而形成一种纯晶体, 它们依次有序排列成几十倍于单个原子大小的距离, 这个纯晶体状态就是该系统的最小能量状态。模拟退火就是模拟上述过程的一种通用随机搜索技术。

遗传算法是一种性能较好的算法, 但是它在实际应用中容易产生早熟现象, 即在进化群体中少数个体的适应值远大于其他个体的适应值, 经过几代迭代后, 这些个体就占据了整个群体, 进化过程提前收敛。对于传统的遗传算法, 竞争是在子代中进行的, 而子代和父代之间没有竞争。这样父代中的优良个体有可能丢失。一些算法通过直接将群体中的最优解放入下一代群体中来保存最优解, 但这有可能引起早熟收敛的问题。此外, 由于遗传算法采用的是随机交叉和变异因子, 交叉和变异后的个体不一定是优良个体, 这会破坏原有的优良个体, 影响算法的性能。

将遗传算法和模拟退火算法耦合, 形成模拟退火算法, 对杂交和变异后个体引入 Boltamann 接受准则, 同父代进行竞争; 不但避免了算法的早熟问题, 同时使群体中的最优解得到保留, 并利用模拟退火的爬山性能改善了遗传算法的性能。具体算法如下:

(1) 初始化参数: 群体规模 $npopsiz$; 杂交概率 p_c 和变异概率 p_m ; 退火初始温度 T_0 ; 温度冷却系数 α 。

(2) 随机产生初始解群。

(3) 个体适应值评价。

(4) 判断是否满足收敛条件。满足条件, 算法停止; 否则, 继续, $T_{k+1} = \alpha T_k$ 。

(5) 利用锦标赛选择复制父代个体到子代。

(6) 利用杂交算子从当前代中随机选取两个父本个体 x_i 和 x_j 按一定规则进行杂交, 杂交概率 p_c 决定运算是否进行。若杂交发生, 并且杂交后个体为 x'_i 和 x'_j , 计算其适应值 $fitness(x'_i)$ 和 $fitness(x'_j)$; 若 $fitness(x_i) < fitness(x'_i)$, $fitness(x_j) < fitness(x'_j)$, 则接受杂交后个体为 x'_i 和 x'_j ; 否则, 以一定概率接受杂交后个体 x'_i 和 x'_j , 即若:

$$\min \left\{ 1, \exp \left(- \frac{fitness(x'_i) - fitness(x_i)}{T} \right) \right\} > random(0,1) \quad (4.26)$$

$$\min \left\{ 1, \exp\left(-\frac{\text{fitness}(x'_j) - \text{fitness}(x_j)}{T}\right) \right\} > \text{random}(0,1) \quad (4.27)$$

则接受 x'_i 和 x'_j ，否则拒绝 x'_i 和 x'_j 。

(7) 变异算子以概率 p_m 作用于下一代的每个串上，若变异发生，则变异后的个体接受与否，按 (6) 的接受准则进行。转到 (3)。

4.4.5 混合遗传算法

混合遗传算法把最小二乘法应用到遗传算法，增加阻尼算子，加快遗传算法的收敛速度、收敛精度。

具体算法如下：

(1) 给定初始值；群体规模 $npopsiz$ ，杂交概率 p_c ，变异概率 p_m ，阻尼算子概率 p_s ，阻尼系数等其他相关参数。

(2) 二进制编码。

(3) 形成初始种群。

(4) 计算各个体的适应值，并用非线性加速。

(5) 判断是否满足收敛条件（在给定的最大迭代代数的前提下，连续 15 代最优适应值无进化）。满足条件，算法停止；否则，继续。

(6) 利用锦标赛法进行选择并复制到下一代（子代）。

(7) 利用锦标赛法选取两个父本的染色体按一定规则进行杂交（单点杂交或均匀杂交），产生子代，杂交概率 p_c 决定运算是否进行。

(8) 变异算子以概率 p_m 作用于下一代的每个串上。

(9) 对每个个体以概率 p_s 作用阻尼算子，进行最小二乘法搜索，具体如下：

对群体中第 i 个个体产生 $[0, 1]$ 间随机数，若该随机数大于阻尼算子概率 p_s ，则进行下面运算，

计算 $f(x_k)$ $\nabla f(x_k)$ 及相应的 Jacobi 矩阵，

计算搜索方向 p_k ，不进行一维搜索。

计算 x_{k+1} ，并加入到子代。转向 (4)

遗传算子（杂交算子、变异算子以及选择算子）的作用是进行宏观搜索，处理的是大范围搜索问题，而阻尼算子中的搜索过程是极值局部搜索，即微观搜索，处理的是小范围搜索问题和搜索加速问题。阻尼算子的取值应保证在迭代过程中，群体的每个个体都有一定机会进行阻尼算子的搜索。因此，确定阻尼算子概率时需考虑所求问题的阻尼最小二乘法的收敛性，若迭代收敛速度较快，则 p_s 可取小一些，否则，取大一点。

4.5 关于优化方法对比以及参数的选取

从计算搜索速度来看，阻尼最小二乘法要优于其他优化方法，混合遗传算法次之，遗传算法最差；但是阻尼最小二乘法和单纯形法的搜索速度都和初始值有关，初始值距真值越近，其搜索速度越快，反之，越慢；遗传算法、遗传模拟退火算法以及混合遗传算法的搜索速度和很多因素有关，参数范围、搜索精度、

种群规模、二进制编码串的长度以及杂交算子、变异算子（初始温度和降温系数、阻尼算子）的合理取值等，参数取值范围越大、搜索精度越高其搜索速度越慢，随种群规模、二进制编码串的长度的增加搜索速度变慢，但由于遗传算法是一种随机搜索方法，因此，其搜索速度也并不是绝对的。

从反演参数的相对误差来看，遗传算法和遗传模拟退火算法较好，混合遗传算法和阻尼最小二乘法次之，单纯形法较差；遗传算法、遗传模拟退火算法以及混合遗传算法的反演参数因反演次数的不同而稍有差异，即采用相同的参数进行反演也会得到不同的结果，但是差别很小，接近全局最优，从而也说明了其具有全局寻优的特点；而单纯形法和阻尼最小二乘法的反演结果会因初始参数的不同而有很大差别，特别是单纯形法，初始值取值不当，会导致反演失败。

从目标函数真值来看，阻尼最小二乘法同遗传算法、遗传模拟退火算法基本一样，混合遗传算法次之，单纯形法最差。遗传算法、遗传模拟退火以及混合遗传算法的最终目标函数值和计算精度要求以及程序控制条件（终止条件）有关。

从算法的可靠性方面来看，单纯形法可靠性稍差，主要由于参数相差较大时导致搜索空间退化低维空间而失败，因此，在参数相差较大，特别是泊松比和弹性模量或粘性系数同时参加反演时就存在此问题，这时应增加泊松比的搜索步长；阻尼最小二乘法的可靠性稍好，但是，在参数相差较大，而且，较小的参数对反演量测信息不敏感时，就会导致反演失败，这时应增加不敏感参数的搜索步长。遗传算法、遗传模拟退火算法以及混合遗传算法的可靠性较好，但是参数取值范围以及算子的选取对反演的成败很关键。

第五章 正反分析模块功能介绍

在正确的安装曙光软件后，打开同济曙光公路隧道设计与分析软件。

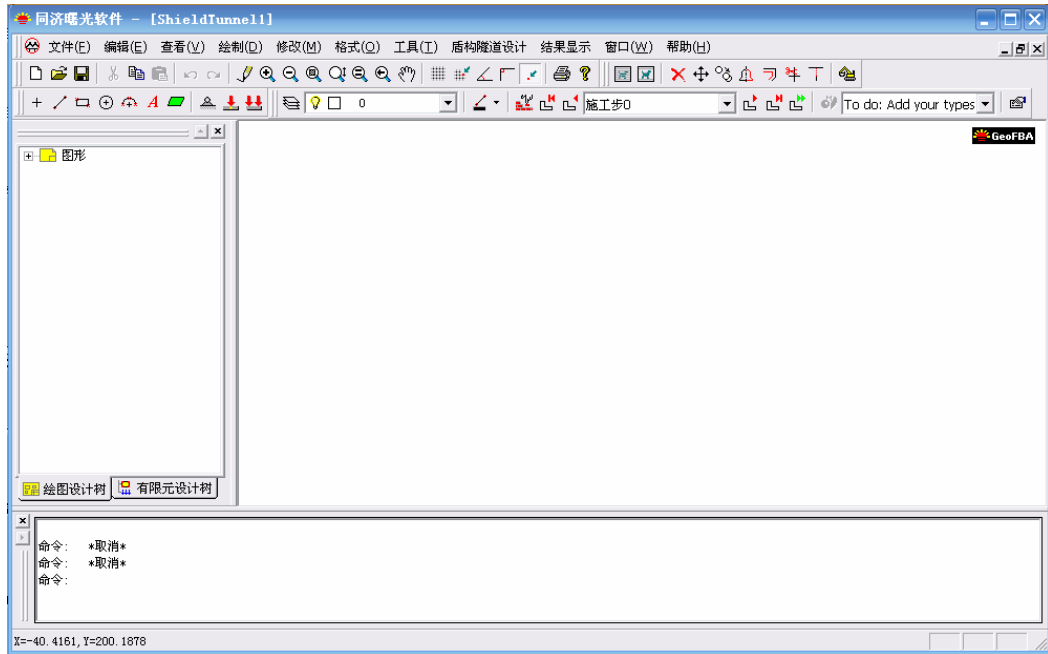


图 5.1 加载盾构隧道计算模块

在工具条中包括文件、编辑、查看、绘制、修改、格式、工具、盾构隧道设计、结果显示、窗口、帮助等几大工具列。

5.1 文件

(1) 新建

此功能用于建立一个新的数据文件。由于 GeoFBA2D 是一个多文档界面系统，因此新建一个数据文件不会删除当前数据文件中的数据内容。曙光软件允许同时建立多个窗口，每个窗口可以独立地建立模型。

(2) 打开

此功能用于打开并读入已存在的数据文件。由于 GeoFBA2D 是一个多文档界面系统，因此打开一个已存在的数据文件也不会删除当前数据文件中的数据内容。曙光软件可以打开与各模块相适应的计算文件，比如正分析模块可以直接打开后缀为 oefm (*.oefm) 的文件，需要注意的是不同升级版本之间以及网络版和单机版之间不兼容。



(3) 关闭

此功能用于关闭当前的数据文件。由于关闭当前的数据文件会删除当前数据文件的所有内容，因此用户应确保当前数据文件的内容已经存盘。关闭当前窗口，但是不关闭软件本身。

(4) 保存

此功能用于重新保存已存在的文件。为防止误操作破坏有用的数据，建议用户经常保存当前文件。如果以前已经保存过这个文件，程序会自动将保存自上次保存以来用户做的所有修改。如果从未保存过这个文件，则会弹出保存文件对话框，提示用户输入文件名（注意：不需要输入扩展名）。

(4) 另存

此功能用于将当前数据保存到指定的文件中，其主要用于数据文件名的更新或重新备份等。由于曙光软件建模过程中的存在部分功能的单向性，用户（特别是初级用户）在建模过程中需要**注意**及时保存，以提高效率。

(5) 导入

导入包括 dxf 文件，对用户有非常重要作用的是导入 dxf 文件，对于复杂的模型，在曙光里面作图显然没有在 AutoCAD 中的方便（虽然曙光提供了相当完善的作图功能），可以把在 AutoCAD 中画的图另存为 DXF 文件，需要注意在另存过程中 DXF 指的是 AutoCAD2000/LT2000 DXF (*.dxf) 文件，这是基于 AutoCAD 本身的稳定性及与曙光软件的接口兼容性方面考虑的。

(6) 打印、打印预览、打印设置

可以打印图形窗口的结果，此功能很少采用。

(7) 退出

指退出曙光软件。

5.2 编辑

(1) 撤销

指撤销一个操作命令。此功能用于恢复最近几次的操作结果，通常在用户误操作的情况下使用。在目前的版本中，可恢复的次数最多为 10 次。



(2) 重复

指恢复撤销的操作命令。

5.3 查看

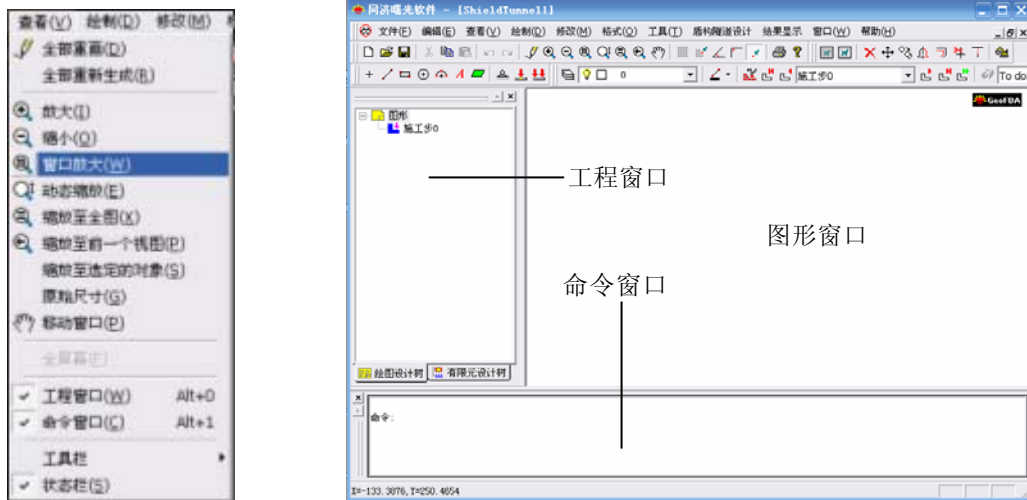


图 5.2 各个窗口示意

(1) 工程窗口

工程窗口显示所有施工步、增量步信息，建模过程中支护参数在划分网格前可以直接在此窗口进行选择。

(2) 命令窗口

命令窗口显示所有建模过程中的命令，显示计算过程中的迭代过程、错误信息等。

(3) 工具栏

控制常用工具、属性、绘制、修改等命令的显示。

(4) 状态栏

显示当前工作状态。比如当前坐标、就绪、计算等。

(5) 其他

所有功能同 AutoCAD。

5.4 绘制



(1) 单元

曙光软件提供两种网格划分功能，自动剖分和手动剖分。其中手动剖分功能需要对局部网格或全部网格进行绘制，相应的每个单元可以直接绘制。

(2) 位移约束

位移约束提供固定约束、柔性约束，对 x , y , 转角 θ 可以分别进行约束。对于点约束，必须先绘制点才能进行约束。

(3) 集中荷载、均布荷载

集中荷载的绘制基于整体坐标系，任何集中荷载可以分解成 x , y 两种方向的集中荷载进行施加；需要注意的是必须先绘制点才能进行集中荷载的施加。均布荷载的施加提供局部坐标系及两种整体坐标系的选择。

(4) 集中弹簧、均布弹簧

弹簧根据工程实际情况分为单向弹簧和双向弹簧，单向弹簧指仅承受压力时作用的弹簧，双向弹簧指在拉、压情况下均发生作用的弹簧。集中弹簧的绘制基于整体坐标系，任何集中弹簧可以分解成 x , y 两种方向的集中弹簧进行施加。均布弹簧的施加提供局部坐标系及整体坐标系的选择。

(5) 孔隙水压力

孔隙水压力的施加只针对线边界情况。

(6) 其他

所有功能同 AutoCAD。

5.5 修改



(1) 属性

对选中的单元，在划分网格前其所有的属性均可以修改，对于被依附的对象必须保证在其不再被依附的前提下才能进行属性的修改，否则无法修改。

(2) 隐藏、取消所有隐藏

可以根据需要隐藏部分或全部模型参数，并通过取消所以隐藏进行恢复。需要注意的是取消所有隐藏不是直接命令，需要在命令窗口打入 a (all) 才能完成操作。

(3) 挖去

挖去是指在某一施工步或增量步中根据实际施工情况, 挖除土层或支护, 需要注意的是挖去不是删除, 挖去针对某一特定的施工步或增量步, 可以恢复; 删除则贯通整个建模过程, 无法恢复。

(4) 其他

所有功能同 AutoCAD。

5.6 格式

(1) 施工步

在同济曙光软件中, 一个完整施工步一般被认为是一个完整的开挖和支护过程。在盾构隧道模块中一般不考虑施工步的概念, 默认即可。

(2) 点

对节点的显示大小进行调整。

(3) 单元和节点

可以选择显示节点编号、单元编号以及边界单元的边界显示等, 如下图所示。

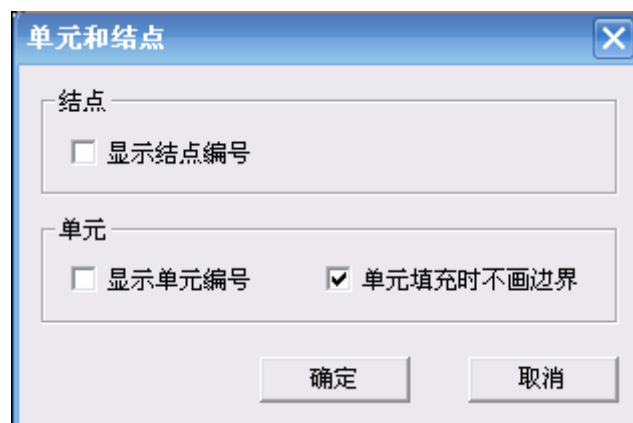


图 5.3 单元和节点命令操作

(4) 边界条件

对边界条件显示进行调整, 包括位移约束大小、单位荷载显示大小、弹簧边界显示大小以及孔隙水压力边界显示大小等, 如下图所示。

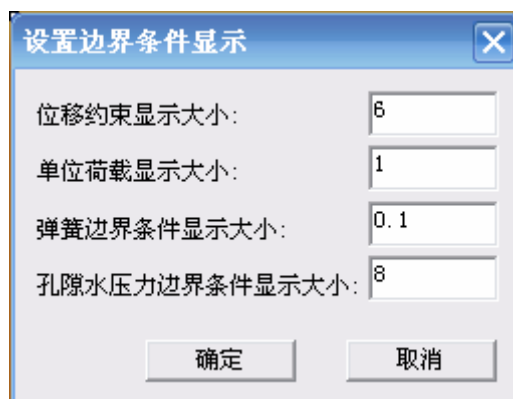


图 5.4 边界条件显示设置

(4) 系统设置

用于后处理显示设置，包括计算结果的显示精度、字体以及背景颜色等。

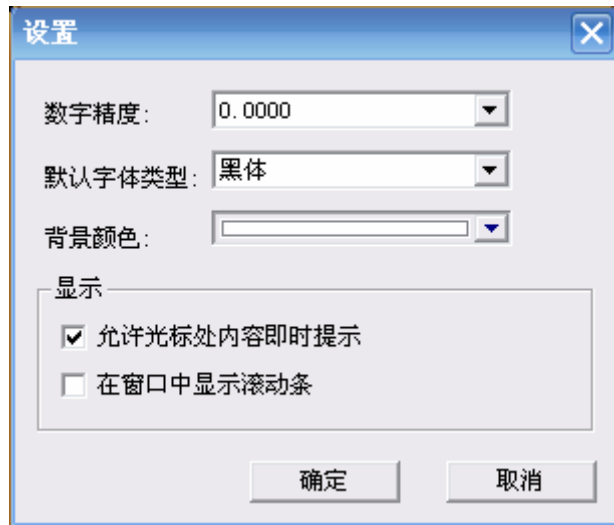
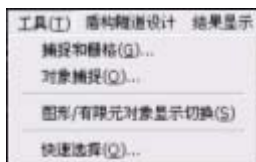


图 5.5 系统设置

(5) 其他

所有功能同 AutoCAD。

5.7 工具



(1) 图形/有限元对象显示切换

采用有限元对象显示可以选择单元结点。

(2) 快速选择

可以对某一种支护参数建立选择集进行直接选择，以节省时间。

(3) 其他

所有功能同 AutoCAD。


5.8 正分析模型建立

建模就是定义分析对象，它主要是通过一系列操作步骤将要分析的实际工程问题转化为 GeoFBA2D 能处理的数据。这些操作步骤大致可以分为：组织模型、定义材料、设定绘图辅助工具和绘图属性、作图、修改、自动寻找封闭面、将材料赋给封闭面、添加边界条件、开挖、全自动生成网格、手动修改/添加网格、设定有限元控制参数、计算和查看计算结果等等。由于 GeoFBA2D 的所有功能均集中在一个窗口内，因此这些操作步骤之间的顺序并不是十分严格的，有些步骤可以有所颠倒，这并不影响最终的结果。基本操作

步骤如下:

5.8.1 设置施工步与增量步

GeoFBA2D[®]支持最多达 32767 个施工步、1000 个增量步。施工步用来模拟岩土工程施工中的开挖过程(开挖的同时也可以新增单元),而增量步可以和有限元计算过程中的增量计算结合使用。对于普通用户而言,一般不需要考虑增量步,这时采用系统的默认值 1 即可。

要设置施工步与增量步,从<格式>菜单中选择<施工步/增量步>,或从属性工具条选择。此时系统会弹出设置施工步与增量步对话框,在总施工步和总增量步中输入用户指定的最大施工步和最大增量步后,选择确定即可。

施工步从 0 到用户指定的最大施工步结束,增量步从 1 到最大增量步结束。注意施工步 0 是初始状态步,它只包含一个增量步。

施工步和增量步设置完之后,还需填写增量步释放系数。增量步释放系数是指施工步中每个增量步的应力释放百分比。如果某施工步只有 1 个增量步,则该施工步的增量释放系数为 1,否则,每个施工步的各增量步释放系数总和应为 1。在特殊情况下,即允许跨施工步释放的情况下,某施工步的增量释放系数可能在该施工步不全部释放完,而在后续的施工步中陆续释放。

5.8.2 定义材料


GeoFBA2D[®]允许用户以最自然的方式定义和使用材料。首先,用户在材料编辑器中定义材料名称、选择材料类型、输入材料常数、选择材料显示颜色及材料填充模式等等。之后,用户就可以通过此材料名称将材料赋给指定的单元。此外,GeoFBA2D[®]还提供了一些常用材料的材料参数及允许用户将定义的材料保存供以后使用。

要定义材料,从<对象数值方法>菜单中选择<材料>,即进入材料编辑器。用户可以在编辑器中定义自己的材料。


5.8.3 作图

这一节是为那些对 AutoCAD 绘图不太熟悉的用户准备的,如果用户对 AutoCAD 较为熟悉的话,则可以跳过这一节。

(a) 绘制直线


- 从<绘制>菜单中选择<直线>,或从绘图工具条中选择.
- 指定起点(1)。
- 指定终点(2)。
- 指定下一条线段的终点(3,4,5...).
- 按下 ENTER 键或鼠标右键结束命令。

(b) 绘制矩形

- 从<绘制>菜单中选择<矩形>, 或从绘图工具条中选择 .
- 指定第一点。
- 指定第二点。


(c) 绘制圆

绘制一个圆可以有几种方法, 例如: 指定圆心和半径, 指定直径上的两点, 指定三个点等。以指定圆心和半径为例,


- 从<绘制>菜单中选择<圆 ▶ 圆心>, 半径, 或从绘制工具条选择 .
- 指定圆心。
- 指定半径。

(d) 绘制圆弧

同绘制一个圆一样, 绘制圆弧同样有几种方法, 例如: 三点划弧, 指定圆心、起点和终点划弧, 指定圆心、半径、起始角、终止角划弧等。以三点划弧为例,

- 从<绘制>菜单中选择<弧 ▶ 3点>, 或从绘制工具条选择 .
- 指定第一点。
- 指定第二点。
- 指定第三点。


(e) 绘制文本


- 从<绘制>菜单中选择<文本>, 或从绘制工具条选择 .
- 指定文本的插入点。
- 输入文本。

5.8.4 将材料赋给封闭面、曲线


从绘图窗口用鼠标选中某封闭面或曲线, 再从工具栏的“材料类型”组合框中选择该封闭面或曲线的单元所应赋予的材料。在网格全部生成后, 用上述同样的过程给所有的单元赋材料, 但是过程繁琐, 不建议采用。

5.8.5 添加边界条件

要添加位移边界条件, 从<绘制>菜单中选择<位移约束>, 或从绘制工具条中选择 .

要添加荷载边界条件, 从<绘制>菜单中选择<荷载>, 或从绘制工具条中选择 .

5.8.6 开挖

从<修改>菜单中选择<挖去>, 或从修改工具条中选择 .

用鼠标选取需要挖去的封闭面或其它对象(可以是生成网格后的单元、结点), 然后按下 ENTER 键。

需要指出的是, 用户要注意开挖时所处的施工步/增量步, 因为这直接关系到有限元数据的生成和计

算。

5.8.7 生成网格

参见 2.7, 2.8

5.8.8 设定有限元控制参数

有限元计算的控制参数是对诸如有限元计算的模型进行选择, 如平面应变、平面应力等; 以及对本构模型进行选择等等。

这些参数的具体含义可以参见 *GeoFBA2D[®]* 计算文件说明书。

要填写有限元计算控制参数, 从<对象数值方法>菜单中选择<控制参数>。

5.8.9 控制有限元模型的显示

有限元模型包含结点、单元、边界条件等信息, 而这些有限元基本元素本身又包含编号等其它信息, 如果将这些信息全部显示在屏幕上, 无疑什么也看不清楚。因此, 适当地控制在屏幕上显示的信息量非常有必要。下面就介绍如何控制结点、单元和边界的显示。

(1) 控制结点的显示

用户可以控制结点的显示内容包括: 结点本身是否显示、结点显示的颜色、结点编号是否显示、结点编号的颜色以及结点编号显示在结点的什么位置上等等。

用户选择<格式>菜单中的<设置>, 就可以打开控制结点显示对话框, 从中用户可以自己指定要显示的项目。

(2) 控制单元的显示

可以控制的单元显示内容包括: 是否显示单元编号、单元编号的颜色、单元编号显示在什么位置等等。

用户选择<格式>菜单中的<设置>, 就可以打开控制单元显示对话框, 从中用户可以自己指定要显示的项目。

(3) 控制边界条件的显示

可以控制的边界条件内容包括: 是否显示荷载边界条件、荷载边界条件的显示颜色、初始荷载边界条件的显示长度、显示位移边界条件、位移边界条件的显示颜色以及位移边界条件显示的参考长度等。

用户选择<格式>菜单中的<边界条件>, 就可以打开控制边界条件显示对话框, 从中用户可以自己指定要显示的项目。

5.9 反分析模型建立

5.9.1 定义测线与测点

与实际工程中的测量类似，同济曙光反分析模块中量测数据以测线形式进行组织。每根测线上可以有一个或若干个测点，量测数据最终在测点上。

测线类型分为绝对位移测线、相对位移测线、轴力测线、弯矩测线、应变测线和应力测线。对于绝对位移测线和相对位移测线，其上布置的测点数不受限制；对于轴力、弯矩、应变和应力测线，其上布置的测点只有一个。

测线可是由直线、圆弧组成的一条连续的线段（可以封闭，也可以不封闭），其上布置有若干个测点。通常情况测线是一条直线，对于轴力、弯矩、应变和应力测线，直线的起点和终点位置重合。

说明：定义好测线及测点后，再利用全自动生成有限元网格，则在有限元网格生成的过程中会对测点予以考虑，即在测点位置之处，会有有限元结点与其严格对应。

1、定义测线的过程

- (1) 用绘图命令或菜单，绘制出准确的测线位置和测点位置；
- (2) 在“反分析”菜单中选择“测线”命令；
- (3) 选择需要定义为测线的线段，以及布置在该测线上的点，按回车或按鼠标右键确认；
- (4) 系统此时提示是否要删除原线段，根据需要输入 yes 或 no，测线定义完成。

2、修改测线类型

- (1) 选择定义好的测线；
- (2) 从“修改”菜单中选择“属性”，弹出如下的对话框；

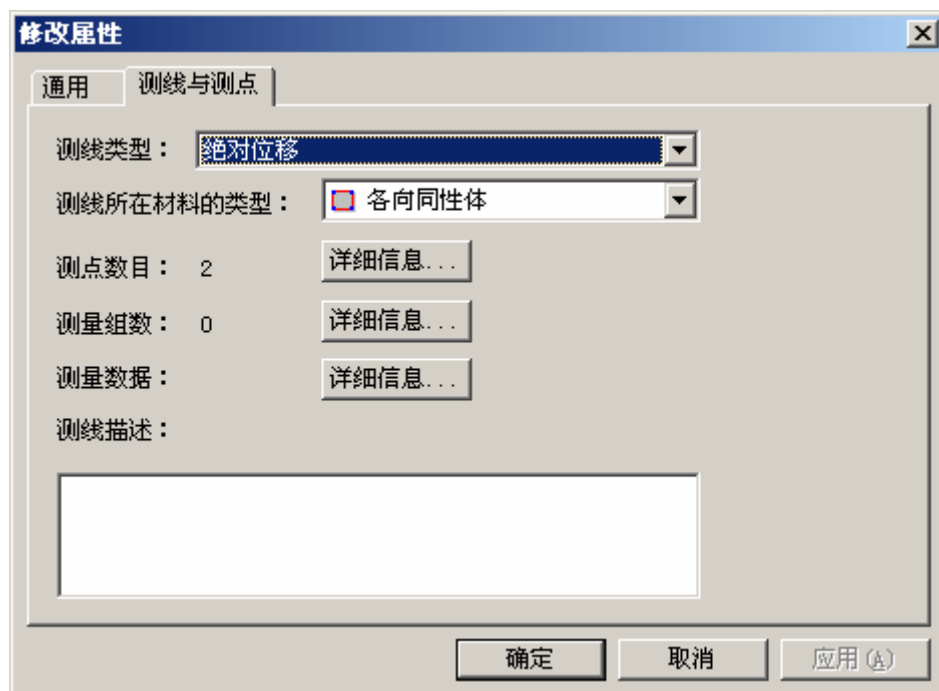


图 5.6 修改属性命令

- (3) 从测线类型中进行选择；

- (4) 从测线所在材料的类型进行选择，定义测线所在的材料类型；
- (5) 按“确定”按钮关闭属性对话框。

3、定义测线所在的施工步

- (1) 选择定义好的测线；
- (2) 从“修改”菜单中选择“属性”，弹出对话框；
- (3) 单击量测组数右侧的“详细信息...”按钮，弹出如下的对话框；

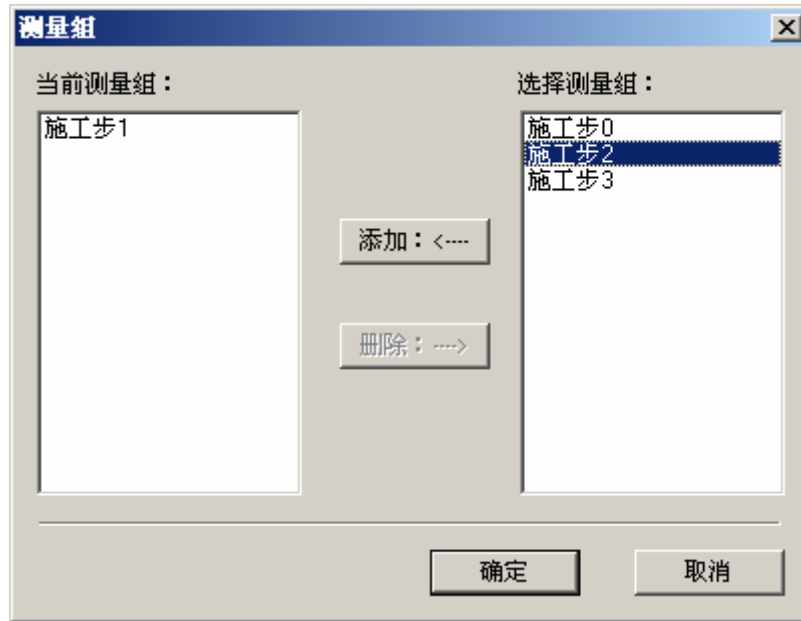


图 5.7 测量组设置

(4) 从右侧的施工步列表中，选择有量测数据的施工步作为测量组，单击“添加”按钮，加入到测线的当前测量组中。若要删除测量组，则从左侧的施工步列表中选择要删除的测量组，单击“删除”按钮。最后按“确定”按钮关闭测量组对话框。

- (5) 按“确定”按钮关闭属性对话框。

4、测点数据的输入

- (1) 选择定义好的测线；
- (2) 从“修改”菜单中选择“属性”，弹出对话框；
- (3) 单击量测数据右侧的“详细信息...”按钮，弹出如下的对话框；

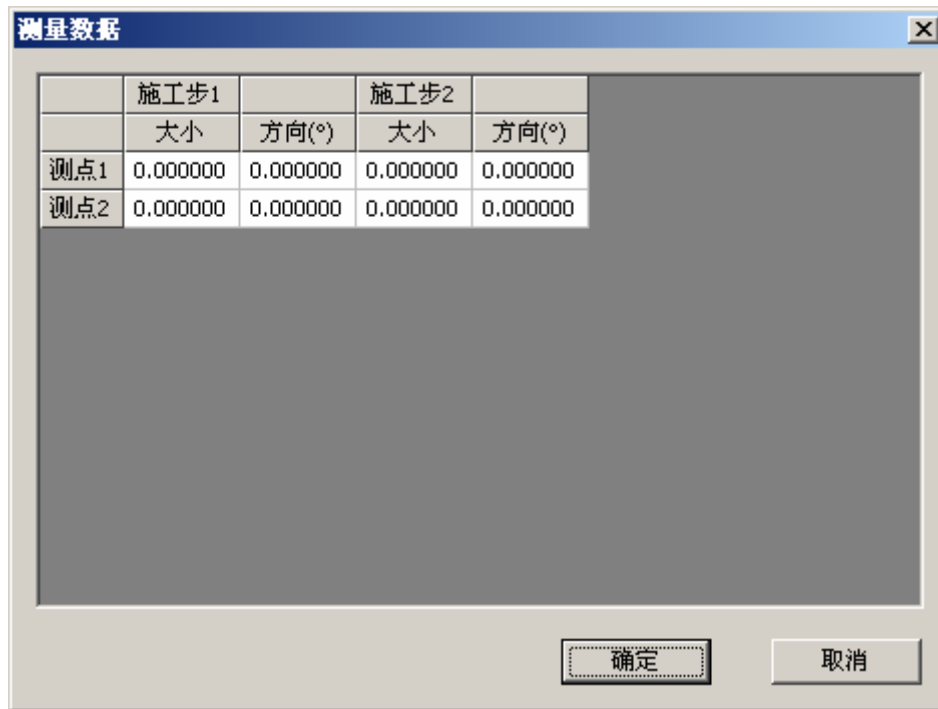


图 5.8 测点数据输入

(4) 在对话框中，输入每个测点在各个施工步的测量值大小及方向。输入完成后，按“确定”按钮关闭测量数据对话框。

(5) 按“确定”按钮关闭属性对话框。

5、测点数据输入说明

对于绝对位移测线，大小和方向均要输入；

对于相对位移测线，每根测线最后一个测点为基点，其他测点测值投影到测线上再减去基点在测线上的投影值（同一测线角度相同），当然还得考虑施工步和增量步的差值。即该投影差值在前后两不同施工步和增量步有两个值，这两个值的差值为反演时采用量测值，其值与计算值比较。单位与网格单位一致。方向程序默认已自动计算好（ $1 > n$ ），一般无需修改；相对位移 δ （设*i*点记为 δ_i ）一般填收敛值。设一根相对位移测线上共有 $1..i..n$ 个测点，*i* 为任一测点，*n* 点为基点，位移收敛值 $\Delta(\delta_i - \delta_n)$ 填正值，测线方向角为测线矢量 $i \rightarrow n$ 与 *x* 轴正向夹角；位移收敛值 $\Delta(\delta_i - \delta_n)$ 表示拉伸时填负值，测线方向角同上。

对于轴力和弯矩测线，只需要输入测点的量测值大小，方向无需输入。

对于应变测线，方向=1,2,3 分别表示应变在 *x,y* 和 *xy* 方向。特别地，对于接触面单元，方向=1,2 分别表示接触面切线和法线方向。

对于应力测线，方向 = 1,2,3,4 分别表示应力在 *x,y,xy* 和 *z* 方向。特别地，对于接触面单元，方向=1,2 分别表示接触面切线和法线方向。

6、反分析起始步和终止步

定义反分析测线和测点及输入量测数据，就如同建立了一个量测数据库，实际反分析计算时，采用哪些施工步的数据进行反算，则由反分析起始步和终止步决定。例如量测数据从第 1 施工步开始，一直到第 5 施工步结束，反分析时可以指定使用第 2 步到第 3 步的量测数据进行反算，然后将得到的第 4、第 5 施工步反算结果与实测值进行比较，来检验反分析的效果。

指定反分析起始步和终止步操作如下：

- (1) 在“反分析”菜单中选择“反分析起始和终止步...”命令；
- (2) 在弹出的对话框中，分别选择反分析起始步和反分析终止步。按“确定”按钮结束该操作。

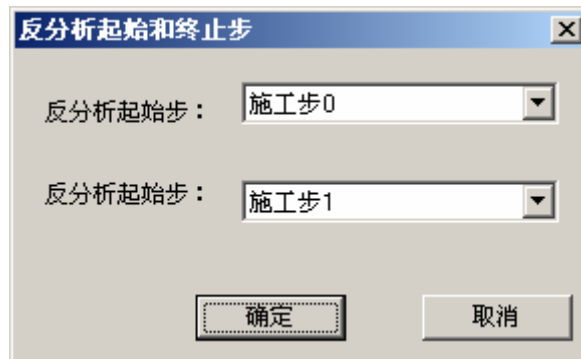


图 5.9 施工步设置

说明：当反分析起始步为施工步 0 时，表示进行的是全量反分析，否则表示进行的增量反分析。

5.9.2 反分析目标

同济曙光软件的反分析目标可以是地应力和材料参数。根据地应力的两种不同表示方法，又分为以线性方程式表达的地应力和以外荷载表达的地应力。

1、线性方程式表达的地应力

地应力用如下方程式表示：

$$\sigma_x^s = a_1 + a_4 z \quad \sigma_z^s = a_2 + a_5 z \quad \tau_{xz}^s = a_3$$

式中 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 为常系数， z 为纵向坐标，竖直向上为正。

因此反分析目标可以是 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 中的任何一个或是它们的任意组合。操作过程如下：

- (1) 从“反分析”菜单中选择“反分析控制”，出现如下对话框；



图 5.10 反分析控制

- (2) 从“反演目标”列表框中选择“地应力（线性表达式）”；
- (3) 从“反演参数”列表中选择 a1.a5 中的待反演值，单击“添加”按钮，则将该参数加入到待反演的参数中；
- (4) 重复过程（3），直到所有待反演参数都已设定好；
- (5) 单击“确定”按钮，关闭反分析控制对话框。

2、外荷载表达的地应力

此时地应力是以外加荷载（均布荷载或集中荷载）表示，可以对外加荷载的大小进行反演。操作过程如下：

- (1) 从“反分析”菜单中选择“反分析控制”，出现如下对话框；

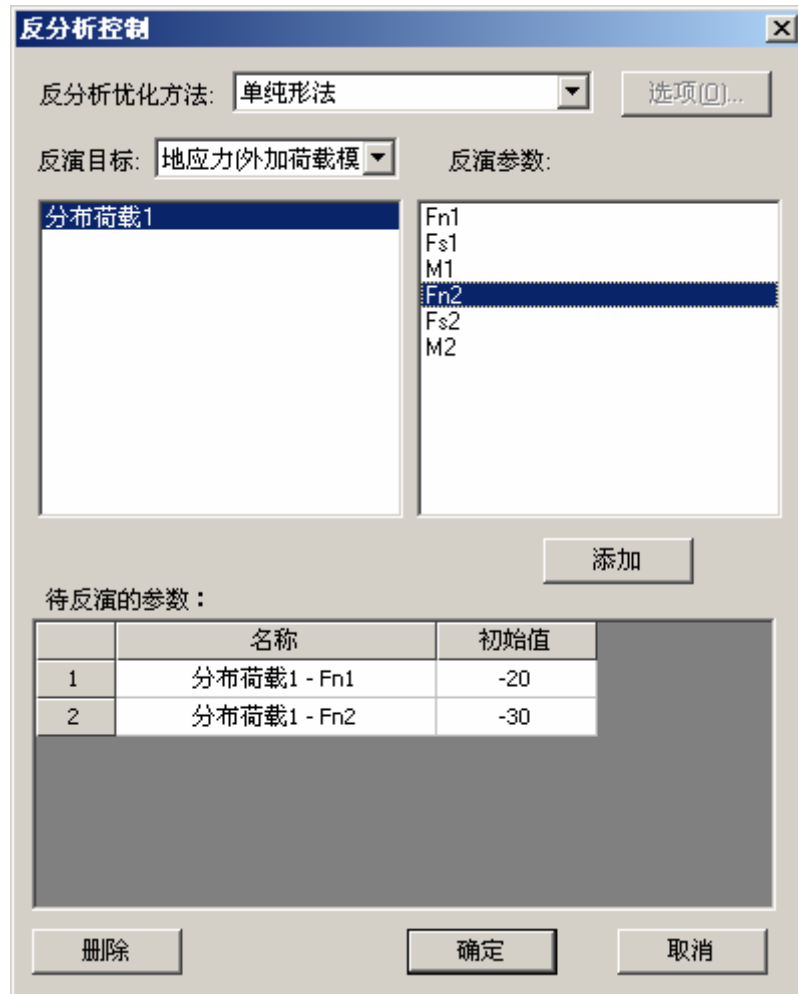


图 5.11 反分析荷载控制

- (2) 从“反演目标”列表框中选择“地应力（外加荷载模式）”；
- (3) 从所列出的荷载中，选择待反演的荷载对象，并从“反演参数”列表中选择荷载值，单击“添加”按钮，则将该参数加入到待反演的参数中；
- (4) 重复过程（3），直到所有待反演参数都已设定好；
- (5) 单击“确定”按钮，关闭反分析控制对话框。

3、材料参数

对材料的参数，如 E ， μ 进行反演。操作过程如下：

- (1) 从“反分析”菜单中选择“反分析控制”，出现如下对话框；

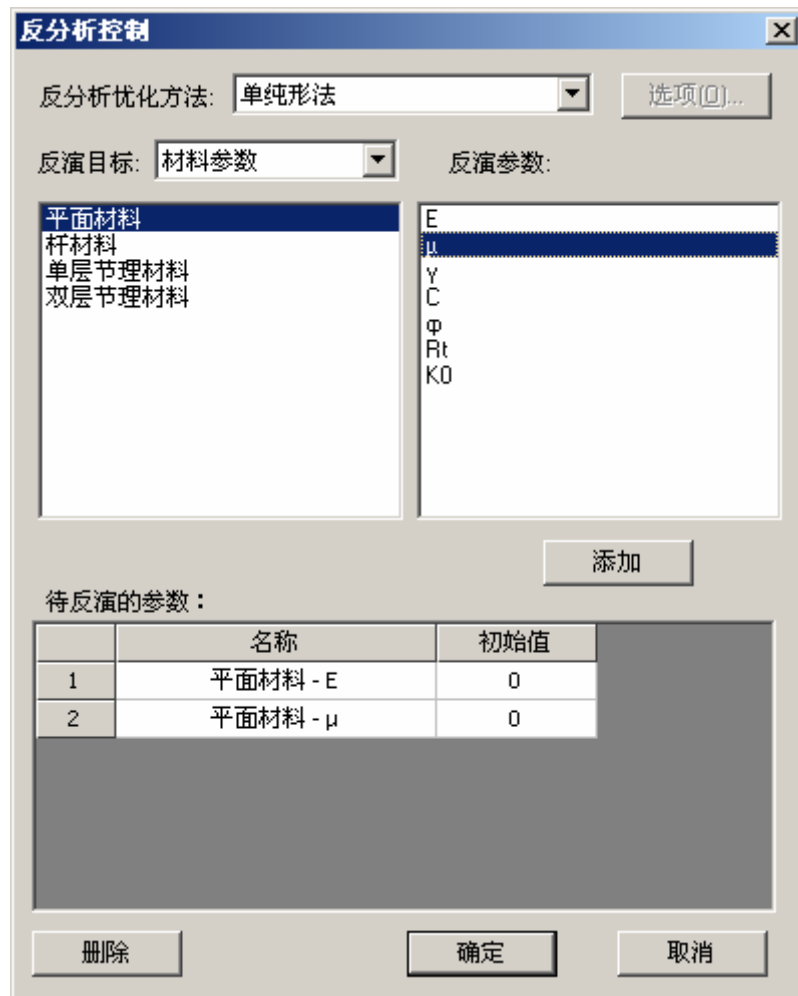


图 5.12 反分析控制

- (2) 从“反演目标”列表框中选择“材料参数”；
- (3) 从材料列表中选择待反演的材料，并从“反演参数”列表中选择材料参数，单击“添加”按钮，则将该参数加入到待反演的参数中；
- (4) 重复过程（3），直到所有待反演参数都已设定好；
- (5) 单击“确定”按钮，关闭反分析控制对话框。

5.9.3 反分析方法

同济曙光软件中提供了多种反分析优化方法，分别是单纯形法、阻尼最小二乘法、遗传算法、遗传模块退火算法和混合遗传算法。关于这几种优化方法的原理，请参阅“同济曙光软件理论手册”。

从“反分析”菜单中选择“反分析控制”，然后从弹出对话框的“反分析方法”进行选择。除单纯形法之外的其它方法，每种优化方法都还有相应的选项设置，见如下对话框。

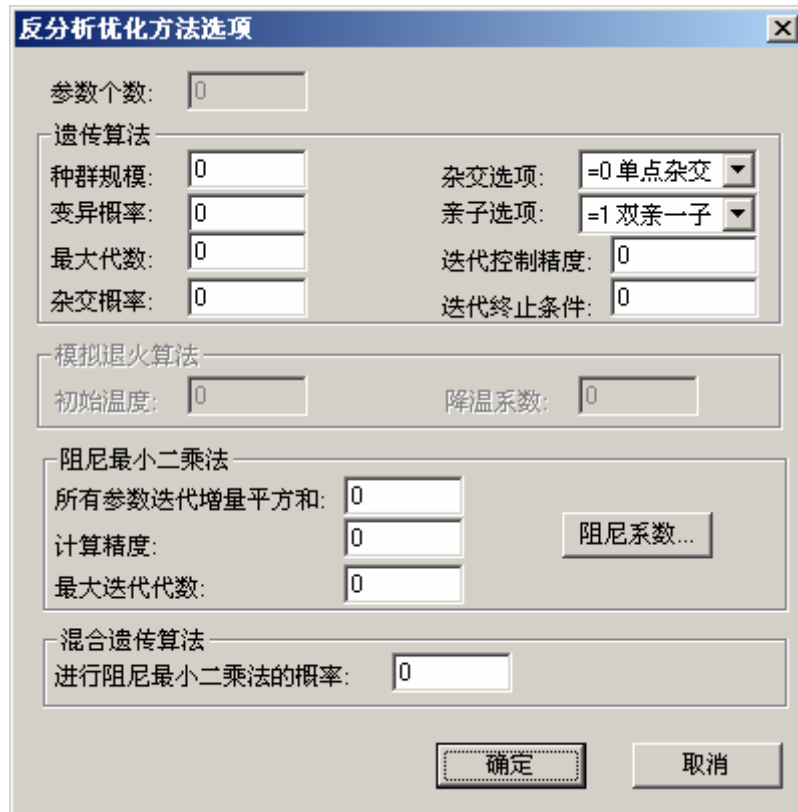


图 5.13 反分析优化方法选择

从使用上说，单纯形法最为简单，速度也较快，但由于这种方法得到的仅仅是局部最优解，因此计算结果与待反演参数的给定初值有很大关系。

以下给出阻尼最小二乘法与遗传算法中一些参数的选取，仅供参考。

(1) 阻尼最小二乘法

阻尼系数的取值是关键，由下图可见，较小的阻尼系数有助于获得较小的目标函数，即较好的解；但同时，阻尼系数取为 0 时，计算会发生溢出（下图中所显示的最小阻尼系数为 0.01）。

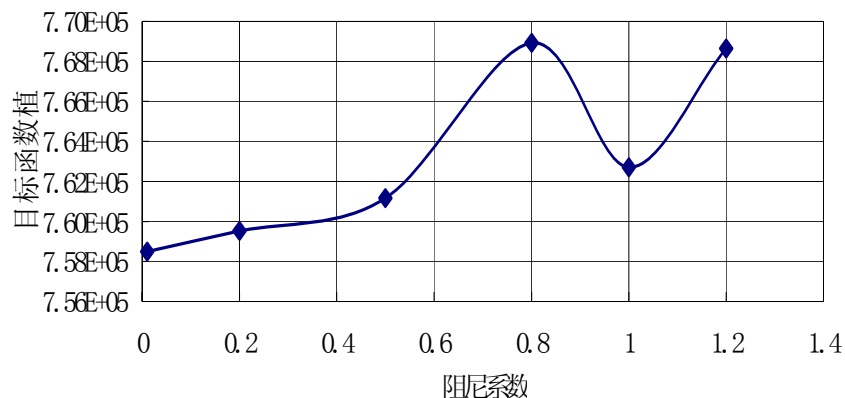


图 5.14 阻尼系数与目标函数关系

(2) 遗传算法

变异是增加群体多样性的搜索算子，一个低水平的变异率足以防止整个群体中任一位保持永远收敛到单一值，高水平的变异率产生的实质是随机搜索。

由下图可见，变异率为 0.08 时，适应值达到最大（最优解相对最好），同时收敛所需的代数达到最大，即效率下降。而变异率超过 0.1 后，适应值相对较差，因为此时接近于随机搜索；变异率为 0.03 时，适应值收敛代数比相对较好。

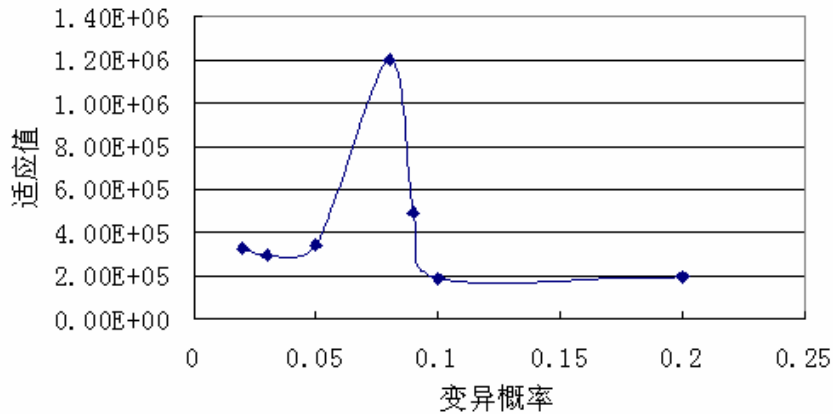


图 5.15 变异率同适应性关系

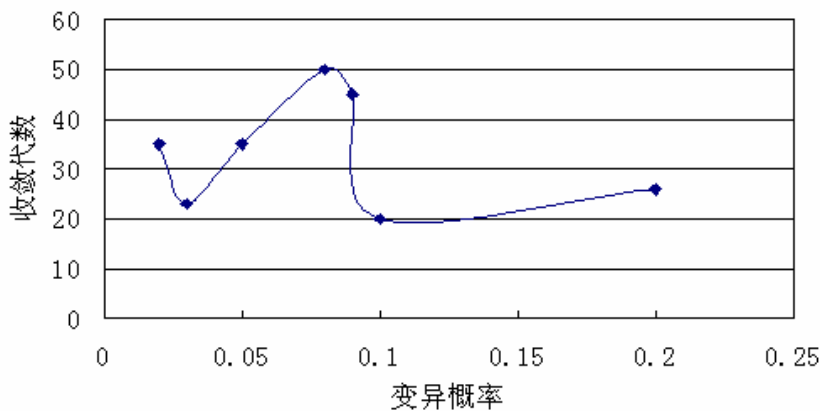


图 5.16 变异率同收敛代数关系

5.9.4 反分析计算

(1) 从“反分析”菜单中选择“反分析求解”，即可打开反分析计算过程控制对话框，进行实际的求解计算。

(2) 由于反分析计算与给定的初值有相当的关系，因此初值的选取比较重要，它应尽量接近真值。当反分析过程不收敛，即目标函数发散时，应停止计算，重新给定初值。

(3) 反演的目标变量不宜太多，当目标变量（即待反演参数的总数）在 1~3 个以内时效果较好。

(4) 反分析计算时的量测数据中应剔除一些异常数据，而且一开始反分析时所采用的量测数据不易多。当能够有反演结果，并且结果较为理想时，再考虑适当增加量测数据。

(5) 反分析计算完成后，其计算结果在命令窗口中会有显示。也可在与前处理文件同名，扩展名为.GYE 文件的结尾处寻找。例如，前处理文件为 Test.pre，则反分析结果存放在 Test.gye 文件的最后，该文件是一个文本文件，可以用任何的文本编辑器打开。例如以下是一个反分析的结果，它在.GYE 的最后。

(6) 建议不太熟悉反分析时，先用一个正分析结果，例如用正分析计算所得的两点相对位移值，做反分析的输入，得到正确的结果后，再做实际的分析计算。

第六章 查看计算结果

6.1 概述

当模型计算完成之后，后处理工具菜单会自动弹出，此时就可以利用后处理功能查看及分析结果，下图是对后处理工具条的介绍。

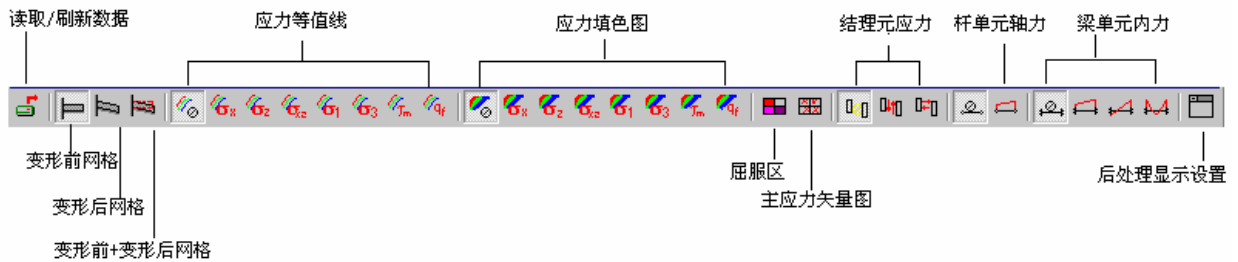


图 6.1 后处理菜单

6.2 显示位移图



从“结果显示”菜单中选择“变形前网格”、“变形后网格”和“变形前+变形后网格”，或从后处理工具栏中单击  按钮之中的一个，就可以在以上三种显示方式下切换，有关显示比例和变形后网格颜色的设置，单击“结果显示”菜单中的“后处理显示设置”或从后处理工具栏中单击 ，见下图。



图 6.2 后处理显示设置

默认状态下，程序在读入计算结果时会自动计算出合适的位移和内力显示比例，用户可以在以上对话框中调整这一比例值，以使结果更好地显示出来，下图是位移图显示示例。

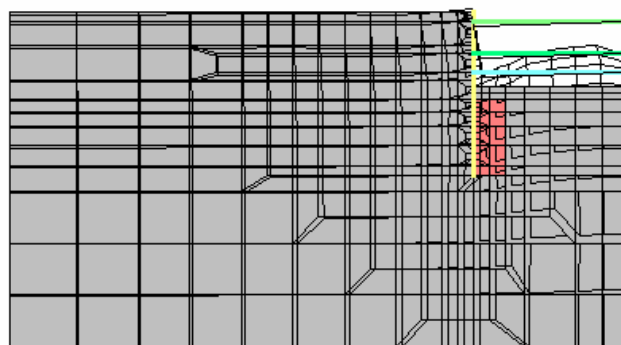


图 6.3 位移图显示示例图

6.3 显示应力图

从“结果显示”菜单中选择的“应力等值线”和“应力填充图”下的子项，或从后处理工具栏中单击相应的图标就可以显示相应的应力等值线和应力填充图，见图 6.4 示例。

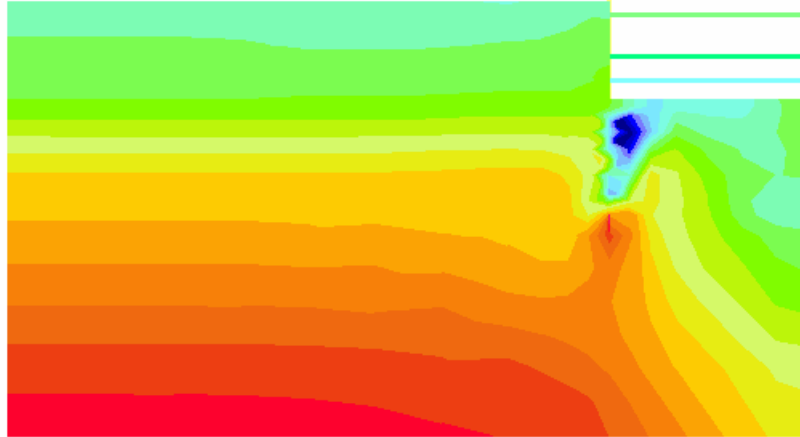


图 6.4 应力填色图示例图

应力等值线和应力填充图的图例，可以从图例窗口中显示出来。要显示图例窗口，从“查看”菜单中选择“图例窗口”。

6.4 显示内力

从“结果显示”菜单中选择“接触元内力”、“杆单元”和“梁单元”的子项，或从后处理工具栏中单击相应的图标可以显示相应的内力图，如图 6.5 所示。

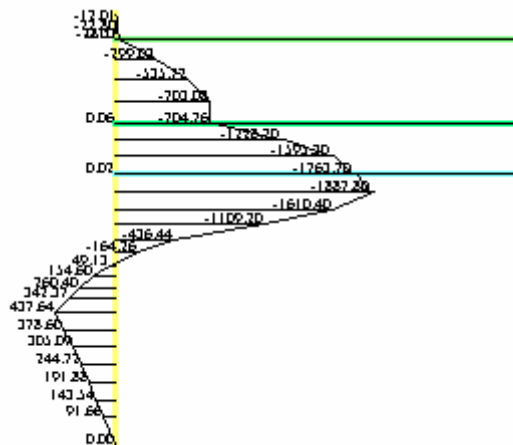


图 6.5 梁弯矩示例图

默认状态下，程序在读入计算结果时会自动计算出合适的内力显示比例，用户同样可以自行调整内力图的显示比例。

6.5 显示介质-结构作用力

从“结果显示”菜单中选择“介质-结构作用力”可以显示介质与结构之间的压力（例如土压力），如图 6.6

所示。

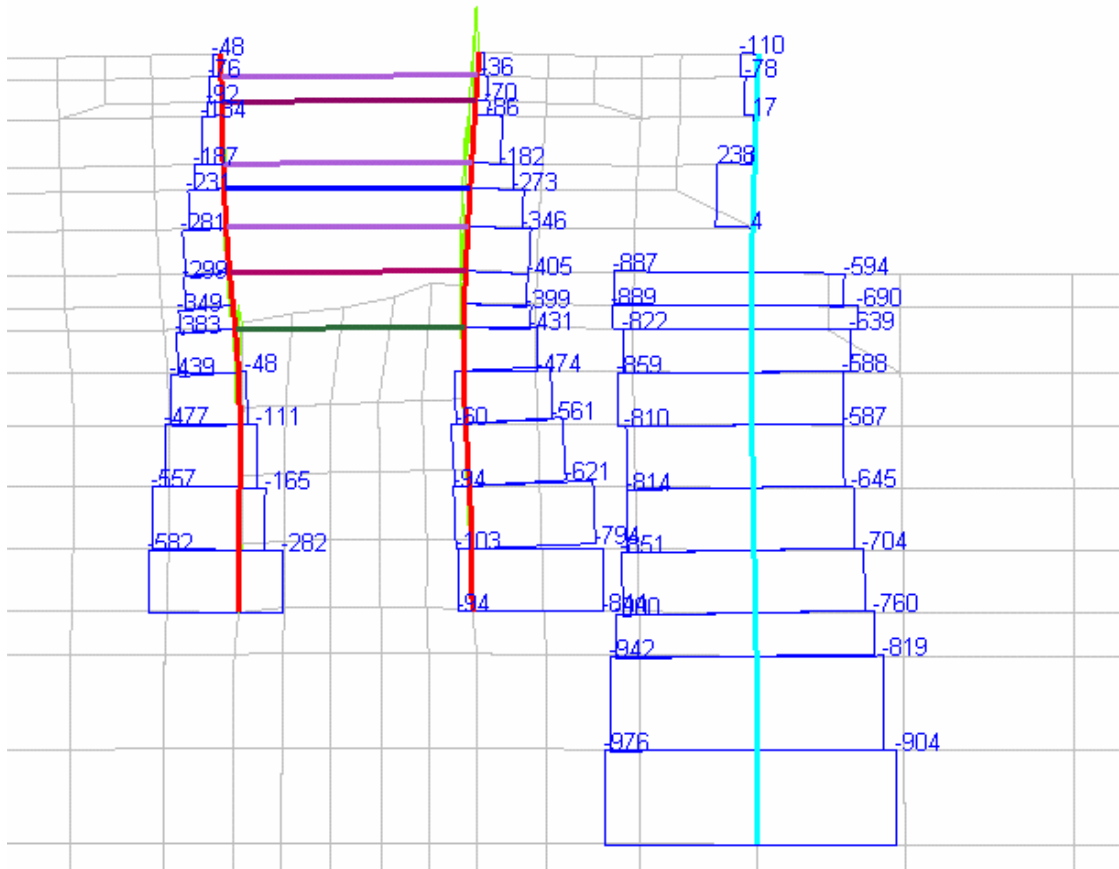


图 6.6 介质 - 结构作用力示意图

6.6 查询单元属性

从“格式”菜单中选择“系统设置”，即弹出以下对话框，见图 6.7 所示。

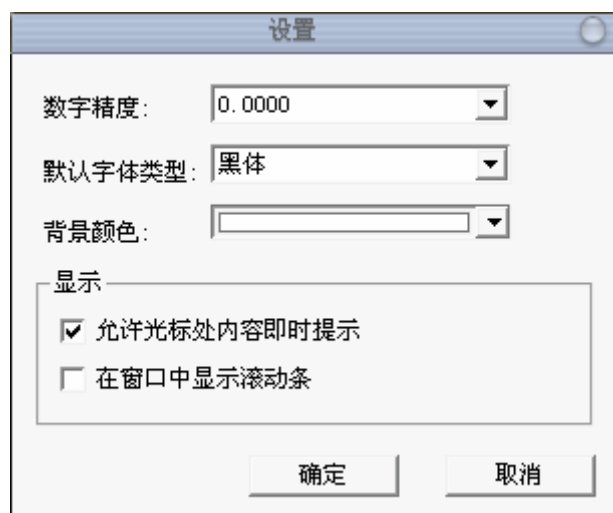


图 6.7 单元属性设置

打开其中的“允许光标处内容即时提示”功能，就可以即时显示出光标处对象的信息，如直线的端点、荷载的大小和单元的内力等，见图 6.7 所示。

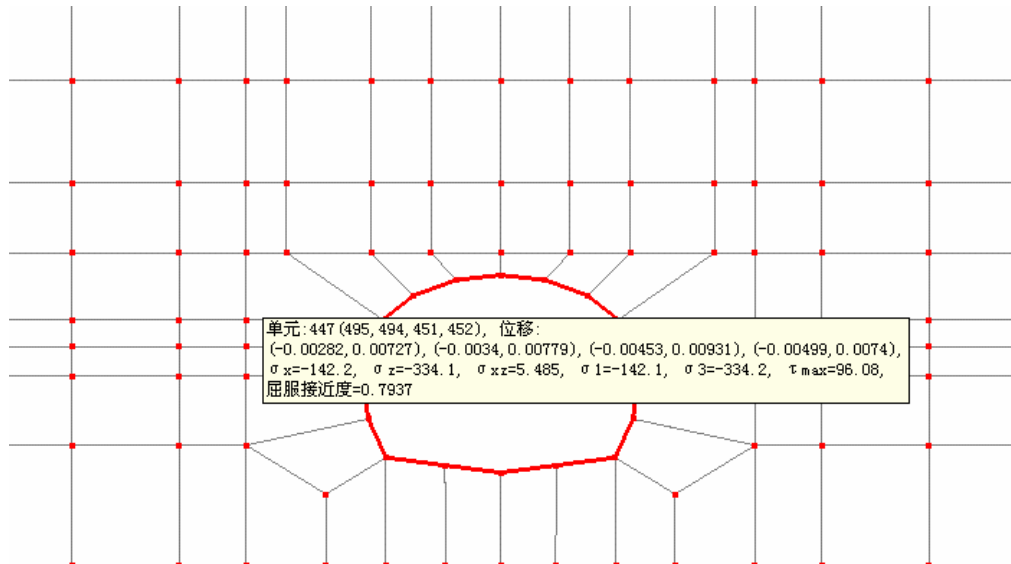


图 6.8 利用光标处内容即时提示功能查询单元内力

第七章 例题解说

7.1 隧道的荷载—结构建模实例

现在我们利用前处理定义分析对象的几何信息。

(1) 边界条件显示设置

- 菜单中选择：<格式>—<边界条件>
- 输入下图所示的设置值
- 按<确定>按钮关闭此对话框->>

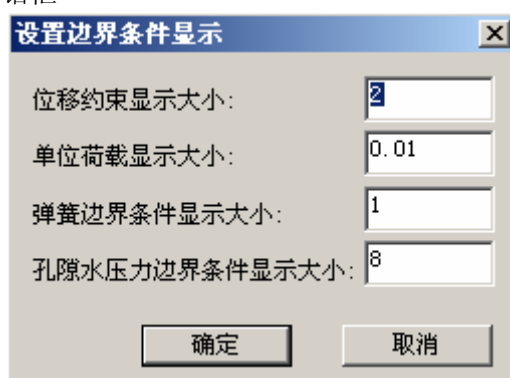



图 7.1 边界条件设置

(2) 定义材料

从〈对象数值分析方法〉菜单中选择〈材料〉，或者从属性工具栏中单击。在定义材料对话框中，单击“添加”按钮。输入材料参数，如下图所示

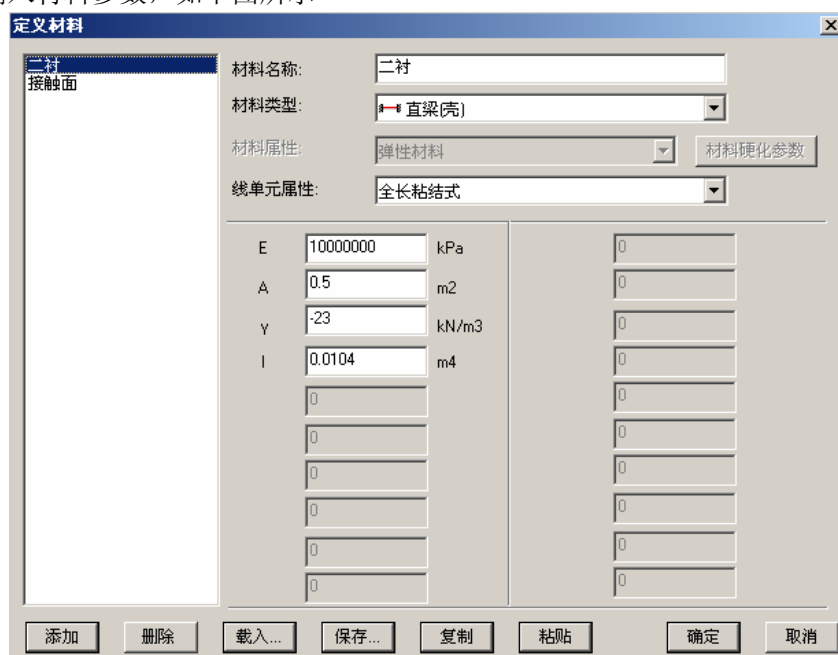



图 7.2 材料定义


(3) 作图

首先从工具菜单中选择绘图辅助工具<栅格和捕捉>等功能,接下来设置<对象捕捉>设置功能,例如打开<端点捕捉>、<交点捕捉>等功能。设置好这些辅助工具将有利于我们方便而准确地作图。


接下来用画<直线>和<圆弧>命令,完成以下图形,其具体做法如下:

★ 首先,从绘图工具栏中单击按钮。

- 输入第一点坐标 **48, 54**
- 输入下一点坐标 **48, 40**
- 输入下一点坐标 **66, 40**
- 输入下一点坐标 **66, 54**

★ 单击按钮。

- 输入圆弧的圆心坐标 **57, 54**
- 输入圆弧的起点坐标 **66, 54**
- 输入圆弧的终点坐标 **57, 63**

★ 单击按钮。

- 输入圆弧的圆心坐标 **57, 54**
- 输入圆弧的起点坐标 **57, 63**
- 输入圆弧的终点坐标 **48, 54**

这样便可以得到以下图形。

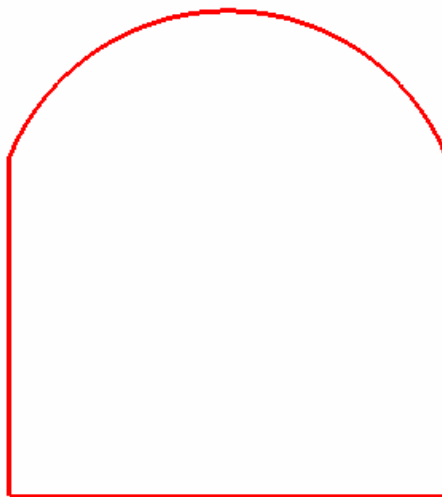


图 7.3 衬砌示意图

(4) 定义地层弹簧

- 菜单中选择: <绘制>—<均布弹簧>

- 输入下图所示的参数(土层弹簧系数可参照《同济曙光理论手册》，弹簧有“双向弹簧”和“受压弹簧”两种，一般选用单向受压的弹簧模拟岩土体对结构的抗力作用)



图 7.4 施加局部弹簧

定义完成后的土层弹簧如图 7.5 所示:

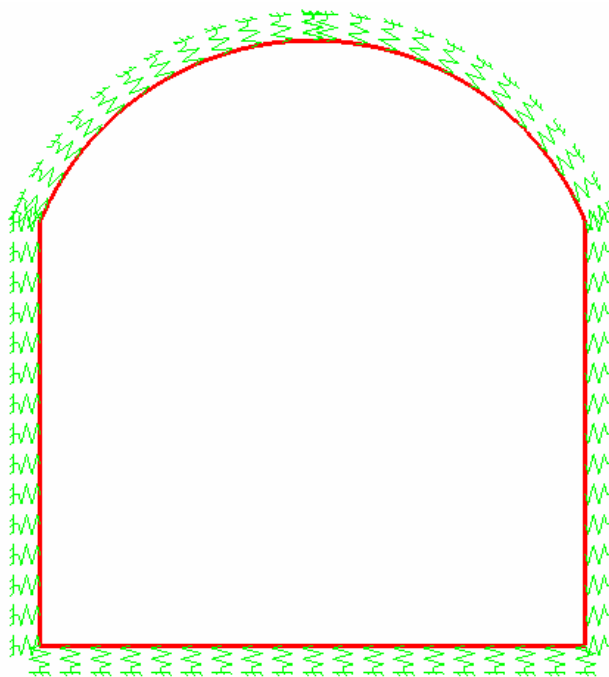


图 7.5 施加地层弹簧

(5) 定义结构荷载

- 菜单中选择: <绘制>—<均布荷载>

- 输入下图所示的参数(有三种荷载模式, 进行荷载结构法计算时按规定选用第三种“”荷载结构模式)

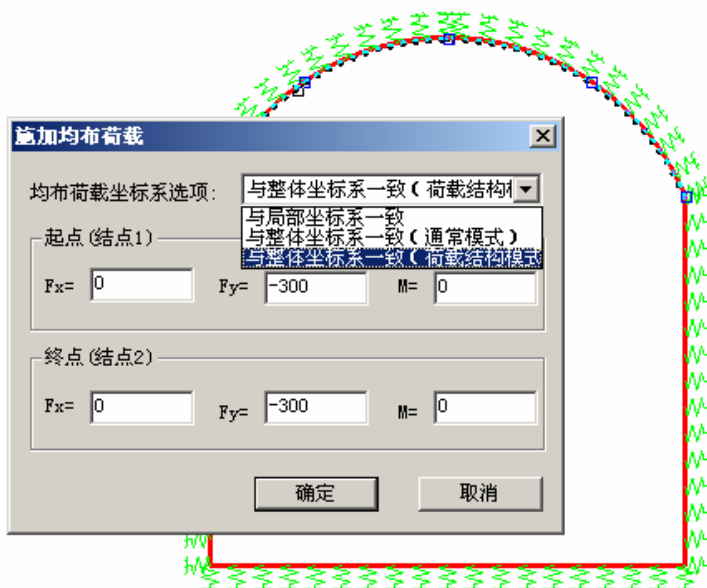


图 7.6 施加均布荷载

定义完成后的结构受载如图 7.7 所示:

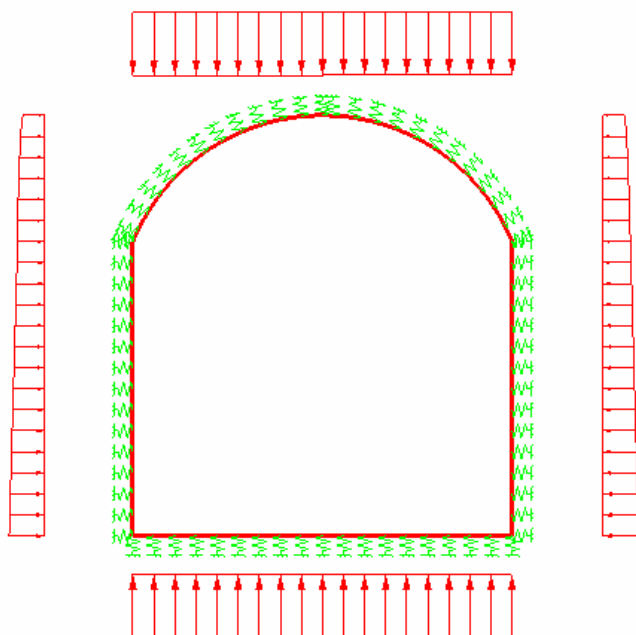


图 7.7 结构受载模式

(6) 生成单元网格

- 菜单中选择: <网格>—<全自动生成网格>

- 按提示输入参数

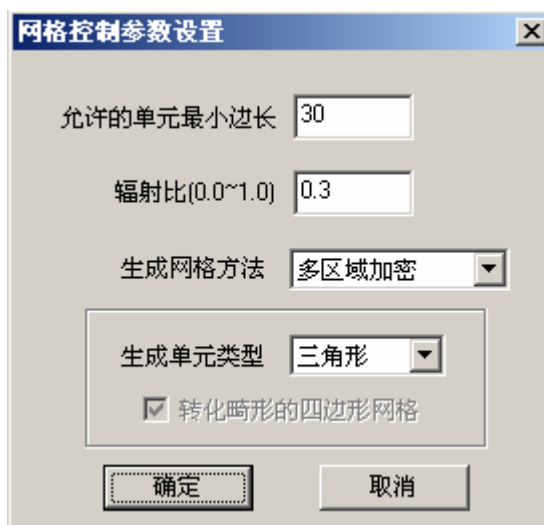


图 7.9 网格参数设置

(7) 分析求解

- 从<对象数值方法>菜单中选择<分析求解>，弹出如下对话框：

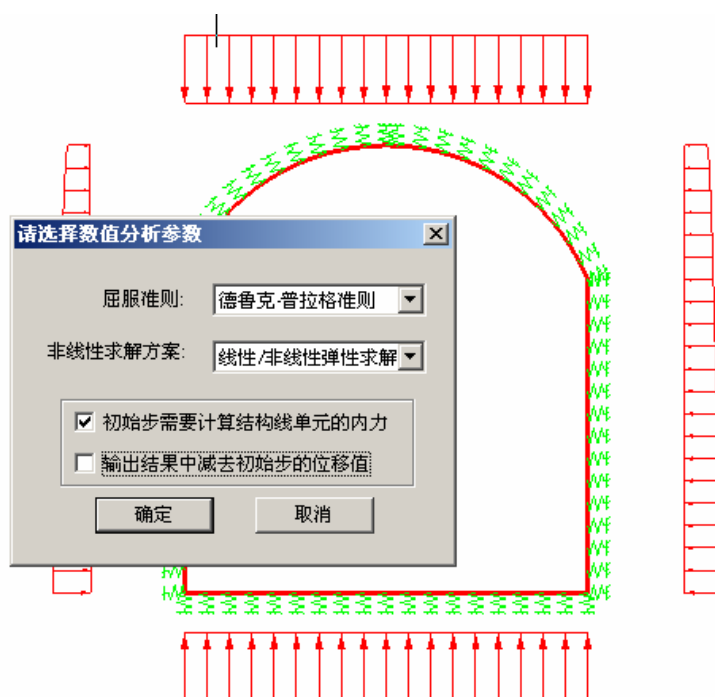


图 7.10 分析参数设置

注意荷载结构计算时，“初始步需要计算结构线单元的内力”且“输出结果中不需要减去初始步的位移”，其选择如上图所示。

计算完成后，计算结果会自动读入并显示出后处理工具栏，用户可以利用后处理工具栏查看感兴趣的结果。

7.2 洞室开挖反分析

问题描述:

地下洞室的开挖,开挖边界与开挖影响区域取为如图 7.11 所示。在开挖后测点 P1 (198.90,119.0), P2(183.4,75.0), P3(214.4,103.5), 开挖后通过监测发现测线 1 收缩 0.05m, 测线 2 收缩 0.05m, 测线 3 收缩 0.08m, 所用的地层参数为 $E = 200000\text{kPa}$, $\mu = 0.4$, $\gamma = -21\text{ kN/m}^3$, $c=12\text{kPa}$, $\varphi = 20^\circ$, $R_t = 5\text{kPa}$, $k=0.46$ 。通过量测信息,反演地层的力学参数弹性模量 E 。

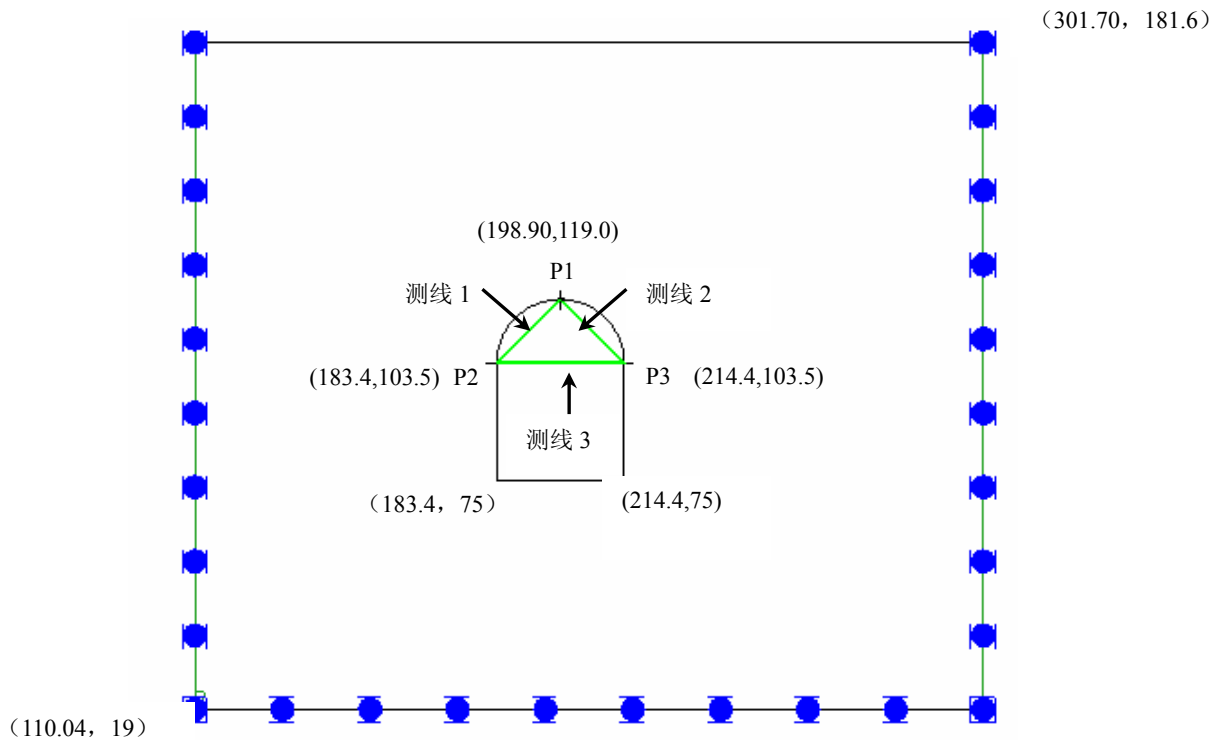


图 7.11 反分析模型

解题步骤:

A. 定义材料

1. 从主菜单上选择: 有限元分析—材料;
2. 单击添加, 将新添加的材料改名为地层;
3. 输入地层参数为 $E = 200000\text{kPa}$, $\mu = 0.4$, $\gamma = -21\text{ kN/m}^3$, $c=12\text{kPa}$, $\varphi = 20^\circ$, $R_t = 5\text{kPa}$, $k=0.46$ 。



图 7.12 定义材料

B. 绘制几何模型

命令: rectangle ✓

第一点: 110.04, 19 ✓

第二点: 301.70, 181.6 ✓

命令: line ✓

第一点: 183.4, 75 ✓

下一点: 214.5, 75 ✓

下一点: 214.4, 103.5 ✓

下一点: ✓

命令: line ✓

第一点: 183.4, 75 ✓

下一点: 183.4, 103.5 ✓

下一点: ✓

命令: point ✓

指定点的位置: 198.90,119.0

指定点的位置: 183.4, 103.5

指定点的位置: 214.4, 103.5

指定点的位置: ✓

从绘制菜单上选择圆弧, 3点画圆弧模式。

命令: arc

指定圆弧的起点, 或者[圆心 Center]:单击 P3 点

指定圆弧的第二点，或者[圆心 Center]:单击 P1 点
指定圆弧的终点：单击 P2 点。这样图形建模完毕。

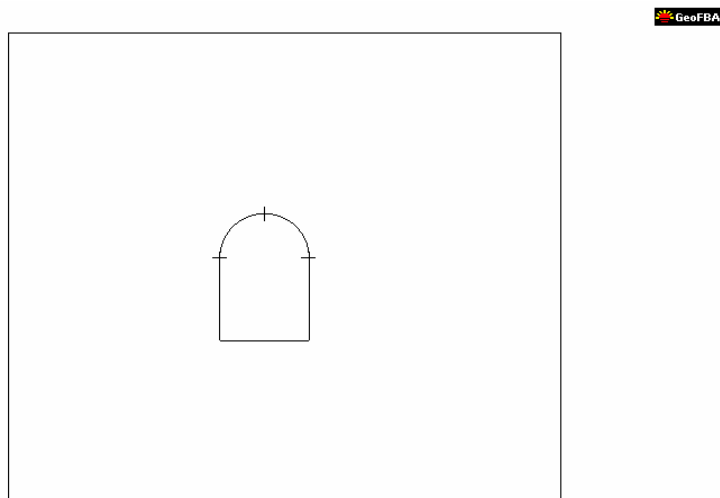



图 7.13 几何模型

C. 保存文件。

D. 寻找封闭面，赋土层材料

单击命令 网格 - 自动寻找封闭面，完成封闭面的寻找。

选中封闭面，单击属性工具 ，弹出修改属性对话框。

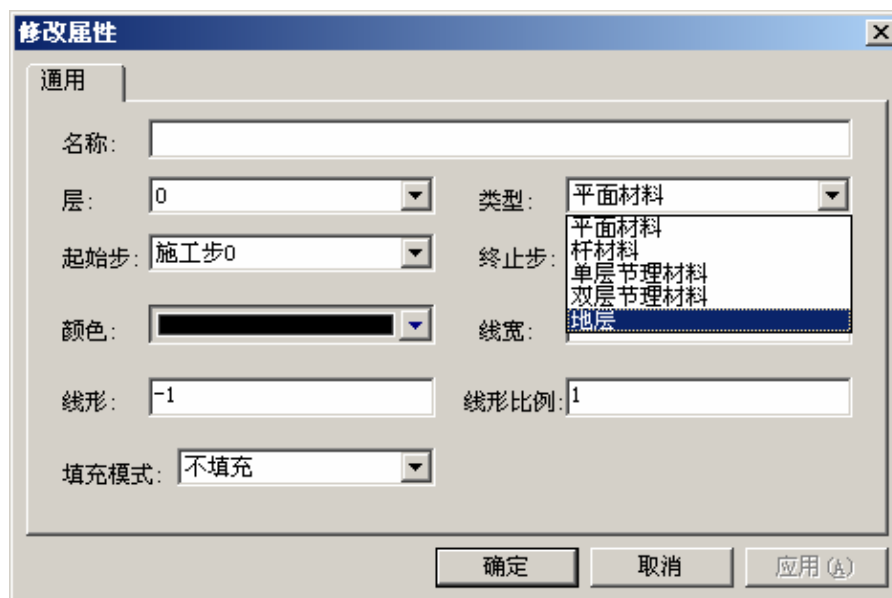



图 7.14 材料属性修改

将类型改为地层。

E. 施加边界条件

单击工具条 ，施加边界条件，选中两竖直边施加水平方向上的固定约束。
选择底边施加垂直方向上的固定约束。

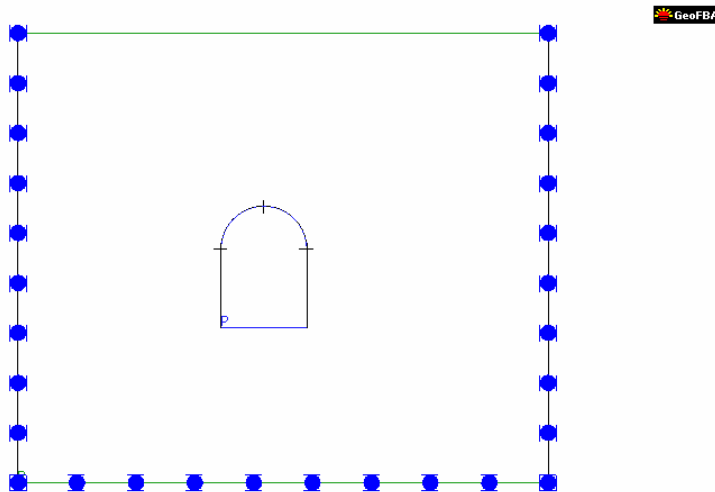



图 7.15 设置边界条件

F. 定义施工步与开挖过程。

单击  工具条，弹出对话框定义为一个开挖步。

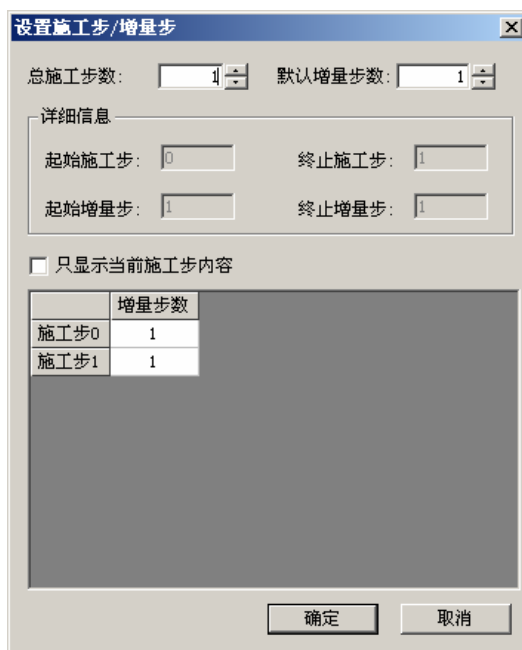


图 7.16 施工步设置

到第 1 施工步，将洞室挖去。

G. 定义测线

定义测线前，必须先画好准备定义测线的普通直线。为此在点 P1, P2, P3 之间画直线。

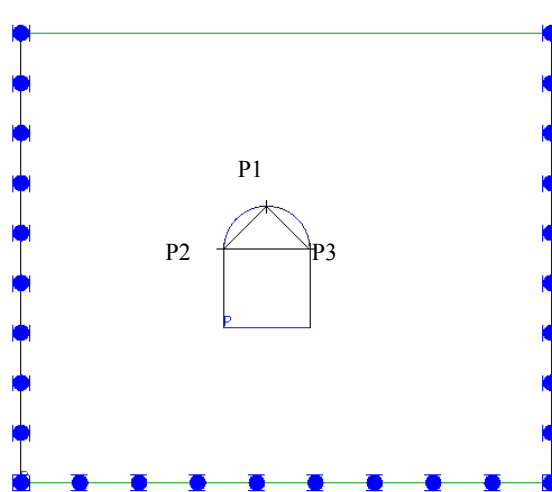
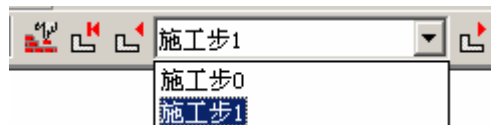


图 7.17 测线布置

将施工步调到施工步 1



单击菜单 反分析—测线。

命令: mealine

选择作为测线的直线或圆弧线段，及作为测点的点：单击 P2,P1,Line1,

删除原线段? [Yes/No]<N>Y

在选择时也可在工程窗口中选中对应的点与直线。

通过同样的步骤可以定义其他的两条测线。

完成测线定义后的工程窗口如下所示：



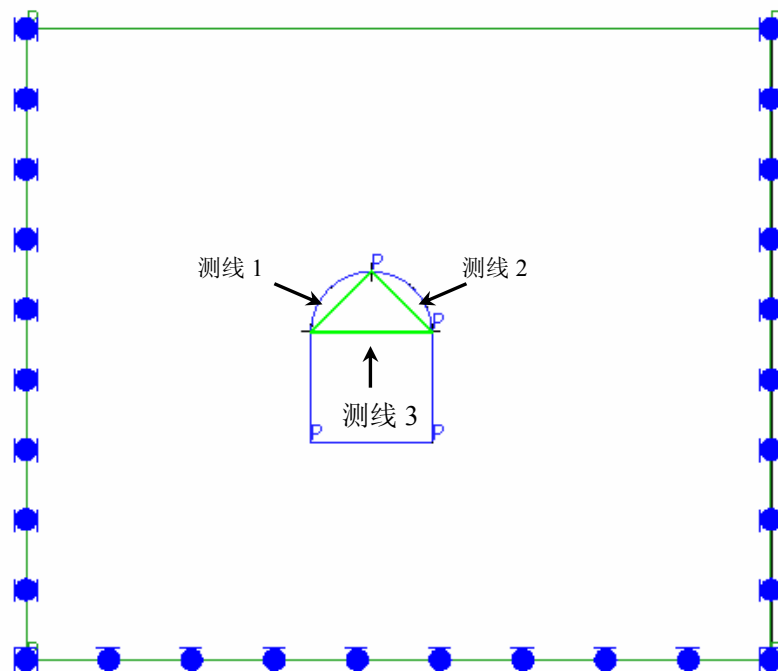


图 7.18 测线布置示意图

修改测线 1 的属性，选中测线 1，单击  工具条，弹出属性对话框，

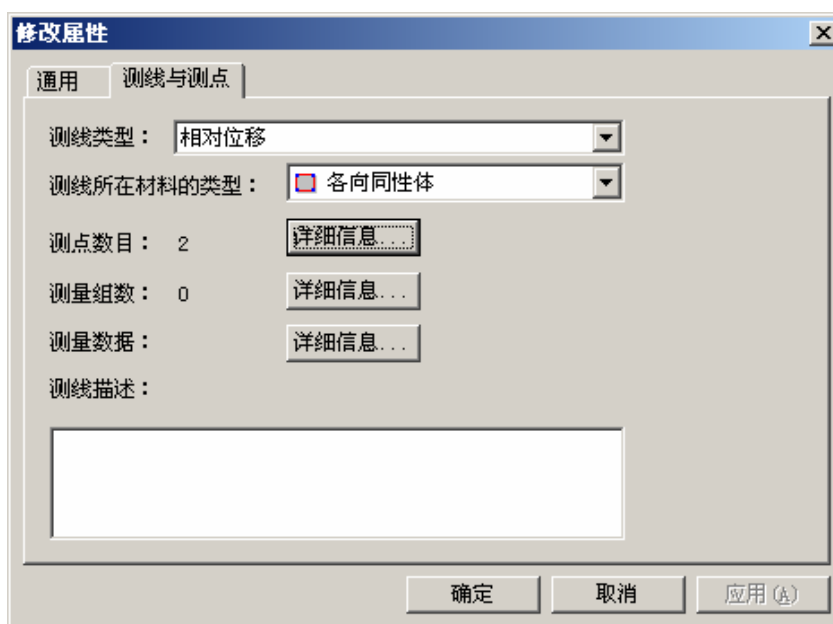


图 7.19 测线属性修改

单击测量组数，详细信息，弹出如下图 7.20 对话框。选中施工步 1 添加到当前测量组。



图 7.20 测量组添加

单击测量数据，详细信息，弹出如下对话框。

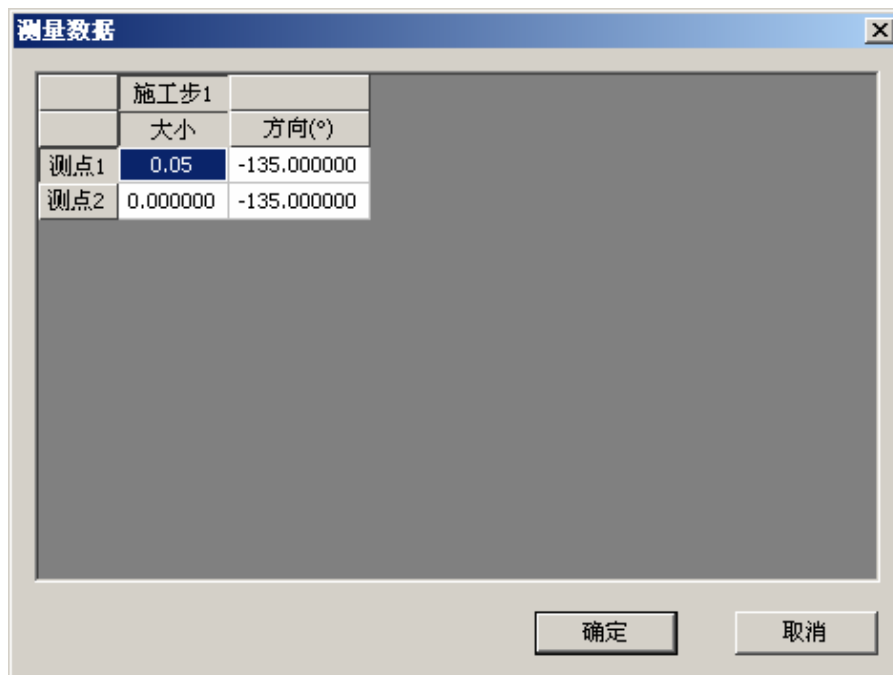


图 7.21 测量数据输入

在测点 1 处输入量测信息为收缩 0.05m。

选中测线 2 与测线 3 重复上述步骤，修改测线信息。测线 2 收缩 0.05m，测线 3 收缩 0.08m。保存文件。

H. 定义反分析起始步与终止步

单击 反分析——反分析起始步与终止步。

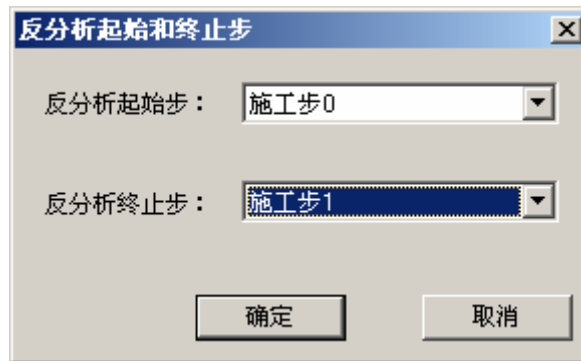


图 7.22 起始及终止步设置

I. 反分析控制

定义反分析目标为地层的弹性模量 E。

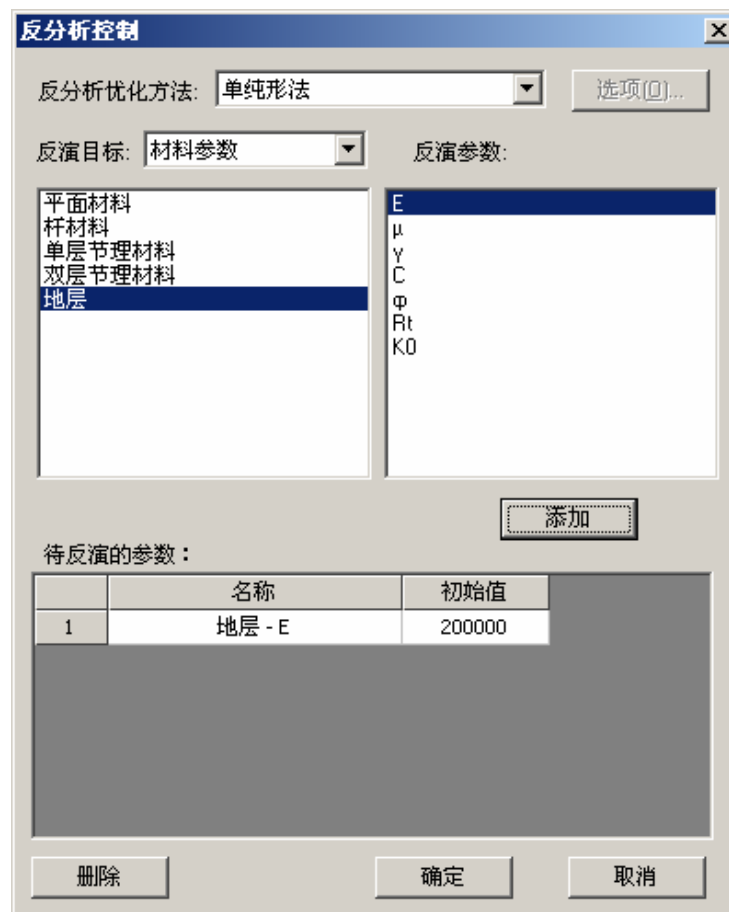


图 7.23 反分析控制

J. 反分析求解

单击网格 - 全自动生成网格。

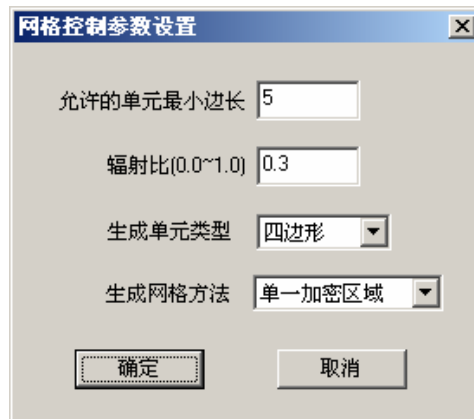


图 7.24 网格生成

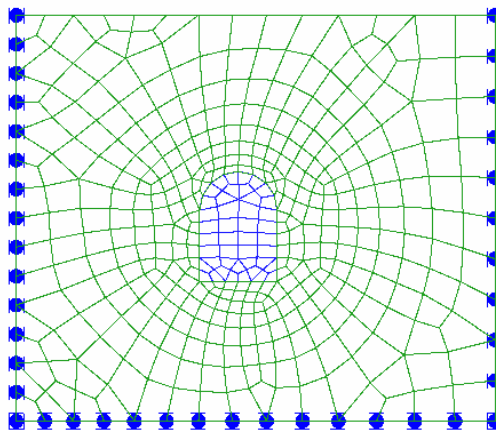


图 7.25 计算模型

单击反分析 - 反分析求解。出现反分析求解过程跟踪图，

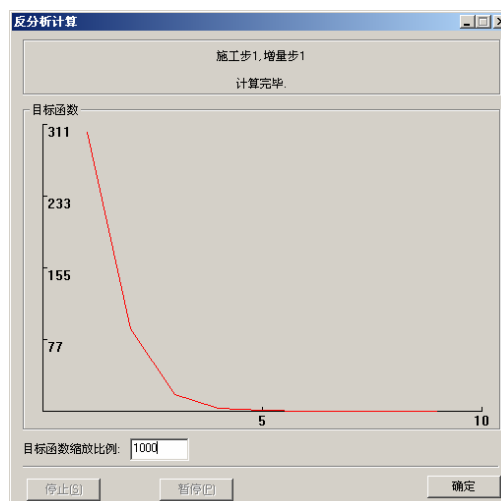


图 7.26 过程跟踪图

反分析跟踪图与所选的优化分析方法密切相关。跟踪图会因所选的分析方法而不同。

K. 查看计算结果

计算完毕后在命令窗口，可以看到反分析的结果。

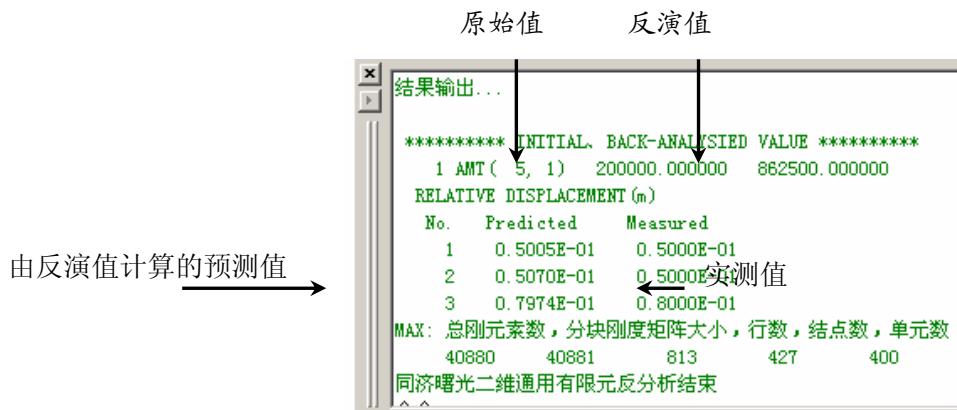


图 7.27 计算结果

7.3 连拱隧道开挖分析

问题描述:

连拱隧道的开挖,隧道的断面如图所示,计算建模采用 DXF 导入的模式.材料的参数如下:

强风化混合岩—— $E = 9e4kPa$, $\mu = 0.29$, $\gamma = -19kN/m^3$, $C = 80kPa$, $\phi = 28^\circ$

中风化混合岩—— $E = 1.0e4kPa$, $\mu = 0.35$, $\gamma = -25.3kN/m^3$, $C = 200kPa$, $\phi = 36^\circ$

微风化混合岩—— $E = 4.5e5kPa$, $\mu = 0.21$, $\gamma = -27.1kN/m^3$, $C = 500kPa$, $\phi = 50^\circ$

C20 喷混凝土——材料类型为直梁 (壳), 材料参数为 $E = 2.8e7kPa$, $A = 0.25m^2$, $\gamma = -25.0kN/m^3$, $I = 0.0013m^4$.

C25 二次衬砌——材料类型为直梁 (壳), 材料参数为 $E = 2.95e7kPa$, $A = 0.045m^2$, $\gamma = -23.0kN/m^3$, $I = 0.0076 m^4$.

锚杆——材料类型为杆 $E = 2.1e8kPa$, $A = 0.0005m^2$, $\gamma = -77kN/m^3$

中隔墙—— $E = 2.85e7kPa$, $\mu = 0.4$, $\gamma = -25.3kN/m^3$, $C = 1900kPa$, $\phi = 55^\circ$

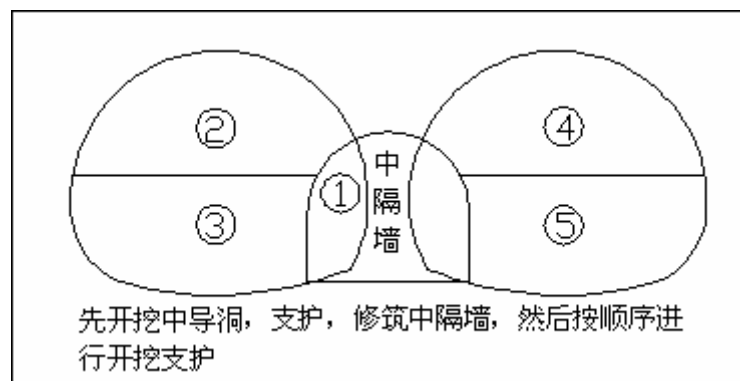


图 7.28 连拱隧道断面图

解题步骤:

1. CAD 建模

在 CAD 中将隧道断面画好, 注意几个问题:

- (1) 在同一位置不允许有重复的线。
- (2) 不要在线与线相交的地方短的线

段,如右图所示。因为在寻找封闭面之后,相交的线在交汇处会被打断,就会出现较短的线段,这会影响后续步骤中网格剖分,使得出现畸形网格的可能性加大。

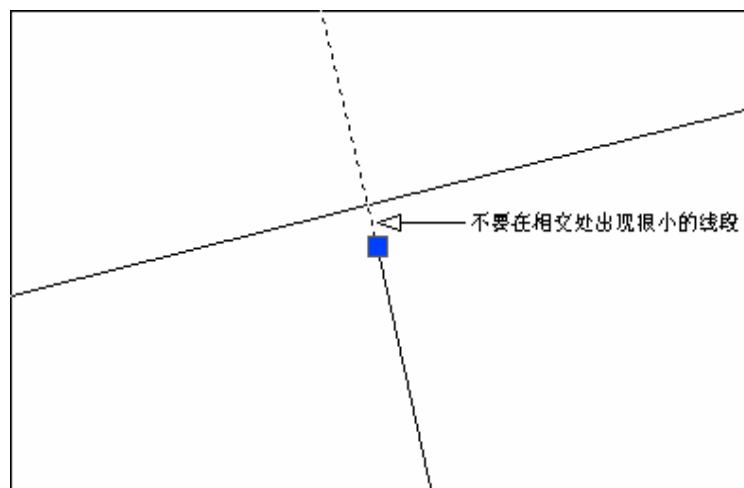



图 7.29 防止出现小线段

- (3) 注意单位一致性。

曙光平台上的 1 代表的距离单位为 1m,所以在 CAD 中的模型也要与之对应,即 1 就是 1m。如果不是的话就通过比例缩放进行调整。

2. 定义材料

- (1) 从〈对象数值方法 M〉菜单中选择〈材料 (M)〉(或者从属性工具栏中单击 )。
- (2) 默认的有三种材料:〈平面材料〉,〈杆材料〉和〈节理材料〉。可以将〈杆材料〉和〈节理材料〉删除,然后单击〈添加〉按钮定义自己模型所需的材料名称和类型以及材料属性,如图 7.30 所示。

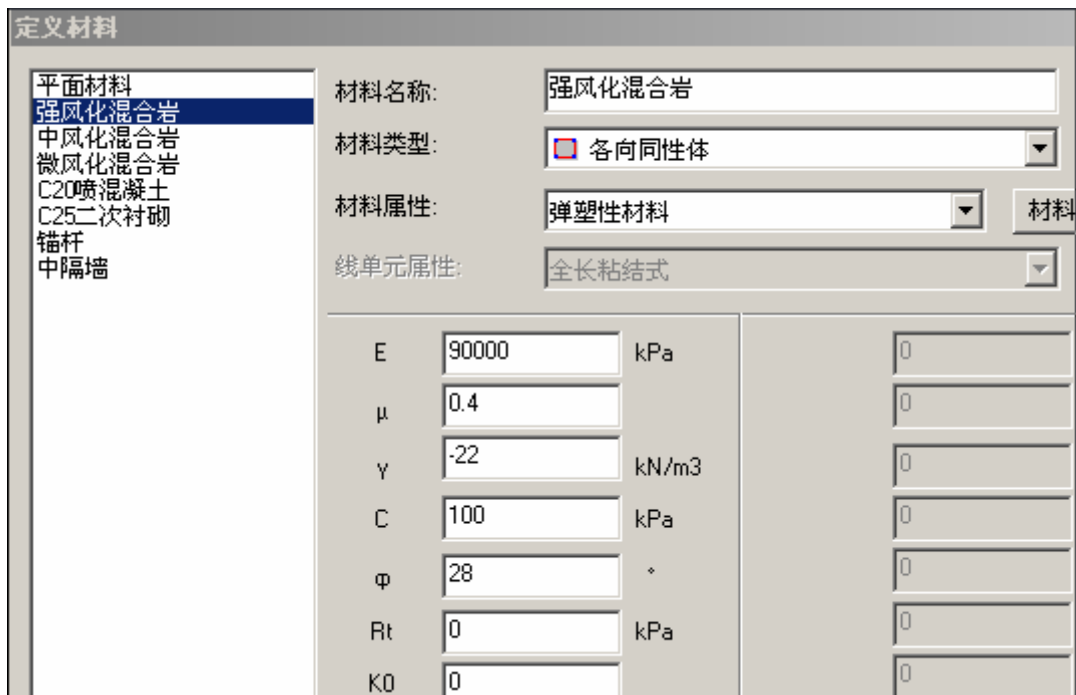
提示:

(1) 在定义材料对话框中,,建议用户保留〈平面材料〉,因为从 CAD 中导入的线段的属性默认为平面材料了,这样不容易出错。

(2) 材料的参数要按实际情况赋予相应的数据,否则会导致**计算无法进行或出现错误的结果**。

(3) 材料被使用后,不应将其从材料库中删除,同时,材料定义表中,该材料以上的所有材料也不能被删除,否则将会出现错误。


(4) 材料表中的材料可以用〈保存〉将每个材料保存在指定的文件夹,这样在做多方案比较须建立多个模型时可以直接〈载入〉而不必再重复输入各个材料。



7.30 定义材料

3. 设置施工步

本算例设置 5 个施工步，具体方法如下：

从〈格式 (0)〉菜单中选择〈施工步 (S)〉，或从属性工具栏中单击 。

在弹出的对话框中，总施工步数 9，默认增量步 3。单击〈确定〉按钮返回程序中。

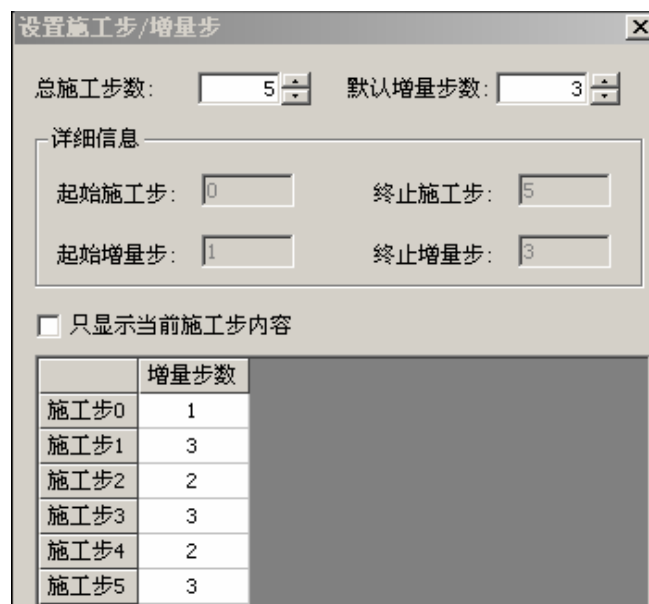


图 7.31 设置施工步

4. 在曙光平台中导入 DXF

选择菜单栏〈文件〉中的〈导入〉〈导入 DXF 文件〉，如下图所示。

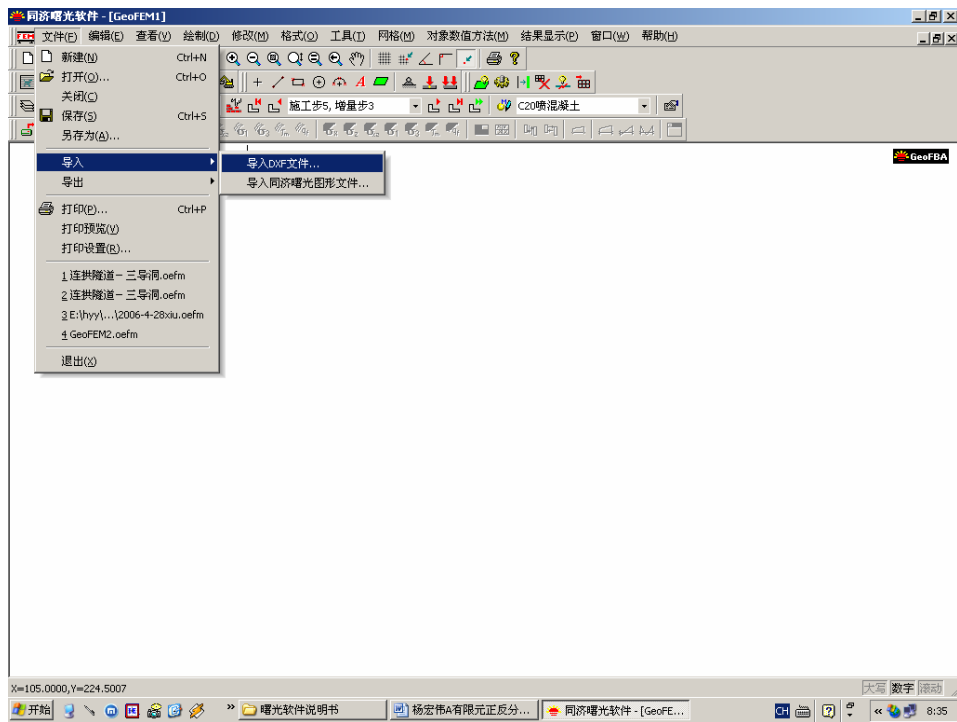


图 7.32 导入 DXF 图形

屏幕跳出一个窗口，如下图所示，选择要导入的 DXF 文件，并<打开>:

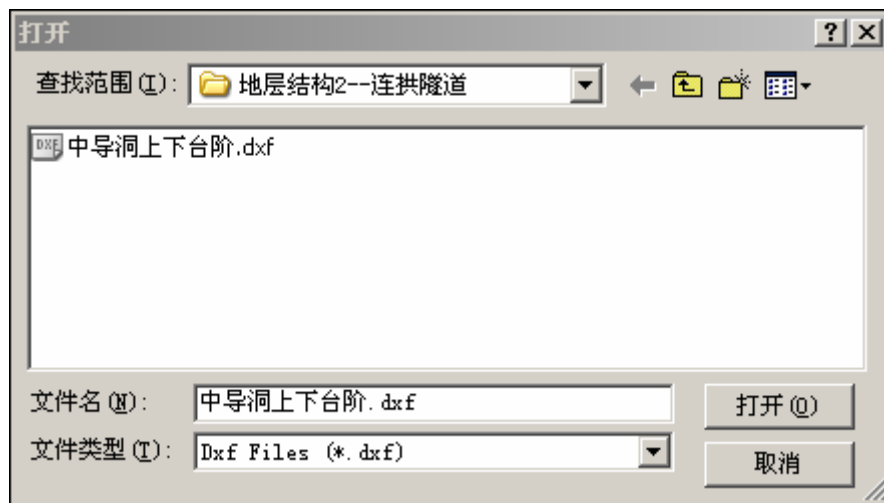


图 7.33 选择 DXF

然后选择<查看>中的<缩放至全图 X>，如下图所示。

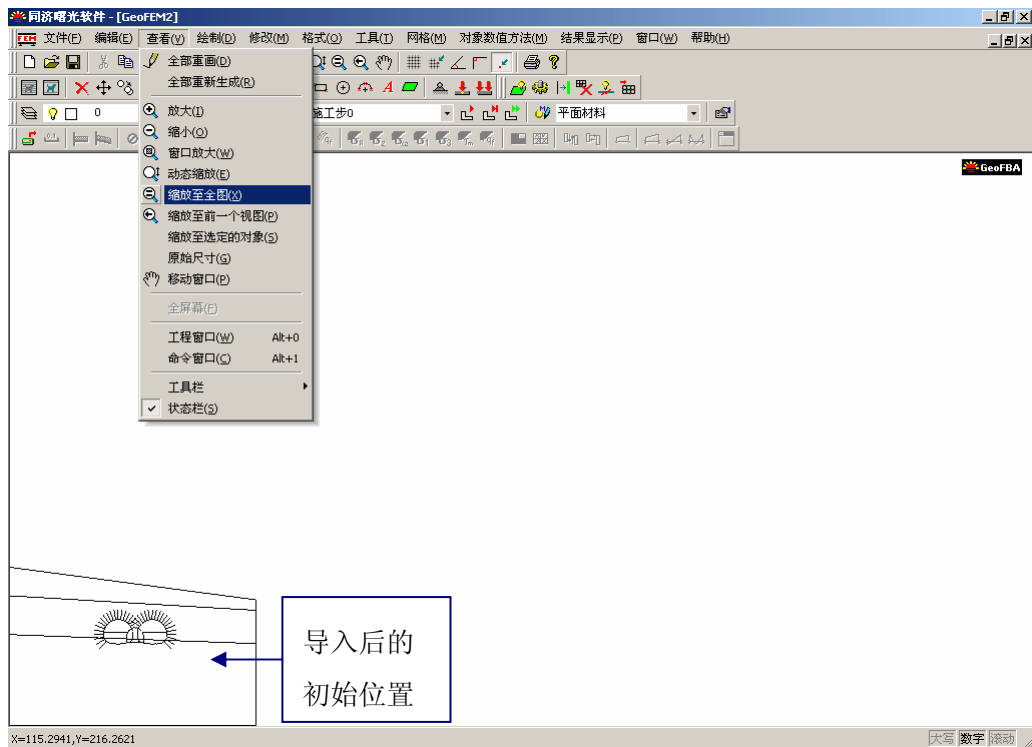


图 7.34 选择缩放命令

则可得到下图所示:

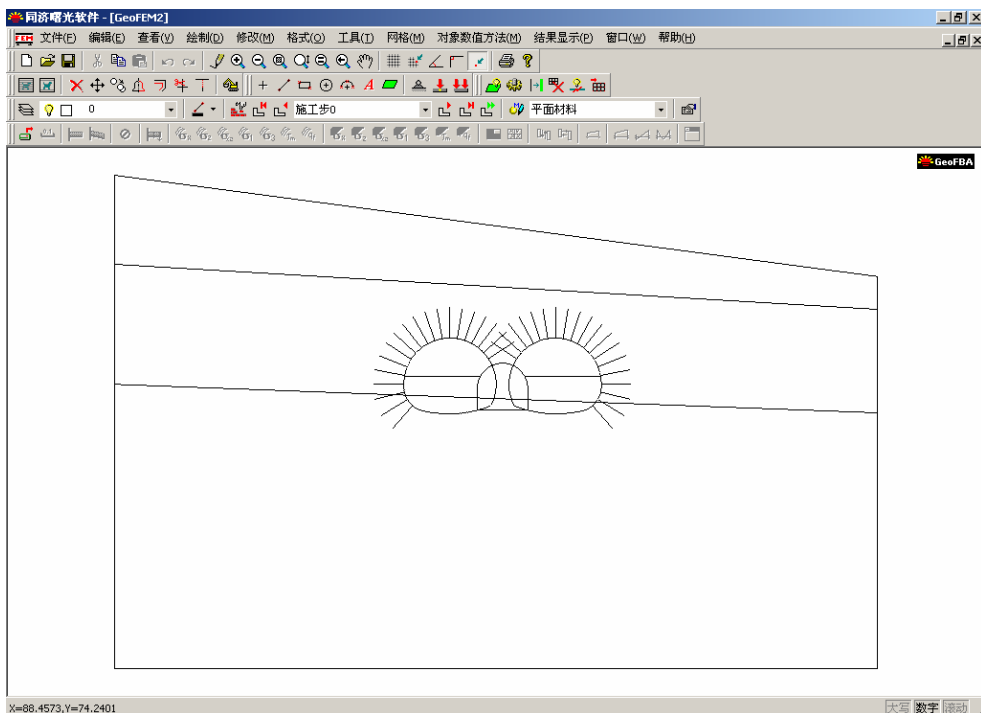


图 7.35 缩放 DXF 至全图

5. 曲线误差调整

将图形导入曙光软件后，一般先要进行曲线误差调整，这样会避免出现靠的太近的点使得寻找封闭面失败。

单击菜单栏<网格> <曲线误差调整>, 如下图所示,

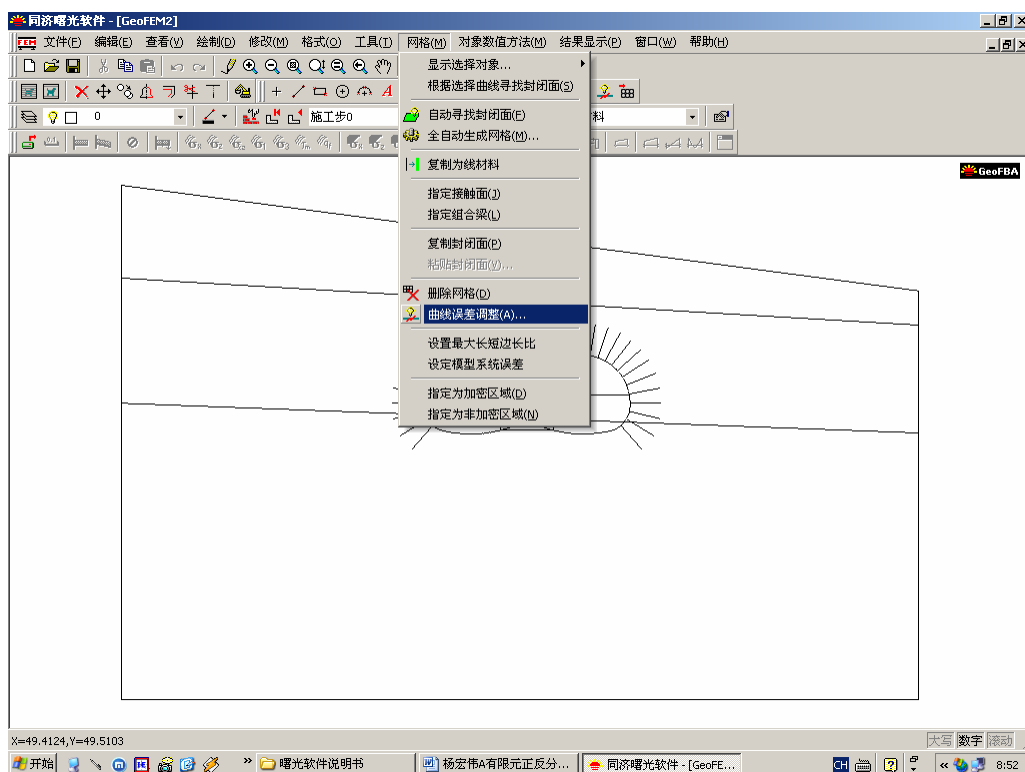


图 7.36 曲线误差调整

屏幕跳出一个窗口, 如下图所示, 调整为 0.01:

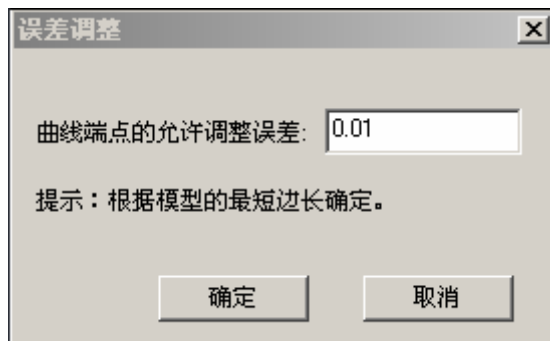



图 7.37 误差调整

6. 赋予锚杆材料属性

接下来, 将模型中的锚杆赋予其属性, 并对应到相应的施工步去。具体操作如下:

先选中锚杆然后单击  修改其属性, 改变其起始步和类型, 然后确定。

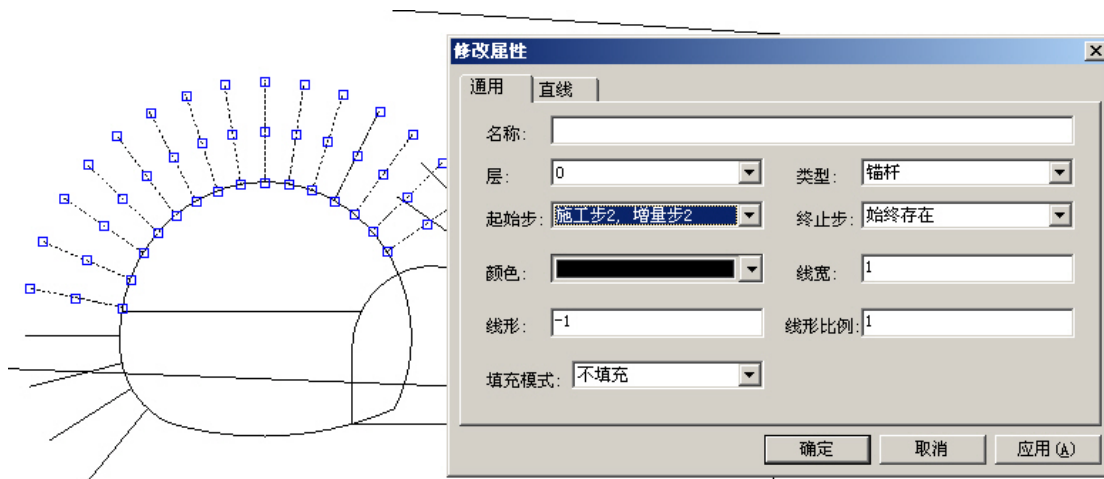


图 7.38 赋与锚杆材料属性

重复上述操作，将所有的锚杆赋予其锚杆的属性对应到相应的施工步中。然后回到施工步 0，此时的模型如下图所示。

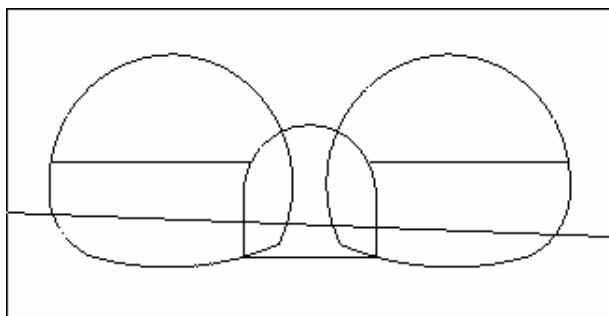



图 7.39 初始状态

7. 寻找封闭面

点击  (或从<网格>下拉菜单中点击<寻找封闭面>)

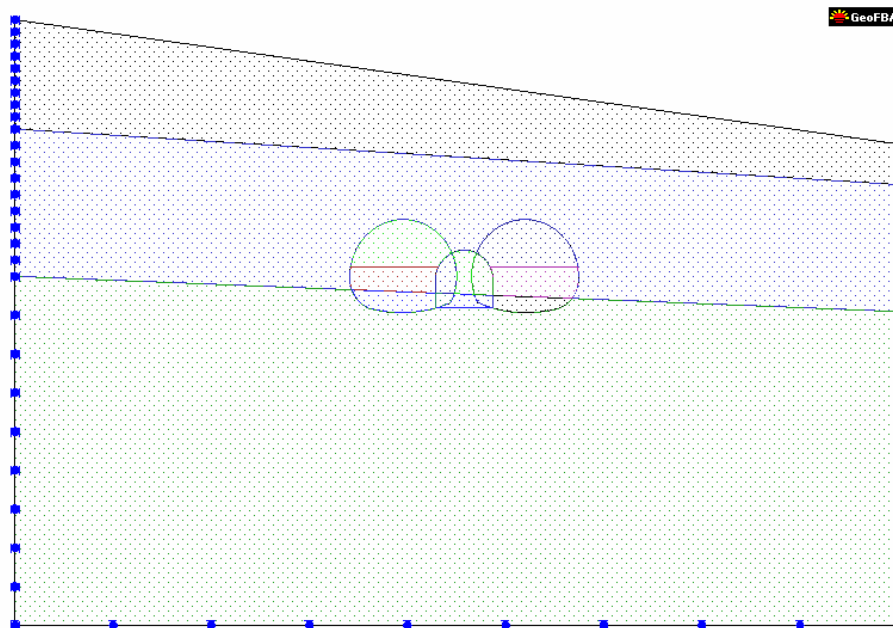
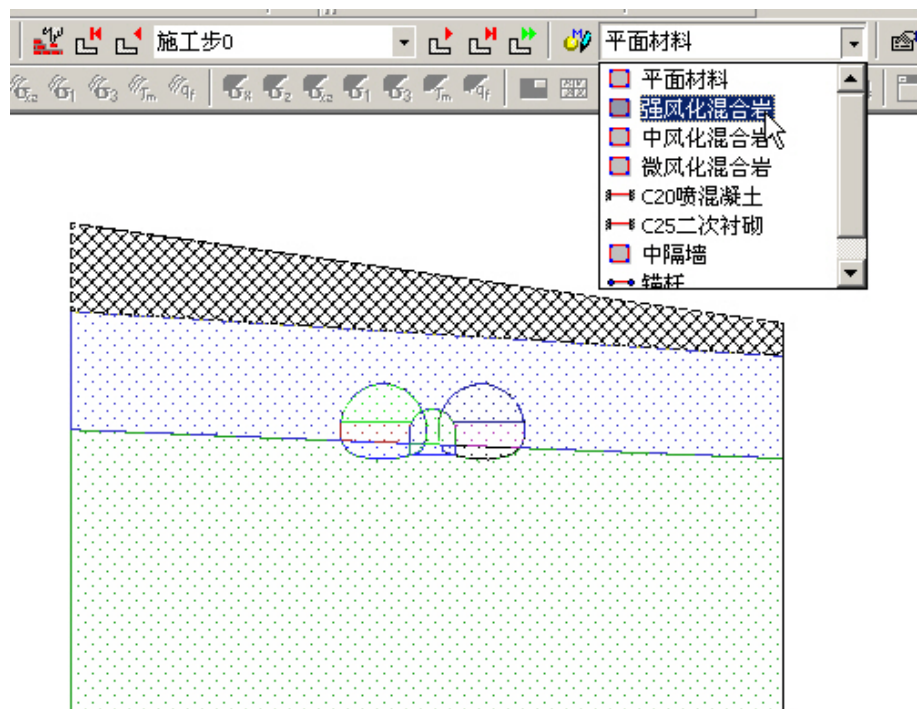


图 7.40 生成封闭面

8. 赋予土层材料属性


完成封闭面寻找之后就要给封闭面赋予材料类型，点击选中封闭面，然后点材料下拉菜单，给选中的封闭面赋予相应的属性。



7.41 赋与土体材料属性

9. 设定边界条件

本例中我们将在模型两侧及底边施加约束条件

① 选择<绘制>菜单中<位移约束>（或从工具栏中单击），然后单击两侧边界线,如下图所示

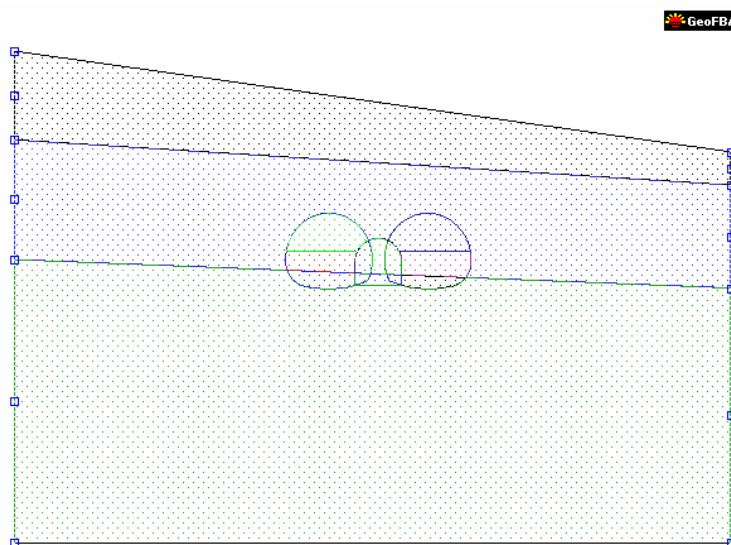


图 7.42 图选择两侧边界线

然后回车或者点右键，跳出如下窗口：

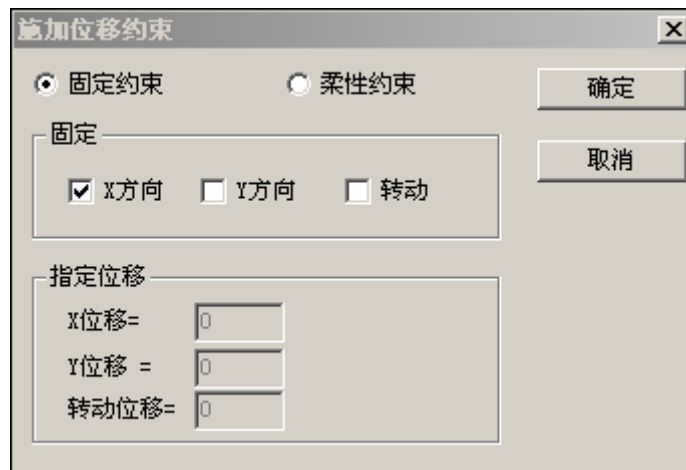


图 7.43 约束 X 方向位移

对两侧我们选择约束 X 方向位移,然后按确定。

② 同样鼠标框选或点选底边的边界线,我们约束 Y 方向位移,如下图所示。

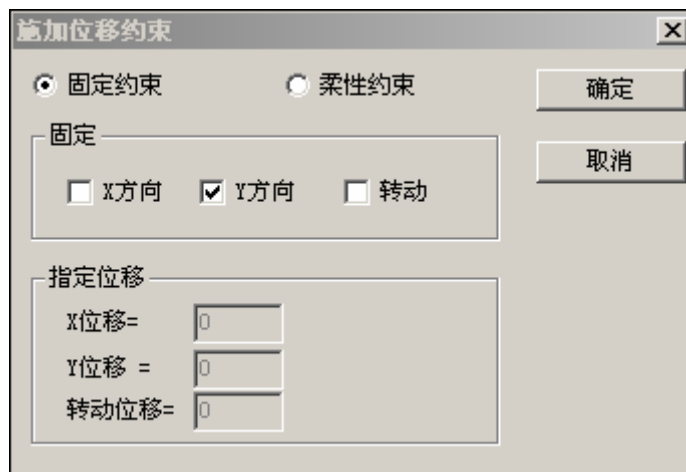


图 7.44 约束 Y 方向位移

③ 边界条件施加完成后,在<格式>下拉菜单,点击<边界条件(B)>出现右图所示的对话框,可以设定边界显示的大小,使得边界条件以合适的大小显示,图面看上去比较漂亮。

提示:


边界条件应当在初始步施加,否则无法约束模型初始步的刚体位移,从而造成求解结果不正确。


10. 施工步 1

锚固、喷层和衬砌的模拟要对应到相应的施工步中。通常一个施工步分两个增量步(也有更多的情况,视具体情况而定)增量步 1 进行开挖,增量步 2 进行支护。

(1) 断面开挖。



单击  按钮,切换至施工步 1,增量步 1。

用鼠标选择上图所示的需要挖去的封闭面,单击工具栏上的  按钮,挖去选中的封闭面,如

下图所示。

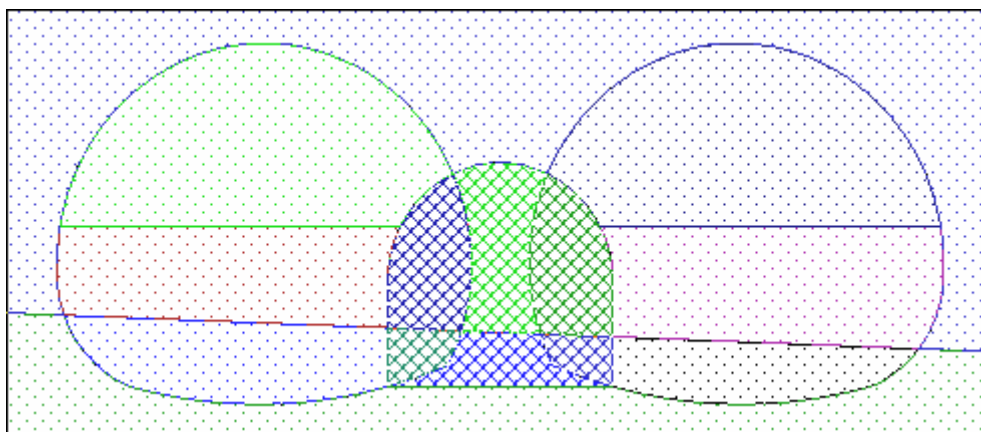


图 7.45 断面开挖

(2) 喷射混凝土支护。

单击下一施工步，切换至施工步 1，增量步 2，进行喷射混凝土支护。

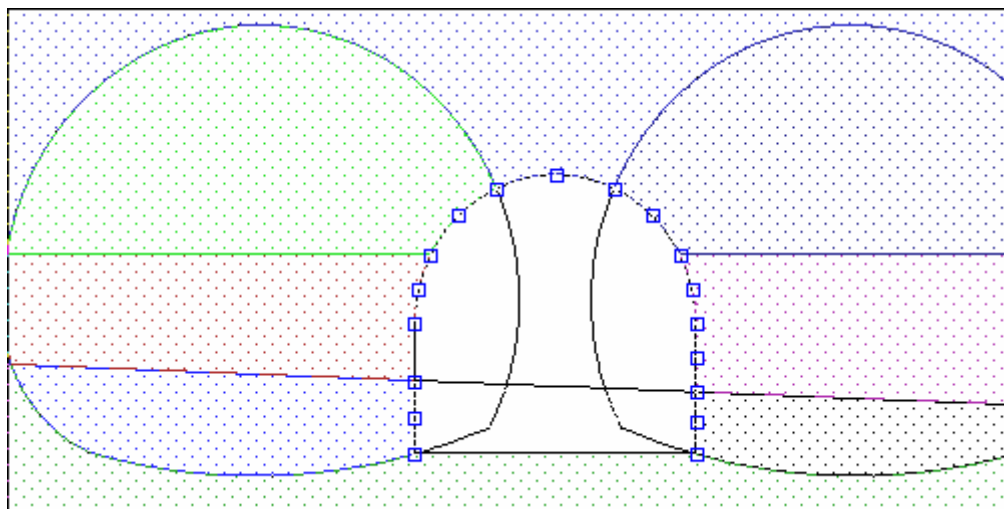



图 7.46 复制线性材料

选中喷层所在的线，如上图所示，然后单击  (复制为线材料命令) 在出现的选择材料对话框中选择<C20 喷射混凝土>。

提示：在这一步操作中，选择喷层所在的线的时候，常常会不小心将周围的封闭面选中，此时只要按住 ctrl 键，用鼠标选中多选的对象（左键单击），就可以将多选的对象从选择集合中去除。

(3) 中隔墙回填。

单击下一施工步，切换至施工步 1，增量步 3。

具体操作如下：

回到施工步 0，点击中隔墙所在的封闭面，如下图。

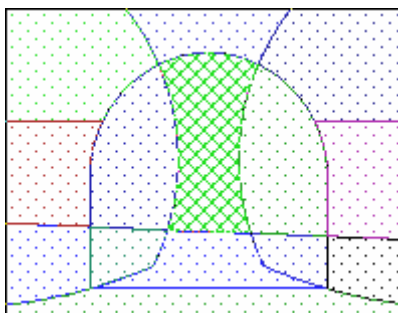


图 7.47 复制封闭面

在网格下拉菜单下点击〈复制封闭面〉，然后切换施工步到 1.3，点击网格下拉菜单下的〈粘贴封闭面〉，在出现的对话框中选择〈中隔墙〉，点确定，得到如下图所示。

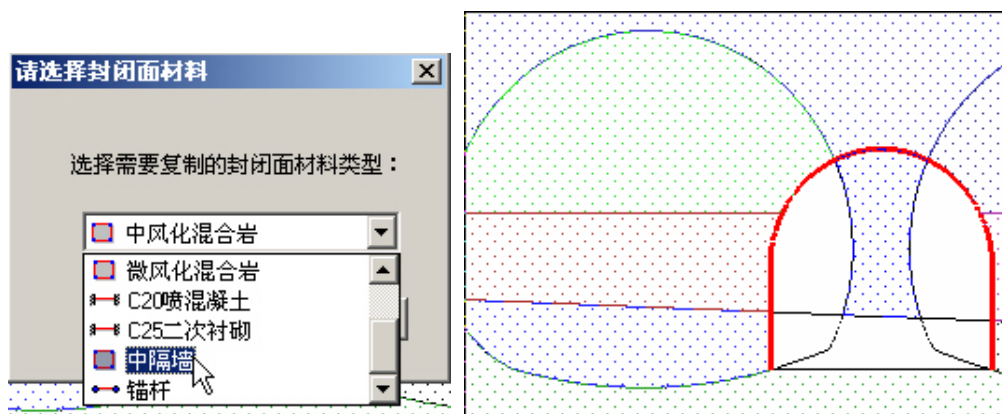


图 7.48 中隔墙粘贴

提示：需要说明的是，复制、粘贴封闭面一次只能对一个封闭面进行操作，因为本例中隔墙由两个封闭面组成，所以需操作两次，完成中隔墙回填后如下图所示：

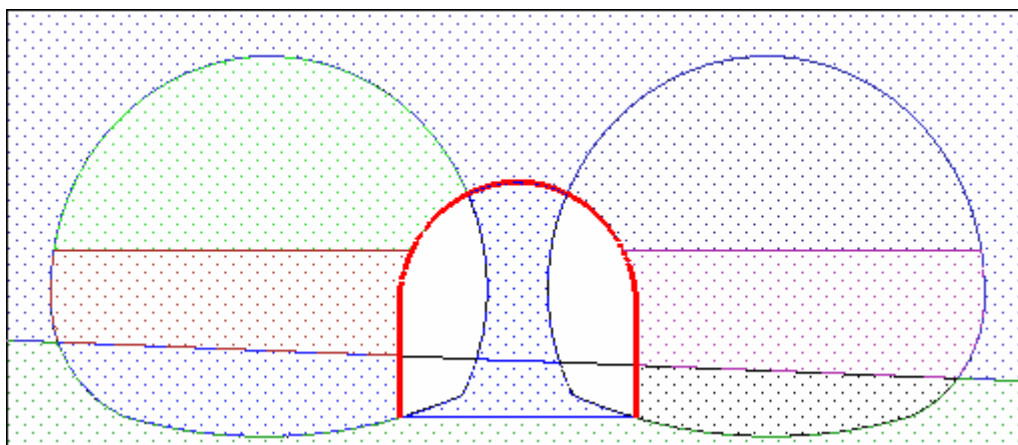


图 7.49 中隔墙显示

11. 施工步 2

(1) 左洞上半断面开挖

切换到施工步 2.1，进行左洞上台阶的开挖，如图 7.50，开挖操作同前所述。

(2) 左洞上半断面喷射混凝土

切换到施工步 2.2，进行左洞上台阶的初期支护，如图 7.51，初期支护施加同前面一致。

12. 施工步 3

(1) 左洞下半断面开挖

切换到施工步 3.1, 进行左洞上台阶的开挖, 如图 7.52, 开挖操作同前所述。

(2) 左洞下半台阶初期支护

切换到施工步 3.2, 进行左洞上台阶的初期支护, 如图 7.53, 初期支护施加同前面一致。

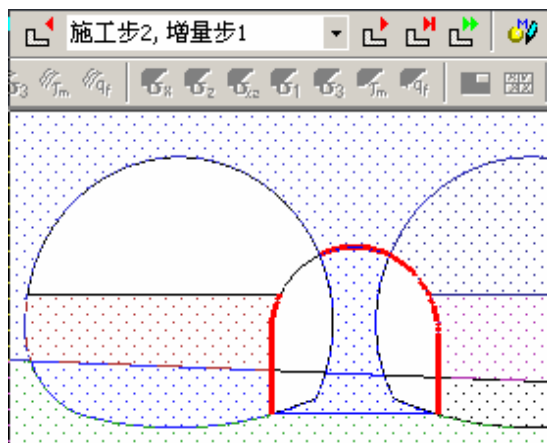


图 7.50 左洞上半断面开挖

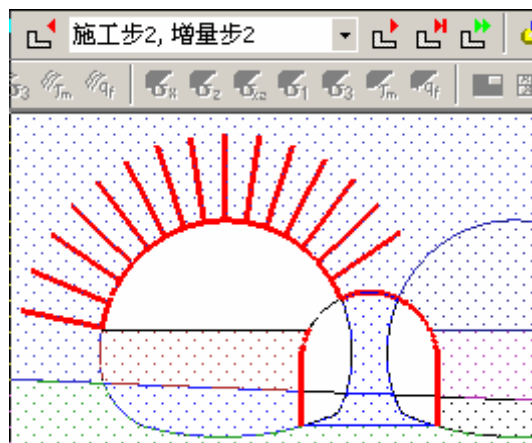


图 7.51 左洞上半台阶初期支护

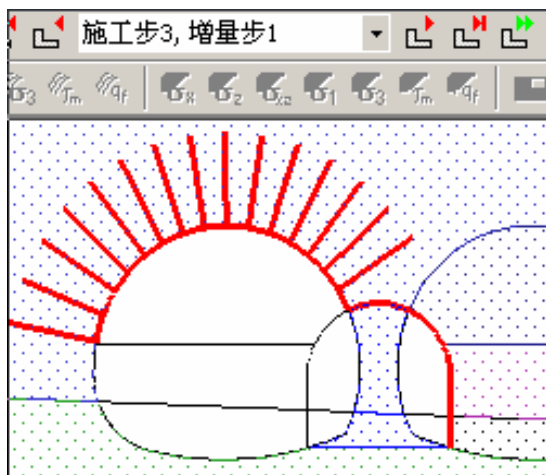


图 7.52 左洞下半断面开挖

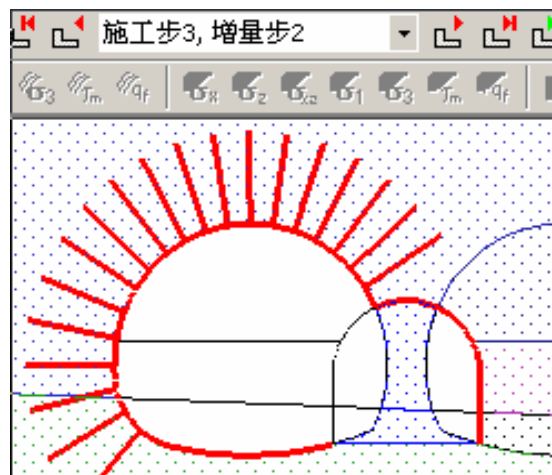


图 7.53 左洞下半台阶初期支护

(3) 左洞二衬施作

切换到施工步 3.3

① 点击网格下拉菜单的<指定组合梁>命令 (注意命令窗口的提示)

② 命令窗口弹出的第一个提示: <选择要施加组合梁的参考结构>, 单击初期支护

③ 命令窗口又弹出一个提示: <指定组合梁位于结构的哪一侧>, 鼠标点击初期支护内侧

④ 命令窗口又弹出一个提示: <组合梁之间是否有接触面 Yes/ <NO>>, 在命令窗口输入 N

⑤ 屏幕弹出一个窗口, 如图 7.54 所示, 选择<C25 二次衬砌>, 点击确定, 则二次支护施加完毕, 如图 7.55 所示。

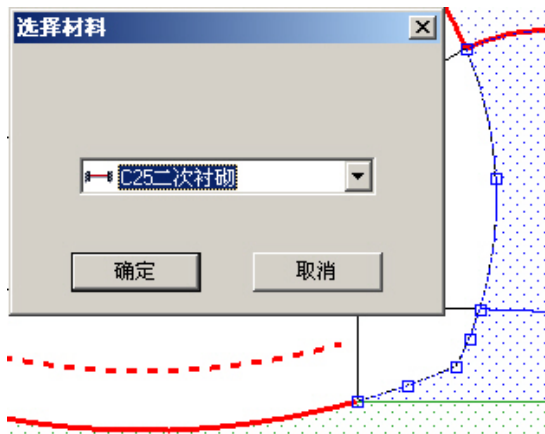


图 7.54 二次衬砌施加

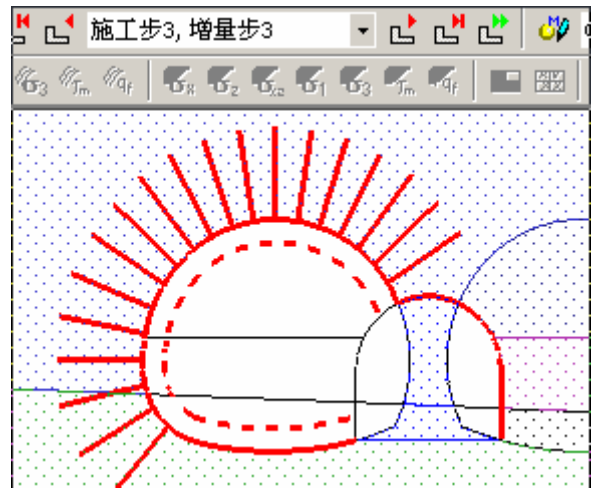



图 7.55 组合梁

⑥ 中隔墙位置的二衬通过命令  来完成。

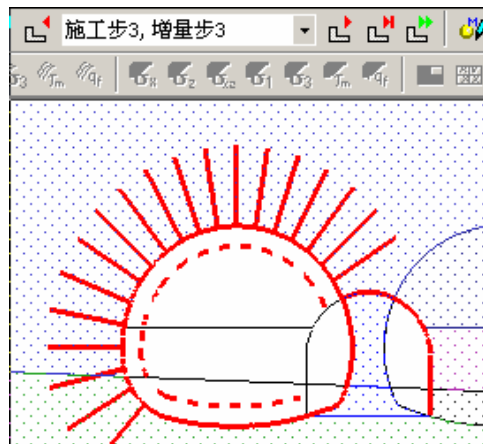


图 7.56 中隔墙二次衬砌生成

至此，左洞的开挖和支护完成。

13. 右洞开挖及支护

同样，右洞开挖和支护同左洞类似，这里不再赘述。各个步骤可参考以下各图。

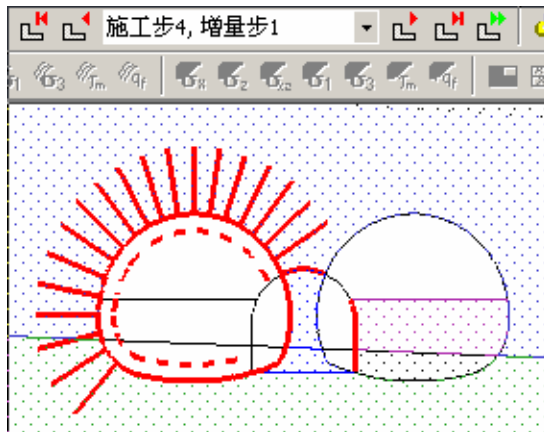


图 7.57 右洞上半台阶开挖

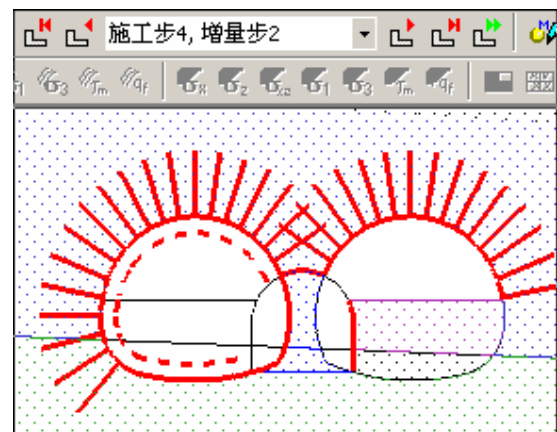


图 7.58 右洞上半台阶初期支护施作

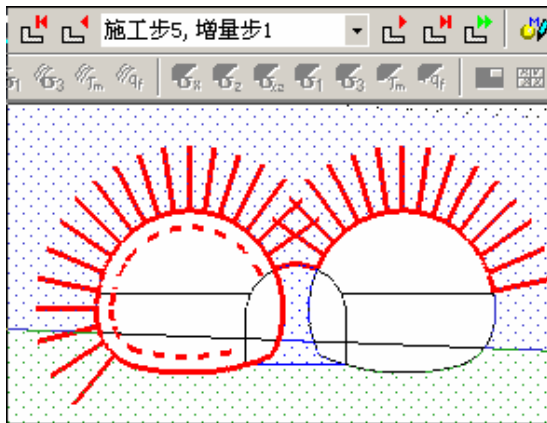


图 7.59 右洞下半台阶开挖

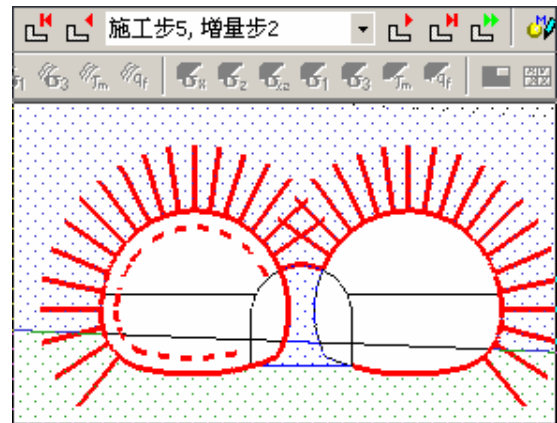


图 7.60 右洞下半台阶初期支护施作

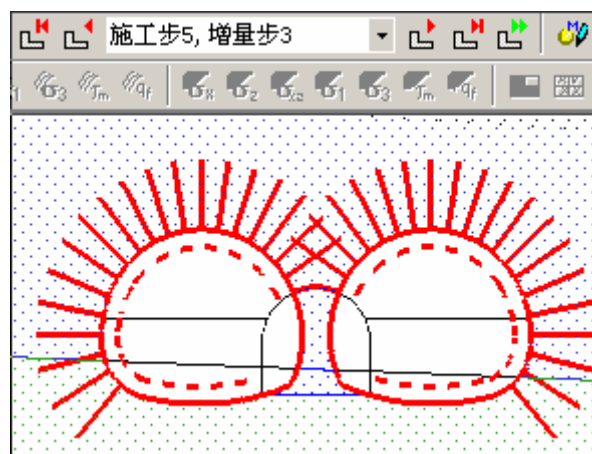




图 7.61 右洞二次衬砌施作


14. 检查模型

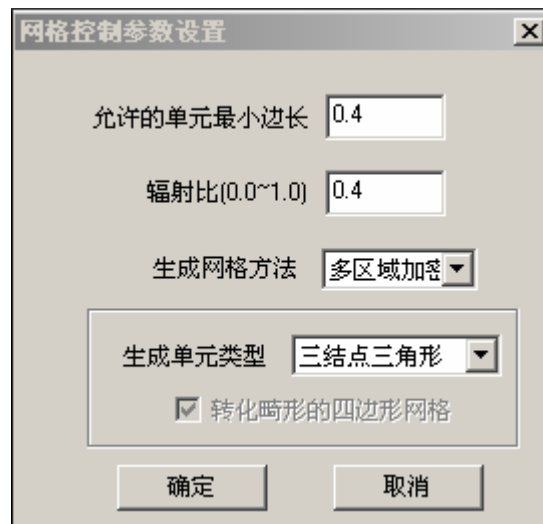
- (1) 回到初始施工步 0, 点击  (下一施工步) 按钮, 逐一检查每个施工步的操作, 看是否有遗漏或错误的操作。此外, 在“工程窗口”的“绘图设计树”中也可以查看每一施工步所做的操作。
- (2) 如有需要修改的对象, 就选中然后单击 , 对其属性进行修改, 比如起始步、终止步以及材料类型等进行修改。

提示:

- 如果出现对象属性被锁定, 不能修改的情况, 那么一定是存在跟被锁定对象关联的对象, 二者之间有依存关系, 须先删除依附于其上的对象, 才能对其进行改变属性或者删除的操作。

15. 全自动生成网格

- (1) <网格>菜单中选择<全自动生成网格>命令, 或在工具栏上单击  按钮, 弹出如下对话框
- (2) 设定<允许的最小单元边长>、<辐射比>、<生成网格方法>和<单元类型>等参数, 如下图所示。



7.62 网格控制参数设置

(3) 点击确定，生成有限元计算模型如 7.63 所示

提示：

- 根据实际模型大小,确定合适的<允许的最小单元边长>、<辐射比>,对一般的隧洞,在模型不太大的情况下 <允许的最小单元边长>一般可取为 0.5m 左右,<辐射比>可在 0.5~0.9 之间选择(辐射比越大网格由里向外发散的越快,网格和节点数目越少,但太大的辐射比会造成生成网格失败)
- 如果不能生成网格则会出现提示说明网格生成失败的原因,可以根据提示来查找问题。
- 四节点的四边形单元计算精度要比三结点三角形的要高,但某些情况下(如建模时存在过小线段)不能生成满意的四边形网格(诸如会出现网格畸形等问题),此时可尝试换用三角形网格进行剖分单元。

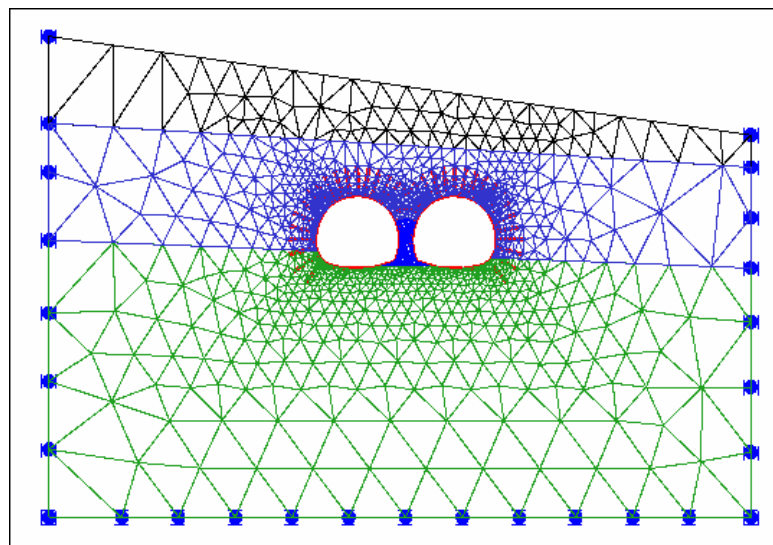


图 7.63 有限元计算模型

16. 分析求解

选择菜单栏<对象数值方法>中的<分析求解>进行计算。

如果在分析求解这一步碰到问题，请看出现的对话框和命令栏的提示，对照找出问题所在。

17. 查看计算结果

当模型计算完成之后，后处理工具菜单会自动弹出，此时就可以利用后处理功能查看及分析结果，下图是对后处理工具条的介绍。

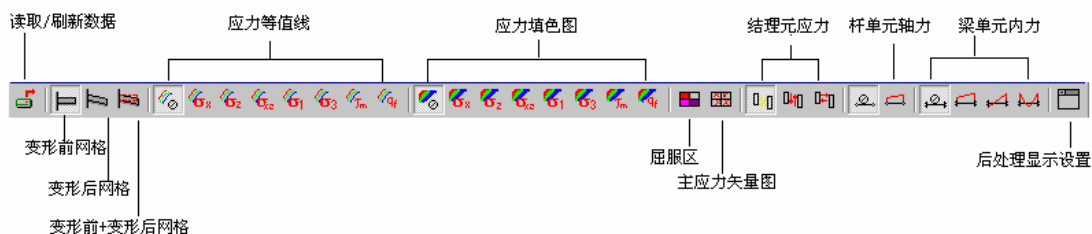
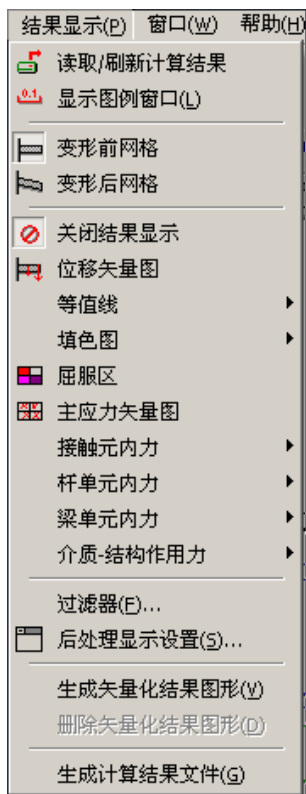


图 7.64 后处理显示

(1) 曙光后处理输出单位如下表所示

名称	单位
位移	m
轴力	kN
剪力	kN
弯矩	kN.m
应力	kPa

(2) 过滤器对话框可以对显示进行控制，通过点击图 7.60 中的 就可根据用户的需要选择要显示的对象。



<结果显示>下拉菜单

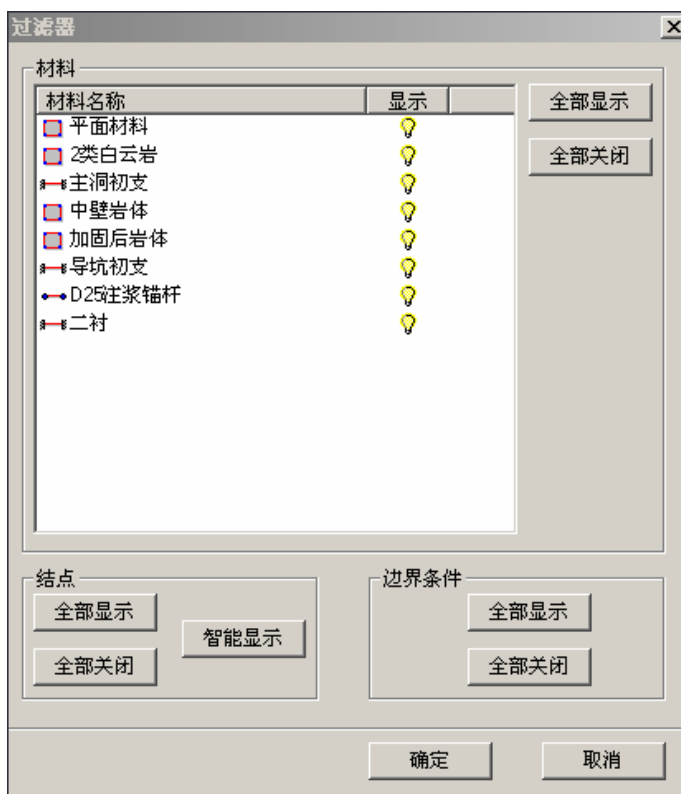


图 7.65 过滤器

(3) 具体查看单元信息时,可将鼠标停留在该单元处时,就可以显示出光标处对象的信息。

提示:

➤ 背景颜色及小数点位设置

此时选择<格式>菜单中的<设置>, 在设置对话框中可以设定背景颜色和小数点显示位数, 如下图所示。

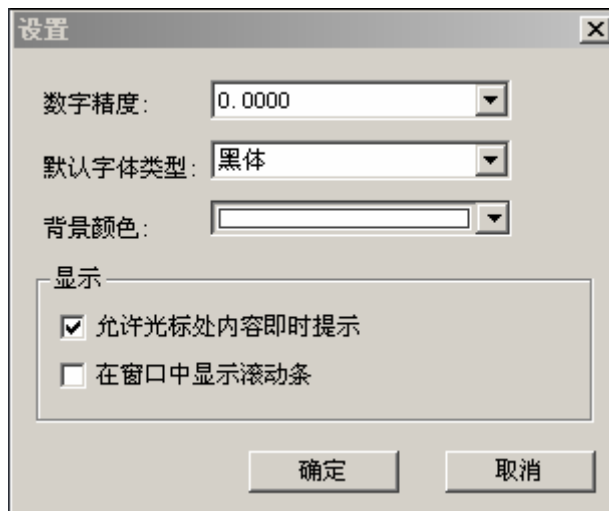


图 7.66 显示设置

➤ 选择合适的结果显示比例和颜色

合适的结果显示比例和颜色也是比较重要的。从<结果显示>菜单中选择<后处理显示设置>, 从中可以设定结果显示比例和颜色。其中包括位移显示比例的设置、位移显示的颜色、内力显示比例和颜色等。

➤ 图形显示结果的保存一般有三种方式

- ① 同济曙光软件中的当前窗口显示结果可以通过<文件>菜单中的<导出->导出为 BMP 图像>存成一个 Windows 的标准 BMP 文件。
- ② 在曙光软件中当用户选择<编辑>菜单中<复制>命令
- ③ 按下 **CTRL+C** 时, 就将当前窗口显示结果自动放在 Windows 的粘贴板上, 此时在其它程序(例如 Word 软件中)中只要选择粘贴命令, 就可以自动将结果图形放入其中。

➤ 生成结果计算文件

- ① 选择<工具>菜单中<图形/有限元对象显示切换>, 则模型如下图所示。

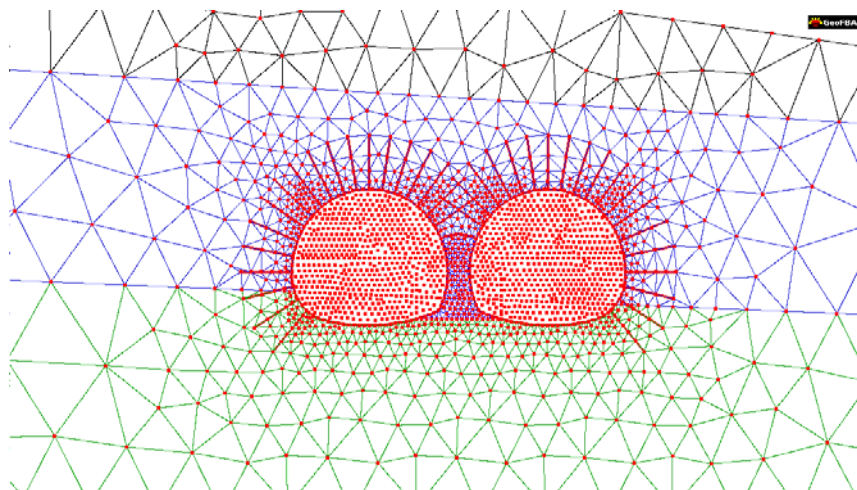


图 7.67 图形/有限元对象显示切换

- ② 框选整个有限元模型。
- ③ 选择<结果显示>菜单中的<生成计算结果文件>，跳出窗口如图 7.68 所示，选择<纯文本格式>即生成计算结果文件。



图 7.68 输出文本格式

7.4 设计建议及常用问题解答

7.4.1 导入 DXF 图形的绘制要求

对于导入的 DXF 文件，有如下要求：

- (1) 图层：第 0 层；
- (2) 图层颜色：白色（背景颜色为黑色）；
- (3) 没有亮点，亮点包括点、细微线段（离散后）；
- (4) 不支持多义线；
- (5) 闭合圆不支持，需要分为两半或者细分。

7.4.2 可能出现的错误及注意事项

- 1、如果用菜单<文件>→<导入>→<导入 DXF 文件...>导入 dxf 格式的图形文件，则需要用<网格>菜单的<曲线误差调整>功能对原来绘图过程中可能出现的曲线在端点处的误差进行调整；
- 2、自动寻找封闭面针对的对象是“平面材料”类型的曲线，其它类型的曲线不进入封闭面的寻找，因此需要对图形对象指定各曲线的材料属性，特别是“杆材料”和“节理材料”，否则可能会造成生成**网格失败**或**网格畸形**。
- 3、在生成封闭面后，应用鼠标对封闭面进行点选检查，发现不合格的封闭面或者根本不能生成封闭面，则属于误差控制失败。解决的方法是：在 CAD 图中对出现错误的封闭面上的曲线端点进行微调，以消除可能出现的误差(推荐使用)；或者选择<绘制>菜单中的<面>命令，用手工生成封闭面。
- 4、如果在某步挖去的封闭面，需要在后面的某步重新回填，这是可以使用<网格>菜单中的<复制封闭面>和<粘贴封闭面>功能对该封闭面复制到需要回填的施工步。
- 5、对于绘图窗口的选取的对象，如果由于不小心而多选了自己不想选的对象，按住 ctrl 键再用鼠标单击多选的对象，则可以将这些对象从选择集合中去除。如果要取消全部选中的对象，则只需要按下 ESC 键即可。
- 6、施加集中力时，需要在施加位置用<绘制>菜单中的<点>功能绘制点。如果希望是在网格剖分之后再再在某个单元节点上施加集中力，则需要打开<结果显示>菜单中的<过滤器>功能，选择<结点>-<全部显示>，然后再在节点上施加集中力，施加完毕再关闭结点显示。
- 7、在全自动生成网格过程中出现的警告信息，虽然不一定会影响分析结果，但一定是模型不合理或模型病态才会出现的，应该引起足够的重视。
- 8、曲线的所有端点和交点在全自动生成网格时都会变成有限元的结点，因此必须要对模型中靠得太近的上述端点或交点进行必要的调整，否则会报“网格畸形”的警告信息，并会影响计算结果的精度。
- 9、使用<绘制>菜单中的<单元>命令绘制单元时，要保证单元的结点按逆时针方向。
- 10、自动生成网格时的“单元最小边长”根据模型大小选择，不能小于 0；辐射比的大小最好取为 0~1 之间(推荐值 0.3)，辐射比越大网格由里(加密区域或开挖区域)向外发散得越快，网格和结点数目越少，但太大的辐射比会造成生成网格失败。
- 11、对某些工程模型如果总不能自动生成满意的四边形网格，请用三角形网格进行计算，或用手动功能绘制网格。

联系方式

地址：上海市赤峰路 65 号，同济大学科技园 402，上海同岩土木工程科技有限公司

电话：(021) 65975069, 65975070

传真：(021) 65975068

邮编：200092

网址：[Http://www.tjgeo.com](http://www.tjgeo.com)