

岩土工程有限元分析软件

PLAXIS 3D[®] 2016

案例教程

复杂内支撑基坑开挖支护模拟



北京筑信达工程咨询有限公司
北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层, 100043

版 权

计算机程序 PLAXIS 及全部相关文档都是受专利法和版权法保护的产品。全球范围的所有权属于 Plaxis bv。如果没有 Plaxis 和北京筑信达工程咨询有限公司的预先书面许可，未经许可的程序使用或任何形式的文档复制一律禁止。

更多信息和此文档的副本可从以下获得：

北京筑信达工程咨询有限公司

北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层 100043

电话：86-10-6892 4600

传真：86-10-6892 4600 - 8

电子邮件：support@cisec.cn

网址：www.cisec.cn

目录

1. 模型概况.....	1
2. 几何模型定义.....	2
2.1 模型边界.....	2
2.2 定义土层.....	2
2.3 定义结构单元.....	3
3. 网格划分.....	7
3.1 有限元网格加密.....	7
3.2 有限元网格自动划分和预览.....	7
4. 分步施工定义.....	8
5. 结果查看.....	10
5.1 基坑变形分析.....	10
5.2 支护结构变形及受力分析.....	11

1. 模型概况

随着城市化脚步的加剧，城市空间的高效利用变得越来突出，因此深基坑开挖工程也变得越来越重要。本案例介绍了地下连续墙、支撑用哪些结构单元模拟，基坑开挖过程如何在软件中一步步实现，通过对本案例的学习，读者可以掌握基坑分步开挖施工过程在 PLAXIS 3D 中的模拟方法。

本例中基坑长度为 131.450m，宽度为 59.472m。地基土层由上而下为杂填土、黏土 1、粉砂、黏土 2、粉土，厚度分别为 3m、6m、7m、12m、22m，地下水位在地面以下 9m 处。基坑围护结构采用地下连续墙，基坑中间布置两排对撑支护，角点处布置角撑，支撑结构共三层，每间隔 4m 布置一层。基坑俯视图如图 1 所示，开挖分 3 次进行，每次开挖 4m，冠梁、腰梁、支撑均用梁单元模拟，地下连续墙用板单元模拟，支护结构如图 2 所示。

提示：学习本案例教程之前，需要读者已经掌握 PLAXIS 软件的基本操作。

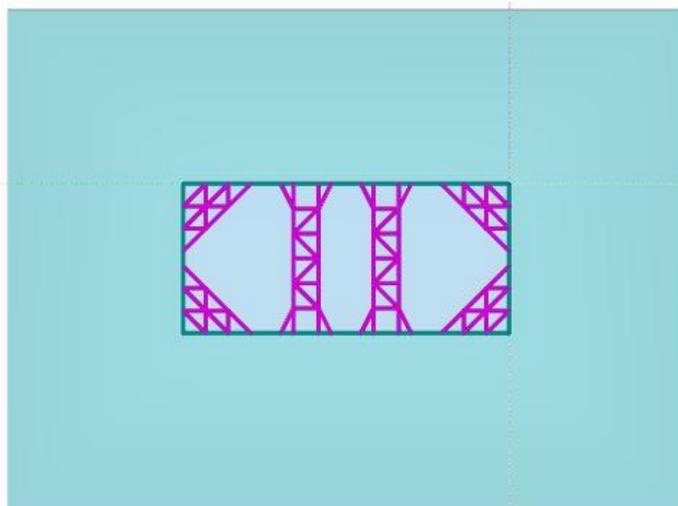


图 1 基坑俯视图

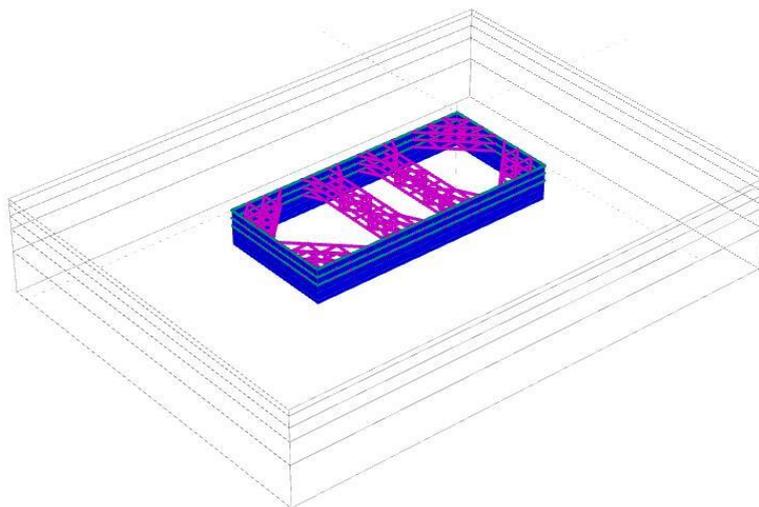


图 2 基坑支护结构

2. 几何模型定义

2.1 模型边界

在项目属性窗口>>模型标签>>模型边界中定义 X 和 Y 方向的边界, $X_{min}=-70$, $X_{max}=130$; $Y_{min}=-200$, $Y_{max}=70$ 。

2.2 定义土层

- 在 $x=0$, $y=0$ 的位置处创建钻孔, 如图 3 在修改土层对话框中定义水头高度 $h=-9$ 。添加五层土层并创建土层材料, 土层分布情况见表 1, 土层材料属性见表 2。

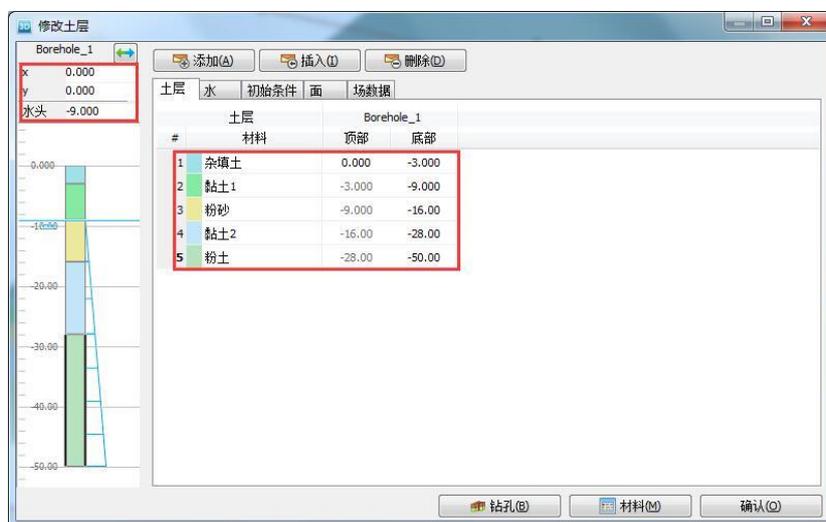


图 3 定义地层钻孔

表 1 土层分布

杂填土	0	-3
黏土 1	-3	-9
粉砂	-9	-16
黏土 2	-16	-28
粉土	-28	-50

表 2 土层材料参数

土类	杂填土	黏土 1	粉砂	黏土 2	粉土	单位
本构模型	HSS	HSS	HSS	HSS	HSS	-
排水类型	排水	排水	排水	排水	排水	-
天然/饱和重度	18.3	19.3	18.8	20.1	18.9	kN/m^3
$E_{50,ref}$	5000	7300	9300	8900	4800	kPa
$E_{oed,ref}$	5000	7300	9300	8900	4800	kPa
$E_{ur,ref}$	20000	20000	27900	26700	19200	kPa
粘聚力	10	32	3	24	13	kPa
内摩擦角	28	22.2	39.8	15.6	23.9	°

剪胀角	0	0	0	0	0	°
$G_{0,ref}$	60000	80000	150000	120000	100000	kPa
$\gamma_{0.7}$	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	-
界面折减	0.75	0.75	1	1	1	-
渗透系数 $k_x=k_y$	0.43	0.001	0.5	0.001	0.001	m/day

2.3 定义结构单元

基坑围护结构冠梁、腰梁、支撑用梁模拟，地下连续墙用板模拟，材料参数见表 3、表 4。

表 3 内支撑系统材料参数

参数	冠梁/腰梁	内支撑	单位
面积 A	0.48	0.36	m^2
重度	0	0	kN/m^3
E	30	30	Gpa
I3	0.026	0.011	m^4
I2	0.014	0.011	m^4

表 4 地下连续墙材料参数

参数	衬砌	侧壁墙	单位
厚度 d	0.2	0.0227	m
重度 γ	22	22	kN/m^3
材料属性	线性、各项同性	线性、各项同性	--
杨氏模量 E	21e6	21e6	kN/m^2
泊松比 ν	0.2	0.2	--

本案例基坑支护结构采用从 CAD 文件导入的方式建模。通过该操作可以导入代表第一排支撑结构的线，选择这些线用创建梁命令可以创建梁单元，对创建的梁单元分别赋予不同的材料参数即可模拟冠梁、腰梁、内支撑。在创建完第一排支撑结构后通过阵列命令可以创建第二排、第三排支撑。具体操作方法如下：

- 在结构模型下，点击导入结构 ，如图 4 所示，弹出打开结构窗口。找到代表支撑文件的 CAD 图形文件路径，点击打开，弹出如图 5 所示导入结构窗口。在对象类型栏仅勾选多段线，点击确定，导入成功后的模型如图 6 所示。

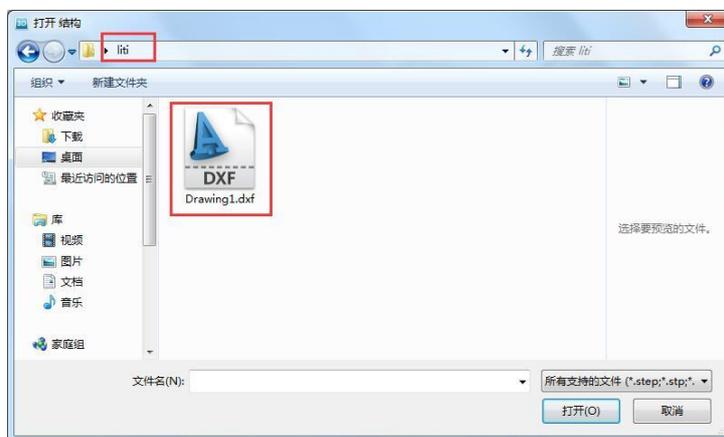


图 4 查找文件路径

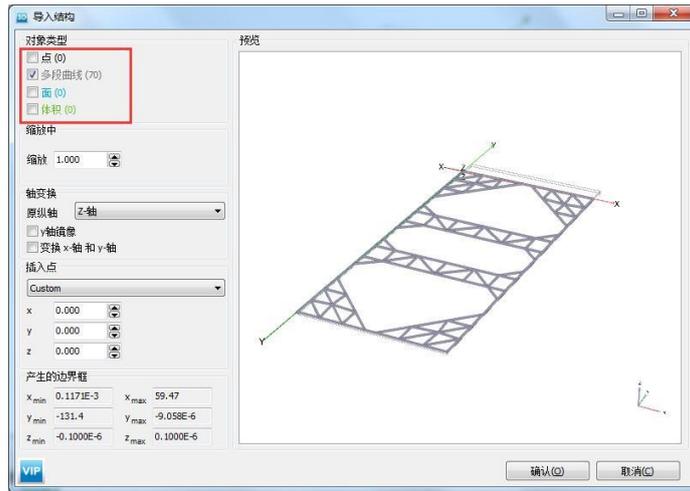


图 5 内支撑导入窗口

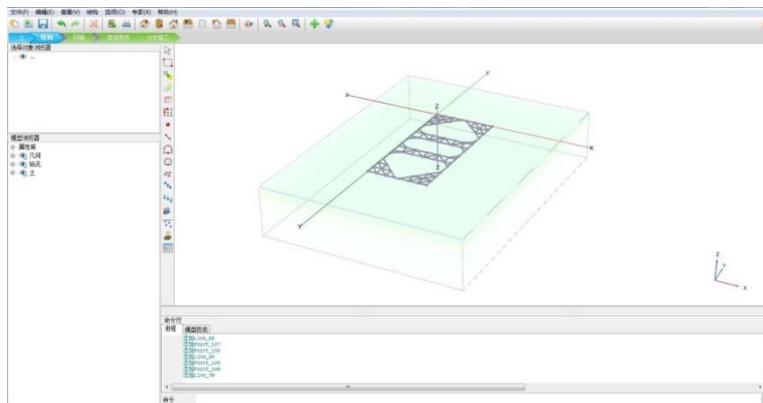


图 6 导入的内支撑几何模型

注意：

- 1) 本案例采用的 CAD 文件可以通过百度网盘下载，链接为：<http://pan.baidu.com/s/1bpMoTQJ>
 - 2) 导入过程详细操作步骤参考筑信达官网知识库文章“[点与线对象导入 PLAXIS 3D 模型的方法](#)”。
- 选中代表冠梁的四条线，右键选择创建梁，并在选择浏览器中赋以冠梁/腰梁的材料参数。
 - 选中其他的线，点击右键选择创建梁，在选择浏览器赋以内支撑的材料参数。第一排支撑创建完成后如图 7 所示。

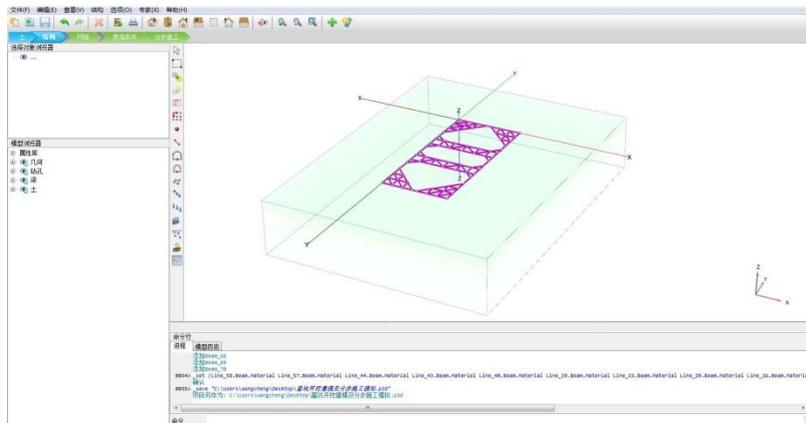


图 7 创建完成的第一排支撑

- 通过阵列工具创建第二排、第三排支撑。选中第一排支撑，点击阵列工具 ，弹出创建阵列窗口，如图 8，选择阵列方向为 z 方向，数量 3，间距-4。

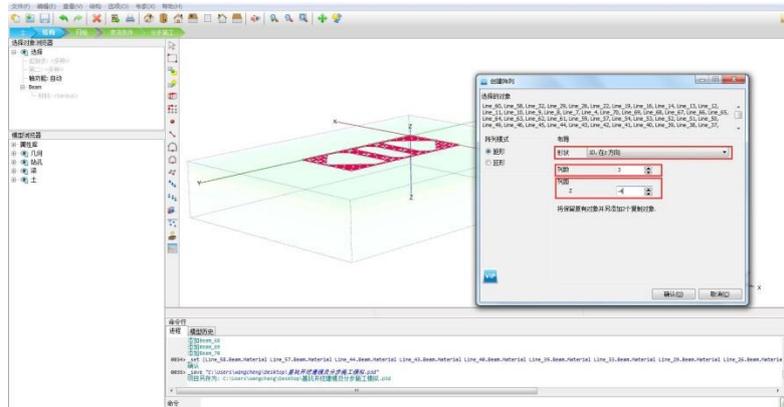


图 8 通过阵列工具创建多层支撑

- 通过拉伸工具生成地连墙。选中第一排支撑的冠梁，点击拉伸工具，弹出拉伸窗口，如图 9 所示设置拉伸矢量 $z=-18$ 。右击拉伸的面创建板、创建正向界面、创建负向界面，在选择浏览器中赋以地连墙的材料参数。地连墙创建完成后如图 10 所示。

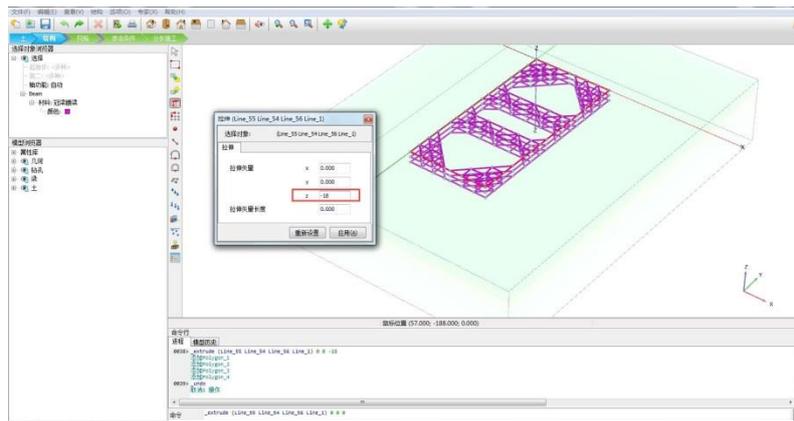


图 9 通过拉伸工具创建地连墙

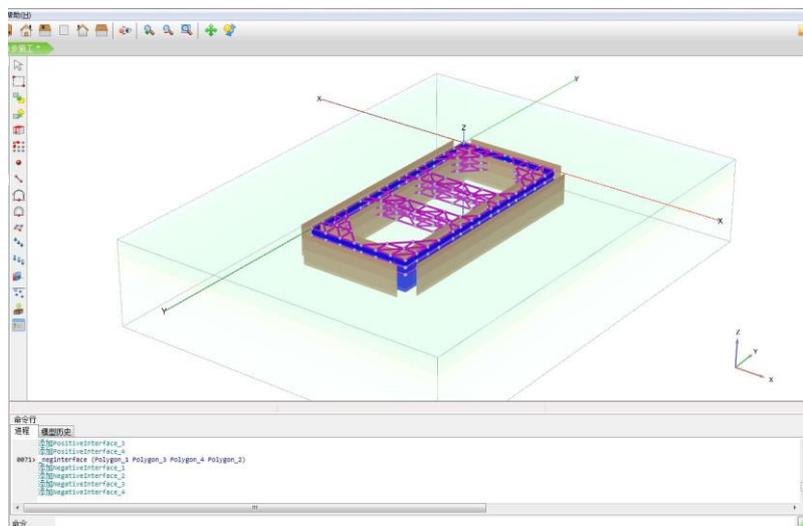


图 10 创建完成后的地下连续墙

- 选择合适视角，同时选中第一排所有梁单元，右键选择组，在**模型浏览器**>>组中，重新

命名为“第一排支撑”，按照同样的方法分别给第二排、第三排支撑创建组并命名为“第二排支撑”、“第三排支撑”。定义完成后如图 11 所示。



图 11 为支撑建立组

- 通过图形交互在-4m、-8m、-12m 深度处定义基坑开挖面。点击创建面 ，利用 Tab 键捕捉基坑角点，如图 12 创建 z=0 位置的面；选中该面点击阵列工具，如图 13 选择阵列方向为 z 方向，数量 3，间距-4。

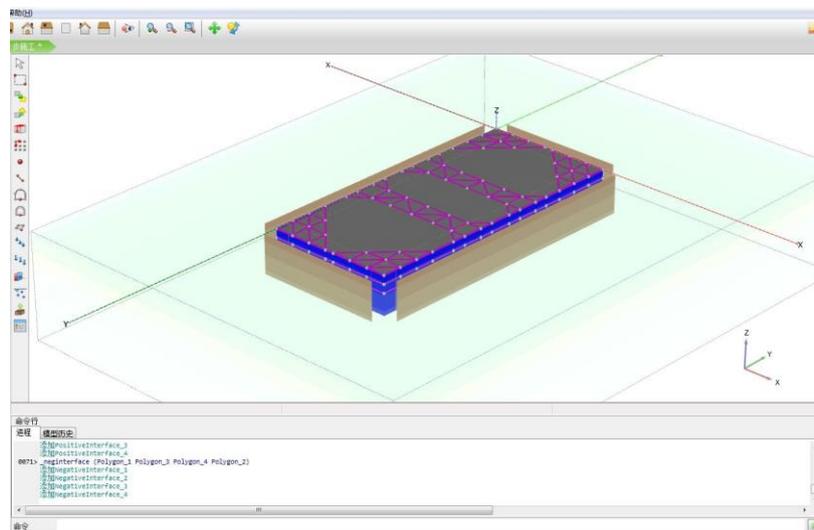


图 12 创建 z=0 处开挖面

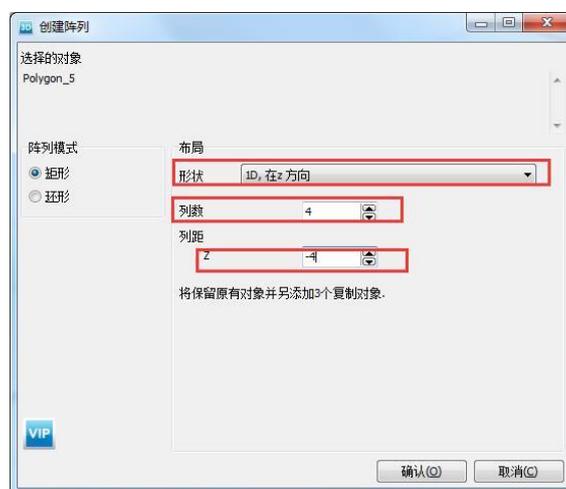


图 13 通过阵列工具创建开挖面

3. 网格划分

切换到网格模式，进行有限元网格划分。

3.1 有限元网格加密

- 如图 14 所示，程序已自动将结构单元网格进行加密，以绿色显示，其余部分未加密，以灰色显示。

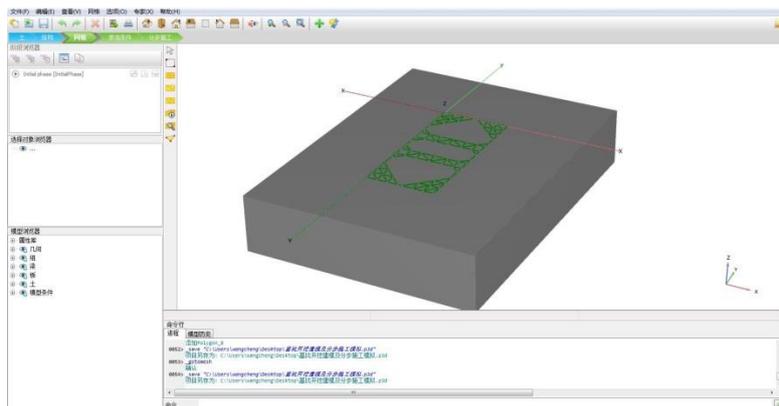


图 14 网格加密

3.2 有限元网格自动划分和预览

- 点击  **创建网格**，设置单元分布(Element distribution)为**粗**。点击确认，程序自动划分网格。
- 点击  **预览**生成的网格，图 15 为生成的网格。
- 单击**关闭**按钮，关闭输出窗口。

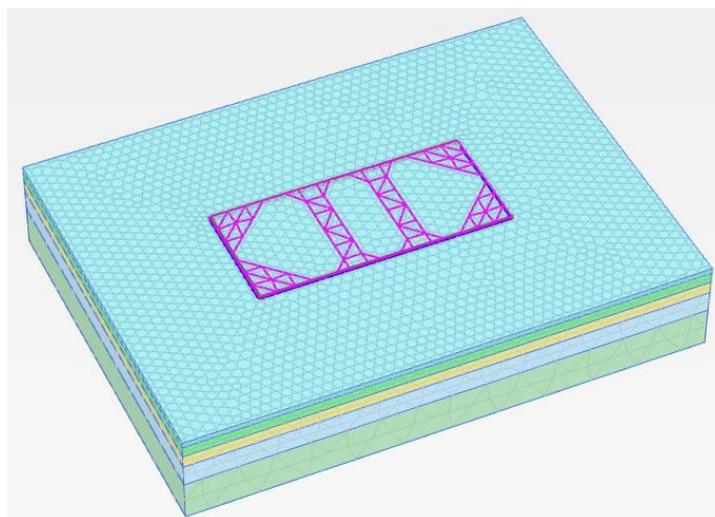


图 15 生成的网格

4. 分步施工定义

根据实际工程施工顺序，首先施工地下连续墙。在地下连续墙的支护下基坑开挖分三步进行，每次开挖前先施工支撑，再开挖基坑，开挖深度均为 4m。开挖过程定义如下：

- 初始阶段（initial phase）：采用默认设置，生成初始应力场。
- 地连墙施工（phase1）：在阶段浏览器点击添加阶段 ，双击 phase1 在阶段窗口将 ID 改为地连墙施工，采用默认设置；如图 16，在模型浏览器激活板和界面。



图 16 地连墙施工

- 第一排支撑（phase2）：施工冠梁和第一排内支撑。添加阶段，双击 phase2 在阶段窗口将 ID 改为第一排支撑，采用默认设置；如图 17，在模型浏览器>>组中激活第一排支撑。

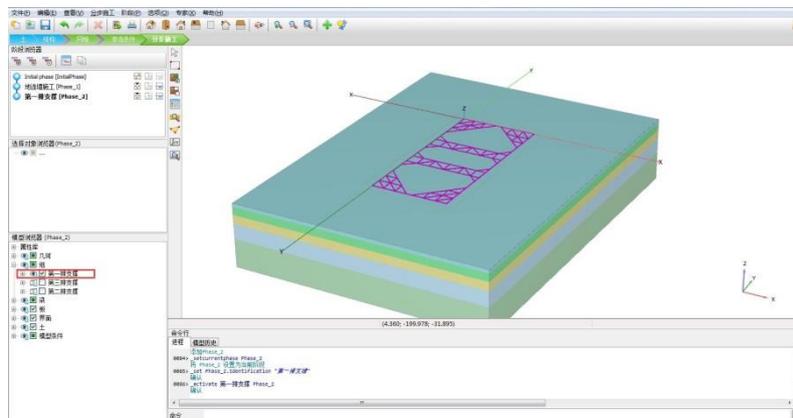


图 17 施工第一排支撑

- 开挖第一层土体（phase3）：开挖基坑内 0m 至-4m 范围土体。添加阶段，将阶段重命名为开挖第一层土体，采用默认设置；如图 18，选中基坑内第一层土体，在选择浏览器冻结该土体，再次选择基坑内土体，用同样方法冻结该土体，此时基坑开挖至-4m 深度处。

注意：第一层土体厚度为 3m，所以只冻结基坑内第一层土体并未开挖至-4m 深度处。

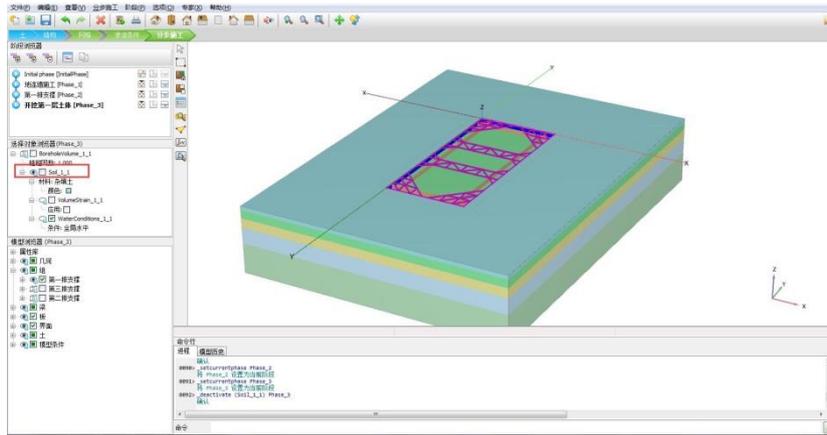


图 18 开挖第一层土体

- 第二排支撑 (phase4): 施工腰梁和第二排内支撑。添加阶段, 双击 phase4 在阶段窗口将 ID 改为第二排支撑, 采用默认设置; 与 phase2 操作类似, 在**模型浏览器>>组**中激活第二排支撑。
- 开挖第二层土体 (phase5): 开挖基坑内-4m 至-8m 范围土体。添加阶段, 将阶段重命名为开挖第二层土体, 采用默认设置; 与 phase3 操作类似, 选中基坑内土体, 在选择浏览器冻结该土体, 此步开挖土体厚度为 4m。
- 第三排支撑 (phase6): 施工腰梁和第三排内支撑。添加阶段, 双击 phase6 在阶段窗口将 ID 改为第三排支撑, 采用默认设置; 在**模型浏览器>>组**中激活第三排支撑。
- 开挖第三层土体 (phase7): 开挖基坑内-8m 至-12m 范围土体。由于地下水位位于地表以下 9m 深度处, 此步开挖首先需将基坑内水头降至基坑底部, 而降水会导致地下水渗流。为了模拟这个过程, 需要完成以下操作。添加阶段, 将阶段重命名为开挖第三层土体, 将孔压计算类型改为稳态地下水渗流, 其他参数采用默认设置; 选中基坑内土体, 在选择浏览器冻结该土体, 并将水力条件设置为干; 如图 19, 选中基坑底部土体, 将水力条件改为水头, $z_{ref}=-12m$ 。定义完成后模型如图 20 所示。



图 19 设置坑底水头

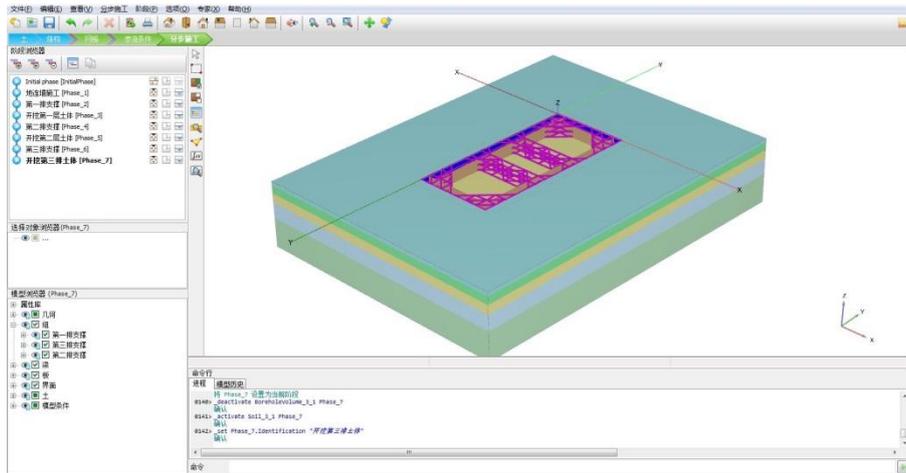


图 20 开挖完成的基坑模型

5. 结果查看

点击查看结果 ，弹出输出程序窗口。

5.1 基坑变形分析

通过查看变形可以分析基坑开挖对基坑周边和基坑内部土体位移的影响。

- 点击菜单栏 **变形»总位移**，可以查看基坑开挖后周边土体和基坑底部的变形。
- 点击左侧工具栏垂直剖面 ，按住 **shift** 键，通过鼠标左键画一条水平直线，该水平线将基坑切出一个剖面。

图 21 为基坑开挖后周边土体及坑底变形云图，图 22 为通过基坑的某剖面变形矢量图。从图中可以看出基坑侧壁土体有向基坑内部移动趋势，坑底有隆起现象。

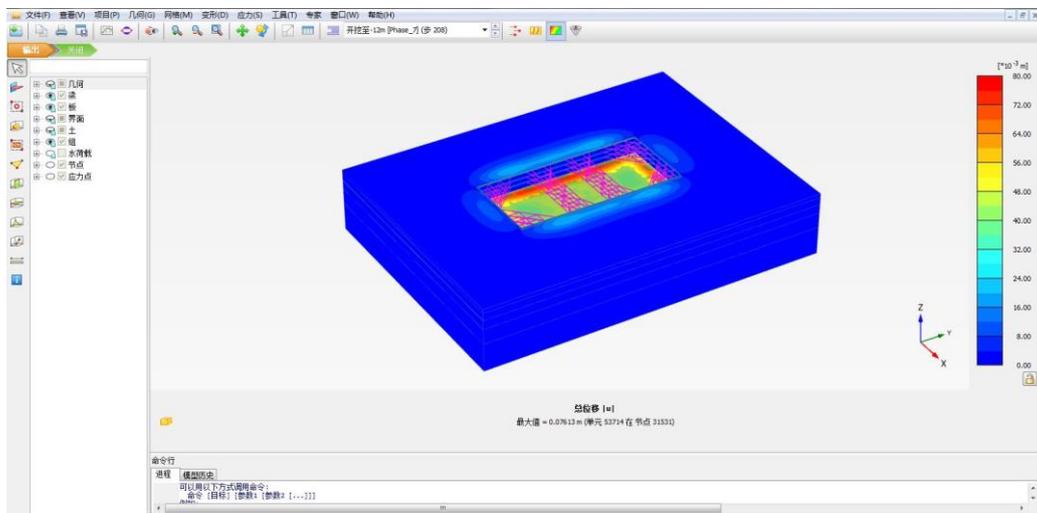


图 21 基坑开挖至-12m 时土体变形

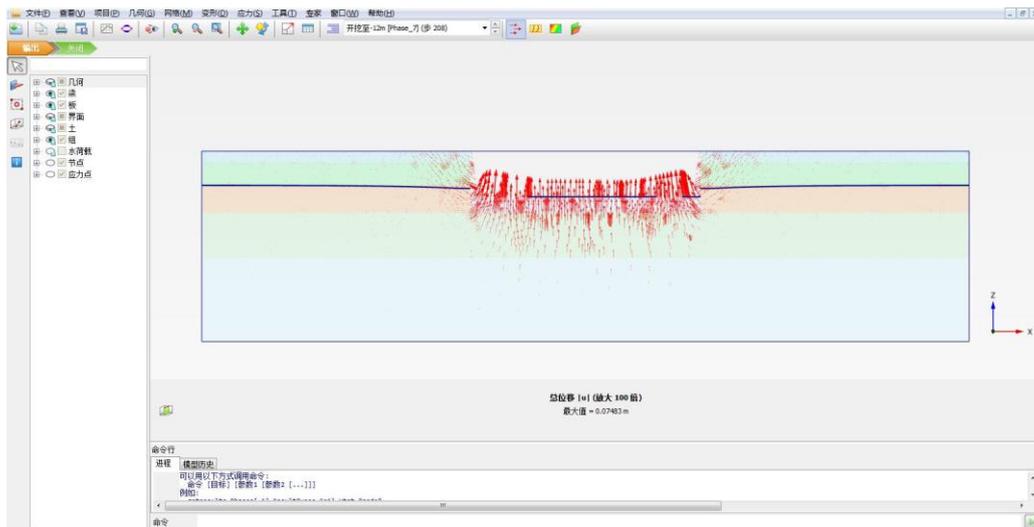


图 22 某断面基坑土体变形矢量图

5.2 支护结构变形及受力分析

- 点击左侧工具栏拖拽窗口选择结构工具 ，如图 25，通过按住鼠标左键绘制选择区域，在弹出选择结构窗口中选择板，点击视图，可以查看地下连续墙的位移。

图 26 为地下连续墙位移云图，地下连续墙变形指向向基坑内部，且中间位置变形量大于顶部和底部。

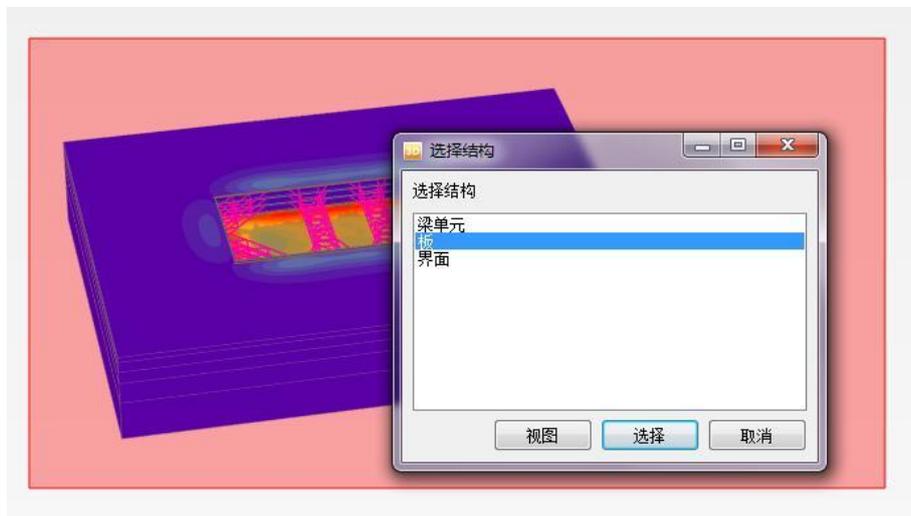


图 23 选择结构

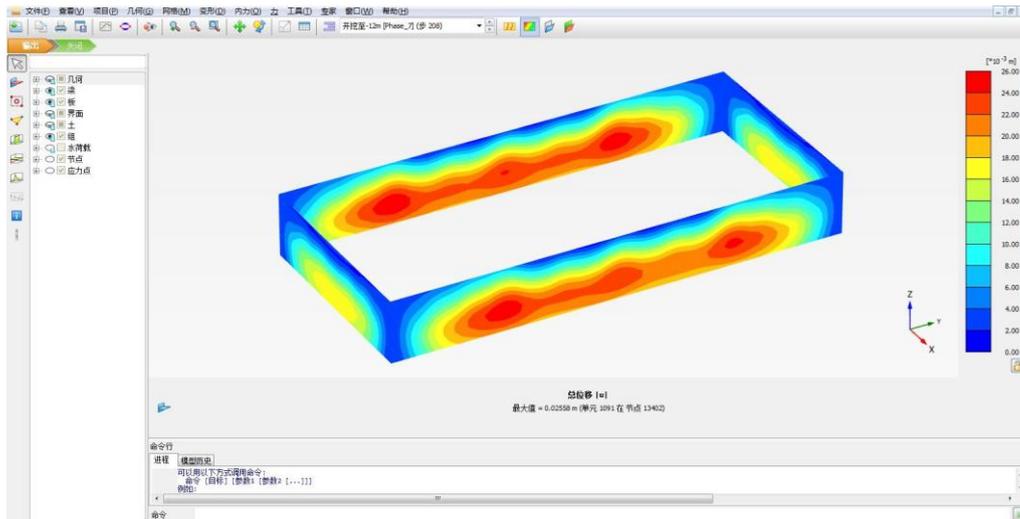


图 24 地下连续墙位移

- 点击菜单栏 **力** 菜单，可以查看轴力、剪力、弯矩。
图 25-27 分别为地下连续墙轴力、剪力、竖向弯矩云图。

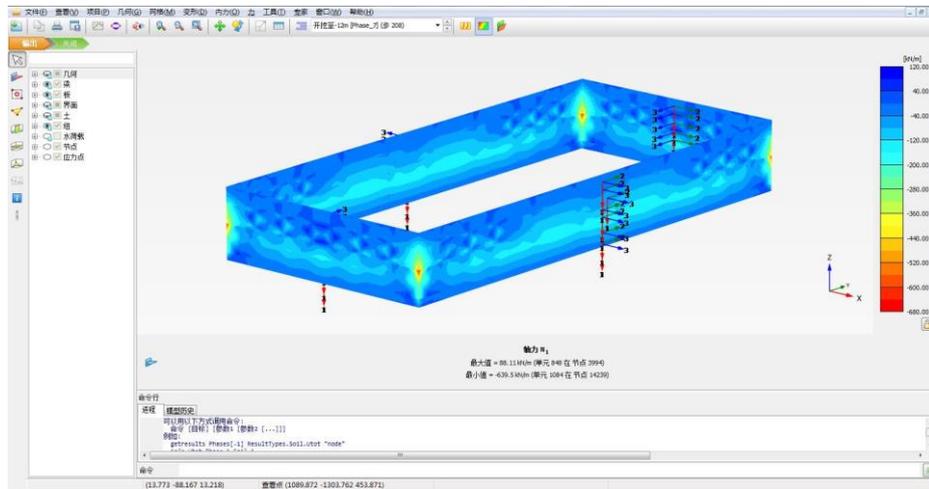


图 25 地下连续墙轴力 N1 云图

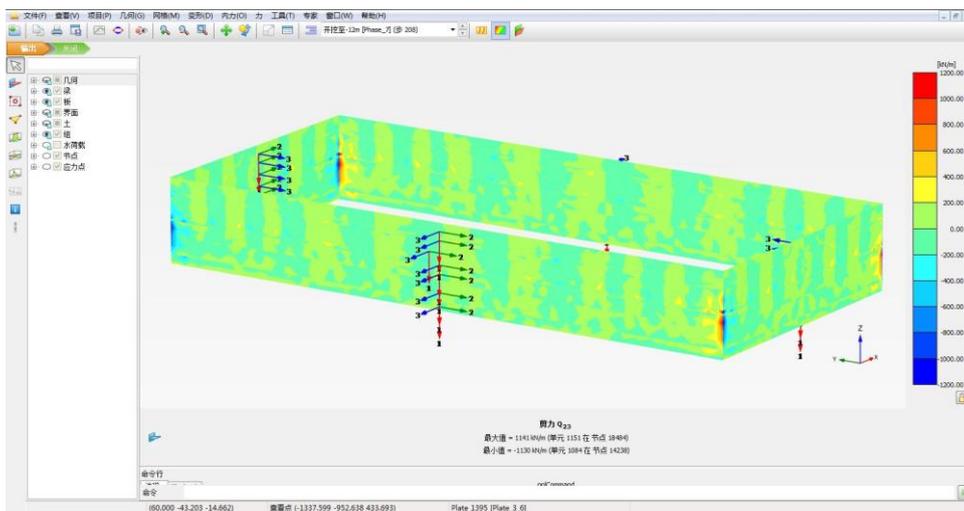


图 26 地下连续墙剪力 Q23 云图

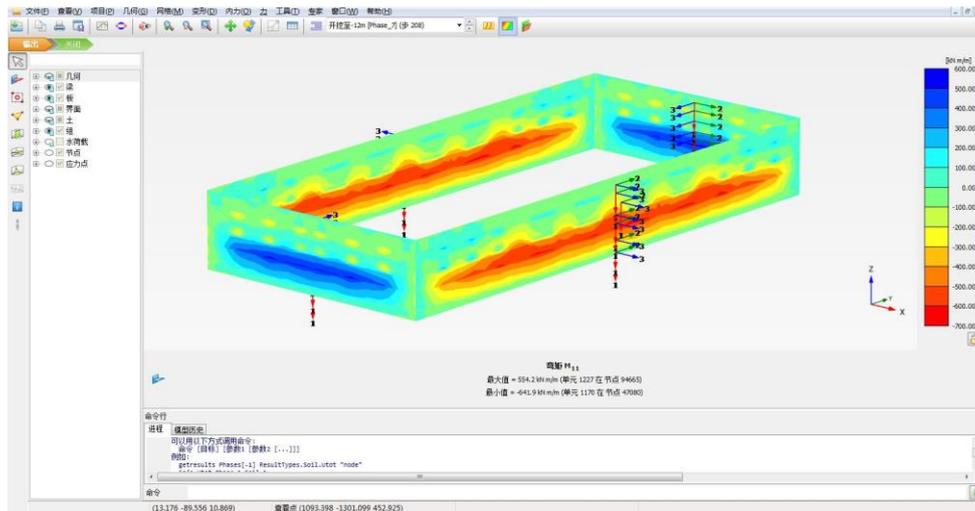


图 27 地下连续墙弯矩 M11 云图

- 为了方便查找支撑结构，隐藏土体、界面、板，点击左侧工具栏拖拽窗口选择结构工具



，通过按住鼠标左键绘制选择区域，只选择表示第一层支撑结构单元，在弹出选择结构窗口中选择梁单元，点击视图，可以查看支撑的位移。

图 28 为放大 200 倍后的第一层支撑变形，可以单出第一层支撑有向上的位移，支撑中间位置位移量最大。其他两层支撑变形查看方法与第一层支撑变形类似，读者可以自行练习。

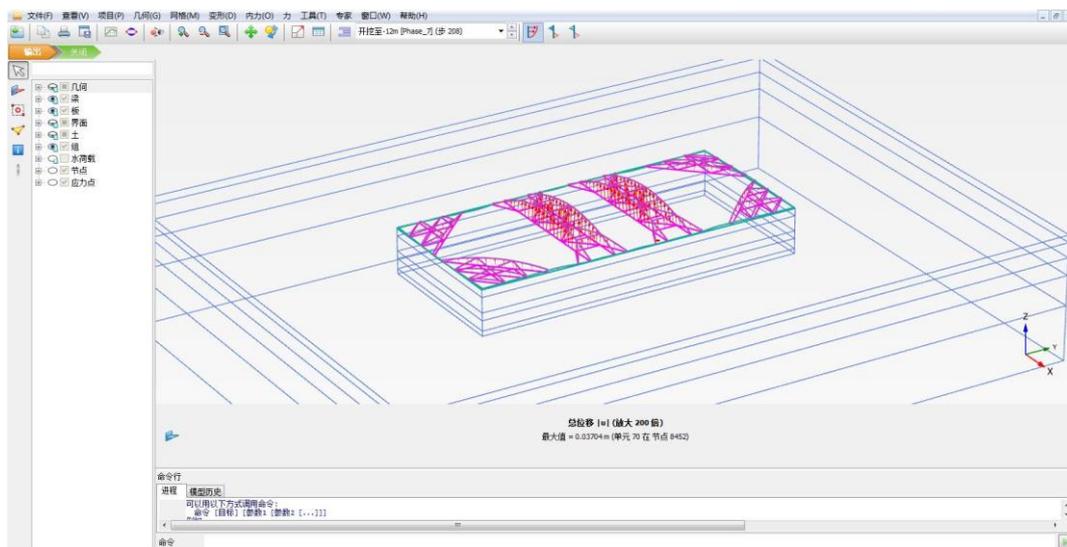


图 28 第一层支撑变形

- 点击菜单栏 **力** 菜单，可以查看支撑轴力、剪力、弯矩。仅以第一层支撑的轴力、剪力、弯矩进行介绍，读者可以自行练习查看其它两层支撑分析结果。

图 29 为第一层支撑轴力分布图，可以看出支撑结构轴力最大值为 704kN。图 30 为第一层支撑结构弯矩 M2 分布图，弯矩最大值为 27.89kNm。

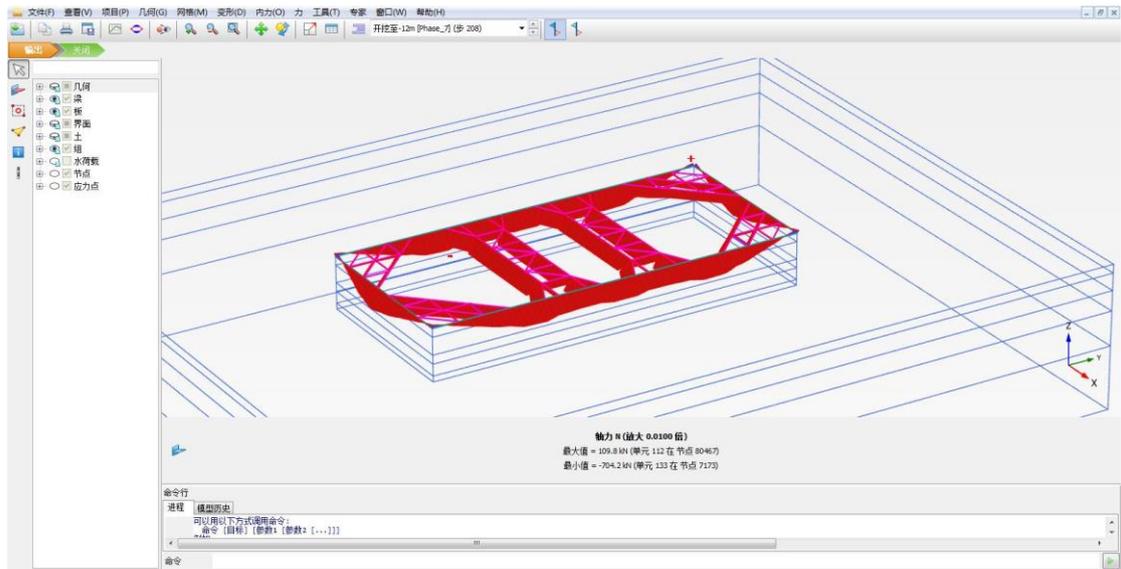


图 29 第一层支撑轴力分布图

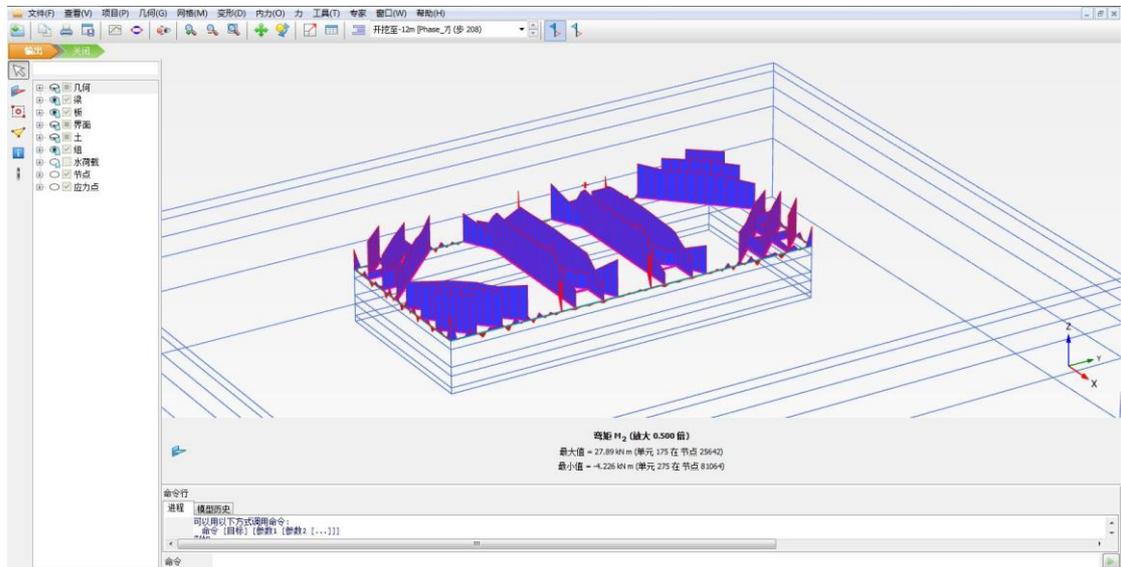


图 30 第一层支撑弯矩 M2 分布图

本教程到此结束

岩土工程有限元分析软件

PLAXIS 3D[®] 2016

案例教程

双侧壁导坑法隧道施工过程分析



北京筑信达工程咨询有限公司
北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层, 100043

版 权

计算机程序 PLAXIS 及全部相关文档都是受专利法和版权法保护的产品。全球范围的所有权属于 Plaxis bv。如果没有 Plaxis 和北京筑信达工程咨询有限公司的预先书面许可，未经许可的程序使用或任何形式的文档复制一律禁止。

更多信息和此文档的副本可从以下获得：

北京筑信达工程咨询有限公司

北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层 100043

电话：86-10-6892 4600

传真：86-10-6892 4600 - 8

电子邮件：support@cisec.cn

网址：www.cisec.cn

目录

1. 模型概况.....	1
2. 几何模型定义.....	2
2.1 模型边界.....	2
2.2 定义土层.....	2
2.3 定义结构单元.....	3
2.4 定义隧道.....	3
3. 网格划分.....	11
3.1 有限元网格加密.....	11
3.2 有限元网格自动划分和预览.....	12
4. 分步施工定义.....	13
5. 结果查看.....	14

1. 模型概况

本案例模拟岩石隧道双侧壁导坑法施工开挖过程。图 1、图 2 分别为双侧壁导坑法隧道施工的横断面和纵剖面示意图，隧道围岩级别为 V 级，隧道埋深 35m。分步施工过程按照实际施工顺序进行，分块、分步开挖。首先开挖导洞，施工导洞衬砌和锚杆；然后开挖上台阶，施工上台阶衬砌和锚杆；最后开挖下台阶，施工下台阶衬砌并拆除临时支撑。每次开挖进尺均为 2m。

由于模型关于隧道中心线对称，本案例仅取隧道半侧进行分析。案例主要介绍了土层材料定义方法、隧道设计器使用方法、计算阶段设置及计算结果查看方法，通过学习本案例读者可以掌握双侧壁导坑法在 PLAXIS 3D 中的模拟过程以及计算结果分析方法。

提示：学习本案例教程之前，需要已经掌握 PLAXIS 软件的基本操作。

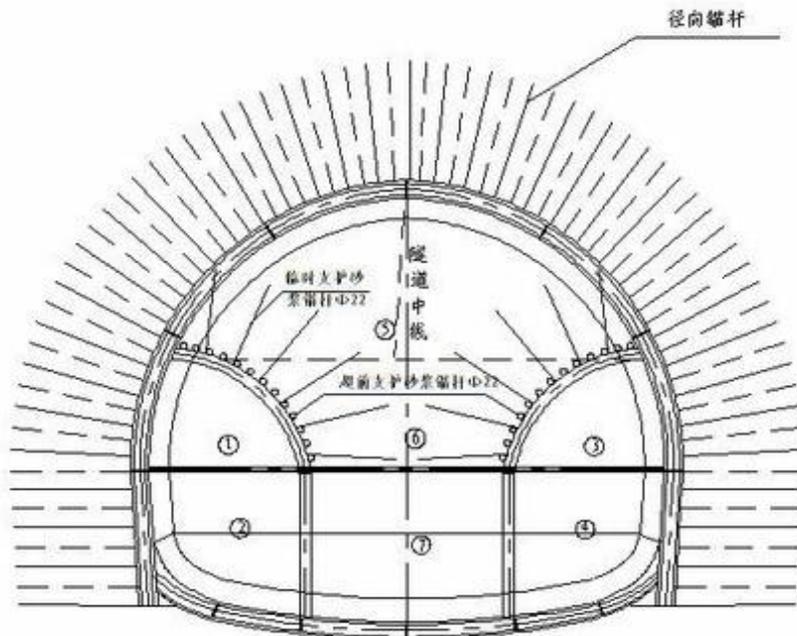


图 1 隧道横断面示意图

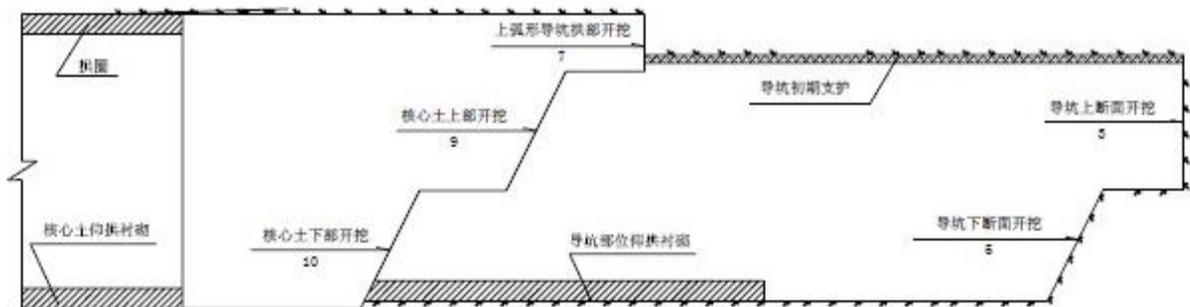


图 2 隧道纵剖面示意图

2. 几何模型定义

2.1 模型边界

在项目属性窗口>>模型标签>>模型边界中定义 X 和 Y 方向的边界， $X_{min}=0$ ， $X_{max}=50$ ； $Y_{min}=0$ ， $Y_{max}=20$ 。

2.2 定义土层

在 $X=0$ ， $Y=0$ 的位置处创建钻孔，如图 3 在修改土层对话框中定义水头高度 $h=-70$ 。然后添加一层土层并创建土层材料，土层厚度 65m，土层材料属性见表 1。

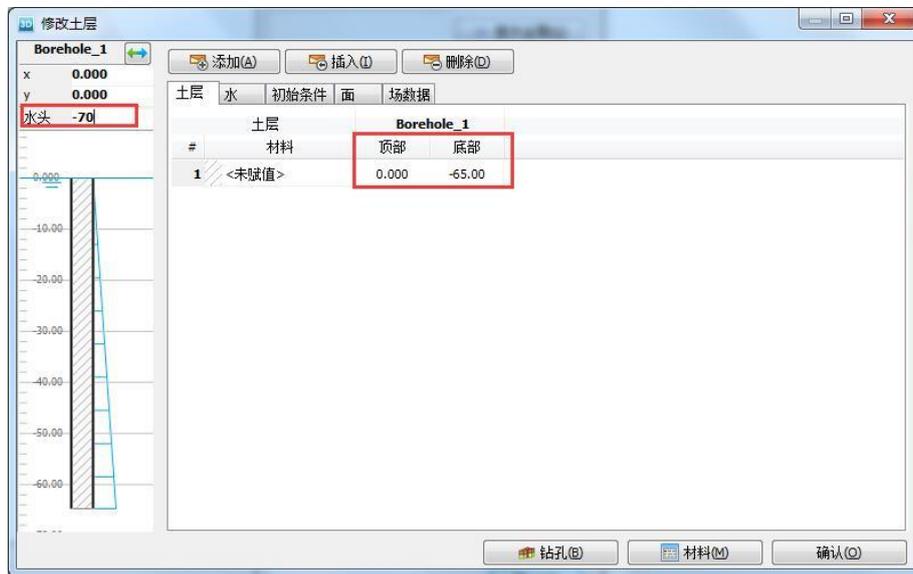


图 3 修改土层

表 1 土层材料

参数	名称	岩石	单位
材料模型	模型	摩尔库仑	-
材料类型	类型	排水	-
水位以上土体容重	γ_{unsat}	20	kN/m^3
水位以下土体容重	γ_{sat}	20	kN/m^3
弹性模型	E'	1200e3	kN/m^2
泊松比	ν	0.35	-
黏聚力	c'	26	kN/m^2
内摩擦角	ϕ'	80	$^\circ$
剪胀角	ψ	0	$^\circ$
界面	R_{inter}	0.67	-

2.3 定义结构单元

在创建隧道前先定义衬砌、临时支撑、锚杆等结构单元的材料参数。衬砌、临时支撑用板模拟，锚杆用嵌入式梁单元模拟，材料参数见表 2、表 3。

表 2 衬砌、临时支撑材料参数

参数	符号	衬砌	临时支撑	单位
厚度	d	0.2	0.0227	m
重度	γ	22	22	kN/m ³
材料属性	Type	线性、各项同性	线性、各项同性	--
杨氏模量	E	21e6	21e6	kN/m ²
泊松比	ν	0.2	0.2	--

表 3 锚杆材料参数

参数	符号	锚杆	单位
杨氏模量	E	70e6	kN/m ²
重度	γ	17	kN/m ³
桩类型	--	预定义	--
预定义桩类型	--	实心圆桩	--
直径	Diameter	0.042	m
侧摩阻分布	Type	线性	--
桩顶侧阻力	T _{top,max}	158	kN/m
桩底侧阻力	T _{bot,max}	158	kN/m

2.4 定义隧道

通过隧道设计器可以定义隧道横截面和纵剖面。在结构模式中点击创建隧道 ，选择在 (0,0,-45) 处创建隧道，弹出隧道设计器。隧道的创建按照以下步骤进行：

- 在一般标签定义形态类型为自由，选择定义右半部分。
- 在线段标签下点击添加 ，参数设置方法如图 4，将 segment_1 线段类型设置为弧，相对起始角：0；半径：17；线段角度：20。

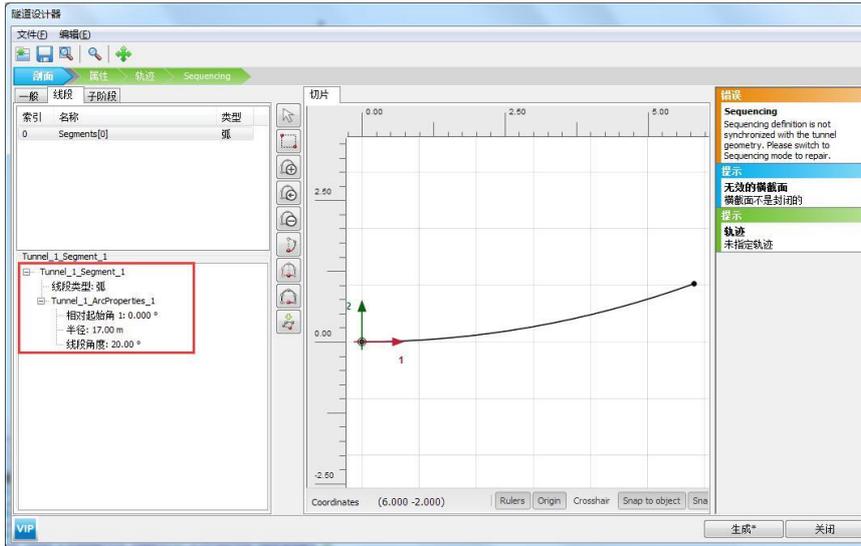


图 4 创建 segment_1

- 在线段标签下点击添加 ，用同样的方法添加 segment_2、segment_3。segment_2 线段类型：弧；相对起始角：0；半径：3.5；线段角度：90。segment_3 线段类型：弧；相对起始角：0；半径：6.5；线段角度：35。
- 点击 **延伸至对称轴** ，完成对隧道轮廓的定义。定义完成后如图 5 所示。

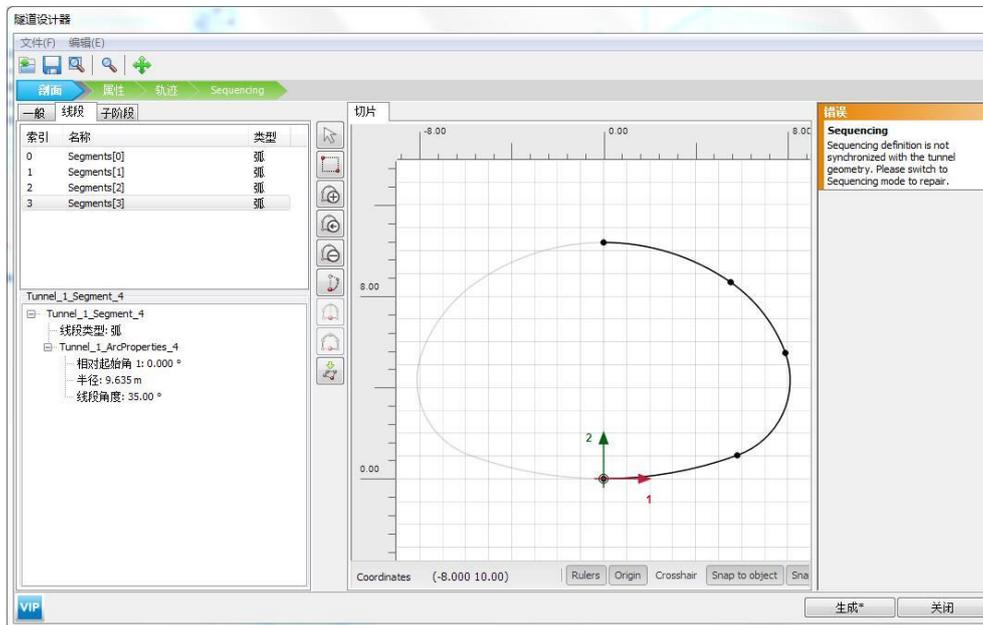


图 5 线段标签参数设置

- 在子阶段标签通过创建圆、线与隧道轮廓进行布尔运算，创建隧道临时支撑，上下台阶分界线。点击子阶段标签，点击添加 ，生成 Subtions{0}，位移 1：8，位移 2：0；类型：弧；相对起始角：0；半径：5；线段角度：360。点击子阶段标签，点击添加 ，生成 Subtions{1}，位移 1：0，位移 2：5；类型：线；相对起始角：0；长度：3。定义

完成后如图 6 所示。

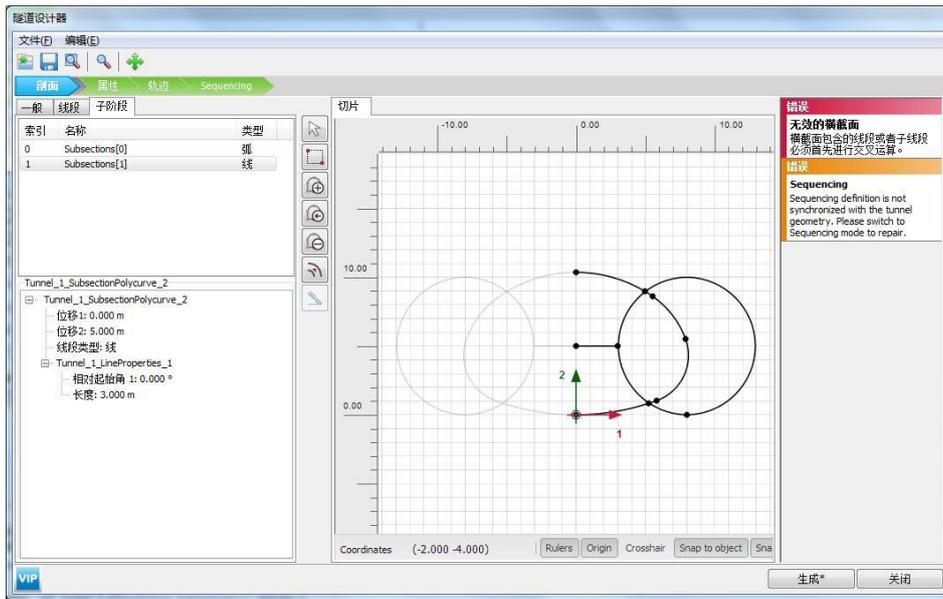


图 6 子阶段标签设置

- 选中所有对象，右键进行布尔运算，删除不需要的线。定义完成后如图 7 所示。

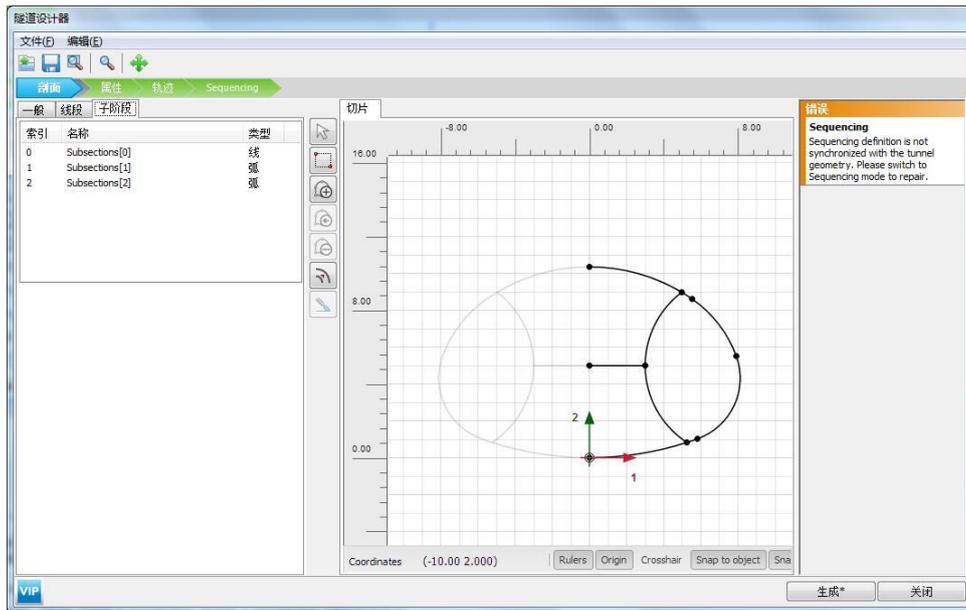


图 7 布尔运算后的横断面

- 在属性菜单下创建衬砌临时支撑、锚杆并赋予相应的材料参数。点击属性菜单，在一般标签下，选中外轮廓线右键创建板，创建负向界面；在选择窗口中给板赋予衬砌的材料参数。
- 选中代表临时支撑的线右键创建板；在选择窗口中给板赋予临时支撑的材料参数；选中隧道土体在选择窗口为土体赋予岩石材料属性，创建完成后如图 8。

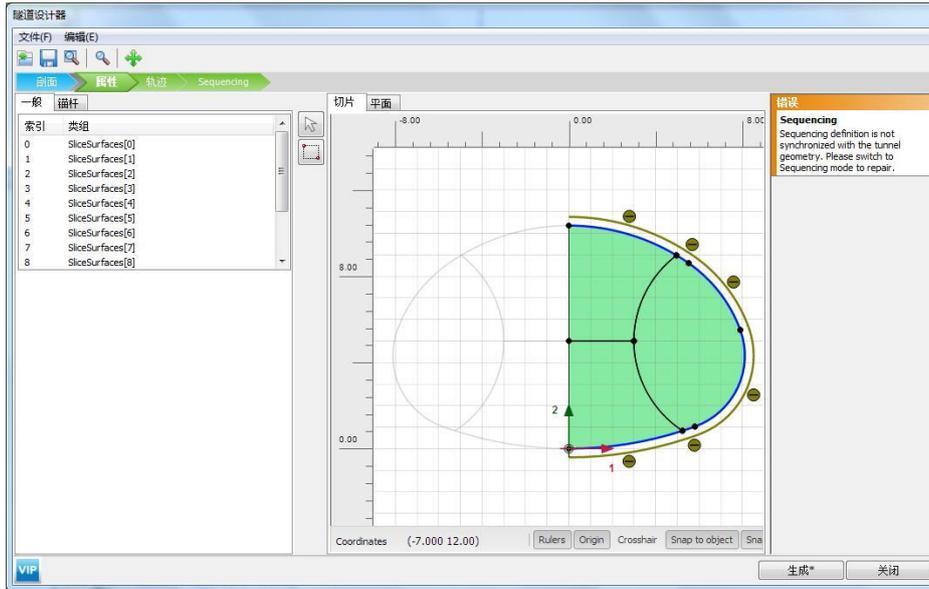


图 8 定义衬砌、临时支撑

- 在锚杆标签下定义锚杆。点击锚杆标签，选中如图 9 所示隧道轮廓线，点击创建岩石锚固  创建锚杆，按图 9 所示参数定义拱顶锚杆。材料：锚杆；锚杆数量（宽度）：4；锚杆长度：3.5；距起始点偏移量（宽度）：0.6；间距（宽度）：1.2；距起始点偏移量（长度）：0；锚杆数量（深度）：1；距起始点偏移量（深度）：1；间距（深度）：2。

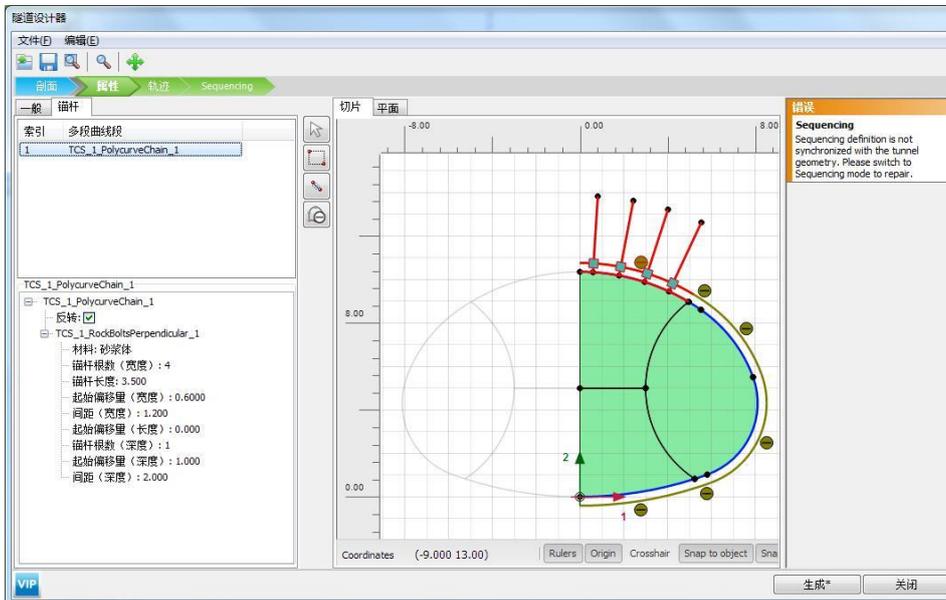


图 9 创建拱顶锚杆

- 选中如图 10 所示隧道轮廓线，点击创建岩石锚固  创建锚杆，按图 10 所示参数定义锚杆。材料：锚杆；锚杆数量（宽度）：9；锚杆长度：3.5；距起始点偏移量（宽度）：0.18；间距（宽度）：1.2；距起始点偏移量（长度）：0；锚杆数量（深度）：1；距起始点偏移量（深度）：1；间距（深度）：2。

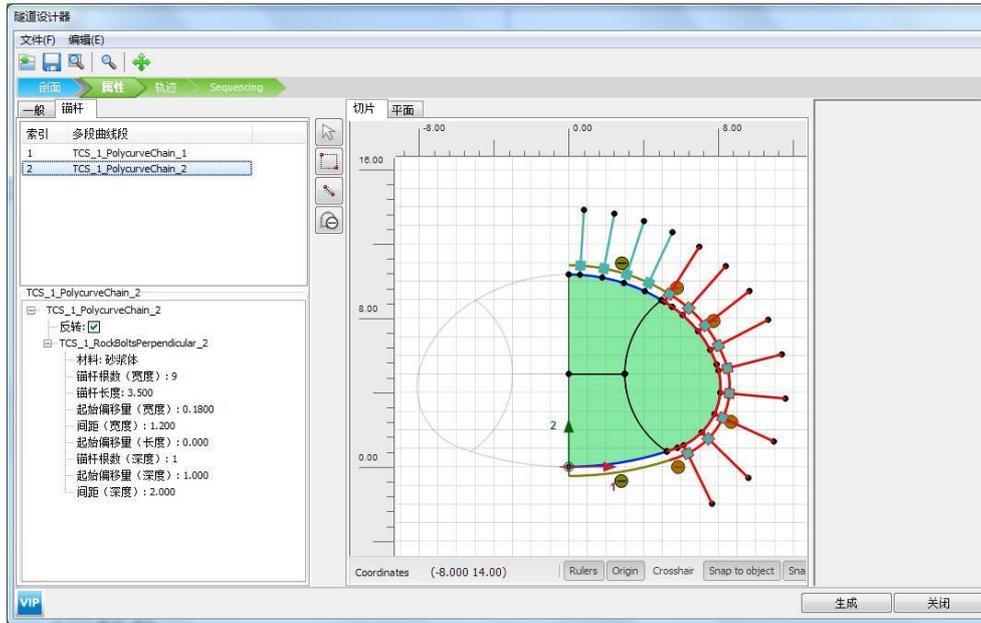


图 10 创建侧壁墙锚杆

- 在轨迹菜单下创建隧道延纵剖面分段开挖进尺。点击轨迹菜单，在线段标签创建线，用于模拟隧道纵剖面轨迹。点击添加 ，创建 segment{0}，如图 11 设置线段类型：线；相对起始角：0；长度：20。

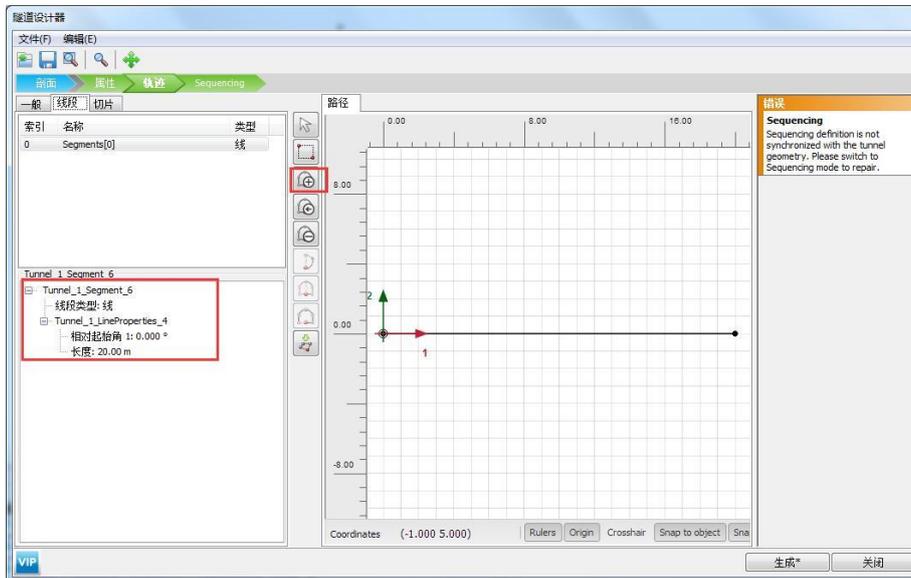


图 11 隧道轨迹

- 点击切片标签，在该标签下可以设置隧道分步开挖进尺，如图 12 设置切片方法为长度；切片长度：2；起始于：开始。

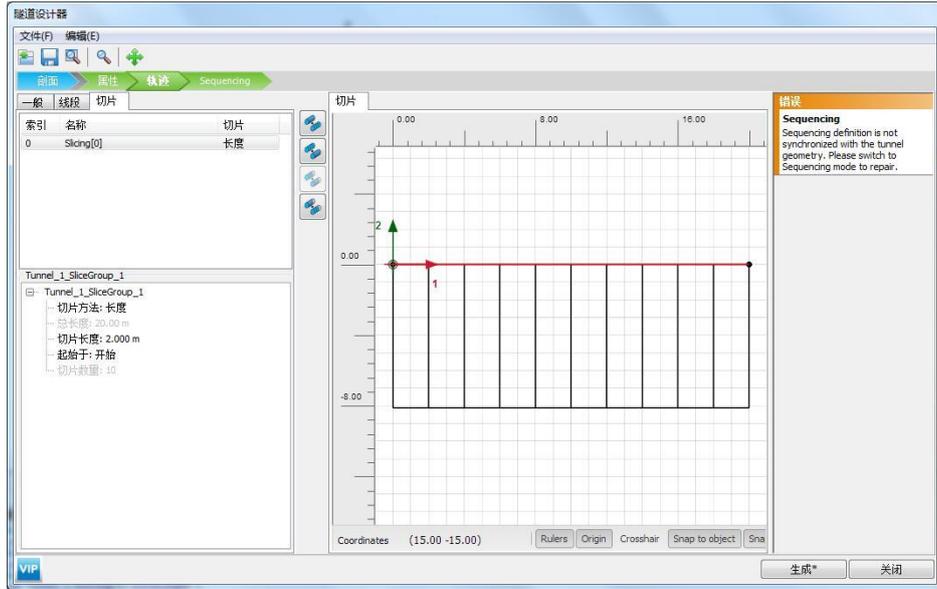


图 12 隧道纵剖面切片

- 点击 **Sequencing** 标签，定义隧道分步施工阶段开挖的土体和施工的衬砌、临时支撑等。
 点击竖向工具栏添加隧道阶段子步 ，生成子步 **Step_1_1**，模拟开挖导洞。如图 13，取消勾选，冻结侧壁导坑土体，开挖导洞。

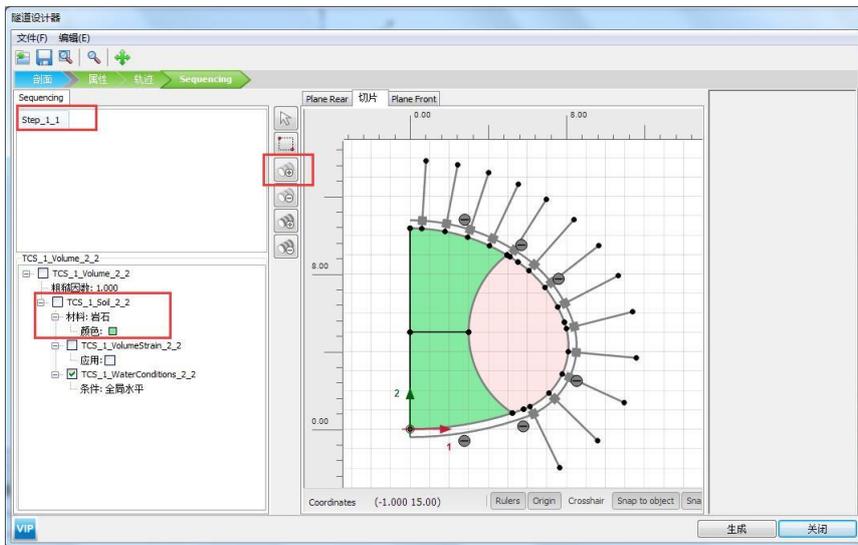


图 13 开挖导洞

- 与上步操作类似，点击添加隧道阶段子步 ，生成子步 **Step_1_2**，模拟施工导洞衬砌和锚杆。如图 14，点击代表衬砌、锚杆、临时支撑的单元，在选择窗口中激活，同时激活界面。

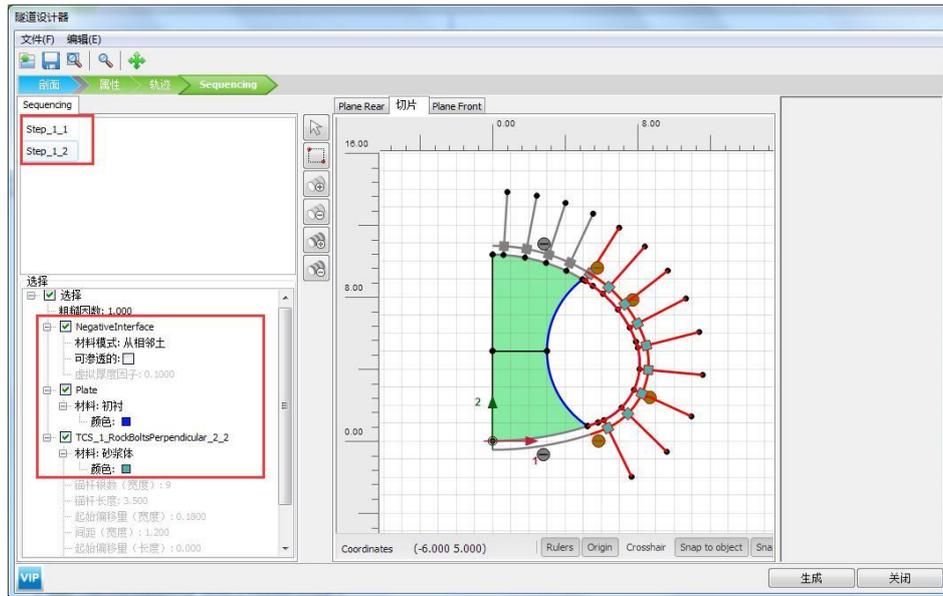


图 14 施工导洞衬砌和锚杆

- 与上面的操作类似，如图 15，点击添加隧道阶段子步 ，生成子步 Step_1_3，开挖上台阶，选中上台阶土体并冻结；

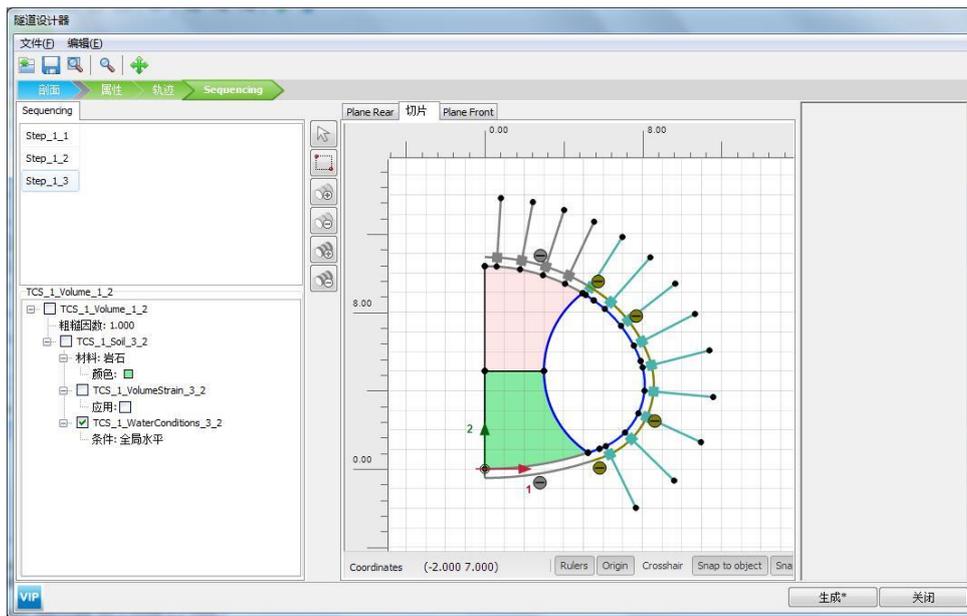


图 15 开挖上台阶

- 点击添加隧道阶段子步 ，如图 16，生成子步 Step_1_4，施工上台阶衬砌和锚杆，选中上台阶代表上台衬砌和锚杆的单元，在选择窗口中激活，同时激活界面；

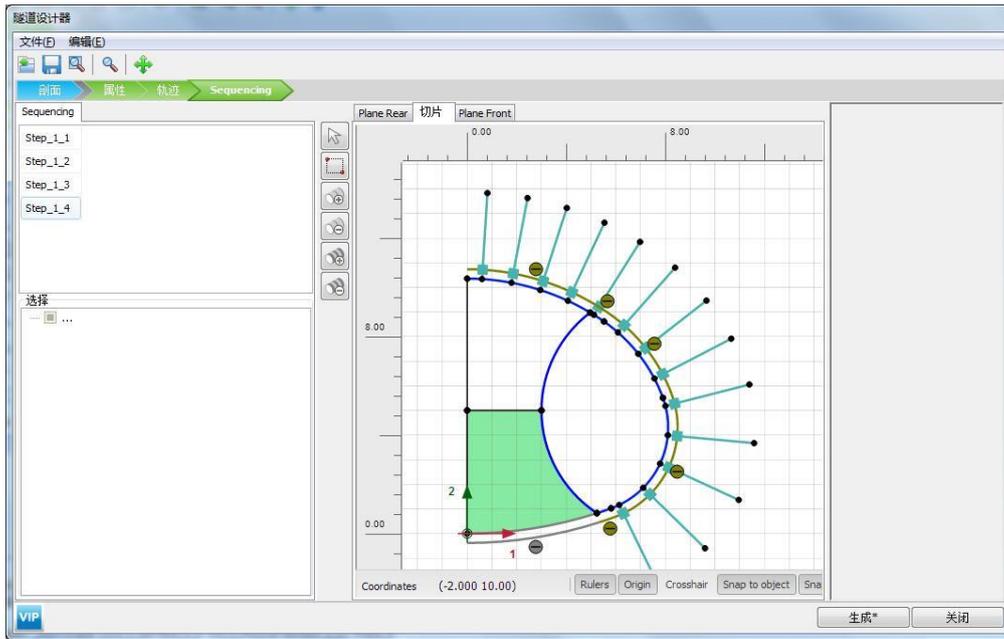


图 16 施工上台阶衬砌和锚杆

- 点击添加隧道阶段子步 ，如图 17，生成子步 Stept_1_5，开挖下台阶。

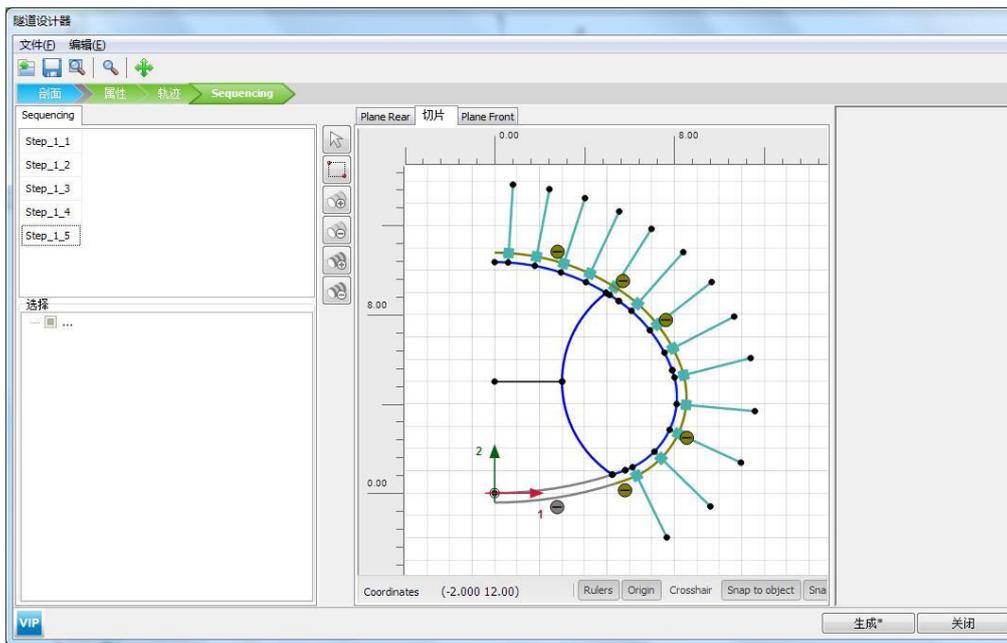


图 17 开挖下台阶

- 点击添加隧道阶段子步 ，如图 18，生成子步 Stept_1_6，施工衬砌、拆除临时支撑。选中并冻结下台阶土体，在选择窗口中激活下台阶衬砌和界面，选中代表临时支撑的板单元，在选择窗口冻结板单元；

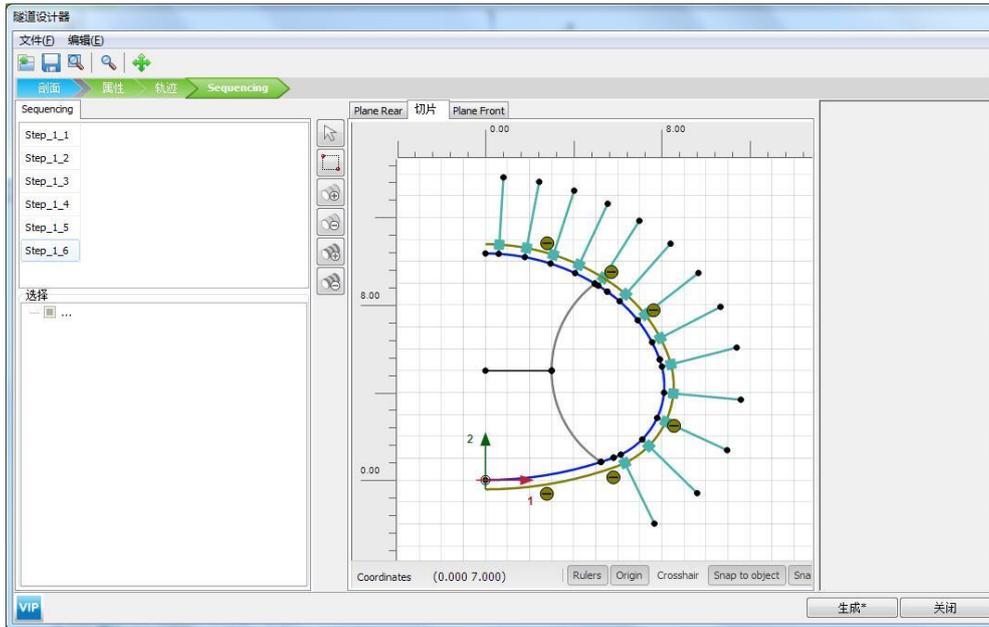


图 18 施工下台阶并拆除临时支撑

- 点击生成，完成对隧道的定义。隧道定义完成后如图 19 所示。

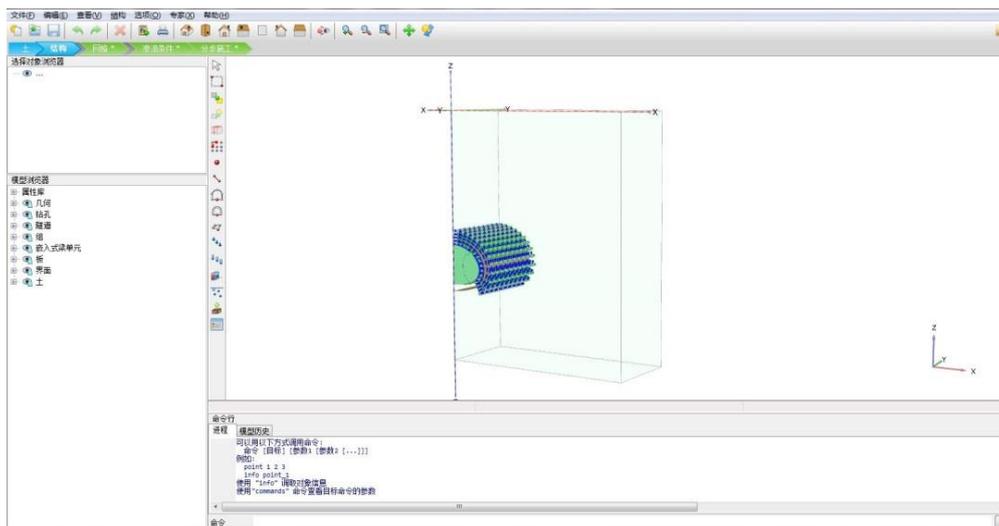


图 19 定义完成的隧道模型

3. 网格划分

切换到网格模式，进行有限元网格剖分。

3.1 有限元网格加密

- 如图 20，程序已自动将结构单元网格进行加密，以绿色显示，其余部分未加密，以灰色显示。

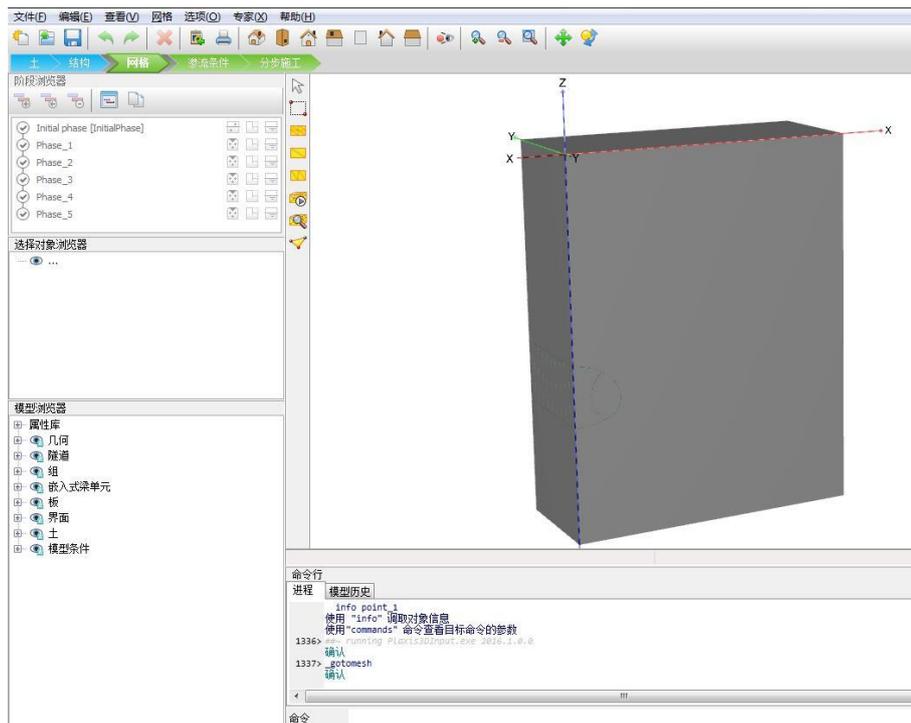


图 20 有限元网格加密

3.2 有限元网格自动划分和预览

- 点击  **创建网格**，设置单元分布(Element distribution)为**粗**。点击确认，程序自动划分网格。
- 点击  **预览**生成的网格，图 21 为程序自动生成的网格，可以看出隧道周边网格较密。
- 单击**关闭**按钮，关闭输出窗口。

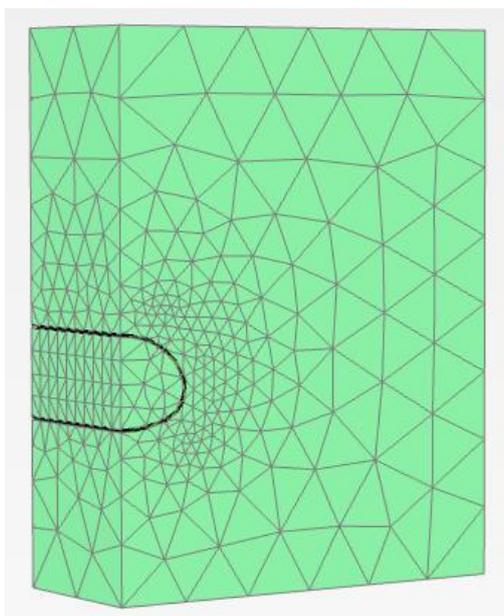


图 21 生成的网格

4. 分步施工定义

本例模拟双侧壁导坑法开挖的施工过程。

- Initial Phase: 阶段窗口采用默认设置，计算类型：k0 过程；荷载类型：分步施工。
- Phase1: 点击添加阶段  添加一个新阶段，阶段窗口采用默认设置，计算类型：塑性计算；荷载类型：分步施工；程序自动勾选重置位移为零。如图 22 在模型浏览器>>隧道菜单下右击 Tunnel_1，在弹出窗口中点击 Advance to text tunnel step，完成第一阶段定义。

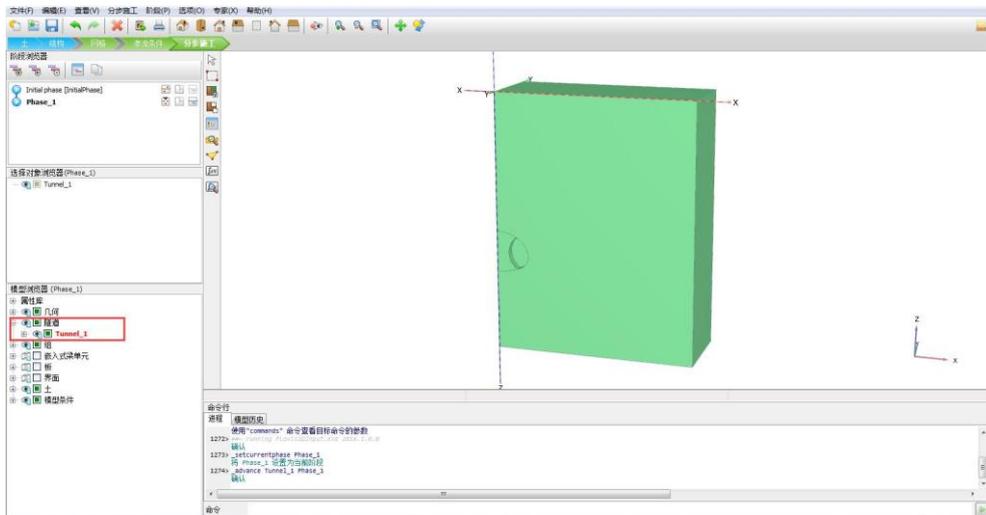


图 22 phase1 阶段定义

- Phase2: 点击添加阶段  添加一个新阶段，按照 phase1 方法再次在模型浏览器右击 Tunnel_1，在弹出窗口中点击 Advance to text tunnel step，完成第二阶段定义后如图 23 所示。

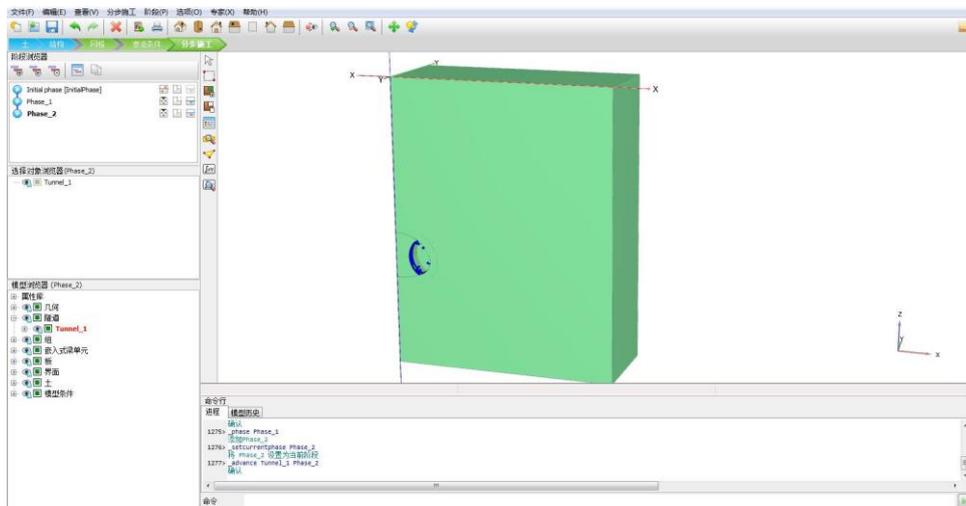


图 23 激活导坑衬砌和临时支撑

- Phase3: 点击添加阶段  添加一个新阶段，在模型浏览器右击 Tunnel_1，在弹出窗口

中点击 Advance to text tunnel step。

- Phase4: 点击添加阶段  添加一个新阶段，在模型浏览器右击 Tunnel_1，在弹出窗口中点击 Advance to text tunnel step。
- Phase5: 点击添加阶段  添加一个新阶段，在模型浏览器右击 Tunnel_1，在弹出窗口中点击 Advance to text tunnel step。
- Phase6: 点击添加阶段  添加一个新阶段，在模型浏览器右击 Tunnel_1，在弹出窗口中点击 Advance to text tunnel step。经过上述操作完成对双侧导坑法隧道施工完整过程的模拟，定义完成后如图 24 所示。

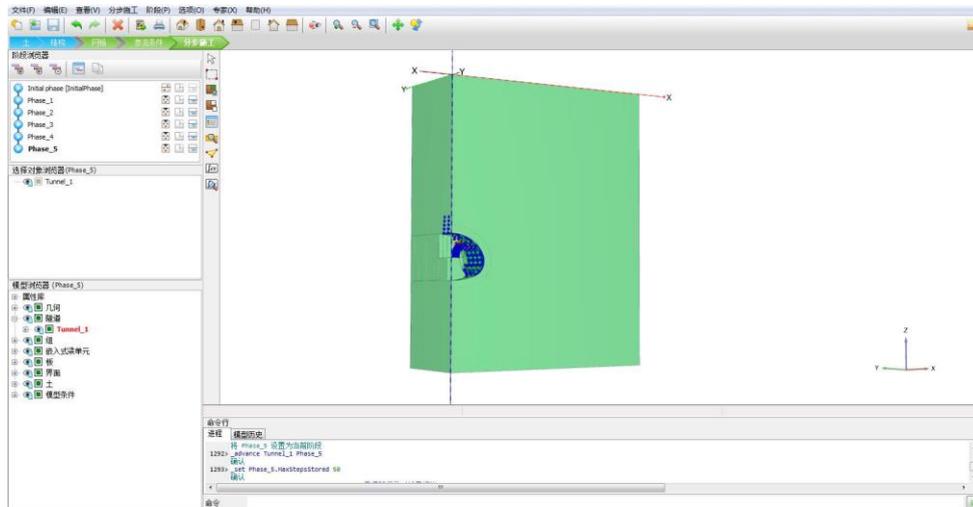


图 24 双侧壁导坑法隧道施工

5. 结果查看

图 25 为隧道围岩竖向变形云图。从图中可以发现，由于开挖卸荷，隧道拱顶周围有向下的位移，最大值 6.49mm，在拱顶位置；而隧道拱底附近有向上隆起的趋势，最大位移 6.299mm。

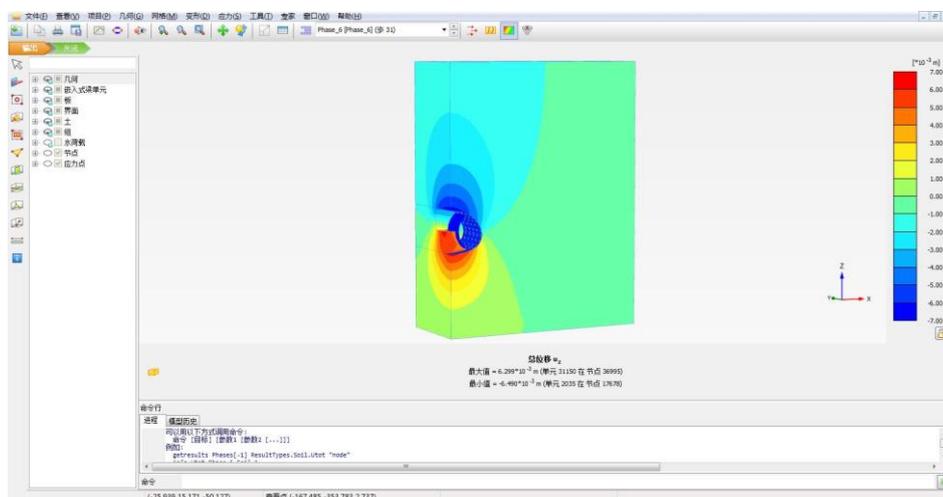


图 25 围岩竖向变形

开挖之后隧道围岩主应力方向如图 26 所示，从图中可以看出，最大主应力方向发生明显偏转，开挖面周围最大主应力方向几乎与隧道断面平行，最小主应力方向与隧道断面接近垂直。随着与开挖断面距离的增加逐渐恢复到初始应力状态。

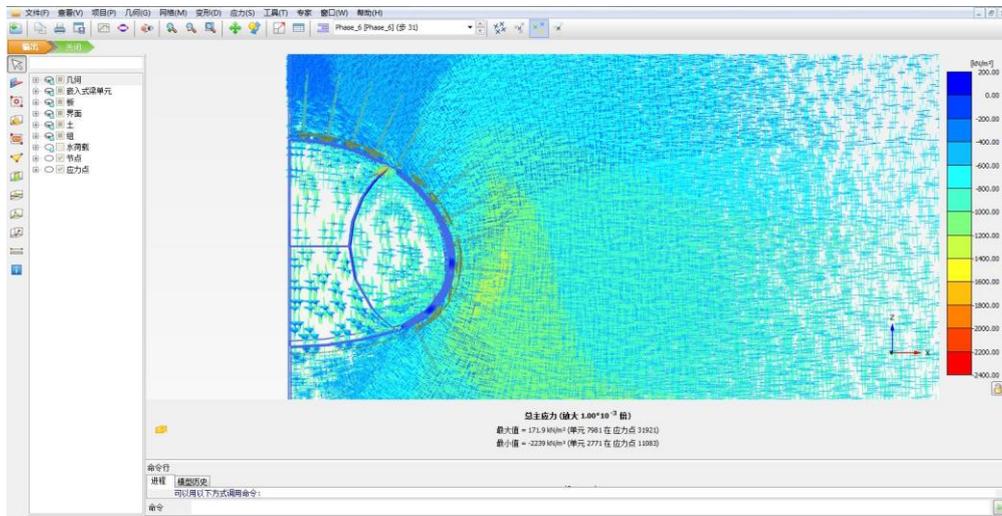


图 26 围岩主应力分布

衬砌沿隧道环向的轴力、弯矩如图 27、图 28 所示。可以看出，隧道环向轴力最大值为 2009kN/m，出现在临时支撑靠近上台阶中间位置；衬砌上轴力分布较均匀，临时支撑上不同位置轴力差别较大。在临时支撑与隧道衬砌相交处弯矩值最大，约为 45.54kN m/m。

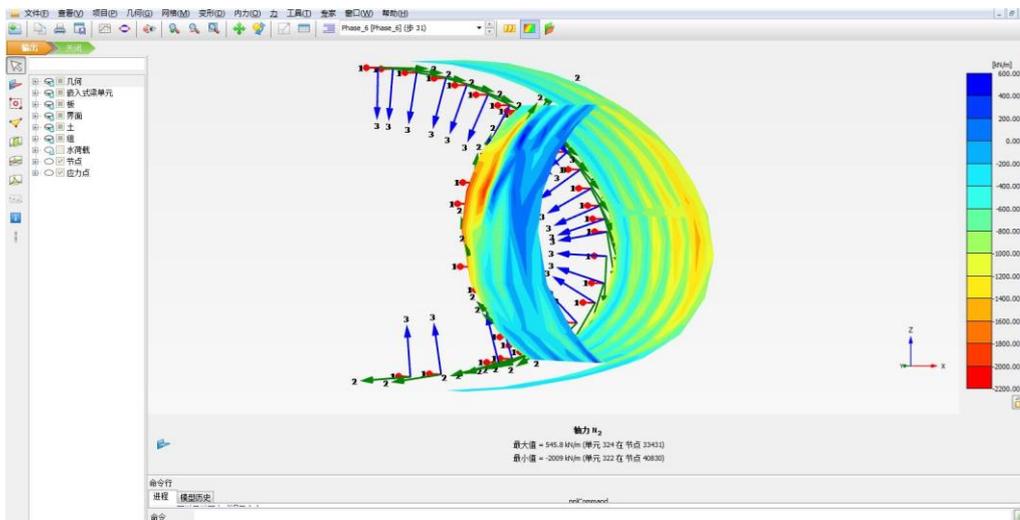


图 27 衬砌轴力 N2 云图

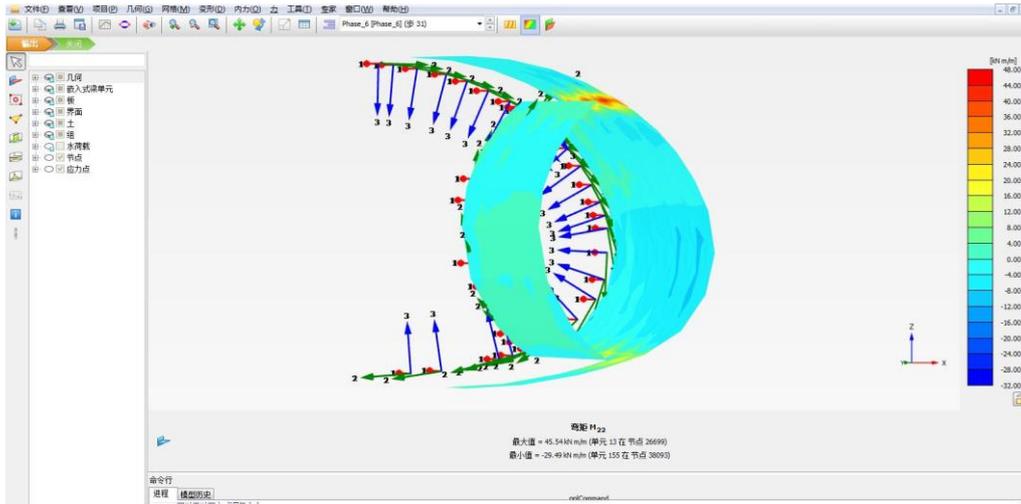


图 28 衬砌弯矩 M22 云图

本教程到此结束！

岩土工程有限元分析软件

PLAXIS 2D[®] 2017

案例教程

地铁车站抗震时程分析



北京筑信达工程咨询有限公司
北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层, 100043

版 权

计算机程序 PLAXIS 及全部相关文档都是受专利法和版权法保护的产品。全球范围的所有权属于 Plaxis bv。如果没有 Plaxis 和北京筑信达工程咨询有限公司的预先书面许可，未经许可的程序使用或任何形式的文档复制一律禁止。

更多信息和此文档的副本可从以下获得：

北京筑信达工程咨询有限公司

北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层 100043

电话：86-10-6892 4600

传真：86-10-6892 4600 - 8

电子邮件：support@cisec.cn

网址：www.cisec.cn

目录

1. 模型概况.....	1
2. 几何模型.....	1
2.1 模型边界.....	1
2.2 定义车站结构.....	2
3. 生成网格.....	6
3.1 有限元网格加密.....	6
3.2 有限元网格自动划分和预览.....	6
4. 边界条件.....	7
5. 分步施工.....	8
6. 结果查看.....	9

1. 模型概况

随着经济的迅猛发展和城市交通的日益拥挤,我国已经进入了地铁工程建设的黄金时代。我国是一个多地震的国家,以往的震害表明,地铁地下结构一旦遭受震破坏,将会给地震应急和震后修复工作带来极大的困难,并且地铁地下结构完全埋深于土中,土-地下结构的动力相互作用将明显改变场地周围土体的动力反应特性,进而影响上部已建和拟建建筑结构的地震反应特征。

本案例介绍地铁车站结构在地震作用下的动力响应。重点讲解如何通过动力乘子和创建线位移来模拟地震波,以及动力分析边界条件的确定。计算完成后绘制动力时间-加速度、动力时间-位移曲线分析车站结构动力响应。车站横断面如图 1 所示,通过学习本案例读者可以掌握地震作用对地铁车站结构影响的分析方法。

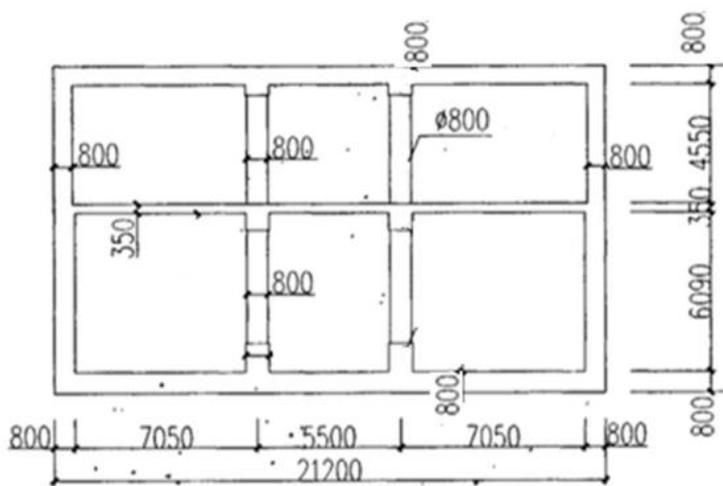


图1 隧道横断面

提示:学习本案例教程之前,需要已经掌握 PLAXIS 软件的基本操作。

2. 几何模型

2.1 模型边界

在项目属性窗口>>模型标签>>模型边界中定义 X 和 Y 方向的边界, $X_{min}=-80$, $X_{max}=80$; $Y_{min}=-50$, $Y_{max}=0$ 。

1.2 定义土层

点击生成钻孔  在 $X=-80$, $Y=0$ 的位置处创建钻孔,如图 2 在修改土层对话框中定义水头高度 $h=-70$ 。然后添加土层并创建土层材料,土层顶部 0,底部-60,土层材料参数如表 1 所示。

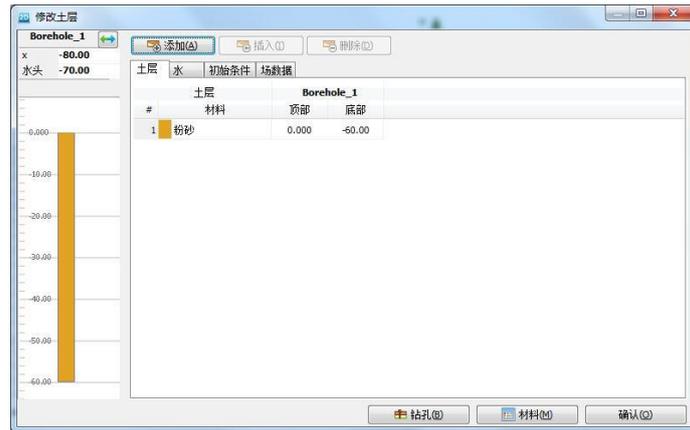


图 2 创建钻孔

表 1 土层材料属性

土类	天然/饱和重度 (kN/m^3)	变形模量 (kPa)	泊松比 ν	粘聚力 (Mpa)	内摩擦角 ($^\circ$)	剪胀角 ($^\circ$)
粉砂	20/20	43000	0.3	1	34	4

2.2 定义车站结构

在**结构**→**结构**菜单中使用板模拟地铁结构顶板、底板、柱、楼板。采用的建模方法是先建立车站底板，然后通过阵列命令生成楼板和顶板，最后连接板生成柱和侧墙。

- 通过**创建板**  命令生成底板：(-10.2, -17.79) (10.2, -17.79)。如图 3 所示。

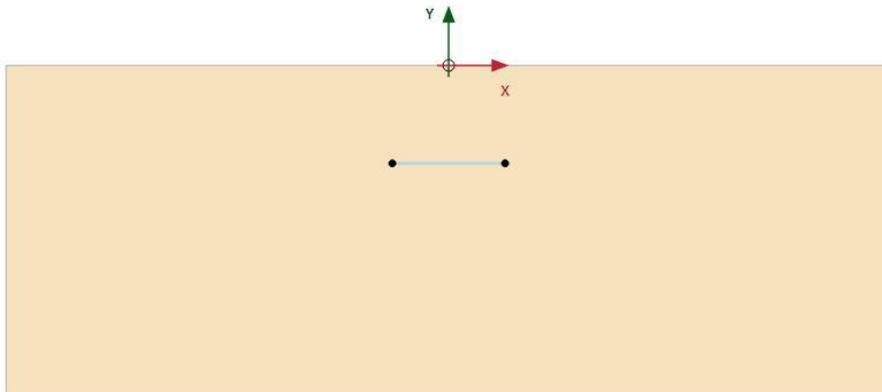


图 3 创建底板

- 通过**创建阵列**  命令生成楼板、顶板：选中生成的底板，选择阵列，方向：y 方向，数量 2 个，列距 6.665；选中底板，选择阵列，方向：y 方向，数量 2 个，列距 11.79。创建的楼板、顶板如图 4 所示。

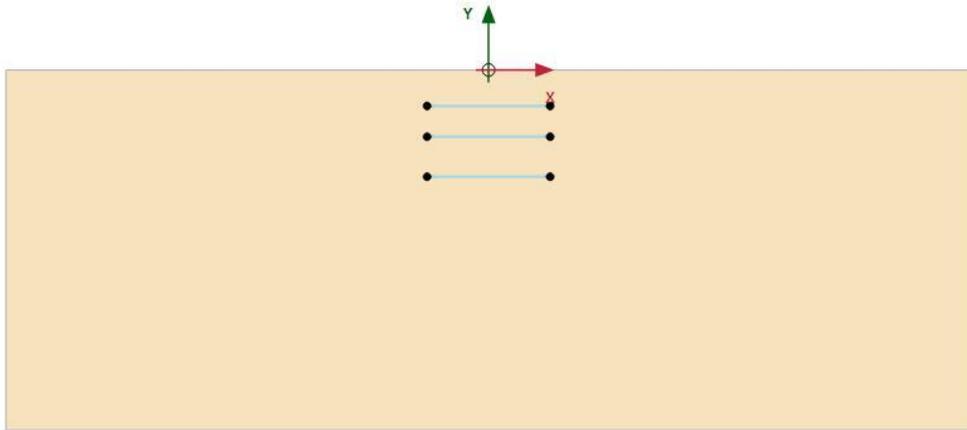


图 4 生成楼板和顶板

- 通过**创建板**模拟侧墙：(-10.2,-17.79) (-10.2,-6)，如图 5。

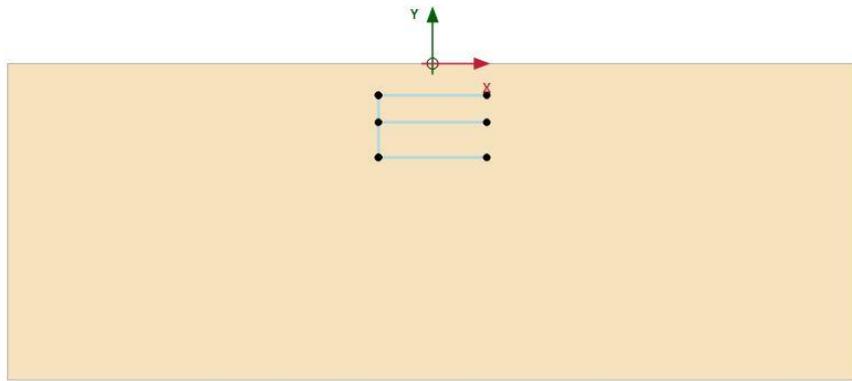


图 5 生成侧墙

- 通过创建**阵列**命令  生成两排中心柱、侧墙：选中生成的侧墙，选择阵列，方向：x 方向，数量 2 个，列距 7.45；再次选中侧墙，选择阵列，方向：x 方向，数量 2 个，列距 12.95；第三次选中侧墙，选择阵列，方向：x 方向，数量 2 个，列距 20.4；创建完成后如图 6 所示。

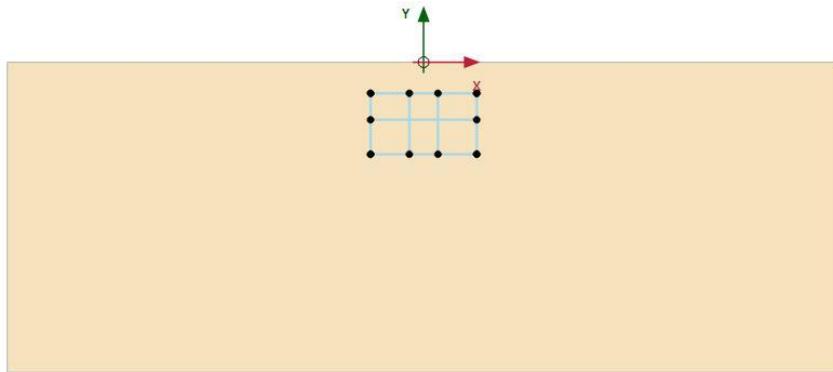


图 6 车站结构

- 如图 7，选中代表右侧墙的板单元，和代表底板的板单元，右键选择创建**负向界面** ；选中代表左侧墙的板单元，和代表顶板的板单元，右键选择创建**正向界面** 。

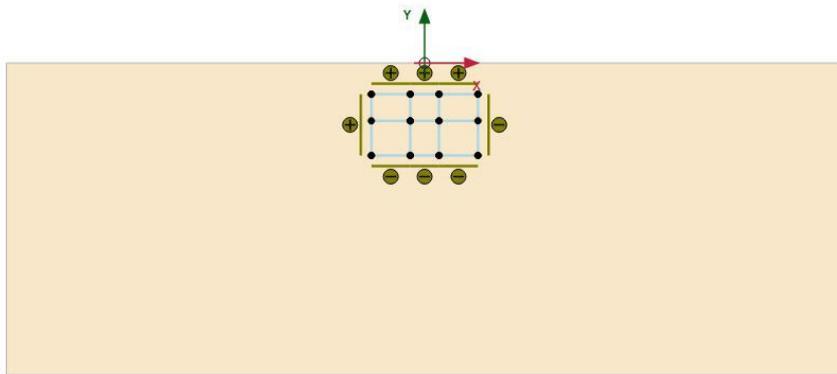


图 7 创建界面

- 点击显示材料 ，材料组类型选择板，根据表 2 创建相应板材料数据组。

表 2 车站结构材料参数

参数	名称	侧墙/顶板/底板	楼板	圆柱	单位
材料类型	类型	弹性；各向同性	弹性；各向同性	弹性；各向同性	-
轴向刚度	EA	24000000	10500000	1256637.06	kN/m
抗弯刚度	EI	1280000	107187.5	31582.7	kNm ² /m
重度	w	5	5	0	kNm/m
泊松比	v	0.15	0.15	0.15	-
瑞利波	α	0.232	0.232	0.232	
瑞利波	β	0.008	0.008	0.008	

- 为定义的结构单元赋予对应的材料参数：选中结构后在选择浏览器指定相应材料属性。定义完成后如图 8。

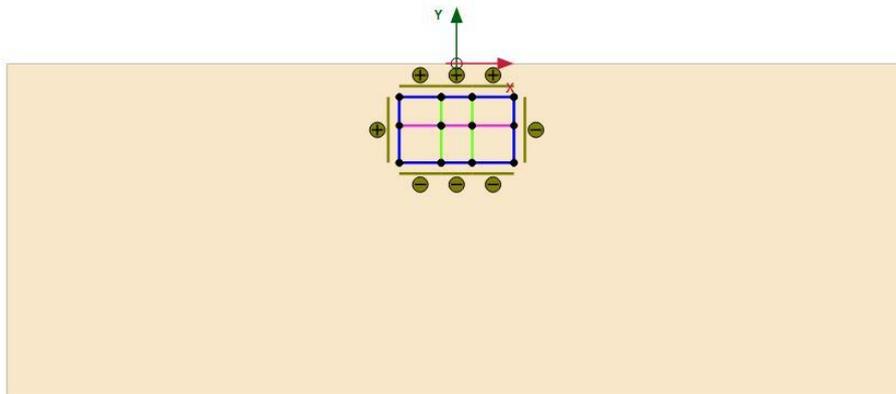


图 8 指定车站结构材料属性

注意：为了方便区分地铁车站结构不同部分结构，可以更改楼板、柱材料颜色。

- 定义地震波：通过菜单栏**结构>>显示动力乘子**，点击  新建位移乘子；点击  打开文件，找到 **smc225.txt** 文档路径并打开，导入地震波，按图 9 设置地震波定义参数，点击确定关闭窗口。

注意：地震波文件 smc22.txt 可以通过百度网盘下载，链接为：<https://pan.baidu.com/s/1c21och6>

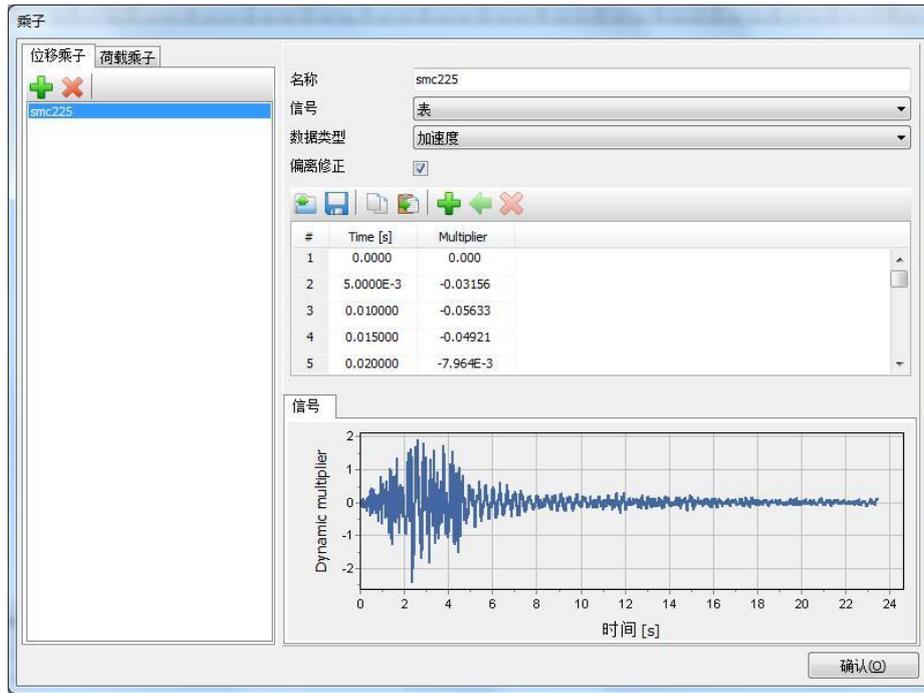


图 9 地震波定义

- 点击**创建线位移**  **线位移**，在点 (-80, -60)、(80, -60) 之间创建线位移，按图 10 设置相应参数。定义完成后的分析模型如图 11 所示。

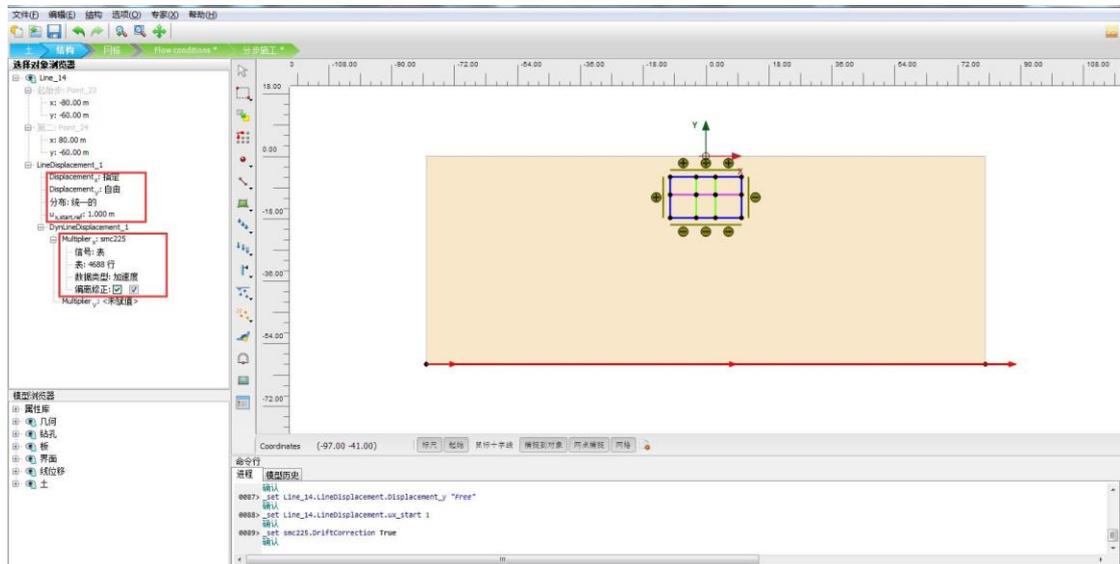


图 10 地震作用模拟

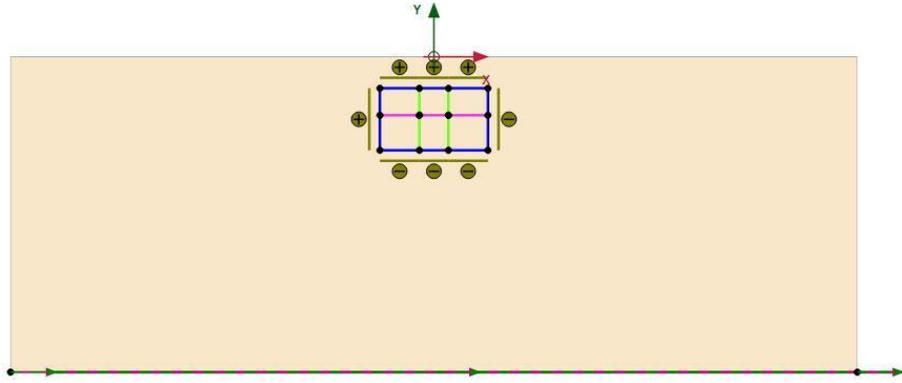


图 11 定义完成的分析模型

3. 生成网格

切换到**网格**模式，进行有限元网格剖分。

3.1 有限元网格加密

- 程序已自动将结构单元网格进行加密，以绿色显示，其余部分未加密，以灰色显示。
- 为了更准确的分析土—车站结构的相互作用，将车站内土层进行网格加密。如图 12，选中这些土层类组，在选择浏览器中将粗糙系数修改为 0.25。

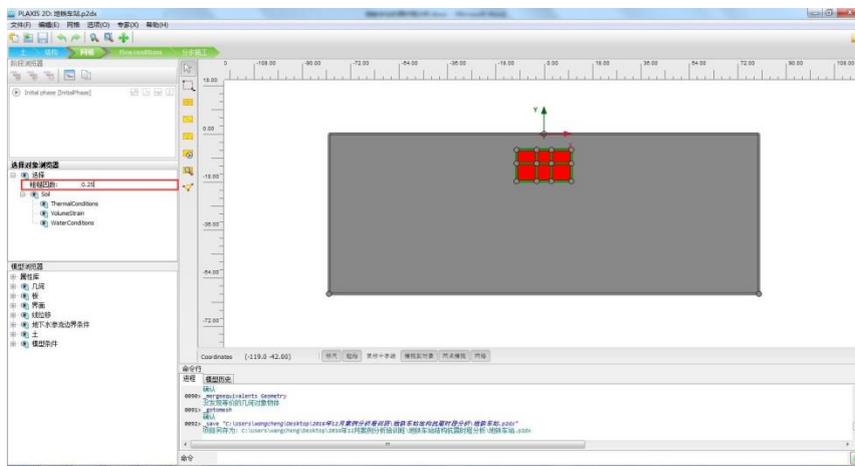


图 12 网格加密

3.2 有限元网格自动划分和预览

- 点击  **创建网格**，设置单元分布(Element distribution)为细，点击确认自动划分网格。
- 点击  **预览**生成的网格，图 13 为程序自动生成的网格。
- 单击**关闭**按钮，关闭输出窗口。

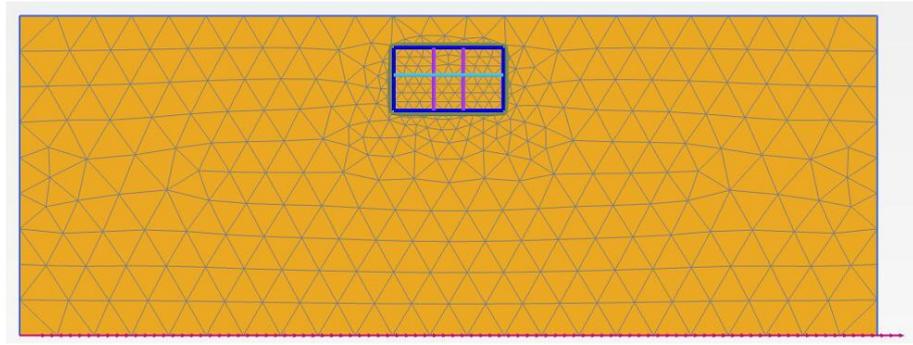


图 13 生成的网格

4. 边界条件

地震荷载施加在水平方向，将竖向边界条件定义为粘性，水平边界定义为无。

- 动力边界条件: 在**模型浏览器**»**模型条件**»**Dynamics** 子菜单下按照图 14 设置动力边界，将 X 轴方向设置为粘性边界。



图 14 动力边界

5. 分步施工

初始阶段模拟生成初始应力场，第一阶段模拟施工车站结构，第二阶段模拟地震对车站结构的影响。

- 初始阶段：采用默认设置，计算类型：k0 过程；荷载类型：分步施工。
- 施工地铁车站：计算类型：塑性计算；荷载类型：分步施工；勾选重置位移为零。选中并冻结车站土体。在竖向菜单栏通过**选择结构**工具选中所有板单元，如图 15，在选择浏览器激活所有板，界面单元。

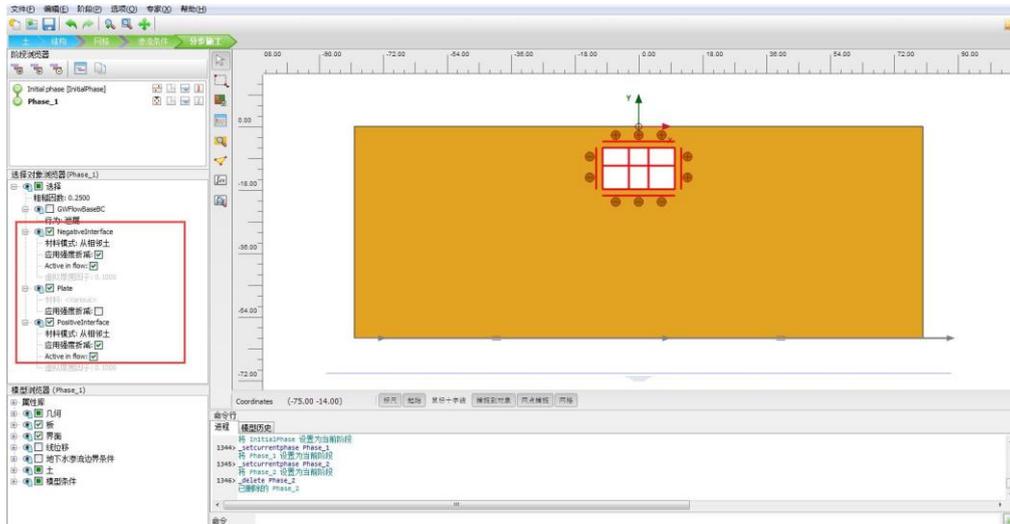


图 15 施工地铁车站

- 地震计算：如图 16 设置参数，计算类型：动力；荷载类型：分步施工；动力时间间隔：20s；勾选重置位移为零。本阶段需在在模型浏览器窗口激活**线位移**。

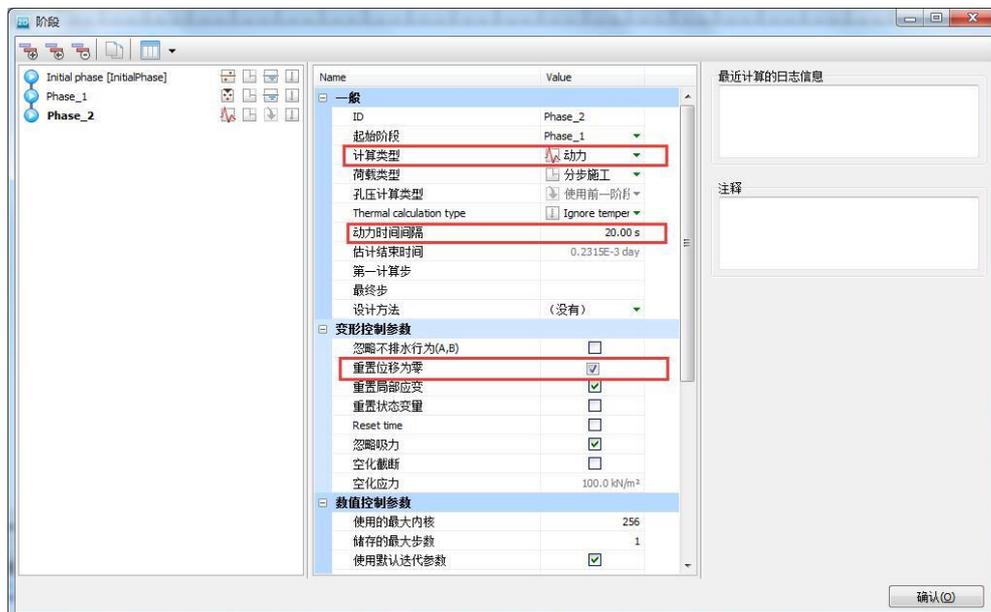


图 16 地震计算阶段设置

- 点击选择生成曲线所需的点 ，如图 17 搜索并选择节点 A (-2.75, -17.79)，在后处理阶段将以节点 A 计算结果生成曲线。



图 17 选择生成曲线的点

6. 结果查看

计算完成后，点击查看计算结果 ，在后处理程序中可以查看计算结果。在 **变形»** **总位移** 菜单下可以查看土体位移，点击矢量图即可显示位移矢量图。图 18 为地震作用下土体位移矢量图，从图中可以看出，车站顶板、底板周边土体有隆起现象。

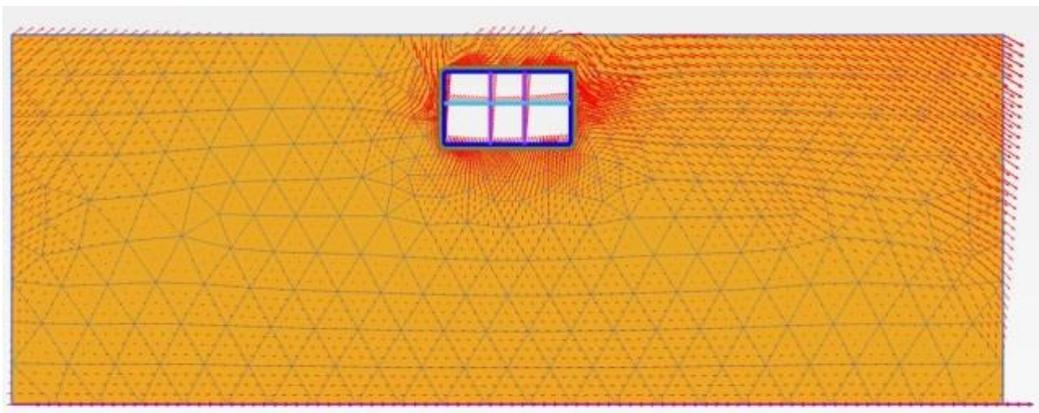


图 18 地震作用下土体变形矢量图

点击左侧竖向工具栏拖拽窗口选择结构 ，框选车站结构在弹出窗口选择板后点击视图确认。在菜单栏 **力** 菜单下可以查看结构轴力、剪力、弯矩。图 19 为车站结构轴力分布图，缩放因子为 0.003，可以看出车站底板、中心柱上轴力较大，最大值 950.7kN/m；侧墙上部轴力小、下部轴力大；顶板、楼板轴力较小，最小值 80.9kN/m。

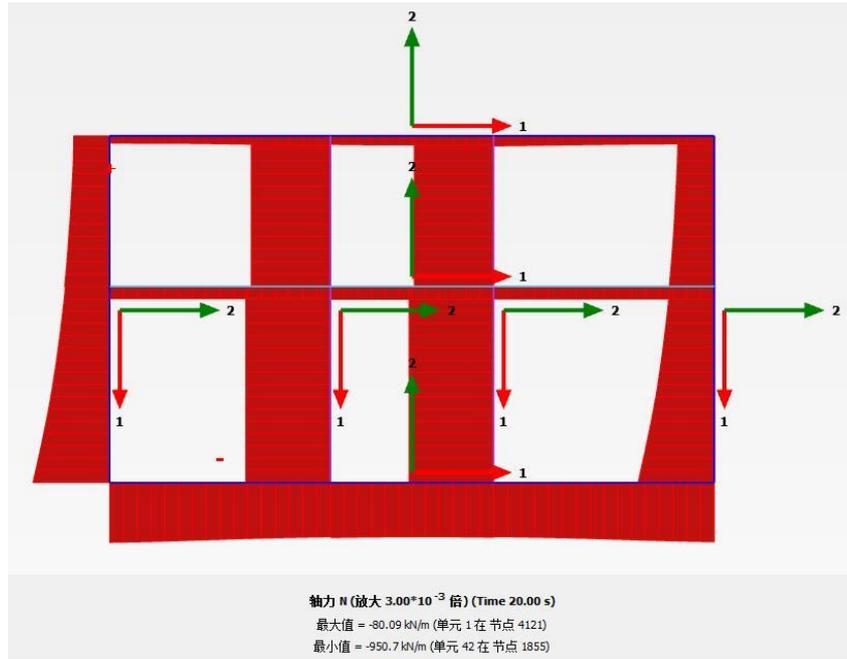


图 19 车站结构轴力分布

图 20 为车站结构剪力分布图，从图中可以看出剪力较大部位为车站底板、顶板、侧墙，最大值为 874.4kN/m；中心柱和楼板剪力较小，在缩放因子为 0.003 时几乎观察不到剪力。

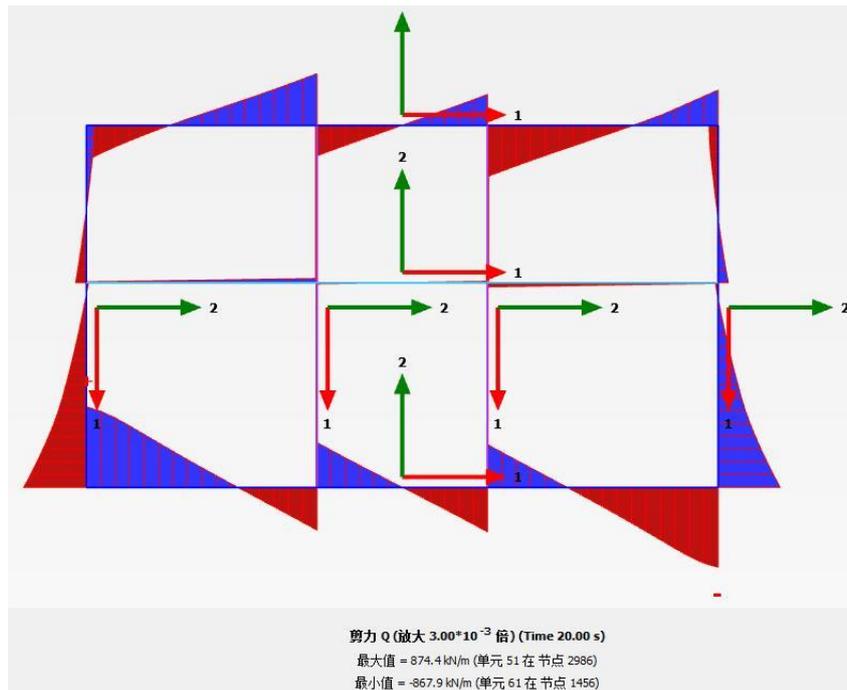


图 20 车站结构剪力分布

图 21 为车站结构弯矩分布图，与车站结构剪力分布类似，顶板、底板、侧墙处弯矩值较大，最大值 1588kN/m/m；楼板、中心柱上弯矩值较小。

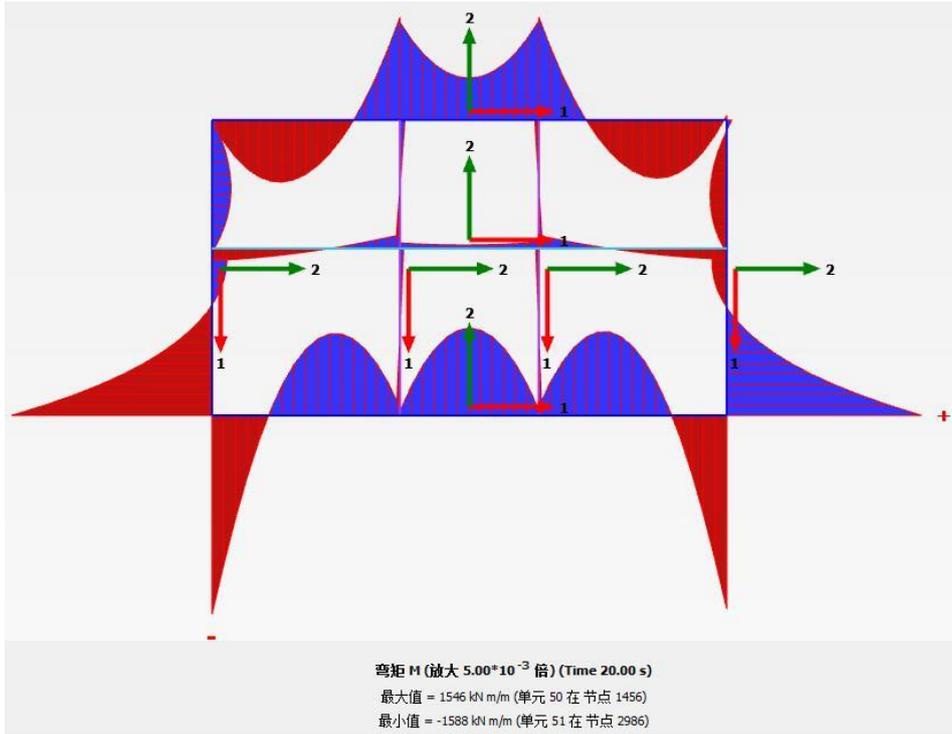


图 21 车站结构弯矩分布图

注意：为了调整显示比例，通过点击后处理菜单栏**查看»比例**，弹出缩放因子窗口可以调整图形显示比例以便查看。

图 22-24 为车站底板位置动力监测结果，可以看出车站底板结构加速度发展趋势与地震波形态类似。

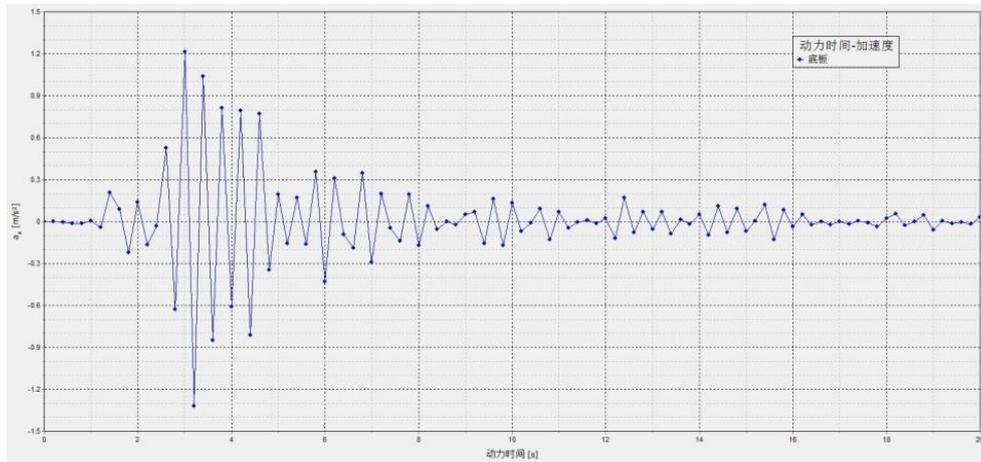


图 22 车站底板动力时间—加速度

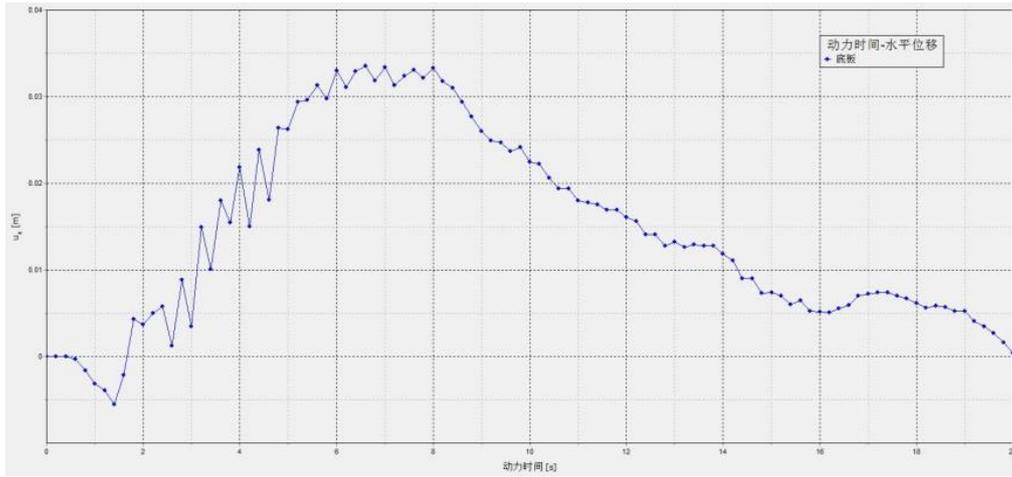


图 23 车站底板动力时间—水平位移

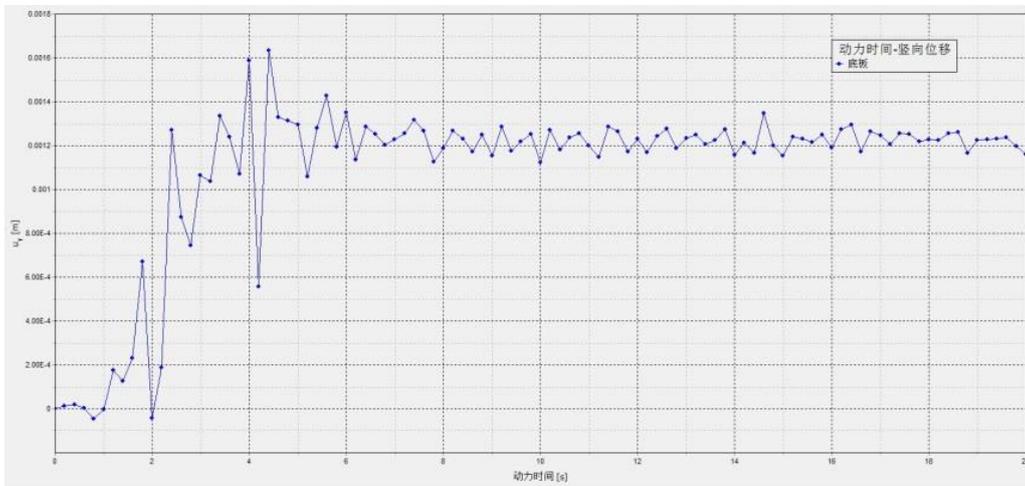


图 24 车站底板动力时间—竖向位移

本教程到此结束！

岩土工程有限元分析软件

PLAXIS 2D[®] 2017

案例教程

公路边坡支护与稳定性分析



北京筑信达工程咨询有限公司
北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层, 100043

版 权

计算机程序 PLAXIS 及全部相关文档都是受专利法和版权法保护的产品。全球范围的所有权属于 Plaxis bv。如果没有 Plaxis 和北京筑信达工程咨询有限公司的预先书面许可，未经许可的程序使用或任何形式的文档复制一律禁止。

更多信息和此文档的副本可从以下获得：

北京筑信达工程咨询有限公司

北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层 100043

电话：86-10-6892 4600

传真：86-10-6892 4600 - 8

电子邮件：support@cisec.cn

网址：www.cisec.cn

目录

1. 模型概况.....	1
2. 几何模型.....	1
2.1 模型边界.....	1
2.2 结构模式.....	2
3. 网格划分.....	4
3.1 有限元网格加密.....	4
3.2 有限元网格自动划分和预览.....	4
4. 分步施工定义.....	5
5. 结果查看.....	9
5.1 破坏机理分析.....	9
5.2 不同阶段安全系数分析.....	10

1. 模型概况

近年来，我国高速公路建设飞速发展，高等级公路的修筑也逐步由东部转向西部，由平原地区转向山区，不可避免地会碰到一些深挖、高填等形式的半填半挖路堤。由于开挖、回填均改变了原边坡的坡率，路堤施工后的边坡稳定性状况发生较大变化；雨季持续的强降雨会导致山体水位抬升，也会较大程度影响路堤边坡稳定性。

本案例分析模型如图 1、图 2 所示，在施工阶段分别对旱季低水位、雨季强降雨高水位条件下边坡安全性进行了分析，对比了两种工况下的潜在滑移面位置、边坡安全系数，并进一步分析了高水位条件下采用三排土钉支护方式时的路堤边坡稳定性。通过学习本案例，读者可以掌握 PLAXIS 3D 中边坡稳定性的分析方法。

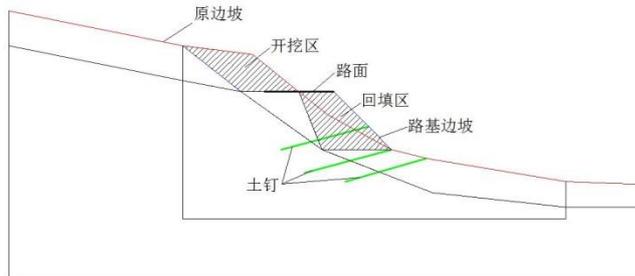


图 1 工程概况

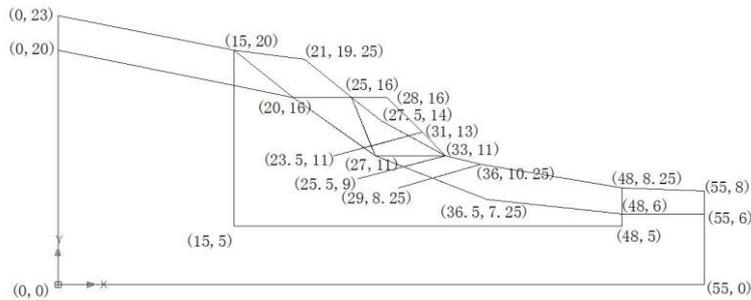


图 2 分析模型坐标

提示：学习本案例教程之前，需要已经掌握 PLAXIS 软件的基本操作。

2. 几何模型

2.1 模型边界

- 打开 PLAXIS 2D 程序。将会弹出快速选择对话框，选择一个新的工程。
- 在工程属性窗口的工程标签下，键入一个合适标题。
- 在模型标签下，模型（平面应变）和单元（15-Node）保持默认选项。
- 在几何形状设定框中土层模型尺寸可以采用默认值。

2.2 结构模式

读者可以通过定义钻孔、在 palxis 中创建土多边形、根据图 2 所示坐标绘制 CAD 图形后导入 palxis 三种方式建立分析模型，本案例介绍通过 CAD 文件导入的方法建立分析模型。

- 地层导入: 在 PLAXIS 中, 菜单栏**结构>>输入几何模型**。找到绘制完成的.dwg 文件路径, 打开文件。在导入几何形状窗口, 勾选线和多边形, 导入地层, 如图 3。导入成功后的分析模型见图 4。

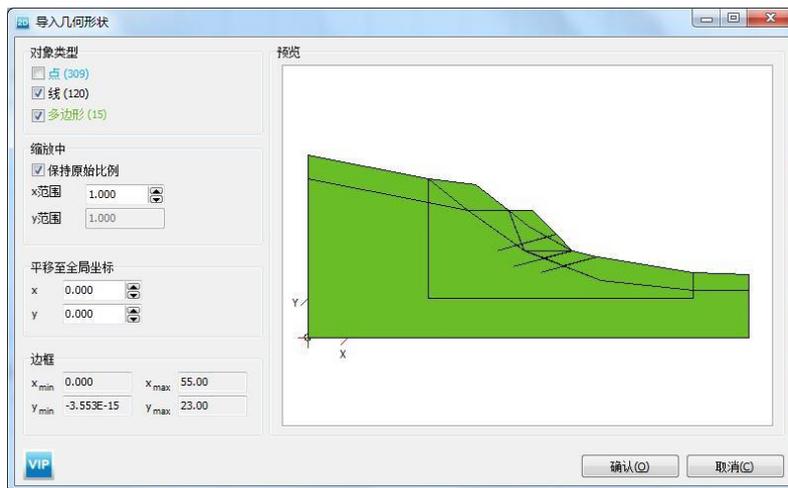


图 3 导入几何形状

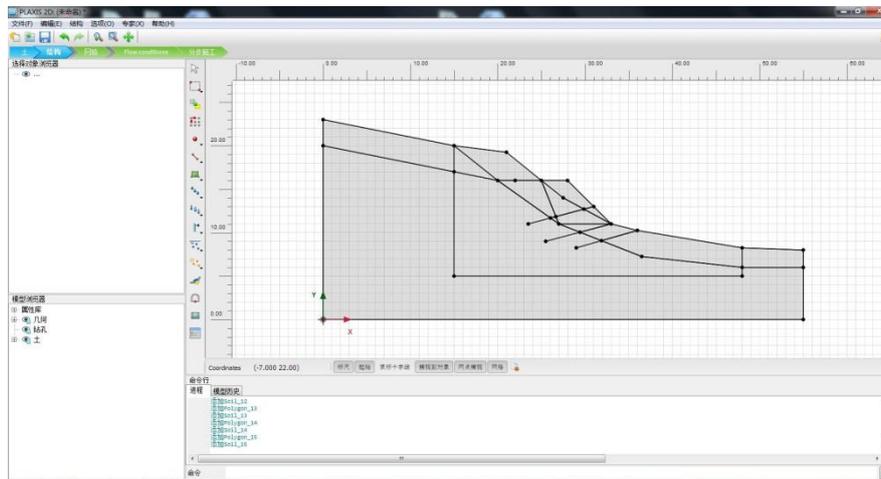


图 4 导入后的分析模型

注意:

通过.dwg 文件导入的方式建模详细方法参考筑信达官网知识库相关文章, 文章链接如下: [如何将 AutoCAD 中创建的几何图形导入到 PLAXIS 2D AE 中?](#)

- 打开**显示材料**  定义岩层和填料材料参数, 各层材料参数见表 1。

表 1 土层材料参数

参数	名称	中风化岩	强风化岩	填料		单位
一般						
材料模型	模型	摩尔库伦	摩尔库伦	摩尔库伦		-
材料类型	类型	排水的	排水的	排水的		-

水位以上土体容重	γ_{unsat}	16	16	19		kN/m^3
水位以下土体容重	γ_{sat}	17	17	21		kN/m^3
初始孔隙比	e_{int}	0.5	0.5	0.5		-
参数						
参考弹性模量	E'	12.00E3	12.00E3	20.00E3		kN/m^2
泊松比	ν'	0.3000	0.3000	0.3000		-
黏聚力	c_{ref}'	8.000	8.000	8.000		kN/m^2
内摩擦角	φ'	35.00	19.00	30.00		$^\circ$
剪胀角	ψ	0.000	0.000	0.000		$^\circ$
流动参数						
数据组	-	标准	标准	标准		-
土类别	-	粗	粗	粗		-
<2 μm	-	10	10	10		%
2 μm -50 μm	-	13	13	13		%
50 μm -2mm	-	77	77	77		%
默认参数	-	否	否	否		-
水平渗透系数	k_x	0.001	0.01	0.1		m/天
竖向渗透系数	k_y	0.001	0.01	0.1		m/天
渗透率变化	c_k	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$		-
界面						
界面强度折减因子	Rinter	1	1	1	1	-
初始						
K_0	-	自动	自动	自动	自动	-

- 创建路面：选中代表路面的线（点（22,16）至点（28,16）），右键选择**创建板**。按表 2 定义路面材料参数。

表 2 路面材料参数

参数	名称	路面	单位
材料类型	类型	弹性；各向同性	-
轴向刚度	EA	250.0E3	kN/m
抗弯刚度	EI	500.0	kNm^2/m
重度	w	3	kNm/m
泊松比	ν	0.2	-

- 创建荷载：为了模拟路面交通荷载，在板上创建荷载，选中板右键选择**创建线荷载**，荷载大小： $-10\text{kN}/\text{m}$ 。
- 创建土钉：选中代表土钉的线，右键选择**创建 embedded beam row**，按表 3 定义土钉材料参数。定义完成的分析初始模型见图 5。

表 3 土钉参数

参数	名称	土钉	单位
刚度	E	$1\text{E}10^7$	kN/m^2

单位重度	γ	4	kN/m^3
桩类型	预定义	大直径圆桩	-
直径	D	0.042	m
水平间距	L_s	2.500	m
侧摩阻力	$T_{\text{top,max}}$	40.00	kN/m
	$T_{\text{bot,max}}$	40.00	kN/m
端阻力	F_{max}	0	kN

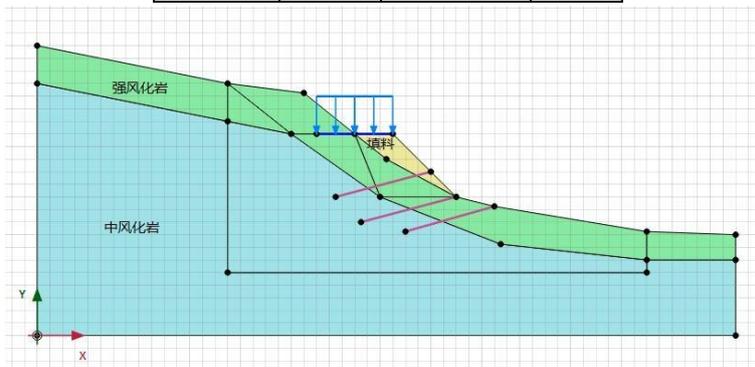


图 5 创建完成的几何模型

3. 网格划分

切换到**网格**模式，进行有限元网格剖分。

3.1 有限元网格加密

- 程序已自动将结构单元（路面，土钉）网格进行加密，以绿色显示，其余部分未加密，以灰色显示。
- 为了更准确的分析路堤周围土层的变形，将路堤附近土层进行网格加密。选中这些土层类组，在选择浏览器中将粗糙系数修改为 0.5。设置完成后如图 6 所示。

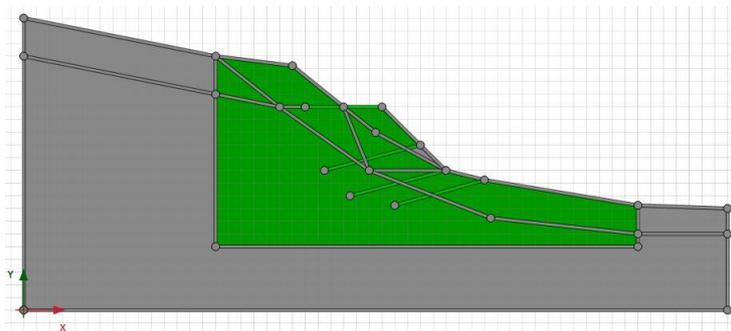


图 6 网格局部加密

3.2 有限元网格自动划分和预览

- 点击  **创建网格**，设置单元分布(Element distribution)为**中等**，点击确认自动划

分网格。

- 点击  **预览**生成的网格。
- 单击**关闭**按钮，关闭输出窗口，图 7 为生成的网格。

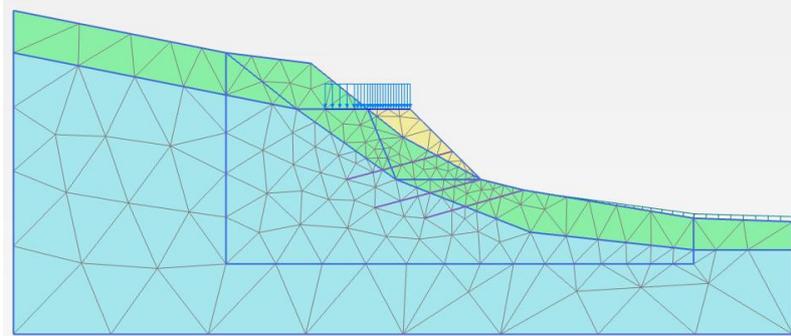


图 7 生成的网格

4. 分步施工定义

1. 初始阶段 (initialphase): 原始边坡状态。

- 切换到渗流模式，点击**创建水位线**  定义原始水位线: user waterlevel_1 (-1,10) (56,10)
- 冻结所有结构单元，冻结填料，恢复原始山坡地层。计算类型: **重力加载**。初始应力阶段定义完成后见图 8。

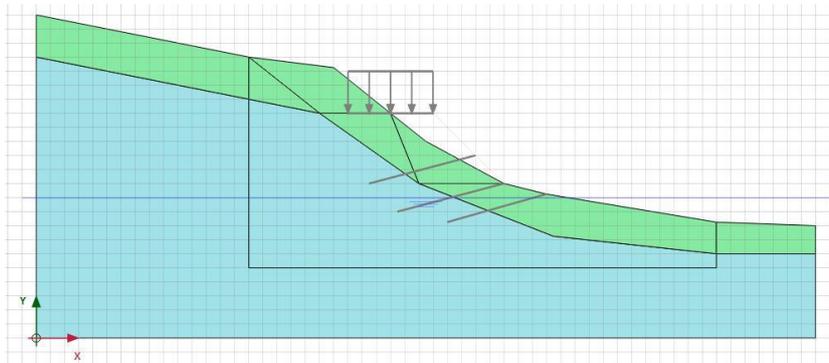


图 8 初始应力

2. 原山坡安全系数 (phase1)

- 阶段窗口: 计算类型: **安全性**; 勾选**重置位移为零**, 见图 9。

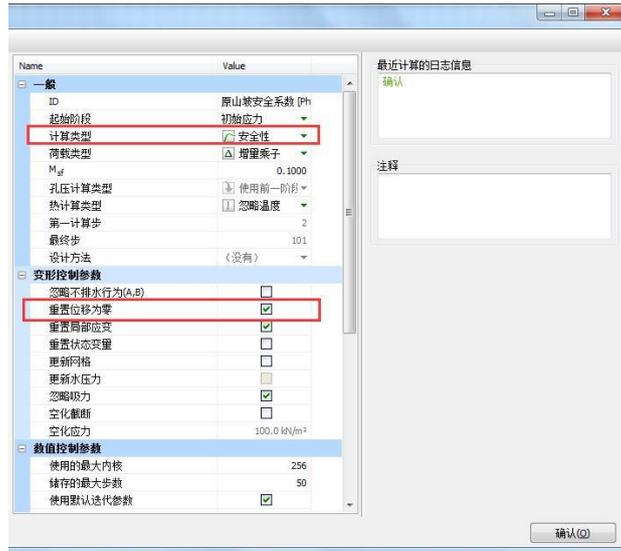


图 9 原山坡安全性分析

3. 路堤施工 (phase2): 模拟挖方段、填方段、路堤施工完成, 并且施加交通荷载之后地基变形。
 - 阶段窗口: 如图 10, 起始阶段选择为初始阶段, 计算类型: 塑性计算; 勾选重置位移为零;

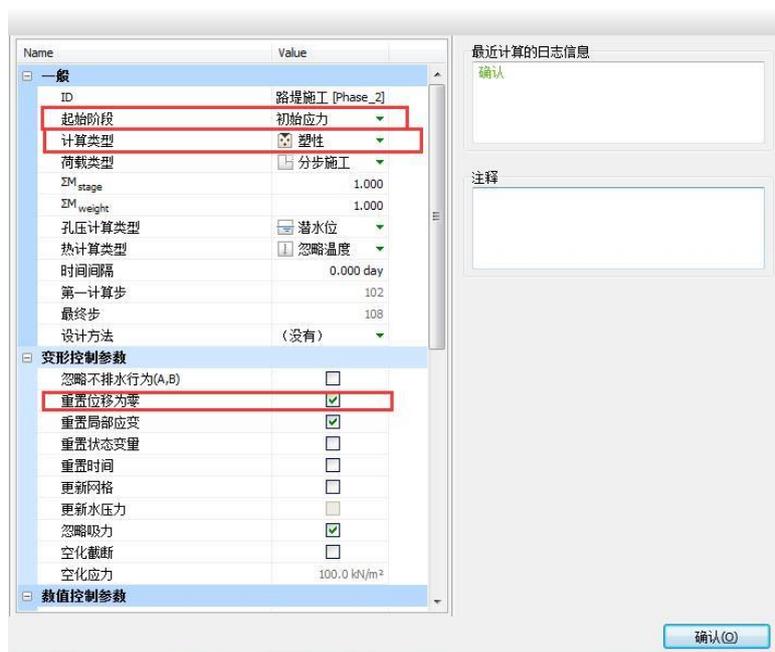


图 10 路堤施工设置

- 选中并冻结设计路面上方的原坡体;
- 激活设计路面下方新填筑部分网格, 将材料设为填料; 替换路面下部相应区域强风化土层为填料;
- 激活代表路面的板单元;
- 激活荷载, 勾选线荷载后在选择浏览器中将 $q_{y,start,ref}$ 设置为-10kN/m/m。定义完成后的分析模型如图 11 所示。

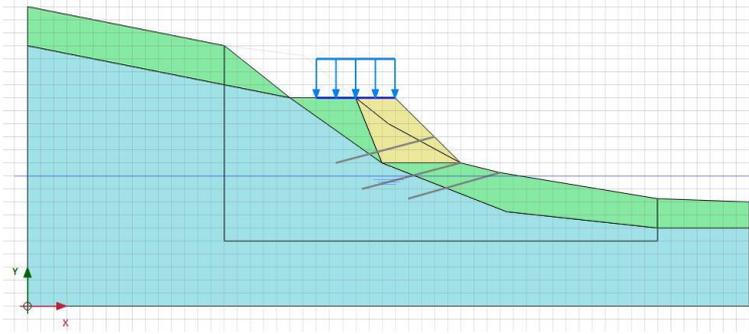


图 11 施工路堤

4. 无降雨安全系数 (phase3)

- 阶段窗口: 计算类型: **安全性**; 勾选**重置位移为零**;

5. 强降雨水位抬升 (phase4): 用于模拟雨期强降雨条件下地下水位抬升。

- 阶段窗口: 如图 12, 起始阶段选择为 phase2; 计算类型: 塑性计算; 孔压计算类型: **稳态地下水渗流**。

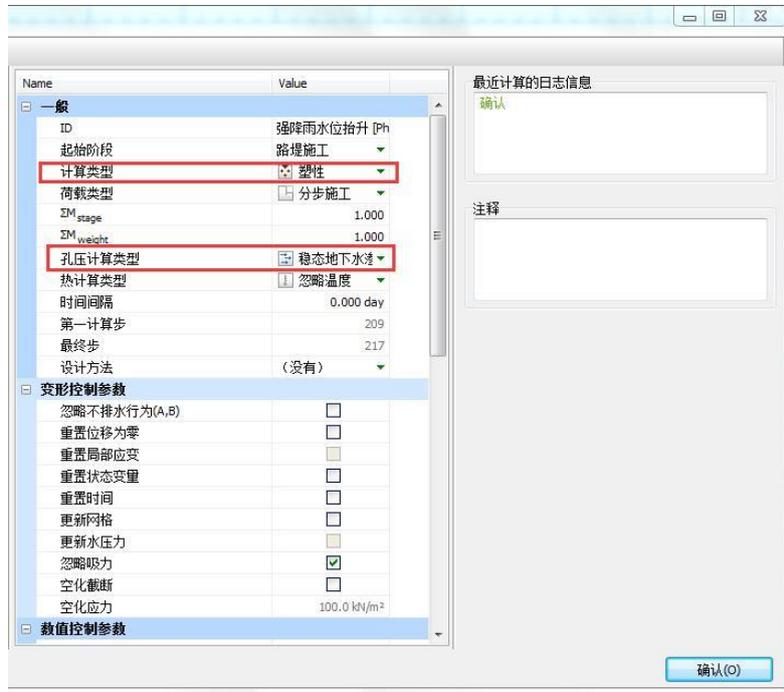


图 12 强降雨水位抬升阶段定义

- 切换至渗流条件模式, 点击**创建水位线** 定义强降雨水位线: user waterlevel_2 (-1,20) (5,20) (20,10) (56,10), 选中水位线 user waterlevel_2 点击鼠标右键将该水位设置为**全局水位**, 如图 13。定义完成的分析模型如图 14。

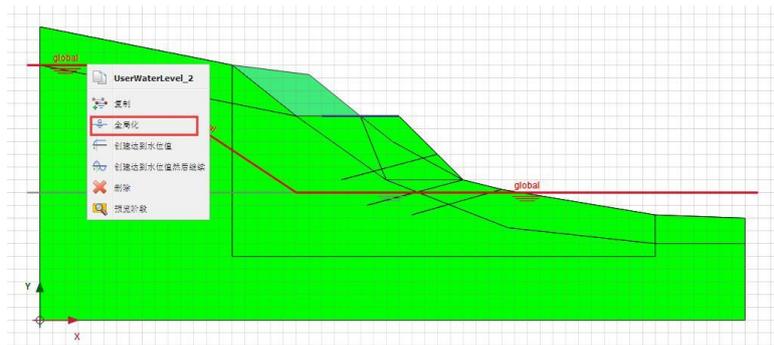


图 13 设置全局水位为 user waterlevel_2

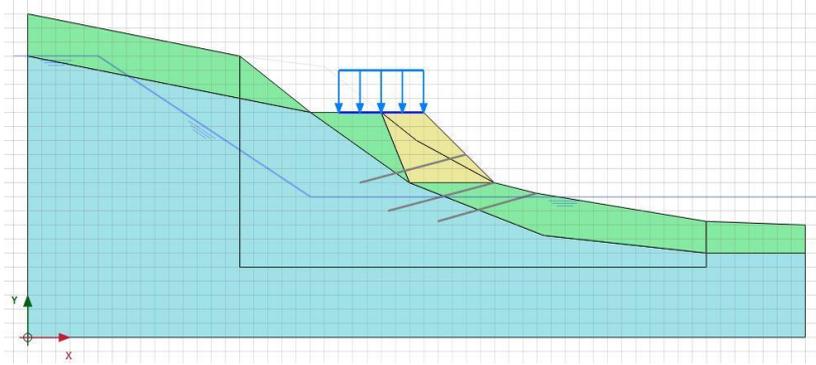


图 14 强降雨条件下山坡水位

6. 强降雨安全系数 (phase5)

- 阶段窗口：起始阶段选择为阶段 4；计算类型：安全性计算；勾选重置位移为零。

7. 打设三排土钉 (phase6)

- 阶段窗口：起始阶段选择为阶段 4；计算类型：塑性计算；
- 选中代表土钉的线点击鼠标右键选择激活三排土钉；设置方法如图 15。

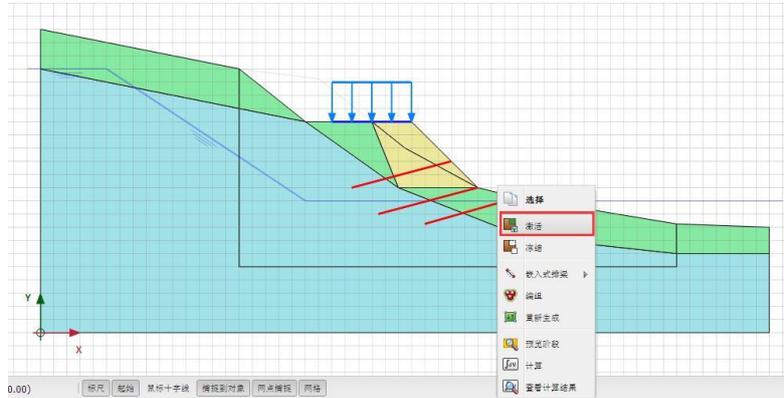


图 15 打设三排土钉

8. 三排土钉安全系数 (phase7)

- 阶段窗口：起始阶段选择为阶段 6；计算类型：安全性计算；勾选重置位移为零。如图 16。

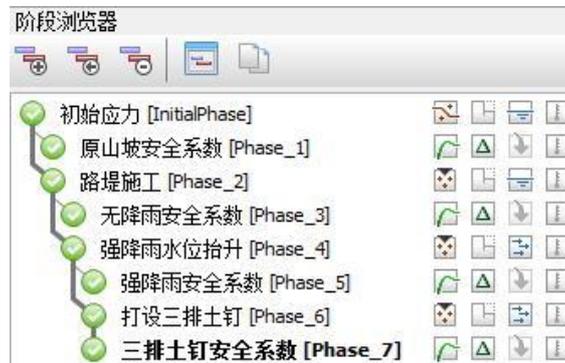


图 16 分步施工工况

9. 选择生成曲线所需要的节点

- 选择生成曲线所需的点 ：如图 17，选择节点 (15,20)、(25,16)、(28,16)、(33,11)，

点击更新 ，保存选中的节点。

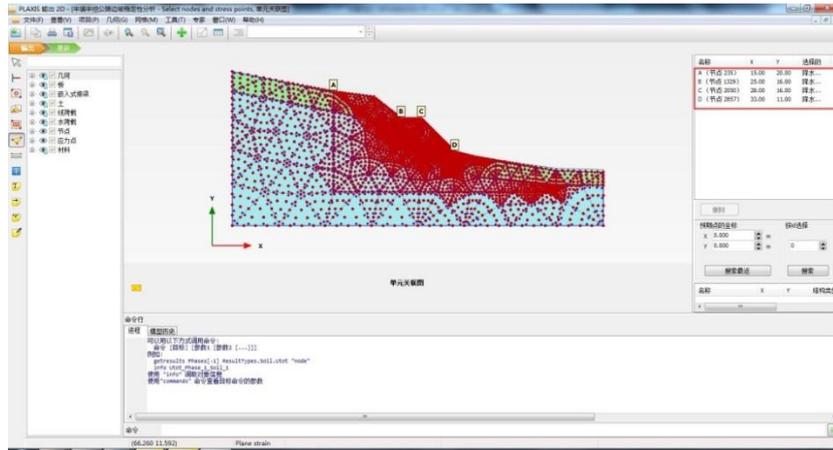


图 17 选择生成曲线所需的点

- 开始计算 ，计算完成后保存  计算结果。

5. 结果查看

计算完成后，在后处理程序中可以查看计算结果 。

5.1 破坏机理分析

通过查看安全性分析阶段的增量位移，可以看出路堤边坡潜在滑移面的位置。

- 计算完成后点击查看计算结果 ，弹出输出程序窗口。
- 点击菜单栏**变形>>增量位移**，查看增量位移云图。
- 切换显示阶段，查看无降雨安全系数、强降雨安全系数、三排土钉安全系数等不同阶段的增量位移。

图 18、图 19 分别显示了无降雨和强降雨时边坡的增量位移云图，图中可以看出边坡潜在滑移面的位置，对比可以发现无降雨和强降雨条件下路堤边坡潜在滑移面位置未发生明显变化，这是由于水位变化影响范围处于潜在滑移面以下，对边坡破坏影响较小。无降雨时边坡安全系数为 1.192，强降雨条件下边坡安全系数为 1.112。图 20 为采用三排土钉加固后的增量位移云图，可以看出潜在滑移面明显向坡体内部移动，此时边坡安全系数为 1.583。

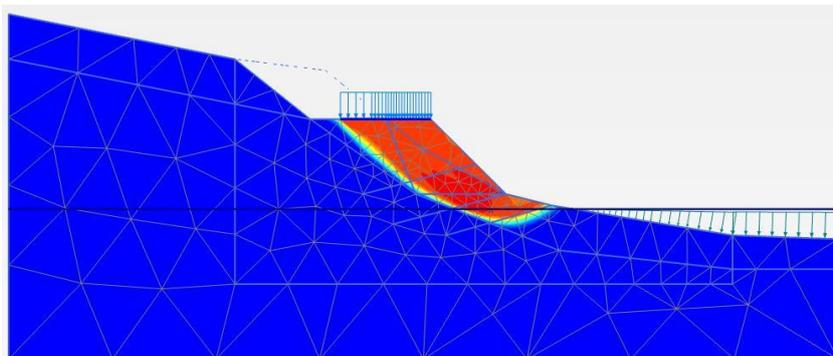


图 18 无降雨时边坡潜在滑移面

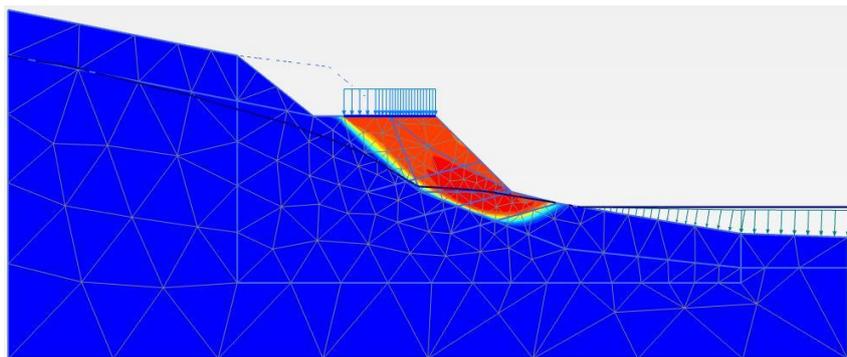


图 19 强降雨时边坡潜在滑移面

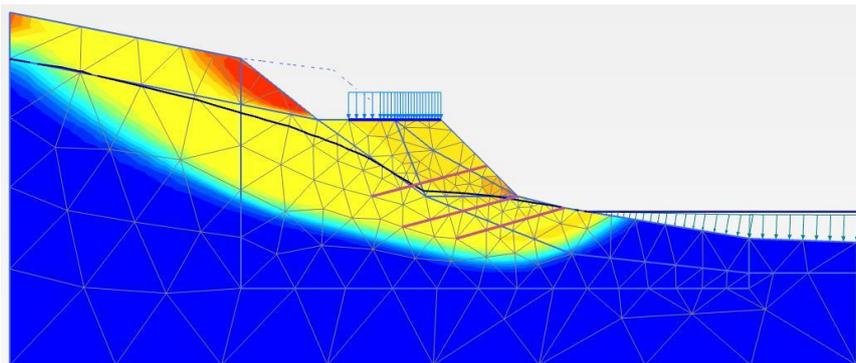


图 20 打设三排土钉时边坡潜在滑移面

5.2 不同阶段安全系数分析

- 点击曲线管理器 ，新建曲线，X 轴选择节点 B (25,16)，窗口内选择变形>>总位移|u|，Y 轴选择项目，窗口内选择乘子>> $\sum Msf$ 。本案例仅以节点 B 为例进行分析，读者可以选择其他几个节点进行练习。
- 点击设置 ，弹出设置窗口，如图 21。设置标题为原山坡，点击右上角阶段，弹出图 22 所示的选择阶段窗口，表示选择生成曲线的阶段，仅勾选 phase1。完成生成原山坡安全系数曲线相关设置。

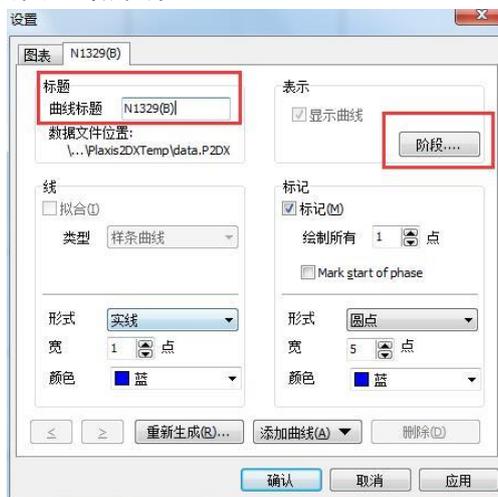


图 21 曲线设置窗口



图 22 选择生成曲线的阶段

- 右键点击任意位置，选择**添加曲线>>从当前项目**，弹出曲线生成窗口，如图 23，点击确认。修改曲线标题为无降雨，点击**阶段**，仅勾选 phase3。完成对无降雨安全系数阶段的曲线添加。

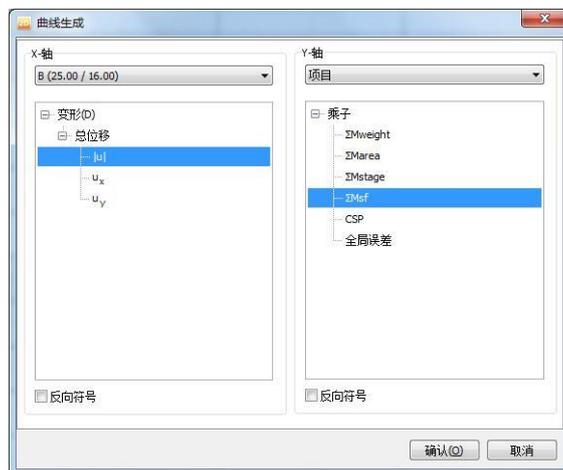


图 23 曲线生成

- 重复上述操作，分别完成对 phase5、phase7 两个阶段的曲线添加。Phase5 曲线标题为强降雨，phase7 曲线标题为三排土钉。
- 如图 24，在**图表**菜单设置曲线显示比例、名称：X 轴缩放更改为手动，最大化：0.00，最大 10.0；Y 轴缩放改为手动，最大化：1.00，最大：1.70；设置图标名称：位移—安全系数。点击确认关闭窗口，点击保存  图表。



图 24 曲线显示比例设置

查看计算过程保存的曲线，图 25 为节点 (25,16) 位置位移—安全系数曲线，曲线达到稳定阶段后的纵坐标值即为安全系数。从图中可以看出，无降雨时安全系数为 1.192，强降雨时安全系数为 1.112，强降雨条件下边坡安全系数比无降雨条件下低；三排土钉加固时安全系数为 1.583，采用三排土钉支护时边坡安全系数提高。

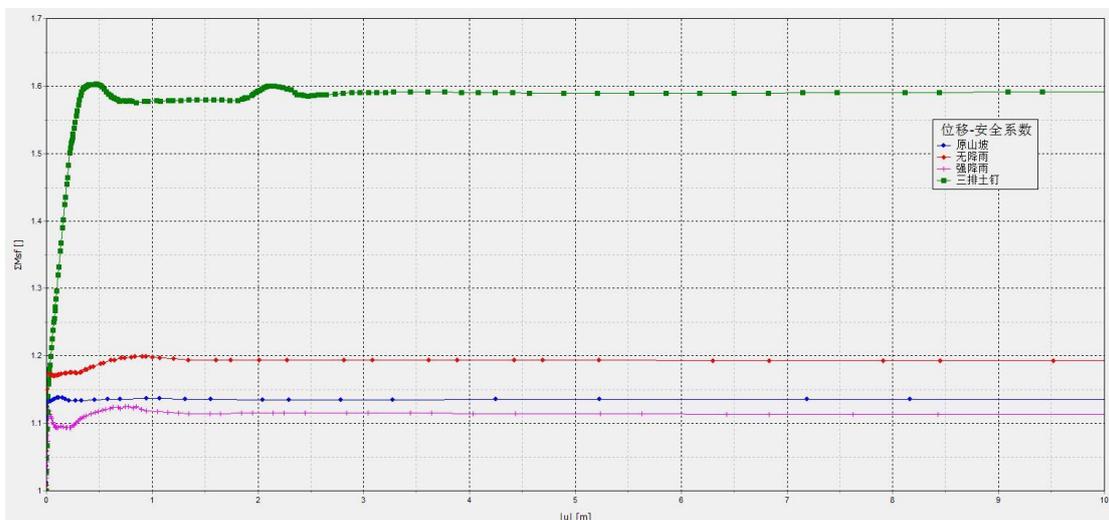


图 25 位移—安全系数曲线

本教程到此结束！

岩土工程有限元分析软件

PLAXIS 2D AE[®]

案例教程

基坑开挖对邻近隧道的影响分析



北京筑信达工程咨询有限公司
北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层, 100043

版 权

计算机程序 PLAXIS 及全部相关文档都是受专利法和版权法保护的产品。全球范围的所有权属于 Plaxis bv。如果没有 Plaxis 和北京筑信达工程咨询有限公司的预先书面许可，未经许可的程序使用或任何形式的文档复制一律禁止。

更多信息和此文档的副本可从以下获得：

北京筑信达工程咨询有限公司

北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层 100043

电话：86-10-6892 4600

传真：86-10-6892 4600 - 8

电子邮件：support@cisec.cn

网址：www.cisec.cn

北京筑信达工程咨询有限公司版权所有©, 2013.

目录

基坑开挖对邻近隧道的影响分析.....	1
工程概况.....	2
几何模型创建.....	3
1.1 项目属性.....	3
1.2 土层定义.....	3
1.3 结构单元定义.....	6
有限元网格划分.....	11
2.1 有限元网格加密.....	11
2.2 有限元网格自动划分和预览.....	11
计算阶段定义.....	13
3.1 初始阶段.....	13
3.2 隧道开挖.....	13
3.3 地连墙施工.....	14
3.4 第一层开挖.....	15
3.5 第二层开挖.....	15
3.6 第三层开挖.....	15
查看计算结果.....	17
4.1 地层变形.....	17
4.2 结构变形及内力.....	18

基坑开挖对邻近隧道的影响分析

随着城市地铁和高层建筑的兴建,建筑基坑工程与地铁隧道工程之间的相互影响问题日渐突出。特别是在二者之间距离较近的情况下,在既有隧道附近开挖基坑,势必会造成隧道的一定变位,而运营时期的地铁隧道对位移比较敏感,一般有较高的控制要求,反之亦然。

通过对建模、分析、后处理过程的详细说明,指导读者在 PLAXIS 2D 中分析基坑开挖对邻近隧道的影响,从中了解软件在隧道建模(隧道设计器)、盾构隧道施工(如土层损失)、基坑支护结构(地连墙、内支撑等)、基坑分步开挖、基坑降水、计算结果分析等方面的实现方法。

本案例教程的分析模型如图 1 所示。

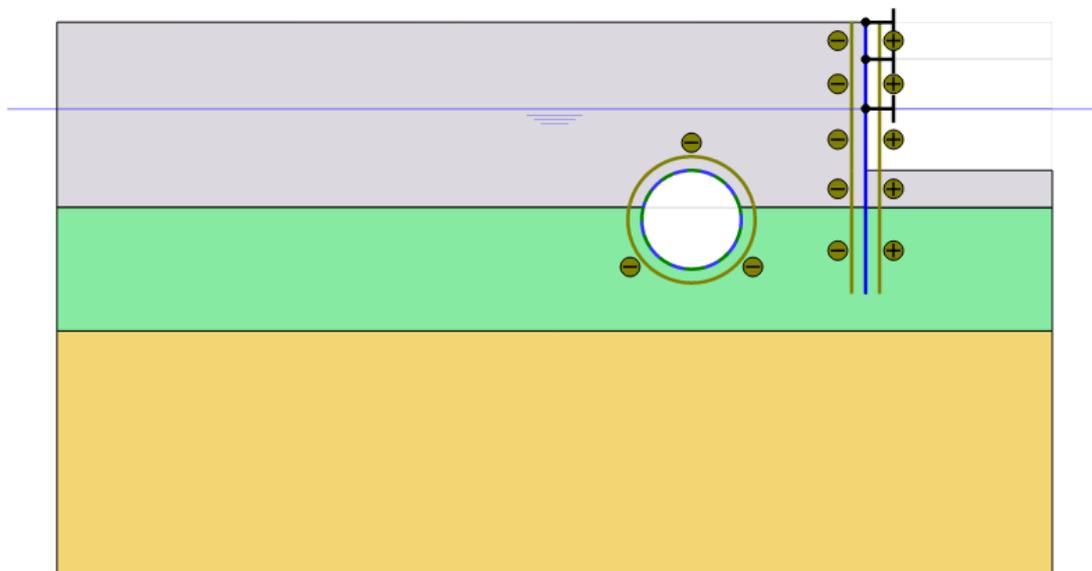


图 1 基坑开挖对邻近隧道影响的分析模型

工程概况

本工程所分析的基坑位于既有隧道附近，二者净距约 10m。工程各部分的情况如下：

1. 既有隧道
 - 埋深 16m（隧道中心位置）。
 - 直径 8m。
 - 盾构法施工，管片厚度 350mm。
2. 建筑基坑
 - 总宽度 30m，总开挖深度 12m。
 - 分三层开挖，各层开挖深度分别为 3m，4m，5m。
 - 支护结构：钢筋混凝土地连墙+内支撑，墙厚 1000mm，墙深 22m，设置 3 层内支撑，间距 5m。
3. 地层结构
 - 地基土层主要有 3 层，地下水埋深 7m。
 - 粉质粘土，厚 15m。
 - 粘土，厚 10m。
 - 砂土，厚度大，模型中取 20m 厚。

由于工程模型具有对称性，本教程取模型的一半进行分析，见图 1。

几何模型创建

按照如下步骤创建几何模型：

1.1 项目属性

1. 根据基坑、隧道的几何尺寸及位置关系，确定分析模型的边界条件（范围）。
2. 本案例取模型边界范围为： $x_{min}=-80, x_{max}=0, y_{min}=-45, y_{max}=0$ 。



图 1.1 项目属性—模型边界范围

1.2 土层定义

在“土层模式”中通过添加钻孔、定义钻孔柱状、赋予土层材料属性等步骤完成模型土层的创建。本案例中所有土层按水平、均匀分布考虑，故只需定义一个钻孔即可。

1. 用创建钻孔工具  在点(0,0)处单击创建一个钻孔。这时修改土层(*Modify soil layers*)窗口自动弹出。
2. 按照土层沿深度的分布状态，点击“添加”按钮添加 3 层土，并定义各层土的层顶、层底标高，依次为 0、-15、-25、-45，钻孔水头设为-7m。
3. 点击“材料”按钮  打开材料数据组(*Material sets*)窗口，在土和界面(*Soil and interfaces*)组类型下分别创建 3 个材料数据组，分别命名为粉质粘土、粘土、砂土。

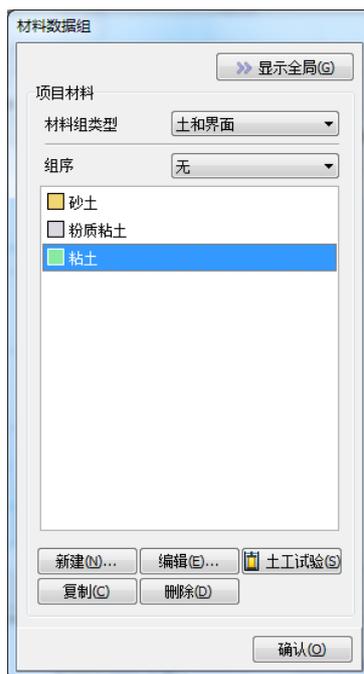


图 1.2 材料数据组窗口—土层材料属性定义

4. 本案例 3 层土的材料本构模型均使用小应变刚度硬化土模型（HSsmall），该模型考虑了土体在加载与卸载-重加载应力路径下刚度的不同，以及刚度与应力水平的相关性，小应变状态下的刚度等特征，故特别适合于开挖类工程的应用。更多关于本构模型的详尽介绍，见材料模型手册。
5. 各层土的材料属性根据表 1.1 定义，“参数”页面中的高级参数均采用默认值。注意泊松比 ν_{ur} 是一个高级参数。



图 1.3 土层材料属性—参数定义

6. 在本例中不考虑固结和渗流，故土体的渗透性不会影响到计算的结果。因此，渗流参数(Flow parameters) 页面中的参数都保持默认值。

表 1.1 土层材料属性

参数	粉质粘土	粘土	砂土	单位
本构模型	小应变硬化	小应变硬化	小应变硬化	-
排水类型	不排水 A	不排水 A	排水	-
γ_{unsat}	16	17	20	kN/m ³
γ_{sat}	18	19	20	kN/m ³
E_{50}	5000	10000	25000	kN/m ²
E_{oed}	5000	8000	25000	kN/m ²
E_{ur}	17000	42000	75000	kN/m ²
m	0.8	1.0	0.5	-
c	5	19	1	kN/m ²
Φ	25	26	31	°
Ψ	0	0	1	°
$\gamma_{0.7}$	1e-4	1e-4	1e-4	-
G_0	45000	83000	200000	kN/m ²
R_{inter}	0.7	0.7	Rigid	-

7. 在界面页面，前两层土按照表 1.1 在强度选项框中选择手动，输入参数 R_{inter} 的值为 0.7，砂土选择刚性。该参数代表界面强度和土体强度的关系。
8. 在初始条件页面中，K0 采用默认值“自动”。
9. 定义完成材料属性之后，从材料数据组窗口中将 3 种材料按照顺序依次拖放到“修改土层”窗口中的钻孔柱状上，此时钻孔柱状显示出于材料属性对应的颜色。

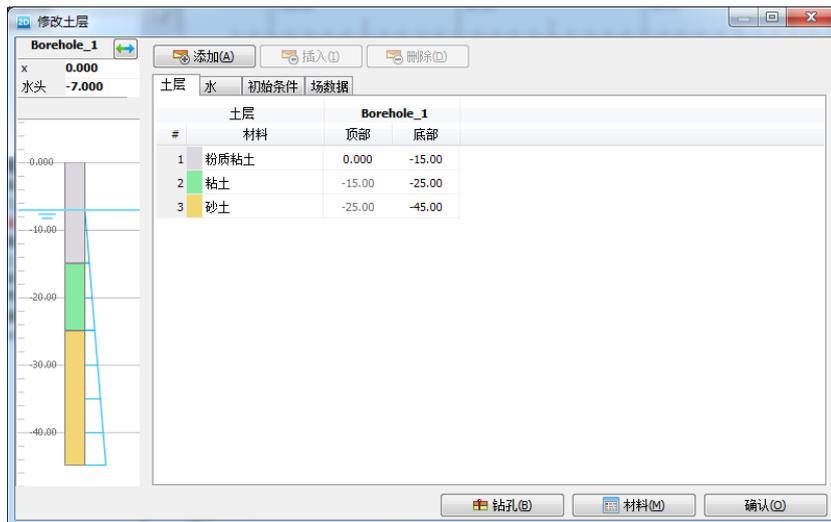


图 1.4 修改土层窗口一一定义钻孔柱状

10. 关闭材料组窗口后，点击 OK 关闭修改土层窗口。
11. 此时完成了土层的定义，整个模型的土层显示在绘图区。



图 1.5 定义完成的模型土层

12. 进入结构模式(Structure)定义结构单元。

1.3 结构单元定义

以下介绍隧道、地连墙、内支撑、基坑分层开挖面的创建。模型右侧边界作为基坑的对称轴。

1. 隧道模型的创建

- 1) 点击左侧工具栏中隧道设计器  按钮，在绘图区单击创建隧道断面，弹出“隧道设计器”窗口。
- 2) 在“剖面”页面定义隧道断面形状。“一般”选项卡中选择形态类型为“圆”，断面形式选择“定义整个隧道”。
- 3) “线段”选项卡中定义隧道半径为 4m。此时隧道的断面形状出现在右侧绘图区。

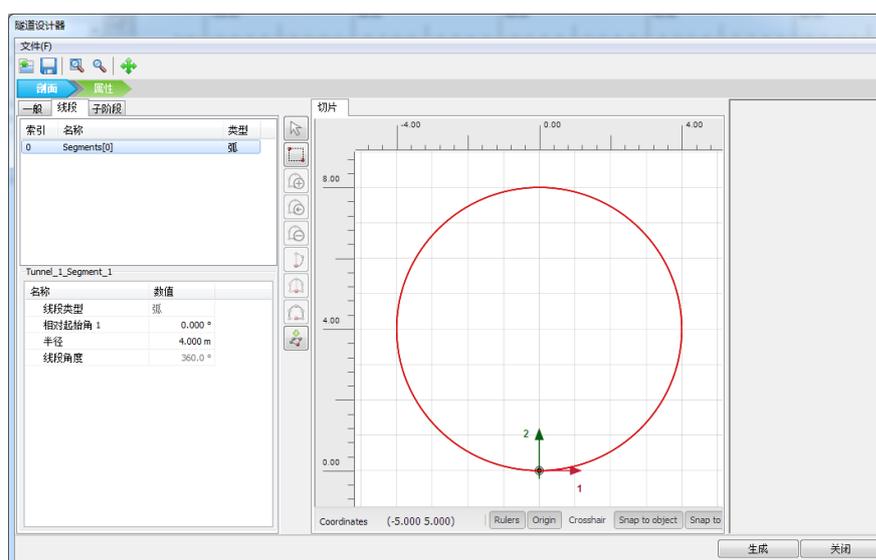


图 1.6 隧道设计器—定义隧道断面形状

- 4) 进入“属性”页面，在右侧绘图区选择已创建的隧道断面，鼠标右击弹出下拉菜单，在其中分别选择创建板、创建线收缩、创建负向界面（表示接触面位于断面

- 外侧)选项,分别代表隧道衬砌(盾构隧道的管片)、盾构开挖隧道的土层损失、衬砌与周围土体的接触面。
- 5) 线收缩为隧道断面的“收缩变形”,按照土层损失率的定义,输入其线收缩率为0.5%。负向界面单元的材料模式默认为“从相邻土”。板单元应赋予隧道衬砌的材料属性。
 - 6) 再次打开材料数据组窗口 ,材料组类型切换到“板”,按照表 1.2 创建衬砌和地连墙的材料属性。

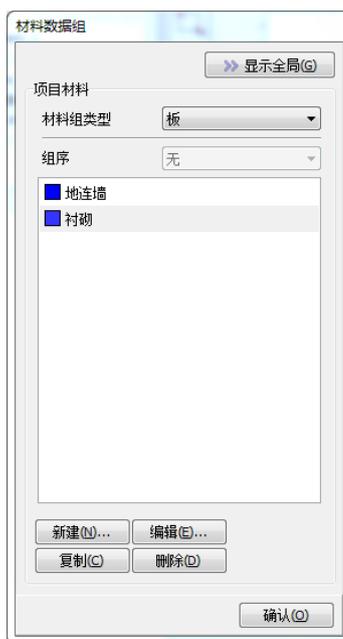


图 1.7 材料数据组窗口一定义板的材料属性

表 1.2 板的材料属性

参数	名称	衬砌	地连墙	单位
材料类型	类型	弹性; 各向同性	弹性; 各向同性	-
轴向刚度	EA	1.4×10^7	2×10^7	kN
抗弯刚度	EI	1.43×10^5	1.67×10^6	m
重度	W	8	8	kN
泊松比	v	0.1	0.15	kN

- 7) 定义隧道断面形状及属性之后,点击生成按钮完成隧道的创建。

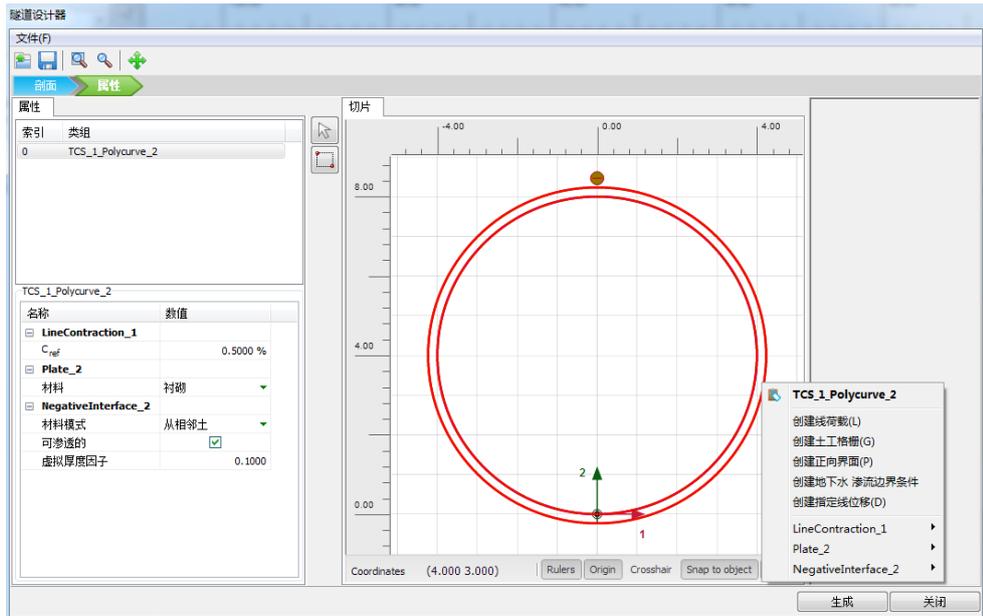


图 1.8 隧道设计器—定义隧道断面属性

- 8) 此时生成的隧道断面位置可能需要调整。在模型浏览器中修改隧道位置坐标到 (-29, -20)，该点为隧道断面的起始点位置，即隧道设计器中局部坐标原点的位置。然后在隧道对象名称（此处为 Tunnel_1）处右击鼠标选择“生成隧道”按钮完成隧道位置的修改。



图 1.9 修改隧道位置

2. 基坑模型的创建

- 1) 在左侧工具栏中选择“创建结构”->“创建板”工具，在绘图区点击 (-15,0)，(-15,-22) 两点创建地连墙。
- 2) 打开材料数据组窗口 ，将已创建的地连墙材料属性拖放到刚刚创建的代表地连墙的板上。
- 3) 选择地连墙，鼠标右击出现下拉菜单，从中分别选择创建正向界面、创建负向界面，代表地连墙与两侧土体的接触面。界面单元的材料属性默认为“从周围土层”。

- 4) 基坑分三层开挖，每层开挖深度分别为 3m，4m，5m，故各开挖面的标高分别为-3、-7、-12。在左侧工具栏中选择“创建线”->“创建线”工具，分别在前述三个标高处绘制开挖面，x 方向从-15m 到 0m。
- 5) 在左侧工具栏中选择“创建结构”->“创建锚定杆”工具，在地连墙位置，即 x=-15m 处，分别沿三个开挖面高度创建三层内支撑。选中刚创建的锚定杆，在

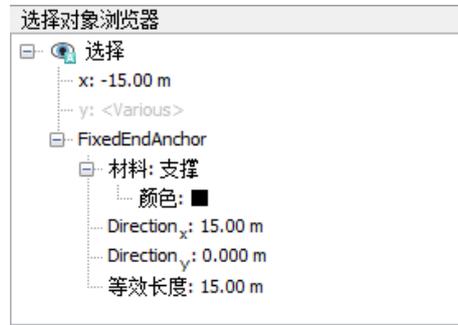


图 1.10 修改锚定杆的等效长度

- 6) 打开材料数据组窗口 ，材料组类型切换到“锚杆”，按照表 1.3 创建内支撑的材料属性。

表 1.3 锚定杆的材料属性

参数	名称	锚定杆	单位
材料类型	类型	弹性	-
轴向刚度	EA	1.2×10^7	kN
L 问题	-	5	m

- 7) 将已创建的内支撑材料属性拖放到刚刚创建的代表内支撑的锚定杆上。



图 1.11 材料数据组窗口一内支撑材料属性

3. 整个几何模型创建完成，“结构模式”中显示的模型如图 1.12。

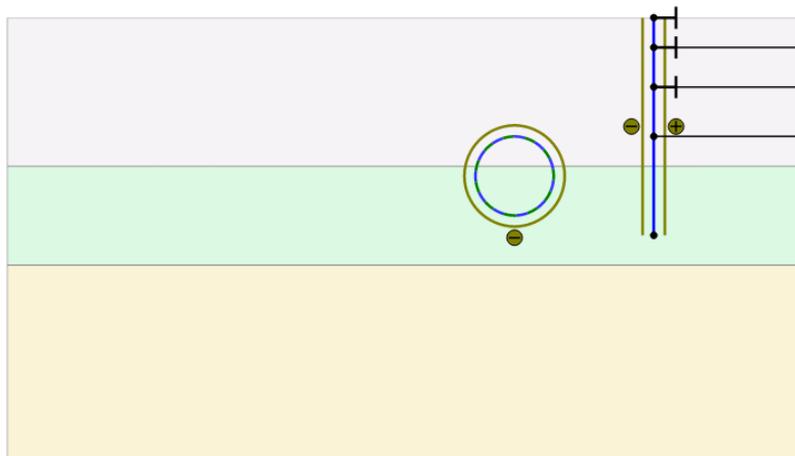


图 1.12 结构模式中的几何模型

有限元网格划分

进入网格模式，进行有限元网格剖分。

2.1 有限元网格加密

1. 程序已自动将结构单元（隧道衬砌，地连墙，内支撑）网格进行加密，以绿色显示，其余部分未加密，以灰色显示。
2. 为了更准确的分析隧道和基坑内开挖土层的变形，将开挖土层进行网格加密。选中这些土层类组，在选择浏览器中将粗糙系数修改为 0.25。



图 2.1 修改粗糙因数

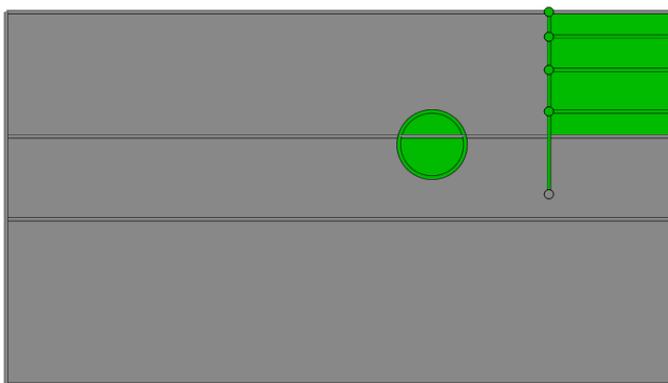


图 2.2 网格局部加密

2.2 有限元网格自动划分和预览

1.  创建网格。设置单元分布(*Element distribution*)为中等，点击确认自动划分网格。



图 2.3 单元分布总体粗糙程度设置

2.  网格预览。

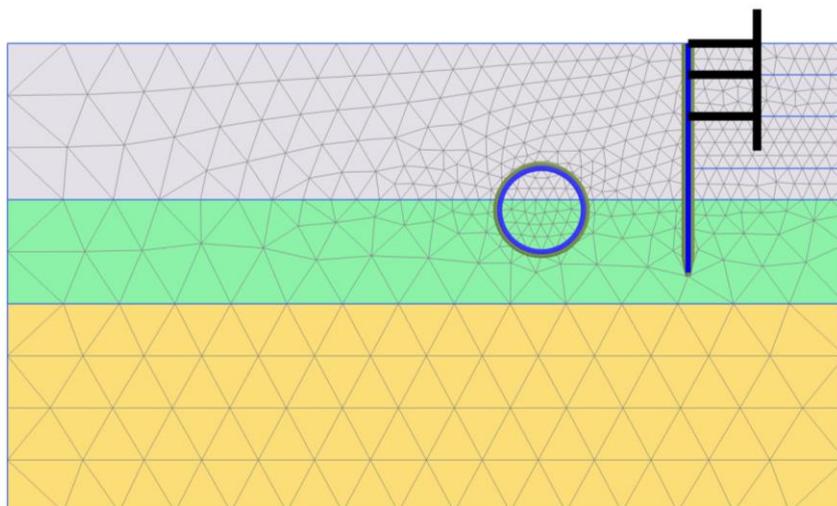


图 2.4 划分完成的有限元网格

计算阶段定义

分析过程一共包含六个阶段。初始阶段用 *K0 过程* 生成初始应力。下一阶段是隧道开挖和支护，接着是地连墙的建造，然后是第一层内支撑安装和开挖，依次开挖到坑底。

3.1 初始阶段

1. 点击 *分步施工(Staged construction)* 标签，进入计算阶段定义。
2. 初始阶段程序已自动创建。由于本例中土层为水平、均匀分布，故保持其计算类型为 *K0 过程*。
3. 检查所有土层都激活，而所有结构单元都未激活（灰色显示）。

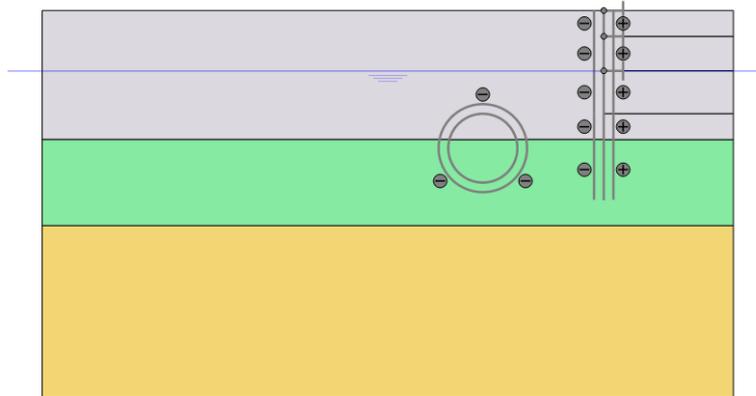


图 3.1 初始计算阶段

3.2 隧道开挖

1.  添加一个新的阶段 *Phase_1*，修改名称为“隧道开挖”。
2. 选中隧道内部的土类组，注意包括两部分。在选择浏览器中点击所选土类组前面的复选框（去掉绿色对勾）将其冻结，表示将该部分土层挖除。
3. 同时将该类组的水力条件设置为“干”，因为隧道位于水位以下，隧道内部的水也要“挖掉”。

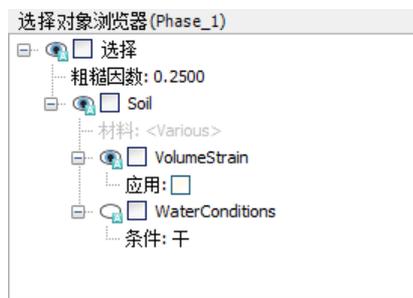


图 3.2 隧道内土类组的冻结

4. 点击模型浏览器中隧道前面的复选框将其激活（显示绿色对勾），表示添加了隧道的衬砌、衬砌与周围土层的界面、隧道断面的收缩。注意此时模型浏览器中对应的板、界面、线收缩都被激活。



图 3.3 激活隧道衬砌、界面和线收缩

5. 本例中上部两层土均为不排水分析，但隧道为既有建筑物，从修建隧道至基坑开挖，由隧道开挖造成的孔隙水压力变化可视为已固结完成，故本计算阶段不考虑超静孔隙水压力变化。
6. 在阶段窗口中，计算类型保持默认设置“塑性计算”，变形控制参数中勾选“忽略不排水行为”选项。注意程序已自动选择了“重置位移为零”选项。

Name	Value
一般	
ID	隧道开挖 [Phase_1]
起始阶段	Initial phase
计算类型	塑性
荷载类型	分步施工
EM _{stage}	1.000
EM _{weight}	1.000
孔压计算类型	潜水位
时间间隔	0.000 day
第一计算步	4
最终步	11
设计方法	(没有)
变形控制参数	
忽略不排水行为(A,B)	<input checked="" type="checkbox"/>
重置位移为零	<input checked="" type="checkbox"/>
重置局部应变	<input checked="" type="checkbox"/>
重置状态变量	<input type="checkbox"/>
更新网格	<input type="checkbox"/>
更新水压力	<input type="checkbox"/>

图 3.4 设置变形控制参数

3.3 地连墙施工

1. 添加一个新的阶段 *Phase_2*，命名为“地连墙施工”。
2. 选择代表地连墙的板，在选择浏览器中激活板，及其两侧的界面单元。



图 3.5 激活地连墙及其界面

3. 本例主要分析基坑开挖对既有隧道的影响，不考虑之前由隧道施工产生的变形，因此需要选择“重置位移为零”选项，注意此时应力场并不受影响。

3.4 第一层开挖

1. 添加一个新的阶段 *Phase_3*，命名为“开挖 1”。
2. 选中第一层要开挖的土层类组 ($z=0 \sim -3\text{m}$)，在选择浏览器中将其冻结。
3. 选中第一道锚定杆（内支撑） ($z=0\text{m}$)，在选择浏览器中将其激活。

3.5 第二层开挖

1. 添加另一个阶段 *Phase_4*，命名为“开挖 2”。
2. 选中第二层要开挖的土层类组 ($z=-3 \sim -7\text{m}$)，在选择浏览器中将其冻结。
3. 选中第二道锚定杆（内支撑） ($z=-3\text{m}$)，在选择浏览器中将其激活。

3.6 第三层开挖

1. 添加另一个阶段 *Phase_4*，命名为“开挖 3”。
2. 选中第三层要开挖的土层类组 ($z=-7 \sim -12\text{m}$)，在选择浏览器中将其冻结，并将其水力条件设置为“干”。
3. 选中第三道锚定杆（内支撑） ($z=-7\text{m}$)，在选择浏览器中将其激活。
4. 选中第三层之下的土层类组 ($z=-12 \sim -15\text{m}$)，在选择浏览器中将其水力条件设置为“内插”，表示坑内水位降低到坑底。注意，此时坑内外存在水位差，由于第二层粘土为弱透土层，本例不考虑基坑降水的渗流，用静水位代替水位变化。
5. 进入水位模式 (Water levels)，可以查看各土层类组的水力条件变化。

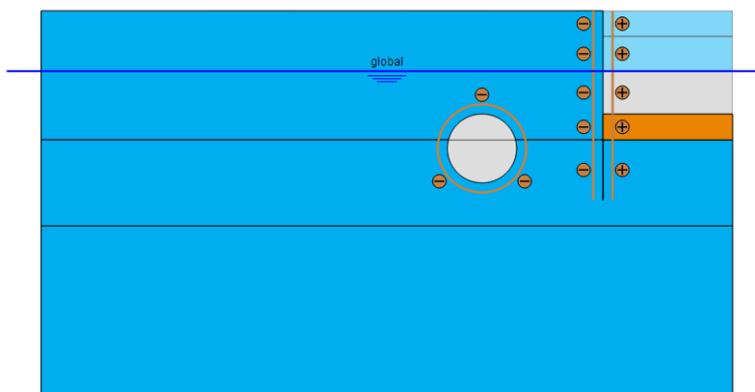


图 3.6 各土层类组的水力条件

6. 点击预览按钮  预览该计算阶段，可以在输出程序中检查稳态孔压的分布。

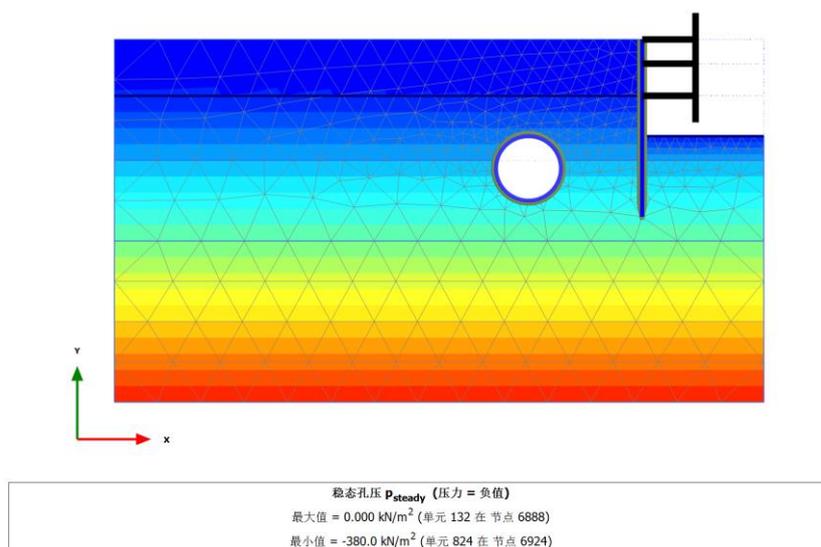


图 3.7 预览稳态孔压的分布

7. 点击关闭按钮返回输入程序。
8.  开始运行计算。
9.  计算完成之后保存项目。

查看计算结果

计算完成后，点击查看计算结果按钮来查看计算结果。

4.1 地层变形

1. 选择最后一个计算阶段，点击查看计算结果按钮，输出程序将打开并显示最后一个阶段结束时的变形网格。

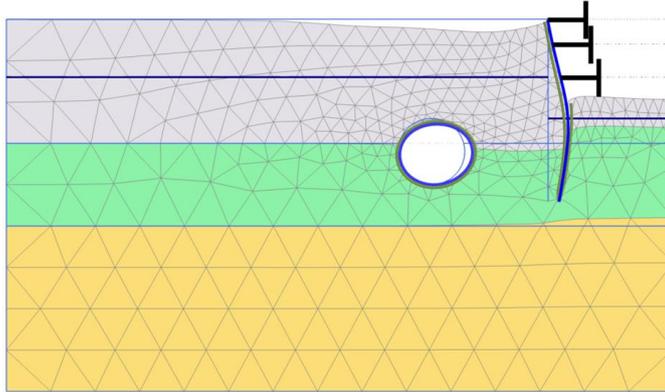


图 4.1 第三层开挖后的变形图

2. 在“变形”菜单中可以选择总位移及其 x、y 方向的分量进行输出。

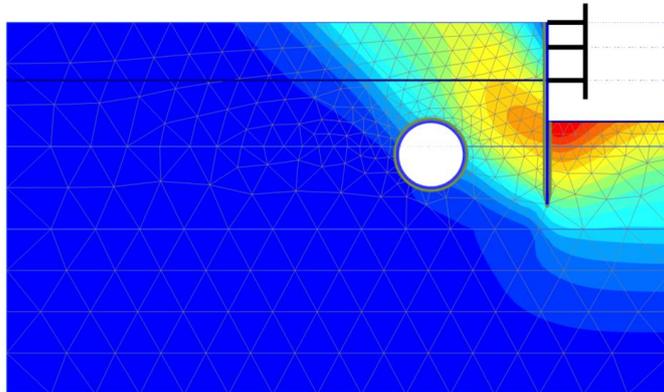


图 4.2 第三层开挖后的总位移云图

3. 还可以使用左侧工具栏中的剖面切割工具检查某一剖面上的变形分布规律，比如查看基坑第三层开挖以后地表的沉降变形情况。

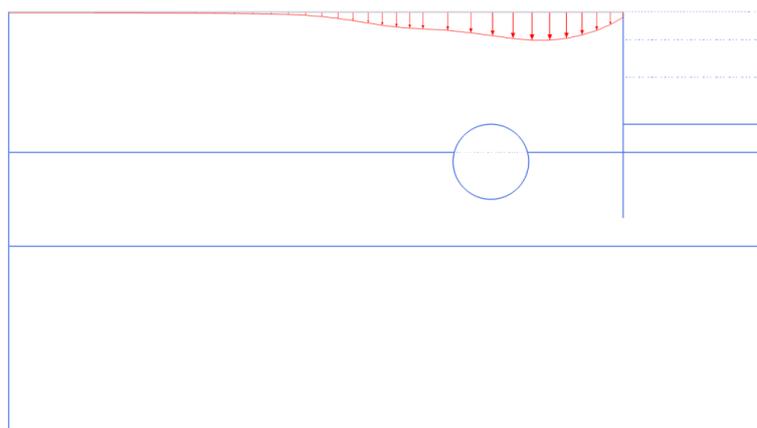


图 4.3 第三层开挖后地表沉降剖面图

4.2 结构变形及内力

1. 在模型中双击隧道，进入隧道结构视图，显示隧道的总位移，可以通过“变形”菜单切换隧道在水平和垂直方向的位移分量。

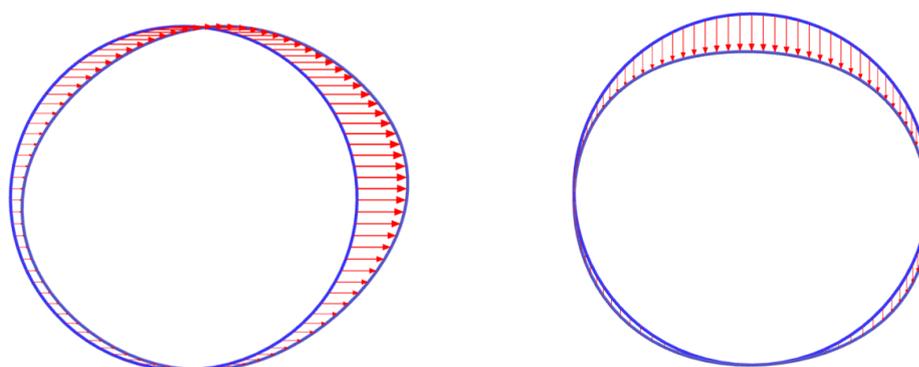


图 4.4 第三层开挖后隧道的水平位移（左）和竖向位移（右）

2. 在模型中双击地连墙，进入地连墙的结构视图，可以查看地连墙的水平位移。

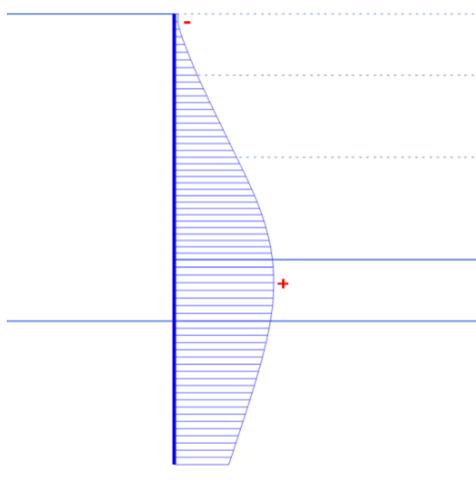


图 4.5 第三层开挖后地连墙的水平位移

3. 通过“内力”菜单可以评估地连墙的内力分布，如轴力、弯矩、剪力等。

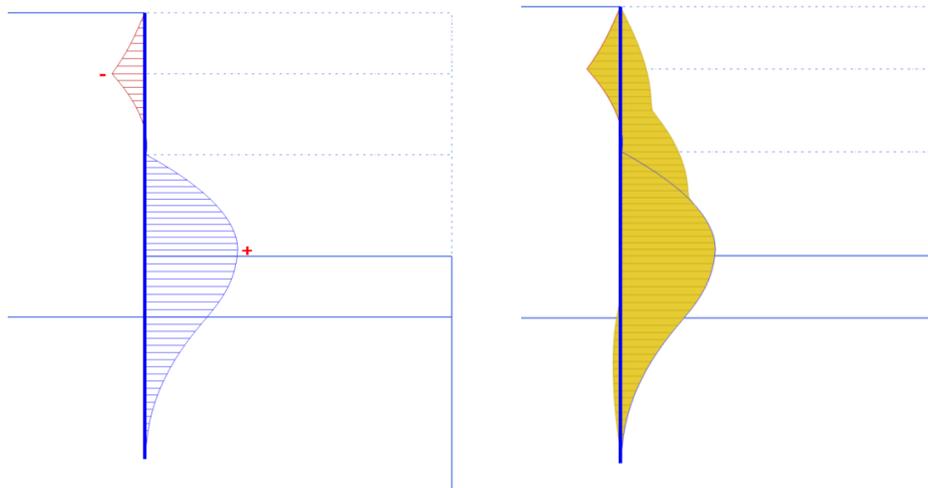


图 4.6 第三层开挖后地连墙的弯矩（左）及其弯矩包络图（右）

本教程到此结束！

岩土工程有限元分析软件

PLAXIS 2D[®] 2017

案例教程

真空预压法加固软土地基分析



北京筑信达工程咨询有限公司
北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层, 100043

版 权

计算机程序 PLAXIS 及全部相关文档都是受专利法和版权法保护的产品。全球范围的所有权属于 Plaxis bv。如果没有 Plaxis 和北京筑信达工程咨询有限公司的预先书面许可，未经许可的程序使用或任何形式的文档复制一律禁止。

更多信息和此文档的副本可从以下获得：

北京筑信达工程咨询有限公司

北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层 100043

电话：86-10-6892 4600

传真：86-10-6892 4600 - 8

电子邮件：support@cisec.cn

网址：www.cisec.cn

目录

1. 模型概况.....	1
2. 几何模型定义.....	1
3. 网格划分.....	3
4. 分步施工定义.....	3
5. 结果查看.....	5

1. 模型概况

本例主要是分析某工程采用真空预压法加固软土地基。场地土层依次为吹填土、淤泥土、淤泥质土和残积土，地下水位于地表。垂直排水系统采用塑料排水板，排水板间距 1.2m，长度 11.5m。水平排水垫层为厚度为 0.5m 的砂层（模型中未考虑砂层）。利用抽真空设备保证真空压力不小于 90kPa。

由于对称性，本例只取一半作为分析模型，如图 1 所示。通过该案例重点讲解涉及真空预压法的土体材料属性定义，排水边界，计算阶段设置以及计算结果查看等内容。通过本案例讲解能够掌握真空预压法在 PLAXIS 软件中的实现方法。

提示：学习本案例教程之前，需要已经掌握 PLAXIS 软件的基本操作。

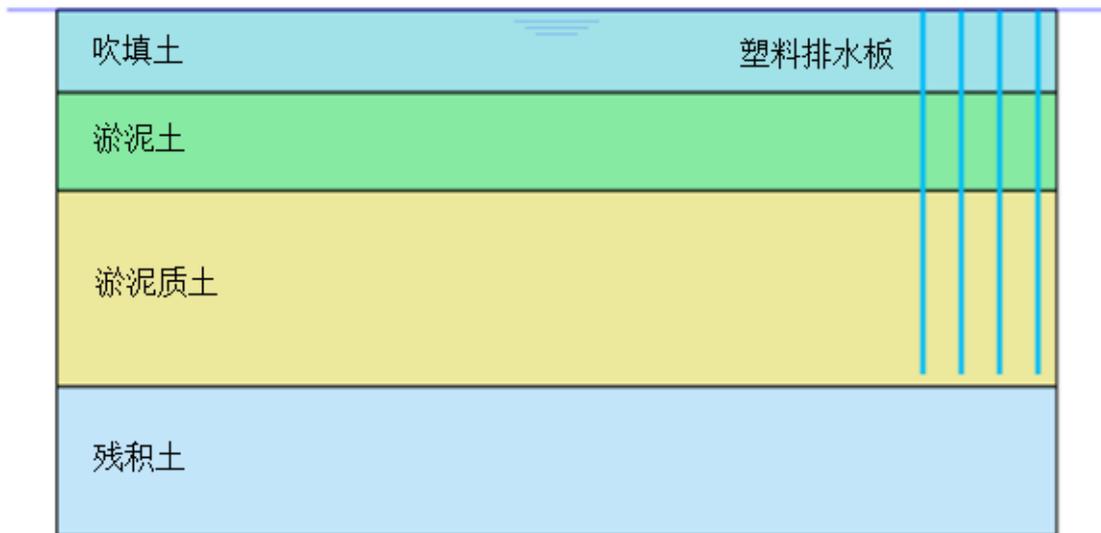


图 1 项目几何模型

2. 几何模型定义

1.1 模型边界

在项目属性窗口 >> 模型标签 >> 模型边界中定义 X 和 Y 方向的边界， $X_{min}=0, X_{max}=31.4; Y_{min}=-18, Y_{max}=0$ 。

1.2 定义土层

在 $X=0, Y=0$ 的位置处创建钻孔，在修改土层对话框中定义水头高度 $h=0$ 。然后添加四层土并创建土层材料，土层分布情况见表 1，土层材料属性见表 2。

表 1 土层分布

吹填土	0	-2.6
淤泥	-2.6	-5.7
淤泥质土	-5.7	-11.9
残积土	-11.9	-16.6

表 2 土层材料属性

参数	名称	吹填土	淤泥	淤泥质土	残积土	单位
材料模型	模型	摩尔库仑	摩尔库仑	摩尔库仑	摩尔库仑	-
材料类型	类型	不排水 (A)	不排水 (A)	不排水 (A)	不排水 (A)	-
水位以上土体容重	γ_{unsat}	15.1	14.6	18.7	18.2	kN/m ³
水位以下土体容重	γ_{sat}	15.1	14.6	18.7	18.2	kN/m ³
弹性模型	E'	1810	2050	1950	1270	kN/m ²
泊松比	V	0.35	0.35	0.3	0.3	-
黏聚力	C'	4.27	3.75	17.3	14.5	kN/m ²
内摩擦角	ϕ'	15.11	13.98	16.8	23.1	°
剪胀角	ψ	0	0	0	0	°
数据组	-	用户自定义	用户自定义	用户自定义	用户自定义	-
模型	-	饱和的	饱和的	饱和的	饱和的	-
水平渗透系数	k_x	0.000864	0.000864	0.00864	0.00864	m/天
竖向渗透系数	k_y	0.000864	0.000864	0.00864	0.00864	m/天

1.3 定义排水线

在结构模式中使用排水线模拟塑料排水板。排水线 4 根，排水线间距 1.2m，长度 11.5m。

建模思路是建立一根排水线再用阵列工具创建其余 3 根。一根排水线坐标 X=30.8, Y=0; X=30.8, Y=-11.5。选中该排水线后选择竖向工具栏中的阵列工具，形状默认为 1D，在 X 方向，列数为 4，列距为-1.2，如图 2 所示。



图 2 阵列工具窗口

3. 网格划分

程序会自动给排水线加密，粗糙因数为 0.25。选择竖向工具栏中的生成网格工具，单元分布选择为中等，点击确定，网格划分成功后的网格如图 3 所示。

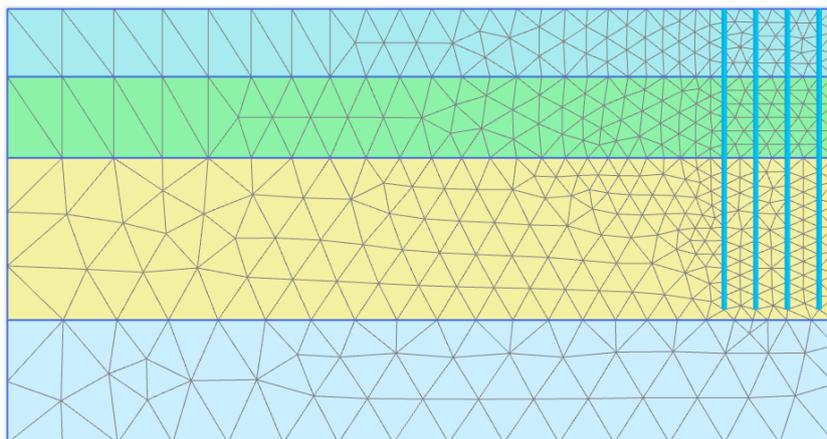


图 3 划分的网格

4. 分步施工定义

本例只考虑三个阶段，初始阶段，10 天抽真空压力至 90kPa 和真空固结 10 天。

- 初始阶段 (Phase 0):

设置模型浏览器>>模型条件>>地下水流动中的边界条件,由于 Xmax 为对称边界,需要将其改为关闭,如图 4 所示。其余选项使用默认设置。

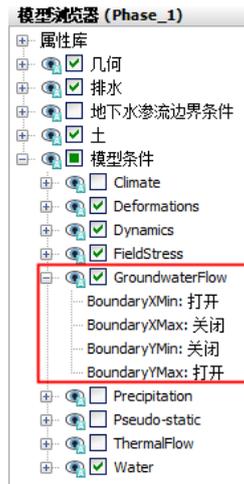


图 4 地下水流动边界条件

- 10 天抽真空压力至 90kPa (Phase 1):

修改阶段窗口>>一般>>ID 为对应名称，计算类型为渗流与变形完全耦合计算，时间间隔为 10 天。变形控制参数中去掉忽略吸力中的对勾，如图 5 所示。注意：Phase 1 程序会自动勾选重置位移为零，忽略生成初始应力场时产生的位移。

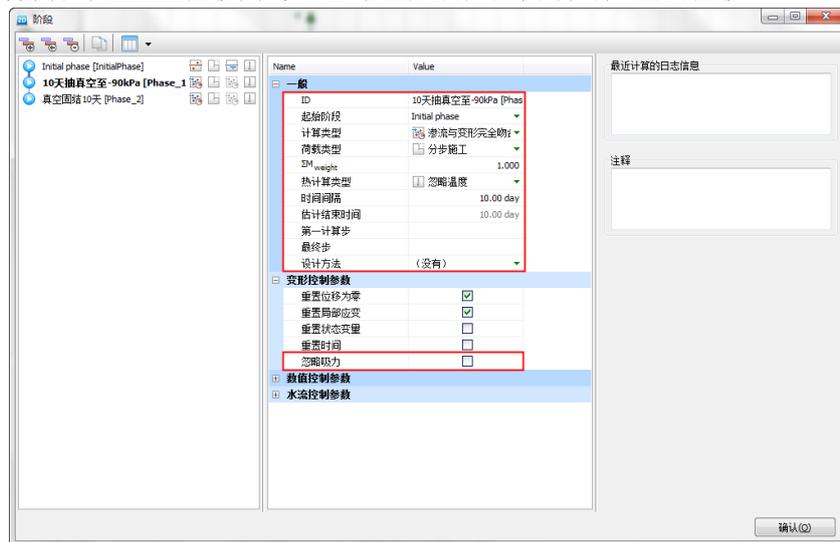


图 5 阶段窗口设置

在选择对象浏览器中激活全部排水线并设置行为类型为真空， $h=-9m$ ，如图 6 所示。

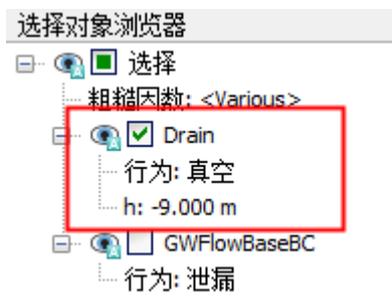


图 6 排水线属性定义

- 真空固结 10 天 (Phase 2):

定义方法和 Phase 1 一样。重置位移为零程序不会自动勾选，由于抽真空过程产生的位移也是我们关心的位移，所以重置位移为零使用默认选项不勾选。全部分步施工定

义完成后如图 7 所示。

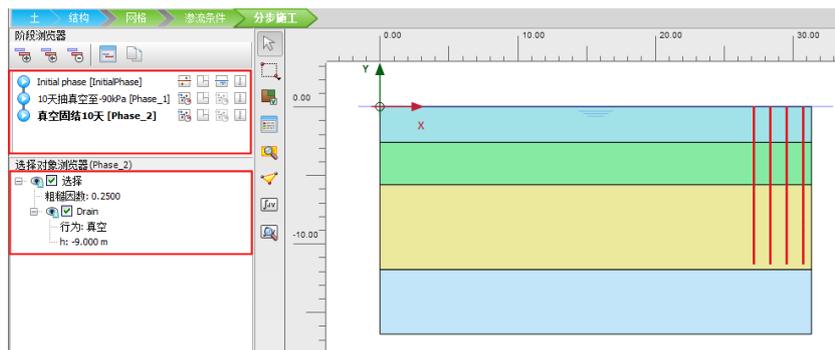


图 7 分步施工定义后整体模型

5. 结果查看

计算完成后，在后处理程序中可以查看计算结果。图 8 显示了阶段 1 的沉降云图，图中可以看出由于真空预压作用在靠近对称轴的位置处沉降较大，沿着深度和 X 负方向沉降量逐渐减小，抽 10 天真空时产生最大沉降值 36.55cm。

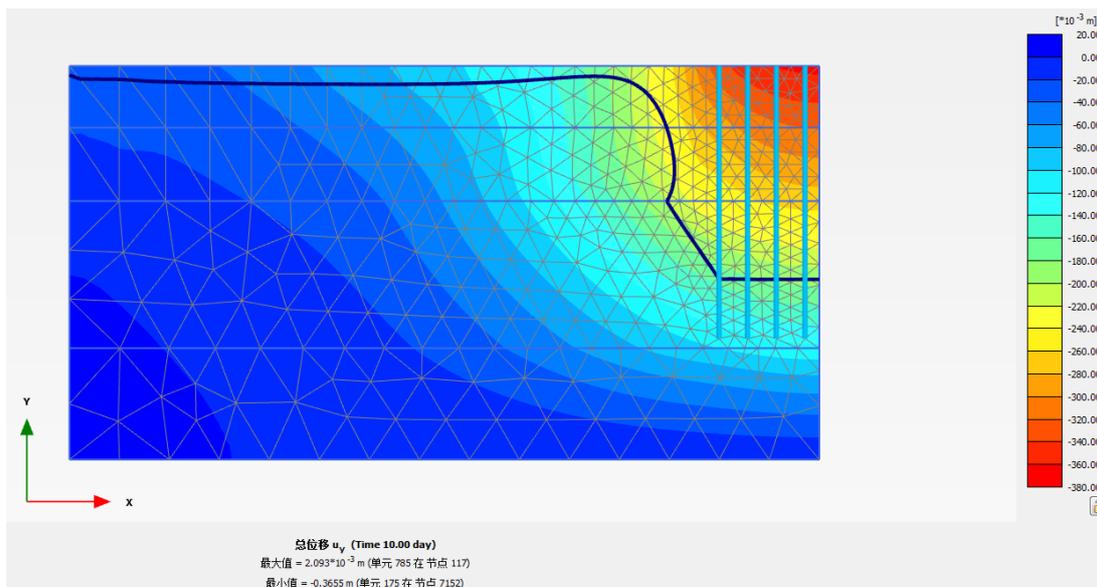


图 8 阶段 1 沉降云图

图 9 显示了阶段 2 的沉降云图，真空预压 20 天后沉降最大值为 41.77cm。图中黑色实线代表地表浸润线，对比图 8 和图 9 可见由于真空预压排水导致浸润线降低。

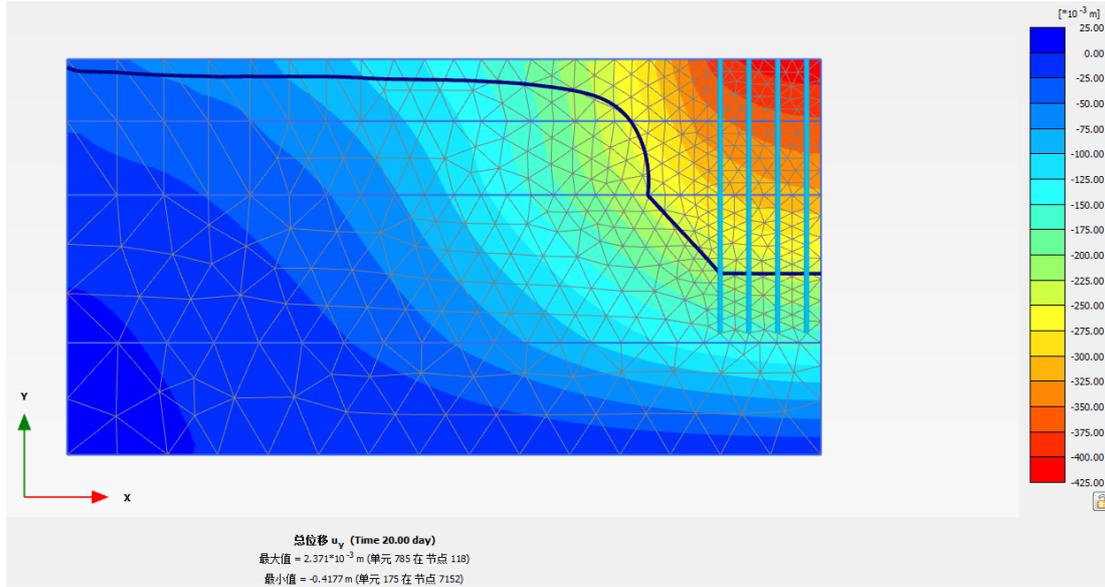


图 9 阶段 2 沉降云图

图 10 显示了阶段 2 的吸力分布云图，从图中可以看出真空加荷过程中，吸力随着土层深度增加而逐渐减小。

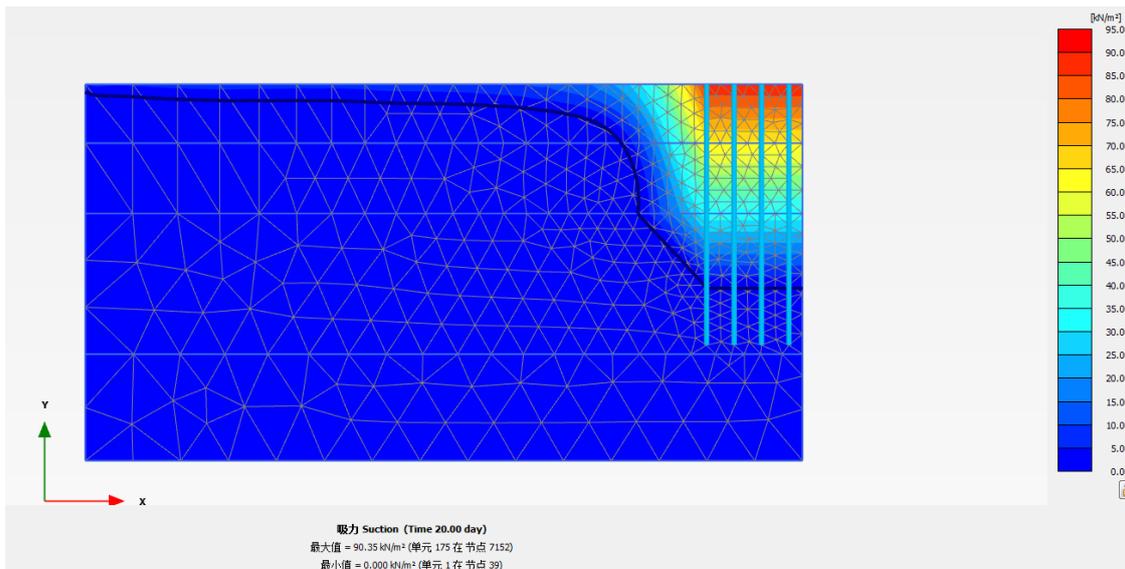


图 10 吸力分布云图