

岩土工程有限元分析软件

**PLAXIS 3D 2013<sup>®</sup>**

**案例教程**



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

超固结粘土上的基础沉降.....	1
几何模型.....	2
情形 A: 刚性基础 .....	3
1.1 几何模型输入.....	4
1.2 材料数据组(Material data set).....	6
1.3 结构单元定义.....	9
1.4 网格划分.....	9
1.5 执行计算.....	11
1.6 查看计算结果.....	14
情形 B: 筏形基础 .....	16
2.1 几何模型输入.....	17
2.2 定义结构单元.....	17
2.3 网格划分.....	19
2.4 执行计算.....	19
2.5 查看计算结果.....	20
情形 C: 桩-筏基础 .....	23
3.1 几何模型输入.....	24
3.2 结构单元定义.....	24
3.3 网格划分.....	25
3.4 执行计算.....	26
3.5 计算结果查看.....	26



---

## 超固结粘土上的基础沉降

---

本章是 PLAXIS 3D 的第一个应用：超固结粘土上的基础沉降。这是熟悉程序实际应用的第一步。

这里详细讲述了几何模型创建的一般步骤、有限元网格的划分、有限元计算的执行和输出结果的评估等。本例中涉及的信息将在后面的示例中应用，因此在进一步学习其他教程案例之前透彻学习本例是十分重要的。

## 几何模型

本例主要解决轻度超固结湖积粘土上方建筑基础的施工和加载问题。粘土层下是硬岩层，形成了几何模型的自然边界。确定几何形状的时候不将岩层考虑进去，而是在粘土层的底部施加一个恰当的边界条件。本练习的目的是计算基础沉降。

该建筑地下一层，地上五层 (如图 1 所示)。为了减少计算时间，只取该建筑的 1/4 进行模拟，沿对称线确定对称边界条件。考虑粘土中任何可能的破坏机理的发展，且避免外边界的影响，模型在两个水平方向的尺寸设为 75m。

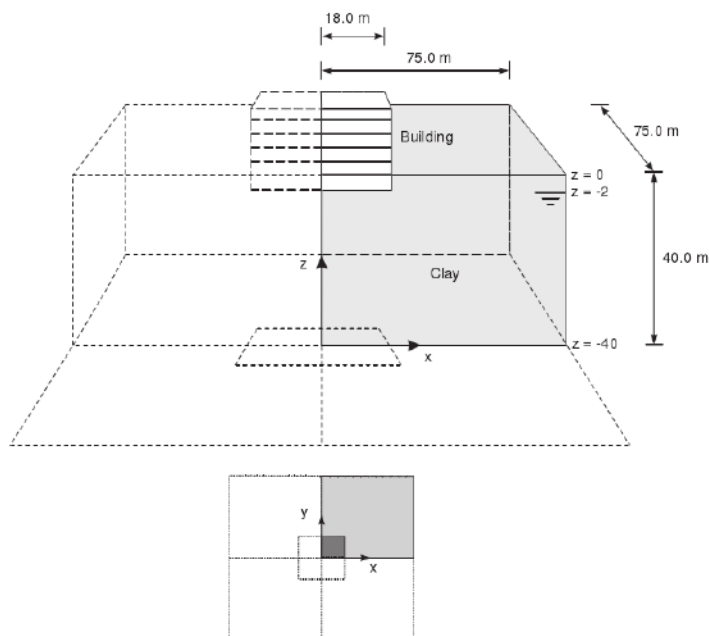


图 1 筏基上方形建筑的几何模型

按照以下 3 种不同情形考虑该模型：

**情形 A：** 考虑建筑物刚度很大，地下室由无孔线弹性实体单元来模拟。

**情形 B：** 结构力模拟为作用在筏型基础上的荷载。

**情形 C：** 在模型中加入嵌入桩以减少沉降。

## 情形 A：刚性基础

在这种情形下，考虑建筑物刚度很大。地下室由无孔线弹性实体单元模拟。地下室的总重相当于建筑物的永久荷载和可变荷载之和。这种方法模型十分简单，因此作为第一个练习，但是这种方法存在一些弊端，比如它并没有给出作用在基础上的结构力的任何信息。

### 目标：

- 开始一个新的工程
- 用一个钻孔创建地层
- 创建材料属性
- 使用创建面工具(*Create surface*)和拉伸工具(*Extrude tools*)创建实体
- 材料赋值
- 局部网格加密
- 划分网格
- 用 *K0 过程*生成初始应力
- 定义塑性计算

### 1.1 几何模型输入

打开 PLAXIS 3D 软件，将会出现一个快速选择(Quick select)对话框，在这个对话框里可以选择已有工程，也可以创建一个新工程(如图 1.1 所示)。

点击开始一个新工程(Start a new project)。弹出工程属性窗口(Project properties)，包括工程(Project)和模型(Model)两个页面。

#### 1. 工程属性 (Project properties)

每个分析的第一步就是设置有限元模型的基本参数。在工程属性(Project properties)窗口中进行设置。这些属性包括问题的描述、基本单位和绘图区尺寸。

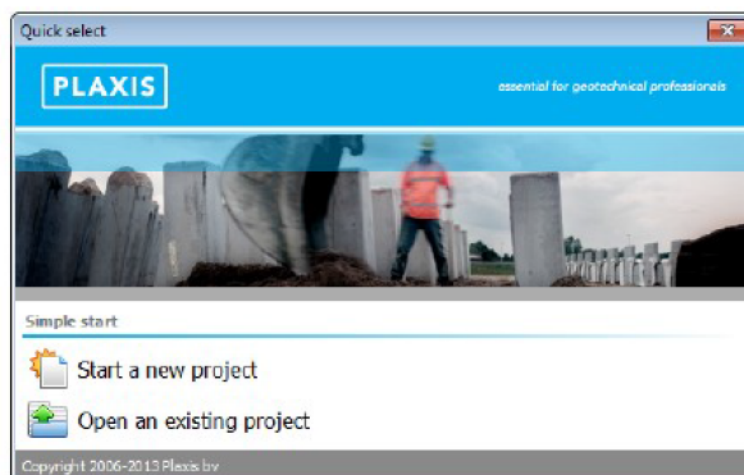


图 1.1 快速选择(Quick select)对话框

按照以下步骤为基础计算输入恰当的属性：

- 1) 在工程页面(Project)中输入工程标题(Title)“Tutorial 1”，在注释框(Comments)中输入“Settlements of a foundation”，如图 1.2 所示。

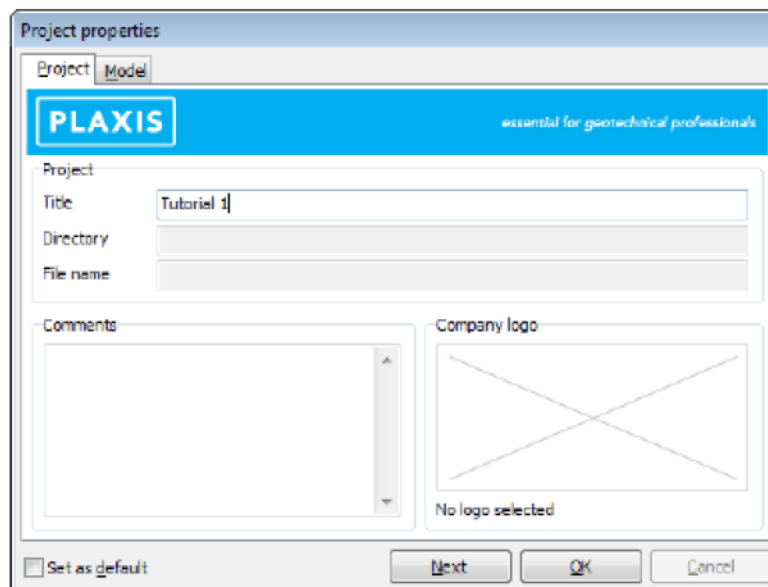


图 1.2 工程属性窗口的工程(Project)页面



- 2) 点击下一个按钮或模型标签进入模型(Model)页面, 如图 1.3 所示。
- 3) 保持单位框中的默认单位(Units): 长度(Length)=m, 力(Force)=kN, 时间(Time)=day。
- 4) 一般设置框(General)中显示一个固定的重力为 1.0G, 方向竖直向下(-z 方向); 可以在地球重力框中指定重力 (1.0G) 加速度值, 本练习中重力加速度值取默认值 9.810m/s<sup>2</sup>; 在  $\gamma_{water}$  框中设定水的重度, 本练习中水的重度( $\gamma_{water}$ )取默认值 10kN/m<sup>3</sup>。
- 5) 在几何形状设定框(Contour)中设定土层模型尺寸  $x_{min}=0$ ,  $x_{max}=75$ ,  $y_{min}=0$ ,  $y_{max}=75$ 。
- 6) 点击 OK 完成设定。

注: 如果因为操作失误或其他任何原因, 需要修改工程属性, 可以在文件菜单中选择对应的选项进入工程属性窗口(Project properties)。

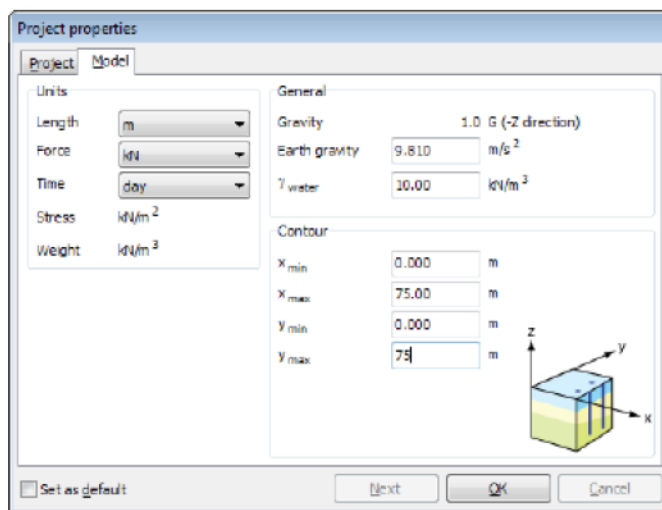


图 1.3 工程属性窗口的模型(Model)页面


## 2. 土层定义

当你点击完 OK 按钮时, 工程属性窗口关闭, 显示土体模式视图。土层信息在钻孔中输入。

钻孔在绘图区中给出土层位置和水位信息。如果定义了多个钻孔, PLAXIS 3D 会在钻孔之间自动内插, 从钻孔信息中推导出土层位置。

注: PLAXIS 3D 也可以处理不连续的土层, 比如, 模型区域中只有局部土层, 更多这方面的介绍详见参考手册第 4.2.2 节的介绍。

在当前例子中, 只有一层土, 只需一个钻孔就可以定义土层。按照以下步骤定义钻孔:

- 1)  在侧边工具栏中点击创建钻孔按钮开始定义土层。点击几何模型中的 (0,0,0)点, 在(x,y)=(0,0)处创建一个钻孔。弹出修改土层窗口(Modify soil layers)。
- 2) 在修改土层窗口(Modify soil layers)中点击添加按钮(Add)添加新的土层。土层顶部边界设为  $z=0$ , 底部边界设为  $z=-40$ 。
- 3) 钻孔柱状中水头值设为  $-2m$ , 如图 1.4 所示。

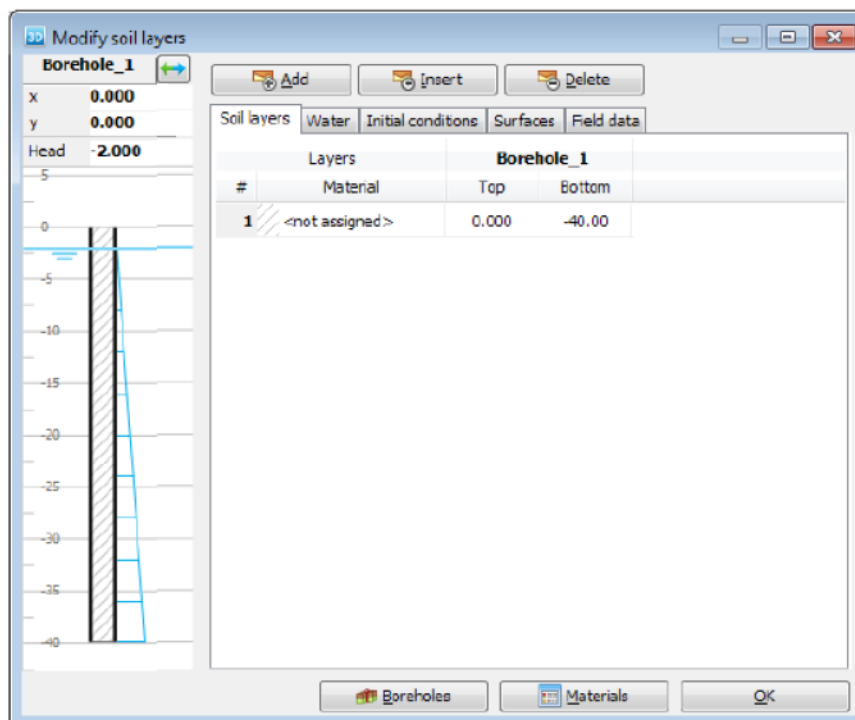


图 1.4 修改土层窗口(Modify soil layers)

下节讲述材料属性创建及其对土层的赋值。

## 1.2 材料数据组(Material data set)

为了模拟土的行为，必须赋予几何模型恰当的材料模型和材料参数。在 PLAXIS 中，土的属性都放在材料数据组(Material data set)中，各种材料数据组都保存在材料数据库中。从这个数据库中，可以将一个数据组分配给一个或多个类组。对结构(像梁，板，等)也是类似的，但是不同类型的结构有不同的参数，因此就有不同的数据组。

PLAXIS 3D 将材料数据组分成土和界面(Soils and interfaces)、板(Plates)、土工格栅(Geogrids)、梁(Beams)、嵌入桩(Embedded piles)和锚杆(Anchors)。在划分网格之前，必须将材料数据组赋予到所有土层和结构中。

- 1)  在修改土层窗口(Modify soil layers)中点击材料(Materials)按钮，打开材料组(Material sets)窗口。
- 2) 注：如果由于失误将修改土层窗口(Modify soil layers)关闭了，双击绘图区中的钻孔或从土层下拉菜单(Soil)中选择修改土层选项(Modify soil layers)来重新打开。
- 3) 在材料组(Material sets)窗口的下方，点击创建(New)按钮，土层 (Soil)窗口就会出现，它包含五个页面，分别是一般设定(General)、参数(Parameters)、渗流参数(Flow parameters)、界面(Intefaces)和初始条件(Initial)。
- 4) 在一般页面(General)下的材料组(Material sets)框中，在标题(Identification)框中输入湖积粘土(Lacustrine Clay)，如图 1.5 所示。
- 5) 从材料模型下拉菜单中选择摩尔库伦模型(M-C)，在排水类型下拉菜单中选择排水(Drained)。

- 6) 按照表 1.1 在一般属性框中输入**重度**。其他高级参数(Advanced Parameters)保留默认值。
- 7) 点击下一步按钮(Next)，或点击参数标签输入模型参数。参数 (Parameters)页面中显示的参数取决于所选的**材料模型**（本例中是 MC 模型）。M-C 模型只包含 5 个基本参数： $E'$ ， $\nu'$ ， $c'$ ， $\phi'$ ， $\psi'$ 。
- 8) 按照表 1.1 在参数页面的相应框中湖积粘土的模型参数，如图 1.6 所示。

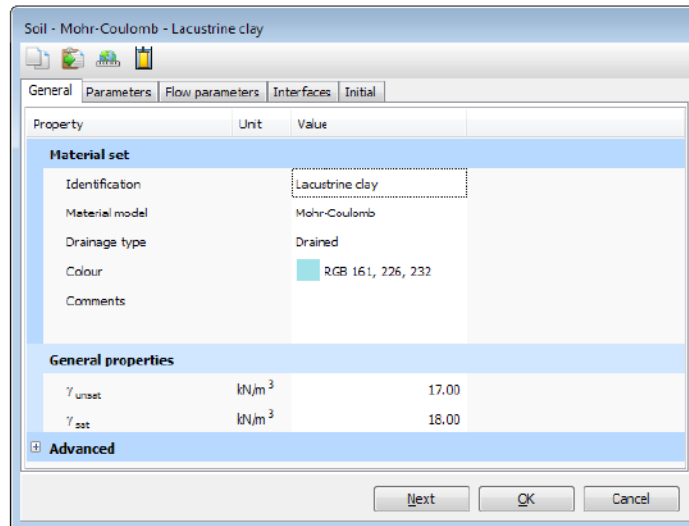


图 1.5 土(Soil)和界面(Interfaces)数据组窗口中的一般页面

表 1.1 材料属性

参数	符号	湖积粘土	建筑物	单位
<b>一般设定</b>				
材料模型	<i>Model</i>	M-C 模型	线弹性	--
排水类型	<i>Type</i>	排水	无孔	--
地下水位以上重度	$\gamma_{unsat}$	17.0	50	$kN/m^3$
地下水位以下重度	$\gamma_{sat}$	18.0	--	$kN/m^3$
<b>参数</b>				
杨氏模量	$E'$	$1 \times 10^4$	$3 \times 10^7$	$kN/m^2$
泊松比	$\nu'$	0.3	0.15	--
内聚力	$c'_{ref}$	10	--	$kN/m^2$
摩擦角	$\phi'$	30.0	--	°
剪胀角	$\psi'$	0.0	--	°
<b>初始条件</b>				
$K_0$ 的确定	--	自动	自动	--
侧向土压力系数	$K_0$	0.5000	1.000	--

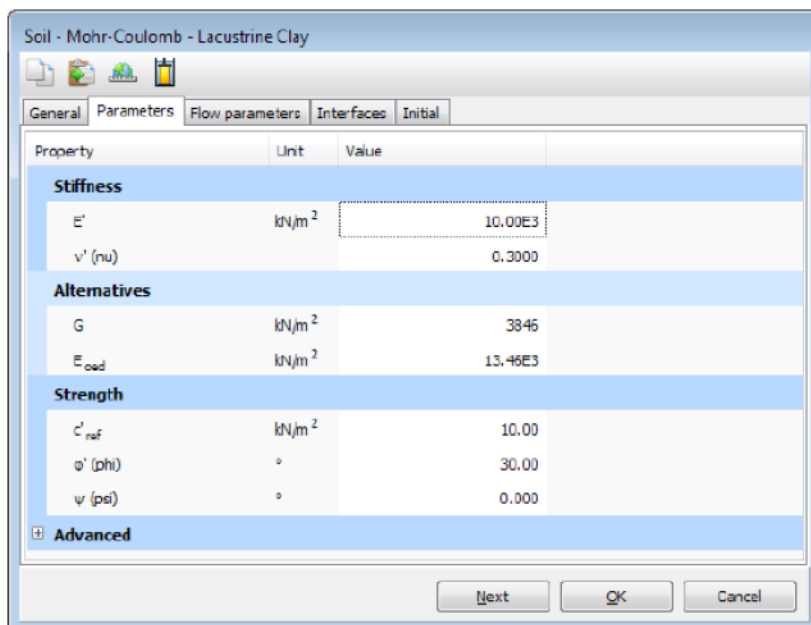


图 1.6 土(Soil)和界面(Interfaces)数据组窗口中的参数页面

- 9) 在本例中不考虑固结作用。这样土的渗透将不会影响到计算结果，渗流参数窗口可以跳过。
- 10) 因为几何模型中不含界面，因此界面页面也可跳过。
- 11) 点击初始条件(Initial)页面，确认  $K_0$  设为自动，此时， $K_0$  就由 Jaky 公式确定： $K_0=1-\sin\phi$ 。
- 12) 点击 OK 按钮完成当前材料数据组的输入。创建好的数据组就会呈现在材料组窗口的树目录中。
- 13) 从材料组(Material sets)窗口中将湖积粘土(Lacustrine Clay)数据组拖放到修改土层窗口左手边的土层柱状图上。

注：光标改变形状表明是否可以放置数据组（到对象上），土层颜色的变化表明正确的为土层赋予了材料属性。

建筑物由线弹性无孔材料模拟，定义材料属性的步骤如下：




- 1) 材料组窗口中点击创建按钮(New)。
- 2) 在一般页面(General)下的材料组(Material sets)框中，在名称框中(Indentification)输入建筑物(Building)，如图 1.5 所示。
- 3) 从材料模型下拉菜单中选择线弹性模型(Linear elastic)，在排水类型下拉菜单中选择无孔(Non-porous)。
- 4) 根据表 1.1 中所列材料数据组，在一般属性框中输入重度。该重度对应建筑物的永久荷载和可变荷载之和。
- 5) 点击下一步按钮(Next)或按下参数标签(Parameters)，输入模型参数。线弹性模型只包含 2 个基本参数： $E'$ ,  $\nu'$ 。
- 6) 在参数页面相应的编辑框中输入表 1.1 中的模型参数。
- 7) 点击 OK 按钮完成当前材料组的输入，已创建的材料信息将会出现在材料组窗口的树形目录中，但是不能直接应用。

- 8) 点击 OK 按钮关闭材料组窗口(Material sets)。
- 9) 再点击 OK 按钮关闭修改土层窗口(Modify soil layers)。

注：PLAXIS 3D 区分材料组的工程数据库和全局数据库。使用全局数据库可以将数据组从一个工程转到另一个工程。点击显示全局按钮(Show global)就可以在材料组窗口(Material sets)中显示全局数据库。程序安装时案例教程中所有案例的数据组都存储在全局数据库中。

### 1.3 结构单元定义

结构单元在程序的结构模式(Structure)中创建。点击结构按钮(Structure)，进行结构单元的输入。按照如下步骤模拟建筑物：

- 1)  点击创建面按钮(Create surface)。将光标放在坐标原点(0,0,0)处，检查显示在光标位置显示器中的光标位置。当点击鼠标，就定义了面的点。
- 2) 在坐标(0,18,0) (18,18,0) (18,0,0)处分别定义其他 3 个点，按鼠标右键或者按 Esc 结束面的定义。注意，此时创建的面仍是选中状态，以红色显示。
- 3)  点击拉伸对象按钮(Extrude object)由面创建体。
- 4) 在拉伸窗口(Extrude)将 z 值改成-2，如图 1.7 所示，点击应用按钮(Apply) 关闭窗口。
- 5)  点击选择按钮(Select)，用鼠标右键选择创建的面，在弹出菜单中选择删除 (Delect)，这样就删除了刚才创建的面，但代表建筑物的体仍然保留。

这样，建筑体和材料数据组就都创建完成了。

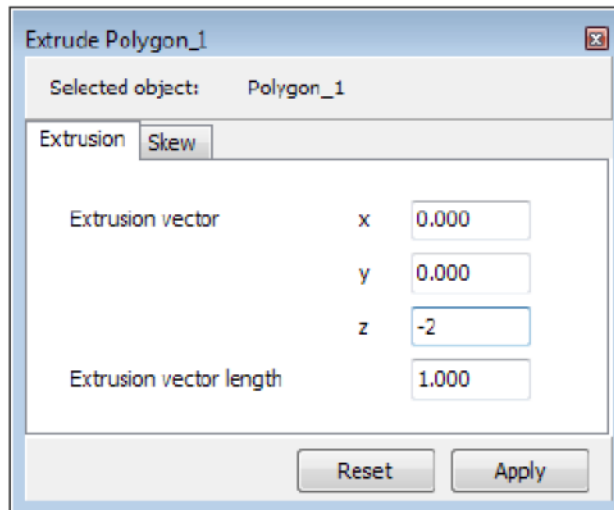



图 1.7 拉伸(Extrude)窗口

### 1.4 网格划分

建模完成后，点击网格(Mesh)标签进入网格模式。PLAXIS 3D 具有完全自动划分网格的程序，可将几何模型划分为实体单元和相应的结构单元。网格划分充分考虑了几何模型中几何对象的位置，因此土层、荷载和结构的准确位置在有限元网格中都会考虑。考虑对建筑体进行局部网格细化。按照以下步骤生成网格：

- 1)  点击侧边工具栏中**细化网格按钮(Refine mesh)**，点击创建的建筑体进行局部网格细化，这时该体积会变成绿色，如图 1.8 所示。

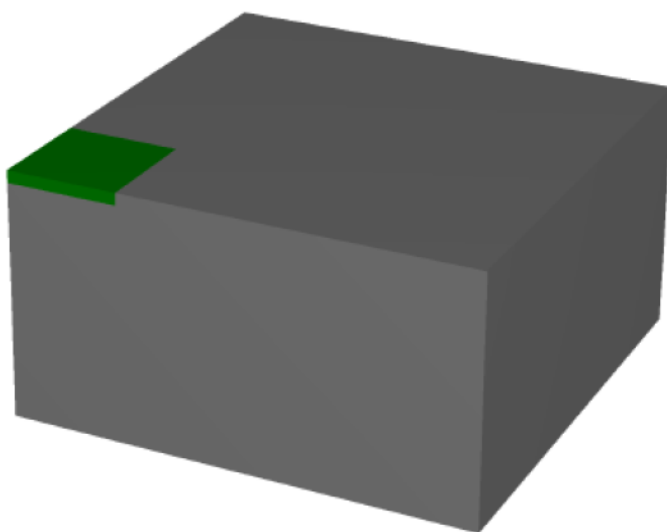





图 1.8 模型中局部网格细化的表示

- 2)  从侧边工具栏中点击**生成网格按钮(Generate mesh)**，或者在网格菜单(Mesh)中选择**生成网格(Generate mesh)**选项。在网格选项窗口中将**单元分布(Element distribution)**修改为粗，如图 1.9 所示，点击 OK 开始网格划分。
- 3)  当网格划分完成之后，点击**查看网格按钮(View mesh)**，在新打开的窗口中显示生成的网格，如图 1.10 所示。
- 4)  点击**关闭按钮(Close)**即可返回至输入程序中的网格模式。

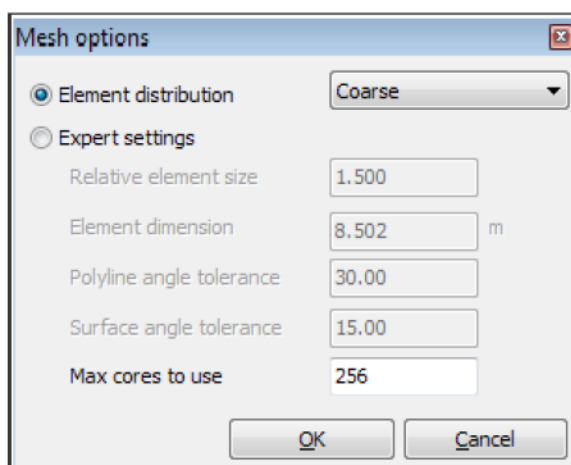


图 1.9 网格选项窗口

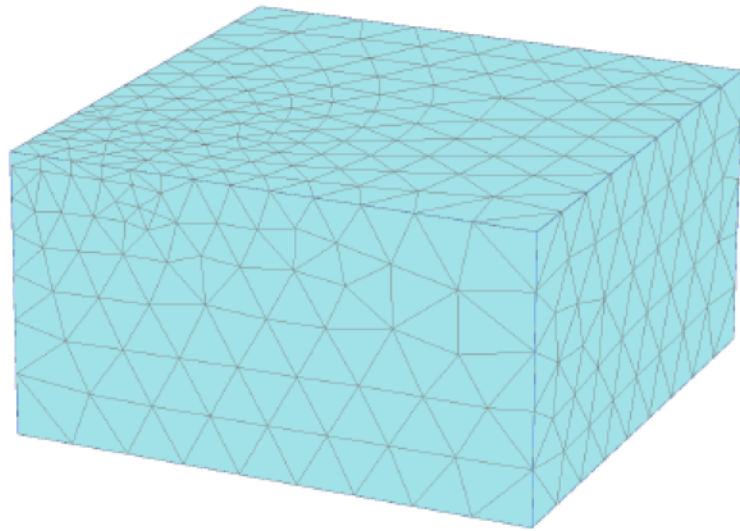


图 1.10 输出窗口中生成的网格

注：在默认的情况下，单元分布设为中等。可以在网格选项窗口中修改单元分布设置。另外，也可以选择整体或局部细化网格，详见参考教程(Reference Manual)7.1 节。

- 若几何模型更改，有限元网格必须重新划分。
- 自动生成的网格可能不满足实际的工程计算需求，因此在使用中建议用户检查网格划分结果，必要时做相应的网格细化。

### 1.5 执行计算

网格划分完毕之后，有限元模型就基本完成了。点击分步施工(Staged construction)，定义计算阶段。

#### 1. 初始条件

初始阶段就是初始条件的生成。一般来说，初始条件包含初始几何构造和初始应力状态，比如，有效应力、孔隙水压和状态参数。初始水位已在修改土层窗口中输入，这个水位用于计算初始有效应力状态。因此，不需进入水力模式(Water mode)。

定义一个新工程之后，第一个计算阶段命名为“初始计算”，在阶段浏览器(Phase explorer)中自动创建并选择 (如图 1.11 所示)。初始条件下，几何模型中的所有结构单元和荷载都自动关闭，只有土体是激活的。

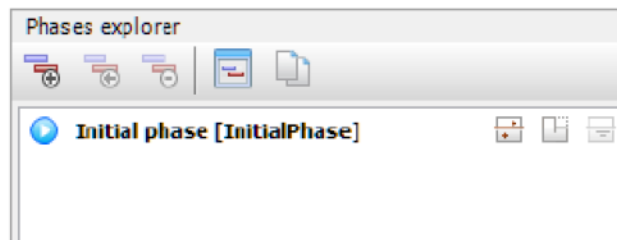



图 1.11 阶段浏览器

## PLAXIS 3D 2013 案例教程：超固结粘土上的基础沉降

本教程案例中，将介绍初始阶段的特点。案例这部分概述了该选项的定义方法，即使使用参数默认值。

- 1)  点击编辑阶段按钮(Phase)或双击阶段浏览器(Phase explorer)中的阶段，就会显示阶段窗口，如图 1.12 所示。

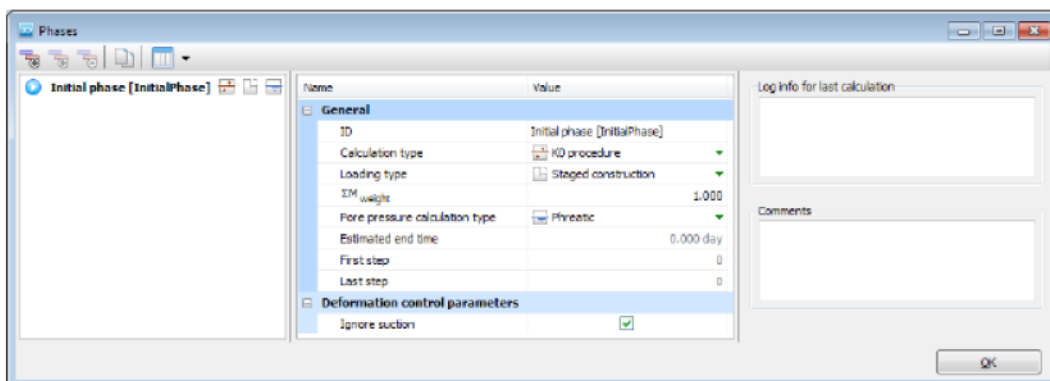






图 1.12 初始阶段的阶段窗口

- 2)  在阶段(Phase)窗口下的一般设置子树中，程序默认选择计算类型为 K0 过程。本工程中采用该选项生成初始应力。
- 3)  加载类型(Loading type)选为分步施工(Staged construction)，这是 K0 过程的唯一可选项。
- 4)  孔隙水压计算类型(Pore pressure calculation type)默认选为潜水位(Phreatic)选项。
- 5) 本例中阶段(Phase)窗口的其他选项也采用默认值。点击 OK 关闭阶段(Phase)窗口。
- 6) 在模型浏览器(Model explorer)中展开模型条件(Model conditions)子树。
- 7) 展开水力条件子树(Water)，总体水位(Global Water Level)自动选择由修改土层窗口中钻孔水头值生成的水位(钻孔水位\_1)。
- 8) 保证工程中所有的土体都激活，其材料属性均为湖积粘土(Lacustrine Clay)。

注：K0 过程只能用于地表水平、潜水位水平的水平成层几何模型。在参考手册(Reference Manual)7.3 节中有更多关于 K0 过程的详尽介绍。

### 2. 施工步

定义完初始条件之后，就可以模拟建筑物施工了。按照如下步骤添加一个模拟建筑物施工的计算阶段：

- 1)  点击阶段浏览器(Phase explorer)中的添加按钮(Add)，就会在浏览器中创建一个阶段(Phase 1)。
- 2) 双击阶段 1(Phase 1)打开阶段窗口。



- 3) 在一般设置子树的 ID 框中给这个新的阶段命名, 比如 **Building**。
- 4) 当前阶段从包含初始应力状态的初始阶段开始。该阶段采用默认选项和默认值, 如图 1.13 所示。
- 5) 点击 OK 按钮关闭阶段窗口。
- 6) 右击在 1.1.3 节中创建的建筑物, 从弹出菜单的**设置材料**选项中选择建筑物 **Building** 选项, 此时已将“Building”材料属性赋予给了建筑物。

注: 在**阶段浏览器(Phase explorer)**或**阶段窗口**中可以使用**添加(Add)**、**插入(Insert)**、**删除(Delete)**按钮实现计算阶段的添加、插入或删除。

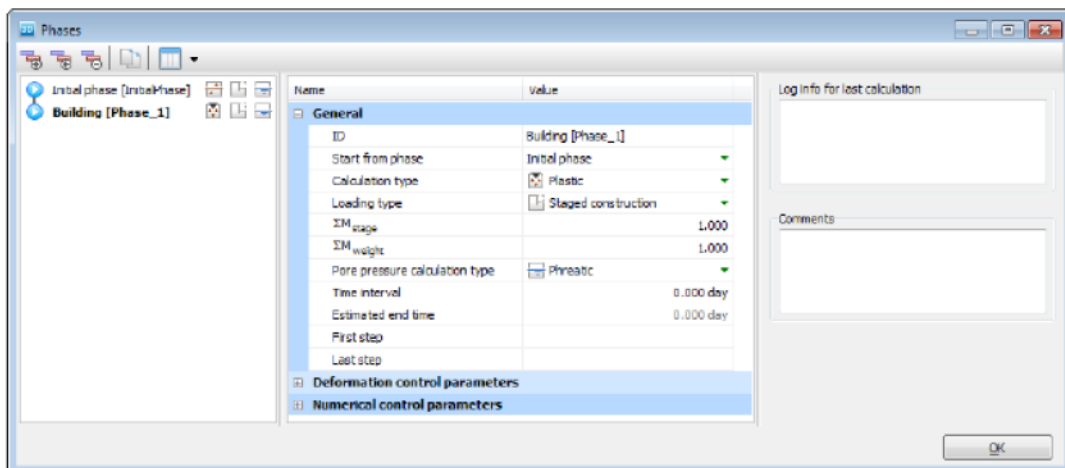




图 1.13 建筑物施工(Building)阶段的阶段窗口


### 3. 执行计算

所有计算阶段(本例中为 2 个阶段)都标记为计算(用蓝色箭头表示)。用**开始阶段参数(Start from phase)**来控制执行顺序。

 点击**计算按钮(Calculate)**开始计算。忽略“未选择绘制曲线的节点和应力”警告信息, 在计算执行的过程中, 出现了一个显示当前计算阶段计算进度信息的窗口, 如图 1.14 所示。

窗口中的信息不断更新, 显示计算进度、当前步数、当前迭代的全局误差, 当前计算步的塑性点数, 等等。可能需要几十秒的时间运行计算。运行完成后, 计算窗口关闭, 返回主窗口。

 **阶段浏览器(Phase explorer)**中的阶段列表更新完毕。计算成功的阶段用绿色圆中的对勾表示。

 查看结果之前先保存工程。

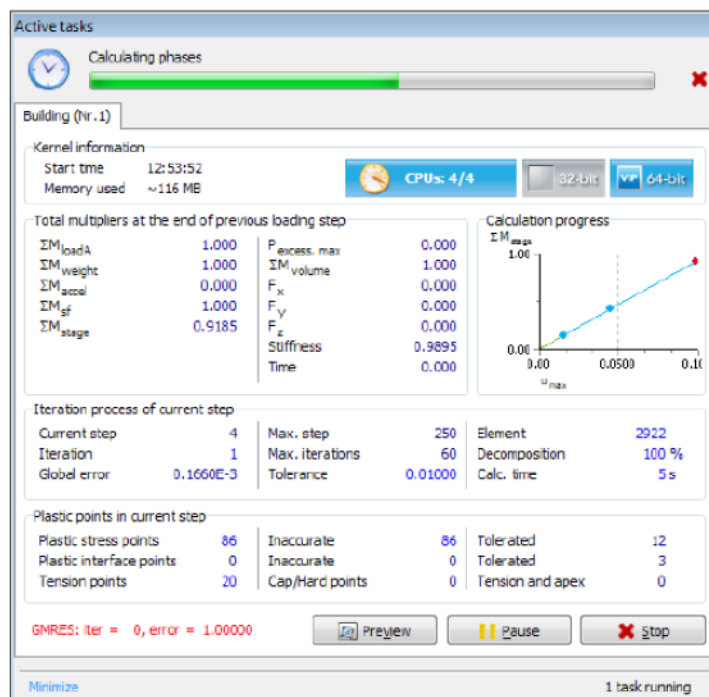


图 1.14 显示计算进度的活动任务窗口

## 1.6 查看计算结果

一旦计算完成，就可以在输出程序中显示计算结果。在输出程序中，可以只查看完全三维模型中、剖面或结构单元中的位移和应力。计算结果也可以表格的形式输出，浏览当前结果需按照如下步骤进行：

- 1) 选择阶段浏览器(Phase explorer)树形目录中的最后一个计算阶段 **Building**。



- 2) 点击侧边工具栏中的**查看计算结果按钮(View calculation results)**，打开输出程序。输出程序默认显示所选计算阶段结束时的三维变形网格。变形可按比例缩放以更清楚的观察。

- 3) 从变形菜单中选择**总位移(Total displacement)**，->  $|u|$ ，就会显示总位移的彩色云图。

- 4) 在彩色边界处是代表总位移值的图例，若图例未显示，需从视图菜单(View)中选择图例选项(Legend)。



- 5) 在输出窗口中点击等值面 **Iso surfaces** 按钮，显示具有相同位移的区域。

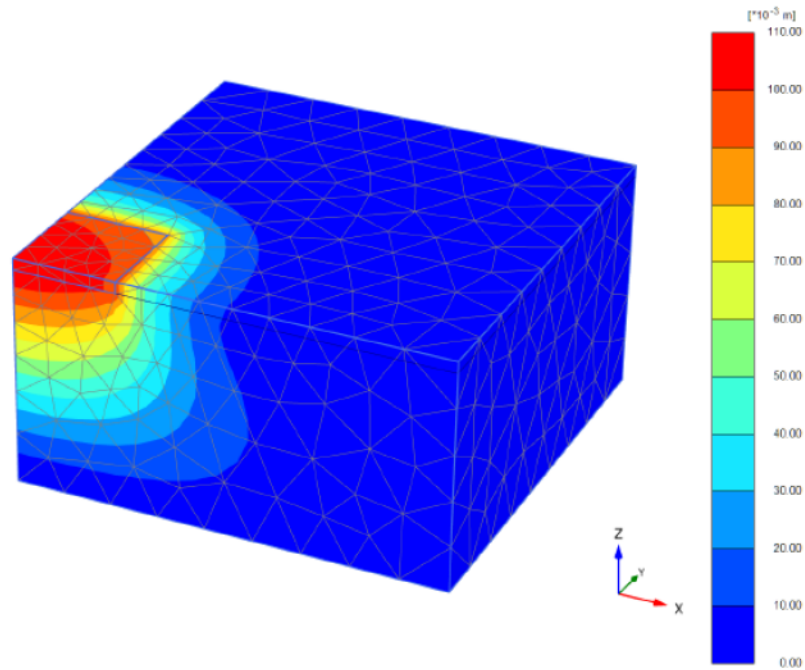


图 1.15 最后一个阶段结束时的总位移云图

注：除总位移之外，变形菜单(Displacement)中还可选择增量位移(Incremental displacement)和阶段位移(Phase displacement)。

- 增量位移(Incremental displacement)是一个计算步中产生的位移(在本例中就是最后一步)，有助于显示破坏机理。
- 阶段位移(Phase displacement) 是一个计算阶段中产生的位移(在本例中就是最后一个计算阶段)，用于检查一个单独阶段的影响，在开始阶段计算之前无需重置位移为零。

## 情形 B：筏形基础

在此情形下，需修改模型，地下室由结构单元组成。这就要求计算基础中的结构力。筏形基础由 50cm 厚的混凝土底板，由混凝土梁加强。地下室墙为 30cm 厚的混凝土墙。上部楼板荷载通过柱和地下室墙向下传递到筏板上。柱承受 11650kN 的荷载，地下室墙体承受 385kN/m 的线荷载，如图 2.1 所示。

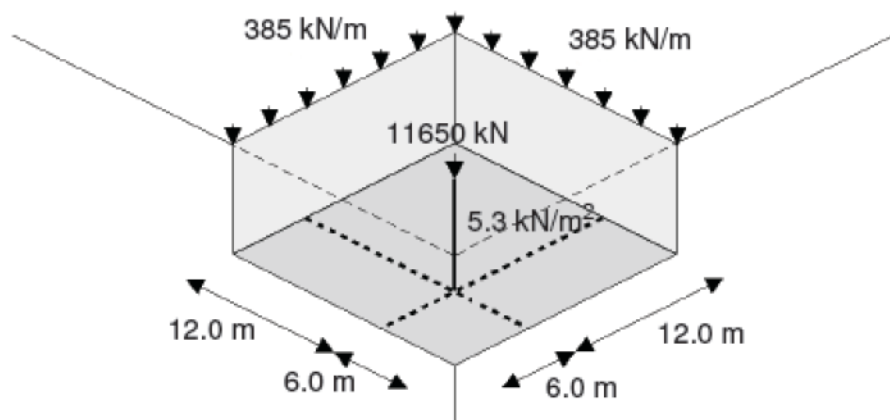


图 2.1 地下室几何尺寸


另外，筏板上承受 5.3kN/m<sup>2</sup> 的均布荷载。修改粘土层属性，使其刚度随深度递增。

### 目标：


- 用不同的名称保存工程。
- 修改已有数据组。
- 定义随深度递增的土体刚度。
- 模拟板，定义板的材料属性。
- 模拟梁，定义梁的材料属性。
- 定义点荷载。
- 定义线荷载。
- 定义面上的分布荷载。
- 删除阶段。
- 激活和冻结土体。
- 激活和冻结结构单元。
- 激活荷载。
- 在输出窗口进行缩放。
- 在输出窗口中画剖面。
- 查看结构计算结果的输出。

## 2.1 几何模型输入

本练习中的几何模型和上节相同，不同之处就是增加了结构单元模拟基础。因此不必重创建模，只需将之前的模型另存为不同的名称，并做相应修改。按如下步骤执行：

- 1)  打开 PLAXIS 3D 程序。将会弹出快速选择对话框(Quick select)，在此对话框中选择情形 1 时的工程。
- 2) 在文件菜单中选择另存为选项，用不同的名称保存工程(如：Tutorial 1b)

粘土层的材料属性已经定义。修改该材料属性，考虑土层刚度随深度增大，按照如下步骤进行：


- 1)  点击显示材料按钮(Show materials)，打开材料组窗口(Material sets)。
- 2) 确认组类型选为土(Soil)和界板(Interface)选项。
- 3) 选择湖积粘土(Lacustrine Clay)材料组，并点击编辑按钮 Edit)。
- 4) 在参数页面将土层刚度  $E'$  改为  $5000\text{kN/m}^2$ 。
- 5) 在高级参数的  $E'_{\text{inc}}$  框中输入  $500\text{kN/m}^2$ ， $z_{\text{ref}}$  保持默认值  $0.0\text{m}$  不变。即  $z=0.0\text{m}$  处土层刚度为  $5000\text{kN/m}^2$ ，从  $z=0.0\text{m}$  处往下每米增加  $500\text{kN/m}^2$ 。
- 6) 点击 OK 关闭土层窗口。
- 7) 点击 OK 关闭材料组窗口。

## 2.2 定义结构单元

进入结构模式定义组成地下室的结构单元：

- 1)  点击选择按钮(Selection)。
- 2) 右击代表建筑物的体，从弹出的菜单中选择分解为面选项(Decompose into surfaces)。
- 3) 删除最顶部的面（选择面并按下 Delete 键）。
- 4)  选择代表建筑物的体，在选择浏览器(Selection explorer)中点击可视化开关隐藏该体。
- 5) 右击建筑物的底面，从弹出菜单中选择创建板选项(Create plate)。
- 6) 将板分配到模型内部地下室的两个竖向面上。删除模型边界处余下的两个竖直面。

注：按住 Ctrl 键的同时点击多个对象，就可以同时选择多个对象。用同样的方法可以将一个属性赋予多个类似的对象。

- 7)  打开材料数据库，将组类型设为板(Set type to Plates)。
- 8) 根据表 2.1 创建地下室墙和底板的材料属性。
- 9) 将材料属性拖放到地下室墙和底板上。在这个过程中可能需要移动材料组窗口(Material sets)。
- 10) 点击 OK 键关闭材料组窗口。

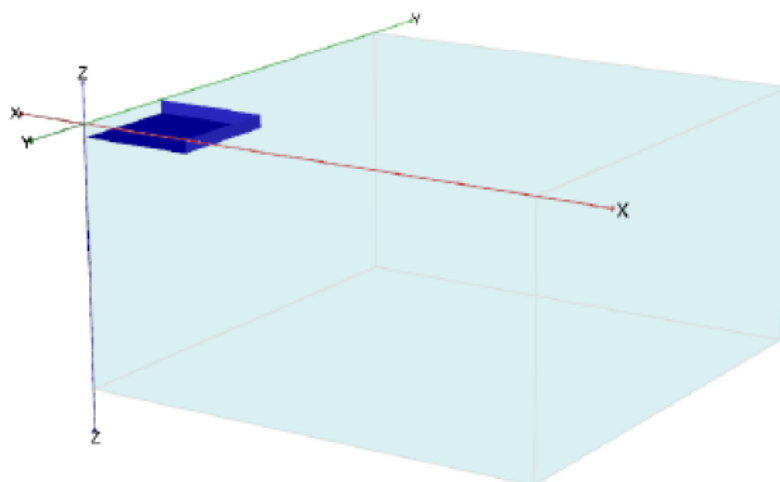



图 2.2 工程中板的位置


表 2.1 地下室墙、底板的材料属性

参数	符号	地下室底板	地下室墙	单位
厚度	d	0.5	0.3	m
重度	$\gamma$	15	15.5	kN/m <sup>3</sup>
材料性质	Type	线性、各项同性	线性、各项同性	--
杨氏模量	E1	$3 \times 10^7$	$3 \times 10^7$	kN/m <sup>3</sup>
泊松比	$\nu_{12}$	0.15	0.15	--


注：当指定**重度**时，注意考虑板单元本身不占体积并与土单元重叠。因此，为抵消重叠部分，要考虑从板、梁、嵌入桩的实际**重度**中扣除土的**重度**。对部分重叠的板、梁、嵌入桩，应该按比例减小其**重度**。


- 右击建筑物底面，从弹出的菜单中选择**创建面荷载**选项。荷载的实际值可以在**结构模式**中指定，也可在定义计算阶段时指定（阶段定义模式）。在本练习中，荷载值将会在阶段定义模式(Phase definition mode)中指定。

- 
 在侧边工具栏中点击**创建线按钮(Create line)**。

- 
 从弹出的子工具中选择**创建线荷载选项(Create line load)**。

- 点击命令输入区，输入“0 18 0 18 18 0 18 0 0”，然后按 Enter 键。这时就定义了地下室墙体上的线荷载。输入的值是线上三个点的坐标值，点击鼠标右键停止绘制线荷载。

- 
 在侧边工具栏中点击**创建线按钮(Create line)**。

- 
 从弹出的子工具中选择**创建梁选项(Create beam)**。

- 点(6,6,0)，创建竖向梁的第一个点，按住 Shift 键移动鼠标至点(6,6,-2)。注意按住 Shift 键后光标只能竖向移动。可以看到，在光标位置指示器中 z 坐标发生

变化了,此时  $x$  和  $y$  坐标保持不变。点(6,6,-2)定义梁的第二点。点鼠标右键停止绘制。

- 18) 从点(0,6,-2)到点(18,6,-2), 从点(6,0,-2)到点(6,18,-2) 创建水平方向的梁。

注: 在默认状态下, 光标位置都在  $z=0$  位置处。沿竖直方向移动光标应按住 Shift 键。




- 19)  打开材料数据库, 将组类型设为梁 (Set type to Beams)。
- 20) 根据表 2.2 创建水平梁和竖直梁的材料属性。将材料属性拖放至相应的梁单元上。

表 2.2 地下室梁、柱的材料属性

参数	符号	地下室柱	地下室梁	单位
横截面积	A	0.49	0.7	m <sup>2</sup>
材料重度	$\gamma$	24.0	6.0	kN/m <sup>3</sup>
材料属性	Type	线性	线性	--
杨氏模量	E	3×10 <sup>7</sup>	3×10 <sup>7</sup>	kN/m <sup>2</sup>
惯性矩	I <sub>3</sub>	0.020	0.058	m <sup>4</sup>
	I <sub>2</sub>	0.020	0.029	m <sup>4</sup>

- 21)  在侧边工具栏中点击创建荷载按钮(Create load)。
- 22)  从弹出的子工具中选择创建点荷载选项(Create point load)。点击(6,6,0)在竖向梁顶部添加一个点荷载。

进入网格页面生成网格。

### 2.3 网格划分

点击划分网格, 保持单元分布为粗。

检查生成的网格。

由于几何模型已改变, 所有的计算阶段必须重新定义。

### 2.4 执行计算

进入分步施工模式。

#### 1. 初始条件



与前面的例子相同, 用 *KO* 过程生成初始条件。

在初始计算阶段所有的结构单元应处于未激活状态。

初始阶段并未涉及开挖。因此, 代表地下室的体应该是激活的, 其材料属性应为湖积粘土。

#### 2. 施工步


## PLAXIS 3D 2013 案例教程：超固结粘土上的基础沉降

此处不在一个计算阶段施工建筑物，而是采用不同的计算阶段。在阶段 1 中，模拟建造墙体和基础开挖。在阶段 2 中，模拟建造梁和底板。最后一个阶段，即阶段 3 中激活荷载。


- 1)  代表施工步的阶段的计算类型默认设为塑性(Plastic)。
- 2) 将阶段 1 重命名为开挖(Excavation)。
- 3) 选择基础上的土层，在选择浏览器(Selection explorer)中点击它前面的复选框来冻结该土层。
- 4) 在模型浏览器(Model explorer)中点击对应地下室墙的板前面的复选框，以激活板。
- 5)  在阶段浏览器(Phase explorer)中点击添加阶段(Add phase)按钮。这样，添加了一个新的阶段（阶段 2）。双击阶段\_2，弹出阶段窗口：
- 6) 重新命名阶段 2 为建造（Construction）。保持该阶段的默认设置不变，并关闭阶段窗口。
- 7) 在模型浏览器(Model explorer)中点击对应地下室底板的板前面的复选框，以激活板。
- 8) 在模型浏览器(Model explorer)中点击梁前面的复选框以激活工程中的所有梁。
- 9)  在建造阶段之后添加一个新的阶段，重命名为加载“Loading”。
- 10) 在模型浏览器(Model explorer)中点击面荷载前面的复选框，以激活地下室底板上的面荷载。荷载 z 分量设为-5.3，这表明荷载大小为 5.3 kN/m<sup>2</sup>，方向为-z 方向。
- 11) 在模型浏览器(Model explorer)中点击线荷载前面的复选框，以激活地下室墙上的线荷载。荷载 z 分量设为-385，这表明荷载大小为 385 kN/m，方向为-z 方向。
- 12) 在模型浏览器(Model explorer)中点击点荷载前面的复选框，以激活地下室柱子上的点荷载。荷载 z 分量设为 11650，这表明荷载大小为 11650 kN，方向为-z 方向。
- 13)  点击预览阶段按钮(Review phase)，检查每个阶段的设置。
- 14) 计算阶段全部定义完毕之后，开始执行计算。忽略“未选择绘制曲线的节点和应力”警告信息。
- 15) 计算完毕后保存工程。

### 2.5 查看计算结果

在阶段浏览器(Phase explorer)中选择建造(Construction)选项。

- 1)  点击查看计算结果按钮(View calculation results)，打开输出程序。显示该阶段结束时的变形网格。
- 2) 在显示阶段(Displayed step)下拉菜单中选择最后一个阶段，以切换到最后一个阶段结束时的计算结果。



- 3)  为了评估几何模型中的应力和变形，选择**竖向剖面工具**(Vertical cross section)。此时显示几何模型的俯视图，弹出**剖面点窗口**。最大位移出现在柱子下面，此处的剖面最有意义。
- 4) 在**剖面点窗口**(Cross section points)中分别输入第一个点 A 的坐标(0.0,6.0)，第二点 A' 的坐标(75.0,6.0)。
- 5) 点 OK，出现一个**竖向剖面**。该剖面可以像几何模型的标准 3D 视图一样进行旋转。
- 6) 从位移菜单中选择总位移—>uz，如图 2.3 所示。竖向位移的最大、最小值都显示在标题处。若标题未显示，需从视图菜单(View)中选择相应选项。

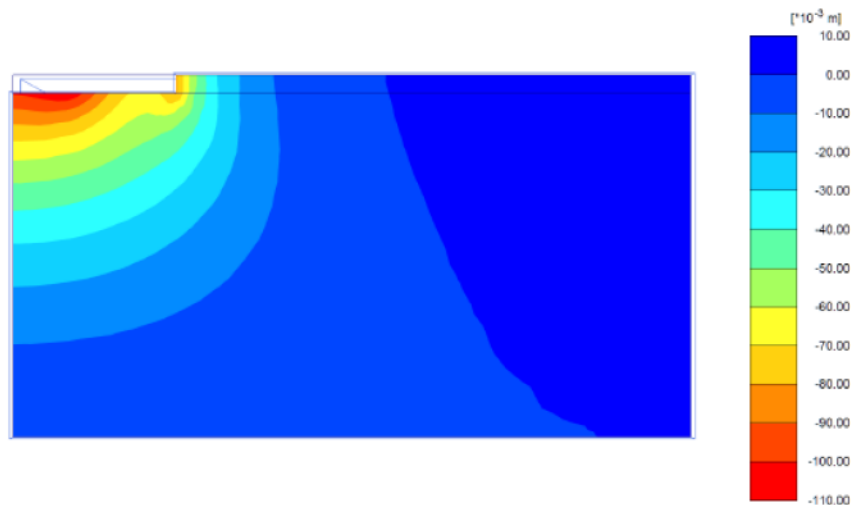




图 2.3 显示竖向总位移的剖面

- 7) 按下 Ctrl 和 “+”、Ctrl 和 “-” 移动剖面。
- 8) 在窗口 Window 菜单下的列表中选择并回到几何模型的三维视图。
- 9) 双击底板。弹出另一个窗口，显示底板的位移，在力(Force)菜单中选择 M11 可以查看板的弯矩。
- 10)  点击云图按钮(Shading)，将显示图 2.4 所示的图形。
- 11)  点击工具菜单(Tools)中的表格选项(Table)，板的弯矩就可以表格的形式列出。此时，打开一个新的窗口，其中出现一个显示底板上每个节点弯矩值的表格。

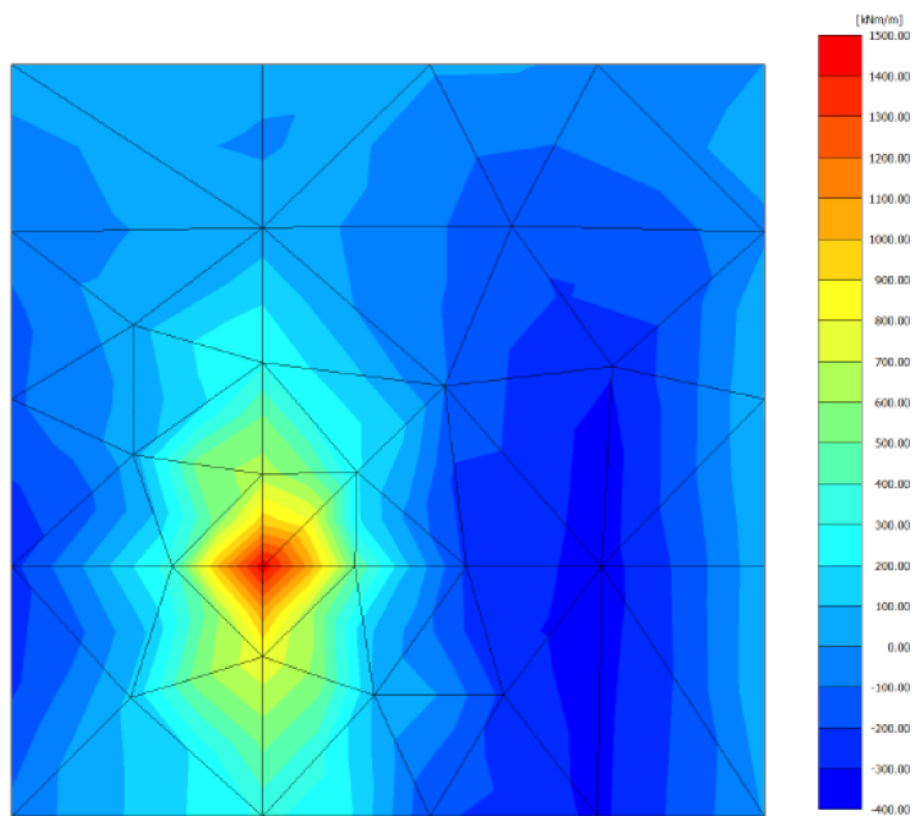


图 2.4 地下室底板的弯矩

### 情形 C：桩-筏基础


由于筏形基础的位移相当大，使用嵌入桩减小这些位移。这些嵌入桩代表入长 20m、直径 1.5m 的钻孔桩。

目标：

- 使用嵌入桩。
- 定义嵌入桩的材料属性。
- 多次复制对象。

### 3.1 几何模型输入

除了桩基础部分，本例的模型和之前相同。无需重建模型，可以将之前的模型用不同的名称另存，并做相应修改。按照如下步骤进行：

- 1)  打开 PLAXIS 3D 程序。弹出快速选择对话框(Quick select)，在此对话框中选择情形 B 的工程。
- 2) 在文件菜单中选择另存为选项，将工程以不同的名称保存。(如：Tutorial 1c)

### 3.2 结构单元定义

#### 定义嵌入桩

进入结构模式(Structures)。





- 3)  在侧边工具栏中点击创建线按钮(Create line)，再从弹出的子工具中选择创建嵌入桩按钮(Create embedded pile)。
- 4) 从点(6,6,-2)到点(6,6,-22)定义一根桩。
- 5)  打开材料数据库，将组类型设为嵌入桩(Embedded pilea)。
- 6) 根据表 3.1 创建嵌入桩的材料属性，其中截面面积 A 和惯性矩 I2, I3, I23 由实心圆桩的直径自动计算。点击 OK 确认输入。

表 3.1 嵌入桩的材料属性

参数	符号	桩基	单位
杨氏模量	E	3×107	kN/m2
重度	γ	6.0	kN/m3
桩类型	--	预定义	--
预定义桩类型	--	实心圆桩	--
直径	Diameter	1.5	m
侧阻力	Type	线性	--
桩顶最大侧阻力	Ttop,max	200	kN/m
桩底最大侧阻力	Tbot,max	500	kN/m
基底反力	Fmax	1×104	kN


- 7) 将桩的材料属性拖放到绘图区中的嵌入桩上，材料属性成功赋值后嵌入桩的颜色会变化。
- 8) 点击 OK 关闭材料组窗口(Material sets)。


注：嵌入桩的材料属性赋值方法有：在绘图区或选择浏览器和模型浏览器中右击桩，然后在弹出菜单的设置材料选项中选择相应的材料属性。

- 9)  点击选择(Select)按钮，选择嵌入桩。
- 10)  选择创建阵列按钮(Create array)。
- 11) 在创建阵列(Create array)窗口中选择形状为 2D、在 xy 平面选项。
- 12) 保持列数为 2。设置列间距为  $x=12$ ， $y=0$ 。
- 13) 保持行数为 2。设置行间距为  $x=0$ ， $y=12$ 。详见图 3.1 所示。
- 14) 点击 OK 创建阵列。一共创建了  $2 \times 2=4$  根嵌入桩。

### 3.3 网格划分

现在几何模型已创建完毕，可以进行划分网格了。

 划分网格。保持单元分布为粗(Coarse)。

 查看网格。

点击模型浏览器(Model explorer)中土层子树前的眼睛按钮，隐藏土层。此时可看到嵌入桩。详见图 3.2 所示。

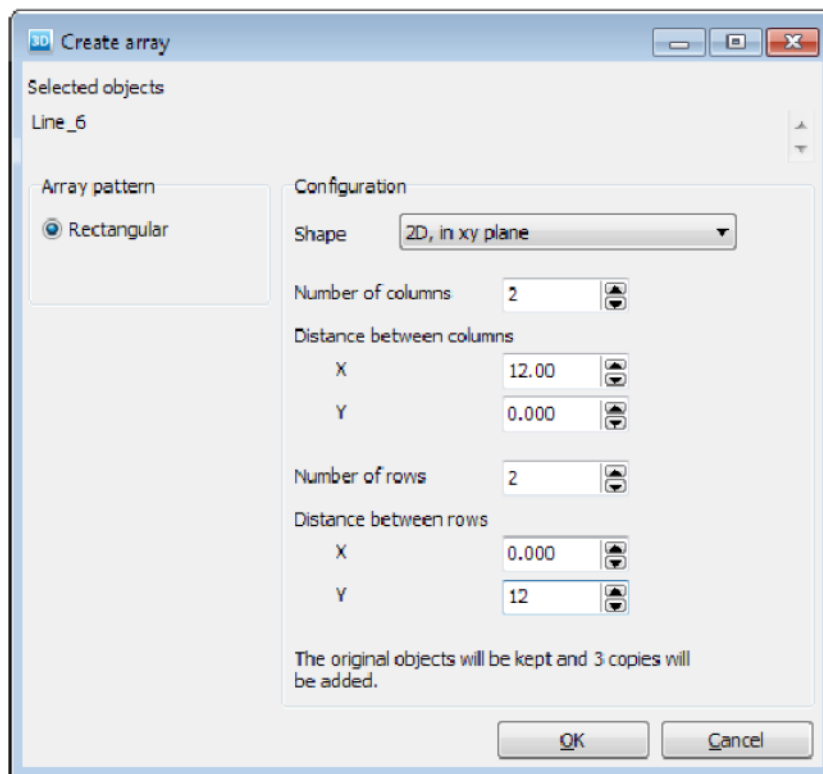


图 3.1 创建阵列(Create array)窗口

关闭网格预览窗口。

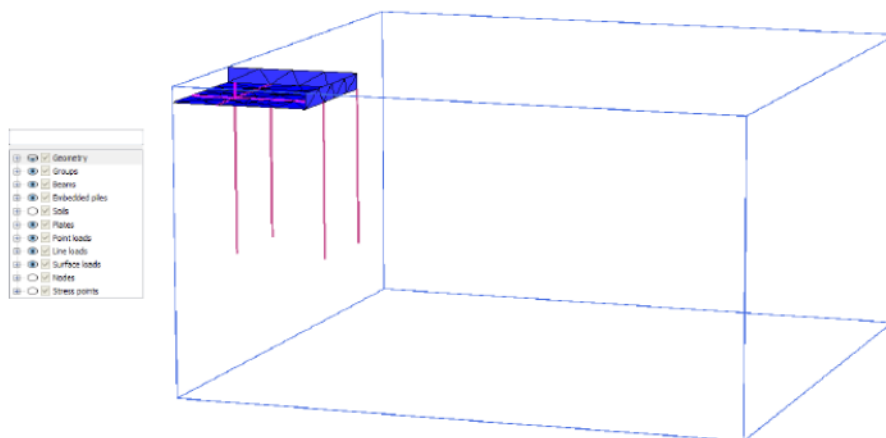



图 3.2 输出窗口中的部分几何模型

### 3.4 执行计算

划分完网格之后，所有施工步都要重新定义。尽管实际工程中桩是在除建造墙之外的另一个施工步中建造，但为了简单起见，本例中将桩和墙放在一个施工步中建造。按照如下步骤重新定义所有施工步：

- 1) 切换至分步施工(Staged construction)模式。
- 2) 检查初始阶段的计算类型是否为 K0 过程。确保所有的结构单元都未激活，而所有土层都已激活。土层材料属性为湖积粘土(Lacustrine clay)。
- 3) 在阶段浏览器(Phase explorer)中选择开挖阶段(Excavation)。
- 4) 确认地下室土体已开挖，且地下室墙已激活。
- 5) 激活所有桩。
- 6) 在阶段浏览器(Phase explorer)中选择建造阶段(Construction)，确保所有结构单元都已激活。
- 7) 在阶段浏览器(Phase explorer)中选择加载阶段>Loading)，确保所有结构单元和荷载都已激活。
- 8)  执行计算。
- 9) 计算完成后保存工程。

### 3.5 计算结果查看

- 1) 选择加载>Loading)阶段，查看计算结果。
- 2) 双击地下室底板，在力>Force)菜单中选择 M11。结果见图 3.3。

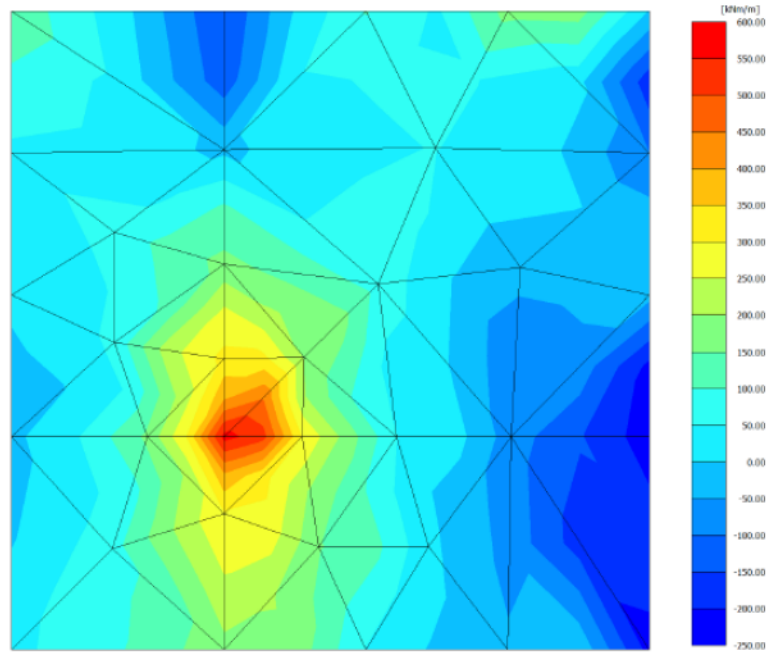




图 3.3 地下室底板的弯矩

- 3) 在窗口(Window)菜单中选择对应变形网格的窗口。
- 4)  在侧边工具栏中点击隐藏土层按钮(Hide soil)。
- 5) 按住 Shift 键点击要隐藏的土体，就可观察嵌入桩。
- 6)  点击选择结构按钮(Select structures)，按住<Ctrl>+<Shift>键并双击其中一根桩，就可以查看所有嵌入桩。
- 7) 在力菜单中选择 N 选项观察嵌入桩的轴力，如图 3.4 所示。

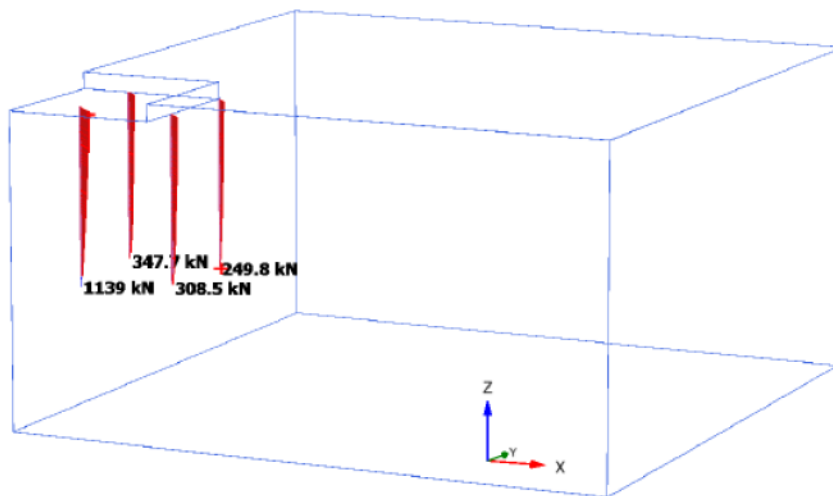


图 3.4 嵌入桩的轴力

本教程到此结束！

岩土工程有限元分析软件

**PLAXIS 3D 2016<sup>®</sup>**

## 案例教程

砂土地基中的基坑开挖



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©, 2017.

## 目录

砂土地基中的基坑开挖.....	1
几何模型.....	2
1.1 工程属性.....	2
1.2 土层定义.....	2
1.3 结构单元定义.....	4
网格划分.....	7
执行计算.....	8
查看计算结果.....	11





## 几何模型

按照如下步骤创建几何模型：

### 1.1 工程属性

1. 开启一个新的工程。
2. 为该工程输入一个合适的标题。
3. 定义土层平面尺寸： $x_{min}=0, x_{max}=80, y_{min}=0, y_{max}=50$ 。

### 1.2 土层定义

定义土层需添加一个钻孔并赋予其材料属性。由于所有土层都是水平的，只需定义一个钻孔即可。



1.  在点(0,0,0)处创建钻孔。这时修改土层(*Modify soil layers*)窗口自动弹出。
2. 分别在从上往下-1、-9.5、-11、-20 的位置处添加四层土层。将钻孔柱状中的水头设为-4m。
3.  打开材料组(*Material sets*)窗口。
4. 在土和界面(*Soil and interfaces*)组类型下创建一个新的数据组。
5. 将新的数据组命名为“填土(*Fill*)”。
6. 从材料模型下拉菜单中选择硬化土模型(*Hardening Soil*)。与摩尔-库伦模型相比，硬化土模型考虑了原始加载与卸载-重加载时刚度的不同。更多关于硬化土模型的详尽介绍，见材料模型手册第六章。
7. 根据表 1.1 定义土的饱和和非饱和重度。
8. 在参数页面中，根据表 1.1 输入参数  $E_{50}^{ref}, E_{oed}^{ref}, E_{ur}^{ref}, c_{ref}', \varphi_{ref}', \psi', v_{ur}', m$  的值。注意泊松比是一个高级参数。
9. 在本例中不考虑固结，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	符号	填土	砂土	软粘土	单位
<b>一般设定</b>					
材料模型	<i>Model</i>	硬化土模型	硬化土模型	硬化土模型	--
排水类型	<i>Type</i>	排水	排水	不排水 A	--
地下水位以上重度	$\gamma_{unsat}$	16.0	17.0	16.0	$kN/m^3$
地下水位以下重度	$\gamma_{sat}$	20.0	20.0	17.0	$kN/m^3$
<b>参数</b>					
标准三轴排水试验割线刚度	$E_{50}^{ref}$	$2.2 \times 10^4$	$4.3 \times 10^4$	$2.0 \times 10^3$	$kN/m^2$
主固结加载切线刚度	$E_{oed}^{ref}$	$2.2 \times 10^4$	$2.2 \times 10^4$	$2.0 \times 10^3$	$kN/m^2$
卸载/重加载刚度	$E_{ur}^{ref}$	$6.6 \times 10^4$	$1.29 \times 10^5$	$1.0 \times 10^4$	$kN/m^2$

刚度的应力水平相关幂值	$m$	0.5	0.5	1.0	--
内聚力	$c'_{ref}$	1	1	5	$kN/m^2$
摩擦角	$\varphi'$	30.0	34.0	25.0	$^\circ$
剪胀角	$\psi$	0.0	4.0	0.0	$^\circ$
泊松比	$\nu'_{ur}$	0.2	0.2	0.2	--
<b>界面</b>					
界面强度	--	手动	手动	手动	--
强度折减因子	$R_{inter}$	0.65	0.7	0.5	--
<b>初始条件</b>					
$K_0$ 的确定	--	自动	自动	自动	--
侧向土压力系数	$K_0$	0.5000	0.4408	0.7411	--
超固结比	$OCR$	1.0	1.0	1.5	--
覆土压力	$POP$	0.0	0.0	0.0	--

10. 在界面页面，在强度框中选择手动，输入参数  $R_{inter}$  的值为 0.65，该参数代表界面强度和土体强度的关系，有以下公式：

$$c_i = R_{inter} c_{soil} \text{ and } \tan\varphi_i = R_{inter} \tan\varphi_{soil} \leq \tan\varphi_{soil}$$

因此，使用输入的  $R_{inter}$  值，可以给出相对于周围土体的摩擦角和内聚力得到折减的界面摩擦角和粘聚力。

注：一旦在强度(Strength)下拉下单中选择了刚性(Rigid)选项，界面就和周围土体具有相同的强度，此时  $R_{inter} = 1.0$ 。

注意， $R_{inter} < 1.0$  时，界面的强度和刚度都会得到折减，详见参考手册第 6.1.4 节的介绍。

- 在初始条件页面中，根据表 1.1 定义 OCR 值。
- 点击 OK 关闭窗口。
- 按照同样的方法定义砂土和软粘土的材料属性，见表 1.1。
- 关闭材料组窗口后，点击 OK 关闭修改土层窗口。
- 在土体模式(Soil)中右击上部土层。在弹出的鼠标右键菜单中，在设置材料菜单中选择填土 Fill 选项。
- 用同样的方法为位于  $y=-9.5m$  和  $y=-11.0m$  之间的土层赋予软粘土材料属性。
- 将砂土材料属性赋予其余两层土。
- 进入结构模式(Structure)定义结构单元。

注：拉伸截断选项(Tension cut-off)默认激活，其值为 0  $kN/m^2$ 。该选项可在土体窗口(Soil)下参数页面(Parameters)中的高级 Advanced 选项中找到。此处可修改拉伸截断(Tension cut-off)值，也可完全冻结该选项。

### 1.3 结构单元定义

以下介绍板桩墙、腰梁、支撑、土层锚杆、面荷载的创建。









1.  在点(30,20,0)、(30,32,0)、(50,32,0)、(50,20,0)之间创建面。
2.  将该面拉伸至  $z=-1$ ,  $z=-6.5$ ,  $z=-11$ 。
3. 右击创建的最下面的体积（位于  $z=0$  和  $z=-11$  之间），从弹出菜单中选择分解为面选项(Decompose into surface)。
4. 删除最上面的面（2个）。当分解体积时又生成了一个面。
5. 隐藏开挖体积（不要删除）。模型浏览器和选择浏览器树目录中的“眼睛”按钮可用于隐藏部分模型，以便于更好的观察。隐藏对象用闭上的眼睛表示。
6.  点击创建结构按钮(Create structure)。
7.  在  $z=-1m$  位置处沿基坑四周创建梁（腰梁）。按住 *Shift* 键在  $-z$  方向移动鼠标光标，当鼠标光标指示器显示鼠标光标  $z$  坐标为  $-1$  时停止移动鼠标。注意当你放开 *Shift* 键时，光标位置的  $z$  坐标就不再变化，这表明你只能在  $z=-1m$  处的  $xy$  平面上进行绘制了。
8. 点击点(30,20,-1)、(30,32,-1)、(50,32,-1)、(50,20,-1)、(30,20,-1)绘制腰梁。点鼠标右键停止绘制。
9.  在点(35,20,-1)和(35,32,-1)之间创建梁（支撑）。按 *Esc* 键结束绘制支撑。
10.  根据表 1.2 创建腰梁和支撑的材料属性。
11.  在  $x=35$ （已有）， $x=40$ 、 $x=45$  处分别复制三个支撑。

表 1.2 梁的材料属性

参数	符号	支撑	腰梁	单位
横截面积	$A$	0.007367	0.008682	$m^2$
材料重度	$\gamma$	78.5	78.5	$kN/m^3$
材料属性	Type	线性	线性	--
杨氏模量	$E$	$2.1 \times 10^8$	$2.1 \times 10^8$	$kN/m^2$
惯性矩	$I_3$	$5.073 \times 10^{-5}$	$1.045 \times 10^{-4}$	$m^4$
	$I_2$	$5.073 \times 10^{-5}$	$3.66 \times 10^{-4}$	$m^4$

#### 12. 土层锚杆模拟

在 PLAX 3D 中可以使用点对点锚杆(Node-to-node)和嵌入桩选项(Embedded pile)模拟土层锚杆，步骤如下：

- 1)  首先用点对点锚杆(Node-to-node)的创建土层锚杆的自由段，点击创建结构按钮，在出现的选项中选择相应按钮开始创建点对点锚杆。



- 2) 点击命令行，输入“30、24、-1、21、24、-7”。按下 Enter 和 Esc 建创建第一根土层锚杆的自由段。
- 3) 在点(50,24,-1)和(59,24,-7)之间创建一个点对点锚杆。
- 4)  用嵌入桩选项(Embedded pile)创建锚杆的注浆段。在点(21,24,-7)和(18,24,-9)、(59,24,-7)和(62,24,-9)之间创建嵌入桩。
- 5)  分别根据表 1.3 和表 1.4 创建嵌入桩和点对点锚杆的材料属性，并将其赋予相应构件。





表 1.3 点对点锚杆的材料属性

参数	符号	点对点锚杆	单位
材料类型	Type	弹性	--
轴向刚度	EA	6.5×105	kN

表 1.4 嵌入桩的材料属性(灌浆体)

参数	符号	灌浆体	单位
杨氏模量	E	3×107	kN/m2
重度	γ	24	kN/m3
桩类型	--	预定义	--
预定义桩类型	--	实心圆桩	--
直径	Diameter	0.14	m
侧摩阻分布	Type	线性	--
桩顶侧阻力	Ttop,max	200	kN/m
桩底侧阻力	Tbot,max	0.0	kN/m
基底反力	Fmax	0.0	kN



注：表示赋予对象的材料属性的颜色可以修改，点击所选材料属性的颜色框，从窗口中的颜色区域选择一种颜色。

- 6) 复制已创建的锚杆注浆段，创建其余的锚杆注浆段。
- 7)  点击选择按钮(Select)，并按住 Ctrl 键点击锚杆的两个部分的所有单元。
- 8)  使用创建阵列功能(Create array)，在形状(Shape)下拉菜单中选择 1D，y 方向选项，定义列间距为 4m，将土层锚杆的两个部分(2 根嵌入桩+2 根点对点锚杆)复制为 4 个完整的锚杆，分别位于 y=24 和 y=28 处。
- 9)  全选所有锚杆部分（8 个对象），按住 Ctrl 键点击鼠标右键，在弹出菜单中选择群组（Group）选项。
- 10)  在模型浏览器树目录中，点击群组前面的“+”号展开群组子树。
- 11) 点击 Group\_1 重命名为“GroundAnchors”。

注：工程中的对象名称不能包含任何空格和除“\_”以外的特殊字符。

13. 按照下面步骤定义板桩墙和相应的界面：




- 1)  选中在分解体积时创建的所有四个竖直面，按住 Ctrl 键，点击鼠标右键，在弹出菜单中选择**创建板 (Create plane)** 选项。
- 2)  根据表 1.5 **创建板桩墙 (板)** 的材料属性，并将其赋予四片墙。
- 3) 选中所有面，在鼠标右键菜单中选择相应选项，在这些面上添加正向界面和负向界面。


注：界面的“正”和“负”没有物理意义，只是为了区分面两侧的界面。

表 1.5 板桩墙的材料属性

参数	符号	板桩墙	单位
厚度	d	0.379	m
重度	$\gamma$	2.55	kN/m <sup>3</sup>
材料属性	Type	线性、各项异性	--
杨氏模量	E1	$1.46 \times 10^7$	kN/m <sup>2</sup>
	E2	$7.3 \times 10^5$	kN/m <sup>2</sup>
泊松比	$\nu$	0.0	--
剪切模量	G12	$7.3 \times 10^5$	kN/m <sup>2</sup>
	G13	$1.27 \times 10^6$	kN/m <sup>2</sup>
	G23	$3.82 \times 10^5$	kN/m <sup>2</sup>

- 4) 定义了各向异性（两个方向刚度不同）的板桩墙。局部坐标轴应该指向正确的方向（定义哪个是刚性方向，哪个是柔性方向）。一般情况下，垂直方向是板桩墙刚度最大的方向，局部坐标 1 轴应指向 z 方向。



 在**模型浏览器 (Model explorer)** 树目录中展开面子树，将功能轴设为手动，将 Axis1z 设为-1。其他板桩墙也做同样的设置。

14.  通过点(34,19,0)、(41,19,0)、(41,12,0)、(34,12,0)创建一个面荷载。几何模型定义完成。

注：局部坐标 1 轴用红色箭头表示，2 轴用绿色箭头表示，3 轴用蓝色箭头表示。

更多关于板的局部坐标的信息详见参考手册。

## 网格划分

1. 进入网格模式。
2.  创建网格。设置单元分布(*Element distribution*)为粗。
3.  查看网格。隐藏模型中的土层方便查看嵌入桩。

## 执行计算

计算过程一共包含六个阶段。初始阶段用 *K0 过程* 生成初始应力。下一阶段是板桩墙的建立和第一次开挖。然后是腰梁和支撑的安装。阶段 3 激活锚杆并施加预应力。之后的阶段是基坑的进一步开挖。最后一个阶段是在基坑附近施加附加荷载。








1. 点击 **分步施工(Staged construction)** 标签，定义计算阶段。
2. 初始阶段已自动创建。保持其计算类型为 *K0 过程*。确保所有土层都激活，而所有结构单元都未激活。
3.  添加一个新的阶段 *Phase\_1*。该阶段采用参数默认值。
4. 冻结第一次开挖的土体，从  $z=0$  至  $z=-1$ 。
5. 在 **模型浏览器(Model explorer)** 中，点击所有板和界面前面的复选框 *checkbox* 将其激活。工程中激活的单元在 **模型浏览器** 中用绿色对勾表示。
6.  添加一个新的阶段 *Phase\_2*。还是采用参数默认值。
7. 在 **模型浏览器(Model explorer)** 中激活所有的梁。
8.  添加一个新的阶段 *Phase\_3*，依旧采用参数默认值。
9. 在 **模型浏览器(Model explorer)** 中激活锚杆群组。
10.  选择其中一根点对点锚杆。
11.  在 **选择浏览器(Selection explorer)** 中展开点对点锚杆选项。
12. 点击 **调整预应力按钮(Adjust prestress)**，将其修改为 *True*，输入一个  $200\text{kN}$  的预应力，详见图 3.1 所示。
13. 对其他所有点对点锚杆做相同的设置。



图 3.1 选择浏览器中的点对点锚杆

14.  添加另一个阶段 *Phase\_4*，依旧采用参数默认值。
15. 进入 **水位模式 (Water levels)**。
16.  选择该阶段要开挖的土体，从  $z=-1$  至  $z=-6.5$ 。

17. 在选择浏览器(Selection explorer)中展开土体树目录，接着展开水力条件子目录，点击条件并从下拉菜单中选择干(Dry)选项。



图 3.2 选择浏览器中的渗流条件

18. 隐藏基坑周围的土层。
19. 选择开挖面以下的土层 (即从  $z=-6.5$  至  $z=-9.5$ )。
20. 在选择浏览器(Selection explorer)中展开土体树目录，接着展开水力条件子目录。
21. 点击条件并从下拉菜单中选择水头 Head)选项。输入  $zref=-6.5m$ 。
22. 选择开挖面以下的软粘土体。
23. 将水力条件(Water Conditions)设为内插 Interpolate。
24. 进入分步施工(Staged construction)模式。
25. 冻结要开挖的土体，从  $z=-1$  至  $z=-6.5$ 。
26. 预览该计算阶段。
27. 在预览窗口中点击竖向剖面按钮(Vertical cross section)，过基坑画一条线来定义一个纵剖面。
28. 从应力菜单中选择  $p_{steady}$ 。
29. 用等值线显示稳态孔隙水压力分布。确保视图菜单中勾选了图例选项。稳态孔隙水压分布如图 3.3 所示。滚动鼠标滚轮缩放图形以便观察。

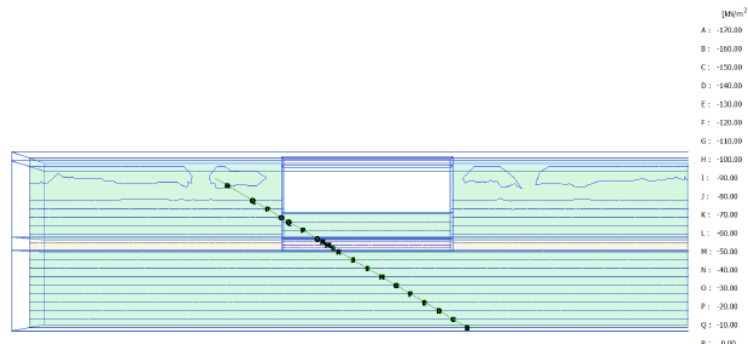






图 3.3 纵向剖面中 Phase\_4 的稳态孔隙水压预览

30. 点击关闭按钮返回输入程序。
31.  添加另一个阶段 Phase\_5，依旧采用参数默认值。
32. 激活面荷载，将其值设为  $\sigma_z = -20 \text{ kN/m}^2$ 。
33. 定义曲线点
  - 1) 在开始计算之前，选择基坑和荷载附近的一些应力点，后面可以绘制应力-应变曲线。
  - 2)  点击**选择曲线点按钮**(*Select points for curves*)，就会在窗口中显示模型和选择点窗口。
  - 3) 定义点(37.5,19,-1.5)作为关注点坐标(*Point-of-interest coordinates*)。
  - 4) 点击搜索最近按钮(*Search closest*)，将显示跟关注点最近的节点和应力点。
  - 5) 点击要选择的应力点前面的复选框 *checkbox*，选择的应力点就会出现在列表里。
  - 6) 再选择点(37.5,19,-5)、( 37.5,19,-6)、( 37.5,19,-7)附近的应力点，然后关闭选择点窗口。
  - 7) 点击更新按钮(*Update*)以关闭输出程序。
34.  开始运行计算。
35.  计算完成之后保存。


注：除了在计算之前选择曲线节点和应力点之外，也可以在计算后查看输出计算结果时选择点。但是，这样一来曲线就不够精确了，因为此时只考虑了保存的计算步结果。

绘制结构内力的曲线，可以只在计算之后选择节点。

也可以通过直接点击来选中节点和应力点。移动鼠标时，窗口底部的光标位置指示栏中将给出准确的位置坐标。

## 查看计算结果

计算完成后，从阶段树目录中选择一个计算阶段，点击**查看计算结果**按钮来查看基坑计算结果。

1.  选择最后一个计算阶段 *Phase\_5*，点击**查看计算结果**按钮(*View calculation results*)。输出程序将打开并显示最后一个阶段结束时的变形网格。
2. 在相应菜单中选择想要查看的输出项来查看应力、变形、三维几何模型。比如，从应力菜单中选择塑性点(*Plastic points*)以观察模型中的塑性点。
3. 如图 4.1，在塑性点(*Plastic points*)窗口中选择除弹性点(*Elastic points*)和仅显示不精确点(*only inaccurate points*)选项之外的所有选项。图 4.2 显示了在最后一个计算阶段结束时模型中产生的塑性点。

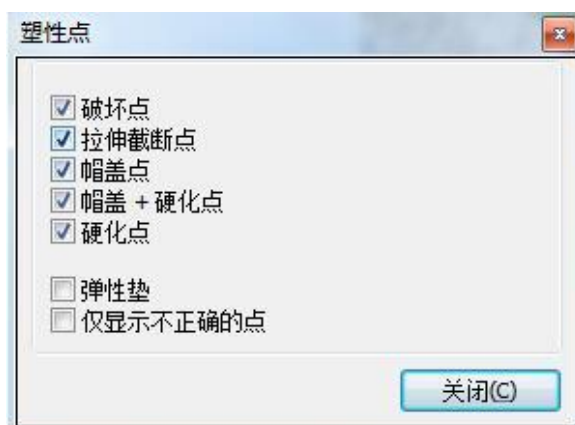

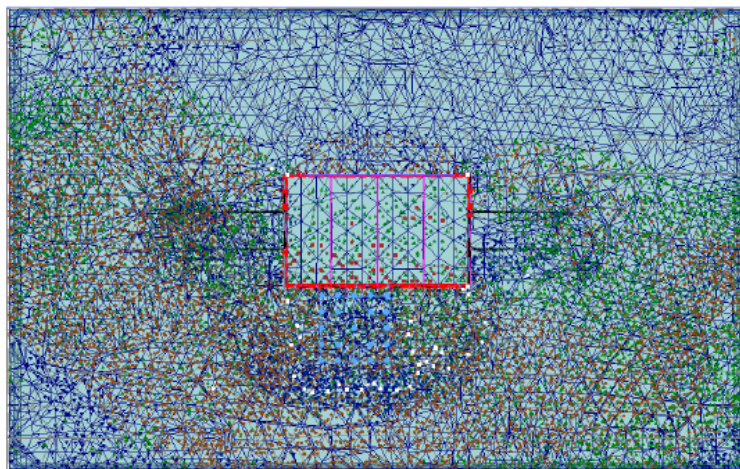


图 4.1 塑性点(Plastic points)窗口


4.  开始选择结构。点击墙的一部分以选择它，同时按下 **Ctrl+A** 选中所有墙单元。选中的墙单元呈红色。



塑性点

■ 破坏点; □ 拉伸截断点; ▼ 帽盖点; ◆ 帽盖+硬化点; ▲ 硬化点

图 4.2 最后一个计算阶段结束时的塑性点

5. 按住 Ctrl 或 Shift 键，双击其中一个墙单元，观察所有墙单元中的总位移|u|的变形平面。
6.  从工具菜单中选择**曲线管理器(Curves manager)**选项或在工具栏中点击相应的按钮，就可生成一条曲线。
7. 所有预先选中的应力点都显示在**曲线管理器**窗口中的曲线点页面。
8. 创建一张图表。
9. 在下拉菜单中选择点 K 作为曲线的 x 轴，在总应变下面选择  $\epsilon_1$ 。
10. 在下拉菜单中选择点 K 作为曲线的 y 轴，在有效主应力下面选择  $\sigma_1$ ，见图 4.3。
11. 勾选相应的复选框，将曲线两个轴的符号都反向。
12. 点击 OK 确认输入。
13. 曲线显示的是大主应力与大主应变的关系。在初始条件开始时，二者的值均为 0。初始条件生成后，主应变的值仍为 0，但主应力不再为 0。按照如下步骤在一张图中绘制所有已选应力点的曲线：
  - 1) 选择**添加曲线(Add curve)**→从右键菜单中选择从当前工程。
  - 2) 用同样的方法生成点 L,M,N 的曲线。
  - 3) 图 4.4 中的图形显示了所有四个点的应力-应变曲线。若要查看数据点的信息，确认在**视图菜单(View)**中选择了**显示值(Value indication)**选项，并将鼠标在数据点上放一会儿。此时会给出图中的坐标信息、点号、阶段数和步数。尤其在最后一个计算阶段施加荷载后，最下面一个应力点的应力明显增大。

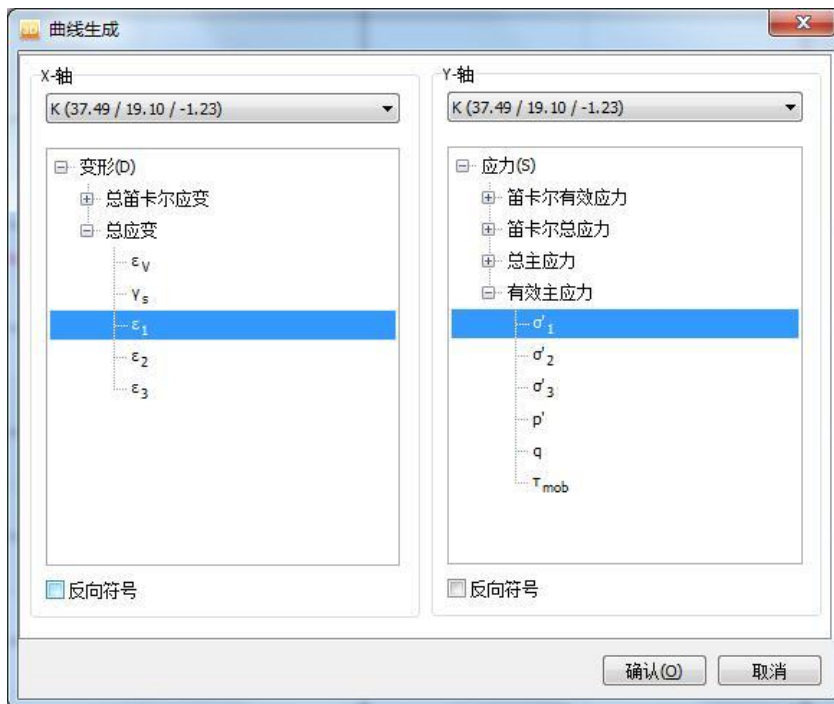


图 4.3 曲线生成窗口

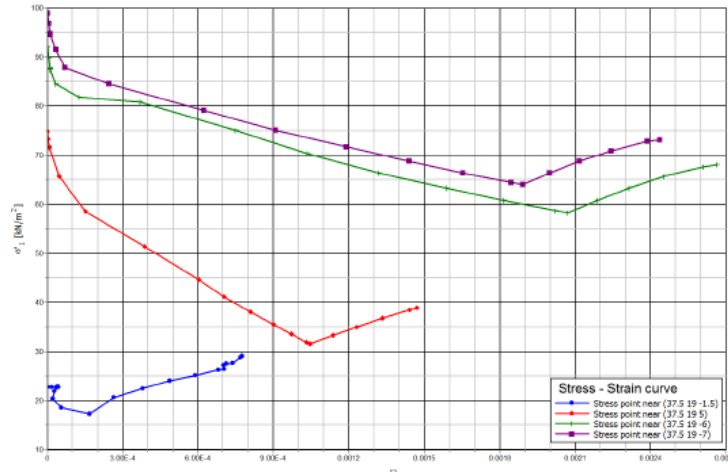


图 4.4 应力-应变曲线

注：想重新进入曲线生成窗口（以下情况下：操作失误，想重新生成曲线或修改曲线），可以从格式菜单(Format)中选择曲线设置选项，弹出曲线生成窗口，点击重新生成按钮(Regenerate)。

格式菜单(Format)中的图表设置选项(Chart settings)可用于修改图表的设置。

14. 按照如下步骤创建应力点 K 的应力路径曲线：

- 1) 创建一个图表。
- 2) 在曲线生成窗口中，下拉菜单中选择点 K，选择笛卡尔有效应力  $\sigma'_{yy}$  (Cartesian effective stresses)。
- 3) 从图形 y 轴下拉菜单中选择点 K，选择笛卡尔有效应力  $\sigma'_{zz}$  (Cartesian effective stresses)。
- 4) 点击 OK 完成输入，如图 4.5 所示。

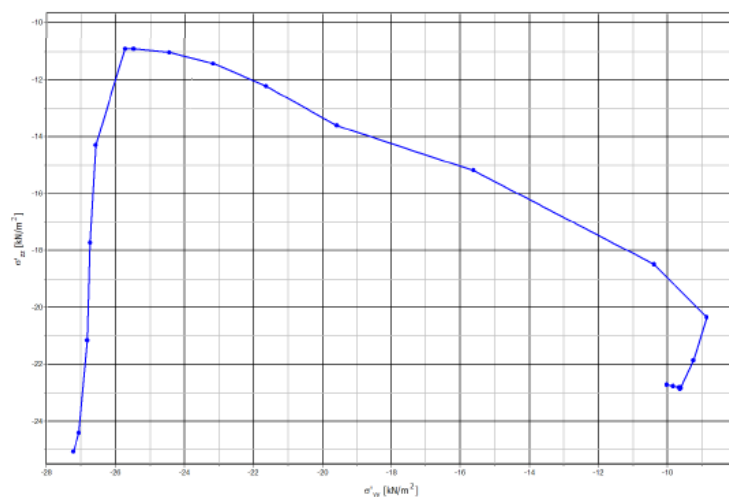


图 4.5 (37.5, 19 -1.5) 附近的应力点 K 处的应力路径图( $\sigma'_{yy} - \sigma'_{zz}$  图)

本教程到此结束！



岩土工程有限元分析软件

**PLAXIS 3D 2016<sup>®</sup>**

## 案例教程

吸力桩的加载



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©, 2017.

## 目录

目录.....	1
吸力桩的加载.....	2
<b>几何模型</b> .....	<b>3</b>
1.1 工程属性.....	3
1.2 土层定义.....	3
1.3 结构单元定义.....	4
<b>网格划分</b> .....	<b>9</b>
<b>执行计算</b> .....	<b>10</b>
<b>查看计算结果</b> .....	<b>12</b>

---

## 吸力桩的加载

---

本例将研究近海地基中的吸力桩。吸力桩是一种大直径的空心钢桩，桩顶封闭，通过从内部抽水将其安装在海底。桩的内外压差就是桩的安装动力。

在本练习中，吸力桩的长度是  $10\text{m}$ ，直径为  $4.5\text{m}$ 。桩侧安装锚索，距桩顶  $7\text{m}$ 。为避免桩的局部破坏，锚索作用位置处桩的壁厚有所增加。土层为粉砂。为了模拟不排水行为，要用不排水强度参数进行不排水应力分析。本例将研究吸力桩在工作荷载下的位移。考察工作荷载的四个不同角度。不模拟桩的安装过程。问题的几何形状见图 1 所示。

### 目标：

- 使用形状设计器
- 使用刚体 (Rigid body) 对象
- 用不排水强度参数进行不排水有效应力分析。
- 土层粘聚力随深度增加而增加。
- 复制材料组。
- 在输出程序中修改设置。
- 利用辅助对象加密网格

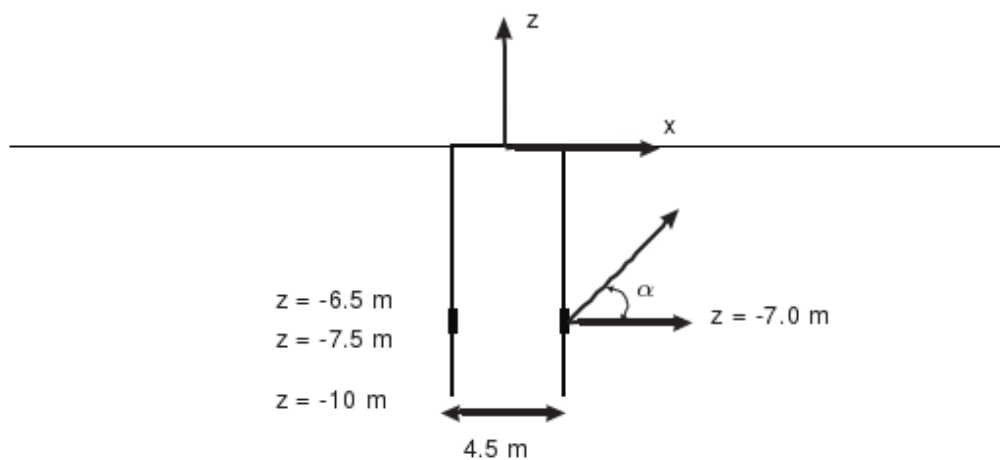


图 1 吸力桩几何形状

## 几何模型

模拟吸力桩周围 60m 长、60m 宽的区域。该模型的尺寸已足够大，可以避免来自模型边界的任何影响。

### 1.1 工程属性

按照如下步骤定义本例的几何模型：

1. 打开输入程序，从创建/打开工程(Create/Open project)对话框中选择新工程(New project)。
2. 为本例题输入一个恰当的标题。
3. 保持标准单位制，模型尺寸设为  $xmin=-30m, xmax=30m, ymin=0m, ymax=30m$ 。
4. 点击 OK。

### 1.2 土层定义

本例中只有一层水平土层，只需一个钻孔就足以定义该土层。



1.  在几何模型中添加一个钻孔。
2. 修改土层窗口中添加一个土层，顶部边界标高设为  $z=0m$ ，底部边界标高为  $z=-30m$ 。
3. 本例中水深为 50m，水头可以设置为 50m，但是只要整个几何体均处于水面，就会得到相同的计算结果。因此 1m 的水头足以模拟本例问题，设置水头为 1m
4.  打开材料组窗口，按照表 1.1 创建数据组。在参数页面的强度高级参数中去掉拉伸截断选项(Tension cut-off)。在本例中，土的渗透性不影响计算结果。本例中不使用有效强度属性，而使用粘聚力参数模拟不排水剪切强度。在参数页面中展开高级数据树目录就可以进入高级参数设置。

表 1.1 砂土及其界面的材料属性

参数	符号	砂土	界面	单位
<b>一般设定</b>				
材料模型	<i>Model</i>	M-C 模型	M-C 模型	--
排水类型	<i>Type</i>	不排水 B	不排水 B	--
地下水位以上重度	$\gamma_{unsat}$	20.0	20.0	$kN/m^3$
地下水位以下重度	$\gamma_{sat}$	20.0	17.0	$kN/m^3$
<b>参数</b>				
杨氏模量	$E'$	$10^3$	$10^3$	$kN/m^2$
泊松比	$\nu'$	0.35	0.35	--
剪切强度	$S_{u,inc}$	1.0	1.0	$kN/m^2$
摩擦角	$\varphi_u$	0.0	0.0	°
剪胀角	$\psi$	0.0	0.0	°

刚度增量	$E'_{inc}$	1000	1000	$kN/m^2/m$
参考标高	$z_{ref}$	0.0	0.0	$m$
内聚力增量	$S_{u,inc}$	4.0	4.0	$kN/m^2/m$
参照标高	$z_{ref}$	0.0	0.0	$m$
<b>界面</b>				
界面强度	--	手动	刚性	--
界面强度折减	$R_{inter}$	0.7	1.0	--
<b>初始条件</b>				
$K_0$ 的确定	--	手动	手动	--
侧向土压力系数	$K_{0,x}, K_{0,x}$	0.5	0.5	--

注：可以通过复制“砂土”的属性数据并修改  $R_{inter}$  的值快速创建界面属性数据。




5. 将“砂土”材料属性赋予土层，然后关闭材料组窗口。

### 1.3 结构单元定义

在结构模式中用刚性半圆面来模拟吸力桩。具体步骤如下：

#### 创建吸力桩

在结构模式中，吸力桩作为刚体来考虑。可以通过在土体表面创建多段线，经过拉伸后实现。

1.  点击侧边工具栏中的创建多段线按钮
2. 在 (2.5,0,0) 处单击创建绘图区的插入点，形状设计器窗口弹出
3. 在一般设置界面，默认形状选项为自由
4. 多段线在 x-y 平面内绘制（如图 3.2），因此在本算例中默认方向轴有效。更多内容详见参考手册 5.7.2 节
5.  在线段页面，点击顶部工具栏的增加断面按钮
6. 线段类型设置为弧，相对起始角设置为  $90^0$ ，半径为 2.5m，线段角度为  $180^0$ ，如图 3.3
7. 点击确认，在几何模型中增加多段线，关闭形状设计器。
8.  点击多段线，选择拉伸选项，设置拉伸矢量  $Z=-10$
9. 右击所创建的面，选择创建正向界面为吸力桩创建正向界面，类似地，为该曲面创建负向界面
10. 右击多段线，在出现的菜单中选择关闭，右击关闭的曲线，在出现的菜单中选则创

建面，为吸力桩创建顶面

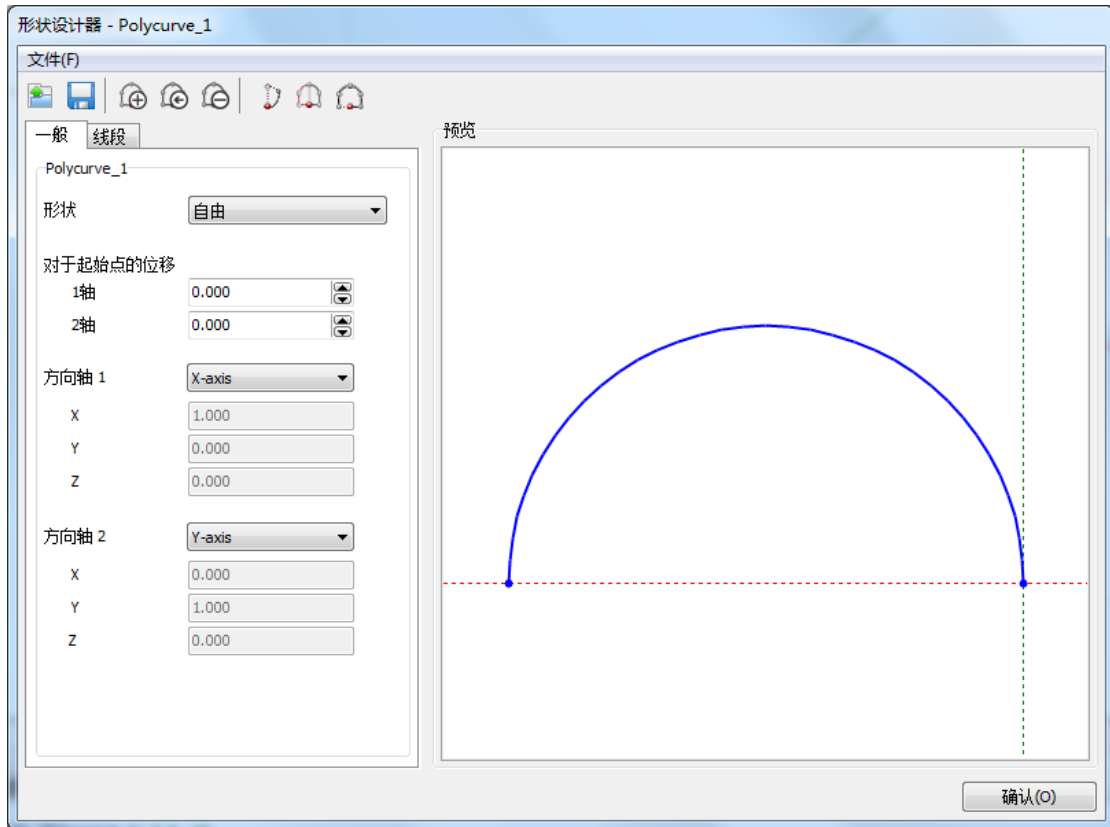


图 3.2 形状设计器的一般设置页面

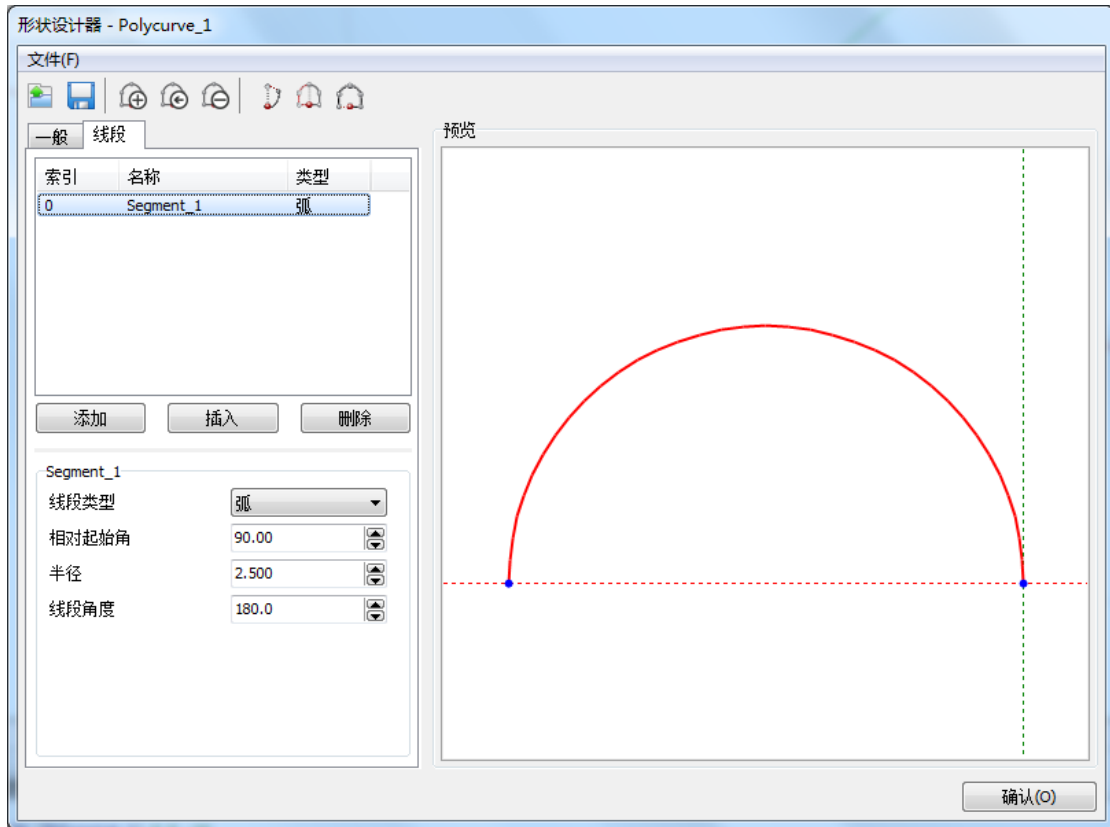


图 3.3 形状设计器的线段设置页面

## PLAXIS 3D 2016 案例教程：吸力桩的加载

为了创建吸力桩，我们使用刚体（Rigid body）功能。关于刚体（Rigid body）功能的更多信息参见参考手册 5.6.8 节。

11. 右击顶面，创建一个负向界面
12. 在模型浏览器中选择界面
13. 在选择浏览器树中，选择界面材料模式为自定义
14. 在下拉菜单中选择界面材料，如图 3.4 所示

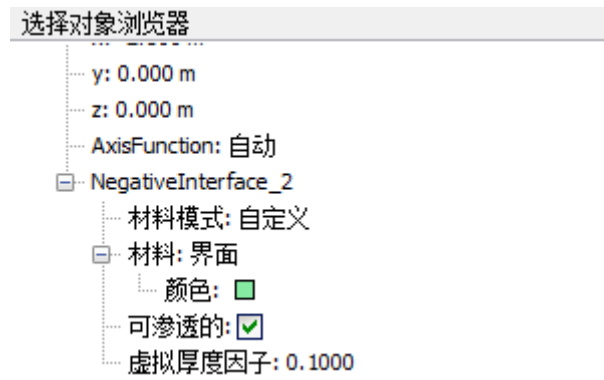


图 3.4 在选择浏览器中设置界面材料

15. 多选顶面和侧曲面，右击，在出现的菜单中选择创建刚体（create rigid body），创建新的刚体（如图 3.5 所示）

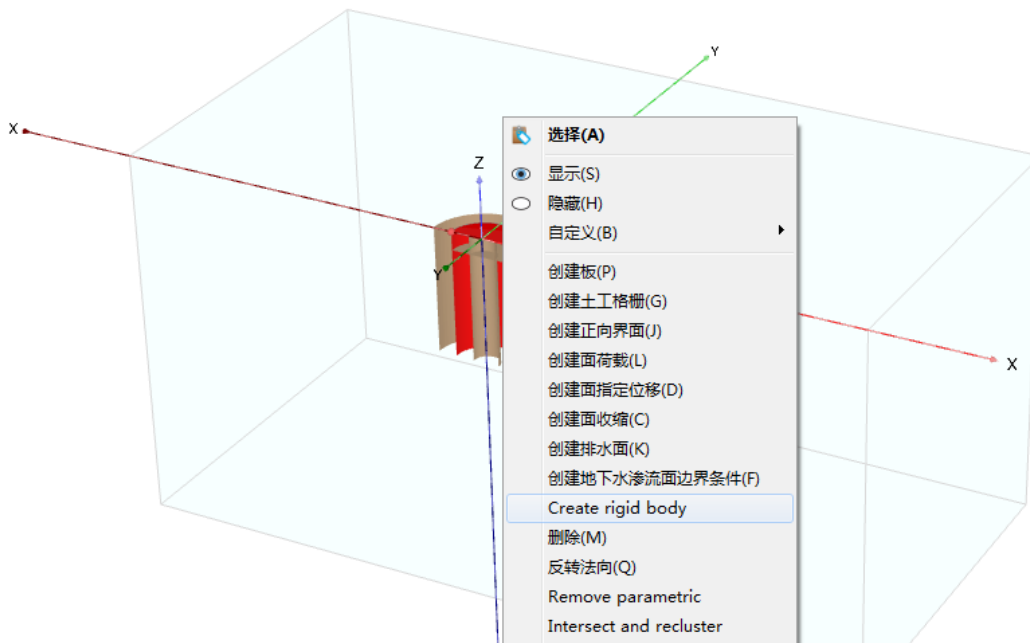


图 3.5 创建刚体





16. 在选择对象浏览器中，通过设置  $x_{ref}$ ,  $y_{ref}$ ,  $z_{ref}$  的值，将刚体参考点设置为 (2.5, 0, -7)



17. 设置  $y$  方向的平动条件 (Translation condition<sub>y</sub>) 为位移, 设置  $x$  方向的转动条件 (Rotation condition<sub>x</sub>) 和  $y$  方向的转动条件 (Rotation condition<sub>z</sub>) 为转动, 对应值分别为  $u_y = \phi_x = \phi_z = 0$  (如图 3.6 所示)

### 为局部网格加密创建辅助对象

为了达到更好的加密效果, 我们可以利用形状设计器, 在吸力桩周围创建一个曲面。

1.  点击侧边工具栏中的创建多段线按钮, 并在绘图区域内选择点 (7.5, 0, 0)
2. 在一般设置界面, 默认形状选项为自由, 默认方向轴为  $x$  轴和  $y$  轴
3.  在线段页面, 点击顶部工具栏的增加断面按钮
4. 线段类型设置为弧, 相对起始角设置为  $90^\circ$ , 半径为 7.5m, 线段角度为  $180^\circ$ , 如图 3.3
5. 点击确认, 在几何模型中增加多段线, 关闭形状设计器。
6.  在顶部工具栏中点击闭合多段曲线, 将所创建曲线闭合。
7. 点击确认, 在几何模型中增加多段线, 关闭形状设计器。
8.  点击多段线, 选择拉伸选项, 设置拉伸矢量  $Z = -15$

该算例的几何模型设置完毕, 如图 3.7 所示

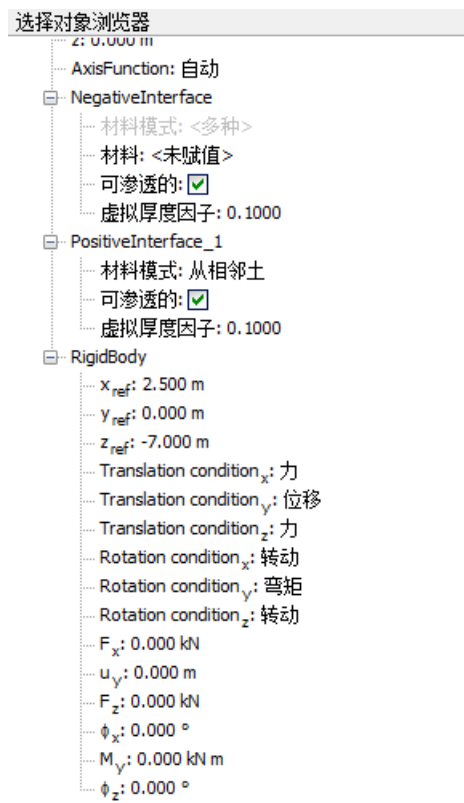


图 3.6 选择对象浏览器中的 RigidBody 设置

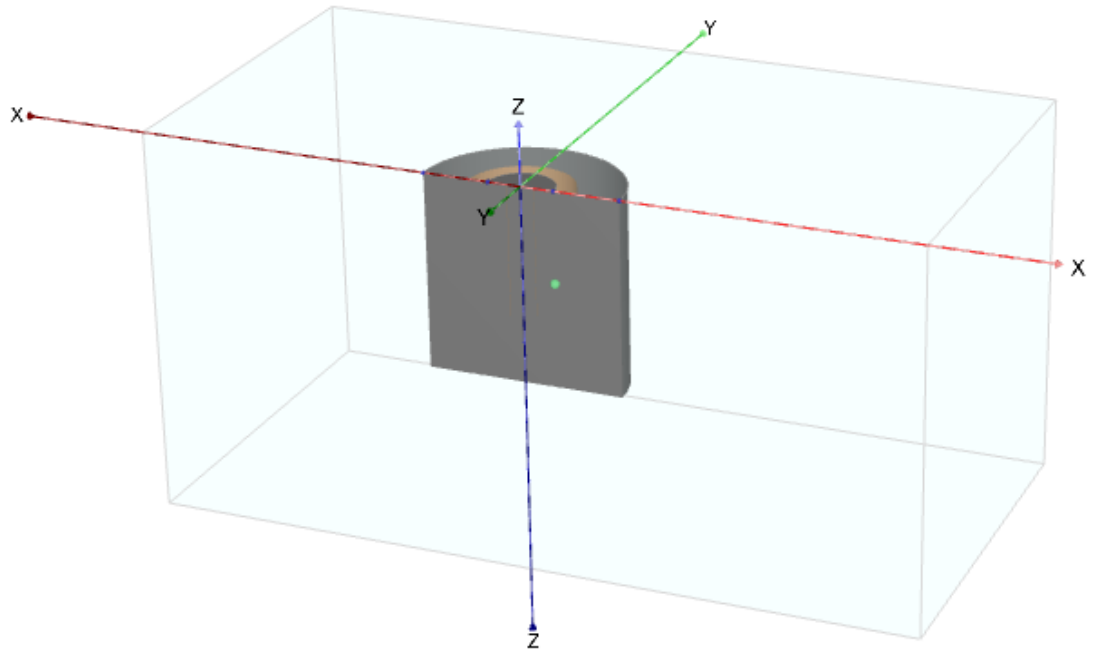



图 3.7 吸力桩几何模型



## 网格划分

按如下步骤划分网格：

1. 点击**网格**标签，进入**网格模式**
2. 隐藏吸力桩周围土体，多选吸力桩以及吸力桩周围曲面以及顶面。
3. 在选择对象浏览器中设置**粗糙因数**为 0.25
4.  单元分布为中等，生成网格
5. 进入分步施工模式

## 执行计算

本例的计算包括 6 个阶段。它们分别为初始条件的确定，吸力桩的确定，四种不同的荷载条件。将分析保持荷载大小不变时改变荷载方向的影响。

1. 点击**分步施工**标签进行计算阶段的定义。保持计算初始阶段的计算类型为 **K0 过程**。确保所有结构和界面都未激活。
2.  添加一个新的计算阶段，将其重命名为 “install pile”
3. 在这个阶段，选择**忽略不排水行为**
4. 激活所有刚体和界面
5.  添加一个新的计算阶段，将其重命名为 “Load pile 30 degrees”
6. 在阶段窗口中，勾选**变形控制参数**中的**重置位移为零**
7. 为了使本例的计算速度更快，设置求解器类型为 **Pardiso (multicore direct)**
8. 在数值控制参数中，通过取消勾选**使用默认迭代参数**，来修改迭代参数。
9. 设置单步最大荷载分率（Max load fraction per step）为 0.1
10. 点击模型浏览器中的**刚体 (Rigid body)**
11. 在选择对象浏览器中，设置所选刚体（Rigid body）的  $F_x=1949\text{KN}, F_z=1125\text{KN}$

根据表 3.2 定义其他计算阶段，每个阶段都应该选择位移重置为零，求解器类型为 **Pardiso (multicore direct)**，单步最大荷载分数（Max load fraction per step）为 0.1

计算顺序如图 3.8 所示。阶段\_1 的计算是在初始阶段计算完成后开始进行。其他阶段的计算均是在吸力桩安装计算完成之后进行。

12.  开始计算


13.  计算完成时，保存

表 3.2 荷载信息

计算阶段	参考计算阶段	$F_x/ \text{kN}$	$F_z/ \text{kN}$
阶段 2: <i>Load pile 30 degrees</i>	阶段 1	1949	1125
阶段 3: <i>Load pile 40 degrees</i>	阶段 1	1724	1447
阶段 4: <i>Load pile 50 degrees</i>	阶段 1	1447	1724
阶段 5: <i>Load pile 60 degrees</i>	阶段 1	1125	1949

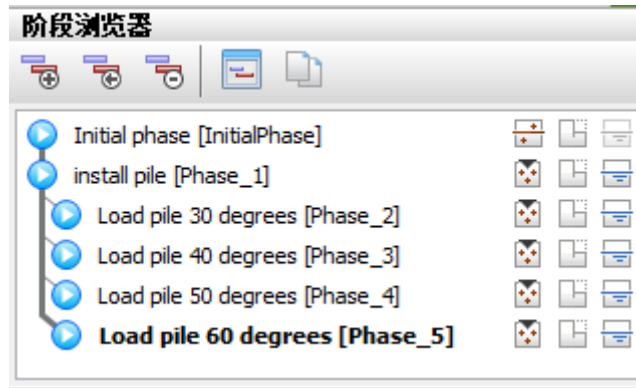



图 3.8 阶段浏览器

## 查看计算结果

按照如下步骤查看计算结果：

1. 查看最后一个计算阶段的计算结果。将显示整个几何模型的变形网格。吸力桩本身的位移是关注的重点。
2.  选择位移云图，旋转模型使 x 轴与屏幕垂直
3. 如果坐标轴不可见，从视图菜单 (View) 中选择该选项。可以很清晰地看出，作用在桩上的集中力不影响局部位移场，表明此处的桩足够厚。
4. 按照同样的方法，不同荷载方向下吸力桩的总可以从下拉菜单中选择相应阶段来观察。需要注意阶段 2，此时荷载的水平分量最大，如图 3.9 所示

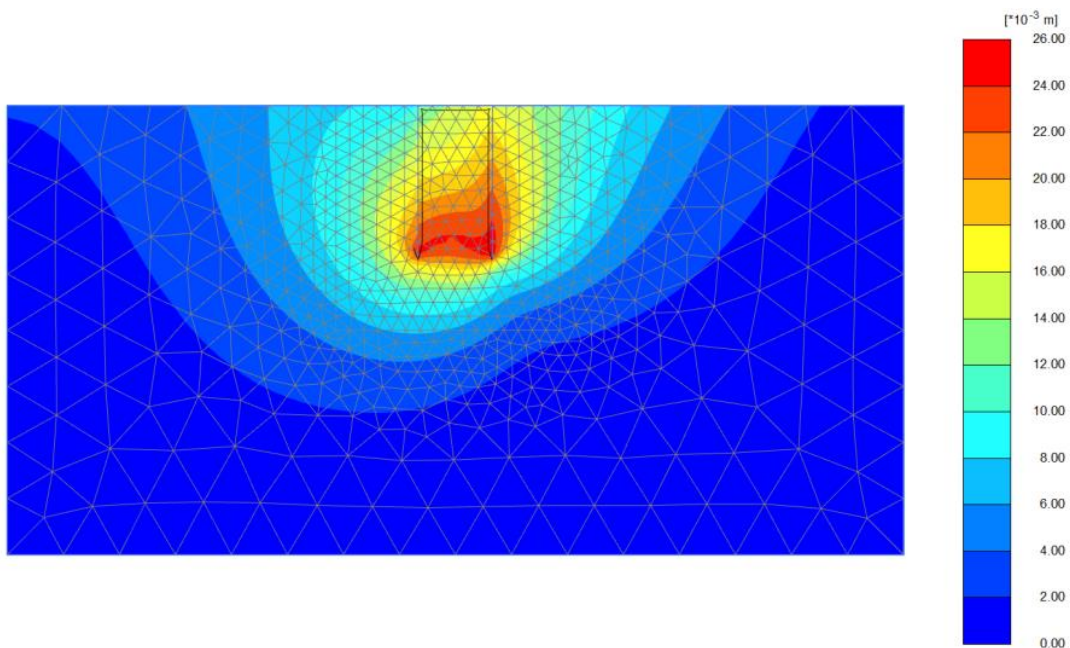


图 3.9 阶段 2 结束时吸力桩的总位移



**PLAXIS 3D**  
**Tutorial Manual**  
**2013**

岩土工程有限元分析软件

**PLAXIS 3D 2013<sup>®</sup>**

**案例教程**



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

路堤修建.....	1
几何模型.....	2
1.1 工程属性.....	2
1.2 土层定义.....	2
1.3 路堤和排水线定义.....	4
网格划分.....	6
执行计算.....	7
3.1 初始阶段.....	7
3.2 固结分析.....	7
查看计算结果.....	10
安全性分析.....	14
5.1 安全性计算的定义.....	14
5.2 结果估计-安全性.....	15
使用排水线.....	17



---

## 路堤修建

---

在高地下水位的软土地基上建造路堤会引起孔隙水压力的增加。由于这种不排水条件，有效应力会保持在较低的水平，为了安全地建造路堤，必须留出中间固结时间。在固结过程中，超孔隙水压力会消散，土层会获得继续进行施工所需要的剪切强度。

本练习着重介绍路堤的建造过程，分析上述力学机理。在分析过程中，将引入两个新的计算选项，分别是固结分析和使用安全性分析( $\phi/c$ -折减)的安全系数计算。也涉及到模拟排水线以加速排水固结过程。

### 目标：

- 模拟排水线
- 固结分析
- 在固结过程中改变渗透性。
- 安全性分析( $\phi-c$  折减)。

## 几何模型

图 1.1 显示了路堤的一个横断面。该路堤宽 16m，坡度 1:3。该问题具有对称性，因此仅需模拟一半（本例选择右半边）。本项目中考虑 2m 长的具有代表性的断面进行分析。路堤本身为松散砂土，地基土为 6m 厚的软土。该软土层上部 3m 用泥炭土模拟，下部 3m 用粘土模拟。潜水位位于原始地面以下 1m 处。软土层以下为密砂层，模型中考虑 4m 厚砂层。

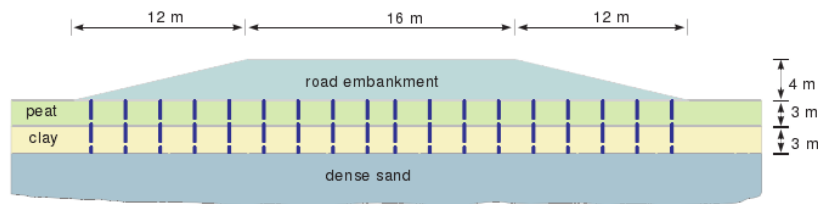


图 1.1 软土路堤几何形状

### 1.1 工程属性

1. 启动输入程序，从快速选择对话框中选择开始一个新工程(*Start a new project*)。
2. 在工程属性窗口(*Project properties*)的工程(*Project*)页面中，输入一个适当的标题。
3. 设置模型尺寸  $x_{min}=0, x_{max}=60, y_{min}=0, y_{max}=2$ ，单位保持默认值。

### 1.2 土层定义

组成路堤基础的土层用一个钻孔定义。在结构模式定义路基层。

1.  在点(0,0)处创建一个钻孔。修改土层窗口(*Modify soil layers*)就会弹出。
2. 按照图 1.2 定义三个土层。

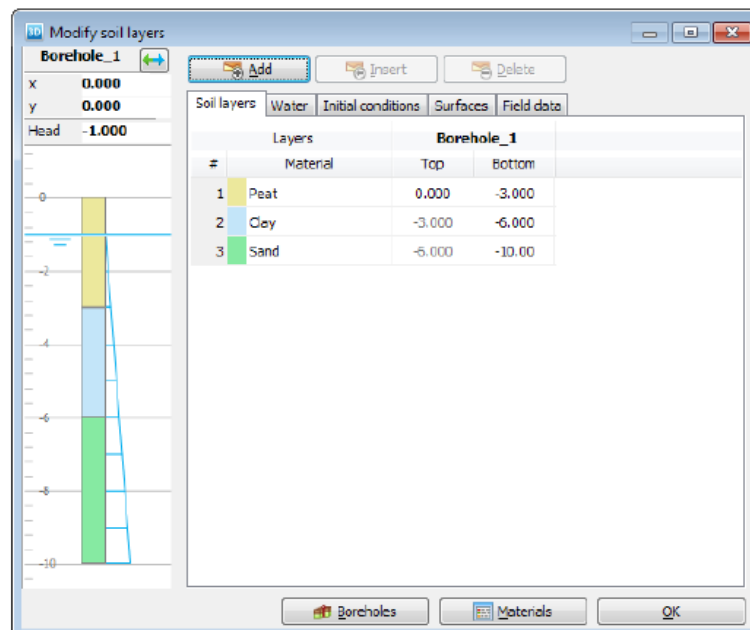



图 1.2 土层分布

3. 水位为  $z=-1m$ 。在钻孔柱状中将水头设为  $-1m$ 。
4.  打开材料组窗口。
5. 根据表 1.1 创建土层材料组，将这些材料属性赋给钻孔中的相应土层。
6. 关闭修改土层窗口(*Modify soil layers*)，进入结构模式(*Structures*)中定义结构单元。

注：应定义初始孔隙比 ( $e_{init}$ ) 和渗透系数改变 ( $ck$ )，以模拟由于土体压缩而导致的渗透系数变化。在使用高级模型时推荐使用该选项。

表 1.1 路堤及地基土的材料属性

参数	符号	路堤	砂土	泥炭土	粘土	单位
<b>一般设定</b>						
材料模型	<i>Model</i>	硬化土	硬化土	软土	软土	--
排水类型	<i>Type</i>	排水	排水	不排水 A	不排水 A	--
地下水位以上土重度	$\gamma_{unsat}$	16.0	17.0	8.0	15.0	$kN/m^3$
地下水位以下土重度	$\gamma_{sat}$	19.0	20.0	12.0	18.0	$kN/m^3$
初始孔隙比	$e_{init}$	0.5	0.5	2.0	1.0	--
<b>参数</b>						
标准三轴排水试验割线刚度	$E_{50}^{ref}$	$2.5 \times 10^4$	$3.5 \times 10^4$	--	--	$kN/m^2$
主固结加载切线刚度	$E_{oed}^{ref}$	$2.5 \times 10^4$	$3.5 \times 10^4$	--	--	$kN/m^2$
卸载/重加载刚度	$E_{ur}^{ref}$	$7.5 \times 10^4$	$1.05 \times 10^5$	--	--	$kN/m^2$
刚度的应力水平相关幂值	$m$	0.5	0.5	--	--	--
修正压缩指数	$\lambda^*$	--	--	0.15	0.05	--
修正膨胀指数	$\kappa^*$	--	--	0.03	0.01	--
内聚力	$c'_{ref}$	1.0	0.0	2.0	1.0	$kN/m^2$
摩擦角	$\varphi'$	30.0	33.0	23.0	25.0	°
剪胀角	$\psi$	0.0	3.0	0.0	0.0	°
高级参数：默认设置	--	是	是	是	是	--
<b>渗流参数</b>						
数据	--	USDA	USDA	USDA	USDA	--
模型	--	Van Genuchten	Van Genuchten	Van Genuchten	Van Genuchten	--
土类型	--	壤质砂土	砂土	粘土	粘土	
$< 2\mu m$	--	6.0	4.0	70.0	70.0	%
$2\mu m - 50\mu m$	--	11.0	4.0	13.0	13.0	%
$50\mu m - 2mm$	--	83.0	92.0	17.0	17.0	%
默认设置	--	是	是	是	是	--
x 向渗透系数	$k_x$	3.499	7.128	0.1	0.04752	$m/day$
y 向渗透系数	$k_y$	3.499	7.128	0.1	0.04752	$m/day$
z 向渗透系数	$k_z$	3.499	7.128	0.02	0.04752	$m/day$
渗透系数变化	$c_k$	$1 \times 10^{15}$	$1 \times 10^{15}$	1.0	0.2	--
<b>界面</b>						






## PLAXIS 3D 2013 案例教程：路堤修建

界面强度	--	刚性	刚性	刚性	刚性	--
强度折减因子	$R_{inter}$	1.0	1.0	1.0	1.0	--
初始条件						
$K_0$ 的确定	--	自动生成	自动生成		自动生成	--
超固结比	$OCR$	1.0	1.0	1.0	1.0	--
覆土压力	$POP$	0.0	0.0	5.0	0.0	$kN/m^2$

### 1.3 路堤和排水线定义

在结构模式中定义路堤和排水线。

#### 1. 定义路堤土层：

- 1)  改变模型方向，点击工具栏上相应按钮显示前视图。
- 2)  在点(0,0,0)、(0,0,4)、(8,0,4)、(20,0,0)之间创建面。
- 3)  通过点(0,0,2)和(14,0,2)创建一条线来定义路堤土层。
- 4)  按住 *Ctrl* 键在模型中点击选择刚创建的线和面。
- 5)  点击拉伸对象按钮(*Extrude object*)。
- 6) 按照图 1.3 将拉伸向量的 *y* 分量设为 2，点击应用 (*Apply*)。

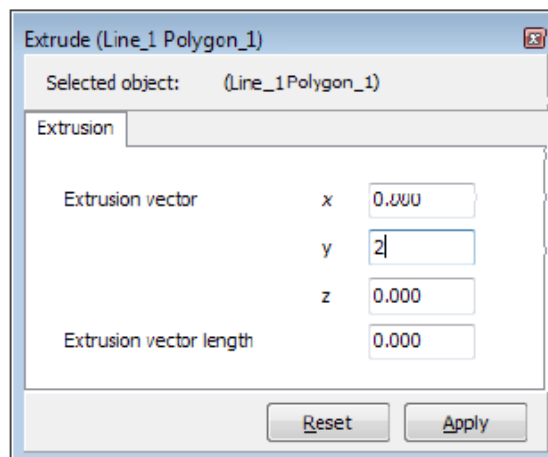





图 1.3 拉伸窗口

- 7) 删除拉伸前创建的面和线。
- 8) 右击由拉伸命令创建的体，并在弹出的菜单中指向 *Soil\_4* 选项。
- 9) 此时出现一个新的菜单。指向设置材料选项(*Set material option*)，选择路堤 (*Embankment*)。

本工程中，通过对比无排水线工况下的结果，来研究排水线对固结时间的影响。排水线只在设置排水线工况的计算阶段中激活。

2. 排水线按照正方形排列，两个连续排水线之间的排（或列）间距为  $2m$ ，本例中只考虑一排排水线。按照如下步骤创建排水形式：

- 1)  点击侧边工具栏中的创建水力条件按钮(Create hydraulic conditions)。
- 2)  在弹出的菜单中选择创建线排水(Create line drain)。在点(1,1,0)和(1,1,-6)之间创建一个线排水。
- 3)  点击创建阵列按钮，定义排水形式。
- 4) 在创建阵列窗口的形状下拉菜单中选择 1D, x 方向，指定排水形式。如图 1.4 所示。几何模型见图 1.5。

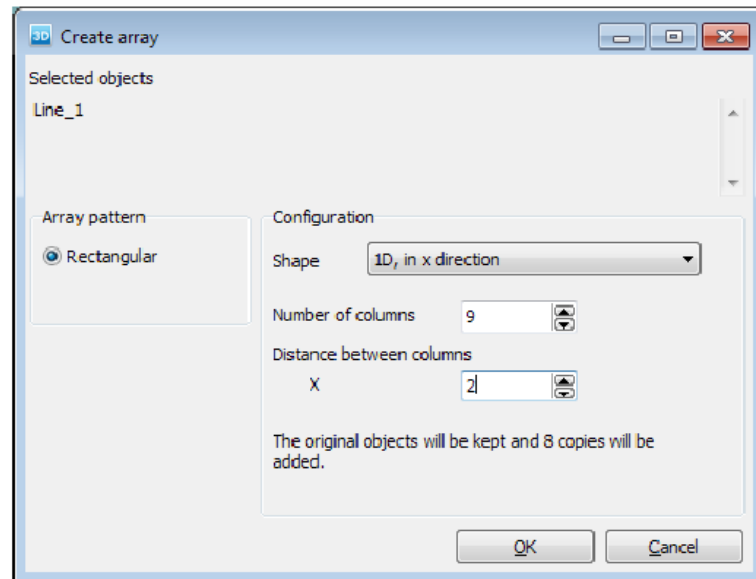


图 1.4 排水形式的设定

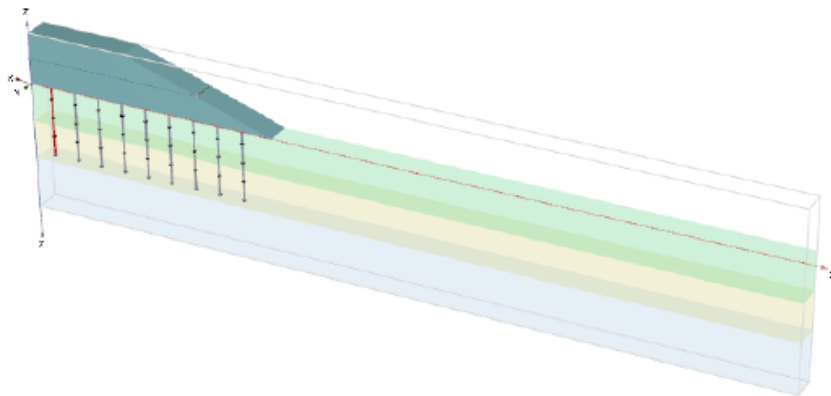




图 1.5 几何模型



## 网格划分

1. 进入网格模式。
2.  点击划分网格按钮。将单元分布设为粗(*Coarse*)。
3.  查看生成的网格。网格划分结果见图 2.1。

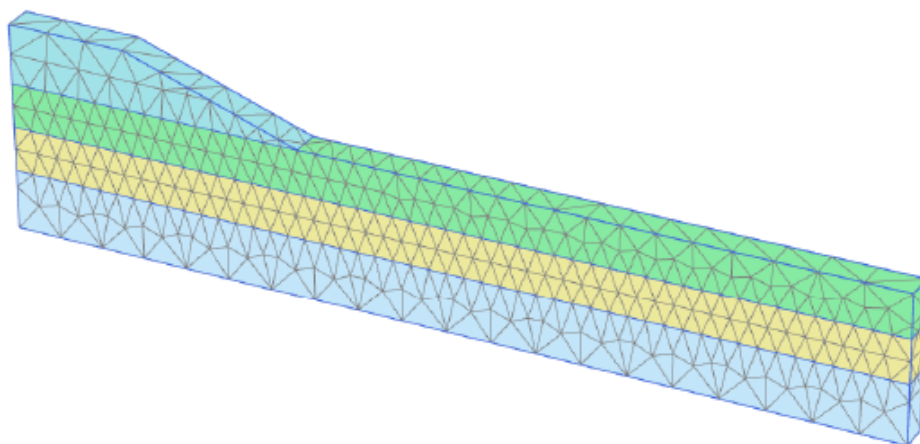


图 2.1 网格划分

## 执行计算

将考虑两次路堤建造过程。第一次计算不考虑排水线。

### 3.1 初始阶段

1. 在初始条件下路堤是不存在的，因此在初始阶段要冻结对应的土体。使用 *K0* 方法计算初始应力。初始水压完全是静水压力，取决于由赋给钻孔的水头值所确定的一般潜水位。在初始阶段，孔隙水压的计算方法选择潜水位(*Phreatic*)选项，总体水位设为钻孔水位\_1 ( *BoreholeWaterlevel\_1* )，该水位对应由指定的钻孔水头确定的水位。
2. 渗流边界条件可以在模型浏览器中的模型条件(*Model conditions*)子树中设定。在当前条件下，由于对称性，必须关闭左侧竖向边界  $x_{min}$ ，这样就不会发生水平方向的渗流。底部边界要打开，因为超孔压可以自由流入下部渗透性大的砂土层中。上部边界显然是要打开的。
3. 定义完成后地下水渗流子树 (*GroundwaterFlow*) 视图见图 3.1。

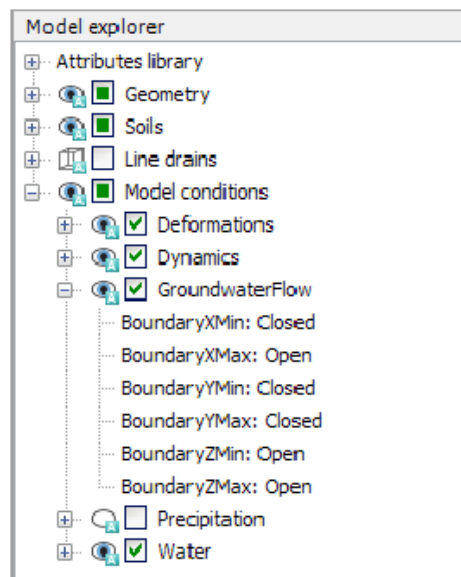


图 3.1 地下水渗流边界条件

### 3.2 固结分析

固结分析在计算中引入了时间维度。为了准确进行固结分析，必须选择合适的时间步。使用小于最小临界值的时间步会导致应力振荡。*PLAXIS* 中的固结条选项采用考虑了临界时间步的全自动时间步程序，在该程序中加载类型参数一共有三个主要形式：






- i. 给定时间的固结，包括对激活的几何模型变化的影响(分步施工 Staged construction)。
- ii. 直至几何模型中的所有孔隙水压都减小到指定最小值(Minimum pore pressure)时的固结。
- iii. 直至土层达到指定的固结度(Degree of consolidation) 的固结。

固结过程-无排水线



路堤建造分为两个阶段。第一个施工阶段完成之后，为了使超孔隙水压消散，要进行为期 30d 的固结。第二个施工阶段之后，要进入另一个固结期，由此决定了最终的沉降量。因此，除了初始阶段之外，还要定义四个计算阶段。

按照如下步骤定义计算阶段：



### 1. 阶段 1:

- 1)  在引入第一个施工阶段之前，先点击**添加阶段按钮**。
- 2)  在一般设定子树的**计算类型**下拉菜单中选择**固结选项**。
- 3)  **加载类型**默认为**分步施工**。本阶段使用该默认值。
- 4)  **孔隙水压计算方法**自动选择**潜水位(Phreatic)**选项。注意，一个计算阶段的**总体水位**可以在**模型浏览器**中的**模型条件**下的**水力条件(Water)**子树中设定。
- 5) 将**时间间隔(Time interval)**设为 2days，点击 **OK** 关闭阶段窗口。
- 6) 在**分步施工(Staged construction)**模式中激活路堤的第一部分。
- 7)  点击**添加阶段按钮**，引入下一个计算阶段。



### 2. 阶段 2: 第二阶段也是固结分析。在这一阶段几何模型不改变，因为只要求进行对最终时间的固结分析。

- 1)  将**计算类型**设置成**固结(Consolidation)**。
- 2) 将**时间间隔(Time interval)**设为 30days。本阶段其余参数使用默认值。
- 3)  点击**添加阶段按钮**，引入下一个计算阶段。


### 3. 阶段 3:

- 1)  将**计算类型**设置成**固结(Consolidation)**。
- 2) 将**时间间隔(Time interval)**设为 1day。其他参数采用默认值。
- 3) 在**分步施工(Staged construction)**模式中激活路堤的第二部分。
- 4)  点击**添加阶段按钮**，引入下一个计算阶段。

### 4. 阶段 4: 第四个阶段是达到**最小孔隙水压**的固结分析。

- 1)  将**计算类型**设置成**固结(Consolidation)**。
- 2)  在**加载类型**下拉菜单中选择**最小孔隙水压(Minimum pore pressure)**选项。  
**最小孔隙水压**采用默认值 ( $IP-stop = 1.0 \text{ kN/m}^2$ )，其余参数也采用默认值。

这样，计算阶段的定义就完成了。

- 5)  在开始计算之前，点击**选择曲线点按钮**，选中如下点：如点 A，选择路堤坡趾处，第二点（点 B）用于绘制超孔隙水压力发展（及消散）曲线。最后，还要选中软土层中间的一点，靠近（但不正好落在）左侧边界上。

6.  开始计算。

在固结分析的过程中，可以在计算信息窗口的上部观察到时间的发展，如图 3.2 所示。除了乘子，出现了一个参数  $P_{max}$ ，它代表当前的最大超孔隙水压。这个参数在最小孔压固结分析情况下很重要，此时要求所有孔隙水压都要减小到指定值以下。

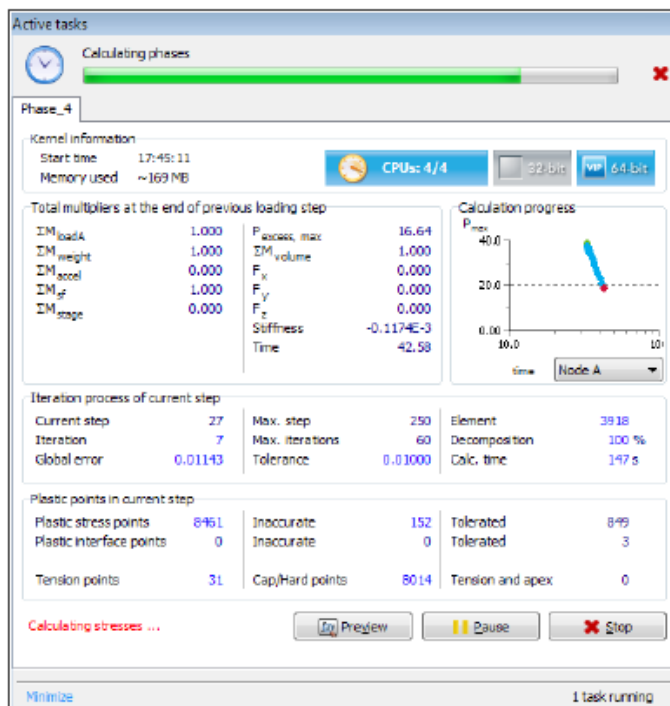



图 3.2 活动任务窗口中显示的计算进程

## 查看计算结果

1.  计算完成之后，选择第三阶段并点击**查看计算结果按钮**。此时输出窗口中显示的是路堤最后一部分在不排水施工后的变形网格，如图 4.1 所示。从第三阶段的计算结果可以看出，变形网格显示了由于不排水行为导致的路堤坡趾和内部的隆起。

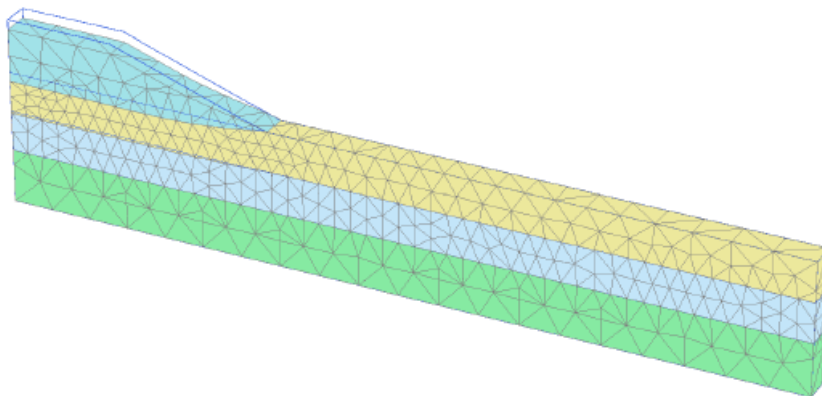



图 4.1 路堤不排水施工后的变形网格 (阶段 3, 真实比例)

2. 在变形菜单中选择**增量位移** (*Incremental displacements*  $|\Delta u|$ )。
3.  在视图菜单中选择**矢量图选项**，或者在工具栏中点击相应的按钮，显示矢量图结果。
4. 评估总位移增量，可以看出破坏机理正在发展，如图 4.2。

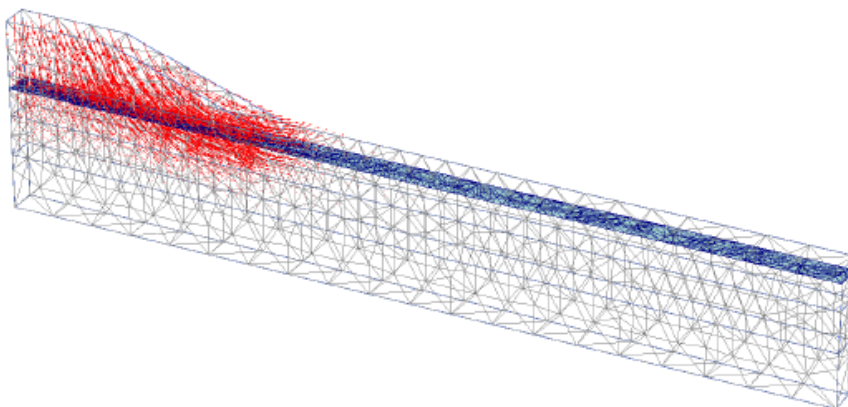



图 4.2 路堤不排水施工后的位移增量

5. 按住 **Ctrl+7**，显示发展的超孔隙水压力 (更多快捷键详见参考手册附录 C)。也可以在应力菜单中选择**孔隙水压选项**(*Pore pressures*)，在出现的子菜单中选择相应的选项。
6.  点击**中心主方向**，就会在每个土单元中心显示超孔隙水压的主方向。结果如图 4.3 所示。从图中可以清晰的看出最大超孔隙水压出现在路堤中心下方。
7. 在下拉菜单中选择阶段 4。

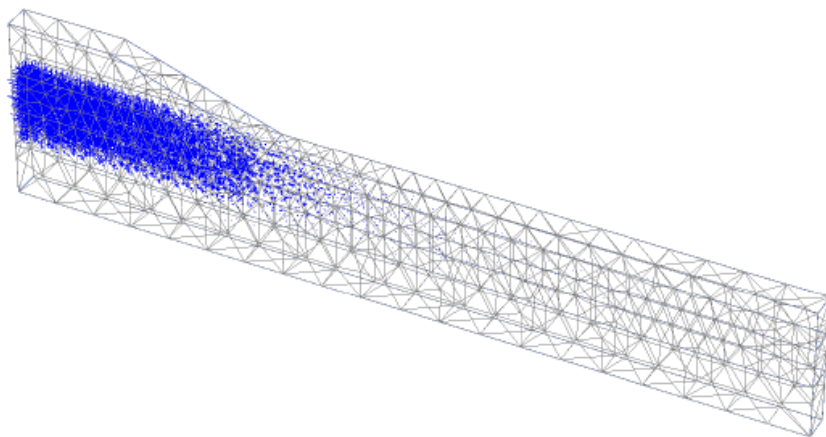




图 4.3 路堤不排水施工后的超孔隙水压

8.  定义一个通过(0,1)和(60,1)的垂直断面。
9.  在工具栏中点击等值线 (Contour lines) 按钮，以等值线形式显示结果。
10. 在视图(View)菜单中选择视角(Viewpoint)选项。弹出相应的窗口。
11. 在视角(Viewpoint)窗口中选择前视图 (Front view) 选项，如图 4.4 所示。

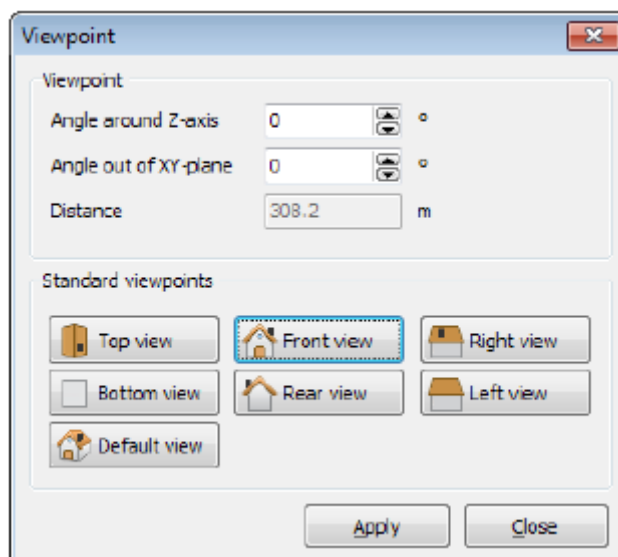



图 4.4 视角窗口

12.  用绘制扫描线 (Draw scanline) 按钮或视图菜单中的相应选项，定义等值线标签的位置。

从图中看出在第四阶段中原始土层表面和路堤的沉降明显增大。这是因为超孔压消散 (=固结)，可以导致土层的进一步沉降。图 4.5 是固结后的剩余超孔隙水压分布图，核对其最大值小于  $1.0\text{kN/m}^2$ 。

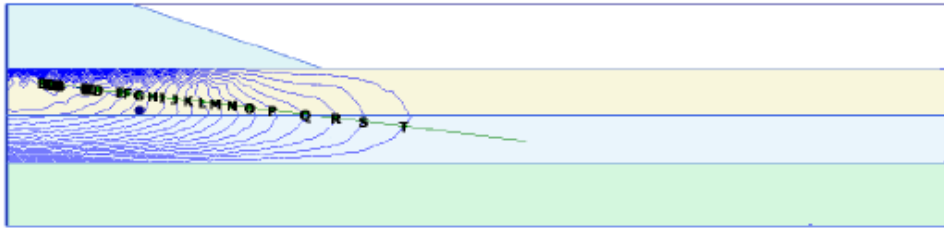





图 4.5 固结到  $P_{excess} < 1.0 \text{ kN/m}^2$  后的超孔隙水压等值线

13. 曲线管理器(*Curves manager*)通常用于观察路堤下超孔隙水压随时间的变化。按照如下步骤创建曲线:

- 1)  点击工具栏中的曲线管理器器(*Curves manager*)按钮。弹出相应的窗口。
- 2) 在图表页面点击创建。弹出曲线生成窗口。
- 3) 从下拉菜单中选择工程(*Project*) 选项, 在树形目录中选择时间作为  $x$  轴。
- 4) 从下拉菜单中选择软土层中间点  $B$ , 在树形目录中依次选择应力 *Stresses*、孔隙水压 *Pore pressure*、 $p_{excess}$  作为  $y$  轴。
- 5)  $y$  轴选择反转选项(*Invert*)。
- 6) 点击 *OK* 以生成曲线。
- 7)  点击工具栏中的设置按钮, 将弹出设置窗口, 显示创建曲线页面。
- 8) 点击阶段按钮, 从弹出窗口中选择阶段 1 至阶段 4。
- 9) 在曲线标题框中输入“*Phases1-4*”, 以重命名曲线。
- 10) 点击 *Apply* 更新图形。
- 11)  保存图表。

注: 右击图表名称, 从弹出的菜单中指向视图(*View*)选项并在图表选项中选择图例(*Legend*), 就可以在图表区域内部显示图例。

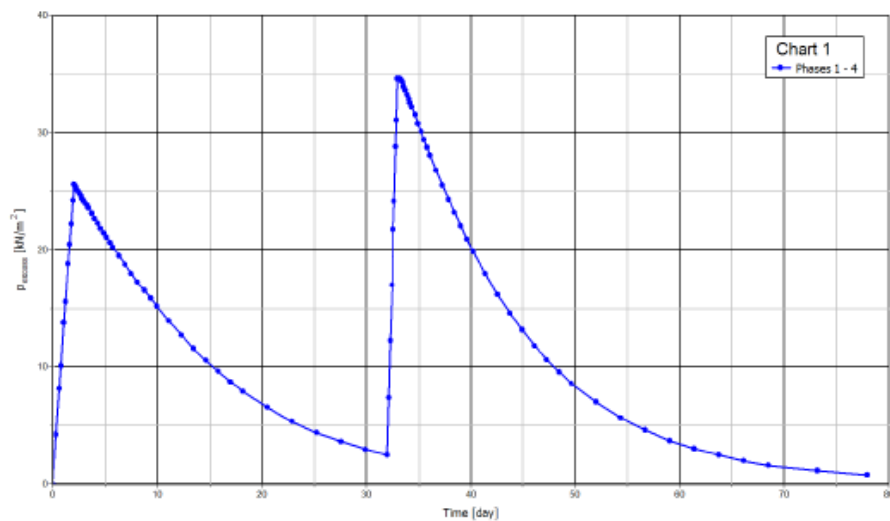


图 4.6 路堤下超孔隙水压力的发展

图 4.6 清楚的显示了四个计算阶段的情况。在施工阶段中，超孔隙水压力会即时的产生小幅增大，但是在固结过程中，超孔压又随着时间的增长逐渐减小。实际上，在路堤建造过程中就已经产生了固结，因为施工也有一个较小的时间间隔。

www.cisec.cn



## 安全性分析

在路堤设计中，不但最终的稳定性十分重要，施工过程中的稳定性同样十分重要。从输出结果中可以很清晰的看出，第二个施工阶段之后破坏机理就开始发展。

评价该问题这个施工步的总体安全系数很有意义，当然对其他施工步也很重要。

在结构工程中，通常将安全系数定义为破坏荷载和工作荷载的比值。但是对土工结构，这种定义并不总是适用。比如对于路堤，绝大部分的荷载是由土重引起的，而土重的增加并不一定会导致坍塌。实际上，在一个土自重逐渐增大的试验（像离心试验）中一个纯摩擦土的边坡不会破坏。因此安全系数更恰当的定义方法：

$$\text{Safety factor} = \frac{S_{\text{maximum available}}}{S_{\text{needed for equilibrium}}} \quad (5.1)$$

其中， $s$  代表剪切强度。即真实强度与计算的达到平衡条件所需的最小强度之比即为安全系数，这是土力学中的习惯用法。通过引入标准库仑条件，安全系数表示为：

$$\text{Safety factor} = \frac{c - \sigma_n \tan \varphi}{c_r - \sigma_n \tan \varphi_r} \quad (5.2)$$

其中， $c$  和  $\varphi$  是输入的强度参数， $\sigma_n$  是实际的法向应力分量。参数  $c_r$  和  $\varphi_r$  是刚够维持平衡的折减强度参数。上述原理为 PLAXIS 中用于求解总体安全系数的安全性分析的基本原理。。在这种方法中，内聚力和摩擦角的正切按照同样的比例进行折减：



$$\frac{c}{c_r} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} = \sum M_{sf} \quad (5.3)$$



强度参数的折减由总乘子  $\sum M_{sf}$  控制。这个参数在逐步计算过程中不断增大直至发生破坏。因此，安全系数就定义为发生破坏时的  $\sum M_{sf}$  值，假设对一系列连续加载步在破坏时可以得到一个基本为常数的  $\sum M_{sf}$  值。

### 5.1 安全性计算的定义

在计算阶段窗口的**计算类型**下拉菜单中，可以选择安全性计算选项。

为计算路堤在不同施工步的总体安全系数，应按照如下步骤进行：

1. 首先，我们想要计算第一个施工步后的安全系数。在计算程序中引入一个新的计算阶段 (*Phase\_5*)，并在开始阶段下拉菜单中选择阶段 1.
2.  在一般设定子树中，选择**计算类型**为安全性计算 (*Safety*)。
3.  **加载类型**自动修改为增量乘子，这是**安全性计算类型**中唯一的选项。
4. 控制强度折减过程的初步乘子增量， $M_{sf}$ ，自动设为 0.1。本练习中使用该值。

5.  注意在孔隙水压力计算类型下拉菜单中的使用前一阶段孔压(Use pressures from the previous phase)选项会自动选择并变灰，表明这个选项不可修改。
6. 为了从求解的破坏机理中排除已有变形，在变形控制参数子树中选择重置位移为零(Reset displacements to zero)选项。其余所有参数都使用默认值。这样，第一个安全性计算阶段就定义完成了。
7. 按照同样的步骤创建新的计算阶段，分析每个固结阶段结束时的稳定性。除了选择计算类型为安全性(Safety)之外，选择相应的固结阶段作为起始阶段参数。显示安全性(Safety)计算阶段的阶段浏览器，如图 5.1 所示。
8.  计算安全性阶段。

注：安全性计算中的最大步数默认值(Max steps)为 100。与分步施工计算相比，附加步数会全部执行。在大多数安全性计算中，100 步足够达到破坏状态。如果未达到，步数可以增加至最大值为 10000。

对大多数安全性分析， $M_{sf}=0.1$  作为启动计算过程的初始步是合适的，强度折减总乘子的发展， $\sum M_{sf}$ ，由荷载进阶过程自动控制。

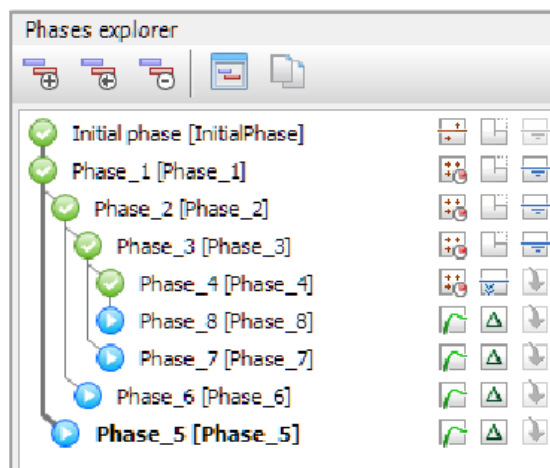




图 5.1 显示安全性计算阶段的阶段浏览器

## 5.2 结果估计-安全性

在安全性计算中会产生附加位移。总位移无物理意义，但是最后一步（破坏时）的增量位移表明了可能的破坏机理。

为了观察路堤建造的三个不同阶段中的破坏机理，作如下操作：

1.  选择最后一个安全性阶段，并点击查看计算结果按钮。
2. 从变形菜单中选择增量位移 (Incremental displacements  $|\Delta u|$ )。
3.  将显示方式由矢量图改成云图。这样能很好的显示破坏机理(如图 5.2)。位移增量的大小没有意义。

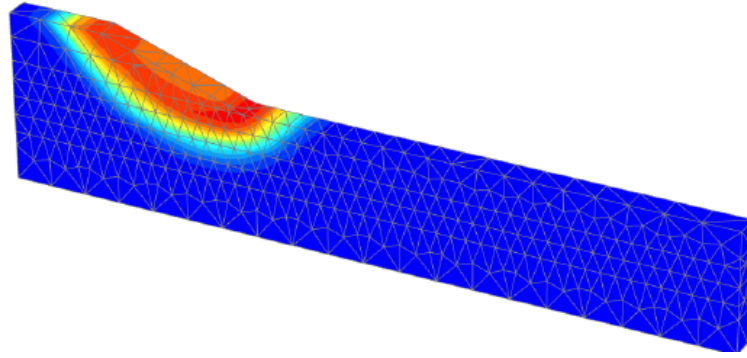


图 5.2 总位移云图，表明最后一个施工步中路堤最有可能的破坏机理

4. 从工程菜单的计算信息选项中可以得到安全系数。 $\sum M_{sf}$  的值就代表安全系数，假设在之前几步中该值其实已经基本为常量。
5. 但是，评估安全系数的最好办法是绘制参数  $\sum M_{sf}$  与某个节点位移的曲线，尽管位移是无意义的，但可以表明破坏机理是否发展。  
为了用这种方法评估三种情况下的安全系数，按照如下步骤：
  - 1) 在工具栏中点击曲线管理器按钮。
  - 2) 在图表页面中点击创建。
  - 3) 在曲线生成窗口中，在  $x$  轴选择路堤坡趾（点 A），选择变形→总位移→ $|u|$ 。
  - 4) 对  $y$  轴，选择项目→乘子→ $\sum M_{sf}$ 。这样图表中就考虑了该安全性计算阶段，结果曲线见图 5.3 所示。
  - 5) 图中最大位移没有意义。从图中可以看出，对所有曲线  $\sum M_{sf}$  都得到了一个基本恒定值。将鼠标光标放在曲线上任一点处，就会出现一个显示  $\sum M_{sf}$  的精确值的信息框。

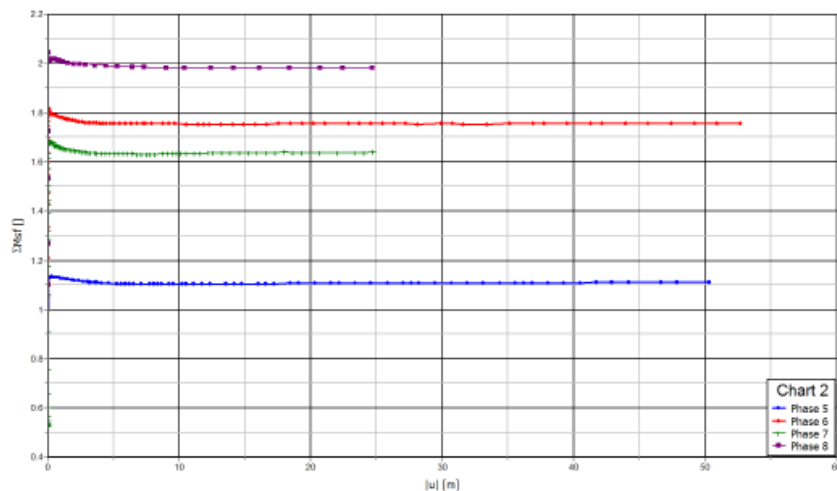





图 5.3 安全系数评估

## 使用排水线

在这部分，将研究工程中排水线的影响。路堤施工将通过引入四个具有与前四个固结阶段相同属性的新阶段来定义，新阶段的不同之处为：

- i. 在所有新阶段中应激活排水线。
- ii. 前三个固结阶段（1-3）的时间间隔为 1d。最后一个阶段设为最小孔隙水压，其值为  $1.0\text{kN/m}^2$  (IP-stop)。

 计算完成后，选择最后一个阶段并点击**查看计算结果按钮**。此时输出窗口中就会显示路堤最后一部分排水施工后的变形网格。为了对比排水线的影响，可以使用节点 B 的超孔隙水压消散。

- 1)  打开**曲线管理器**。
- 2) 在**图表页面**中双击**图表 1**（节点 B 的  $P_{\text{excess}}$  与时间关系曲线），则显示该图表，关闭**曲线管理器**。
- 3)  点击工具栏中的**设置按钮**。弹出**设置窗口**。
- 4) 点击**添加曲线按钮**，从弹出的菜单中选择从当前工程中添加选项(Add from current project)。弹出**曲线生成窗口**。

注：除了添加新曲线，也可以用曲线设置窗口中的相应按钮重新生成已有曲线。

- 5) 对 y 轴选择**反转符号选项**。
- 6) 点击 **OK** 确认设置，关闭**曲线生成窗口**。
- 7) 这样在图表中就添加了一个新的曲线，对应它的新页面也在设置窗口中打开。
- 8) 点击**阶段按钮**。从显示窗口中选择初始阶段和后四个阶段（排水线），点击 **OK**。
- 9) 在设置窗口中点击 **Apply** 以预览生成的曲线。
- 10) 点 **OK** 关闭设置窗口。如图 6.1 所示，图表中清楚的给出了在超孔隙水压消散所需时间上排水线的影响。

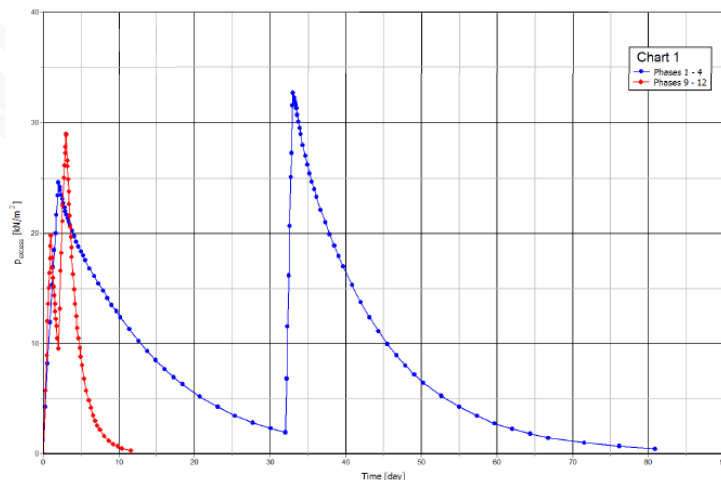


图 6.1 排水线的影响

本教程到此结束！

岩土工程有限元分析软件

**PLAXIS 3D 2016<sup>®</sup>**

## 案例教程

盾构隧道的分步开挖



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©, 2017.

## 目录

盾构隧道的分步开挖.....	2
<b>几何模型.....</b>	<b>3</b>
1.1 工程属性.....	3
1.2 土层定义.....	3
<b>网格划分.....</b>	<b>11</b>
<b>执行计算.....</b>	<b>12</b>
<b>查看计算结果.....</b>	<b>20</b>

## 盾构隧道的分步开挖

盾构隧道的衬砌一般都用预制混凝土管片建造，这些管片在盾构机中拼装已形成隧道衬砌。在隧道衬砌拼装的过程中盾构机（TBM）位置保持不变。一旦拼装好一段隧道衬砌管片之后，就继续开挖，直至开挖出足够的空间以安装下一段衬砌管片。由此可见，整个施工过程可以划分成多个施工步，其长度等于一段隧道衬砌管片的长度，通常情况下约为 1.5m。每一个施工步都重复着相同的步骤。

为模拟这样的施工过程，需要建立包括很多 1.5m 长的片段的几何模型。计算由很多的塑性阶段组成，每个阶段都模拟着相同的开挖过程：防止开挖面破坏的掌子面平衡压力，盾构机护盾的锥形形状，盾构机中土体和孔隙水的开挖，隧道衬砌的安装及土与创建衬砌之间空隙的注浆。在每个阶段中，除了位置之外（每个阶段按 1.5 m 移动），计算阶段的输入是完全相同的。

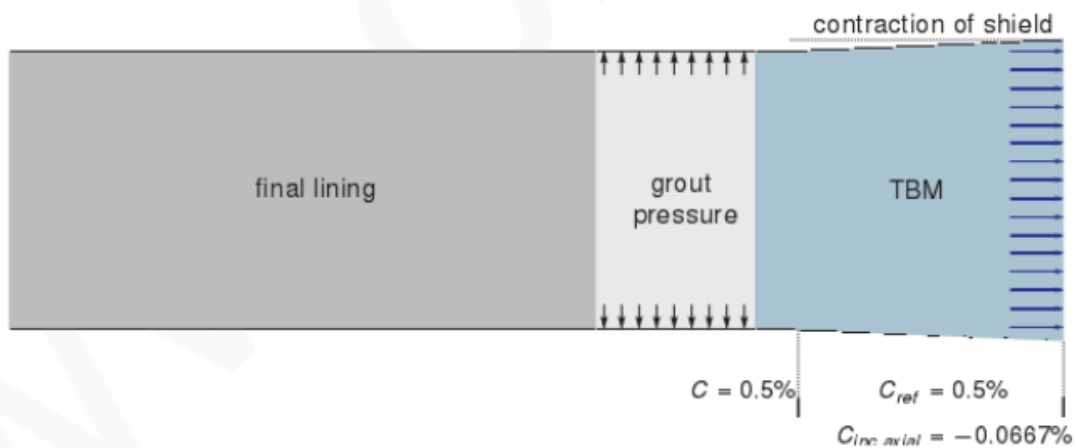


图 5.1 盾构隧道模型的施工步骤



## 几何模型

在模型中，只取对称结构的一半。模型宽 20m，y 方向展开 80m，深 20m。这些尺寸是足以考虑任何可能的破坏机理的发展,也足以避免来自模型边界的任何影响。

### 1.1 工程属性

按照如下步骤定义本例的几何模型：

1. 打开输入程序，从创建/打开工程(Create/Open project)对话框中选择新工程(New project)。
2. 为本例题输入一个恰当的标题。
3. 保持标准单位制，模型尺寸设为  $xmin=-20m, xmax=0m, ymin=0m, ymax=80m$ 。
4. 点击 OK。

### 1.2 土层定义

地基土包含三层土。上部软砂层厚 2m，从地表展开之平均海平面（MSL）。砂土层下是 12m 厚的粘土层，其下是厚层的硬砂层，模型中只考虑 6m 厚。因此，模型底部在平均海平面（MSL）以下 18m 处。假设整个模型的土层均呈水平分布，所以只需一个钻孔就足以描述地层情况。当前地下水水头位于平均海平面处。



1.  点击创建钻孔按钮，在 (0, 0, 0) 点出创建钻孔，修改土层窗口将打开。
2. 在修改土层窗口中定义三层土:上部砂土顶部标高 2m，底部标高 0m，粘土底部标高-12m，坚硬砂土底部标高-18m。
3.  打开材料组窗口。按照表 1.1 信息创建土层和隧道最终混凝土衬砌的材料属性。

表 1.1 土层材料特性

参数	符号	上部砂土	粘土	坚硬砂土	混凝土	单位
<b>一般设定</b>						
材料模型	<i>Model</i>	M-C 模型	M-C 模型	M-C 模型	线弹性	--
排水类型	<i>Type</i>	排水	排水	排水	无孔	--
地下水位以上重度	$\gamma_{unsat}$	17.0	16.0	17.0	27.0	$kN/m^3$
地下水位以下重度	$\gamma_{sat}$	20.0	18.0	20.0	--	$kN/m^3$
<b>参数</b>						
杨氏模量	$E'$	$1.3 \times 10^4$	$1.0 \times 10^4$	$7.5 \times 10^4$	$3.1 \times 10^7$	$kN/m^2$
泊松比	$\nu'$	0.3	0.35	0.3	0.1	--
内聚力	$c'_{ref}$	1	5	1	--	$kN/m^2$
摩擦角	$\varphi'$	31.0	25.0	31.0	--	°
剪胀角	$\psi$	0.0	0.0	0.0	--	°
<b>界面</b>						
界面强度	--	刚性	刚性	刚性	刚性	--
<b>初始设定</b>						

## PLAXIS 3D 2016 案例教程：盾构隧道的分步开挖

$K_0$ 的确定	--	自动生成	自动生成	自动生成	--
-----------	----	------	------	------	----

4. 如图 5.2 将材料属性赋予相应的土层。关闭修改土层窗口。混凝土的材料属性在后面赋值。

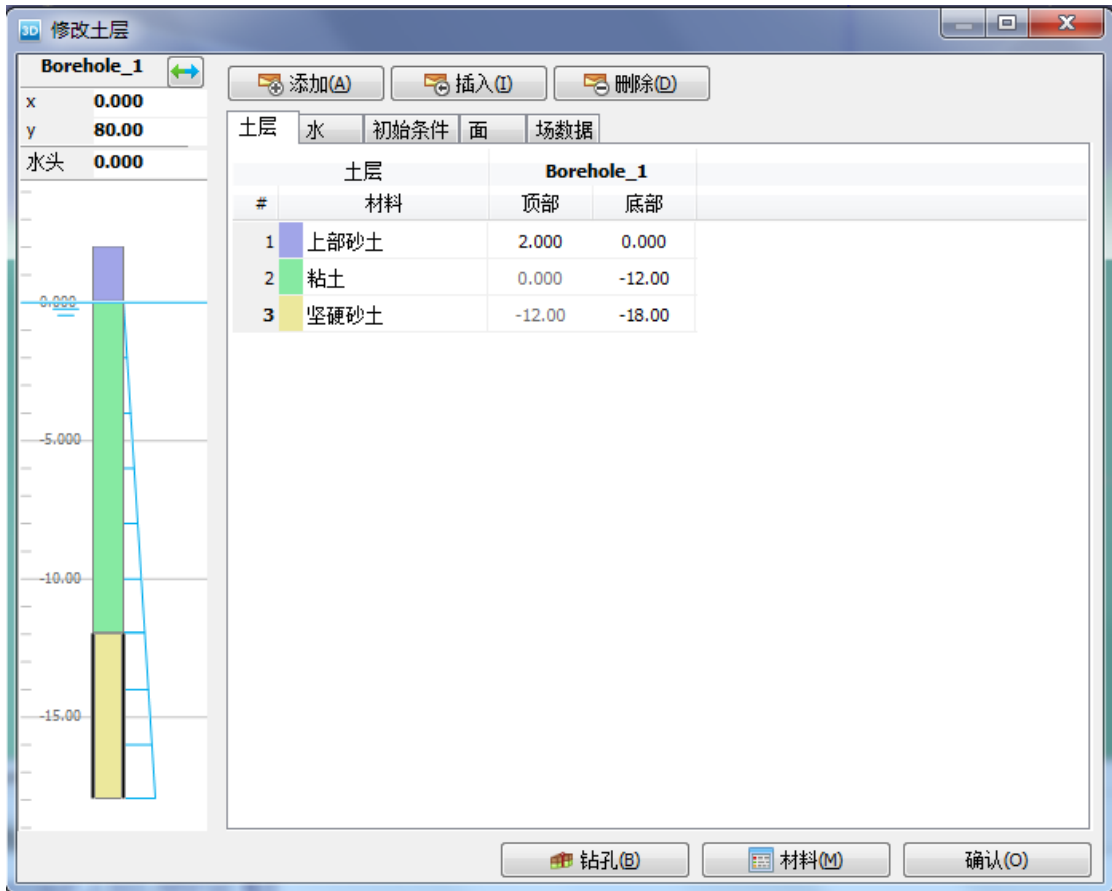



图 5.2 土层分布

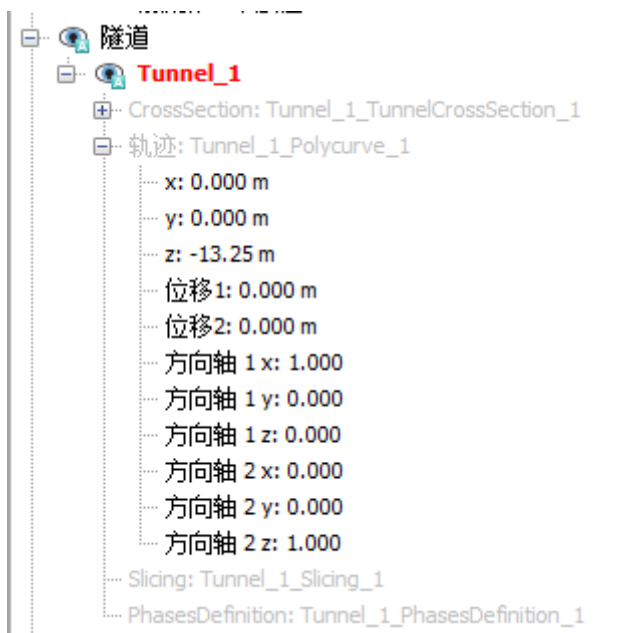
### 1.3 结构单元的定义

用盾构机进行隧道开挖，盾构机长 9.0m，直径 8.5m。

#### 创建隧道面

在结构模式中定义隧道和盾构机的几何形状。

1.  在侧边工具栏中点击创建隧道按钮
2. 点击绘图区任何位置定义插入点，隧道设计窗口弹出。
3. 在选择浏览器中设置隧道插入点 (0, 0, -13.25) (如图 5.3)
4. 在一般设定页面中，形状类型的下拉菜单中选择圆选项。



### 5.3 隧道插入点

5. 在本例中，需要生成隧道的左半部分。在“**整个或一半隧道**”的下拉菜单中选择**定义左半部分**选项。经过上述设置，一般设定页面截图如图 5.4 所示。

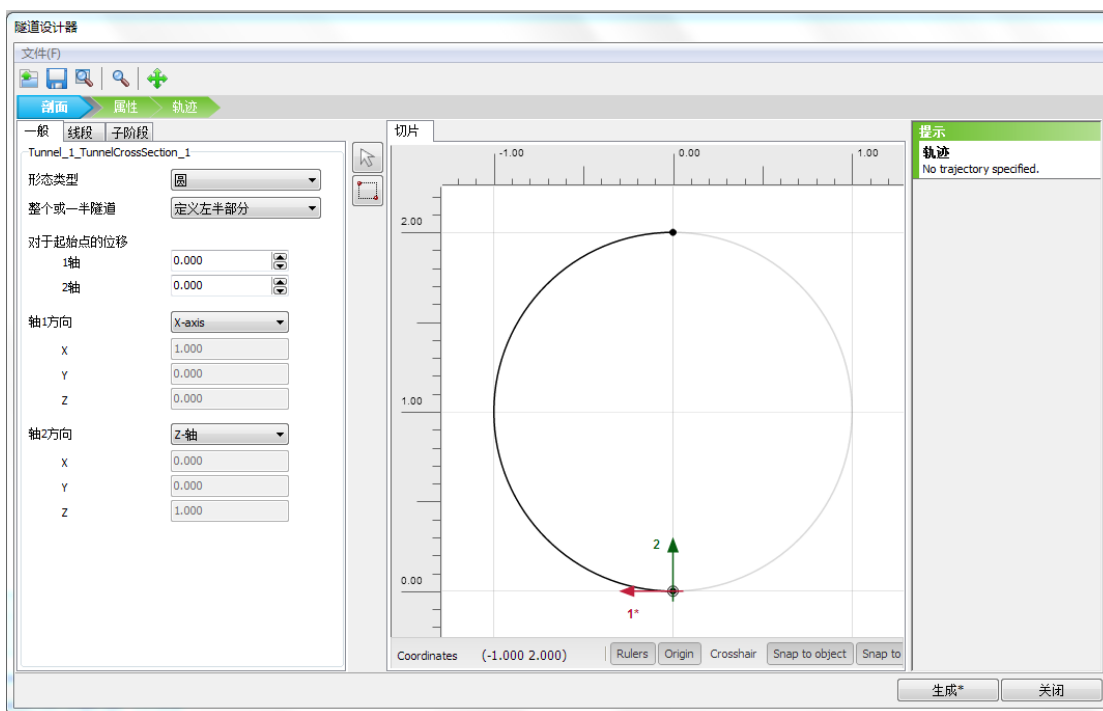



图 5.4 隧道设计器的一般设定页面

6. 点击**线段**按钮进入相应界面，自动产生一个线段，在**线段**菜单下会出现一个窗口，在这个窗口中可以定义线段的属性。
7. 在线段窗口中设置半径为 4m。
8. 进入子阶段界面

9.  点击侧边工具栏中的生成厚衬砌按钮，会弹出生成厚衬砌（Generate thick lining）窗口。
10. 输入 0.25m 并点击确认，进行上述设置之后，剖面页面截图如图 5.5 所示

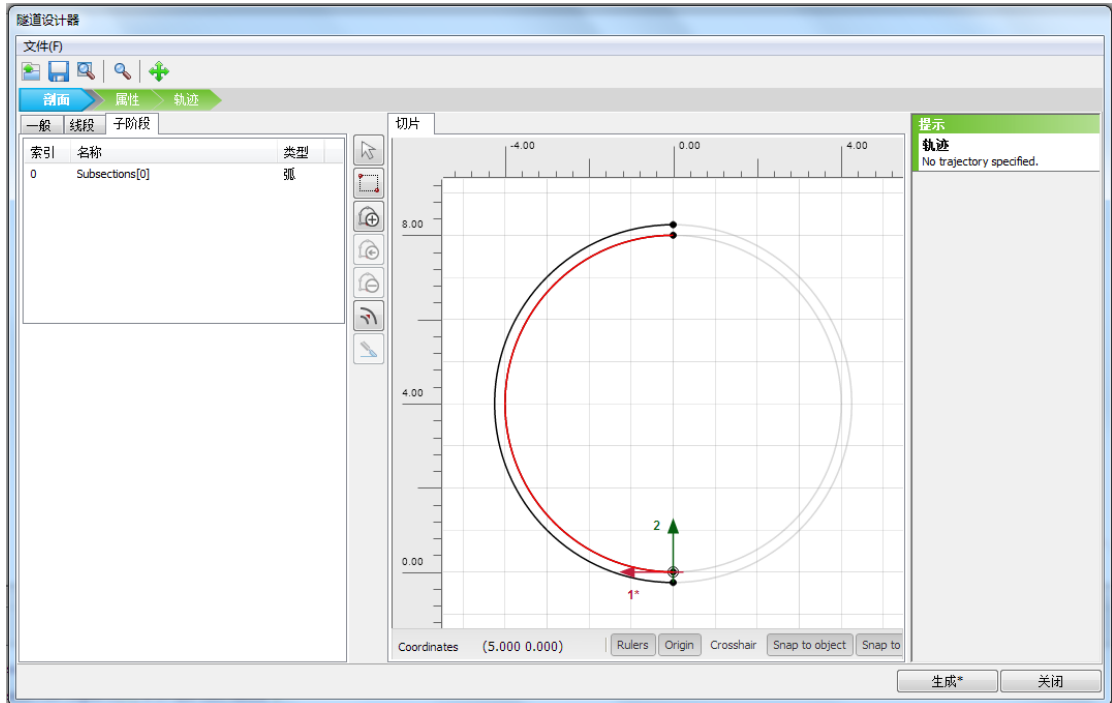


图 5.5 隧道设计器的剖面页面

11. 进入属性页面，在这里我们定义隧道的属性，像注浆压力，表面收缩，千斤顶反力，隧道掌子面压力。
12. 进入到切片界面，右击外环面，在出现的菜单中选择创建板（如图 5.6 所示）

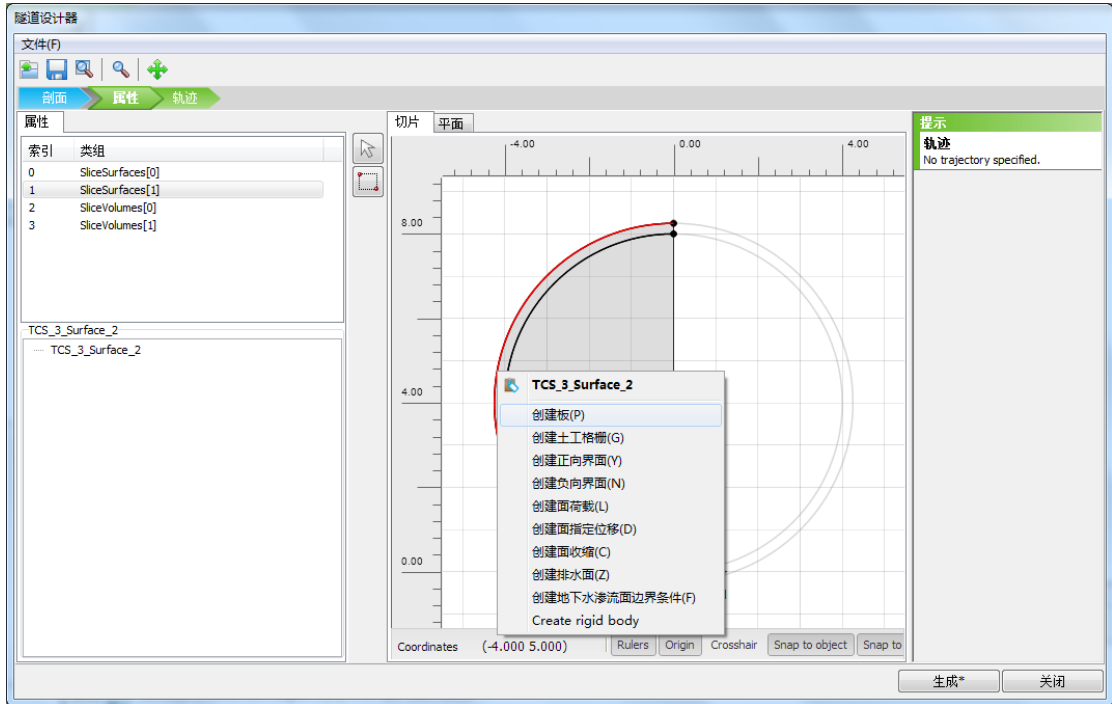



图 5.6 创建板的属性页面

13.  点击浏览器下方的材料，创建一个新的材料数据组，TBM 的材料参数已由表 5.2 列出。

注：隧道设计器中阶段页面的设置对于均匀的隧道衬砌或者段时间内可以建成的隧道没有特殊意义。一般来说，在下列几种情况中，阶段页面的设置会变得有意义：

- 需要在不同阶段开挖或者建造隧道（衬砌）
- 不同的隧道阶段其衬砌属性不同
- 在衬砌中考虑铰链连接（在隧道设计结束之后。可在作图区域内添加铰链）
- 隧道形状由不同半径的弧线组成（如：新奥法（NATM）施工隧道）

表 5.2 代表 TBM 的板材料参数

参数	符号	TBM	单位
厚度	$d$	0.35	$m$
材料重度	$\gamma$	120	
材料特性	--	线性、各向同性	
杨氏模量	$E_1$	$23.0 \times 10^6$	$kN/m^3$
泊松比	$\nu_{12}$	0.0	--
剪切模量	$G_{12}$	$11.5 \times 10^6$	$kN/m^2$

必须在隧道外侧添加土—结构的相互作用

注：

## PLAXIS 3D 2016 案例教程：盾构隧道的分步开挖

隧道衬砌由曲面板（壳）组成。衬砌属性可以在板的材料数据库中指定。同样，隧道的接触界面也是一个曲面。

1. 右击同样的外环面，在出现的菜单中选择创建负向界面，来创建整个隧道周围的负向界面。
2. 下一步是创建隧道的面收缩。右击外环面，选择创建面收缩
3. 在属性窗口中设置  $C_{ref}=0.5$ ，阶段分布将在分布施工中进行设置

### 注浆压力

代表注浆压力的面荷载在建造过程中保持不变。规范中规定，隧道注浆压力在隧道顶端（ $z=-4.75$ ）应为 $-100\text{KN/m}^2$ ，随深度的增长率为 $-20\text{KN/m}^2/\text{m}$ 。定义注浆压力：

1. 右击外环面，再出现的菜单中选择创建面荷载，来创建整个隧道周围的面荷载。
2. 在属性窗口中选择分布下拉菜单下的垂直的，垂直增量
3. 设置 $\sigma_{n,ref}=-100\text{KN/m}^2$ ， $\sigma_{n,inc}=-20\text{KN/m}^2/\text{m}$ ，通过改变  $x_{ref}$ ， $y_{ref}$ ， $z_{ref}$  的值，定义（0，0，-4.75）作为荷载参考点（如图 5.7）

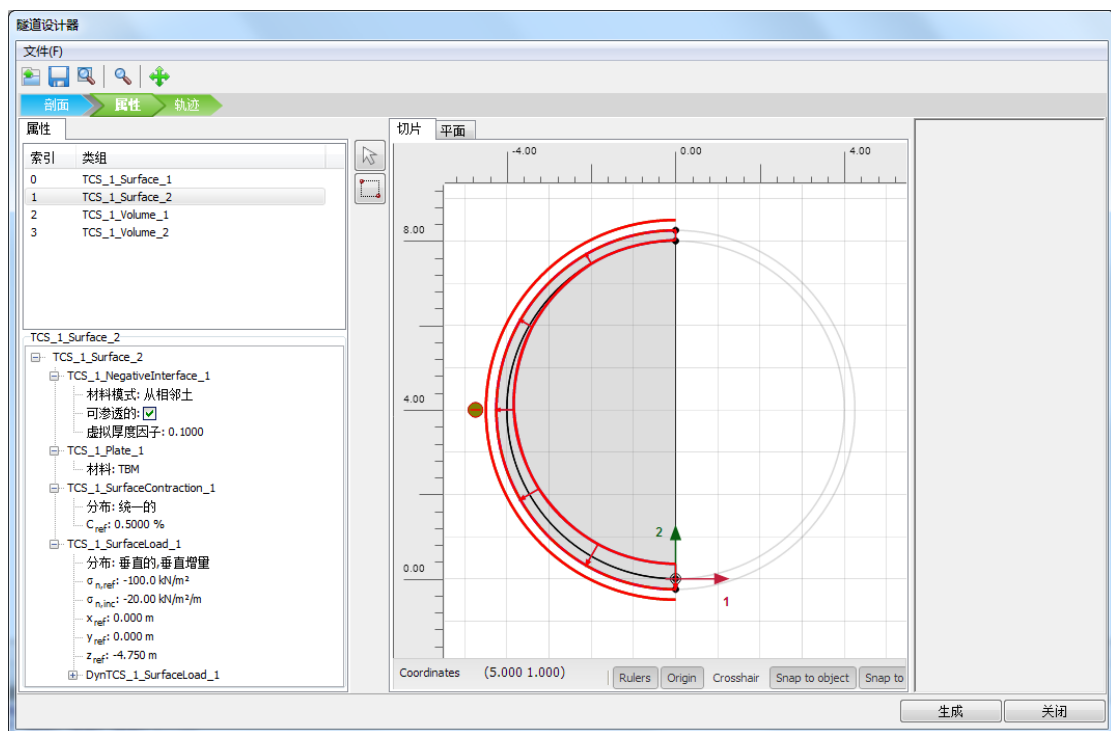


图 5.7 隧道设计器的切片页面

### 隧道掌子面压力

隧道掌子面平衡压力是随深度线性增大的膨胀压力。盾构机初始位置处，以及模拟盾构机前进的 4 个连续位置处，都要定义隧道掌子面平衡压力。

1. 选择位于隧道横断面上方的平面页面
2. 选择整个隧道断面，右击所选断面的任意位置，在出现的菜单中选择创建面荷载，来创建整个隧道周围的面荷载。
3. 在属性窗口中选择分布下拉菜单下的垂直的，垂直增量
4. 设置 $\sigma_{n,ref}=-90\text{KN/m}^2$ ， $\sigma_{n,inc}=-14\text{KN/m}^2/\text{m}$ ，通过设置  $x_{ref}$ ， $y_{ref}$ ， $z_{ref}$  的值，定义（0，0，


-4.75) 作为荷载参考点 (如图 5.8)

### 千斤顶反力

为了在开挖过程中向前推移, 盾构机必须通过已建好的隧道衬砌向前推进, 这就需要液压千斤顶来完成。因此, 必须考虑由千斤顶施加在隧道衬砌上的力。在分布施工中会将千斤顶反力施加在隧道衬砌上。

### 轨迹

下一步是创建代表隧道的轮廓。通过在隧道中创建两个部分来完成。隧道总长 41.5m, 分成两个部分, 前一段长 25m, 后一段包含盾构分步施工片段, 长 16.5m。

1. 点击**轨迹**标签, 进入相应页面
2.  在线段页面中, 点击左侧工具条中的**添加**按钮
3. 在属性窗口中, 设置长度为 25, 其他选项默认
4. 添加另一个线段, 设置长度为 16.5
5. 进入切片页面, 创建切片
6. 点击第二个创建的线段, 在属性窗口中, 将切片方式 (slicing method) 设置为**长度**, 切片长度 (slice length) 设置为 1.5 (如图 5.9 所示)

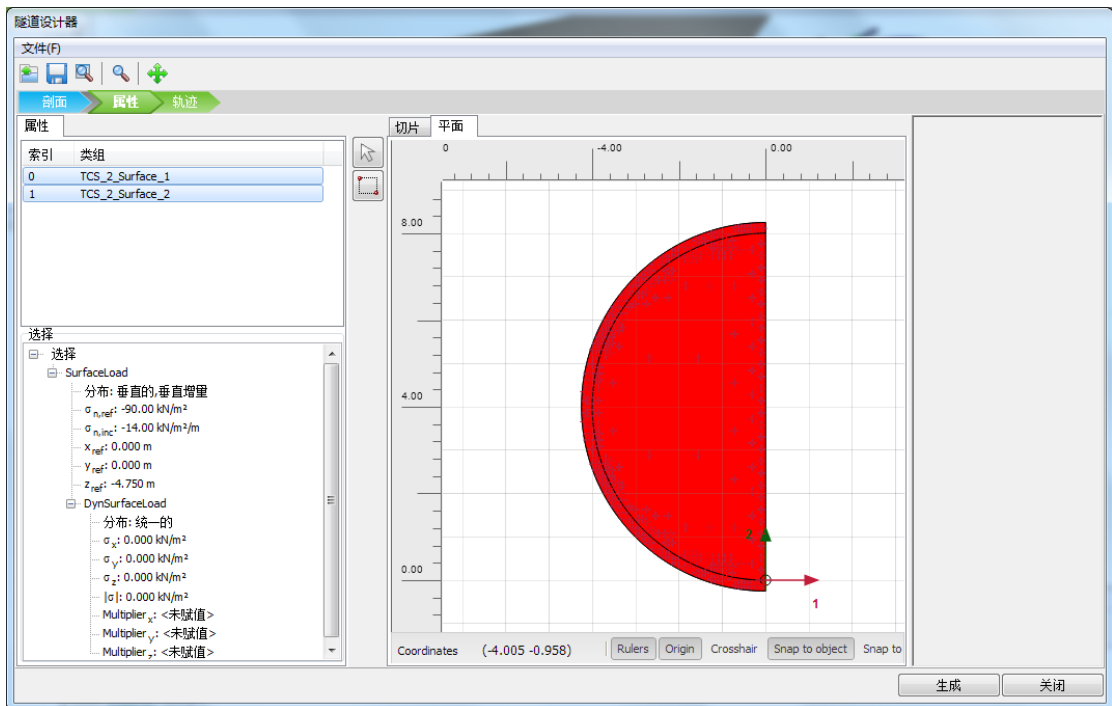


图 5.8 隧道设计器的平面页面

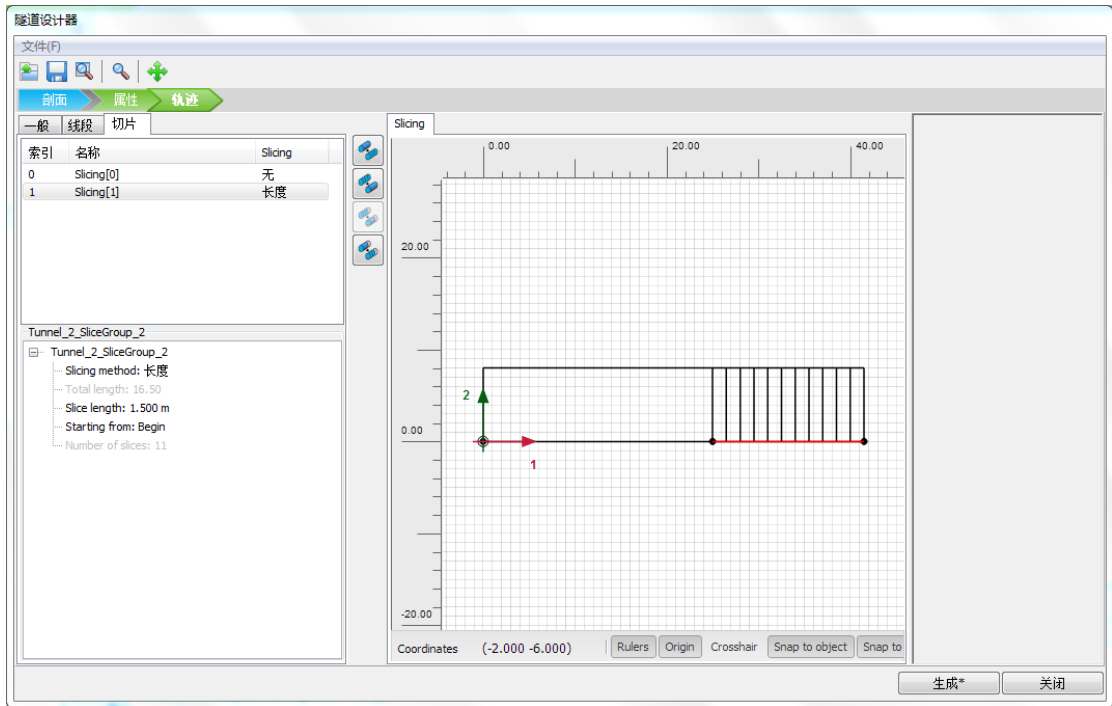


图 5.9 隧道设计器中的轨迹页面

7. 点击生成按钮加入已定义的隧道模型
8. 关闭隧道设计器窗口

在结构模式中建立的模型，如图 5.10 所示。

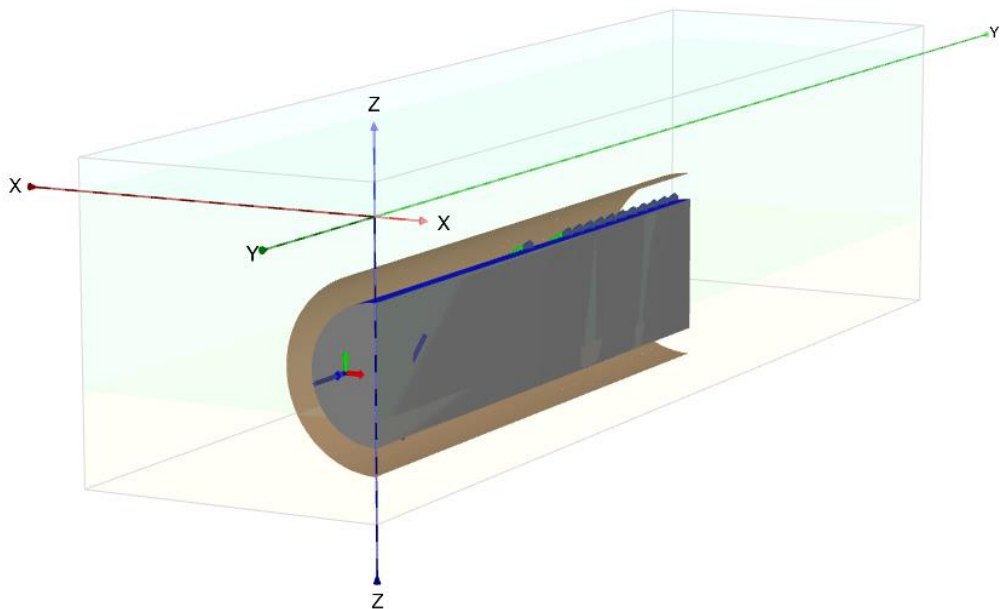




图 5.10 结构模式中所创建的隧道



## 网格划分

在网格模式中，可以指定全局和局部粗细度并生成网格。为了得到更精确的结果，需要细化墙板周围的网格。进入网格模式之后，整个几何模型以深灰色显示。

1.  点击划分网格按钮以生成网格。网格选项窗口出现。
2. 采用默认选项（中等）生成网格。
3.  点击查看网格按钮以检查生成的网格，如图 5.11 所示。

检查完网格之后，关闭输出窗口。此时网格划分已完成，定义计算阶段需要的所有输入都已完成。

## 执行计算

土体开挖和隧道衬砌建造均在分步施工模式中模拟。因水位保持不变，水位模式可直接跳过。需要注意由于划分网格，隧道被分为两部分：上面的部分位于粘土层中，下面的部分新的衬砌环。第一阶段不同于后面的阶段，因为在该阶段第一次激活隧道。该阶段将模拟已经掘进了 25m 的隧道。后续阶段模拟每次 1.5m 的掘进进尺。

### 初始阶段

初始阶段由 K0 过程生成初始应力，设置采用程序默认值。

### 第一阶段：TBM 初始位置

在第一阶段中，假设 TBM 已经推进了 25m。考虑到在前 25m 中 TBM 的锥度，激活代表 TBM 的板并施加 0.5% 的断面收缩。下一阶段将激活最终衬砌。

1. 添加第一个计算阶段。

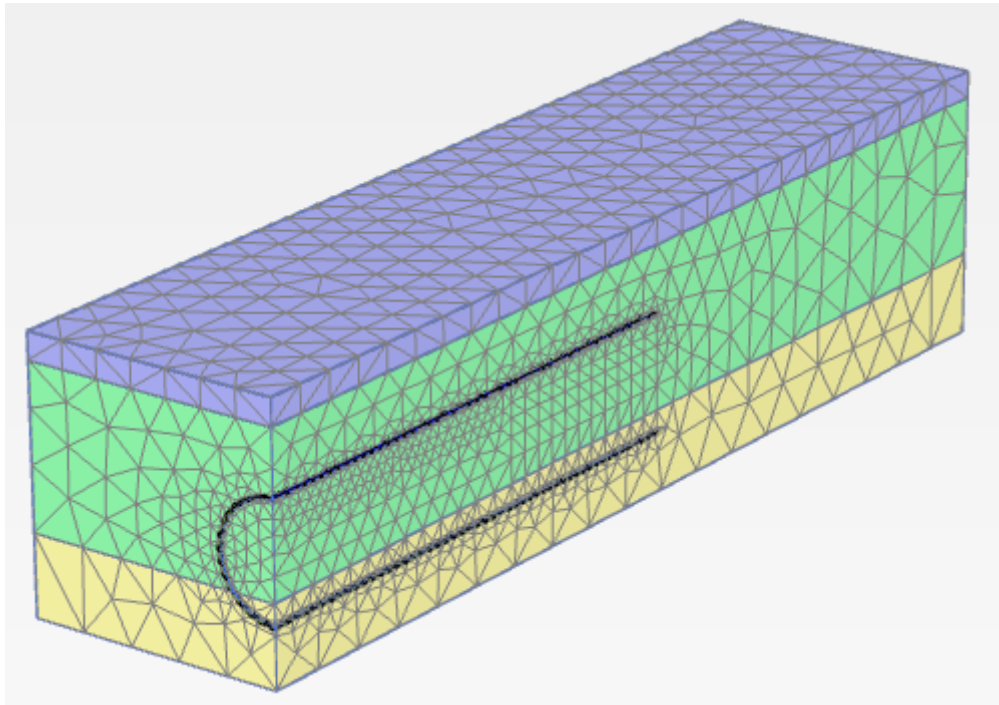



图 5.11 网格划分

2.  选择右视图来改变模型视图，以便更清楚的观察到隧道内部。
3. 在绘图区选择对应前 25m 隧道内部空间和衬砌的土体单元（如图 5.12 所示）。注意图中只显示了隧道周围的模型部分。

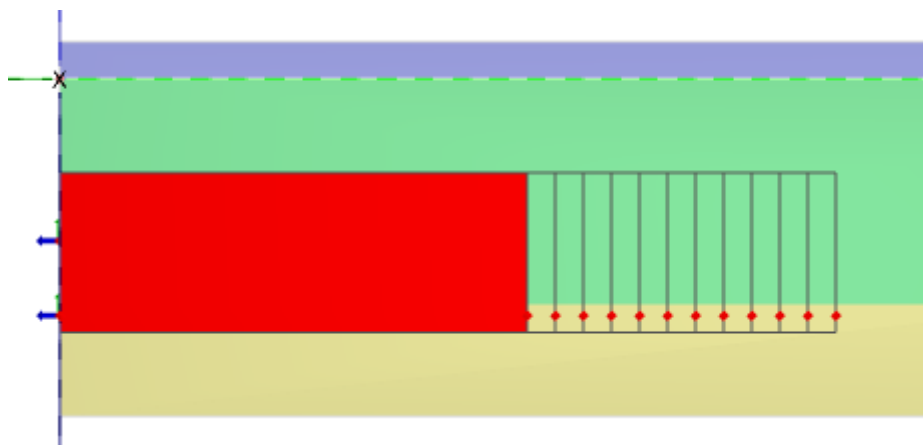




图 5.12 选择土体（0-25m）

4. 在选择浏览器中冻结选中的土体（包括衬砌和隧道内部土体）。土体被关闭了，但代表冻结土体的线框依然以红色显示，因为冻结土体依然处于选中状态。
5.  在选择浏览器中，展开土体子树并将水力条件设为干（Dry）。

注：冻结的对象会自动隐藏，如实体或面，但是代表被隐藏对象的线框仍保留。计算阶段中冻结对象的可见性可以在可视化设置窗口的相应页面中进行设置，（详见参考手册 3.5.3 节）。

激活隧道前 25m 的界面、板和断面收缩：

1.  在弹出菜单中选择“选择板”选项。选择模型中 0m 至 25m 之间赋予了板属性的面，如图 5.13 所示。

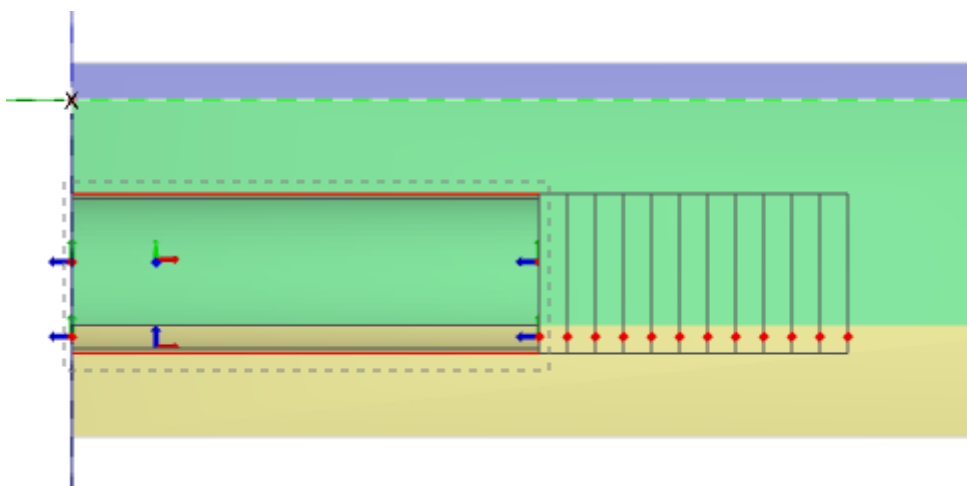


图 5.13 选择板（0-25m）

2. 在选择浏览器中，通过在相应框中打钩以激活板、负向界面和断面收缩。  
25m 之后的部分（25m~26.5m 部分）代表紧邻 TBM 之后的尾部空隙注浆段。冻结隧道内部的土体及衬砌，激活代表注浆压力的面荷载。
3. 选择 25~26.5m 之间对应衬砌和隧道内部空间的实体单元，如图 5.14 所示。
4. 在选择浏览器中冻结选中的土体，并将水力条件设成干（Dry）。

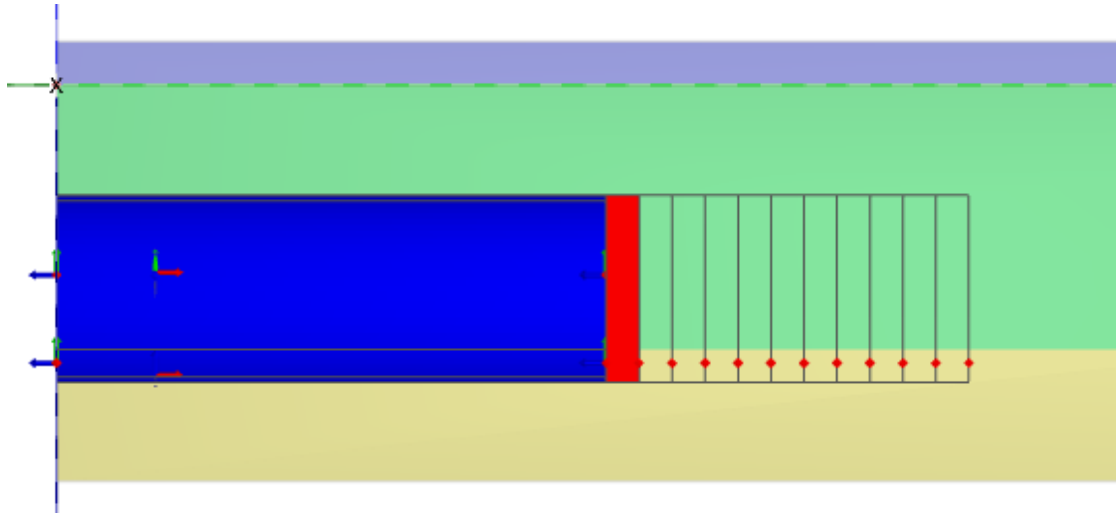



图 5.14 选择土体（25m-26.5m）

在这一部分中，不要激活板、负向界面和断面收缩。为了区分模型中定义的面荷载，用选择板选项只选择那些赋予了板、界面、断面收缩和注浆压力属性的面。

5.  通过画矩形框来选择模型中 25m 至 26.5m 间的面，如图 5.15 所示。
6. 在选择浏览器中激活对应注浆压力的荷载。注意在结构模式中已经做了正确的设置。

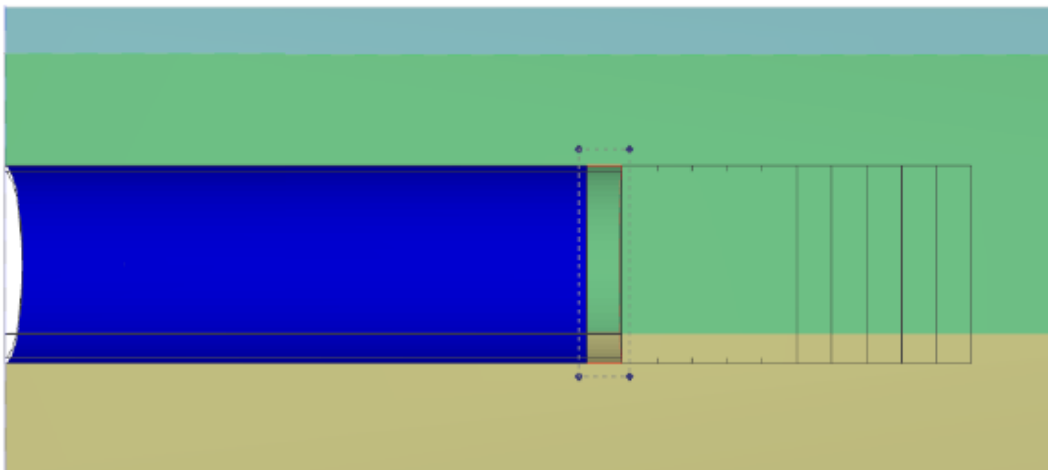



图 5.15 选择板（25m-26.5m）

之后的 6 段（26.5-35.5m）用来模拟 TBM：

7.  选择位于 26.5-35.5m 之间的后 6 段中对应衬砌和隧道内部土体的土体单元。如图 5.16
8. 在选择浏览器中冻结选中的土体，并将水力条件设成干 *Dry*。

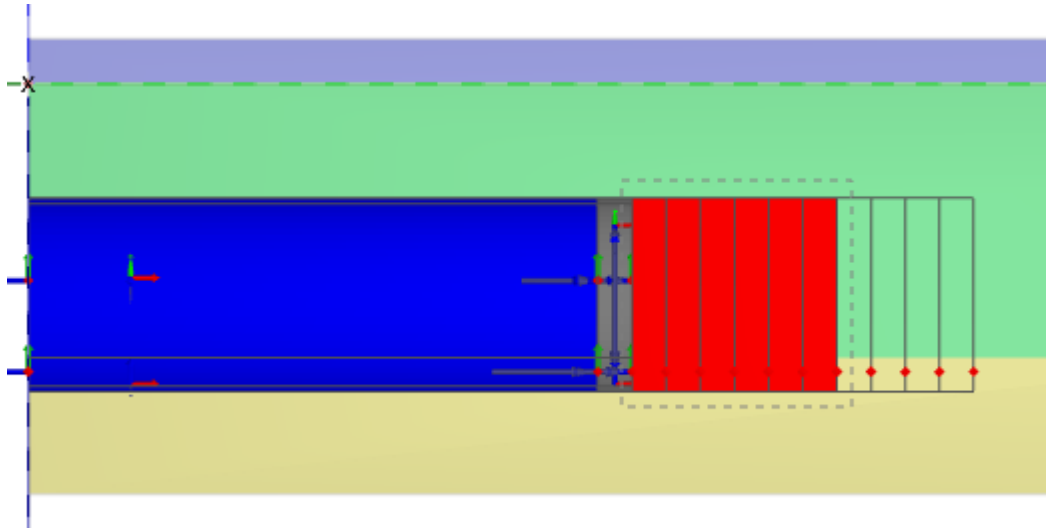




图 5.16 选择土体 (26.5m-35.5m)

9.  选择模型中 26.5m 至 35.5m 之间赋予了板属性的面。


10. 在选择浏览器中激活负向界面、板和断面收缩。

TBM 具有微锥形的形状。典型地, TBM 尾部断面比前端断面小 0.5%。TBM 前 7.5m 长度上 (35.5~28m) 直径逐渐减小, 但到尾部的最后 1.5m (28~26.5m) 直径不变。这意味着 28~26.5m 段具有 0.5% 的均匀断面收缩, 其余 5 段具有线性变化的断面收缩, 参考值  $c_{ref}=0.5%$ , 增量  $c_{inc,axial}=-0.0667%$ , 参考点  $y$  坐标值为 28。

11.  选中 28~35.5m 之间的面。

12. 在选择浏览器中选择断面收缩的分布形式为轴向增量, 令  $c_{ref}=0.5%$ ,  $c_{inc,axial}=-0.0667%/m$ 。增量必须是负数, 因为沿局部坐标 1 轴正向断面收缩是减小的。参考位置为(0,28,0)。

13. 第一计算阶段需要定义的最后一部分是保证隧道掌子面稳定的平衡压力:

14.  选择  $y=35.5$  处对应平衡压力的面荷载。图 5.17 显示了模型的整体视图和局部细节。

15. 在选择浏览器中激活面荷载。在结构模式中定义几何模型时, 已经将荷载分布设成垂直于面(Perpendicular)、竖直增量(Vertical increment), 其值定为  $\sigma_{n,ref}=-90kN/m^2$ ,

$\sigma_{n,inc}=-14 kN/m^2$ 。参考位置为(0,0,-4.75)。

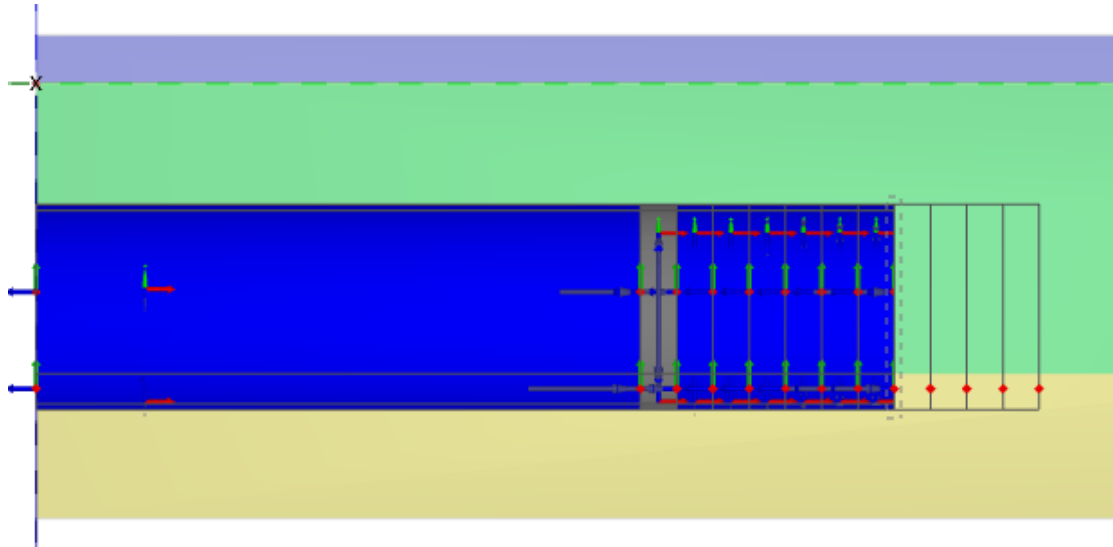



图 5.17 选择  $y=35.5$  处的隧道掌子面平衡压力

16.  点击预览按钮来预览已经定义的所有对象，如图 5.18 所示。确保已经施加注浆压力和隧道掌子面平衡压力，而且二者均从顶部至底部增大。

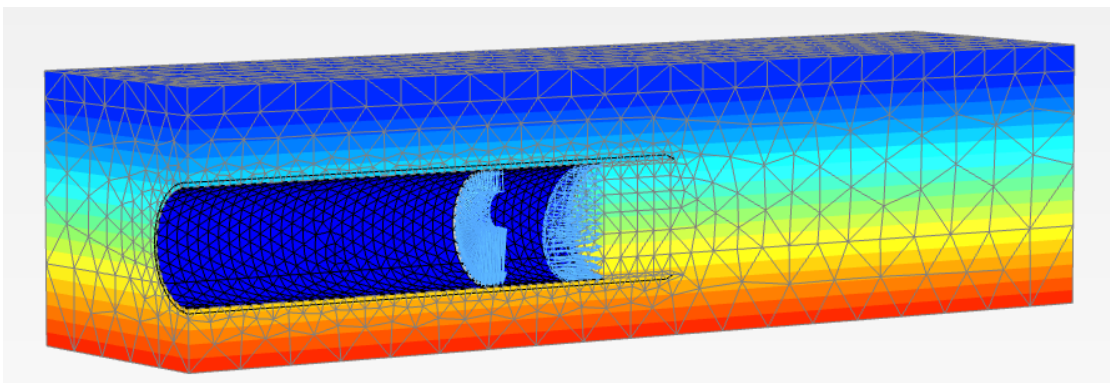






图 5.18 阶段 1 预览

### 第二阶段：TBM 推进阶段 1

本阶段模拟 TBM 向前推进 1.5m:

1. 添加一个新的阶段。
2. 隐藏隧道外部土体，这样就可以从隧道外部和内部都能够操作 TBM、衬砌、面荷载和断面收缩。
3.  选择 0~25m 之间的板，冻结板和断面收缩。
4.  选择 0~25m 之间对应隧道衬砌的实体单元。
5.  在选择浏览器中展开土体子树。
6. 激活选中的土体。

7. 点击材料，从下拉菜单中选择混凝土材料。
8. 直接点击模型，选中并冻结 25~26.5m 之间的荷载。
9. 激活 25~26.5m 之间的负向界面。
10.  选择 25~26.5m 之间的实体单元，按照前面相同的步骤定义最终衬砌。
11. 激活对应的面选择并激活  $y=26.5m$  处的千斤顶反力。
12. 在选择对象浏览器中，将千斤顶反力设置为垂直， $\sigma_{n,ref}=635.4kN/m^2$ ，如图 5.19 所示。

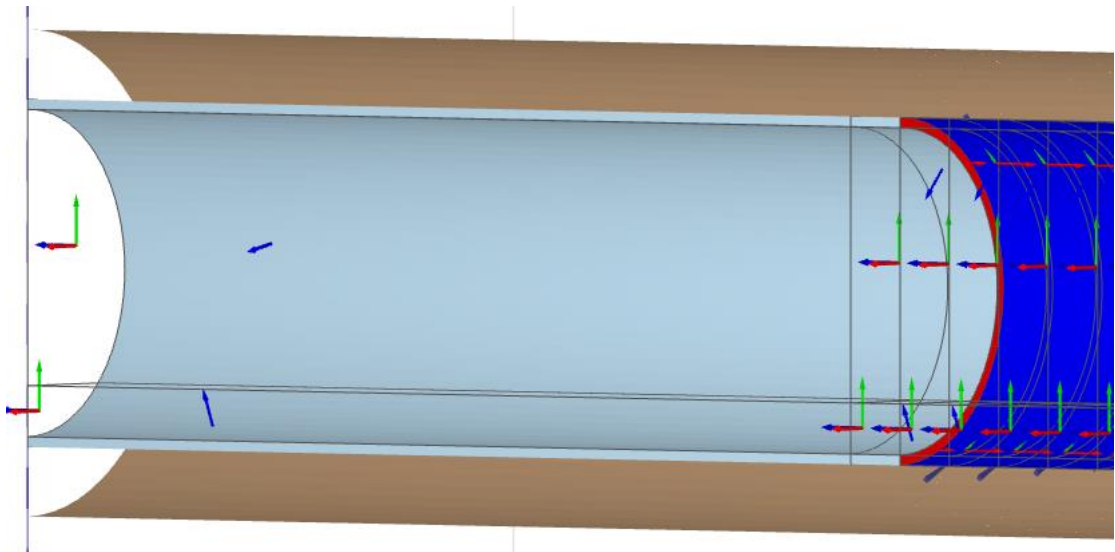



图 5.19  $y=26.5m$  处的千斤顶反力

由于 TBM 已经向前推进了 1.5m，只需在  $y=26.5m$  至  $y=28m$  段上施加注浆压力。冻结该段上的板、界面和断面收缩。

13. 选择模型中 26.5~28m 之间的面，冻结界面、板和断面收缩。
14. 激活对应注浆压力的荷载。

之后的 6 段（28~37m）对应 TBM：

15.  $y=28m$  至  $y=29.5m$  段是 TBM 的尾部。选择组成 TBM 的两部分板单元，将断面收缩修改为统一值（Uniform），令  $c_{ref}=0.5\%$ 。

16.  冻结阶段 1 中激活的隧道平衡压力（ $y=35.5m$ ）。

17. 本阶段开挖  $y=35.5m$  至  $y=37m$  之间的部分。冻结隧道内部空间和对应隧道衬砌的土体，将水力条件设定成干 Dry。

18. 激活  $y=35.5m$  至  $y=37m$  之间的界面、板和断面收缩。

19. 定义该断面的收缩为：轴增量，令  $c_{ref}=0.5\%$ ， $c_{inc,axial}=-0.0667\%/m$ ，参考位置为  $(0,29.5,0)$

20. 激活  $y=37m$  处的隧道平衡压力。这样就完成了 TBM 第一步推进的定义。

### 5.3.4 第三阶段：TBM 推进阶段 2

第三阶段是 TBM 的另一个向前推进阶段，因此原则上只需做与前面阶段同样的操作即可，只是向前推进一段。

1. 添加一个新的阶段。
2. 0~25m 段是施工完成的隧道，无需作任何改变。25~26.5m 段也是施工完成的隧道，但是必须冻结该段侧面的千斤顶反力。选择该段的侧面，在选择浏览器中冻结  $y=26.5m$  处代表千斤顶反力的面荷载。
3. 冻结 26.5~28m 段代表注浆压力的面荷载，激活界面。
4. 选择代表最终衬砌的实体单元（26.5~28m）。赋予刚刚激活的最终衬砌以混凝土材料属性。
5. 选择并激活  $y=28m$  处代表千斤顶反力的面
6. 在选择对象浏览器中，将千斤顶反力设置为垂直， $\sigma_{n,ref}=635.4kN/m^2$ ，如图 5.20 所示。

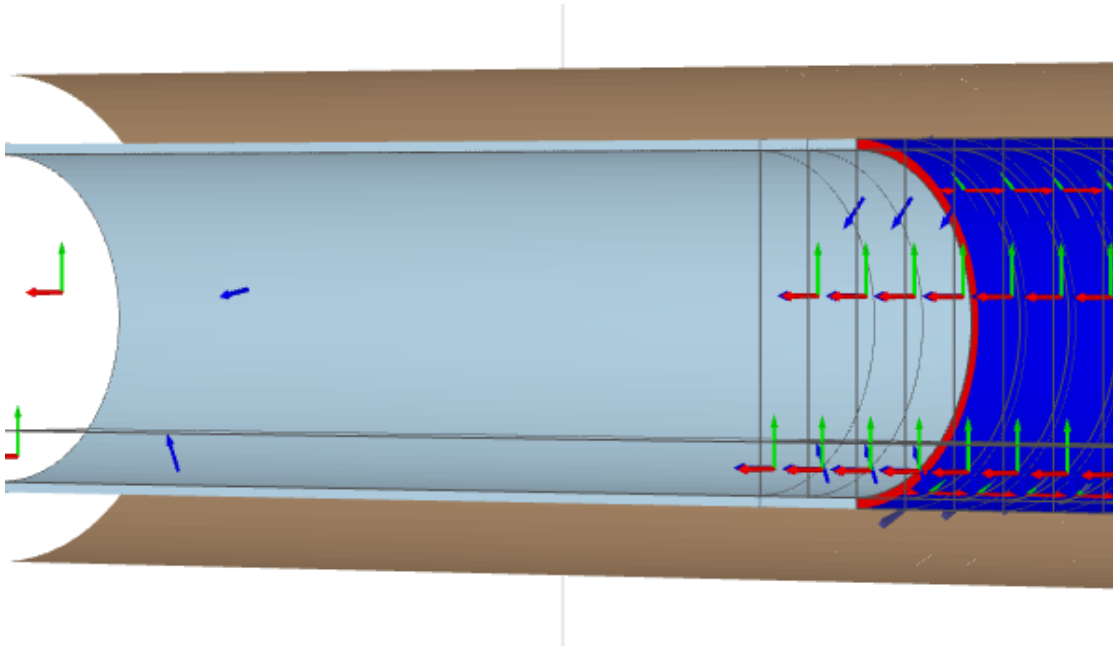



图 5.20  $y=28m$  处激活的千斤顶反力

$y=28m$  至  $y=29.5m$  段由 TBM 尾部变成了注浆压力段。

7. 选择代表 TBM 的两部分，冻结代表 TBM 的板、面收缩和界面，激活代表注浆压力的面荷载。
8.  $y=29.5m$  至  $y=31m$  段成为 TBM 的尾部。选择组成 TBM 的两部分板单元，将断面收缩修改为统一值（Uniform），令  $c_{ref}=0.5\%$ 。
9.  冻结阶段中激活的隧道掌子面平衡压力（ $y=37m$ ）。
10. 本阶段开挖  $y=37m$  至  $y=38.5m$  段。冻结隧道内部和对应隧道衬砌的土体，将水力条件设定成干（Dry）。



11. 激活  $y=37m$  至  $y=38.5m$  之间的界面、板和断面收缩。
12. 定义该断面的收缩为：轴增量，令  $c_{ref}=0.5\%$ ， $c_{inc,axial}=-0.0667\%/m$ ，参考位置为  $(0,31,0)$
13. 激活  $y=38.5m$  处的隧道平衡压力。

点击计算按钮开始计算。忽略掉“没有选择曲线节点或应力点”等提示信息，因为在本例中我们不绘制任何荷载-位移曲线，继续计算。

## 查看计算结果

计算完成之后，在输出程序中可以观察到计算结果。在输出程序中位移和应力将在完全 3D 模型中显示，但是计算结果也可以表格的形式输出。按照如下步骤检查当前分析的计算结果：

1. 在阶段浏览器中选择阶段 3，即最后的计算阶段。
2. 点击输出按钮，打开输出程序。输出程序将默认显示所选计算阶段结束时的 3D 变形网格。
3. 从变形菜单中选择总位移，然后选择  $u_z$ ，以云图的形式观察模型中的竖向总位移，如图 5.21 所示。

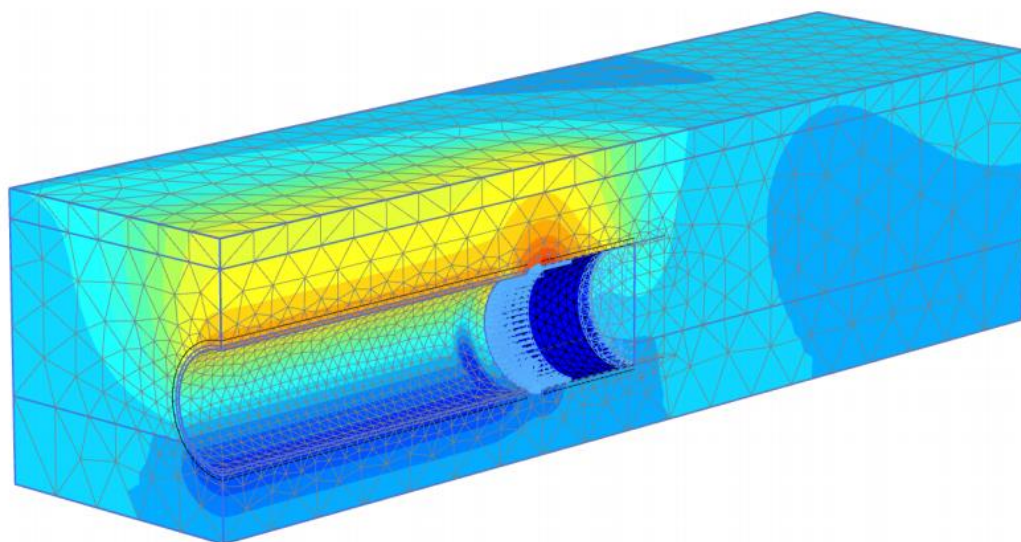


图 5.21 最后一个计算阶段后总竖向位移( $u_z \approx 2.5\text{cm}$ )

4. 为了观察地表沉降，应选择水平截面按钮来形成一个水平截面。在出现的窗口中输入截面标高为 1.95m，打开截面切割显示窗口，如图 5.24 所示。地表最大沉降约为 2cm。

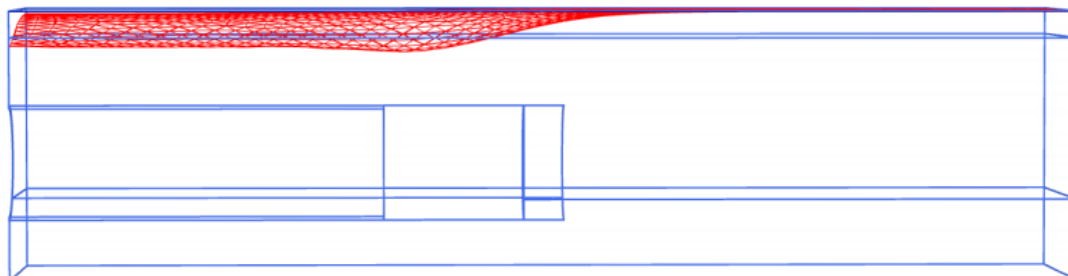


图 5.22 地表沉降槽  $|u| \approx 1.5\text{cm}$



**PLAXIS 3D**  
**Tutorial Manual**  
**2013**

岩土工程有限元分析软件

**PLAXIS 3D 2013<sup>®</sup>**

**案例教程**



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

水位快速下降分析.....	1
几何建模.....	2
1.1 工程属性.....	2
1.2 土层定义.....	2
1.3 坝体定义.....	3
生成网格.....	4
执行计算.....	5
3.1 初始阶段：高水位.....	5
3.2 阶段 1：水位快速下降.....	6
3.3 阶段 2：水位缓慢下降.....	8
3.4 阶段 3：低水位.....	9
3.5 阶段 4 到 7：.....	9
查看结果.....	11

WWW.CISEG.COM



## 水位快速下降分析

本章讲述软粘土和砂土地基中的基坑开挖施工。该基坑相对较小，尺寸为  $12\text{m} \times 20\text{m}$ ，开挖至地表以下  $6.5\text{m}$ 。采用支撑、腰梁和锚杆作为基坑的支护结构。开挖完毕后，将在基坑的一侧施加面荷载。本例研究水位下降条件下的水库大坝的稳定性分析。库水位的快速下降时，由于保留在坝体内的高孔隙水压力，将导致坝体的不稳定。坝高  $30\text{m}$ ，坝顶和坝底宽度分别为  $5\text{m}$  和  $172.5\text{m}$ 。坝体由黏土心墙和两侧的级配填料组成。坝体的几何形状如图 1。坝后正常水位为  $25\text{m}$ ，考虑水位下降  $20\text{m}$  的工况。坝体右侧正常潜水位埋深  $10\text{m}$ 。地基土由超固结粉砂组成。

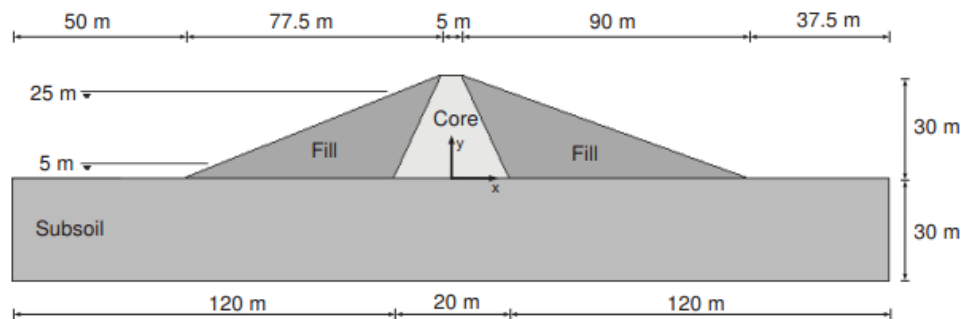


图 1 大坝几何形状

### 目标:

- 进行完全流固耦合分析
- 定义时间相关的水力条件
- 使用非饱和和渗流参数



## 几何建模

### 1.1 工程属性

1. 打开输入程序，从快速选择对话框中选择开始新项目。
2. 在项目属性窗口中输入合适的标题。
3. 保持默认的单位并设置模型边界为  $x_{min}=-130$ ， $x_{max}=130$ ， $y_{min}=0$ ， $y_{max}=50$ 。

假设坝体位于开阔河谷，取 50m 长的坝体代表段以减小模型尺寸。模型的几何形状见图 1.1。

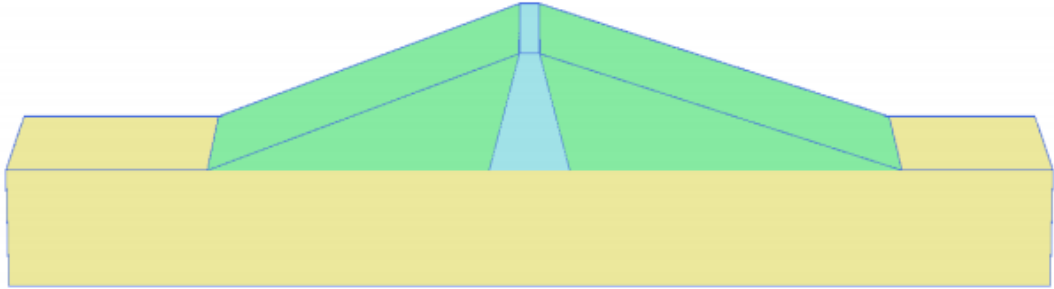


图 1.1 模型的几何形状

### 1.2 土层定义

为了定义下卧的地基土体，需要添加一个钻孔并赋予材料属性，模型中的地基土层考虑 30m 厚的超固结粉砂层。



1.  在(0,0,0)处创建钻孔，弹出修改土层窗口。
2. 添加从地表( $z=0$ )至 30m 深处( $z=-30$ )的土层。
3. 设置钻孔水头为-10m，自动生成一个水平水位。该水位将与地下水渗流的面边界条件组合用于完全流固耦合分析中。
4.  打开材料组窗口。
5. 参照表 1.1 给出的信息，在土体和界面选项中创建数据组。注意此处与界面和初始条件页面无关(未用到界面或  $K_0$  过程)。
6. 将地基土材料组赋给钻孔中的土层。

表 1.1 坝体和地基土材料属性表

参数	名称	心墙	填料	地基土	单位
<b>常规</b>					
材料模型	<i>Model</i>	摩尔库伦	摩尔库伦	摩尔库伦	-
排水类型	<i>Type</i>	非透水	透水	透水	-
水位以上的土体重度	$\gamma_{unsat}$	16	16	17	$kN/m^3$
水位以下的土体重度	$\gamma_{sat}$	18	20	21	$kN/m^3$
<b>参数</b>					
杨氏模量	$E'$	1.50E+03	2.00E+04	5.00E+04	$kN/m^2$
泊松比	$\nu'$	0.35	0.33	0.3	-

粘聚力	c',ref	-	5	1	$kN/m^2$
不排水抗剪强度	su,ref	5	-	-	$kN/m^2$
摩擦角	$\varphi'$	-	31	35	$^\circ$
剪胀角	$\psi$	-	1	5	$^\circ$
杨氏模量增量	E',inc	300	-	-	$kN/m^2$
参考位置	zref	30	-	-	$m$
不排水抗剪强度增量	su,inc	3	-	-	$kN/m^2$
参考位置	zref	30	-	-	$m$
<b>渗流</b>					
渗流数据组	Model	Hypres	Hypres	Hypres	-
模型	-	VG 模型	VG 模型	VG 模型	-
土体	-	下层土	下层土	下层土	-
土体粗细度	-	很细	粗	粗	-
水平渗透系数	kx	1.00E-04	0.25	0.01	$m/day$
	ky	1.00E-04	0.25	0.01	$m/day$
垂直渗透系数	kz	1.00E-04	0.25	0.01	$m/day$

### 1.3 坝体定义

坝体在结构模式中定义。





1.  在(-80 0 0)、(92.5 0 0)、(2.5 0 30)和(-2.5 0 30)处指定点来定义面。
2.  在(-10 0 0)、(10 0 0)、(2.5 0 30)和(-2.5 0 30)处指定点来定义面。
3. 在绘图区选中两个面并单击右键，在弹出的菜单中选择**交叉与重组**选项。
4. 选中这些面并沿(0 50 0) 拉伸，生成代表坝体的实体。
5. 删除用于创建土体实体的面。
6. 将对应的材料组赋给土体实体。
7.  时间相关条件可以赋给地下水渗流面边界条件。按照表 1.2 中的信息来定义地下水渗流面边界条件（利用创建水力条件工具）。

表 1.2 地下水渗流面边界条件

面	点
1	(-130 0 0), (-80 0 0), (-80 50 0), (-130 50 0)
2	(-80 0 0), (-2.5 0 30), (-2.5 50 30), (-80 50 0)
3	(-130 0 0), (-130 0 -30), (-130 50 -30), (-130 50 0)

## 生成网格

在生成网格时建议将单元分布参数设定为细。修改全局粗细度：

1.  在工具栏中点击**生成网格按钮**，弹出网格选项窗口。
2. 从单元分布下拉列表中选择选项**细**(如图 2.1)

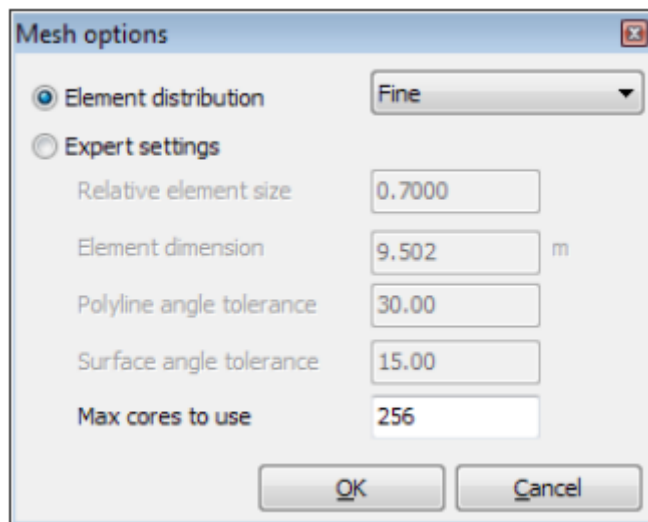



图 2.1 全局粗细度修改

3. 点击 **OK** 按钮关闭网格选项(*Mesh options*)窗口，生成网格。
4.  点击工具栏中的**查看网格(View mesh)**按钮来预览生成的网格，网格划分结果如图 2.2 所示。

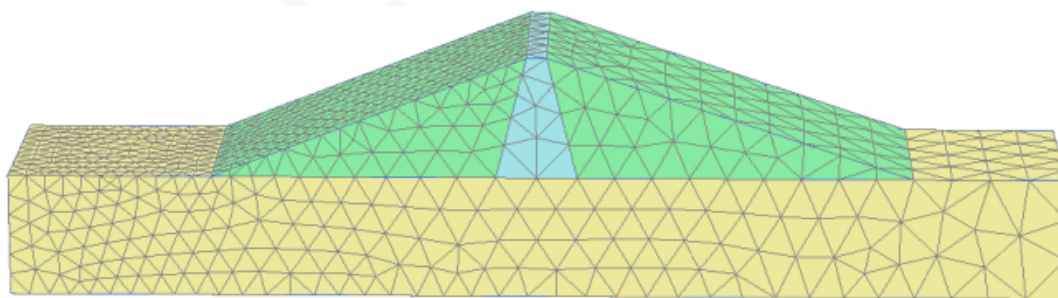


图 2.2 网格划分结果

## 执行计算

计算过程将考虑初始状态(高水位)、水位快速下降工况、水位慢速下降工况以及最终的低水位工况。每种工况都要进行安全性分析。




1. 进入水位设置模式。
2.  依照表 3.1 给出的信息, 创建对应满库的高水位工况, 以及下降后的低水位工况。
3. 在模型浏览器(*Model explorer*)的属性库(*Attribute library*)中将创建的用户水位重命名为“高水位” (*High\_Reservoir*)和“低水位” (*Low\_Reservoir*)。

表 3.1 水位

水位	点
高水位	(-130 0 25), (-10 0 25), (93 0 -10), (130 0 -10), (130 50 -10), (93 50 -10)(-10 50 25), (-130 50 25)
低水位	(-130 0 5), (-10 0 5), (93 0 -10), (130 0 -10), (130 50 -10), (93 50 -10)(-10 50 5), (-130 50 5)

注: 钻孔水位和非水平的用户水位不能修改(如时间相关性)。

### 3.1 初始阶段: 高水位

1. 进入分步施工(*Staged construction*)模式
2. 在阶段浏览器(*Phases explorer*)中双击初始阶段(*Initial phase*)
3. 在阶段窗口的常规设置子树下将阶段重命名为“高水位” (*High reservoir*)。
4.  选择重力加载(*Gravity Loading*)选项作为计算类型。注意分步施工(*Staged construction*)是加载类型的唯一选项。
5.  选择孔隙压力计算类型为稳态地下水渗流(*Steady state groundwater flow*)。

注意: 在变形控制参数(*Deformation control parameters*)子树中, 默认选择忽略不排水行为(A, B)和忽略吸力(*Ignore suction*)选项。数值控制参数(*Numerical control parameters*)和水力控制参数(*Water control parameters*)子树中的参数均采用默认值。

6. 单击 *OK* 关闭阶段窗口。
7. 在分步施工(*Staged construction*)模式中激活代表坝体的土体。
8. 在模型浏览器(*Model explorer*)中展开模型条件(*Model conditions*)子树。
9. 在地下水渗流(*GroudwaterFlow*)子树中将(*Boundary Y<sub>min</sub>*, *BoundaryY<sub>max</sub>*, *BoundaryZ<sub>min</sub>*)设为关闭。其余边界打开(图 3.1)。
10. 在水力条件子树中选择高水位(*High\_Reservoir*)作为全局水位(*Global Water Level*)。

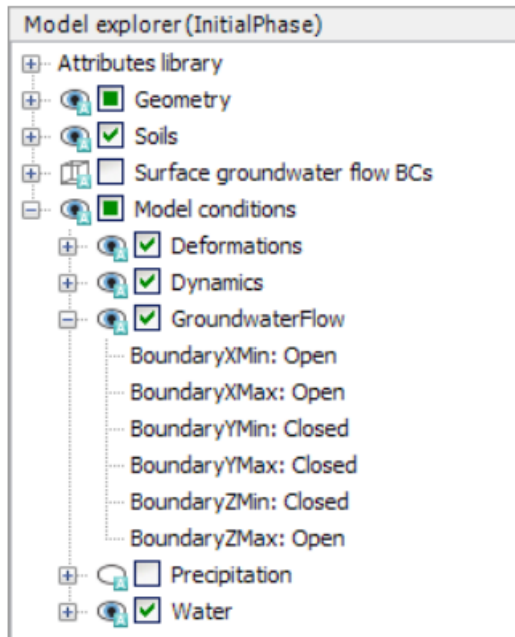





图 3.1 地下水渗流边界条件

### 3.2 阶段 1：水位快速下降

在水位快速下降阶段，水库中的水位将在 5 天内从  $Z=25m$  下降到  $Z=5m$ 。定义描述水位变化的函数如下：

1. 在模型浏览器(*Model explorer*)中展开属性库 (*Attributes library*)。
2. 右键点击渗流函数(*Flow functions*)并在弹出的菜单中选择编辑(*Edit*)选项，出现渗流函数(*Flow functions*)窗口。
3.  在水头函数(*Head functions*)页面中点击对应按钮添加一个新函数。新函数将在列表中高亮显示，定义函数的各选项也将显示。
4. 给快速下降函数指定一个合适的名字(比如 *Rapid*)
5. 在信号(*Signal*)下拉菜单中选择线性(*Linear*)选项
6. 令  $\Delta Head = -20m$ ，代表总的水位下降值
7. 指定时间间隔为 5 天。定义的函数图形如图 3.2 所示。
8. 单击 *OK* 关闭渗流函数(*Flow functions*)窗口
9.  添加一个新的计算阶段并重命名(如 *Rapid drawdown*)
10.  选择计算类型(*Calculation*)为完全流固耦合 (*Fully coupled flow-deformation*)
11. 设置时间间隔(*Time interval*)为 5 天。

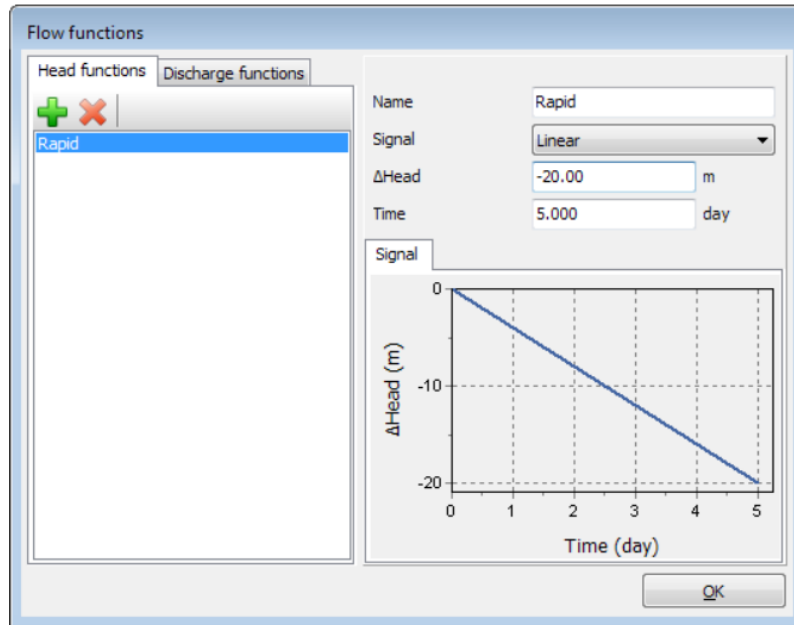


图 3.2 水位快速下降工况下的渗流函数

12. 在位移控制参数(*Deformation control parameters*)子树中, 选择重置位移为零(*Reset displacements to zero*)选项。
13. 点击 *OK* 关闭阶段(*Phases*)窗口
14. 激活全部地下水渗流面边界条件
15. 在绘图区多选地下水渗流面边界条件。
16. 在选择浏览器(*Selection explorer*)中, 选择水头(*Head*)选项作为行为特征。水头分布为常量(*Constant*), 令  $h_{ref}=25m$ 。
17. 将时间相关性设置为时间相关 (*Time dependent*), 并将水头函数(*Head Function*)选择为快速下降(*Rapid*)。与水头函数相关的信息也会显示在对象浏览器(*Object explorers*)中(图 3.3)。

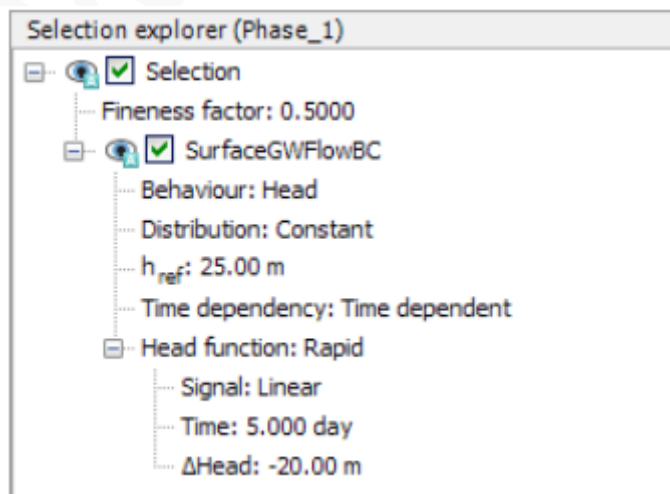


图 3.3 水位快速下降工况下的 SurfaceGWFlowBC(地下水流体面边界条件)的定义

## PLAXIS 3D 2013 案例教程：水位快速下降分析

18. 在模型浏览器(*Model explorer*)中的水力条件 (*Water*) 子树下选择钻孔水位 1(*BoreholeWaterLevel\_1*)选项作为全局水位。

### 3.3 阶段 2：水位缓慢下降

在水位缓降阶段，水库水位将在 50 天内从  $z=25\text{m}$  下降到  $z=5\text{m}$ 。定义描述水位变化的函数如下：

1. 按照前述步骤创建一个新的渗流函数
2. 给缓慢下降函数指定一个合适的名字(比如 *Slow*)
3. 在信号(*Signal*)下拉菜单中选择线性 (*Linear*) 选项
4. 令  $\Delta \text{Head} = -20\text{m}$ ，代表总的水位下降值
5. 指定时间间隔为 50 天。定义的函数图形如图 3.4 所示。

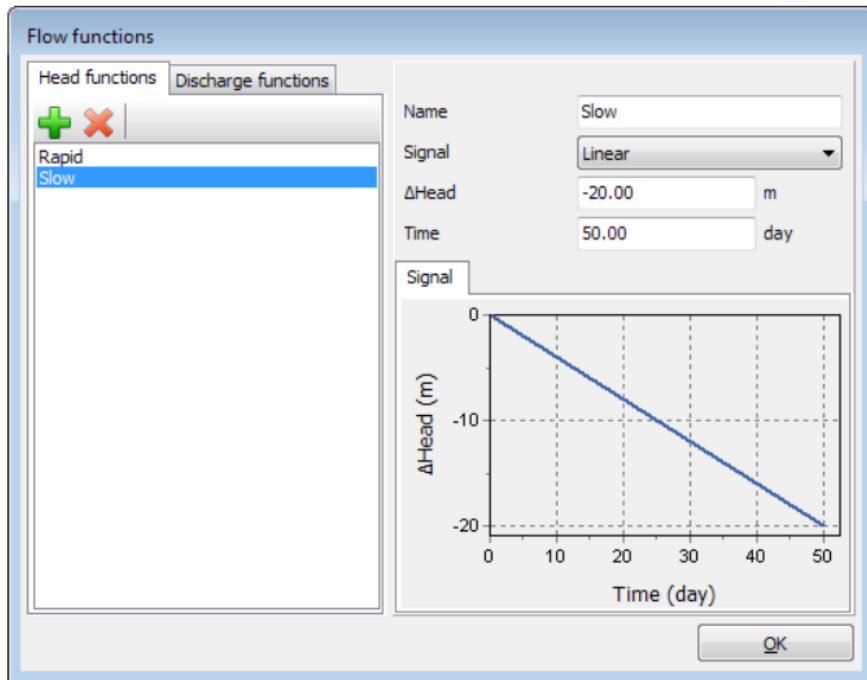







图 3.4 水位缓降工况下的渗流函数

6. 点击 *OK* 关闭渗流函数(*Flow functions*)窗口。
7.  添加一个新的计算阶段并重命名(如 *Slow drawdown*)
8. 设置开始阶段 (*Start from phase*)参数为高水位(*High reservoir*).
9.  设置计算类型(*Calculation type*)为完全流固耦合 (*Fully coupled flow-deformation*) .
10. 设置时间间隔为 50 天。
11. 在变形控制参数子树中，选择重置位移为零选项。
12. 点击 *OK* 关闭阶段窗口。
13. 在模型中选中全部地下水渗流面边界条件。
14. 在选择浏览器中选择慢速下降(*Slow*)选项作为水头函数
15. 钻孔水位 1(*BoreholeWaterLevel\_1*)仍然作为全局水位(*GlobalWaterLevel*)。



### 3.4 阶段 3：低水位

本阶段考虑低库水位下的稳态渗流工况

1.  添加一个新的计算阶段
2. 在阶段浏览器中双击新增加的计算阶段，则显示阶段窗口
3. 在常规设置子树中指定新计算阶段的名字(比如 *Low level*)
4. 设置开始阶段参数为高水位(*High reservoir*)
5.  设置计算类型为塑性(*Plastic*)选项。
6.  设置孔隙压力计算类型(*Pore pressure calculation type*)为稳态地下水渗流(*Steady state groundwater flow*)选项。
7. 在变形控制参数子树中，选择重置位移为零选项。
8. 点击 *OK* 关闭阶段窗口。
9. 在模型浏览器(*Model explorer*)中的关闭地下水渗流面边界条件(*BSs*)。
10. 在水力条件子树中选择低库水位(*Low\_Reservoir*)作为全局水位(*GlobalWaterLevel*)。

### 3.5 阶段 4 到 7：

阶段 4-7 分别为前述各阶段定义稳定性计算。

1.  在 *Phases explorer*(阶段浏览器)中选择相应的阶段，添加一个新的计算阶段并进入阶段窗口。
2.  设置计算类型(*Calculation type*)为安全性计算(*Safety*)。设置增量乘子(*Incremental multipliers*)为加载类型(*Loading type*)
3. 在变形控制子树中，选择重置位移为零(*Reset displacements to zero*)选项。
4. 在数值控制参数(*Numerical control parameters*)子树中，令阶段 4 的最大步数为 30，阶段 5-7 的最大步数为 50。阶段浏览器的最终视图如图 3.5 所示。

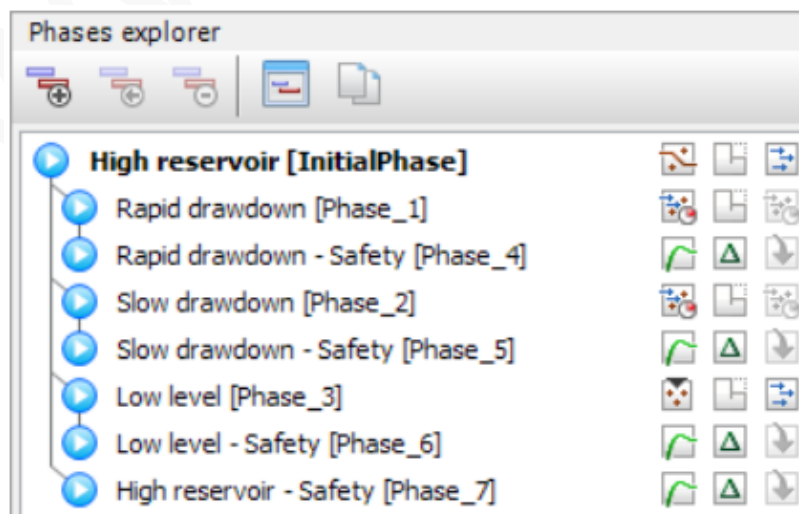




图 3.5 阶段浏览器 (phases explorer) 的最终视图



## PLAXIS 3D 2013 案例教程：水位快速下降分析



---

 在分步施工(*Staged construction*)模式中选择位于顶点(-2.5 25 30)处的节点。

 在分步施工(*Staged construction*)模式中点击计算(*Calculation*)按钮开始执行计算。

www.cisec.cn

## 查看结果

1.  计算结束后，点击查看计算结果(View the calculation result)按钮显示结果。输出(Output)窗口当前显示的是所选计算阶段的变形网格。
2. 在 *Stresses*(应力)菜单中指向孔隙压力(Pore pressure)选项，并在弹出菜单中选择  $p_{water}$  选项。
3.  定义一个通过(-130 15)和(130 15)的竖向剖面。
4. 按照孔隙水压力分布绘制的四种地下水渗流计算结果，如图 4.1 至 4.4 所示。四种不同的工况分别为：
5. 高(标准)库水位工况(图 4.1)

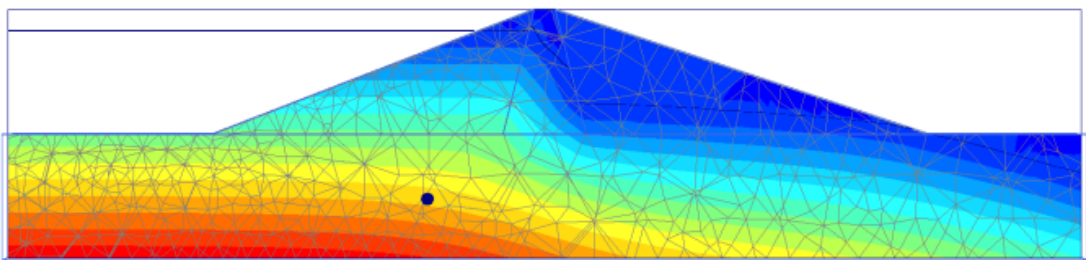


图 4.1 高库水位时的孔隙水压力分布

6. 水位快速下降后的工况(图 4.2)。

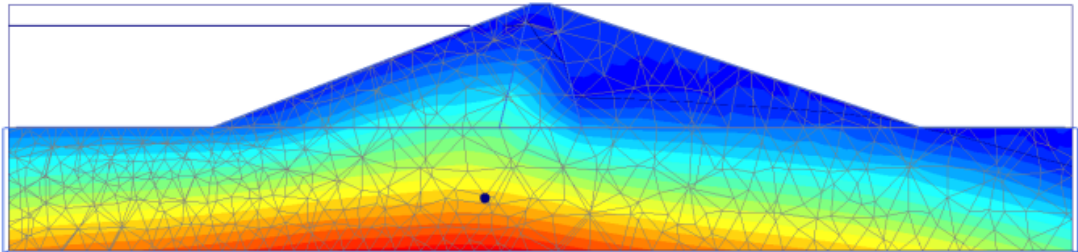


图 4.2 水位快速下降后孔隙水压力分布

7. 库水位缓慢下降后的工况(图 4.3)

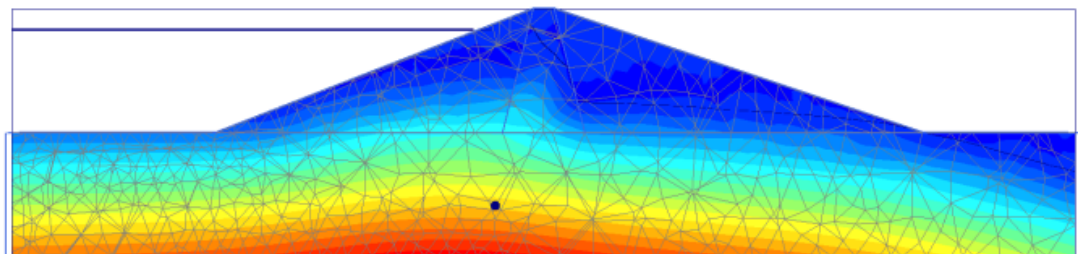


图 4.3 水位缓降后孔隙水压力分布

8. 低水位工况(图 4.4)

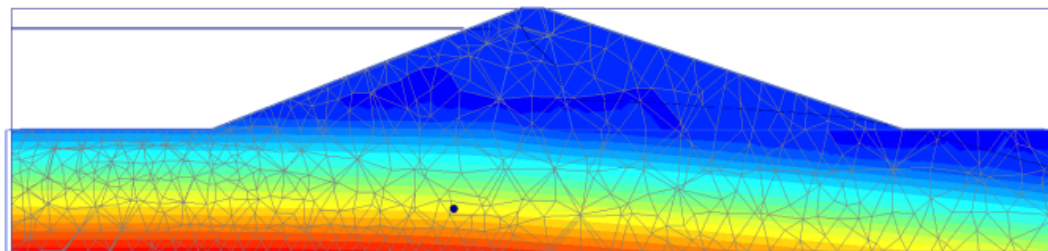


图 4.4 低水位时孔隙水压力分布

- 在变形分析中，当考虑孔隙水压力变化时，坝体将发生附加变形。这些变形和有效应力分布能从上述四个阶段计算结果的基础上查看。
- 由于本教程重点关注的是大坝在不同工况下的安全系数变化，因此 4-7 阶段的  $\Sigma$   $M_{sf}$  发展与坝顶节点的位移关系函数曲线绘制如图 4.5。

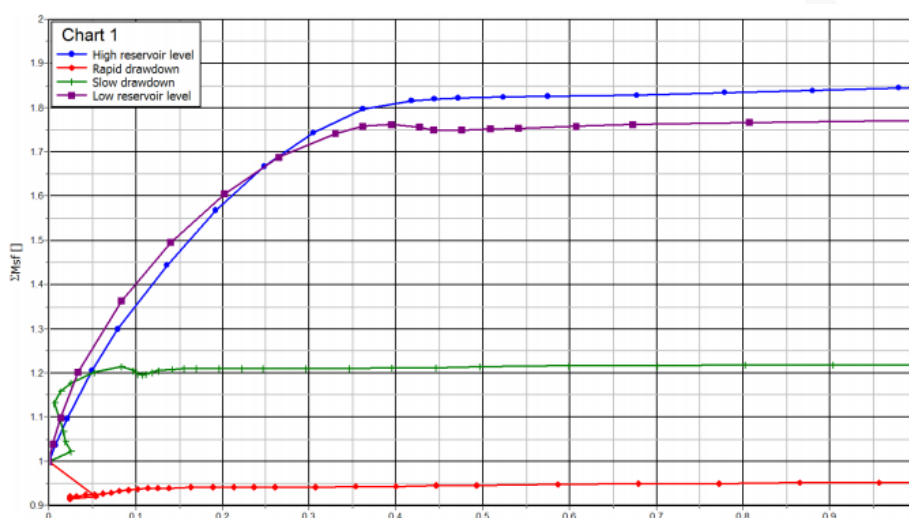


图 4.5 不同工况下的安全系数

库水位的快速下降能显著降低大坝的稳定性。利用 *PLAXIS 3D* 进行完全流固耦合分析与稳定性分析，能有效地分析此类工况。

本教程到此结束！

岩土工程有限元分析软件

**PLAXIS 3D 2016<sup>®</sup>**

## 案例教程

弹性地基上发电机的动力分析



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©, 2017.

## 目录

弹性地基上发电机的动力分析.....	1
几何建模.....	2
1.1 几何模型.....	2
1.2 土层定义.....	2
1.3 结构单元定义.....	3
网格生成.....	5
执行计算.....	6
3.1 不考虑阻尼的计算.....	6
3.2 考虑阻尼的计算.....	8
查看结果.....	9



---

## 弹性地基上发电机的动力分析

---

本章研究振动源对周围土体的影响。为了减少计算时间，根据对称边界条件，只考虑整个模型的四分之一部分。用瑞利阻尼来考虑由粘滞作用引起的物理阻尼。同时，由于径向波的传播，几何阻尼对减弱振动也有明显作用。

边界条件的模拟是动力计算的关键点之一。为了避免在模型边界上产生伪波反射(实际情况中是不存在的)，需要施加特殊的边界条件以吸收到达边界的振动波。



## 几何建模

振动源为建立在直径  $1\text{m}$ 、厚度  $0.2\text{m}$  混凝土基础上的发电机，见图 1.1。发电机产生的振动波通过基础传播到地基土层。振动波模拟为频率  $10\text{Hz}$ ，振幅  $10\text{kN/m}^2$  的统一谐波加载。除了基础的重量，发电机的重量模拟为  $8\text{kN/m}^2$  的均匀分布荷载。

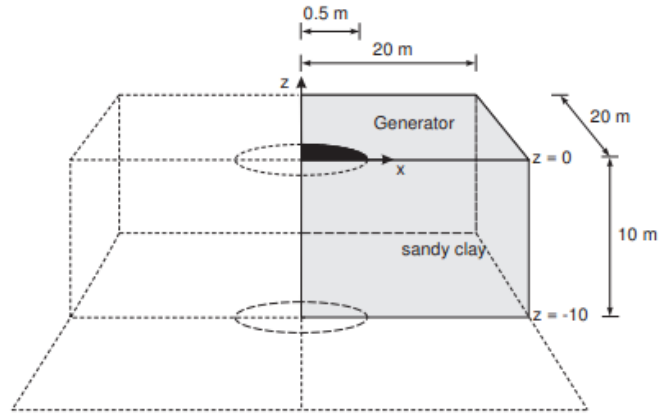


图 1.1 弹性地基上的发电机

模型边界距离关注区域应该足够远，以避免可能产生的反射波造成的干扰。尽管我们采取了特殊的措施(吸波边界)来避免伪波反射，但仍会存在一些小的影响，因此将边界设置足够远是一个好的习惯。动力分析中通常将边界设置得要比静力分析中远。

### 1.1 几何模型

1. 打开输入程序，从快速选择（Quick select）对话框中选择开始新项目（Start a new project）。
2. 在项目属性窗口输入合适的标题
3. 使用默认单位并设置模型尺寸： $X_{min}=0$ ， $X_{max}=20$ ， $Y_{min}=0$ ， $Y_{max}=20$ 。几何模型见图 1.2

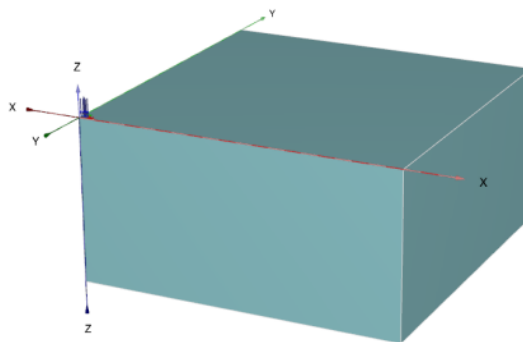


图 1.2 几何模型

### 1.2 土层定义

地基土由一层  $10\text{m}$  厚的土层组成。定义地表位于  $z=0$  处。按表 1.1 创建材料组并赋予土层材料属性。注意本例中将水位设置在  $z=-10$ ，不考虑水的作用。

表 1.1 土层材料性质

参数	名称	粉质黏土	单位
<b>常规</b>			
材料模型	<i>Model</i>	线弹性	—
排水类型	<i>Type</i>	排水	—
水位以上重度	$\gamma_{\text{unsat}}$	20.0	$\text{kN} / \text{m}^3$
水位以下重度	$\gamma_{\text{sat}}$	20.0	$\text{kN} / \text{m}^3$
<b>参数</b>			
杨氏模量	$E'$	$5 \cdot 10^4$	$\text{kN} / \text{m}^2$
泊松比	$\nu'$	0.3	—
<b>界面</b>			
界面强度	—	刚性	—
<b>初始条件</b>			
$K_0$ 确定	—	自定义	—
侧向土压力系数	$K_0$	0.5	—

### 1.3 结构单元定义



- 发电机在结构(Structures)模式中定义，采用多段线工具定义几何形状。
  -  点击工具栏中的创建多段线按钮。
  - 在一般页面中，采用默认形状选项（自由）和默认方向轴（x-轴，y-轴）。
  - 在线段页面中，定义了三段线段，如表 1.2。插入点位于(0,0,0)点。

表 1.2 构成多段线的线段

线段	线段 1	线段 2	线段 3
线段类型	直线	弧线	直线
线段属性	相对起始角度=0° 长度=0.5m	相对起始角度=90° 半径=0.5m 线段角度=90°	相对起始角度=90° 相对长度=0.5m



- 右击多段线，从弹出菜单中选择创建面(Create surface)选项。
  - 右击创建的面，从弹出菜单中选择创建面荷载(Create surface load)选项。
  -  在选择浏览器中单击面荷载(SurfaceLoad)前面的“+”号展开子树。
  - 采用均匀分布(Uniform distribution)，将压力分量赋值为(0 0 -8)
- 定义动力乘子

动荷载通过荷载或指定位移的输入值和相应的时间相关乘子来定义。

定义动荷载的乘子：

- 在模型浏览器(Model explorer)中展开属性库 (Attributes library) 子树。

## PLAXIS 3D 2016 案例教程：弹性地基上发电机的动力分析

- 2) 右击动力乘子(Dynamic multiplier)子树，从弹出菜单中选择编辑(Edit)选项，弹出乘子(Multipliers)窗口。
- 3) 点击荷载乘子(Load multiplier)页面
- 4)  点击添加按钮添加一个荷载乘子。
- 5) 定义一个振幅(Amplitude)为 10，频率(Frequency)为 10Hz，相位(Phase)为  $0^\circ$  的谐波信号。如图 1.3。
- 6)  在选择浏览器中点击 DynSurfaceLoad\_1 前面的“+”来展开动荷载子树。
- 7) 指定荷载分量为(0 0 -1)。点击动荷载子树中的 *Multiplier\_z* 并从弹出菜单中选择 *LoadMultiplier\_1*。

注：动荷载乘子可以在几何(Geometry)模式中定义，也可在计算(Calculation)模式中定义。

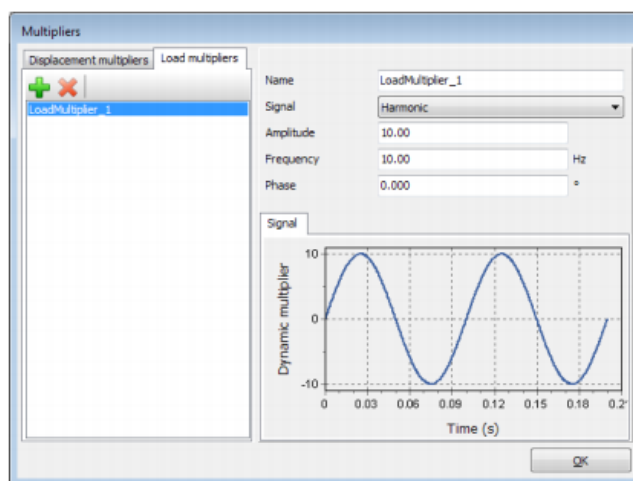




图 1.3 谐波(Harmonic)乘子的定义

## 网格生成

1. 进入网格(Mesh)模式。
2. 通过设置细化系数(*Fineness factor*)为 0.125 来细化发电机所对应的面的网格。
3.  点击生成网格(*Generate mesh*)按钮。单元分布(*Element distribution*)采用中等(*Medium*)选项。
4.  观察生成的网格。

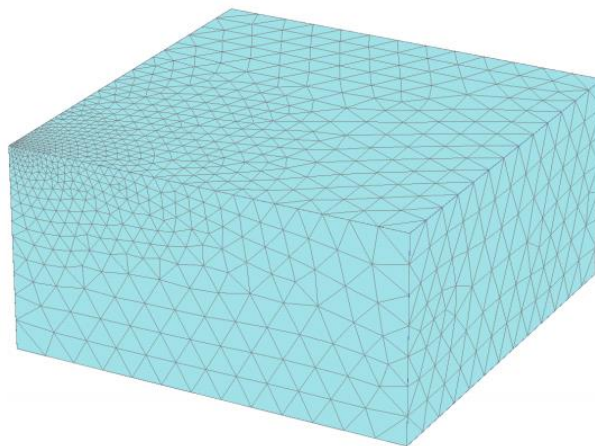


图 2.1 几何模型和网格

注：在所有动力分析中，用户要特别注意单元尺寸以减少波的数值频散。应该注意到尺寸大的单元不能传播高频波。波的传播由波速和波长共同控制。如果动力输入中包含高频波，要么高频波被过滤掉，要么使用更细的网格。

## 执行计算


### 3.1 不考虑阻尼的计算

计算包括四个阶段。初始阶段由  $K_0$  过程生成初始应力。第二个阶段是考虑静荷载的塑性(*Plastic*)计算。第三个阶段是考虑运行的发电机影响的动力(*Dynamic*)计算。第四个阶段，即最后一个阶段也是动力计算，关闭发电机，土体自由振动。

#### 1. 初始阶段

- 1) 点击分步施工(*Staged construction*)页面来定义计算阶段。
- 2) 初始阶段已经自动定义，本例中采用初始阶段的默认设置。

#### 2. 阶段 1

- 1)  添加一个新的阶段(阶段\_1)。此计算阶段使用默认设置。
- 2) 在分步施工(*Staged construction*)模式中激活面荷载的静力分量，不激活动荷载。(图 3.1)

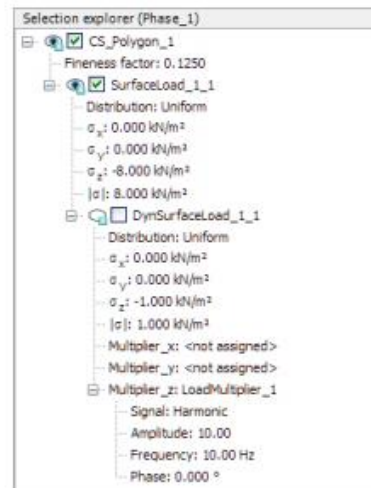




图 3.1 阶段\_1 中施加荷载

#### 3. 阶段 2

- 1)  添加一个新的阶段(阶段\_2)。
- 2)  在阶段窗口的一般设定子树中，选择动力(*Dynamic*)选项为计算类型。
- 3) 设置时间间隔参数为 0.5 s。
- 4) 在阶段窗口的变形控制参数(*Deformation control parameter*)子树中选择重置位移为零。计算阶段的其余参数采用默认值。
- 5) 在分步施工(*Staged construction*)模式中激活面荷载的动力分量。注意荷载的静力分量也是激活的。(图 3.2)

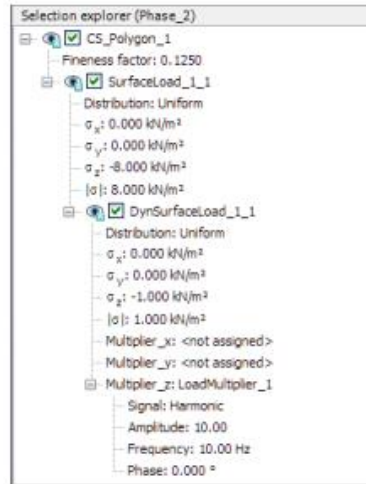


图 3.2 阶段\_2 中施加荷载



- 6) 实际土体是半无限介质，因此需要定义特殊的边界条件。如果没有这些特殊的边界条件，振动波将在模型边界上发生反射，造成扰动。为了避免这种不真实的反射，要在  $X_{max}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Z_{min}$  处指定粘性边界。在模型浏览器(Model explorer)中的模型条件(Model conditions)下的动态(Dynamics)子树中指定动力边界条件(图 3.3)



图 3.3 动力计算的边界条件

#### 4. 阶段 3

- 1) 添加一个新的阶段(阶段\_3)
- 2) 在阶段窗口的一般设定子树中，选择动力选项作为计算类型。
- 3) 设置时间间隔参数为 0.5s。
- 4) 在分步施工(Staged construction)模式中关闭面荷载的动力分量。注意静荷载仍然是激活状态。此阶段的动力边界条件应该和上一阶段相同。图 3.4 显示了本例的阶段浏览器。
- 5) 选择位于地表的节点（如(1.4 0 0)，(1.9 0 0)，(3.6 0 0)）以生成曲线。

6.  执行计算。
7.  保存工程。

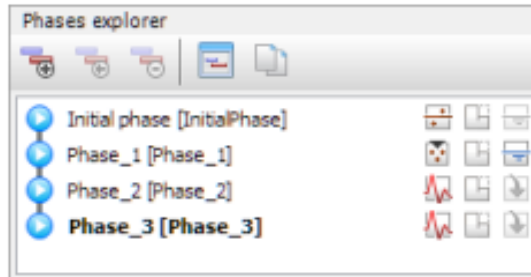


图 3.4 阶段浏览器

### 3.2 考虑阻尼的计算

第二次计算中,通过瑞利阻尼的形式引入材料阻尼。瑞利阻尼可以在材料组中进行输入。必要的一些步骤:

1. 用另一名字保存项目。
2. 打开土体材料组窗口。
3. 在常规页面中点击 *Rayleigh  $\alpha$*  参数旁边的框。注意常规 (*General*) 页面转为显示单自由度等效 (*Single DOF equivalence*) 框。
4. 设置两个目标的  $\xi$  参数均为 5%。
5. 分别将目标 1 (*Target1*) 和目标 2 (*Target2*) 的频率值设为 9 和 11。
6. 点击瑞利参数的其中一个定义框。程序会自动计算出  $\alpha$  和  $\beta$  的值。
7. 点击确定 (*OK*), 关闭数据组。
8. 查看各计算阶段是否正确定义(根据前面给出的信息), 然后开始计算。

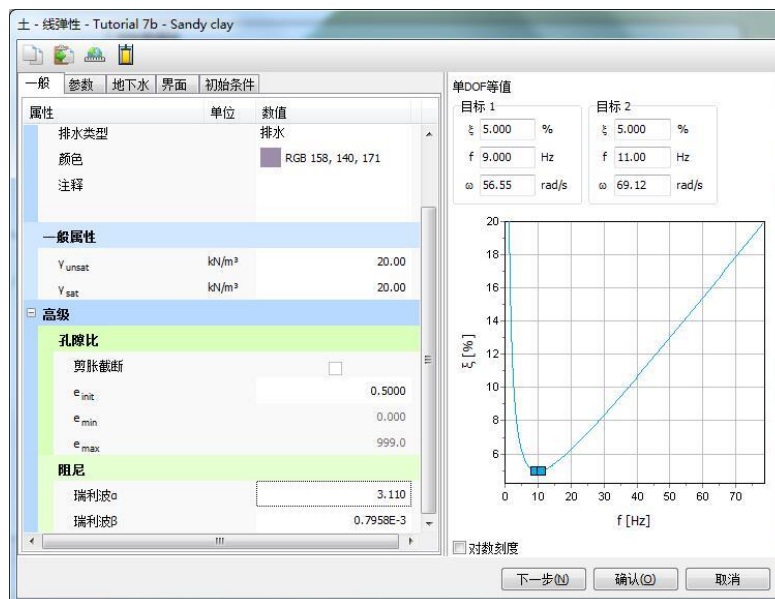


图 3.5 瑞利阻尼的输入

## 查看结果

曲线管理器工具对动力分析特别有用。可以很容易的绘制加载-时间曲线（输入值），以及选定点的位移、速度和加速度随时间变化的曲线。乘子随时间的变化曲线可以通过设定  $x$  轴为动力时间(Dynamic time),  $y$  轴为  $U_2$  来绘制。图 4.1 显示了结构表面选定点的响应。可以看出即使没有阻尼, 振动波也将由于几何阻尼而发生衰减。

图 4.2 中存在明显的阻尼现象。可以看出力被撤销之后( $t=0.5s$  时)一段时间, 振动波完全衰减掉。同时, 位移振幅也变得很小。对比图 4.1(无阻尼)和图 4.2(有阻尼)。

也可以通过选择变形 (Deformations) 菜单中适当的选项, 在输出程序中显示某一特定时间的位移, 速度和加速度。图 4.3 显示了阶段 2 结束时( $t=0.5s$ )土体内的总加速度。

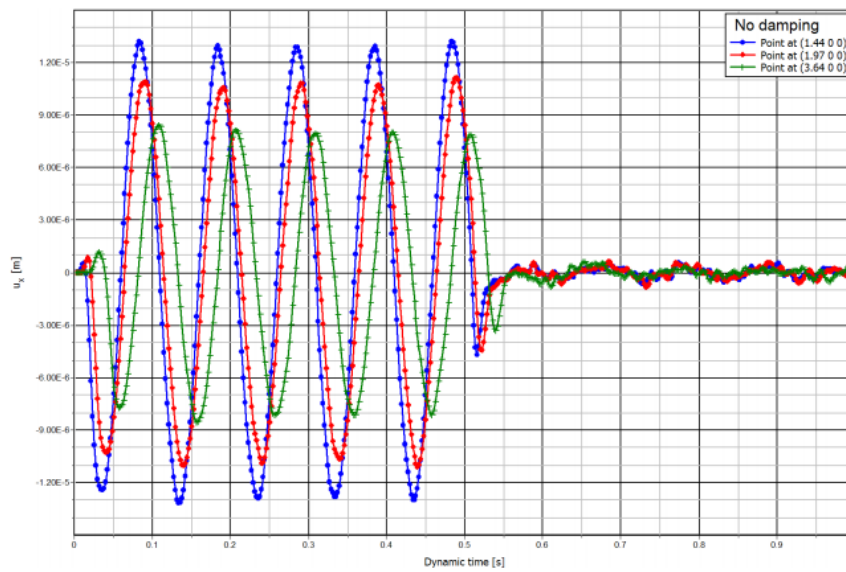


图 4.1 距振源不同距离处地表的垂直位移-时间曲线(无阻尼)

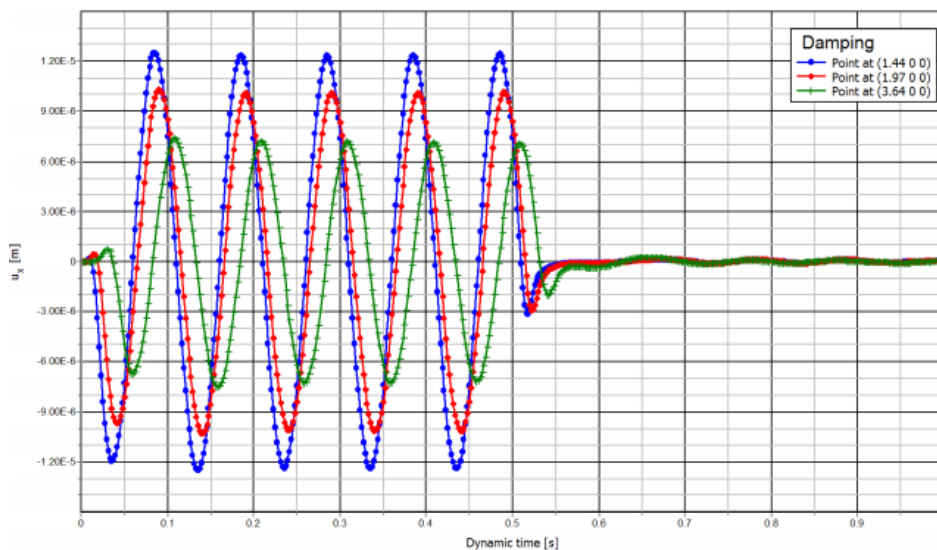


图 4.2 垂直位移-时间曲线(有阻尼)



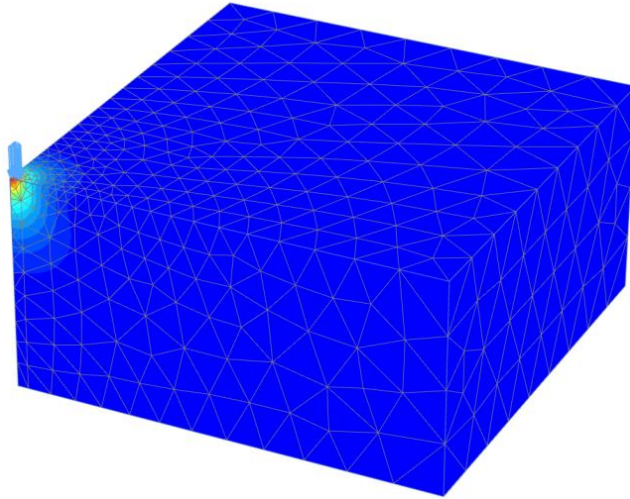


图 4.3 阶段 2 结束时土体中的总加速度(无阻尼)

本教程到此结束！

岩土工程有限元分析软件

**PLAXIS 3D 2016<sup>®</sup>**

## 案例教程

建筑物自由振动与地震分析



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©, 2017.

## 目录

建筑物自由振动与地震分析.....	1
几何建模.....	2
1.1 几何模型.....	2
1.2 土层定义.....	2
1.3 结构单元定义.....	4
网格生成.....	8
执行计算.....	9
结果查看.....	11



---

## 建筑物自由振动与地震分析

---

本例研究一个长条形五层建筑在自由振动和地震荷载作用下的固有频率问题。

该建筑地上五层,地下一层,宽  $10m$ ,高  $17m$ (含地下室)。地面以上总高度为  $5 \times 3m = 15m$ ,地下室埋深  $2m$ 。楼板和墙体重度按照  $5kN/m^2$  计算。建筑物建造在  $15m$  厚的黏土层之上,黏土层下部为深厚砂层。模型中考虑  $25m$  厚的砂层。

## 几何建模

建筑物的长度远大于其宽度，假设地震在建筑物宽度方向上起主要作用。考虑以上因素，模型中只考虑 3m 长的代表段以减小模型尺寸。模型几何体系如图 1.1 所示。

### 1.1 几何模型

1. 启动输入程序，从快速选择(Quick select)对话框中选择开始新工程(Start a new project)。
2. 在工程属性(Project properties)窗口的工程(Project)页面中，输入合适的名称。
3. 保持默认单位并设置模型边界为  $X_{min}=-80$ ， $X_{max}=80$ ， $Y_{min}=0$ ， $Y_{max}=3$ 。

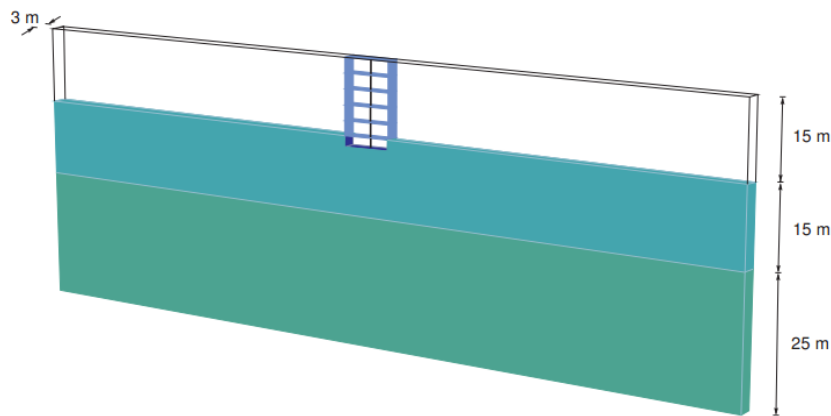


图 1.1 几何模型

### 1.2 土层定义

1. 地基土包含两层。上部黏土层，位于  $z=0$  和  $z=-15$  之间，下卧下部砂层展开至  $z=-40$ 。通过设置钻孔的水头(Head)为-15m 来定义潜水位。按照表 1.1 创建材料组集并赋给对应土层。上层土主要为黏土，下层土主要为砂土。忽略地下水作用。

表 1.1 地基土层材料属性表

参数	名称	上部粘土层	下部砂层	单位
<b>一般属性</b>				
材料模型	Model	HS small 模型	HS small 模型	--
排水类型	Type	排水	排水	--
地下水位以上重度	$\gamma_{unsat}$	16.0	20.0	$kN/m^3$
地下水位以下重度	$\gamma_{sat}$	20.0	20.0	$kN/m^3$
<b>参数</b>				
标准三轴排水试验的割线刚度	$E_{50}^{ref}$	$2.0 \times 10^4$	$3.0 \times 10^4$	$kN/m^2$
主固结加载下的切线刚度	$E_{oed}^{ref}$	$2.561 \times 10^4$	$3.601 \times 10^4$	$kN/m^2$
卸载/重加载刚度	$E_{ur}^{ref}$	$9.484 \times 10^4$	$1.108 \times 10^5$	$kN/m^2$
刚度与应力水平相关的幂值	$m$	0.5	--	--

内聚力	$c'_{ref}$	10	5	$kN/m^2$
摩擦角	$\varphi'$	18	28	°
剪胀角	$\psi$	0	0	°
泊松比	$\nu'_{ur}$	0.2	0.2	--
$G_s = 0.722G_0$ 时的剪切应变	$\gamma_{0.7}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$	--
小应变剪切模量	$G_0^{ref}$	$2.7 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5$	°

2. 当作用周期剪切荷载时，*HS small* 模型将表现出明显的滞后效应。从小应变剪切刚度  $G_0^{ref}$  开始，实际刚度将随着剪应变的增加而减少。图 1.2 和 1.3 展示了模量衰减曲线，比如剪切模量随应变的衰减。

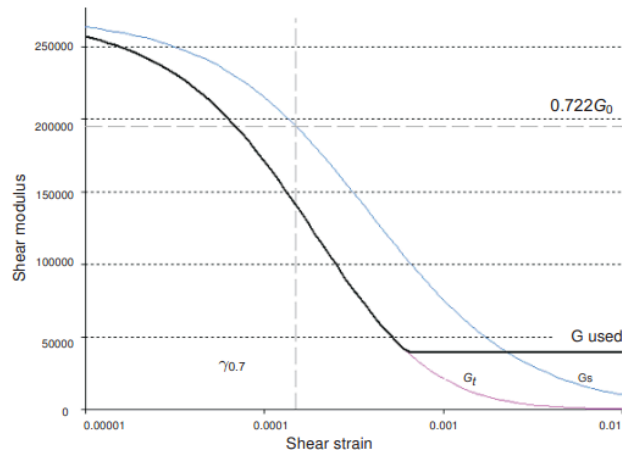


图 1.2 上部粘土层模量衰减曲线

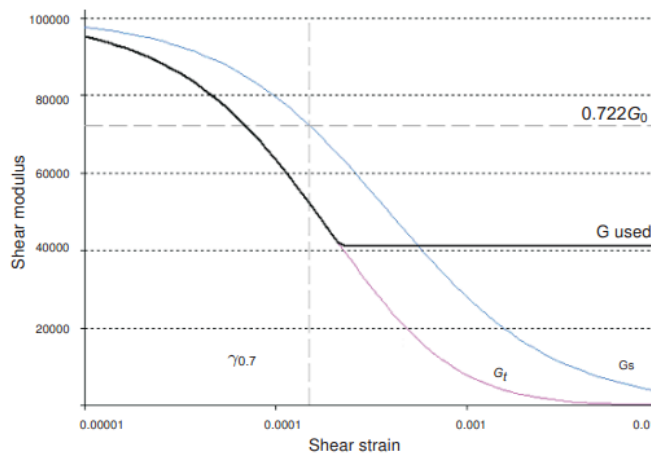


图 1.3 下部砂土层模量衰减曲线

3. 在 *HS small* 模型中，切线剪切模量下限值为  $G_{ur}$ :

$$G_{ur} = \frac{E_{ur}}{2(1+\nu_{ur})}$$



4. 表 1.2 为上部黏土层和下部砂土层的  $G_{ur}^{ref}$  值，及其与  $G_0^{ref}$  的比值。该比值决定了能够得到的最大阻尼比。

表 1.2  $G_{ur}$  值及其与  $G_0^{ref}$  的比值

参数	单位	上部粘土层	下部砂层
$G_{ur}$	$kN/m^2$	39517	41167
$G_0^{ref} / G_{ur}$	--	6.75	2.5

5. 图 1.4 和 1.5 为模型中材料的阻尼比与剪应变的函数关系。关于从模量衰减曲线到阻尼曲线的详尽描述可以参看相关文献。

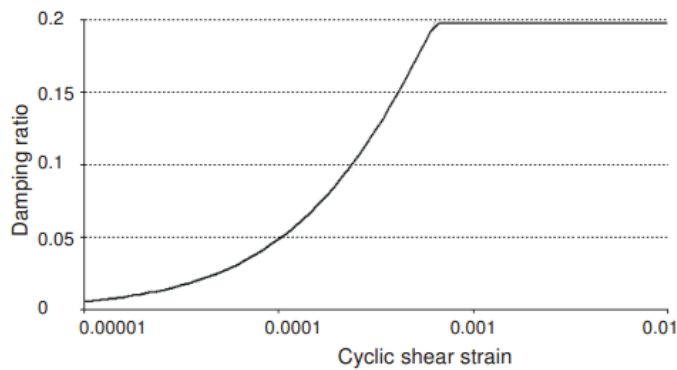


图 1.4 上部黏土层阻尼曲线

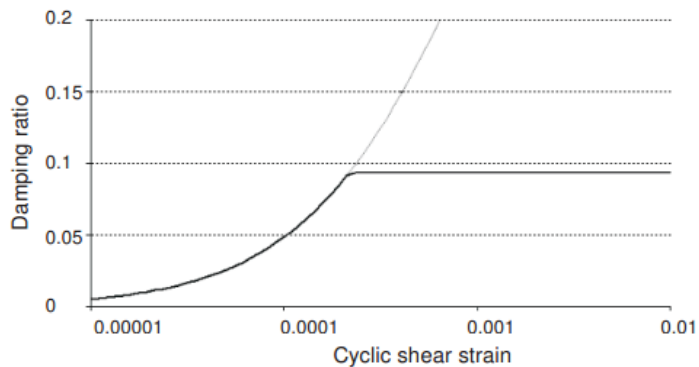


图 1.5 下部砂土层阻尼曲线

### 1.3 结构单元定义

模型的结构单元在结构(Structures)模式下定义，步骤如下：

1. 定义通过点(-5 0 -2)，(5 0 -2)，(5 3 -2)和(-5 3 -2)的面
2. 通过在 z 方向上定义一维阵列来复制面。设置列数为 2，间距为 2m。
3. 选中 z=0 的面，定义一个 z 方向的一维阵列，设置列数为 6，间距为 3m。
4. 定义通过点(5 0 -2)，(5 3 -2)，(5 3 15)和(5 0 15)的面



5.  通过在  $x$  方向上定义一维阵列来复制面。设置列数为 2，间距为-10m。
6. 选择  $z=0$  处垂直和水平方向的面
7. 右键点击选中面，在弹出的菜单中选择**相交并重组(Intersect and recluster)**选项。在**结构(Structures)模式**下进行相交运算非常重要，因为不同的材料组将分别赋给地下室和建筑物的其他部分。
8.  选中所有代表建筑物的面(包括地下室，楼层，墙体)，点击右键并从弹出菜单中选择**创建板(Create plate)**选项。
9. 按照表 1.3 为表示结构的板定义材料组。注意地下室和建筑物其他部分采用两种不同的材料组。
10. 对  $z=-2$  的水平板和地表以下的竖向板赋予地下室(**Basement**)材料属性。
11. 对模型中其余的板赋予对应的材料属性
12. 为了模拟建筑物地下室的结构-土相互作用，在地下室外侧创建界面。注意按照面的局部坐标系，创建正向或负向界面。

表 1.3 建筑物材料属性(板属性)

参数	符号	上部结构	地下室	单位
厚度	$d$	0.3	0.3	$m$
重度	$\gamma$	33.33	50	$kN/m^3$
材料属性	$Type$	线性、 各项同性	线性、 各项同性	--
杨氏模量	$E_1$	$3 \times 10^7$	$3 \times 10^7$	$kN/m^2$
瑞利阻尼	$\alpha$	0.2320	0.2320	--
	$\beta$	$8 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-3}$	--
泊松比	$\nu_{12}$	0	0	--






13. 结构的中柱采用**点对点锚杆(Node-to-node anchor)**模拟，按照以下步骤建立结构中柱：
  - 1)  创建一条通过点(0 1.5 -2)和(0 1.5 0)的线，对应地下室的柱。
  - 2)  创建一条通过点(0 1.5 0)和(0 1.5 3)的线，对应首层柱。
  - 3)  通过定义一个  $z$  方向的一维阵列，复制后一条线，设置列数为 5，间距为 3m。
  - 4)  选中创建的直线，右键点击并在弹出的菜单中选择创建**点对点锚杆(Create node-to-node anchor)**选项。
  - 5) 按照表 1.4 创建材料组并赋给点对点锚杆。

表 1.4 点对点锚杆材料属性

参数	符号	柱	单位
材料类型	$Type$	弹性	--
轴向刚度	$EA$	$2.5 \times 10^6$	$kN$

14. 在建筑的左上角施加一个  $10kN/m$  的横向力，步骤如下：

- 1)  创建一条通过(-5 0 15)和(-5 3 15)的直线。
  - 2) 指定荷载分量为(10 0 0)。
15. 地震作用通过在底边界上施加指定位移来模拟。建立指定位移的步骤为：
- 1)  创建一个通过点(-80 0 -40)，(80 0 -40)，(80 3 -40)和(-80 3 -40)的指定面位移。
  - 2) 指定位移的  $x$  分量设为指定(*Prescribed*)并赋值为 1.0，然后将指定位移的  $y$ ,  $z$  分量设为固定(*Fixed*)。分布形式默认为统一。
16. 定义指定位移的动力乘子：
- 1) 在模型浏览器(*Model explorer*)中展开属性库(*Attributes library*)子树，右键点击动力乘子(*Dynamic multipliers*)并在弹出菜单中选择编辑(*Edit*)选项。乘子(*Multipliers*)窗口弹出并显示位移乘子(*Displacement multipliers*)页面。
  - 2)  在乘子(*Multipliers*)窗口点击对应的按钮来添加一个乘子。
  - 3) 在信号(*Signal*)下拉菜单中选择表(*Table*)选项
  - 4) 包含地震数据的文件可以在 PLAXIS 知识库中得到 (<https://kb.plaxis.nl/search/site/smc>)。复制所有数据到一个文本编辑器文件(如记事本 *notepad*)并保存到你的电脑。
  - 5) 在网页浏览器中打开上述页面并复制所有数据。
  - 6)  在乘子(*Multipliers*)窗口中点击打开(*Open*)按钮，选择已保存的文件。在导入数据(*Import data*)窗口中的解析方法(*Parsing method*)下拉菜单中选择强震动观测 CD-ROM 文件(*Strong motion CD-ROM files*)选项，单击确定(*OK*)关闭窗口。
  - 7) 动力乘子(*Dynamic Multipliers*)窗口中显示数据表和数据图(图 1.6)。
  - 8) 在数据类型(*Data type*)下拉列表中选择加速度(*Acceleration*)选项。
  - 9) 在模型浏览器(*Model explorer*)中展开面位移(*Surface displacement*)子树，通过在下拉菜单中选择对应选项，将 *DisplacementMultiplier\_1* 赋给  $x$  分量。

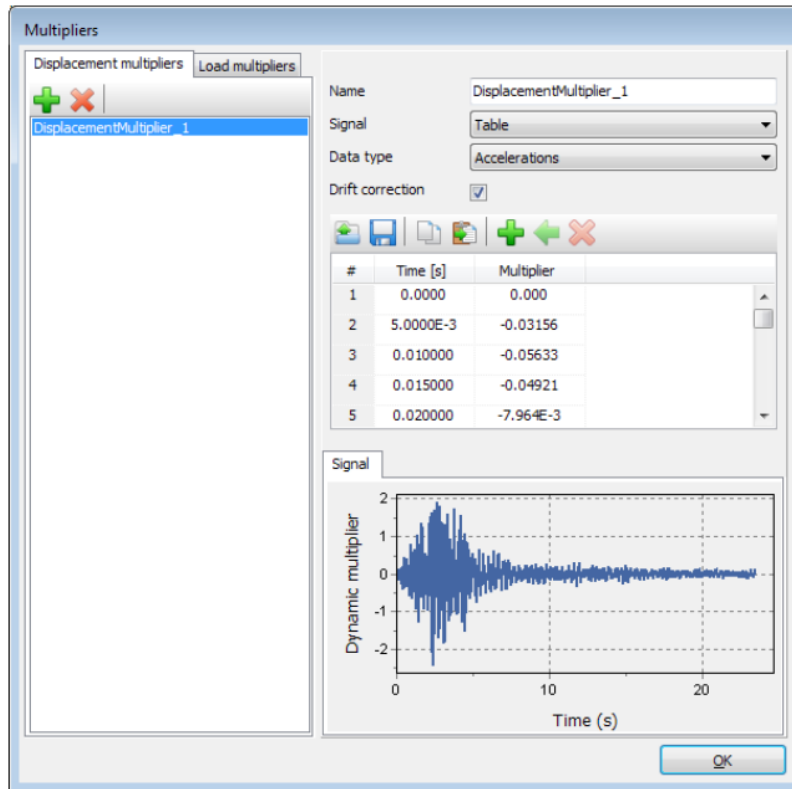


图 1.6 动力乘子窗口

## 网格生成

1. 进入网格(Mesh)模式。
2. 点击生成网格(*Generate mesh*)按钮。设置单元分布为细(*Fine*)。
3. 观察生成的网格(图 2.1)。

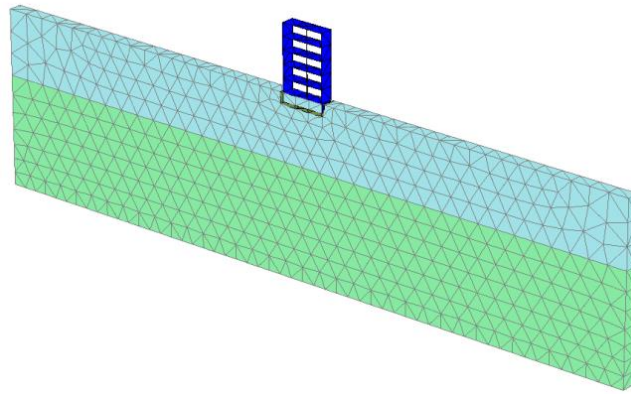


图 2.1 几何模型及网格


## 执行计算

计算过程包括初始条件阶段，建筑施工模拟，加载，自由振动分析和地震分析。

### 1. 初始阶段

- 1) 点击分步施工(*Staged construction*)页面，定义计算阶段。
- 2) 初始阶段已自动定义。本章将使用初始阶段的默认设置。
- 3) 在分步施工(*Staged construction*)模式中确认建筑物和荷载未激活。

### 2. 阶段一

- 1)  添加一个新的阶段(阶段\_1)。本计算阶段将使用默认设置。
- 2) 在分步施工(*Staged construction*)模式中建造建筑物(激活所有板，界面和锚杆)，冻结地下室的实体单元(图 3.1)

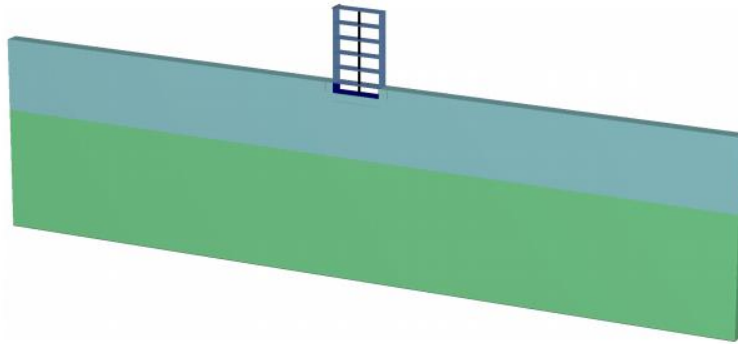





图 3.1 建筑物施工

### 3. 阶段二

- 1)  添加一个新的阶段(阶段\_2)
- 2) 在阶段(*Phases*)窗口中的变形控制(*Deformation control*)参数子树中选择重置位移为 0(*Reset displacement to zero*)。本计算阶段的其余参数将使用默认值。
- 3) 在分步施工(*Staged construction*)模式下激活线荷载。已经在结构(*Structures*)模式中已经定义了荷载值。

### 4. 阶段三




- 1)  添加一个新的阶段(阶段\_3)。
- 2)  在阶段窗口中选择动力 (*Dynamic*) 选项作为计算类型。
- 3) 设置时间间隔(*Time interval*)参数为 5 秒。
- 4) 在分步施工(*Staged construction*)模式中冻结线荷载。
- 5) 在模型浏览器(*Model explorer*)中展开模型条件(*Model conditions*)子树。
- 6) 展开动力(*Dynamic*)子树。默认 *x*, *y* 方向边界条件为粘性(*Viscous*)边界。*y* 方向边界条件选为无(*None*)。设置  $Z_{min}$  边界条件为粘性(*Viscous*)。

注：为了更好的查看结果，自由振动和地震可以创建为动画。为了创建动画，建议增加保存的计算步数，可以在阶段窗口的参数 (*Parameter*) 页面中将保存的最大步数 (*Max steps saved*) 参数设置为一个合适的值(图 3.2)。



图 3.2 动力计算的边界条件

5. 阶段四

- 1)  添加一个新的阶段(阶段\_4)。
  - 2) 在阶段窗口设置开始阶段(*Start from phase*)选项为阶段 1(建筑物施工)。
  - 3)  选择计算类型为动力计算。
  - 4) 设置动力时间间隔参数为 20 秒。
  - 5) 在变形控制参数子树中选择重置位移为零。本计算阶段的其余参数将使用默认值。
  - 6) 在模型浏览器(*Model explorer*)中激活面位移(*Surface displacement*)及其动力分量。此阶段中  $Z_{min}$  边界为非粘滞边界
6.  选择荷载位移曲线点(0 1.5 15)，(0 1.5 6)，(0 1.5 3)和(0 1.5 -2)。开始计算。

## 查看结果

1. 图 4.1 显示了阶段 2 结束时结构的变形情况(施加了水平荷载), 图 4.2 显示了自由振动阶段选定点 A(0 1.5 15),B(0 1.5 6),C(0 1.5 3)和 D(0 1.5 -2)处的位移时程曲线。从图中可以看出由于土体和建筑物的阻尼作用, 振动随时间逐渐衰减。
2. 在设置窗口的图表(Chart)页面的动力 (Dynamics) 框中, 选择使用频率表示法 (频谱) (Use frequency representation(spectrum)) 和 使用标准频率 (Use standard frequency(Hz)) 选项, 结果如图 4.3 所示。从图中可以估算出该建筑的主频率约为 1Hz。也可以创建自由振动与地震的结果动画以更好的查看结果。
3. 图 4.4 显示了地震阶段点 A(0 1.5 15)处的位移时程曲线。从图中可以看出由于土体和建筑物的阻尼作用, 振动随时间逐渐衰减。
4. 地震作用的时程特征通过快速傅立叶变换, 转化为标准化功率谱, 如图 4.5 所示。

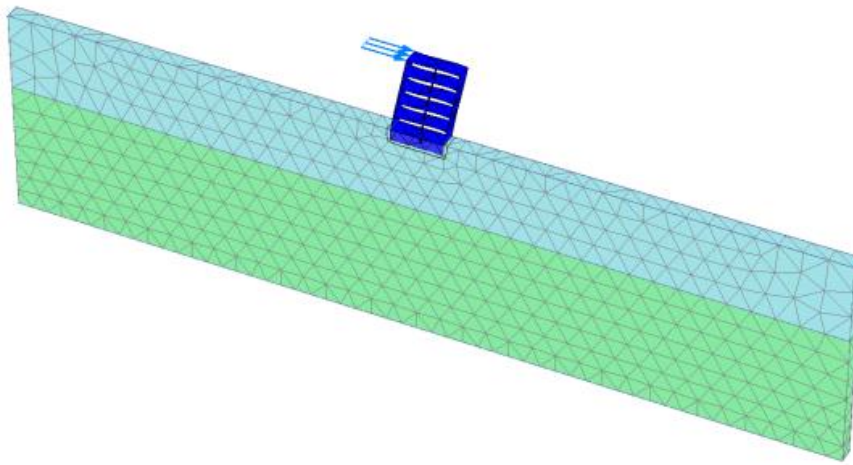


图 4.1 系统变形网格

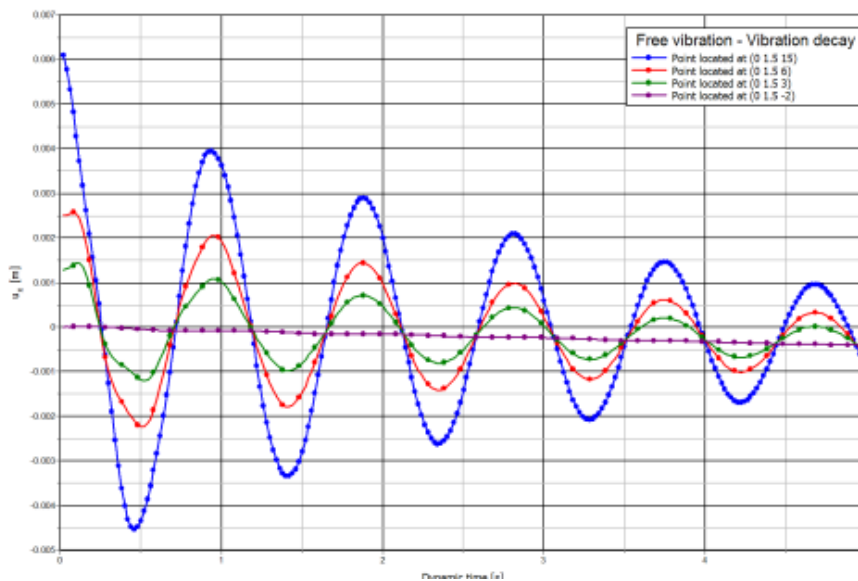


图 4.2 位移时程曲线(自由振动)



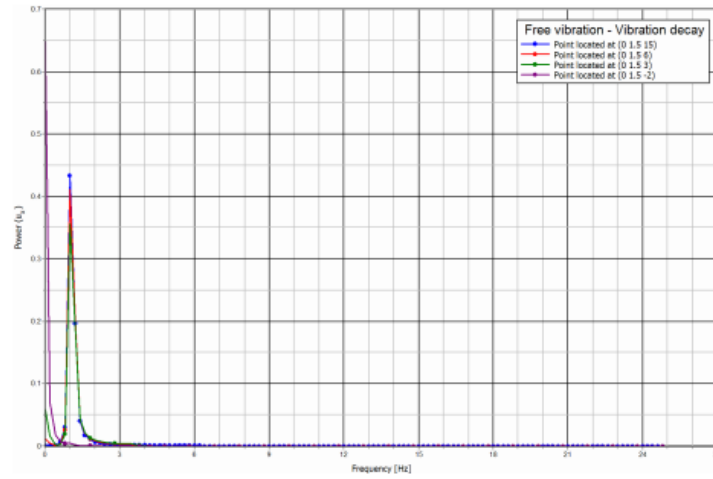


图 4.3 频率表示法(频谱-自由振动)

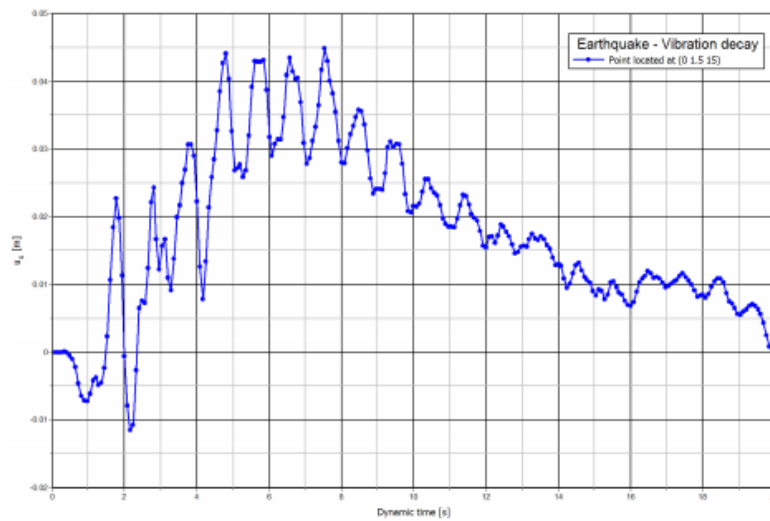


图 4.4 建筑物顶部的位移时程曲线(地震)

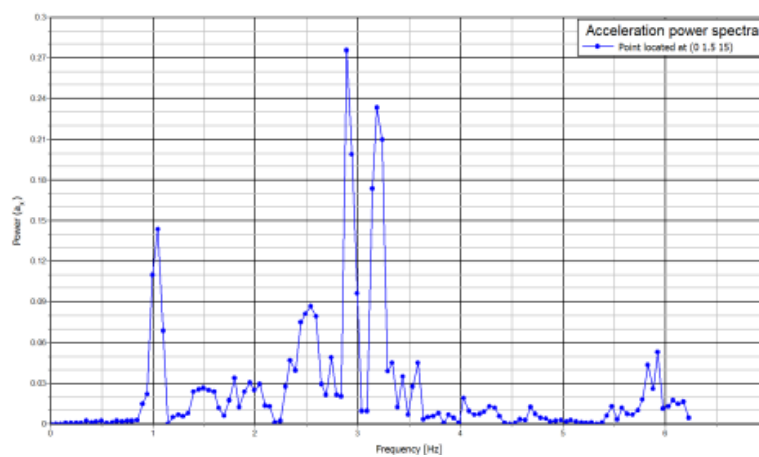


图 4.5 点(0 1.5 15)处的加速度功率谱

本教程到此结束！