PLAXIS

PLAXIS 3D 2024.2

教程手册 3D

Bentley®
Advancing Infrastructure

上次更新时间: 2024 年 4 月 12 日

目录

前言: 介绍 6

章节 1: 超固结黏土地基 7

1.1 工况 A：刚性地基 8
1.1.1 创建新项目 9
1.1.2 定义土壤地层学 11
1.1.3 创建和分配材料数据集 12
1.1.4 定义结构单元 17
1.1.5 生成网格 18
1.1.6 定义并执行计算 20
1.1.7 查看计算结果 23
1.2 工况 B：筏板地基 24
1.2.1 创建新项目 25
1.2.2 创建和分配材料数据集 26
1.2.3 定义结构单元 26
1.2.4 生成网格 30
1.2.5 定义并执行计算 30
1.2.6 查看计算结果 31
1.3 工况 C：桩筏地基 33
1.3.1 创建新项目 33
1.3.2 定义结构单元：基础桩 33
1.3.3 生成网格 35
1.3.4 定义并执行计算 36
1.3.5 查看计算结果 36

章节 2: 砂土挖掘 39

2.1 创建新项目 40
2.2 定义土壤地层学 40
2.3 创建和分配材料数据集 40
2.4 定义结构单元 42
2.4.1 腰梁和支柱 42
2.4.2 地锚杆 44
2.4.3 桩板墙和荷载 45
2.5 生成网格 47
2.6 定义计算 47
2.6.1 执行计算 49
2.7 结果 50

章节 3: 装载吸力桩 54

3.1 创建新项目 54
3.2 定义土壤地层学 55
3.3 创建和分配材料数据集 55
3.4 定义结构单元 56
3.4.1 创建吸力桩 56

3.4.2 创建局部网格细化的辅助对象 60
3.5 生成网格 61
3.6 定义计算 62
3.6.1 初始阶段：初始条件 62
3.6.2 第 1 阶段：安装吸力桩 62
3.6.3 第 2 阶段：荷载桩 30 度 62
3.6.4 第 3、4、5、6 阶段： 不同方向角的荷载桩 63
3.6.5 执行计算 63
3.7 结果 63

章节 4: 地连墙挖掘的稳定性 65

4.1 创建新项目 65
4.2 定义土壤地层学 66
4.3 创建和分配材料数据集 66
4.4 地连墙的定义 67
4.5 生成网格 68
4.6 定义计算 69
4.6.8 执行计算 71
4.7 结果 71

章节 5: 盾构隧道的分阶段挖掘 [GSE] 74

5.1 创建新项目 74
5.2 定义土壤地层学 75
5.3 创建和分配材料数据集 75
5.4 结构单元的定义 76
5.4.1 创建隧道横截面 77
5.4.2 隧道属性的定义 80
5.4.3 轨迹 84
5.4.4 排序 86
5.5 生成网格 96
5.6 定义并执行计算 97
5.6.1 初始阶段 97
5.6.2 第 1 阶段：TBM 的初始位置 98
5.6.3 第 2 阶段：TBM 推进 1 101
5.6.4 第 3 阶段：TBM 推进 2 102
5.6.5 第 4 阶段：TBM 推进 3 102
5.6.6 第 5 阶段：TBM 推进 4 102
5.7 结果 102

章节 6: 路堤施工 [ADV] 104

6.1 创建新项目 104
6.2 定义土壤地层学 105
6.3 创建和分配材料数据集 105
6.4 路堤和地漏的定义 107
6.5 生成网格 109
6.6 定义计算 109
6.6.1 初始阶段 110
6.6.2 固结分析 110
6.6.3 执行计算 112
6.7 结果 112
6.8 安全分析 115
6.9 使用地漏 118

章节 7: 快速下降分析 [ULT] 120

7.1 创建新项目 120
7.2 定义土壤地层学 121
7.3 创建和分配材料数据集 121
7.4 定义水坝 122
7.5 生成网格 123
7.6 定义并执行计算 124
7.6.1 初始阶段：高蓄水池水位 125
7.6.2 第 1 阶段：快速下降 126
7.6.3 第 2 阶段：慢速下降 127
7.6.4 第 3 阶段：低水位 128
7.6.5 第 4 阶段至第 7 阶段 129
7.6.6 执行计算 129
7.7 结果 129

章节 8: 弹性地基上生成器的动力分析 [ULT] 134

8.1 创建新项目 134
8.2 定义土壤地层学 135
8.3 创建和分配材料数据集 135
8.4 结构单元的定义 136
8.5 生成网格 137
8.6 定义并执行计算 138
8.6.1 初始阶段 138
8.6.2 第 1 阶段：承台 139
8.6.3 第 2 阶段：启动生成器 139
8.6.4 第 3 阶段：停止生成器 141
8.6.5 执行计算 142
8.6.6 附加阻尼计算 142
8.6.7 结果 143

章节 9: 建筑自由振动和地震分析 [ULT] 145

9.1 定义几何 145
9.2 定义土壤地层学 146
9.3 创建和分配材料数据集 146
9.4 结构单元的定义 150
9.4.1 创建建筑 150
9.4.2 创建荷载 151
9.4.3 在边界创建界面 152
9.5 生成网格 153
9.6 定义并执行计算 153
9.6.1 初始阶段 154
9.6.2 第 1 阶段 - 建筑施工 154
9.6.3 第 2 阶段 - 激发 154
9.6.4 第 3 阶段 - 自由振动 154
9.6.5 第 4 阶段 - 地震 155
9.6.6 执行计算 157
9.7 结果 157

附录 160

附录 A: 土体重量引起的初始应力的计算方案 161

介绍

PLAXIS 3D 是一个有限元包，专为岩土工程项目中的变形、稳定性和水流分析而开发。这种简单的图形输入程序能够快速生成复杂的有限元模型，而增强的输出工具可以详细呈现计算结果。计算本身是全自动的，以强大的数值程序为基础。这一概念使新用户在仅仅几小时的培训后便能用包处理工作。

尽管各种教程涉及多种要了解的实际应用程序，但教程手册旨在帮助新用户熟悉 PLAXIS 3D。因此，教程和各自的材料数据集不能用作实际项目的基础。

用户应对土体力学有基本的了解，并应能够在 Windows 环境中工作。强烈建议遵循教程手册中的顺序。请注意，结果可能有轻微差别，具体取决于硬件和软件配置。

教程手册既不提供关于有限元方法的理论背景信息，也不解释程序中提供的各种土体模型的细节。后者可在整个手册中包括的材料模型手册中找到，理论背景见科学手册。有关可用程序功能的详细信息，请参阅参考手册。除了整套手册之外，我们也在全球几个地点定期安排短课程，以提供关于程序使用的实践经验和背景信息。

可用教程及许可级别：

鉴于为单独的许可服务提供了 PLAXIS 3D 功能和土体模型，当前的教程手册可随之前安装的具体许可级别提供。

有关许可级别的详细信息，请访问：通用信息手册、 参考手册 和材料模型手册）。

总的来说，每个许可级别的教程可以按照以下约定分辨：

- 没有标识的教程 - 对 PLAXIS 3D 许可证普遍开放。
- [ADV] - 针对有 PLAXIS 3D Advanced 许可证的用户的教程。
- [ULT] - 针对有 PLAXIS 3D Ultimate 许可证的用户的教程。
- [GSE] - 针对有 Geotechnical SELECT 订阅的用户的教程（需要之前的 Basic、Advanced 或 Ultimate 许可级别）。

1 超固结黏土地基

本章中讨论 PLAXIS 3D 首次应用，即黏土地基的沉降。这是熟悉 PLAXIS 3D 程序实际应用的第一步。

在此详细描述了创建几何图形，生成有限元网格，执行有限元计算以及评估输出结果的一般过程。本教程提供的信息将在后面的教程中应用。因此，请务必先完成第一个教程，再尝试探讨进一步教程示例。

几何图形

本练习涉及以轻度超固结的湖积黏土建造和装载方形建筑的地基。黏土层下面是坚硬的岩石层，形成了所考虑几何图形的天然边界。几何图形中不包括岩石层，而是在黏土层底部应用相应的边界条件。本练习的目的是找到地基沉降。

该建筑由地下一层和地上五层组成。为了减少计算时间，使用沿着对称线的对称边界条件，仅对建筑的四分之一进行建模。为使黏土中实现任何可能的机制并避免外部边界的影响，模型在两个水平方向上延伸至总半径为 75 米。

该模型在三种不同的工况下被考虑：

- 工况 A：建筑被认为非常坚硬和粗糙。地下室通过无孔线弹性体积单元来模拟。
- 工况 B：结构内力被模拟为筏板地基上的荷载。
- 工况 C：模型中包含预埋梁以减少沉降。

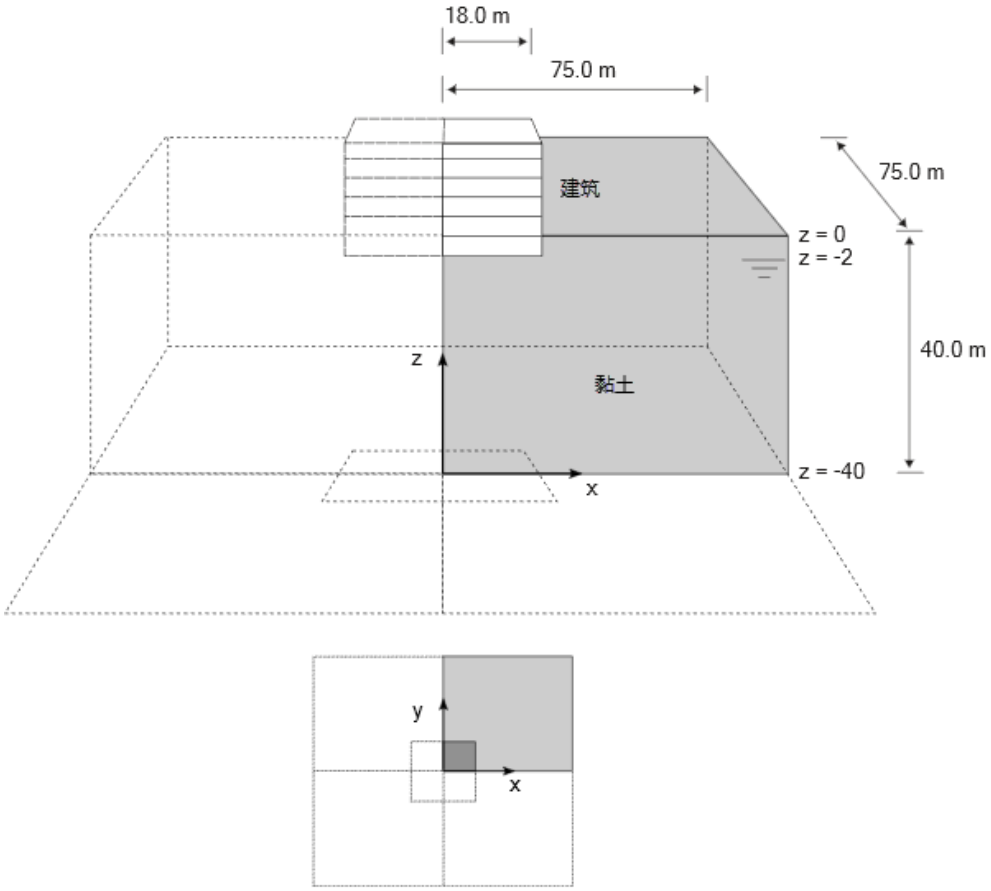


图 1: 筏板地基上方形建筑的几何图形

1.1 工况 A：刚性地基

在此工况中，建筑被认为非常坚硬。地下室通过无孔线弹性体积单元来模拟。地下室的总重量对应建筑的总永久和可变荷载。此方法将得出非常简单的模型，因此作为第一个练习使用，但它有一些缺点。例如，不能提供有关地基中结构内力的信息。

目标

- 开始新项目。
- 使用单个钻孔创建土壤地层学。
- 创建材料数据集。
- 使用**创建表面**和**拉伸**工具创建体积。
- 分配材料。
- 局部网格细化。
- 生成网格。
- 使用 K_0 程序生成初始应力。
- 定义**塑性**计算。

1.1.1 创建新项目

1. 双击输入程序图标，启动 PLAXIS 3D。

   将出现**快速启动**对话框，您可以在这里新建项目或选择一个现有项目（请参阅图 2(第 9 页)）。



图 2: 快速启动窗口

2. 单击**开始新项目**。

   将显示**项目属性**窗口（请参阅图 3(第 10 页)），其中包含以下页面：**项目**、**模型**和**云服务**。



图 3: 项目属性窗口

注释:

每一次分析的第一步都是设置有限元模型的基本参数。在**项目属性**窗口中完成此步骤。这些设置包括描述问题、模型类型、单元基本类型、基本单位和绘图区域大小。

按照下方步骤输入承台计算的适当设置。

3. 在**项目**页面中，在**标题**框中输入教程 1，并在**注释**框中键入地基沉降。
4. 单击底部的**下一步**按钮或单击**模型**选项卡。
   模型属性如图 4(第 11 页) 所示：

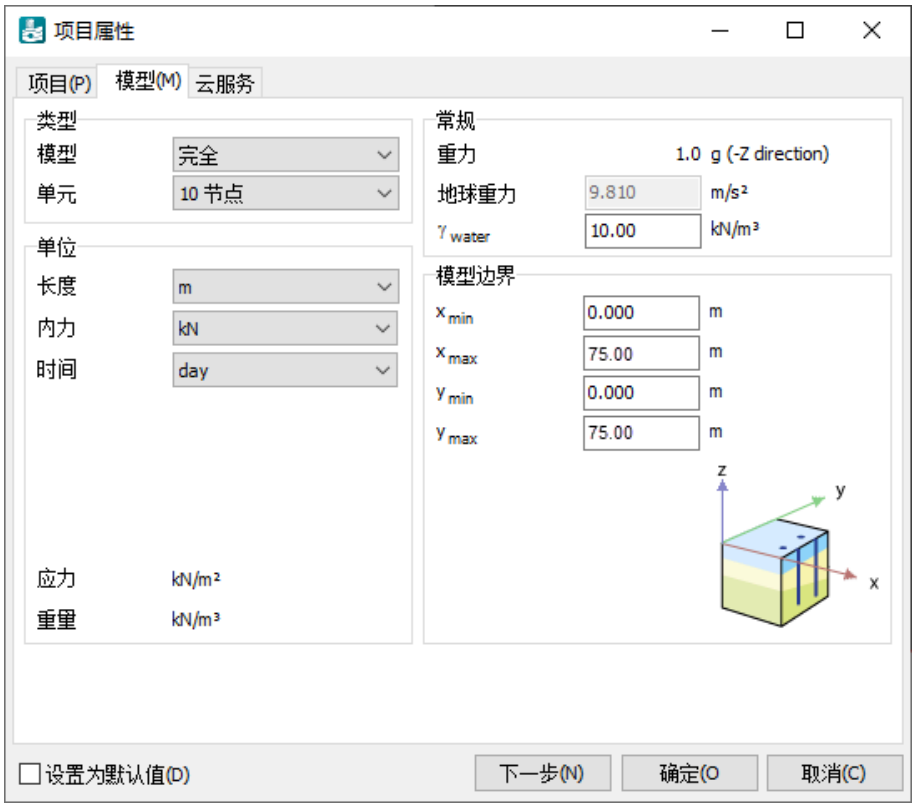


图 4: 项目属性 - 模型选项卡

5. 在**单位**框中保留缺省单位（长度 = m；内力 = kN；时间 = day）。
6. **常规**框表示在垂直向下方向 (-z) 上的固定重力为 1.0 G。
7. 在 γ_{water} 框中可以定义水的单位重量。将其保留为缺省值 10 kN/m^3。
8. 在**模型边界**组中将模型尺寸设置为：
   a. x_{min} = 0.0 且 x_{max} = 75.0，
   b. y_{min} = 0.0 且 y_{max} = 75.0。
9. 单击**确定**按钮以确认此设置。

项目将以此给定属性创建。**项目属性**窗口关闭，将显示**土体模式**视图，可以在此处定义土壤地层学。

注释: 今后可以更改项目属性。您可以通过选择菜单**文件** > **项目属性...**来访问项目属性。

1.1.2 定义土壤地层学

在 PLAXIS 3D 的**土体模式**中，可以定义土壤地层学。

在钻孔中输入有关土层的信息。钻孔是在绘图区域中的位置，其中给出了土层位置和地下水位信息。如果定义了多个钻孔，PLAXIS 3D 将自动在钻孔之间插值，并从钻孔信息中得出土层的位置。

注释: PLAXIS 3D 还可以处理不连续的层，即仅在模型区域中局部存在的层。有关详细信息，请参阅 参考手册 中有关多个钻孔的信息。

在当前示例中，仅存在一个土层，并且仅需要一个钻孔来定义土壤地层学。要定义钻孔，请执行以下步骤：

1. 在边栏中单击**创建钻孔**按钮 ，开始定义土壤地层学。
2. 单击几何图形中的位置 (0 0 0)。

   钻孔将位于 (x,y) = (0 0)。

   此时将显示**修改土层**窗口（请参阅图 5(第 12 页)）。
3. 单击**修改土层**窗口中的**添加**按钮，添加土层。
4. 保持土层的顶部边界位于 z = 0，将底部边界设为 z = -40 米。
5. 将水头设置为 -2.0 米。

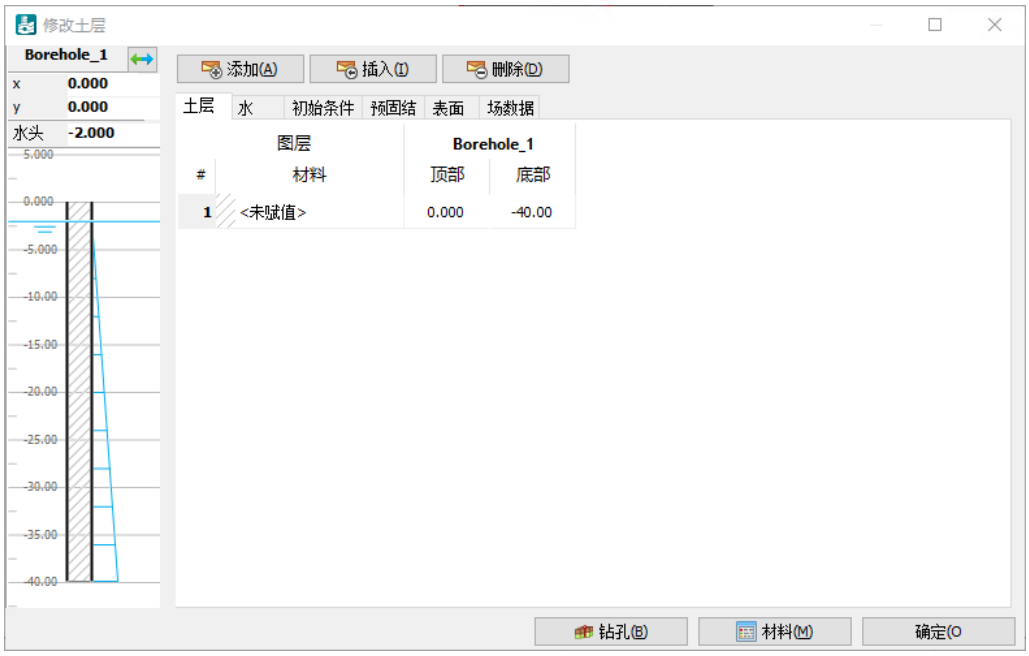


图 5: 修改土层窗口

接下来，定义材料数据集，并将其分配至土层。

1.1.3 创建和分配材料数据集

为了模拟土体的行为，必须向几何图形分配一个合适的材料模型和适当的材料参数。在 PLAXIS 3D 中，土体属性收集在材料数据集中，各种数据集存储在材料数据库中。从数据库中，一个数据集可以分配给一个或多个类组。对于结构（如梁、板等）而言，系统是相似的，但不同类型的结构具有不同的参数，因此具有不同类型的数据集。

PLAXIS 3D 区分**土体和界面**、**岩石结构面**、**板**、**土工格栅**、**梁**、**预埋梁**和**锚杆**的材料数据集。

本教程中使用的材料显示在表 1(第 13 页)中，它们用作**土体和界面**的材料数据集。

表 1: 材料属性

属性	名称	湖积黏土	建筑	单位
常规				
土体模型	模型	摩尔-库伦	线弹性模型	-
排水类型	类型	排水	非多孔	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	17.0	50	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	18.0	-	kN/m^3
力学				
杨氏弹性模量	E'_{ref}	$1 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^7$	kN/m^2
泊松比	$\nu(nu)$	0.3	0.15	-
粘聚力	c'_{ref}	10	-	kN/m^2
摩擦角	$\varphi'\ (phi)$	30.0	-	度
剪胀角	$\psi\ (psi)$	0.0	-	度
初始				
K_0	-	自动	自动	-
侧土压力系数	K_0	0.5000	0.5000	-

若要创建本教程的材料集，请执行以下步骤：

1. 单击**修改土层**窗口或边栏中的**材料**按钮 。
   此时将弹出**材料集**窗口，如图 6(第 14 页) 所示。



图 6: 材料集窗口

注释: 或者，可以通过双击绘图区域的钻孔或选择菜单**土体** > **修改图层**来重新打开**修改土层**窗口。

创建湖积黏土材料集

首先创建黏土材料集：

1. 单击**材料集**窗口下侧的**新建**按钮。
   此时将出现**土体**窗口（请参阅图 7(第 15 页)）。它包含五个页面：**常规**、**力学**、**地下水**、**界面**和**初始**。
2. 在**常规**页面的**材料集**部分的**标识**字段中，键入 `Lacustrine Clay`。
3. 从**土体模型**下拉菜单中选择 Mohr-Coulomb 模型，从**排水类型**下拉菜单中选择排水。

   注释: 若要了解为何选择了某种特定的土体模型，请访问材料模型手册附录 B。
4. 根据表 1(第 13 页)中列出的材料数据，在**单位重量**框中输入单位重量。将未提及的**孔隙比**参数保持为其缺省值。

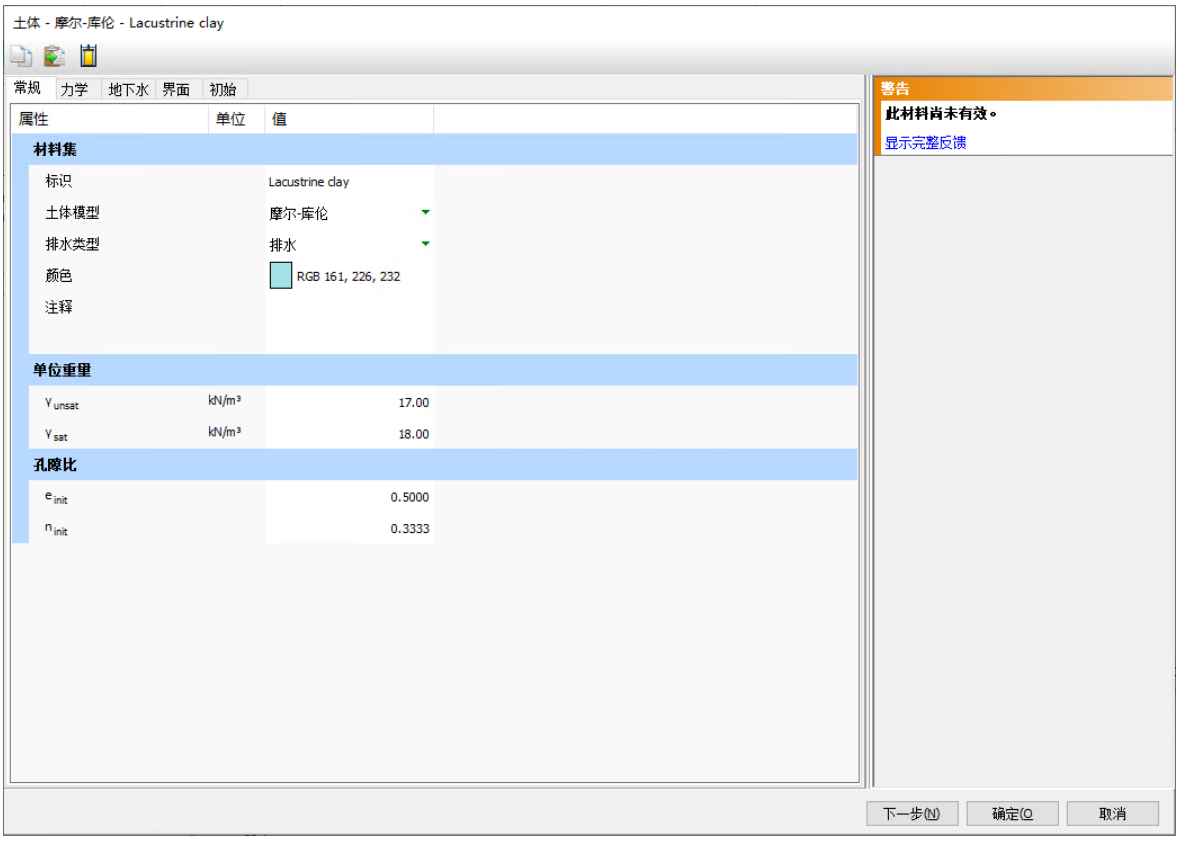


图 7: 土体和界面数据集窗口的常规页面

注释:

1. 如图 7(第 15 页) 所示，**土体**窗口中包含一个**反馈侧面板**。此面板可防止定义无效的材料数据集。要显示详细消息列表，请选择*显示完整反馈*。有三种消息类型：
   - **错误：**必须更改参数值或参数值组合，否则材料集可能无效，项目计算将受阻。
   - **警告：**参数值似乎偏离了推荐的参数值或参数范围。一般情况下，材料集不会被视为无效，计算项目不会受阻。但是，所选参数可能会导致意外结果。
   - **提示：**输入的参数可以在特定情况或选项下定义。
2. 在定义材料和结构时会显示**反馈侧面板**。为方便起见，此面板将仅在一些教程示例中显示。

5. 单击**下一步**按钮或单击**力学**选项卡，继续输入力学参数。
   力学页面上出现的参数取决于所选的材料模型（在本例中为 Mohr-Coulomb 模型）。Mohr-Coulomb 模型涉及五个基本参数（E'_{ref}、ν、c'_{ref}、φ'、ψ）。

注释: 请参考材料模型手册，了解不同土体模型及其相应参数的详细说明。

6. 根据表 1(第 13 页)在**力学**标签的相应框中输入**湖积黏土**的模型参数 E'_{ref}、ν、c'_{ref}、φ' 和 ψ。

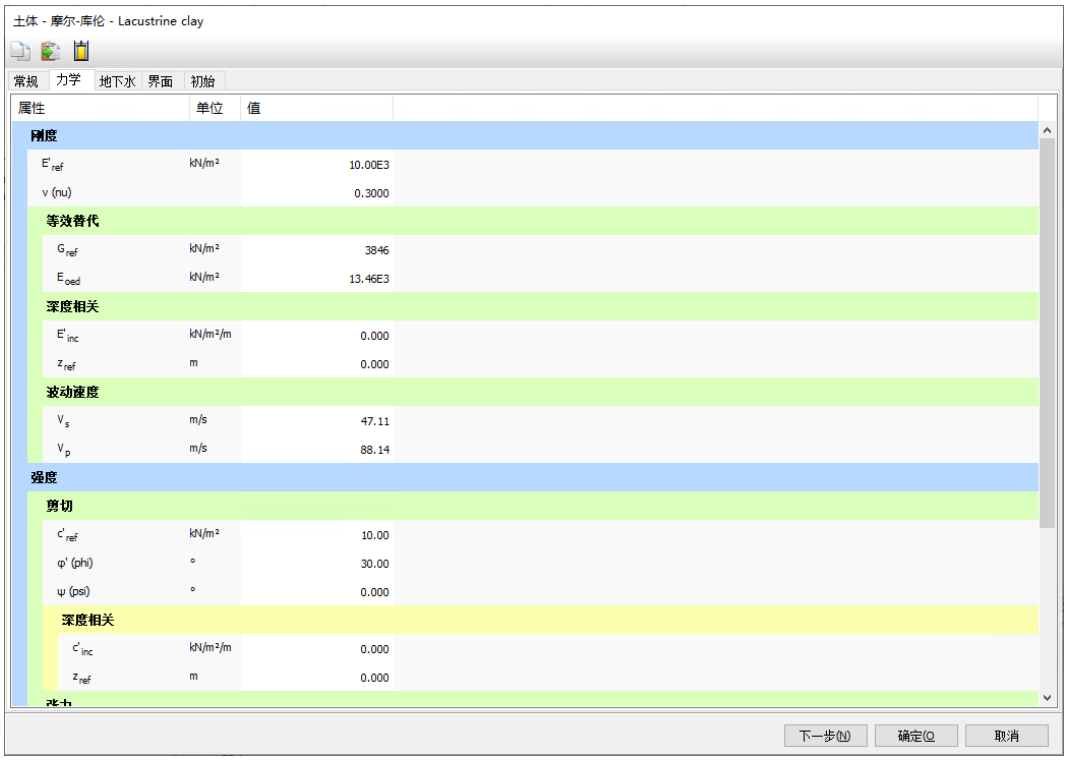


图 8: 土体和界面数据集窗口的力学页面

7. 本练习将不考虑固结。因此，土体的渗透性不会影响结果，可以跳过**地下水**窗口。
8. 由于几何模型不包括界面，因此可以跳过**界面**选项卡。
9. 单击**初始**选项卡，并检查 **K0 确定**是否设置为自动。在这种情况下，K_0 由 Jaky 的公式确定：$K_0 = 1 - \sin\varphi$。
10. 单击**确定**按钮以确认当前材料数据集的输入。
    创建的数据集显示在**材料集**窗口的树视图中。
11. 从**材料集**窗口中将设置好的**湖积黏土**拖动（选中并在移动时始终按住鼠标左键）到**修改土层**窗口左手边的土柱图形并将其放在此处（松开鼠标左键）。

注释: 请注意，光标会改变形状以指示是否可以放入数据集。土层颜色的变化表明数据集是否正确分配到土层。

创建建筑材料集

该建筑采用线弹性无孔材料建模。要定义此数据集，请执行以下步骤：

1. 单击**材料集**窗口中的**新建**按钮。
2. 在**常规**页面的**材料集**部分的**标识**字段中，键入 Building。
3. 从**土体模型**下拉菜单中选择线弹性模型，从**排水类型**下拉菜单中选择非多孔，如图 9(第 17 页) 所示。

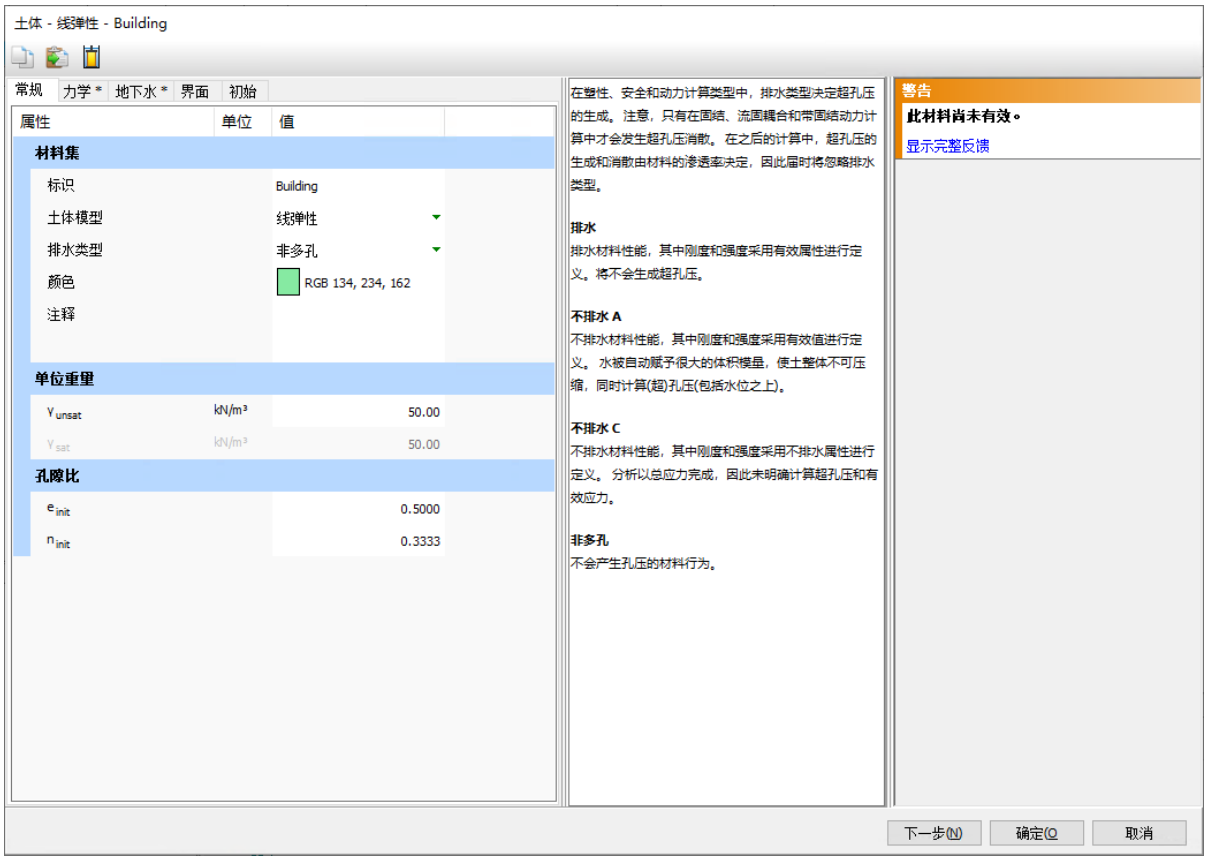


图 9: 排水类型 - 土体和界面数据集窗口的常规页面

4. 根据表 1(第 13 页)中列出的材料数据，在**常规属性**框中输入单位重量。此单位重量对应建筑的总永久和可变荷载。
5. 单击**下一步**按钮或单击**力学**选项卡，继续输入模型参数。
   线弹性模型只涉及两个基本参数（E_{ref}、ν），将其输入到表 1(第 13 页)的相应框中。
6. 单击**确定**按钮以确认当前材料数据集的输入。
   创建的数据集将出现在**材料集**窗口的树视图中，但不直接使用。
7. 单击**确定**按钮，关闭**材料集**窗口。
8. 单击**确定**按钮，关闭**修改土层**窗口。

注释: PLAXIS 3D 区分项目数据库和材料集的全局数据库。使用全局数据库可将数据集从一个项目交换到另一个项目。通过单击**显示全局**按钮，**材料集**窗口可以显示全局数据库。

1.1.4 定义结构单元

结构单元是在程序的**结构模式**中创建的。

要对建筑进行建模，请执行以下操作：

1. 单击**结构**选项卡，继续在**结构模式**中输入结构单元。
2. 单击**创建表面**按钮 。将光标置于坐标 (0 0 0)。检查光标位置指示器中显示的光标位置。
   单击时，将定义表面的第一个表面点。

3. 分别用坐标 (0 18 0)、(18 18 0)、(18 0 0) 定义其他三个点。右键单击或按下 **<Esc>** 键来最终确定表面的定义。
   请注意，创建的表面仍处于选中状态并显示为红色。
4. 单击**拉伸对象**按钮  以从表面创建体积。
   将弹出**拉伸**窗口（请参阅图 10(第 18 页)）。



图 10: 拉伸窗口

5. 将 z 值更改为 -2，然后单击**应用**关闭窗口。
6. 单击**选择**按钮  。
7. 右键单击创建的表面并从出现的菜单中选择**删除**。
   这将删除表面，但建筑体积会被保留。

建筑体积以及相应的材料数据集现在已经创建完成。

1.1.5 生成网格

模型完成。PLAXIS 3D 支持全自动网格生成程序，其中的几何形状分为体积单元和兼容的结构单元（若适用）。网格的生成充分考虑了几何模型中几何实体的位置，以便在有限元网格中考虑层、荷载和结构的准确位置。在建筑体积中将考虑局部细化。

注释:

- 缺省情况下，**单元分布**设置为**中**。可以在**网格选项**窗口中更改**单元分布**设置。此外，可选择全局或局部细化网格（请参阅 参考手册 中的网格生成）。
- 若几何形状有修改，必须重新生成有限元网格。
- 自动生成的网格可能不完全适合预期的计算。因此，建议用户检查网格并在必要时进行改进。

若要生成网格，请执行以下步骤：

1. 单击相应的选项卡进入**网格模式**。
2. 在边栏中单击**细化网格**按钮 ，然后单击创建的建筑体积以局部细化网格。
   细化后，已创建的建筑体积将以绿色显示。（请参见图 11(第 18 页)）。

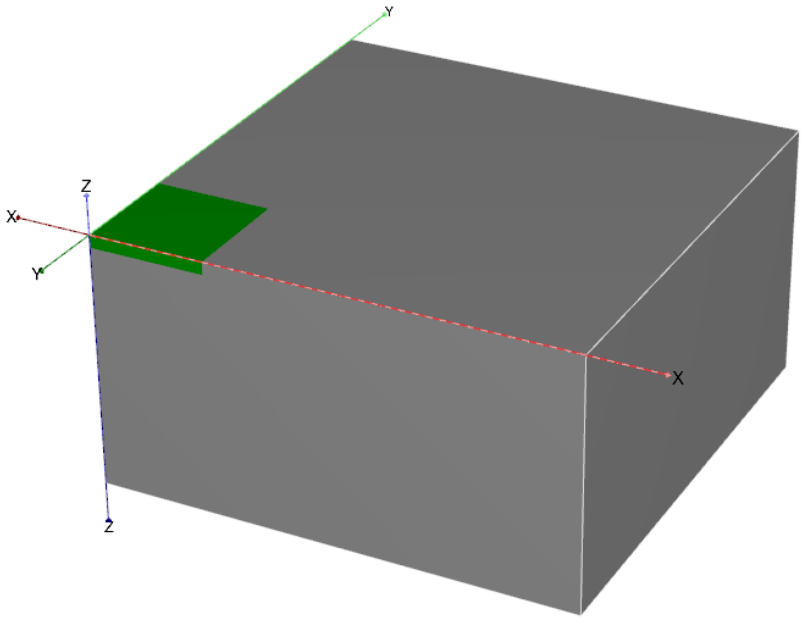


图 11: 模型中局部细化的指示

3. 在边栏中单击**生成网格**按钮，或选择菜单**网格** > **生成网格**。
4. 在**网格选项**窗口中将**单元分布**更改为**粗糙**，如图 12(第 19 页) 所示。



图 12: 网格选项窗口

5. 单击**确定**，启动网格生成。
6. 网格生成后，单击**查看网格**按钮。
这将打开一个新窗口，显示生成的网格（请参阅图 13(第 20 页)）。

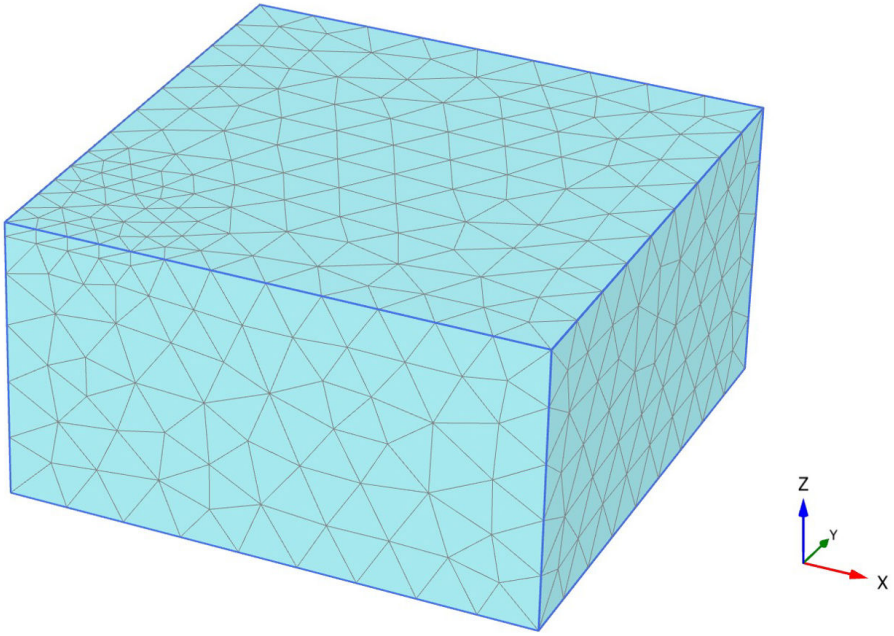


图 13: 输出窗口中生成的网格

7. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序并返回至输入程序的**网格模式**。

1.1.6 定义并执行计算

网格一旦生成，有限元模型便完成。现在必须定义计算阶段。

初始阶段

“初始阶段”始终涉及初始条件的生成。一般来说，初始条件包括初始几何形状配置和初始应力状态，即有效应力、孔隙压力和状态参数（若适用）。**修改土层**窗口中已经输入了初始水位。计算初始有效应力状态时会考虑该水位。因此不需要进入**渗流条件模式**。

本教程将描述**初始阶段**的属性。本教程的这一部分概述了即使使用了参数的缺省值，也要进行定义的选项。

1. 单击**分阶段施工模式**，继续定义计算阶段。

   新项目定义完成后，将在**阶段浏览器**中自动创建并选中名为“初始阶段”的第一个计算阶段（请参阅图 14(第 20 页)）：

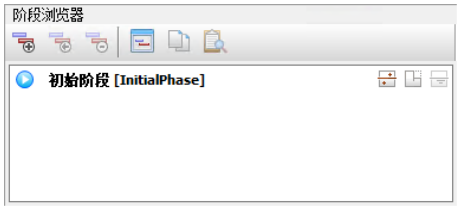


图 14: 阶段浏览器

几何图形中存在的所有结构单元和荷载最初都会自动关闭；只有土体容积最初是激活状态。

2. 单击**编辑阶段**按钮 或双击**阶段浏览器**中的阶段。

   阶段窗口如图 15(第 21 页) 所示。

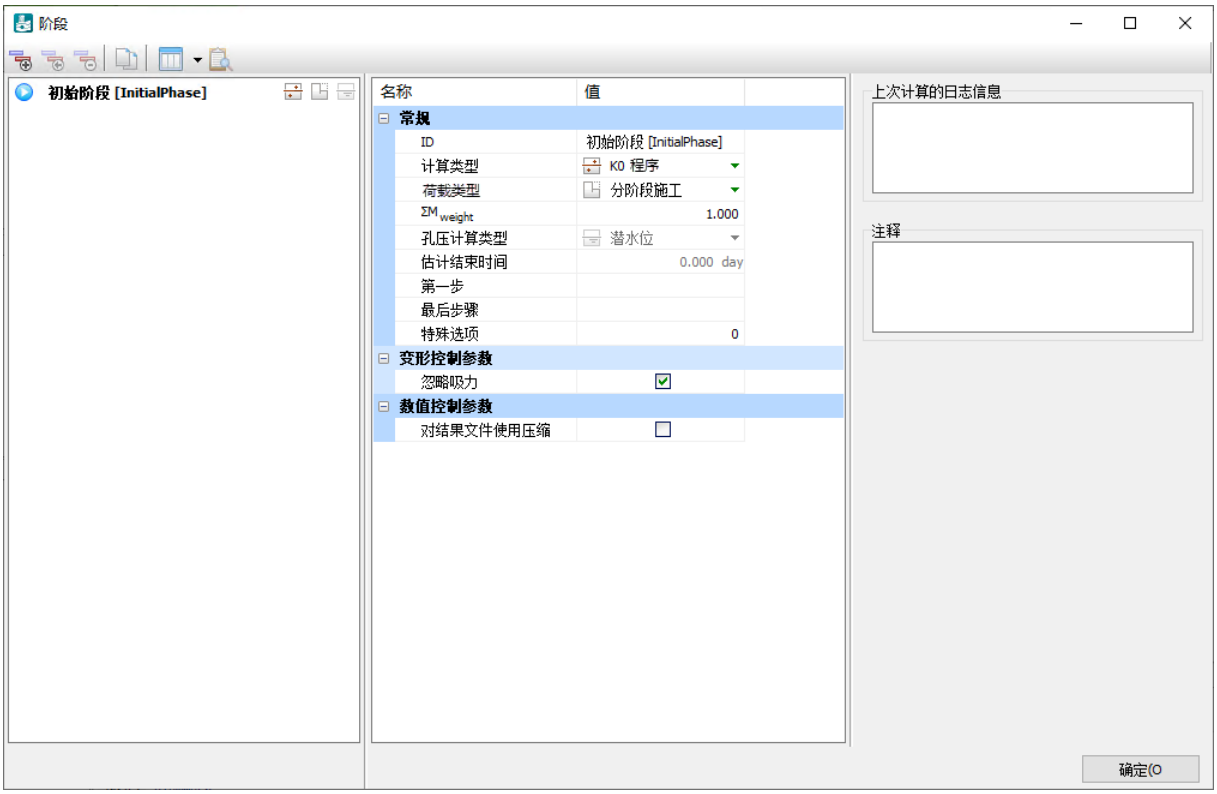


图 15: 初始阶段的阶段窗口

本教程将描述初始阶段的属性。下面概述了即使使用了参数的缺省值，也要进行定义的选项。

	缺省情况下，选择 K0 程序，作为**阶段窗口**中**常规**子树内的**计算类型**。该选项将在此项目中用于生成初始应力。
	分阶段施工选项作为**荷载类型**被选中。这是可用于 **K0 程序**的唯一选项
	缺省情况下，选择潜水位选项，作为**孔压计算类型**。

注释: K0 程序仅可用于具有水平地面和（若适用）水平潜水位的水平分层几何图形。有关 **K0 程序**的更多信息，请参阅 参考手册 中的“分析类型”。

3. 本教程也将使用**阶段**窗口中的其他缺省选项。
4. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
5. 在**模型浏览器**中，展开**模型条件**子树。
6. 展开**水**子树。
   水位会自动分配给**全局水位：钻孔水位 1**，该值是根据在**修改土层**窗口中分配给钻孔的水头值生成的。
7. 确保项目中的所有土体都处于激活状态，并且分配给它们的材料是**湖积黏土**。

第 1 阶段：施工阶段

在定义初始条件后，可以对建筑的施工进行建模。这将在单独的计算阶段完成，此阶段需要按如下方式进行添加：

1. 在**阶段浏览器**中单击**添加阶段**按钮 。
   一个名为第 1 阶段的新阶段将被添加至**阶段浏览器**（请参阅图 16(第 22 页)）。

注释: 使用**阶段浏览器**或**阶段**窗口中的**添加**、**插入**和**删除**按钮，可以添加、插入或删除计算阶段。

2. 双击 **第 1 阶段**，打开**阶段**窗口。
3. 在**常规**子树的 **ID** 框中，为新阶段写入（可选）适当的名称（如建筑）。
4. 当前阶段始于**初始阶段**，包含初始应力状态。对于此阶段，缺省选项和分配的值有效。

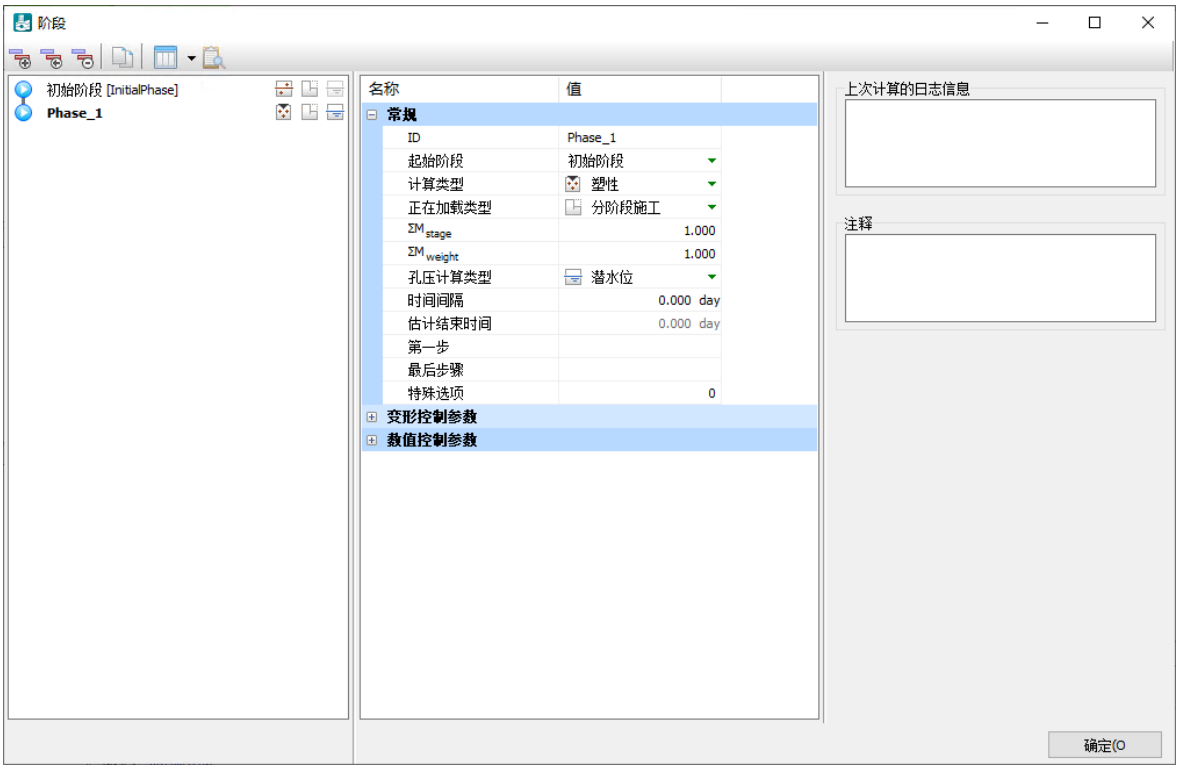


图 16: 建筑阶段的阶段窗口

5. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
6. 右键单击之前创建的建筑体积。选择菜单**土体_1_土体_2_1** > **设置材料** > **建筑**。
   现在，建筑数据集已分配给建筑体积。

执行计算

所有计算阶段（在本例中为两个阶段）都进行了计算标记，由蓝色箭头 指示。执行顺序由**起始阶段**参数控制。

1. 单击**计算**按钮 ，计算项目。忽略没有为曲线选择节点和应力点的警告。
   在执行计算期间，将显示一个窗口（请参阅图 17(第 23 页)），给出有关实际计算阶段进度的信息。



图 17: 激活任务窗口显示计算进度

不断更新的信息显示了计算进度、当前步骤数、当前迭代中的全局错误以及当前计算步骤中的塑性点数量等。需要花几秒钟执行计算。当计算完成后，窗口将关闭，焦点返回主窗口。

2. **阶段浏览器**中的阶段列表将更新。完成的计算阶段由绿色圆内的复选标记表示。
3. 单击保存按钮 以保存项目，然后再查看结果。

1.1.7 查看计算结果

计算完成后，结果将显示在**输出**程序中。在**输出**程序中，可以查看完整三维模型以及横截面或结构单元中的位移和应力。计算结果也以表格形式提供。

要查看当前结果，请执行以下步骤：

1. 在**阶段浏览器**树中选择最后一个计算阶段（**建筑**）。
2. 在边栏中单击**查看计算结果**按钮 以打开**输出**程序。缺省情况下，**输出**程序将在所选计算阶段结束时显示三维变形网格。变形会被缩放，确保它们清晰可见。
3. 选择菜单**变形** > **总位移** > **|u|**。
   图 18(第 24 页) 显示了总位移的颜色阴影。在颜色边界处显示带位移值的图例。当图例没有显示时，选择菜单**视图** > **图例**来显示它。

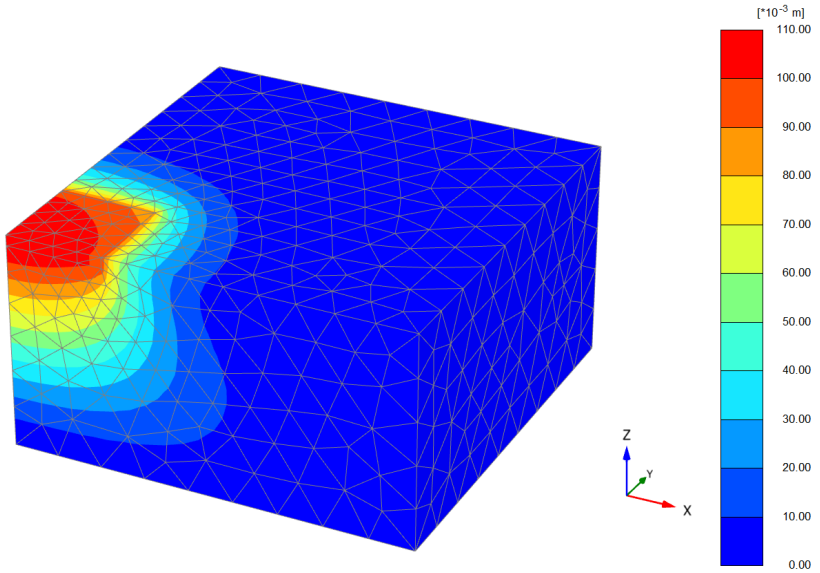


图 18: 最后一个计算阶段结束时的总位移阴影

4. 在**输出**窗口中，单击**等值面**按钮 以显示具有相同位移的区域。

注释:

- 除了**总位移**之外，**变形**菜单还能够显示**增量位移**和**阶段位移**。
  - 增量位移是在一个计算步骤（在本例中是最后一个步骤）中发生的位移。增量位移可能有助于将失效机制可视化。
  - 阶段位移是在一个计算阶段（在本例中是最后一个阶段）中发生的位移。阶段位移可用于检查单个施工阶段的影响，而无需在开始阶段之前将位移重置为零。

1.2 工况 B：筏板地基

在此工况中，模型经过修改，地下室由结构单元组成。因此可以计算地基中的结构内力。

筏板地基由混凝土梁加固的 50 厘米厚的混凝土底板组成。地下室的墙壁由 30 厘米厚的混凝土组成。上层底板的荷载通过柱子和地下室墙壁转移到楼板上。柱子承受 11650 kN 的荷载，墙壁承受 385 kN/m 的线荷载，如下面图 19(第 25 页) 所示。

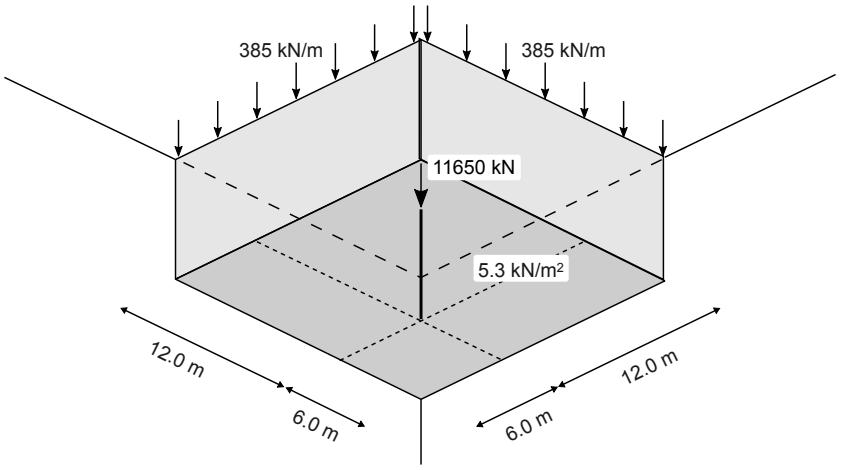


图 19: 地下室的几何图形

此外，楼板承受的分散荷载为 5.3 kN/m^2。黏土层的性质将被改变，使得黏土的刚度将随着深度而增加。

目标

- 用其他名称保存项目
- 修改现有数据集
- 定义随深度增加的土体刚度
- 对板进行建模和定义板的材料数据集
- 对梁进行建模和定义梁的材料数据集
- 分配点荷载
- 分配线荷载
- 将分散荷载分配给表面
- 删除阶段
- 激活和取消激活土体
- 激活和取消激活结构单元
- 激活荷载
- 放大输出
- 在输出中绘制横截面
- 查看结构输出

1.2.1 创建新项目

此练习中使用的几何图形与前一个相同，不同之处在于，使用了其他单元对地基进行建模。您可以从上一个项目开始，用其他名称存储此项目，然后对其进行修改。要进行此操作，请执行以下步骤：

1. 双击输入程序图标，启动 PLAXIS 3D。

   将出现**快速选择**对话框。
2. 在“最近的项目”列表中，选择工况 A 的项目。

上一个项目将打开。

3. 选择**文件** > **项目另存为**，用其他名称保存项目（例如，教程 1b）。

1.2.2 创建和分配材料数据集

已经定义了黏土层的材料集。要修改此材料集，将随深度增加的土体刚度考虑在内，请执行以下步骤：

1. 在边栏中单击**材料**按钮。
   将弹出**材料集**窗口。
2. 确保**土体和界面**选项选为**材料集类型**。
3. 选择**湖积黏土**材料集，并单击**编辑**按钮。
4. 在**力学**页面，将土体刚度 E'_{ref} 更改为 5000 kN/m^2。
5. 在**深度相关**的刚度参数中，在 E'_{inc} 框中输入值 500。保留 z_{ref} 的缺省值 0.0 米。现在，z=0.0 米 处的土体的刚度定义为 5000 kN/m^2，随着每米深度的增加而增加 500 kN/m^2（请参阅图 20(第 26 页)）。

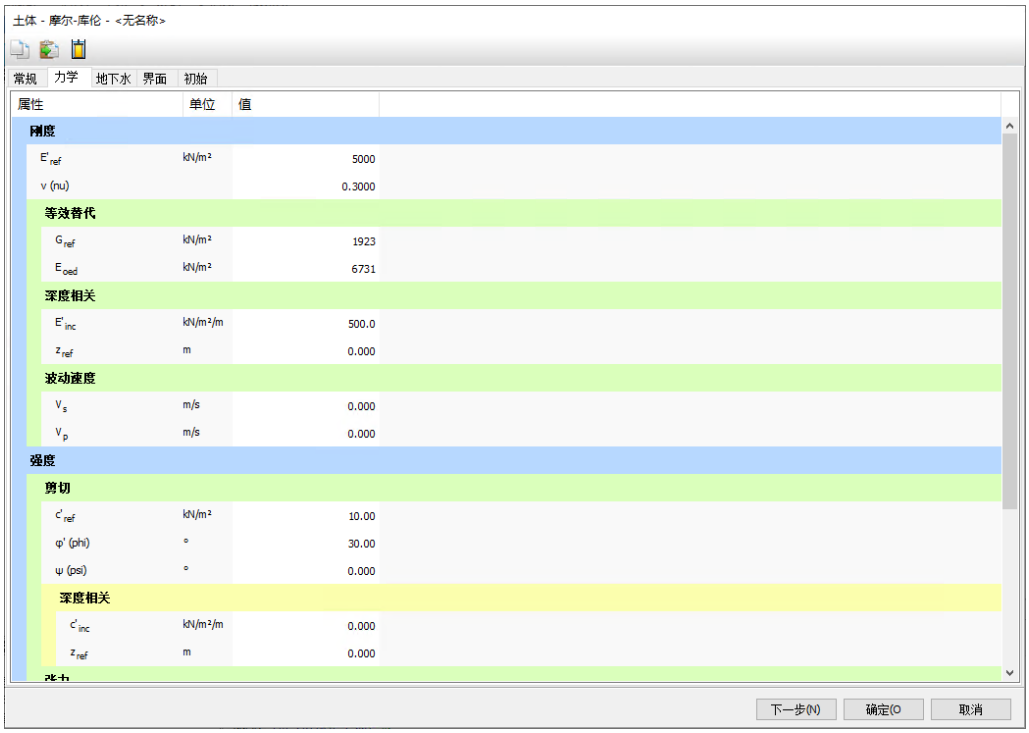


图 20: 深度相关刚度参数

6. 单击**确定**关闭**土体**窗口。
7. 单击**确定**关闭**材料集**窗口。

1.2.3 定义结构单元

进入**结构模式**以定义构成地下室的结构单元。

将使用以下材料属性创建许多材料数据集。

表 2: 地下室楼板和地下室墙的材料属性

参数	名称	地下室楼板	地下室墙	单位
常规				
行为类型	类型	弹性	弹性	-
单位重量	γ	15	15.5	kN/m^3
力学				
各向同性	-	是	是	-
杨氏弹性模量	E_1	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	kN/m^2
泊松比	ν_{12}	0.15	0.15	-
厚度	d	0.5	0.3	m

注释: 在指定单位重量时，请考虑单元本身不占用任何体积并与土体单元重叠的事实。因此，可以考虑从板、梁或预埋梁材料的实际单位重量中减去单位土体重量，以补偿重叠。对于部分重叠的板、梁或预埋梁，单位重量应成比例减少。

表 3: 地下室柱和地下室梁的材料属性

参数	名称	地下室柱	地下室梁	单位
常规				
行为类型	类型	弹性	弹性	-
单位重量	γ	24	6.0	kN/m^3
力学				
横截面类型	类型	用户定义	用户定义	-
横截面区域	A	0.49	0.7	m^2
惯性矩	I_2	0.020	0.029	m^4
	I_3	0.020	0.058	m^4
杨氏弹性模量	E	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	kN/m^2

创建地下室楼板和地下室墙创建地下室柱和地下室梁

1. 单击**结构**选项卡，继续在**结构模式**中输入结构单元。
2. 单击**选择**按钮 。
3. 右键单击代表建筑的体积。从出现的菜单中选择**分解为面**选项。
4. 删除顶部表面，方法是选中顶部表面，然后按**<删除>**。

5. 选择代表建筑的体积。单击**选择浏览器**中的可视化切换开关以隐藏体积。完成此操作后，内部表面应该可见。
6. 右键单击建筑的底部表面。从出现的菜单中，选择**创建** > **创建板**选项。
7. 删除模型边界处的两个垂直表面。随后，将板分配给模型内的两个垂直地下室表面。图 21(第 28 页)显示了地下室和墙板的视图。

   - 在单击实体的同时按住 **<Ctrl>** 键，可以选择多个实体。
   - 一个特征可以分配给多个相似的对象，就像分配给单个选择一样。

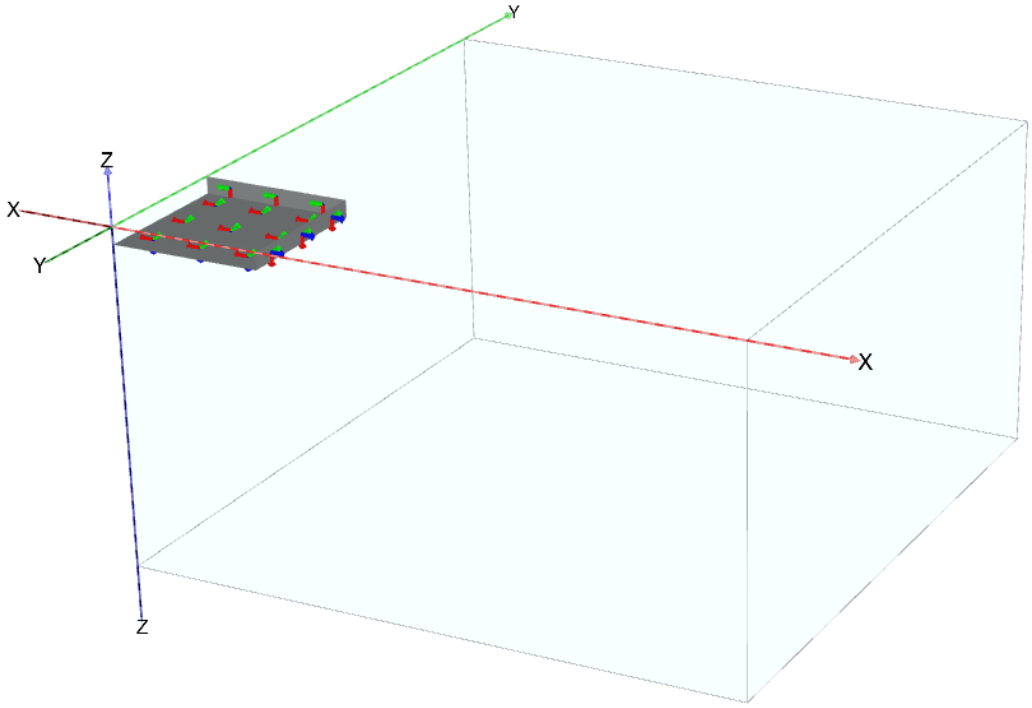


图 21: 项目中板的位置

注释: 要可视化图 21(第 28 页) 中显示的局部轴，请在菜单栏中选择**选项** > **显示局部轴** > **在具有结构的表面上显示局部轴**。

8. 单击**材料**按钮  打开材料数据库，然后将**材料集类型**设置为**板**。
9. 根据表 2(第 27 页)，创建地下室楼板和地下室墙的数据集。
   在定义板的“力学”属性时，会出现一个局部轴和荷载方向约定窗口，如图 22(第 29 页) 所示。

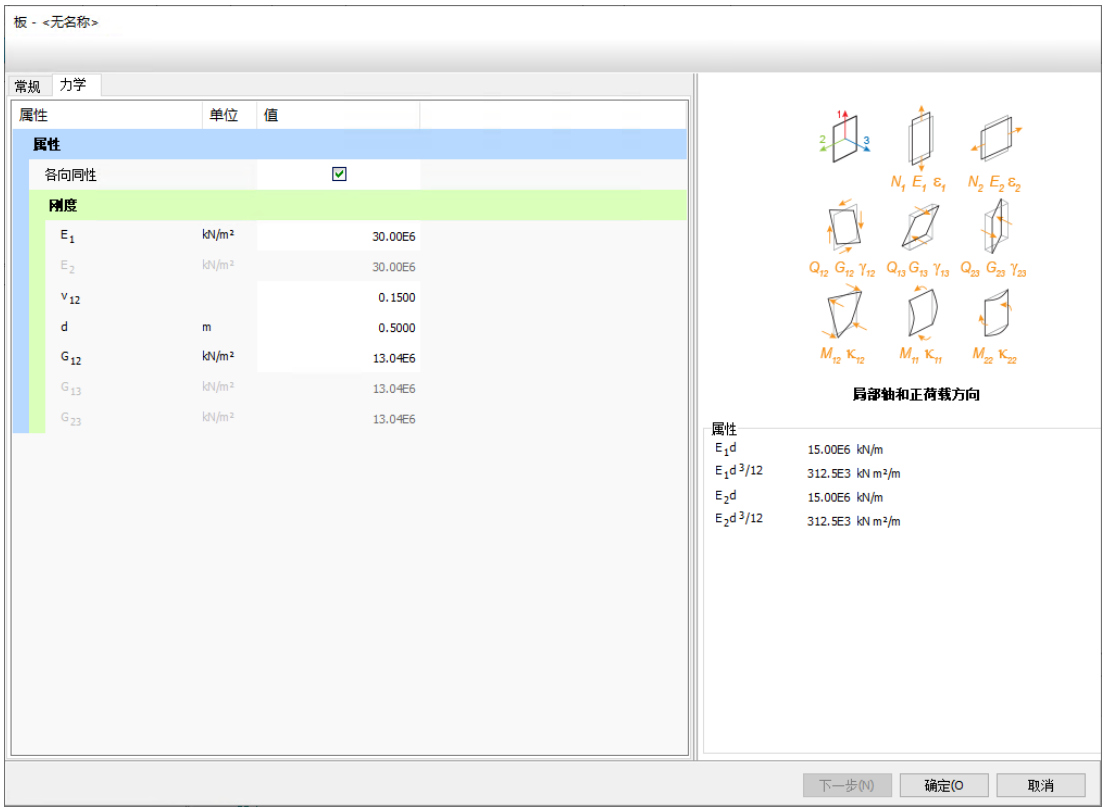


图 22: 地下室楼板的力学属性

10. 将数据集相应地拖放到地下室楼板和地下室墙。可能需要移动**材料集**窗口，方法是单击其标题并拖动该窗口。如果正确分配了材料，则板将获得相应的材料颜色。
11. 单击**确定**按钮，关闭**材料集**窗口。
12. 右键单击地下室楼板并从出现的菜单中选择**创建** > **创建表面荷载**选项。荷载的实际值可以在**结构模式**中分配，也可以在定义计算阶段时分配。在此示例中，该值将在（**分阶段施工模式**）内的**阶段定义**中分配。
13. 在边栏中单击**创建线**按钮 ，并从显示的其他工具中选择**创建线荷载**选项 。
14. 单击命令输入区域，键入 `0 18 0 18 18 0 18 0 0` 并按**<输入>**。线荷载现在将在地下室墙上定义。定义的值是线的三个点的坐标。单击鼠标右键停止绘制线荷载。
15. 在边栏中单击**创建线**按钮 ，并从显示的其他工具中选择**创建梁**选项 。
16. 要使用垂直梁创建地下室柱，则单击 (6 6 0)，此点是垂直梁的第一个点。按住 **<Shift 键>** 将鼠标光标移至 (6 6 -2)。请注意，按住 **<Shift 键>** 时，光标只会垂直移动。从光标位置指示器可以看出，z 坐标发生变化，而 x 和 y 坐标将保持不变。单击 (6 6 -2) 以定义梁的第二个点。要停止绘图，请单击鼠标右键。
17. 对于地下室梁，创建从 (0 6 -2) 到 (18 6 -2) 和从 (6 0 -2) 到 (6 18 -2) 的水平梁。

> **注释:** 缺省情况下，光标位于 z=0。要在垂直方向移动，请在按住**<Shift 键>** 的同时移动鼠标。

18. 单击**材料**按钮 打开材料数据库，然后将**材料集类型**设置为**梁**。
19. 根据表 3(第 27 页)，创建水平梁的数据集。
20. 通过拖放将数据集分配给相应的梁单元。
21. 在边栏中单击**创建荷载**按钮 。
22. 从显示的其他工具中选择**创建点荷载**选项 。单击 (6 6 0) 以在垂直梁的顶部添加点荷载。

1.2.4 生成网格

若要生成网格，请执行以下步骤：

1. 单击相应的选项卡进入**网格模式**。
2. 单击**生成网格**按钮 。将**单元分布**保持为**粗糙**。
3. 单击**查看网格**按钮 ，检查生成的网格。
4. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序并返回至**输入**程序的**网格模式**。

随着几何形状发生改变，所有计算阶段都必须重新定义。

1.2.5 定义并执行计算

进入**分阶段施工模式**。

初始阶段

1. 单击**分阶段施工**选项卡，继续定义计算阶段。
2. 与前一个示例一样，将使用 K_0 程序 生成初始条件。
3. 在初始阶段，所有结构单元都应处于非激活状态。
4. 在初始阶段不进行挖掘。因此，地下室体积应该处于激活状态，并且分配给它的材料应该是**湖积黏土**。

第 1 阶段至第 3 阶段：施工阶段

不是在一个计算阶段建造建筑，而是使用单独的计算阶段。在**第 1 阶段**，对墙壁施工和挖掘进行建模。在**第 2 阶段**，对楼板和梁的施工进行建模。在最后一个阶段（**第 3 阶段**）对荷载的激活进行建模。

缺省情况下，代表施工阶段的阶段的计算类型设置为**塑性** 。

第 1 阶段：挖掘

1. 在**阶段**窗口中，将第 1 阶段重命名为挖掘。
2. 在**分阶段施工模式**中，通过选择位于地基上方的土体并单击**选择浏览器** > **钻孔体积_1_1** 中该土体前面的复选框来停用它。
3. 在**模型浏览器**中，单击与地下室墙对应的板前面的复选框以将其激活。

第 2 阶段：施工

1. 在**阶段浏览器**中，单击**添加阶段**按钮 。添加新阶段（第 2 阶段）。双击第 2 阶段。将弹出**阶段**窗口。
2. 通过将其 **ID** 定义为施工来重命名阶段。保留阶段的缺省设置，并关闭**阶段**窗口。

3. 在**模型浏览器**中，单击与地下室楼板对应的板前面的复选框以将其激活。
4. 在**模型浏览器**中，单击梁前面的复选框，以激活项目中的所有梁。

第 3 阶段：荷载

1. 在**施工**阶段之后添加一个新阶段 。将其重命名为 Loading。
2. 在**模型浏览器**中，单击**表面荷载**前面的复选框，以激活地下室楼板上的表面荷载。将荷载的 z 分量的值设置为 -5.3。这表明荷载为 5.3 kN/m^2，作用于负 z 方向。
3. 在**模型浏览器**中，单击**线荷载**前面的复选框，以激活地下室墙上的线荷载。将每个荷载的 z 分量的值设置为 -385。这表明荷载为 385 kN/米，作用于负 z 方向。
4. 在**模型浏览器**中，单击**点荷载**前面的复选框，以激活地下室柱上的点荷载。将荷载的 z 分量的值设置为 -11650。这表明荷载为 11650 kN，作用于负 z 方向。

执行计算

1. 单击**预览阶段**按钮 以查看每个阶段的设置。
2. 单击计算按钮 ，计算项目。忽略没有为曲线选择节点和应力点的警告。
3. 单击保存按钮 ，在计算完成后保存项目。

1.2.6 查看计算结果

1. 在**阶段浏览器**中选择**施工**阶段。
2. 单击**查看计算结果**按钮 以打开输出程序。
   此时会显示该阶段结束时的变形网格。
3. 在**显示的步骤**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结果。
4. 为了评估几何图形内部的应力和变形，请选择**竖向横截面**工具 。
   将显示几何图形的顶视图并显示**横截面点**窗口。由于最大的位移出现在柱下，所以这里的横截面是最需要的结果。
5. 在**横截面点**窗口中输入 (0.0 6.0) 和 (75.0 6.0) 分别作为第一个点 (A) 和第二个点 (A*) 的坐标。
6. 单击**确定**。
   将显示竖向横截面。横截面可以像几何图形的常规**三维**视图一样旋转。
7. 选择菜单**变形** > **总位移** > **u_z**
   垂直位移的值如图 23(第 32 页) 所示。如果标题不可见，请从**视图**菜单中选择此选项。

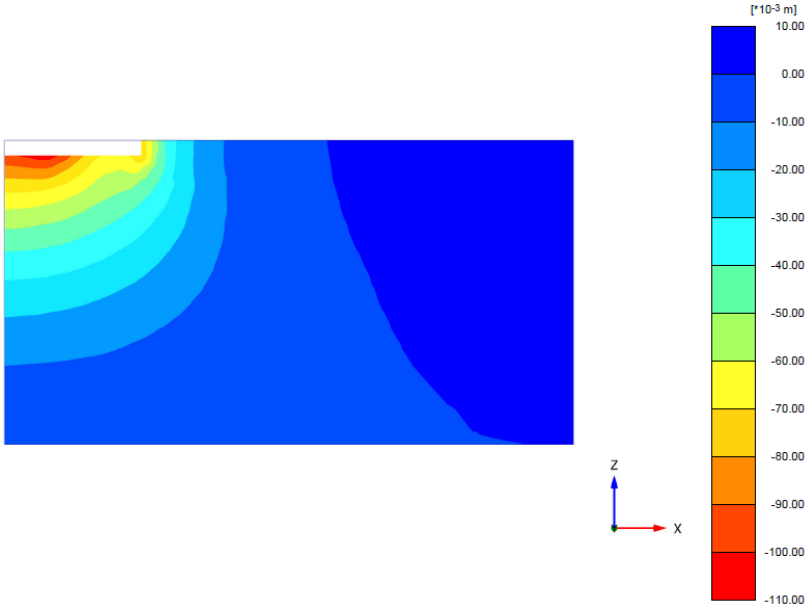


图 23: 显示总垂直位移的横截面

8. 按 **<CTRL+>** 和 **<CTRL->** 移动横截面。
9. 通过从**窗口**菜单的列表中选择此窗口，返回几何图形的三维。
10. 双击楼板。
    将出现一个单独的窗口，显示楼板的位移。要查看楼板中的弯矩，请选择菜单**力** > **M_11**。
11. 单击**阴影**按钮 。
    弯矩如图 24(第 32 页) 所示。

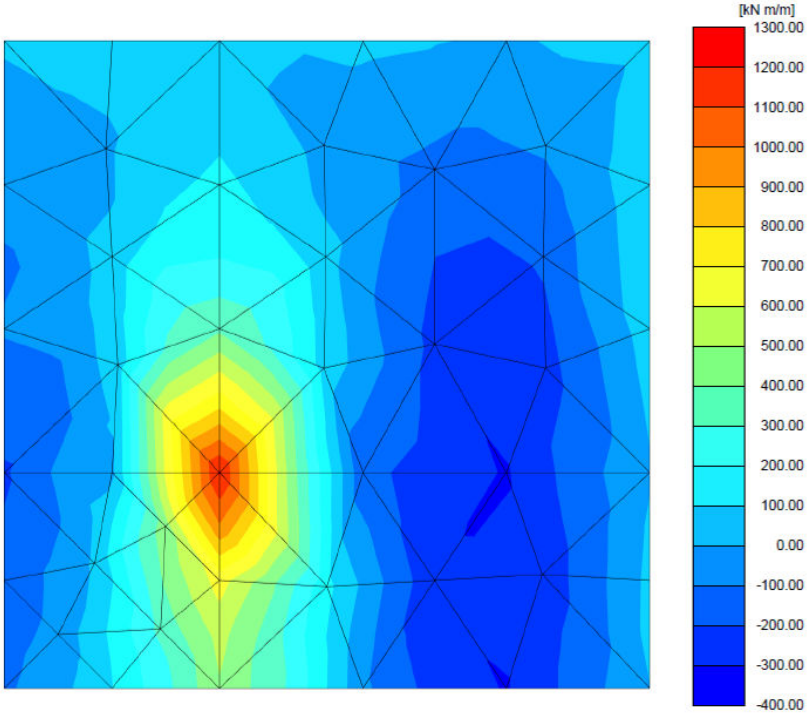


图 24: 地下室楼板的弯矩

12. 要以表格形式查看弯矩，请选择**工具** > **表** 。

这将打开一个新窗口，其中呈现一个表，显示楼板每个节点的弯矩值。

1.3 工况 C：桩筏地基

由于筏板地基的位移较大，将采用预埋梁来减小这些位移。这些预埋梁代表长度为 20 米，直径为 1.5 米的钻孔桩。

目标

- 选择预埋梁。
- 定义预埋梁的材料数据集。
- 创建实体的多个副本。

1.3.1 创建新项目

此练习中使用的几何图形与前一个相同，但桩基础除外。不需要创建新模型；可以从之前的模型开始，用其他名称存储项目并对其进行修改。要进行此操作，请执行以下步骤：

1. 双击输入程序图标 ，启动 PLAXIS 3D。

   将出现**快速选择**对话框。
2. 选择工况 B 的项目。
   项目将打开。
3. 选择菜单**文件** > **项目另存为**，用其他名称保存项目（例如，教程 1c）。

1.3.2 定义结构单元：基础桩

基础由桩组成。将把这些桩建模为预埋梁。这些桩需要新材料。材料属性如下所示：

表 4: 预埋梁的材料属性

参数	名称	桩基础	单位
常规			
材料类型	类型	弹性	-
单位重量	γ	6.0	kN/m^3

力学			
横截面类型	-	预定义	-
预定义梁类型	-	实心圆弧梁	-
直径	-	1.5	m
杨氏弹性模量	E	$3 \cdot 10^7$	kN/m^2
轴向侧摩阻力	类型	线性	-
预埋梁顶部的侧摩阻力	$T_{skin,start,max}$	200	kN/m
预埋梁底部的侧摩阻力	$T_{skin,end,max}$	500	kN/m
桩端反力	F_{max}	$1 \cdot 10^4$	kN

要对地基桩进行建模，请执行以下操作：

1. 单击**结构**选项卡，继续在**结构模式**中输入结构单元。
2. 单击边栏上的**创建线**按钮，右键单击线，然后从出现的其他工具中选择**创建** > **创建预埋梁**选项。
3. 定义从 (6 6 -2) 到 (6 6 -22) 的桩。
4. 单击**材料**按钮 打开材料数据库，然后将**材料集类型**设置为**预埋梁**。
5. 根据表 4(第 33 页)，创建预埋梁的数据集。横截面区域 A 的值以及惯性矩 I_2 和 I_3 由大圆桩的直径自动计算得出。单击**确定**，确认输入。
6. 将**预埋梁**数据拖放到绘图区域中的预埋梁中。
   预埋梁将更改颜色以指示材料集已成功分配。
7. 单击**确定**按钮，关闭**材料集**窗口。

注释:

也可以通过在绘图区域或**选择浏览器**和**模型浏览器**中右键单击材料集并从显示菜单的**设置材料**选项中选择材料，将材料集分配给预埋梁。

8. 单击**选择**按钮，然后选择预埋梁。
9. 单击**创建阵列**按钮。
10. 在**创建阵列**窗口中，针对形状选择 **2D，在 xy 平面**选项。
11. 保持列数为 2。将列之间的距离设置为 x=12 且 y=0。
12. 保持行数为 2。将行之间的距离设置为 x=0 且 y=12。

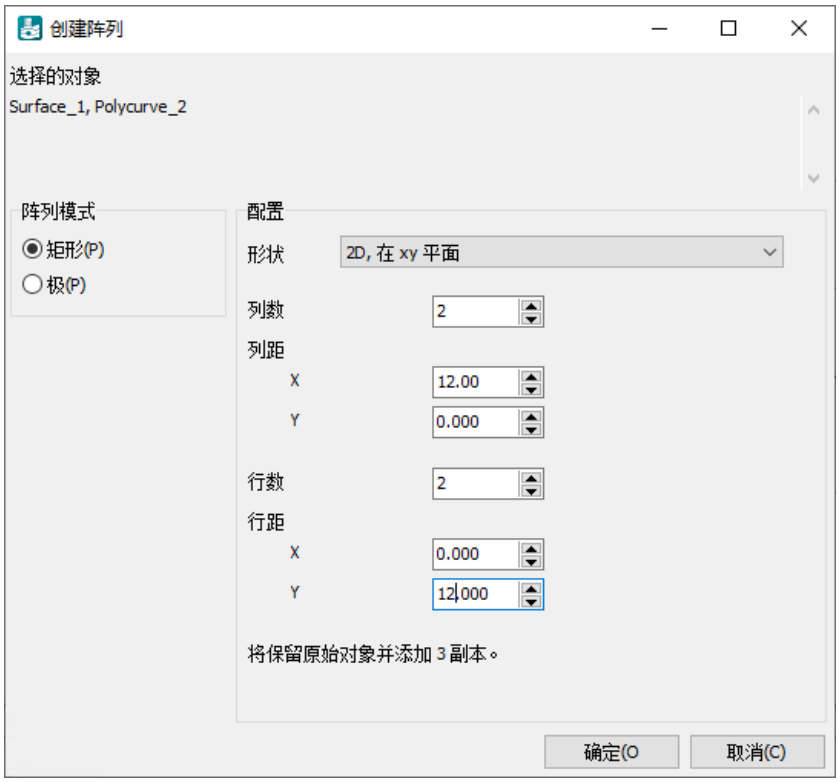


图 25: 创建阵列窗口

13. 按**确定**以创建阵列。总共将创建 2x2=4 个桩。

1.3.3 生成网格

几何模型现已完成，可以生成网格。

若要生成网格，请执行以下步骤：

1. 进入**网格模式**。
2. 在边栏中单击**生成网格**按钮 。将**单元分布**保持为**粗糙**。
3. 单击**查看网格**按钮 ，查看网格。
4. 单击**模型浏览器**中**土体**子树前面的眼睛按钮 来隐藏土体。
   预埋梁如图 26(第 36 页) 所示：

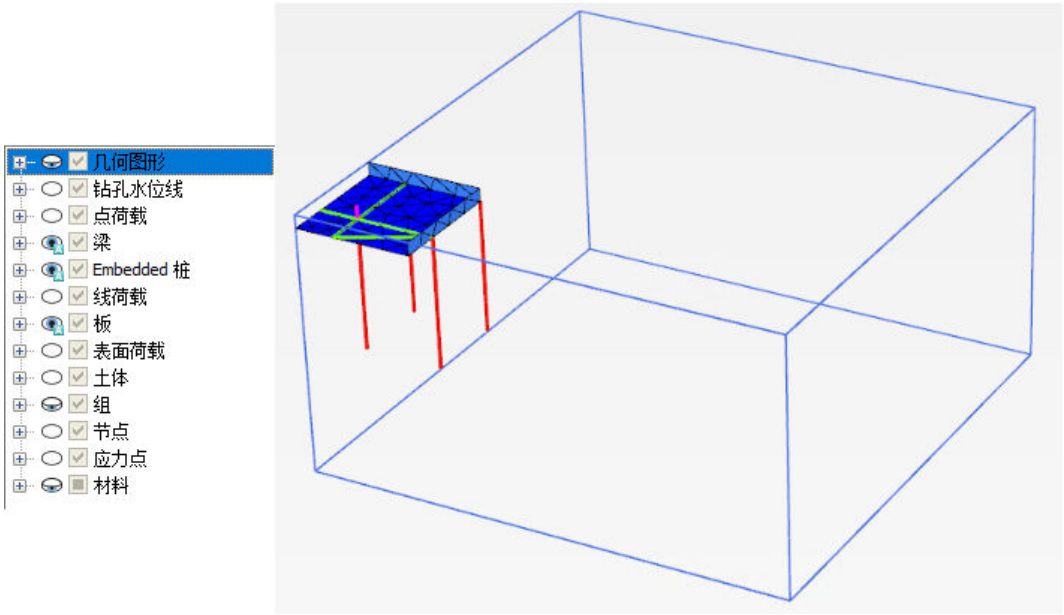


图 26: 输出中模型的部分几何图形

5. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序并返回至**输入**程序的**网格模式**。

1.3.4 定义并执行计算

生成网格后，必须重新定义所有施工阶段。尽管在实践中，桩将在另一个施工阶段而不是墙的施工阶段进行建造，但为简单起见，在本教程中，这两个操作将同一个施工阶段完成。要重新定义所有施工阶段，请执行以下步骤：

1. 切换到**分阶段施工模式**。
2. 检查 **K0 程序**是否选为初始阶段的**计算类型**。确保所有结构单元都处于非激活状态并且所有土体都处于激活状态。
3. 在**阶段浏览器**中选择**挖掘**阶段。
4. 确保地下室土体已挖掘并且地下室墙处于激活状态。
5. 激活所有预埋梁。
6. 在**阶段浏览器**中选择**施工**阶段。确保所有结构单元都处于激活状态。
7. 在**阶段浏览器**中选择**荷载**阶段。确保所有结构单元和荷载都处于激活状态。
8. 单击计算按钮 ，计算项目。
9. 单击保存按钮 ，在计算完成后保存项目。

1.3.5 查看计算结果

计算完成后，结果将显示在**输出**程序中。

要查看结果，请执行以下步骤：

1. 选择**荷载**阶段并查看计算结果。
2. 双击地下室楼板。选择菜单**力** > **M_11**。
   结果如图 27(第 37 页) 所示：

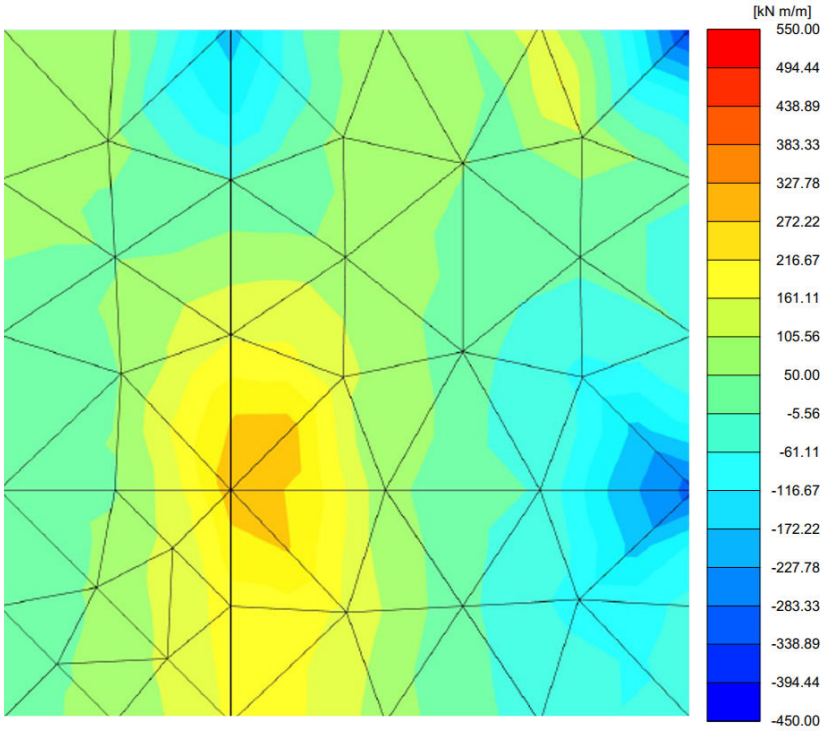


图 27: 地下室楼板的弯矩

3. 双击图例后，将显示**图例设置**，您可以在其中调整图例。确保**锁定图例**以实现所需的缩放效果。
   a. 缩放：手动
   b. 最小值：-450
   c. 最大值：550
   d. 间隔数：18
4. 在**窗口**菜单中选择与变形网格对应的视图。
5. 在边栏中单击**切换可见性**按钮 。
6. 要查看预埋梁，请在按住 **<Shift 键>** 的同时单击土体，将其隐藏。
7. 单击**选择结构**按钮 。要查看所有预埋梁，请按住 **<Ctrl>+<Shift 键>** 并双击其中一个桩。
8. 选择菜单**力** > **N**，查看预埋梁中的轴向荷载。
   该图如下所示：

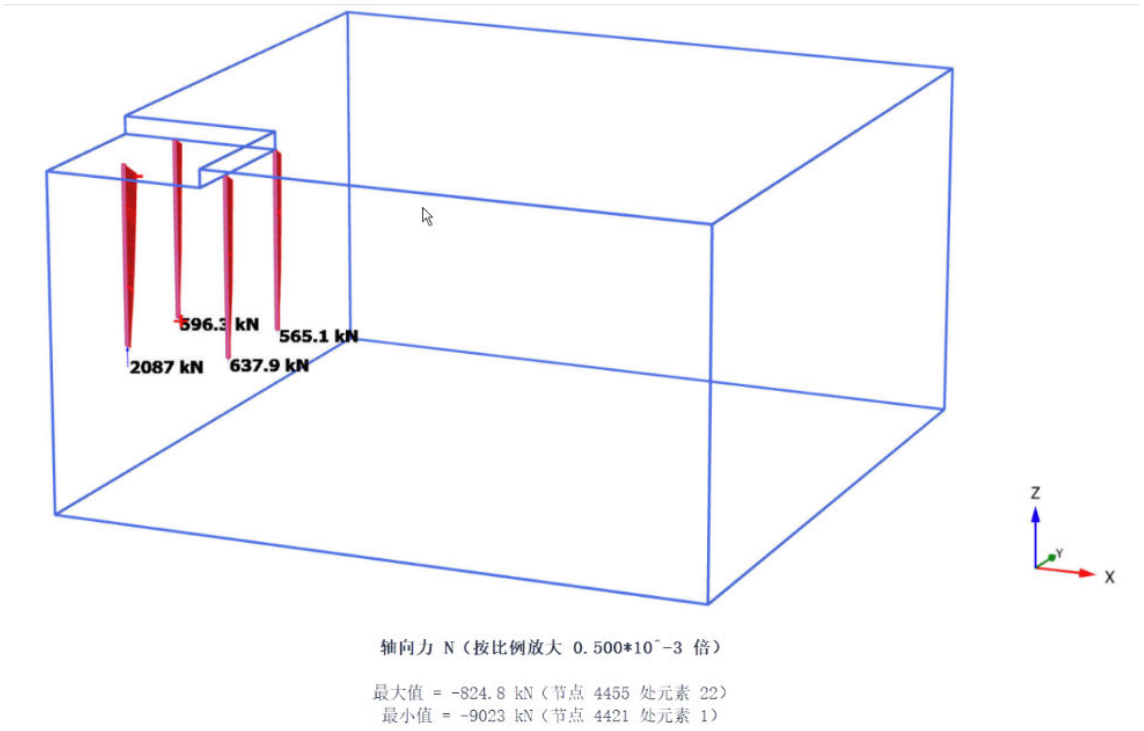


图 28: 预埋梁中的合成轴向力 (N)

2 砂土挖掘

本教程描述了如何在软黏土和砂土层中建造挖掘坑。此坑是一个相对较小的 12 x 20 米的挖掘坑，挖掘深度为地表以下 6.5 米。支柱、腰梁和地锚杆用于防止坑塌陷。全面挖掘后，在坑的一侧增加了额外的表面荷载。

目标

- 使用硬化土体模型
- 对地锚杆进行建模
- 使用界面功能
- 定义超固结比率 (OCR)
- 对地锚杆施加预应力
- 更改水条件
- 选择应力点以生成应力/应变曲线
- 查看塑性点

几何图形

本练习的建议几何图形为 80 米宽，50 米长。挖掘坑位于几何图形的中心。

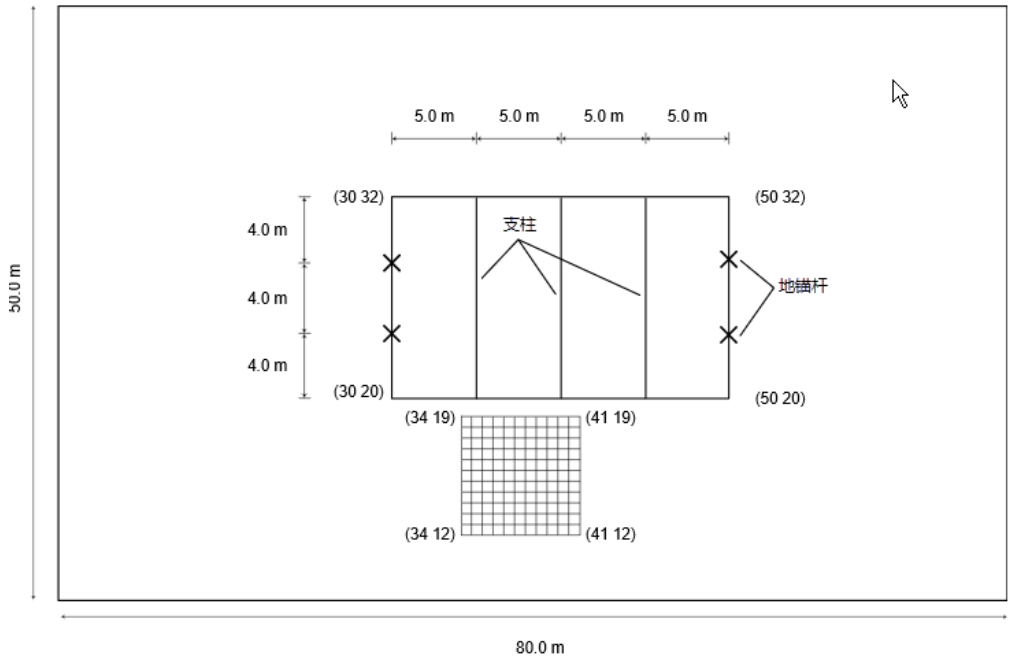


图 29: 挖掘坑顶视图

下图显示了带有土层的挖掘坑的横截面。黏土层被认为是不可渗透的。

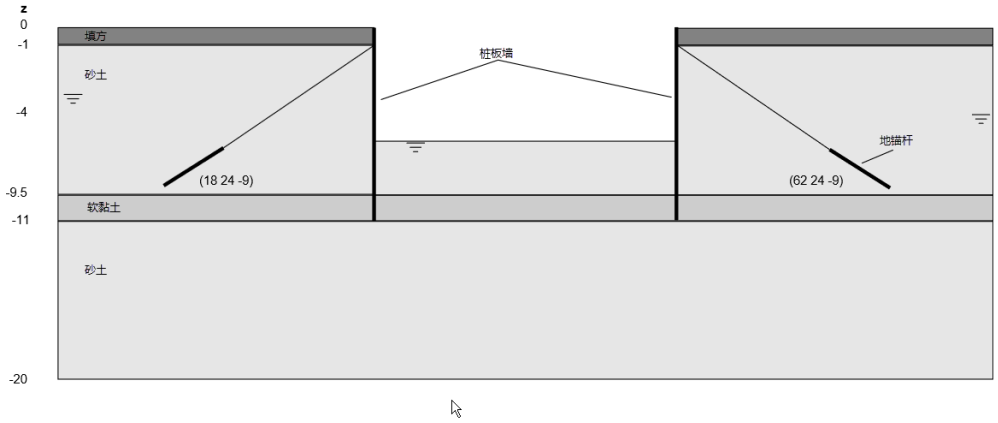


图 30: 带有土层的挖掘坑的横截面

2.1 创建新项目

若要创建几何模型，请执行以下步骤：

1. 开始新项目。
2. 为项目输入适当的标题。
3. 将土体等高线的限制定义为
   a. x_{min} = 0.0 且 x_{max} = 80.0，
   b. y_{min} = 0.0 且 y_{max} = 50.0。

2.2 定义土壤地层学

要定义土壤地层学，需要增加钻孔，并且必须指定材料属性。由于所有土层都是水平的，因此只需要一个钻孔。

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 (0 0 0) 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 在 -1、-9.5、-11、-20 的底层处添加 4 个土层。
3. 将钻孔列中的**水头**设置为 -4 米。

2.3 创建和分配材料数据集

需要为不同的土层定义多种材料。材料属性见表 5(第 41 页)。

表 5: 土层的材料属性

属性	名称	填充	砂土	软黏土	单位
常规					
土体模型	模型	硬化土体	硬化土体	硬化土体	-
排水类型	类型	排水	排水	不排水 A	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	16.0	17.0	16.0	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20.0	20.0	17.0	kN/m^3
力学					
CD 三轴试验的割线刚度	E_{50}^{ref}	$2.2 \cdot 10^4$	$4.3 \cdot 10^4$	$2.0 \cdot 10^3$	kN/m^2
切线固结仪刚度	E_{oed}^{ref}	$2.2 \cdot 10^4$	$2.2 \cdot 10^4$	$2.0 \cdot 10^3$	kN/m^2
卸载/重新装载刚度	E_{ur}^{ref}	$6.6 \cdot 10^4$	$1.29 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^4$	kN/m^2
泊松比	ν_{ur}	0.2	0.2	0.2	-
刚度应力水平依赖性的功率	m	0.5	0.5	1.0	-
粘聚力	c'_{ref}	1	1	5	kN/m^2
摩擦角	φ' *(phi)*	30.0	34.0	25	度
剪胀角	ψ*(psi)*	0.0	4.0	0.0	度
界面					
强度定义	-	手动	手动	手动	-
界面折减因子	R_{inter}	0.65	0.7	0.5	-
初始					
K_0 测定	-	自动	自动	自动	-
预上覆岩层压力	*POP*	0.0	0.0	0.0	-
超固结比率	*OCR*	1.0	1.0	1.5	-

1. 在边栏中单击**材料**按钮。
   将弹出**材料集**窗口。
2. 在**土体和界面**材料集类型下创建新数据集。
3. 将新数据集标识为填充。
4. 从**材料模型**下拉菜单中，选择硬化土体模型。与 Mohr-Coulomb 模型相比，硬化土体模型考虑了原始加载和卸载-重加载之间的刚度差异。有关硬化土体模型的详细描述，请参阅材料模型手册。
5. 根据表 5(第 41 页)定义饱和和不饱和单位重量。
6. 在**力学**页面中，输入 E_{50}^{ref}、E_{oed}^{ref}、E_{ur}^{ref}、米、c'_{ref}、φ'_{ref}、ψ 和 ν'_{ur} 的值。

7. 由于本练习不考虑固结，因此土体的渗透性不会影响结果。因此，缺省值可以保留在**地下水**页面中。
8. 在**界面**页面的**强度**框中，选择**手动**，然后为参数 R_{inter} 输入值 0.65。

   此参数根据以下公式将界面强度与土体强度相关联：

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

   因此，与相邻土体中的摩擦角和粘聚力相比，使用输入的 R_{inter} 值可减少界面摩擦和界面粘聚力（粘附力）。

   注释:

   - 在**强度**下拉菜单列表中选择**刚体**选项时，界面与土体具有相同的强度属性 ($R_{inter} = 1.0$)。
   - 请注意，R_{inter} 值 < 1.0 会降低界面强度和刚度（有关详细信息，请参阅 参考手册）。

9. 在**初始**页面中，根据表 5(第 41 页)定义 OCR 值。
10. 单击**确定**关闭窗口。
11. 关闭**材料集**窗口后，单击**确定**按钮以关闭**修改土层**窗口。
12. 在**土体模式**中，右键单击上土层。选择**土体 1** > **设置材料** > **填充**。
13. 以同样的方式将**软黏土**材料分配给 y = -9.5 米和 y = -11.0 米之间的土层。
14. 对于剩余的两个土层，分配**砂土**材料。

注释: 缺省情况下，**拉伸截断**选项在值为 0 kN/m^2 时激活。此选项位于页面**力学** > **强度** > **拉伸**。此处**拉伸截断**值可以更改，也可以将此选项完全停用。

2.4 定义结构单元

下面描述了腰梁和支柱、地锚杆、桩板墙和表面荷载的创建。

2.4.1 腰梁和支柱

结构单元的材料属性见表 6(第 42 页)。这些属性是在后续步骤中定义材料所必需的。

表 6: 腰梁和支柱的材料属性

属性	名称	支柱	腰梁	单位
常规				
材料类型	类型	弹性	弹性	-
单位重量	γ	78.5	78.5	kN/m^3
力学				
横截面类型	类型	用户定义	用户定义	-
横截面区域	A	0.007367	0.008682	m^2

力学				
惯性矩	I_2	$5.073 \cdot 10^{-5}$	$3.66 \cdot 10^{-4}$	m^4
	I_3	$5.073 \cdot 10^{-5}$	$1.045 \cdot 10^{-4}$	m^4
杨氏弹性模量	E	$2.1 \cdot 10^{8}$	$2.1 \cdot 10^{8}$	kN/m^2

1. 单击**结构**选项卡，继续在**结构模式**中输入结构单元。
2. 在 (30 20 0)、(30 32 0)、(50 32 0) 和 (50 20 0) 之间创建表面。
3. 将表面拉伸到 z = -1、z = -6.5、z = -11。
4. 右键单击创建的最深体积（在 z = 0 和 z = -11 之间），然后选择**分解为面**。
5. 删除顶部表面（2 个表面）。
   体积分解时会创建一个额外的表面。
6. 隐藏挖掘体积（不要删除）。
   模型浏览器和**选择浏览器**树中的眼睛按钮可用于隐藏模型的某些部分并简化视图。隐藏的项目实体由闭着的眼睛表示。
7. 单击**创建结构**按钮 。
8. 在 z = -1m 的标高处，沿挖掘周边创建梁（*腰梁*）。按 **<Shift 键>** 并一直按住，同时沿 z 方向移动鼠标光标。当鼠标光标的 z 坐标在光标位置指示器中为 -1 时停止移动鼠标。请注意，松开 **<Shift 键>**时，光标位置的 z 坐标不变。这表明只能在位于 z = -1 的 xy 平面上绘图。
9. 单击 (30 20 -1)、(30 32 -1)、(50 32 -1)、(50 20 -1)、(30 20 -1) 绘制腰梁。单击鼠标右键停止绘制腰梁。
10. 在 (35 20 -1) 和 (35 32 -1) 之间创建梁（*支柱*）。按 **<Esc>** 结束支柱定义。
11. 根据表 6(第 42 页)创建腰梁和支柱的数据集，并相应地分配材料。
12. 将支柱复制到 x = 35（现有）、x = 40 和 x = 45 处的总共三个支柱中。

创建的支柱和腰梁如图 31(第 44 页) 所示

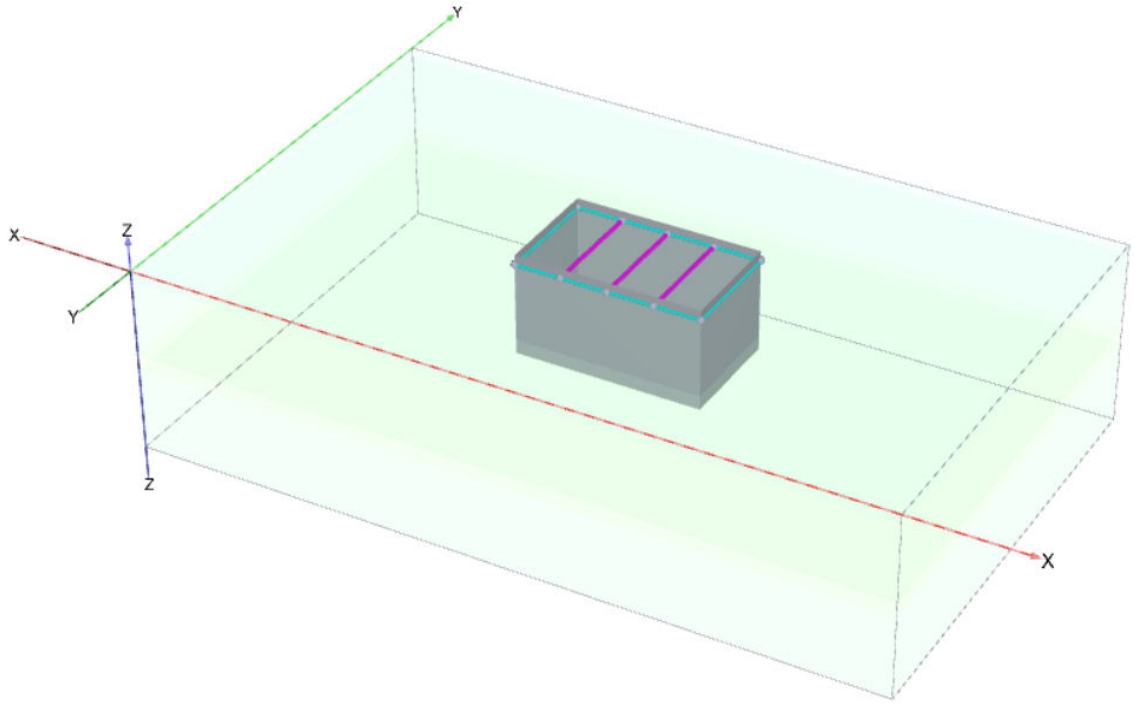


图 31: 支柱和腰梁的可视化 - 结构模式

2.4.2 地锚杆

结构单元的材料属性见表 7(第 44 页)和表 8(第 44 页)。这些属性是在后续步骤中定义材料所必需的。

表 7: 点对点锚杆的材料属性

属性	名称	点对点锚杆	单位
材料类型	类型	弹性	-
轴向刚度	EA	$6.5 \cdot 10^5$	kN

表 8: 预埋梁（注浆体）的材料属性

属性	名称	注浆	单位
常规			
材料类型	类型	弹性	-
单位重量	γ	24	kN/m^3
力学			
横截面类型	类型	预定义	-

力学			
预定义的横截面类型	类型	实心圆弧梁	-
直径	-	0.14	m
杨氏弹性模量	E	$3 \cdot 10^7$	kN/m^2
轴向侧摩阻力	类型	线性	-
预埋梁顶部的侧摩阻力	$T_{skin,start,max}$	200	kN/m
预埋梁底部的侧摩阻力	$T_{skin,end,max}$	0.0	kN/m
桩端反力	F_{max}	0.0	kN

在 PLAXIS 3D 中，地锚杆可以使用点对点锚杆和预埋梁选项进行建模，如下所述：

1. 首先，使用点对点锚杆功能创建锚杆的未注浆部分。通过单击边栏上的创建线并选择**创建点对点锚杆**按钮开始创建结构。
2. 要创建第一个地锚杆的未注浆部分，请单击命令行并键入 `30 24 -1 21 24 -7`。按 **<输入>** 和 **<Esc>**
3. 在点 (50 24 -1) 和 (59 24 -7) 之间创建点对点锚杆。
4. *锚杆的未注浆部分*是使用**预埋梁**选项创建的。在 (21 24 -7) 和 (18 24 -9) 之间以及 (59 24 -7) 和 (62 24 -9) 之间创建预埋梁。将行为设置为注浆体（有关详细信息，请参阅 参考手册）。
5. 分别根据表 7(第 44 页)和表 8(第 44 页)创建预埋梁数据集和点对点锚杆数据集。将数据集分配给点对点锚杆和预埋梁。

   注释: 通过单击所选材料集的“颜色”框，并从窗口的**颜色**部分中选择一种颜色，可以更改指示分配给项目中实体的材料集的颜色。
6. 剩余的注浆锚将通过复制已定义的注浆锚来创建。单击“选择”按钮，并在按住 **<Ctrl>** 键的同时单击组成两个地锚杆的所有单元。
7. 使用创建阵列函数将两个地锚杆（2 个预埋梁 + 2 个点对点锚杆）复制到位于 y = 24 和 y = 28 的总共 4 个完整的地锚杆。为此，在“形状”下拉菜单的阵列函数中，选择 y 方向的 1D 选项，然后将列数定义为 2，将列距定义为 4 米。
8. 多选地锚杆的所有部分（总共 8 个实体）。当选中所有部分并按下**<Ctrl>** 键时，右键单击并选择**组**。
9. 在**模型浏览器**树中，通过单击组前面的 (+) 展开**组**子树。
10. 单击“组 1”并将其重命名为 `GroundAnchors`。

    注释: 项目中实体的名称不应包含任何空格或特殊字符，但 _（下划线）除外。

2.4.3 桩板墙和荷载

结构单元的材料属性如下表所示。这些属性是在后续步骤中定义材料所必需的。

表 9: 桩板墙的材料属性

参数	名称	桩板墙	单位
常规			
行为类型	类型	弹性	-
重量	γ	2.55	kN/m^3
力学			
各向同性	-	否	-
杨氏弹性模量	E_1	$1.46 \cdot 10^7$	kN/m^2
	E_2	$7.3 \cdot 10^5$	kN/m^2
泊松比	ν_{12}	0.0	-
厚度	d	0.379	m
剪切弹性模量	G_{12}	$7.3 \cdot 10^5$	kN/m^2
	G_{13}	$1.27 \cdot 10^6$	kN/m^2
	G_{23}	$3.82 \cdot 10^5$	kN/m^2

要定义桩板墙和相应的界面，请执行以下步骤：

1. 选择体积分解时创建的所有四个垂直表面。按住 **<Ctrl>** 键，右键单击并从出现的菜单中选择**创建** > **创建板**选项。
2. 根据表 9(第 46 页)创建桩板墙（板）的数据集。将数据集分配给四面墙。
3. 选中所有表面后，使用鼠标右键菜单中的选项（**创建** > **创建正界面/创建负界面**）为所有表面*同时*分配正界面和负界面。

   注释: 界面的“正”或“负”一词没有物理意义。它只用于区分表面每一侧的界面。
4. 定义了非各向同性（两个方向上的不同刚度）桩板墙。局部轴应指向正确的方向（定义哪个是“硬”方向或“软”方向）。由于垂直方向通常是桩板墙中刚度最大的方向，因此局部轴 1 应指向 z 方向。

   要考虑几何中的非各向同性行为，在**模型浏览器**树中展开子树**几何图形** > **表面** > **多边形体积_3_2**，并将**轴函数**设置为手动，将轴 1_z 设置为 -1。对所有桩板墙表面执行此操作。

   注释:

   - 第一个局部轴用红色箭头表示，第二个局部轴用绿色箭头表示，第三个轴用蓝色箭头表示。有关板的局部轴的更多信息，请参阅 参考手册。
5. 创建由以下点定义的表面荷载：(34 19 0)、(41 19 0)、(41 12 0)、(34 12 0)。
   几何图形现在已完全定义（请参阅图 32(第 47 页)）。

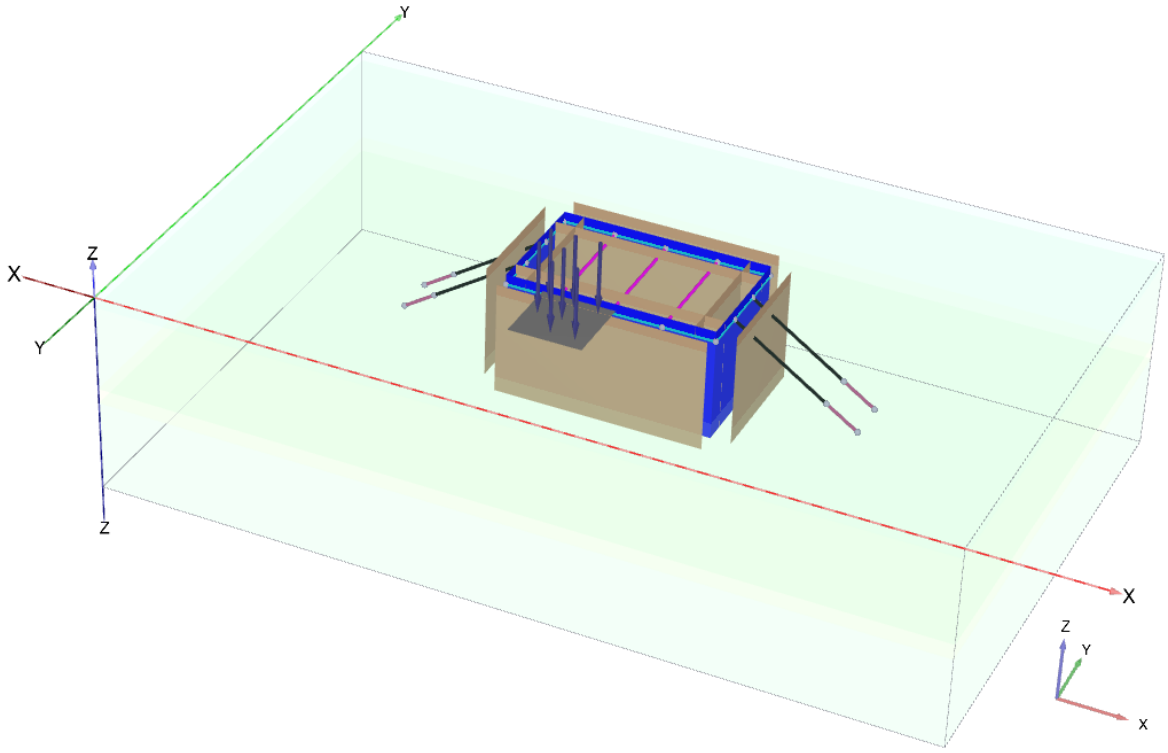


图 32: 结构模式 - 完整的项目几何图形

2.5 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 选择表示挖掘的表面。然后在**选择浏览器**从中将**粗糙度系数**的值设置为 0.25。
3. 将单元分布设置为**粗糙**。取消勾选**增强网格细化**的框。单击**生成网格**按钮 以生成网格。

   注释: 增强网格细化会自动用于网格生成。有关详细信息，请参阅 参考手册。
4. 单击**查看网格**按钮，查看网格。隐藏模型中的土体以查看预埋梁。
5. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序并返回至输入程序的**网格模式**。

2.6 定义计算

计算包含 *6 个阶段*。初始阶段包括使用 **K0 程序**生成初始应力。下一阶段包含安装板桩和第一次挖掘。然后将安装腰梁和支柱。在第 3 阶段，将激活地锚杆并施加预应力。之后的阶段将进行进一步的挖掘。最后一个阶段是在坑旁边施加额外的荷载。

1. 单击**分阶段施工**选项卡，继续定义计算阶段。
2. 初始阶段已引入。保持其计算类型为 **K0 程序**。确保所有土体体积为激活状态，且所有结构单元为非激活状态。

3. 添加新阶段（第 1 阶段）。此计算阶段将使用参数的缺省值。
4. 停用第一个挖掘体积（从 z = 0 到 z = -1）。
5. 在**模型浏览器**中，单击所有板和界面前方的复选框来激活所有板和界面。

   项目中的激活单元由**模型浏览器**中的绿色复选标记指示。

   注释: 为了更清楚地显示激活的单元，可以隐藏土层，这可以通过右键单击感兴趣的土体并选择**隐藏**来实现。
6. 添加新阶段（第 2 阶段）。此计算阶段将使用参数的缺省值。
7. 在**模型浏览器**中激活所有梁。
8. 添加新阶段（第 3 阶段）。此计算阶段将使用参数的缺省值。
9. 在**模型浏览器**中，激活**地锚杆**组。
10. 选择其中一个点对点锚杆。
11. 在**选择浏览器**中，展开点对点锚杆功能。
12. 单击**调整预应力**复选框。输入 200kN 的预应力，如图 33(第 48 页) 所示。

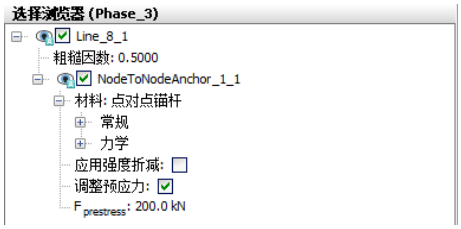


图 33: 选择浏览器中的点对点锚杆

13. 对所有其他点对点锚杆执行相同的操作。
14. 添加其他阶段（第 4 阶段）。此计算阶段将使用参数的缺省值。
15. 选择该阶段要挖掘的土体（在 z = -1 和 z = -6.5 之间）。
16. 在**水条件**功能下的**选择浏览器**中，单击**条件**，然后从下拉菜单中选择**干**选项，如图 34(第 48 页) 所示。



图 34: 选择浏览器中的水条件

17. 停用要挖掘的体积（在 z = -1 和 z = -6.5 之间）。
18. 隐藏挖掘周围的土体和板。
19. 选择挖掘下方的土体（在 z = -6.5 和 z = -9.5 之间）。
20. 在**水条件**功能下的**选择浏览器**中，单击**条件**，并从下拉菜单中选择**水头**。输入 z_{ref} = -6.5 米。
21. 选择挖掘下方的软黏土土体。
22. 将水条件设置为**内插(竖向)**。
23. 预览此计算阶段。
24. 单击**预览**窗口中的**竖向横截面**按钮，并通过在挖掘中间绘制一条线来定义横截面。

    注释: 绘制时按住**<Shift 键>** 以绘制一条直线。
25. 从**应力** > **孔隙水压力**菜单中选择 p_{steady} 选项。
26. 显示稳态孔隙水压力分布的等高线。确保**图例** > **视图**选项已选中。稳态孔隙水压力分布如图 35(第 49 页) 所示。滚动鼠标的滚轮按钮进行放大或缩小，以获得更好的视图。
27. 将图例设置更改为：
    - 缩放：手动
    - 最大值：0
    - 间隔数：18

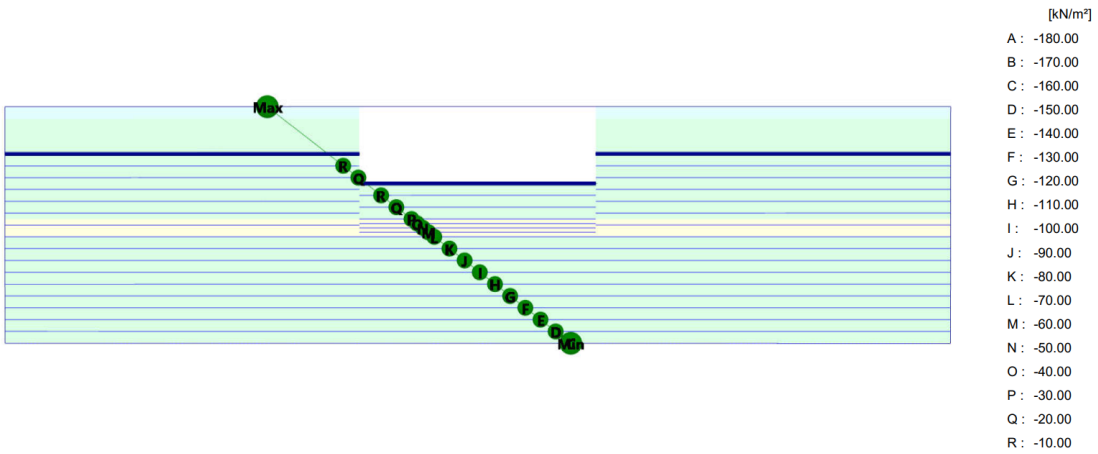


图 35: 第 4 阶段中稳态孔隙水压力的横截面预览

28. 单击**关闭**按钮，返回输入程序。
29. 添加其他阶段（第 5 阶段）。此计算阶段将使用参数的缺省值。
30. 激活表面荷载并设置 σ_z = -20 kN/m^2。

2.6.1 执行计算

在开始计算过程之前，选择挖掘坑和荷载旁边的一些应力点，以便稍后绘制应力应变曲线。

1. 单击**为曲线选择点**按钮 。
   模型和**选择点**窗口将显示在输出程序中。
2. 将**相关点坐标**定义为 (37.5 19 -1.5)。

注释: 可以从菜单更改可视化设置。有关详细信息，请参阅 参考手册。

3. 单击**搜索最相近项**按钮。
   将显示最近节点和应力点的编号。
4. 单击要选择的应力点前面的复选框。
   选定的应力点将显示在列表中。
5. 还要选择坐标 (37.5 19 -5)、(37.5 19 -6) 和 (37.5 19 -7) 附近的应力点，然后关闭**选择点**窗口。
6. 单击**更新**按钮，关闭输出程序。
7. 开始计算过程。
8. 计算完成后保存项目。

注释:

- 不需要在开始计算之前选择曲线的节点或应力点，也可以在查看输出结果时，在计算之后选择点。然而，由于这样只考虑省下来的计算步骤的结果，曲线的准确性会降低。
- 要绘制结构内力曲线，只能在计算后选择节点。
- 只需单击即可选择节点或应力点。移动鼠标时，窗口底部的光标位置指示栏会给出位置的准确坐标。

2.7 结果

计算完成后，可以从**阶段**树中选择一个计算阶段并按下**查看计算结果**按钮来查看挖掘结果。

1. 选择最后一个计算阶段（第 5 阶段），然后单击**查看计算结果**按钮。
   输出程序将打开并在最后一个阶段结束时显示变形网格。
2. 通过从相应的菜单中选择所需的输出，可以查看应力、变形和三维几何图形。例如，选择菜单**应力** > **塑性点**来研究模型中的塑性点。
3. 在**塑性点**窗口中，选择除**弹性点**和**仅显示不正确的点**选项以外的所有选项（请参阅图 36(第 50 页)）。

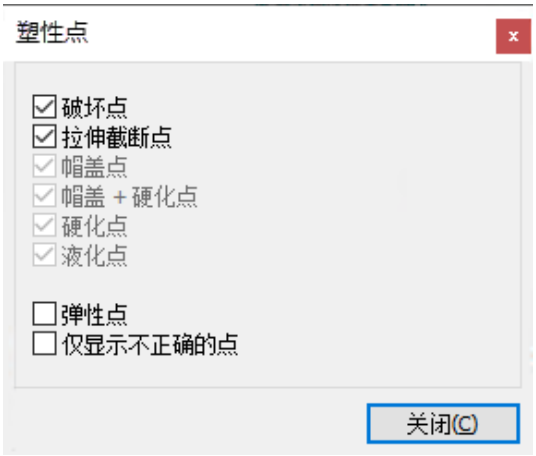


图 36: 塑性点窗口

下图显示了最后一个计算阶段结束时模型中生成的塑性点。

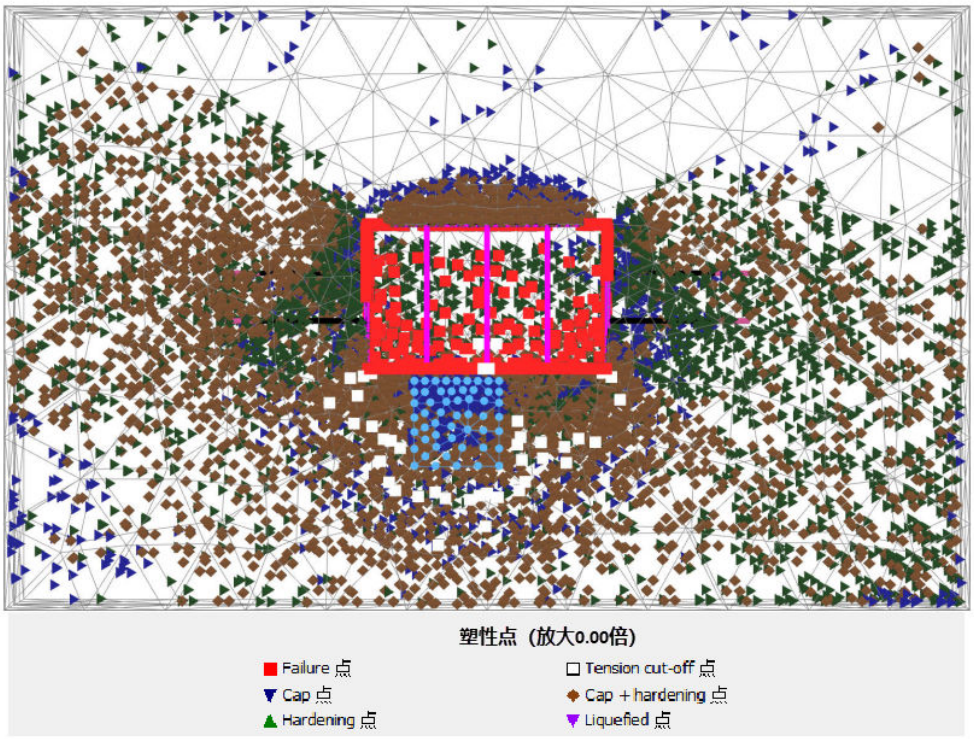


图37: 最后一个计算阶段结束时的塑性点

该图现在将显示主要主应变与主要主应力的关系。这两个值在初始条件开始时都为零。初始条件生成后，主应变仍为零，而主应力不再为零。要在一张图中绘制所有选定应力点的曲线，请按照以下步骤操作：

1. 单击**曲线管理器**选项，将弹出一个窗口。单击**新建**，然后选择 X 轴和 Y 轴的应力点，如图 38(第 52 页)所示。
2. 右键单击，然后选择**从当前项目 > 添加曲线**。
3. 以相同的方式为剩余的三个应力节点生成曲线。

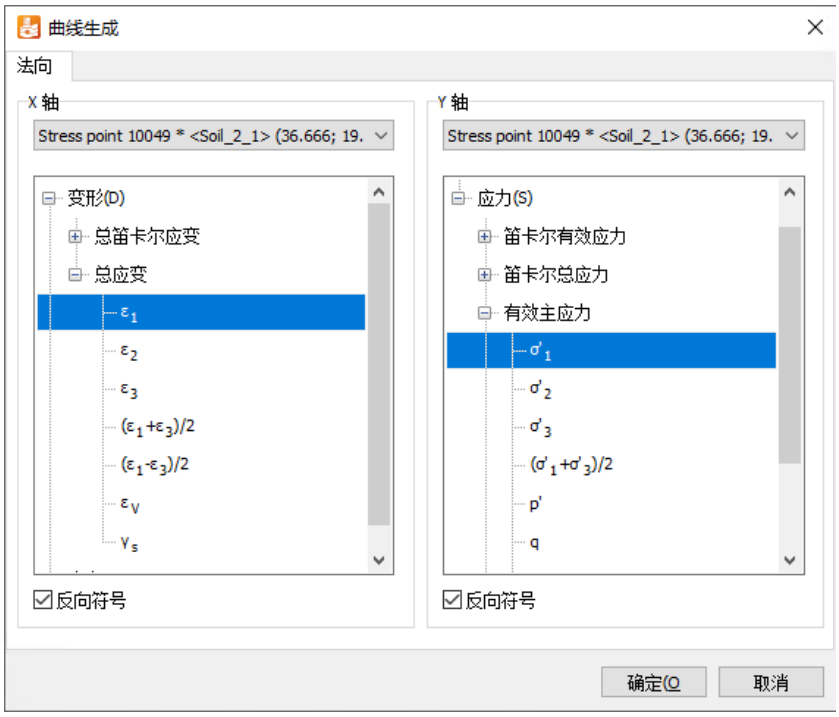


图 38: 曲线生成窗口

该图现在将显示所有四个应力点的应力-应变曲线。

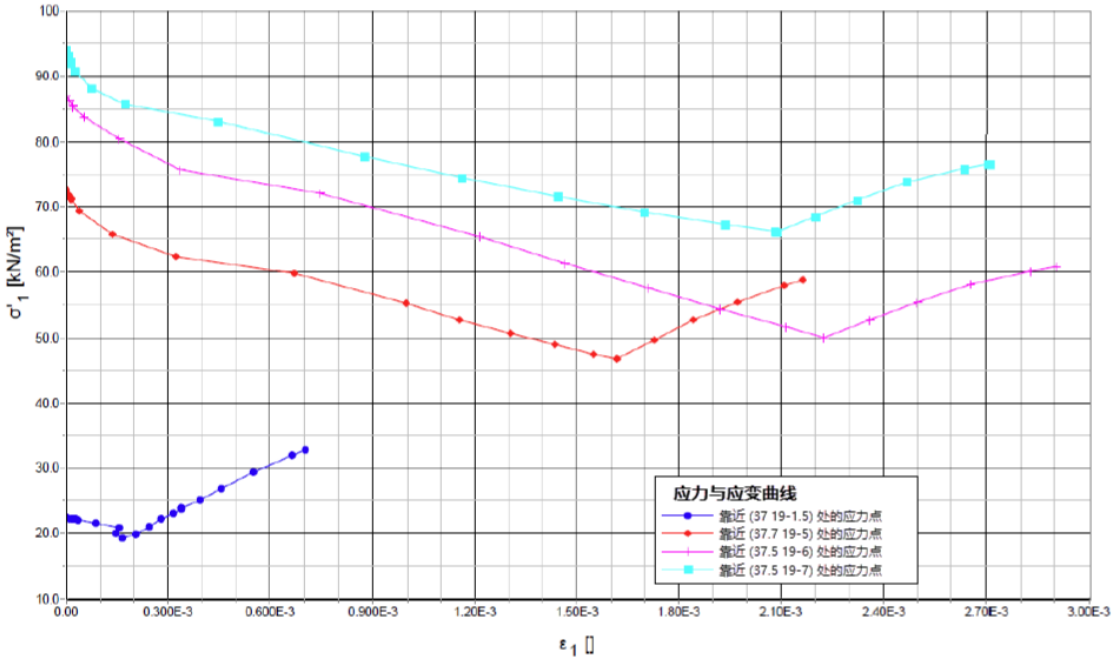


图 39: 应力-应变曲线

要查看有关标记的信息，请确保选中菜单项**视图** > **值表示**，并在标记上按住鼠标一段时间。给出了图中坐标、图中点数、阶段数和步数的信息。特别是较低的应力点在最后阶段施加荷载时显示出显著的应力增加。

注释:

- 要重新进入**曲线生成**窗口（在出现错误、需要重新生成或修改的情况下），请选择菜单项**格式** > **曲线设置**。结果会出现**曲线设置**窗口，在该窗口上应单击**重新生成**按钮。
- 菜单项**格式** > **图表设置**菜单可用于修改图表的设置。

要为应力节点 (37.5 19 -1.5) 创建应力路径图，请执行以下步骤：

1. 创建新图表。
2. 在**曲线生成**窗口中，从图形的 x 轴下拉菜单中选择节点 (37.5 19 -1.5)，在**笛卡尔有效应力**下选择 σ'_{yy}。
3. 从图形 y 轴的下拉菜单中选择节点 (37.5 19 -1.5)。在**笛卡尔有效应力**下选择 σ'_{zz}。
4. 单击**确定**确认输入。

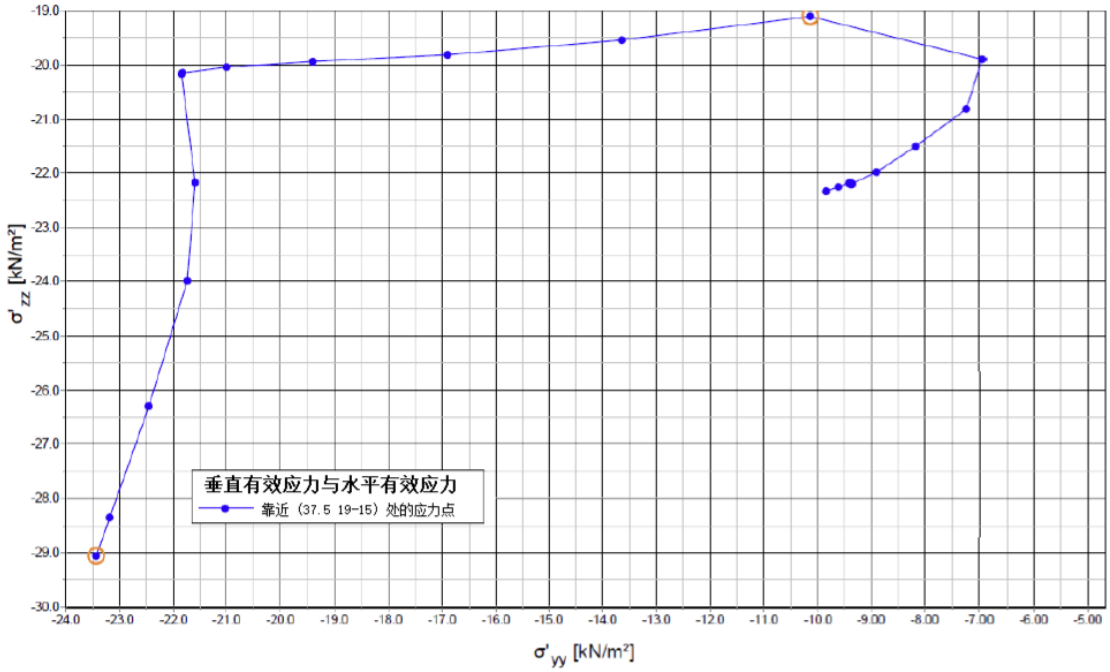


图 40: 位于 (37.5 19 -1.5) 附近的应力节点处的垂直有效应力 (σ'_{yy}) 与水平有效应力 (σ'_{yy})

3 装载吸力桩

在本教程中，将考虑近海地基中的吸力桩。吸力桩是一种直径较大、顶部封闭的空心钢桩，安装在海床中，从内部抽水。由此产生的内外压力差是这种装置的驱动力。

本练习将研究吸力桩在工作荷载条件下的位移。将考虑工作荷载的四个不同角度。安装过程本身不会进行建模。

目标

- 使用多段曲线设计器
- 使用刚体对象
- 具有不排水强度参数的不排水有效应力分析
- 不排水剪切强度随深度增加
- 复制材料数据集
- 更改输出中的设置
- 局部网格细化的辅助对象

几何图形

在本练习中，吸力桩的长度为 10 米，直径为 5.0 米。锚链连接在桩的侧面，距顶部 7 米。所考虑位置的水深为地上 50 米。只会对一个对称的一半进行建模。

土体由黏土组成，但由于荷载持续时间短，将执行具有不排水强度参数的不排水有效应力分析。问题的几何图形如下所示。

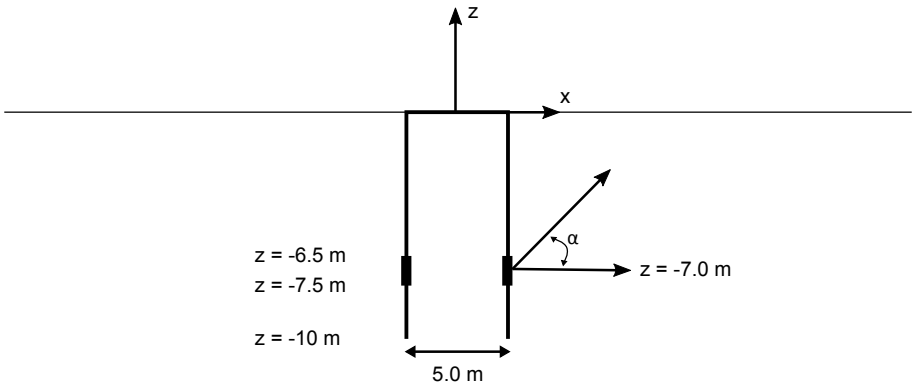


图 41: 吸力桩的几何图形

3.1 创建新项目

在本例中，将模拟一个 30 m 宽、60 米长、一半为吸力桩的区域。凭借这些尺寸，模型就足够大，可以避免模型边界的任何影响。要为此练习定义几何图形，请执行以下步骤：

1. 启动**输入**程序，然后从**创建/打开项目**对话框中选择**新建项目**。
2. 为项目输入适当的标题。
3. 保留标准单位并将模型尺寸设置为：
   a. x_{min} =-30.0 且 x_{max} = 30.0，
   b. y_{min} = 0.0 且 y_{max} = 30.0。
4. 单击**确定**。

3.2 定义土壤地层学

在当前示例中，仅存在一个水平土层。一个钻孔就足以定义它。

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 (0 0 0) 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 在**修改土层**窗口中添加一个顶部边界位于 z = 0 米、底部边界位于 z = -30 米的土层。
3. 考虑位置的水深为 50 米。这意味着水头设置为 50 米，但只要整个几何形状低于水位，结果就会相等（地面以上的水是总荷载而不是有效荷载）。因此，1.0 米的水头就足够了。将**水头**设置为 1.0 米。

3.3 创建和分配材料数据集

数据集的材料属性见表 10(第 55 页)。

表 10: 土体和界面的材料属性

属性	名称	黏土	界面	单位
常规				
土体模型	模型	摩尔-库伦	摩尔-库伦	-
排水类型	类型	不排水 B	不排水 B	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	20	20	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20	20	kN/m^3
力学				
杨氏弹性模量	E'_{ref}	1000	1000	kN/m^2
泊松比	$\nu(nu)$	0.35	0.35	-
刚度增加	E'_{inc}	1000	1000	$kN/m^2/m$
参考层	z_{ref}	0.0	0.0	m
不排水剪切强度	$s_{u,ref}$	1.0	1.0	kN/m^2

力学				
不排水剪切强度增加	$s_{u,inc}$	4.0	4.0	$kN/m^2/m$
拉伸截断	-	非激活	非激活	-
界面				
强度定义	-	刚性	刚性	-
界面折减因子	R_{inter}	1.0	1.0	-
初始				
K_0 测定	-	手动	手动	-
初始侧土压力系数	$K_{0,x}$，$K_{0,y}$	0.5	0.5	-

1. 单击**材料**按钮 。
2. 创建表 10(第 55 页)中给出的数据集。在强度高级参数的**力学**页面中，取消选择**拉伸截断**选项。在本练习中，土体的渗透性不会影响结果。在此示例中，不使用有效强度属性，而是使用粘聚力参数来模拟不排水剪切强度。

   注释:

   通过复制“黏土”数据集，可以快速创建**界面**数据集。
3. 将“黏土”材料数据集分配给土层并关闭**材料集**窗口。

3.4 定义结构单元

吸力桩在**结构模式**中被建模为半个圆柱面，然后被定义为刚体。此外，为局部网格细化设置了一个辅助对象。

3.4.1 创建吸力桩

在**结构模式**中，将把吸力桩定义为刚体。这是通过在土体表面创建多段曲线并将其向下拉伸来实现的。

1. 单击**结构**选项卡以进入**结构模式**。
2. 单击**启动设计器**按钮 ，然后从边栏中选择**创建多段曲线** 。
3. 在绘图区域单击 (2.5 0 0)，定义插入点。

   注释: 选择菜单**选项** > **可视化设置**，然后将**间隔**设置为 2，同时**间距**保留为 1 米。这允许以 0.5 米的间隔移动鼠标。

   将弹出**多段曲线设计器**窗口。

4. 在 xy 平面中绘制多段曲线（请参阅图 42(第 57 页)）。因此，缺省方向轴对本示例有效。

注释: 有关详细信息，请参阅 参考手册 中的“*创建多段曲线*”。

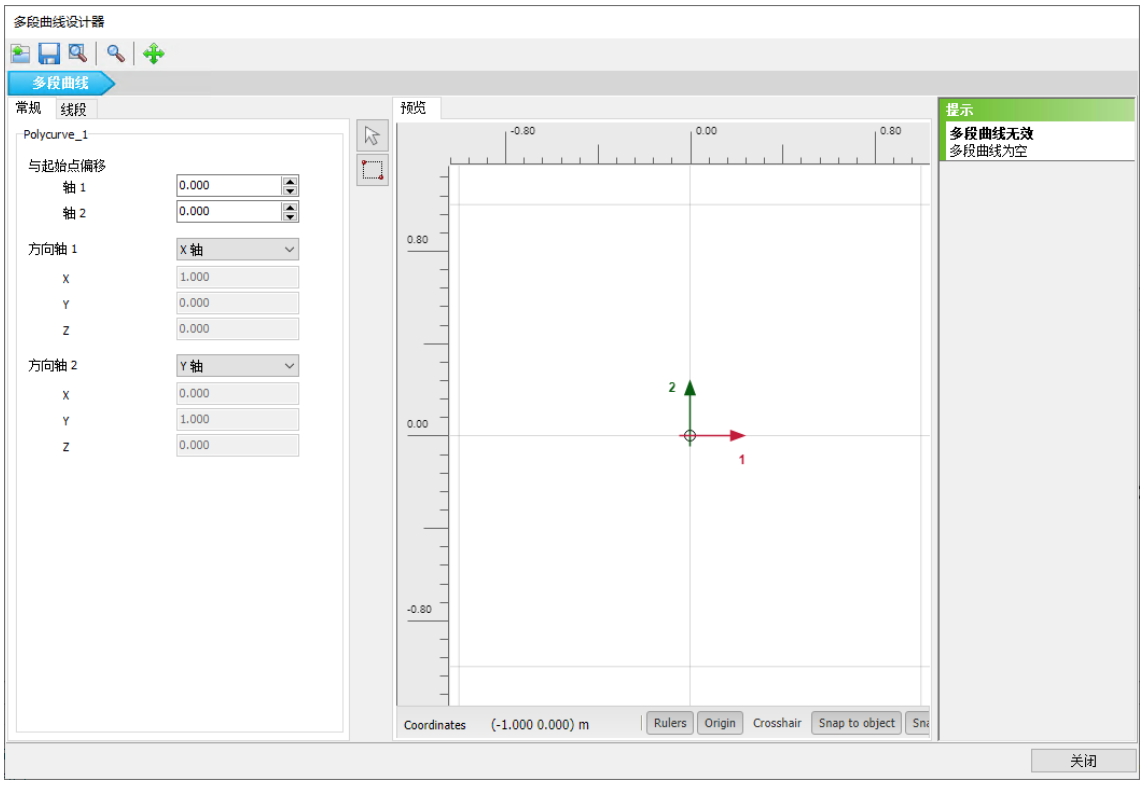


*图 42: **多段曲线设计器**的**常规**页面*

5. 在**线段**页面中，单击侧工具栏中的**添加线段**按钮 。
6. 在线段浏览器中，针对新创建的单元，将**线段类型**设置为**弧**，将**相对起始角**设置为 90°，将**半径**设置为 2.5 米，将**线段角度**设置为 180°。几何图形将自动出现在**预览区域**中。

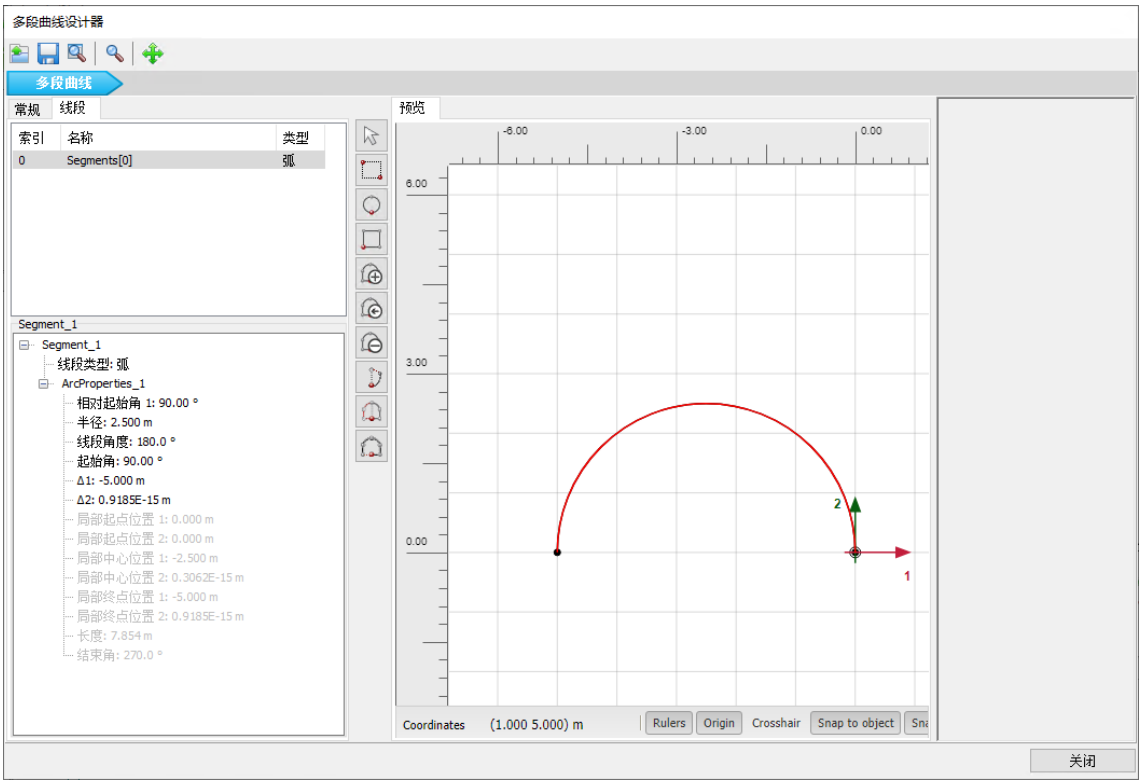


*图 43: **多段曲线设计器**的**线段**页面*

7. 单击**关闭**，多段曲线将自动插入到模型中。
8. 单击创建的多段曲线，选择**拉伸对象** ，并将 z 值设置为 -10 米。
9. 右键单击已创建点表面，然后选择“创建正界面”，在吸力桩内部创建一个界面。以同样的方法在吸力桩外部创建一个负界面。
10. 右键单击多段曲线并从出现的菜单中选择**关闭**。此外，右键单击闭合的多段曲线，并选择**创建** > **创建表面**。
    这将创建吸力桩的顶部表面。
11. 右键单击顶部表面并创建一个负界面。
12. 在**模型浏览器**中，选择每个**界面**。选择界面后，在**材料模式**内的**选择浏览器**中，从显示的下拉菜单中选择**自定义**（请参阅图 44(第 58 页)）。
13. 针对**材料**选项，从下拉菜单中选择**界面**。



图 44: 选择浏览器中的界面材料分配

14. 多选顶部和曲面。右键单击选择的表面并从出现的菜单中选择选项**创建** > **创建刚体**（请参阅图 45(第 59 页)）。

注释:

要创建吸力桩，使用刚体功能。有关刚体的更多信息，请参阅 参考手册 中的相应部分。

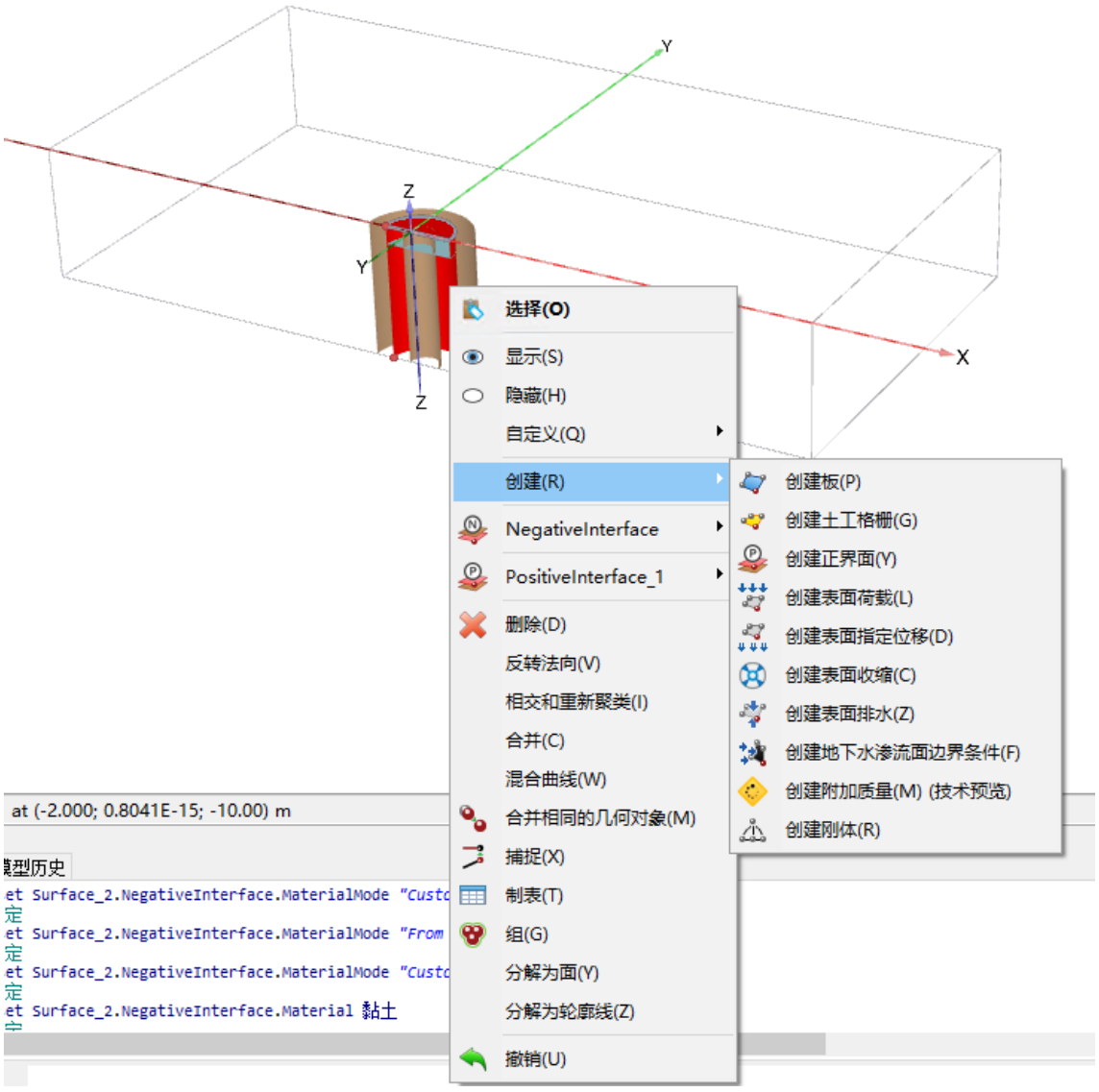


图 45: 创建刚体

15. 选择已创建的刚体，然后在**选择浏览器**中，将参考点设置为 (2.5 0 -7)，将值分配给 x_{ref}、y_{ref} 和 z_{ref}。
16. 如图 46(第 60 页)所示，将转换条件 $_y$ 设置为**位移**，将旋转条件 $_x$ 和旋转条件 $_z$ 设置为**旋转**。它们对应的值为 $u_y = \phi_x = \phi_z = 0$。

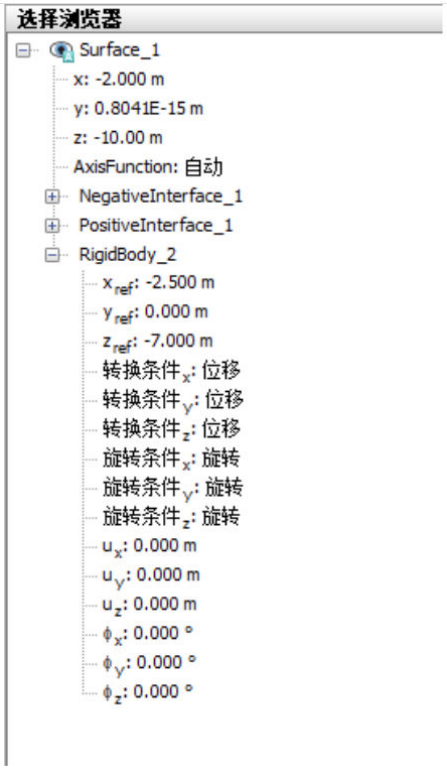


图 46: 选择浏览器中的刚体

3.4.2 创建局部网格细化的辅助对象

在吸力桩周围创建一个表面，以实现更好的网格细化。这是通过使用**多段曲线设计器**在吸力桩周围创建圆形表面来实现的。

1. 单击“启动设计器”按钮，从边栏中选择**创建多段曲线**按钮，然后单击绘图区域中的 (7.5 0 0)。
2. 在**常规**页面中，缺省方向轴（x 轴，y 轴）对此多段曲线有效。
3. 在**线段**页面中，单击顶部工具栏中的**添加线段**。将**线段类型**设置为**弧**，将**相对起始角**设置为 90°，将**半径**设置为 7.5 米，将**线段角度**设置为 180°。
4. 从工具栏中单击**闭合多段曲线**以闭合多段曲线。
5. 关闭**多段曲线设计器**。
6. 单击创建的多段曲线，选择**拉伸对象**，并将 z 值设置为 -15 米。
7. 选择刚创建的多段曲线和先前为吸力桩创建的多段曲线，右键单击并从显示的菜单中选择**删除**，如图 47(第 61 页) 所示。

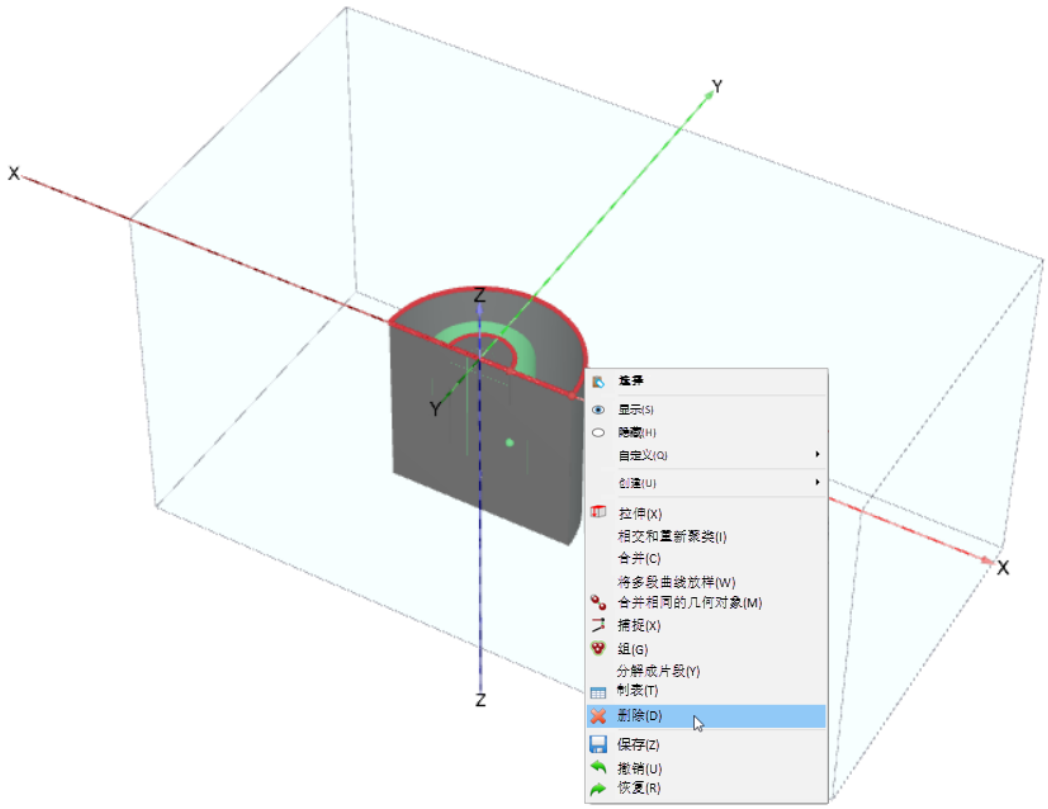


图 47: 删除两个创建的多段曲线

项目的几何图形定义如图 48(第 61 页) 所示。

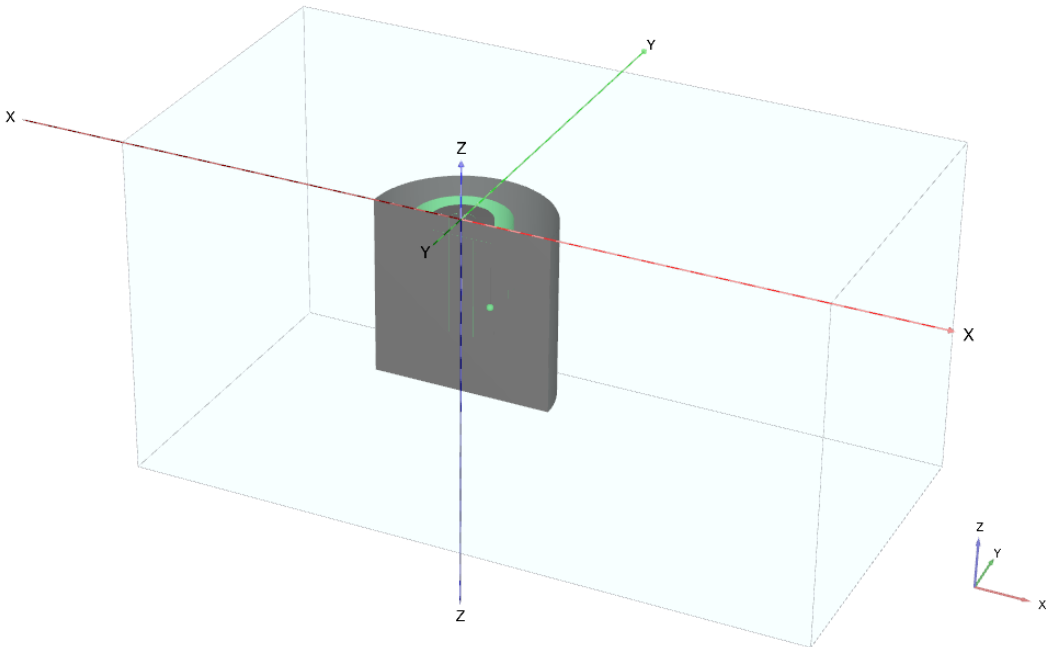


图 48: 吸力桩的几何图形

3.5 生成网格

若要生成网格，请执行以下步骤：

1. 单击**网格**选项卡以进入**网格模式**。
2. 隐藏吸力桩的外表面以及限制网格细化区域的表面。多选吸力桩、吸力桩周围表面和吸力桩顶部表面。
3. 在**选择浏览器**中，将**粗糙度系数**的值设置为 0.25。
4. 单击**生成网格**按钮  以生成网格。单元分布为**中等**。
5. 进入**分阶段施工模式**。

3.6 定义计算

本练习的计算包括六个阶段。分别为初始条件的确定、吸力桩的安装和四种不同的荷载条件。将分析在保持量级不变的情况下荷载方向变化的影响。

3.6.1 初始阶段：初始条件

单击**分阶段施工**选项卡，继续定义计算阶段。

1. 保持初始阶段的计算类型为 **K0 程序**。确保所有结构和界面都已关闭。

3.6.2 第 1 阶段：安装吸力桩

1. 添加新的计算阶段并将其重命名为 `Install pile`。
2. 对于此阶段，我们使用**忽略不排水行为**选项。
3. 激活项目中的所有刚体和界面。

3.6.3 第 2 阶段：荷载桩 30 度

1. 添加新的阶段并将其重命名为 `Load pile 30 degrees`。
2. 在**阶段**窗口中，打开**变形控制参数**子树，勾选**将位移重置为零**复选框。
3. 在**数字控制参数**子树集中：
   a. 针对**求解器类型**选择 **Pardiso（多核直接）**，以加快该特定项目的计算速度。

b. 取消勾选**使用缺省迭代参数**复选框，此复选框使您能够更改高级设置。
c. 将**每个步骤最大荷载系数**更改为 0.1。

4. 在**模型浏览器**中，单击**刚体**。
5. 在**选择浏览器**树中，为选择的刚体设置 F_x = 1949 kN，F_z = 1125 kN。

3.6.4 第 3、4、5、6 阶段： 不同方向角的荷载桩

根据表 11(第 63 页)中的信息定义剩余阶段。针对每个阶段选择**将位移重置为零**选项，并将**求解器类型**设置为 **Pardiso（多核直接）**，将**每个步骤最大荷载系数**设置为 0.1。

表 11: 链条连接点的荷载信息

相位	起始阶段	F_x	F_z
荷载桩 30 度 [第 2 阶段]	第 1 阶段	1949 kN	1125 kN
荷载桩 40 度 [第 3 阶段]	第 1 阶段	1724 kN	1447 kN
荷载桩 50 度 [第 4 阶段]	第 1 阶段	1447 kN	1724 kN
荷载桩 60 度 [第 5 阶段]	第 1 阶段	1125 kN	1949 kN

阶段的顺序在**阶段资源管理器**中显示（请参阅图 49(第 63 页)）。第 1 阶段的计算在初始阶段的计算完成后开始。其余阶段的计算在桩安装阶段的计算完成后开始。

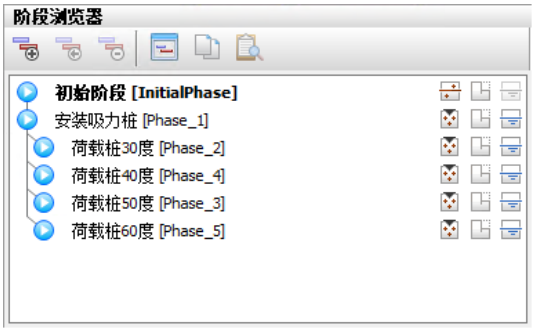


图 49: 阶段浏览器

3.6.5 执行计算

1. 开始计算过程。
2. 计算完成后保存项目。

3.7 结果

要查看结果，请执行以下步骤：

1. 查看最后一个计算阶段的结果。将显示整个几何图形的变形网格。尤其是，吸力桩本身的位移很重要。
2. 选择阴影表示并旋转模型，使 Y 轴与屏幕垂直。
3. 如果轴不可见，请从**视图**菜单中选择此选项。很明显，作用在桩上的点力不会干扰局部位移场，这表明桩在此处足够厚。
4. 同理，通过从下拉菜单中选择相应的阶段，可以检查吸力桩在不同荷载方向下的总位移。第 2 阶段尤其重要，因为在这个阶段荷载的水平部分将具有最大值。

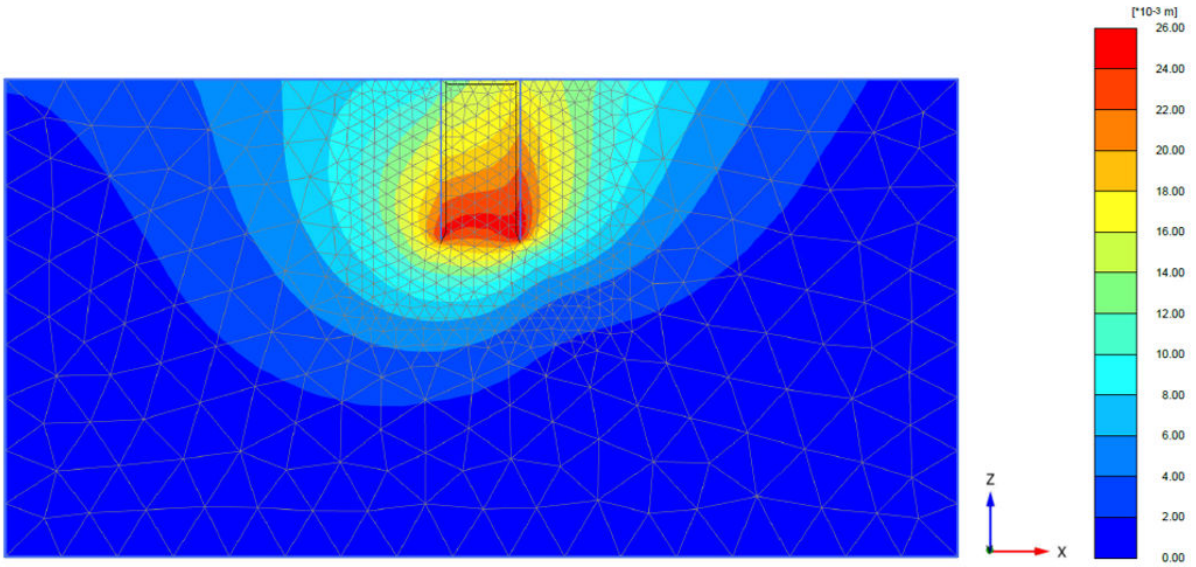


图 50: 第 2 阶段结束时吸力桩的总位移

4 地连墙挖掘的稳定性

本课程是关于在地下水位位于地表以下 1.0 米处的坚硬砂质黏土层中建造地连墙。地连墙的挖掘过程按特定顺序进行，以获得周围土体的最大支撑，并防止土体塌陷。地连墙由许多单独建造的段组成。本练习对其中一个这样的段的建造进行了建模。

目标

- 定义用户定义的水条件
- 地连墙安装建模

几何图形

单个地连墙段分三部分挖掘，施工建模可分五个阶段。在前三个阶段，墙体按图 51(第 65 页) 所示的顺序逐部分挖掘。在挖掘过程中，单位重量为 11 kN/m^3 的流体膨润土同时被泵入管沟中，因而膨润土压力和土体中的拱起部分可防止周围土体塌陷。挖完管沟后，在第四阶段，在管沟中浇注流体混凝土来代替膨润土。在第五阶段，混凝土硬化，地连墙这一段完工。第三阶段挖掘的稳定性最低，此时这一段已全部挖掘并填充膨润土。在每个阶段过后，通过 phi-c 折减程序计算安全系数，以观察挖掘的稳定性。

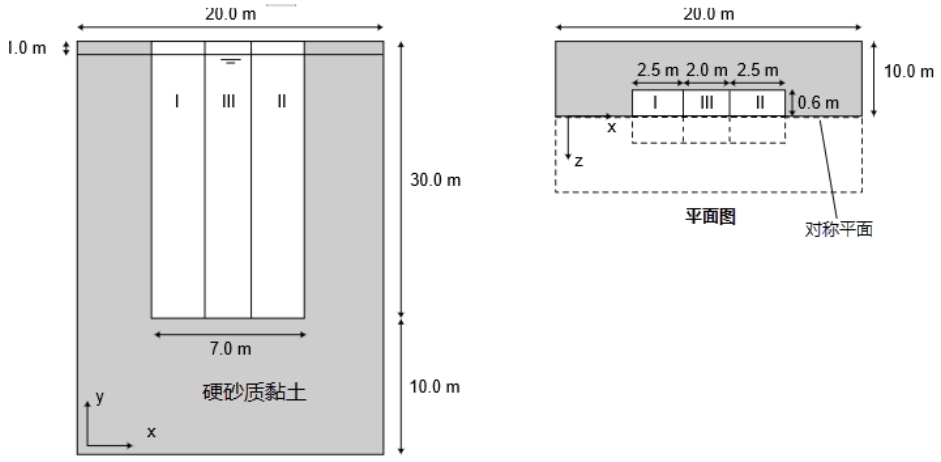


图 51: 地连墙的几何图形

4.1 创建新项目

本练习中考虑的地连墙深 30 米，厚 1.2 米。其中一段宽 7.0 米，由三个挖掘部分组成；第一部分和第二部分宽 2.5 米，第三部分宽 2.0 米。墙关于其中心平面呈对称，因此只需要对一半的厚度进行建模。墙和土体之间的相互作用被认为是完全粗糙的，因此不需要界面。

要为此练习定义几何图形，请执行以下步骤：

1. 启动**输入**程序，然后从**创建/打开项目**对话框中选择**新建项目**。

2. 为项目输入适当的标题。
3. 保留标准单位并将模型尺寸设置为：
   a. x_{min} =0 且 x_{max} = 20，
   b. y_{min} = 0 且 y_{max} = 10。
4. 单击**确定**。

4.2 定义土壤地层学

在当前示例中，仅存在一个水平土层。一个钻孔就足以定义它。

1. 单击**创建钻孔**按钮  并在 (0 0 0) 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 在**修改土层**窗口中添加一个顶部边界位于 z = 40 米、底部边界位于 z = 0 米的土层。
3. 将**水头**设置为 39 米。

4.3 创建和分配材料数据集

数据集的材料属性见表 12(第 66 页)。

表 12: 土体和混凝土的材料属性

属性	名称	硬砂质黏土	混凝土	单位
常规				
土体模型	模型	摩尔-库伦	线弹性	-
排水类型	类型	排水	非多孔	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	15	24	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20	-	kN/m^3
力学				
杨氏弹性模量	E'_{ref}/E_{ref}	$50{\cdot}10^3$	$2.6{\cdot}10^7$	kN/m^2
泊松比	$\nu(nu)$	0.3	0.2	kN/m^2
粘聚力	c'_{ref}	15	-	kN/m^2
摩擦角	φ' (phi)	30	-	度
剪胀角	ψ (psi)	0.0	-	度

界面				
强度定义	-	刚性	刚性	-

初始				
K_0 测定	-	自动	自动	-

1. 单击**材料**按钮 。
2. 创建土层和混凝土的数据集，如表 12(第 66 页)所示。
3. 将“硬砂质黏土”材料数据集分配给土层并关闭**材料集**窗口。

4.4 地连墙的定义

地连墙在**结构模式**中建模。构成地连墙的体积单元是通过挤压矩形表面生成的。

表面的坐标见表 13(第 67 页)：

表 13: 构成地连墙的表面

线段	点坐标
I	(6.5 0 40) (9 0 40) (9 0.6 40) (6.5 0.6 40)
II	(11 0 40) (13.5 0 40) (13.5 0.6 40) (11 0.6 40)
III	(9 0 40) (11 0 40) (11 0.6 40) (9 0.6 40)

1. 在边栏中单击**创建表面**按钮，并根据表 13(第 67 页)创建三个表面。
2. 按住 **<Ctrl>** 键的同时在模型中单击创建的表面将其选中。
3. 在边栏中单击**拉伸对象**按钮。将拉伸矢量设置为 (0 0 -30)，将拉伸矢量长度设置为 30，如图 52(第 68 页) 所示。

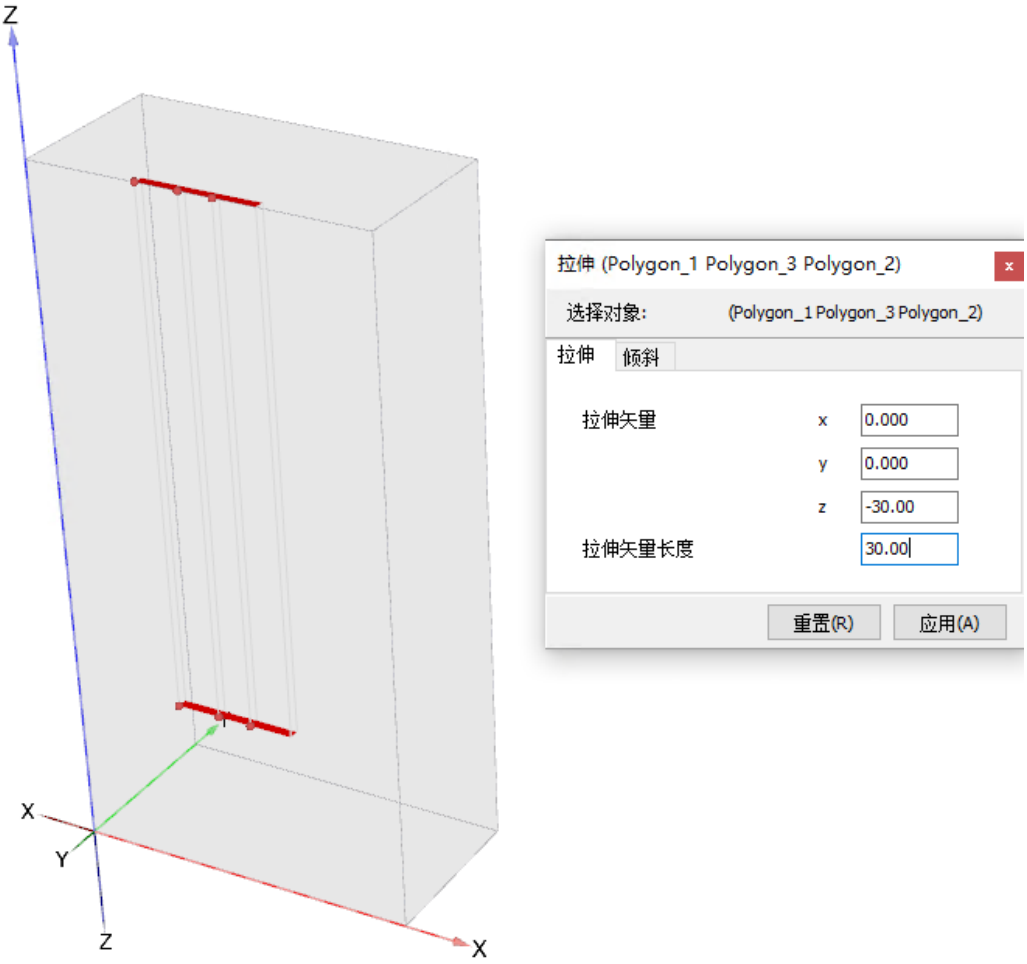


图 52: 拉伸表面

4. 删除表面。

4.5 生成网格

若要生成网格，请执行以下步骤：

1. 单击**网格**选项卡以进入**网格模式**。
2. 多选地连墙的所有体积单元。
3. 在**选择浏览器**中，将**粗糙度系数**的值设置为 0.50。
4. 单击**生成网格**按钮。缺省选项（**中等**）用于生成网格。
5. 单击**查看网格**按钮以检查生成的网格（请参阅图 53(第 69 页)）。

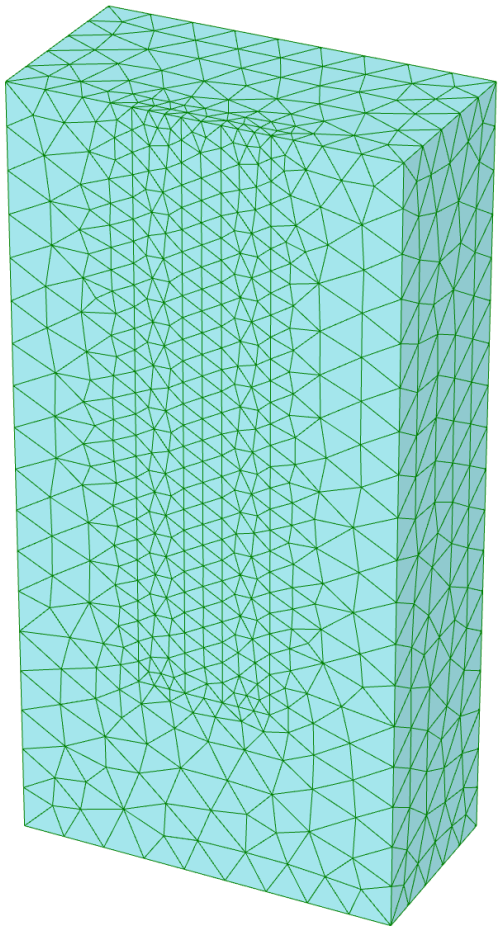


图 53: 生成的网格

6. 进入**分阶段施工模式**。

4.6 定义计算

计算包含 5 个阶段。在第一阶段，挖掘的第一部分被移除，同时填充膨润土。单位重量为 11 kN/m^3 的膨润土采用随深度线性增加的人工“水”压力进行模拟。该压力取代了挖掘内部的原始水压。在挖掘部分的第二和第三阶段，第二部分和第三部分被移除并填充膨润土。在第四阶段，整个挖掘的管沟都填充了流体混凝土。通过人工“水”压的变化来模拟单位重量为 24 kN/m^3 的流体混凝土。在第 5 阶段，通过消除人工压力、重新激活挖掘的类组并将混凝土材料集分配给这些类组来模拟混凝土的硬化。

4.6.1 初始阶段

初始阶段包括使用 **K0 程序**生成初始应力。初始阶段的缺省设置有效。

4.6.2 第 1 阶段 - 第一部分的挖掘

1. 添加第一个计算阶段。
2. 选择第一个挖掘体积（第一部分）。
3. 在选择浏览器中（请参阅图 54(第 70 页)），停用土体。将水条件设置为**用户定义**，然后输入 z_{ref} = 40 米，p_{ref} = 0.0 kN/m^2，p_{inc} = -11 kN/m^2/m。

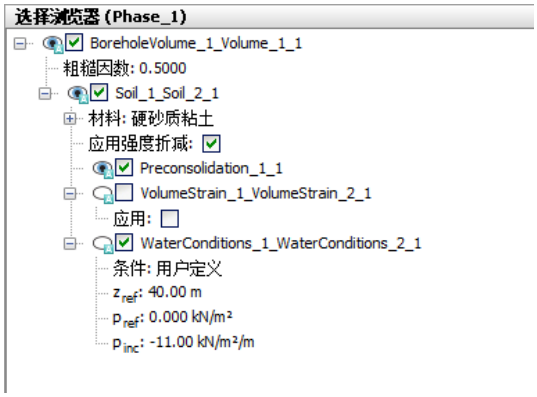


图 54: 第一部分的用户定义的水条件

现在挖掘的第一部分定义了膨润土压力，从 40 米参考层的 0 kN/m^2 开始，每米深度增加 11 kN/m^2，最后挖掘底部的压力为 330 kN/m^2。

4. 单击**预览阶段**按钮以查看当前阶段的设置。

4.6.3 第 2 阶段 - 第二部分的挖掘

1. 添加新阶段。
2. 选择第二个挖掘体积（第二部分）。
3. 在选择浏览器中，停用土体。将水条件设置为**用户定义**，然后输入 z_{ref} = 40 米，p_{ref} = 0.0kN/m^2，p_{inc} = -11 kN/m^2/m。

4.6.4 第 3 阶段 - 第三部分的挖掘

1. 添加新阶段。
2. 选择第三个挖掘体积（第三部分）。
3. 在选择浏览器中，停用土体。将水条件设置为**用户定义**，然后输入 z_{ref} = 40 米，p_{ref} = 0.0kN/m^2，p_{inc} = -11kN/m^2/m。

4.6.5 第 4 阶段 - 流体混凝土

挖掘中的膨润土现在被重量为 24.0kN/m^3 的流体混凝土所取代。

1. 添加新阶段。
2. 选择三个挖掘体积。

3. 在选择浏览器中，更改**用户定义**的水条件，然后输入 p_{inc}= -24kN/m^2/m。其他参数必须保持其原始值（z_{ref} = 40 米，p_{ref} = 0.0kN/m^2）。

4.6.6 第 5 阶段 - 固化混凝土

1. 添加新阶段。
2. 选择三个挖掘体积。
3. 选择浏览器，重新激活土体并将材料设置为混凝土。
4. 将水条件设置为**干燥**。

注释:

尽管混凝土是无孔的，并且计算程序将自动假定这些单元中的孔隙水压力为零，但最好的做法是重新生成水压，以使生成的孔隙水压力与计算程序中使用的孔隙水压力相对应。

4.6.7 第 6 阶段至第 9 阶段 - 安全分析

在第 6 阶段至第 9 阶段，除了流体混凝土阶段（由于单位重量较高，比膨润土阶段的关键性要低）之外，分别为前几个阶段定义了稳定性计算。第 3 阶段应该是最关键的，因为膨润土的支撑压力很低。此外，挖掘处于其最大宽度，这降低了横向拱起的可能性。通过**安全**分析计算前三个阶段的安全系数，可以检查第 3 阶段是否是最关键的阶段。

1. 在**阶段浏览器**中选择第 1 阶段。
2. 添加新的计算阶段并进入**阶段**窗口。
3. 将**计算类型**设置为**安全**。**增量乘子**选项作为**荷载类型**是有效的。
4. 在**变形控制**子树中，选择**将位移重置为零**选项。
5. 在**数字控制参数**子树中，将**最大步数**参数设置为 40。
6. 按照相同的程序在第 2、3 和 5 阶段之后添加**安全**分析阶段。

4.6.8 执行计算

1. 在**分阶段施工模式**，为曲线选择 (10 1 40) 和 (10 4.5 40) 附近的一些节点。
2. 开始计算过程。
3. 计算完成后保存项目。

4.7 结果

挖掘的稳定性可以通过每个挖掘阶段过后计算的安全系数来评估。使用曲线程序来绘制 ΣMsf（安全系数）将其作为位移 |u| 的函数（请参阅图 55(第 72 页)）。在第 3 阶段，稳定性最低。但是，ΣMsf 仍然大于 1，因此不会发生塌陷。

要以这种方式计算三种情况下的安全系数，请执行以下步骤:

1. 单击工具栏中的**曲线管理器**按钮。
2. 单击**图表**页面的**新建**。
3. 在**曲线生成**窗口中，x 轴选择两个节点中的其中一个节点。选择**变形** > **总位移** > **|u|**。
4. **y** 轴选择**项目**，然后选择**乘子** > **ΣMsf**。该图表中考虑了安全阶段。因此，图 55(第 72 页) 的曲线如下。
5. 在**图表**选项卡中将 x 轴间隔最大值设置为 0.1，将 y 轴的值设置为 7.0。

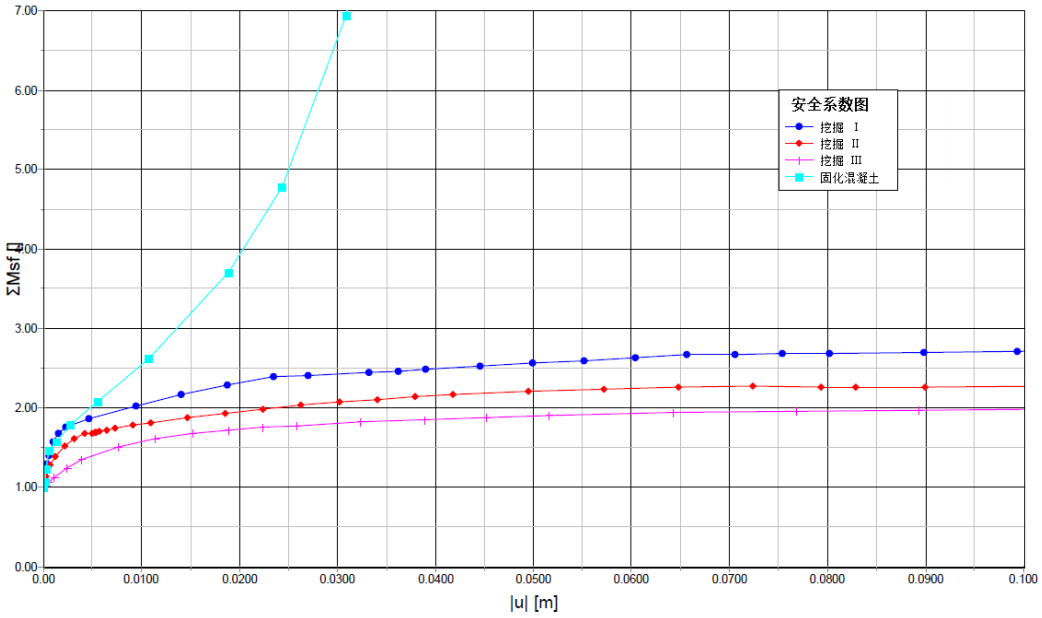


图 55: ΣMsf（安全系数）作为总位移的函数

保持挖掘稳定的一个重要现象是土体中的拱起。此现象如图 56(第 72 页)、图 57(第 73 页) 和图 58(第 73 页) 所示。要查看选定深度处的主应力方向，请单击**水平横截面**按钮生成水平横截面。

1. 要创建此类图，请在边栏中单击**水平横截面**按钮生成水平横截面。
2. 在出现的窗口中填写 25 米的横截面高度（在地连墙的中间高度）。
3. 选择菜单项**应力** > **主总应力** > **总主应力**。
4. 在**视图** > **视角**中选择顶视图以重新调整模型的方向，获得更清晰的拱起效果视图。

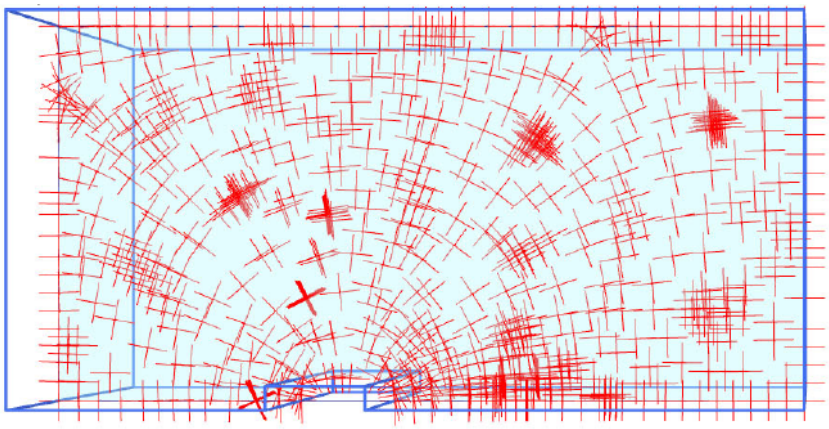


图 56: 第 1 阶段结束时 z = 25 米处的主应力方向

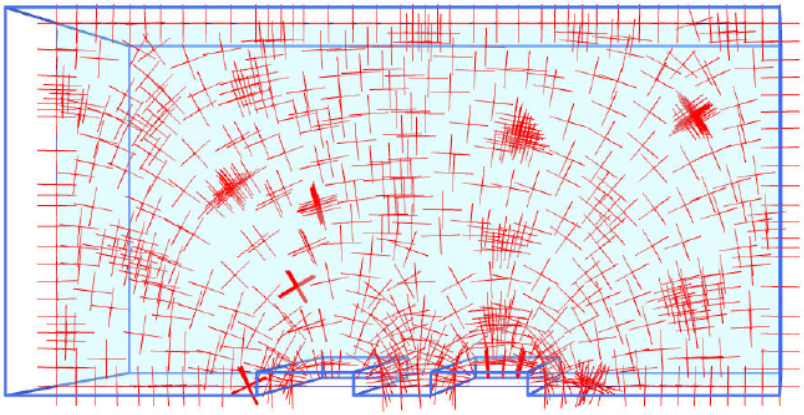


图 57: 第 2 阶段结束时 z = 25 米处的主应力方向

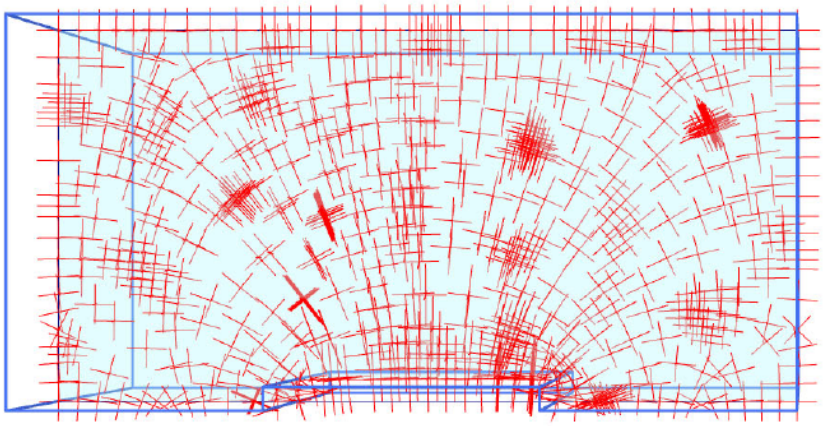


图 58: 第 4 阶段结束时 z = 25 米处的主应力方向

5 盾构隧道的分阶段挖掘 [GSE]

盾构隧道的衬里通常使用预制混凝土环段建造，这些环段在隧道掘进机内用螺栓连接起来，形成隧道衬里。在隧道衬里的竖立建造过程中，隧道掘进机 (TBM) 保持静止。一旦隧道衬里环完全竖立起来，就重新开始挖掘，直到挖出足够的土体来竖立下一个衬里环。因此，施工过程可以按隧道环的长度（通常为 1.5 米）来划分施工阶段。在其中的每个阶段，都一遍又一遍地重复相同的步骤。

为了对此进行建模，可以使用由多个切片（或段，每个 1.5 米长）组成的几何图形。计算由多个*塑性*阶段组成，每个阶段都对挖掘过程的相同部分进行建模：隧道掌子面处防止掌子面主动破坏所需的*支撑压力*、*TBM 盾构的锥形形状*、土体*挖掘*和 TBM 内的孔隙水、*隧道衬里的安装*以及土体与新安装的衬里之间的空隙*注浆*。在每个阶段，计算阶段的输入都是相同的，但位置除外，因为每个阶段将移动 1.5 米。

目标

- 使用 TBM 的隧道掘进过程建模。
- TBM 锥壳形状建模。
- 使用**隧道设计器**定义隧道的几何图形、轨迹和排序。

几何图形

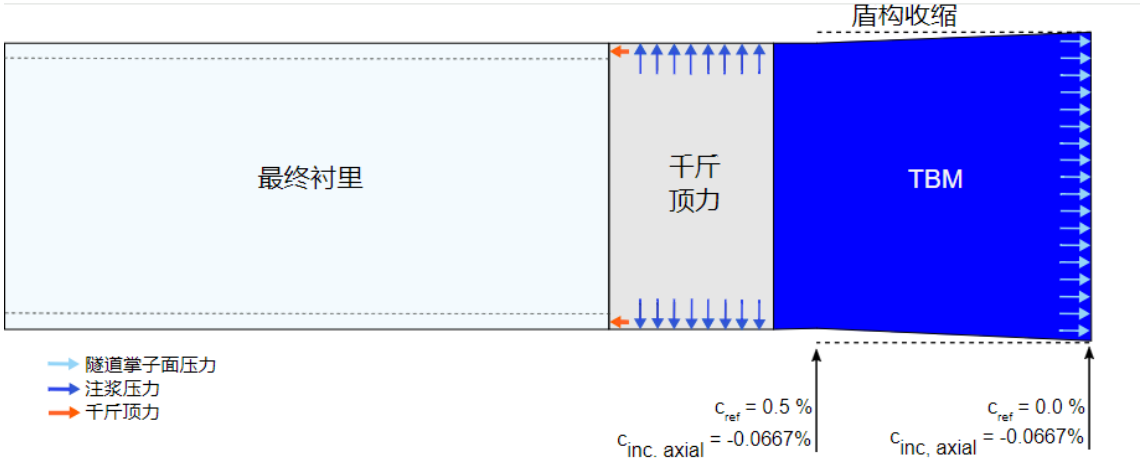


图 59: 盾构隧道模型的施工阶段

5.1 创建新项目

在模型中，只包括一个对称的一半。该模型宽 20 米，沿 y 方向延伸 80 米，深 20 米。这些尺寸足以促使任何可能的塌陷机制的形成并避免模型边界的任何影响。

1. 启动输入程序，然后从**快速选择**对话框中选择**开始新项目**。

2. 在**项目属性**窗口的**项目**页面中，输入相应标题。
3. 保留缺省单位并将模型尺寸设置为
   a. x_{min} = -20 且 x_{max} = 0，
   b. y_{min} = 0 且 y_{max} = 80。

5.2 定义土壤地层学

下层土由三层组成。上层软砂层深 2 米，从地表延伸至平均海平面 (MSL)。在上层砂层之下，有一个 12 米厚的黏土层，该层下面是一个延伸到很深的硬砂层。模型中仅包含 6 米硬砂层。因此，模型底部在 MSL 以下 18 米。整个模型中假定土层是水平的，因此只需一个钻孔就足以描述土层。目前的地下水水头与 MSL 对应。

1. 按**创建钻孔**按钮 ，并单击轴系统的原点，在 (0 0 0) 处创建钻孔。**修改土层**窗口将打开。
2. 定义 3 层：上层砂土顶部位于 2 米，底部位于 0 米，黏土底部位于 -12 米，硬砂底部位于 -18 米。

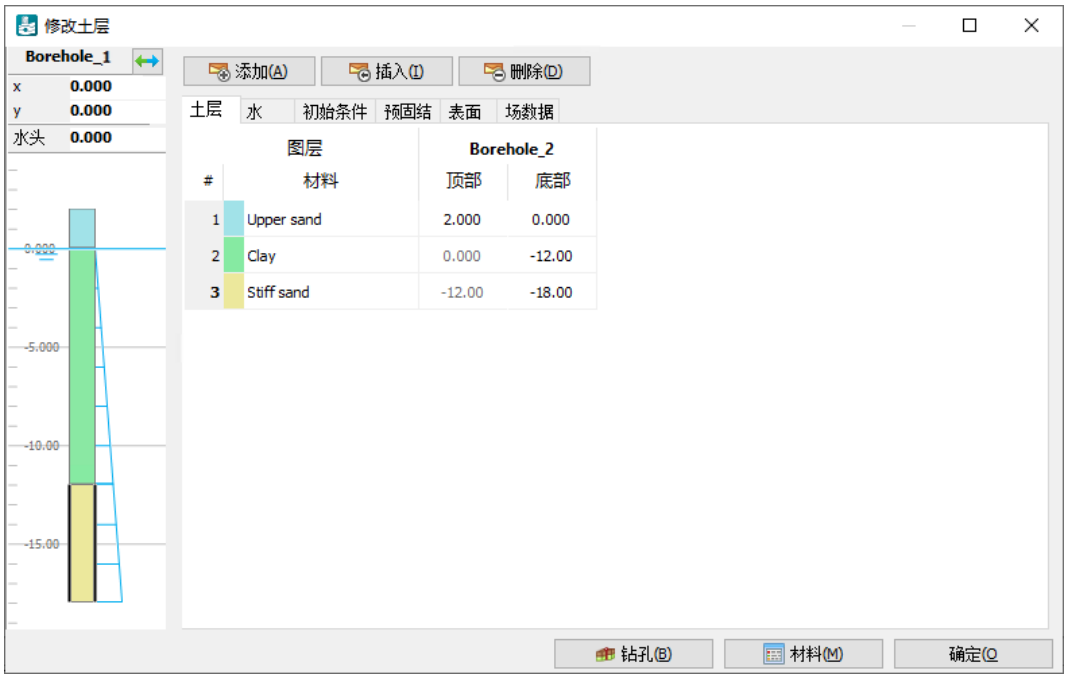


图 60: 土层分布

5.3 创建和分配材料数据集

数据集的材料属性见表 14(第 76 页)。

表 14: 土层的材料属性

属性	名称	上层砂土	黏土	硬砂	混凝土	单位
常规						
土体模型	模型	摩尔-库伦	摩尔-库伦	摩尔-库伦	线弹性	-
排水类型	类型	排水	排水	排水	非多孔	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	17.0	16.0	17.0	27.0	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20.0	18.0	20.0	-	kN/m^3
力学						
杨氏弹性模量	E'_{ref}	$1.3 \cdot 10^4$	$1.0 \cdot 10^4$	$7.5 \cdot 10^4$	$3.1 \cdot 10^7$	kN/m^2
泊松比	$\nu(nu)$	0.3	0.35	0.3	0.1	-
粘聚力	c'_{ref}	1.0	5.0	1.0	-	kN/m^2
摩擦角	$\varphi'(phi)$	31	25	31	-	度
剪胀角	$\psi(psi)$	0	0	0	-	度
界面						
强度定义	-	刚性	刚性	刚性	刚性	-
初始						
K_0 测定	-	自动	自动	自动	自动	-

1. 通过单击**材料**按钮  打开材料数据库，并为隧道中的土层和最终混凝土衬里创建数据集，如表 14(第 76 页)所示。
2. 将材料数据集分配给相应的土层（图 60(第 75 页)），并关闭**修改土层**窗口。具体的数据集将稍后分配。

5.4 结构单元的定义

隧道挖掘由长 9.0 米、直径 8.5 米的隧道掘进机 (TBM) 进行。TBM 已经在土体中推进 25 米。后续阶段将对每推进 1.5 米的情况进行建模。

注释: 在此处考虑的隧道中，由于隧道衬里均匀，隧道将立即施工，因此线段没有特定的意义。通常，在下列情况下，线段的意义将变得重要：

- 隧道（衬里）的挖掘或施工应分阶段进行。
- 不同的隧道线段具有不同的衬里属性。
- 可以考虑衬里中的铰链连接（铰链可在**分阶段施工模式**中在隧道设计后添加， 参考手册 - *第 7 章 - 连接的定义*。）

- 隧道形状由具有不同半径的圆弧组成（例如，NATM 隧道）。

隧道衬里的材料属性见表 15(第 77 页)。

表 15: 代表 TBM 的板的材料属性

属性	名称	TBM	单位
常规			
材料类型	-	弹性	-
单位重量	γ	247	kN/m^3
力学			
各向同性	-	是	-
杨氏弹性模量	E_1	$200 \cdot 10^6$	kN/m^2
泊松比	ν_{12}	0	-
厚度	d	0.17	m
剪切弹性模量	G_{12}	$100 \cdot 10^6$	kN/m^2

注释: 隧道衬里由曲面板（外壳）组成。可以在板的材料数据集中指定衬里属性。同样，隧道界面也是一个弯曲界面。

5.4.1 创建隧道横截面

在**结构模式**下，定义隧道和 TBM 的几何图形。

1. 在边栏中单击**启动设计器**按钮。
2. 单击列表中的**创建隧道**按钮。
3. 单击绘图区域上的任意位置以定义插入点。这将弹出**隧道设计器**窗口。
4. 在**选择浏览器**中，将隧道的插入点设置为 (0 0 -13.25)，如图 61(第 78 页) 所示。

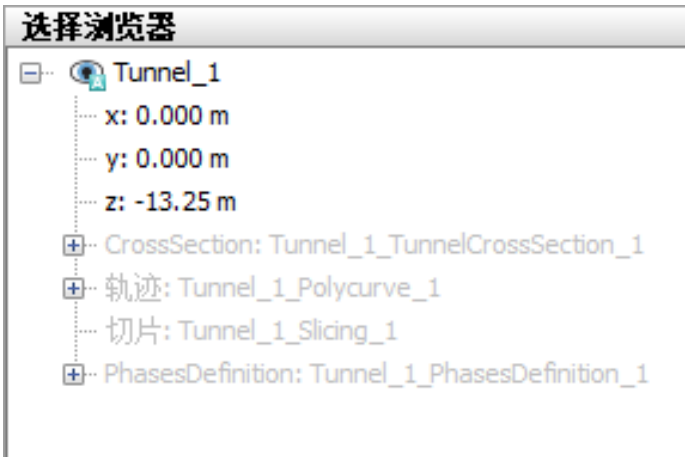


图 61: 隧道的插入点

5. 在**常规**页面中，从下拉菜单中为**形状类型**选择*圆形*。
6. 在本例中生成隧道的左半部分。因此，从**整个或一半隧道**下拉菜单中选择*定义左半部分*。

注释:

选中*与起始点偏移*选项后，可以参考局部轴移动隧道的插入点。

恰当分配后的**常规**页面的屏幕截图见图 62(第 78 页)。

.

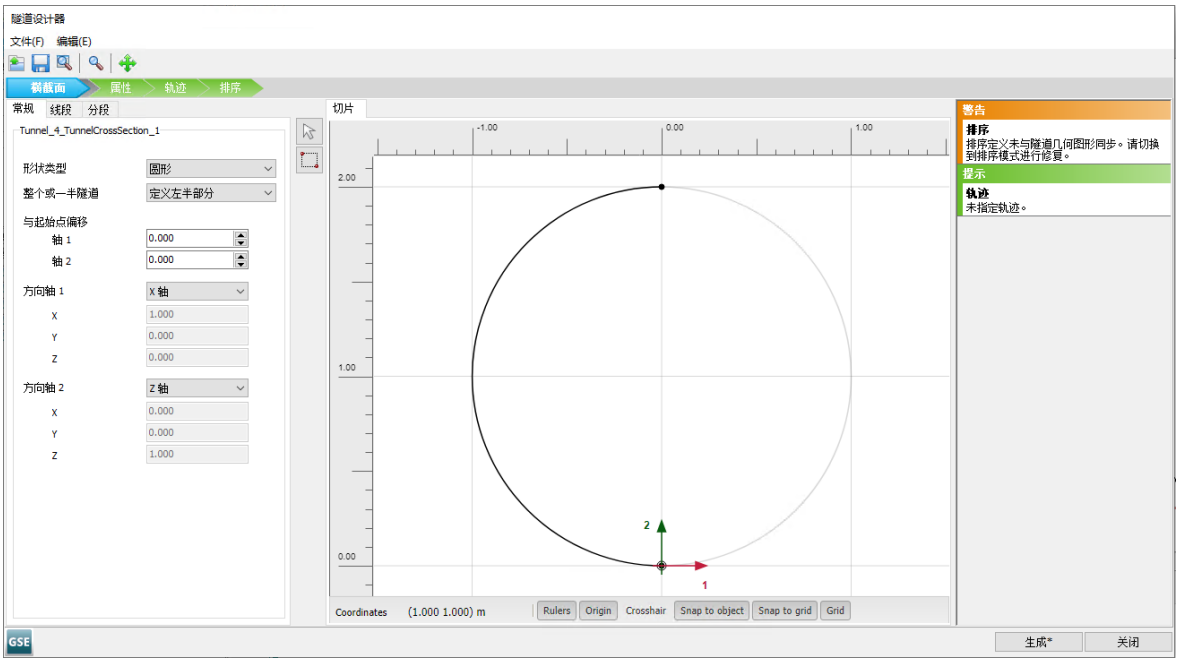


图 62: 隧道设计器的常规页面

7. 转到**线段**页面，定义 TBM 点半径和最终衬里的厚度。

注释:

注意，创建的线段已显示在*显示区域*中。现在线段列表中还显示了一个新的方框。通过单击*线段[0]*，*选择浏览器*将被激活，其中包含线段的对应可编辑属性。

8. 选择已创建的线段后，将*半径*设置为 4 米（请参见图 63(第 79 页)）。这是隧道的内径。

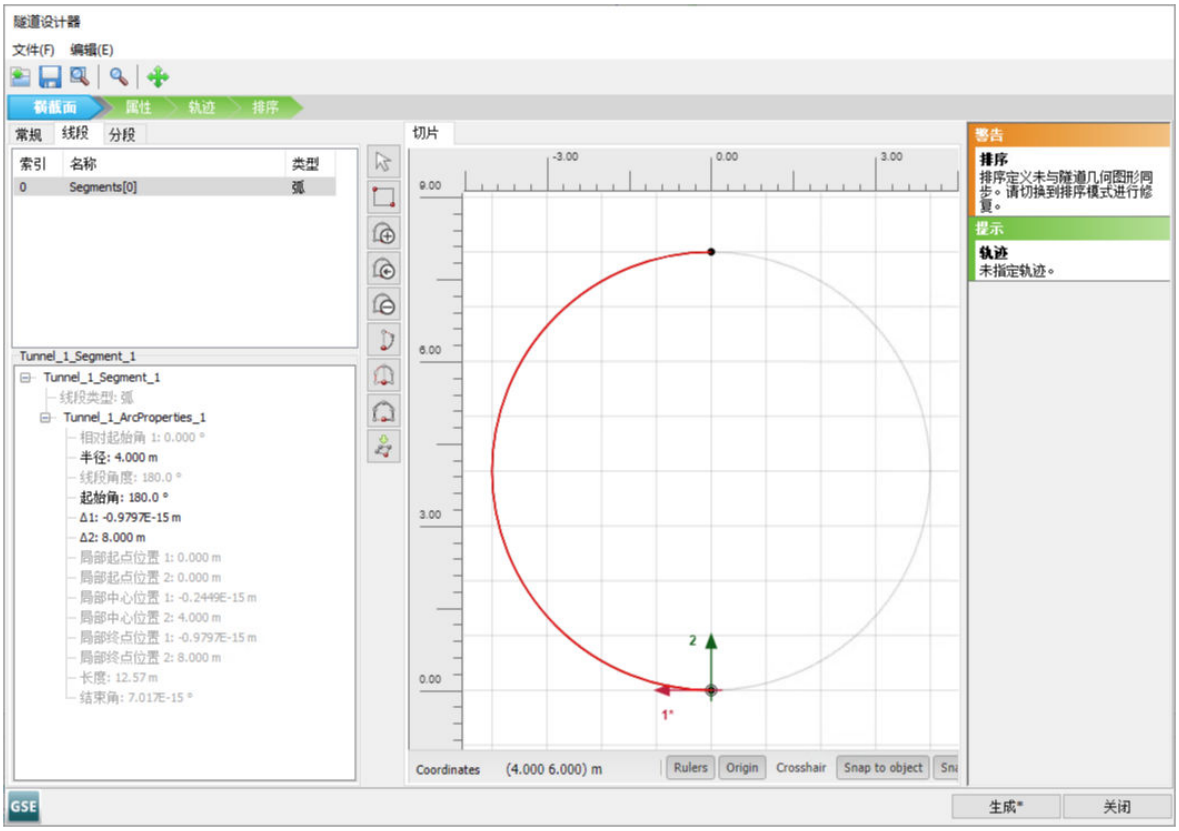


图 63: 隧道半径的定义

9. 单击**分区间**页面。
10.  在边栏中单击**生成厚衬里**按钮。将弹出**生成厚衬里**窗口。
11. 分配值 0.25 米，然后单击**确定**。

生成的衬里会显示在*绘图区域*中，如图 64(第 80 页) 所示。

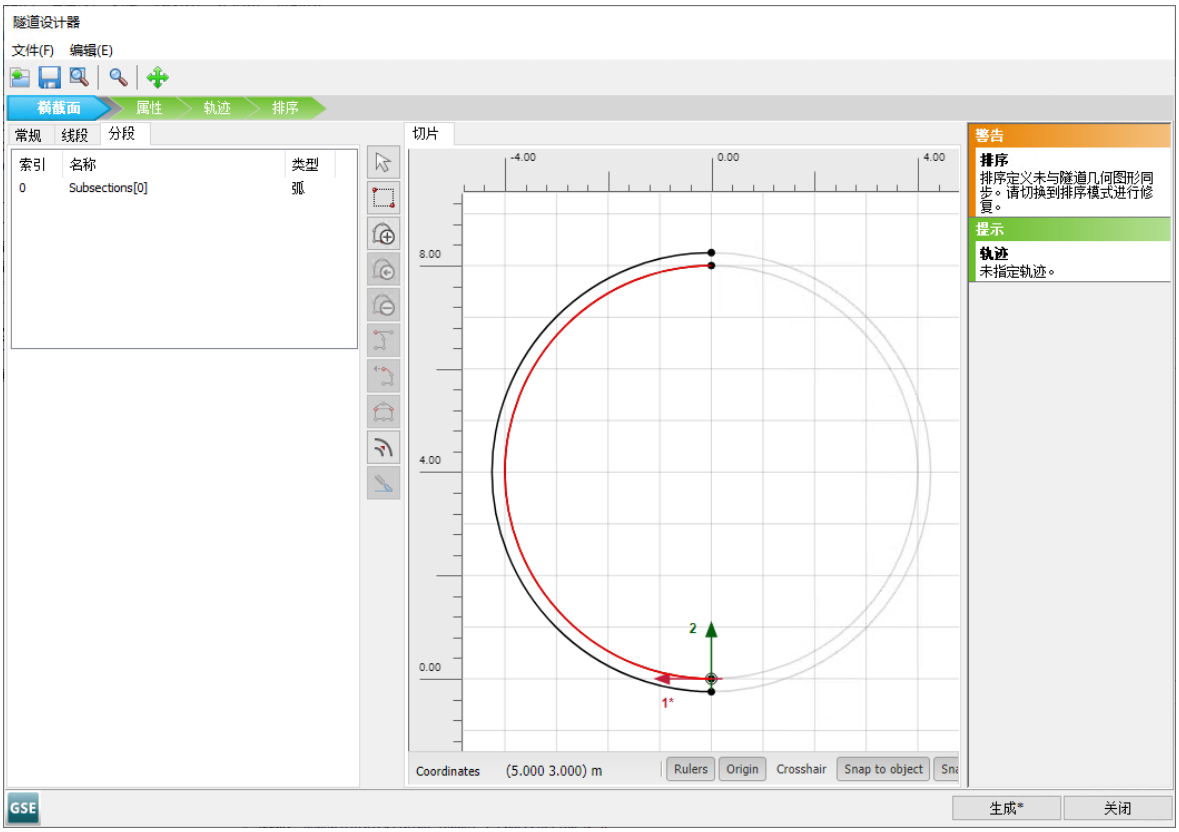


图 64: 生成的厚衬里

5.4.2 隧道属性的定义

需要为隧道定义的一些属性包括：注浆压力、表面收缩、千斤顶力和隧道掌子面压力。

1. 单击**属性**页面。
2. 单击**切片**选项卡（位于*绘图区域*上方），然后单击 TBM 点外表面。从出现的菜单中，选择**创建** > **创建板**（请参见图 64）。

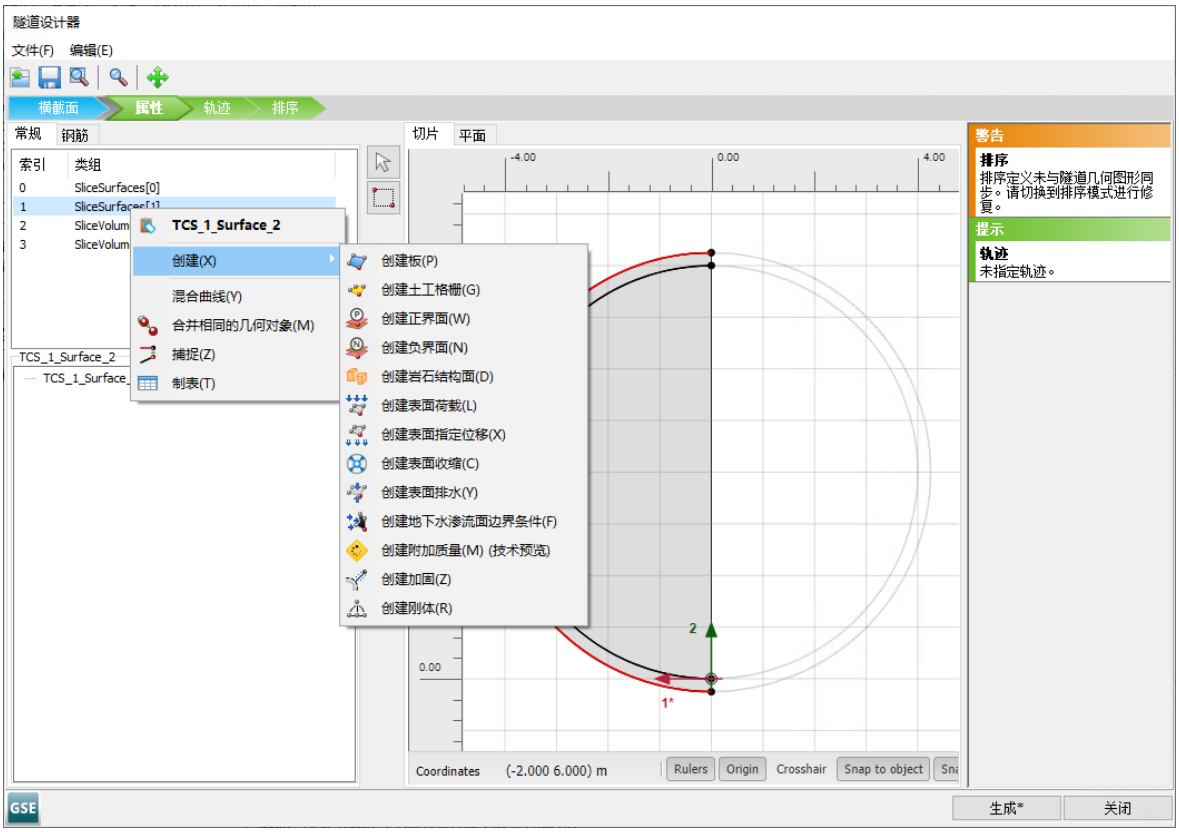


图 65: 用于创建板的隧道设计器的属性页面

3. 选择板后，按照表 15(第 77 页)在**选择浏览器 > 材料**中为 TBM 创建新的材料数据集。
4. 将已创建的材料指定给该板。

表面收缩

由于 TBM 的锥壳形状很小，因此必须在隧道外部添加土体-结构相互作用。通常情况下，TBM 尾部的横截面积比 TBM 前部小 0.5% 左右。在 TBM 的前 7.5 米长度（5 个切片）上实现了直径缩短，而到尾部的最后 1.5 米具有恒定的直径。

这意味着段尾具有 0.5% 的均匀收缩，其余 5 段具有线性收缩，参考值 C_{ref} = 0.5%，增量 $C_{inc,axial}$ = -0.0667%。考虑：

- 在隧道施工过程中，在隧道内挖掘切片的前表面上设置基准。
- 在定义隧道排序(第 86 页)时施加了表面收缩。
- $C_{inc,axial}$ = -0.0667%/m 并且在每一步中保持不变（请参见排序(第 86 页) <步骤_1_1> 到 <步骤_1_5>）。

注释:

有关**表面收缩**的更多信息，请参阅 参考手册。

1. 右键单击切片的外表面，然后从出现的菜单中选择**创建负界面**，在整个隧道周围创建负表面。
2. 要为隧道创建**表面收缩**，请再次单击外表面，然后选择**创建** > **创建表面收缩**。
3. 在选定外表面的情况下，在隧道设计器的**选择浏览器**中，选择**表面收缩** > **分布** > **轴增量**。同时将 C_{ref} 定义为 *0.5%*，将 $C_{inc,axial}$ 定义为 *-0.0667%*/m。

注释:

- 隧道轮廓 0.5% 的表面收缩大约对应隧道体积 0.5% 的体积损失（仅适用于较小的表面收缩值）。
- 收缩的输入值并不总是完全应用，这取决于周围类组和对象的刚度。
- 增量 $C_{inc,axial}$ 必须是负数，以阐释相对于挖掘前面的体积损失。

已创建的界面和表面收缩的视图如图 66(第 82 页) 所示

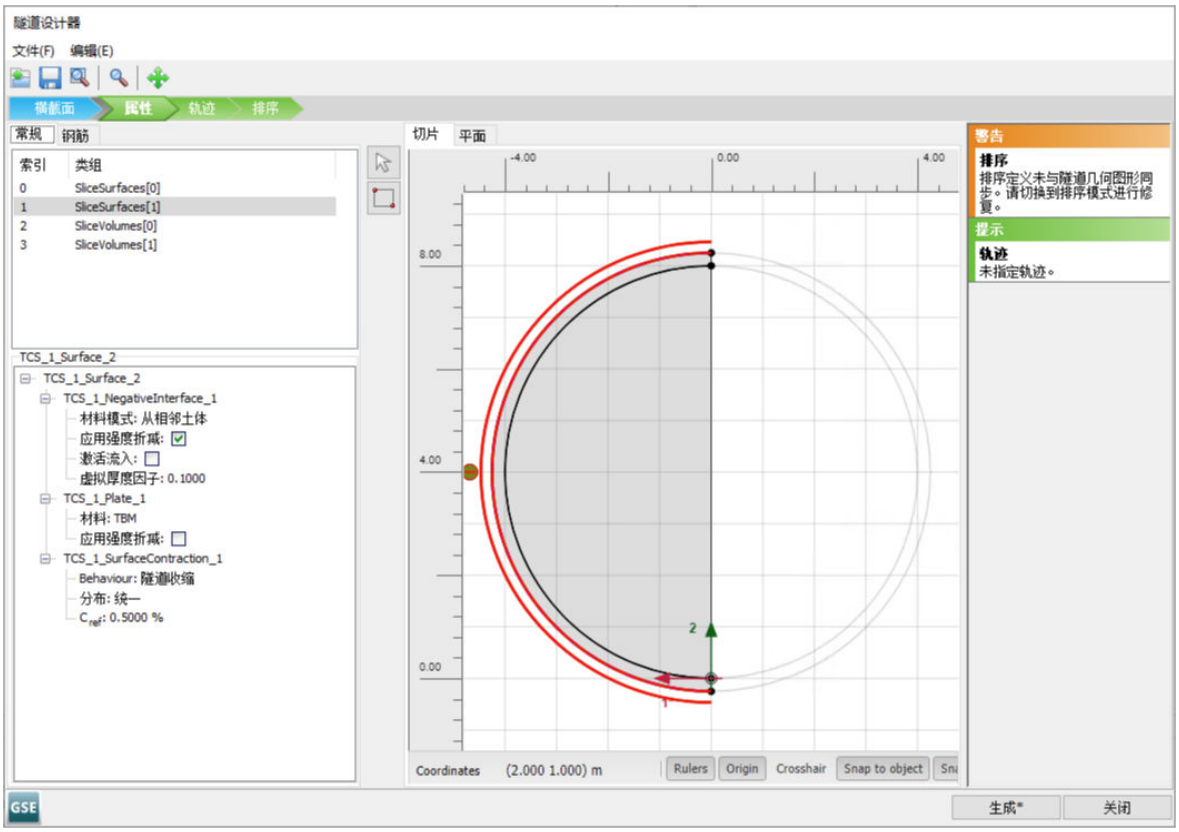


图 66: 隧道切片的外表面上已创建的负界面和表面收缩

注浆压力

在建造过程中，代表注浆压力的表面荷载是恒定的。在隧道掘进工艺规范中，给出了在隧道顶部（z = -4.75 米）注浆压力应为 -100 kN/m^2，并应随着每米深度的增加而增加 -20 kN/m^2。要定义注浆压力，请执行以下操作：

1. 单击**切片**选项卡。
2. 右键单击切片的外表面，然后从出现的菜单中选择**创建** > **创建表面荷载**，在整个隧道周围创建表面荷载。
3. 在隧道设计器的**选择浏览器**中，从下拉菜单中选择**表面荷载** > **分布** > **垂直，垂直增量**。
4. 如图 67(第 83 页) 所示：
   a. 将 $\sigma_{n,ref}$ 定义为 -100，将 $\sigma_{n,inc}$ 定义为 -20。

b. 通过为 x_{ref}、y_{ref} 和 z_{ref} 指定值，将 (0 0 -4.75) 定义为荷载的参考点。

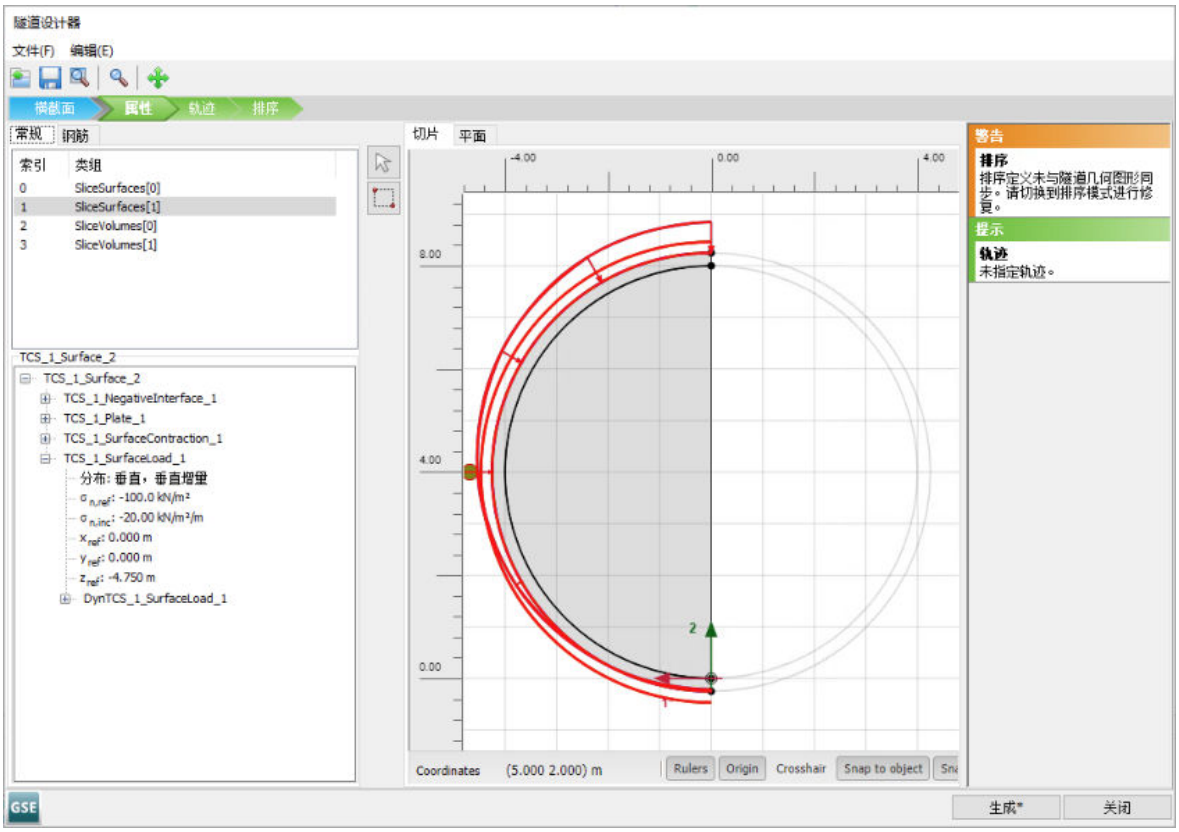


图 67: 隧道设计器中的"切片"选项卡 - 注浆压力定义

隧道掌子面压力

隧道掌子面压力是随深度线性增加的膨润土压力（膨润土泥浆，BS）或土压力（土压力平衡，EPB）。对于 TBM 的初始位置和模拟 TBM 推进时的连续四个位置，必须定义隧道掌子面压力。

1. 单击位于显示区域（隧道横截面显示在其中）上方的**平面**选项卡。
2. 选择两个面表面（请参见图 68(第 84 页)），然后按并右键单击。然后从出现的菜单中选择**创建** > **创建表面荷载**，在 TBM 面上创建表面荷载。
3. 在**选择浏览器**中，转到**选择** > **表面荷载**，然后从下拉菜单中选择**分布** > **垂直，垂直增量**。
4. 如图 68(第 84 页) 所示：
   a. 将 $\sigma_{n,ref}$ 设置为 -90 kN/m^2，将 $\sigma_{n,inc}$ 设置为 -14 kN/m^2/m。
   b. 通过为 x_{ref}、y_{ref} 和 z_{ref} *指定值，将 (0 0 -4.75) 设置为荷载的参考点。*

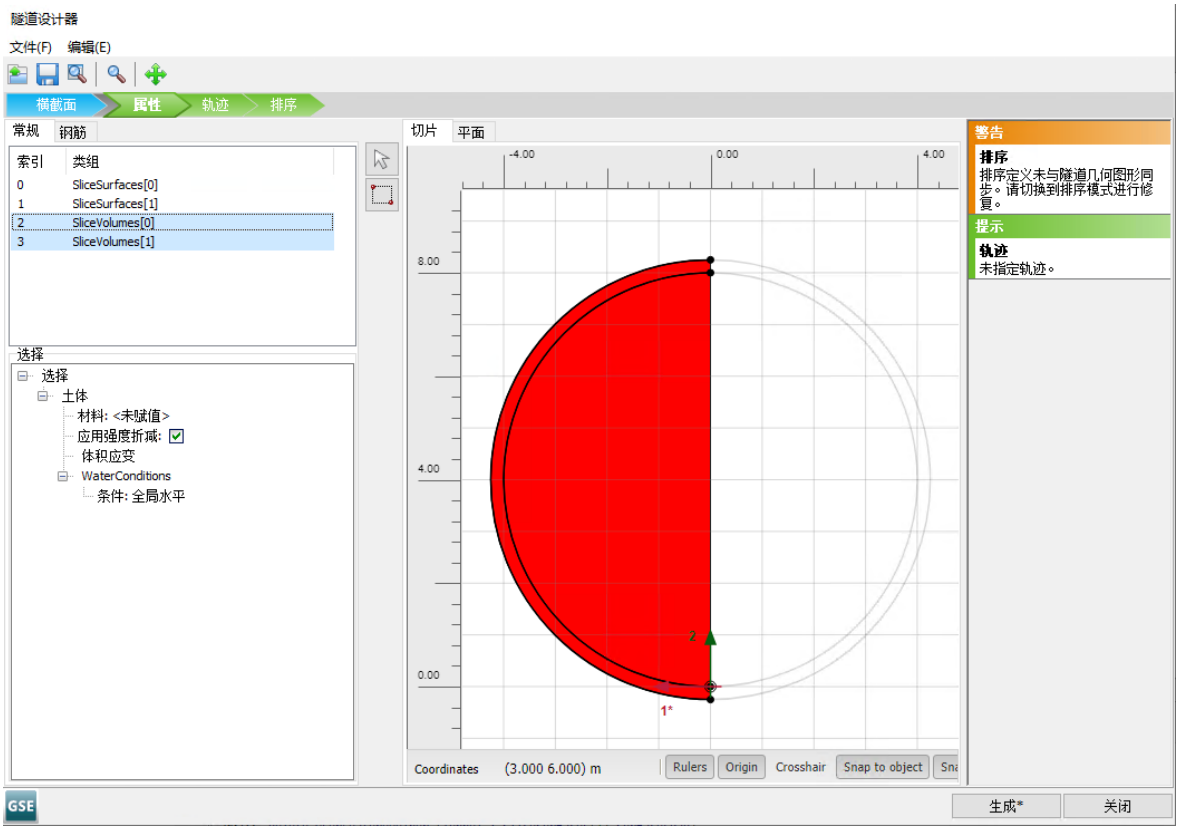


图 68: 隧道设计器中的平面选项卡 - TBM 面压力的定义

千斤顶力

注释:

为了在掘进过程中前进，TBM 必须将其自身推向现有的隧道衬里。这是由液压千斤顶完成的。必须考虑千斤顶施加在最终隧道衬里上的力。这将在*<步骤_1_7>*分配给隧道 排序(第 86 页) 的隧道衬里。

5.4.3 轨迹

下一步是创建钻孔过程的路径。如前所述，TBM 已经推进土体 25 米，然后每次挖掘 1.5 米的切片，从 25 米前进到 41.5 米：

1. 单击**轨迹**页面以进入相应的窗口。
2. 在**线段**选项卡中，单击左边栏上的**增加线段**，创建第一段。
3. 在**选择浏览器**中，将长度设置为 25（请参见图 69(第 85 页)）。

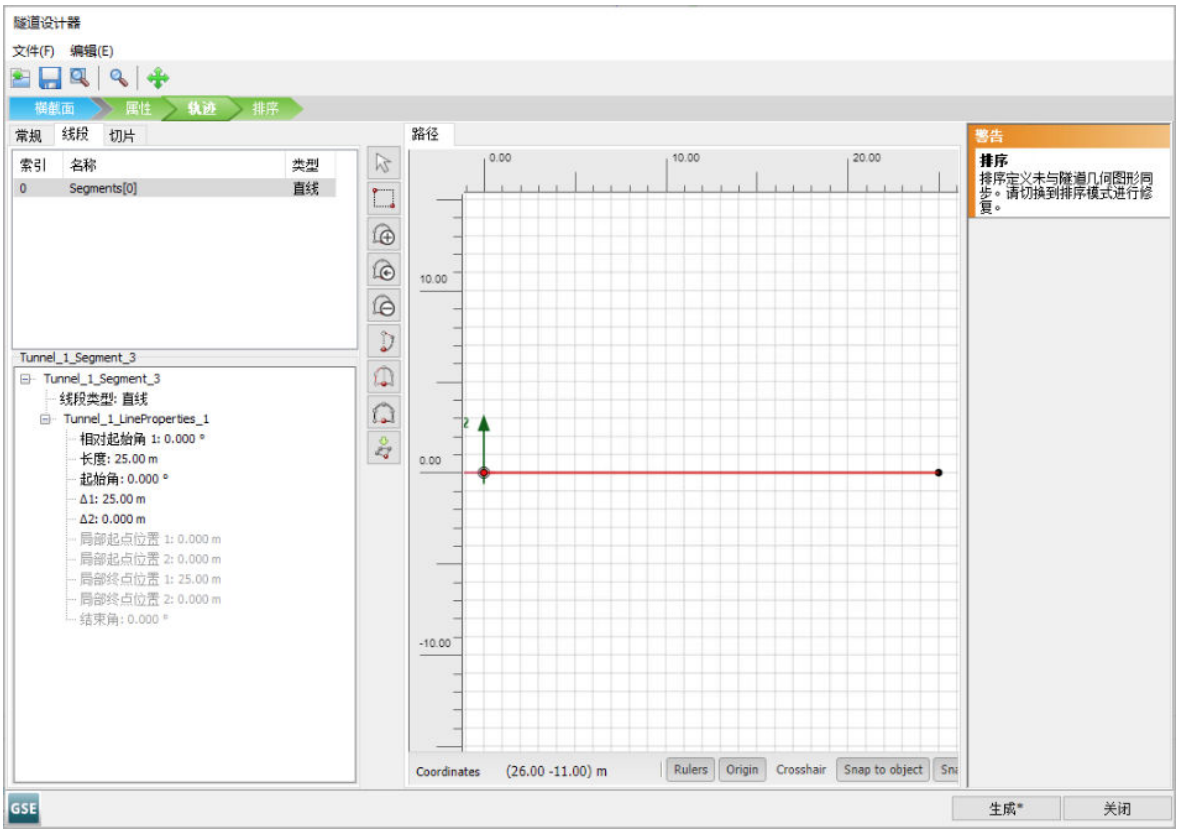


图 69: 隧道设计器中的轨迹页面 - 添加轨迹线段

4. 添加第二段，并将*长度*设置为 16.5。
5. 转到**切片**选项卡，创建隧道切片直至达到 41.5 米，然后单击出现的第二段。
6. 在**选择浏览器**中，转到**切片方法**，选择 *长度*，然后将**切片长度**设置为 1.5 米（图 70(第 86 页)）。

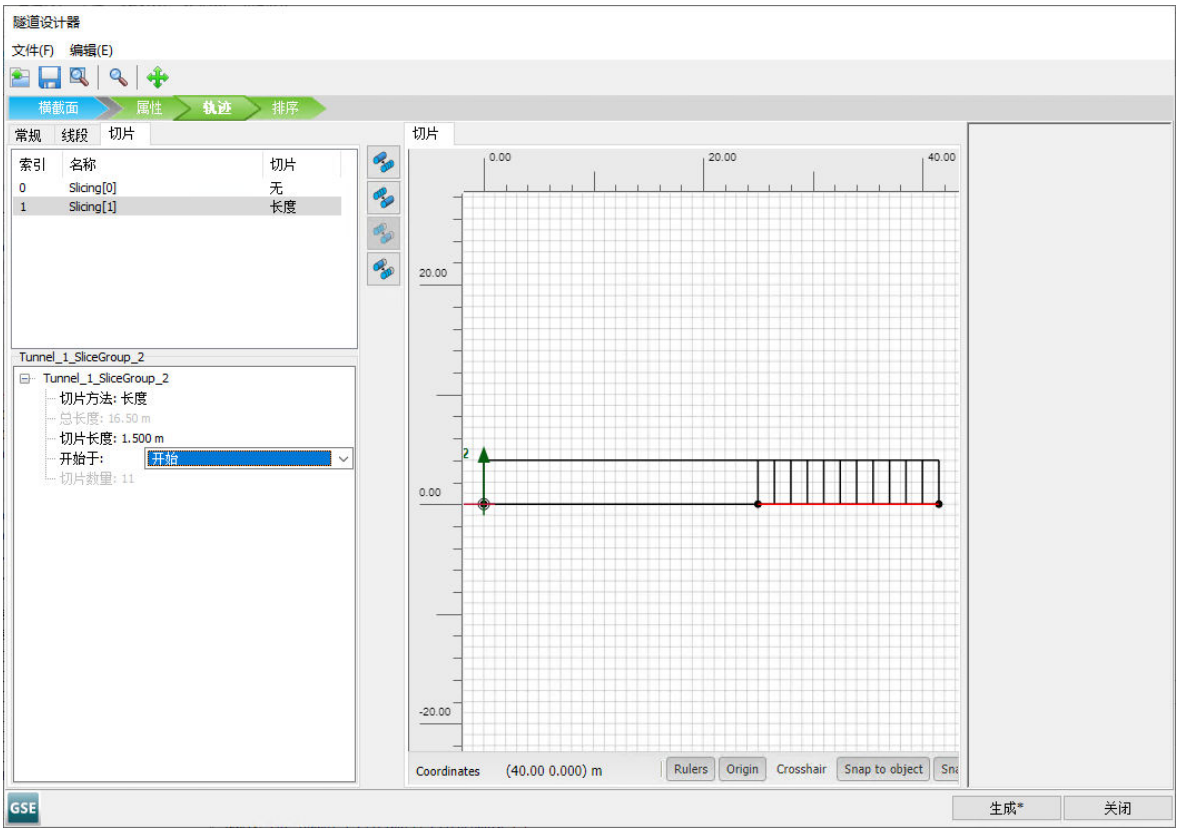


图 70: 隧道设计器中的轨迹页面 - 将轨迹线段切片

5.4.4 排序

为了简化**分阶段施工模式**中阶段的定义，定义了隧道的排序。将挖掘 TBM 前方的土体，向隧道掌子面施加支撑压力，激活 TBM 盾构，并对盾构的锥度进行建模。然后在 TBM 的后方，对由于注浆产生的压力进行

建模。随后，还需要对液压千斤顶施加在已安装的 TBM 衬里上的驱动力进行建模。最后将放置一个新的衬里环。

1. 单击**排序**页面以进入相应的窗口。
2. 在**排序**页面中的**常规**子菜单下，将**挖掘方法**设置为 *TBM*。

a. ***<步骤_1_1> 掌子面挖掘***

- 单击**切片**选项卡。现在可以看到，在**常规**子菜单下，缺省情况下第一步（即步骤_1_1）可用。
- 选择隧道内的体积，然后在**选择浏览器**中停用土体，并将**水条件**设置为 *干*，如图 71(第 87 页) 所示。

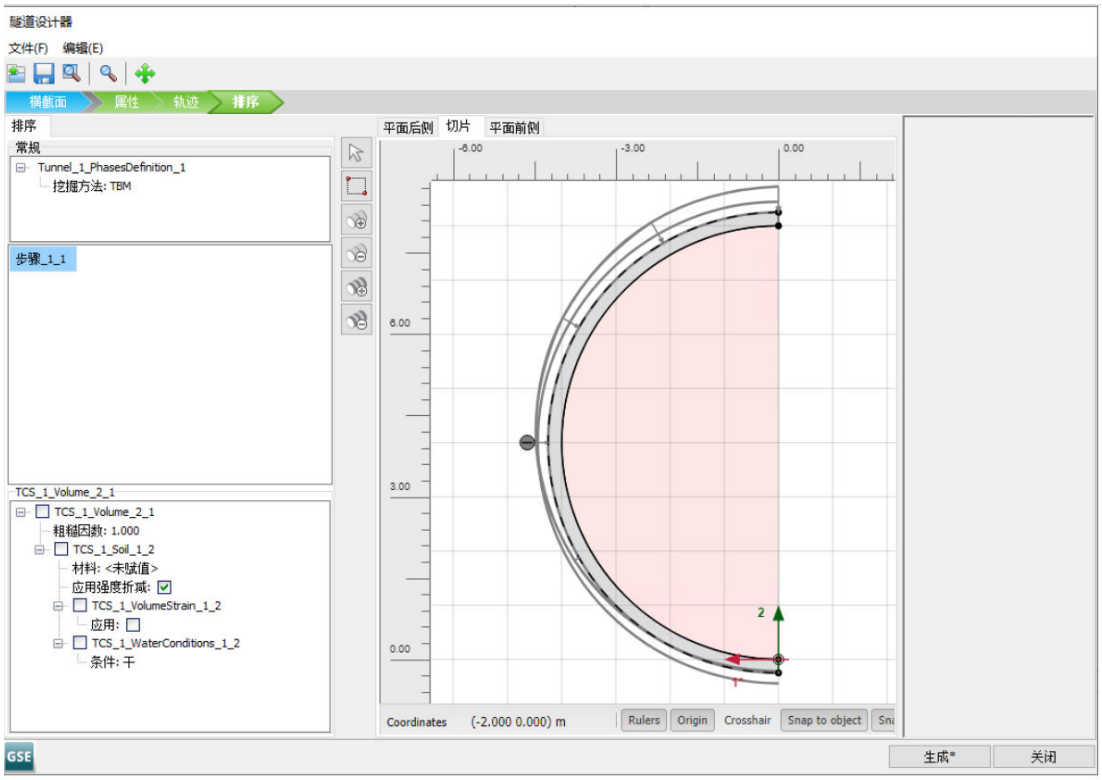


图 71: 掌子面挖掘中的切片 - 已停用的土体

- 停留在**切片**选项卡上，选择外表面。然后转到**选择浏览器**，并激活负界面、板和表面收缩（图 72(第 88 页)）。
- 为表面收缩 C_{ref} 设置值 0%（因为这是在挖掘的前面）。

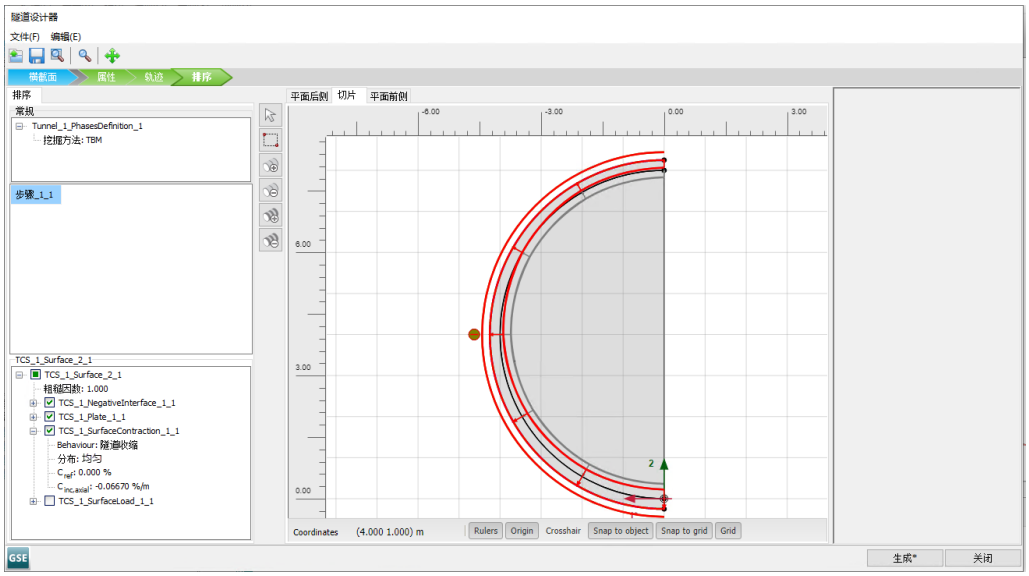


图 72: 隧道设计器中的“切片”选项卡 <步骤_1_1> 表面收缩的 TBM 激活和定义

- 单击**平面前侧**选项卡，然后选择所有表面。在**选择浏览器**中，激活 TBM 面压力对应的**表面荷载**（图 73(第 88 页)）。

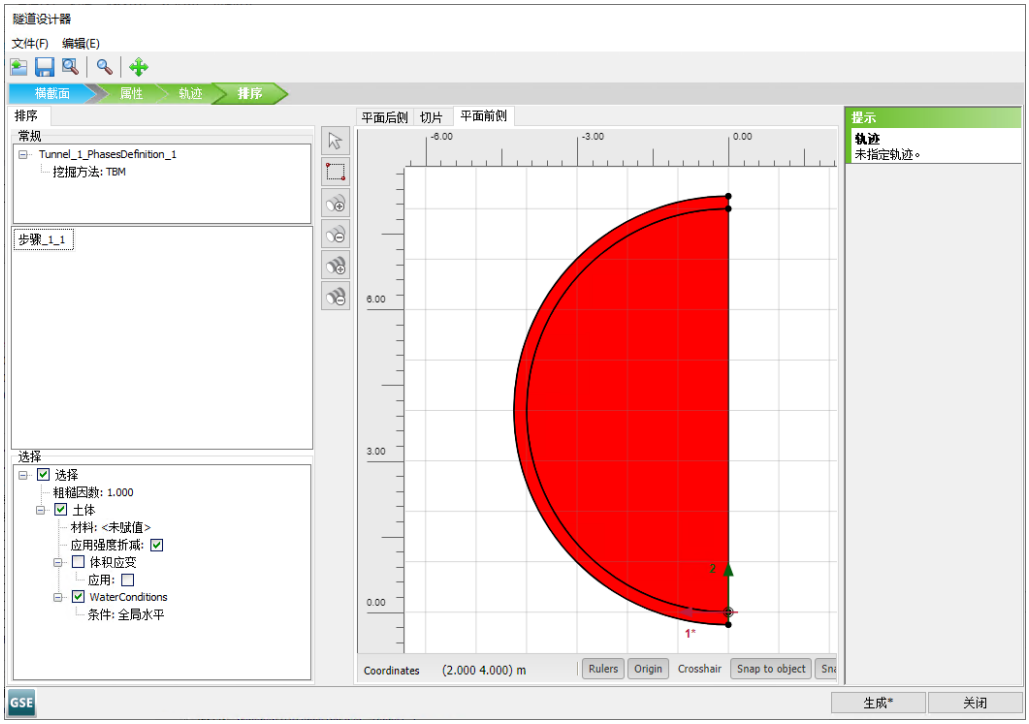


图 73: “平面前侧”选项卡 隧道设计器 - <步骤_1_1> 面压力的定义

b. *<步骤_1_2 > TBM 锥度*

- 在**平面前侧**选项卡中继续操作。
- 单击**添加步骤**按钮，添加新步骤。

注释: 与上一步不同的是，缺省情况下会停用对应于面压力的荷载（只会在 TBM 前部考虑面压力）。

- 转到**切片**选项卡，选择外表面，并将 C_{ref} 设置为 0.1%，请参见图 74(第 89 页)。

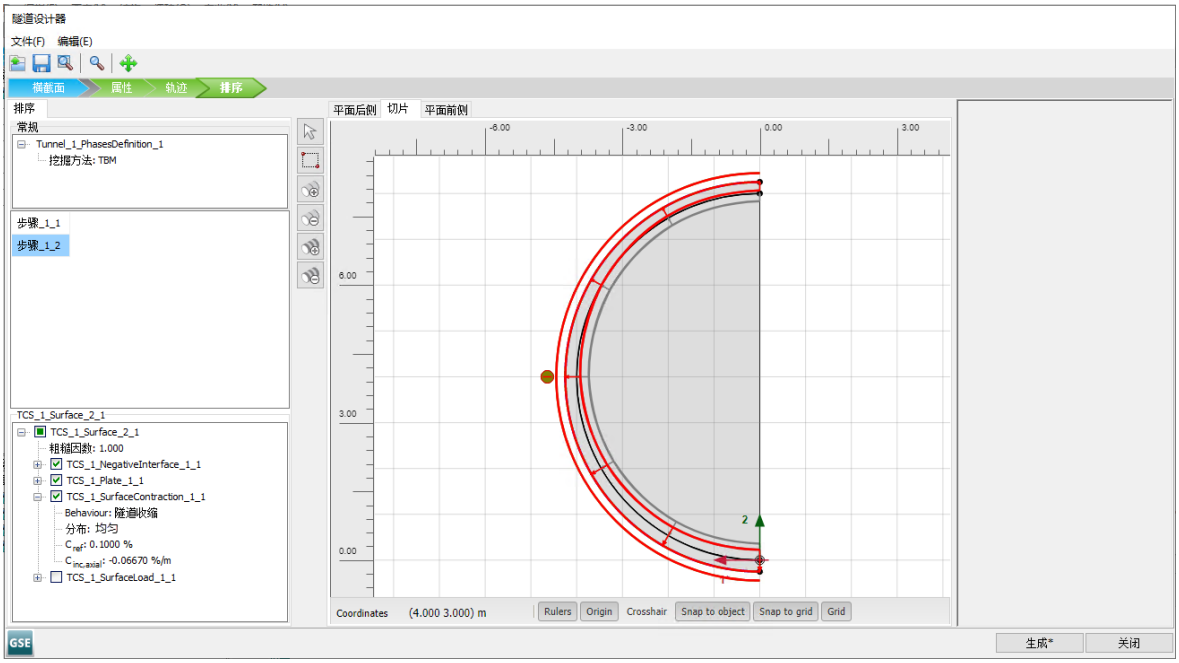


图 74: 隧道设计器中的"切片"选项卡 - <步骤_1_2> 表面收缩的定义

c. *<步骤_1_3 到步骤_1_5 > TBM 锥度*

-  单击**添加步骤**按钮三次，添加三个新步骤。这些步骤对于定义 TBM 盾构的剩余锥体部分是必要的（图 75(第 90 页)）。
- 对于每个步骤，请确认已选择**切片**选项卡，选择外表面，然后在**选择浏览器**中为表面收缩设置以下值：

  步骤_1_3：C_{ref}= 0.2%

  步骤_1_4：C_{ref}= 0.3%

  步骤_1_5：C_{ref}= 0.4%，请参阅图 75(第 90 页)

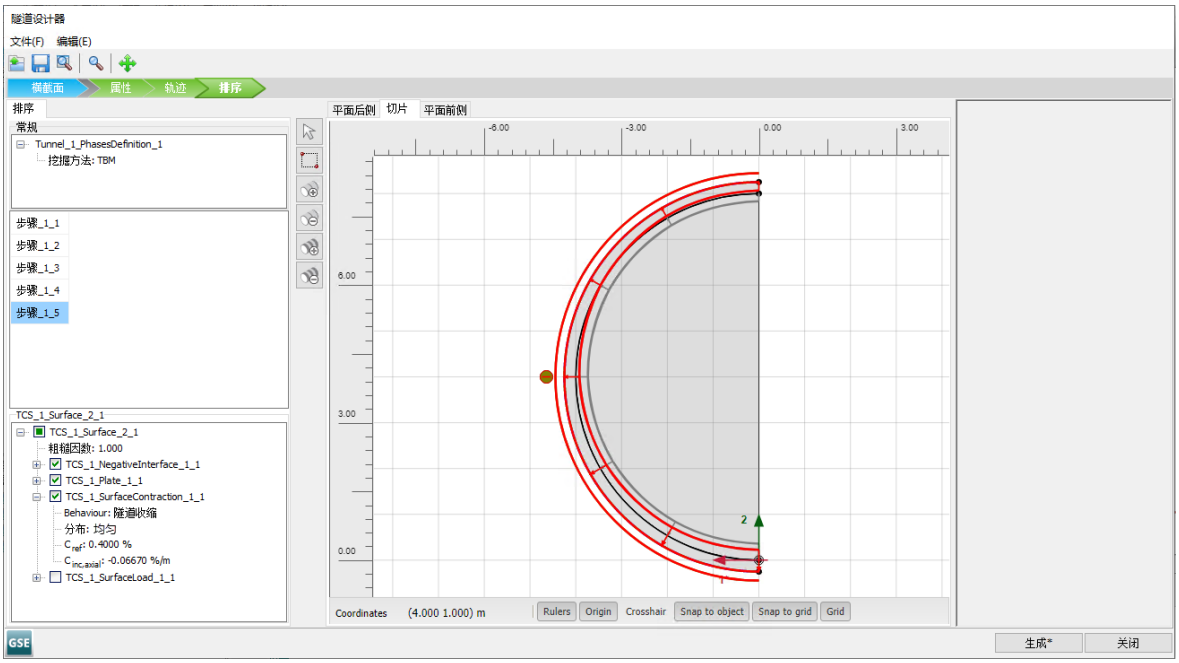


图 75: 隧道设计器中的“切片”选项卡 <步骤_1_3 到步骤_1_5> 表面收缩的定义

d. *<步骤_1_6> 盾尾*

- 单击**添加步骤**按钮。
- 盾构的最后一片具有恒定的直径。从**切片**选项卡中选择外表面。
- 在**选择浏览器**中，选择**表面收缩** > **分布** > **均匀** 选项，并将 C_{ref} 设置为 *0.5*%（图 76(第 91 页)）。

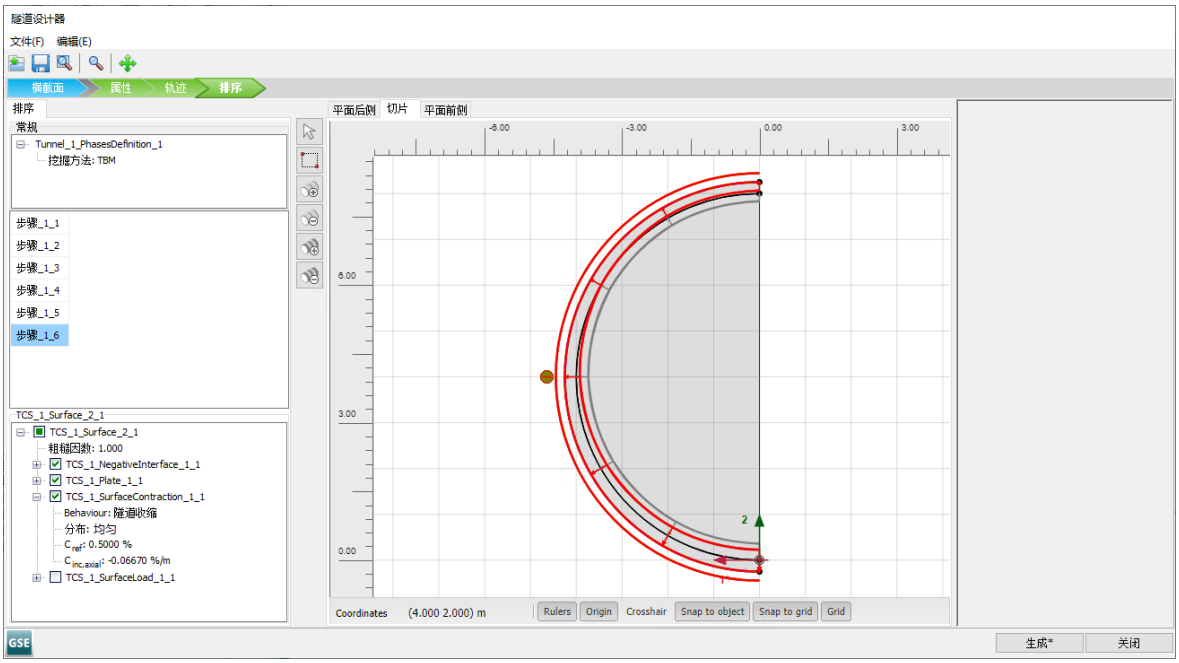


图 76: 隧道设计器中的"切片"选项卡<步骤_1_6> 表面收缩的定义

e. *<步骤_1_7> 注浆和千斤顶顶推*

为了在掘进过程中前进，TBM 必须将其自身推向现有的隧道衬里。这是由液压千斤顶完成的。必须考虑千斤顶施加在最终隧道衬里上的力。还需要施加注浆压力。

- 单击**添加步骤**按钮。
- 从**切片**选项卡中选择外表面。
- 停用负界面、板和表面收缩。
- 在**选择浏览器**中，激活与*注浆压力*对应的**表面荷载**（图 73）。

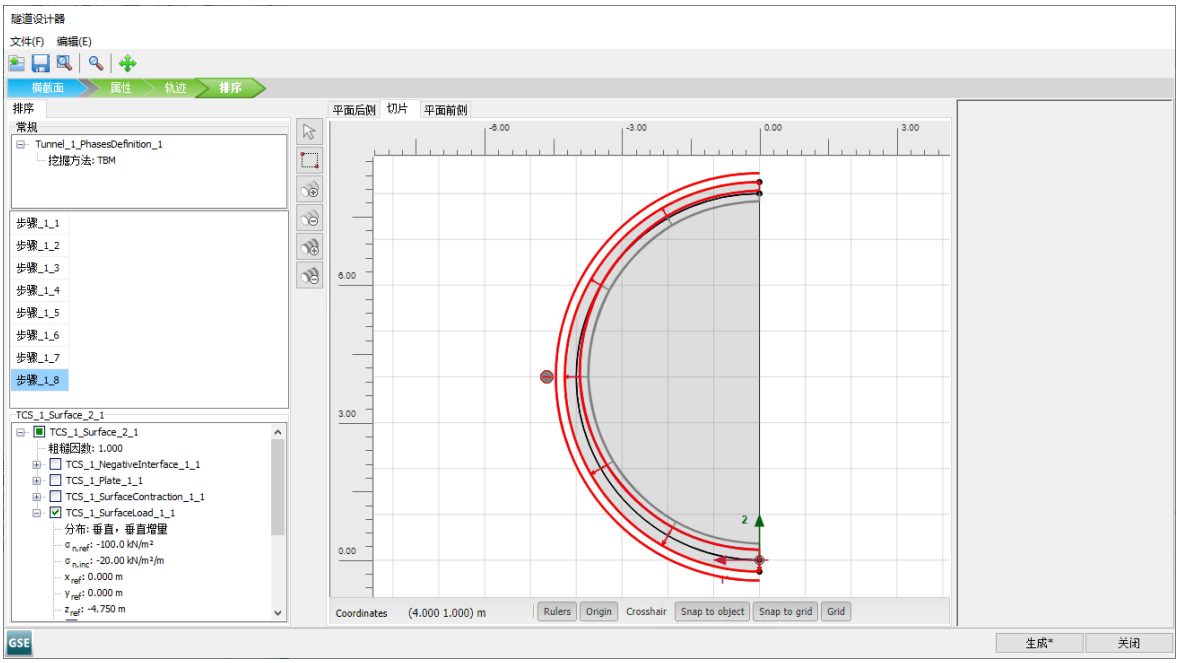


图 77: 隧道设计器中的"切片"选项卡 <步骤_1_7> 注浆压力 TBM

- 单击**平面后侧**选项卡，然后选择后部外表面（即已创建的厚衬里），定义顶靠最终衬里的千斤顶。
- 在**选择浏览器**中，激活**表面荷载**，并为分布选择 *垂直* 选项，并将 $\sigma_{n,ref}$ 设置为 635.4 kN/m^2（图 78(第 92 页)）。

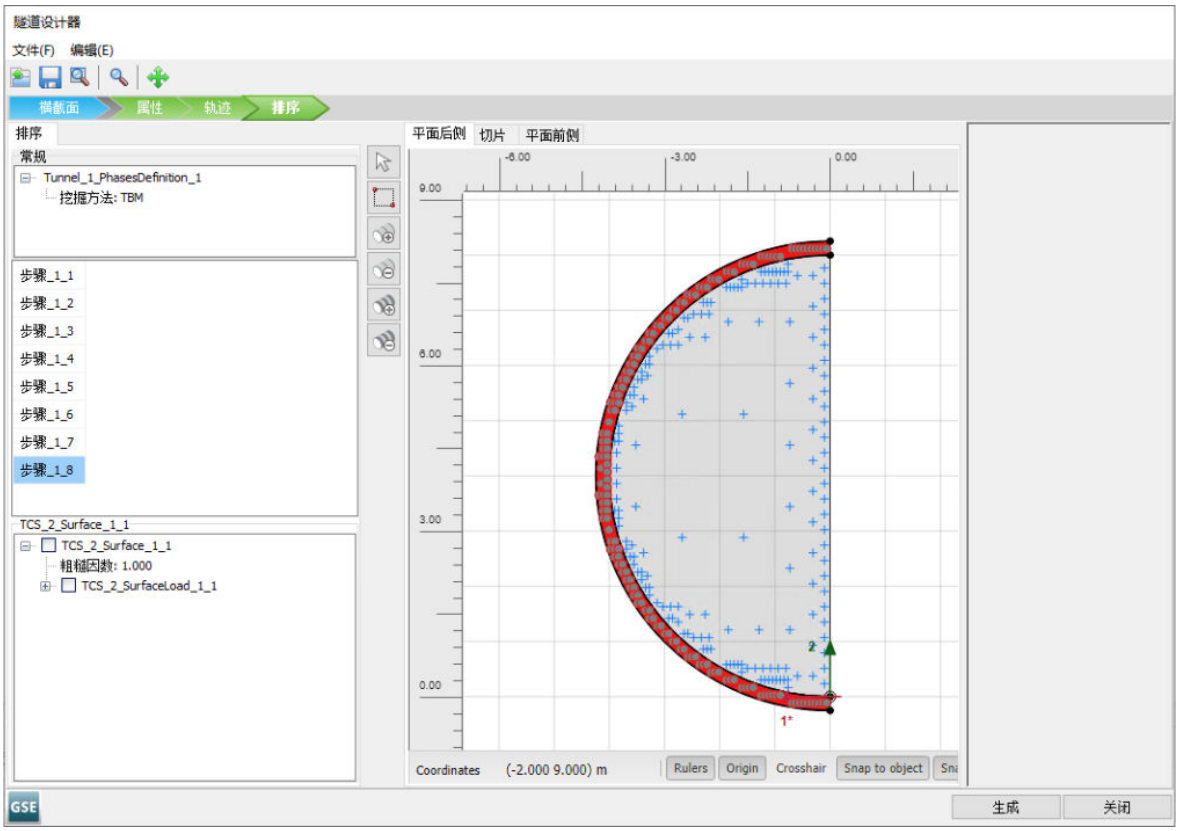


图 78: "平面后侧"页面隧道设计器 <步骤_1_7> 施加千斤顶力

f. ***<步骤_1_8> 最终衬里***

- 单击**添加步骤**按钮。
- 转到**切片**选项卡，然后选择外表面。
- 在**选择浏览器**中，停用与注浆压力对应的表面荷载，并激活负界面。
- 继续在**切片**选项卡中选择外体积（或衬里）。激活它，在**选择浏览器**中单击**材料**下拉列表，然后选择*混凝土*选项（图 79(第 94 页)）。

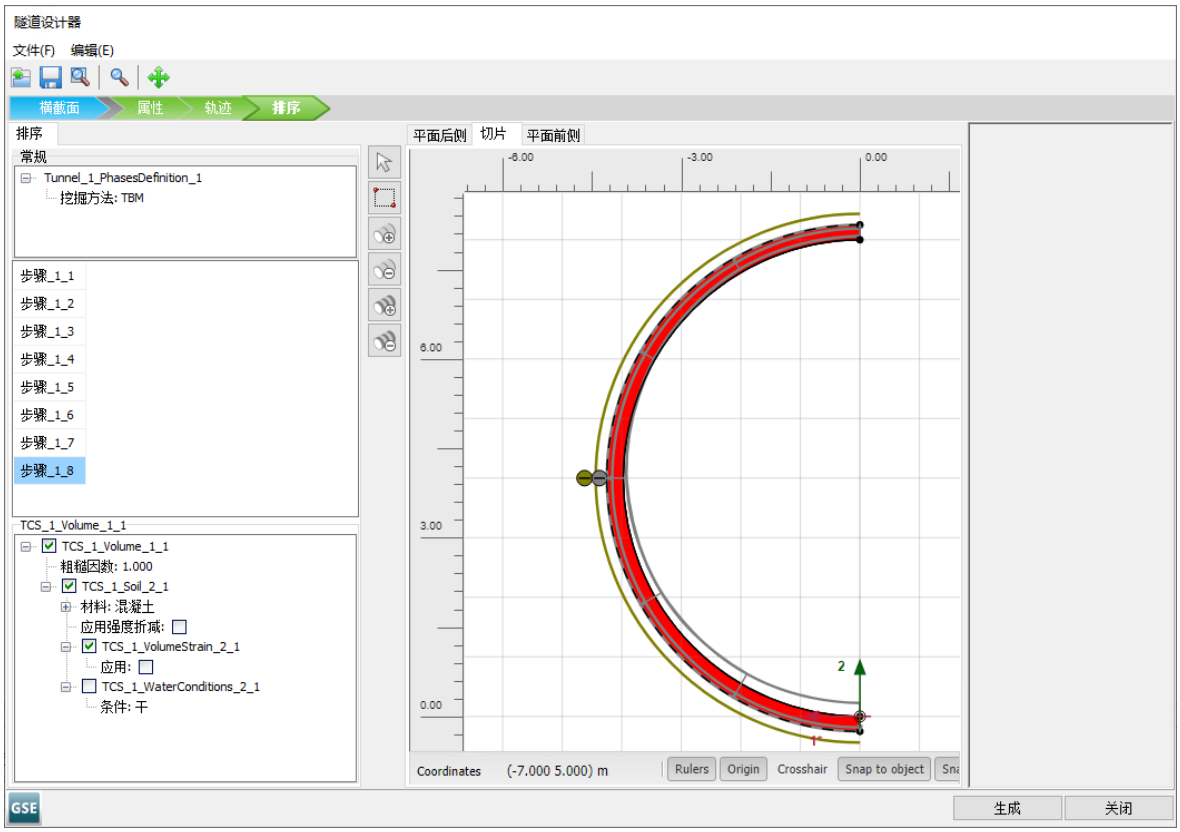


图 79: 隧道设计器中的"切片"选项卡 <步骤_1_8> 最终衬里的材料定义

- 单击**平面后侧**选项卡，然后选择后部外表面（或衬里的后部区域）。
- 在**选择浏览器**中，停用与顶推千斤顶对应的表面荷载（图 80(第 95 页)）。

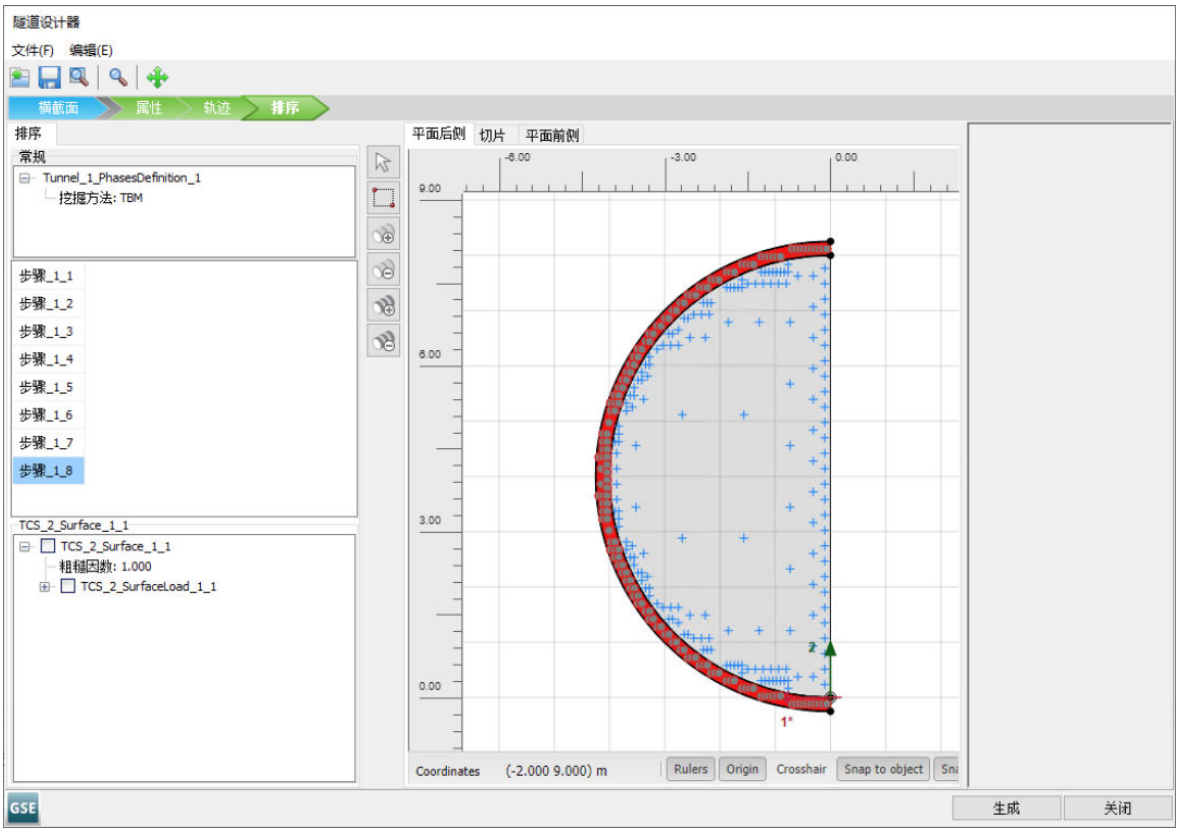


图 80: "平面后侧"选项卡隧道设计器 <步骤_1_8> 停用千斤顶力

注释: 对于*步骤_1_1* 至*步骤_1_5*，请记住收缩增量 $C_{inc,axial}$ 必须为 -0.0667%。

3. 单击**生成**将定义的隧道包含在模型中。
4. 关闭**隧道设计器**窗口。
   >在**结构模式**下创建模型。单击**选项**菜单，然后选择**在有结构的面上显示局部坐标**，如图 81(第 96 页)所示。

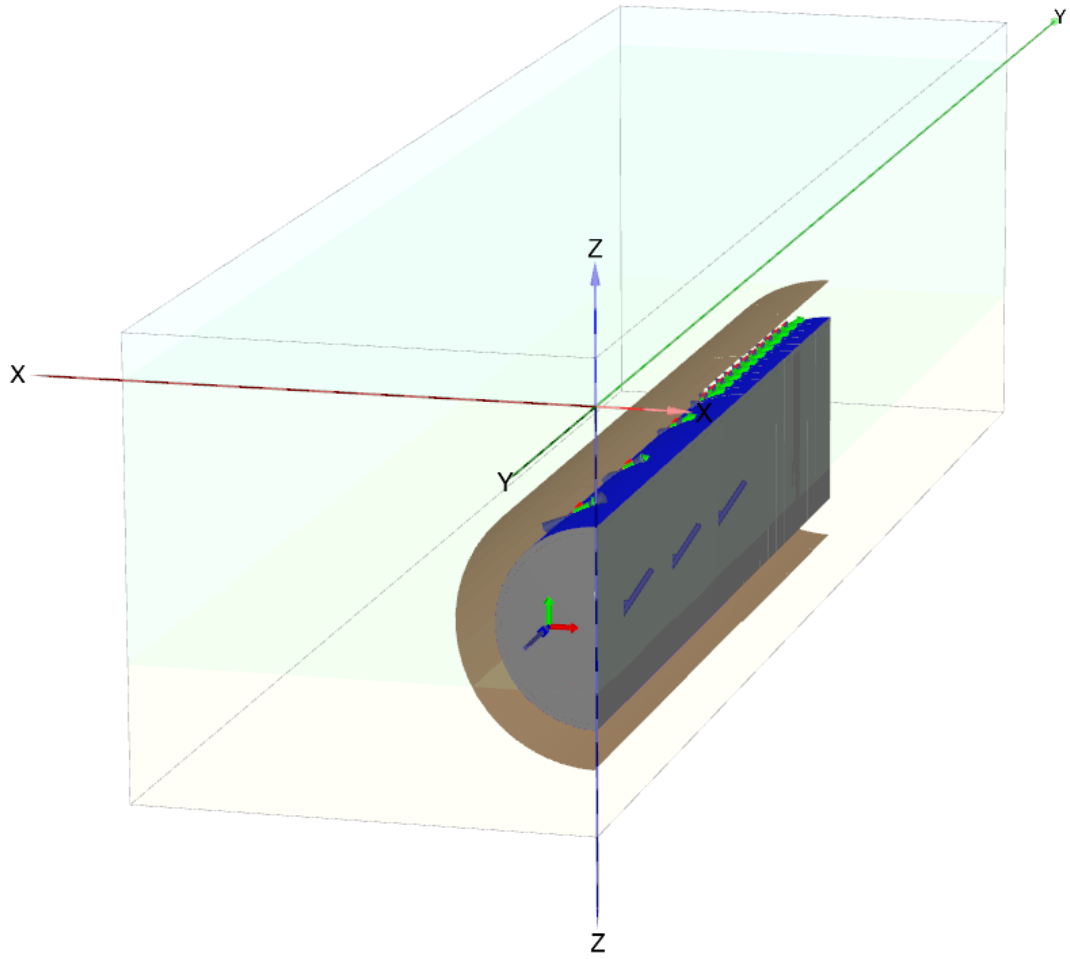


图 81: 在结构模式下创建的隧道（带有局部轴）

注释:

可以在生成后编辑隧道。为此，请在**结构模式**下转到**模型浏览器**，展开“*隧道*”树，右键单击相关隧道，然后从弹出菜单中选择**编辑**选项。

5.5 生成网格

在**网格模式**中，可以指定全局和局部细化并生成网格。缺省局部细化对本示例有效。

1. 单击**生成网格**按钮以生成网格。将显示**网格选项**窗口。

   将使用缺省选项（*中等*）生成网格。
2. 单击**查看网格**按钮以检查生成的网格（图 82(第 97 页)）。

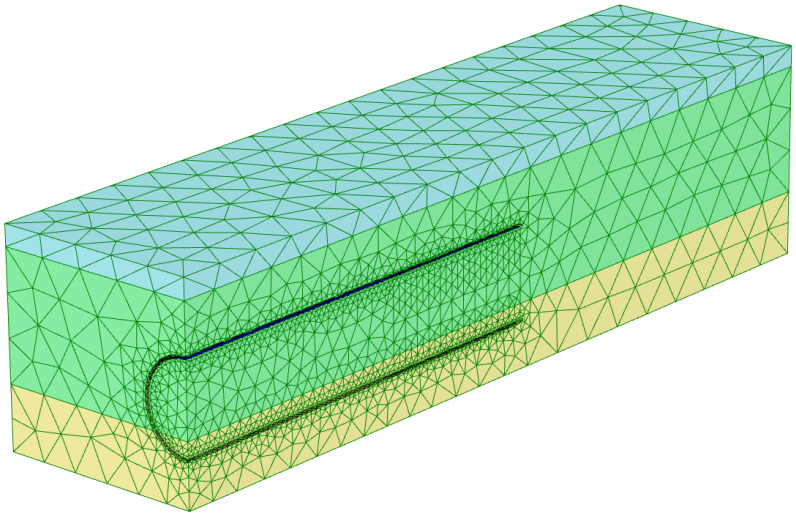


图 82: 生成的网格

检查网格后，可以关闭输出窗口。网格生成现已完成，因此创建定义计算阶段所需的所有输入也已完成。

5.6 定义并执行计算

土方挖掘和隧道衬里施工将采用**分阶段施工**模式进行建模。由于水位将保持恒定，因此可以跳过**渗流条件**模式。值得注意的是，由于网格生成，隧道被有效地分成位于黏土的上部和位于硬砂的下部。因此，隧道的下部和上部都应考虑在内。

第一阶段与其余阶段不同，因为在此阶段隧道被首次激活。该阶段将对已经深入土体 25 米的隧道进行建模。后续阶段将对每推进 1.5 米的情况进行建模。

5.6.1 初始阶段

初始阶段包括使用 K_0 *程序*生成初始应力。初始阶段的缺省设置有效。

1. 从菜单工具栏选择**视图** > **缺省视图** > **右视图**以将模型重新定向，并获取隧道的更清晰视角，如图 83(第 98 页) 所示。

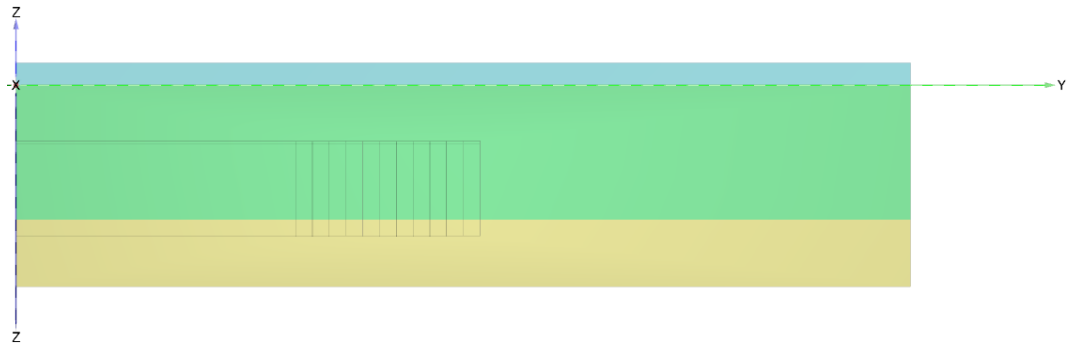


图 83: 预挖掘的隧道轮廓

5.6.2 第 1 阶段：TBM 的初始位置

在第一阶段，假设 TBM 已经推进 25 米。紧挨着前 25 米的一段（25 米到 26.5 米之间的段）将代表 TBM 正后方的区域，在该区域将注浆注入到尾端空隙中。在接下来的 6 段（26.5 米- 35.5 米），将对 TBM 进行建模。

1. 添加第一个计算阶段
2. 在**模型浏览器**中，展开*隧道*，然后展开 *Tunnel_1*。向下滚动到**前进步骤**选项并将其设置为 7，以便模拟前 25 米的推进情况。请注意，最终衬里会自动激活（请参见图 84(第 98 页)）。

注释:

值为 -1 的前进步骤代表未挖掘隧道的土体（初始阶段）。在本教程中， 25 米处的前进步骤 7 代表 TBM 后部的位置；在此位置，千斤顶力将施加到安装在 23.5 米到 25 米之间的衬里环上。

TBM 的前部将从前进步骤 8 再前进 1.5 米，并且 1.5 米长的新衬里环将安装在 TBM 的后部旁边（在 25 米到 26.5 米之间）。

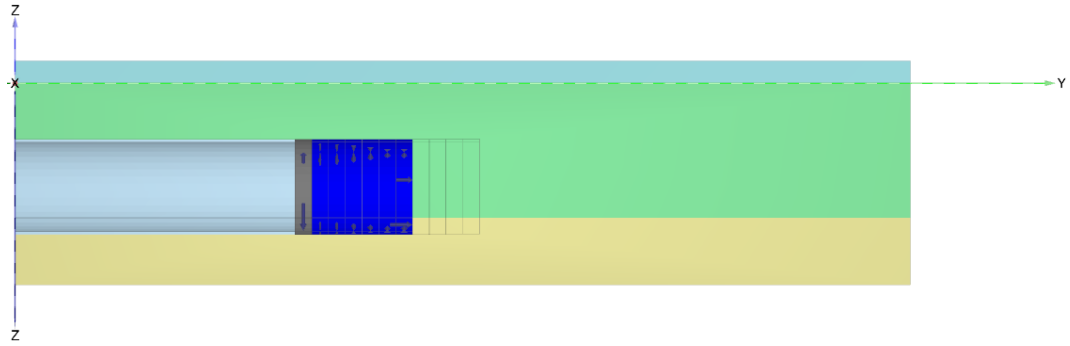


图 84: 前 25 米后隧道的前进

3. 为了考虑 TBM 在前 25 米的锥度，必须：停用最终衬里类组，激活代表 TBM 的板，并施加 0.5% 的表面收缩。
   a. 在绘图区域中选择并激活代表隧道前 25 米的最终衬里的土体（图 85(第 99 页)）

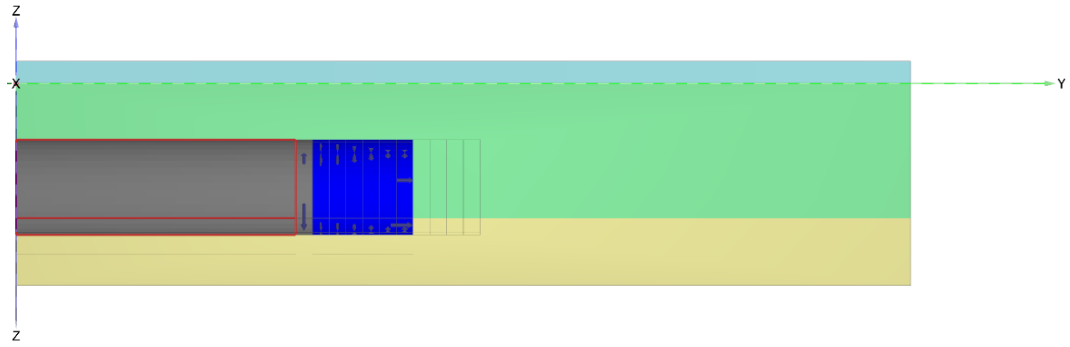


图 85: 对应于最终衬里（0 米到 25 米）的已停用土体 - 线框视图

请注意，衬里已关闭，但表示已停用体积的线框仍为红色，因为已停用的衬里仍处于选中状态。

注释: 停用对象将自动隐藏为体积或表面，但表示隐藏对象的线框将保留。可以在**可视化设置**窗口中调整未激活对象的可见性（请参见 参考手册 - 修改显示设置）。

4. 选择 0 米到 25 米之间的隧道外表面（在线框线内），如图 86(第 99 页) 所示。

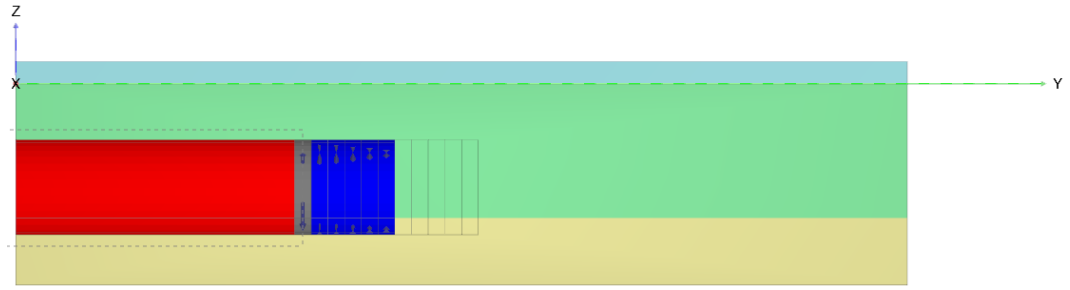


图 86: 选择板（0 米 - 25 米）

5. 在**选择浏览器**中：
   a. 检查隧道周围的界面是否已激活。请注意，缺省情况下该界面已激活。

   提示: 如果需要，为了更好地呈现激活界面，请隐藏黏土和砂土体。

   b. 单击相应的复选框，激活**板**和**表面收缩**（请参见图 87(第 99 页)）。



图 87: 第 1 阶段 - 在隧道的 0 米到 25 米之间激活板和表面收缩

6. 在绘图区域中选择 TBM 衬里后部 0 米到 25 米之间的侧面，如图 88(第 100 页) 所示。然后在**选择浏览器**中取消选中相应的复选框，停用**表面荷载**。

注释:

请注意，这样做是因为仅在此阶段放置 TB 米，并且 TBM 不会移动，因此此处不会考虑千斤顶顶推。

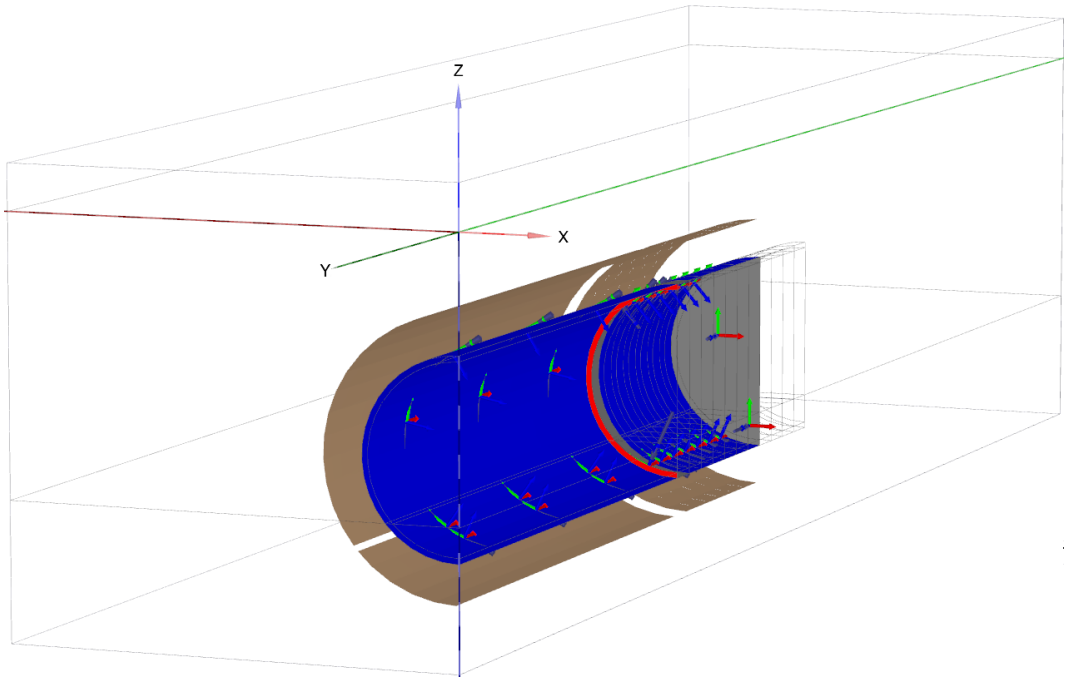


图 88: 对非移动 TBM 停用千斤顶力（25.0 米）

7. 单击**预览**按钮，以预览前 35.5 米的挖掘（图 89(第 100 页)）。确保同时施加注浆压力和隧道掌子面压力，并且两个压力都从上到下增加。

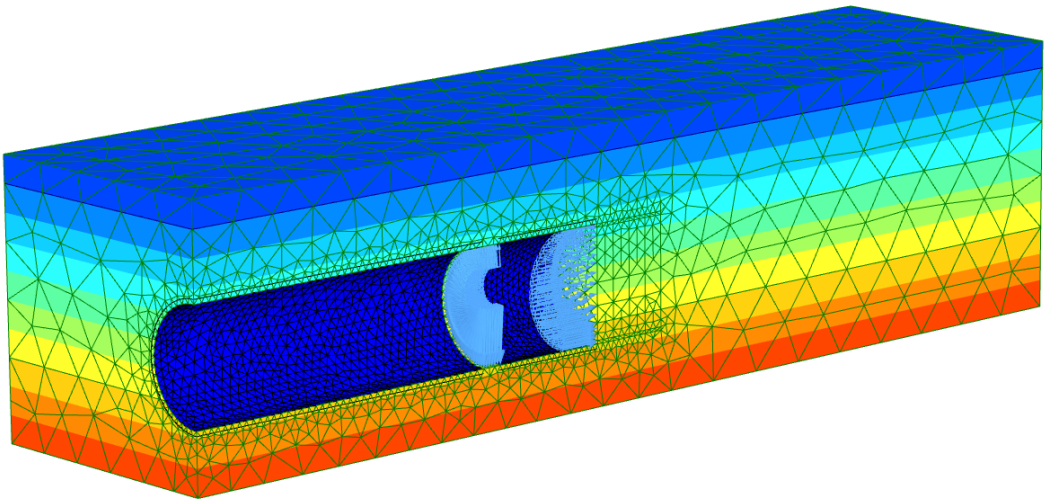


图 89: 第 1 阶段的预览

注释: 在下一阶段，最终衬里会自动重新激活。

5.6.3 第 2 阶段：TBM 推进 1

在此阶段，将模拟 TBM 推进 1.5 米（从 y = 35.5 到 y = 37）。

1. 添加新阶段
2. 在**模型浏览器**中，展开*隧道*，然后展开 *Tunnel_1*。在*模型浏览器*中向下滚动到**前进步骤**选项，将其设置为 8 以模拟前 26.5 米的推进情况。或者，也可以执行图 90(第 101 页) 中所示的前进步骤。

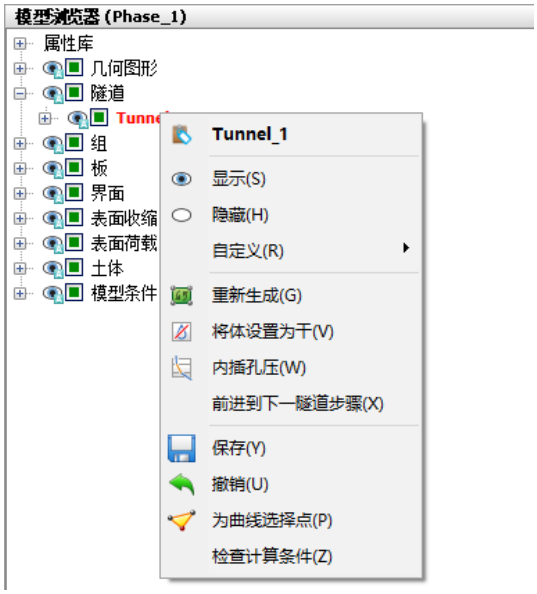


图 90: 模型浏览器中的推进到下一隧道步长选项

注释: 缺省情况下，前进到下一隧道步骤后，前 25 米的最终衬里会重新激活，而 TBM 板和表面收缩会自动停用。

此阶段结束后，TBM 将挖掘 35.5 米到 37 米之间（前部），并且新的衬里截面将安装在 TBM 后部的 25 米到 26.5 米之间（请参见图 91(第 101 页)）。

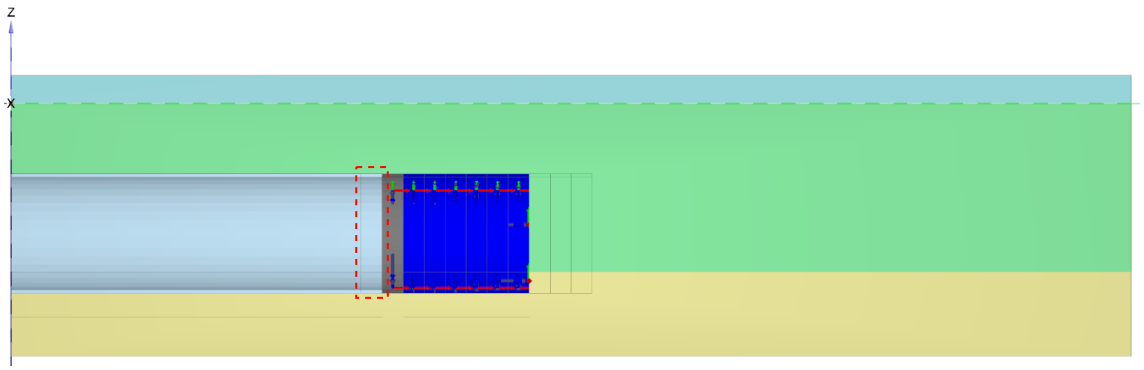


图 91: 35.5 米到 37 米的 TBM 前进情况（前部）- 虚线中 25 米到 26.5 米之间的新衬里环（后部）

5.6.4 第 3 阶段：TBM 推进 2

在此阶段，TBM 从 y = 37 推进到 y = 38.5。

1. 添加新阶段
2. 在**模型浏览器**中，展开*隧道*，右键单击 *Tunnel_1*。然后单击**推进到下一隧道步长**。

5.6.5 第 4 阶段：TBM 推进 3

在此阶段，TBM 从 y = 38.5 推进到 y = 40。

1. 添加新阶段
2. 在**模型浏览器**中，展开*隧道*，右键单击 *Tunnel_1*。然后单击**推进到下一隧道步长**。

5.6.6 第 5 阶段：TBM 推进 4

在此阶段，将模拟 TBM 的最终推进（从 y = 40 到 y = 41.5）。

1. 添加新阶段
2. 在**模型浏览器**中，展开*隧道*，右键单击 *Tunnel_1*。然后单击**推进到下一隧道步长**。
3. 按**计算**按钮以开始计算。忽略消息“没有为曲线选择节点或应力点”，因为在本示例中没有绘制荷载位移曲线，然后开始计算。

5.7 结果

计算完成后，可以在输出程序中评估结果。在输出程序中，位移和应力显示在完整的三维模型中，但计算结果也以表格形式提供。若要查看当前分析结果，请执行以下步骤：

1. 在*阶段浏览器*中选择最后一个计算阶段（第 5 阶段）
2. 在边栏中单击**查看计算结果**按钮以打开*输出*程序。缺省情况下，输出程序将在所选计算阶段结束时显示三维变形网格。
3. 从*变形*菜单中，选择*总位移*，然后选择 u_z 以便查看以阴影图显示的模型中的总垂直位移（图 92(第 103 页)）。
4. 为了查看地面沉降：
   - 选择*水平横截面*按钮制作水平横截面。
   - 在出现的窗口中填写 1.95 米的横截面高度。
   - 在**视图**菜单中，选择**视图点** > **右视图**。
   - 在**网格**菜单中，使**类组边界**可见。
   - 在**视图**菜单中，选择**分布平面**选项。

结果，显示带有横截面的窗口（图 93(第 103 页)）。地面最大沉降约为 1.9 厘米。

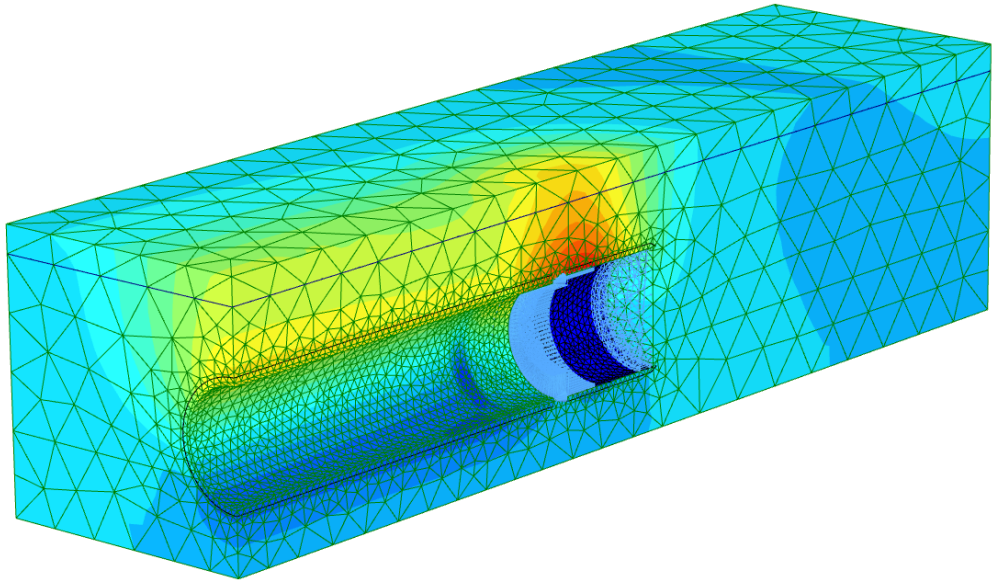


图 92: 最终阶段后的总垂直位移 $u_z \approx 3.1$ 厘米

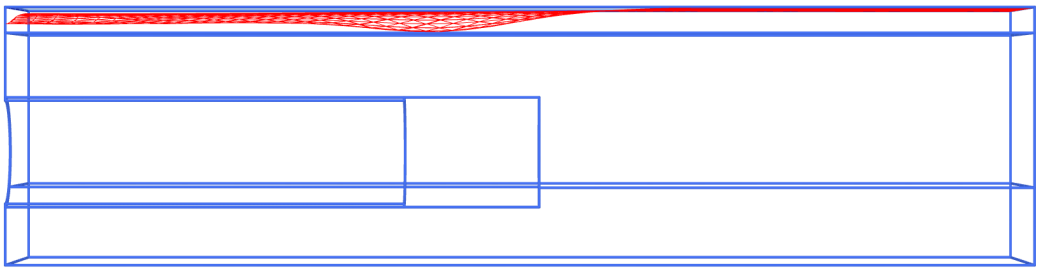


图 93: 地面沉降槽 $u_z \approx 1.9$ 厘米

6 路堤施工 [ADV]

在地下水水位较高的软土上进行路堤施工将导致孔压升高。由于这种不排水行为，有效应力保持在较低水平，必须采用中期固结期才能保证路堤的安全施工。在固结期间，超孔隙水压力会消散，这样，土体可以获得必要的剪切强度来继续施工过程。

本教程设计路堤施工，详细介绍了上述机制。分析中介绍了两个新的计算选项，即固结分析和通过安全分析（phi/c 折减）计算安全系数。它还涉及对排水进行建模以加快固结过程。

目标

- 对排水进行建模
- 固结分析
- 固结期间渗透率的变化
- 安全分析（phi-c 折减）

几何图形

图 94(第 104 页) 显示了路堤的横截面。

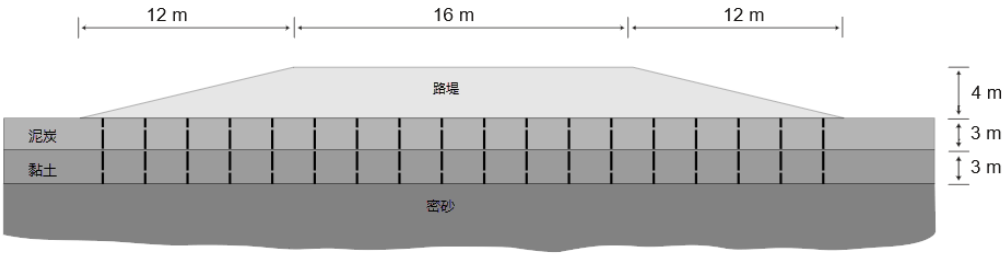


图 94: 软土上路堤的情况

6.1 创建新项目

路堤宽 16 米。斜坡的倾斜度为 1:3。问题是对称的，因此仅进行一半建模（在本例中，选择右半部分）。项目中考虑了 2 米的代表性段。路堤本身由松散的砂土组成。下层土是 6 米厚的软土。软土层的上面 3 米建模为泥炭层，下面 3 米建模为黏土。潜水位在原地表下方 1 米处。软土层下方是致密的砂土层，在本模型中，考虑其厚度为 4 米。

1. 启动输入程序，然后从**快速选择**对话框中选择**开始新项目**。
2. 在**项目属性**窗口的**项目**页面中，输入相应标题。
3. 保留缺省单位并将模型尺寸设置为
   a. $x_{min} = 0$ 且 $x_{max} = 60$。
   b. $y_{min} = 0$ 且 $y_{max} = 2$。

6.2 定义土壤地层学

构成路堤地基的土层是使用钻孔定义的。路堤层在**结构**模式中定义。

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 (0 0 0) 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 定义三个土层，如图 95(第 105 页) 所示。
3. 水位位于 z = -1 米处。在钻孔列中指定**水头**值为 -1。

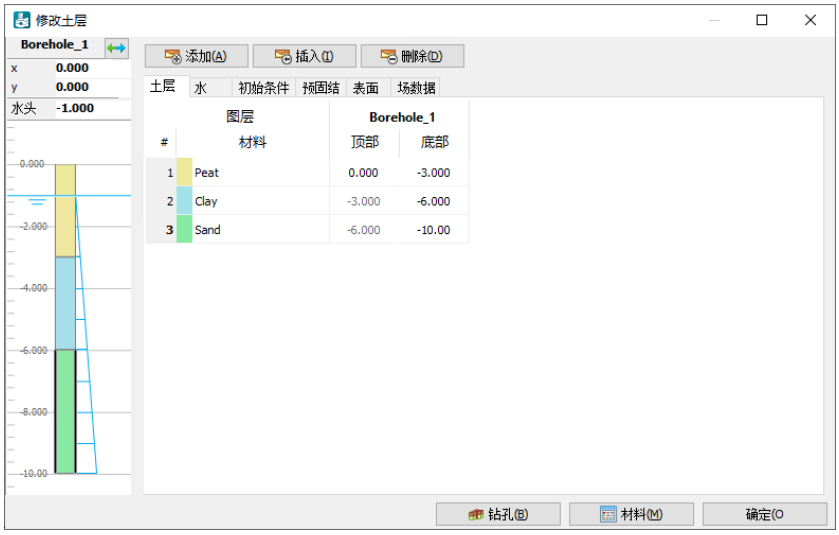


图 95: 土层分布

6.3 创建和分配材料数据集

数据集的材料属性如下表所示。

表 16: 路堤和下层土的材料属性

参数	名称	路堤	砂土	泥炭	黏土	单位
常规						
土体模型	模型	硬化土体	硬化土体	软土模型	软土模型	-
材料行为类型	类型	排水	排水	不排水 (A)	不排水 (A)	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	16	17	8	15	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	19	20	12	18	kN/m^3

参数	名称	路堤	砂土	泥炭	黏土	单位
常规						
初始孔隙比	e_{init}	0.5	0.5	2.0	1.0	-
力学						
标准排水三轴试验中的割线刚度	E_{50}^{ref}	$2.5 \cdot 10^4$	$3.5 \cdot 10^4$	-	-	kN/m^2
主固结仪荷载的切线刚度	E_{oed}^{ref}	$2.5 \cdot 10^4$	$3.5 \cdot 10^4$	-	-	kN/m^2
卸载/重新装载刚度	E_{ur}^{ref}	$7.5 \cdot 10^4$	$1.05 \cdot 10^5$	-	-	kN/m^2
更改压缩指数	λ^*	-	-	0.15	0.05	-
更改膨胀指数	κ^*	-	-	0.03	0.01	-
刚度应力水平依赖性的功率	m	0.5	0.5	-	-	-
粘聚力（常量）	c'_{ref}	1.0	0.0	2.0	1.0	kN/m^2
摩擦角	φ'	30	33	23	25	度
剪胀角	ψ	0.0	3.0	0	0	度
地下水						
分类标准	-	USDA	USDA	USDA	USDA	-
模型	-	Van Genuchten	Van Genuchten	Van Genuchten	Van Genuchten	-
土体分类	-	壤质砂土	砂土	黏土	黏土	-
<2μm	-	6.0	4.0	70.0	70.0	%
2μm - 50μm	-	11.0	4.0	13.0	13.0	%
50μm - 2mm	-	83.0	92.0	17.0	17.0	%
请使用缺省值	-	从数据集	从数据集	无	从数据集	-
水平渗透率（x 方向）	k_x	3.499	7.128	0.1	0.04752	米/天
水平渗透率（y 方向）	k_y	3.499	7.128	0.1	0.04752	米/天
垂直渗透率	k_z	3.499	7.128	0.05	0.04752	米/天
孔隙比依赖性	-	否	否	是	是	
渗透率变化	c_k	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$	1.0	0.2	-

界面						
强度定义	-	刚性	刚性	刚性	刚性	-
界面折减因子	R_{inter}	1.0	1.0	1.0	1.0	-
初始						
K_0 测定	-	自动	自动	自动	自动	-
预上覆岩层压力	*POP*	0.0	0.0	5.0	0.0	kN/m^2
超固结比率	*OCR*	1.0	1.0	1.0	1.0	-

注释:

应定义初始孔隙比 (e_{init}) 和渗透率变化 (c_k)，用以模拟土体压缩引起的渗透率变化。使用高级模式时建议使用此选项。

1. 单击**材料**按钮 。
2. 根据表 16(第 105 页)创建土体材料数据集，并将其分配到钻孔中的相应层（图 95(第 105 页)）。
3. 关闭**修改土层**窗口，并进入**结构模式**以定义结构单元。

6.4 路堤和地漏的定义

路堤和地漏在**结构模式**中定义。要定义路堤层，请执行以下操作：

1. 通过单击工具栏中的相应按钮来调整模型的方向，使其显示前视图。
2. 通过在 (0 0 0)、(0 0 4)、(8 0 4) 和 (20 0 0) 处定义点来创建表面。
3. 创建一条穿过 (0 0 2) 和 (14 0 2) 的线来定义路堤层。
4. 按住 **<Ctrl>** 键的同时在模型中单击创建的表面将其选中。
5. 单击**拉伸对象**按钮。将值 2 分配给拉伸矢量的 y 分量，如图 96(第 107 页) 所示，然后单击**应用**。

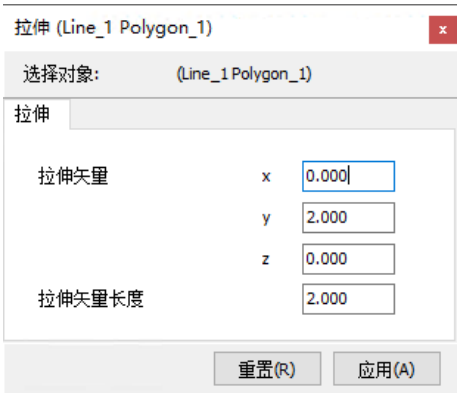


图 96: 拉伸窗口

6. 删除在拉伸之前创建的表面和线及其对应点。
7. **右键单击**通过拉伸创建的范围，然后选择菜单项 **Soil_4** > **设置材料** > **路堤**。

在此项目中，将对照在无排水孔情况下的结果来研究排水孔对固结时间的影响。地漏仅在计算阶段有效.。

地漏呈方形排列，同一行（或列）的两个相邻地漏之间的距离为 2 米。本教程将只考虑同一行地漏。要创建地漏模式，请执行以下操作：

1.  在边栏中单击**创建水力条件**按钮。
2.  单击显示菜单中的**创建排水线**按钮。在模型中的点 (1 1 0) 和点 (1 1 -6) 之间定义排水线。
3.  单击**创建阵列**按钮以定义地漏模式。
4. 在**创建阵列**窗口中，选择下拉菜单中的菜单项**形状** > **1D，在 x 方向**，然后指定模式，如图 97(第 108 页)所示。

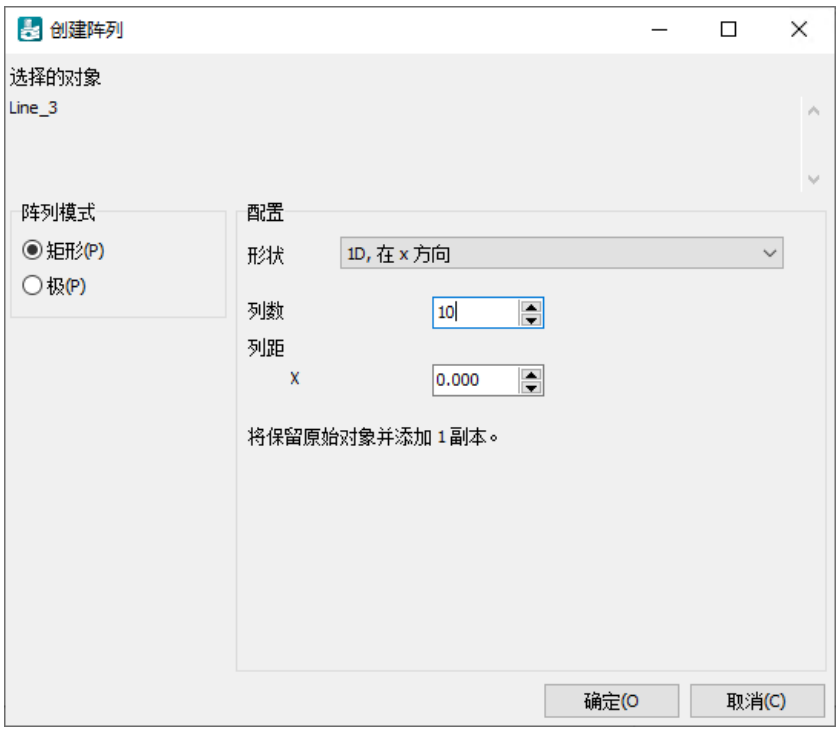


图 97: 地漏模式的设置

模型几何图形如图 98 (第 109 页) 所示：

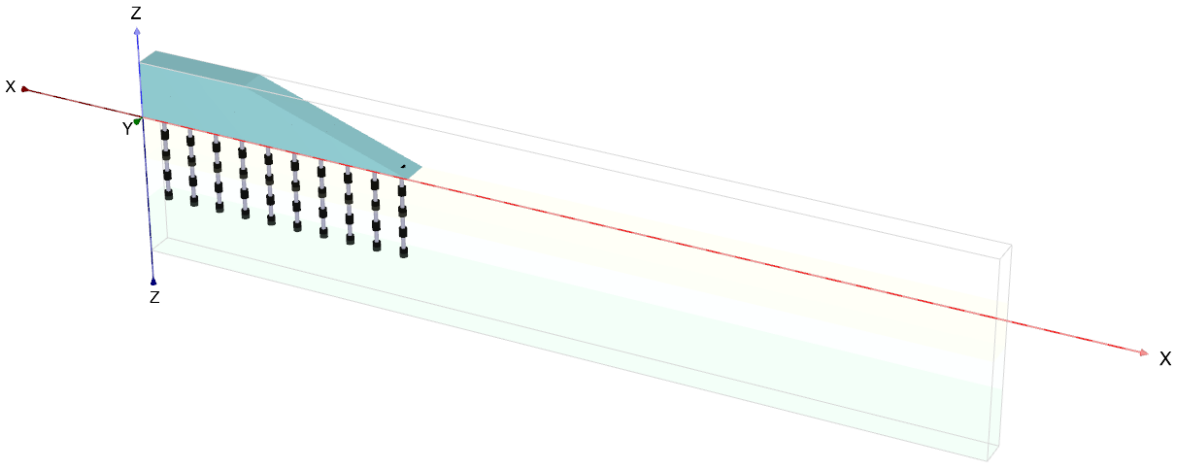


图 98: 模型几何图形

6.5 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 选择所有体积，包括路堤，然后将**选择浏览器**中的**粗糙度系数**设置为 0.3。
3. 单击**生成网格**按钮。将单元分布设置为**粗糙**。
4. 查看生成的网格。

生成的网格如图 99(第 109 页) 所示。

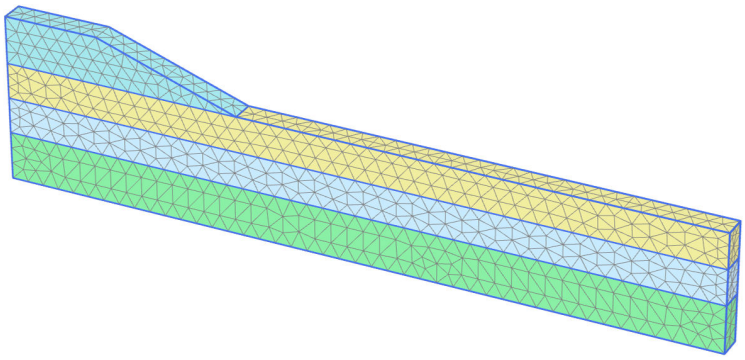


图 99: 生成的网格

6.6 定义计算

将把路堤施工过程考虑两次。在第一个计算中，将不考虑地漏。

6.6.1 初始阶段

路堤在初始情况下不存在。因此，相应的土体在初始阶段已停用。**K0 程序**可用于计算初始应力。初始水压为完全静水压力，并基于由分配至钻孔的**水头**值定义的一般潜水位。对于**初始阶段**，为**孔隙水压力计算类型**选择了**潜水**选项。**全局水位**设置为**钻孔水位 1**，与为钻孔指定的水头定义的水位相对应。

水流的边界条件可以在**模型浏览器**中通过选择**模型条件** > **地下水**来指定。在当前情况下，由于对称性，必须关闭左侧垂直边界 (Xmin)，所以不应出现水平流。底部是开放的，因为超孔隙水压力可以自由地流入深层可渗砂土层。上边界显然也是开放的。定义后的**地下水渗流**子树视图见图 100(第 110 页)。

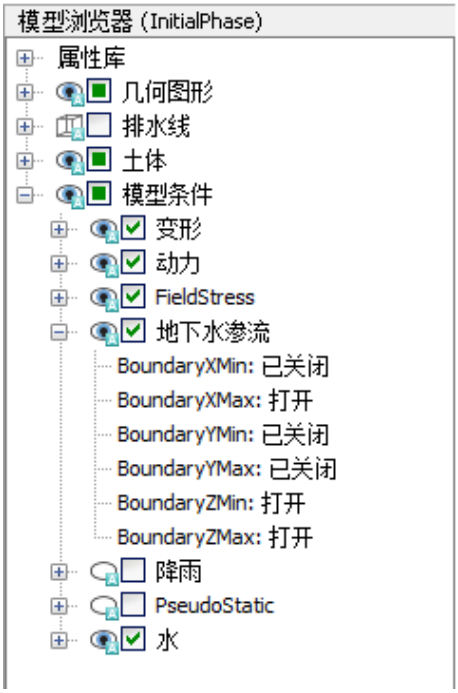


图 100: 地下水渗流的边界条件

6.6.2 固结分析

固结分析在计算中引入了时间维度。为了正确地进行固结分析，必须选择适当的时间步长。采用小于临界最小值的时间步长可能导致应力振荡。PLAXIS 3D 中的固结选项允许有一个完全自动的时间步长程序，将此临界时间步长考虑在内。在该程序中，**荷载类型**参数有三种主要可能性：

- 预定义期间固结，包括变化对激活几何的影响（**分阶段施工**）。
- 固结，直至几何形状中的所有超孔隙水压力降低至预定义的最小值（**最小超孔隙水压力**）。
- 固结直到土体达到指定的固结度（**固结度**）。

固结过程 - 无排水

路堤施工分为两个阶段。在第一个施工阶段后，有 30 天的固结期，以消散超孔隙水压力。在第二个施工阶段后，再引入一个固结期，之后可以确定最终沉降。

要定义计算阶段，请执行以下步骤：

第 1 阶段 - 第一个施工阶段

1. 单击**添加阶段**按钮以引入第一个施工阶段。
2. 在**计算类型**的**常规**子树中，从下拉菜单中选择**固结**选项。
3. 缺省情况下，**荷载类型**设置为**分阶段施工**。此阶段将使用此选项。
4. **潜水位**选项将被自动选择作为孔压计算类型。请注意，计算阶段的全局水位可以在子树**模型浏览器** > **模型条件** > **水**中定义。
5. 将**时间间隔**值指定为 2 天，然后单击**确定**关闭**阶段**窗口。
6. 在**分阶段施工模式**下，激活路堤的第一部分。

第 2 阶段 - 第一固结期

第二阶段也是**固结**分析。在此阶段，由于仅需对最终时间进行固结分析，因此不对几何图形进行更改。

1. 单击**添加阶段**按钮以引入下一个计算阶段。
2. 将计算类型定义为**固结**。
3. 将**时间间隔**值指定为 30 天。此阶段其他参数使用缺省值。

第 3 阶段 - 第一个施工阶段

1. 单击**添加阶段**按钮以引入下一个计算阶段。
2. 将计算类型定义为**固结**。
3. 将**时间间隔**值指定为 1 天。其他参数使用缺省值。
4. 在**分阶段施工**模式下，激活路堤的第二部分。

第 4 阶段 - 长期固结

第四阶段是对最小超孔隙压力的**固结**分析。

1. 单击**添加阶段**按钮以引入下一个计算阶段。
2. 将计算类型定义为**固结**。
3. 在**荷载类型**中，从下拉菜单中选择**最小超孔隙水压力**选项。使用最小压力的缺省值 (|P-stop| = 1.0 kN/m^2) 以及其他参数的缺省值。

计算阶段的定义已完成。

6.6.3 执行计算

1. 在开始计算前，单击**为曲线选择点**按钮并选择以下点：选择路堤突趾 (20 0 0) 作为第一个节点。将使用第二个节点来绘制超孔隙水压力的发展（和衰减）。为此，需要在软土层中间的某个点，靠近（但实际上不在）左侧边界（例如，(0.7 0 -3)）。
2. 开始计算。

在固结分析期间，可以在计算信息窗口的上部查看时间的发展（请参阅图 101(第 112 页)）。除乘子外，还会出现参数 P_{max}，表示当前的最大超孔隙压力。此参数在**最小超孔隙压力**固结分析中很重要，其中所有孔隙压力均指定为降低至预定义值以下。



图 101: 激活任务窗口中显示的计算进度

6.7 结果

计算结束后，选择第三个计算阶段并单击**查看计算结果**按钮。现在的**输出**窗口显示路基最后部分不排水施工后变形的网格。鉴于第三阶段的结果，变形的网格展示了不排水行为导致的堤趾和腹地的抬升（请参阅图 102(第 113 页)）。

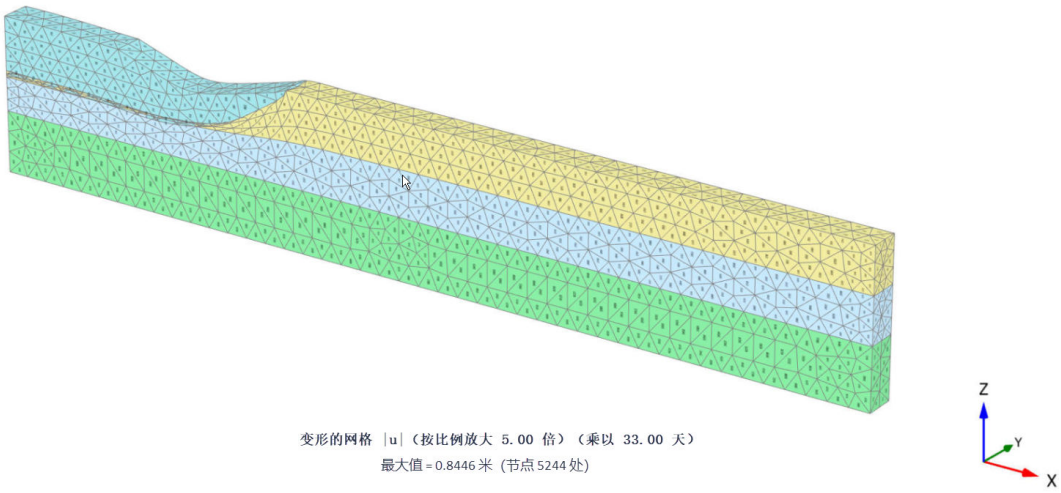


图 102: 不排水路堤施工（第 3 阶段）后变形的网格

1. 选择菜单项**变形** > **增量位移** > **|Δu|**。
2. 选择菜单项**查看** > **箭头**或单击工具栏中的相应按钮以显示结果箭头。

通过对总位移增量的计算，可以从图 103(第 113 页) 中看到一种失效机制正在形成：

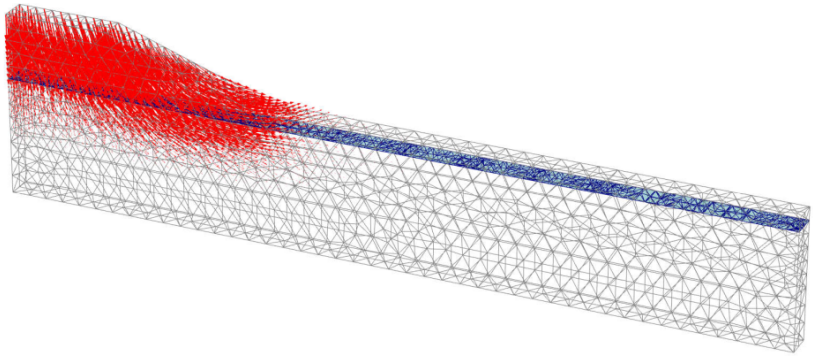


图 103: 不排水路堤施工后的位移增量

1. 单击 **<Ctrl> +<7>** 显示得出的超孔隙水压力（有关更多快捷方式，请参阅 PLAXIS 3D 参考手册 的附录 G）。可以通过选择在**应力**菜单中选择**孔隙水压力**选项时在侧面菜单中显示的相应选项来显示超孔隙水压力。
2. 单击**中心主方向**。超压的主方向在每个土体单元的中心显示。对于彩色可视化，在通用工具栏中选择**彩色主方向**。 结果如图 104(第 114 页) 所示。很明显，最高超孔隙水压力发生在路堤中心下方。

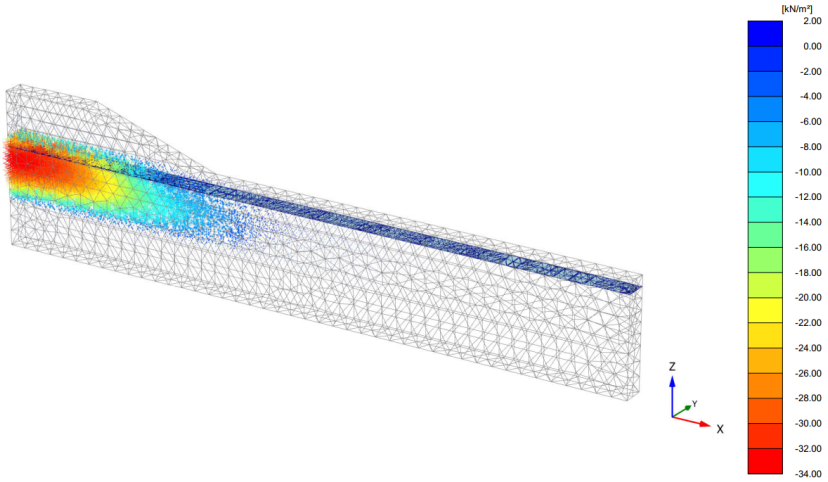


图 104: 不排水路堤施工后的超孔隙水压力（第 3 阶段）

1. 在下拉菜单中选择第 4 阶段。
2. 定义穿过 (0 1) 和 (60 1) 的竖向横截面。
3. 单击工具栏中的**等高线**按钮，以等高线显示结果。
4. 选择菜单项**视图** > **视角**。将弹出相应的窗口。
5. 在**视角**窗口中，选择**前视图**选项，如图 105(第 114 页) 所示：



图 105: 视角窗口

6. 使用**绘制扫描线**按钮或**视图**菜单中的相应选项定义等高线标签的位置。

可以看出，在第四阶段，原始土面和路堤的沉降明显增加。这是由超孔隙水压力的消散（= 固结）引起的，这导致土体进一步沉降。下图显示了固结后剩余超孔隙水压力的分布。检验最大值是否低于 1.0 kN/m^2。

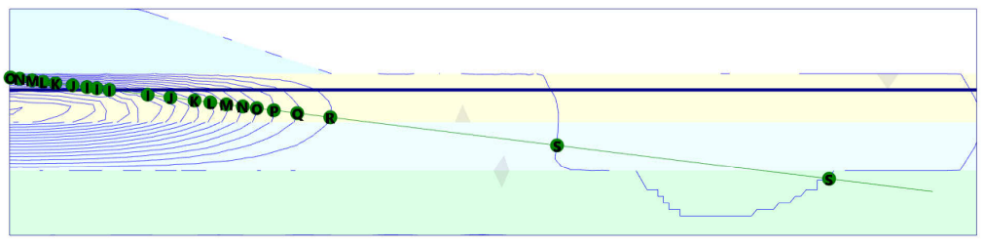


图 106: 固结至 P_{excess} < 1.0 kN/m^2 后的超孔隙水压力等高线

曲线管理器可用于查看路堤下超孔隙水压力随着时间的发展。若要创建这种曲线，请执行以下步骤：

1. 单击工具栏中的**曲线管理器**按钮。将弹出相应的窗口。
2. 在**图表**页面中，单击**新建**。**曲线生成**窗口弹出
3. 在下拉菜单中，x 轴选择**项目**选项，在树中，选择**时间**。
4. 在下拉菜单中，为 y 轴选择软土层中间的点（第二个节点 (0.7 0.0 -3)）。在树中，选择**应力** > **孔压** > **p excess**。
5. 选择 y 轴**反向符号**选项。
6. 单击**确定**生成曲线。
7. 单击工具栏中的**设置**按钮。将出现**设置**窗口，显示创建曲线的页面。
8. 在与研究节点对应的页面中，单击**阶段**按钮并在出现的窗口中选择阶段 1 到 4。
9. 通过在**曲线标题**单元中键入 Phases 1 - 4 来重命名曲线。
10. 单击**应用**以更新绘图。
11. 将图表保存在输出中，将项目保存在输入中。

注释: 要在图表区域中显示图例，请右键单击图表名称，然后选择菜单项**视图** > **图表图例**。

图 107(第 115 页) 显示了四个计算阶段。在施工阶段，超孔隙水压力会随着时间出现小幅上升，而在固结期，超孔隙水压力会随着时间降低。实际上，由于涉及较小的时间间隔，路堤施工期间已经出现了固结。

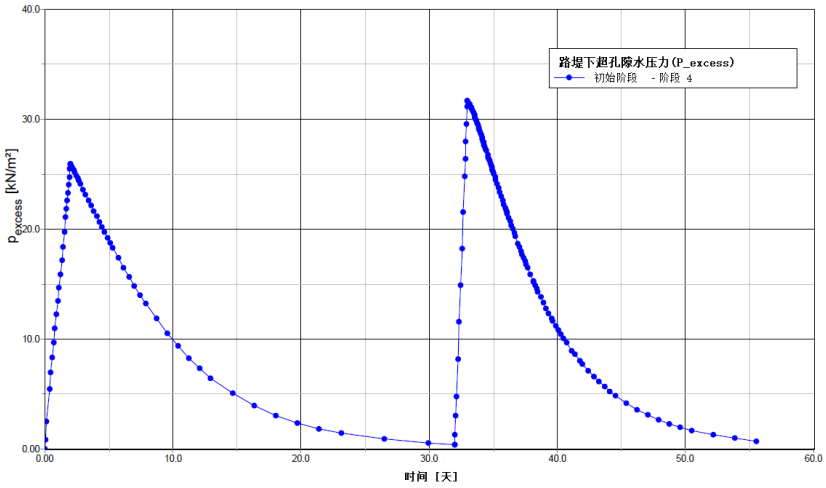


图 107: 路堤下超孔隙水压力的发展

6.8 安全分析

6.8.1 一般注意事项

在路堤设计中，不仅要考虑最终稳定性，也要考虑施工过程中的稳定性。从输出结果中可以看出，失效机制出现在第二个施工阶段后。

在问题的这个阶段以及其他施工阶段要计算全局安全系数。

在结构工程中，安全系数通常定义为倒塌荷载与工作荷载的比值。然而，对于土体结构，该定义并非始终有用。例如，对于路堤而言，大多数荷载由土体重量引起，土体重量的增加不一定导致倒塌。实际上，在增加土体自重的试验中，纯摩擦土体的斜坡不会失效（如在离心试验中一样）。因此，更合适的安全系数定义是：

$$Safety\ factor = \frac{S_{maximum\ available}}{S_{needed\ for\ equilibrium}}$$

式中，S 代表剪切强度。真正强度与计算得出的平衡所需最低强度之比是土体力学中惯常使用的安全系数。通过引入标准库仑条件，可得到安全系数：

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

式中，c 和 φ 是输入强度参数，σ_n 是实际的法向应力分量。参数 c_r 和 φ_r 是折减强度参数，刚好足够维持平衡。上述原理是**安全**分析的基础，可在 PLAXIS 3D 中用于计算全局安全系数。在该方法中，粘聚力和摩擦角切线以相同比例降低：

$$\frac{c}{c_r} = \frac{\tan(\varphi)}{\tan(\varphi_r)} = \Sigma Msf$$

强度参数的折减由总乘子 ΣMsf 控制。该系数逐步提高，直至发生失效。之后，如果在发生失效时，多个连续的荷载步长可得到一个大致恒定的数值，安全系数定义为失效时的 ΣMsf 值。

安全性计算选项见**阶段**窗口中的**计算类型**下拉菜单。

6.8.2 定义计算

要计算不同施工阶段的路堤的全局安全系数，请执行以下步骤：

1. 添加新的计算阶段。
2. 在**阶段**窗口的**起始阶段**中，从下拉菜单中选择第 1 阶段。
3. 在**常规**子树中，针对计算类型选择**安全性**。
4. **荷载类型**自动更改为**增量乘子**。
5. 第一个控制强度折减过程的乘子增量 **Msf** 自动设置为 0.1。此值将在本教程中使用。
6. 请注意，**孔隙水压力计算类型**下拉菜单中的**使用前一阶段的压力**选项将被自动选中并呈现灰显状态，表示该选项无法更改
7. 要在所得的失效机制中排除现有变形，在**变形控制参数**子树中选择**将位移重置为零**选项。将使用所有其余参数的缺省值。现在，已经定义了第一次安全性计算。
8. 遵循相同的步骤创建新的计算过程，分析每个固结阶段结束时的稳定性。除了选择**安全性**作为计算类型，还要选择相应的固结阶段作为**起始阶段**参数。显示**安全性**计算阶段的**阶段**浏览器如图 108(第 117 页) 所示。

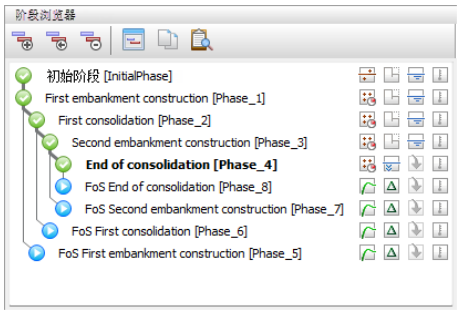


图 108: 显示安全性计算阶段的阶段浏览器

9. 计算安全性阶段。

注释:

- 安全性计算中**最大步数**的缺省值是 100。与**分阶段施工**计算相比，规定的步数始终完全执行。在大多数**安全性**计算中，100 步足以达到失效状态。如果未达到，则步数最高可增至 10000。
- 对于大多数安全性分析，以 Msf = 0.1 作为第一步便足以启动过程。在计算过程中，强度折减总乘子 ΣMsf 的发展由荷载前进步骤自动控制。

6.8.3 结果评估 - 安全性

在安全性计算过程中，会产生额外的位移。总位移没有物理意义，但最后一步（失效时）中的增量位移表明了可能的失效机制。

要查看路堤施工三个不同阶段中的机制：

1. 选择最后一个**安全**阶段（第 8 阶段），然后单击**查看计算结果**按钮。
2. 选择菜单项**变形** > **增量位移** > **|Δu|**。
3. 将表示方式从**箭头**更改为**阴影**。所得的图表让人直观看到失效机制（请参阅 图 109(第 117 页)）。位移增量的量级是不相关的。

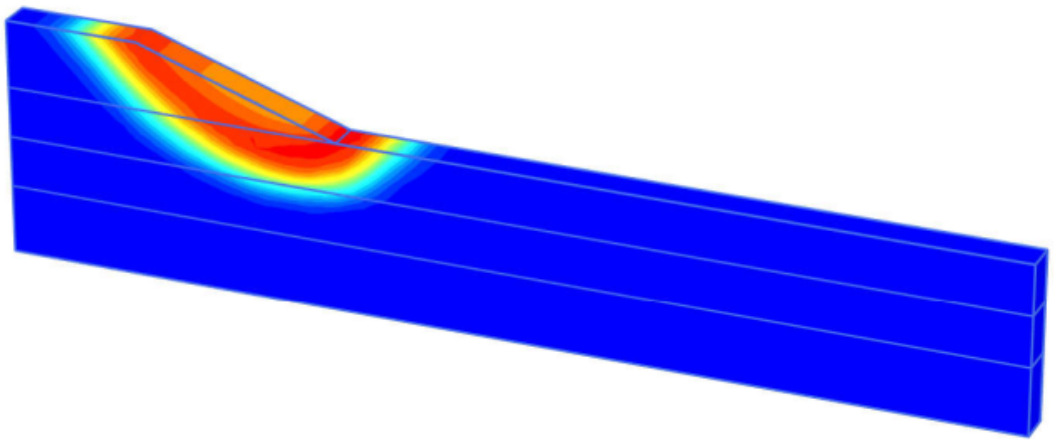


图 109: 总位移增量阴影，表明最终阶段最适用的路堤失效机制

安全系数可在**项目**菜单的**计算信息**选项中获得。**ΣMsf** 的值代表安全系数，但前提是该值在之前几个步骤中大致恒定。

然而，计算安全系数的最佳方式是绘制曲线，其中根据某个节点的位移绘制参数 **ΣMsf** 的图。尽管位移不相关，但它们表明是否出现了失效机制。

要计算四种情况下的安全系数，请执行以下步骤:

1. 单击工具栏中的**曲线管理器**按钮。
2. 单击**图表**页面的**新建**。
3. 在**曲线生成**窗口中，x 轴选择堤趾（第一个节点）。选择菜单项**变形** > **总位移** > **|u|**。
4. Y 轴选择**项目**，然后选择**乘子** > **ΣMsf**。该图表中考虑了**安全**阶段。因此，出现的曲线如下。
5. 在**图表**选项卡中将 x 轴间隔最大值设置为 1。

图 110(第 118 页) 显示了计算阶段的安全系数。

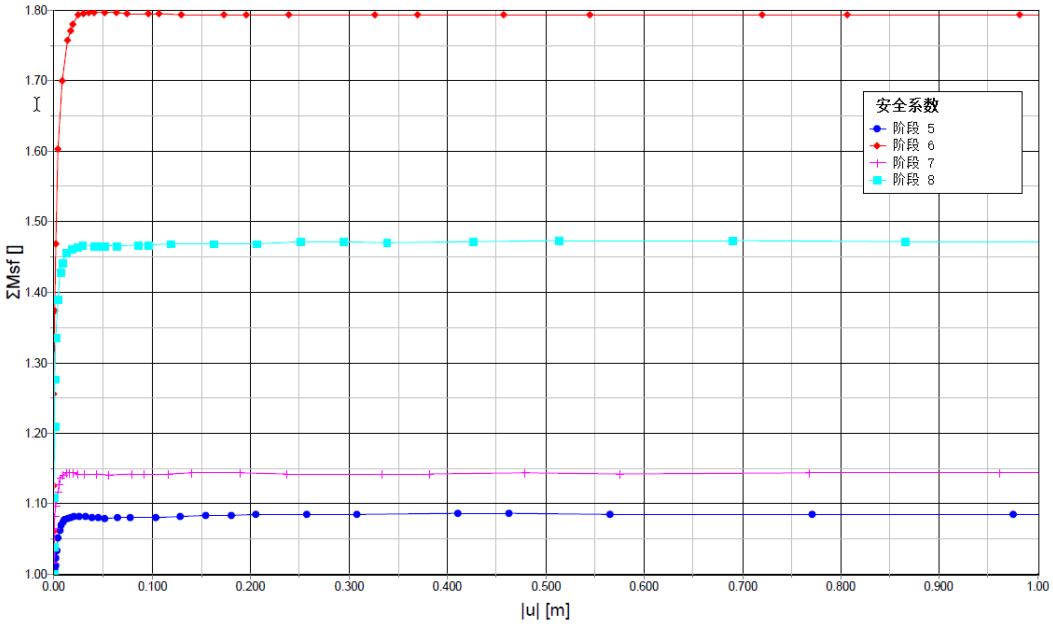


图 110: 安全系数计算

绘制的最大位移是不相关的。可以看出，所有曲线都得到了一个大致恒定的 **ΣMsf** 值。将鼠标悬停在曲线上的某个点上，将出现一个方框显示 **ΣMsf** 的确切值。

6.9 使用地漏

本节将调查项目中的地漏的作用。通过引入与前四个固结阶段具有相同属性的四个新阶段来重新定义路堤施工。这些新阶段的区别在于：

- 所有新阶段都应使用地漏。
- 前三个固结阶段（1 至 3）的**时间间隔**为 1 天。最后一个阶段设置为**最小超孔隙水压力**，并将最小超压 (|P-stop|) 赋值为 1.0 kN/m^2。

1. 计算结束后，选择最后一个计算阶段并单击**查看计算结果**按钮。现在的**输出**窗口显示路基最后部分排水施工后变形的网格。为了比较地漏的作用，可以使用节点 (0.7 0 -3) 上的超孔隙水压力消散。
2. 打开**曲线管理器**。
3. 在**图表**页面，双击图表 1（节点 (0.7 0 -3) 处的 p_{excess} 与时间的对比）。将显示阶段选择为阶段 1-4。关闭**曲线管理器**。
4. 单击工具栏中的**设置**按钮。将弹出**设置**窗口。
5. 单击**添加曲线**按钮并在出现的菜单中选择**从当前项目添加**选项。将弹出**曲线生成**窗口。

注释: 如不需要添加新曲线，可以使用**曲线设置**窗口中的对应按钮重新生成现有曲线。

6. 选择 y 轴**反向符号**选项。
7. 单击**确定**以接受选定的选项并关闭**曲线生成**窗口。
8. 在图表中添加新曲线，与之对应的新页面将在**设置**窗口中打开。
9. 单击**阶段**按钮。在所显示的窗口中选择**初始阶段**和后四个阶段（地漏）并单击**确认**。
10. 在**设置**中，单击**应用**预览生成的曲线。
11. 单击**确定**关闭**设置**窗口。图 111(第 119 页) 清晰地显示了在超孔隙水压力消散所需的时间内地漏的作用。

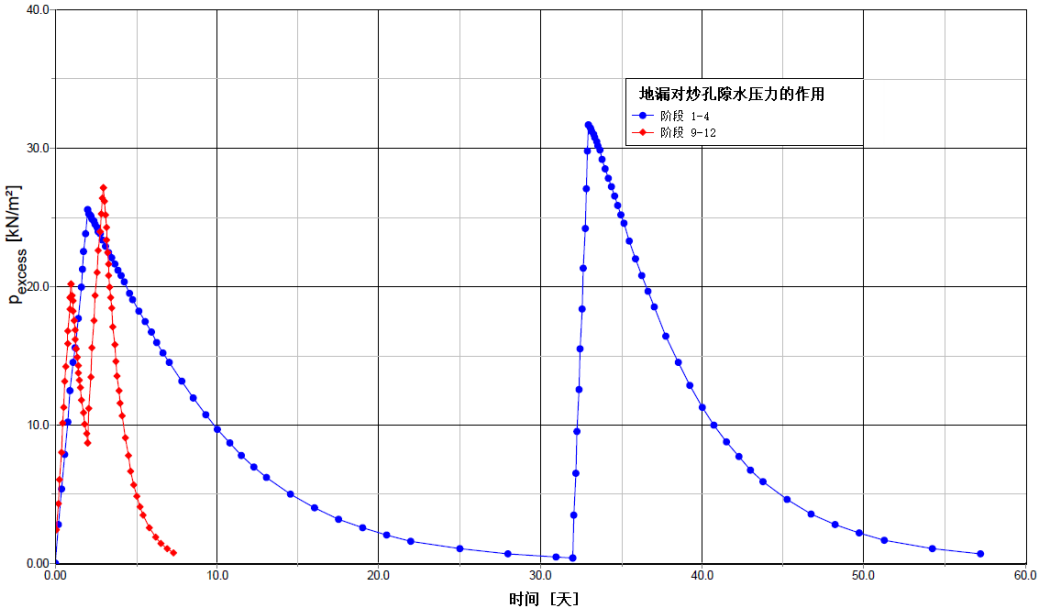


图 111: 地漏的作用

7 快速下降分析 [ULT]

本示例涉及蓄水池水坝在水位下降条件下的稳定性。蓄水池水位的快速下降可能会导致水坝不稳定，因为水坝内部存在高孔隙水压。水坝由黏土芯构成，两侧具有高等级填料。下层土由超固结粉砂组成。

目标

- 执行流固耦合分析。
- 定义时间相关的水力条件。
- 使用不饱和渗流参数。

几何图形

考虑的水坝高 30 米。水坝顶宽和底宽分别为 5 米和 172.5 米。水坝的几何形状如下所示。水坝后方正常水位为 25 米。假设水位下降 20 米的情况。则水坝右侧的正常潜水位低于地面 10 米。

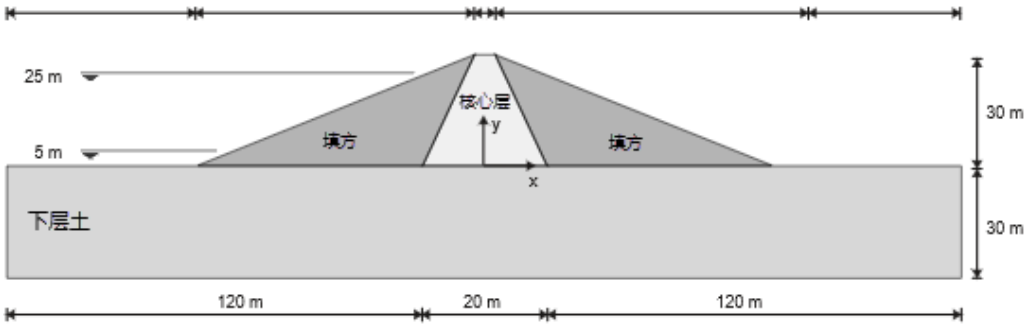


图 112: 工程几何图形

7.1 创建新项目

假设水坝位于宽阔的山谷中，为了减小模型尺寸，模型中考虑了 50 米的代表性长度。

若要创建几何模型，请执行以下步骤：

1. 启动输入程序，然后从**快速选择**对话框中选择**开始新项目**。
2. 在**项目属性**窗口中，输入相应标题。
3. 保留缺省单位并将模型尺寸设置为：
   a. x_{min} = -130.0 米，x_{max} = 130.0 米
   b. y_{min} = 0m 且 y_{max} = 50.0m

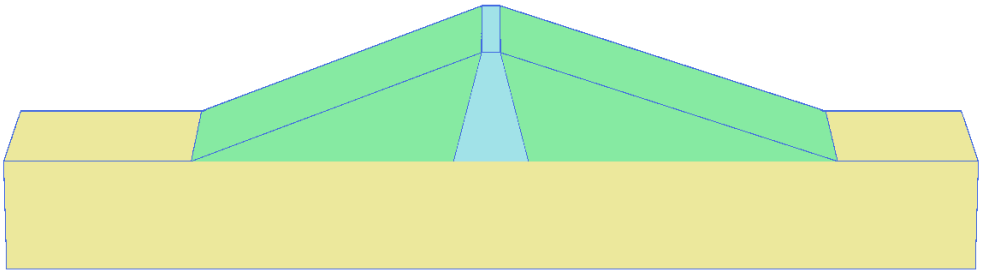


图 113: 模型的几何图形

7.2 定义土壤地层学

要定义基本地基土体，需要增加钻孔，并且必须指定材料属性。在模型中，将一层 30 米的超固结粉砂视为下层土。

1. 在 (0.0 0.0) 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 添加从地表 (y=0) 延伸至 30 米深度 (y=-30) 的土层。
3. 将钻孔中的**水头**设置为 -10 米。将自动生成水平水位。该水位与地表地下水渗流边界条件相结合，用于**流固耦合**分析。

7.3 创建和分配材料数据集

需要为土层创建三个材料数据集。

在表 17(第 121 页)中显示的层具有以下属性：

表 17: 水坝和下层土的材料属性

属性	名称	芯数	填充	下层土	单位
常规					
土体模型	模型	摩尔-库伦	摩尔-库伦	摩尔-库伦	-
排水类型	类型	不排水 (B)	排水	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	16.0	16.0	17.0	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	18.0	20.0	21.0	kN/m^3
力学					
杨氏弹性模量	E'_{ref}	$1.5 \cdot 10^3$	$2.0 \cdot 10^4$	$5.0 \cdot 10^4$	kN/m^2
泊松比	$\nu(nu)$	0.35	0.33	0.3	-

力学					
杨氏弹性模量增量	E'_{inc}	300	-	-	kN/m^2/m
参考层	z_{ref}	30	-	-	m
不排水剪切强度	$s_{u,ref}$	5.0	-	-	kN/m^2
粘聚力	c'_{ref}	-	5.0	1.0	kN/m^2
摩擦角	φ'	-	31	35.0	度
剪胀角	ψ	-	1.0	5.0	度
不排水剪切强度增量	$s_{u,inc}$	3.0	-	-	kN/m^3

地下水					
分类标准	模型	Hypres	Hypres	Hypres	-
SWCC 拟合方法	-	Van Genuchten	Van Genuchten	Van Genuchten	-
下层土/上层土	-	下层土	下层土	下层土	-
土体分类	-	超细	粗糙	粗糙	-
水平方向渗透率	k_x	$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.25	0.01	米/天
水平方向渗透率	k_y	$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.25	0.01	米/天
垂直方向渗透率	k_z	$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.25	0.01	米/天

若要创建材料集，请执行以下步骤：

1. 打开**材料集**窗口。
2. 根据表 17(第 121 页)中给出的信息，创建**土体和界面**材料集类型下的数据集。请注意，**界面**和**初始**标签页不相关（不使用界面或 **K0 程序**）。
3. 为钻孔中的土层指定**下层土**材料数据集。

7.4 定义水坝

水坝在**结构模式**中定义。

1. 通过在 (-80 0 0)、(92.5 0 0)、(2.5 0 30) 和 (-2.5 0 30) 处指定点来定义表面。
2. 通过在 (-10 0 0)、(10 0 0)、(2.5 0 30) 和 (-2.5 0 30) 处指定点来定义表面。
3. 多选创建的表面并右键单击绘图区域。选择**相交和重新聚类**菜单项。
4. 多选表面并沿 (0 50.0 0) 拉伸。将生成代表水坝的体积。
5. 删除用于创建土体的表面。

6. 为土体分配相应的材料数据集。
7. 时间相关条件可以分配给地表地下水渗流边界条件。根据表 18(第 123 页)中的信息，定义地表地下水渗流边界条件（在**创建水力条件**工具下）。

表 18: 地表地下水渗流边界条件

表面	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)

7.5 生成网格

对于网格的生成，建议将**单元分布**参数设置为**精细**。

要修改全局粗糙度：

1. 在边栏中单击**生成网格**按钮。将显示**网格选项**窗口。
2. 从**单元分布**下拉菜单中选择**精细**选项（请参阅图 114(第 123 页)）：

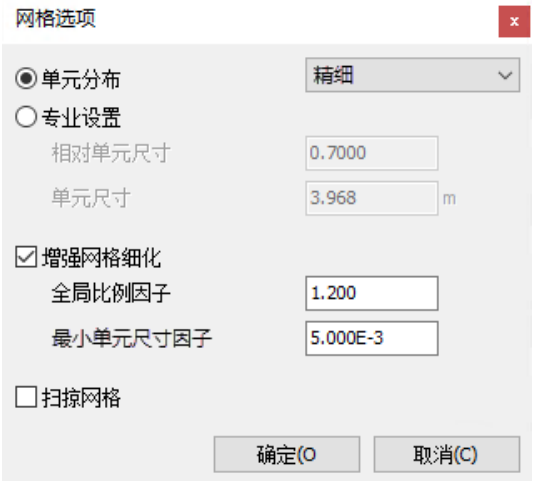


图 114: 修改全局粗糙度

3. 单击**确定**以关闭**网格选项**窗口并生成网格。
4. 在边栏中单击**查看网格**按钮以预览网格。生成的网格如图 115(第 124 页) 所示：

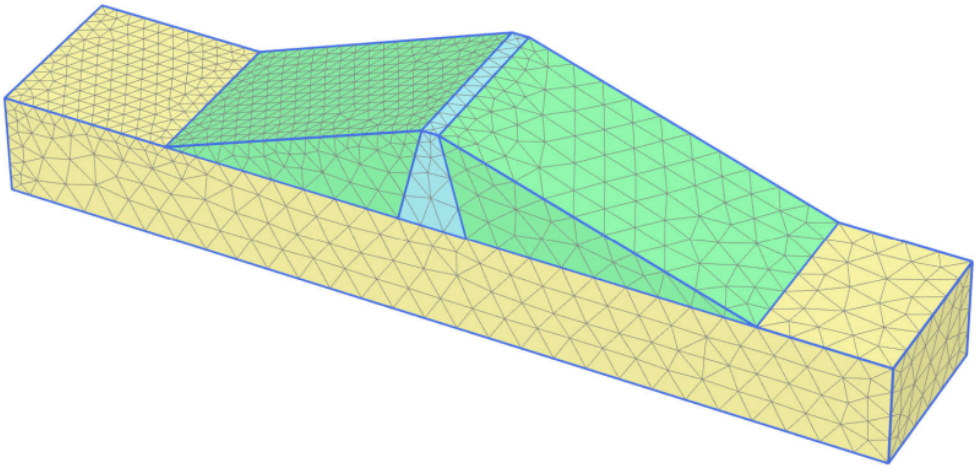


图 115: 生成的网格

7.6 定义并执行计算

在计算过程中将考虑以下情况：

- 初始状态（高蓄水池水位）- 长期水位为 25 米的情况。
- 快速下降情况 - 水位从 25 米快速下降至 5 米。
- 缓慢下降情况 - 水位从 25 米缓慢下降至 5 米。
- 低水位情况 - 长期水位为 5 米的情况。

除**初始阶段**外，计算还包括八个阶段。在初始阶段，使用**重力荷载**计算水坝正常工作状态下的初始应力和初始孔隙水压力。在此情况下，使用稳态地下水流计算水压分布。一期和二期均从初始阶段（即水坝蓄水池水位为 25 米）开始，然后水位降至 5 米。完成这一过程的时间间隔有所不同（即不同的水位下降速度；快速下降和缓慢下降）。两种情况下，水压分布均采用流固耦合分析进行计算。第三个计算阶段也从初始阶段开始，并考虑水坝在蓄水池长期处于 5 米低水位的行为，采用稳态地下水流计算来计算水压分布。最后，针对所有的水压情况，采用 phi-c 折减法计算水坝的安全系数。

1. 进入**渗流条件模式** 。
2. 根据表 19(第 124 页)中给出的信息，创建与满水位和低水位情况相对应的水位。

表 19: 水位

水位	点
高蓄水池水位	(-130 0 25)、(-10 0 25)、(93 0 -10)、(130 0 -10)、(130 50 -10)、(93 50 -10)、(-10 50 25)、(-130 50 25)
低蓄水池水位	(-130 0 5)、(-10 0 5)、(93 0 -10)、(130 0 -10)、(130 50 -10)、(93 50 -10)、(-10 50 5)、(-130 50 5)

3. 在**属性库**下的**模型浏览器**中，将创建的用户水位重命名为 `High_Reservoir` 和 `Low_Reservoir`。

注释:

不能对**钻孔水位**和非水平**用户水位**进行**时间相关性**等修改。

7.6.1 初始阶段：高蓄水池水位

1. 进入**分阶段施工模式**。
2. 双击**阶段浏览器**中的初始阶段。
3. 在**阶段**窗口的**常规**子树中，将阶段重命名为高蓄水池水位。
4.  针对**计算类型**，选择**重力荷载**选项。
   请注意，**分阶段施工**是**荷载类型**的唯一可用选项。
5.  为**孔压计算类型**选择**稳态地下水渗流**选项。
6. 请注意，缺省状态下，选项**忽略不排水行为 (A,B)** 和**忽略吸力**在**变形控制参数**子树中处于选中状态。**数值控制参数**和**渗流控制参数**子树中的参数将使用缺省值。
7. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
8. 在**分阶段施工模式**下，激活代表路堤的土体类组。
9. 在**模型浏览器**中，展开**模型条件**子树。
10. 在**地下水渗流**子树中，将**边界 Y 最小值**、**边界 Y 最大值**和**边界 Z 最小值** 设置为**关闭**。其余边界应该是**打开**的（请参阅图 116(第 126 页)）。
11. 在**水**子树中，将**全局水位**选为高蓄水池水位（高蓄水池水位）。

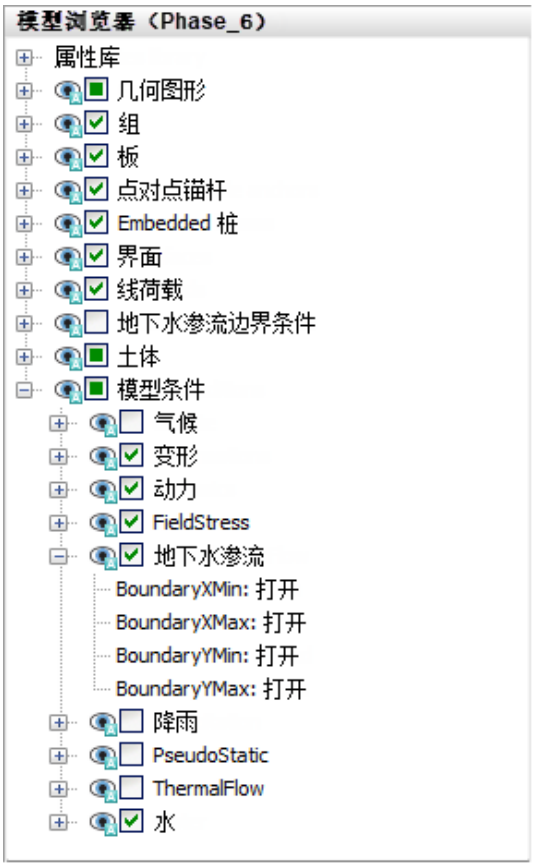


图 116: 地下水渗流的边界条件

7.6.2 第 1 阶段：快速下降

在快速下降阶段，水库中的水位将在 5 天内从 z = 25 米下降到 z = 5 米。要定义描述水位波动的函数，请执行以下操作：

1. 添加新的计算阶段。
2. 在**阶段浏览器**中双击新添加的阶段。
   显示**阶段**窗口。
3. 在**常规**子树中指定阶段名称（例如，快速下降）。
4. 将**计算类型**设置为**流固耦合**。
5. 将**时间间隔**设置为 5 天。
6. **将位移重置为零**选项在**变形控制参数**子树中会自动选中。
7. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
8. 在**模型浏览器**中展开**属性库**。
9. 右键单击**渗流函数**，并在出现的菜单中选择**编辑**选项。
   将显示**渗流函数**窗口。
10. 在**水头函数**页面中，单击相应的按钮添加新函数。新函数将在列表中高亮显示，并显示定义函数的选项。
    a. 为快速下降的函数指定适当名称（例如，Rapid）。

b. 从**信号**下拉菜单中选择**线性**选项。
c. 为 **ΔHead** 分配值 -20 米，表示水头减少的量。
d. 指定时间间隔为 5 天。图 117(第 127 页) 显示定义的函数。

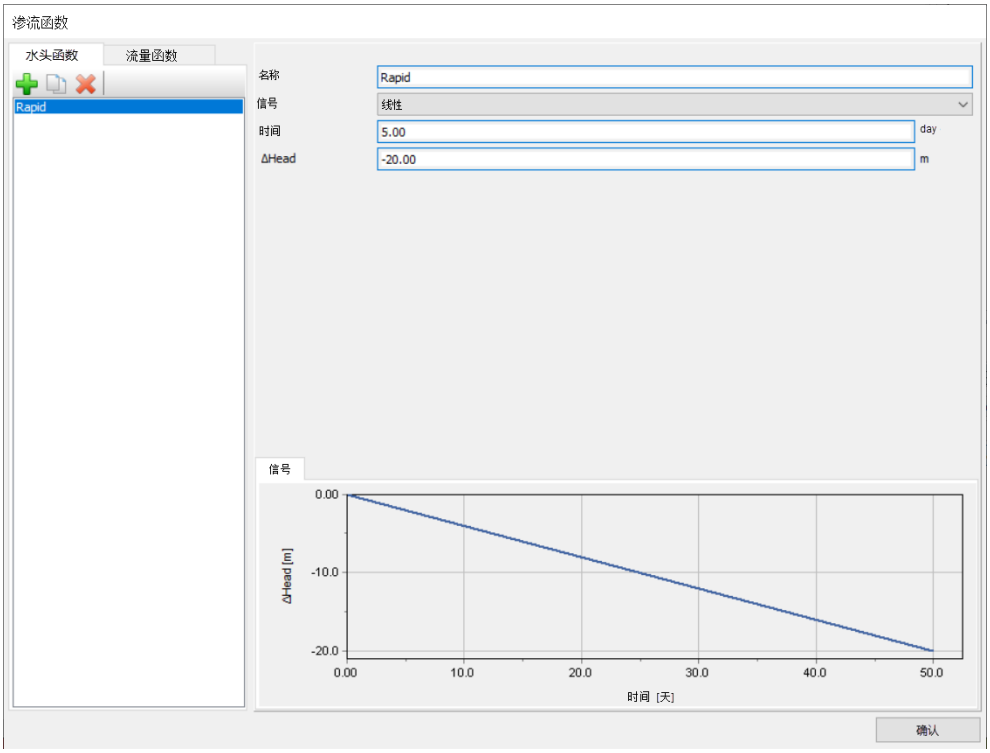


图 117: 快速下降情况下的渗流函数

e. 单击**确定**关闭**渗流函数**窗口。

11. 激活所有地表地下水渗流边界条件。
12. 在绘图区域中多选地表地下水渗流边界条件。
13. 在**选择浏览器**中，针对**行为**，选择**水头**选项。水头分布**均匀**。将值 25 米分配给 h_{ref}。
14. 将时间相关性设置为**时间相关**，针对**水头函数**，选择**快速**选项。
与水头函数相关的信息也显示在**对象浏览器**中。
15. 在**模型浏览器** > **模型条件** > **水**中，针对**全局水位**，选择“钻孔水位 1”选项。

7.6.3 第 2 阶段：慢速下降

在慢速下降阶段，水库中的水位将在 50 天内从 z = 25 米下降到 z = 5 米。要定义描述水位波动的函数，请执行以下操作：

1. 在**阶段浏览器**中选择初始阶段（高蓄水池水位）。
2. 添加新的计算阶段。
3. 在**阶段浏览器**中双击新添加的阶段。显示**阶段**窗口。
4. 在**常规**子树中指定阶段名称（例如，慢速下降）。
5. 将**计算类型**设置为**流固耦合**。
6. 将**时间间隔**选项设置为 50 天。
7. **将位移重置为零**选项在**变形控制参数**子树中会自动选中。

8. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
9. 按照前面所述的步骤创建新渗流函数（请参阅图 118(第 128 页)）。
   a. 为慢速下降的函数指定适当名称（例如，Slow）。
   b. 从**信号**下拉菜单中选择**线性**选项。
   c. 为 **ΔHead** 分配值 -20 米，表示水头减少的量。
   d. 指定时间间隔为 50 天。

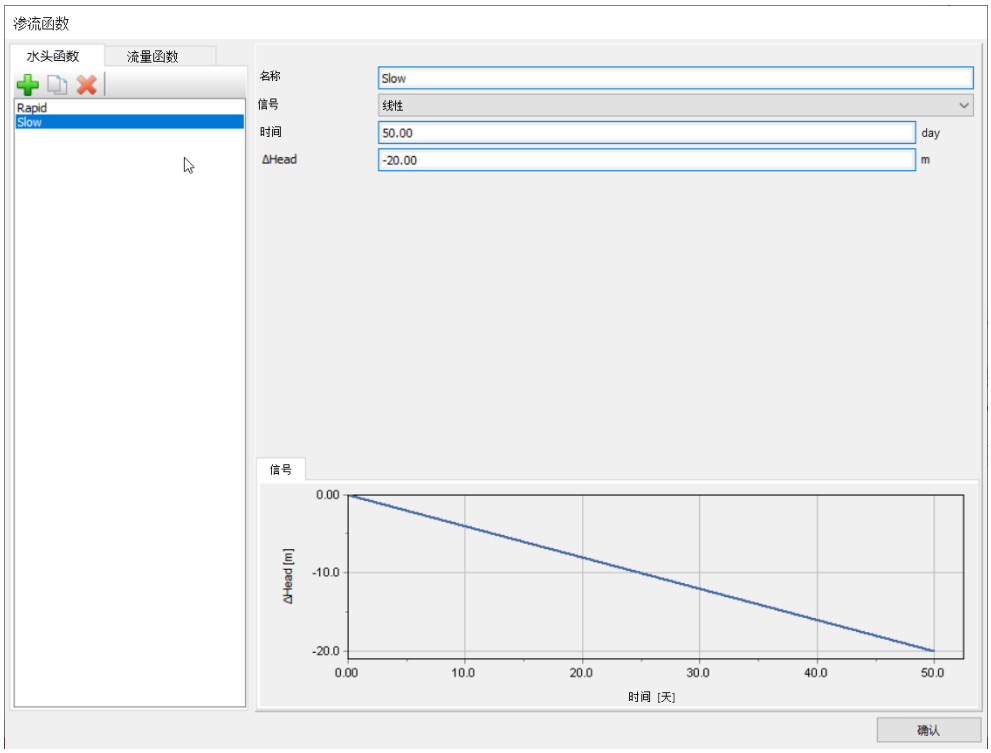


图 118: 慢速下降情况下的渗流函数

10. 激活所有地表地下水渗流边界条件，并在绘图区域中对其进行多选。
11. 在**选择浏览器**中，针对行为选择**水头**选项。水头分布**均匀**。将值 25 米分配给 h_{ref}。
12. 将时间相关性设置为**时间相关**，针对**水头函数**，选择**慢速**选项。
13. 在**模型浏览器**的**水头**子树中，针对**全局水位**，选择**钻孔水位 1** 选项。

7.6.4 第 3 阶段：低水位

此阶段考虑低蓄水池水位的稳态情况。

1. 在**阶段浏览器**中选择初始阶段（高蓄水池水位）。
2. 添加新的计算阶段。
3. 在**阶段浏览器**中双击新添加的阶段。
   显示**阶段**窗口。
4. 在**常规**子树中指定阶段名称（例如，低水位）。
5. 缺省计算类型（**塑性**）对此阶段有效。
6. 缺省**孔压计算类型**（**稳态地下水渗流**）对此阶段有效。

7. 在**变形控制**子树中，选择**忽略不排水行为 (A,B)**，还要确保**将位移重置为零**已选中。
8. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
9. 地表地下水渗流边界条件应在**模型浏览器**中停用。
10. 在**水**子树中，将**全局水位**选为低蓄水池水位（低蓄水池水位）。

7.6.5 第 4 阶段至第 7 阶段

在第 4 阶段至第 7 阶段，分别为之前的阶段定义了稳定性计算。

1. 在**阶段浏览器**中选择第 1 阶段。
2. 添加新的计算阶段并进入**阶段**窗口。
3. 在**常规**子树中指定阶段名称（例如，快速下降 - 安全）。
4. 将**计算类型**设置为**安全**。针对**荷载类型**，选择**增量乘子**选项。
5. 选择**变形控制**子树中的**将位移重置为零**选项。
6. 在**数字控制参数**子树中，将第 4 阶段的**最大步数**参数设置为 50。
7. 对第 5 阶段至第 7 阶段执行相同的程序，如图 119(第 129 页) 所示。



图 119: 阶段浏览器的最终视图

7.6.6 执行计算

1. 在**分阶段施工模式**中，选择位于顶部 (-2.5 25.0 30.0) 的节点。
2. 开始计算过程。忽略计算警告。
3. 计算完成后保存项目。

7.7 结果

1. 计算完成后单击**查看计算结果**按钮。

   输出窗口现在显示选定阶段的变形网格。
2. 选择菜单项**应力** > ***孔隙水压力*** > P_{Water}。
3. 定义穿过 (-130 15) 和 (130 15) 的竖向横截面

注释:

- 请注意，缺省情况下，图例在横截面图中是锁定的，这意味着如果在模型中重新定位横截面或显示其他阶段的结果，则将使用相同的层位分布。
- 可以通过单击图例下方的**锁定**图标来解锁图例。“自由”图例由**打开的锁**图标指示。

下面显示了在四种情况下根据孔隙压力分布进行的四次地下水渗流计算结果：

- 高（标准）蓄水池水位的情况 - 请参阅图 120(第 131 页)。
- 蓄水池水位快速下降的情况 - 请参阅图 121(第 131 页)。
- 蓄水池水位缓慢下降的情况 - 请参阅图 122(第 132 页)。
- 低蓄水池水位的情况 - 请参阅图 123(第 132 页)。

在变形分析中考虑孔隙压力的变化时，水坝会产生额外变形。可根据第 1 阶段至第 4 阶段的结果查看这些变形和有效应力分布。

对于第 1 阶段和第 2 阶段，将图例设置更改为**手动**，并设置如下值：

- 最小值：-480
- 最大值：200
- 间隔数：18

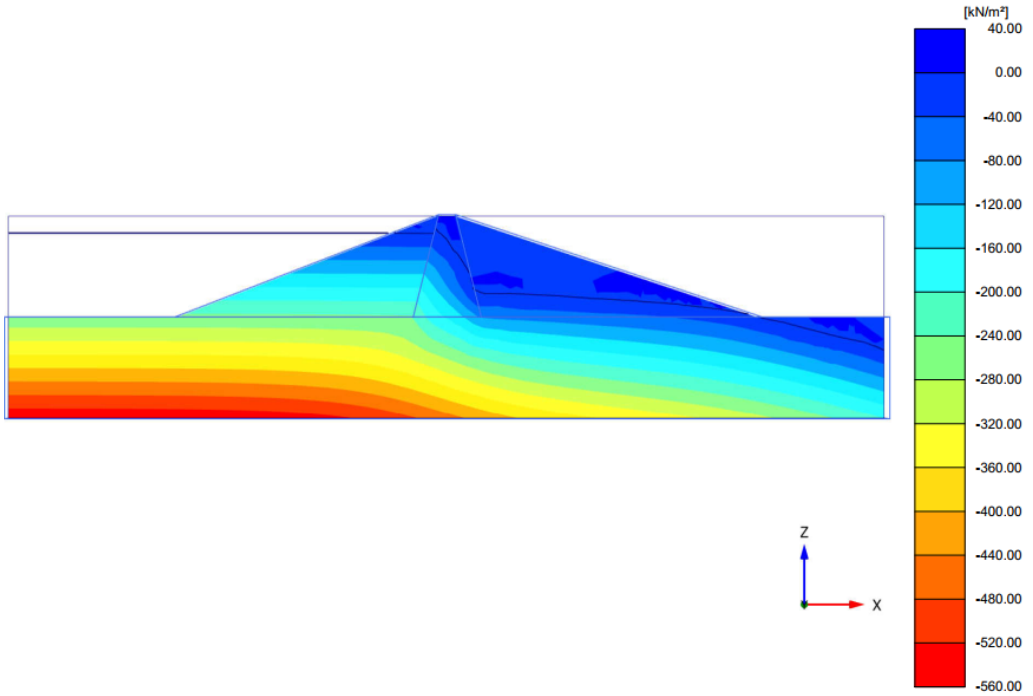


图 120: 高蓄水池水位的孔隙水压力分布（初始阶段）

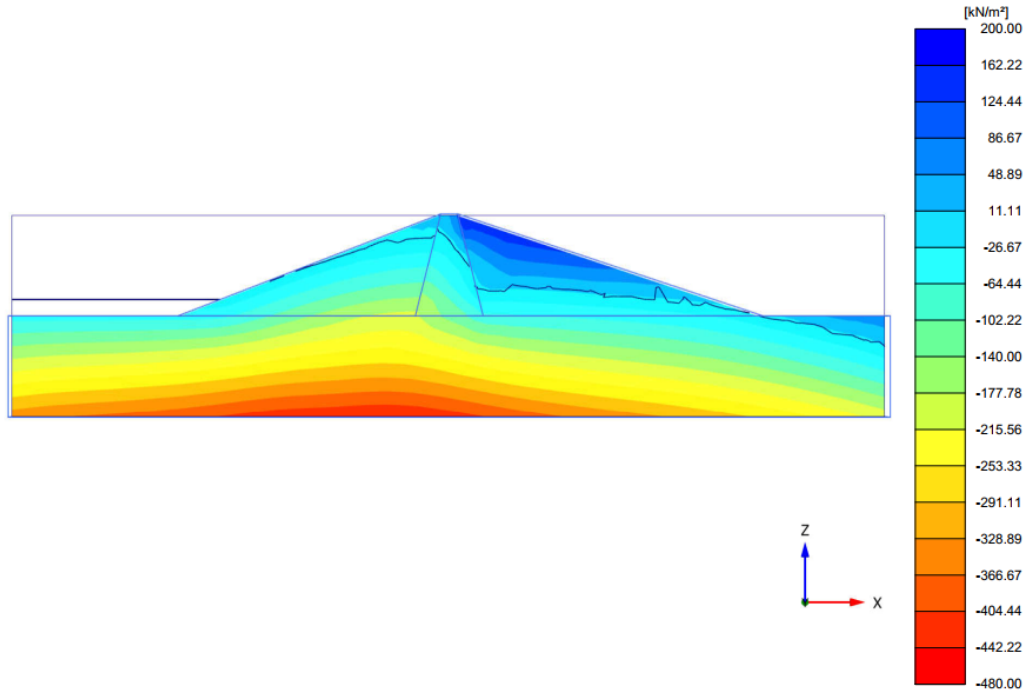


图 121: 快速下降后的孔隙水压力分布（第 1 阶段）

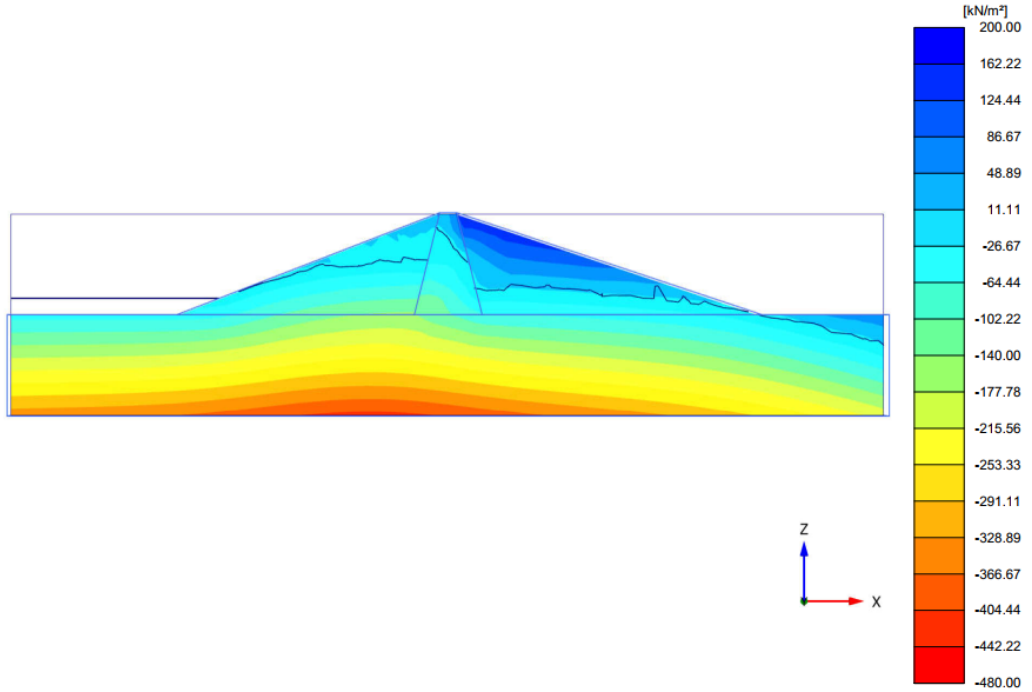


图 122: 缓慢下降后的孔隙水压力分布（第 2 阶段）

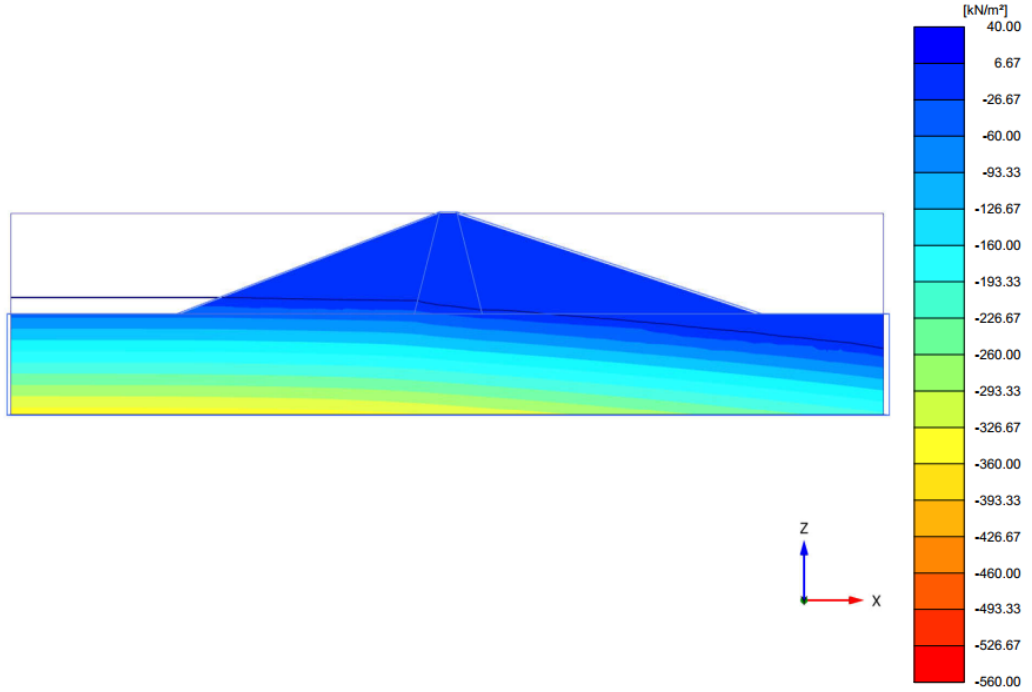


图 123: 低蓄水池水位的孔隙水压力分布（第 3 阶段）

本教程着重研究了不同情况下水坝安全系数的变化。因此，根据水坝顶点位移，绘制了第 4 至第 7 阶段 **ΣMsf** 的变化曲线（请参阅图 124(第 133 页)）。

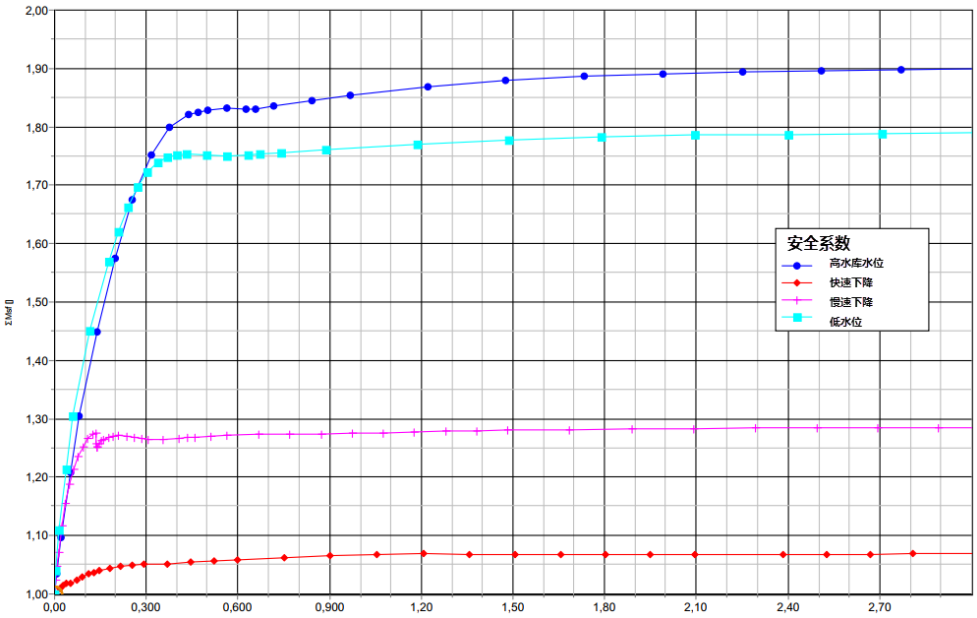


图 124: 不同情况下的安全系数

蓄水池水位快速下降会显著降低水坝的稳定性。对 PLAXIS 3D 进行流固耦合和稳定性分析可有效分析此类情况。

8 弹性地基上生成器的动力分析 [ULT]

本教程研究了振动源对其周围土体的影响。为了减少计算时间，使用沿着对称线的对称边界条件，仅对整个几何形状的四分之一进行建模。通过瑞利阻尼考虑粘滞效应引起的物理阻尼。此外，由于径向波传播，“几何阻尼”在振动衰减中可能非常重要。

在动力计算中对边界进行建模是关键点之一。为了避免模型边界的假波反射（实际上并不存在），必须应用特殊条件吸收到达边界的波。

目标

- 进行**动力**计算。
- 定义动力边界条件（粘性）。
- 通过荷载乘子定义动力荷载。
- 通过瑞利阻尼定义材料阻尼。

几何图形

振动源是以直径为 1 米的 0.2 米厚混凝土承台为基础的生成器。生成器引起的振动通过承台传输到下层土中（请参阅图 125(第 134 页)）。这些振动被模拟为均匀谐波荷载，频率为 10Hz，幅度为 10kN/m^2。除了承台的重量，生成器的重量被建模为 8kN/m^2 的均匀分布荷载。

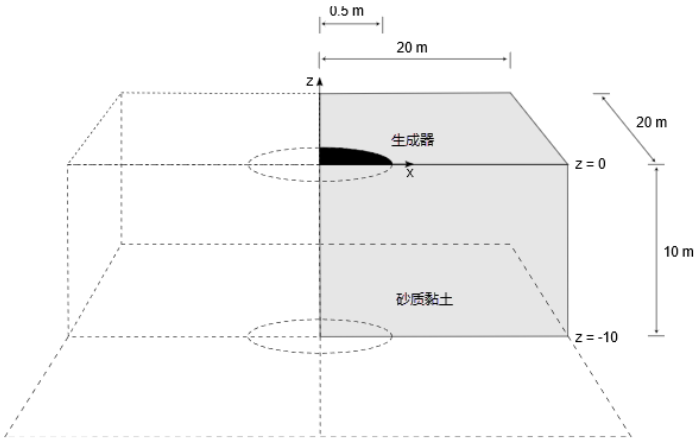


图 125: 以弹性下层土为基础的生成器

模型边界应该离相关区域足够远，以避免由可能出现的反射而引起的干扰。尽管采取了特殊措施（吸收边界）来避免伪反射，但总会有较小的影响，因此将边界放远仍然是一个好习惯。在动力分析中，模型边界通常比在静力分析中更远。

8.1 创建新项目

若要创建几何模型，请执行以下步骤：

1. 启动输入程序，然后从**快速选择**对话框中选择**开始新项目**。
2. 在**项目属性**窗口中，输入相应标题。
3. 保留缺省单位并将模型尺寸设置为：
   a. $x_{min} = 0$ 且 $x_{max} = 20$。
   b. $y_{min} = 0$ 且 $y_{max} = 20$。

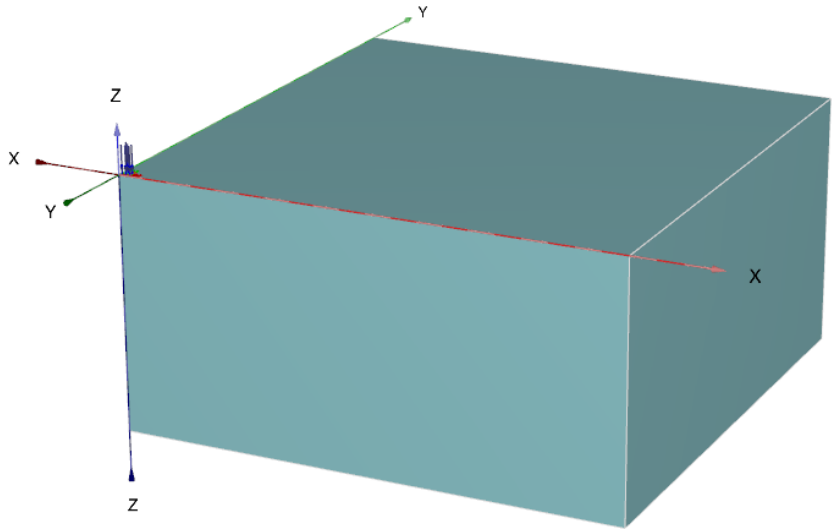


图 126: 模型的几何图形

8.2 定义土壤地层学

1. 下层土由深度为 10 米的土层组成。地面定义为 z = 0。
2. 请注意，本例中未考虑水条件，并且水头设置为 z = -10。

8.3 创建和分配材料数据集

根据表 20(第 135 页)创建材料数据集，并将其分配给土层。

表 20: 材料属性

属性	名称	砂质黏土	单位
常规			
土体模型	模型	线弹性	-

属性	名称	砂质黏土	单位
常规			
排水类型	类型	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	20.0	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20.0	kN/m^3
力学			
杨氏弹性模量	E'_{ref}	$5 \cdot 10^4$	kN/m^2
泊松比	$\nu(nu)$	0.3	-
界面			
强度定义	-	刚性	-
初始			
K_0 测定	-	自动	-
侧土压力系数	$K_{0,x}$, $K_{0,y}$	0.5	-

8.4 结构单元的定义

生成器在**结构模式**中定义。**多段曲线**功能用于定义几何图形。

1. 在边栏中单击**创建多段曲线**按钮并单击绘图区域中的 (0 0 0) 作为插入点。
2. 在**常规**页面中，缺省方向轴（x 轴、y 轴）对此多段曲线有效。
3. 在**线段**页面中，三个线段的定义见表 21(第 136 页)。

表 21: 线段属性

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

4. 创建线段后，关闭多段曲线设计器。
5. 右键单击多段曲线并从出现的菜单中选择**创建** > **创建表面**选项。
6. 右键单击创建的表面并从出现的菜单中选择**创建** > **创建表面荷载**选项。

7. 在**选择浏览器**中，对于**表面荷载**，**均匀**分布有效。将 (0 0 -8) 分配给压力分量。

8.4.1 动力乘子的定义

动力荷载是根据荷载的输入值或规定的位移和相应的时间相关乘子来定义的。

要创建动力荷载的乘子，请执行以下操作：

1. 在**模型浏览器**中，展开**特性库**子树。
2. 右键单击**动力乘子**子树，并从出现的菜单中选择**编辑**选项。

   将弹出**乘子**窗口。
3. 单击**荷载乘子**选项卡。
4.  单击**添加**按钮，为荷载引入一个乘子。
5. 定义一个**谐波**信号，**振幅**为 10，**频率**为 10 Hz，**相位**为 0°，如图 127(第 137 页) 所示。

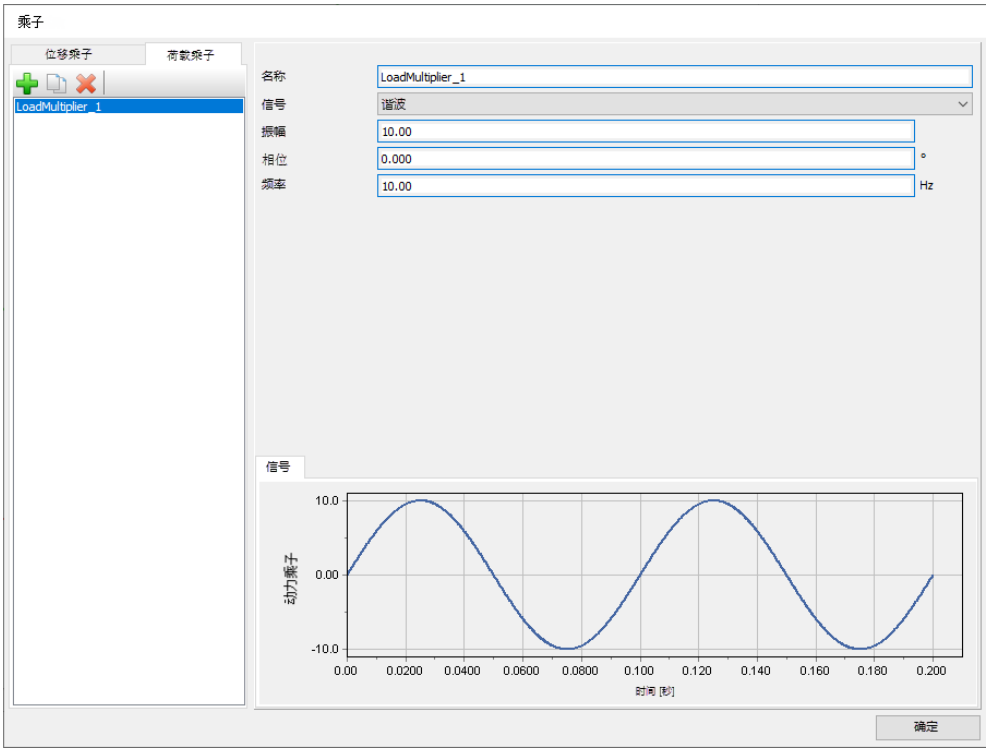


图 127: 定义谐波乘子

6.  在**选择浏览器**中，在 DynSurfaceLoad_1 下，将荷载的分量指定为 (0 0 -1)。
7. 单击动力荷载子树中的 $Multiplier_z$，并从出现的菜单中选择 LoadMultiplier_1 选项。

注释:

可以在**结构模式**和**分阶段施工模式**下定义动力乘子。

8.5 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 通过分配 0.125 的**粗糙度系数**来优化与生成器对应的表面。
3. 单击**生成网格**按钮。针对**单元分布**，将使用**中等**选项。
4. 查看生成的网格（请参阅图 128(第 138 页)）。

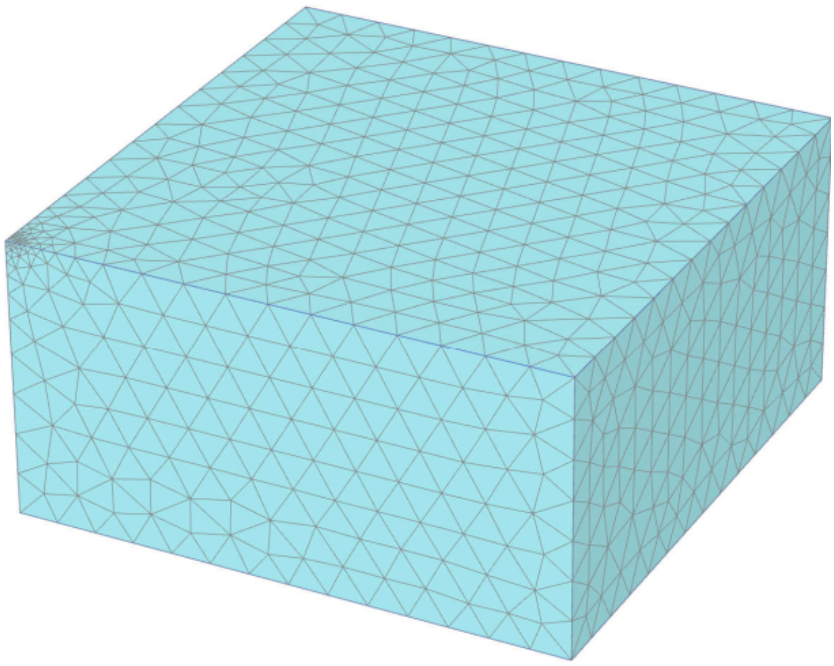


图 128: 生成的网格

注释: 在所有动力计算中，用户应特别注意单元尺寸以减少波的数值色散。应该注意的是，大型单元无法传输高频。波的传播受波速和波长的影响。如果动力输入包含高频，则应滤除高频或使用更细的网格。

8.6 定义并执行计算

计算包含 4 个阶段。初始阶段包括使用 **K0 程序**生成初始应力。第一个阶段是**塑性**计算，在此阶段激活静力荷载。第二个阶段是**动力**计算，在此阶段考虑了运行生成器的影响。第三个阶段也是最后阶段，即 **动力**计算，在此阶段生成器关闭，土体将自由振动。

8.6.1 初始阶段

1. 单击**分阶段施工**选项卡，继续定义计算阶段。

2. 初始阶段已引入。本教程将使用初始阶段的缺省设置。

8.6.2 第 1 阶段：承台

1. 添加新的计算阶段（第 1 阶段）。已添加阶段的缺省设置将用于此计算阶段。
2. 在**分阶段施工模式**中，如图 129(第 139 页) 所示，激活表面荷载的静力分量。不要激活动力荷载。

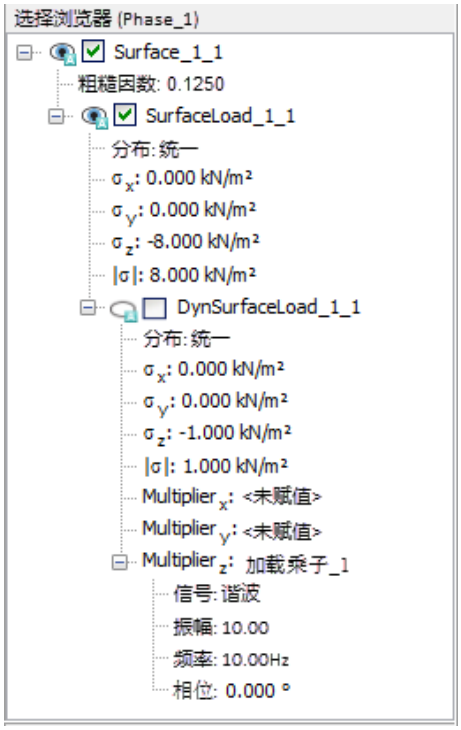


图 129: 第 1 阶段的应用荷载

8.6.3 第 2 阶段：启动生成器

在此阶段，采用频率为 10 Hz、振幅为 10 kN/m2 的垂直谐波荷载来模拟生成器传递的振动。考虑五个周期，总时间间隔为 0.5 秒。

1. 添加新的计算阶段（第 2 阶段）。
2. 在**阶段**窗口的**常规**子树中，针对计算类型选择**动力**选项。
3. 将**时间间隔**参数设置为 0.5 秒。
4. 在**变形控制参数**子树中，选择**将位移重置为零**参数。此计算阶段将使用其余参数的缺省值。
5. 在**数字控制参数**子树中，取消勾选**使用缺省迭代参数**复选框，此复选框使您能够更改高级设置，并将**时间步长确定**设置为**手动**。
6. 将**最大步数**设置为 250。

7. 在**分阶段施工模式**下，激活表面荷载的动力分量。请注意，荷载的静力分量仍处于激活状态（请参阅图 130(第 140 页)）。

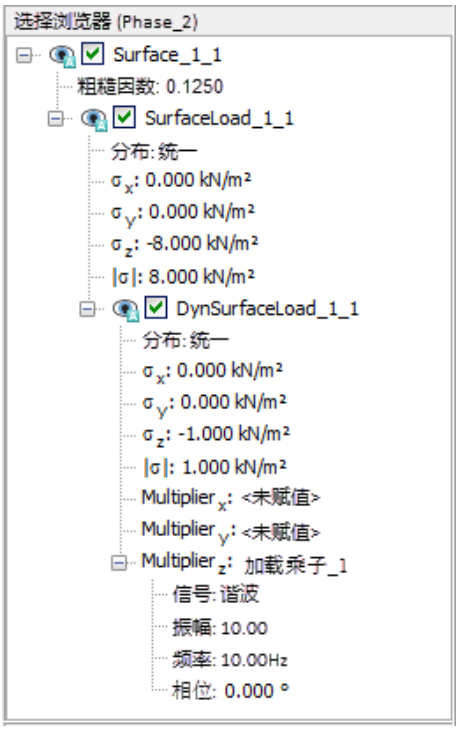


图 130: 第 2 阶段的应用荷载

必须定义特殊的边界条件，以阐释土体实际上是一种半无限介质这一事实。如果没有这些特殊的边界条件，波就会反射到模型边界上，引起扰动。为避免这些伪反射，将粘性边界指定为 Xmax、Ymax 和 Zmin。可以在**模型浏览器** > **模型条件** > **动力**中指定动力边界，如图 131(第 141 页) 所示。

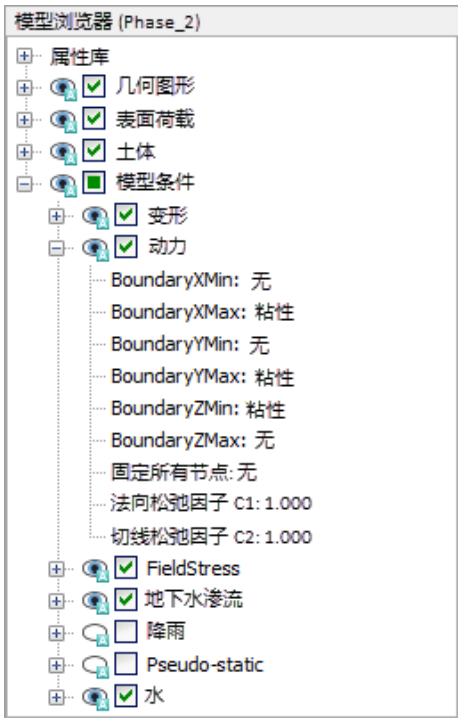


图 131: 动力计算的边界条件

8.6.4 第 3 阶段：停止生成器

1. 添加新的计算阶段（第 3 阶段）。
2. 在**阶段**窗口的**常规**子树中，针对**计算类型**，选择**动力**选项。
3. 将**动力时间间隔**参数设置为 0.5 秒。
4. 在**数字控制参数**子树中，取消勾选**使用缺省迭代参数**复选框，此复选框使您能够更改高级设置，并将**时间步长确定**设置为**手动**。
5. 将**最大步数**设置为 250。
6. 在**分阶段施工模式**中，停用表面荷载的动力分量。请注意，静力荷载仍处于激活状态。此阶段的动力边界条件应与前一阶段相同。

图 132(第 141 页) 显示了本教程的**阶段**浏览器。

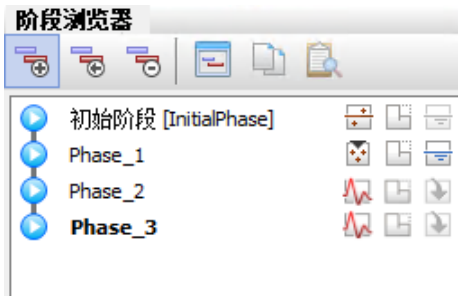


图 132: 阶段浏览器

8.6.5 执行计算

1. 选择要在曲线中考虑的位于地表的节点（例如，(1.4 0 0)、(1.9 0 0)、(3.6 0 0)）。
2. 执行计算。
3. 保存项目。

8.6.6 附加阻尼计算

在第二次计算中，采用瑞利阻尼法引入材料阻尼。可在材料数据集中输入瑞利阻尼。必须执行以下步骤：

1. 以另一个名称保存项目。
2. 打开土体的材料数据集。
3. 在**常规**页面的**瑞利阻尼**下，针对输入方法选择 **SDOF 等值**选项（请参阅图 133(第 142 页)）。
4. 将 ξ_1 和 ξ_2 的值设置为 5%。
5. 为频率目标 f_1 和 f_2 分别设置值 9 和 11。
6. 请注意，程序会自动计算 α 和 β 的值。

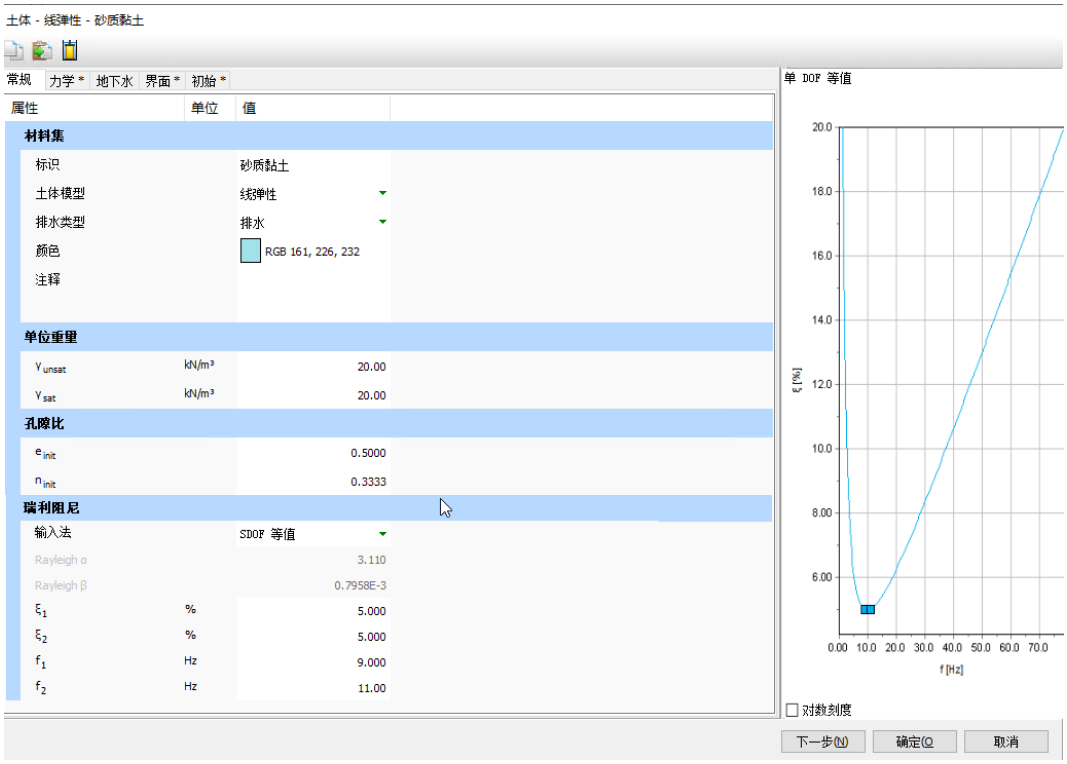


图 133: 输入瑞利阻尼

7. 单击**确定**关闭数据库。
8. 检查各阶段的定义是否正确（根据前面给出的信息），并开始计算。

8.6.7 结果

曲线管理器功能对动力分析尤为有用。这可以轻松地显示实际荷载与时间（输入）的对比，以及预先选择点的位移、速度和加速度与时间的对比。所定义的乘子随时间的变化可以通过将**动力时间**分配给 x 轴，将 u_z 分配给 y 轴来绘制。图 134(第 143 页) 显示了结构表面上预先选择点的响应。即使没有阻尼，波也会因几何阻尼而消散。

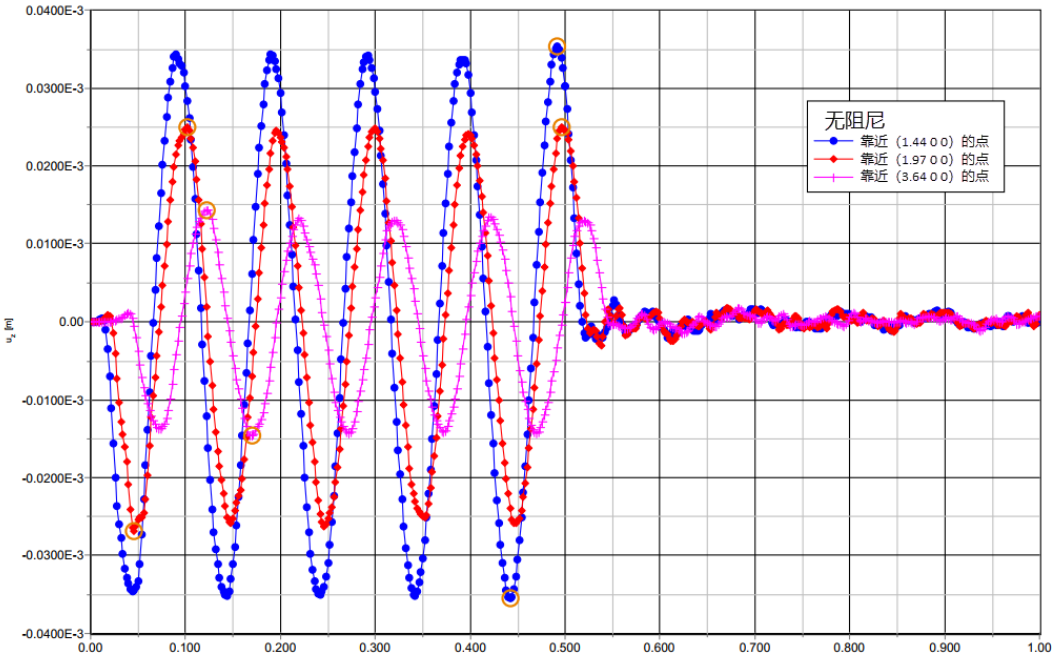


图 134: 距离振动源不同距离处的表面的垂直位移 - 时间（无阻尼）

图 135(第 144 页) 显示了带有材料阻尼的结构表面上预先选择点的响应。在消除表面荷载的动力分量一段时间后（当 t = 0.5 秒时），振动得到控制。将没有阻尼的结果与有阻尼的结果进行比较，位移的振幅也有所降低。

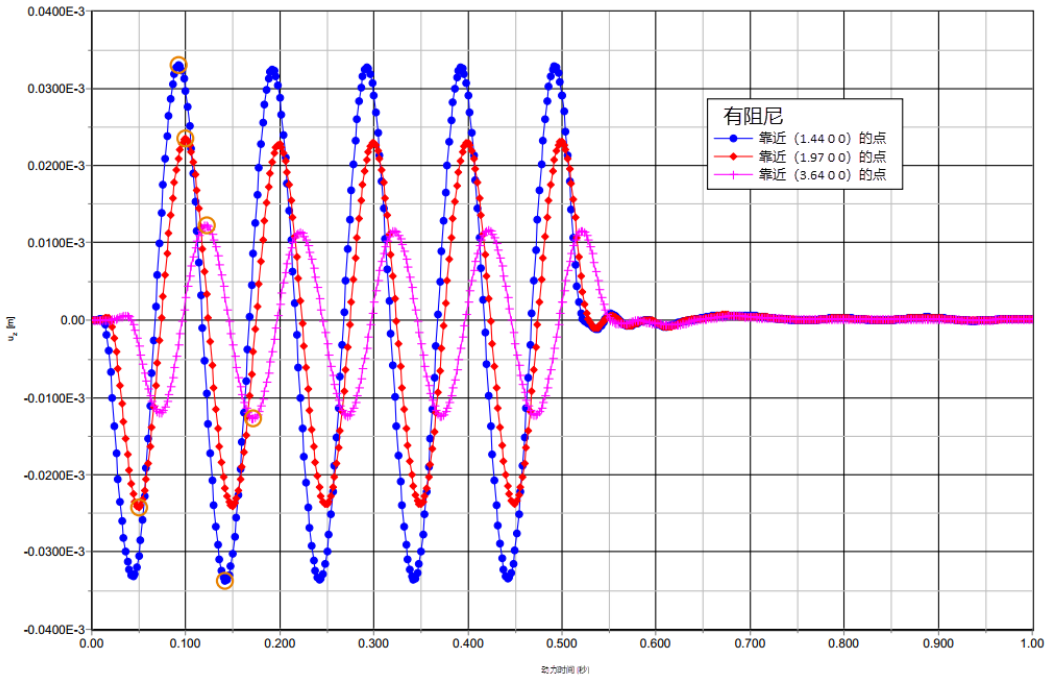


图 135: 垂直位移时间（有阻尼）

在输出程序中，可以通过选择**变形**菜单中的相应选项，显示特定时间的位移、速度和加速度。图 136(第 144 页) 显示了第 2 阶段结束时（当 t = 0.5 秒时），土体中的总加速度。

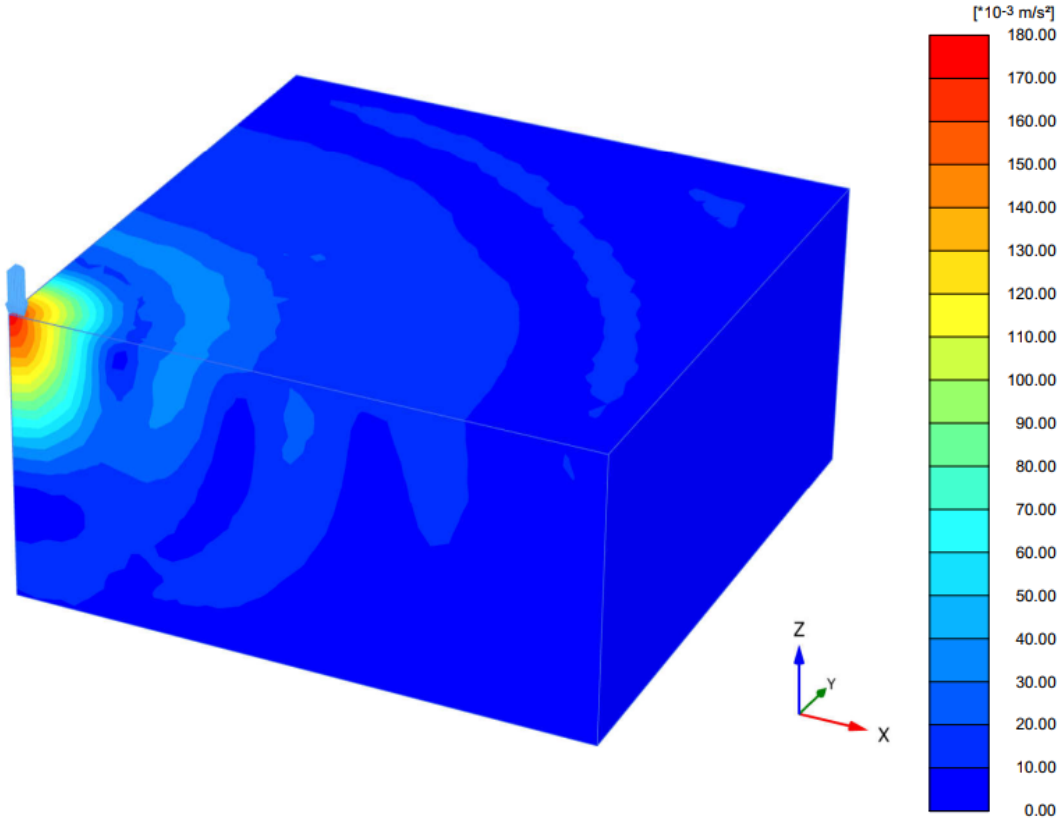


图 136: 第 2 阶段结束时土体中的总加速度（有阻尼）

9 建筑自由振动和地震分析 [ULT]

本示例说明了五层高建筑在自由振动和地震荷载作用下的自然频率。两种计算采用不同的动力边界条件：

- 在自由振动中，考虑**粘滞**边界条件。该选项适用于动力源在网格内部的问题。
- 针对地震荷载，考虑**自由场**和**合规基础**边界条件。这是地震分析的首选方案，沿模型边界施加动力输入。

目标

- 进行**动力**计算
- 定义动力边界条件（自由场和合规基础）
- 通过位移乘子定义地震
- 模拟结构的自由振动
- 通过具有小应变刚度的硬化土体模型模拟滞回行为
- 通过傅立叶频谱计算自然频率

几何图形

包括 5 层和地下室的建筑。它宽 10 米，高 17 米，包括地下室。地面上的总高度为 5 x 3 米 = 15 米，地下室深 2 米。地板和墙壁的重量取值为 $5 kN/m^2$。该建筑建在 15 米深的黏土层之上，下面是深层的砂土层。在该模型中，考虑 25 米的砂土层。

9.1 定义几何

建筑物的长度远大于其宽度，地震应该会对建筑物的宽度产生主要影响。考虑到这些事实，模型中将考虑 3 米的代表性部分，以便减小模型尺寸。若要创建几何图形，请执行以下步骤：

1. 启动输入程序，然后从**快速选择**对话框中选择**开始新项目**。
2. 在**项目属性**窗口中，输入相应标题。
3. 保留缺省单位并将模型尺寸设置为：
   a. $x_{min} = -80$ 且 $x_{max} = 80$
   b. $y_{min} = 0$ 且 $y_{max} = 3$

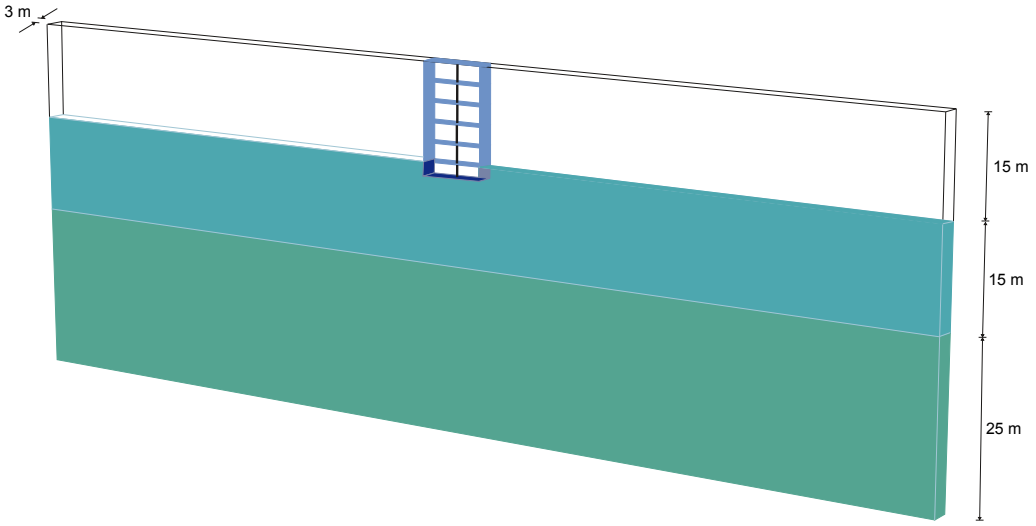


图 137: 模型的几何图形

9.2 定义土壤地层学

1. 下层土由两层组成。**上层黏土层**位于地面 (z = 0) 和 z = -15 之间。
2. 下面的**下层砂土层**位于 z = -40。
3. 通过为钻孔中的**水头**分配值 -15 来定义潜水位。

9.3 创建和分配材料数据集

本教程需要两个材料数据集。材料模型的属性和一些详细信息见表 22(第 146 页)。

表 22: 材料属性

属性	名称	上层黏土层	下层砂土层	单位
常规				
土体模型	模型	HS-small	HS-small	-
排水类型	类型	排水	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	16	20	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20	20	kN/m^3
力学				
标准排水三轴试验中的割线刚度	E_{50}^{ref}	$2.0 \cdot 10^4$	$3.0 \cdot 10^4$	kN/m^2

力学				
主固结仪荷载的切线刚度	E_{oed}^{ref}	$2.561 \cdot 10^4$	$3.601 \cdot 10^4$	kN/m^2
卸载/重新装载刚度	E_{ur}^{ref}	$9.484 \cdot 10^4$	$1.108 \cdot 10^5$	kN/m^2
泊松比	ν_{ur}	0.2	0.2	-
刚度应力水平依赖性的功率	m	0.5	0.5	-
应变极小时的剪切弹性模量	G_0^{ref}	$2.7 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^5$	kN/m^2
当 $G_s = 0.722\ G_0$ 时的剪切应变	$\gamma_{0.7}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	-
粘聚力	c'_{ref}	10	5	kN/m^2
摩擦角	φ'	18.0	28.0	度
剪胀角	ψ	0.0	0.0	度

在循环剪切荷载作用下，具有小应变刚度的硬化土体模型将表现出典型的滞回行为。从小应变剪切刚度 G_0^{ref} 开始，实际刚度随剪切强度的增加而减小。图 138(第 147 页) 和图 139(第 148 页) 显示了弹性模量折减曲线，即剪切弹性模量随应变的衰减。

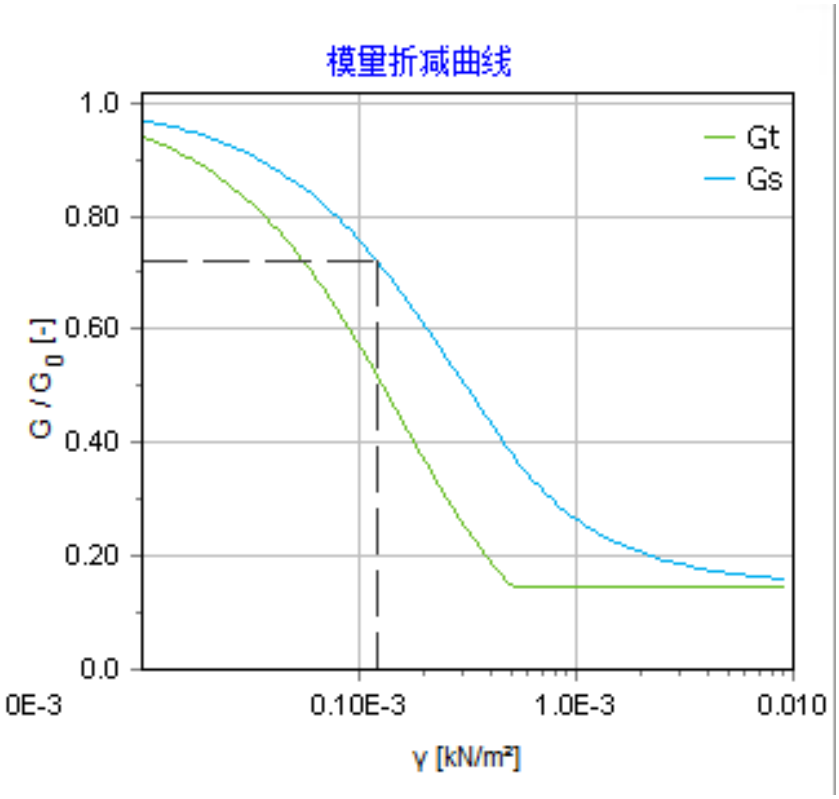


图 138: 上层黏土层的弹性模量折减曲线

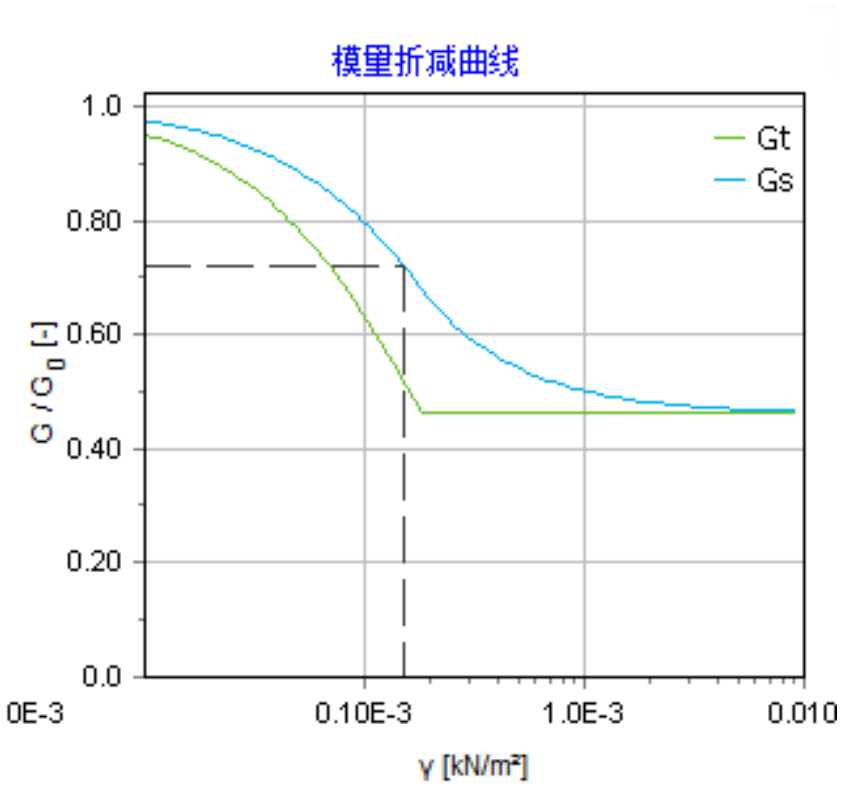


图 139: 下层砂土层的弹性模量折减曲线

在具有小应变刚度的硬化土体模型中，切线剪切弹性模量由下限 G_{ur} 约束。

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

上层黏土层和**下层砂土层**的 G_{ur}^{ref} 值和与 G_0^{ref} 的比值见表 23(第 148 页)。该比值决定了可以得到的最大阻尼比。

表 23: G_{ur} 值和与 G_0^{ref} 的比值

参数	单位	上层黏土层	下层砂土层
G_{ur}	kN/m^2	39517	41167
G_0^{ref}/G_{ur}	-	6.83	2.43

图 140(第 149 页) 和图 141(第 149 页) 显示了阻尼比，它是模型中所用材料的剪切应变的函数。有关弹性模量折减曲线与阻尼曲线的详细描述和详细说明，请参阅文献。请参阅 Brinkgreve, R.B.J., Kappert, M.H., Bonnier, P.G.(2007).小应变刚度模型中的滞回阻尼。In Proc.10th Int. Conf. on Comp.Methods and Advances in Geomechanics.Rhodes, Greece, 737-742。

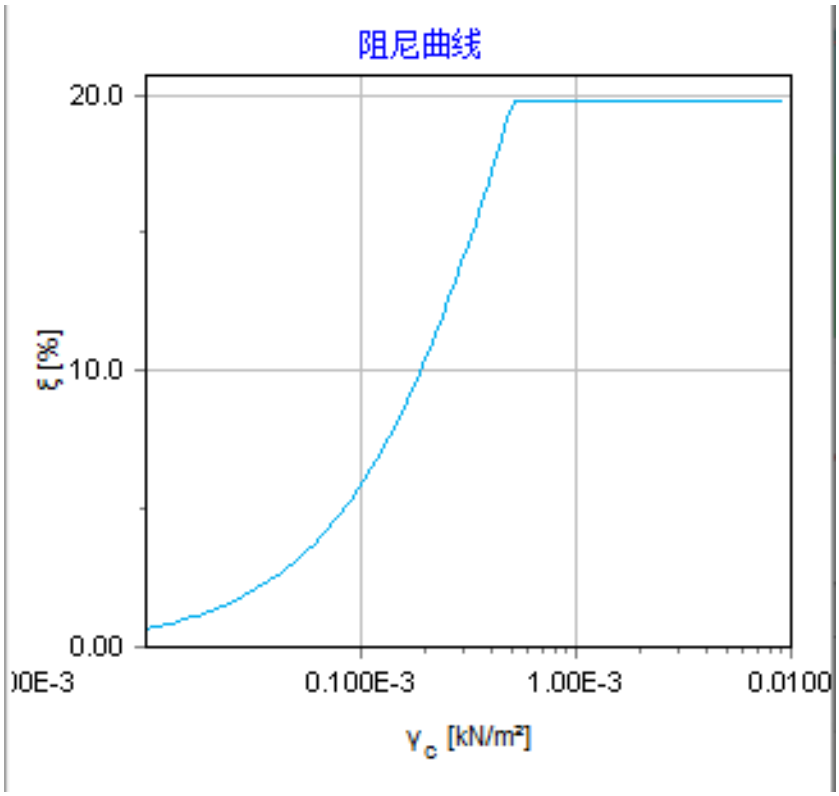


图 140: 上层黏土层的阻尼曲线

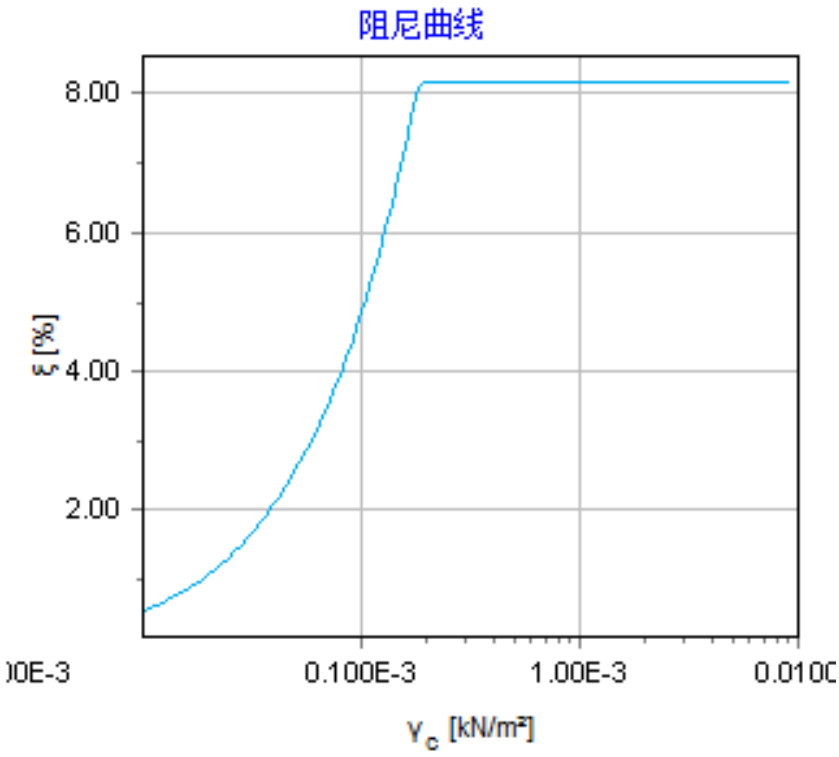


图 141: 下层砂土层的阻尼曲线

1. 根据表 22(第 146 页)创建材料数据集，然后

2. 将其分配给相应的土层。上层主要由黏土组成，下层由砂土组成。

9.4 结构单元的定义

模型结构单元的定义见**结构模式**。

9.4.1 创建建筑

包括 5 层和地下室的建筑。它宽 10 米，高 17 米，包括地下室。地面上的总高度为 5 x 3 米 = 15 米，地下室深 2 米。地板和墙壁的重量取值为 $5 kN/m^2$。

对于建筑，需要两个材料数据集，它们对应的材料属性在表 24(第 150 页)中进行了介绍：

表 24: 建筑材料属性（板属性）

参数	名称	建筑其余部分	地下室	单位
常规				
材料类型	类型	弹性	弹性	-
单位重量	γ	33.33	50	kN/m^3
瑞利阻尼（直接）	α	0.2320	0.2320	-
	β	$8 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	-
力学				
各向同性	-	是	是	-
杨氏弹性模量	E_1	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	kN/m^2
泊松比	ν_{12}	0	0	-
厚度	d	0.3	0.3	m

结构定义

要创建结构的楼板和墙：

1. 定义穿过点 (-5 0 -2)、(5 0 -2)、(5 3 -2) 和 (-5 3 -2) 的表面。
2. 通过在 z 方向定义 1D 数组来创建表面的副本。将列数设置为 2，将它们之间的距离设置为 2 米。
3. 在 z = 0 处选择创建的表面并在 z 方向定义 1D 数组。将列数设置为 6，将连续列之间的距离设置为 3 米。
4. 定义穿过点 (5 0 -2)、(5 3 -2)、(5 3 15) 和 (5 0 15) 的表面。

5. 通过在 x 方向定义 1D 数组来创建垂直表面的副本。将列数设置为 2，将它们之间的距离设置为 -10 米。
6. 多选位于 z = 0 的垂直表面和水平表面。
7. 右键单击选择并在出现的菜单中选择**相交和重新聚类**选项。在**结构模式**中进行相交很重要，因为不同的材料数据集将分配给地下室和建筑的其余部分。
8. 选择代表建筑的所有已创建表面（地下室、楼板和墙），右键单击并从出现的菜单中选择**创建** > **创建板**选项。
9. 根据表 24(第 150 页)，为代表结构的板定义材料数据集。请注意，两个不同的材料数据集分别用于地下室和建筑的其余部分。
10. 将**地下室**材料数据集分配给位于 z = -2 的水平板和位于地面以下的垂直板。
11. 将相应的材料数据集分配给模型中的其余板。
12. 为了模拟建筑地下室的土体-结构相互作用，将界面分配给地下室的外侧。请注意，根据表面的局部坐标系，会分配正界面或负界面。

中心柱

结构的中心柱是使用**点对点锚杆**功能进行建模的。建模过程描述如下：

1. 创建穿过点 (0 1.5 -2) 和 (0 1.5 0) 的**线**，这两个点与地下室的柱相对应。
2. 创建穿过点 (0 1.5 0) 和 (0 1.5 3) 的**线**，这两个点与一层的柱相对应。
3. 通过在 z 方向定义 1D 数组来创建最后定义的线的副本。将列数设置为 5，将它们之间的距离设置为 3 米。
4. 选择创建的线，右键单击并从出现的菜单中选择**创建** > **创建点对点锚杆**选项。
5. 根据表 25(第 151 页)创建材料数据集，并将其分配给锚杆。

表 25: 点对点锚杆的材料属性

参数	名称	列	单位
材料类型	类型	弹性	-
正常刚度	EA	$2.5 \cdot 10^6$	kN

9.4.2 创建荷载

创建静力荷载

在建筑物的左上角横向施加 10kN/m 的静力横向力。若要创建荷载：

1. 创建穿过 (-5 0 15) 和 (-5 3 15) 的线荷载。
2. 将荷载的分量指定为 (10 0 0)。

地震定义

通过在底部边界施加指定位移并将动力乘子分配给指定位移来模拟地震：

- **若要定义指定位移：**

1. 创建穿过 (-80 0 -40)、(80 0 -40)、(80 3 -40) 和 (-80 3 -40) 的表面指定位移。
2. 将指定位移的 x 分量设置为**指定**，并赋值 1.0。指定位移的 y 和 z 分量是**固定**。缺省分布（**统一**）有效。

- **若要定义指定位移的动力乘子：**

1. 在**模型浏览器**中，展开**特性库**子树。右键单击**动力乘子**，并从出现的菜单中选择**编辑**选项。

   此时将弹出**乘子**窗口，显示**位移乘子**页面。
2. 要添加乘子，请单击**乘子**窗口中的相应按钮。
3. 从**信号**下拉菜单中选择**表**选项。
4. 包含地震数据的文件可在 Bentley 社区上获取。
5. 在 Web 浏览器中打开页面，将所有数据复制到文本编辑器（例如记事本），然后将文件以扩展名 *.smc 保存在您的计算机中。
6. 在**乘子**窗口中，单击**打开**按钮并选择保存的文件。在**输入数据**窗口，从**解析方法**下拉菜单中选择**强运动只读光盘驱动器文件**选项，并按下**确定**关闭窗口。
7. 选择**数据类型**下拉菜单中的**加速度**选项。
8. 选择**偏离修正**选项，并单击**确定**，结束定义乘子。
9. 在**动力乘子**窗口中显示了表格和图表（请参阅图 142(第 152 页)）。

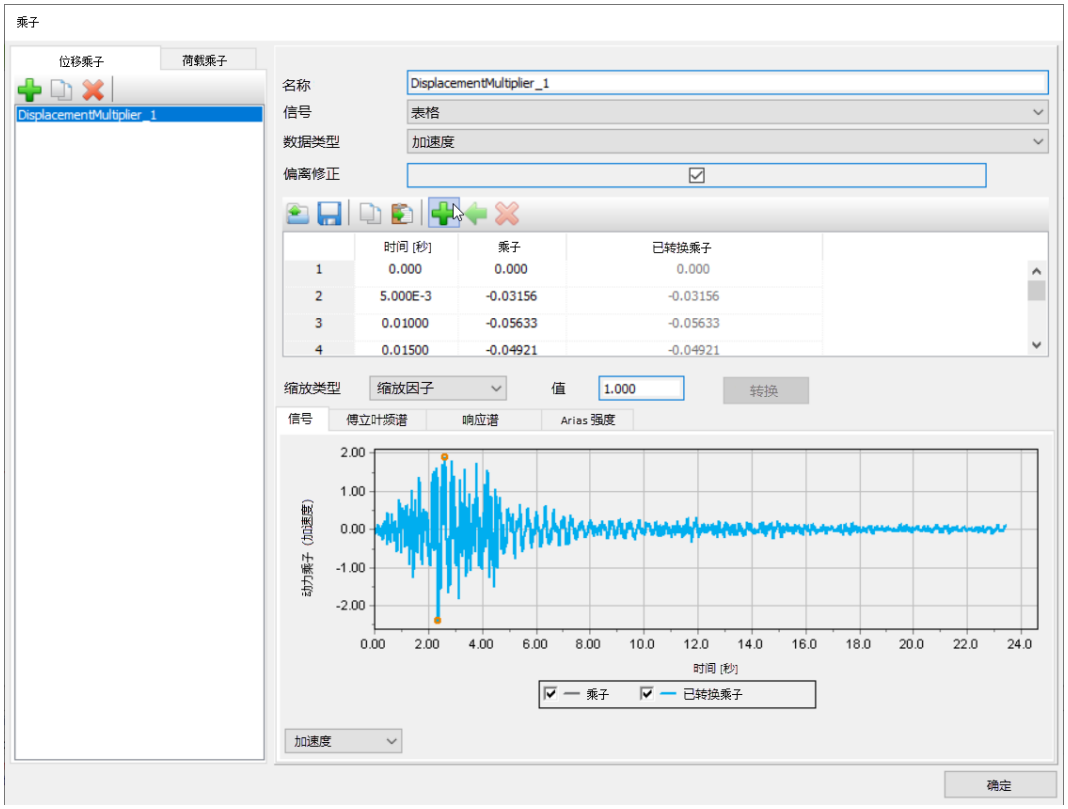


图 142: "动力乘子"窗口

10. 在**模型浏览器**中，展开**表面位移**子树，在 DynSurfaceDisplacement_1 中，通过选择下拉菜单中的选项将乘子 $_x$ 分配给 x 分量。

9.4.3 在边界创建界面

在**结构模式**下，**自由场**和**合规基础**要求沿模型的垂直边界和底部边界手动创建界面单元。界面单元必须添加到模型中，否则**自由场**和**合规基础**边界条件将被忽略。若要定义界面：

1. 创建穿过 (-80 3 0)、(-80 0 0)、(-80 0 -40) 和 (-80 3 -40) 的表面。右键单击创建的表面，然后单击**创建** > **创建正界面**，在模型内部添加界面。
2. 创建穿过 (80 3 0)、(80 0 0)、(80 0 -40) 和 (80 3 -40) 的表面。右键单击创建的表面，然后单击**创建** > **创建负界面**，在模型内部添加界面。
3. 模型底部的表面已经由指定位移创建。右键单击模型底部的表面，然后单击**创建** > **创建正界面**，在模型内部添加界面。

9.5 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 单击**生成网格**按钮。将单元分布设置为**精细**。
3. 查看生成的网格。

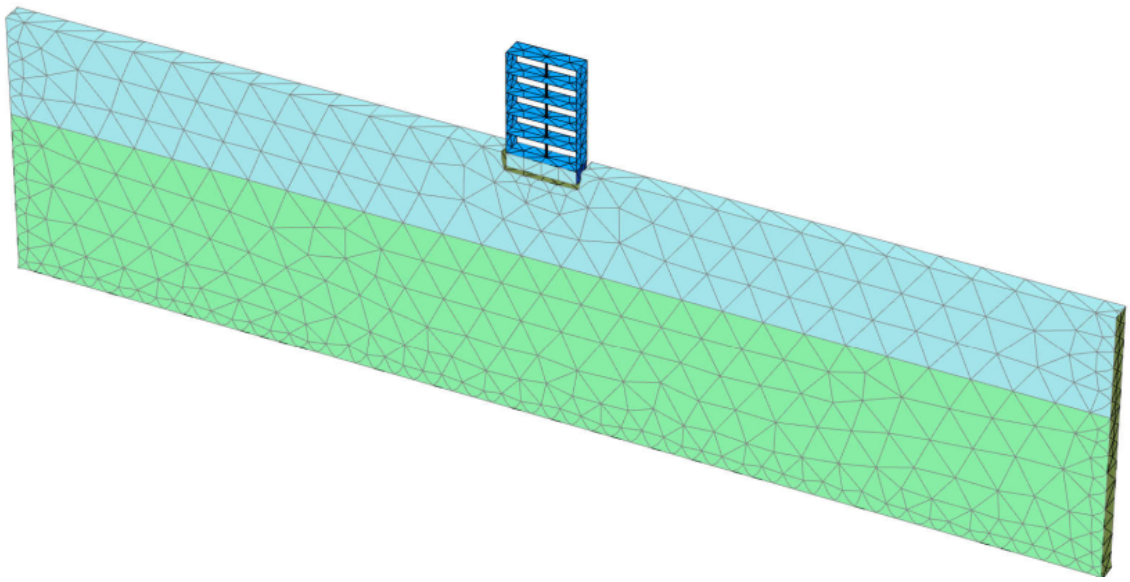


图 143: 生成的网格

9.6 定义并执行计算

计算过程包括初始条件阶段、建筑施工模拟、荷载、自由振动分析和地震分析。

9.6.1 初始阶段

1. 单击**分阶段施工**选项卡，继续定义计算阶段。
2. 初始阶段已引入。本教程将使用初始阶段的缺省设置。
3. 在**分阶段施工模式**下，检查建筑和荷载是否处于非激活状态。

9.6.2 第 1 阶段 - 建筑施工

1. 添加新的计算阶段（第 1 阶段）。已添加阶段的缺省设置将用于此计算阶段。
2. 在**分阶段施工模式**中，建造建筑（激活所有板、锚杆，但仅激活地下室的界面），并停用地下室体积。

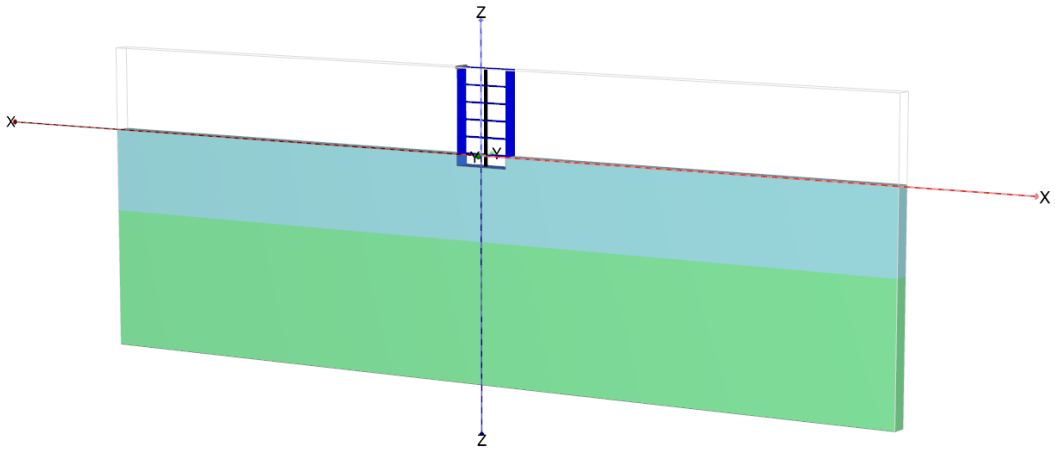


图 144: 建筑施工

9.6.3 第 2 阶段 - 激发

1. 添加新的计算阶段（第 2 阶段）。
2. 在**变形控制参数**子树的**阶段**窗口中，选择**将位移重置为零**。此计算阶段将使用其余参数的缺省值。
3. 在**分阶段施工模式**下，激活线荷载。荷载的值已经在**结构模式**中定义。

9.6.4 第 3 阶段 - 自由振动

1. 添加新的计算阶段（第 3 阶段）。
2. 在**阶段**窗口中，针对**计算类型**，选择**动力**选项。

3. 将**时间间隔**参数设置为 5 秒。
4. 在**分阶段施工模式**下，停用线荷载。
5. 在**模型浏览器**中，展开**模型条件**子树。
6. 展开**动力**子树。缺省情况下，x 方向的边界条件设置为粘性。为 y 方向的边界选择**无**选项。将边界 Zmin 设置为**粘性**（请参见图 145(第 155 页)）。



图 145: 动力计算（第 3 阶段）的边界条件

注释: 为了更好地呈现结果，可以创建自由振动和地震的动画。如果要创建动画，建议增加保存步骤的数量，做法是在**阶段**窗口的**参数**页面中为**保存的最大步数**参数分配适当的值。

9.6.5 第 4 阶段 - 地震

1. 添加新阶段（第 4 阶段）。
2. 在**阶段**窗口中，将**起始阶段**选项设置为第 1 阶段（建筑施工）。
3. 为**计算类型**选择**动力**选项。
4. 将**动力时间间隔**参数设置为 20 秒。
5. 在**变形控制参数**子树中，选择**将位移重置为零**。此计算阶段将使用其余参数的缺省值。
6. 在**数值控制参数**子树中，取消选中**使用默认迭代参数**复选框。
7. 将**最大步数**设置为 1000。
8. 将**时间步长确定**设置为**手动**，将**子步数**设置为 4。

注释:

- 动力时间间隔设置为 20 秒，且时间间隔为 0.005 秒，计算结果为 20/0.005=4000。因此该计算需要 4000 步。因此，将**最大步数**设置为 1000，并将**子步数**设置为 4。但是，由于一个或两个相对较小的单元，自动时间步长会建议更小的时间步长，这要求对时间步长大小执行敏感度分析。有关动力计算时间步长的更多信息，请访问 Bentley 社区。

- 有关偏离修正和输入信号的更多信息，请访问 Bentley 社区。

9. 在**模型浏览器**中，展开**模型条件**子树。
10. 展开**动力**子树。为 x 方向的边界设置**自由场**选项。y 方向的边界已设置为**无**。将边界 Zmin 设置为**合规基础**（请参阅图 146(第 156 页)）。

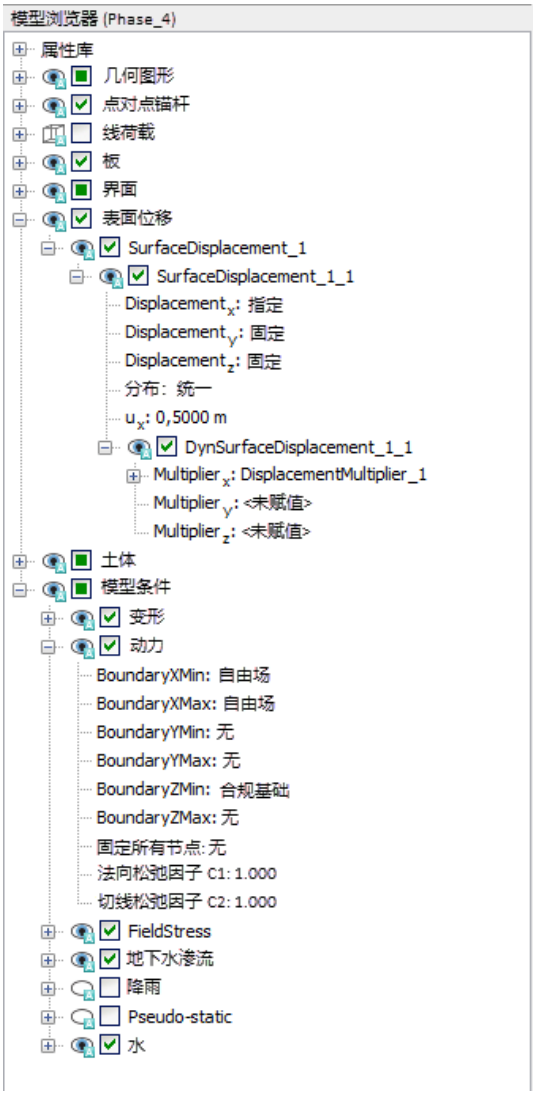


图 146: 动力计算（第 4 阶段）的边界条件

11. 确保模型边界上的界面未在**模型浏览器**中激活。

注释:

- 动力时间间隔设置为 20 秒，且时间间隔为 0.005 秒，计算结果为 20/0.005=4000。因此该计算需要 4000 步。因此，将**最大步数**设置为 1000，并将**子步数**设置为 4。但是，由于一个或两个相对较小的单元，自动时间步长会建议更小的时间步长，这要求对时间步长大小执行敏感度分析。有关动力计算中使用的时间步长的更多信息，请访问 Bentley 社区。
- 有关偏离修正和输入信号的更多信息，请访问 Bentley 社区。

12. 在**模型浏览器**，激活**表面位移**及其动力分量。将 u_x 值设置为 0.5 米。考虑到模型底部的边界条件将使用**合规基础**来定义，采用的输入信号必须是露头运动的一半。

9.6.6 执行计算

1. 在 (0 1.5 15)、(0 1.5 6)、(0 1.5 3) 和 (0 1.5 -2) 处选择荷载位移曲线的点。
2. 执行计算。

9.7 结果

图 147(第 157 页) 显示了第 2 阶段（施加水平荷载）结束时的变形结构。

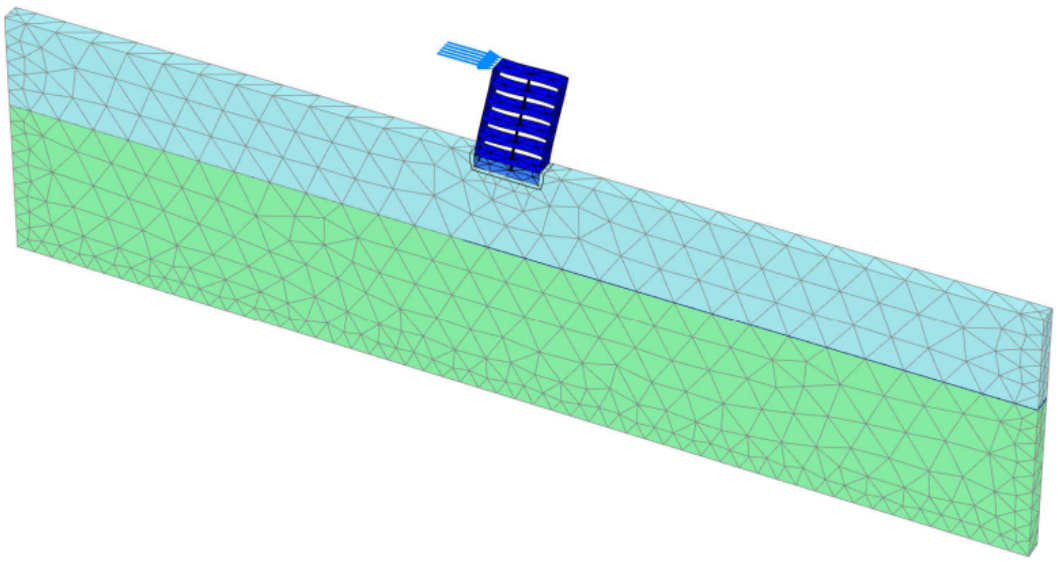


图 147: 第 2 阶段结束时系统的变形网格

图 148(第 158 页) 显示了自由振动阶段所选点 A (0 1.5 15)、B (0 1.5 6)、C (0 1.5 3)、D (0 1.5 -2) 的位移时程。可以从图上看出，由于土体和建筑中的阻尼，振动随着时间慢慢衰减。

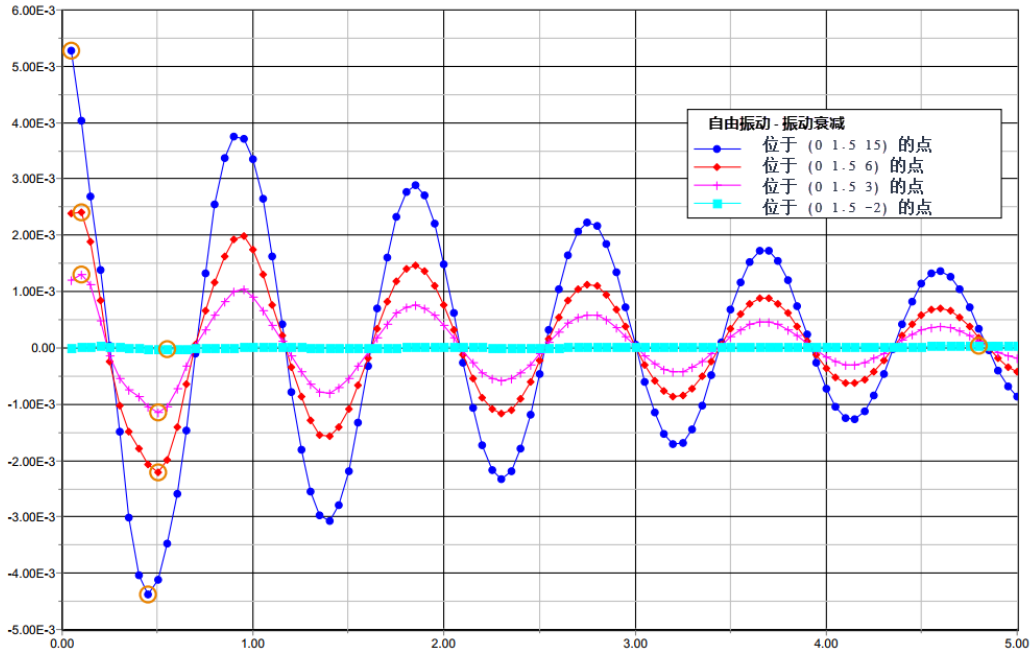


图 148: 位移时程（自由振动）

在**傅立叶页面**下的**曲线生成**窗口中，选择**功率（频谱）**，之后在总位移子树下，选择 u_x，然后单击确定，生成图表。根据图 149(第 158 页)，可以计算建筑的主频率约为 1 Hz。 为了更好地呈现结果，可以创建自由振动和地震的动画。

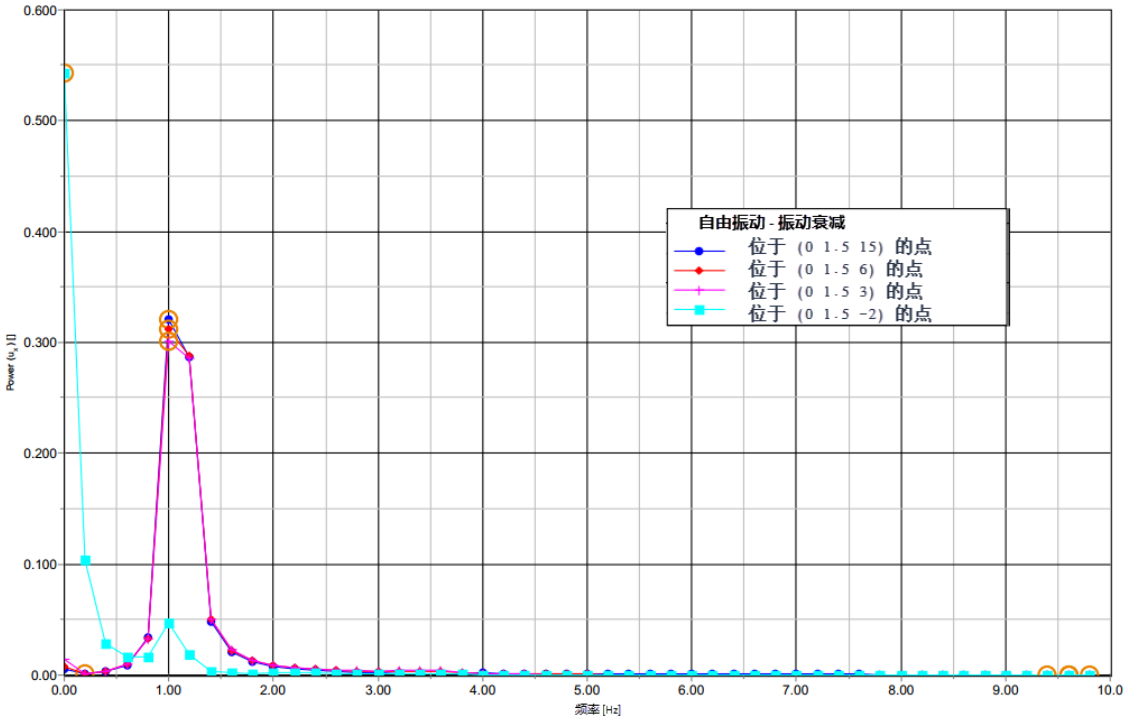


图 149: 频率表示（频谱 - 自动振动）

图 150(第 159 页) 显示地震阶段点 A (0 1.5 15) 的位移时程。可以从图上看出，由于土体和建筑中的阻尼，振动随着时间慢慢衰减。

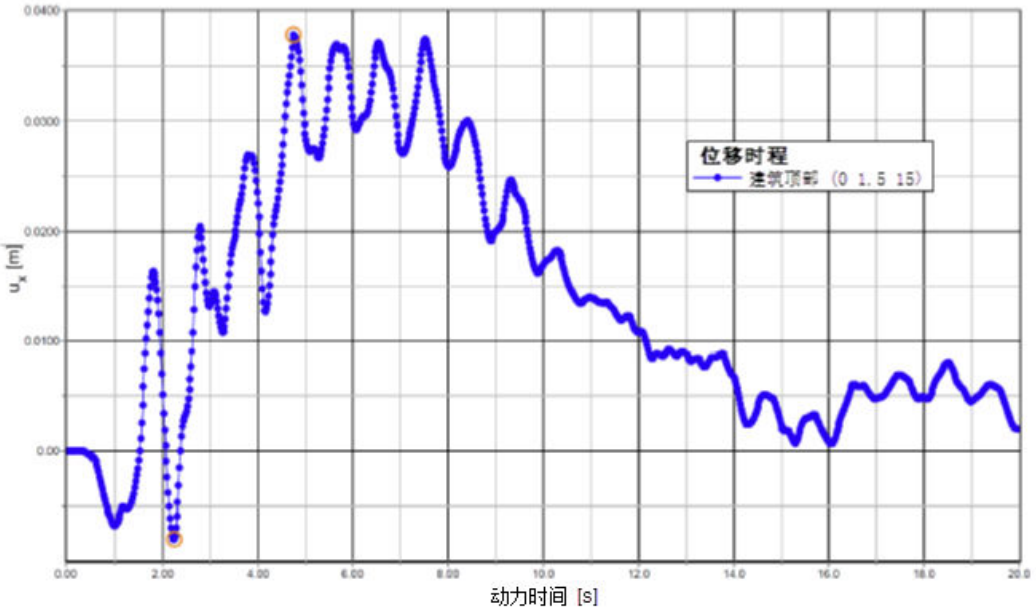


图 150: 建筑顶部的位移时程（地震）

地震阶段点 A (0 1.5 15) 的时程特征已通过第 4 阶段的快速傅立叶变换转换为归一化功率谱，并在图 151(第 159 页) 中绘制。

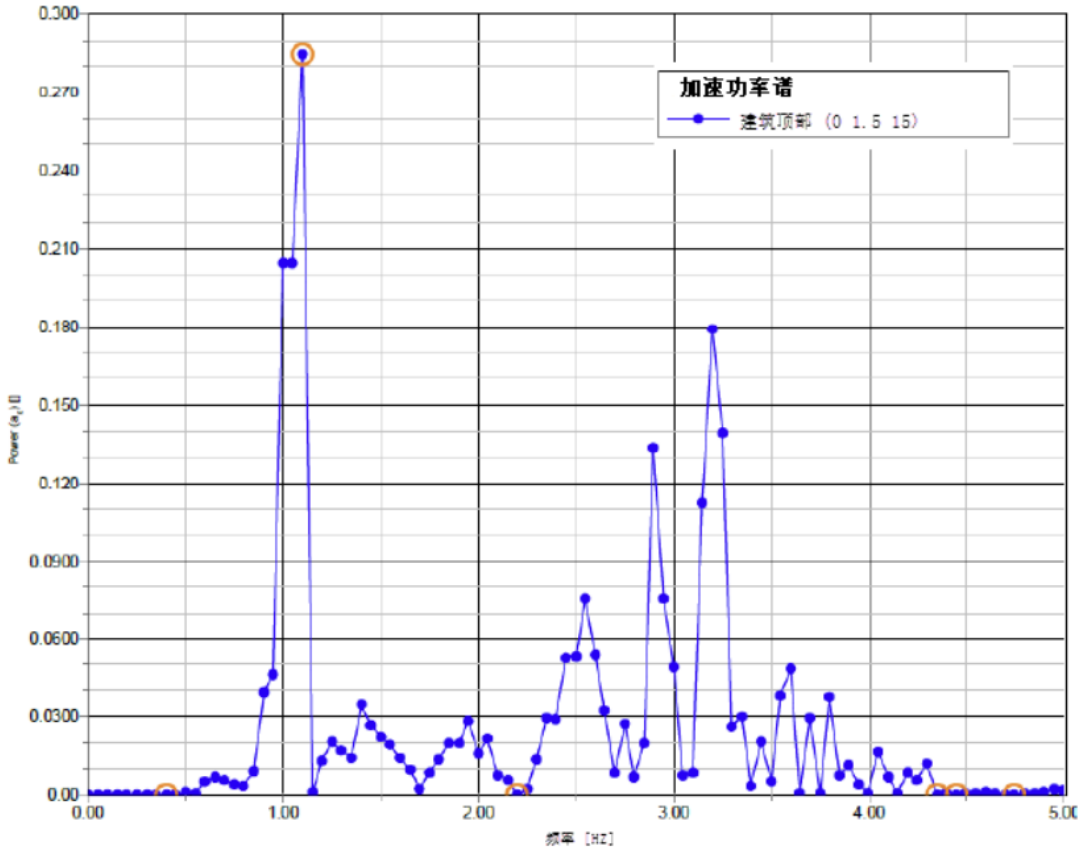
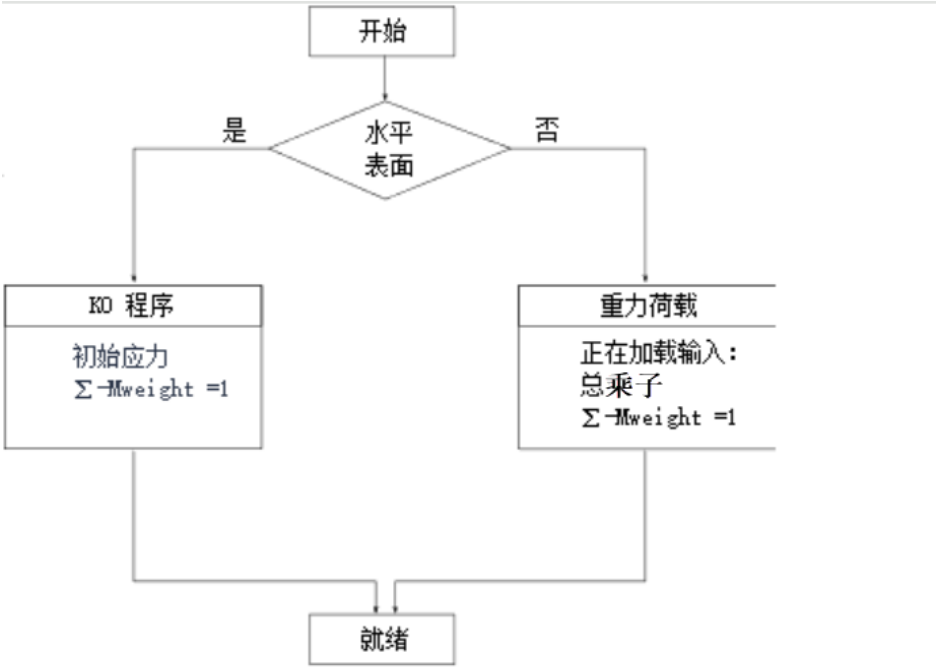


图 151: (0 1.5 15) 处的加速功率谱

附录

A

土体重量引起的初始应力的计算方案



非水平表面和非水平重量分层的示例如下：

