PLAXIS

PLAXIS 2D 2024.2

教程手册 2D

Bentley®
Advancing Infrastructure

上次更新时间: 2024 年 4 月 12 日

目录

前言: 介绍 8

章节 1: 砂土上圆形承台的沉降 9

1.1 几何图形 9
1.2 工况 A：刚性承台 10
1.2.1 新建项目 10
1.2.2 定义土壤地层学 13
1.2.3 创建和分配材料数据集 14
1.2.4 定义承台 19
1.2.5 生成网格 19
1.2.6 定义并执行计算 21
1.3 工况 B：柔性承台 28
1.3.1 修改几何图形 28
1.3.2 为承台添加材料属性 30
1.3.3 生成网格 31
1.3.4 计算 31
1.3.5 查看计算结果 33
1.3.6 生成荷载-位移曲线 33

章节 2: 路堤排水和不排水稳定性 36

2.1 创建新项目 36
2.2 定义土壤地层学 36
2.3 创建和分配材料数据集 37
2.4 创建路堤 38
2.5 生成网格 39
2.6 定义并执行计算 39
2.6.1 初始阶段：初始条件 39
2.6.2 第 1 阶段：在排水下层土上进行路堤施工 39
2.6.3 第 2 阶段：在不排水下层土上进行路堤施工 40
2.6.4 计算 41
2.7 结果 41
2.8 安全分析 42
2.8.1 安全分析结果评估 43

章节 3: 水下挖掘施工 47

3.1 创建新项目 48
3.2 定义土壤地层学 48
3.3 创建和分配材料数据集 48
3.4 定义结构单元 50
3.4.1 要定义地连墙，请执行以下操作： 50
3.4.2 若要定义界面： 52
3.4.3 要定义挖掘层，请执行以下步骤： 53
3.4.4 要定义支柱，请执行以下操作： 53
3.4.5 要定义分散荷载，请执行以下步骤： 54

3.5 生成网格 54
3.6 定义并执行计算 55
3.6.1 初始阶段 55
3.6.2 第 1 阶段：外部荷载 56
3.6.3 第 2 阶段：第一个挖掘阶段 57
3.6.4 第 3 阶段：安装支柱 58
3.6.5 第 4 阶段：第二个（水下）挖掘阶段 58
3.6.6 第 5 阶段：第三个挖掘阶段 59
3.6.7 执行计算 60
3.7 查看计算结果 60
3.7.1 位移和应力 61
3.7.2 剪力和弯矩 62

章节 4: 岩质边坡的稳定化 65

4.1 新建项目 65
4.2 定义岩体地层学 66
4.3 创建和分配材料数据集 66
4.4 定义结构单元 67
4.4.1 定义断层 68
4.4.2 定义路堑挖掘 69
4.4.3 定义锚索 69
4.4.4 定义挡土墙和回填土 70
4.5 生成网格 72
4.6 定义并执行计算 73
4.6.1 初始阶段：初始条件 73
4.6.2 第 1 阶段：第一个挖掘阶段 74
4.6.3 第 2 阶段：安装前两排锚索 74
4.6.4 第 3 阶段：第二个挖掘阶段 75
4.6.5 第 4 阶段：安装第三排锚索 76
4.6.6 第 5 阶段：建造挡土墙 76
4.6.7 第 6 阶段：回填 77
4.6.8 第 7 阶段和第 8 阶段：安全分析 77
4.7 计算 78
4.8 结果 78
4.8.1 评估结果 78
4.8.2 安全分析结果评估 80

章节 5: 隧道施工引起的沉降 [GSE] 84

5.1 创建新项目 84
5.2 定义土壤地层学 85
5.2.1 创建和分配材料数据集 85
5.3 定义结构单元 88
5.3.1 定义隧道 88
5.3.2 定义建筑 90
5.4 生成网格 91
5.5 定义并执行计算 92
5.5.1 初始阶段 92
5.5.2 第 1 阶段：建筑 92
5.5.3 第 2 阶段：TBM 93
5.5.4 第 3 阶段：TBM 锥度 93
5.5.5 第 4 阶段：尾端空隙注浆 93
5.5.6 第 5 阶段：衬里安装 94

5.5.7 执行计算 94
5.6 结果 94
章节 6: NATM 隧道挖掘 [GSE] 98
6.1 新建项目 98
6.2 定义土壤地层学 98
6.3 创建和分配材料数据集 100
6.4 定义隧道 102
6.5 生成网格 105
6.6 定义并执行计算 105
6.6.1 初始阶段 105
6.6.2 第 1 阶段：第一次隧道挖掘（应力释放比） 106
6.6.3 第 2 阶段：第一次（临时）衬里 106
6.6.4 第 3 阶段：第二次隧道挖掘（应力释放比） 106
6.6.5 第 4 阶段：第二次（最终）衬里 107
6.6.6 执行计算 107
6.7 结果 108
章节 7: 使用锚定墙进行干地挖掘 [ADV] 110
7.1 创建新项目 110
7.2 定义土壤地层学 111
7.3 创建和分配材料数据集 111
7.4 定义结构单元 113
7.4.1 要定义地连墙和界面，请执行以下操作： 113
7.4.2 要定义挖掘层，请执行以下步骤： 114
7.4.3 定义地锚 114
7.4.4 要定义分散荷载，请执行以下步骤： 116
7.5 生成网格 116
7.6 定义并执行计算 117
7.6.1 初始阶段 117
7.6.2 第 1 阶段：激活墙体和荷载 118
7.6.3 第 2 阶段：第一个挖掘阶段 119
7.6.4 第 3 阶段：第一锚行 119
7.6.5 第 4 阶段：第二个挖掘阶段 120
7.6.6 第 5 阶段：第二锚行 120
7.6.7 第 6 阶段：最后一个挖掘阶段 121
7.6.8 执行计算 122
7.7 结果 123
章节 8: 使用锚定墙进行干地挖掘 - ULS [ADV] 126
8.1 定义几何 126
8.2 定义并执行计算 128
8.2.1 所有阶段的更改 128
8.2.2 执行计算 129
8.3 结果 129
章节 9: 路堤施工 [ADV] 132
9.1 创建新项目 132
9.2 定义土壤地层学 133
9.3 创建和分配材料数据集 133
9.4 定义施工 135
9.4.1 要定义路堤，请执行以下操作： 135

9.4.2 定义排水孔 136
9.5 生成网格 137
9.6 定义并执行计算 137
9.6.1 初始阶段：初始条件 137
9.6.2 固结分析 138
9.6.3 安全分析 140
9.6.4 计算 141
9.7 结果 142
9.7.5 安全分析结果 144
9.8 使用地漏 147
9.9 更新网格和更新水压分析 148

章节 10: 挖掘和脱水 [ADV] 150

10.1 创建并分配材料数据集 150
10.2 定义结构单元 150
10.3 生成网格 150
10.4 定义并执行计算 151
10.4.1 第 6 阶段：脱水 151
10.4.2 执行计算 152
10.5 结果 152

章节 11: 圆形水下承台的循环竖向承载力和刚度 [ADV] 154

11.3 创建新项目 155
11.4 定义土壤地层学 155
11.5 创建和分配材料数据集 156
11.5.1 材料：黏土-总荷载 156
11.5.2 材料：黏土-循环荷载 164
11.5.3 材料：混凝土 167
11.6 定义结构单元 168
11.6.1 定义混凝土地基 168
11.6.2 定义界面 168
11.6.3 定义竖向荷载 169
11.7 生成网格 170
11.8 定义并执行计算 170
11.8.1 初始阶段 171
11.8.2 第 1 阶段：承台和界面激活 171
11.8.3 第 2 阶段：循环竖向承载力和刚度 171
11.8.4 第 3 阶段：计算竖向循环刚度 171
11.8.5 执行计算 172
11.9 结果 172

章节 12: 流经路堤的水流 [ULT] 175

12.1 创建新项目 175
12.2 定义土壤地层学 175
12.3 创建并分配材料数据集 176
12.4 生成网格 177
12.5 定义并执行计算 178
12.5.1 初始阶段 178
12.5.2 第 1 阶段 - 瞬态地下水渗流分析 179
12.5.3 第 2 阶段 - 长期地下水渗流分析 180
12.5.4 执行计算 181
12.6 结果 181

章节 13: 马铃薯田含水率 [ULT] 184

13.1 创建新项目 184
13.2 定义土壤地层学 185
13.3 创建和分配材料数据集 186
13.4 生成网格 187
13.5 定义并执行计算 188
13.5.1 初始阶段 188
13.5.2 瞬变阶段 189
13.5.3 执行计算 191
13.6 结果 191

章节 14: 水位骤降情况下水坝的稳定性 [ULT] 193

14.1 创建新项目 193
14.2 定义土壤地层学 193
14.3 创建和分配材料数据集 194
14.4 定义水坝 195
14.5 生成网格 195
14.6 定义并执行计算 196
14.6.1 初始阶段：水坝构造和高蓄水池 196
14.6.2 第 1 阶段：快速下降 199
14.6.3 第 2 阶段：慢速下降 201
14.6.4 第 3 阶段：低水位 202
14.6.5 第 4 阶段至第 7 阶段：安全分析 203
14.6.6 执行计算 204
14.7 结果 204

章节 15: 弹性地基上生成器的动力分析 [ULT] 207

15.1 创建新项目 207
15.2 定义土壤地层学 208
15.3 创建和分配材料数据集 208
15.4 定义结构单元 209
15.5 生成网格 210
15.6 定义并执行计算 210
15.6.1 初始阶段 211
15.6.2 第 1 阶段：承台 211
15.6.3 第 2 阶段：启动生成器 211
15.6.4 第 3 阶段：停止生成器 213
15.6.5 执行计算 213
15.6.6 附加阻尼计算 214
15.7 结果 215

章节 16: 打桩 [ULT] 217

16.1 创建新项目 217
16.2 定义土壤地层学 218
16.3 创建和分配材料数据集 218
16.4 定义结构单元 220
16.4.1 定义桩 220
16.4.2 定义荷载 221
16.5 生成网格 222
16.6 定义并执行计算 223
16.6.1 初始阶段 223

16.6.2 第 1 阶段：桩激活 223
16.6.3 第 2 阶段：打桩 224
16.6.4 第 3 阶段：衰减 225
16.6.5 执行计算 225
16.7 结果 225

章节 17: 建筑自由振动和地震分析 [ULT] 228

17.1 创建新项目 228
17.2 定义土壤地层学 229
17.3 创建和分配材料数据集 229
17.4 定义结构单元 232
17.4.1 定义建筑 233
17.4.2 定义荷载 234
17.4.3 在边界创建界面 235
17.5 生成网格 235
17.6 定义并执行计算 236
17.6.1 初始阶段 236
17.6.2 第 1 阶段：建筑 237
17.6.3 第 2 阶段：激发 237
17.6.4 第 3 阶段：自由振动 237
17.6.5 第 4 阶段：地震 238
17.6.6 执行计算 239
17.7 结果 239

章节 18: 通航船闸的热膨胀 [ULT] 242

18.1 创建新项目 242
18.2 定义土壤地层学 243
18.3 创建和分配材料数据集 243
18.4 定义结构单元 244
18.5 生成网格 246
18.6 定义并执行计算 246
18.6.1 初始阶段 246
18.6.2 第 1 阶段：施工 247
18.6.3 第 2 阶段：加热 249
18.6.4 执行计算 251
18.7 结果 251

章节 19: 隧道建造中的冻结管 [ULT] 255

19.1 创建新项目 255
19.2 定义土壤地层学 256
19.3 创建和分配材料数据集 256
19.4 定义结构单元 258
19.5 生成网格 259
19.6 定义并执行计算 260
19.6.1 初始阶段 260
19.6.2 第 1 阶段：瞬态计算 261
19.6.3 执行计算 261
19.7 结果 261

介绍

PLAXIS 2D 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 2D。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。

教程可用于不同的许可级别：

鉴于为单独的许可服务提供了 PLAXIS 2D 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 2D 许可证普遍开放。
- [ADV] - 针对有 PLAXIS 2D Advanced 许可证的用户的教程。
- [ULT] - 针对有 PLAXIS 2D 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 砂土上圆形承台的沉降

本章中讨论的第一个应用为砂土上圆形地基承台的沉降。这是熟悉 PLAXIS 2D 实际应用的第一步。在此详细描述了创建几何模型，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。将在后面的教程中使用本章提供的信息。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。

对象：

- 开始新项目
- 创建轴对称模型
- 使用*钻孔*单元创建土壤地层学
- 为土体 (*Mohr-Coulomb 模型*) 创建并分配材料数据集
- 定义指定位移
- 使用*板*单元创建承台
- 为板创建并分配材料数据集
- 创建荷载
- 创建网格
- 使用 K0 程序生成初始应力
- 定义*塑性*计算
- 在计算阶段激活并修改荷载值
- 查看计算结果
- 为曲线选择点
- 创建“荷载-位移曲线”

1.1 几何图形

半径为 1.0 米的圆形承台放置在厚度为 4.0 米的砂土层上，如图 1 (第 10 页) 所示。在砂土层下方有一个延伸至较大深度且坚硬的岩石层。此练习的目的是获得施加在承台上的荷载所引起的土体位移和应力。对刚性和柔性承台均进行了计算。两种情况下有限元模型的几何图形相似。模型中不包括岩石层，而是在砂土层底部应用相应的边界条件。为使砂土中实现任何可能的机制并避免外部边界的影响，如图 1(第 10 页) 所示的模型在水平方向上延伸至总半径为 5.0 米。

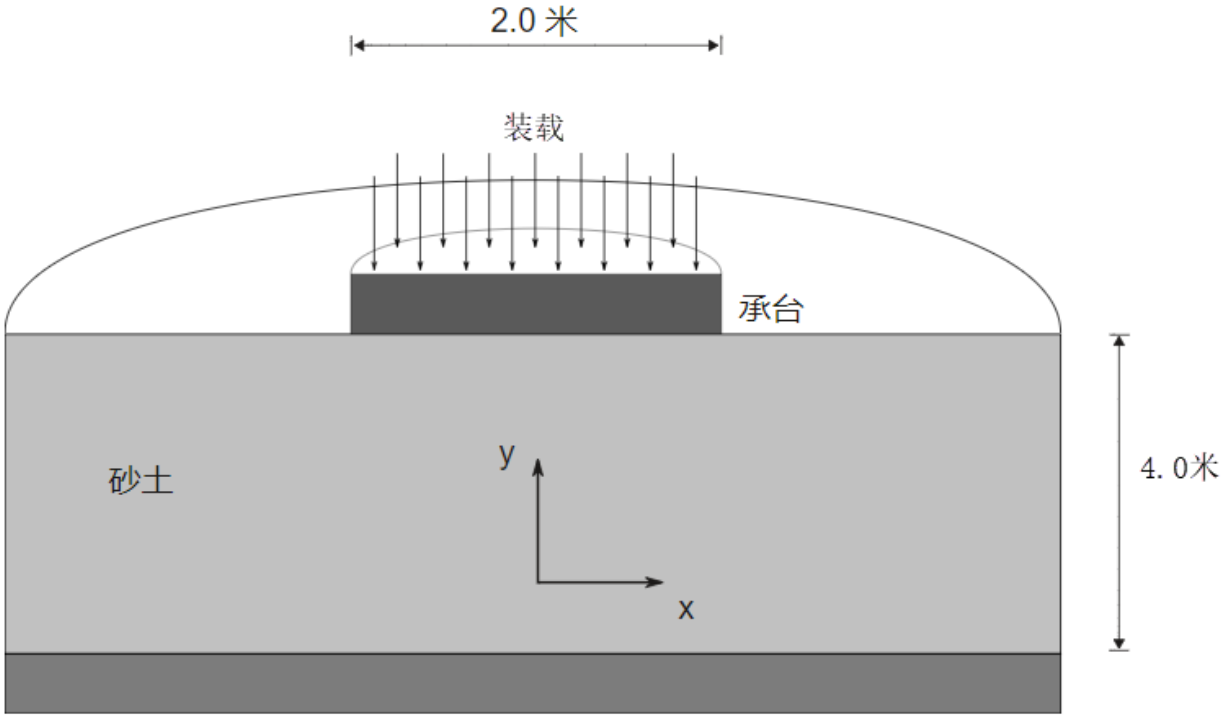


图 1: 砂土层上圆形承台的几何图形

1.2 工况 A：刚性承台

在第一次计算中，承台被认定为具有很大刚度和粗糙度。在此计算中，将通过砂土层顶部的均匀凹陷模拟承台沉降，而不是模拟承台本身。此方法将得出非常简单的模型，因此作为第一个练习使用，但其也有一些缺点。例如，不能提供有关承台中结构内力的信息。

此教程的第二部分介绍了柔性承台上的外部荷载，是一种更高级的建模方法。

1.2.1 新建项目

1. 双击输入程序图标，启动 PLAXIS 2D。

   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。

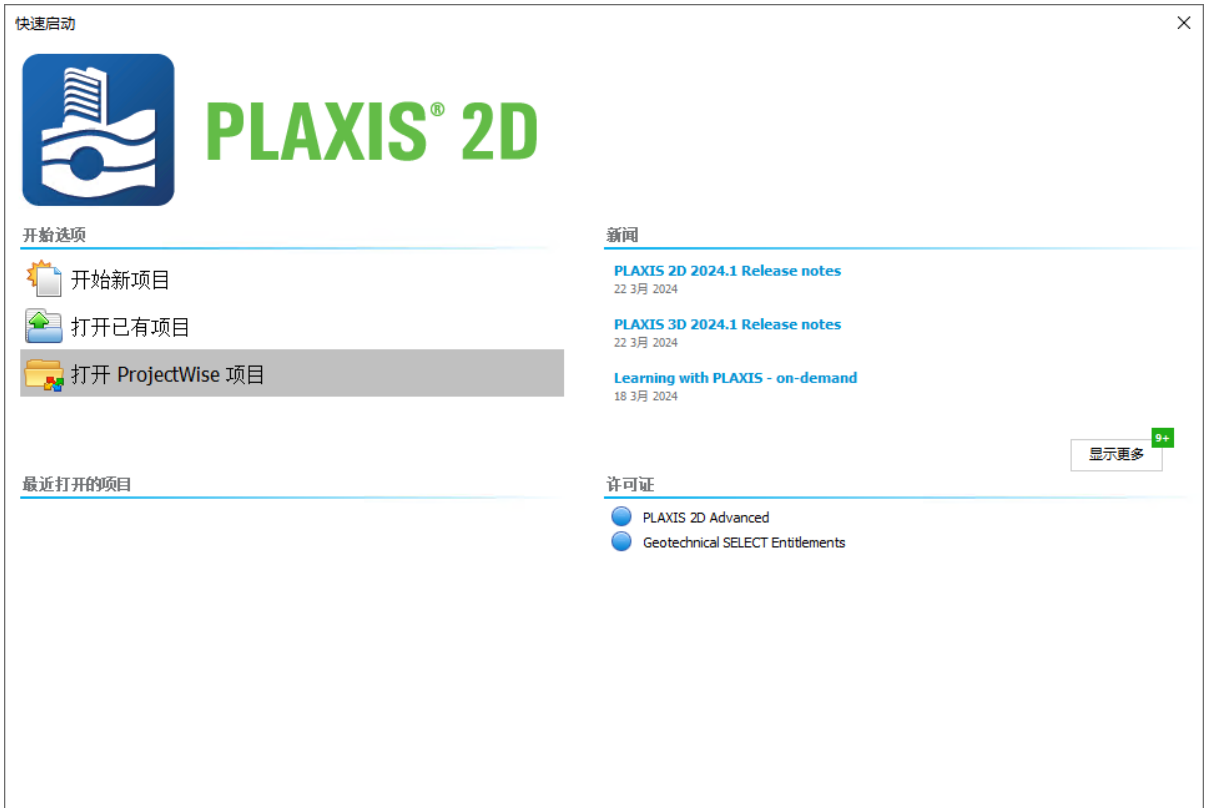


图 2: 快速启动 - PLAXIS 2D

2. 单击**开始新项目**。

   将显示**项目属性**窗口，其中包含三个页面：**项目**、**模型**和**云服务**。

   注释: 对于不同的许可层级，**项目属性**窗口将包含三个或四个页面，除了**项目**、**模型**和**云服务**之外，额外的页面是**常量**。



图 3: "项目属性"窗口 - PLAXIS 2D

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**框中输入第 1 课，并在**注释**框中键入圆形承台沉降。
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 13 页) 所示：

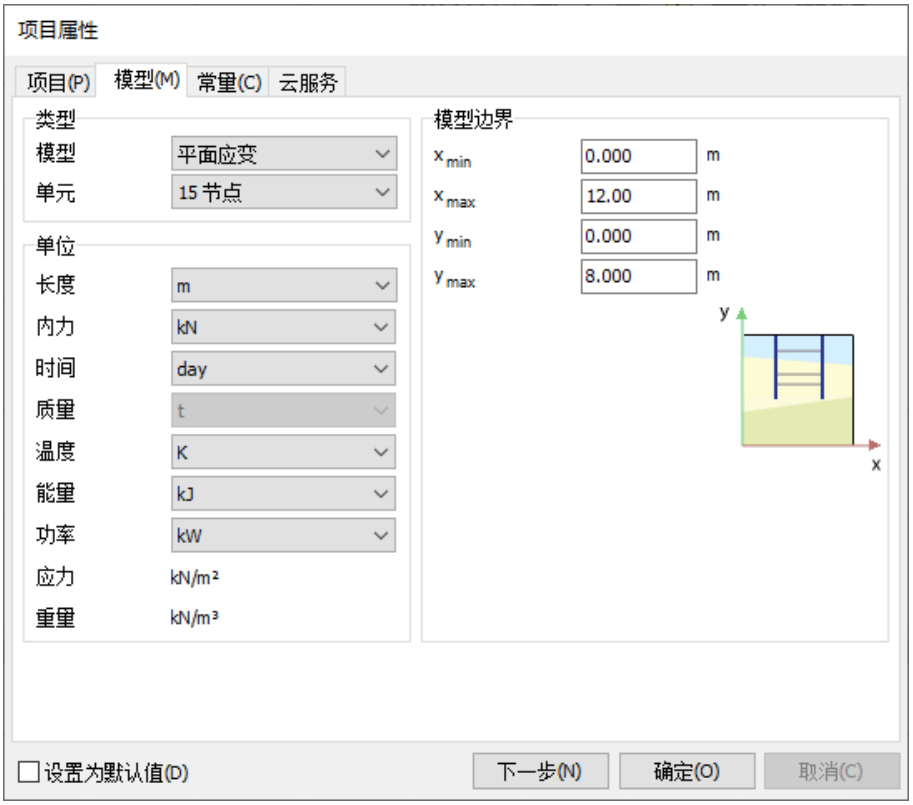


图 4: 模型属性页面

5. 在**类型**组中，指定模型（模型）的类型和基本单元类型（单元）。由于本教程涉及圆形承台，请分别从**模型**和**单元**下拉菜单中选择轴对称和 15 节点选项。
6. 在**等高线**组，将模型尺寸设置为 $x_{min} = 0$、$x_{max} = 5$、$y_{min} = 0$ 和 $y_{max} = 4$。
7. 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，可以在此处定义土层。

注释: 今后可以更改项目属性。您可以通过从**文件**菜单中选择相应的选项来访问**项目属性**窗口。

1.2.2 定义土壤地层学

在 PLAXIS 2D 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 2D 将自动在钻孔之间插值。钻孔以外的层位分布保持水平。

注释: 建模过程以五种模式（土体、结构、网格、水流条件和分阶段施工）完成。有关模式的更多信息，请参见参考手册 中的*输入程序***结构模式**。

为了创建土层，请遵循以下步骤：

1. 单击侧（垂直）工具栏中的**创建钻孔**按钮 ，开始定义土层。
2. 在绘图区域单击 x = 0，定位钻孔位置。

   此时将显示**修改土层**窗口，如图 5(第 14 页) 所示。

3. 单击**修改土层**窗口中的**添加**按钮，添加土层。
4. 设置土层的顶部边界为 y = 4，底部边界为 y = 0 m。
5. 将水头设置为 2.0 m。

缺省情况下，钻孔列内的水头值（地下水水头）设置为 0 m。

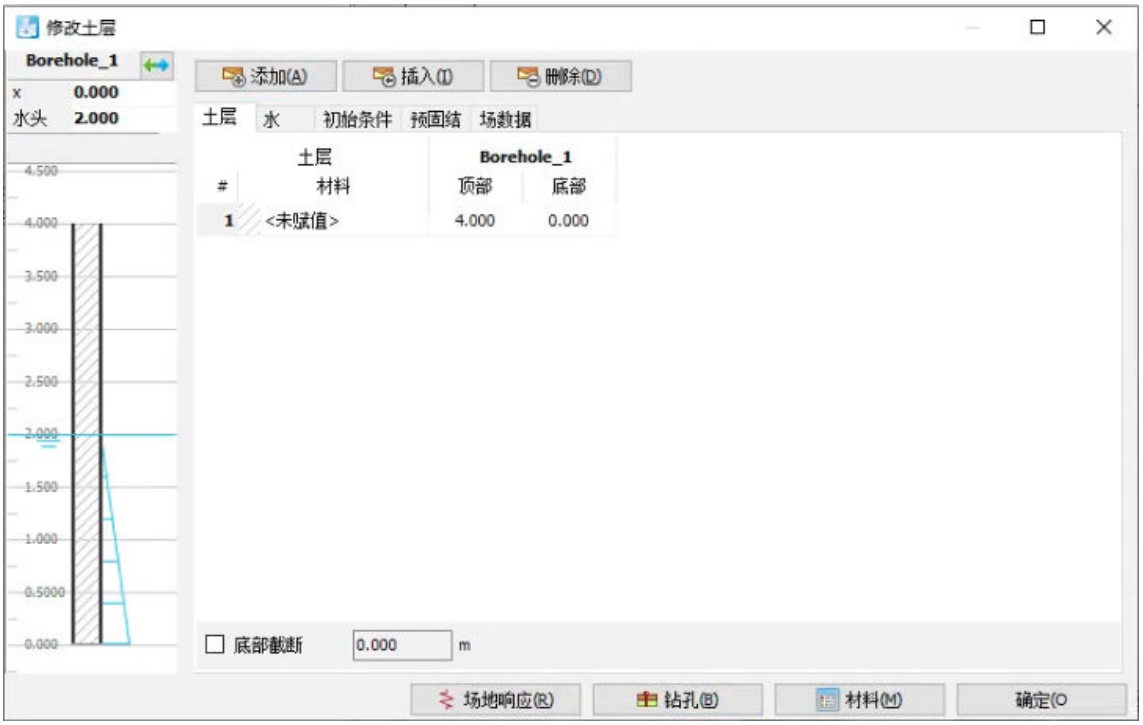


*图 5: **修改土层**窗口*

接下来，定义材料数据集，并分配至土层，参见创建和分配材料数据集(第 14 页)。

1.2.3 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土体模型和适当的材料参数。在 PLAXIS 2D 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土层。对于结构（如墙、板、锚、土工格栅等）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材料数据集。PLAXIS 2D 区分了**土体和界面**、**岩石结构面**、**板**、**土工格栅**、**嵌入梁行**、**锚索**和**锚杆**的材料数据集。

本教程中使用的砂土层具有以下属性，如表 1(第 14 页)所示：

表 1: 砂土层材料属性

参数	名称	值	单位
常规			
土体模型	模型	摩尔-库伦	-

参数	名称	值	单位
常规			
排水类型	类型	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	17	$\mathrm{kN/m^3}$
饱和单位重量	γ_{sat}	20	$\mathrm{kN/m^3}$
力学			
杨氏模量	E'_{ref}	$13 \cdot 10^3$	$\mathrm{kN/m^2}$
泊松比	ν	0.3	-
粘聚力	c'_{ref}	1	$\mathrm{kN/m^2}$
摩擦角	φ'	30	度
剪胀角	ψ	0	度

若要创建砂土层材料集，请遵循以下步骤：

1. 单击**修改土层**窗口或侧工具栏中的**材料**按钮 ，打开**材料集**窗口。
   此时将弹出**材料集**窗口，如图 6(第 16 页) 所示。



图 6: 材料集窗口

2. 单击**材料集**窗口下侧的**新建**按钮。
   将显示一个新窗口，其中包含以下页面：**常规**、**力学**、**地下水**、**界面**和**初始**。
3. 在**常规**页面的**材料集**框中，在**标识**框中写入砂土。
   在本示例中，缺省材料模型 (Mohr-Coulomb) 和排水类型（排水）有效。
4. 根据表 1(第 14 页)中列出的材料属性，在**常规属性**框中输入正确的值（图 7(第 17 页)）。表中未提到的参数保持缺省值。

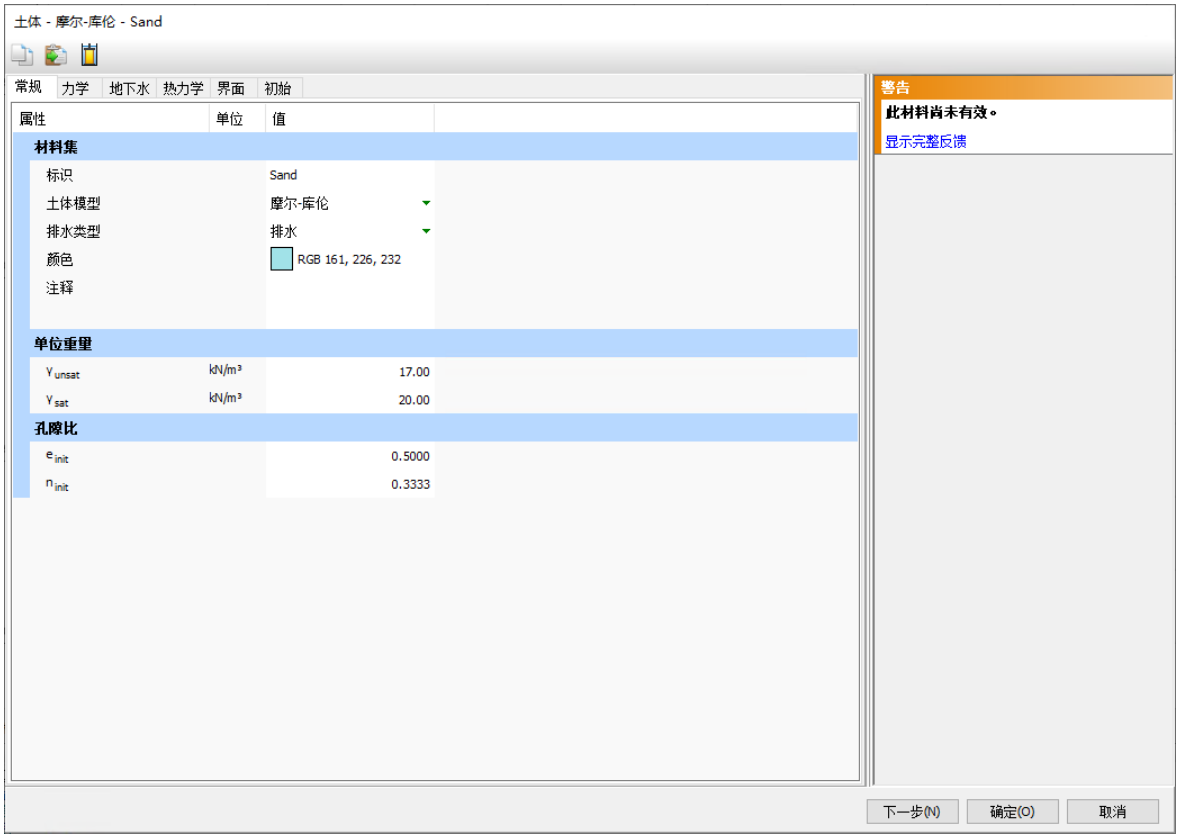


*图 7: **土体**窗口的**常规**页面*

注释:

1. 如图 7(第 17 页) 所示，**材料**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，继续输入模型参数。
   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）。

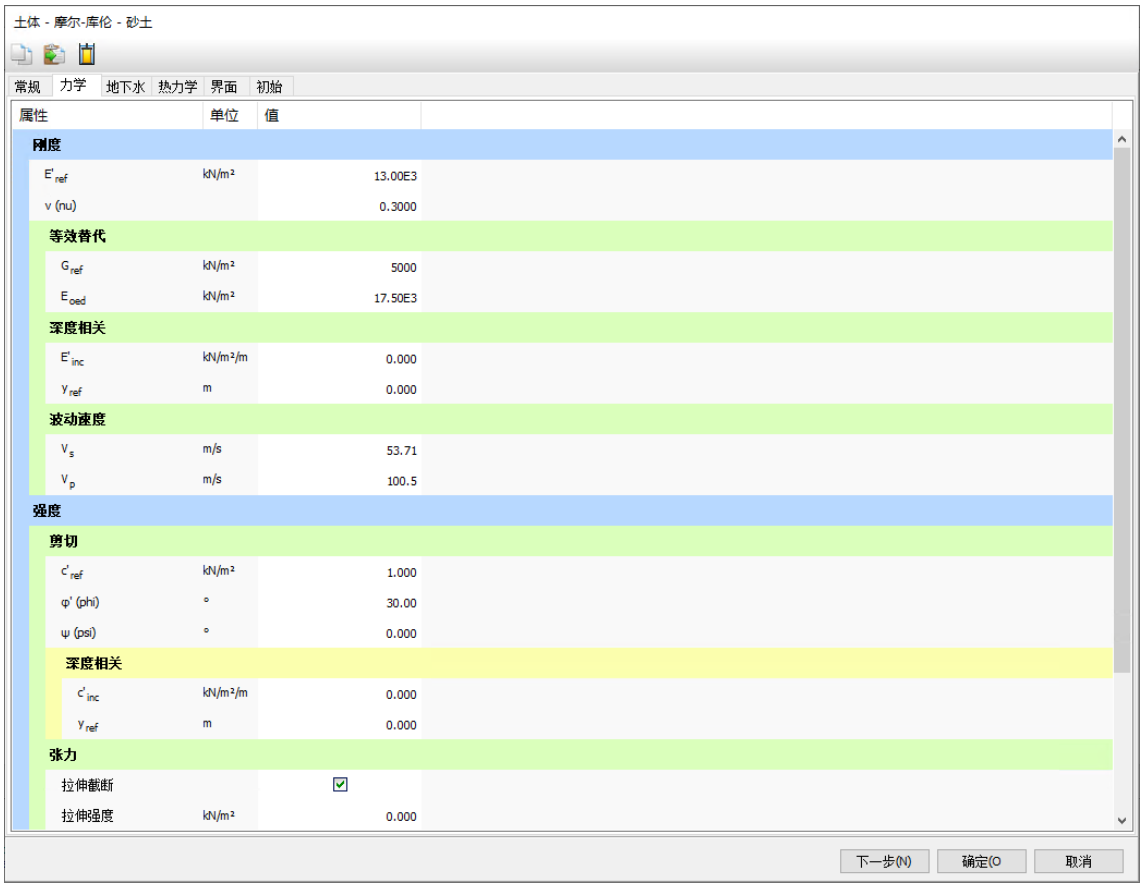


*图 8: **土体**窗口的**力学**页面 - 土体和界面材料集类型*

6. 在**力学**页面的相应编辑框中输入表 1(第 14 页)中的模型参数（图 8(第 18 页)），并将其他参数保留为其缺省值。有关不同土体模型及其相应参数的详细描述，请参阅材料模型手册。

   注释: 若要了解为何已选择某种特定的土体模型，请参见材料模型手册附录 B。

7. 排干土体材料中的水，几何模型不包括界面，在本例中，缺省热条件和初始条件有效，因此可以跳过剩余页面。单击**确定**以确认当前材料数据集的输入。
   现在，创建的数据集将出现在**材料集**窗口的树视图中。
8. 从**材料集**窗口中将设置好的**砂土**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在此放入（松开鼠标左键）。
9. 在**材料集**窗口中单击**确定**，关闭数据库。
10. 单击**确定**，关闭**修改土层**窗口。

注释:

- 可以通过打开**材料集**窗口，从树视图中选择要更改的数据集，并单击**编辑**按钮来更改现有数据集。还可以通过点击侧工具栏中相应的按钮来打开**材料集**窗口。
- PLAXIS 2D 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。在程序安装期间，教程手册中所有教程的数据集都存储在全局数据库中。
- 可以在**选择浏览器**的**材料**下拉菜单中更改分配给模型中选定实体的材料。请注意，所有可分配给实体的材料数据集均在下拉菜单中列出。但是，只列出了**项目材料**下的材料，未列出**全局材料**下的材料。
- 该程序对材料参数进行一致性检查，若检测到数据不一致，将给出警告信息。

1.2.4 定义承台

在程序的**结构模式**下创建结构单元和荷载。在此练习中，将创建统一凹陷，以塑造一个非常硬且粗糙的承台。

注释:

绘图区域中网格的可见性可以简化几何图形的定义。网格在屏幕上提供了一个矩阵，可以作为参考。它也可以用于在创建几何图形的过程中捕捉规则点。单击绘图区域下的相应按钮可以激活网格。若要定义网格单元的大小和捕捉选项：

单击底部工具栏中的**捕捉选项**按钮 。这将弹出**捕捉**窗口，可以在此处指定网格单元格的大小和捕捉间隔。根据**捕捉间隔数**的值，捕捉点的间距可进一步划分为更小的间隔。使用本教程中的缺省值。

1. 单击**结构**选项卡，继续在**结构模式**中输入结构单元。
2. 单击侧工具栏中的**创建指定位移**按钮 。
3. 在展开的菜单中选择**创建线位移**选项 。
4. 在绘图区域，将光标移至 (0 4) 点，然后单击鼠标左键。
5. 沿着土体的上边界移动至 (1 4) 点，再次单击鼠标左键。
6. 单击鼠标右键停止绘图。
7. 在**选择浏览器**中，将指定位移（位移 $_x$）的 x 分量设置为固定。
8. 为 $u_{y,start,ref}$ 赋值 -0.05，表示向下位移 0.05 m，从而指定垂直方向上的统一指定位移，如图 9(第 19 页)所示。

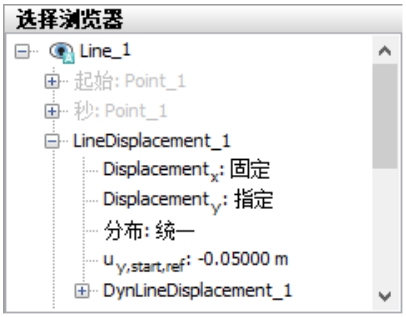


*图 9: **选择浏览器**中的指定位移*

模型的几何形状完整。

几何模型完整时，可以生成有限元网格。转到 生成网格(第 19 页)

1.2.5 生成网格

PLAXIS 2D 支持全自动网格生成程序，其中的几何形状分为基本单元类型的单元和兼容的结构单元（若适用）。

网格的生成充分考虑了模型中点和线的位置，以便在有限元网格中考虑层、荷载和结构的准确位置。生成过程的基础是查找最优三角形的稳健三角测量原则。除了网格生成本身，还可实现将输入数据（属性、边界条件、材料集等）从几何模型（点、线、类组）到有限元网格（单元、节点和应力点）的转换。

要生成网格，请遵循以下步骤：

1. 单击相应的选项卡，转到**网格模式**。
2. 在边栏中单击**生成网格**按钮 。
   此时将弹出**网格选项**窗口，如图 10(第 20 页) 所示。缺省情况下，选择**中等**选项，作为单元分布。



*图 10: **网格选项**窗口*

3. 单击**确定**，启动网格生成。
4. 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，如图 11(第 20 页) 所示。请注意，承台下的网格是自动细化的。

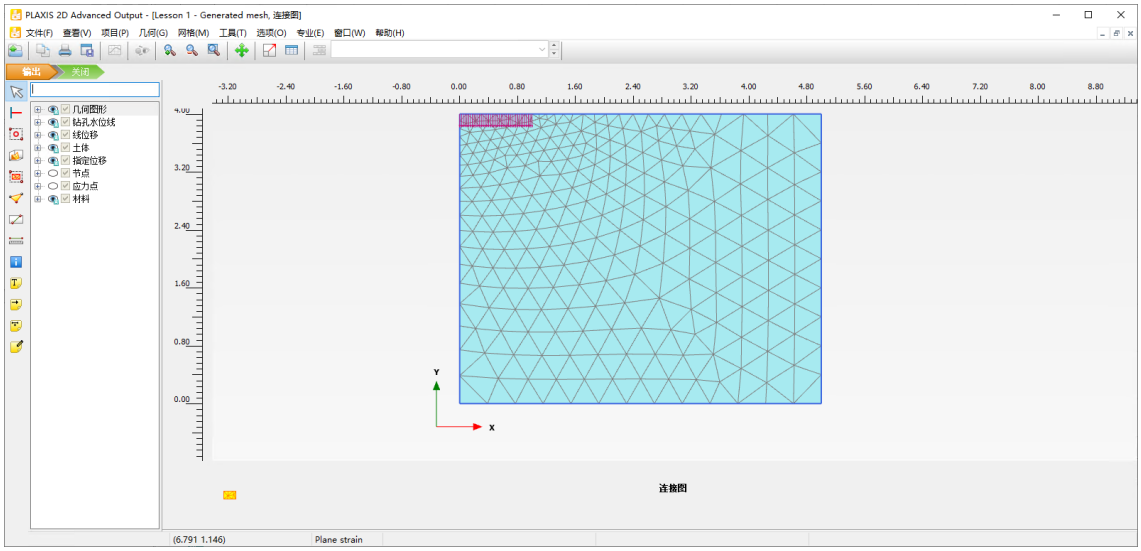


*图 11: **输出**窗口中生成的网格*

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**。

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，可选择全局或局部改进网格（详情参见参考手册 ）。
- 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。

网格一旦生成，有限元模型便完成。

网格生成后，定义计算阶段并完成计算，参见初始阶段(第 21 页)获取说明。

1.2.6 定义并执行计算

在执行实际计算之前，必须分阶段定义计算。此示例需要两个阶段：初始阶段和模拟承台沉降阶段。

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）。

1. 单击**分阶段施工**选项卡，继续定义计算阶段。可跳过**水流条件模式**。

   当一个新项目已获得定义时，将自动创建并在**阶段浏览器**中选择命名为“初始阶段”的第一个计算阶段，如图 12(第 21 页) 所示：

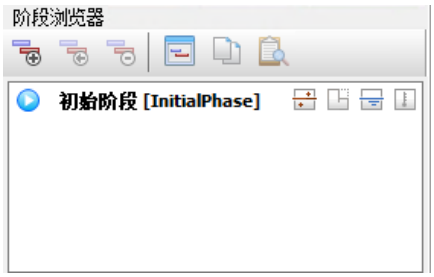


图 12: 阶段浏览器 - 初始阶段

2. 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。

   单击**编辑阶段**按钮 或双击**阶段浏览器**中的阶段。

   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。
	分阶段施工可作为**荷载类型**提供。
	缺省情况下，选择潜水位选项，作为**孔压计算类型**。

注释: K0 程序应主要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 。

本教程也将使用**阶段**窗口中的其他缺省选项。

阶段窗口如图 13(第 22 页) 所示。

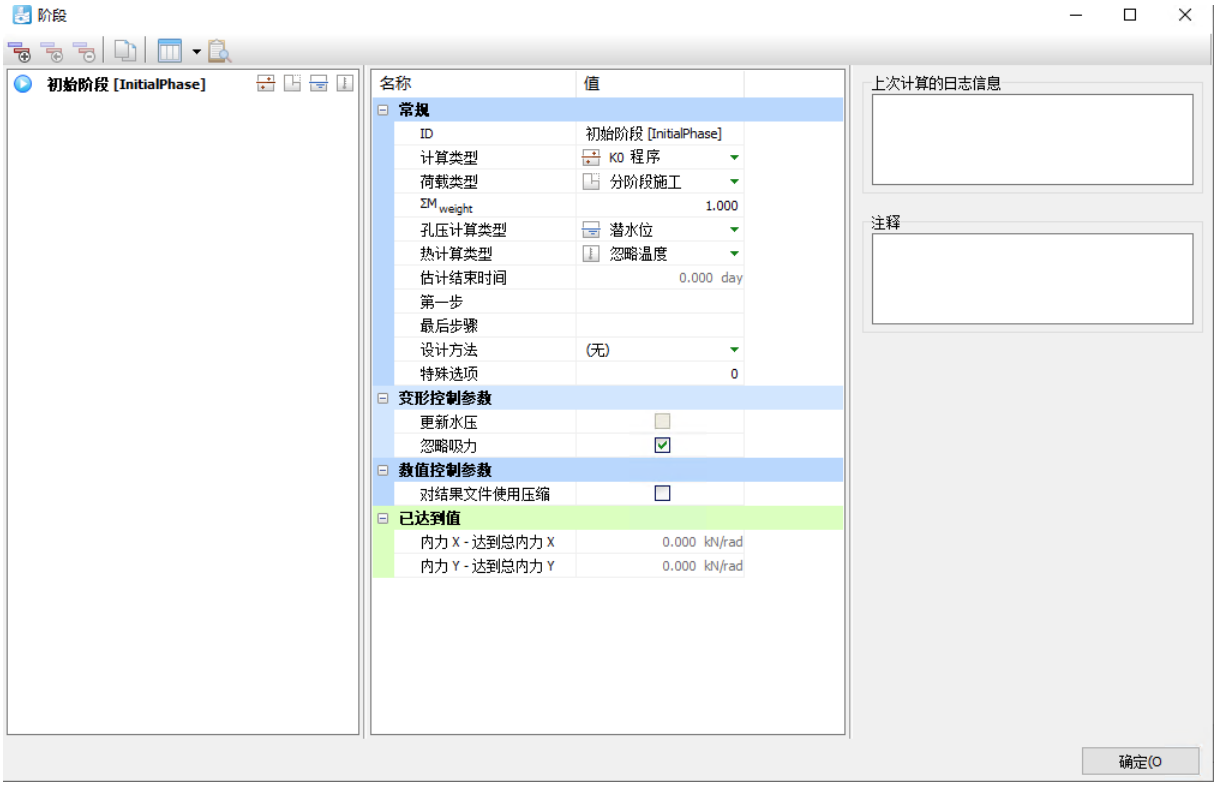


图 13: 阶段窗口 - 初始阶段

3. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
4. 在**模型浏览器**中，展开**模型条件**子树，如图 14(第 23 页) 所示。

   对于变形问题，存在两种边界条件：指定位移和指定力（荷载）。原则上，所有边界在每个方向上都必须有一个边界条件。也就是说，当某一边界（自由边界）没有明确的边界条件时，自然条件将适用，即指定力等于零和自由位移。

   为了避免几何图形位移未确定的情况，几何图形的某些点必须有指定位移。指定位移的最简单形式是固定（零位移），但也可定义非零指定位移。
5. 展开**变形**子树。
   请注意，缺省情况下，该框处于勾选状态。缺省情况下，在几何图形的基础上生成完全固定，而将滚柱支座分配至垂直边界（**边界 X 最小值**和**边界 X 最大值**通常是固定的，**边界 Y 最小值**完全固定，而**边界 Y 最大值**则为自由）。
6. 展开**水**子树。

   修改土层窗口中已经输入了初始水位。根据在**修改土层**窗口 (BoreholeWaterLevel_1) 中分配至钻孔的**水头**值生成的水位自动分配至**全局水位**。

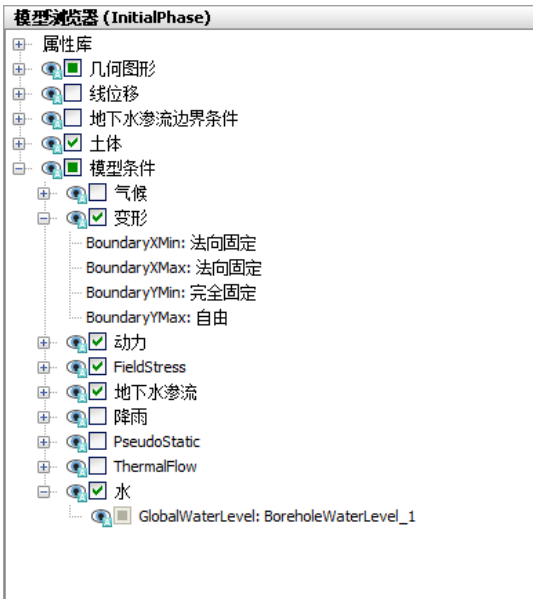


图 14: 显示模型条件和变形的模型浏览器

模型浏览器窗口中显示了根据钻孔指定**水头**而定义的水位。请注意，两个**阶段定义**模式中均只显示全局水位。仅在**水流条件模式**下，模型才显示所有水位。

项目初始阶段中的模型几何图形如图 15 (第 23 页) 所示。

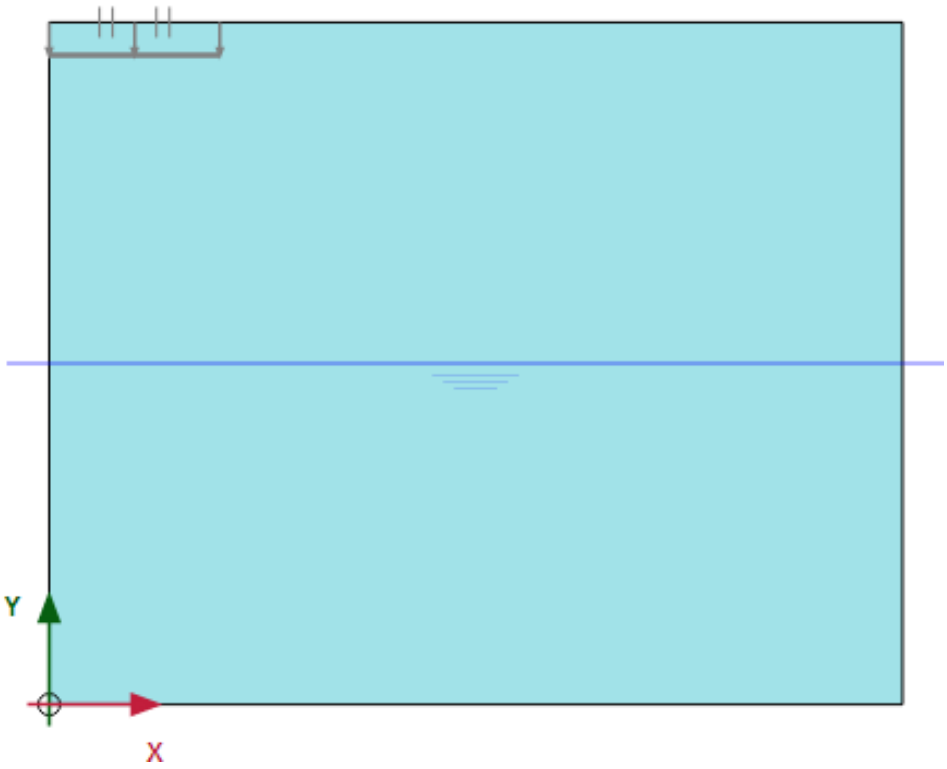


*图 15: **分阶段施工**模式中的初始阶段*

接下来，定义承台沉降的计算阶段。

第 1 阶段：承台

为了在此分析中模拟承台沉降，需要进行塑性计算。PLAXIS 2D 有一个方便的自动阶跃荷载程序，称为“荷载提升”。此程序可用于大多数实际应用。在塑性计算中，激活指定位移来模拟承台的凹陷。为了定义计算阶段，请遵循以下步骤：

1. 在**阶段浏览器**中单击**添加阶段**按钮 。
   一个名为 Phase_1 的新阶段将被添加至**阶段浏览器**。
2. 双击 **Phase_1**，打开**阶段**窗口。在**常规**部分的 **ID** 框中，为新阶段写入（可选）适当的名称（如凹陷）。

   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，如图 16(第 24 页) 所示。

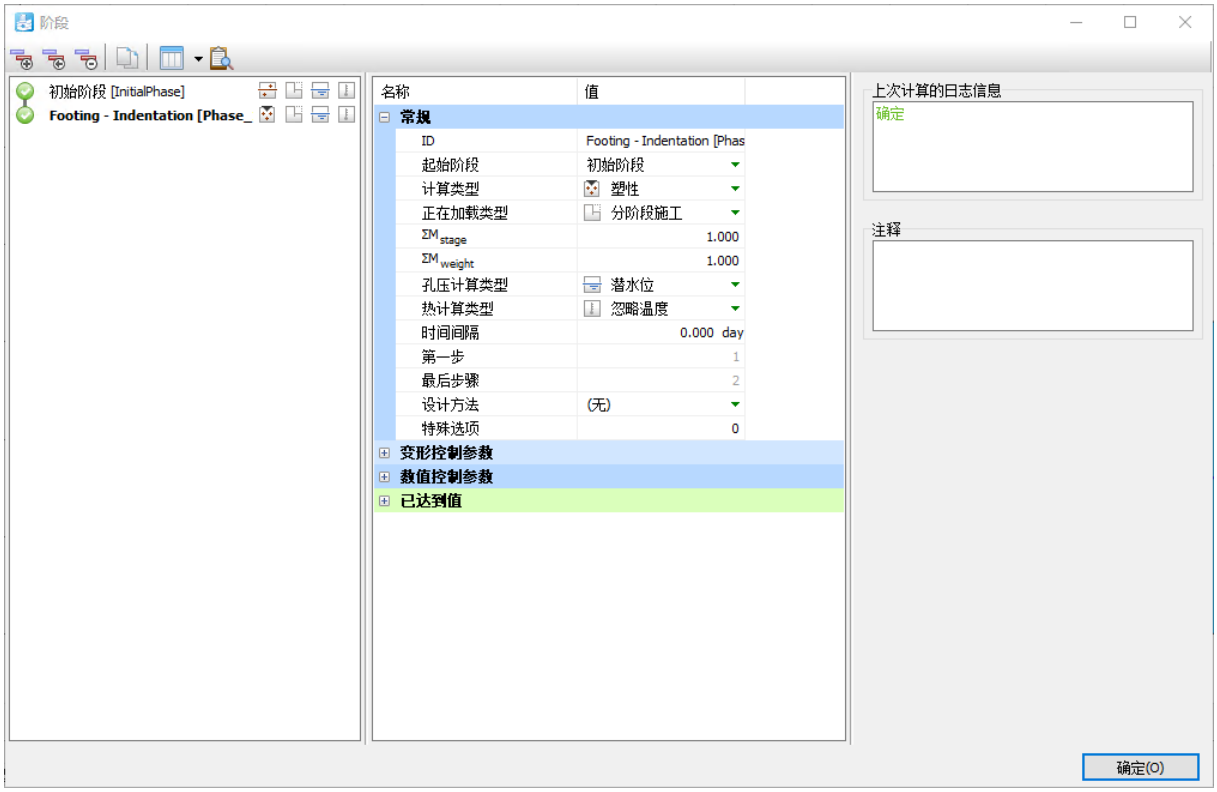


*图 16: “凹陷”阶段的**阶段**窗口*

3. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
4. 单击**分阶段施工**选项卡，进入相应模式。
5. 在绘图区域右键单击指定位移，然后在出现的菜单中选择**激活**选项，如图 17(第 25 页) 所示。

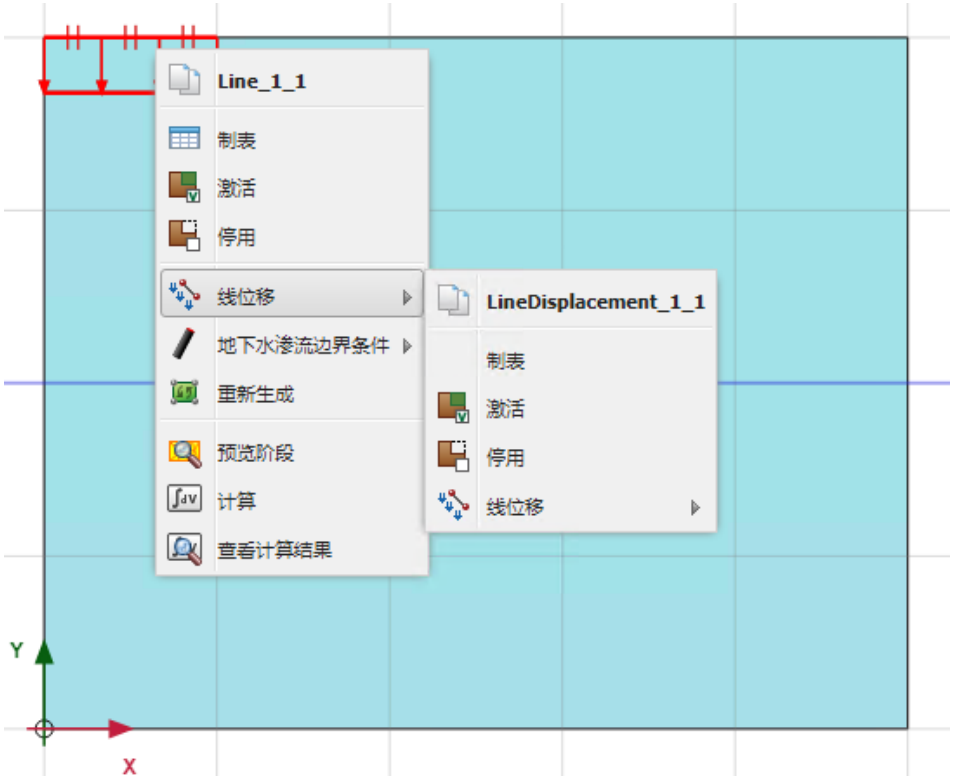


*图 17: 在**分阶段施工**模式下激活指定位移*

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。

执行计算

已为计算标记两个计算阶段，如蓝色箭头所示。执行顺序由**起始阶段**参数控制。

1. 单击**计算**按钮开启计算过程。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，给出有关实际计算阶段进度的信息，如图 18(第 26 页) 所示。



图 18: 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。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。

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。

2. 在查看结果之前，单击**保存**按钮保存项目。

一旦计算完成，结果将显示在**输出**程序中。

查看计算结果

在**输出**程序中，可以查看完整二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。若要检查 0.05 m 指定位移所产生的外施荷载：

1. 打开**阶段**窗口。
2. 从**已达到值**子树中查找当前应用的重要值 **Force-Y**。这个值代表了与施加的指定垂直位移相对应的反作用力，它相当于承台 1.0 弧度下的总力（请注意，分析是轴对称的）。为得到总承台力，**Force-Y** 的值应乘以 2π（得出的值约为 588 kN）。

   结果可以在“输出”程序中进行评估。在**输出**窗口中，您可以查看完整几何形状、横截面和结构单元中的位移和应力（若适用）。

   计算结果也以表格形式提供。若要查看承台分析结果，请遵循以下步骤：
3. 在**阶段**浏览器中选择最后一个计算阶段。
4. 单击侧工具栏中的**查看计算结果**按钮。

   于是，**输出**程序启动，显示计算阶段结束时变形的网格，如 图 19(第 27 页) 所示：

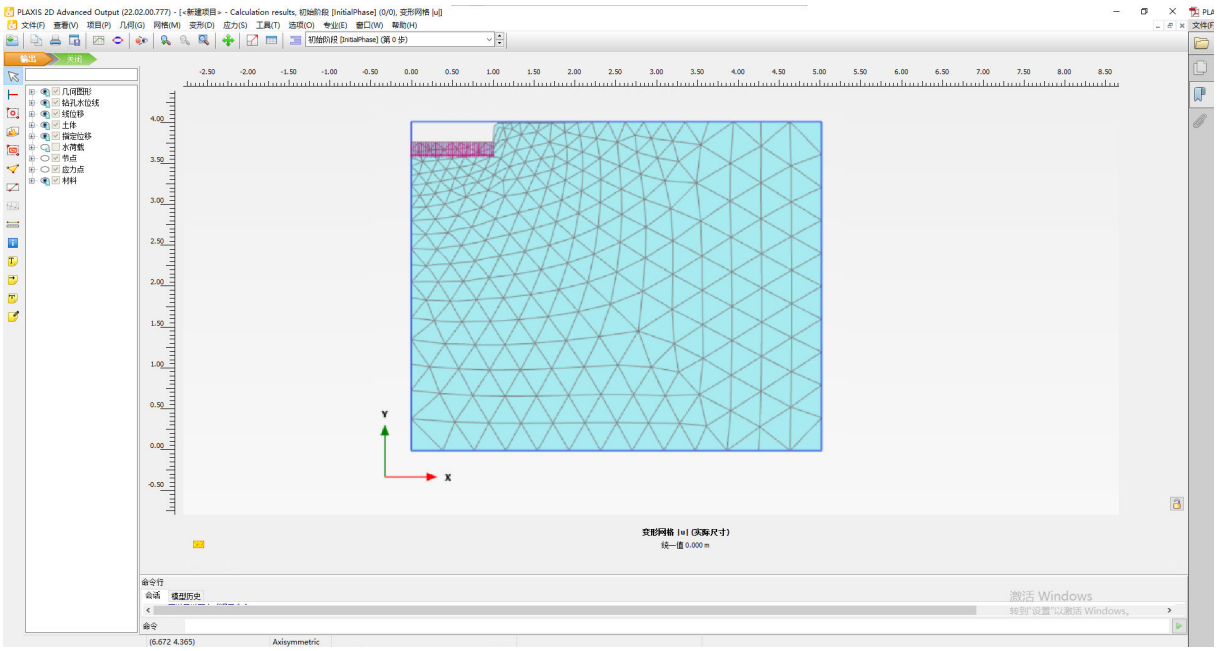


图 19: 变形网格

缩放变形网格，以确保变形可见。

5. 选择菜单**变形** > **总位移** > **|u|**。

   图中显示了总位移的着色阴影。图右手边的图例中显示了颜色分布。

   注释: 在**查看**菜单中单击相应的选项，可打开或关闭图例。

6. 在工具栏中单击等值线按钮，可在等值线中显示总位移分布。
   该图显示了总位移的等高线，并带有标记。索引显示的是与标签相对应的位移值。
7. 单击**箭头**按钮。
   该图以箭头的形式显示了所有节点的总位移，指示了它们的相对量。
8. 单击菜单**应力** > **主有效应力** > **有效主应力**。

   该图显示了每种土体单元应力点上的有效主应力，指示了它们的方向和相对量，如图 20(第 28 页) 所示：

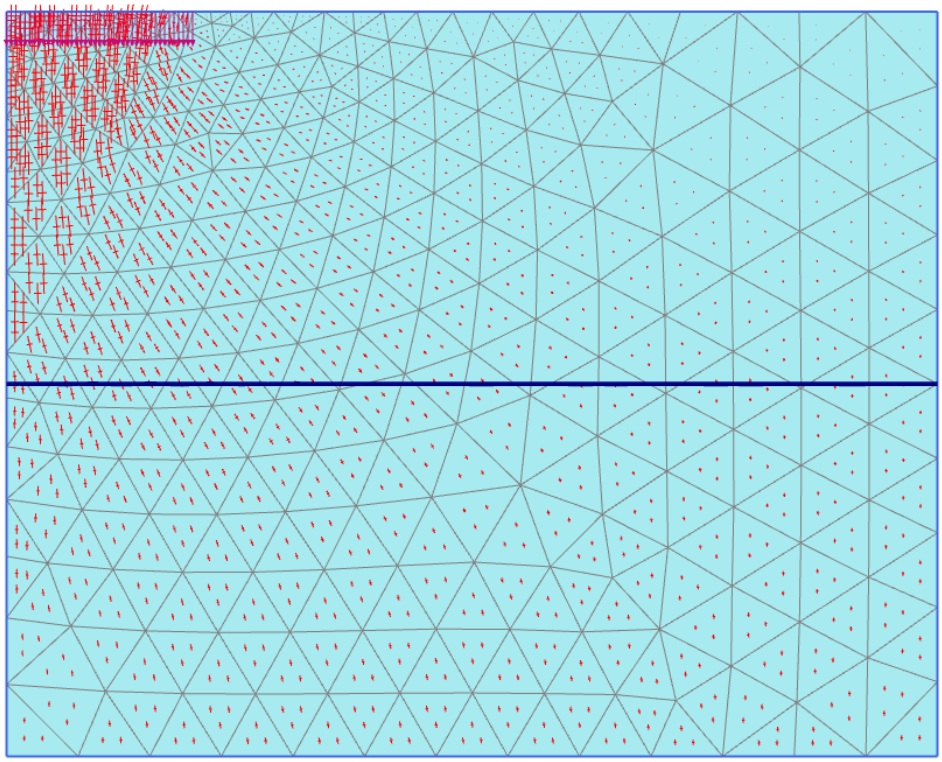


图 20: 有效主应力

9. 单击工具栏上的**表**按钮 。
   这将打开一个新窗口，其中呈现出一个表，显示所有单元每个应力点的主应力值和其他应力度量。

注释:

- 除了总位移，**变形**菜单还支持表示**增量位移**。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最终失效机制可视化。
- 应力图和位移图与**几何图形**菜单中提供的几何要素相结合。

1.3 工况 B：柔性承台

项目已经修改为将承台建模为柔性板。因此可以计算承台中的结构内力。此练习中使用的几何图形与前一个相同，不同之处在于，使用了其他单元对承台进行建模。此计算本身是基于荷载的应用，而不是指定的位移。不需要创建新模型；可以从之前的模型开始，仅需对其进行修改并存储为其他名称即可。要进行此操作，请执行以下步骤：

1.3.1 修改几何图形

1. 在输入程序中，选择**文件** > **项目另存为**菜单。为当前项目文件输入一个不存在的名称，然后单击**保存**按钮。

2. 返回到**结构模式**。单击**选择**按钮确保您处于选择模式。
3. 在指定的位移上右键单击，然后选择**线位移** > **删除**，如图 21(第 29 页) 所示。

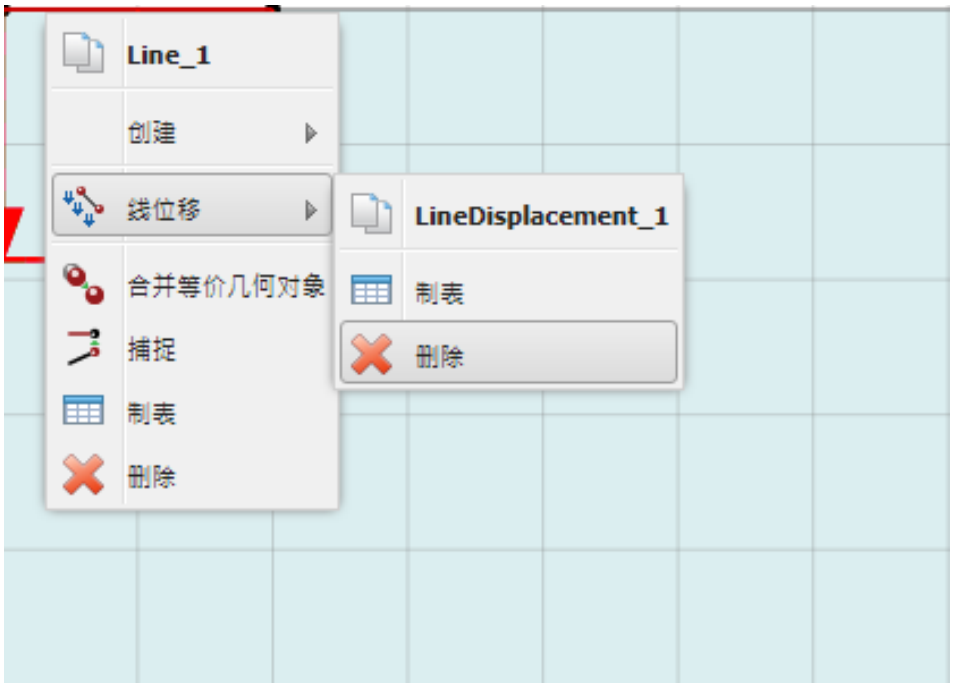


图 21: 删除线位移选项

4. 在模型中承台位置的线上右键单击。选择**创建** > **创建板**，如图 22(第 29 页) 所示。

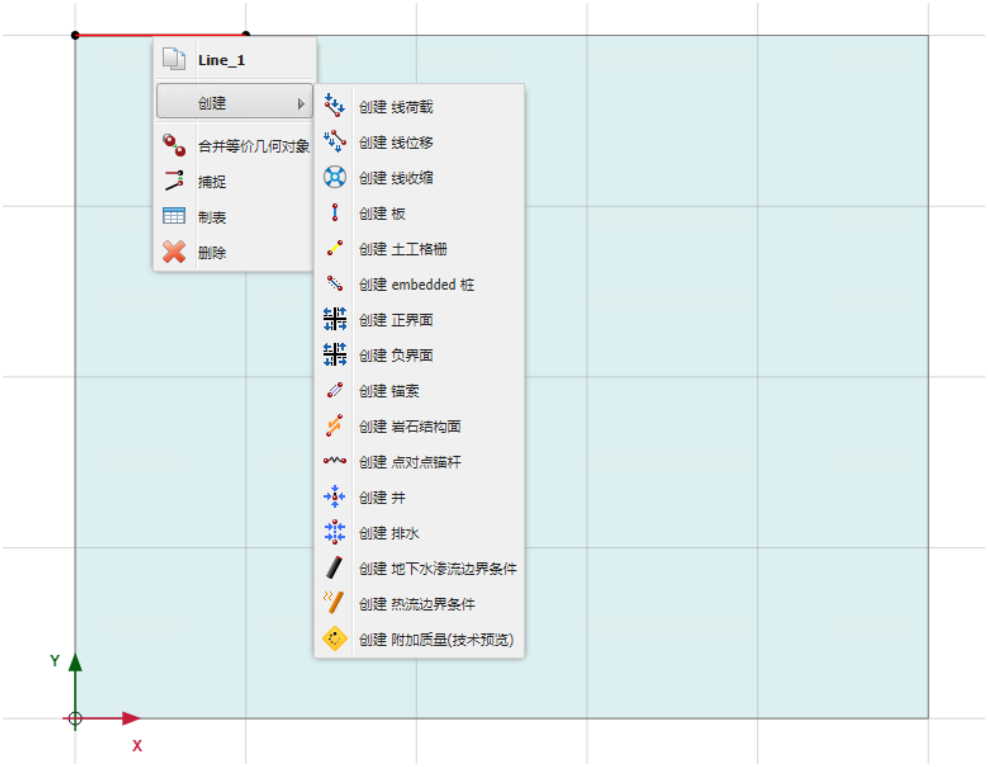


图 22: 创建板选项

将创建一个模拟柔性承台的板。

5. 在模型中承台位置的线上再次右键单击，然后选择**创建** > **创建线荷载**，如图 23(第 30 页)所示。

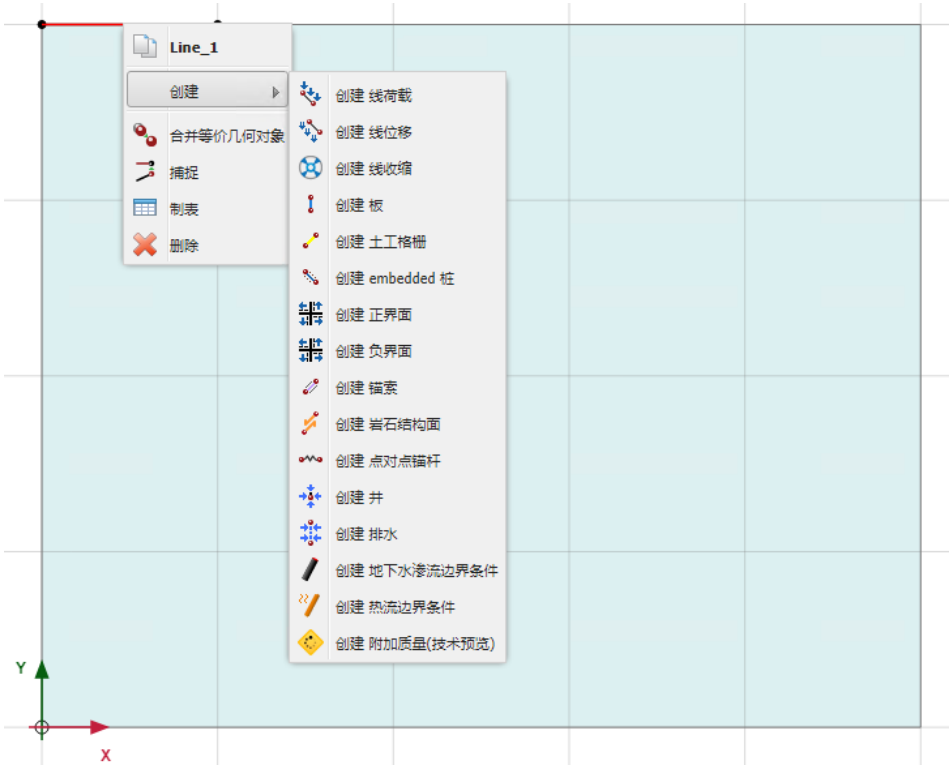


图 23: 创建线荷载选项

6. 在**选择浏览器**中，分散荷载的缺省输入值为 y 方向 -1.0 kN/m^2。输入值稍后将在荷载激活时更改为实际值。

1.3.2 为承台添加材料属性

柔性承台的材料属性如下所示：

表 2: 承台的材料属性

参数	名称	值	单位
常规			
材料类型	-	弹性	-
单位重量	W	0.0	kN/m/m
防止冲孔	-	否	

力学			
各向同性	-	是	-

力学			
轴向刚度	EA_1	$5 \cdot 10^{6}$	kN/m
弯曲刚度	EI	$8.5 \cdot 10^{3}$	kNm^2/m
泊松比	ν	0.0	-

1. 单击侧面工具栏中的**材料**按钮。
2. 在**材料集**窗口中，从**材料集类型**下拉菜单中选择**板**。
3. 单击**新建**按钮。
   将出现一个新窗口，可以在其中输入承台属性。
4. 在**标识**框中键入承台。缺省情况下，材料类型选择**弹性**选项。在本示例中保留此选项。
5. 输入表 2 (第 30 页)中列出的属性。表中未提到的参数保持缺省值。
6. **注释:** 等效厚度由 EA 和 EI 值自动计算 PLAXIS 2D。不可手动定义。

   单击**确定**。

   新数据集当前显示在**材料集**窗口的树视图中。
7. 将名为承台的集拖动到绘图区域，并在承台上方将其释放。请注意，光标的形状将改变，以指示放置材料集有效。

   注释: 如果**材料集**窗口显示在承台上方并将其隐藏，请单击其标题并将其拖动到其他位置。
8. 单击**确定**关闭材料数据集。

1.3.3 生成网格

要生成网格，请遵循以下步骤：

1. 进入**网格模式**。
2. 在边栏中单击**生成网格**按钮。对于**单元分布**参数，请使用**中等**选项（缺省）。
3. 单击**查看网格**按钮，查看网格。
4. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

注释: 重新生成网格会导致节点和应力点的重新分布。

1.3.4 计算

1. 进入**分阶段施工模式**。
2. 让初始阶段保持原样。初始阶段与前一案例中的相同。
3. 双击后续阶段 (Phase_1)，并输入适当的阶段 ID 名称。将**计算类型**设为**塑性**，将**荷载类型**设为**分阶段施工**。
4. 关闭**阶段**窗口。
5. 在**分阶段施工模式**模式下，激活荷载和板。

模型如图 24(第 32 页) 所示：

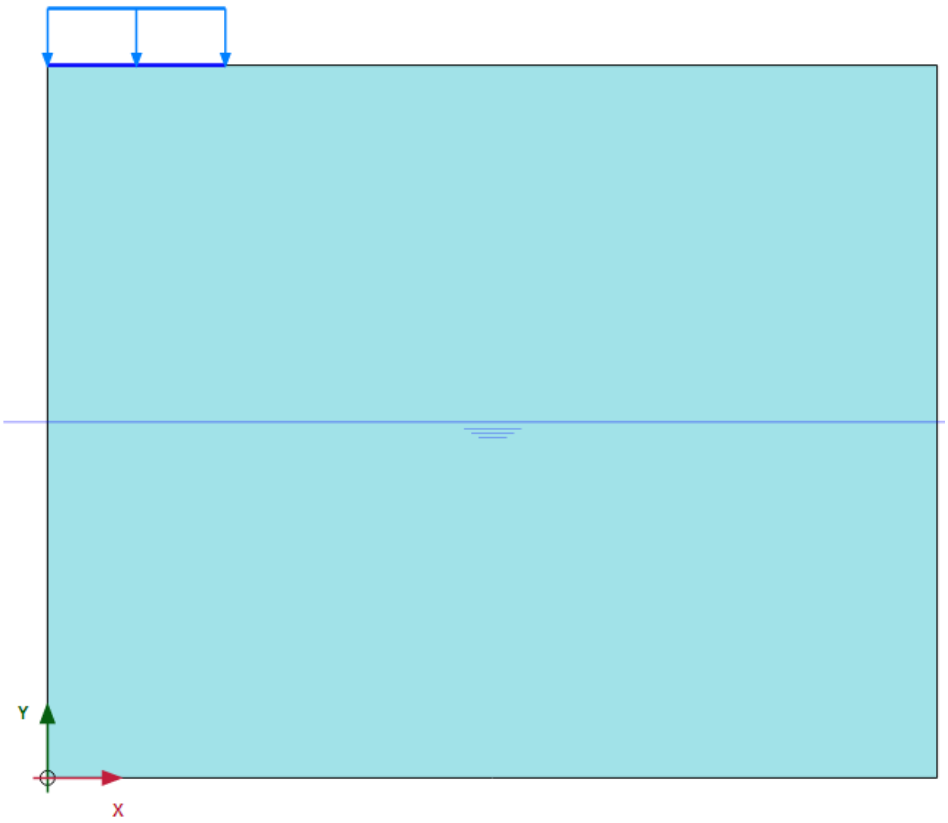


图 24: 在模型中激活板和荷载

6. 在**选择浏览器**（如图 25(第 32 页) 所示）中，将 -188 kN/m^2 分配至线荷载的垂直分量。请注意，这给出了总荷载，大致等于从本教程第一部分中获得的承台力。(188 kN/m^2 · π ·(1.0 m)^2 ≈ 590 kN).



*图 25: 在**选择浏览器**中定义荷载分量*

7. **水流条件**页面中无需任何更改。
   计算定义已完成。在开始计算之前，建议选择节点或应力点，以便后期生成荷载-位移曲线或应力和应变图。要进行此操作，请执行以下步骤：
8. 单击侧工具栏中的**选择曲线的点**按钮。
   其结果是，所有节点和应力点都显示在"输出"程序的模型里。可通过直接点击这些点或使用**选择点**窗口中可用的选项来选择它们。
9. 在**选择点**窗口中，输入相关点的坐标 (0.0 4.0)，然后单击**查找最近的点**。
   然后会列出该特定位置附近的节点和应力点。

10. 勾选节点前面的框，选择正好位于 (0.0 4.0) 的节点。当选中**网格**菜单中的**选择标签**选项时，选定节点用模型中的**节点 4***表示。

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。若要通过单击来选择所需节点，使用工具栏上的**放大**选项 来放大相关区域可能会很方便。

11. 单击左上角的**更新**按钮，返回至“输入”程序。
12. 检查两个计算阶段是否都用蓝色箭头标记，以用于计算。如果不是，请单击计算阶段的符号，或者右击并从弹出式菜单中选择**计算标记**。
13. 单击**计算**按钮 开始计算。
14. 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

1. 计算完成后，可单击**查看计算结果**按钮查看最终计算步骤的结果。选择感兴趣的绘图。位移和应力应与练习的第一部分获得的位移和应力相似。
2. 单击侧工具栏中的**选择结构**按钮，然后双击承台。
   将打开一个新窗口，其中可以绘制承台的位移或弯矩（取决于第一个窗口中的绘图类型）。
3. 请注意，菜单已更改。从**力**菜单中选择各种选项来查看承台中的力。

注释: 在输出程序中可以同时打开多个（子）窗口。所有窗口都在**窗口**菜单的列表中显示。 PLAXIS 2D 应遵循 Windows 标准来表示子窗口（**叠铺**、**平铺**、**最小化**、**最大化**等）。

1.3.6 生成荷载-位移曲线

除最终计算步骤的结果外，查看荷载-位移曲线通常很有用。要生成荷载-位移曲线，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**曲线管理器**窗口。
2. 在**图表**标签页中，单击**新建**。

   此时将弹出**曲线生成**窗口，如图 26(第 34 页) 所示。

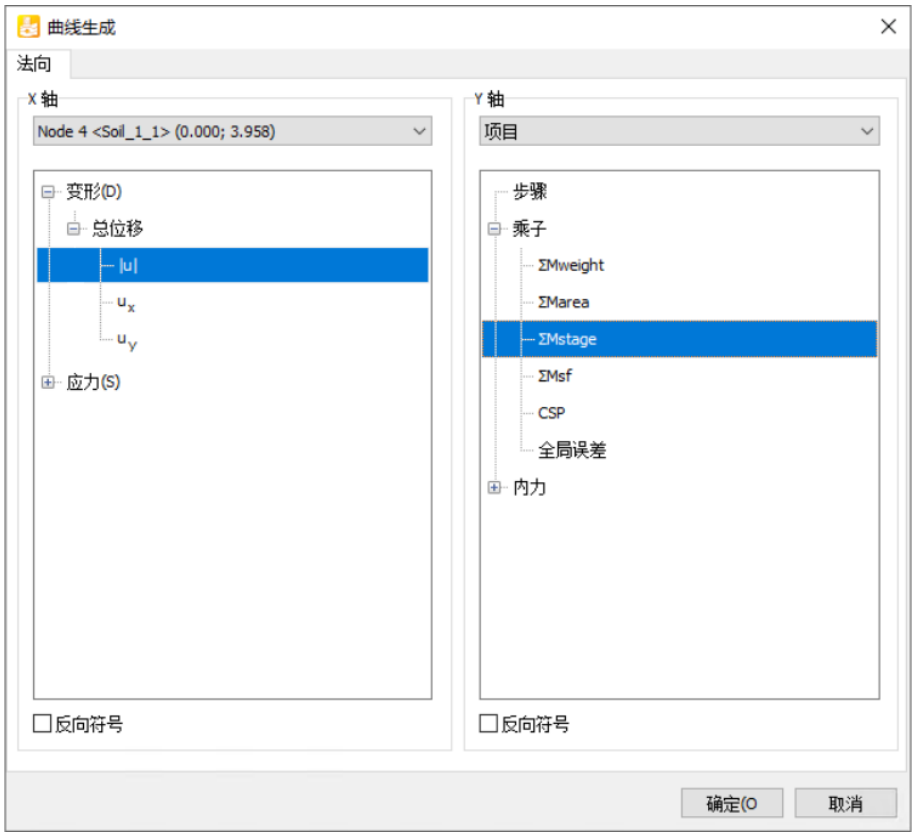


*图 26: **曲线生成**窗口*

3. 对于 x 轴，从下拉菜单中选择**节点 4*(0.00 / 4.00)**。选择**位移** > **总位移** > **|u|**。
4. 对于 y 轴，从下拉菜单中选择项目选项。选择**乘子** > **ΣMstage** 选项。ΣMstage 是已应用的指定变更的比例。因此，该值的范围为 0 到 1，这意味着应用了 100% 的指定荷载，并且完全达到了规定的极限状态。
5. 单击**确定**接受输入并生成荷载-位移曲线。
   因此，绘制的曲线如图 27(第 34 页) 所示：

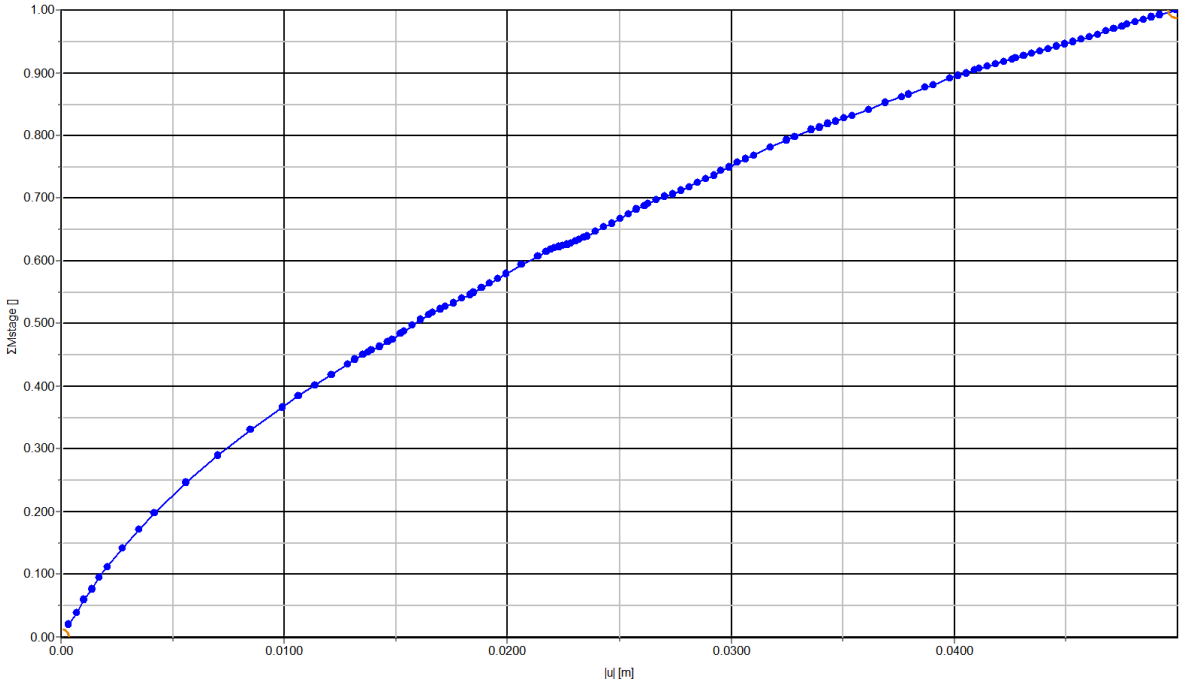


图 27: 承台荷载-位移曲线

注释:

可以通过以下方式重新进入**设置**窗口（在出现错误、需要重新生成或修改的情况下）：

- 双击图表图例中的曲线，或
- 选择菜单**格式** > **设置**。

图表的属性可以在**图表**标签页中修改，而属性曲线可以在相应的标签页中修改。

2 路堤排水和不排水稳定性

本章模拟黏土上的路堤施工。首先将黏土视为排水材料，之后将其视为不排水材料。确定这两种情况下的安全系数。例如，这将表明路堤的长期和短期稳定性。

目标：

- 对**排水**和**不排水**土体行为进行建模。
- 在计算过程中改变材料集。
- 计算安全系数。

几何图形

图 28(第 36 页) 显示了路堤的布局。该路堤高 4 米，堤顶宽 2 米。在这个示例中，地下水水位刚好低于地面，但为了简化问题，将把地下水水位定义在地面水平。

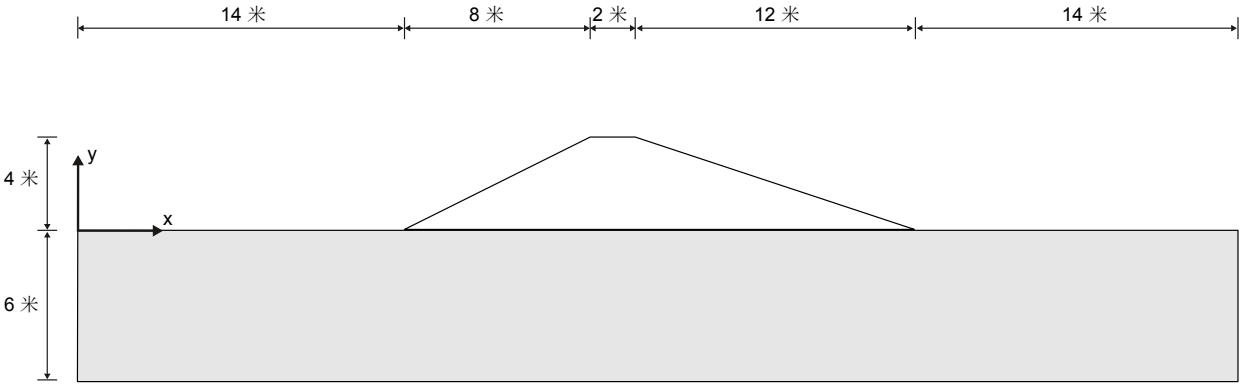


图 28: 工程几何图形

2.1 创建新项目

要创建新项目，请执行以下步骤：

1. 启动输入程序，然后从**快速启动**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. 在**模型**页面中，保留**模型**（**平面应变**）和**单元**（**15 节点**）的缺省选项。
4. 将模型尺寸设置为：x_{min} = 0 米，x_{max} = 50 米，y_{min} = -6 米，以及 y_{max} = 4 米。
5. 保留单位、常量和常规参数的缺省值，然后单击**确定**关闭**项目属性**窗口。

2.2 定义土壤地层学

下层土剖面由单个黏土层组成，一直延伸到较大深度。由于我们只讨论路堤的稳定性，因此在非常大的深度之前，无需对黏土层建模；该模型必须足够深，以支持形成失效机制。请注意，进行变形分析可能需要较深的模型，因为路堤施工引起的变形仍将在相当深的位置发生。

要定义土壤地层学，请执行以下操作：

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 x = 0 处创建钻孔。
   此时将弹出**修改土层**窗口，如图 29(第 37 页) 所示。
2. 从**顶部** = 0 到**底部** = -6 **添加**单个土层。
3. 保持该钻孔的**水头**为 0。因此，地下水位与地面重合。

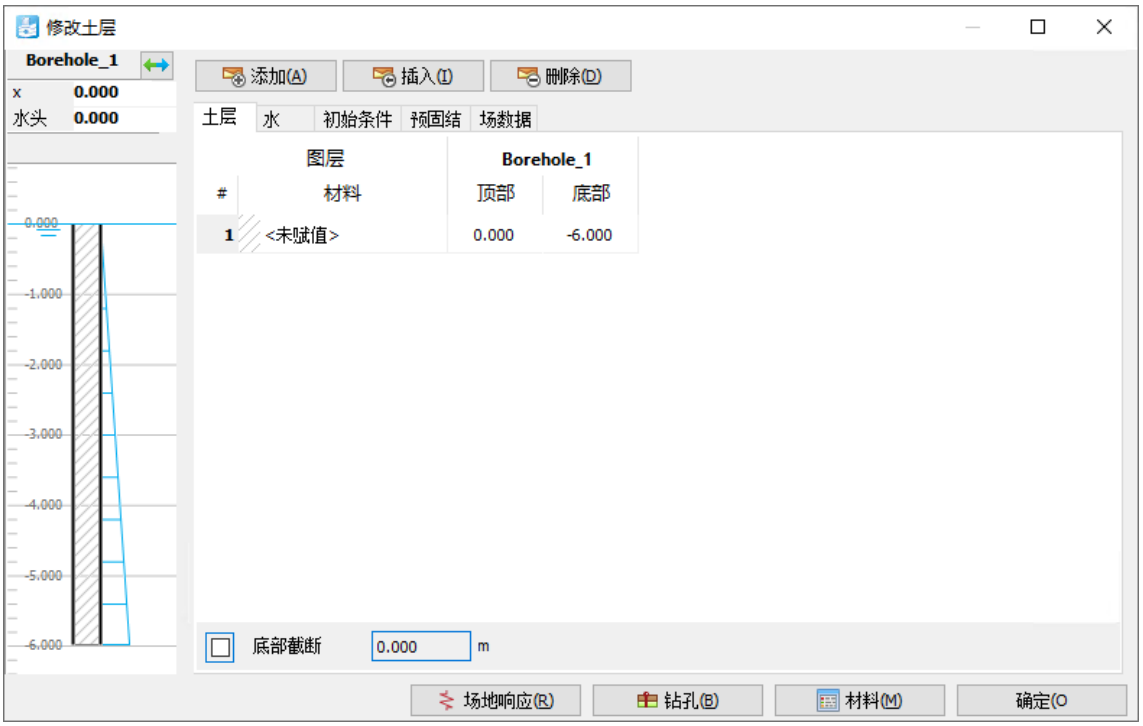


*图 29: **修改土层**窗口中的土壤地层学*

2.3 创建和分配材料数据集

必须为此项目定义 三 个材料集。一种材料代表用于路堤施工的砂土，另外两种材料代表下层土：一个排水材料集和一个不排水材料集，表示长期和短期条件下的黏土。

表 3: 土层的材料属性

参数	名称	路堤	黏土层	单位
常规				
土体模型	-	硬化土体	硬化土体	-

参数	名称	路堤	黏土层	单位
常规				
材料行为类型	-	排水	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	16	13	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	16	13	kN/m^3
力学				
标准排水三轴试验中的割线刚度	E_{50}^{ref}	$15{\cdot}10^3$	5,600	kN/m^2
主固结仪荷载的切线刚度	E_{oed}^{ref}	$15{\cdot}10^3$	5,000	kN/m^2
卸载/重新装载刚度	E_{ur}^{ref}	$45{\cdot}10^3$	$20{\cdot}10^3$	kN/m^2
刚度应力水平依赖性的功率	m	0.5	1.0	-
粘聚力	c'_{ref}	3	10	kN/m^2
摩擦角	φ'	30	25	度
初始				
K_0-确定	-	自动	自动	-
超固结比	OCR	1.0	1.2	-

1. 选择**显示材料**按钮，将显示**材料集**窗口。
2. 使用**新建**按钮定义表 3(第 37 页)中定义的两个材料集。
3. 要为黏土层创建不排水材料集，请在**材料集**窗口中选择排水材料，然后单击**复制**按钮复制材料集。在已复制的材料集中，更改名称并将**排水类型**设置为**不排水 (A)**。
4. 为下层土指定表示排水的黏土的材料集。

2.4 创建路堤

要创建路堤，请定义表示该路堤的土体多边形，然后为其指定材料属性。

1. 进入**结构模式**。
2. 从工具边栏中选择**创建土体多边形**选项，然后从显示的小弹出按钮菜单中再次选择**创建土体多边形**选项。
3. 现在绘制从 (x y) = (14 0) 到 (22 4)，(24 4) 最后到 (36 0) 的多边形。
4. 然后为多边形指定路堤材料。可以打开**材料集**窗口，然后将材料集拖放到多边形上，或者选择多边形，然后在**选择浏览器**中将土体多边形的**材料**选项设置为路堤材料。

2.5 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 单击**生成网格**按钮 以生成网格。
   将显示**网格选项**窗口。
3. 在**单元分布**列表中选择**精细**选项并生成网格。
4. 单击**查看网格**按钮 ，以查看网格，生成的网格如图 30(第 39 页) 所示。

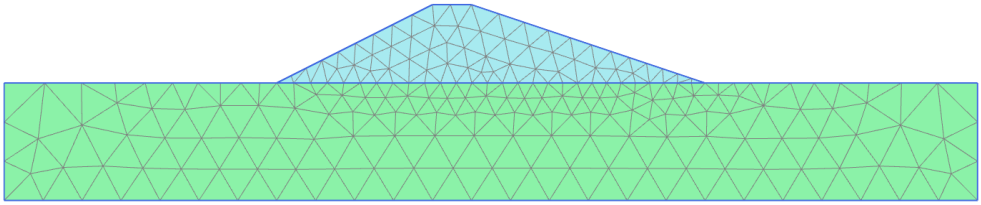


图 30: 生成的网格

5. 在输出程序左上部选择**关闭**按钮，关闭网格视图。

2.6 定义并执行计算

由于我们只关注稳定性，因此这里的路堤建造是在一个阶段中完成的。注意，在沉降预测中，最好将路堤建造分为多个阶段，如有必要，在阶段之间加入固结阶段。路堤建造要在排水和不排水下层土上进行，因此必须确定三个计算阶段：初始阶段和两个施工阶段。

2.6.1 初始阶段：初始条件

在初始条件下，路堤尚不存在。由于下层土只有 1 层水平地面，**K0 过程**可以用来生成初始应力。由于这是缺省选项，不需要对初始阶段进行修改。初始阶段中的模型几何图形如图 31 (第 39 页) 所示。

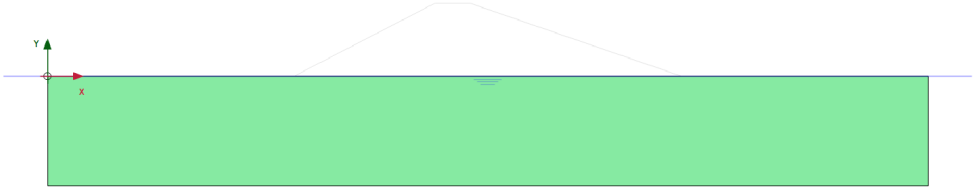


图 31: 初始阶段的配置

2.6.2 第 1 阶段：在排水下层土上进行路堤施工

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
   在该新阶段，**计算类型** > **塑性**分析和**荷载类型** > **分阶段施工**用作缺省设置。
2. 右键单击路堤，然后从弹出菜单中选择**激活**选项，激活代表路堤的土体。第 1 阶段的模型如图 32 (第 40 页) 所示。

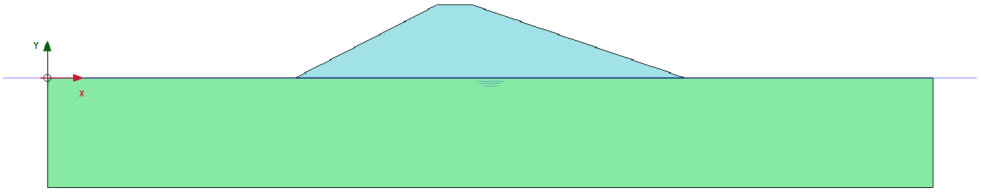


图 32: 第 1 阶段的配置

2.6.3 第 2 阶段：在不排水下层土上进行路堤施工

在此计算阶段，在假定地基不排水行为的情况下，建造相同的路堤。这意味着必须更改下层土材料集，但施工阶段必须从初始阶段开始，因为这是第 1 阶段的替代计算，而不是第 1 阶段的继续。

1. 在**阶段浏览器**中选择**初始阶段**，然后使用**添加阶段**按钮创建新阶段。
   由于初始阶段是选定的阶段，因此新创建的阶段 2 将从初始阶段开始。如果出现错误，即第 2 阶段从第 1 阶段开始，可以在**选择浏览器**中双击**第 2 阶段**，打开**阶段**窗口进行更改。在**常规**部分中，将**起始阶段**选项设置为初始阶段，然后再次关闭**阶段**窗口。
2. 现在，下层土的土体特性必须通过指定下层土为不排水材料来更改为不排水。有几种方式可以进行此操作：

   从导航边栏中选择**显示材料**按钮。从打开的**材料集**窗口中，将不排水黏土的材料集拖放到下层土上。

   或者

   右键单击下层土，然后从打开的弹出菜单中连续选择**土体 (**) > **土体 (**) > **设置材料**选项，最后指定表示不排水下层土的材料。

   或者

   选择下层土，然后在**选择浏览器**中更改**土体**对象下表示不排水下层土材料的**材料**。
3. 最后，激活路堤。第 2 阶段的模型如图 33(第 40 页) 所示。

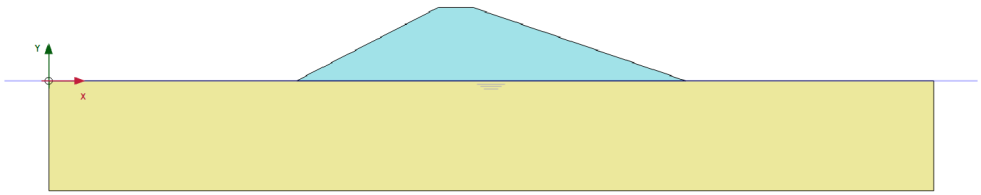


图 33: 第 2 阶段的配置

2.6.4 计算

建议在开始计算之前选择一些节点或应力点，用以稍后在例如荷载-位移或应力-应变曲线中评估结果。在此项目中，将选择一个位于左侧边坡中间的点，用以稍后评估安全系数。

1. 在导航边栏中单击**为曲线选择点**按钮。
2. 在左侧边坡的中间位置选择一个**节点**，即 (x y) = (18 2) 附近。
3. 单击左上部的**更新**按钮，关闭输出程序并存储所选点。
4. 单击**计算**按钮开始计算。

2.7 结果

1. 完成计算后，选择第一阶段并单击**查看计算结果**按钮。
   将打开输出程序，显示在排水下层土上路堤施工后的变形网格。
2. 从顶部的**显示的步骤**下拉列表中进行选择，以查看第 2 阶段的结果。现在将显示在不排水下层土上路堤施工后的变形网格。

   图 34(第 41 页) 显示了两个阶段的变形网格。对于排水下层土，路堤沉降发生在各处，但对于不排水下层土，路堤沉降在中间，但在突趾附近隆起。这是完全合理的：下层土现在不排水，因此体积不会发生变化。因此，如果由于路堤的重量，下层土在中间沉降，则其必须在其他部位（通常紧邻路堤）隆起。

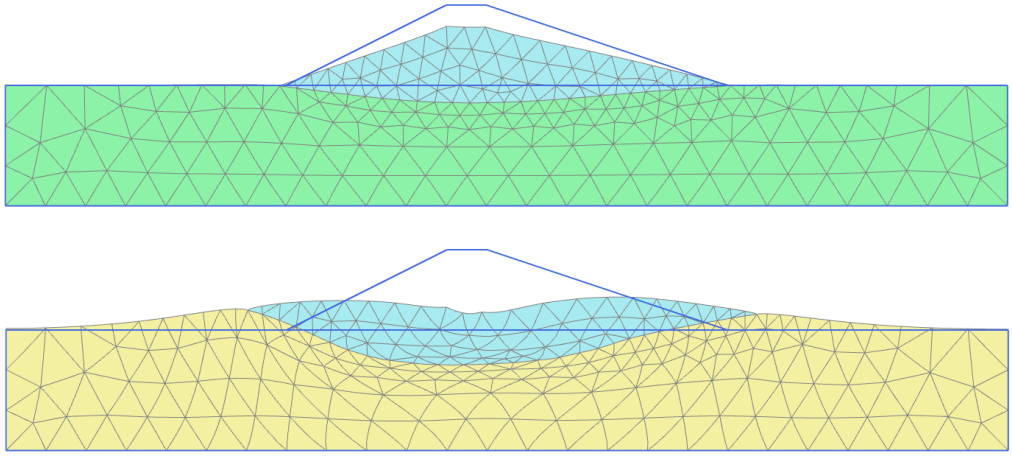


图 34: 第 1 阶段（顶部）和第 2 阶段（底部）后的变形网格

   还可以看出，在下层土不排水的情况下，路堤似乎加宽，导致路堤顶部出现较大沉降。此情况并非明显可见，在进行安全系数分析后将对其进行更详细的讨论。
3. 从**应力**菜单中选择 **孔压**选项，然后选择 $\mathbf{p_{excess}}$。将显示由于下层土不排水荷载而产生的超孔隙压力。缺省情况下，孔隙压力显示为 iso 阴影，但通过顶部水平按钮栏中的按钮和，可以看到孔隙压力的主方向，为所有或减少数量的应力点。

图 35(第 42 页) 显示了 由于路堤的施工而产生的超孔隙水压力。最高的超孔隙压力当然位于路堤正下方，但在路堤突趾两侧也会出现一些超孔隙压力。

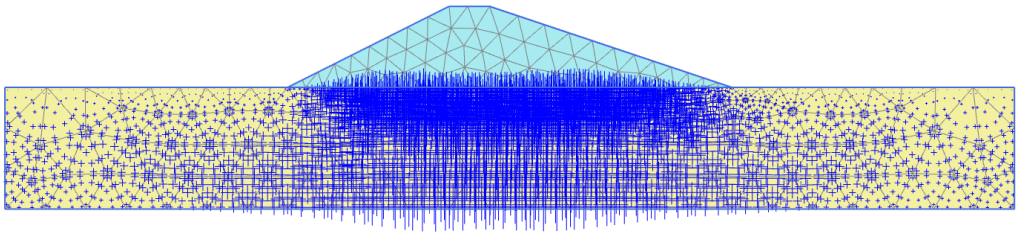


图 35: 不排水下层土施工后的超孔隙压力

4. 查看结果后，关闭输出程序并返回输入程序。

2.8 安全分析

在路堤设计中，不仅要考虑沉降，还要考虑安全系数的稳定性。可以看出，对于在排水和不排水下层土上建造的路堤，其沉降有所不同，因此，要评估两种情况下的全局安全系数。

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。真正的强度与计算得出的平衡所需最低强度（即移动强度）之比是土力学中常用的安全系数。对于采用标准库仑失效条件的土体模型，其安全系数为：

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

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。上述原理是安全方法的基础，可在 PLAXIS 2D 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，多个连续的持续变形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。

注意，对于不使用库伦失效条件的土体模型，强度折减的概念保持不变，但强度参数的折减是针对该土体模型的。

安全性计算选项见**阶段**窗口中**常规**部分的**计算类型**下拉菜单。如果选择了**安全**选项，**参数**页面中的**荷载输入**将自动设置为**增量乘子**，这意味着乘子 ΣMsf 将增量，直至发生失效。**荷载输入**的另一个选项是**目标-ΣMsf**，这意味着乘子 ΣMsf 只会增加到指定的目标值，而不是失效。然而，本文不使用后面的选项。

要计算两种情况下路堤的全局安全系数，遵循以下步骤：

1. 在**阶段**浏览器中选择第 1 阶段。
2. 添加新的计算阶段。

3. 双击新阶段，打开**阶段**窗口。
4. 在**阶段**窗口中，所选择的阶段将在**起始阶段 1** 下拉菜单中自动选中。
5. 在**常规**子树中，从下拉菜单将**计算类型**设置为**安全性**。
6. **增量乘子**选项已在**正在加载输入**框中选中。将第一个控制强度折减过程的乘子增量 **Msf** 设置为 0.1。
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。
8. 现在，已经定义了第一次安全性计算。
9. 遵循相同的步骤创建一个新的计算过程，分析不排水下层土上的路堤施工结束时的稳定性。
10. 单击**计算**按钮开始计算。

显示安全性计算的阶段浏览器窗口如图 36(第 43 页)所示。

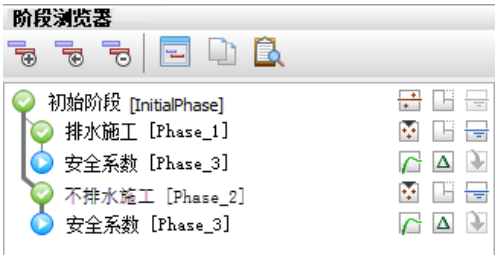


图 36: 显示安全性计算阶段的阶段浏览器

注释:

注意，在**安全性**阶段，**孔压计算类型**下拉菜单中的选项**使用前一阶段的压力**将被自动选择并以灰色显示，表示该选项无法更改。**安全性**计算始终使用与必须计算安全系数的阶段相同的孔压。

注释:

安全性计算中**最大步长**的缺省值是 100。与**分步施工**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 1000。

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。

2.8.1 安全分析结果评估

由于土体强度持续降低，在**安全性**计算过程中会产生额外的位移。得到的总位移没有没有物理意义，因为他们依赖于应用的荷载步长：更多的荷载步长意味着计算将进一步推进失效，从而产生更大的位移，而在现实中，失效的路堤将在有限的变形下重新建立新的平衡。然而，最后一步（失效时）中的增量位移非常有用，因为它们表明了可能的失效机制。增量位移是每荷载增量的位移变化。通常，由于荷载增量较小，该值非常小，但在失效的情况下，失效区域仅需要非常小的荷载变化就能产生较大的位移变化，因此，失效区域有较大的增量位移而模型中其他位置的增量位移应该较小。

要查看排水下层土上的路堤的机制：

1. 选择第 3 阶段，即第 1 阶段后的**安全性**阶段，然后单击**查看计算结果**按钮。
2. 在输出程序中，选择菜单**变形** > **增量位移** > **|Δu|**。

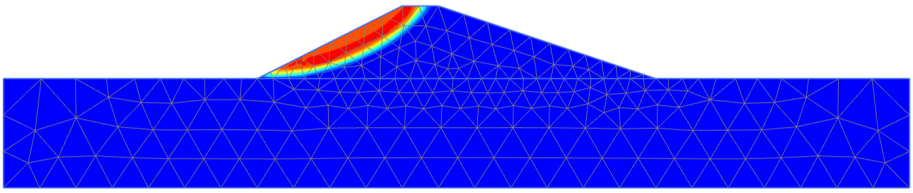


图 37: 位移增量阴影，表明排水施工后最适用的路堤失效机制

所得的图表（如图 37(第 44 页)所示）让人直观看到失效机制。位移增量的量级是不相关的。从结果中可以看出，路堤左侧的斜坡因典型的滑动面而失效。

在工具栏的下拉列表中选择第 4 阶段，评估在不排水下层土上建造的路堤的失效机制。失效机制不再局限于路堤本身，而主要是路堤下的下层土失效。这也解释了之前观察到的路堤基底变宽的现象：路堤下方的土体失效，在水平方向上移动，远离路堤中心，如图 38(第 44 页) 所示。

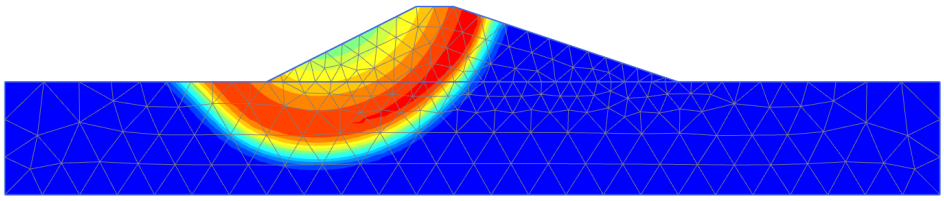


图 38: 位移增量阴影，表明不排水施工后最适用的路堤失效机制

安全系数可在**项目**菜单的**计算信息**选项中获得。**计算信息**窗口中的**乘子**页面代表荷载乘子的实际值。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。

要以这种方式计算三种情况下的安全系数，遵循以下步骤:

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，使用下拉列表中之前选择的 x 轴的**节点**。选择**变形** > **总位移** > **|u|**。
4. Y 轴选择**项目** > **乘子** > **ΣMsf**。该图表中考虑了**安全**阶段。
5. 按**确定**关闭窗口并生成图表。
6. 右键单击图表并在出现的菜单中选择**设置**选项。**设置**窗口弹出。
7. 在对应曲线的页面中单击**阶段**按钮。
8. 在**选择阶段**窗口中，仅选择第 3 阶段，如图 39(第 45 页) 所示：

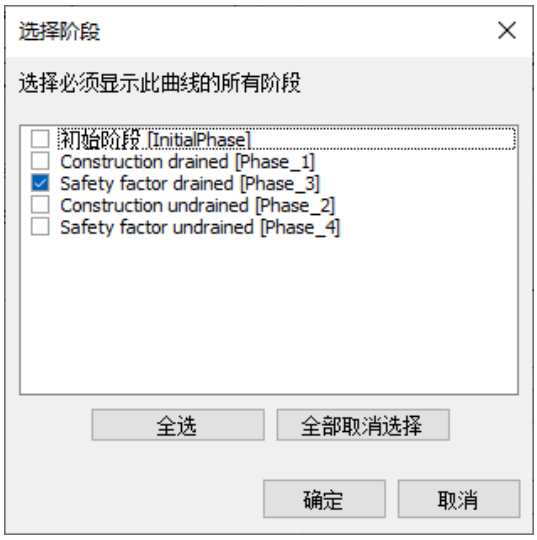


图 39: "选择阶段"窗口

9. 单击**确定**，关闭**选择阶段**窗口。
10. 在**设置**窗口的对应页面中更改曲线标题。
11. 单击**添加曲线**按钮并在出现的菜单中选择**从当前项目**选项。按照第 3 阶段的相同步骤，定义第 4 阶段的曲线。
12. 在**图表**页面中（如图 40(第 45 页) 所示），将 x 轴的缩放设置为**手动**并将**最大**值设置为 0.5：



图 40: "设置"窗口中的"图表"页面

13. 单击**应用**根据所做的更改更新图表，然后单击**确定**，关闭**设置**窗口。
14. 图表如以下图 41(第 46 页) 所示：

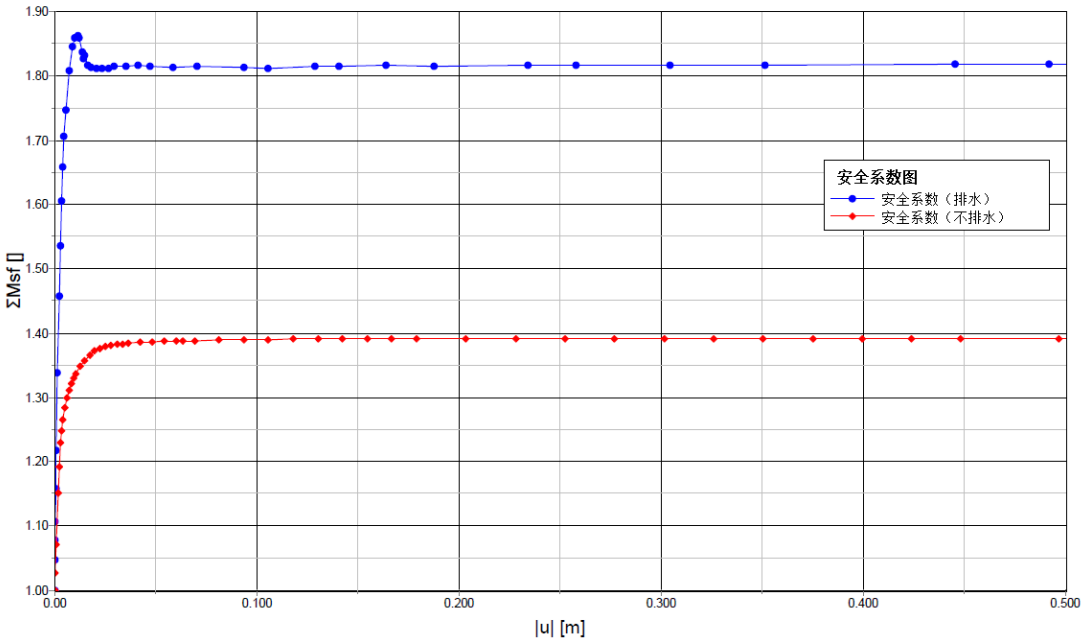


图 41: 安全系数计算

绘制的最大位移是不相关的。可以看出，两条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 的确切值和计算阶段。可以借助后者确定安全系数为 1.8 的上方曲线为第 3 阶段，即排水土体上的路堤。同样，安全系数为 1.4 的下方曲线为第 4 阶段，即不排水土体上的路堤。

3 水下挖掘施工

本教程对使用 PLAXIS 2D 分析水下挖掘施工的方法进行了说明。这里将使用教程 1 中使用的大部分程序功能。此外，还将使用若干新功能，如使用界面和锚单元、生成水压和使用多计算阶段。将对新功能进行详细介绍，而在教程 1 中介绍的功能将不进行详细描述。因此，建议在尝试此练习之前完成教程 1。

目标：

- 使用界面功能模拟土体-结构的交互作用。
- 高级土体模型（软土模型 和 硬化土体模型）。
- **不排水 (A)** 排水类型。
- 定义**锚定杆**。
- 为锚创建并指定材料数据集。
- 挖掘模拟（类组取消激活）。

几何图形

本教程讨论的是靠近河流的挖掘施工。水下挖掘的目的是通过安装预制隧道段来进行隧道施工，这些预制隧道段将“浮置”到挖掘处，然后“沉置”到挖掘处底部。挖掘宽度 30 米，最终深度 20 米，其纵向延伸距离大，可采用平面应变模型。挖掘侧方由 30 米长的地连墙支撑，每隔 5 米由水平支柱支撑。将沿挖掘界面考虑表面荷载。从地连墙 2 米到距墙体 7 米范围施加荷载，量级为 5 $kN/m^2/m$。

下层土上部 20 米由软土层组成，软土层被建模为单一均质黏土层。此黏土层下方是一层更硬的砂土层，并延伸到很大的深度，模型中考虑 30 米砂土层，如图 42(第 47 页) 所示。

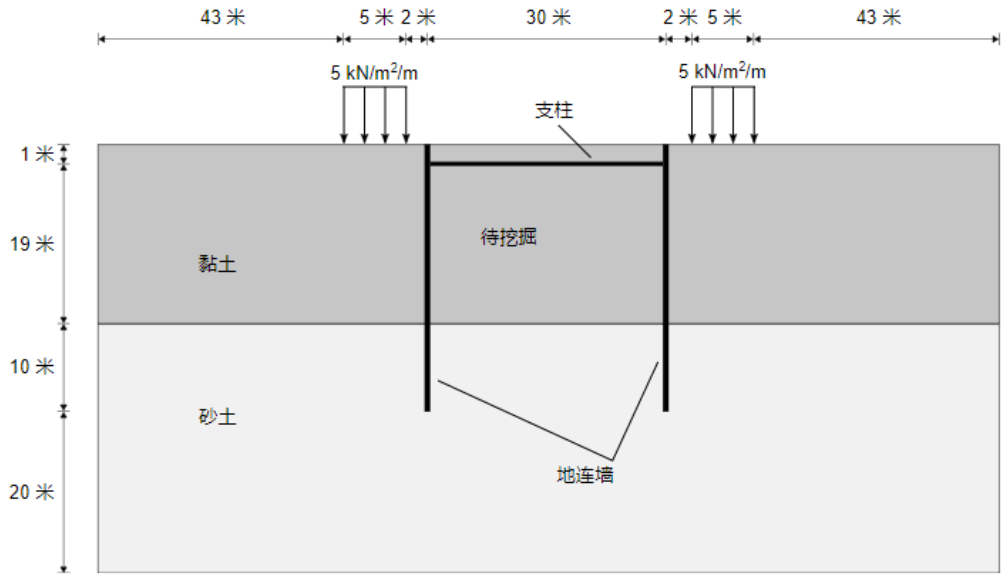


图 42: 水下挖掘情况的几何模型

由于几何图形是对称的，在分析中只考虑其一半（左侧）。在三个不同的挖掘阶段中模拟挖掘过程。将使用板为地连墙建模，如前一个教程中用于承台的板。通过界面在两侧为墙体与土体之间的交互作用建模。与土体中的摩擦相比，界面支持减小墙体摩擦。将支柱建模为弹簧单元，其法向刚度为所需的输入参数。

3.1 创建新项目

1. 双击输入程序图标 ，启动 PLAXIS 2D。
2. 单击**开始新项目**。
3. 在**项目属性**窗口的**项目**页面中，输入相应标题。
4. 在**模型**选项卡中，保留**模型**（平面应变）和**单元**（15 节点）的缺省选项。
5. 将模型**等高线**设置为 x_{min} = 0 米，x_{max} = 65 米，y_{min} = -30 米以及 y_{max} = 20 米。
6. 保留单位和常量的缺省值，然后单击**确定**。

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，可以在此处定义土层。

3.2 定义土壤地层学

要定义土壤地层学，请执行以下操作：

1. 单击**创建钻孔**按钮  并在 x = 0 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 添加上层土层，并将其高度设置为顶层 20 米，底层 0 米。
3. 添加底层土层，并将其高度设置为顶层保留 0 米，底层 -30 米。
4. 将钻孔中的**水头**设置为 18 米。

接下来，定义材料数据集，并分配至土层，参见创建和分配材料数据集(第 48 页)。

3.3 创建和分配材料数据集

需要创建两个数据集，一个用于黏土层，另一个用于砂土层。

土层具有以下属性，如表 4(第 48 页)所示：

表 4: 砂土和黏土层的材料属性和界面

参数	名称	黏土	砂土	单位
常规				
土体模型	模型	硬化土体	硬化土体	-

参数	名称	黏土	砂土	单位
常规				
排水类型	类型	不排水 (A)	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	16	17	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	18	20	kN/m^3
力学				
标准排水三轴试验中的割线刚度	E_{50}^{ref}	$4 \cdot 10^3$	$40 \cdot 10^3$	kN/m^2
主固结仪荷载的切线刚度	E_{oed}^{ref}	$3.3 \cdot 10^3$	$40 \cdot 10^3$	kN/m^2
卸载/重新装载刚度	E_{ur}^{ref}	$12 \cdot 10^3$	$120 \cdot 10^3$	kN/m^2
泊松比	ν_{ur}	0.15	0.2	-
刚度应力水平依赖性的功率	m	1.0	0.5	-
粘聚力（常量）	c'_{ref}	1	0	kN/m^2
摩擦角	φ'	25	32	度
剪胀角	ψ	0	2	度
正常固结 K_0 值	K_0^{nc}	0.5774	0.4701	-
地下水				
数据集	-	标准	标准	-
土体类型	-	粗糙	粗糙	-
请使用缺省值	-	无	无	-
水平方向渗透率	k_x	$1 \cdot 10^{-3}$	1	米/天
垂直方向渗透率	k_y	$1 \cdot 10^{-3}$	1	米/天
界面				
强度定义	-	手动	手动	-
界面折减因子	R_{inter}	0.5	0.67	-
初始				
K_0 测定	-	自动	自动	-

初始				
预上覆岩层压力	*POP*	5	0	kN/m^2
超固结比率	*OCR*	1	1	-

要创建材料集，请执行以下步骤：

1. 单击**修改土层**窗口中的**材料**按钮 。
   在弹出的**材料设置**窗口中，**设置类型**在缺省情况下选择**土体和界面**选项。
2. 单击**材料集**窗口中的**新建**按钮，创建新的数据集。
3. 对于黏土层，输入黏土作为**标识**，并选择硬化土体作为**土体模型**。将 **排水类型**设置为不排水 (A)。
4. 输入黏土层的属性，如表 4 所列，(第 48 页)的材料属性。
5. 单击**界面**选项卡。在**强度**下拉菜单中选择**手动**选项。输入参数 R_{inter} 值 0.5。

   此参数根据以下公式将土体强度与界面强度相关联：$tan(\varphi_{interface}) = R_{inter} tan(\varphi_{soil})$ 和 $c_{inter} = R_{inter} c_{soil}$ 其中：$c_{soil} = c_{ref}$ ，请参见表 4(第 48 页)

   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（墙体摩擦）和界面粘聚力（粘附力）。
6. 在**初始**标签页中，保留 K_0 确定的缺省选项和超固结比 (OCR)的缺省值。将预上覆岩层压力 (POP) 值设置为 5.0。
7. 对于砂土层，输入砂土作为**标识**，然后再次选择硬化土体作为**土体模型**。排水类型应设置为排水。
8. 输入砂土层的属性，如 表 4 (第 48 页)。
9. 单击**界面**选项卡。在**强度**框中，选择**手动**选项。输入参数 R_{inter} 值 0.67。关闭数据集。
10. 将材质数据集分配给相应的土层。

注释:

- 在**强度**下拉菜单中选择**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 中的相应部分。
- 通过在模型浏览器中选择**界面** > **Interface_#_#** > **材料模式**，可以直接将数据集分配给界面，而不是接受界面的缺省数据集。

3.4 定义结构单元

下文介绍了地连墙、支柱、表面荷载和挖掘层的创建。

1. 单击**结构**选项卡，继续在**结构模式**中输入结构单元。

3.4.1 要定义地连墙，请执行以下操作：

必须定义具有以下材料属性的地连墙，如表 5(第 51 页)所示：

表 5: 地连墙（板）的材料属性

属性	名称	值	单位
常规			
材料类型	-	弹性	-
重量	W	10	kN/m/m
防止冲孔	-	否	-
力学			
各向同性	-	是	-
轴向刚度	EA_1	$7.5 \cdot 10^6$	kN/m
弯曲刚度	EI	$1.0 \cdot 10^6$	kNm^2/m
泊松比	ν	0.0	-

1. 单击侧工具栏中的**创建结构**按钮。
2. 在展开的菜单中选择**创建板**选项，如图 43(第 51 页) 所示。



图 43: 创建板选项

3. 在绘图区域中，将光标移动至水平线的上方位置 (50 20)，然后单击。向下移动 30 米 (50 -10) 并单击。右键单击完成绘图。
4. 单击侧面工具栏中的**显示材料**按钮。在**材料集**窗口中将**材料集类型**参数设置为**板**，然后单击**新建**按钮。输入地连墙作为数据集的**标识**，并输入表 5(第 51 页)所给定的属性。

5. 单击**确定**关闭数据集。
6. 将**地连墙**数据集拖动到几何对象中的墙体，并在光标指示可以释放后立即将其释放。
7. 单击**确定**，关闭**材料集**窗口。

注释: 通常情况下，在一个坐标上只能存在一个点，且在两个点之间只能存在一条线。重合点或重合线将自动减少为单个点或线。详细信息请参见 参考手册 。

3.4.2 若要定义界面：

1. 右键单击表示地连墙的板。

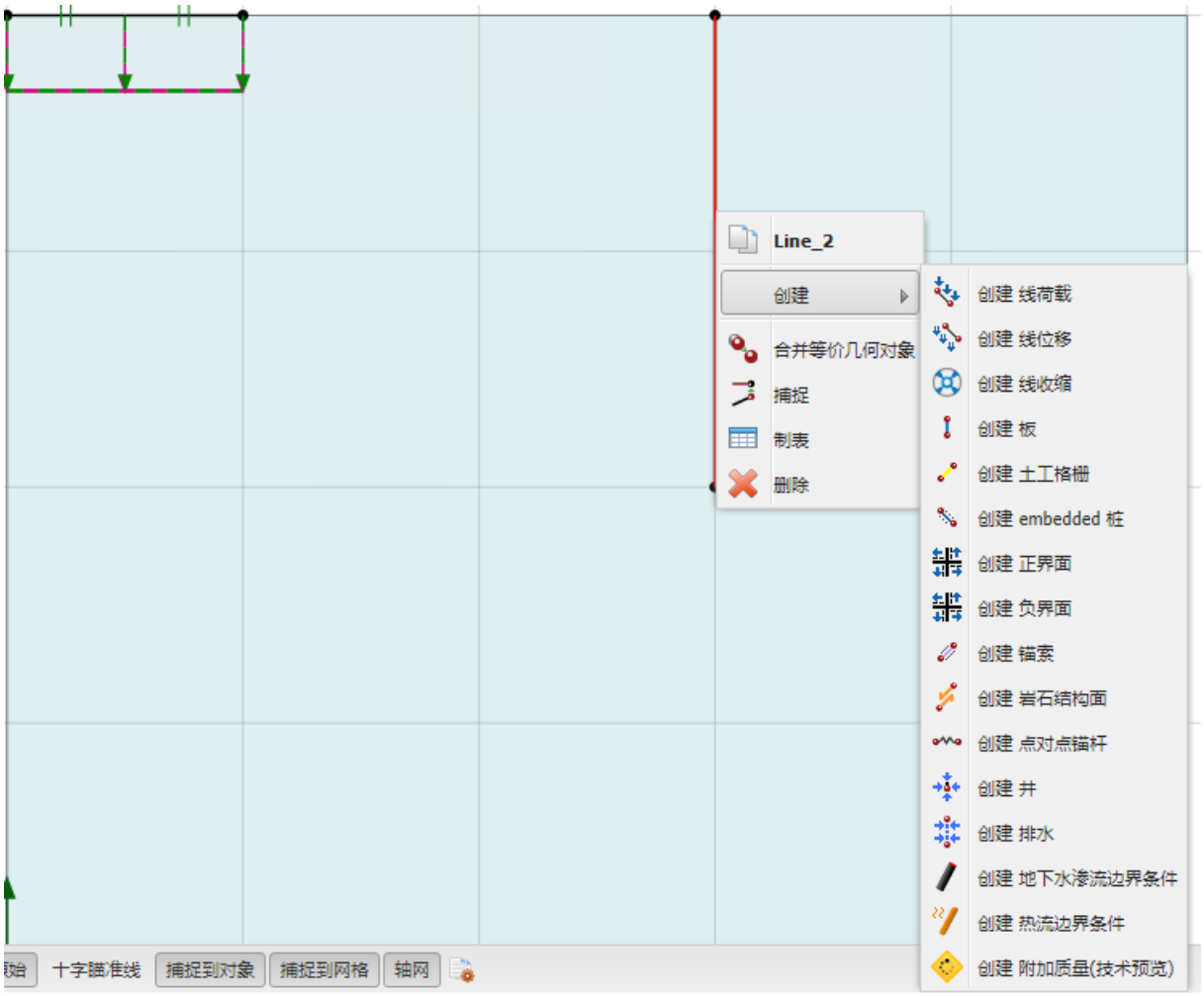


图 44: 创建正界面

2. 选择**创建** > **正界面** 。
3. 以同样的方式指定负界面，如图 44(第 52 页) 所示。

注释:

- 为标识几何图形线两侧的界面，添加了正号 (⊕) 或负号 (⊖)。此符号对结果没有实际作用或影响。

- 可以为界面定义**虚拟厚度因子**。这是一个纯数值，可用于优化界面的数值性能。要对其进行定义，请在绘图区域中选择界面，然后在**选择浏览器**中指定**虚拟厚度因子**参数的值。建议没有经验的用户不要更改缺省值。有关界面属性的详细信息，请参阅参考手册 - *第 5 章 - 高级几何对象建模选项。*

3.4.3 要定义挖掘层，请执行以下步骤：

1. 单击侧边工具栏中的**创建线**按钮。
2. 要定义第一个挖掘阶段，请将光标移动到墙体位置 (50 18)，然后单击。将光标向右移动 15 米至 (65 18)，然后再次单击。右键单击完成第一个挖掘阶段的绘图。
3. 要定义第二个挖掘阶段，请将光标移动至位置 (50 10) 并单击。移动至 (65 10) 并再次单击。右键单击完成绘制第二个挖掘阶段的绘图。
4. 第三个挖掘阶段将自动定义，因为它对应土层之间的边界 (y=0)。

3.4.4 要定义支柱，请执行以下操作：

表 6(第 53 页)显示了支柱的材料属性。

表 6: 支柱（锚杆）的材料属性

属性	名称	支柱	单位
常规			
材料类型	-	弹性	-
力学			
平面外间距	$L_{spacing}$	5	m
轴向刚度	EA	$2 \cdot 10^{6}$	kN

要定义支柱，请执行以下步骤：

1. 单击侧面工具栏中的**创建结构**按钮，然后在展开的菜单中选择**创建锚定杆**。
2. 将光标移动到 (50 19) 并单击鼠标左键。添加了一个锚定杆，用固定大小的旋转 T 表示。
3. 单击侧面工具栏中的**显示材料**按钮。在**材料集**窗口中将**设置类型**参数设置为**锚杆**，然后单击**新建**按钮。输入支柱作为数据集的**标识**，并输入表 6(第 53 页)中给定的属性。单击**确定**关闭数据集。
4. 单击**确定**关闭**材料集**。
5. 确保在绘图区域中选择了锚定杆。
6. 在**选择浏览器**中，通过选择**材料**下拉菜单中的相应选项，将材料数据集分配给支柱。
锚杆根据**选择浏览器**中的方向 $_x$ 和方向 $_y$ 参数在模型中确定方向。缺省方向在此教程中有效。

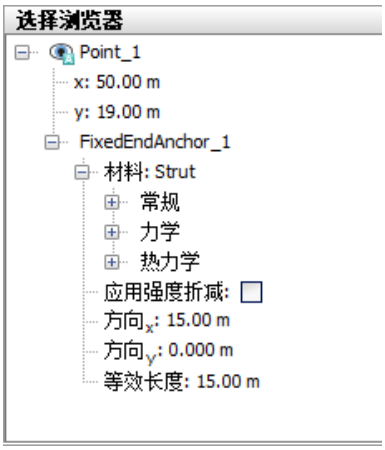


图 45: "选择浏览器"中的锚定杆参数

7. 输入 15 米的**等效长度**，相当于挖掘宽度的一半，如图 45(第 54 页) 所示。

注释: 等效长度是连接点和固定终点之间的实际距离。对于一般为挖掘宽度的一半的挖掘问题，认为挖掘中间的对称轴是固定的。

3.4.5 要定义分散荷载，请执行以下步骤：

1. 单击侧面工具栏中的**创建荷载**按钮 。
2. 在展开的菜单中选择**创建线荷载**选项 ，定义分散荷载。
3. 将光标移动至 (43 20)，然后单击将光标向右移动 5 米至 (48 20)，然后再次单击。右键单击完成绘图。
4. 在**选择浏览器**中，荷载的 y 组件 ($q_{y,start,ref}$) 指定值为 -5 kN/m/m，如 图 46(第 54 页) 所示。

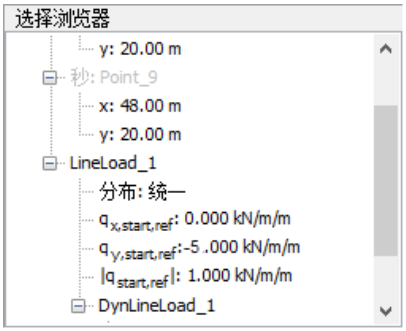


图 46: "选择浏览器"中分散荷载的分量

3.5 生成网格

要生成网格，请遵循以下步骤：

1. 进入**网格模式**。

2. 在边栏中单击**生成网格**按钮。对于**单元分布**参数，请使用**中等**选项（缺省）。
3. 单击**查看网格**按钮，以查看网格，如图 47(第 55 页) 所示。

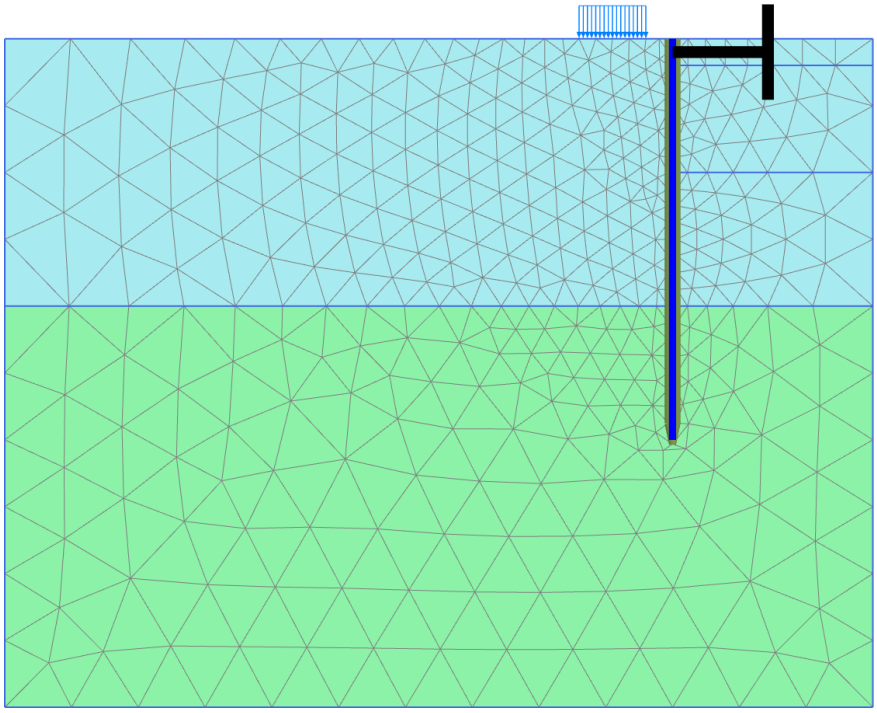


图 47: 生成的网格

4. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

3.6 定义并执行计算

在实践中，挖掘施工过程可以由多阶段组成。首先，将墙体安装至所需深度。然后进行挖掘，创造用于安装锚或支柱的空间。然后逐渐移除土体，直至挖掘的最终深度。通常将采取特别措施以防止水进入挖掘区。也可提供支柱支撑挡土墙。

在 PLAXIS 2D 中，可以使用**阶段**窗口的**常规**子树中提供的**分阶段施工**荷载类型来模拟这些过程。此操作可以激活或取消激活有限元模型选定组件的重量、刚度和强度。请注意，程序的**分阶段施工**模式中的修改仅适用于此类型荷载。此教程将介绍使用此强大的计算选项来模拟挖掘的方法。

3.6.1 初始阶段

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

3.6.2 第 1 阶段：外部荷载

1. 在**阶段浏览器**中单击**添加阶段**按钮创建新阶段。
   该阶段的缺省设置有效。在模型中，除墙体、界面、支柱和荷载外，所有几何对象都处于激活状态。
2. 单击侧面工具栏中的**选择多个对象**按钮。在显示的的菜单中，选择**选择线** > **选择板**，如图 48(第 56 页)所示。

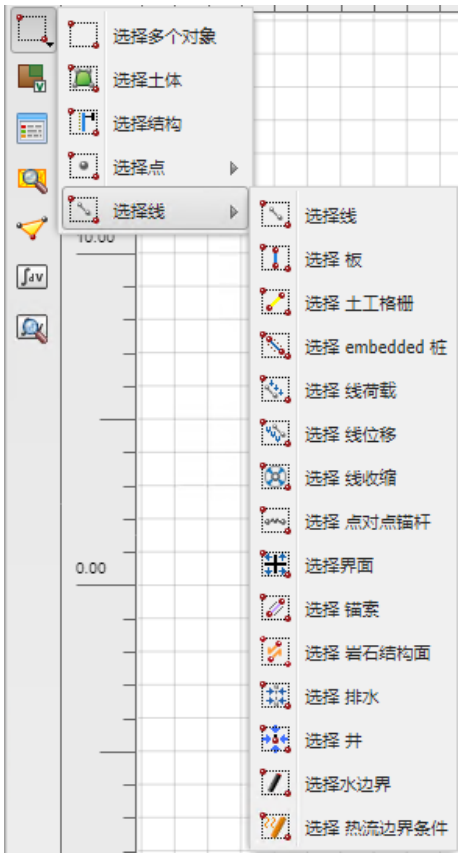


图 48: 选择多个对象

3. 在绘图区域中定义一个包含所有板单元的矩形，如图 49(第 57 页) 所示。
4. 右键单击绘图区域中的墙体，然后从上下文菜单中选择**激活选项**。

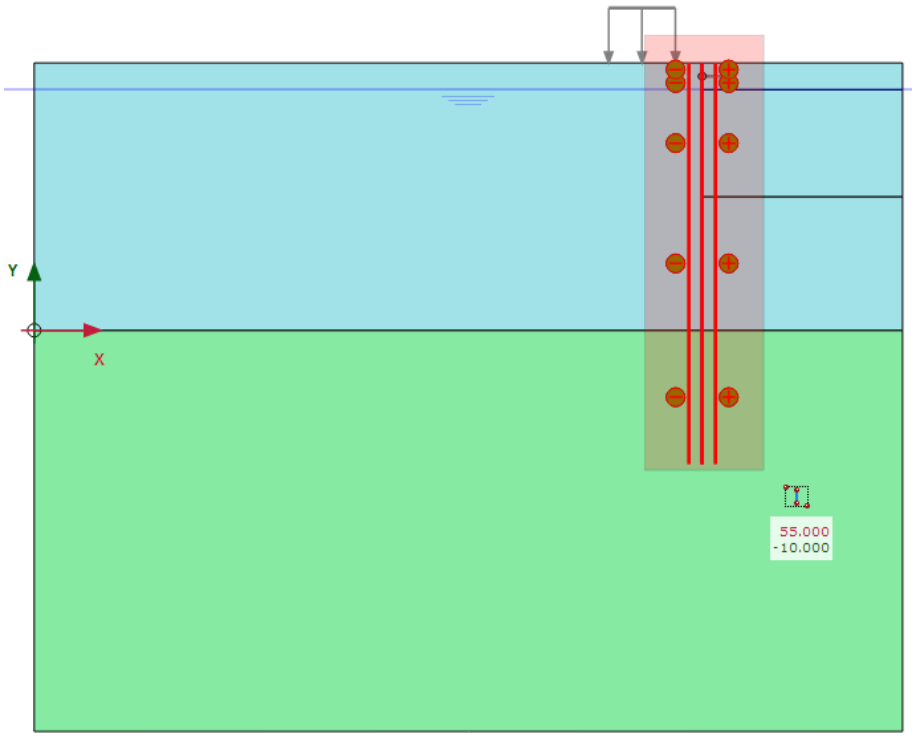


图 49: 在模型中选择的多个板单元

取消选择墙体时，可以看到墙现在以材质数据集中指定的颜色可见。

5. 右键单击分散荷载将其激活，然后从出现的菜单中选择**激活选项**。
   结构模式中的荷载定义为 -5 kN/m/m。可以在**选择浏览器**中选中该值。
6. 确保模型中的所有界面都处于活动状态。

注释: 通过右键单击相应的几何图形线，然后从上下文菜单中选择相应的界面（正或负），可以选择界面。

3.6.3 第 2 阶段：第一个挖掘阶段

1. 在**阶段浏览器**中单击**添加阶段**按钮 。
   将在**阶段浏览器**中显示一个新的计算阶段。请注意，程序将自动假定当前阶段应从前一阶段开始，并且将激活相同的对象。

   注释: 要复制父阶段的设置，请在**阶段**浏览器中选择该阶段，然后单击**添加阶段**按钮。请注意，通过在**阶段**窗口的**起始阶段**下拉菜单中选择父阶段来指定父阶段时，不会复制父阶段的设置。
2. 该阶段的缺省设置有效。在**分阶段施工模式**中，除锚定杆以外的所有结构单元都处于激活状态。
3. 在绘图区域中右键单击右上角的类组，然后在显示菜单中选择**取消激活**选项。

第一个挖掘阶段中的模型如图 50 (第 58 页) 所示。

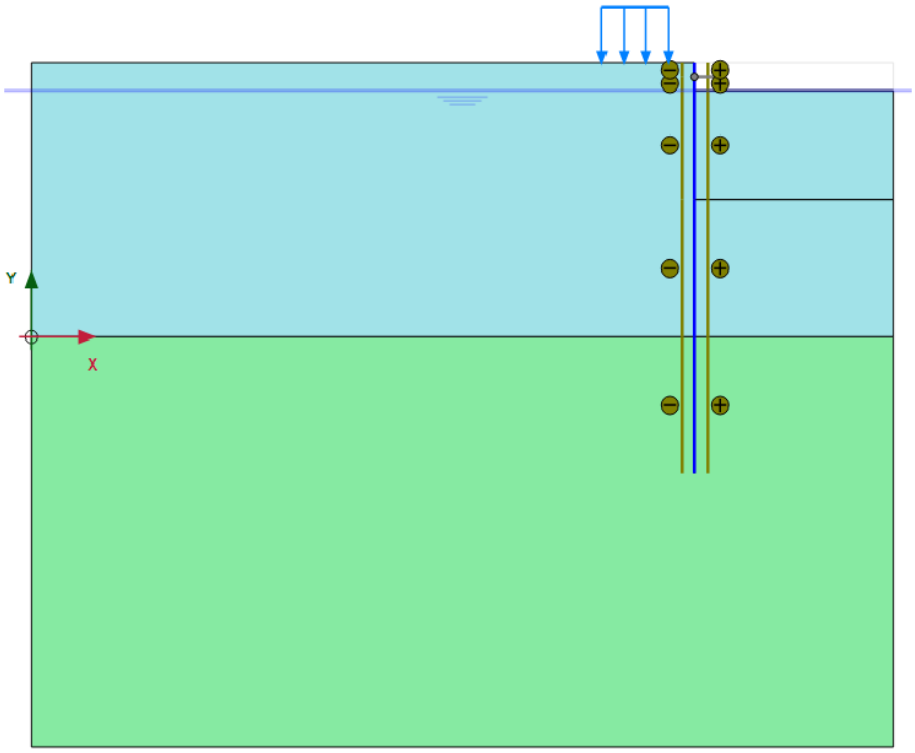


图 50: 第一个挖掘阶段的模型

3.6.4 第 3 阶段：安装支柱

1. 在**阶段浏览器**中单击**添加阶段**按钮 。
2. 激活支柱。
   支柱变为黑色表示已激活。

3.6.5 第 4 阶段：第二个（水下）挖掘阶段

1. 单击**添加阶段**按钮 ，添加新阶段。
2. 在网格右侧的顶部取消激活第二类组。它应该是最高的激活类组。

> **注释:** 请注意，在 PLAXIS 2D 中取消激活土体类组时，孔压不会自动取消激活。因此，在这种情况下，水保留在挖掘区域内，并且将模拟水下挖掘。

生成的模型如图 51(第 59 页) 所示。

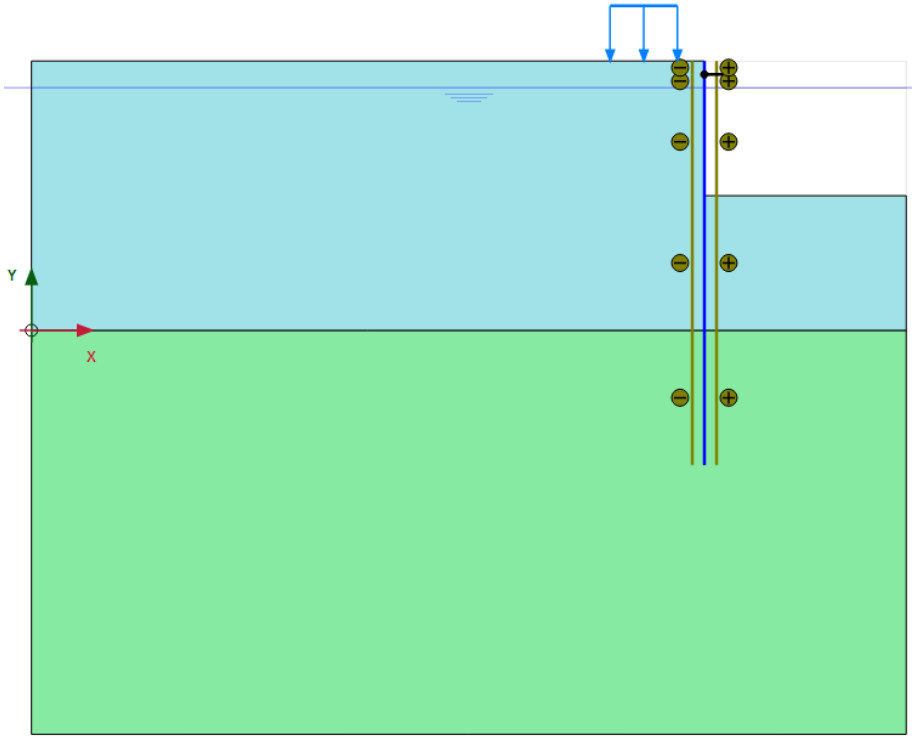


图 51: 第二个挖掘阶段的模型

3.6.6 第 5 阶段：第三个挖掘阶段

在最终计算阶段，将模拟坑内最后一层黏土层的挖掘。

1. 单击**添加阶段**按钮 ，添加新阶段。
2. 在网格右侧的顶部取消激活第三类组。
   该阶段的模型如图 52 (第 60 页) 所示：

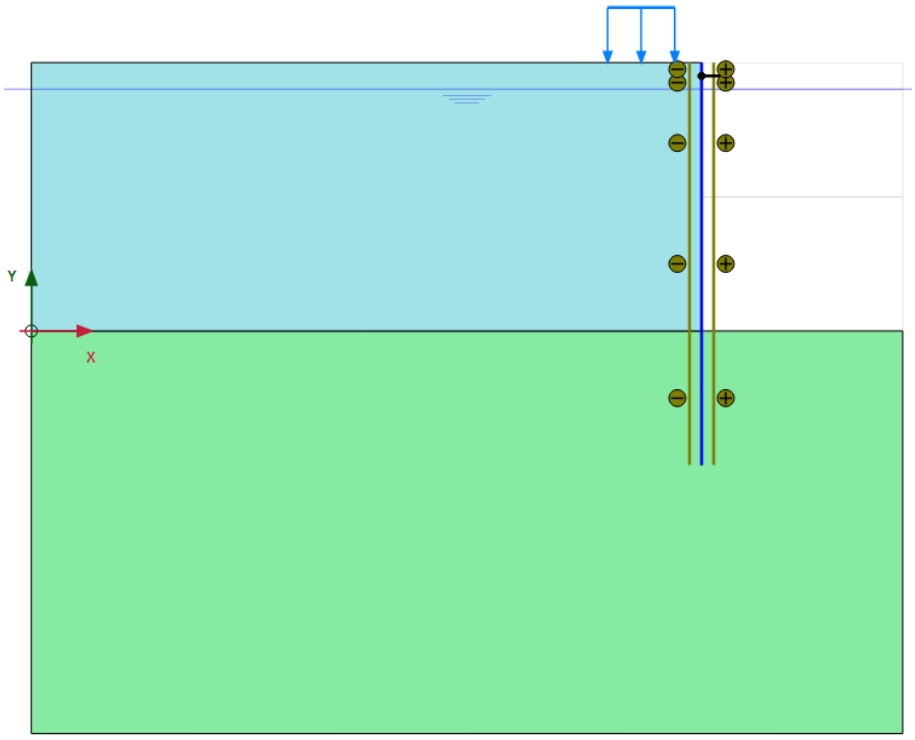


图 52: 第三个挖掘阶段的模型

计算定义已完成。

3.6.7 执行计算

在开始计算之前，建议选择节点或应力点，以便在稍后生成荷载位移曲线或应力-应变图。要完成此操作，请遵循以下步骤：

1. 在边栏中单击**为曲线选择点**按钮 。
   连接图将在输出程序中显示，**选择点**窗口将被激活。
2. 在墙体上可能出现大变形量的点（例如，50 10）上选择一些节点。将列出位于该指定位置附近的节点。
   通过在列表中选中节点前面的复选框来选择一个方便的节点。
3. 单击左上角的**更新**选项卡保存所选点，关闭输出程序并返回至**输入**程序。
4. 单击**计算**按钮 ，计算项目。

在**分阶段施工**计算阶段，名为 ∑Mstage 的乘子从 0.0 增大至 1.0。此参数显示在计算信息窗口中。当 ∑Mstage 值达到 1.0 时，施工阶段完成，计算阶段完成。当 ∑Mstage 值小于 1.0 时，如果**分阶段施工**计算完成，程序将给出警告消息。未完成施工阶段的最可能原因是发生了机械故障，但也可能有其他原因。有关**分阶段施工**的详细信息，请参见参考手册 。

3.7 查看计算结果

除了土体中的位移和应力外，还可以使用输出程序查看结构对象中的力。要检查此项目的结果，请执行以下步骤：

3.7.1 位移和应力

要查看位移和应力，请执行以下步骤：

1. 单击**计算**窗口中的最终计算阶段。
2. 单击工具栏中的**查看计算结果**按钮。
   输出程序将因此启动，显示所选计算阶段完成时的变形网格（放大），如图 53(第 61 页) 所示，并指示最大位移为：

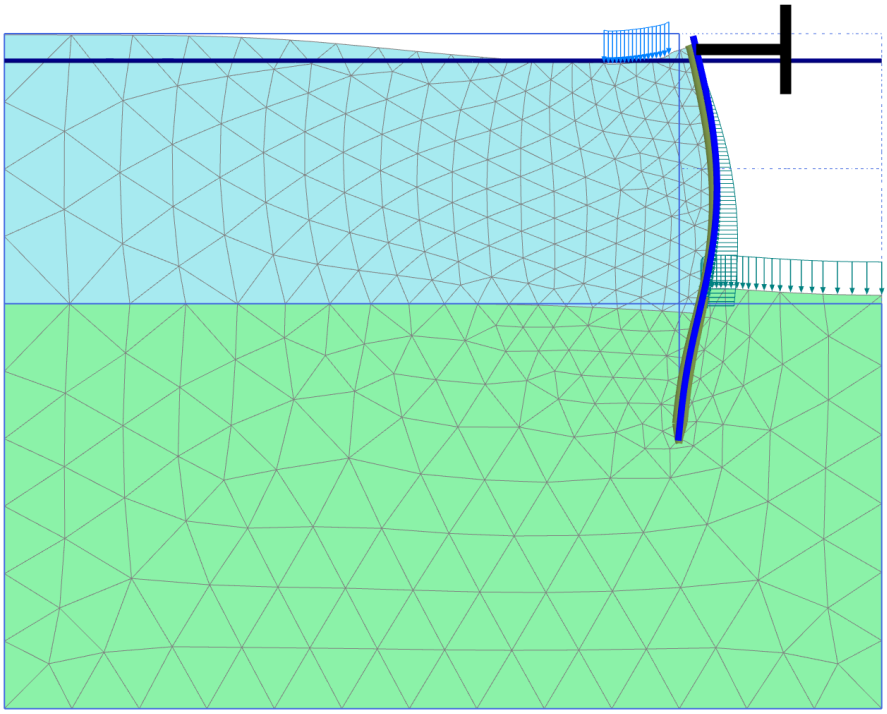


图 53: 第三个挖掘阶段后的变形网格

注释:

在输出程序中，可以通过单击**几何对象**菜单中的相应选项来打开/关闭模型中应用的荷载、约束和指定位移的显示。

3. 选择菜单**变形** > **增量位移** > **|Δu|**。
   该图显示了位移增量的着色阴影，表示墙体背后土体移动机制的形成。
4. 单击工具栏中的**箭头**按钮。
   在该图中，所有节点的位移增量显示为箭头。箭头的长度表示相对量级。
5. 选择菜单**应力** > **主有效应力** > **有效主应力**。

图 54(第 62 页) 显示了每个土体单元的三个中间应力点处的有效主应力，表示它们的方向和相对量级。请注意，已选择工具栏中的**中心主应力**按钮。主应力的方向表示挖掘底层有一个大的被动区域，支柱背后有一个小的被动区域。

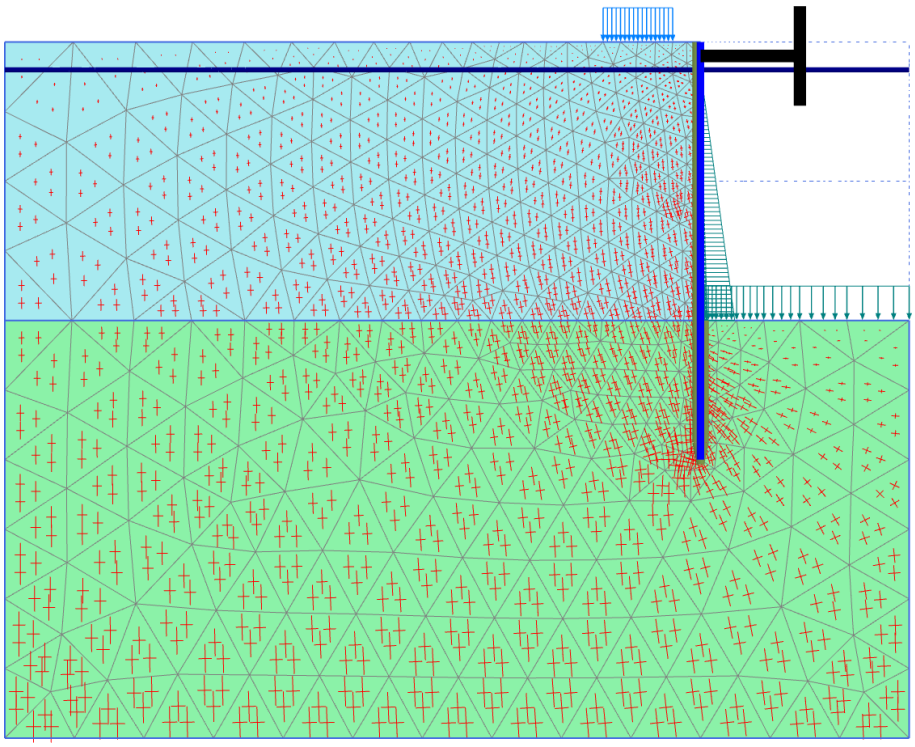


图 54: 挖掘后的主应力

3.7.2 剪力和弯矩

请遵循下面提供的步骤绘制墙体内的剪力和弯矩。

1. 双击墙体。
   打开一个显示轴力的新窗口。
2. 选择菜单**内力** > **弯矩 M**。
   图 55(第 63 页)显示了墙体弯矩的最大力矩：

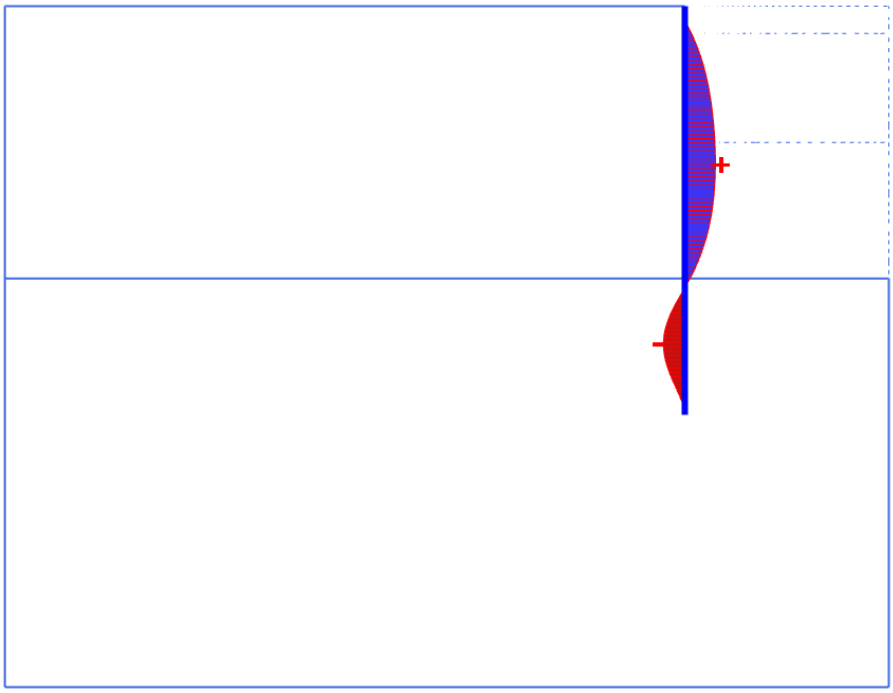


图 55: 墙体弯矩

3. 从**内力**菜单中选择**剪力 Q**。

   图中当前显示了墙体剪力。

   注释: 窗口菜单可用于在墙体内力窗口和完整几何对象应力窗口之间切换。此菜单还可用于**平铺**或**层叠**两个窗口，这是 windows 环境中的公用选项。

4. 在**窗口**菜单中选择第一个窗口（显示完整几何对象的有效应力）。双击支柱。
   支柱内力 (kN) 在显示的表格中显示。
5. 单击工具栏上的**曲线管理器**按钮。
   将因此弹出**曲线管理器**窗口。
6. 单击**新建**创建新图表。
   曲线生成窗口弹出。
7. 对于 x 轴，从下拉菜单中选择点 A。在树中选择**变形 - 总移位 - |u|**。
8. 对于 y 轴，在下拉菜单中保留**项目**选项。在树中选择**乘子 - ΣMstage**。
9. 单击**确定**接受输入并生成荷载-位移曲线。
   因此，绘制的曲线如图 56(第 64 页) 所示：

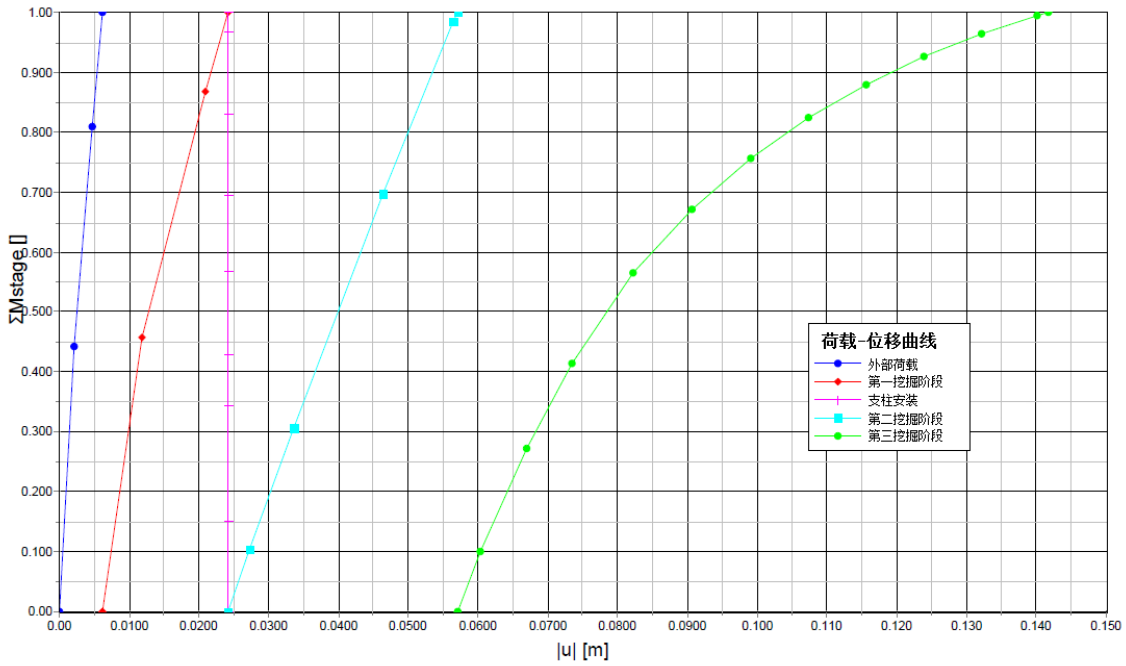


图 56: 墙体变形量荷载-位移曲线

曲线显示了施工阶段。在每个阶段，∑Mstage 参数从 0.0 更改为 1.0。最后阶段曲线斜率的减小表示塑性变形量增大。但是计算结果表示，在施工完成时，挖掘保持稳定。

4 岩质边坡的稳定化

本教程对使用 PLAXIS 2D 模拟沙泥岩岩体中的道路挖掘进行了说明。本教程引入了*岩石结构面*和*锚索*元素来对路堑进行建模。

对象：

- 使用**重力荷载**方法生成初始应力。
- 使用**岩石结构面**特征对断层进行建模。
- 使用**锚索**特征对加固进行建模。
- 确定加固对安全系数的影响。

几何图形:

在本教程中，考虑了自然斜坡地基的几何图形，路堑边坡在其中进行挖掘。不受支持的路堑挖掘将导致岩质边坡不稳定，因此挖掘分为两个阶段执行。在挖掘前 9 米之后，将使用两排锚索对挖掘的斜坡进行加固，这两排锚索的间距为 3 米。完成剩余 6 米的最终挖掘之后，将安装第三排锚索。然后通过使用回填土建造一面 3 米厚的挡土墙来对最终挖掘进行额外加固。挡土墙将充当落石障碍物，以避免岩石滚落到道路上。

岩体内有倾斜角度为 38.7^{o} 的断层，并且由于挖掘，坡脚附近出现断层日光。断层与顶部坡面之间的距离为 12 米。图 57(第 65 页) 显示了岩质边坡以及断层和加固的几何图形。

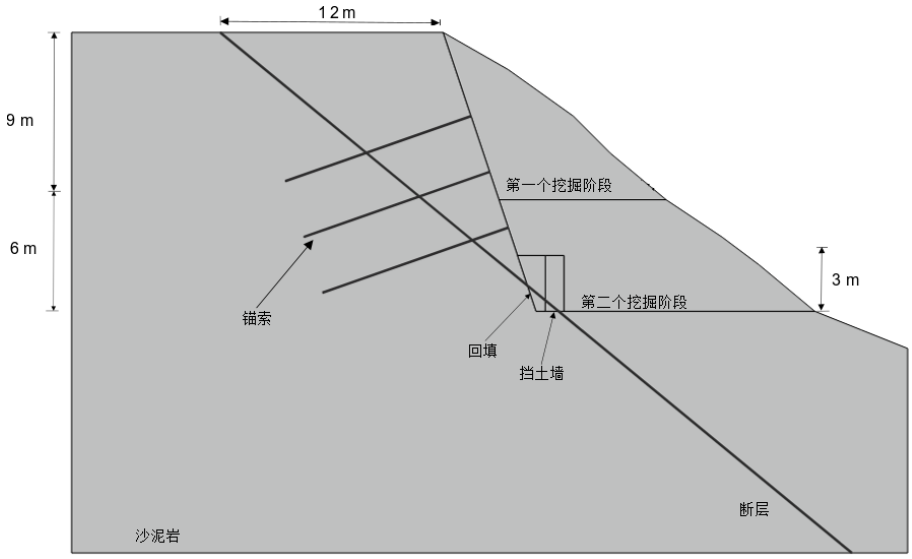


图 57: 岩质边坡以及加固的几何图形

4.1 新建项目

要创建新项目，请执行以下步骤：

1. 启动**输入程序**，然后从**快速启动**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. 在**模型**页面中，保留**模型（平面应变）**和**单元（15 节点）**的缺省选项。
4. 如下所示设置模型**等高线**：x_{min} = 0 米，x_{max} = 45 米，y_{min} = -13 米，y_{max} = 15 米。
5. 保留单位、常量和常规参数的缺省值，然后单击**确定**关闭**项目属性**窗口。

4.2 定义岩体地层学

必须定义自然斜坡的几何图形。为此，请执行以下步骤：

1. 单击**结构**选项卡，继续在**结构模式**中输入结构单元。
2. 单击底部工具栏中的**捕捉选项**按钮 。在出现的窗口中，将**间距**设置为 0.5，将**捕捉间隔数**设置为 1，如图 58(第 66 页) 所示。



图 58: 显示捕捉选项的窗口

3. 在边栏中单击**创建土体多边形**按钮 ，并选择**创建土体多边形**选项。
4. 在命令行中创建岩体，或通过单击坐标上的点来创建：

```
(0 -13) (0 15) (20 15) (23.5 13) (27 10.5) (29 8.5) (32 6) (35 4) (37 2.5) (40
0) (42.5 -1) (45 -2) (45 -13)
```

4.3 创建和分配材料数据集

在本教程中，岩体是使用霍克-布朗本构模型建模的沙泥岩。要创建岩体的材料集，请执行以下步骤：

1. 选择**显示材料**按钮 ，此时将弹出**材料集**窗口。
2. 单击**材料集**窗口中的**新建**按钮，创建如表 7(第 66 页)中所示的数据集。

表 7: 沙泥岩的材料属性

参数	名称	值	单位
常规			
土体模型	-	霍克布朗	-
排水类型	-	排水	-

参数	名称	值	单位
常规			
不饱和单位重量	γ_{unsat}	24	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	24	kN/m^3
力学			
杨氏模量	E_{rm}	$1 \cdot 10^6$	kN/m^2
泊松比	ν	0.25	-
完整岩体的单轴抗压强度	$\lvert \sigma_{ci} \rvert$	$25 \cdot 10^3$	kN/m^2
完整岩体参数	m_i	10	度
地质强度指标	GSI	39	-
干扰因素	D	0	-
拉伸截断	-	真实	-
抗拉强度	-	30	kN/m^2
剪胀角	ψ_{max}	10	度
膨胀参数	σ_{ψ}	50	kN/m^2

3. 选择已创建的多边形，并为该土体多边形指定材料，如图 59(第 67 页) 所示。

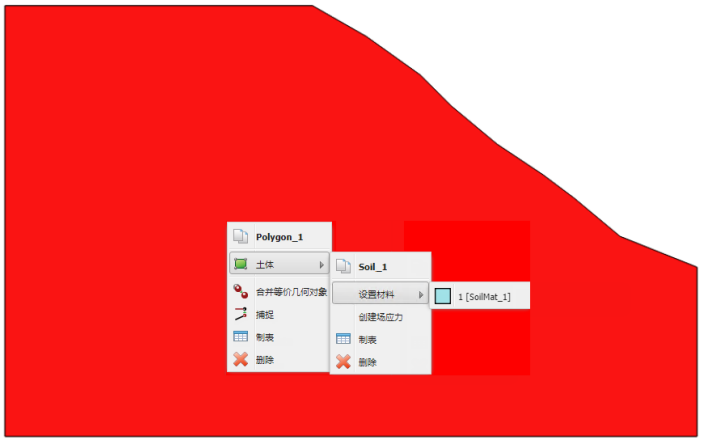


图 59: 为已创建的多边形指定土体材料

4.4 定义结构单元

下面描述了断层、锚索元素和挡土墙的创建。

4.4.1 定义断层

断层使用岩石结构面进行建模，下面的表 8(第 68 页)定义了其材料属性：

表 8: 断层（岩石结构面）的材料属性

参数	名称	值	单位
常规			
材料模型	-	摩尔-库伦	-
排水类型	-	排水	-
力学			
正常刚度	k_n	$1 \cdot 10^6$	kN/m^3
剪切刚度	k_s	$100 \cdot 10^3$	kN/m^3
强度方法	-	峰值	
粘聚力	c'	8	kN/m^2
摩擦角	φ'	20	^{o}
剪胀角	ψ	0	^{o}
考虑间隙闭合	-	真实	-

1. 在**结构**模式下，单击**创建线**按钮 ，然后选择**创建岩石结构面**选项 。
2. 穿过点 (8 15) 和 (42 -13) 绘制岩石结构面。
3. 选择该岩石结构面，然后在**选择浏览器**中单击**材料**。这将显示一个下拉列表。
4. 单击**添加**按钮 ，为该岩石结构面创建并指定新的材料集，如图 60(第 69 页) 所示。
5. 根据表 8(第 68 页)中列出的属性，定义岩石结构面的材料数据集。

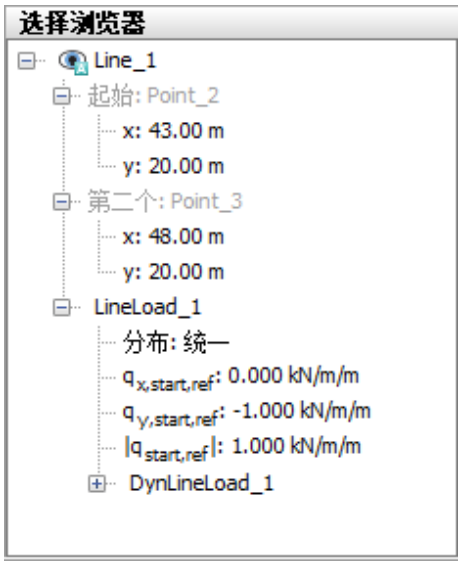


图 60: 在"选择浏览器"中指定岩石结构面的材料

4.4.2 定义路堑挖掘

路堑分为两个阶段进行挖掘，且总高度为 15 米。第一个挖掘阶段对应于上方 9 米，第二个挖掘阶段对应于剩余 6 米。要定义挖掘，请执行以下步骤：

1. 通过绘制一条穿过点 (20 15) 和 (25 0) 的线，定义路堑的斜坡面。
2. 通过绘制一条穿过点 (25 0) 和 (40 0) 的线，定义挖掘底部（路面）。
3. 通过从点 (23 6) 到与初始斜坡面相交的点 (32 6) 绘制一条水平线，定义上方 9 米挖掘高度。

4.4.3 定义锚索

第一个挖掘阶段后上坡的加固是通过创建两排直径为 25.4 毫米的灌浆锚索元素实现的。第二个挖掘阶段后下坡由第三排锚索加固。三排锚索之间的间距为 3 米。

表 9(第 69 页)和表 10(第 70 页)分别列出了锚索的坐标和材料属性。

表 9: 锚索元素坐标

锚索位置	第一个点	第二个点
顶部	(21.5 10.5)	(11.5 7)
中	(22.5 7.5)	(12.5 4)
底部	(23.5 4.5)	(13.5 1)

表 10: 锚索的属性

参数	名称	值	单位
常规			
材料类型	-	弹塑性	-
力学			
锚索间距	$L_{spacing}$	3	m
横截面类型	-	预定义	-
预定义的横截面类型	-	实心圆弧梁	-
直径	D	0.0254	m
刚度	E	$98.6 \cdot 10^6$	kN/m^2
压缩屈服强度	$N_{p,comp}$	0	kN
拉伸屈服强度	$N_{p,tens}$	548	kN
剪切刚度	k_s	$15 \cdot 10^6$	kN/m^2
强度分布	-	统一	-
粘聚力	-	800	kN/m
结合摩擦角	φ_{bond}	20	o
失效曲面周长	-	预定义	-

1. 单击侧工具栏中的**创建线**按钮，然后选择**创建锚索**选项 。
2. 从点 (21.5 10.5) 到点 (11.5 7) 绘制一条线，以创建第一排锚索。
3. 重复步骤 2，使用表 9(第 69 页)中给定的坐标定义中间排和下排锚索。
4. 单击**材料集** > **材料集类型** > **锚索**，然后单击**新建**，基于表 10(第 70 页)中列出的参数创建锚索材料数据集。
5. 在绘图区域中多选所有锚索，然后通过从**选择浏览器**的**材料**下拉菜单中选择相应的选项来指定锚索材料。

4.4.4 定义挡土墙和回填土

挡土墙以 1 米厚度进行建模，并建造在岩质边坡的坡脚。回填土在坡面和挡土墙之间提供，其厚度随高度的不同而变化。表 11(第 71 页)和表 12(第 71 页)分别显示了挡土墙和回填土的材料属性。

表 11: 挡土墙的材料属性

参数	名称	值	单位
常规			
土体模型	-	摩尔-库伦	-
排水类型	-	非多孔	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	24	kN/m^3
力学			
杨氏模量	E_{ref}	$27 \cdot 10^6$	kN/m^2
泊松比	ν	0.15	-
粘聚力	c_{ref}	500	kN/m^2
摩擦角	φ	35	o
剪胀角	ψ	5	o
拉伸截断	-	真实	
抗拉强度	-	750	kN/m^2

表 12: 回填土的材料属性

参数	名称	值	单位
常规			
土体模型	-	摩尔-库伦	-
排水类型	-	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	20	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20	kN/m^3
力学			
杨氏模量	E'_{ref}	$100 \cdot 10^3$	kN/m^2
泊松比	ν	0.3	-
粘聚力	c'_{ref}	5	kN/m^2
摩擦角	φ'	45	o
剪胀角	ψ	15	o

要定义挡土墙和回填土的几何图形，请执行以下步骤：

1. 单击**创建线**按钮 ，然后选择**创建线**选项。
2. 通过定义依次穿过点 (25.5 0), (25.5 3)、(25.5 3), (26.5 3) 和 (26.5 3), (26.5 0) 的线，绘制挡土墙。
3. 通过从挡土墙上的点 (25.5 3) 到路堑坡面上的点 (24 3) 绘制一条线，定义回填土。
4. 使用表 11(第 71 页)和表 12(第 71 页)中列出的参数，在**材料集** > **土体和界面**中为挡土墙和回填土创建单独的材料。稍后将在**分阶段施工**模式下指定这些材料。

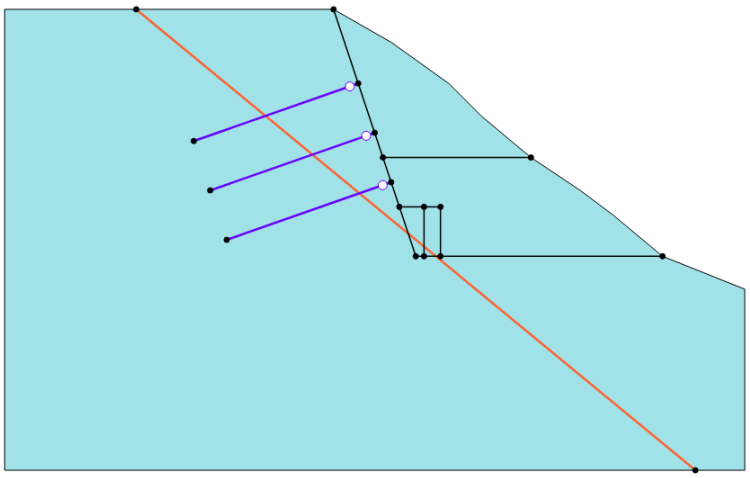


图 61: 模型的最终几何图形

4.5 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 选择将下坡、岩石结构面和第三排锚索围起的土体多边形，如图 62(第 72 页) 所示。在**选择浏览器**中，将粗糙因数设置为 0.5。

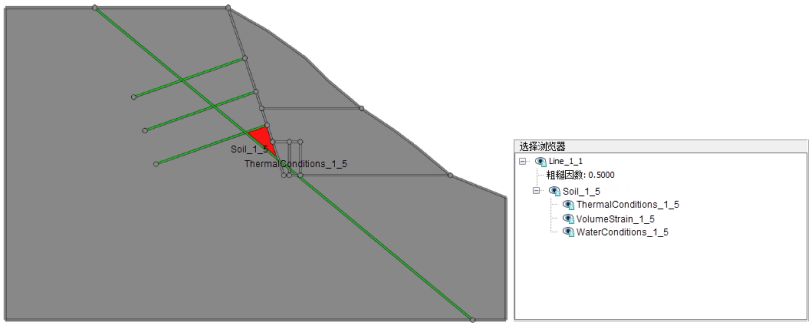


图 62: 细化所选土体多边形的网格

3. 单击**生成网格**按钮 以生成网格。将显示**网格选项**窗口。
4. 在**单元分布**列表中选择**中等**选项，然后生成网格。
5. 单击**查看网格**按钮 ，查看网格。生成的网格如图 63(第 73 页) 所示。
6. 在输出程序左上部选择**关闭**按钮，关闭网格视图。

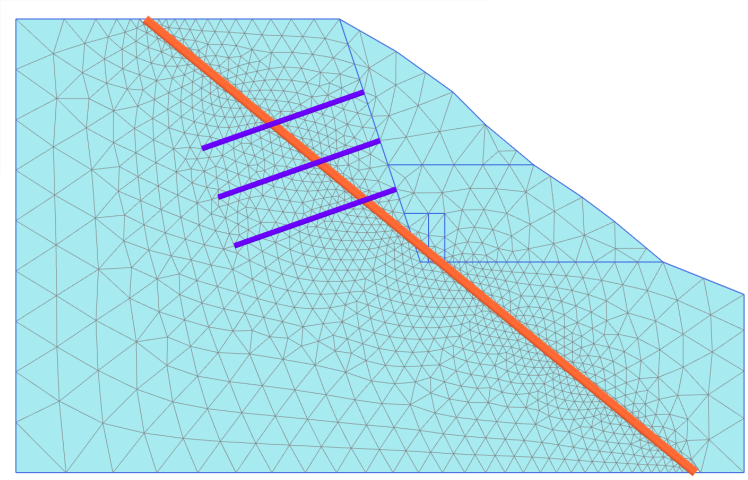


图 63: 生成的网格

注释:

在需要较大应力集中或较大变形梯度的区域，必须有更准确（更精细）的有限单元网格，而几何图形的其他部分可能不需要精细网格。当几何模型包括边、角或结构对象时，通常会出现这种情况。局部细化基于局部粗糙因数，您可以为每个几何体指定该因数。

4.6 定义并执行计算

本项目的施工包括初始阶段和另外八个阶段。

- 在**初始阶段**，将使用**重力荷载**方法生成初始应力。
- **第 1 阶段**涉及挖掘上方 9 米。
- **第 2 阶段**包括安装前两排锚索以及将其连接到路堑的坡面。
- **第 3 阶段**涉及往下挖掘 6 米，以达到路面的设计级别。
- **第 4 阶段**包括安装第三排锚索以及将其连接到路堑的坡面。
- **第 5 阶段**涉及在路堑的坡脚附近建造挡土墙。
- **第 6 阶段**涉及在坡面和挡土墙之间放置回填土。

此外，将分别对**第 3 阶段**和**第 6 阶段**执行安全分析。

4.6.1 初始阶段：初始条件

初始应力场通过**重力荷载**方法生成。

1. 进入**分步施工**模式。
2. 激活原始斜坡岩体的所有多边形。
3. 通过在**模型浏览器**中选择岩石结构面将其激活。所有其他结构组件（锚索）应保持停用状态。
4. 在**阶段浏览器**中，双击初始阶段，然后为**计算类型**选择**重力荷载**选项。初始阶段的其他缺省参数将保持不变。
5. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。

注释: 此教程示例不考虑水条件，因此忽略孔压计算选项。

4.6.2 第 1 阶段：第一个挖掘阶段

1. 单击**添加阶段**按钮 ，创建新阶段。
2. 停用挖掘的上方 9 米类组。

第 1 阶段的模型如下面的图 64(第 74 页) 所示：

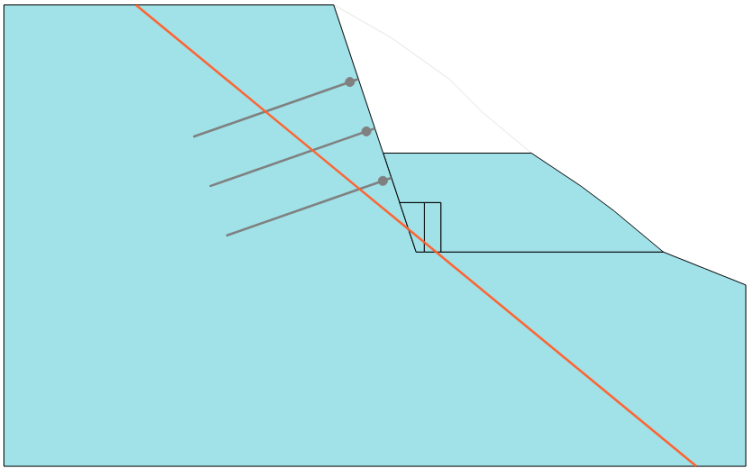


图 64: 第 1 阶段的配置

4.6.3 第 2 阶段：安装前两排锚索

1. 在**阶段浏览器**中，单击**添加阶段**按钮 。
2. 选择前两排锚索，然后通过单击**锚索**前面的复选框，在**选择浏览器**中激活它们。
3. 在**选择浏览器**中，单击**调整预应力**复选框，并指定预应力 **200 kN**。

第 2 阶段的模型如下面的图 65(第 75 页) 所示：

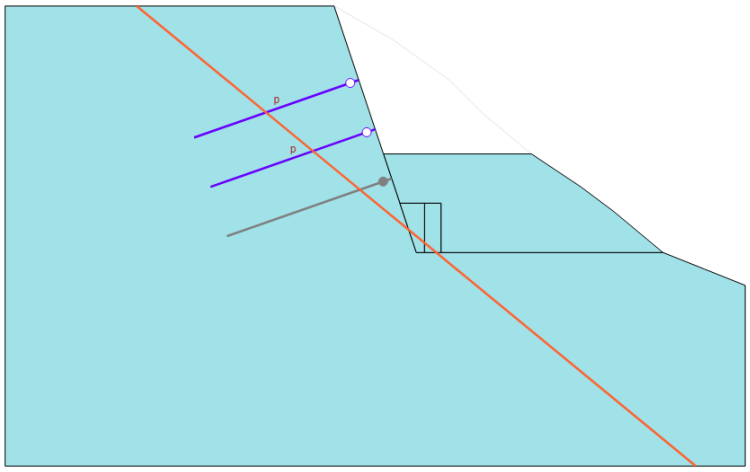


图 65: 第 2 阶段的配置

注释: 选中**调整预应力**复选框时，会将预应力应用于锚索（按锚索和力单位），同时将结合剪力假定为零 [状态：未结合]。取消选中**调整预应力**复选框时，在后续阶段会假定与周围岩体的结合相互作用已形成 [状态：已结合]。缺省情况下，在对锚杆或锚索应用了预应力之后的计算阶段，预应力设置不会继续生效，但预应力会保留。这样，现有锚索力将用作起始条件，并根据模型中应力和力的变化“自然地”形成。

4.6.4 第 3 阶段：第二个挖掘阶段

1. 单击**添加阶段**按钮 ，添加新阶段。
2. 停用第二挖掘的土体多边形。
3. 停用第二挖掘内的岩石结构面线条。

第 3 阶段的模型配置如下面的图 66(第 75 页) 所示：

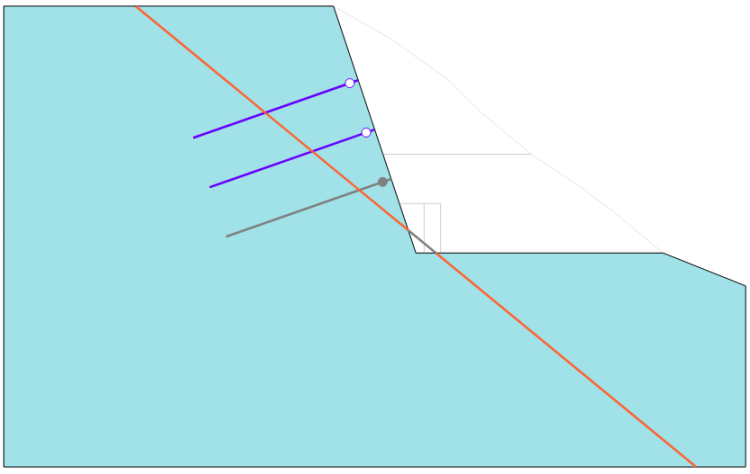


图 66: 第 3 阶段的配置

4.6.5 第 4 阶段：安装第三排锚索

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 选择第三排锚索，然后通过单击**锚索**前面的复选框，在**选择浏览器**中激活它。
3. 在**选择浏览器**中，单击**调整预应力**复选框，并指定预应力 **200 kN**。

第 4 阶段的模型配置如图 67(第 76 页) 所示。

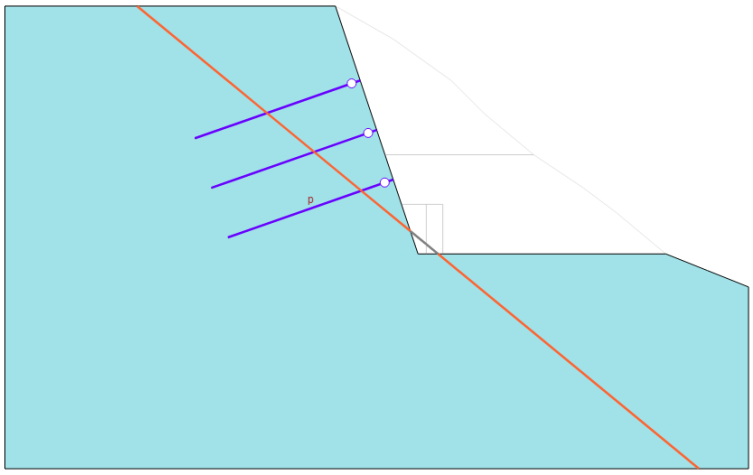


图 67: 第 4 阶段的配置

4.6.6 第 5 阶段：建造挡土墙

1. 单击**添加阶段**按钮，添加新阶段。
2. 激活挡土墙，并按照表 11(第 71 页)为挡土墙指定材料。

第 5 阶段的模型配置如下面的图 68(第 76 页) 所示：

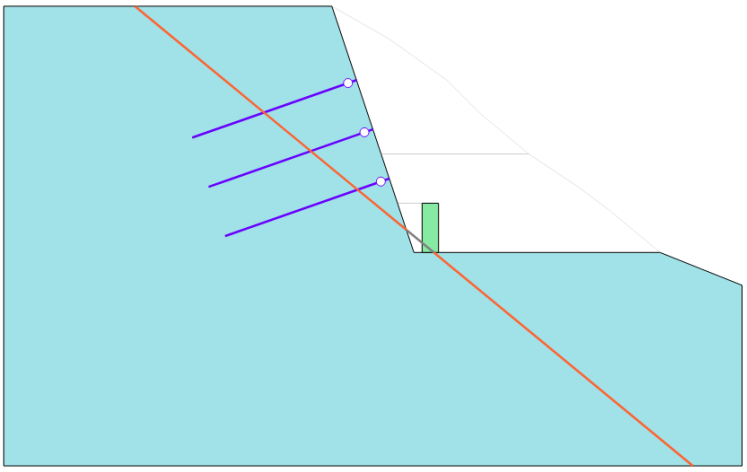


图 68: 第 5 阶段的配置

4.6.7 第 6 阶段：回填

1. 单击**添加阶段**按钮，添加新阶段。
2. 激活回填土，并按照表 12(第 71 页)为回填土指定材料。

第 6 阶段的模型配置如下面的图 69(第 77 页) 所示：

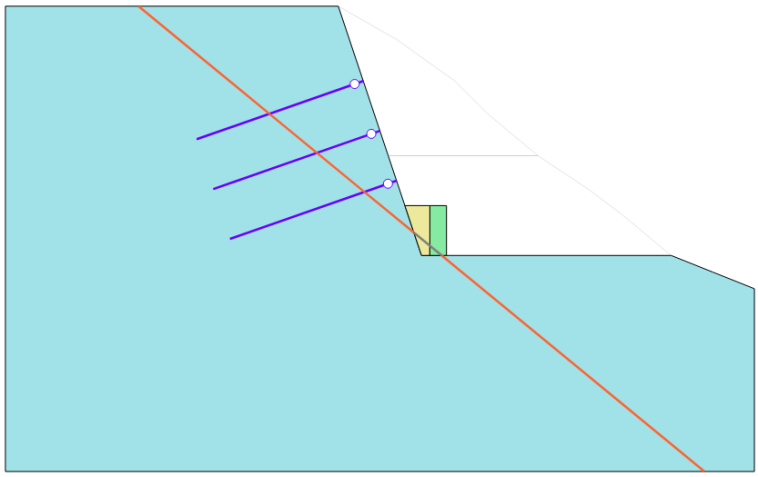


图 69: 第 6 阶段的配置

4.6.8 第 7 阶段和第 8 阶段：安全分析

要设计路堑边坡，在挖掘期间和完成施工之后都必须考虑稳定性，这点很重要。因此，必须计算第 3 阶段（第二个挖掘阶段）和第 6 阶段（回填后）的全局安全系数。要计算这两种情况的全局安全系数，请执行以下步骤：

1. 在**阶段浏览器**中选择第 3 阶段。
2. 添加新的计算阶段。
3. 双击新阶段，打开**阶段**窗口。
4. 在**阶段**窗口中，系统会自动从**起始阶段**下拉菜单中选择第 3 阶段。
5. 在**计算类型**框中，选择**安全性**。
6. 在**变形控制参数**部分，选择**将位移重置为零**选项，以从先前计算中排除现有变形。
7. 在**数值控制参数**部分，取消选择**使用默认迭代参数**选项，然后在**最大步数**框中输入 **180**。现已定义第 3 阶段的安全性计算。
8. 按照如上所述的相同步骤，创建新的计算阶段，以分析建造挡土墙和回填土（第 6 阶段）后最终阶段的稳定性。

图 70(第 78 页) 显示了定义安全性计算后的阶段。

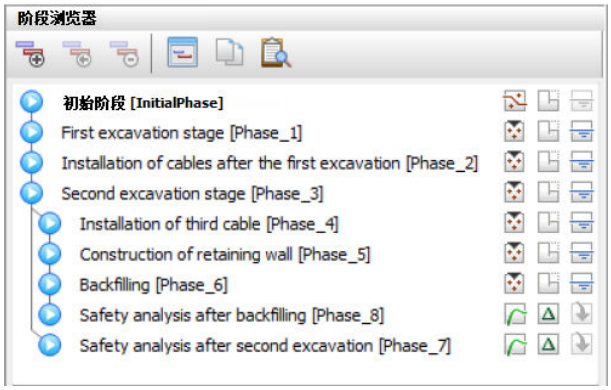


图 70: 安全性计算阶段

4.7 计算

在启动计算之前，建议选择一些节点来生成图表，以便在稍后阶段确定安全系数。为此，请执行以下步骤。

1. 单击侧工具栏中的**为曲线选择点**按钮 。
2. 为曲线选择特征点 (23 6)，然后单击**更新**。
3. 单击**计算**按钮 ，计算项目。
4. 计算完成后，单击**保存**按钮 ，保存该项目。

4.8 结果

在本教程中，将评估挖掘阶段和安全分析的结果。

4.8.1 评估结果

1. 计算完成后，选择第 3 阶段（第二个挖掘阶段），然后单击**查看计算结果**按钮 。输出程序将显示第二个挖掘阶段后的变形网格。然后放大坡脚区域以检查该变形网格。

   图 71(第 79 页) 显示了第 3 阶段的变形网格。

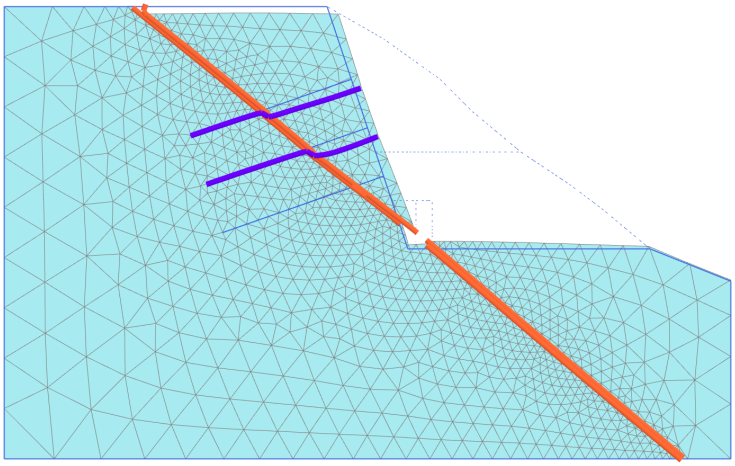


图 71: 第二个挖掘阶段后的变形网格

2. 要检查锚索中生成的轴向力，请从工具栏中的**显示的步骤**下拉菜单转到第 6 阶段。单击侧工具栏中的**拖拽窗口以选择结构**按钮，然后拖动鼠标以定义一个包围所有锚索的矩形。在出现的窗口中选择**锚索**选项，如图 72(第 79 页) 所示。

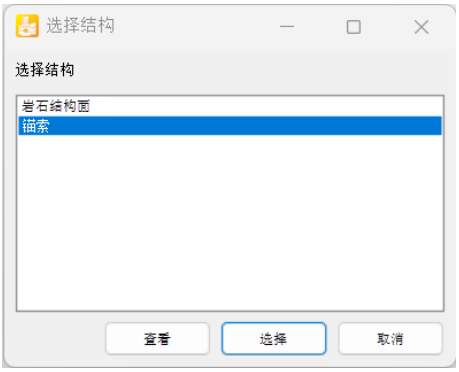


图 72: "选择结构"窗口

3. 单击**查看**。请注意，锚索在结构视图中显示。
4. 从**力**菜单中选择 $T_{s,bond}$ 选项，以查看在灌浆段中形成的剪力，如图 73(第 80 页) 所示。

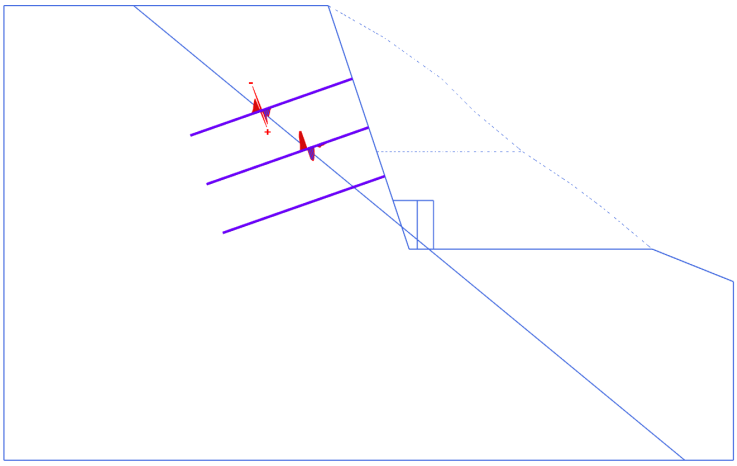


图 73: 回填后结合 $T_{s,bond}$ 中产生的剪力

5. 再次从**力**菜单中选择**轴向力 N** 选项，如图 74(第 80 页) 所示。

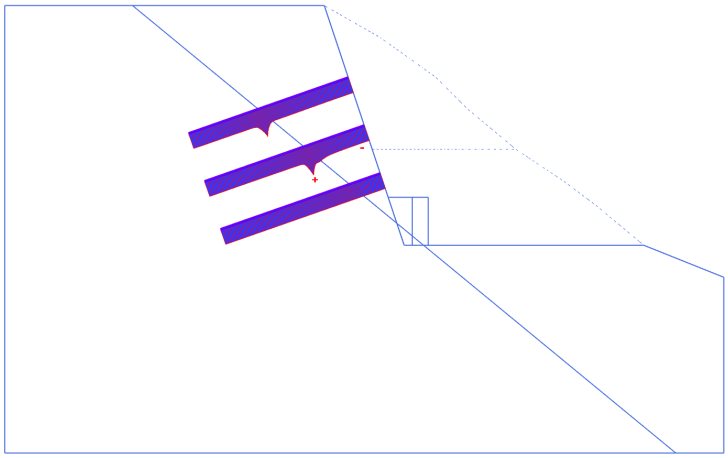


图 74: 回填后锚索中的轴向力

图 73(第 80 页) 和图 74(第 80 页) 说明了锚索和断层的相交处的轴向力增强了许多，结合中的剪力也在此处形成。当岩石面沿岩石结构面移动时，锚索力会运动。但是，安装第三排锚索后，岩石面不会进一步移动，因此下排锚索中的力不会运动。下排锚索的主要功能是提供更高的安全系数，而不是限制岩石面在正常工况下的移动。

4.8.2 安全分析结果评估

为了评估路堑边坡设计的稳定性，将根据强度折减法对此项目执行安全分析。由于土体强度持续降低，在安全性计算过程中会产生额外的位移。将计算最后一个失效步骤的增量位移，以评估可能的失效机制。要查看由第二挖掘产生的斜坡增量位移，请执行以下步骤：

1. 在输入程序中选择第 7 阶段，然后单击**查看计算结果**按钮 ，该阶段是自第 3 阶段起的安全阶段。
2. 在输出程序中，选择菜单**变形 > 增量位移 > |Δu|**，显示第二个挖掘阶段之后安全性计算的的总增量位移等高线图。

3. 在工具栏的**显示的步骤**下拉菜单中，选择第 8 阶段，查看建造回填土和挡土墙之后岩质边坡的安全性计算结果。

   结果如图 75(第 81 页) 所示。

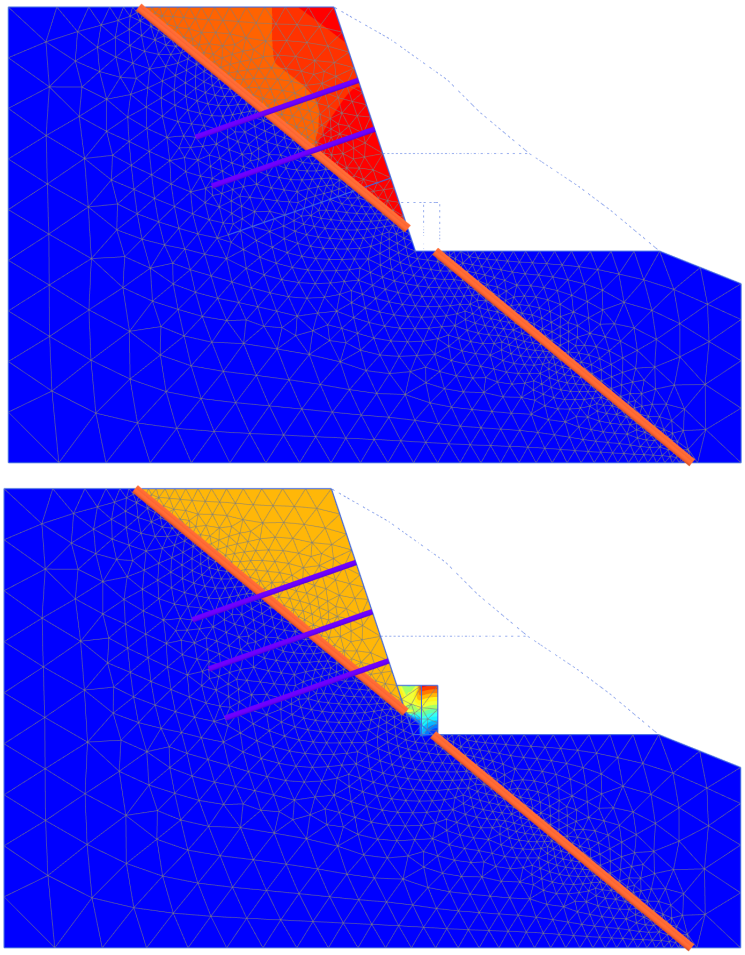


图 75: 位移增量的阴影表示第二个挖掘阶段（上方）和回填（下方）后最适用的失效机制

4. 在顶部工具栏中，单击**箭头**按钮 ，此时将显示增量位移运动矢量。箭头长度表示特定增量位移的量级，而箭头方向表示位移增量方向，如图 76(第 82 页) 所示。

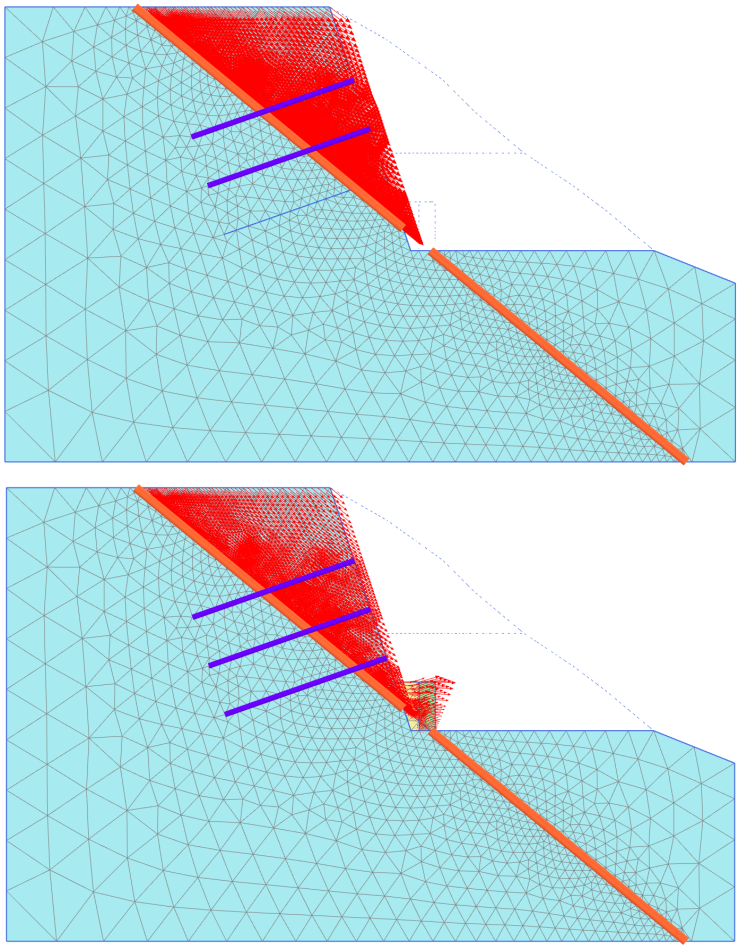


图 76: 第二个挖掘阶段（上方）和回填（下方）后的位移增量

图 75(第 81 页) 和图 76(第 82 页) 显示了第 3 阶段和第 6 阶段的安全性计算的增量位移等高线图和箭头。位移增量的量级不相关，但它表明是否出现了失效机制。在图 75(第 81 页) 中，岩质边坡往往会沿岩石结构面向下滑，表明需要通过建造挡土墙来稳定化。在这两张图中，可以看到潜在失效机制是岩石块沿岩石结构面滑动这一平面破坏。

可以看到，ΣMsf 的值从某个步骤起保持相对恒定，而位移保持增加。要准确计算安全系数，需要根据破坏区内某个节点的位移绘制参数 ΣMsf 的值。要确定安全系数，请执行以下步骤：

1. 要计算第 7 阶段和第 8 阶段（分别对应于第 3 阶段和第 6 阶段）的安全系数，请单击**曲线管理器**按钮 。
2. 在**图表**页面中，单击**新建**选项。
3. 在**曲线生成**窗口中，从下拉列表中为 x 轴选择计算前**节点**。选择**变形>总位移 > |u|**。
4. 为 Y 轴选择**项目 > 乘子 > ΣMsf**。
5. 按**确定**关闭窗口并生成图表。
6. 右键单击图表并在出现的菜单中选择**设置**选项。**设置**窗口弹出。
7. 在节点曲线对应的页面中，单击**阶段**按钮。
8. 在**选择阶段**窗口中，确保仅选择安全性计算阶段 。
9. 单击**确定**，关闭**选择阶段**窗口。
10. 在**设置**窗口的对应页面中更改曲线的标题和颜色。
11. 单击**应用**以根据所做更改更新图表，然后单击**确定**以关闭“设置”窗口。图表如图 77(第 83 页) 所示。

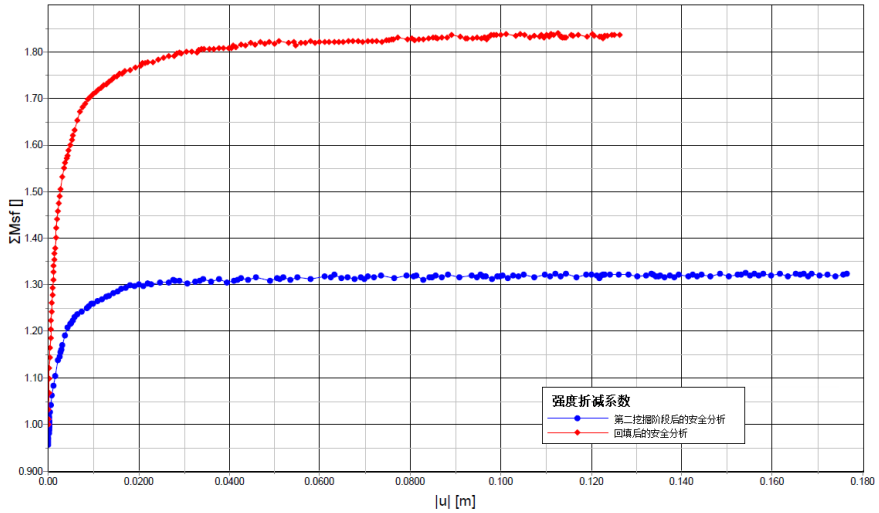


图 77: 安全系数计算

第 7 阶段表示第二个挖掘阶段，此阶段的安全系数较低，大约为 1.33。这表明岩石结构面上的岩质边坡不稳定。而第 8 阶段表示建造了挡土墙以及回填土之后的最终路堑边坡，在此阶段路堑边坡是稳定的，此阶段的安全系数较高，大约为 1.83。

5 隧道施工引起的沉降 [GSE]

本教程中讨论了中软土中盾构隧道的施工以及对桩基的影响。盾构隧道施工包括在隧道掘进机 (TBM) 前方挖掘土体，以及在其后方安装隧道衬里。在此过程中，土体通常被过度挖掘，这意味着最终隧道衬里所占用的横断面积始终小于挖掘的土体面积。尽管已采取措施填补这一缺口，但由于隧道施工过程，无法避免土体中的应力重新分布和变形。为避免破坏上部土体上现有建筑或地基，有必要预测这些影响并采取适当的措施。可以使用有限元方法进行此类分析。此教程显示了此类分析的示例。

目标：

- 隧道掘进过程建模
- 使用**不排水 (B)**选项为不排水行为建模

几何图形

本教程中考虑的隧道的直径为 5 米，且所处的平均深度为 17 米。隧道的集合图形如图 78(第 84 页) 所示。

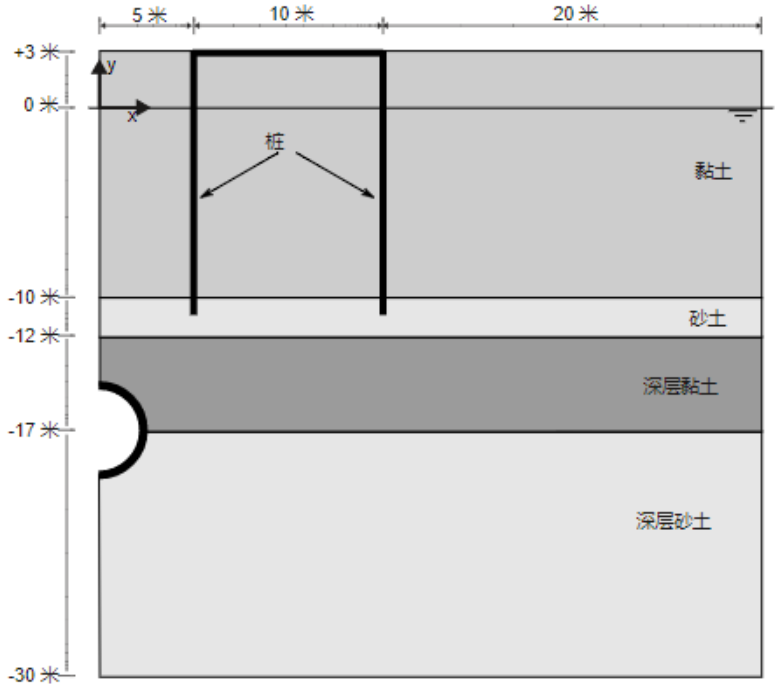


图 78: 显示土层的隧道工程几何图形

5.1 创建新项目

若要创建新项目，请遵循以下步骤：

1. 启动输入程序，然后从**快速启动**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. 在**模型**标签页中，保留**模型**（**平面应变**）和**单元**（**15-节点**）的缺省选项。
4. 将模型**等高线**设置为 x_{min} = 0 米，x_{max} = 35 米，y_{min} = -30 米以及 y_{max} = 3 米。
5. 保留单位和常量的缺省值，然后按下**确定**关闭**项目属性**窗口。

5.2 定义土壤地层学

土体轮廓指示四个不同的层：上部 13 米由软黏土类型的土体组成，其刚度随深度近似线性增加。黏土层下方有一层 2 米厚的细砂层。此层被用于建造传统砖砌房屋的旧木桩的基础层。此类建筑的桩基础在隧道旁边建模。这些桩的位移可能会对建筑造成破坏，这是非常不理想的。砂土层下方是 5 米厚的肥土黏土层。

要定义土壤地层学，请执行以下操作：

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 x = 0 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。

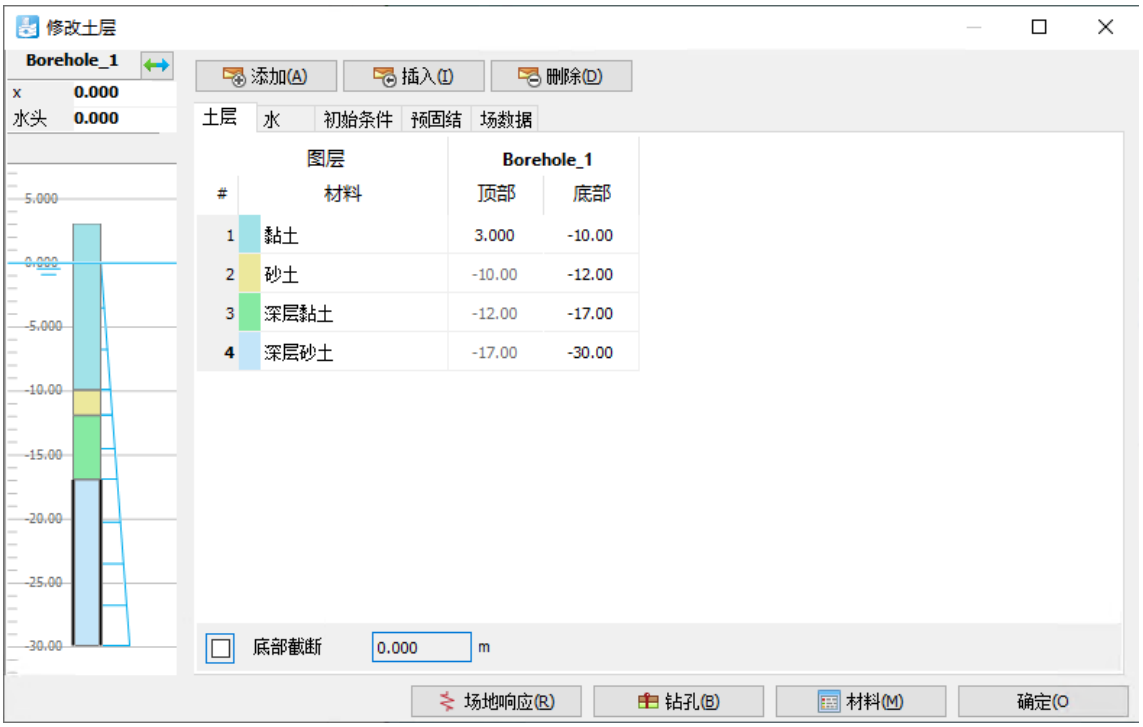


*图 79: **修改土层**窗口中的土壤地层学*

2. 创建土壤地层，如 图 79(第 85 页) 所示。
3. 将钻孔中的**水头**保持在 0 米。

5.2.1 创建和分配材料数据集

需要为黏土层和砂土层创建四个数据集。

对于上方黏土层，刚度和剪切强度随深度增加而增加。因此，将在**高级**子树中输入 E'_{inc} 和 $s_{u,inc}$ 值。E'_{ref} 和 $s_{u,ref}$ 的值成为参考层 y_{ref} 的参考值。在 y_{ref} 下方，E' 和 s_u 的实际值随深度增加而增加，具体如下：

$$E'(y) = E_{ref}' + E_{inc}'(y_{ref} - y)$$

$$s_u(y) = s_{u,ref} + s_{u,inc}(y_{ref} - y)$$

两个下方土层的数据集包括隧道界面的适当参数。在其他数据集中，界面属性可保持其缺省值。输入具有表 13(第 86 页)和表 14(第 87 页)中所列属性的四个数据集，然后将其分配给几何模型中的相应类组。

这些层有以下属性：

表 13: 黏土层的材料属性

属性	名称	黏土	深层黏土	单位
常规				
土体模型	-	摩尔-库伦	摩尔-库伦	-
排水类型	-	不排水 (B)	不排水 (B)	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	15	16	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	18	18.5	kN/m^3
力学				
参考层的杨氏模量	E'_{ref}	$3.4 \cdot 10^3$	$9.0 \cdot 10^3$	kN/m^2
泊松比	$\nu(nu)$	0.33	0.33	-
杨氏弹性模量增量	E'_{inc}	400	600	kN/m^3
参考层	y_{ref}	3.0	-12	m
参考层的不排水剪切强度	$s_{u,ref}$	5	40	kN/m^2
不排水剪切强度 inc.	$s_{u,inc}$	2	3	kN/m^3
地下水				
数据集	-	标准	标准	-
土体类型	-	粗糙	粗糙	-
请使用缺省值	-	无	无	-
水平方向渗透率	k_x	$0.1 \cdot 10^{-3}$	0.01	米/天
垂直方向渗透率	k_y	$0.1 \cdot 10^{-3}$	0.01	米/天
界面				
强度定义	-	刚性	手动	-

界面				
界面折减因子	R_{inter}	1.0	0.7	-

初始				
K_0 测定	-	手动	手动	-
侧土压力系数	$K_{0,x}$	0.6	0.7	-

表 14: 砂土层材料属性

属性	名称	砂土	深层砂土	单位
常规				
土体模型	-	HS-small	HS-small	-
排水类型	-	排水	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	16.5	17	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20	21	kN/m^3
力学				
标准排水三轴试验中的割线刚度	E_{50}^{ref}	$25 \cdot 10^3$	$42 \cdot 10^3$	kN/m^2
主固结仪荷载的切线刚度	E_{oed}^{ref}	$25 \cdot 10^3$	$42 \cdot 10^3$	kN/m^2
卸载/重新装载刚度	E_{ur}^{ref}	$75 \cdot 10^3$	$126 \cdot 10^3$	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}	$80 \cdot 10^3$	$110 \cdot 10^3$	kN/m^2
当 $G_s = 0.722\ G_0$ 时的剪切应变	$\gamma_{0.7}$	$0.2 \cdot 10^{-3}$	$0.13 \cdot 10^{-3}$	-
粘聚力	c'_{ref}	0	0	kN/m^2
摩擦角	φ'	31	35	度
剪胀角	ψ	1	5	度
地下水				
分类标准	-	标准	标准	-

地下水				
土体分类	-	粗糙	粗糙	-
请使用缺省值	-	无	无	-
水平方向渗透率	k_x	1.0	0.5	米/天
垂直方向渗透率	k_y	1.0	0.5	米/天
界面				
强度定义	-	刚性	手动	-
界面折减因子	R_{inter}	1.0	0.7	-
初始				
K_0 测定	-	自动	自动	-
预上覆岩层压力	POP	0.0	0.0	-
超固结比率	OCR	1.0	1.0	-

要创建材料集，请执行以下步骤：

1. 单击**修改土层**窗口或侧面工具栏中的**材料**按钮 ，并创建数据集。

5.3 定义结构单元

将隧道和建筑定义为结构单元。

5.3.1 定义隧道

这里考虑的隧道是圆形隧道的右半部分。生成基本几何图形后，请按照以下步骤设计圆形隧道：

1. 在**结构模式**模式中单击侧面工具栏中的**创建隧道**按钮 ，然后在绘图区域中的 (0 -17) 处单击。
   将弹出**隧道设计器**窗口，显示**横断面模式** 模式的**常规**标签页。
2. 在**形状类型**下拉菜单中选择**圆形**选项。
3. 在**整个或一半隧道**下拉菜单中选择**定义右半部分**选项。
4. 在**与起始点偏移**组中，将**轴 2** 设置为 -2.5。无需更改方向轴。
5. 单击**线段**选项卡以进入相应的标签页。
   将自动创建线段。线段列表下方将显示一个新框，可以在其中定义线段的属性。
6. 在**线段**框中，将**半径**设置为 2.5 米。
   生成的图表如 图 80(第 89 页) 所示。

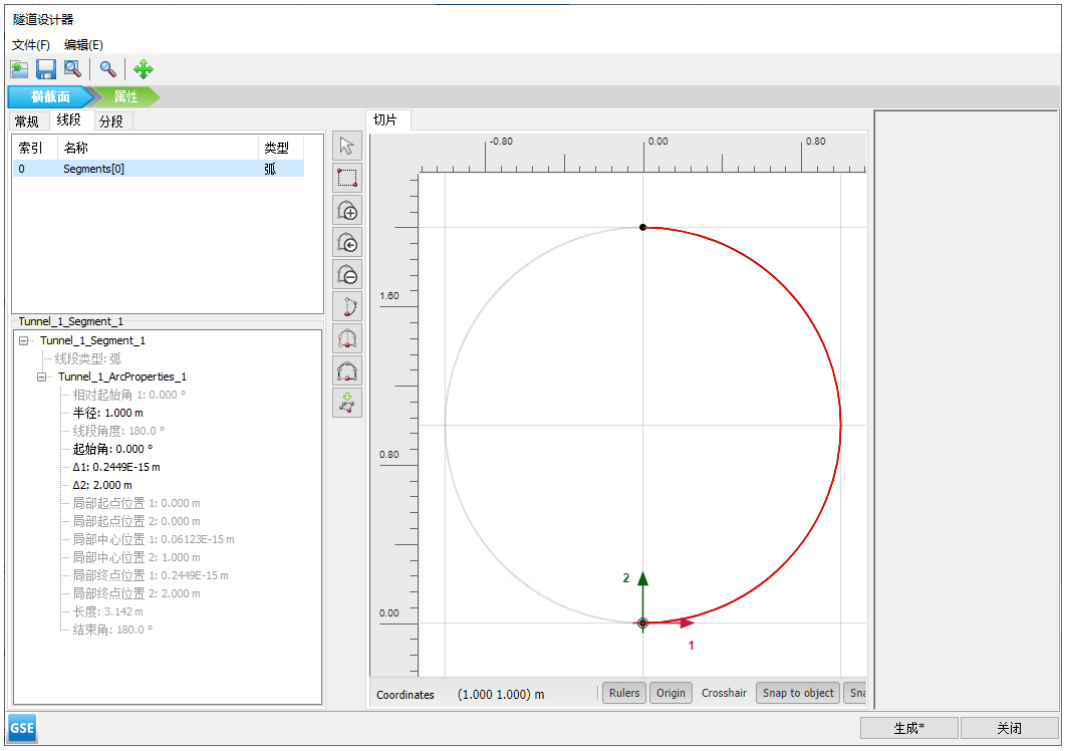


图 80: 隧道线段的几何图形

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（铰链可于隧道设计后在总绘图区域添加）。
- 隧道形状由具有不同半径的圆弧组成（例如，NATM 隧道）。

7. 单击**属性**选项卡进入相应的模式。
8. 在显示的区域中右键单击线段，然后在显示菜单中选择**创建** > **创建板**选项。
9. 在隧道设计器中，打开**选择浏览器**中的材料属性，然后单击加号按钮 以创建新的材料数据集。按照表 15(第 89 页)指定 TBM 的材料参数：

表 15: 板的材料属性

参数	名称	TBM	内衬	建筑	单位
常规					
材料类型	-	弹性	弹性	弹性	-
单位重量	W	17.7	8.4	25	kN/m/m
防止冲孔	-	否	否	否	-
力学					
各向同性	-	是	是	是	-

力学					
轴向刚度	EA_1	$63 \cdot 10^6$	$14 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{10}$	kN/m
弯曲刚度	EI	$472.5 \cdot 10^3$	$143 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{10}$	kNm^2/m
泊松比	ν(nu)	0	0.15	0	-

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。

10. 右键单击显示区域中的线段，然后在显示的菜单中选择**创建负界面**选项。
11. 在显示区域中的线段上右键单击，然后在显示的菜单中选择**创建线收缩**选项。在多段曲线属性中，为 C_{ref} 指定值 0.5%。隧道模型如图 81(第 90 页) 所示：

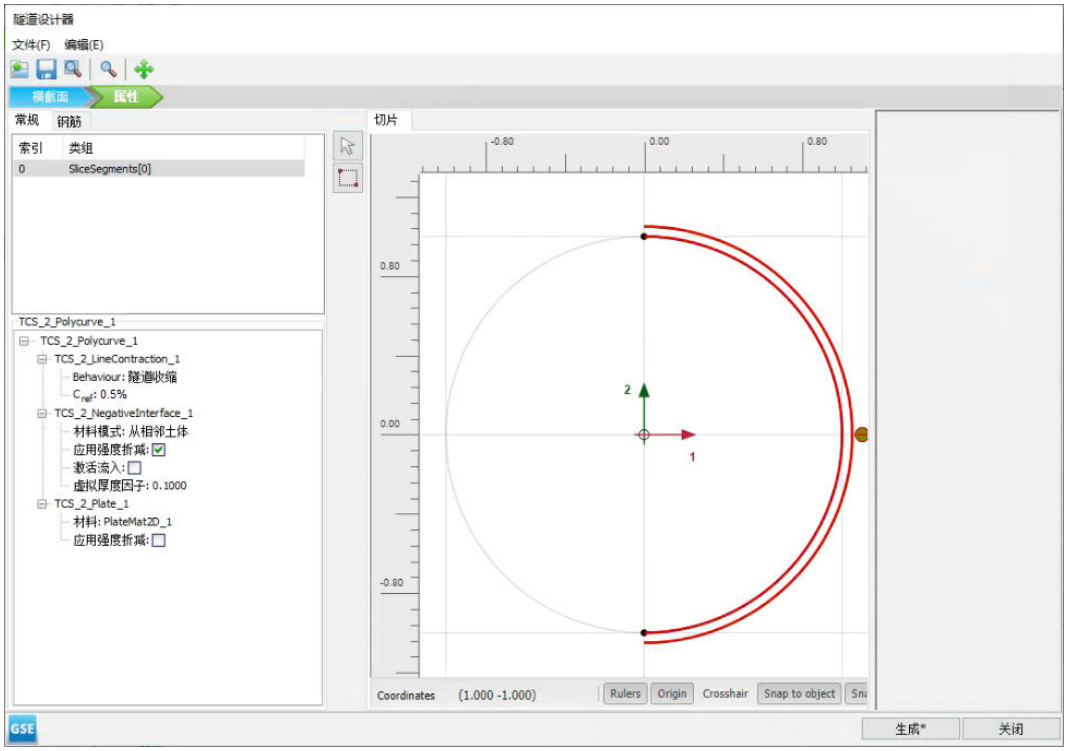


*图 81: **属性**选项卡中的隧道模型*

注释:

- C_{ref} 值为 0.5% 时相应的隧道的体积损失为 0.5%。施加在线上的实际应变是施加收缩的一半。因此，由此产生的线性收缩为 0.25%。
- 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。

12. 单击**生成**将定义的隧道包含在模型中。
13. 关闭**隧道设计器**窗口。

5.3.2 定义建筑

建筑本身将由桩基上的刚性板来表示。

1. 从边栏中，选择**创建线** > **创建板**，然后绘制一个从 (5 3) 到 (15 3) 的板来表示建筑。
2. 根据表 15(第 89 页)为建筑创建材料集，并将其指定给板。不要忘记为隧道衬里创建材质集。
3. 从边栏中，选择**创建线** > **创建预埋梁**，然后从 (5 3) 到 (5-11) 和从 (15 3) 到 (15-11) 绘制两个桩。
4. 根据表 16(第 91 页)为基础桩创建材料集，并将其指定给基础桩。为此，请单击侧工具栏中的**显示材料**按钮。 在**材料集**窗口中，将**材料集类型**参数设置为**预埋梁**，单击**新建**按钮，然后输入表 16(第 91 页)中给定的属性。

表 16: 桩（预埋梁）的材料属性

参数	名称	基础桩	单位
常规			
材料类型	-	弹性	-
单位重量	γ	7.0	kN/m^3
力学			
桩间距	$L_{spacing}$	3.0	m
横截面类型	-	预定义	-
预定义的横截面类型	-	实心圆弧梁	-
直径	-	0.25	m
刚度	E	$10 \cdot 10^6$	kN/m^2
轴向侧摩阻力	轴向侧摩阻力	线性	-
	$T_{skin,\ start,\ max}$	1.0	kN/m
	$T_{skin,\ end,\ max}$	100.0	kN/m
横向阻力	横向阻力	无限制	-
桩端反力	F_{max}	100.0	kN
界面刚度系数	缺省值	是	-

5.4 生成网格

在这种情况下，可接受的缺省全局粗糙度参数（**中**）。请注意，结构单元（板和嵌入梁）的内部自动细化系数为 0.25。

1. 进入**网格模式**。
2. 在边栏中单击**生成网格**按钮。对于**单元分布**参数，请使用**中等**选项（缺省）。
3. 单击**查看网格**按钮，以查看网格，如图 82(第 92 页) 所示。

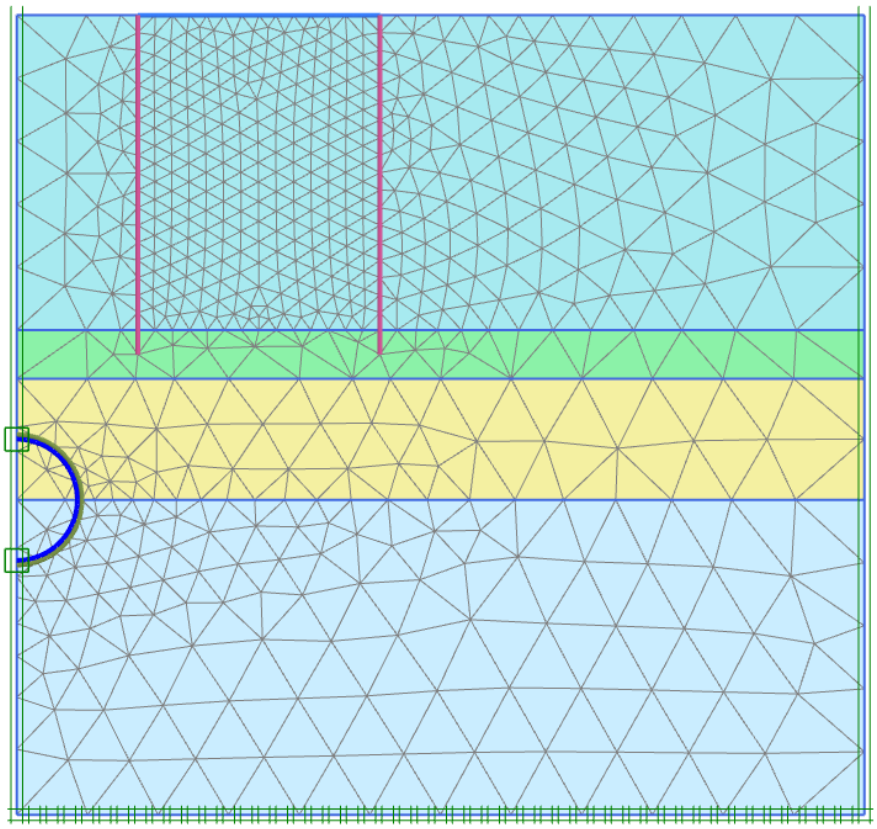


图 82: 生成的网格

注释:

选中**使用默认约束**后，延伸到至少在一个方向固定的几何对象边界的板获得固定旋转，而延伸到自由边界的板获得自由旋转。要在输出程序中查看约束，请转到顶部菜单栏，然后单击**几何图形** > **约束**。

4. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

5.5 定义并执行计算

需要进行分阶段施工计算来模拟隧道施工。

5.5.1 初始阶段

1. 进入**分阶段施工**模式，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**。水压可根据钻孔中已定义的 y=0.0 米的常规孔压产生。确保建筑、基础桩和隧道衬里为取消激活状态。

5.5.2 第 1 阶段：建筑

第一个计算阶段用于激活建筑。

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**阶段**窗口中，将阶段 ID 重命名为 Building。
3. 在**变形控制参数**子树中，选择**忽略 undr. behaviour (A,B)**选项。其余参数的缺省值对该阶段有效。
4. 在绘图区域激活建筑物的板和基础桩。

5.5.3 第 2 阶段：TBM

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**阶段**窗口中选择**变形控制参数**子树中的**将位移重置为零**选项。
3. 在**分阶段施工**中，多选择隧道内的类组。在**选择浏览器**中，取消激活两个土体类组，并将**水条件**设置为**干**。
4. 激活此阶段中代表隧道掘进机的圆形板（因此具有 TBM 材料集）以及负界面。请注意，收缩在此阶段为未激活状态。

5.5.4 第 3 阶段：TBM 锥度

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 多选板。在**选择浏览器**中激活收缩。

注释:

- 收缩表示 TBM 锥壳形状的影响（钻头直径大于尾端直径）。
- 隧道衬里本身的收缩不会在隧道衬里中引入力。收缩过程导致的衬里力的最终改变是由于周围土体中的应力重新分布或外力变化引起的。

5.5.5 第 4 阶段：尾端空隙注浆

在隧道掘进机 (TBM) 的尾端，注入灌浆以填充 TBM 和最终隧道衬里之间的间隙。对周围土体施加压力来模拟注灌浆过程。

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**分阶段施工**模式下，取消激活 TBM（板、负界面和收缩）。
3. 多选隧道内的类组。在**选择浏览器**中，激活**水分条件**。
4. 在**条件**下拉菜单中选择**用户定义**选项，然后将 $\mathbf{p_{ref}}$ 设置为 $\mathbf{-230\ kN/m^2}$。隧道内的压力分布为常量。

5.5.6 第 5 阶段：衬里安装

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**分阶段施工**中，将隧道内的类组设置为**干**。
3. 激活板和隧道的负界面。
4. 由于板当前表示隧道的最终衬里，请为板单元指定*衬里*材料集。

5.5.7 执行计算

1. 在边栏中单击**为曲线选择点**按钮。
2. 为荷载位移曲线选择一些特征点（例如，隧道上方地面的角点 (0 -14.50) 和建筑物的角点 (5 3)）。
3. 单击**计算**按钮，计算项目。
4. 计算完成后，单击保存按钮保存项目。

5.6 结果

计算后，选择最后一个计算阶段并单击**查看计算结果**按钮。**输出**程序启动，显示计算阶段结束时变形的网格，如图 83(第 95 页) 所示：

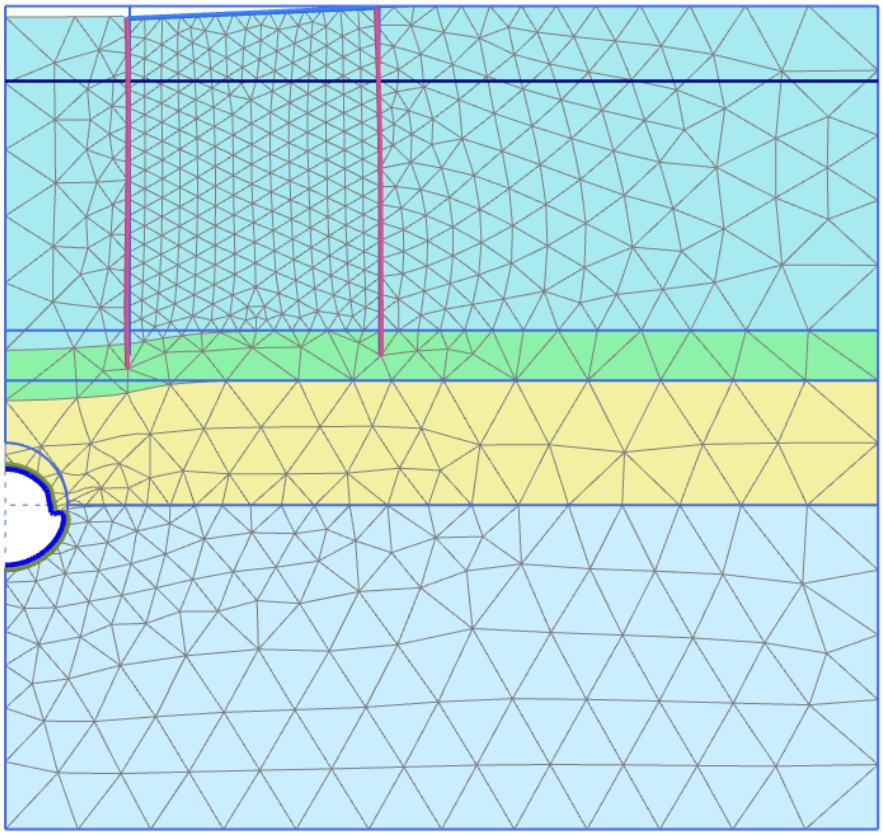


图 83: 隧道施工后的变形网格（第 5 阶段；手动放大 20 倍）

由于第二计算阶段（移除隧道内的土体和水），土体表面出现一定程度沉降，隧道衬里显示一定程度变形。在此阶段，衬里中的轴向力将达到的最大轴向力。可以双击衬里，并从**力**菜单中选择与力相关的选项来查看衬里力。轴向力图和弯矩图分别按 $5 \cdot 10^{-3}$ 和 0.2 的比例缩放，如图 84(第 95 页) 所示。

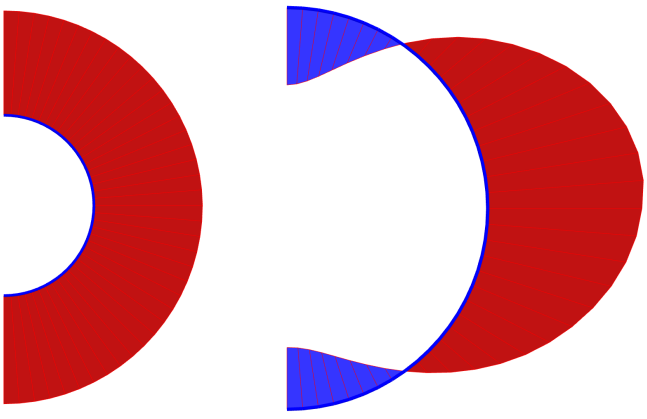


图 84: 第二阶段后衬里中的轴向力和弯矩

有效应力如图 85(第 96 页) 所示，隧道周围发生拱起。此拱起减少了作用在隧道衬里上的应力。因此，最终阶段的轴向力小于第二计算阶段后的轴向力。

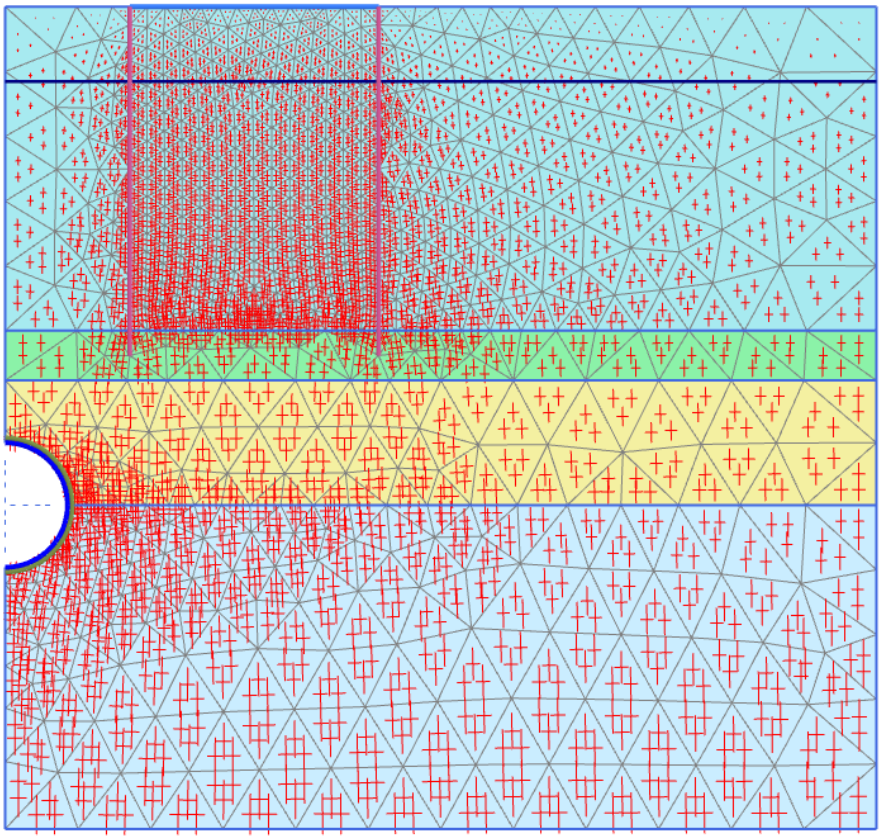


图 85: 隧道施工后的有效主应力（第 2 阶段 TBM）

要在衬里安装阶段结束时显示结构倾度，请执行以下操作：

1. 单击边栏中的**距离测量**按钮 。
2. 单击位于结构左角的节点 (5 3)。
3. 单击位于结构右角的节点 (15 3)。

将显示**距离测量信息**窗口，如图 86(第 97 页) 所示，其中显示了结构的最终倾度：

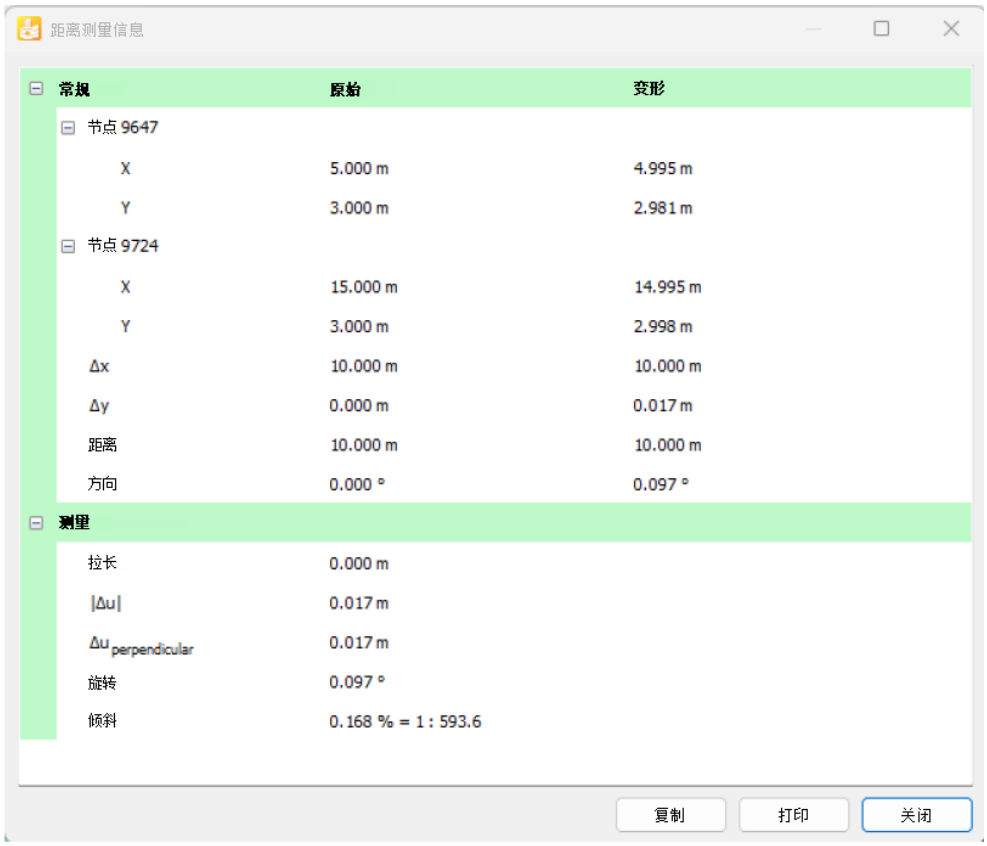


图 86: "距离测量信息"窗口

6 NATM 隧道挖掘 [GSE]

本教程说明了使用 PLAXIS 2D 进行 NATM 隧道建造分析。NATM 是一种技术，它用喷射混凝土对因挖掘而暴露的地面进行稳定，形成临时衬里。

目标：

- 使用**解除限制**法模拟 NATM 隧道建造。
- 使用**重力荷载**生成初始应力。

几何图形

隧道的几何图形如图 87(第 98 页) 所示：

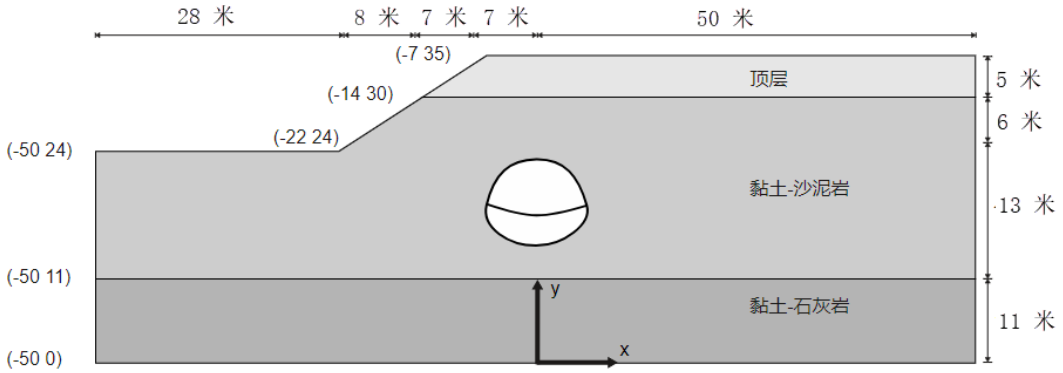


图 87: 工程几何图形

6.1 新建项目

要创建新项目，请执行以下步骤：

1. 启动输入程序，然后从**快速启动**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. 在**模型**页面中，确保将**模型**设置为**平面应变**，并将**单元**设置为 **15-节点**。
4. 将土体等高线的界线定义为 x_{min} = -50 m、x_{max} = 50 m、y_{min} = 0 m 和 y_{max} = 35 m。

6.2 定义土壤地层学

基本地层将利用**钻孔**要素创建。模型中考虑了 11 m 的黏土-石灰岩层。该土层的底部可作为 y 方向 (y_{min} = 0) 上的参考。

要定义土壤地层学，请执行以下操作：

1. 单击**创建钻孔**按钮，然后在 x = -22 m 处创建第一个钻孔。
2. 在**修改土层**窗口中创建三个土层。
   a. **第 1 层**：**顶部**和**底部**都等于 24，这意味着第 1 层在 Borehole_1 中的深度等于零。
   b. **第 2 层**：范围为**顶部** = 24，**底部** = 11。
   c. **第 3 层**：范围为**顶部** = 11，**底部** = 0。
3. 在**修改土层**窗口底部，单击**钻孔**按钮。
4. 在出现的菜单中，选择**添加**选项。
   这将弹出**添加钻孔**窗口。
5. 指定第二个钻孔的位置 (x = -14)。
6. 请注意，Borehole_2 有土层可用。
   a. **第 1 层**：**顶部**和**底部**都等于 30，这意味着第 1 层在 Borehole_2 中的深度等于零。请注意，第 2 层在 Borehole_2 中的深度大于第 1 层在 Borehole_1 中的深度。
   b. **第 2 层**：范围为**顶部** = 30，**底部** = 11。
   c. **第 1 层**：范围为**顶部** = 11，**底部** = 0。
7. 在 x = -7 处创建一个新钻孔 (Borehole_3)。
8. 在 Borehole_3 中：
   a. **第 1 层**：范围为**顶部** = 35，**底部** = 30，这意味着第 1 层在 Borehole_3 中的深度不等于零。
   b. **第 2 层**：范围为**顶部** = 30，**底部** = 11。
   c. **第 3 层**：范围为**顶部** = 11，**底部** = 0。
9. 所有钻孔的水位均位于 y = 0 m。
10. 指定如图 88(第 99 页)所示的土层分布。

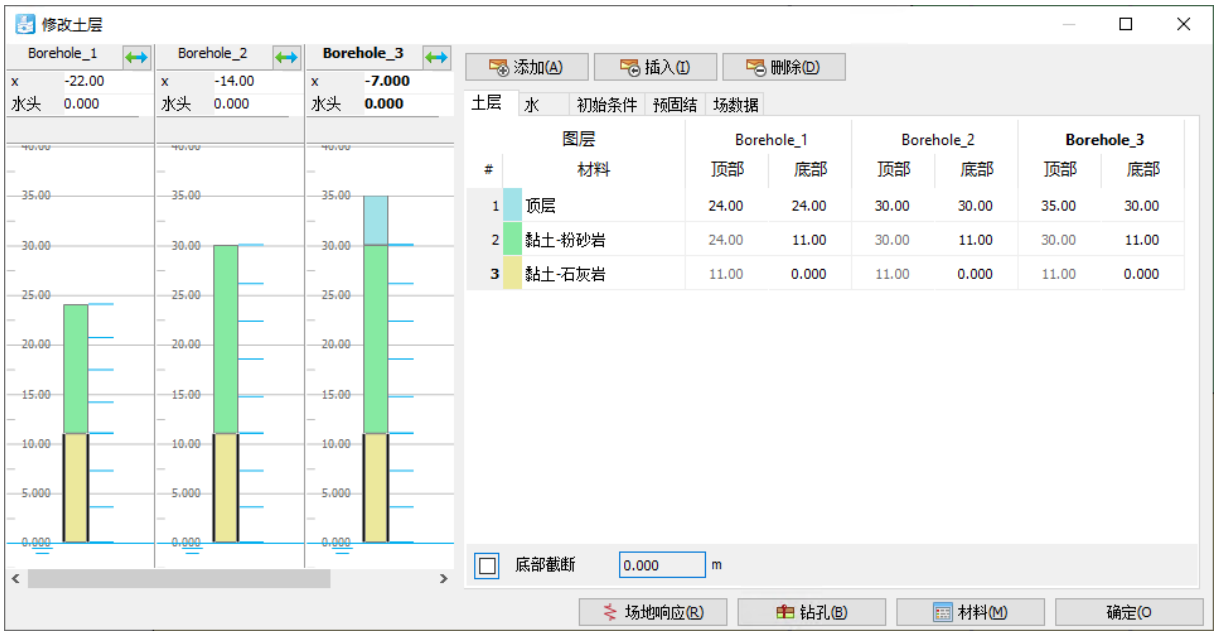


图 88: 土层分布

6.3 创建和分配材料数据集

需要为土层创建三个材料集。

请注意，第一个钻孔左侧的模型分层以 Borehole_1 为基础，最后一个钻孔右侧的分层以 Borehole_3 为基础。因此，x = -50 m 或 x = 50 m 处不需要钻孔。

土层具有以下属性，如表 17(第 100 页)所示：

表 17: 土层的材料属性

属性	名称	顶层	单位
常规			
土体模型	-	硬化土体	-
排水类型	-	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	20	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	22	kN/m^3
力学			
标准排水三轴试验中的割线刚度	E_{50}^{ref}	$40 \cdot 10^3$	kN/m^2
主固结仪荷载的切线刚度	E_{oed}^{ref}	$40 \cdot 10^3$	kN/m^2
卸载/重新装载刚度	E_{ur}^{ref}	$120 \cdot 10^3$	kN/m^2
泊松比	ν_{ur}	0.2	-
刚度应力水平依赖性的功率	m	0.5	-
粘聚力	c'_{ref}	10	kN/m^2
摩擦角	φ'	30	度
界面			
强度定义	-	刚性	-
界面折减因子	R_{inter}	1.0	-

表 18: 软岩层的材料属性

参数	名称	黏土-淤泥石头	黏土-石灰岩	单位
常规				
土体模型	-	霍克布朗	霍克布朗	-
材料行为类型	-	排水	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	25	24	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	25	24	kN/m^3
力学				
杨氏模量	E_{rm}	$1.0 \cdot 10^6$	$2.5 \cdot 10^6$	kN/m^2
泊松比	ν (nu)	0.25	0.25	-
单轴抗压强度	$\lvert \sigma_{ci} \rvert$	$25 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	kN/m^2
完整岩石的材料常量	m_i	4	10	-
地质强度指标	GSI	40	55	-
干扰因素	D	0.2	0.0	-
膨胀参数	ψ_{max}	30	35	度
膨胀参数	σ_{ψ}	400	1000	kN/m^2
界面				
强度定义	-	手动	刚性	-
界面折减因子	R_{inter}	0.5	1.0	-

1. 根据表 17(第 100 页)创建土体材料数据集，并将它们分配至相应的层（图 88(第 99 页)）。然后按照表 18(第 101 页)指定软岩层的值，从出现的窗口中查找各个强度参数的分析，如图 89(第 102 页) 所示。
2. 关闭**修改土层**窗口，并进入**结构模式**以定义结构单元。

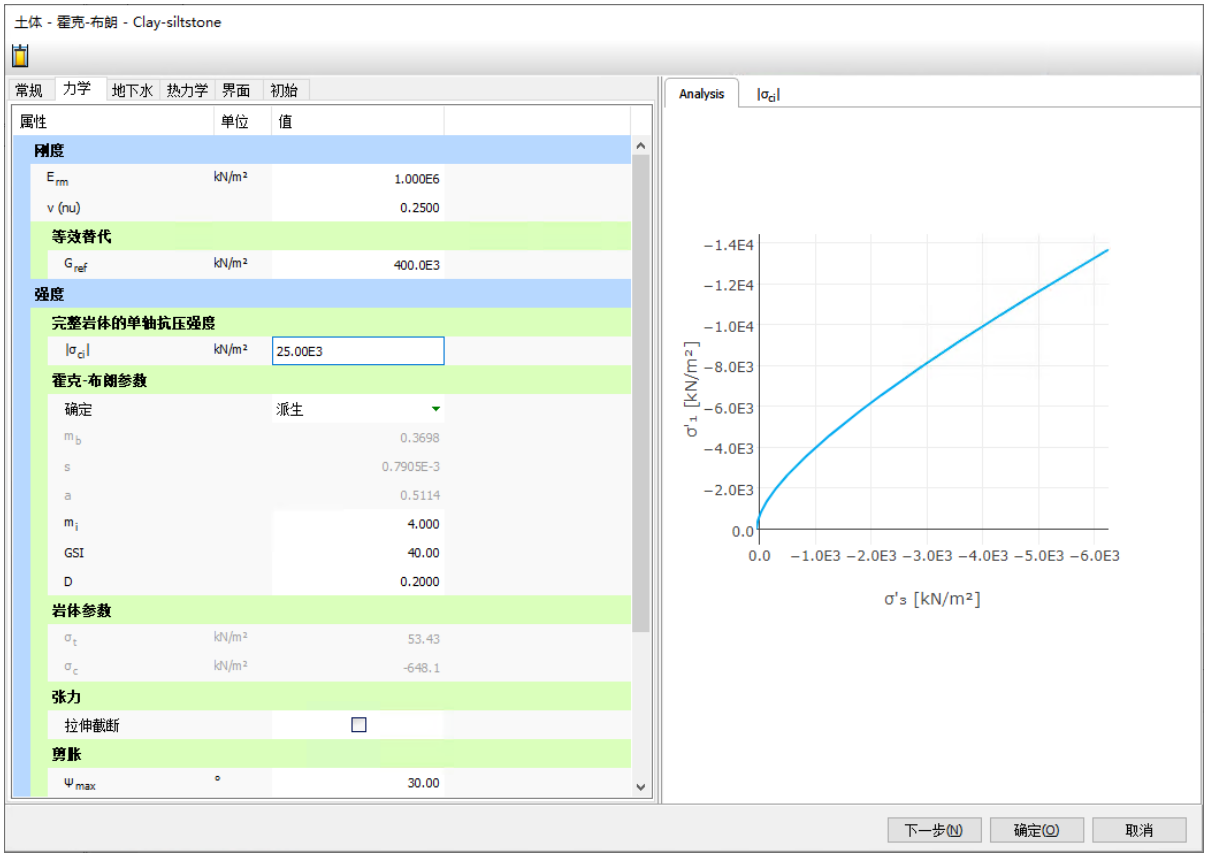


图 89: 力学参数

6.4 定义隧道

1. 在**结构模式**下，单击侧工具栏中的**创建隧道**按钮，然后单击绘图区域中的 (0 16)，指定隧道位置。这将弹出**隧道设计器**窗口。
2. 将使用缺省形状选项（**自由**）。定义模型中隧道位置的其他参数的缺省值也有效。
3. 单击**管段**选项卡。
4. 单击侧工具栏中的**添加区间**按钮。在隧道选择浏览器中。
   a. 将**管段类型**设置为**弧**。
   b. 将**半径**设置为 10.4 m
   c. 将**管段角度**设置为 22°。
5. 其余参数的缺省值有效。
6. 单击**添加区间**按钮，添加新的弧形管段。
   a. 将**半径**设置为 2.4 m。
   b. 将**管段角度**设置为 47°。
   c. 其余参数的缺省值有效。
7. 单击**添加区间**按钮，添加新的弧形管段。
   a. 将**半径**设置为 5.8 m。

b. 将**管段角度**设置为 50°。
c. 其余参数的缺省值有效。

8. 单击**延伸至对称轴**选项 ，完成隧道的右半部分。
这将自动添加一个新的弧形管段，封闭一半的隧道。
9. 单击**对称封闭**按钮 ，完成隧道。这将自动添加四个新的弧形管段，封闭该隧道。
10. 单击**分区间**选项卡。
11. 单击**添加**按钮 ，添加新的分区间。

注释:

- 当前分区间将用于将上导坑（上挖掘类组）与仰拱（下挖掘类组）分开。
- 创建新的分区间时，将显示某些警告和/或错误。在本教程中，您可以忽略它们并按照说明继续操作。

选择已创建的分区间后，在**选择浏览器**中执行以下操作：
a. 将**偏移 2** 设置为 3 m。
b. 从**线段类型**下拉菜单中选择**弧**选项。
c. 将**半径**设置为 11 m。
d. **管段角度**设置为 360°。

12. 单击**选择多个对象**按钮 ，然后选择切片中的所有几何实体。
13. 单击**相交**按钮 。
14. 在显示区域中选择切片外分区间的相交部分，并单击侧工具栏中的**删除**按钮 删除此部分。

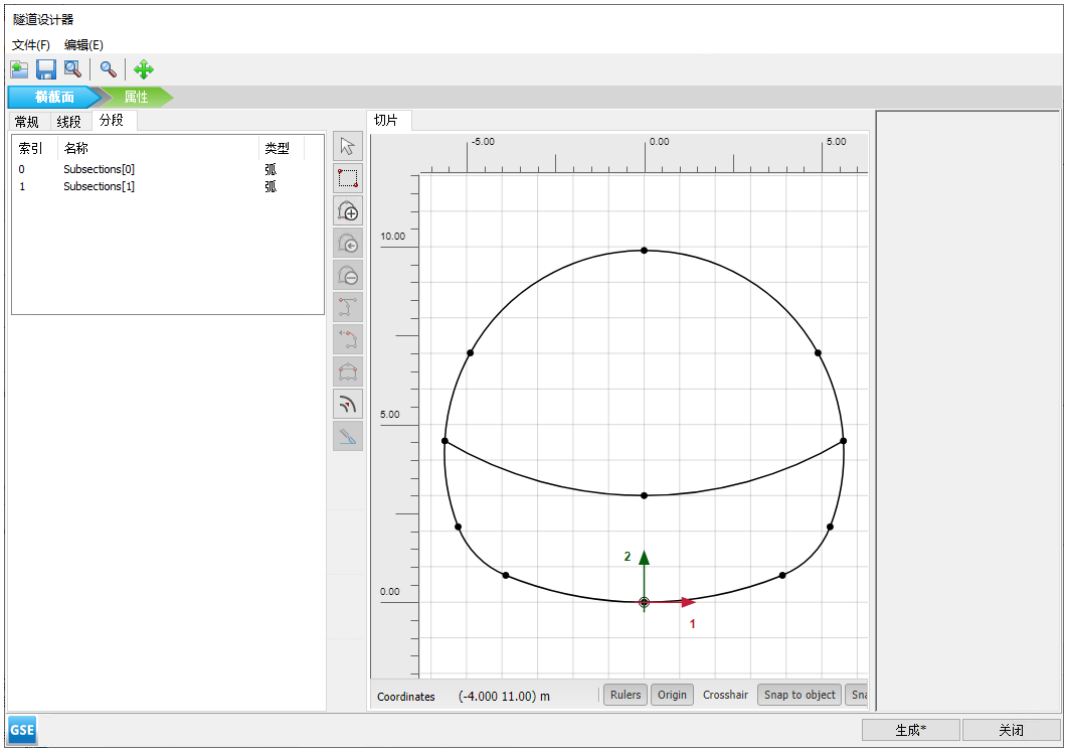


图 90: 隧道横截面中的管段

15. 进入**属性**页面。
16. 在显示区域中多选多段曲线，右键单击并在出现的菜单中选择**创建** > **创建板**。

17. 隧道横截面中的各个管段如图 90(第 103 页) 所示。
18. 按 **<Ctrl + M>** 以打开**材料集**窗口。根据表 19(第 104 页)，为创建的板新建一个材料数据集。

表 19: 板的材料属性

参数	名称	内衬	单位
常规			
材料类型	-	弹性	-
单位重量	W	5	kN/m/m
防止冲孔	-	否	-
力学			
各向同性	-	真实	-
轴向刚度	EA_1	$6.0 \cdot 10^6$	kN/m
弯曲刚度	EI	$20 \cdot 10^3$	kNm^2/m
泊松比	ν	0.15	-

19. 多选创建的板，在**选择浏览器**中，将材料**衬里**分配至所选板。
20. 将负界面分配至定义隧道形状（而非挖掘水平或分区间）的线。
隧道设计器窗口中的最终隧道视图如图 91(第 104 页) 所示：

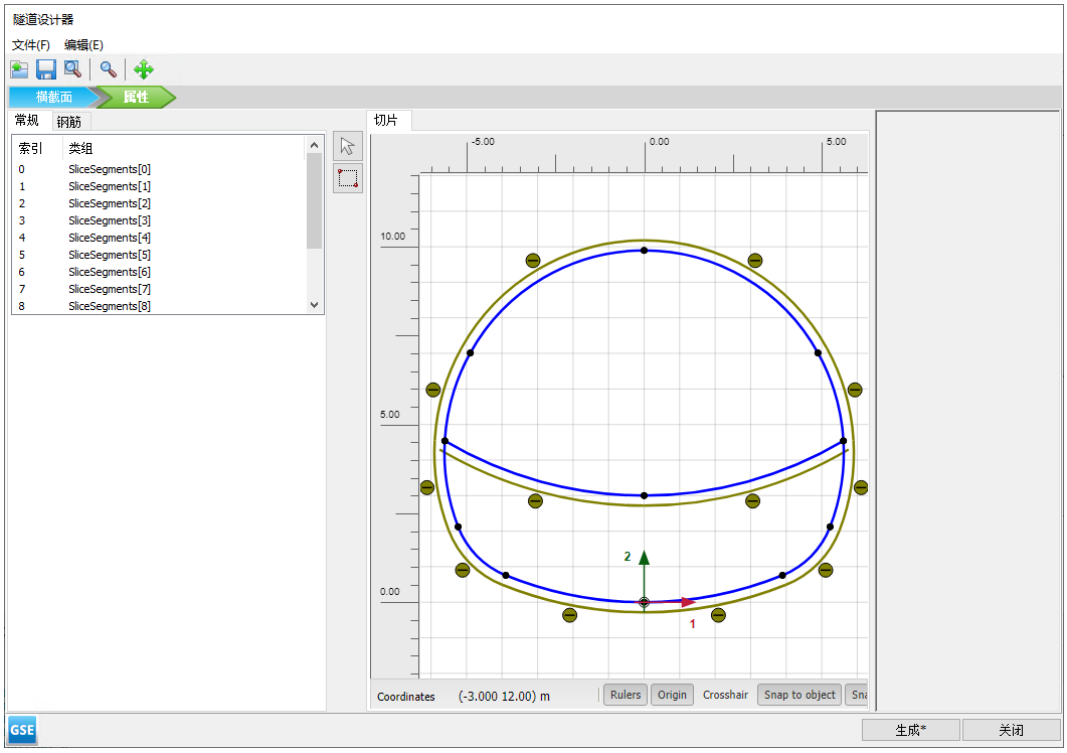


图 91: 最终隧道

21. 单击**生成**以更新模型中的隧道，并单击**关闭**。

6.5 生成网格

在这种情况下，可接受的缺省全局粗糙度参数（**中**）。

1. 进入**网格模式**。
2. 在边栏中单击**生成网格**按钮 。对于**单元分布**参数，请使用**中等**选项（缺省）。
3. 单击**查看网格**按钮 ，以查看网格，如图 92(第 105 页) 所示。

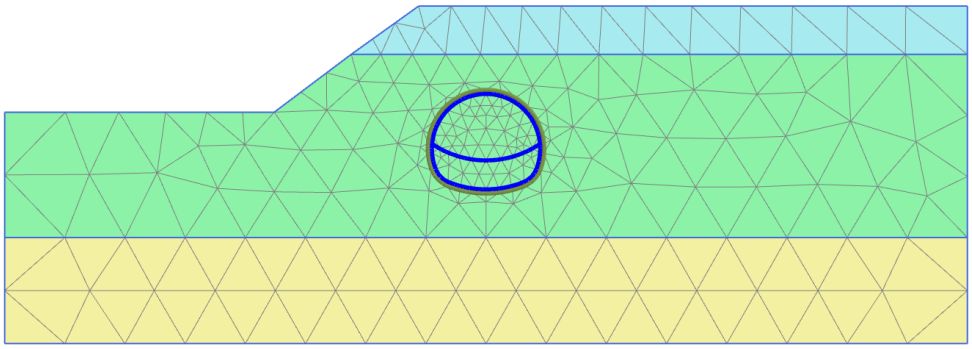


图 92: 生成的网格

4. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

6.6 定义并执行计算

为了模拟隧道的建造，需要进行分步施工计算，其中激活隧道衬里并取消激活隧道内部的土体类组。计算阶段为**塑性**分析和**分步施工**。采用 β 法模拟三维成拱效应。其概念是将作用于隧道建造位置周围的初始应力 p_k 分为两部分，一部分是 (1-β) p_k，应用于不受支持的隧道，另一部分是**解除限制**法，应用于受支持的隧道。

要应用 PLAXIS 2D 中的这种方法，可以使用模型浏览器中的**应力释放**选项，该选项可用于每种已停用的土体类组。**解除限制**定义为之前所述的因子 (1-β)。例如，如果已停用的土体类组中 60% 的初始应力不应出现在当前的计算阶段（因此稍后只考虑剩余的 40%），这意味着该未激活类组的**应力释放** (1-β) 参数应设置为 60%。可在后续的计算阶段增加**解除限制**值，直至达到 100%。

要定义计算过程，请遵循这些步骤：

6.6.1 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。请注意，土层不是水平的。在这种情况下，不建议使用 **K0 程序**来生成初始有效应力。

   相反，要使用**重力荷载** 。**阶段**窗口的**常规**子树中有此选项。
3. 本例中将不考虑水。通用潜水位应保持在模型库。

4. 确保隧道未激活。

6.6.2 第 1 阶段：第一次隧道挖掘（应力释放比）

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**分阶段施工**模式下，停用隧道中的上部类组。不要激活隧道衬里。
3. 当已停用的类组仍被选中时，在**选择浏览器**中将**应力释放(1 - β)** 设置为 60%。

第 1 阶段的模型如图 93 (第 106 页) 所示。

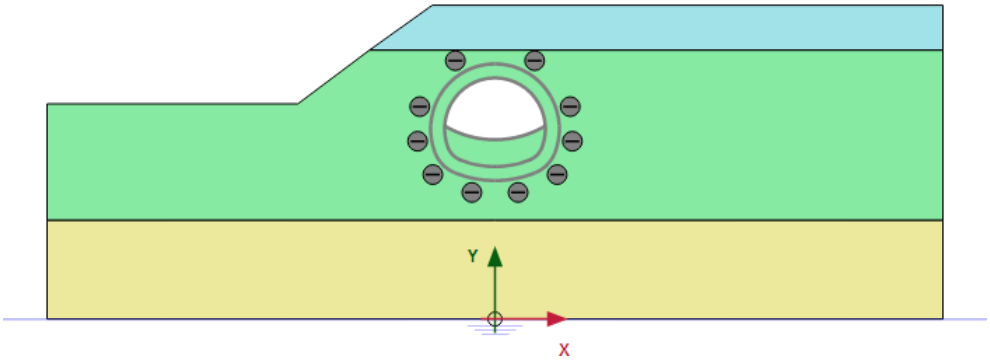


图 93: 第 1 阶段的配置

6.6.3 第 2 阶段：第一次（临时）衬里

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**分阶段施工**模式下，**激活**在前一阶段挖掘的隧道部分的**衬里**和**界面**。
3. 选择已停用的类组。在**选择浏览器**中，将**应力释放**设置为 100%，如图 94(第 106 页) 所示。

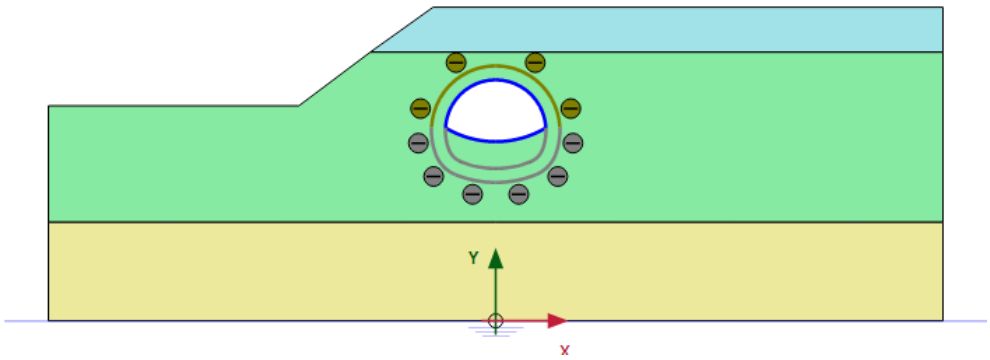


图 94: 第 2 阶段的配置

6.6.4 第 3 阶段：第二次隧道挖掘（应力释放比）

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**分阶段施工模式**下，停用隧道中部的较低类组（仰拱）和临时衬里。
3. 当较低的已停用类组仍被选中时，在**选择浏览器**中将**应力释放**设置为 60%。
4. 第 3 阶段的模型如图 95 (第 107 页) 所示。

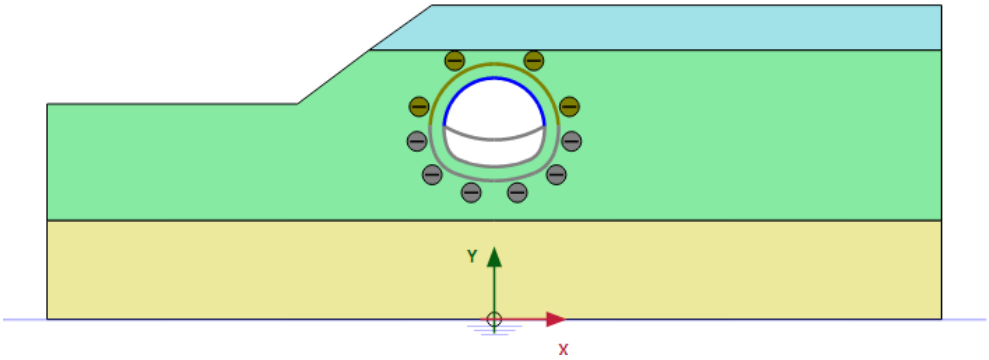


图 95: 第 3 阶段的配置

6.6.5 第 4 阶段：第二次（最终）衬里

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 激活剩余衬里和界面。
   整个隧道周围的所有板和界面均激活。
3. 选择较低的已停用类组。在**选择浏览器**中，将**应力释放比**设置为 100 %。
4. 第 4 阶段的模型如图 96 (第 107 页) 所示。

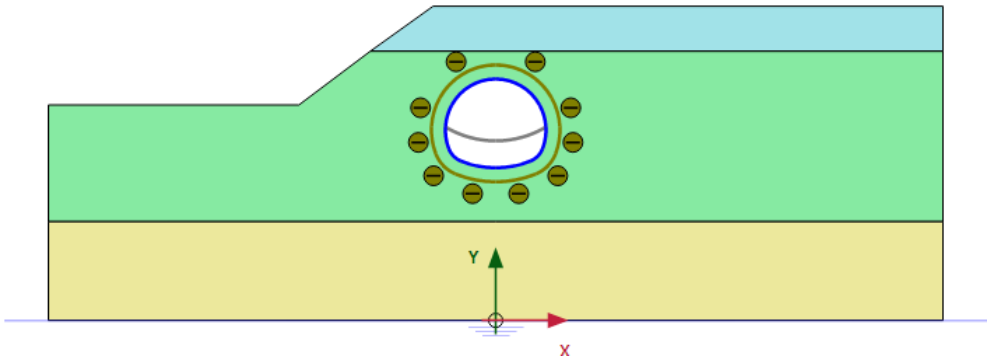


图 96: 第 4 阶段的配置

6.6.6 执行计算

1. 在边栏中单击**为曲线选择点**按钮 。
2. 在坡顶点和隧道顶选择一个节点。这些点可能可用于在施工阶段评估变形。
3. 单击**计算**按钮 ，计算项目。
4. 计算完成后，单击保存按钮 保存项目。

6.7 结果

计算后，选择最后一个计算阶段并单击**查看计算结果**按钮。**输出**程序启动，显示计算阶段结束时变形的网格，如 图 97(第 108 页) 所示：

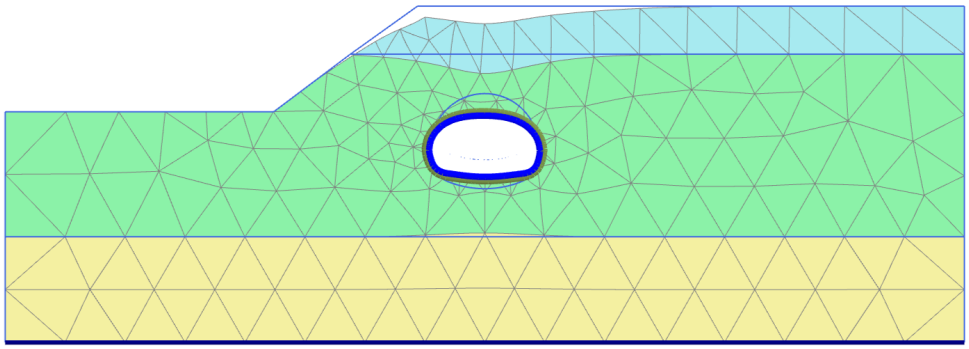


图 97: 最后一个计算阶段结束时变形的网格

要显示隧道内产生的弯矩：

1. 要选择所有隧道截面的衬里，单击侧边工具栏中相应的按钮，并拖动鼠标，定义一个矩形，该矩形包含所有隧道截面。在出现的窗口中选择**板**选项，如图 98(第 108 页) 所示：

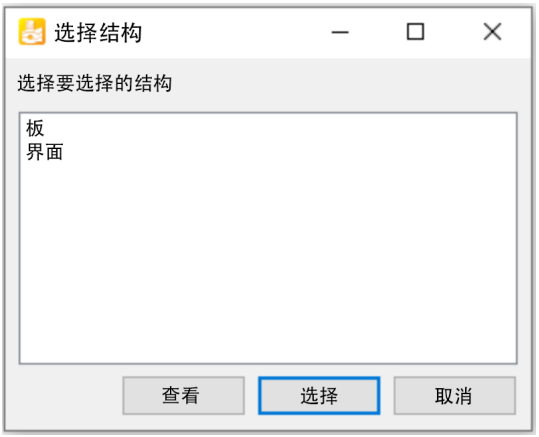


图 98: "选择结构"窗口

2. 单击**查看**。

   注意，隧道衬里在**结构**视图中显示。
3. 在**内力**菜单中选择**弯矩 M** 选项。以 0.5 的系数缩放的结果如图 99(第 109 页) 所示。

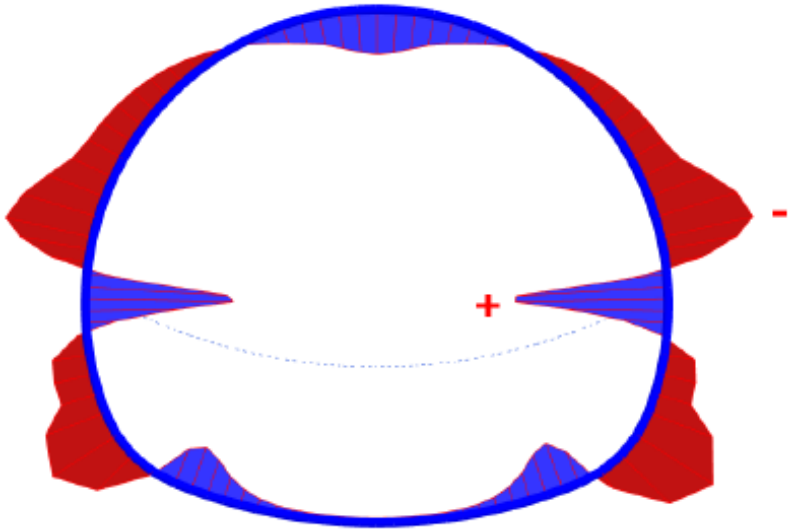


图 99: 所得的 NATM 隧道中的弯矩

7 使用锚定墙进行干地挖掘 [ADV]

本示例涉及干地挖掘施工。以混凝土地连墙支撑挖掘施工。用施加了预应力的地锚杆锚定墙壁。

PLAXIS 2D 允许对这种问题类型进行详细建模。本示例展示了如何对地锚杆进行建模以及如何向锚杆施加预应力。此外，干地挖掘涉及地下水渗流计算，以生成新的水压分布。分析的这一方面有详细的解释。

目标：

- 对地锚杆进行建模。
- 通过地下水渗流计算生成孔压。
- 显示模型中的接触应力和合力。
- 缩放显示的结果。

几何图形

挖掘施工宽 20 米，深 10 米。使用长 16 米，厚 0.35 米的混凝土地连墙保持周围的土体。每面墙壁使用两排地锚杆支撑墙壁。锚杆总长度为 14.5 米，倾斜 33.7 度 (2:3)。在挖掘施工的左侧，考虑 10 kN/m^2 的表面荷载。

相关的土体部分包括三个不同的层。从地面至深 3 米处是相对松散的细砂土。该层下方至最低 15 米处，是大致均匀的致密级配良好砂土层。该层特别适合安装地锚杆。底层是壤土，位于很深的地方。在该模型中，视该层为 15 米，如图 100(第 110 页) 所示。

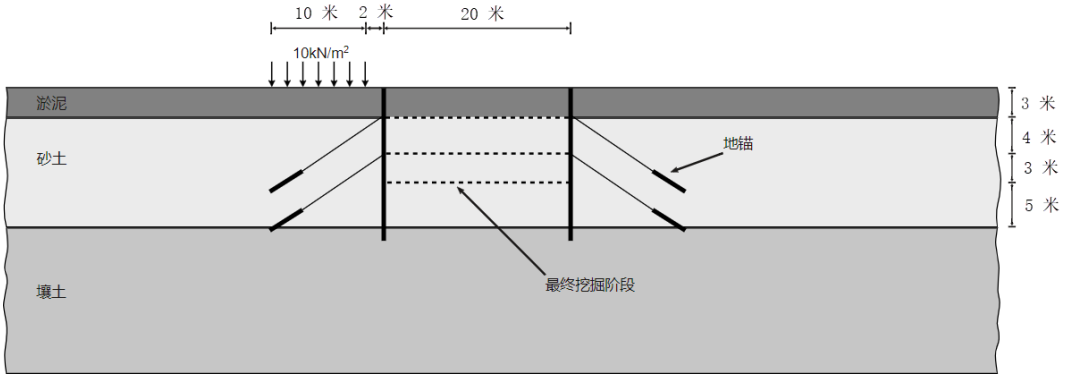


图 100: 以锚定墙支撑挖掘施工

7.1 创建新项目

1. 启动输入程序，然后从**快速启动**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. 在**模型**页面中，保留**模型**（**平面应变**）和**单元**（**15 节点**）的缺省选项。

4. 将模型**等高线**设置为 x_{min} = 0 米，x_{max} = 100 米，y_{min} = 0 米，y_{max} = 30 米。
5. 保留单位和常量的缺省值，然后按下**确定**关闭**项目属性**窗口。

7.2 定义土壤地层学

要定义土壤地层学，请执行以下操作：

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 x = 0 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 向钻孔添加三个土层。向最上面土层的**顶**层赋值 30，以此将地面层定位在 y = 30 处。这些土层的底层分别位于 27、15 和 0 m 处。
3. 将**水头**设置为 23 m。
   土层地层如图 101 (第 111 页) 所示：

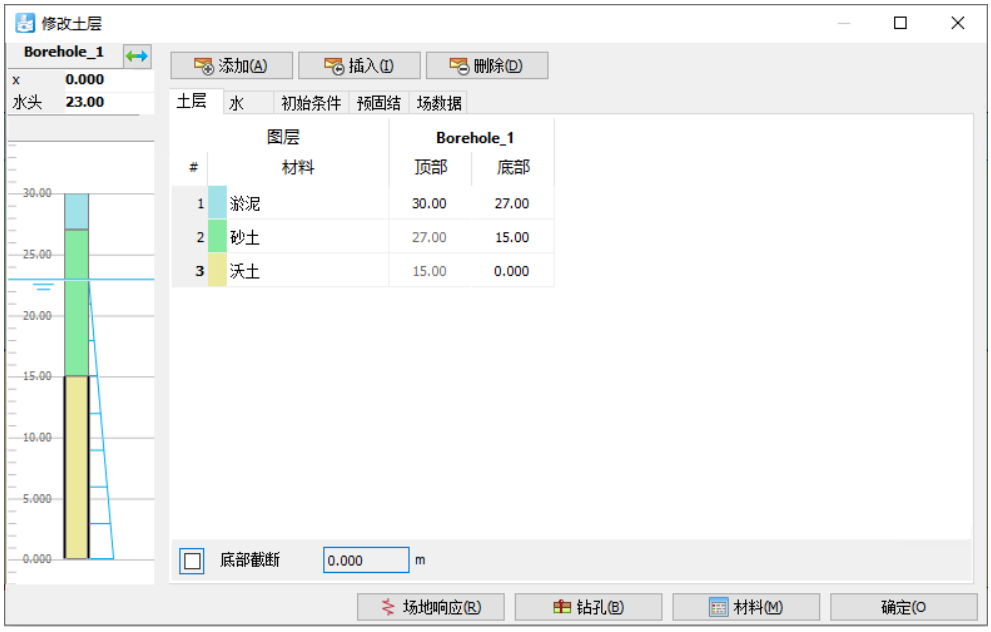


图 101: "修改土层"窗口

7.3 创建和分配材料数据集

需要创建三个数据集。材料具有以下属性，如表 20(第 111 页)所示：

表 20: 土体和界面属性

参数	名称	淤泥	砂土	壤土	单位
常规					
土体模型	模型	硬化土体	硬化土体	硬化土体	-

参数	名称	淤泥	砂土	壤土	单位
常规					
排水类型	类型	排水	排水	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	16	17	17	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20	20	19	kN/m^3
力学					
标准排水三轴试验中的割线刚度	E_{50}^{ref}	$20 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^3$	kN/m^2
主固结仪荷载的切线刚度	E_{oed}^{ref}	$20 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	kN/m^2
卸载/重新装载刚度	E_{ur}^{ref}	$60 \cdot 10^3$	$90 \cdot 10^3$	$36 \cdot 10^3$	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	0.8	-
粘聚力（常量）	c'_{ref}	1	0	5	kN/m^2
摩擦角	φ'	30	34	29	度
剪胀角	ψ	0	4	0	度
正常固结 K_0 值	K_0^{nc}	0.5	0.4408	0.5152	-
地下水					
分类标准	-	USDA	USDA	USDA	-
SWCC 拟合方法	-	Van Genuchten	Van Genuchten	Van Genuchten	-
土体分类	-	淤泥	砂土	壤土	-
< 2 μm	-	6.0	4.0	20.0	%
2μm - 50μm	-	87.0	4.0	40.0	%
50μm - 2mm	-	7.0	92.0	40.0	%
渗流参数 - 使用缺省值	-	从数据集	从数据集	从数据集	-
水平方向渗透率	k_x	0.5996	7.128	0.2497	米/天
垂直方向渗透率	k_y	0.5996	7.128	0.2497	米/天
界面					
强度定义	-	手动	手动	刚性	-
界面折减因子	R_{inter}	0.65	0.70	1.0	-

界面					
考虑间隙闭合	-	是	是	是	
初始					
K_0 测定	-	自动	自动	自动	-
预上覆岩层压力	*POP*	0	0	25	kN/m^2
超固结比率	*OCR*	1.0	1.0	1.0	-

1. 使用表 20(第 111 页)中给出的参数定义三个土体和界面数据集。
2. 将材料数据集分配给相应的土层（图 101(第 111 页)）。

7.4 定义结构单元

地连墙、挖掘水平、地锚和表面荷载的创建描述如下。

1. 单击**结构**选项卡，继续在**结构模式**中输入结构单元。

7.4.1 要定义地连墙和界面，请执行以下操作：

必须定义具有以下材料属性的地连墙，如表 21(第 113 页)所示：

表 21: 地连墙（板）的材料属性

参数	名称	值	单位
常规			
材料类型	-	弹性	-
重量	*W*	8.3	kN/m/m
防止冲孔	-	真实	-
力学			
各向同性	-	真实	-
轴向刚度	EA_1	$12 \cdot 10^6$	kN/m
弯曲刚度	*EI*	$120 \cdot 10^3$	kNm^2/m
泊松比	ν (nu)	0.15	-

1. 在**结构模式**下，将地连墙建模为通过 (40 30) - (40 14) 和 (60 30) - (60 14) 的板。

2. 在模型中多选板。
3. 在**选择浏览器**中单击**材料**。

   该视图将更改，旁边将显示下拉菜单和加号按钮，如图 102(第 114 页) 所示：



图 102: 在"选择浏览器"中分配材料

4. 单击添加按钮 。
   为板创建新的材料集。
5. 根据表 21(第 113 页)中列出的属性，定义地连墙的材料数据集。混凝土的杨氏弹性模量为 35 GN/m^2，墙体厚度为 0.35 m。
6. 将正负界面分配给已创建的代表地连墙的几何线。

7.4.2 要定义挖掘层，请执行以下步骤：

土体挖掘分为三个阶段：第一挖掘层对应淤泥层底部，并将自动创建。要定义剩余挖掘阶段，请执行以下步骤：

1. 在 (40 23) 和 (60 23) 之间绘制一条线 ，定义第二个挖掘阶段。
2. 在 (40 20) 和 (60 20) 之间绘制一条线 ，定义第三个挖掘阶段。

7.4.3 定义地锚

可以通过点对点锚和嵌入梁的组合为地锚建模。嵌入梁模拟锚的注浆部分，而点对点锚模拟其自由长度。实际上，注浆体周围存在复杂的三维应力状态，该状态无法在二维模型中进行模拟。

锚和注浆体的坐标 如表 22(第 114 页)、表 23(第 115 页) 和表 24(第 115 页)所列，注浆体的材料属性如表 25(第 115 页)。

表 22: 点对点锚的坐标

锚位置	名称	第一个点	第二个点
顶部	左	(40 27)	(31 21)
	右	(60 27)	(69 21)
底部	左	(40 23)	(31 17)
	右	(60 23)	(69 17)

表 23: 锚杆属性（点对点锚）

参数	名称	值	单位
材料类型	-	弹性	-
轴向刚度	EA	$500 \cdot 10^{3}$	kN
平面外间距	$L_{spacing}$	2.5	m

表 24: 注浆坐标

锚位置	名称	第一个点	第二个点
顶部	左	(31 21)	(28 19)
	右	(69 21)	(72 19)
底部	左	(31 17)	(28 15)
	右	(69 17)	(72 15)

表 25: 注浆体属性（嵌入梁）

参数	名称	值	单位
常规			
材料类型	-	弹性	-
单位重量	γ	0	kN/m^3
力学			
桩间距	$L_{spacing}$	2.5	m
梁类型	-	预定义	-
预定义梁类型	-	实心圆弧梁	-
直径	D	0.3	m
刚度	E	$7.07 \cdot 10^{6}$	kN/m^2
轴向侧摩阻力	分布	线性	-
	$T_{skin,\ start,\ max}$	400	kN/m
	$T_{skin,\ end,\ max}$	400	kN/m
横向阻力	横向阻力	无限制	-
桩端反力	F_{max}	0	kN
界面刚度因数	缺省值	是	-

1. 根据表 22(第 114 页)定义点对点锚杆 。
2. 根据表 23(第 115 页)中指定的参数创建**锚**材料数据集。
3. 在绘图区域中多选锚。在**选择浏览器**的**材料**下拉菜单中选择相应的选项可指定材料数据集。
4. 根据表 24(第 115 页)，使用**嵌入梁**按钮 定义注浆体。
5. 根据表 25(第 115 页)中指定的参数创建**注浆**材料数据集，并将其分配给注浆体。
6. 将嵌入梁的**行为**设置为**注浆体**，如图 103(第 116 页) 所示。

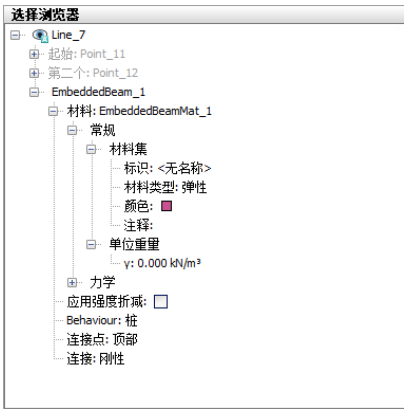


图 103: "选择浏览器"中的嵌入梁

将自动建立与锚的连接。

7. 多选（选择时 **<Ctrl>** 按住）顶部点对点锚和嵌入梁。右键单击所选区域，并在上下文菜单中右键单击并选择**组**选项。
8. 在**模型浏览器**中展开**组子树**。
   请注意，将创建一个由顶部地锚单元组成的组。
9. 单击**模型浏览器**中的 **Group_1** 并键入新名称（例如，GroundAnchor_Top）。
10. 遵循相同的步骤创建组并重命名底部地锚。

虽然不能用此二维模型为精确的应力状态和与土体的交互作用建模，可以用这种方式在假定注浆体相对于土体无滑动的情况下，在全局层面上估计结构的应力分布、位移和稳定性。此模型无法评估地锚的拔出力。

7.4.4 要定义分散荷载，请执行以下步骤：

1. 在 (28 30) 和 (38 30) 之间创建线荷载 。

7.5 生成网格

要生成网格，请遵循以下步骤：

1. 进入**网格模式**。
2. 在边栏中单击**生成网格**按钮 。**单元分布**参数（**中等**）使用缺省选项。
3. 单击**查看网格**按钮 ，以查看网格，如图 104(第 117 页) 所示。

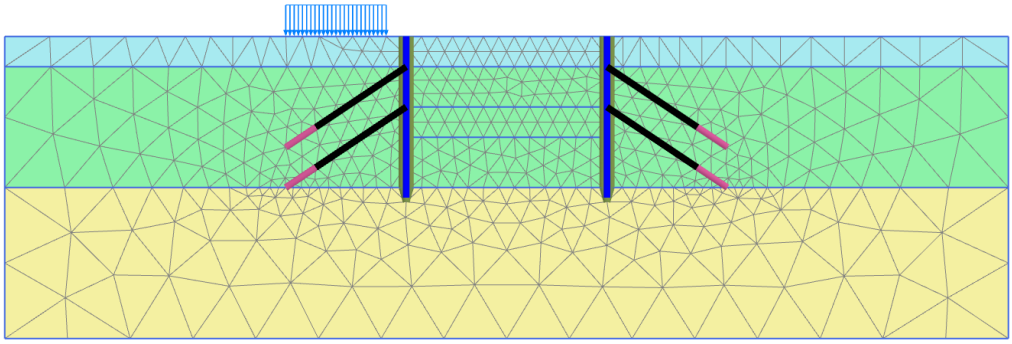


图 104: 生成的网格

7.6 定义并执行计算

本项目的计算包括六个阶段。初始阶段（第 0 阶段），生成初始应力。在第 1 阶段，建造墙壁并激活表面荷载。在第 2 阶段，在不链接锚杆和墙壁的情况下挖掘基坑的前 3 米。在该深度处，挖掘是干地施工。在第 3 阶段，安装第一个锚杆并施加预应力。在第 4 阶段，再挖掘 7 米的深度。在该深度处，挖掘仍然是干地施工。在第 5 阶段，安装第二个锚杆并施加预应力。在第 6 阶段，继续挖掘至最终 10 米的深度，包括挖掘施工的脱水。

在定义计算阶段前，可在**渗流条件**模式下定义在计算中要考虑的水位。在最后一个挖掘阶段降低水位。在侧边界处，地下水水头保持在 23.0 米。问题的底部边界应是封闭的。抽干地下水会触发地下水渗流。挖掘施工底部的水压为零，即地下水水头与垂直高度相同（水头 = 20 米）。绘制新的一般潜水位并进行地下水渗流计算可以达到这种条件。在地下水渗流计算过程中激活界面可以防止水流渗透墙壁。

7.6.1 初始阶段

初始应力场通过 **K0 程序**生成，并使用由该程序自动定义的所有类组中的缺省 K_0 值。

1. 进入**分阶段施工模式**。
2. 最初，所有结构组件和荷载都处于非激活状态。因此，请确保已停用板、点到点锚、嵌入梁行和界面荷载。
3. 在**阶段浏览器**中双击初始阶段将使用初始阶段的缺省参数。请选择**潜水**选项作为**孔压计算类型**。请注意，当孔压由潜水位产生时，定义的潜水位的完整几何图形将用于产生孔压。
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。
   将自动为**全局水位**指定根据钻孔中指定的水头值创建的水位（**BoreholeWaterLevel_1**）。
7. 初始 阶段的模型如图 105 (第 118 页) 所示。

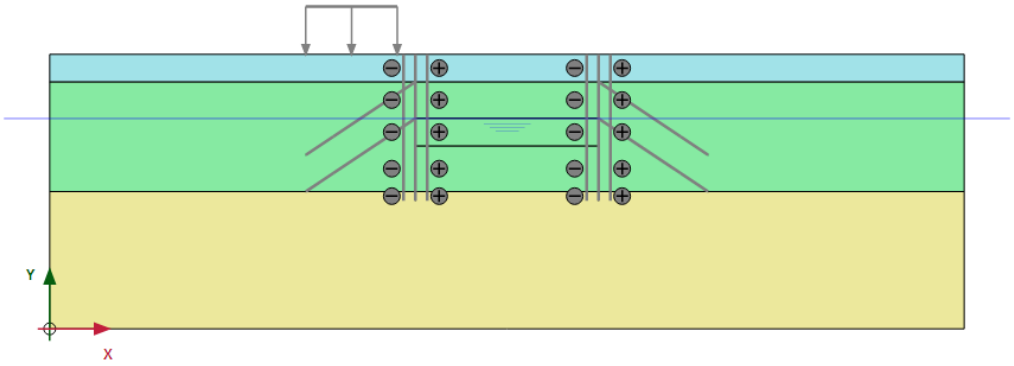


图 105: 初始阶段的配置

7.6.2 第 1 阶段：激活墙体和荷载

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**分阶段施工模式**中，单击**模型浏览器**中墙体和界面前方的复选框来激活所有墙体和界面。项目中的激活单元由绿色复选标记指示。
3. 激活分散荷载。
4. 在**选择浏览器**中，选择线荷载并指定值为 -10 至 $q_{y,start,ref}$，如图 106(第 118 页) 所示：



图 106: "选择浏览器"中的线荷载

分阶段施工模式下第 1 阶段的模型如图 107(第 118 页) 所示：

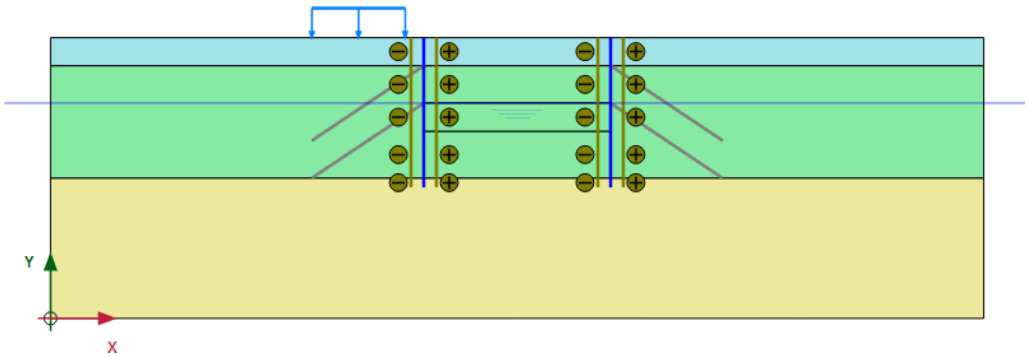


图 107: 分阶段施工模式下第 1 阶段的配置

7.6.3 第 2 阶段：第一个挖掘阶段

1. **在阶段浏览器**中单击**添加阶段**按钮 可添加新的阶段。
2. 在**分阶段施工模式**下停用挖掘的上部类组

第一个挖掘阶段中的模型如图 108 (第 119 页) 所示。

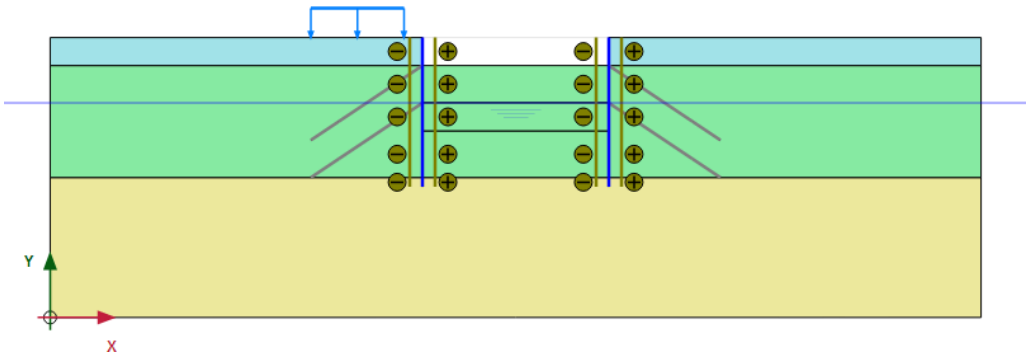


图 108: 分阶段施工模式下第 2 阶段的配置

7.6.4 第 3 阶段：第一锚行

1. 在**阶段浏览器**中单击**添加阶段**按钮 。
2. 单击**模型浏览器**中**组**子树下 **GroundAnchors_Top** 前方的复选框可激活上方地锚杆。
3. 多选顶部点对点锚。
4. 在**选择浏览器**中，将**调整预应力**参数设置为 **True**，并向预应力赋值 500 kN。

注释: 在已完成分阶段施工计算后，预应力精确匹配，并转化为锚杆力。在连续的计算阶段，力仅被认为是锚杆力，因此可以进一步增大或减小，这取决于周围应力和力的发展情况。

分阶段施工模式下第 3 阶段的模型如图 109(第 119 页) 所示：

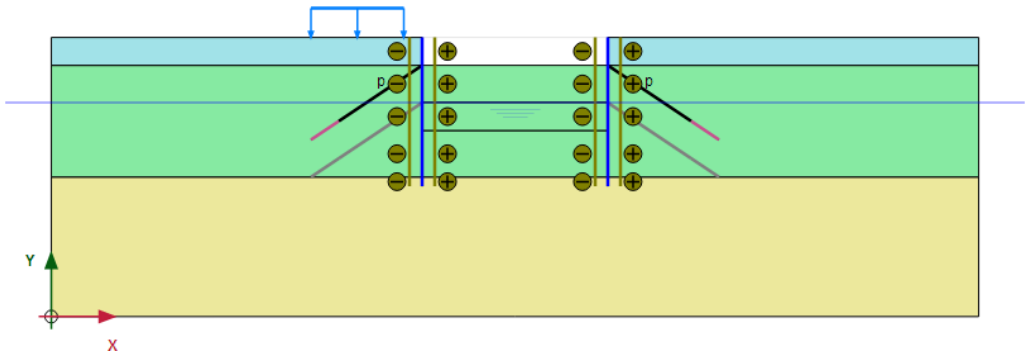


图 109: 分阶段施工模式下第 3 阶段的配置

7.6.5 第 4 阶段：第二个挖掘阶段

1. 单击**添加阶段**按钮，添加新阶段。
2. 停用挖掘的第二个类组。

分阶段施工模式下第 4 阶段的模型如图 110(第 120 页) 所示：

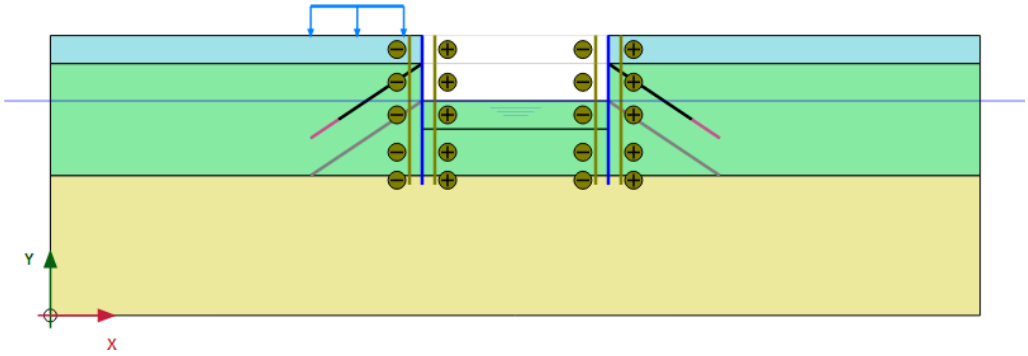


图 110: 分阶段施工模式下第 4 阶段的配置

请注意，锚不再预加应力。

7.6.6 第 5 阶段：第二锚行

1. 单击**添加阶段**按钮，添加新阶段。
2. 激活较低的地锚。
3. 选择底部的节点到节点锚。
4. 在**选择浏览器**中，将**调整预应力**参数设置为 **True**，并向预应力赋值 1000 kN。

分阶段施工模式下第 5 阶段的模型如图 111(第 120 页) 所示：

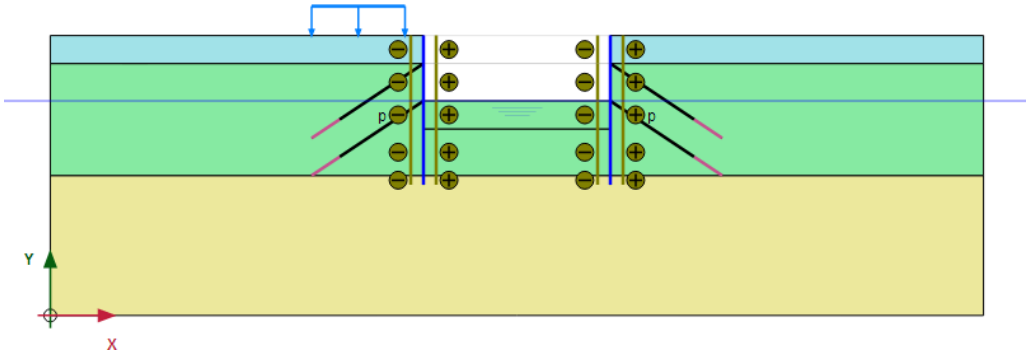


图 111: 分阶段施工模式下第 5 阶段的配置

7.6.7 第 6 阶段：最后一个挖掘阶段

1. 单击**添加阶段**按钮，添加新阶段。
2. 在**阶段**窗口，在**常规** > **孔隙压力计算类型**中，选择**稳态地下水渗流**选项。其余参数的缺省值有效。
3. 停用挖掘的第三个类组。
4. 单击**水流条件**选项卡，显示相应模式。
5. 在**模型浏览器**中，展开**特性库**。
6. 展开**水位**子树。
7. 单击侧工具栏中的**创建水位**按钮，并绘制一个新的潜水位。从 (0 23) 开始，途径 (40 20)、(60 20) 绘制潜水层，并在 (100 23) 结束。
8. 在**模型浏览器**中，展开**用户水位**子树。单击 **UserWaterLevel_1** 并键入降落水位，以重命名在**水流条件**模式下创建的水位，如图 112(第 121 页) 所示。

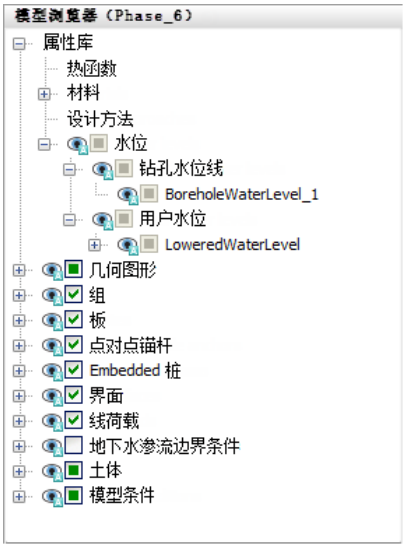


图 112: "模型浏览器"中的水位

9. 在**模型浏览器**中，展开**模型条件** > **地下水渗流**。缺省边界条件为有效，如图 113(第 122 页) 所示。

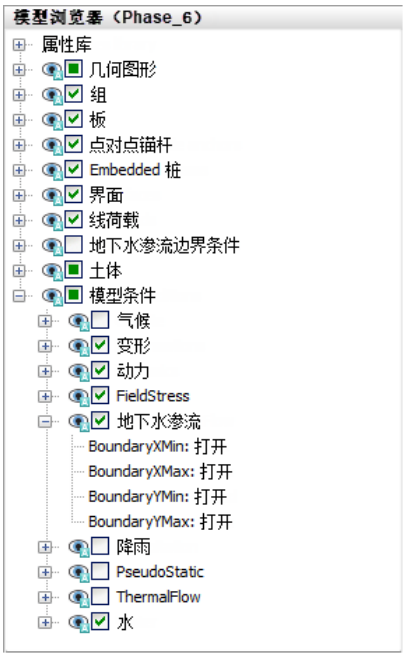


图 113: "模型浏览器"中"模型条件"下的"地下水渗流"子树

10. 在**水**子树中，将**降落水位**分配至**全局水位**。

模型和定义的水位如图 114(第 122 页) 所示：

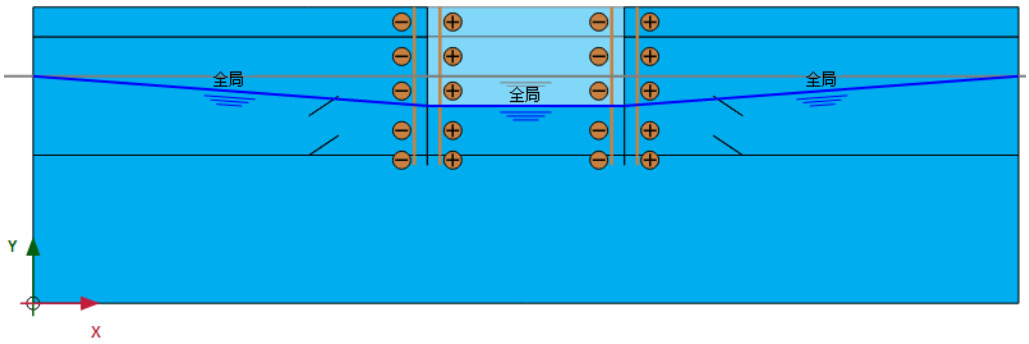


图 114: "水流条件"模式下第 6 阶段的配置

注释: 请注意，对于**地下水渗流**（稳态或瞬态）来说，水位与激活模型边界的交点很重要。该程序根据与水位对应的地下水水头计算水流边界条件。水位的"内部"部分未使用，将被地下水渗流计算得出的潜水位所取代。因此，水位工具只是一个为水流计算创建边界条件的方便工具。

7.6.8 执行计算

1. 在边栏中单击**为曲线选择点**按钮 。
2. 为曲线选择若干特征点（例如，地连墙上地锚的连接点，例如 (40 27) 和 (40 23)。
3. 单击**计算**按钮 ，计算项目。

4. 计算完成后，单击保存按钮 保存项目。

7.7 结果

计算阶段 2 到阶段 6 结束时的变形的网格如图 115(第 123 页)、图 116(第 123 页)、图 117(第 123 页)、图 118(第 124 页) 和 图 119(第 124 页) 所示：

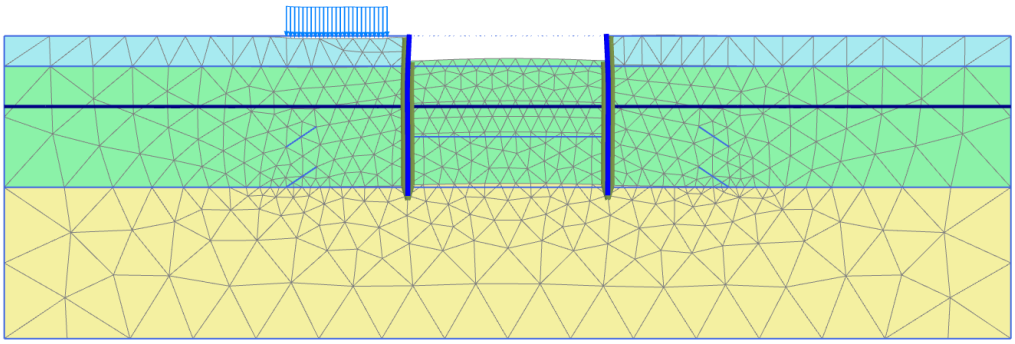


图 115: 变形的网格（按比例放大 50.0 倍）- 第 2 阶段

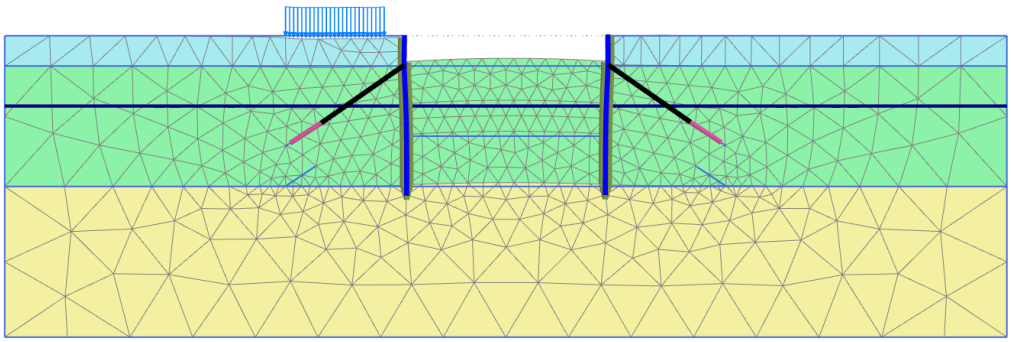


图 116: 变形的网格（按比例放大 50.0 倍）- 第 3 阶段

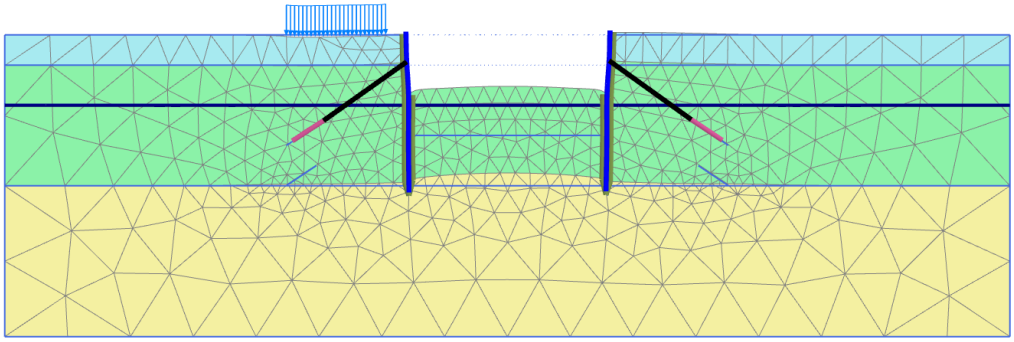


图 117: 变形的网格（按比例放大 50.0 倍）- 第 4 阶段

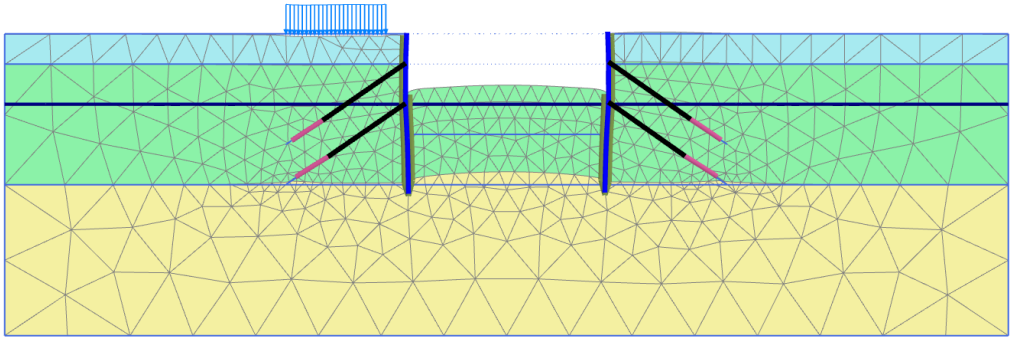


图 118: 变形的网格（按比例放大 50.0 倍）- 第 5 阶段

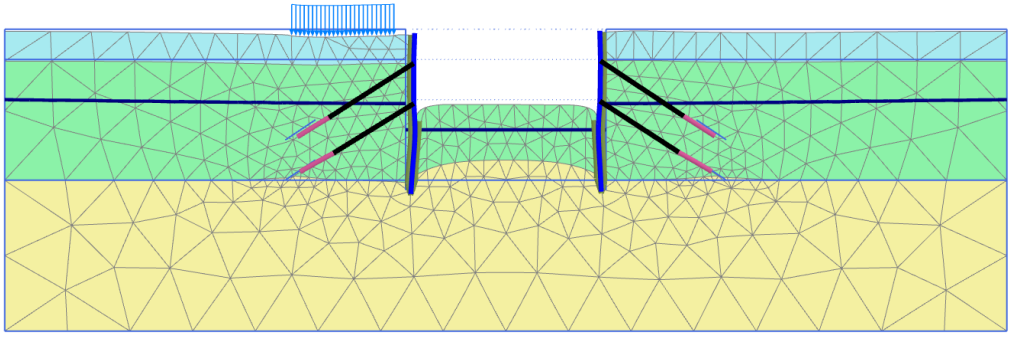


图 119: 变形的网格（按比例放大 50.0 倍）- 最后阶段

图 120(第 124 页) 显示了最终情况下的有效主应力。挖掘基底的被动应力状态清晰可见。可以看出，注浆锚杆周围应力集中。

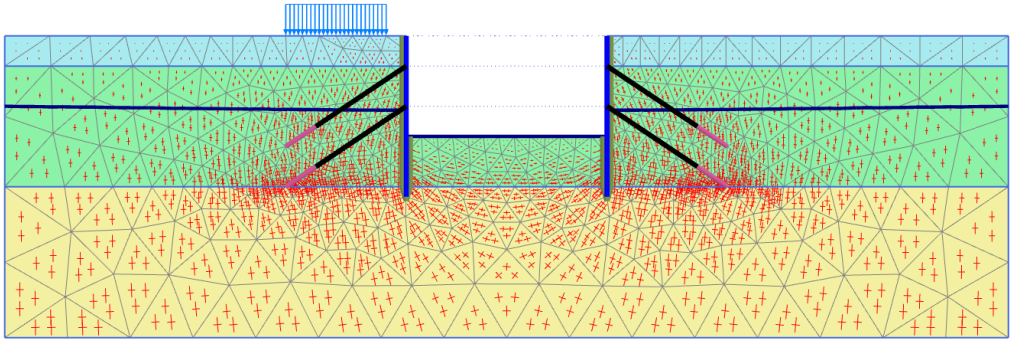


图 120: 有效主应力（最终阶段）

图 121(第 125 页) 显示了最终状态下地连墙中的弯矩。弯矩线上的两次下沉是由锚杆力引起的。

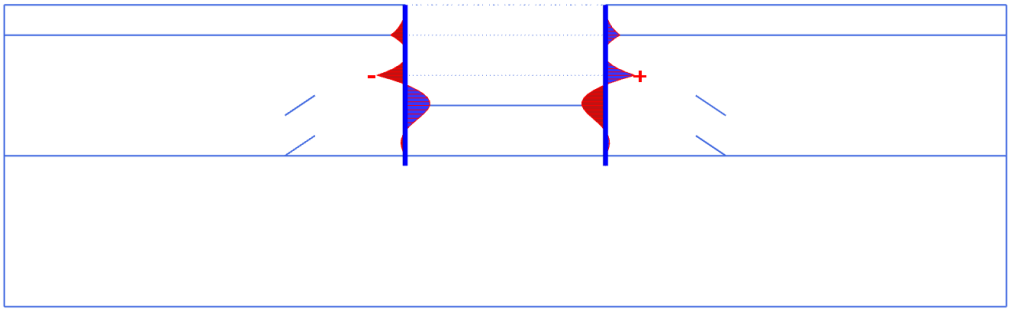


图 121: 最终阶段地连墙中的弯矩

双击锚杆即可查看锚杆力。当进行此项操作以得到第三和第五个计算阶段的结果时，可以看出，锚杆力确实等于激活预应力的计算阶段中规定的预应力。在以下阶段中，该值可能因模型的变化而变化。

8 使用锚定墙进行干地挖掘 - ULS [ADV]

本教程将定义并进行极限限制状态 (ULS) 计算，以使用锚定墙 (使用锚定墙进行干地挖掘 [ADV](第 110 页)) 进行干地挖掘。将使用相同的几何模型。本示例介绍了**设计方法**的特点。该特点允许在进行耐用性计算之后，使用荷载和模型参数的分项系数。

目标

- 使用**设计方法**

8.1 定义几何

为了定义一种设计方法：

1. 打开在使用锚定墙进行干地挖掘 [ADV](第 110 页)中创建的项目，并以另一个名称保存。
2. 选择菜单**土体** > **设计方法**或**结构** > **设计方法**。
   这将显示相应的窗口。
3. 单击**添加**按钮。
   列表中增加了一种新的设计方法。
4. 在本例中，将使用欧洲规范 7 的设计方法 3。此设计方法包括荷载的分项系数和材料（强度）的分项系数。单击列表中的设计方法，并指定一个代表名称（例如：“欧洲规范 7 - 设计方法 3”）。

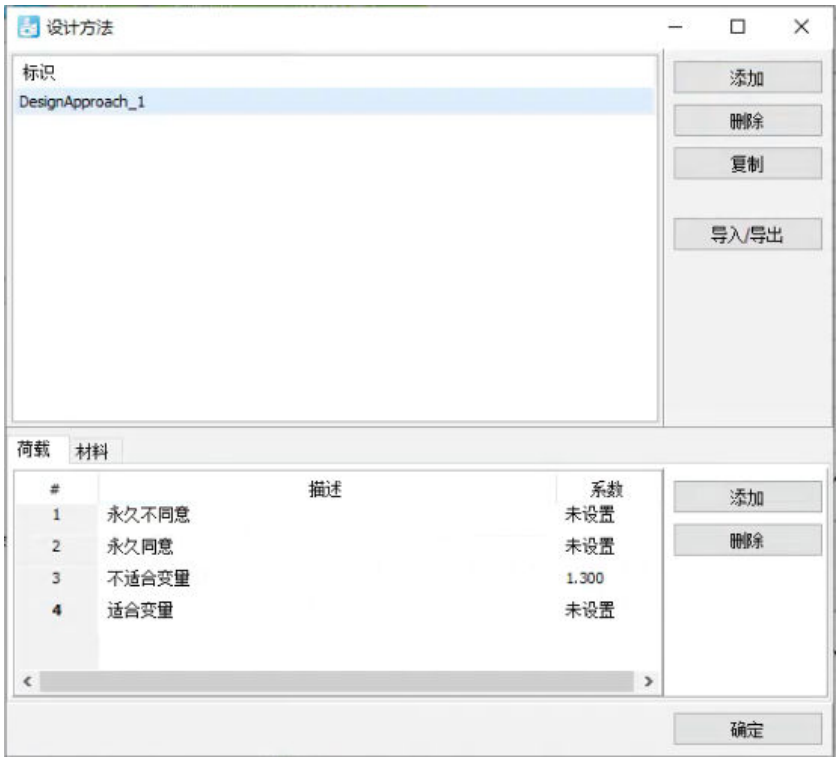


图 122: 荷载的分项系数

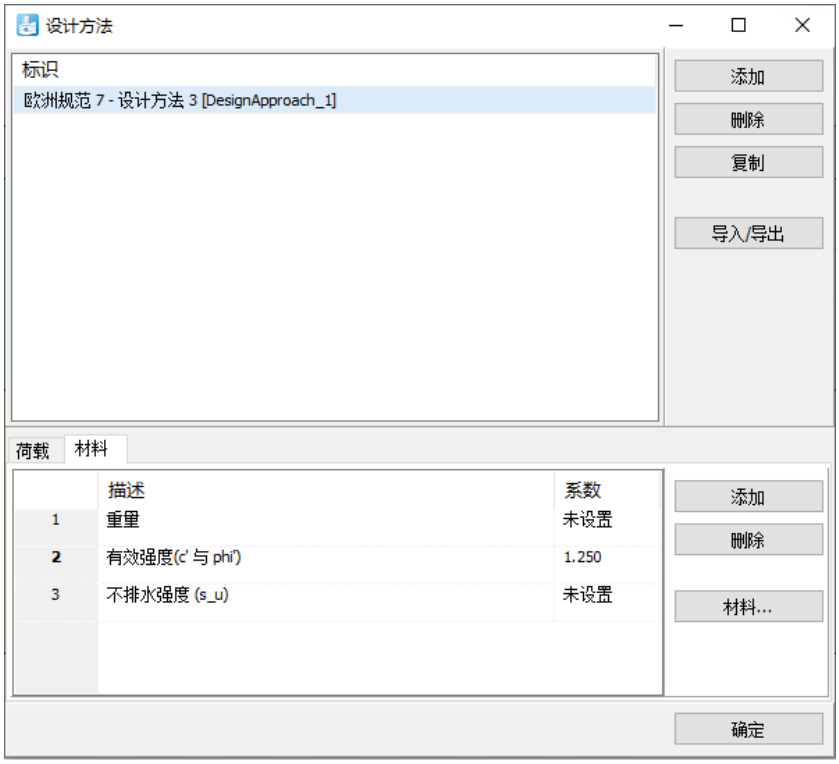


图 123: 材料的分项系数

5. 在窗口的下部，可定义荷载和材料的分项系数，如图 122(第 127 页) 所示。将**不适合变量**的分项系数设置为 1.3。

6. 单击**材料**选项卡。
7. 向**有效强度（c' 和 phi'）** 赋值 1.25，如图 123(第 127 页) 所示。
8. 单击**材料...**按钮。这将弹出**材料集**窗口。
9. 打开**壤土**材料数据集。请注意，视图已改变。在当前视图中，可以将系数分配至不同的土体参数，也可以看到这些系数对土体参数的影响。
10. 单击**力学**选项卡。在**力学**页面中，从下拉列表中为 c'_{ref} 和 φ' 分别选择**标签 > 有效强度(c' 与 phi') [材料因数标签 2]**。系统将为强度参数更新新值，如图 124(第 128 页) 所示。
11. 对其余的土体数据集执行上述步骤。
12. 关闭**设计方法**窗口。

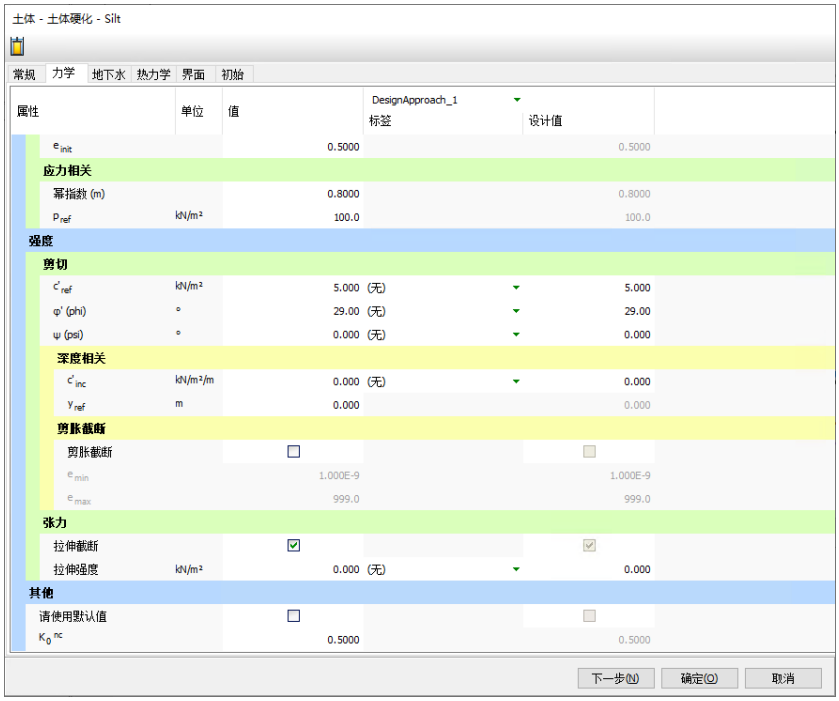


图 124: 壤土的"力学"页面，其中显示了为材料指定分项系数后的有效强度参数

注释:

请注意，ϕ和 ψ 的分项系数分别适用于 ϕ和 ψ 的切线。

8.2 定义并执行计算

对于耐用性计算，有两种主要的设计计算方案（见 参考手册 中的"设计方法"）。本教程使用第一种方法。

8.2.1 所有阶段的更改

1. 进入**分阶段施工模式**。
2. 在**阶段浏览器**中，单击阶段 Phase_1。

3. 添加新阶段。
4. 双击新添加的阶段以打开**阶段**窗口。
5. 在**阶段**窗口的**常规**子树中，在相应的下拉菜单中选择定义的设计方法。
6. 在**模型浏览器**中，展开**线荷载**及其下面所有的子树。
7. 在荷载的静力分量的**荷载系数标签**下拉菜单中选择**不适合变量**选项。

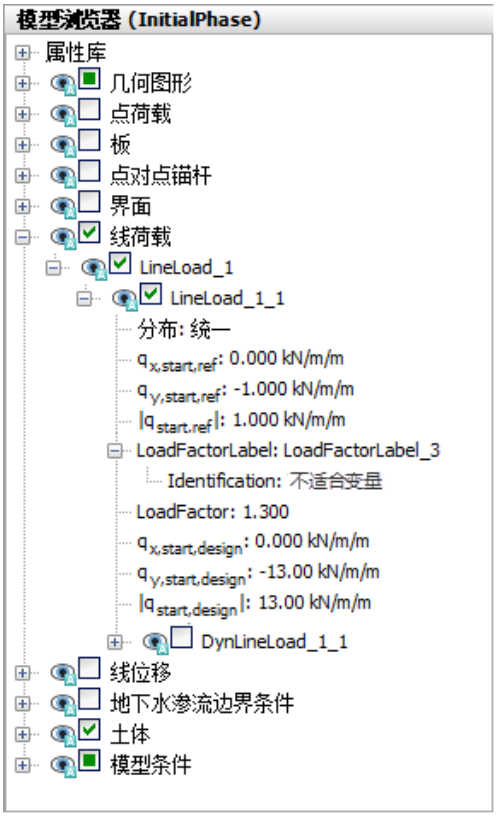


图 125: 在"选择浏览器"中为荷载分配系数标签

8. 按照相同的步骤为所有剩余的 SLS 阶段定义 ULS 阶段。确保第 7 阶段始于第 1 阶段，第 8 阶段始于第 2 阶段，第 9 阶段始于第 3 阶段，以此类推。

8.2.2 执行计算

1. 在边栏中单击**为曲线选择点**按钮 。
2. 为曲线选择若干特征点（例如，地连墙上地锚的连接点，例如 (40 27) 和 (40 23)）。
3. 单击**计算**按钮 ，计算项目。
4. 计算完成后，单击保存按钮 保存项目。

8.3 结果

所得的设计方法阶段的结果可以在输出中计算。图 126(第 130 页) 显示了位于 (40.0 27.0) 节点的 ΣMstage - |u| 图。

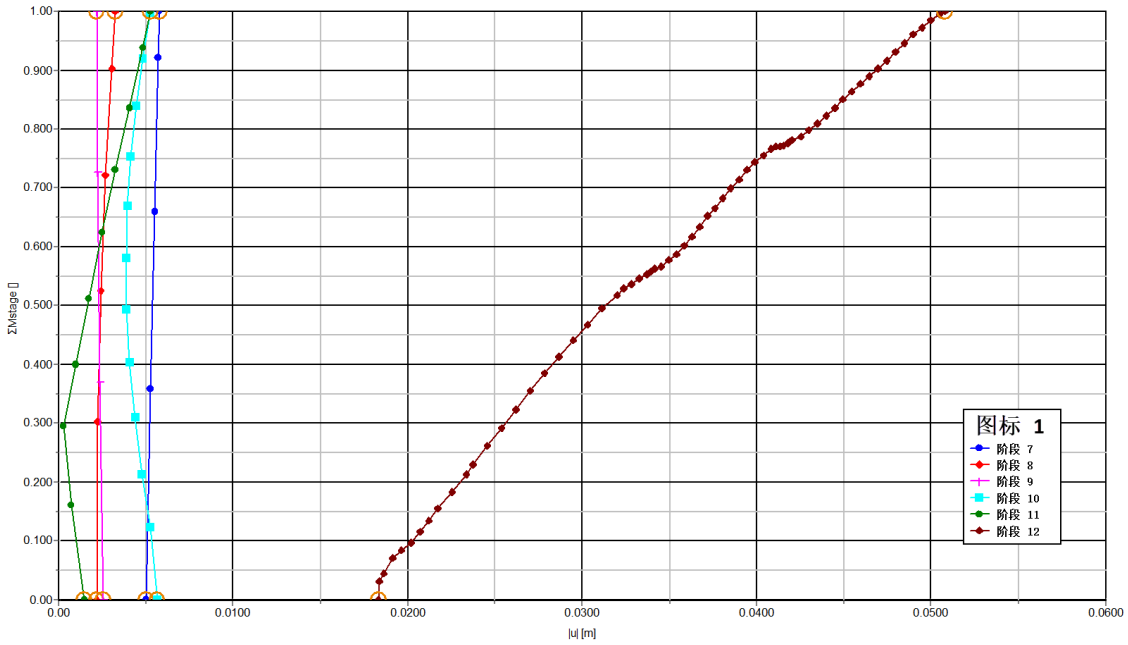


图 126: ULS 阶段的ΣMstage - |u| 图

如果 ULS 计算成功完成，则模型符合相应的设计方法。如果因变形过多而对此产生疑问，可以考虑使用相同的设计方法进行额外的**安全性**计算，这应得出稳定的大于 1.0 的 ΣM_{sf} 值。注意，如果已经使用了分项系数，则 ΣM_{sf} 没有必要也包括安全系数。因此，在这种情况下，只要 ΣM_{sf} 大于 1.0 即可。

图 127(第 131 页) 显示了第 6 阶段和相应 ULS 阶段（第 12 阶段）**安全性**计算的 ΣMsf - |u| 图。可以断定，这种情况符合设计要求。

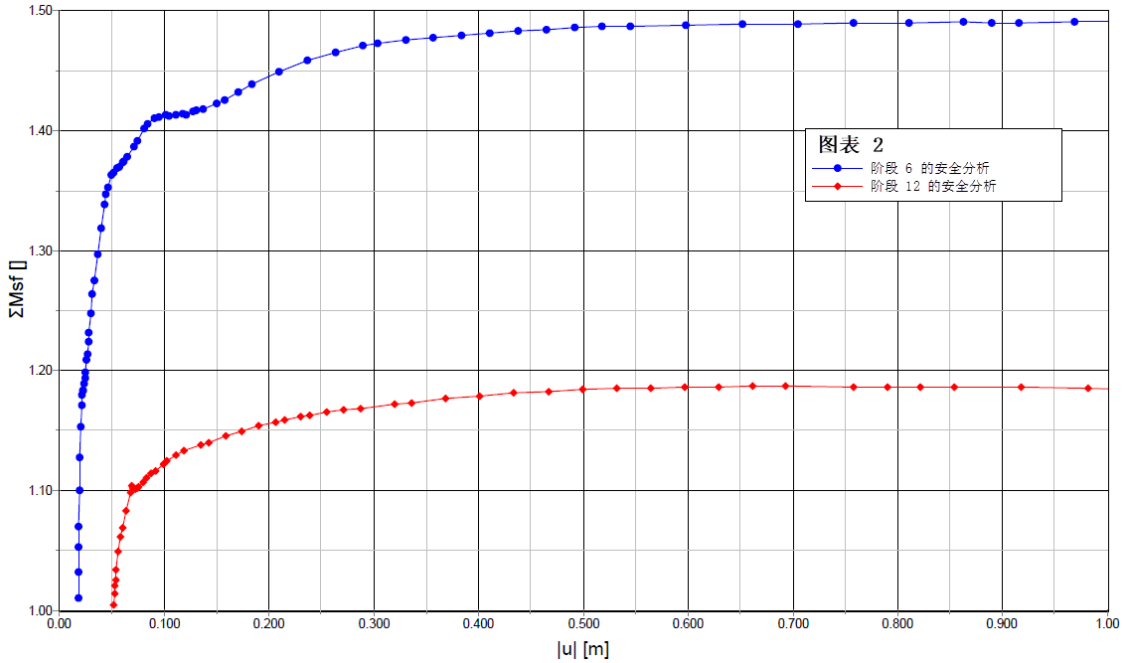


图 127: 最后一个计算阶段和相应 ULS 阶段的ΣMsf - |u| 图

9 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。分析中介绍了三个新的计算选项，即固结分析、更新网格分析和通过安全分析（强度折减）计算安全系数。

目标：

- 固结分析
- 对排水进行建模
- 固结期间渗透率的变化
- 安全分析（强度折减）
- 更新网格分析（大变形）

几何图形

路堤宽 16 米，高 4 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）。路堤本身由松散的砂土组成。下层土是 6 米厚的软土。上方 3 米是泥炭，下方 3 米是黏土。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，如图 128(第 132 页)所示。

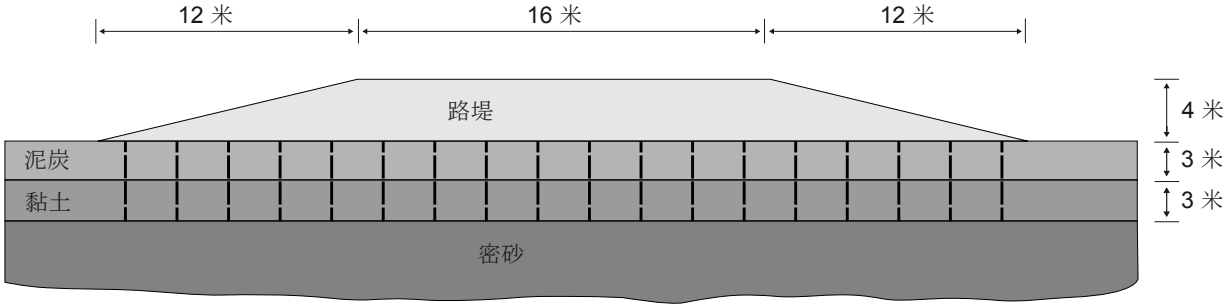


图 128: 软土上路堤的情况

9.1 创建新项目

1. 双击输入程序图标，启动 PLAXIS 2D。
2. 单击**开始新项目**。
3. 在**项目属性**窗口的**项目**页面中，输入相应标题。
4. 在**模型**页面中，确保将**模型**设置为**平面应变**，并将**单元**设置为 **15-节点**。

5. 将模型**等高线**设置为 x_{min} = 0 米，x_{max} = 60 米，y_{min} = -10 米，以及 y_{max} = 4 米。

9.2 定义土壤地层学

使用钻孔定义下层土层。路堤层在**结构模式**中定义。

要定义土壤地层学，请执行以下操作：

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 x = 0 处创建钻孔。
   此时将弹出**修改土层**窗口，如图 129(第 133 页) 所示。

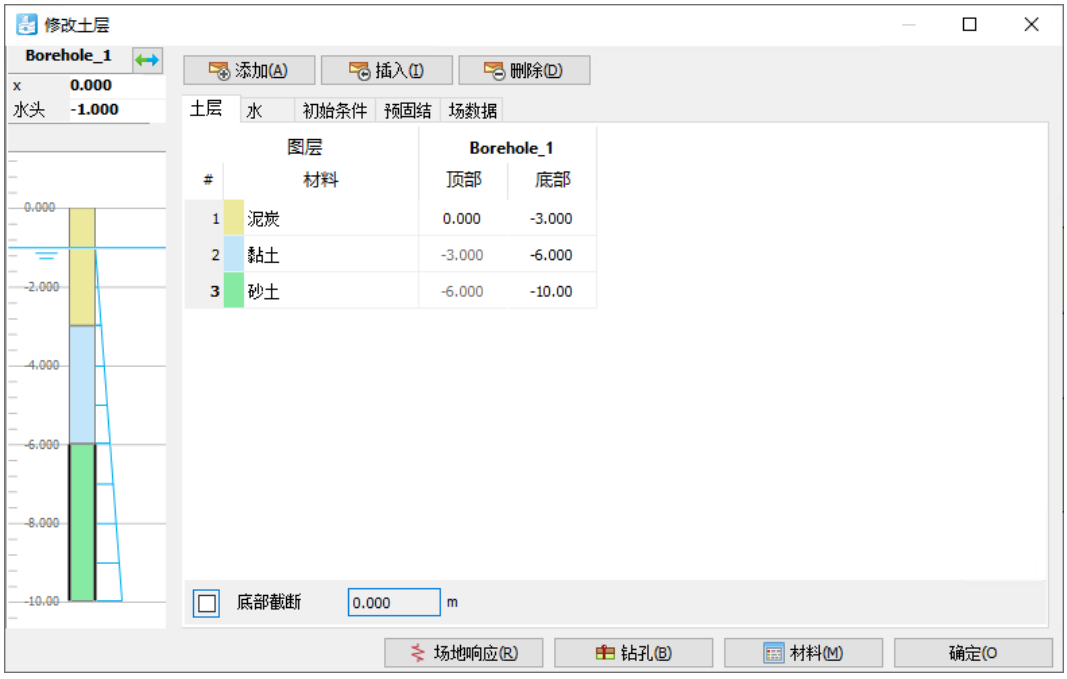


图 129: 土层分布

2. 定义三个土层，如图 所示。
3. 水位位于 y=-1 米处。在钻孔列中指定**水头**值为 -1 。

9.3 创建和分配材料数据集

本教程需要多个材料集。材料属性如下所示：

表 26: 砂土和黏土层的材料属性和界面

参数	名称	路堤	砂土	泥炭	黏土	单位
常规						
土体模型	-	硬化土体	硬化土体	软土	软土	-
排水类型	-	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
初始孔隙比	e_{init}	0.5	0.5	2.0	1.0	-
力学						
更改压缩指数	λ^*	-	-	0.15	0.05	-
更改膨胀指数	κ^*	-	-	0.03	0.01	-
标准排水三轴试验中的割线刚度	E_{50}^{ref}	$25 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	-	-	kN/m^2
主固结仪荷载的切线刚度	E_{oed}^{ref}	$25 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	-	-	kN/m^2
卸载/重新装载刚度	E_{ur}^{ref}	$75 \cdot 10^3$	$105 \cdot 10^3$	-	-	kN/m^2
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	2	1	kN/m^2
摩擦角	φ'	30	33	23	25	度
剪胀角	ψ	0	3	0	0	度
其他：设置为缺省值		是	是	是	是	-
地下水						
分类标准	-	USDA	USDA	USDA	USDA	-
SWCC 拟合方法	-	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	-

地下水						
水平渗透率	k_x	3.499	7.128	0.1	0.04752	米/天
垂直渗透率	k_y	3.499	7.128	0.05	0.04752	米/天
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	1	1	1	-
初始						
K_0 测定	-	自动	自动	自动	自动	-
预上覆岩层压力	*POP*	0	0	5	0	kN/m^2
超固结比	*OCR*	1.0	1.0	1.0	1.0	-

要创建材料集，请执行以下步骤：

1. 单击**材料**按钮，打开**材料集**窗口。
2. 根据表 26(第 134 页)创建土体材料数据集，并将其分配到钻孔中的相应层（参见图 129(第 133 页)）。
3. 关闭**修改土层**窗口，然后进入**结构模式**，定义路堤和排水。

注释: 应定义初始孔隙比 (e_{init}) 和渗透率变化 (c_k)，用以在固结分析中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。

9.4 定义施工

在**结构模式**中定义路堤和地漏。

1. 单击**结构**选项卡，继续在**结构模式**中输入结构单元。

9.4.1 要定义路堤，请执行以下操作：

1. 在边栏中单击**创建土体多边形**按钮，并选择**创建土体多边形**选项。
2. 单击 (0 0)、(0 4)、(8 4) 和 (20 0)，在绘图区域定义路堤。
3. 选择并右键单击已创建的多边形，并为该土体多边形指定**路堤**数据集，如图 130(第 136 页) 所示。

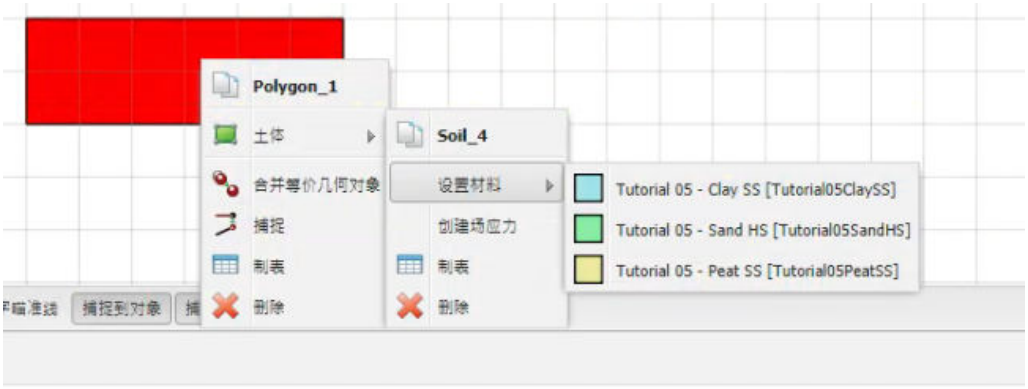


图 130: 在绘图区域为土体类组指定材料数据集。

4. 要定义路堤施工层，请单击侧工具栏中的**剪切多边形**按钮，然后单击 (0 2) 和 (14 2) 来定义剪切线。路堤类组将分为两个子类组。

9.4.2 定义排水孔

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。在有排水孔的情况下，排水孔仅在计算阶段有效。

1. 在边栏中单击**创建水力条件**按钮，并在显示的菜单中选择**创建排水孔**选项，如图 131(第 136 页) 所示。



图 131: “创建排水孔”选项

2. 在软土层（软土和泥炭；y = 0 米到 y = -6 米）中定义排水孔。两个连续的排水孔之间的距离为 2 米。考虑到对称性，第一个排水孔位于距模型边界 1 米处。将创建共 10 个排水孔。将**水头**定义为 0.0 米。几何图形如图 132(第 136 页) 所示。

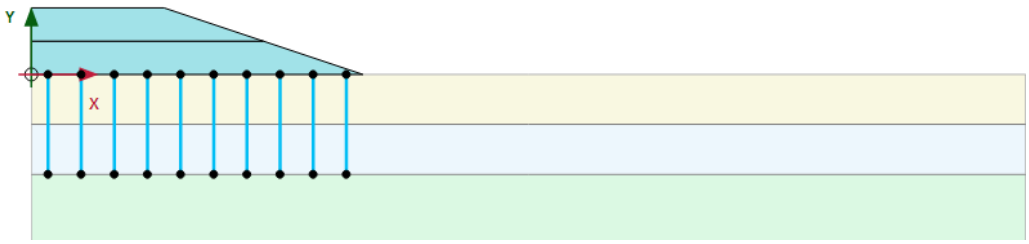


图 132: 模型的最终几何图形

注释:

平面应变模型中排水孔的建模实际上涉及到基于排水模式在周围土体中使用的等效（横向）渗透率。在此简化示例中，已省略后者。详细信息请参阅文献 [1]。

9.5 生成网格

要生成网格，请遵循以下步骤：

1. 进入**网格模式**。
2. 在边栏中单击**生成网格**按钮。对于**单元分布**参数，请使用**中等**选项（缺省）。
3. 单击**查看网格**按钮，以查看网格，如图 133(第 137 页) 所示。

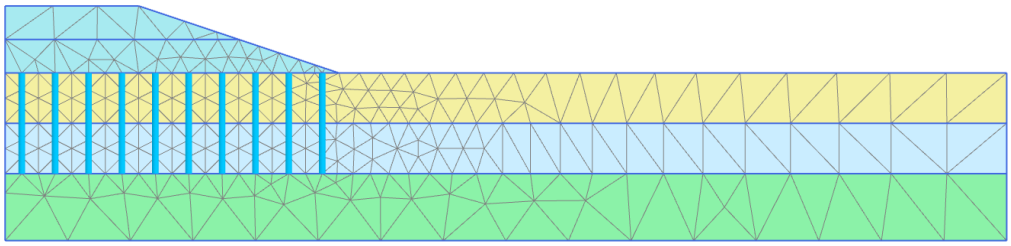


图 133: 生成的网格

4. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

9.6 定义并执行计算

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。因此，除了初始阶段以外，一共必须定义四个计算阶段。

9.6.1 初始阶段：初始条件

路堤在初始情况下不存在。

剩余的活动几何图形是水平的，具有水平层，因此可以使用 **K0 程序**来计算初始应力。初始阶段的模型的几何图形如图 134(第 138 页) 所示。

[1] Achtergronden bij numerieke modellering van geotechnische constructies, deel 2。CUR 191.Stichting CUR, Gouda Indraratna, B.N., Redana, I.W., Salim, W. (2000)。预测与观察使用竖向排水孔的软黏土地基的性能。Proc.GeoEng.2000，墨尔本

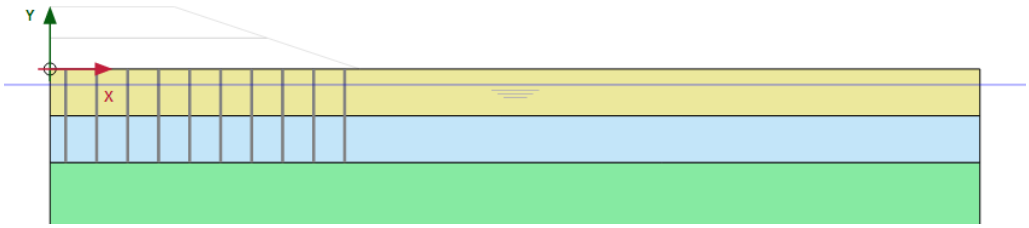


图 134: 初始阶段的配置

初始水压为完全静水压力，并基于一般潜水位 y=-1 米处。请注意，根据钻孔中**水头**的指定值，将在 y=-1 米处自动创建潜水位。除潜水位外，还必须注意在计算过程中将进行的固结分析的边界条件。在不给予任何额外输入的情况下，除底部边界外的所有边界都在排水，因此水可以从这些边界自由流出，超孔隙压力可以消散。但是，在当前情况下，必须关闭左侧垂直边界，因其为对称线，所以不应出现水平流。剩余的边界是开放的，因为超孔隙压力可以通过这些边界消散。为正确定义固结边界条件，请执行以下步骤：

1. 转至**分阶段施工模式**，并在**模型浏览器**中展开**模型条件**子树，如图 135(第 138 页) 所示。
2. 展开**地下水渗流**子树，并将**边界 XMin** 设置为**关闭**，并将 **边界 YMin** 设置为**打开**。

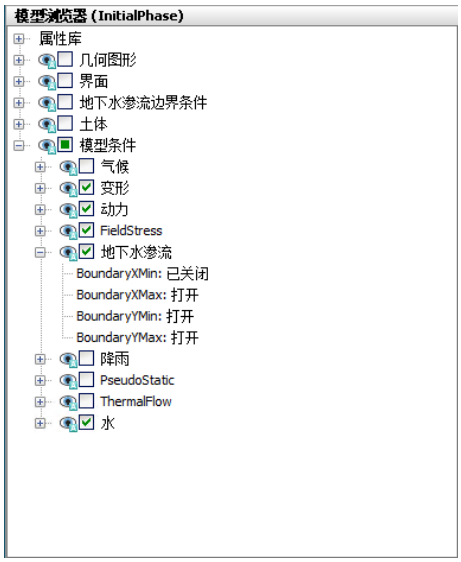


图 135: 问题的边界条件

9.6.2 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 2D 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，有三种主要的可能性：

	预定义期间固结，包括变化对激活几何的影响（**分步施工**）。
	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，直至达到规定的饱和度（**固结度**）。

本练习将使用前两种可能性。要定义计算阶段，遵循以下步骤：

第 1 阶段：第一段路堤施工

第一计算阶段为**固结**分析，**分阶段施工**。

1. 单击**添加阶段**按钮，创建一个新的阶段并双击。
2. 在**阶段**窗口中，转到**常规**子树，然后从**计算类型**下拉菜单中选择**固结**选项。
3. 确保为**荷载类型**选择**分阶段施工**选项。
4. 输入**时间间隔**为 2 天。将使用剩余参数的缺省值。
5. 在**分阶段施工模式**中，激活路堤的第一部分。第 1 阶段的模型如图 136 (第 139 页) 所示。

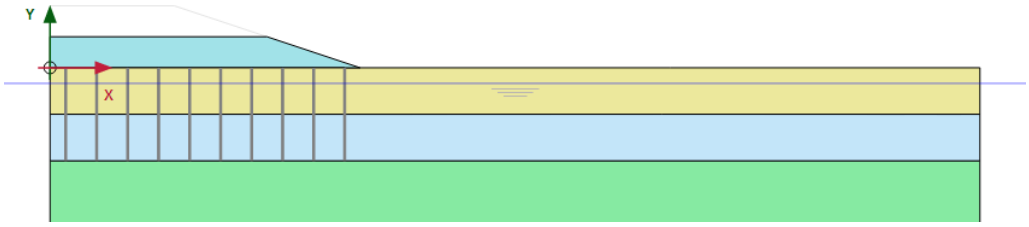


图 136: 第 1 阶段的配置

第 2 阶段：第一固结期

第二阶段也是**固结**分析，**分阶段施工**。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，创建新阶段。
2. 在**阶段**窗口中，转到**常规**子树，然后从**计算类型**下拉菜单中选择**固结**选项。
3. 确保为**荷载类型**选择**分阶段施工**选项。
4. 输入**时间间隔**为 30 天。将使用剩余参数的缺省值。

第 3 阶段：第二段路堤施工

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**阶段**窗口中，转到**常规**子树，然后从**计算类型**下拉菜单中选择**固结**选项。
3. 确保为**荷载类型**选择**分阶段施工**选项。
4. 输入**时间间隔**为 1 天。将使用剩余参数的缺省值。
5. 在**分阶段施工模式**下，激活路堤的第二部分。第 3 阶段的模型如图 137 (第 140 页) 所示。

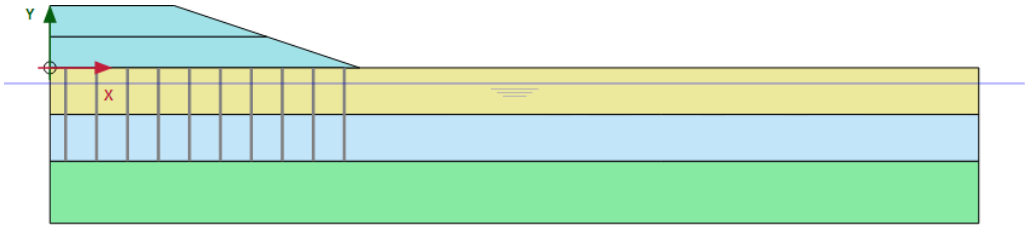


图 137: 第 3 阶段的配置

第 4 阶段：固结结束

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，创建新阶段。
2. 在**阶段**窗口中，转到**常规**子树，然后从**计算类型**下拉菜单中选择**固结**选项。
3. 在**荷载类型**下拉菜单中选择**最小超孔压**选项，并接受最小压力的缺省值 1 kN/m^2。将使用剩余参数的缺省值。

9.6.3 安全分析

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。

要计算不同施工阶段的路堤的全局安全系数，遵循以下步骤：

1. 在**阶段**浏览器中选择第 1 阶段。
2. 添加新的计算阶段。
3. 双击新阶段，打开**阶段**窗口。
4. 在**阶段**窗口中，所选择的阶段将在**起始阶段**下拉菜单中自动选中。
5. 在**常规**子树中，选择**安全性**作为计算类型。
6. **增量乘子**选项已在**正在加载输入**框中选中。将第一个控制强度折减过程的乘子增量 **Msf** 设置为 0.1。
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。
8. 现在，已经定义了第一次安全性计算。
9. 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。定义安全性计算后的各个阶段如图 138(第 140 页)所示。

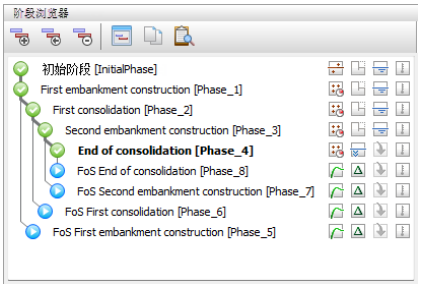


图 138: 安全性计算阶段

9.6.4 计算

在开始计算之前，建议选择节点或应力点，以稍后生成荷载-位移曲线或应力-应变图。要完成此操作，请遵循以下步骤：

1. 在边栏中单击**为曲线选择点**按钮 。
2. 选择路堤突趾 (20 0) 作为第一个点。
3. 第二点将用于绘制超孔隙压力的发展（和衰减）。为此，该点需在模型左侧软土层中间某处，即路堤正下方。例如，选择计算前点 (0 -3)。
4. 单击**更新**选项。
5. 单击**计算**按钮 ，计算项目。

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（如图 139(第 141 页) 所示）。



*图 139: **激活任务**窗口中显示的计算进度*

除乘子外，还会出现 $P_{excess,max}$，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。

9.7 结果

9.7.1 变形网格

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，如图 140(第 142 页) 所示的变形网格展示了不排水行为导致的堤趾和腹地的抬升。

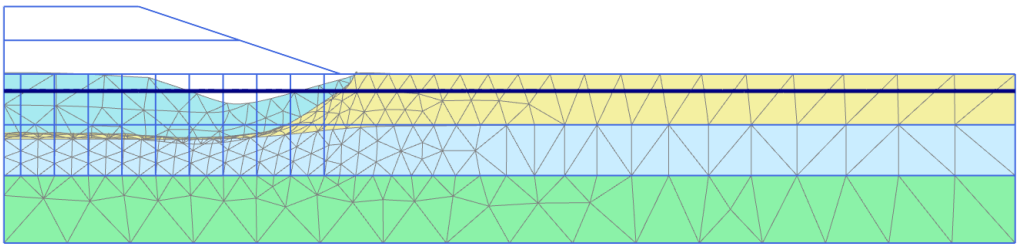


图 140: 不排水路堤施工（第 3 阶段）后变形的网格

9.7.2 增量位移

1. 选择菜单**变形** > **增量位移** > **|Δ u|**。
2. 在菜单中选择菜单**查看** > **箭头**选项或单击工具栏中的相应按钮 显示结果箭头。

通过对总位移增量的计算，可以看到一种失效机制正在形成，如图 141(第 142 页) 所示：

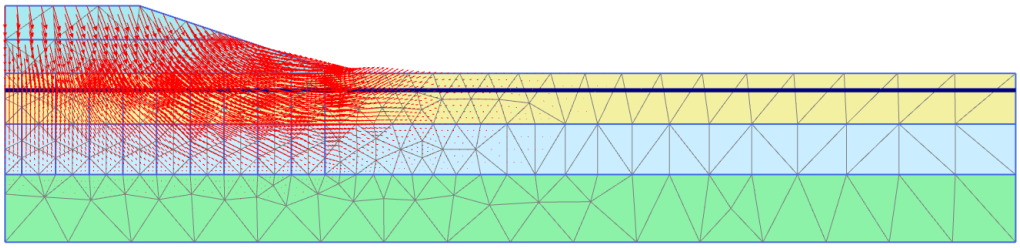


图 141: 不排水路堤施工后的位移增量

9.7.3 超孔压

1. 按 **<Ctrl + 7>**显示得出的超孔隙水压力（有关更多快捷方式，请参阅参考手册 的附录 C）。也可以通过选择菜单**应力** > **孔压** > **Pexcess** 来显示它们。
2. 单击**中心主方向**按钮 。超压的主方向在每个土体单元的中心显示。结果如图 142(第 143 页) 所示。

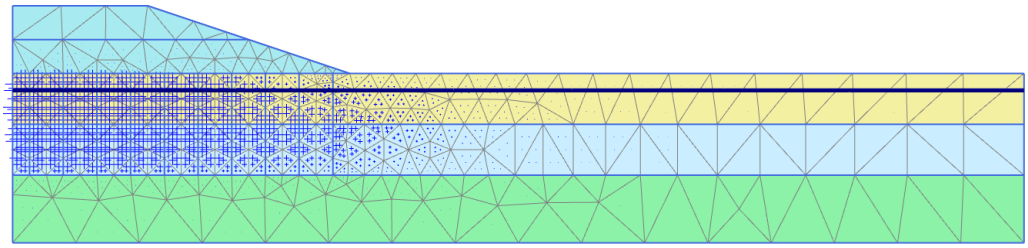


图 142: 不排水路堤施工后的超孔隙水压力

很明显，最高超孔隙水压力发生在路堤中心下方。

3. 在下拉菜单中选择**第 4 阶段**。
4. 单击工具栏中的**等高线**按钮，以等高线显示结果。
5. 要在土体轮廓上显示等值线的**标签**，请单击**绘制扫描线**按钮（或**查看**菜单中的相应选项）。然后通过单击初始点并拖动等值线，在几何图形上标识一条线（图 143(第 143 页)）。

通过探索不同的阶段，可以看出，在**第 4 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。图 143(第 143 页) 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。

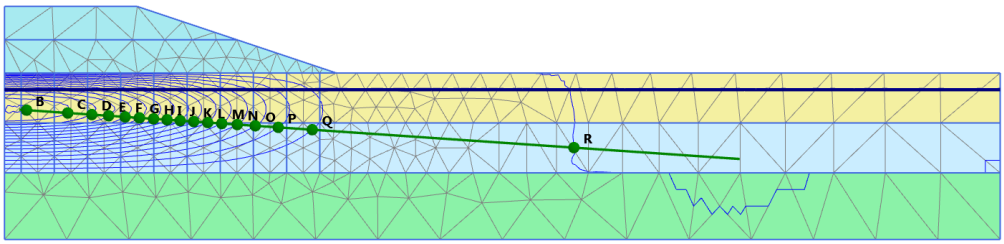


图 143: 固结至 P_{excess} < 1.0 kN/m^2 后的超孔隙水压力等高线

9.7.4 超孔压的形成

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。要创建这种曲线，遵循以下步骤：

1. 在**曲线管理器**中，单击按钮以创建新曲线。
2. 在下拉菜单中，x 轴选择**项目**选项，在树中，选择**时间**。
3. 在下拉菜单中，为 y 轴选择软土层中间的点（如第二个计算前点(第 141 页)所定义）。在树中，选择**应力** > **孔压** > **Pexcess**。
4. 选择 y 轴**反向符号**选项。
5. 单击**确定**。
6. 打开**曲线设置** (F3)，进入第二个页面。
7. 在**显示**框中，单击**阶段**按钮。在缺省情况下，所有阶段都会选中，显示在曲线中。为了曲线的清晰性，隐藏**安全**阶段（第 5 - 8 阶段）。
8. 单击**确定**关闭**曲线设置**窗口。

应该会出现如图 144(第 144 页) 所示的以下曲线：

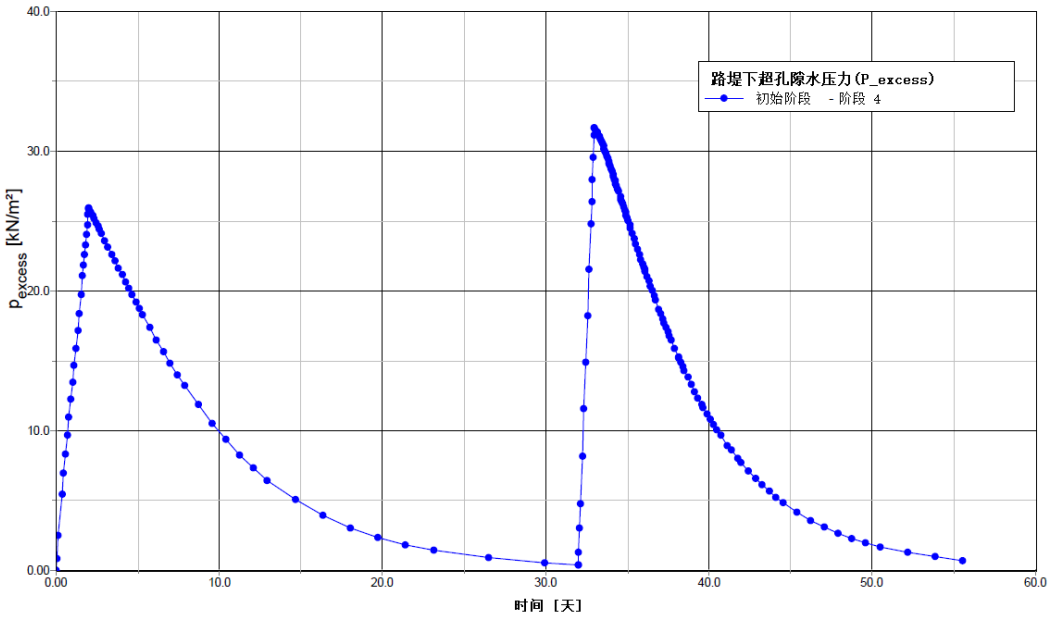


图 144: 路堤下超孔隙水压力的发展

上图清晰地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。从曲线中可以看出，需要 50 天以上才能达到完全固结。

先保存图表再关闭输出程序。

9.7.5 安全分析结果

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. 选择其中一个阶段并单击**查看计算结果按钮** 。
2. 选择菜单**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（如图 145(第 144 页)所示）让人直观看到失效机制。位移增量的量级是不相关的。

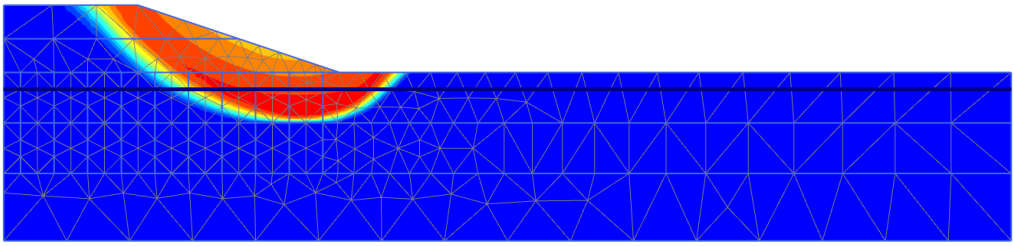


图 145: 总位移增量阴影，表明最终阶段最适用的路堤失效机制

安全系数可在**项目**菜单的**计算信息**选项中获得。**计算信息**窗口中的**乘子**页面代表荷载乘子的实际值。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。

要以这种方式计算三种情况下的安全系数，遵循以下步骤:

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（A 点）。选择**变形** > **总位移** > **|u|**。
4. Y 轴选择**项目** > **乘子** > **ΣMsf**。该图表中考虑了**安全**阶段。
5. 右键单击图表并在出现的菜单中选择**设置**选项。**设置**窗口弹出。
6. 在对应曲线的页面中单击**阶段**按钮。
7. 在**选择阶段**窗口中选择第 5 阶段，如图 146(第 145 页) 所示：

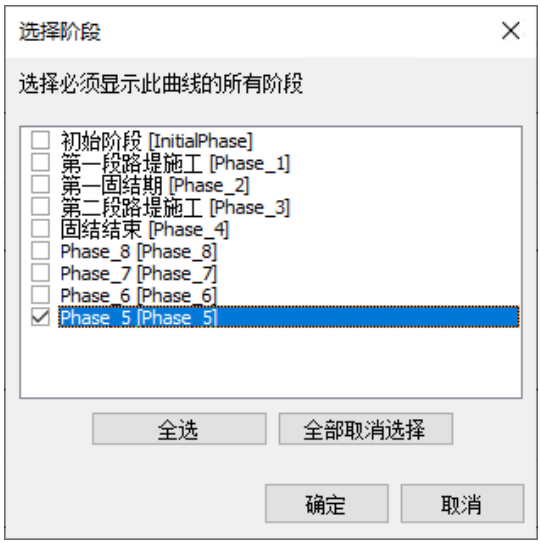


图 146: "选择阶段"窗口

8. 单击**确定**，关闭**选择阶段**窗口。
9. 在**设置**窗口的对应页面中更改曲线标题。
10. 单击**添加曲线**按钮并在出现的菜单中选择**从当前项目...**选项。遵循所述步骤定义第 6、7、8 阶段的曲线。
11. 在**设置**窗口中单击**图表**选项卡，打开对应的页面。
12. 在**图表**页面中，规定图表名称。
13. 将 x 轴的缩放设置为**手动**并将**最大**值设置为 1，如图 147(第 146 页) 所示：

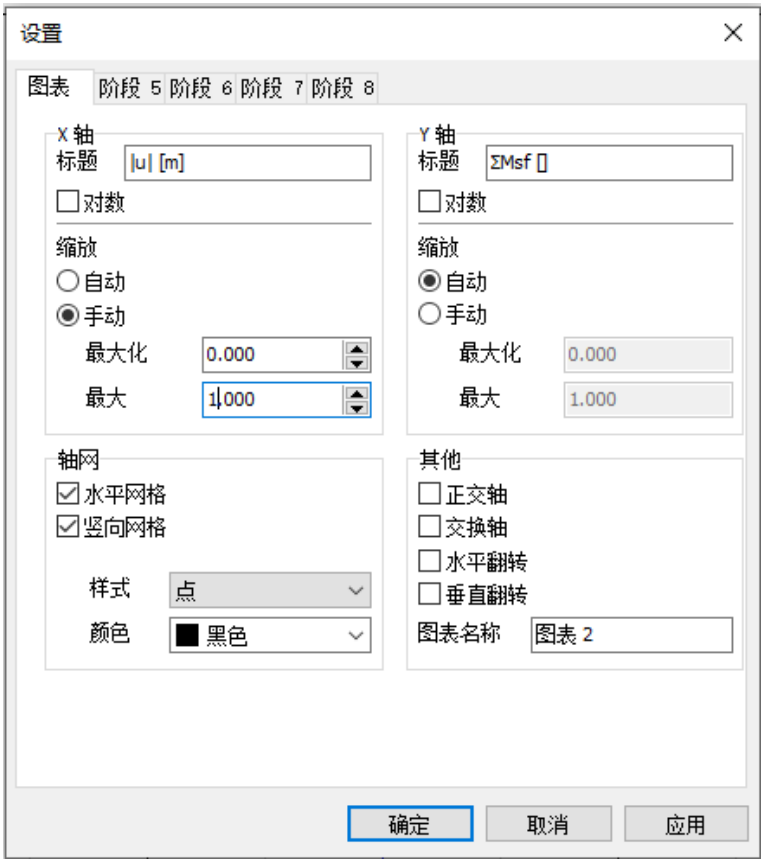


图 147: "设置"窗口中的"图表"页面

14. 单击**应用**根据所做的更改更新图表，然后单击**确定**，关闭**设置**窗口。
15. 要修改图例的位置，右键单击图例。
16. 在上下文菜单中选择**查看** > **图表图例**。
17. 可以拖动图例重新安排图例在图表中的位置。图表如图 148(第 147 页) 所示：

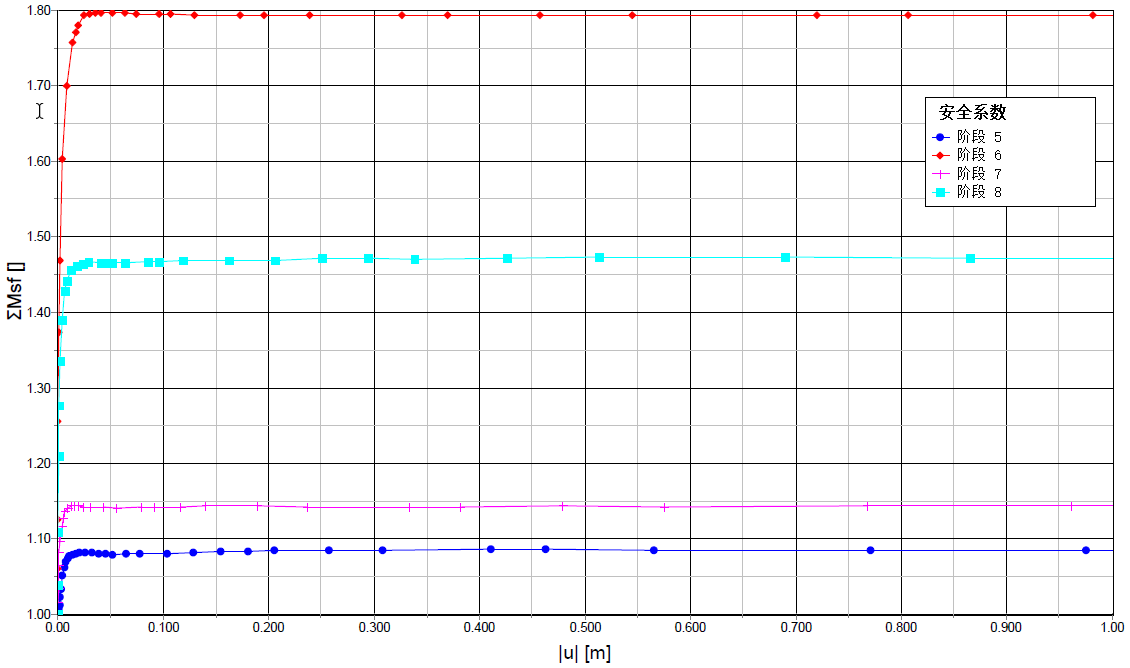


图 148: 安全系数计算

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 Σ 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。

9.8 使用地漏

本节将调查项目中的地漏的作用。本节将介绍与前四个固结阶段具有相同属性的四个新阶段。第一个新阶段应从初始阶段开始。这些新阶段的区别在于：

- 所有新阶段都应使用地漏。在**分步施工**模式下激活它们。
- 前三个固结阶段（9 至 11）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**，并将最小压力 (|P-stop|) 赋值为 1.0 kN/m^2。

遵循以下步骤：

1. 结束计算后，保存项目，然后选择最后一个阶段并单击**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，可以使用第二点上的超孔隙水压力消散。
2. 单击**曲线管理器**按钮 ，打开**曲线管理器**。
3. 在**图表**页面，双击图表 1（第二点 (0 -3) 处的 p_{excess} 与时间的对比）。之后，图表会显示出来。关闭**曲线管理器**。
4. 双击图表右侧图例中的曲线。**设置**窗口弹出。
5. 单击**添加曲线**按钮并在出现的菜单中选择**从当前项目...**选项。**曲线生成**窗口弹出。
6. 选择 y 轴**反向符号**选项并单击**确定**，接受选择的选项。
7. 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。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**。
8. 在**设置**窗口的对应页面中更改曲线标题。
9. 在**图表**页面中，规定图表名称。

10. 单击**应用**，预览生成的曲线，然后单击**确定**，关闭**设置**窗口。该图表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，如图 149(第 148 页) 所示：

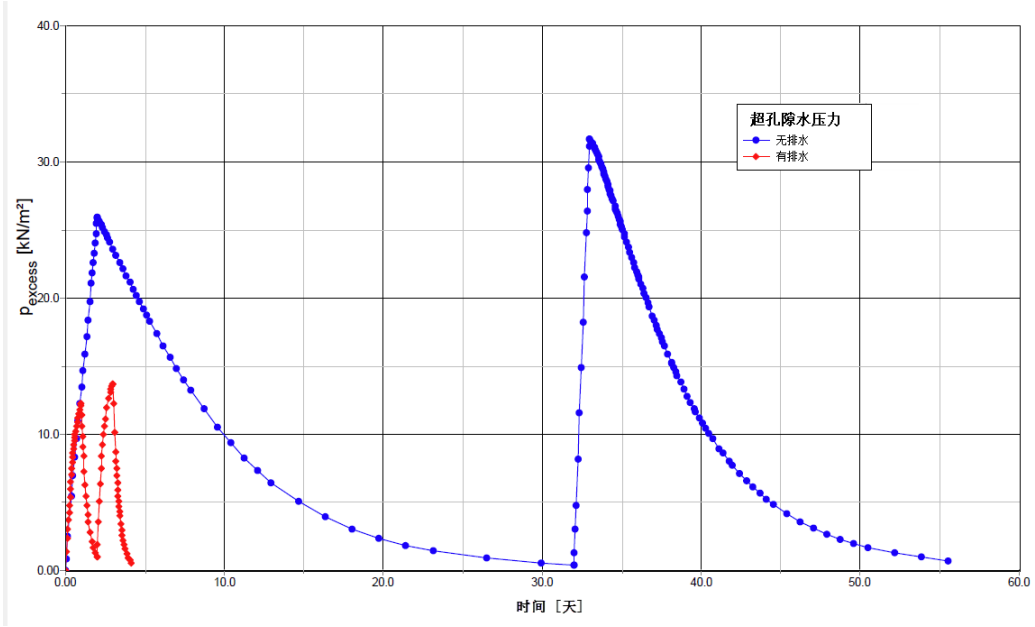


图 149: 地漏的作用

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。

9.9 更新网格和更新水压分析

可从固结（第 4 阶段）结束时**变形网格**的输出中看出，路堤在施工开始后沉降约一米。原先在潜水位以上的部分砂土会沉降到潜水位以下。

由于浮力，沉降到水位以下的土体的有效重量将发生变化，导致有效覆岩层随时间减少。在 PLAXIS 2D 中，可以使用**更新网格**和**更新水压**选项模拟这种影响。对于路堤，我们将研究使用这些选项的影响。

1. 在**阶段**浏览器中选择初始阶段。
2. 添加新的计算阶段。
3. 以与第 1 阶段相同的方式定义新阶段。在**变形控制参数**子树中，勾选**更新网格**和**更新水压**选项。
4. 以相同的方式定义其他 3 个阶段。

计算结束后，比较两种不同计算方法的沉降。

1. 在**曲线生成**窗口中，x 轴选择时间，y 轴选择软土层中间点 (0 -3) 的垂直位移 (u_y)。
2. 在该曲线中，将考虑初始阶段和第 1 至 4 阶段的结果。
3. 向图表添加新曲线。
4. 在该曲线中，将考虑初始阶段和第 13 至 16 阶段的结果。生成的图表如图 150(第 149 页) 所示。

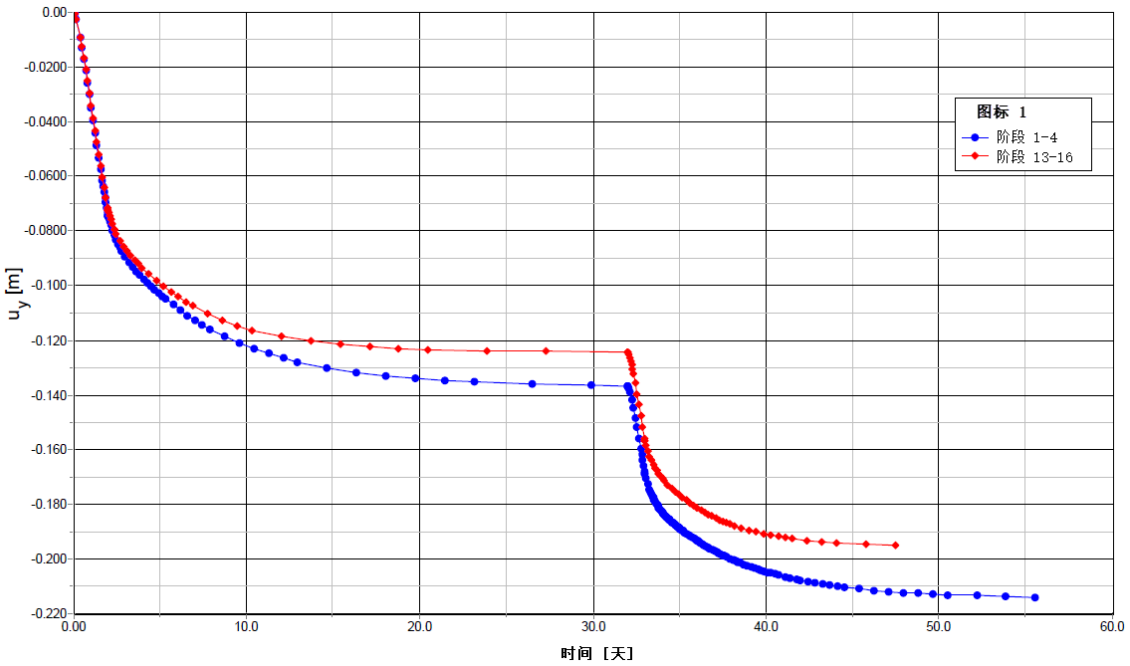


图 150: 更新网格和水压分析对所得沉降的影响

可以看出，当使用**更新网格**和**更新水压**选项时，沉降较小（红色曲线）。一部分原因在于**更新网格**程序包括二阶变形效应，考虑了几何图形的变化，另一部分原因在于**更新水压**程序使路堤的有效重量变小。最后一种影响是由沉降到（恒定）潜水位以下的土体的浮力引起的。这些程序的使用允许考虑较大变形的积极影响，对沉降进行现实分析。

10 挖掘和脱水 [ADV]

本教程将分析地下水位下降和板桩墙周围的渗流。将使用教程使用锚定墙进行干地挖掘 [ADV](第 110 页)中的几何模型。本示例中引入了**井**的特点。

10.1 创建并分配材料数据集

材料参数与原项目保持一致，如表 20(第 111 页)所示：

若要创建项目：

1. 打开教程 使用锚定墙进行干地挖掘 [ADV](第 110 页) 中规定的项目。
2. 以另一个名称保存项目（如“围绕板桩墙的水流”）。

10.2 定义结构单元

1. 在**结构模式**下，单击侧工具栏中的**创建水力条件**按钮 。
2. 在出现的菜单中选择**创建井**选项 。
3. 单击 (42 20) 和 (42 17) 绘制第一口井。
4. 单击 (58 20) 和 (58 17) 绘制第二口井。

10.3 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 如图 151(第 151 页) 所示，选择类组和两口井。在**选择浏览器**中，将**粗糙度系数**指定为 0.25。

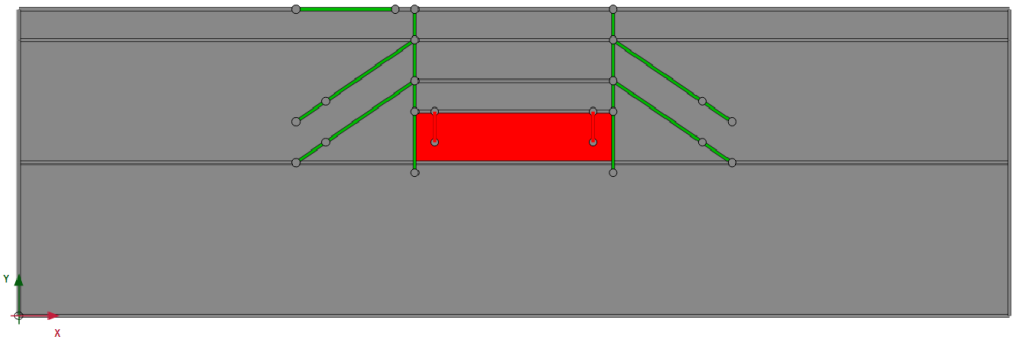


图 151: 指示模型中网格的局部细化

3. 单击**生成网格**按钮 以生成网格。使用**单元分布**参数（中等）的缺省选项。
4. 单击**查看网格**按钮，以查看网格，如图 152(第 151 页) 所示。

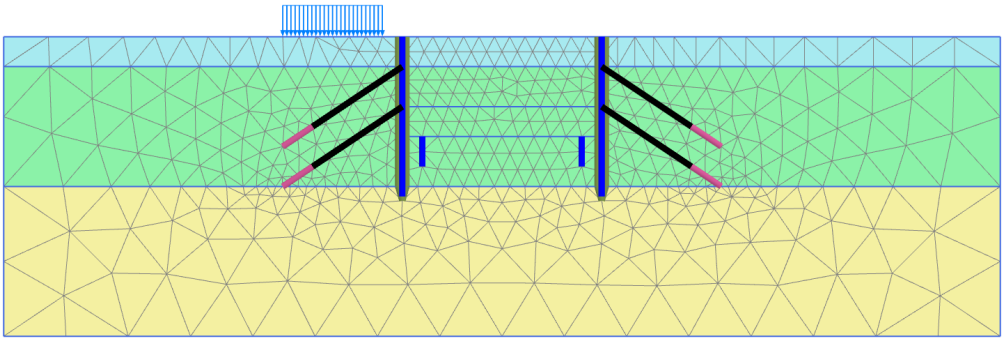


图 152: 生成的网格

5. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

10.4 定义并执行计算

- 进入**分阶段施工模式**。必须修改第 6 阶段进行的地下水渗流分析。

10.4.1 第 6 阶段：脱水

在此阶段，这些井将用于将挖掘时的潜水位降至 y = 17m。这相当于最终挖掘水平以下 3 m。

1. 在模型中多选井并激活。
2. 在**选择浏览器**中，井的行为缺省设置为**提取**。
3. 将排放值设置为 1.5m^3/天/m。
4. 将 h_{min} 值设置为 17m。这意味着只要墙壁位置的地下水水头至少达到 17m，就会抽水。

   图 153(第 152 页) 显示了**选择浏览器**中分配至各井的参数。

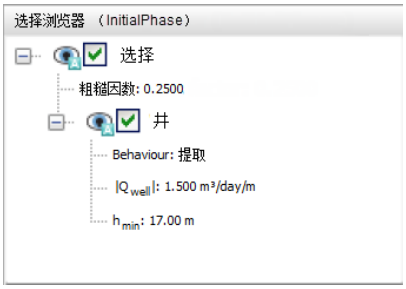


图 153: 井属性

10.4.2 执行计算

计算过程的定义完整。

1. 单击**计算**按钮 ，计算项目。
2. 计算完成后保存项目。

10.5 结果

要显示渗流场：

1. 在下拉菜单中选择第 6 阶段。
2. 单击菜单**应力** > **地下水渗流** > **|q|**。

   结果的缩放显示（比例因子 = 5.0）如图 154(第 152 页) 所示：

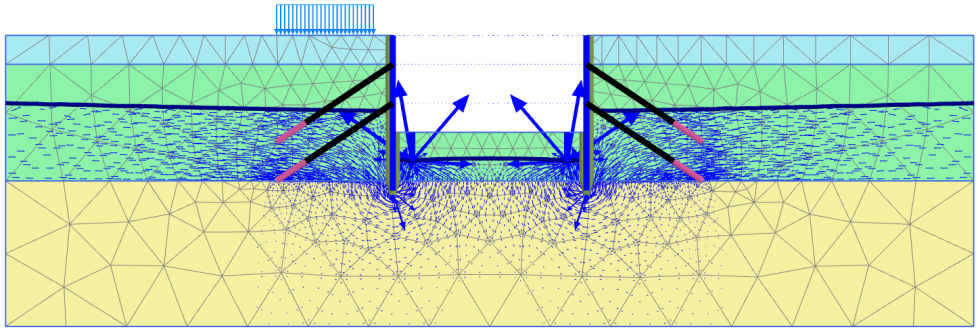


图 154: 第 6 阶段结束时得到的渗流场

单击菜单**应力** > **孔压** > **地下水水头**。将结果与教程使用锚定墙进行干地挖掘 [ADV](第 110 页)中定义的工程的第 6 阶段的结果进行比较。

图 155(第 153 页) 显示了所得到的有井和没有井的地下水水头 。

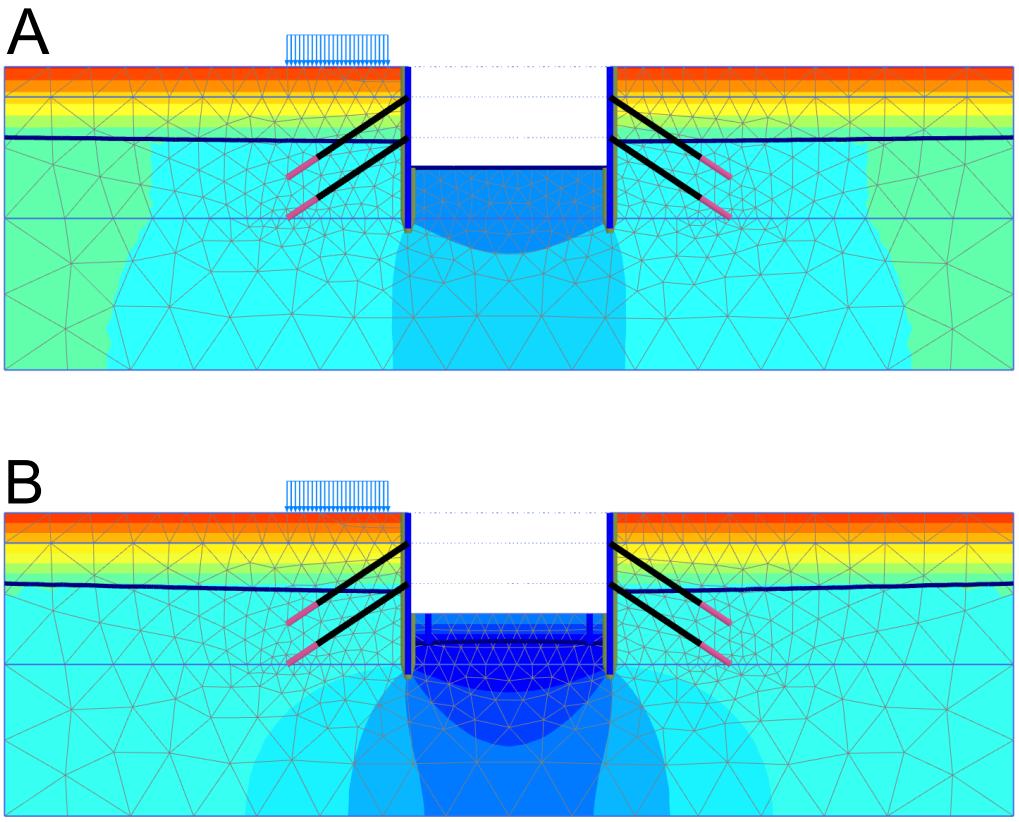


图 155: 所得地下水水头的比较

A：地下水水头（教程使用锚定墙进行干地挖掘 [ADV](第 110 页)中的第 6 阶段）

B：地下水水头（当前工程的第 6 阶段）

11 圆形水下承台的循环竖向承载力和刚度 [ADV]

本教程说明了如何计算圆形刚性水下承台（例如，一个具有夹套结构的承台）在暴雨期间暴露于循环荷载时的竖向承载力和竖向刚度。通过分配量级不同的荷载地块使暴雨理想化。使用循环累积工具获得 UDCAM-S 模型 的土体参数。本示例考虑的圆形混凝土承台半径为 11 米，位于超固结的黏土层上。

它介绍了在循环竖向荷载分量的作用下，建立地基非线性应力-应变关系以及计算荷载-位移曲线的方法。用二维轴对称模型进行圆形承台分析。土体轮廓由超固结比 (OCR) 为 4、浮容重为 10 kN/m^3、土压力系数 (K_0) 为 1 的黏土组成。各向异性固结三轴压缩试验的（静力）不排水剪切强度在埋深为 s_u^C = 130 kPa 时为定值。黏土的最大剪切模量 G_{max} 为 67275 kPa。土体的循环行为是根据 Drammen 黏土的等高线图 (Andersen, Kleven & Heien, 1988 [2]) 得出的，假设该行为可以代表实际黏土的行为。

11.1 目标：

- 通过运行循环累积程序、确定应力-应变曲线以及优化材料模型参数来获得 UDCAM-S 模型 的输入参数。
- 计算总竖向循环承载力。
- 计算将循环荷载计算在内的总分量和循环分量的竖向刚度。

11.2 几何图形

土体属性和承台几何图形如图 156(第 154 页) 所示。

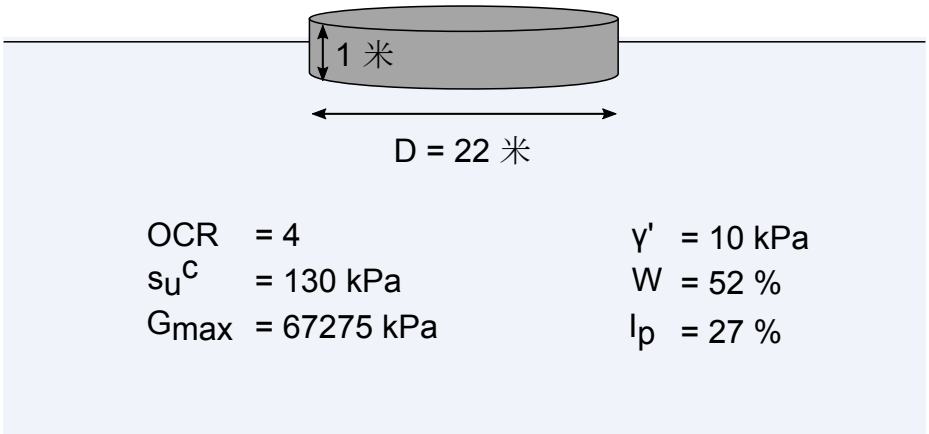


图 156: 工程几何图形

[2] Andersen, K.H., Kleven, A., Heien, .D.(1988).重力结构设计的循环土体数据。《岩土工程期刊》，517–539.

11.3 创建新项目

要创建新项目，请执行以下步骤：

1. 开启输入程序并从**快速选择**对话框选择**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. 在**模式**页面中，确保
   a. 将**模式**设置为**轴对称**，并且
   b. 将**单元**设置为 **15-节点**。
4. 将模型等高线的限制定义为
   a. x_{min} = 0.0 米，x_{max} = 40.0 米
   b. y_{min} = -30.0 米，以及 y_{max} = 0.0 米

11.4 定义土壤地层学

使用钻孔定义下层土层。

要定义土壤地层学，请执行以下操作：

1. 单击**创建钻孔**按钮  并在 x = 0 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 创建一个土层，顶层位于 0.0 米，底层位于 -30.0 米。
3. 为简化起见，本示例中不考虑水。因此，地下水位设置在模型底部下方，土体重量基于有效（水下）重量。
4. 在钻孔列中将**水头**值指定为 -50.00

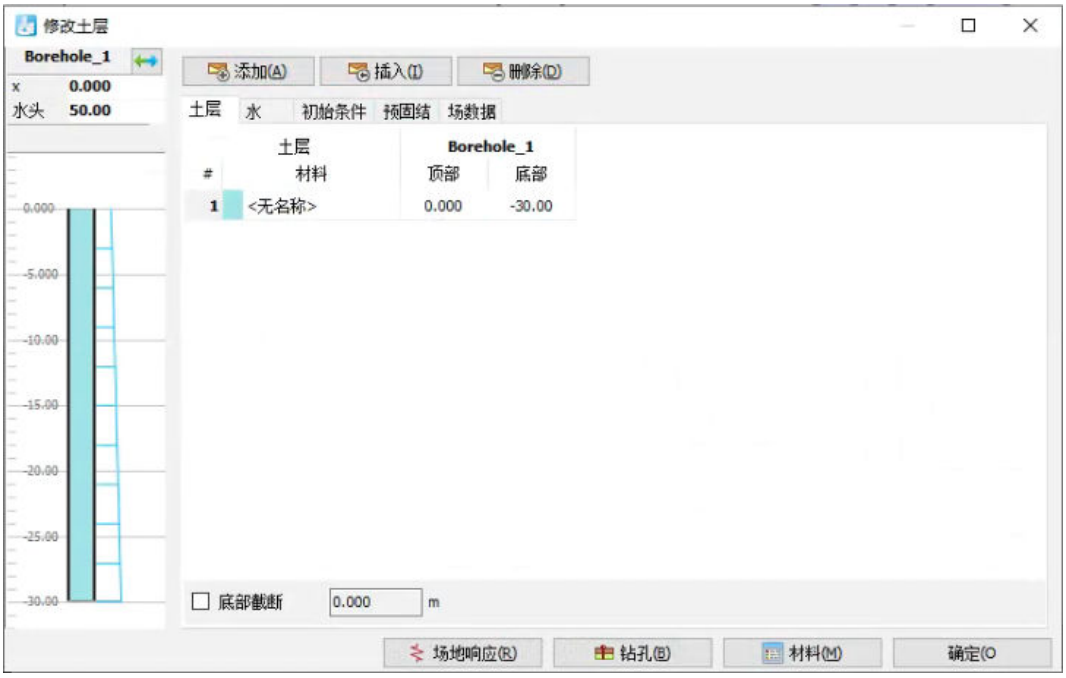


图 157: 土层

11.5 创建和分配材料数据集

需要创建三个材料数据集；两个针对黏土层（黏土 - 总荷载和黏土 - 循环荷载），一个针对混凝土地基。

打开**材料集**窗口。

11.5.1 材料：黏土-总荷载

此材料的模型参数将由循环累积和优化工具确定。

其他属性如表 27(第 156 页) 所示：

表 27: 材料属性

参数	名称	黏土-总荷载	单位
常规			
标识	-	黏土-总荷载	-
土体模型	-	UDCAM-S 模型	-
排水类型	-	不排水 (C)	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	10	kN/m^3

要创建材料集，请执行以下步骤：

1. 选择**土体和界面**作为**集类型**，并单击**新建**按钮。
2. 在**常规**选项卡，根据表 27(第 156 页)输入值。
3. 转到**力学**选项卡。

将运行循环累积和优化工具，而不是在此选项卡中输入模型参数。此程序由三个步骤组成。

单击 **力学**选项卡并单击侧面窗口中的**循环累积和优化工具**选项，如图 158(第 157 页) 所示。

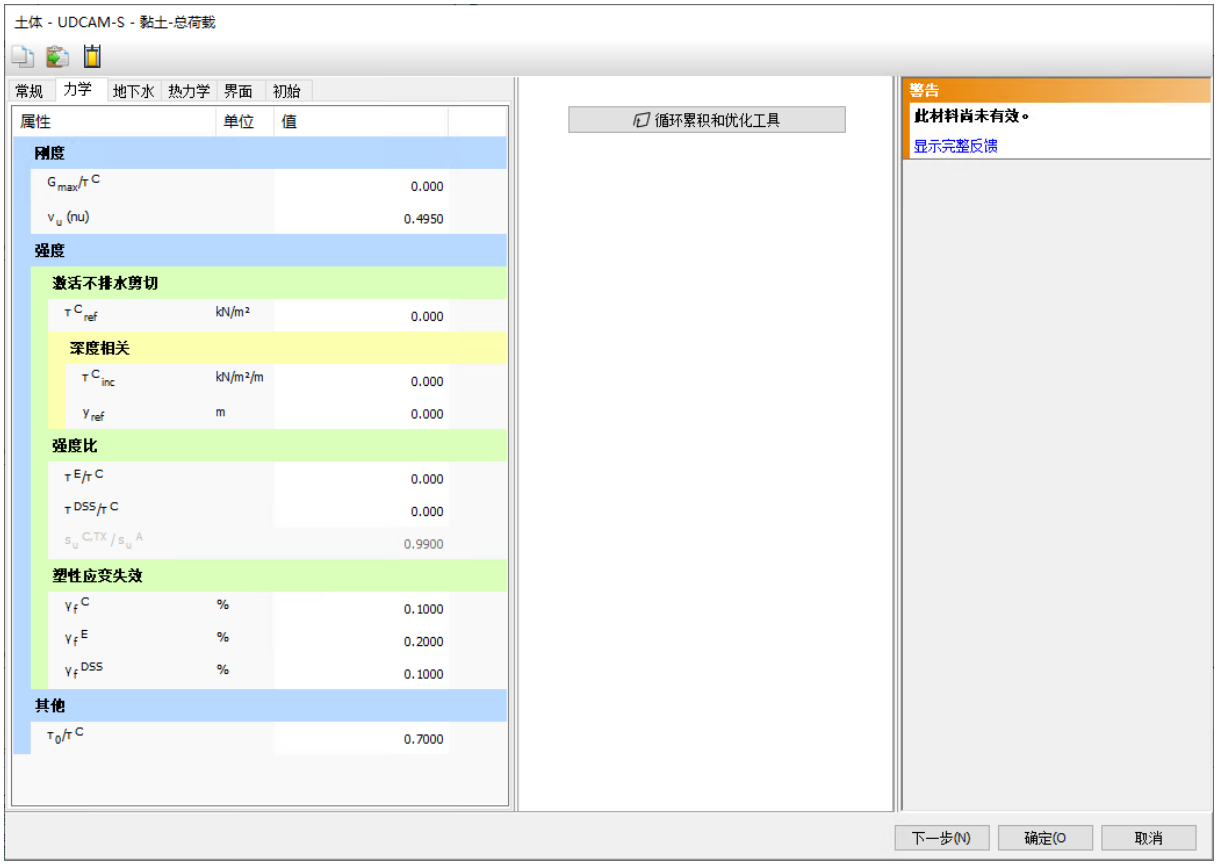


图 158: 循环累积和优化工具

将打开一个新窗口，如图 159(第 158 页) 所示：

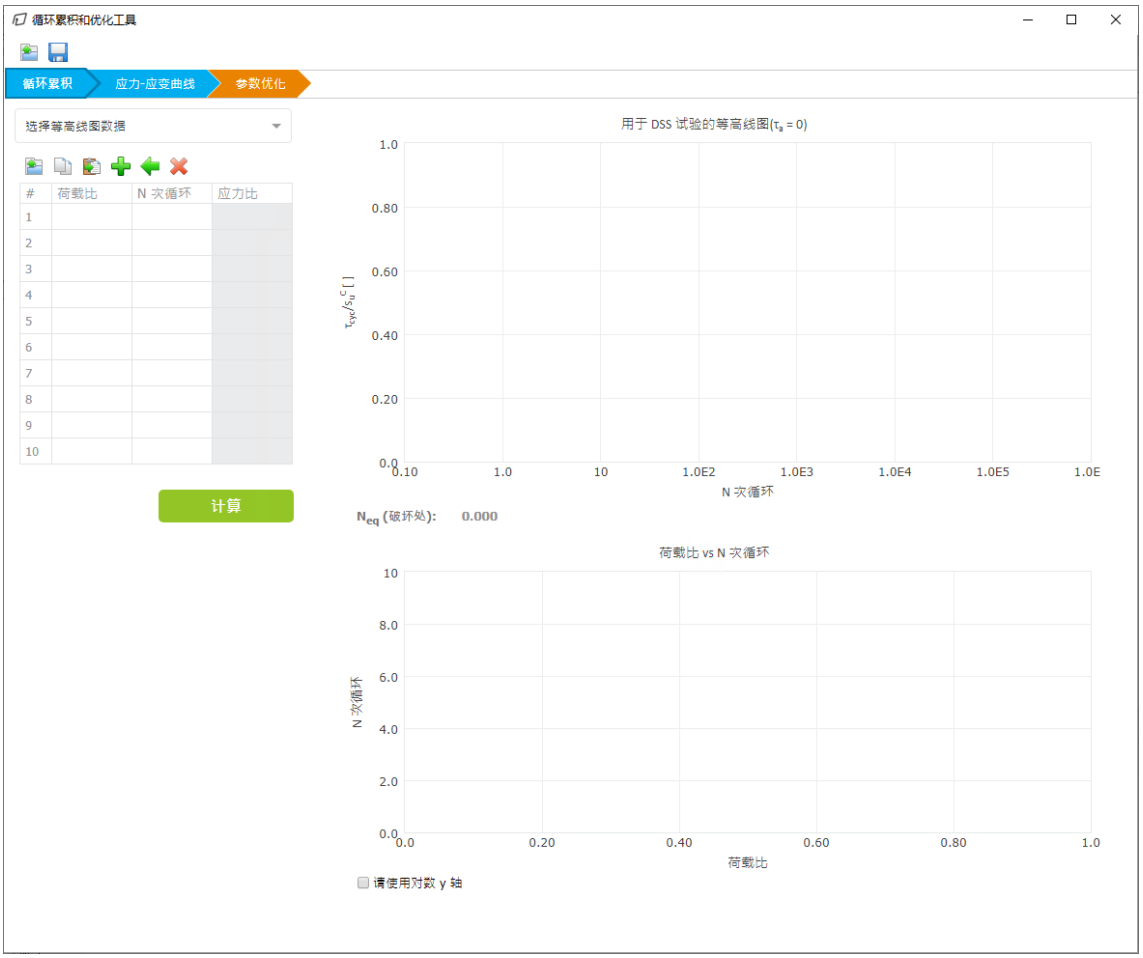


图 159: 循环累积工具窗口

窗口中的三个模式（**循环累积**、**应力-应变曲线**和**参数优化**）将表示循环累积和优化程序的三个步骤。

循环累积

此步骤旨在确定给定土体等高线图和荷载分布的峰值荷载 N_{eq} 的无排水循环的等效周期。

将使用以下暴雨组合数据，如表 28(第 158 页)：

表 28: 设计为 6 小时暴雨的循环竖向荷载组合

#	荷载比	N 次循环
1	0.02	2371
2	0.11	2877
3	0.26	1079
4	0.40	163
5	0.51	64

#	荷载比	N 次循环
6	0.62	25
7	0.75	10
8	0.89	3
9	1.0	1

1. 从**循环累积**选项卡中的**选择等高线图数据**中选择相应的等高线图。在此情况下，选择 **Drammen 黏土, OCR = 4**。

   注释: 有关等高线图的详细信息，请参见 Andersen (2015) [3] 和 参考手册，循环累积和优化工具。

2. 可在空白表中输入暴雨组合的荷载比和周期数。表 28(第 158 页) (Jostad, Torgersrud, Engin & Hofstede, 2015) [4]作为与最大循环竖向荷载（荷载比）和循环周期（N 次循环）相关的标准化循环竖向荷载。此处假设土体中的循环剪应力历史与承台的最大循环竖向荷载成正比。输入表格时，应确保最小荷载比位于顶部，最大荷载比位于底部。

   注释: 设计风暴为被转化为恒定循环荷载地块的荷载历史。每个地块对应一个恒定振幅的多个周期，该恒定振幅由荷载组合的时间记录确定。有关详细信息，请参阅参考手册循环累积和优化工具。

   在表中输入荷载地块后，**荷载比与 N 次循环**的关系图将显示数据的图形表示。对于此处给出的数据和打开的对数缩放，生成的图表如图 160(第 159 页) 所示。

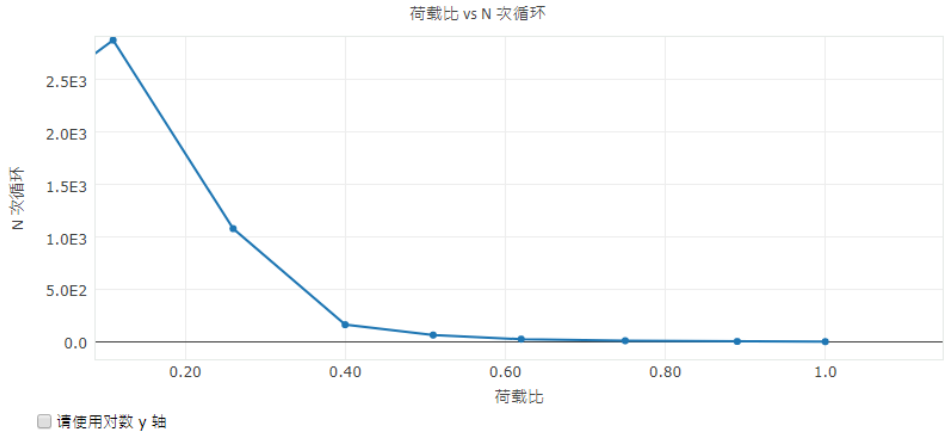


图 160: "荷载比与 N 次循环"图（对数缩放）

3. 单击**计算**以计算等效循环数 N_{eq}。
   选定的等高线图与上一个循环（图 161(第 160 页)）土体失效（此处剪切应变定义为 15%）的比例因子的剪应力历史以及不同比例因子的应力历史端点位置共同绘制。计算出的等效循环数与端点轨迹最后一点在 x 轴的值对应，等于 6.001。

[3] Andersen, K.H.(2015).近海地基设计的循环土体参数，ISSMGE McClelland 近海岩土工程前沿讲座 III。Meyer (Ed).Taylor & Francis Group, London, ISFOG 2015.ISBN 978-1-138-02848-7.

[4] Jostad, H.P., Torgersrud, Ø., Engin, H.K., Hofstede, H. (2015).使用循环应变等高线图计算带裙座自升式地基固定性的有限元程序。英国伦敦城市大学

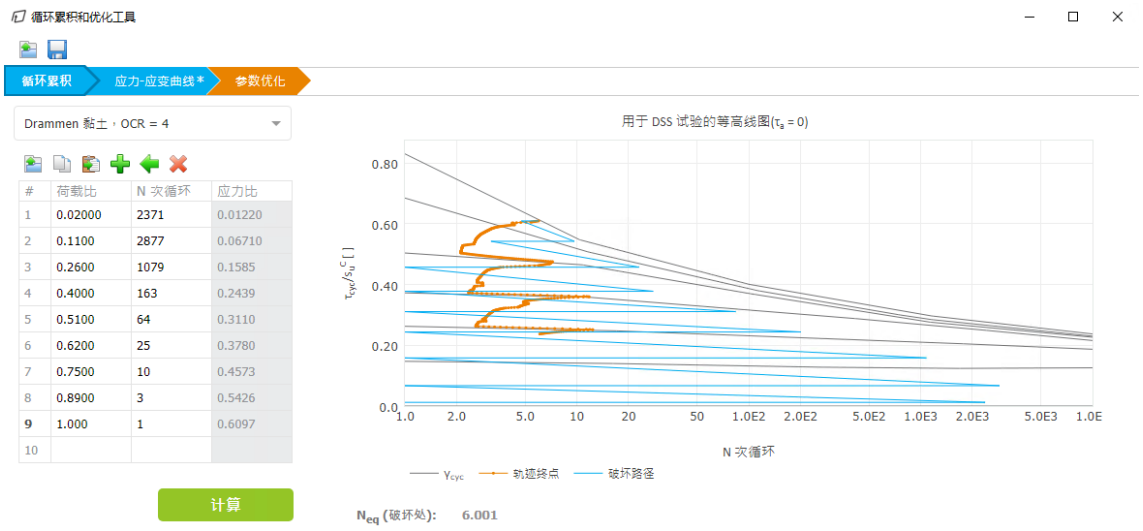


图 161: 循环累积 PLAXIS 2D

应力-应变曲线

此选项卡旨在针对给定的（计算）N_{eq} 和给定的循环平均剪应力比（此处取暴雨期间循环荷载和平均竖向荷载之间的比值）获得非线性应力-应变曲线。

1. 转至**应力-应变曲线**选项卡。
2. 保留**从循环累积**的缺省选项，用于确定 N_{eq}。采用前一个表中计算的等效循环次数。
3. 保留**土体特性**为**各向异性**，并且**比例因子**，**DSS** 和**比例因子 TX** 为 1。

注释:

- 循环强度可根据可用土体与循环强度的比进行缩放。
- 如果土体的塑性指数和/或含水量不同于 Drammen 黏土，则可通过应用不同于 1 的比例因子来缩放循环强度（请参见 Andersen, 2015 [5] 获取详细信息）。

4. 将描述应力路径倾角的 DSS、三轴压缩和三轴拉伸的循环与平均剪应力的比设置为适当值。在此示例中，选择以下输入值以获得失效时的应变兼容性，即不同应力路径在失效时的相同循环和平均剪切应变。
   a. DSS 循环平均比 $(\Delta\tau_{cyc}/\Delta\tau_a)^{DSS} = 1.1$，
   b. 三轴压缩 $(\Delta\tau_{cyc}/\Delta\tau_a)^{TXC} = 1.3$，以及
   c. 拉伸 $(\Delta\tau_{cyc}/\Delta\tau_a)^{TXE} = -6.3$
5. 选择作为荷载类型，为第一个材料选择**总荷载情况** 。
   DSS 和三轴等高线图与循环平均比描述的应力路径共同绘制（图 162(第 161 页)）。请注意，将对剪切应力相对于压缩时的静力不排水剪切强度进行标准化。在等高线图下方绘制提取的应力-应变曲线。
6. 单击**计算**，在等高线图下方生成相应的标准化应力-应变曲线。要查看结果，请参见图 162(第 161 页)。

[5] Andersen, K.H.(2015).近海地基设计的循环土体参数，ISSMGE McClelland 近海岩土工程前沿讲座 III。Meyer (Ed).Taylor & Francis Group, London, ISFOG 2015.ISBN978-1-138-02848-7.

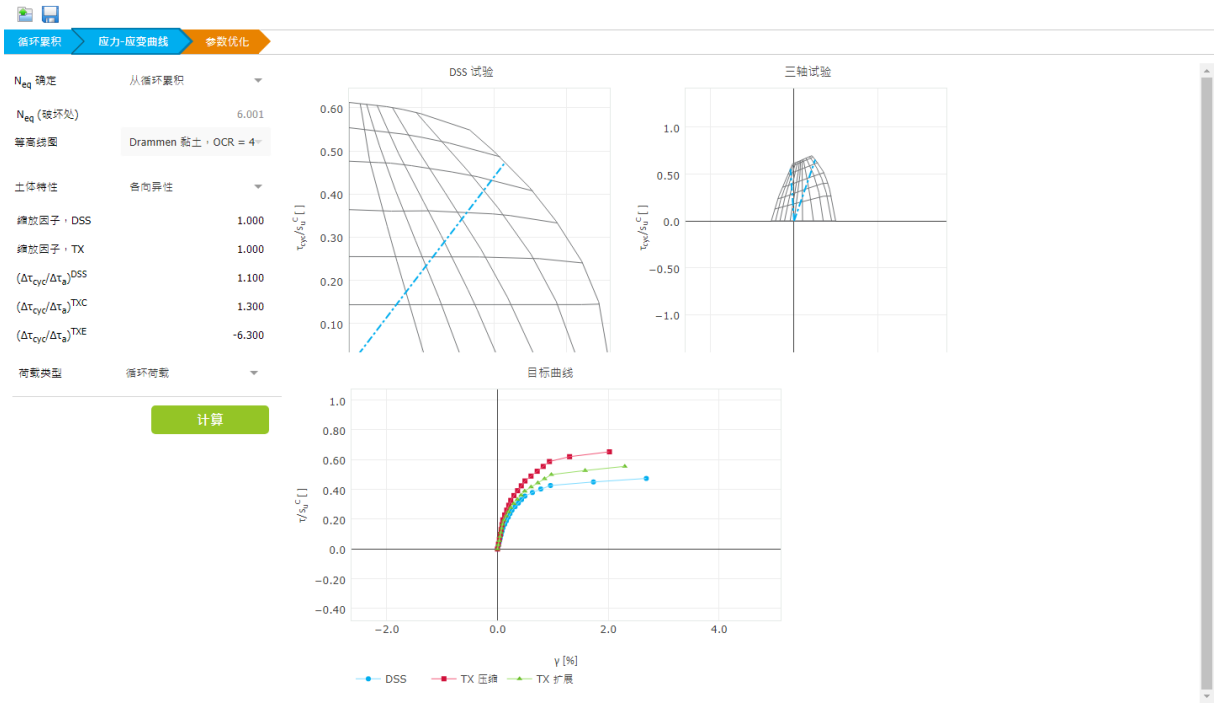


图 162: 总荷载的应力-应变曲线

参数优化

优化的目的在于获得 UDCAM-S 模型的一组参数。

优化后的参数范围和结果如表 29(第 161 页)所示：

表 29: 优化后的参数范围和结果

参数	名称	最小值	最大值	优化值	单位
三轴压缩失效时初始剪切弹性模量与降低的剪切强度的比	G_{ur}/τ^C	400.0	480.0	420.4	-
三轴压缩失效时的剪切应变	γ_f^C	6.0	8.0	6.431	%
三轴拉伸失效时的剪切应变	γ_f^E	5.0	8.0	7.873	%
直接简单剪切失效时的剪切应变	γ_f^{DSS}	8.0	12.0	11.97	%
循环压缩剪强度与不排水静力压缩剪切强度的比	$\tau^C/S_u{}^C$	1.14	1.16	1.152	-
循环 DSS 剪切强度与不排水静力压缩剪切强度的比	$\tau^{DSS}/S_u{}^C$	0.89	0.91	0.9051	-
循环拉伸剪且强度与不排水静力压缩剪切强度的比	$\tau^E/S_u{}^C$	0.62	0.64	0.6208	-

参数	名称	最小值	最大值	优化值	单位
三轴压缩试验失效时的参考降低剪切强度	τ^{C}_{ref}	-	-	149.7	-
参考深度	y_{ref}	-	-	0.000	m
三轴压缩试验失效时的降低剪切强度随深度增加	τ^{C}_{inc}	-	-	0.000	$kN/m^2/m$
三轴拉伸试验失效时的降低剪切强度与三轴压缩试验的降低剪切强度的比	τ^{E}/τ^{C}	-	-	0.5389	-
相对于降低的 TXC 剪切强度的剪切强度初始调用	τ^{0}/τ^{C}	-	-	2.332E-3	-
直接简单剪切试验失效时的降低剪切强度与三轴压缩试验的降低剪切强度的比	τ^{DSS}/τ^{C}	-	-	0.7858	-

使用以下步骤计算优化值。

1. 单击**参数优化**选项卡。
2. 在**静力属性**中输入黏土参数。将 $s_u{}^C{}_{ref}$ 设置为 130.0，将 K_0 确定设置为**手动**，并将 K_0 设置为 1.0。
3. 为表 29(第 161 页)中列出的参数建议最大值和最小值。

> **注释:**
>
> 在优化中，如果希望保持此值，则将 $\tau^C / S_u{}^C$、$\tau^{DSS} / S_u{}^C$ 和 $\tau^E / S_u{}^C$ 的最大值和最小值设置为接近应变插值的结果。
>
> 通过将 G_{max} 除以土体属性得出的结果 $(\tau^C / S_u{}^C) \cdot S_u{}^C$，来计算 G_{max} / τ^C。
>
> 设置接近此值的最大值和最小值。

4. 单击**计算**获得优化后的参数（图 163(第 163 页) 和表 29(第 161 页)中的列优化值）。

   数秒后，优化值将显示在参数范围表的相应列中。根据这些值，计算优化参数并在右侧表格中列出，如图 163(第 163 页) 所示。

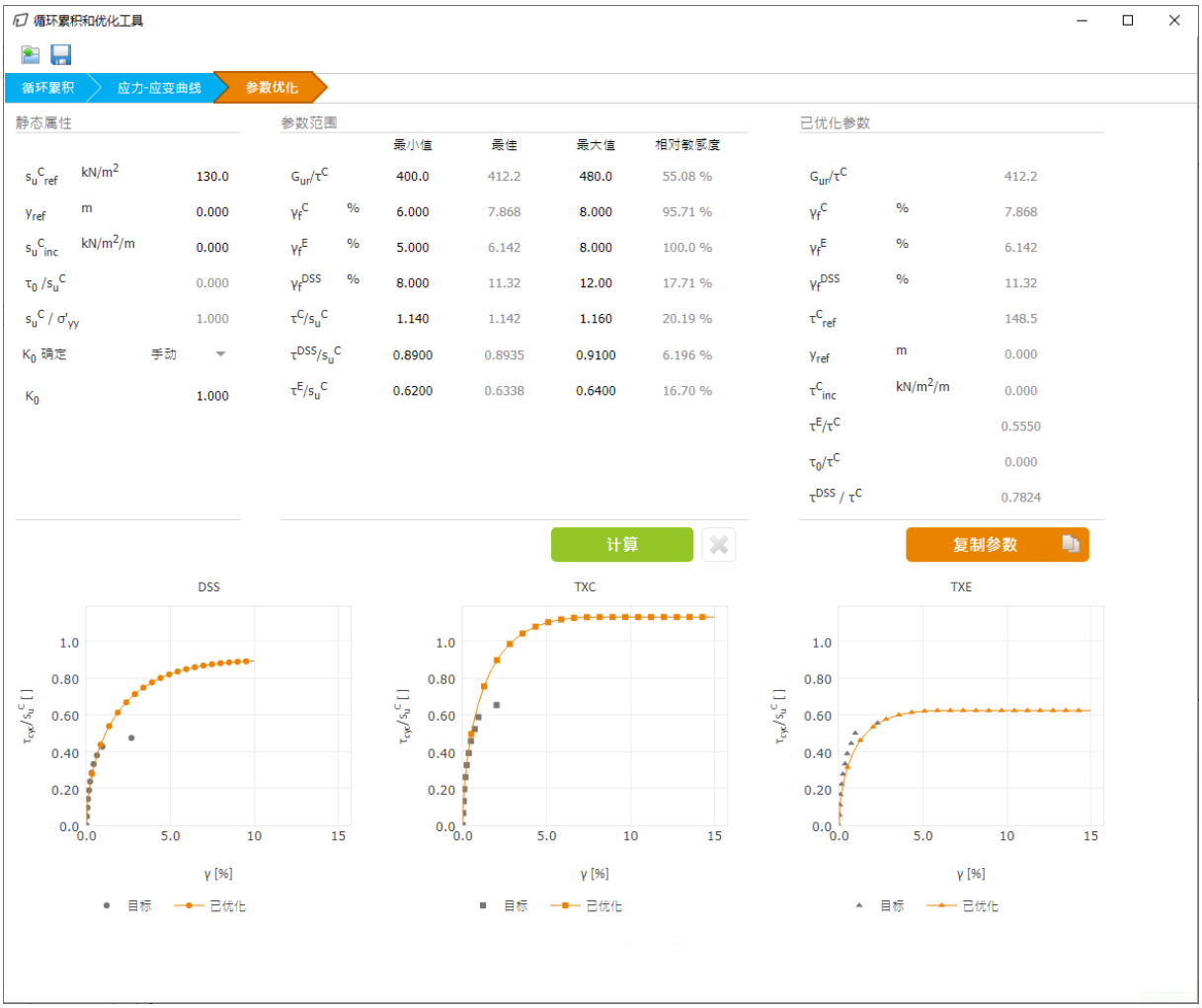


图 163: 总荷载的优化参数

以 UDCAM-S 模型使用优化参数进行试验建模得到的结果应力-应变曲线与等高线图中的目标点共同显示。

5. 计算完成后，保存循环累积和优化工具的应用状态。保存的数据将用于创建其他材料。要保存应用状态，请按下窗口顶部的**保存**按钮 。将状态保存为文件名 optimised_total.json。
6. 复制优化的材料参数：按下**复制参数**按钮，并返回至描述材料的 **Soil-UDCAM-S** 窗口。
7. 单击**粘贴材料**按钮 。
   力学选项卡中的值将替换为新值，如图 164(第 164 页) 所示。

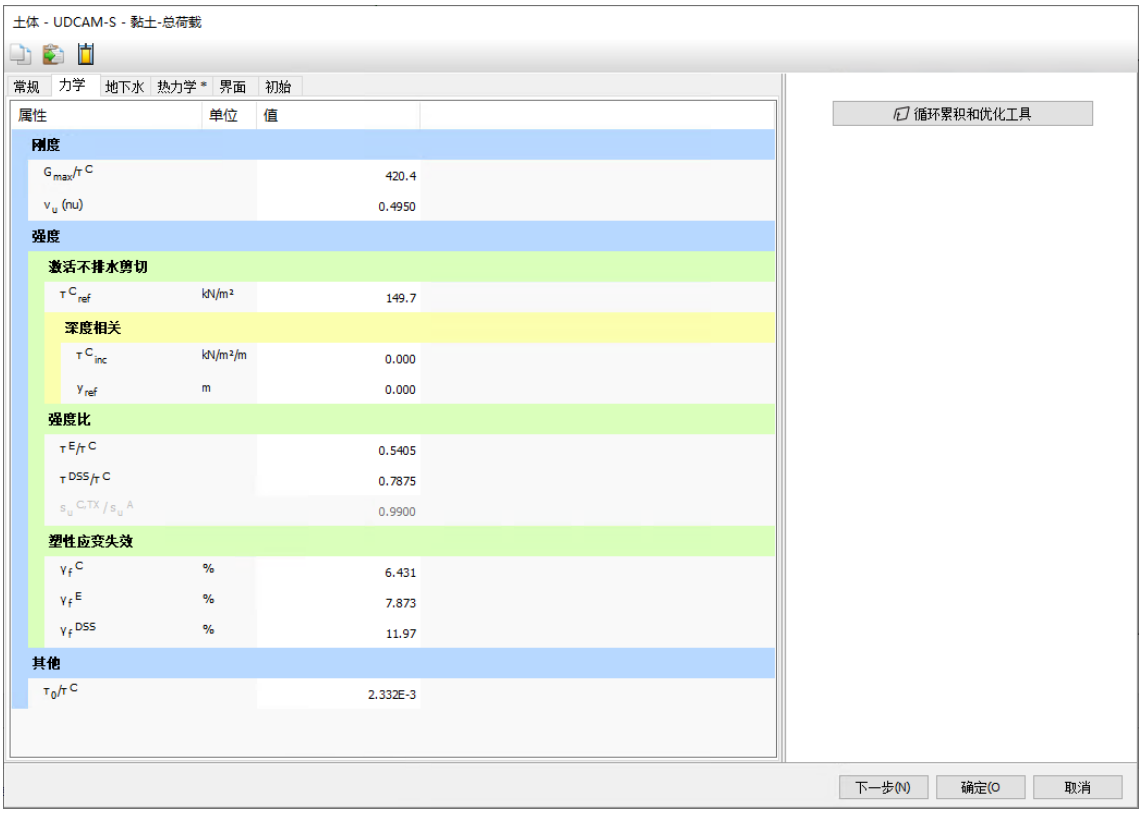


图 164: 将参数复制到黏土总材质中

8. 转至**初始**选项卡，并将 K_0 确定设置为手动，将 K_0 设置为 1，选中 $K_{0,x} = K_{0,z}$（缺省值）并将 $K_{0,x}$ 设置为 1。
9. 单击**确定**，关闭已创建的材料。
10. 将**黏土-总荷载**材料分配给钻孔中的土层。

11.5.2 材料：黏土-循环荷载

为第二种黏土创建材料。将重用来自*黏土-总荷载*材料的某些信息。但是，必须根据其他条件重新计算优化参数。

优化后的参数范围和结果如表 30(第 164 页)所示：

表 30: 优化后的参数范围和结果

参数	名称	最小值	最大值	优化值	单位
三轴压缩失效时初始剪切弹性模量与降低的剪切强度的比	G_{max} / τ^C	700.0	800.0	703.2	-
三轴压缩失效时的剪切应变	γ_f^C	1.0	3.0	2.966	%

参数	名称	最小值	最大值	优化值	单位
三轴拉伸失效时的剪切应变	γ_f^E	1.0	3.0	2.699	%
直接简单剪切失效时的剪切应变	γ_f^{DSS}	1.0	3.0	2.946	%
循环压缩剪强度与不排水静力压缩剪切强度的比	$\tau^C / {S_u}^C$	0.66	0.67	0.6667	-
循环 DSS 剪切强度与不排水静力压缩剪切强度的比	$\tau^{DSS} / {S_u}^C$	0.47	0.49	0.4787	-
循环拉伸剪且强度与不排水静力压缩剪切强度的比	$\tau^E / {S_u}^C$	0.57	0.59	0.5790	-
三轴压缩试验失效时的参考降低剪切强度	${\tau^C}_{ref}$	-	-	86.67	-
参考深度	y_{ref}	-	-	0.000	m
三轴压缩试验失效时的降低剪切强度随深度增加	${\tau^C}_{inc}$	-	-	0.000	$kN/m^2/m$
三轴拉伸试验失效时的降低剪切强度与三轴压缩试验的降低剪切强度的比	τ^E / τ^C	-	-	0.8684	-
相对于降低的 TXC 剪切强度的剪切强度初始调用	τ^0 / τ^C	-	-	0.000	-
直接简单剪切试验失效时的降低剪切强度与三轴压缩试验的降低剪切强度的比	τ^{DSS} / τ^C	-	-	0.7181	-

使用以下步骤计算优化值。

1. 复制**黏土-总荷载**材料。
2. 输入黏土-循环荷载作为标识。
3. 转至**力学**选项卡。
   与第一种材料一样，此参数也将使用**循环累积和优化工具**确定。
4. 单击**力学**选项卡上的**循环累积和优化工具**按钮，打开工具。
5. 单击**打开文件**按钮 ，然后选择在优化第一种材料之后保存的应用状态 `optimised_total.json`。
   所有选项卡都将填写数据。
6. 保持**循环累积**选项卡不变。
7. 转至**应力-应变曲线**选项卡，将荷载类型设置为**循环荷载**。
8. 按下**计算**，并完成计算。
   应力-应变曲线如图 165(第 166 页) 所示：

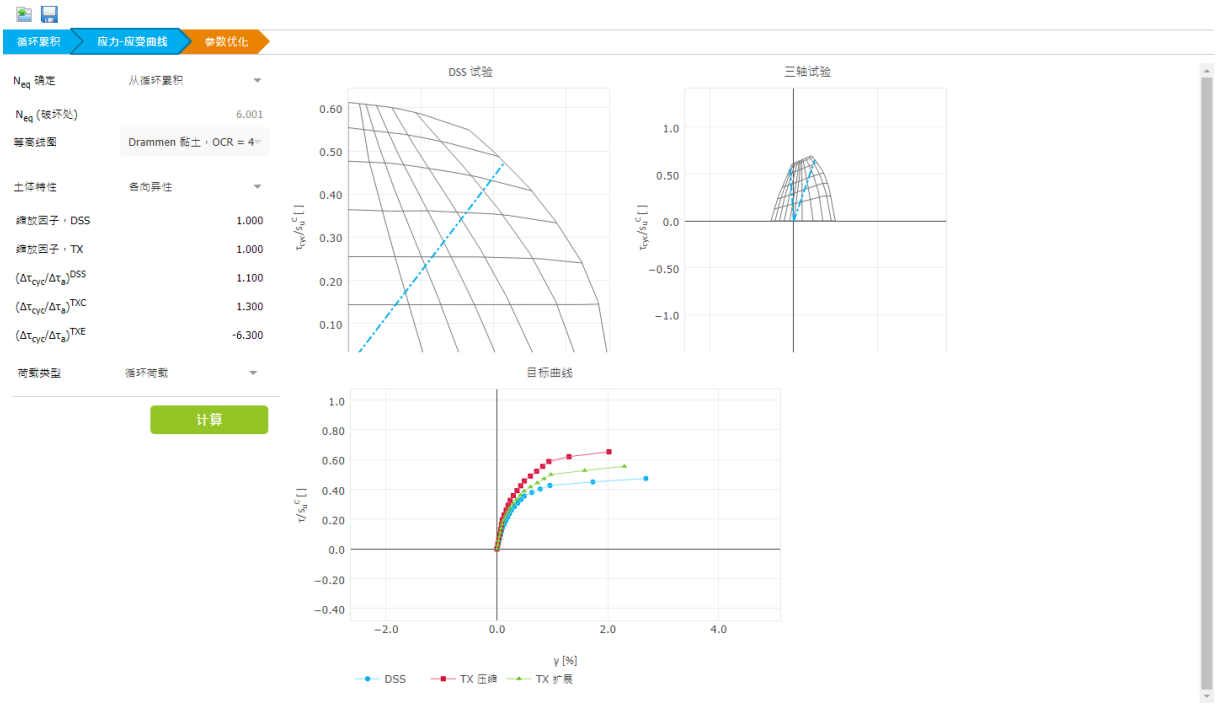


图 165: 循环荷载的应力-应变曲线

9. 转至**参数优化**选项卡。接受有关重置优化选项卡以获取更新值的通知。
10. 确保将 $s_u{}^C{}_{ref}$ 设置为 130.0，并将 K_0 确定设置为自动。
11. 修改**参数范围**的最大值和最小值，该值请参见表 30(第 164 页)。
12. 单击**计算**，获得优化参数。
    优化的参数如图 166(第 167 页) 所示，并在表 30(第 164 页)中的“优化值”列中列出。

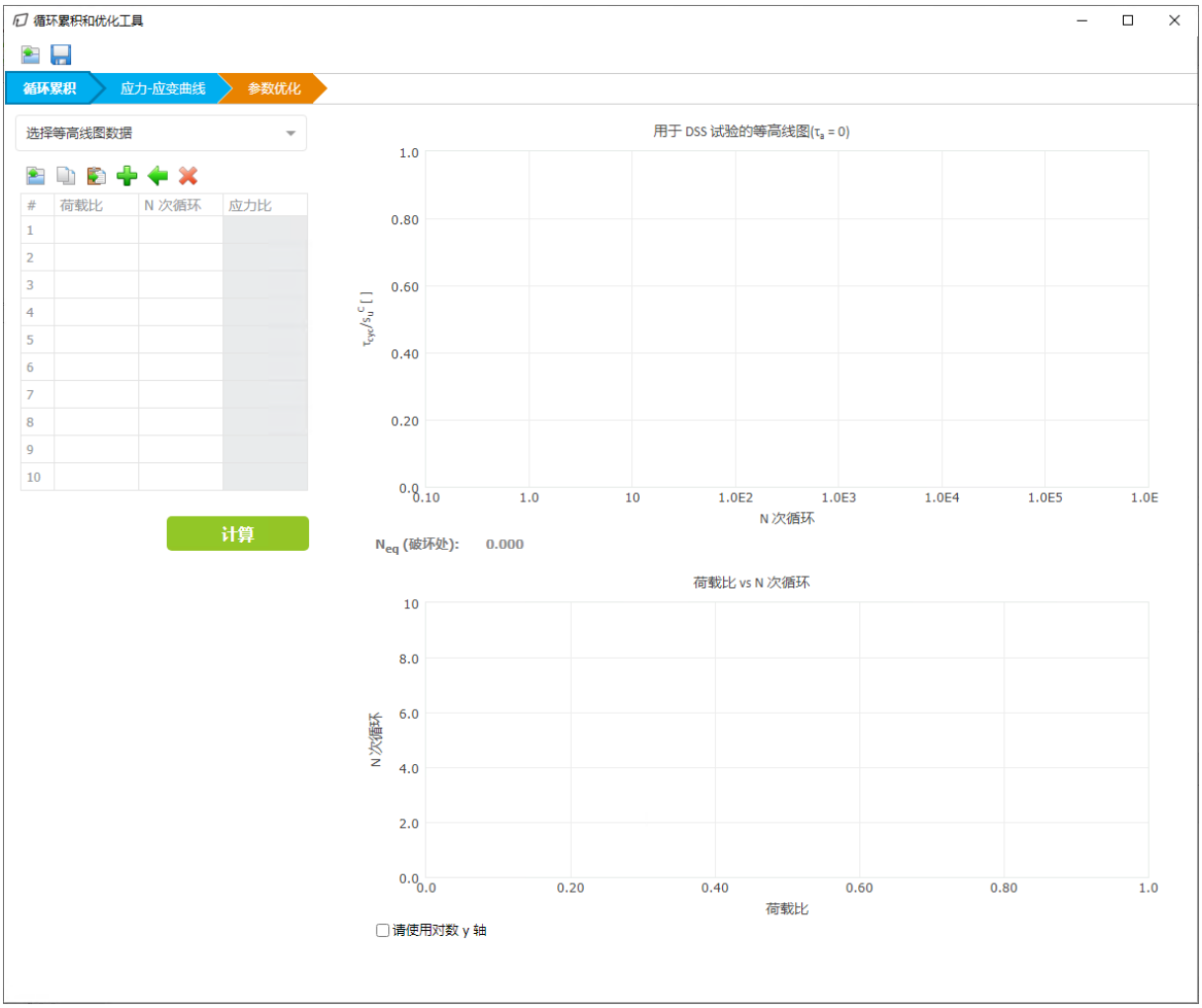


图 166: 循环荷载的优化参数

13. 将应用状态保存为文件名 `optimised_cyclic.json`。
14. 复制优化的材料参数：单击**复制参数**按钮并返回至 **Soil-UDCAM-S** 窗口。
15. 单击**粘贴材料**按钮 。
    力学选项卡中的值将替换为新值。
16. 单击**确定**，关闭已创建的材料。

11.5.3 材料：混凝土

为混凝土地基创建新材料。

1. 选择**土体和界面**作为**材料集**类型，并单击**新建**按钮。
2. 输入混凝土承台作为**标识**，并选择**线弹性**作为**土体模型**。
3. 将**排水类型**设置为**非多孔**。
4. 输入材料属性：
   a. 单位重量为 $24\ \mathrm{kN/m^3}$，

b. 杨氏弹性模量为 $30x10^6$ kN/m^2，且
c. 泊松比为 0.1。

5. 单击**确定**，关闭已创建的材料。
6. 单击**确定**，关闭**材料集**窗口。

11.6 定义结构单元

必须定义混凝土地基和界面。

11.6.1 定义混凝土地基

1. 单击**结构**选项卡，然后在结构模型中输入结构单元。
2. 在边栏中选择**创建土体多边形**功能，然后单击 (0.0, 0.0)、 (11.0, 0.0)、(11.0, -1.0) 和 (0.0, -1.0).

注释: 不要将**混凝土承台**材料分配给多边形。

11.6.2 定义界面

创建一个界面，为地基和周围土体的交互作用建模。将界面延伸至土体中半米处。确保界面位于承台外侧（土体内部）。将分两部分创建界面：

1. 单击**创建界面**，从 (11.0, -1.0) 到 (11.0, 0.0)，创建其上部，图 168(第 169 页)。
2. 单击**创建界面**，从 (11.0, -1.5) 到 (11.0, -1.0)，创建其下部（地基和土体之间），图 168(第 169 页)。
3. 上部界面（地基和土体之间）的建模强度折减 30%。
   a. 复制**黏土-总荷载**材料并将其命名为黏土-总荷载-界面。
   b. 将 R_{inter} 设置为 0.3，以折减界面强度，如图 167(第 168 页) 所示，并

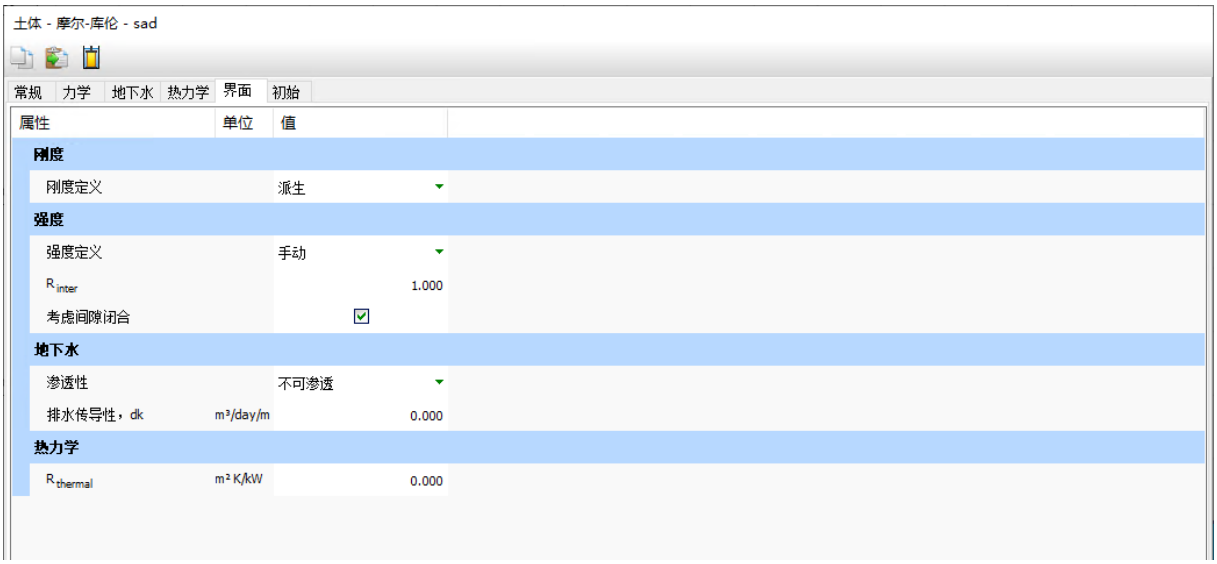


图 167: 黏土-总荷载界面

c. 将其分配到界面的上部。

4. 对于阶段 3（计算竖向循环刚度），需要另一种强度折减材料。

a. 复制**黏土-循环荷载材料**，并将其命名为黏土-循环荷载-界面。

b. 将 R_{inter} 设置为 0.3，以折减截面强度。

c. 不要对其进行分配。将在阶段 3 进行分配。

5. 对延伸至土体中的界面材料应用全土体强度 (R_{inter} = 1.0)，如原始黏土材料**黏土-总荷载**中的隐式定义。保留**材料模式**缺省设置：从相邻土体。模型的几何图形如图 168(第 169 页) 所示：

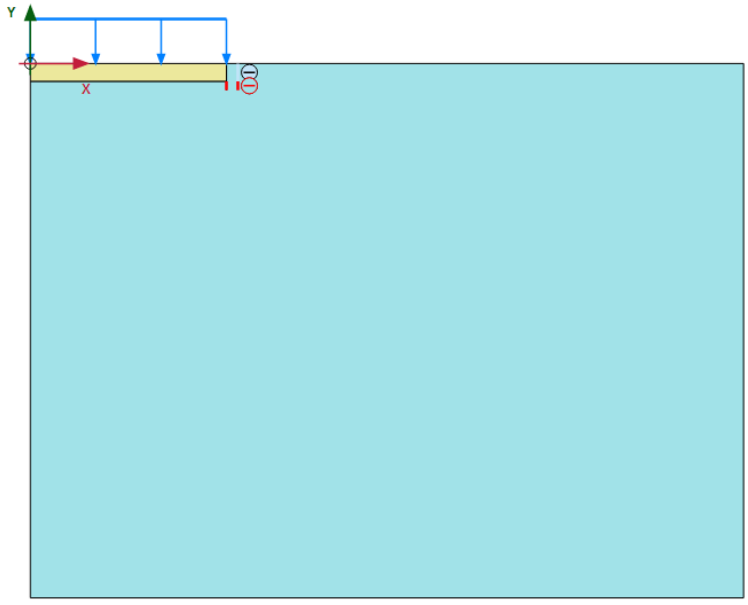


图 168: 模型的几何图形

11.6.3 定义竖向荷载

要计算循环竖向性能和刚度，请在地基顶部应用竖向荷载。

1. 选择**创建线荷载**并单击 (0.0, 0.0) 和 (11.0, 0.0) 定义分散荷载。
2. 在**选择浏览器**中将 $q_{y,start,ref}$ 值设置为 -1000 kN/m/m。

11.7 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 在边栏中单击**生成网格**按钮 。对于**单元分布**参数，请使用**中等**选项（缺省）。
3. 单击**查看网格**按钮 ，以查看网格，如图 169(第 170 页) 所示。

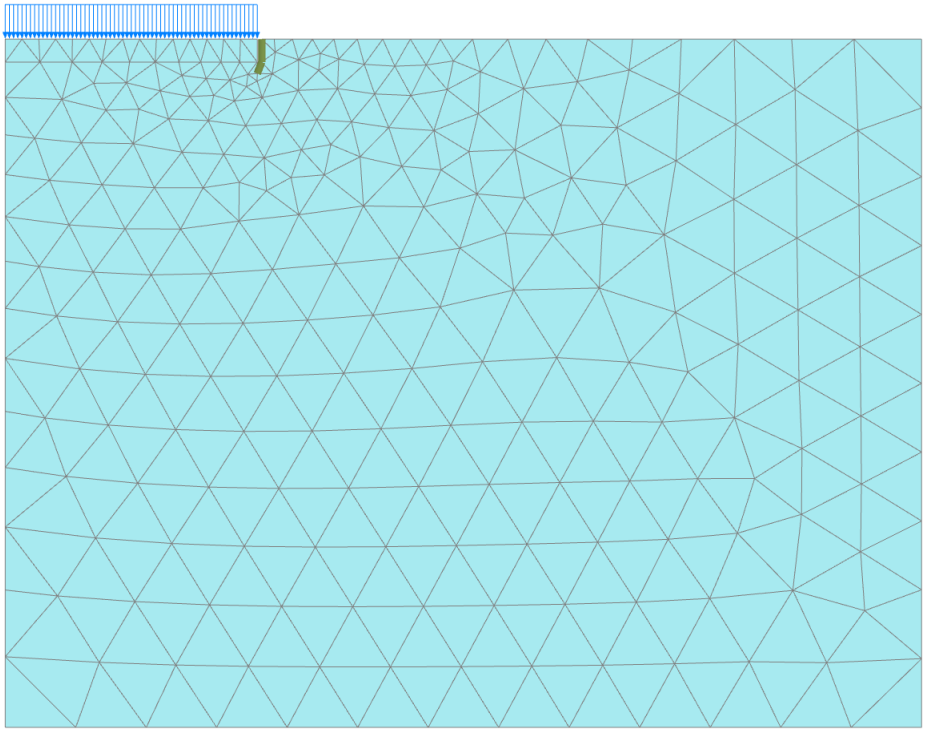


图 169: 生成的网格

4. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

11.8 定义并执行计算

计算包含以下阶段：

- 在初始阶段，通过 **K0 过程**使用缺省值生成初始应力条件。
- 在第 1 阶段，通过将**混凝土**材料分配到相应的多边形来激活承台。同时激活界面。

- 在第 2 阶段，计算总竖向循环承载力和刚度。
- 在第 3 阶段，计算竖向循环承载力和刚度。

11.8.1 初始阶段

1. 转至**分阶段施工模式**。
2. 在**阶段浏览器**中双击初始阶段
3. 确保已将**计算类型**设置为 K0 程序。
4. 单击确定，关闭**阶段**窗口，

11.8.2 第 1 阶段：承台和界面激活

1. 单击**添加阶段**按钮 ，创建新阶段。
2. 阶段 1 从初始阶段开始。
3. 将**混凝土承台**材料分配给相应的多边形，可激活承台。
4. 以及激活界面。

11.8.3 第 2 阶段：循环竖向承载力和刚度

在第 2 阶段，计算总竖向循环承载力和刚度。可通过增加竖向荷载（应力）直至失效获得竖向承载力。刚度计算由力除以位移得出。

1. 单击**添加阶段**按钮 ，创建新阶段。
2. 阶段 2 从阶段 1 开始。
3. 在**阶段**窗口中，打开**变形控制参数**子树，选择**将位移重置为零**选项并**重置小应变**。
4. 在**阶段**窗口中，转到**数值控制参数**，然后在**最大存储步数**中设置 **500** 步。
5. 激活线荷载。

11.8.4 第 3 阶段：计算竖向循环刚度

在阶段 3（仍从阶段 1 开始），激活**黏土-循环荷载材料**，可计算竖向循环刚度。可通过增加竖向荷载（应力）直至失效获得竖向承载力。

1. 单击**添加阶段**按钮 ，创建新阶段。
2. 在**阶段**窗口，将**起始阶段**设置为阶段 1。
3. 转至**变形控制参数**子树，选择**将位移重置为零**选项并**重置小应变**。
4. 在**阶段**窗口中，转到**数值控制参数**，在**最大存储步数**中设置 **500** 步，然后关闭**阶段**窗口。
5. 用**黏土-循环荷载**替换土体材料。
6. 为界面的上部分配**黏土-循环荷载-界面**材料。界面下部的材料模式仍为**从相邻土体**。
7. 确保激活该行。

计算定义已完成。

11.8.5 执行计算

在开始计算之前，建议选择节点或应力点，以稍后生成荷载-位移曲线或应力-应变图。

要进行此操作，请执行以下步骤：

1. 在边栏中单击**为曲线选择点**按钮 。
   连接图将在输出程序中显示，**选择点**窗口将被激活。
2. 在承台上选择一个*计算前节点* (0.0, 0.0)。关闭**选择点**窗口。
3. 单击**更新**选项卡，关闭输出程序，并返回至输入程序。
4. 单击**计算**按钮 ，计算项目。
5. 计算完成后，转到输出程序，单击**为曲线选择点**按钮 ，然后在承台上选择一个*计算前节点* (0.0, 0.0)。

11.9 结果

11.9.1 总荷载竖向循环承载力

应用的竖向应力（荷载）：$q_y = -1000 kN/m^2$

失效时间：$q_y = 720 kN/m^2$（图 170(第 172 页)）

总竖向承载力：$V_{cap} = q_y \cdot Area = 720\ kN/m^2 \cdot \pi \cdot (11m)^2 = 273.7MN$

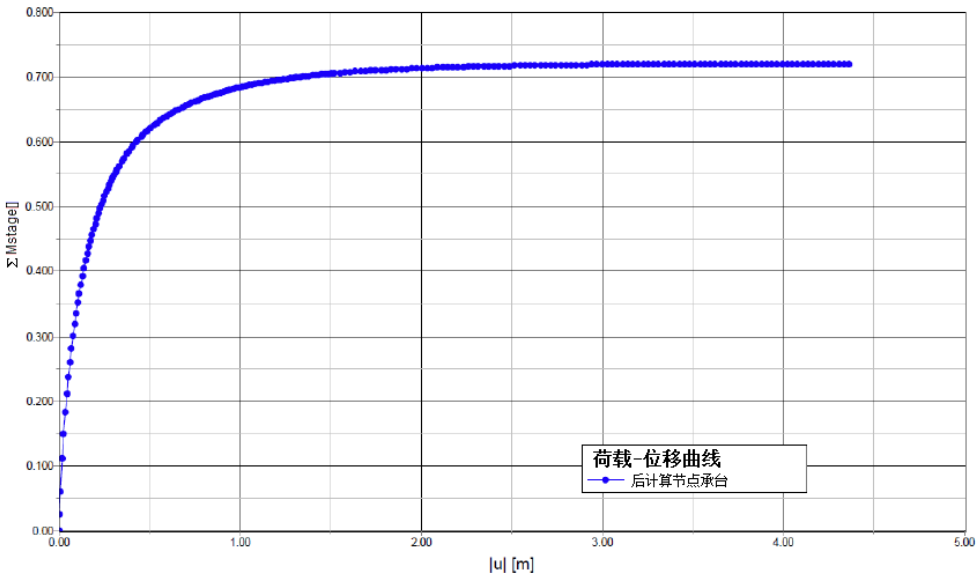


图 170: 总位移与ΣMstage

注释: 使用计算前点生成荷载位移曲线

可以通过电子表格使用 ΣMstage 的所选 *计算前节点*与其相应位移的计算结果来生成作为 q_y 函数的荷载位移曲线。

考虑到对于 PLAXIS，任何计算步骤中的分散荷载 q_y 可以定义为：

$q_{active}=q_{phase.start}+\Sigma Mstage(q_{phase.end}-q_{phase.start})$

其中：

- $q_{phase.start}$ 是阶段开始时的荷载值（或实际上是前一个阶段结束时的荷载值）。
- $q_{phase.end}$ 是当前阶段结束时所需的荷载值，即再"分阶段施工"设置中定义的值。

由于在本教程中，$q_{phase.start}=0$，因而 $q_{active}=\Sigma Mstage \times q_{phase.end}$

程序：

1. 从输出程序转到**曲线管理器**并获取 ΣMstage-位移曲线。
2. 单击 图标。为所有步骤复制 |u| 与 ΣMstage 的对比值并将其粘贴到电子表格上。确保粘贴的值及其单位与 PLAXIS 的输出一致。
3. 将 ΣMstage 列的每个值乘以 $q_{phase.end}$.的值对于此实例，$q_{phase.end}$ 等于定义的竖向荷载 1000KN。
4. 图表 |u| 与 q_y。

对比之下，静力竖向承载力（使用静力不排水剪切强度）为 228.1MN。竖向承载力较大的原因在于，与标准单调实验室测试获得的值相比，波浪荷载期间的较高应变率导致剪切强度提高，而且这种影响大于暴雨期间的循环退化。

11.9.2 循环荷载竖向循环承载力

应用的竖向应力（荷载）：$q_y = -1000 kN/m^2$

失效时间：$q_y = 458.1 kN/m^2$（图 171(第 173 页)）

总竖向承载力

$V_{cap} = q_y \cdot$ 面积 $= 458.1 kN/m^2 \cdot \pi \cdot$（11 米）$^2 = 174.14 MN$

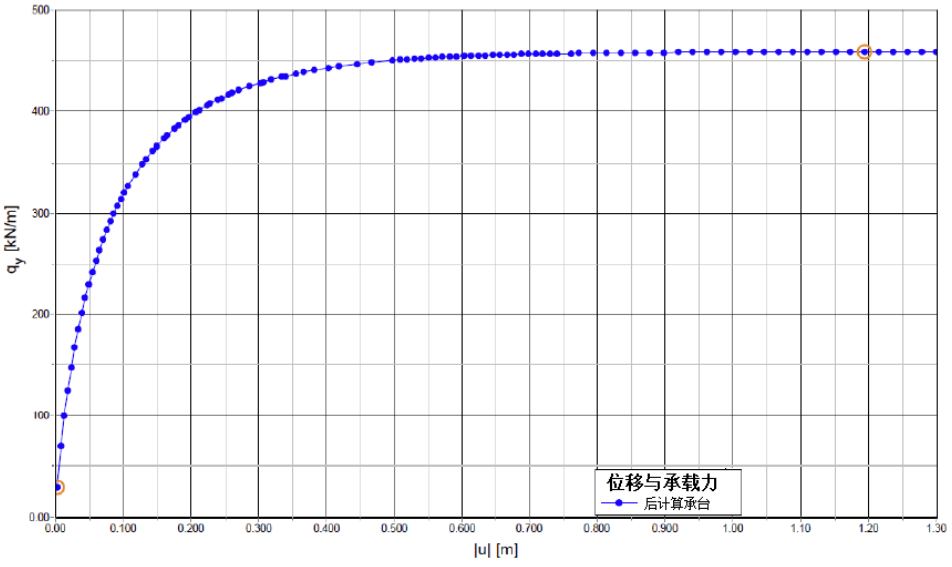


图 171: 循环荷载的总位移与竖向承载力曲线

注释: 使用计算后点生成荷载位移曲线

荷载位移曲线作为 q_y 与 |u| 的函数（请参见图 171(第 173 页)），可以直接在**曲线管理器** 中使用计算后点上的数据来生成。为此，必须在运行计算之前为每个特定阶段定义**最大存储步数**（在**数值控制参数**中）（此示例使用 500 步）。请注意，存储多个计算步骤来获取计算后节点上的结果可能会生成大量文件，这可能不合适，具体取决于项目。如果出现这种情况，建议按照前几节中所述使用计算前节点来获取荷载位移曲线。

在生成图表之前，在**曲线管理器**窗口中选择“反向符号”选项以获取 q_y 的正值。

11.9.3 竖向刚度

总分量和循环分量的竖向刚度（将循环荷载计算在内）的计算方法为 $k_y = F_y / u_y$。总竖向位移包括暴雨期间积累的竖向位移。荷载与刚度的对比如图 172(第 174 页)所示：

注释: 为构建竖向荷载与竖向刚度图表，请使用荷载位移曲线的值（|u| 比 q_y）并为每个步骤运算 F_y，同时考虑：

- $F_y = q_y \times Area_{footing}$。
- 在此示例中，u_y 等于 |u|。

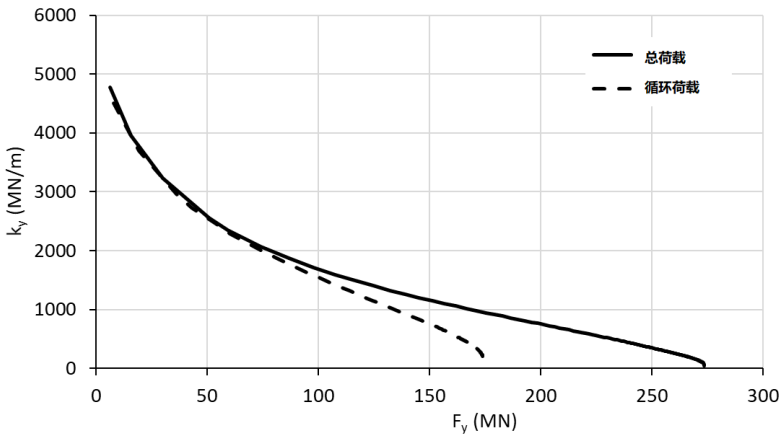


图 172: 总荷载分量和循环荷载分量竖向荷载与刚度的对比

12 流经路堤的水流 [ULT]

在本章中，将考虑流经路堤的水流。水流从左侧（河流）流向右侧（围垦地）。因此，路堤右侧会出现渗漏。潜水位的位置取决于河流水位，而河流水位会随着时间变化。

目标：

- 进行**仅渗流**分析
- 使用横截面曲线

几何图形

图 173(第 175 页) 显示了存在地表水自由流动的路堤布局问题。堤顶宽度为 2.0 米。初始河水水位为 1.5 米深。河流和围垦地之间的水位差为 3.5 米。

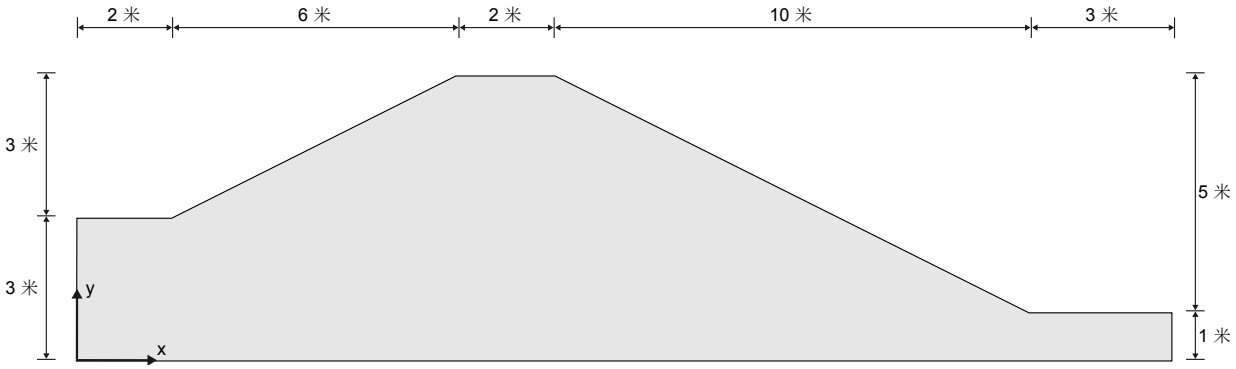


图 173: 工程几何图形

12.1 创建新项目

要创建新项目，请执行以下步骤：

1. 开启输入程序并从**快速选择**对话框选择**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. 在**模型**页面中，保留**模型**（**平面应变**）和**单元**（**15 节点**）的缺省选项。
4. 将模型尺寸设置为： x_{min} = 0 m、x_{max} = 23 m、y_{min} = 0 m 和 y_{max} = 6 m
5. 保留单位、常量和通用参数的缺省值，并单击**确定**。
   项目属性窗口关闭。

12.2 定义土壤地层学

钻孔数量必须根据表 31(第 176 页)中提供的信息来确定。

表 31: 模型中的钻孔信息

钻孔数量	位置 (x)	水头	顶部	底部
1	2	4.5	3	0
2	8	4.5	6	0
3	10	4.0	6	0
4	20	1.0	1	0

要定义土壤地层学，请执行以下操作：

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 x = 2 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 指定水头值为 4.5。
3. 在钻孔中添加一个土层。将最顶层设置为 3。不需要改变土层的底部边界。
4. 根据表 31(第 176 页)中提供的信息，创建其余所需的钻孔。

12.3 创建并分配材料数据集

需要为土层创建一个材料数据集。

砂土层具有以下属性，如表 32(第 176 页)所示：

表 32: 路堤材料（砂土）的材料属性

参数	名称	砂土	单位
常规			
材料模型	-	线弹性	-
排水类型	-	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	20	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20	kN/m^3
力学			
杨氏模量	E'_{ref}	$10 \cdot 10^3$	kN/m^2
泊松比	ν	0.3	-

地下水			
分类标准	-	标准	-
土体分类	-	中等细	-
渗流参数 - 使用缺省值	-	从数据集	-
水平渗透率	k_x	0.02272	米/天
垂直渗透率	k_y	0.02272	米/天

要创建材料集，请执行以下步骤：

1. 根据上表定义土体材料，并将材料数据集分配至类组。跳过**界面**和**初始**页面，，因为这些参数不相关。
2. 将材料分配到土体类组后，关闭**修改土层**窗口。

12.4 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 如图 174(第 177 页) 所示，选择构成左侧边坡和河床的两条线。在**选择浏览器**中，将**粗糙度系数**指定为 0.5。

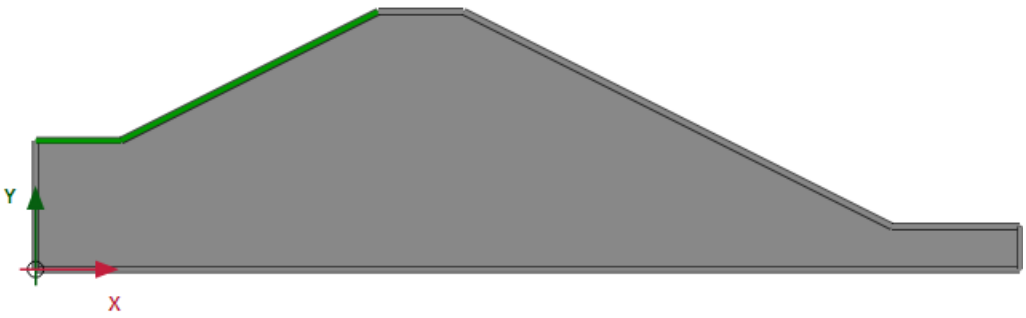


图 174: 左侧边坡的选择

3. 单击**生成网格**按钮 以生成网格。
   将显示**网格选项**窗口。
4. 选择**单元分布**下拉菜单中的**精细**选项，然后生成网格。
5. 单击**查看网格**按钮，以查看网格，如图 175(第 178 页) 所示。

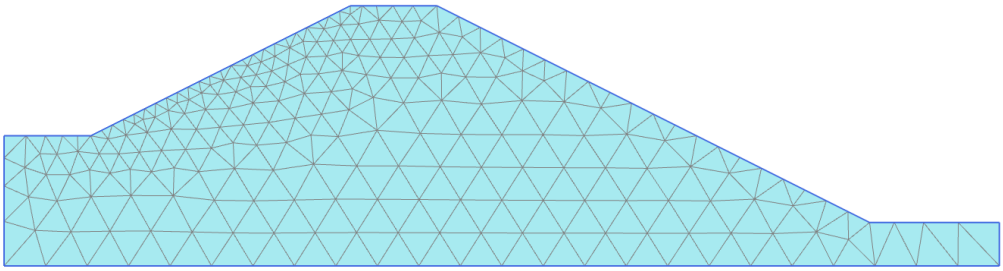


图 175: 生成的网格

6. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

12.5 定义并执行计算

在本项目中，仅分析渗流相关行为。计算过程包括三个阶段，将在**分步施工**模式中进行定义。在初始阶段，计算出稳态地下水渗流以得出平均河流水位。在第 1 阶段，计算出瞬态地下水渗流以得出水位的谐波变化。第 2 阶段的计算与第 1 阶段类似，但阶段更长。

单击**分步施工**选项卡进入相应的模式。根据为每个钻孔规定的水头值（表 31 (第 176 页)）自动创建全局水位。**分步施工**模式中的模型如图 176(第 178 页) 所示。

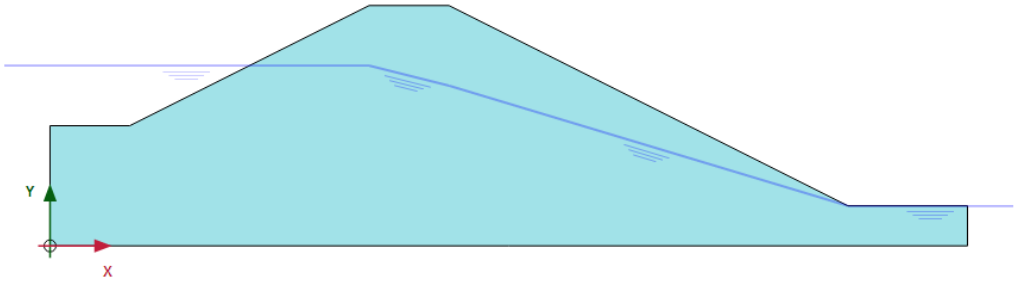


*图 176: **分步施工模式**中的模型*

注释: 注意，全局水位中的“内部”部分将由地下水渗流计算结果所取代。

12.5.1 初始阶段

1. 双击**阶段**浏览器中的初始阶段。
2. 在**常规**子树中，选择**仅水流**选项，作为**计算类型**。
3. 其余参数的缺省值对该阶段有效。单击**确定**关闭**阶段**窗口。
4. 在**模型浏览器**中，展开**模型条件**子树。
5. 在**模型条件**中，展开**地下水渗流**子树。缺省边界条件与初始阶段相关。确认是否只有底部边界封闭。展开的地下水渗流边界条件形如图 177 (第 179 页) 所示。

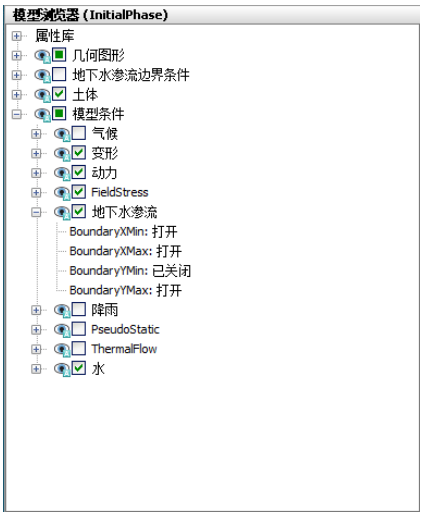


图 177: 初始阶段地下水渗流的边界条件

6. 在**模型浏览器**中，展开**地下水渗流边界条件**子树。模型末端的边界条件由程序自动创建，并在**地下水渗流边界条件**下列出。

注释: 请注意，当**地下水渗流边界条件**子树下的边界条件处于激活状态时，忽略**地下水渗流**中指定的模型条件。

12.5.2 第 1 阶段 - 瞬态地下水渗流分析

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**阶段浏览器**中，双击当前阶段。
3. 在**常规**子树中，选择**瞬变地下水渗流**选项，作为孔隙压力计算类型。
4. 将**时间间隔**设置为 1 天。
5. 在**数字控制参数**子树中，将**最大存储步数**参数设置为 50。将使用剩余参数的缺省值。
6. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
7. 单击侧工具栏中的**选择多个对象**按钮。
8. 单击**选择线** > **选择水边界**。
9. 选择水力边界，如图 178(第 179 页) 所示。

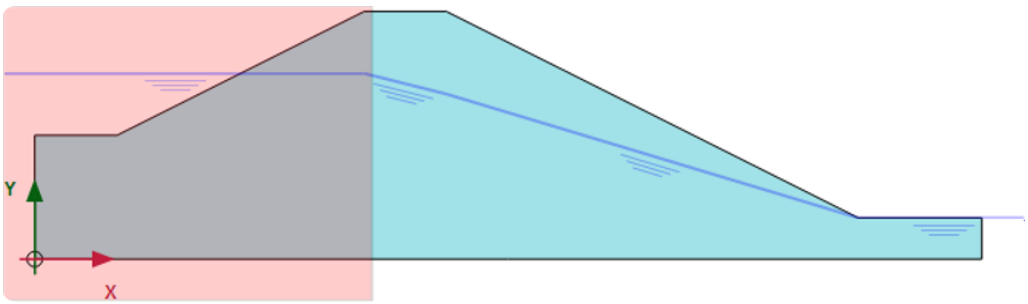


图 178: 选择的水力边界

10. 单击右键并单击**激活**。

11. 在**选择浏览器**中，将**行为**参数设置为**水头**。
12. 将 h_{ref} 设置为 4.5 m。
13. 选择**时间相关性**下拉菜单中的**时间相关**选项。
14. 单击**水头函数**参数。
15. 单击**添加**按钮，添加新的水头函数。
16. 在**渗流函数**窗口中，选择**信号**下拉菜单中的**谐波**选项。将振幅设置为 1 m，相位角为 0°，期间为 1 天。

    快速阶段的渗流函数如图 179 (第 180 页) 所示。

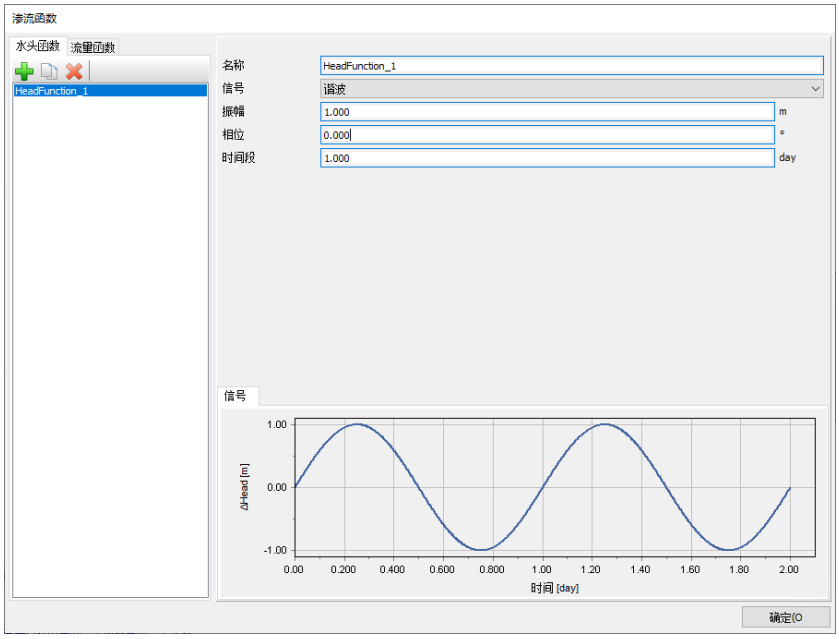


图 179: 快速情况下的渗流函数

17. 单击**确定**，关闭**水流函数**窗口。

12.5.3 第 2 阶段 - 长期地下水渗流分析

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**阶段浏览器**中，双击当前阶段。
3. 在**常规**子树中，选择**起始阶段**下拉菜单中的**初始阶段**。
4. 选择**瞬变地下水渗流**选项，作为**孔隙压力计算类型**。
5. 将**时间间隔**设置为 10.0 天。
6. 在**数字控制参数**子树中，将**最大存储步数**参数设置为 50。将使用剩余参数的缺省值。
7. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
8. 确保选择与第 1 阶段相同的边界。
9. 在**选择浏览器**中，单击**水头函数**参数。
10. 单击**添加**按钮，添加新的水头函数。
11. 在**渗流函数**窗口中，选择**信号**下拉菜单中的**谐波**选项。将振幅设置为 1 m，相位角为 0°，期间为 10 天，如图 180(第 181 页) 所示。

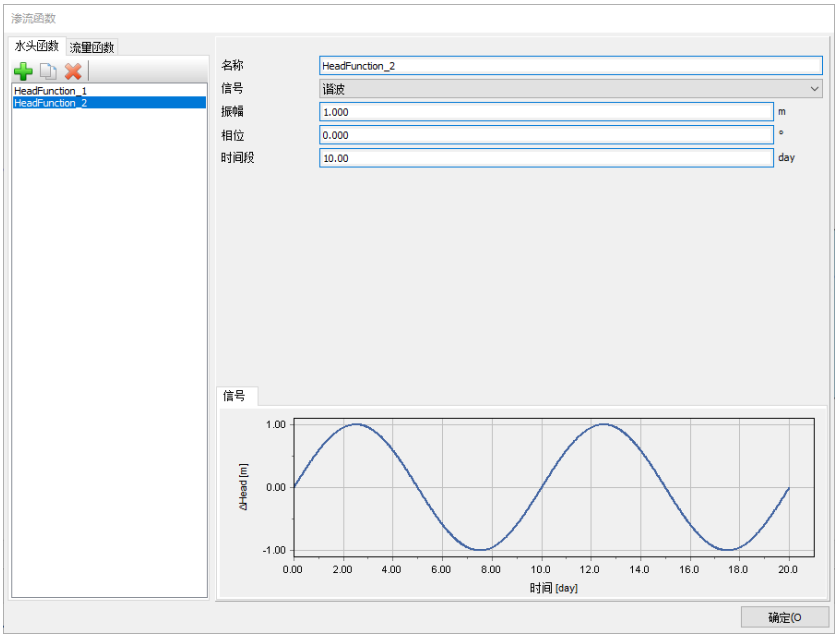


图 180: 慢速情况下的渗流函数

12. 单击**确定**，关闭**水流函数**窗口。

12.5.4 执行计算

若要选择曲线中需要考虑的点：

1. 在**分阶段施工**模式下，单击侧工具栏中的**选择曲线的点**按钮 。
   “输出”程序中显示了**连通性图**。
2. 在**选择点**窗口中，选择在曲线中需要考虑的、距离 (0 3) 和 (8 2.5) 最近的节点。
3. 单击**更新**，关闭输出程序。
4. 单击**计算**按钮 ，计算项目。
5. 计算完成后保存项目。

12.6 结果

在输出程序中，**创建动画**工具可用于以动画展示输出程序中显示的结果。若要创建动画，请遵循以下步骤：

1. 单击菜单**应力** > **孔压** > **地下水水头**。
2. 选择菜单**文件** > **创建动画**。相应的窗口弹出。
3. 定义动画文件的名称和存储位置。在缺省情况下，程序根据项目进行命名并存储在项目文件夹中。可以用同样的方式创建动画来比较孔压或渗流场的发展。
4. 取消选择初始阶段和第 2 阶段，使动画中仅包含第 1 阶段，并相应地对动画进行重命名。**创建动画**窗口如图 181 (第 182 页) 所示：

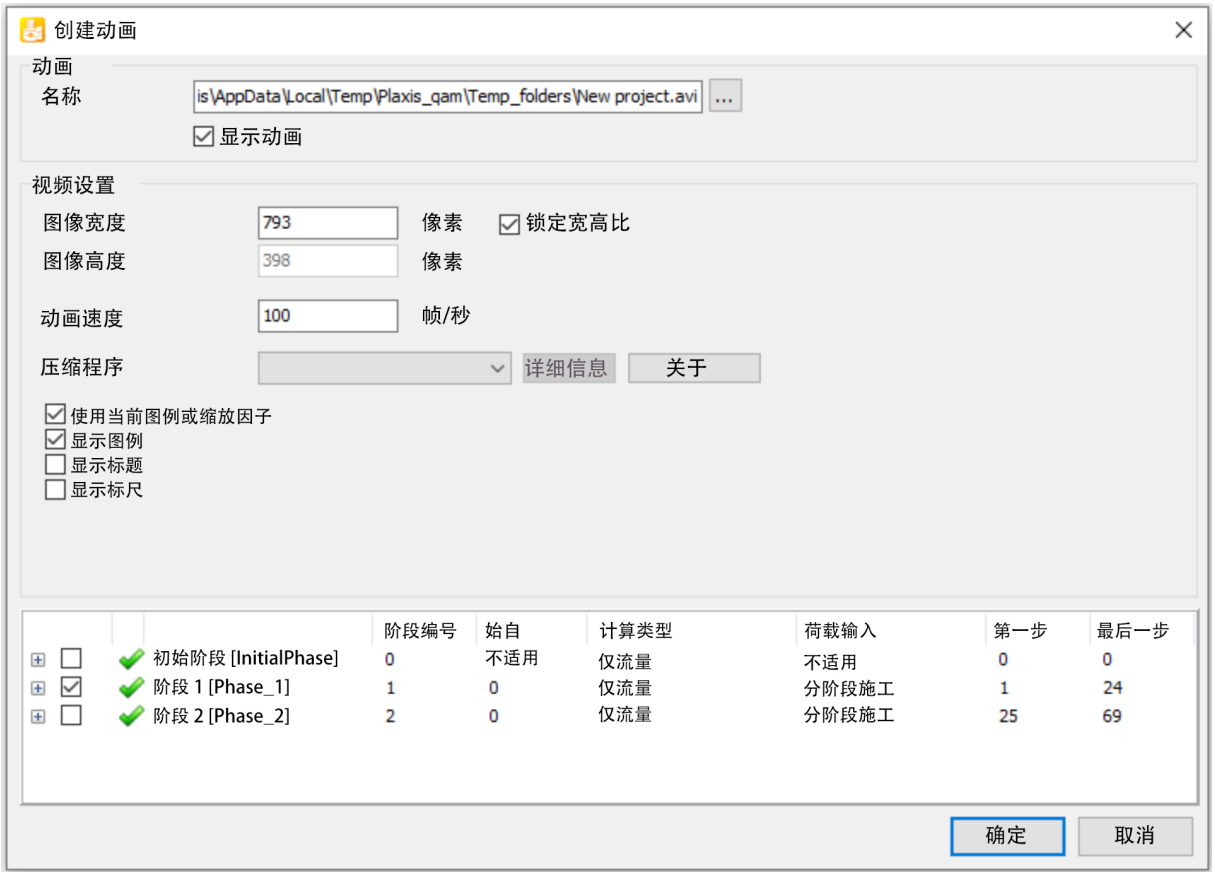


*图 181: **创建动画窗口***

在横截面中查看结果：

1. 单击侧边工具栏中的**横截面**按钮 。**横截面点**窗口会弹出，可以定义横截面的起点和终点。通过点 (2.0 3.0) 和 (20.0 1.0) 绘制横截面。横截面中的结果在新窗口中显示。
2. 在**横截面**视图中，选择**应力** > **孔压** > **p active** 菜单。
3. 单击 **工具**菜单并选择**横截面曲线**选项 。在曲线窗口弹出后，选择菜单**选择样式** > **各个步骤**。
4. 选择第 1 阶段。横截面中的结果的变化在新窗口中显示，如图 182(第 183 页) 所示。
5. 针对第 2 阶段进行相同操作。此操作可能需要大约 30 秒，如图 183(第 183 页) 所示。
6. 在一个特定的横截面上，可以比较因谐波变化的不同时间间隔造成的结果变化，参见下图。

可以看出，外部水位变化越慢，对路堤和较长距离的孔压的影响越明显。

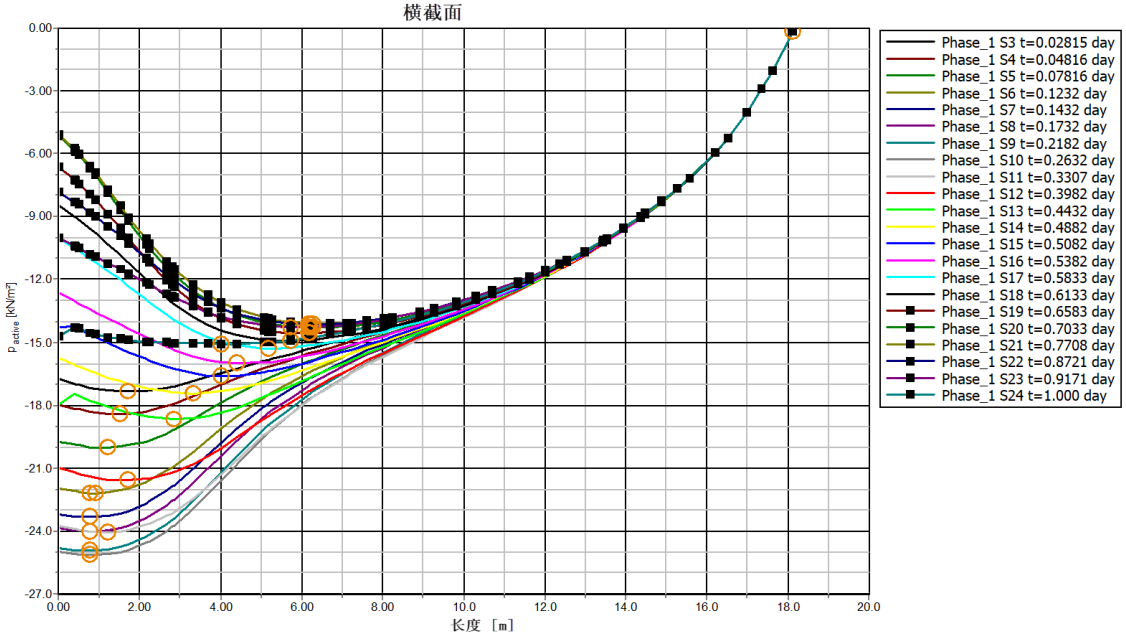


图 182: 第 1 阶段横截面上的主动孔压变化

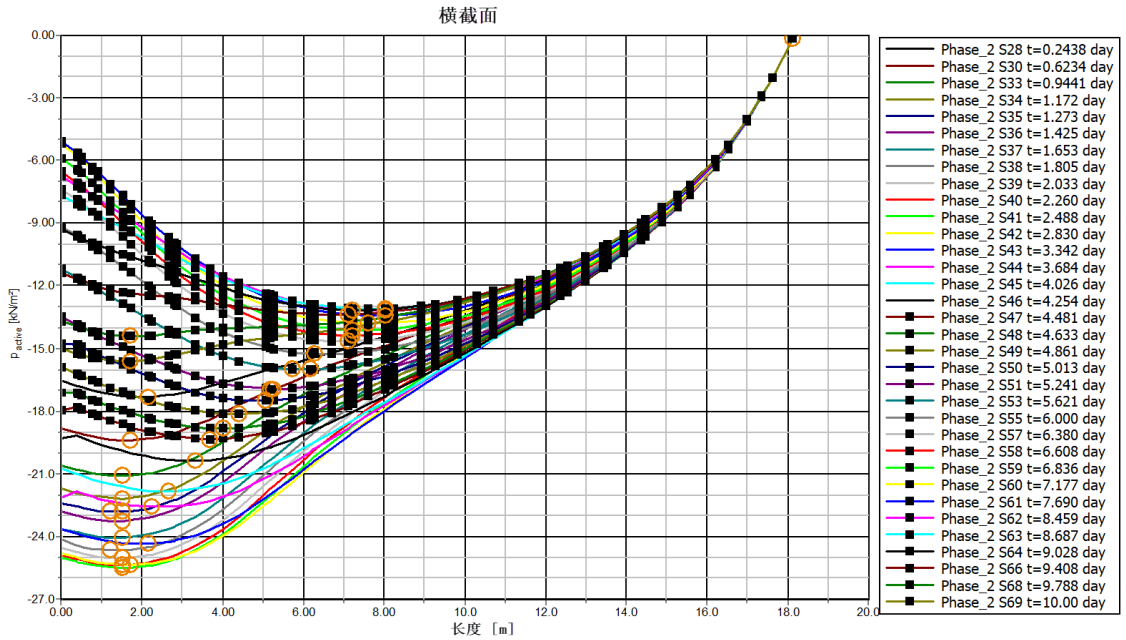


图 183: 第 2 阶段横截面上的主动孔压变化

13 马铃薯田含水率 [ULT]

本教程演示了 PLAXIS 2D 对农业问题的适用性。马铃薯田教程涉及在砂土基础上的壤土层。沟渠中的水位保持不变。降水量和蒸发量可能因日常天气条件而变化。计算的目的是预测时间相关的边界条件下壤土层含水率随时间的变化。

目标：

- 定义降水

几何图形

由于对称性问题，模拟宽度为 15.0 m 的条带即可，如图 184(第 184 页) 所示。壤土层厚 2.0 米，砂土层深 3.0 米。

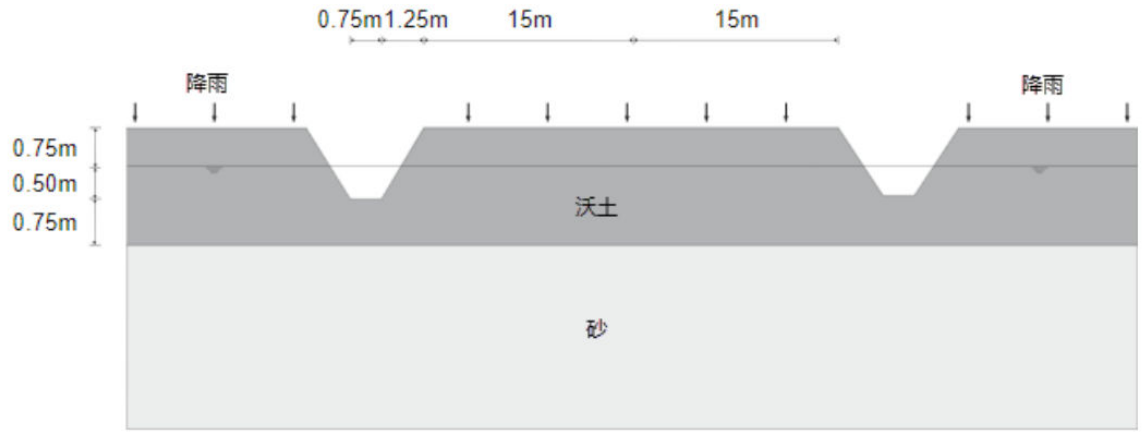


图 184: 马铃薯田几何图形

13.1 创建新项目

要创建新项目，请执行以下步骤：

1. 开启输入程序并从**快速选择**对话框选择**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. 在**模型**页面中，保留**模型**（**平面应变**）和**单元**（**15 节点**）的缺省选项。
4. 将模型尺寸设置为：x_{min} = 0 m、x_{max} = 15 m、y_{min} = 0 m 和 y_{max} = 5 m。
5. 保留单位、常量和通用参数的缺省值，并按**确定**。
   项目属性窗口关闭。

13.2 定义土壤地层学

由于模型的几何形状，应该更改捕捉的选项。

1. 单击底部工具栏中的**捕捉选项**按钮，即可显示捕捉窗口，如图 185(第 185 页) 所示。



*图 185: 修改**捕捉间隔数***

2. 在出现的窗口中，将**捕捉间隔数**设置为 100。
3. 单击**确定**，关闭**捕捉**窗口。

要定义土壤地层学，请执行以下操作：

4. 单击**创建钻孔**按钮，分别在 x = 0.75 和 x = 2 处创建两个钻孔。
5. 在**修改土层**窗口中添加两个土层。
6. 在第一个钻孔中，将最上面的土层设置为**顶部** = 3.75，**底部** = 3。将最下面的土层设置为**底部** = 0。
7. 在第二个钻孔中，将最上面的土层设置为**顶部** = 5，**底部** = 3。将最下面的土层设置为**底部** = 0。
8. 对于这两个钻孔，**水头**都位于 y = 4.25 处。

图 186(第 186 页) 显示了**修改土层**窗口中定义的土壤地层。

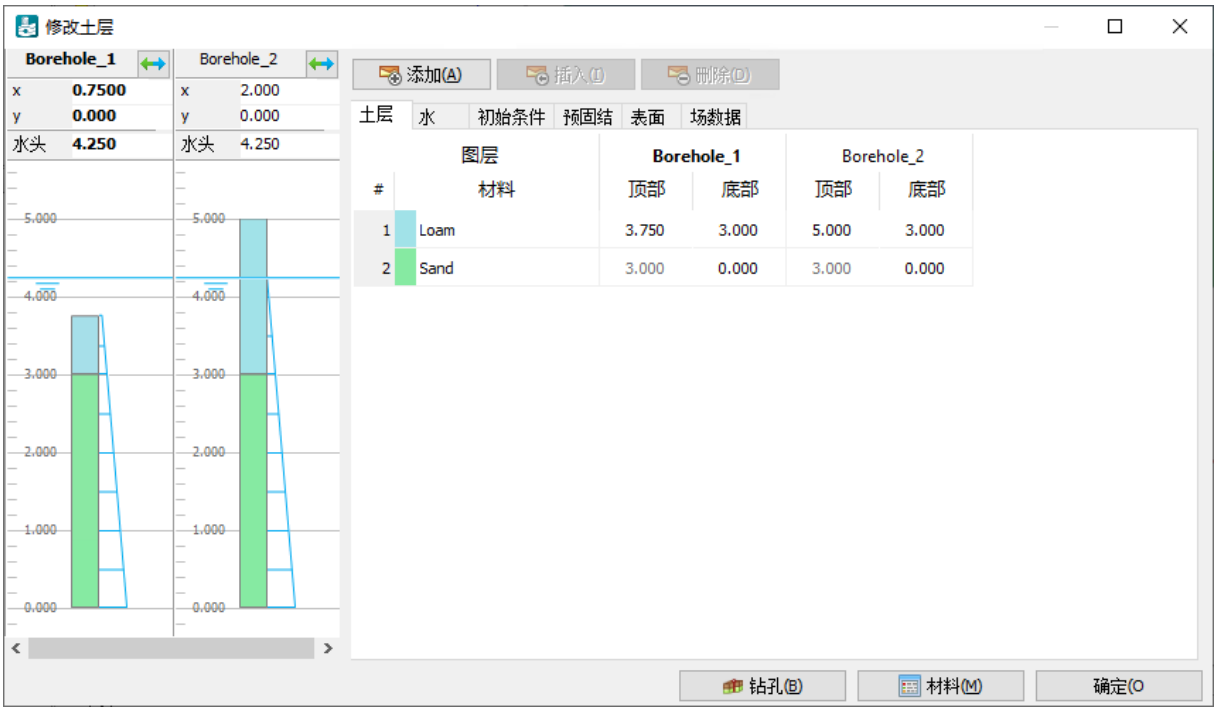


*图 186: **修改土层**窗口中的土壤地层学*

13.3 创建和分配材料数据集

需要为土层创建两个材料数据集。

这些层有以下属性：

表 33: 材料的材料属性

参数	名称	壤土	砂土	单位
常规				
土体模型	模型	线弹性	线弹性	-
排水类型	类型	排水	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	19	20	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	19	20	kN/m^3
力学				
刚度	E'_{ref}	$1 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	kN/m^2
泊松比	ν	0.3	0.3	-

地下水				
分类标准	类型	Staring	Staring	-
SWCC 拟合方法	-	Van Genuchten	Van Genuchten	-
下层土/上层土	-	表层土	下层土	-
土体分类	-	亚黏土 (B9)	壤质砂土 (O2)	-
渗流参数 - 使用缺省值	-	从数据集	从数据集	-
水平方向渗透率	k_x	0.01538	0.1270	米/天
垂直方向渗透率	k_y	0.01538	0.1270	米/天

要创建材料集，请执行以下步骤：

1. 根据表 33(第 186 页)创建材料数据集。
2. 将材料数据集分配至模型中的相应类组中。

13.4 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 多选可组成模型上边界的线段，如图 187(第 187 页) 所示：

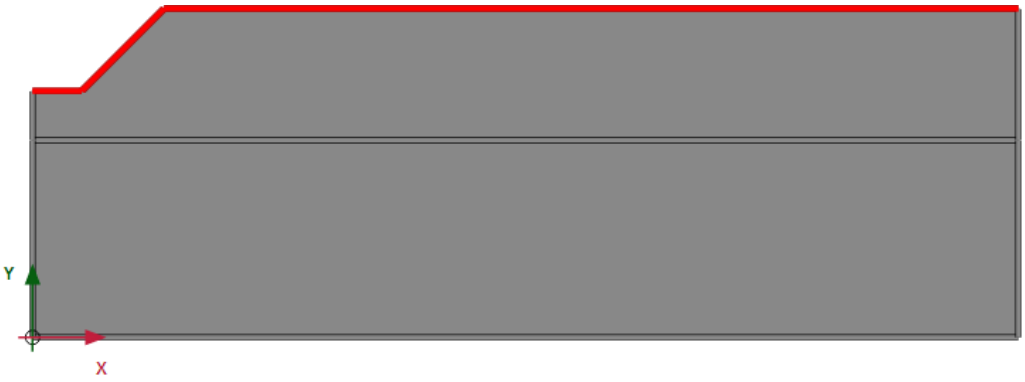


图 187: 模型上边界

3. 在**选择浏览器**中，将**粗糙度系数**参数设置为 0.5。
4. 单击**生成网格**按钮 以生成网格。**单元分布**参数（**中等**）使用缺省选项。
5. 单击**查看网格**按钮 ，以查看网格，如图 188(第 188 页) 所示。

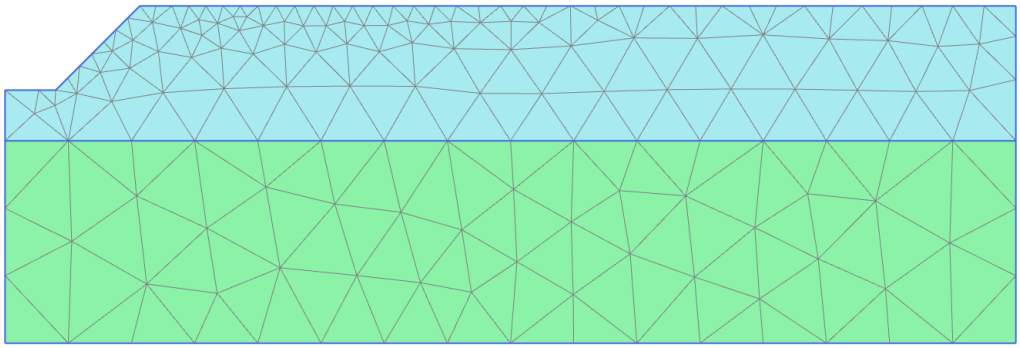


图 188: 生成的网格

6. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

13.5 定义并执行计算

计算过程包括两个阶段。在初始阶段，将计算稳态下的地下水流。在阶段 1 中，已计算瞬态地下水流。

13.5.1 初始阶段

1. 进入**分阶段施工模式**。在此项目中，将只进行地下水渗流分析。
2. 在**阶段**窗口中，选择**常规**子树，然后为**计算类型**选择**仅渗流**选项。
3. 其余参数的缺省值对该阶段有效。单击**确定**关闭**阶段**窗口。
4. **右键单击**模型底部边界，然后在出现的菜单中选择**激活**选项。
5. 在**选择浏览器**中，在**行为**下拉菜单中选择**水头**选项，并将 h_{ref} 设置为 3.0，如图 189(第 188 页) 所示。



图 189: 带有地下水渗流基础的初始阶段

6. 在**模型浏览器**中，展开**模型条件**子树。
7. 展开**地下水渗流**子树。将**边界 X 最小值**和**边界 X 最大值**设置为**封闭**。
8. 展开**水**子树。将钻孔水位分配至**全局水位**。

注释: 请注意，要将明确分配至地下水渗流边界的条件考虑在内。在本教程中，将为模型的底部边界考虑指定的**水头**，而不是**模型条件**下**地下水渗流**子树中指定的**封闭**条件。

13.5.2 瞬变阶段

在瞬变阶段，定义了降水的时间相关变化。

将定义具有以下降水数据的排水函数，如表 34(第 189 页)所示。

表 34: 降水数据

ID	时间 [天]	Δ 排水 [m^3/天/m]
1	0	0
2	1	0.01
3	2	0.03
4	3	0
5	4	-0.02
6	5	0
7	6	0.01
8	7	0.01
9	8	0
10	9	-0.02
11	10	-0.02
12	11	-0.02
13	12	-0.01
14	13	-0.01
15	14	0
16	15	0

1. 单击**添加阶段**按钮 ，创建新阶段。
2. 在**阶段**窗口的**常规**子树中，选择**瞬变地下水渗流**，作为**孔隙压力计算类型**。
3. 将**时间间隔**设置为 15 天。
4. 在**数字控制参数**子树中，将**最大存储步数**设置为 250。将使用剩余参数的缺省值。
5. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
6. 若要定义降水数据，应定义一个排水函数。在**模型浏览器**中，展开**特性库**子树。
7. 右击**水流函数**，并在出现的菜单中选择**编辑**选项。这将弹出**渗流函数**窗口。

8. 在**排水函数**页面中添加新功能。
9. 为该函数指定一个名称，并在**信号**下拉菜单中选择**表格**选项。
10. 单击**添加行**按钮，在表中引入新行。使用表 34(第 189 页)中给出的值完成数据。

    图 190(第 190 页) 显示了定义的降水函数。

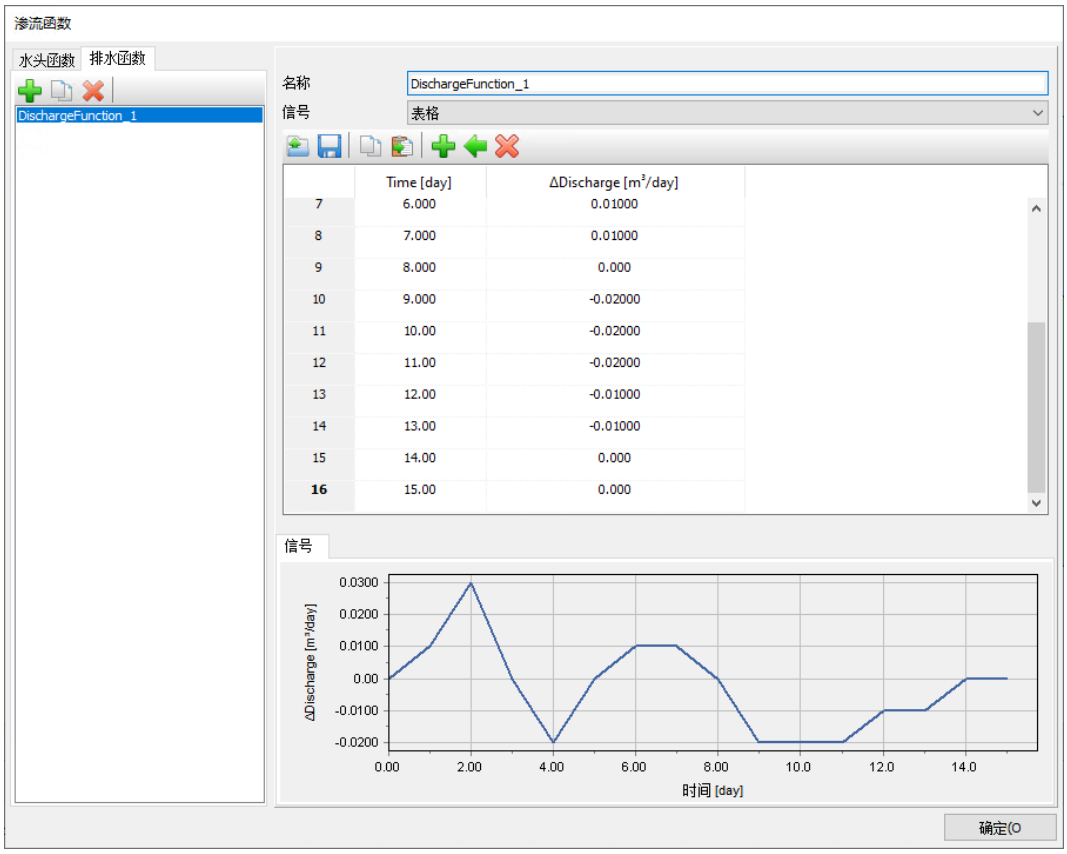


*图 190: 显示降水数据和图的**渗流函数**窗口*

11. 单击**确定**，关闭窗口。
12. 在**模型浏览器**中的**模型条件**下，展开并激活**降雨**子树。排水 (q) 和条件参数（ψ_{min} = -1.0 m 且 ψ_{max} = 0.1m）的缺省值有效。
13. 对于降水，在相应的下拉菜单中选择**时间相关**选项，并分配定义的函数。
14. 在**模型浏览器**中，在**排水函数**下设置 DischargeFunction_1，如图 191(第 191 页) 所示。

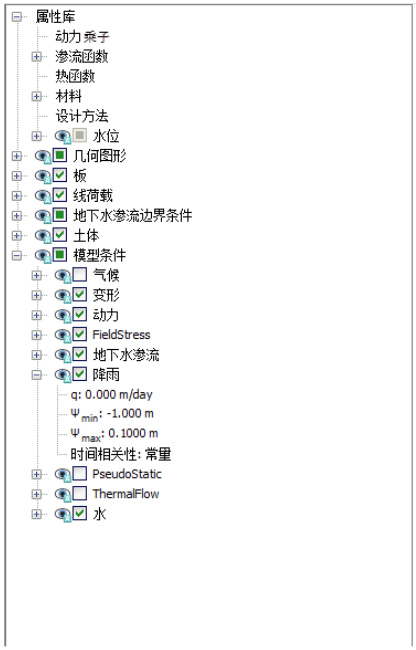


图 191: "模型浏览器"中的降水

注释: 降水为负值则表示蒸发。

13.5.3 执行计算

1. 单击**计算**按钮 ，忽略反馈并继续计算项目。
2. 计算完成后保存项目。

13.6 结果

计算的重点是马铃薯田时间相关的饱和度。

要查看结果，请执行以下步骤：

1. 单击菜单**应力** > **地下水流** > **饱和度**。
2. 双击图例。

   将弹出**图例设置**窗口。定义设置，如图 192(第 192 页) 所示。



图 192: 设置的值

3. 图 193(第 192 页) 显示了最后一个时间步长的饱和度的空间分布。

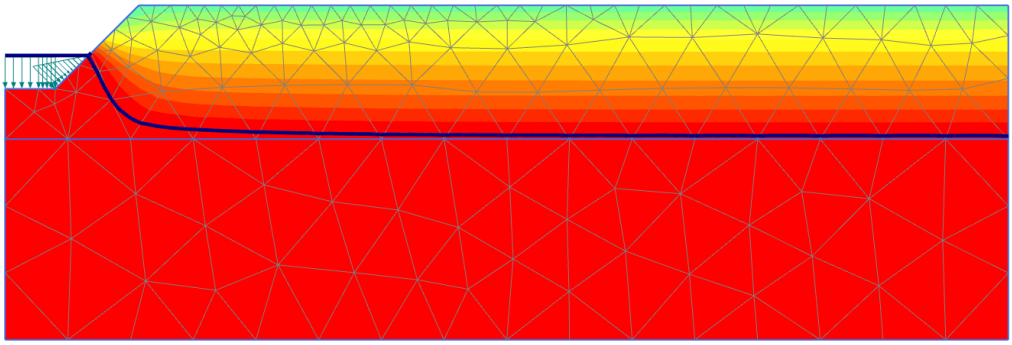


图 193: 第 15 天的饱和度场

4. 创建瞬态阶段的动画，以便更好地显示结果。
5. 还可以在 x=4 米处创建一个竖向横截面，并为孔隙压力和饱和度绘制横截面曲线。

14 水位骤降情况下水坝的稳定性 [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。将使用有限元方法分析此此类情况，需要进行流固耦合分析。时间相关的孔隙压力与变形发展耦合，并用于稳定性分析。此示例演示了在 PLAXIS 2D 中交互执行耦合分析和稳定性分析的方法。

目标：

- 定义时间相关的水力条件（渗流函数）。
- 利用水位确定瞬态流条件。

几何图形

拟水坝高度为 30 米，底部宽度为 172.5 米，顶部宽度为 5 米。水坝由黏土芯构成，两侧具有高等级填料。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。水坝的几何图形如图 194(第 193 页) 所示。

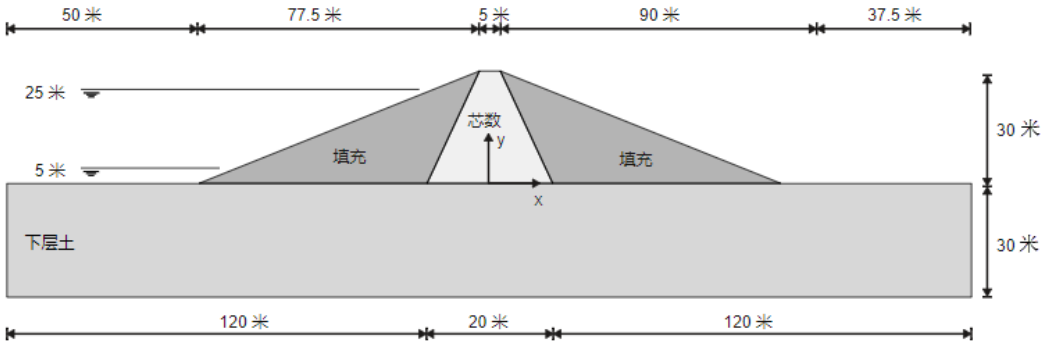


图 194: 工程几何图形

14.1 创建新项目

若要创建新项目，请遵循以下步骤：

1. 启动输入程序，然后从**快速启动**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. 保留缺省单元和常量，并将模型**等高线**设置为 x_{min} = -130 米，x_{max} = 130 米，y_{min} = -30 米以及 y_{max} = 30 米。

14.2 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 米的超固结粉砂作为下层土。

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 x = 0 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 添加从地表面 (y=0) 延伸至 30 米深度 (y=-30) 的土层。

14.3 创建和分配材料数据集

需要为土层创建三个材料数据集。

土层具有以下属性，如表 35(第 194 页)所示：

表 35: 水坝和下层土的材料属性

参数	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	16	17	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	18	20	21	kN/m^3
力学					
杨氏模量	E'_{ref}	$1.5 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	kN/m^2
泊松比	ν	0.35	0.33	0.3	-
粘聚力	c'_{ref}	-	5	1	kN/m^2
杨氏弹性模量增量	E'_{inc}	300	-	-	$kN/m^2/m$
不排水剪切强度	$s_{u,ref}$	5	-	-	kN/m^2
摩擦角	φ'	-	31	35	度
剪胀角	ψ	-	1	5	度
不排水剪切强度增量	$s_{u,inc}$	3.0	-	-	kN/m^3
参考层	y_{ref}	30	-	-	m

地下水					
分类标准	-	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(标准)	-	超细	粗糙	粗糙	-
渗流参数 - 使用缺省值		无	无	无	-
水平渗透率	k_x	$0.1 \cdot 10^{-3}$	1.00	0.01	米/天
垂直渗透率	k_y	$0.1 \cdot 10^{-3}$	1.00	0.01	米/天

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 35(第 194 页)给出的信息，在**土体和界面**材料集类型下创建数据集。请注意，**热**、**界面**和**初始**标签页不相关（不使用热属性、界面或 **K0 过程**）。
3. 为钻孔中的土层指定**下层土**材料数据集。

14.4 定义水坝

将在**结构模式**中定义水坝。

要用鼠标绘制水坝，必须减小捕捉到网格的距离。缺省情况下，此距离为 1 米，但在此教程中，此距离应为 0.5 米。要更改捕捉到网格的距离，请选择绘图区域下方的**捕捉选项**按钮。**间距**定义两个轴网点之间的距离，*间隔*定义两个轴网点之间捕捉到网格的间距量。为了使捕捉到网格的距离为 0.5 米，可以将**间距**设置为 0.5 米，将**间隔**保留为 1，也可以将**间距**保留为 1 米，将**间隔**量设置为 2。

1. 单击**多边形**按钮，定义穿过点 (-80 0)、(92.5 0)、(2.5 30) 和 (-2.5 30) 的多边形。
2. 再次单击**多边形**按钮，这次单击**剪切多边形**按钮，在水坝中创建子类组。定义从 (-10 0) 到 (-2.5 30) 和从 (10 0) 到 (2.5 30) 的两条剪切线。
3. 为土体类组指定相应的材料数据集。

14.5 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 在边栏中单击**生成网格**按钮。**单元分布**参数使用**精细**选项。
3. 单击**查看网格**按钮，以查看网格，如图 195(第 196 页) 所示。

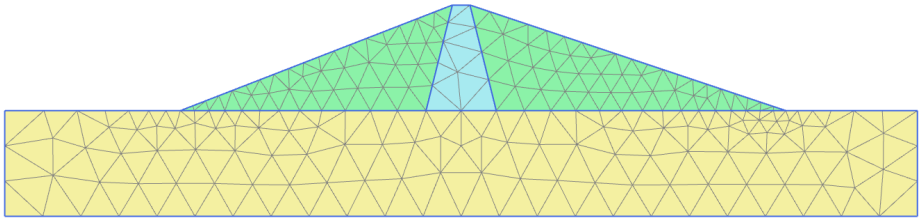


图 195: 生成的网格

4. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

14.6 定义并执行计算

将讨论以下情况：

- 长期水位为 25 米的情况。
- 水位从 25 米快速下降至 5 米。
- 水位从 25 米慢速下降至 5 米。
- 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。第一阶段和第二阶段均从初始阶段开始（即，蓄水池水位为 25 米时的水坝），水位降至 5 米。完成此阶段的时间间隔有所不同（即，水位下降速度不同；快速下降和慢速下降）。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。

请注意，将仅为不同的计算阶段定义水条件。模型不需要更改几何图形。可以在**渗流条件模式**中定义水位。

14.6.1 初始阶段：水坝构造和高蓄水池

缺省情况下，初始阶段将添加到**阶段浏览器**中。

1. 单击相应的选项卡进入**渗流条件模式**。
2. 激活**填充**和**核心**。
3. 在**阶段浏览器**中，双击 **初始阶段**。
   显示**阶段**窗口。
4. 在**常规**子树中指定阶段名称（例如，高蓄水池）。
5. 选择**计算类型** > **重力荷载**选项 。
6. 选择**孔压计算类型** > **稳态地下水渗流**选项 
7. 在**变形控制参数**子树中，取消选中**忽略吸力**选项。

> **注释:** 请注意，在此练习中将进行流固耦合分析，此类分析总是考虑非饱和区域的吸力。因此，建议在进行流固耦合分析（如本教程中的初始阶段）之前的计算阶段也要考虑吸力，以避免在有吸力和无吸力的阶段之间发生变化时产生土体应力不平衡。

输入所有参数后的阶段窗口如图 196(第 197 页) 所示：

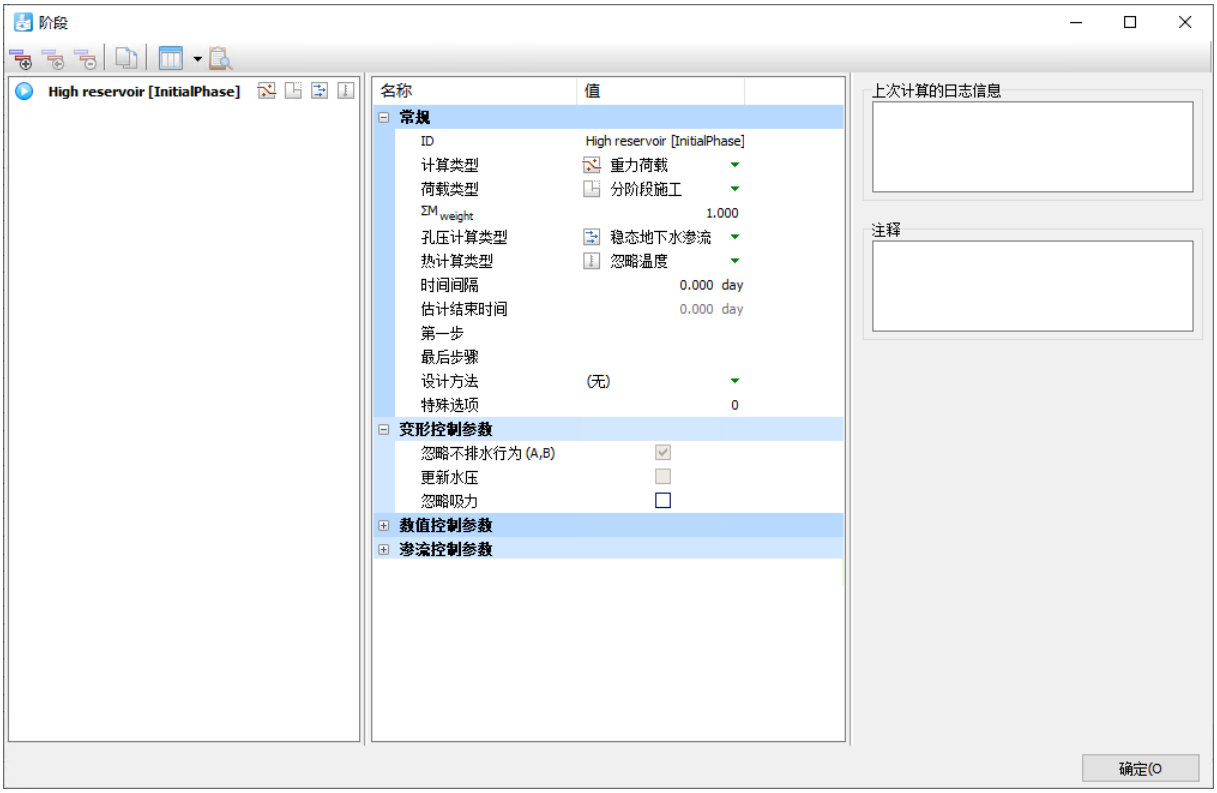


*图 196: **阶段**窗口*

8. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。

注释: 请注意，在缺省情况下，对于**重力荷载**计算类型，忽略**不排水性能 (A)** 和 **(B)**。相应的选项在**阶段**窗口中的**变形控制参数**子树中可以找到

9. 在水位下降之前，确定与蓄水池水位相对应的水位。水位由四个点组成：

- 从最左侧地表面以上 25 米处开始 (-132 25)；
- 第二个点正好在水坝内部 25 米高度 (-10 25)；
- 第三个点在坝趾附近 (93 -10) 处；
- 第四个点正好在右侧边界外地表面以下 10 米处 (132 -10)。

注释: 在定义几何图形时按住 **Shift** 键可以定义直线。

定义的水位如图 197(第 197 页) 所示

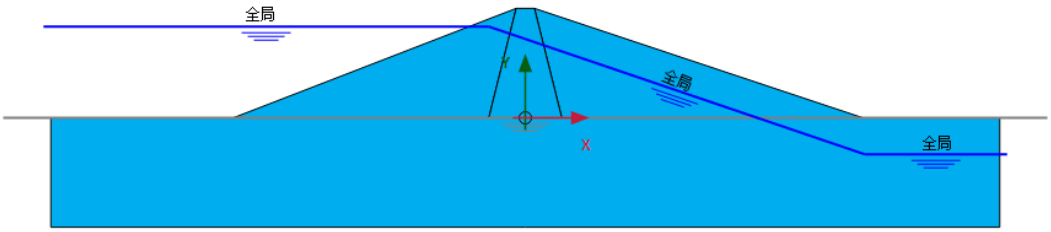


图 197: 蓄水池中的高水位

10. 在创建的水位上右键单击，然后在显示的菜单中选择**全局化**选项。

请注意，也可以通过在**模型条件** > **水** > **全局水位** > **UserWaterLevel_1** 中选择相应选项，在**模型浏览器**指定全局水位。

11. 在**模型浏览器**中，展开**特性库**。
12. 展开**水位**子树。在**渗流条件**模式中创建的水位归组在**用户水位**下。
13. 展开**用户水位**子树。
    可以看到已创建的水位名为 UserWaterLevel_1。**模型浏览器**中水位的位置如图 198(第 198 页) 所示

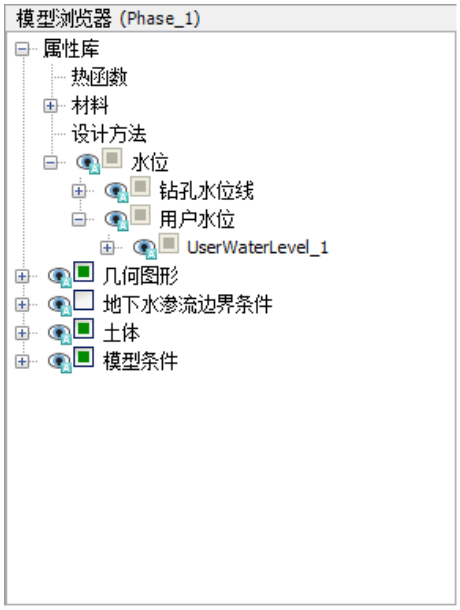


*图 198: **模型浏览器**中的水位*

14. 双击已创建的水位，并将其重命名为 *FullReservoir_steady*。这是一个满足命名要求的独特名称（没有无效字符）。
15. 展开**模型条件**子树。
16. 展开**地下水渗流**子树。

    请注意，在缺省情况下，模型底部的边界设置为**关闭**，如图 199(第 198 页) 所示。这与本示例相关。

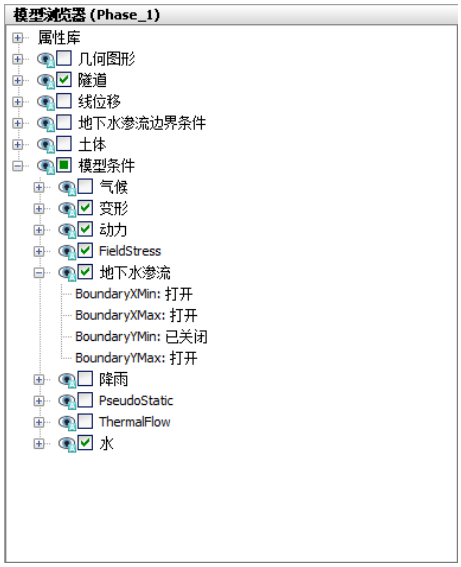


*图 199: **模型浏览器**中的**地下水渗流**边界条件*

14.6.2 第 1 阶段：快速下降

在此阶段将考虑蓄水池水位快速下降。

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
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，Rapid drawdown）。请注意，在**起始阶段**下拉菜单中将自动选择**高蓄水池**阶段。
4. 为**计算类型**选择**流固耦合**选项。
5. 将**时间间隔**参数的值指定为 5 天。
6. 在**变形控制参数**子树中，确保选择**将位移重置为零**和**重置小应变**选项。
7. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
8. 由于水位的全局性质，如果为模型中的水位指定了某个属性，则该属性将在所有阶段影响该水位。此阶段的水位与之前定义的水位具有相同的几何形状，但它与时间相关，需要为其指定函数。因此，需要创建具有相同几何形状和不同属性的新水位。在**模型浏览器**中，转到**属性库** > **水位** > **用户水位**，然后右键单击 FullReservoir_Steady，如图 200(第 199 页) 所示。然后在出现的菜单中选择**复制**选项。

   将创建水位的副本。



图 200: 水位复制

9. 将新创建的水位重命名为 *FullReservoir_Rapid*。

   可以通过指定**流动函数**来描述水位的行为。请注意，**渗流函数**是全局实体，可以在**模型浏览器**中的**属性库**下找到。

要定义流动函数，请执行以下操作：

a. 在**模型浏览器**中，转到**属性库**，然后单击**渗流函数**选项。在出现的菜单中选择**编辑**选项。将显示**流动函数**窗口。

b. 在**水头函数**标签页中，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。

c. 为快速下降的函数指定适当**名称**（例如，Rapid）。

d. 从**信号**下拉菜单中选择**线性**选项。

e. 指定时间间隔为 5 天。

f. 为 **ΔHead** 指定值 -20 米，这表示水头减少的量。

图 201(第 200 页) 中将显示一个显示已定义函数的图形。

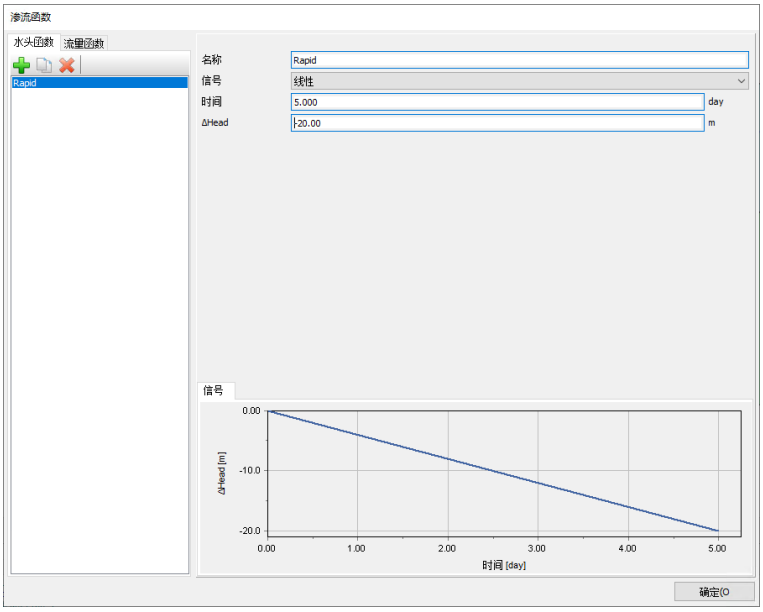


图 201: 快速下降情况下的水流函数

g. 单击**确定**，关闭**水流函数**窗口。

10. 在**模型浏览器**中，右键单击 **FullReservoir_Rapid**，然后在出现的菜单中选择**用作全局水位**选项。
11. 展开 **FullReservoir_Rapid** 子树。请注意，水位由 3 个水位线段组成。选择上游路肩中的水位线段（水坝左侧，蓄水池一侧）。
12. 展开选定线段的子树，然后为**时间依赖性**参数选择**时间相关**选项。
13. 为**水头函数**参数选择**快速**选项。
图 202(第 201 页) 显示了**模型浏览器**中选定的水位线段。

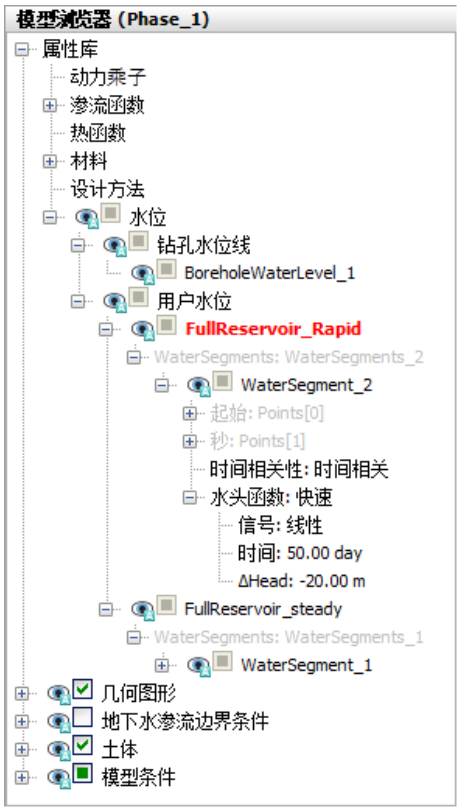


图 202: 下降水位线段属性

14. 请注意，在**模型浏览器**的**模型条件**下的**水**子树中，**全局水位**将获得新的水位 (FullReservoir_Rapid)。

阶段的配置如图 203(第 201 页) 所示。

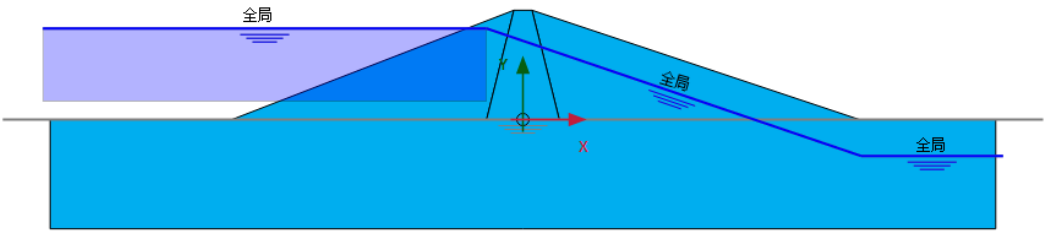


图 203: 快速下降阶段的配置

请注意，上游路肩水位线段下方的阴影表示此阶段的水位变化。

14.6.3 第 2 阶段：慢速下降

在此阶段，蓄水池水位下降的速度较低。

1. 在**阶段浏览器**中选择**高蓄水池**阶段。
2. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
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）。**起始阶段**参数将自动选择**高蓄水池**阶段。

5. 选择**流固耦合**选项作为计算类型。
6. 指定**时间间隔**参数值为 50 天。
7. 请确保在**变形控制参数**子树中选择了**将位移重置为零**和**重置小应变**选项。缺省情况下，**忽略吸力**选项处于未选中状态。
8. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
9. 创建一个新的高水位副本。新建立的水位将作为慢速下降阶段的**全局水位**。尽管此阶段的水位与先前定义的水位具有相同的几何形状，但时间相关性的流动函数是不同的。
10. 将新创建的水位重命名为 “FullReservoir_Slow”。
11. 按照前一阶段描述的步骤添加新的流动函数。
    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. 指定时间间隔为 50 天。
    d. 为 **ΔHead** 指定值为 -20 ，表示水头减少的量。将显示一个显示已定义函数的图形。
    e. 单击**确定**，关闭**渗流函数**窗口，如图 204(第 202 页) 所示。

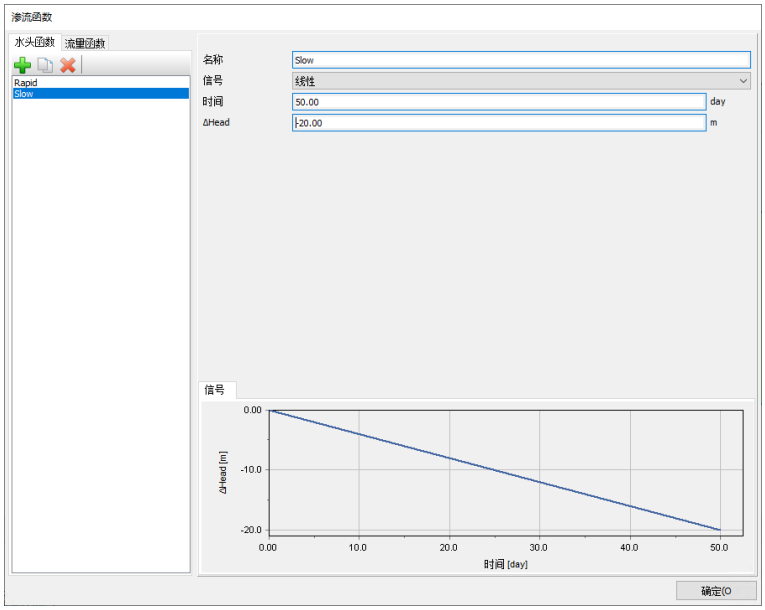


图 204: 慢速下降情况下的水流函数

12. 在**模型浏览器** > **属性库** > **水位** > **用户水位**中，右键单击 **FullReservoir_Slow**，然后在显示的菜单中选择**用作全局水位**选项。
13. 展开 **FullReservoir_Slow** 子树。选择上游路肩中的水位线段（水坝左侧，蓄水池一侧）。
    在**模型浏览器**中选择的线段在模型中用红色表示。
14. 展开选定线段的子树，然后为**时间依赖性**参数选择**时间相关**选项。
15. 选择**慢速**选项作为**水头函数**参数。
    请注意，在**模型浏览器**的**模型条件**下的**水**子树中，**全局水位**将获得新的水位 (FullReservoir_Slow)。

14.6.4 第 3 阶段：低水位

此阶段考虑低蓄水池水位的稳态情况。

1. 转到**阶段浏览器**，然后选择**高水库水位**阶段。

2. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
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）。**起始阶段**参数将自动选择**高蓄水池**阶段。
5. 确保为**计算类型**选择**塑性**选项。
6. 为**孔压计算类型**选择**稳态地下水渗流**选项。
7. 在**变形控制参数**子树中，选择**忽略不排水行为 (A,B)**。然后确保选择**将位移重置为零**和**重置小应变**选项。
   最后，取消选中**忽略吸力**选项。
8. 单击**确定**关闭**阶段**窗口。
9. 定义水位降低后与蓄水池水位相对应的水位。水位由四个点组成：
   - 从最左侧地表面以上 5 米处开始 (-132 5)；
   - 第二个点正好在水坝内部 5 米高度 (-60 5)；
   - 第三个点在 (93 -10) 处；
   - 第四个点正好在右侧边界外地表面以下 10 米处 (132 -10)。
10. 将新创建的水位重命名为 “LowLevel_Steady”。
11. 在**模型浏览器** > **模型条件** > **水**中，为**全局水位**指定新创建的水位 (LowLevel_Steady)。

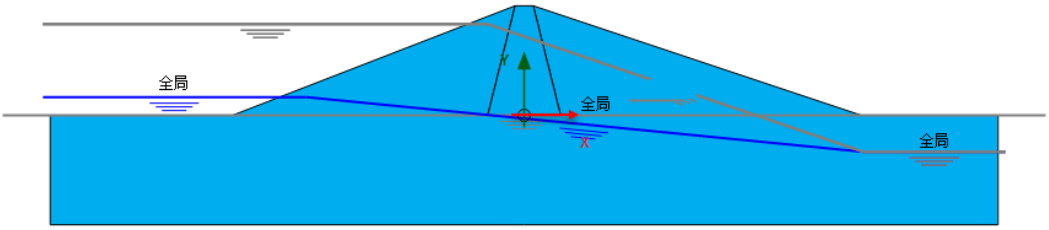


*图 205: 在**水流条件**模式下的低水位工况模型*

所有定义的水位如图 205(第 203 页) 所示。

14.6.5 第 4 阶段至第 7 阶段：安全分析

在阶段 4 至阶段 7 中，为前面的阶段定义了稳定性计算。

1. 在**阶段浏览器**中选择父阶段。
2. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。继续并进入**阶段**窗口。
3. 将**计算类型**设置为**安全**。
4. 在**变形控制**子树中，选择**将位移重置为零**。
5. 在**变形控制参数**子树中，选中**忽略吸力**选项以进行所有安全分析。

   注释: 在**安全**阶段考虑吸力会提供更高的安全系数，因此在**安全**阶段忽略吸力更为保守。在 PLAXIS 2D 的**安全**分析中，在确定安全系数之前，首先要解决由吸力变为无吸力所引起的不平衡问题。因此，在计算的第一部分中 ΣM_{sf} 可以减少。
6. 阶段浏览器窗口的最终视图如图 206(第 204 页) 所示。

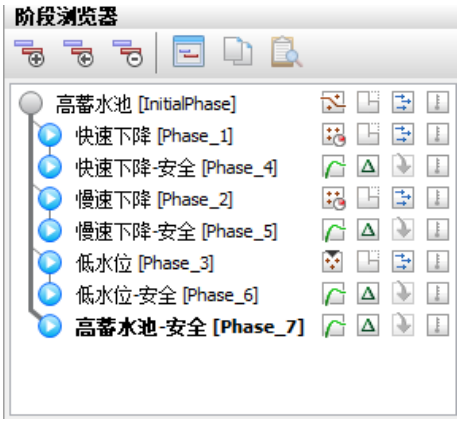


图 206: "阶段浏览器"的最终视图

14.6.6 执行计算

1. 进入**分步施工**模式。
2. 选择位于坝顶 (-2.5 30) 和坝趾 (-80 0) 的节点。
3. 单击**计算**按钮计算项目并忽略**安全**分析中有关吸力影响的警告。
4. 计算完成后保存项目。

14.7 结果

根据孔隙压力分布进行四次地下水流计算，结果如下图所示。讨论四种不同情况：

- 高（标准）蓄水池水位的稳态情况，如图 207(第 204 页) 所示。

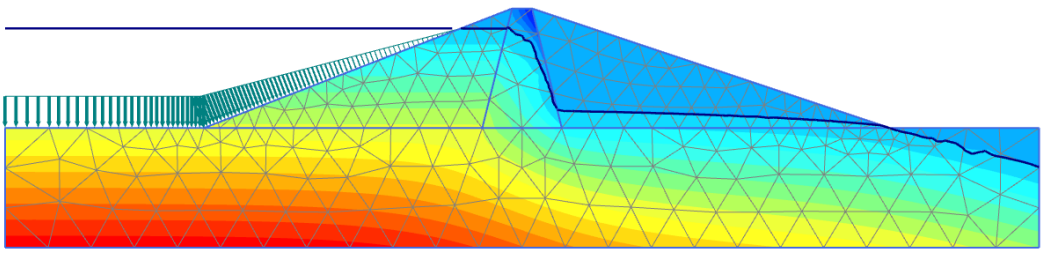


图 207: 高蓄水池水位的孔隙压力分布 (p_{active})

- 蓄水池水位快速下降后的孔隙压力分布，如图 208(第 205 页) 所示。

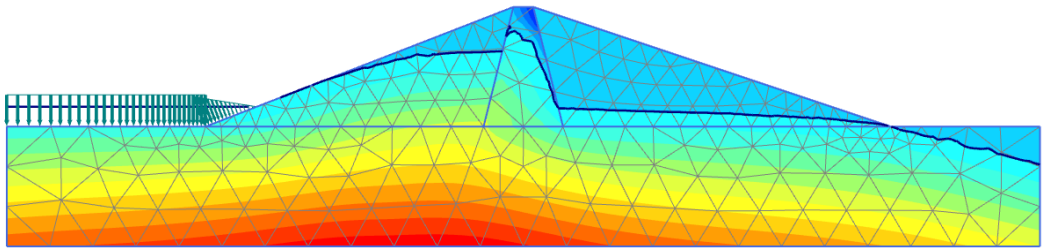


图 208: 快速下降后的孔隙压力分布 (p_{active})

- 蓄水池水位慢速下降后的孔隙压力分布，如图 209(第 205 页) 所示。

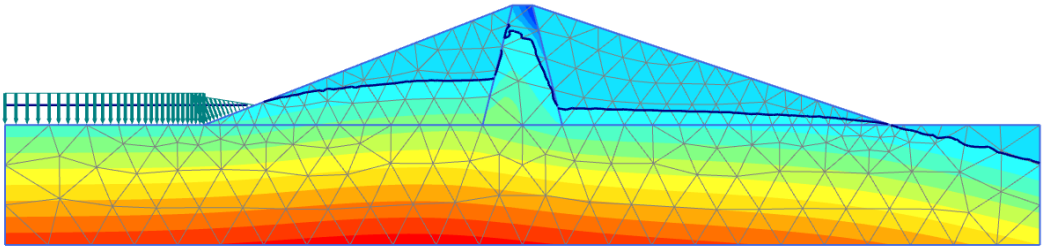


图 209: 慢速下降后的孔隙压力分布 (p_{active})

- 低蓄水池水位的稳态情况，如图 210(第 205 页) 所示。

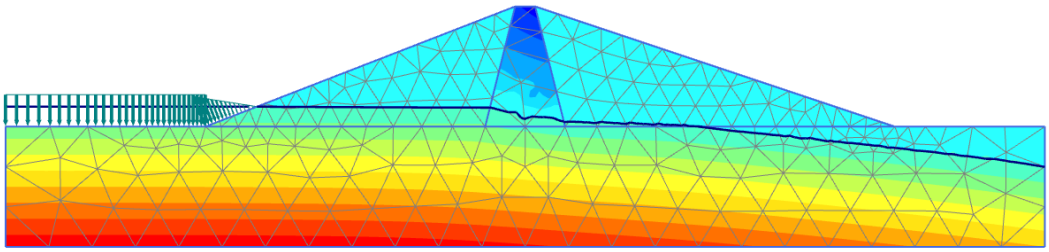


图 210: 低蓄水池水位的孔隙压力分布 (p_{active})

注释:

核心网格精细化程度越高，潜水位越平滑。

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。可根据前四个计算阶段的结果查看这些变形和有效应力分布。本文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 (-2.5 30.0) 位移，绘制了第 4 至第 7 阶段 **ΣMsf** 的变化曲线，请参见图 211(第 206 页)。

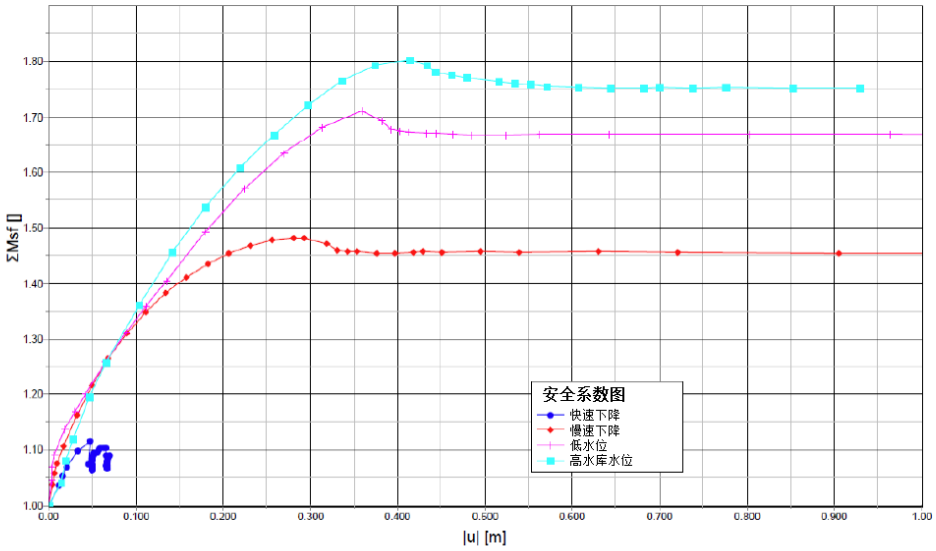


图 211: 不同情况下的安全系数

蓄水池水位快速下降会显著降低水坝的稳定性。对 PLAXIS 2D 进行流固耦合和稳定性分析可有效分析此类情况。

注释:

在强度折减方法中，安全系数是发生渐进失效时的强度折减系数 **ΣMsf** 的值。因此，应采取足够的**安全**分析步骤，以确保确实发生失效。可以从位移与 **ΣMsf** 的关系图中查看，其中曲线展平：当位移迅速增加时，强度不再降低。

注释:

在安全分析中移除吸力，可在计算开始时引入不平衡力。在没有吸力的情况下，**ΣMsf** 可以在计算的第一部分减少。

15 弹性地基上生成器的动力分析 [ULT]

可以使用 PLAXIS 2D 模拟动力土体-结构相互作用。本文研究了振动源对其周围土体的影响。生成器引起的振动通过承台传输到下层土中。

通过瑞利阻尼考虑粘滞效应引起的物理阻尼。此外，由于轴对称，“几何阻尼”在振动衰减中可能非常重要。

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：

- 定义**动力**计算
- 定义动力荷载
- 定义动力边界条件（粘性）
- 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，如图 212(第 207 页) 所示。

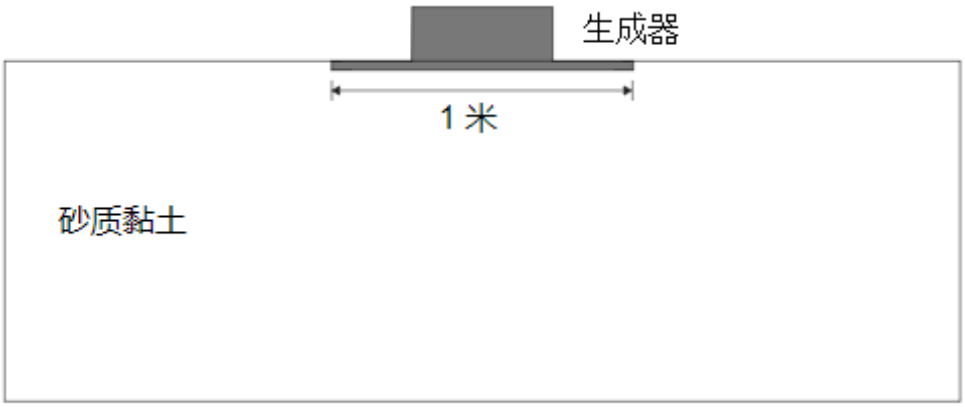


图 212: 以弹性下层土为基础的生成器

15.1 创建新项目

若要创建新项目，请遵循以下步骤：

1. 开启输入程序并从**快速选择**对话框选择**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. 由于该问题具有三维性质，因此使用轴对称模型。在**模型**页面中，为**模型**选择**轴对称**选项，并保留**单元**的缺省选项（**15 节点**）。
4. 保留单位和常量的缺省值，并将模型等高线设置为 x_{min} = 0 m、x_{max} = 20 m、y_{min} = -10 m 和 y_{max} = 0 m。

注释: 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来避免伪反射（粘性边界），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。

15.2 定义土壤地层学

底土由一个深度为 10 m 的土层组成。地面层定义在 y = 0。请注意，本例中未考虑水条件。要定义土壤地层学，请执行以下操作：

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 x = 0 处创建钻孔。
2. 创建一个从地表 (y = 0) 延伸到 10 m 深度 (y = -10) 的土层。
3. 将**水头**保持在钻孔 0 m 处。这意味着底土已完全饱和。

15.3 创建和分配材料数据集

土层由砂质黏土组成，假定它具有弹性。在**土体和界面**下创建数据集，根据表 36(第 208 页)中提供的信息设置类型。指定的杨氏弹性模量似乎比较高。这是因为地面的动刚度通常比静刚度大得多，因为动力荷载通常很快，引起的应变非常小。

表 36: 材料的材料属性

参数	名称	值	单位
常规			
土体模型	模型	线弹性	-
排水类型	类型	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	20	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20	kN/m^3
力学			
刚度	E'_{ref}	$50 \cdot 10^3$	kN/m^2
泊松比	ν'	0.3	-

初始			
K_0 测定	-	自动	-
侧土压力系数	$K_{0,x}$	0.50	-

注释: 采用摩尔-库伦模型或线弹性模型时，通过弹性参数和土体重量计算波速 V_p 和 V_s。V_p 和 V_s 也可作为输入值输入；然后将自动计算弹性参数。弹性参数和波速关系另见 参考手册 的*力学页面*。

15.4 定义结构单元

生成器在**结构模式**中定义。

表 37: 承台的材料属性

参数	名称	值	单位
材料类型	-	弹性	-
重量	W	5	kN/m/m
各向同性	-	是	-
轴向刚度	EA_1	$7.6 \cdot 10^6$	kN/m
抗弯刚度	EI	$24 \cdot 10^3$	kNm^2/m
泊松比	ν	0	-

1. 创建一个从 (0 0) 延伸到 (0.5 0) 的板来代表承台。
2. 根据表 37(第 209 页)中提供的信息定义承台的材料数据集。假定承台具有弹性，重量为 5 kN/m^2。
3. 在承台上施加分散荷载来模拟生成器的重量以及它所产生的振动。荷载的实际值将在今后定义。
   模型如图 213(第 210 页) 所示：

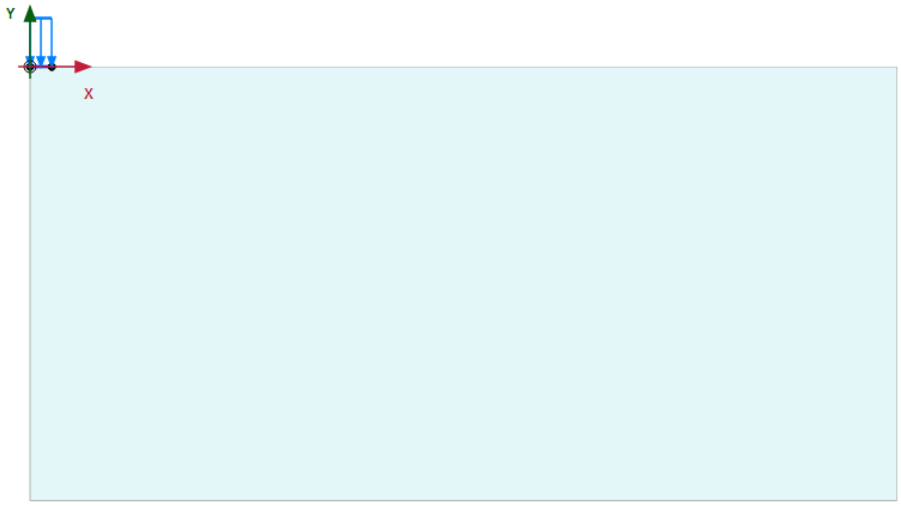


图 213: 模型布局

15.5 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 单击**生成网格**按钮 以生成网格。**单元分布**参数（**中等**）使用缺省选项。
3. 单击**查看网格**按钮 ，查看网格。

   生成的网格如图 214(第 210 页) 所示。请注意，承台下的网格是自动细化的。

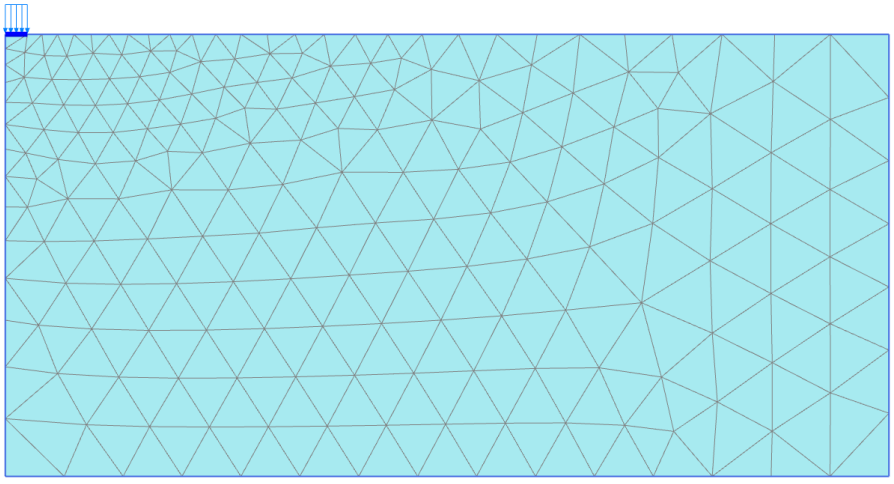


图 214: 生成的网格

4. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

15.6 定义并执行计算

计算包括 4 个阶段，将在**分步施工模式**中进行定义。

15.6.1 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。

15.6.2 第 1 阶段：承台

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。已添加阶段的缺省设置将用于此计算阶段。
2. 激活承台。
3. 激活分散荷载的静力分量。在**选择浏览器**中，将 $q_{y,start,ref}$ 值设置为 -8 kN/m/m。不要激活荷载的动力分量，如图 215(第 211 页) 所示。

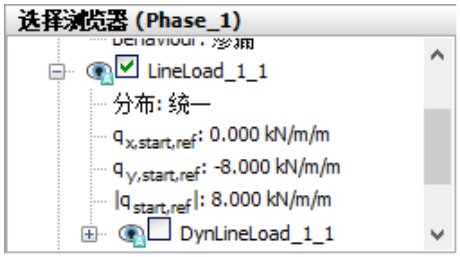


*图 215: 在**选择浏览器**中指定静力荷载分量*

15.6.3 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/m^2 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. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**阶段**窗口的**常规**子树中，选择**动力**选项，作为计算类型。
3. 将**动力时间间隔**参数设置为 0.5 s。
4. 在**阶段**窗口的**变形控制参数**子树中，选择**将位移重置为零**参数。剩余阶段的缺省值将用于此计算阶段。
5. 在**模型浏览器**中，展开**特性库**子树。
6. 右击**动力乘子**子树，并从出现的菜单中选择**编辑**选项。
   这将弹出**乘子**窗口。
7. 单击**荷载乘子**选项卡。
8. 单击**添加**按钮，为荷载引入一个乘子。
9. 定义一个**谐波**信号，**振幅**为 10，**相位**为 0°，**频率**为 10 Hz，如图 216(第 212 页) 所示。

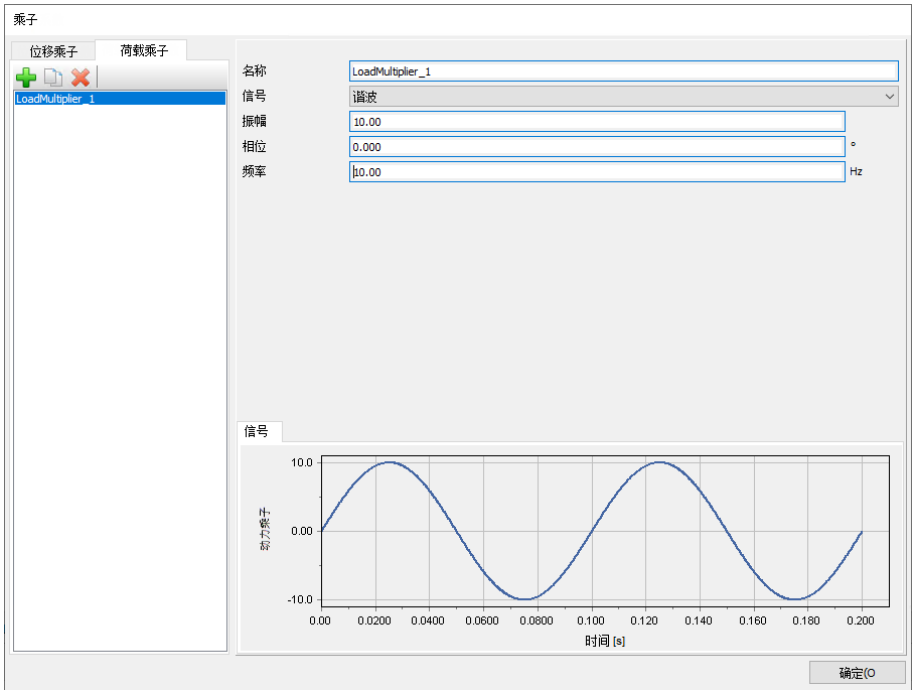


*图 216: 定义**谐波**乘子*

10. 在**选择浏览器**中，激活荷载 (DynLineLoad_1) 的动力分量。
11. 将荷载的分量指定为 ($q_{x,\,start,\,ref}$, $q_{y,\,start,\,ref}$) = (0.0, -1.0)。单击动力荷载子树中的 Multiplier_y，并从下拉菜单中选择 LoadMultiplier_1 选项，如图 217(第 212 页) 所示。

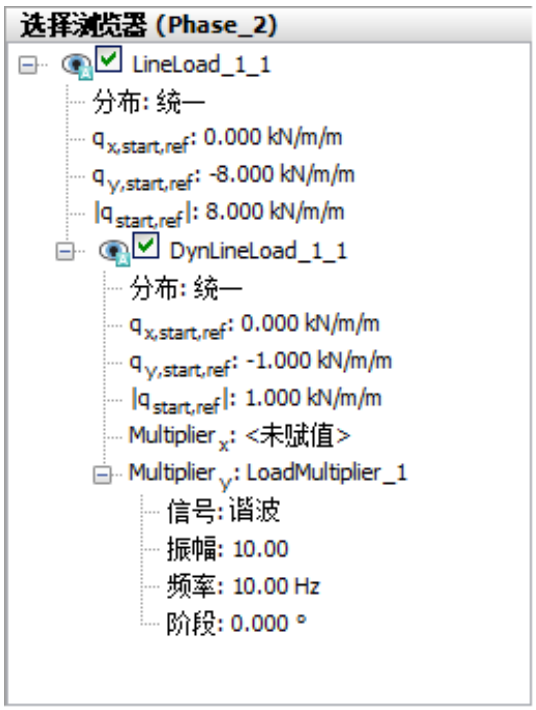


*图 217: 在**选择浏览器**中指定动力荷载分量*

注释: 可以在**几何**模式和**计算**模式下定义动力乘子。

12. 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 和 Ymin。可以在**模型浏览器** > **模型条件** > **动力**子树中指定动力边界，如图 218(第 213 页) 所示。



*图 218: **动力计算**的边界条件*

15.6.4 第 3 阶段：停止生成器

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**阶段**窗口的**常规**子树中，选择**动力**选项，作为计算类型。
3. 将**动力时间间隔**参数设置为 0.5 s。
4. 在**分阶段施工**模式下，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。

15.6.5 执行计算

1. 单击侧工具栏中的**选择曲线的点**按钮，然后选择要在曲线中进行考虑的、位于地表的节点，如 (1.4 0)、(1.9 0) 和 (3.6 0)。
2. 单击**计算**按钮，计算项目。
3. 计算完成后，单击保存按钮保存项目。

15.6.6 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**页面中，将显示**瑞利阻尼**参数。将**输入法**设置为 **SDOF 等值。**
4. 为了引入 5% 的材料阻尼，将两个目标 ξ_1 和 ξ_2 的 ξ 参数值设置为 **5%**，对于 f_1 和 f_2，将频率值分别设置为 **1** 和 **10**。
5. 该程序会自动计算 **α** 值和 **β** 值，如图 219(第 214 页) 所示。

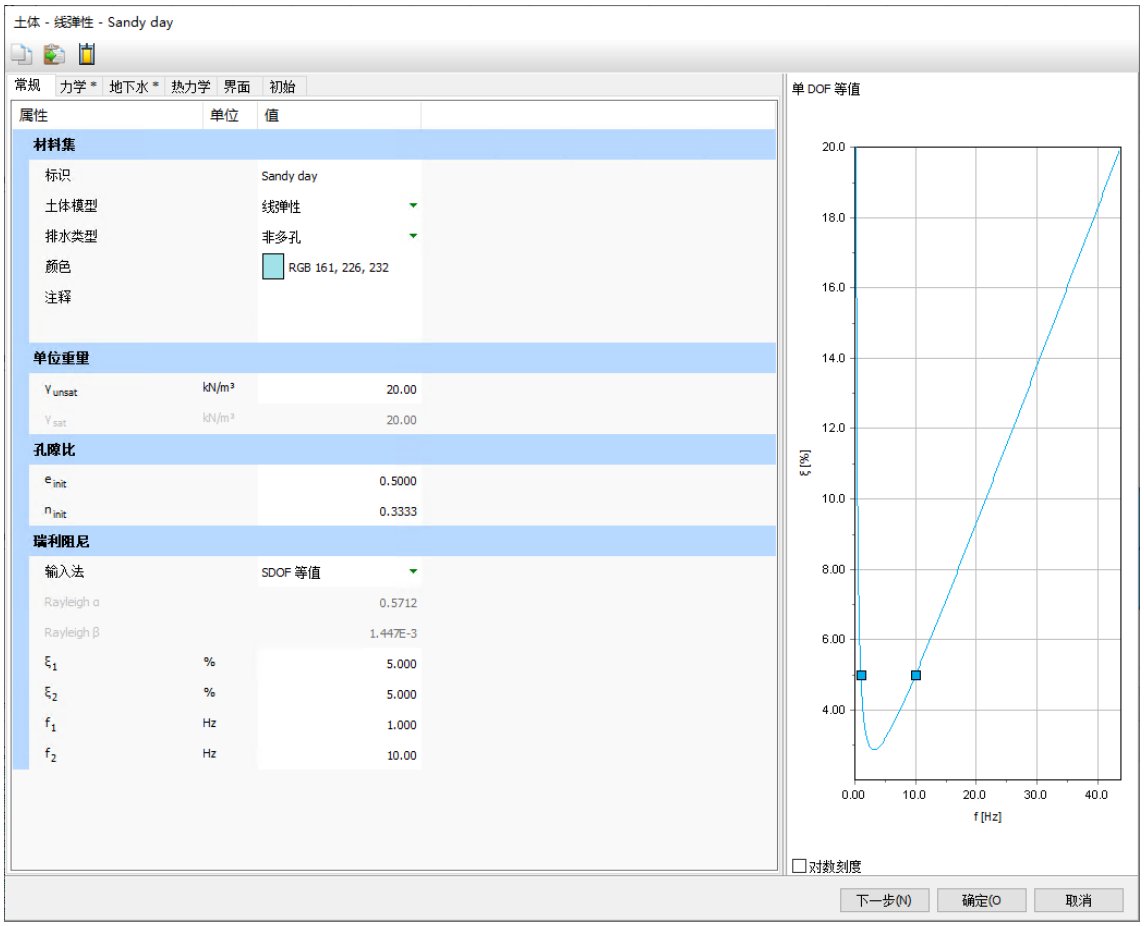


图 219: 输入瑞利阻尼

6. 单击**确定**，关闭数据库。
7. 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。

15.7 结果

曲线生成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_y 分配给 y 轴来绘制。

图 220(第 215 页) 显示了结构表面上预先选择点的响应。可以看出，即使没有阻尼，波浪也会消散，这可归因于几何阻尼。

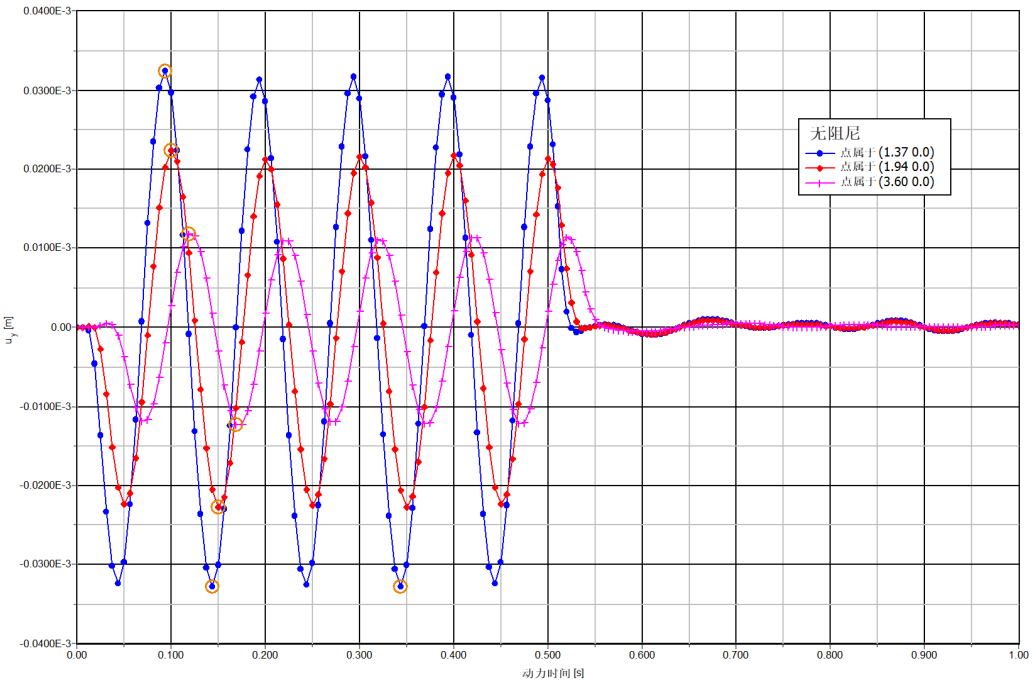


图 220: 距离振动源不同距离处的表面的垂直位移与时间（无阻尼）

图 221(第 216 页) 中明确存在阻尼。

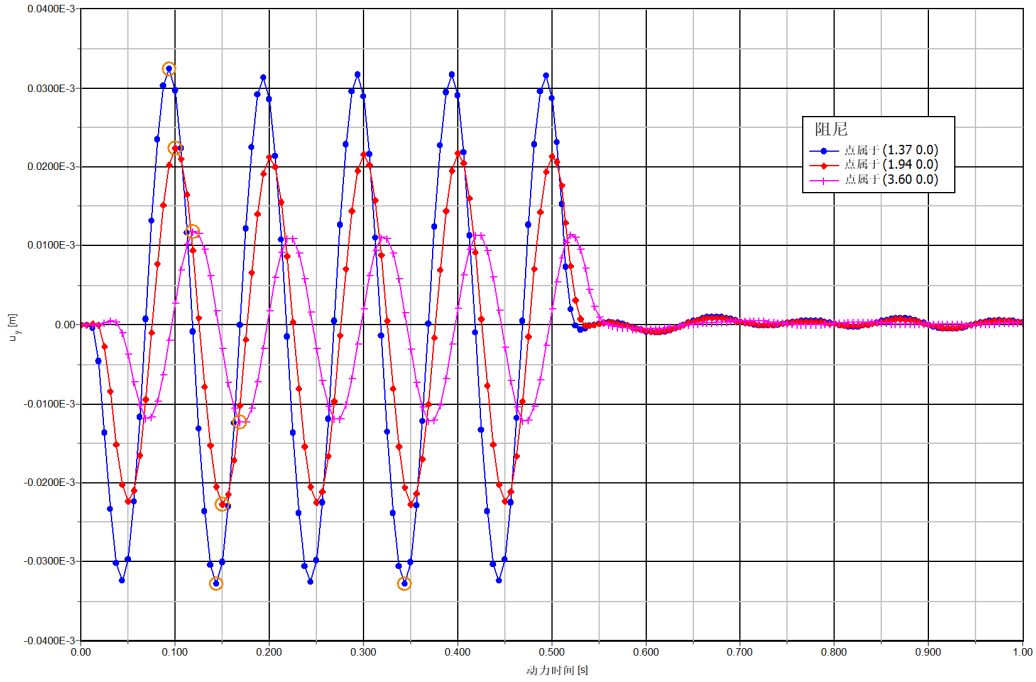


图 221: 距离振动源不同距离处的表面的垂直位移与时间（有阻尼）

可以看出，当消除内力一段时间后（当 t = 0.5 秒时），振动得到完全控制。此外，位移的振幅降低。比较有无阻尼情况下的曲线。

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 222(第 216 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。

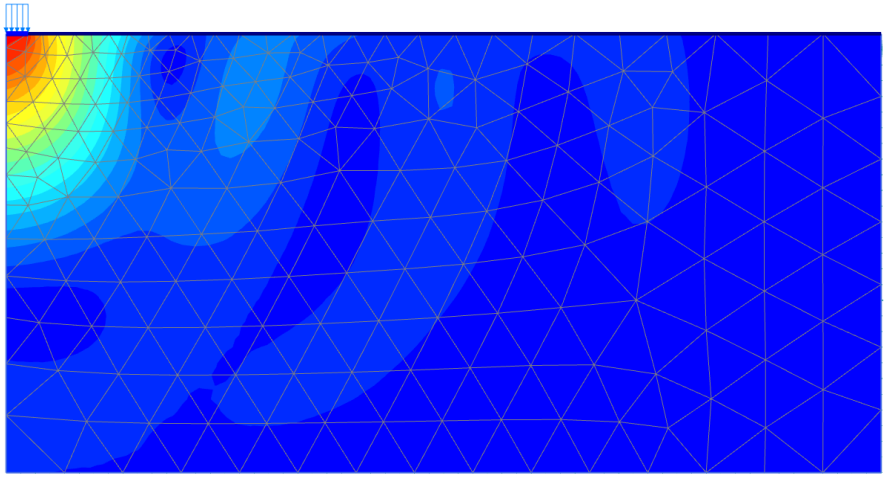


图 222: 第 2 阶段结束时土体中的加速度 ($|\boldsymbol{a}|$)（有阻尼）

16 打桩 [ULT]

打桩是一个动态过程，引起周围土体的振动。此外，由于桩周围的应力迅速增加，会产生超孔隙水压力。

在本示例中，重点是桩下不可逆的变形。为了更加真实地模拟这个过程，通过 具有小应变刚度的硬化土体模型 来为砂土层特性建模。

几何图形

本示例涉及穿透 11 米厚的黏土层，将混凝土桩打入砂土层。桩的直径为 0.4 米，如图 223(第 217 页) 所示。

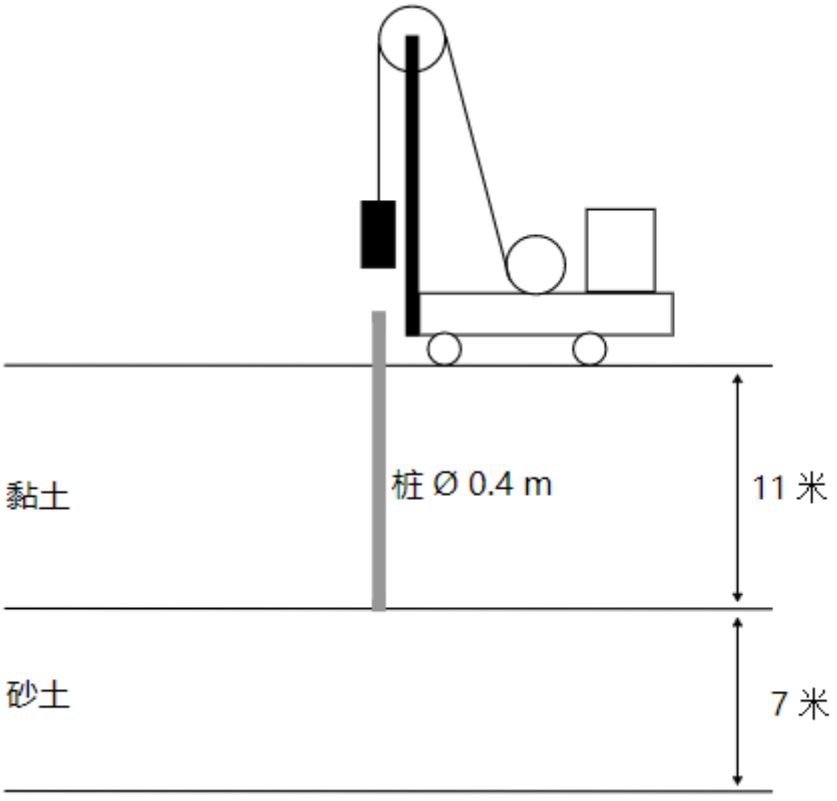


图 223: 打桩情况

16.1 创建新项目

若要创建新项目，请遵循以下步骤：

1. 启动输入程序，然后从**快速启动**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. 在**模型**页面中，为**模型**选择**轴对称**选项，并保留**单元**的缺省选项（**15 节点**）。
4. 保留单位和常量的缺省值，并将模型**等高线**设置为 x_{min} = 0 m、x_{max} = 30 m、y_{min} = 0 m 和 y_{max} = 18 m。

16.2 定义土壤地层学

底土分为 11 m 厚的黏土层和 7 m 厚的砂土层。假定潜水位在地表。整个几何图形内的静水孔隙压力都是根据这条浸润线生成的。要定义土壤地层学，请执行以下操作：

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 x = 0 处创建钻孔。
2. 创建两个从 y = 18 到 y = 7 和 y = 7 到 y = 0 的土层。
3. 将钻孔中的**水头**设置在 18 m 处。

16.3 创建和分配材料数据集

黏土层用 Mohr-Coulomb 模型 建模。人们认为该行为是**不排水 (B)**。用界面强度折减系数模拟沿桩身摩擦减小过程。

为了正确模拟桩尖以下的非线性变形，通过具有小应变刚度的硬化土体模型方式对砂土层进行建模。由于荷载过程快速，砂土层也被认为不排水。砂土层中的短界面并不代表土体与结构相互作用。因此，界面强度折减系数应取为统一（刚性）。

这些层有以下属性：

表 38: 黏土层和桩的材料属性

参数	名称	黏土	桩	单位
常规				
土体模型	模型	摩尔-库伦	线弹性	-
排水类型	类型	不排水 (B)	非多孔	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	16	24	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	18	-	kN/m^3
力学				
杨氏弹性模量（常量）	E'_{ref}	$5.0 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^6$	kN/m^2
泊松比	ν	0.3	0.1	-
杨氏弹性模量增量	E'_{inc}	$1.0 \cdot 10^3$	-	kN/m^2
参考层	y_{ref}	18	-	m

力学				
不排水剪切强度	$s_{u,ref}$	5.0	-	kN/m^2
不排水剪切强度增量	$s_{u,inc}$	3	-	kN/m^3
参考层	y_{ref}	18	-	m
粘聚力	c'_{ref}	-	-	kN/m^2
界面				
强度定义	类型	手动	刚性	-
界面折减因子	R_{inter}	0.5	1.0	-
初始				
K_0 测定	-	自动	自动	-
侧土压力系数	$K_{0,x}$	0.5000	0.5000	-

表 39: 砂土层材料属性

参数	名称	砂土	单位
常规			
土体模型	模型	HS-small	-
排水类型	类型	不排水 (A)	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	17	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20	kN/m^3
力学			
标准排水三轴试验中的割线刚度	E_{50}^{ref}	$50 \cdot 10^3$	kN/m^2
主固结仪荷载的切线刚度	E_{oed}^{ref}	$50 \cdot 10^3$	kN/m^2
卸载/重新装载刚度	E_{ur}^{ref}	$150 \cdot 10^3$	kN/m^2
泊松比	ν_{ur}	0.2	-
刚度应力水平依赖性的功率	m	0.5	-
应变极小时的剪切弹性模量	G_0^{ref}	$120 \cdot 10^3$	kN/m^2
当 $G_s = 0.722\ G_0$ 时的剪切应变	$\gamma_{0.7}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	-
粘聚力	c'_{ref}	0	kN/m^2

力学			
摩擦角	φ'	31	度
剪胀角	ψ	0	度
界面			
强度定义	-	刚性	-
初始			
K_0 测定	-	自动	-

1. 根据表 38 (第 218 页)和表 39 (第 219 页)创建材料数据集

16.4 定义结构单元

将桩定义为 0.2 米宽的柱。**界面**单元沿桩放置，模拟桩与土体之间的交互作用。界面应延伸至砂土层内半米左右。请注意，应仅在土体一侧定义界面。在为桩-土体交互作用正确建模时，有必要将贯入期间土体沿桩滑动引起的材料阻尼以及桩端周围足够的灵活性包括在内。

注释: 使用**放大**功能创建桩和界面

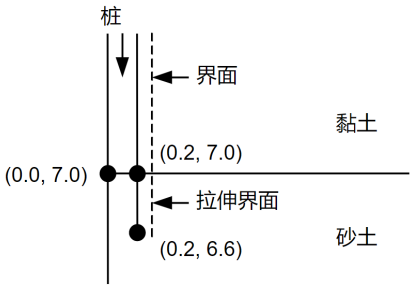


图 224: 拉伸界面

16.4.1 定义桩

若要定义混凝土桩：

1. 单击**结构**选项卡，继续在**结构模式**中输入结构单元。
2. 选择侧工具栏中的**创建线**功能，然后从 (0.2 6.6) 到 (0.2 18) 绘制一条线。
3. 为该线分配一个负界面，以模拟桩与周围土体的相互作用。

该桩由混凝土制成，采用考虑无孔性能的线弹性模型进行建模。在开始时，该桩并不存在，所以最初该区域的黏土属性代表此桩。

16.4.2 定义荷载

为了模拟驱动力，在桩顶建立了分布单位荷载。若要创建动力荷载：

1. 点击工具栏中的**创建荷载** > **创建线荷载**，然后点击 (0 18.0) 和 (0.2 18.0)，定义分散荷载。
2. 荷载分量将在**选择浏览器**中定义。请注意，本项目中将不会使用荷载的静力分量。若未激活静力荷载，该程序将忽略荷载的静力分量。
3. 展开**动力荷载**子树，并指定重力方向的单位荷载。
4. 单击 Multiplier_y 下拉菜单，然后单击出现的加号按钮 。
   这将弹出**乘子**窗口，并自动添加一个新的荷载乘子。
5. 定义一个**谐波**信号，**振幅**为 5000，**相位**为 0°，**频率**为 50 Hz，如图 225(第 221 页) 所示。在打桩阶段，我们将只考虑此信号的半个周期 (0.01 s)。

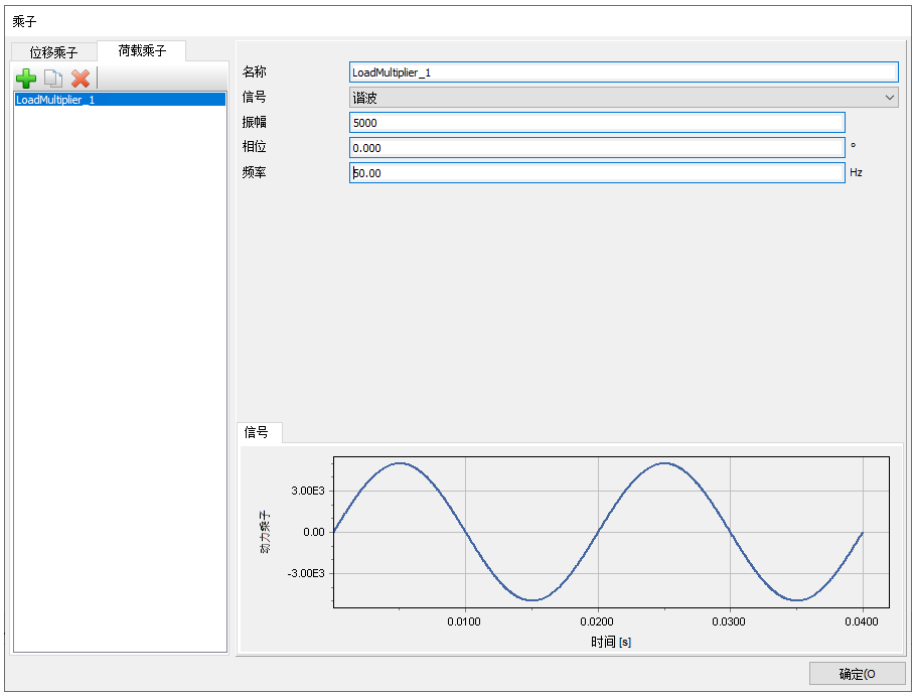


图225: 定义谐波乘子

注释:

请注意，可通过右击**模型浏览器**中**属性库**下的**动力乘子**子树来定义动力乘子。

请注意，动力乘子是属性，因此可以在程序的所有模式下定义它们。

最终的几何模型如图 226 (第 222 页) 所示：



图 226: 几何模型

16.5 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 单击**生成网格**按钮 以生成网格。**单元分布**参数（**中等**）使用缺省选项。
3. 单击**查看网格**按钮 ，以查看网格，如 图 227(第 222 页) 所示。

   得到的网格如下所示。请注意，承台下的网格是自动细化的。

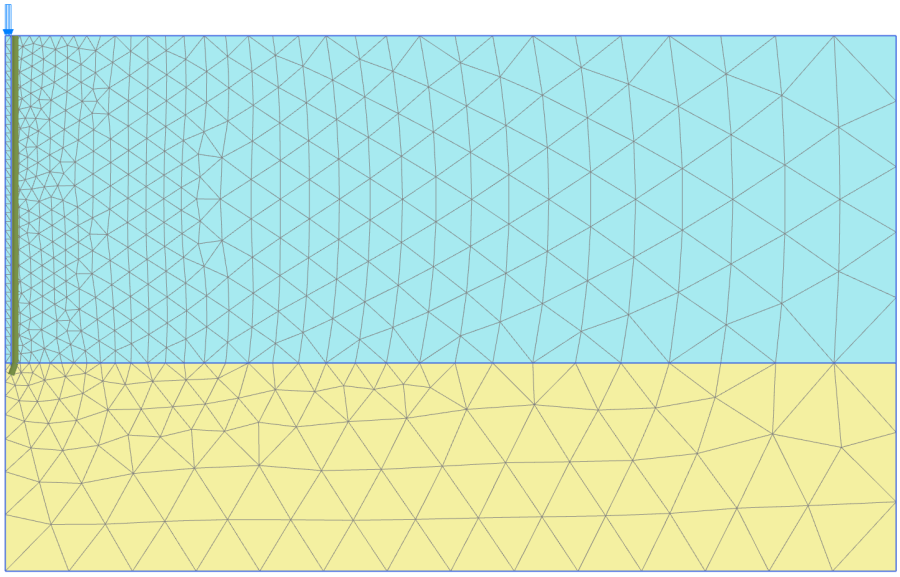


图 227: 生成的网格

4. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

16.6 定义并执行计算

计算包含 3 个阶段。在初始阶段，生成初始应力条件。在第 1 阶段，创建桩。在第 2 阶段，通过激活半个荷载谐和循环来模拟使桩受到单次冲击。在第 3 阶段，将荷载保持为零并及时分析桩和土体的动力响应。后两个阶段涉及动力计算。

16.6.1 初始阶段

初始有效应力是使用缺省值、由 **K0 程序**生成的。请注意，在初始情况下，桩不存在，黏土属性应分配至相应的类组。假定潜水位在地表。整个几何图形内的静水孔隙压力都是根据这条浸润线生成的。

16.6.2 第 1 阶段：桩激活

1. 单击**添加阶段**按钮 ，创建新阶段。
2. 在**阶段**窗口的**常规**子树中，选择**塑性**选项，作为**计算类型**。
3. 缺省情况下，选择**分阶段施工**，作为**荷载类型**。
4. 在**分阶段施工**模式下，将桩属性分配至桩类组。
5. 仅激活**黏土**层中的界面。**分阶段施工**模式下第 1 阶段的模型如图 228(第 223 页) 所示：



*图 228: **分阶段施工**模式下第 1 阶段的配置*

16.6.3 第 2 阶段：打桩

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**阶段**窗口的**常规**子树中，选择**动力**选项，作为**计算类型**。
3. 将**动力时间间隔**设置为 0.01 s。
4. 在**变形控制参数**子树中，选择**将位移重置为零**。
5. 在**分阶段施工模式**下，激活分散荷载的动力分量。

   选择浏览器中荷载的激活动力分量如图 229(第 224 页)所示。

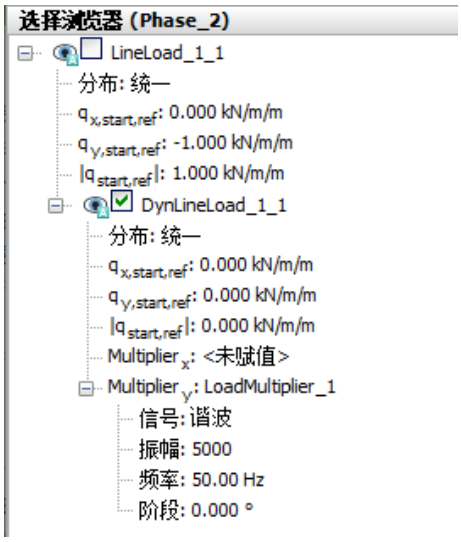


*图 229: **选择浏览器**中的动力荷载分量*

6. 展开子树**模型浏览器** > **模型条件** > **动力**，如图 230(第 225 页)所示。

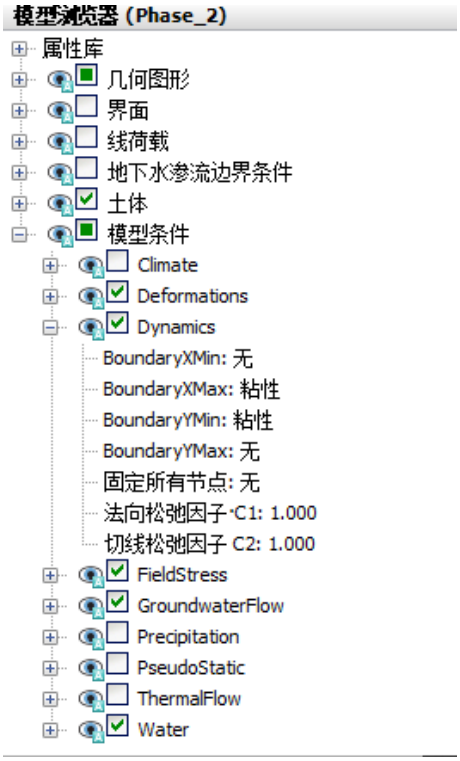


*图 230: **动力计算**的边界条件*

7. 将粘性边界指定为 x_{max} 和 y_{min}。

此阶段的结果是外荷载的半个谐和周期。在此阶段结束时，荷载恢复为零。

16.6.4 第 3 阶段：衰减

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 在**阶段**窗口的**常规**子树中，选择**动力**选项，作为**计算类型**。
3. 将**动力时间间隔**设置为 0.19 s。
4. 在**分阶段施工模式**下，停用动力荷载。

16.6.5 执行计算

1. 单击侧工具栏中的**选择曲线的点**按钮，然后在桩顶选择一个节点，用于荷载位移曲线。
2. 单击**计算**按钮，计算项目。
3. 计算完成后，单击**保存**按钮，保存该项目。

16.7 结果

图 231(第 226 页) 显示了桩（顶点）的沉降与时间的关系观察此图可得出以下结果：

- 单冲程引起的桩顶端最大竖向沉降约为 14 毫米。然而，最终沉降约为 9.5 毫米。
- 大部分沉降发生在第 3 阶段冲程结束以后。这是因为压缩波仍在桩中向下传播，造成额外沉降。
- 尽管没有 Rayleigh 阻尼，但由于土体塑性和波能在模型边界处被吸收，桩的振动将受到阻尼影响。

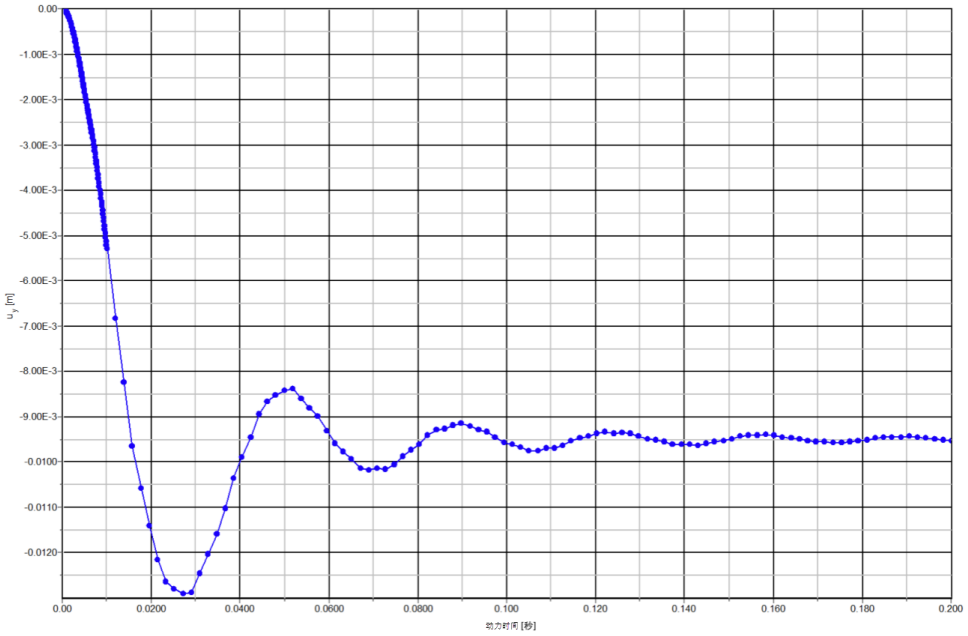


图 231: 桩沉降与时间

观察第二计算阶段（t=0.01 秒，即在冲程之后）的输出，可以看到桩端周围少量局部出现较大的超孔隙压力。土体的剪切强度因此降低，这有助于桩贯入砂土层。由于不考虑固结，超孔隙压力也保持在第三阶段。

图 232(第 226 页) 显示了 t=0.01 秒时界面单元中的剪应力。此图显示，整个桩身均达到最大剪应力，表明土体沿桩滑动。

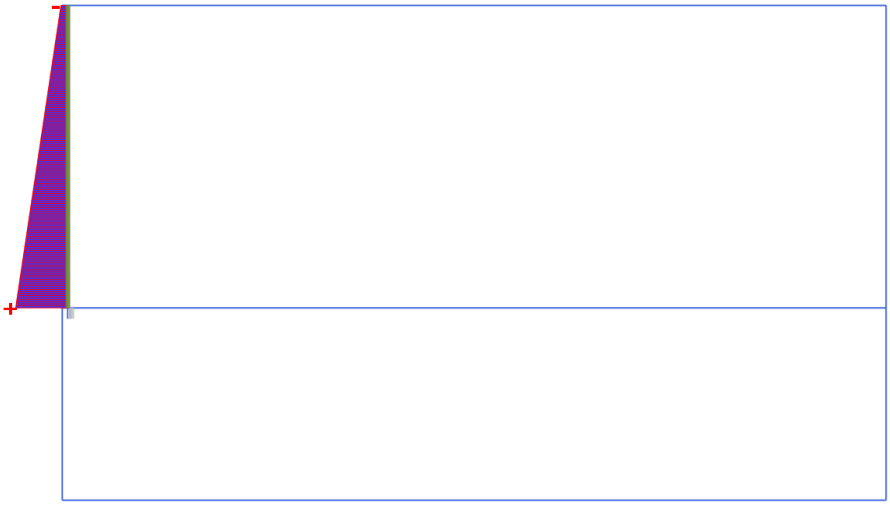


图 232: 在 t = 0.01 s 时界面中的最大剪应力

当查看最后计算阶段（t = 0.2 秒）的变形网格时，还可以看到桩的最终沉降约为 9.5 毫米。要查看整个动力过程，建议使用**创建动画**选项来及时查看变形网格的“电影”。您可能会注意到动画的第一部分比第二部分要慢。

17 建筑自由振动和地震分析 [ULT]

本示例说明了五层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，在模型底部施加动力输入。

目标：

- 进行**动力**计算
- 定义动力边界条件（自由场、合规基础和粘性）
- 通过动力乘子定义地震
- 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
- 根据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。包括地下室在内，宽 10 米，高 17 米。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 米深的松散砂之上，下面是深层的密度较大的砂土层。在该模型中，考虑 25 米深的砂土层，如图 233(第 228 页) 所示。

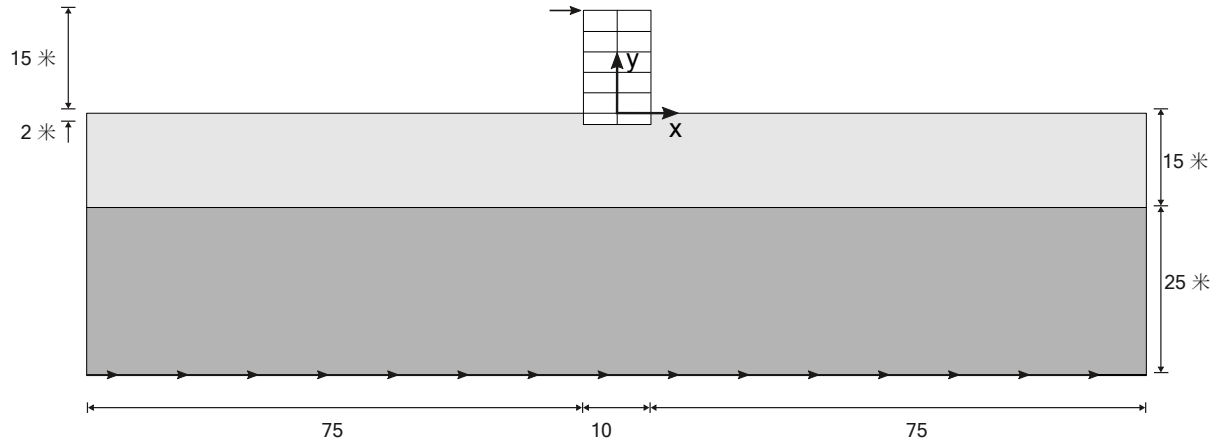


图 233: 工程几何图形

17.1 创建新项目

若要创建新项目，请遵循以下步骤：

1. 启动输入程序，然后从**快速启动**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. 在**模型**页面中，保留**模型**（**平面应变**）和**单元**（**15 节点**）的缺省选项。
4. 保留缺省单元和常量，并将模型**等高线**设置为 x_{min} = -80 米，x_{max} = 80 米，y_{min} = -40 米以及 y_{max} = 15 米。

17.2 定义土壤地层学

下层土分为 15 m 厚的高度松散砂土层和 25 m 厚的中密砂土层。假定潜水面在 y = -15 m 处。整个几何图形内的静水孔隙压力都是根据这条浸润线生成的。

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 x = 0 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 添加两个从 y = 0 到 y = -15 和 y = -15 到 y = -40 的土层。
3. 将钻孔中的**水头**设置在 -15 m 处。

17.3 创建和分配材料数据集

上层是非常松散的砂土而下层则是中等密度的砂土。二者均具有具有小应变刚度的硬化土体模型属性。忽略地下水的存在。具有具有小应变刚度的硬化土体模型属性的土层有固有的滞回阻尼。

- 打开**材料集**窗口。
- 根据表 40 (第 229 页)中给出的信息，创建**土体和界面**集合类型下的数据集。
- 向钻孔中的相应土层分配材料数据集。

表 40: 材料属性

参数	名称	上层砂土层	下层砂土层	单位
常规				
土体模型	-	HS-small	HS-small	-
排水类型	-	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}	$20 \cdot 10^3$	$30 \cdot 10^3$	kN/m^2
主固结仪荷载的切线刚度	E_{oed}^{ref}	$26 \cdot 10^3$	$36 \cdot 10^3$	kN/m^2

力学				
卸载/重新装载刚度	E_{ur}^{ref}	$95 \cdot 10^3$	$110 \cdot 10^3$	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}	$270 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	kN/m^2
当 $G_s = 0.722\ G_0$ 时的剪切应变	$\gamma_{0.7}$	$0.15 \cdot 10^{-3}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	-
粘聚力	c'_{ref}	10	5	kN/m^2
摩擦角	φ'	31	28	度
剪胀角	ψ	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。下图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 234(第 230 页) 显示了割线剪切弹性模量，图 235(第 231 页) 则显示了切线剪切弹性模量。

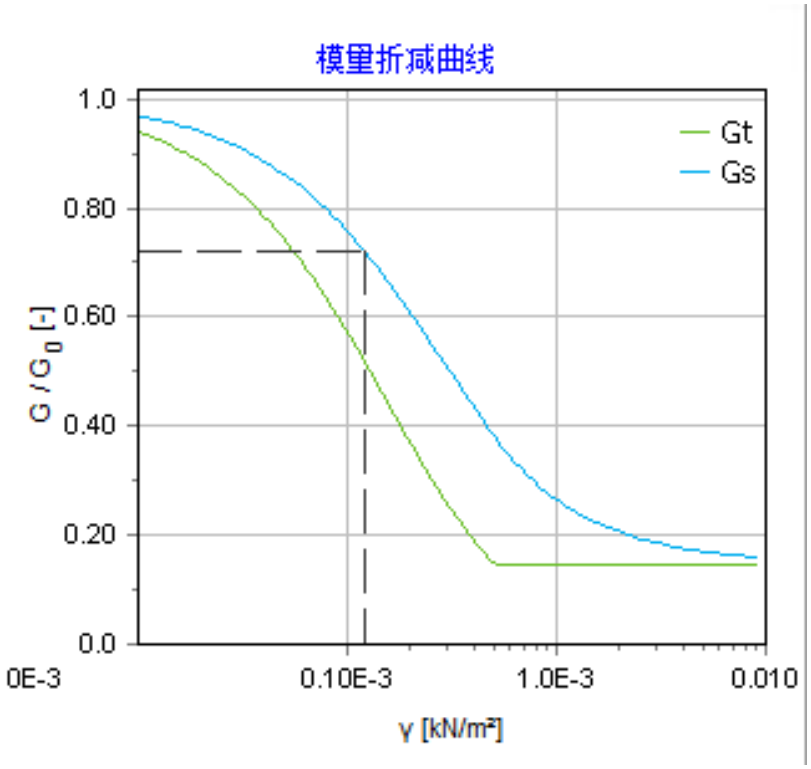


图 234: 上层砂土层的弹性模量折减曲线

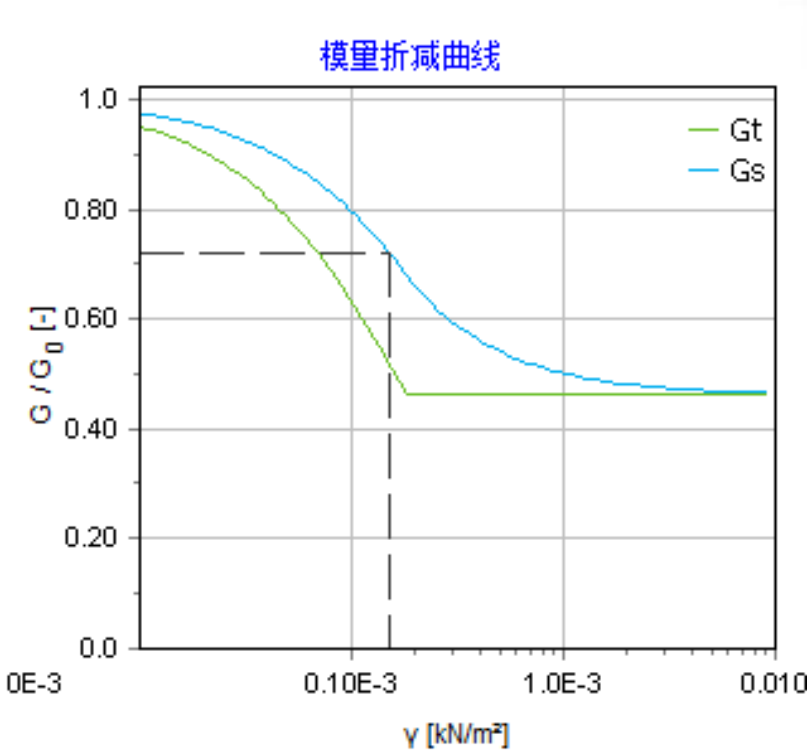


图 235: 下层砂土层的弹性模量折减曲线

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。

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

上层砂土层和**下层砂土层**的 G_{ur}^{ref} 值和与 G_0^{ref} 的比值见表 41(第 231 页) 。该比值决定了可以得到的最大阻尼比。

表 41: G_{ur} 值和与 G_0^{ref} 的比值

参数	上层砂土层	下层砂土层	单位
G_{ur}	39.10^3	45.10^3	kN/m^2
G_0^{ref}/G_{ur}	6.82	2.18	-

图 236(第 232 页)和图 237(第 232 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说明，请参阅文献 [6]

[6] 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。

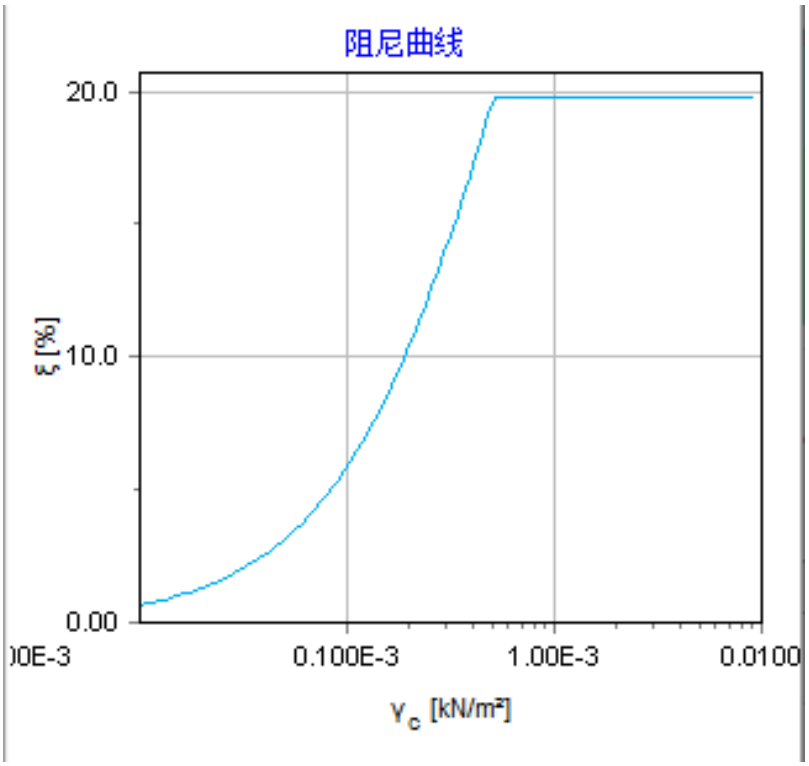


图 236: 上层砂土层的阻尼曲线

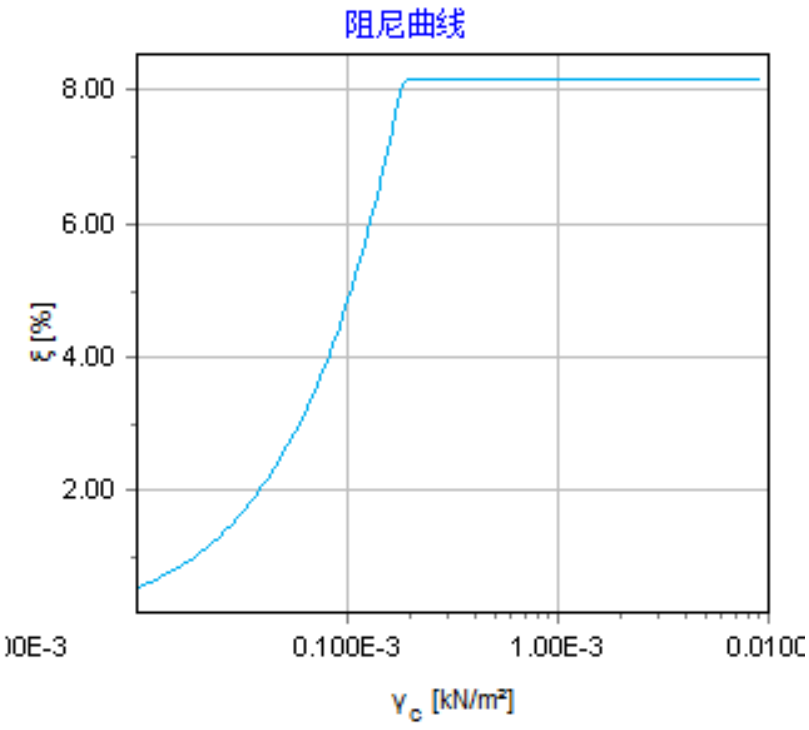


图 237: 下层砂土层的阻尼曲线

17.4 定义结构单元

模型结构单元的定义见**结构模式**。

17.4.1 定义建筑

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

代表建筑墙壁和地板的板视为具有线弹性。请注意，使用了两个不同的材料数据集，一个用于地下室，另一个用于建筑的其他部分。利用瑞利阻尼法模拟建筑的物理阻尼。参考手册 中有关于瑞利阻尼参数的描述。

表 42: 建筑材料属性（板属性）

参数	名称	建筑	地下室	单位
常规				
材料类型	-	弹性	弹性	-
重量	W	10	20	kN/m/m
输入法	-	直接	直接	-
Rayleigh α	-	0.2320	0.2320	-
Rayleigh β	-	$8.0 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-3}$	-
防止冲孔	-	否	否	-
力学				
各向同性	-	是	是	-
轴向刚度	EA_1	$9 \cdot 10^6$	$12 \cdot 10^6$	kN/m
弯曲刚度	EI	$67.5 \cdot 10^3$	$160 \cdot 10^3$	kNm^2/m
泊松比	ν	0	0	-

表 43: 节点到节点锚的材料属性

参数	名称	列	单位
材料类型	类型	弹性	-
平面外间距	$L_{spacing}$	3	m
轴向刚度	EA	$2.5 \cdot 10^6$	kN

1. 用板在从 (-5 0) 到 (-5 15) 和从 (5 0) 到 (5 15) 处创建建筑的垂直墙壁。
2. 现在再用板从 (-5 -2) 到 (-5 0) 和从 (5 -2) 到 (5 0) 处定义地下室的垂直墙壁。
3. 将建筑的地下室和地面层定义为从 (-5 -2) 到 (5 -2) 和从 (-5 0) 到 (5 0) 的板。
4. 通过将地下室楼层复制 5 次来定义楼层。为此，请选择地下室楼层并选择**阵列**按钮。现在指定，我们想要以 y 方向复制它，有 6 个副本（注意：副本数量包括原件），中间距离为 3 m。
5. 根据表 42(第 233 页)，为建筑中的结构单元定义材料数据集。
6. 将地下室材料数据集分配至模型中的垂直板 (2) 和最低水平板（均在地面层以下）。
7. 将建筑材料数据集分配至模型中的剩余板。
8. 使用节点到节点锚要素来定义位于建筑物中心连接连续楼层的柱子，即从 (0 -2) 到 (0 0)、从 (0 0) 到 (0 3)、从 (0 3) 到 (0 6)、从 (0 6) 到 (0 9)、从 (0 9) 到 (0 12) 和从 (0 12) 到 (0 15)。当然，这也可以通过绘制一个柱子并用阵列函数复制到其他位置来实现。
9. 根据表 43(第 233 页)，定义锚的属性，并将材料数据集分配至模型中的锚。
10. 定义一个界面来模拟土体和建筑之间的相互作用。

17.4.2 定义荷载

1. 为了模拟驱动力，在桩顶创建了点荷载。若要创建动力荷载：
   a. 在建筑的左上角创建一个点荷载。
   b. 设置 $F_{x,ref}$ = 10 kN/m 和 $F_{y,ref}$ = 0 kN/m。
2. 地震是通过在底部边界施加指定位移来模拟的。若要定义指定位移：
   a. 在模型底部定义线位移，从 (-80 -40) 到 (80 -40)。
   b. 将线位移的 x 分量设置为**指定**，并赋值 1.0。线位移的 y 分量是**固定**。应该保留缺省分布（统一）。
3. 定义线位移的动力乘子：
   a. 扩展动力线位移。
   b. 单击 **Multiplier_x** 下拉菜单，点击出现的加号按钮。这将弹出**乘子**窗口，并自动添加一个新的位移乘子。
   c. 从**信号**下拉菜单中选择**表**选项。
   d. Bentley 社区提供包含地震数据的文件：查找教程“建筑的自由振动和地震分析”。下载地震信号文件 `225a.smc`。
   e. 在**乘子**窗口中，单击**打开**按钮。在出现的窗口中，在下拉菜单中更改**强运动只读光盘驱动器文件**选项的**纯文本文件 *.txt**，并选择出现的已保存 .smc 文件。
   f. 选择**数据类型**下拉菜单中的**加速度**选项。
   g. 选择**偏离修正**选项，并单击**确定**，结束定义乘子。
   定义的乘子如图 238(第 235 页) 所示：

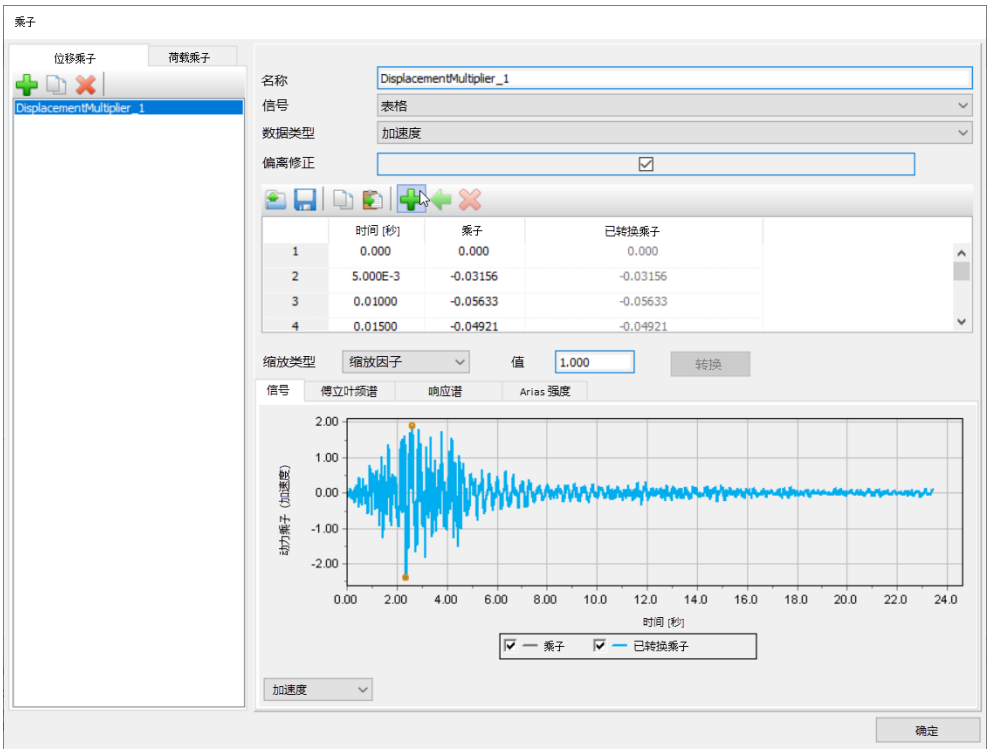


图 238: "动力乘子"窗口

17.4.3 在边界创建界面

在"结构"模式下，"自由场"和"合规基础"边界要求沿模型的垂直边界和底部边界创建界面单元。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. 单击**在边界创建界面**按钮，在模型边界自动生成界面。

模型的几何图形如图 239(第 235 页) 所示：

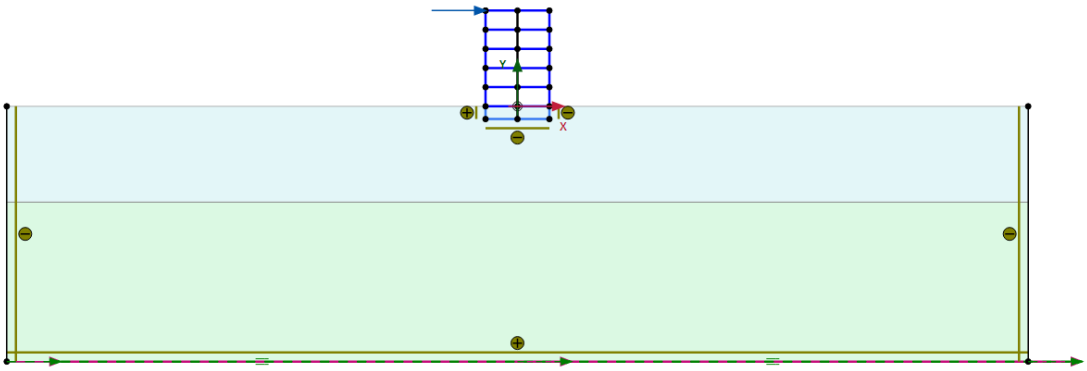


图 239: 模型的几何图形

17.5 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 通过将边界上**粗糙度系数**改成 1 来重置边界上的网格细化。
3. 选择两个土层，并将它们的**粗糙度系数**设置为 0.3。
4. 单击**生成网格**按钮 以生成网格。将**单元分布**设置为**中等**。
5. 单击**查看网格**按钮 ，查看网格。
   生成的网格如图 240(第 236 页) 所示。

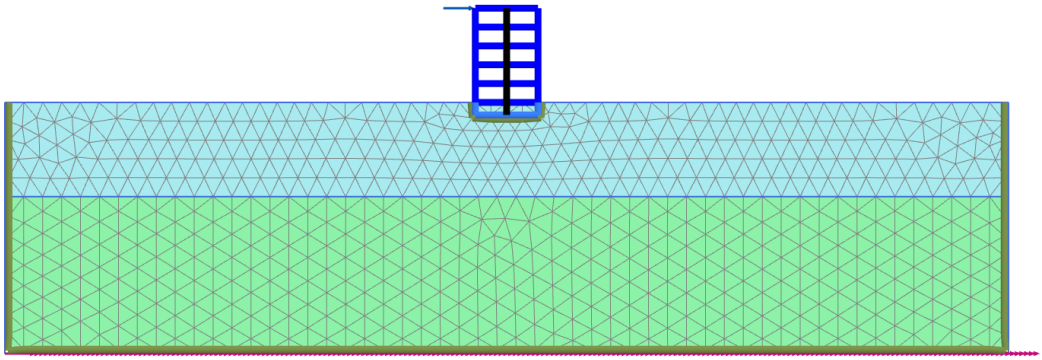


图240: 生成的网格

6. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

17.6 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。

17.6.1 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激活。
4. 初始阶段的模型如图 241 (第 237 页) 所示。

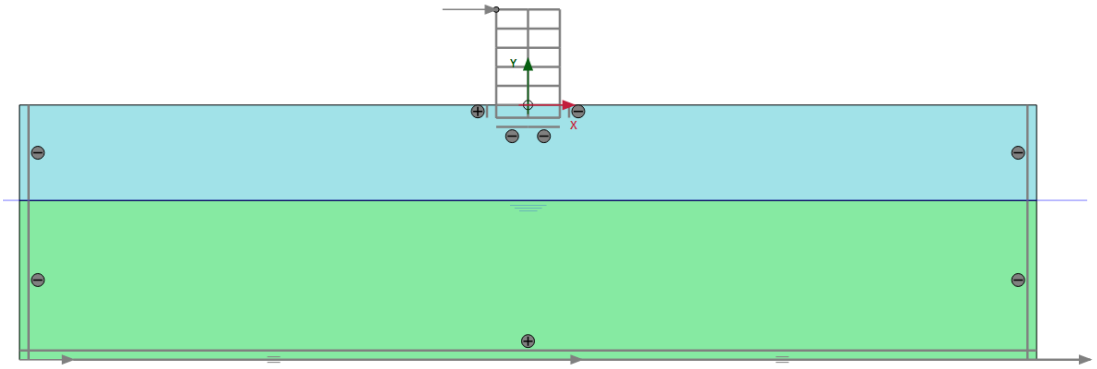


图 241: 初始阶段

17.6.2 第 1 阶段：建筑

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。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。
3. 第 1 阶段的模型如图 242 (第 237 页) 所示。

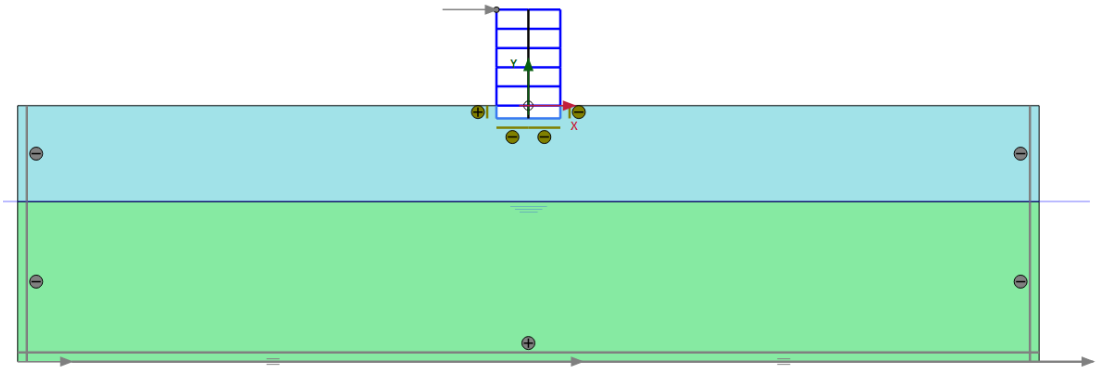


图 242: 建筑施工

17.6.3 第 2 阶段：激发

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段 (Phase_2)。
2. 在**阶段**窗口中，选择**变形控制参数**子树中的**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，激活荷载。荷载的值已经在**结构模式**中定义。

17.6.4 第 3 阶段：自由振动

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段 (Phase_3)。

2. 在**阶段**窗口中，选择**动力**选项，作为**计算类型**。
3. 将**动力时间间隔**参数设置为 5 秒。
4. 在**分阶段施工**模式下，释放（停用）点荷载。
5. 在**模型浏览器**中，展开**模型条件**子树。
6. 展开**动力**子树。检查边界条件**边界 X 最小值**、**边界 X 最大值**和**边界 Y 最小值**是否有粘性，如图 243(第 238 页) 所示。

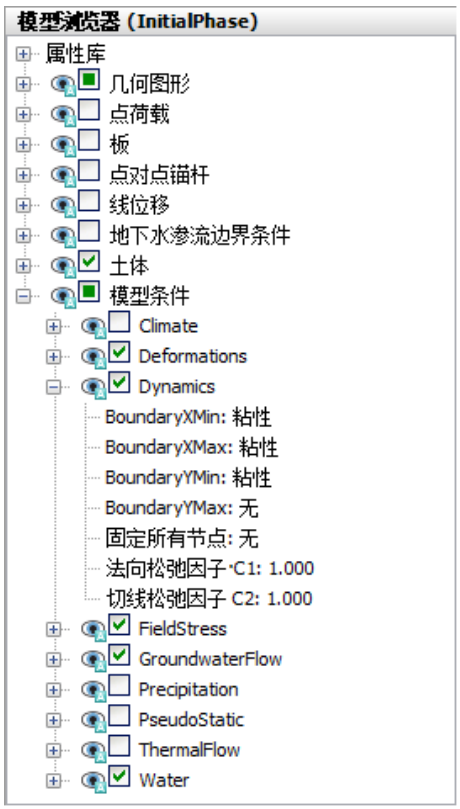


*图 243: **动力计算**的边界条件*

注释:

为了更好的显示结果，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。

17.6.5 第 4 阶段：地震

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段 (Phase_4)。
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**。
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，以获得更详细的时间-加速曲线。

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。将**边界 X 最小值**和**边界 X 最大值**设置为**自由场**。将**边界 Y 最小值**设置为**合规基础**，如图 244(第 239 页) 所示。



*图 244: **动力计算** (Phase_4) 的边界条件*

11. 无需激活界面单元即可启用**自由场**或**合规基础**边界。
12. 在**模型浏览器**，激活**线位移**及其动力分量。请确保 $u_{x,start,ref}$ 的值设置为 0.5 m。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基岩（内）运动的一半。

17.6.6 执行计算

1. 单击侧工具栏中的**选择曲线的点**按钮，然后在建筑顶部选择一个接近或位于 (0 15) 的点。
2. 单击**计算**按钮，计算项目。
3. 计算完成后，单击**保存**按钮，保存该项目。

17.7 结果

图 245(第 240 页) 显示了第 2 阶段（施加水平荷载）结束时的变形结构。

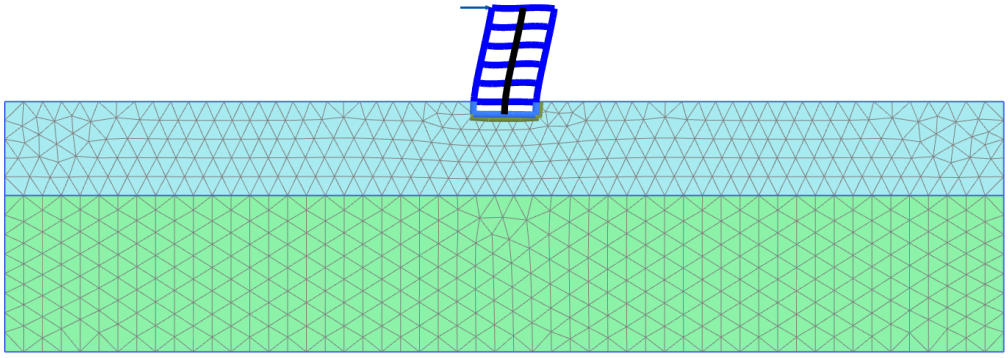


图 245: 第 2 阶段中的变形结构

图 246(第 240 页) 为自由振动阶段所选点 A (0 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。

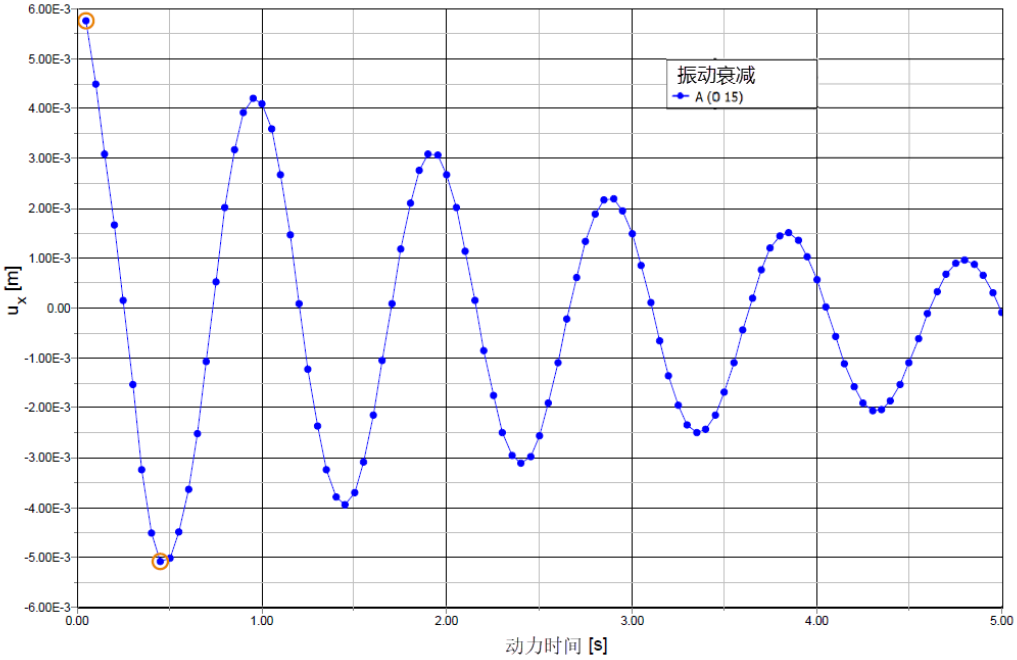


图 246: 所选点位移时程

在**曲线生成**窗口的**傅立叶**页面中，选择**功率频谱** > **总位移** > **Ux**，并选择**确定**，生成图表。图表如图 247(第 241 页) 所示。根据此图，可以计算建筑的主频率约为 1 Hz。

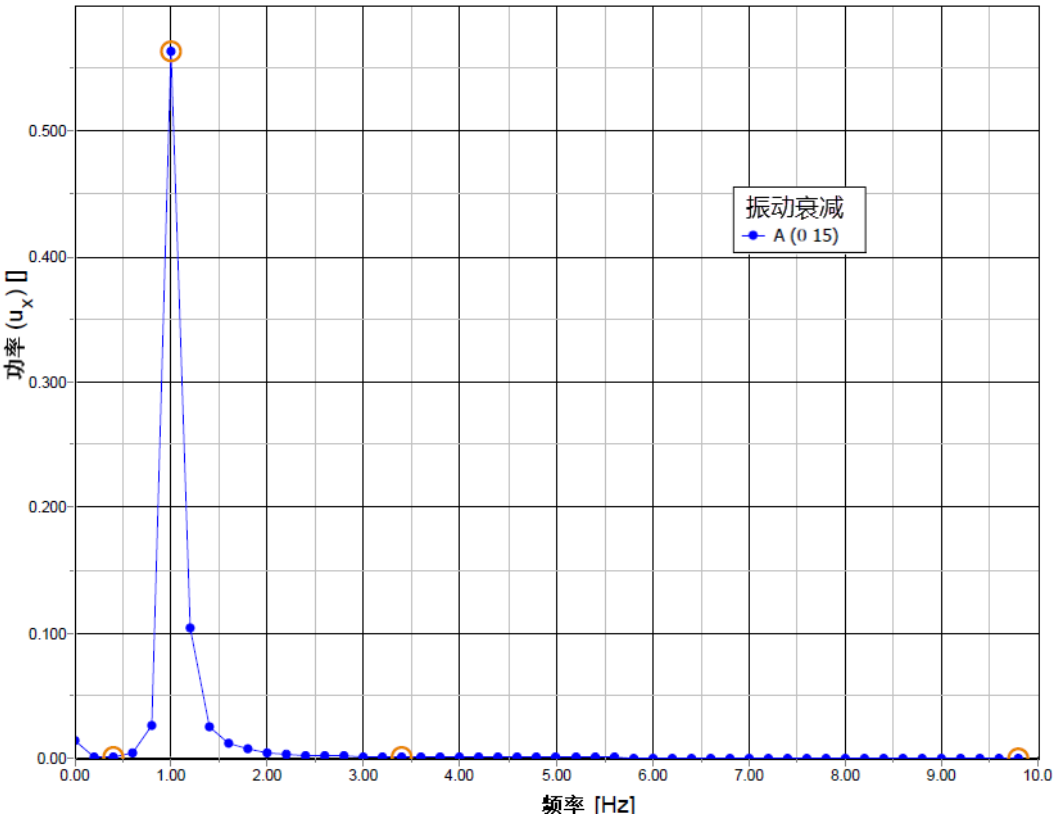


图 247: 频率表示（频谱）

图 248(第 241 页)显示了地震阶段（动力分析）所选点 (0 15) 的横向加速度时程。为了更好地呈现结果，可以创建自由振动和地震的动画。

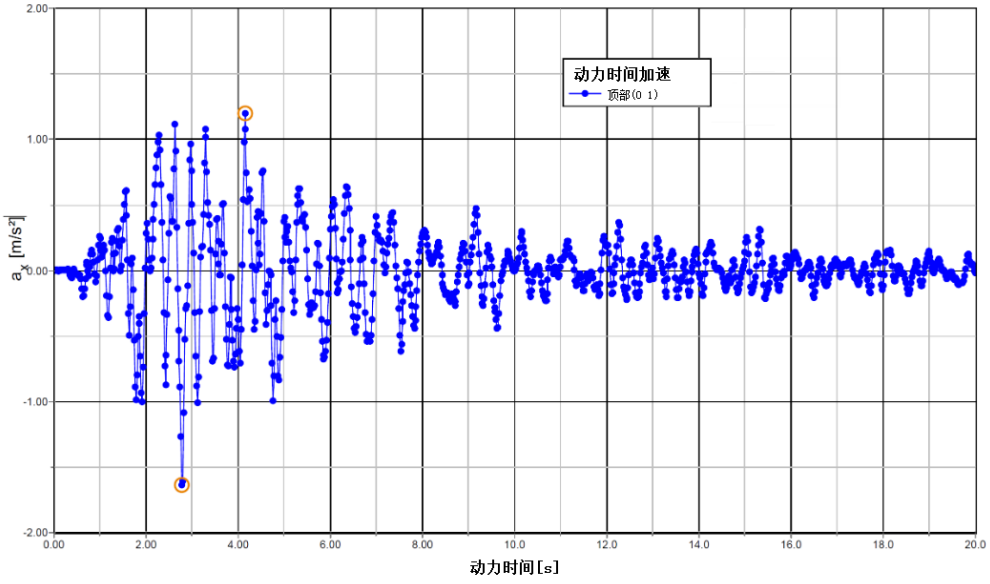


图 248: 加速在动力时间上的变化

18 通航船闸的热膨胀 [ULT]

通航船闸因维护暂时为“空”。一段时间后，气温显著升高，导致船闸内侧热膨胀，而混凝土块的土体侧保持相对较冷。这会导致墙体向后弯曲，从而增加墙后土体中的侧向应力，并增加墙体本身的弯矩。

目标：

此示例演示了如何使用**热**模块来分析此类情况。

- 定义热温度函数
- 热膨胀的使用
- 为 THM 计算执行完全耦合分析

项目的几何图形如图 249(第 242 页)所示。

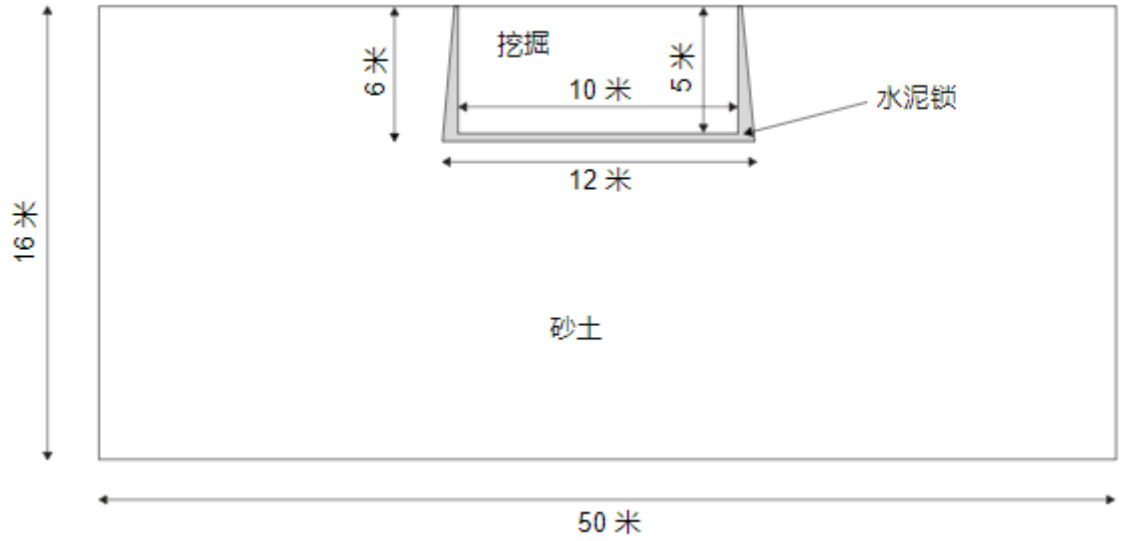


图 249: 工程几何图形

18.1 创建新项目

1. 启动输入程序，然后从**快速启动**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. 在**模型**页面中，**模型**和**单元**的缺省选项用于此项目。本教程中也使用了单位的缺省选项。
4. 将模型**等高线**设置为 x_{min} = 0 米，x_{max} = 25 米，y_{min} = -16 米以及 y_{max} = 0 米。

5. 单击**确定**，关闭**项目属性**窗口。

18.2 定义土壤地层学

要定义土壤地层学，请执行以下操作：

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 x = 0 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 创建顶层为 0.0 米，底层为 -16 米的单个土层。水头设置为 -4 米。

18.3 创建和分配材料数据集

需要创建两个数据集；一个用于砂土层，另一个用于混凝土块

1. 打开**材料集**窗口。
2. 使用表 44(第 243 页)中给出的参数定义**砂土**层的数据集，用于**常规**、**力学**、**地下水**、**热力学**和**界面**和**初始**页面。
3. 根据表 44(第 243 页)为**混凝土**创建另一个数据集。
4. 将材料数据集**砂土**分配给钻孔土层。

表 44: 材料属性

参数	名称	砂土	混凝土	单位
常规				
土体模型	-	HS-small	线弹性	-
排水类型	-	排水	非多孔	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	20	24	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	20	-	kN/m^3
力学				
杨氏模量	E_{ref}	-	$25 \cdot 10^6$	kN/m^2
泊松比	ν	-	0.15	-
标准排水三轴试验中的割线刚度	E_{50}^{ref}	$40 \cdot 10^3$	-	kN/m^2
主固结仪荷载的切线刚度	E_{oed}^{ref}	$40 \cdot 10^3$	-	kN/m^2
卸载/重新装载刚度	E_{ur}^{ref}	$1.2 \cdot 10^5$	-	kN/m^2
刚度应力水平依赖性的功率	m	0.5	-	-

力学				
应变极小时的剪切弹性模量	G_0^{ref}	$80 \cdot 10^3$	-	kN/m^2
当 $G_s = 0.722\ G_0$ 时的剪切应变	$\gamma_{0.7}$	$0.1 \cdot 10^{-3}$	-	-
粘聚力	c'_{ref}	2	-	kN/m^2
摩擦角	φ'	32	-	度
剪胀角	ψ	2	-	度

地下水				
数据集	-	USDA	-	-
模型	-	Van Genuchten	-	-
土体 - 类型	-	砂土	-	-
渗流参数 - 使用缺省值	-	从数据集	-	-

热				
比热容	c_s	860	900	千焦每吨每开氏度
热导率	λ_s	$4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	千瓦每米每开氏度
土体密度	ρ_s	2.6	2.5	吨/立方米
热力膨胀类型	-	各向同性	各向同性	-
体积热膨胀	α_{sv}	$1.5.10^{-6}$	$0.03.10^{-3}$	1/开氏度

界面				
强度定义	-	刚性	手动	-
界面折减因子	R_{inter}	1.0	0.67	-

初始				
K_0 测定	-	自动	自动	-

18.4 定义结构单元

在分阶段施工期间，船闸将被建模为混凝土块。

1. 进入**结构模式**。

2. 单击边栏中的**创建土体多边形**按钮，然后选择**创建土体多边形**选项。
3. 单击 (0 -5)、(5 -5)、(5 0)、(5.5 0)、(6 -6)、(0 -6) 和 (0 -5)，在绘图区域中定义船闸。

> **注释:**
>
> 可以选择**捕捉**选项，并且将**间距**设置为 0.5 即可创建多边形。

将在**分阶段施工**的后期分配**混凝土**材料。

4. 单击侧边工具栏中的**创建线**按钮。
5. 在展开的菜单中选择**创建热流边界条件**选项。
6. 在垂直边界和底部边界（X_{min}, X_{max} 和 Y_{min}）创建热流边界。
7. 垂直边界的**行为**缺省选项为**关闭**。
8. 选择底部边界，在**选择浏览器**中将**行为**设置为**温度**。
9. 将参考温度 T_{ref} 设置为 283.4 K，如图 250(第 245 页) 所示。

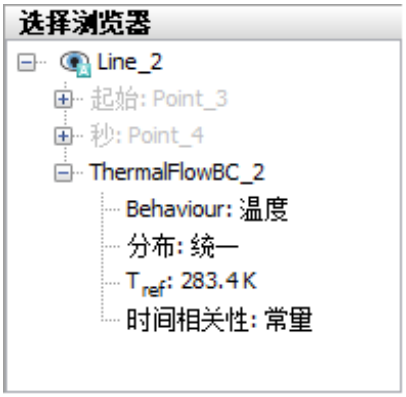


*图 250: **选择浏览器**中的热流边界条件*

模型的几何图形现已完成，如图 251(第 245 页) 所示。

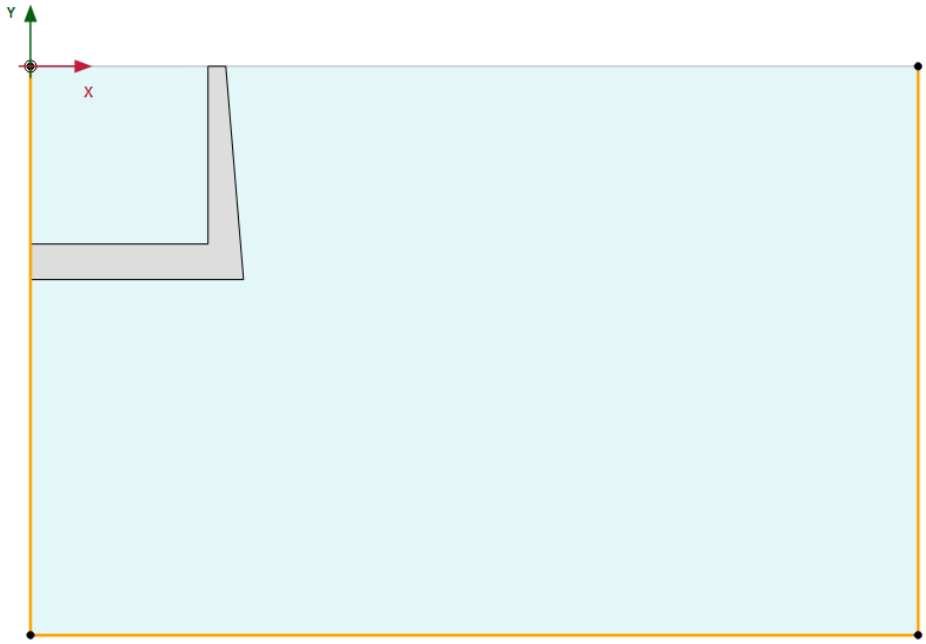


图 251: 模型的几何图形

18.5 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 选择表示混凝土块的多边形，然后将**选择浏览器**中的**粗糙因数**设置为 0.25。
3. 单击**生成网格**按钮 以生成网格。本例中使用了**中**的缺省单元分布。
4. 单击**查看网格**按钮，查看网格。
   生成的网格如图 252(第 246 页) 所示。

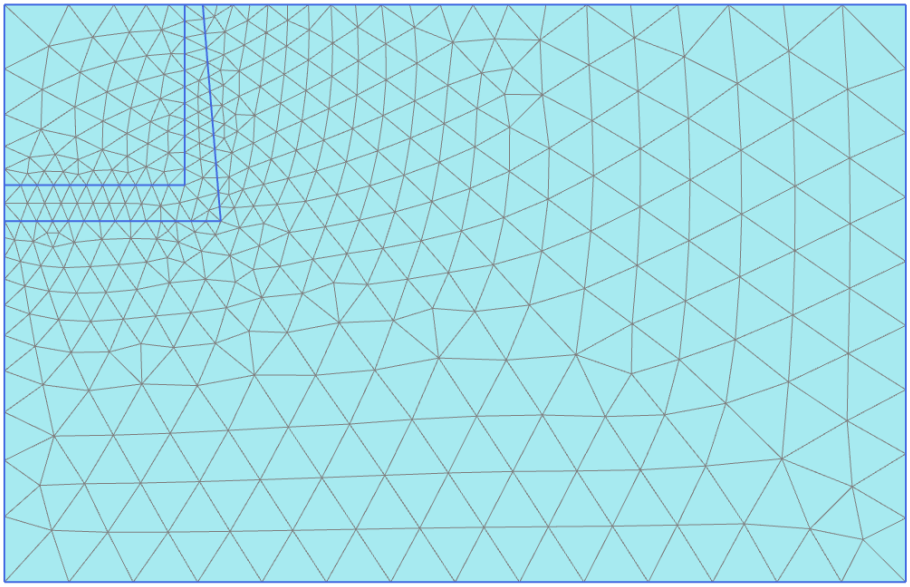


图 252: 生成的网格

5. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

18.6 定义并执行计算

此教程中的计算分为三个阶段。在塑性计算中激活混凝土锁，然后将温升定义为流固耦合分析。

18.6.1 初始阶段

1. 单击**分阶段施工**选项卡，继续定义计算阶段。
2. 双击**阶段浏览器**中的**初始阶段**。
3. 在此示例中，使用了**计算类型**和**孔压计算类型**缺省选项。
4. 选择**热计算类型**中的**地温梯度**选项，然后关闭**阶段**窗口。

5. 在**分阶段施工**中，激活**模型条件**子树下的**热流**，并将 T_{ref} 值设置为 283 度。h_{ref} 和**地温梯度**缺省值有效。热流参数如图 253(第 247 页) 所示，初始阶段的模型如图 254(第 247 页) 所示。

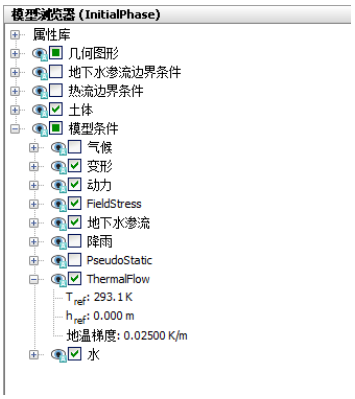


图 253: "模型浏览器"中的热流

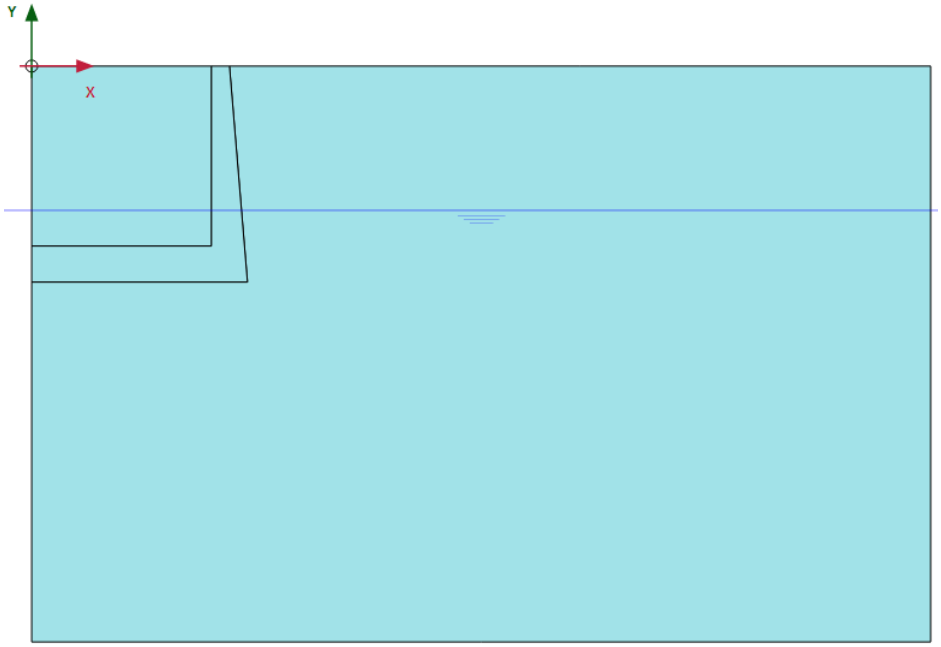


图 254: 初始阶段

18.6.2 第 1 阶段：施工

1. 单击**添加阶段**按钮创建一个新的阶段 (Phase_1)。
2. 在**阶段浏览器**中双击 Phase_1。
3. 在**阶段**窗口中输入阶段 ID 相应名称并选择**稳态地下水渗流**作为**孔压计算类型**。
4. 将**热计算类型**设置为**稳态热流**。
5. 请确保**将位移重置为零**并且已选择**忽略吸力**选项。

6. 在**分阶段施工**模式中，为已创建的代表导航锁的多边形分配**混凝土**数据集，如图 255(第 248 页) 所示。

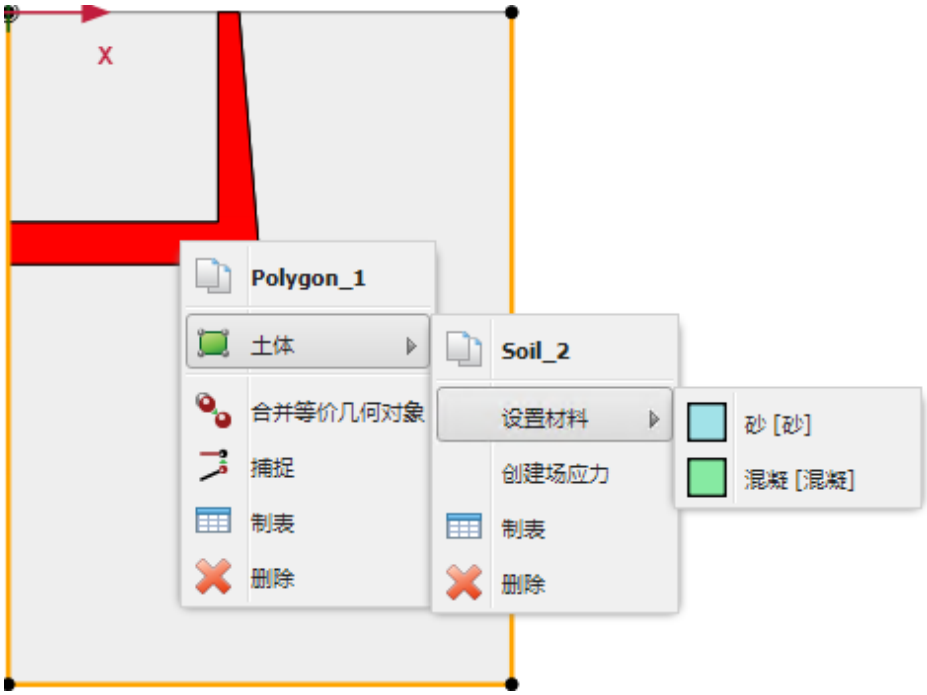


图 255: 混凝土数据集作为多边形材料

7. 右键单击被多边形截断的土体类组并从显示的菜单中选择**取消激活**选项。
8. 在**选择浏览器**中，将该类组的**水分条件**设置为**干**。
9. 在**模型浏览器**中，激活所有的**热流边界条件**。
10. 在**模型浏览器**中，激活**模型条件** > **气候**条件。
11. 将**气温**设置为 283 K，并且将**表面传递**设置为 1 kW/m^2/K，如图 256(第 249 页) 所示。

    这将定义地表面和锁内部的热条件。

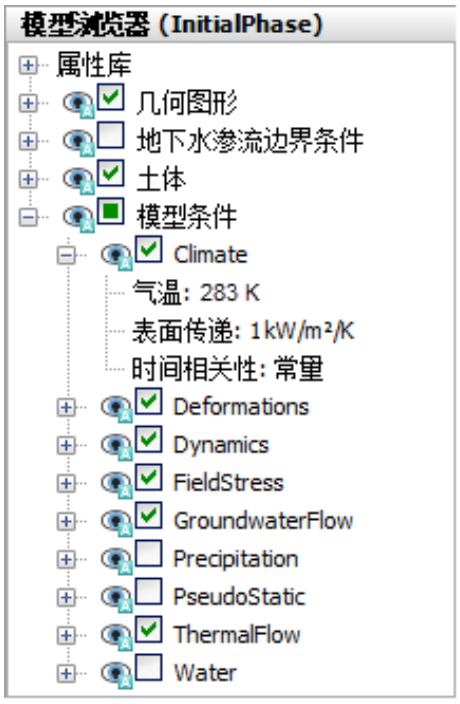


图 256: Phase_1 的模型条件

12. 取消激活**热流**选项。这是因为在稳态热流计算中使用了包括气候条件在内的热流边界条件，而不是地温梯度选项。

图 257(第 249 页) 显示了 **Phase_1** 完成时的模型。

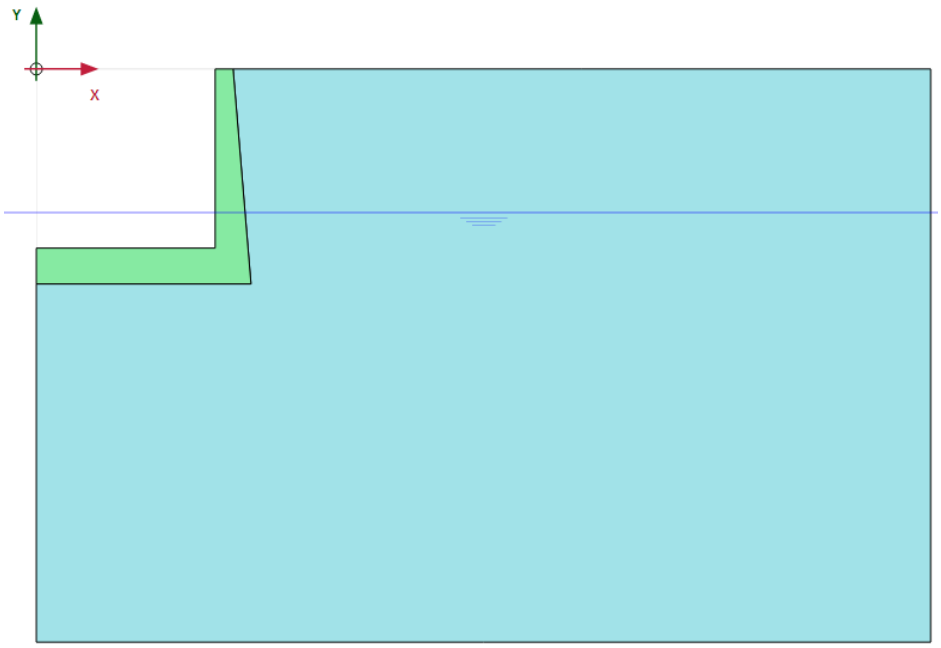


图 257: Phase_1 完成时的模型

18.6.3 第 2 阶段：加热

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段 (Phase_2)。
2. 在**阶段浏览器**中双击 Phase_2。
3. 将**计算类型**设置为**流固耦合**。
4. 将**热计算类型**设置为**使用前一阶段的温度**。这表明需要考虑温度，并且初始温度取自前一阶段。
5. 将**时间间隔**设置为 10 天。
6. 请确保在**变形控制参数**子树中选择了**将位移重置为零**和**重置小应变**选项。缺省情况下，**忽略吸力**选项处于未选中状态。
7. 在用于该阶段的**气候**中定义了**时间相关性**温度函数。请按照下列步骤创建温度函数。
   a. 在**模型浏览器**的**属性库**中右键单击**热函数**选项，并在显示的菜单中选择**编辑**选项。将显示**热函数**窗口。
   b. 在**温度函数**标签页中，通过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。
   c. 该信号使用**谐波**缺省选项
   d. **振幅**指定值为 15，**周期**指定值为 40 天。

   图 258(第 250 页) 中显示了一个显示已定义函数的图形。由于该阶段的时间间隔为 10 天，因此该阶段仅考虑四分之一温度循环，即 10 天后温度升高 15 度。

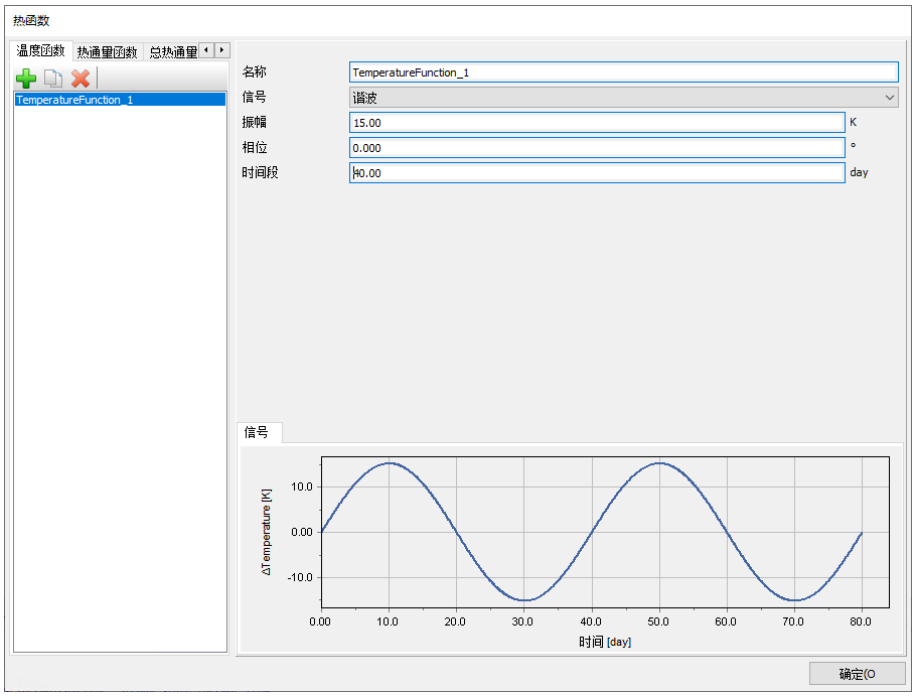


图 258: 温度函数

   e. 单击**确定**关闭**热函数**窗口。
8. 在**模型浏览器**中展开子树**模型条件**，如图 259(第 251 页) 所示。
9. 在**气候**选项中将**时间相关性**设置为**时间相关**并指定创建的温度函数。

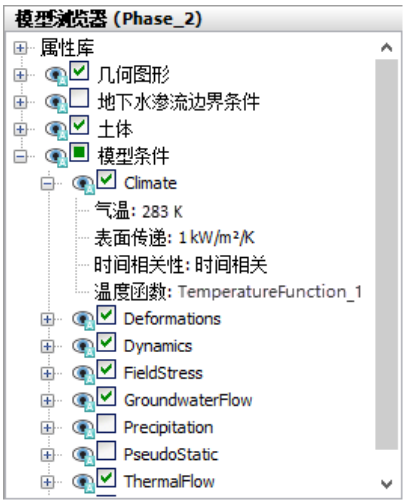


图 259: Phase_2 的模型条件

计算定义已完成。

18.6.4 执行计算

在开始计算之前，建议为今后生成曲线选择节点或应力点。

1. 单击侧面工具栏中的**为曲线选择点**按钮，然后选择曲线的特征点（例如，在挖方顶部，(5.0，0.0)）。
2. 单击**计算**按钮计算项目，将显示一条关于**流固耦合**分析中使用的不同应力类型的警告。出现此警告是因为**流固耦合**分析始终使用吸力进行计算，而其他计算类型缺省情况下不计算吸力，并且有吸力和无吸力的混合阶段可能会导致异常结果。但是，由于本教程中处理的是砂土，吸力的影响非常小，因此可以忽略此警告。
3. 计算完成后，单击**保存**按钮，保存该项目。

18.7 结果

在**阶段浏览器**中，选择**初始阶段**并单击工具栏上的**查看计算结果**按钮。在输出程序中，选择菜单**应力** > **热力流** > **温度**。

图 260(第 252 页) 显示了初始温度分布，该分布由地表参考温度和地温梯度获得。因此模型的地表温度为 283.0 K，底部温度为 283.4 K。

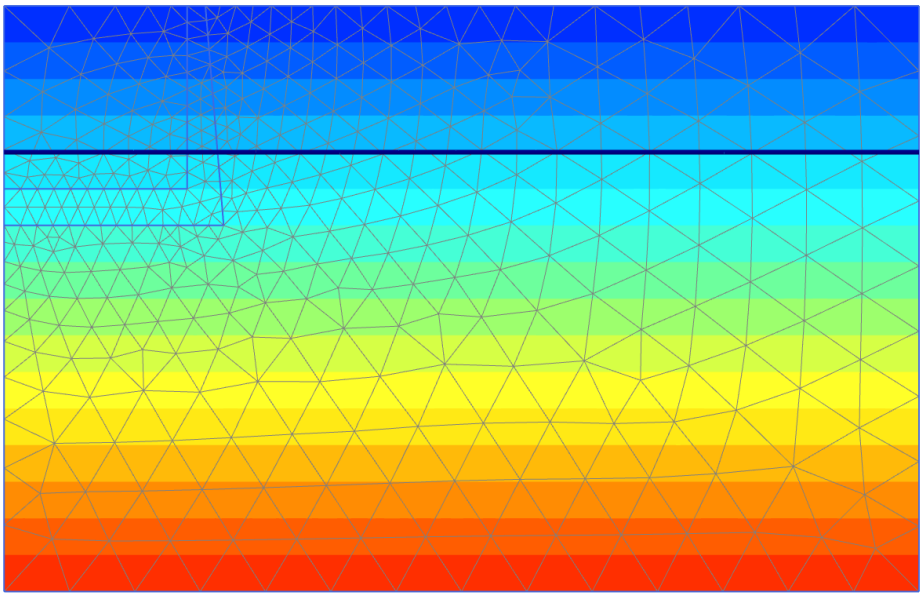


图 260: 初始温度分布

图 261(第 252 页) 显示了使用稳态热流计算从 Phase_1 获得的温度分布。实际上，顶部和底部的温度等于**初始阶段**中定义的温度。但是，由于当前地表温度是根据**气候**条件（气温）来定义的，因此该温度也应用于船闸内侧，并会影响地面的温度分布。

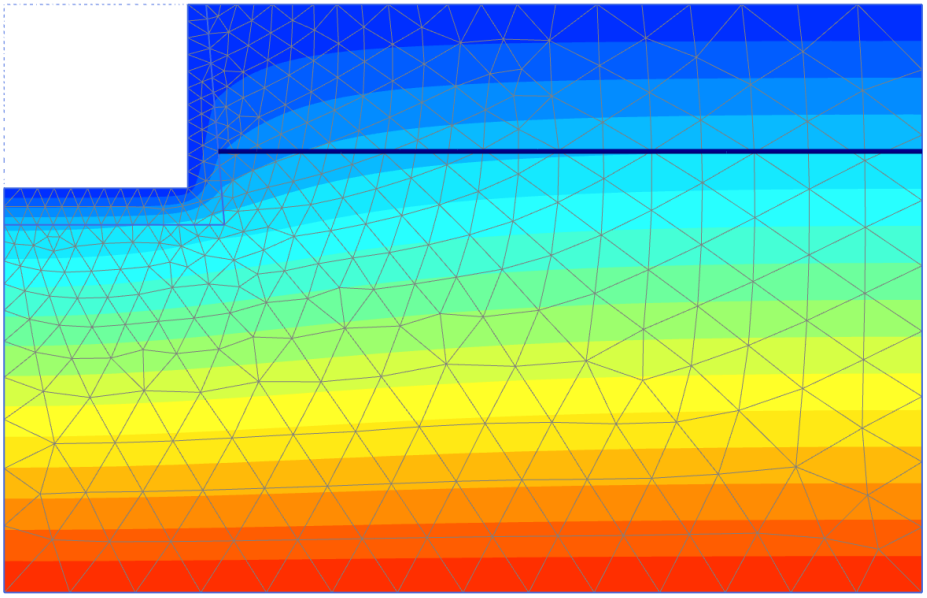


图 261: Phase_1 中的稳态温度分布

在 Phase_2 中获得了最需要的结果，其中**气候**条件下的气温从 283 K 逐渐升至 298 K（由波幅为 15K 的四分之一谐波周期定义）。图 262(第 253 页) 显示了地表温度随时间的变化。

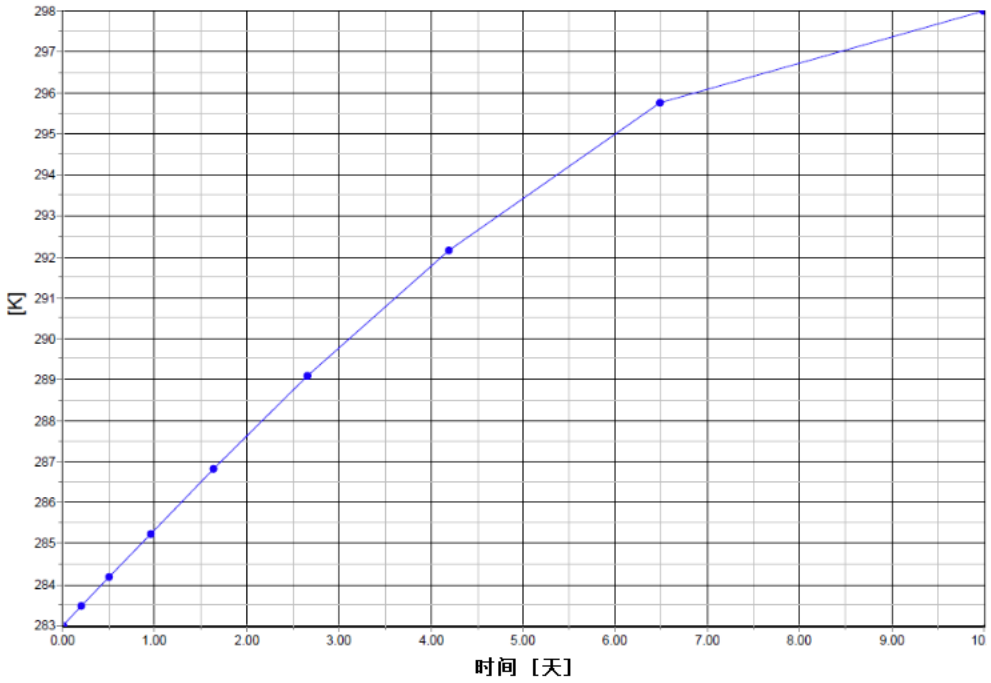


图 262: A 点的温度分布随时间变化

由于混凝土块内部温度急剧升高，而外侧（土体侧）保持“冷”，墙体将向土体弯曲。图 263(第 253 页) 显示了 Phase_2 完成时的变形网格。

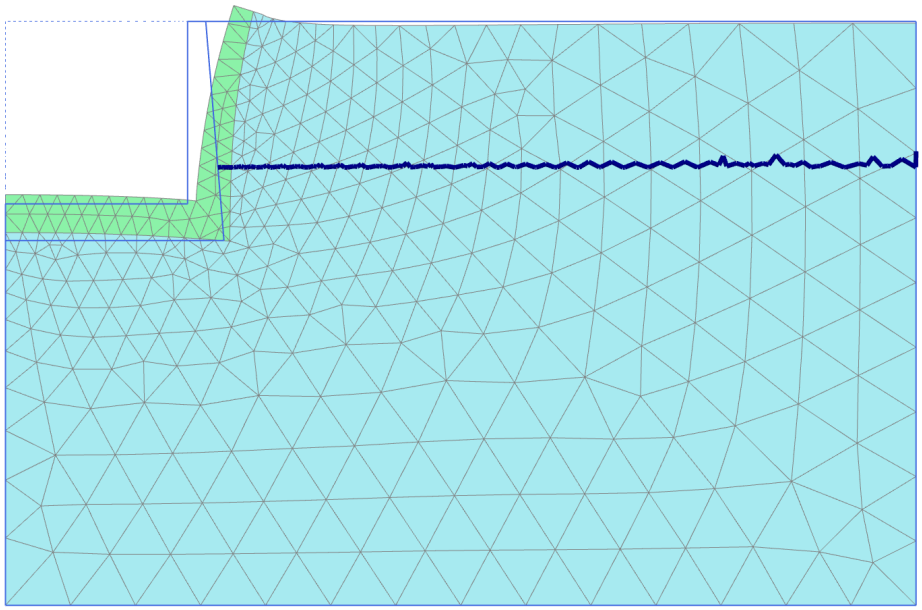


图 263: Phase_2 完成时的变形网格

由于此向后的弯曲，混凝土块正后方土体中的侧向应力将增加，趋向于被动应力状态。

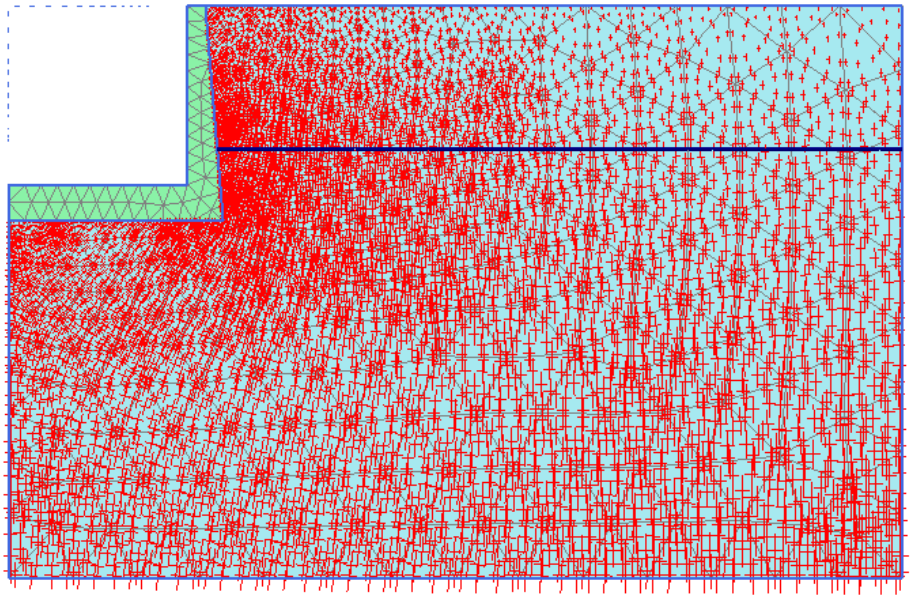


图 264: Phase_2 完成时在主方向的有效主应力

注释: 请注意，图 264(第 254 页) 的可视化效果不同，因其显示了多孔材料中的应力。可以在**视图** > **设置**的**结果**选项卡上对其进行修改（有关详细信息，请参见参考手册）。

注释: 请注意，图 264(第 254 页) 显示了所有应力点的主应力，而缺省情况下，仅显示 3 个中心应力点的主应力。可以使用导航栏上的 和 按钮对其进行更改。

19 隧道建造中的冻结管 [ULT]

本教程说明了由于地面冻结而引起的地下水渗流与热流耦合的变化。使用冻结管建造隧道。首先在土体中安装冻结管，使土体冻结并防水，以便建造隧道。这种建造方法需要大量能量来冷却土体，因此，通过模拟存在地下水渗流时的冷却行为，可以设计出一个最佳冻结系统。

目标：

- 对土体冻结和热流与地下水渗流之间的耦合进行建模
- 对未冻水含量进行建模。
- 使用命令行进行结构定义。

几何图形

在本教程中，隧道半径为 3.0 米，建造位置位于 30 米深的土层。地下水从左至右渗流，影响土体的热行为。首先，土体将经历冻结管带来的低温，土体充分冻结后便可进行隧道建造。后者不包括在本教程中。

由于地下水渗流引起温度分布不对称，因此需要模拟整个几何图形，而在以前的示例中，仅模拟几何图形的一半便已足够。项目的几何图形如图 265(第 255 页) 所示。

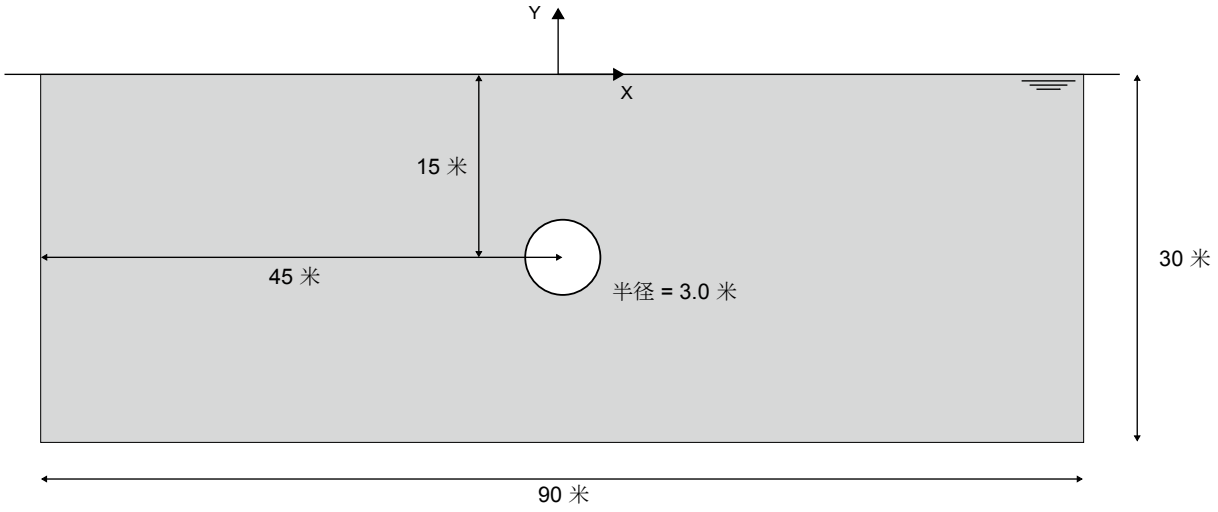


图 265: 工程几何图形

19.1 创建新项目

1. 启动输入程序，然后从**快速启动**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. 在**模型**页面中，**模型**和**单元**的缺省选项用于此项目。本教程中也使用了单位的缺省选项。请注意，**质量**单位自动设置为**吨**。

4. 将模型**等高线**设置为 x_{min} = -45 m，x_{max} = 45 m，y_{min} = -30 m 以及 y_{max} = 0 m。
5. 在**常量**页面中，将 T_{water} 和 T_{ref} 设置为 283 K，其他常量保持缺省值。常量描述参见参考手册。
6. 单击**确定**，关闭**项目属性**窗口。

19.2 定义土壤地层学

要定义土壤地层学，请执行以下操作：

1. 单击**创建钻孔**按钮 并在 x = 0 处创建钻孔。
   将弹出**修改土层**窗口。
2. 创建一个单一的土层，顶层 0 m，底层 -30 m。设置地面层 (0 m) 的水头。

19.3 创建和分配材料数据集

1. 单击**修改土层**窗口中的**材料**按钮 。
2. 使用表 45 (第 256 页)中的参数为**通用参数**和**地下水**页面定义土体数据集。

表 45: 材料属性

参数	名称	砂土	单位
常规			
土体模型	-	摩尔-库伦	-
排水类型	-	排水	-
不饱和单位重量	γ_{unsat}	18	kN/m^3
饱和单位重量	γ_{sat}	18	kN/m^3
初始孔隙比	e_{init}	0.5	-
力学			
杨氏模量	E'_{ref}	$100 \cdot 10^3$	kN/m^2

力学			
泊松比	ν	0.3	-
粘聚力	c'_{ref}	0	kN/m^2
摩擦角	φ'	37	度
剪胀角	ψ	0	度

地下水			
分类标准	-	标准	-
土体 - 分类	-	中等	-
渗流参数 - 使用缺省值	-	无	-
水平渗透率	k_x	1	米/天
垂直渗透率	k_y	1	米/天

热			
比热容	c_s	860	千焦每吨每开氏度
热导率	λ_s	$4 \cdot 10^{-3}$	千瓦每米每开氏度
土体密度	ρ_s	2.6	吨/立方米
热力膨胀类型	-	各向同性	-
热膨胀	α_{sv}	$0.015 \cdot 10^{-3}$	1/开氏度
未冻水饱和度法	-	用户定义（见下表）	-

界面			
强度定义	-	刚性	-
热阻因子	$R_{thermal}$	0	平方米开氏度/千瓦

初始			
K_0 测定	-	自动	-

若要模拟在特定温度下流过土体的（流体）水的数量，需要定义一个表格来确定未冻水含量的曲线，该表格要包括特定温度下未冻水的含量值。同样的曲线也可应用于其他项目，因此，可以保存该表格并加载至其他项目的土体属性。有关详细信息，请参阅参考手册。

3. 单击**热力学**选项卡。使用 表 46(第 258 页)中给出的数值完成数据。

表 46: 沙中未冻水含量曲线的输入值

#	温度 [K]	未冻水含量 [-]
1	273.0	1.00
2	272.0	0.99
3	271.6	0.96
4	271.4	0.90
5	271.3	0.81
6	271.0	0.38
7	270.8	0.15
8	270.6	0.06
9	270.2	0.02
10	269.5	0.00

4. 针对**未冻水含量**，在页面底部的下拉菜单中选择**用户定义**选项。
5. 通过单击**增加行**按钮 增加表格的行。使用表 46 (第 258 页)中给出的数值完成数据。
6. 根据表 45 (第 256 页)中给出的数值，输入**界面**和**初始**页面的数值。
7. 单击**确定**关闭数据集。
8. 向土层分配材料数据集。

注释:

可以单击表格中的**保存**按钮保存表格。必须对文件进行适当命名。为了方便起见，请将文件保存在保存项目的同一个文件夹中。

19.4 定义结构单元

通过定义长度与冻结管直径（10 厘米）相似的线进行冻结管建模，包括对流边界条件。为简单起见，本教程中只定义了 12 个冷却元件，但在现实中，为了获得足够的冻土量可能会使用更多元件。

1. 进入**结构模式**。
2. 单击侧边工具栏中的**创建线**按钮。
3. 单击命令行并输入

   线 0 -12.05 0 -11.95

   按 **Enter** 创建第一条冻结管。有关命令行的详细信息，请参阅参考手册 。
4. 复制第一条冻结管 12 次，以此创建其余的冻结管。为此，选择代表刚刚创建的代表冻结管的线。
5. 在侧边工具栏中选择**创建阵列**选项。当我们想创建一圈冻结管时，将**阵列模式**设置为**极**，**中心点**为 (x y) = (0 -15)，**总项数**为 12（原来的线加上 11 条复制的线），最后，当我们想创建一个完整的圈时，必须将**填充角度**设置为 360 度。按“确定”创建另外 11 条冻结管。

6. 使用侧边工具栏中的**选择线**选项，对代表冻结管的 12 条线进行多选。
7. 右键单击所选择的线并选择**热流边界条件**来创建冻结管的热流边界条件。
8. 对于所选择的冻结管，在**选择浏览器**中展开**热流边界条件**的子树。
9. 将**行为**设置为**对流**，T_{fluid} 设置为 250 开氏度，**传递系数**设置为 1.0 千瓦每平方米每开氏度。
10. 单击侧边工具栏中的**创建线**按钮。
11. 在扩展菜单中选择**创建热流边界条件**选项。在绘图区域沿模型周长创建热边界条件，即从 (x y) = (-45 0) 到 (45 0)、(45 -30)、(-45 -30)，然后返回 (-45 0)。
12. 选择刚刚创建的四条边界并右键单击。在弹出菜单中选择**创建**和**创建地下水渗流边界条件**，向热流边界条件添加地下水渗流边界条件。

PLAXIS 2D 允许应用不同类型的**热**边界条件。在本教程中，冻结管将以对流边界条件建模。

1. 对已创建的边界进行多选。
2. 针对**热流边界条件**，将**行为**设置为**温度**，将 T_{ref} 设置为 283 K。

若要分配地下水边界条件，要遵循以下步骤：

1. 对顶部和底部边界进行多选。
2. 针对**地下水渗流边界条件**，将**行为**设置为**闭合**。
3. 选择左边界，将**行为**设置为**流入**，q_{ref} 值为 0.1 米/天。
4. 右边界的缺省行为是**渗漏**。

借助**隧道设计器**创建隧道。由于计算不考虑变形，因此无需向隧道分配板材料。生成的隧道将仅用于在冻结管周围生成更密集和均匀的网格。在任何计算阶段都不会激活隧道，但 PLAXIS 2D 将探测线元素并根据这些元素生成网格。更改管道元素的粗糙因数将导致网格更加密集，但并非更加均匀。

1. 单击侧边工具栏中的**创建隧道**按钮并单击绘图区域中的 (0 -18)。
2. 针对**形状类型**，选择**圆形**选项。注意，缺省选项是**自由**。
3. 本示例使用**定义整个隧道**这个缺省选项。
4. 进入**线段**选项卡并将多选的两条线段的**半径**设置为 3 米。
5. 单击**生成**，在模型中生成定义的隧道。关闭**隧道设计器**窗口。

模型的几何图形如图 266(第 259 页) 所示。

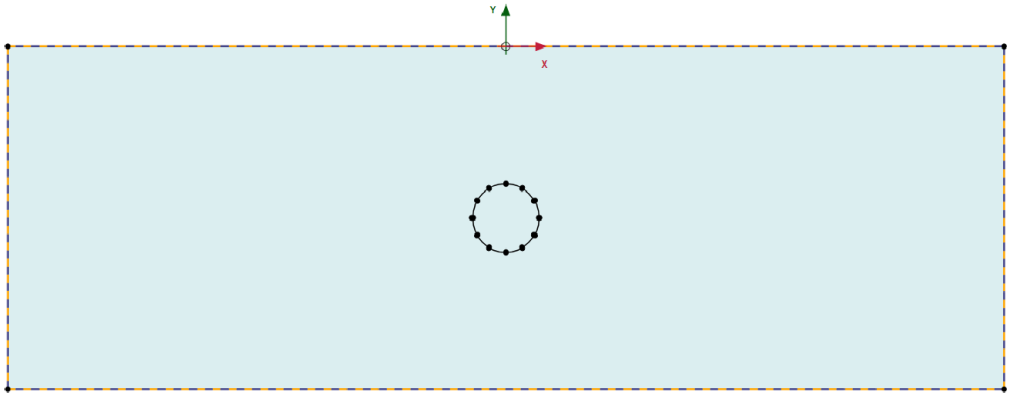


图 266: 模型的几何图形

19.5 生成网格

1. 进入**网格模式**。
2. 单击**生成网格**按钮 以生成网格。本例中使用了**中**的缺省单元分布。
3. 单击**查看网格**按钮，查看网格。

   生成的网格如图 267(第 260 页) 所示。

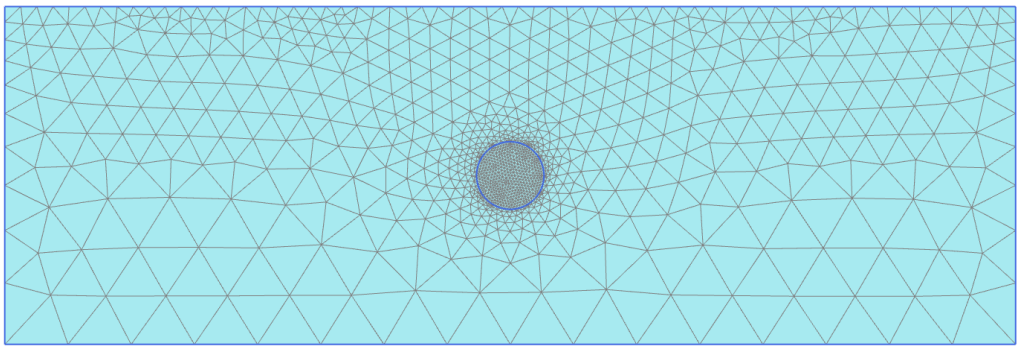


图 267: 生成的网格

4. 单击**关闭**选项卡，关闭输出程序。

19.6 定义并执行计算

本教程的计算在**仅渗流模式**下进行。

19.6.1 初始阶段

1. 单击**分阶段施工**选项卡，继续定义计算阶段。
2. 双击**阶段浏览器**中的**初始阶段**。
3. 在**阶段**窗口中，从**计算类型**下拉菜单中选择**仅水流**选项。
4. 为**热计算类型**选择**地温梯度**选项。
5. 在**分阶段施工**中，激活**模型条件**子树下的**热流**，并将 T_{ref} 的值设置为 283 K，h_{ref} 为 0 m，**地温梯度**为 0 K/m。
6. 初始 阶段的模型如图 268 (第 261 页) 所示。

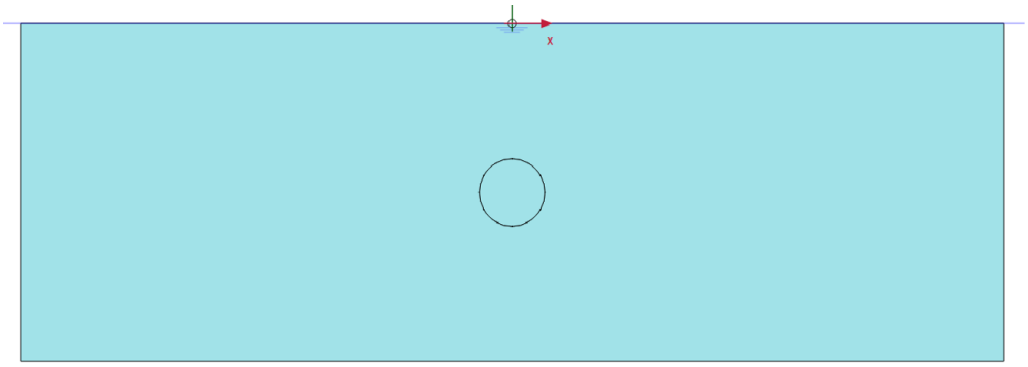


图 268: 初始阶段

19.6.2 第 1 阶段：瞬态计算

1. 单击**添加阶段**按钮，创建新阶段。
2. 双击**阶段浏览器**中的新阶段。
3. 在**阶段**窗口中，为阶段 ID 输入一个适当的名称（如瞬变计算）。
4. 将**瞬变地下水渗流**设置为**孔隙压力计算类型**的选项。
5. 将**瞬变热流**设置为**热计算类型**的选项。
6. 将**时间间隔**设置为 180 天，**最大存储步数**为 100。这是为了能够在计算后查看中途时间步数。
7. 在**分阶段施工**模式下，单击**模型浏览器**中**热流边界条件**的复选框，激活所有热边界条件。
8. 在**模型浏览器**中，激活**地下水渗流边界条件**子树中对应左、上、右、下边界条件的四个地下水渗流边界条件。

19.6.3 执行计算

在开始计算之前，建议为今后生成曲线选择节点或应力点。

1. 在边栏中单击**为曲线选择点**按钮。至少选择模型中间的节点和曲线的一些特性点（例如两个冻结管之间）。
2. 单击**计算**按钮，计算项目。
3. 计算完成后，单击**保存**按钮，保存该项目。

19.7 结果

本计算要了解的结果可以是两条冻结管之间没有地下水渗流时的时间点、整个模型上的地下水渗流，以及稳态和瞬态计算的温度分布。

要查看输出程序中的结果：

1. 单击工具栏中的**查看计算结果**按钮。

2. 选择菜单**应力** > **热流** > **温度**。
3. 图 269(第 262 页) 为最后一步瞬态计算的温度空间分布。注意，已经关闭了单元轮廓以更好地显示隧道内部土体的温度在冰点以下。

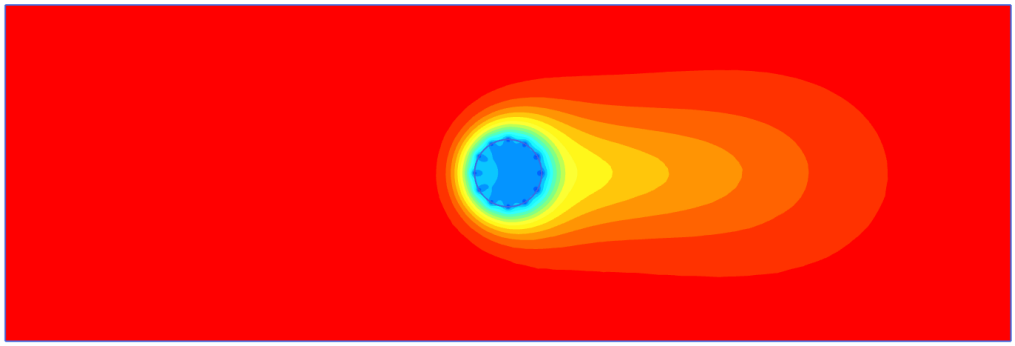


图 269: 瞬态阶段的温度分布

1. 选择菜单**应力** > **地下水渗流** > **|q|**。
2. 选择菜单**查看** > **箭头**或单击工具栏中的相应按钮 显示结果箭头。

在输出程序中，可以查看中间保存步骤的结果。有关详细信息，请参阅参考手册 。可以查看隧道冻结的进展。

图 270(第 262 页) 显示了瞬态计算中间步骤（38 天左右）的地下水渗流场分布。

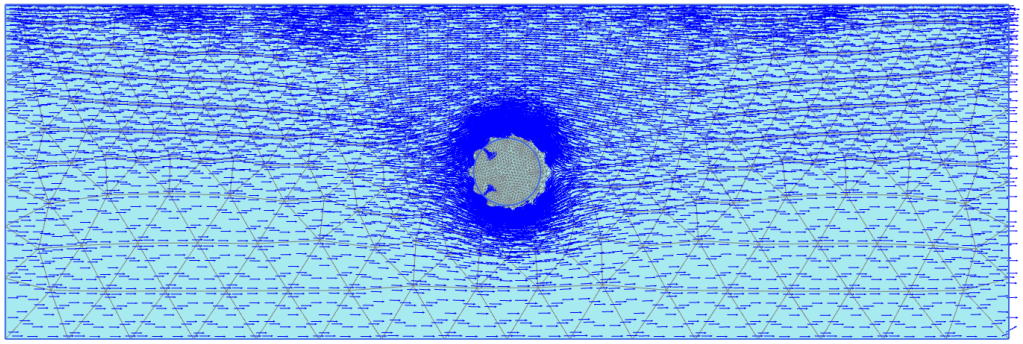


图 270: 中间步骤（t_{approx} 为 38 天）瞬态阶段的地下水渗流场

图 271(第 262 页) 显示了瞬态流计算的最后一个时间步长的地下水渗流场。很明显，整个隧道区域全部冻结，没有渗流。

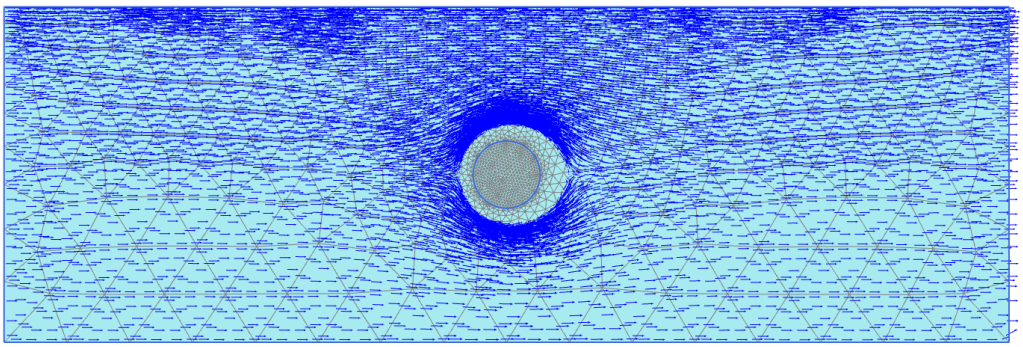


图 271: 180 天后的地下水渗流场

图 272(第 263 页) 显示了隧道中间点的温度随时间的变化。可以看出，温度迅速降至 273 K 左右，此时孔隙水开始结冰。在这个过程中，温度几乎保持恒定且唯一，之后在所有孔隙水结冰后（在 t = 122 秒时），冰的温度进一步降低。

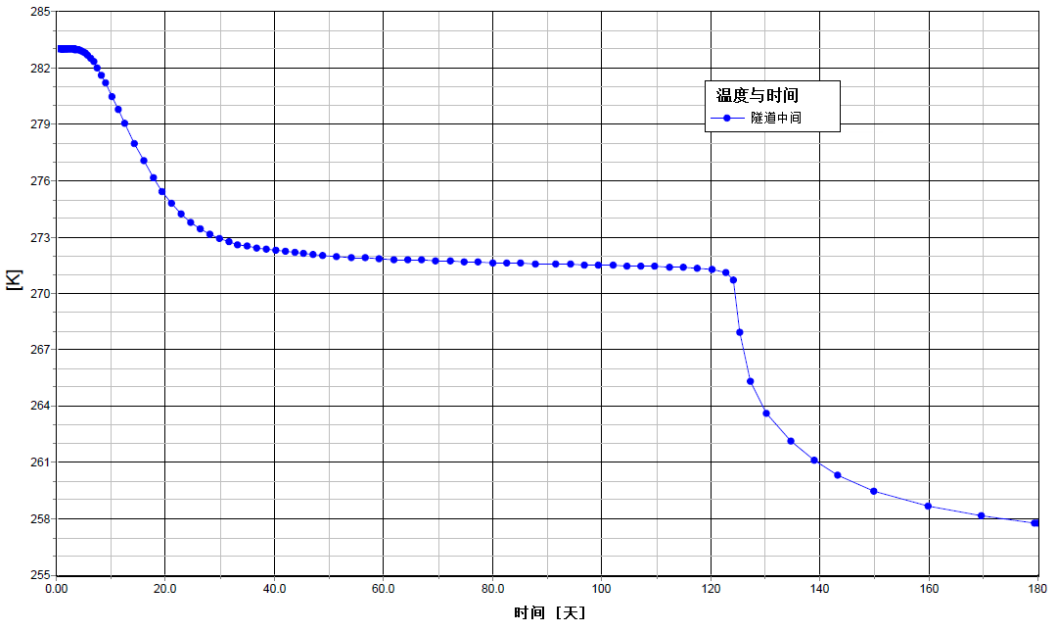


图 272: 隧道中心的温度随时间下降