

岩土工程有限元分析软件

PLAXIS 3D 2016[®]

案例教程

盾构隧道的分步开挖



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

版 权

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

更多信息和此文档的副本可从以下获得：

北京筑信达工程咨询有限公司

北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层 100043

电话：86-10-6892 4600

传真：86-10-6892 4600 - 8

电子邮件：support@cisec.cn

网址：www.cisec.cn

北京筑信达工程咨询有限公司版权所有©, 2017.

目录

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

盾构隧道的分步开挖

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

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

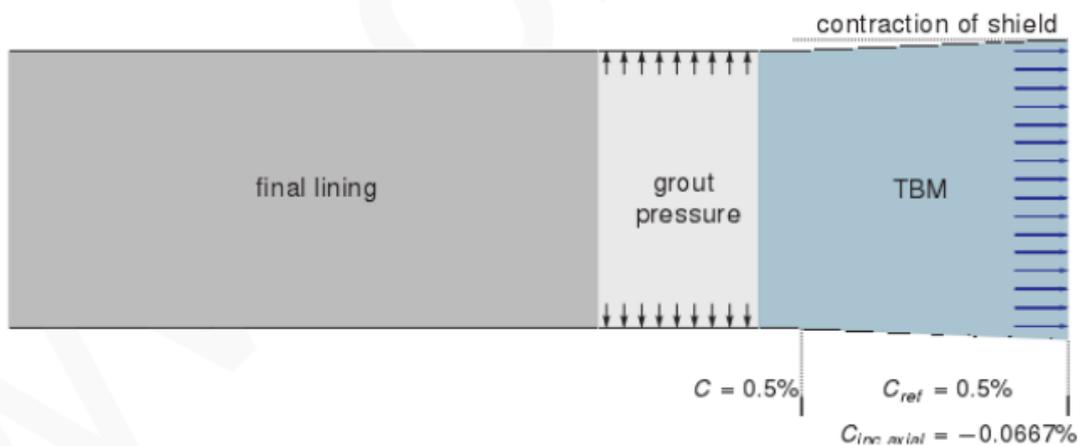


图 5.1 盾构隧道模型的施工步骤

几何模型

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

1.1 工程属性

按照如下步骤定义本例的几何模型：

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

1.2 土层定义

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

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

表 1.1 土层材料特性

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

PLAXIS 3D 2016 案例教程：盾构隧道的分步开挖

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

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

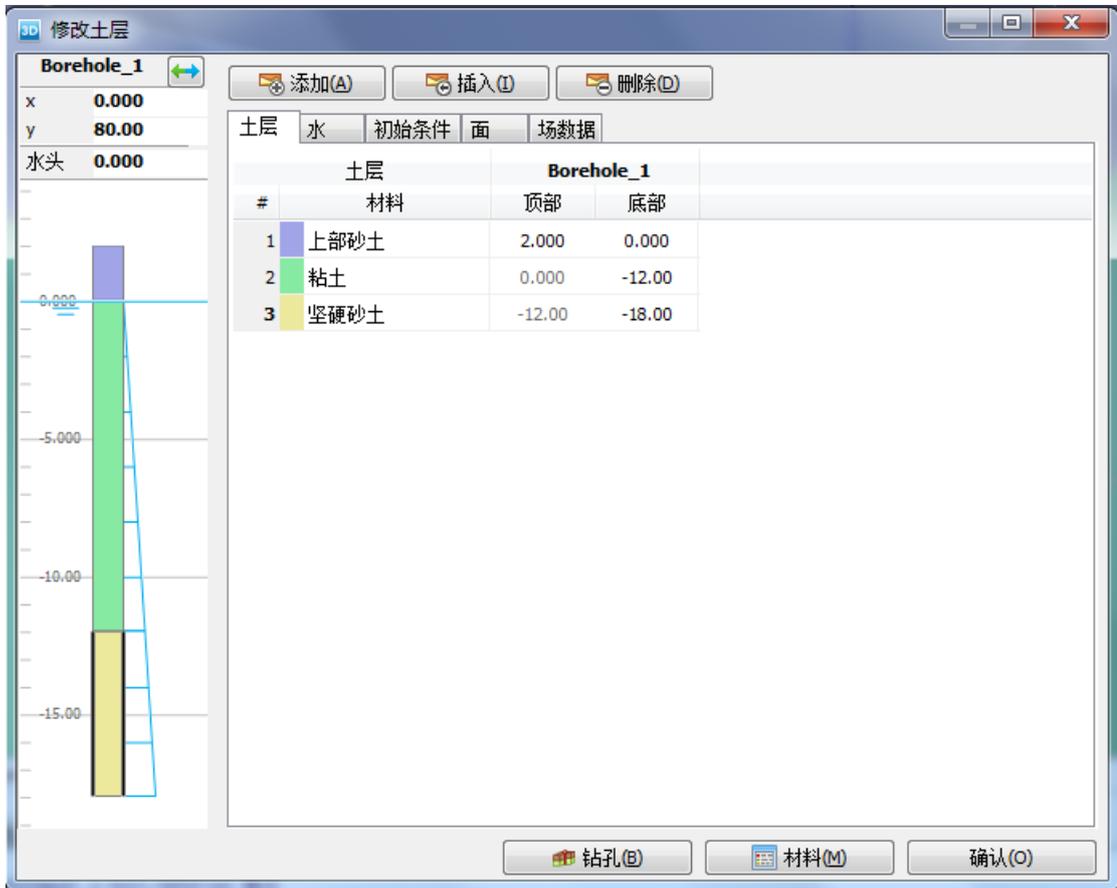


图 5.2 土层分布

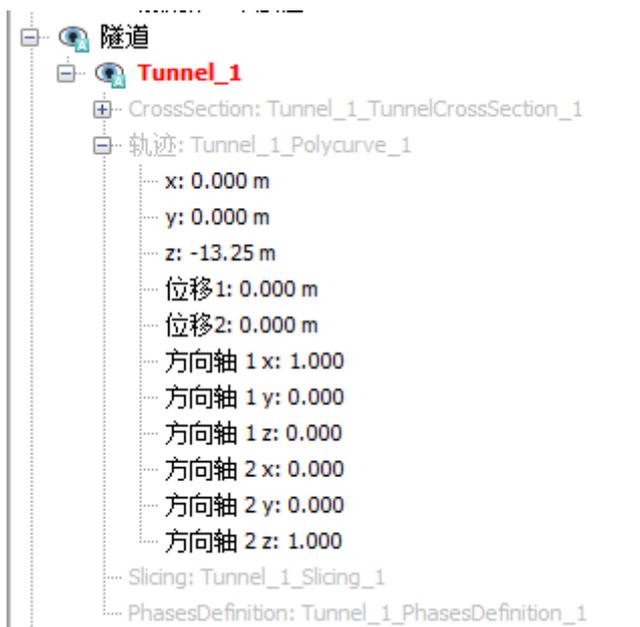
1.3 结构单元的定义

用盾构机进行隧道开挖，盾构机长 9.0m，直径 8.5m。

创建隧道面

在结构模式中定义隧道和盾构机的几何形状。

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



5.3 隧道插入点

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

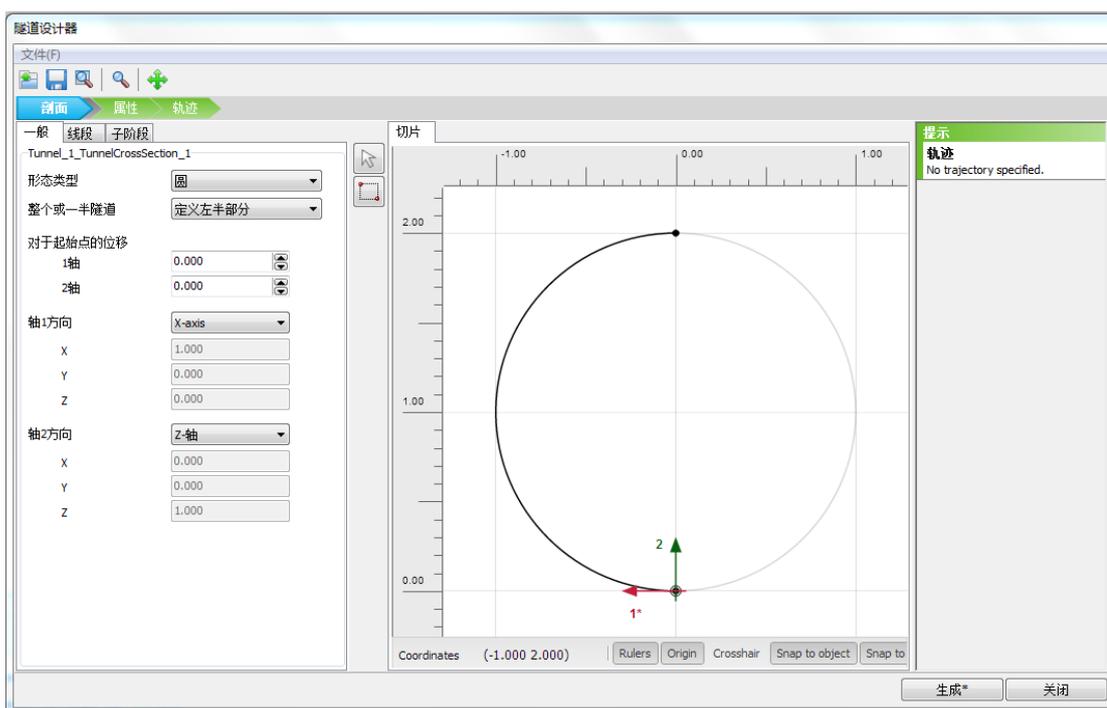


图 5.4 隧道设计器的一般设定页面

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

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

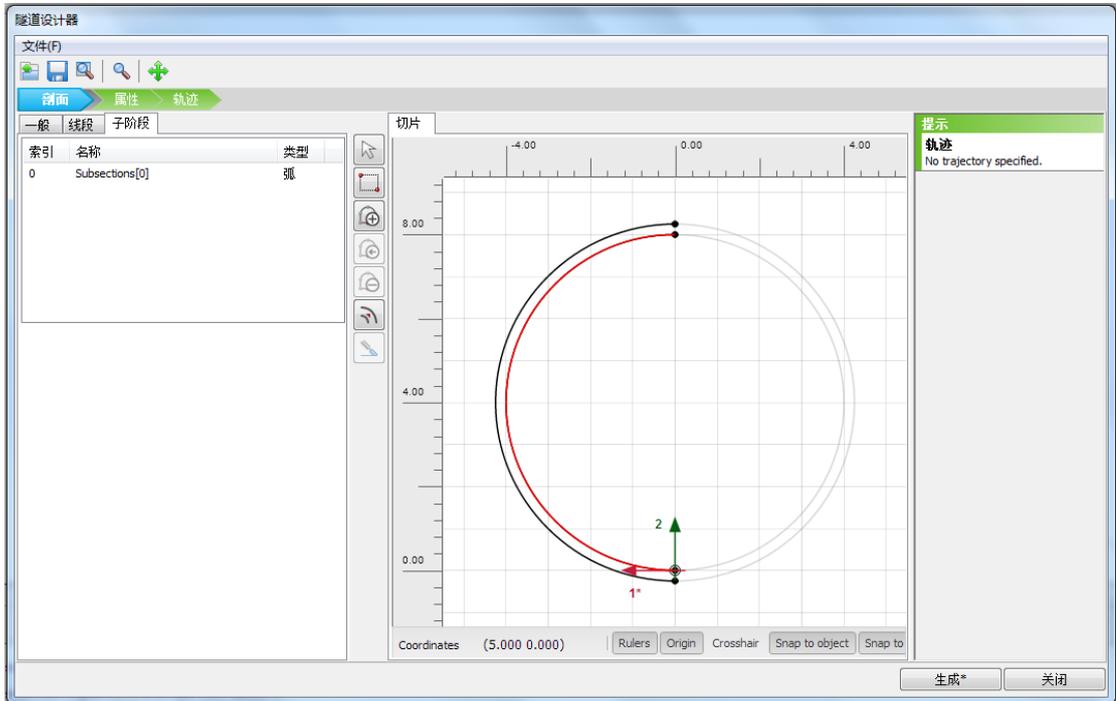


图 5.5 隧道设计器的剖面页面

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

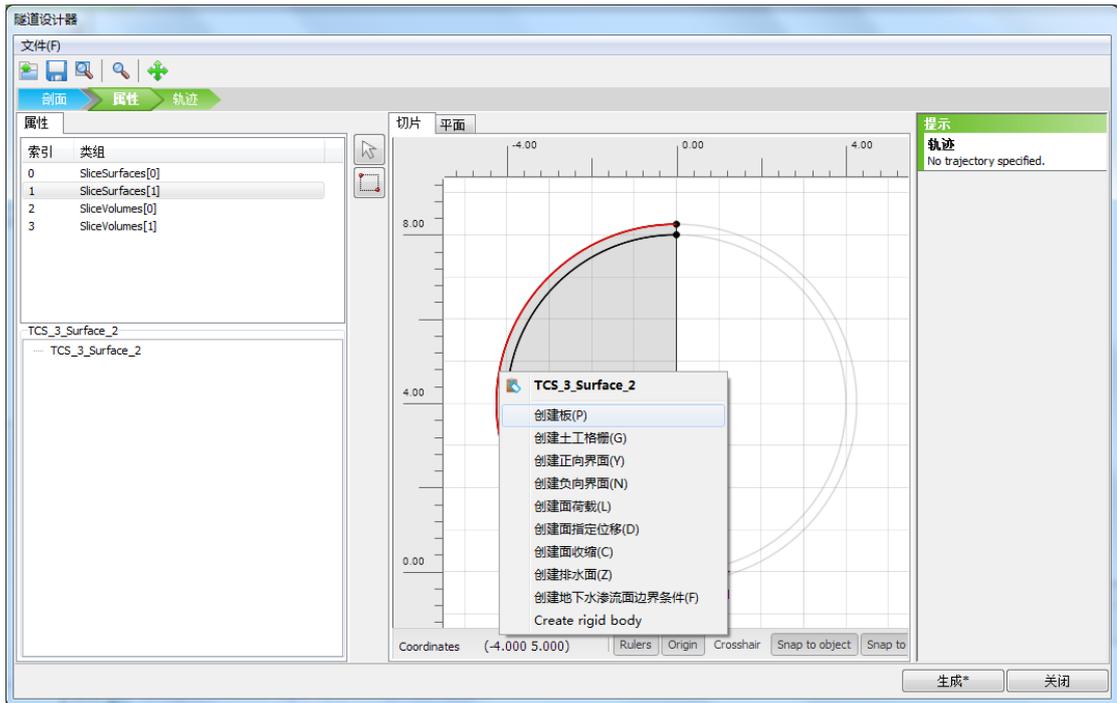


图 5.6 创建板的属性页面

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

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

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

表 5.2 代表 TBM 的板材料参数

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

必须在隧道外侧添加土—结构的相互作用

注：

PLAXIS 3D 2016 案例教程：盾构隧道的分步开挖

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

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

注浆压力

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

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

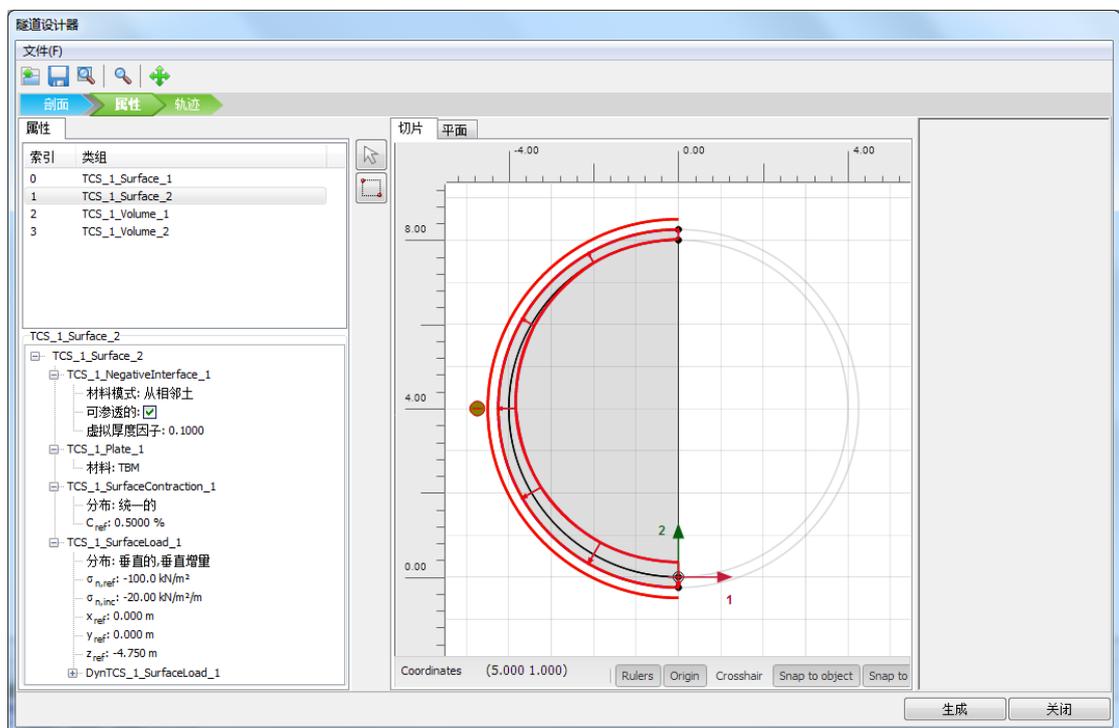


图 5.7 隧道设计器的切片页面

隧道掌子面压力

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

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

-4.75) 作为荷载参考点 (如图 5.8)

千斤顶反力

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

轨迹

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

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

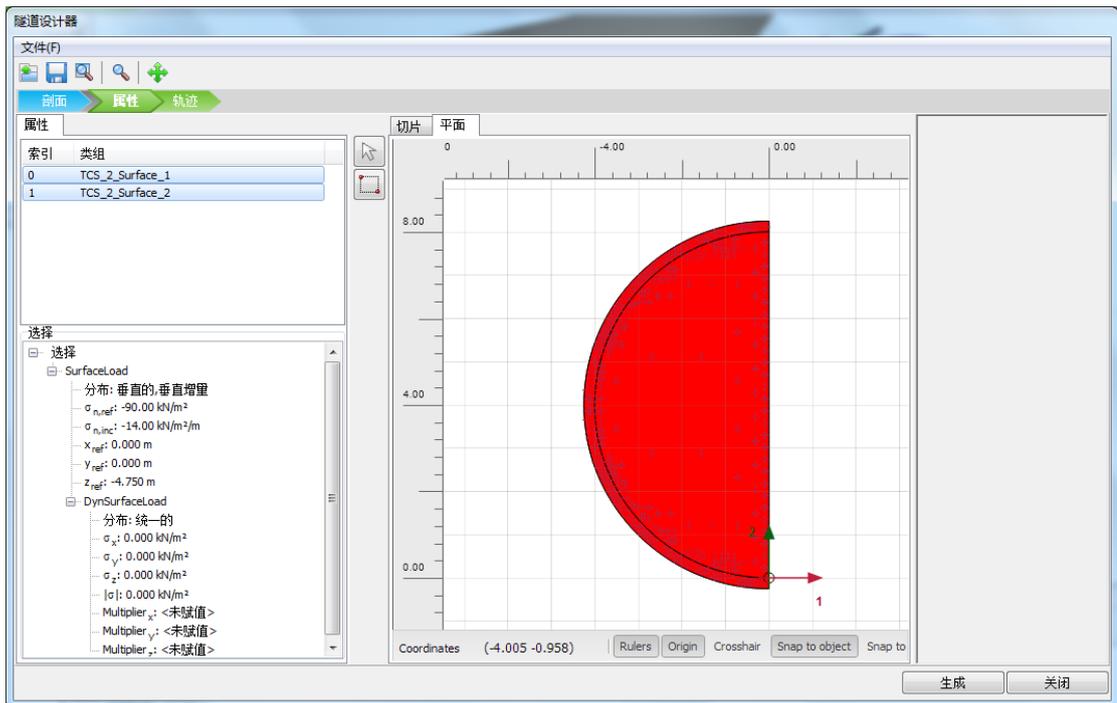


图 5.8 隧道设计器的平面页面

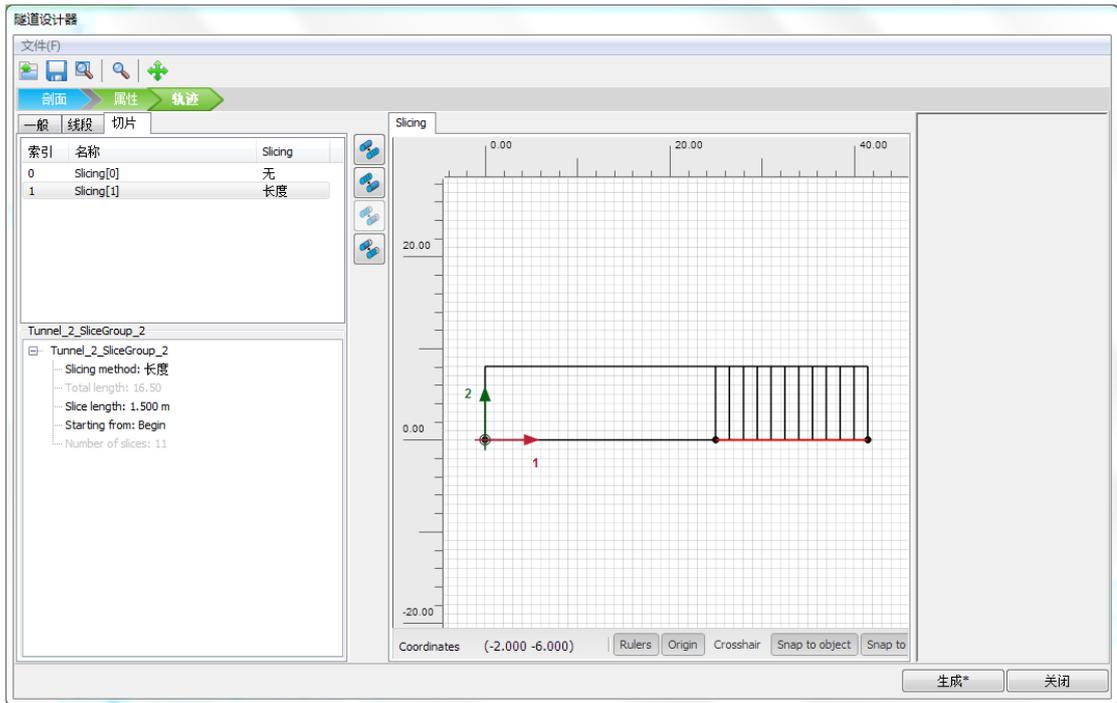


图 5.9 隧道设计器中的轨迹页面

7. 点击生成按钮加入已定义的隧道模型
8. 关闭隧道设计器窗口

在结构模式中建立的模型，如图 5.10 所示。

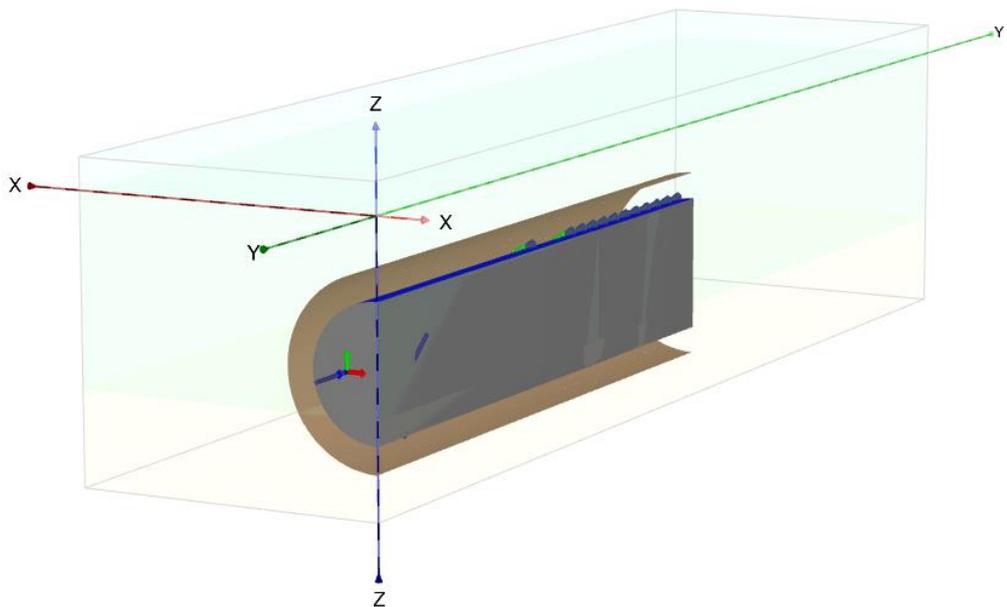


图 5.10 结构模式中所创建的隧道

网格划分

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

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

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

执行计算

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

初始阶段

初始阶段由 K0 过程生成初始应力，设置采用程序默认值。

第一阶段：TBM 初始位置

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

1. 添加第一个计算阶段。

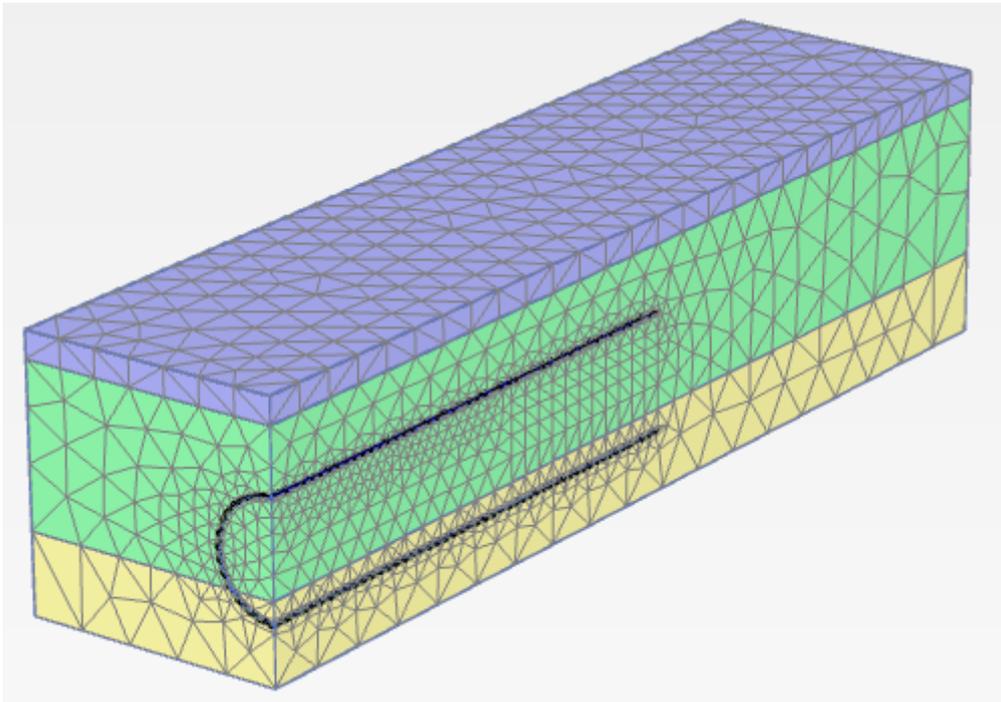


图 5.11 网格划分

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

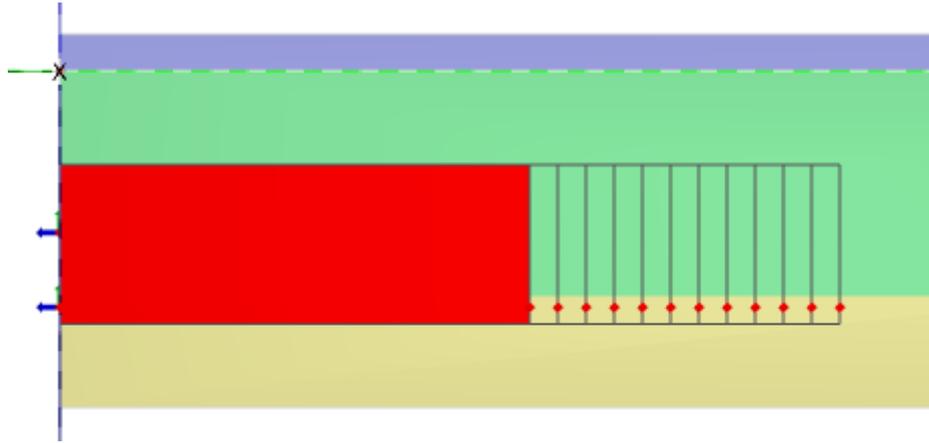


图 5.12 选择土体（0-25m）

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

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

激活隧道前 25m 的界面、板和断面收缩：

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

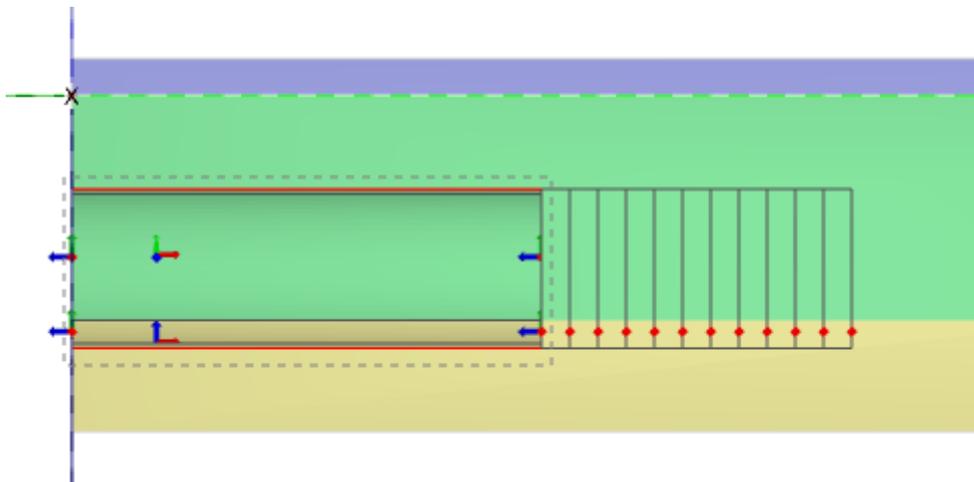


图 5.13 选择板（0-25m）

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

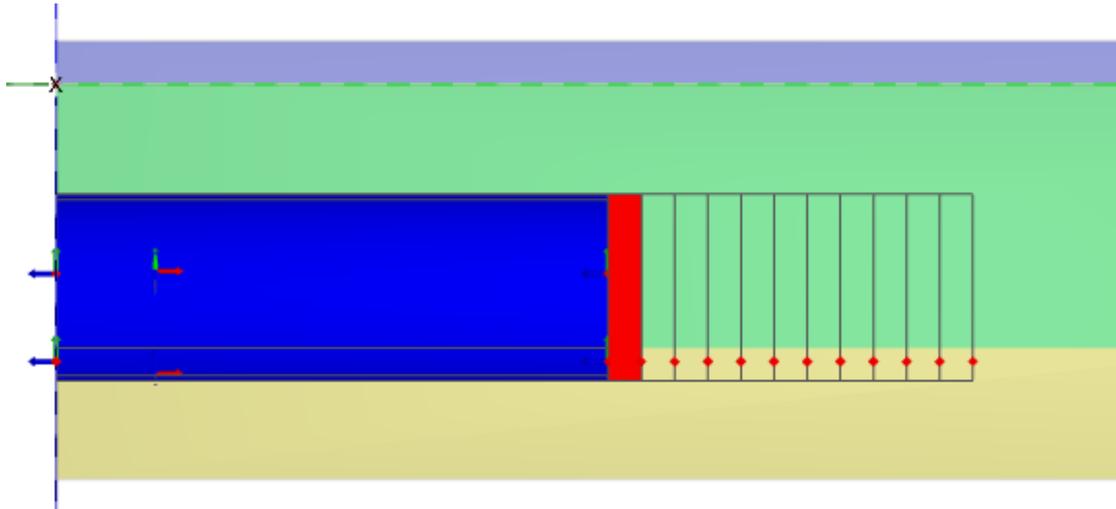


图 5.14 选择土体（25m-26.5m）

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

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

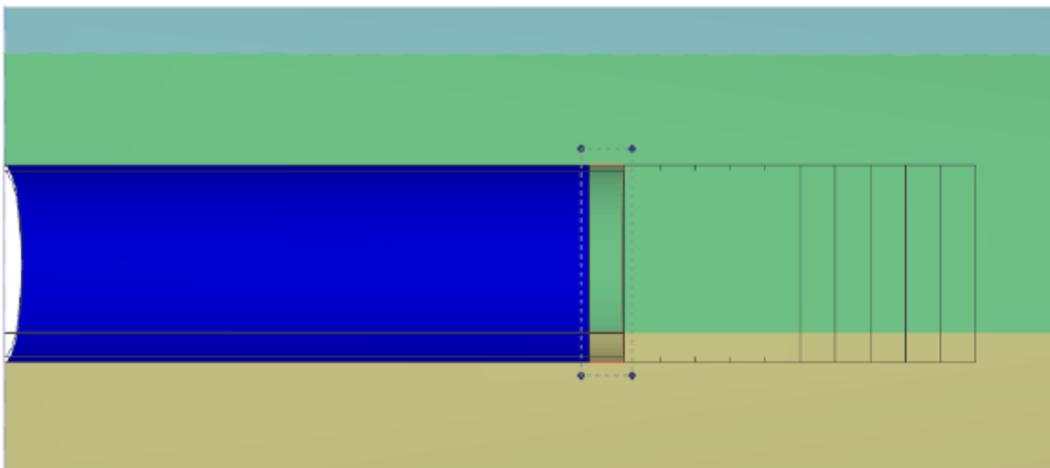


图 5.15 选择板（25m-26.5m）

之后的 6 段（26.5-35.5m）用来模拟 TBM：

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

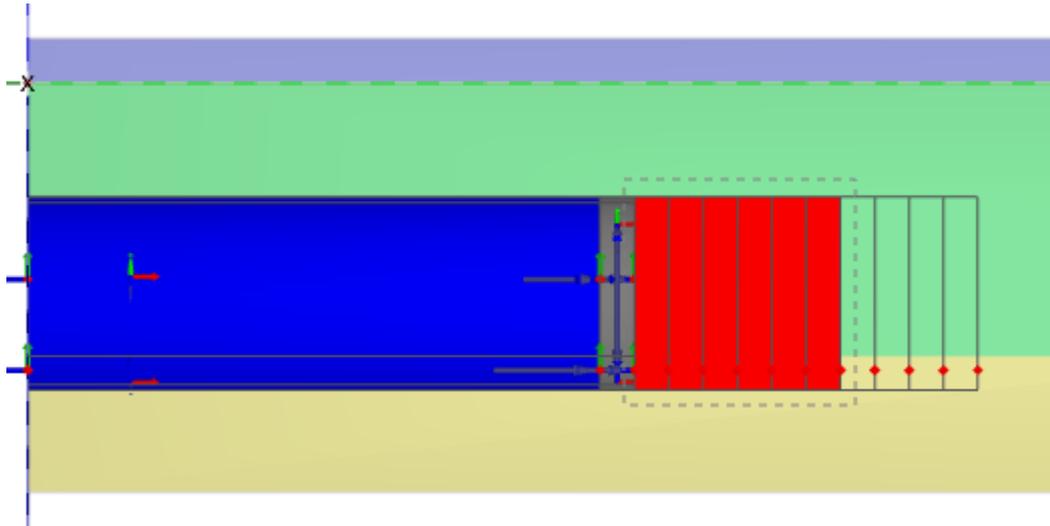


图 5.16 选择土体 (26.5m-35.5m)

9.  选择模型中 26.5m 至 35.5m 之间赋予了板属性的面。

10. 在选择浏览器中激活负向界面、板和断面收缩。

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

11.  选中 28~35.5m 之间的面。

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

13. 第一计算阶段需要定义的最后一部分是保证隧道掌子面稳定的平衡压力:

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

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

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

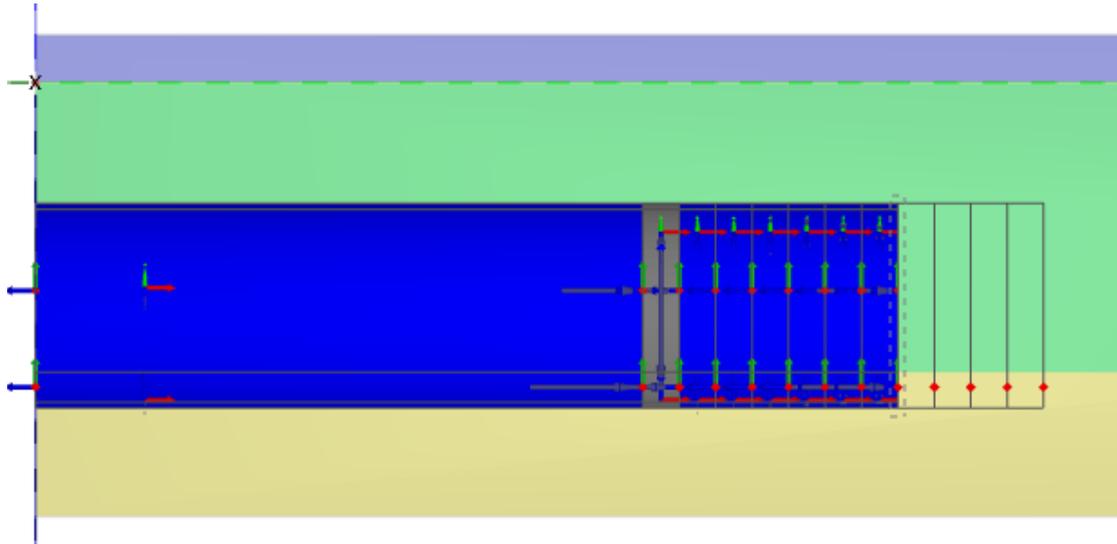


图 5.17 选择 $y=35.5$ 处的隧道掌子面平衡压力

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

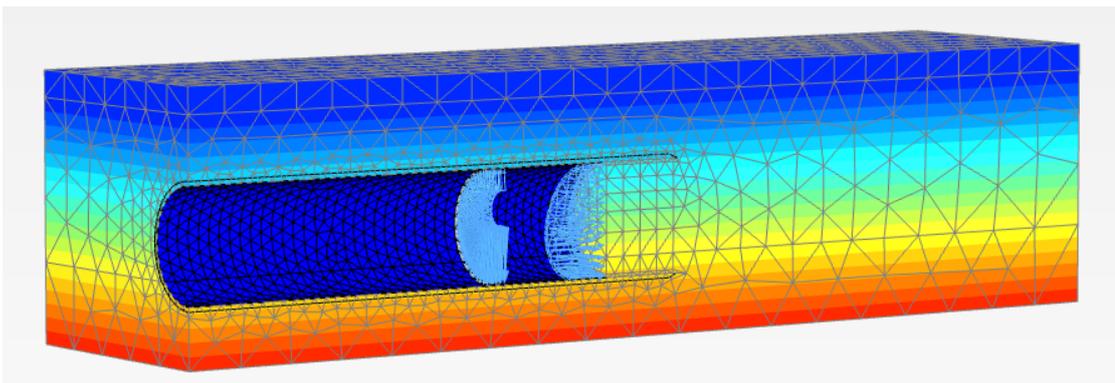


图 5.18 阶段 1 预览

第二阶段：TBM 推进阶段 1

本阶段模拟 TBM 向前推进 1.5m:

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

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

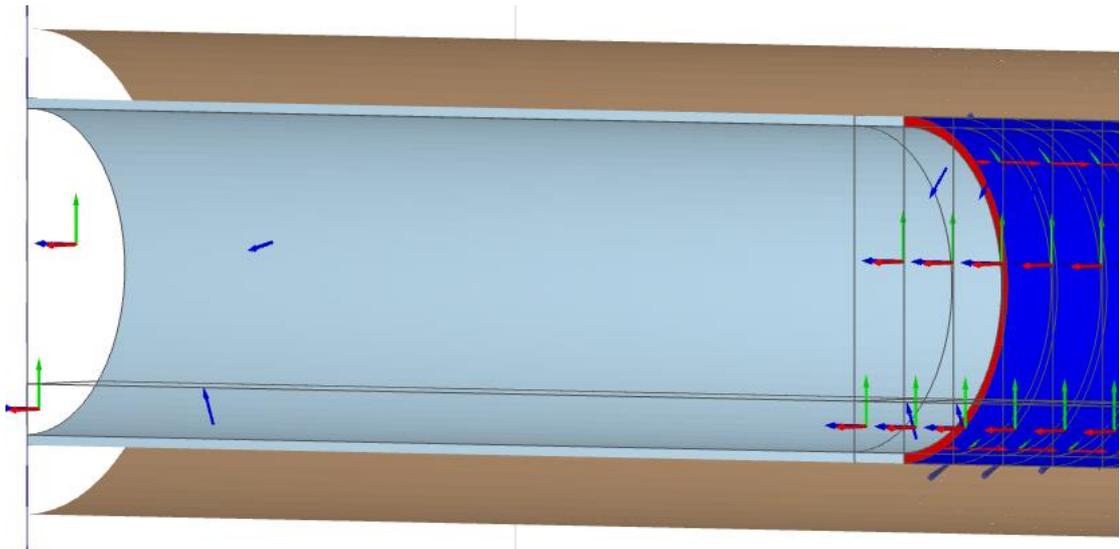


图 5.19 $y=26.5m$ 处的千斤顶反力

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

13. 选择模型中 26.5~28m 之间的面，冻结界面、板和断面收缩。
 14. 激活对应注浆压力的荷载。
- 之后的 6 段（28~37m）对应 TBM：
15. $y=28m$ 至 $y=29.5m$ 段是 TBM 的尾部。选择组成 TBM 的两部分板单元，将断面收缩修改为统一值（Uniform），令 $c_{ref}=0.5\%$ 。
 16.  冻结阶段 1 中激活的隧道平衡压力（ $y=35.5m$ ）。
 17. 本阶段开挖 $y=35.5m$ 至 $y=37m$ 之间的部分。冻结隧道内部空间和对应隧道衬砌的土体，将水力条件设定成干 Dry。
 18. 激活 $y=35.5m$ 至 $y=37m$ 之间的界面、板和断面收缩。
 19. 定义该断面的收缩为：轴增量，令 $c_{ref}=0.5\%$ ， $c_{inc,axial}=-0.0667\%/m$ ，参考位置为 $(0,29.5,0)$ 。
 20. 激活 $y=37m$ 处的隧道平衡压力。这样就完成了 TBM 第一步推进的定义。

5.3.4 第三阶段：TBM 推进阶段 2

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

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

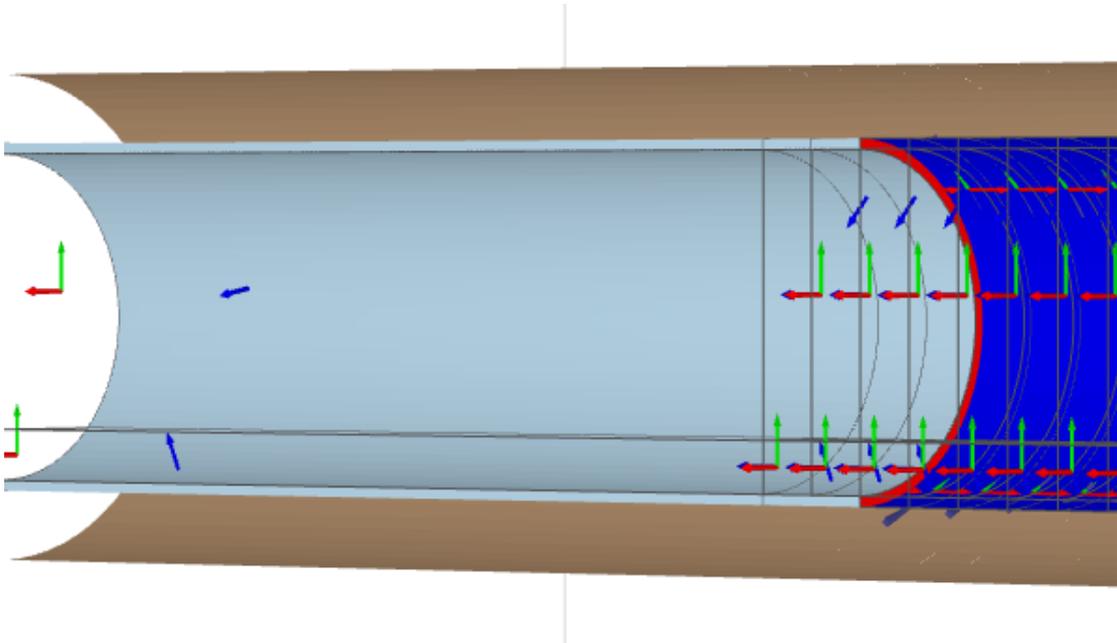


图 5.20 $y=28m$ 处激活的千斤顶反力

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

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

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

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

查看计算结果

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

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

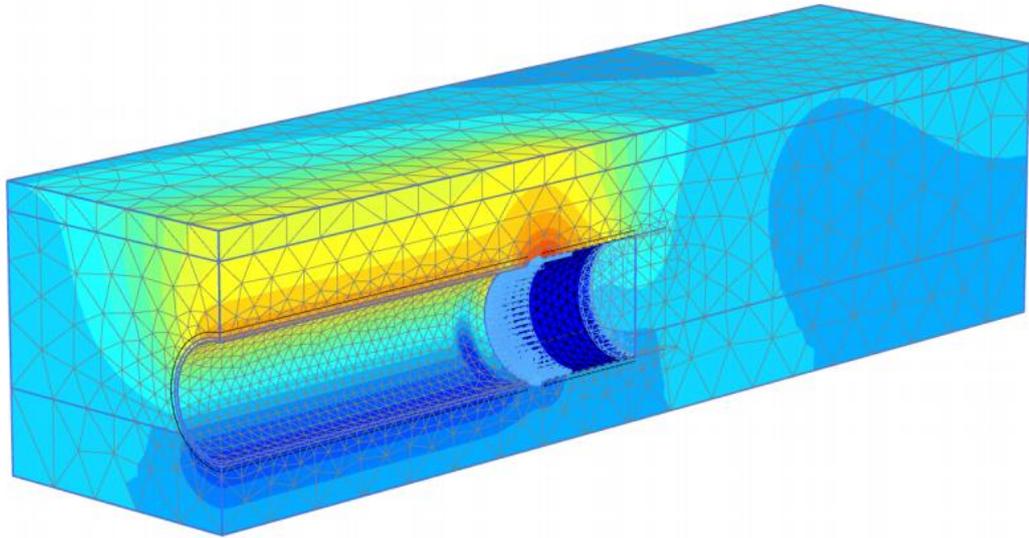


图 5.21 最后一个计算阶段后总竖向位移($u_z \approx 2.5\text{cm}$)

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

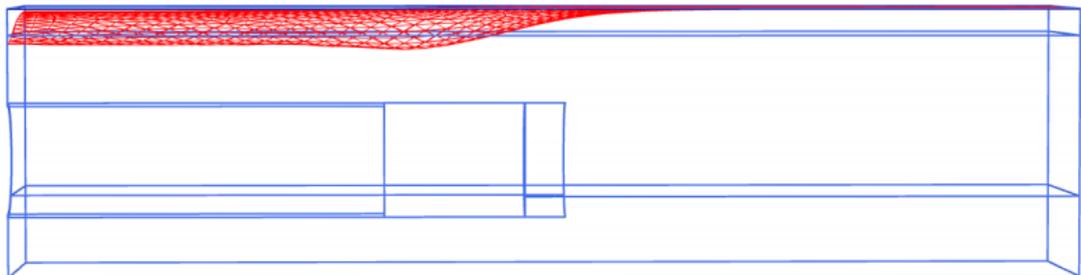


图 5.22 地表沉降槽 $|u| \approx 1.5\text{cm}$