



## 教程 4 锚杆隧道施工

### 目录

1. 预览 .....	2
1.1 教程目的 .....	2
1.2 问题详述 .....	2
2. 2D 建模 .....	6
2.1. 一般设置 .....	6
2.2. 绘制几何 .....	6
2.3. 网格 .....	10
3. 计算设置 .....	13
3.1. 编辑阶段 1 .....	13
3.2. 编辑阶段 2 .....	16
3.3. 编辑阶段 3 .....	19
3.4. 编辑阶段 4 .....	21
3.5. 编辑阶段 5 .....	23
4. 求解 .....	24
5. 结果 .....	25
5.1. 位移 .....	25
5.2. 结构应力 .....	28

## 1. 预览

### 1.1 教程目的

隧道施工包括一系列通过不同土壤条件的施工过程。对于隧道工程师来说，准确地模拟该施工过程非常重要，因为它会显著影响项目周边环境（例如地表沉降）或隧道结构（例如衬砌或喷射混凝土中的应力）。

CESAR-LCPC 为此类分析提供了一整套工具。

本教程的目的是确定混凝土隧道衬砌在使用期间的应力场。根据里昂-马赛高速铁路 Tartaiguille 隧道（Charmetton, 2001 年）的工程，对其进行了简化，以符合教程的目标。然而，它将引导用户完成隧道施工建模的各个方面。

### 1.2 问题详述

#### 一般假定

- 开挖均匀且一直沿水平轴  $Oz$ 。隧道断面在  $y$  轴上对称。因此，在平面应变分析条件下，选择模型的一半进行分析
- 土体的非线性行为
- 衬砌用体积单元模拟，混凝土假定为线弹性行为

#### 几何定义

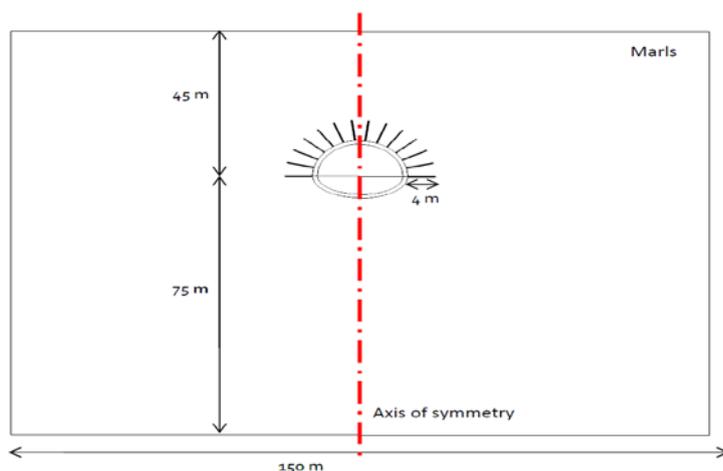


图 1：项目几何详情

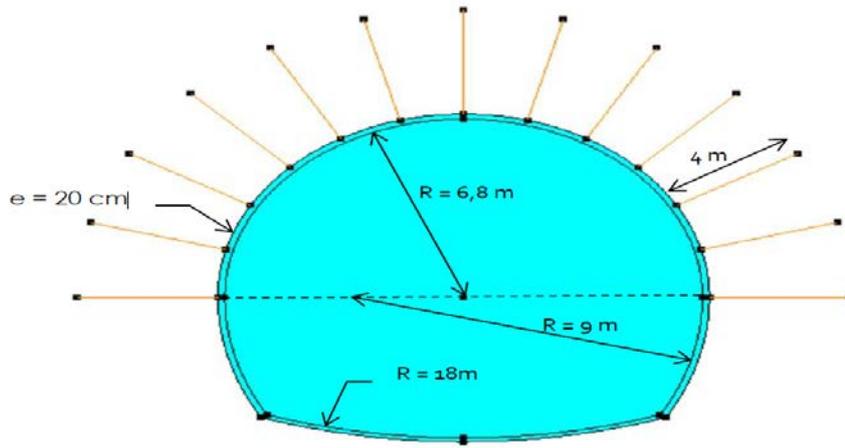
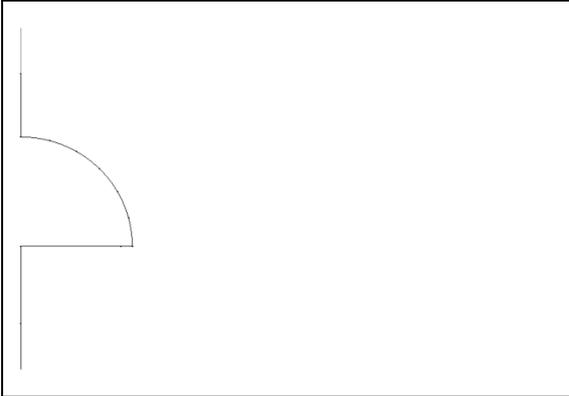
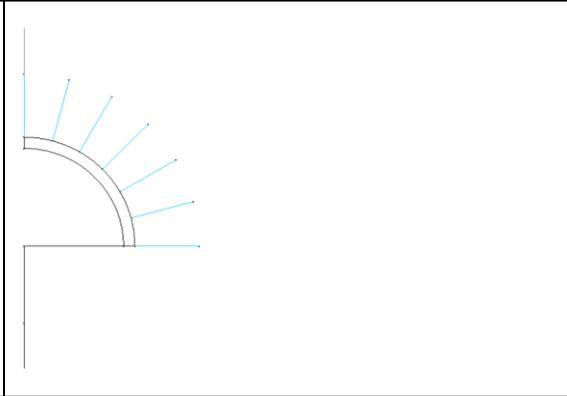
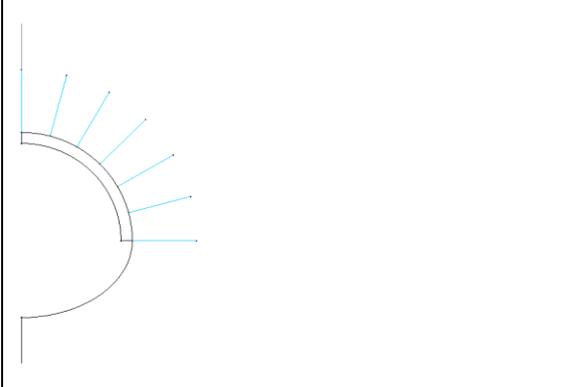
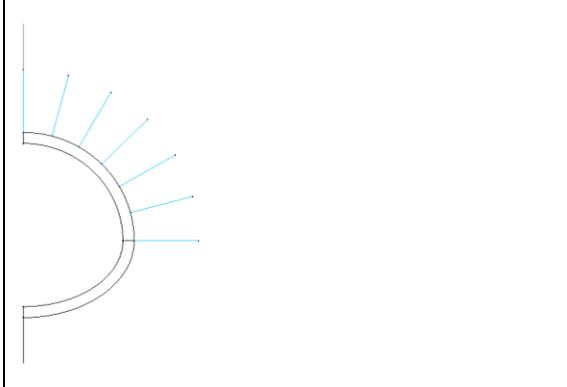


图 2：隧道截面详情

阶段定义：

阶段 1：由土体自重生成初始应力场

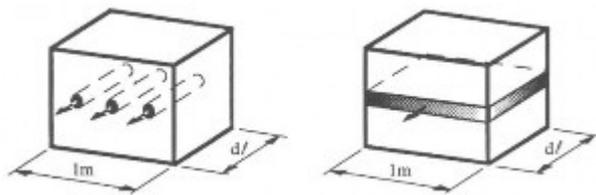
<p>阶段 2：开挖上台阶</p>	<p>阶段 3：安装锚杆和上部衬砌，隧道开挖面持续开挖会导致土体完全松弛</p>
	
<p>阶段 4：开挖下台阶</p>	<p>阶段 5：安装下部衬砌，应力完全释放</p>
	

材料属性:

假设土体和泥灰岩具有一样的均质属性

	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	$\nu$	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$\psi'$ (°)
Marls	23	1 500	0,3	300	20	0
Shotcrete	25	7 000	0,2	-	-	-

锚杆为圆截面杆件 ( $E_s=21\text{GPa}; \phi_s=2.5\text{cm}$ )。由于我们在平面应变变形的假设下进行二维建模，因此锚杆的杨氏模量和截面必须等效，以实现三维拉伸-压缩行为的等效性。



考虑到每 2m 开挖长度加一圈锚杆，有以下等式：

$$E_{eq} \times S_{eq} = \frac{E_s \times S_s}{2}$$

因此，考虑到 E 相等，所以： $S_{eq} = \frac{S_s}{2}$

下表中列出了模型的参数：

	$E_{eq}$ (MPa)	$S_{eq}$ (m <sup>2</sup> )
Bolt (equivalent)	210 000	$2,4 \cdot 10^{-4}$

实体定义和状态:

重要的是标记不同的实体（使用名称），并在整个施工阶段确定其状态。这有助于属性的输入和操作的管理。



图 3：实体列表

Bodies	Stage #1	Stage #2	Stage #3	Stage #4	Stage #5
1	Marls	→	→	→	→
2	Marls	Inactive	→	→	→
3	Marls	Inactive	Concrete	→	→
4	Marls	→	→	Inactive	→
5	Marls	→	→	Inactive	Concrete
6	Inactive	→	Bolts	→	→

边界条件:

由于存在垂直对称轴，水平位移沿垂直边界固定， $x=0$  和  $x=75m$ 。

模型底部固定垂直位移。

网格:

在接近隧道的地方(出现高应变梯度的地方)细化网格, 远离的地方逐步变粗。



## 2. 2D 建模

### 2.1. 一般设置

1. 运行软件
2. 设置单位
  - 一般/长度设置为 m
  - 力学/力设置为 MN
  - 力学/位移设置为 mm
  - 力学/面，勾选科学计数法 (E)
  - 应用

3. 在工作平面中 ，设置可见网格为 5m (dX=dy=5m)

 使用“保存为默认”设置成属于你的工作环境。

### 2.2. 绘制几何

CESAR 配备了一套隧道界面设计工具。

1. 点击工具脚本 
2. 选择 TunnelM.xml 作为 XML 脚本文件
3. 在隧道几何中，选择 ，用 3 半径和 2 角度来定义隧道界面形状，然后选择开挖计划  (全断面)
  - 不对称? 否
  - 椭圆反转? 是
  - R1[m] 6.8m
  - A1[°] 90
  - R2[m] 9
  - A2[°] 30
  - R4[m] 18

应用

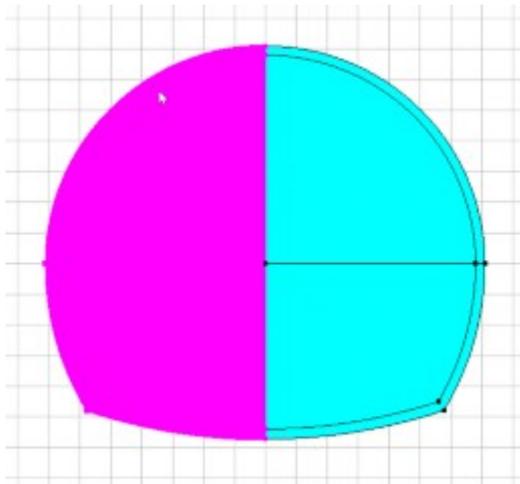
4. 重复上步操作，修改半径和角度，创建衬砌

- 不对称? 否
- 椭圆反转? 是
- R1[m] 7.1m
- A1[°] 90
- R2[m] 9.3
- A2[°] 30
- R4[m] 18.3

应用

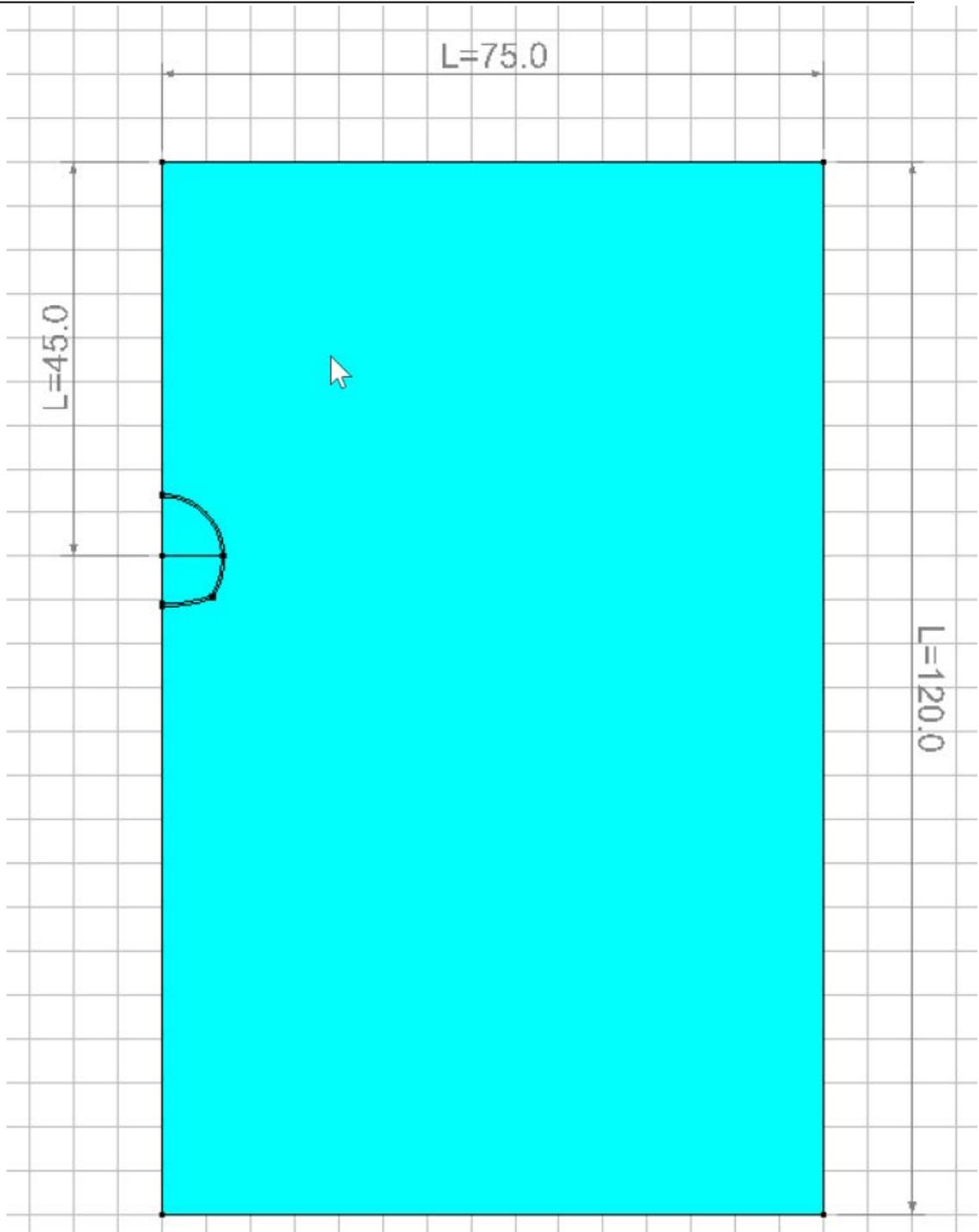
考虑轴对称问题，只选取模型的一半以减少节点和相关的计算时间。

使用线工具，添加竖向线段将模型分成两半，再添加一水平线段用于分布开挖。然后删除另一半（如下图）。



绘制土体:

使用点和/或线绘制几何，如下图所示。

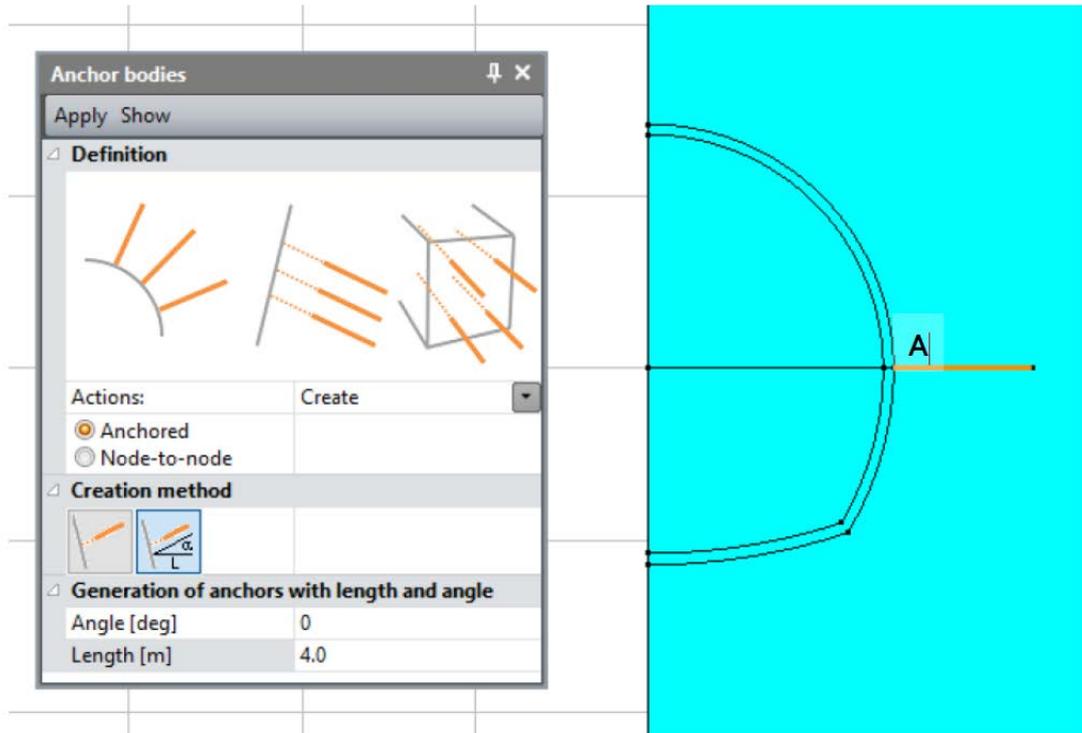


删除隧道的另一半后土体模型图

绘制锚杆:

将锚杆作为锚固 1D 实体引入。先创建一个，然后复制。

1. 选择工具锚固实体
2. 选择“方法 2”
3. 设置长度 4m，角度 0°，点击 A 点，生成一根水平锚杆，如下图所示



1. 点击操作实体
2. 选择旋转并设置旋转参数
  - 移动选择对象=不激活
  - 操作数量=6
  - $\theta=15$
  - 中心 (0, 0)
3. 应用

#### 实体编辑：

此步骤为可选，但有助于识别和选择实体组

1. 在选择工具中点击**选择实体**
2. 点击实体属性
3. 右击对应与土层的实体，命名为土，选择一个颜色，点击应用
4. 右击上衬砌，命名上衬砌，指定颜色，应用



5. 右击下衬砌，命名下衬砌，指定颜色，应用
6. 右击上台阶，命名上台阶，指定颜色，应用
7. 右击下台阶，命名下台阶，指定颜色，应用

💡我们也可以合并锚杆。在几何栏中，使用合并实体

1. 选择代表锚杆的 1D 实体，命名锚杆，指定颜色，应用

## 2.3. 网格

### 2.3.1 密度定义

#### 密度定义

💡在高应变区域定义密集分区，即在墙和锚附近。使用渐进密度定义可以在边界上生成从小段到大段的渐进演变

1. 转到项目栏上的**网格**选项卡，开始沿直线定义分割
2. 选择隧道截面和锚杆，点击 **固定长度密度**为这些线段指定长度，在对话框中输入 1m，点击应用
3. 点击 **渐进密度**用不同的长度分割线段，定义方法勾选第一部分和最后一部分
  - 第一段输入 0.4m，最后一段输入 2m，点击线段 A
  - 第一段输入 2m，最后一段输入 10m，点击线段 B
  - 第一段输入 0.4m，最后一段输入 10m，点击线段 C
4. 点击 **固定长度密度**为最后两条线段和垂直边界指定长度，在对话框中输入 10m，选择边界，点击应用

📍单击的位置定义初始分割的位置

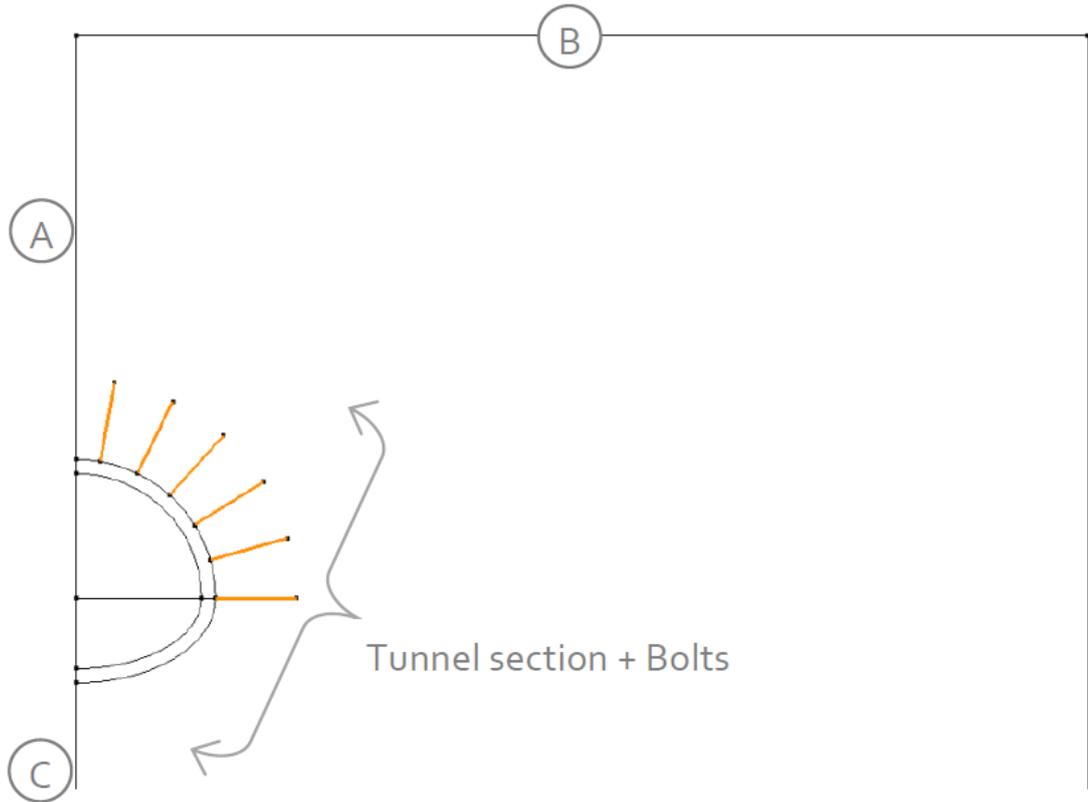


图 4：线段编号

💡CESAR-LCPC 提出了一种用于整合表面单元内部应力的后处理工具；结果是一般的结构受力（M，N，V）。当这些单元为四边形时，应力积分能给出更好的结果。因此，用户将生成适当的几何体（四边形曲面）以生成此类网格。

### 2.3.2 网格

CESAR-LCPC 为曲面网格划分过程提供了 3 个级别，可生成粗网格或密集网格。默认为“2 次”，在**偏好**>研究设置中设置 3 次（线性插值=粗糙，三次插值=密集）。

#### 1D 实体网格：

从 1D 实体网格开始，因为它们是锚固单元，需要在土体之前划分网格

选择 1D 实体，选择 2 次插值，选择锚杆，点击应用，如果必要，可使用 1D 实体方向将其调整为统一方向。

💡用户可调整箭头的大小和方向，在项目设置中，显示属性下，设置矢量尺寸为 0.02，箭头尺寸为 0.003

#### 曲面实体网格：

选择面网格，选择二次插值，选择三角形，点击应用生成网格

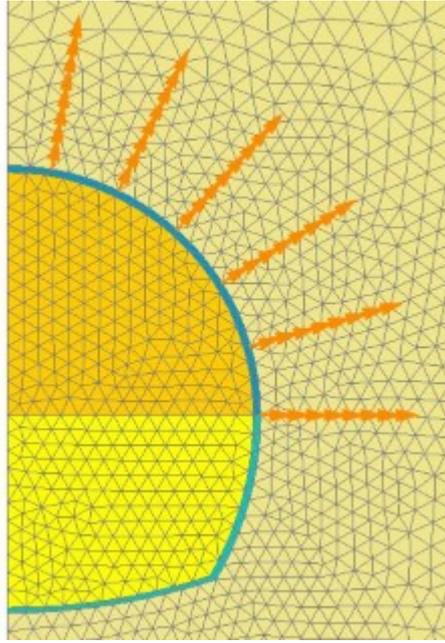


图 5：放大隧道截面和锚杆区域的网格

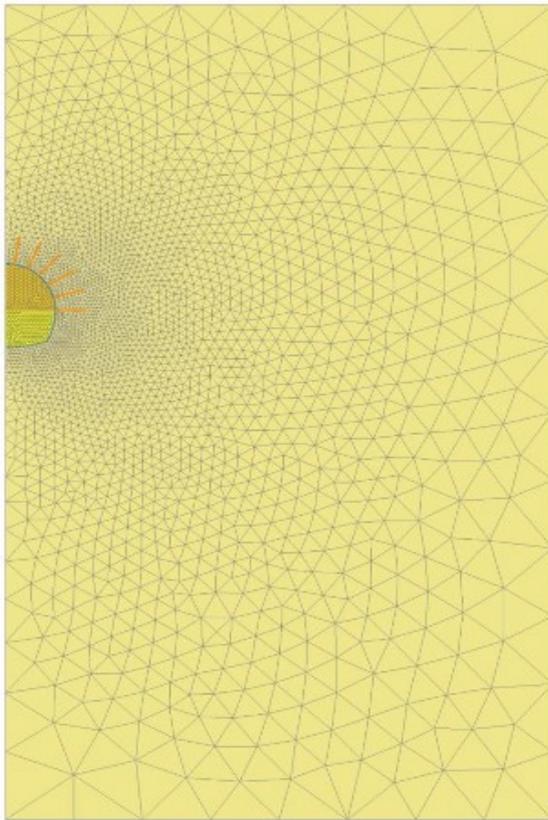


图 6：查看全部网格



### 3. 计算设置

#### 3.1. 编辑阶段 1

初始应力场使用“ $K_0$  过程”

模型定义:

在工作窗口的右侧，“树状视图”窗口显示物理域列表

1. 右击静力学，点击添加模型，会打开一个新的工具箱定义模型
2. 输入**阶段 1** 作为“模型名称”
3. 选择 **MCNL** 作为“求解器”
4. 勾选“**平面应变**”及“**分步施工**”
5. 勾选**地应力**作为初始类型，点击**定义地应力**
  - 点击插入定义新土层
  - 输入如下值:

Height (m)	Unit weight (MN/m <sup>3</sup> )	Ko_x (-)	Ko_z (-)
45	0.023	0.5	0.5

- 点击确认:
6. 点击确认

右侧数据树如下所示

固体实体材料属性:

为项目定义材料库

1. 点击  **曲面实体属性**

2. 为属性集命名（如混凝土）

- 在**弹性参数**中，选择“各项同性线弹性”并定义 $\rho, E, \nu$

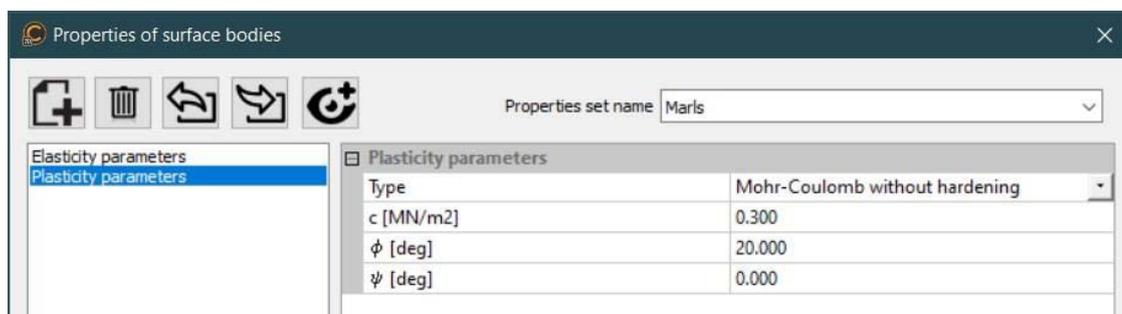
- 点击确认



3. 点击 , 创建其它属性集

- 为属性集命名（例如泥灰岩）
- 在**弹性参数**中，选择“各项同性线弹性”并定义 $\rho, E, \nu$
- 在塑性参数中，选择“无硬化的莫尔-库仑”并定义 $c, \phi$  和  $\psi$
- 点击确认并关闭

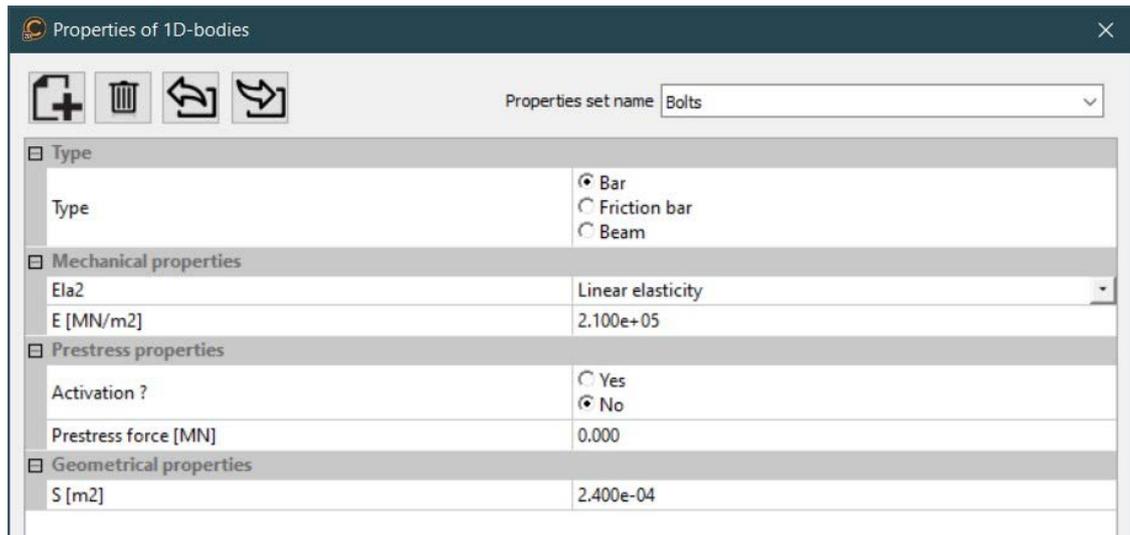
	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (MN/m <sup>2</sup> )	$\nu$	c (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$\psi$ (°)
<i>Concrete</i>	2500	7 000	0,2	-	-	-
<i>Marls</i>	2300	1 500	0,3	0.02	30	10



锚杆材料属性:

为锚杆添加属性，类型为“杆件”，定义刚度 E 和截面积 S

Name of the body	Type	E (MN/m <sup>2</sup> )	S (m <sup>2</sup> )
<i>Bolts</i>	Bar	210 000	$2,4 \cdot 10^{-4}$



指定数据集:

将数据集指定给模型中对应的实体

激活/冻结实体:

阶段 1 中，所有组都为土体，锚杆未激活

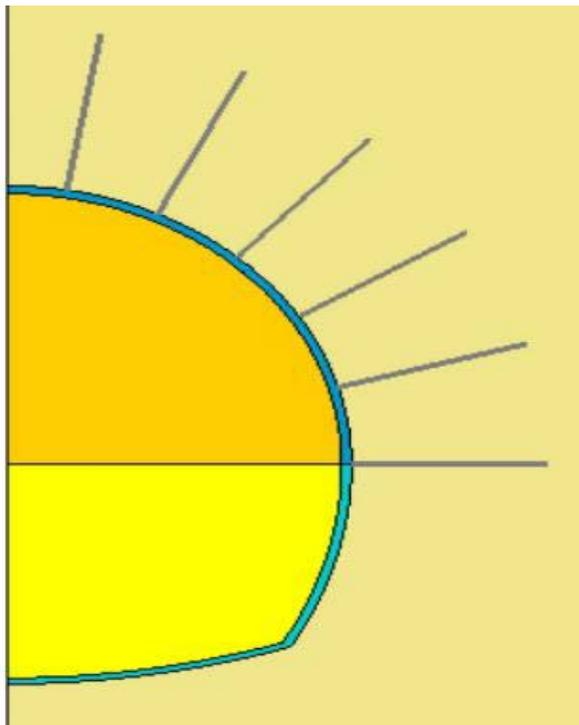


图 7: 阶段 1 中锚杆设置为“冻结”时模型的状态

边界条件:



选择“侧面和地面支撑”，应用

荷载集：

用地应力定义初始应力场时无荷载，我们想单独查看该阶段

计算参数：

点击分析参数，在一般参数部分，输入如下值：

- 迭代过程：
  - 最大增量步：1
  - 每个增量步最大迭代次数：500
  - 容忍度：0.01
- 求解方式：1-初始应力法
- 算法类型：Pardiso
- 分析类型：标准

### 3.2. 编辑阶段 2

在该阶段中，开挖上台阶，为了平衡模型，需施加开挖力。

在创建一个新分析阶段时，可以很方便地复制前一阶段的参数。在这里，我们修改两场地方：

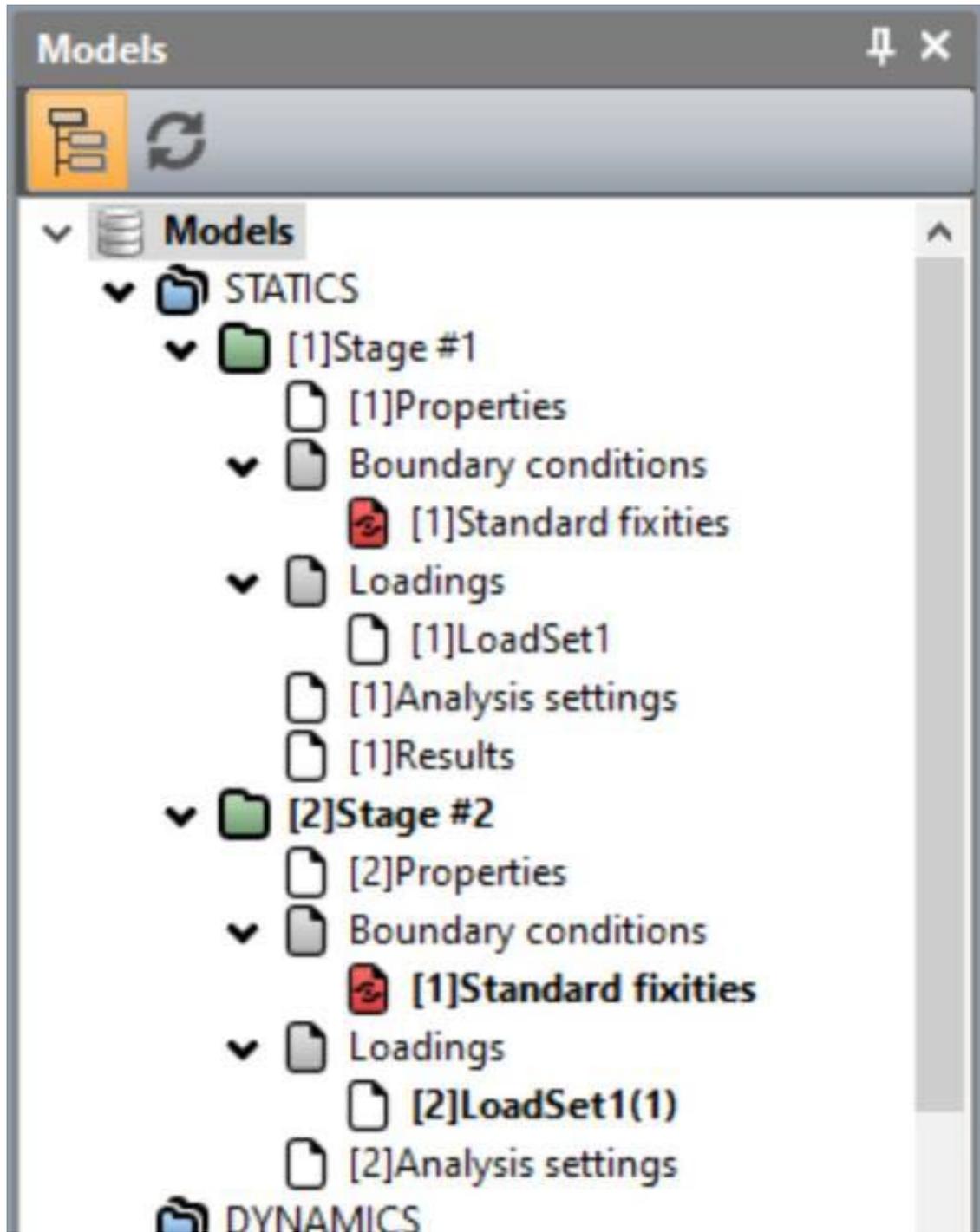
- 在属性中，激活锚杆实体
- 在荷载中，激活开挖力

模型定义：

新建模型，命名为“阶段 2”，选择分布施工

现在复制前一模型的数据集，从阶段 1 复制属性到阶段 2，选择复制，复制边界条件时选择分享。

现在数据树如下图所示：



激活/冻结实体:

将上台阶和上衬砌冻结

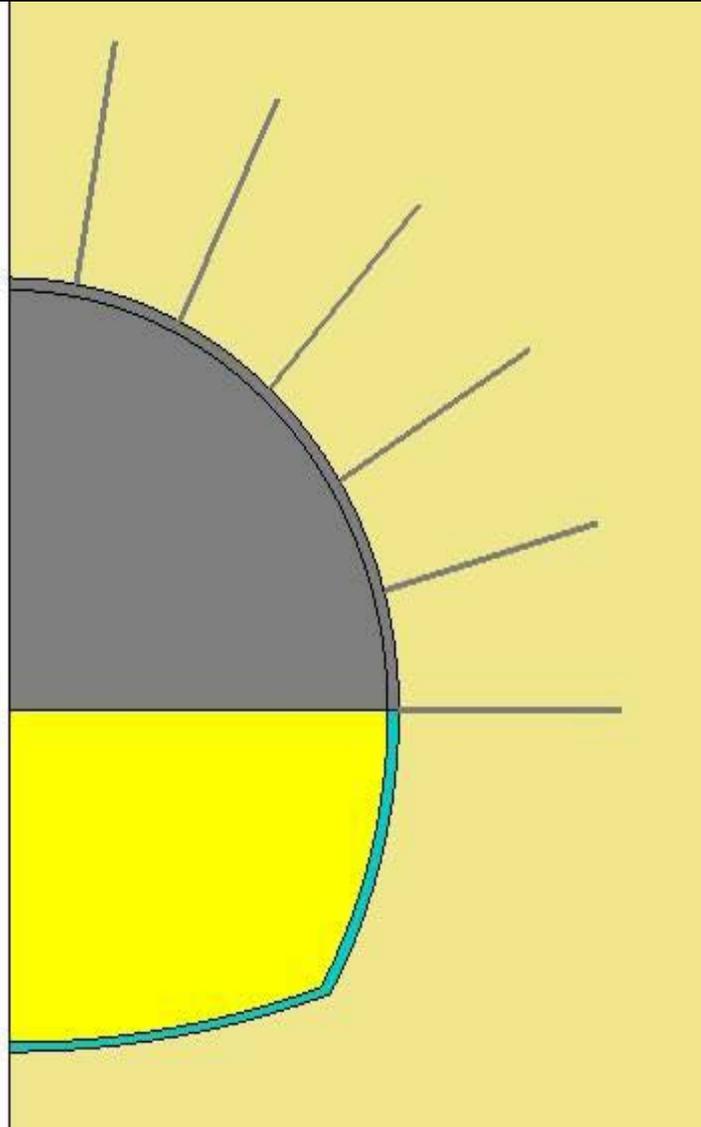


图 8：阶段 2 冻结实体后的模型状态

边界条件：

无变化

荷载设置：

由于掌子面还不够远，仅应用 40%的开挖力 ( $\lambda = 0.4$ )

分析设置：

无变化

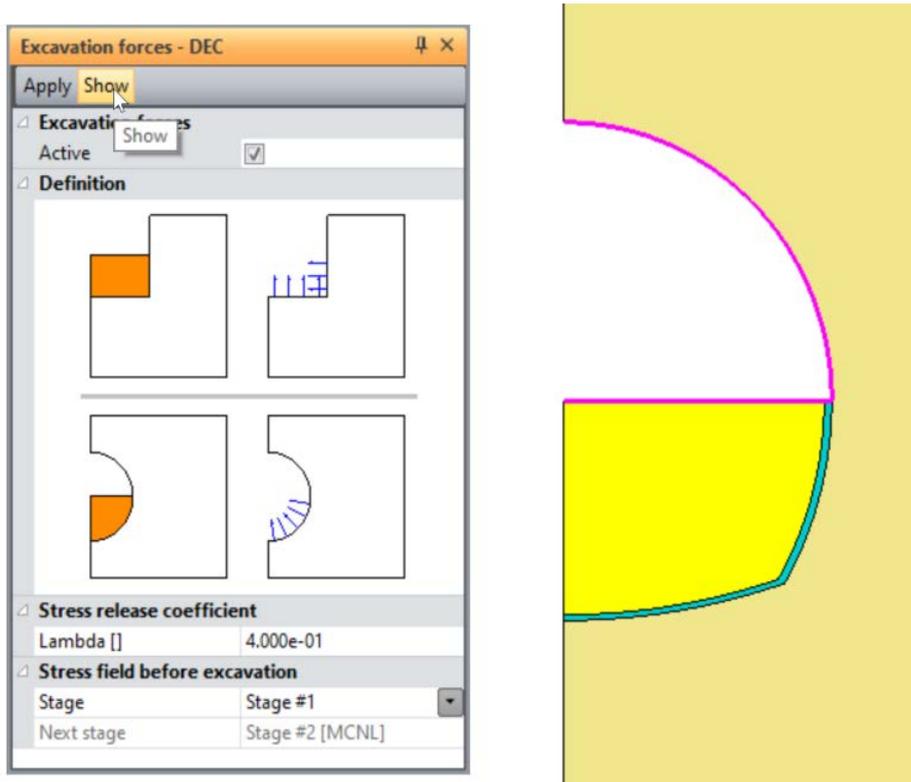
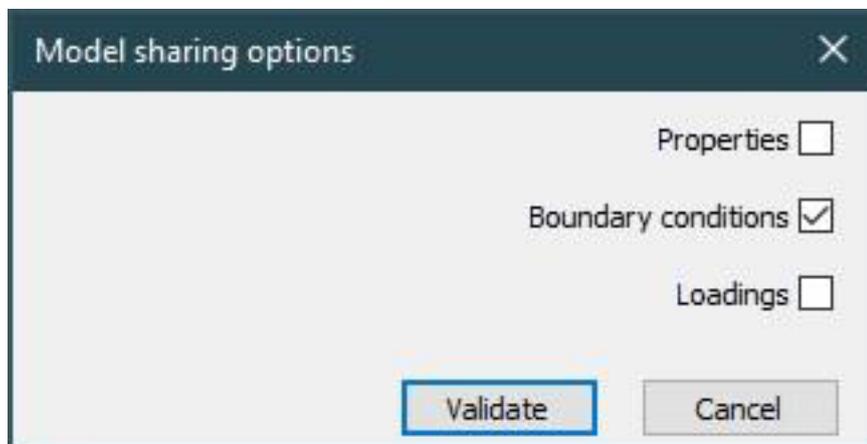


图 9：显示开挖力

### 3.3. 编辑阶段 3

在该阶段，我们激活衬砌和锚杆，掌子面足够远了，土体完全松弛  
模型定义：

由于阶段 3 和阶段 2 大部分参数相同，我们复制阶段 2 并修改，复制后命名为“阶段 3”，选择分布施工，在弹窗中勾选边界条件。



激活/冻结实体：

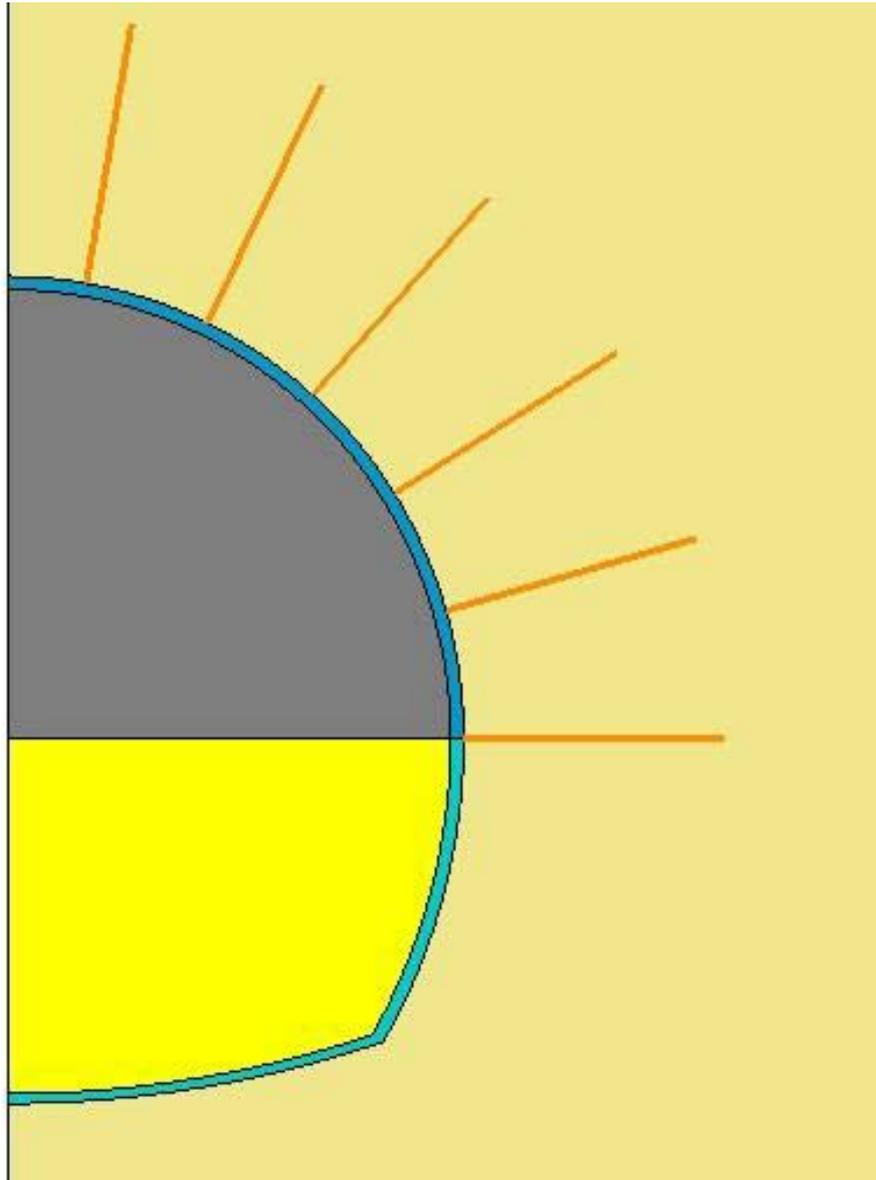


图 10：阶段 3 激活实体后的模型状态

指定材料：

将“混凝土”指定给上部衬砌

边界条件：

无变化

荷载设置：

随着掌子面的推进，土体应力完全释放，设置 $\lambda = 0.6$ 表示 100%应力释放

激活隧道衬砌重力，添加荷载集，命名为上部衬砌自重，点击重力，点击自动选择，应用，图上会显示“重力”

分析设置：

无变化

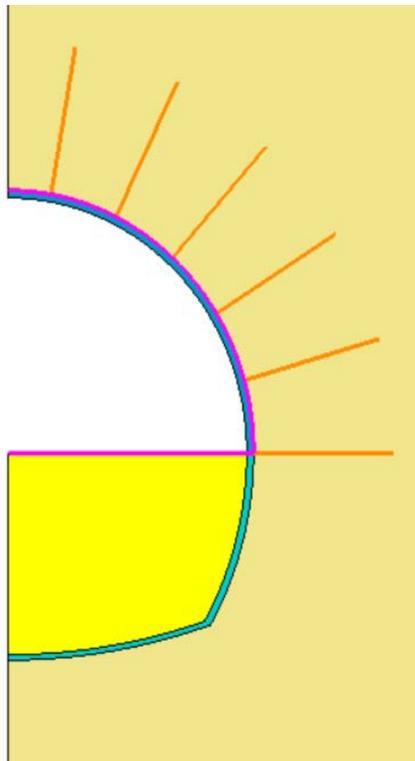
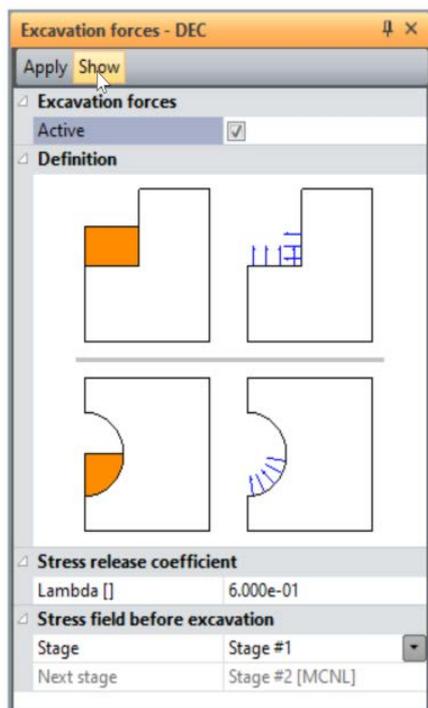


图 11：阶段 3 显示开挖力

### 3.4. 编辑阶段 4

开挖下部衬砌

模型定义：

复制阶段 3 的模型，命名为“阶段 4”，只勾选边界条件。

激活/冻结实体：

将下台阶和下部衬砌冻结

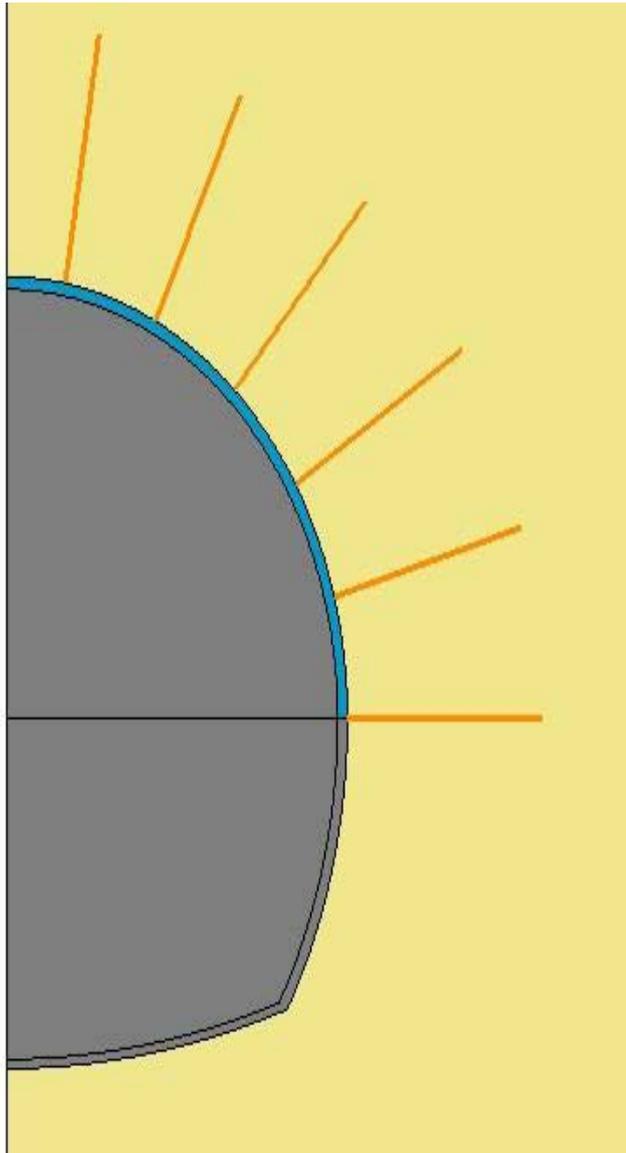


图 12：阶段 4 冻结实体后的模型状态

边界条件：

无变化

荷载设置：

添加荷载集，命名为“开挖下台阶”，设置开挖力 $\lambda = 0.4$ ，删除阶段 3 中的荷载（开挖力和衬砌自重）

分析设置：

无变化

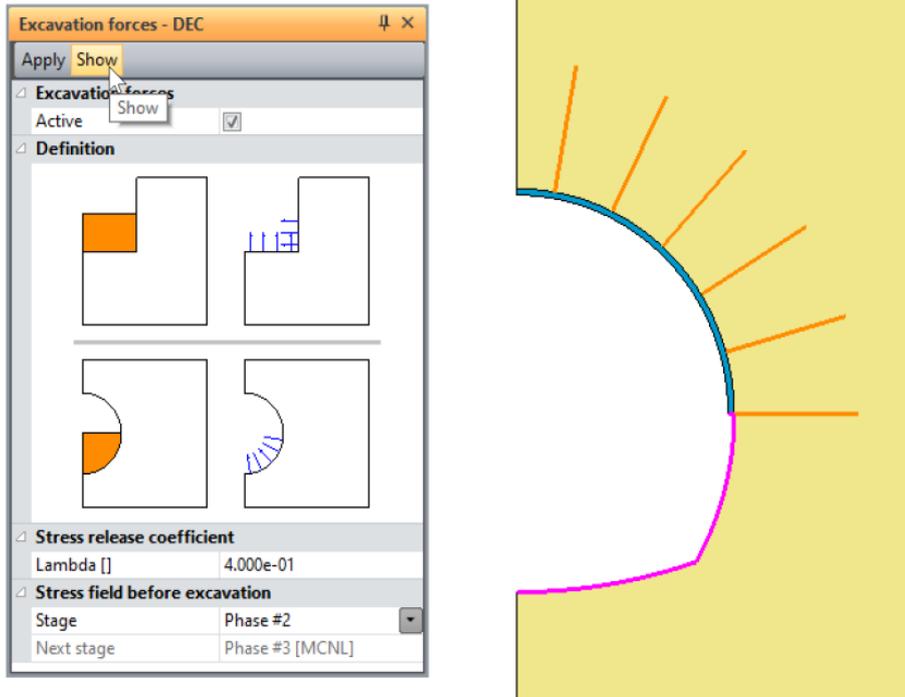


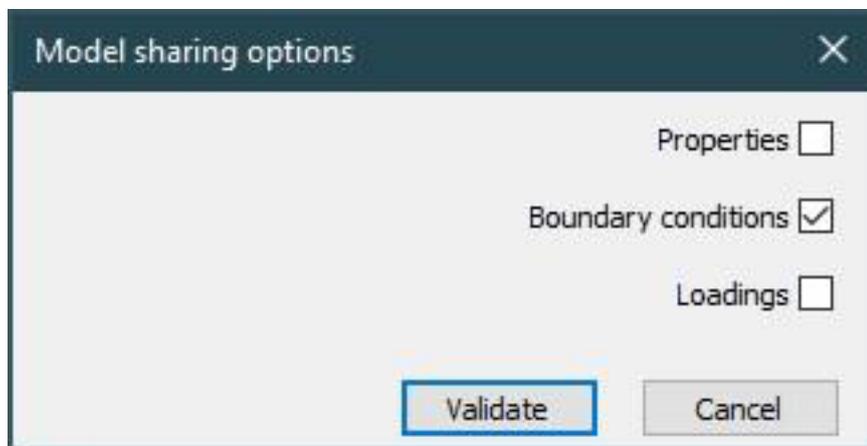
图 13: 阶段 4 显示开挖力

### 3.5. 编辑阶段 5

激活下部衬砌，土体应力完全释放

模型定义:

由于阶段 5 和阶段 4 大部分参数相同，我们复制阶段 4 并修改，复制后命名为“阶段 5”，选择分布施工，在弹窗中勾选边界条件。



激活/冻结实体:

激活下部衬砌

指定材料:

将“混凝土”指定给下部衬砌

边界条件:

无变化

荷载设置:

随着掌子面的推进，土体应力完全释放，设置 $\lambda = 0.6$ 表示 100%应力释放

激活隧道衬砌重力，添加荷载集，命名为下部衬砌自重，点击重力，点击自动选择，应用，图上会显示“重力”

分析设置:

无变化

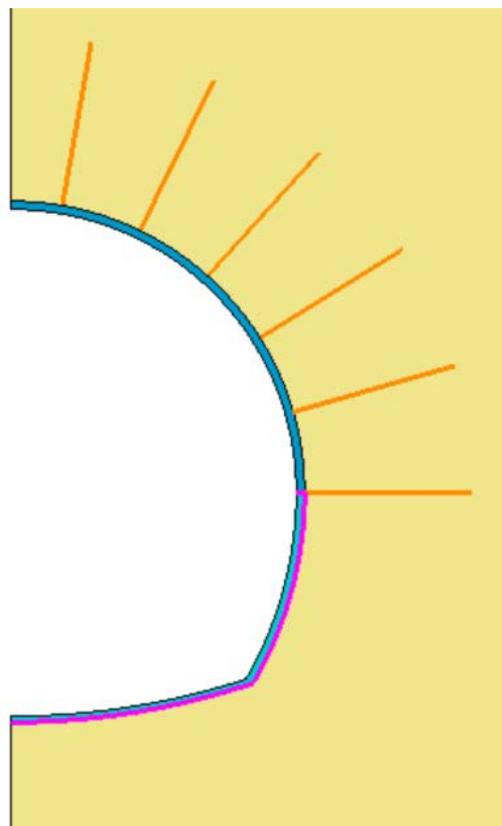
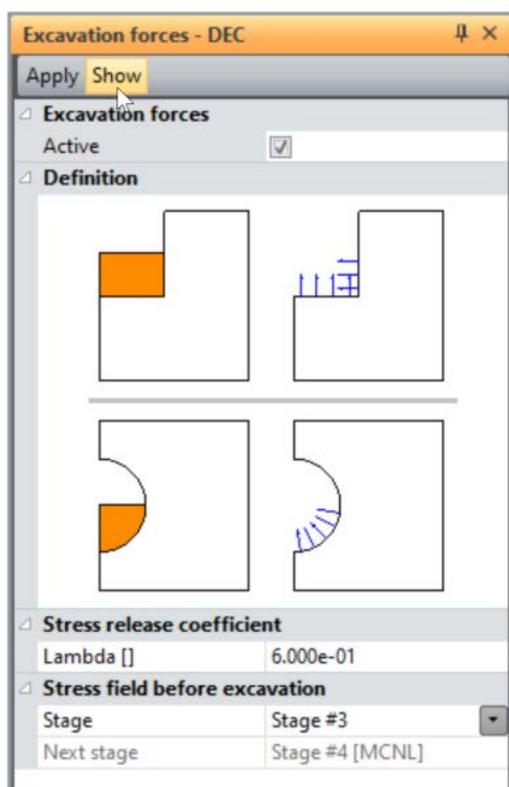


图 14: 阶段 5 显示开挖力

#### 4. 求解

点击分析，计算，勾选全部阶段，点击确认。

## 5. 结果

### 5.1. 位移

1. 点击结果栏



2. 点击  结果类型

- 选择网格变形
- 勾选等值图，在列表中选择 $|\mu|$ ，总位移
- 应用



3. 点击  网格设置

- 选择组边界，作为网格边界样式
- 应用



4. 点击  等值图设置

- 勾选绘制等值图，作为等值线样式
- 勾选等值线并选择灰色
- 应用



5. 点击  图例

- 选择等值图作为图例类型
- 勾选“图例边框”
- 应用

可得到图 15

图 17 显示了隧道完成后地面沉降

1. 点击图表栏

2. 选择土体表面的边界



3. 点击 ，线设置

- 给线集命名，如表面
- 添加

4. 激活 ，线集图表

- 选择 v，垂直位移作为参数
- 选择表面作为线集
- 选择增量 1
- 应用

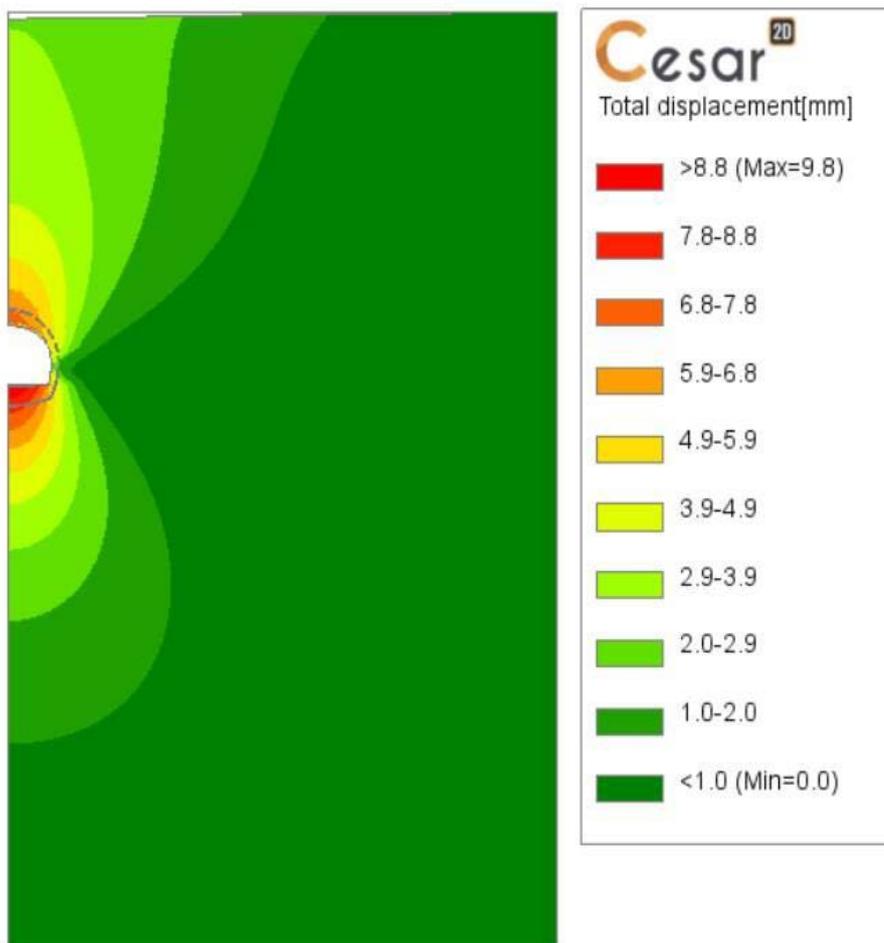


图 15：显示阶段 5 的总位移

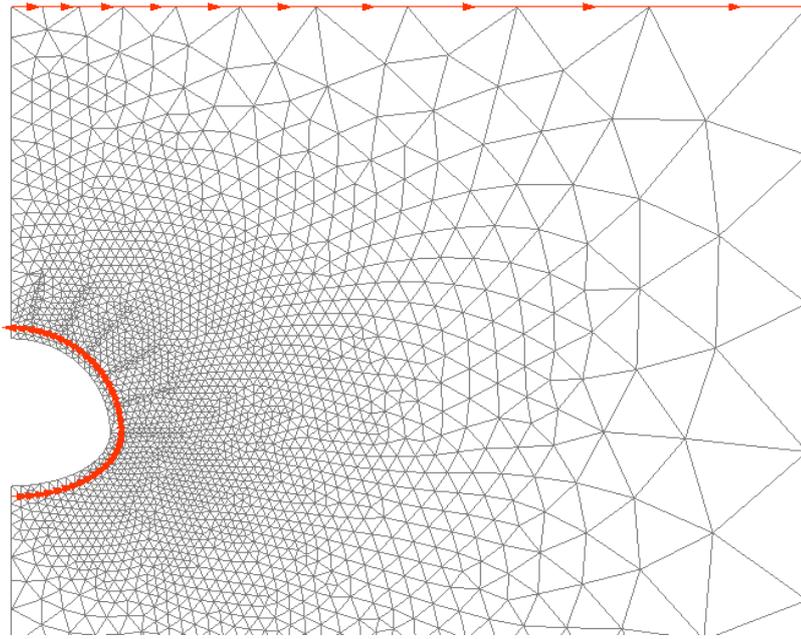


图 16: 生成隧道外拱和土体接触面的线集

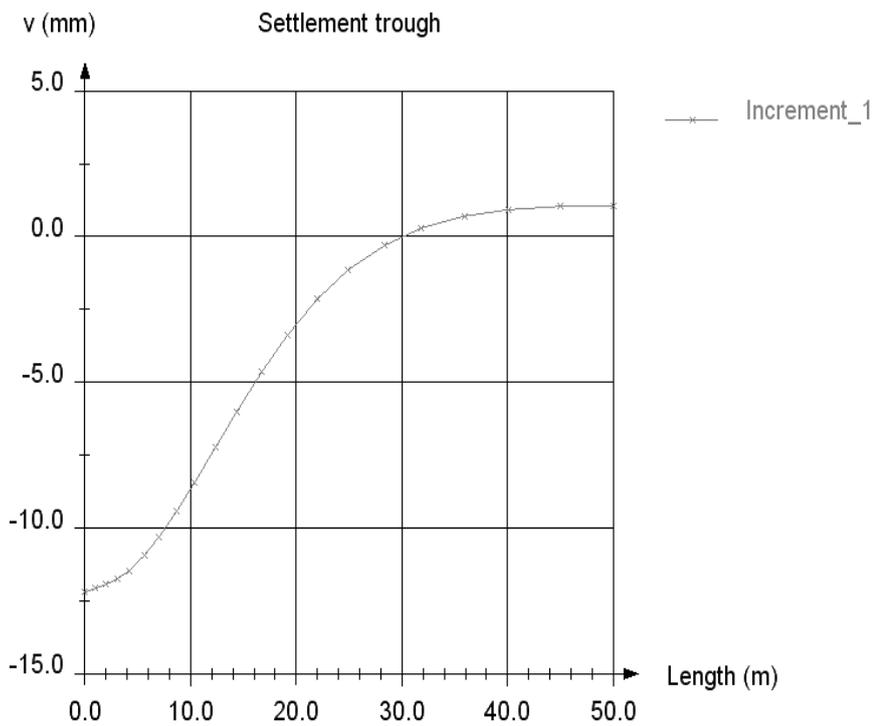


图 17: 阶段 5 的地表沉降

我们也可以单独查看隧道截面，得到锚杆和衬砌的受力

选中隧道截面，点击仅显示选择

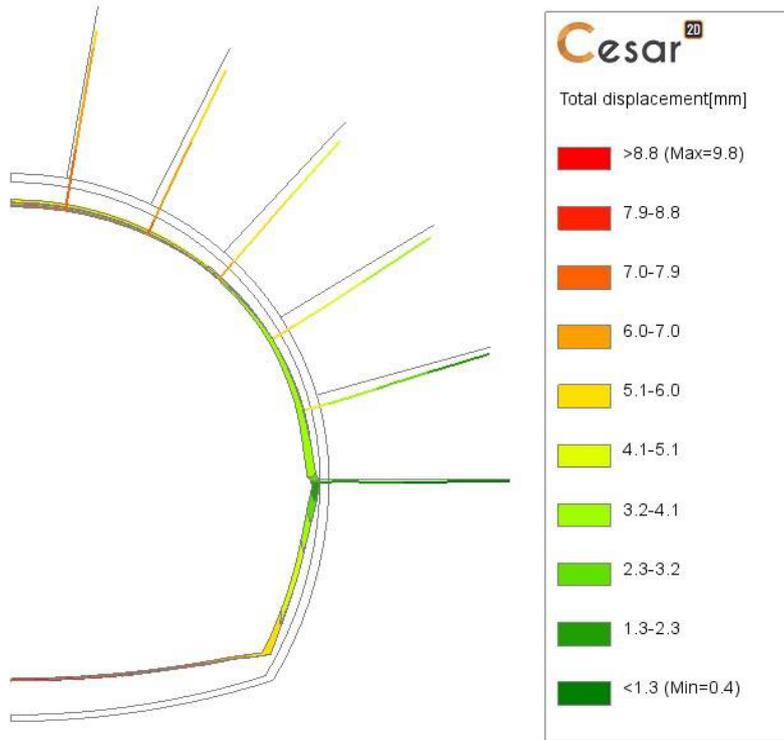


图 18: 显示阶段 5 的总位移——放大隧道和锚杆部分

## 5.2. 结构应力

获得锚杆的受力，点击结果类型，选择未变型网格，勾选 1D 实体结果，选择法向力，点击应用

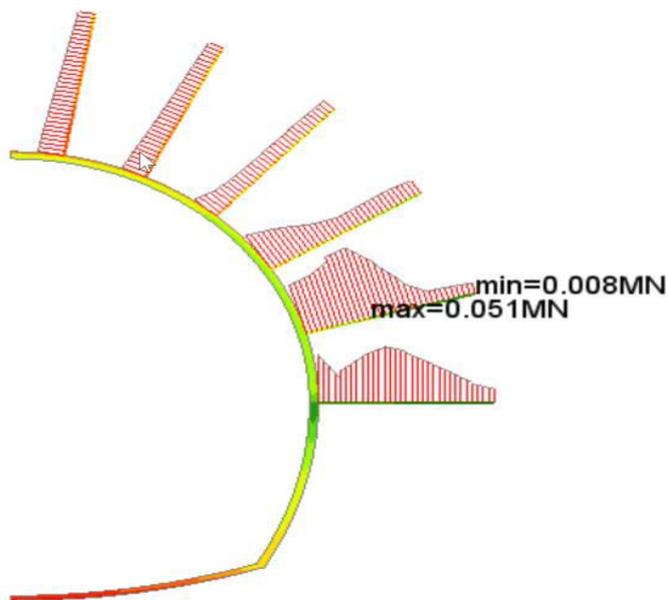


图 19: 显示阶段 5 中锚杆的轴力

为了得到衬砌的受力，我们将在衬砌厚度上每个截面对应力进行积分，首先我们生成积分线。

点击图表，选择选择隧道断面外拱处的边，点击线集，命名“外拱”，点击“线集图”，选择 N，轴力作为参数，选择“外拱”为线集，选择增量\_1，应用。

重复上一操作得出弯矩分布

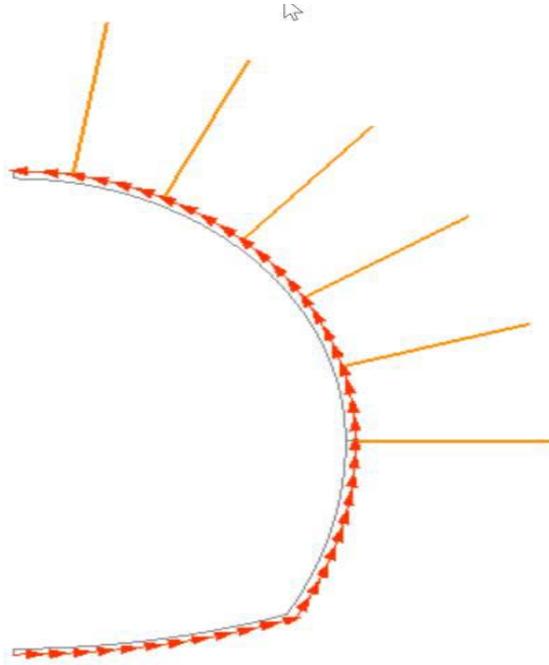


图 20：在隧道外拱处生成线集

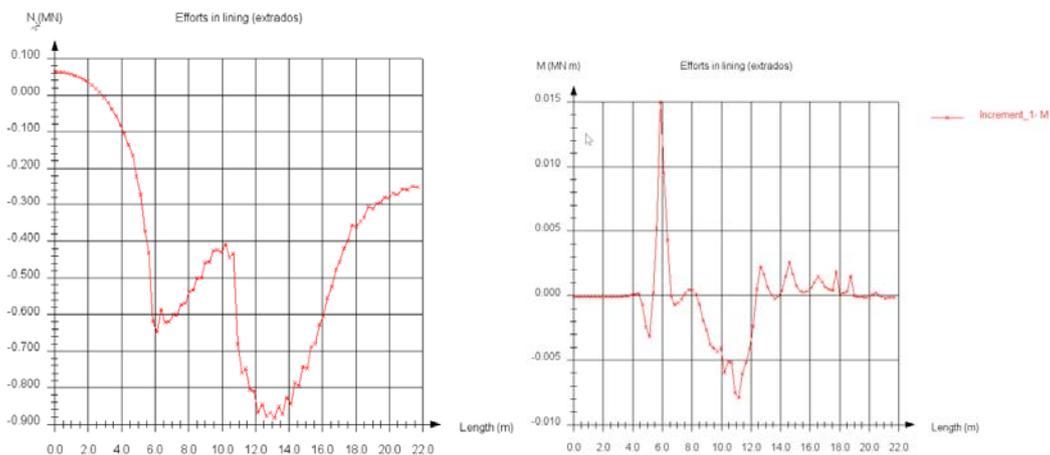


图 21：阶段 5 结束时，衬砌的轴力

💡一定要注意网格类型和密度对标量值影响很大，因为结果来自对衬砌厚度截面的法向应力积分，强烈推荐使用四边形单元。