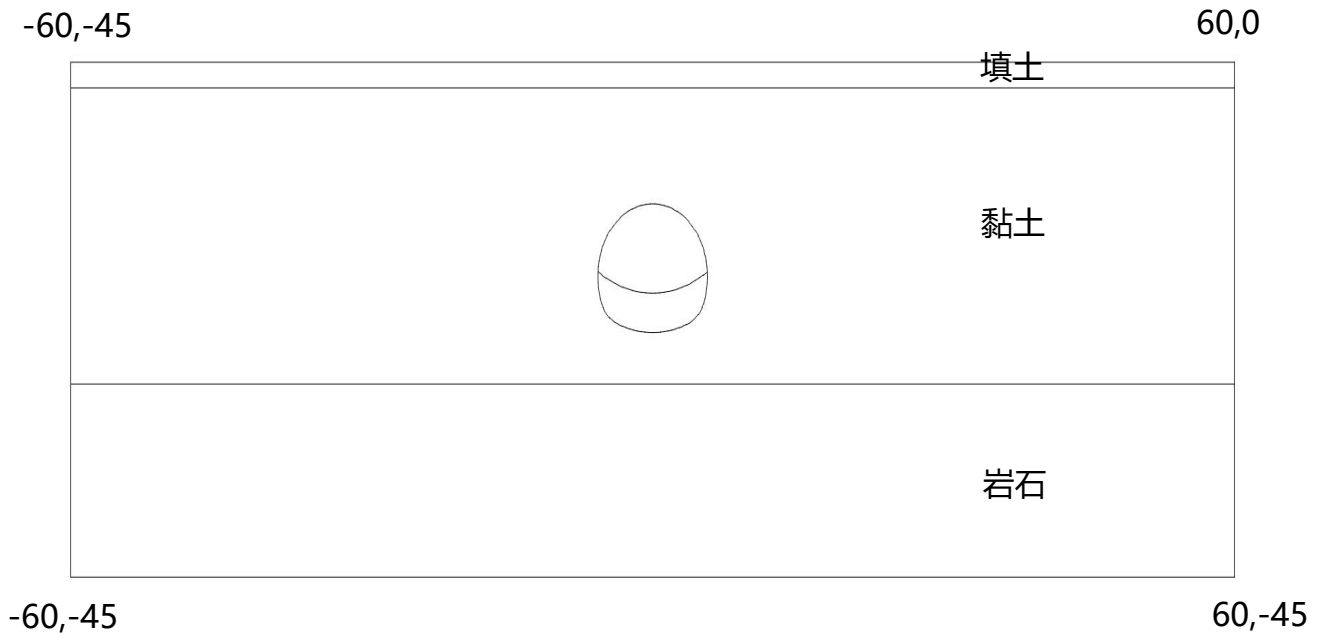


隧道顺序开挖



本教程将演示隧道的 SEM/NATM 法施工。SEM/NATM（连续掘进法/新奥法）是一种用喷射混凝土稳定开挖表面形成临时衬砌的技术。

选择单位

本教程中使用 “m-Pa-N/m³”。

创建几何

绘制矩形，两 endpoint 坐标分别为 (-60, -40 和 60, 0)。

选择 “绘制线” 来绘制下面列出的材料线：

类型	起点	终点
线	-60, -2	60, -2
	-60, -25	60, -25

选择“绘制弧”绘制材料线，如下所示：

类型	起点	中间点	终点	分段数
弧	3.88,-20.23	4.69,-19.62	5.25,-18.77	6
	4.95,-13.87	0.00,-11.00	-4.95,-13.87	25
	-5.25,-18.77	-4.69,-19.62	-3.88,-20.23	6
	-3.88,-20.23	0.00,-21.00	3.88,-20.23	20
	5.25,-18.77	5.57,-17.55	5.63,-16.29	6
	5.63,-16.29	5.42,-15.05	4.95,-13.87	6
	-5.25,-18.77	-5.57,-17.55	-5.63,-16.29	6
	-5.63,-16.29	-5.42,-15.05	-4.95,-13.87	6
	-5.63,-16.29	0.00,-17.94	5.63,-16.29	25

生成网格

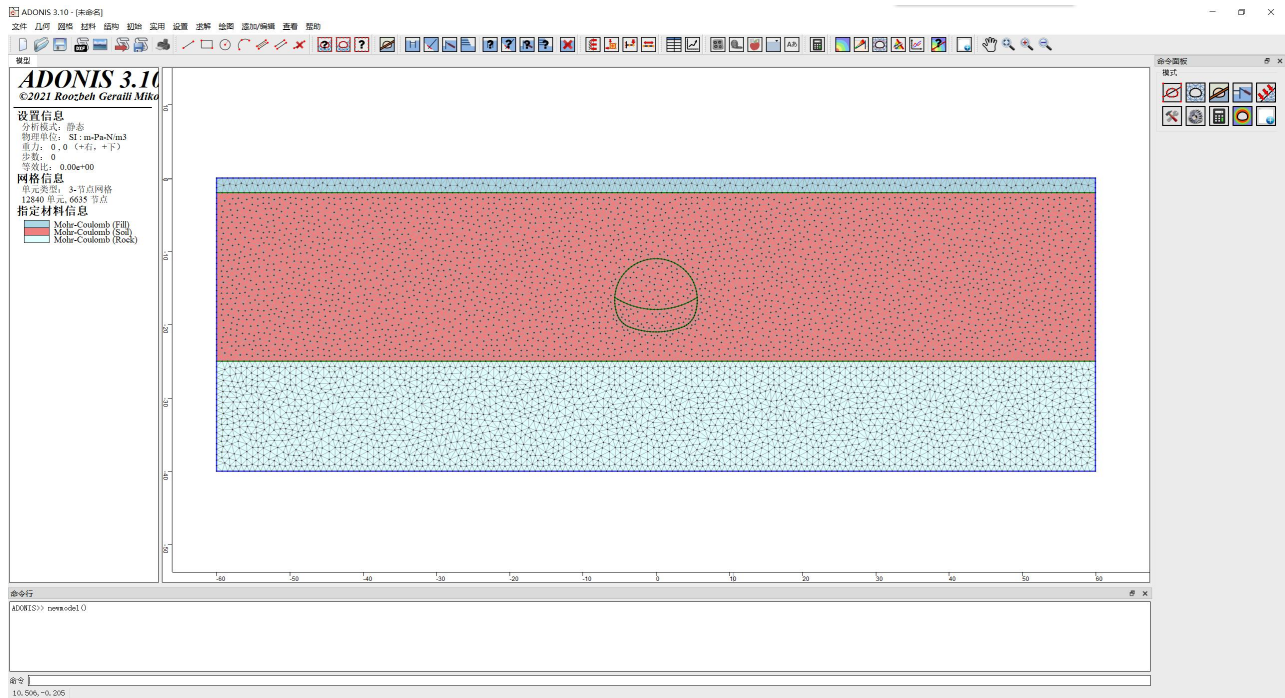
本教程选择 3 节点三角形网格，最大网格边界大小设置为 0.75。

指定材料属性

材料全部选择 Mohr-Coulomb，参数如下。

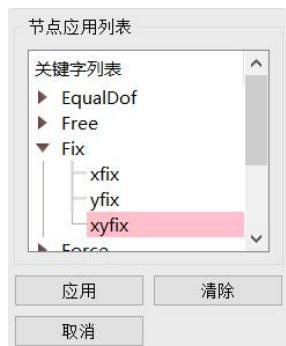
材料 ID	材料名称	密度 (kg/m ³)	杨氏模量 (Pa)	泊松比	粘聚力 (Pa)	摩擦角 (°)	抗拉强度 (Pa)	侧压系数 K ₀
1	填土	1950	1.0x10 ⁷	0.30	1.0x10 ³	29	0.0	0.5
2	黏土	2200	1.0x10 ⁸	0.25	3.9x10 ⁴	35	0.0	0.6
3	岩石	2400	5.0x10 ⁸	0.25	1.0x10 ⁵	40	1.0x10 ⁴	0.65

将材料指定给相应的土层。



边界条件

设置外部边界，选择初始条件，选择应用边界条件，从“关键字列表”中选择 Fix 关键字下的 xyfix。然后使用鼠标选择位于模型底部的节点。完成后，单击“应用”，或按 Enter 键。



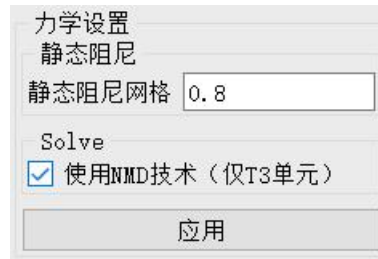
然后选择 xfix，使用鼠标选择位于模型左侧和右侧的节点，应用。

激活节点混合离散化

低阶有限元在经历塑性变形时往往表现出“固定”状态，这导致了对加载能力的不准确估计。ADONIS 采用节点混合离散化(NMD)方法来解决这一问题。NMD 是由 Detourney&Dzik (2006) 引入的，作为混合离散化(MD)技术的改进。为了激活 NMD，选择“设置”，然后选择“力学设置”，在 solve 下勾选“使用 NMD 技术”，单击“应用”按钮。

注：

- 1.NMD 仅适用于 3 节点单元 (6 节点不可用)。
- 2.默认情况下，NMD 没有激活。如果需要，用户可以打开它。



初始化压力条件

初始化压力参数如下表：

压力类型	初始值(Pa)	Y 变量(Pa)	X-范围(m)	Y-范围(m)
sy y	0	19130	-60,60	-2,0
sy y	4905	21582	-60,60	-25,-2
syy	53955	23544	-60,60	-40,-25
s xx	0	9564.8	-60,60	-2,0
s xx	2943	12949	-60,60	-25,-2
s xx	35071	15304	-60,60	-40,-25
s zz	0	9564.8	-60,60	-2,0
s zz	2943	12949	-60,60	-25,-2
s zz	35071	15304	-60,60	-40,-25

在求解之前，将 y 方向的重力加速度设置为 9.8m/s²。

运行，在达到平衡后，将 x 和 y 位移都重置为零。

执行顺序开挖

需要进行分段施工计算，其中隧道衬砌被激活，隧道内的土体被冻结。计算阶段为塑性分析、分级施工。用所谓的 β 法模拟三维拱效应，其思想是初始应力 p_k 作用于隧道要建造的位置，无支撑隧道部分使用 $(1-\beta) p_k$ ，已支护隧道部分使用部分约束法。要定义计算过程，请遵循以下步骤：

第一阶段：开挖顶部

第二阶段：进行应力松弛

在 ADONIS 中执行应力松弛，使用“计算松弛”。假设在临时支撑安装之前，开挖土中的初始应力消失 60%（因此其余 40%将在以后考虑）。为了实现这一点，应该将松弛因子设置为 0.6。应力松弛是逐渐应用于隧道边界的，步长默认设置为 250。然后使用鼠标选择应力松弛边界或直接指定范围($xlim=[-8.5, 8.5]$ 和 $ylim=[-22.0, -8.0]$)。

注：松弛步数可以增加，有利于更平滑的逐步释放压力，250 步基本上能适用于绝大多数情况。



静态模式

运行类型

求解 步长
 求解安全系数 求解弹性
 计算松弛

Parameters

松弛因子

松弛步长

范围

X范围 (x1, xu) [

Y范围 (y1, yu) [

第三阶段：在开挖顶部安装喷射混凝土支护。

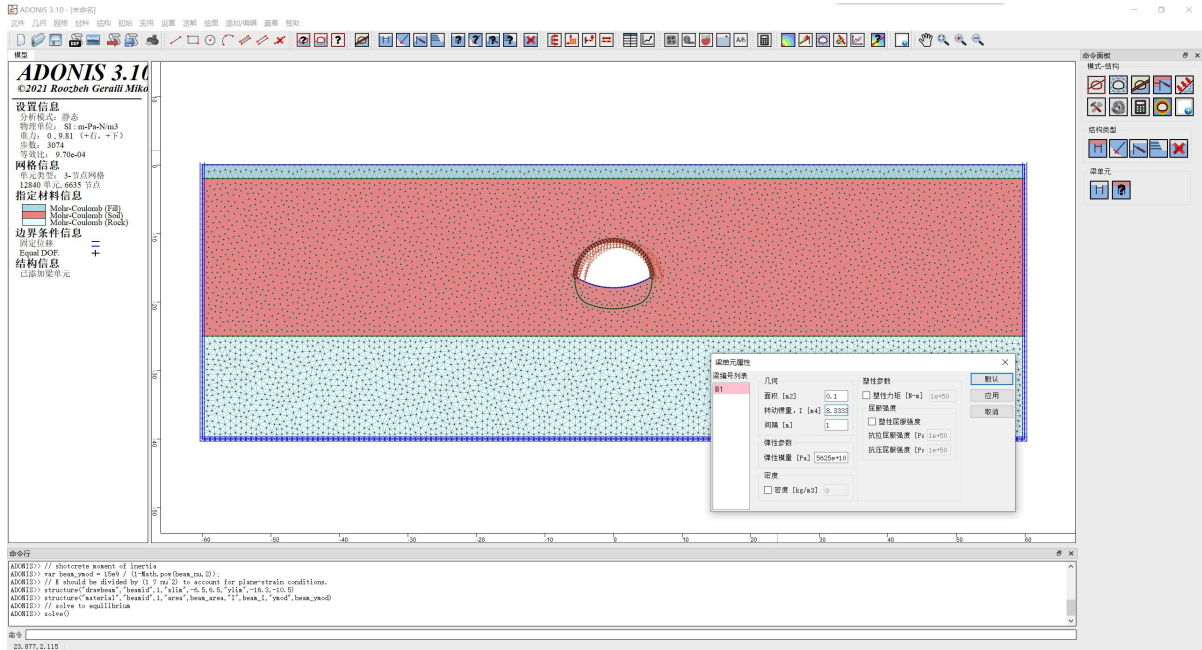
本阶段隧道顶部将安装 100mm 厚喷射混凝土，混凝土参数如下表。

厚度(m)	杨氏模量(Pa)	泊松比
0.1	1.5×10^{10}	0.2

选择梁，选择边、范围，然后使用鼠标选择要安装喷射混凝土支护的范围(或输入 $xlim=[-8.0, 8.0]$ 和 $ylim=[-19.0, -10.0]$)，并应用。然后单击梁单元属性并给定喷射混凝土属性，如下表，选择“求解模型”按钮，直到达到平衡。

梁编号	面积 (m ²)	转动惯量 (m ⁴)	间隔	弹性模量(Pa)
B1	0.1	8.3333×10^{-5}	1	1.5625×10^{10}

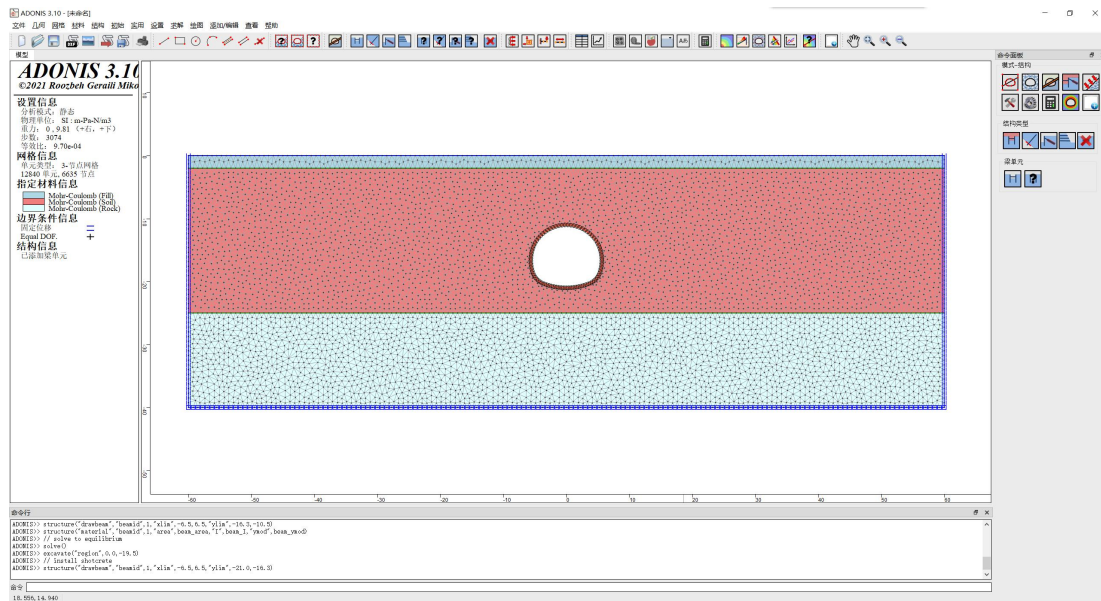
注：在 ADONIS 中，梁单元公式是平面应力公式。如果梁表示在垂直于分析平面的方向上连续的结构（例如，混凝土隧道衬砌），则 E 应除以 $(1-\nu^2)$ 来考虑平面应变条件。



第四阶段：开挖剩下台阶

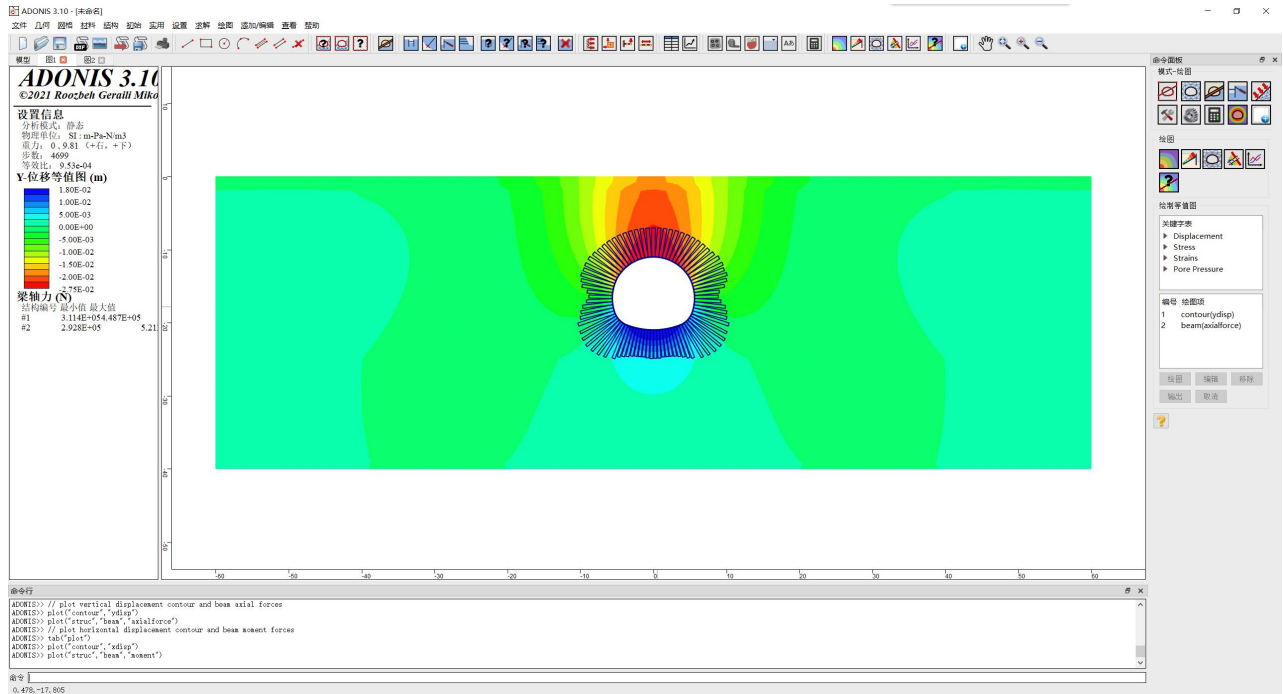
第五阶段：为剩下台阶安装喷射混凝土支护

重复第 3 阶段的步骤，并在隧道开挖部分安装梁单元，然后“求解模型”按钮，直到达到平衡。

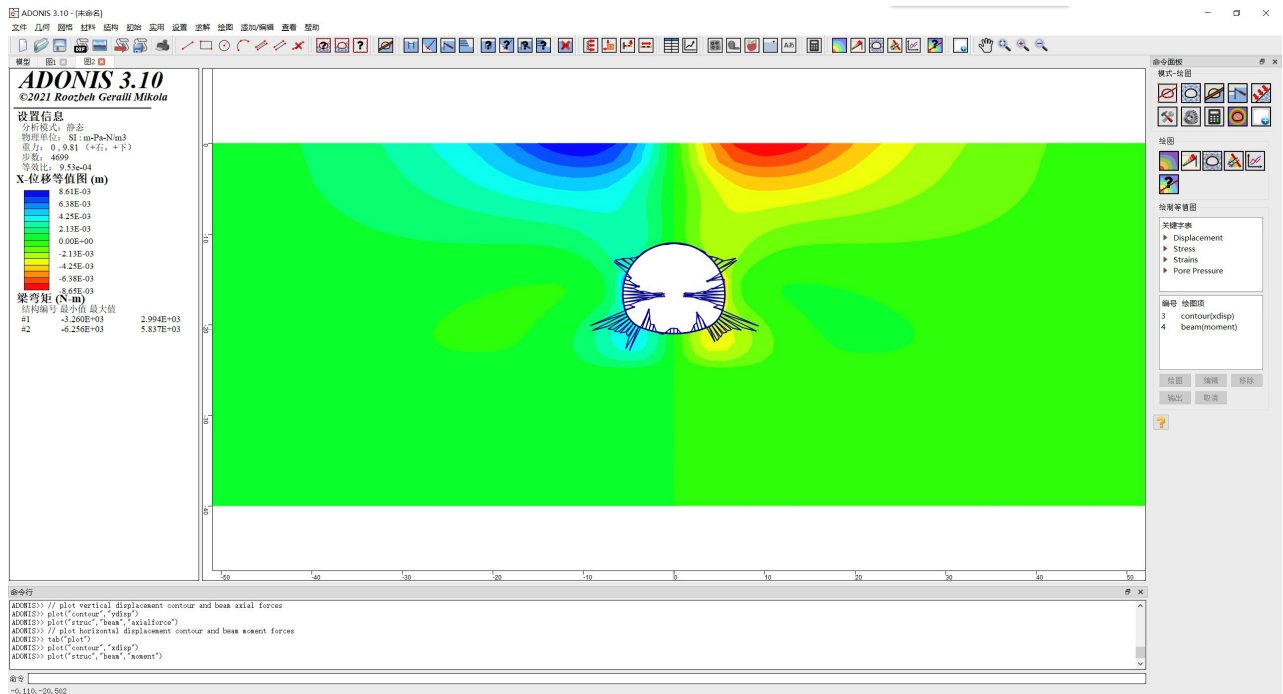


后处理

查看竖直位移等值图和梁轴力图。



查看水平位移等值图及梁弯矩图。



模型的脚本

本教程的命令如下:

```
// 创建新模型
newmodel()

// 设置单位
set("unit", "stress-pa")

// 创建几何
rect("startPoint", -60, -40, "endPoint", 60, 0)
line("startPoint", -60, -2, "endPoint", 60, -2)
line("startPoint", -60, -25, "endPoint", 60, -25)
arc("startPoint", 3.88, -20.23, "midPoint", 4.69, -19.62, "endPoint", 5.25, -
18.77, "numSeg", 6)
arc("startPoint", 4.95, -13.87, "midPoint", 0.00, -11.00, "endPoint", -4.95, -
13.87, "numSeg", 25)
arc("startPoint", -5.25, -18.77, "midPoint", -4.69, -19.62, "endPoint", -3.88, -
20.23, "numSeg", 6)
arc("startPoint", -3.88, -20.23, "midPoint", 0.00, -21.00, "endPoint", 3.88, -
20.23, "numSeg", 20)
arc("startPoint", 5.25, -18.77, "midPoint", 5.57, -17.55, "endPoint", 5.63, -
16.29, "numSeg", 6)
arc("startPoint", 5.63, -16.29, "midPoint", 5.42, -15.05, "endPoint", 4.95, -
13.87, "numSeg", 6)
arc("startPoint", -5.25, -18.77, "midPoint", -5.57, -17.55, "endPoint", -5.63, -
16.29, "numSeg", 6)
arc("startPoint", -5.63, -16.29, "midPoint", -5.42, -15.05, "endPoint", -4.95, -
13.87, "numSeg", 6)
arc("startPoint", -5.63, -16.29, "midPoint", 0.00, -17.94, "endPoint", 5.63, -
16.29, "numSeg", 25)
```



```
// 生成网格
```

```
triangle("elemtype","T3")
```

```
discretize("maxedge",0.75)
```

```
triangle("maxedge",0.75)
```

```
// 创建材料
```

```
material("create","Mohr-
```

```
Coulomb","matid",1,"matname","Fill","density",1950,"shear",3.84615e+06,"bulk",8.3  
3333e+06,"coh",1e3,"fric",29,"dil",0,"tens",0)
```

```
material("create","Mohr-
```

```
Coulomb","matid",2,"matname","Soil","density",2200,"shear",4e+07,"bulk",6.66667  
e+07,"coh",3.9e4,"fric",35,"dil",0,"tens",0)
```

```
material("create","Mohr-
```

```
Coulomb","matid",3,"matname","Rock","density",2400,"shear",2e+08,"bulk",3.3333  
3e+08,"coh",1e5,"fric",40,"dil",0,"tens",1.0e4)
```

```
// 指定材料
```

```
material("assign","matid",1,"region",0.0,-1.0)
```

```
material("assign","matid",2,"region",0.0,-9.0)
```

```
material("assign","matid",2,"region",0.0,-13.0)
```

```
material("assign","matid",2,"region",0.0,-18.5)
```

```
material("assign","matid",3,"region",0.0,-32.0)
```

```
// 指定边界条件
```

```
applybc("xfix","xlim",-60.1,-59.9,"ylim",-40.1,0.1)
```

```
applybc("xfix","xlim",59.9,60.1,"ylim",-40.1,0.1)
```

```
applybc("xyfix","xlim",-60.1,60.1,"ylim",-40.1,-39.9)
```

```
// 使用 (NMD)技术增加精确度
```

```
set("useNMD","on")
```

```
// 初始化应力条件
```

```
var grav = 9.81
var dsyy1 = 1950*grav var isyy1 = 0.0
var dsyy2 = 2200*grav
var isyy2 = dsyy2*2.0 - dsyy1*2.0 var dsyy3 = 2400*grav
var isyy3 = dsyy3*(2.0+23.0) - dsyy1*2.0 - dsyy2*23.0 var k01 = 0.5
var k02 = 0.6 var k03 = 0.65
initial("syy",isyy1,"yvar",dsyy1,"xlim",-60,60,"ylim",-2,0)
initial("syy",isyy2,"yvar",dsyy2,"xlim",-60,60,"ylim",-25,-2)
initial("syy",isyy3,"yvar",dsyy3,"xlim",-60,60,"ylim",-40,-25)
initial("sxx",k01*isyy1,"yvar",k01*dsyy1,"xlim",-60,60,"ylim",-2,0)
initial("sxx",k02*isyy2,"yvar",k02*dsyy2,"xlim",-60,60,"ylim",-25,-2)
initial("sxx",k03*isyy3,"yvar",k03*dsyy3,"xlim",-60,60,"ylim",-40,-25)
initial("szz",k01*isyy1,"yvar",k01*dsyy1,"xlim",-60,60,"ylim",-2,0)
initial("szz",k02*isyy2,"yvar",k02*dsyy2,"xlim",-60,60,"ylim",-25,-2)
initial("szz",k03*isyy3,"yvar",k03*dsyy3,"xlim",-60,60,"ylim",-40,-25)

// 添加重力
set("gravity",0,grav)

// 求解初始状态
solve()

// 重置位移为 0
initial("xydisp",0)

// 开挖顶部 (砂层)
excavate("region",0.0,-13.0)
// 求解 60% 应力释放 (剩下 40%)
solve("relax","relaxFactor",0.6,"relaxStep",250,"xlim",-8.5,8.5,"ylim",-22.0,-8.0)

// 添加喷射混凝土
var beam_nu = 0.2; // shotcrete poisson's ratio
```

```
var beam_th = 0.1; // shotcrete thickness
var beam_b = 1.0; // out of plane length
var beam_area = beam_th * beam_b; // shotcrete area
var beam_I = (beam_b*Math.pow(beam_th,3))/12.0; // shotcrete moment of
inertia
var beam_ymod = 15e9 / (1-Math.pow(beam_nu,2)); // E should be divided by
(1 nu^2) to accountor plane-strain conditions.
structure("drawbeam","beamid",1,"xlim",-6.5,6.5,"ylim",-16.3,-10.5)
structure("material","beamid",1,"area",beam_area,"I",beam_I,"ymod",beam_ym
od)

// 求解平衡
solve()

// 开挖剩下台阶
excavate("region",0.0,-19.5)

// 添加喷射混凝土
structure("drawbeam","beamid",1,"xlim",-6.5,6.5,"ylim",-21.0,-16.3)

// 求解平衡
solve()

// 绘制竖向位移等值图和梁轴力图
plot("contour","ydisp")
plot("struc","beam","axialforce")

// 绘制水平位移等值图和梁弯矩图
tab("plot")
plot("contour","xdisp")
plot("struc","beam","moment")
```