

岩土工程有限元分析软件

PLAXIS 3D 2016[®]

案例教程

砂土地基中的基坑开挖



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

砂土地基中的基坑开挖.....	1
几何模型.....	2
1.1 工程属性.....	2
1.2 土层定义.....	2
1.3 结构单元定义.....	4
网格划分.....	7
执行计算.....	8
查看计算结果.....	11

砂土地基中的基坑开挖

本章讲述软粘土和砂土地基中的基坑开挖施工。该基坑相对较小，尺寸为 $12\text{m} \times 20\text{m}$ ，开挖至地表以下 6.5m 。采用支撑、腰梁和锚杆作为基坑的支护结构。开挖完毕后，将在基坑的一侧施加面荷载。

本例中几何模型尺寸为 80m 宽、 50m 长，如图 1 所示。基坑位于几何模型的正中间。图 2 是基坑的一个剖面图。粘土层按不透水考虑。

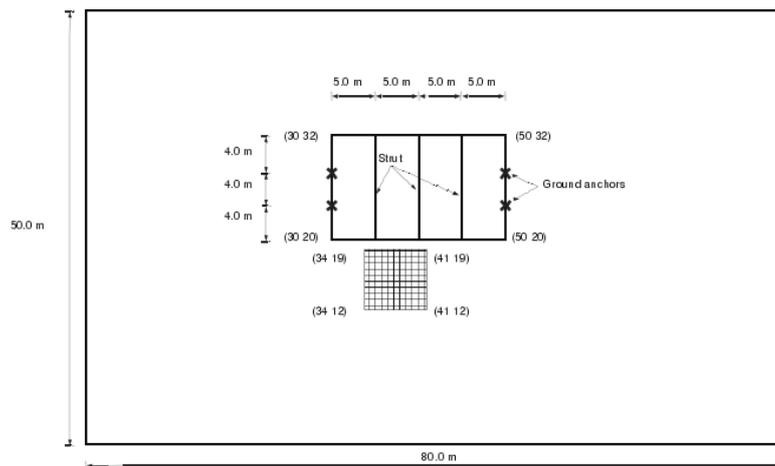


图 1 基坑俯视图

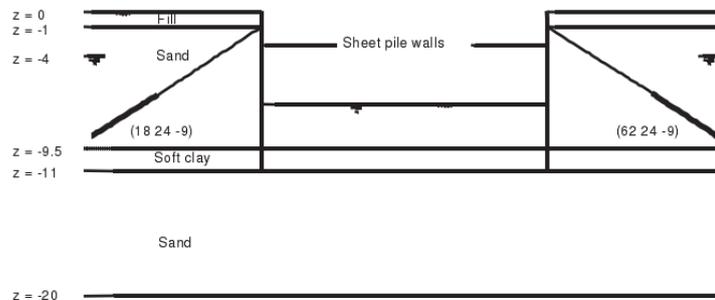


图 2 基坑剖面图

目标:

- 使用硬化土模型
- 模拟土层锚杆
- 使用界面功能
- 定义超固结比(OCR)
- 给土层锚杆施加预应力
- 改变水力条件
- 选择应力点以生成应力-应变曲线
- 观察塑性点

几何模型

按照如下步骤创建几何模型：

1.1 工程属性

1. 开启一个新的工程。
2. 为该工程输入一个合适的标题。
3. 定义土层平面尺寸： $x_{min}=0, x_{max}=80, y_{min}=0, y_{max}=50$ 。

1.2 土层定义

定义土层需添加一个钻孔并赋予其材料属性。由于所有土层都是水平的，只需定义一个钻孔即可。

1.  在点(0,0,0)处创建钻孔。这时修改土层(*Modify soil layers*)窗口自动弹出。
2. 分别在从上往下-1、-9.5、-11、-20 的位置处添加四层土层。将钻孔柱状中的水头设为-4m。
3.  打开材料组(*Material sets*)窗口。
4. 在土和界面(*Soil and interfaces*)组类型下创建一个新的数据组。
5. 将新的数据组命名为“填土(*Fill*)”。
6. 从材料模型下拉菜单中选择硬化土模型(*Hardening Soil*)。与摩尔-库伦模型相比，硬化土模型考虑了原始加载与卸载-重加载时刚度的不同。更多关于硬化土模型的详尽介绍，见材料模型手册第六章。
7. 根据表 1.1 定义土的饱和和非饱和重度。
8. 在参数页面中，根据表 1.1 输入参数 $E_{50}^{ref}, E_{oed}^{ref}, E_{ur}^{ref}, c_{ref}', \varphi_{ref}', \psi', v_{ur}', m$ 的值。注意泊松比是一个高级参数。
9. 在本例中不考虑固结，土体的渗透性不会影响到计算的结果。因此，渗流参数(*Flow parameters*) 页面中的参数都保持默认值。

表 1.1 土层材料属性

参数	符号	填土	砂土	软粘土	单位
一般设定					
材料模型	<i>Model</i>	硬化土模型	硬化土模型	硬化土模型	--
排水类型	<i>Type</i>	排水	排水	不排水 A	--
地下水位以上重度	γ_{unsat}	16.0	17.0	16.0	kN/m^3
地下水位以下重度	γ_{sat}	20.0	20.0	17.0	kN/m^3
参数					
标准三轴排水试验割线刚度	E_{50}^{ref}	2.2×10^4	4.3×10^4	2.0×10^3	kN/m^2
主固结加载切线刚度	E_{oed}^{ref}	2.2×10^4	2.2×10^4	2.0×10^3	kN/m^2
卸载/重加载刚度	E_{ur}^{ref}	6.6×10^4	1.29×10^5	1.0×10^4	kN/m^2

刚度的应力水平相关幂值	m	0.5	0.5	1.0	--
内聚力	c'_{ref}	1	1	5	kN/m^2
摩擦角	φ'	30.0	34.0	25.0	°
剪胀角	ψ	0.0	4.0	0.0	°
泊松比	ν'_{ur}	0.2	0.2	0.2	--
界面					
界面强度	--	手动	手动	手动	--
强度折减因子	R_{inter}	0.65	0.7	0.5	--
初始条件					
K_0 的确定	--	自动	自动	自动	--
侧向土压力系数	K_0	0.5000	0.4408	0.7411	--
超固结比	OCR	1.0	1.0	1.5	--
覆土压力	POP	0.0	0.0	0.0	--

10. 在界面页面，在强度框中选择手动，输入参数 R_{inter} 的值为 0.65，该参数代表界面强度和土体强度的关系，有以下公式：

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

因此，使用输入的 R_{inter} 值，可以给出相对于周围土体的摩擦角和内聚力得到折减的界面摩擦角和粘聚力。

注：一旦在强度(Strength)下拉下单中选择了刚性(Rigid)选项，界面就和周围土体具有相同的强度，此时 $R_{inter} = 1.0$ 。

注意， $R_{inter} < 1.0$ 时，界面的强度和刚度都会得到折减，详见参考手册第 6.1.4 节的介绍。

- 在初始条件页面中，根据表 1.1 定义 OCR 值。
- 点击 OK 关闭窗口。
- 按照同样的方法定义砂土和软粘土的材料属性，见表 1.1。
- 关闭材料组窗口后，点击 OK 关闭修改土层窗口。
- 在土体模式(Soil)中右击上部土层。在弹出的鼠标右键菜单中，在设置材料菜单中选择填土 Fill 选项。
- 用同样的方法为位于 $y=-9.5m$ 和 $y=-11.0m$ 之间的土层赋予软粘土材料属性。
- 将砂土材料属性赋予其余两层土。
- 进入结构模式(Structure)定义结构单元。

注：拉伸截断选项(Tension cut-off)默认激活，其值为 0 kN/m²。该选项可在土体窗口(Soil)下参数页面(Parameters)中的高级 Advanced 选项中找到。此处可修改拉伸截断(Tension cut-off)值，也可完全冻结该选项。

1.3 结构单元定义

以下介绍板桩墙、腰梁、支撑、土层锚杆、面荷载的创建。

1.  在点(30,20,0)、(30,32,0)、(50,32,0)、(50,20,0)之间创建面。
2.  将该面拉伸至 $z=-1$, $z=-6.5$, $z=-11$ 。
3. 右击创建的最下面的体积（位于 $z=0$ 和 $z=-11$ 之间），从弹出菜单中选择分解为面选项(Decompose into surface)。
4. 删除最上面的面（2个）。当分解体积时又生成了一个面。
5. 隐藏开挖体积（不要删除）。模型浏览器和选择浏览器树目录中的“眼睛”按钮可用于隐藏部分模型，以便于更好的观察。隐藏对象用闭上的眼睛表示。
6.  点击创建结构按钮(Create structure)。
7.  在 $z=-1m$ 位置处沿基坑四周创建梁（腰梁）。按住 *Shift* 键在 $-z$ 方向移动鼠标光标，当鼠标光标指示器显示鼠标光标 z 坐标为 -1 时停止移动鼠标。注意当你放开 *Shift* 键时，光标位置的 z 坐标就不再变化，这表明你只能在 $z=-1m$ 处的 xy 平面上进行绘制了。
8. 点击点(30,20,-1)、(30,32,-1)、(50,32,-1)、(50,20,-1)、(30,20,-1)绘制腰梁。点鼠标右键停止绘制。
9.  在点(35,20,-1)和(35,32,-1)之间创建梁（支撑）。按 *Esc* 键结束绘制支撑。
10.  根据表 1.2 创建腰梁和支撑的材料属性。
11.  在 $x=35$ （已有）， $x=40$ 、 $x=45$ 处分别复制三个支撑。

表 1.2 梁的材料属性

参数	符号	支撑	腰梁	单位
横截面积	A	0.007367	0.008682	m^2
材料重度	γ	78.5	78.5	kN/m^3
材料属性	Type	线性	线性	--
杨氏模量	E	2.1×10^8	2.1×10^8	kN/m^2
惯性矩	I_3	5.073×10^{-5}	1.045×10^{-4}	m^4
	I_2	5.073×10^{-5}	3.66×10^{-4}	m^4

12. 土层锚杆模拟

在 PLAX 3D 中可以使用点对点锚杆(Node-to-node)和嵌入桩选项(Embedded pile)模拟土层锚杆，步骤如下：

- 1)  首先用点对点锚杆(Node-to-node)的创建土层锚杆的自由段，点击创建结构按钮，在出现的选项中选择相应按钮开始创建点对点锚杆。

- 2) 点击命令行，输入“30、24、-1、21、24、-7”。按下 Enter 和 Esc 建创建第一根土层锚杆的自由段。
- 3) 在点(50,24,-1)和(59,24,-7)之间创建一个点对点锚杆。
- 4)  用嵌入桩选项(Embedded pile)创建锚杆的注浆段。在点(21,24,-7)和(18,24,-9)、(59,24,-7)和(62,24,-9)之间创建嵌入桩。
- 5)  分别根据表 1.3 和表 1.4 创建嵌入桩和点对点锚杆的材料属性，并将其赋予相应构件。

表 1.3 点对点锚杆的材料属性

参数	符号	点对点锚杆	单位
材料类型	Type	弹性	--
轴向刚度	EA	6.5×105	kN

表 1.4 嵌入桩的材料属性(灌浆体)

参数	符号	灌浆体	单位
杨氏模量	E	3×107	kN/m2
重度	γ	24	kN/m3
桩类型	--	预定义	--
预定义桩类型	--	实心圆桩	--
直径	Diameter	0.14	m
侧摩阻分布	Type	线性	--
桩顶侧阻力	Ttop,max	200	kN/m
桩底侧阻力	Tbot,max	0.0	kN/m
基底反力	Fmax	0.0	kN

注：表示赋予对象的材料属性的颜色可以修改，点击所选材料属性的颜色框，从窗口中的颜色区域选择一种颜色。

- 6) 复制已创建的锚杆注浆段，创建其余的锚杆注浆段。
- 7)  点击选择按钮(Select)，并按住 Ctrl 键点击锚杆的两个部分的所有单元。
- 8)  使用创建阵列功能(Create array)，在形状(Shape)下拉菜单中选择 1D，y 方向选项，定义列间距为 4m，将土层锚杆的两个部分(2 根嵌入桩+2 根点对点锚杆)复制为 4 个完整的锚杆，分别位于 y=24 和 y=28 处。
- 9)  全选所有锚杆部分（8 个对象），按住 Ctrl 键点击鼠标右键，在弹出菜单中选择群组（Group）选项。
- 10)  在模型浏览器树目录中，点击群组前面的“+”号展开群组子树。
- 11) 点击 Group_1 重命名为“GroundAnchors”。

注：工程中的对象名称不能包含任何空格和除“_”以外的特殊字符。

13. 按照下面步骤定义板桩墙和相应的界面：

- 1)  选中在分解体积时创建的所有四个竖直面，按住 Ctrl 键，点击鼠标右键，在弹出菜单中选择**创建板 (Create plane)** 选项。
- 2)  根据表 1.5 **创建板桩墙 (板)** 的材料属性，并将其赋予四片墙。
- 3) 选中所有面，在鼠标右键菜单中选择相应选项，在这些面上添加正向界面和负向界面。

注：界面的“正”和“负”没有物理意义，只是为了区分面两侧的界面。

表 1.5 板桩墙的材料属性

参数	符号	板桩墙	单位
厚度	d	0.379	m
重度	γ	2.55	kN/m ³
材料属性	Type	线性、各项异性	--
杨氏模量	E1	1.46×10^7	kN/m ²
	E2	7.3×10^5	kN/m ²
泊松比	ν	0.0	--
剪切模量	G12	7.3×10^5	kN/m ²
	G13	1.27×10^6	kN/m ²
	G23	3.82×10^5	kN/m ²

- 4) 定义了各向异性（两个方向刚度不同）的板桩墙。局部坐标轴应该指向正确的方向（定义哪个是刚性方向，哪个是柔性方向）。一般情况下，垂直方向是板桩墙刚度最大的方向，局部坐标 1 轴应指向 z 方向。

 在**模型浏览器 (Model explorer)** 树目录中展开面子树，将功能轴设为手动，将 Axis1z 设为-1。其他板桩墙也做同样的设置。

14.  通过点(34,19,0)、(41,19,0)、(41,12,0)、(34,12,0)创建一个面荷载。几何模型定义完成。

注：局部坐标 1 轴用红色箭头表示，2 轴用绿色箭头表示，3 轴用蓝色箭头表示。

更多关于板的局部坐标的信息详见参考手册。

网格划分

1. 进入网格模式。
2.  创建网格。设置单元分布(*Element distribution*)为粗。
3.  查看网格。隐藏模型中的土层方便查看嵌入桩。

执行计算

计算过程一共包含六个阶段。初始阶段用 *K0 过程* 生成初始应力。下一阶段是板桩墙的建造和第一次开挖。然后是腰梁和支撑的安装。阶段 3 激活锚杆并施加预应力。之后的阶段是基坑的进一步开挖。最后一个阶段是在基坑附近施加附加荷载。

1. 点击 **分步施工(Staged construction)** 标签，定义计算阶段。
2. 初始阶段已自动创建。保持其计算类型为 *K0 过程*。确保所有土层都激活，而所有结构单元都未激活。
3.  添加一个新的阶段 *Phase_1*。该阶段采用参数默认值。
4. 冻结第一次开挖的土体，从 $z=0$ 至 $z=-1$ 。
5. 在 **模型浏览器(Model explorer)** 中，点击所有板和界面前面的复选框 *checkbox* 将其激活。工程中激活的单元在 **模型浏览器** 中用绿色对勾表示。
6.  添加一个新的阶段 *Phase_2*。还是采用参数默认值。
7. 在 **模型浏览器(Model explorer)** 中激活所有的梁。
8.  添加一个新的阶段 *Phase_3*，依旧采用参数默认值。
9. 在 **模型浏览器(Model explorer)** 中激活锚杆群组。
10.  选择其中一根点对点锚杆。
11.  在 **选择浏览器(Selection explorer)** 中展开点对点锚杆选项。
12. 点击 **调整预应力按钮(Adjust prestress)**，将其修改为 *True*，输入一个 *200kN* 的预应力，详见图 3.1 所示。
13. 对其他所有点对点锚杆做相同的设置。



图 3.1 选择浏览器中的点对点锚杆

14.  添加另一个阶段 *Phase_4*，依旧采用参数默认值。
15. 进入 **水位模式 (Water levels)**。
16.  选择该阶段要开挖的土体，从 $z=-1$ 至 $z=-6.5$ 。

17. 在选择浏览器(Selection explorer)中展开土体树目录，接着展开水力条件子目录，点击条件并从下拉菜单中选择干(Dry)选项。



图 3.2 选择浏览器中的渗流条件

18. 隐藏基坑周围的土层。
19. 选择开挖面以下的土层 (即从 $z=-6.5$ 至 $z=-9.5$)。
20. 在选择浏览器(Selection explorer)中展开土体树目录，接着展开水力条件子目录。
21. 点击条件并从下拉菜单中选择水头 Head)选项。输入 $zref=-6.5m$ 。
22. 选择开挖面以下的软粘土体。
23. 将水力条件(Water Conditions)设为内插 Interpolate。
24. 进入分步施工(Staged construction)模式。
25. 冻结要开挖的土体，从 $z=-1$ 至 $z=-6.5$ 。
26. 预览该计算阶段。
27. 在预览窗口中点击竖向剖面按钮(Vertical cross section)，过基坑画一条线来定义一个纵剖面。
28. 从应力菜单中选择 p_{steady} 。
29. 用等值线显示稳态孔隙水压力分布。确保视图菜单中勾选了图例选项。稳态孔隙水压分布如图 3.3 所示。滚动鼠标滚轮缩放图形以便观察。

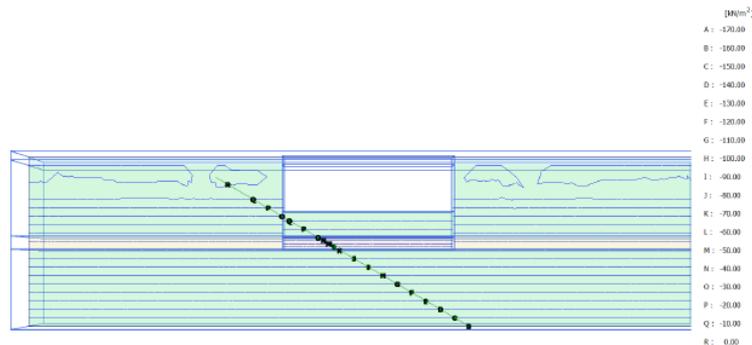


图 3.3 纵向剖面中 Phase_4 的稳态孔隙水压预览

30. 点击关闭按钮返回输入程序。
31.  添加另一个阶段 Phase_5，依旧采用参数默认值。
32. 激活面荷载，将其值设为 $\sigma_z = -20 \text{ kN/m}^2$ 。
33. 定义曲线点
 - 1) 在开始计算之前，选择基坑和荷载附近的一些应力点，后面可以绘制应力-应变曲线。
 - 2)  点击**选择曲线点按钮**(*Select points for curves*)，就会在窗口中显示模型和选择点窗口。
 - 3) 定义点(37.5,19,-1.5)作为关注点坐标(*Point-of-interest coordinates*)。
 - 4) 点击搜索最近按钮(*Search closest*)，将显示跟关注点最近的节点和应力点。
 - 5) 点击要选择的应力点前面的复选框 *checkbox*，选择的应力点就会出现在列表里。
 - 6) 再选择点(37.5,19,-5)、(37.5,19,-6)、(37.5,19,-7)附近的应力点，然后关闭选择点窗口。
 - 7) 点击更新按钮(*Update*)以关闭输出程序。
34.  开始运行计算。
35.  计算完成之后保存。

注：除了在计算之前选择曲线节点和应力点之外，也可以在计算后查看输出计算结果时选择点。但是，这样一来曲线就不够精确了，因为此时只考虑了保存的计算步结果。

绘制结构内力的曲线，可以只在计算之后选择节点。

也可以通过直接点击来选中节点和应力点。移动鼠标时，窗口底部的光标位置指示栏中将给出准确的位置坐标。

查看计算结果

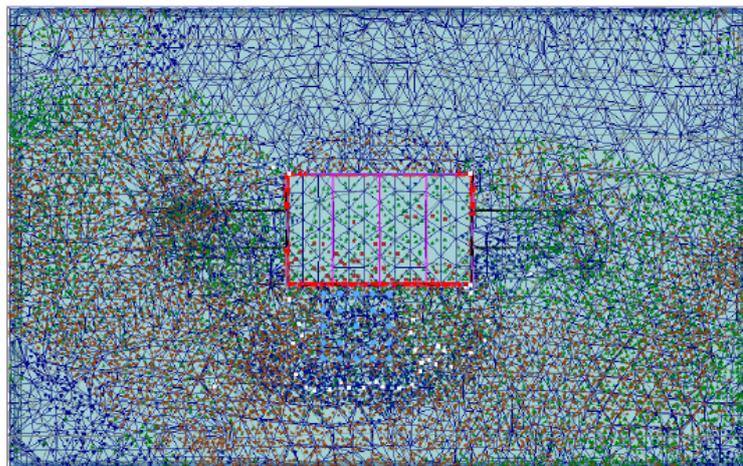
计算完成后，从阶段树目录中选择一个计算阶段，点击**查看计算结果**按钮来查看基坑计算结果。

1.  选择最后一个计算阶段 *Phase_5*，点击**查看计算结果**按钮(*View calculation results*)。输出程序将打开并显示最后一个阶段结束时的变形网格。
2. 在相应菜单中选择想要查看的输出项来查看应力、变形、三维几何模型。比如，从应力菜单中选择塑性点(*Plastic points*)以观察模型中的塑性点。
3. 如图 4.1，在塑性点(*Plastic points*)窗口中选择除弹性点(*Elastic points*)和仅显示不精确点(*only inaccurate points*)选项之外的所有选项。图 4.2 显示了在最后一个计算阶段结束时模型中产生的塑性点。



图 4.1 塑性点(*Plastic points*)窗口

4.  开始选择结构。点击墙的一部分以选择它，同时按下 **Ctrl+A** 选中所有墙单元。选中的墙单元呈红色。



塑性点

■ 破坏点; □ 拉伸截断点; ▼ 帽盖点; ◆ 帽盖+硬化点; ▲ 硬化点

图 4.2 最后一个计算阶段结束时的塑性点

5. 按住 Ctrl 或 Shift 键，双击其中一个墙单元，观察所有墙单元中的总位移|u|的变形平面。
6.  从工具菜单中选择**曲线管理器(Curves manager)**选项或在工具栏中点击相应的按钮，就可生成一条曲线。
7. 所有预先选中的应力点都显示在**曲线管理器**窗口中的曲线点页面。
8. 创建一张图表。
9. 在下拉菜单中选择点 K 作为曲线的 x 轴，在总应变下面选择 ϵ_1 。
10. 在下拉菜单中选择点 K 作为曲线的 y 轴，在有效主应力下面选择 σ_1 ，见图 4.3。
11. 勾选相应的复选框，将曲线两个轴的符号都反向。
12. 点击 OK 确认输入。
13. 曲线显示的是大主应力与大主应变的关系。在初始条件开始时，二者的值均为 0。初始条件生成后，主应变的值仍为 0，但主应力不再为 0。按照如下步骤在一张图中绘制所有已选应力点的曲线：
 - 1) 选择**添加曲线(Add curve)**→从右键菜单中选择从当前工程。
 - 2) 用同样的方法生成点 L,M,N 的曲线。
 - 3) 图 4.4 中的图形显示了所有四个点的应力-应变曲线。若要查看数据点的信息，确认在**视图菜单(View)**中选择了**显示值(Value indication)**选项，并将鼠标在数据点上放一会儿。此时会给出图中的坐标信息、点号、阶段数和步数。尤其在最后一个计算阶段施加荷载后，最下面一个应力点的应力明显增大。

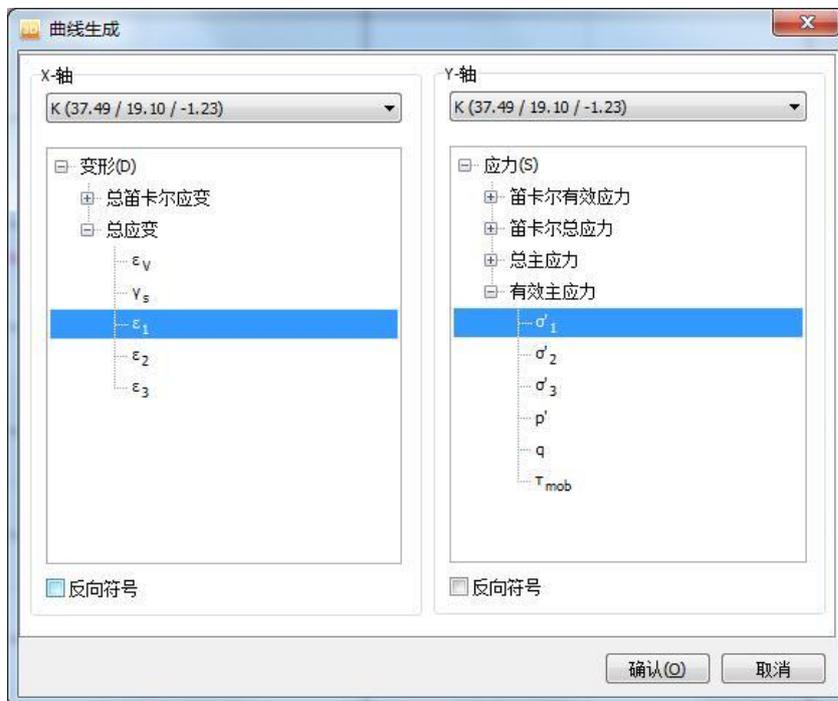


图 4.3 曲线生成窗口

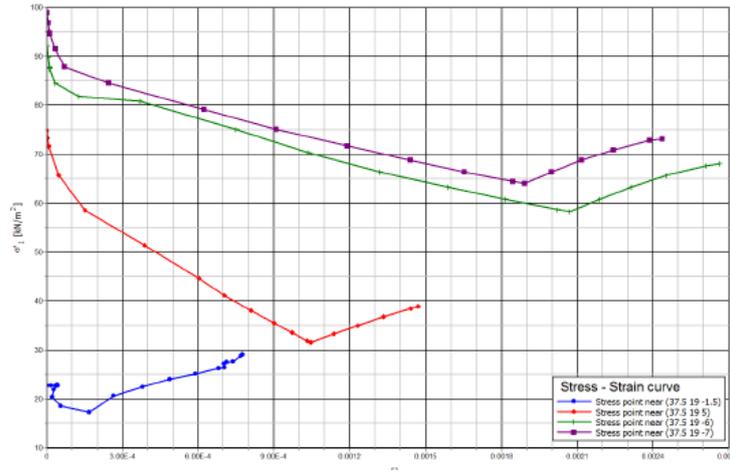


图 4.4 应力-应变曲线

注：想重新进入曲线生成窗口（以下情况下：操作失误，想重新生成曲线或修改曲线），可以从格式菜单(Format)中选择曲线设置选项，弹出曲线生成窗口，点击重新生成按钮(Regenerate)。

格式菜单(Format)中的图表设置选项(Chart settings)可用于修改图表的设置。

14. 按照如下步骤创建应力点 K 的应力路径曲线：

- 1) 创建一个图表。
- 2) 在曲线生成窗口中，下拉菜单中选择点 K，选择笛卡尔有效应力 σ'_{yy} (Cartesian effective stresses)。
- 3) 从图形 y 轴下拉菜单中选择点 K，选择笛卡尔有效应力 σ'_{zz} (Cartesian effective stresses)。
- 4) 点击 OK 完成输入，如图 4.5 所示。

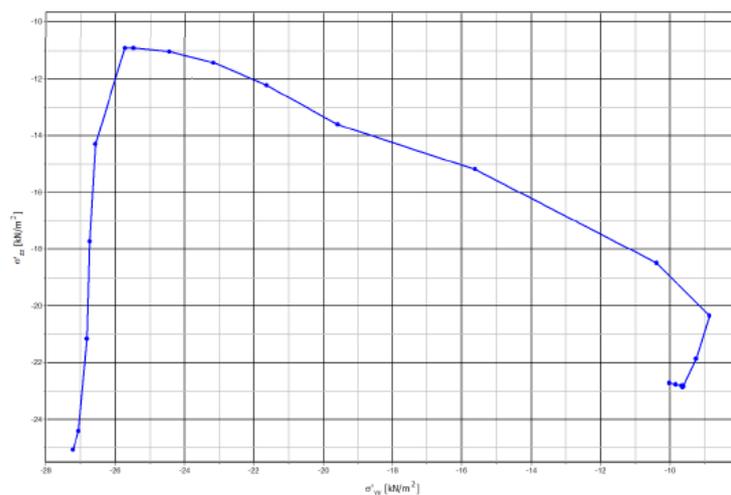


图 4.5 (37.5, 19 -1.5) 附近的应力点 K 处的应力路径图($\sigma'_{yy} - \sigma'_{zz}$ 图)

本教程到此结束！