


Soil Model Verification 模块的应用案例

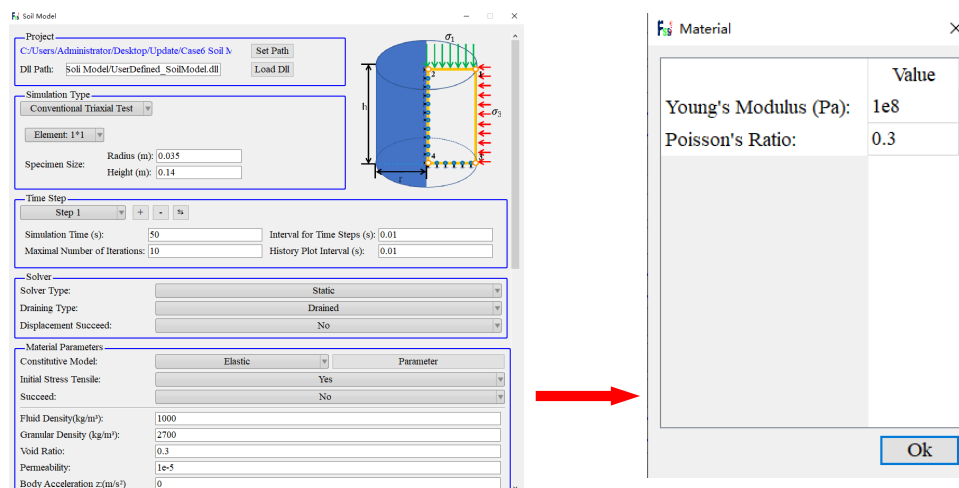
通过 Soil Model Verification 功能模拟室内三轴试验，不仅可以验证本构模型的正确性，而且可以用于标定本构模型涉及的相关参。本章案例介绍了静态加载条件下修正剑桥 Modified Cambridge Soil、Pastor-Zienkiewicz III 本构模型的验证过程。为于真实室内试验过程保持一致，本章案例设置了固结时间步 Step 1 和加载时间步 Step 2 两个时间步。

1.1 修正剑桥本构模型静态排水三轴试验

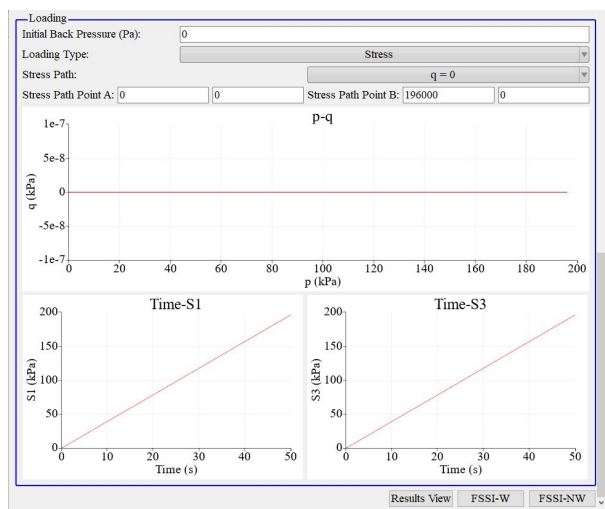
1.1.1 设置固结时间步 Step 1

为了计算初始固结状态，设置 Step1。首先，点击图标，打开 Soil Model Verification 界面。在 Step 1 工作界面下，点击 Set Path 按钮，设置文件保存路径。FssiCAS 求解器类型选择静态求解器，排水类型选择排水，本构模型选择弹性本构，固结围压设置为 196kPa，本构参数及其它参数设置详见图 6-1。

注：Soil Model Verification 模块推荐使用静态求解器。




(a) Step 1 中弹性材料参数设置



(b) 显示 Step 1 应力边界

图 6-1 Step 1 中修正剑桥模型材料参数设置及应力边界显示

1.1.2 设置静态三轴加载时间步 Step 2

点击 Time Step 栏里的 , 命名新添加的时间步 Step 2, 如图 6-2 所示。

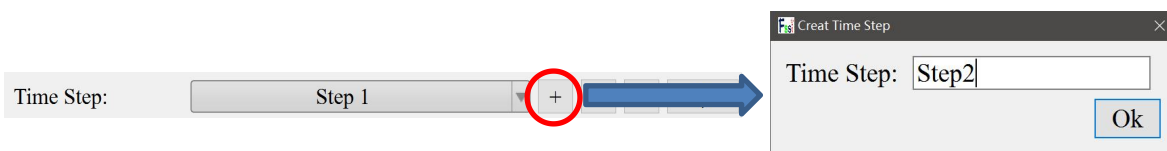


图 6-2 增加并命名计算步 Step 2

在 Step 2 工作界面下, 求解器类型选择静态求解器, 排水类型选择排水, 本构类型选择修正剑桥本构 Modified Cambridge Soil, 本构参数及其它参数设置详见图 6-3。

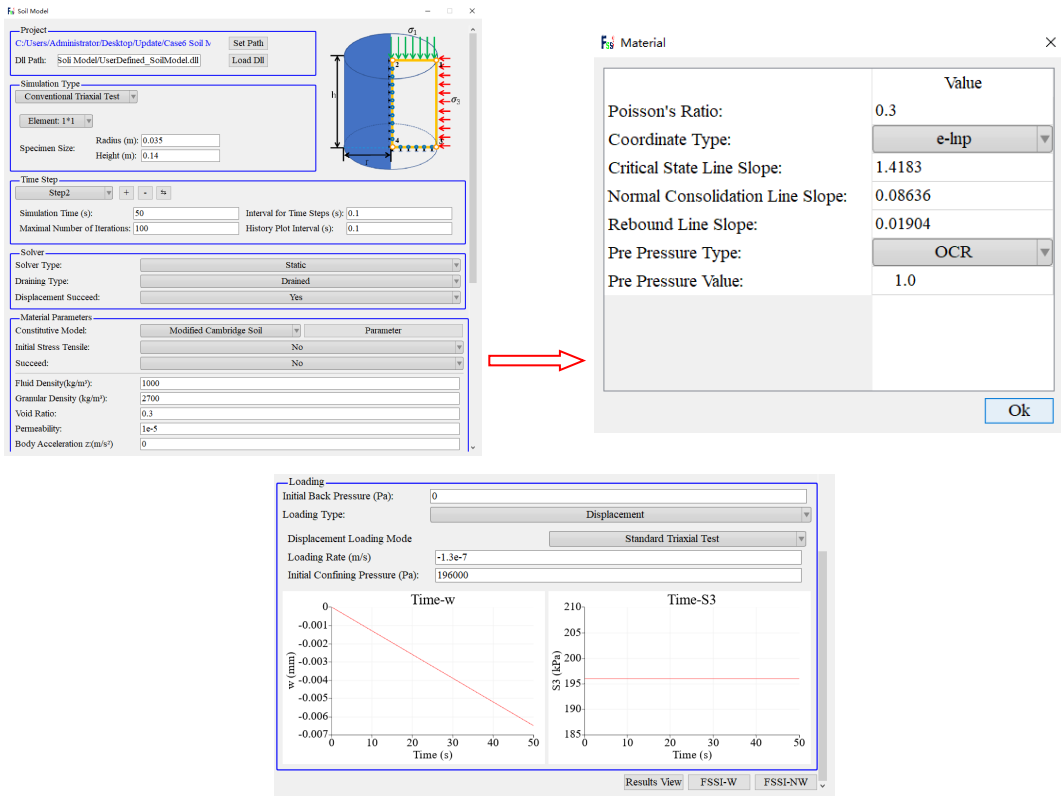


图 6-3 Step 2 中修正剑桥模型材料参数设置

1.1.3 计算与后处理过程

所有参数设置完毕后，点击 FSSI-W 按钮，保存当前项目并开始计算。如果需要执行用户自己编写或修改的计算文件，则需选择 FSSI-NW 进行计算。计算完成时，Monitor 界面显示如图 6-4 红框所示内容。

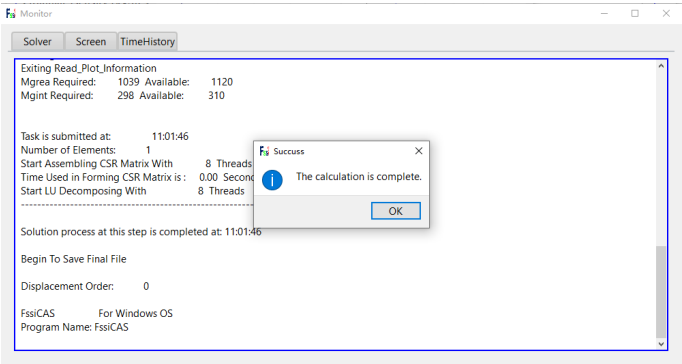


图 6-4 数值计算完成显示结果

进行数值计算的过程中，软件会及时展示计算结果。为方便用户及时了解本构模型的验证结果，FssiCAS 提供了 7 种常见的结果曲线，分别为：广义剪应力-轴向应变曲线、应力路径曲线、

体积应变-轴向应变曲线、孔隙水压力-时间曲线、平均有效应力-时间曲线、孔隙比-时间 q 曲线、轴向位移-时间曲线，具体如图 6-5 所示。

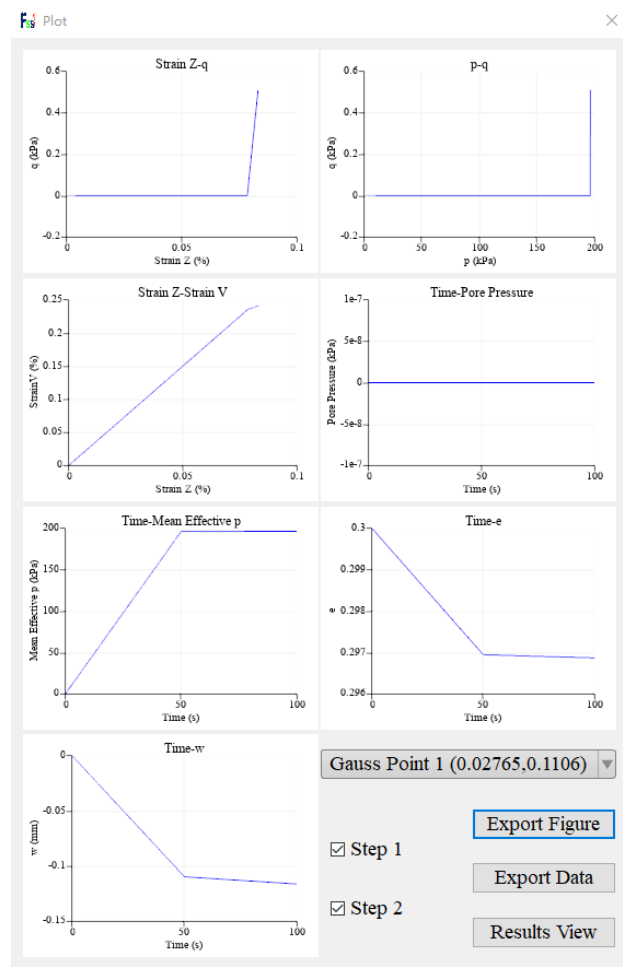


图 6-5 PZ III 修正剑桥静态排水试验结果图界面

注：

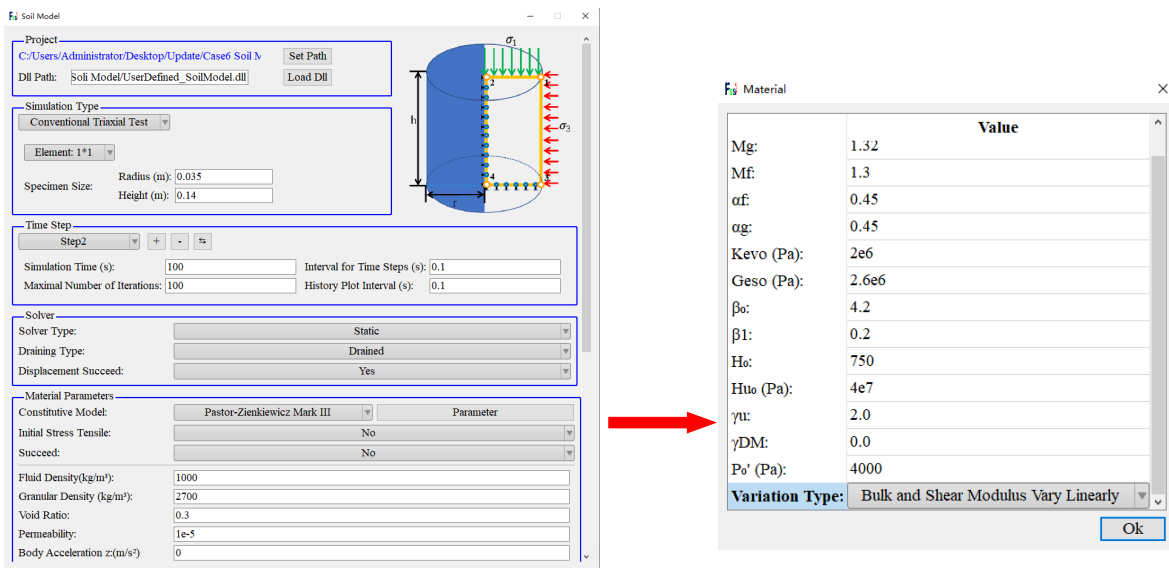
1. 单独勾选 Step 1/2，点击 Results View 可以分别查看单个时间步生成的 7 种结果曲线。
2. 点击高斯点下拉菜单可以查看 Gauss Point 1/2/3/4 中任一高斯点对应结果图。
3. 按住鼠标滚轴，框选 7 种结果图的局部位置可以放大所选区域，点击 Results View 按钮会还原放大的图像。
4. 用户可以根据需要，从 7 种结果图中选择相应图像与试验结果进行对比，从而标定本构参数。

1.2 Pastor-Zienkiewicz III 静态排水三轴试验

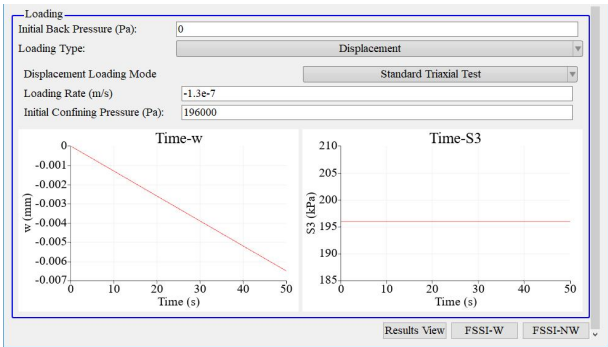
Pastor-Zienkiewicz III 静态三轴试验的 Step 1 参数设置与上述修正剑桥案例相同，如图 6-1 所示。

1.2.1 设置静态三轴加载时间步 Step 2

在 Step 2 界面下工作，求解器类型选择静态求解器，排水类型选择排水，本构类型选择 Pastor-Zienkiewicz III，加载类型选择位移控制，速度为 -1.3×10^{-7} m/s，Pastor-Zienkiewicz III 本构参数及其它参数设置详见图 6-6。



(a) 设置 Step 2 中 Pastor-Zienkiewicz III 模型材料参数



(b) 显示 Step 2 应力边界

图 6-6 Pastor-Zienkiewicz III 模型静态排水试验 Step 2 参数设置及应力边界显示

1.2.2 计算与后处理

所有参数设置完毕后，点击 **FSSI-W** 按钮，保存当前项目并开始计算。如果需要执行用户自己编写或修改的计算文件，则需选择 **FSSI-NW** 进行计算。计算完成时，**Monitor** 界面显示如图 6-7 红框所示所示。数值计算生成的 7 张结果曲线，如图 6-8 所示。

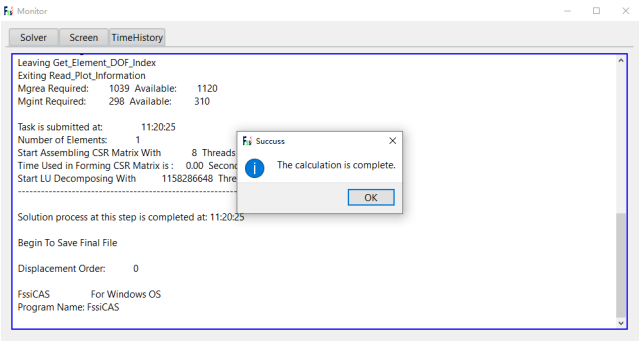


图 6-7 数值计算完成界面

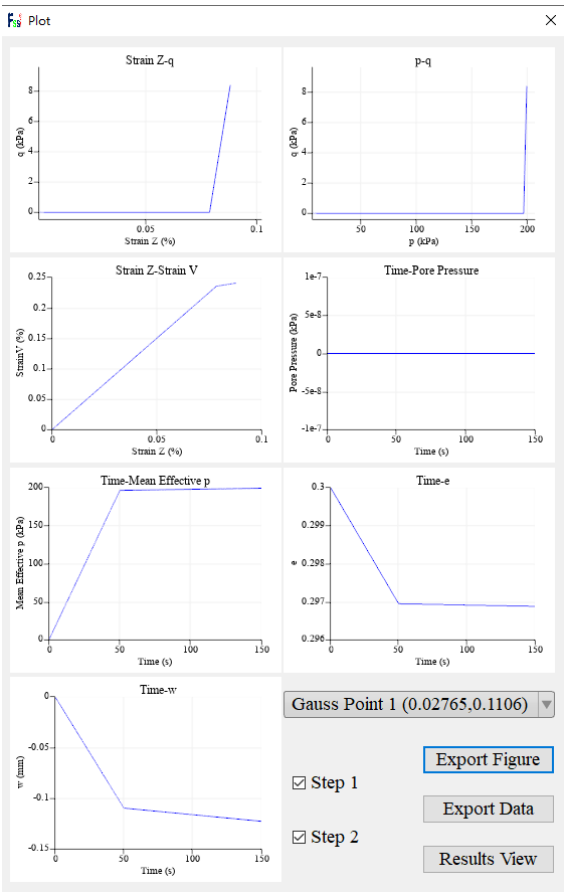


图 6-8 Pastor-Zienkiewicz III 模型静态排水数值试验结果

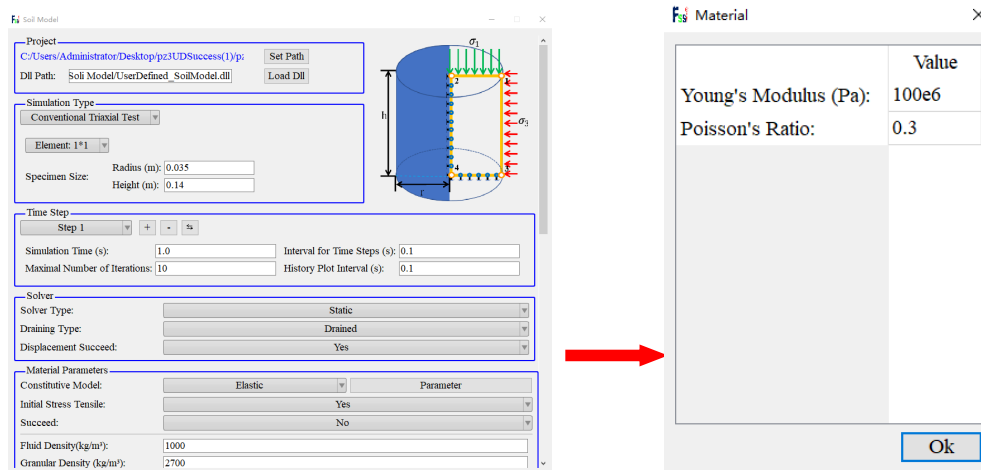
注：

- 1.单独勾选 Step 1/2，点击 Results View 可以分别查看单个时间步生成的 7 种结果曲线。
- 2.点击高斯点下拉菜单可以查看 Gauss Point 1/2/3/4 中任一高斯点对应结果图。
- 3.按住鼠标滚轴，框选 7 种结果图的局部位置可以放大所选区域，点击 Results View 按钮会还原放大的图像。
- 4.用户可以根据需要，从 7 种结果图中选择相应图像与试验结果进行对比，从而标定本构参数。

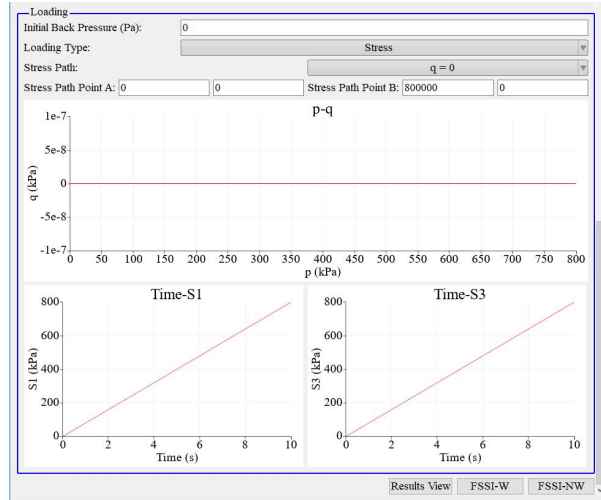
1.3 Pastor-Zienkiewicz Mark III 动态三轴试验

1.3.1 设置动态三轴加载时间步 Step 1

在 Step 1 工作界面下，求解器类型选择静态求解器，排水类型选择排水，本构类型选择弹性本构，第三主应力大小为 800kPa，本构参数及其它参数设置详见图 6-9。



(a) 设置 Step 1 中弹性模型材料参数

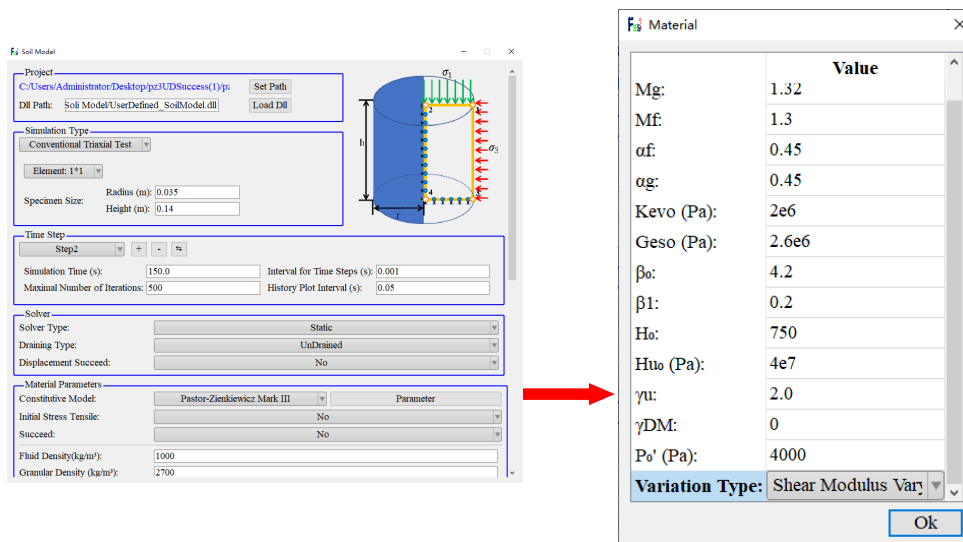


(b) 显示 Step 1 应力边界

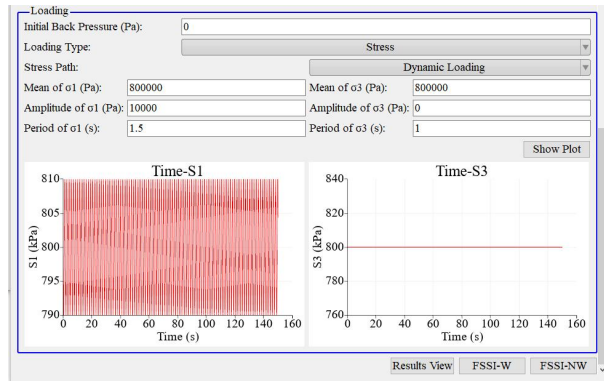
图 6-9 Step 1 中材料参数设置及应力边界显示

1.3.2 设置动态三轴加载时间步 Step 2

在 Step 2 界面下工作，求解器类型为静态求解器，排水类型选择不排水，本构模型选择 Pastor-Zienkiewicz Mark III，加载类型选择动态加载，动态加载的幅值为 10kPa，周期为 1.5s，第三主应力大小为 800kPa。Pastor-Zienkiewicz Mark III 模型参数及其它参数设置见图 6-10。



(a) 设置 Step 2 中 Pastor-Zienkiewicz III 模型材料参数



(b) 显示 Step 2 中应力边界

图 6-10 Step 2 中 Pastor-Zienkiewicz III 模型材料参数设置及应力边界显示

1.3.3 计算与后处理

所有参数设置完毕后，点击 FSSI-W 按钮，保存当前项目并开始计算。如果需要执行用户自己编写或修改的计算文件，则需选择 FSSI-NW 进行计算。计算完成时，Monitor 界面显示如图 6-11 红框所示所示。

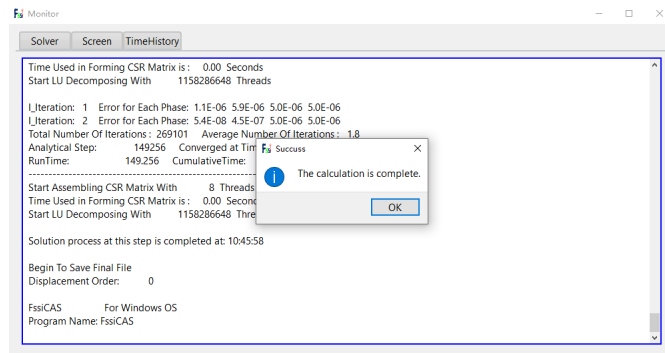


图 6-11 数值计算完成界面

数值计算过程中，自动生成的结果曲线如图 6-12 所示。

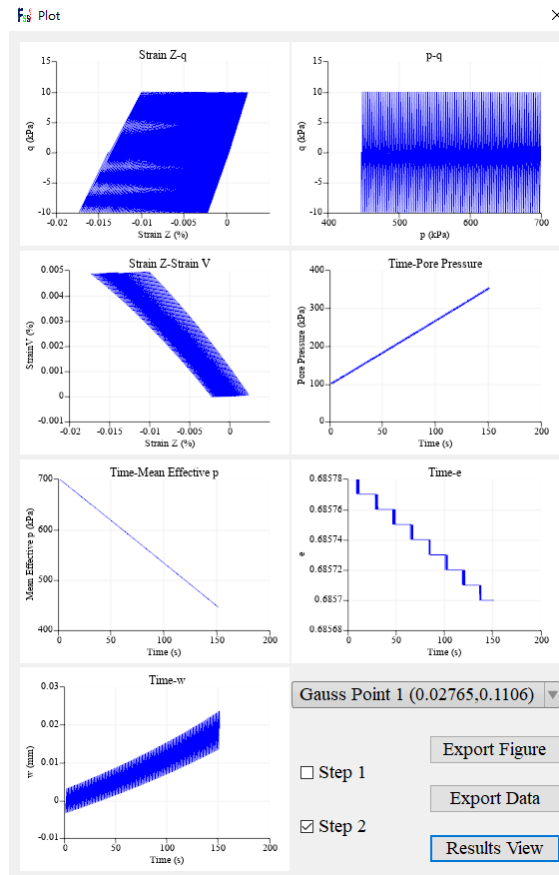


图 6-12 PZ III 动态不排水试验结果曲线

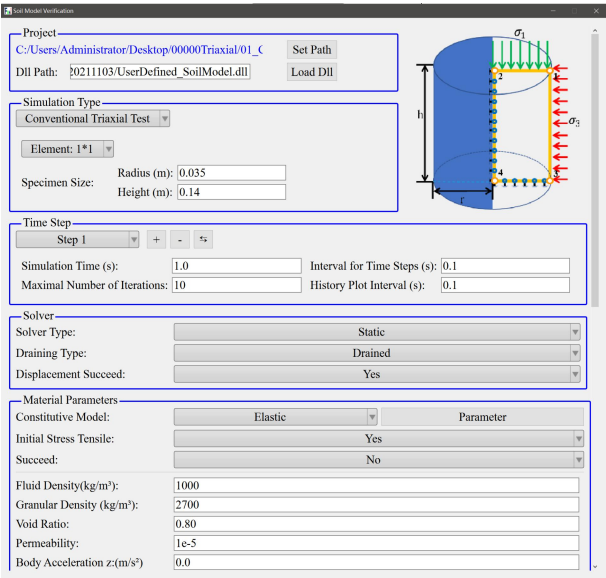
注：

1. 单独勾选 Step 1/2，点击 Results View 可以分别查看单个时间步生成的 7 种曲线。
2. 点击高斯点下拉菜单可以查看 Gauss Point 1/2/3/4 中任一高斯点对应结果图。
3. 按住鼠标滚轴，框选 7 种结果图的局部位置可以放大所选区域，点击 Results View 按钮会还原放大的图像。
4. 用户可以根据需要，从 7 种结果图中选择相应图像与试验结果进行对比，从而标定本构参数。

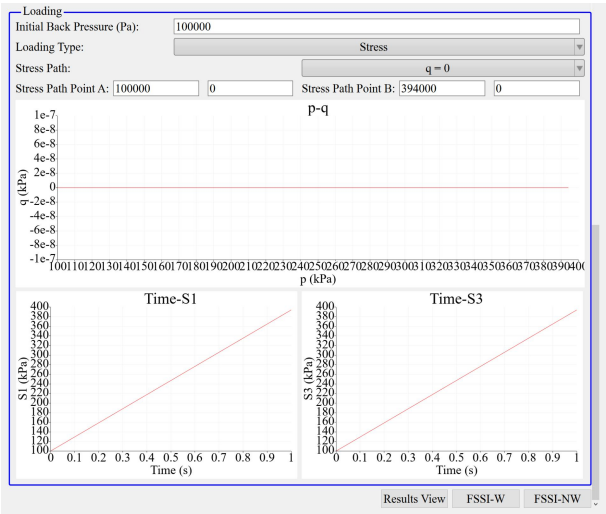
1.4 Cyclic Mobility 模型循环不排水三轴试验

1.4.1 设置初始固结计算步 Step 1

如图 6-13 所示，将反压设置为 100kPa，围压设置为 394kPa，以保证固结完成后试样的初始孔压和有效应力分别为 100kPa 和 294kPa。该阶段本构模型选择弹性（Elastic），计算参数为：弹性模量 100MPa，泊松比 0.30。其余选参数与修正剑桥模型排水三轴试验的固结时间步设置相同。



(a) 设置 Step 1 中弹性模型材料参数



(b) 显示 Step 1 中应力边界

图 6-13 循环不排水三轴试验 Step 1 中 Cyclic Mobility 模型参数设置及应力边界显示

1.4.2 设置动态三轴加载计算步 Step 2

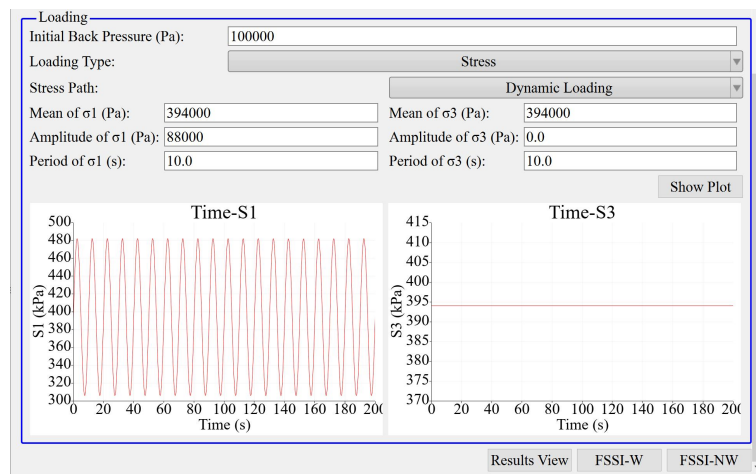
在 Step2 中将排水条件(Draining Type)修改为不排水(Undrained),将加载模式(Loading Type)设置为应力控制 (Stress), 将应力路径 (Stress) 设置为动态加载 (Dynamic Loading), 即可模拟不排水条件下的等应力幅值动三轴试验。对于密实 Toyoura 砂, 本章按照表 6-1 所示的参数进行赋值。动态加载的幅值为 88kPa, 相应的循环应力比为 $CSR=88/294/2=0.15$, 周期为 10.0s, 其它参数设置详见图 10-14。

表 10-5 动三轴试验中 Toyoura 砂 Cyclic Mobility 模型计算参数

参数名称	λ	κ	R_f	e_{ref}	ν	m	a	b_r	R^*	$1/R_0$	ζ_0
参数取值	0.05	0.0064	3.294	0.74	0.3	0.1	2.2	1.5	0.8	5.0	0.0

The screenshot shows the 'Soil Model Verification' software interface. The 'Project' section displays the file path 'C:/Users/Administrator/Desktop/00000Triaxial/01_C' and the DLL path '20211103/UserDefined_SoilModel.dll'. The 'Simulation Type' is set to 'Conventional Triaxial Test' with 'Element: 1*1'. The 'Specimen Size' is defined by a radius of 0.035 m and a height of 0.14 m. The 'Time Step' section shows 'Step2' as the current step, with a simulation time of 200.0 s and a time step interval of 0.001 s. The 'Solver' section is configured with 'Static' solver type, 'Undrained' draining type, and 'No' displacement succeeded. The 'Material Parameters' section lists the constitutive model as 'CyclicMobility_Zhang' and sets various parameters: Fluid Density (1000 kg/m³), Granular Density (2700 kg/m³), Void Ratio (0.80), Permeability (1e-5), and Body Acceleration (0.0 m/s²). A diagram of a triaxial test specimen is shown on the right, illustrating the applied stresses σ_1 and σ_3 .

(a) Step 2 中 Cyclic Mobility 模型计算参数设置



(b) 显示 Step 2 应力边界条件

图 10-14 Step2 中 Cyclic Mobility 模型的材料参数设置及应力边界条件显示

所有参数设置完毕后，点击 FSSI-W 按钮，保存当前项目并开始计算。

1.4.3 计算与后处理

计算得到的 $CSR=0.15$ 条件下 Toyoura 砂的有效应力路径和应力应变关系，分别如图 10-15(a) 和 (b) 所示。可以看出，在循环荷载作用下，试样的有效应力逐渐丧失，变形逐渐增大；液化后剪切荷载作用下试样交替发生流动变形和剪胀硬化，属于典型的循环活动性现象，表明 Cyclic Mobility 模型可以很好地描述砂土的液化行为。

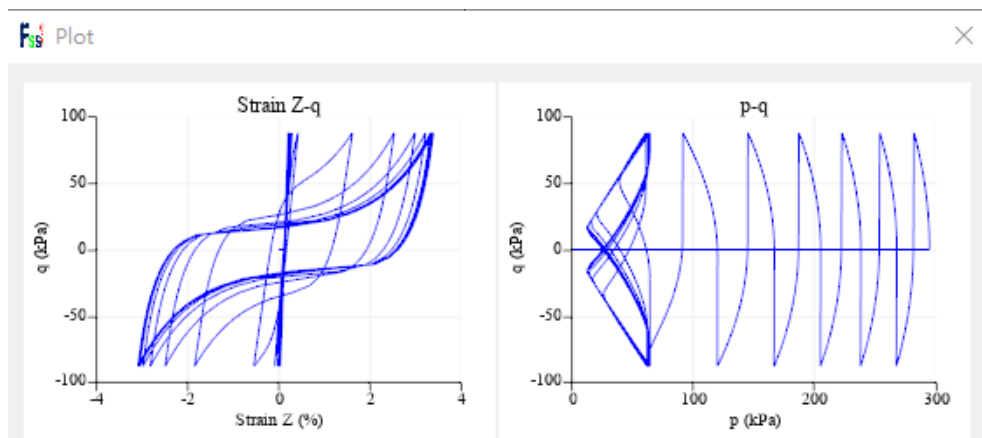


图 10-15 $CSR=0.15$ 条件下 Toyoura 砂的液化行为模拟