

波浪荷载作用下管线和海床的动力响应

本章节采用一个简单案例让用户使用软件计算在波浪荷载作用下管线和海床的动态响应。

本案例模拟 Turcotte et al.在 1984 年所做的水槽实验,模型如图 3-1 所示,相关参数如表 3.1、3.2、3.3 所示;本案例共设置 Step 1 和 Step 2 两个时间步,Step 1 为计算模型的初始状态,Step 2 施加波浪荷载。

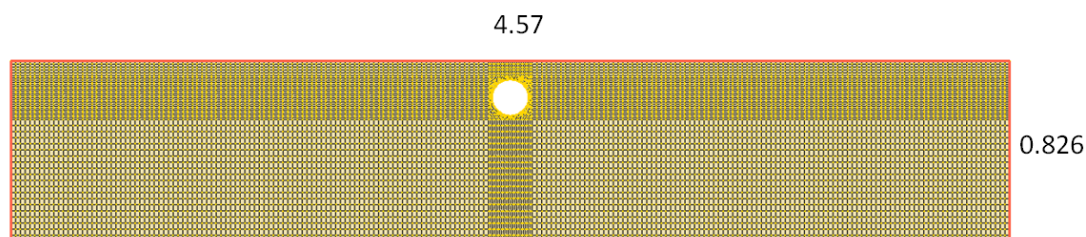


图 3-1 在波浪荷载作用下管线和海床的动态响应的模型图

表 3.1 波浪参数

Wave	
Water Depth (m)	0.533
Wave Period (s)	2.3
Wave Height (m)	0.0302

表 3.2 土体参数(采用简单的线弹性本构模型)

Seabed	
Young's Modulus (Pa)	0.64×10^6
Poisson's Ratio	0.33
Void Ratio	0.724
Permeability (m/s)	1.1×10^{-3}
Granular Density (kg/m ³)	2700

表 5.3 管线的材料参数(采用简单的线弹性本构模型)

Pipeline	
Young's Modulus (Pa)	2.48×10^9
Poisson's Ratio	0.24
Void Ratio	0.47
Permeability (m/s)	1.6×10^{-1}
Granular Density (kg/m ³)	1700
Buried depth (m)	0.168
Diameter (m)	0.166
Wall Thickness (m)	0.01

3.1 FssiCAS 图形界面操作——前处理

3.1.1 新建工程文件

用户首先在任何路径新建一个文件夹，自定义文件名，比如命名为 Pipeline；

用户点击图标 ，即可启动 FssiCAS 软件；

在 FssiCAS 软件中，用户点击 File—New，即可新建一个项目；用户点击 File—Save，选择之前新建的文件夹（选择 Pipeline 文件夹），即可将新建的项目保存在之前新建的文件夹里；当用户点击右上角 ×（退出软件）时，在弹出的窗口中选择 Yes，可保存当前项目，选择 No 即不保存当前项目，即可将新建的项目保存在之前新建的文件夹里，如图 3-2 所示。

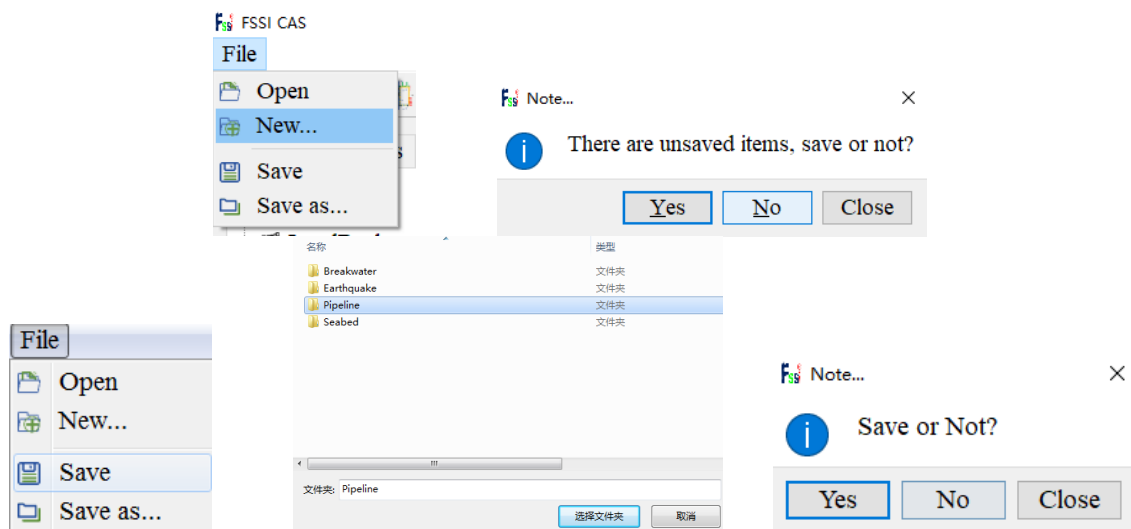


图 3-2 在 FssiCAS 软件中新建和保存一个项目的过程图

3.1.2 导入网格

用户点击在前处理界面上 Model 树状菜单栏中的 Load Mesh，在弹出 Choose GID mesh File 窗口中，选择从 Gid 软件中导出的网格文件，双击或点击打开按钮，可导入几何模型的网格，如图 3-3 所示。

在弹出的 Load Mesh 窗口中设置固体节点数和流体单元阶次，在本案例中固体节点采用四边形四节点一阶单元，流体单元阶次为一阶，因此，固体节点数设置为 4，流体节点阶次设置为 1，点击 OK，如图 3-4 所示。

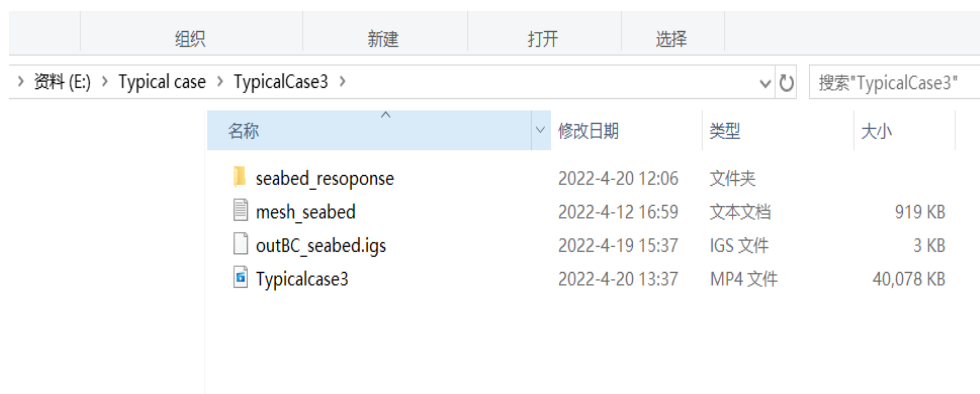


图 3-3 导入 Gid 软件输出的网格文件

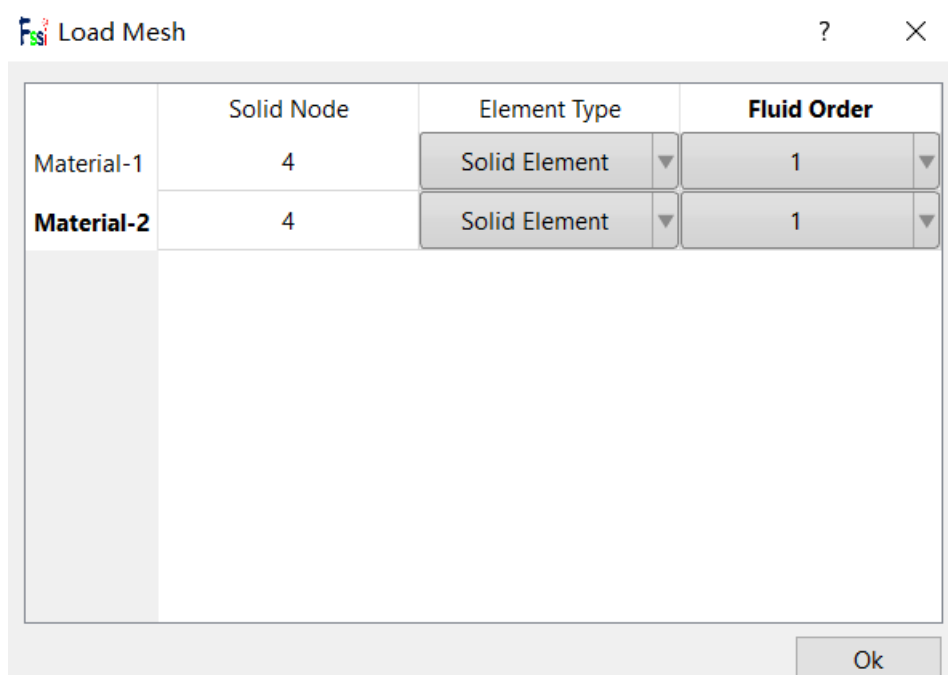


图 3-4 设置固体节点数和流体节点阶次

3.1.3 导入背景线

加载几何模型的背景线，是为了后续施加边界条件、区分材料以及设置输出时程结果的线。

在 Model 树状菜单栏中的 Load Background 中，用户点击 Outer Boundary，在弹出的 Outer Boundary 窗口中点击 Choose File，选择从 Gid 或 Solidworks 等建模软件中导出的背景线.igs 文件，如图 3-5 所示。

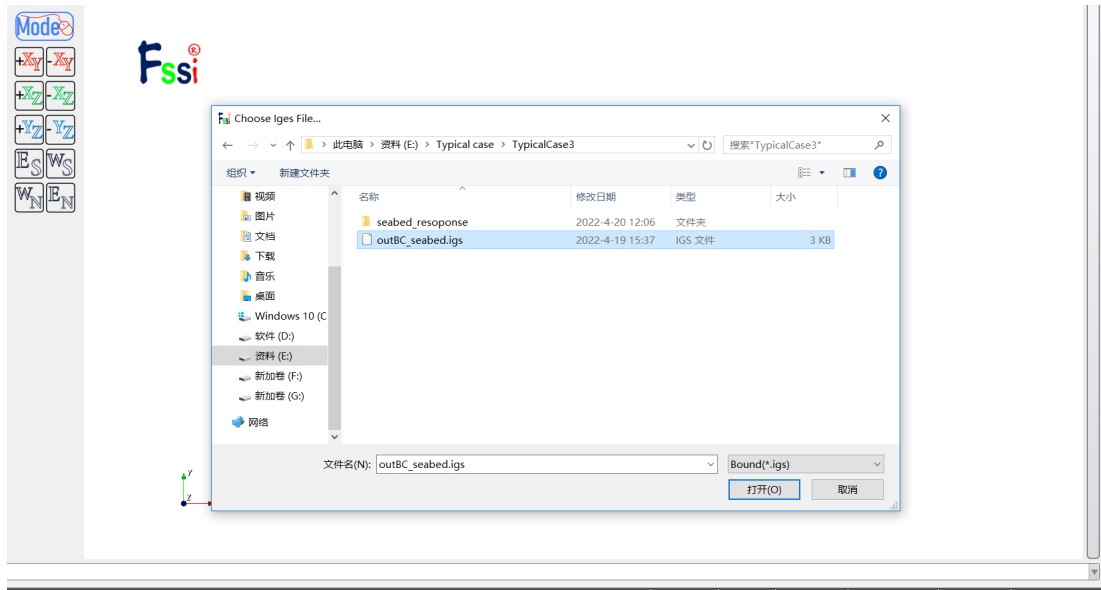


图 3-5 导入背景线

3.1.4 添加边界条件

需要将几何模型的边界条件设置为：左右两侧边界设置为 **X 方向位移固定**，底部边界设置为 **X、Y 方向位移均固定**，顶部边界添加水动力边界条件：

点击工具栏 2 中图标 ，进入边界选择模式，如图 3-6 所示；

点击工具栏 2 中图标 ，进入背景线选择模式，如图 3-7 所示；

点击键盘‘R’键，开始选择；



图 3-6 进入边界选择模式



图 3-7 进入背景线选择模式

在工作区中拖动鼠标框选左右两侧的边界，点击选择后被选择的线出现高亮；

点击鼠标右键，在显示边界条件下拉菜单中选择 **Displacement—Add**，在弹出的窗口中勾选 **Constant Displacement XDof** 并点击 **OK**，将左右两侧的边界设置为 **X 方向位移固定**，如图 3-8 所示。

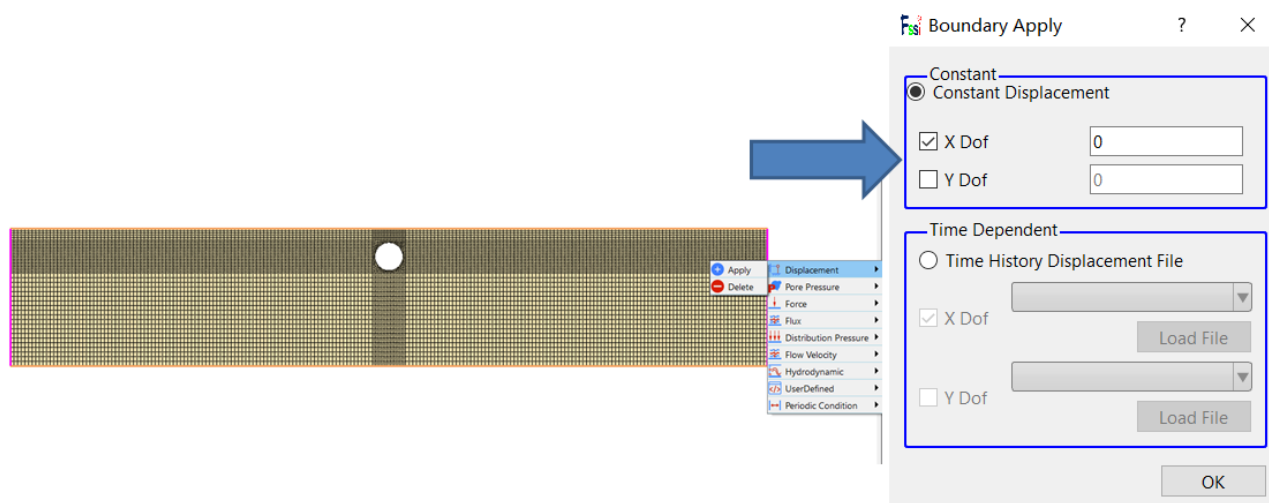


图 3-8 将左右两侧的边界设置为 X 方向位移固定

在工作区中拖动鼠标框选底部边界，点击选择后被选择的线出现高亮；

点击鼠标右键，在显示边界条件下拉菜单中选择 Displacement—Add，在弹出的窗口中勾选 Constant Displacement XDof 和 Constant Displacement YDof 并点击 OK，将底部边界设置为 X、Y 方向位移均固定，如图 3-9 所示；

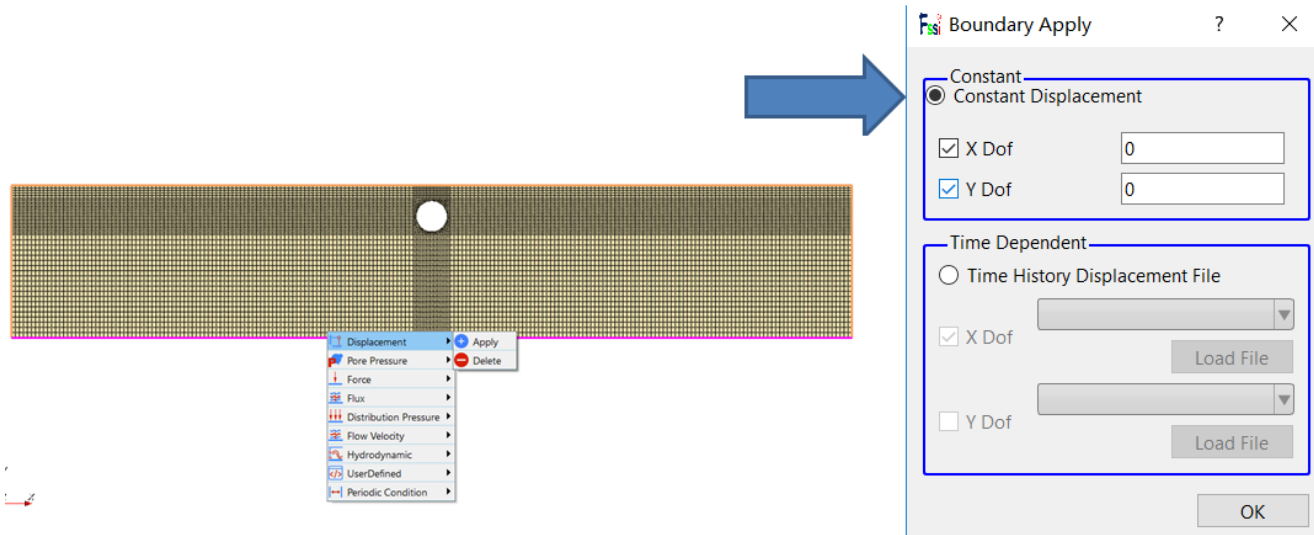


图 3-9 将底部边界设置为 X、Y 方向位移均固定

在工作区中拖动鼠标框选顶部两边界，点击选择后被选择的线出现高亮；

点击鼠标右键，在显示边界条件下拉菜单中选择 Hydrodynamic—Add，即完成顶部边界设置为添加水动力边界条件，如图 3-10 所示；

再次点击键盘‘R’键，可结束选择；

点击操作界面右侧的伸缩区，勾选 Show Boundary Condition，可以检查是否正确添加边界条件。

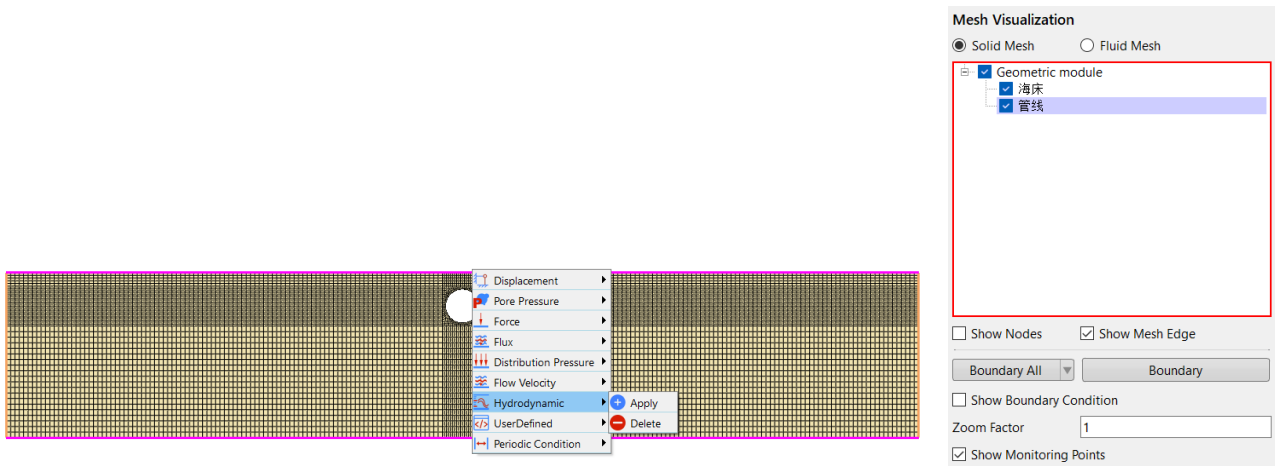


图 3-10 将顶部边界设置添加水动力边界条件

3.1.5 设置材料参数

在前处理界面正上方的工具栏 2 中，点击设置材料属性和参数的功能按钮 **Material**，在工作区中用鼠标左键点击海床模型，然后在弹出的窗口中选择线弹性本构模型，并输入海床和管线的属性参数，点击 OK，即可设置材料属性和参数，如图 3-11 所示。

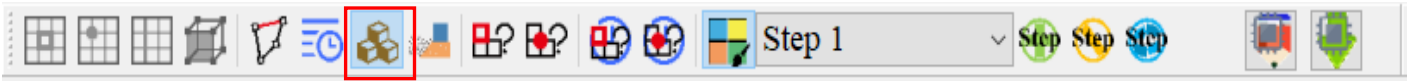


图 3-11 前处理界面正上方的工具栏 2 中设置材料属性和参数的功能按钮 **Material**

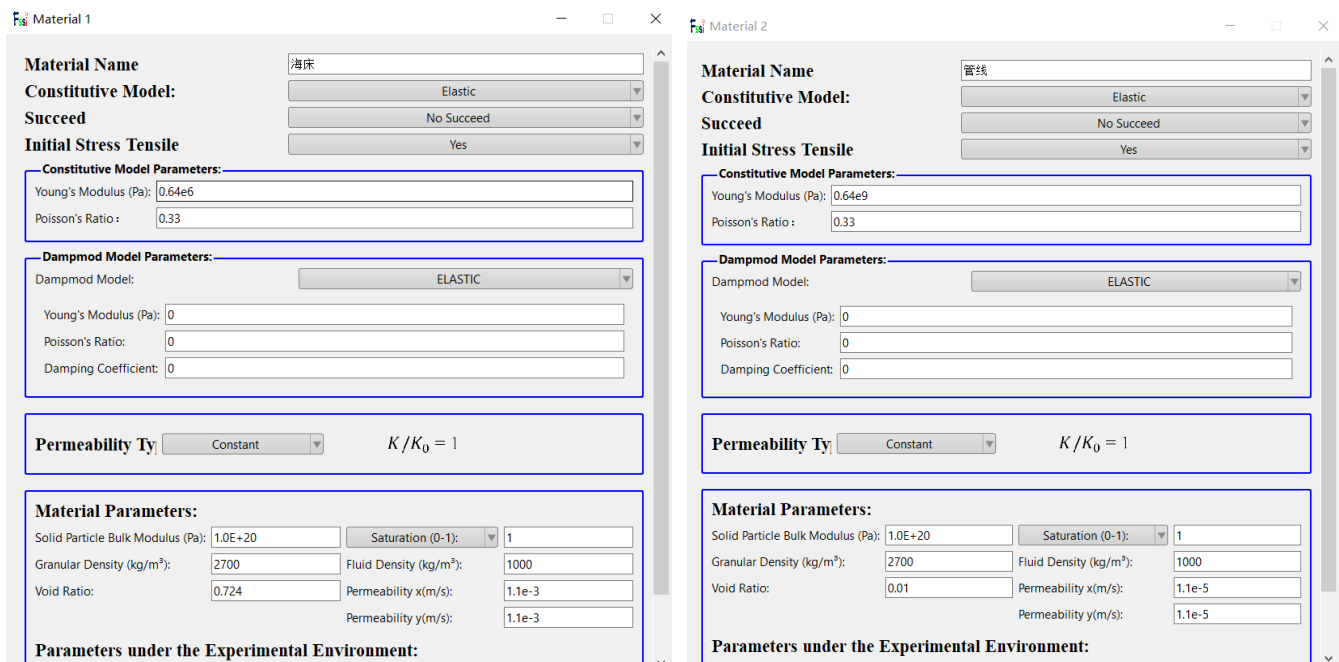


图 3-11 初始状态时海床和管线的相关属性参数

3.1.6 设置重力加速度

点击 FssiCAS—Preprocess—Load—Filed Quantity—Uniform Field，为整个案例施加重力载荷。即加速度场的 X 方向为 0 m/s^2 ，Y 方向为 -9.806 m/s^2 ，如图 3-12 所示。Step 2 的重力场在新建时间步时后自动复制当前时间步的设置，因此后续时间步不再重复施加加速度场。

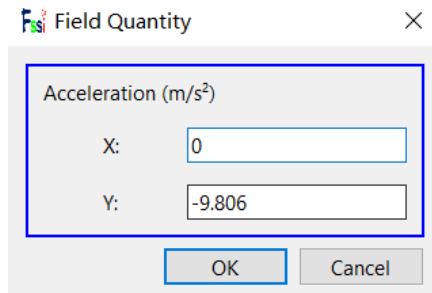


图 3-12 重力加速度设置

3.1.7 水动力边界条件设置

在前处理界面上 Model 树状菜单栏里的 Hydrodynamics 中，点击 Stokes Wave；

在弹出的窗口中输入波浪参数：一阶行波，波浪周期 2.23s，波高 0m（Step 1 只有静水压力，无波浪力，因此不加波浪高度），水深 0.533m，水位线 $0.533\text{m} + 0.826\text{m} = 1.359\text{m}$ ，点击 OK，添加静水压力，如图 3-13 所示；

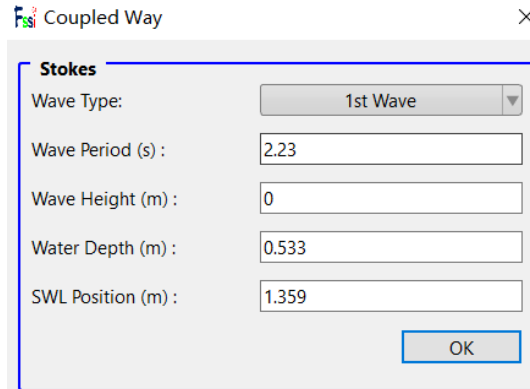


图 3-13 添加静水压力

注：水位线是指静态水面与 X 坐标轴 $X=0$ m 的距离。

3.1.8 设置求解器类型

在前处理界面上 Model 树状菜单栏里的 Solver 中，点击 Solver Type，在弹出的对话框中设置求解器类型，求解器设置为 Static（Static 表示与时间无关的静态，为了获得初始状态最好用 static 求解器），并进行相关属性参数设置，如图 3-14 所示；

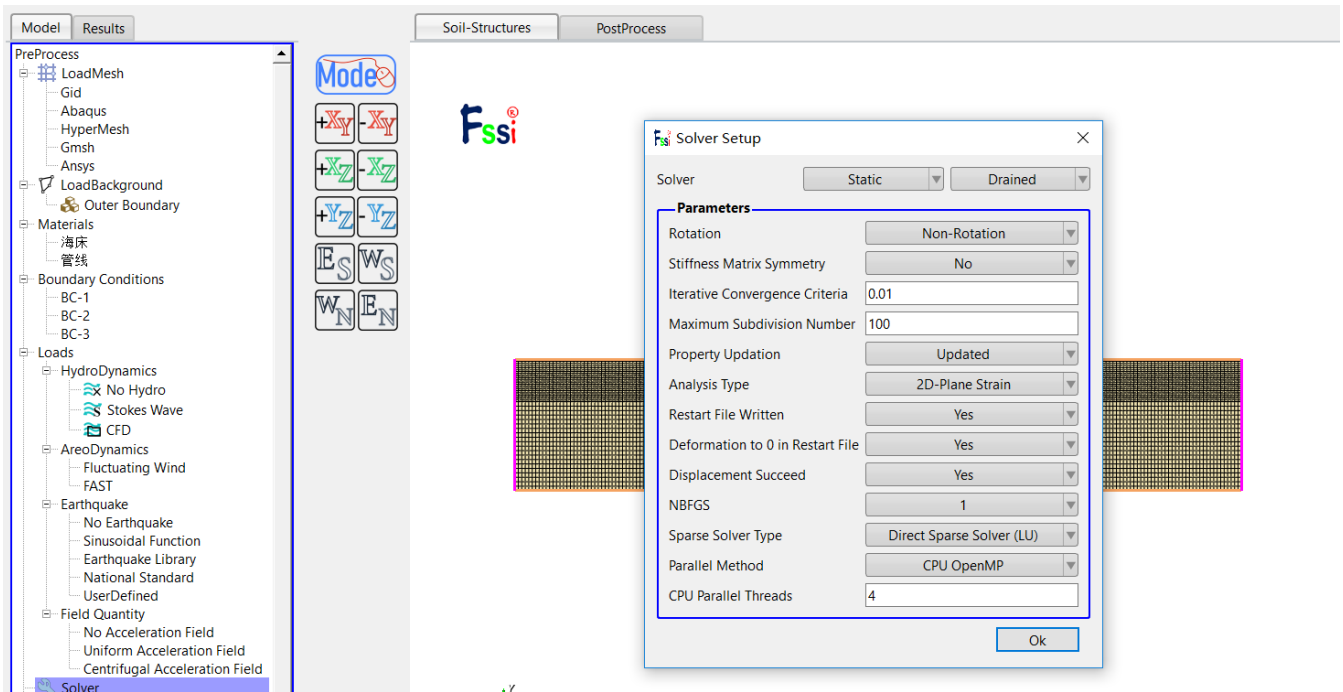


图 3-14 设置求解器的相关属性参数

3.1.9 设置时间步

点击 Time Step，Simulation Time (s)为计算总时间，设置为 0.2 s；Interval for Time Steps (s)为时间步长，设置为 0.01 s；Interval for Updating Coordinate (s)为坐标更新时间，设置为 1 s（大于计算总时间，意为不更新坐标）；Interval for Updating Global Stiffness Matrix (s)为刚度矩阵更新时间，设置为 1s（不更新刚度矩阵）；Maximum Iterations 为每个时间步最大迭代次数，设置为 10 步；Restart File Output Inerval (s)为输出重启文件的时间，设置为 1s（不生成重启文件）；Result File Output Inerval (s)为输出某一时刻所有节点/高斯点上的位移、应力、应变等结果文件的时间间隔，设置为每 0.05 s 输出一次结果文件；Results Output 为选择输出节点上的结果；History Output Interval (s)为输出特定的节点或单元上的应力、应变等结果文件的时间间隔，设置为每 0.1 s 输出一次（意为不输出）。 α ， β_1 ， β_2 为时间系数，保持默认值即可。具体设置如图 3-15 所示。可在 Results Sequence 中选择输出流速、流线图，每一步均需要选择。

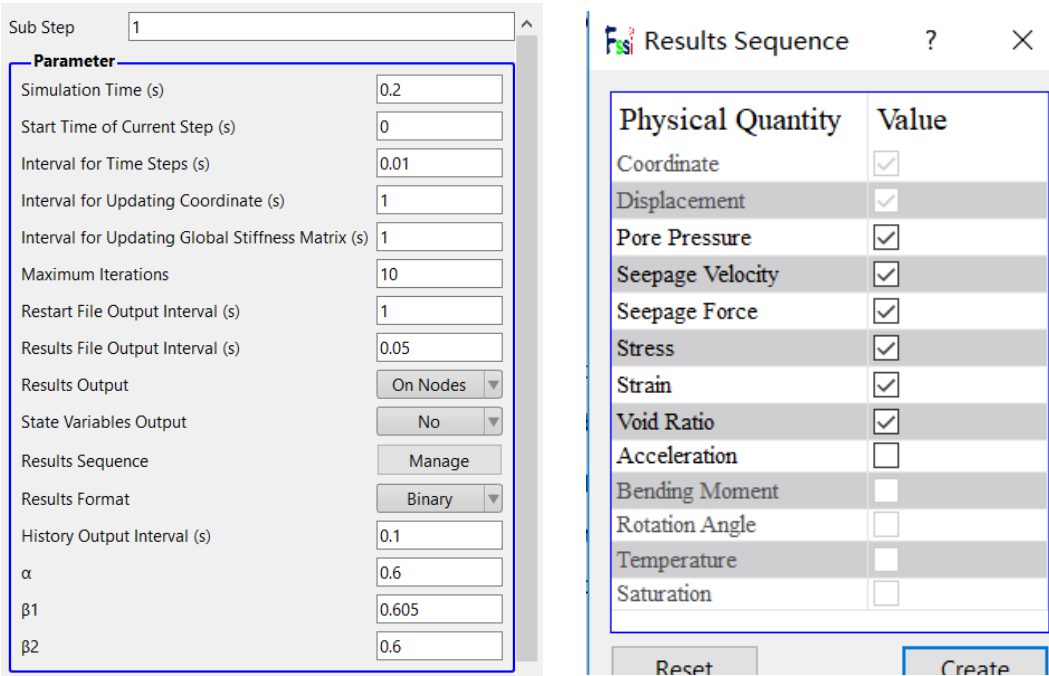


图 3-15 设置时间步和相关属性参数

3.1.10 设置初始条件

在前处理界面上 Model 树状菜单栏中，点击 Initial State，点击 OK，即可完成初始状态设置，如图 3-16 所示。

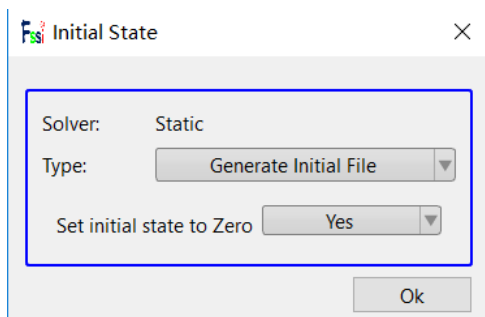


图 3-16 设置初始状态和指定初始条件

3.1.11 时间步 Step 2 设置

本案例设置 Step 1、Step 2 两个时间步，Step 1 用于给后续计算提供一个良好的初始状态，Step 2 为正式加载计算时间步。点击  按钮可增加时间步，添加成功后左端任务栏会显示添加的时间步，点击  按钮可以对需要设置的时间步进行设置，如图 3-17 所示。

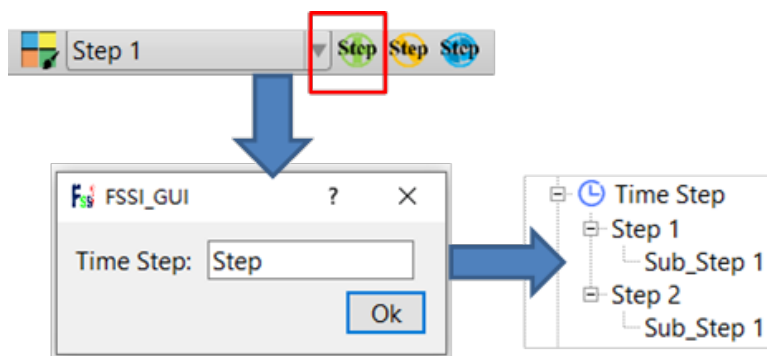
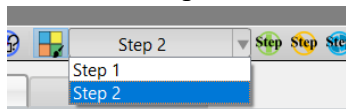


图 3-17 增加时间步的步骤示意图

如果先设置 Step 1 的边界条件和前处理的各项参数再添加新的时间步，新的时间步会自动复制 Step 1 的所有设置；如果先添加新的时间步再设置 Step 1，每个时间步都需要重新设置对应的边界条件和参数。为了提高操作效率，一般情况下先将 Step 1 的所有参数都设置完整再创建新的

时间步。本案例 Step 2 的相关参数设置如下。



3.1.12 水动力边界条件设置

在前处理界面上 Model 树状菜单栏中的 Hydrodynamics 中，点击 Stokes Wave；Step 2 需施加波浪荷载，在弹出的窗口中输入波浪参数：波浪类型选择三阶波浪，波浪周期为 2.23s，波高为 0.0302m，水深 0.533m，水位线 $0.533\text{m} + 0.826\text{m} = 1.359\text{m}$ ，当前流速为 0，点击 OK，如图 3-18 所示。

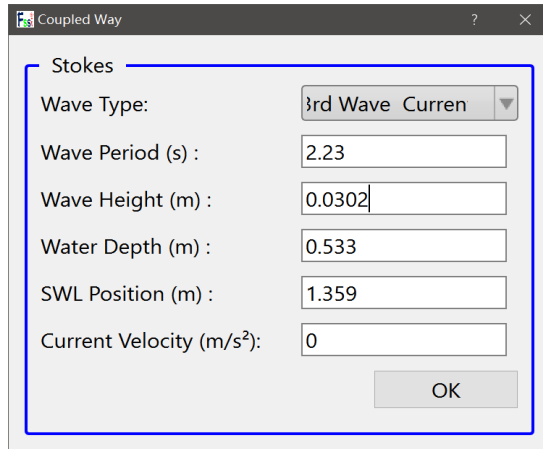


图 3-18 水动力边界设置

3.1.13 设置求解器类型

在前处理界面上的 Model 树状菜单栏中的 Solver 中，点击 Solver Type，在弹出的对话框中设置求解器类型，求解器设置为 Consolidation（Consolidation 表示土的固结分析，与时间一阶导数相关），并进行相关属性参数设置，如图 3-19 所示。

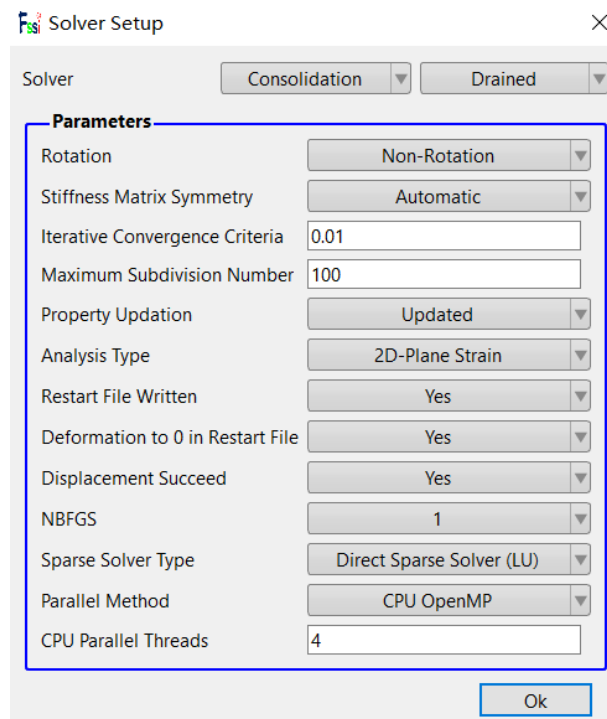


图 3-19 求解器的相关属性参数设置

3.1.14 设置时间步

在前处理界面上的 Model 树状菜单栏中的 Solver 中，点击 Time Step，设置求解时间步数为 $200 \times 0.01\text{s} = 2\text{s}$ ，时间步长为 0.01s ，更新坐标，更新刚度矩阵为 1s ，每步最大迭代 10 次，每 0.3s 输出重启文件，每 0.1s 输出分布图结果，如图 3-20 所示；

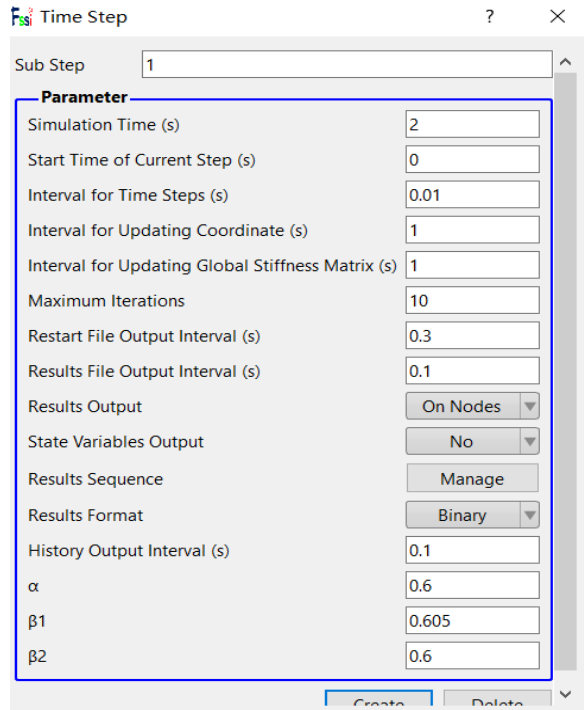


图 3-20 设置时间步和相关属性参数

3.1.15 添加时程输出

为方便得出某一位置处的位移、孔压、有效应力等结果，可在前处理中添加某一位置的时程输出，在后处理进行结果查询。

时程点设置为：取 4 个点；

坐标为 $(2.5, 0.826, 0)$ $(2.5, 0.58, 0)$ $(2.5, 0.47, 0)$ $(2.5, 0, 0)$ ；

固体节点编号：5333, 5245, 4999, 4467；

流体节点编号：5334, 5246, 5000, 4468；

3.1.15.1 固体节点的时程点

用户首先点击前处理界面最右侧的伸缩区，在展开的窗口中选中 Solid，勾选 Show Node，点击 Mesh，即可进入固体节点和单元显示模式，再点击伸缩区可收回窗口，如图 3-21 所示；

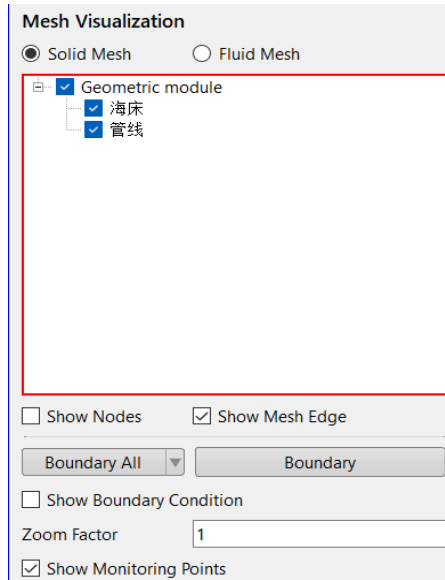


图 3-21 在前处理界面最右侧的伸缩区中选 Solid 进入固体节点和单元显示模式

然后用户点击在前处理界面上工具栏 2 中的第六个快捷功能按钮 , 进入选择输出时程结果的节点或单元模, 然后点击前处理界面上工具栏 2 中的第二个快捷功能按钮 , 进入节点选择模式;

在前处理界面正下方的命令窗口中, 输入 `highlight point/2.5 0.826 0` 或者 `highlight point /5333`, 按键盘上的 `Enter` 键, 即可在工作区中显示坐标为 (2.5, 0.826, 0) 的点, 被显示的节点出现高亮;

点击键盘上的“R”键, 进入选择模式;

拖动鼠标框选高亮的固体节点, 点鼠标右键, 选择 `All History Plot`, 即可输出 x 方向位移、z 方向位移、速度, 如图 3-22 所示;

根据上述操作, 依次找到坐标为 (2.5, 0.58, 0) (2.5, 0.47, 0) (2.5, 0, 0) 的固体节点, 点鼠标右键, 选择 `All History Plot`, 创建。

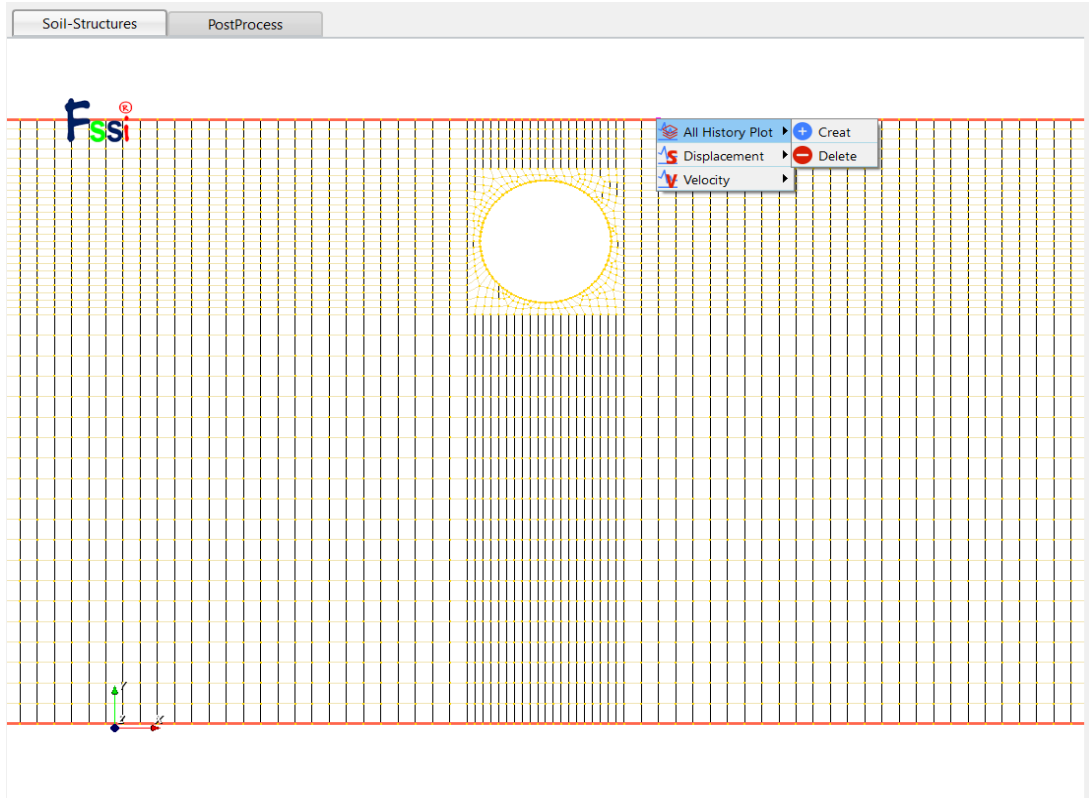


图 3-22 输出四个固体节点上的 x 方向位移，z 方向位移的时程结果

3.1.15.2 固体单元的时程点

再次点击前处理界面上工具栏 2 中的第一个快捷功能按钮 ，进入单元选择模式；

点击前处理界面最右侧的伸缩区，勾选 **Show Monitoring Points**，即可在工作区中显示之前已输出时程结果的所有节点和单元，被显示的之前已输出时程结果的节点和单元出现高亮；

点击键盘上的“R”键，进入选择模式；

拖动鼠标框选该固体节点所在的单元，点鼠标右键，选择 **All History Plot**，即可输出有效应力 (σ_x 、 σ_z 、 σ_y 、 τ_{xz})，孔隙比 e ，应变 (ϵ_x 、 ϵ_z 、 ϵ_y 、 γ_{xz})，如图 3-23 所示；

根据上述操作，依次找到坐标为 (2.5, 0.58, 0) (2.5, 0.47, 0) (2.5, 0, 0) 的固体节点，输出所在的单元的时程结果。

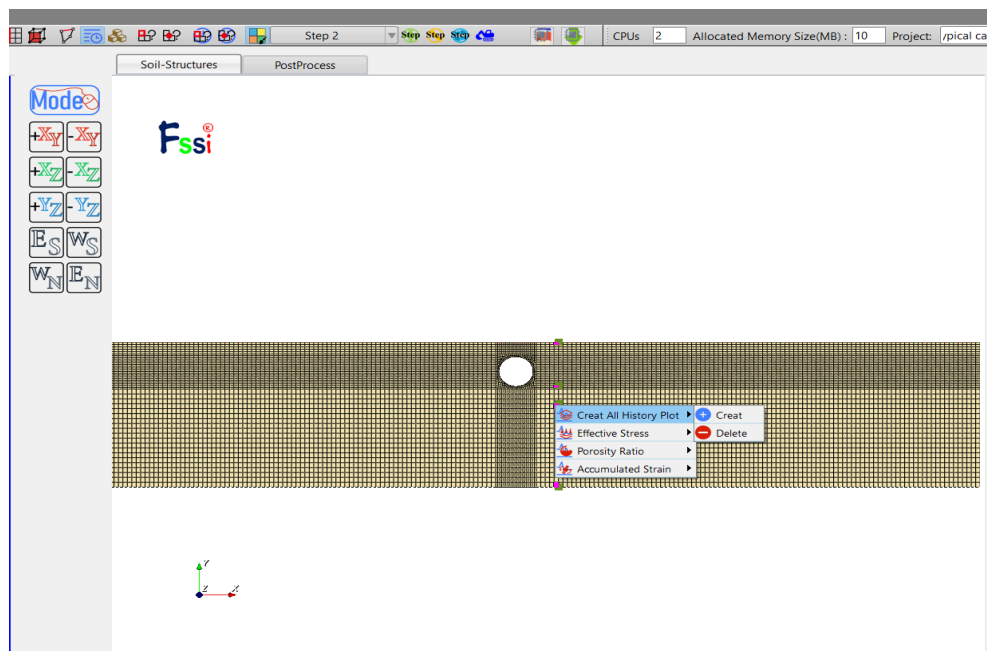


图 3-23 输出四个固体单元上的有效应力，孔隙比，应变的时程结果

3.1.15.3 流体节点的时程点

点击前处理界面最右侧的伸缩区，在展开的窗口中点击 **Fluid**，勾选 **Show Node**，点击 **Mesh**，即可进入流体节点和单元显示模式，再点击伸缩区可收回窗口，如图 3-24 所示；

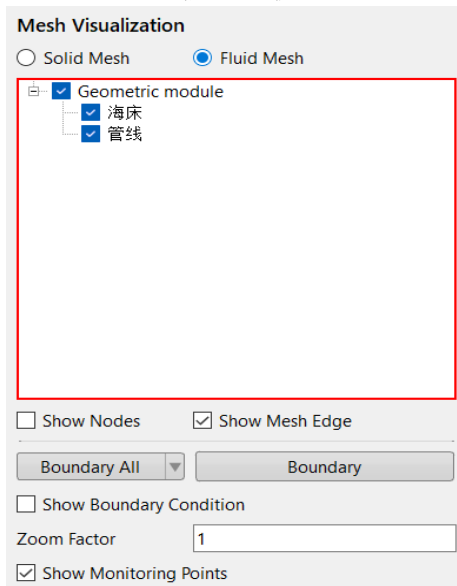


图 3-24 在前处理界面最右侧的伸缩区中选中 **Fluid** 进入流体节点和单元显示模式
再次点击前处理界面上工具栏 2 中的第六个快捷功能按钮 ，进入输出时程选择模式；

点击前处理界面上工具栏 2 中的第二个快捷功能按钮，进入节点选择模式；

点击前处理界面最右侧的伸缩区，勾选 **Show Monitoring Points**，即可在工作区中显示之前已输出时程结果的所有节点和单元，被显示的之前已输出时程结果的节点和单元出现高亮；

点击键盘上的“R”键，进入选择模式；

拖动鼠标框选高亮的流体节点，点鼠标右键，选择输出孔压 **Pore Pressure**，如图 3-25 所示；

根据上述操作，依次找到坐标为 (2.5, 0.58, 0) (2.5, 0.47, 0) (2.5, 0, 0) 的流体节点，输出所在的单元的时程结果。

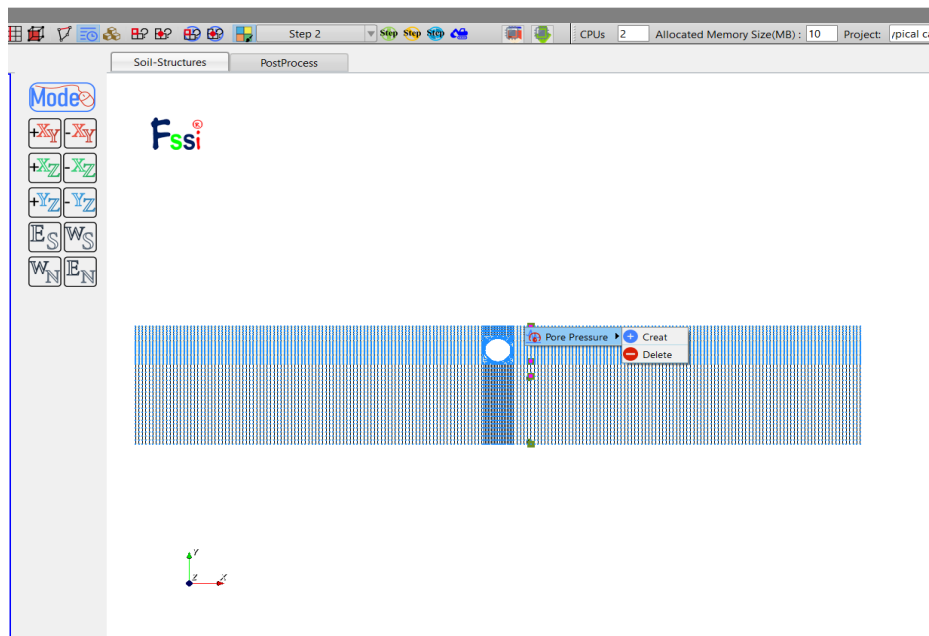


图 3-25 输出流体节点上的孔压的时程结果

3.1.15.4 流体单元的时程点

再次点击前处理界面上工具栏 2 中的第一个快捷功能按钮，进入单元选择模式；

点击前处理界面最右侧的伸缩区，勾选 **Show History Plot**，即可在工作区中显示之前已输出时程结果的所有节点和单元，被显示的之前已输出时程结果的节点和单元出现高亮；

拖动鼠标框选该流体节点所在的单元，点鼠标右键，选择输出孔压 **Pore Pressure**，如图 3-26 所示；

再次点击键盘“R”键，可结束选择；

坐标为 (2.5, 0.58, 0) (2.5, 0.47, 0) (2.5, 0, 0) 的流体节点所在的单元的时程结果的输出方法如上述；

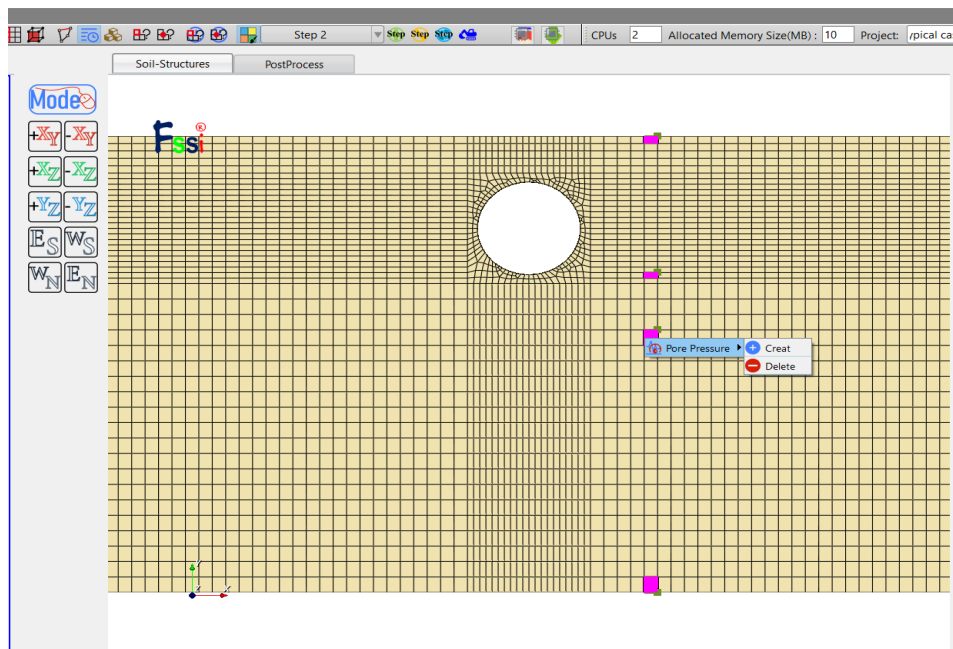


图 3-26 输出流体单元上的孔压的时程结果

在前处理界面最右侧的伸缩区，点击 **Show History Plot** 可以显示已输出时程结果的所有节点和单元；

最后用户点击在前处理界面上 **Model** 树状菜单栏里 **Solver** 中的 **Time History**，即可查看所有之前已输出时程结果的节点和单元，可以显示已输出的所有时程结果列表，选择列表中的项，点击右键可以进行删除操作，如图 3-27 所示；

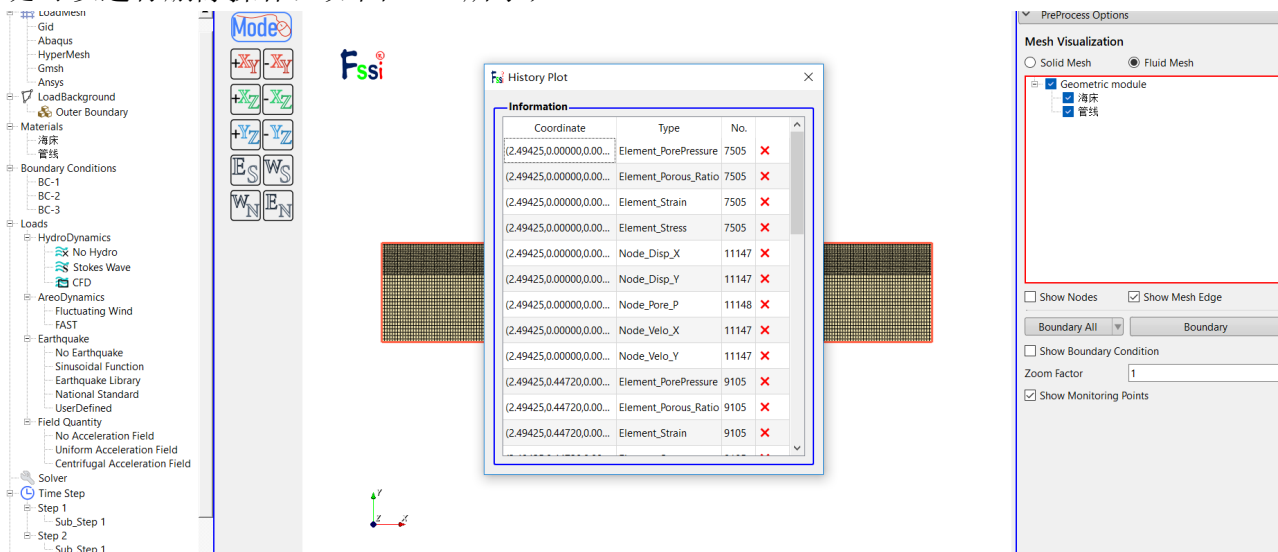


图 3-27 在前处理界面上 **Model** 树状菜单中的 **Time History** 显示已输出的时程结果列表

3.1.16 计算并保存

点击在前处理界面上 Model 树状菜单栏里 Computaton 中的 FSSI-W，或者在前处理界面正上方的工具栏 2 中的 WriteCalculate 功能按钮，点击 All step，保存当前项目，开始计算，如图 3-28 所示；

计算完成后结果储存在 Project\Results\Soil_Model\ Multiple
在退出 FssiCAS 软件时，用户在弹出的 Note 窗口中点击 Yes，即可退出软件时保存项目。

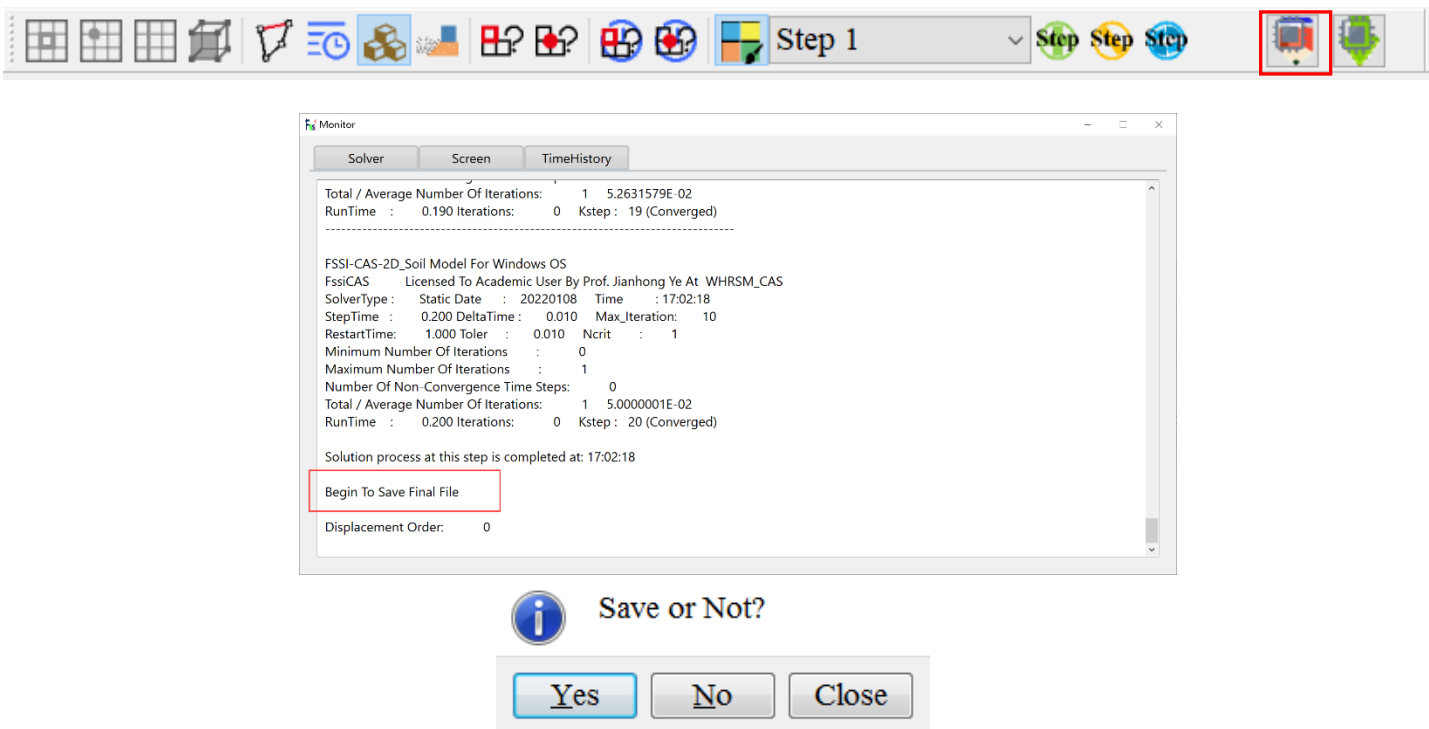


图 3-28 计算和保存

3.2 FssiCAS 图形界面操作——后处理

用户点击树状菜单栏上的 Results，即可进入后处理界面。

3.2.1 加载文件

点击在后处理界面上 Results 树状菜单栏中的 Open Results File，在弹出的窗口中点击 Load Files，选择需要处理的结果文件夹，即可进入后处理阶段，如图 3-29 所示。

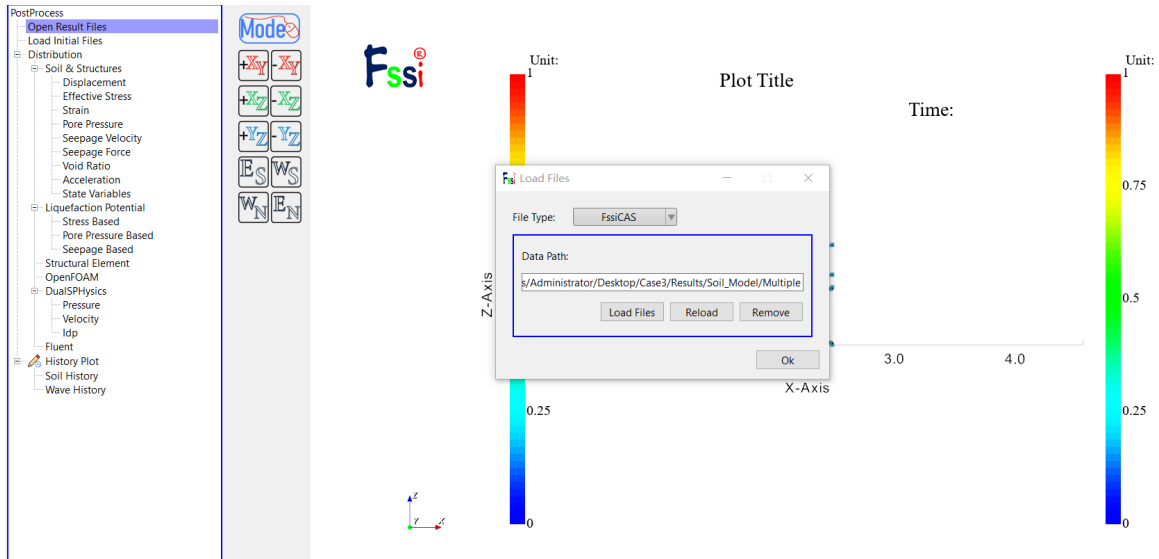


图 3-29 选择需要处理的结果文件夹的过程

3.2.2 绘制分布图

点击 FssiCAS—Postprocess—Distribution Plot—Solid—Displacement，在界面上方工具栏选择 Displacement X，输入想要查看的时间步点击回车，如图 3-30 所示。

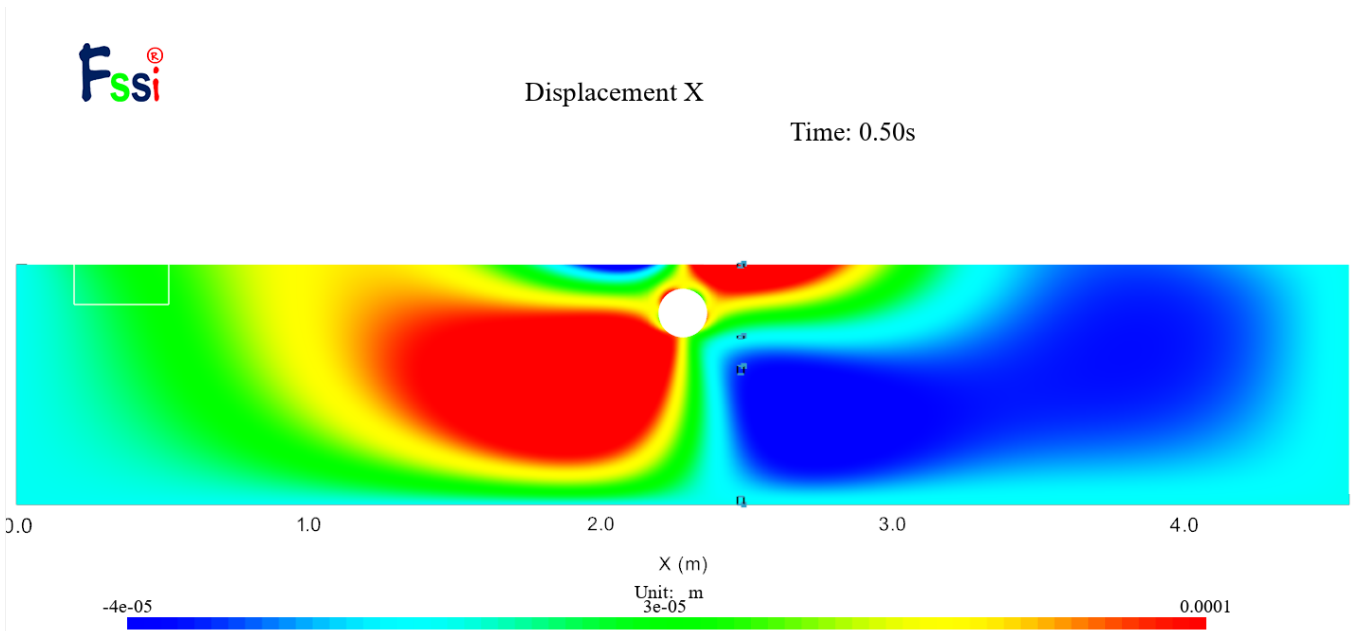
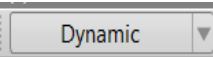
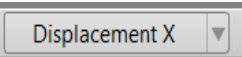
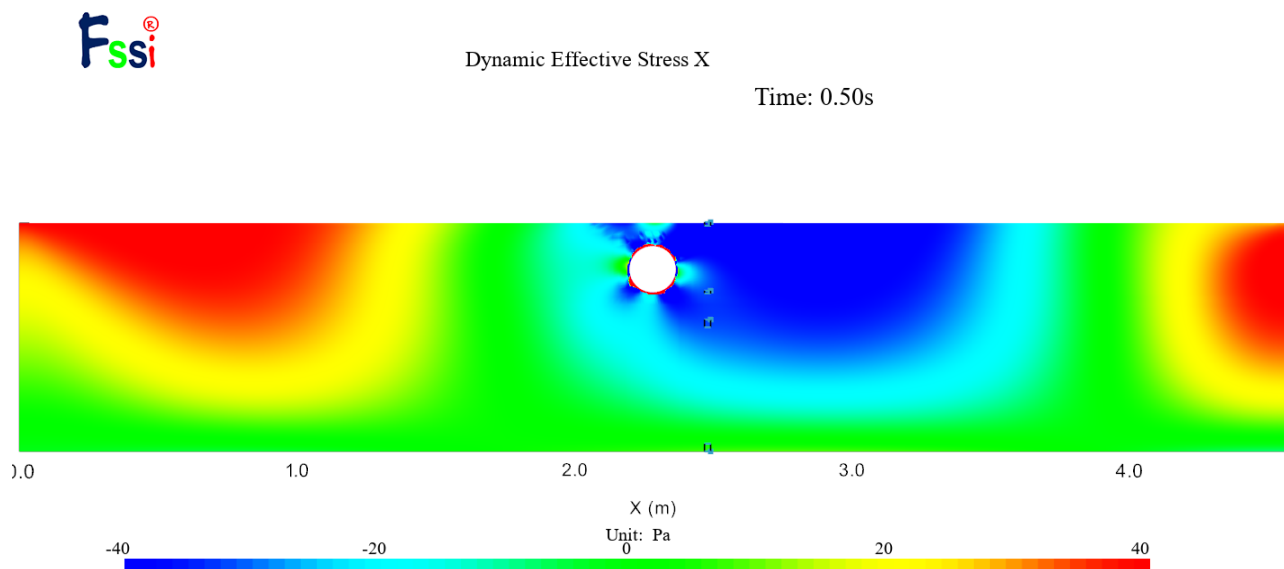
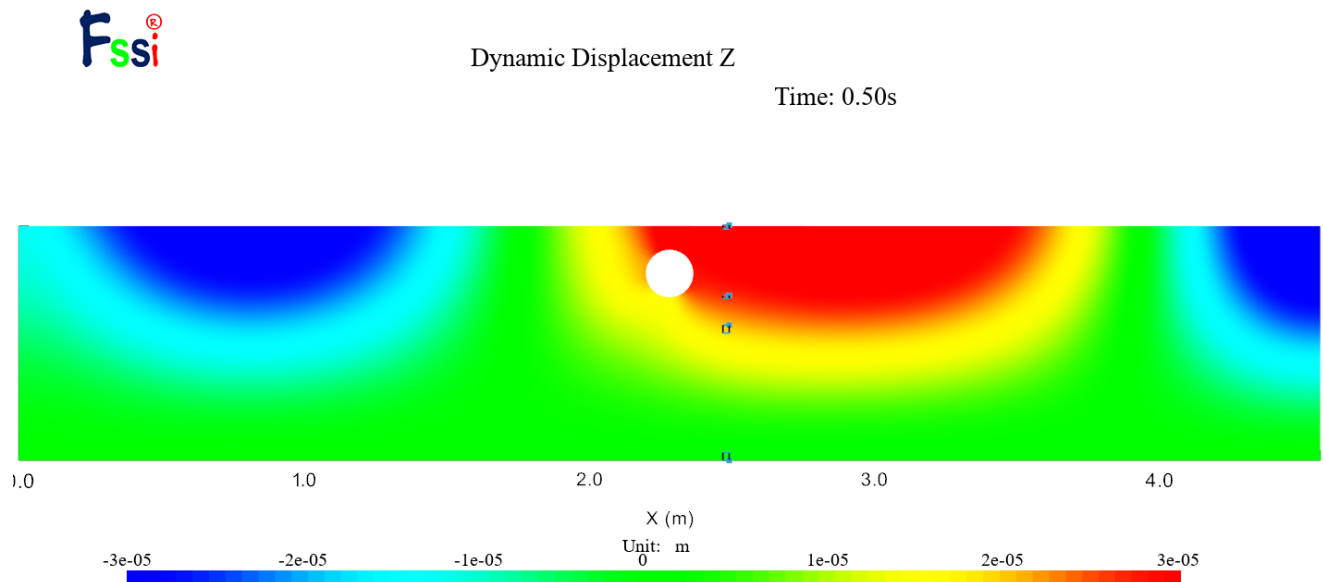


图 3-30 X 方向位移图

Dynamic 状态下的查看的结果等于当前时间步的计算结果减去第一个输出文件的计算结果;

Full 状态下的结果分布就是当前时间步的计算结果, 点击此菜单  , 得到的动态结果图如图 3-31 所示。



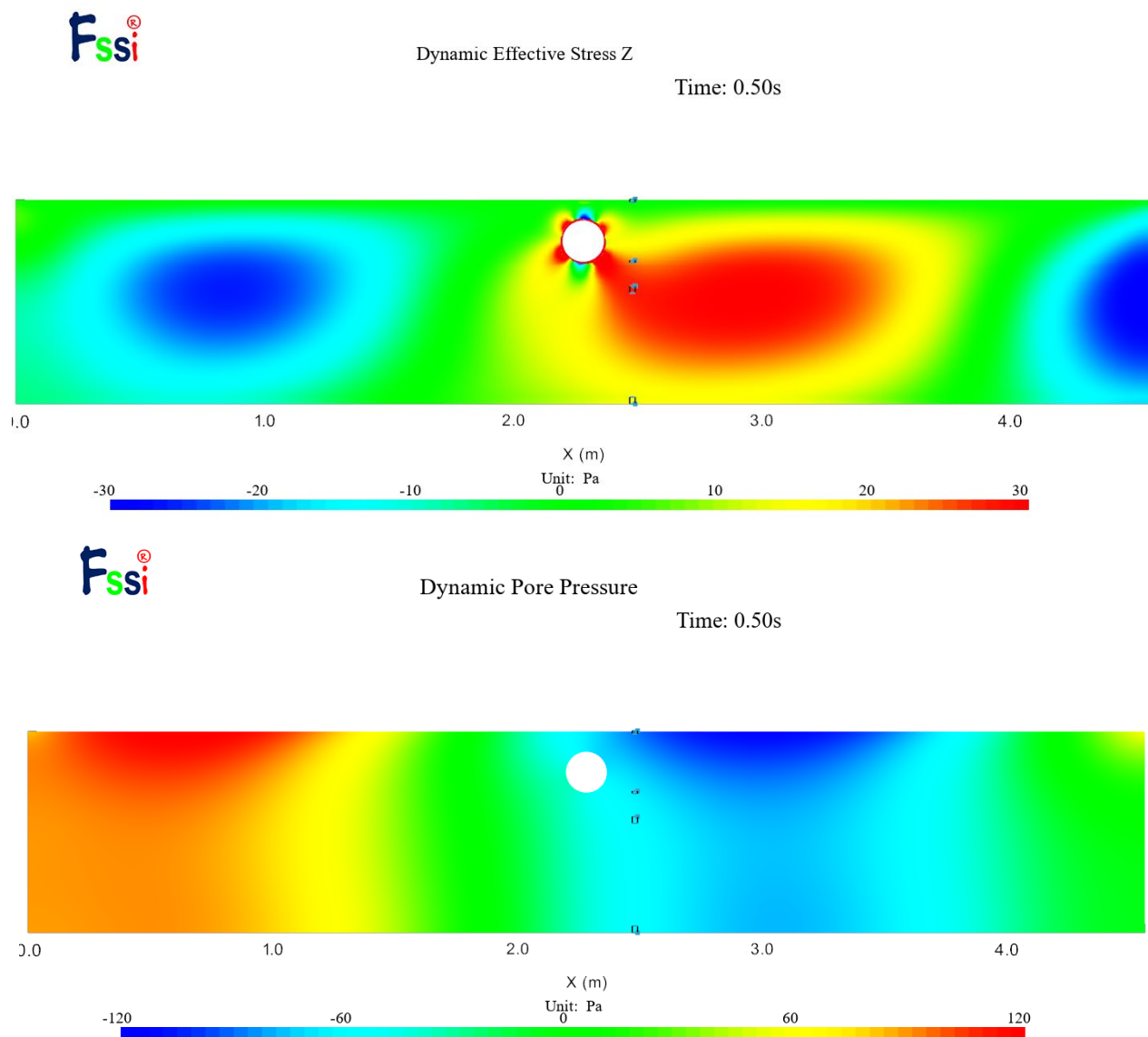


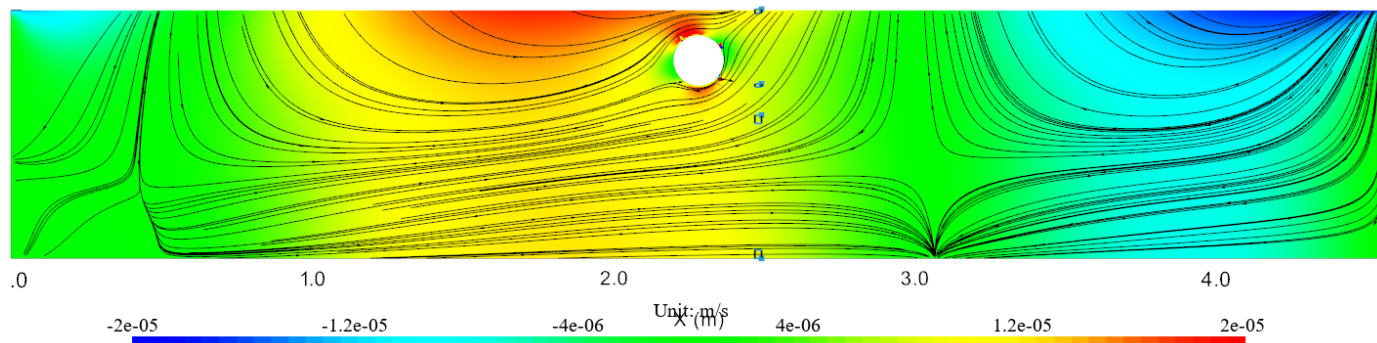
图 3-31 结果分布图

点击 FssiCAS—Postprocess—Distribution—Solid & Structures—SeepageVelocity，可以绘制渗流分布图。可以通过选择工具栏，可以绘制渗流速度矢量图和渗流速度流线图。如图 3-32 所示。



Seepage Streamlines

Time: 0.50s



Seepage Velocity Vector

Time: 1.20s

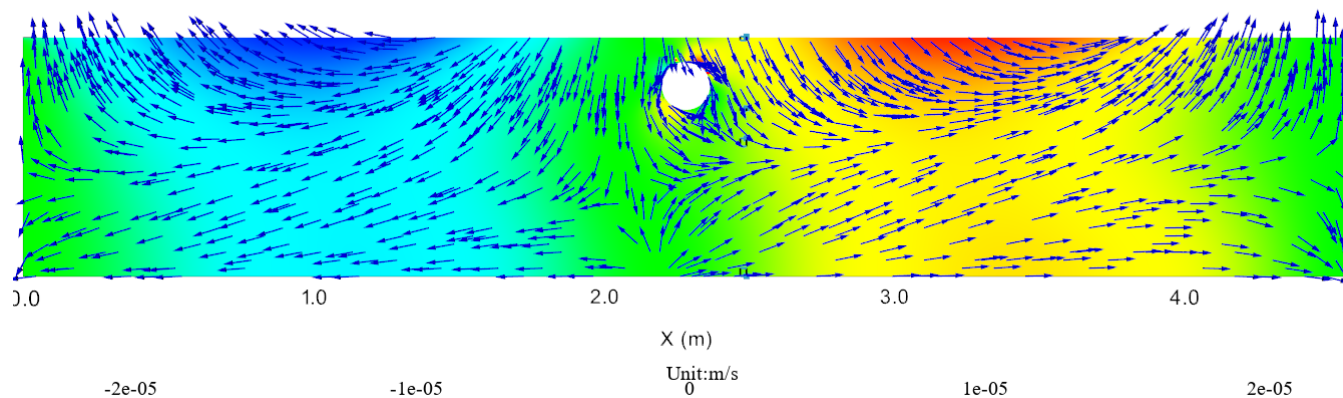


图 3-32 流线、流速图

后处理部分不仅可以输出模型的位移、应力、应变结果分布图，也可以输出模型上节点或单元的时程曲线。

首先点击 History Plot—Soil History—Time-History，选择需要输出时程曲线的节点或单元，勾选节点 No.*，双击 Plot 中所列选项可以查看节点的时程曲线，如图 3-33 所示。点击 Export 可输出时程曲线数据及图片，结果存储到 Results-Soil_Model-Multiple-ExportFiles 文件中，如图 3-34 所示。

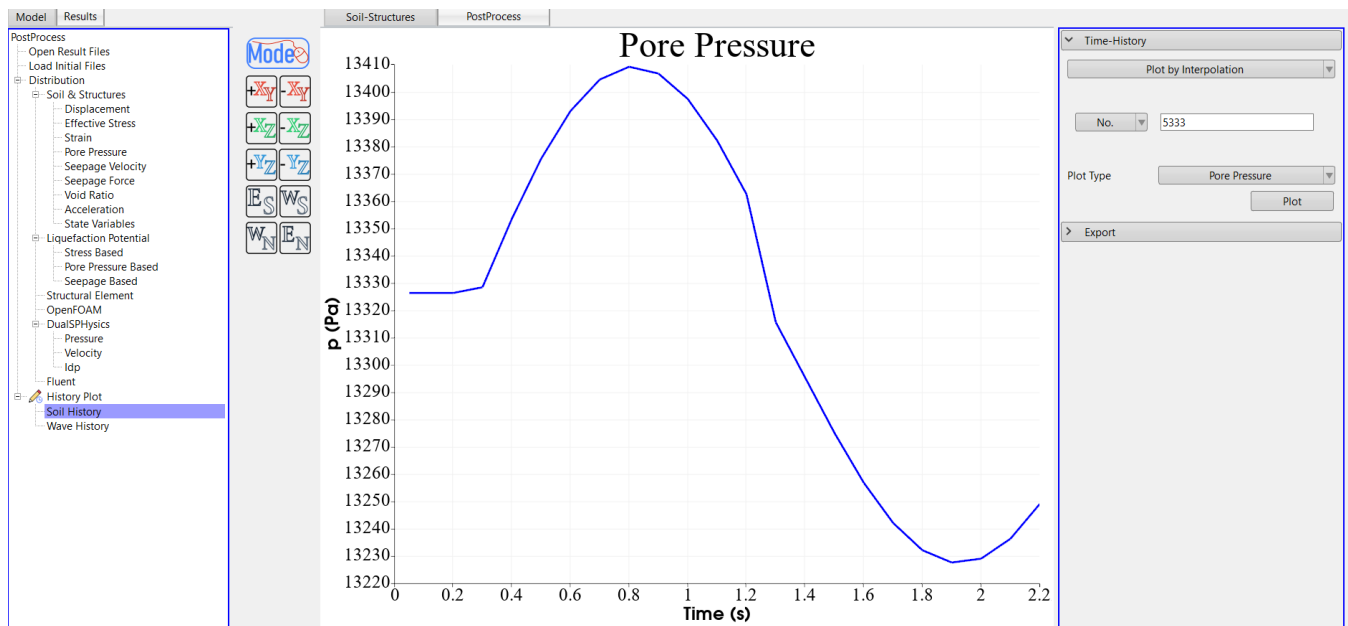


图 3-33 时程图

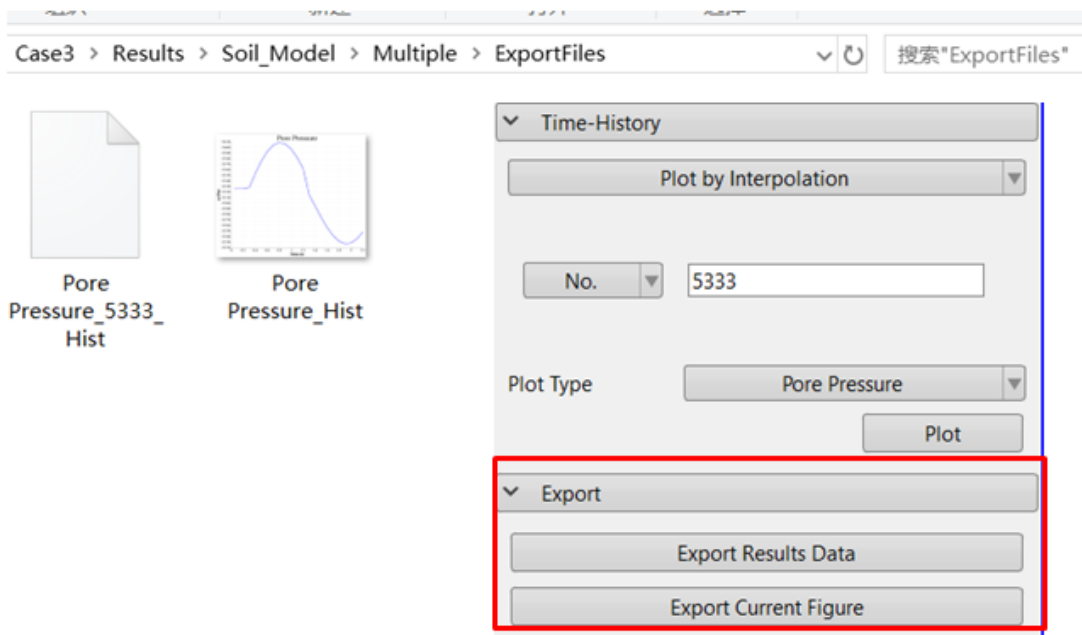


图 3-34 输出结果图