

基于 FssiCas-DualSPHysics 的波浪-海底管道耦合计算

通过 FssiCAS 与 DualSPHysics 耦合计算海底管线室内试验，并介绍 FssiCAS 界面的基本操作方法。数值计算模型示意图如图 1 所示。

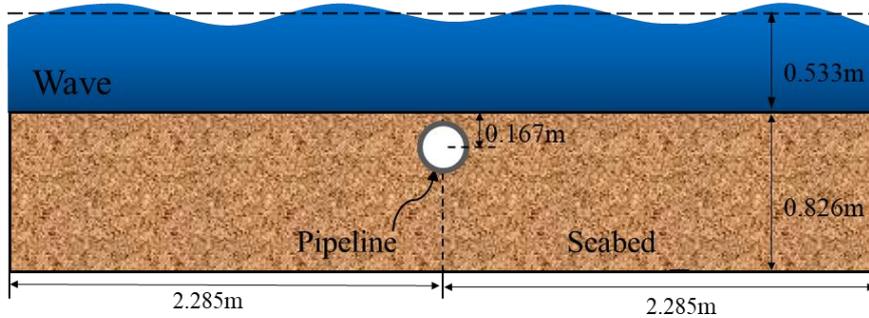


图 1 防波堤试验示例图

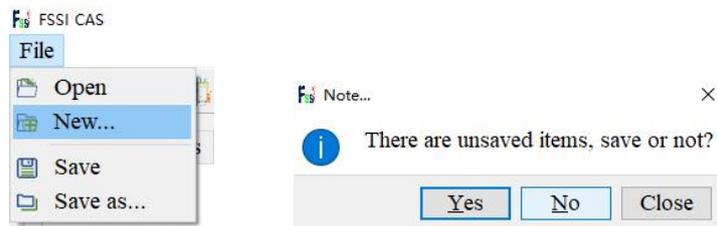
1.1 FssiCAS 图形界面操作——前处理

1.1.1 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 `Central_Point>Loading`；

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 `Central_Point>Loading` 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 1-1 所示。



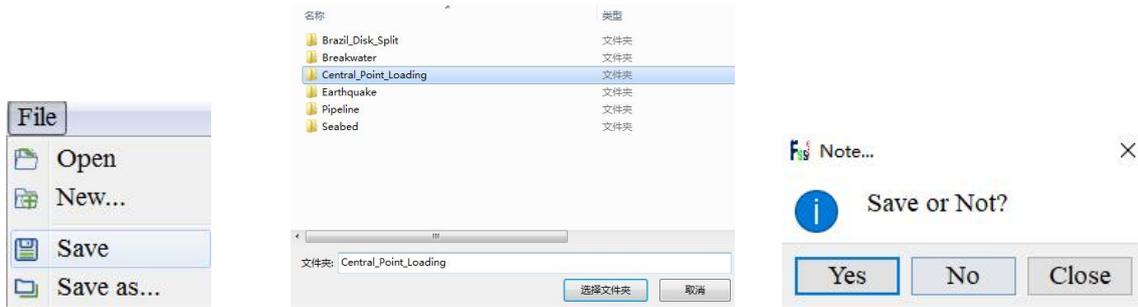


图 1-1 在 FssiCAS 软件中新建和保存一个项目的过程图

1.1.2 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 Abaqus .inp File 窗口中，选择从 Abaqus 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 1-2 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，在本案例中海床及海底管线的固体节点和流体节点设置如图 1-3 所示。在工作区中显示几何模型如图 1-4 所示。

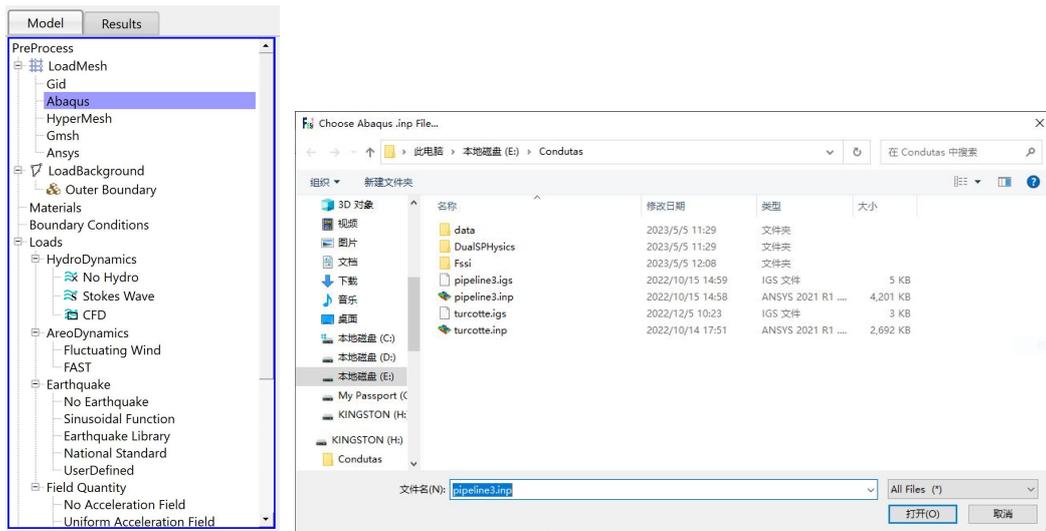


图 1-2 导入几何模型的网格文件

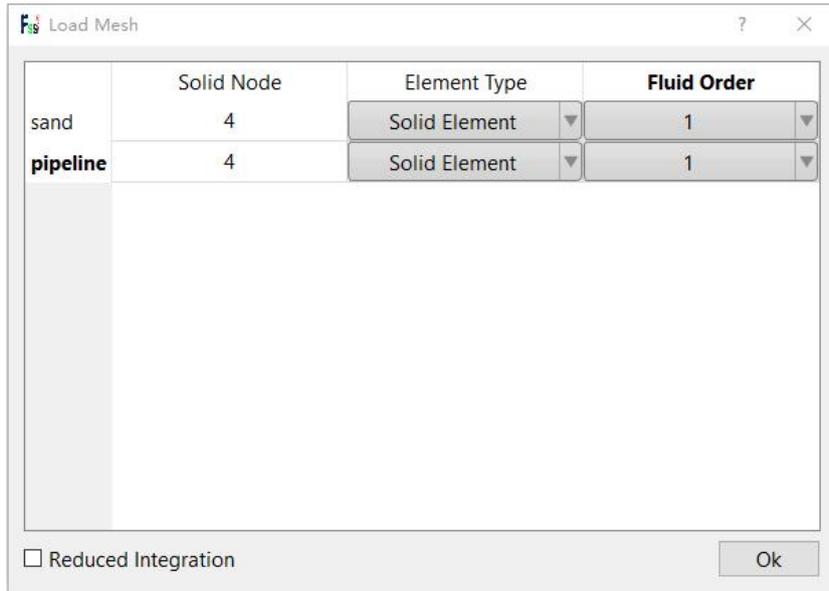


图 1-3 设置固体节点数和流体单元阶次

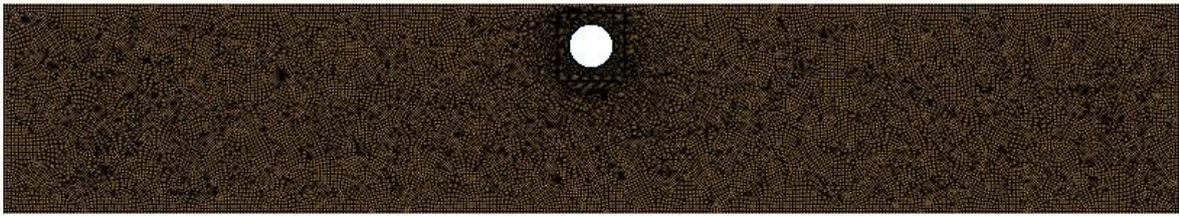


图 1-4 几何模型的显示

1.1.3 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。在几何模型比较复杂的情况下,添加背景线可以使施加边界条件更加便捷。

用户点击在前处理界面上 Model 树状菜单栏中的 Load Background, 选择 Outer Boundary 加载外背景线,在弹出 igs File 窗口中,选择从 Abaqus 软件中导出的背景线文件,双击或点击打开按钮,可导入几何模型的背景线,如图 1-5 所示。

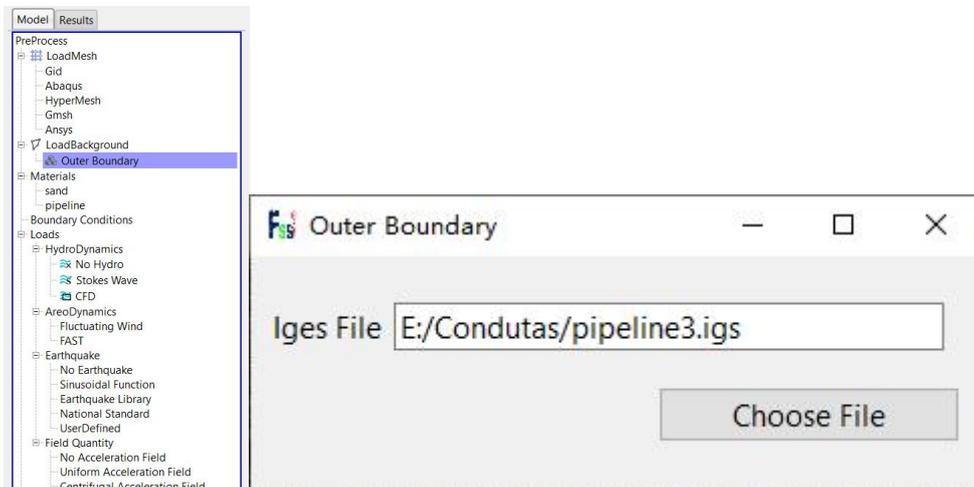


图 1-5 导入几何模型的背景线

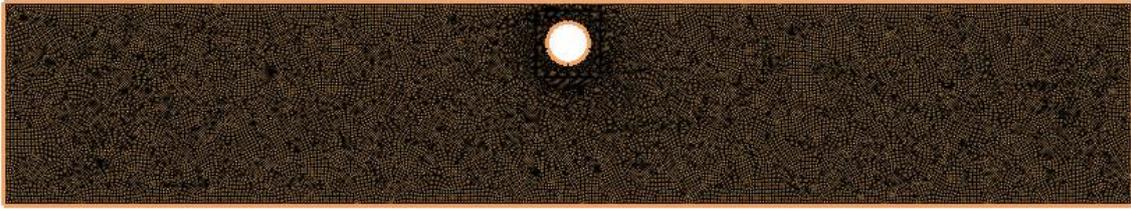


图 1-6 防波堤背景线

1.1.4 添加边界条件

需要将几何模型的边界条件设置为：将海床左右边界设为 X 方向固定，将海床底部设为 XY 方向固定，在海床上部边界施加水动力边界条件，设置管线与海床接触的流体单元流速为 0m/s。

点击工具栏 2 中图标，进入边界选择模式，如图 1-7 所示；

点击工具栏 2 中图标，进入背景线选择模式，如图 1-8 所示；

点击键盘‘R’键，开始选择；



图 1-7 进入边界选择模式



图 1-8 进入背景线选择模式

点击 R 键，选择海床左右边界，再点击鼠标右键，在显示边界条件下拉菜单中，选择 Displacement—Apply，如图 1-9 所示；

在弹出的对话框中勾选 X 方向位移固定。如图 1-10 所示；

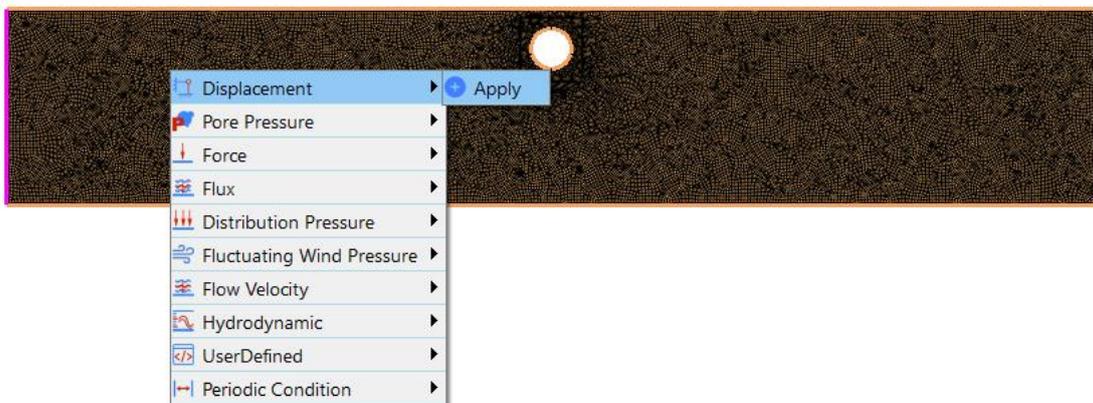


图 1-9 选定海床左右两边背景线并添加位移边界条件

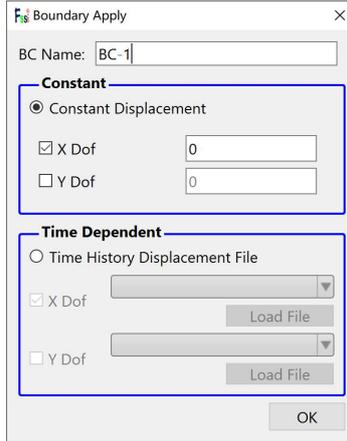


图 1-10 施加 X 方向位移固定

选择海床底部边界，再点击鼠标右键，在显示边界条件下拉菜单中，选择 Displacement—Apply，在弹出的对话框中勾选 XY 方向位移固定。如图 1-11 所示；

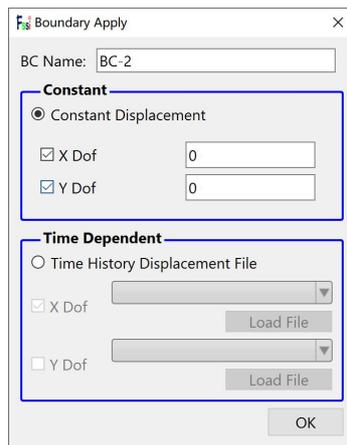


图 1-11 施加 XY 方向位移固定

选择海床与流体接触的上部边界，再点击鼠标右键，在显示边界条件下拉菜单中，选择 Hydrodynamic—Apply，为海床上边界施加水动力边界条件。如图 1-12 所示；

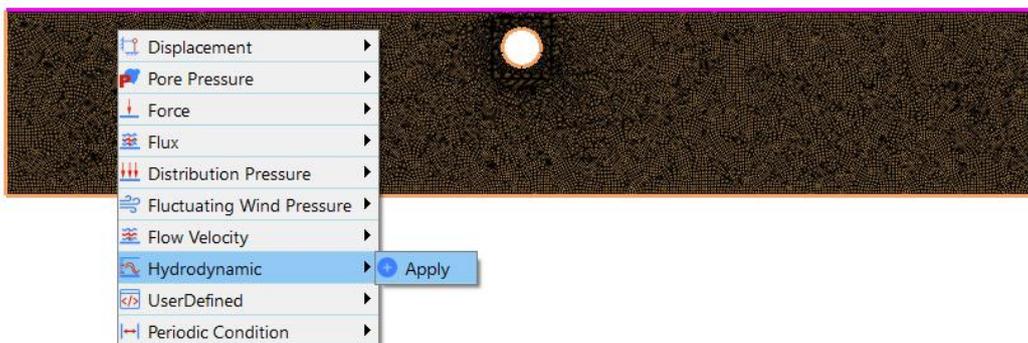


图 1-12 海床及防波堤上部施加水动力边界条件

选择海底管线外侧与海床接触的流体单元,再点击鼠标右键,在显示边界条件下拉菜单中,选择 Flow Velocity, 设置流速为 0m/s。如图 1-13 所示;

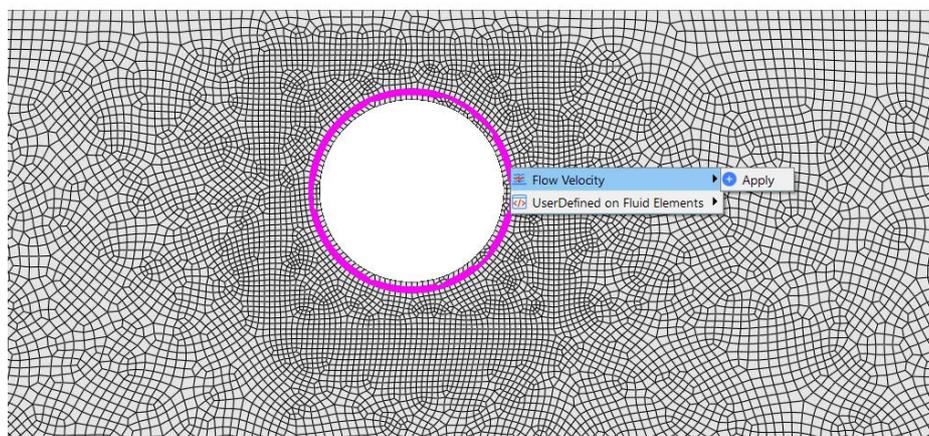


图 1-13 施加管线外侧流速为 0m/s

在右侧的伸缩区中勾选 Show Boundary Condition, 如图 1-14 所示, 可以检查是否正确添加边界条件, 该案例添加的边界条件如图 1-15 所示。

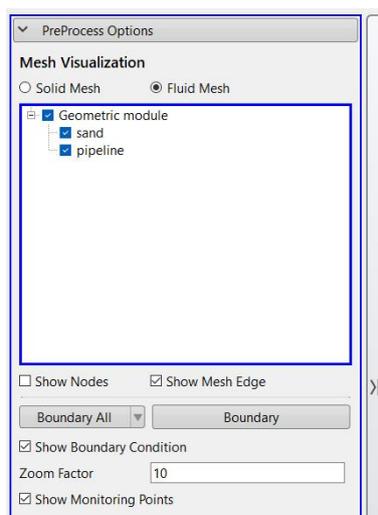


图 1-14 在右侧的伸缩区中勾选 Show Boundary Condition

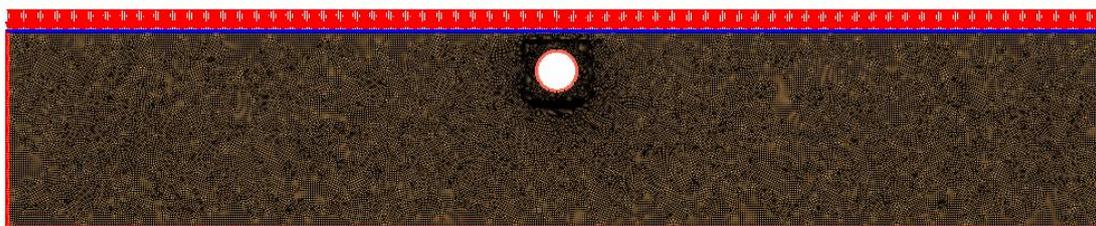


图 1-15 该案例添加的边界条件

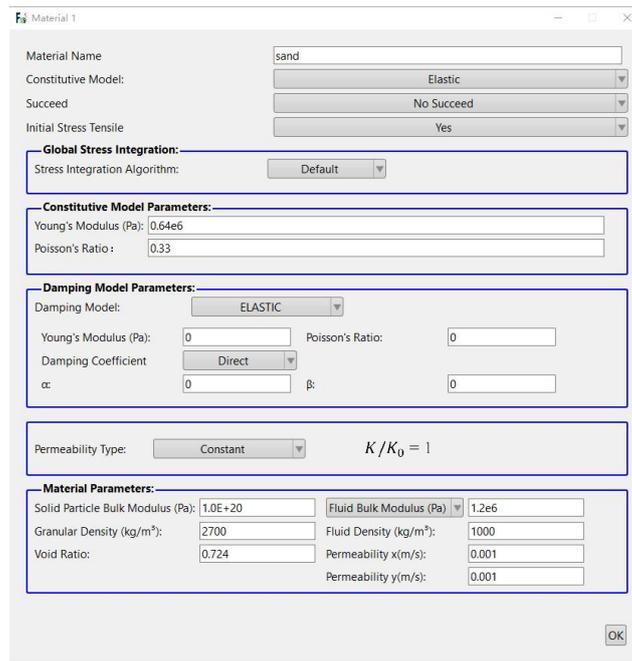
1.1.5 设置材料参数

在前处理界面正上方的工具栏 2 中，点击从左往右第七个设置材料属性和参数的功能按钮 Material;

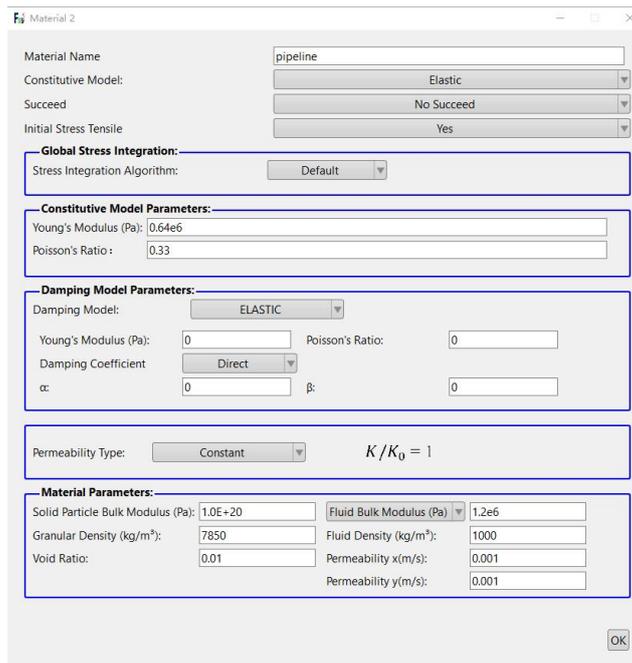
在工作区中用鼠标左键点击几何模型，点击鼠标右键，在弹出的窗口中选择线弹性本构模型，输入对应的材料属性参数，点击 OK，材料属性和参数设置如图 1-17 所示；



图 1-16 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

The 'Material 1' dialog box is shown with the following settings:

- Material Name: sand
- Constitutive Model: Elastic
- Succeed: No Succeed
- Initial Stress Tensile: Yes
- Global Stress Integration: Stress Integration Algorithm: Default
- Constitutive Model Parameters: Young's Modulus (Pa): 0.64e6, Poisson's Ratio: 0.33
- Damping Model Parameters: Damping Model: ELASTIC, Young's Modulus (Pa): 0, Poisson's Ratio: 0, Damping Coefficient: Direct, α : 0, β : 0
- Permeability Type: Constant, $K/K_0 = 1$
- Material Parameters: Solid Particle Bulk Modulus (Pa): 1.0E+20, Fluid Bulk Modulus (Pa): 1.2e6, Granular Density (kg/m³): 2700, Fluid Density (kg/m³): 1000, Void Ratio: 0.724, Permeability x(m/s): 0.001, Permeability y(m/s): 0.001

The 'Material 2' dialog box is shown with the following settings:

- Material Name: pipeline
- Constitutive Model: Elastic
- Succeed: No Succeed
- Initial Stress Tensile: Yes
- Global Stress Integration: Stress Integration Algorithm: Default
- Constitutive Model Parameters: Young's Modulus (Pa): 0.64e6, Poisson's Ratio: 0.33
- Damping Model Parameters: Damping Model: ELASTIC, Young's Modulus (Pa): 0, Poisson's Ratio: 0, Damping Coefficient: Direct, α : 0, β : 0
- Permeability Type: Constant, $K/K_0 = 1$
- Material Parameters: Solid Particle Bulk Modulus (Pa): 1.0E+20, Fluid Bulk Modulus (Pa): 1.2e6, Granular Density (kg/m³): 7850, Fluid Density (kg/m³): 1000, Void Ratio: 0.01, Permeability x(m/s): 0.001, Permeability y(m/s): 0.001

图 1-17 设置材料的相关属性参数

1.1.6 添加时间步

本案例分为 Step1 与 Step2 两个时间步，在 Step1 中进行海床在自身重力及静水压力下固结状态的计算；Step2 进行波浪与土体的耦合计算。点击界面上方工具栏中的 Create Time Step 添加时间步，并命名为 Step2，即可成功添加。如图 1-18 所示。



图 1-18 添加 Step2

1.1.7 水动力边界条件设置

本案例先添加静水使海床固结，再施加波浪。首先在 Step1 的模式下设置静水位。如图 1-19 所示。

点击 FssiCAS—Preprocess—Hydrodynamics—Stokes Wave，波浪类型为一阶波，其他参数如图所示。

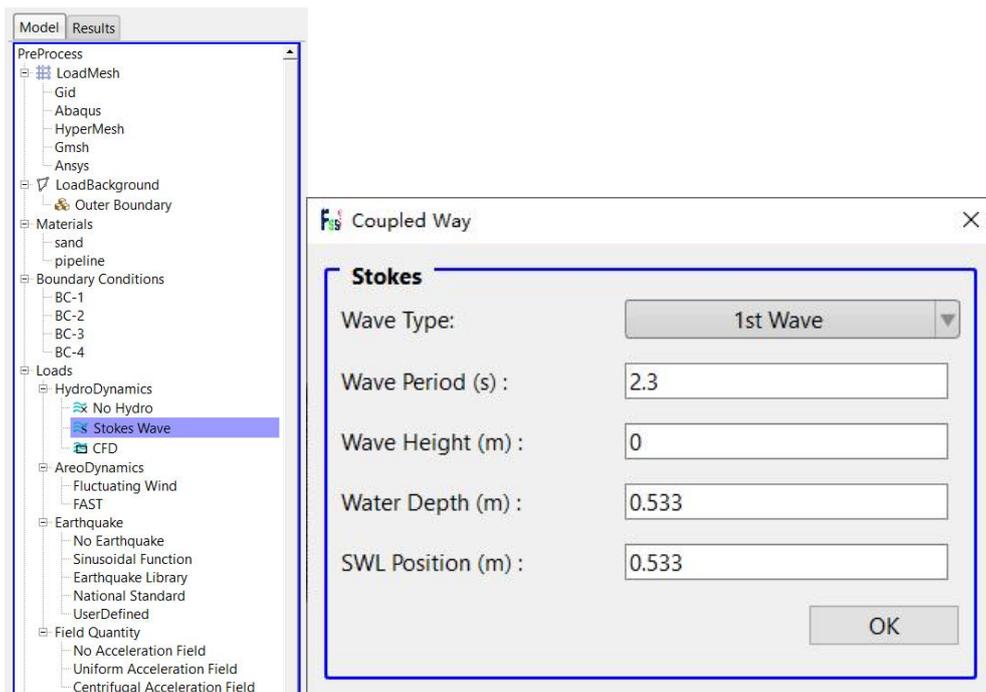


图 1-19 固结状态水动力边界条件设置

在 Step2 模式下施加波浪，先将时间步选择为 Step2，点击 CFD 进行选择。如下图所示，在 CFD Solver 的下拉菜单中选择 DualSPHysics，并在选择相应的结果文件。所施加的波浪参数如图 1-20 所示。（注：当前 FssiCAS 版本调用 DualSPHysics 波浪结果文件时，原始二进制 bi4 结果文件会被改写，请用户注意备份原始文件）

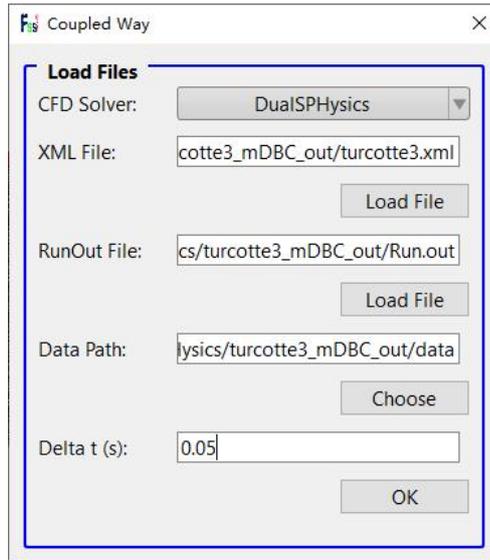
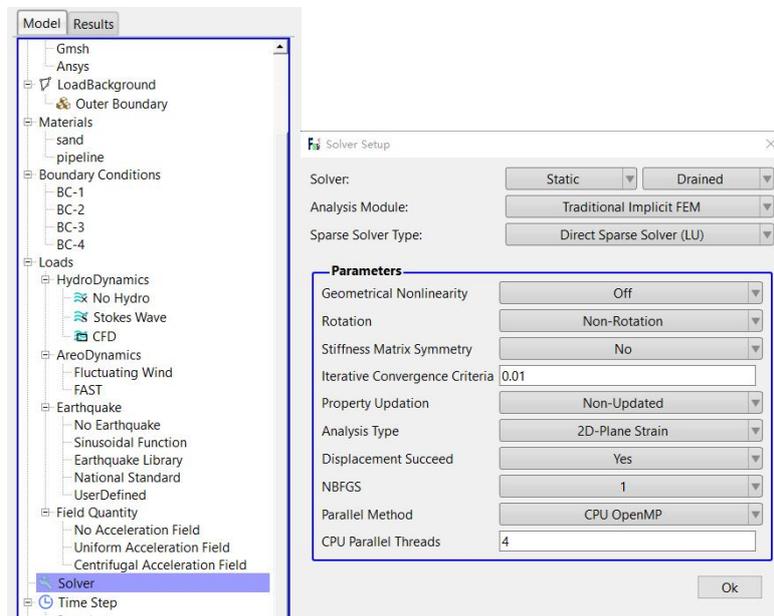


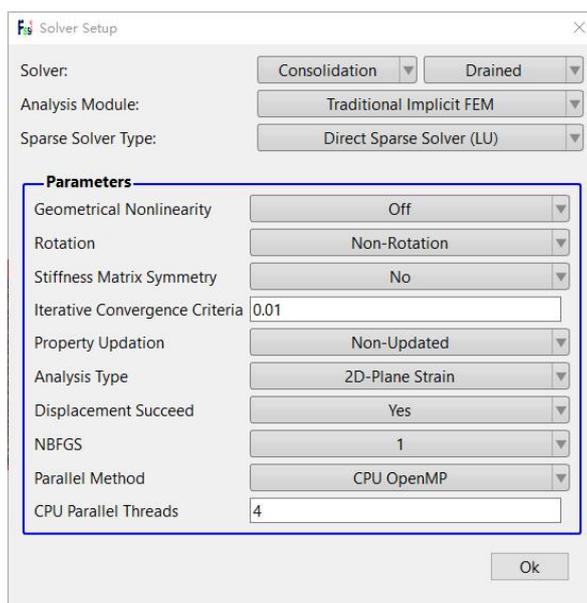
图 1-20 波浪参数设置

1.1.8 设置求解器类型和时间步

在 Step1 模式下，点击前处理界面上 Model 树状菜单栏里的 Solver，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），Step2 模式下，求解器设置为 Consolidation，并进行相关属性参数设置，如图 1-21 所示；



(a) Step1 中求解器相关设置



(b) Step2 中求解器相关设置

图 1-21 设置求解器的相关属性参数

在前处理界面上的 Model 树状菜单栏中的 Time Step 中，点击 Step1 下的 Sub_Step1，设置固结时间步数为 0.5s，时间步长为 0.05s，不更新坐标，不更新刚度矩阵，每步最大迭代 10 次，不输出重启文件，每 0.05s 输出分布图结果，每 0.05s 输出时程结果，输出高斯点上结果，如图 1-22 所示；

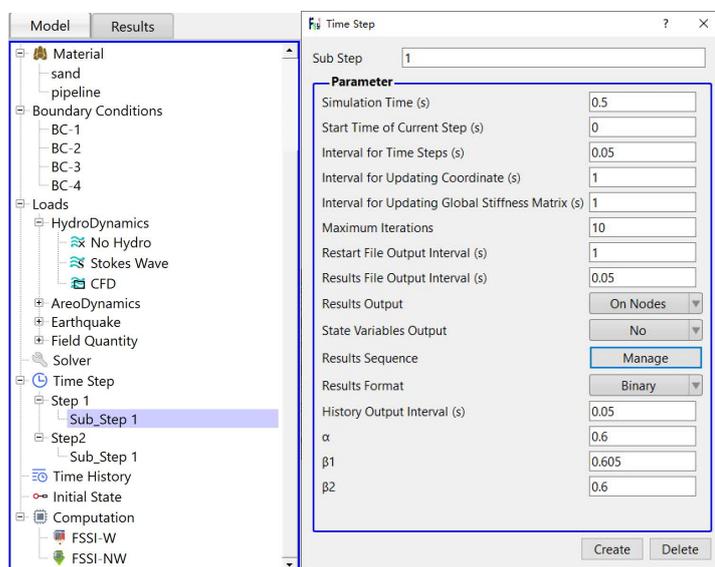


图 2-21 设置时间步 1 和相关属性参数

在前处理界面上的 Model 树状菜单栏中的 Time Step 中，点击 Step2 下的 Sub_Step1，设置求解时间步数为 30s，时间步长为 0.05s，不更新坐标，不更新刚度矩阵，每步最大迭代 10 次，不输出重启文件，每 0.05s 输出分布图结果，每 0.05s 输出时程结果，输出高斯点上结果，如图 1-23 所示；

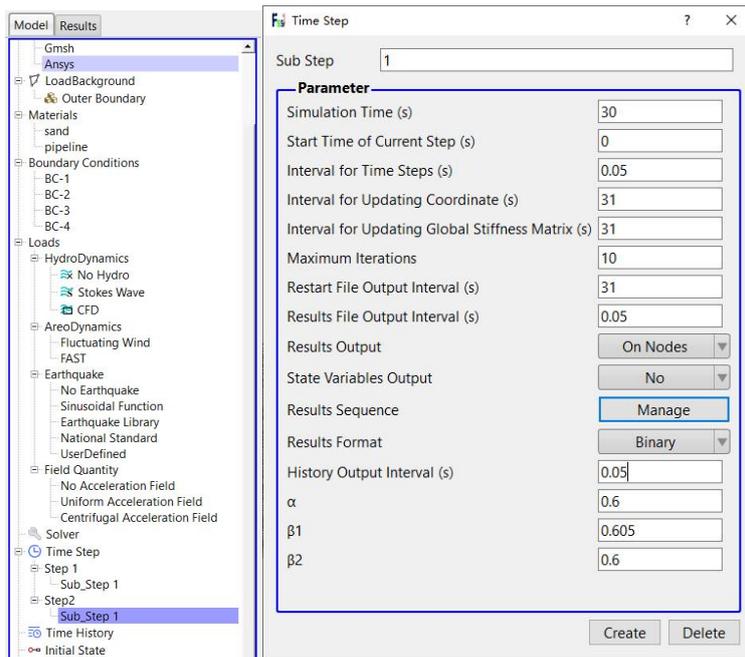


图 1-23 设置时间步 2 和相关属性参数

1.1.9 添加时程输出

需要输出时程结果的点设置为：与海底管线接触的土体所有流体节点的孔压。

点开右侧伸缩栏，选择 **Fluid Mesh**，进行流体节点的选择

点击工具栏中图标 ，进入输出时程选择模式；

点击工具栏中图标 ，进入节点选择模式；

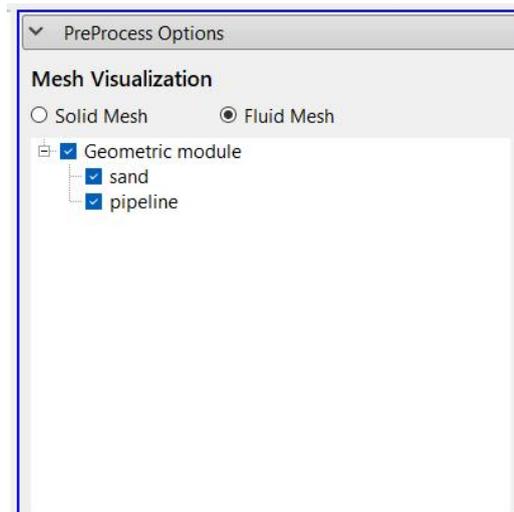


图 1-24 选择流体节点

选择相应的土体节点，如图 1-25 所示。

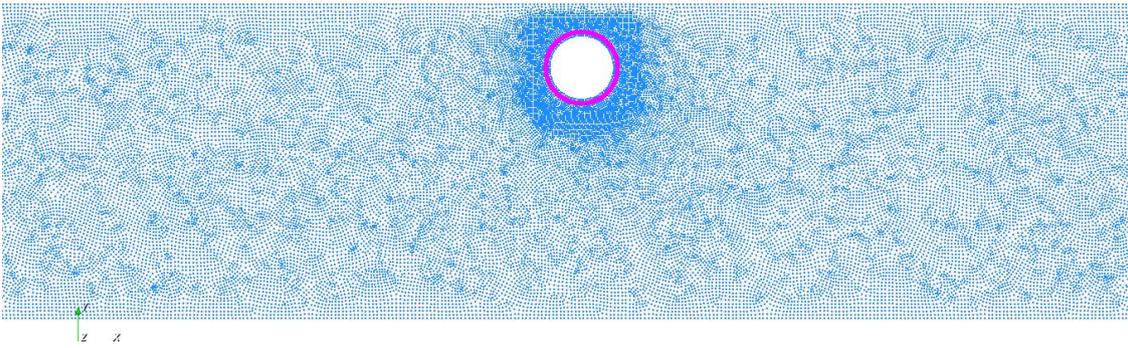


图 1-25 选定流体节点

右键选择输出孔压，如图 1-26 所示；

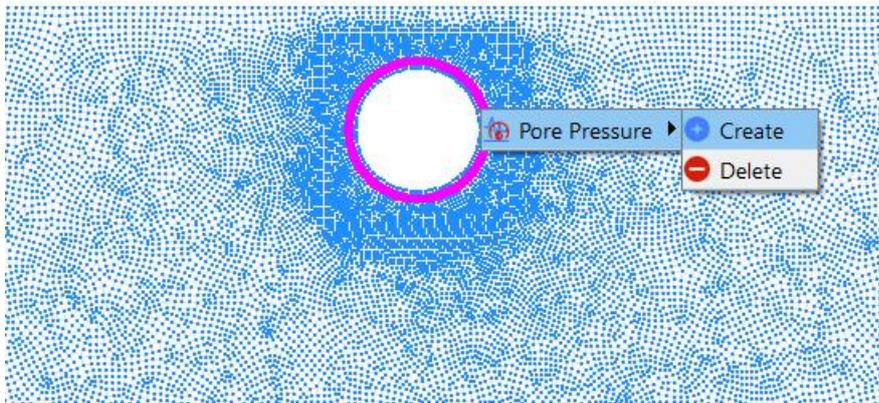


图 1-26 设置输出时程结果的节点

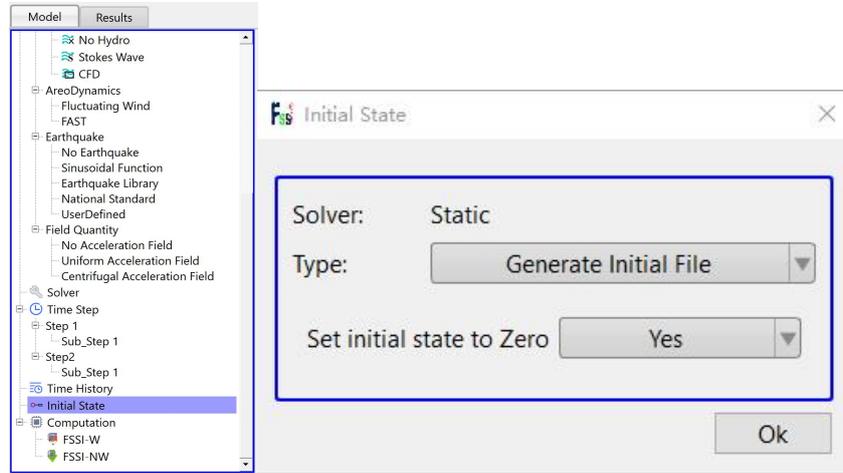
在右侧的伸缩区中勾选 Show History Plot 可以显示已经输出时程结果的点或单元；
 点击 FssiCAS—Preprocess—Solver—Time Histroy，可以显示输出的时程结果列表，选择列表中的项，点击右键可以进行删除操作，如图 1-27 所示；

Information			
Coordinate	Type	No.	
(2.19103,-0.16450,0.00000)	Node_Pore_P	78	✘
(2.19103,-0.16950,0.00000)	Node_Pore_P	80	✘
(2.19130,-0.15950,0.00000)	Node_Pore_P	76	✘
(2.19130,-0.17450,0.00000)	Node_Pore_P	82	✘
(2.19183,-0.15452,0.00000)	Node_Pore_P	74	✘
(2.19183,-0.17948,0.00000)	Node_Pore_P	84	✘
(2.19263,-0.14958,0.00000)	Node_Pore_P	72	✘
(2.19263,-0.18442,0.00000)	Node_Pore_P	86	✘

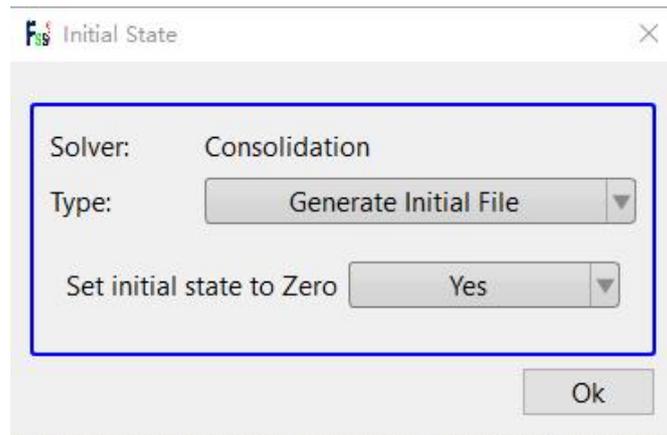
图 1-27 显示输出的时程结果列表

1.1.10 设置初始条件

在前处理界面上 Model 树状菜单栏中，点击 Initial State，设置起始时间为 0s，点击 OK，即可完成初始状态设置，如图 1-28 所示；



(a) 设置 Step 1 的初始状态



(b) 设置 Step 2 的初始状态

图 1-28 设置初始状态

1.1.11 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工具栏 2 中的 WriteCalculate 功能按钮，保存当前项目，选择相应时间步开始计算，如图 1-29 所示；

计算完成后结果储存在 Project\Results\Soil_Model\Static。

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如图 1-30 所示。

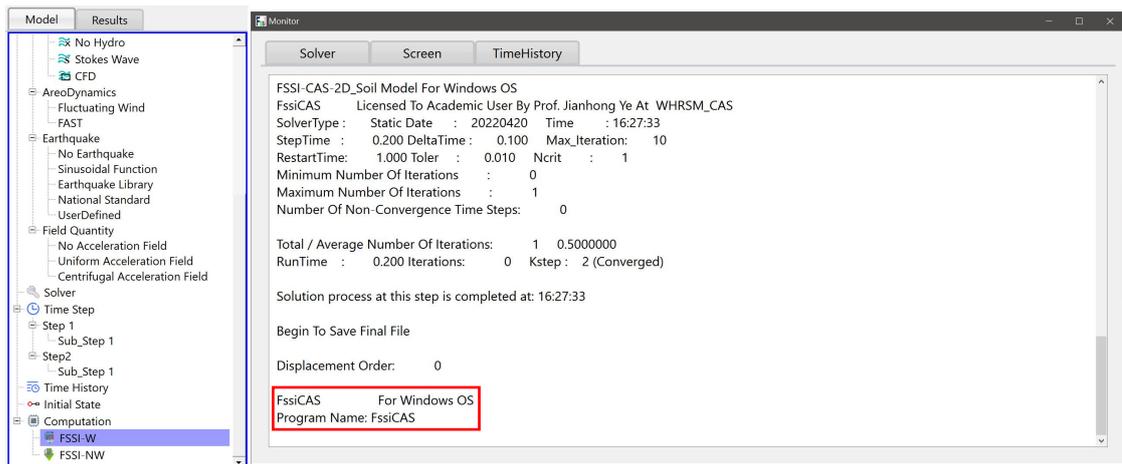


图 1-29 计算完成

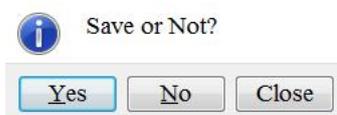


图 1-30 保存项目文件

1.2 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。

1.2.1 加载 FssiCAS 文件

点击在后处理界面上 Results 树状菜单栏中的 Open Results File，在弹出窗口的 File Type 中选择 FssiCAS，点击 Load Files，选择需要处理的结果文件夹，即可导入 FssiCAS 计算结果，如图 2-1 所示。

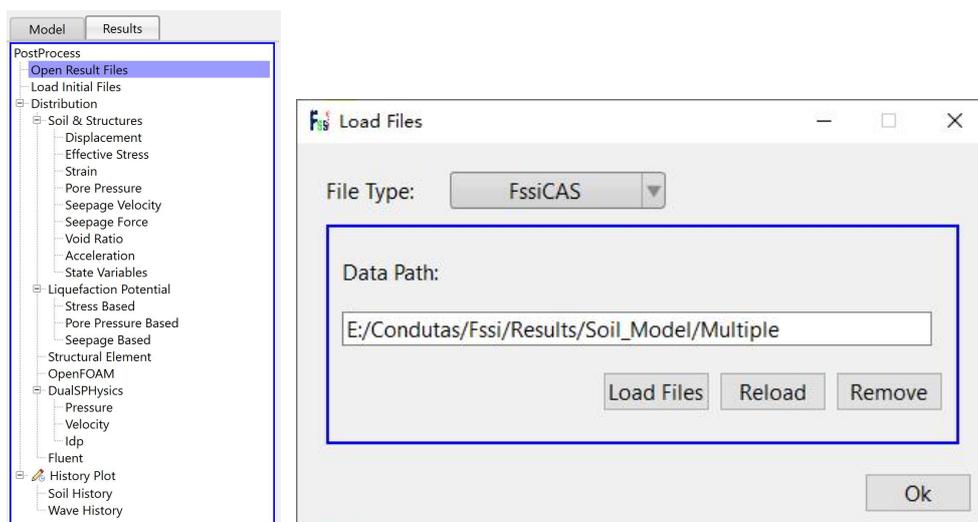


图 2-1 打开结果文件

1.2.2 绘制分布图

在工作区中显示选择 ，在工具栏 2 中的输入窗口  处输入时间步，按键盘上的“回车键”，即可在工作区中显示该时间步的位移分布图；

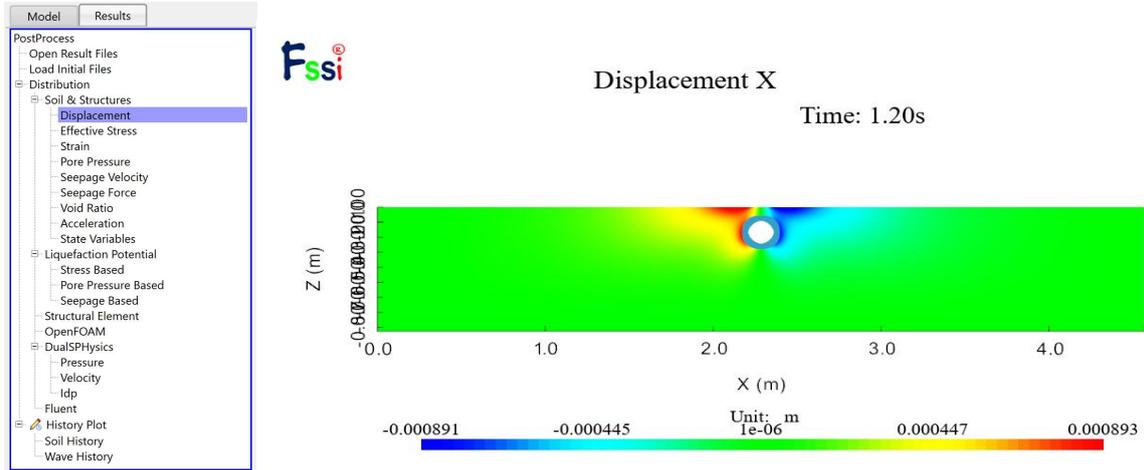
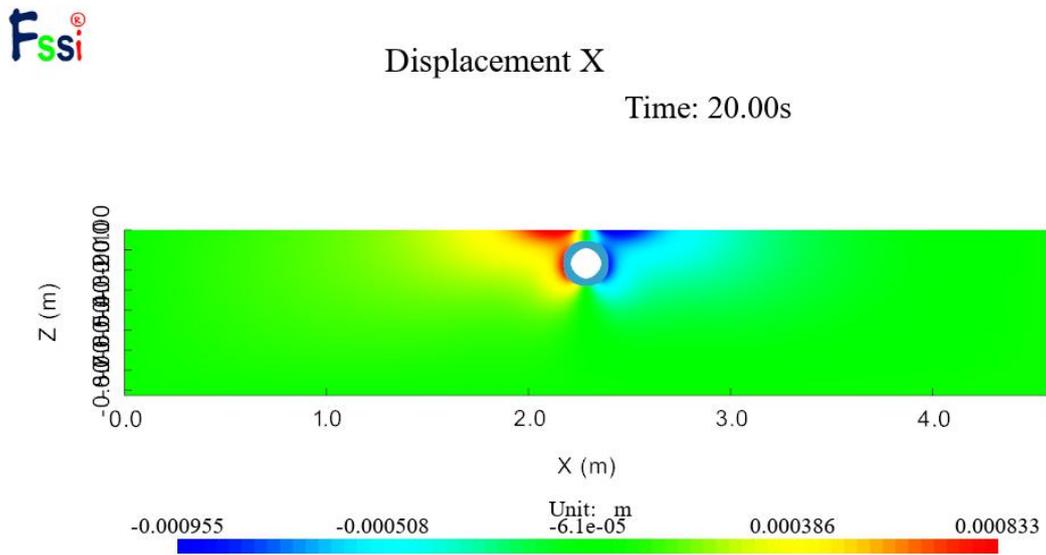


图 2-2 绘制分布图

本案例计算结果分布图如图 2-3 所示





Dynamic Pore Pressure

Time: 21.50s

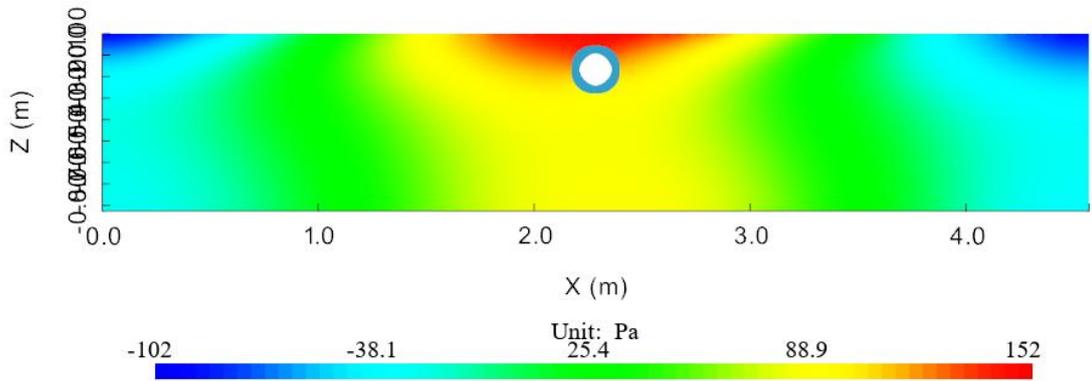


图 2-3 位移和孔压分布图

1.2.3 DualSPHysics 波浪结果与 FssiCAS 土体结果联合显示

导入 DualSPHysics 波浪计算结果，点击在后处理界面上 Results 树状菜单栏中的 Open Results File，在弹出窗口的 File Type 中选择 DualSPHysics，选择需要处理的结果文件夹，即可导入波浪计算结果，如图 2-4 所示。

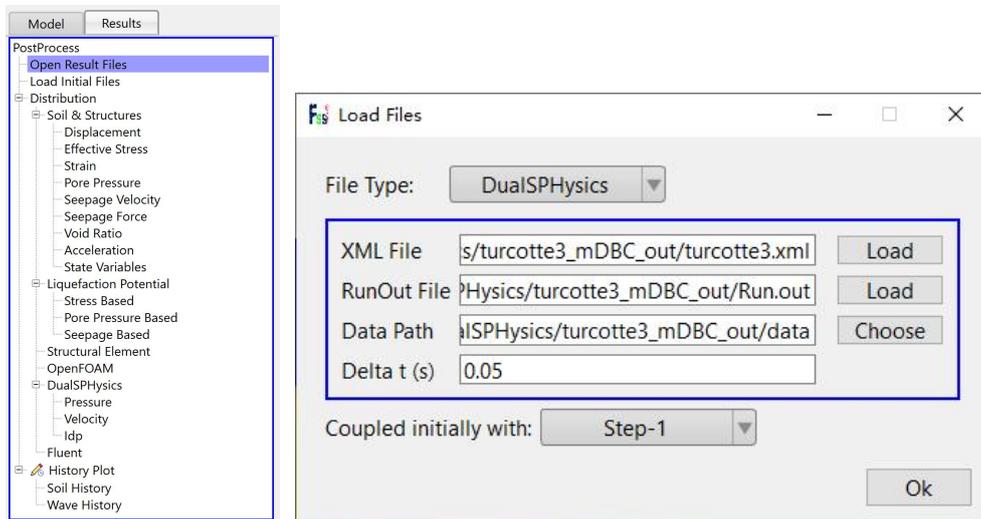


图 2-4 导入 DualSPHysics 波浪结果文件

在左侧菜单栏 DualSPHysics 下，可以选择呈现波浪的压力、流速或是仅绘制波浪运动图。如图 2-5 所示，选择绘制波浪压力分布图。

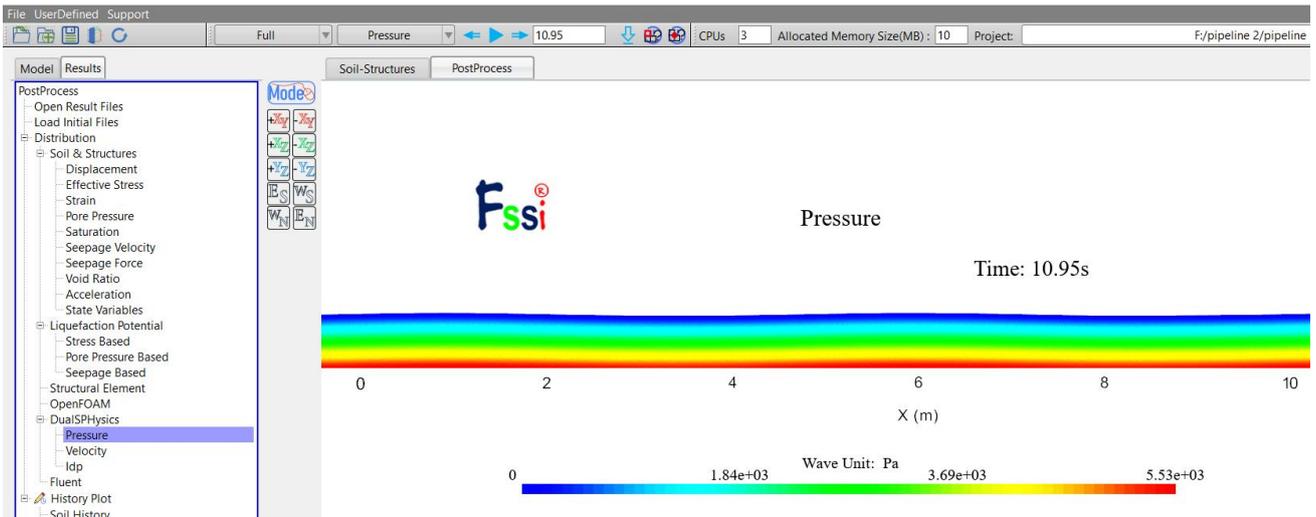


图 2-5 流体压力分布

点开伸缩栏，将固体模型与流体模型同时勾选，即可同时显示波浪与海床的响应。图 2-6 为勾选示意图，图 2-7 为 21s 时波浪与土体孔压联合分布图。

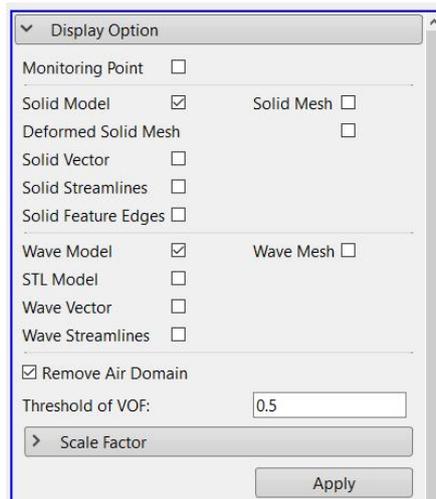


图 2-6 伸缩栏操作

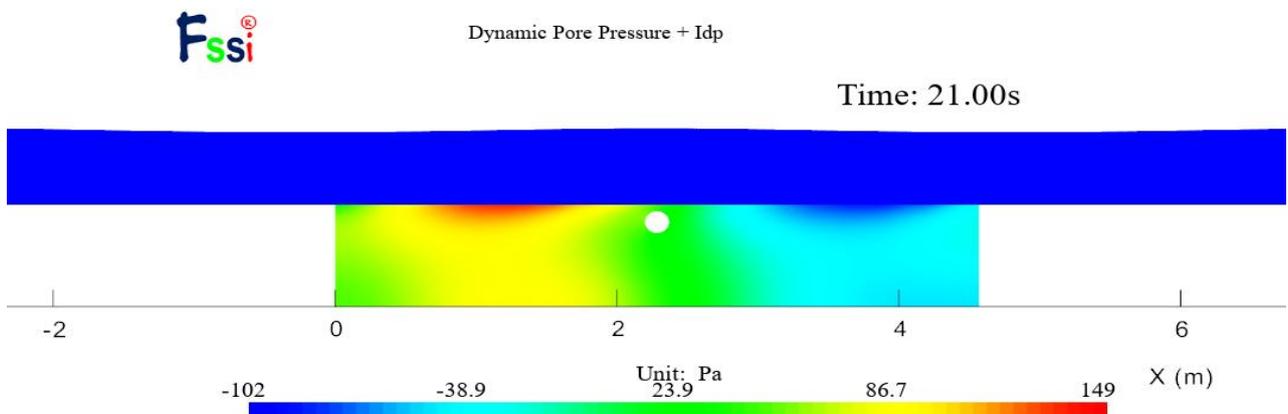


图 2-7 波浪土体联合展示