

基于 FssiCAS-OpenFOAM 的波浪-海床-桩基础动力响应

本案例用于演示如何采用 FssiCAS 和 OpenFOAM 进行波浪-海床-桩基的单向耦合计算，以研究单桩基础与海床在波浪作用下的动力响应及稳定性。其中，流体动力学的计算 OpenFOAM 中 interFoam 所开发的求解器 olaFlow，固体域使用 FssiCAS 进行计算，计算模型示意图如图 18-1 所示。本案例中，海床的厚度为 30 m，长度为 100 m。结构物是一个圆柱体的单桩，半径 4 m，高 25 m 并且有 10 m 插入了海床。波浪参数为水深 10 m，波高 4 m，周期 5 s。注意，计算该案例需要至少 14 G 的内存资源。

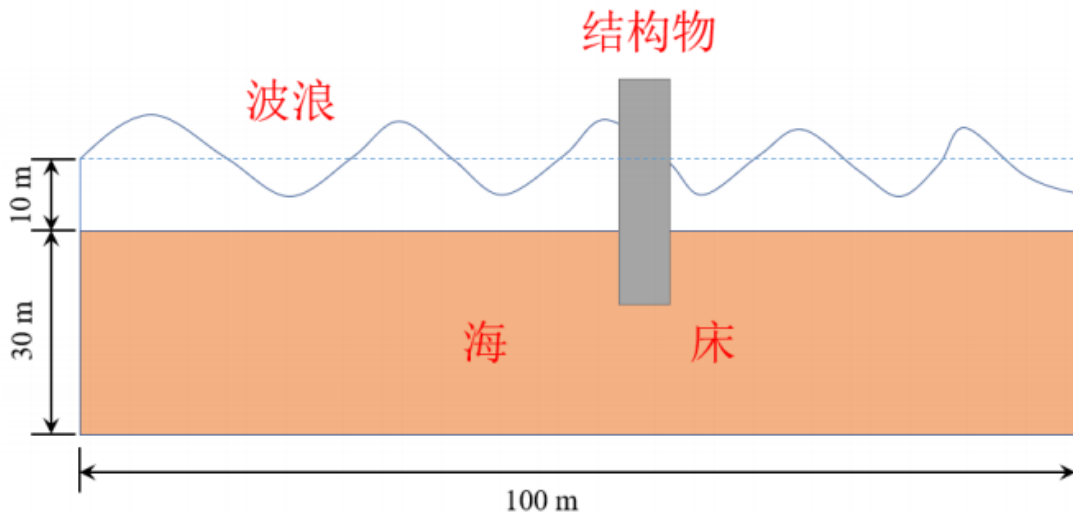
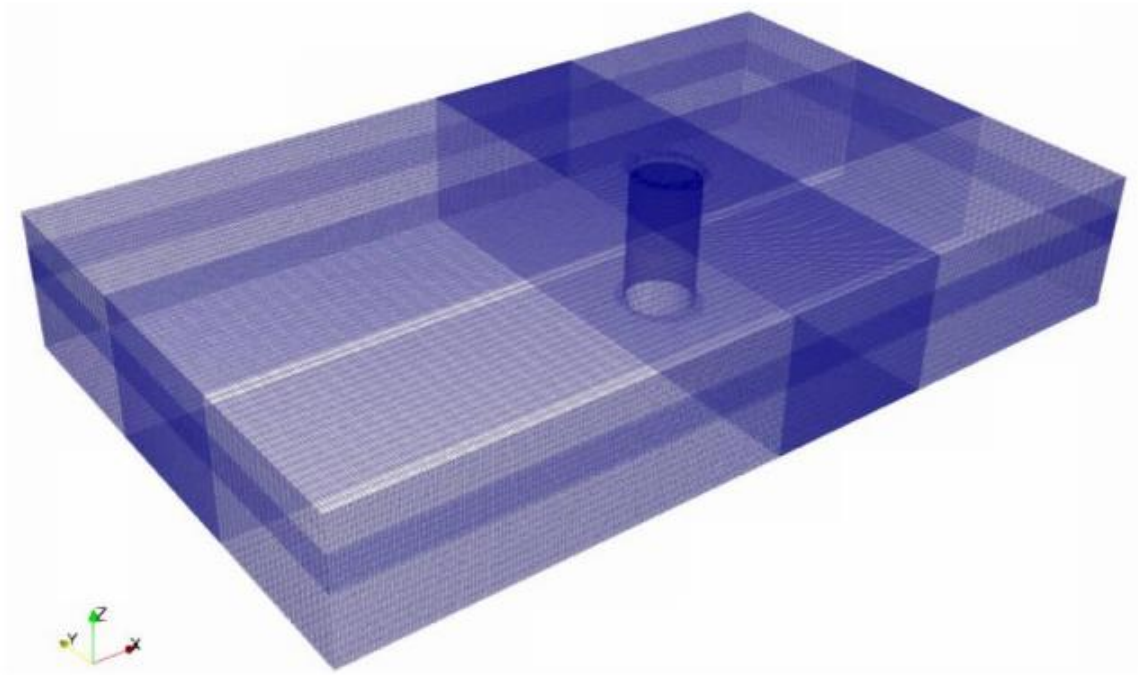


图 18-1 波浪-海床-结构物单向耦合的计算模型示意图

18.1 流体域计算(OpenFOAM)

本案例采用 OpenFOAM 自带的 blockMesh 和 snappyHexMesh 划分流体网格，划分结果如图 18-2(a)所示。关于边界条件、波浪参数等相关设置，可参考 olaFlow tutorials 提供的 breakwater 案例。对于采用了并行计算的 OpenFOAM 案例，务必在进行耦合计算前使用“reconstructPar”命令以整合流体的计算结果，例如“reconstructPar -fields '(p alpha.water U)’”。若仅进行单向耦合计算，不需要在 FssiCAS 界面中查看 alpha.water 或 U 的分布，则仅需整合压力 p。

如图 18-2(b)、18-2(c)所示，整合后的计算结果中，所有文件(包括 polyMesh 中的网格文件)都必须为 ASCII 格式。



(a) 使用 blockMesh 和 snappyHexMesh 划分的流体网格

此电脑 > Cases (E:) > OF_FssiCAS_tutorial > FluidPart

名称	修改日期	类型	大小
0	2022/8/4 17:03	文件夹	
0.1	2022/8/4 17:03	文件夹	
0.2	2022/8/4 17:03	文件夹	
0.3	2022/8/4 17:03	文件夹	
0.org	2022/8/4 17:03	文件夹	
constant	2022/8/4 17:03	文件夹	
system	2022/8/4 17:03	文件夹	

文件夹中的文件
格式必须为 ASCII

(b) 相应路径下所需的内容

此电脑 > Cases (E:) > OF_FssiCAS_tutorial > FluidPart > constant > polyMesh

名称	修改日期	类型	大小
boundary	2022/6/24 16:59	文件	2 KB
cellZones	2022/6/24 16:59	文件	1 KB
faces	2022/6/24 16:59	文件	506,405 KB
faceZones	2022/6/24 16:59	文件	1 KB
neighbour	2022/6/24 16:59	文件	113,686 KB
owner	2022/6/24 16:59	文件	115,373 KB
points	2022/6/24 16:59	文件	79,365 KB
pointZones	2022/6/24 16:59	文件	1 KB

文件夹中的文件
格式必须为 ASCII

(c) polyMesh 中的网格信息文件

图 18-2 OpenFOAM 的网格与计算结果

18.2 固体域计算(FssiCAS)

18.2.1 FssiCAS 图形界面操作——前处理

18.2.1.1 网格生成与导入

本案例中的固体模型及网格是由 GiD 软件建立了固体模型并划分网格如图 18-3 所示。

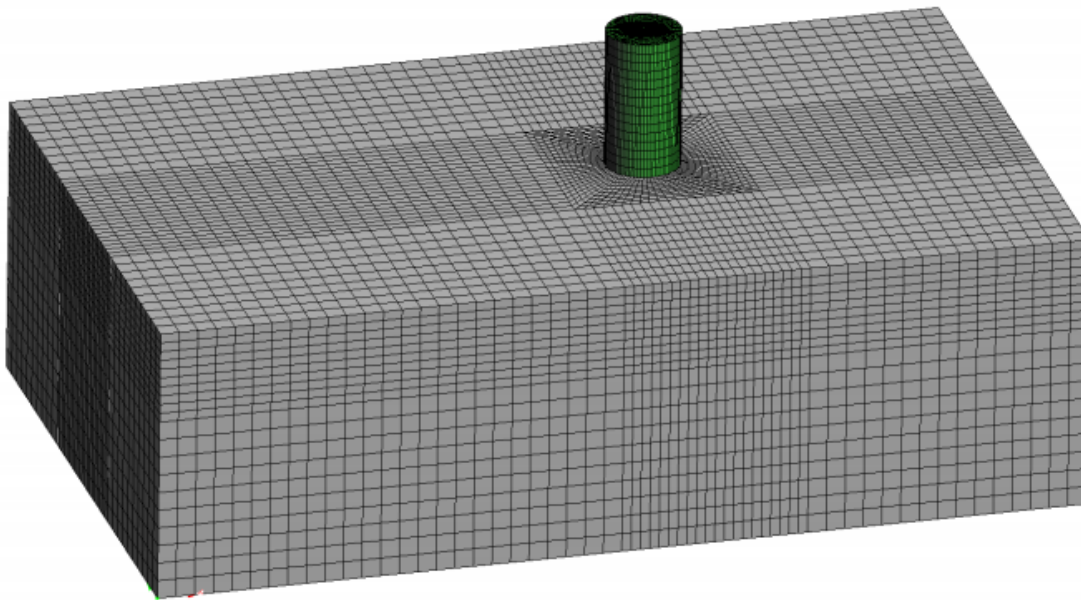


图 18-3 使用 GiD 建立的固体模型与划分好的固体网格

点击左侧 Model 菜单栏中的 FssiCAS—Preprocess—Load Mesh—GiD，在弹出的对话框中找到 GiD 输出的网格文件，双击网格文件或点击打开按钮即可导入网格，如图 18-4 所示。

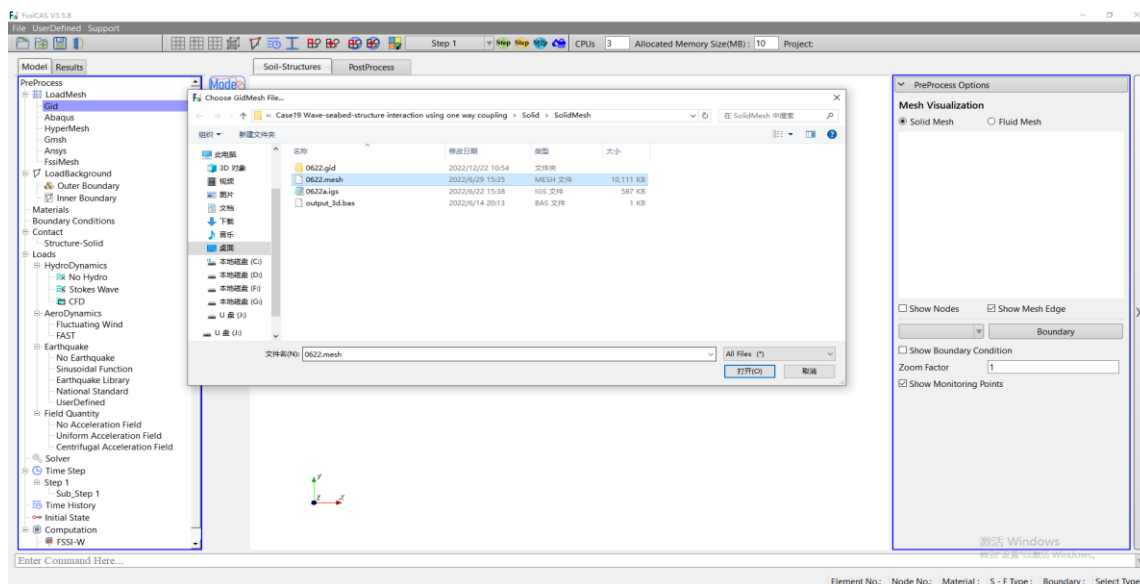


图 18-4 将固体网格导入 FssiCAS

在弹出的 Load Mesh 窗口中设置固体单元类型和流体单元阶次，如图 18-5 所示。本案例中固体单元采用了六面体八节点单元，由于材料一是含流体节点的海床，所以流体单元阶次选为 1；材料二是不含流体节点的柱体，流体单元阶次选为 0。选择完毕后，点击 OK，即可在工作区看到如图 18-6 所示的固体网格。

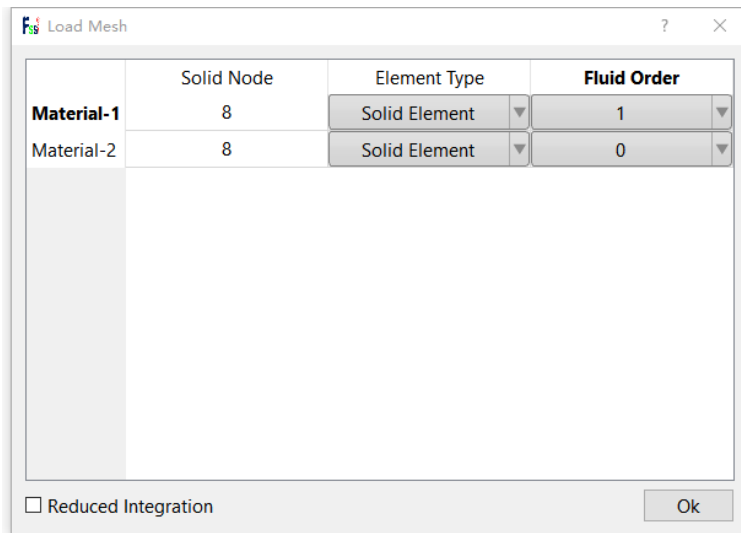


图 18-5 设置单元类型和流体单元阶次

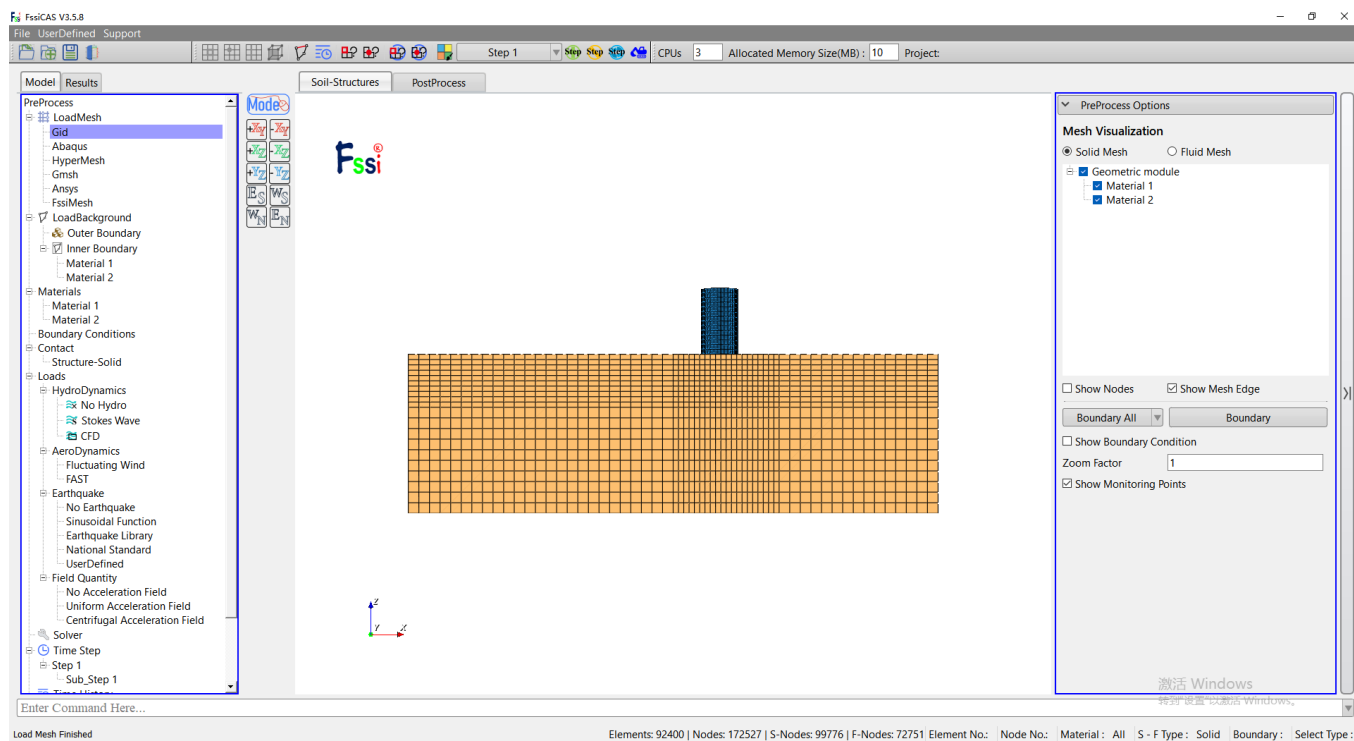




图 18-6 导入 FssiCAS 的固体网格

18.2.1.2 设置边界条件

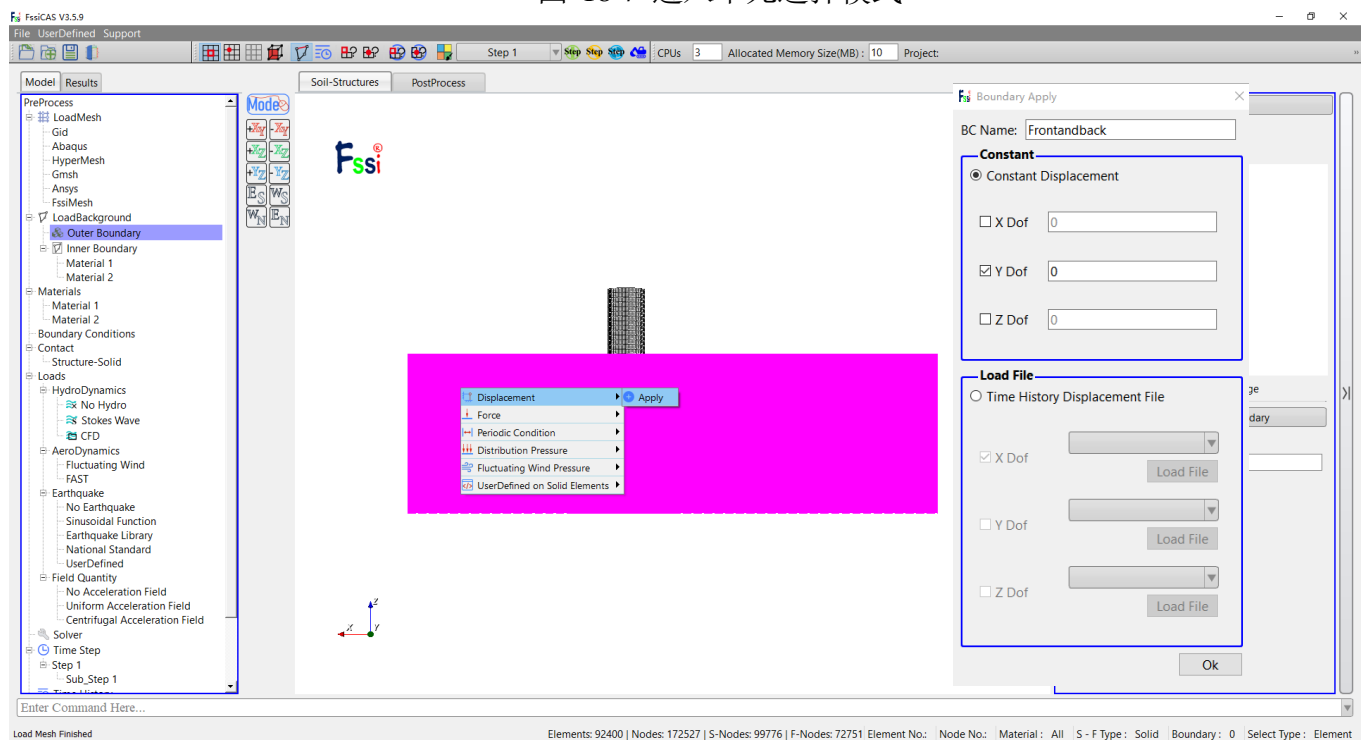
本案例中，海床的前后面需在 y 方向位移固定，海床的左右面需在 x 和 y 方向位移固定，海床底面需在 x 、 y 和 z 三个方向位移固定。海床上表面和柱体表面施加分布力边界条件，然后选择显示流体网格，在海床上表面施加孔压边界条件。

首先，点击上方工具栏中图标，开始添加边界条件，再点击图标进入单元选择模式，如图 18-7 所示。以海床前后面为例，点击键盘的‘R’开始选择，待选好要施加位移固定的单元后，右键并依次选择 Displacement—Apply，如图 18-8，施加 y 方向的位移固定边界条件。再对海床底部施加 x 、 y 、 z 三个方向的位移固定边界条件，左右面施加 x 、 y 两个方向的位移固定边界条件。类似地，施加分布力边界条件时也是选好单元后，右键并依次选择 Distribution Pressure—Apply，如图 18-9。

在施加孔压边界条件时，需要先点击右菜单栏中的 Fluid，然后点击 Mesh 显示含有流体节点的网格，如图 18-10。待选择好要施加孔压边界的单元后，右键并依次选择 Pore Pressure—Apply，如图 18-11。



图 18-7 进入单元选择模式



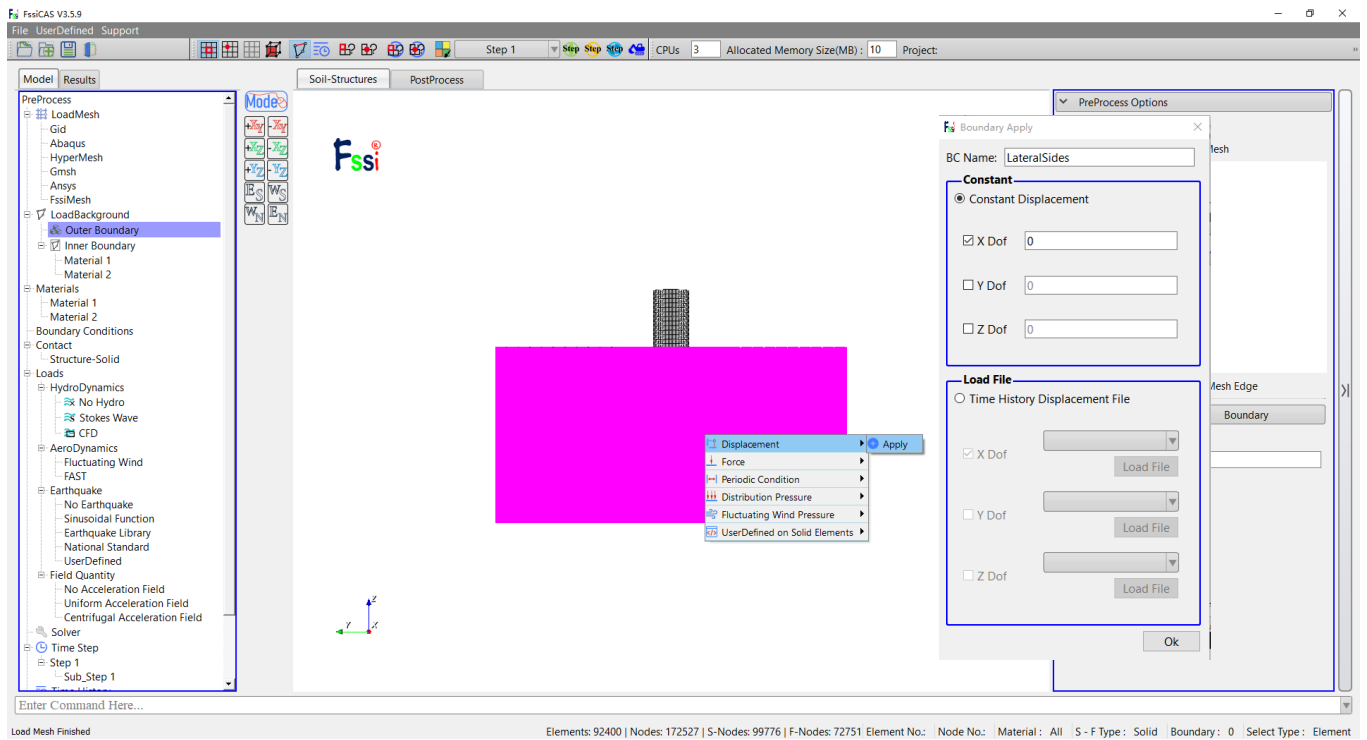
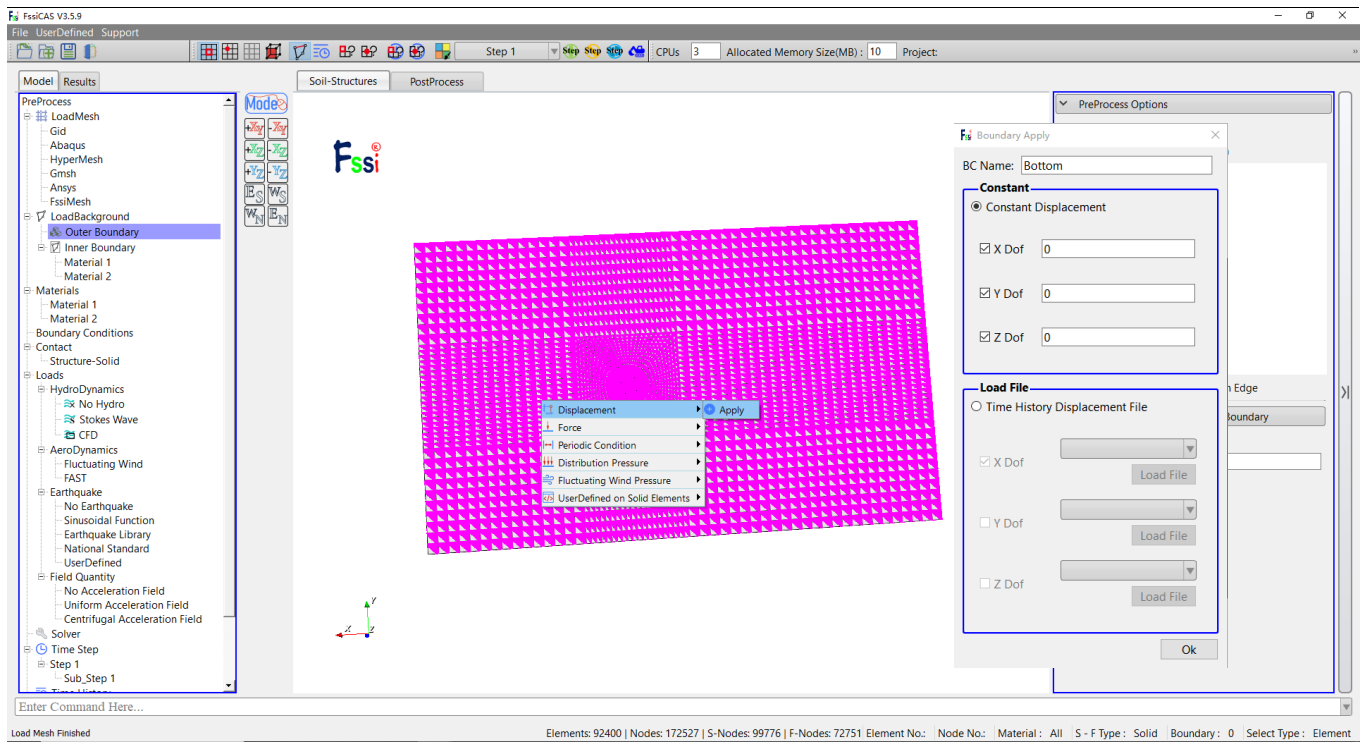


图 18-8 施加位移固定的边界条件

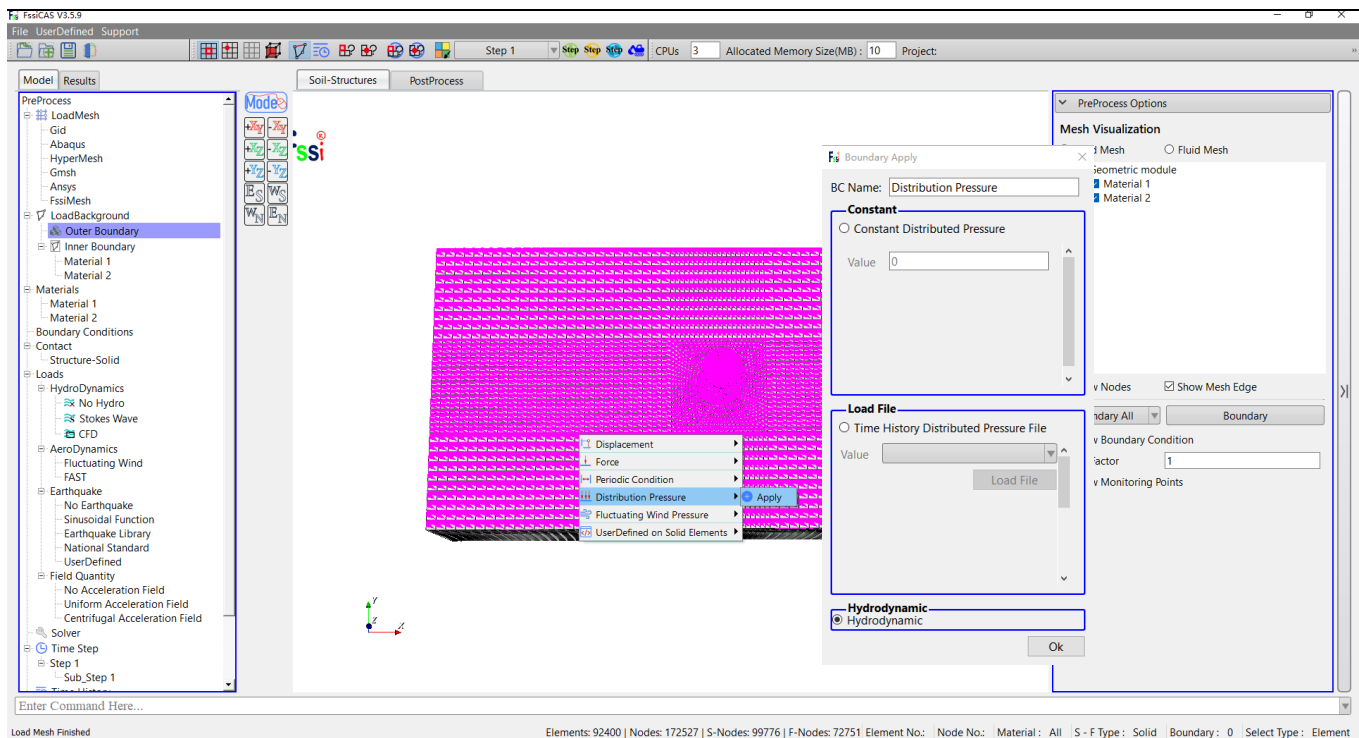


图 18-9 施加分布力的边界条件

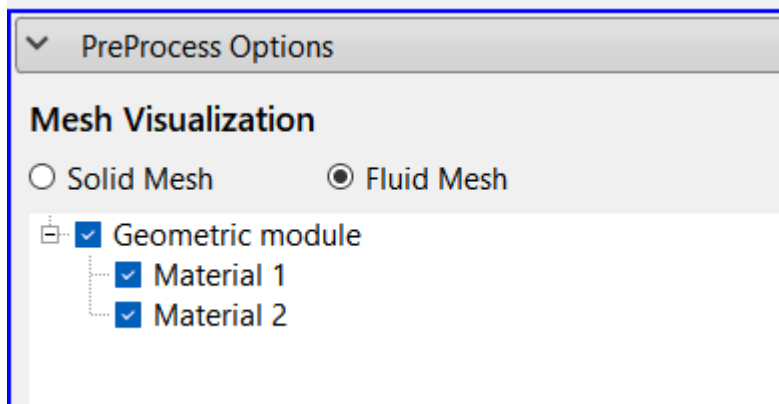


图 18-10 选择含有流体节点的网格

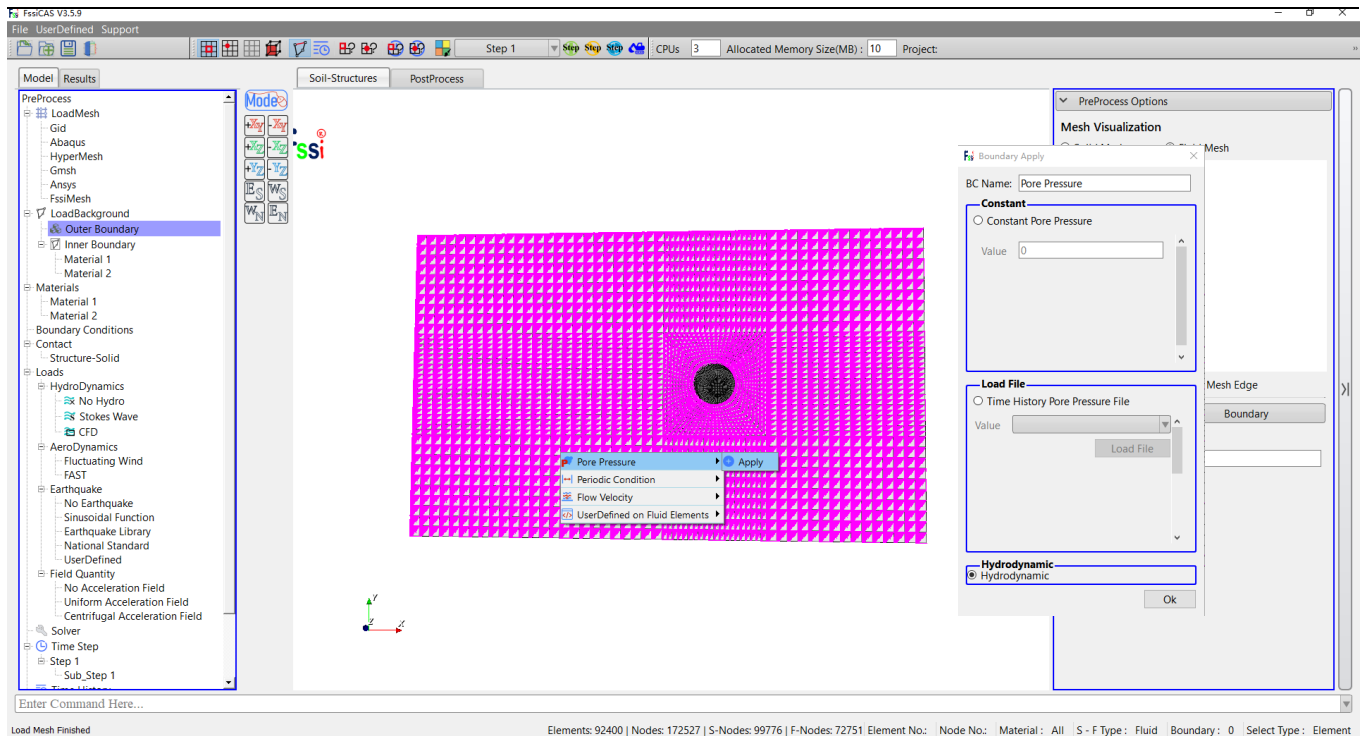
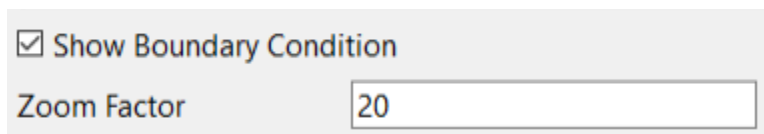
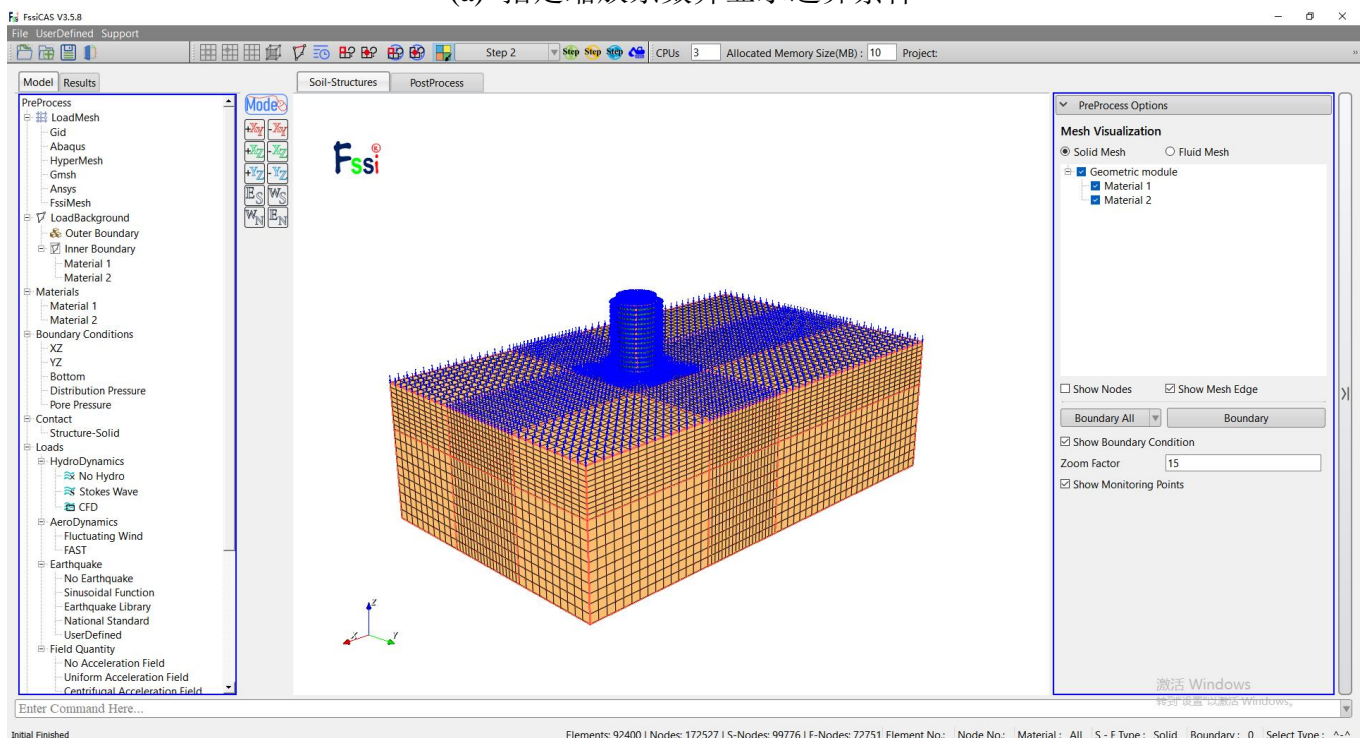


图 18-11 施加孔压边界条件

如图 18-12 所示，待所有边界条件施加完毕后，在右菜单栏中指定合适的缩放倍数并显示，检查各个面上施加的边界条件是否无误。



(a) 指定缩放系数并显示边界条件



(b) 检查边界条件是否无误

图 18-12 指定缩放系数并检查施加上的各个边界条件

18.2.1.3 设置材料参数和本构模型

点击左侧菜单栏中的 **Material**，给材料一（海床）、材料二（柱体）设置好各自的名称、材料参数、本构参数，如图 18-13 和 18-14 所示。

The screenshot shows a dialog box titled "Material 1" with the following settings:

- Material Name:** Seabed
- Constitutive Model:** Elastic
- Succeed:** No Succeed
- Initial Stress Tensile:** Yes
- Global Stress Integration:**
 - Stress Integration Algorithm: Default
- Constitutive Model Parameters:**
 - Young's Modulus (Pa): 5e8
 - Poisson's Ratio: 0.36
- 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
 - Saturation (0-1): 1
 - Granular Density (kg/m³): 2700
 - Fluid Density (kg/m³): 1000
 - Void Ratio: 0.65
 - Permeability x(m/s): 1e-4
 - Permeability y(m/s): 1e-4
 - Permeability z(m/s): 1e-4

An "OK" button is located at the bottom right of the dialog box.

图 18-13 设置海床的相关参数

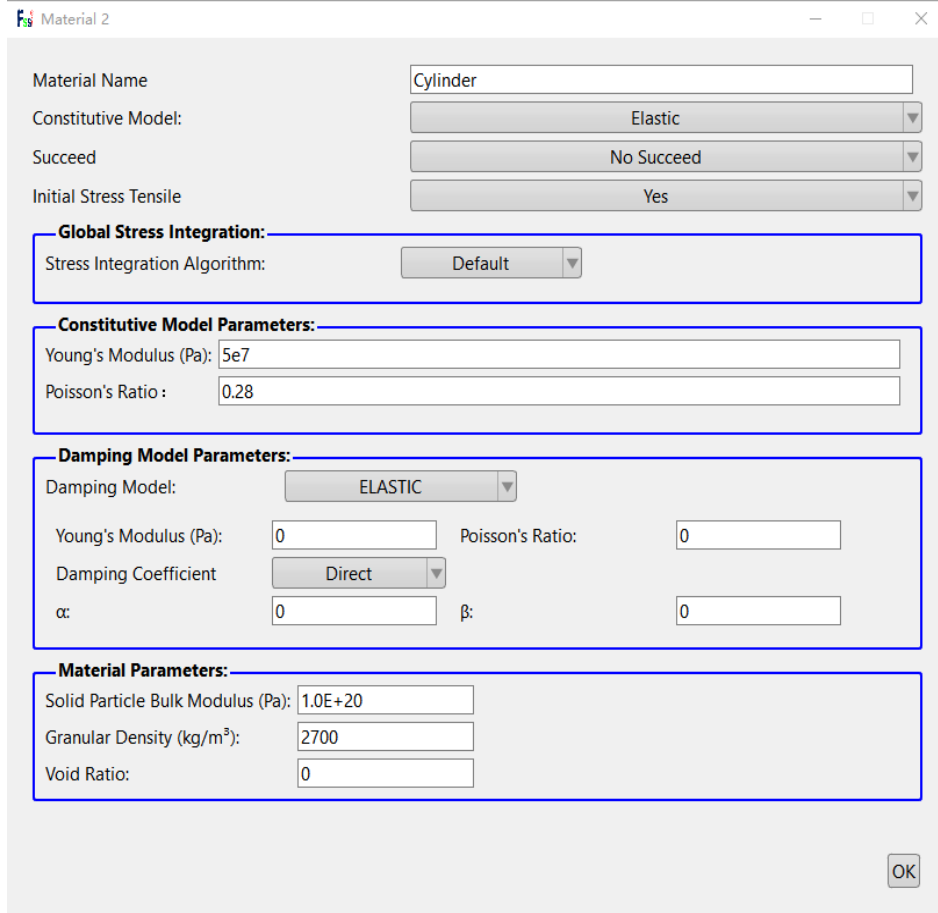
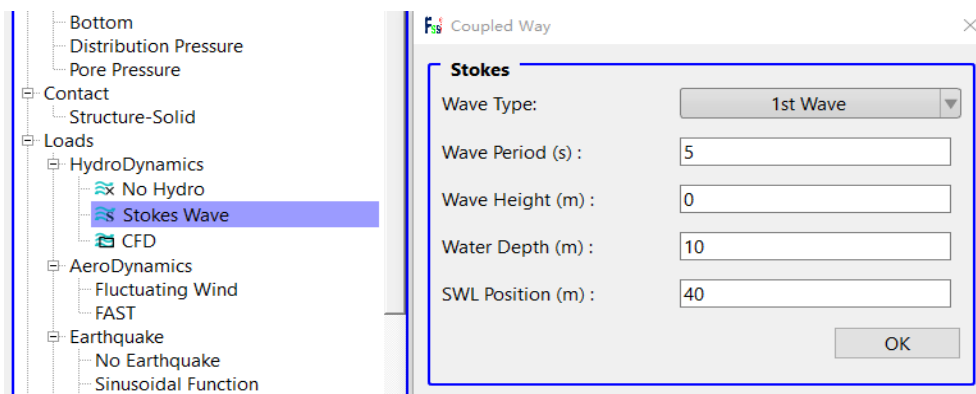


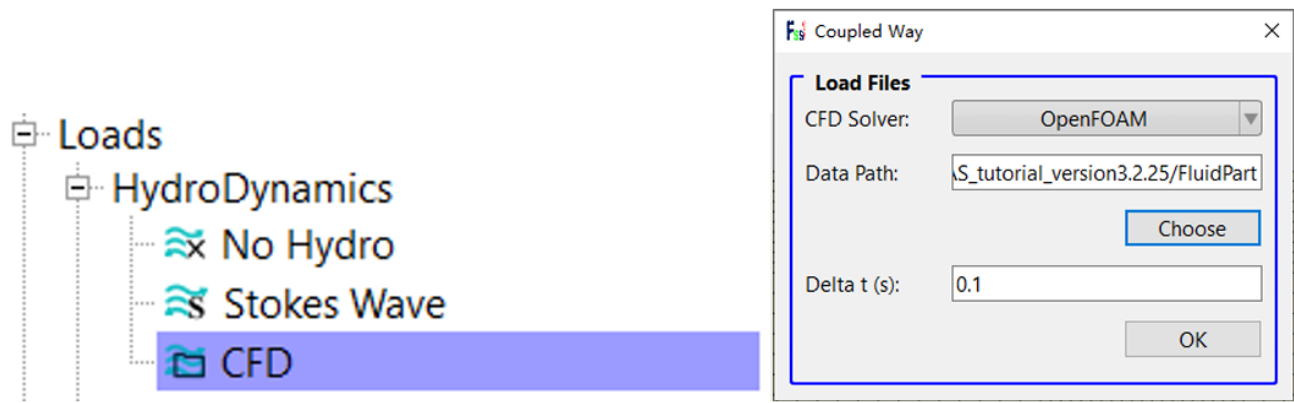
图 18-14 设置柱体的相关参数

18.2.1.4 设置水动力计算的耦合方式

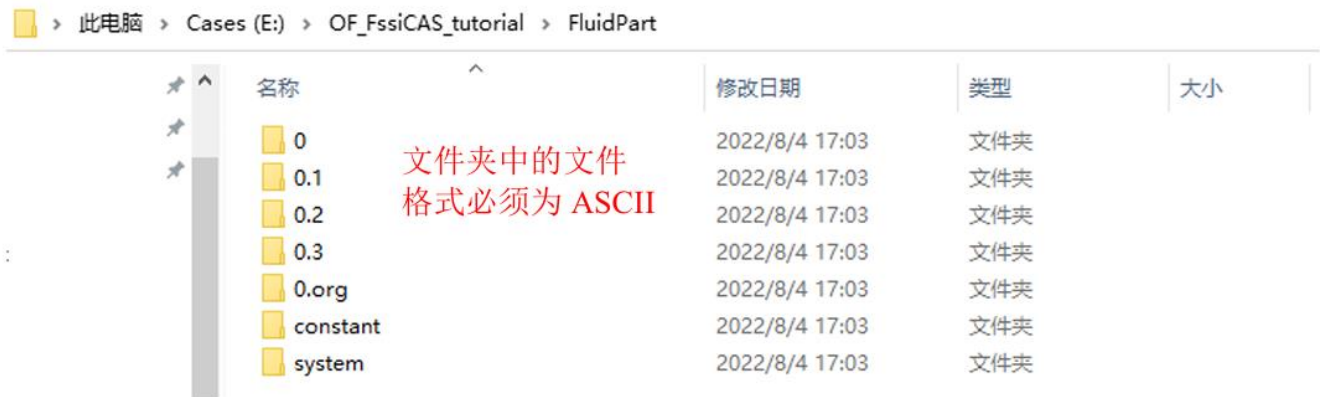
本案例所采用的计算方式是 OpenFOAM 和 FssiCAS 的单向耦合。如图 18-15(a)所示，在 Step1 中选择 Hydrodynamics 中的 Stokes Wave，输入相关参数。如图 18-15(b)所示，在左侧菜单栏的 Hydrodynamics 中选择 CFD，选择 OpenFOAM 结果文件所在的文件夹(constant、system 文件夹所在的路径，如图 18-15(c))，且该路径下所有的文件格式必须为 ASCII。Delta t 处填写 OpenFOAM 结果文件的时间步，点击 OK 即可完成水动力耦合方式的设置。



(a) Step 1 中 Stokes 波的参数信息设置界面



(b) Step 2 指定流体结果文件的路径与时间步



(c) 相应路径下所需的内容

图 18-15 设置水动力计算的耦合方式

18.2.1.5 设置加速度场、求解器、时间步和初始状态

本案例需要分为 Static 和 Consolidation 两个 Step，前一个 Step 是用于计算初始状态，后一个 Step 是计算波浪场、海床地基和结构物之间的动力响应。首先点击图 18-7 中绿色背景的 Step 按钮，创建一个 Step 2。目前，图 18-7 中下拉菜单里仍显示的是 Step 1，点击左侧菜单栏中 Field Quantity 下的 Uniform Acceleration Field 并在 z 方向上设为-9.806 以施加竖直方向的重力加速度，x 和 y 方向设置为 0，如图 18-16 所示。点击左侧菜单栏的 Solver，求解器选为 Static 并设置好相关参数，如图 18-17 所示。然后点击 Step 1 中的 Sub_Step 1，输入与时间步相关的参数，如图 18-18 所示，点击 OK 完成时间步的设置。最后，如图 18-19，点击左侧菜单栏中的 Initial State，点击 OK 完成初始状态的设置。

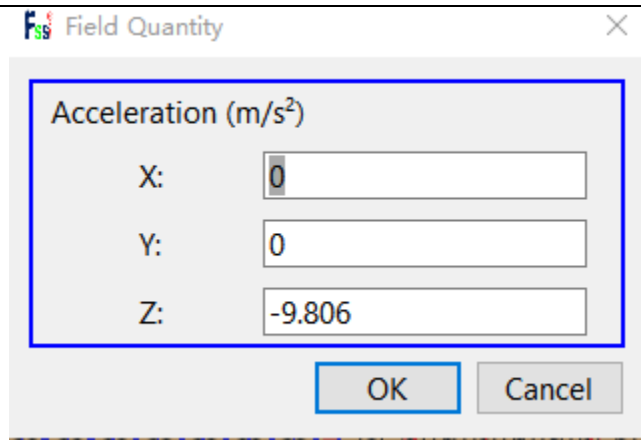


图 18-16 重力加速度的设置

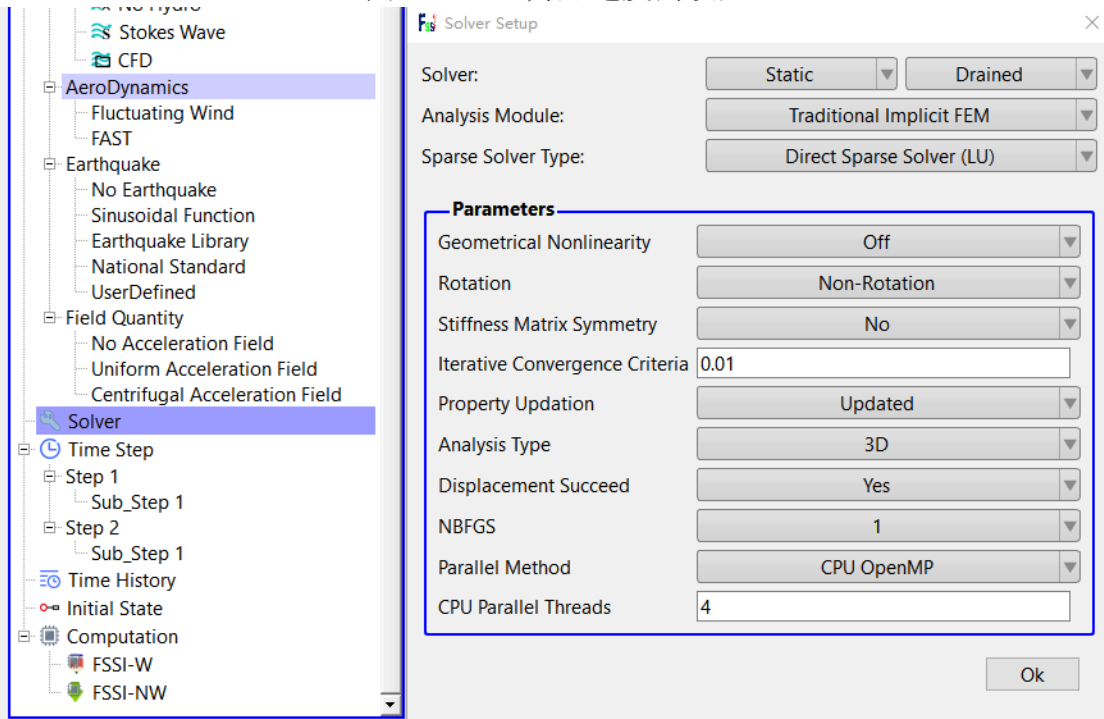


图 18-17 Step 1 中求解器的相关设置

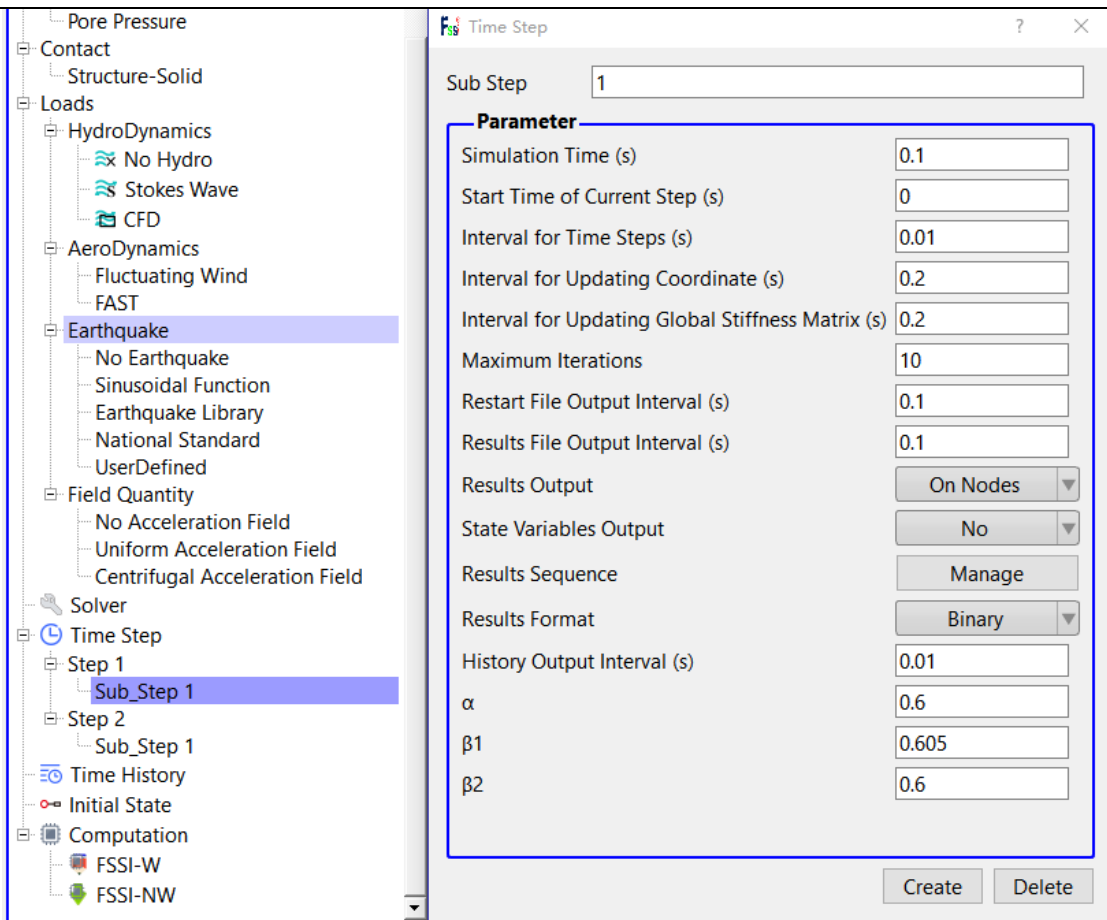


图 18-18 Step 1 中时间步的相关设置

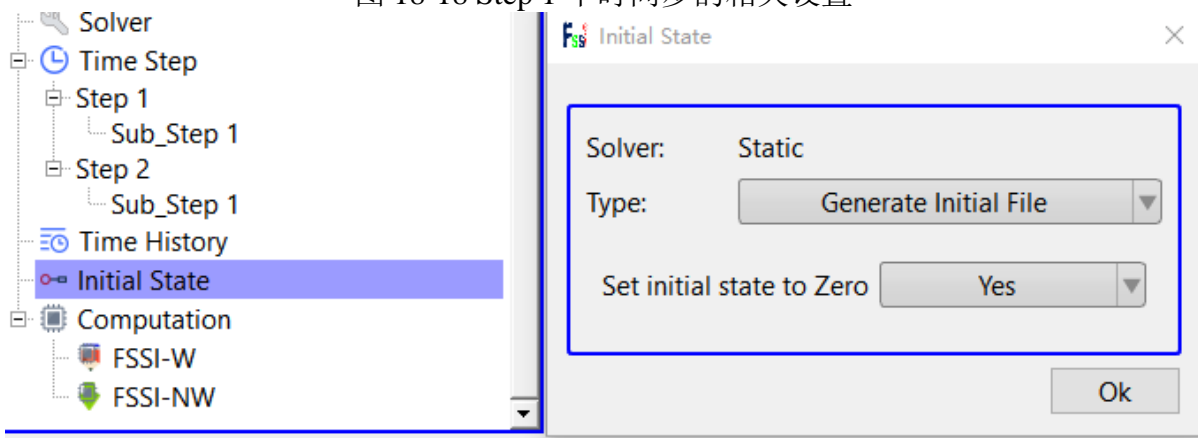


图 18-19 设置 Step 1 的初始状态

之后，点击图 18-7 中的下拉菜单，选择 Step 2，设置好重力加速度，再点击左侧菜单栏的 Solver，求解器选为 Consolidation 并设置好相关参数，如图 18-20 所示。类似地，依次设置好 Step 2 的时间步和初始状态，分别如图 18-21 和 18-22 所示。

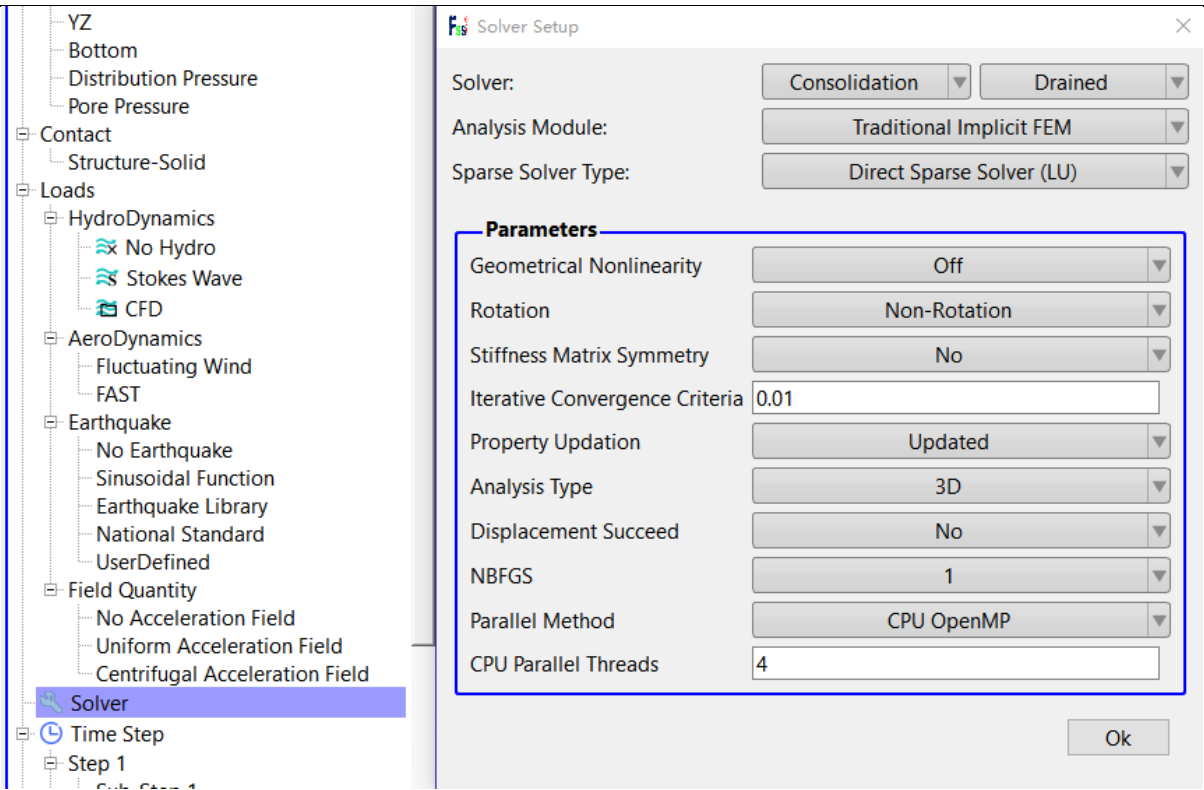


图 18-20 Step 2 中求解器的相关设置

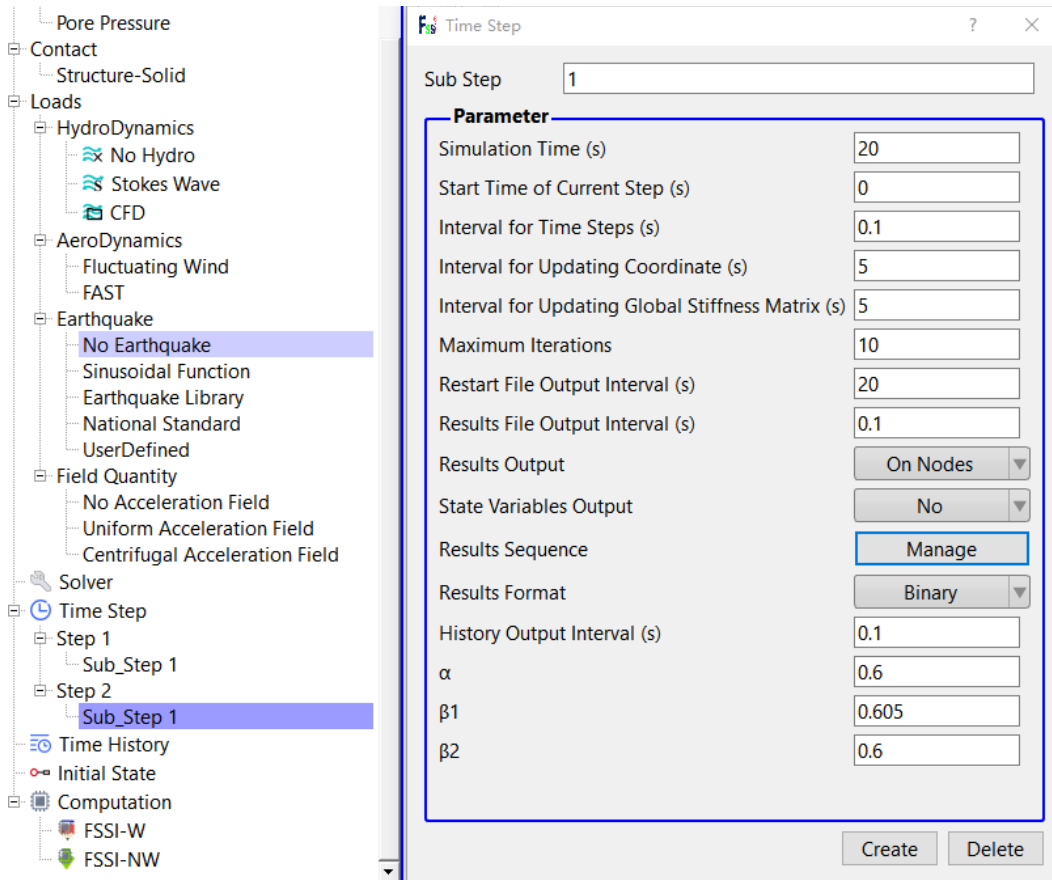


图 18-21 Step 2 中时间步的相关设置

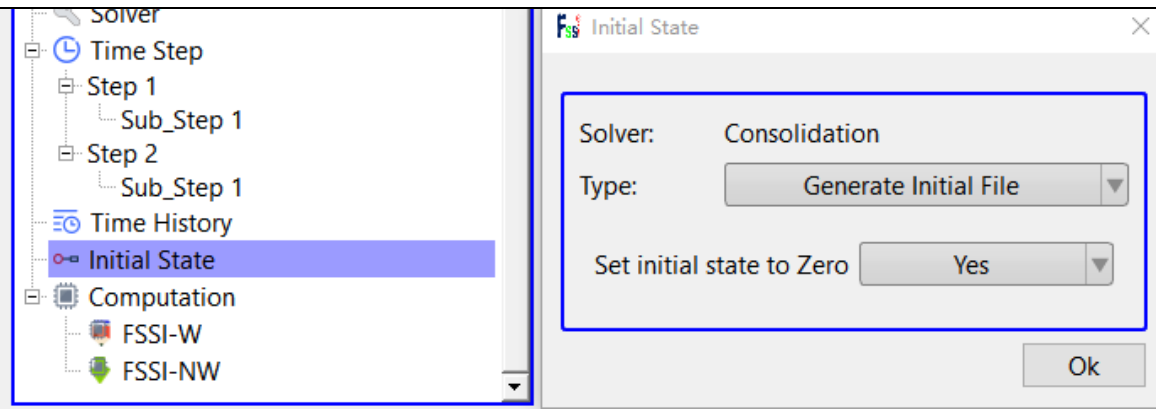


图 18-22 设置 Step 2 的初始状态

18.2.2 计算并保存

点击左侧菜单栏中的 FSSI-W，即可保存当前项目到指定目录并开始计算。

18.2.3 FssiCAS 图形界面操作——后处理

18.2.3.1 加载文件

待计算结束后，点击左侧菜单栏的 Results 标签进入后处理界面。点击 PostProcess—OpenResult Files，点击 Soil Result Files Director 下方的 Load Files 来选择结果文件所在路径并加载，即可对固体结果进行处理；点击 OpenFOAM ControlDict 下的 Load File 并选择相应的 ControlDict 进行加载，即可对流体结果进行处理，如图 18-23 所示。

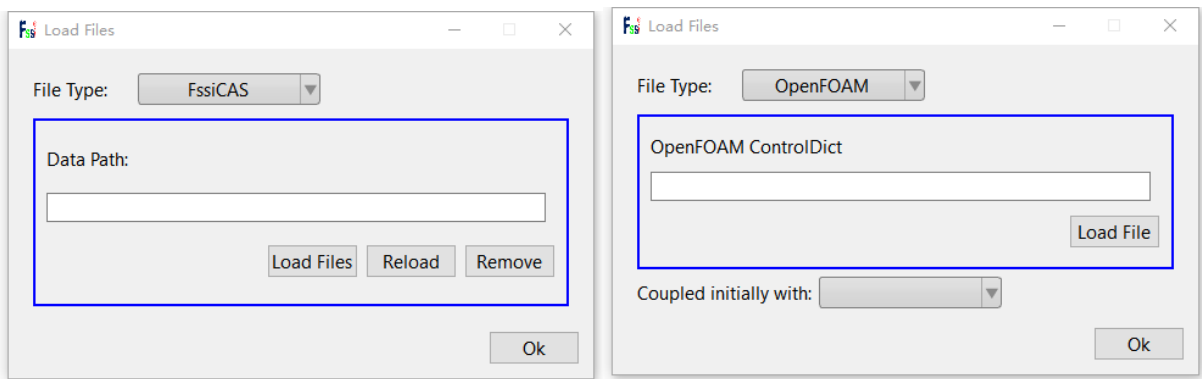


图 18-23 加载固体和流体的结果文件

18.2.3.2 绘制分布图

在左侧菜单栏中选择 Displacement，然后在上方菜单栏选择显示各个方向的位移云图，这里以 X 方向为例，见图 18-24。再依次选择 OpenFOAM—alpha.water，Pore Pressure，在右侧菜单

栏（如图 18-25 所示）的 Display Option 中勾选上 Soil Model 和 Wave Model 就能同时显示流体和固体的分布图，再通过调整 Scalar Bar 和 Axis 的相关参数即可对图像进行优化。这里以波浪自由面和土体孔压为例，如图 18-26 所示。

类似地，可选择 Seepage Velocity，然后在上方菜单栏中选择 Seepage Streamlines 进行流线分布图的绘制。选择 Seepage Streamlines 后，先在右侧菜单中的 Sectional View 中进行剖切设置，如图 18-27 所示，从 $y=30\text{m}$ 处进行剖切，去掉 y 方向从 0 到 30m 的部分。流线 StreamLines 的相关设置如图 18-28 所示，可通过限制种子分布区域来使流线更加密集，并可通过最大积分步数、种子数和箭头数量来调整流线。这里以波浪自由面和土体渗流的流线为例，联合分布图如图 18-29 所示。

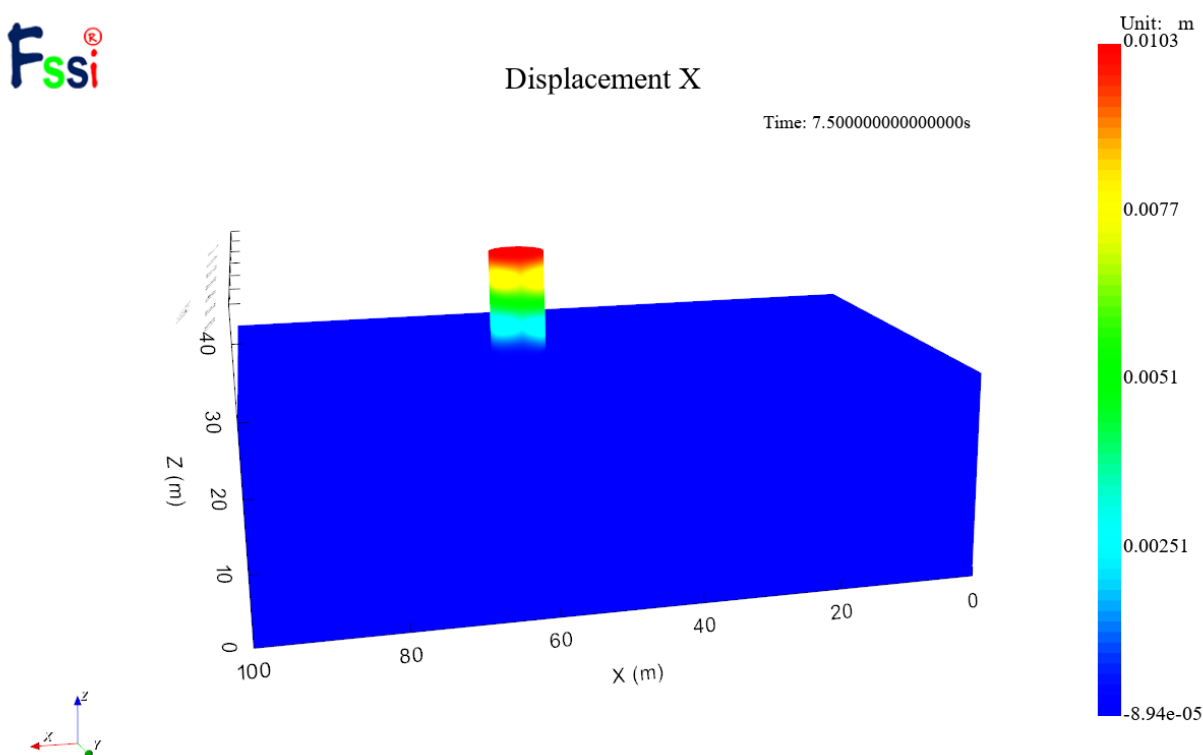


图 18-24 $t = 7.5\text{ s}$ 时 X 方向的位移云图

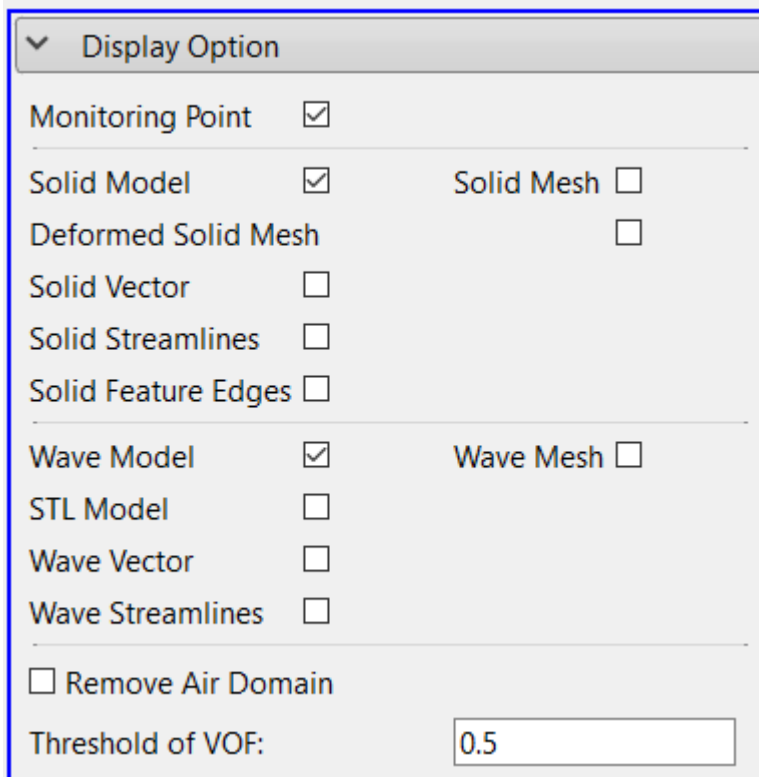


图 18-25 右侧菜单栏中 Display Option 的相关设置

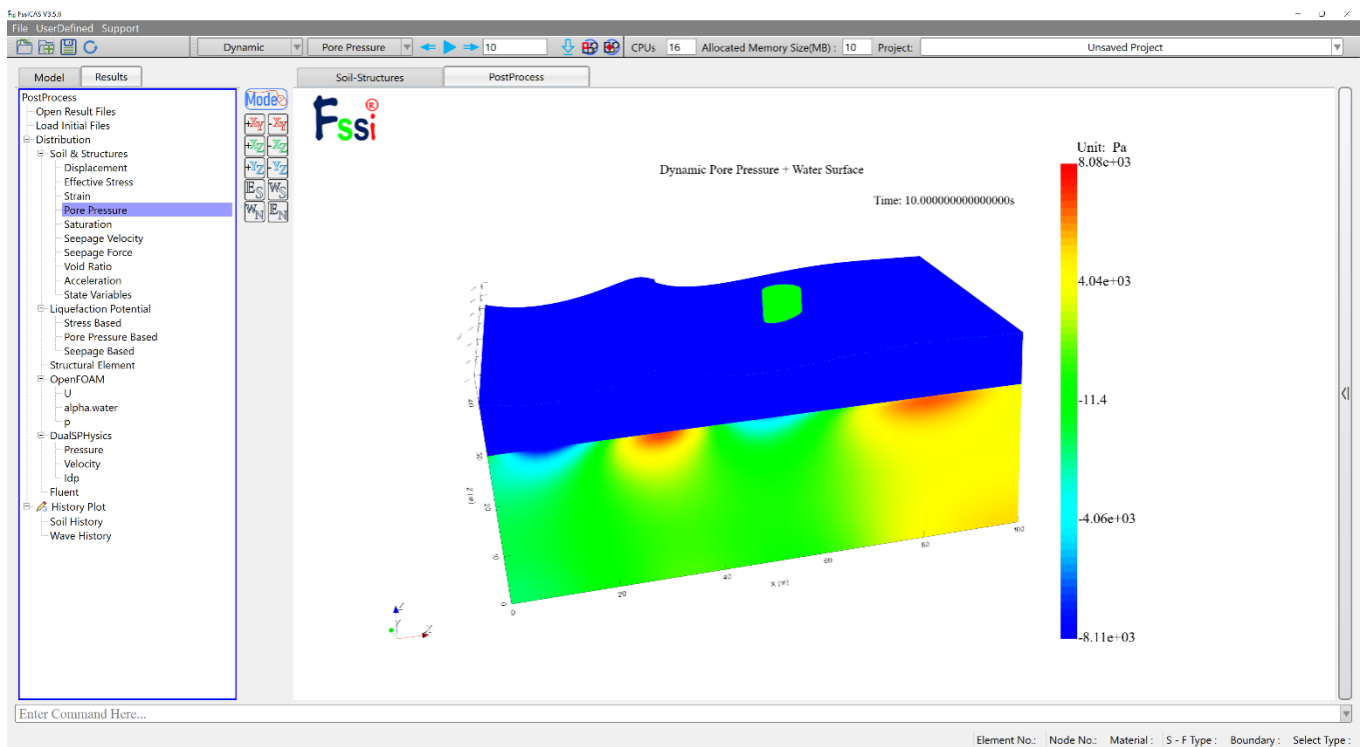


图 18-26 $t = 10\text{ s}$ 时海床动态孔压和波浪自由面的分布图

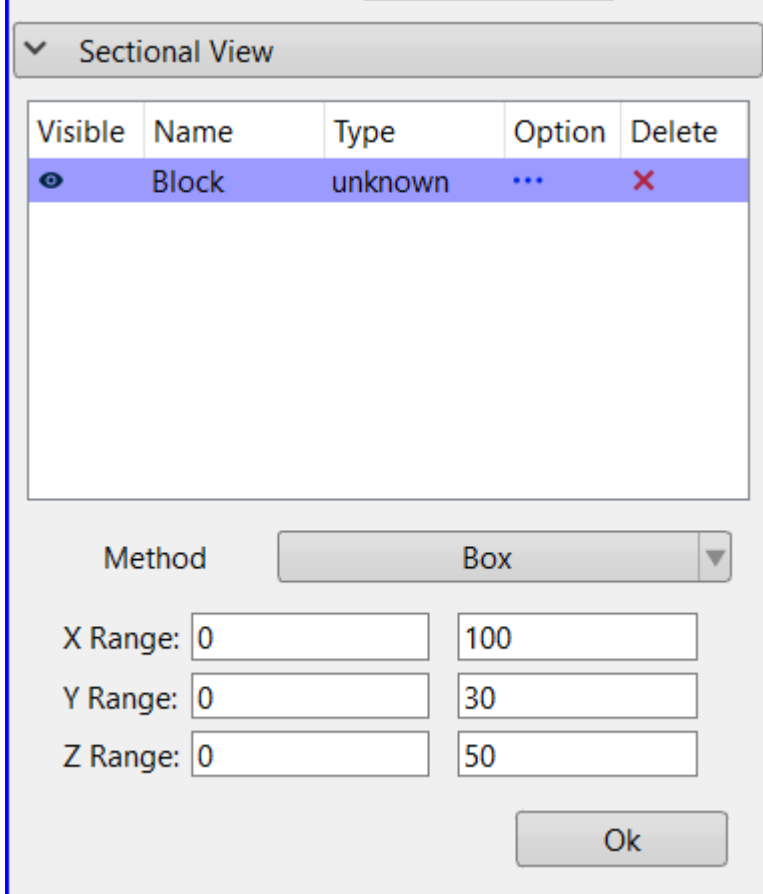


图 18-27 剖切功能的相关设置

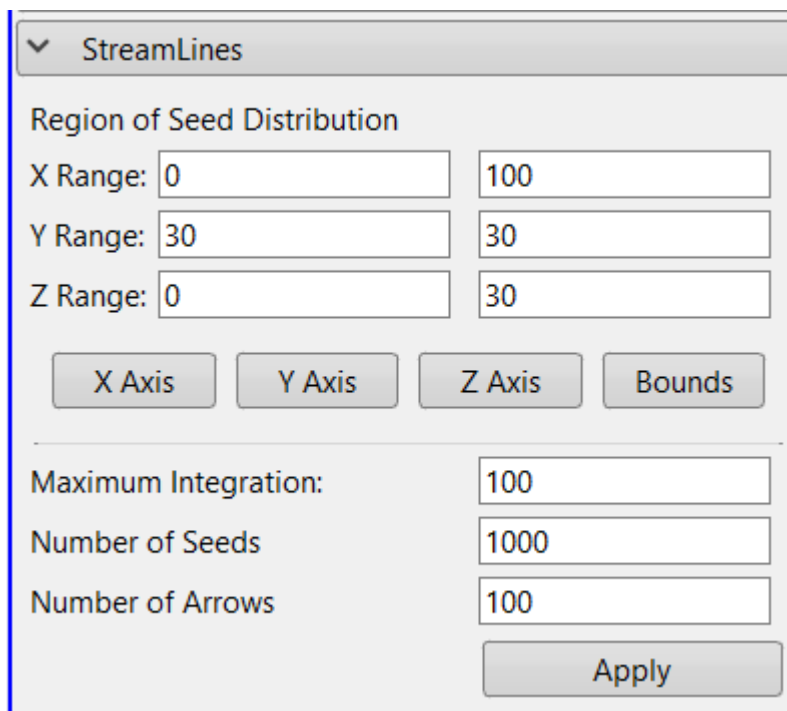


图 18-28 固体部分流线显示的相关设置

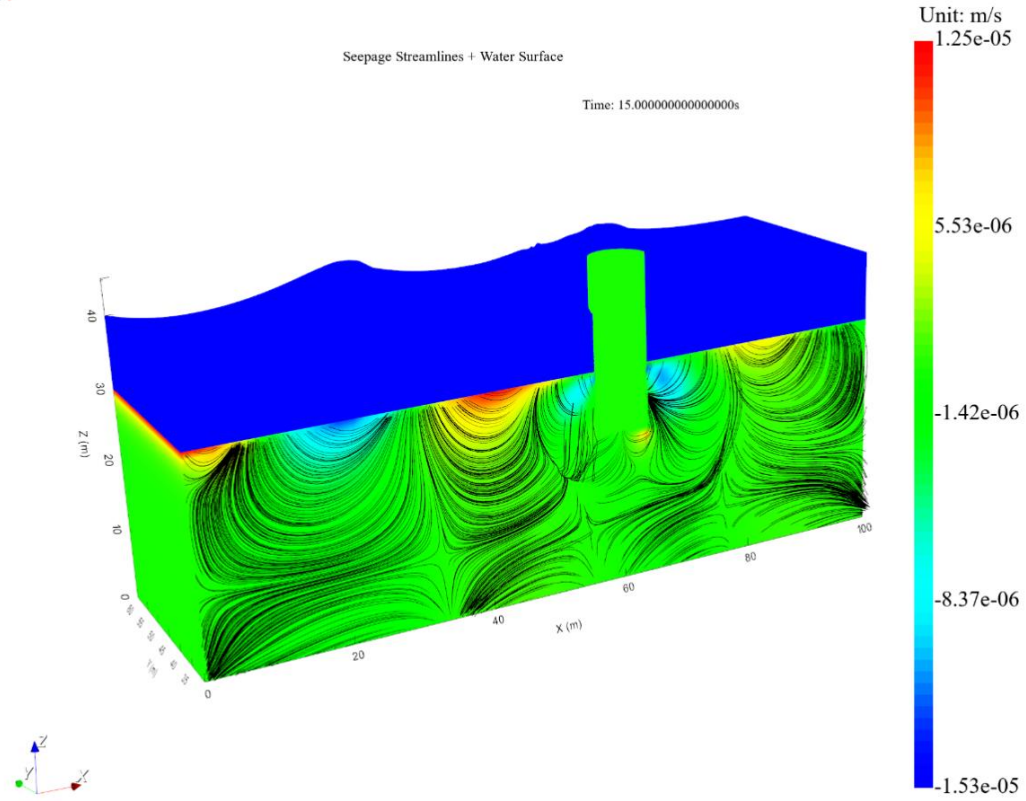


图 18-29 波浪自由面和土体渗流流线的联合分布图