

基于 FssiCAS-Fluent 耦合系统的波浪-海床-防波堤系统 动力响应

本案例用于演示如何采用 FssiCAS 和 Ansys Fluent 进行波浪-海床-防波堤的单向耦合计算，以研究沉箱式复合防波堤与海床在波浪作用下的动力响应及稳定性。其中，流体动力学的计算在 Ansys Fluent 中完成，固体域使用 FssiCAS 进行计算，计算模型示意图如图 1 所示。本案例中，海床的厚度为 0.19m，长度为 3.6m。结构物为复合式防波堤，由沉箱和毛石堆构成。波浪参数为水深 0.32m，波高 0.05m，波长 4.57m，周期 2.2s，采用 Stokes II 阶波进行模拟。注意，计算该案例需要至少 16G 的内存资源。

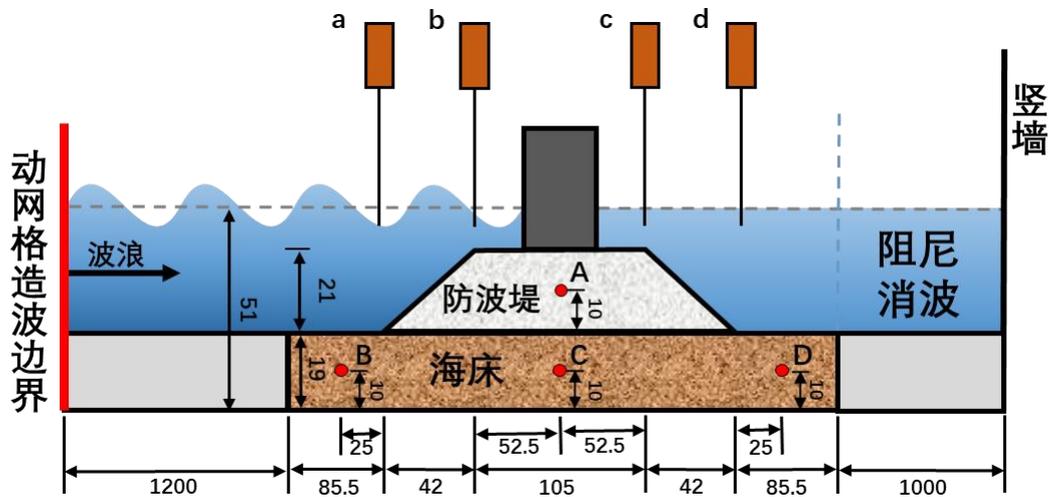


图 1 复合防波堤水槽试验数值模拟模型示意图（单位：cm）

1. 流体域计算（FLUENT）

本案例流体域计算过程基于 ANSYS WorkBench 平台中的流体流动(Fluent)模块实现，包括建模、划分网格、计算等，如图 2 所示。其中采用 Design Model 完成建模，如图 3 所示。采用 Meshing 进行网格划分，划分结果如图 4 所示。在 Fluent 中完成计算过程，在进入界面设置计算线程数及精度，如图 5 所示。在 Fluent 完成湍流模型、材料参数、边界条件、动网格、求解方法等设置后，在计算设置界面中，添加自动保存的结果文件，选择 ASCII 类型，选择自动保存的数据结果类型，如图 6 所示。计算完成后的自动保存的结果文件应均为 ASCII 文件格式，如图 7 所示，文件名称及保存间隔时间可在图 6 界面中自行设置，本案例设置结果文件名为“wave-计算时间”，设置每隔 0.05s 保存一个结果文件。

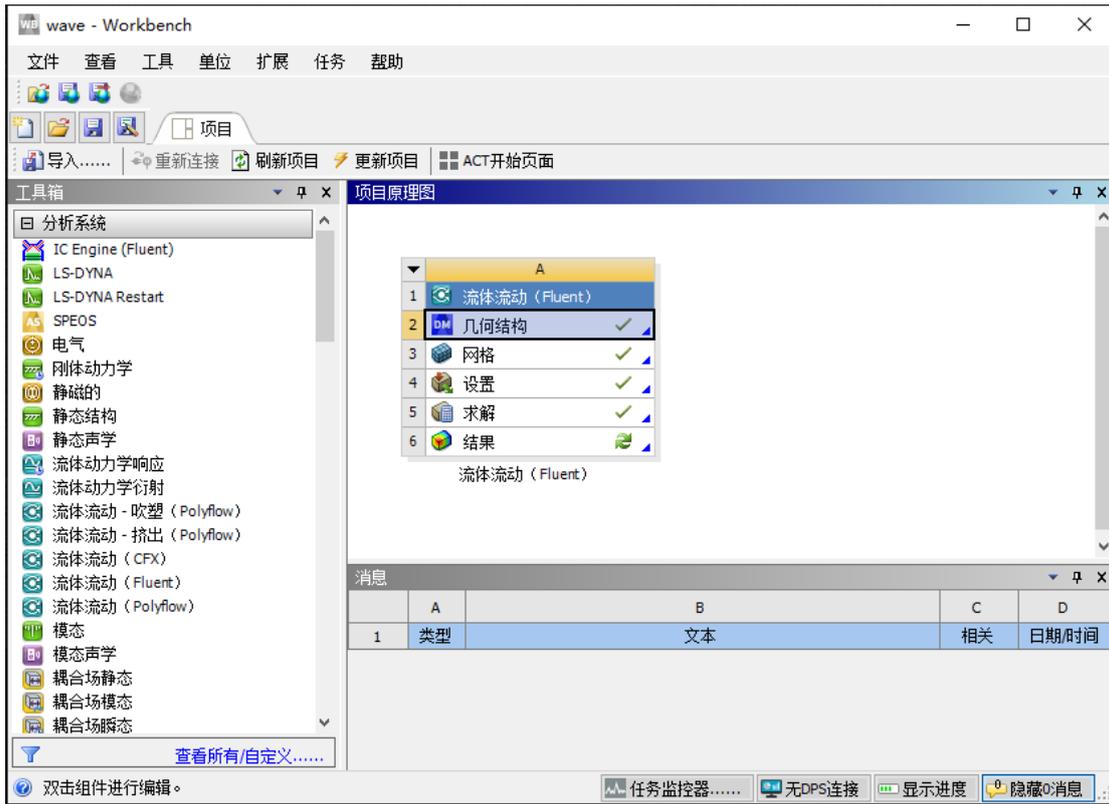


图 2 ANSYS WorkBench 操作界面

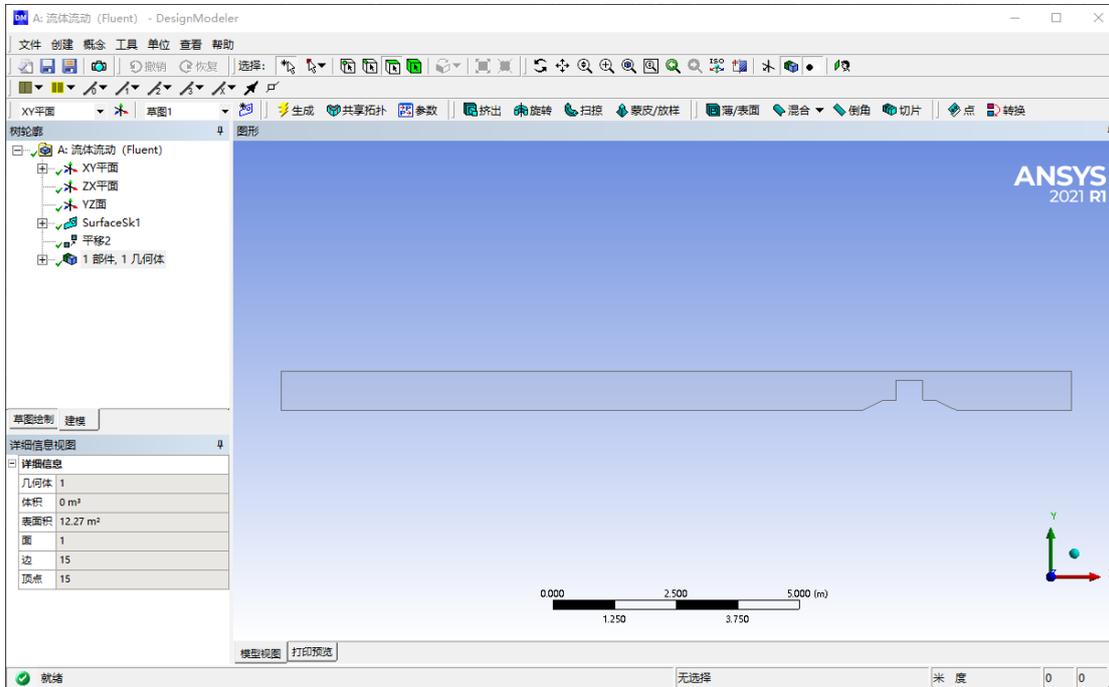


图 3 Design Model 建模界面

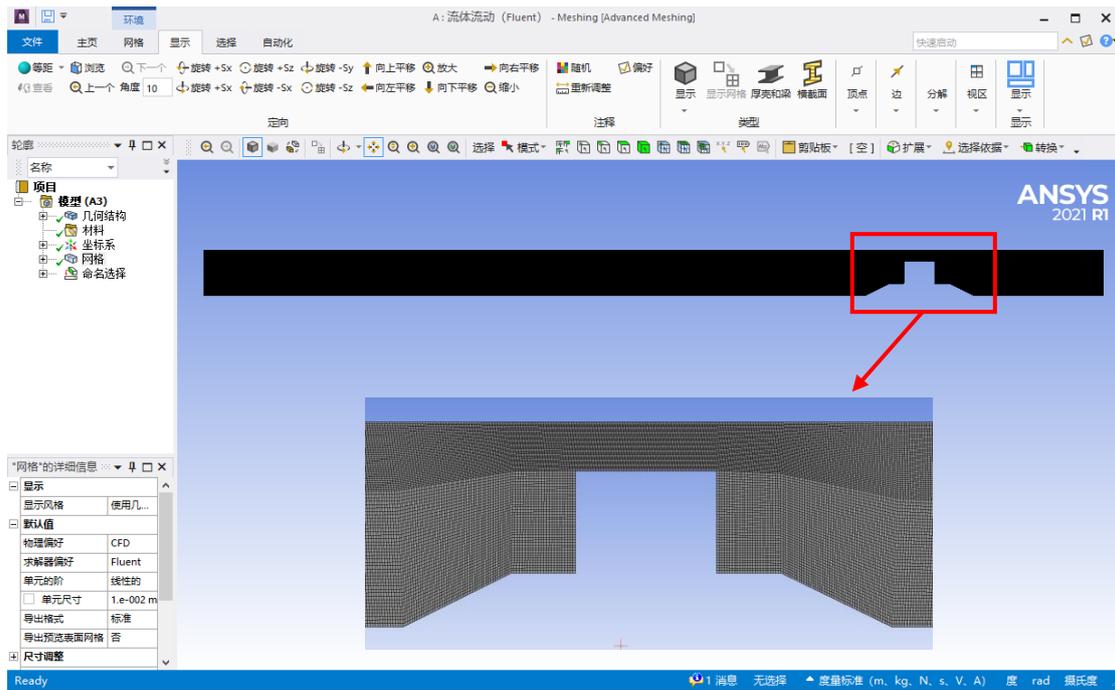


图 4 Meshing 网格划分界面

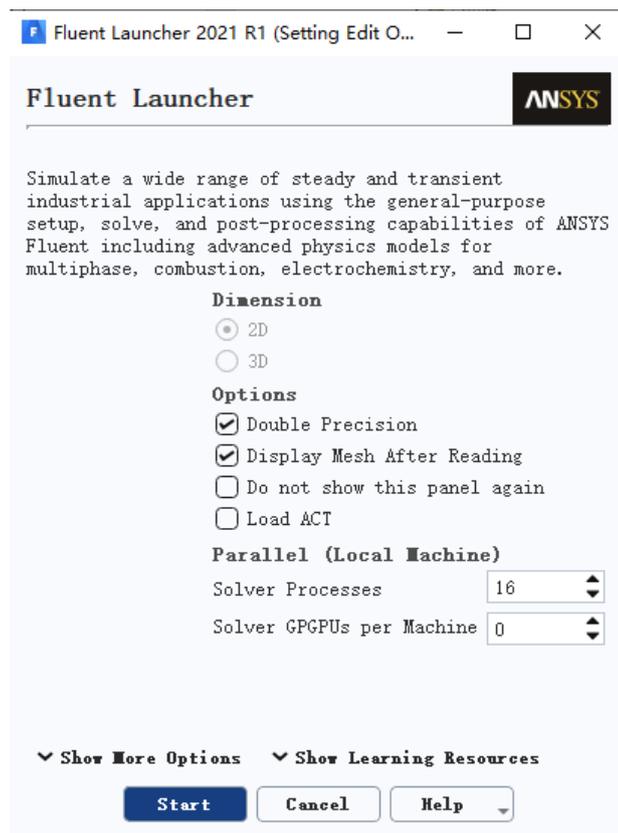


图 5 Fluent 进入窗口界面

2. 固体域计算（FssiCAS）

2.1 FssiCAS 图形界面操作——前处理

2.1.1 网格生成与导入

本案例中的固体模型及网格是由 Abaqus 软件建立了固体模型并划分网格后导出 .inp 文件和 .igs 文件。点击左侧 Model 菜单栏中的 FssiCAS—Preprocess—Load Mesh—Abaqus，在弹出的对话框中找到 Abaqus 输出的 .inp 文件，双击网格文件或点击打开按钮即可导入网格，如图 8 所示。

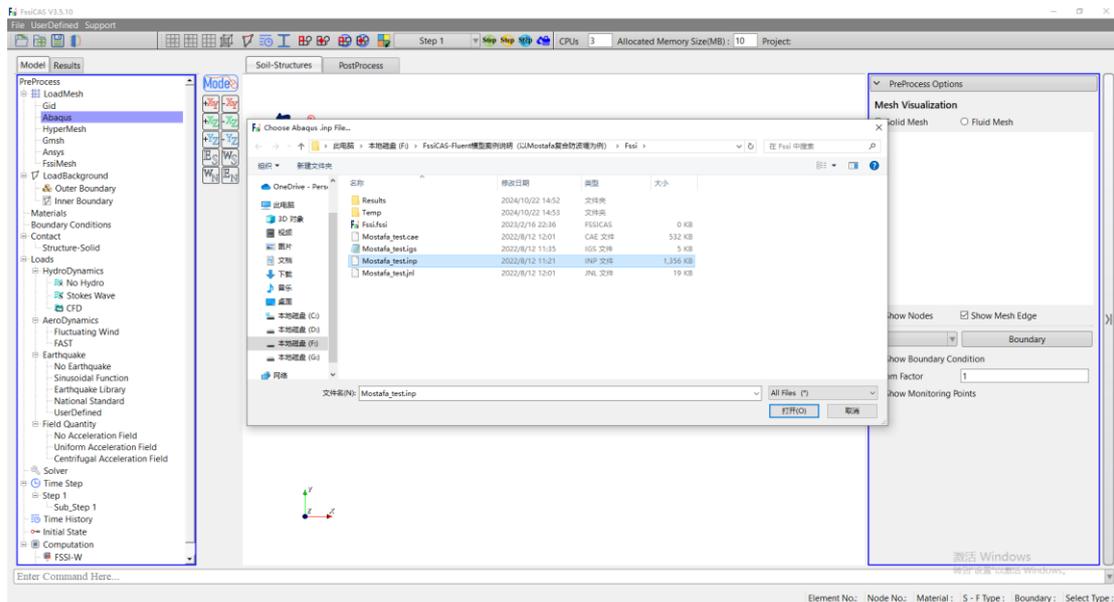


图 8 将固体网格导入 FssiCAS

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 9 所示。本案例中固体单元采用了 4 节点单元，由于海床、毛石堆及沉箱中都包含流体节点，所以流体单元阶次选为 1。选择完毕后，点击 OK，即可在工作区看到如图 10 所示的固体网格。

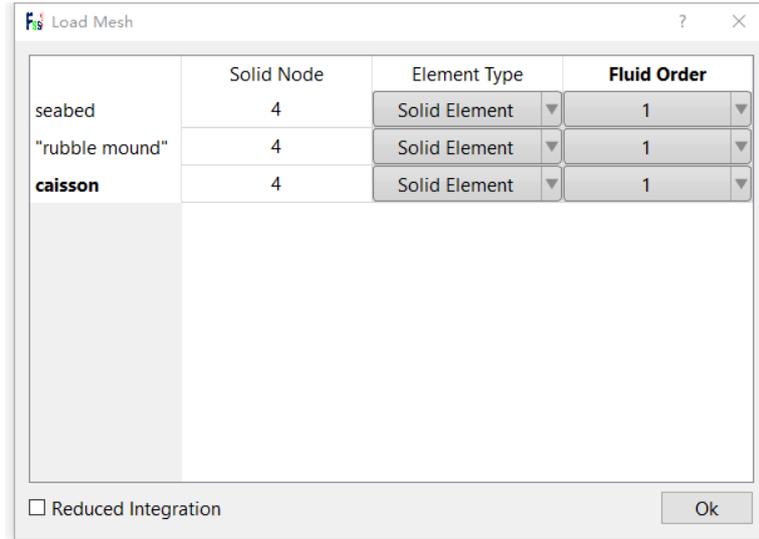


图 9 设置单元类型和流体单元阶次

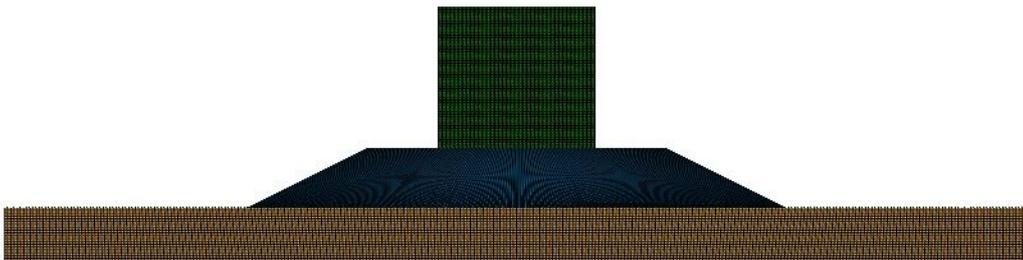


图 10 导入 FssiCAS 的固体网格

点击 Preprocess—Load Background—Outer Boundary，在弹出的文件选择对话框中选择 Abaqus 输出的*.igs 网格文件，双击或点击打开按钮，如图 11 所示。界面中展示导入模型如图 11 所示。

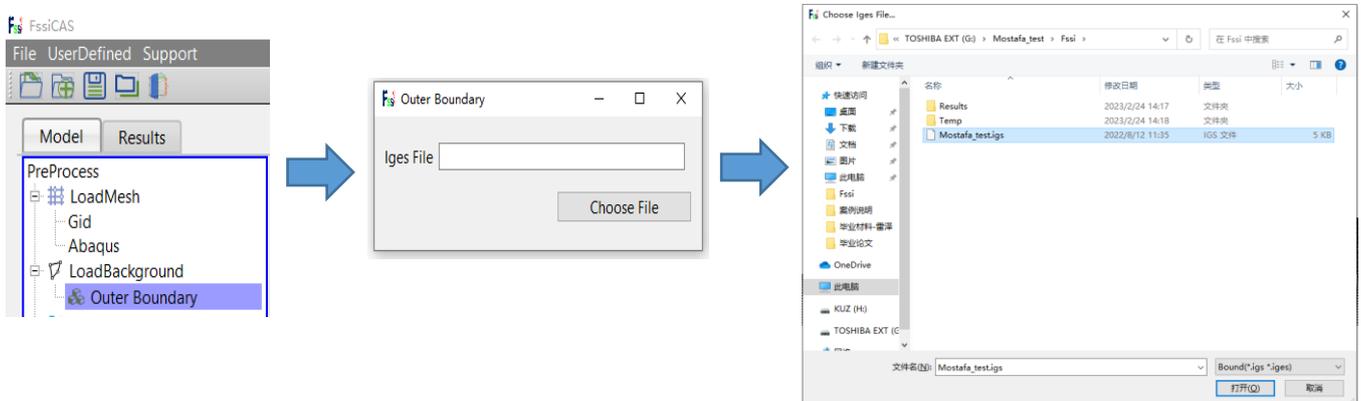


图 11 加载外背景线 (Outer Boundary) 的步骤示意图

2.1.2 边界条件设置

本案例需要对模型的底面 ($z = 0 \text{ m}$) 节点设置 x 、 y 方向的约束，对左右两个侧边 ($x = 10.925\text{m}$ 、 $x = 14.525\text{m}$) 的节点设置 x 方向的约束。依次点击工具栏中图标  和 ，如图 12 所示，然后点击键盘 ‘R’ 键，开始进入背景线选择模式。该模式可以对背景线进行框选和点选，选中的背景线将会变亮，同一条边界线被重复选中将会取消原本的选中状态，最后右击鼠标设置边界条件，具体操作如图 13 所示。



图 12 进入背景线选择模式

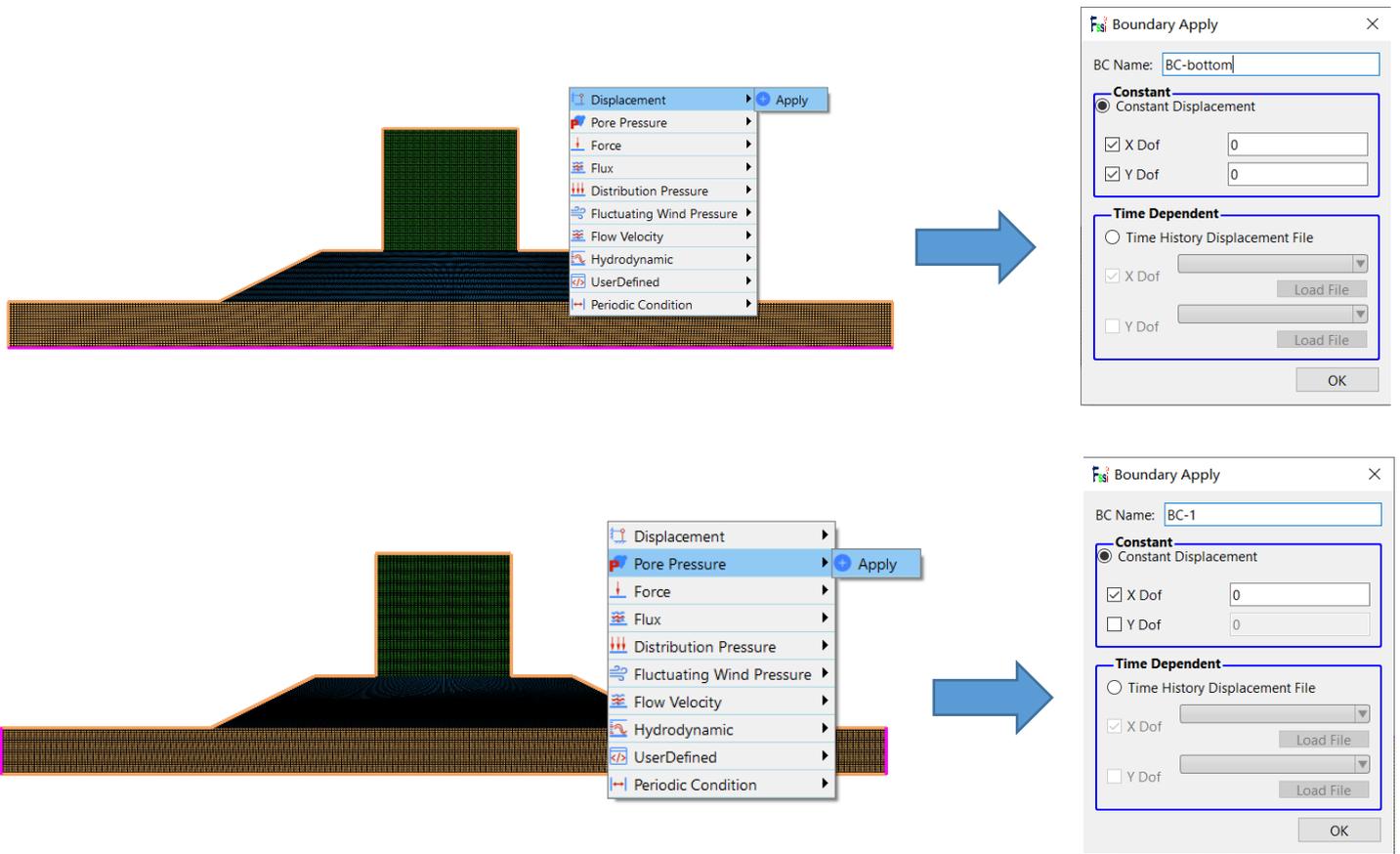


图 13 选择背景线添加边界条件

注：1.在右侧快捷窗口中点击 Show Boundary Condition，可以检查是否正确添加边界条件。

2.添加边界条件时，第二次设置会覆盖第一次设置，如重复添加边界条件，一定要保证第二次的边界条件为最终边界条件，或者单独对重复节点进行多种不

同的边界条件的设置。

在固体与流体的接触面设置水动力边界条件，如图 14 所示。

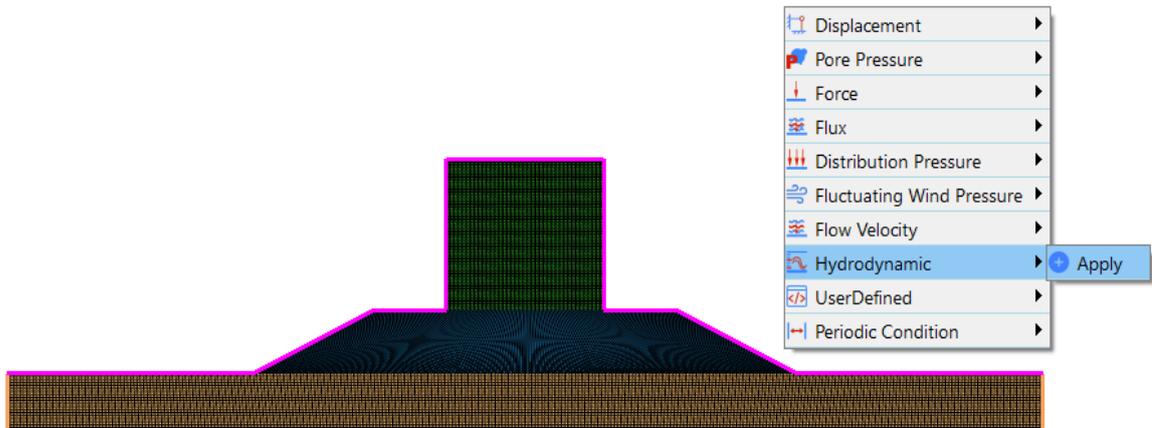
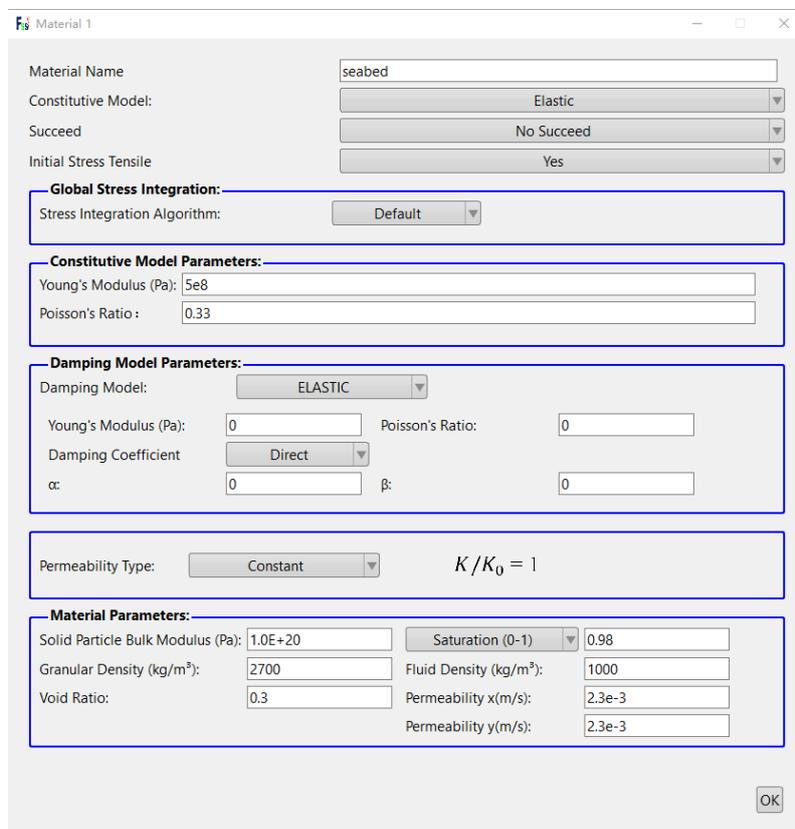


图 14 添加水动力边界条件

2.1.3 材料参数设置

点击左侧菜单栏中的 **Material**，给材料一（seabed）、材料二（rubble mound）、材料三（cassion）设置好各自的名称、材料参数、本构参数，如图 15（a）、（b）和（c）所示。



(a) 材料一（seabed）参数设置界面

Material 2

Material Name: rubble mound

Constitutive Model: Elastic

Succeed: No Succeed

Initial Stress Tensile: Yes

Global Stress Integration:
Stress Integration Algorithm: Default

Constitutive Model Parameters:
Young's Modulus (Pa): 1e9
Poisson's Ratio: 0.24

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: 0.33 Permeability x(m/s): 0.16
Permeability y(m/s): 0.16

OK

(b) 材料二 (rubble mound) 参数设置界面

Material 3

Material Name: caisson

Constitutive Model: Elastic

Succeed: No Succeed

Initial Stress Tensile: Yes

Global Stress Integration:
Stress Integration Algorithm: Default

Constitutive Model Parameters:
Young's Modulus (Pa): 1e9
Poisson's Ratio: 0.38

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 Permeability x(m/s): 0
Permeability y(m/s): 0

OK

(c) 材料三 (caisson) 参数设置界面

图 15 材料参数设置界面

2.1.4 设置 Step 1 水动力计算的耦合方式

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 12 中绿色背景的 Step 按钮, 创建一个 Step2。目前, 图 12 中下拉菜单里仍显示的是 Step 1, Step1 是用于计算初始状态, 因此需要设置静水位, 模拟海床的静水固结状态。左侧菜单栏的 Hydrodynamics 中选择 Stokes Wave, 设置相关参数, 如图 16 所示。

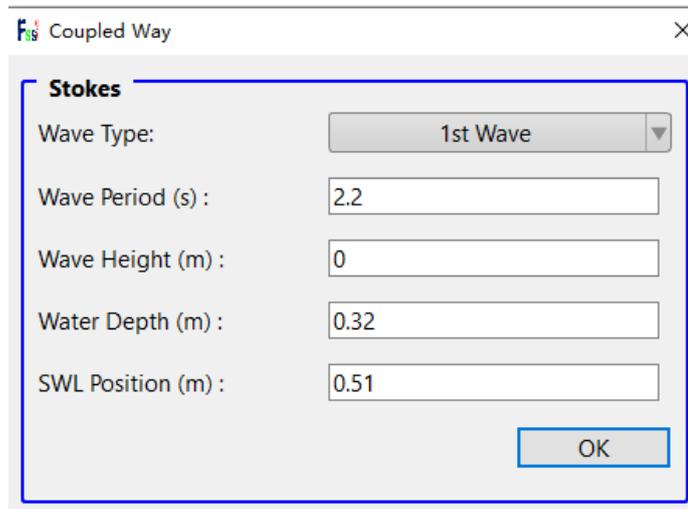


图 16 Step 1 水动力计算耦合方式设置

2.1.5 设置加速度场、求解器、时间步和初始状态

点击左侧菜单栏中 Field Quantity 下的 Uniform Acceleration Field 并在 y 方向上设为-9.806m/s² 以施加竖直方向的重力加速度, x 方向设置为 0, 如图 17 所示。

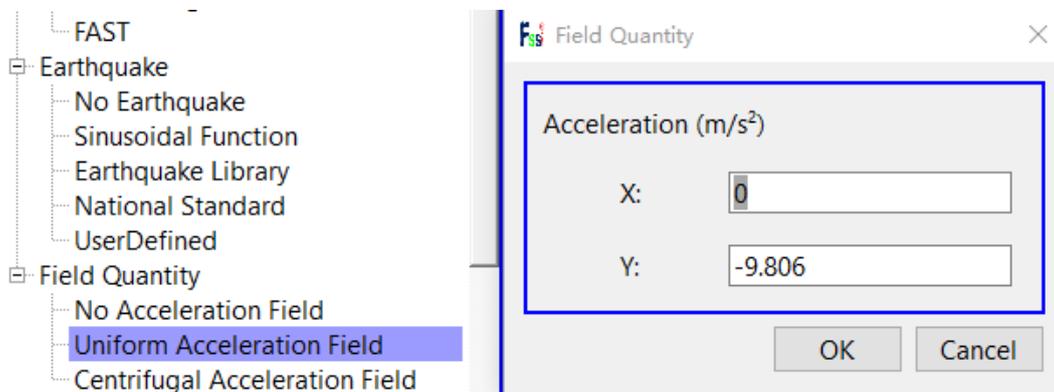


图 17 重力加速度设置界面

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 所示。

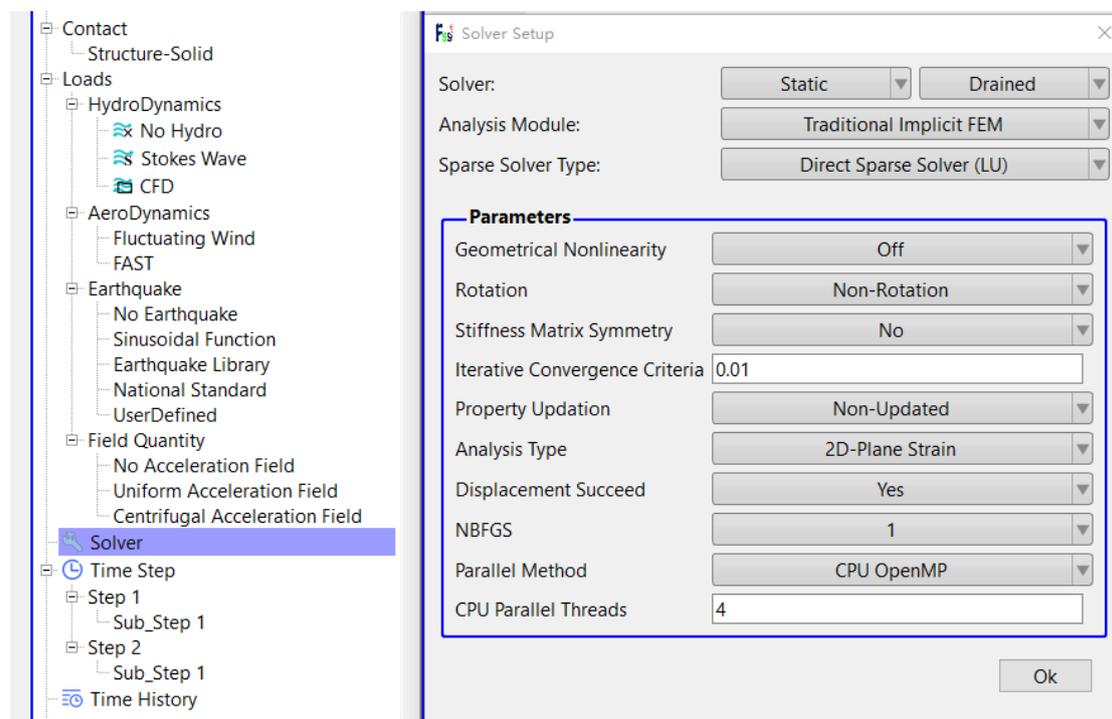


图 18 Step1 中求解器相关设置

然后点击 Step 1 中的 Sub_Step 1，输入与时间步相关的参数，如图 19 所示，点击 OK 完成时间步的设置。最后，如图 20，点击左侧菜单栏中的 Initial State，点击 OK 完成初始状态的设置。

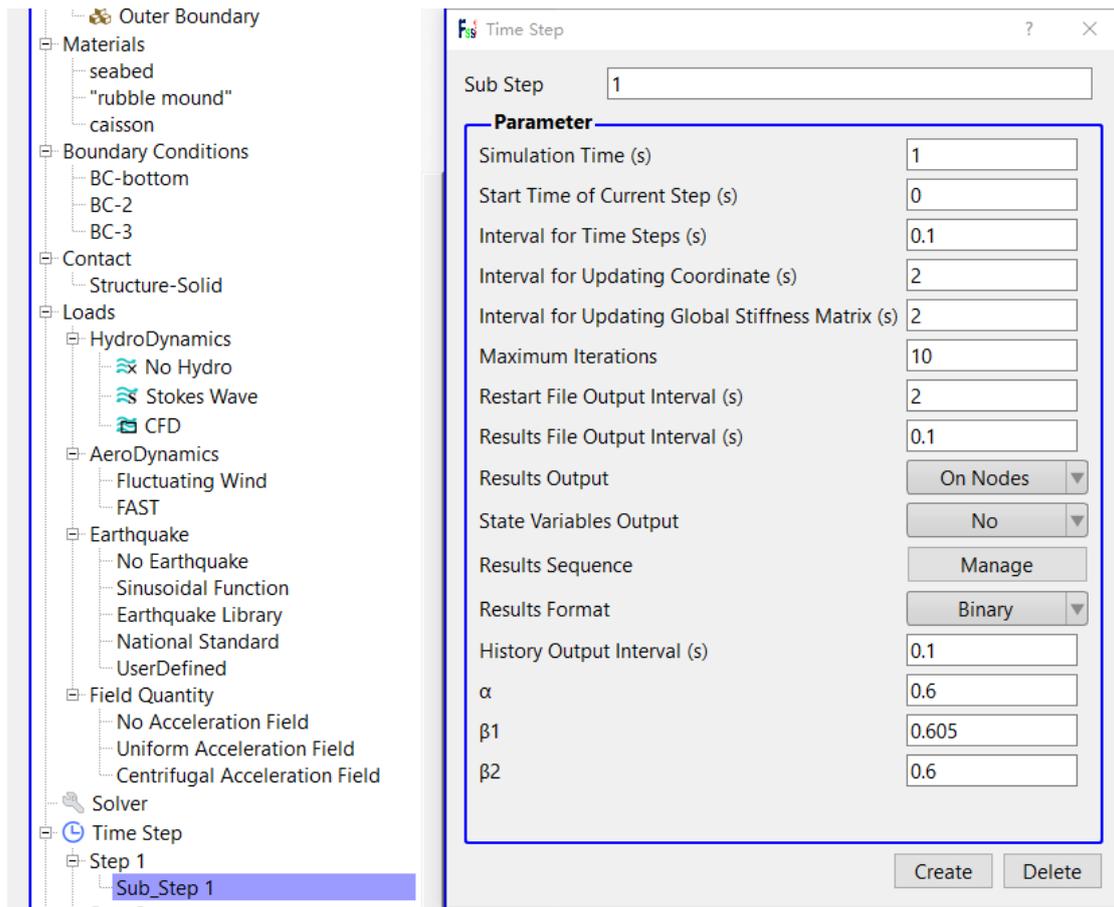


图 19 Step1 中时间步相关设置

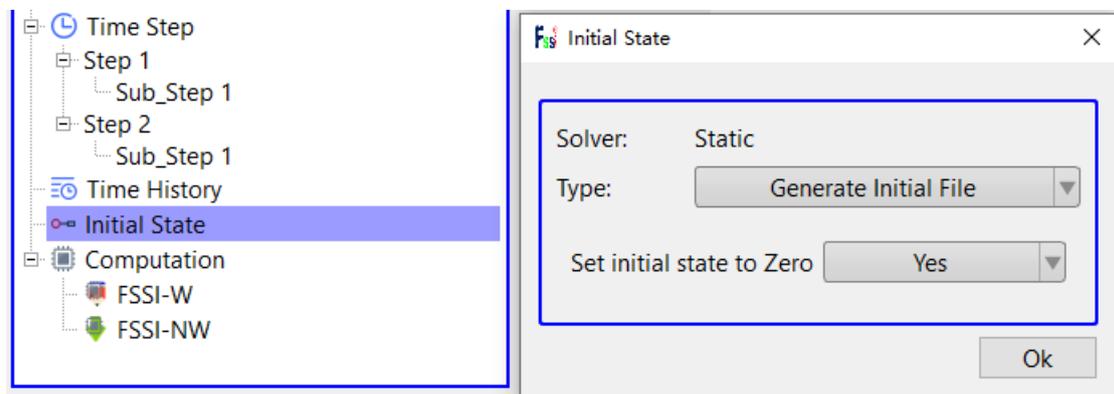


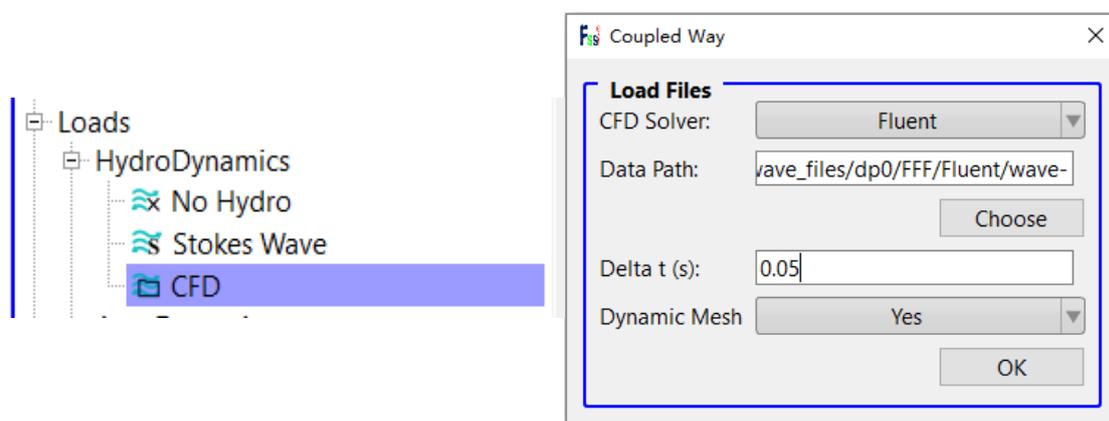
图 20 设置 Step 1 的初始状态

之后，点击图 12 中的下拉菜单，选择 Step 2，进行 Step 2 中的相关设置。

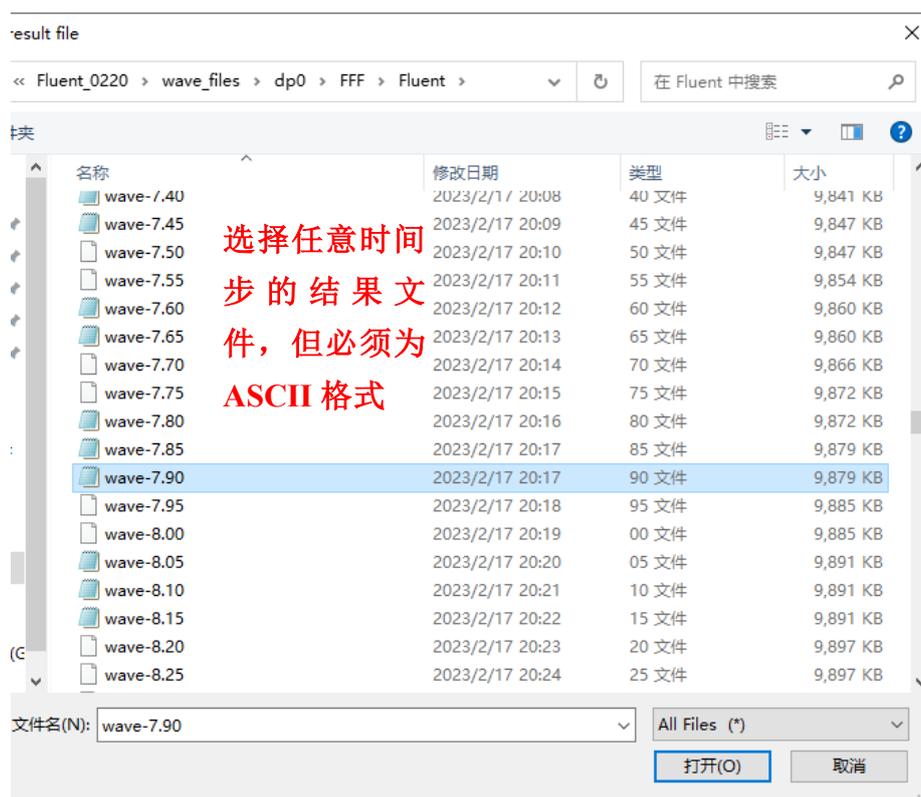
2.1.3 设置 Step 2 水动力计算的耦合方式

本案例所采用的计算方式是 Fluent 和 FssiCAS 的单向耦合。如图 21(a)所示，在左侧菜单栏的 Hydrodynamics 中选择 CFD，选择 Fluent 结果文件所在的文件

夹(如图 21(b)), 且该路径下所有的文件格式必须为 ASCII。Delta t 处填写 Fluent 结果文件的时间步, 如果在 Fluent 计算过程中采用了动网格功能, 则 Dynamic mesh 中选择 Yes, 否则选 No, 点击 OK 即可完成水动力耦合方式的设置。



(a) 指定流体结果文件的路径与时间步



(b) 相应路径下所需的内容

图 21 设置 Step 2 水动力计算的耦合方式

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 22 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 23 和 24 所示。

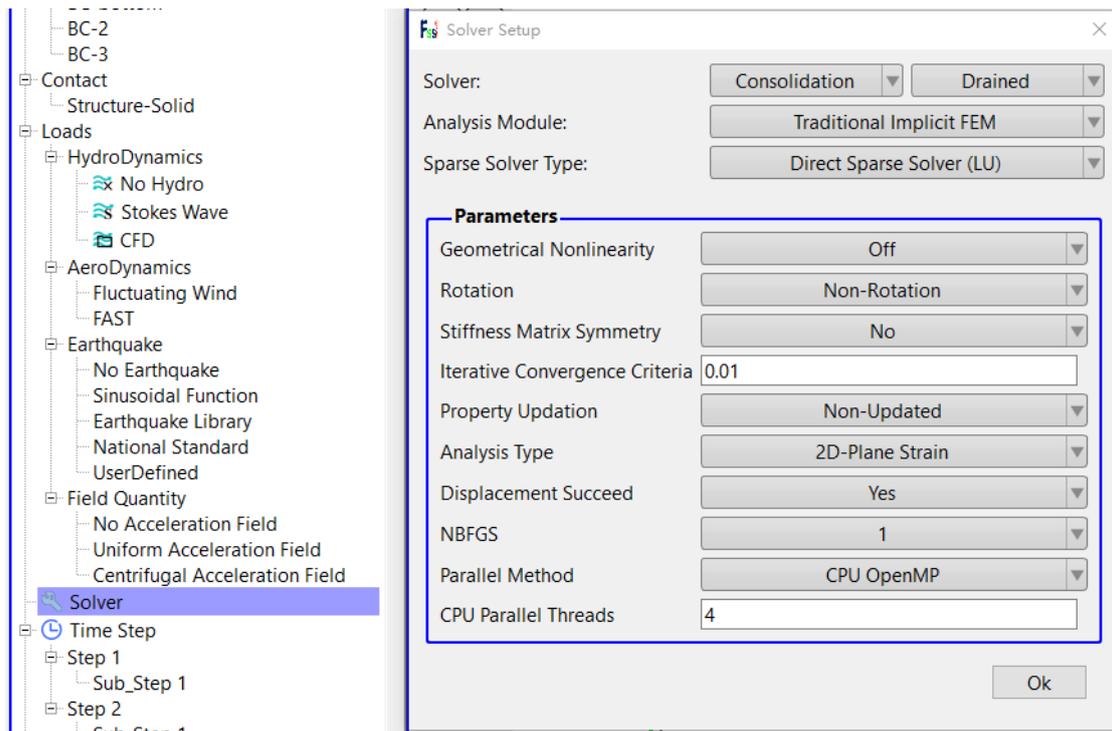


图 22 Step2 中求解器相关设置

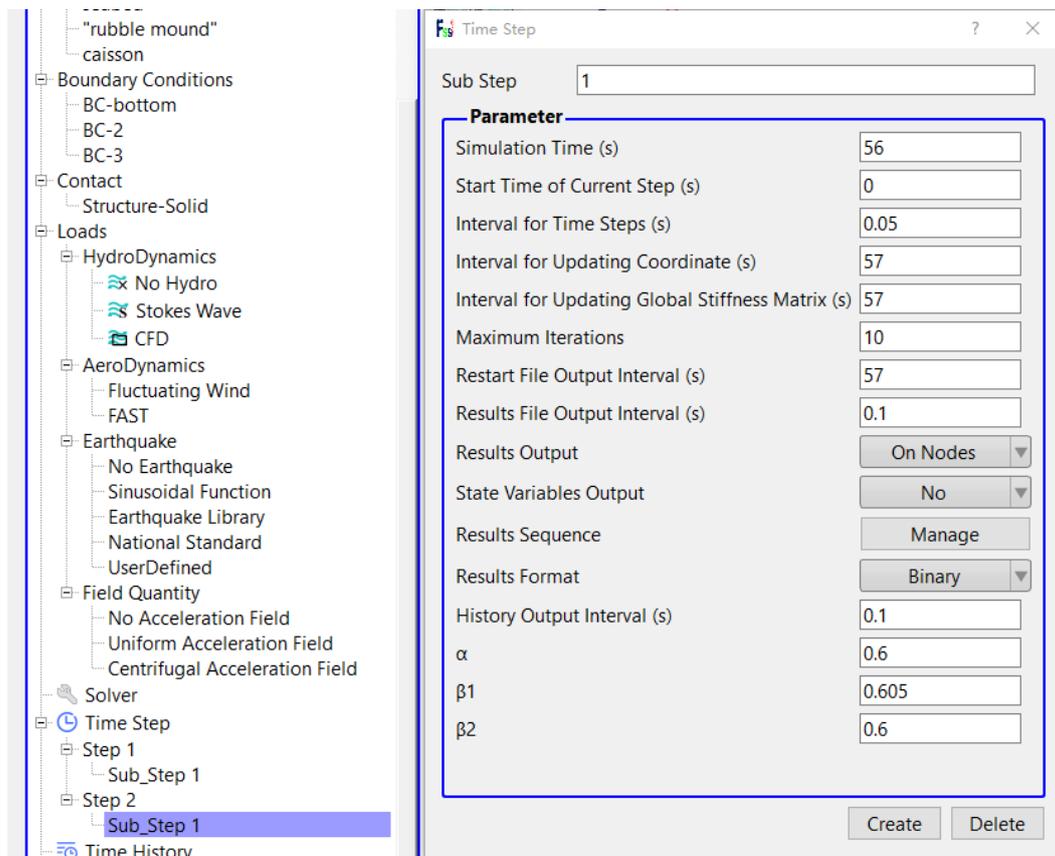


图 23 Step2 中时间步相关设置

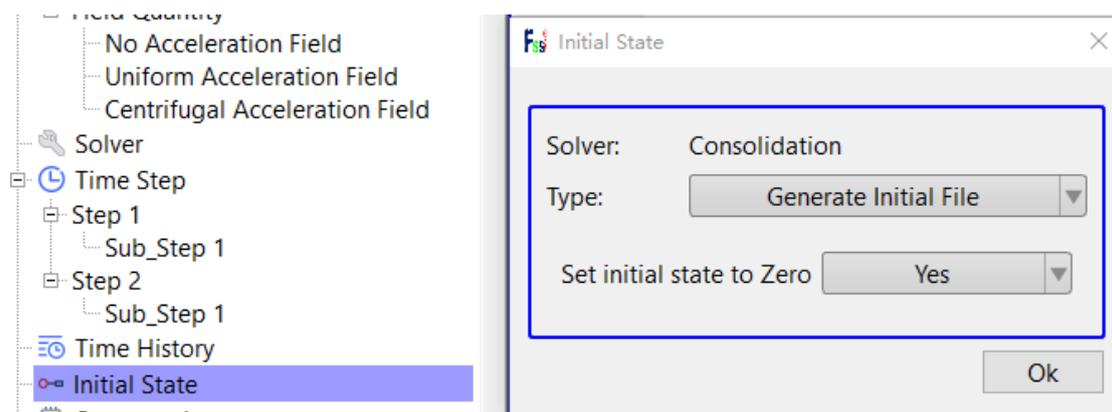


图 24 设置 Step 2 的初始状态

2.1.6 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。

2.2 FssiCAS 图形界面操作——后处理

2.2.1 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, 在 File Type 中选择 FssiCAS, 选择文件储存路径，点击 Load Files 加载，即可对固体结果进行处理；在 File Type 中选择 Fluent, 选择文件储存路径，即可对流体结果进行处理，如图 25 所示。

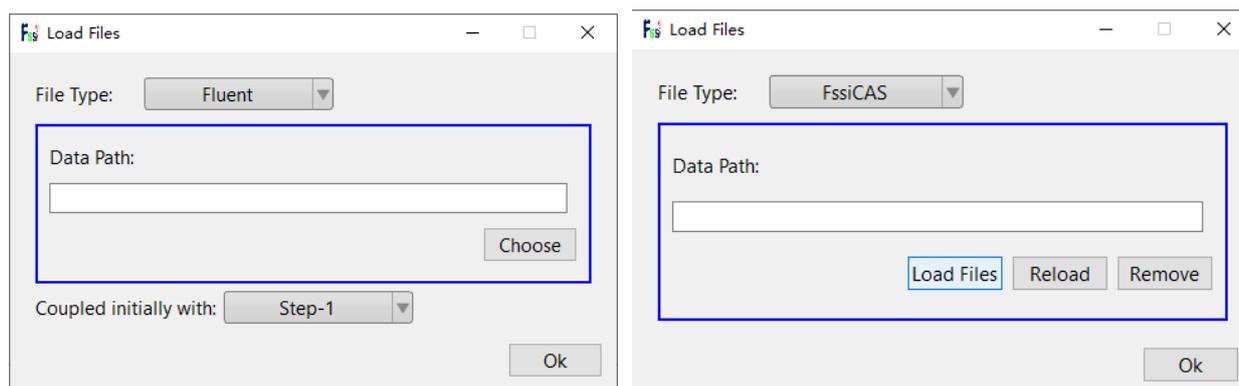


图 25 加载固体和流体的结果文件

2.2.2 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，如图 26。再依次选择 Fluent—Water Surface, Pore Pressure, 在右侧菜单栏（如图 27 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 28 所示。

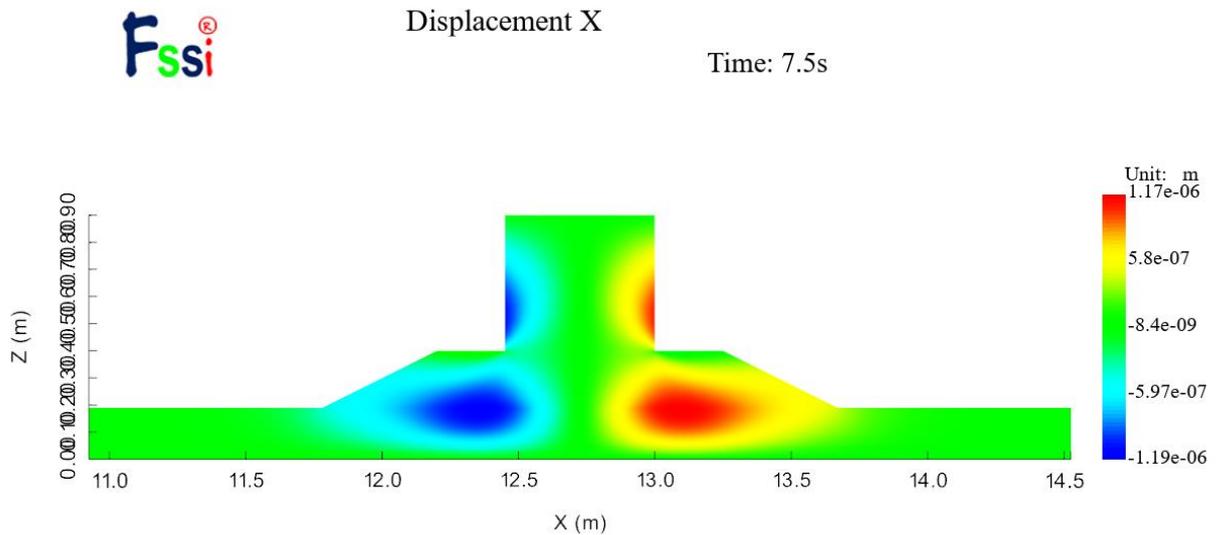


图 26 t= 7.5 s 时 X 方向的位移云图

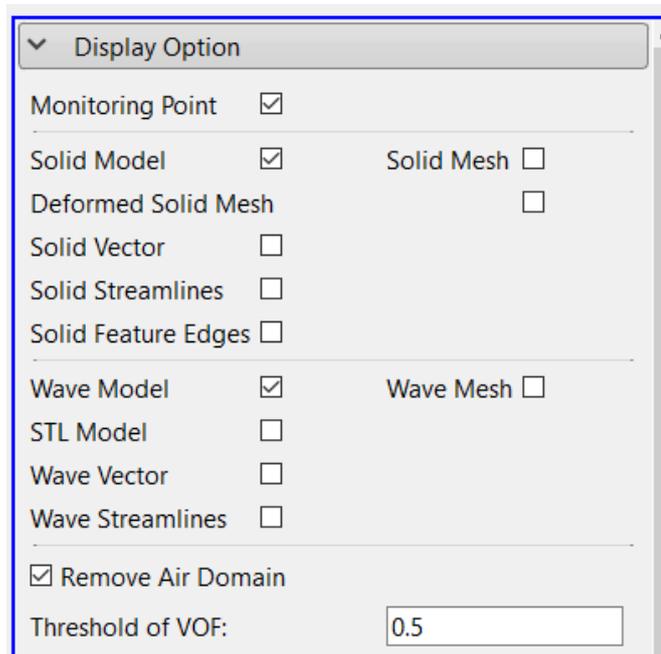


图 27 右侧菜单栏中 Display Option 的相关设置

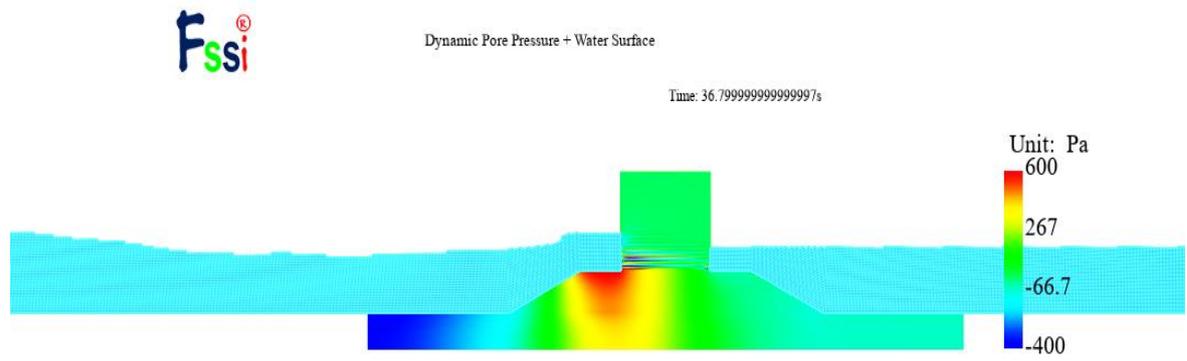


图 28 $t=36.8s$ 时海床动态孔压和波浪自由面的分布图