

基于 FssiCas-DualSPHysics 的波浪-防波堤耦合计算

通过 FssiCAS 与 DualSPHysics 耦合计算防波堤室内试验，并分别介绍 DualSPHysics 中模拟案例的设置以及 FssiCAS 界面的基本操作方法。数值计算模型示意图如图 1-1 所示，波浪及土体材料相关参数如表 1 所示：

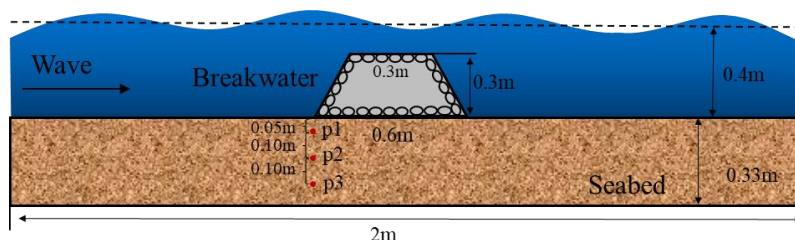


图 1-1 防波堤试验示例图

表 1 波浪-海床-防波堤相互作用波浪水槽试验波浪参数和土体参数

波浪形式	介质	$H(\text{cm})$	$d(\text{m})$	$T(\text{s})$	$G(\text{N/m}^2)$	ν	$k(\text{m/s})$	n	Sr
2 阶 Stokes 波	波	10	0.4	1					
	砂床				8.28×10^6	0.3	6.57×10^{-4}	0.369	0.99
	防波堤				1×10^7	0.24	1.8×10^{-1}	0.33	0.99

1.1 DualSPHysics 波浪模型设置

波浪水动力模型由开源流体计算模型 DualSPHysics 组成。波浪水动力模型的控制方程为 Navier Stokes 方程。在调用 DualSPHysics 的求解器开始计算之前，需要设置好两大类参数。一是 XML 文件的设置，其中包括（常量设置、粒子间距及模拟域设置、结构物模型设置、流体域设置、推波板运动设置、波浪参数设置、边界条件、粘度选项及时间步长等参数的设置）；二是求解器及后处理文件的设置（包括调用的求解器类型、后处理输出内容及文件设置）如下列各图所示。

1.1.1 XML 文件设置

(1) 常量设置

在<constantsdef>关键字下进行常量设置、包括重力加速度、初始密度、系统声速、平滑长度、克朗数等。

```

<constantsdef>
  <gravity x="0" y="0" z="-9.806" />
  <rho0 value="1000" />
  <hswl value="0" />
  <gamma value="7" />
  <speedsystem value="0"/>
  <coefsound value="25"/>
  <speedsound value="0" />
  <coefh value="1.5"/>
  <cflnumber value="0.2"/>
</constantsdef>

```

图 1-2 XML 中常量设置

(2) 粒子间距及模拟域设置

dp 为粒子间距，pointmin 和 pointmax 分别为模拟域的起始点坐标和终点坐标。以二维案例为例。

```

<definition dp="0.005">
  <pointmin x="-127" y="0" z="-2.0" /> ! 模拟域的范围2维
  <pointmax x="323" y="0" z="38" />
</definition>

```

图 1-3 粒子间距及模拟域设置

(3) 结构物模型设置

在关键字 setmkbound 之后进行固定边界的建模，mk=0 代表此结构物的编号、将结构物按照坐标点建立模型，并将结构物的坐标依次输入。此案例结构物包括水槽和防波堤，并将边界层数设为 5 层，如下图所示。

```

<!-- tank and structure -->
<setmkbound mk="0" />
<setfrdrawmode auto="true" />
<drawextrude closed="false">
  <extrude x="0" y="2" z="0" />
  <point x="#Tankx0" y="-1" z="#Tankz0" />
  <point x="#Tankx1" y="-1" z="#Tankz1" />
  <point x="#Tankx2" y="-1" z="#Tankz2" />
  <point x="#Tankx3" y="-1" z="#Tankz3" />
  <point x="#Tankx4" y="-1" z="#Tankz4" />
  <point x="#Tankx5" y="-1" z="#Tankz5" />
  <point x="#Tankx6" y="-1" z="#Tankz6" />
  <point x="#Tankx7" y="-1" z="#Tankz7" />
  <layers vdp="0,-1,-2,-3,-4" />
</drawextrude>
<setfrdrawmode auto="false" />

```

```

<!-- Variables to define the geometry -->
<newvar Tankx0="0" Tankz0="1" />
<newvar Tankx1="0" Tankz1="0" />
<newvar Tankx2="10.7" Tankz2="0" />
<newvar Tankx3="10.85" Tankz3="0.3" />
<newvar Tankx4="11.15" Tankz4="0.3" />
<newvar Tankx5="11.3" Tankz5="0" />
<newvar Tankx6="25" Tankz6="0" />
<newvar Tankx7="25" Tankz7="1" />
<newvar Hdp="Dp/2" />
<exportvar vars="Hdp" />

```

图 1-4 结构物模型设置

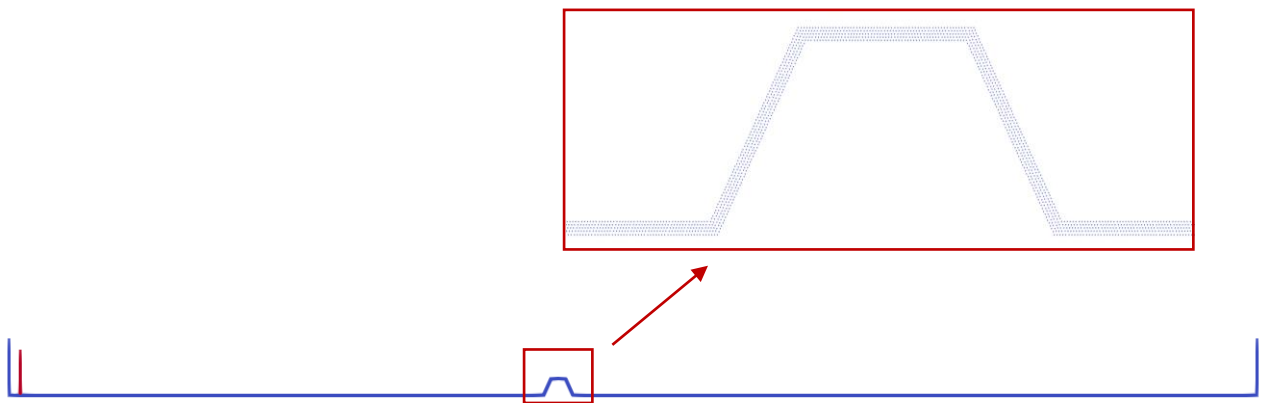


图 1-5 DualSPHysics 中建立的水槽及防波堤边界

(4) 流体域设置

通过关键词 `setmkfluid` 进行流体域范围设置。需要设置流体种子点的生成位置以及流体域的坐标范围。Z 的高度为静水深度。

```

<!-- water -->
<setmkfluid mk="0"/>
<fillbox x="4" y="0" z="0.2" objname="FillBox">
  <modefill>void</modefill>
  <point x="0" y="-1" z="-0.1" />
  <size x="35" y="2" z="0.5" />
</fillbox>
<shapeout file="" />

```

图 1-6 流体域设置

图 1-7 DualSPHysics 中建立的计算案例模型

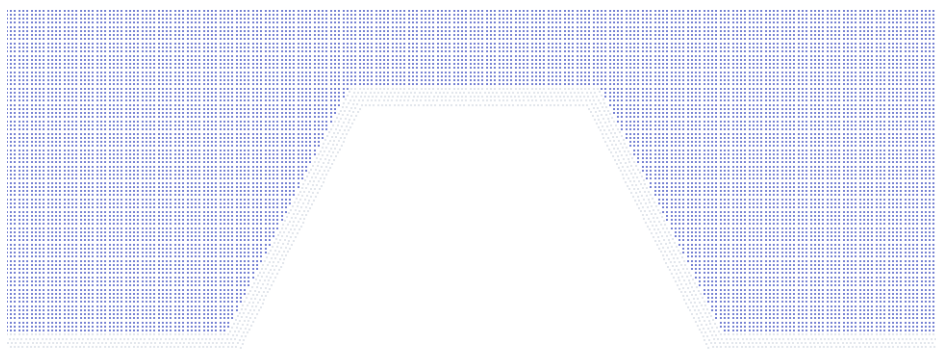


图 1-8 防波堤附近局部放大图

(5) 推波板运动设置

DualSPHysics 中通过推板造波的方式生成波浪，指定运动的边界编号，并指定运动方向。如下图所示，设置推波板边界编号为 $mk=10$ ，并沿 x 方向运动。

```
<motion>
  <objreal ref="10">
    <begin mov="1" start="0" />
    <mvnull id="1" />
  </objreal>
</motion>
```

图 1-9 指定推波板运动

(6) 波浪参数设置

波浪由推板造波产生，所以通过输入波浪参数而计算出推波板运动的时程。下图是对选用的波浪理论、波高、周期等波浪参数的设置。

```

<wavepaddles>
  <piston>
    <mkbound value="10"/>
    <waveorder value="2">
    <start value="0"/>
    <duration value="0"/>
    <depth value="0.4" />
    <pistondir x="1" y="0" z="0" />
    <waveheight value="0.1" />
    <waveperiod value="1" />
    <phase value="0" />
    <ramp value="1" />
    <savemotion xpos="5.0" zpos="-0.26" />
  </piston>
</wavepaddles>

```

图 1-10 初始水位和波浪参数设置

(7) 边界条件、粘度选项及时间步长等参数的设置

通过 `parameters` 关键词，设置边界条件类型、粘度计算公式、时间步长、模拟时长、输出文件间隔等参数。如下图所示，时间步长为可变时间步长、最小值为 0.05s，模拟时长为 40s，每隔 0.05s 输出结果文件。

```

<parameters>
  <parameter key="SavePosDouble" value="0" />
  <parameter key="Boundary" value="2" />
  <parameter key="StepAlgorithm" value="2" />
  <parameter key="VerletSteps" value="40" />
  <parameter key="Kernel" value="2" />
  <parameter key="ViscoTreatment" value="2" />
  <parameter key="Visco" value="1e-6" />
  <parameter key="ViscoBoundFactor" value="0" />
  <parameter key="DensityDT" value="3"/>
  <parameter key="DensityDTvalue" value="0.1"/>
  <parameter key="Shifting" value="0"/>
  <parameter key="ShiftCoef" value="-2" />
  <parameter key="ShiftTFS" value="1.5"/>
  <parameter key="RigidAlgorithm" value="1"/>
  <parameter key="FtPause" value="0.0" />
  <parameter key="CoefDtMin" value="0.05" />
  <parameter key="DtIni" value="0"/>
  <parameter key="DtMin" value="0" />
  <parameter key="DtFixed" value="0" />
  <parameter key="DtFixedFile" value="NONE" />
  <parameter key="DtAllParticles" value="0" />
  <parameter key="TimeMax" value="40" />
  <parameter key="TimeOut" value="0.05" />
  <parameter key="PartsOutMax" value="1" />
  <parameter key="RhopOutMin" value="700" />
  <parameter key="RhopOutMax" value="1300" />
  <simulationdomain >
    <posmin x="default" y="default" z="default" />
    <posmax x="default" y="default" z="default" />
  </simulationdomain>
</parameters>

```

图 1-11 边界条件、粘度选项及时间步长等参数的设置

1.1.2 求解器及后处理文件设置

DualSPHysics 模型能够在 Windows 系统和 Linux 系统下计算，因此求解器及后处理文件

分为 Windows 系统下的 bat 文件和 Linux 系统下的 sh 文件。以 Linux 系统为例。

(1) 指定运算 xml 文件

```
export name=fangbodi
export dirout=${name}_mDBC_out
export diroutdata=${dirout}/data
```

图 1-12 指定 xml 文件进行计算

(2) 选择前后处理调用的求解器

```
export dirbin=../../bin/linux
export LD_LIBRARY_PATH=${LD_LIBRARY_PATH}:${dirbin}
export gencase=${dirbin}/GenCase_linux64"
export dualsphysicscpu=${dirbin}/DualSPHysics5.0CPU_linux64"
export dualsphysicsgpu=${dirbin}/DualSPHysics5.0_linux64"
export boundaryvtk=${dirbin}/BoundaryVTK_linux64"
export partvtk=${dirbin}/PartVTK_linux64"
export partvtkout=${dirbin}/PartVTKOut_linux64"
export measuretool=${dirbin}/MeasureTool_linux64"
export computeforces=${dirbin}/ComputeForces_linux64"
export isosurface=${dirbin}/IsoSurface_linux64"
export flowtool=${dirbin}/FlowTool_linux64"
export floatinginfo=${dirbin}/FloatingInfo_linux64"
```

图 1-13 指定求解器文件位置

(3) 选择采用 CPU 或 GPU 运算

```
${dualsphysicsgpu} -gpu -mdbc ${dirout}/${name} ${dirout} -dirdataout data -svres
if [ $? -ne 0 ] ; then fail; fi
```

图 1-14 采用 GPU 计算

(4) 后处理输出结果及输出文件格式设置

```
if [ $option -eq 2 -o $option -eq 1 ] ; then
export dirout2=${dirout}/particles

export dirout2=${dirout}/measuretool
${measuretool} -dirin ${diroutdata} -points elevation.txt -onlytype:all -elevation:0.4 -savecsv ${dirout2}/_elevation
if [ $? -ne 0 ] ; then fail; fi


export dirout2=${dirout}/measuretool
${measuretool} -dirin ${diroutdata} -points press.txt -onlytype:all -vars:-all,+press -savecsv ${dirout2}/_press
if [ $? -ne 0 ] ; then fail; fi
```

图 1-15 后处理输出结果设置

至此，波浪水动力模型 DualSPHysics 的相关设置已完成。

1.2 FssiCAS 图形界面操作——前处理

1.2.1 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 2-1 所示。

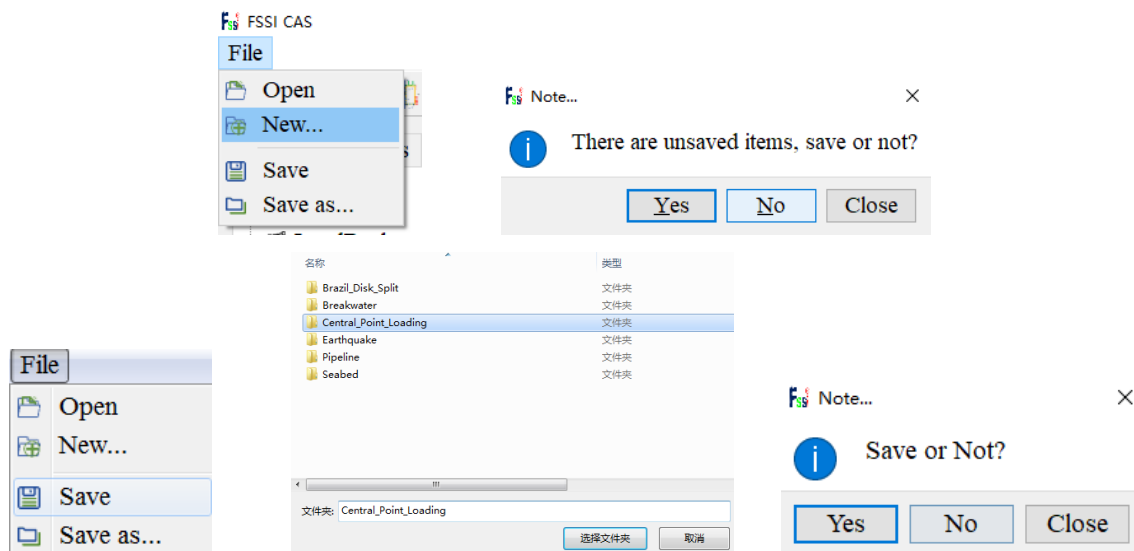


图 2-1 在 FssiCAS 软件中新建和保存一个项目的过程图

1.2.2 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 2-2 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，在本案例中海床及防波堤的固体节点和流体节点设置如图 2-3 所示。在工作区中显示几何模型如图 2-4 所示。

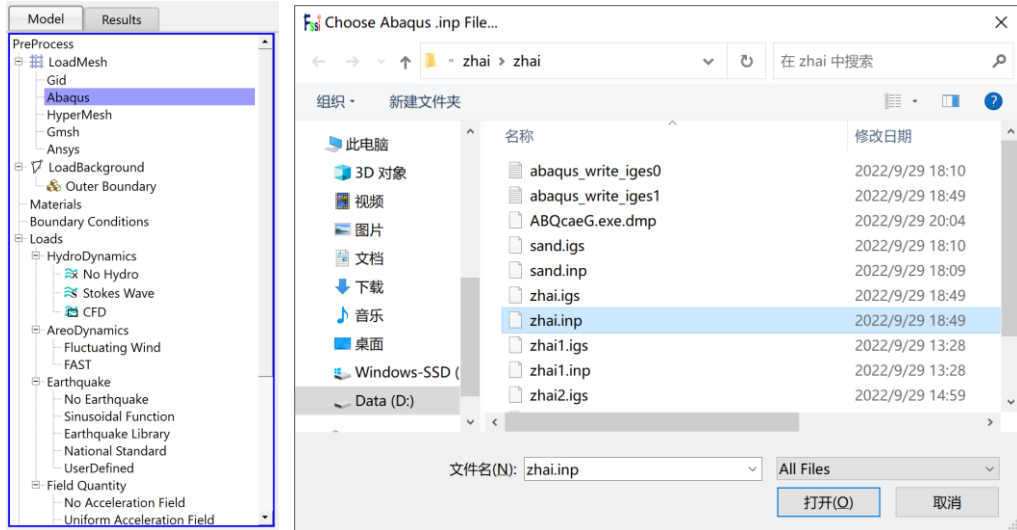


图 2-2 导入几何模型的网格文件

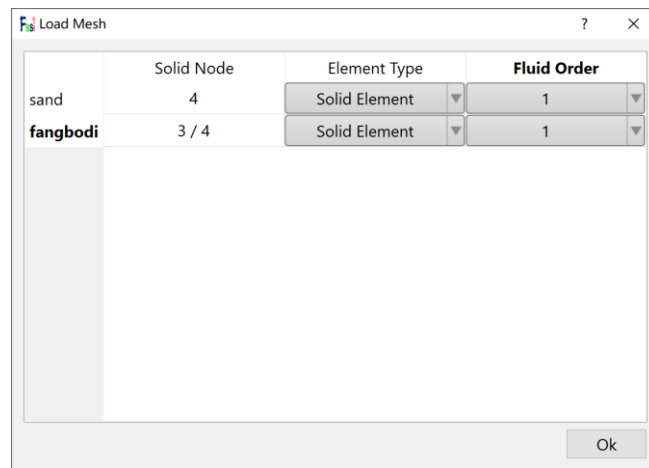


图 2-3 设置固体节点数和流体单元阶次

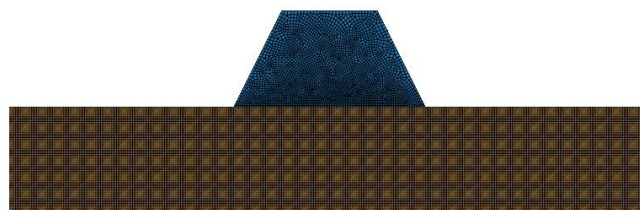


图 2-4 几何模型的显示

1.2.3 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 2-5 所示。

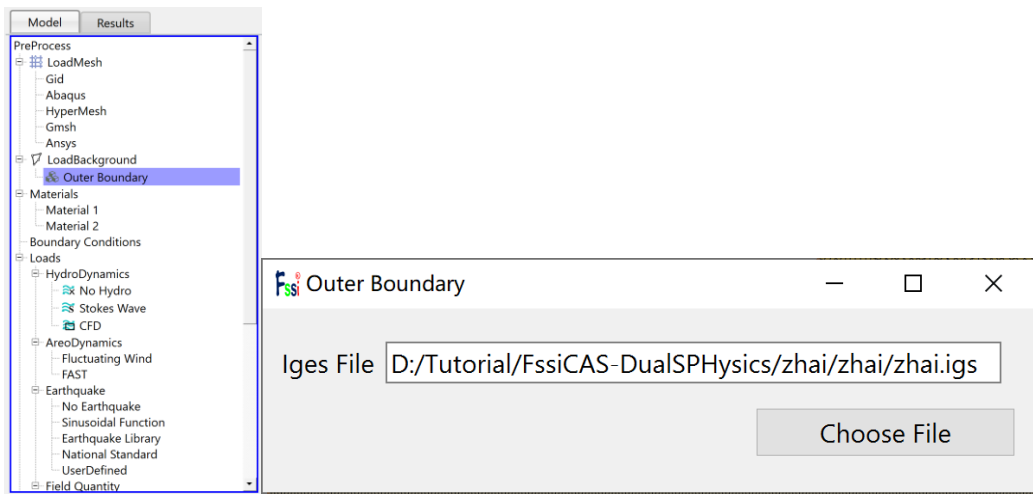


图 2-5 导入几何模型的背景线

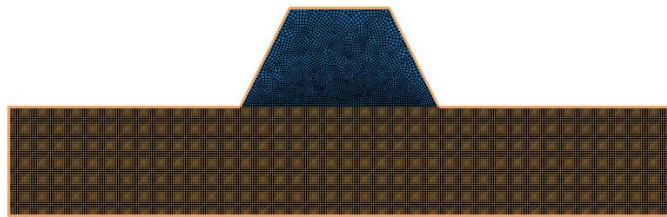



图 2-6 防波堤背景线

1.2.4 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。

点击工具栏 2 中图标，进入边界选择模式，如图 2-7 所示；

点击工具栏 2 中图标，进入背景线选择模式，如图 2-8 所示；

点击键盘‘R’键，开始选择；



图 2-7 进入边界选择模式



图 2-8 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 2-9 所示；

在弹出的对话框中勾选 X 方向位移固定。如图 2-10 所示；

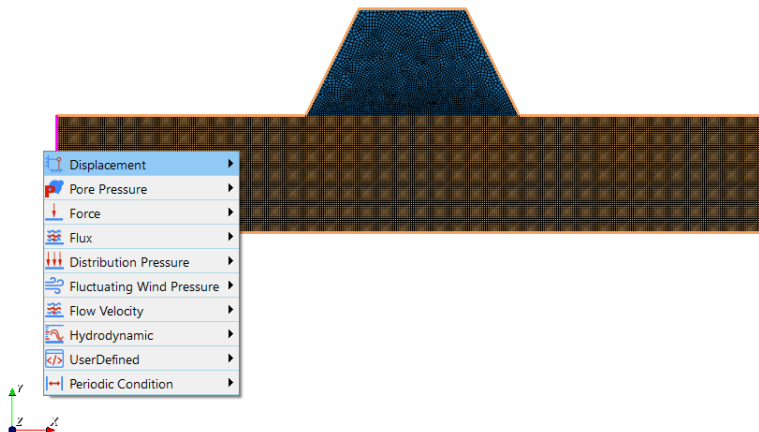


图 2-9 选定海床左右两边背景线并添加位移边界条件

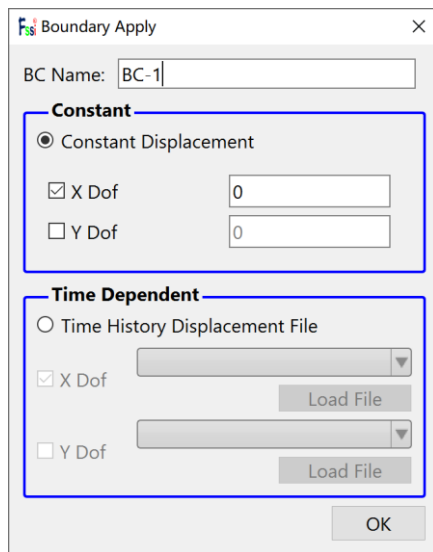


图 2-10 施加 X 方向位移固定

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 2-11 所示；

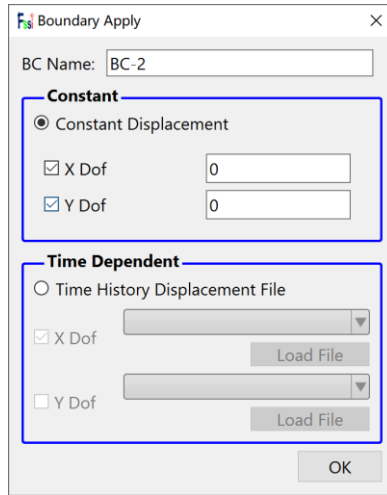


图 2-11 施加 XY 方向位移固定

选择海床及防波堤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 2-12 所示；

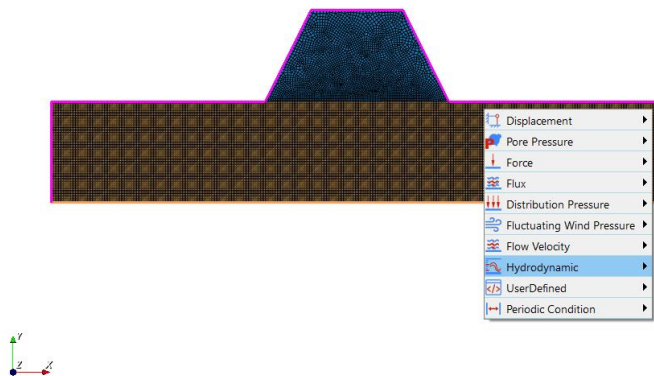


图 2-12 海床及防波堤上部施加水动力边界条件

在右侧的伸缩区中勾选 **Show Boundary Condition**，如图 2-13 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 2-14 所示。

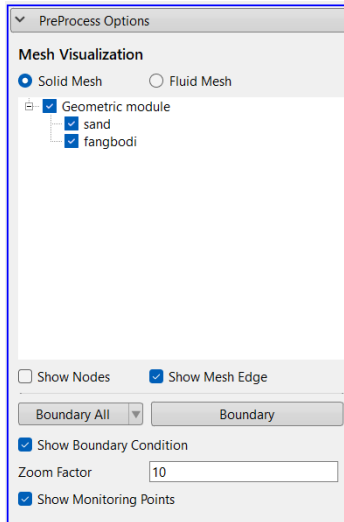


图 2-13 在右侧的伸缩区中勾选 Show Boundary Condition

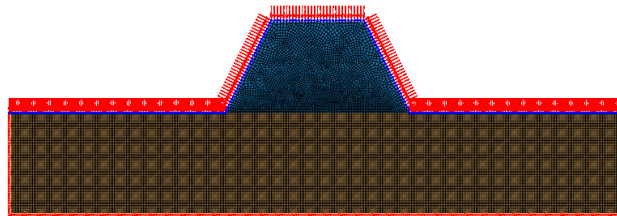


图 2-14 该案例添加的边界条件

1.2.5 设置材料参数

用户点击在前处理界面上 **Model** 树状菜单栏中的 **Material**, 分别设置多种材料的属性参数。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 2-16 所示;

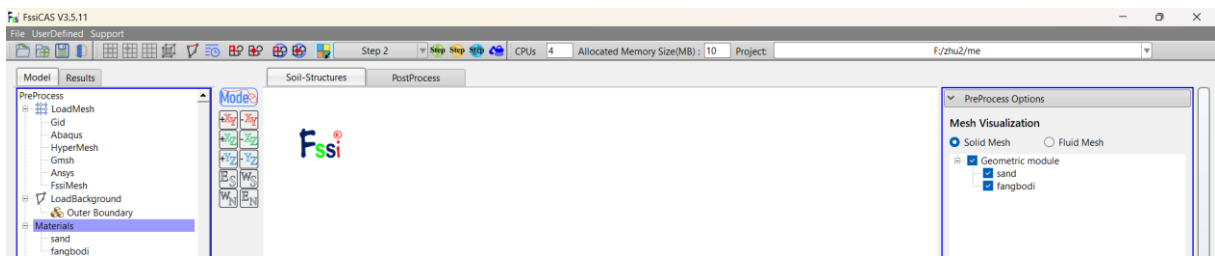


图 2-15 前处理界面正上方的工具栏 2 中设置材料属性和参数的功能按钮 **Material**

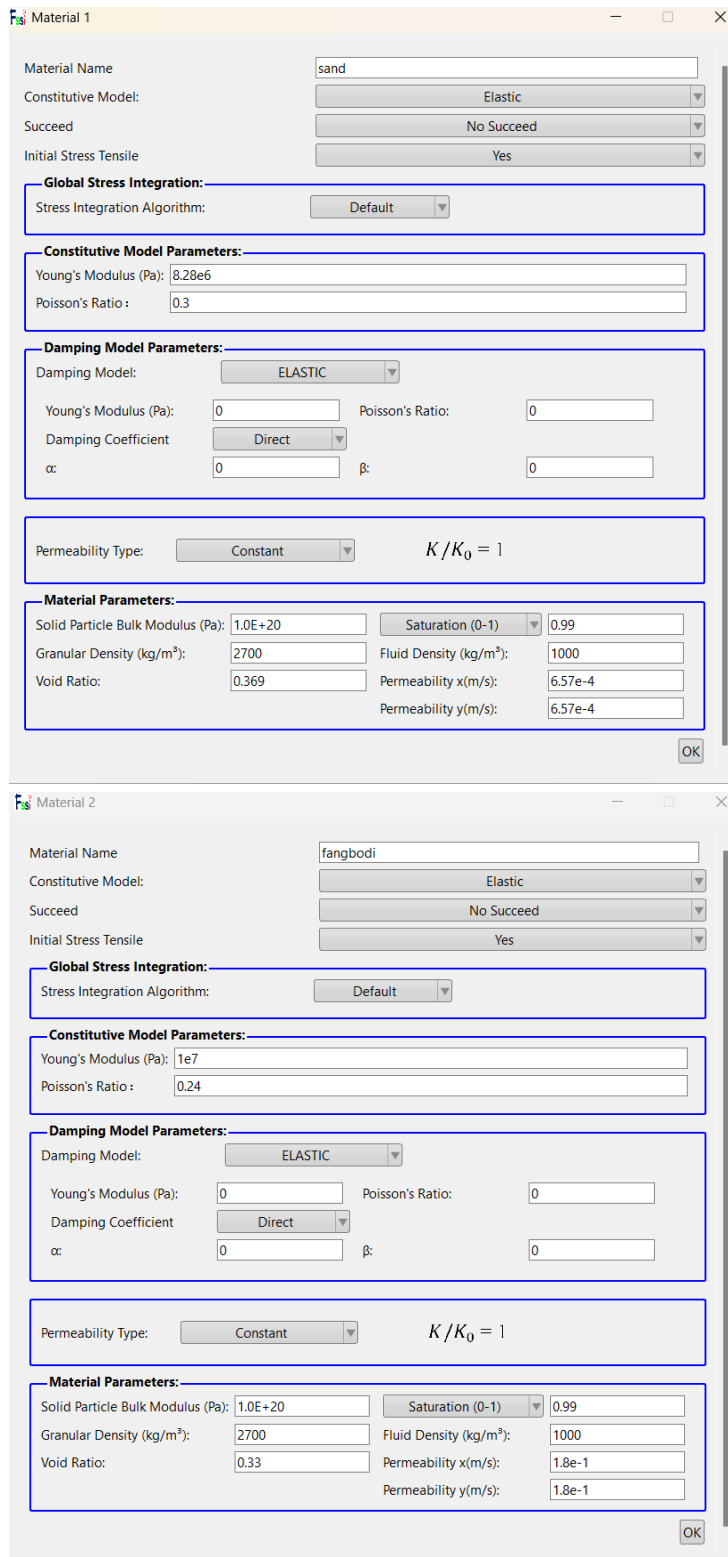


图 2-16 设置材料的相关属性参数

1.2.6 添加时间步

本案例分为 Step1 与 Step2 两个时间步，在 Step1 中进行海床及防波堤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 2-17 所示。



图 2-17 添加 Step2

1.2.7 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 2-18 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。

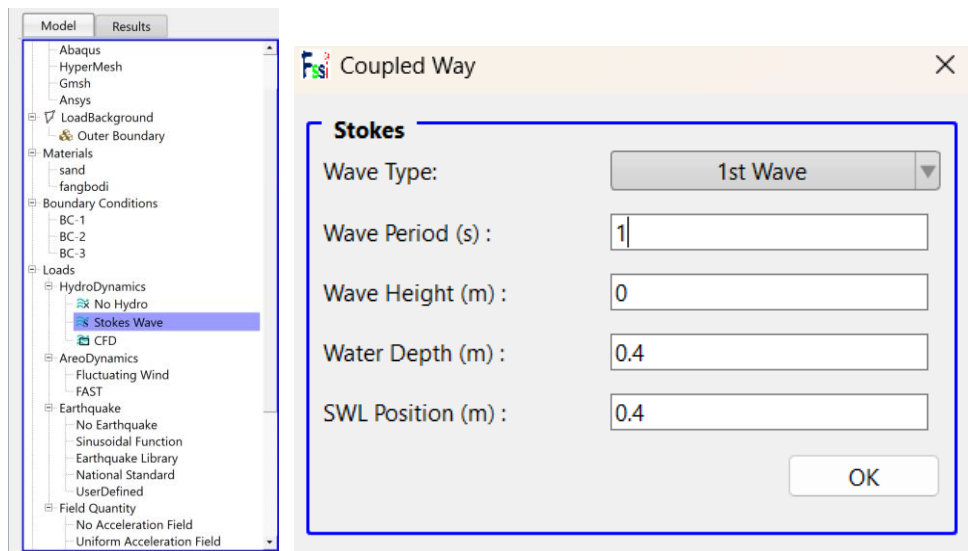


图 2-18 固结状态水动力边界条件设置

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 2-19 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）

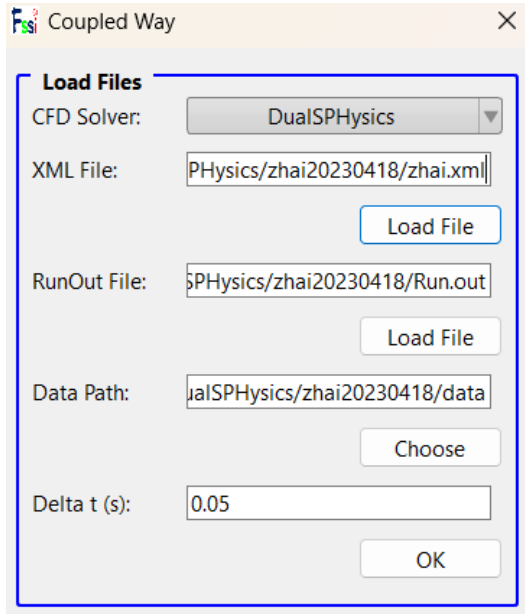
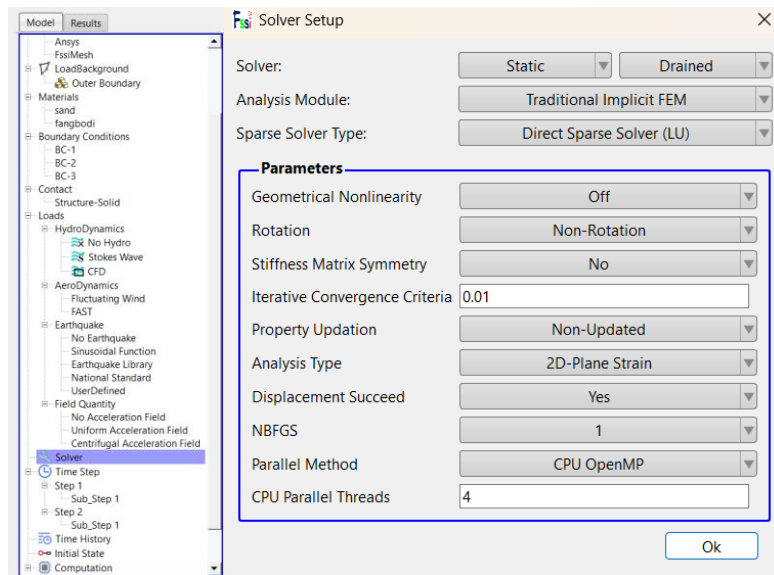


图 2-19 波浪参数设置

1.2.8 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 2-20 所示；



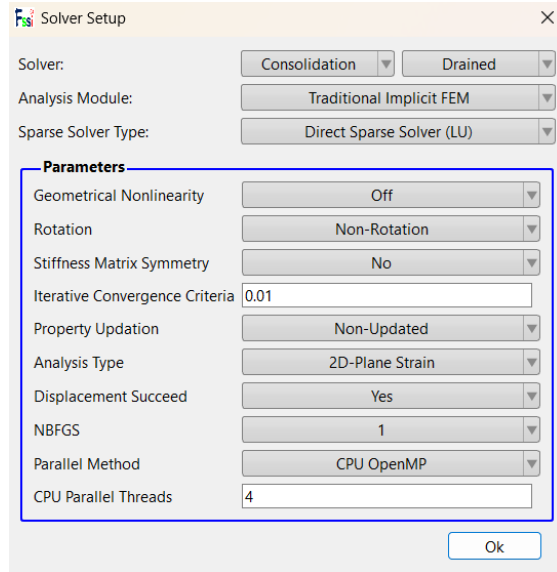


图 2-20 设置求解器的相关属性参数

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 1s，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 2-21 所示：

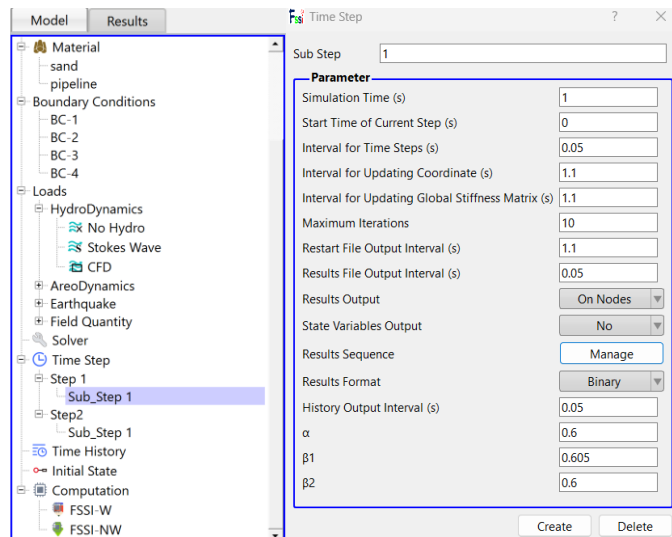


图 2-21 设置时间步 1 和相关属性参数

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 20s，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 2-22 所示：

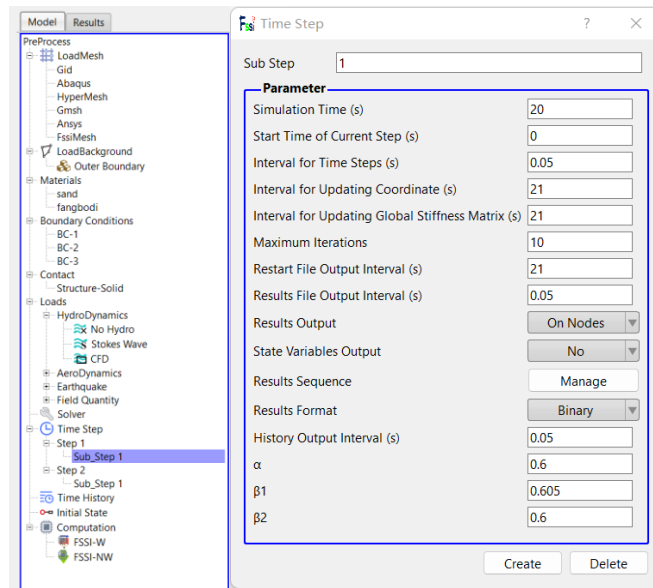




图 2-22 设置时间步 2 和相关属性参数

1.2.9 添加时程输出

需要输出时程结果的点设置为：防波堤前部下方海床中三个监测点，位置如图 1-1 所示。坐标分别为 p_1 (0.7, -0.05)， p_2 (0.7, -0.15)， p_3 (0.7, -0.25)。

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；

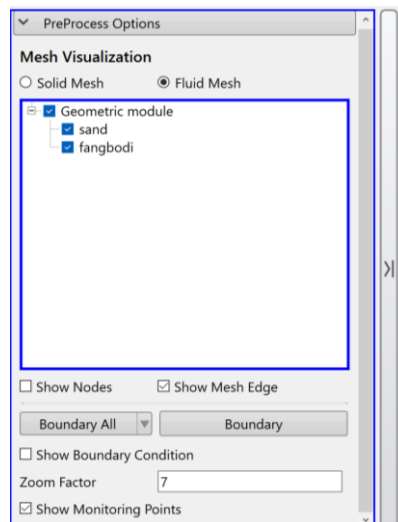


图 2-23 选择流体节点

定位点的位置，在命令行中输入 **Highlight Point/0.7 -0.05**，回车， p_1 位置处出现高亮。如图 2-24 所示。

图 2-24 确定时程点位置

点击 R 键，拖动鼠标左键选中高亮点，右键选择输出孔压，如图 2-25 所示；

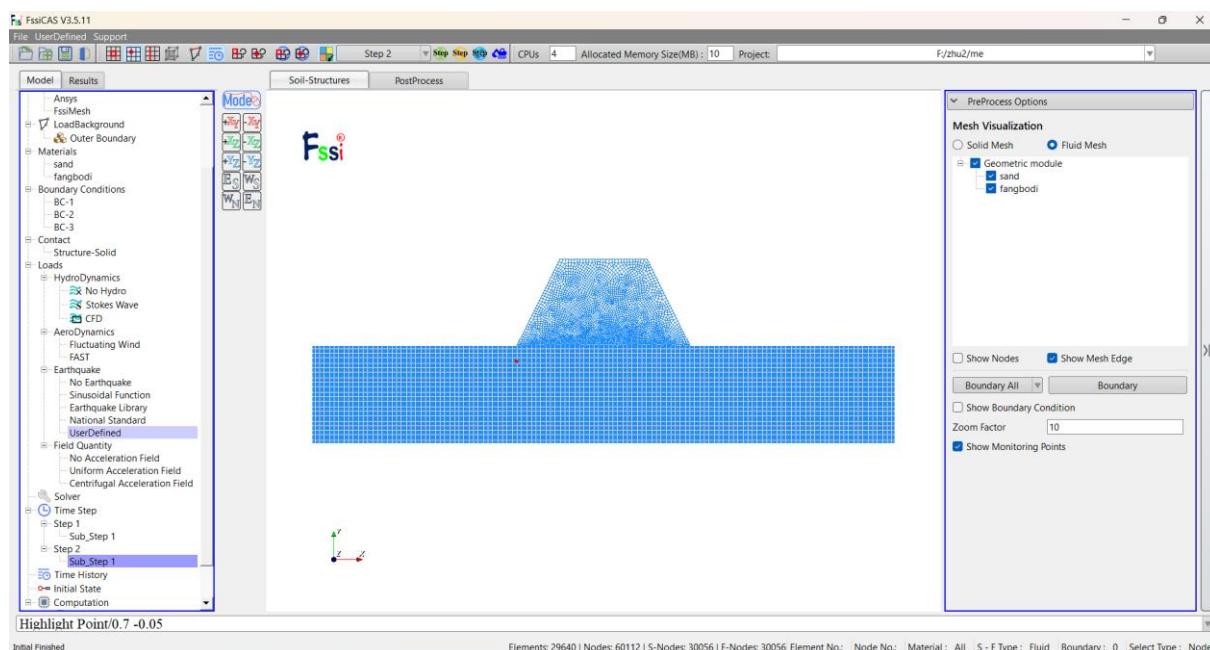


图 2-25 设置输出时程结果的节点

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 History，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 2-26 所示；

Coordinate	Type	No.	
(0.70000,-0.05000,0.00000)	Node_Pore_P	9760	X
(0.70000,-0.15000,0.00000)	Node_Pore_P	25720	X
(0.70000,-0.25000,0.00000)	Node_Pore_P	41680	X

图 2-26 显示输出的时程结果列表

1.2.10 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 2-27 所示；

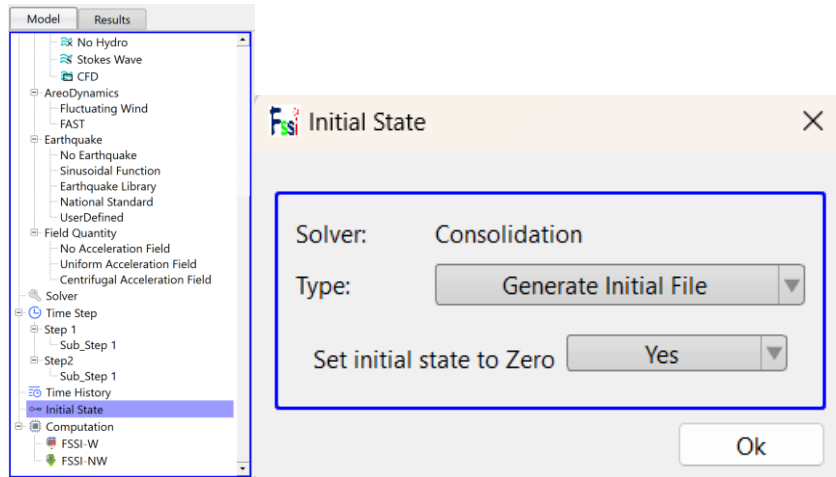



图 2-27 设置初始状态

1.2.11 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 2-28 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 2-29 所示。

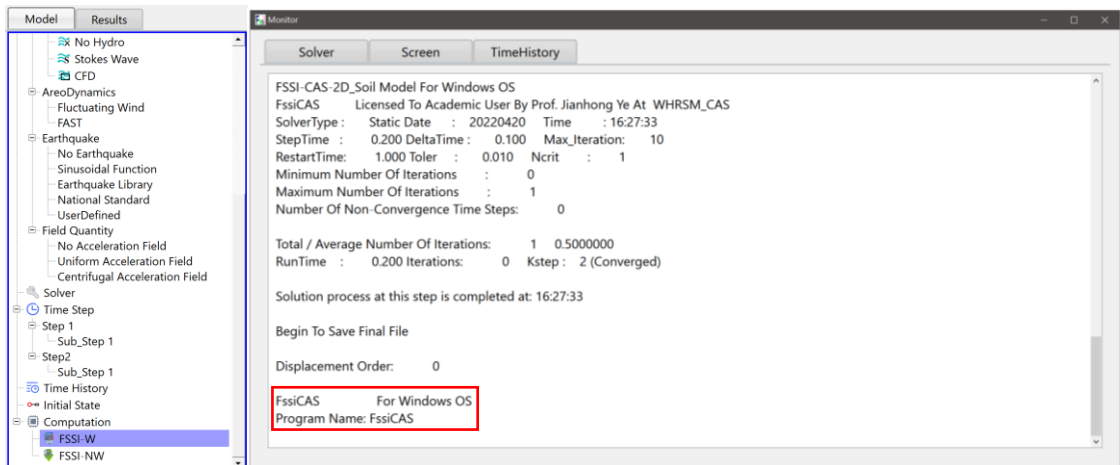


图 2-28 计算完成

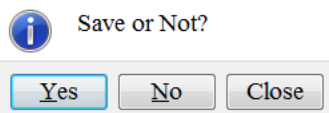


图 2-29 保存项目文件

1.3 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。

1.3.1 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 3-1 所示。

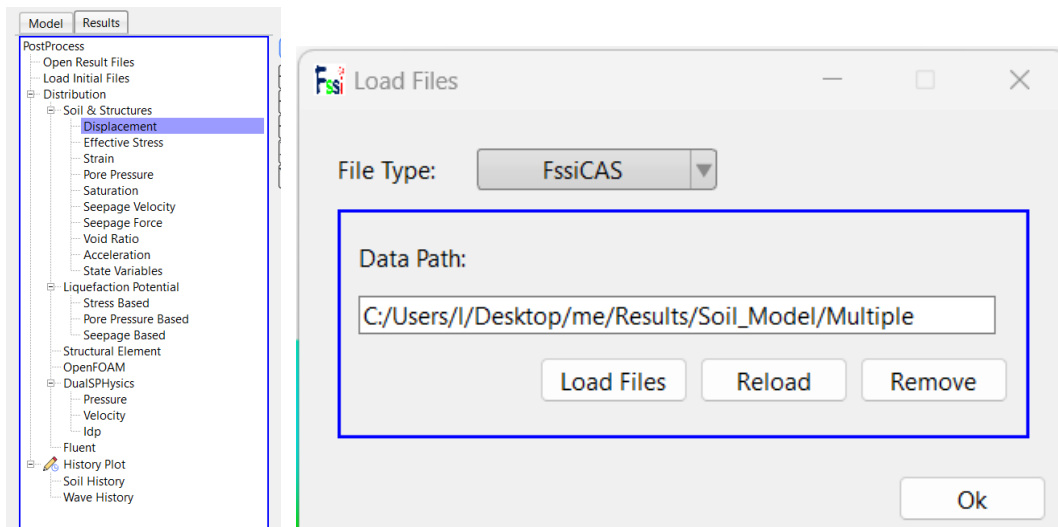
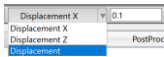



图 3-1 打开结果文件

1.3.2 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；

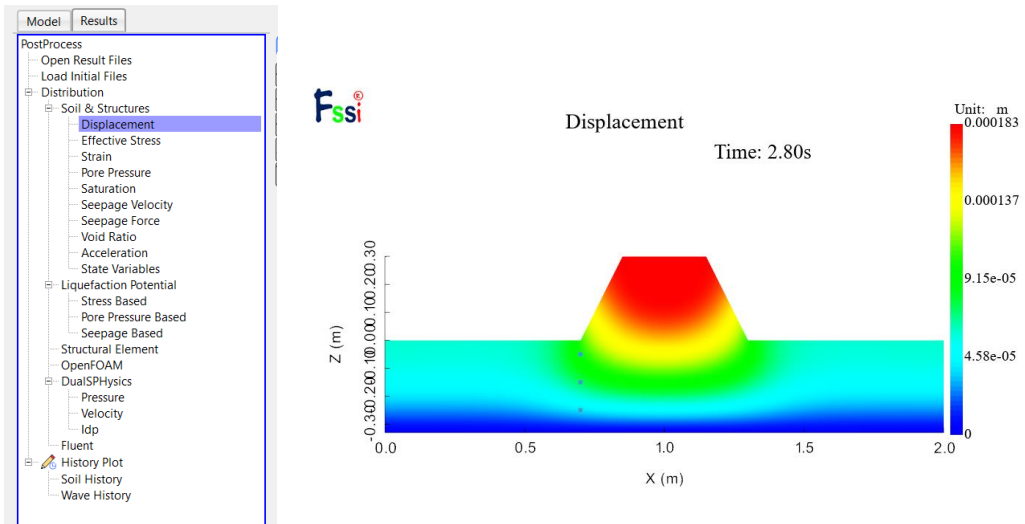


图 3-2 绘制分布图

本案例计算结果分布图如图 3-3 所示

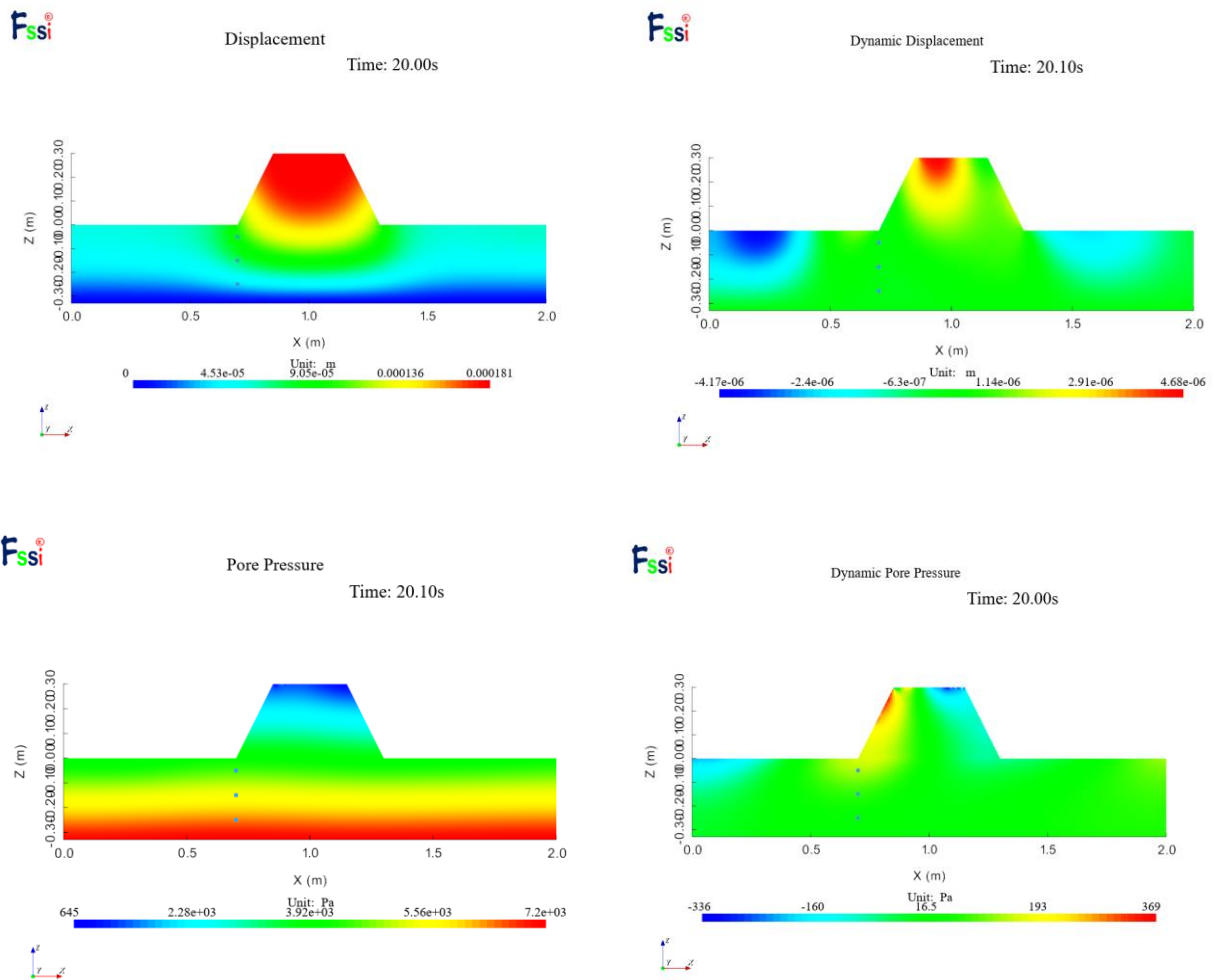


图 3-3 位移和孔压分布图

1.3.3 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 3-4 所示。

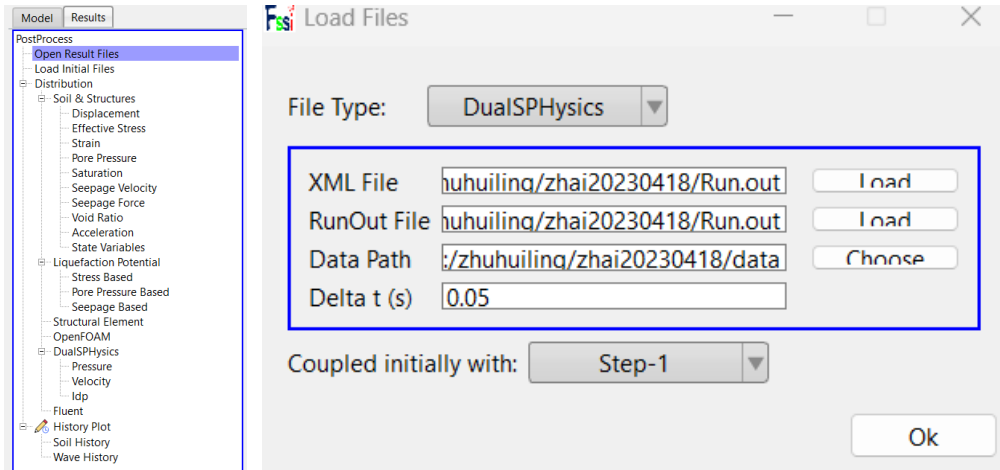


图 3-4 导入 DualSPHysics 波浪结果文件

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 3-5 所示，选择绘制波浪压力分布图。

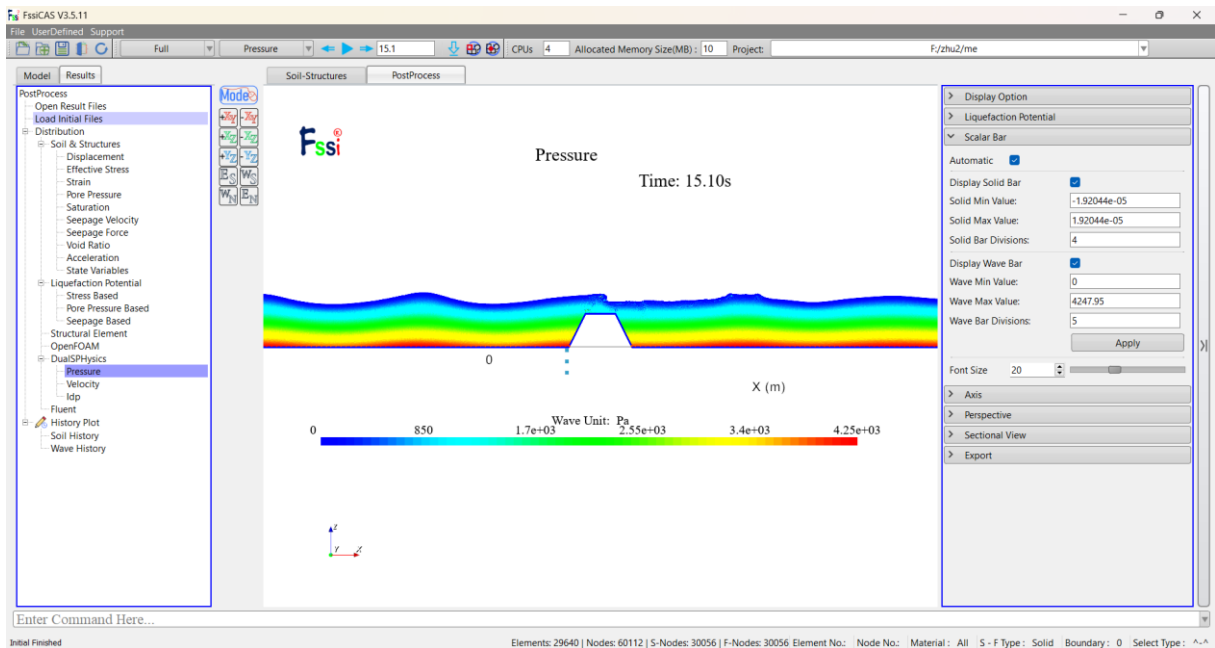


图 3-5 流体压力分布

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 3-6 为勾选示意图，图 3-7 为 15.1s 时波浪与土体孔压联合分布图。

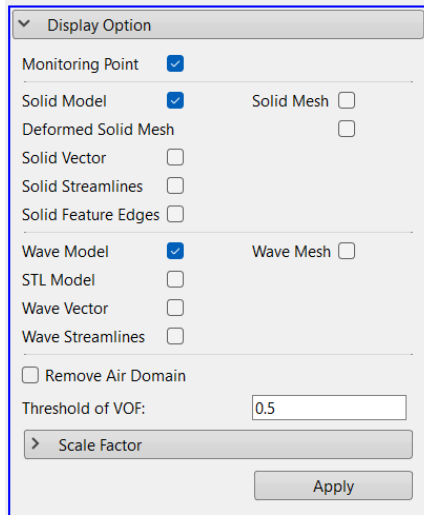


图 3-6 伸缩栏操作



Pore Pressure + Idp

Time: 15.10s

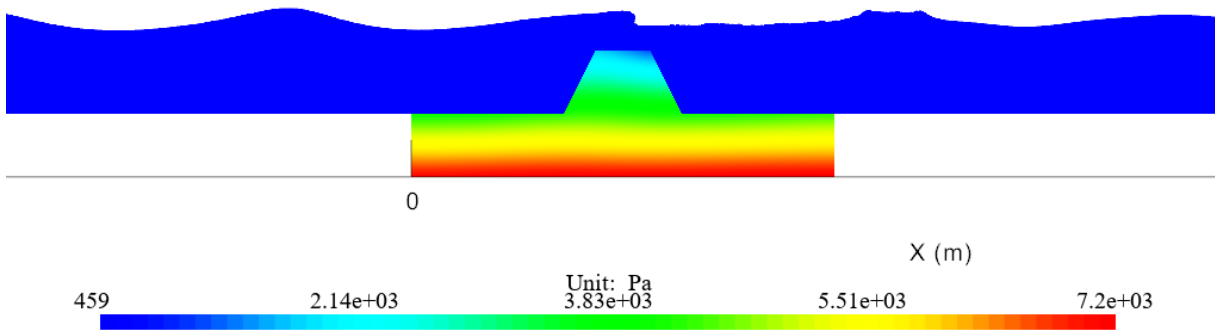


图 3-7 波浪与土体孔压分布