

波浪作用下松散海床的动力响应

本案例用于研究 3 阶 Stokes 波作用下松散海床的动力响应，由于波浪在海床表面产生周期性的压力，因此采用 Pastor-Zienkiewicz-Mark III (PZIII) 高级本构模型描述海床砂土的动力力学行为。波浪在砂性海床上方通过，给海床表面施加了周期性动态水压力。海床厚度 $h = 20 \text{ m}$ ，计算长度 $L = 400 \text{ m}$ 。波浪水动力参数为：周期 $T = 8.0 \text{ s}$ ，水深 $d = 10 \text{ m}$ ，波高 $H = 3.0 \text{ m}$ 。模型如图 2-1 所示。

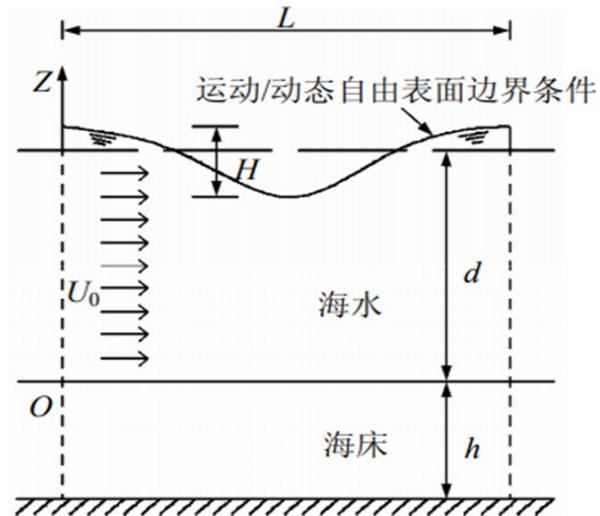


图 2-1 波浪作用下海床发生液化的计算模型图

2.1 FssiCAS 图形界面操作——前处理

2.1.1 导入网格和背景线

点击 FssiCAS—Preprocess—Load Mesh，在弹出的文件选择对话框中选择 Abaqus 输出的网格文件，双击或点击打开 inp 文件，如图 2-2 所示。

名称	修改日期	类型	大小
Results	2022-4-29 19:04	文件夹	
Temp	2022-4-29 19:04	文件夹	
Case2 Dynamic Response of Loose S...	2022-4-28 19:50	FSSICAS	0 KB
mesh_seabed	2022-4-2 11:31	文件	232 KB
mesh_seabed.inp	2022-4-19 11:56	INP 文件	1,349 KB
outBC_seabed.igs	2022-4-19 11:56	IGS 文件	3 KB

图 2-2 导入网格的步骤示意图

在弹出的对话框中设置单元节点阶次，如图 2-3 所示。由于本案例中固体节点采用四边形四节点单元，S.Node 默认为 4。因为有流体作用，所以流体节点阶次设置为 1，点击 Ok 按钮确认选择。

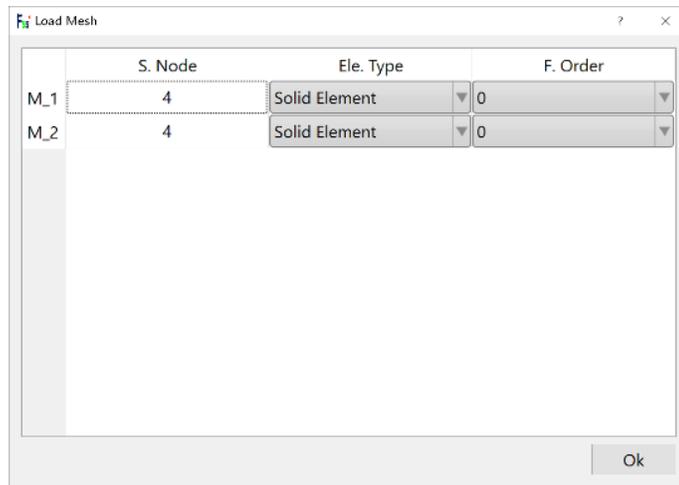


图 2-3 设置流体节点阶次界面

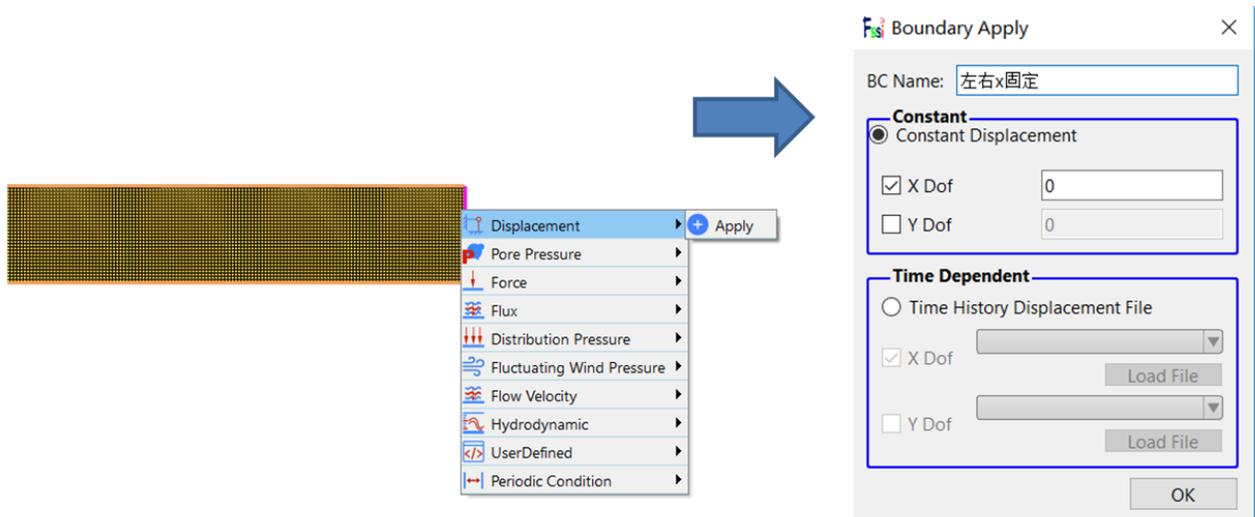
点击 Preprocess—Load Background—Outer Boundary，在弹出的文件选择对话框中选择 Gid 输出的*.igs 背景线文件，双击或点击打开按钮，具体步骤如图 2-4 所示。

名称	修改日期	类型	大小
Results	2022-4-29 19:04	文件夹	
Temp	2022-4-29 19:04	文件夹	
Case2 Dynamic Response of Loose S...	2022-4-28 19:50	FSSICAS	0 KB
mesh_seabed	2022-4-2 11:31	文件	232 KB
mesh_seabed.inp	2022-4-19 11:56	INP 文件	1,349 KB
outBC_seabed.igs	2022-4-19 11:56	IGS 文件	3 KB

图 2-4 加载外背景线 (Outer Boundary) 的步骤示意图

2.1.2 添加边界条件

本案例在左右两个侧边 ($x = 0\text{ m}$) 和($x = 400\text{ m}$) 施加 x 方向的约束，在底边 ($y = 0\text{ m}$) 节点施加 x 与 y 方向的约束。首先，依次点击工具栏中图标  和  按钮，进入背景线选择模式。通过点击键盘 ‘R’ 键，进入边界选择模式，当单击边界线被选择线变亮时，右击鼠标后设置约束，具体操作如图 2-5 所示。



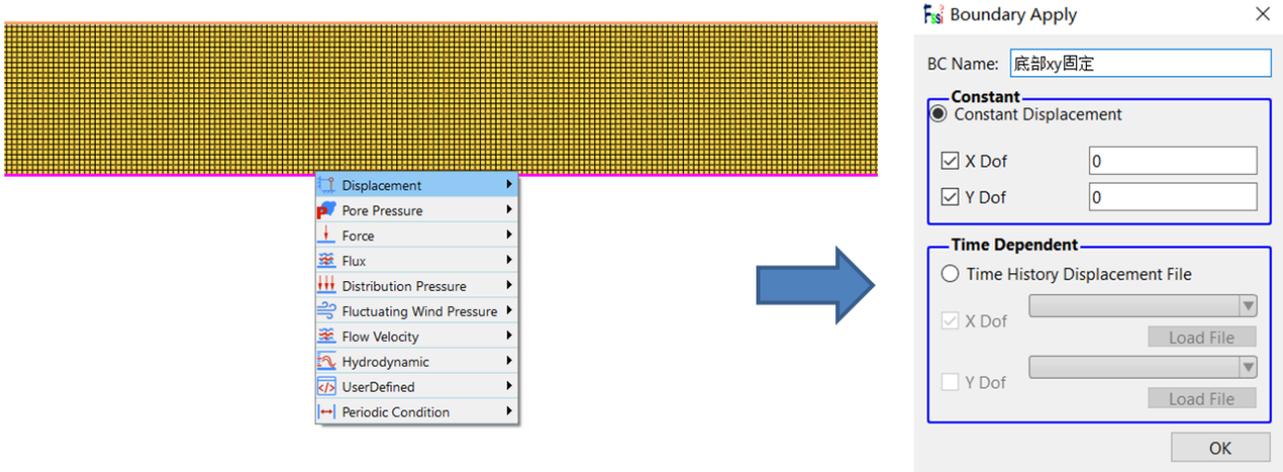


图 2-5 选择边界线添加边界条件

2.1.3 添加时程输出

本案例以计算域对称线 $x = 200 \text{ m}$ 上的结果为典型代表研究波浪作用下海床内的孔隙水压力、有效应力变化过程和液化特征。为了得到 $x = 200 \text{ m}$ 上节点和单元的时程结果，首先点击  按钮，根据右下角显示的坐标找到 $x = 200 \text{ m}$ 的位置，界面显示如图 2-6 所示。

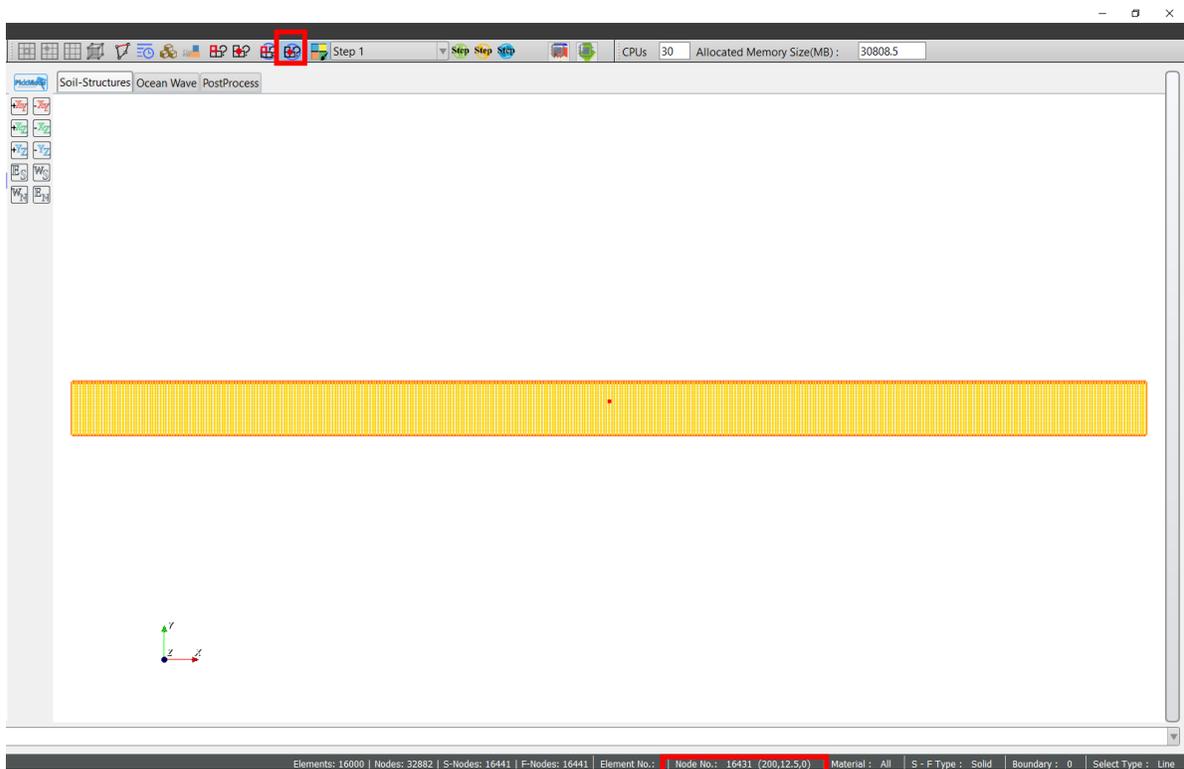


图 2-6 节点坐标查询界面

然后依次点击工具栏中图标，，进入输出节点时程选择模式。通过点击键盘‘R’键，进入节点选择模式。由于网格较密，需要拨动鼠标滚轴放大模型，当将 $x = 200\text{ m}$ 的所有节点都选择后，右键单击选择 All History Plot-Add，从而将 $x = 200\text{ m}$ 上所有节点的应力、应变等成功添加到时程输出文件，如图 2-7 所示。

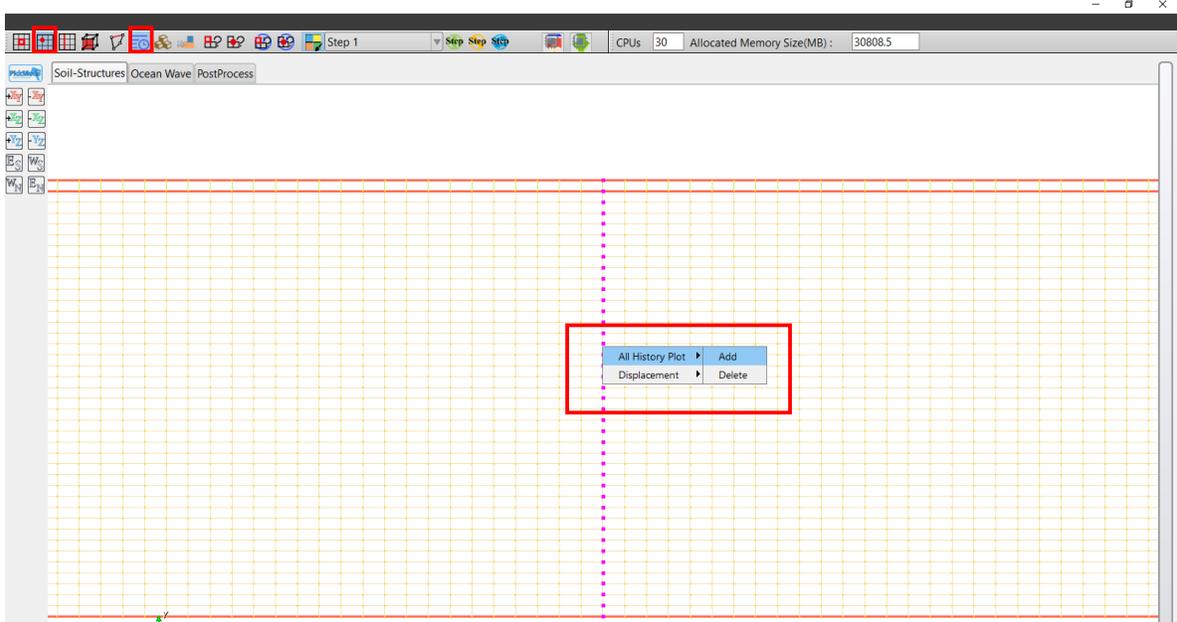


图 2-7 添加时程输出界面

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；勾选 Show Monitoring Points 可以查看是否正确添加时程输出点。

2.边界条件添加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单独对重复节点进行多种不同的边界条件的设置。

2.1.4 水动力边界条件设置

本案例施加了波浪荷载，因此海床表面要施加水动力边界，如图 2-8 所示。波浪荷载通过 3 阶 Stokes 波的解析解进行计算获得，具体设置步骤为点击 FssiCAS—Preprocess—Hydrodynamics—Stokes Wave，如图 2-9 所示。

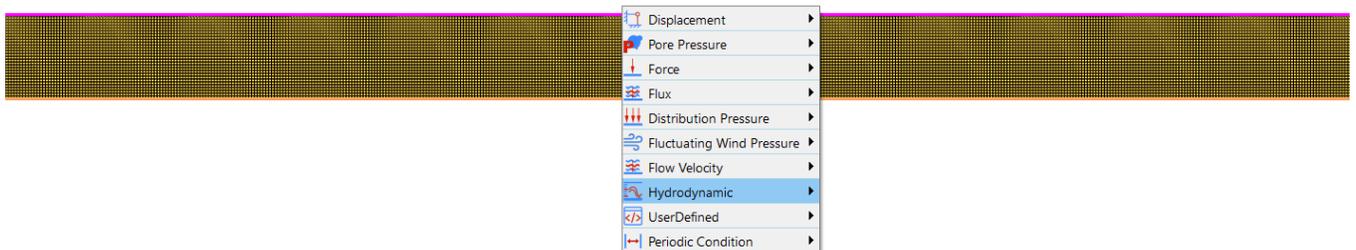


图 2-8 添加水动力边界条件示意图

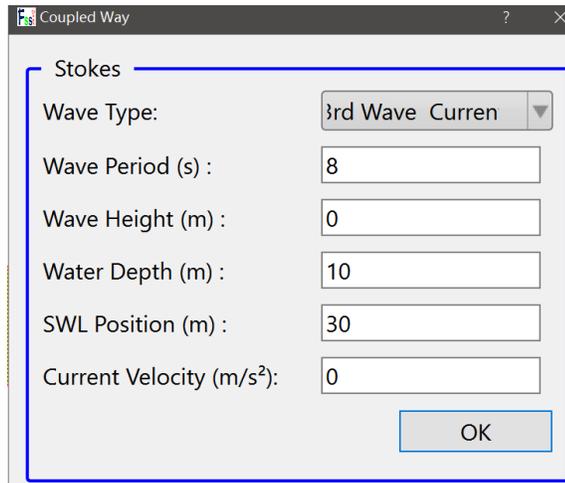


图 2-9 Stokes 波的参数信息设置界面

2.1.5 Step 1 时间步

2.1.5.1 设置材料参数

通过点击 FssiCAS—Preprocess—Material—Material 1/ Material 2，用户可以自行更改材料名称，设置材料参数。Material 1（弹性海床）的材料参数设置如图 2-10 所示，Material 2（海床）的材料参数与 Material 1 相同。

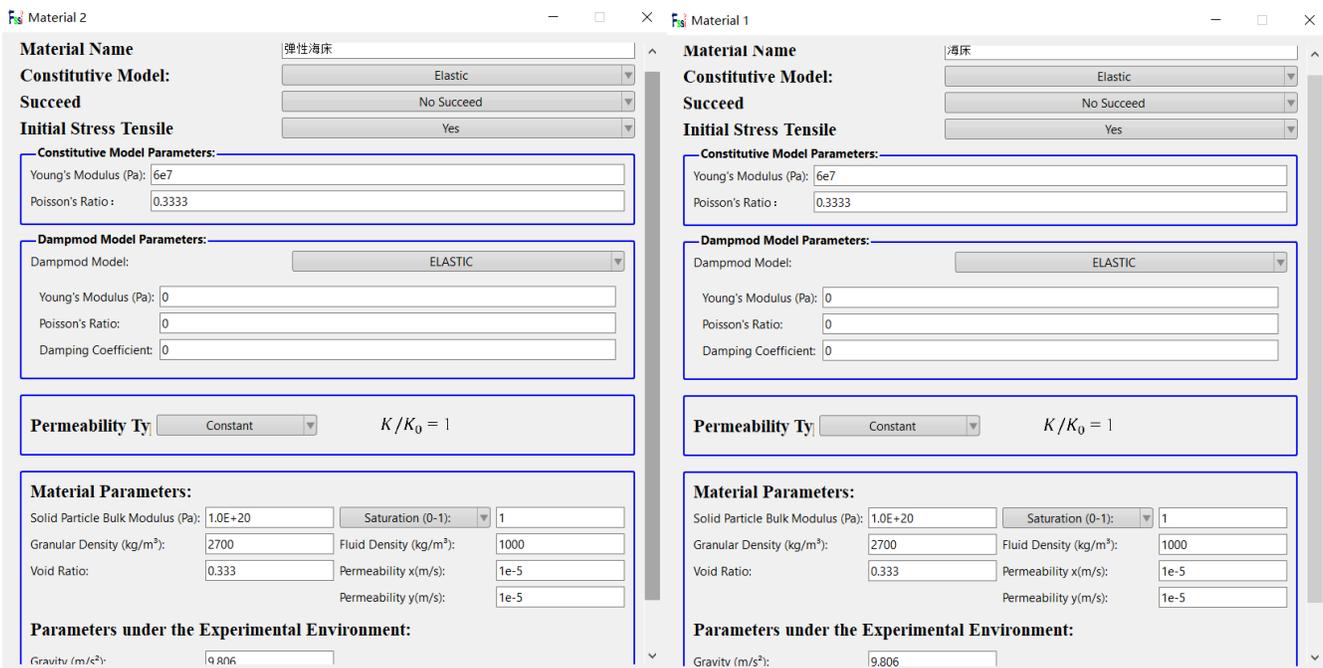


图 2-10 海床的计算参数设置界面

2.1.5.2 设置重力加速度场

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/s²，Y 方向为 -9.806 m/s²，如图 2-11 所示。Step 2、Step 3 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。

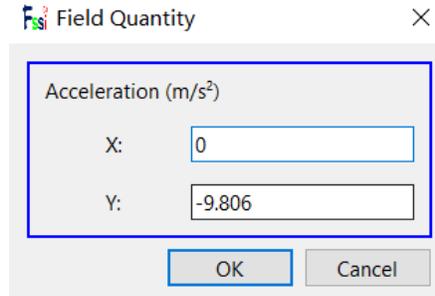


图 2-11 重力加速度设置

2.1.5.3 设置求解器类型

点击 FssiCAS—Preprocess—Solver—Solver Type，在弹出对话框中设置求解器类型，Step 1 的求解器类型及其参数设置如图 2-12 所示。

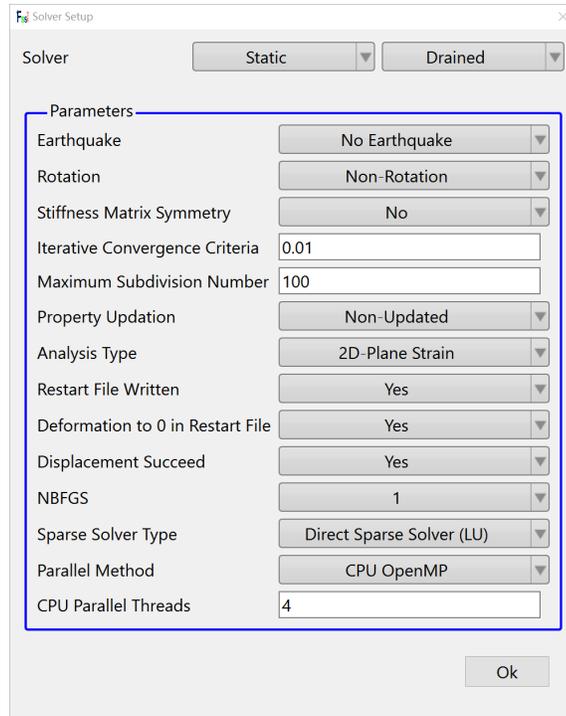


图 2-12 求解器类型及相关参数设置界面

2.1.5.4设置时间步

通过点击 FssiCAS—Preprocess—Solver—Time Step 设置时间步。

Simulation Time (s)为计算总时间，设置为 1 s；Interval for Time Steps (s)为时间步长，设置为 0.1 s；Interval for Updating Coordinate (s)为坐标更新时间，设置为 1.1 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 2s（不更新刚度矩阵）；Maximum Iterations 为每个时间步最大迭代次数，设置为 20 步；Restart File Step (s)为输出重启文件的时间，设置为 2s（不生成重启文件）；Output Time Step (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 0.2 s 输出一次结果文件；Results Output 为选择输出节点上的结果；History Plot 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 0.2 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 2-13 所示。

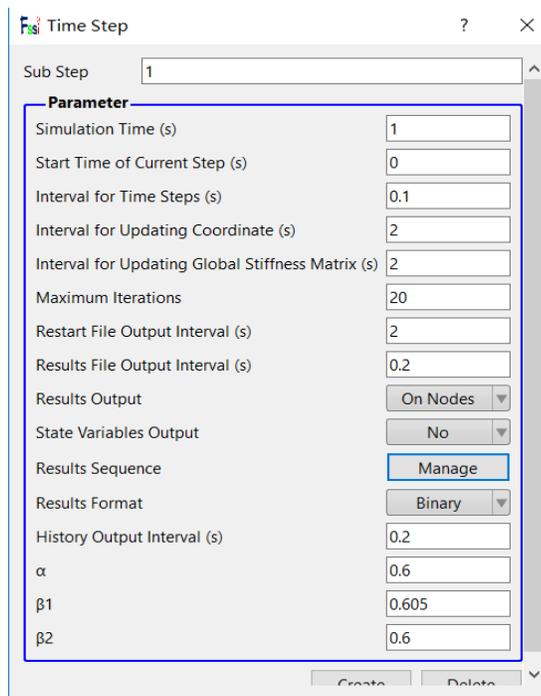
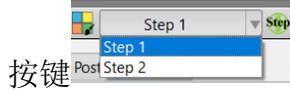


图 2-13 时间步相关参数设置界面

2.1.6 Step 2 时间步

为了修正 Step 1 的初始应力和稳态渗流，更好地衔接后续动力响应分析，在 Step 2 时间步中，土体采用一般线性弹性本构模型，求解器选择 Static。

Step 1 设置完毕后，点击  按钮添加 Step 2，Step 2 会自动复制 Step 1 的所有设置，点击



按钮选择 Step 2 进入 Step 2 设置界面。本小节只展示 Step 2 需要修改的与 Step 1 不同的设置。

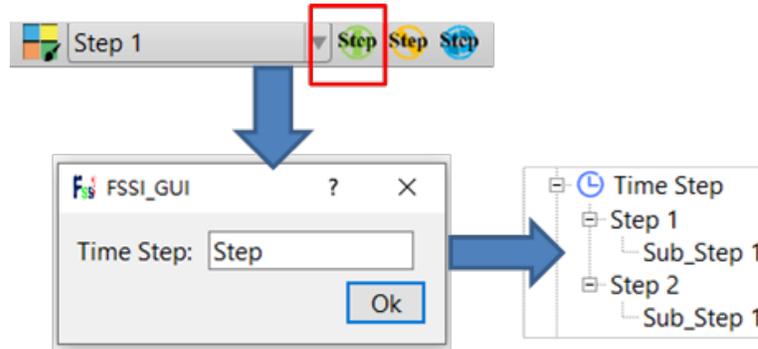


图 2-14 增加时间步的步骤示意图

2.1.6.1 设置材料参数

点击 Preprocess—Material—海床，用户可以自行更改材料名称，在显示的对话框中输入材料参数。Step 2 中 Material 2 采用 General Elastic 本构模型，Material 1（弹性海床）的材料参数不进行修改，Material 2（海床）的材料参数设置如图 2-15 所示。

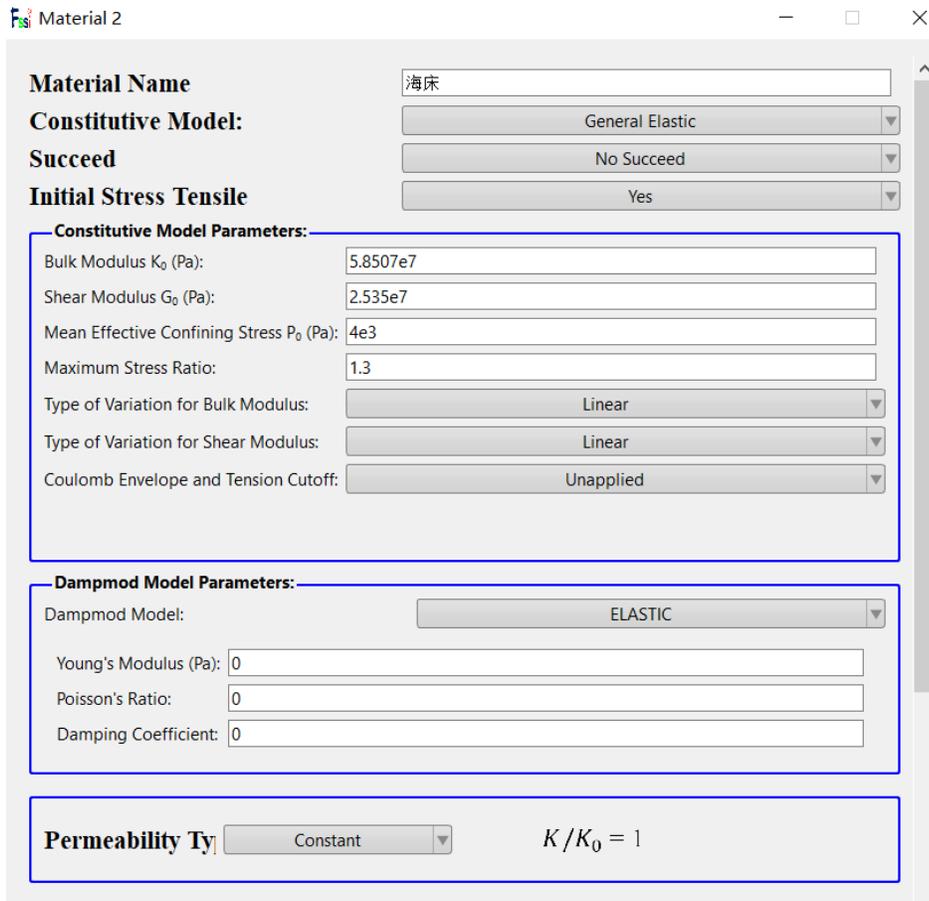


图 2-15 材料参数设置界面

2.1.6.2 设置求解器类型

点击 FssiCAS—Preprocess—Solver—Solver Type，在弹出对话框中设置求解器类型，Step 2 的求解器类型及其参数设置如图 2-16 所示。

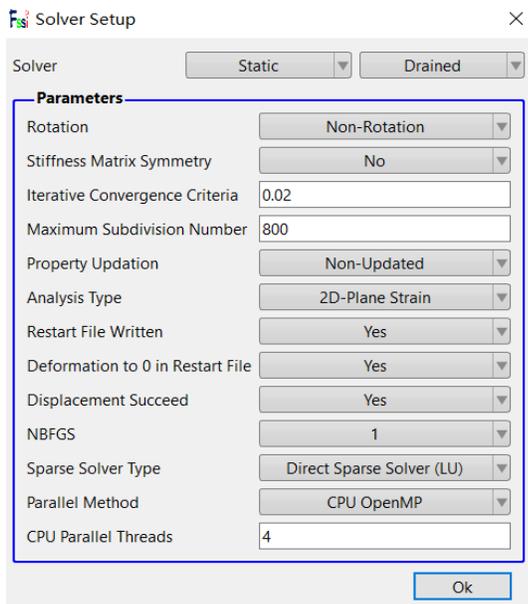


图 2-16 求解器类型及相关参数设置界面

2.1.6.3 设置时间步

点击 FssiCAS—Preprocess—Solver—Time Step，设置计算总时间为 1s，时间步长为 0.1 s，每 2s 更新一次坐标，每 2 s 更新一次刚度矩阵，每个时间步最大迭代次数为 20 步，每 2s 生成一次重启文件，每 0.2 s 输出一次结果文件，输出节点上结果，每 0.2 s 输出一次 $x = 200 \text{ m}$ 上所有节点的应力、应变等结果文件， α ， β_1 ， β_2 为时间系数，保持默认值即可，具体设置步骤如图 2-17 所示。

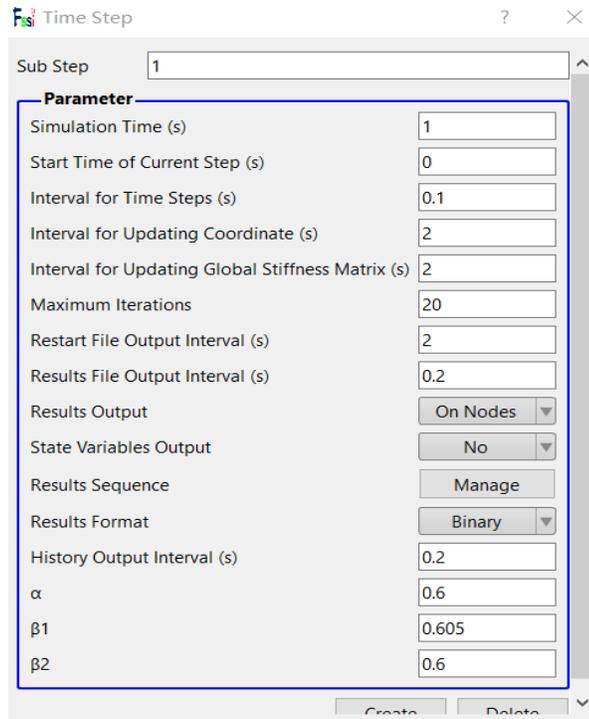


图 2-17 时间步 2 相关参数设置界面

2.1.6.4 设置初始条件

点击 FssiCAS—Preprocess—Initial State，设置初始条件，点击 ok，完成初始状态设置，如图 2-18 所示。

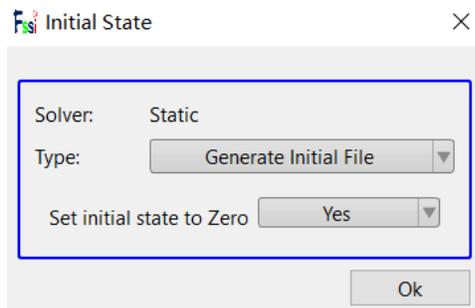


图 2-18 初始条件设置界面

2.1.7 Step 3 时间步

Step 3 为波浪作用阶段，因此求解器选择 Dynamic，弹性海床选择可以更好地描述砂土的动力学行为的 PZIII 本构模型。Step 2 设置完毕后，点击  按钮添加 Step 3，Step 3 会自动复制 Step 2 的所有设置，点击界面工具栏的按钮选择 Step 3 进入 Step 3 设置界面。本小节只展示 Step 3 需要修改的与 Step 2 不同的设置。

2.1.7.1 添加波浪

设置波浪周期 8s，波浪高度 3m，如图 2-19 所示。

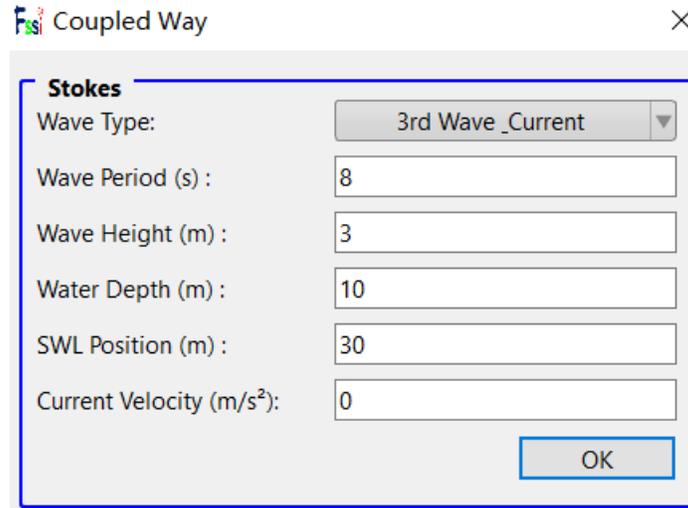


图 2-19 添加波浪

2.1.7.2 设置材料参数

点击 Preprocess—Material—海床，用户可以自行更改材料名称，在显示的对话框中输入材料参数。Step 3 中海床采用 Pastor-Zienkiewicz Mark III 本构模型，材料参数设置如图 2-20 所示，其他材料参数不进行修改。

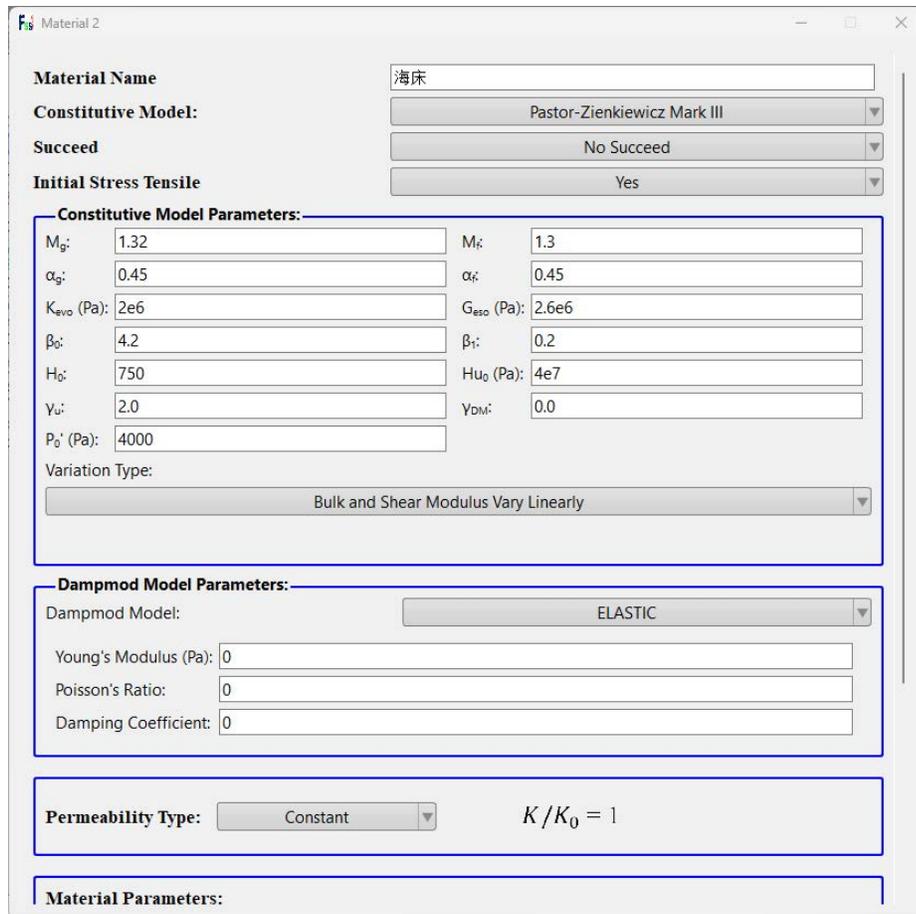


图 2-20 材料参数设置界面

2.1.7.3 设置求解器类型

点击 FsiCAS—Preprocess—Solver—Solver Type, 在弹出对话框中设置求解器类型, Step 3 的求解器类型及其参数设置如图 2-21 所示。

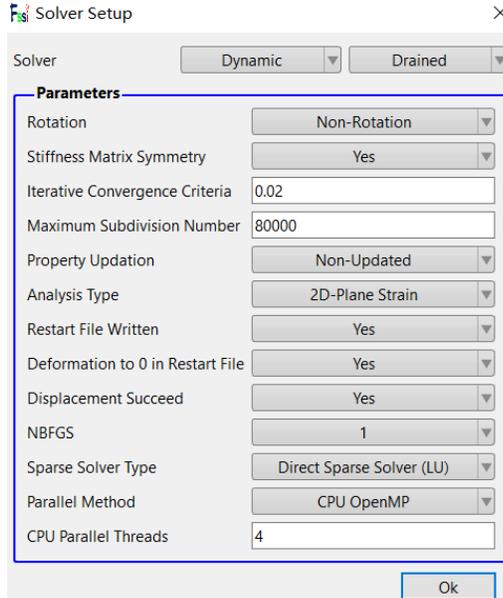


图 2-21 求解器类型及相关参数设置

2.1.7.4 设置时间步

点击 FssiCAS—Preprocess—Solver—Time Step，设置计算总时间为 50 s，时间步长为 0.1 s，每 5 s 更新一次坐标，每 5 s 更新一次刚度矩阵，每个时间步最大迭代次数为 20 步，不生成重启文件，每 0.1 s 输出一次结果文件，每 0.1 s 输出一次时程点上的结果， α ， β_1 ， β_2 保持默认值，具体设置步骤如图 2-22 所示。

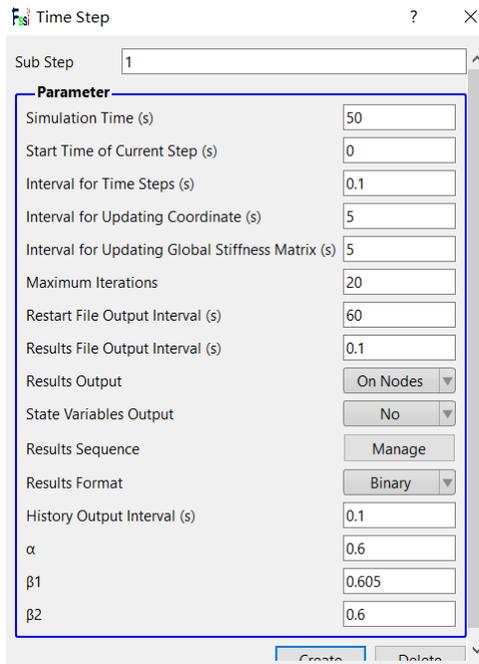


图 2-22 时间步相关参数设置界面

2.1.7.5 设置初始条件

点击工具栏，点击 FssiCAS—Preprocess—Initial State，设置初始条件，点击 ok，完成初始状态设置，如图 2-23 所示。

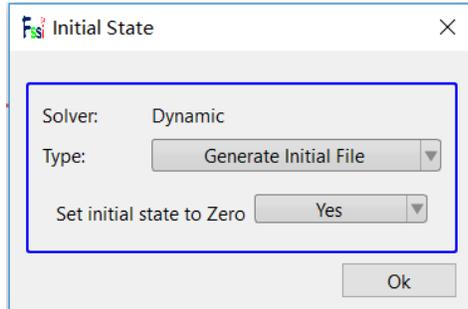


图 2-23 初始条件设置界面示意图

2.1.8 计算

点击 FssiCAS—Preprocess—Computation—FSSI-W，勾选 All Step，开始计算。界面显示图 2-24 红框内所示内容时，即表示计算完成。

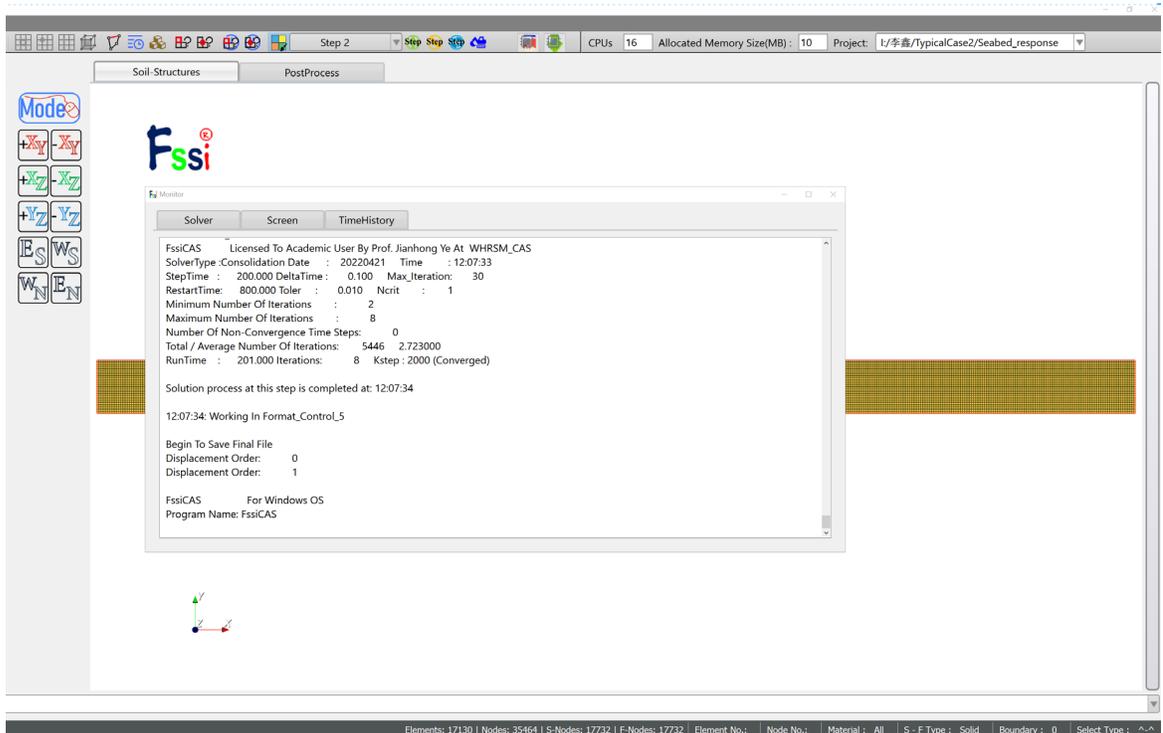


图 2-24 数值计算完成界面

注：勾选 All Step 才能连续计算两个时间步。多时间步计算时生成的结果文件在 Results—Soil_Model—Multiple 文件夹中。

2.2 FssiCAS 图形界面操作——后处理

2.2.1 加载文件

点击 FssiCAS—Postprocess—Open Results File—Load File，加载 Results—Soil_Model 路径下的 Multiple 文件夹，如图 2-25 所示。

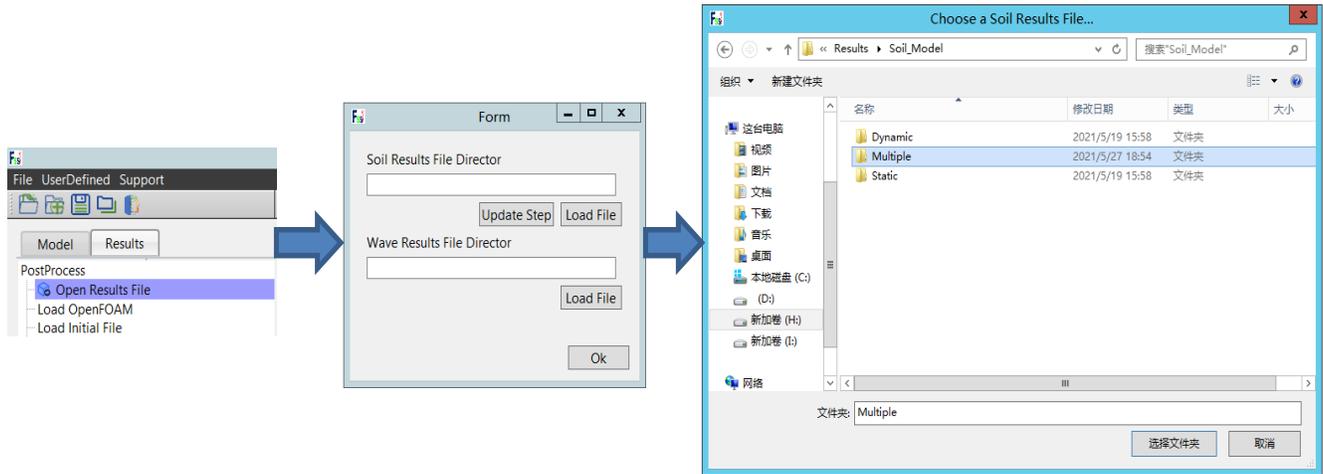


图 2-25 加载数值计算结果文件步骤图

注：计算没有完成也可以在不停止计算的同时进入后处理加载结果文件进行结果查看。

2.2.2 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 2-26 所示。

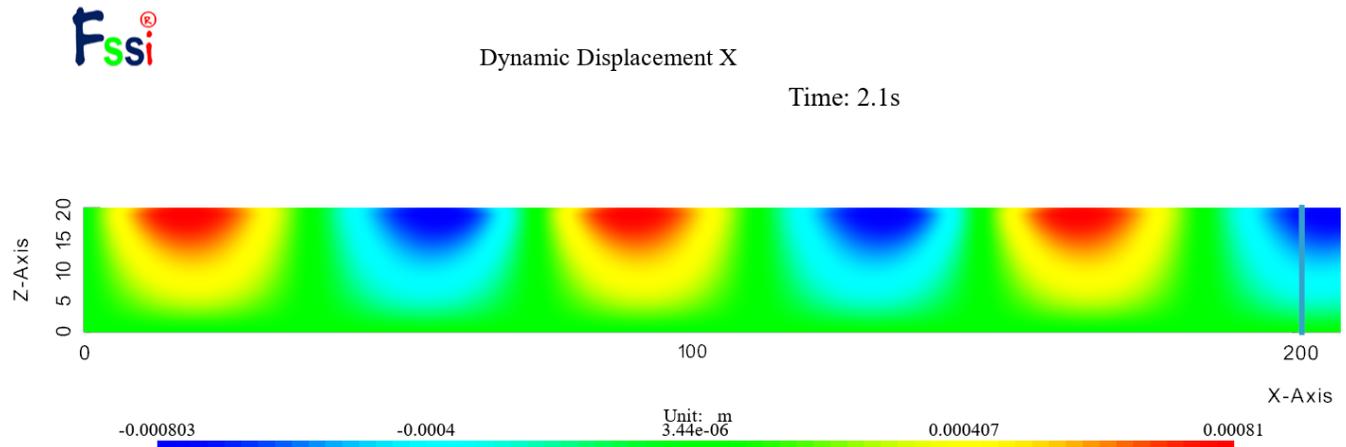


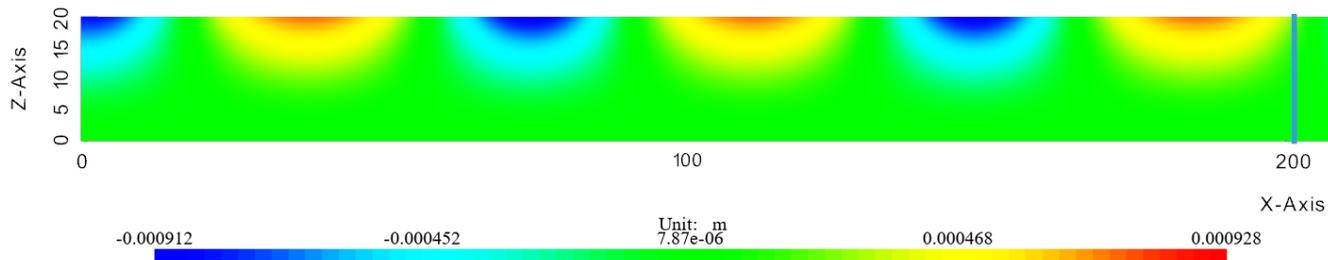
图 2-26 X 方向的位移分布图

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，如图 2-27 所示。



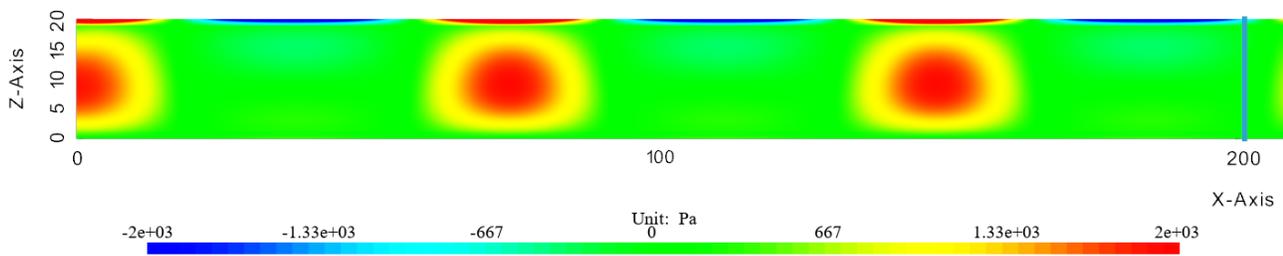
Dynamic Displacement Z

Time: 2.1s



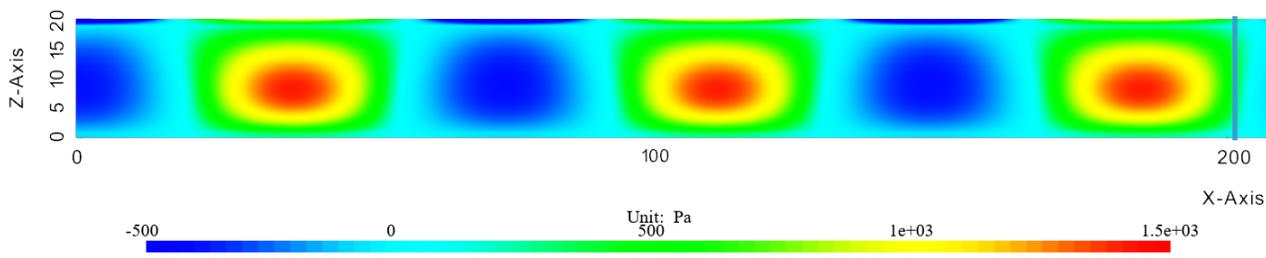
Dynamic Effective Stress X

Time: 2.1s



Dynamic Effective Stress Z

Time: 2.1s





Dynamic Pore Pressure

Time: 2.1s

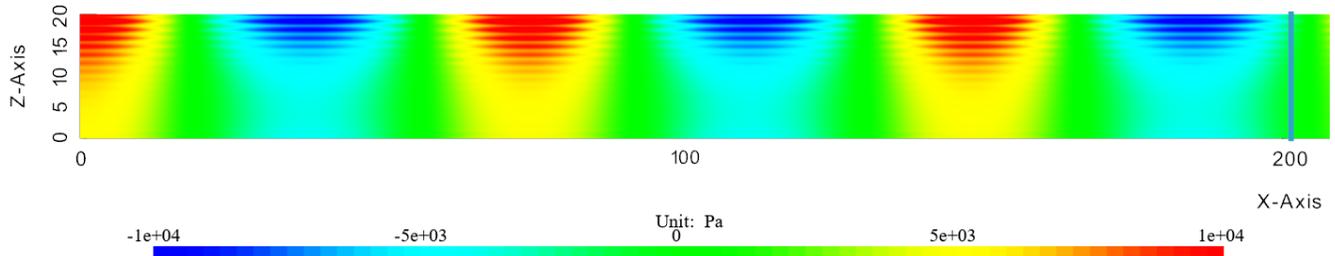


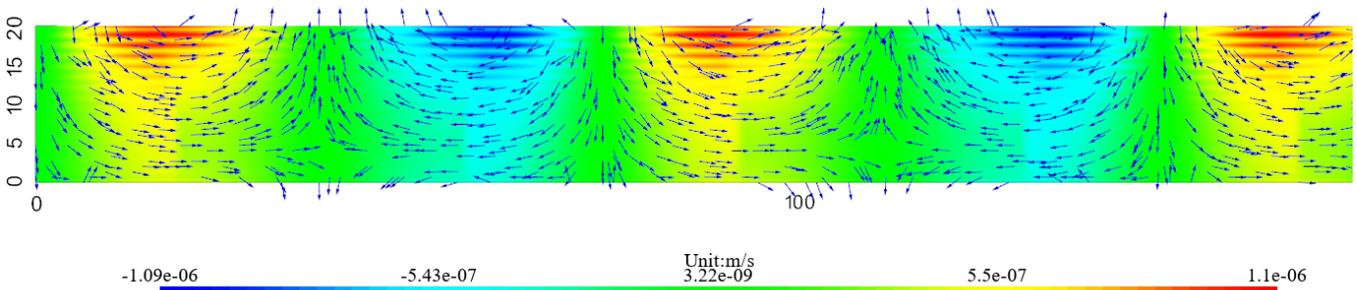
图 2-27 位移、应力、应变结果分布图

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 2-28 所示。



Seepage Velocity Vector

Time: 2.1s





Seepage Streamlines

Time: 2.1s

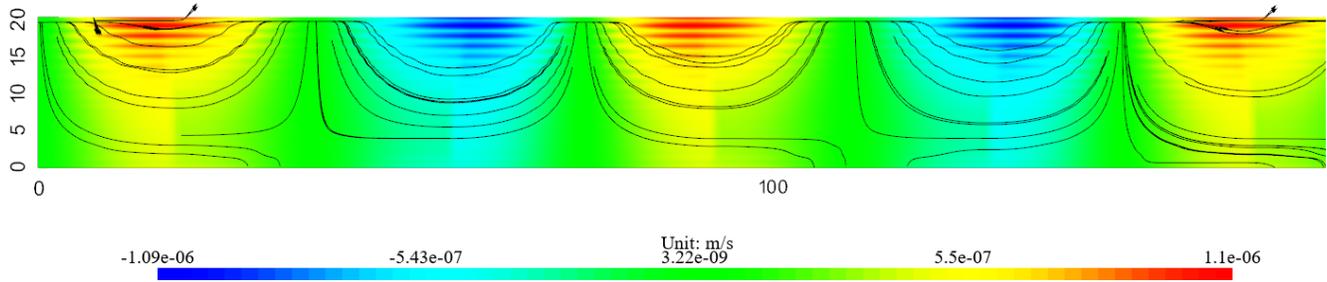


图 2-28 流速、流线图

