

浅埋隧道地震动力响应数值模拟分析

目录

| | |
|-----------------------------|----|
| 1 FssiCAS 图形界面操作——前处理..... | 2 |
| 1.1 导入网格和背景线..... | 2 |
| 1.2 添加边界条件..... | 4 |
| 1.3 水动力边界条件设置..... | 5 |
| 1.4 Step 1 时间步..... | 6 |
| 1.4.1 设置材料参数..... | 6 |
| 1.4.2 设置重力加速度场..... | 9 |
| 1.4.3 设置求解器类型..... | 10 |
| 1.4.4 设置时间步..... | 10 |
| 1.5 Step 2 时间步..... | 11 |
| 1.5.1 设置 Step 2 的材料参数..... | 12 |
| 1.5.2 设置 Step 2 重力加速度场..... | 13 |
| 1.5.3 设置 Step 2 的求解器..... | 13 |
| 1.5.4 设置 Step 2 的时间步..... | 13 |
| 1.6 Step 3 时间步..... | 13 |
| 1.6.1 设置 Step 3 的材料参数..... | 13 |
| 1.6.2 设置 Step 3 重力加速度场..... | 15 |
| 1.6.3 设置 Step 3 的求解器..... | 15 |
| 1.6.4 设置 Step 3 的时间步..... | 16 |
| 1.7 Step 4 时间步..... | 17 |
| 1.7.1 设置 Step 4 的材料参数..... | 17 |
| 1.7.2 设置 Step 4 重力加速度场..... | 19 |
| 1.7.3 加载自定义地震波..... | 19 |
| 1.7.4 设置 Step 4 的求解器..... | 20 |
| 1.7.5 设置 Step 4 的时间步..... | 21 |
| 1.8 设置初始条件..... | 22 |
| 1.9 计算..... | 22 |
| 2 FssiCAS 图形界面操作——后处理..... | 22 |
| 2.1 加载文件..... | 22 |
| 2.2 绘制分布图..... | 24 |

1 FssiCAS 图形界面操作——前处理

本案例用于研究模拟分析隧道位于浅层可液化土体工况下的地震动力响应及稳定性。

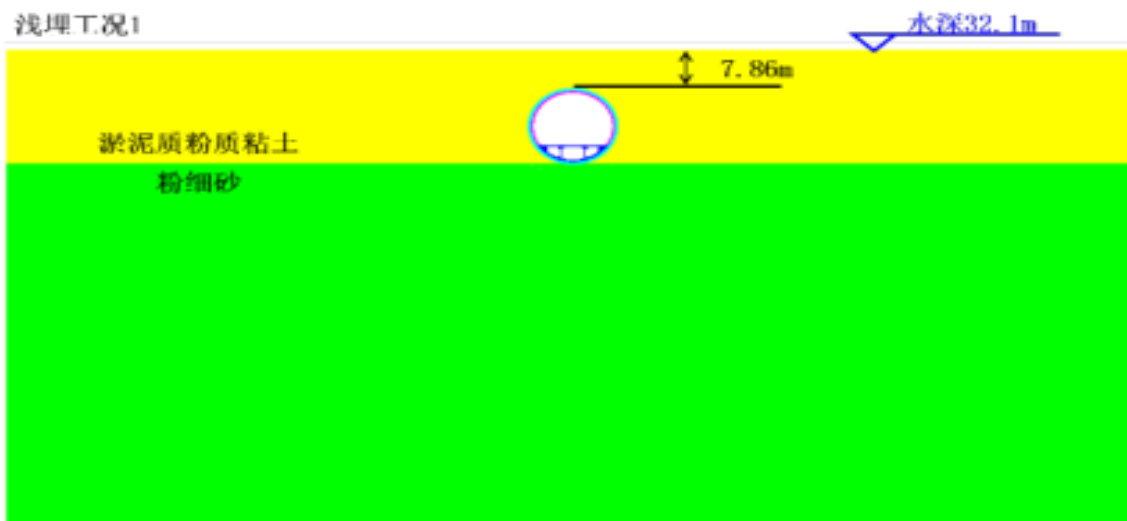


图 1-1 浅埋隧道工况示意图

数值模拟模型求解区域为 200m×100m，隧道直径 16m。认为隧道是不透水介质，因此仅设置固体网格，地基土为孔隙介质，设置固体、流体网格。隧道浅埋工况下，由于表层可液化地基土、结构物、地震动力的相互作用更为复杂，对计算精度要求更高，因此固体单元采用 8 节点四边形网格，流体单元采用 4 节点四边形网格。浅埋工况的单元数量 38328，节点数量 151783。隧道附近网格尺寸为 0.15m，远离隧道的地基土网格尺寸为 1.5m，期间网格尺寸渐变过渡。模型边界条件设置，在左右两侧设置周期性边界保证位移、孔压一致，以减弱边界处的地震波反射效应；底部水平竖直方向固定；顶部设置相应深度的静水水位水动力边界条件。网格划分情况如图所示。

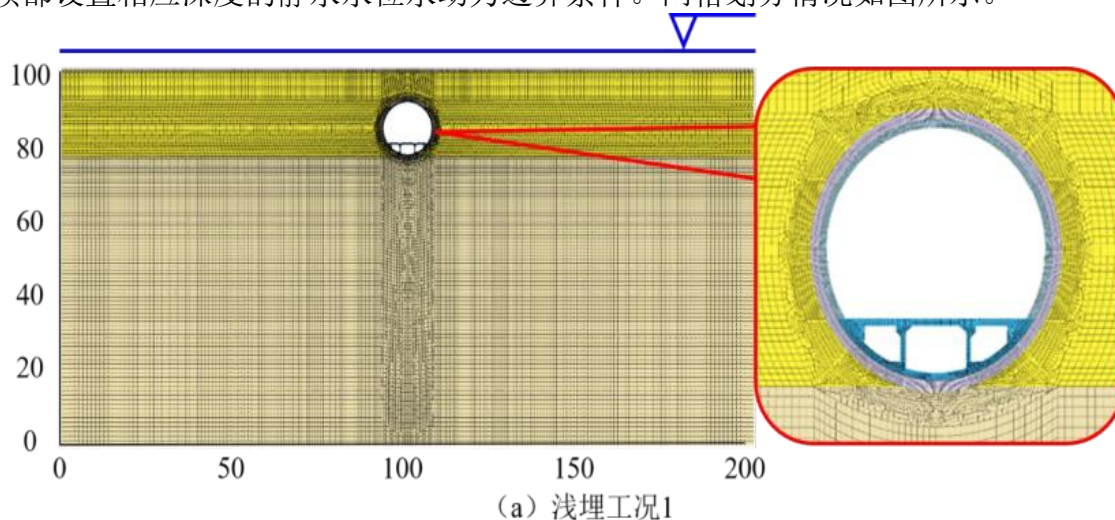


图 1-2 浅埋工况网格划分示意图

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 Gid 输出的网格文件，双击或点击打开 MESH_AF 文件。

在弹出的对话框中设置单元节点阶次，由于材料 3 4 5 隧道为不透水介质，因此仅设置固体网格，1 2 6 7 地基土为孔隙介质，设置固体、流体网格。如图 1-3 所示。由于本案例中固体节点采用四边形八节点单元，S.Node 默认为 8。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，如图 1-3 所示。

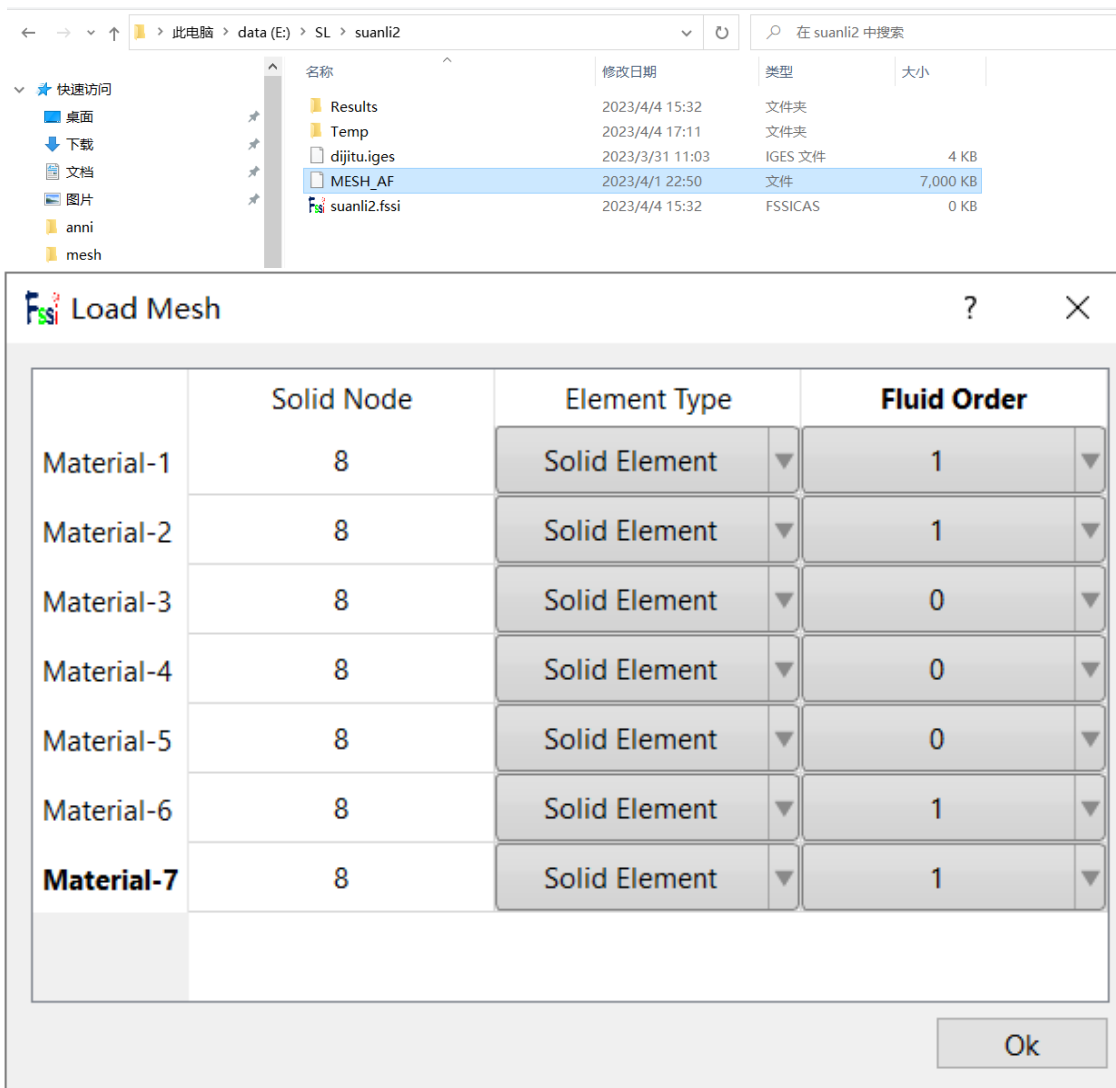


图 1-3 流体节点阶次界面

点击 Preprocess—Load Background—Outer Boundary，在弹出的文件选择对话框中选择*.iges 背景线文件，双击或点击打开按钮，如图 1-4 所示。

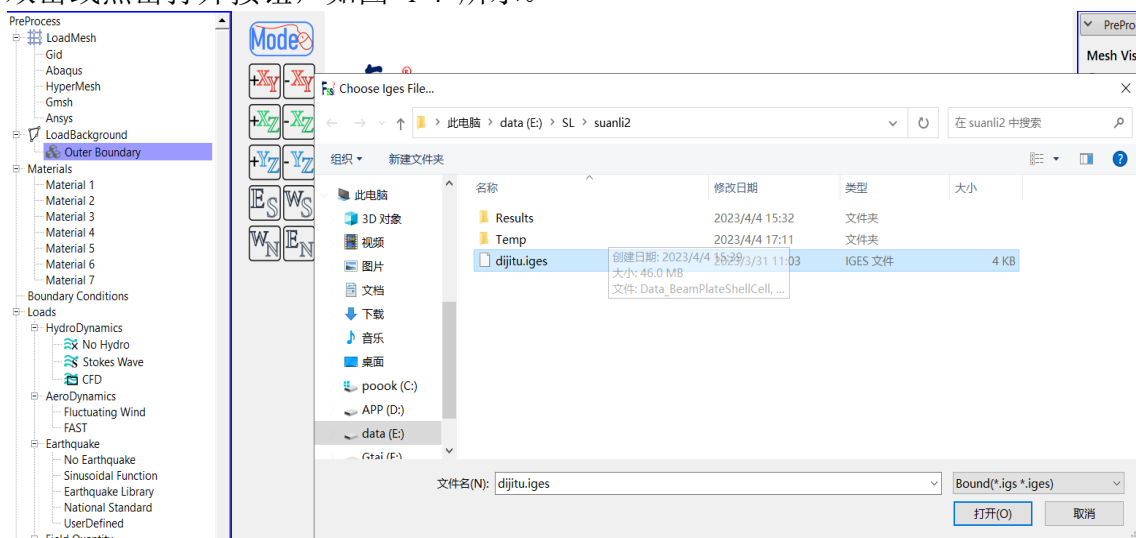


图 1-4 加载外背景线 (Outer Boundary) 的步骤示意图

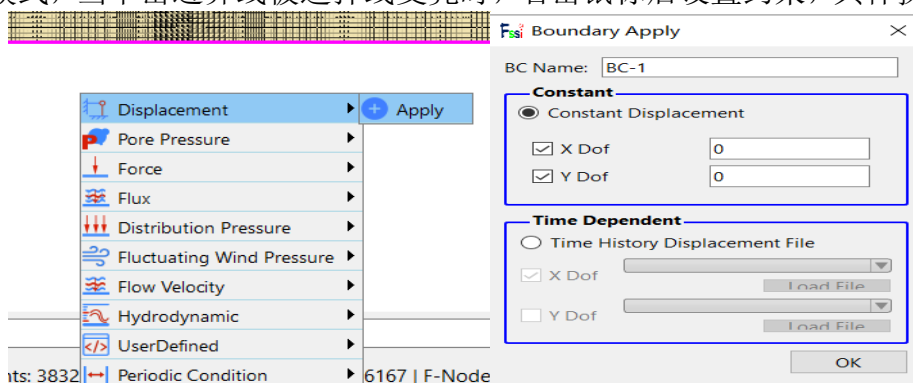


图 1-5 加载完成模型图

1.2 添加边界条件

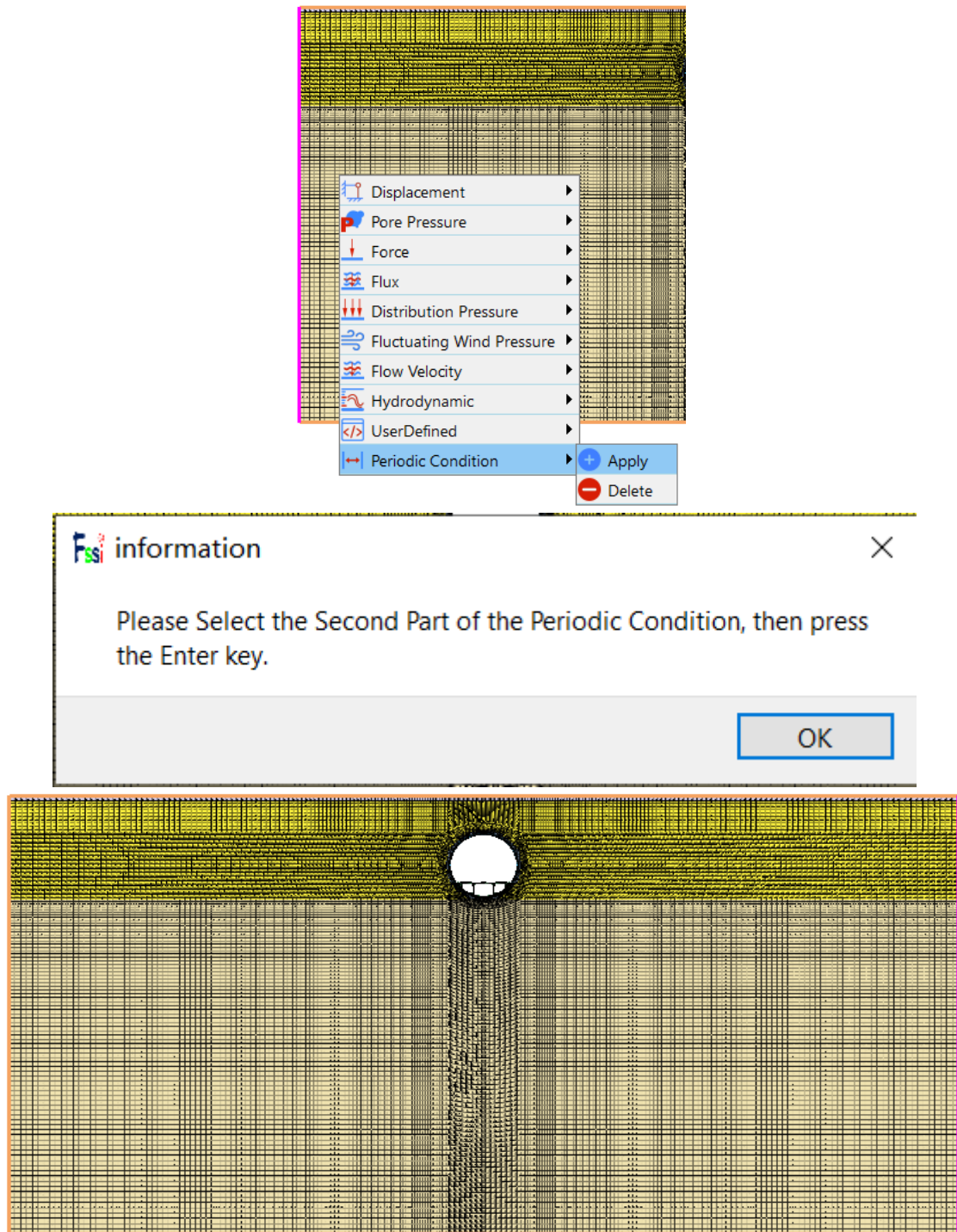
模型边界条件设置，在左右两侧设置周期性边界保证位移、孔压一致，以减弱边界处的地震波反射效应；底部水平垂直方向固定；顶部设置相应深度的静水水位水动力边界条件。

首先，依次点击左上角工具栏中图标  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 。



(底部水平垂直方向固定)

在左右两侧设置周期性边界保证位移、孔压一致，以减弱边界处的地震波反射效应，添加周期性边界的时候，首先选择一条边（左边），按下 Periodic Condition—Apply，跳出信息界面，点击 ok 之后，选择另一条边（右边），按下回车（Enter 键）即可。



(左右两侧设置周期性边界)

图 2-5 选择边界线添加边界条件

1.3 水动力边界条件设置

本案例顶部设置相应深度的静水水位水动力边界条件，如图 1-6 所示

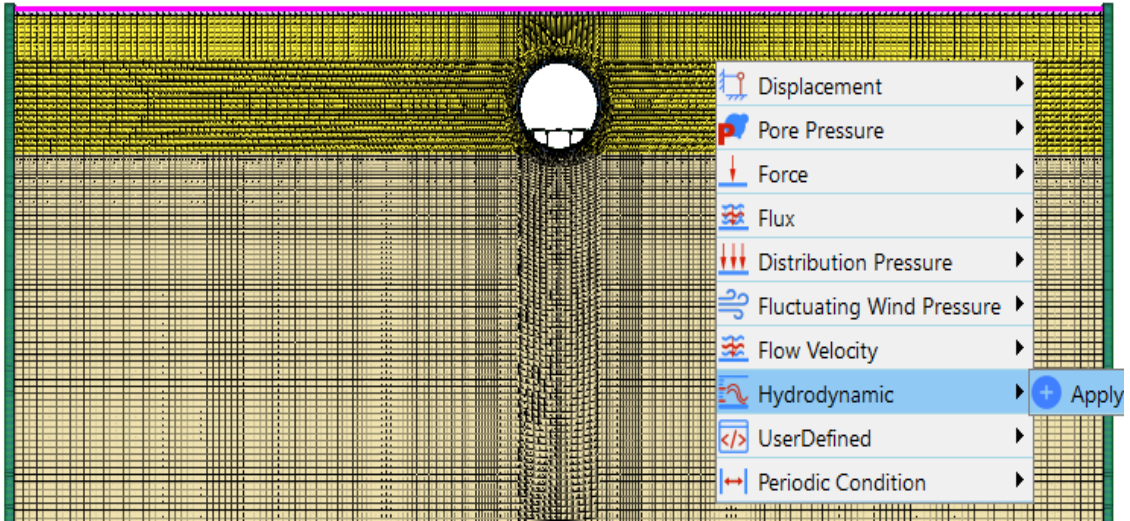


图 1-6 顶部设置水动力边界

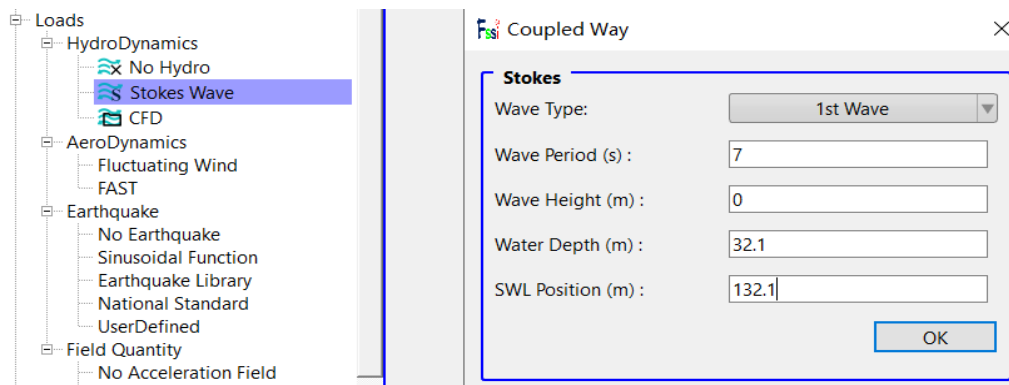


图 1-7 波的参数信息设置界面

1.4 Step 1 时间步

1.4.1 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 2 6 7 材料参数一样，3 5材料一样，各材料参数如下图 1-8。

Material Name

Constitutive Model:

Succeed

Initial Stress Tensile

Constitutive Model Parameters:

Young's Modulus (Pa):

Poisson's Ratio:

Dampmod Model Parameters:

Dampmod Model:

Young's Modulus (Pa):

Poisson's Ratio:

Damping Coefficient:

Permeability Ty $K/K_0 = 1$

Material Parameters:

Solid Particle Bulk Modulus (Pa): Saturation (0-1):

Granular Density (kg/m³): Fluid Density (kg/m³):

Void Ratio: Permeability x(m/s):

Permeability y(m/s):

Parameters under the Experimental Environment:

Gravity (m/s²):

(Material 1-粉细砂)

Material Name 淤泥质粉质粘土

Constitutive Model: Elastic

Succeed No Succeed

Initial Stress Tensile Yes

Constitutive Model Parameters:

Young's Modulus (Pa): 1e8

Poisson's Ratio: 0.3

Dampmod Model Parameters:

Dampmod Model: ELASTIC

Young's Modulus (Pa): 0

Poisson's Ratio: 0

Damping Coefficient: 0

Permeability Ty 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: 1.07 Permeability x(m/s): 1e-7

Permeability y(m/s): 1e-7

Parameters under the Experimental Environment:

Gravity (m/s²): 9.81

(Material 2\6\7-淤泥质粉质粘土 1\2\3)

注: Material 2\6\7 虽然材料参数一样,但是取名必须区分开, Material 2 对应淤泥质粉质粘土 1, Material 6 对应淤泥质粉质粘土 2, Material 7 对应淤泥质粉质粘土 3。

Material Name 隧道桥墩

Constitutive Model: Elastic

Succeed No Succeed

Initial Stress Tensile Yes

Constitutive Model Parameters:

Young's Modulus (Pa): 4e10

Poisson's Ratio: 0.2

Dampmod Model Parameters:

Dampmod Model: ELASTIC

Young's Modulus (Pa): 0

Poisson's Ratio: 0

Damping Coefficient: 0

Material Parameters:

Solid Particle Bulk Modulus (Pa): 1.0E+20

Granular Density (kg/m³): 2500

Void Ratio: 0.01

Parameters under the Experimental Environment:

Gravity (m/s²): 9.81

Material Name 隧道外壁

Constitutive Model: Elastic

Succeed No Succeed

Initial Stress Tensile Yes

Constitutive Model Parameters:

Young's Modulus (Pa): 4e10

Poisson's Ratio: 0.2

Dampmod Model Parameters:

Dampmod Model: ELASTIC

Young's Modulus (Pa): 0

Poisson's Ratio: 0

Damping Coefficient: 0

Material Parameters:

Solid Particle Bulk Modulus (Pa): 1.0E+20

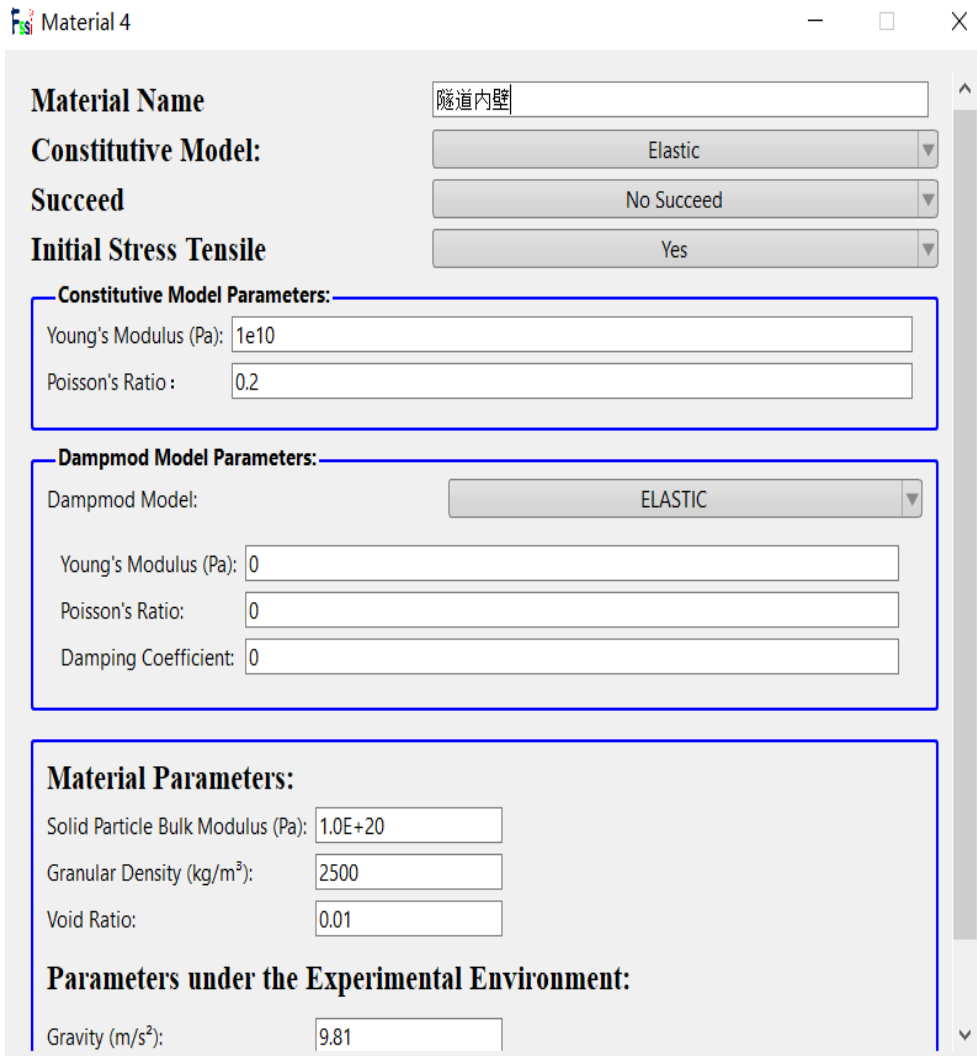
Granular Density (kg/m³): 2500

Void Ratio: 0.01

Parameters under the Experimental Environment:

Gravity (m/s²): 9.81

(Material 3\5-隧道桥墩\隧道外壁)



(Material 4-隧道内壁)

图 1-8 材料参数设置

1.4.2 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/s^2 ，Y 方向为 -9.806 m/s^2 ，如图 1-9 所示。Step 2、Step 3 和 Step 4 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。

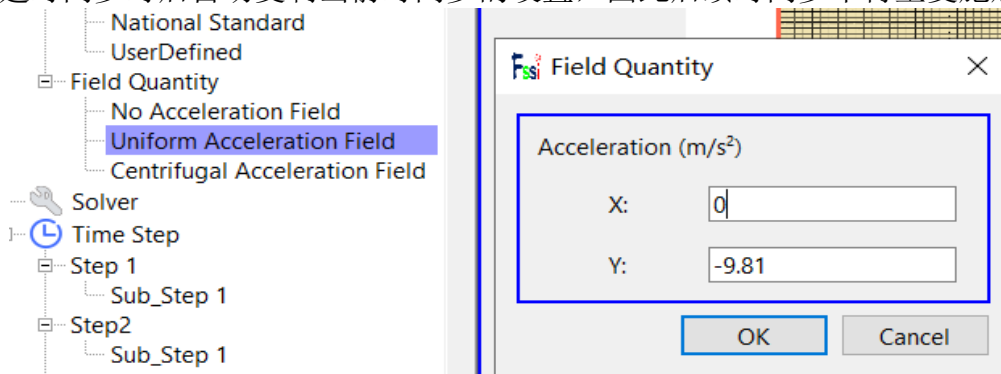


图 1-9 重力加速度设置

1.4.3 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 1-10 所示。

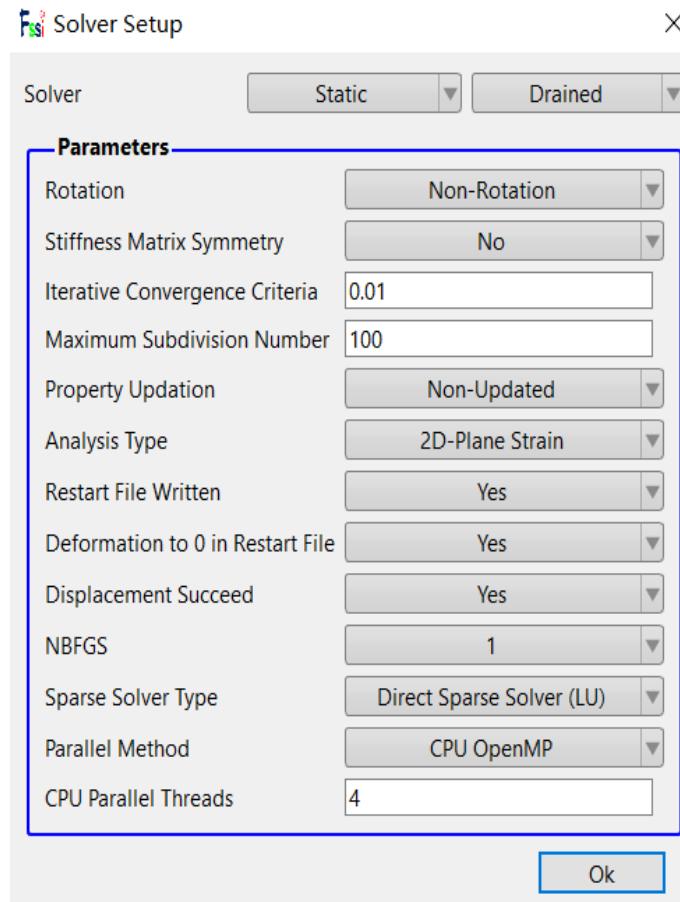


图 1-10 求解器类型及相关参数设置界面

1.4.4 设置时间步

通过点击 FssiCAS—Time Step—Step1—Sub_Step1 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 0.5 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 1.1 s（不更新刚度矩阵）；Maximum Iterations 为每个时间步最大迭代次数，设置为 10 步；Restart File Step (s) 为输出重启文件的时间，设置为 1.1 s（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 0.5 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 1.1 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 1-11 所示。

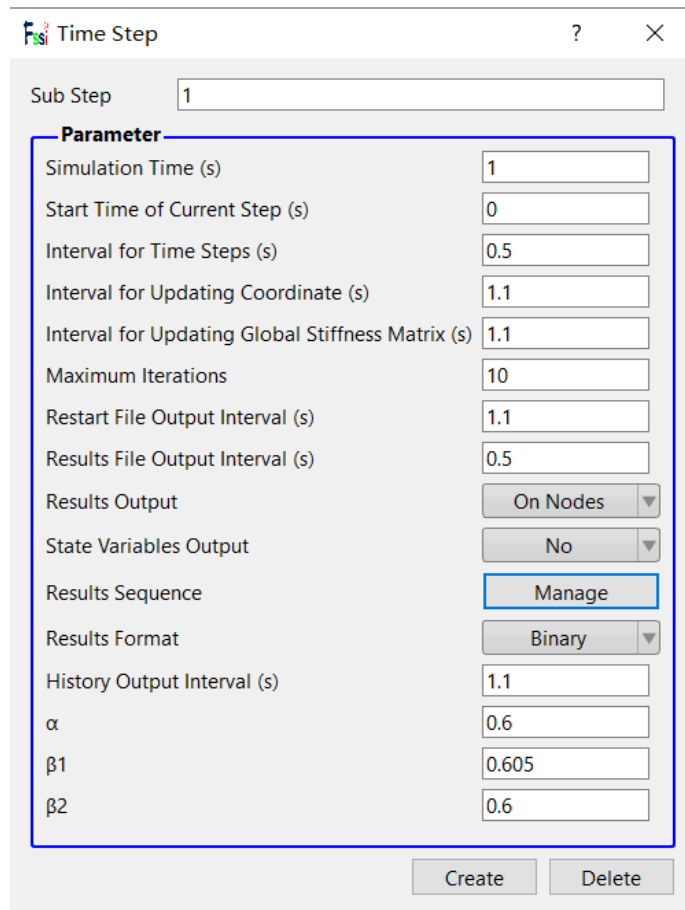


图 1-11 Time Step1 相关参数设置界面

参数设置完成点击 Initial State—Ok

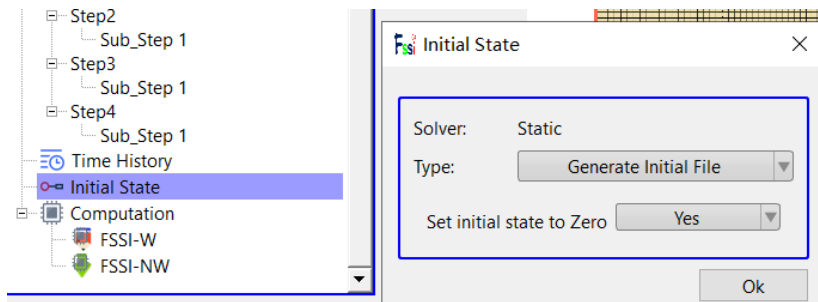




图 1-12 设置初值

1.5 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（General Elastic），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。

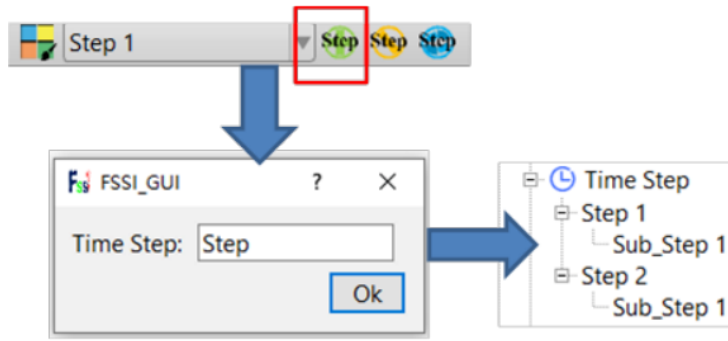
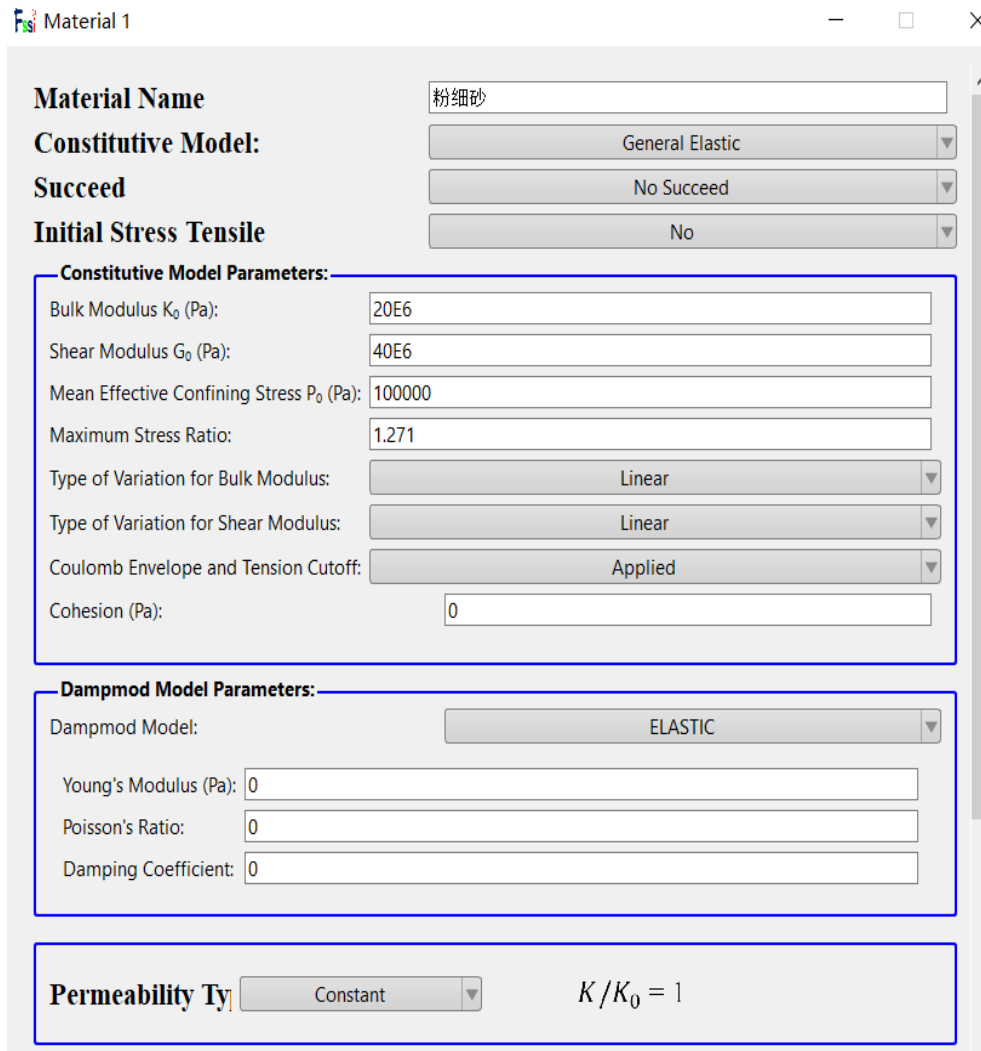


图 1-12 增加时间步的步骤示意图

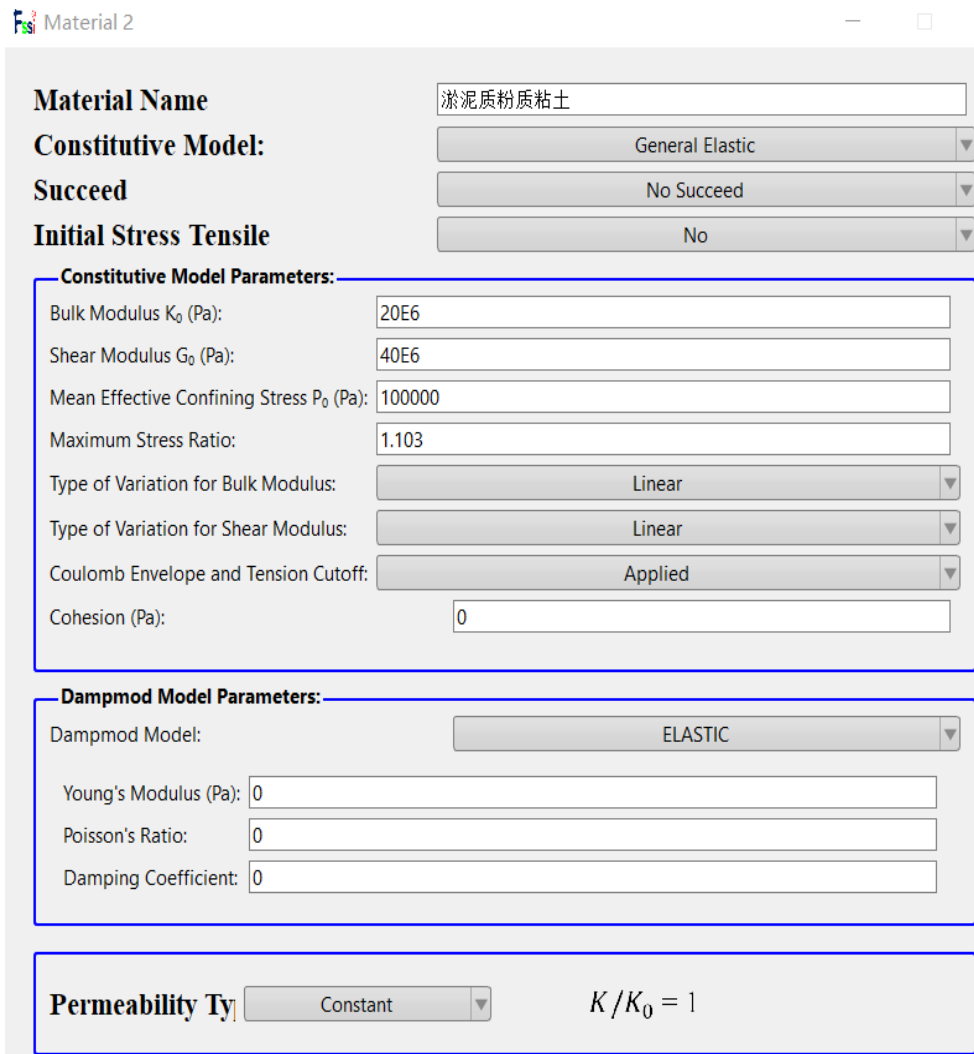
1.5.1 设置 Step 2 的材料参数

通过点击 FssiCAS—Preprocess—Material—Material 1/ Material 2/Material 3等，用户可以自行更改材料名称，设置材料参数。Step 2 的各材料参数设置如图 1-13 所示。

以下所有 Step 2 3 4 步的材料参数中 Material Parameters 部分自动继承 Step 1 设置，故后续 Material Parameters 部分不附截图。



(Material 1 - 粉细砂)



(Material 2\6\7 - 淤泥质粉质粘土)
图 1-13 Step 2 材料参数设置

Material 3 4 5 均不发生变化，继承 Step 1 的材料参数。

1.5.2 设置 Step 2 重力加速度场

重力场在 Step 1 中已经添加，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。

1.5.3 设置 Step 2 的求解器

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跟 Step 1 设置一致。

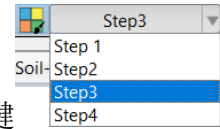
1.5.4 设置 Step 2 的时间步

Step 2 的时间步设置与 Step 1 设置一致。

1.6 Step 3 时间步

1.6.1 设置 Step 3 的材料参数

Step 3 阶段，求解器选择 Dynamic，弹性海床选择可以更好地描述砂的动态力学行为的



PZIII 本构模型。Step 2 设置完毕后，点击  按钮添加 Step 3，点击按钮  选择 Step 3 进入 Step 3 设置界面。设置材料参数。Step 3 的各材料参数设置如图 1-14 所示。

Material 1

Material Name 粉细砂

Constitutive Model: Pastor-Zienkiewicz Mark III

Succeed No Succeed

Initial Stress Tensile No

Constitutive Model Parameters:

| | | | |
|-----------------|--------|-----------------|---------|
| M_g : | 1.44 | M_f : | 1.271 |
| α_g : | 0.485 | α_f : | 0.485 |
| K_{evo} (Pa): | 5.48e6 | G_{eso} (Pa): | 10.95e6 |
| β_0 : | 4.2 | β_1 : | 0.2 |
| H_0 : | 41.06 | H_{u_0} (Pa): | 4e7 |
| γ_u : | 2 | γ_{DM} : | 4 |
| P_0' (Pa): | 100000 | | |

Variation Type: Bulk and Shear Modulus Vary Linearly

Dampmod Model Parameters:

Dampmod Model: ELASTIC

Young's Modulus (Pa): 0

Poisson's Ratio: 0

Damping Coefficient: 0

Permeability Type Constant $K/K_0 = 1$

(Material 1 - 粉细砂)

| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|---------|
| Material Name | 淤泥质粉质粘土 | | |
| Constitutive Model: | Pastor-Zienkiewicz Mark III | | |
| Succeed | No Succeed | | |
| Initial Stress Tensile | No | | |
| Constitutive Model Parameters: | | | |
| M_g : | 1.14 | M_f : | 1.103 |
| α_g : | 0.276 | α_f : | 0.276 |
| K_{evo} (Pa): | 5.5e6 | G_{eso} (Pa): | 10.13e6 |
| β_0 : | 4.2 | β_1 : | 0.2 |
| H_0 : | 29.93 | H_{u_0} (Pa): | 4e7 |
| γ_u : | 2 | γ_{DM} : | 4 |
| P_0^* (Pa): | 100000 | | |
| Variation Type: | Bulk and Shear Modulus are Constant | | |
| Dampmod Model Parameters: | | | |
| Dampmod Model: | ELASTIC | | |
| Young's Modulus (Pa): | 0 | | |
| Poisson's Ratio: | 0 | | |
| Damping Coefficient: | 0 | | |
| Permeability Ty | Constant | $K/K_0 = 1$ | |

(Material 2\6\7 - 淤泥质粉质粘土1\2\3)

图 1-14 Step 3 材料参数设置

Material 3 4 5 均不发生变化，继承 Step 1 的材料参数。

1.6.2 设置 Step 3 重力加速度场

重力场在 Step 1 中已经添加，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。

1.6.3 设置 Step 3 的求解器

点击 FssiCAS—Preprocess—Solver—Solver Type，在弹出对话框中设置求解器类型，Step 3 阶段，求解器选择 Dynamic，如下图 1-15。

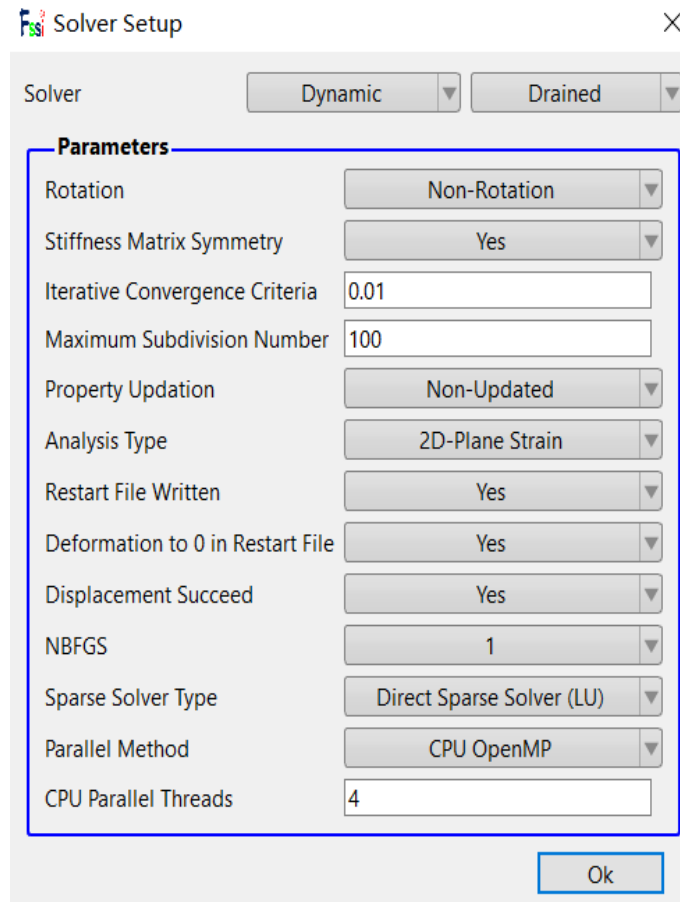


图 1-15 Step 3 求解器设置

1.6.4 设置 Step 3 的时间步

Step 3 的时间步设置如下图所示。

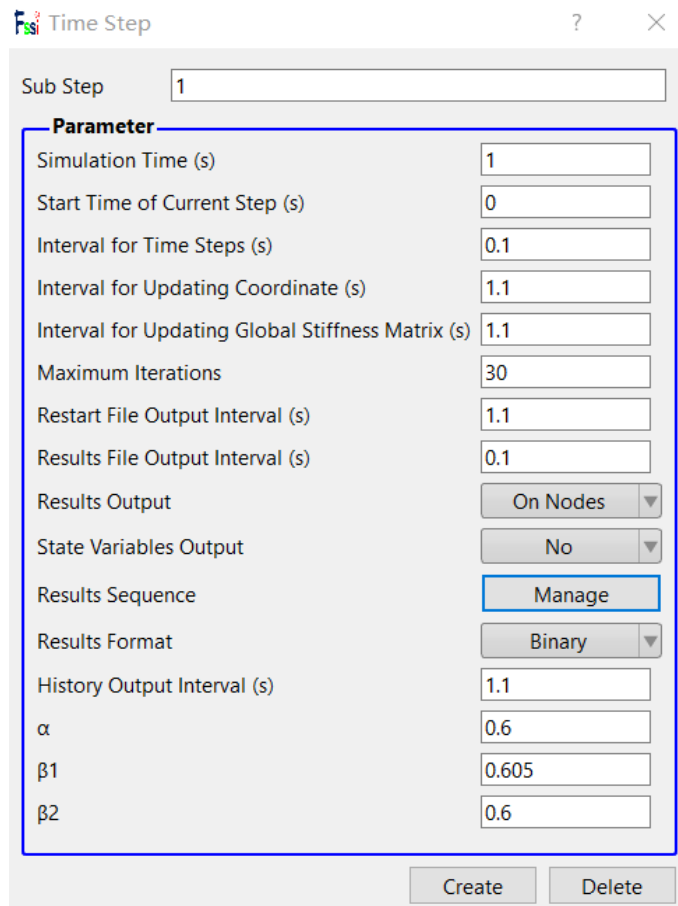


图 1-16 Time Step3 相关参数设置界面

1.7 Step 4 时间步

1.7.1 设置 Step 4 的材料参数

Step 4 阶段，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 3 设置完毕后，点击  按钮添加 Step 3，点击按钮  选择 Step 4 进入 Step 4 设置界面。设置材料参数。Step 4 的各材料参数设置如图 1-17 所示。

以下所有 Step 4 材料参数中 Material Parameters 部分和 Step 1 一致，没有改变，故不附截图。

Material Name

Constitutive Model:

Succeed

Initial Stress Tensile

Constitutive Model Parameters:

| | | | |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|
| M_g : | <input type="text" value="1.44"/> | M_f : | <input type="text" value="1.271"/> |
| α_g : | <input type="text" value="0.485"/> | α_f : | <input type="text" value="0.485"/> |
| K_{evc} (Pa): | <input type="text" value="5.48e6"/> | G_{esc} (Pa): | <input type="text" value="10.95e6"/> |
| β_0 : | <input type="text" value="4.2"/> | β_1 : | <input type="text" value="0.2"/> |
| H_0 : | <input type="text" value="41.06"/> | H_{u_0} (Pa): | <input type="text" value="4e7"/> |
| γ_u : | <input type="text" value="2"/> | γ_{DM} : | <input type="text" value="4"/> |
| P_0' (Pa): | <input type="text" value="100000"/> | | |

Variation Type:

Dampmod Model Parameters:

Dampmod Model:

Young's Modulus (Pa):

Poisson's Ratio:

Damping Coefficient:

Permeability Ty: $K/K_0 = 1$

(Material 1 – 粉细砂)

Material 2

Material Name 淤泥质粉质粘土

Constitutive Model: Pastor-Zienkiewicz Mark III

Succeed No Succeed

Initial Stress Tensile No

Constitutive Model Parameters:

| | | | |
|-----------------|--------|-----------------|---------|
| M_g : | 1.14 | M_f : | 1.103 |
| α_g : | 0.276 | α_f : | 0.276 |
| K_{evo} (Pa): | 5.5e6 | G_{esc} (Pa): | 10.13e6 |
| β_0 : | 4.2 | β_1 : | 0.2 |
| H_0 : | 29.93 | H_{U_0} (Pa): | 4e7 |
| γ_u : | 2 | γ_{DM} : | 4 |
| P_0^* (Pa): | 100000 | | |

Variation Type: Bulk and Shear Modulus are Constant

Dampmod Model Parameters:

Dampmod Model: ELASTIC

Young's Modulus (Pa): 4e7

Poisson's Ratio: 0.31

Damping Coefficient: 0.004

Permeability Ty Constant $K/K_0 = 1$

(Material 2\6\7 - 淤泥质粉质粘土 1\2\3)

图 1-17 Step 4 材料参数设置

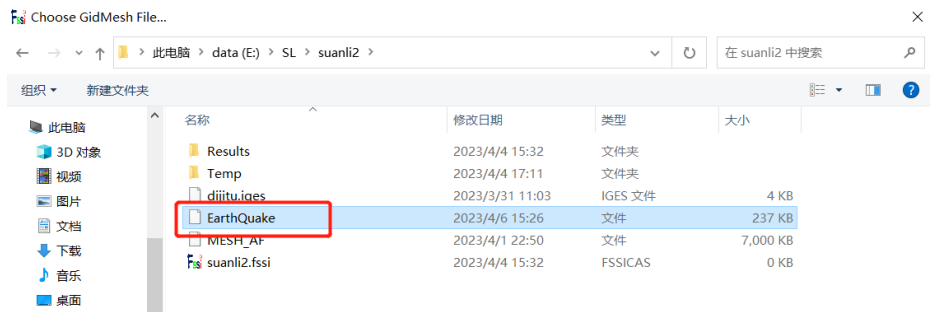
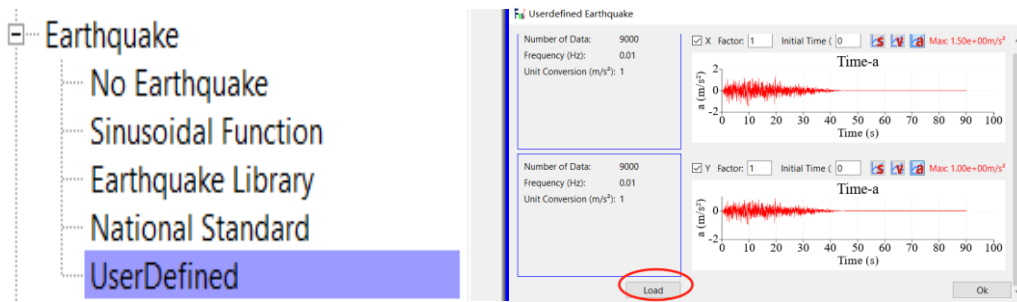
Material 3 4 5 均不发生变化，继承 Step 1 的材料参数。

1.7.2 设置 Step 4 重力加速度场

重力场在 Step 1 中已经添加，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。

1.7.3 加载自定义地震波

点击Preprocess—Earthquake—UserDefined，用户可以加载用户自定义地震波，在显示的对话框中加载地震波文件，如图 1-18 所示。加载地震波后，在界面中显示的地震波如图 1-18 所示。点击UserDefined，点击左下角的 Load，导入地震波文件。



加载成功后，如下，勾选 X Y Factor。点击 Ok

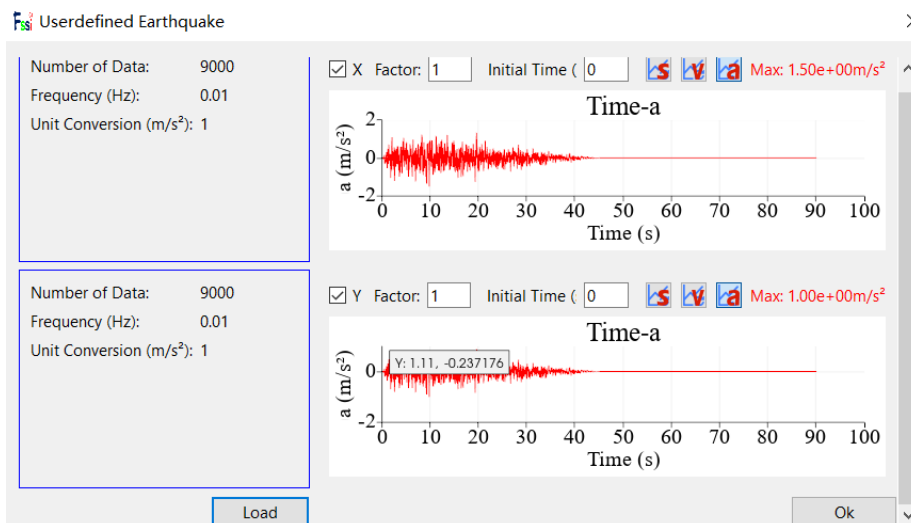


图 1-18 加载自定义地震波流程

1.7.4 设置 Step 4 的求解器

点击 FssiCAS—Preprocess—Solver—Solver Type，在弹出对话框中设置求解器类型，Step 4 阶段，求解器选择 Dynamic，如下图 1-19。

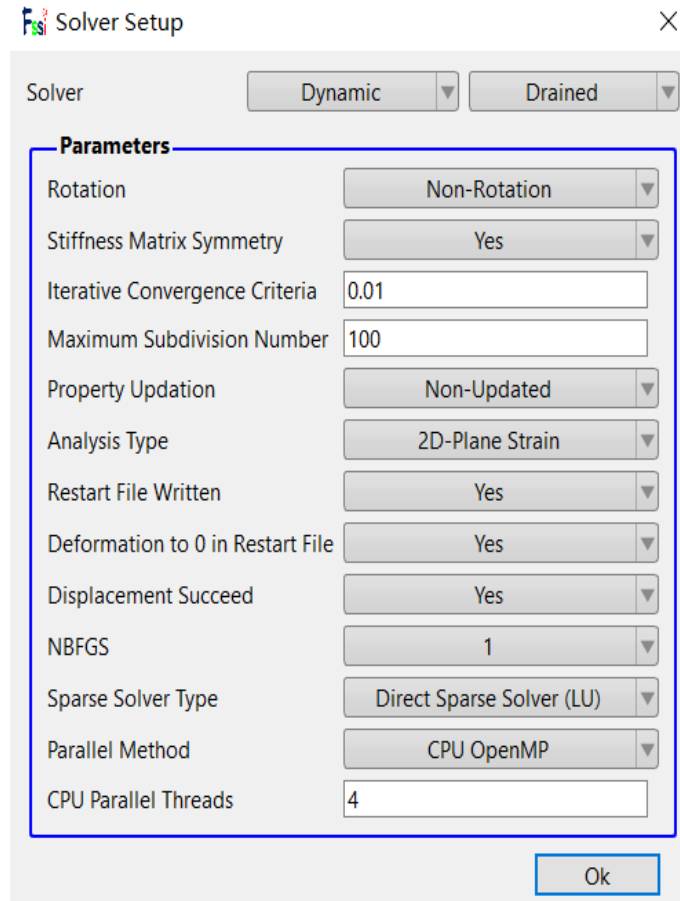


图 1-19 Step 4 求解器设置

1.7.5 设置 Step 4 的时间步

通过点击 FssiCAS—Time Step—Step4—Sub_Step1 设置时间步。

Simulation Time (s)为计算总时间，设置为 90 s；Interval for Time Steps (s)为时间步长，设置为 0.01 s；Interval for Updating Coordinate (s)为坐标更新时间，设置为 91 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 91s（不更新刚度矩阵）；Maximum Iterations 为每个时间步最大迭代次数，设置为 30 步；Restart File Step (s)为输出重启文件的时间，设置为 91s（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 0.01 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 91 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 1-20 所示

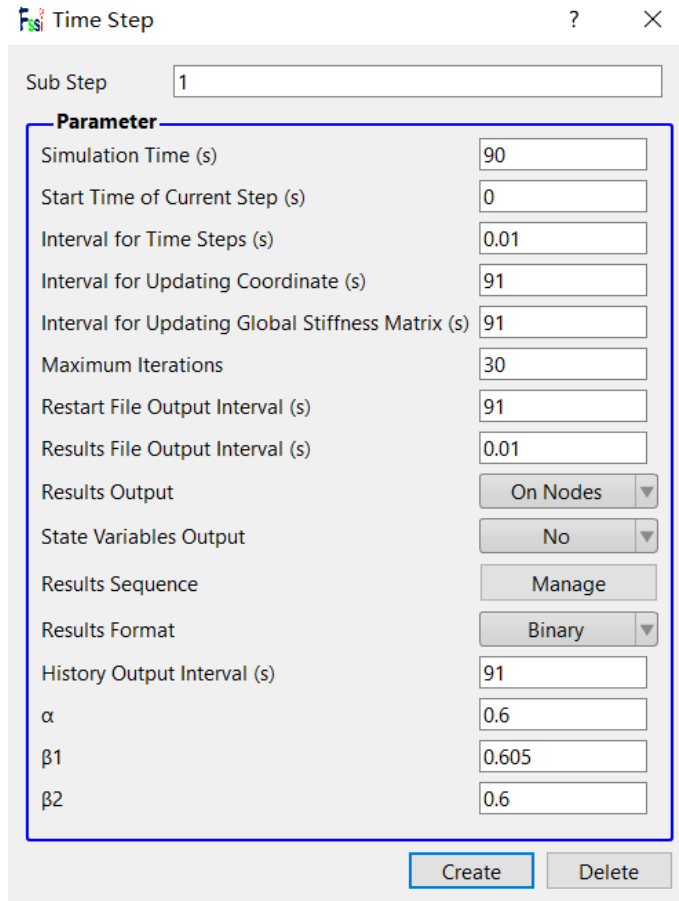


图 1-20 Time Step 4 相关参数设置界面

1.8 设置初始条件

点击工具栏，分别在 Step 1、Step 2、Step 3 和 Step 4 下点击 FssiCAS—Preprocess—Initial State，设置初始条件，点击 ok，完成初始状态设置。

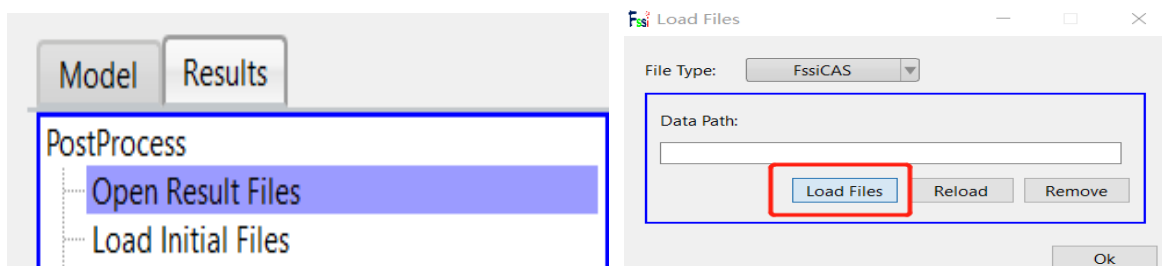
1.9 计算

点击 FssiCAS—Preprocess—Computation—FSSI-W，勾选 All Step，开始计算。

2 FssiCAS 图形界面操作——后处理

2.1 加载文件

案例计算完成之后，点击 FssiCAS—Postprocess—Open Results File—Load File，加载 Results—Soil_Model 路径下的 Multiple 结果文件夹，如下图 2-1 所示。



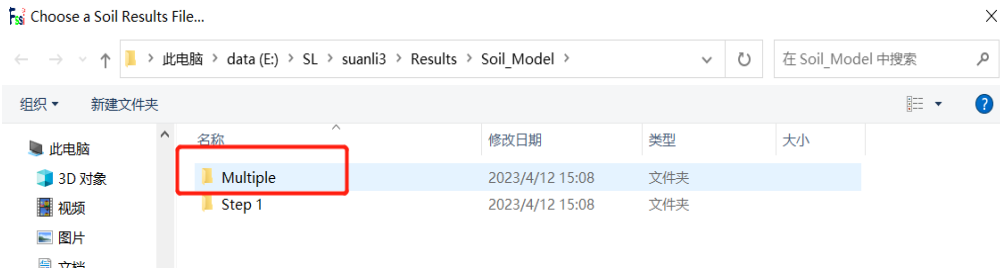
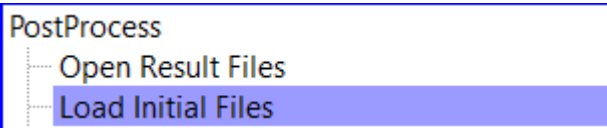
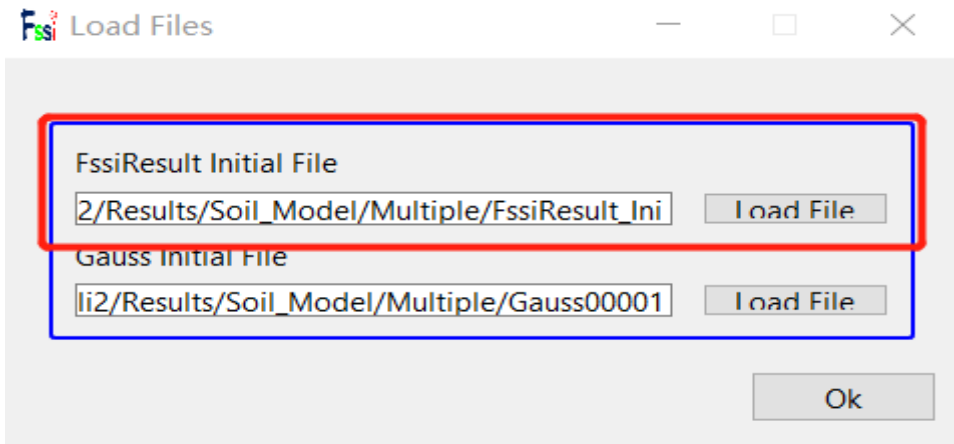


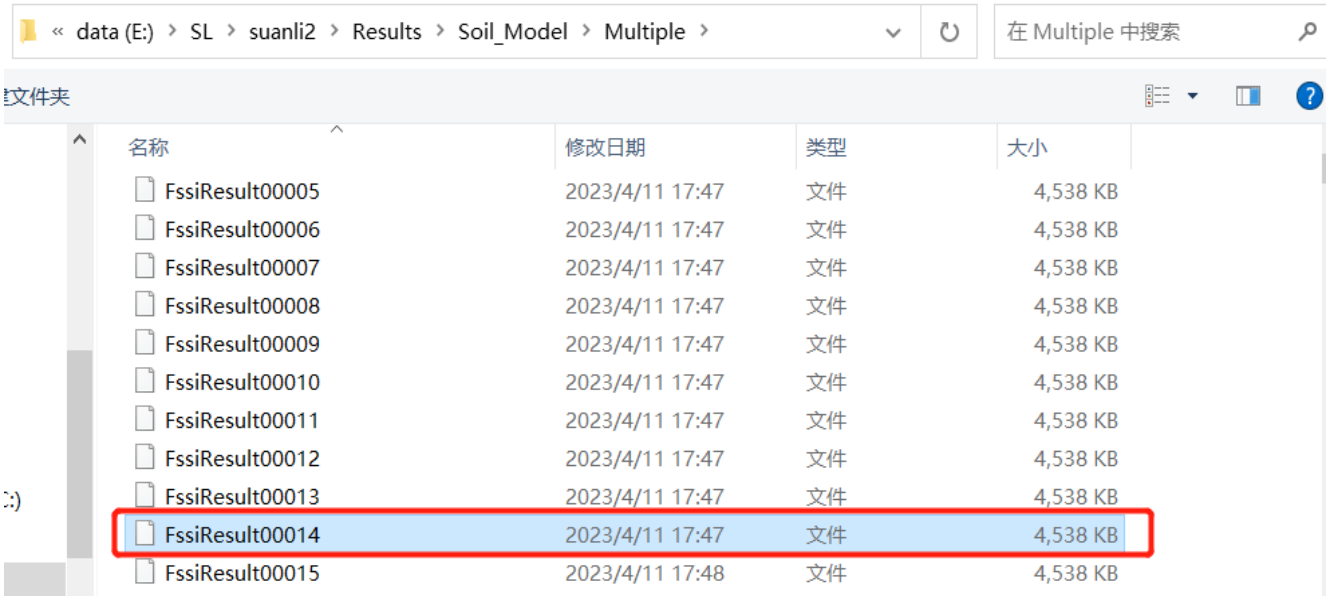
图 2-1 加载数值计算结果文件步骤图



注：加载完成后，需要在 **Load Initial Files** 更改 FssiResult Initial File，手动选择计算完成的文件作为初始载入文件，如图红框部分，点击 Load File，选择



第14步计算文件，即 Step 3 最后一步计算文件作为初始载入文件，如图。



为什么选择第14步计算结果文件作为初始载入文件？

答：因为前3步都是设定初始状态，Step 1和Step 2 的计算总时长为1s，每步时长0.5s，所以是2步，Step 3 每步时长是0.1，所以是10步，随即选择第14步计算结果文件作为初始载入文件（软件会默认选择FssiResult00001 第1步，所以需要手动更改）。

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。

由于计算时没有开位移更新，所以在后处理 Postprocess 右侧的 Display Option 中的 Deformation Scale Factor 调整显示位移变化（左图）。在 Scalar Bar 中调整显示范围变化（右图），点击 Apply。

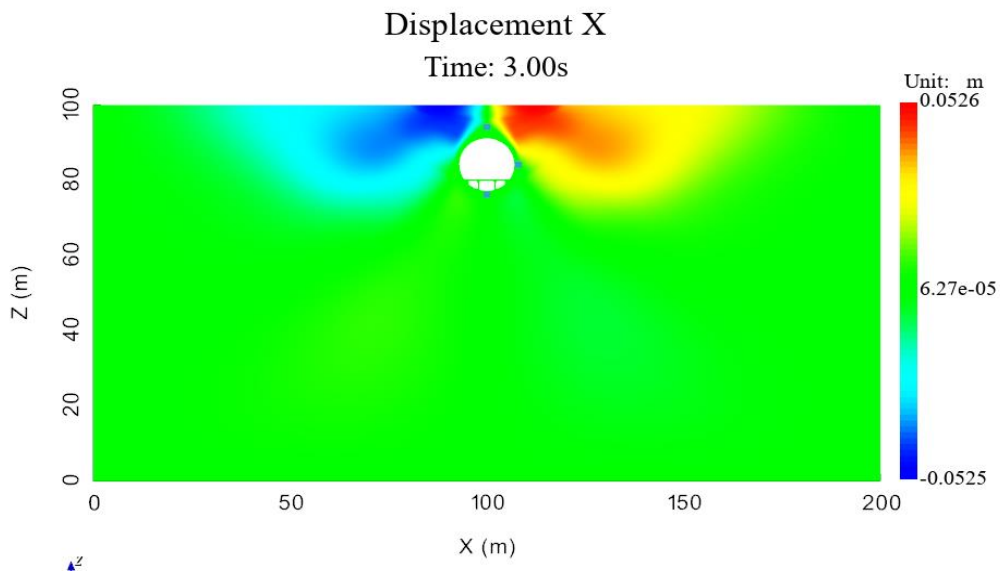
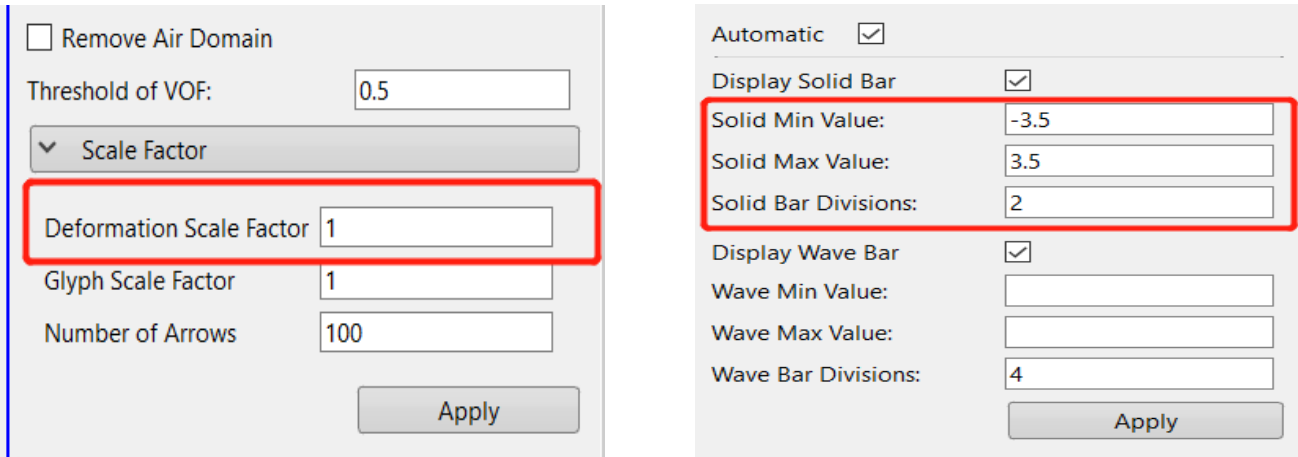


图 2-2a X方向的位移分布图（3s）

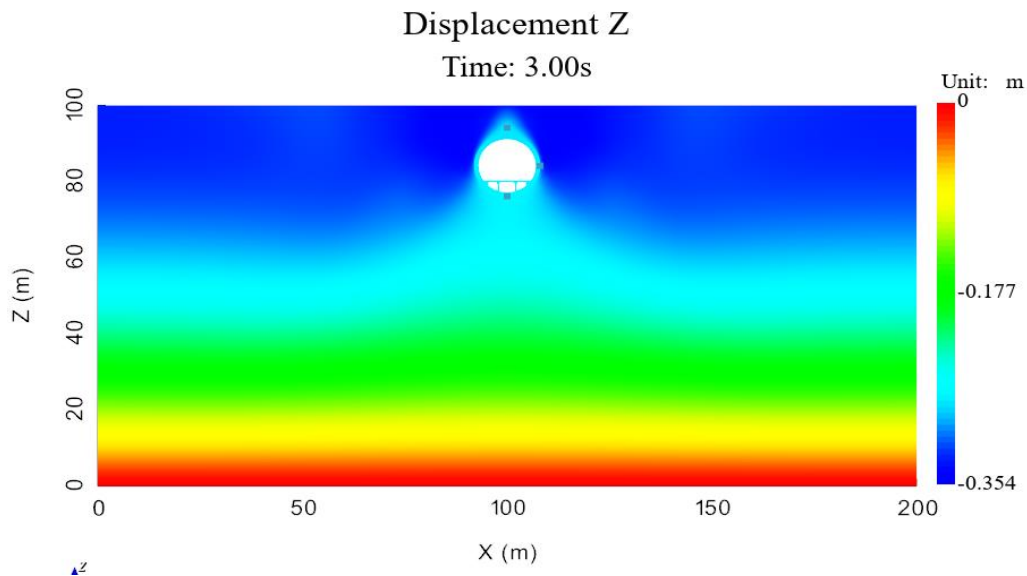


图 2-2b Z方向的位移分布图（3s）

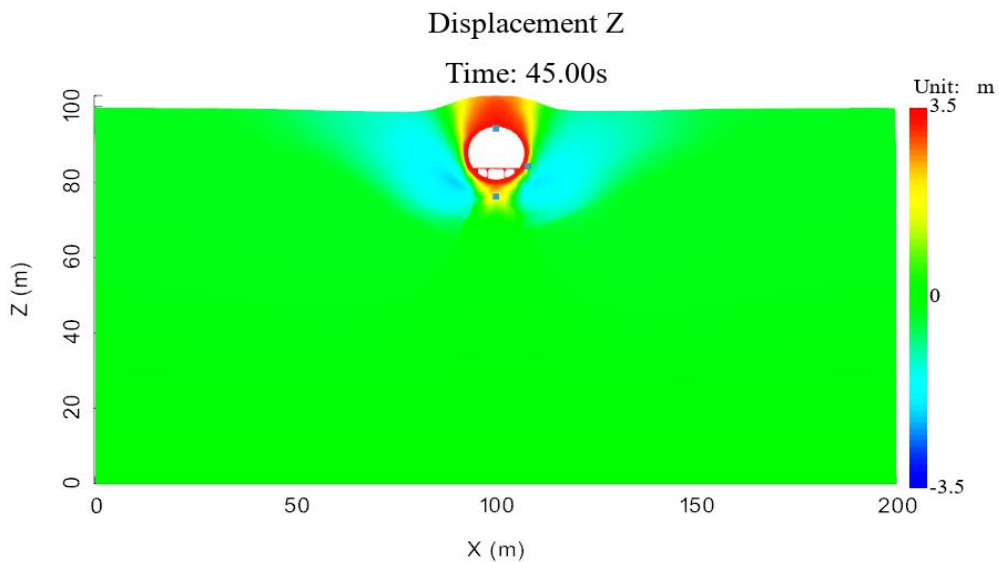


图 2-2c Z方向的位移分布图（45s）

查看地震作用后的液化区域分布图，点击 FssiCAS—Postprocess—Liquefaction Potential—Stress Based，选择工具栏中的 Stress Based Lp-3D。在右边 Scalar Bar 调一下范围大小。由于计算时没有开位移更新，所以在后处理 Postprocess 右侧的 Display Option 中的 Deformation Scale Factor 调整显示位移变化（左图）。在 Scalar Bar 中调整显示范围变化（右图），点击 Apply。

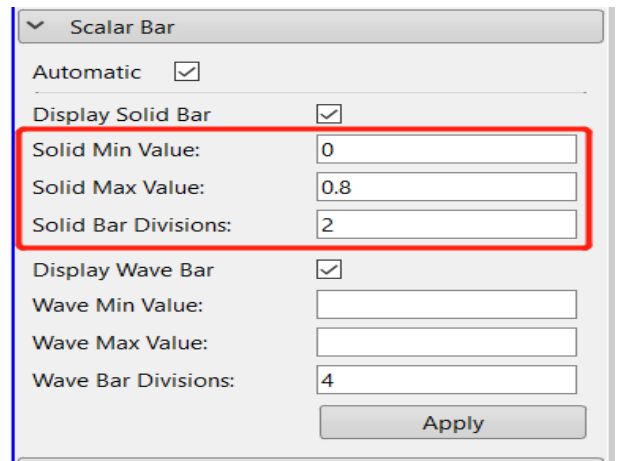
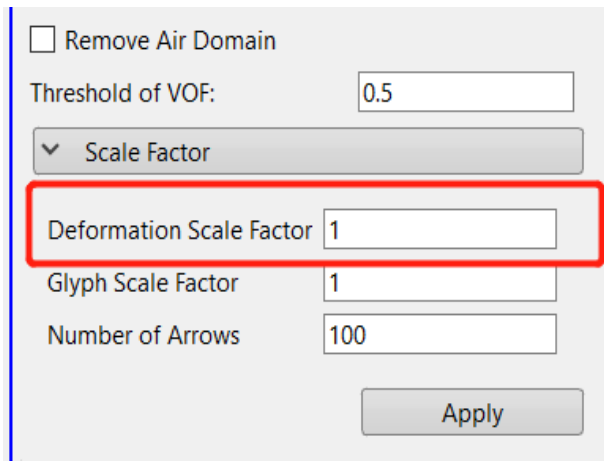


图2-3 浅埋工况各时刻液化区分布

