
基于几何非线性的水下边坡的地震动力响应

1. 案例说明

本案例设置一个土坡，让用户使用 FssiCAS 软件计算模拟土坡静力平衡状态下的沉降，以及地震作用下的大变形液化破坏。

本案例的模型网格示意图如图 1.1 所示

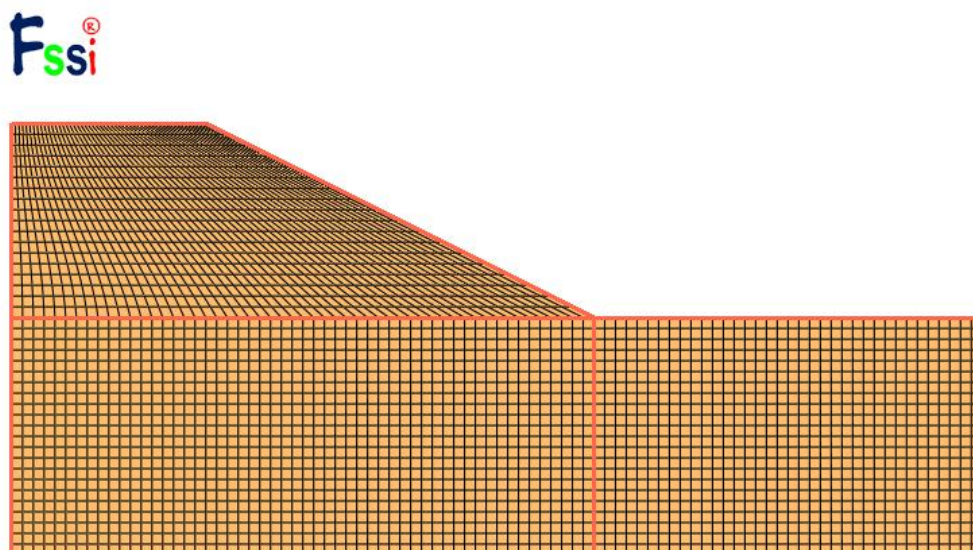



图 1.1 模型网格示意图

2. FssiCAS 图形界面操作——前处理

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 Shell；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，操作如图 2.1 所示。

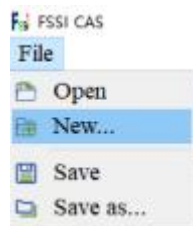


图 2.1 在 FssiCAS 新建项目示意图

2.2 导入网格及背景线

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 Gid mesh File 窗口中，选择从 Gid 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，在本案例中土体部分固体节点采用四面体四节点单元，流体节点阶次设置为 1，点击 OK，如图 2.3 所示。

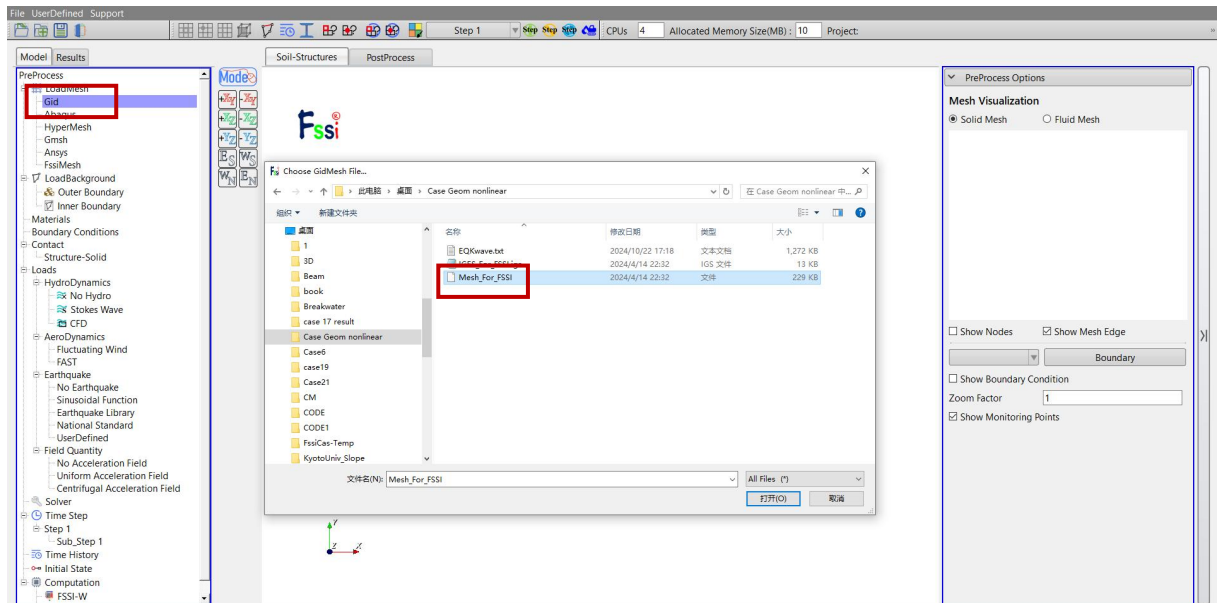


图 2.2 导入 Gid 软件输出的网格文件

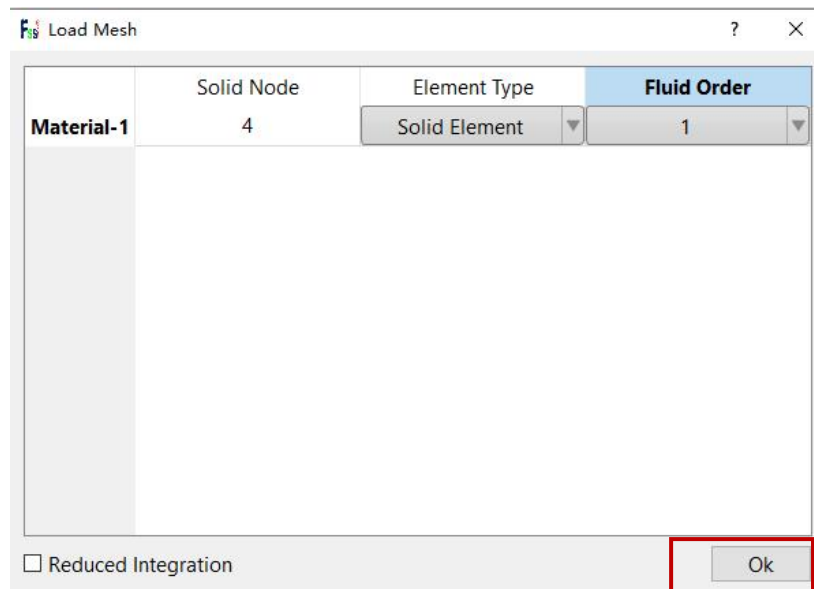


图 2.3 设置固体节点数和流体节点阶次

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 Model 树状菜单栏中的 Load Background 中，用户点击 Outer Boundary，在弹出的 Outer Boundary 窗口中点击 Choose File，选择从 Gid 或 Solidworks 等建模软件中导出的背景线.igs 文件，如图 2.4 所示。

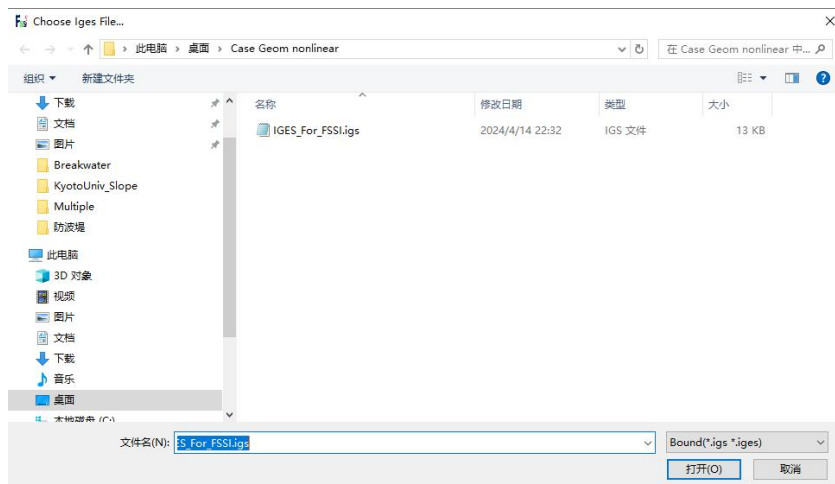


图 2.4 导入背景线

2.3 添加位移边界条件

本案例需要将边界条件设置为： $X=0$ 表面及 $X=1$ 表面， X 方向位移固定、 $Y=0$ 表面 XYZ 方向位移固定、以及边坡上部添加水动力边界条件。

点击顶部边界栏  按钮，进入边界选择模式，如图 2.4 所示。

点击顶部边界栏  按钮，进入边界线选择模式，如图 2.5 所示。



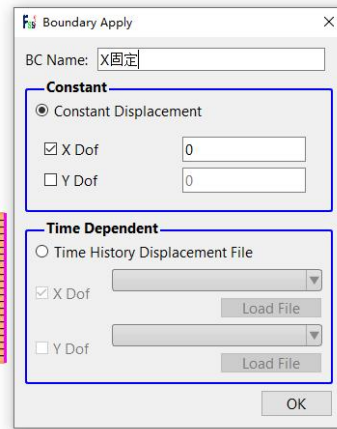
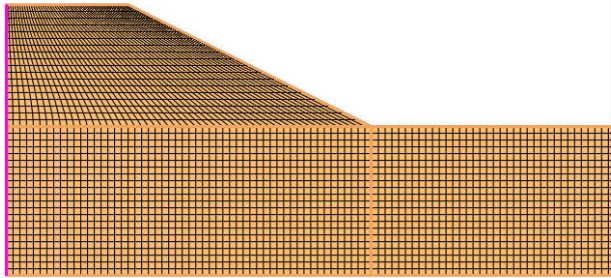
图 2.4 进入边界选择模式



图 2.5 进入边界线选择模式

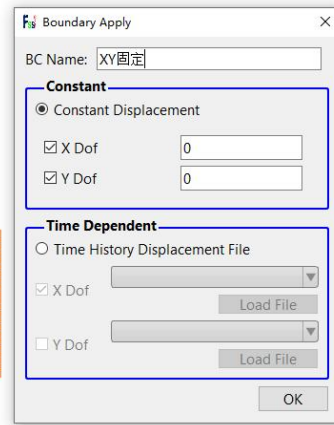
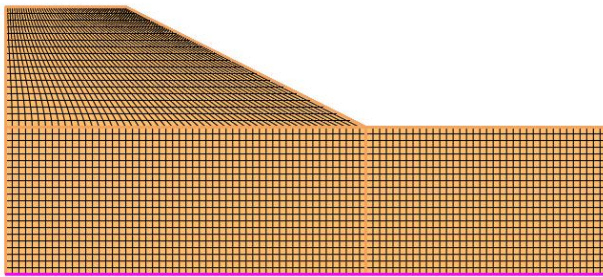
在工作区中拖动鼠标框选前后左右及底部表面的单元，点击选择后被选择的线出现高亮；点击鼠标右键，在显示边界条件下拉菜单中选择 Displacement—Add，在弹出的窗口中勾选 Constant Displacement 相应的 Dof 并点击 OK。操作流程如图 2.6 所示。

Fssi



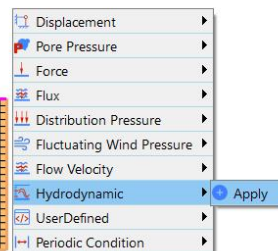
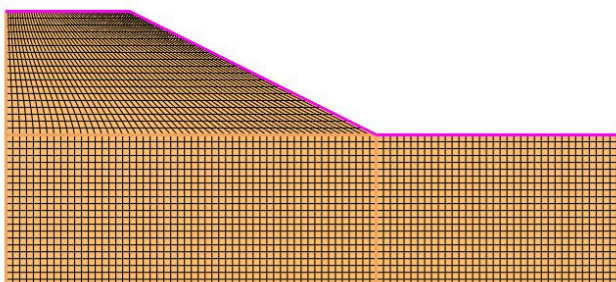
(a) X 方向位移固定

Fssi



(b) XY 方向位移固定

Fssi



(c) 水动力边界条件

图 2.6 添加位移边界条件

2.4 设置材料参数

在前处理界面正上方的工具栏 2 中，点击设置材料属性和参数的功能按钮 Material。在本案例中 Step1 采用线弹性本构，在左侧工具栏点击与模型相对应的材料，并输入土体的属性参数，点击 OK，即可设置材料属性和参数，如图 2.8 所示。

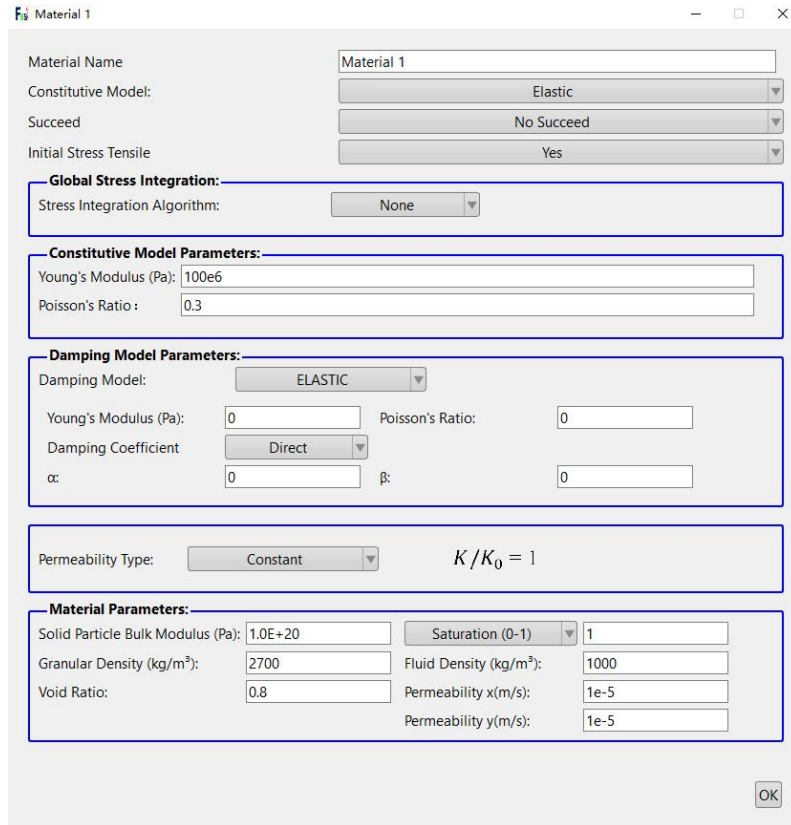


图 2.8 材料参数设置

2.5 设置重力加速度

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 2.9 所示。Step 2 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。

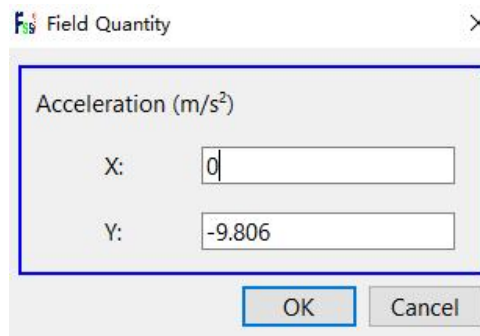


图 2.9 重力加速度设置

2.6 设置水动力边界条件

由于本案例考虑流体节点，需要设置水动力边界条件，并且设置耦合方式设置相应的参数以模拟案例中的水位，点击 FssiCAS—Preprocess—Load—Hydrodynamics—Stokes Wave—OK。具体操作及参数设置如图 2.10 所示。

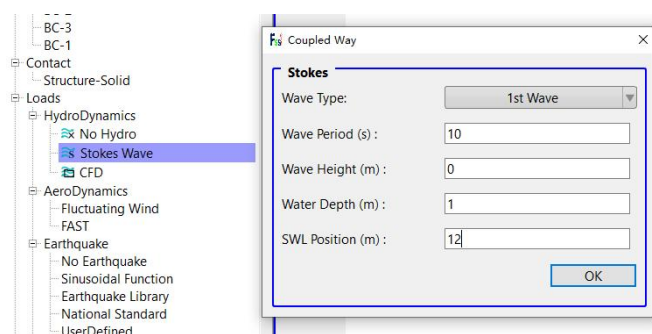


图 2.10 流固耦合方式设置界面

2.7 求解器设置

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，为了获得初始状态最好用 static 求解器），并进行相关属性参数设置，如图 2.11 所示：

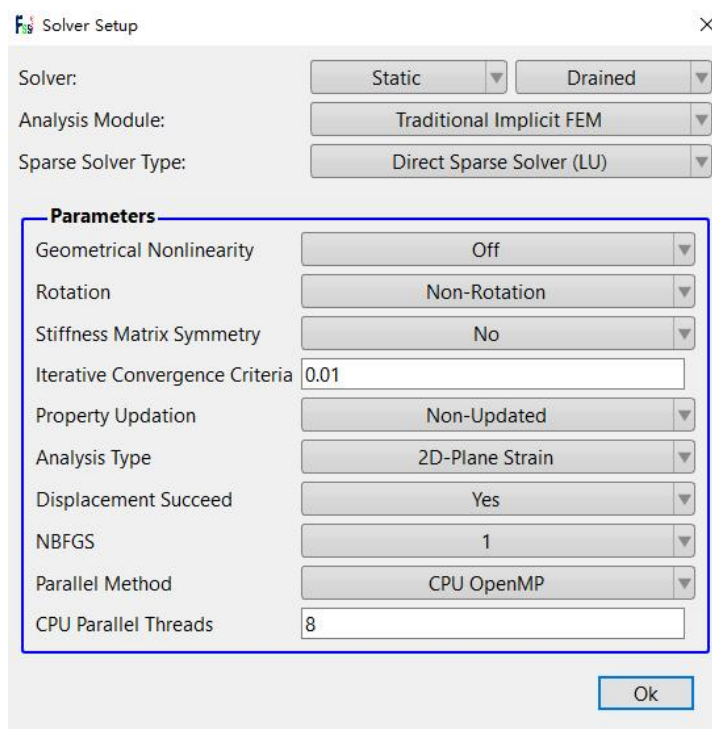


图 2.11 设置求解器的相关属性参数

2.8 时间步设置

点击 Time Step, Simulation Time (s)为计算总时间, 设置为 1s; 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 s; Interval for Updating Global Stiffness Matrix (s)为刚度矩阵更新时间, 设置为 1s; Maximum Iterations 为每个时间步最大迭代次数, 设置为 10 步; Restart File Output Inveral (s)为输出重启文件的时间, 设置为 1.1s (不生成重启文件); Result File Output Inveral (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 0.1s 输出一次结果文件; Results Output 为选择输出节点上的结果; History Output 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 0.1s 输出一次。 α , β_1 , β_2 为时间系数, 保持默认值即可。具体设置如图 2.12 所示。可在 Results Sequence 中选择输出流速、流线图, 每一步均需要选择。

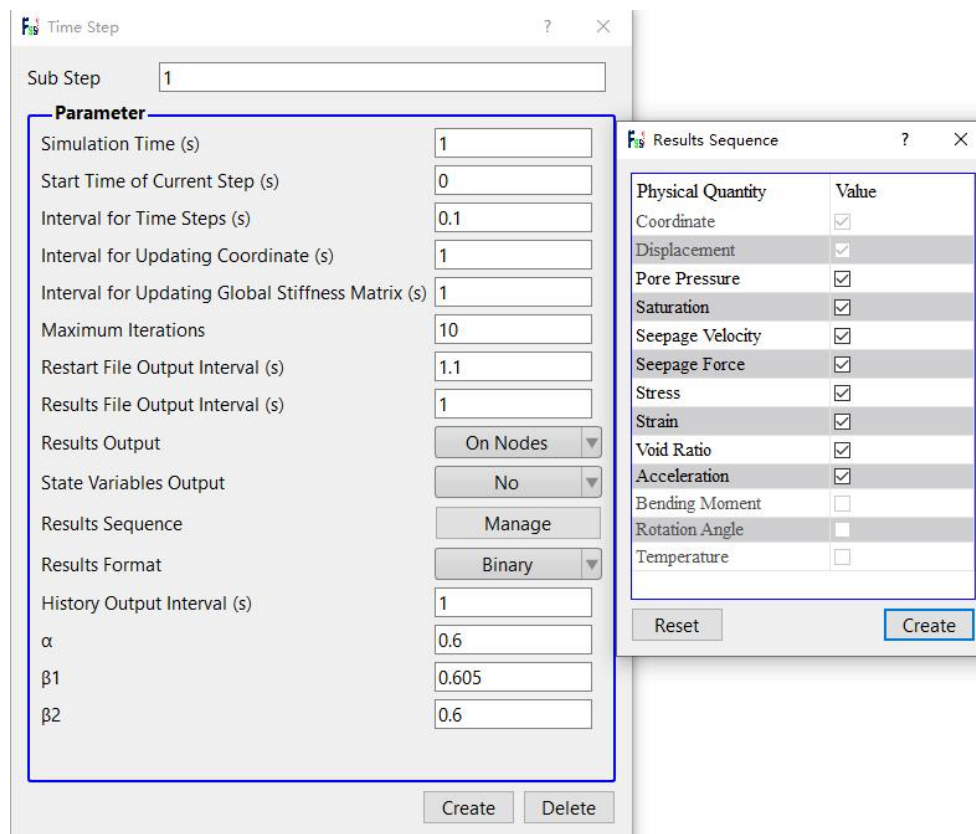


图 2.12 设置时间步和相关属性参数

2.9 设置初始条件

在前处理界面上 Model 树状菜单栏中, 点击 Initial State, 点击 OK, 即可完成初

始状态设置，如图 2.13 所示。

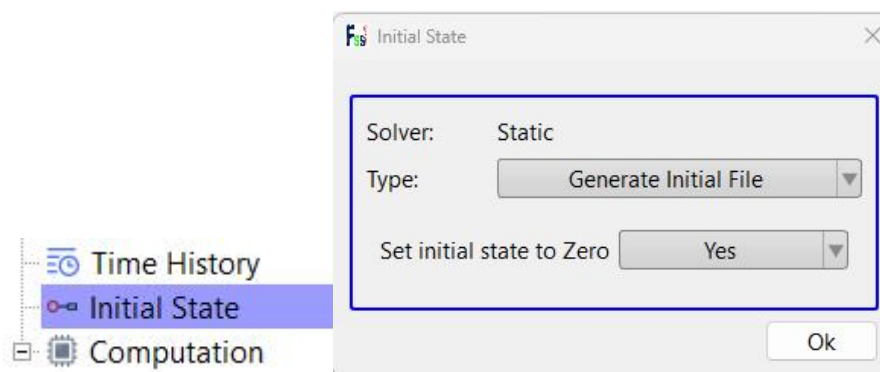


图 2.13 设置初始状态和指定初始条件

2.10 时间步 Step 2 设置

本案例设置 Step 1、Step 2 两个时间步，Step 1 用于给后续计算提供一个良好的初始状态，Step 2 为正式加载计算时间步。点击  按钮可增加时间步，添加成功后左端任务栏会显示添加的时间步，点击  按钮可以对需要设置的时间步进行设置，如图 2.14 所示。



图 2.14 增加时间步的步骤示意图

如果先设置 Step 1 的边界条件和前处理的各项参数再添加新的时间步，新的时间步会自动复制 Step 1 的所有设置；如果先添加新的时间步再设置 Step 1，每个时间步都需要重新设置对应的边界条件和参数。为了提高操作效率，一般情况下先将 Step 1 的所有参数都设置完整再创建新的时间步。本案例 Step 2 的相关参数设置如下。

2.11 设置边界条件

本案例 Step 2 与 Step 1 的位移边界条件及水动力边界条件完全相同，故在 Step 2 中无需对边界条件进行修改。

2.12 材料参数设置

本案例中 Step 2 的土体材料参数设置为 General Elastic，需注意的是，次步材料参数中的 Initial Stress Tensile 需设置为 No，具体材料参数设置如图 2.16 所示。

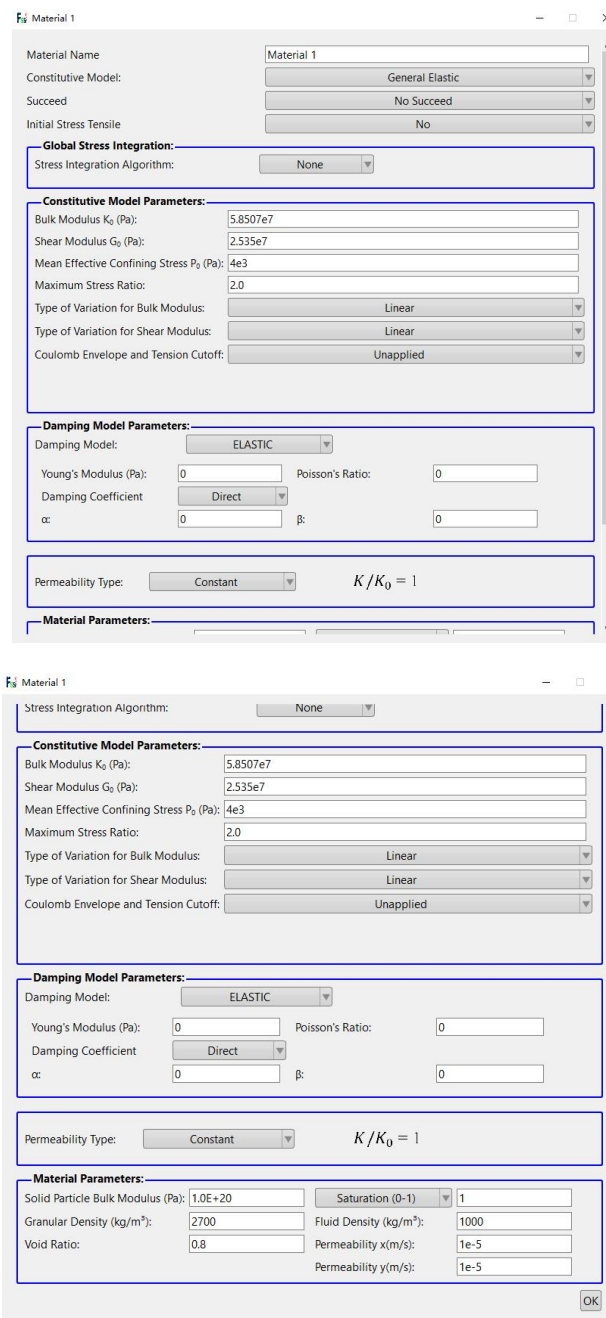


图 2.16 Step 2 材料参数设置

2.13 Step 2 求解器设置

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，并进行相关属性参数设置，如图 2.17 所示；

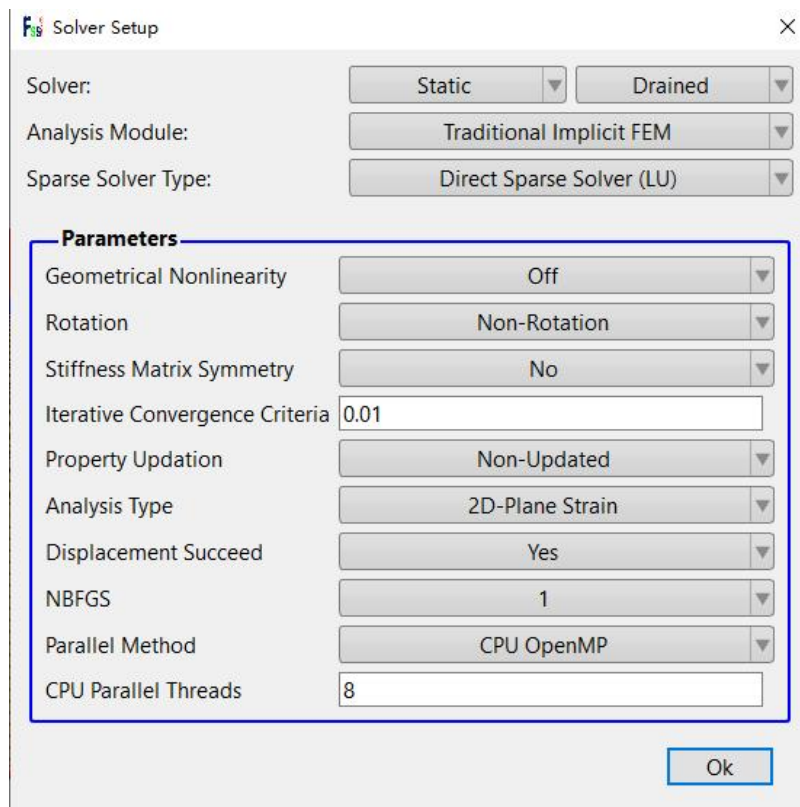


图 2.17 Step 2 求解器设置

2.13 Step 2 时间步设置

点击 Time Step，Simulation Time (s)为计算总时间，设置为 1.5s；Interval for Time Steps (s)为时间步长，设置为 1 s；Interval for Updating Coordinate (s)为坐标更新时间，设置为 1s；Interval for Updating Global Stiffness Matrix (s)为刚度矩阵更新时间，设置为 1s；Maximum Iterations 为每个时间步最大迭代次数，设置为 10 步；Restart File Output Inveral (s)为输出重启文件的时间，设置为 1.1s（不生成重启文件）；Result File Output Inveral (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 1s 输出一次结果文件；Results Output 为选择输出节点上的结果；History Output 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 1s 输出一次。 α ， β_1 ， β_2 为时间系数，保持默认值即可。具体设置如图 2.18 所示。可在 Results Sequence 中选择输出流速、流线图，每一步均需要选择。

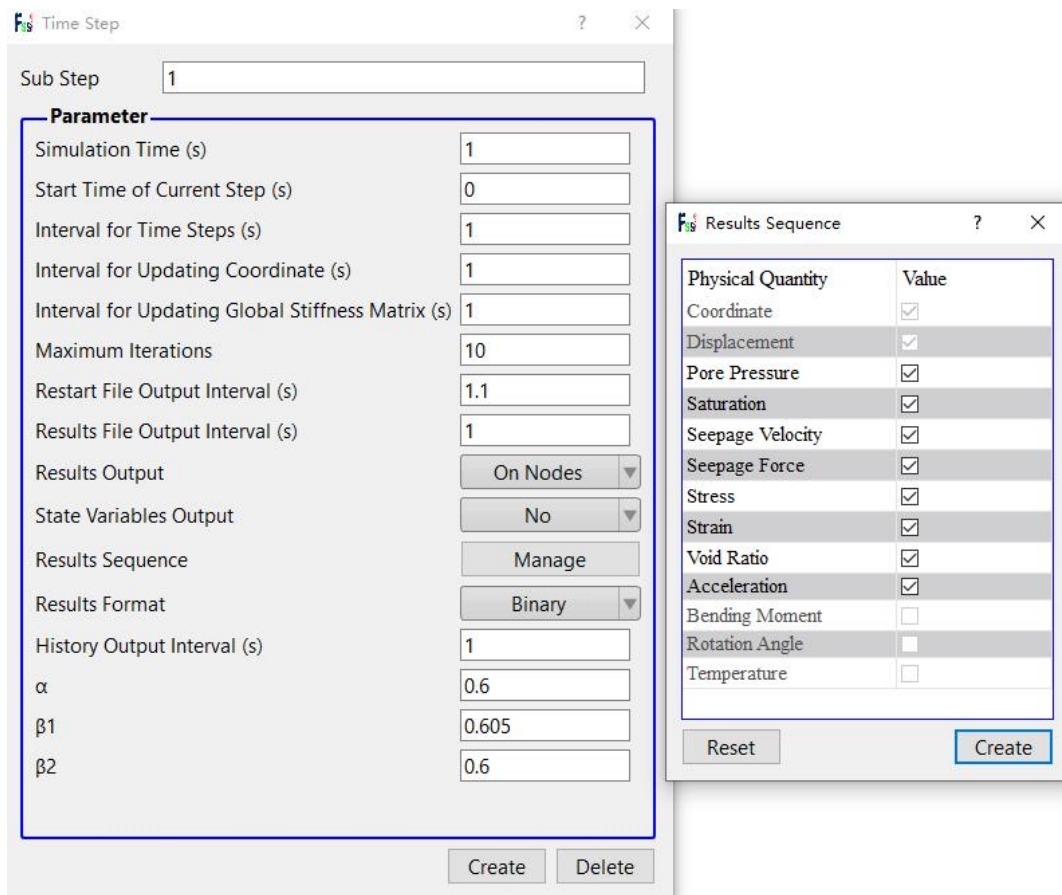


图 2.18 Step 2 时间步设置

2.14 设置初始条件

在前处理界面上 Model 树状菜单栏中，点击 Initial State，点击 OK，即可完成初始状态设置，如图 2.19 所示。

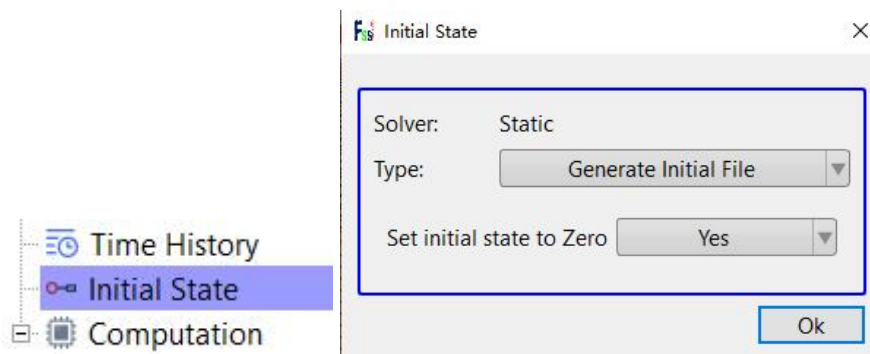


图 2.19 设置初始状态和指定初始条件

2.15 时间步 Step 3 设置

新时间的添加操作同 2.10，并且步本案例 Step 3 的边界条件依旧与 Step 1、2 保

持一致，故不再做过多赘述。

2.16 Step 3 材料参数设置

本案例中 Step 3 的土体材料参数设置为 Pastor-Zienkiewicz Mark III，具体材料参数设置如图 2.20 所示。

The image displays two screenshots of a software interface for material parameter settings. The top screenshot shows the 'Global Stress Integration' and 'Constitutive Model Parameters' sections. The bottom screenshot shows the 'Constitutive Model Parameters', 'Damping Model Parameters', and 'Material Parameters' sections.

Global Stress Integration:

- Material Name: Material 1
- Constitutive Model: Pastor-Zienkiewicz Mark III
- Succeed: No Succeed
- Initial Stress Tensile: Yes
- Stress Integration Algorithm: None

Constitutive Model Parameters:

M_p :	1.32	M_f :	1.30
α_p :	0.45	α_f :	0.45
K_{avo} (Pa):	2e6	G_{avo} (Pa):	2.6e6
β_p :	4.2	β_f :	0.2
H_p :	750	H_{uf} (Pa):	4e7
γ_u :	2	γ_{vm} :	0
P_0' (Pa):	4000		

Variation Type: Bulk and Shear Modulus Vary Linearly

Damping Model Parameters:

- Damping Model: ELASTIC
- Young's Modulus (Pa): 1e6
- Poisson's Ratio: 0.3
- Damping Coefficient: Direct
- α : 0.01
- β : 0.01

Permeability Type: Constant $K/K_0 = 1$

Constitutive Model Parameters:

M_p :	1.32	M_f :	1.30
α_p :	0.45	α_f :	0.45
K_{avo} (Pa):	2e6	G_{avo} (Pa):	2.6e6
β_p :	4.2	β_f :	0.2
H_p :	750	H_{uf} (Pa):	4e7
γ_u :	2	γ_{vm} :	0
P_0' (Pa):	4000		

Variation Type: Bulk and Shear Modulus Vary Linearly

Damping Model Parameters:

- Damping Model: ELASTIC
- Young's Modulus (Pa): 1e6
- Poisson's Ratio: 0.3
- Damping Coefficient: Direct
- α : 0.01
- β : 0.01

Permeability Type: Constant $K/K_0 = 1$

Material Parameters:

Solid Particle Bulk Modulus (Pa):	1.0E+20	Saturation (0-1):	1
Granular Density (kg/m ³):	2700	Fluid Density (kg/m ³):	1000
Void Ratio:	0.8	Permeability x(m/s):	1e-5
		Permeability y(m/s):	1e-5

图 2.20 Step 3 材料参数设置

2.17 Step 3 求解器设置

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，并进行相关属性参数设置，如图 2.21 所示；

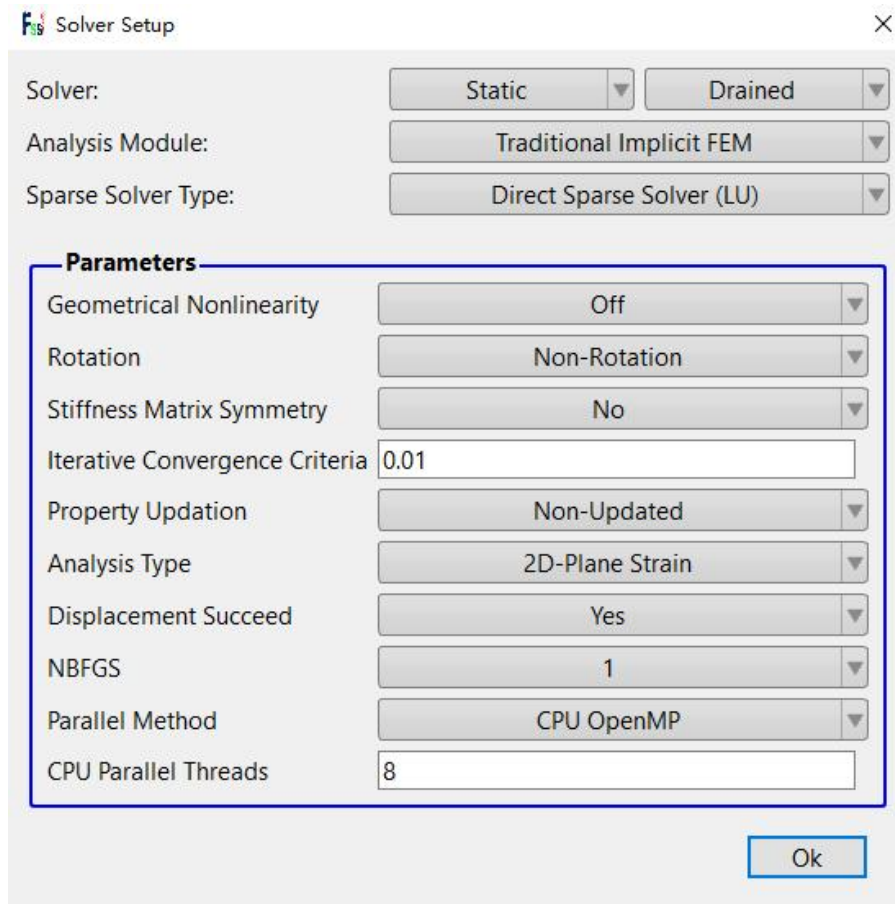


图 2.21 Step 3 求解器设置

2.18 Step 3 时间步设置

点击 Time Step，Simulation Time (s)为计算总时间，设置为 1s；Interval for Time Steps (s) 为时间步长，设置为 1 s；Interval for Updating Coordinate (s)为坐标更新时间，设置为 1s；Interval for Updating Global Stiffness Matrix (s)为刚度矩阵更新时间，设置为 1s；Maximum Iterations 为每个时间步最大迭代次数，设置为 5 步；Restart File Output Inveral (s)为输出重启文件的时间，设置为 1.1s（不生成重启文件）；Result File Output Inveral (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 1s 输出一次结果文件；Results Output 为选择输出节点上的结果；History Output 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 1s 输出 一次。 α ， β_1 ， β_2 为时间系数，保持默认值

即可。具体设置如图 2.22 所示。可在 Results Sequence 中选择输出流速、流线图，每一步均需要选择。

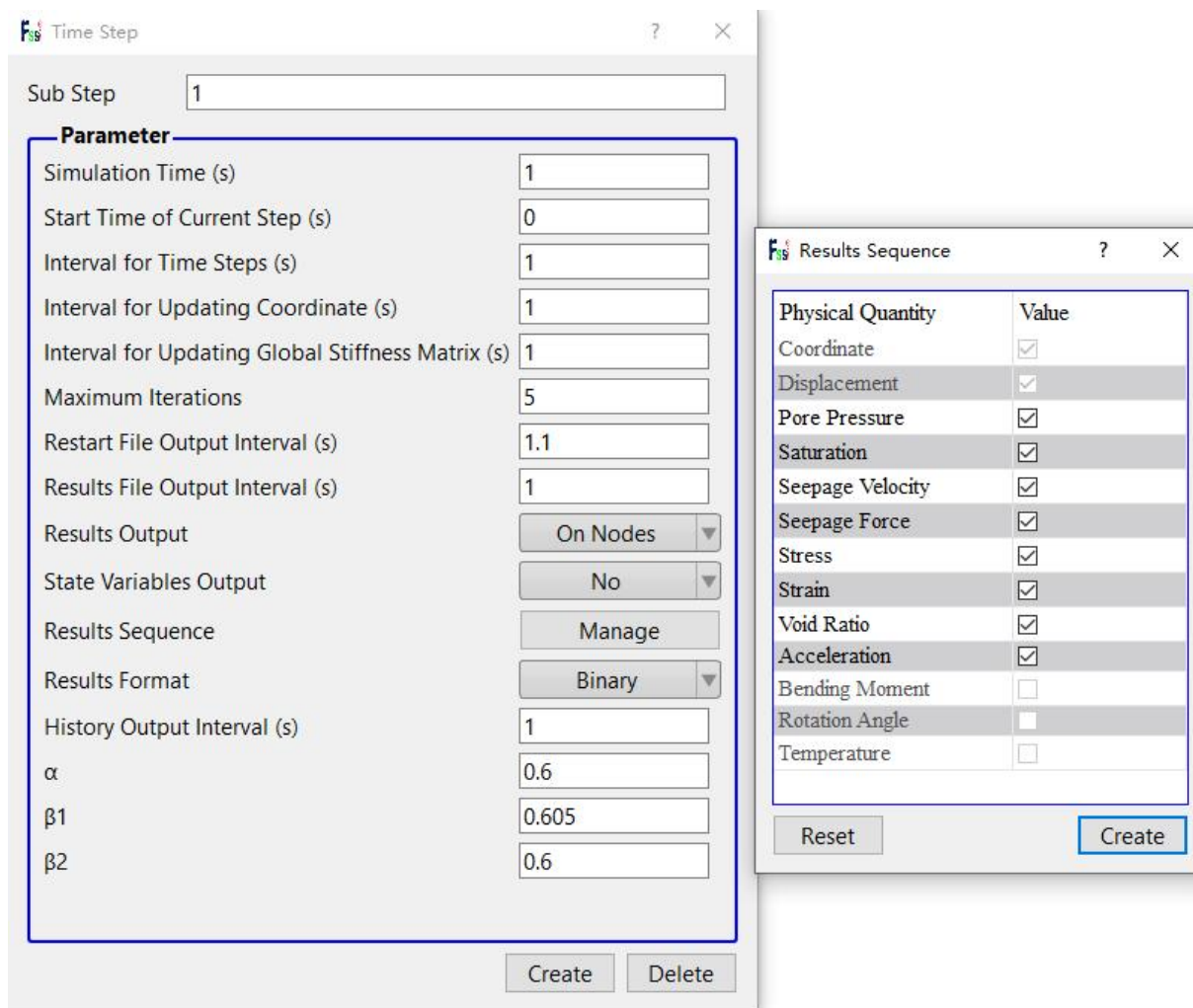


图 2.22 Step 3 时间步设置

2.19 设置初始条件

在前处理界面上 Model 树状菜单栏中，点击 Initial State，点击 OK，即可完成初始状态设置，如图 2.23 所示。

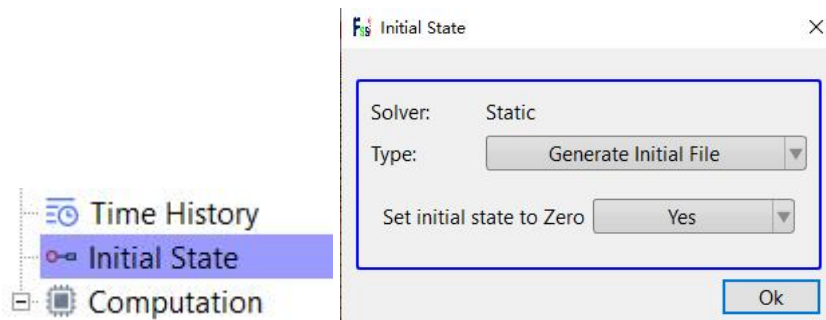


图 2.23 设置初始状态和指定初始条件

2.20 时间步 Step 4 设置

新时间的添加操作同 2.10，并且步本案例 Step 4 的边界条件依旧与 Step 1、2、3 保持一致，且材料参数与 Step 3 保持一致，故不再做过多赘述。

2.21 Step 4 求解器设置

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，由于 Step 4 中需要添加地震，所以求解器设置为 Dynamic，并且几何非线性开关 Geometrical Nonlinearity 选择 On，并进行相关属性参数设置，如图 2.24 所示：

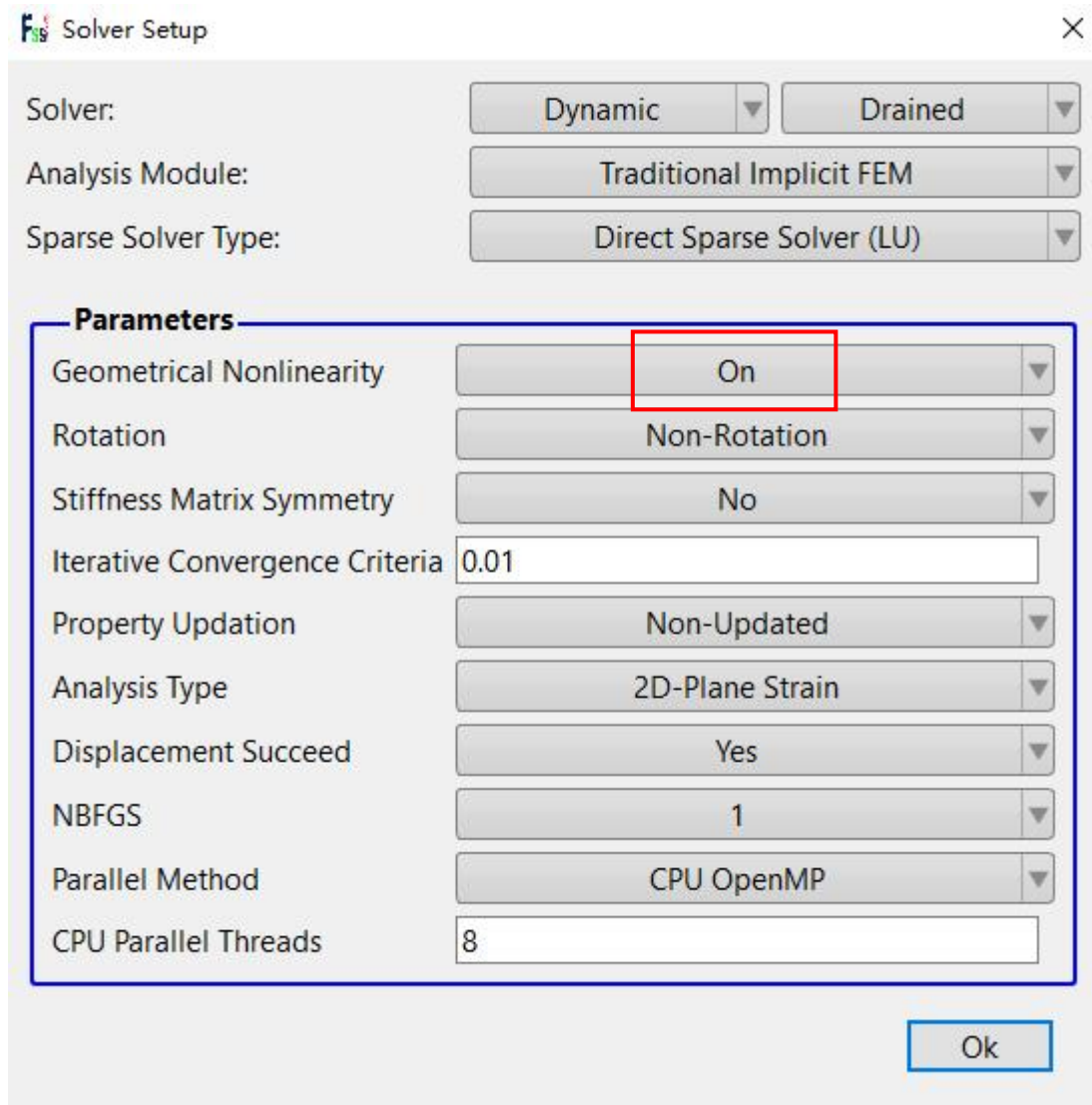


图 2.24 Step 4 求解器设置

2.22 Step 4 加载地震波文件

Step 4 中，需要从外部加载地震波文件，具体操作为：选择左侧工具栏中的 Earthquake 点击 UserDefined，随后点击 Load 选择需要导入的地震波文件。具体操作如图 2.25 所示

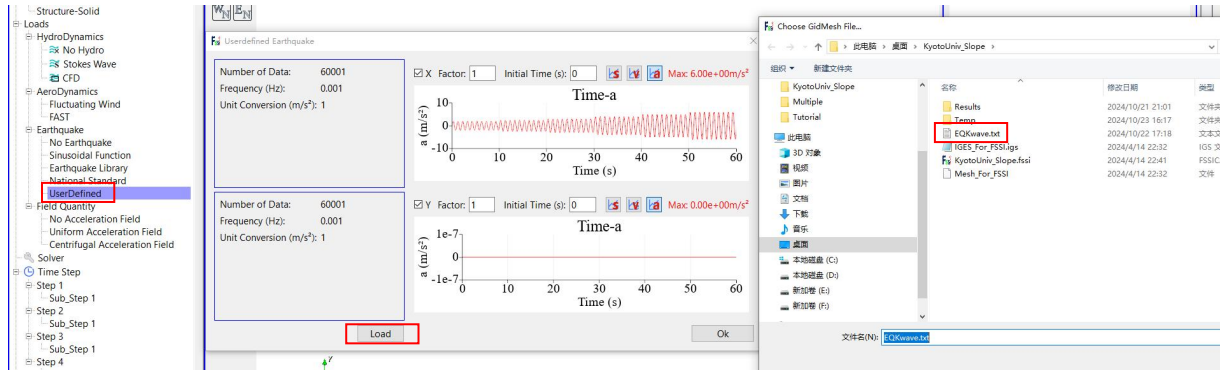


图 2.25 加载地震文件

2.24 Step 4 时间步设置

点击 Time Step, Simulation Time (s)为计算总时间，设置为 60s；Interval for Time Steps (s) 为时间步长，设置为 0.001 s；Interval for Updating Coordinate (s)为坐标更新时间，设置为 0.001s；Interval for Updating Global Stiffness Matrix (s)为刚度矩阵更新时间，设置为 0.001s；Maximum Iterations 为每个时间步最大迭代次数，设置为 100 步；Restart File Output Inveral (s)为输出重启文件的时间，设置为 61s（不生成重启文件）；Result File Output Inveral (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 0.02s 输出一次结果文件；Results Output 为选择输出节点上的结果；History Output 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 0.02s 输出 一次。 α , β_1 , β_2 为时间系数，保持默认值即可。具体设置如图 2.26 所示。可在 Results Sequence 中选择输出流速、流线图，每一步均需要选择。

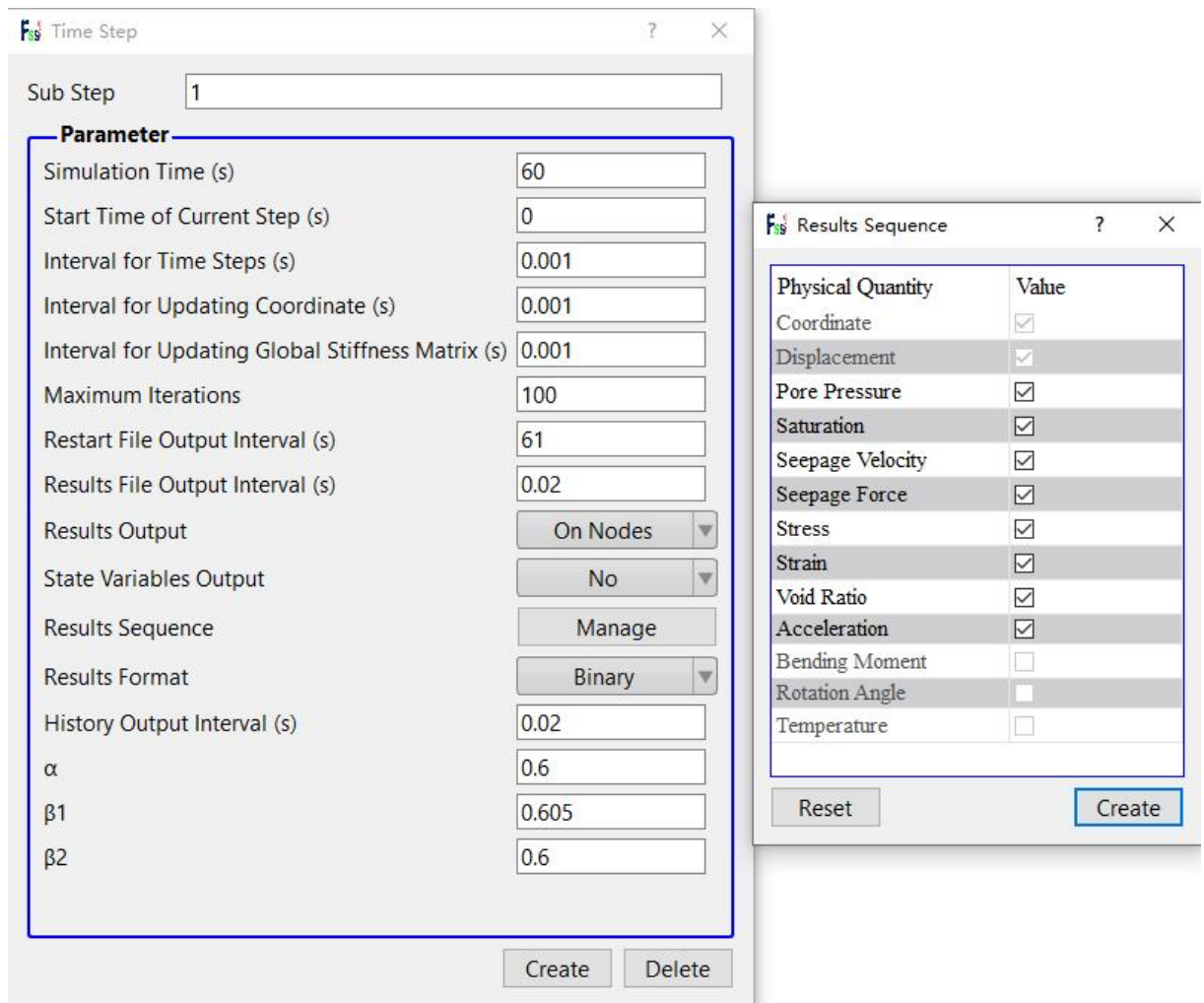


图 2.26 Step 3 时间步设置

2.19 设置初始条件

在前处理界面上 Model 树状菜单栏中，点击 Initial State，点击 OK，即可完成初始状态设置，如图 2.27 所示。

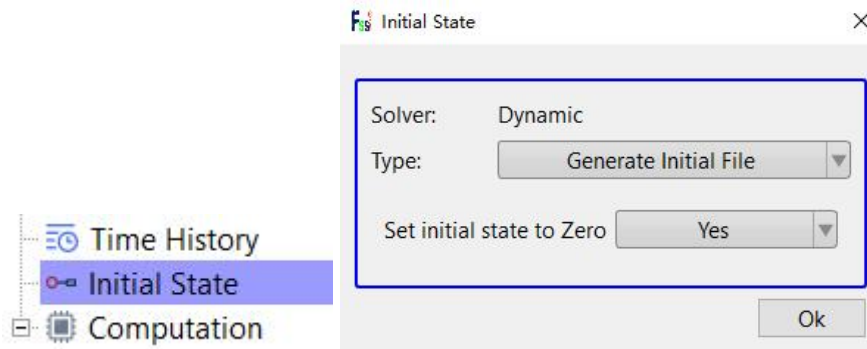


图 2.27 设置初始状态和指定初始条件

3 FssiCAS 图形界面操作——后处理

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 Post Process—Open Result 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。如图 3.1 所示。

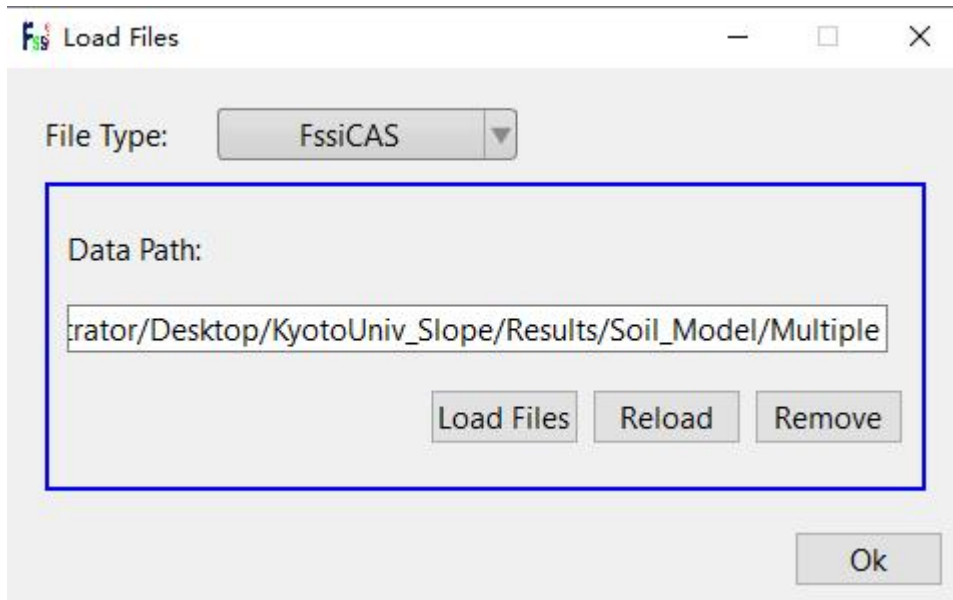


图 3.1 加载结果文件

3.1 位移分布云图

后处理部可以输出模型的位移、应力、应变结果分布云图，并且也可以打开 Deformation Scale Factor 开关来浏览模型的变形效果。

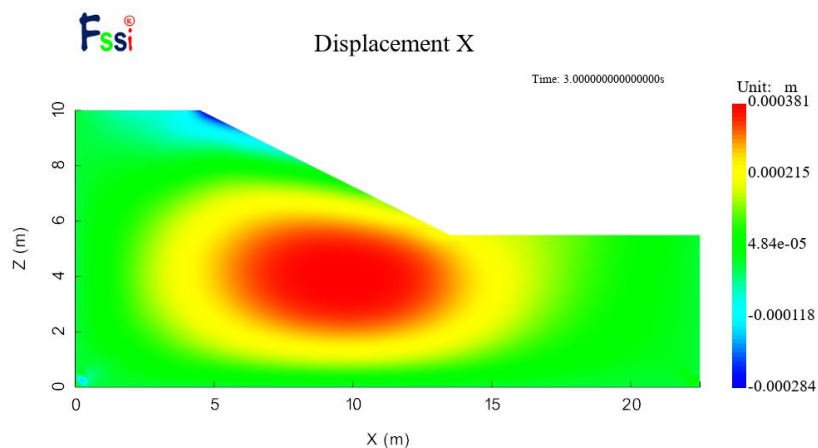


图 3.2 第 3s 时刻 X 方向位移分布结果云图

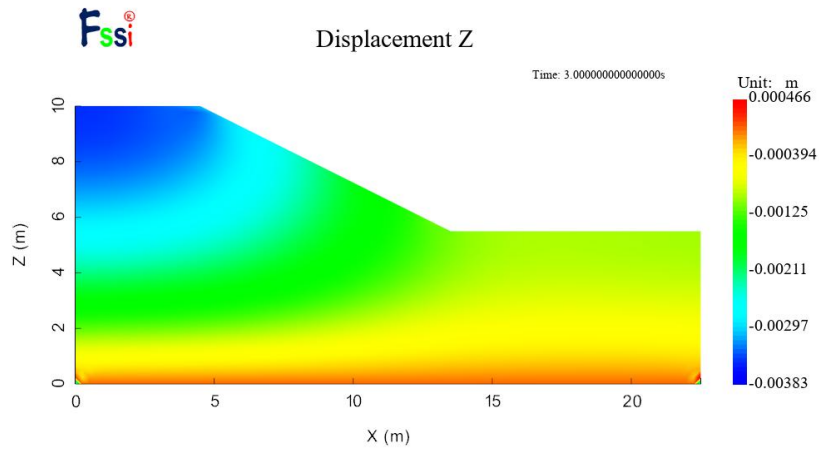


图 3.3 第 3s 时刻 Z 方向位移分布结果云图

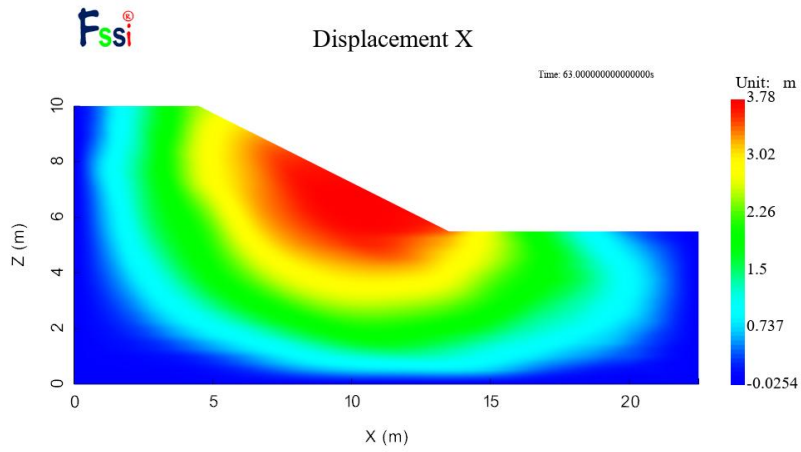


图 3.4 第 63s 时刻 X 方向位移云图

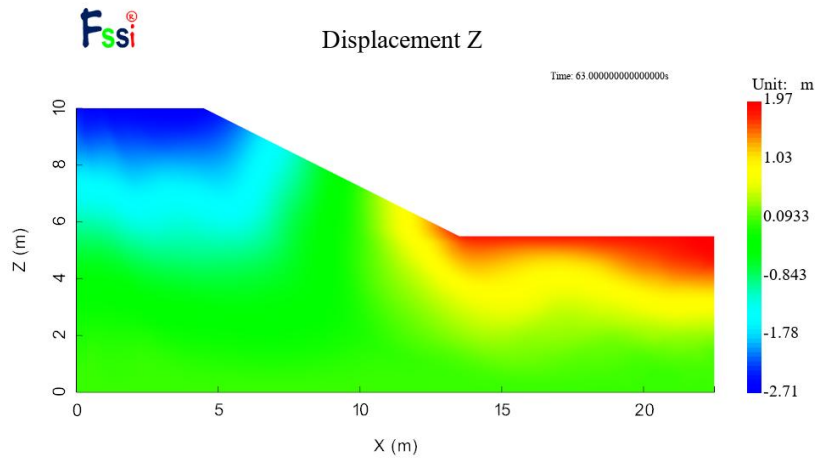


图 3.5 第 63s 时刻 Z 方向位移云图

Fssi[®]

Displacement Vector

Time: 63.000000000000000s

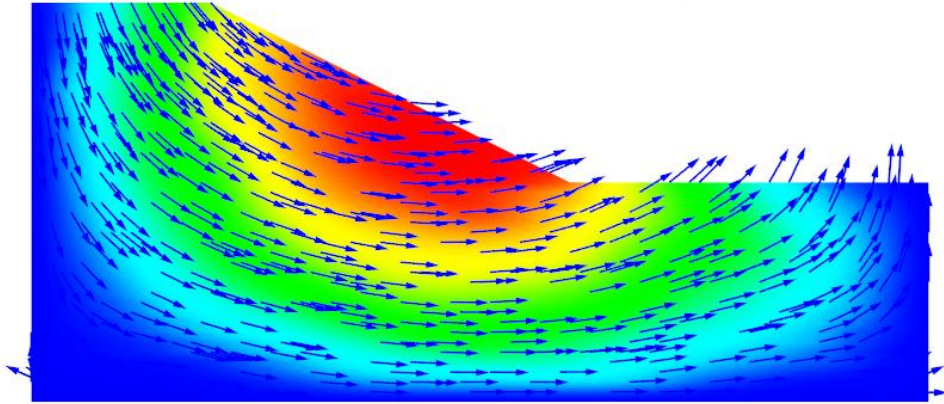


图 3.6 地震作用后位移流线趋势云图

Fssi[®]

Displacement

Time: 63.000000000000000s

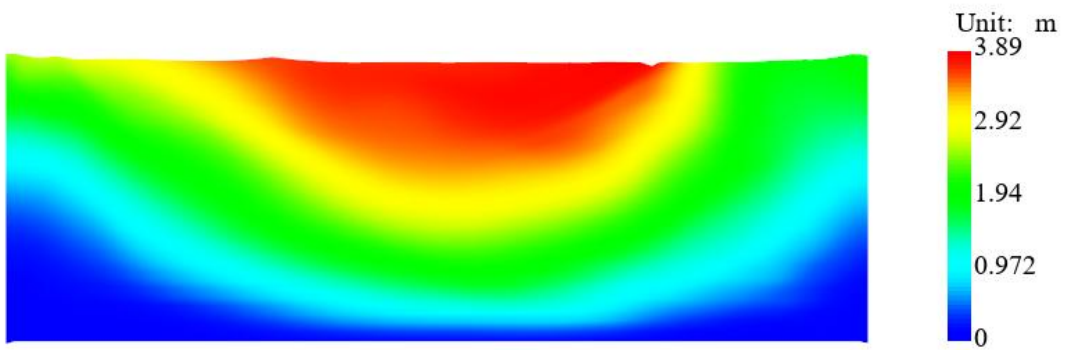


图 3.7 第 63s 震后液化效果图