

尾矿库渗流与地震动力响应

本案例目的为研究在渗流和地震作用下尾矿库的动力响应。在稳态渗流作用下，土体部分采用 General Elastic 本构模型；在研究地震动力响应时，土体部分采用 Pastor-Zienkiewicz-Mark III (PZIII) 高级本构模型描述其动态力学行为。

本案例设置 Step 1、Step 2、Step 3 三个时间步，Step 1 与 Step 2 为稳态渗流阶段的时间步、Step 3 为地震动力响应阶段的时间步。

Step 1 时间步是为了计算初始应力和稳态渗流，为后续的分析提供一个良好的初始状态。因此土体采用弹性本构模型，求解器选择 Static；

为了修正 Step 1 的初始应力和稳态渗流，并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 Consolidation；

为了研究地震动力响应，在 Step 3 时间步，添加了用户自定义地震波载荷。因此求解器选择 Dynamic，土体部分选择可以更好地描述砂土的动力力学行为的 PZIII 本构模型。

土体右上边的节点施加了静态水压力，水动力参数为：周期 $T=1.0$ s，水深 $d=10$ m，波高 $H=0$ m。模型如图 1-1 所示。

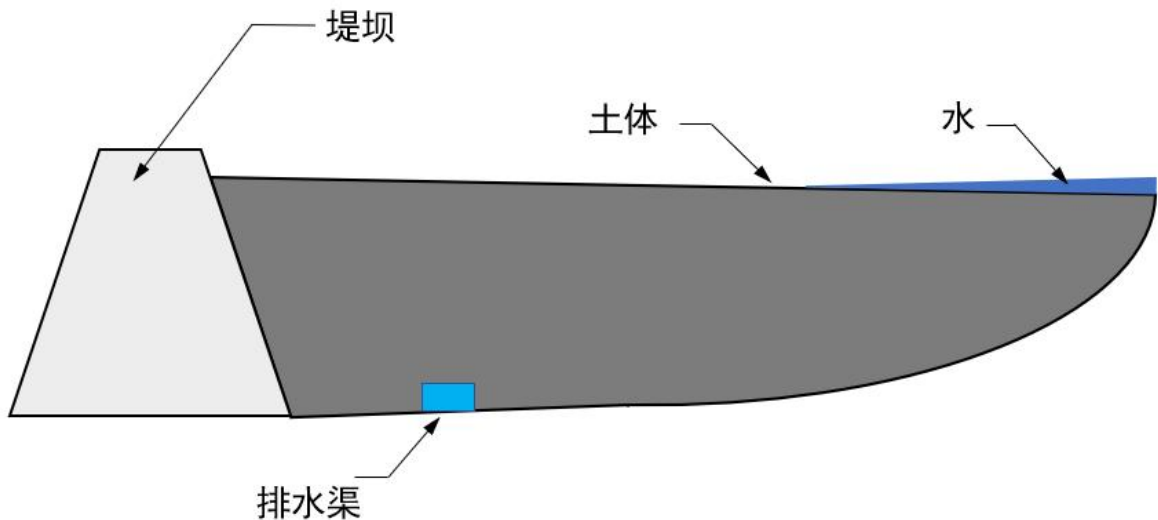


图 1-1 计算模型图

19.1 网格划分

借助 GiD 软件建立二维模型，土体材料命名为 Material 1，排水渠的材料命名为 Material 2，堤坝的材料命名为 Material 3。划分网格后，按以下步骤导出为指定的网格文件格式。

首先新建 txt 文档，输入以下内容保存文件，文件类型选择所有文件，命名为 Output-Format-Gid.bas。

```
Elements:
*loop elems
*ElemsNum *ElemsMat *ElemsConec
*end elems
0
Nodes:
*set elems(all)
*loop nodes
*format "%i%14.8e%14.8e%14.8e"
*NodesNum *NodesCoord(1) *NodesCoord(2) *NodesCoord(3)
*end nodes
0
```

其次，点击 GiD—Files—Export—Using template .bas (only mesh)—Others...；在文件选择对话框中选择名为：Output-Format-Gid.bas 的 .bas 文件，点击 Open；输入网格文件名，点击 Save，网格文件可以保存在指定位置，如图 1-2 所示。

点击 GiD—Files—Export—IGES...，自定义文件名，点击 Save，可以将文件保存在指定位置，并导出背景线.igs 文件。

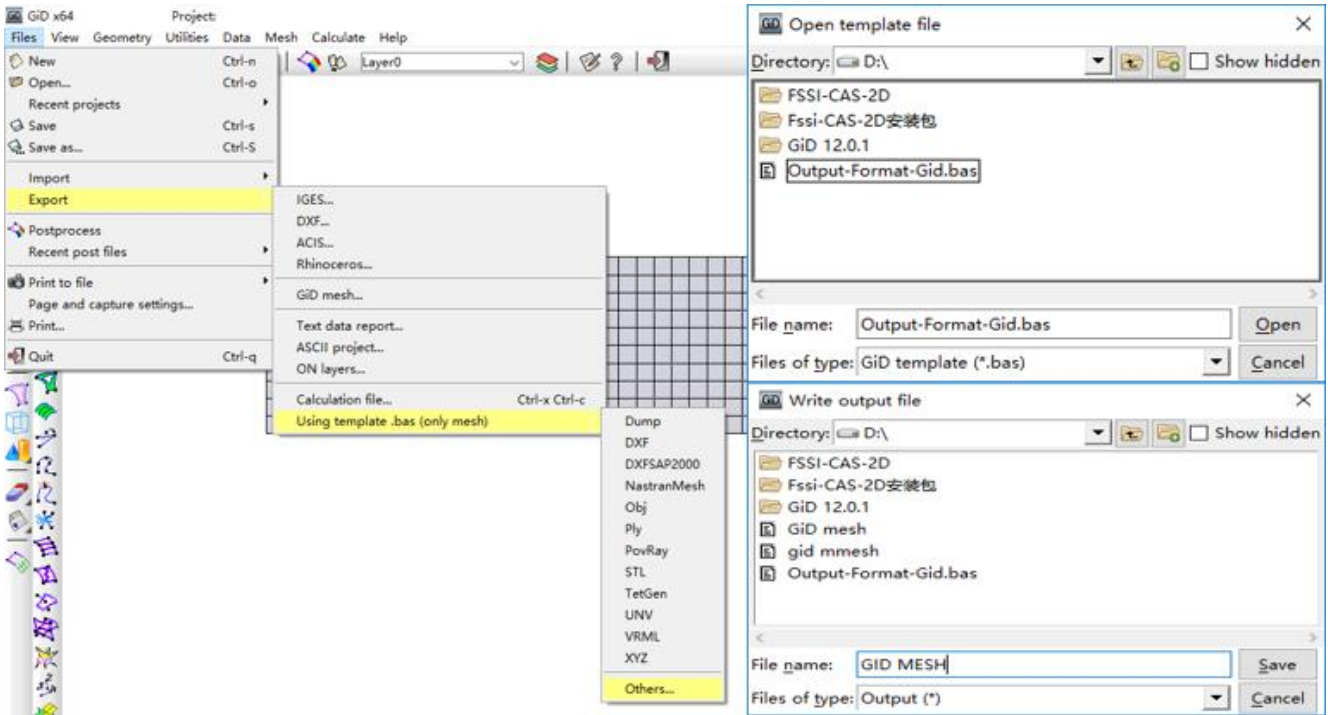


图 1-2 用 GiD 导出网格文件的步骤示意图

19.2 FssiCAS 图形界面操作——前处理

19.2.1 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, 双击或点击打开按钮载入网格文件。

在弹出的对话框中设置单元节点阶次, 如图 1-3 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。土体和排水渠部分的节点因为有流体作用, 所以 Material 1 和 Material 2 的流体节点阶次设置为 1, 点击 Ok 按钮确认选择。

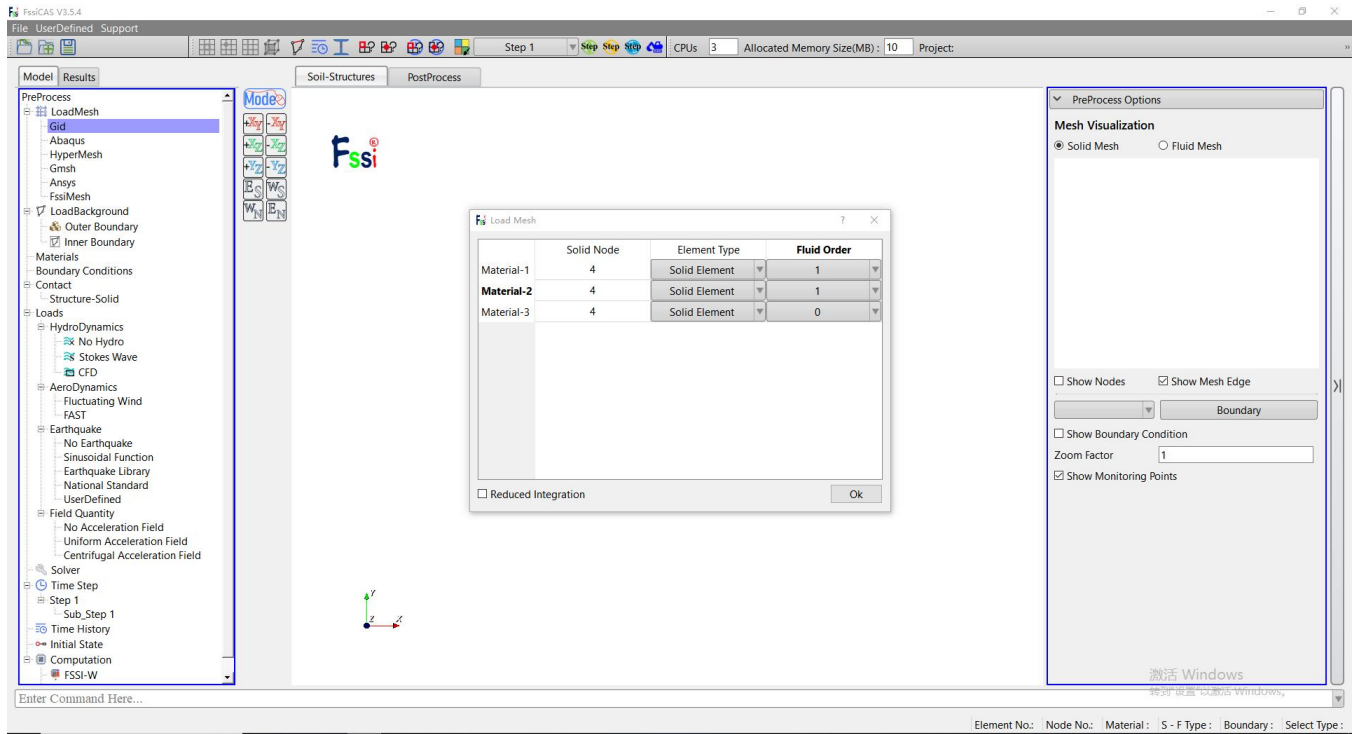


图 1-3 设置流体节点阶次界面

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 1-4 所示，界面中展示导入后的模型如图 1-5 所示。

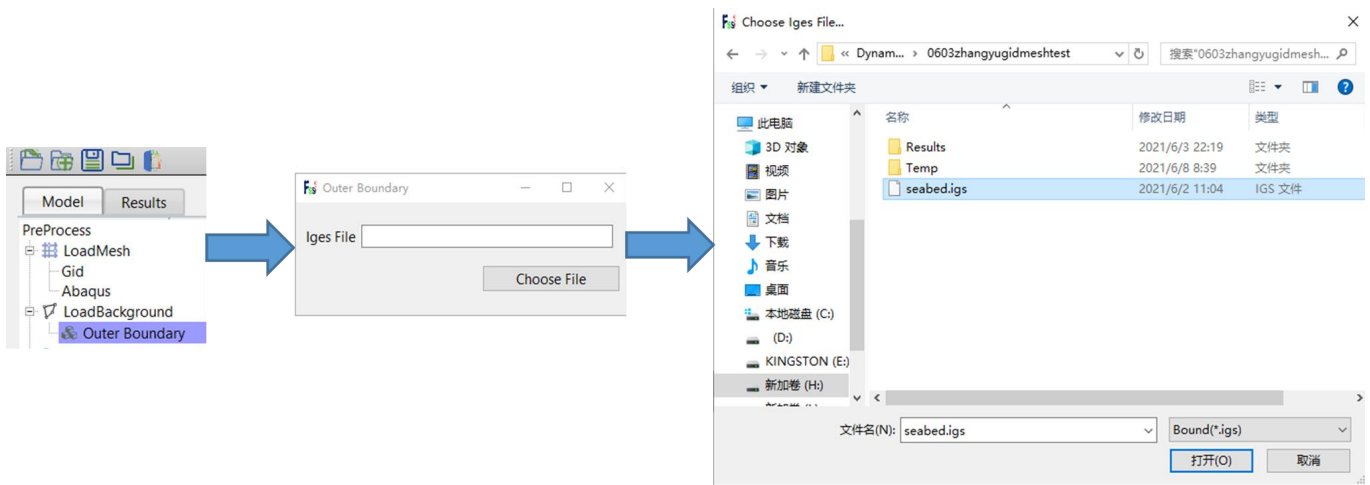


图 1-4 加载外背景线 (Outer Boundary) 的步骤示意图

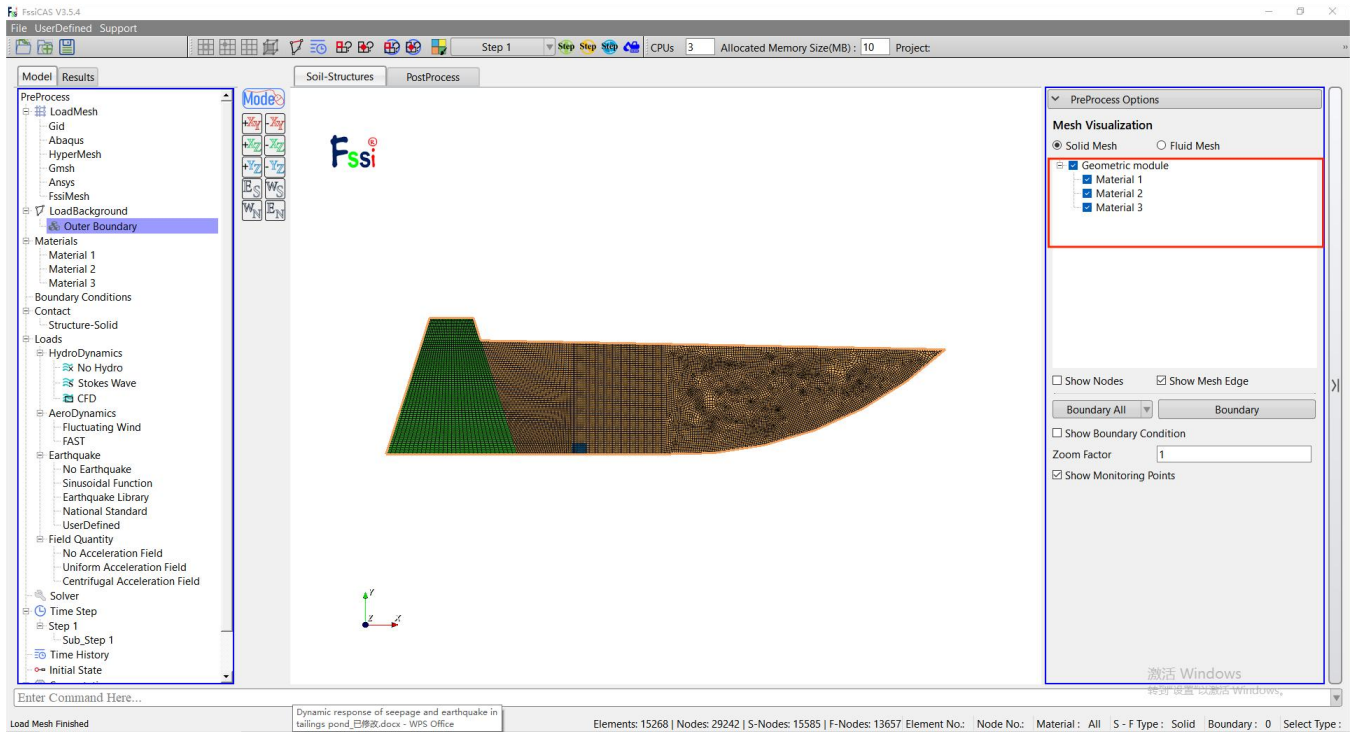




图 1-5 加载网格和外背景线后的模型图

19.2.2 添加边界条件

本案例需要在堤坝和土体的底边 ($y = 0 \text{ m}$) 节点上施加 x 与 y 方向的约束。在排水渠的底边 ($y = 0 \text{ m}$) 节点上施加 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 1-6 所示。

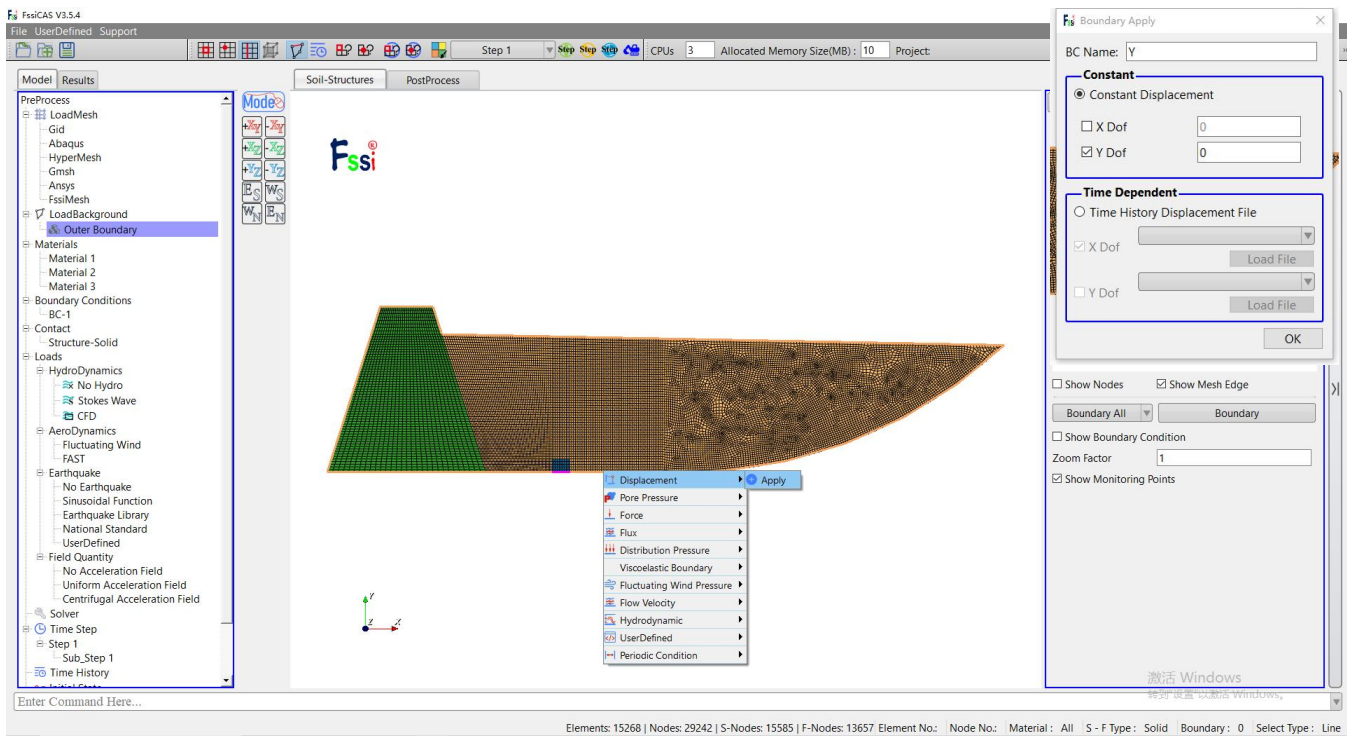
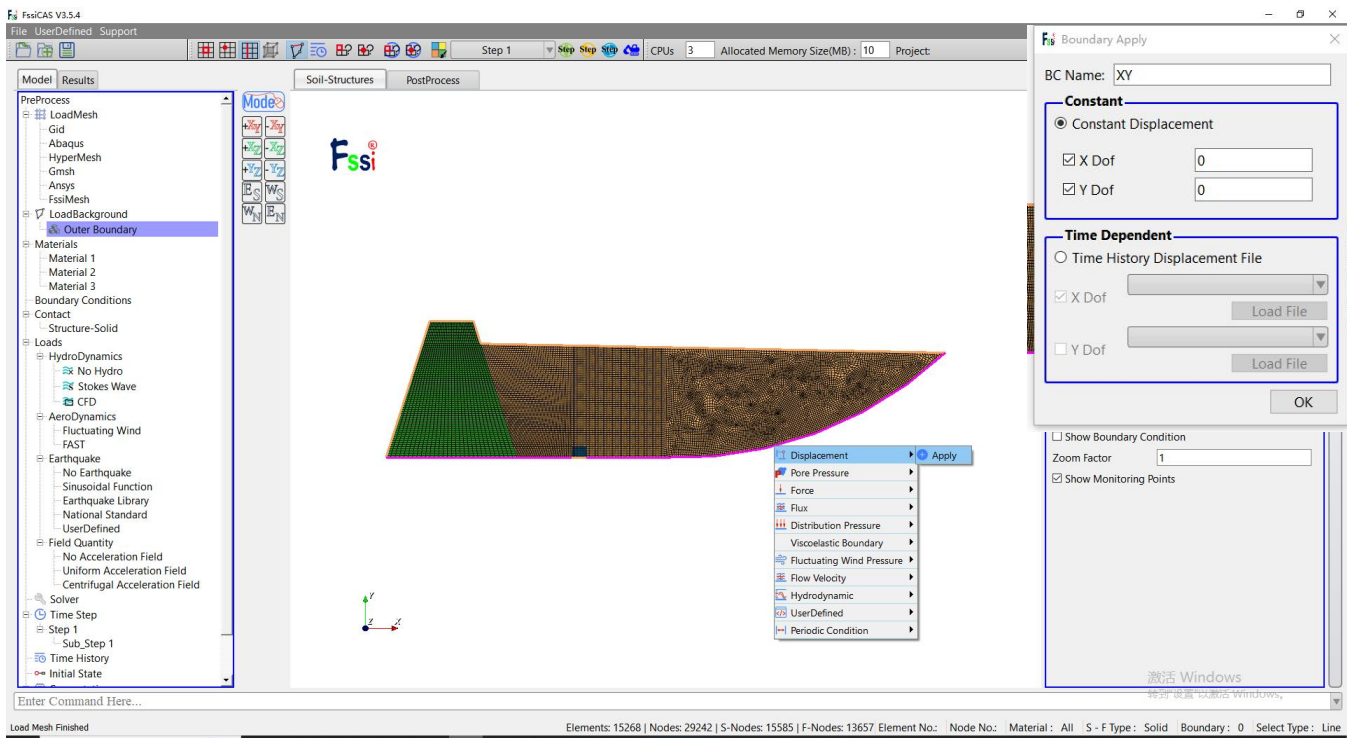


图 1-6 选择边界线添加边界条件

由于土体右上边受静水压力作用，因此这条边上的节点要施加水动力边界，静水荷载通过 1 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 1-7 所示。排水渠的底边上的节点设置孔压为 0，如图 1-8 所示。

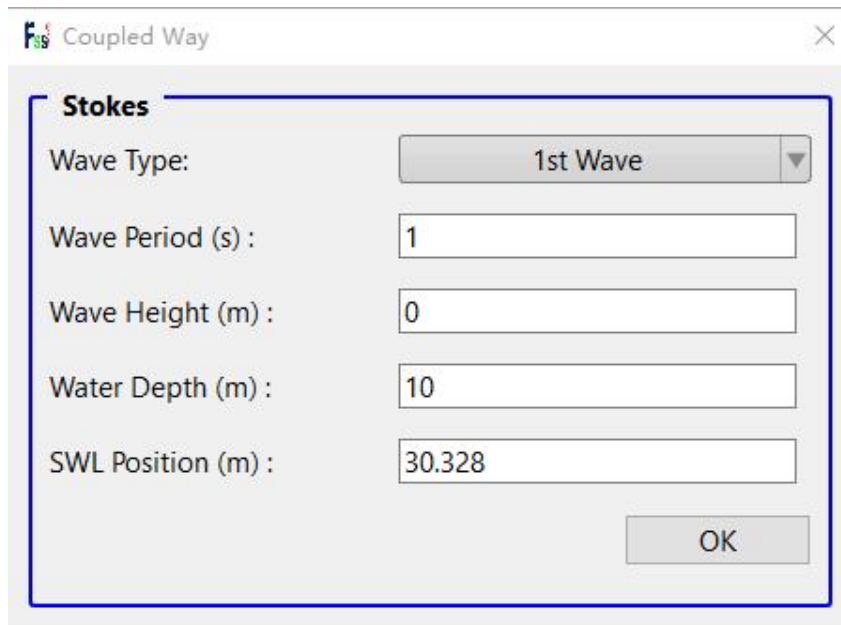
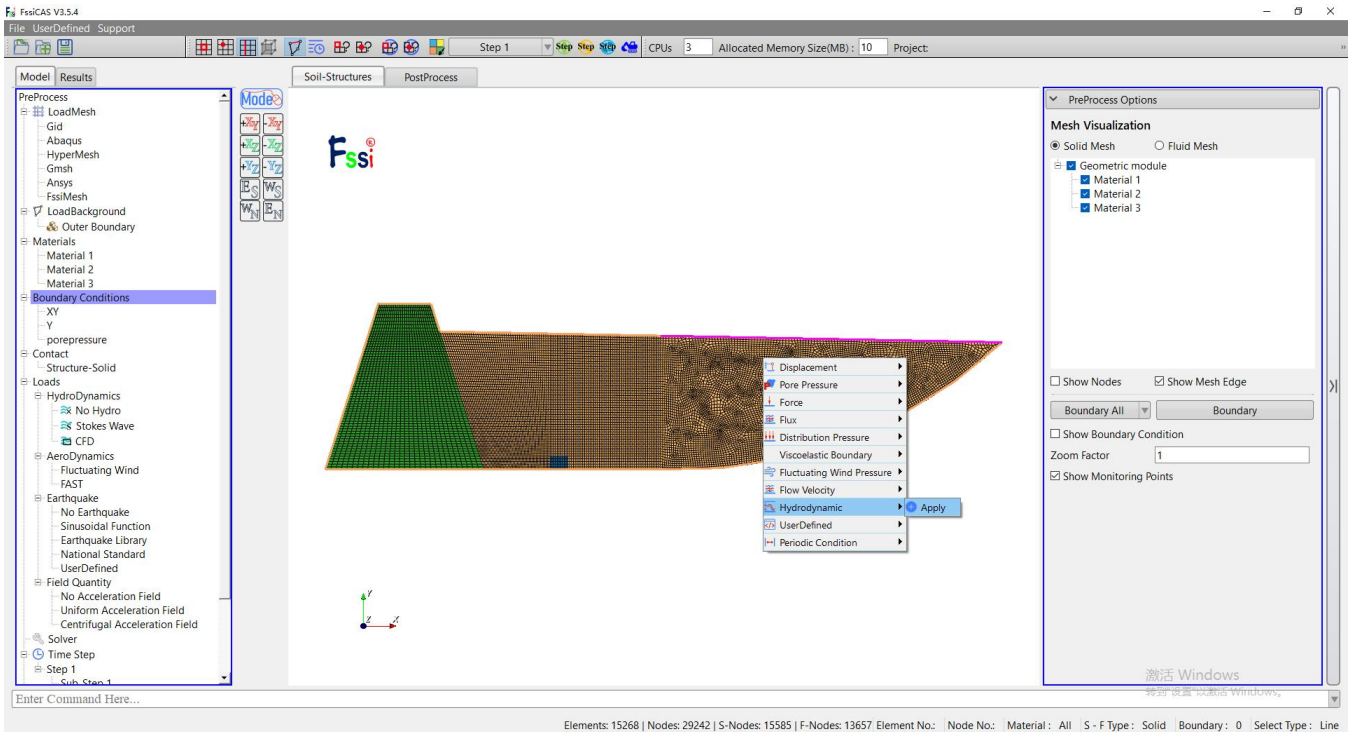


图 1-7 水动力边界条件与 Stokes 波的参数信息设置界面

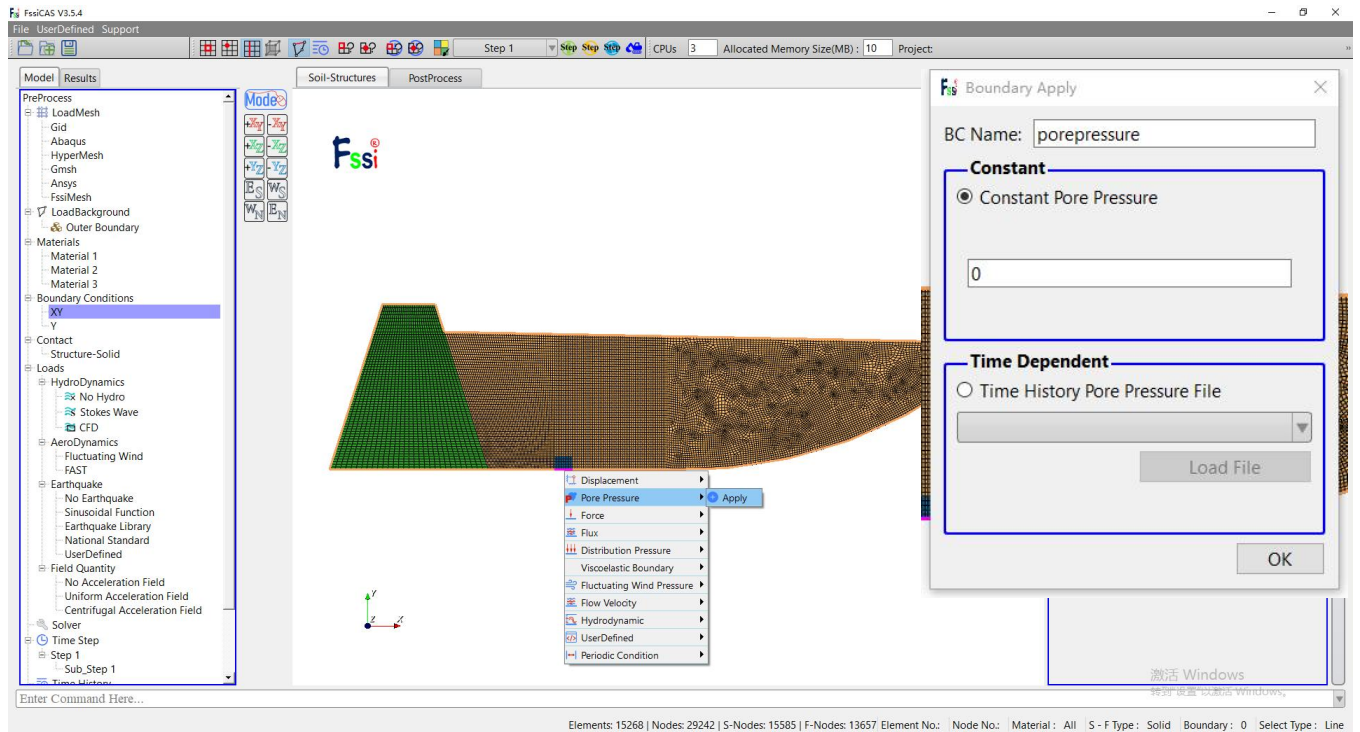



图 1-8 排水渠孔压施加示意图

19.2.3 Step 1 设置

Step 1 时间步是为了计算初始应力和稳态渗流，为后续的分析提供一个良好的初始状态。因此土体采用弹性本构模型，求解器选择 **Static**；

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。本案例 Step 1 的相关参数设置如下。

点击工具栏上的  按钮可以对需要设置的时间步进行设置。如图 1-9 所示，导入网格与背景线文件后，FssiCas 软件会默认创建 Step 1 时间步。

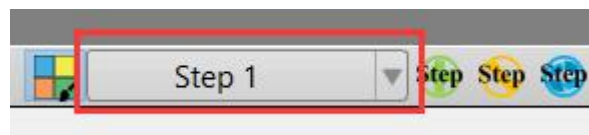


图 1-9 选择时间步的步骤示意图

19.2.3.1 设置材料参数

通过点击 FssiCAS—Preprocess—Material—Material 1/ Material 2/Material 3，用户可以自行更改材料名称，设置材料参数。各材料参数设置如图 1-10 所示。

Material 1

Material Name: Material 1

Constitutive Model: Elastic

Succeed: No Succeed

Initial Stress Tensile: Yes

Global Stress Integration:

Stress Integration Algorithm: Average 2rd-order

Tolerance for Strain Subdivision: 0.05

Maximum Number of Strain Subdivision: 100

Minimum Percentage of Strain Subdivision: 0.01

Constitutive Model Parameters:

Young's Modulus (Pa): 1e7

Poisson's Ratio: 0.33

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

Granular Density (kg/m³): 2700

Void Ratio: 0.5

Fluid Density (kg/m³): 1000

Permeability x(m/s): 1e-4

Permeability y(m/s): 1e-4

Saturation (0-1): 1

OK

Material 2

Material Name: Material 2

Constitutive Model: Elastic

Succeed: No Succeed

Initial Stress Tensile: Yes

Global Stress Integration:

Stress Integration Algorithm: Average 2rd-order

Tolerance for Strain Subdivision: 0.05

Maximum Number of Strain Subdivision: 100

Minimum Percentage of Strain Subdivision: 0.01

Constitutive Model Parameters:

Young's Modulus (Pa): 1e7

Poisson's Ratio: 0.33

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: 0.6

Permeability x(m/s): 1e-1

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

OK

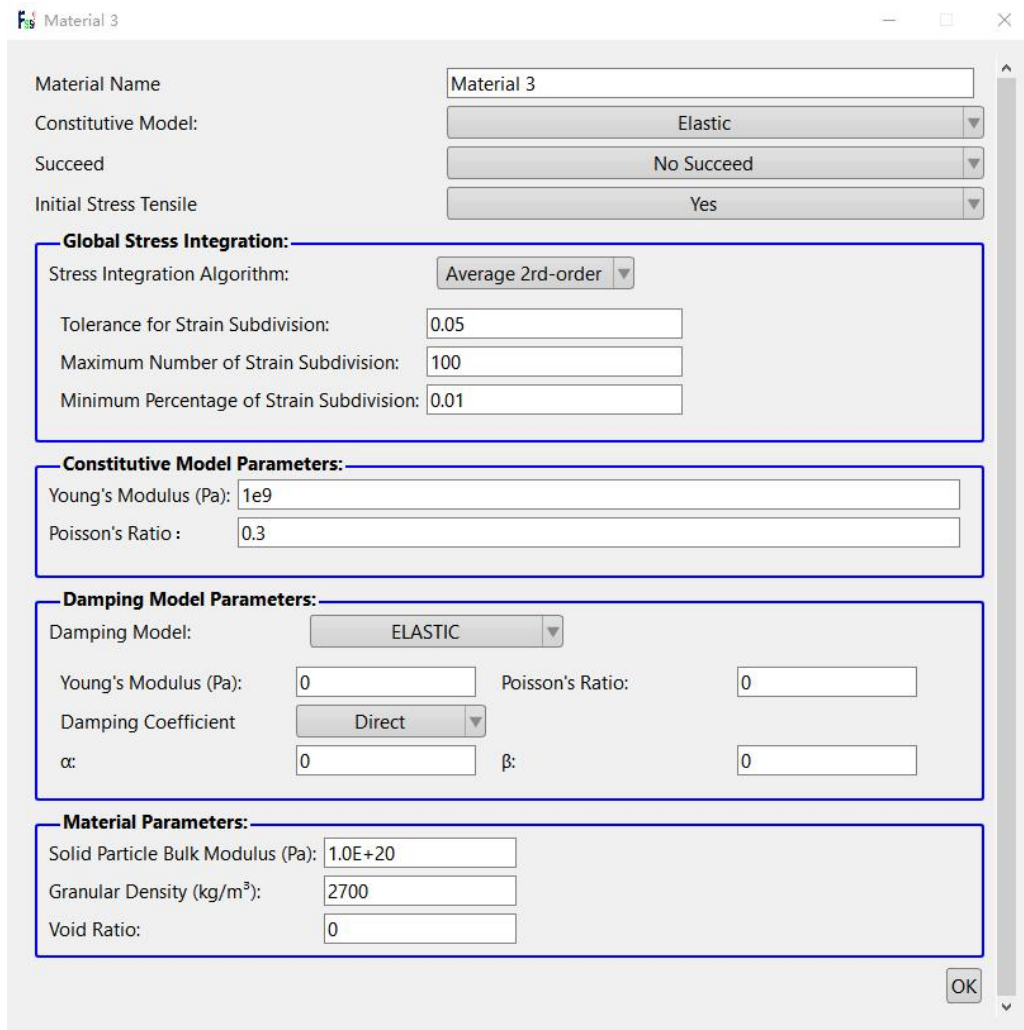


图 1-10 海床的计算参数设置界面

19.2.3.2 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 如图所示。Step 2 与 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。

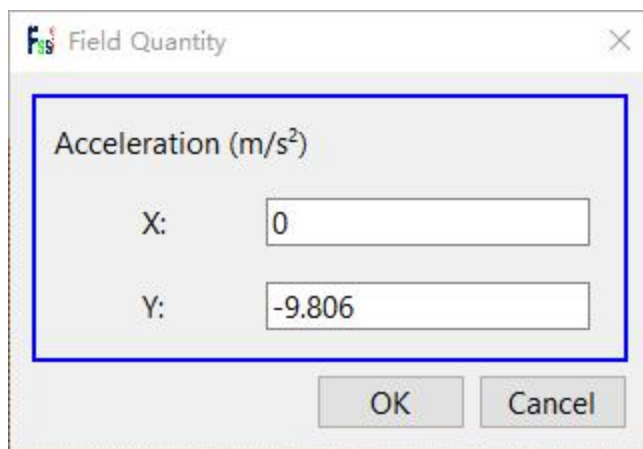
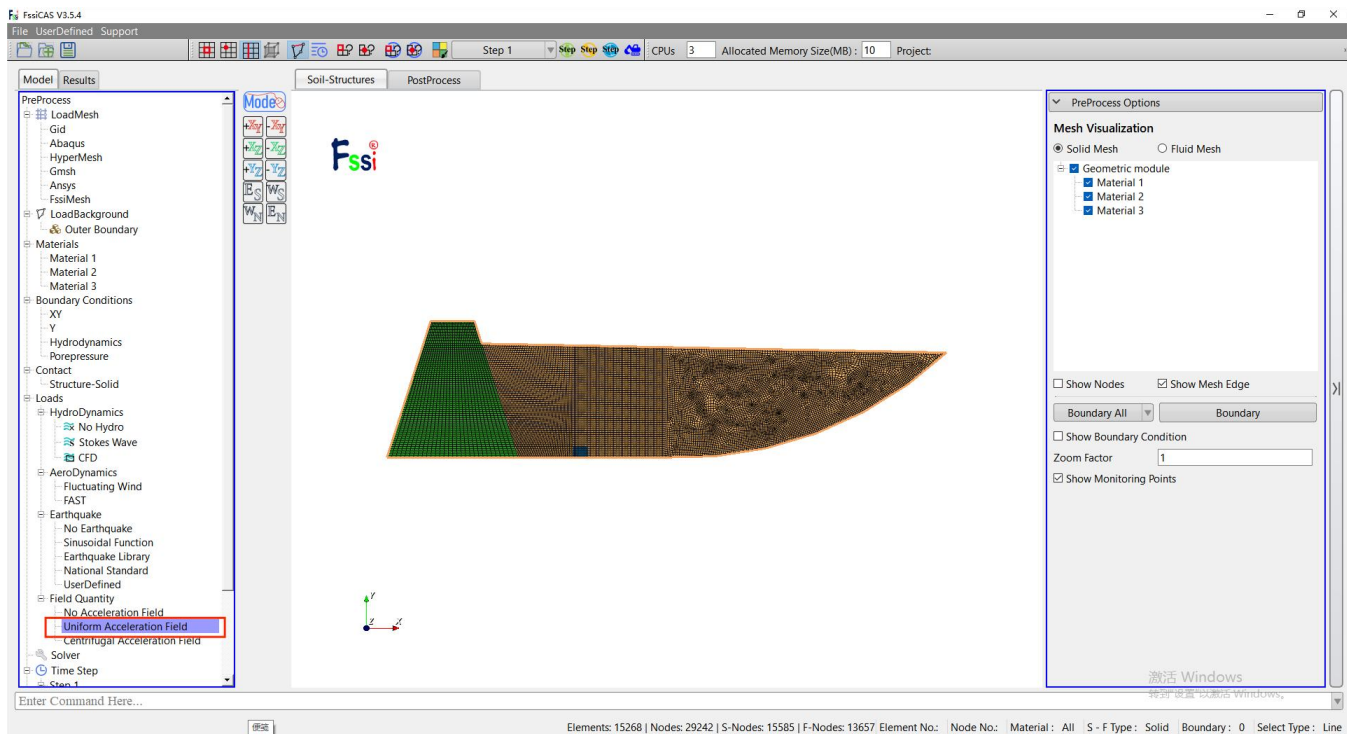


图 1-11 重力加速度设置界面

19.2.3.3 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 1-12 所示。

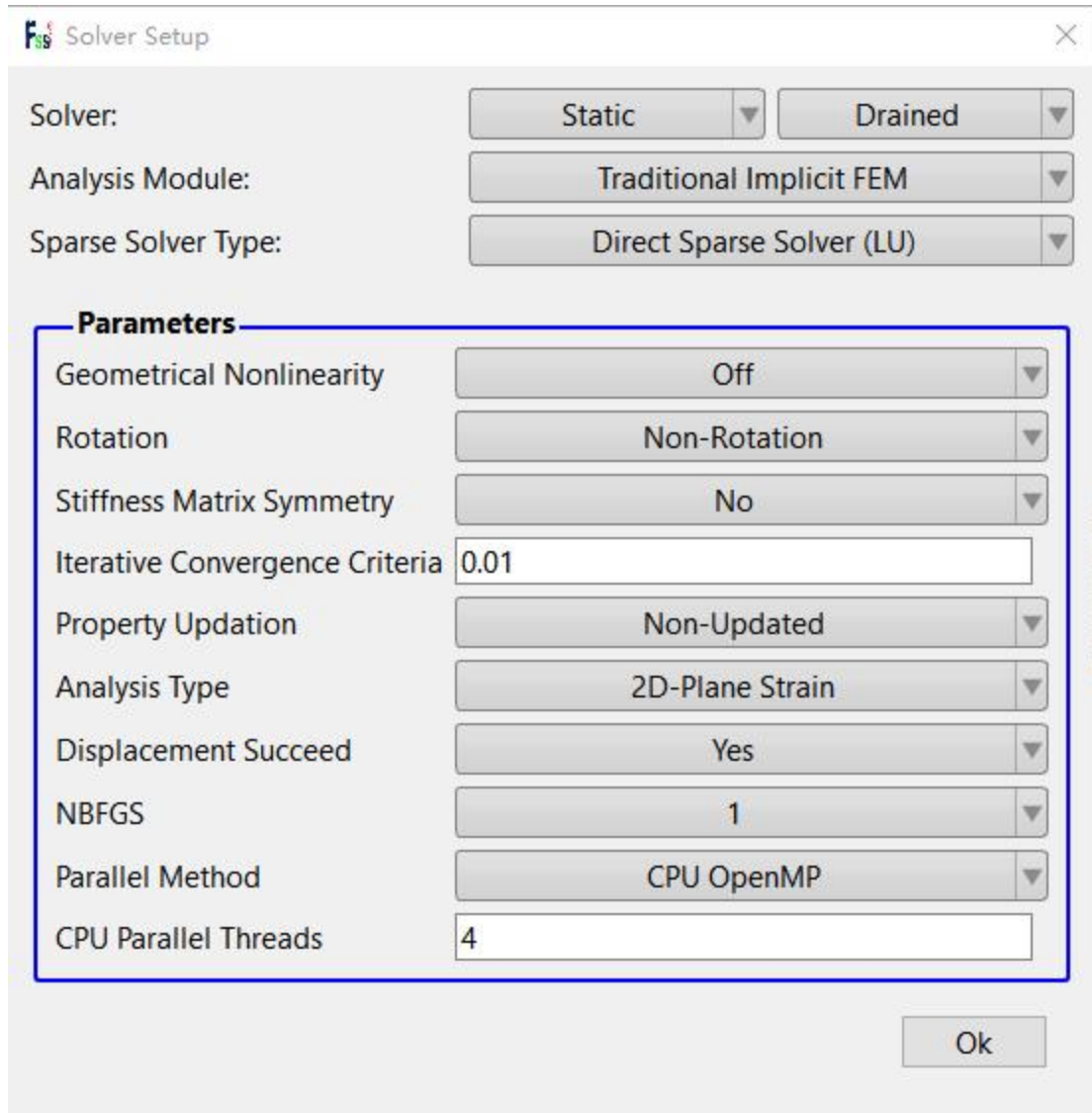


图 1-12 求解器类型及相关参数设置界面

19.2.3.4 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 0.2 s；Updation for Coordinate Time (s)为坐标更新时间，设置为 2 s（大于计算总时间，意为不更新坐标）；Updation for Global Stiffness Matrix (s)为刚度矩阵更新时间，设置为 2 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 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 Type 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 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 1-13 所示。

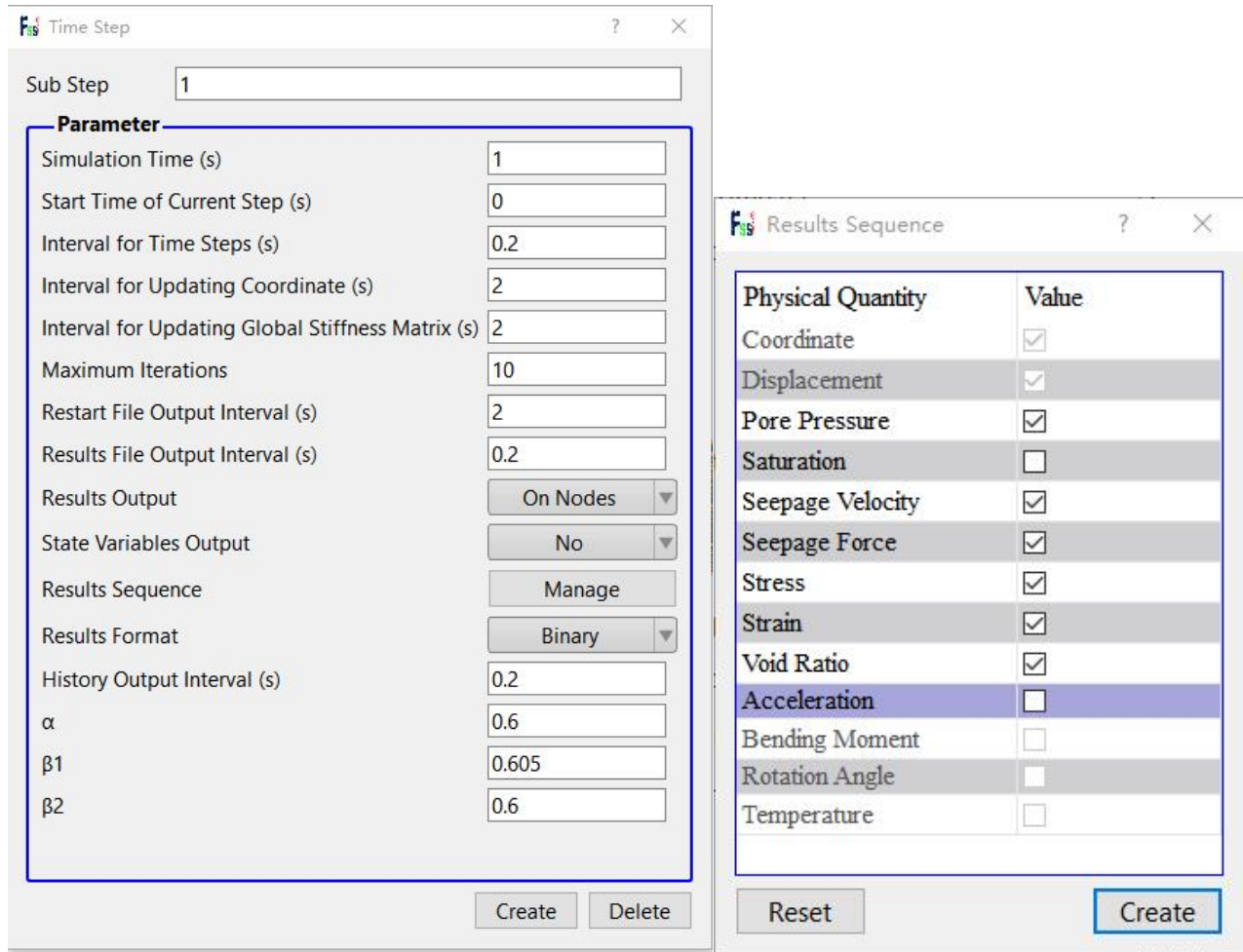




图 1-13 时间步相关参数设置界面

19.2.4 Step 2 设置

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 Consolidation。

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。本节只展示 Step 2 需要修改的与 Step 1 不同的设置。

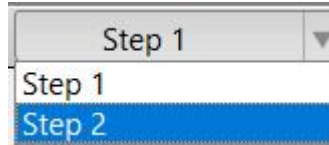


图 1-14 选择时间步的步骤示意图

19.2.4.1 设置材料参数

点击 Preprocess—Material—Material 1，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 1 采用 General Elastic 本构模型，材料参数设置如图 1-15 所示，其他材料的参数不进行修改。

Material 1

Material Name: Material 1

Constitutive Model: General Elastic

Succeed: No Succeed

Initial Stress Tensile: No

Global Stress Integration:

Stress Integration Algorithm: Average 2rd-order

Tolerance for Strain Subdivision: 0.05

Maximum Number of Strain Subdivision: 100

Minimum Percentage of Strain Subdivision: 0.01

Constitutive Model Parameters:

Bulk Modulus K_0 (Pa): 5.8507e7

Shear Modulus G_0 (Pa): 2.535e7

Mean Effective Confining Stress P_0 (Pa): 4e3

Maximum Stress Ratio: 1.3

Type of Variation for Bulk Modulus: Linear

Type of Variation for Shear Modulus: Linear

Coulomb Envelope and Tension Cutoff: Unapplied

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: 0.5 Permeability x(m/s): 1e-4

Permeability y(m/s): 1e-4

OK

图 1-15 材料参数设置界面

19.2.4.2 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 1-16 所示。

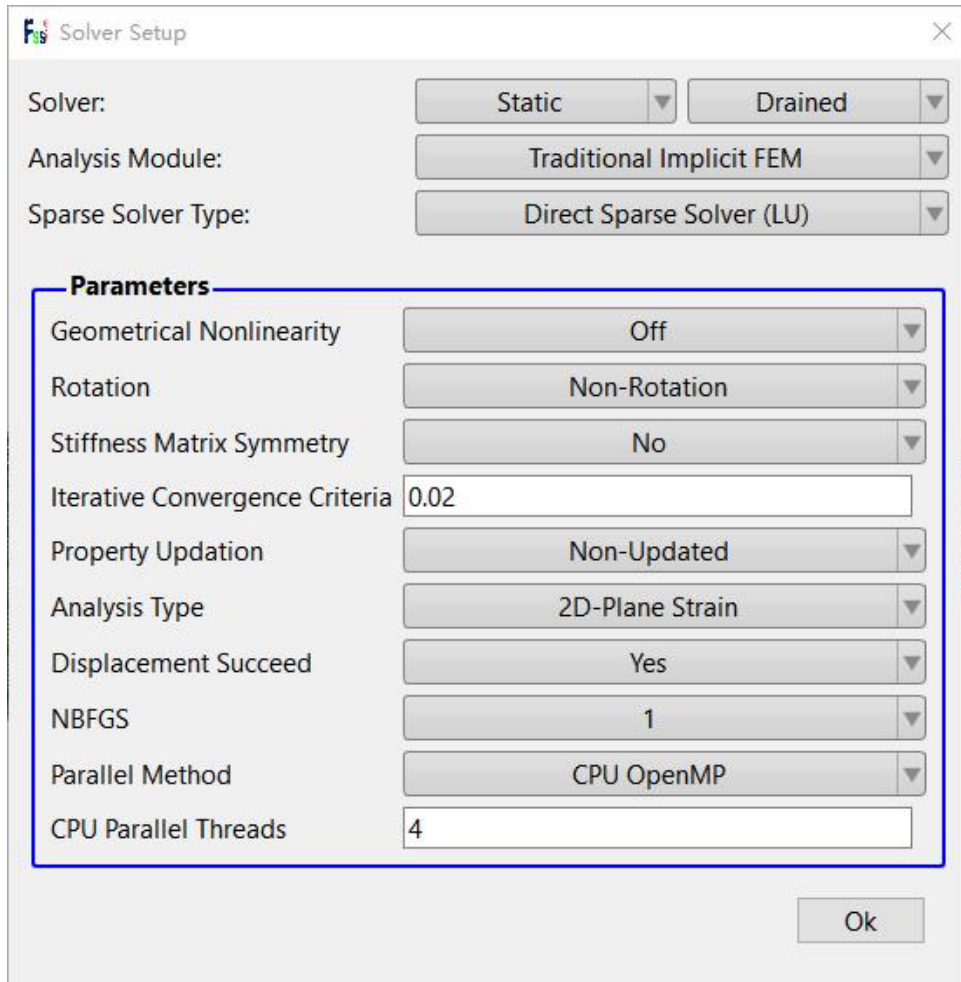


图 1-16 求解器类型及相关参数设置界面

19.2.4.3 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 0.2 s，不更新坐标，不更新刚度矩阵，每个时间步最大迭代次数为 20 步，不生成重启文件，每 0.2 s 输出一次结果文件，每 0.2 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 1-17 所示。

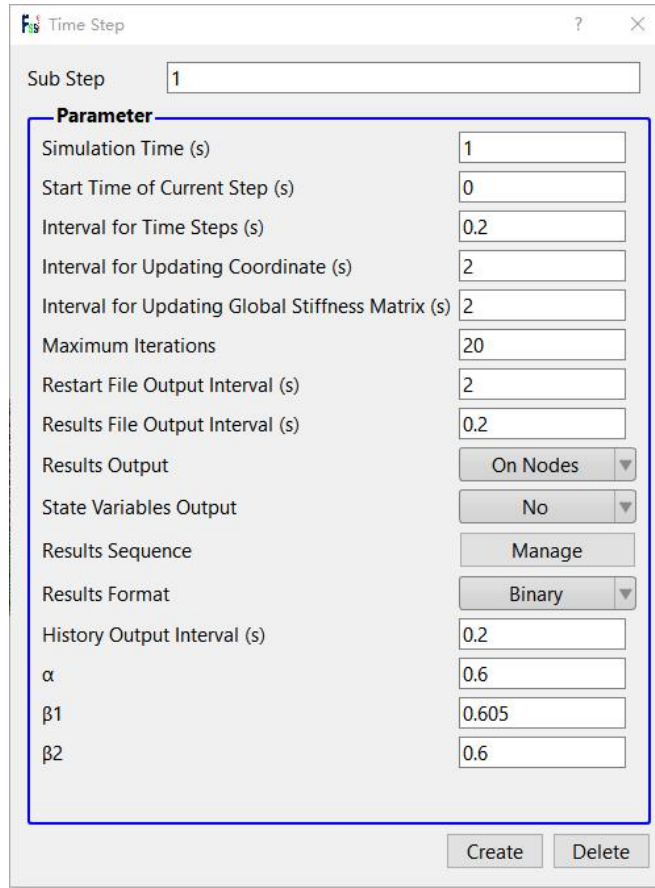




图 1-17 时间步相关参数设置界面

19.2.5 Step 3 设置

Step 3 为地震动力响应阶段,本阶段添加了用户自定义地震波载荷。因此求解器选择 Dynamic, 土体部分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。

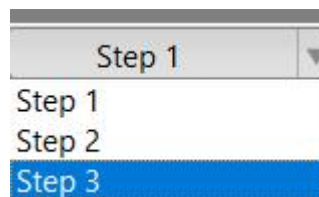


图 1-18 选择时间步的步骤示意图

19.2.5.1 设置材料参数

点击 Preprocess—Material—Material 1，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 Material 1 采用 Pastor-Zienkiewicz Mark III 本构模型，材料参数设置如图 1-19 所示，其他材料参数不进行修改。

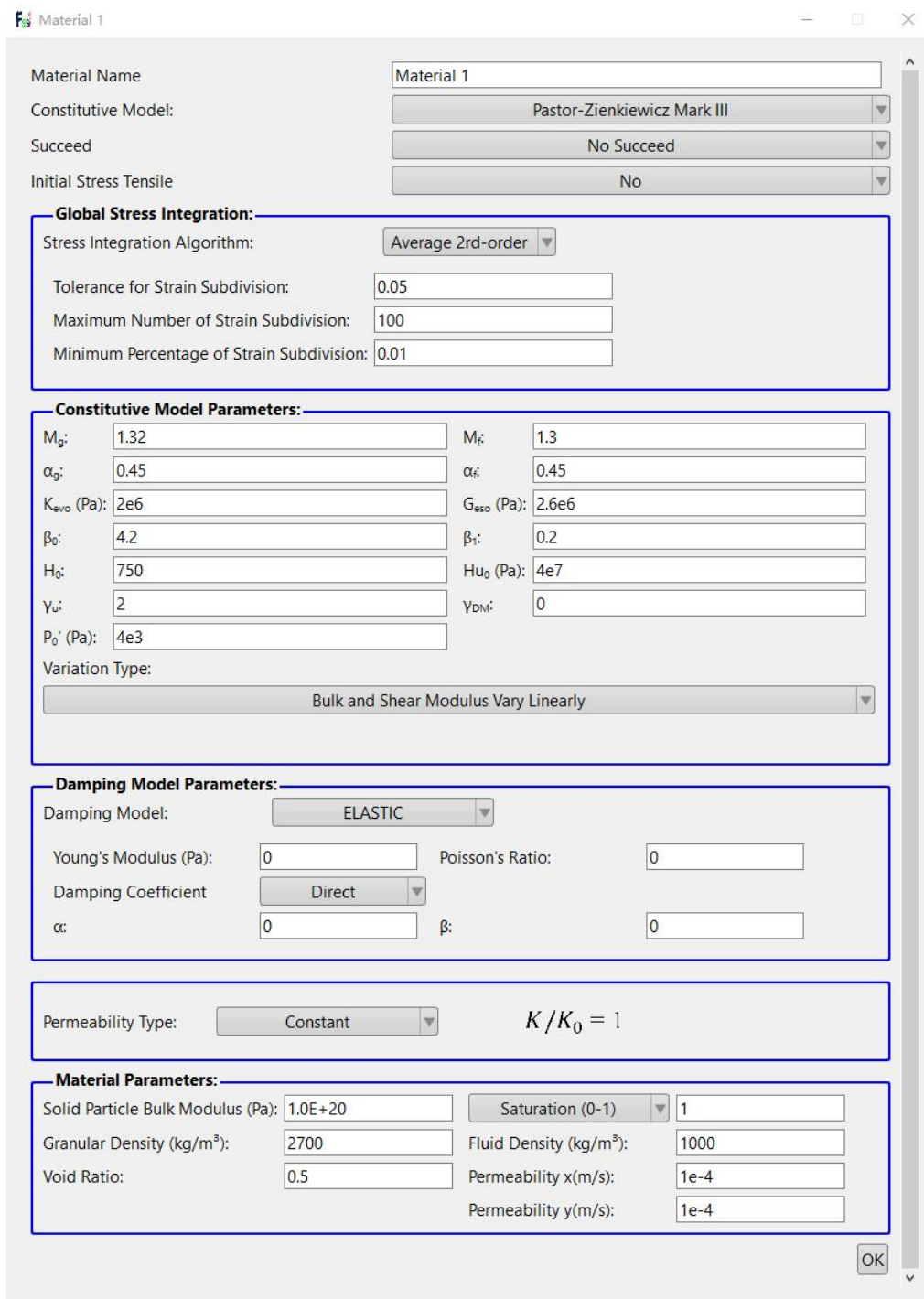


图 1-19 材料参数设置界面

19.2.5.2 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 1-20 所示。

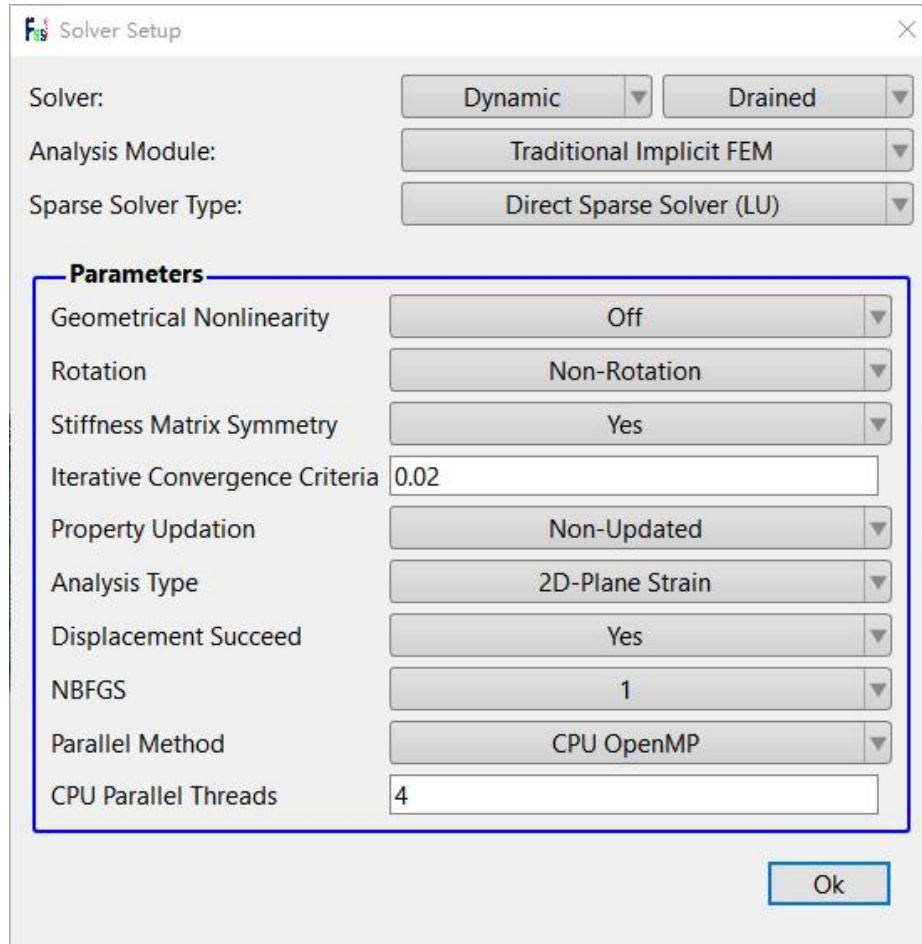
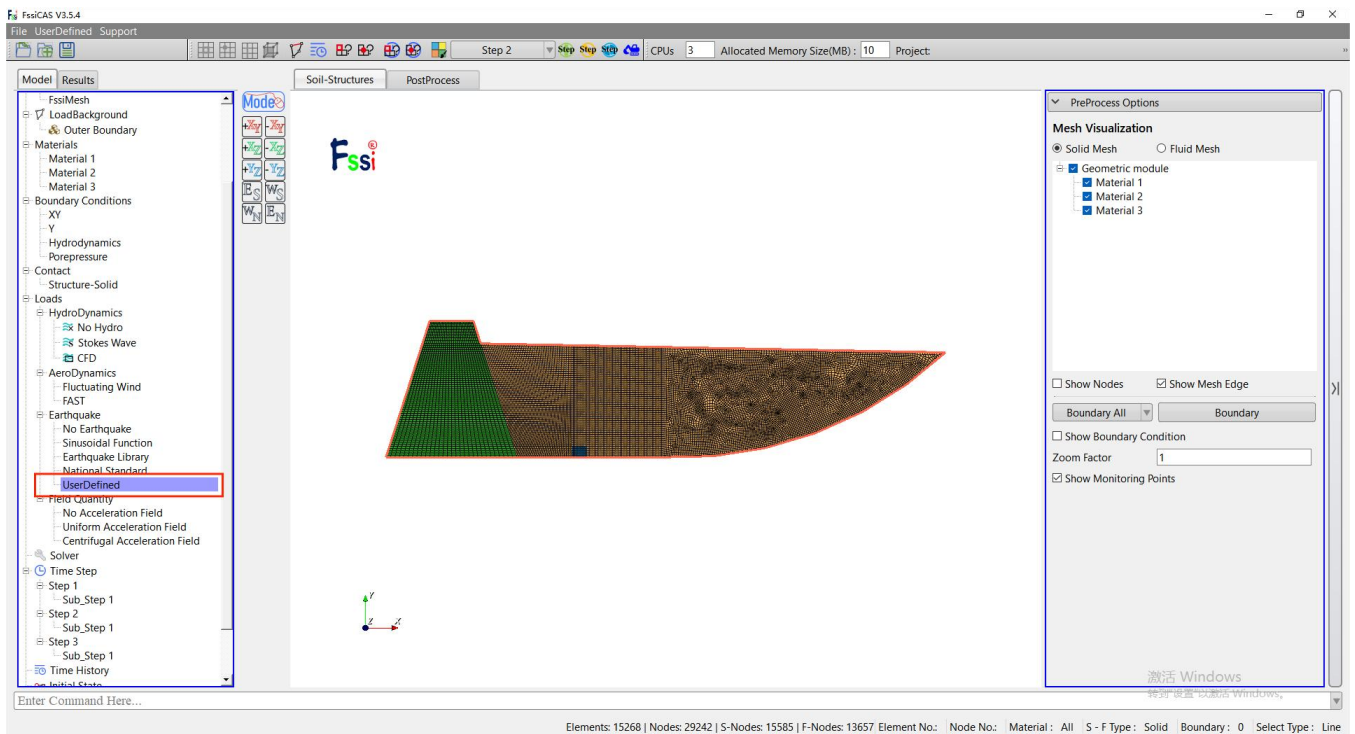


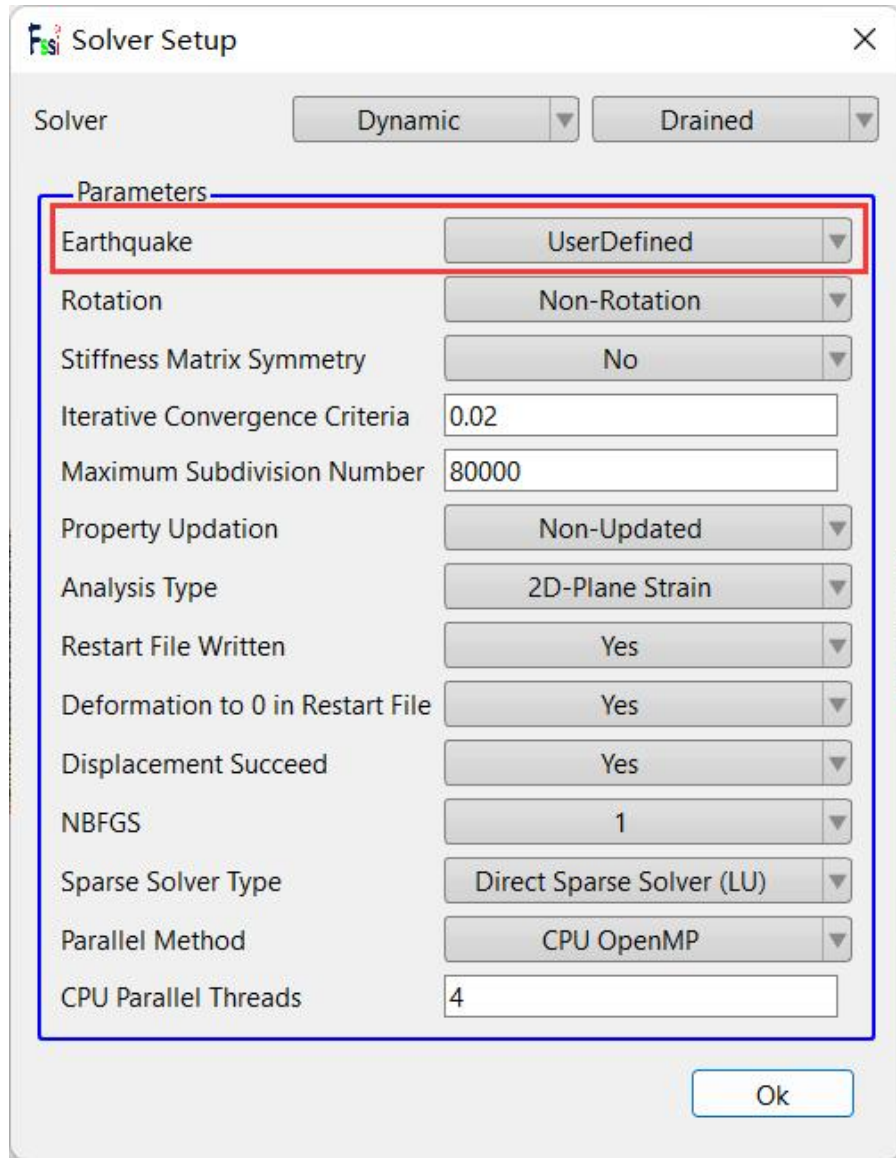
图 1-20 求解器类型及相关参数设置界面

19.2.5.3 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 1-21 所示。加载地震波后，在界面中显示的地震波如图 1-22 所示。



(a)新版本加载地震波示意图



(b)旧版本加载地震波示意图

图 1-21 加载用户自定义地震波界面示意图

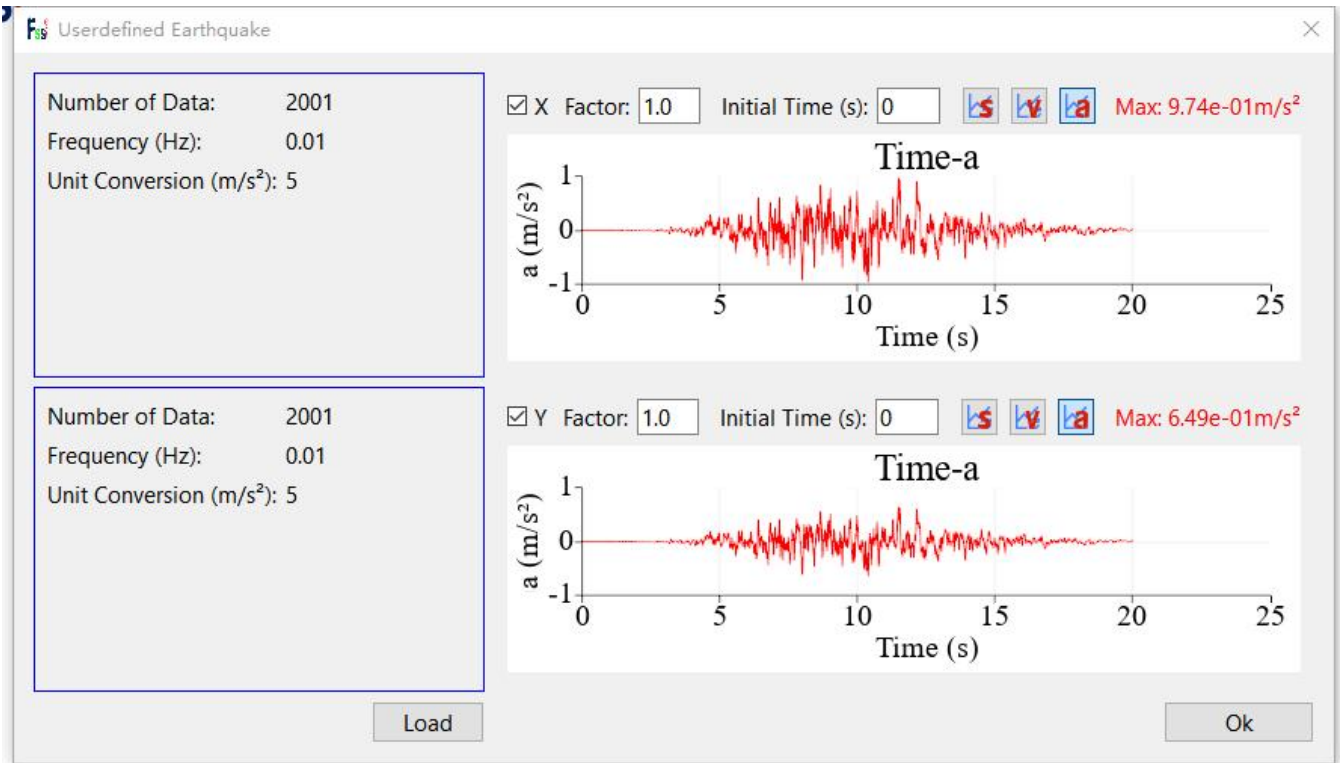


图 1-22(a) 自定义地震波相关参数设置界面

| | | | | | | |
|----|----------------------|--|-------|-------|-------|--|
| 1 | Eqk X | —— X方向的自定义地震波的名字 | | | | |
| 2 | 2001 0.01 0 -3e-05 5 | → 从左到右表示: 总数值点个数; 地震波时间步增量值; 加载地震波开始时间; 首个数值点的数值; 放缩倍数, 若为1则表示不放缩 | | | | |
| 3 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 4 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 5 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 6 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 7 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 8 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 9 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 10 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 11 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 12 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 13 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 14 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 15 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 16 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 17 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 18 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 19 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 20 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 21 | 3e-05 | 2e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 3e-05 | |
| 22 | 3e-05 | 4e-05 | 4e-05 | 4e-05 | 4e-05 | |
| 23 | 4e-05 | 3e-05 | 3e-05 | 2e-05 | 2e-05 | |

→ 数据区, 此处共2001个数据

```

401 -7e-05  0.00104  -0.00166  0.0009  0.00513
402 0.00613  0.00551  0.00545  0.0039  0.00324
403 0.00273
404 Eqk_Y → Y方向的自定义地震波名字
405 2001 0.01 0 -2e-05 5
406 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
407 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
408 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
409 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
410 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
411 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
412 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
413 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
414 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
415 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
416 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
417 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
418 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
419 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
420 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
421 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
422 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
423 2e-05  2e-05  2e-05  2e-05  2e-05
424 2e-05  1.33333e-05  2e-05  2e-05  2e-05
425 2e-05  2.66667e-05  2.66667e-05  2.66667e-05  2.66667e-05
426 2.66667e-05  2e-05  2e-05  1.33333e-05  1.33333e-05
427 2e-05  2.66667e-05  2e-05  2e-05  2e-05
801 0.00176667  0.00106  0.00104  0.00192  -0.000566667
802 -0.00301333  -0.00378667  -0.00354  -0.00376667  -0.00266667
803 -0.0034  -0.0014  -0.00273333  -0.00238667  -0.0015
804 -4.66667e-05  0.000693333  -0.00110667  0.0006  0.00342
805 0.00408667  0.00367333  0.00363333  0.0026  0.00216
806 0.00182
807 Eqk_Z
808 2001 0.0 0.0 0.0 0.0 二维案例中, 无Z方向地震波, 编写格式可以如框所示
809 2001*0.0
810

```

图 1-22(b) 自定义地震波数据文件说明

19.2.5.4 设置时间步

点击 FssiCAS—Preprocess—Solver—Time Step, 设置计算总时间为 20s, 时间步长为 0.01 s, 每 1 s 更新一次坐标, 每 1 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 0.01 s 输出一次结果文件, 每 0.01 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 1-23 所示。

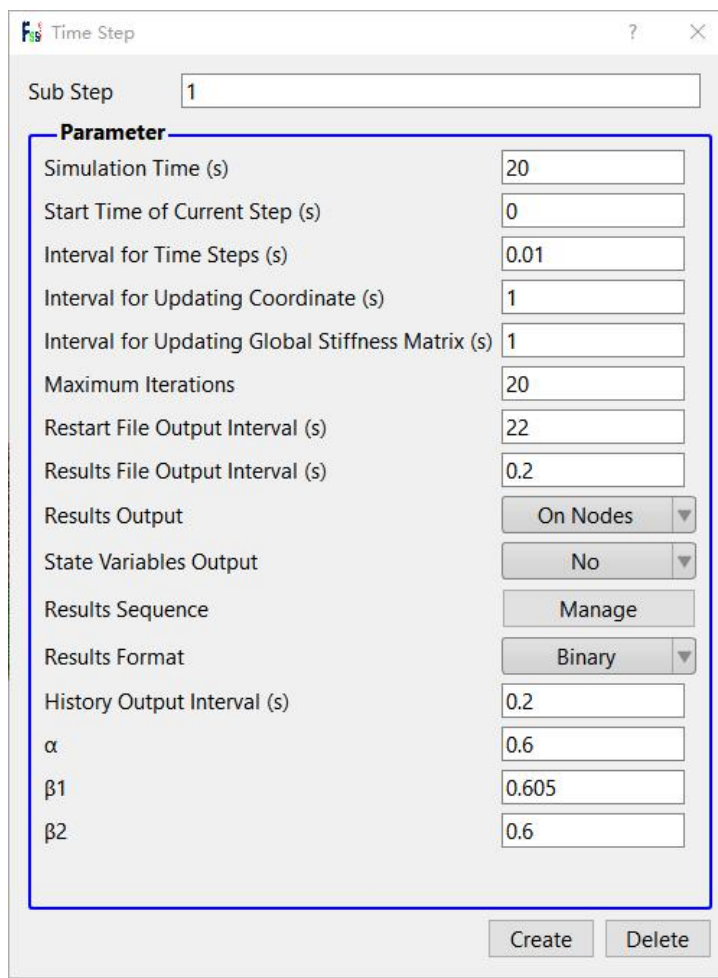
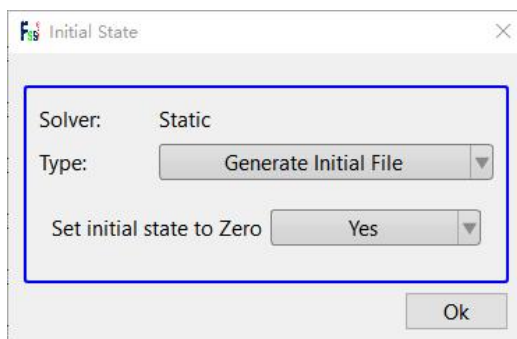


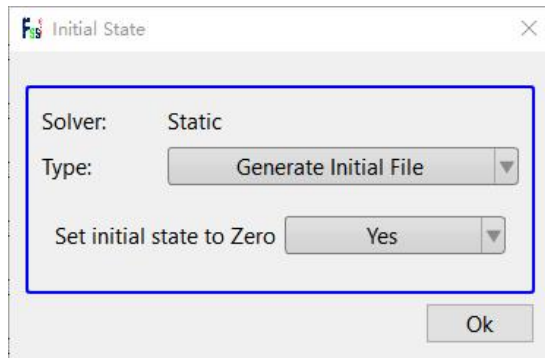
图 1-23 时间步相关参数设置界面

19.2.6 设置初始条件

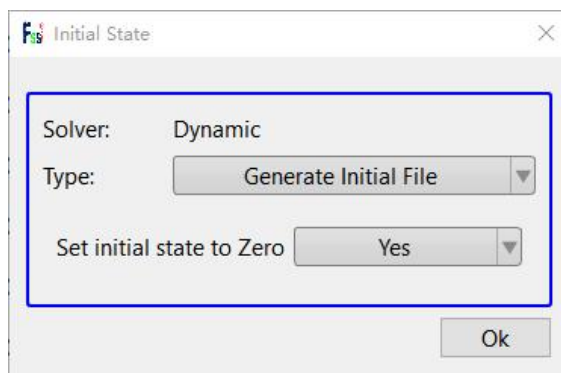
点击工具栏，分别在 Step 1、Step 2、Step 3 下点击 FssiCAS—Preprocess—Initial State，设置初始条件，点击 ok，完成初始状态设置，如图 1-24 所示。



(a) Step 1 的初始条件设置界面



(b) Step 2 的初始条件设置界面



(c) Step 3 的初始条件设置界面

图 1-24 初始条件设置界面示意图

19.2.7 计算

点击 FssiCAS—Preprocess—Computation—FSSI-W, 勾选 All Step, 开始计算。界面显示图 1-25 红框内所示内容时, 即表示计算完成。

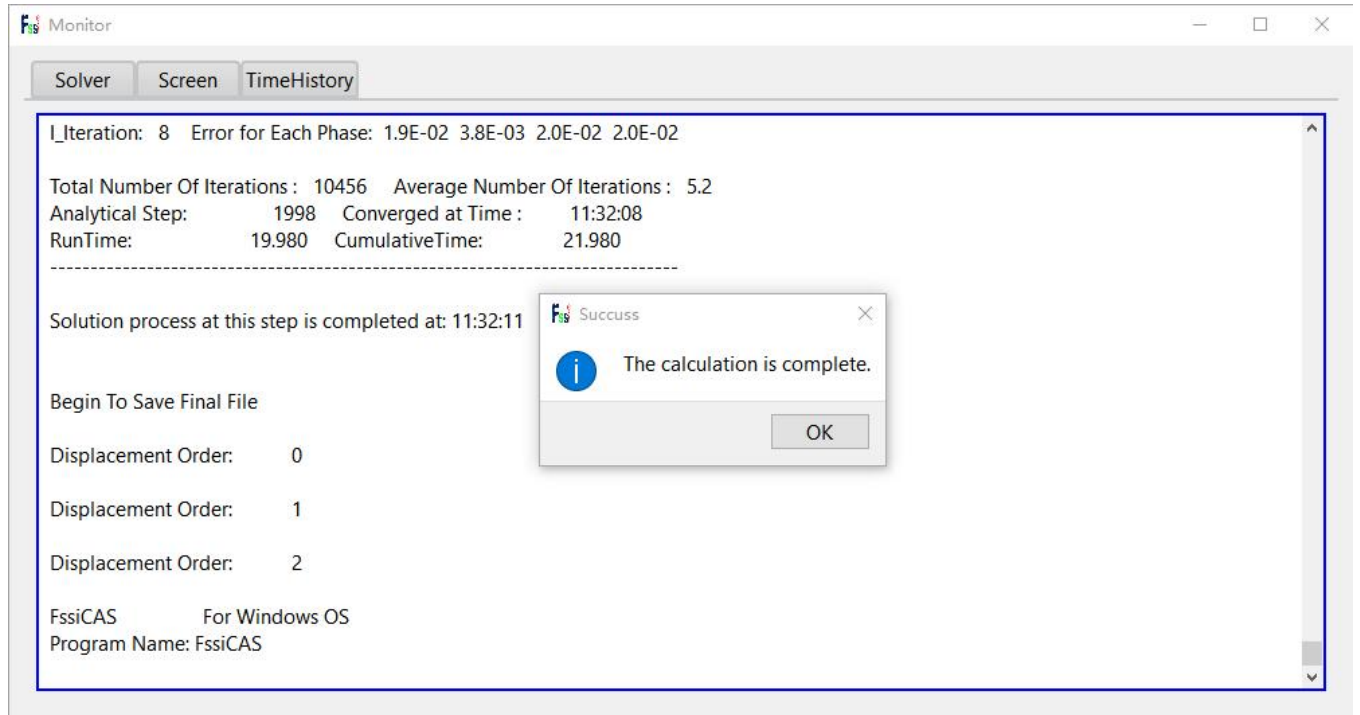


图 1-25 数值计算完成界面

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。

19.3 FssiCAS 图形界面操作——后处理

19.3.1 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 1-26 所示。

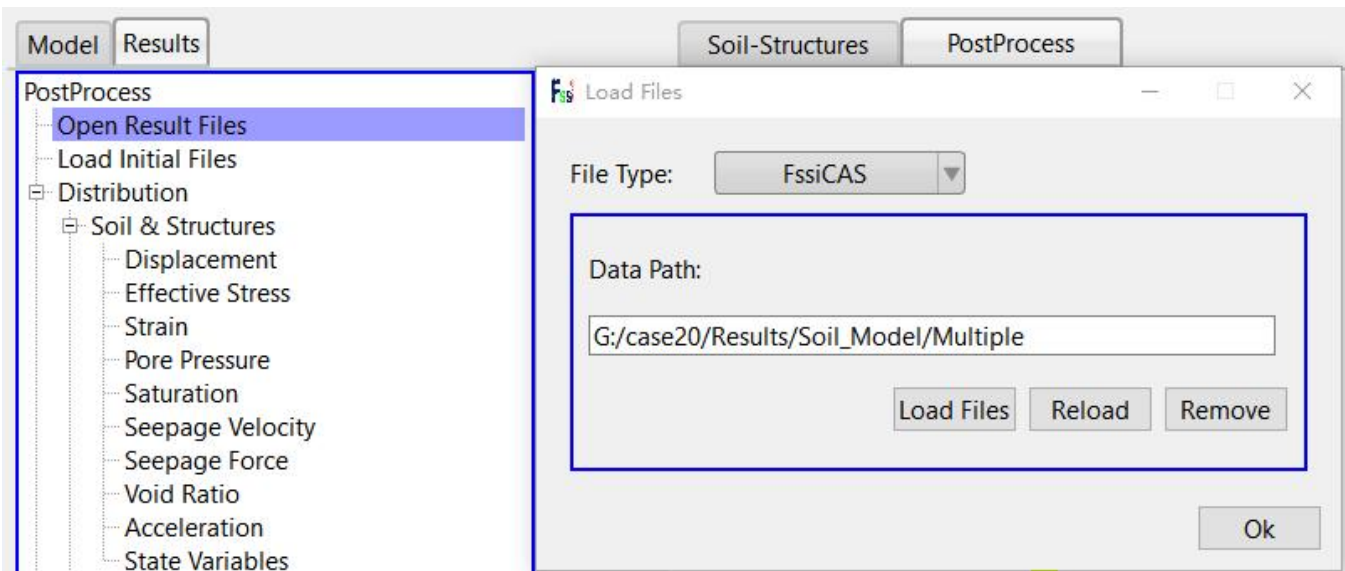


图 1-26 加载数值计算结果文件

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。

19.3.2 绘制分布图

点击 FssiCAS—Postprocess—Distribution—Solid & Structures ，可以选择绘制位移、应力、孔压等计算分布图。例如，点击树状菜单里中的 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，即可绘制 X 方向的位移分布图。如图 1-27 所示。

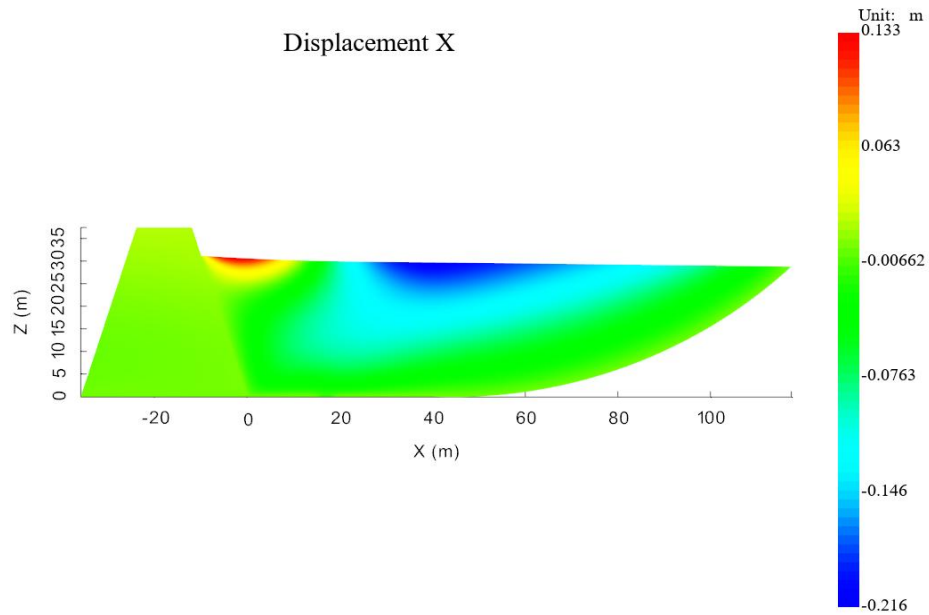


图 1-27 $t = 1$ s 时 X 方向上的位移结果分布图

本案例目的为研究在渗流和地震的动力响应。计算时间的 0 秒—2 秒为稳态渗流阶段。计算时间的 2 秒—22 秒是地震动力响应阶段。

在稳态渗流阶段，点击 FssiCAS—Postprocess—Distribution—Solid & Structures—Pore Pressure，可以查看孔隙压力分布图。如图 1-28 所示。

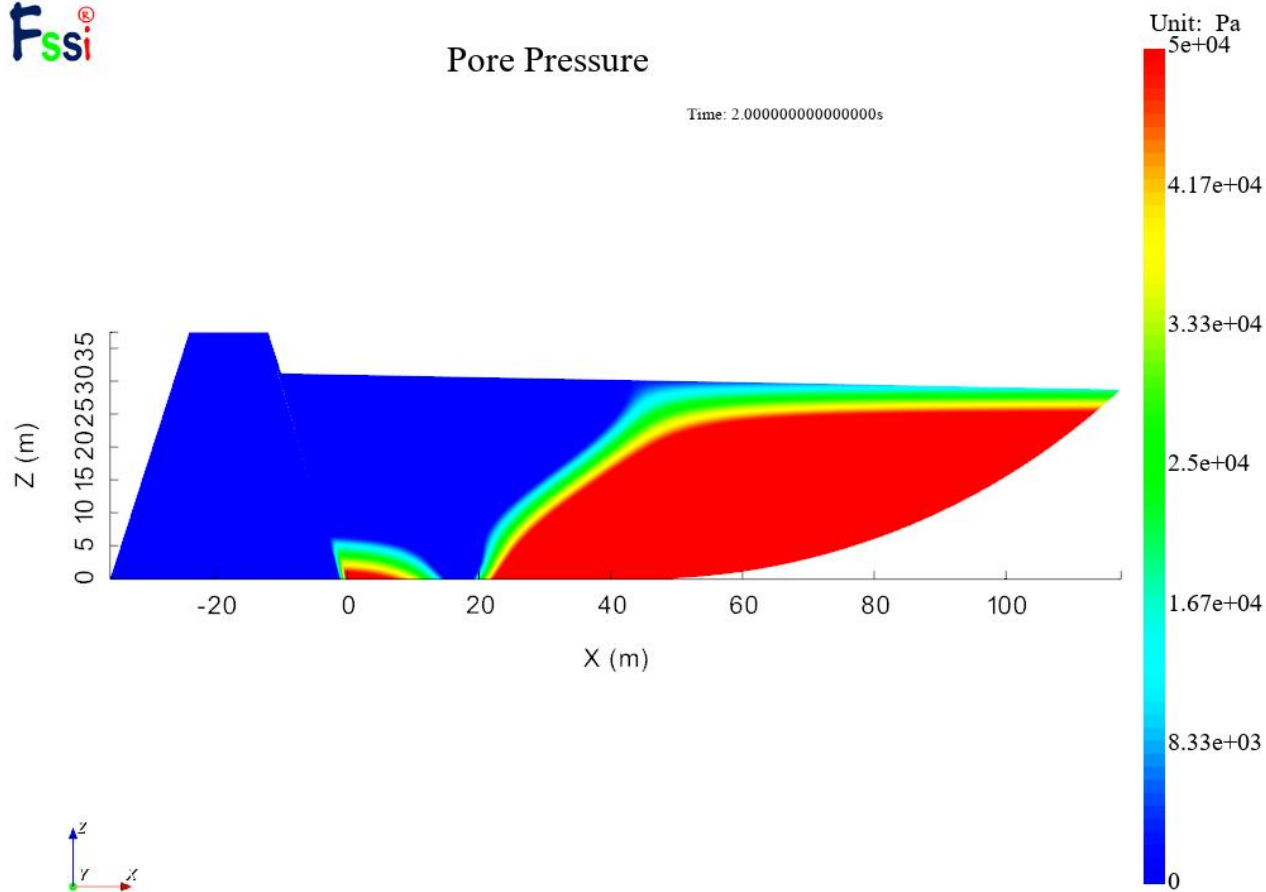


图 1-28 稳态渗流阶段($t = 2$ s) 孔隙压力分布图

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 1-29 所示。

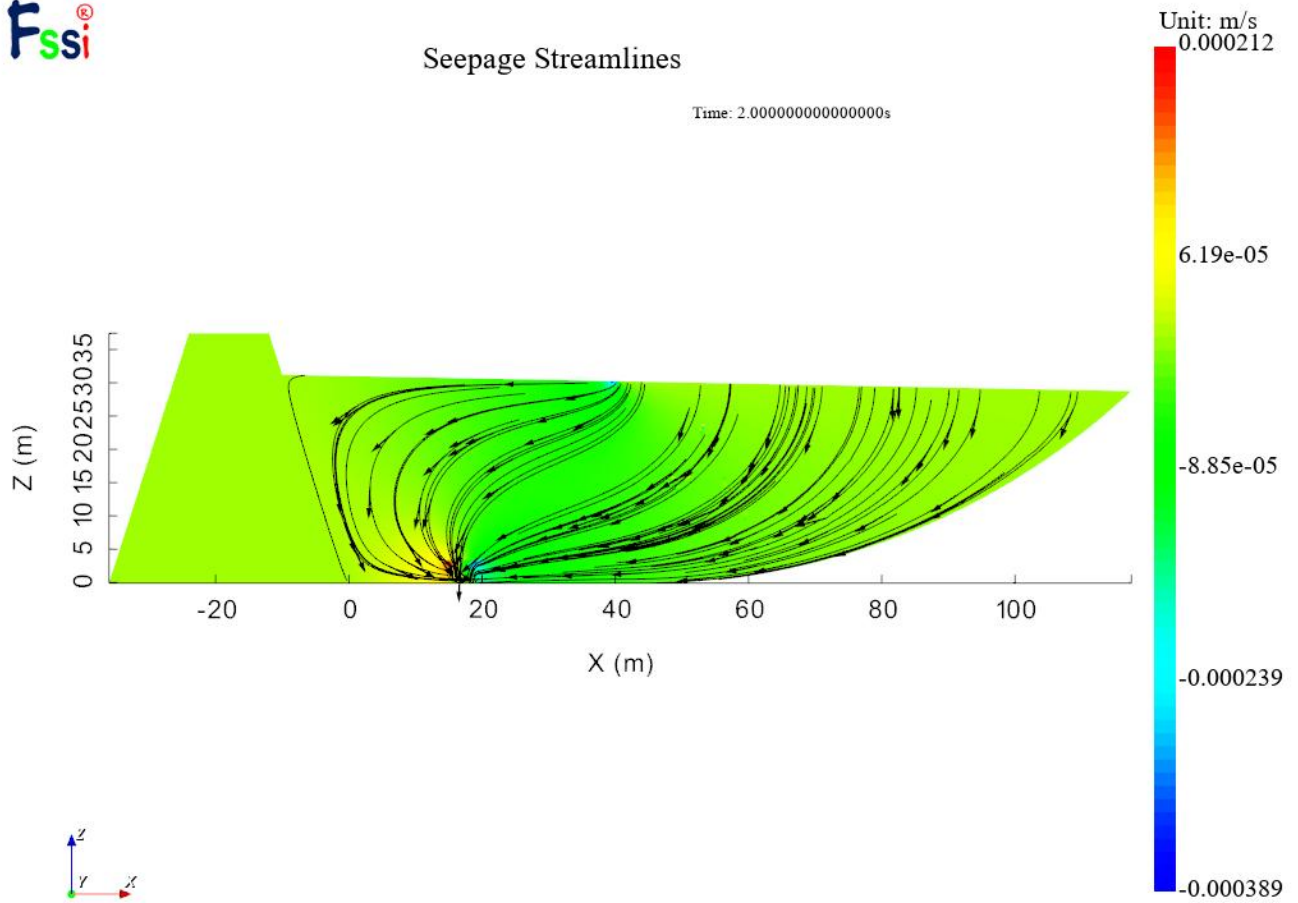


图 1-29 稳态渗流阶段($t = 2\text{ s}$) 时渗透流线分布图

后处理部分不仅可以输出模型的位移、应力、应变结果分布图，也可以输出模型上节点或单元的时程曲线。

首先点击 History Plot—Soil History—History Plot on Node/Element，选择需要输出时程曲线的节点或单元，勾选节点 No.*，双击 Plot Type 中所列选项可以查看节点的时程曲线。

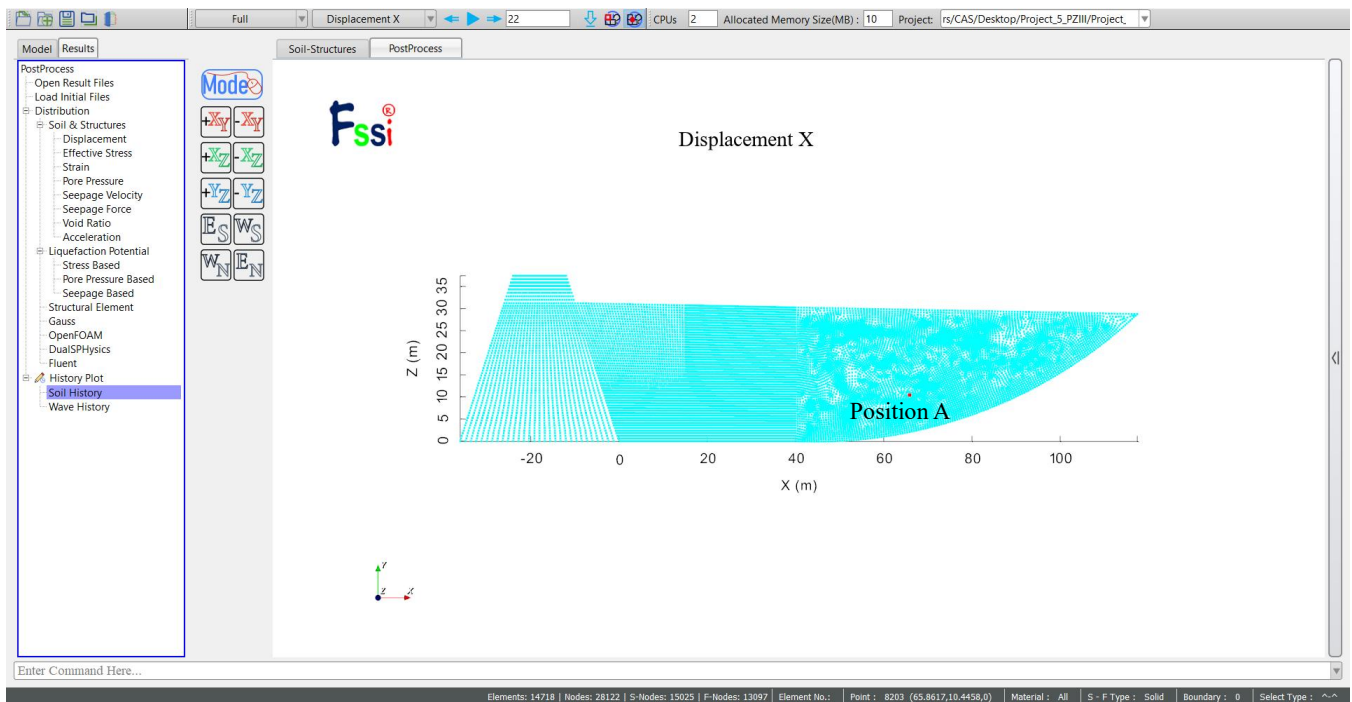
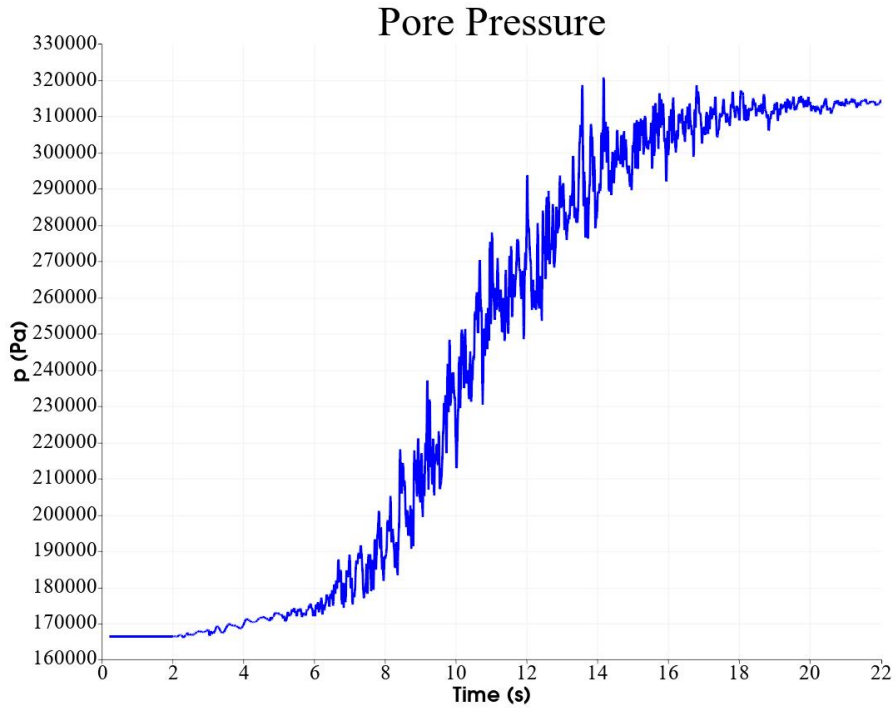
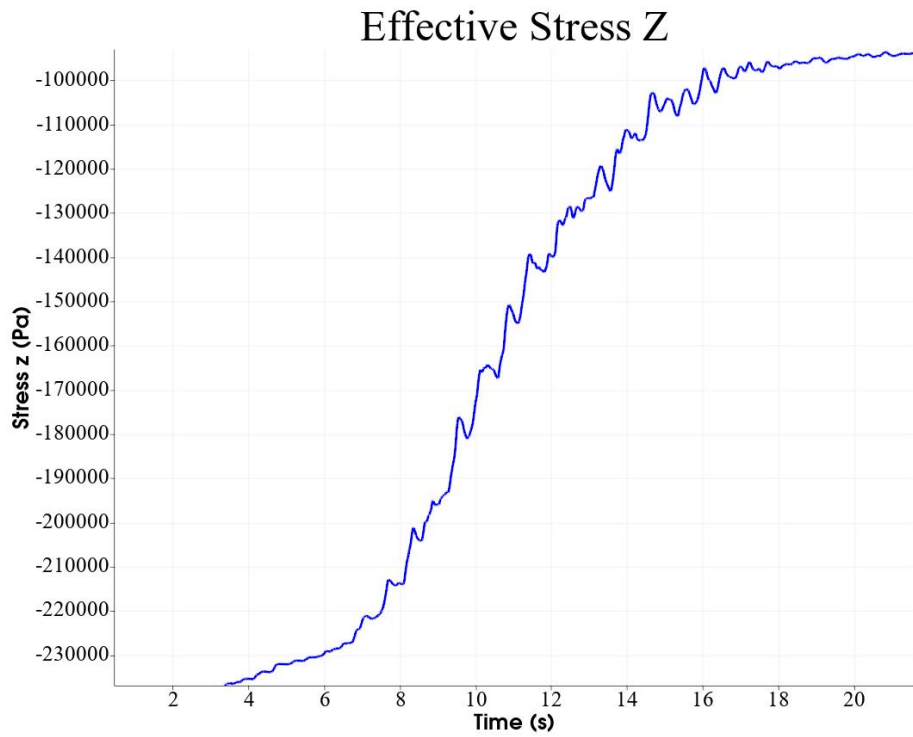


图 1-30 选择 No.8203 节点作为监测点 A 示意图

选择土体内渗流区域内一个典型点作为监测点 A，如图 1-30 所示。绘制监测点 A 的 Effective Pressure Z 和 Pore Pressure 时程曲线，时程曲线如图 1-31 所示。



(a) 孔隙压力时程曲线



(b) Z 方向的有效应力时程曲线

图 1-31 监测点 A 的时程曲线图

从图 1-31 可以看出，在地震波的作用下，监测点 A 的累积孔隙水压力会持续上升，土颗粒间的有效应力（绝对值）逐渐减小。当累积超静孔隙水压力上升到足以克服其上覆的土重量时，粒间有效应力即接近为 0，表明土已经发生了液化。

地震作用后的渗流流线分布图如图 1-32 所示。

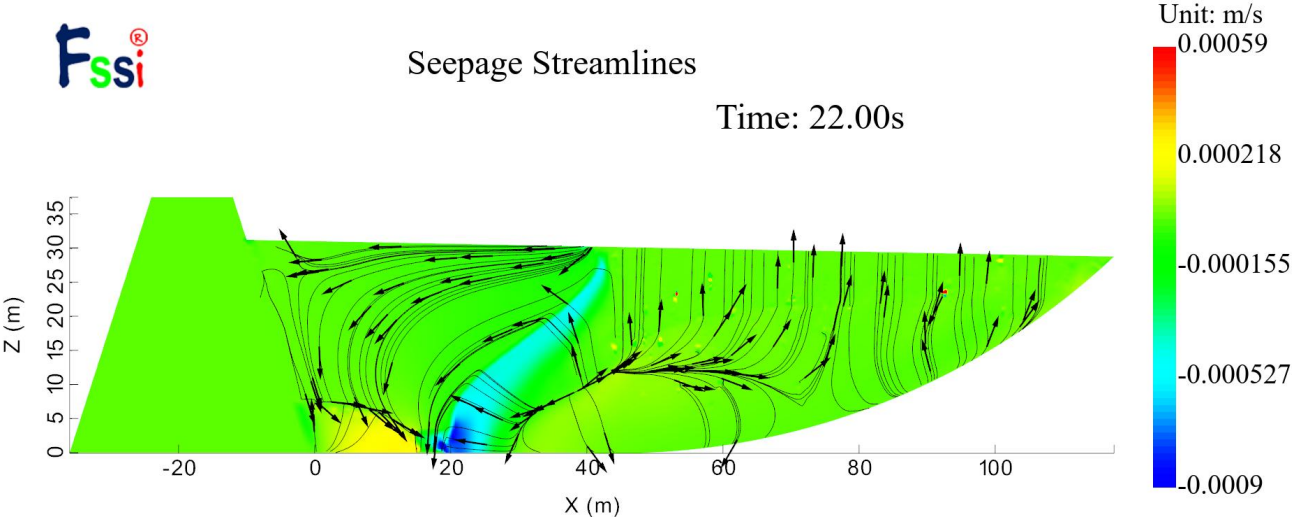


图 1-32 地震作用后(t = 22 s)的渗流流线分布图