

# 海洋风机单桩基础

## 1. 案例说明

本章节案例是一个钢管桩的水平加载模型试验的对比验证案例，现场模型试验的布置如图 1-1 所示。

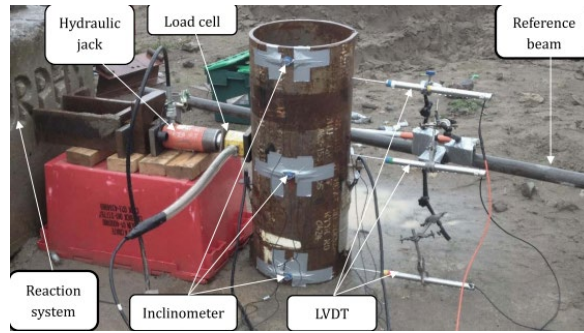


图 1-1 现场模型试验示意图

本案例的计算整体模型如图 1-2 所示。

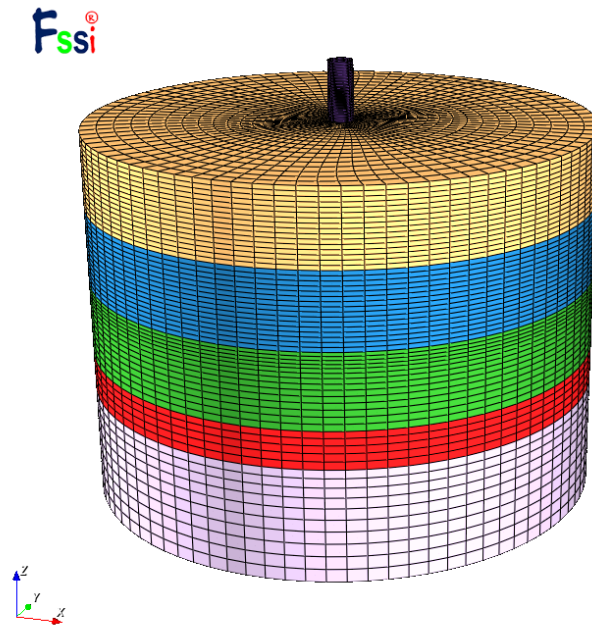


图 1-2 计算模型示意图

钢管桩的尺寸及参数如下表 1.1 所示。

表 1.1 模型试验钢管桩参数

| 桩径/m | 壁厚/m  | 桩长/m | 埋深/m | 泊松比 | 弹性模量/GPa |
|------|-------|------|------|-----|----------|
| 0.34 | 0.014 | 3    | 2.2  | 0.3 | 210      |

桩周围土体设置为圆柱形，直径 6.8m，高 5m，土体的参数如下表 1.2 所示。

表 1.2 模型试验土层参数

| 土层编号 | 土层厚度/m | 泊松比 | 粘聚力/kPa | 弹性模量/MPa | 内摩擦角/(°) |
|------|--------|-----|---------|----------|----------|
| 1    | 0~1    | 0.2 | 1       | 26.5     | 55.5     |
| 2    | 1~2    | 0.2 | 1       | 39.8     | 52.5     |
| 3    | 2~3    | 0.2 | 1       | 45.0     | 49.5     |
| 4    | 3~3.5  | 0.2 | 1       | 47.0     | 47.3     |
| 5    | >3.5   | 0.2 | 1       | 50.0     | 42.0     |

## 2. FssiCAS 图形界面操作——前处理

### 2.1 导入网格

本软件计算所需要的网格需要借助专业网格划分软件 GiD、Abaqus 等软件完成。本案例借助 GiD 软件建立模型并划分网格并导出。

点击 FssiCAS—Preprocess—LoadMesh，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，如图 2-1 导入 GiD 网络的步骤示意图所示。

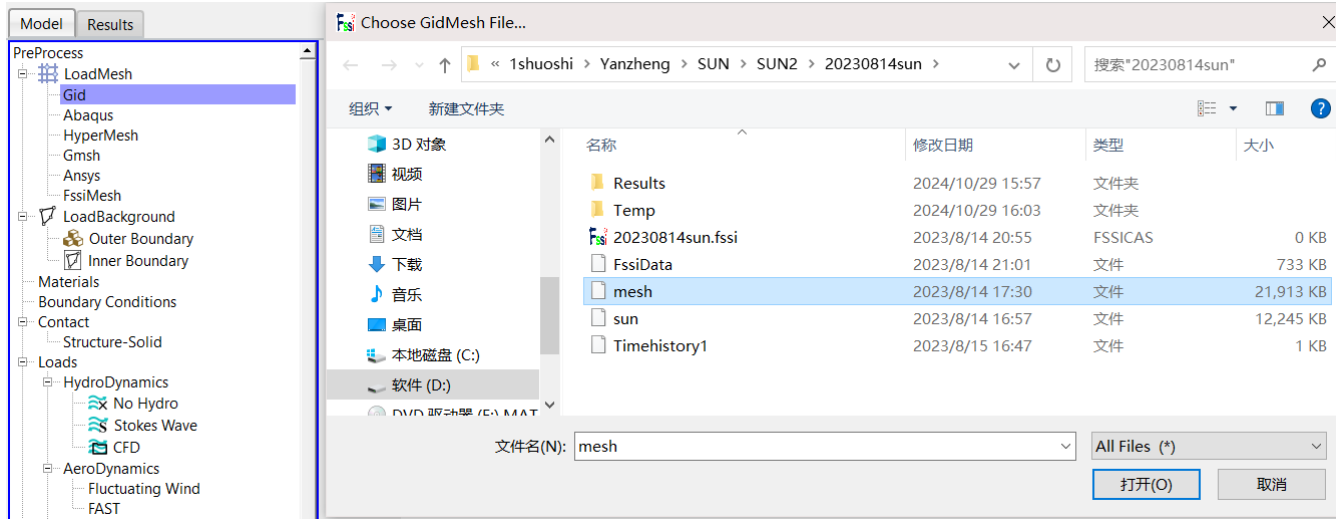


图 2-1 导入 GiD 网络的步骤示意图

在弹出对话框中设置流体节点阶次如图 2-2 所示。本案例中固体节点采用 四边形四节点单元。不设置流体节点，因此，界面中流体节点阶次设置为 0， 点击 Ok 按钮确认选择。

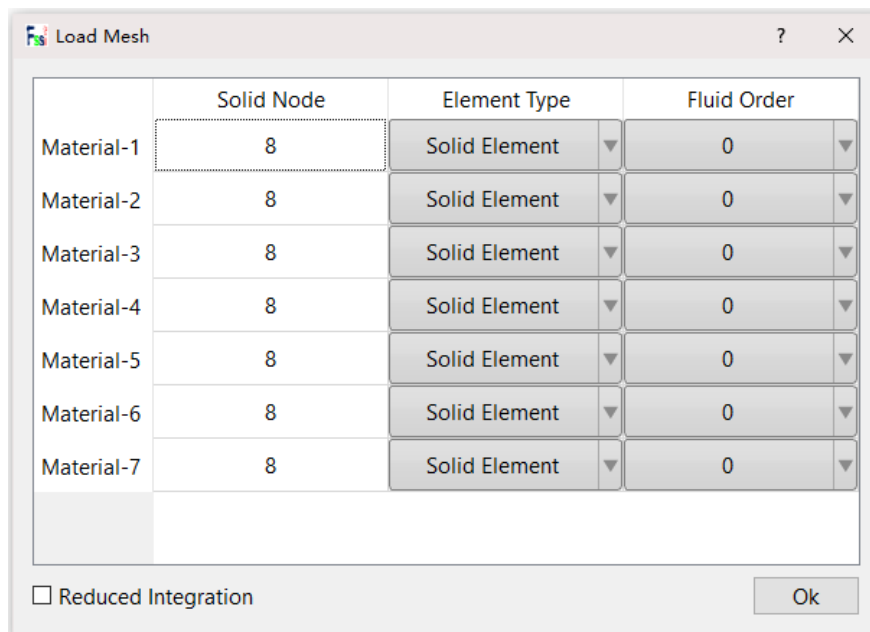


图 2-2 设置流体节点阶次界面

## 2.2 设置边界条件

本案例分析前需要设置边界条件，在土体的侧面设置  $x$  与  $y$  方向的约束，在底面上的( $z = 0\text{ m}$ )设置  $x$ 、 $y$  与  $z$  方向的约束。

依次点击工具栏中图标  和 ，进入单元选取模式。点击键盘‘R’键，开始进入单元选择

模式。依次点击图标  $+Xz$ 、 $-Xz$ 、 $+Yz$ 、 $-Yz$ ，按住鼠标左键，拖动鼠标框选土体的侧面的所有单元，被选择的单元会变亮，右击鼠标后设置 x 与 y 方向的约束，具体操作如图 2-3 所示。然后，点击图标  $-Xy$ ，按住鼠标左键，拖动鼠标框选土体底面所有的单元设置 xyz 方向约束。具体操作如图 2-4 所示。

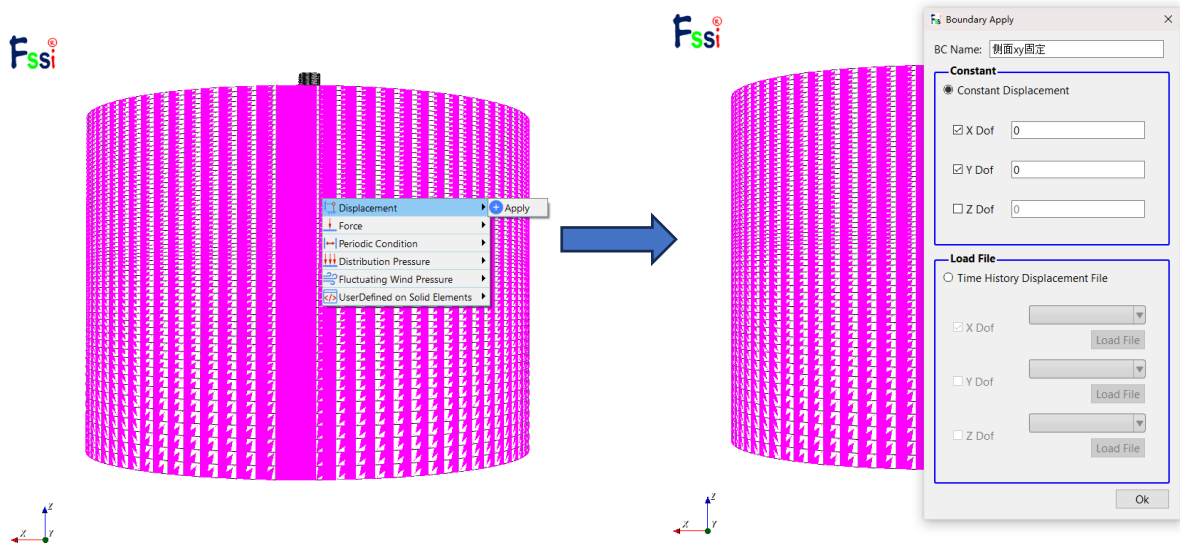


图 2-3 选择土体侧面单元添加边界条件示意图

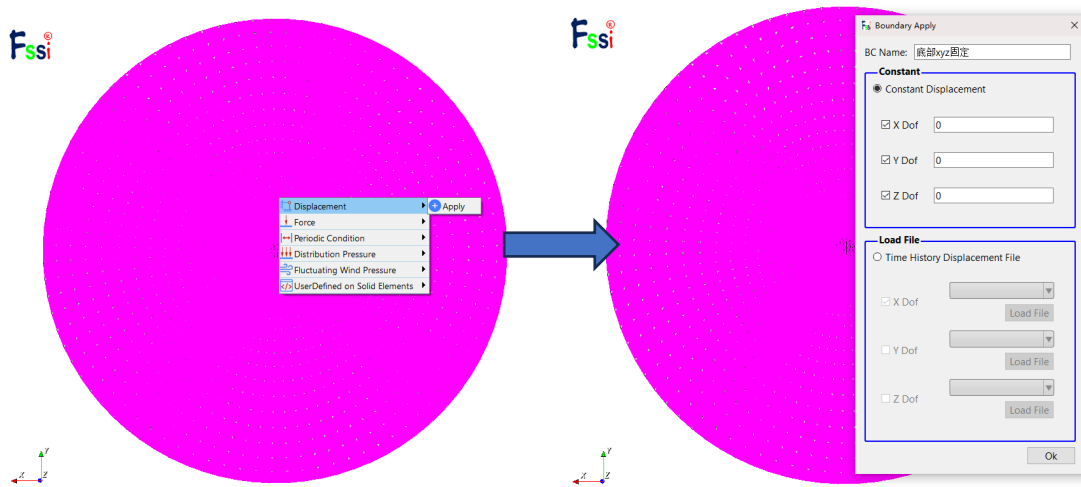


图 2-4 选择土体底面上的单元添加边界条件示意图

## 2.3 设置材料参数

本案例 Step 1 的土体材料我们设置为弹性，依次点击 FssiCAS—PreProcess—Materials—Material-1 至 5，材料名称用户可以自行更改，依次更改为土层 1 至 5，在弹出对话框中输入材料参数，土层 1 至 5 材料参数设置一致，见下图 2- 5。依次点击 FssiCAS—PreProcess—Materials—Material-6 至 7，材料名称可更改为单桩壁和单桩头，单桩的材料参数设置参考表 1. 1，设置为弹性，如下图 2- 6 所示。设置完成后点击对话框右下角 OK，Step 1 材料设置完毕。

Material 1

Material Name: 土层1

Constitutive Model: Elastic

Succeed: No Succeed

Initial Stress Tensile: Yes

**Global Stress Integration:**

Stress Integration Algorithm: Default

**Constitutive Model Parameters:**

Young's Modulus (Pa): 5e7

Poisson's Ratio: 0.33

**Damping Model Parameters:**

Damping Model: ELASTIC

Young's Modulus (Pa): 0

Poisson's Ratio: 0

Damping Coefficient: Direct

$\alpha$ : 0

$\beta$ : 0

**Material Parameters:**

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

Granular Density (kg/m<sup>3</sup>): 2700

Void Ratio: 0.6

OK

图 2- 5 Step 1 中土体材料参数设置界面

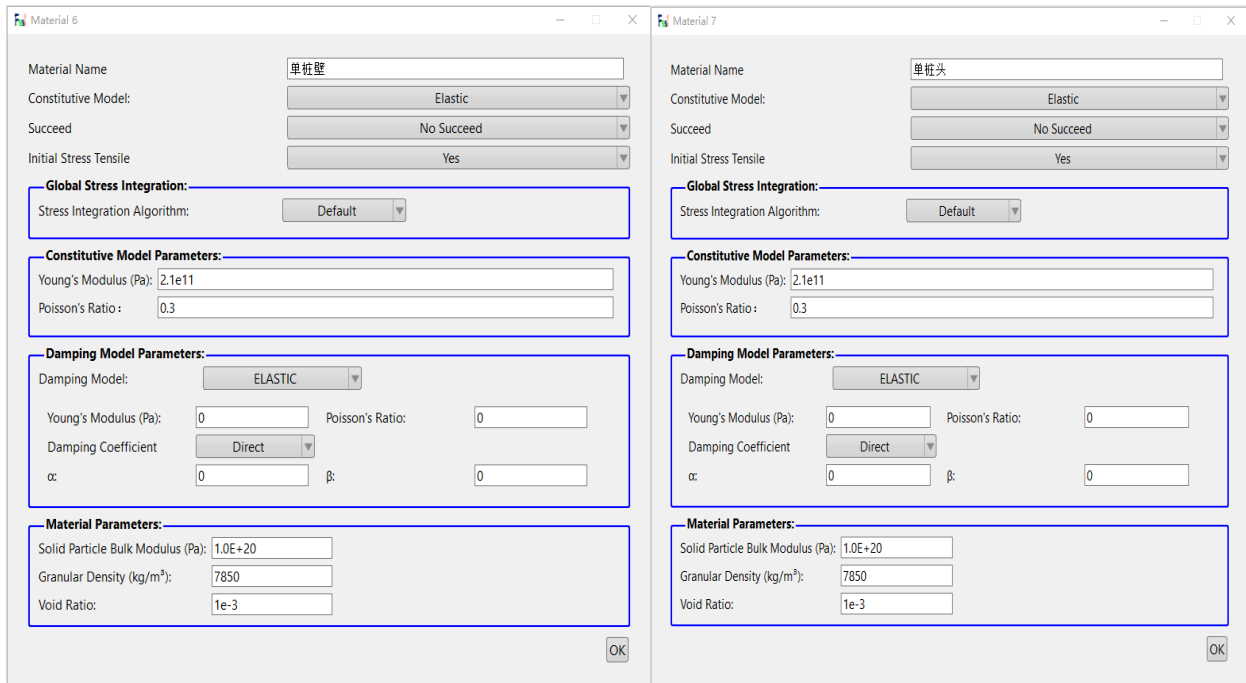


图 2- 6 Step 1 中单桩材料参数设置界面

## 2.4 水动力边界条件设置

由于本案例不考虑流体节点，因此不需要设置水动力边界条件，点击 FssiCAS—PreProcess—Loads—HydroDynamics—No Hydro—Yes。如图 2- 7 所示。



图 2- 7 水动力边界条件设置

## 2.5 设置重力加速度场

点击 FssiCAS—PreProcess—Loads—Filed Quantity—Uniform Acceleration Field，为整个案例施加重力载荷。即加速度场的 X 方向为  $0 \text{ m/s}^2$ ，Y 方向为  $0 \text{ m/s}^2$ ，Z 方向为  $-9.806 \text{ m/s}^2$ ，如图 2- 8 所示。后续时间步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重力加速度场。

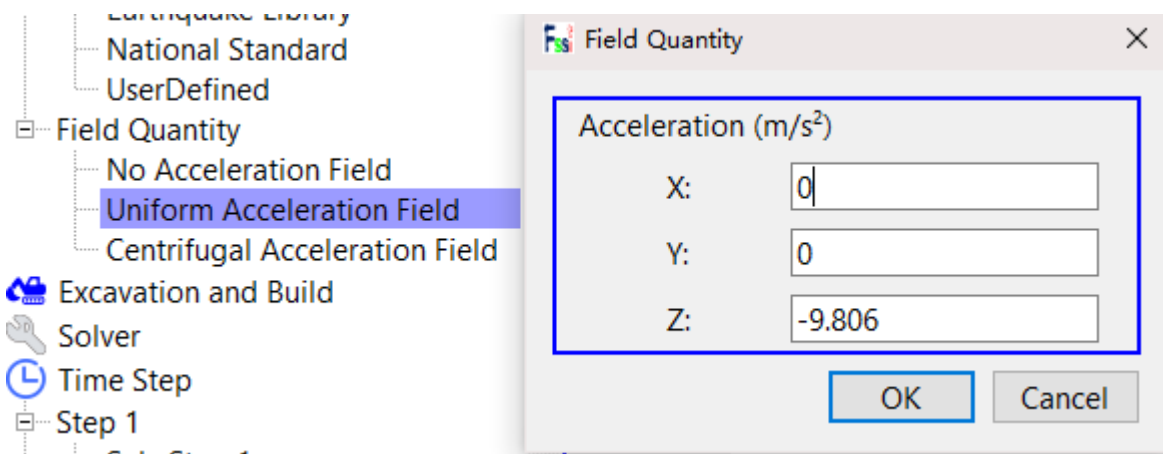


图 2-8 重力加速度场设置

## 2.6 设置求解器类型

点击 FssiCAS—PreProcess—Solver，在弹出对话框中设置求解器类型，如图 2-9 所示。

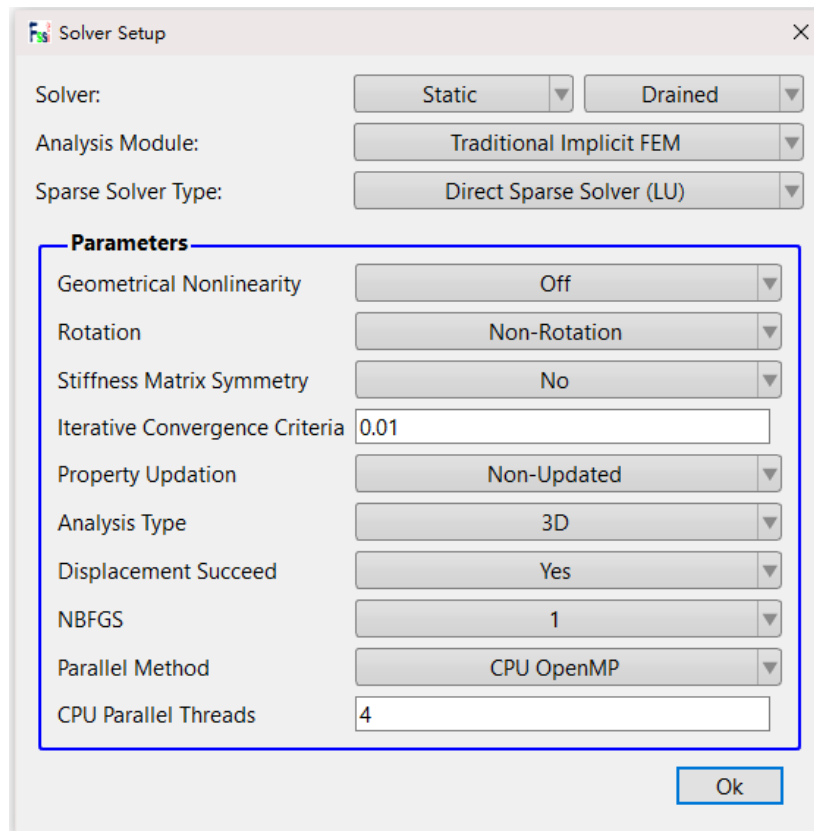


图 2-9 求解器类型设置

## 2.7 设置时间步

点击 FssiCAS—PreProcess—Time Step—Step 1—Sub\_Step 1 。设置时间步相关参数，如图 2-10 所示。

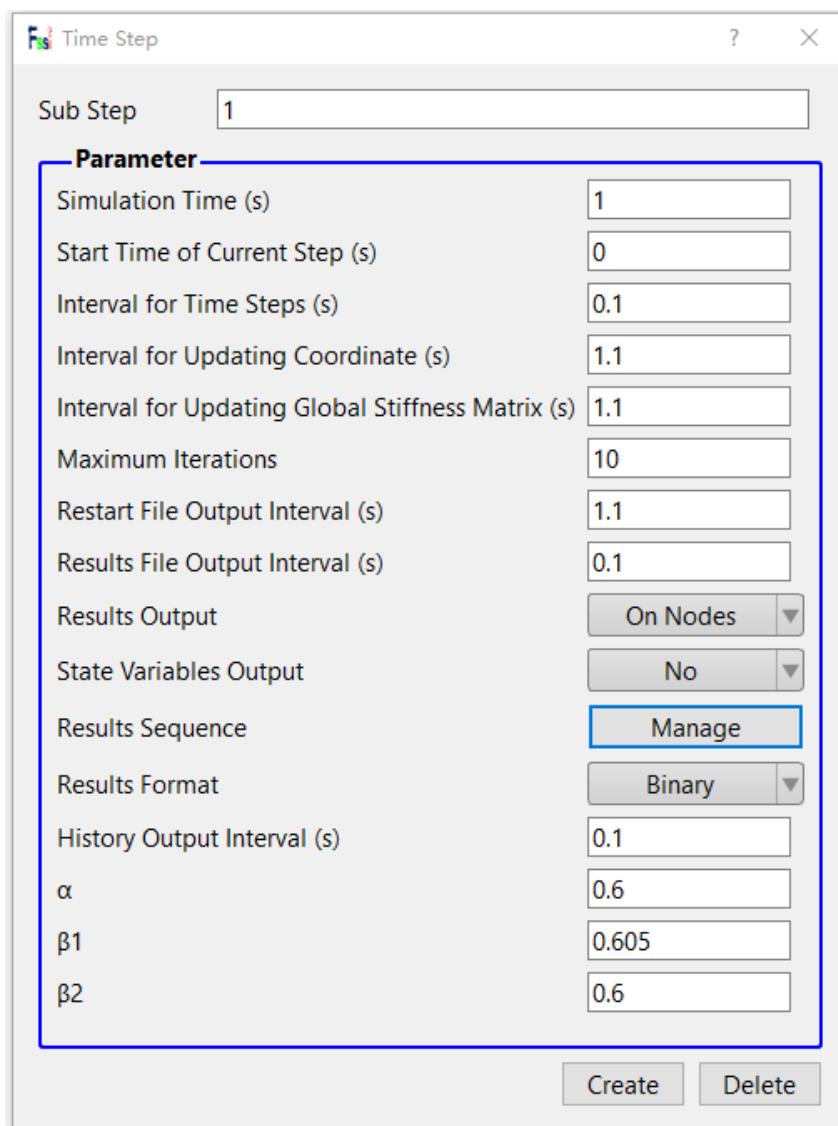

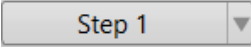



图 2-10 Step 1 时间步相关参数设置界面

## 2.8 创建 Step 2

点击上方工具栏  按钮可增加新的时间步，添加成功后左端任务栏会显示添加的时间步，点击  可以切换时间步，对需要设置的时间步进行设置。

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。这里我们已经设置了 Step 1 的边界条件和参数，点击  增加时间步 Step 2，如图 2-11 所示。Step 2 会自动复制 Step 1 的所有设置，避免重复设置，节省时间。

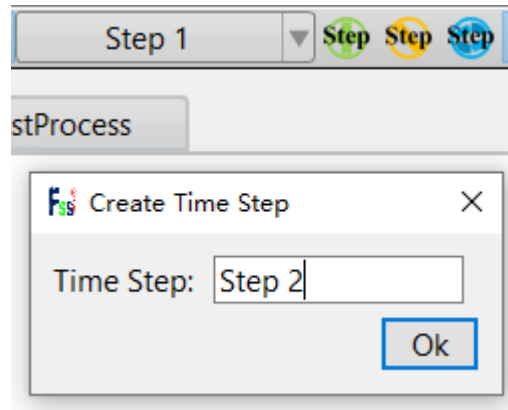
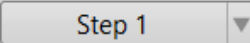



图 2-11 创建 Step 2 时间步

## 2.9 设置开挖

点击上方工具栏  切换到时间步 Step 1，在 Step 1 中设置开挖。点击上方工具栏中的  按钮，在 Model 树状菜单栏中会出现 Excavation and Build 目录。点击树状菜单栏中的 Excavation and Build，在弹出的窗口中点击 Create，然后选择设置开挖区域的方式为 Material，即将某一材料全部设置为开挖区域。勾选需要选择的材料，点击 OK 完成操作。如图 2-12 所示。

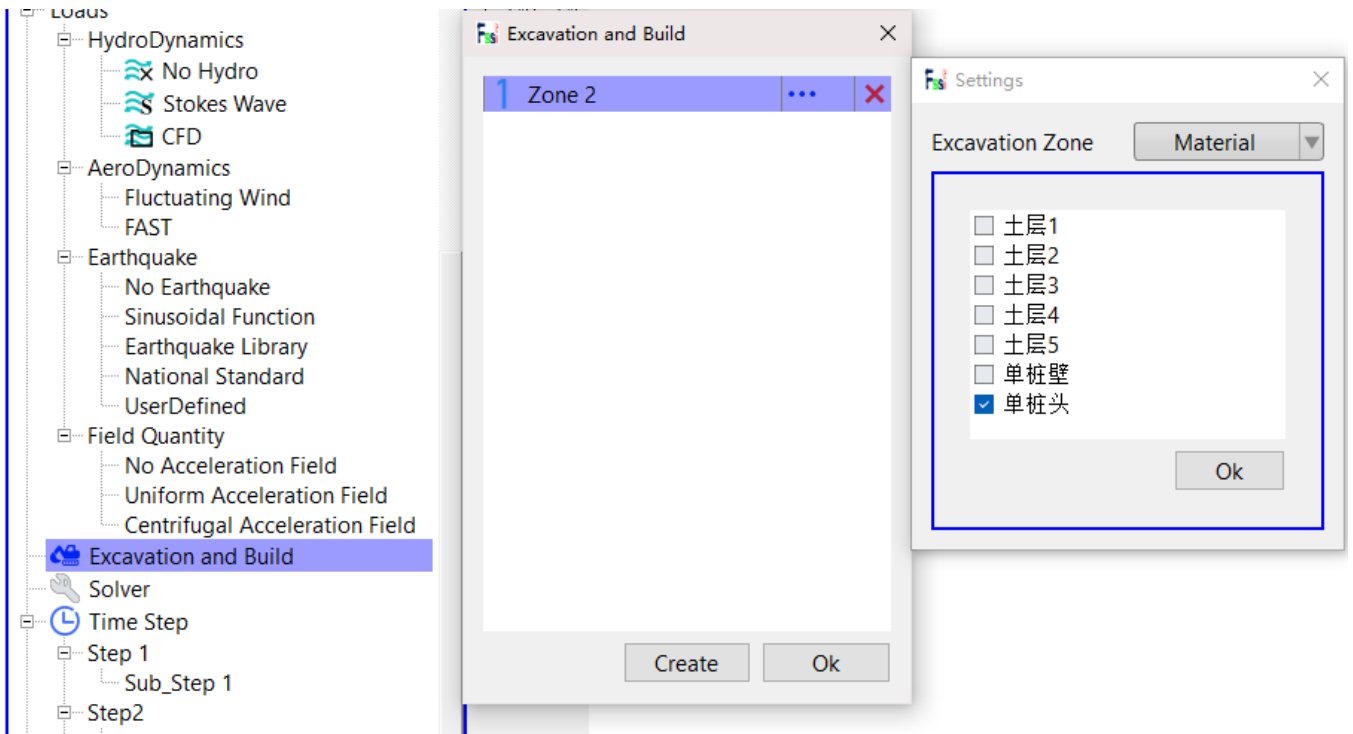


图 2- 12 设置开挖

## 2.10 设置初始条件

在 Step 1 中，点击 FssiCAS—PreProcess—Initial State，设置初始条件，点击 ok，完成 Step 1 初始状态设置。如图 2- 13 所示。

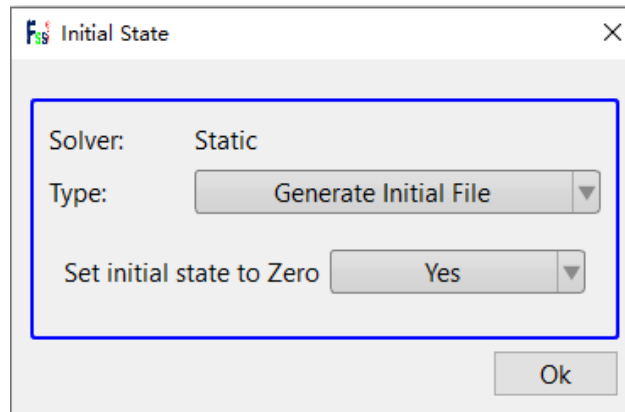


图 2- 13 初始条件设置界面

## 2.11 step 2 设置

点击 **Step 2**，切换到时间步 Step 2，Step 2 中边界及材料参数已设置完毕，不做更改。点击 FssiCAS—PreProcess—Solver，在弹出对话框中设置求解器类型，如图 2- 14 所示

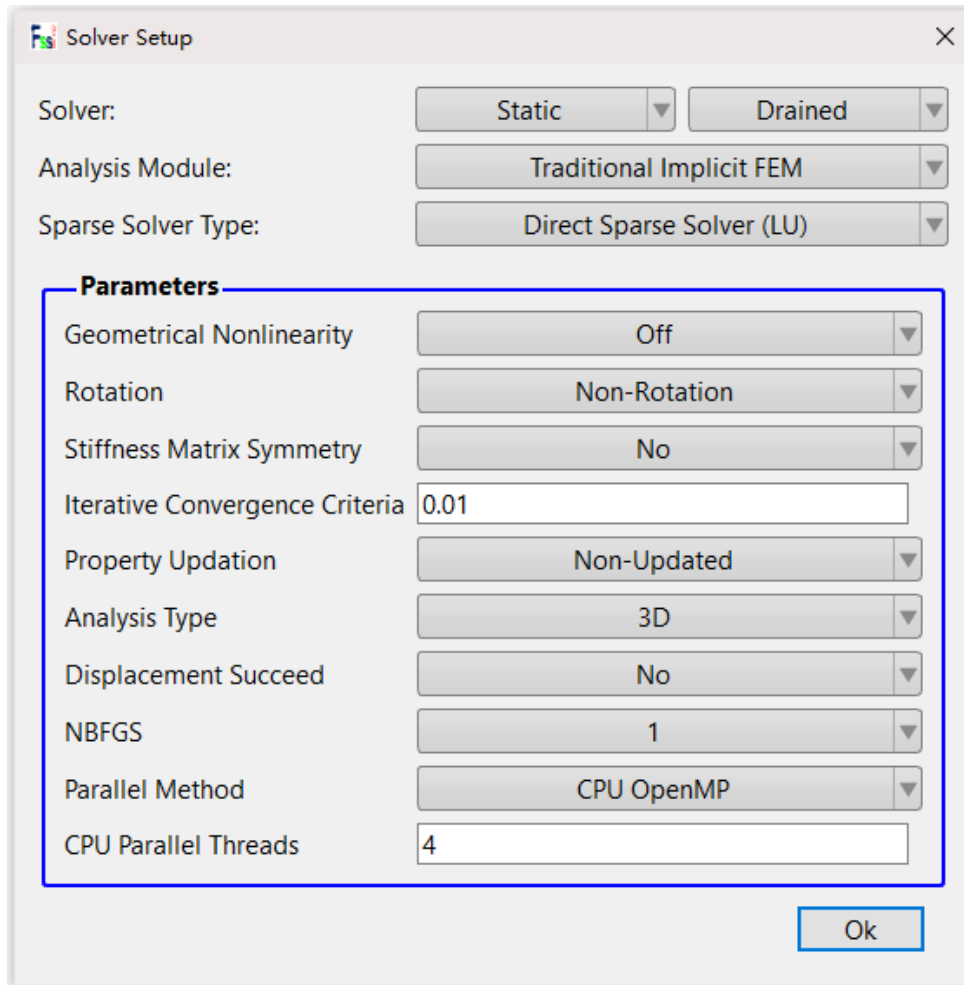

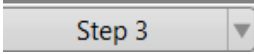


图 2- 14 step2 求解器类型设置

点击 FssiCAS—PreProcess—Initial State，设置初始条件，点击 ok，完成 Step 2 初始状态设置，同上。

### 2.12 创建并设置 Step 3

点击  增加时间步 Step 3，并点击  切换到 Step 3 进行设置。Step 3 中主要是将土层 1~5 的材料属性由弹性设置为一般弹性，土体 1~5 的参数保持一致，如图 2- 15 所示。

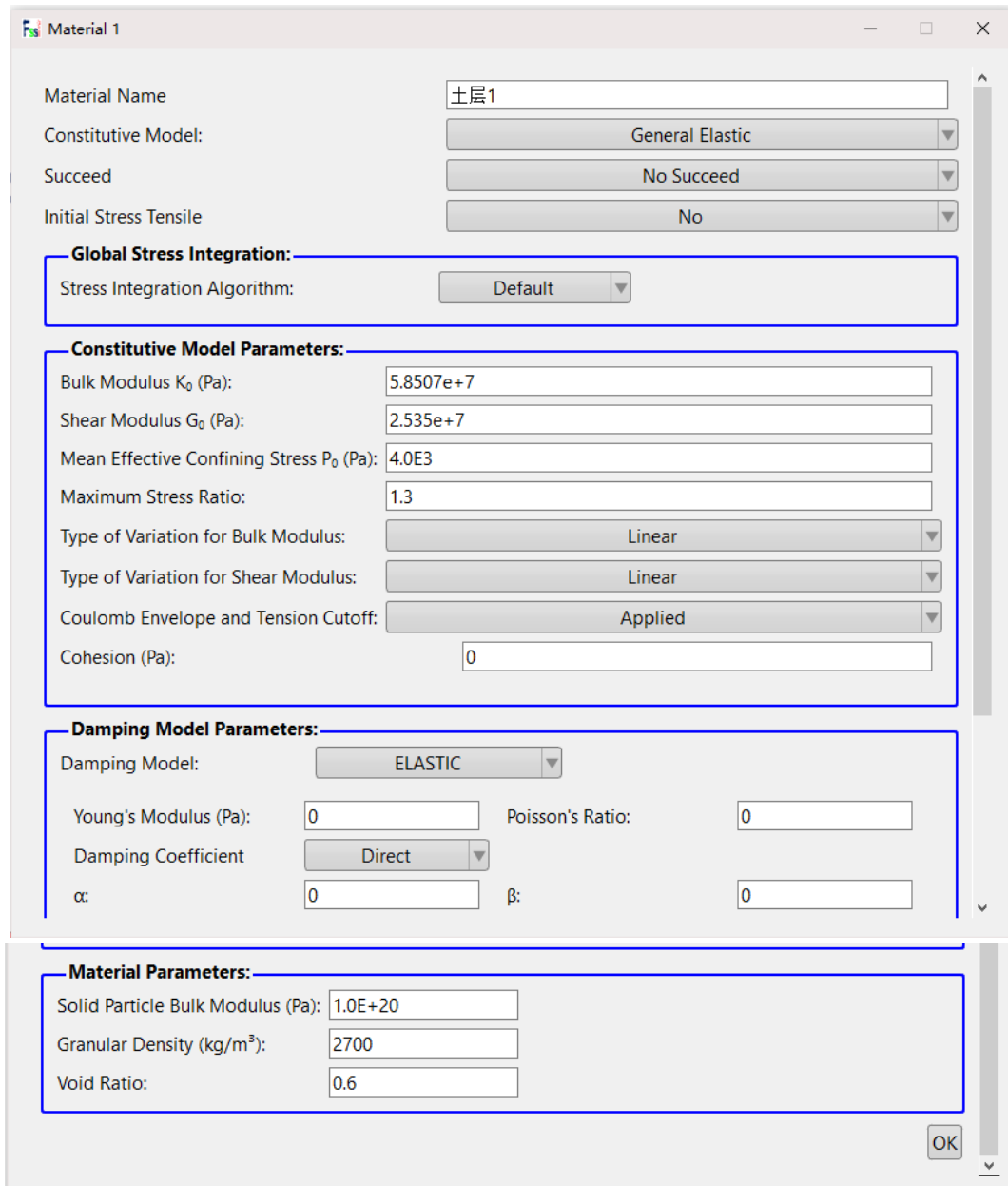



图 2- 15Step 3 中土体材料参数设置界面

Step 3 中其余设置与 Step 2 保持一致，已自动复制。直接点击 FssiCAS—PreProcess—Initial State，设置初始条件，点击 ok，完成 Step 3 初始状态设置，同上。

### 2.13 创建 Step 4 并进行材料参数设置

点击  新增 Step 4，并切换到 Step 4 进行材料参数的设置。参考表 1-2，材料的设置如下图 2- 16 所示。单桩的参数设置不变。

Material 1

Material Name: 土層1

Constitutive Model: Mohr Coulomb Class

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: 80000

Minimum Percentage of Strain Subdivision: 0.01

**Constitutive Model Parameters:**

Young's Modulus (Pa): 2.65e7

Poisson's Ratio: 0.2

Uniaxial Tensile Strength (Pa): 566

Work Hardening Modulus (Pa): 0

Frictional Angle (°): 35.5

Yield Criterion: Drucker Prager

**Internal Stress Integration:**

Minimum Percentage of Strain Subdivision: None

Stress Integration Algorithm: 0.05

Tolerance for Strain Subdivision: 500

Maximum Number of Strain Subdivision: 0.01

**Damping Model Parameters:**

Damping Model: ELASTIC

Young's Modulus (Pa): 0 Poisson's Ratio: 0

Damping Coefficient: Direct

$\alpha$ : 0  $\beta$ : 0

**Material Parameters:**

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

Granular Density (kg/m<sup>3</sup>): 2700

Void Ratio: 0.6

OK

Material 2

Material Name: 土層2

Constitutive Model: Mohr Coulomb Class

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: 80000

Minimum Percentage of Strain Subdivision: 0.01

**Constitutive Model Parameters:**

Young's Modulus (Pa): 3.98e7

Poisson's Ratio: 0.2

Uniaxial Tensile Strength (Pa): 609

Work Hardening Modulus (Pa): 0

Frictional Angle (°): 52.5

Yield Criterion: Drucker Prager

**Internal Stress Integration:**

Minimum Percentage of Strain Subdivision: None

Stress Integration Algorithm: 0.05

Tolerance for Strain Subdivision: 500

Maximum Number of Strain Subdivision: 0.01

**Damping Model Parameters:**

Damping Model: ELASTIC

Young's Modulus (Pa): 0 Poisson's Ratio: 0

Damping Coefficient: Direct

$\alpha$ : 0  $\beta$ : 0

**Material Parameters:**

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

Granular Density (kg/m<sup>3</sup>): 2700

Void Ratio: 0.6

OK

Material 3

Material Name: 土層3

Constitutive Model: Mohr Coulomb Class

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: 80000

Minimum Percentage of Strain Subdivision: 0.01

**Constitutive Model Parameters:**

Young's Modulus (Pa): 4.5e7

Poisson's Ratio: 0.2

Uniaxial Tensile Strength (Pa): 649

Work Hardening Modulus (Pa): 0

Frictional Angle (°): 49.5

Yield Criterion: Drucker Prager

**Internal Stress Integration:**

Minimum Percentage of Strain Subdivision: None

Stress Integration Algorithm: 0.05

Tolerance for Strain Subdivision: 500

Maximum Number of Strain Subdivision: 0.01

**Damping Model Parameters:**

Damping Model: ELASTIC

Young's Modulus (Pa): 0 Poisson's Ratio: 0

Damping Coefficient: Direct

$\alpha$ : 0  $\beta$ : 0

**Material Parameters:**

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

Granular Density (kg/m<sup>3</sup>): 2700

Void Ratio: 0.6

OK

Material 4

Material Name: 土層4

Constitutive Model: Mohr Coulomb Class

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: 80000

Minimum Percentage of Strain Subdivision: 0.01

**Constitutive Model Parameters:**

Young's Modulus (Pa): 4.7e7

Poisson's Ratio: 0.2

Uniaxial Tensile Strength (Pa): 678

Work Hardening Modulus (Pa): 0

Frictional Angle (°): 47.3

Yield Criterion: Drucker Prager

**Internal Stress Integration:**

Minimum Percentage of Strain Subdivision: None

Stress Integration Algorithm: 0.05

Tolerance for Strain Subdivision: 500

Maximum Number of Strain Subdivision: 0.01

**Damping Model Parameters:**

Damping Model: ELASTIC

Young's Modulus (Pa): 0 Poisson's Ratio: 0

Damping Coefficient: Direct

$\alpha$ : 0  $\beta$ : 0

**Material Parameters:**

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

Granular Density (kg/m<sup>3</sup>): 2700

Void Ratio: 0.6

OK

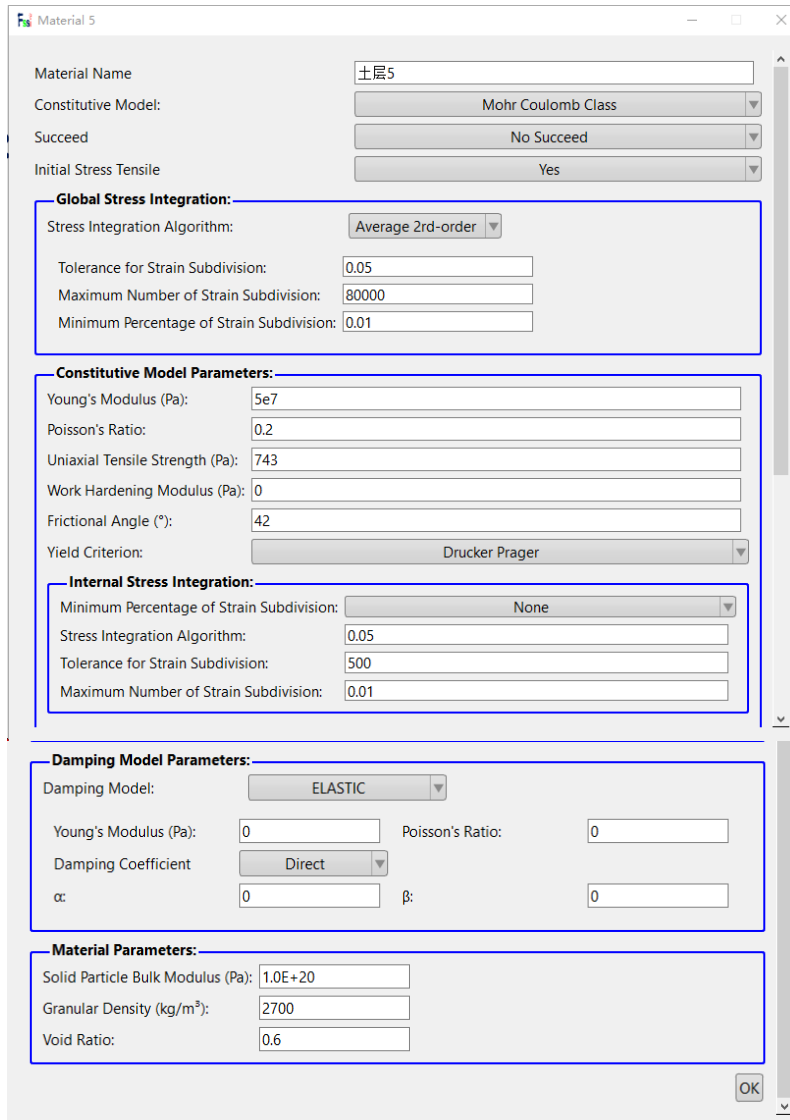


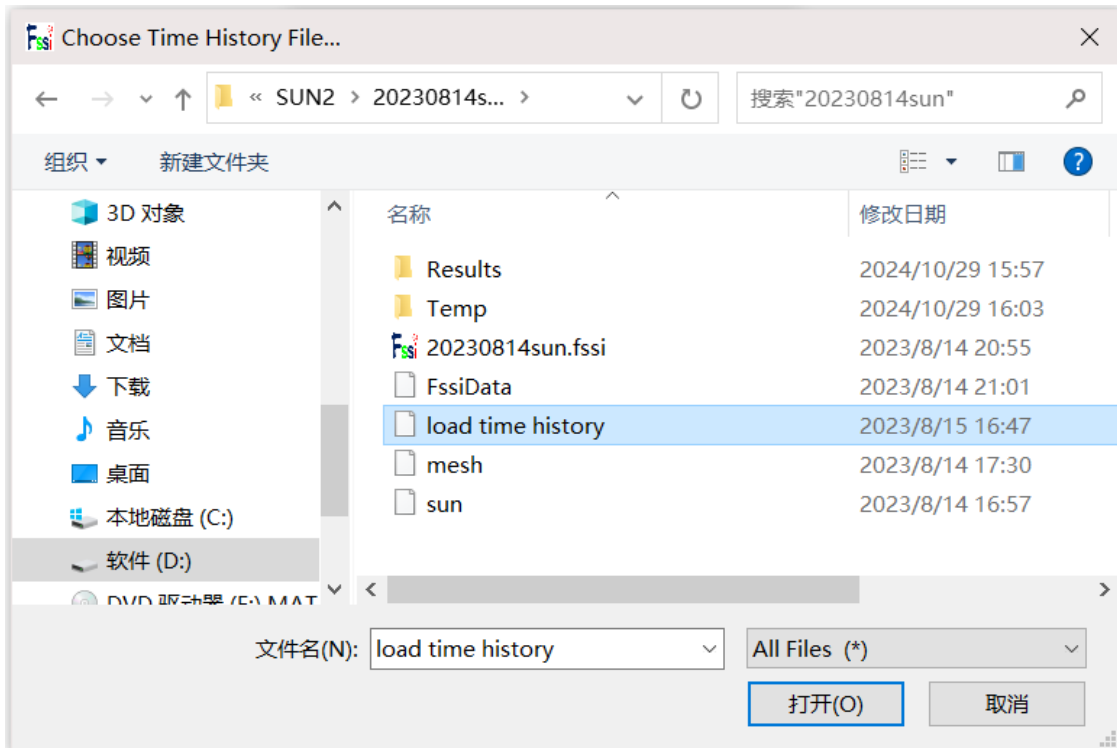
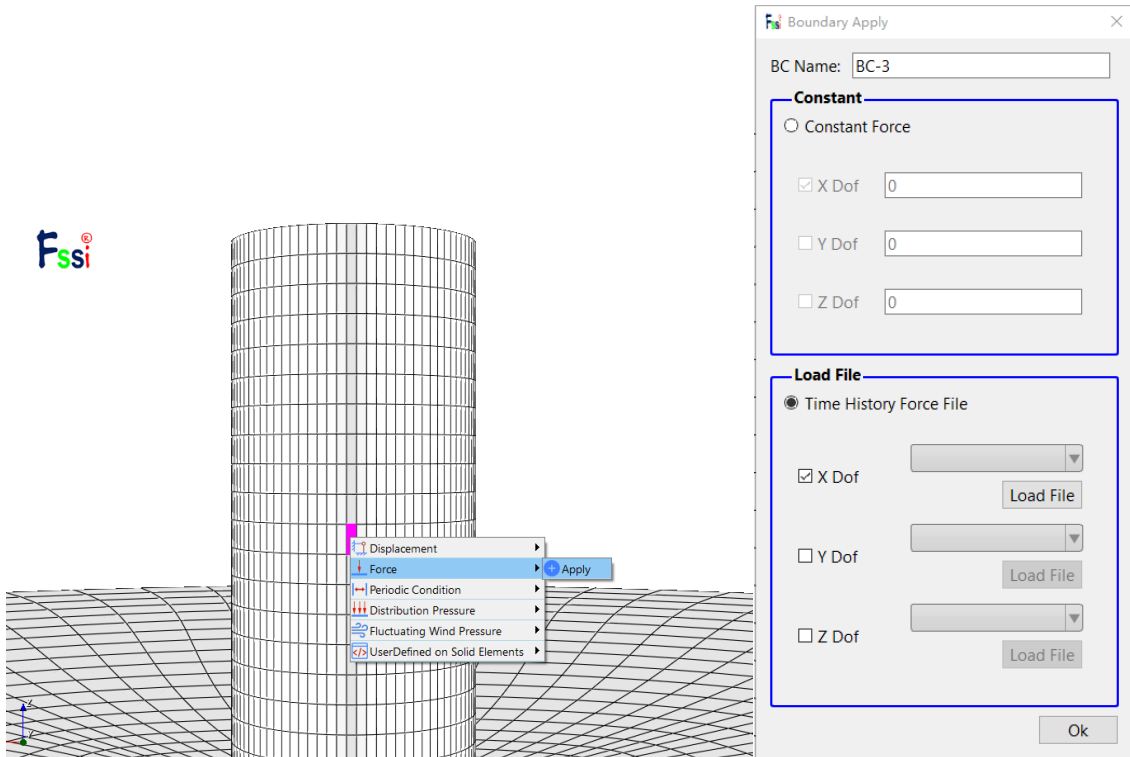


图 2- 16 Step 4 中土体材料参数设置界面

## 2.14 施加力荷载

在高于地面 0.4 m 的桩侧面施加 0 kN~110 kN 的水平力荷载，我们选择桩左侧 0.4m 高处中心单元作为施加点，点击该单元，施加力时程曲线（因为施加在单元上的力会在单元四个角的高斯点上施加，因此我们需要将总力荷载除以 4）。依次点击工具栏中图标  和 ，进入单元选取模式。点击键盘‘R’键，开始进入单元选择模式。选中桩左侧 0.4m 高处中心单元，右击鼠标后点击 Force—Apply，在弹出的对话框中点击 Time History Force File，在 X 方向点击 Load File，然后将时程文件选中，点击 OK。具体操作如下图 2- 17 所示。



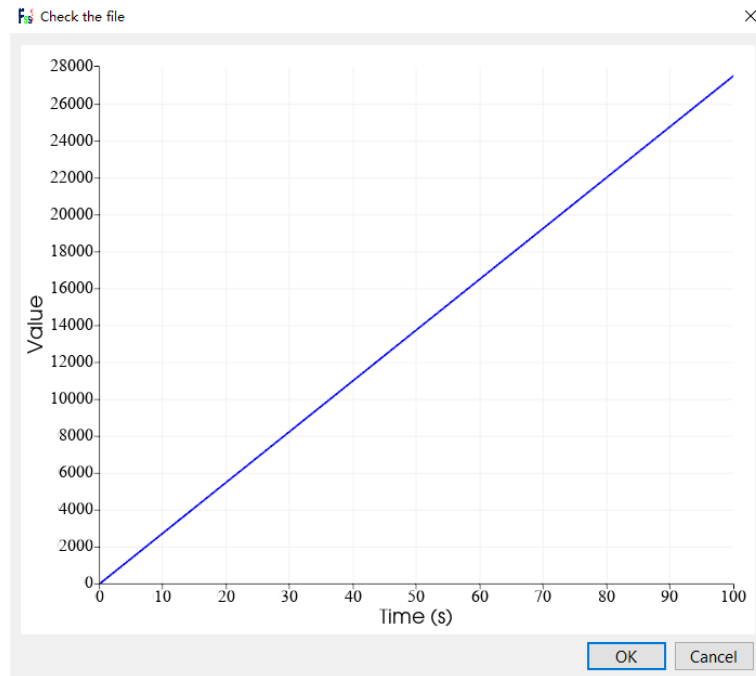


图 2-17 Step 4 中力荷载的施加

## 2.15 Step 4 求解器类型设置

点击 FssiCAS—PreProcess—Solver ， 在弹出对话框中设置求解器类型，如图 2-18 所示。

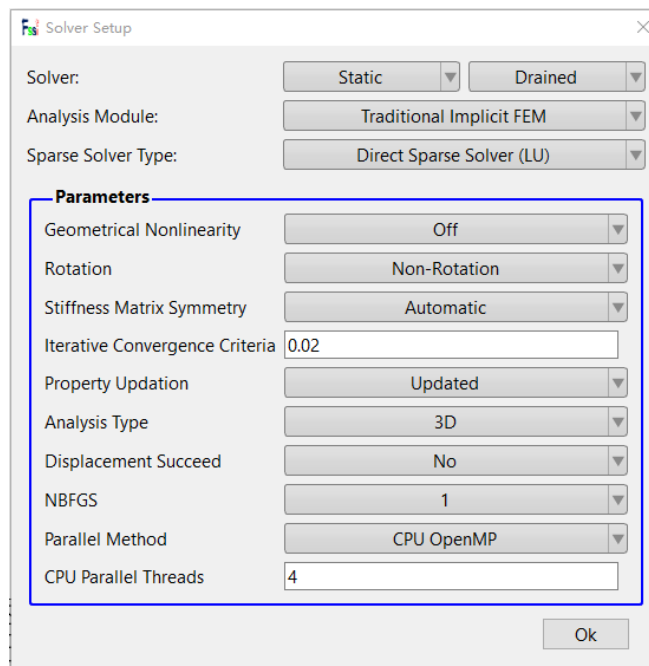


图 2-18 求解器类型设置



## 2.16 Step 4 时间步设置

点击 FssiCAS—PreProcess—Time Step—Step 4—Sub\_Step 1。设置时间步相关参数，如图 2-19 所示。

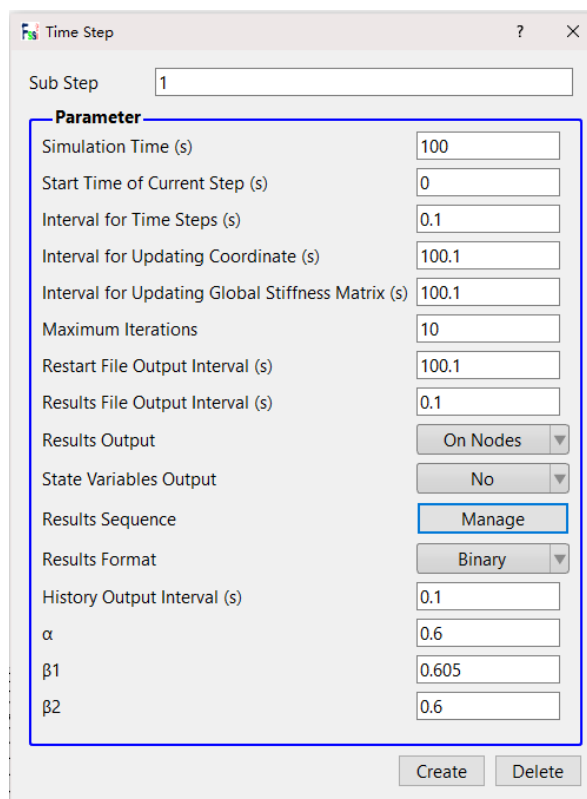




图 2-19 Step 4 时间步设置

## 2.17 添加时程点

依次点击上方工具栏 ，，点击键盘‘R’键，选择单元点后，右击输出时程。本案例中我们选择桩顶单元点输出 X 方向位移时程。如图 2-20 所示。点击 FssiCAS—PreProcess—Time Histroy，可以显示输出的时程结果列表，选择列表中的项，点击右侧红叉可以进行删除操作。

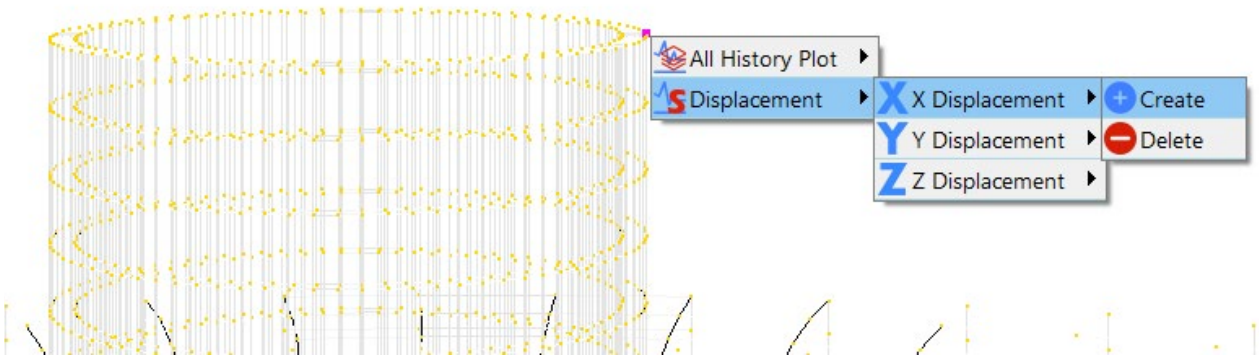


图 2- 20 添加时程点

## 2.18 设置初始状态并计算

点击 FssiCAS—PreProcess—Initial State，设置初始条件，点击 ok，完成 Step 4 初始状态设置，同上。

点击 FssiCAS—PreProcess—Computation—FSSI-W，保存当前项目至指定文件夹（文件路径不能有中文），然后勾选 All Step，点击 OK，开始计算。如图 2- 21 所示。

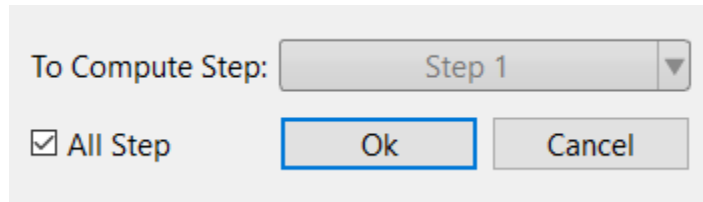


图 2- 21 计算弹窗

## 3. FssiCAS 图形界面操作——后处理

### 3.1 加载文件

点击 FssiCAS—PostProcess—Open Results File—Load Files，选择需要处理的结果文件夹，点击 OK。如图 3- 1 所示。

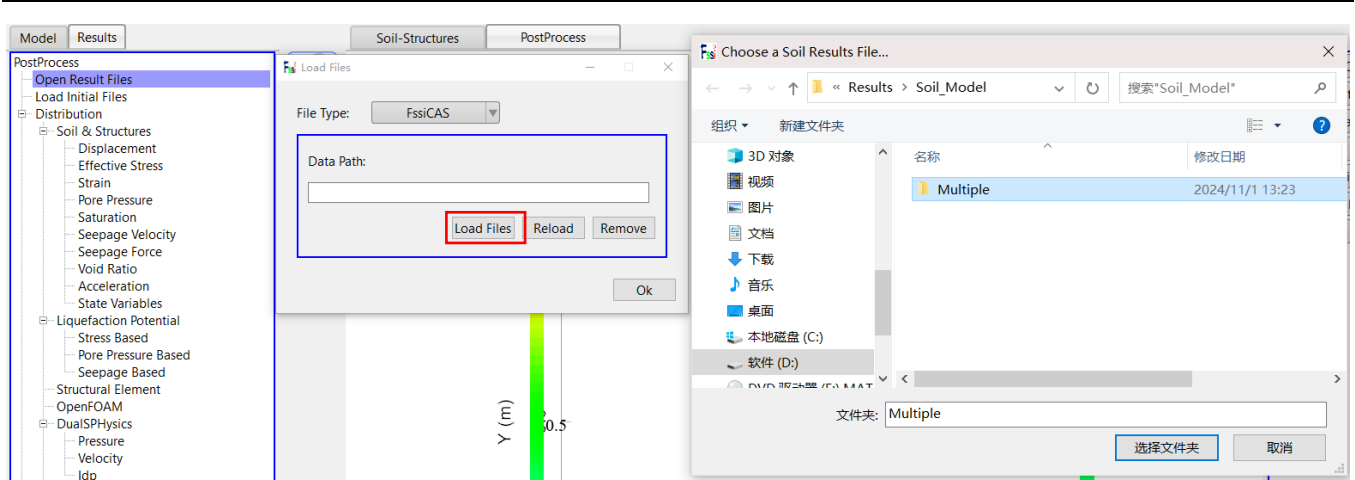
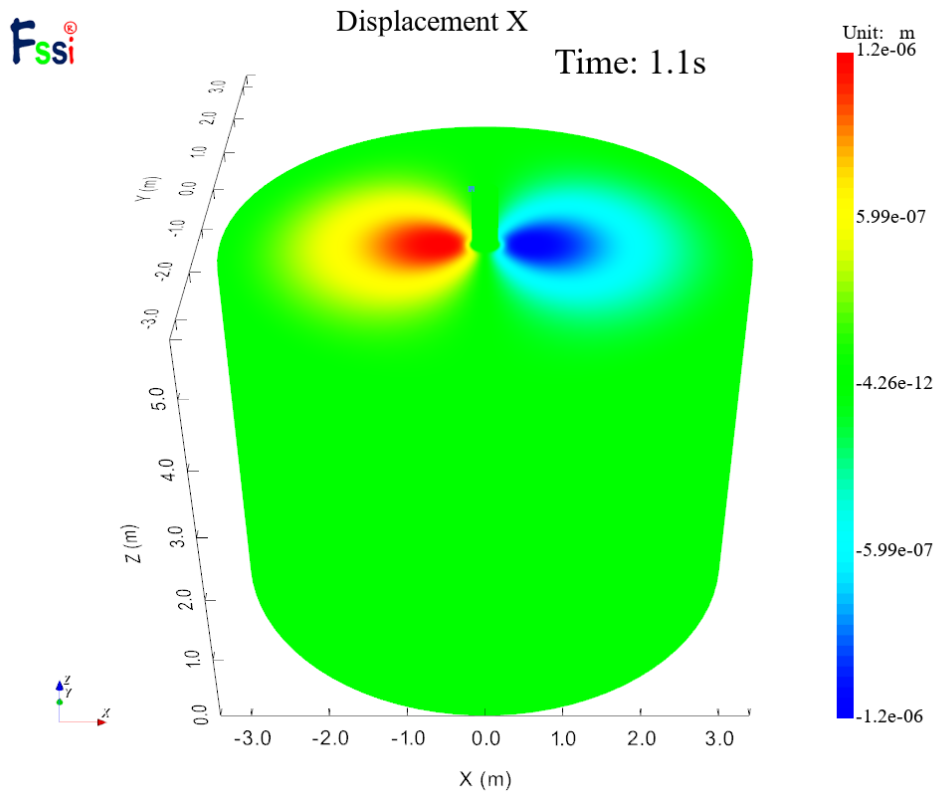


图 3-1 加载数值计算结果文件步骤图

### 3.2 绘制分布图

点击 FssiCAS—PostProcess—Distribution—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 3-2 所示。



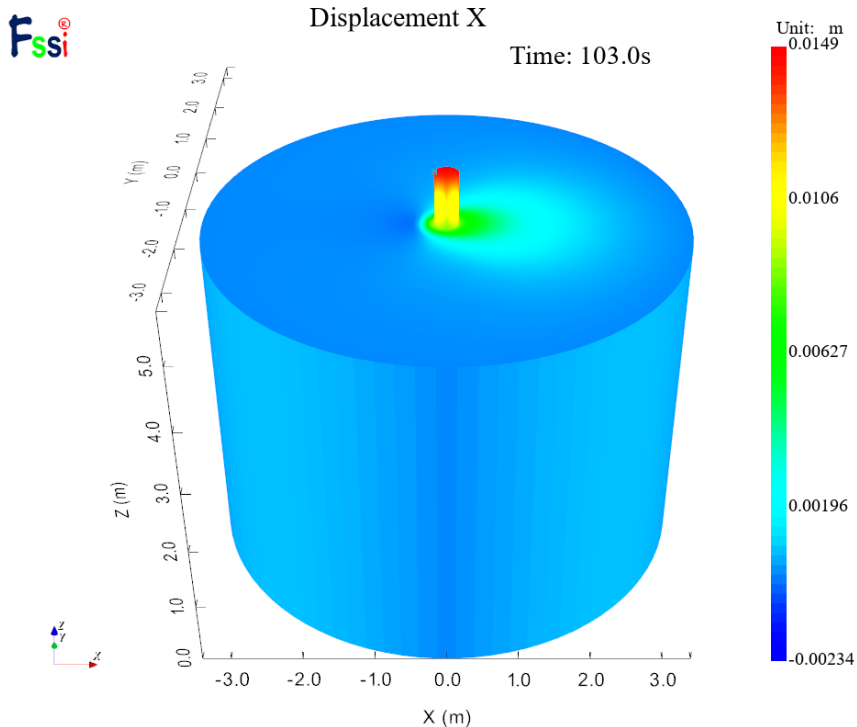


图 3-2 在 1.1s 和 103s 时间步下 X 方向的位移分布图

### 3.3 输出节点位移变化图

点击 FssiCAS—PostProcess—History Plot—Soil History，在右侧工具栏展开 Time-History，点击  将输入坐标改为输入节点编号，然后将可将桩顶时程点的编号输入（可在 FssiCAS—PreProcess—Time Histroy 列表中查看），选择 Displacement X，点击 Plot，即可得到位移时程点的位移变化图。如图 3-3 所示。

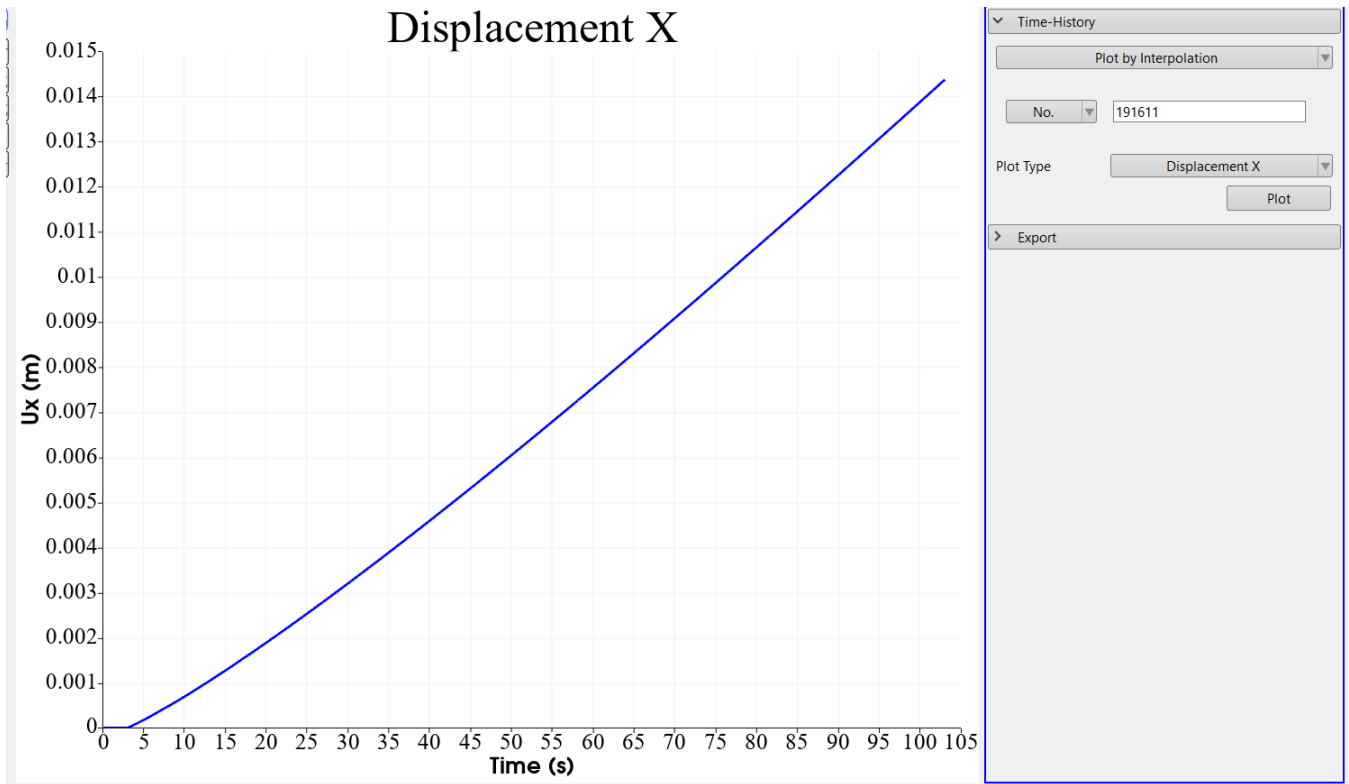


图 3- 3 时程点 X 方向上的的位移变化图

点击右侧工具栏 Export，选择 Export Results Data 或 Export Current Fiture，即可输出该点位移数据或保存该图。

### 3.4 荷载-位移曲线对比验证

在文件夹中将输出的时程文件 TimeHistory 中的桩顶位移数据与原试验数据以及他人采用 FLAC3D 模拟的数据进行处理对比，如下图 3- 4，可见 FssiCAS 的结果具有较高的可靠性。

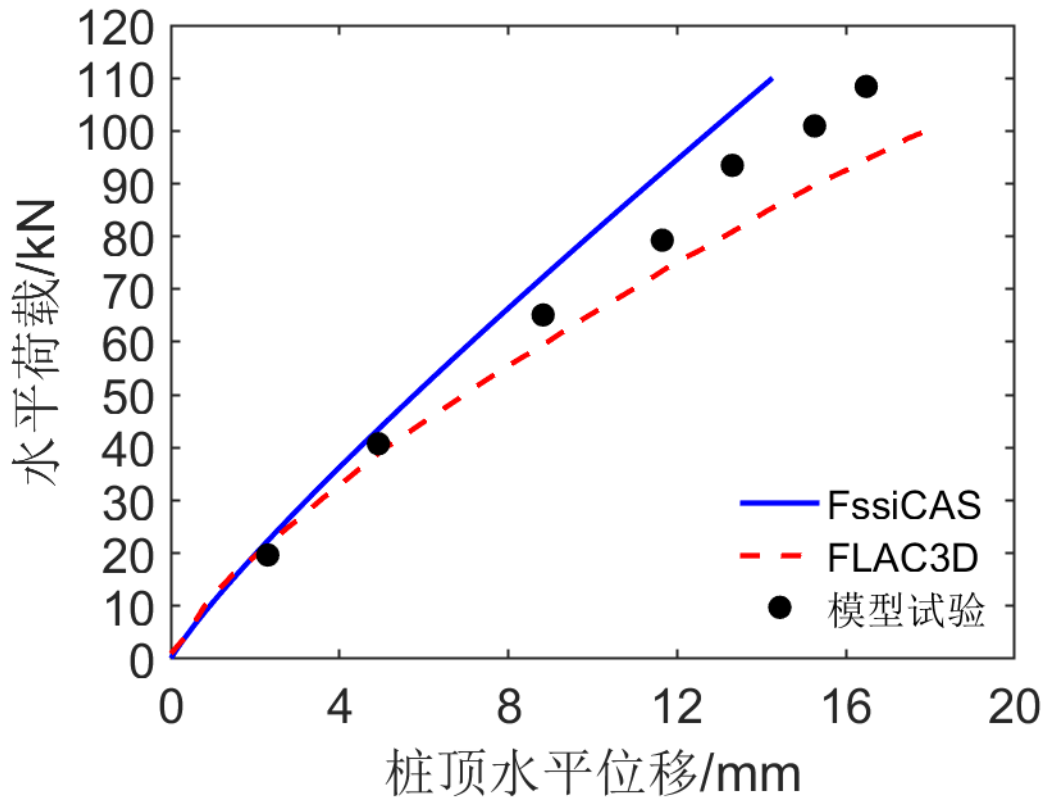


图 3- 4 荷载-位移曲线图