

霍普金森杆冲击实验模拟

本章通过展示一个典型的霍普金森杆冲击实验案例，介绍案例制作、粘弹性人工边界的施加及界面基本操作方法。数值计算模型示意图如图 16-1 所示，圆柱体试样尺寸为直径 0.05m、厚度 0.025m，试样两侧压杆直径 0.05m。模型左侧表面施加一个用户自定义的冲击荷载，大小为 500kPa，频率为 1000Hz，荷载时程曲线如图 16-2 所示：

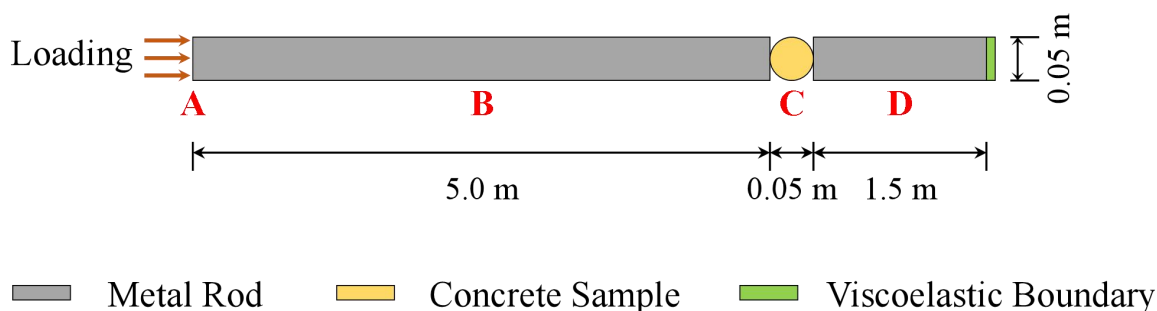


图 16-1 计算模型示意图

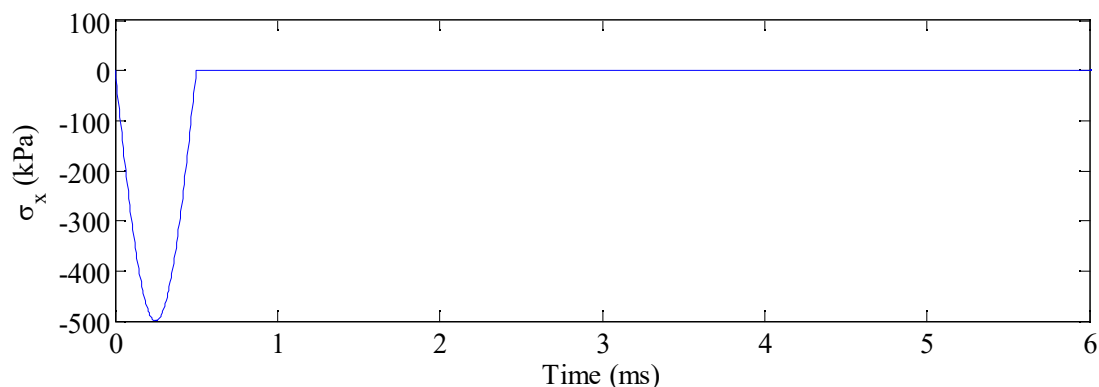


图 16-2 左侧 1000Hz 冲击荷载时程曲线

16.1 网格划分

本软件计算所需要的网格需要借助专业网格划分软件 Gid 或 Solidworks 等建模软件完成。本案例借助 Gid 软件建立模型并划分网格如图 16-3 所示。需注意，粘弹性人工边界单元需单独赋一种材料，一般在计算模型需施加粘弹性边界处向外画一层网格即可，网格尺寸一般与内部介质单元尺寸相同。

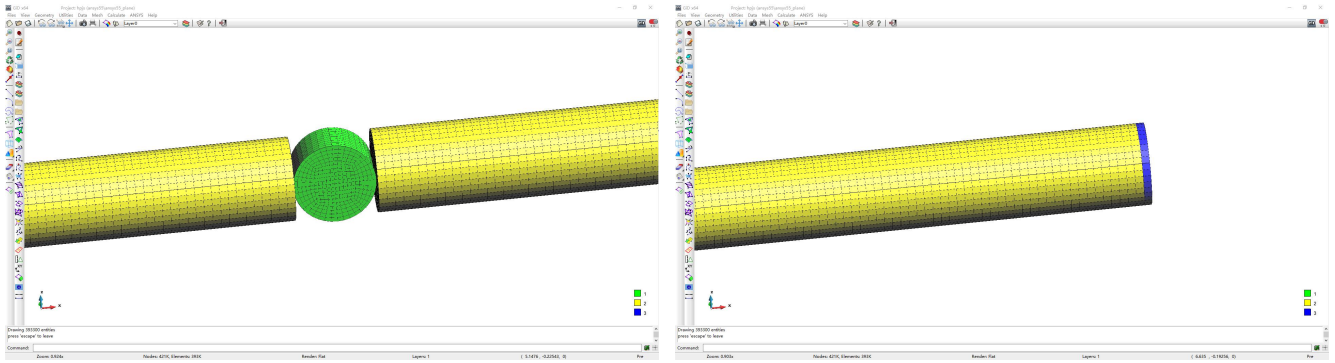



图 16-3 在专业网格划分软件 Gid 中建立模型并划分网格

在 Gid 划分网格后，需导出为指定的网格文件格式，具体方法已经在之前章节详细讲述过，可自行前往查询。

16.2 FssiCAS 图形界面操作——前处理

16.2.1 在 FssiCAS 软件中创建工程文件

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 SHPB；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；用户点击 File—Save，选择之前新建的文件夹（选择 SHPB 文件夹），即可将新建的项目保存在之前新建的文件夹里；当用户点击右上角 ×（退出软件）时，在弹出的窗口中选择 Yes，可保存当前项目，选择 No 即不保存当前项目，即可将新建的项目保存在之前新建的文件夹里，如图 16-4 所示。

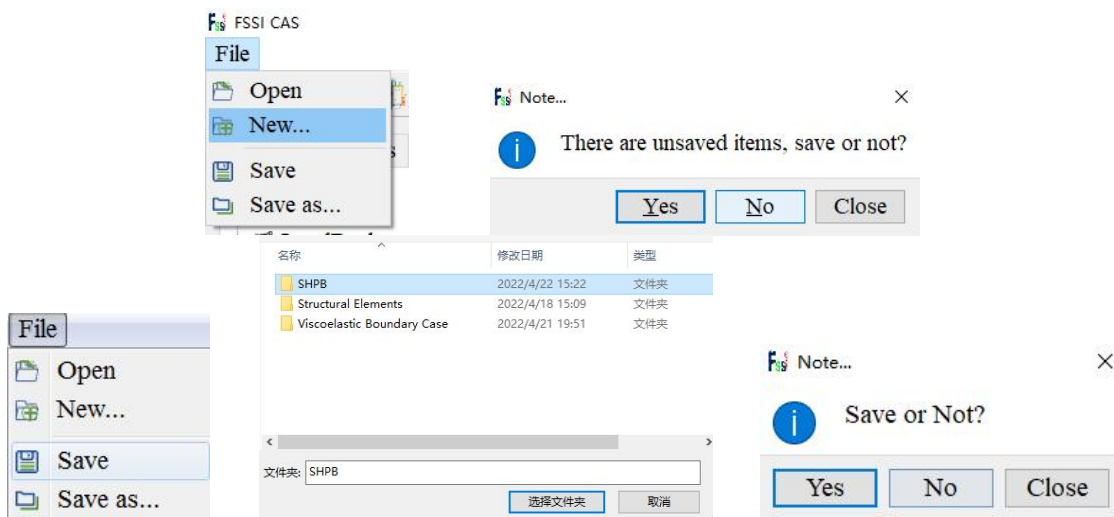


图 16-4 在 FssiCAS 软件中新建和保存一个项目的过程图

16.2.2 导入网格

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 GIDmesh 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 16-5 所示。

在弹出的 Load Mesh 窗口中设置固体单元类型和流体单元阶次, 在本案例中固体单元采用六面体八节点一阶单元, 不设置流体单元阶次。因此, 固体单元节点数设置为 8, 流体单元节点阶次设置为 0 (即没有流体存在)。针对混凝土试样 (即第一种材料), 单元类型选择固体单元; 针对金属压杆 (即第二种材料), 单元类型选择固体单元; 针对粘弹性人工边界单元 (即第三种材料), 单元类型选择粘弹性, 点击 OK, 如图 16-6 所示。在工作区中显示几何模型如图 16-7 所示。

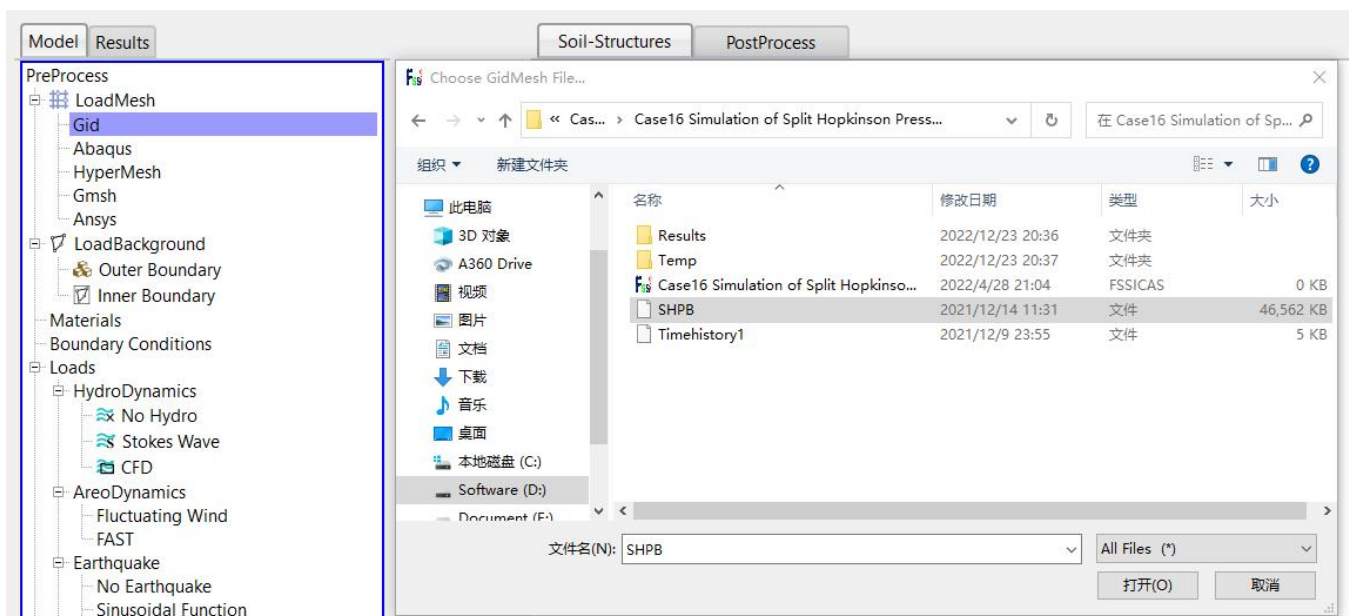


图 16-5 导入几何模型的网格文件

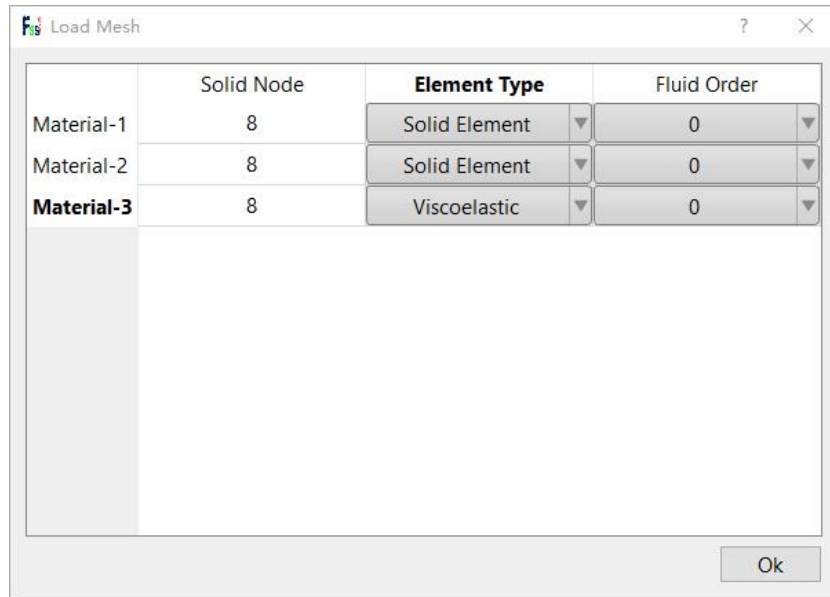


图 16-6 设置固体单元类型和流体单元阶次

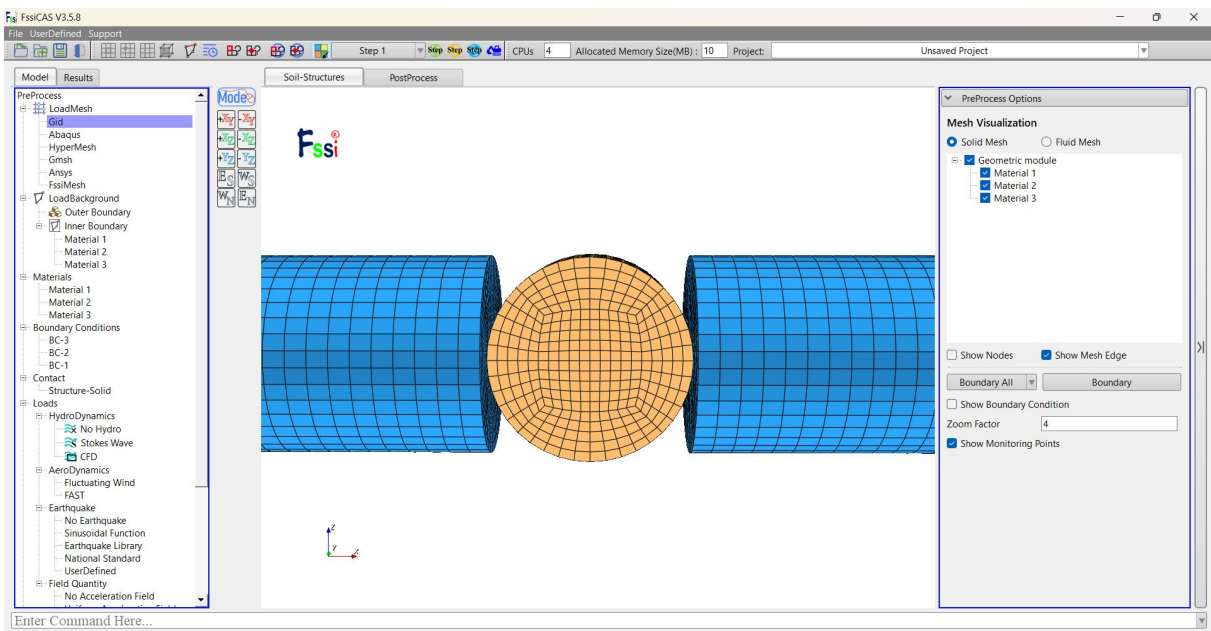



图 16-7 几何模型的显示

16.2.3 设置边界条件

需要将几何模型的边界条件设置为：在模型左侧表面施加用户自定义均布荷载，模型右侧表面设置为 xyz 三个方向位移固定，模型底部关键位置处设置为 z 方向位移固定（起到支撑作用，根据实际情况可多设置几处）。

点击工具栏中图标 ，进入边界选择模式，如图 16-8 所示；

点击工具栏中图标，进入单元选择模式，如图 16-9 所示；

点击键盘‘R’键，开始选择。



图 16-8 Apply Boundary



图 16-9 Select Element

在工作区中拖动鼠标框选模型左侧表面单元，点击鼠标右键，在显示边界条件下拉菜单中，选择 **Distribution Pressure—Apply**，如图 16-10 所示；

在弹出的对话框中施加用户自定义与时间相关的分布力边界条件，点击 **Load File**，选择提前制作好的时程文件 **Timehistory1**，点击 **OK**，如图 16-11 所示；

再次点击键盘‘R’键，可结束选择。

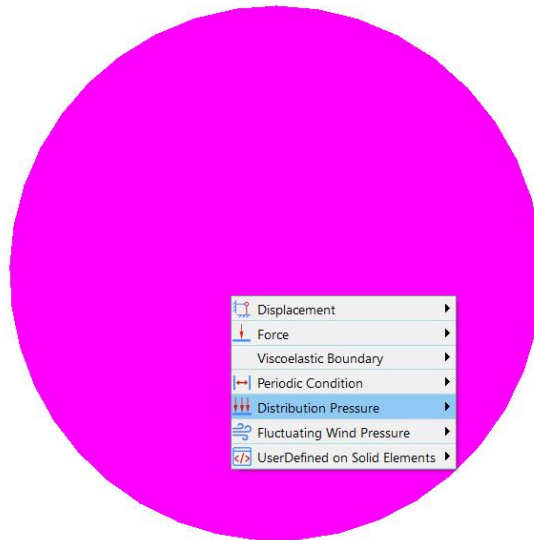


图 16-10 框选模型左侧表面单元并选择施加分布力荷载

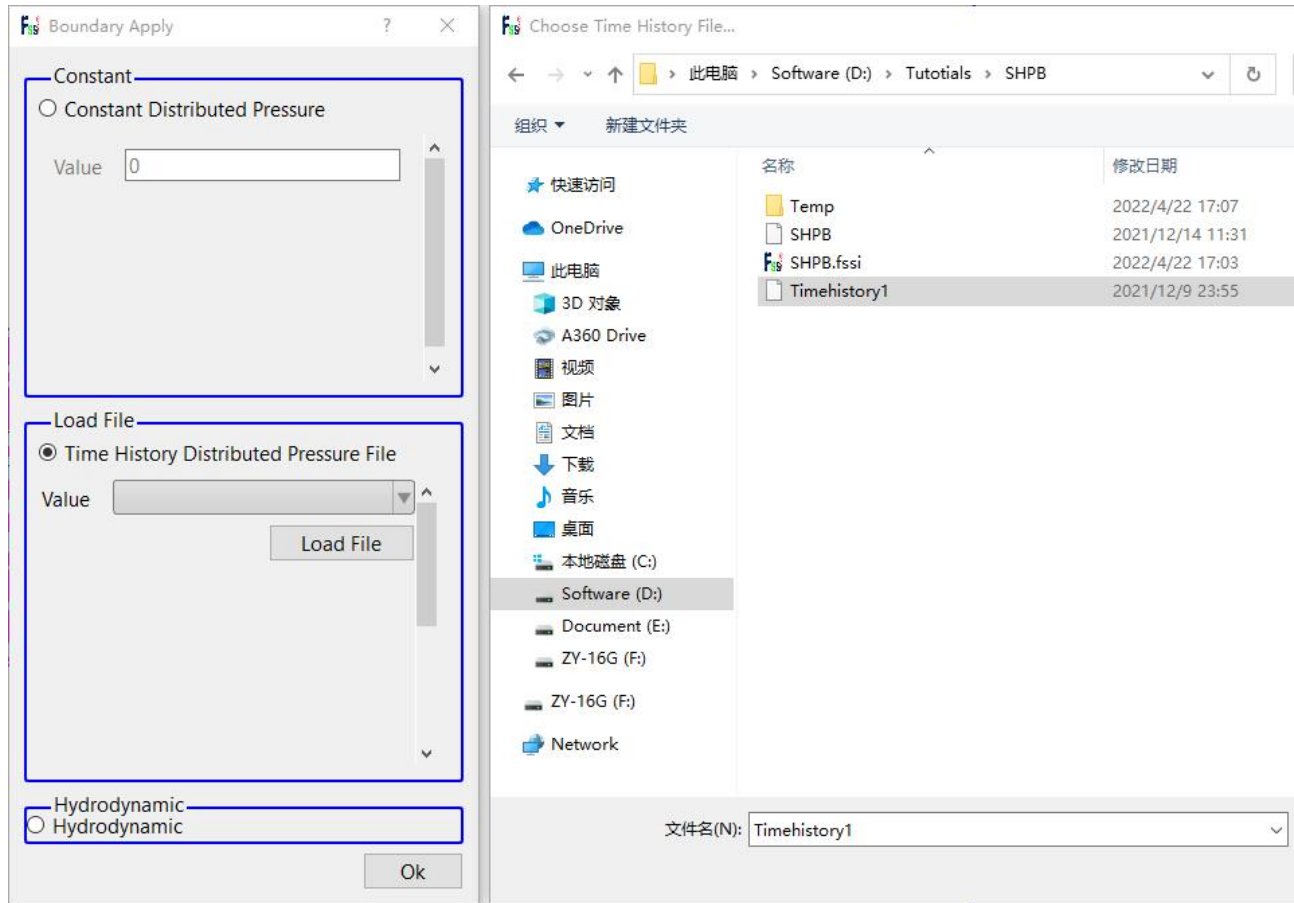


图 16-11 选择时程文件并施加用户自定义分布荷载

用户自定义时程文件格式要求：第一列为时间，第二列为具体数值，如图 16-12 所示；

Timehistory1 - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

0.00000000	0.00000000
0.00000500	15705.37927125
0.00001000	31395.25922982
0.00001500	47054.15585898
0.00002000	62666.61571881
0.00002500	78217.23119687
0.00003000	93690.65571365
0.00003500	109071.61886780
0.00004000	124344.94150618
0.00004500	139495.55070383
0.00005000	154508.49463913
0.00005500	169368.95734946
0.00006000	184062.27335275

图 16-12 用户自定义时程文件格式



点击工具栏中图标，进入边界选择模式，如图 16-13 所示；
点击工具栏中图标，进入节点选择模式，如图 16-14 所示；
点击键盘‘R’键，开始选择。



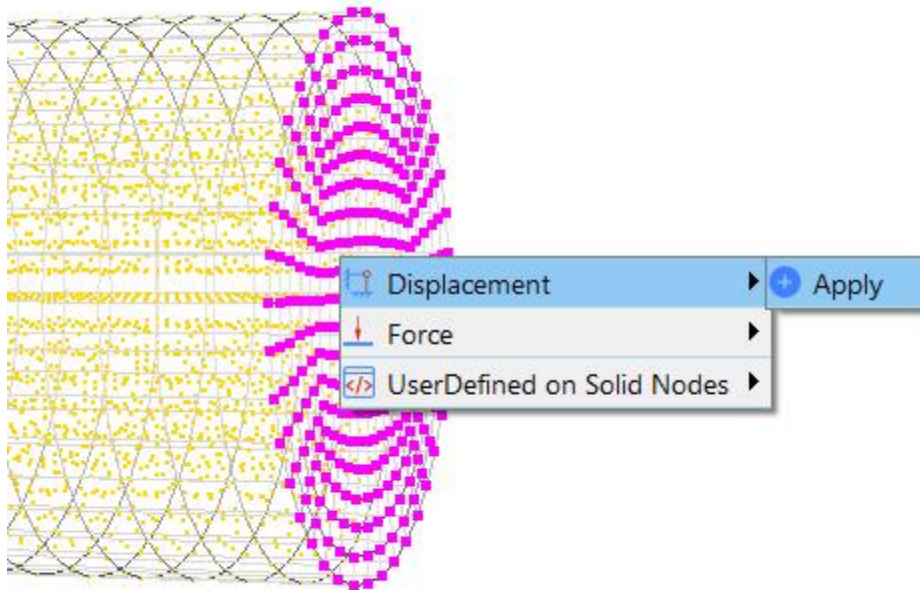
图 16-13 Apply Boundary



图 16-14 Select Node

在工作区中拖动鼠标框选模型右侧表面所有节点，点击鼠标右键，在显示边界条件下拉菜单中，选择 Displacement—Apply，在弹出的对话框中施加 xyz 三个方向位移固定，点击 OK，如图 16-15 所示；

再次点击键盘‘R’键，可结束选择。



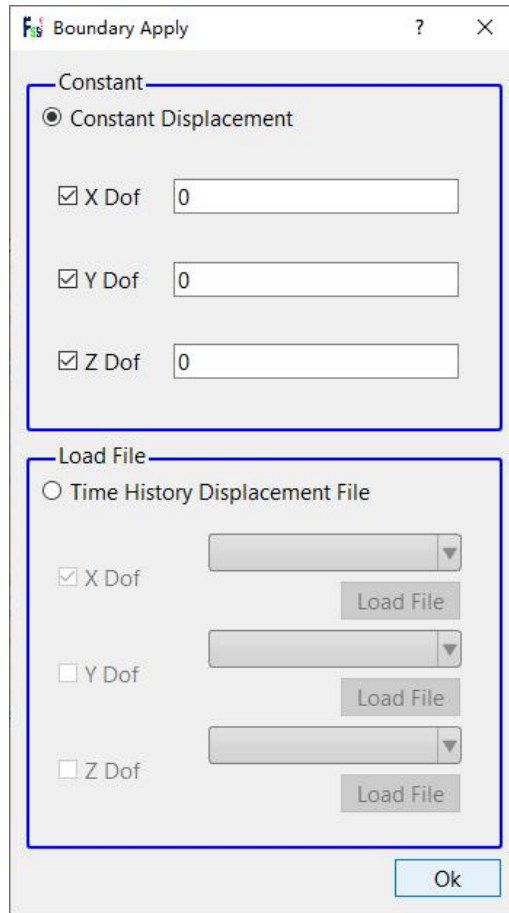


图 16-15 框选模型右侧表面所有节点并设置 xyz 三个方向位移固定

再以相同的方法，选择模型底部关键位置处施加 z 方向位移固定。

在右侧的伸缩区中勾选 **Show Boundary Condition**，如图 16-16 所示，可以检查是否正确添加边界条件，该案例添加的边界条件如图 16-17 所示。

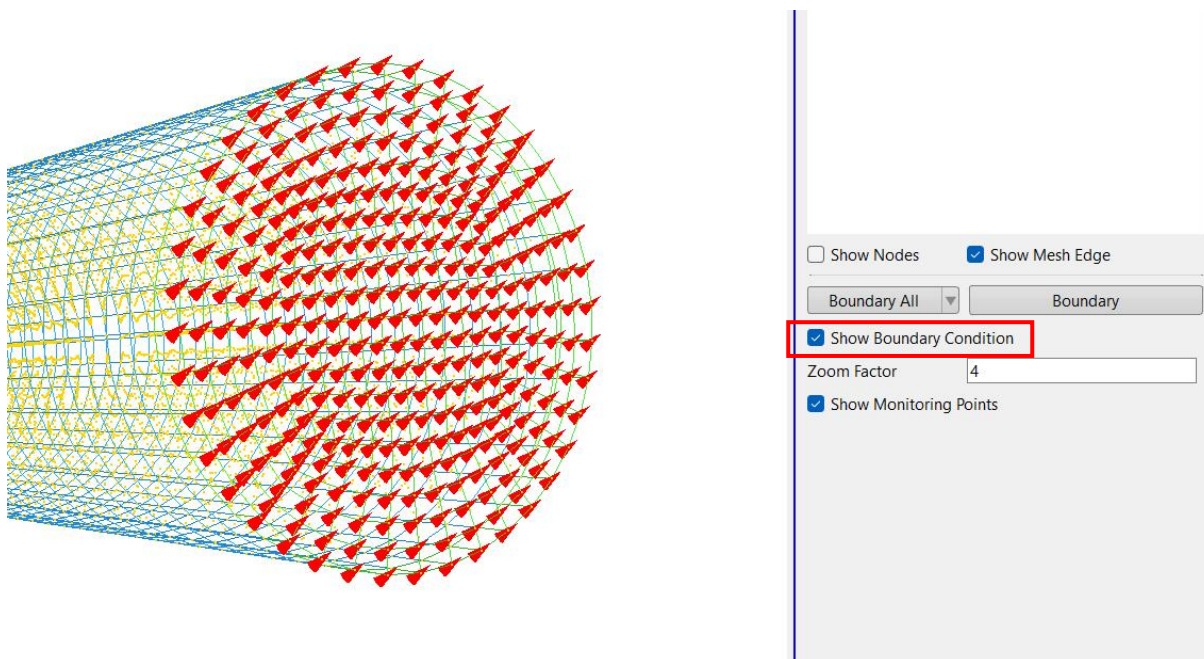


图 16-16 在右侧的伸缩区中勾选 Show Boundary Condition

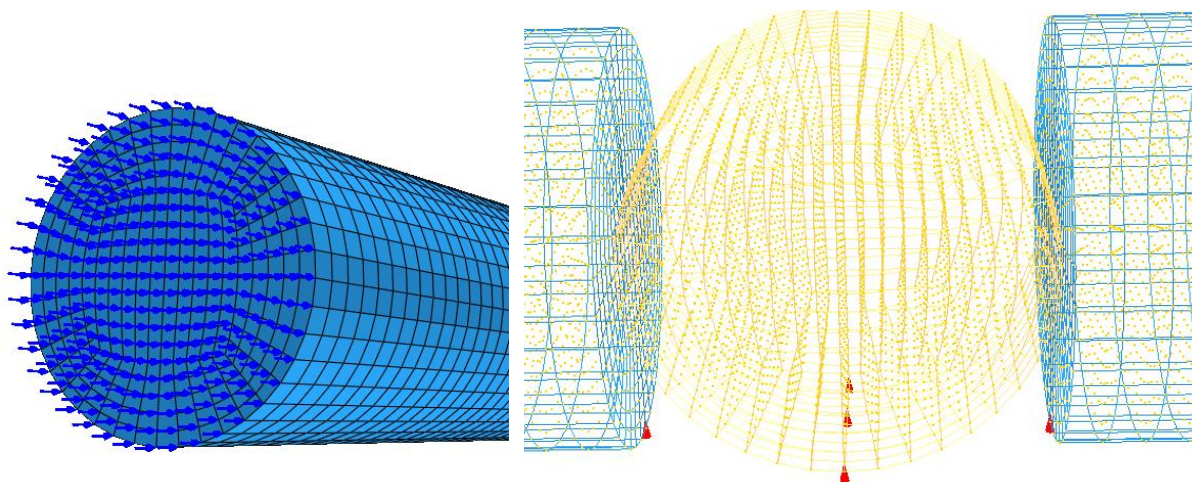


图 16-17 该案例添加的边界条件

16.2.4 设置材料参数与本构模型

用户点击在前处理界面上 Model 树状菜单栏中的 Material，分别设置多种材料的属性参数。针对混凝土试样和金属压杆，在工作区中用鼠标左键点击本构模型，在弹出的窗口中选择 Elastic 模型，输入对应的材料属性参数，点击 OK，完成材料属性设置。针对粘弹性人工边界单元材料，本构模型选择 Elastic_Viscoelastic。材料属性和参数设置如图 16-18 至 16-20 所示。

Material 1

Material Name: Material 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): 2e10

Poisson's Ratio: 0.2

Damping Model Parameters:

Damping Model: ELASTIC

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

Damping Coefficient: Direct

α : 0 β : 0

Material Parameters:

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

Granular Density (kg/m³): 2500

Void Ratio: 0

OK

图 16-18 设置材料的相关属性参数（混凝土试样）

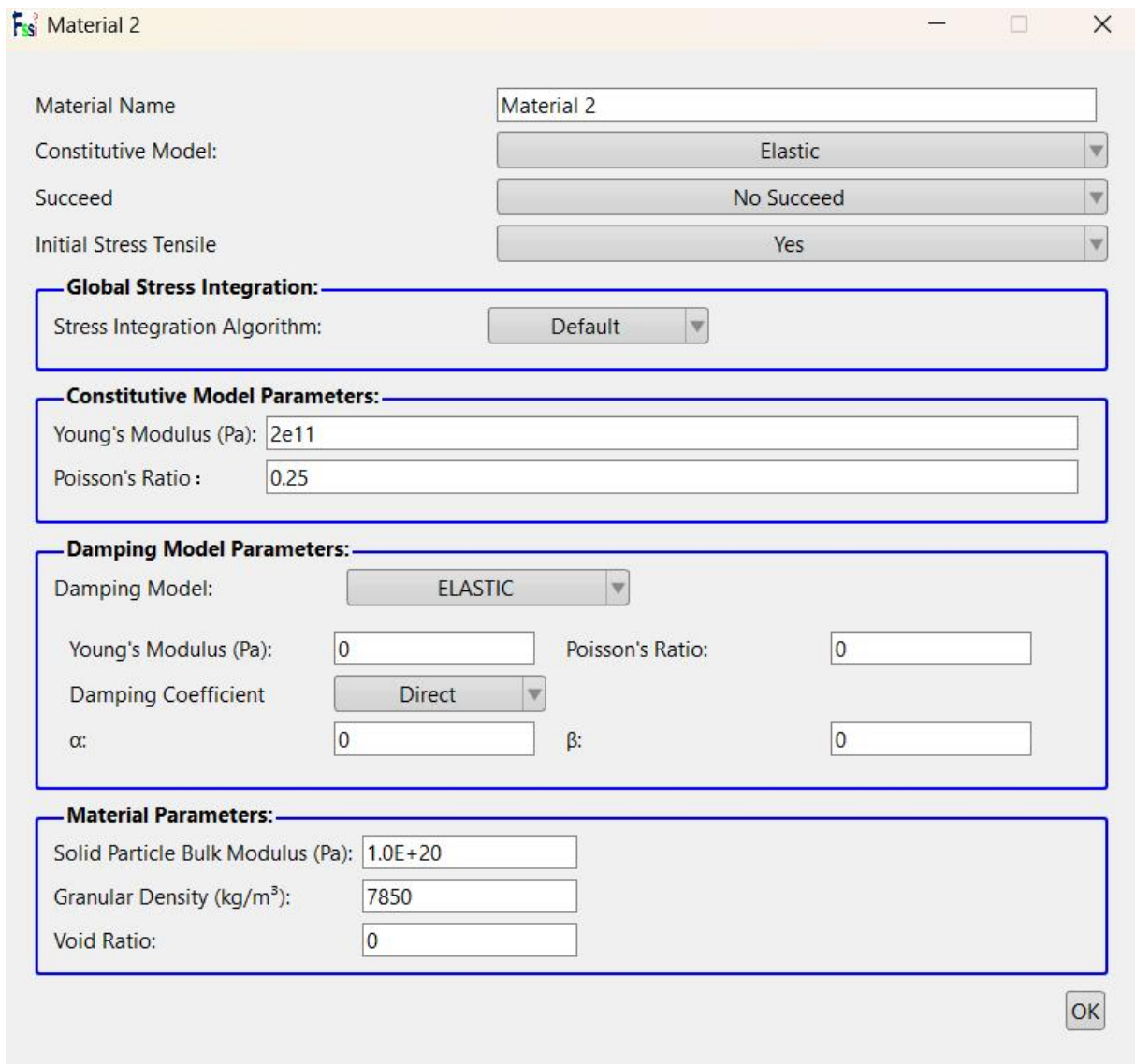


图 16-19 设置材料的相关属性参数（金属压杆）

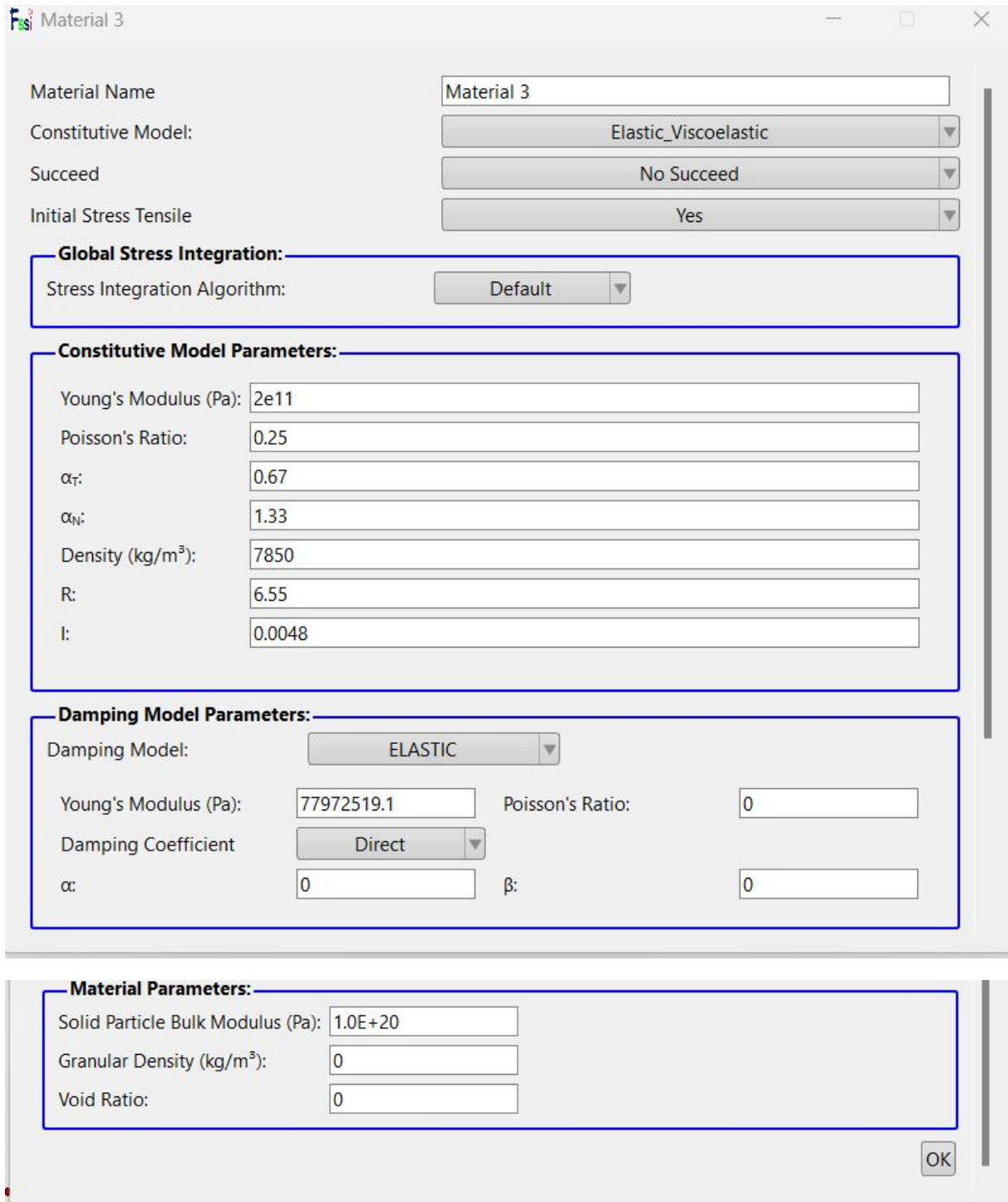


图 16-20 设置材料的相关属性参数（粘弹性人工边界）

粘弹性人工边界本构模型参数说明：

弹性模量 E 、泊松比 ν 均与内部介质材料相同； α_T 为切向粘弹性人工边界参数， α_N 为法向粘弹性人工边界参数；针对二维问题， α_T 取值范围为 0.35~0.65，推荐值为 0.5， α_N 取值范围为 0.8~1.2，

推荐值为 1.0；针对三维问题， α_T 取值范围为 0.5~1.0，推荐值为 0.67， α_N 取值范围为 1.0~2.0，推荐值为 1.33；Density 为内部介质材料平均密度（根据颗粒密度和孔隙比计算得出）；R 为加载点中心至人工边界层平均距离；I 为人工边界层厚度（一般与内部介质单元尺寸相同）。

粘弹性边界具体理论可参考清华大学刘晶波团队提出的一致粘弹性人工边界理论。

阻尼衰减模型参数说明：

泊松比 $\tilde{\nu}$ 由下式确定：

$$\tilde{\nu} = \begin{cases} \frac{\alpha-2}{2(\alpha-1)}, & x < 0 \\ 0, & x \geq 0 \end{cases}, (\alpha = \alpha_T/\alpha_N)$$

弹性模量 \tilde{E} 由下式确定：

$$\tilde{E} = \alpha_N \cdot I \cdot \frac{G}{R} \cdot \frac{(1 + \tilde{\nu}) \cdot (1 - 2\tilde{\nu})}{(1 - \tilde{\nu})}$$

阻尼系数 $\tilde{\eta}$ 由下式确定：

$$\tilde{\eta} = \begin{cases} \frac{\rho R}{2G} \left(\frac{c_s}{\alpha_T} + \frac{c_p}{\alpha_N} \right), & \text{二维} \\ \frac{\rho R}{3G} \left(2 \frac{c_s}{\alpha_T} + \frac{c_p}{\alpha_N} \right), & \text{三维} \end{cases}$$

其中： ρ 为内部介质材料平均密度， G 为内部介质材料剪切模量， λ 为内部介质材料拉梅常数， c_s 为 S 波波速 ($c_s = \sqrt{G/\rho}$)， c_p 为 P 波波速 ($c_p = \sqrt{(\lambda+2G)/\rho}$)。

需注意：针对粘弹性边界单元材料，流体密度和颗粒密度均需赋 0，即不考虑边界单元密度。此外，本案例未考虑流体，认为内部介质材料孔隙比为 0。

16.2.5 设置水动力边界条件

由于本案例不考虑流体节点，不设置水动力边界条件。因此设置耦合方式为非耦合，不考虑波浪动力，点击 FssiCAS—Preprocess—Loads—Hydrodynamics—No Hydro，如图 16-21 所示。



图 16-21 耦合方式选择非耦合（不考虑波浪动力）

16.2.6 设置求解器与时间步

用户点击前处理界面上 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 **Dynamic**（**Dynamic** 表示与时间相关的动态分析），并进行相关属性参数设置，如图 16-22 所示。本案例为霍普金森杆冲击实验演示案例，以探究动态荷载冲击下的介质内部响应特征以及粘弹性边界吸收效果，未考虑重力（即设置 Field Quantity 时选择 No Acceleration Field）。若考虑重力，可将本案例设置为 Step 2，增加一个时间步 Step 1，仅施加重力，选择 Static 求解，以获得初始状态，然后再施加动态荷载，计算 Step 2 即可。

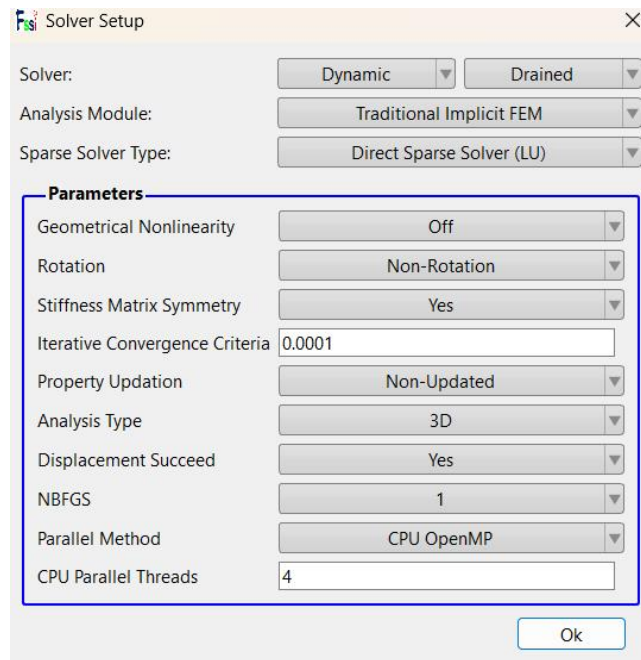


图 16-22 设置求解器的相关属性参数

在前处理界面上的 Model 树状菜单栏中的 Solver 中，点击 Time Step，在 Step 1 下面再设置三个小时时间步，其相关属性参数如图 16-23 所示。

Time Step

Sub Step

Parameter

Simulation Time (s)	<input type="text" value="0.003"/>
Start Time of Current Step (s)	<input type="text" value="0"/>
Interval for Time Steps (s)	<input type="text" value="0.0000002"/>
Interval for Updating Coordinate (s)	<input type="text" value="1.1"/>
Interval for Updating Global Stiffness Matrix (s)	<input type="text" value="1.1"/>
Maximum Iterations	<input type="text" value="50"/>
Restart File Output Interval (s)	<input type="text" value="1.1"/>
Results File Output Interval (s)	<input type="text" value="0.0000002"/>
Results Output	<input type="text" value="On Nodes"/>
State Variables Output	<input type="text" value="No"/>
Results Sequence	<input type="text" value="Manage"/>
Results Format	<input type="text" value="Binary"/>
History Output Interval (s)	<input type="text" value="0.000001"/>
α	<input type="text" value="0.6"/>
β_1	<input type="text" value="0.605"/>
β_2	<input type="text" value="0.6"/>

Time Step

Sub Step

Parameter

Simulation Time (s)	<input type="text" value="0.001"/>
Start Time of Current Step (s)	<input type="text" value="0"/>
Interval for Time Steps (s)	<input type="text" value="0.0000001"/>
Interval for Updating Coordinate (s)	<input type="text" value="1.1"/>
Interval for Updating Global Stiffness Matrix (s)	<input type="text" value="1.1"/>
Maximum Iterations	<input type="text" value="50"/>
Restart File Output Interval (s)	<input type="text" value="1.1"/>
Results File Output Interval (s)	<input type="text" value="0.0000002"/>
Results Output	<input type="text" value="On Nodes"/>
State Variables Output	<input type="text" value="No"/>
Results Sequence	<input type="text" value="Manage"/>
Results Format	<input type="text" value="Binary"/>
History Output Interval (s)	<input type="text" value="0.000001"/>
α	<input type="text" value="0.6"/>
β_1	<input type="text" value="0.605"/>
β_2	<input type="text" value="0.6"/>

Time Step

Sub Step


Parameter

Simulation Time (s)	<input type="text" value="0.016"/>
Start Time of Current Step (s)	<input type="text" value="0"/>
Interval for Time Steps (s)	<input type="text" value="0.000001"/>
Interval for Updating Coordinate (s)	<input type="text" value="1.1"/>
Interval for Updating Global Stiffness Matrix (s)	<input type="text" value="1.1"/>
Maximum Iterations	<input type="text" value="50"/>
Restart File Output Interval (s)	<input type="text" value="1.1"/>
Results File Output Interval (s)	<input type="text" value="0.000002"/>
Results Output	<input type="text" value="On Nodes"/>
State Variables Output	<input type="text" value="No"/>
Results Sequence	<input type="text" value="Manage"/>
Results Format	<input type="text" value="Binary"/>
History Output Interval (s)	<input type="text" value="0.000001"/>
α	<input type="text" value="0.6"/>
β_1	<input type="text" value="0.605"/>
β_2	<input type="text" value="0.6"/>

图 16-23 设置时间步和相关属性参数

16.2.7 添加时程输出

需要输出时程结果的点设置为：模型的纵向对称轴、底部边界及右侧边界的所有节点和单元；

点击工具栏中图标，进入输出时程选择模式；

点击工具栏中图标，进入节点选择模式；

点击工具栏中图标，进入单元选择模式；

点击键盘‘R’键，开始选择；

分别选择典型位置处的单元以及节点，输出位移、有效应力、孔隙比 e 、应变等信息；

在右侧的伸缩区中勾选 Show Monitoring Points 可以显示已经输出时程结果的点或单元；

点击 FssiCAS—Preprocess—Time History，可以显示输出的时程结果列表，选择列表中的项，点击右键可以进行删除操作，如图 16-24 所示。

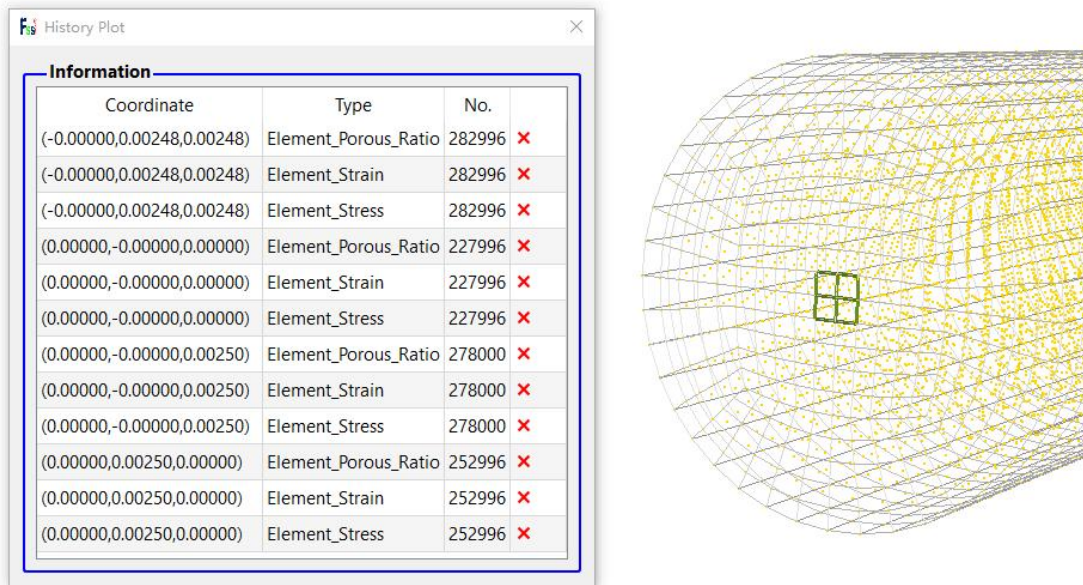


图 16-24 显示输出的时程结果列表

16.2.8 设置初始状态

在前处理界面上 Model 树状菜单栏中，点击 Initial State，设置起始时间为 0s，点击 OK，即可完成初始状态设置，如图 16-25 所示；

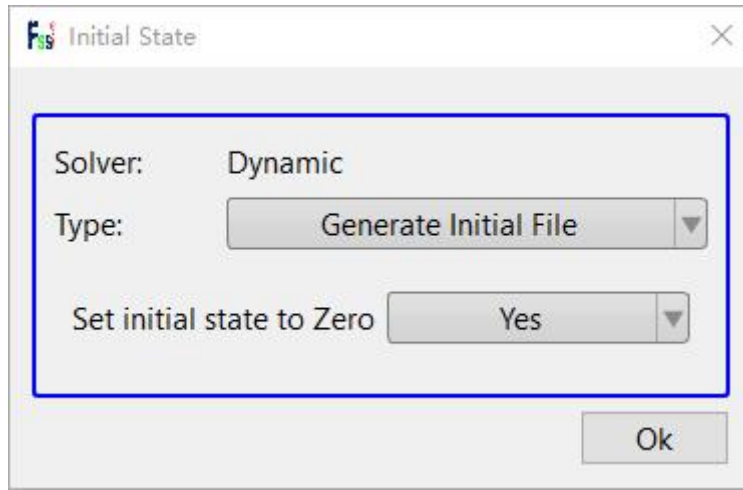


图 16-25 设置初始状态

16.2.9 计算并保存

点击在前处理界面上 Model 树状菜单栏里 Computaton 中的 FSSI-W，保存当前项目，开始计算，计算完成后结果储存在 Project\Results\Soil_Model\Step 1。在退出 FssiCAS 软件时，用户在弹出的 Note 窗口中点击 Yes，即可退出软件时保存项目。

16.3 FssiCAS 图形界面操作——后处理

用户点击树状菜单栏上的 Results，即可进入后处理界面。

16.3.1 加载文件

点击在后处理界面上 Results 树状菜单栏中的 Open Results File，在弹出的窗口中点击 Soil Result Files Director—Load Files，选择需要处理的结果文件夹，即可进入后处理阶段，如图 16-26 所示。

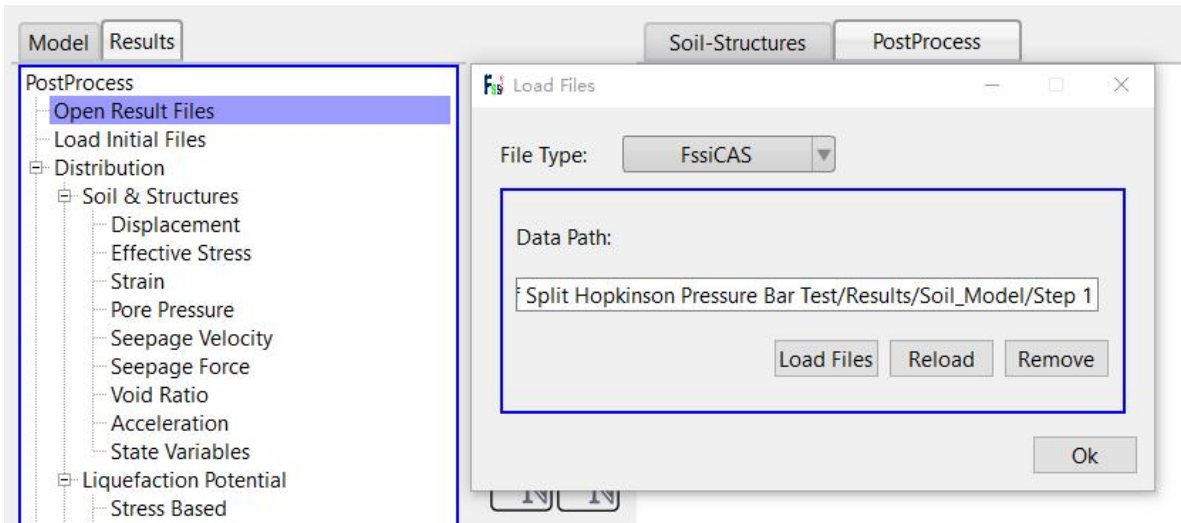
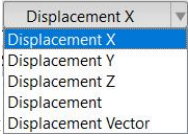



图 16-26 打开结果文件

16.3.2 绘制分布图

在工作区中显示选择 ，在工具栏的输入窗口  处输入时间步，按键盘上的“回车键”，即可在工作区中显示该时间步的 x 方向位移分布云图，如图 16-27 所示：

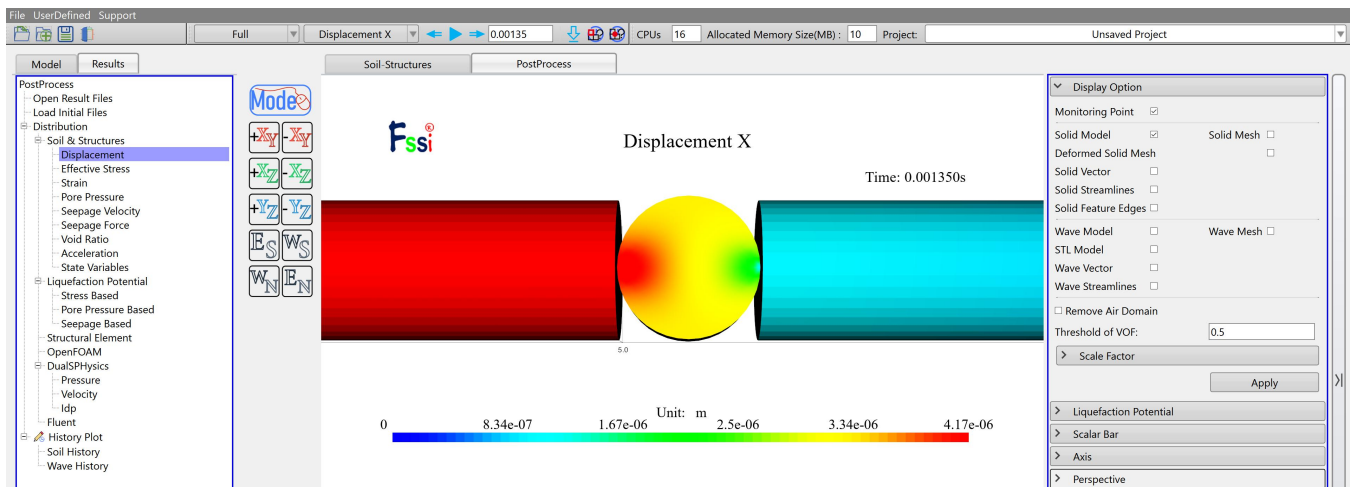


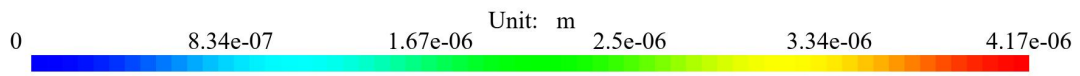
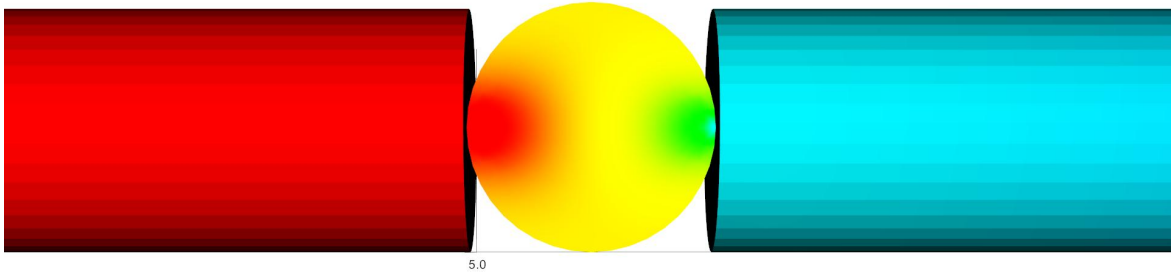
图 16-27 绘制分布图

本案例部分计算结果分布云图如图 16-28 所示：



Displacement X

Time: 0.001350s

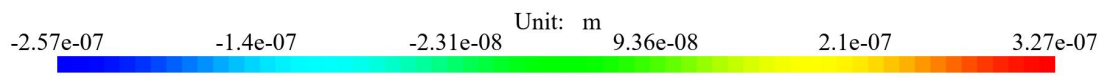
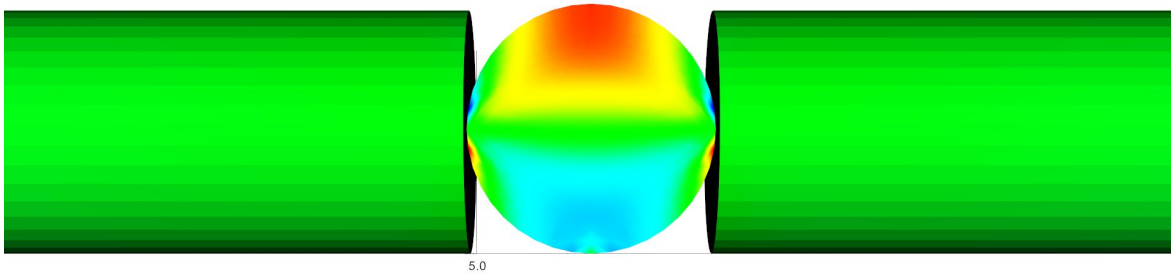


(a) x 方向位移



Displacement Z

Time: 0.001350s

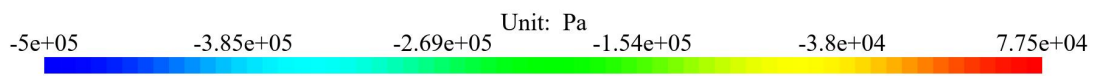
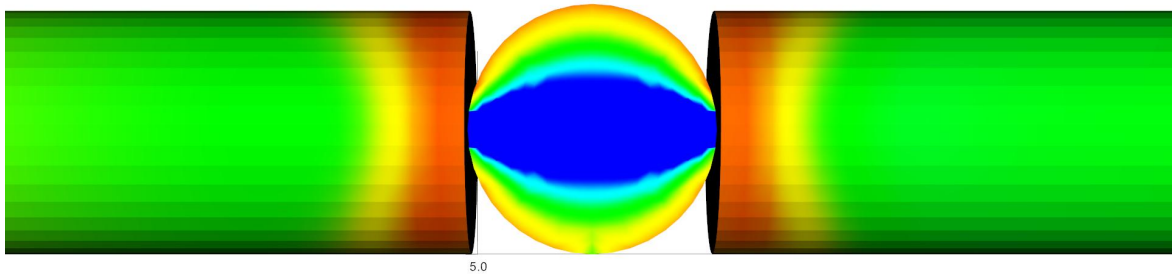


(b) z 方向位移



Effective Stress X

Time: 0.001350s

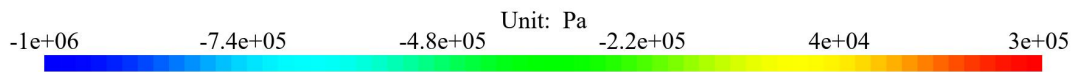
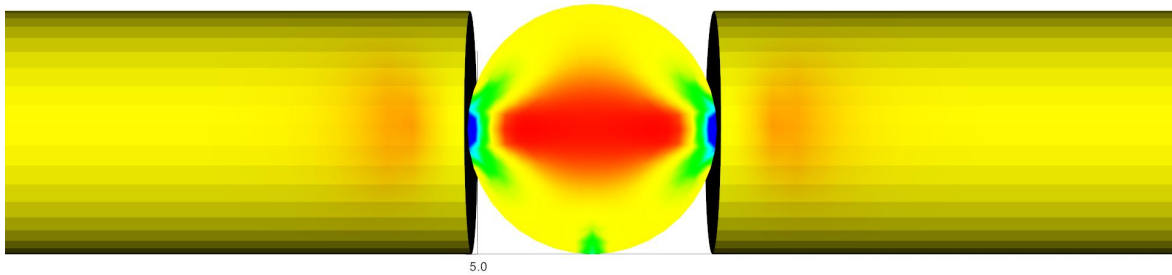


(c) x 方向应力



Effective Stress Z

Time: 0.001350s



(d) z 方向应力

图 16-28 计算结果分布云图 (t=0.00135s)

时程点时程曲线示例如图 16-29 所示:

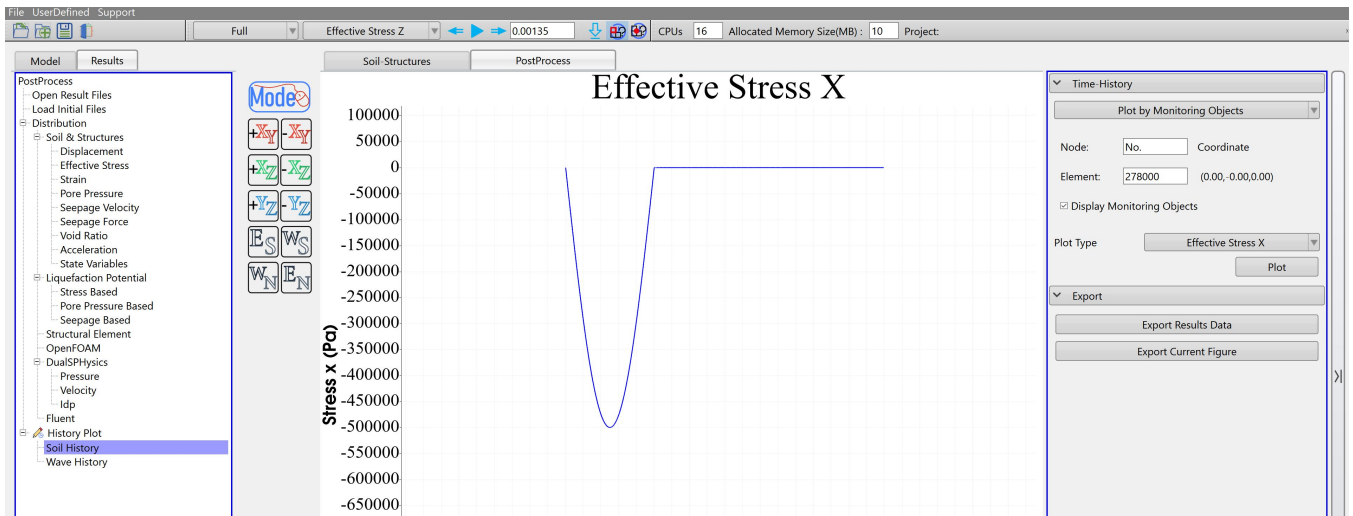


图 16-29 模型左侧表面单元 x 方向有效应力时程曲线