

大变形条件下拉伸、压缩和剪切实验的数值模拟

单轴拉伸实验、单轴压缩实验和简单剪切实验是材料力学性能测试中的三种重要方法。单轴拉伸实验用于测定材料在拉伸荷载下的抗拉强度、屈服强度以及延展性等性能。在该实验中，试样通常制备为标准的长柱形或条形，通过施加沿其长轴方向的拉伸荷载，观察材料在拉伸过程中发生的应变和断裂特征。单轴压缩实验则主要用于考察材料在压缩荷载下的抗压强度和其他力学特性；试样一般制备为圆柱形或立方形，通过施加沿其长度方向的压缩荷载，分析材料在压缩过程中的变形及最终失效情况。与此同时，简单剪切实验则用于评估材料在剪切力作用下的抗剪强度和变形能力。在此实验中，试样被施加平行于其表面的剪切力，通过测量材料的位移和变形情况，可以得知其剪切强度及相关力学性能。本章将模拟这三种实验，并介绍其数值计算模型的基本构建方法。模型示意图如图 1 所示，相关参数如表 1 所示。通过对比不同实验条件下材料的力学响应，可以更全面地理解材料在各种荷载下的行为特征，为工程应用提供可靠的数据支持。

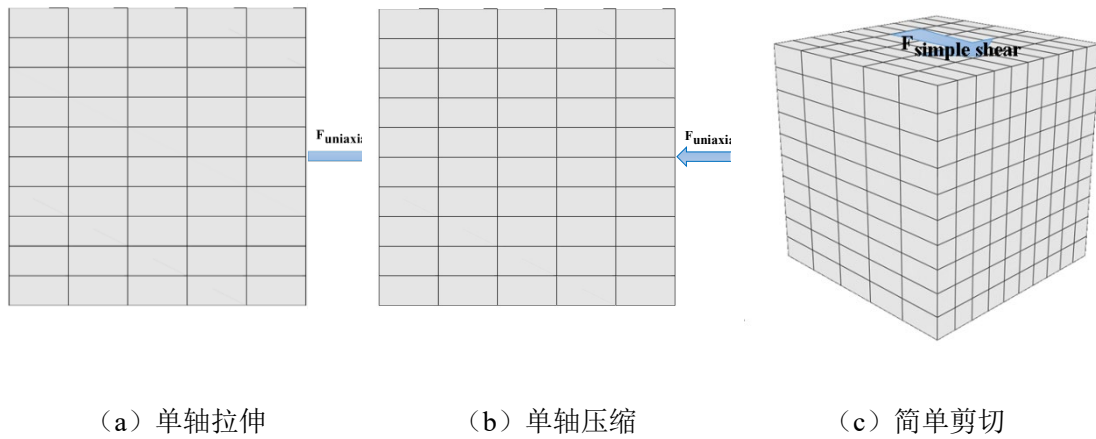


图 1 数值计算模型示意图

表 1 材料参数（采用简单的线弹性本构模型）

Parameters	
Young's modulus (Pa)	10e6
Poisson's ratio	0.3

1.1 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完成。借助 Gid 软件建立模型并划分网格如图 2 在专业网格划分软件 Gid 中建立模型并划分网格所示：

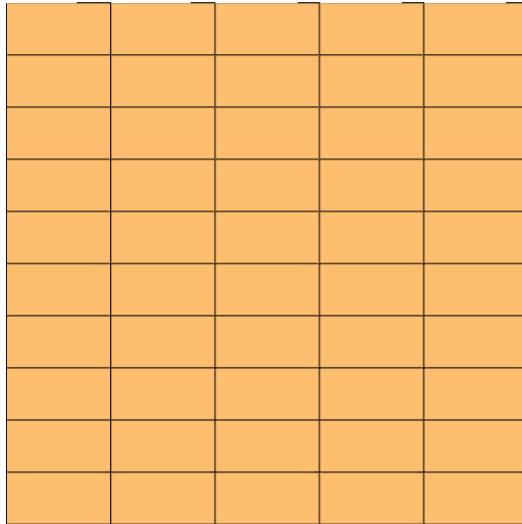


图 2 在专业网格划分软件 Gid 中建立模型并划分网格

1.2 FssiCAS 图形界面操作——前处理

1.2.1 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 Abaqus.inp 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 3 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，在本案例中固体节点采用四边形八节点二阶单元，不设置流体单元阶次，因此，固体节点数设置为 8，流体节点阶次设置为 0（即没有流体存在），点击 OK，如图 4 所示。在工作区中显示几何模型如图 5 所示。

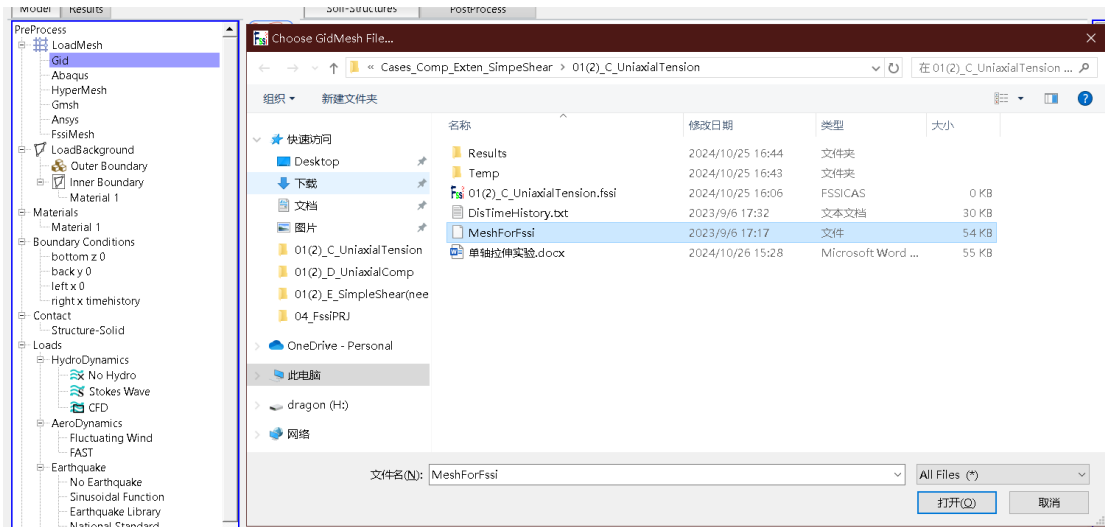


图 3 导入几何模型的网格文件

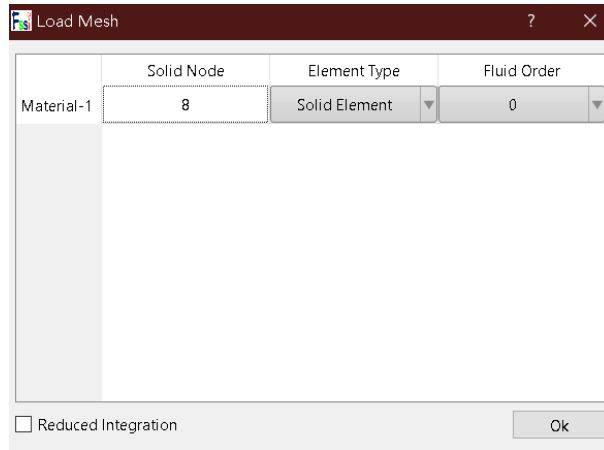


图 4 设置固体节点数和流体单元阶次

注：这里通常规定从第三方网格画分软件导入的网格系统单元上的固体节点的阶次不能改变，由软件自行判断固体节点的阶次。从 **GID**、**Hypermesh** **Solidworks** 等建模软件导出的网格中固体节点为几阶，那么导入 **FSSI-CAS** 软件后固体节点还是原阶次，但可以指定流体单元的阶次，但是流体单元的阶次不能大于同位置固体单元的阶次。

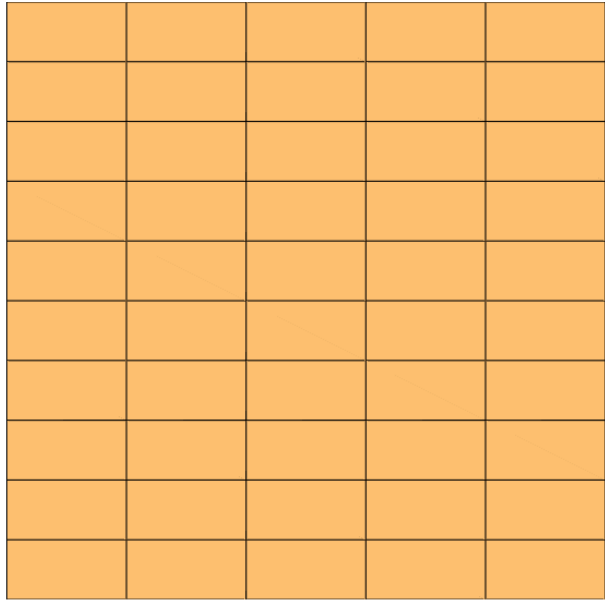


图 5 几何模型的显示

1.2.2 添加边界条件

单轴拉伸：需要将几何模型的边界条件设置为：底面（ $z=0$ ）所有节点设置为 z 方向位移固定；背面（ $y=1$ ）所有节点设置为 y 方向移固定；左侧面（ $x=0$ ）所有节点设置为 x 移方向固定；右侧面（ $x=1$ ）所有节点添加位移时程曲线。

单轴压缩：需要将几何模型的边界条件设置为：底面（ $z=0$ ）所有节点设置为 z 方向位移固定；背面（ $y=1$ ）所有节点设置为 y 方向移固定；左侧面（ $x=0$ ）所有节点设置为 x 移方向固定；右侧面（ $x=1$ ）所有节点添加位移时程曲线。

简单剪切：需要将几何模型的边界条件设置为：底面（ $z=0$ ）所有节点设置为 xyz 方向位移固定；正面（ $y=0$ ）、背面（ $y=1$ ）以及顶面（ $z=1$ ）所有节点设置为 yz 方向移固定；左侧面（ $x=0$ ）和右侧面（ $x=1$ ）添加周期性边界；顶面（ $z=1$ ）所有节点添加位移时程曲线。

点击工具栏 2 中图标 ，进入边界选择模式，如图 6 所示；


点击工具栏 2 中图标 ，进入单元选择模式，如图 7 所示； 点击键盘‘R’键，开始选择；



图 6 进入边界选择模式



图 7 进入单元选择模式

选定相应位置后如图 8，点击鼠标右键，在显示的边界条件下拉菜单中，选择 Displacement—Apply，如图 9 所示；



图 8 选定示意图

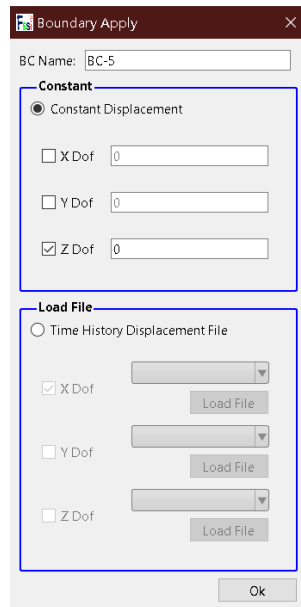
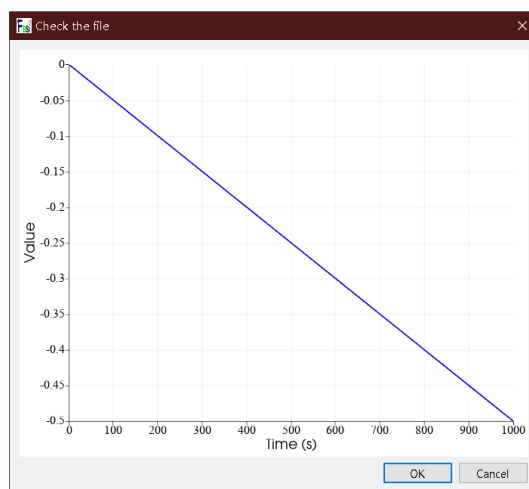
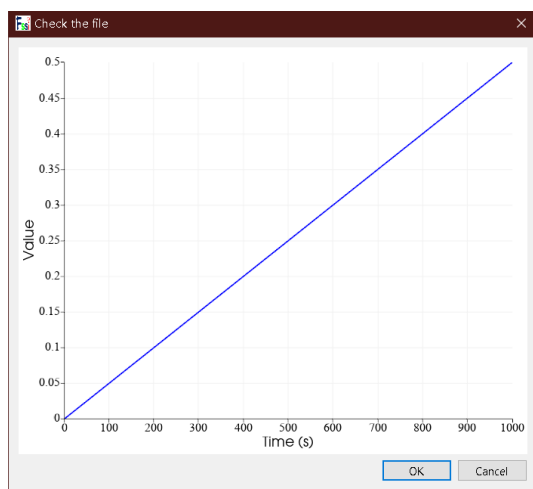
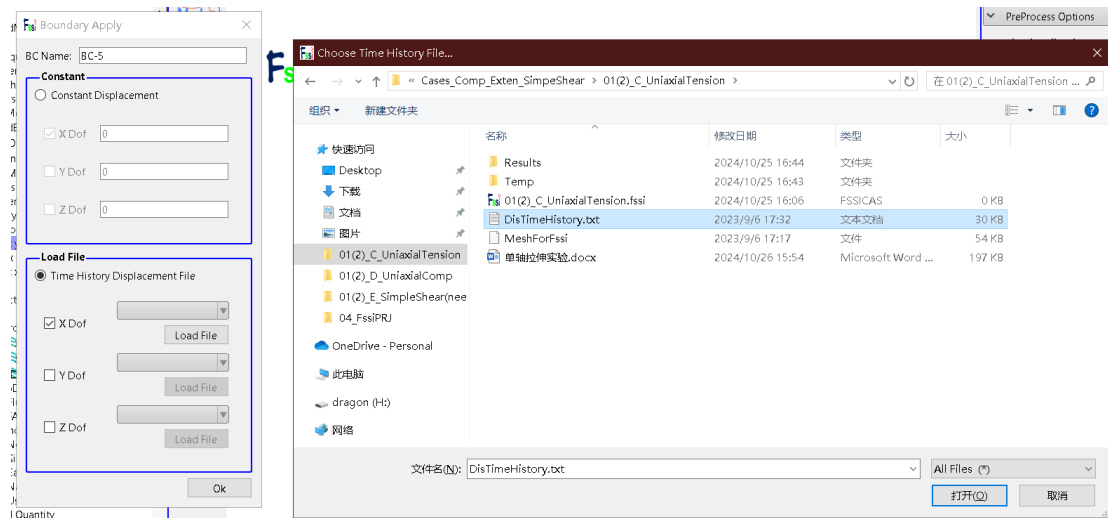


图 9 设置位移固定

设置位移固定后，接下来添加位移时程曲线，选取 $x=1$ 上面所有网格，点击鼠标右键，在显示的边界条件下拉菜单中，选择 Displacement—Apply，勾选 Time History Displacement，勾选 x 方向添加相应位移时程曲线，如图 10 所示。



(a) 单轴拉伸时程曲线

(b) 单轴压缩时程曲线

图 10 添加位移时程曲线

接下来设置简单剪切周期性边界，首先选定右侧面 ($x=1$)，点击鼠标右键，在显示的边界条件下拉菜单中，选择 **Periodic Conduction**—**Apply** 如，而后在弹出对话框点击 **ok**，再选择左侧面 ($x=0$) 选中后点击回车即设置成功，如图 11 图 12 所示；

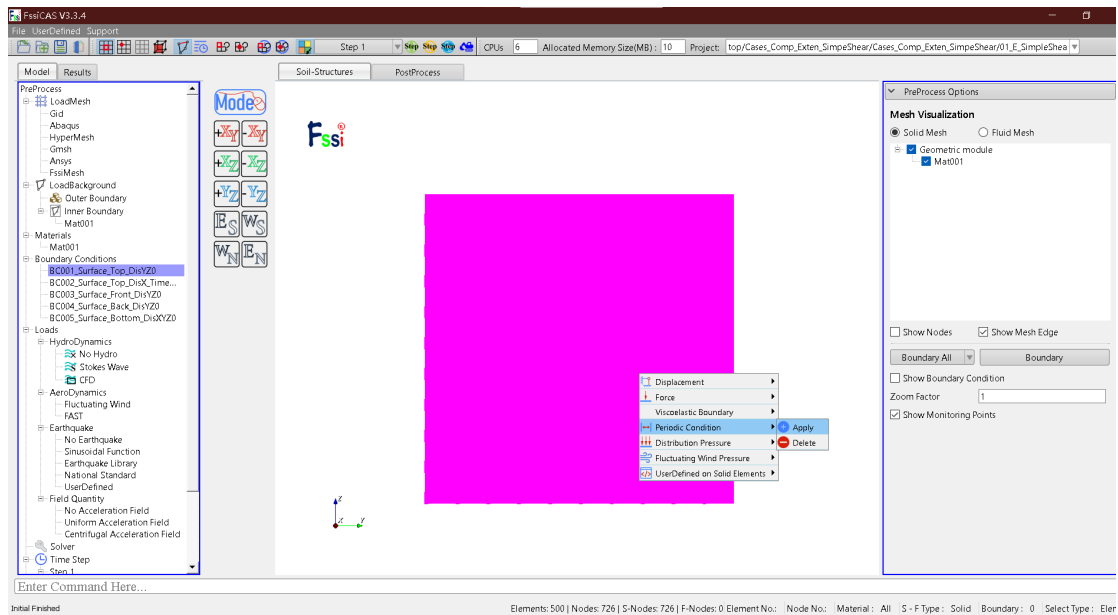


图 11 添加周期性边界（选择左侧面）

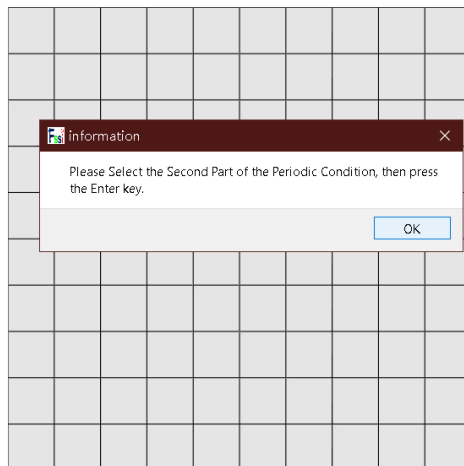


图 12 弹出对话框

在右侧的伸缩区中勾选 **Show Boundary Condition**，如图 13 所示，可以检查是否正确添加边界条件，简单剪切案例添加的边界条件如图 16 所示；

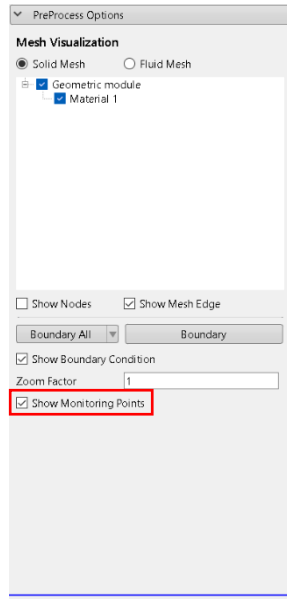


图 13 在右侧的伸缩区中勾选 Show Boundary Condition

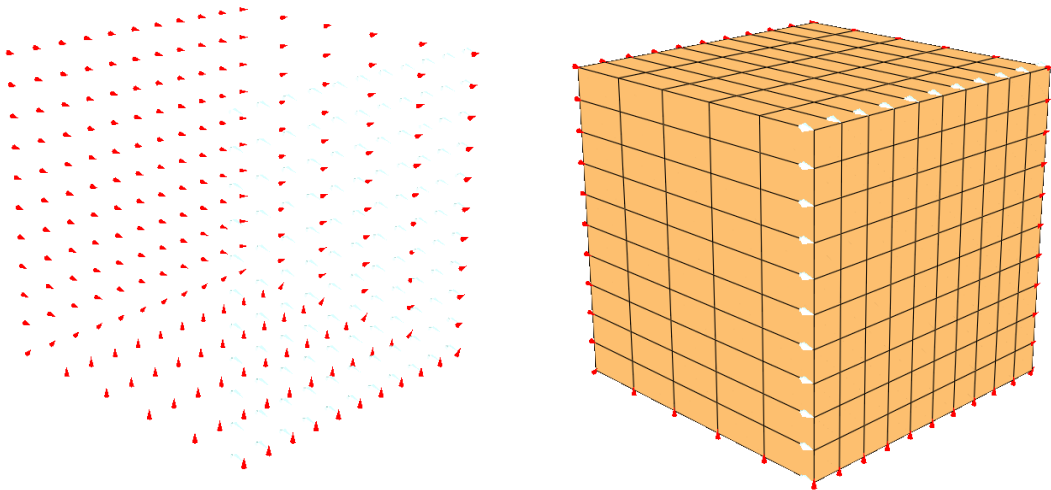


图 14 单轴拉伸案例添加的边界条件

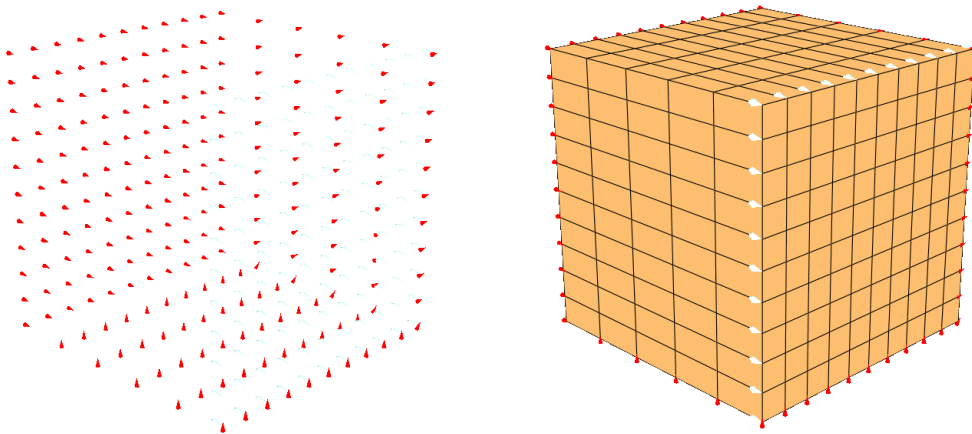


图 15 单轴压缩案例添加的边界条件

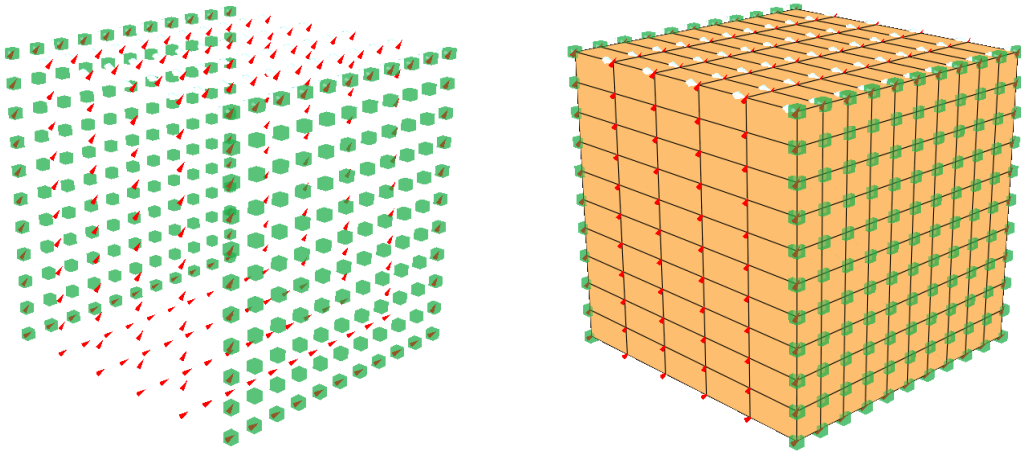


图 16 简单剪切案例添加的边界条件

1.2.3 设置材料参数

点击 PreProcess-Materials 设置材料参数，相关材料参数如图 17 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): 10e6

Poisson's Ratio: 0.3

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): 2700

Void Ratio: 0

OK

图 17 设置材料参数

1.2.4 水动力边界条件设置

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 18 所示；

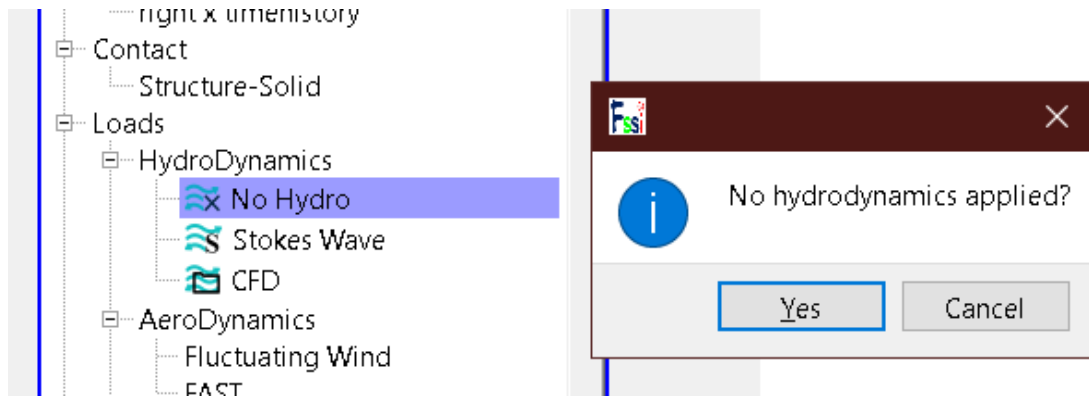


图 18 水动力边界条件设置

1.2.5 设置求解器类型和时间步

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），注意设置几何非线性开关 Geometrical Nonlinearity 选择 On，并进行相关属性参数设置，如图 19 所示；

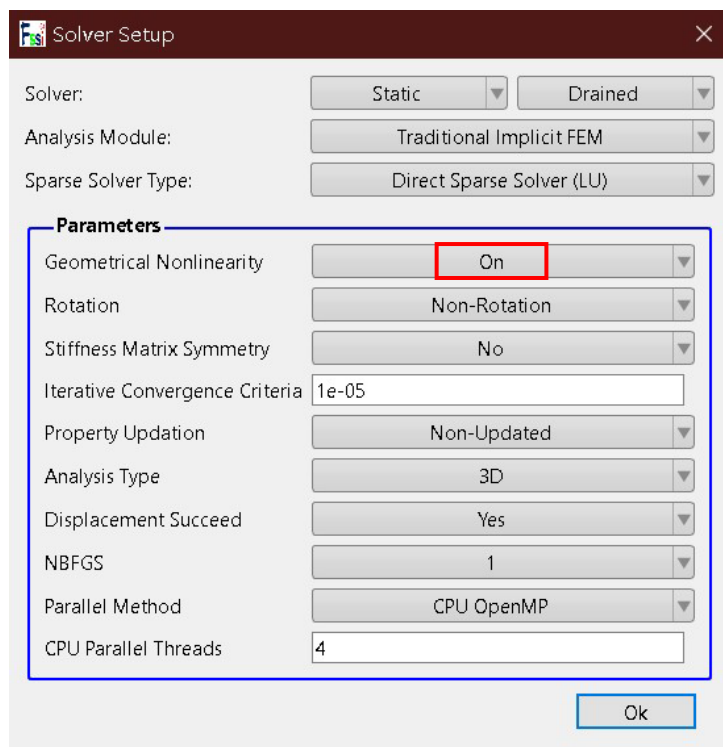


图 19 设置求解器相关参数

在前处理界面上的 Model 树状菜单栏的 Time Step 中，点击 Sub_Step1，设置求解时间步数为 1000s，时间步长为 1s，更新坐标，更新刚度矩阵，每步最大迭代 10 次，不输出重启文件，每 1s 输出分布图结果，每 1s 输出时程结果，输出高斯点上结果，如图 20 所示；

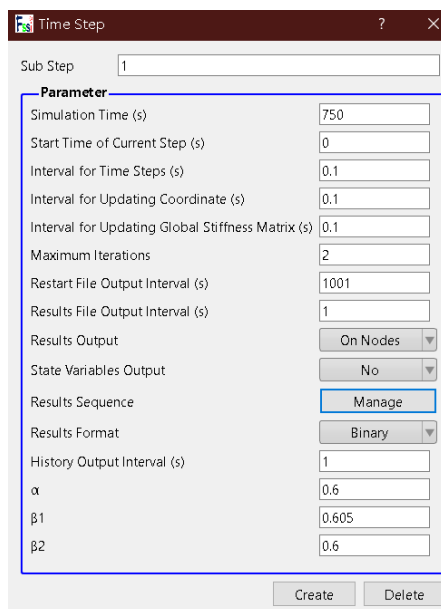


图 20 时间步设置

注：1.更新坐标的数值大于总时间数值表示不更新，反之表示更新； 2.更新刚度矩阵的数值大于总时间数值表示不更新，反之表示更新； 3.输出重启文件的数值大于总时间数值表示不输出，反之表示输出，但是无论如何，程序结束时都会输出一次； 4.必须满足条件： $\alpha \geq 0.5$ 、 $0.5 \beta_1 \geq \beta_2 \geq$ ；

1.2.6 设置初始条件

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 21 所示；

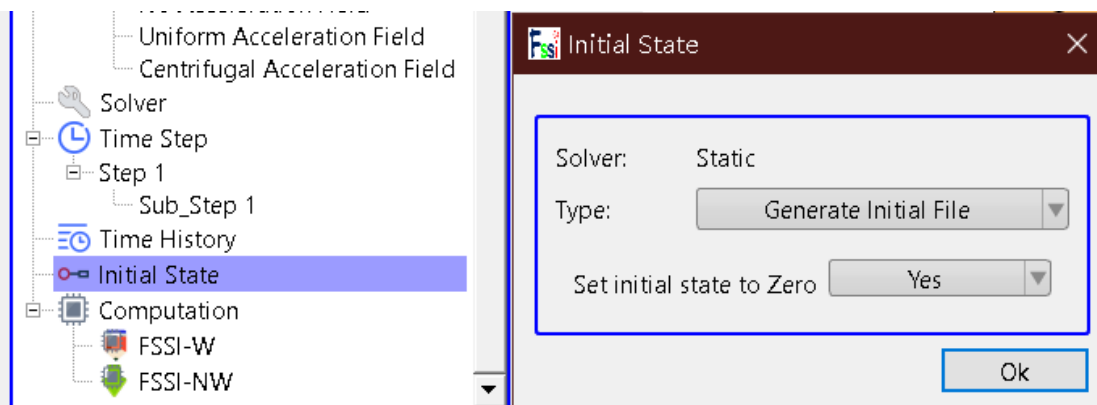


图 21 设置初始状态

1.2.7 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, 开始计算, 如图 22 所示。

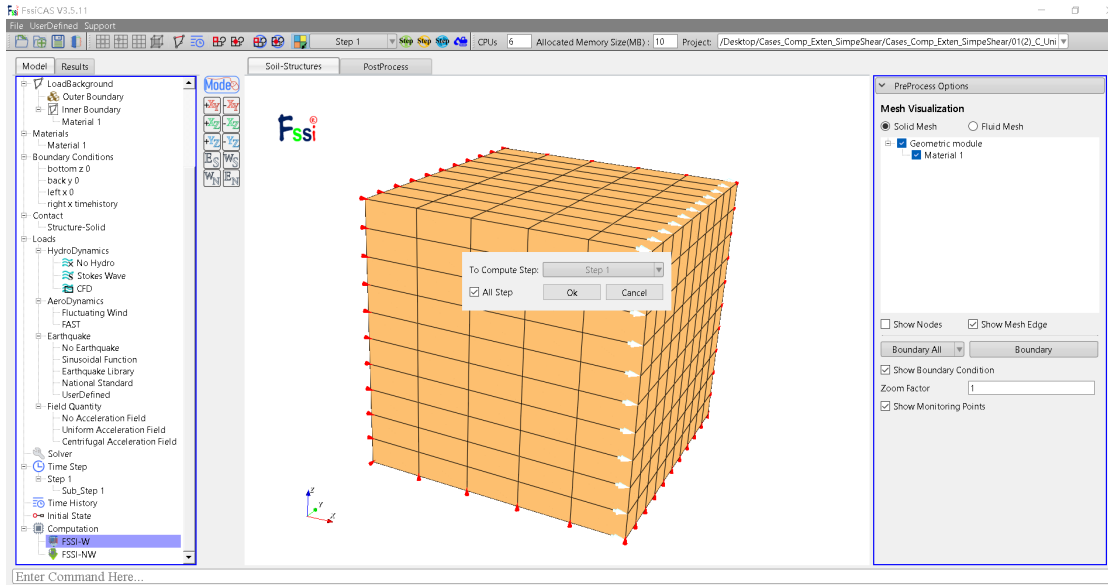


图 22 开始计算

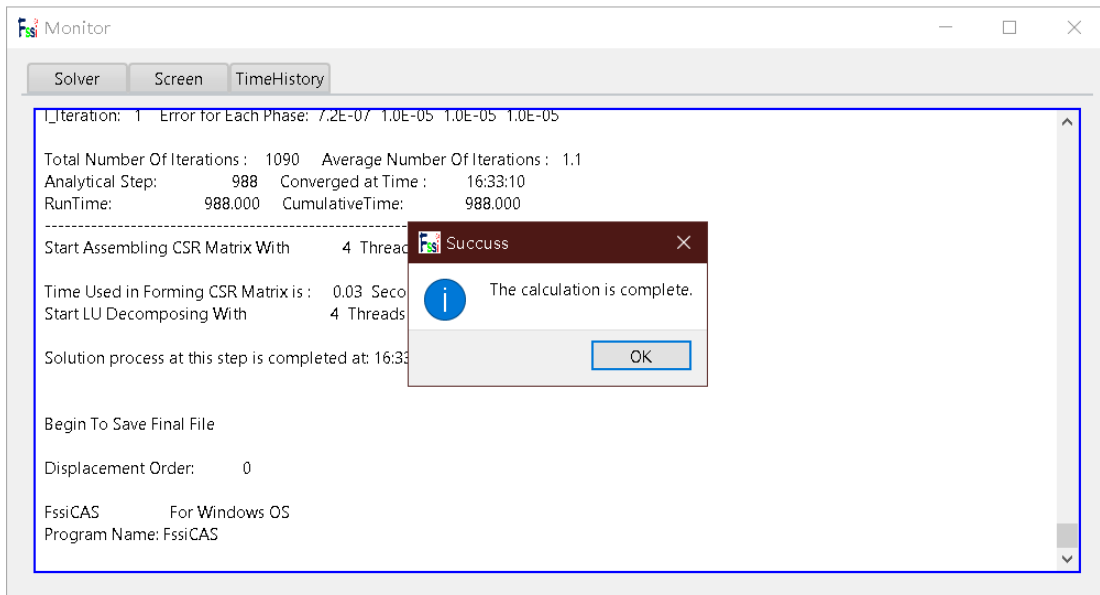


图 23 计算结束

1.1 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。

1.3.1 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 Results 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 24 所示；

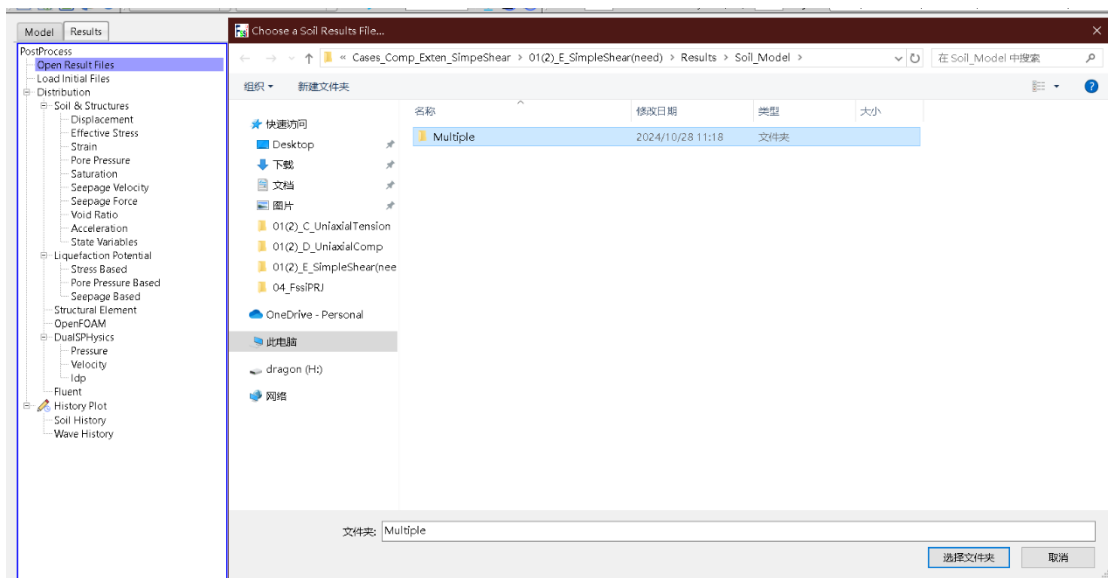


图 24 加载结果文件

1.3.2 查看结果分布图

选择后处理 Display Option-Scale Factor，设置 Deformation Scale Factor 查看变形情况如图 25 所示。

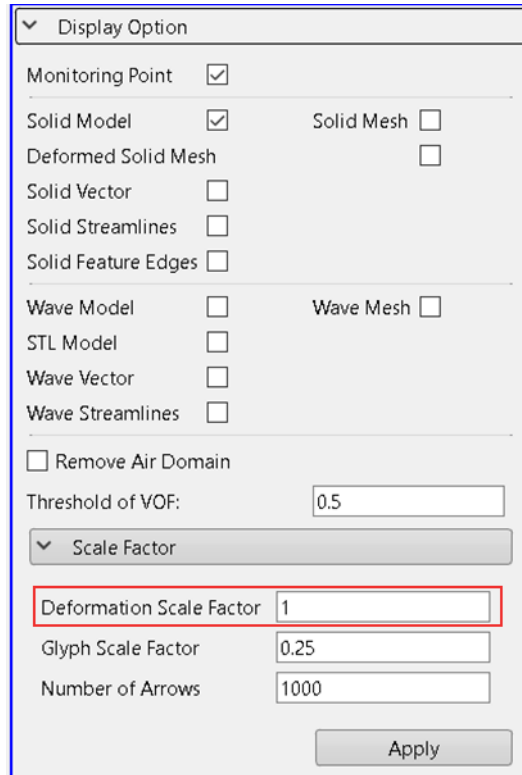


图 25 设置查看变形情况

单轴拉伸结果示意图如下；

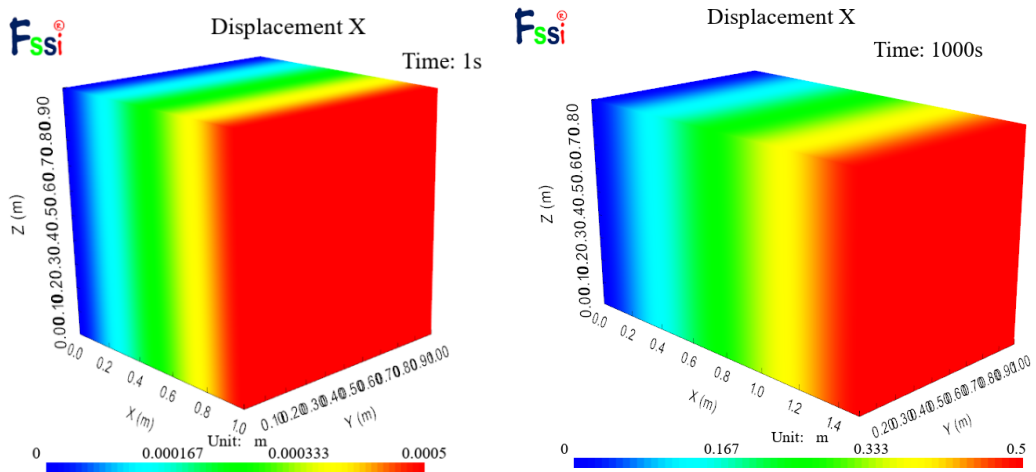


图 26 x 方向位移分布图

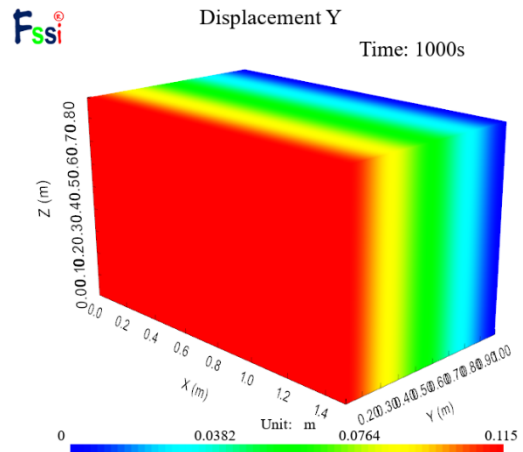
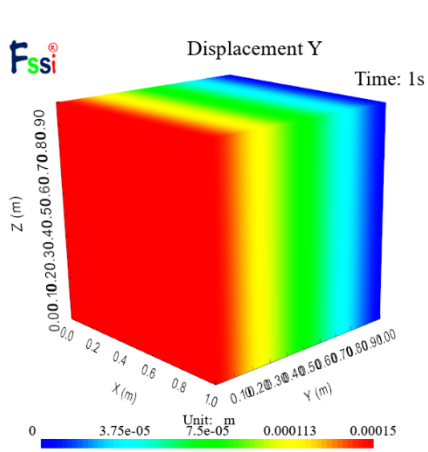


图 27 y 方向位移分布图

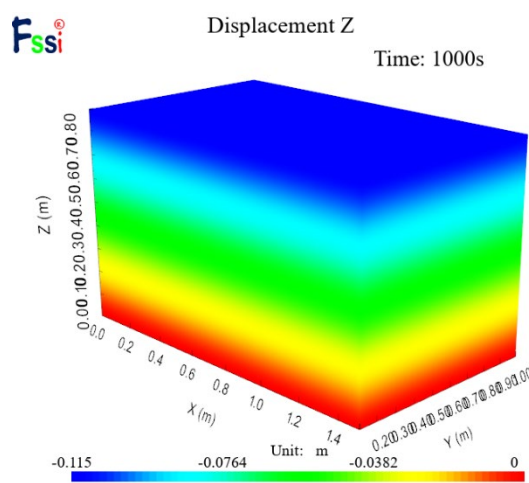
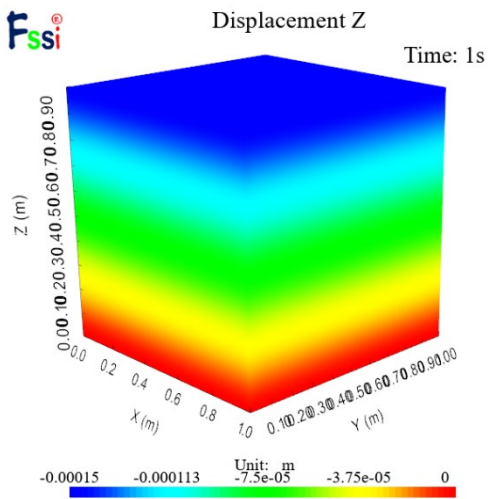


图 28 z 方向位移分布图

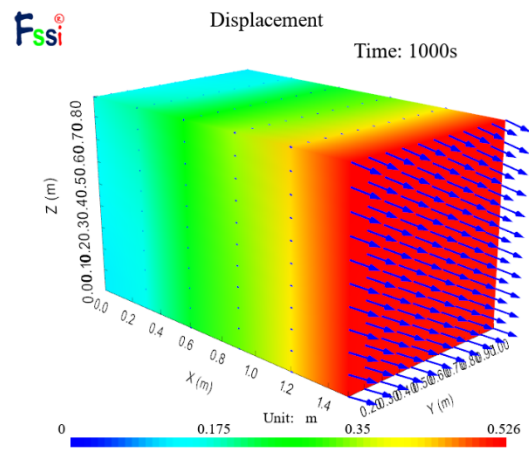
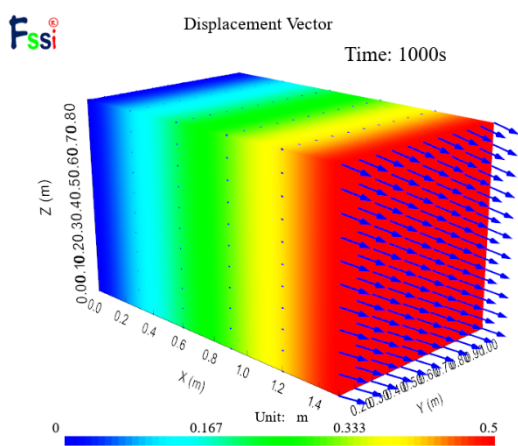


图 29 位移矢量分布图

图 30 位移分布图

单轴压缩结果示意图如下；

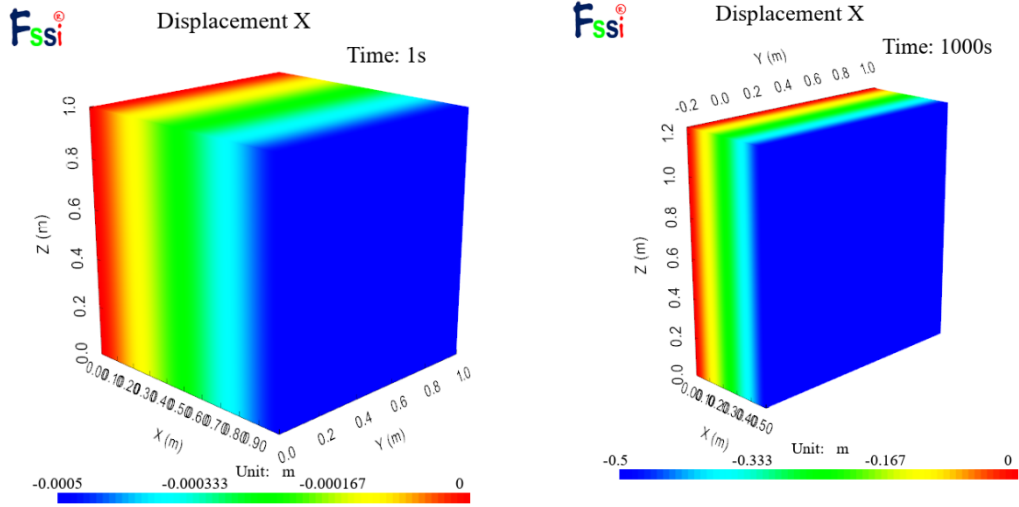


图 31 x 方向位移分布图

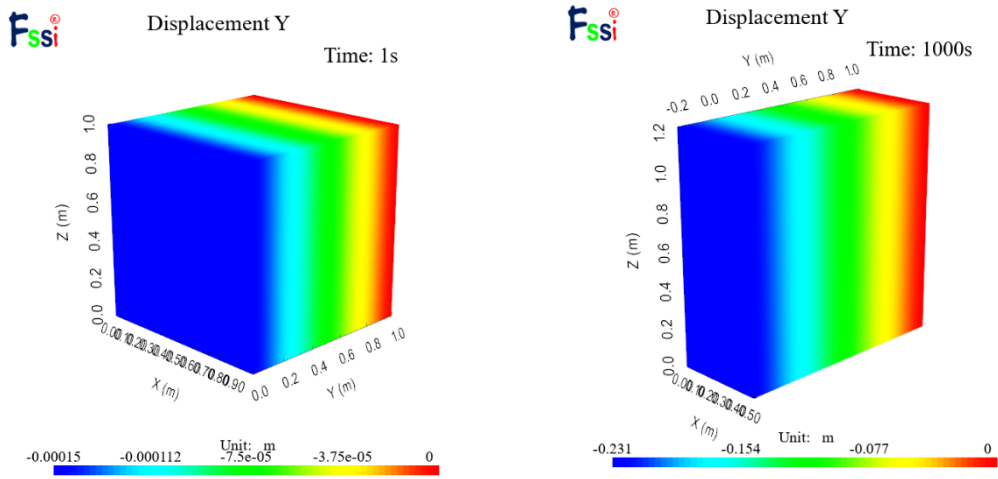


图 32 y 方向位移分布图

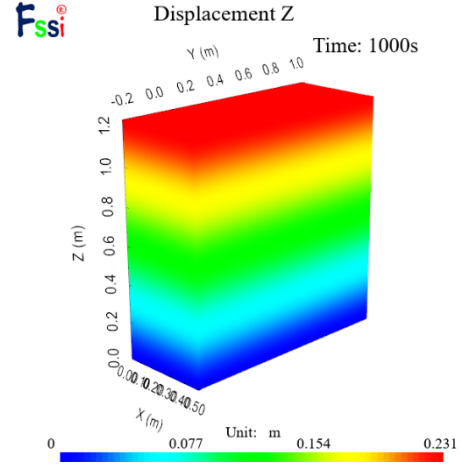
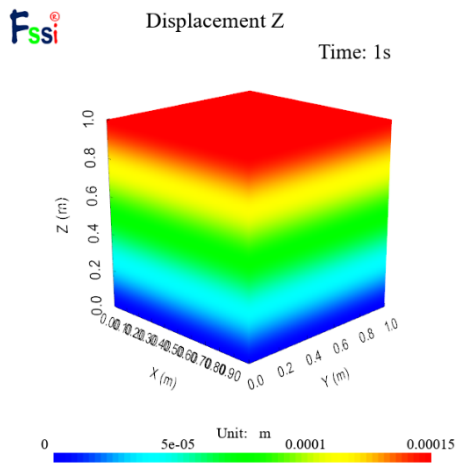


图 33 z 方向位移分布图

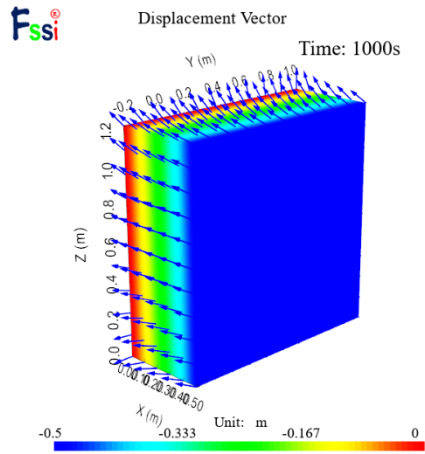


图 34 位移矢量分布图

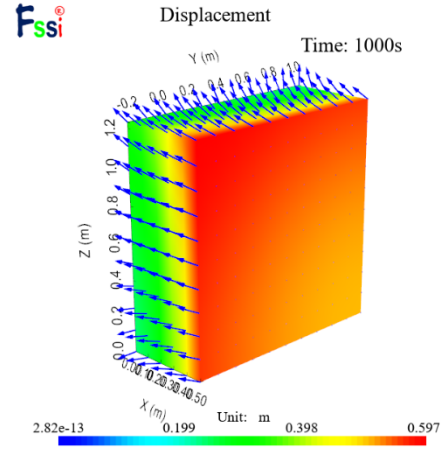


图 35 位移分布图

简单剪切结果示意图如下；

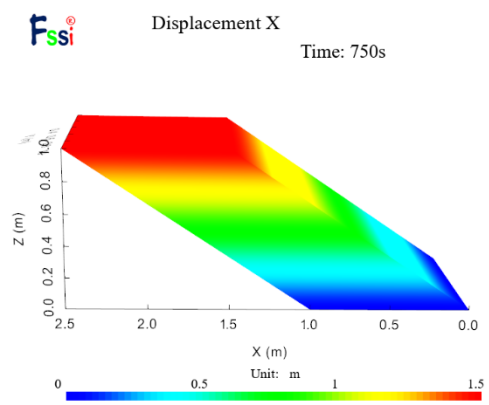
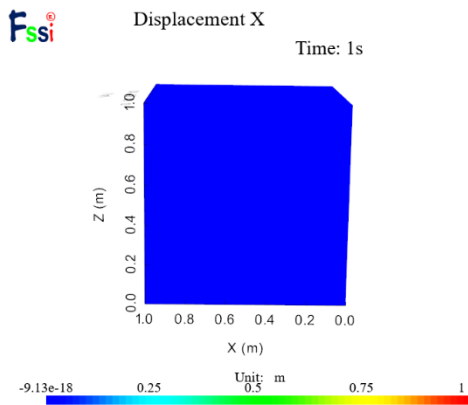


图 36 x 方向位移图

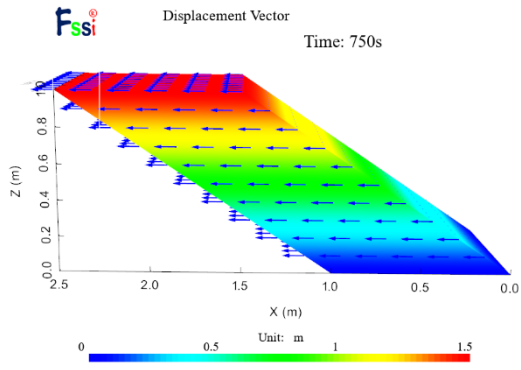


图 37 位移矢量分布图

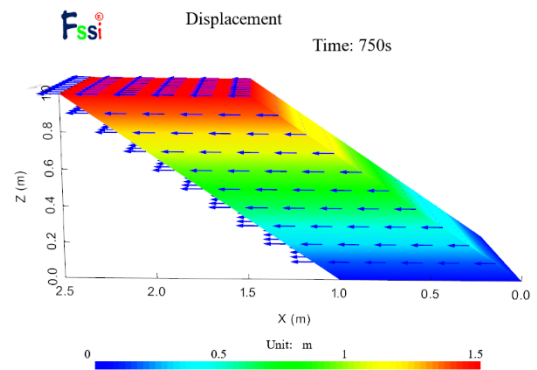


图 38 位移分布图