

统计节理岩体力学模型 SMRM 单轴压缩试验

结构面的空间、几何以及力学对节理岩体的宏观力学特性具有显著的影响，为此伍法权教授提出了著名的统计节理岩体力学模型 SMRM，并将建立的 SMRM 弹塑性本构模型，编程嵌入到 FssiCAS 有限元计算平台。作为该模型现阶段仅有的计算平台，本章将为用户详细介绍 FssiCAS 平台上 SMRM 模型的操作步骤，以期 SMRM 模型被用于解决更多的实际工程问题。本章将以三组结构面控制下的单轴压缩单元体试验为例，基于 Jaeger (1960) 提出的解析解验证 SMRM 对含多组结构面岩体强度的合理预测。

1 单轴压缩单元体试验

1.1 数值模型示意图

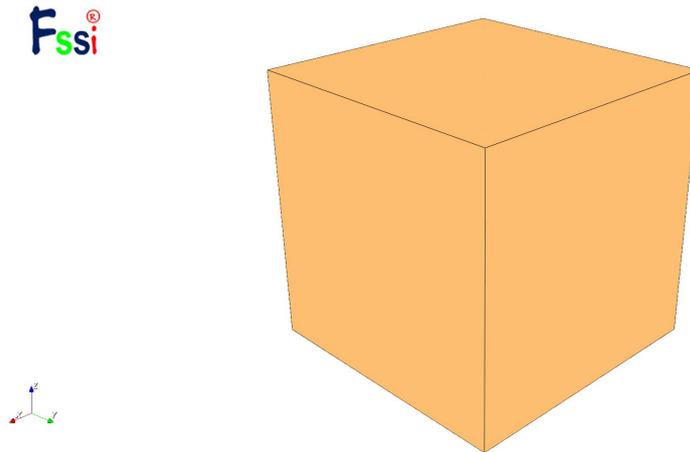


图 22-1 单轴压缩单元体数值模型示意图

1.2 Jaeger (1960) 提出的解析解

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(C_j + \tan\phi_j \cdot \sigma_3)}{(1 - \tan\phi_j \cdot \cot\beta) \cdot \sin 2\beta} \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \min\{\sigma_1^{j1}, \sigma_1^{j2}, \dots, \sigma_1^{jn}\} \quad (2)$$

1.3 材料参数

相关参数如下：完整岩石的弹性模量 $E = 170.27 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\nu = 0.216$ (体积模量 $K = 100 \text{ MPa}$ ，剪切模量 $G = 70 \text{ MPa}$)，内摩擦角 $\phi_r = 40^\circ$ ，抗剪强度 $C_r = 2 \text{ kPa}$ 。第一组结构面的

内摩擦角 $\phi_j = 30^\circ$ ，抗剪强度 $C_j = 1 \text{ kPa}$ ，倾向为-180度，倾角为 40度；第二组结构面的内摩擦角 $\phi_j = 20^\circ$ ，抗剪强度 $C_j = 1.2 \text{ kPa}$ ，倾向为 90度，倾角为 60度；第三组结构面的内摩擦角 $\phi_j = 25^\circ$ ，抗剪强度 $C_j = 1 \text{ kPa}$ ，倾向为 0度，倾角为 60度。多组结构面控制的节理岩体强度解析解常以式 (1) 所示的单一节理强度结合弱环理论进行表达，如式(2)所示。

1.4 软件操作

1.4.1 模型导入及网格划分

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 Abaqus 软件建立模型并划分网格如图 1 所示；

1.4.2 新建工程

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 Case22 Simulation of Triaxial Compressive Test of Jointed Rock masses；然后用户点击图标，启动 FssiCAS 软件，界面如图 22-2 所示。

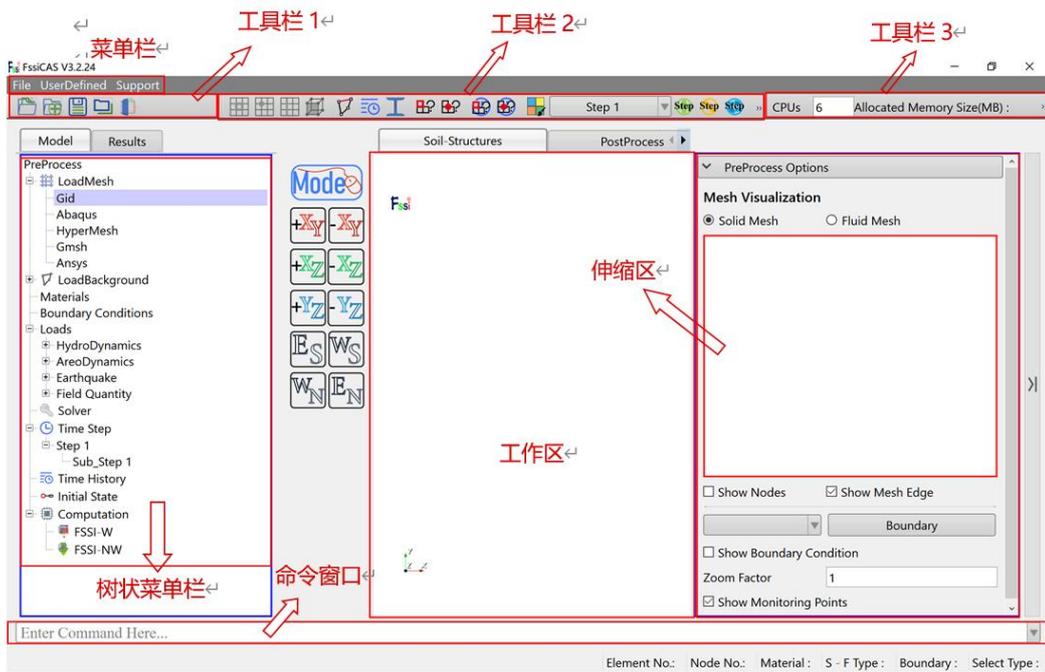


图 22-2 前处理界面

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 Case22 Simulation of Triaxial Compressive Test of Jointed Rock masses 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,如图 22-3 所示。

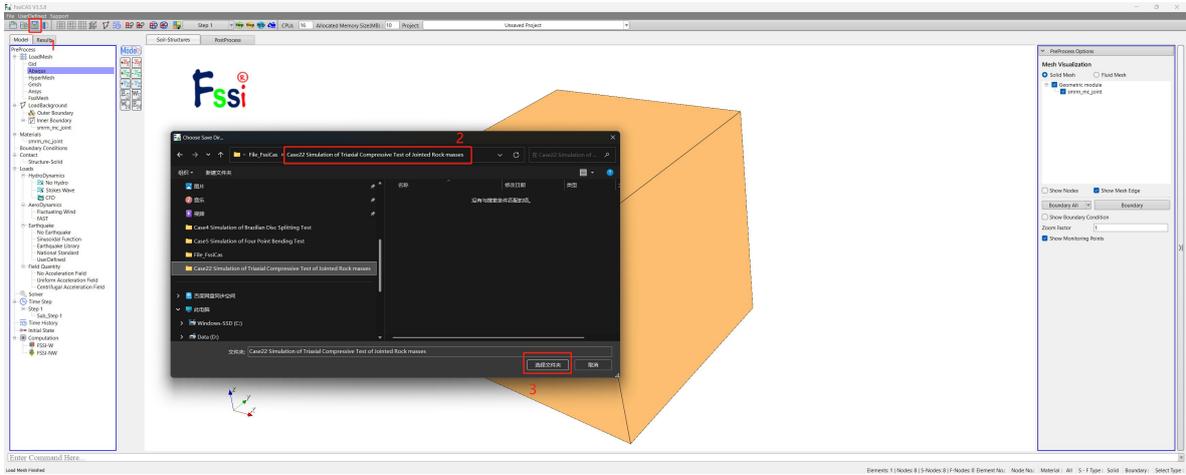


图 22-3 在 FSSI CAS 软件中新建和保存一个项目的过程图

注: 文件夹名字不能包含中文字,软件的安装路径不能包含中文路径,项目的保存路径不能包含中文路径。

1.4.3 添加边界条件

需要将几何模型的边界条件设置为:模型下表面坐标原点 $(0, 0, 0)$ 处施加 x, y, z 方向的位移约束;点 $(1, 0, 0)$ 处施加 y, z 方向的位移约束;点 $(0, 1, 0)$ 处施加 x, z 方向的位移约束;点 $(1, 1, 0)$ 处施加 z 方向的位移约束。除此之外,在模型上表面施加 $z = -0.00025 \text{ m}$ 的位移边界条件。

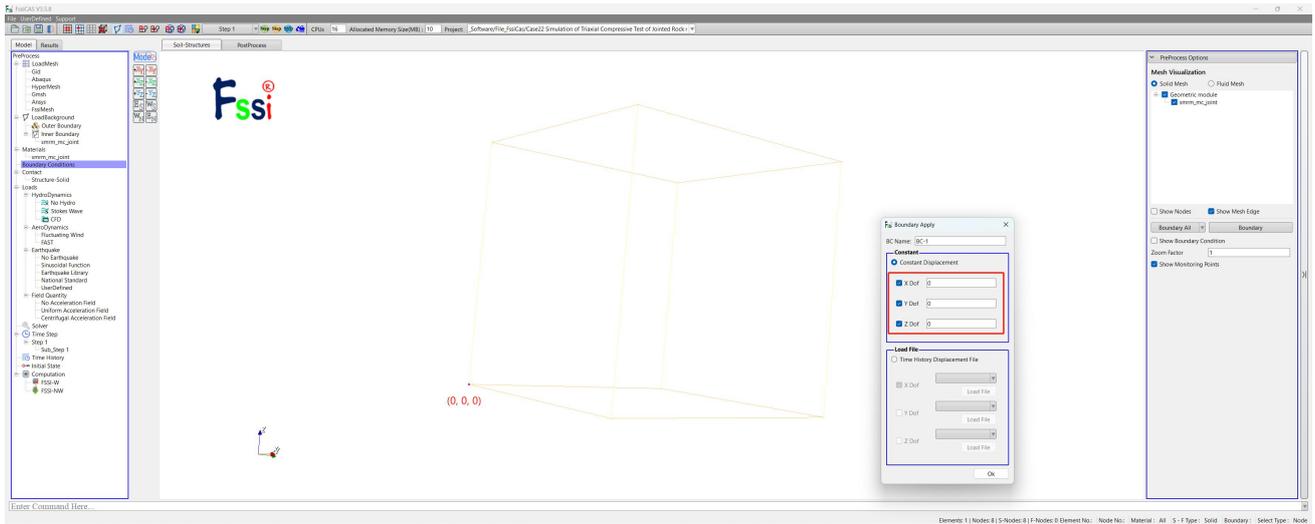
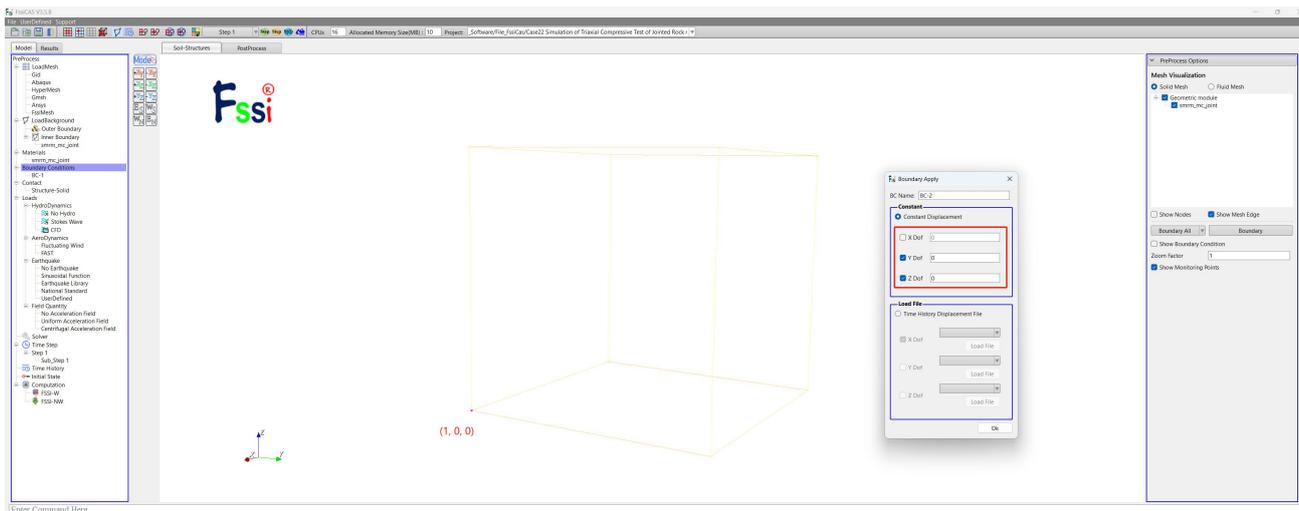
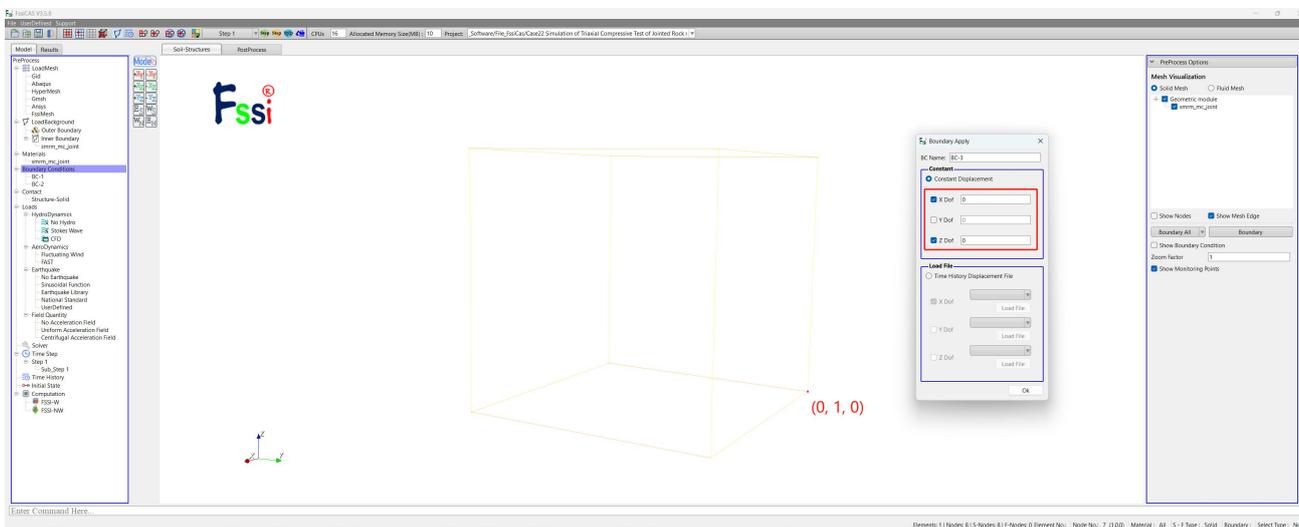


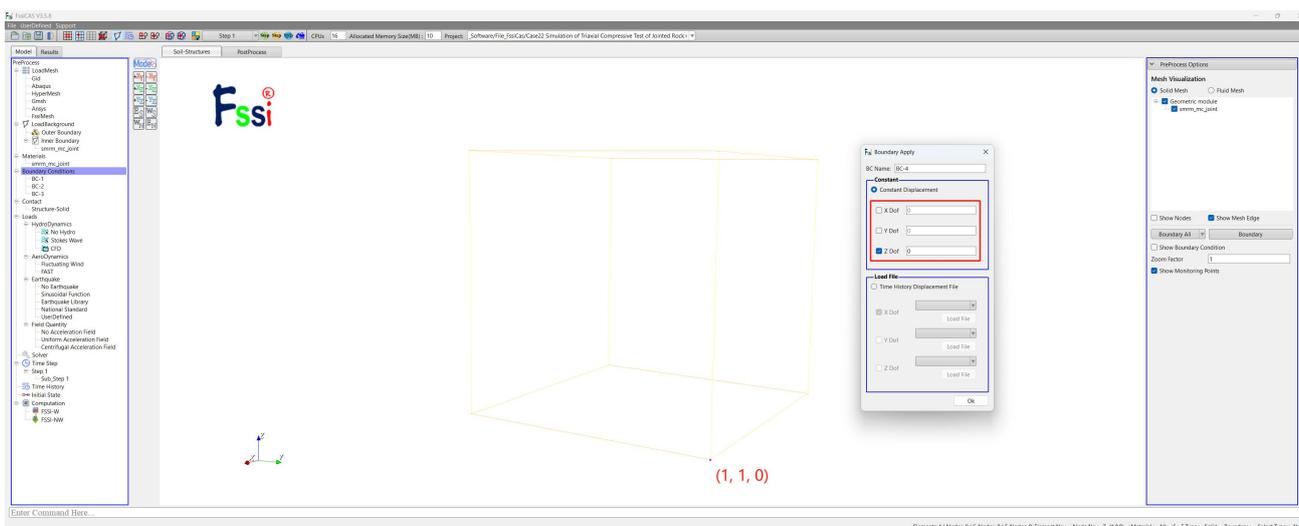
图 22-4 坐标原点 $(0, 0, 0)$ 处的位移约束



(a) 点(1, 0, 0) 处施加 y, z 方向的位移约束



(b) 点(0, 1, 0) 处施加 x, z 方向的位移约束



(c) 点(1, 1, 0) 处施加 z 方向的位移约束

图 22-5 模型下表面其余点处的位移约束

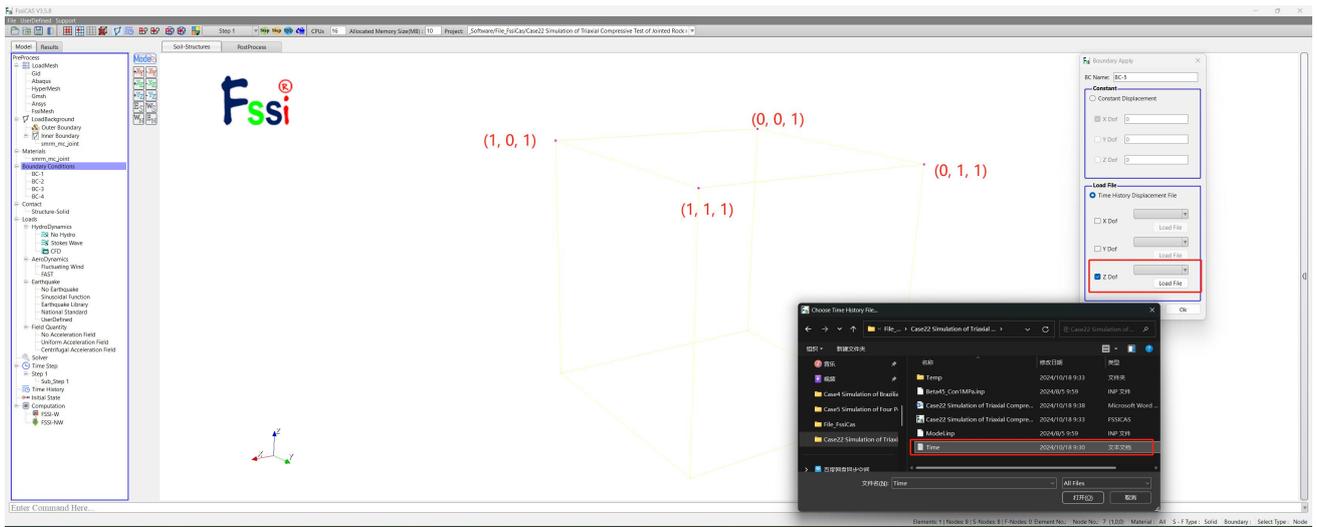


图 22-6 模型上表面施加 $z = -0.00025 \text{ m}$ 的位移边界条件

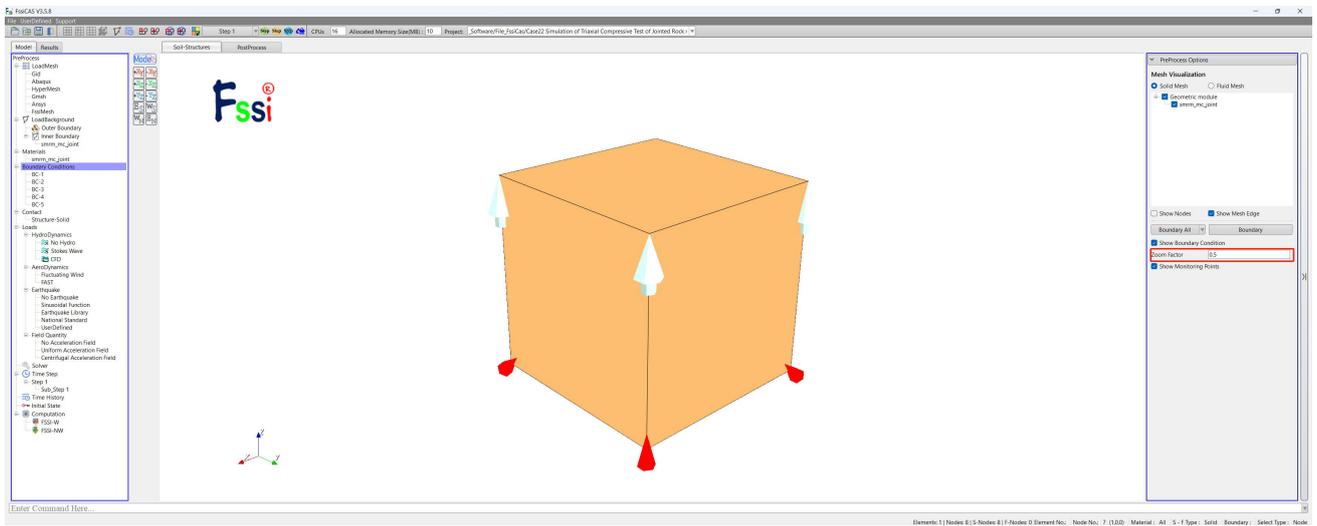


图 22-7 边界条件检查

1.4.4 材料参数输入

在前处理界面正上方的工具栏 2 中，点击材料属性和参数的功能按钮 Material；在本构模型 Constitutive Model 所在的下拉菜单中选择 StatisticalMechanicas_RockMasses_Wu 模型，即 SMRM 模型；在 Constitutive Model Parameters 所在的输入窗口中输入参数，如图 22-8 所示。

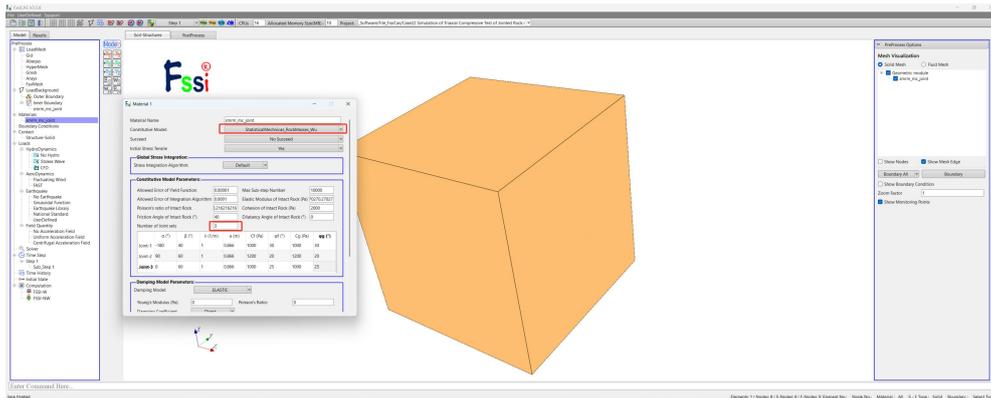


图 22-8 设置材料的相关属性参数

1.4.5 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 22-9 所示；

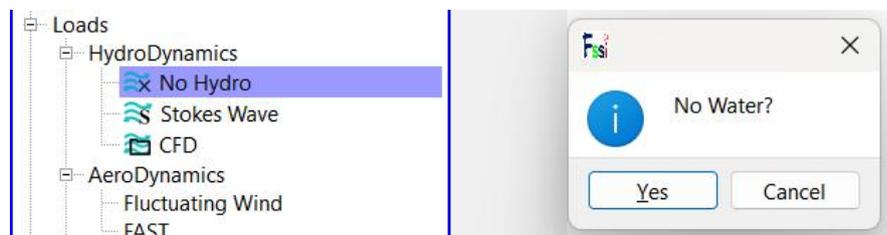


图 22-9 耦合方式选择非耦合（不考虑波浪动力）

1.4.6 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），并进行相关属性参数设置，如图 22-10 所示。需要注意的是，为保证计算结果的精度，本案例将求解器的收敛控制精度设置为 $1e-5$ 。

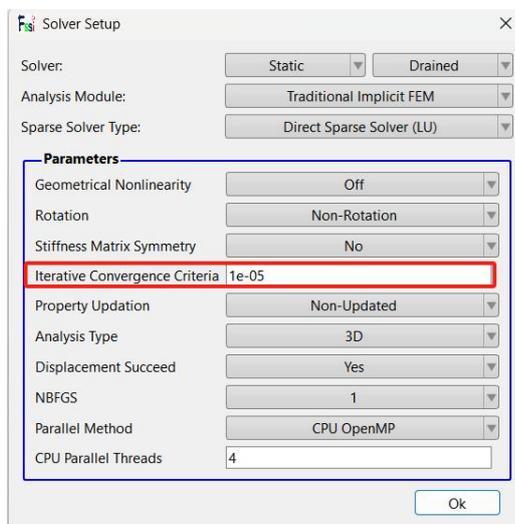


图 22-10 设置求解器的相关属性参数

在前处理界面上的 Model 树状菜单栏的 Time Step 中，点击 Sub_Step1，设置求解时间步数为 $1000 \times 0.001s = 1s$ ，时间步长为 $0.001s$ 。因为是弹塑性求解，因此需要每 $0.001s$ 更新坐标和刚度矩阵，每步最大迭代 100 次，不输出重启文件（故将重启动步的时间设置为 $1.1s$ ），每 $0.05s$ 输出分布图结果，每 $0.001s$ 输出时程结果，输出高斯点上结果，如图 22-11 所示；

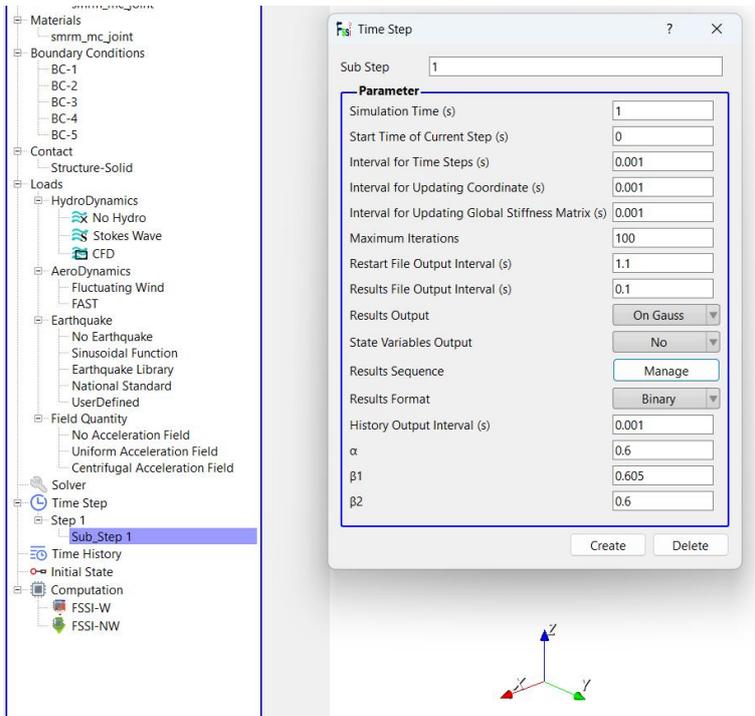


图 22-11 设置时间步和相关属性参数

- 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： $\alpha \geq 0.5$ 、 $\beta_1 \geq \beta_2 \geq 0.5$ ；

1.4.5 添加时程输出

本案例将输出时程结果的点设置为：单元体上坐标为 $(x = 1, y = 1, z = 1)$ 的节点。

具体操作步骤如下：点击工具栏中图标，进入输出时程选择模式；点击工具栏中图标和，进入单元和节点选择模式；选择单元体上坐标为 $(x = 1, y = 1, z = 1)$ 的节点 $z = 1$ 的面，点击 **Create All History Plot**，进而输出单元的应力和节点上的位移。输出结果设置成功后，如图 22-12 所示。

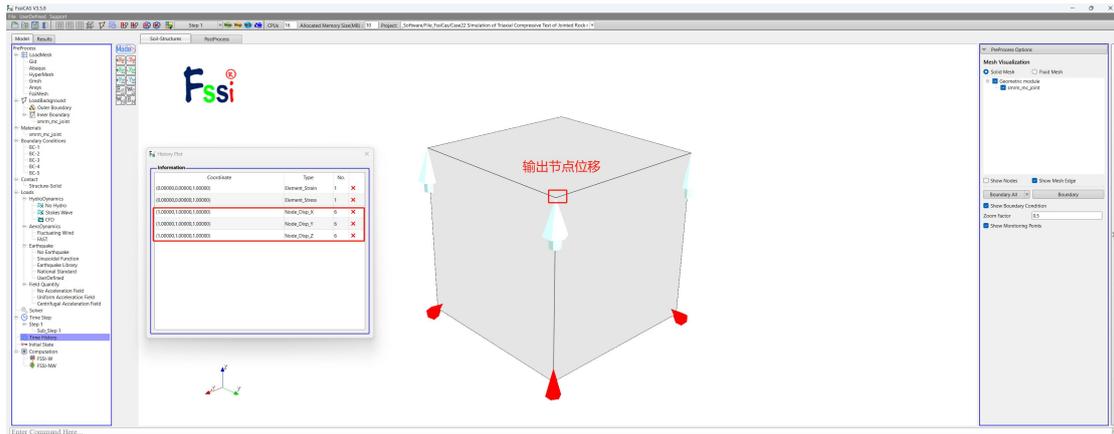


图 22-12 显示输出的时程结果列表

1.4.5 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 22-13 所示；

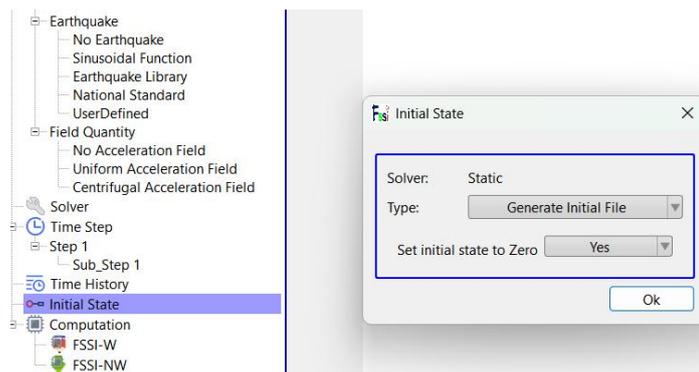


图 22-13 设置初始状态

1.4.6 计算

首先，点击菜单栏上的保存按钮，保存该项目文件。其次，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 22-14 所示；

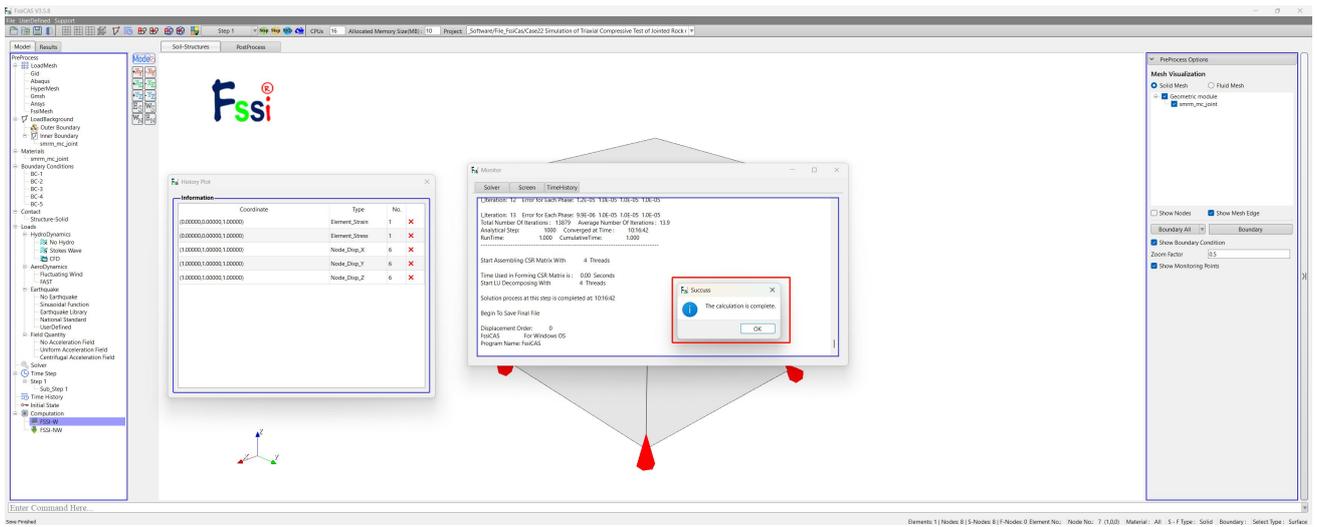


图 22-14 计算过程监视窗口

注：FSSI-NW 表示启动计算程序时不修改输入文件。

FSSI-W 表示启动计算程序时修改输入文件。

1.4.7 FssiCAS 图形界面操作——后处理

首先，用户点击树状菜单栏上的 Results，即可进入后处理界面，加载计算文件。其次，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，计算结果如图 22-15 所示。

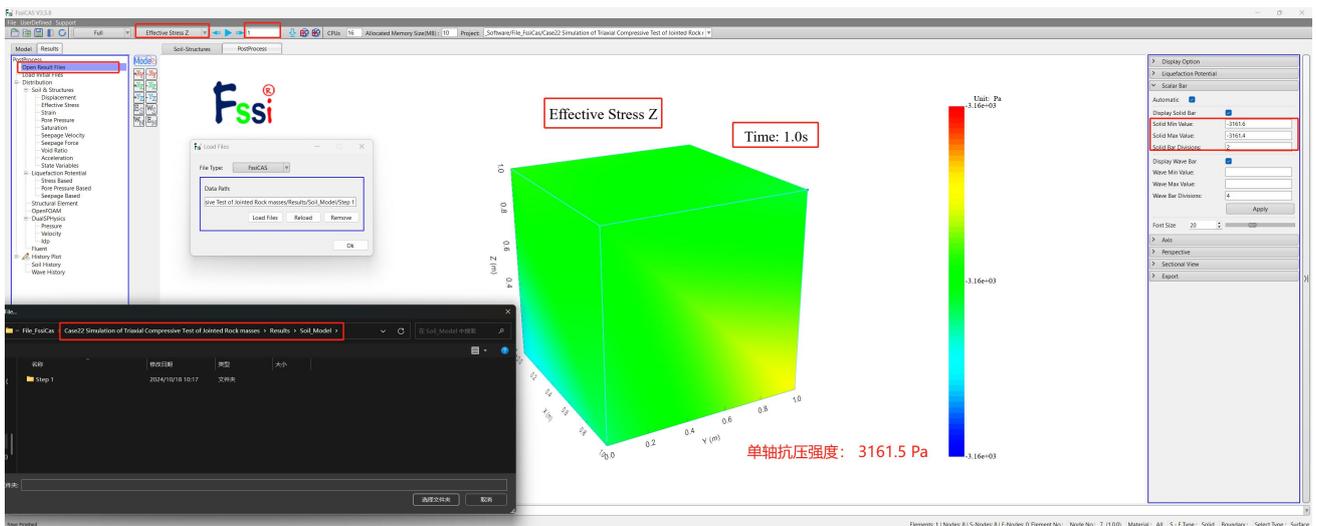


图 22-15 打开结果文件显示 Z 方向有效应力 σ_z

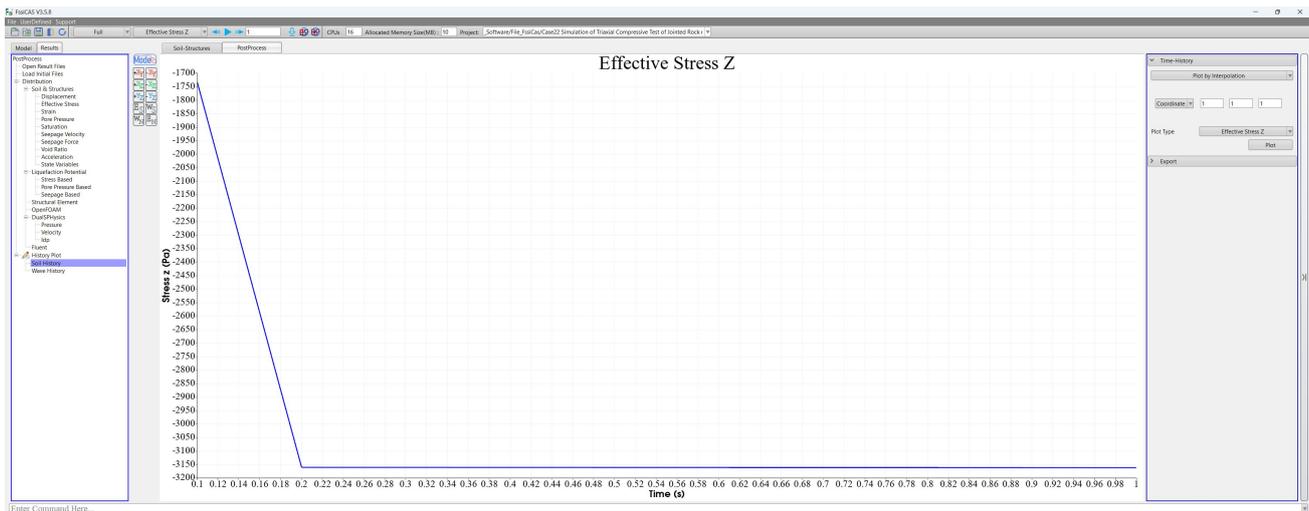


图 22-16 Z 方向有效应力 σ_z 时程曲线

1.4.8 与 Jeager (1960) 提出解析解的对比

以 Jeager (1960) 提出的解析解，分别计算三组结构面独立作用下，节理岩体的单轴抗压强度，如图 22-17 所示。三组结构面综合作用下，最终的抗压强度根据最弱环假说进行计算，如图中红色曲线所示。本案例研究的三组结构面的工况为图 22-17 中 C 点所示，解析解和数值解如表 2 所示。

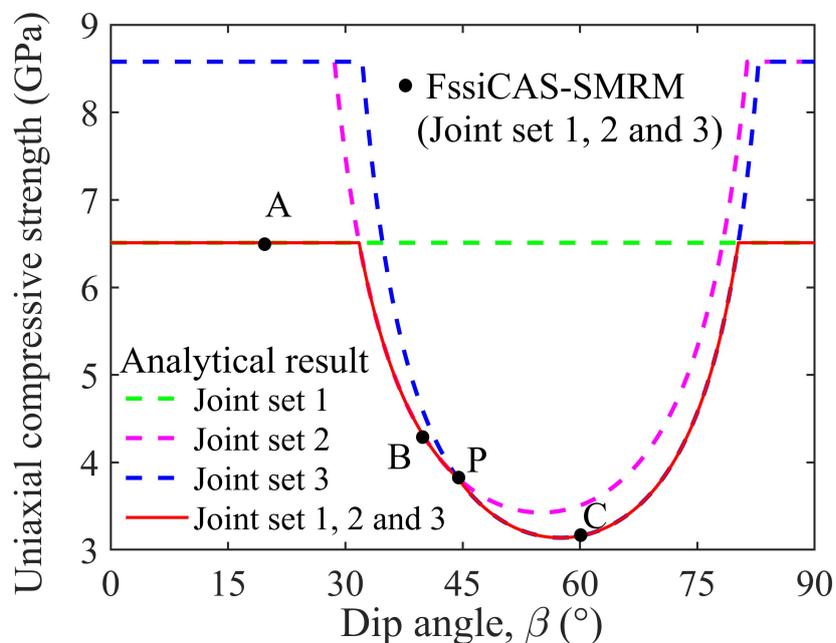


图 22-17 解析解和数值解的对比

表2 解析解和数值解的对比

	σ_1^{j1} (kPa)	σ_1^{j2} (kPa)	σ_1^{j3} (kPa)	σ_1^{Ana} (kPa)	σ_1^{SMRM} (kPa)	$\frac{ \sigma_1^{Ana} - \sigma_1^{SMRM} }{\sigma_1^{Ana}}$
Point C ($\beta_2 = \beta_3 = 60^\circ$)	6510.4	3508.6	3160.2	3160.2	3161.5	0.411e-3

参考文献

- Jaeger, J. C. (1960). Shear failure of anisotropic rocks. *Geological Magazine*, 97(1), 65-72.
 金华, 王媛. (2012). 多组贯穿节理岩体的扩展遍布节理模型研究. *地下空间与工程学报* (05), 951-957.