

有限元理论基础及 Abaqus 内部实现方式研究系列 9:

编写线性 UMAT Step By Step

--基于 Matlab 实现 UMAT 子程序高效开发

V2019-0505



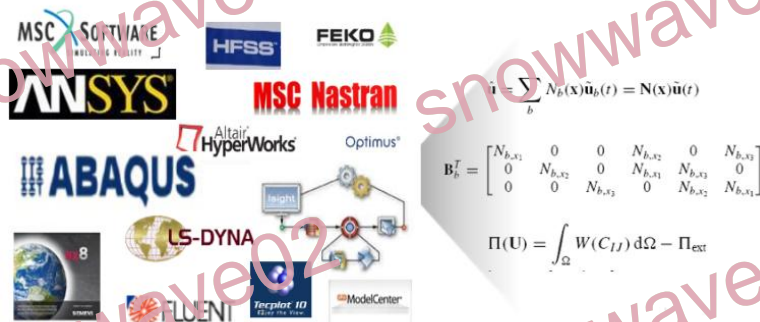
作者: SnowWave02
From www.jishulink.com
email: snowwave02@qq.com

目录

编写线性 UMAT Step By Step.....	1
1 概述.....	3
2 第 9 篇：编写线性 UMAT Step By Step.....	5
2.1 Abaqus 建模.....	6
2.1.1 创建模型.....	6
2.1.2 设置用户自定义材料.....	9
2.1.3 创建装配体.....	10
2.1.4 设置分析步.....	11
2.1.5 划分网格.....	11
2.1.6 创建载荷和约束.....	12
2.1.7 创建 job 并计算.....	15
2.2 UMAT 编写与运行.....	16
2.2.1 UMAT 编写.....	16
2.2.2 UMAT 运行.....	17
2.2.3 查看结果.....	18
2.3 UMAT 调试.....	19
2.4 总结.....	22

1 概述

本系列文章研究成熟的有限元理论基础及在商用有限元软件的实现方式。有限元的理论发展了几十年已经相当成熟，商用有限元软件同样也是采用这些成熟的有限元理论，只是在实际应用过程中，商用 CAE 软件在传统的理论上会做相应的修正以解决工程中遇到的不同问题，且各家软件的修正方法都不一样，每个主流商用软件手册中都会注明各个单元的理论采用了哪种理论公式，但都只是提一下用什么方法修正，很多没有具体的实现公式。商用软件对外就是一个黑盒子，除了开发人员，使用人员只能在黑盒子外猜测内部实现方式。



一方面我们查阅各个主流商用软件的理论手册并通过进行大量的资料查阅猜测内部修正方法，另一方面我们自己编程实现结构有限元求解器，通过自研求解器和商软的结果比较来验证我们的猜测，如同管中窥豹一般来研究的修正方法，从而猜测商用有限元软件的内部计算方法。我们关注 CAE 中的结构有限元，所以主要选择了商用结构有限元软件中文档相对较完备的 Abaqus 来研究内部实现方式，同时对某些问题也会涉及其它的 Nastran/Ansys 等商软。为了理解方便有很多问题在数学上其实并不严谨，同时由于水平有限可能有许多的理论错误，欢迎交流讨论，也期待有更多的合作机会。

iSolver 介绍：

<http://www.iishulink.com/college/video/c12834>

以往的系列文章：

第一篇：**S4 壳单元刚度矩阵研究**。介绍 Abaqus 的 S4 刚度矩阵在普通厚壳理论上的修正。

<http://www.iishulink.com/content/post/2338359>

第二篇：**S4 壳单元质量矩阵研究**。介绍 Abaqus 的 S4 和 Nastran 的 Quad4 单元的质量矩阵。

<http://www.jishulink.com/content/post/343905>

第三篇：**S4 壳单元的剪切自锁和沙漏控制**。介绍 Abaqus 的 S4 单元如何来消除剪切自锁以及 S4R 如何来抑制沙漏的。

<http://www.jishulink.com/content/post/350865>

第四篇：**非线性问题的求解**。介绍 Abaqus 在非线形分析中采用的数值计算的求解方法。

<http://www.jishulink.com/content/post/360565>

第五篇：**单元正确性验证**。介绍有限元单元正确性的验证方法，通过多个实例比较自研结构求解器程序 iSolver 与 Abaqus 的分析结果，从而说明整个正确性验证的过程和 iSolver 结果的正确性。

<https://www.jishulink.com/content/post/373743>

第六篇：**General 梁单元的刚度矩阵**。介绍梁单元的基础理论和 Abaqus 中 General 梁单元的刚度矩阵的修正方式，采用这些修正方式可以得到和 Abaqus 梁单元完全一致的刚度矩阵。

<https://www.jishulink.com/content/post/403932>

第七篇：**C3D8 六面体单元的刚度矩阵**。介绍六面体单元的基础理论和 Abaqus 中 C3D8R 六面体单元的刚度矩阵的修正方式，采用这些修正方式可以得到和 Abaqus 六面体单元完全一致的刚度矩阵。

<https://www.jishulink.com/content/post/430177>

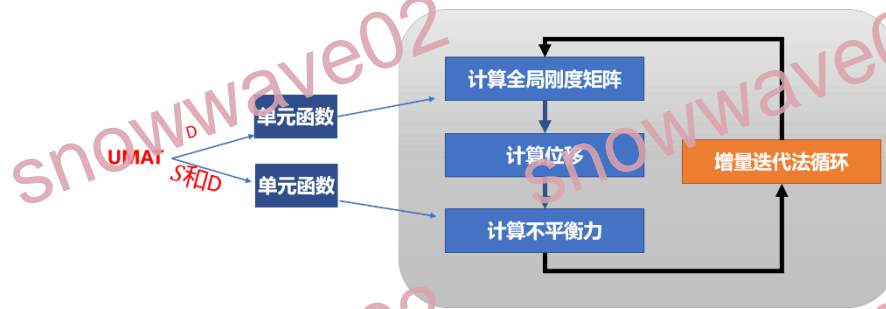
第八篇：**UMAT 用户子程序开发步骤**。介绍基于 Fortran 和 Matlab 两种方式的 Abaqus 的 UMAT 的开发步骤，对比发现开发步骤基本相同，同时采用 Matlab 更加高效和灵活。

<https://www.jishulink.com/content/post/432848>

本文为第九篇：**编写线性 UMAT Step By Step**。介绍基于 Matlab 线性 UMAT 的编写和调试方法，分别使用线性 UMAT 和 Abaqus 自带线性材料计算弯曲梁的算例，对比验证线性 UMAT 的正确性。

第 9 篇：编写线性 UMAT Step By Step

线性材料，即应力应变始终成正比关系的材料，常用于结构的线性静力分析，是各种常用分析的基础。而线性 UMAT 就是实现线性材料算法的接口，它的主要功能是计算单元的应力应变关系矩阵和单元应力，如下图所示。



Abaqus 规定了 UMAT 的输入输出，下表就是一些关键变量的符号说明。

变量类别	变量名称	变量说明
需要更新的变量	STRESS	输入为当前增量步开始之前的应力向量，在当前增量步内需要更新
	DDSDDE	Jacobian 矩阵，即应力应变关系矩阵
	STATEV	存储求解过程中的状态变量，用来传递状态变量，增量步结束时更新
传入变量	STRAIN	当前增量步开始之前的总应变向量
	DSTRAIN	当前增量步内的应变增量
	TIME	当前分析步的时间步和总时间步
	DTIME	增量步大小
	NDI	直接应力分量维数
	NSHR	剪切应力分量维数
	NTENS	应力或应变分量的维数，等于 NDI+NSHR
	NSTATV	状态变量维数
	PROPS	自定义材料常数
	NPROPS	自定义材料常数的个数
	NPT	积分点序号
	KSTEP	当前分析步序号
	KINC	当前增量步序号

下面,我们将通过一个简单算例介绍基于 MATLAB 的线性 UMAT 编写和运行流程,具体开发过程也可以参考下面我们的教学视频:

Abaqus 用户子程序 UMat 详解与开发工具: 章节 4

<https://www.jishulink.com/college/video/c13034?chapter=4>

2.1 Abaqus 建模

2.1.1 创建模型

打开一个 Abaqus, 双击左侧模型树的 Parts, 选择 3D, Solid, Extrude 进行模型创建。

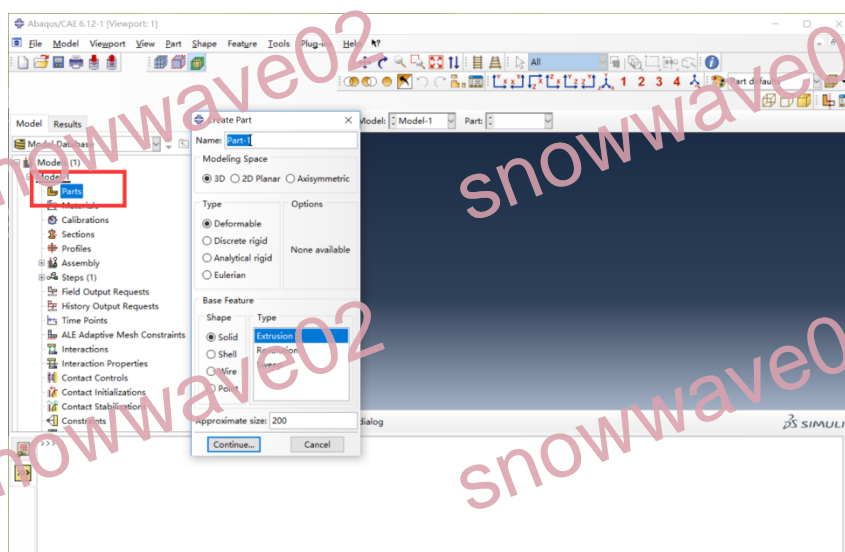


图 1 创建模型

点击 Continue 进入草绘界面, 点击如下图所示 Create Lines: Rectangle 功能按钮进行草图绘制。

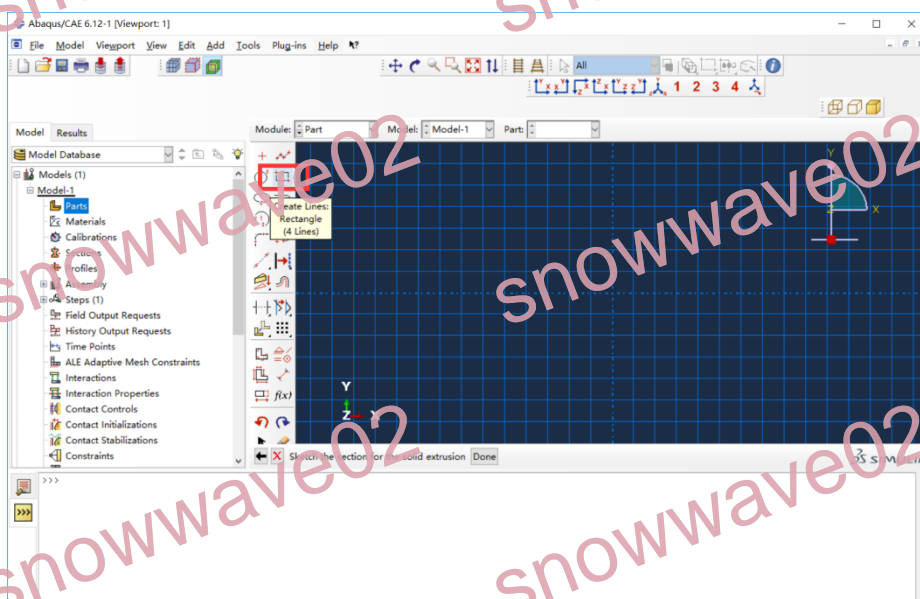


图2 草图绘制

在下图所示输入框中分别输入(0,0)和(1,1)创建一个正方形。

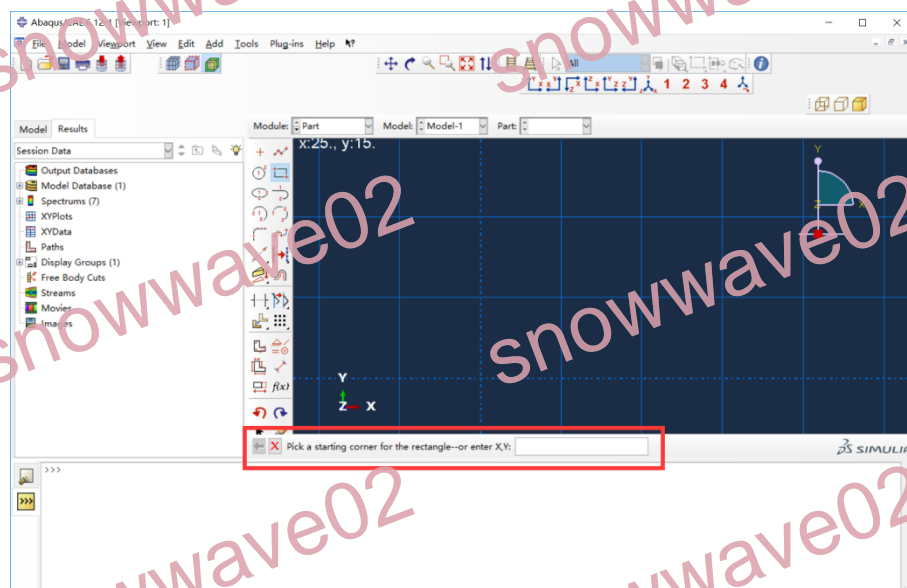


图3 创建正方形

输入完成以后点击鼠标中间完成正方形的创建。

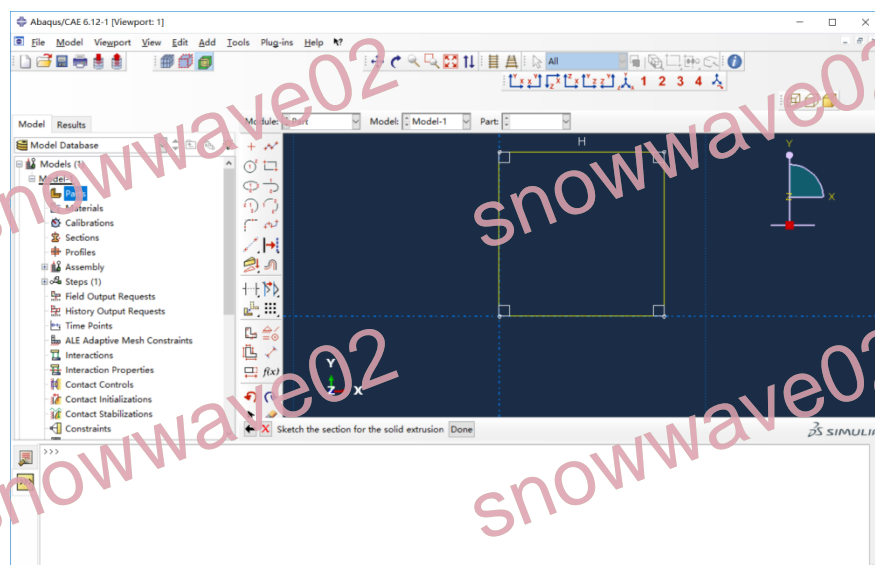


图4 完成创建

点击如下图所示 Done 按钮或者鼠标中间完成草图绘制。

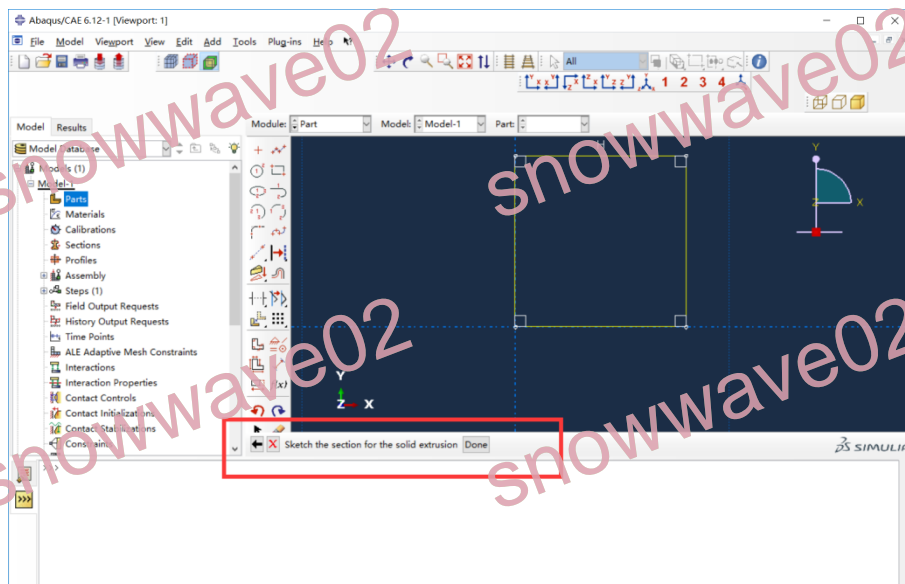


图 5 完成草图

在弹出的 Edit Base Extrusion 界面中的 Depth 输入框中输入 1. 点击 OK 完成模型的创建。

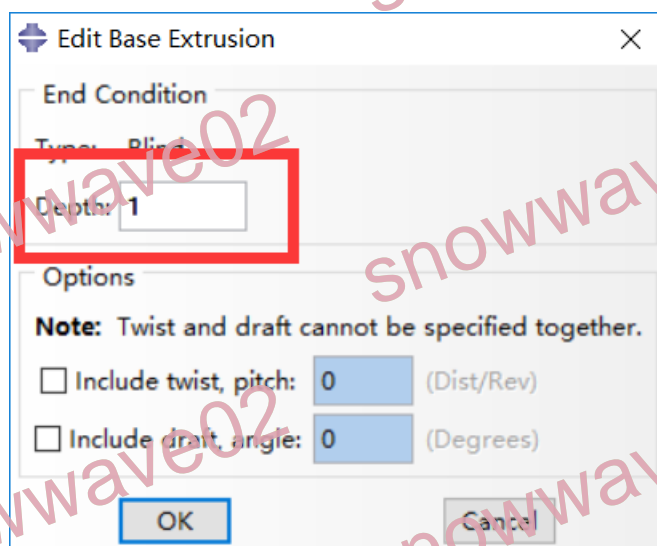


图 6 设置深度

创建以后的模型如下图所示。

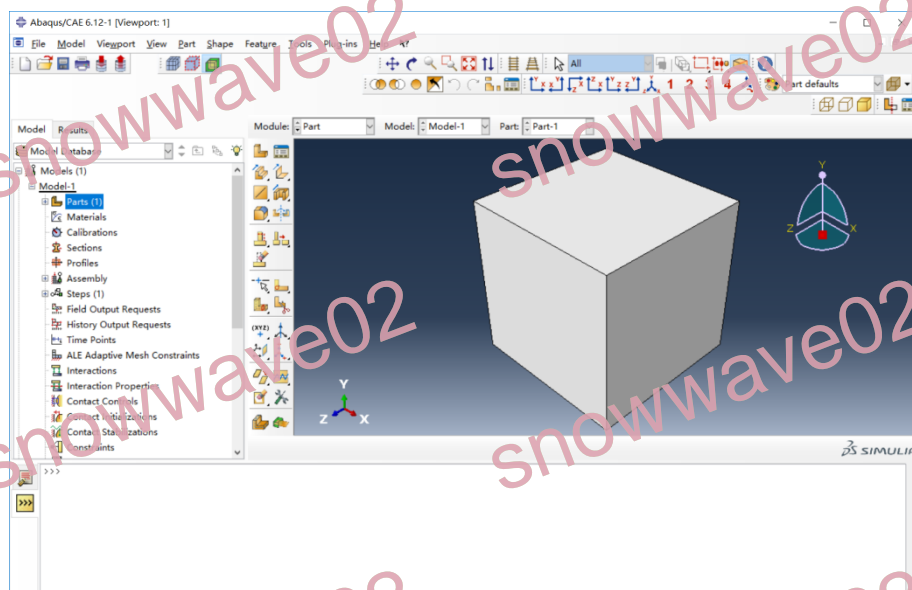



图 7 创建以后的模型

2.1.2 设置用户自定义材料

切换 Abaqus 模块到 Property，点击  创建名为 Material-UMat 的材料。设置属性如图所示：

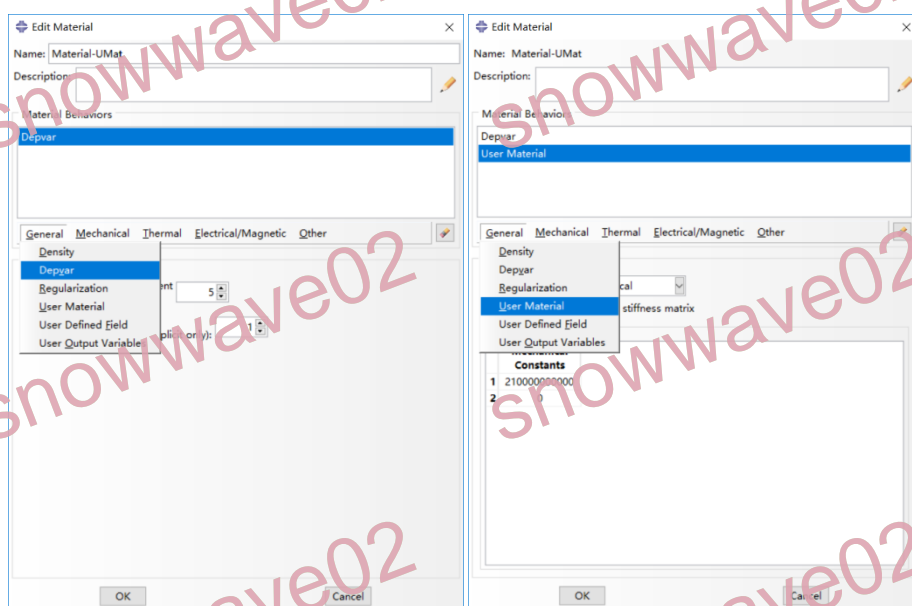



图 8 设置用户自定义材料

通过  创建名为 Section-1 材料属性，在 Edit Section 对话框中。将里面的材料选择我们刚刚创建的 Material-UMat。

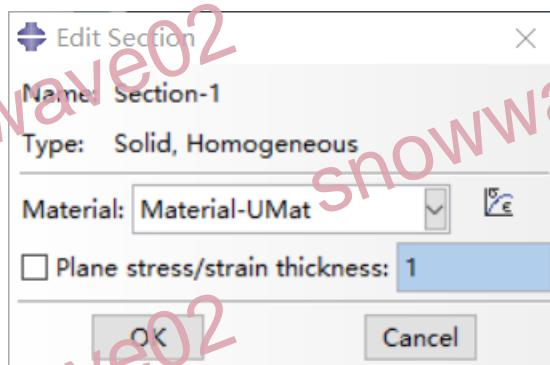



图 9 设置 section 属性

接着点击 ，单击选中我们创建的 part，在弹出的对话框中选中我们刚刚创建的 Section-1。

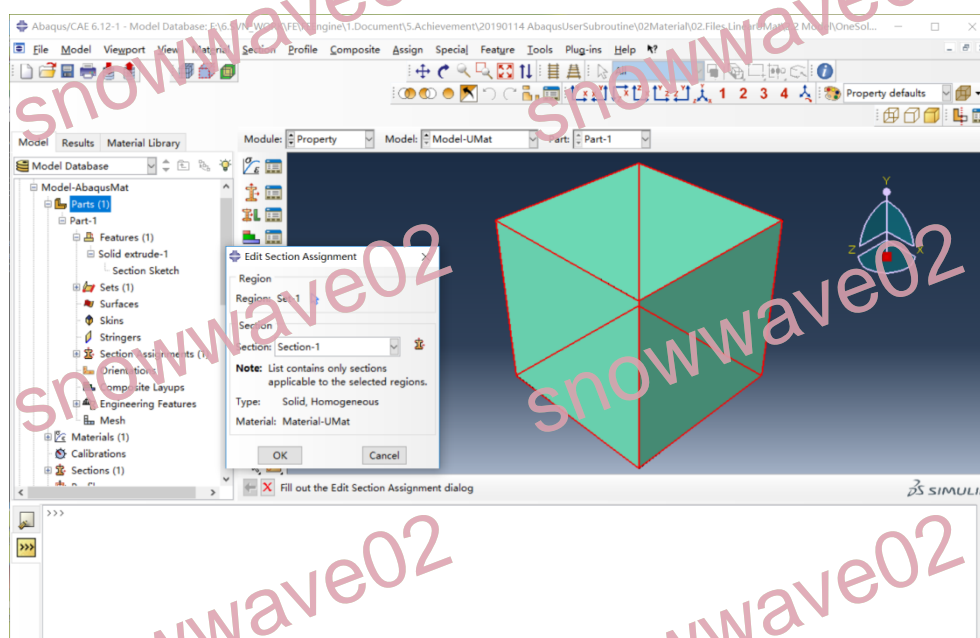


图 10 设置 section 属性

最后点击 OK 完成材料属性附加

2.1.3 创建装配体

切换 Abaqus 模块到 Assembly,点击  导入 Part-1

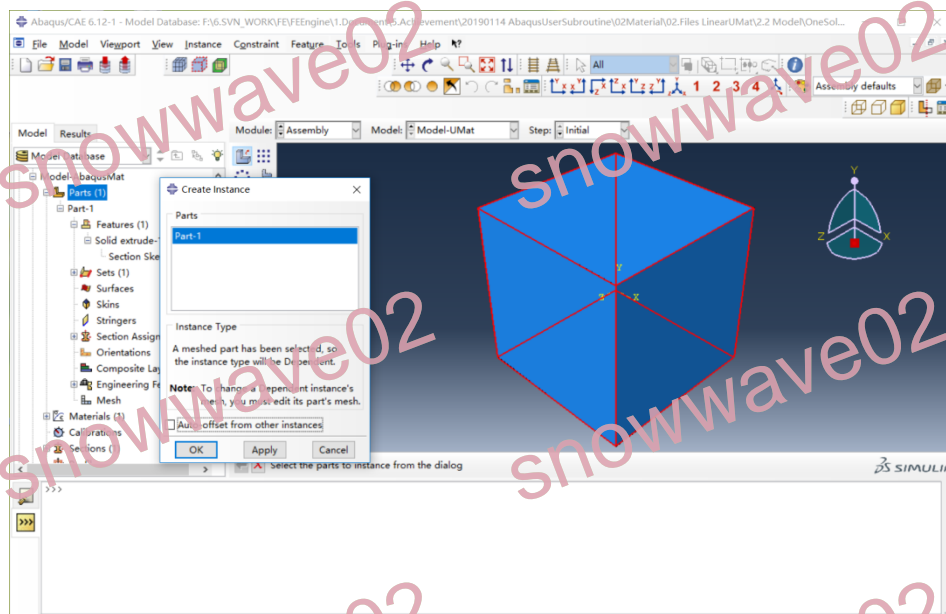



图 11 创建装配体

2.1.4 设置分析步

切换 Abaqus 模块到 Step, 点击  创建类型为 Static, General 的分析步。

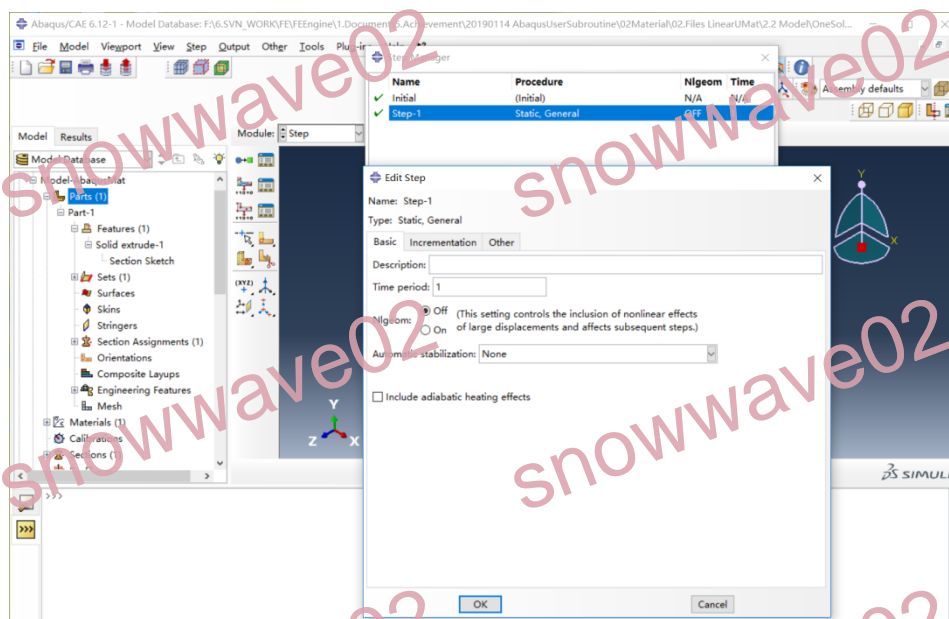



图 12 创建分析步

2.1.5 划分网格

切换 Abaqus 模块到 Mesh, 点击 , 设置网格大小为 1。

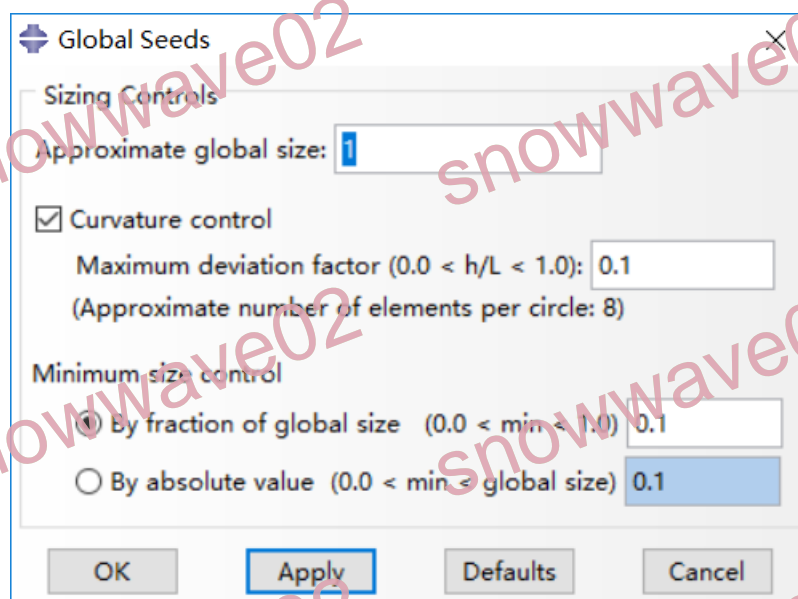


图 13 设置网格尺寸

完成网格尺寸设置以后点击



，进行网格划分。

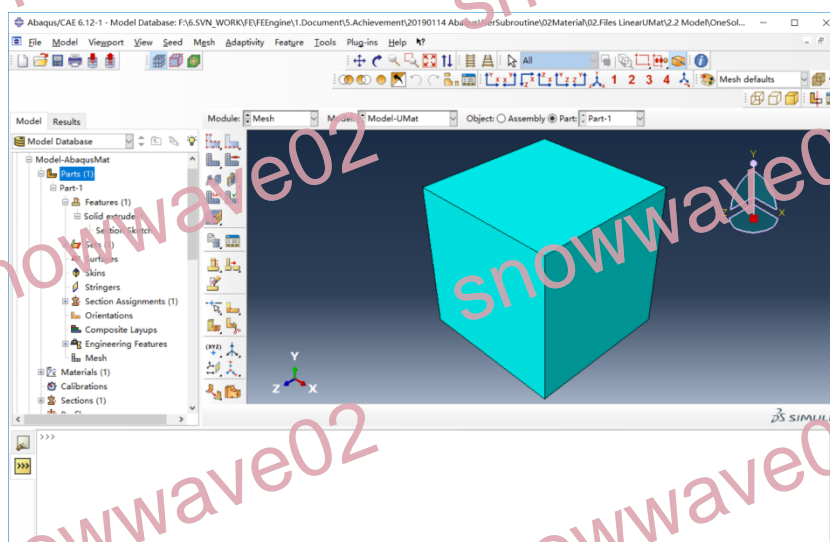


图 14 网格划分以后的模型

2.1.6 创建载荷和约束

切换 Abaqus 模块到 Load, 点击



创建约束。里面设置默认即可。

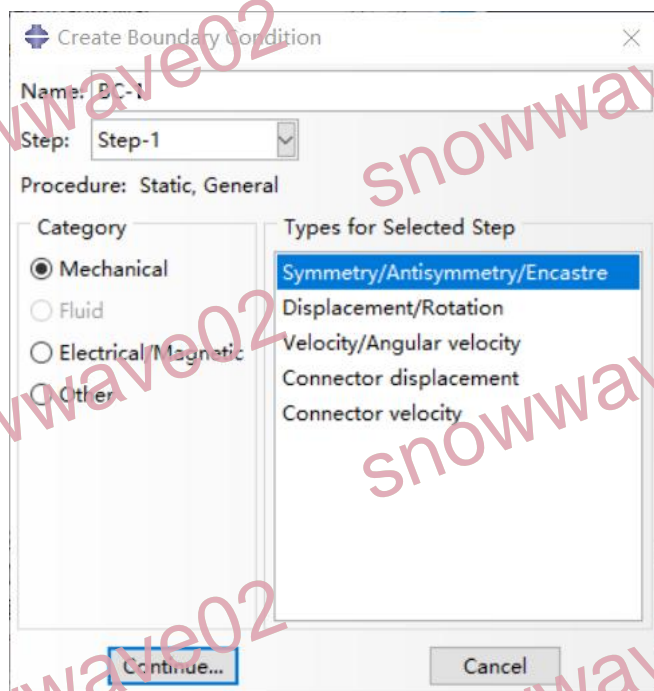


图 15 选择约束类型

然后单击 **Continue**,选择我们需要约束的面, 点击鼠标中间, 完成面选取, 然后如

下图设置 6 个自由度全约束。

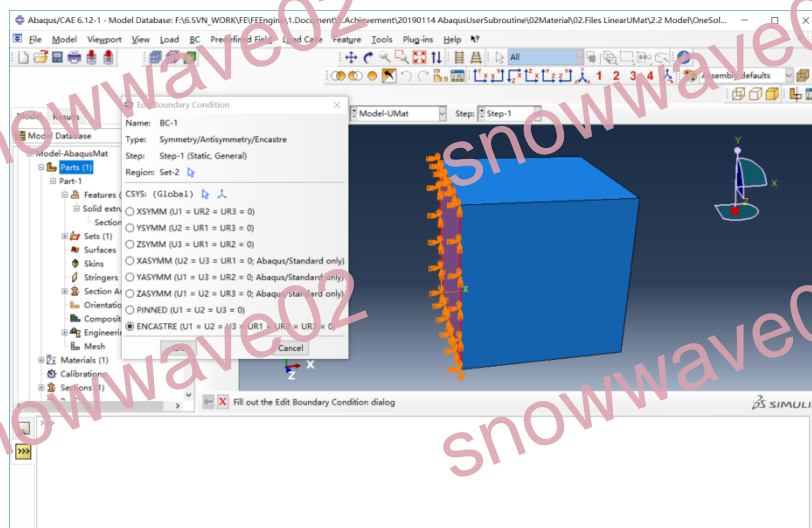



图 16 选择全自由度约束

单击  创建载荷, 选择 **Concentrated force** 类型。然后如下图所示选择对面 4 个顶点作为载荷施加位置。

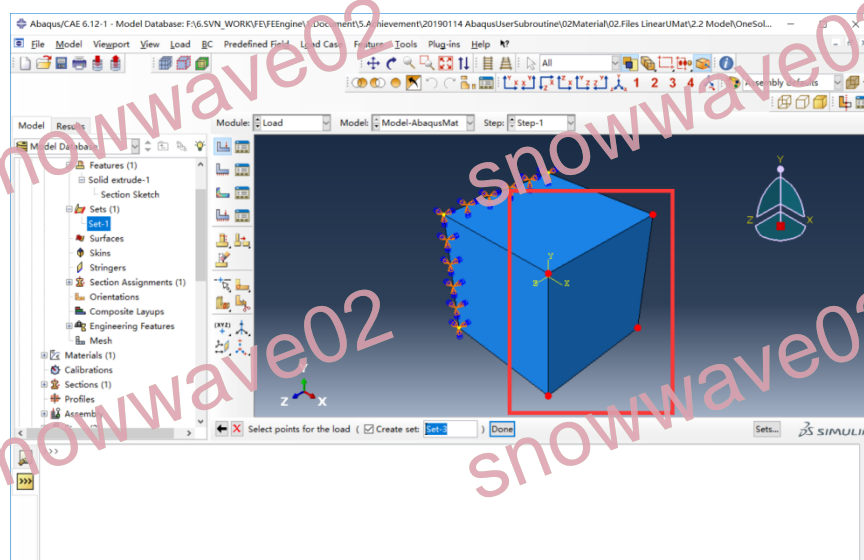


图 17 选择载荷施加点

完成以后在弹出的界面窗口中如下图所示输入载荷值。

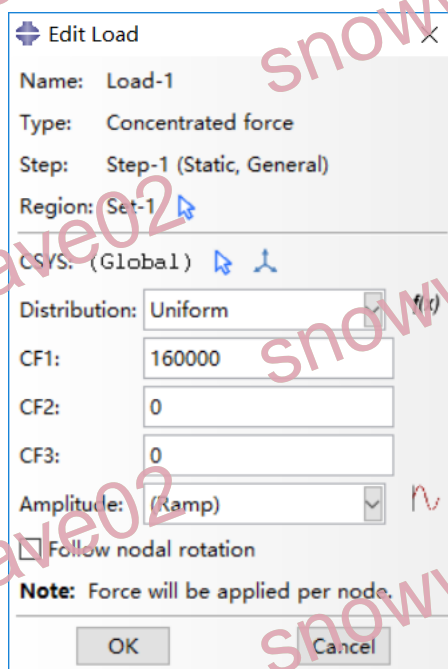


图 18 设置载荷值

完成载荷施加以后的模型如下图所示。

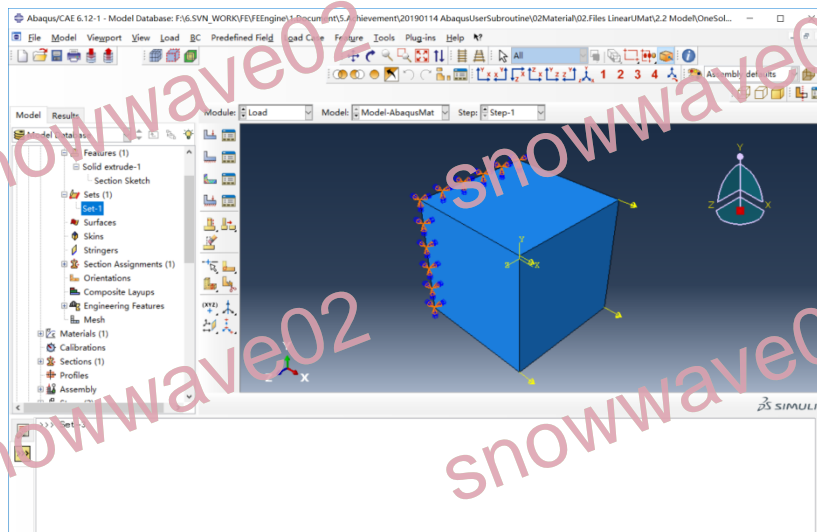


图 19 添加载荷以后的模型

2.1.7 创建 job 并计算

切换到 Abaqus 的 Job 模块下，创建 Abaqus 的 Job，名为 Job-UMat。

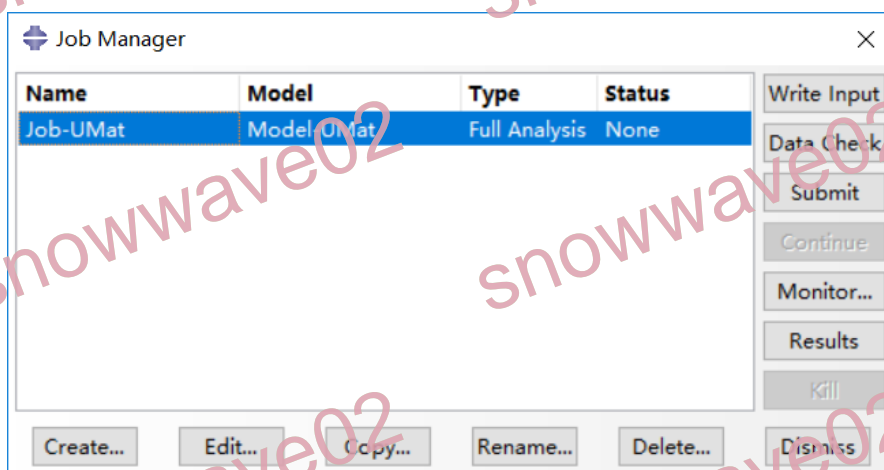


图 20 创建 Job

在 Job 模块的 Abaqus 菜单栏的 Plug-ins 里可以看到 iSolver 插件的菜单。

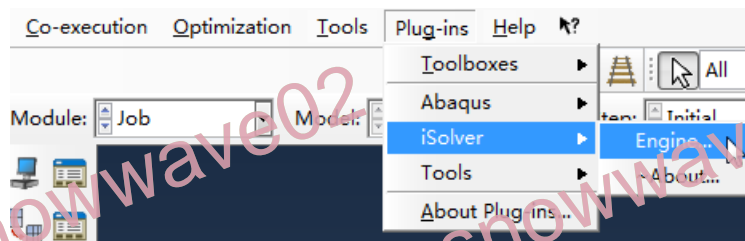


图 21 iSolver 插件菜单

点击 iSolver->Engine，弹出如下所示界面。

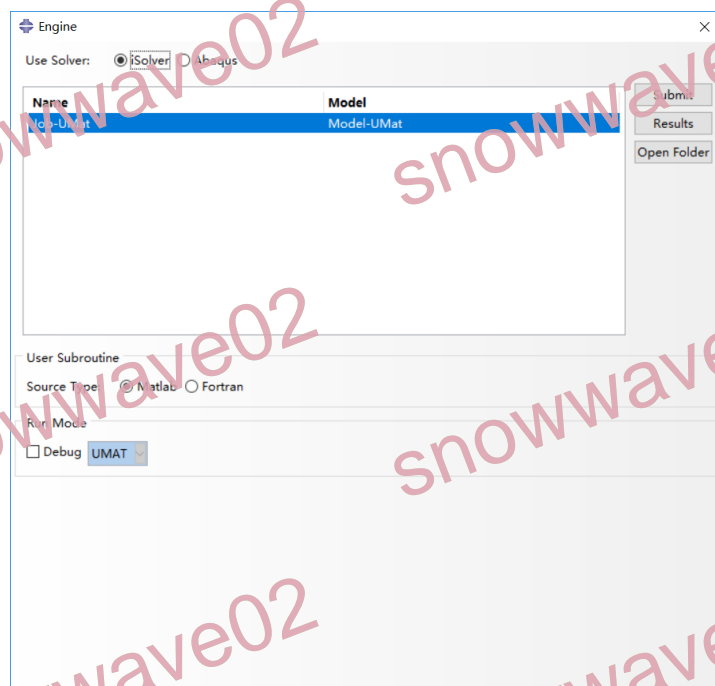
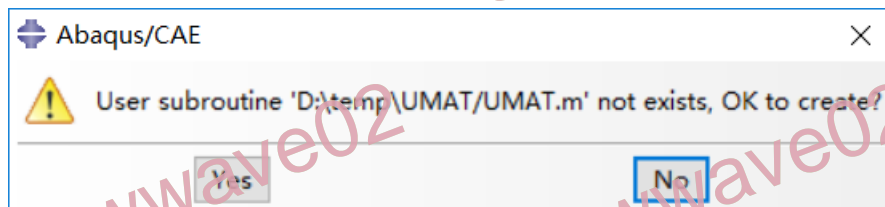


图 22 iSolver 界面

2.2 UMAT 编写与运行

2.2.1 UMAT 编写

点击 **Submit**，对选中的 Job，进行计算。提示用户工作目录下没有 UMAT 文件，是否需要创建。点击 **Yes**，完成文件创建。



此时会进行计算提示出错。接着，我们打开目录下 UMAT.m 文件进行编辑，线性 UMAT 只需要更新应力应变关系矩阵和应力。

其中，三维单元 Jacobian 矩阵 DDSDDDE 的公式如下：

$$\text{DDSDDE} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}$$

公式中的拉梅参数和输入有关：

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

相关代码及注释如下所示：

```
function [STRESS, STATEV, DDSDD, SSE, SPD, SCD, PNEWDT] =
    UMAT(STRESS, STATEV, DDSDD, SSE, SPD, SCD, RPL, DDSDDT, ...

    DRPLDE, DRPLDT, STRAN, DSTRAN, TIME, DTIME, TEMP, DTEMP, PREDEF, DPRED, ...
    CMNAME, NDI, NSHR, NTENS, NSTATV, PROPS, NPROPS, COORDS, DROT, ...
    PNEWDT, CELENT, DFGRD0, DFGRD1, NOEL, NPT, LAYER, KSPT, KSTEP, KINC)

% 读取杨氏模量和泊松比
E = PROPS(1);
nu = PROPS(2);

% 计算拉梅参数和剪切模量
lambda = E * nu / ((1 + nu) * (1 - 2 * nu));
G = E / (2 * (1 + nu));

% 更新应力应变关系矩阵
DDSDD = zeros(NTENS, NTENS);
DDSDD(1:NDI, 1:NDI) = lambda;
for i = 1:NDI
    DDSDD(i, i) = DDSDD(i, i) + 2 * G
end
for i = (NDI + 1) : NTENS
    DDSDD(i, i) = G;
end

% 更新应力
STRESS = STRESS + DDSDD * DSTRAN;

end
```

完成以后保存 UMAT.m。注意，保存路径需在 Abaqus 的工作目录下。

2.2.2 UMAT 运行

切换到 Abaqus 的 Job 模块下，在 Job 模块的 Abaqus 菜单栏的 Plug-ins 里可以看到 iSolver 插件的菜单。

点击 iSolver->Engine，弹出如下所示界面。

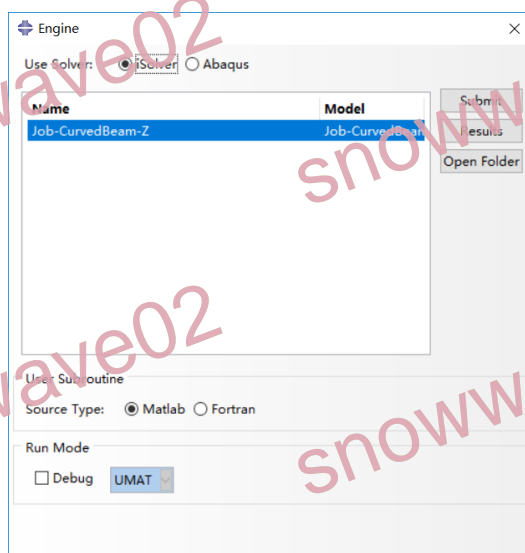


图 23 iSolver 界面

单击鼠标选择需要计算的 Job，然后点击 **Submit**，进行计算。

2.2.3 查看结果

点击 **Results**，对选中的 Job，打开计算生成的文件。

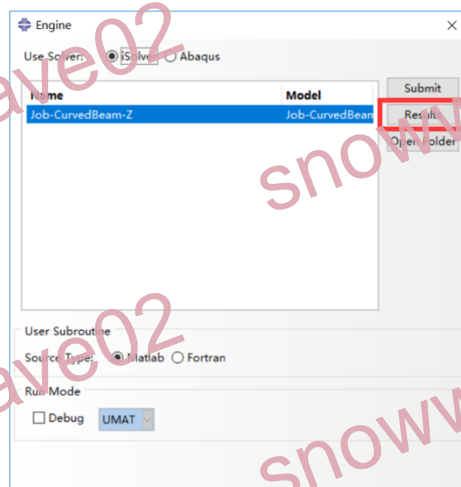


图 24 查看结果

此时会自动切换到 **Visualization** 模块显示云图，得到位移结果如下。

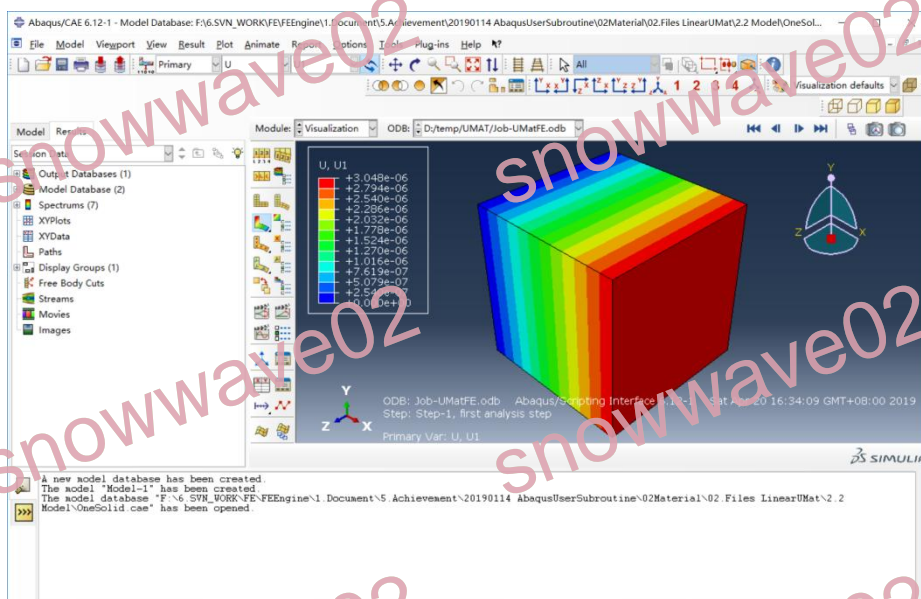


图 25 位移云图

2.3 UMAT 调试

切换到 Abaqus 的 Job 模块下,在 Job 模块的 Abaqus 菜单栏的 Plug-ins 里可以看到 iSolver 插件的菜单。

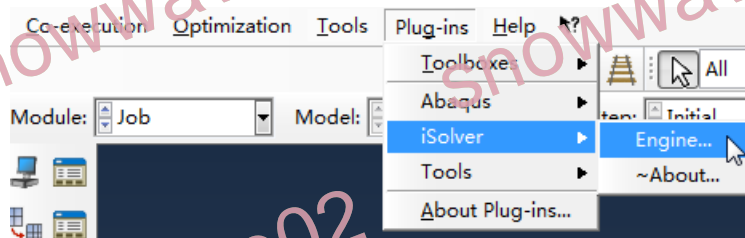


图 26 iSolver 插件菜单

点击 iSolver>Engine, 弹出如下所示界面。

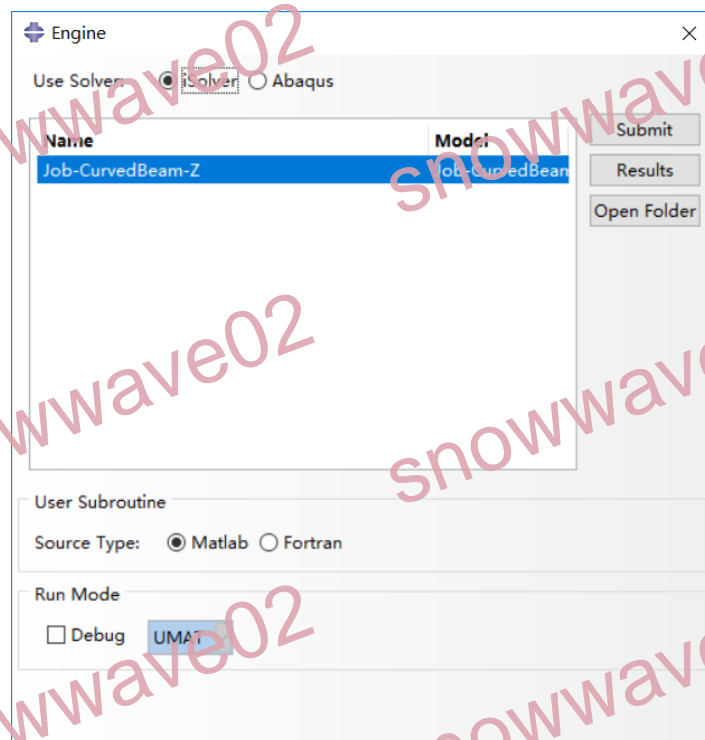


图 27 iSolver 界面

按照下图所示，在功能项 Use Solver 中选择 iSolver，在 Source Type 里面选择 Matlab。勾选 Debug。点击 Submit 进行调试运行。

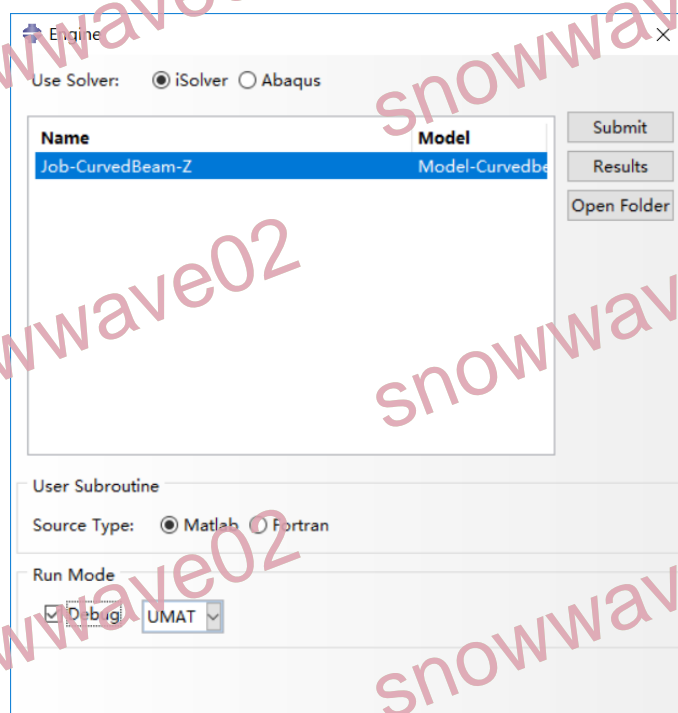


图 28 调试设置

在打开的 UMat.m 文件中，单击第十行打上断点进行调试。

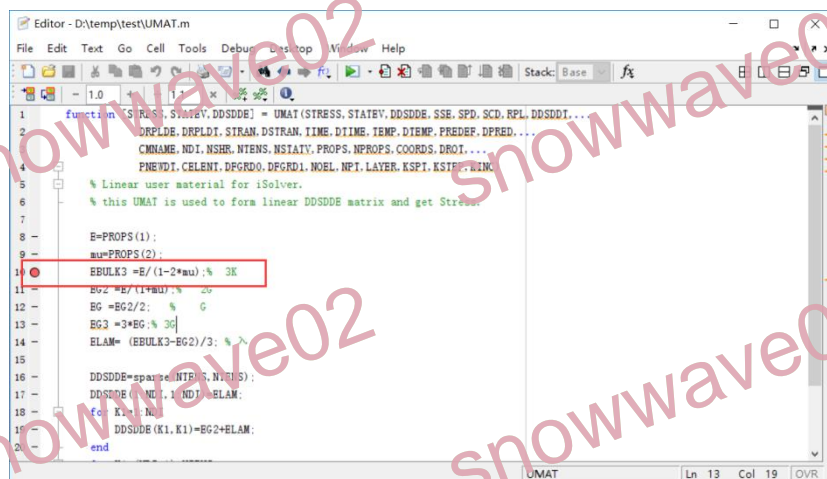


图 29 断点

点击在 Debug 菜单下的 Run UMAT 运行 UMat 程序。

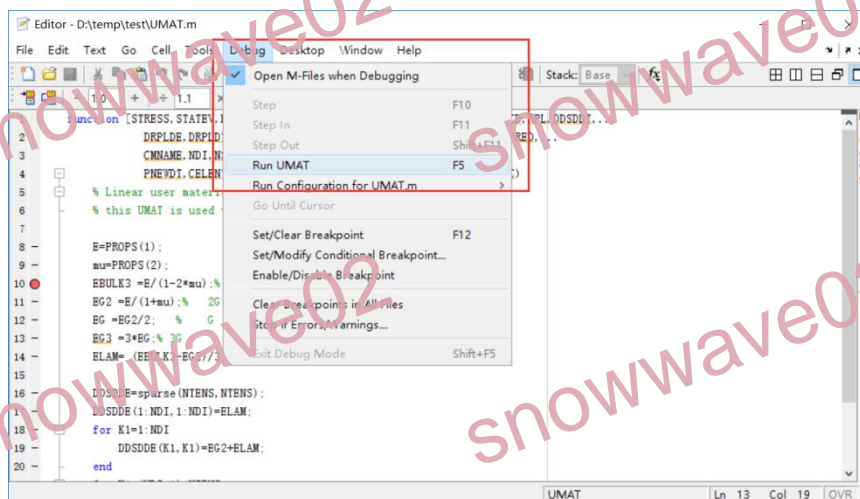


图 30 运行程序

程序在断点处停止，且将鼠标移动到需要调试查看的参数上，能够查看到对应的值。

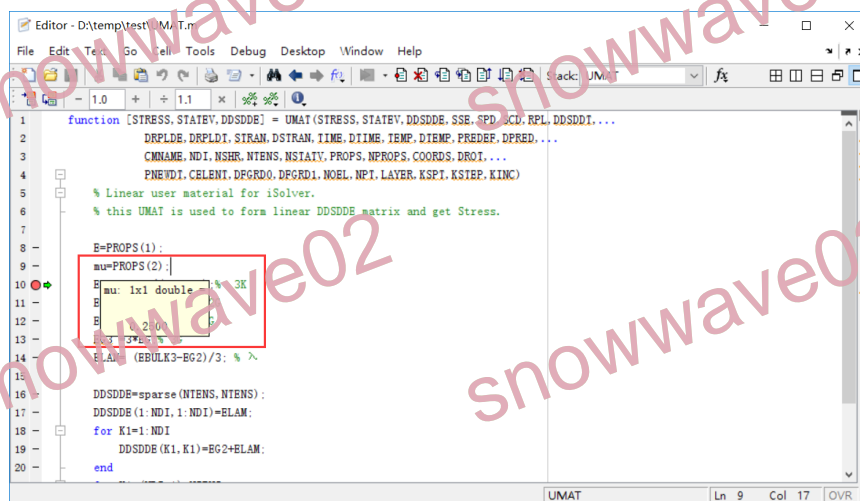


图 31 调试信息查看

按 F5 继续完成程序运行。

2.4 总结

本文首先简单介绍了线性 UMAT 的接口功能和关键接口变量的含义，并通过简单立方体静力分析的算例详细说明了基于 Matlab 线性 UMAT 的开发步骤，最后采用同一个算例对 Abaqus 自带材料和用户编写的线性 UMAT 两者分析结果进行对比，从而证明基于 Matlab 的线性 UMAT 的正确性。

如果有任何其它疑问或者项目合作意向，也欢迎联系我们：

SnowWave02From www.jishulink.com

email: snowwave02@qq.com