

用户自定义材料本构模型

本案例通过研究条形均布荷载作用下均质弹性地基的应力、应变和位移分布，详细介绍了用户自定义材料本构的建立与使用过程。模型示意图如图 7-1 所示。

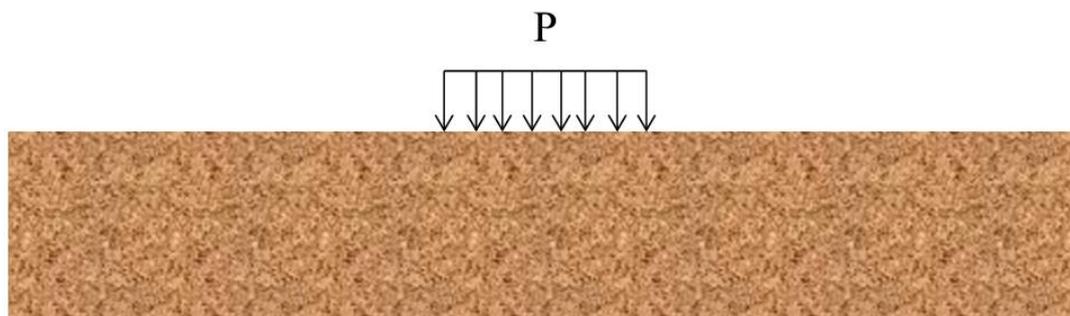


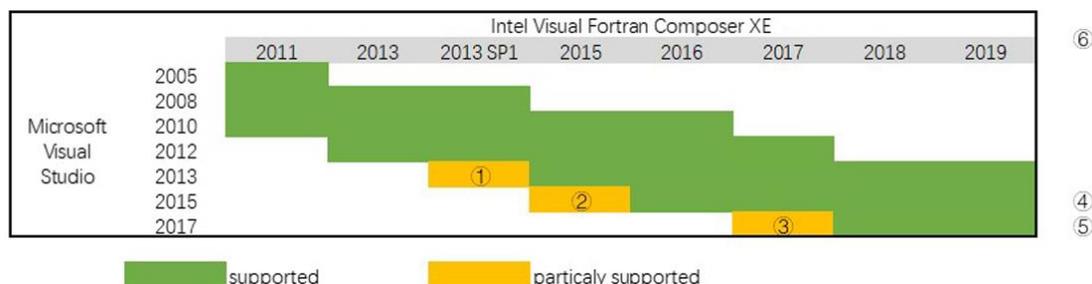
图 7-1 条形均布荷载作用下的地基模型图

7.1 自定义本构的编程与编译

FSSI 提供了用户自定义本构的模板，通过 VS 和 Intel 编译器即可对其进行操作，具体步骤如下。

7.1.1 搭建编译环境

下载 VS (Visual Studio) 软件并下载与 VS 软件匹配的 Intel 编译器(Intel Visual Fortran Composer XE)。需要注意，Intel 编译器必须要与 VS 版本匹配，用户可依据图 7-2 下载匹配的 VS 与 Intel 编译器。



注：建议使用 2017 版本。

①	VS2013 support was added in Composer XE 2013 SP1 Update 1 (14.0.1)
②	VS2013 support was added in Parallel Studio XE 2015 Update 4 (15.0.4)
③	VS2017 is supported in Parallel Studio XE 2017 Update 5 only
④	If is Community edition, Desktop development with C++ component is needed
⑤	If is Community edition, Common Tools for Visual C++ 2015 component is needed
⑥	the version number is same with Intel Parallel Studio XE
	12.0&12.1 13.0&13.1 14.0 15.0 16.0 17.0 18.0 19.0

Release Notes of IVF: <https://software.intel.com/en-us/articles/intel-fortran-compiler-release-notes>

图 7-2 Intel Visual Fortran Composer XE 和 Visual Studio 的版本对应图

7.1.2 根据模板编写 DLL 文件

FSSI 提供的用户自定义本构模板的*.f90 文件提供了 5 个自定义本构的子程序接口，User Defined_SoilModel1、2、3、4、5。本案例以 UserDefined_SoilModel1 为例，找到“**!Local Variables!**用户可以根据自己开发模型的具体情况，自定义一些临时内部变量”的位置开始编写（图 7-3 中红色方框位置）。

```

Subroutine UserDefined_SoilModel1(Propd,Lprpd,Iswdp,Dstre,Detan,Estan,Dmatx,Estre, &
    Param,Lpara,Ielem,Igaus,Nstre,RunTime,DeltaTime)

!DEC$ ATTRIBUTES DLLEXPORT::UserDefined_SoilModel1

Implicit None

! Input Variables
Double Precision,Intent(Inout)::Propd(Lprpd) !存储材料本构模型的输入参数，存储顺序由用户自己安排
Double Precision,Intent(Inout)::Param(Lpara) !该高斯点上与本构执行相关的参数（如上一次执行后的应力状态，塑性应变，硬化参数等等，总之是存储执行该次操作时，需要读取的上一步保留的数据）
Double Precision,Intent(Inout)::Detan(Nstre) !增量应变
Double Precision,Intent(Inout)::Estan(Nstre) !增量应变
Integer,Intent(In)::Iswdp !用于切换功能
Integer,Intent(In)::Lprpd !数组Propd的大小，已经被固定为35
Integer,Intent(In)::Lpara !数组Param的大小，可由用户自己根据情况自己决定大小；当案例中存在多个本构模型时，Lpara的值取这些本构模型各自设置的Lpara值的最大值
Integer,Intent(In)::Ielem !单元编号
Integer,Intent(In)::Igaus !一个单元内的高斯点编号
Integer,Intent(In)::Nstre !应力个数，3D时Nstre=6，2D时Nstre=4
Double Precision ::RunTime !当前时间
Double Precision ::DeltaTime !时间步

! Output Variables
Double Precision,Intent(Inout)::Estre(Nstre) !总有效应力
Double Precision,Intent(Inout)::Dstre(Nstre) !有效应力增量
Double Precision,Intent(Inout)::Dmatx(Nstre,Nstre) !D矩阵，如果是弹塑性本构模型，则为弹塑性D矩阵，用于程序中组刚等功能
    
```

本案例编写的用户自定义材料本构 UserDefined_SoilModel1 代码内容如图 7-3 所示

```

! Local Variables !用户可以根据自己开发模型的具体情况，自定义一些临时内部变量

Double Precision::Young,Poiss,Rlmda,Shear,Dvolv,Svolv
Integer Istre

! Specific codes defined by Users
Goto (1100,1200,1300,1400),Iswdp
=====
! Iswdp=1:由增量应变通过本构形成增量应力
! Iswdp=2:形成对称的D矩阵
! Iswdp=3:形成不对称的D矩阵
! Iswdp=4:与高斯点上本构执行相关的数组Param、Propd等的初始化
=====
    
```

```

1100 Continue ! 计算增量应力
Young=Propd(1)
Pois=Propd(2)
Rlmda=Young*Pois/((1.0D0-2.0D0*Pois)*(1.0D0+Pois))
Shear=Young*0.5D0/(1.0D0+Pois)
Dvolv=Dstan(1)+Dstan(2)+Dstan(3)
Svolv=Rlmda*Dvolv
Dstre(1:3)=Svolv+2.0D0*Shear*Dstan(1:3)
Dstre(4:Nstre)=Shear*Dstan(4:Nstre)
Do Istre=1,Nstre
    Estre(Istre)=Estre(Istre)+Dstre(Istre)
End Do

!Call Interface_Fssi_Umat1(Propd,Lprpd,Iswdp,Dstre,Dstan,Estan,Dmatx,Estre, &
!
!                               Param,Lpara,Ielem,Igaus,Nstre,RunTime,DeltaTime)

Goto 1999

1200 Continue ! D矩阵对称

! Goto 1999

1300 Continue ! D矩阵不对称
Young=Propd(1)
Pois=Propd(2)
Rlmda=Young*Pois/((1.0D0-2.0D0)*Pois)*(1.0D0+Pois)
Shear=Young*0.5D0/(1.0D0+Pois)
Dmatx=0.0D0
Dmatx(1:3,1:3)=Rlmda
Dmatx(1,1)=Dmatx(1,1)+2.0D0*Shear
Dmatx(2,2)=Dmatx(2,2)+2.0D0*Shear
Dmatx(3,3)=Dmatx(3,3)+2.0D0*Shear
Do Istre=4,Nstre
    Dmatx(Istre,Istre)=Shear
End Do
! Call Interface_Fssi_Umat1(Propd,Lprpd,Iswdp,Dstre,Dstan,Estan,Dmatx,Estre, &
!
!                               Param,Lpara,Ielem,Igaus,Nstre,RunTime,DeltaTime)

Goto 1999

1400 Continue !本构执行初始化
Param=0.0d0
! *****
! Fssi中的Param数组等价于Abaqus中的状态变量数组Statev
! Param数组的长度在界面上给出。
! Param(1)=1.0 !储存孔隙比 Statev(1)=1.0
!Param(2)=100 !先期固结压力 Statev(2)=100
!Param(3)=1.0 !储存初始孔隙比 Statev(3)=1.0
Goto 1999

1999 Continue

Return

End Subroutine UserDefined_SoilModel1

```

图 7-3 本案例编写的用户自定义材料本构 UserDefined_SoilModel1 的代码
注：因为在程序中五个自定义本构子程序接口都进行了调用，所以用户不能将未编译的用户自定义材料本构代码自行删除，否则会导致编译无法通过，从而致使程序无法运行。

7.1.3 由*.f90 文件生成动态链接库 (DLL) 文件

编辑完成后，点击生成—生成解决方案，如图 7-4 所示。如果用户不自己定义保存路径，生成的 DLL 文件默认在图 7-4 中新建项目保存路径下的 UserDefined_SoilModel 文件夹

内, 具体路径是 UserDefined_SoilModel—UserDefined_SoilModel—x64—Debug, Debug 配置

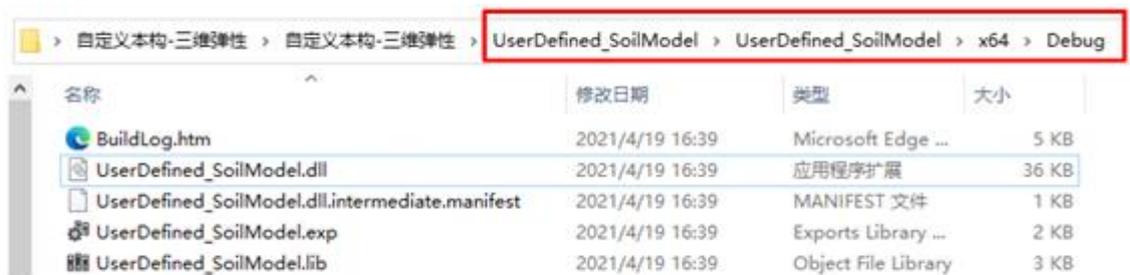


下的 DLL 文件生成路径如图 7-5 所示。

图 7-4 生成用户自定义材料本构 DLL 文件的步骤示意图

图 7-5 Debug 配置下用户自定义本构 UserDefined_SoilModel.dll 文件的存储地址

7.2 Umat 自定义本构模型



7.2.1 搭建编译环境

编译环境同 7.1.1 搭建编译环境。

7.2.2 根据模板编写 DLL 文件

用户可将 Umat 子程序*.for 文件添加至 UserDefined_SoilModel—Source Files 中, 并修改 Umat 子程序名称, 如图 7-6 所示。

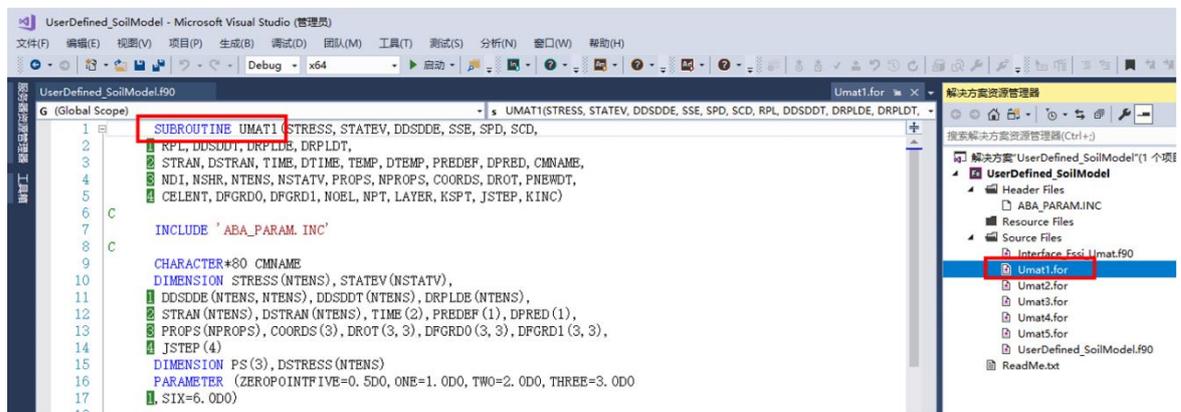


图 7-6 添加 Umat 子程序

在 UserDefined_SoilModel.f90 文件中, 提供了 5 个自定义本构的子程序接口, 以 UserDefined_SoilModel1 为例, 在此子程序中通过调用 Interface 接口子程序, 来实现对

Abaqus Umat 本构模型的调用， FSSI 最多同时支持 5 个 Umat 自定义本构模型的调用。

以 UserDefined_SoilModel1 为例， 如图 7-7 所示

```
42
43 1100 Continue ! 计算增量应力
44
45 Call Interface_Fssi_Umat1(Propd, Lprpd, Iswdp, Dstre, Dstan, Estan, Dmatx, Estre, &
46 Param, Lpara, Ielem, Igaus, Nstre, RunTime, DeltaTime)
47
48 Goto 1999
49
50 1200 Continue ! D矩阵对称
51
52
53 1300 Continue ! D矩阵不对称
54
55 Call Interface_Fssi_Umat1(Propd, Lprpd, Iswdp, Dstre, Dstan, Estan, Dmatx, Estre, &
56 Param, Lpara, Ielem, Igaus, Nstre, RunTime, DeltaTime)
57
58 Goto 1999
59
60 1400 Continue !本构执行初始化
61 Param=0.0D0
62
63 Goto 1999
64
65 1999 Continue
66
67 Return
68
69 End Subroutine UserDefined_SoilModel1
70
71 ! *****
72 ! 调用 Umat 1 的 Fssi_Cas 子程序结束
73 ! *****
```

图 7-7 调用 Interface 接口子程序

7.2.3 由*.f90 文件生成动态链接库 (DLL) 文件

生成 DLL 方式参考 7.1.3 由*.f90 文件生成动态链接库 (DLL) 文件

7.3 FssiCAS 图形界面操作——前处理

7.3.1 导入网格和背景线

点击 FssiCAS—Preprocess—Load Mesh， 在弹出的文件选择对话框中选择 Abaqus 输出的 *.inp 网格文件， 双击或点击打开按钮， 如图 7-8 所示。

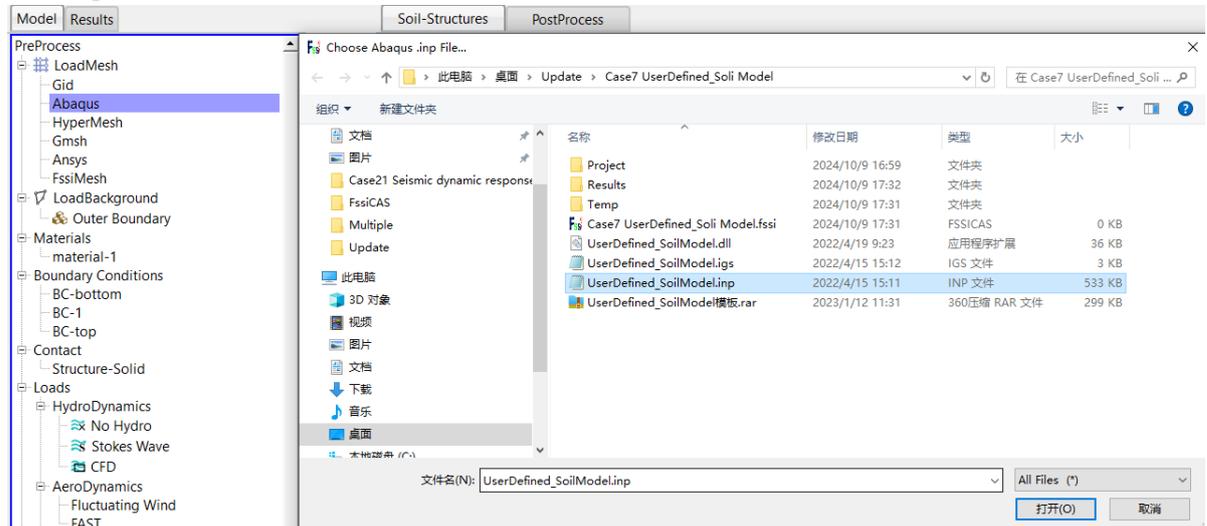


图 7-8 导入 Abaqus 网格的步骤示意图

在弹出对话框中设置流体节点阶次如图 7-9 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。

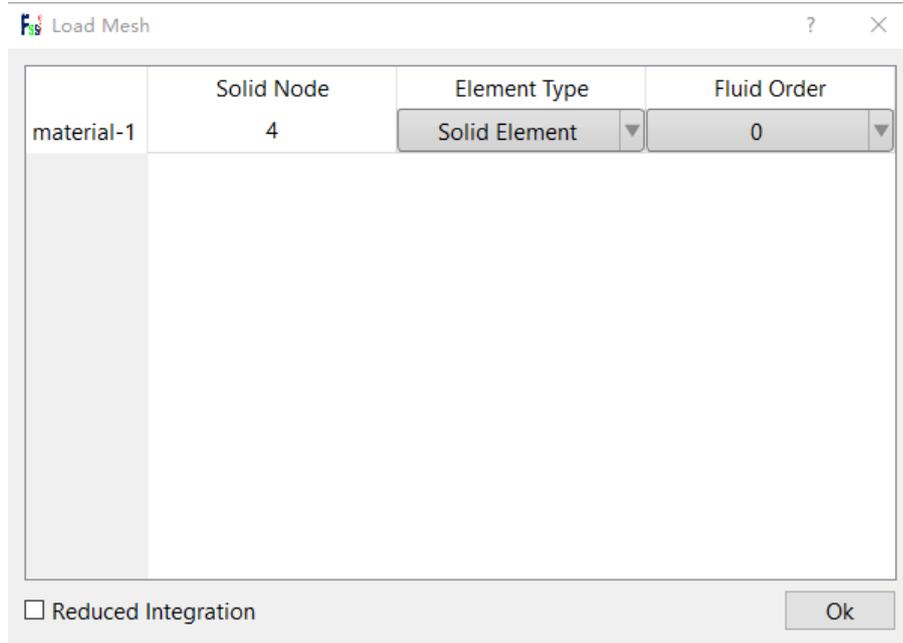


图 7-9 设置流体节点阶次界面

点击 Preprocess—Load Background—Outer Boundary，在弹出的文件选择对话框中选择 Abaqus 输出的*.iges 网格文件，双击或点击打开按钮，如图 7-10 所示。界面中展示导入模型如图 7-11 所示。

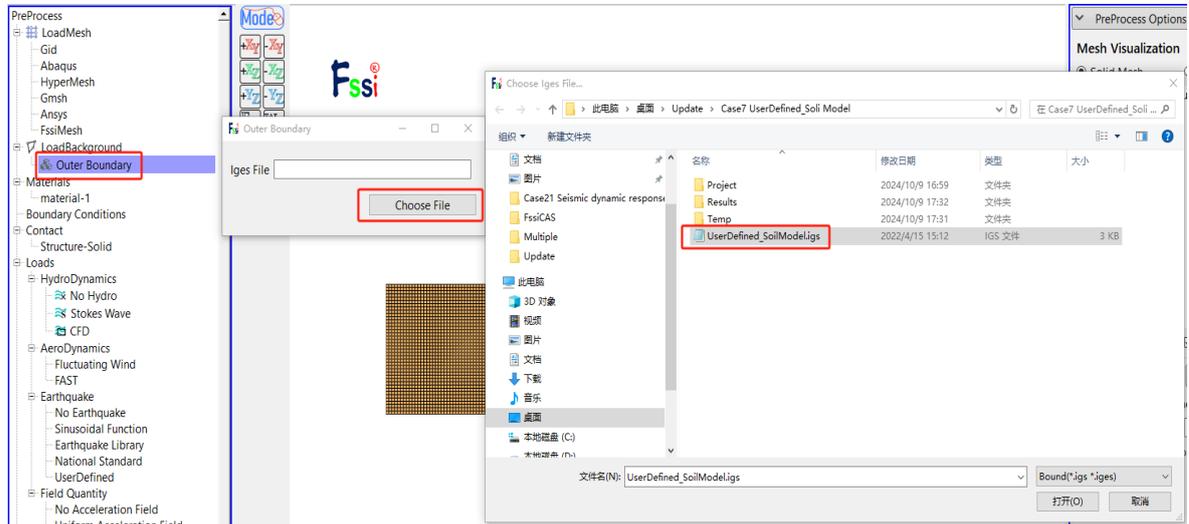


图 7-10 加载外背景线 (Outer Boundary) 的步骤示意图

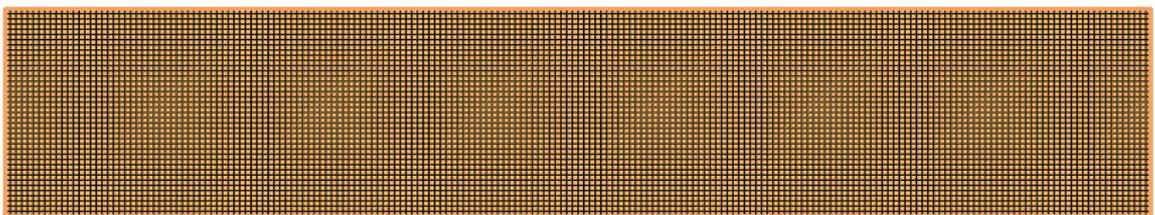


图 7-11 加载网格和外背景线后的模型图

7.3.2 导入自定义材料本构文件

点击左上角工具栏 UserDefined，在下拉菜单中选择 Soil Model—Add，即可完成自定义材料本构的加载，如图 7-12 所示。

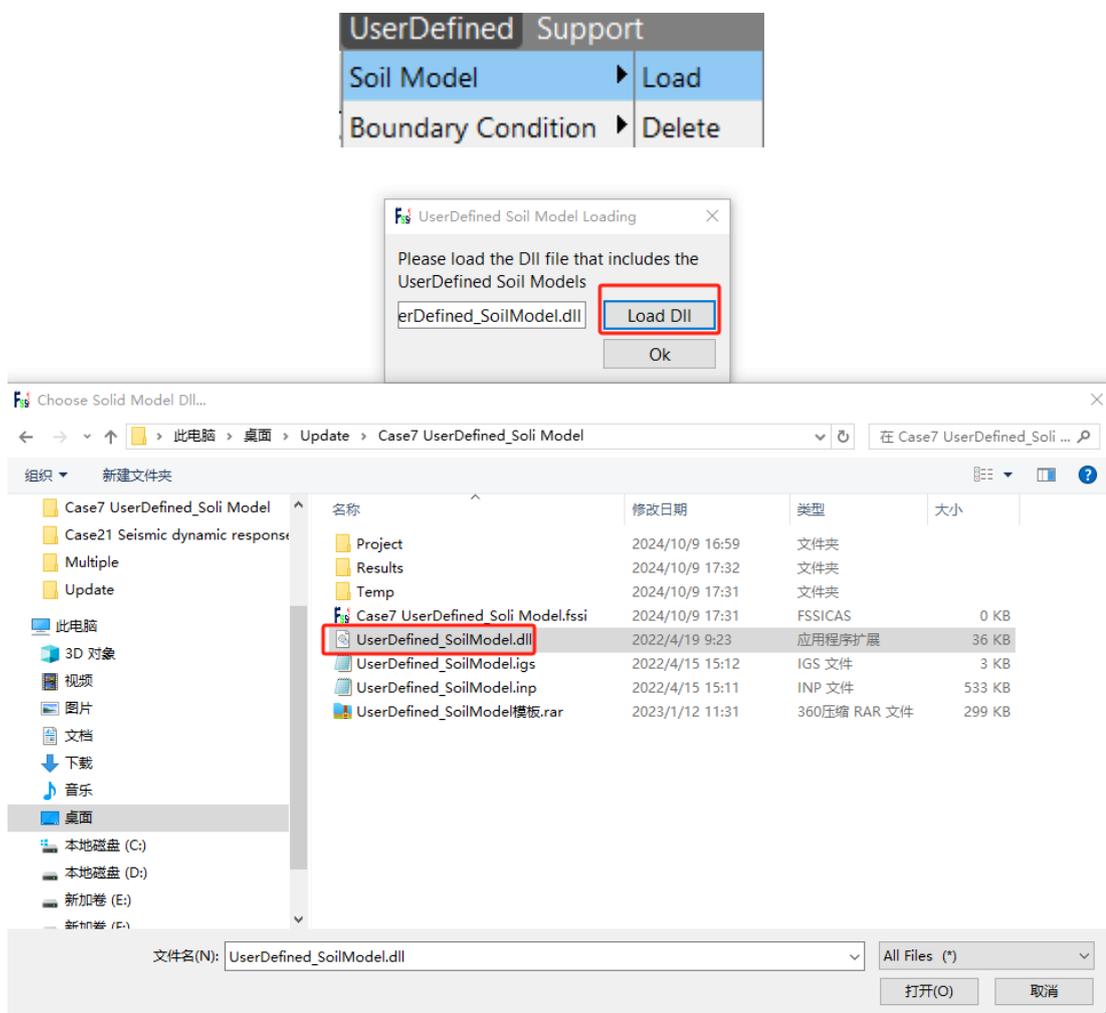


图 7-12 导入用户自定义材料本构 DLL 文件

7.3.3 施加边界条件

本案例分别对底边 ($y = 0 \text{ m}$) 节点设置 x 与 y 方向的约束，对左右两个侧边 ($x = 0 \text{ m}$) 和 ($x = 200 \text{ m}$) 的节点设置 x 方向的约束。点击工具栏中图标 ，点击工具栏中图标 ，进入背景线选择模式。点击键盘'R'键，开始选择。进入边界选择模式，点击选择后被选择的线会变亮。具体操作如图 7-13。在模型顶部($y = 40 \text{ m}$)施加大小为 500 kPa 的条形均布荷载，如图 7-14 所示。

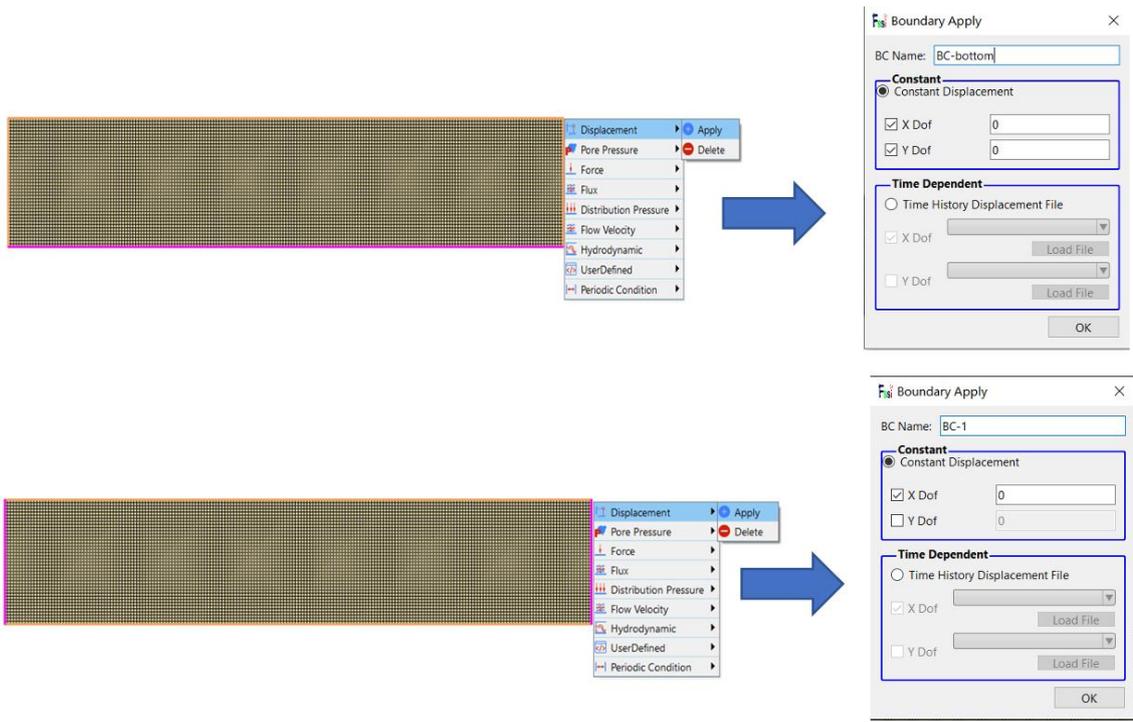


图 7-13 选择边界线添加边界条件

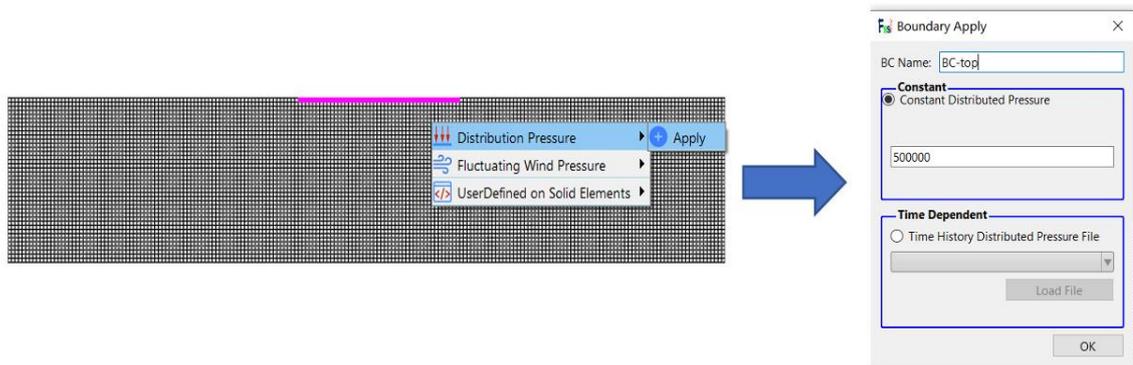


图 7-14 选择单元添加条形均布荷载（以压为正）

- 注：1.在右侧快捷窗口中点击 Show Boundary Condition，可以检查是否正确添加边界件。
 2.添加边界条件时，第二次设置会覆盖第一次设置，如重复添加边界条件，一定要保证第二次的边界条件为最终边界条件，或者单独对重复节点进行多种不同的边界条件的设置。

7.3.4 重力场设置

在 y 方向设置重力加速度为 -9.806m/s^2 ，如图 7-15 所示。

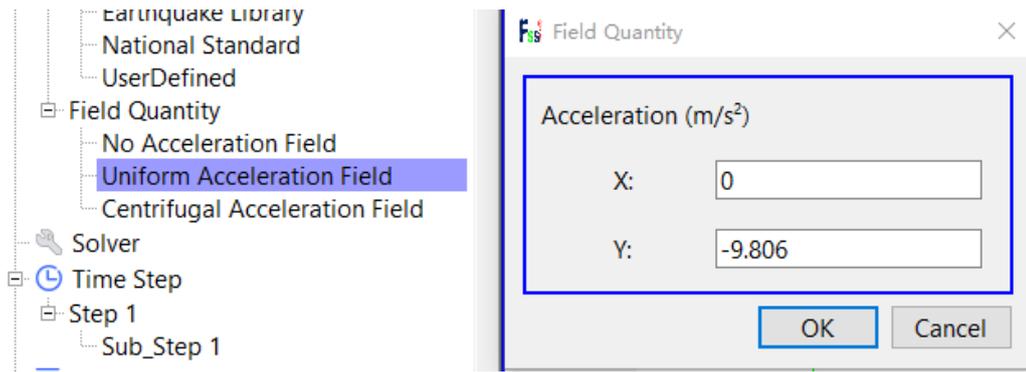


图 7-15 重力加速度设置界面

7.3.5 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。点击 FssiCAS—Preprocess—Loads—Hydrodynamics—No Hydro。如图 7-16 所示。

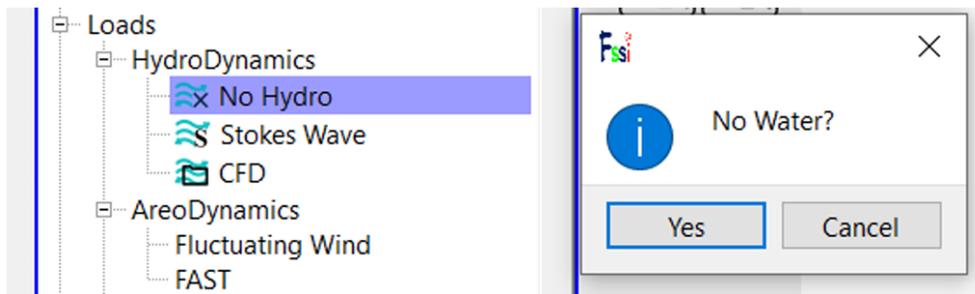


图 7-16 水动力边界条件设置

7.3.6 设置材料参数

点击 FssiCAS—Preprocess—Material—Material 1，用户可以自行更改材料名称，在弹出对话框中输入材料参数。本案例是用户自定义本构，用户在 DLL 文件中一共可以自定义 5 种材料本构，5 种材料本构的名称如图 7-17 所示。界面选择的自定义本构编号必须与 DLL 文件中需要调用的本构编号相同，本案例选择 UserDefined_SoilModel1，具体材料参数设置如图 7-18 所示。

- UserDefined_SoilModel1
- UserDefined_SoilModel2
- UserDefined_SoilModel3
- UserDefined_SoilModel4
- UserDefined_SoilModel5

图 7-17 用户最多可定义和选择的 5 种自定义本构

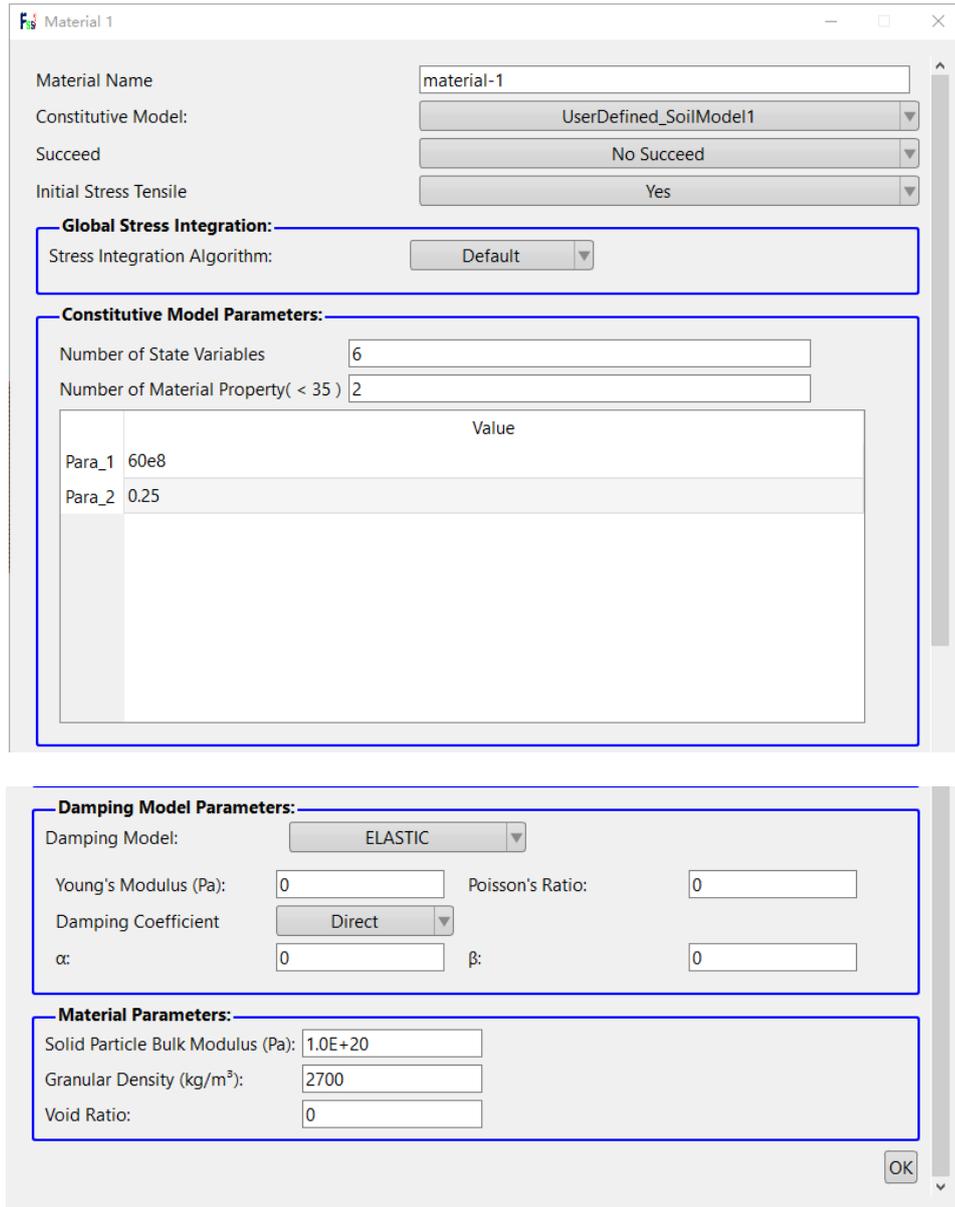


图 7-18 材料参数设置界面

注：Number of Parameters 指的是读入的本构模型参数的个数，例如图 7-18 中本构模型参数有弹性模量和泊松比 2 个，在对应位置填写 2 之后点击键盘“Enter”键即可在 Value 栏中按用户自定义的顺序填写弹性模量和泊松比的数值。

7.3.7 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 7-19 所示。

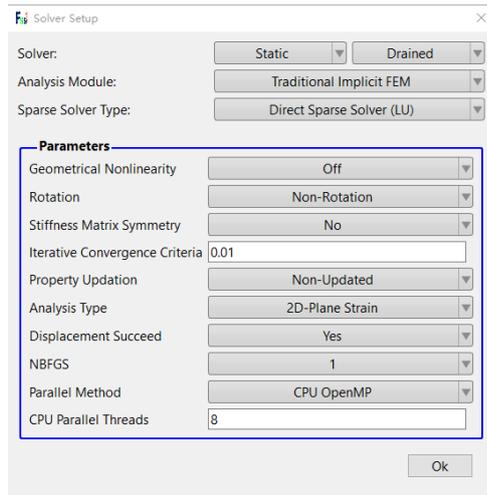


图 7-19 求解器类型及相关参数设置界面

7.3.8 设置时间步

点击 FsiCAS—Preprocess—Solver—Time Step。Step 1 的时间步选项卡中 Simulation Time (s)为计算总时间，设置为 2 s；Start Time of Current Step(s)为开始计算时间，设置为 0 s；Interval for Time Steps (s)为时间步长，设置为 0.1 s；Interval for Updating Coordinate (s)为坐标更新时间，设置为 3 s，即不更新坐标；Interval for Updating Global Stiffness Matrix (s)为刚度矩阵更新时间，设置为 3 s，即不更新刚度矩阵；Maximum Iterations 为每个时间步最大迭代次数，设置为 10 步；Restart File Output Interval (s)为输出重启文件的时间，设置为 0.1 s；Results File Output Interval (s)为输出某一时刻所有节点/高斯点上的位移、应力、应变等结果文件的时间间隔，设置为每 0.1 s 输出一次结果文件；Results Output 为选择输出节点上或高斯点上的结果；State Variables Output 为选择是否输出状态变量；Results Sequence 为选择设置计算结果序列，可选择是否计算保存位移、应力、应变、加速度等结果；Results Format 为计算结果文件形式，可选择保存为二进制文件或 ASCII 文件；History Output Interval (s)为输出特定的节点或单元上的应力、应变等结果文件的时间间隔，设置为每 0.1 s 输出一次。 α ， β_1 ， β_2 为时间系数，保持默认值即可，时间步 step1 的具体设置如图 7-20 所示，完成设置后分别点击 Create。

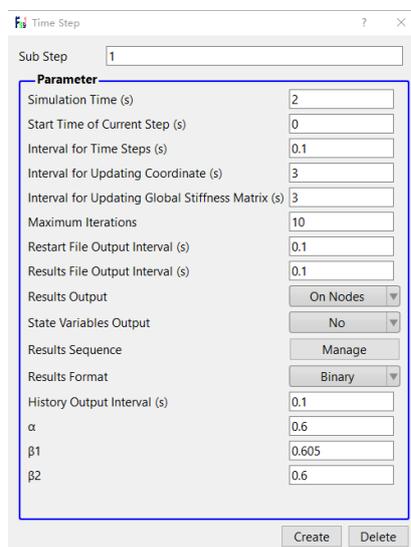


图 7-20 时间步相关参数设置界面

7.3.9 设置初始条件

点击 FssiCAS—Preprocess—Initial State, 设置初始条件, 点击 ok, 完成初始状态设置, 如图 7-21 所示。

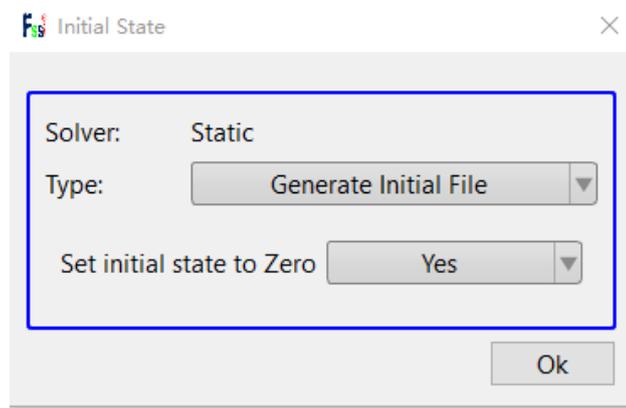


图 7-21 初始条件设置界面

7.3.10 计算

点击 FssiCAS—Preprocess—Computation—FSSI-W 保存当前项目并开始计算。如果需要 执行 Results—Soil_Model—Static 路径下用户自己编写或修改的计算文件, 则需选择 FSSI-NW 进行计算。显示图 7-22 时表示计算完成。

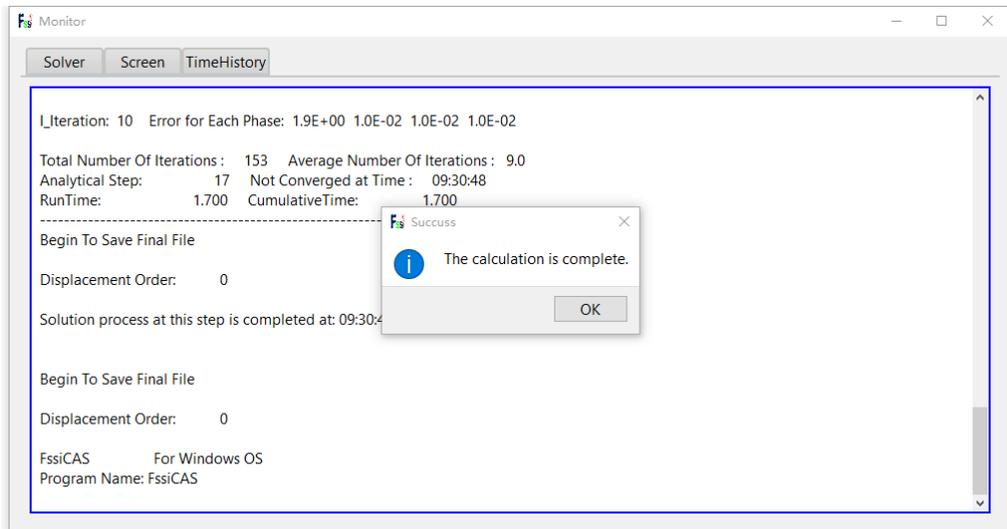


图 7-22 数值计算完成界面

7.4 FssiCAS 图形界面操作——后处理

7.4.1 加载文件

点击 FssiCAS—Postprocess—Open Results File, 选择需要处理的结果文件夹, 如图 7-23 所示。

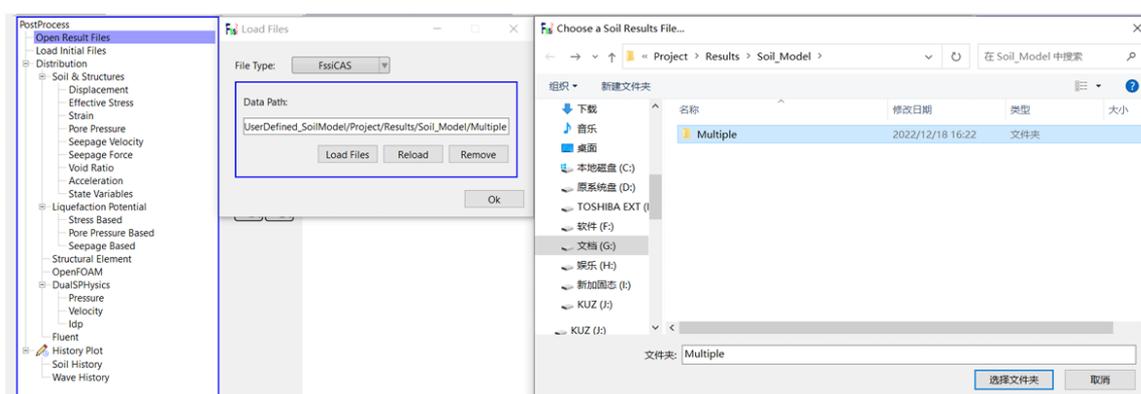


图 7-23 加载数值计算结果文件步骤图

7.4.2 绘制分布图

点击 FssiCAS—Postprocess—Distribution Plot—Solid—Displacement, 在后处理界面正上方的工具栏选择 Displacement X, 且在输入窗口处输入时间步 0.1, 单击键盘上的“回车键”, 即可在工作区中显示 0.1 时间步下 X 方向的位移分布, 如图 7-24 所示。

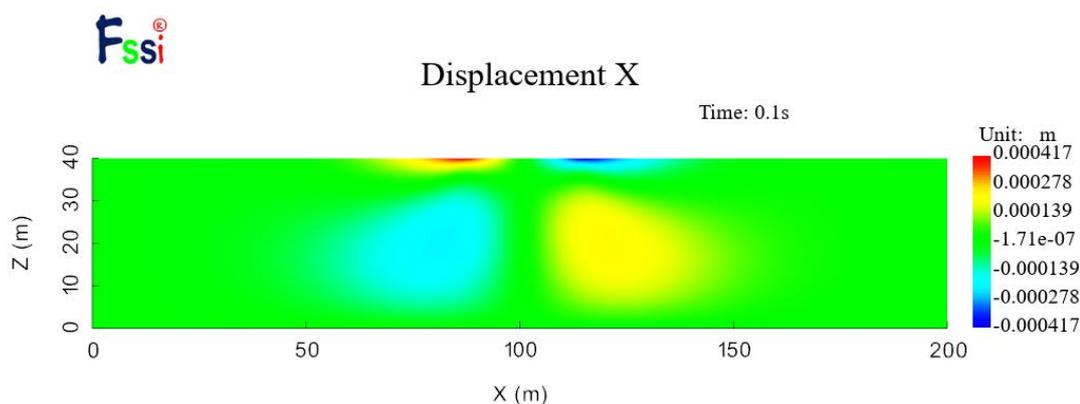


图 7-24 0.1s 时 X 方向的位移分布图

本案例计算结果分布图可以由伸缩栏 Export Results Figure 按键导出, 如图 7-25 所示。

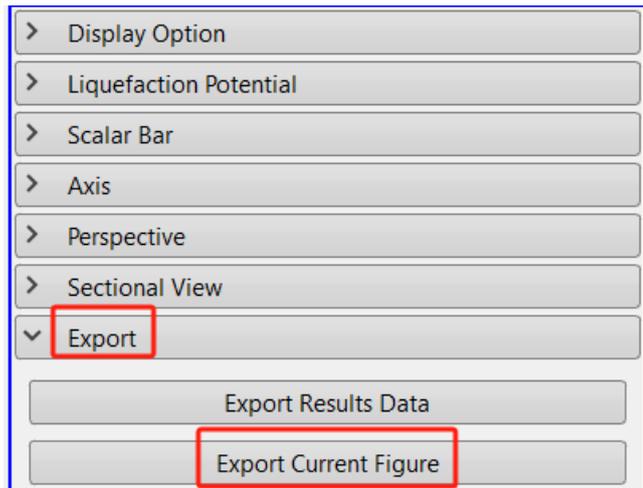
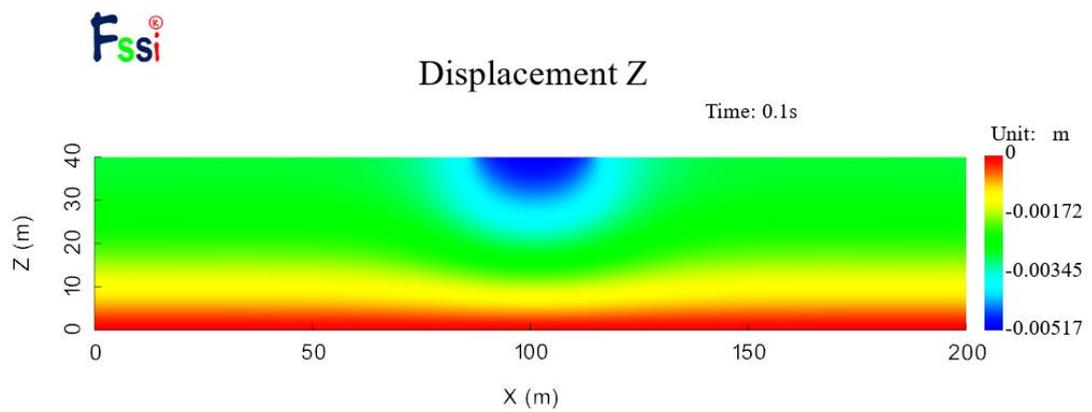
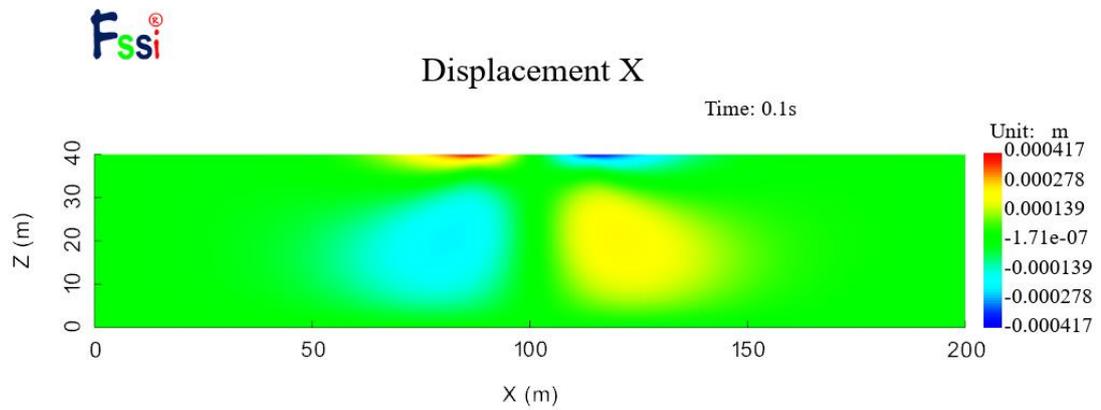


图 7-25 伸缩栏输出图像按键位置图

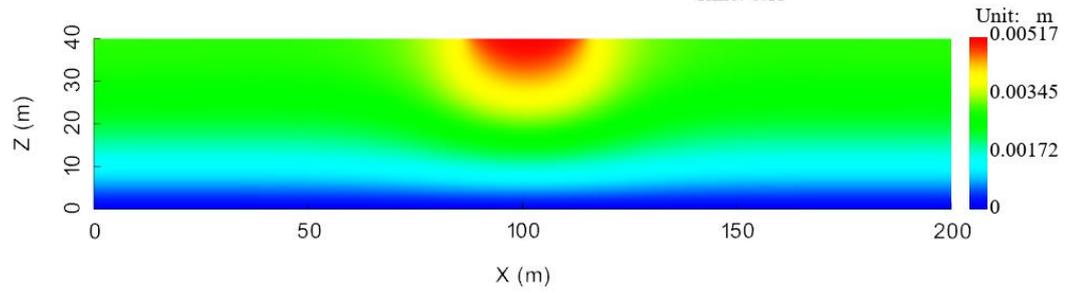
本案例结果分布图如图 7-26 所示。





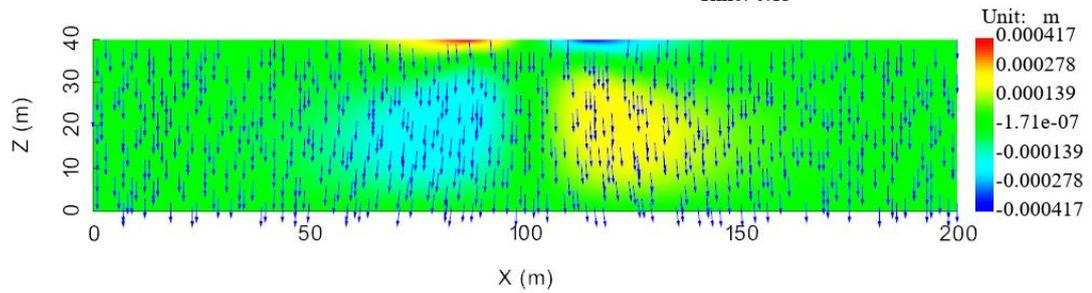
Displacement

Time: 0.1s



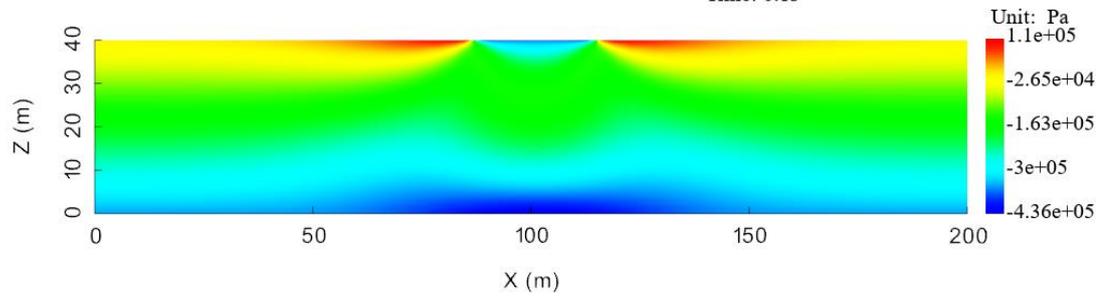
Displacement Vector

Time: 0.1s



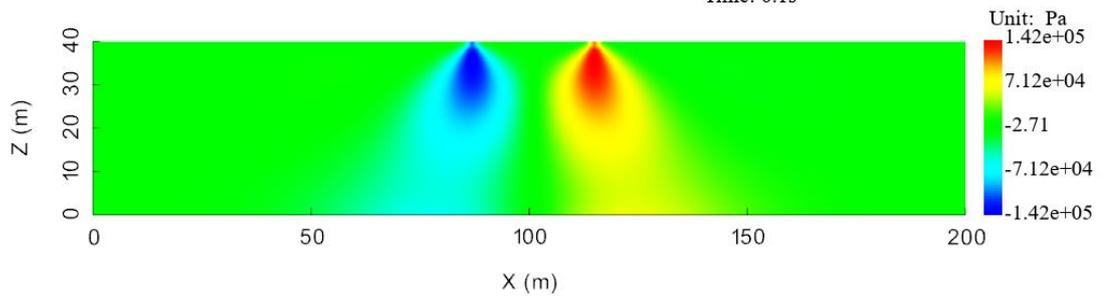
Effective Stress X

Time: 0.1s



Shear Stress XZ

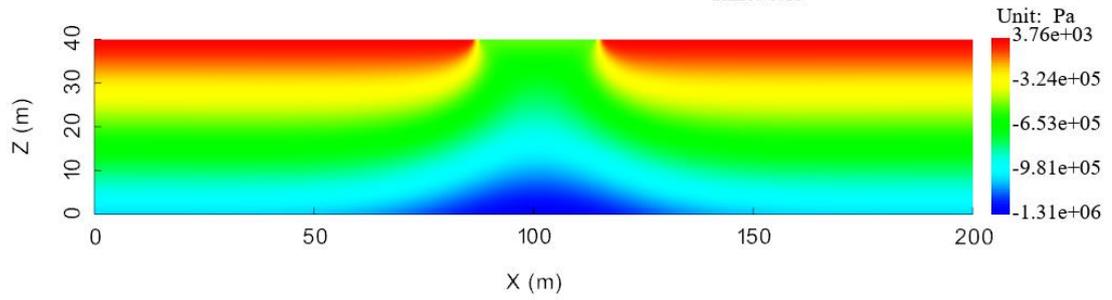
Time: 0.1s



Fssi

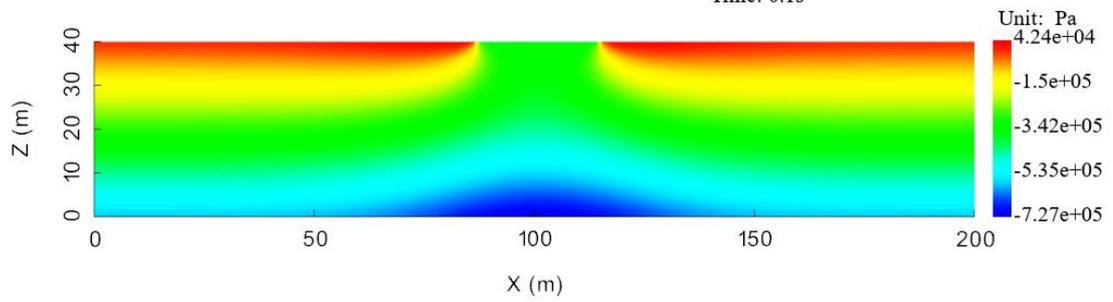
Effective Stress Z

Time: 0.1s

**Fssi**

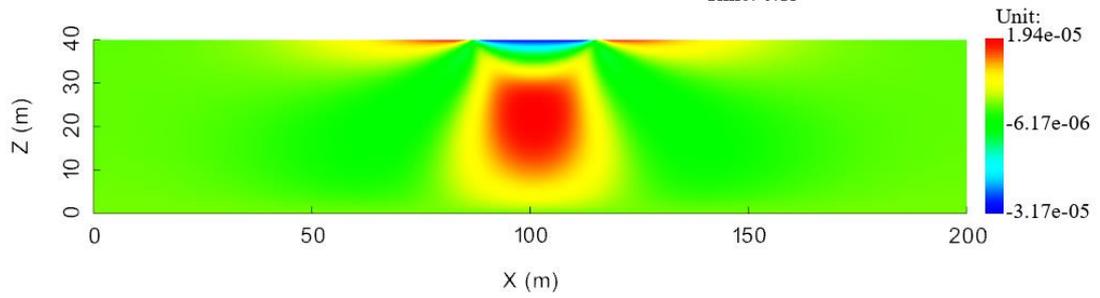
Mean Effective Stress

Time: 0.1s

**Fssi**

Strain X

Time: 0.1s

**Fssi**

Strain Z

Time: 0.1s

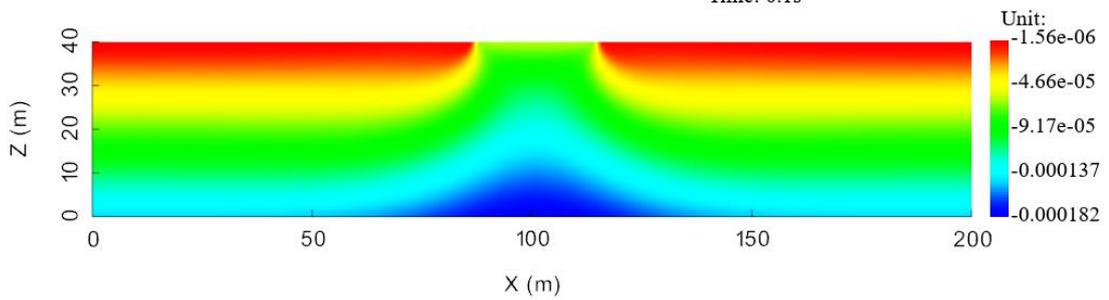


图 7-26 计算结果分布图