

南水北调工程某膨胀土渠段运行期变形计算

12.1 案例说明

12.1.1 工程背景

南水北调工程是中华人民共和国的战略性工程，分东、中、西三条线路，东线工程起点位于江苏扬州江都水利枢纽。中线工程起点位于汉江中上游丹江口水库，供水区域为河南，河北，北京，天津四个省（市）。

南水北调中线总干渠全长约 1432km，渠道沿线地质条件复杂，穿越膨胀土（岩）渠段累计长约 386.8km，分布有膨胀岩的渠段长 169.7km，分布有膨胀土的渠段长 279.7km（部分渠段既分布有膨胀土，又分布有膨胀岩）。其中，分布有强膨胀岩的渠段长 34.2km，中等膨胀岩渠段长 58.73km，弱膨胀岩渠段长 76.79km；分布有强膨胀土的渠段长 5.69km，中等膨胀土渠段长 103.5km，弱膨胀土渠段长 170.5km。膨胀性土（岩）分布区地貌形态多为丘陵，垄岗和山前冲洪积、坡洪积等。渠道挖深以小于 10m 为主，部分渠段挖深可达 10m~15m，局部渠段挖深 15m~30m，少数渠段挖深超过 30m。

渠道过水断面为梯形断面，设计渠底宽度为 10.5~22.0m，渠道内一级边坡坡比为 1:2.0~1:3.5，挖方渠道级马道兼作运行维护道路，以上每 6m 增设一级马道。膨胀土处理以换填土为主，一级马道以下渠坡采用水泥掺量 4%~6% 的水泥改性土换填，一级马道以上渠坡采用水泥改性土或满足设计要求的改性土削坡余料换填。挖方渠段采用抗滑桩和抗滑桩+坡面梁支护措施；填方渠段采取了增设防浪墙、防渗墙、渗控设施、外坡水泥土搅拌抗滑桩、外坡坡脚排水体、加厚土工膜及衬砌板采用纤维混凝土等加强安全措施。

渠道自 2014 年 12 月 12 日运行至今，部分膨胀土渠段边坡出现局部变形迹象或病害，表现为混凝土结构出现裂缝或坡体深层水平变形呈发展趋势，成为渠道安全输水和高效运行的潜在隐患。

但目前，对膨胀土边坡长期变形机理还不清楚，病害的表现形式差异难辨，难以快速确定病害的形成原因及类别，无法对渠坡运行状态进行评价，增加了渠道的运行管理与维护的成本与难度，急需对运行阶段膨胀土渠道的变形病害进行研究，并提出系统的运行状态综合评价方法，为南水北调中间运行维护提供科学依据。从而掌握南水北调运行期间膨胀土及填方渠坡长期变形演化基本规律，揭示边坡变形病害的表观特征和内在机理，建立适用于南水北调膨胀土及填方渠坡长期变形病害分类及评估办法，为南水北调渠坡变形病害快速治理提供理论基础。

12.2 案例模型介绍

本计算模型以浙川段渠道深挖方梯形断面图为构建基础，如图 12-1 所示。本段渠道裙采用

梯形横断面，地面高程高于渠道一级马道，布置全挖方断面，断面形式为：（1）一级马道的高程为渠道加大水位加相应的超高；（2）一级马道以上，一般每增高 6.0m 增设一级马道；（3）由于边坡稳定的要求，一级马道宽 5.0m，四级马道宽 50m，其他各级马道宽 2.0m。

桩号: 10+140 比例尺 1:2000

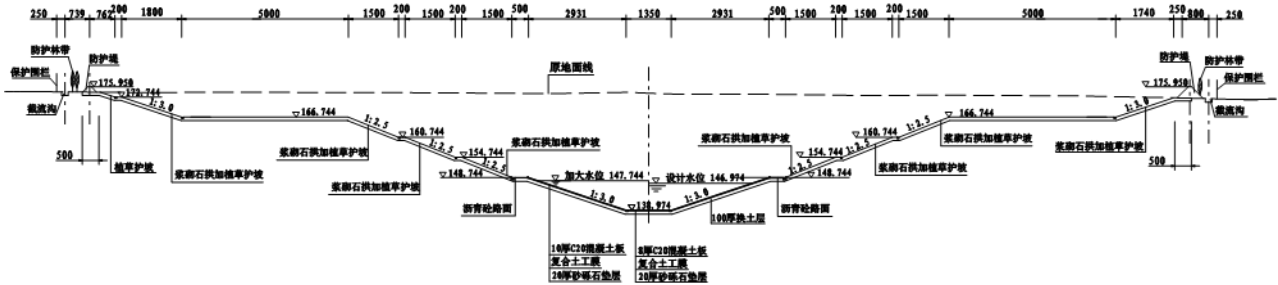


图 12-1 浙川段渠道深挖方断面示意图（单位：cm）

12.3 模型建立

12.3.1 绘制草图

由于本案例进行数值计算的是二维模型，我们就通过 Abaqus 直接绘制草图，来创建数值计算模型。在 Abaqus 中，由草图生成模型时要求草图截面必须是封闭的，所以我们只进行模型边界线的绘制。

打开 Abaqus 后，创建一个新的 Standard/Explicit 模型，接下来在作业区模块中选择草图，并点击创建草图按钮，如图 12-2 所示，我们便进入了绘制草图的界面。

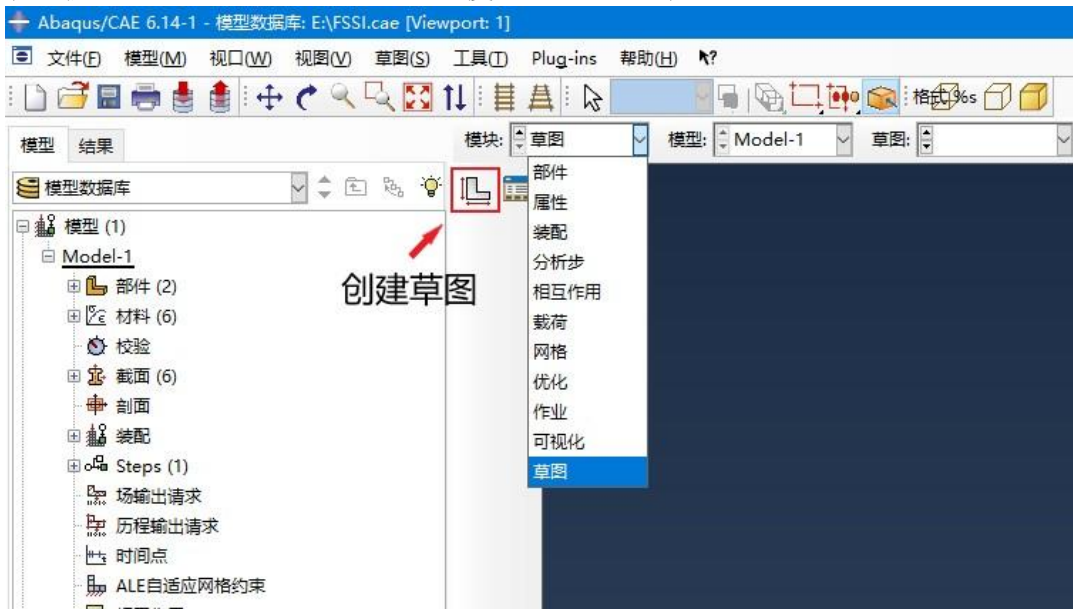


图 12-2 Abaqus 绘制草图操作步骤

根据真实地形确定数值计算模型边界线上各个点的坐标，并将他们依次相连便得到了边界线草图，如图 12-3 所示。然后点击完成就结束了草图的绘制，草图将被保存下来。

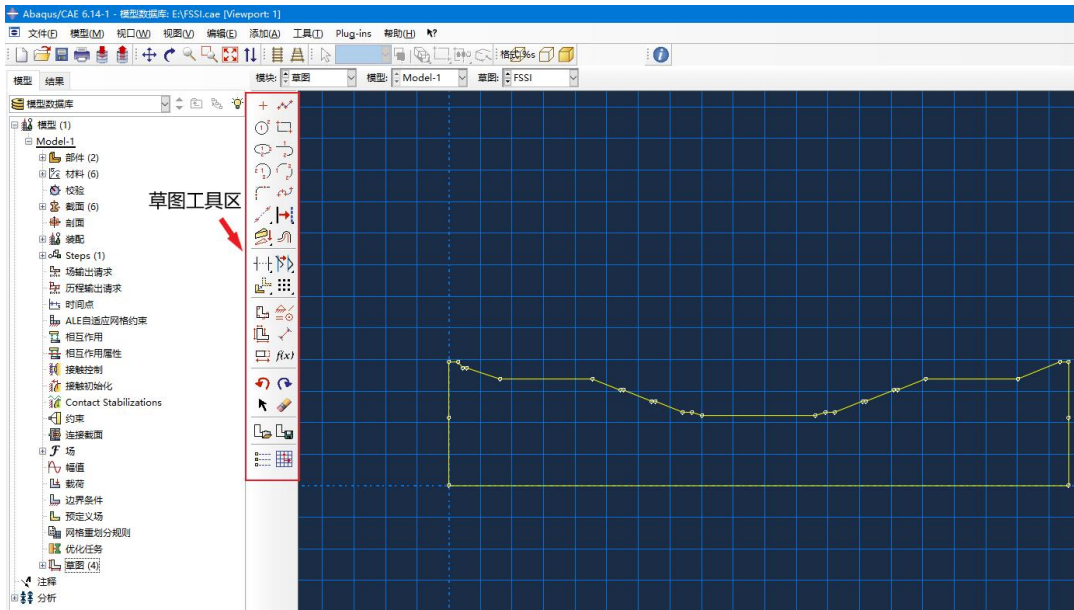


图 12-3 数值模型边界线草图

12.3.2 创建模型

在得到边界线草图后，我们来创建实体模型，在作业区模块中选择部件，并点击创建部件按钮，如图 12-4 所示，我们便进入了编辑部件的界面。

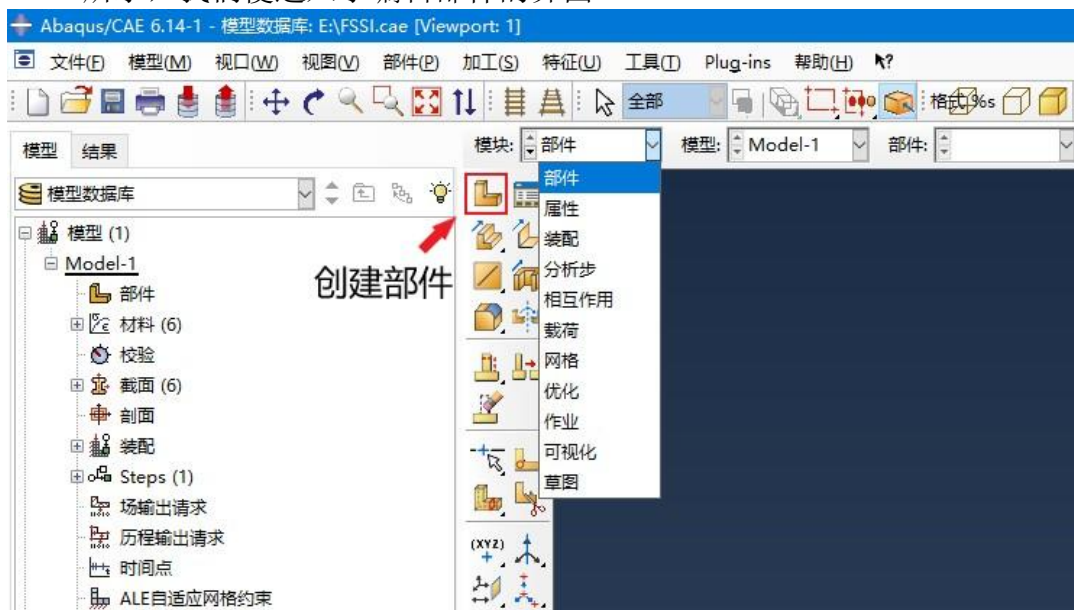


图 12-4 Abaqus 生成模型步骤示意图

点击创建部件的按钮之后，Abaqus 弹出对话框来确定创建模型的类型，我们选择二维平面上的可变形壳模型，如图 12-5 所示。

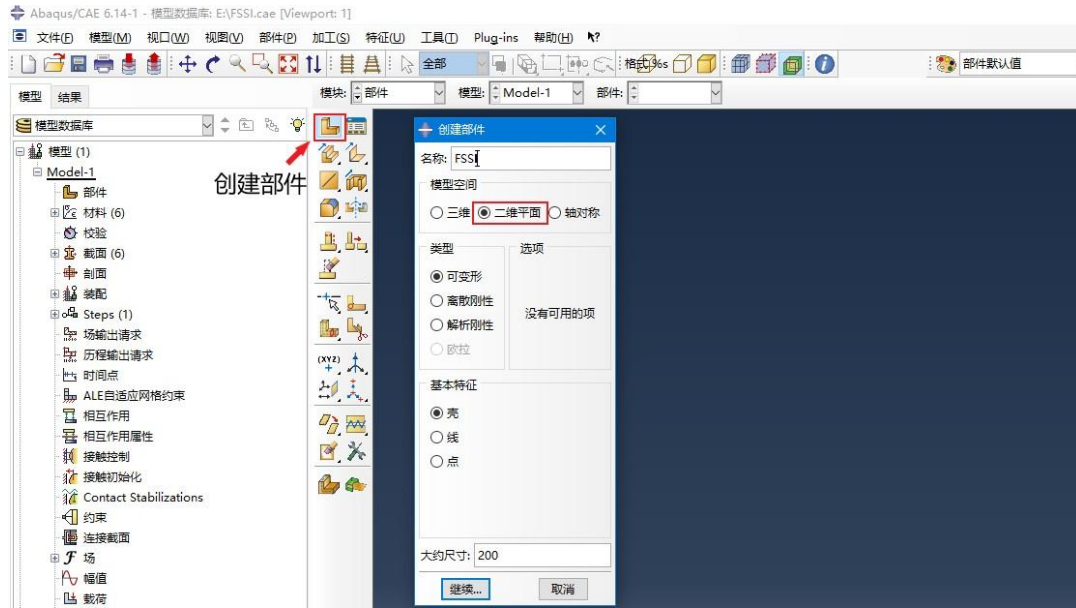


图 12-5 Abaqus 生成模型类型的选择

如图 12-6 所示，我们进入了二维平面上模型的创建窗口，点击打开草图按钮，选择我们已经绘制完成并且保存了的草图，这样我们刚才绘制的边界线草图就被打开了。接下来再点击工作区左下角的完成和确定按钮，我们的二维模型就被创建完成了。

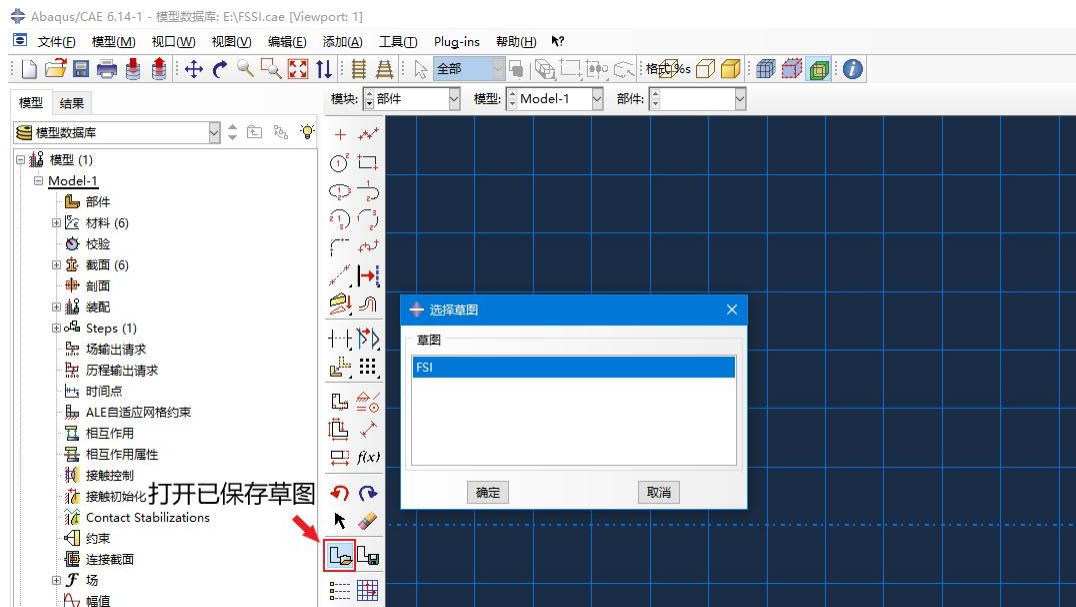


图 12-6 选择已保存的草图

可以看到现在创建完成的模型是一个整体，为了给不同区域设置不同的材料参数，我们就需

要对模型进行进一步的拆分。对于二维模型面的拆分，可以一步到位的方法就是使用草图进行划分，如图 12-7 所示，我们选择通过草图进行拆分。

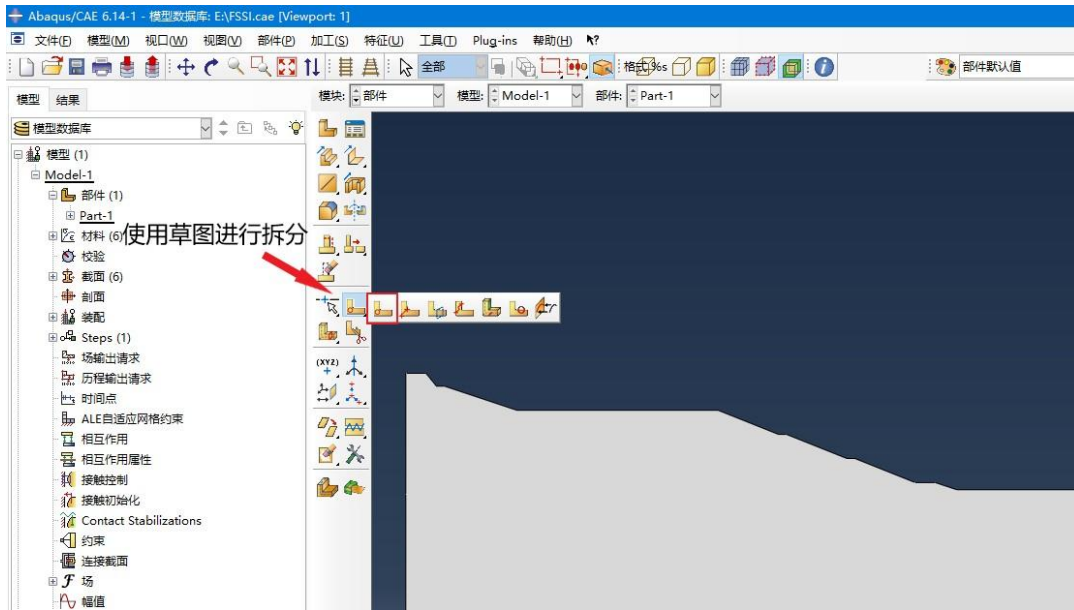


图 12-7 通过草图拆分二维模型

进入草图编辑工作区后，我们就可以通过左侧的草图编辑工具对模型面进行编辑。根据实际地形的数据，将不同材料划分出来，如图 12-8 所示。这里我们在草图面上添加的线都会将模型的面进行切割，点击左下角的完成后，原本整体的模型就会被划分完成。

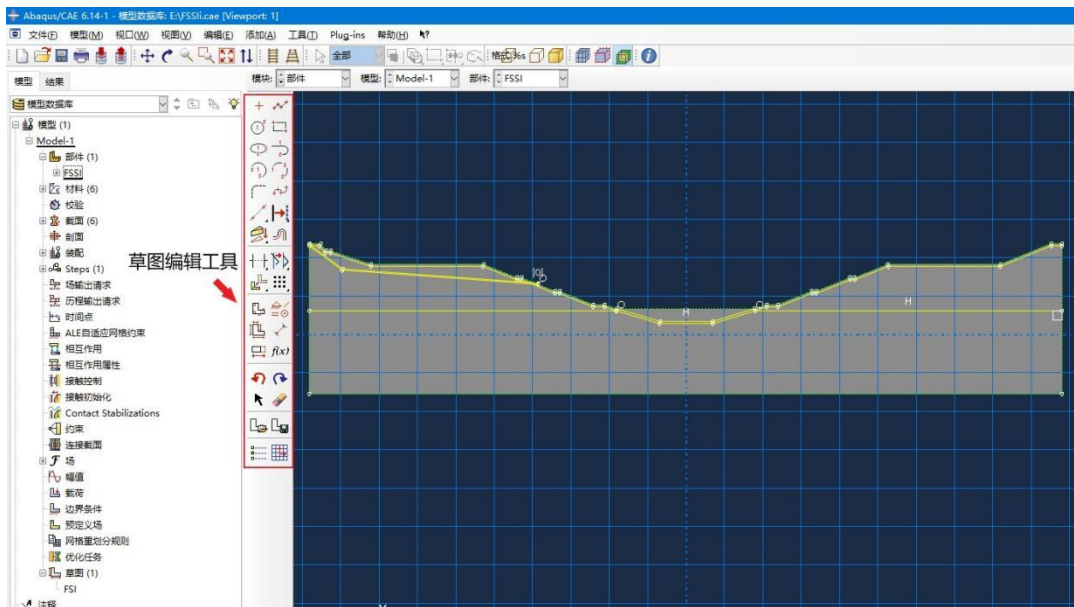


图 12-8 利用草图编辑工具进行拆分

12.3.3 指派材料

Abaqus 给模型指派材料主要三个步骤，首先创建模型中含有的材料，然后创建材料附属的截面，最后将截面指派到模型中的指定区域。我们在作业区模块中选择属性，如图 12-9 所示，左侧按钮从上至下依次是创建材料、创建截面和截面指派。

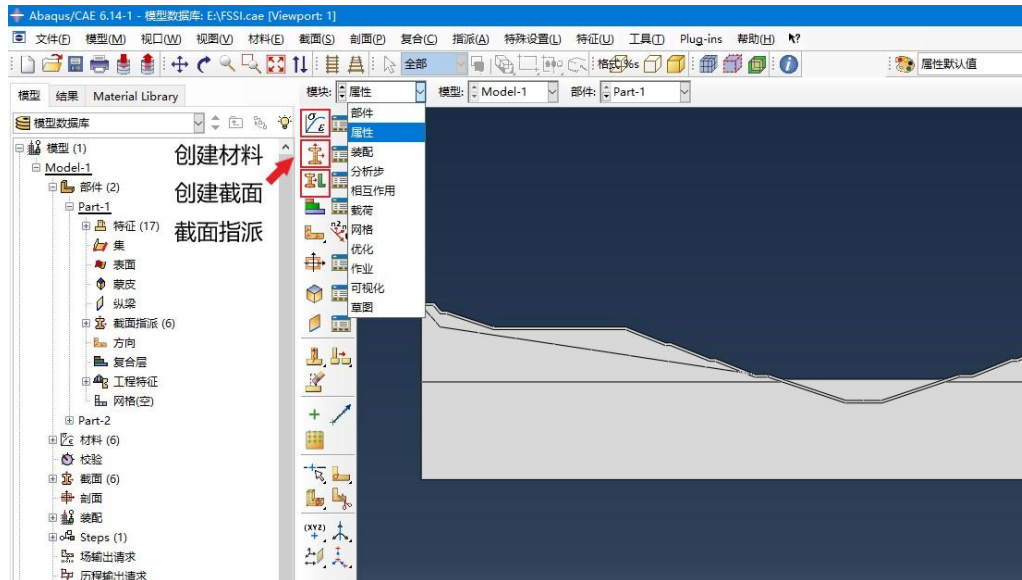


图 12-9 Abaqus 指派模型的材料

点击创建材料，弹出编辑材料的对话框，如图 12-10 所示，我们只需要在这里修改材料的名称，材料的参数到 FSSI 中去设置。这里需要注意的是在 Abaqus 的操作中，所有命名的操作都需要采用英文的命名，不然会导致输出文件的输出错误。

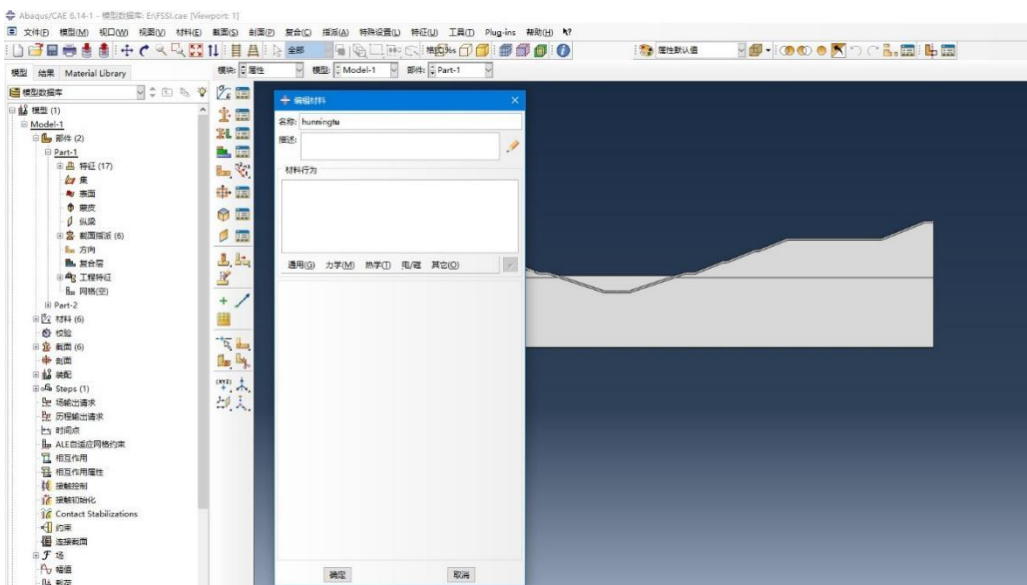


图 12-10 创建并编辑材料

材料创建完成后，点击创建截面的按钮，弹出创建截面的对话框，这里我们将截面命名与材料名称保持一致，选择实体均质的截面类型，如图 12-11 所示。点击继续后，编辑截面的对话框让我们选择截面对应的材料，我们根据名称选择对应的材料，让截面名称与材料名称保持一致，便于输出文件的写出。

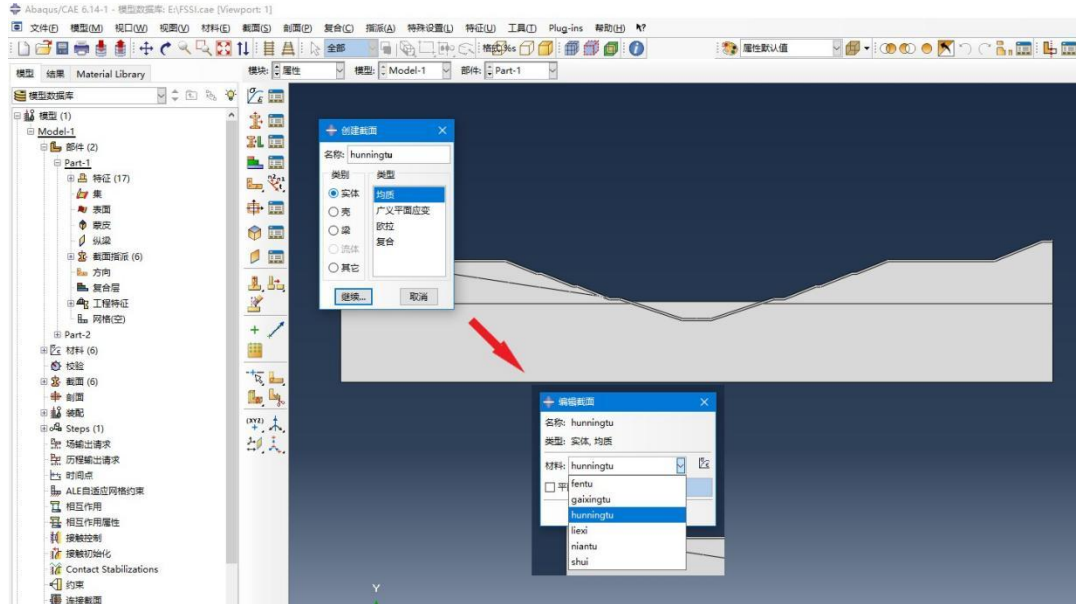


图 12-11 创建并编辑截面

截面与材料一一对应创建完成后，进行截面指派的操作，点击截面指派按钮后，在工作区下面对指派的模型区域进行命名，名称还是与材料名称保持一致。命名之后就可以在模型上选择指派的区域了，这里按住 Shift 可以进行多选，按住 Ctrl 可以取消选择。选择好之后点击完成，弹出对话框选择对应的截面，如图 12-12 所示。

点击确定后，这个区域就完成了材料的指派，完成材料指派的区域会变成绿色。再继续进行其他区域的操作，直到整个模型都变成绿色，这样整个模型就完成了材料的指派。

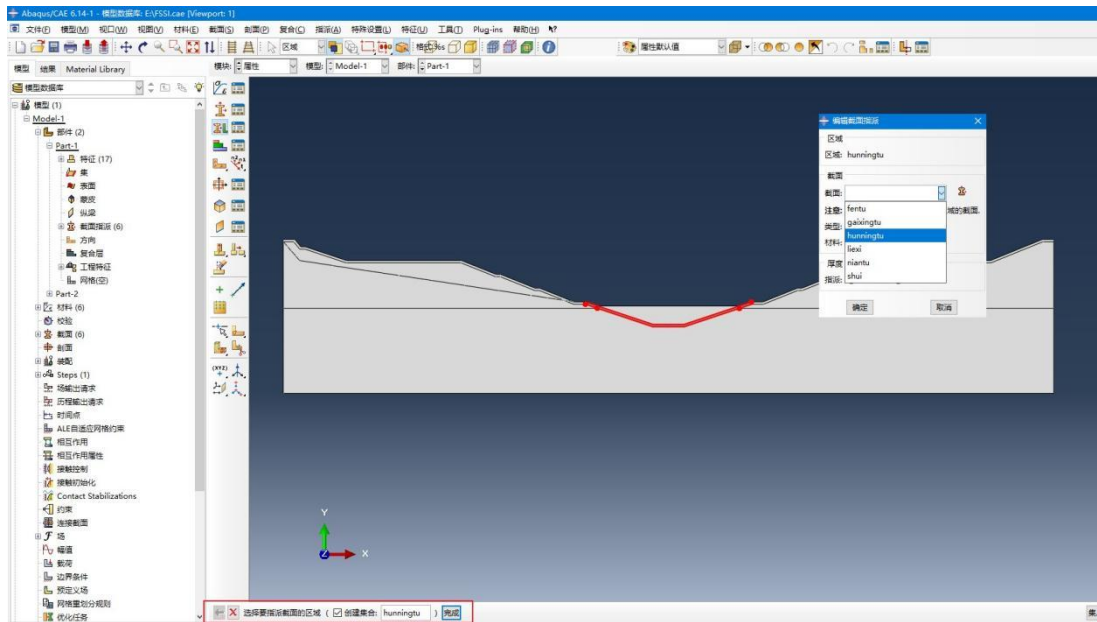


图 12-12 指派截面到模型

在本案例的模型中总共有 6 种材料，包括水、粉质粘土、粘土、改性土、混凝土以及裂隙，6 种材料的分布如图 12-13 所示。

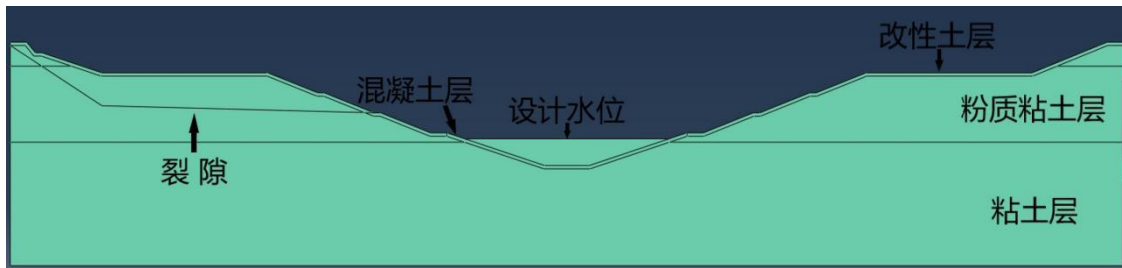


图 12-13 模型材料分布

12.3.4 网格划分

作业区模块选择网格，左侧工具栏有一系列网格划分的工具。Abaqus 网格划分主要分为三个步骤，首先布置种子，其次控制网格属性及类型，最后生成网格。这里需要注意的是，对于一些形状不规则的区域，有可能出现网格生成不成功的现象，这时我们需要通过拆分工具对该区域进行进一步的拆分或者改变该区域的单元类型来解决这类问题，如图12-14所示。

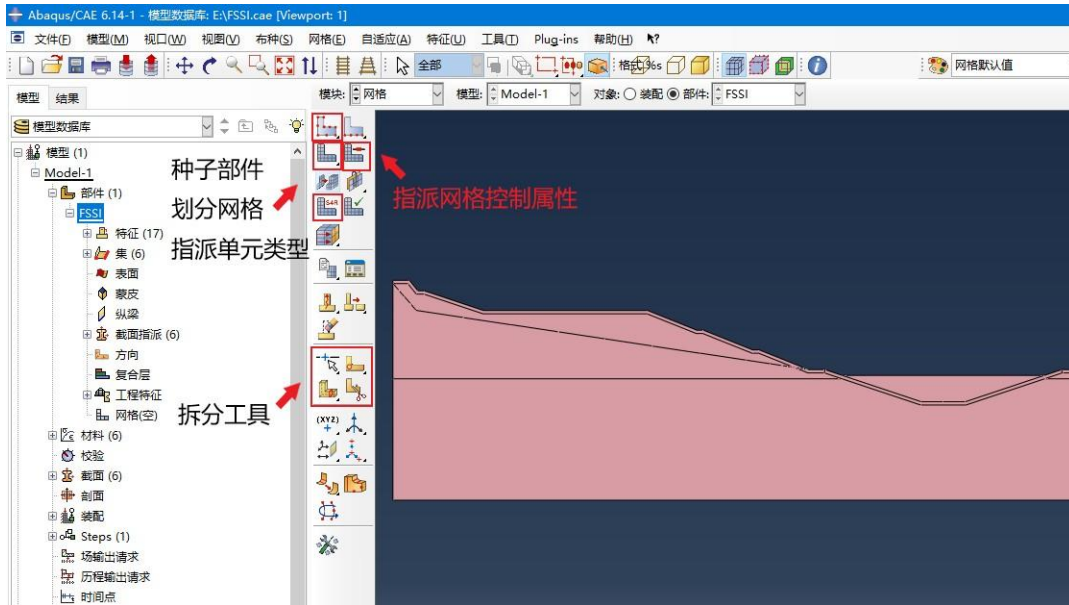


图 12-14 Abaqus 数值模型网格划分

点击种子部件按钮之后，弹出全局种子布置的对话框，如图 12-15 所示，我们可以通过它来控制网格的尺寸。首先输入近似的全局尺寸进行一个整体的控制，然后可以根据需要选择曲率控制以及最小尺寸控制。点击确定之后，我们可以看到种子已经布置到模型的各个边上。如果还需要对指定的边进行种子布置，可以通过右侧工具栏再对指定的边进行单独的种子布置。

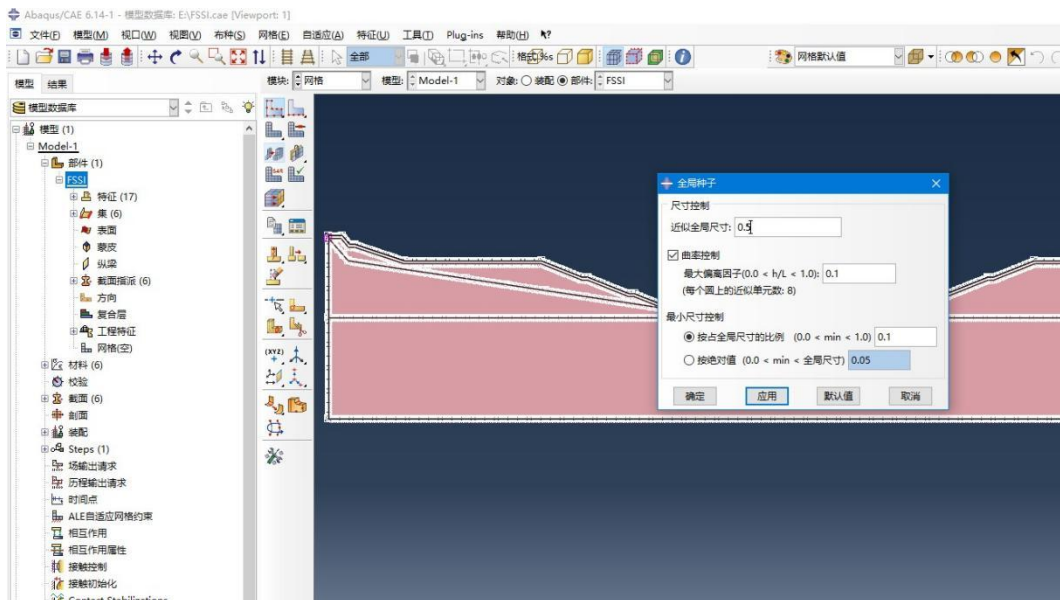


图 12-15 全局种子控制

种子布置完成后，点击网格控制属性按钮，弹出控制属性对话框，如图 12-16 所示，可以对划分网格的单元形状、划分技术以及算法进行设定。控制属性设定完成后，点击确认。

这里值得注意的是，网格控制属性以及单元类型都是可以分区域进行设定的，可以根据模型需要对一个模型的不同区域设定不同的控制属性以及单元类型。如果对整体进行设定，就在点击按钮之后选择整个模型进行后续的设置。

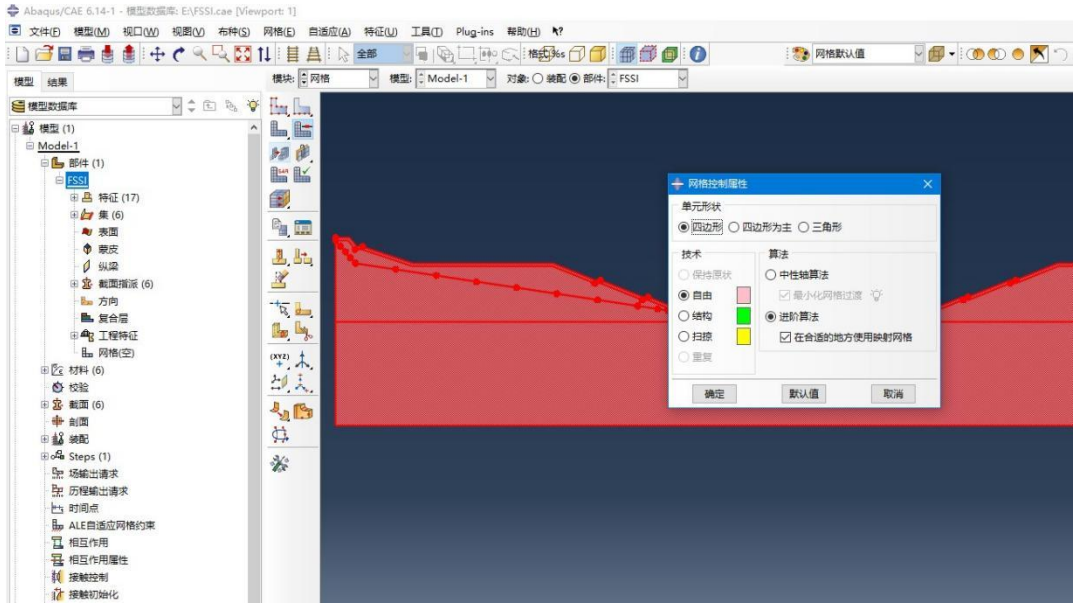


图 12-16 网格属性控制

接下来对单元类型进行指派，点击按钮后，在弹出的对话框中，我们可以对单元的库以及单元的几何阶次等等进行控制。这里为了计算结果更加的准确，我们选择高精度的 CPS8R 单元类型，如图 12-17 所示。

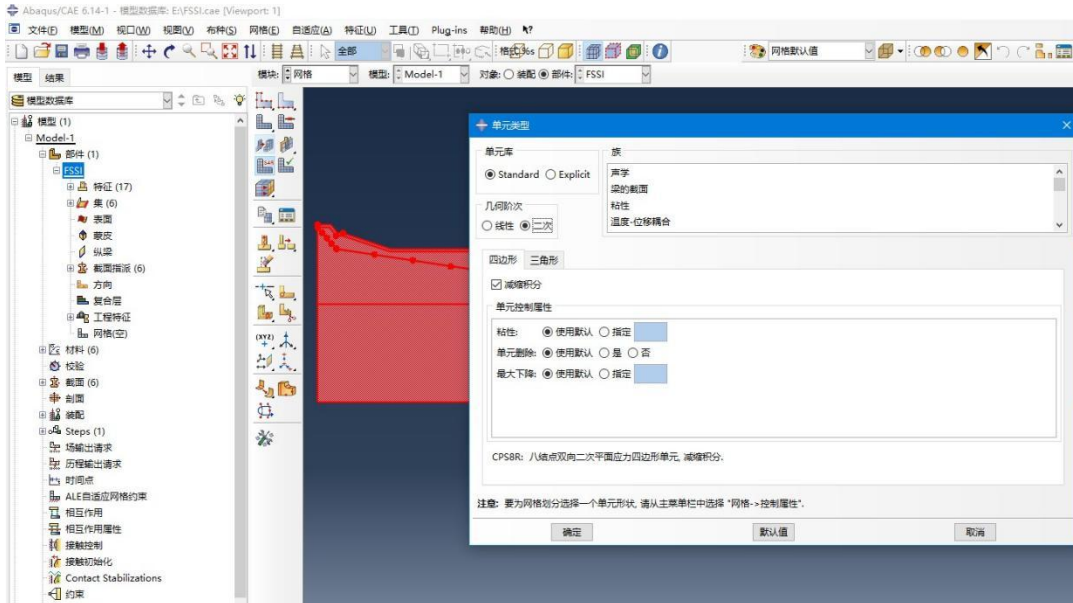


图 12-17 网格单元类型指派

一系列操作完成后，就可以点击网格划分按钮，对模型的整体进行划分网格了。如图 12-18 所示，模型已经按照我们的设定完成了网格的划分。

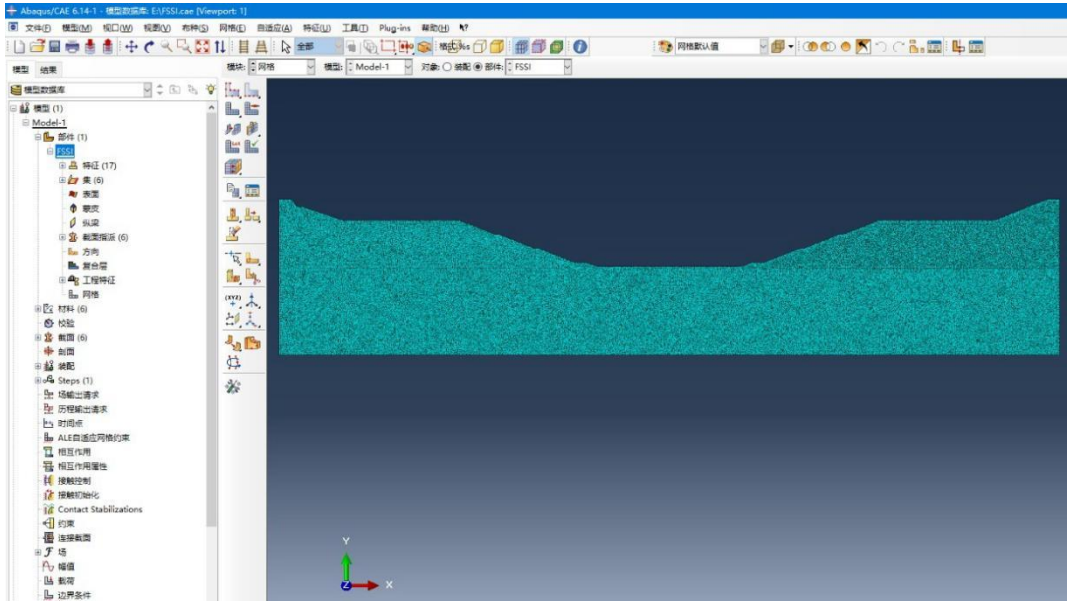


图 12-18 Abaqus 网格划分完成

12.4 生成输出文件

12.4.1 写入 input 文件

之前的网格以及材料操作都是在部件上进行的，我们想要这些信息输出，就需要将部件进行装配。作业区模块选择装配，点击左侧工具栏中的生成实例，如图 12-19 所示，我们选择之前操作的部件，点击确认。

在这个模块中，我们可以对部件进行平移旋转等操作，确保写出文件中的模型信息是我们需要的。

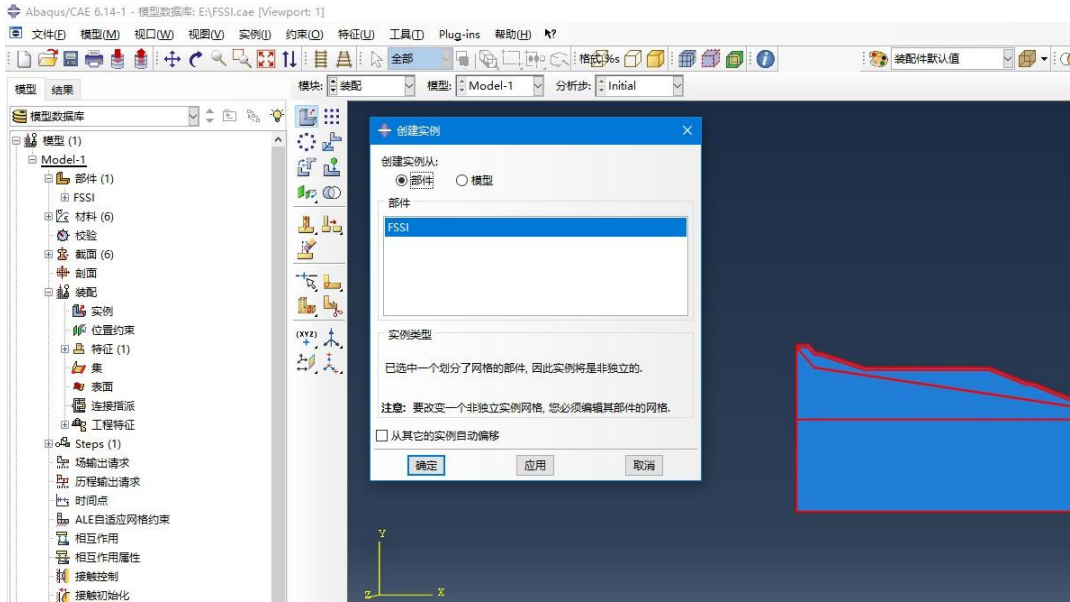


图 12-19 Abaqus 实例装配

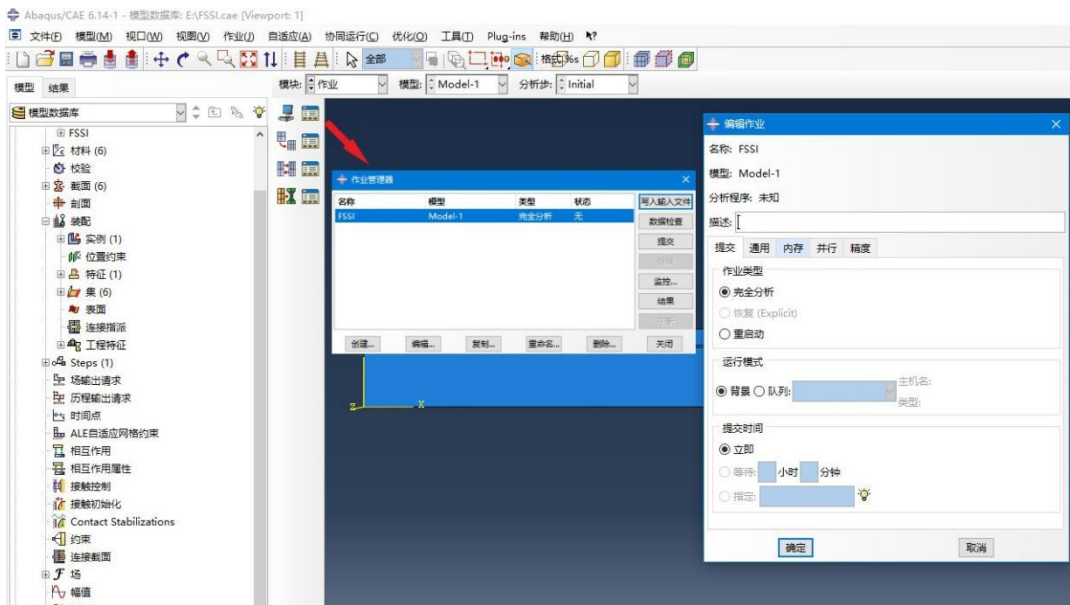


图 12-20 Abaqus 创建输出文件作业

装配完成后，将工作区模块选择到作业，点击创建作业按钮，弹出编辑作业的对话框，我们不需要在这里设定信息，直接点击确认。然后点击作业管理器按钮，在弹出的管理器对话框中，我们可以看到刚创建的作业，如图 12-20 所示，选定它并点击右侧的写入输入文件按钮，这样就将模型的网格材料等信息写入了 input 文件中。

12.4.2 导出背景线草图

我们在 FssiCAS 中进行边界条件的设定时，有背景线将会容易操作。所以我们将 Abaqus 中模型的背景线导出来，依次点击文件—导出一草图，如图 12-21 所示，选择需要的草图，最后点击确认就可以将草图导出了。

这里如果需要对草图再进行编辑的话，可以将作业区模块选择到草图，对草图进行移动添加线等一系列操作后，再进行导出。

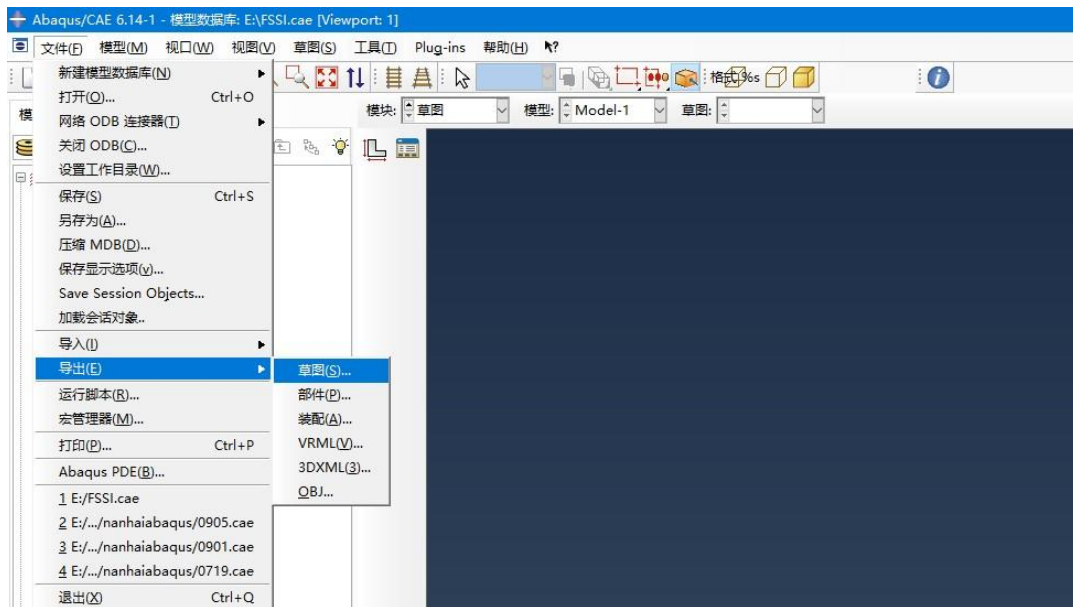


图 12-21 Abaqus 导出背景线草图

12.5 FssiCAS 数值计算

12.5.1 导入网格及背景线

打开 FssiCAS 数值计算软件，我们首先导入 Abaqus 划分的网格文件，也就时导出的 input 文件，找到文件后点击确定，如图 12-22 所示。

导入 input 文件后，在弹出对话框中设置不同材料的单元类型，如图 12-23 所示，这里我们全部选择 Solid Element，右侧的 F.Order 选项与该材料中是否有流体节点有关，如果包含流体节点选择 1，否则设置成 0。

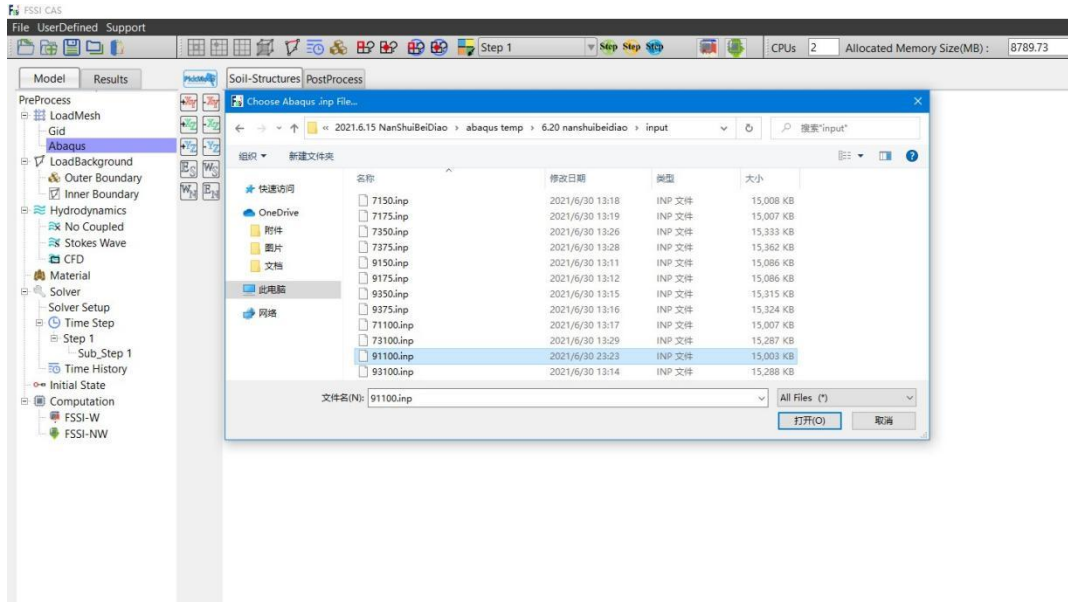


图 12-22 FssiCAS 导入Abaqus 网格文件

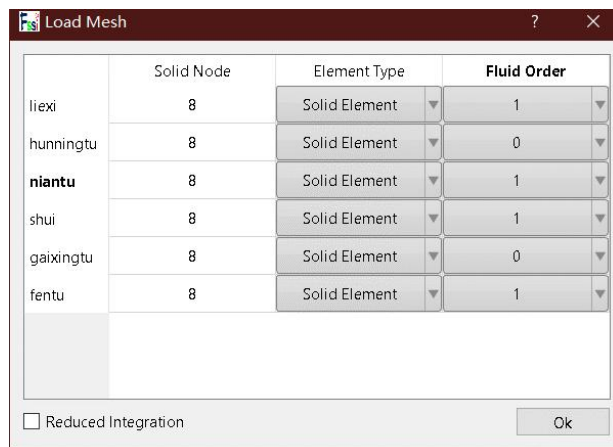


图 12-23 FssiCAS 设置材料单元类型

导入网格文件后，为了方便对数值模型添加边界条件，我们需要将从 Abaqus 导出的背景线导入进来，如图 12-24 所示。

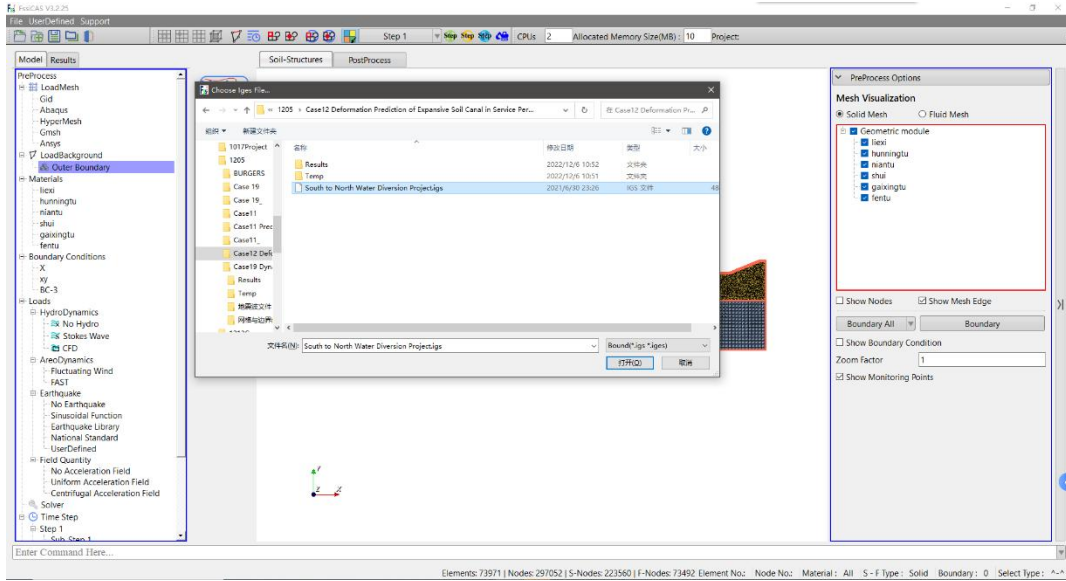


图 12-24 FssiCAS 导入背景线

12.5.2 设置边界条件

点击 FssiCAS 界面的右侧的伸缩操作框后，在右侧的工作区，我们可以通过设置选择性的显示某一部分的网格，如图 12-25 所示。例如可以分别显示带流体节点的材料，或者某一材料单独显示，只需要选择好后，点击 Mesh 按钮后网格就会重新显示了。

这里需要注意的就是，我们选择显示 Soild 和 Fluid 时，可以添加的边界条件是不同的，例如孔压条件只能在显示 Fluid 时添加。

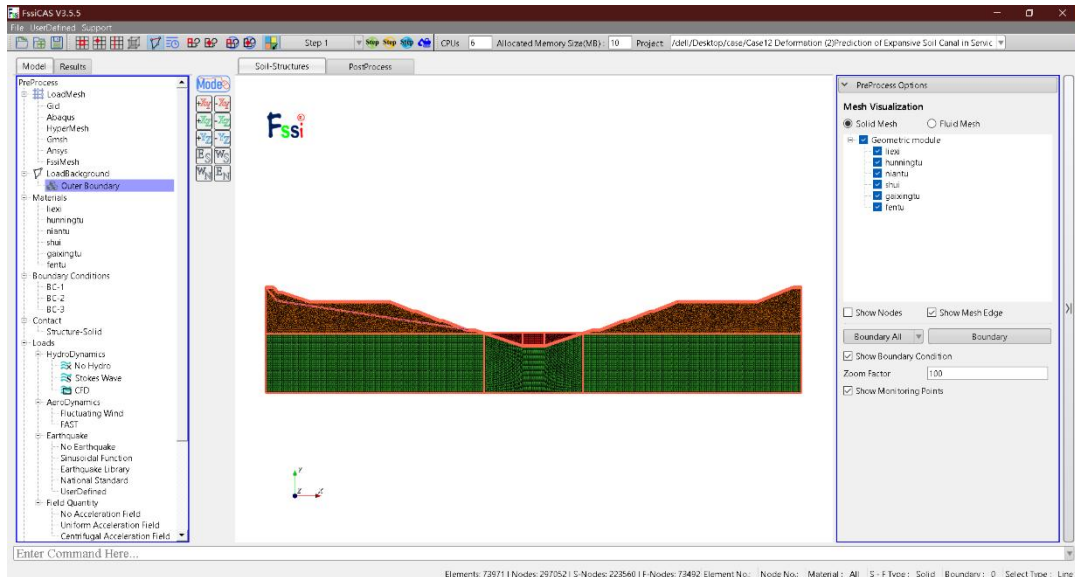


图 12-25 FssiCAS 网格显示设置

我们首先选择显示 Soild 去添加模型的位移边界条件，如图 12-26 所示，首先点击右侧红框中的按钮，代表开始施加边界条件的操作。施加边界条件有三种方法，选择边界线，节点或者单元进行施加，分别对应了左侧的三个按钮。由于我们导入了背景线，所以选择选择边界线来施加边界条件会更加方便。

点击按钮后，按 R 之后，开始框选边界线，再次按 R 后停止选择。选择好需要添加的边界后，点击鼠标右键，在弹出的对话框中依次选择 Displacement-Add-Constant Displacement，就可以在对话框中选择需要固定的位移方向了。

本案例中的模型我们设置的位移边界条件为：左右两侧边界 x 方向固定，底部边界 xy 方向固定。

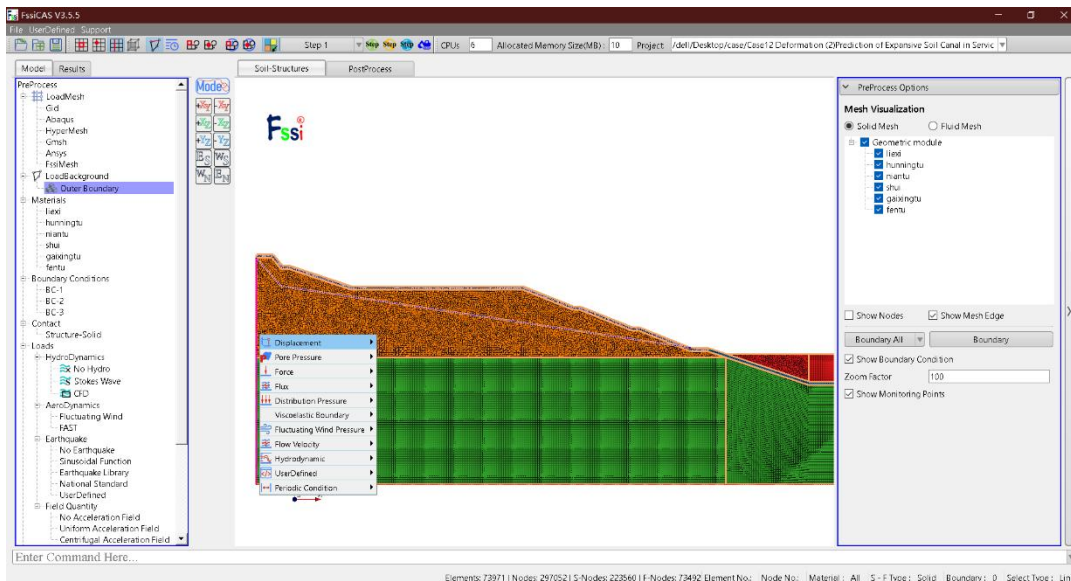


图 12-26 FssiCAS 设置位移边界条件

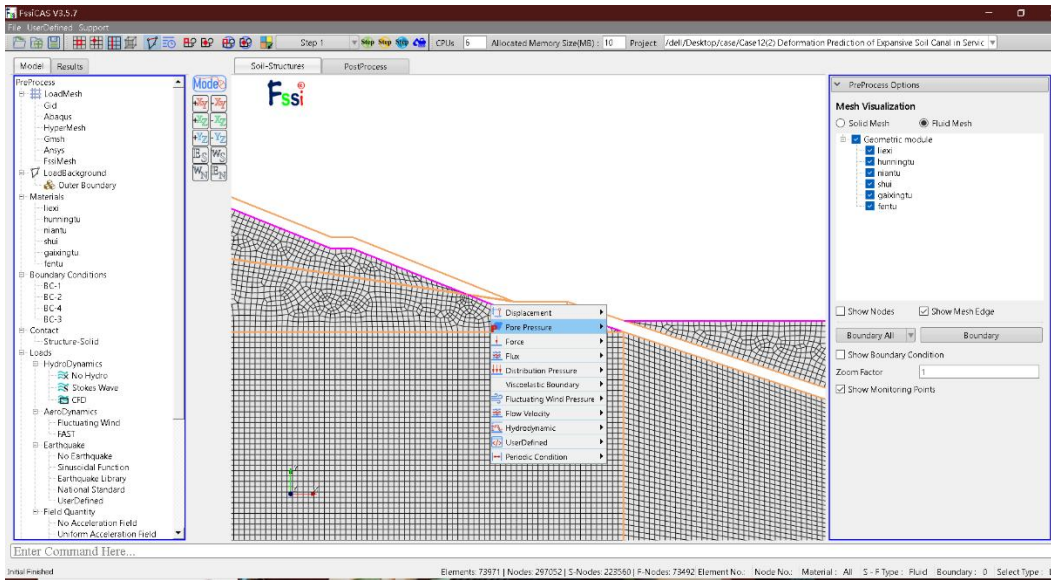


图 12-27 FssiCAS 设置孔压边界条件

接下来施加孔压边界条件，由于实际模型是开挖模型，地下水位在地面下 1 米处，也就是混凝土层和改性土层材料的下边界处施加孔压为 0 的边界条件。

首先选择显示 Fluid，然后与施加位移边界条件同样的操作，选择改性土与混凝土材料的下边界后，点击鼠标右键，依次选择 Pore Pressure-Add-Constant Pressure，就可以在弹出的对话框中设置孔压条件了。

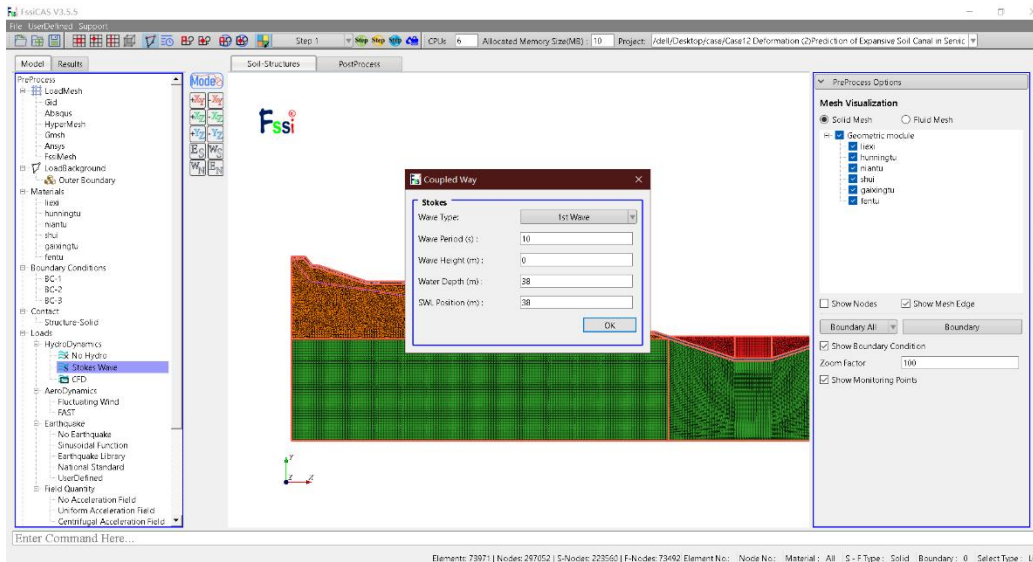


图 12-28 FssiCAS 设置水位

由于模型还存在地上水位，所以我们在Hydrodynamics 中需要设置初始水位。点击Stokes Wave，

如图 12-28 所示，在弹出的对话框中选择 1st Wave，因为是静水位，所以周期可以随便设置，波高设置为 0，水深和水位线设置成地上水位的高度 38 米。

12.5.3 设置材料参数

接下来我们来对各种材料的力学参数进行设定，点击操作界面左侧 Material 中的材料名称，就可以对相应的材料进行参数设置。这些材料都是我们在 Abaqus 中指派到模型上去的，所以在这里的操作只需要对参数进行设置。

在本模型中总共采用两种本构模型：Mohr Coulomb（摩尔库伦）以及 Elastic（弹性）。具体的材料设置参数，如表 12-1 所示。

表 12-1 标准工况下的本构模型材料参数设置

材料	杨氏模量 (Pa)	泊松比	单轴屈服 应力 (Pa)	内摩擦 角	渗流速度 (m/s)	密度 (kg/m ³)	孔隙比
粘土	80e+6	0.38	50e+3	28	1e-5	2650	0.5
粉质粘土	80e+6	0.33	30e+3	30	1e-5	2700	0.5
裂隙	1e+5	0.49	1e+3	5	1e-5	2700	0.5
改性土	200e+6	0.3			1e-15	2750	1e-5
混凝土	20e+9	0.3			1e-15	2500	1e-5

模型中的水设置采用弹性本构模型，参数设置与混凝土相同，但密度为 1000 kg/m³。在第一步的计算中，模型中裂隙的材料参数设置与裂隙所在的粉质粘土地层相同，在第二步中再进行修改。

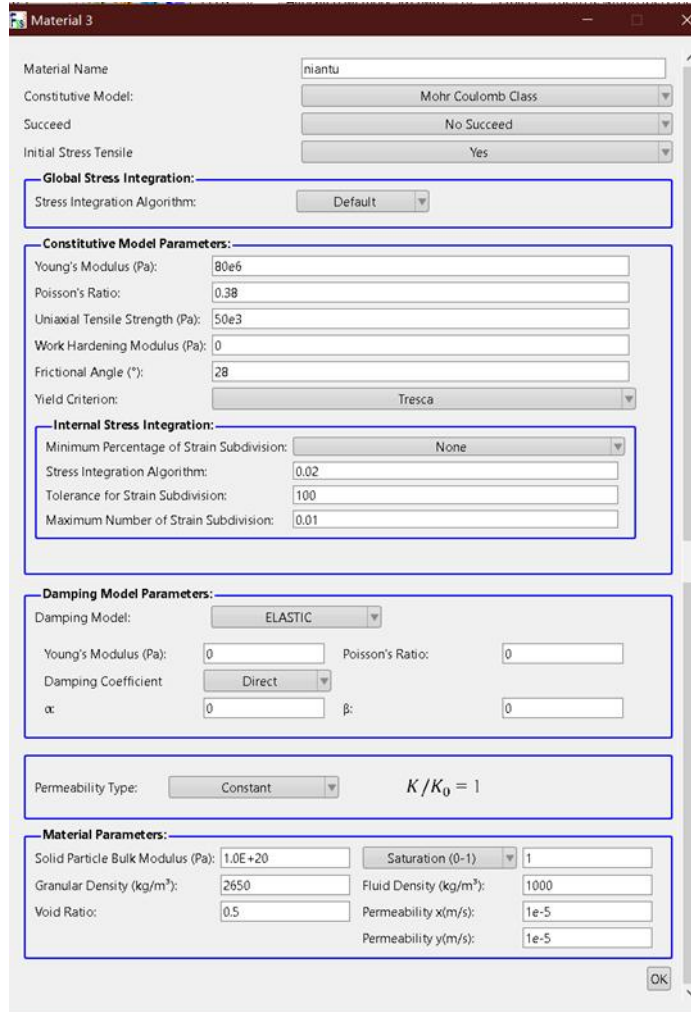


图 12-29 Mohr Coulomb（摩尔库伦）本构模型材料参数设置

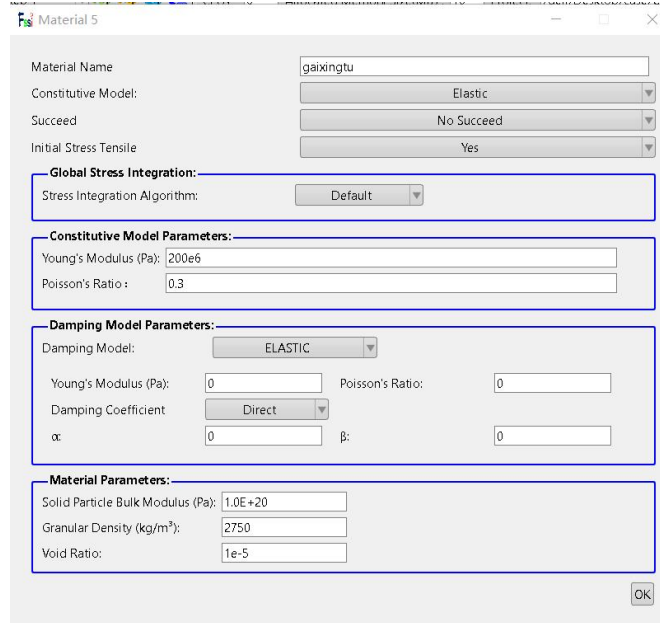


图 12-30 Elastic（弹性）本构模型材料参数设置

12.5.4 设置求解器

材料参数设置完成后，我们开始设置求解器的相关内容，首先是求解器的类型，如图 12-31 所示。其次是时间步长的设置，在这里我们需要设置模拟时长以及步长等数据，如图 12-32 所示。

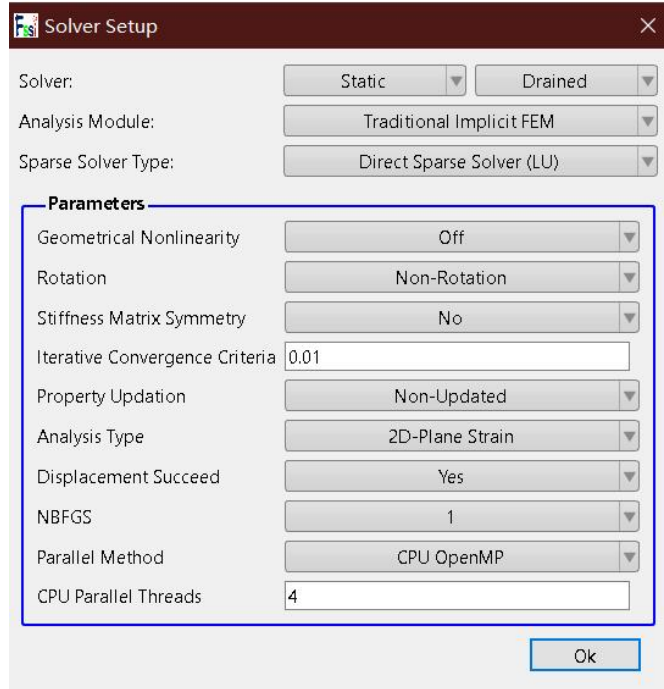


图 12-31 FssiCAS 求解器类型设置

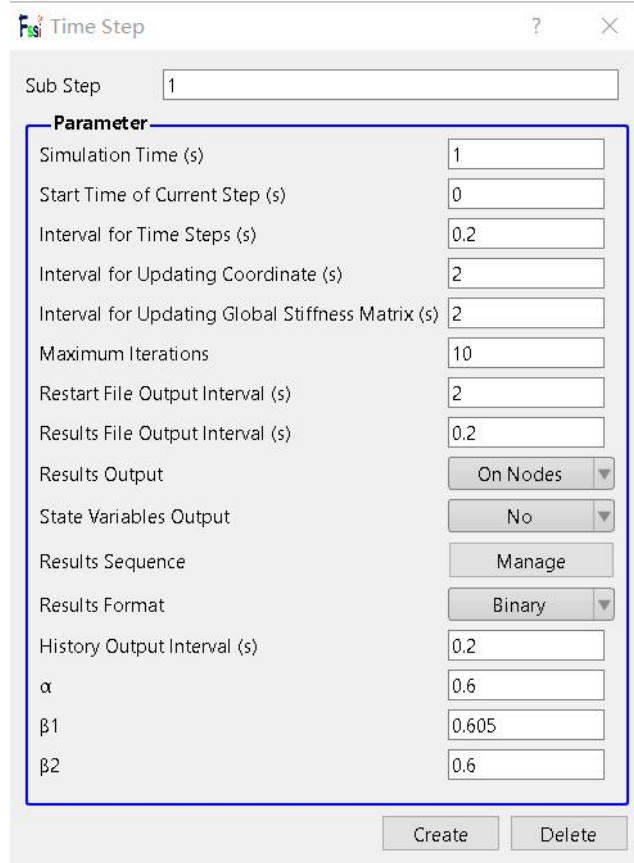


图 12-32 FssiCAS 时间步长设置

最后需要对初始状态进行设置，如图 12-33 所示，本模型没有初始状态，故直接点击 OK，完成初始状态的设置。

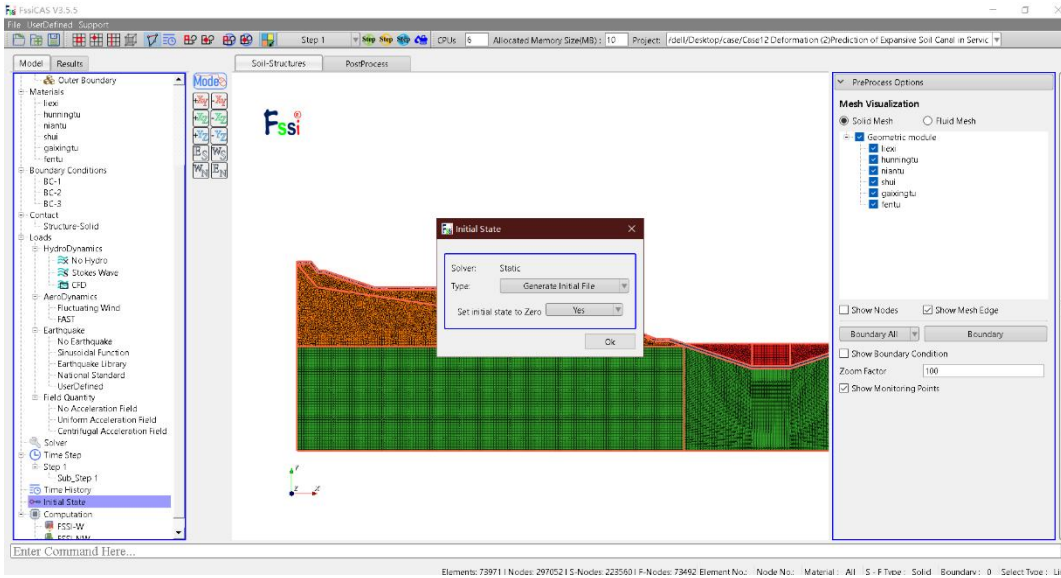


图 12-33 FssiCAS 初始状态设置

12.5.5 设置时间步

本模型存在裂隙材料，我们在计算时希望通过有无裂隙进行对比，从而得出裂隙对于边坡演化的影响。所以在本模型的计算中，我们设置两个时间步，第一个时间步中，裂隙的材料参数与所在地层相同，第二步将裂隙的力学参数大大减弱。

在 FssiCAS 操作界面的上方有三个按钮，分别是时间步的添加、删除和调整，如图 12-34 所示。点击添加时间步后，就会在原本的时间步 Step 1 后面添加一个时间步 Step 2，Step 2 中的边界条件，材料设置以及其他各种设置均会从 Step 1 中复制过来。所以我们在 Step 2 中，只需将裂隙的参数减弱，具体参数如表 12-1 所示。

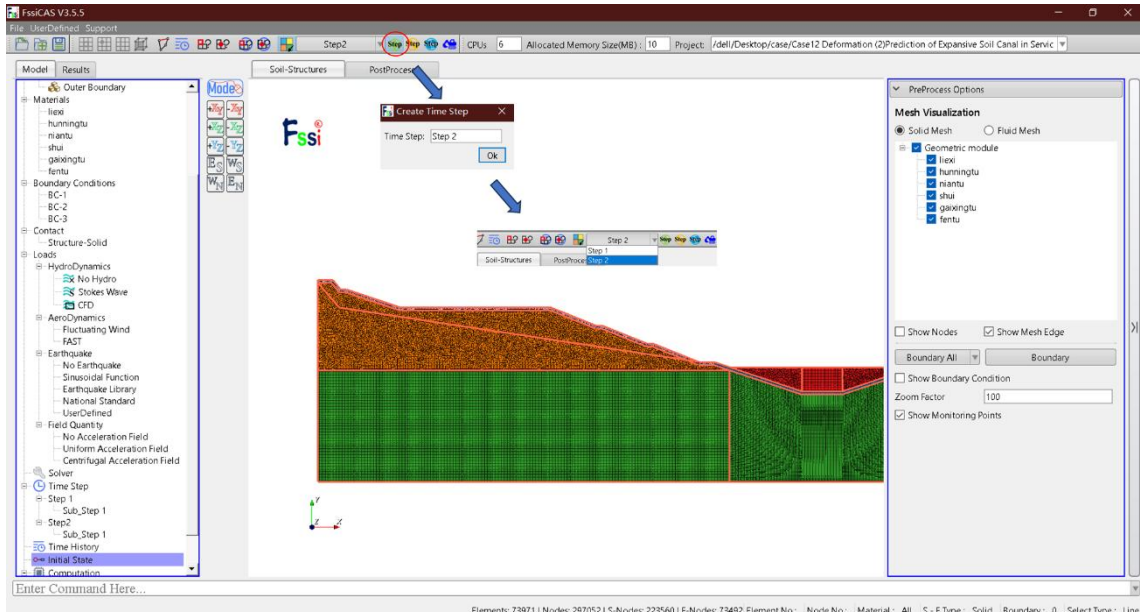


图 12-34 FssiCAS 时间步的操作

12.5.6 开始数值计算

所有选项设置完成后，点击工作区左下方的 **Computation-FSSI-W**，如图 12-35 所示，在弹出的对话框中选择 **All Step** 进行计算，当然也可以选择某一步进行单独计算。点击 **OK** 后，软件会提示将结果文件以及条件设置进行保存，选择一个文件夹进行保存后，计算就可以顺利进行了。

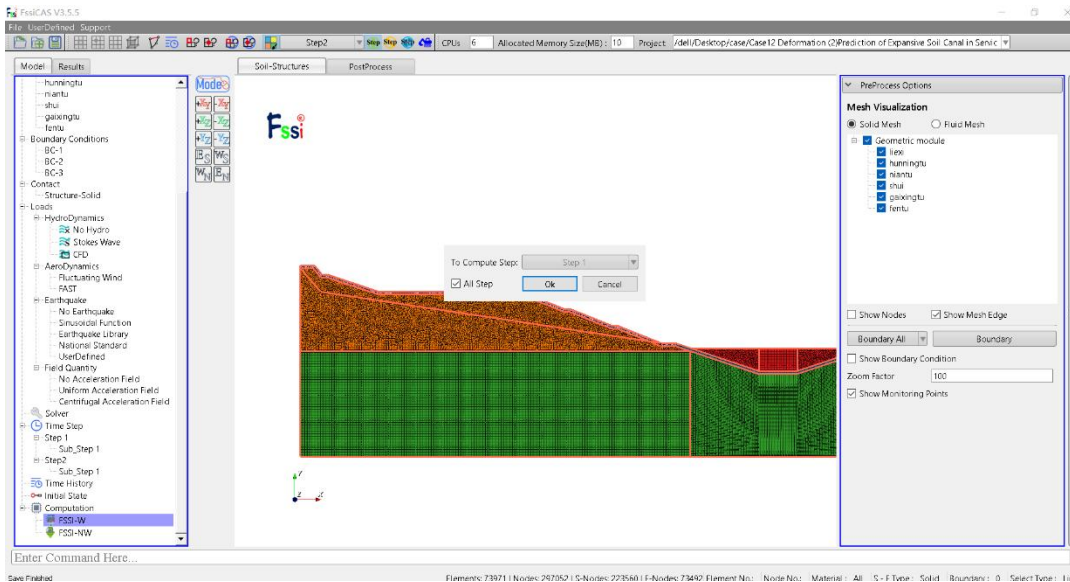


图 12-35 FssiCAS 进行数值计算

在计算过程中，FssiCAS 会弹出对话框来显示计算的进度，当对话框中有图 12-36 红框中的

语言输出时，表示本次计算已经完成。

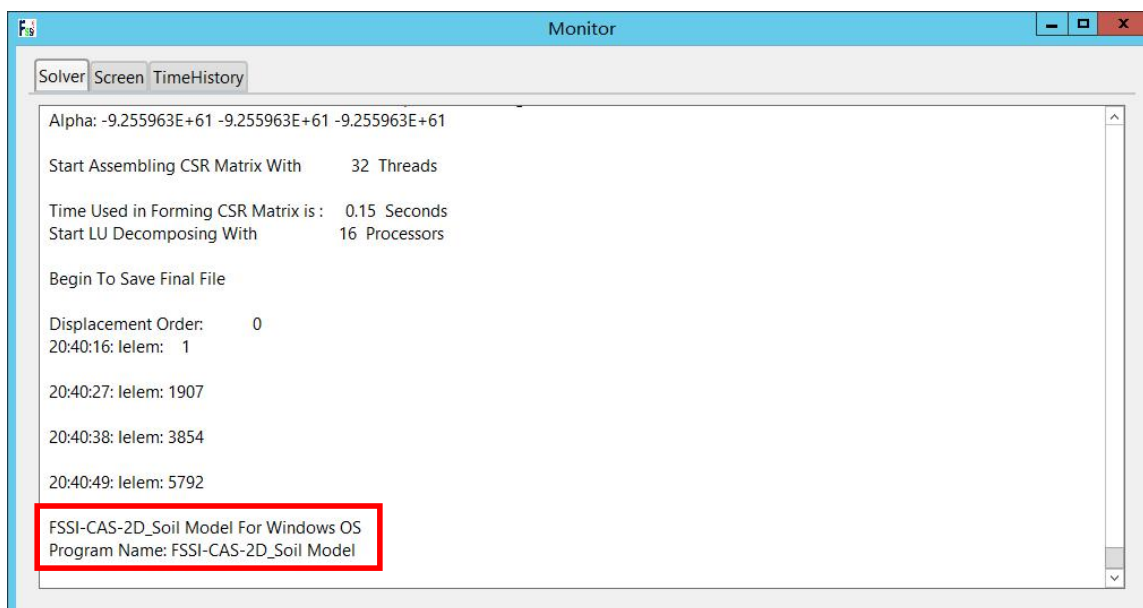


图 12-36 FssiCAS 完成数值计算

12.6 FssiCAS 后处理

在计算完成后，我们需要对计算的结果进行后处理，首先我们将计算的结果导入 FssiCAS 中。在左侧的工具栏中选择 **Results**，就可以进入到后处理的界面。

点击左侧工具栏中的 **Open Results Files** 按钮，如图 12-37 所示，在弹出对话框中的 **Soil Results** 选项框点击 **Load Files** 按钮，并选择我们保存的结果文件夹。这里有两个文件夹，其中 **Multiple** 保存的是 **All Step** 的计算结果，如果只对某一步进行计算，计算结果就保存在 **Static** 文件夹中。

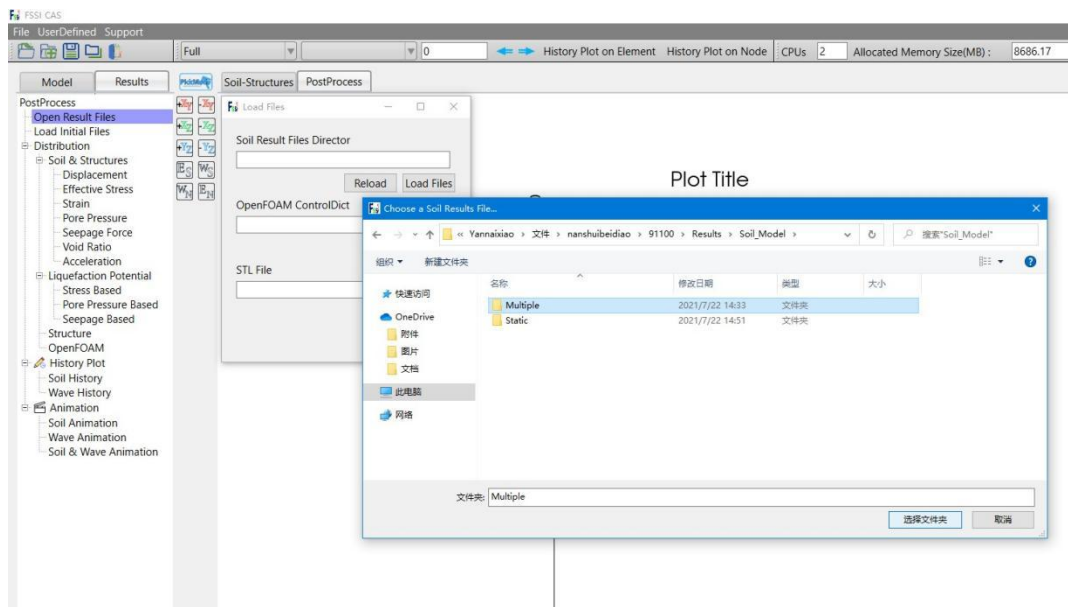


图 12-37 FssiCAS 后处理导入结果文件

导入计算结果后，可以点击左侧的工具栏，选择显示的结果类型，包括位移、孔压、应力等等。选择显示结果类型后，还可以通过上方工具栏，选择显示结果的方向以及时间。计算结果分布图可以右侧由伸缩栏 **Export Results** 按钮导出，如图 12-38 所示。



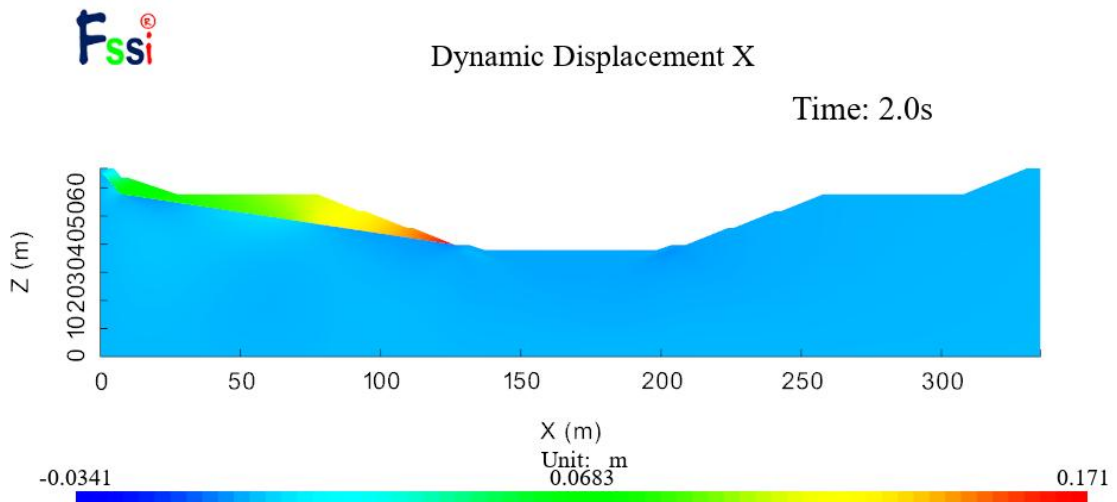
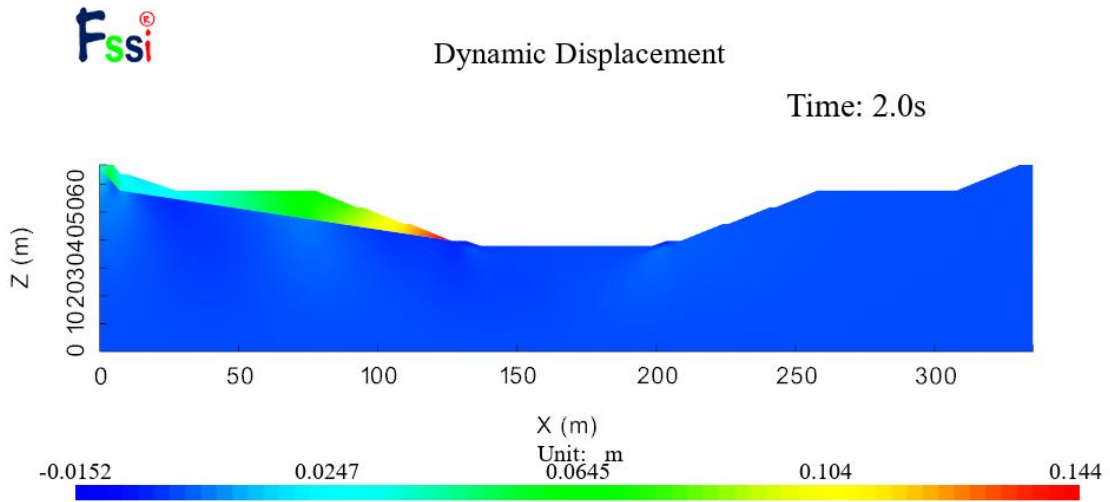
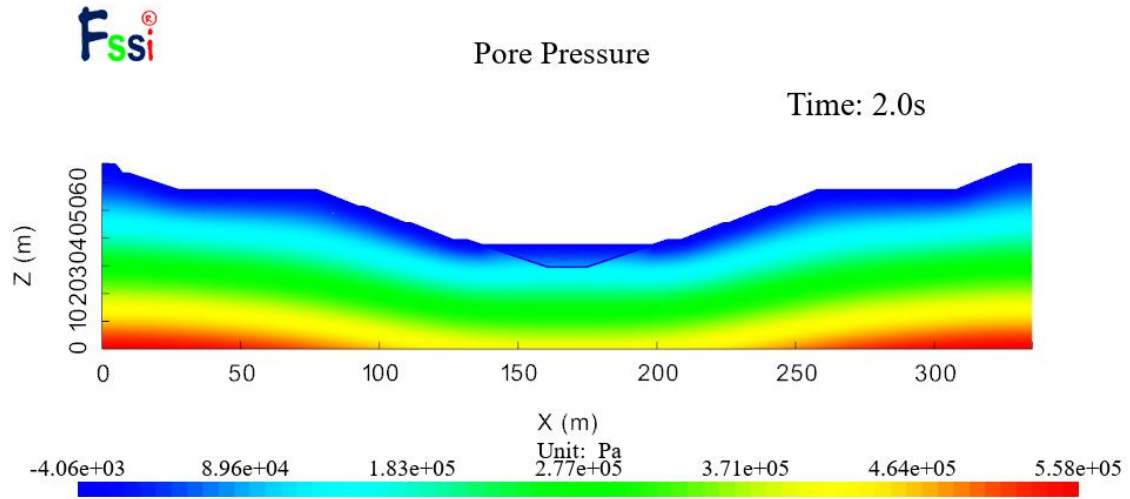
图 12-38 图像输出按钮

Dynamic（动态）状态下查看结果需要在左侧工具栏中点击 **Load Initial File**，在弹出的对话框中选择作为初始状态的结果文件，这里的结果文件是按照时间步保存的，选择好相应的文件点击确认。再将上方工具栏中的 **Full** 改为 **Dynamic**，就可以显示动态的结果了。

Dynamic 状态的结果等于当前时间步的计算结果减去选择作为初始时间步的计算结果；Full 状态下的结果分布就是当前时间步的计算结果。

右侧伸缩工具栏还可以对结果图的标尺、结果最大最小值等进行调整，以便得到更加美观的

结果图，下面是本案例的一部分输出结果图。



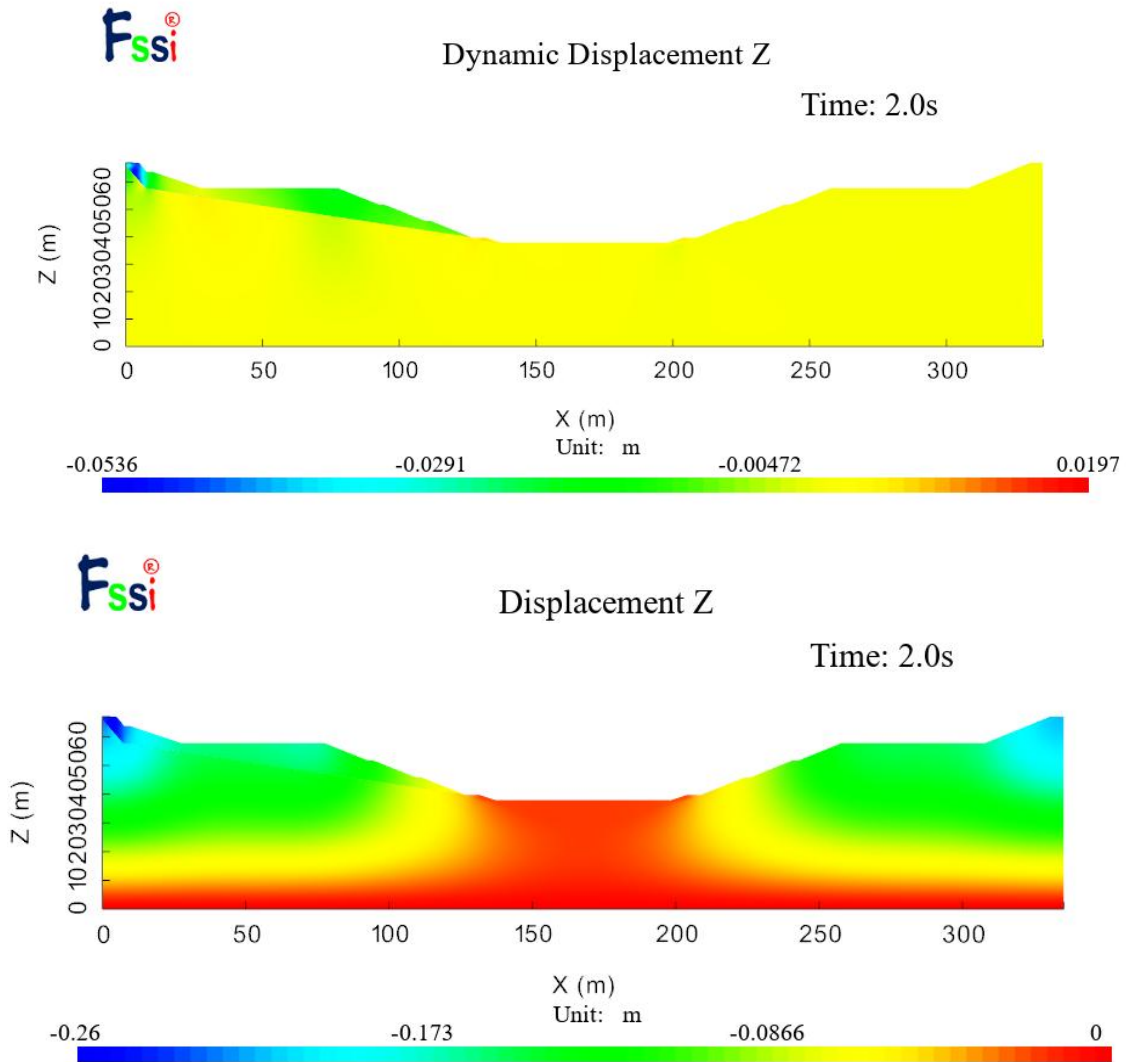


图 12-39 输出结果图

数值计算结果显示，在粉质粘土层设置裂隙后，裂隙的上方土体将发生滑坡现象。在本计算模型相关参数的设定下，裂隙上方土体的整体相对综合位移为 0.2 米左右，主要集中在 x 方向。计算结果可以说明在计算模型所在的膨胀土渠段，由于地质条件及天气因素所产生的土层裂隙，经过长期演化会诱发滑坡灾害，将成为渠道安全输水和高效运行的潜在隐患。

经过对比分析，可以发现本计算模型的计算结果与实地勘查资料高度一致，说明采用的计算软件和数值计算方法有着较高的可信度，可以保证计算结果的准确度。