TUTORIAL
*f*or
FssiCAS©®

An advanced computational software for Geotechnical Engineering, Offshore Geotechnics, Wave-Seabed-Structures Interaction

Version 3.2

Ye Jianhong
BEng, MSc, PhD
Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences

©Copyright of this tutorial is owned by Professor Dr. Ye Jianhong
®Copyright of FssiCAS is possessed by Dr. Ye Jianhong, who is the contributor of this software

Copyright© Statement

目 录

第 1 章 介绍 - 1 -
1.1 控制方程 - 1 -
1.1.1 土体模型控制方程 - 1 -
1.1.2 波浪模型控制方程 - 2 -
1.2 波浪、本构模型和求解器类型 - 3 -
1.3 FssiCAS 中的网格、单元及节点 - 3 -
1.4 FssiCAS 的介绍 - 6 -
1.4.1 开发历史 - 6 -
1.4.2 耦合算法 - 8 -
1.4.3 软件功能 - 9 -
1.5 验证 - 9 -
1.5.1 Hsu 和 Jeng 在 1994 年提出的分析解决方案 - 9 -
1.5.2 行进波和椭圆余弦波的波浪水槽试验（Lu，2005）- 10 -
1.5.3 Cheng and Detournay (1988)解析解验证 - 11 -
1.5.4 驻波反射（Tsai and Lee, 1995） - 12 -
1.5.5 水下防波堤（Mizutani et al., 1998） - 14 -
1.5.6 复合防波堤（Mostafa et al., 1999） - 16 -
1.5.7 离心机水槽试验（Sassa & Sekiguchi , 1999） - 18 -
1.5.8 海底管线水槽实验（Teh et al. , 2003） - 20 -
1.5.9 非线性渗流（Liu et al. , 1999） - 23 -
1.5.10 海底管线波浪动力响应 - 24 -
1.5.11 Nakai and Matsuoka (1986)的试验验证 - 25 -
1.5.12 Terzaghi 提出的一维固结理论的验证 - 27 -
1.6 大型案例应用 - 29 -
1.6.1 大型海洋工程的应用 - 29 -
1.6.2 波浪作用下海床和结构的动力响应与稳定性 - 32 -
1.6.3 地震作用下海床及结构的动力响应与稳定性 - 42 -
第 2 章 用户界面 - 51 -
2.1 前处理界面 - 51 -
2.1.1 菜单栏介绍 - 51 -

2.1.2 工具栏 - 52 -
2.1.3 树状菜单栏 - 59 -
2.1.4 基本操作方式 - 61 -
2.2 后处理界面 - 61 -
2.2.1 树状结果菜单栏 - 62 -
2.2.2 工具栏 2 - 64 -
2.3 工作区 - 65 -
2.4 命令窗口 - 65 -
2.5 伸缩区 - 66 -
第 3 章 网格生成、加载和可视化 - 67 -
3.1 网格生成 - 67 -
3.1.1 从 GID 软件导入网格和背景线 - 67 -
3.1.2 从 Abaqus 软件中导入网格和背景线 - 68 -
3.1.3 从 Hypermesh 软件中导入网格和背景线 - 70 -
3.2 新建项目 - 72 -
3.3 网格加载 - 72 -
3.4 加载背景线 - 73 -
3.5 显示网格和背景线 - 78 -
第 4 章 设置边界条件与开挖 - 80 -
4.1 边界条件 - 80 -
4.2 开挖与建造功能 - 83 -
4.2.1 导入 Iges 文件设置开挖区域 - 84 -
4.2.2 导入 STL 文件设置开挖区域 - 87 -
4.2.3 将一种材料设置为开挖区域 - 87 -
4.2.4 输入参数设置开挖区域 - 88 -
4.2.5 显示开挖区域 - 88 -
第 5 章 设置材料参数和本构模型 - 90 -
5.1 弹性本构模型 - 93 -
5.2 一般弹性本构模型 - 93 -
5.3 考虑拉压不同的本构模型 - 94 -
5.4 莫尔库仑本构模型 - 95 -

5.5 修正剑桥本构模型 - 96 -
5.6 PZIII 本构模型 - 97 -
5.7 Burgers 本构模型 - 98 -
5.8 移动硬化模型本构模型 - 99 -
5.9 Boundary Surface_Dafalias(2004)本构模型 - 100 -
5.10 弹性杆单元 - 102 -
5.11 弹性梁单元 - 102 -
5.12 弹性绳单元 - 104 -
5.13 弹簧单元 - 104 -
5.14 弹性壳单元 - 104 -
5.15 粘弹性单元 - 105 -
5.16 用户自定义本构模型 - 106 -
第 6 章 设置水动力荷载 - 107 -
6.1 不考虑波浪力 - 107 -
6.2 添加 Stokes 解析解波浪力 - 107 -
6.3 CFD - 109 -
第 7 章 求解器类型、时间步、时程和计算 - 110 -
7.1 求解器介绍 - 110 -
7.1.1 求解器设置 - 110 -
7.1.2 地震波 - 112 -
7.1.3 时间步 - 113 -
7.1.4 时程 - 118 -
7.1.5 土体模型前处理界面上的伸缩区界面 - 125 -
7.2 初始状态 - 126 -
7.3 运行计算 - 127 -
第 8 章 后处理 128
8.1 打开不同状态的结果文件 128
8.2 土体和波浪分布图 130
8.3 绘制分布图时的伸缩区界面 132
8.4 时程曲线 134
8.4.1 土体时程结果曲线 134

8.4.2 绘制土体时程图时的伸缩区界面 137
8.5 动画 140
8.5.1 土体动画 140
8.5.2 绘制土体动画时的伸缩区界面 140
8.6 OpenFOAM 143
8.6.1 波浪时程曲线 144
8.6.2 绘制波浪时程图时的伸缩区 145
8.6.3 绘制波浪动画时的伸缩区 147
8.6.4 土体和波浪动画 149
8.6.5 绘制土体和波浪联合动画时的伸缩区 149

第1章 介绍

FssiCAS 是一款用于岩土工程，海洋岩土工程和波浪/地震-结构物-海床地基相互作用的高级计算软件，是用于研究海洋波浪-海床地基-结构物相互作用机制，定量评价波浪/地震侵袭下海床地基、结构物安全稳定性的计算软件。

FssiCAS 采用 RAVANS（Reynolds Average Volume Average Navier Stokes）方程作为波浪的控制方程，采用动态 Biot 方程（Dynamic Biot's Equations）作为海床地基及结构物的控制方程，通过一个耦合算法将两个物理控制方程整合为一个整体。经过 8 个不同的水槽实验，2 个解析解和 1 个离心机实验的验证，证实了 FssiCAS 具有极高的可信度和适应性。FssiCAS 是目前国际上研究波浪-海床-结构物相互作用中能够考虑复杂水动力条件，复杂几何边界、复杂土的本构模型的最为先进的计算模型。

FssiCAS 计算软件可以处理复杂的近海水动力条件，复杂的模型边界条件，用户还可以自由选择使用各种不同的土的本构模型，如莫尔-库仑模型，D-P 模型，修正剑桥模型，Pastor-Zienkcisz III 模型等，能够较准确地描述密实和欠密实海床土的动态力学行为，所以 FssiCAS 的成功开发可以为波浪-海床-结构物相互作用研究提供可信度高的基础分析工具。目前该模型已具备在工程实践中予以应用的条件，可以为我国近海结构物（防波堤、海底管线、采油平台、近海风机等）的设计、后期维护、以及风浪、地震稳定性评价提供技术支持。

1.1 控制方程

Ye J.H.所开发的耦合模型 FssiCAS 包括两个部分：波浪模型和土体-结构模型。波浪模型主要是用于计算粘性液体中波浪的产生与传播。土体-结构模型主要是用于计算出海床地基以及结构物对于波浪的动态响应，包括孔隙压力、土的位移和有效压力。采取耦合算法将两个模型整合起来。该耦合模型不同于以前的泊松方程、拉普拉斯方程和准静态固结方程，该耦合模型将 VARANS (Volume-Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes)方程和动态 Biot 方程（Dynamic Biot's Equations）用于控制波的运动、孔隙海床和结构物中的渗流和动态力学响应。在波浪模型中孔隙介质内外的流体域是耦合的，在整个计算域内压力和流速是连续的，特别是在海床、结构物和海水的交界面上。动态 Biot 方程中土和孔隙水的加速度也考虑在内。

1.1.1 土体模型控制方程

FssiCAS 采用动态 Biot 方程（Dynamic Biot's Equations）描述孔隙介质在地震、波浪等动态荷载作用下的动态响应。动态 Biot 方程，又叫"$u-p$"方程。在动态 Biot 方程中考虑了孔隙水和土的加速度。

$$\frac{\partial \sigma_x'}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}=-\frac{\partial p_s}{\partial x}+\rho\frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} \tag{1-1}$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_z'}{\partial z}+\rho g=-\frac{\partial p_s}{\partial z}+\rho\frac{\partial^2 w_s}{\partial t^2} \tag{1-2}$$

$$k\nabla^2 p_s-\gamma_w n\beta\frac{\partial p_s}{\partial t}+k\rho_f\frac{\partial^2 \varepsilon_v}{\partial t^2}=\gamma_w\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \tag{1-3}$$

公式中u_s和w_s分别是土在横向和纵向的位移；n 是土的孔隙率；σ_x'和σ_z'分别是横向和纵向的有效应力；τ_{xz}是剪应力；p_s是孔隙水压力；$\rho=\rho_f n+\rho_s(1-n)$ 是孔隙海床的平均密度；ρ_f是流体密度；

ρ_s是固体密度；k 是达西渗透系数；g 是重力加速度；γ_w是水的重度；ε_v是体应变。在公式（1-3）中孔隙流体的压缩系数β和体应变ε_v按照如下公式定义。

$$\beta = \frac{1}{K_f} + \frac{1-S_r}{p_{wo}}, \qquad \varepsilon_v = \frac{\partial u_s}{\partial x} + \frac{\partial w_s}{\partial x} + \frac{\partial w_s}{\partial z} \tag{1-4}$$

S_r代表海床的饱和度，p_{wo}代表准静态压力，K_f代表孔隙水的体积模量。通常为：

$$K_f = 2.24 \times 10^6 \ \text{kPa} \tag{1-5}$$

采用有限元方法求解上述控制方程(1-1)到(1-3)。离散控制方程是：

$$M\ddot{u} + Ku - Qp = f^{(1)} \tag{1-6}$$

$$G\ddot{u} + Q^T\dot{u} + S\dot{p} + Hp = f^{(2)} \tag{1-7}$$

求解上述离散方程时，采用第 j 阶方程的 p 阶格式广义 Newmark 进行时间积分。M，K，Q，G，S，H，$f^{(1)}$，$f^{(2)}$为系数矩阵。系数矩阵 M，K，Q，G，S，H，$f^{(1)}$，$f^{(2)}$的定义和求解 Biot 方程数值方法的详细信息可以见 Ye (2012)；Ye et al. (2013b); Zienkiewicz et al. (1999)。

1.1.2 波浪模型控制方程

孔隙介质内部和外部的流场由 RAVANS（Reynolds Average Volume Average Navier Stokes）方程控制。质量守恒方程和动量守恒方程可表示为：

$$\frac{\partial\langle\bar{u}_{fi}\rangle}{\partial X_i} = 0 \tag{1-8}$$

$$\frac{\partial\langle\bar{u}_{fi}\rangle}{\partial t} + \frac{\langle\bar{u}_{fi}\rangle}{n(1+c_A)}\frac{\partial\langle\bar{u}_{fi}\rangle}{\partial X_j} = \frac{1}{1+c_A}\left[-\frac{n}{\rho_t}\frac{\partial\langle\bar{p}\rangle^f}{\partial X_i} - \frac{\partial\langle\overline{u_{fi}'u_{fj}'}\rangle}{\partial X_i} + \frac{1}{\rho_t}\frac{\partial\langle\bar{\tau}_{ij}\rangle}{\partial X_j} + ng_i\right] - \frac{\langle\bar{u}_i\rangle}{1+c_A}\left[\frac{\alpha'(1-n)^2}{n^2 d_{50}^2} + \frac{\beta(1-n)}{n^2 d_{50}^2}\sqrt{\langle\bar{u}_{f1}\rangle^2 + \langle\bar{u}_{f2}\rangle^2}\right] \tag{1-9}$$

式中：$\bar{u}_{fi}$——流速；

x_i——笛卡尔坐标；

t——时间;

ρ_f——水的密度；

p——压力；

τ_{ij}——平均流速流体的粘性应力张量；

g_i——重力加速度；

n——孔隙材料的孔隙率；

d_{50}——孔隙材料的平均粒径；

c_A——附加质量修正系数，$c_A = 0.34(1-n)/n$；

α'、β——分别为与线性和非线性拖曳力相关的经验系数,分别为 200 和 1.1；

$<>$、$<>^f$——分别代表达西体积平均算子和内在平均算子，用以下(1-10)式计算：

$$\langle a\rangle = \frac{1}{v}\int_{v_f} a dv \quad , \quad \langle a\rangle^f = \frac{1}{v_f}\int_{v_f} a dv \tag{1-10}$$

式中：V——总平均体积；V_f——介质中被水占据的体积，即孔隙体积。达西体积平均算子和内在平均算子的关系为$\langle a\rangle = n\langle a\rangle^f$。

1.2 波浪、本构模型和求解器类型

FssiCAS 软件中有十二种本构模型以及三种求解器类型。求解器类型有 Static（与时间无关的静态）、Consolidation（土的固结分析，与时间一阶导数相关）、Dynamic（动态分析，与时间二阶导数相关）。本构模型如 Table 1-1 所示。

Table 1-1 土体本构模型

名称		含义
Soil Constitutive Models 本构模型	Elastic	弹性本构模型
	General Elastic	一般弹性本构模型(可考虑模型与围压相关)
	Bi-Modulus Elastic	考虑拉压不同的本构模型
	Mohr Coulomb	莫尔库伦本构模型
	Modified Cambridge Soil	修正剑桥本构模型
	Pastor Zienkiewicz Mark III	PZIII 本构模型
	Burgers	Burgers 蠕变模型
	Cyclic Mobility_Zhang	移动硬化模型
	Elastic_Truss	弹性桁架单元
	Elastic_Beam	弹性梁单元
	Elastic_Cable	弹性绳单元
	Elastic_Spring	弹性弹簧单元
	Elastic_Shell	弹性壳单元
	Elastic_Viscoelastic	粘弹性单元
	Userdefined_SoilModel1	用户自定义本构（最多可定义 5 种）
	Userdefined_SoilModel2	
	Userdefined_SoilModel3	
	Userdefined_SoilModel4	
	Userdefined_SoilModel5	

1.3 FssiCAS 中的网格、单元及节点

FssiCAS 可以从 GID、Abaqus、HyperMesh 等专业网格剖分软件中导入已经划分好的网格文件，也可以导入由 GID、SolidWorks 等专业网格划分软件导出的.IGES 或.STL 格式的文件。

在 FssiCAS 软件中有五种结构单元类型和对应四种节点类型，列于 Table1-2 中。一般认为结构单元不考虑流体节点。单元类型分别为桁架、梁、弹簧、绳索和壳单元，其中壳单元仅适用于三维案例。根据不同的单元阶数又划分为一阶单元、二阶单元，其中壳单元只有一阶形式。在桁架、梁、弹簧、绳索单元中，节点分别有 2 节点、3 节点；壳单元有 3 节点和 4 节点两种形式。

在 FssiCAS 软件中有三种实体单元类型和对应五种节点类型，列于 Table1-3 中。单元类型分别为三角形单元和四边形单元。根据不同的单元阶数又划分为一阶单元、二阶单元和三阶单元。在二维单元中，三角形单元的节点分别有 3 节点、6 节点；四边形单元的节点有 4 节点、8 节点、9 节点。在三维单元中，四面体单元的节点分别有 4 节点、10 节点；六面体单元的节点有 8 节点、20 节点、27 节点。在 FssiCAS 软件中一个节点处的固体节点与流体节点是合在一起的，同坐标但不同编号，即它们的坐标是同一个，只是用两套编号编排它们，如图 1-1 所示。

当然，流体单元也可以不存在，只有固体节点。而且流体节点的阶次可以与固体节点的阶次不同，比如 8-4 单元或者 4-8 单元。

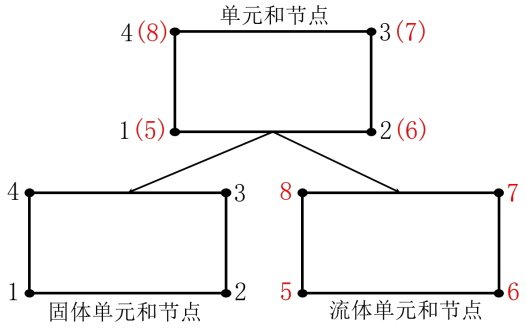
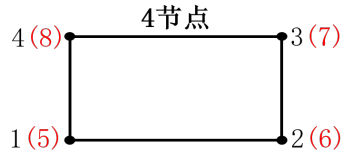
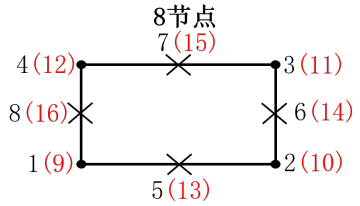
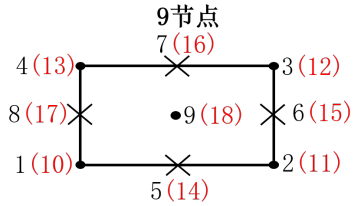
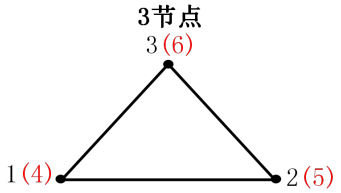
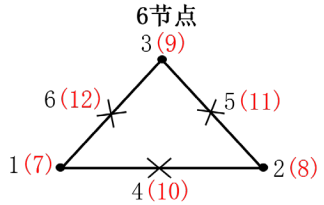


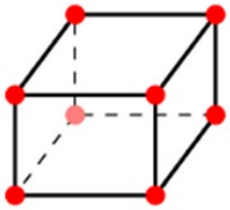
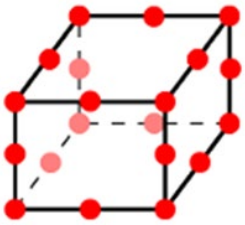
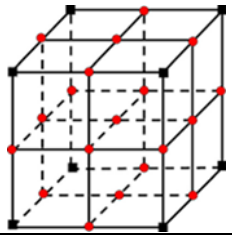
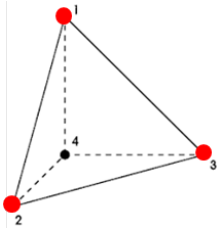
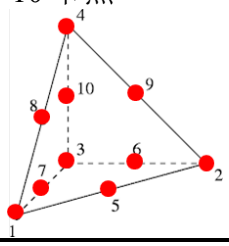
图 1-1 一个单元上的固体节点与流体节点

Table 1-2 结构单元类型

结构单元类型	桁架、梁、弹簧、绳索单元	2 节点 1 2	3 节点 1 2 3
	壳单元	3节点 3 1 2	4节点 4 3 1 2

Table 1-3 实体单元阶数与节点类型

	二维单元阶数		
	一阶单元	二阶单元	三阶单元
节点类型			
			

	三维单元阶数		
	一阶单元	二阶单元	三阶单元
节点类型	8 节点 	20 节点 	27 节点 
	4 节点 	10 节点 	

注：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 FssiCAS 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。

1.4 FssiCAS 的介绍

1.4.1 开发历史

2012 年 Ye 在其博士论文中开发了一个可靠性较高的流体-结构-海床相互作用耦合数值模型，该耦合数值模型包括两个部分，分别为二维版本 FSSI-CAS 2D 和三维版本 FSSI-CAS 3D，后来这两个版本融合为一个程序，并被命名为 FssiCAS。Ye 所发展的 FssiCAS 耦合模型的有效性和可靠性已经得到了 Ye（2012）的广泛验证。Ye 采用 Hsu 和 Jeng（1994）提出的解析解、Lu（2005）对常规波和椭圆余弦波进行的一系列实验室波浪水槽测试、Tsai 和 Lee（1995）对驻波的研究、Mizutani 等（1998）对近海水下防波堤的试验和 Mostafa 等人（1999）对复合防波堤的试验等水动力学经典模型试验数据，与用 FssiCAS 耦合模型的波浪-弹性海床基础-防波堤的动力响应结果进行对比，试验数据和 FssiCAS 耦合模型的计算结果取得了惊人的一致性。数值结果与相应的试验数据之间的一致性表明，FssiCAS 对于波浪-海床-结构相互作用问题具有高度可靠性。

在波浪-海床-结构物相互作用研究方面，Ye 采用 FssiCAS 耦合模型对不同海床（弹性海床、松散海床等）、不同波浪（规则波、椭圆余弦波、驻波等）、不同结构物（水下防波堤、复合防波堤）等复杂条件进行了一系列数值计算，数值结果与这些试验结果均相吻合。此外，FssiCAS 对波浪和松散海底土相互作用问题的有效性和可靠性也通过波浪水槽试验（Teh et al. , 2003）和土工离心机试验（Sassa and Sekiguchi，1999）得到了进一步的验证。有关验证工作的更多详细信息见 Ye et al. ,（2012）和 Ye et al. ,（2013b）。此外，耦合模型 FssiCAS 联合 PZIII 土体模型也已成功应用于研究建在松散海底基础上的理想复合防波堤的动力学和稳定性（Ye et al. , 2015）。综上所述，Ye 所发展的 FssiCAS 耦合模型具有极好的适用性和极高的可靠性。

二维版本 FssiCAS 软件的参考文献：

[1]Ye J H &Jeng D-S (2012). Response of porous seabed to nature loadings-waves and currents. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 138(6):601-613.

[2]Ye J H, Dong P, Jeng D-S (2013). Validation of a2D Semi-Coupled Numerical Model for Fluid-Structures-Seabed Interaction. Journal of Fluids and Structures, 2013: 42: 333–357.

[3]Jeng D-S, Ye J H, J-S Zhang PL-F Liu (2013). An integrated model for the wave-induced seabed response around marine structures: Model, verifications and applications. Coastal Engineering, 72 (1): 1-19.

三维版本 FssiCAS 软件的参考文献：

[1]Ye J H, Jeng D-S & Chan A H C (2012) Consolidation and Dynamics of 3D Unsaturated Porous Seabed under Rigid Caisson Breakwater under Hydrostatic Pressure and Wave. Science China-Technological Sciences 55(8): 2362–2376.

[2]Ye J H, Dong P, Jeng D-S (2013). A 3D Semi-Coupled Numerical Model for the Fluid-Structures-Seabed- Interaction: Model and Verification. Journal of Fluids and Structures, 2013: 40: 148-162.

[3]Ye J H & Jeng D-S (2013). Earthquake Induced Dynamic Response of 3D Poro-Elastic Unsaturated Seabed under a Rubble Mound Breakwater. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 44(1):14-26.

FssiCAS 软件验证的参考文献：

[1]Ye J H &Jeng D-S (2012). Response of porous seabed to nature loadings-waves and currents. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 138(6):601-613.

[2]Ye J H, D-S Jeng, Wang Ren & Zhu Ch-Q (2013). Numerical study of the stability of breakwater built on sloped porous seabed under tsunami loading. Applied Mathematical modeling, 37:9575-9590.
[3]Ye J H, D-S Jeng, Wang Ren & Zhu Ch-Q (2014). Breaking Wave-Induced Response of Composite Breakwater and Liquefaction of Seabed Foundation. Coastal Engineering, DOI:10.1016/j.coastaleng.2013.08.003.
[4]Ye J H, Wang Gang. Seismic dynamics of offshore breakwater on liquefifiable seabed foundation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 76: 86-99.

1.4.2 耦合算法

针对流体-结构物-海床相互作用的问题，Ye J.H.在 2012 年开发了一个数值计算模型 FssiCAS。在 FssiCAS 中，采用 RAVANS（Reynolds Average Volume Average Navier Stokes）方程作为波浪的控制方程，控制波浪运动和孔隙海床中孔隙流动，动态 Biot 方程作为海床地基的控制方程，控制海岸结构物和结构物海床基础的动态响应。通过一个耦合算法将两个物理控制方程整合为一个整体，如图 1-3 所示。

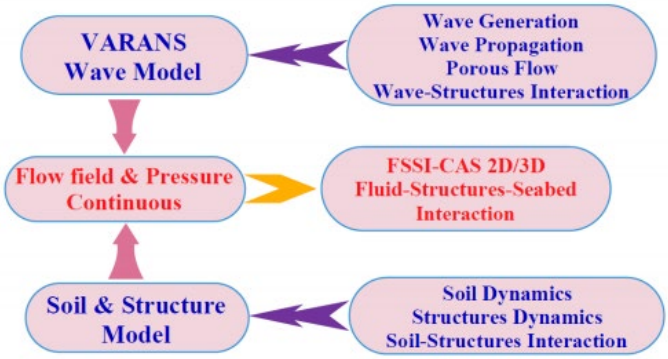


图 1-2 耦合过程图

在耦合动态 Biot 方程和 RAVANS 方程的过程中，数值计算会存在匹配网格和非匹配网格两种网格系统。由于流体域中的单元尺寸普遍比土体中的网格尺寸要小，其网格尺寸的比例大概为 5~20。所以 FssiCAS 数值模型中，我们采用的是非匹配的网格系统。为了使用此网格系统将波模型和土模型的交界面偶合，所以我们在动态 Biot 方程和 RAVANS 方程中设置了数据交换的端口。这个端口采用了 Wang 等人在 2004 年提出的径向基插值法，主要用于波模型和土模型之间的数据交换。

在耦合模型中，波模型主要用于产生波浪，模拟波浪的传播，并且计算出作用于海床和结构物表面的压力。波模型中求出的作用在海床和结构物表面的压力和应力通过数据交换端口，提供给土模型，从而可以计算出海床和结构物的动态响应（位移、孔压、有效应力等）。值得注意的是将 VARANS 方程和动态 Biot 方程在 FssiCAS 模型中相结合，整个计算域中的流场是连续的。

有关耦合模型的详细信息见 Ye（2012）和 Zienkiewicz 等（1999）。

参考文献：

[1]Ye J H &Jeng D-S (2012). Response of porous seabed to nature loadings-waves and currents. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 138(6):601-613.

[2]Zienkiewicz, O.C., Chan, A.H.C., Pastor, M., Schrefler, B.A., Shiomi, T., 1999.Computational Geomechanics with Special Reference to Earthquake Engineering.John Wiley and Sons, England.

1.4.3 软件功能

FssiCAS 计算软件可以在近海工程领域海洋结构物的设计、稳定性评价中应用，主要面向高等院校、科研院所的科研人员，以及相关的设计、勘察院及公司的设计、勘察工程师。其主要功能有：

(1)近海岸各种波浪的传播演化，与近海结构物相互作用（线性/非线性波浪、规则/随机波浪、椭圆余弦波，海啸波等）。

(2)各种孔隙介质内的低速/高速孔隙渗流。

(3)波浪/地震—近海结构物（防波堤、海底管线、近海风机、采油平台等）—海床地基相互作用。

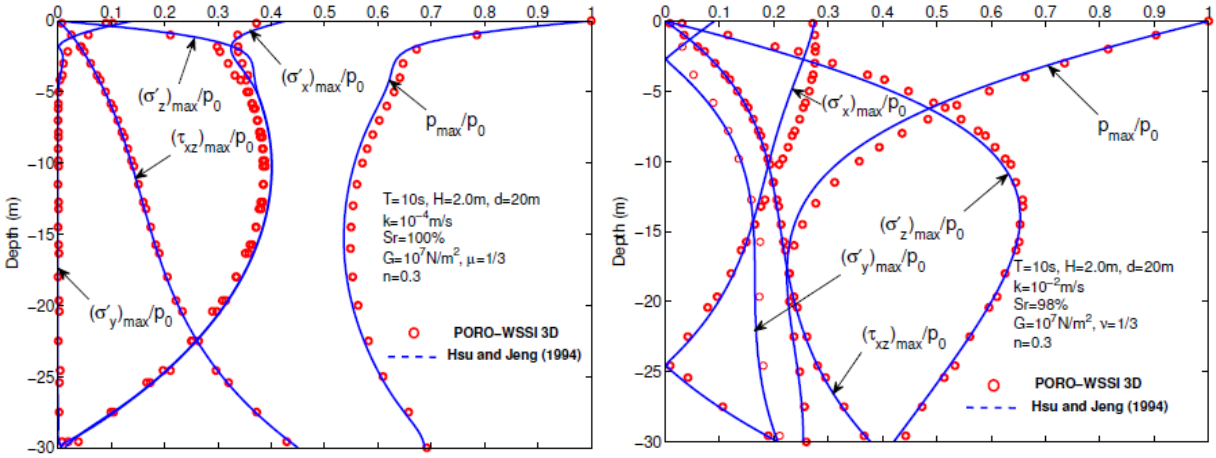
(4)密实/欠密实海床地基的波浪/地震动态响应、液化大变形，以及评价海洋结构物（防波堤、海底管线、近海风机、采油平台等）的安全稳定性。

(5)传统岩土工程中的涉及流-固耦合的各种计算问题，如边坡渗流、大变形滑动，地震动响应分析和地基液化，隧道/洞室变形、涌水等。

1.5 验证

1.5.1 Hsu 和 Jeng 在 1994 年提出的分析解决方案

Hsu and Jeng（1994）针对行进波（Progressive wave）在平直密实弹性海床上传播时导致的海床应力和孔隙压力变化，给出了数学上非常严格的闭合解析解。采用 FssiCAS 耦合模型重现了 Hsu and Jeng（1994）所描述的这一物理过程，得到了不同物理属性海床内应力和孔隙压力的数值解；并将 FssiCAS 的数值解和解析解进行了对比，发现耦合模型 FssiCAS 具有极好的、令人惊叹的准确性。



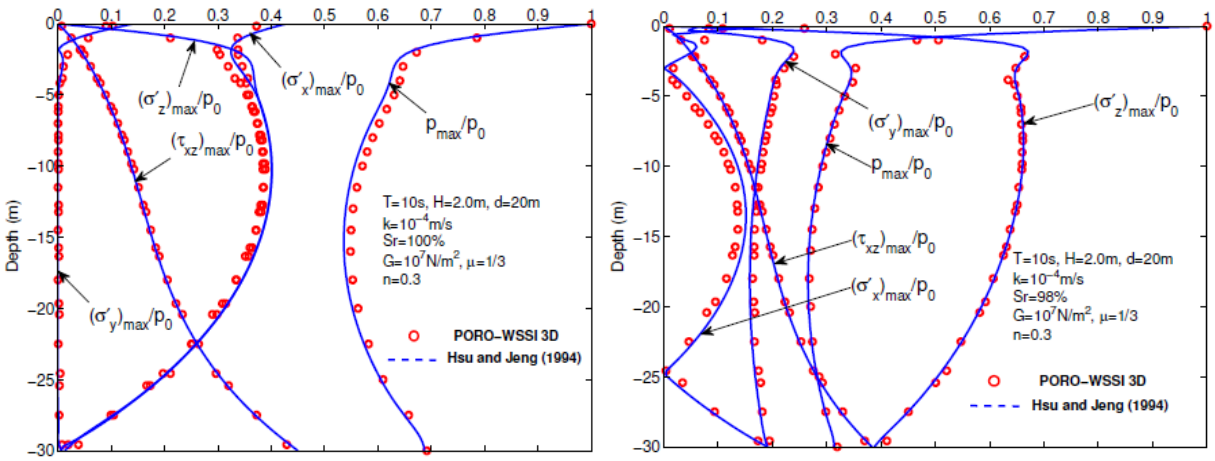


图 1-3 FssiCAS 的数值解和 Hsu and Jeng 提出的解析解的对比图

1.5.2 行进波和椭圆余弦波的波浪水槽试验（Lu，2005）

长沙理工大学的 Lu（2005）针对行进波（Progressive wave）和椭圆余弦波（Cnoidal wave）在平直密实弹性海床上传播时导致的海床应力和孔隙压力变化规律，开展了水槽试验；采用竖向排列的 4 个孔隙压力传感器测量砂床内部水压力对波浪的动态响应。采用 FssiCAS 耦合模型重现了 Lu(2005)所开展的物理水槽试验，得到波浪传播过程中砂床内孔隙压力的数值解；并将 FssiCAS 的数值解和 Lu（2005）试验结果进行对比，发现耦合模型 FssiCAS 具有极好的准确性和可靠性。

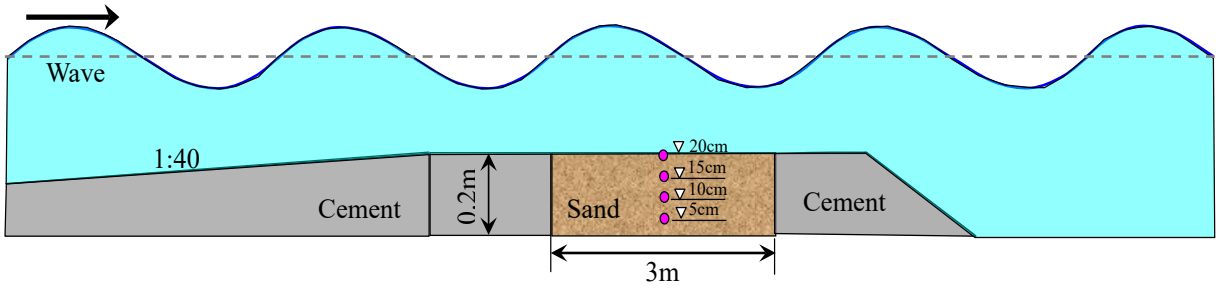
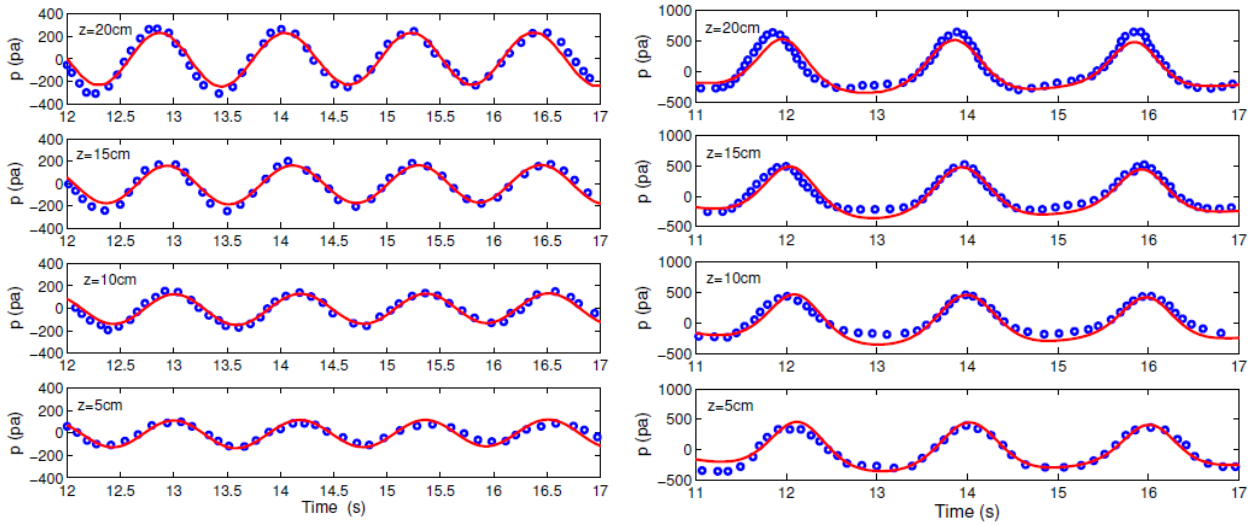


图 1-4 Lu（2005）开展的水槽试验的配置图

Table 1-2 Lu（2005）开展的水槽试验的波浪参数和砂床属性参数

Medium	H (cm)	d (m)	T (s)	G (N/m^2)	ν	k m/s	n	d_{50} (mm)	Sr
Wave	14.0	0.4	1.4						
sand bed				1.0×10^7	0.3	1.0×10^{-3}	0.3893	0.44	0.98
Wave	12.0	0.3	2.0						
sand bed				1.0×10^7	0.3	1.0×10^{-3}	0.3893	0.44	0.98



（a）行进波　　（b）椭圆余弦波

图 1-5 FssiCAS 计算的孔压数值解和 Lu（2005）的测量值的对比图

1.5.3 Cheng and Detournay (1988)解析解验证

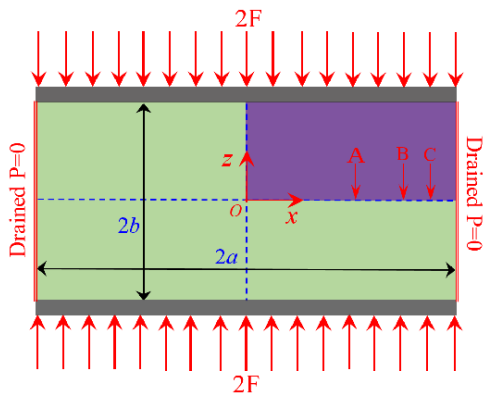
Cheng and Detournay (1988)曾采用解析解的方式对 Mandel-Cryer 效应开展了深入的研究；解析的物理模型如图 1-7 所示。解析模型中上、下表面被对称施加了均匀分布的荷载，且为不透水边界；模型左、右边界为排水自由边界，且与大气相通。模型中的岩土介质为各向同性的完全饱和弹性孔隙材料，其物理参数如图 1-7 所示，解析过程中不考虑重力场。Cheng and Detournay (1988) 通过数学解析的方法给出了孔隙材料内部的孔隙压力的解析解：

$$p(x,t)=\frac{2FB(1+\nu_u)}{3a}\sum_{i=1}^{\infty}\frac{\sin\alpha_i\cos\alpha_i}{\alpha_i-\sin\alpha_i\cos\alpha_i}(\cos\frac{\alpha_i x}{a}-\cos\alpha_i)\exp(-\frac{\alpha_i^2 c_v t}{a^2}) \tag{1-11}$$

$$\tan\alpha_i=\frac{1-\nu}{\nu_u-\nu}\alpha_i \tag{1-12}$$

式中 ν 和$\nu_u=\frac{3\upsilon+\alpha B(1-2\nu)}{3-\alpha B(1-2\upsilon)}$是排水和不排水泊松比，$B=\frac{\alpha M}{K_u}$是 Skenpton 系数，由于孔隙介质为是完全饱和的，所以 B 值接近 1.0. $K_u=\lambda+2\upsilon/3+\alpha^2 M$是不排水体积模量，$M=\left[\frac{n}{K_f}+\frac{\alpha-n}{K_s}\right]^{-1}$是 Biot 模量，n 是材料孔隙率，$\alpha=1-\frac{K_T}{K_s}$是 Biot 系数, K_f是纯水的体积模量，K_s是孔隙材料颗粒的体积模量，K_T是孔隙材料的总体宏观体积模量，$c_\upsilon=\frac{k}{\rho(M^{-1}+\alpha^2(\lambda+2\nu)^{-1})}$是固结系数，$\rho$是纯水的密度，$\lambda=\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$，$\mu=G=\frac{E}{2(1+\nu)}$是拉梅常数。式中 a 和 b 是物理解析模型的半长度，2F 为解析模型上下表面所施加的合力，α_i（i=1, 2, 3, ….）是非线性方程（1-11）的根，可以采用迭代方法求解。

采用 FssiCAS 软件重现图 1-7 所示的物理过程，结果对比如图 1-8 所示。从 FssiCAS 软件的数值结果和解析解结果之间的一致性来看，表明 FssiCAS 软件具有极高的可靠性。



Parameters used in the verification computation adopting Mandel's solution.

Parameters	Value	Parameter	Value
E (MPa)	100	α	1.0
ν	0.25	n	0.375
ν_u	0.5	a (m)	20
λ (MPa)	40	b (m)	10
μ or G (MPa)	40	F (kN)	200
k (m/s)	1.0×10^{-5}	K_s (MPa)	1.0×10^{6}
B	0.9996	K_f (MPa)	2.24×10^{3}

图 1-6 Cheng and Detournay (1988)的解析物理模型和相关的参数

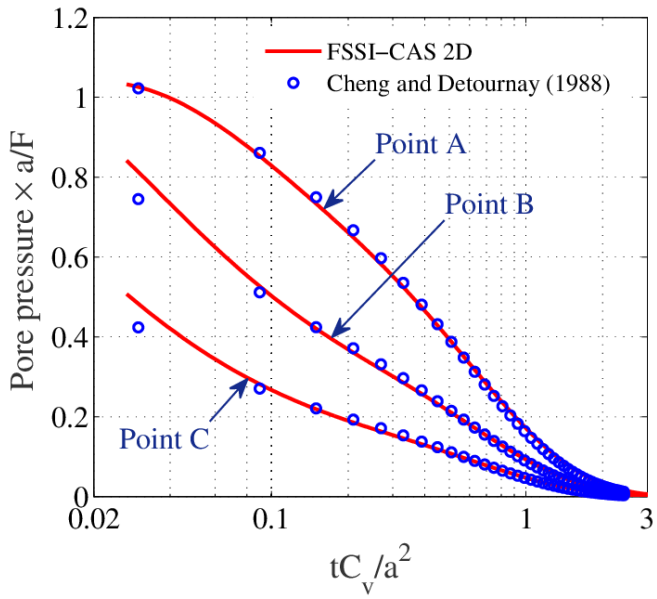


图 1-7 FssiCAS 软件的计算结果与 Cheng and Detournay (1988)的解析结果的对比

参考文献：

[1] Cheng, A.H.D., Detournay, E., 1988. A direct boundary element method for plane strain poroelasticity. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech. 12, 551–572.

1.5.4 驻波反射（Tsai and Lee, 1995）

Tsai and Lee（1995）针对反射驻波在平直密实弹性海床上传播时导致的海床应力和孔隙压力变化规律，开展了水槽试验；试验中在水槽一侧采用推板造波机造波，在水槽另一侧砂床末端放置一块坚硬板子，用以反射入射波在板前形成驻波。采用竖向排列的 5 个孔隙压力传感器（在板子下方），以及水平方向 6 个孔隙压力传感器测量砂床内部水压力对驻波的动态响应。采用 FssiCAS 耦合模型重现了 Tsai and Lee（1995）所开展的物理水槽试验，得到波浪传播过程中砂床内孔隙压力的数值解；并将 FssiCAS 的数值解和 Tsai and Lee（1995）试验结果进行对比，发现耦合模型 FssiCAS 具有很好的准确性和可靠性。

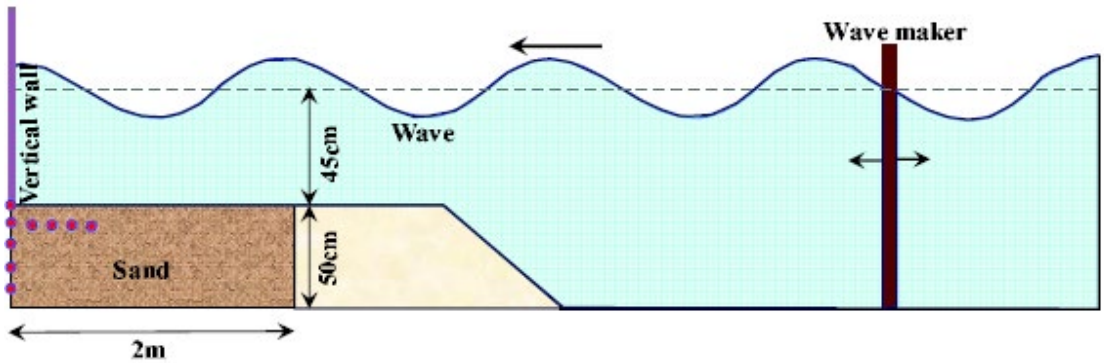
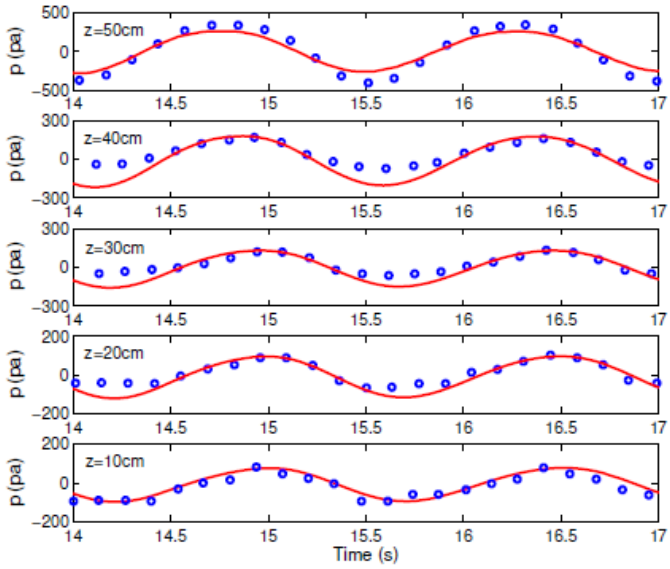


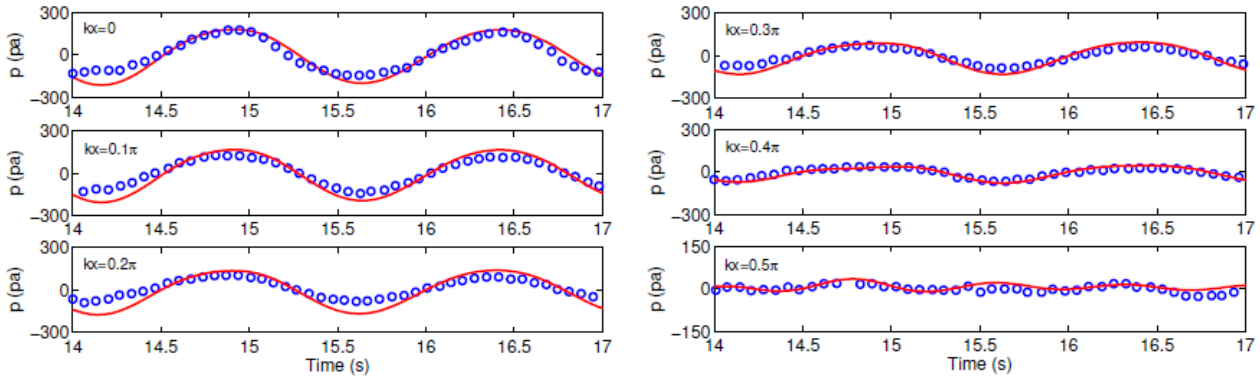
图 1-8 Tsai and Lee（1995）开展的水槽试验的配置图

Table 1-3 Tsai and Lee（1995）开展的水槽试验的波浪参数和砂床属性参数

Medium	H (cm)	d (m)	T (s)	G (N/m^2)	ν	k m/s	n	d_{50} (mm)	Sr
Wave	5.1	0.45	1.5						
sand bed				2.64×10^7	0.3	1.2×10^{-4}	0.38	0.187	0.98



(a) 与竖向六个传感器对比



（b）与横向 6 个传感器对比

图 1-9 FssiCAS 计算的孔压数值解和 Tsai and Lee（1995）的测量值的对比图

1.5.5 水下防波堤（Mizutani et al., 1998）

日本学者 Mizutani et al.（1998）针对近海环境中波浪冲击建造在平直密实弹性海床上的水下防波堤这一工况，开展了水槽试验，研究海床和抛石防波堤内部孔隙压力变化规律；试验中在水槽一侧采用摇板造波机造波，在水槽另一侧设置波浪吸收装置，用以避免入射波在水槽端部反射。试验过程中采用 a，b，c，d 四个波高仪记录波面变化，在砂床和抛石防波堤内部采用 A，B，C，D 四个压力传感器测量波浪导致的孔隙压力的变化规律。采用 FssiCAS 耦合模型重现了 Mizutani et al.（1998）所开展的物理水槽试验，得到波浪冲击水下防波堤过程中砂床内抛石防波堤内、孔隙压力的数值解；并将 FssiCAS 的数值解和 Mizutani et al.（1998）试验结果进行对比，发现耦合模型 FssiCAS 具有很好的准确性和可靠性。

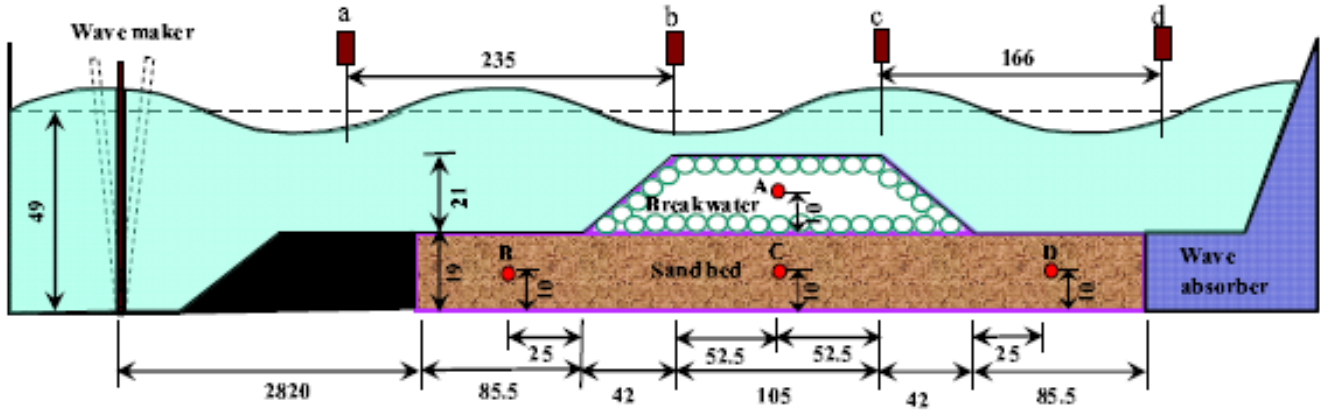
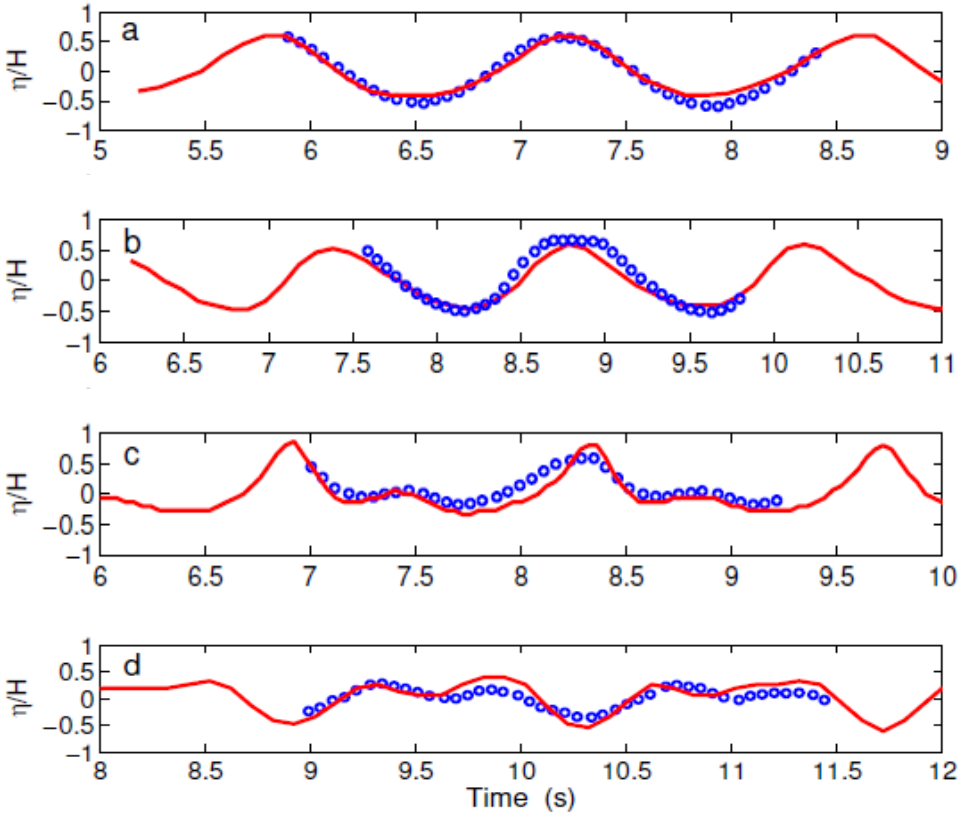


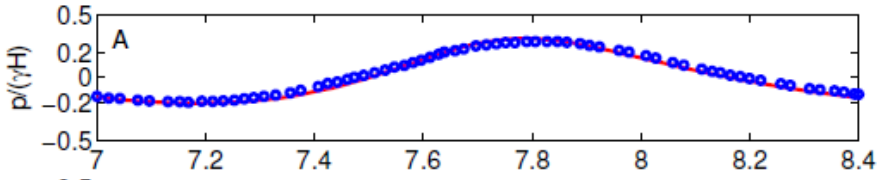
图 1-10 Mizutani et al.（1998）开展的水槽试验的配置图

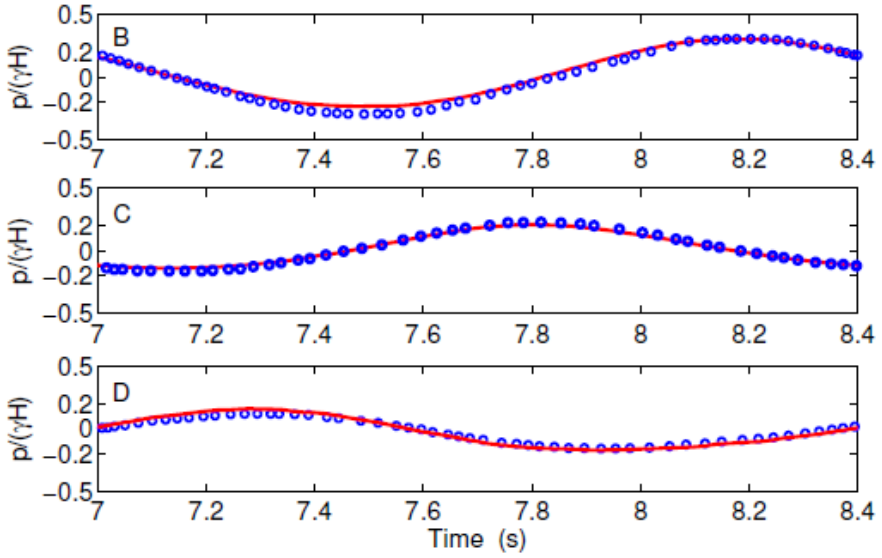
Table 1-4 Mizutani et al.（1998）开展的水槽试验的波浪参数和砂床属性参数

Medium	H (cm)	d (m)	T (s)	G (N/m^2)	ν	k m/s	n	d_{50} (mm)	Sr
Wave	3.0	0.3	1.4						
sand bed				5.0×10^8	0.33	2.2×10^{-3}	0.3	1.0	0.99
Breakwater				1.0×10^9	0.24	1.8×10^{-1}	0.33	30	0.99



（a）波面结果对比





（b）孔隙压力结果对比

图 1-11 FssiCAS 计算的孔压数值解和 Mizutani et al.（1998）的测量值的对比图

1.5.6 复合防波堤（Mostafa et al., 1999）

日本学者 Mostafa et al.（1999）针对近海环境中波浪冲击建造在平直密实弹性海床上的复合防波堤这一工况，开展了水槽试验，研究海床和复合防波堤内部孔隙压力变化规律；试验中在水槽一侧采用摇板造波机造波，在水槽另一侧设置波浪吸收装置，用以避免入射波在水槽端部反射。在此类试验中，由于沉箱的阻挡作用，实际上只有极少的波浪能量能够通过抛石堆到达复合防波堤右侧。试验过程中采用 a，b，c，d 四个波高仪记录波面变化，在砂床和抛石防波堤内部采用 A，B，C，D 四个压力传感器测量波浪导致的孔隙压力的变化规律。采用 FssiCAS 耦合模型重现了 Mostafa et al.（1999）所开展的物理水槽试验，得到波浪冲击复合防波堤过程中砂床内、抛石防波堤内孔隙压力的数值解；并将 FssiCAS 的数值解和 Mostafa et al.（1999）试验结果进行对比，发现耦合模型 FssiCAS 具有很好的准确性和可靠性。

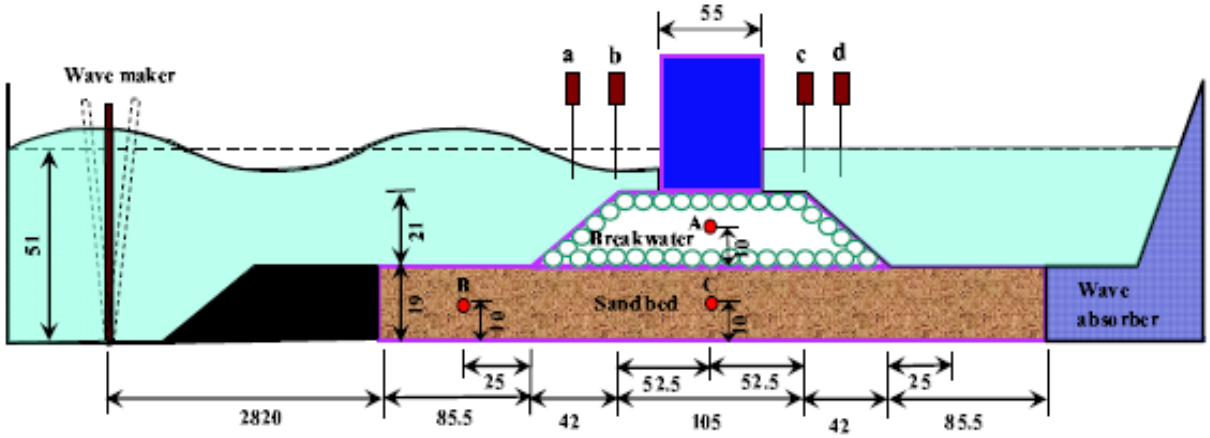
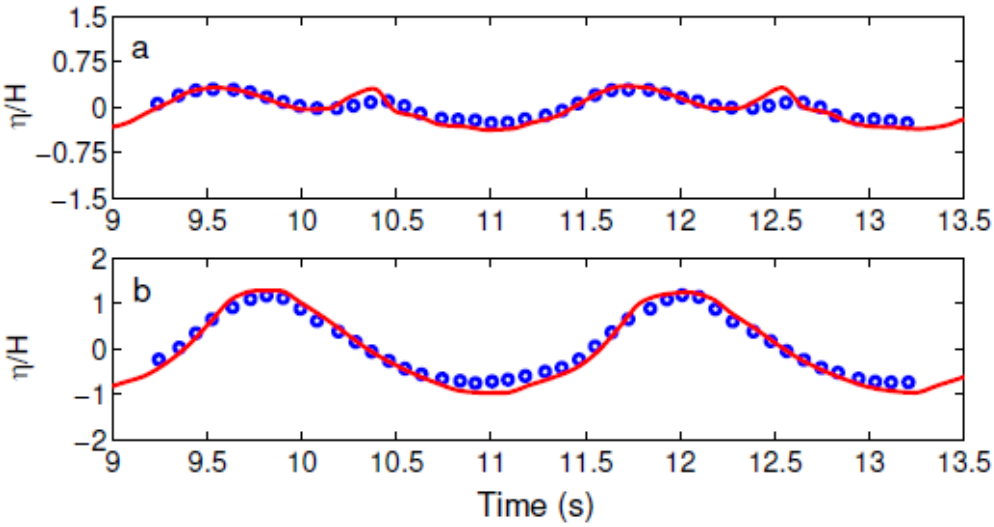


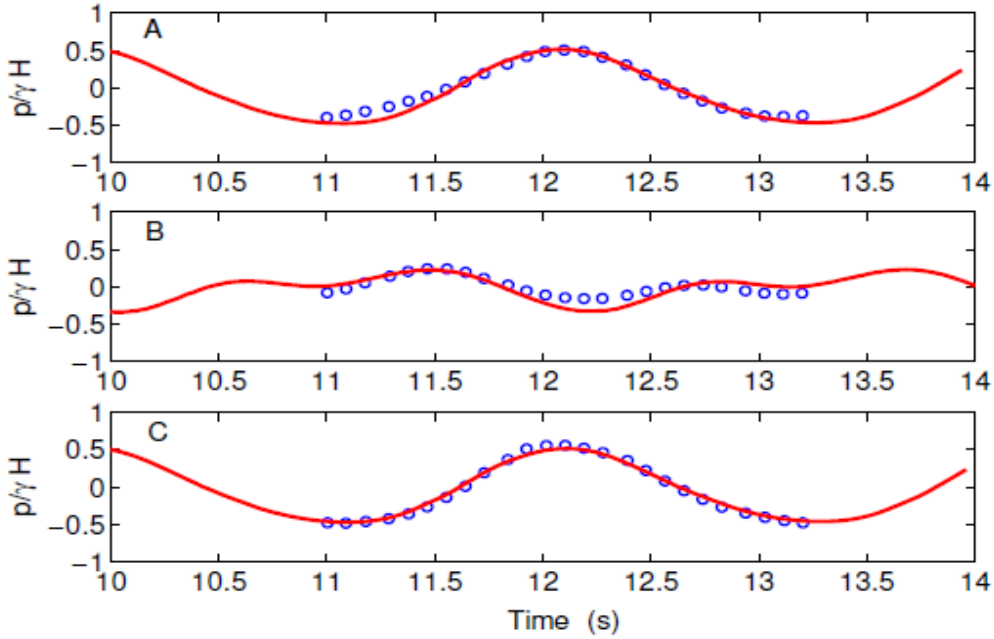
图 1-12 Mostafa et al.（1999）开展的水槽试验的配置

Table 1-5 Mostafa et al.（1999）开展的水槽试验的波浪参数和砂床属性参数

Medium	H (cm)	d (m)	T (s)	G (N/m^2)	ν	k m/s	n	d_{50} (mm)	Sr
Wave	3.0	0.3	1.4						
sand bed				5.0×10^8	0.33	2.2×10^{-3}	0.3	1.0	0.99
Breakwater				1.0×10^9	0.24	1.8×10^{-1}	0.33	30	0.99



(a) 波面对比



（b）孔隙压力对比

图 1-13 FssiCAS 计算的孔压数值解和 Mostafa et al.（1999）的测量值的对比图

1.5.7 离心机水槽试验（Sassa & Sekiguchi , 1999）

日本学者 Sassa & Sekiguchi（1999）在土工离心机里率先开展了水槽造波方面的试验研究，并且在试验中设置砂床，测量砂床内的波浪动力响应。试验中离心机的加速度为 50g，采用粘滞系数是纯水 50 倍的硅油替代水，以保证砂床内流体渗透流动的相似程度。试验用砂为英国一种标准砂 Leighton Buzzard sand（British Standard sieve 100/170），砂床相对密实度 Dr=42%，由于试验用砂是一种标准砂，其力学属性参数较好确定；造波参数为水深 9cm，波高 3.2cm，周期 0.09s。采用 FssiCAS 耦合模型和 PZIII 土本构模型重现了 Sassa & Sekiguchi（1999）所开展的离心机水槽试验，得到离心机内波浪传播过程中砂床内孔隙压力的数值解；并将 FssiCAS 的数值解和 Sassa & Sekiguchi（1999）试验结果进行对比，发现耦合模型 FssiCAS 具有很好的准确性和可靠性。

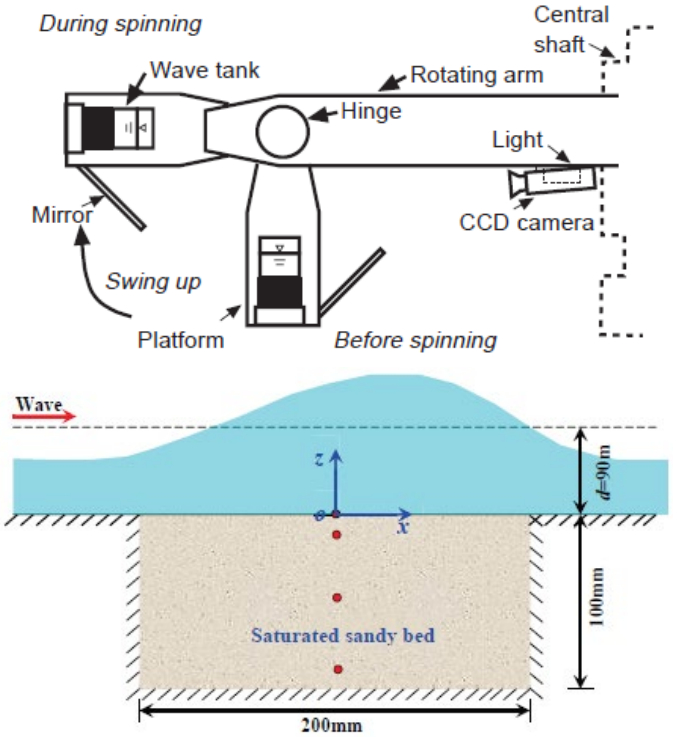
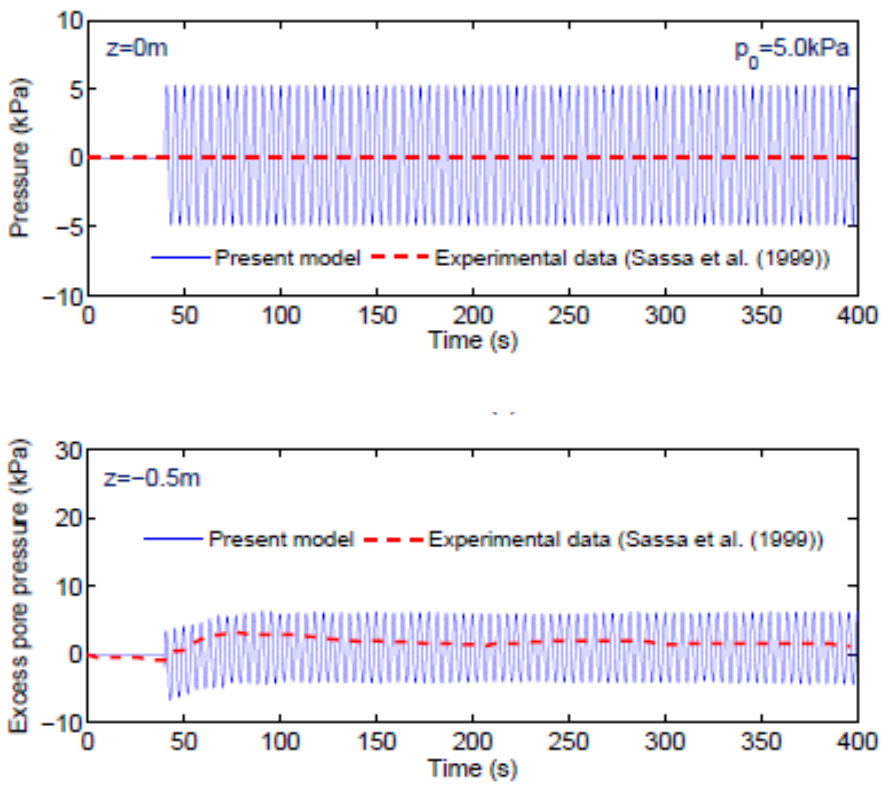


图 1-14 Sassa & Sekiguchi（1999）开展的离心机水槽试验的配置图

Table 1-6 Sassa & Sekiguchi（1999）开展的离心机水槽试验砂床的属性参数和 PZIII 本构模型参数

Parameter	Value	Unit
K_{evo}	1517	[kPa]
G_{eso}	2100	[kPa]
p'_0	72.25	[kPa]
M_g	0.7	–
M_f	0.46	–
α_f	0.01	–
α_g	0.01	–
β_0	0.2	–
β_1	2.5	–
H_0	700	[kPa]
H_{U0}	1000	[kPa]
γ_u	6.0	–
γ_{DM}	4.0	–
Poisson's ratio (ν)	0.3	–
Relative density (D_r)	42	[%]
Porosity (n)	0.445	–
Permeability (k)	1.5×10^{-4}	[m/s]
Saturation (S_r)	100	[%]



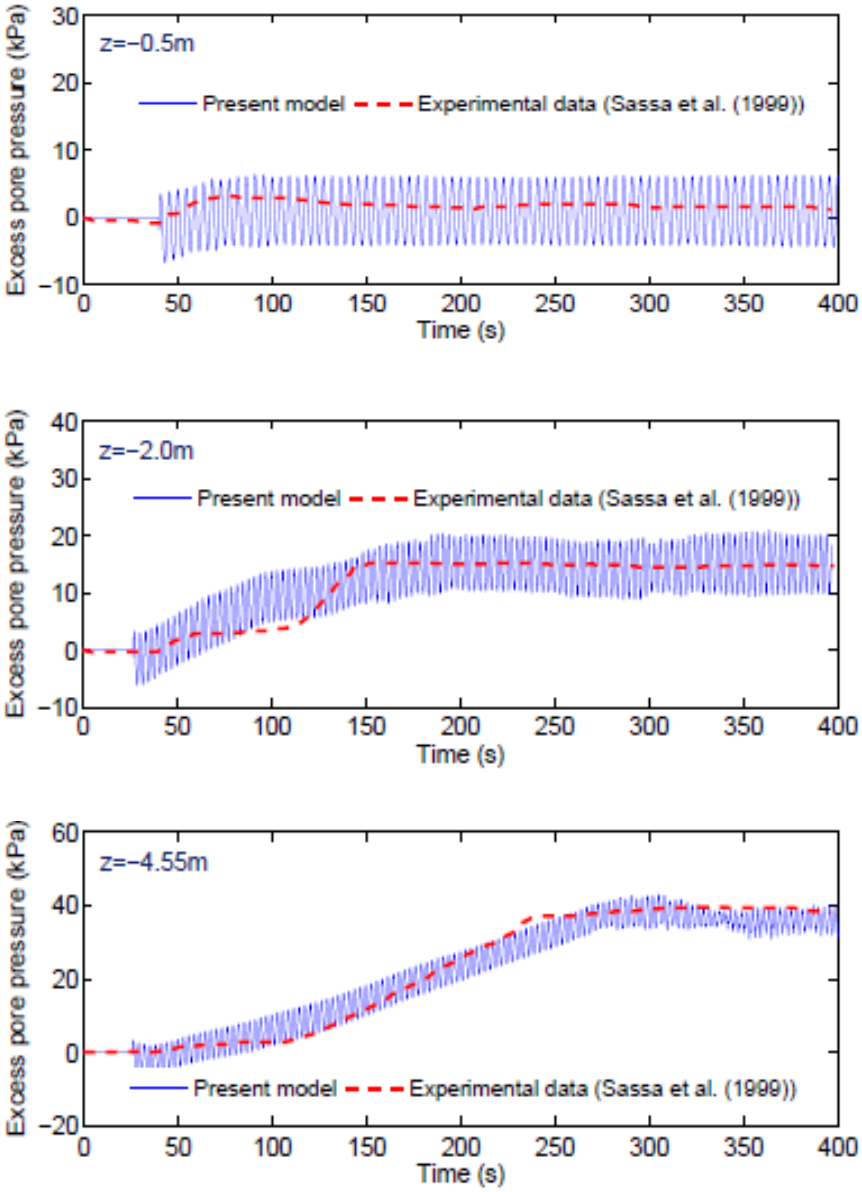


图 1-15 FssiCAS 计算的孔压数值解和 Sassa & Sekiguchi（1999）的测量值的对比图

1.5.8 海底管线水槽实验（Teh et al. , 2003）

英国剑桥大学学者 Teh et al. (2003)等人针对海底管线的波浪动力响应问题开展了波浪水槽试验。试验中将一根管线放置在砂床之上。水槽长 50 米，宽 1.0 米，管线的管径为 75mm，试验中造波参数为水深 0.75 米，波高 9.5cm，周期 1.25s。松散砂床的力学参数借鉴 Chan A H C 和 Dunn 等人 2006 年发表的论文中的参数。采用 FssiCAS 耦合模型和 PZIII 土本构模型重现了 Teh et al. (2003)所开展的海底管线水槽试验，得到波浪传播过程中砂床内孔隙压力的数值解；并将 FssiCAS 的数值解和 Teh et al. (2003)的试验结果进行对比，发现耦合模型 FssiCAS 具有较好的准确性和可靠性。

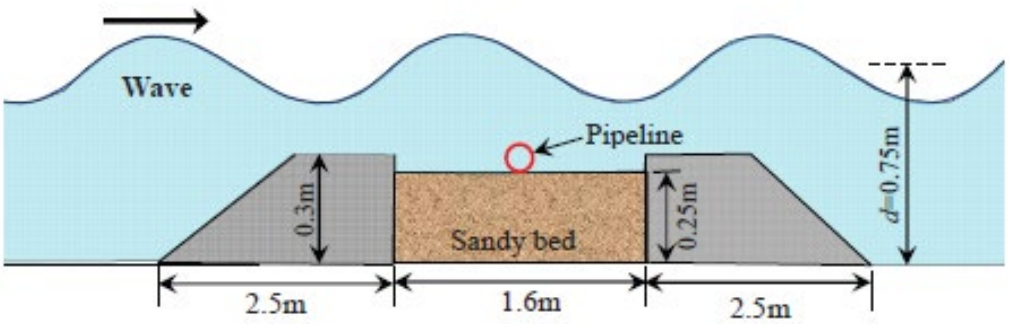
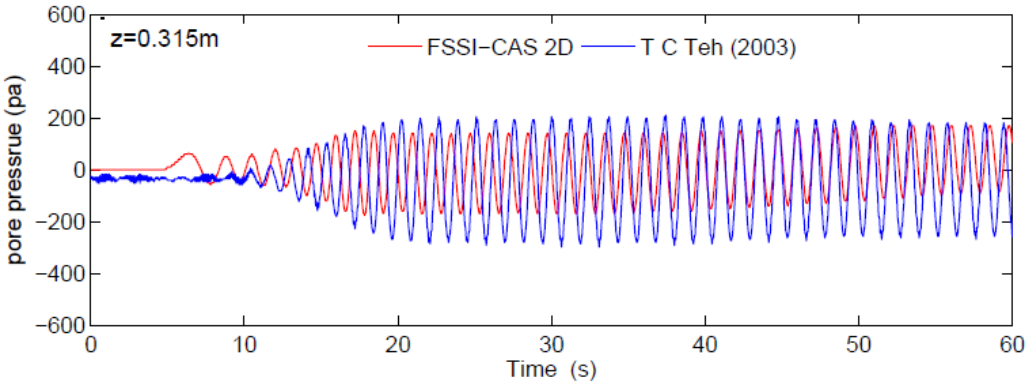
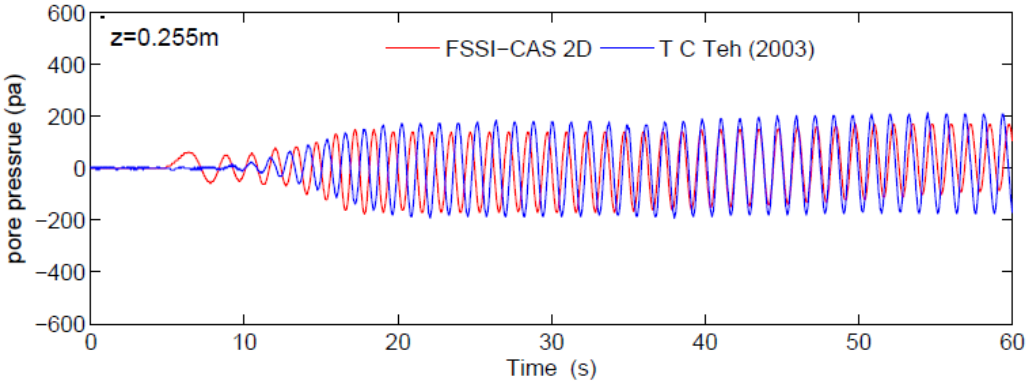


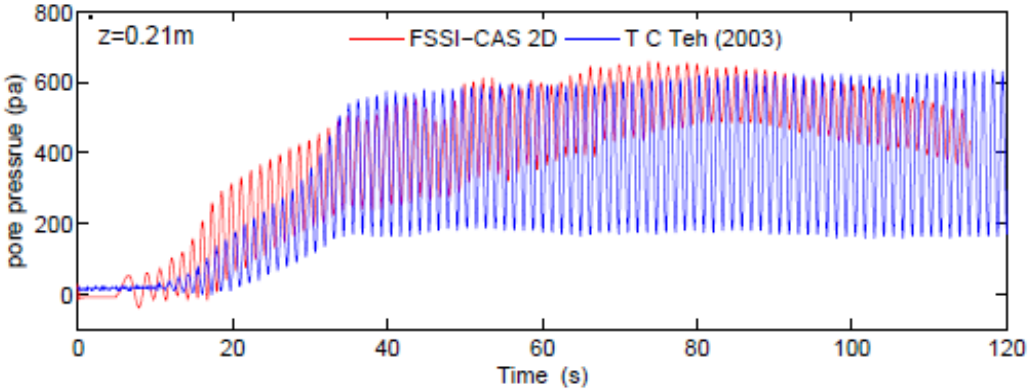
图 1-16 Teh et al. (2003)开展的水槽试验的配置图

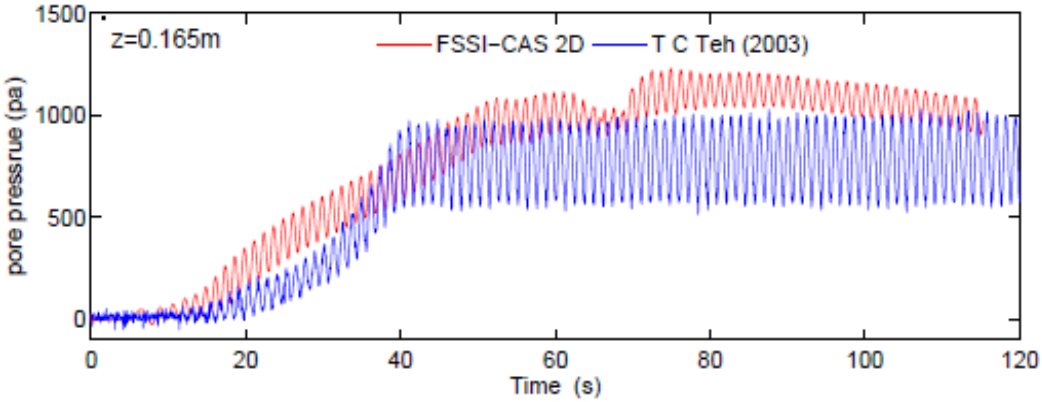
Table 1-7 Teh et al. (2003)开展的水槽试验中砂床的属性参数和 PZIII 本构模型参数

Parameter	Value	Unit
K_{evo}	3000	[kPa]
K_{eso}	1500	[kPa]
p'_0	10	[kPa]
M_g	1.42	–
M_f	0.90	–
α_f	0.45	–
α_g	0.45	–
β_0	4.2	–
β_1	0.2	–
H_0	1050	–
H_{U0}	4000	[kPa]
γ_u	2.0	–
γ_{DM}	4.0	–
Poisson's ratio (ν)	0.3	–
Permeability (k)	2.5×10^{-6}	[m/s]
Saturation (S_r)	95	[%]


z=0.315m
FSSI−CAS 2D
T C Teh (2003)
pore pressrue (pa)
Time (s)


z=0.255m
FSSI−CAS 2D
T C Teh (2003)
pore pressrue (pa)
Time (s)


z=0.21m
FSSI−CAS 2D
T C Teh (2003)
pore pressrue (pa)
Time (s)


z=0.165m
FSSI−CAS 2D
T C Teh (2003)
pore pressrue (pa)
Time (s)

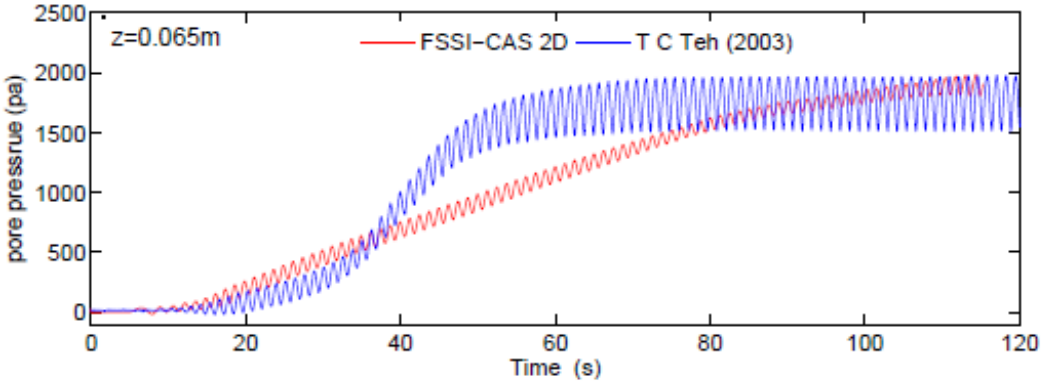
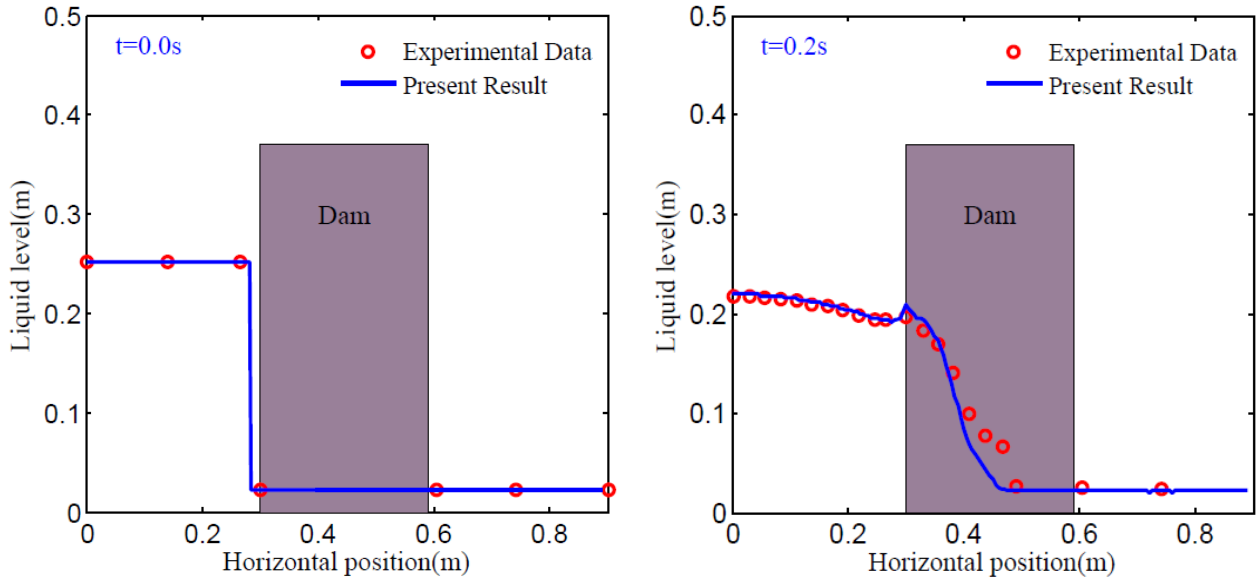


图 1-17 FssiCAS 计算的孔压数值解和 The et al.（2003）的测量值的对比图

1.5.9 非线性渗流（Liu et al. , 1999）

Liu et al.（1999）针对非线性孔隙渗流问题开展了一个经典的透坝试验。流体在孔隙介质内高速渗透过程中，不仅仅要受到线性拖曳力的阻挡，还要受到非线性拖曳力的阻碍。Liu et al.（1999）的试验装置是在透明有机玻璃箱内用球状玻璃珠制作一个坝体，在左侧用板子阻挡住水。试验开始时，将阻水的板子迅速抽走，水即可透过玻璃球坝体流向坝体的右侧；试验期间，利用高速摄像机拍摄玻璃坝体内的液面位置。采用 FssiCAS 耦合模型重现了 Liu et al.（1999）所开展的非线性渗流试验，得到水渗流过程中液面位置的数值解；并将 FssiCAS 的液面位置数值解和 Liu et al.（1999）的试验结果进行对比，发现耦合模型 FssiCAS 针对非线性渗流问题具有极好的准确性和可靠性。



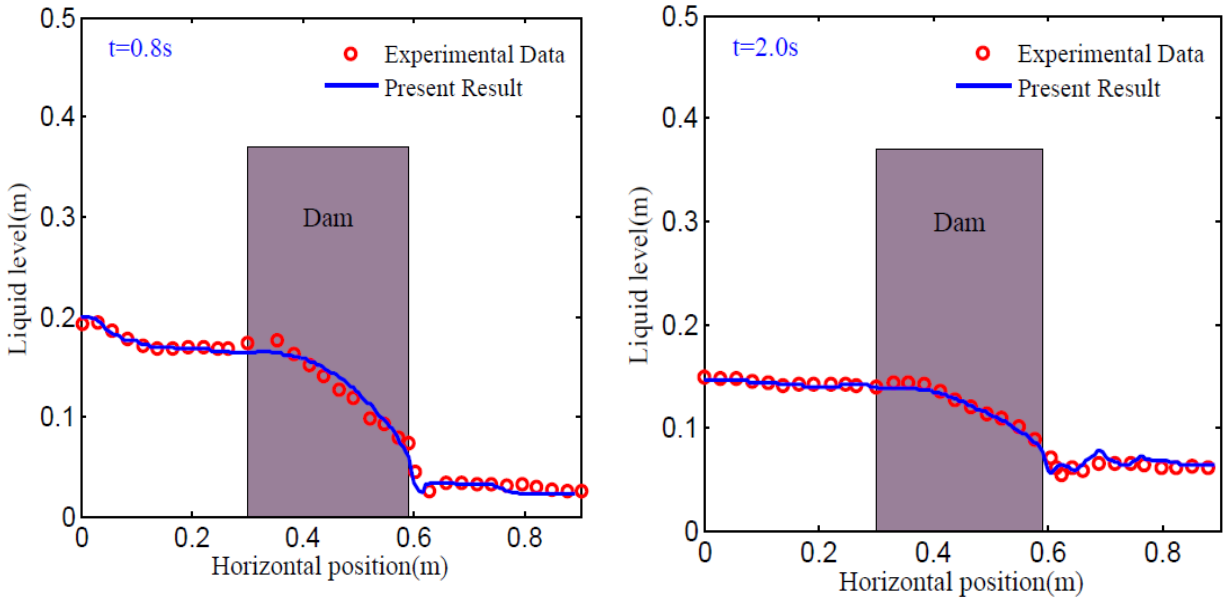


图 1-18 FssiCAS 计算的液面位置数值解和 Liu et al.（1999）的试验结果的对比图

1.5.10 海底管线波浪动力响应

康奈尔大学的 Turcotte (1984)开展了一系列的水槽实验研究海底浅埋油气输送管线的波浪动力响应。试验配置如图 1-20 所示，一根管线浅埋于砂质海床之中，受到上覆的幅值恒定的波浪动力的循环作用；在管线上均匀安装 8 个孔隙压力传感器以测量管线周围的孔隙压力响应。试验中 Turcotte (1984)利用活塞式造波机制造了 3 种波浪。采用 FssiCAS 软件重现这一物理试验过程，所用参数列于表 1-8 中。三种波浪条件下 FssiCAS 的计算结果与 Turcotte (1984)的试验结果的对比如图 1-21 所示；由图可见 FssiCAS 软件具有极高的可信度。

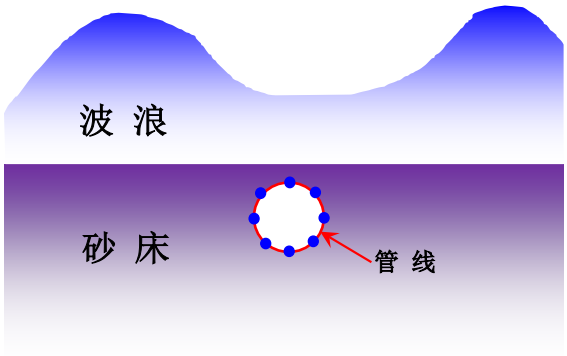


图 1-19 Turcotte (1984)所开展的波浪水槽试验的模型配置

表 1-8 Turcotte (1984)所开展的试验中的配置及物性参数

Parameters in the wave flume tests conducted by Turcotte (1984).

Parameters	Value	Unit
Sandy bed properties		
Length	4.57	m
Depth	0.826	m
Density of particles	2700	kg/m^3
Porosity	0.42	–
Permeability	1.1×1.0^{-3}	m/s
Young's modulus	0.64	MPa
Poisson's ratio	0.33	–
Pipeline properties		
Diameter	0.168	m
Buried depth	0.167	m
Wall thickness	0.01	m
Steel density	7850	kg/m^3
Young's modulus	200	GPa
Poisson's ratio	0.35	–
Specific gravity (SG)	0.907	–

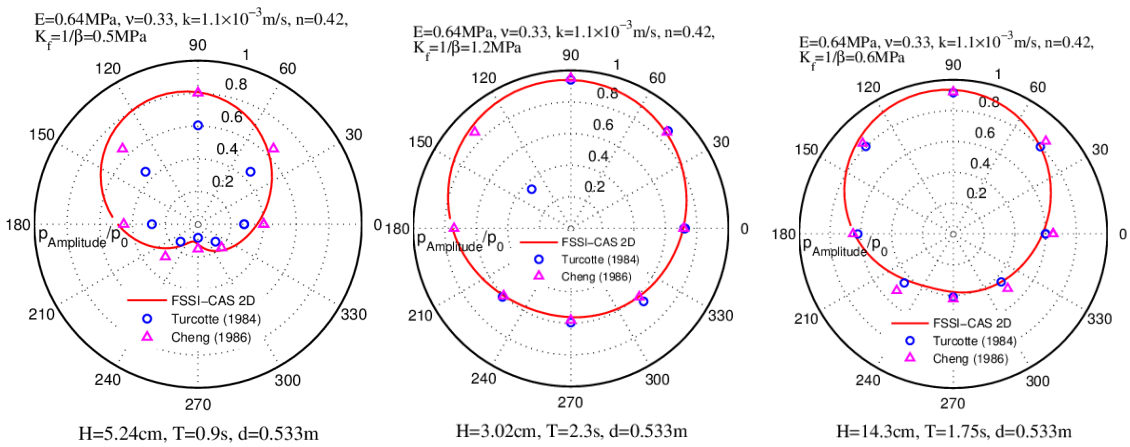


图 1-20 三种波浪条件下 FssiCAS 的计算结果与 Turcotte (1984)的试验结果的对比（孔隙压力幅值沿管线周壁的分布）

相关文献：

[1] Turcotte, B., 1984. Laboratory Evaluation of Wave Tank Parameters for Wave-Sediment Interaction. Cornell University, August.

1.5.11 Nakai and Matsuoka (1986)的试验验证

Nakai and Matsuoka (1986)开展了一组常规排水三轴土工试验，测试日本 Fujinomori 粘性土的静态力学性能。以 FssiCAS 软件为计算平台，采用软件自带的修正剑桥模型，重现这一常规三轴试验。Fujinomori 粘性土的修正剑桥模型的计算参数由 Nakai and Matsuoka (1986)提供，具体为：初始孔隙比 0.7，泊松比 0.3，正常固结线在 *e*-ln*p*'坐标系中的斜率为 0.08636，回弹线在 *e*-

ln$p$'坐标系中的斜率为 0.01904，临界状态线斜率为 1.4183，超固结比为 1.0。FssiCAS 软件的仿真计算结果与 Nakai and Matsuoka (1986)的试验结果对比如图 1-23 所示；从仿真结果和试验结果之家的高度一致性来看，表明 FssiCAS 软件具有极高的可靠性。

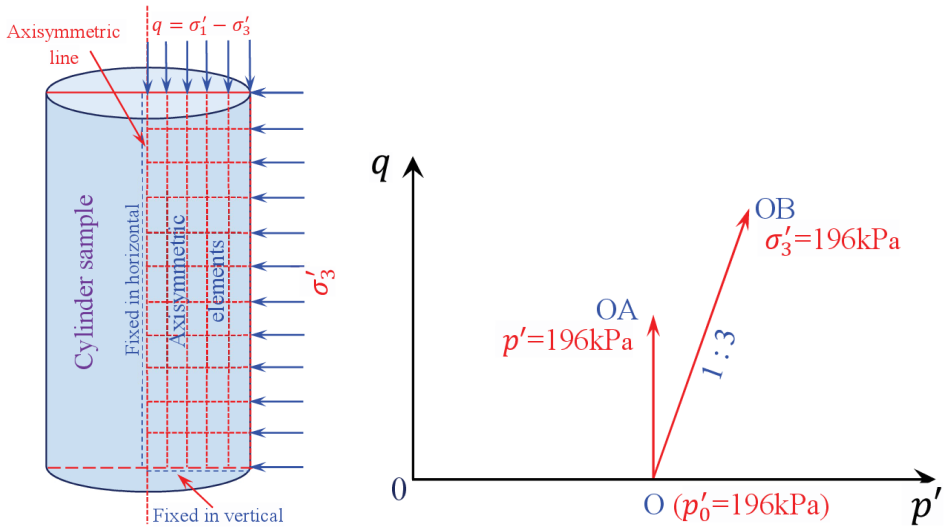
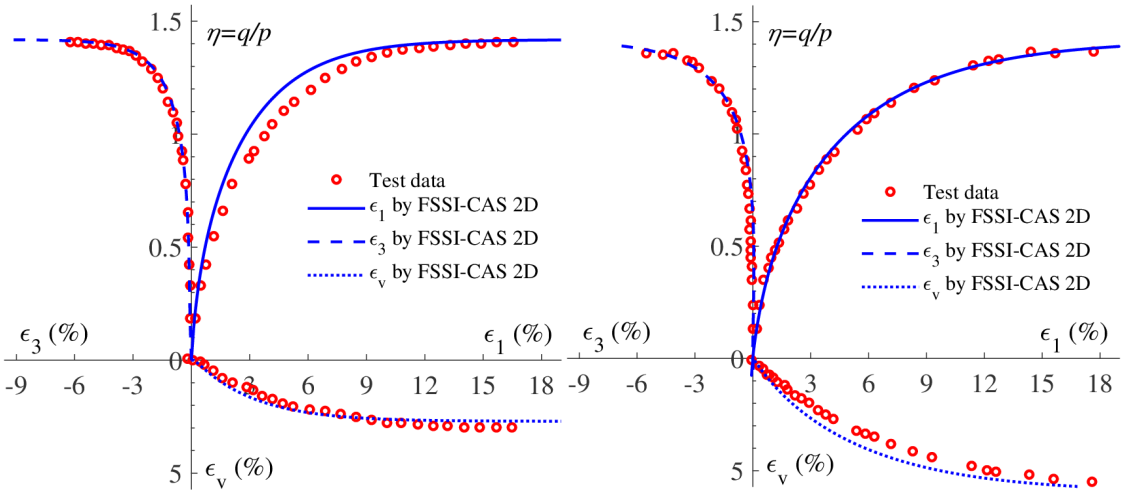


图 1-21 Nakai and Matsuoka (1986)的常规排水三轴试验中试样受力图及应力路径



（a）应力路径 OA　　（b）应力路径 OB

图 1-22 FssiCAS 软件的仿真计算结果与 Nakai and Matsuoka (1986)的试验结果对比

相关文献：

[1] Nakai, T., Matsuoka, H., 1986. A generalized elastoplastic constitutive model for clay in three dimensional stresses. Soil Found. 26 (3), 81–98.s

1.5.12 Terzaghi 提出的一维固结理论的验证

土力学奠基性学者 Terzaghi 曾给出了一个一维土固结模型的解。美国学者 Wang（2000）针对太沙基一维固结问题中的孔隙压力和固结沉降给出了一个更加精细的解析解：

$$p_s(z,t) = \frac{4}{\pi} p_{so} \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{1}{2m+1} exp \frac{-(2m+1)^2 \pi^2 c_v t}{4L^2} sin \frac{-(2m+1)\pi z}{2L} \tag{1-11}$$

$$w_s(z,t) = c_m p_{so} \left\{ (L+z) - \frac{8L}{\pi^2} \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} exp \frac{-(2m+1)^2 \pi^2 c_v t}{4L^2} cos \frac{(2m+1)\pi z}{2L} \right\} + w_{so} \tag{1-12}$$

针对一个厚度为 h 的两侧无线长的饱和砂地层，表面施加了均匀分布的压力 P。采用 FssiCAS 耦合模型计算砂床内部孔隙压力的消散过程和砂床表面的沉降量。计算中对两侧边施加周期性边界用以模拟无限边界。将数值计算结果和 Wang（2000）的解析解进行对比，发现 FssiCAS 耦合模型的数值结果和解析解能够完美地匹配，表明 FssiCAS 耦合模型对地基固结问题具有极好的可信度。

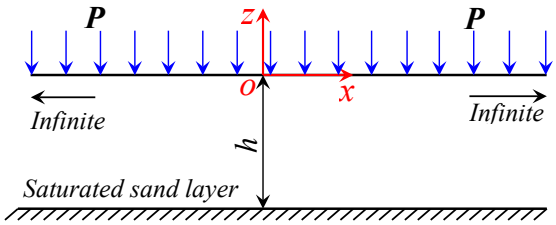


图 1-23 无限长度的饱和砂地层受到均匀分布的压力 P 的作用

Table 1-9 太沙基模型的验证案例所需的参数

Young's modulus	10^8 N/m^2
Poisson's ratio	0.25
Permeability	1.0×10^{-5} m/s
Porosity	0.375
L	20 m
P	10 kPa
β	4.4×10^{-10} m^2/N
λ	40 MPa
μ	40 MPa
α	1.0

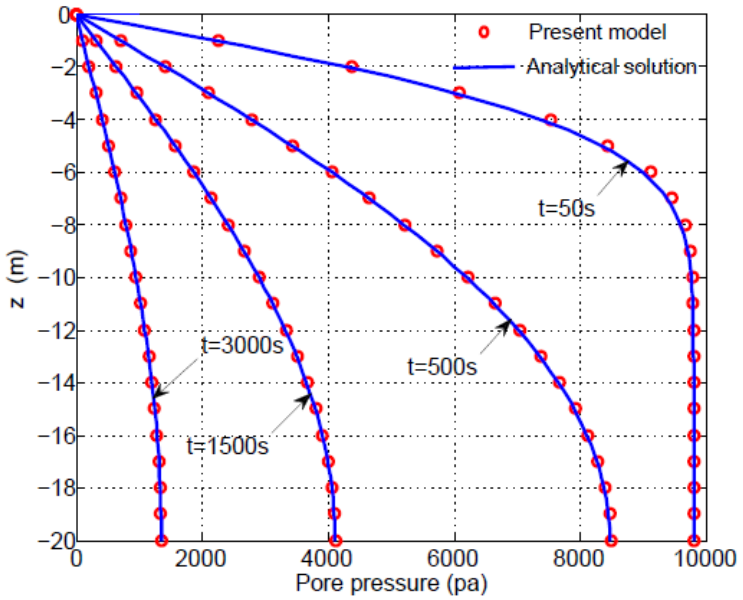


图1-24 不同时间处 x=0 方向上砂层的孔隙压力数值结果与解析解的对比图

(红色的圆圈:FssiCAS 的数值结果)

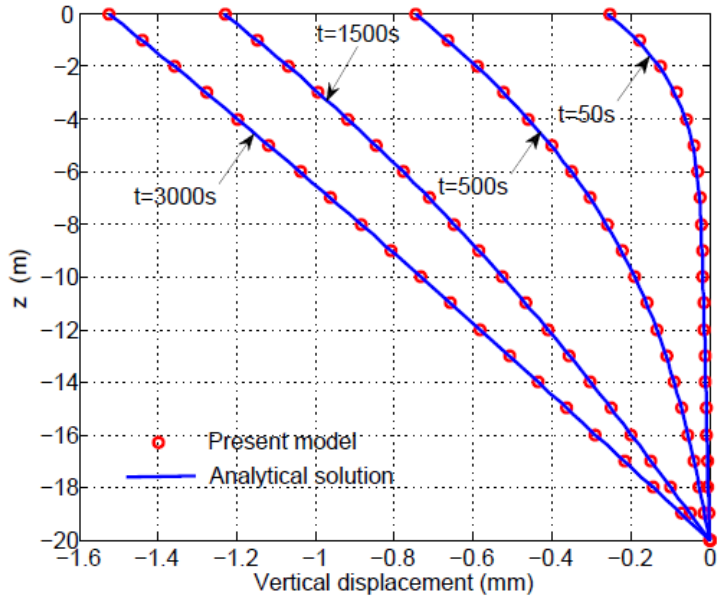


图 1-25 不同时间处 x=0 方向上砂层的竖直位移数值结果与解析解的对比图

(红色的圆圈:FssiCAS 的数值结果)

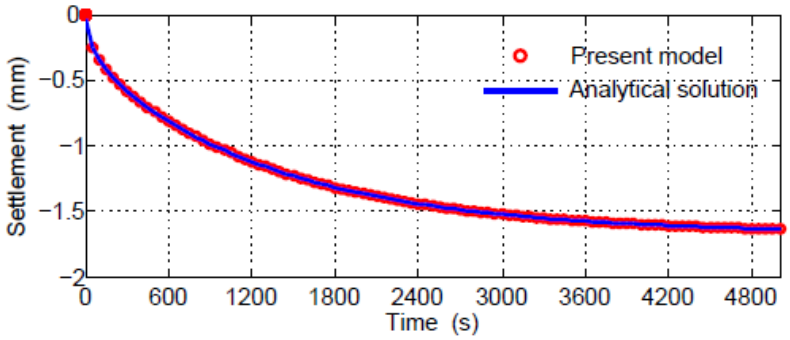


图 1-26 在均匀分布的压力 P 的作用下砂层表面的沉降数值结果与解析解的对比图

(红色的圆圈:FssiCAS 的数值结果)

1.6 大型案例应用

采用 FssiCAS 耦合模型系统地研究了建在海床地基之上的近海结构物的沉降，海床地基固结排水的过程。计算模型的准确性采用太沙基一维固结理论进行了严格的检验。FssiCAS 耦合模型在计算海床地基的固结排水以及相应的结构物沉降问题时，相较传统的计算模型，具有以下优势：

（1）可以耦合地考虑近海环境中的作用在海床地基和结构物上的静水压力；

（2）可以考虑作用在不透水结构物上的浮力。

1.6.1 大型海洋工程的应用

将 FssiCAS 耦合模型对海床-结构物系统固结沉降问题的研究能力应用到千米级的工程大尺度案例中，研究海床地基的固结过程，评估近海结构物的沉降量。经研究表明，FssiCAS 耦合模型对实际工程的应用取得了很好的效果，具有很好工程适用性。

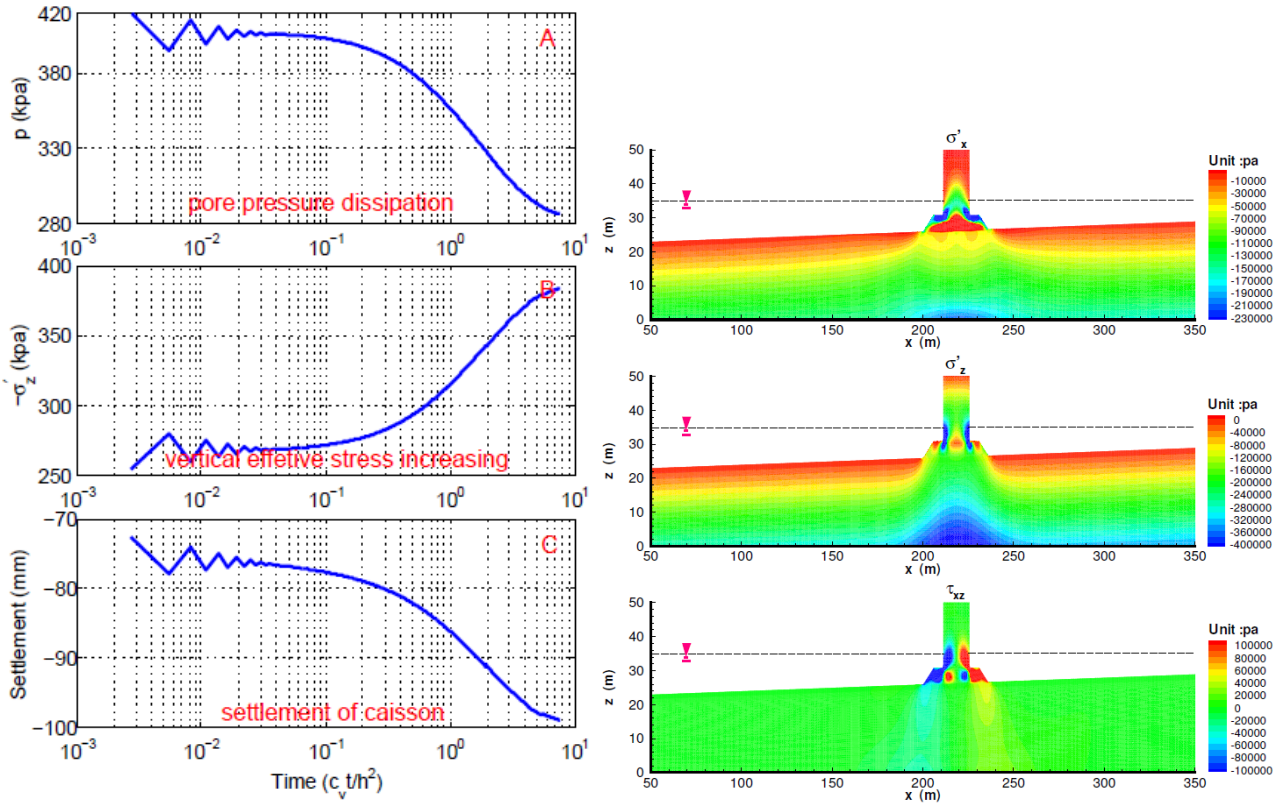


图 1-27 FssiCAS 计算得到的固结过程和海床-结构物的有效应力分布

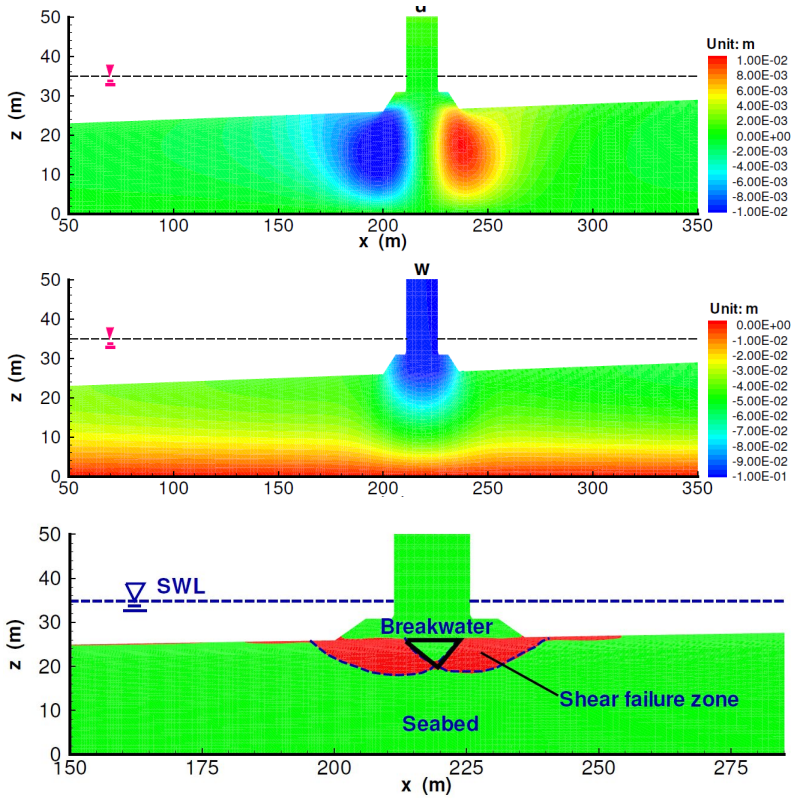


图 1-28 FssiCAS 计算得到的固结后位移分布和预测的海床地基内剪切破坏区的分布

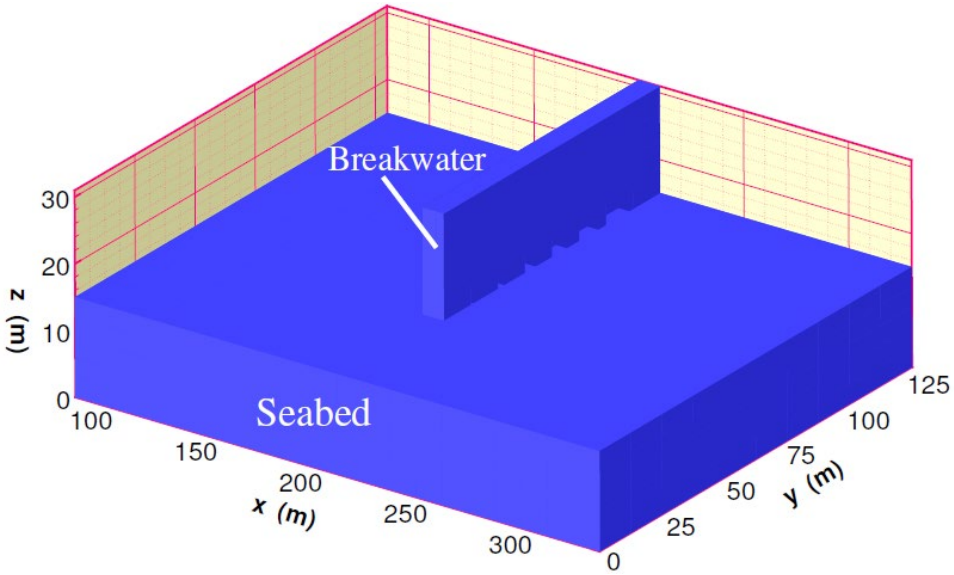


图 1-29 FssiCAS 计算应用的大尺度模型的几何形状与尺寸

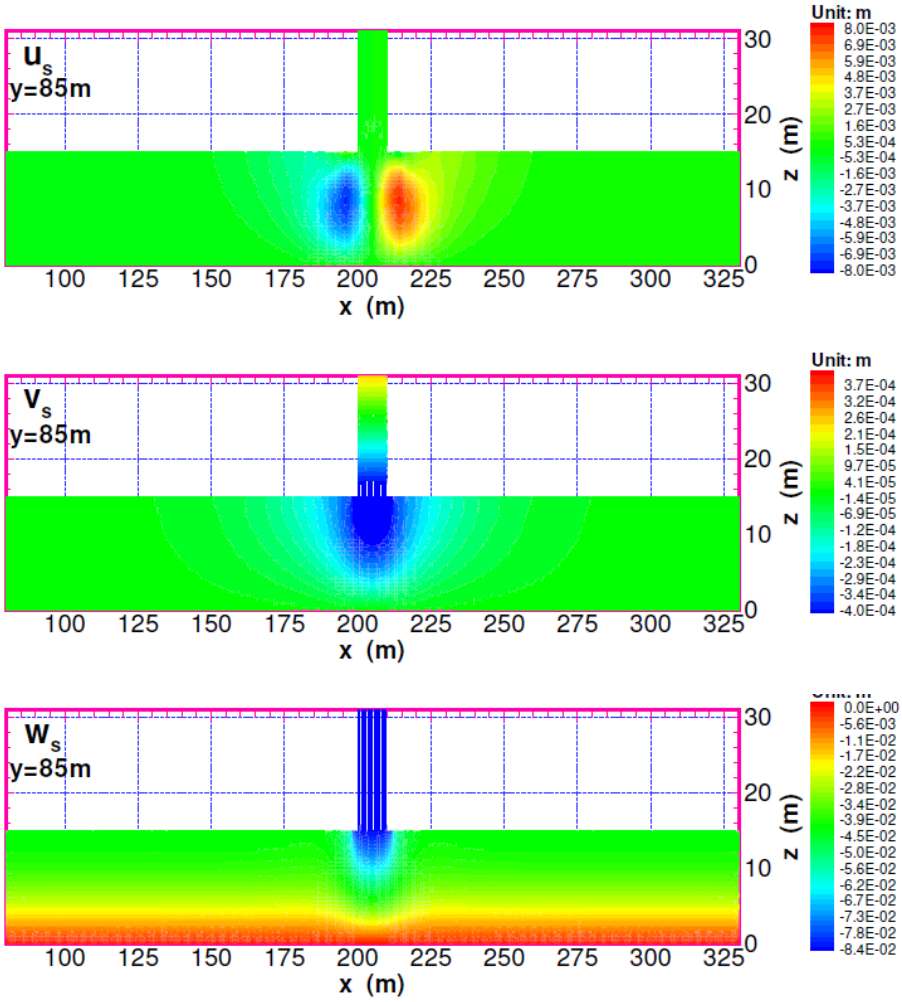


图 1-30 FssiCAS 计算得到的固结后海床-结构物的位移分布

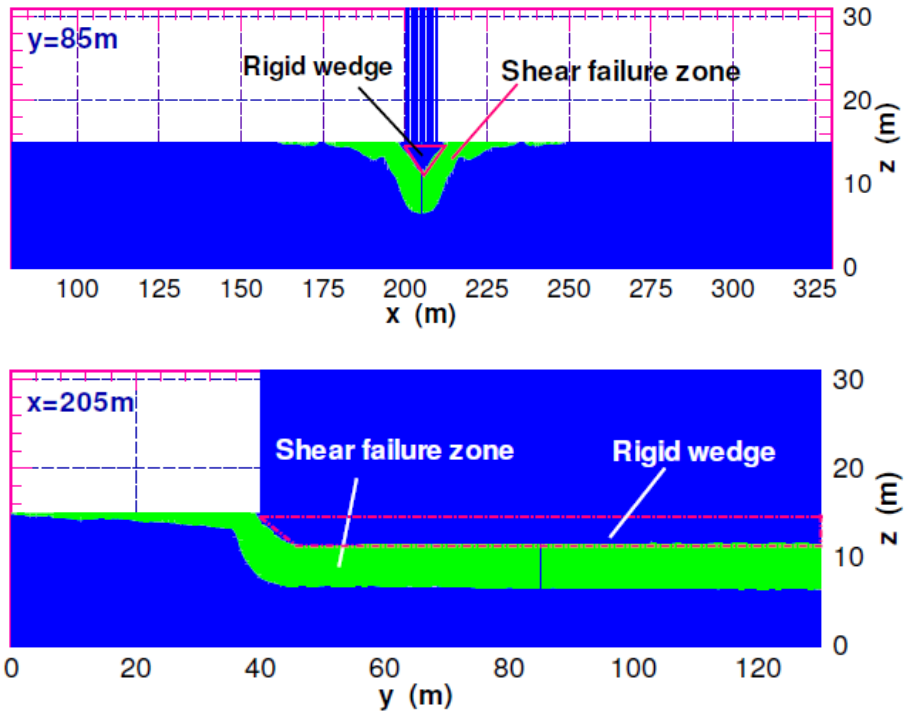


图 1-31 FssiCAS 计算得到的海床地基内剪切破坏区的分布

1.6.2 波浪作用下海床和结构的动力响应与稳定性

在近海环境中，各种波浪对结构物的冲击是工程师们进行结构设计时必须要考虑的一个大问题，需确保在设计波浪的冲击下，近海结构物能够安全稳定。所以近海结构物设计人员尤其关心各种波浪作用下结构物和海床地基的动态响应和相互作用的特征，主要包括：设计波浪对结构物的冲击力量级和时程、结构物的振动幅度、结构物的沉降、海床地基的有效应力和孔隙水压力的变化过程，海床地基的软化或者液化过程、深度和范围，以及是否会造成结构物的失稳等等。采用 FssiCAS 耦合模型研究了各种典型波浪作用下近海结构物及其海床地基的动力响应规律，定量地回答了近海结构物设计人员所关心的结构物安全稳定的问题。根据近海海域的情况，所设计的波浪主要包括规则常规波浪、极端大波浪、地震诱发的海啸；海床地基包括非常密实的弹性海床和欠密实松散海床。

1.6.2.1 特大波浪作用下致密弹性海床及复合防波堤的动力响应与稳定性

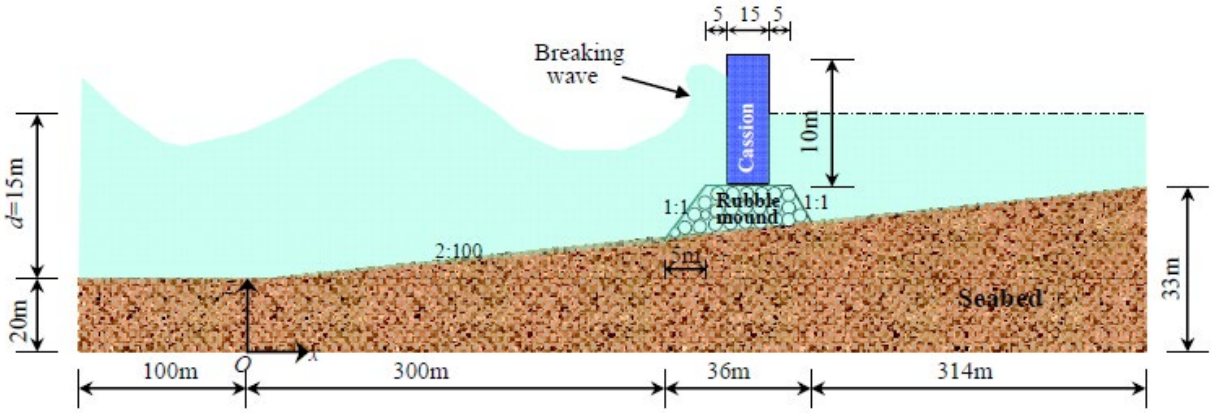


图 1-32 极端波浪作用下密实弹性海床和复合防波堤的模型图

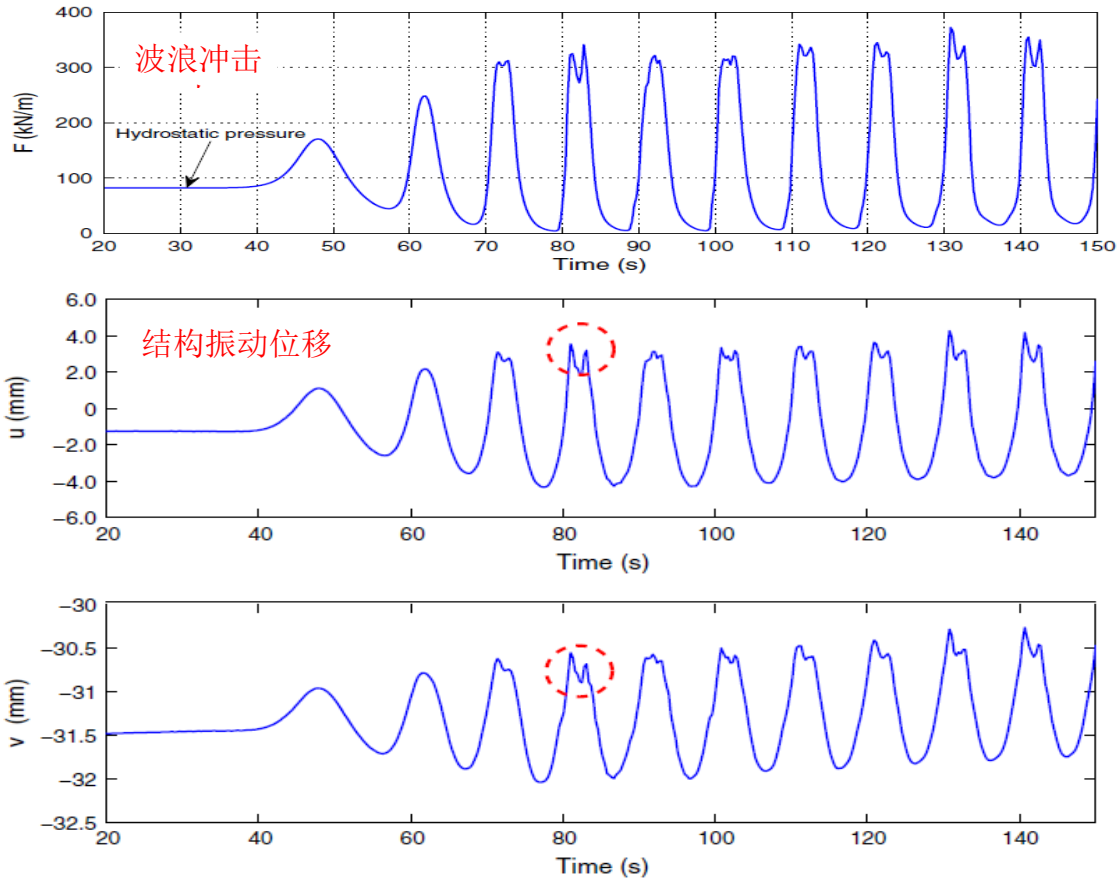


图 1-33 波浪冲击力、结构振动位移的时程曲线

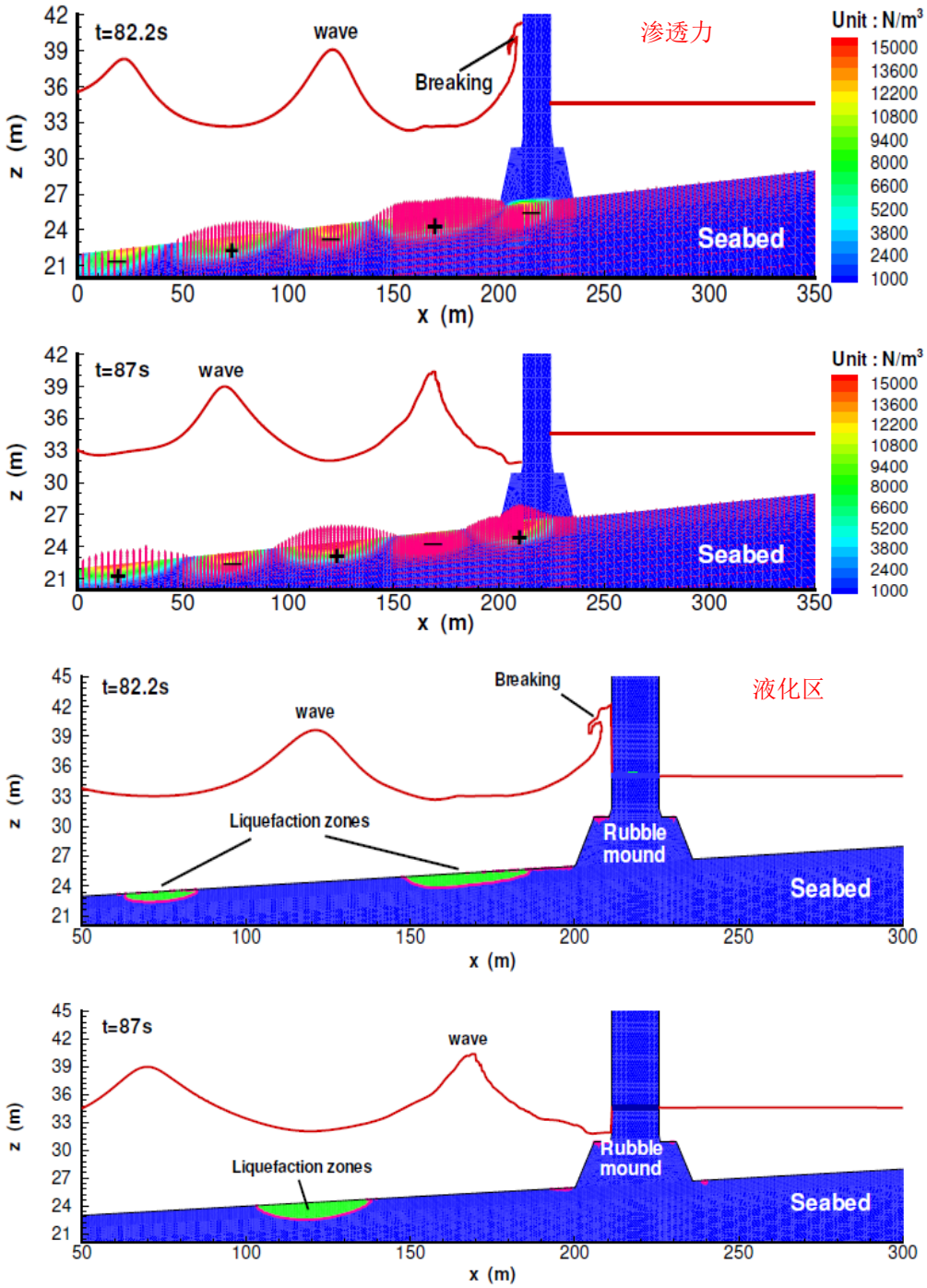


图 1-34 渗透力分布图和液化区分布图

1.6.2.2 海啸下致密弹性海床及碎石堆防波堤的动力响应与稳定性

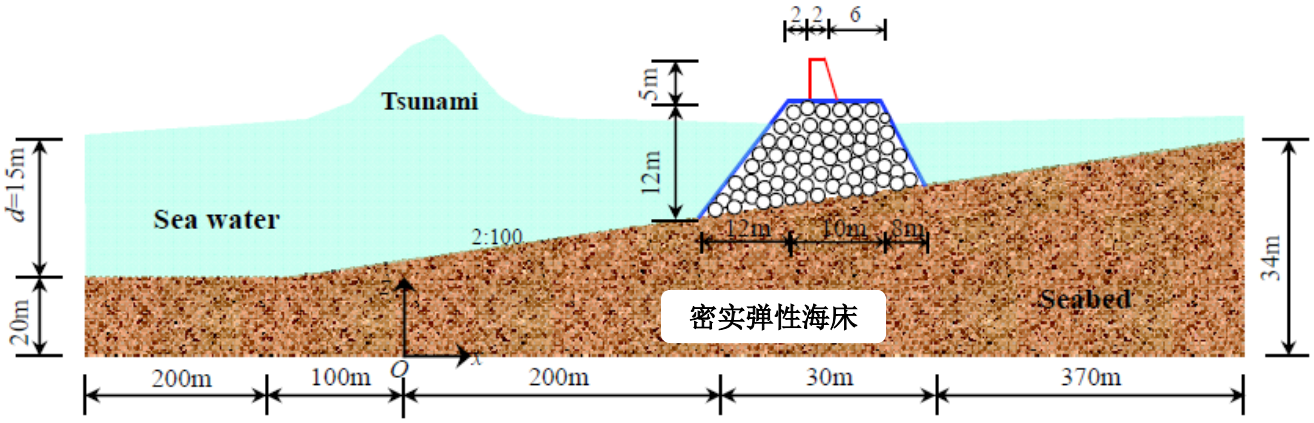


图 1-35 海啸作用下密实弹性海床和碎石丘防波堤的模型图

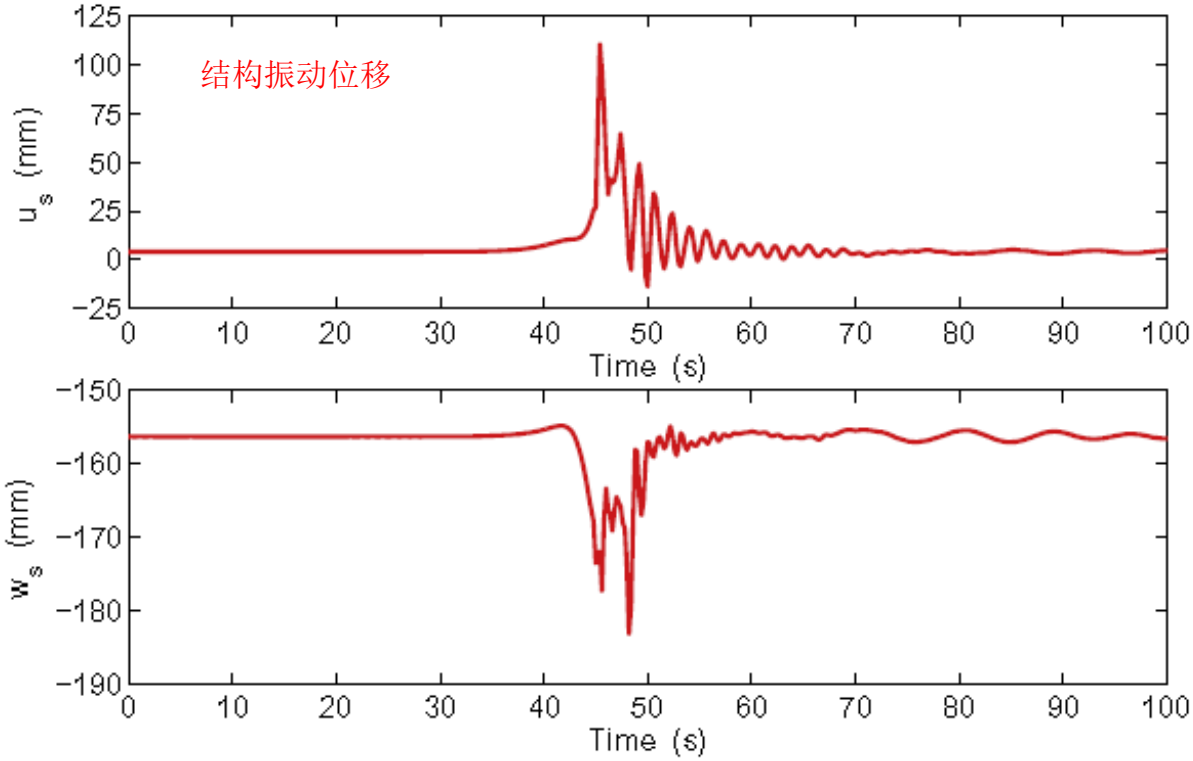


图 1-36 结构振动位移的时程曲线

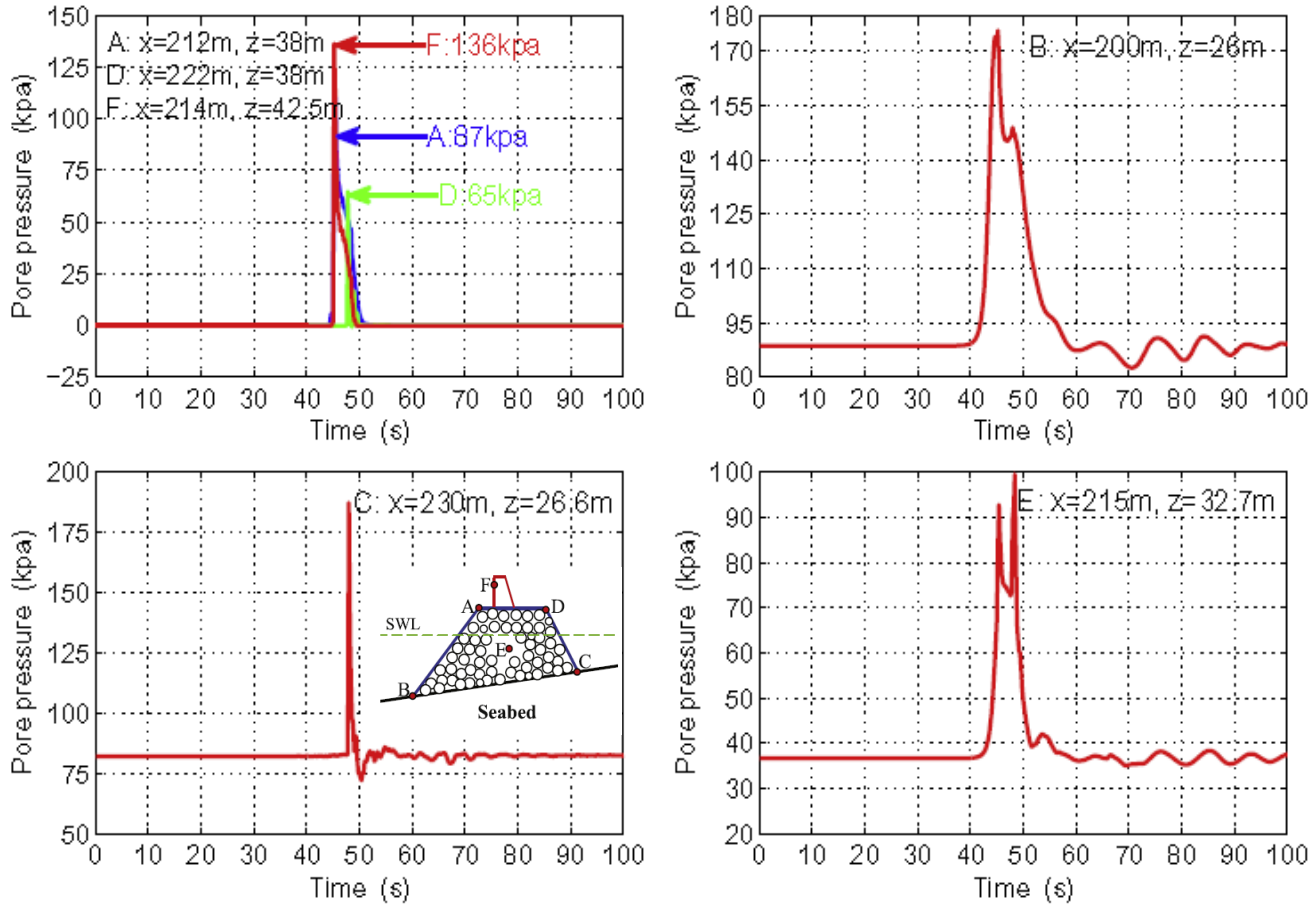


图 1-37 点 A（x=212m，z=38m）、B（x=200m，z=26m）、C（x=230m，z=26.6m）、D（x=222m，z=38m）、E（x=215m，z=32.7m）、F（x=214m，z=42.5m）孔压的时程曲线

1.6.2.3 特大破碎波作用下松散沉积海床及复合防波堤的动力响应与稳定性

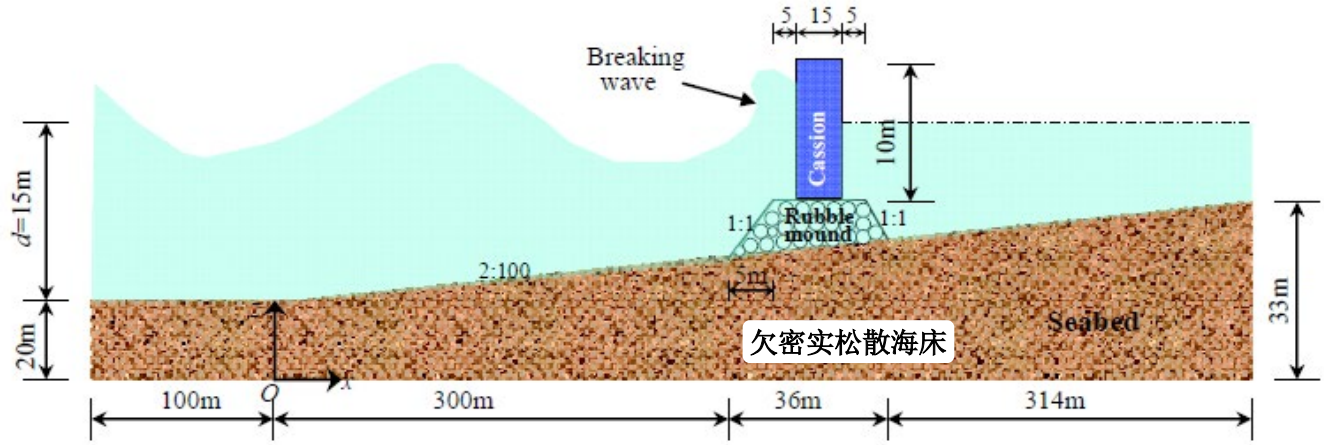


图 1-38 超大破碎波作用下松散沉积海床和复合防波堤的模型图

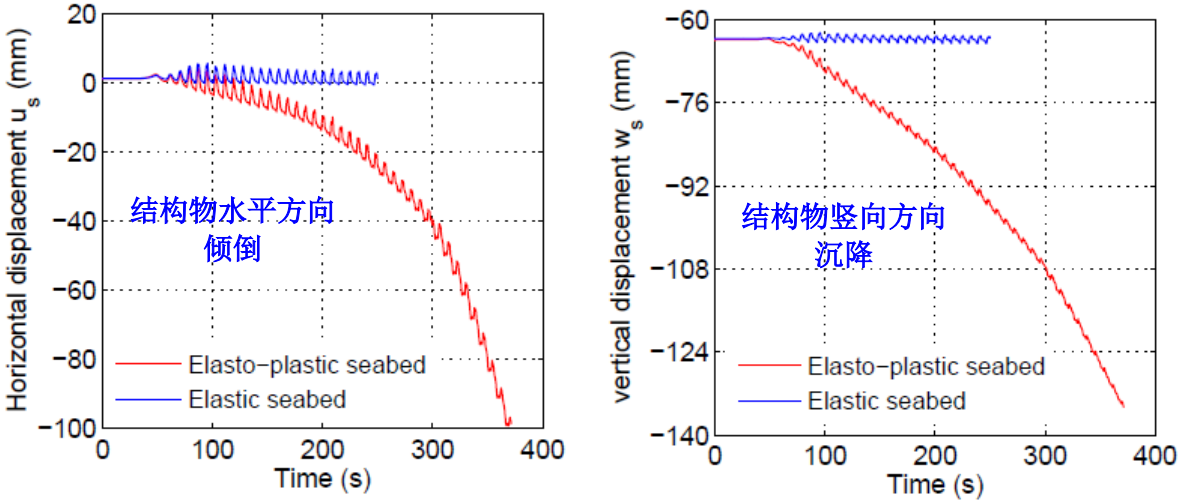


图 1-39 结构物水平方向倾倒和竖向方向沉降的时程曲线

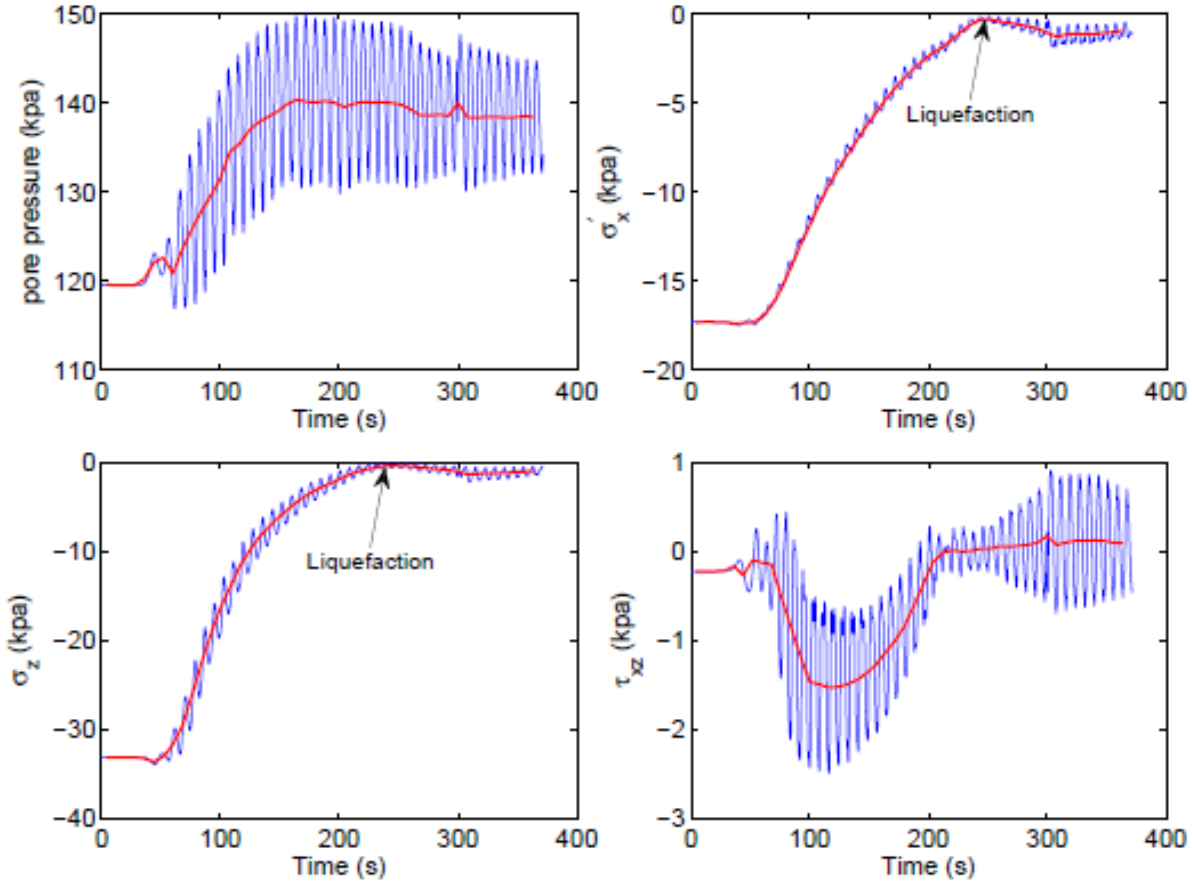


图 1-40 波浪长时间作用下欠密实海床地基内孔隙压力累积、有效应力减少液化的过程

1.6.2.4 三维规则波作用下致密弹性海床和沉箱防波堤的动力响应与稳定性

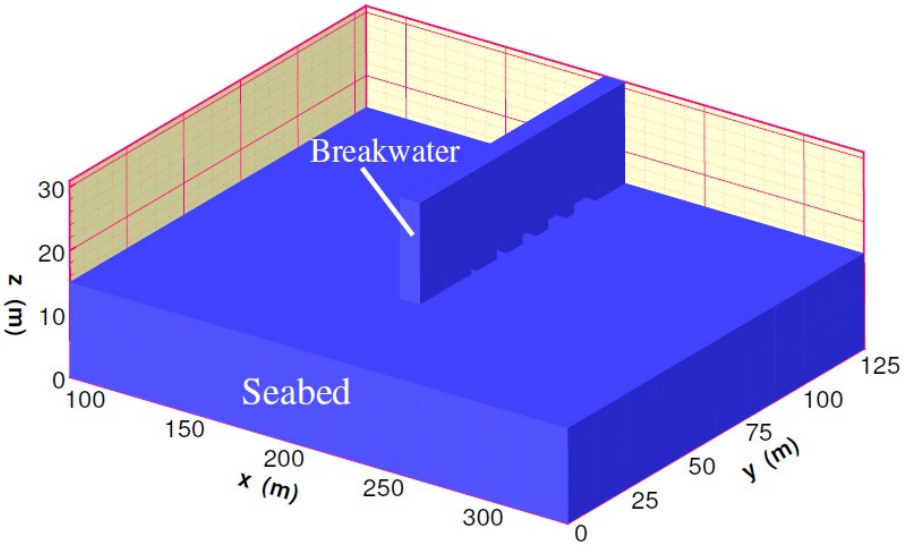


图 1-41 FssiCAS 计算应用的大尺度模型的几何形状与尺寸

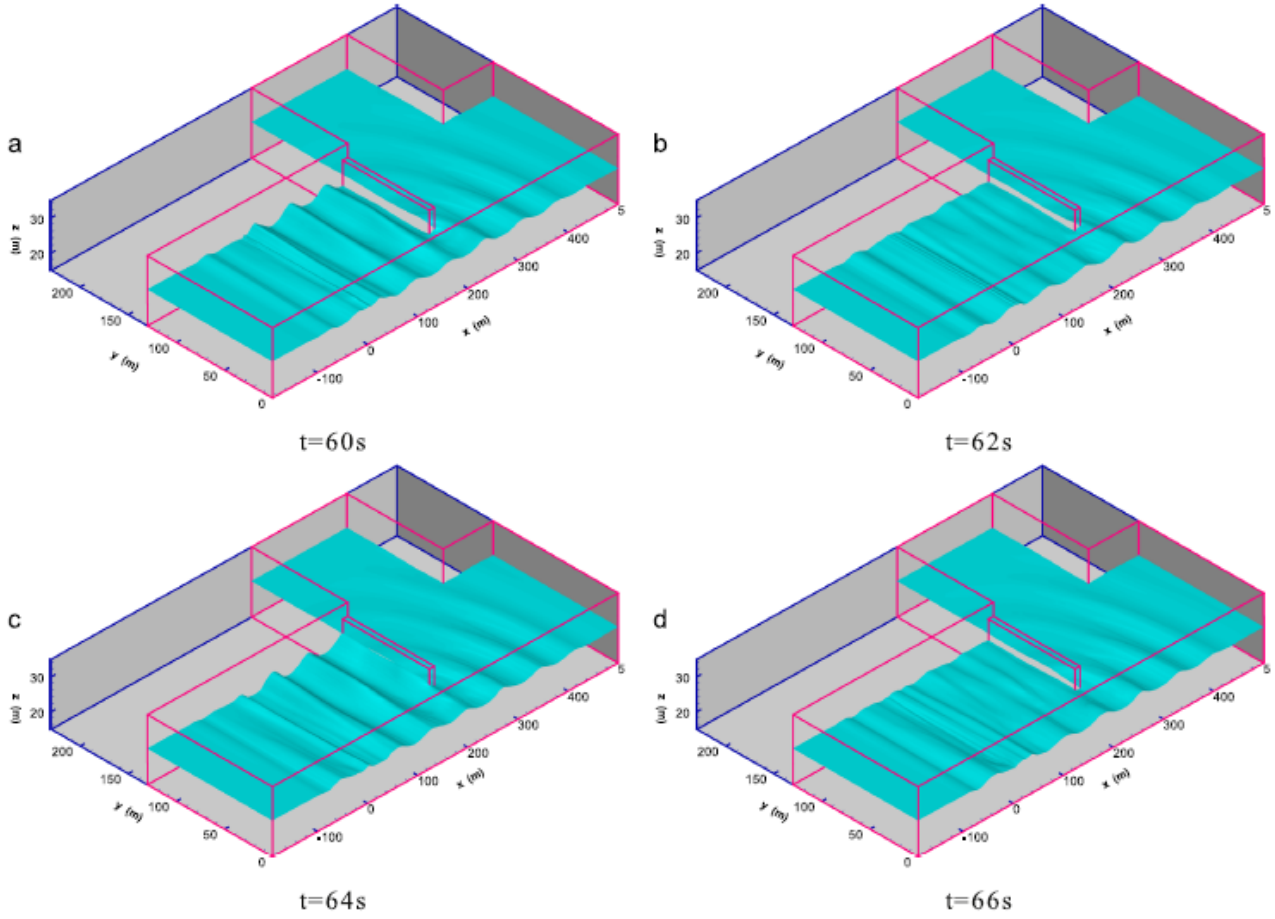


图 1-42 FssiCAS 计算确定的海洋结构物周围的波浪场

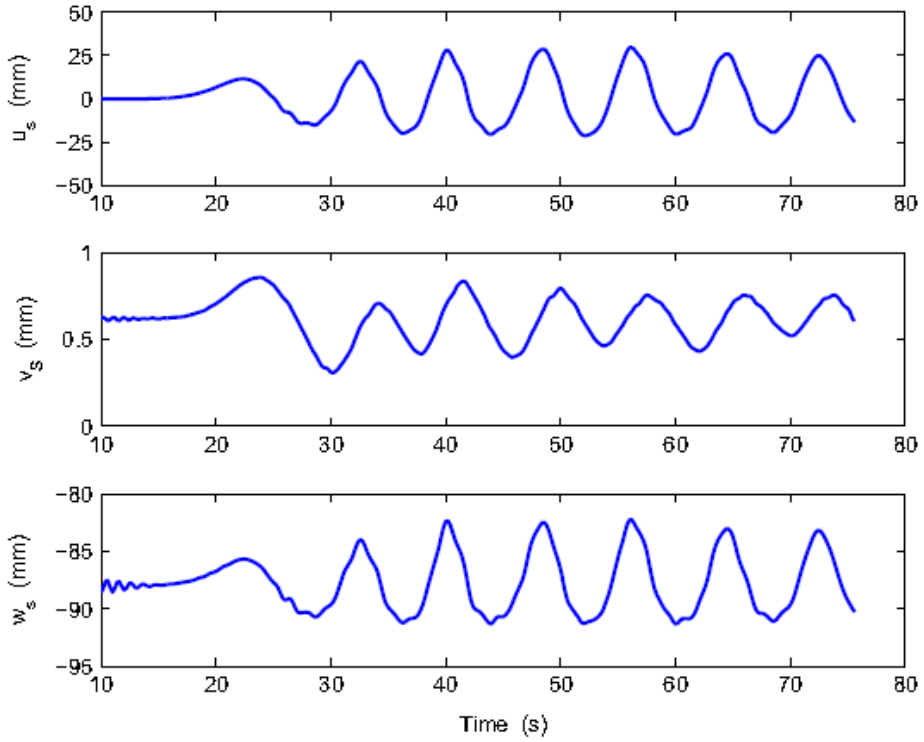


图 1-43 FssiCAS 计算确定的海洋结构物受波浪冲击导致的振动

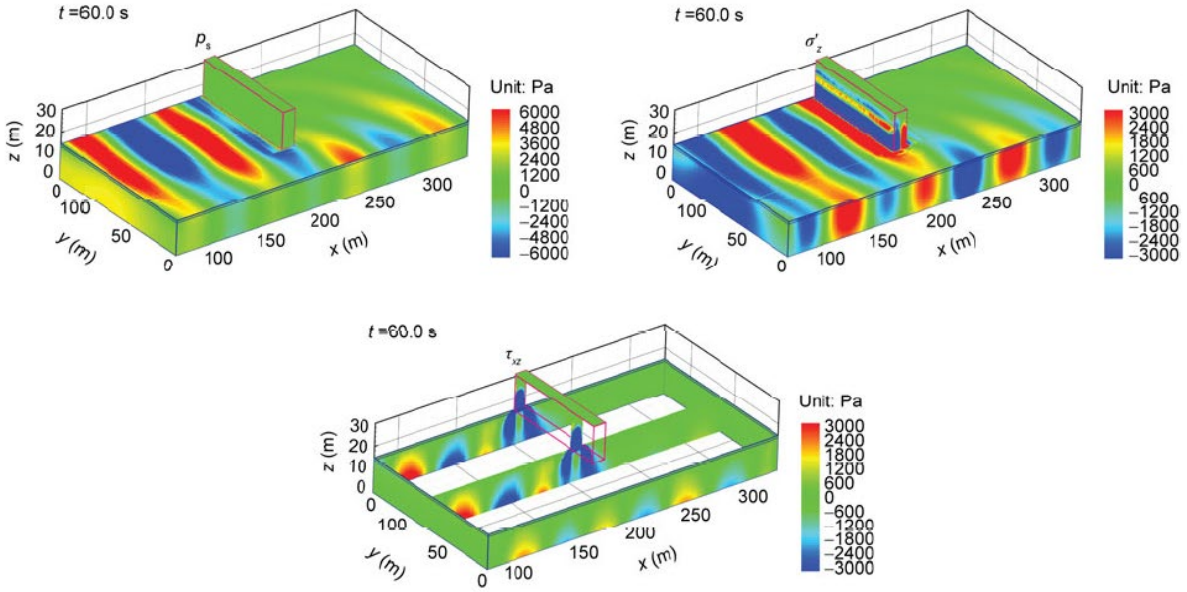


图 1-44 FssiCAS 计算确定的海床地基内的孔隙压力和有效应力分布

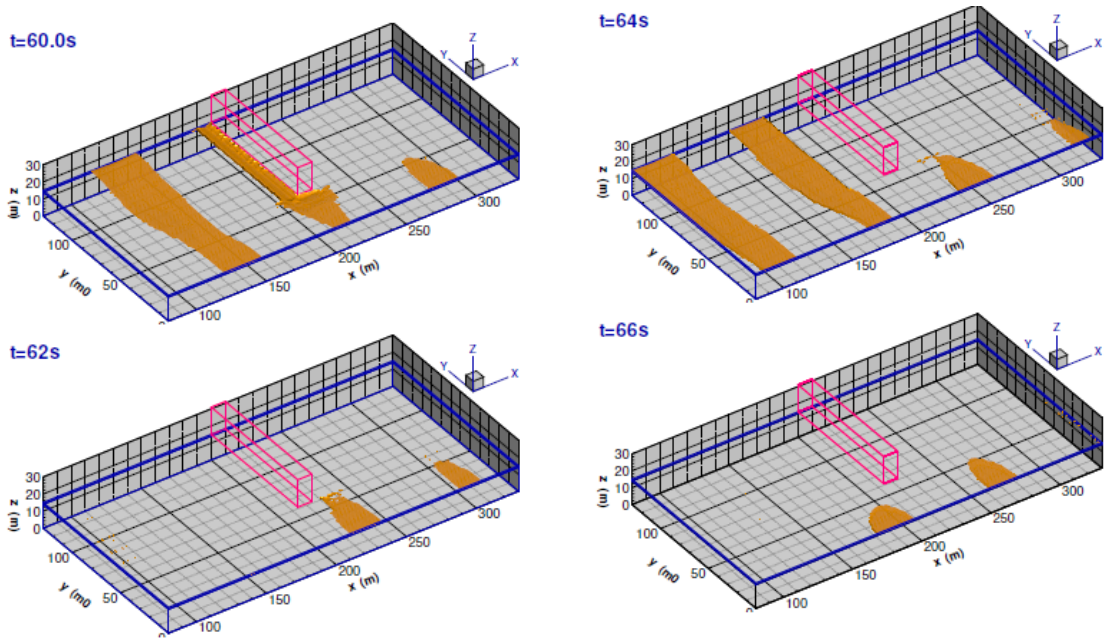


图 1-45 FssiCAS 计算确定的弹性海床地基内瞬态液化区的范围

1.6.2.5 松散沉积海床及沉箱防波堤在三维规则波作用下的动力响应与稳定性

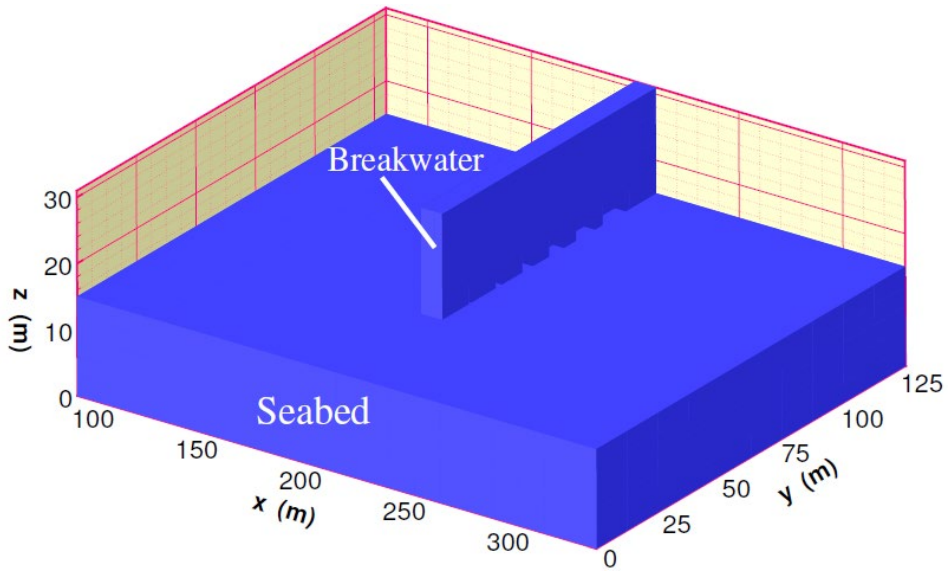


图 1-46 FssiCAS 计算应用的大尺度模型的几何形状与尺寸

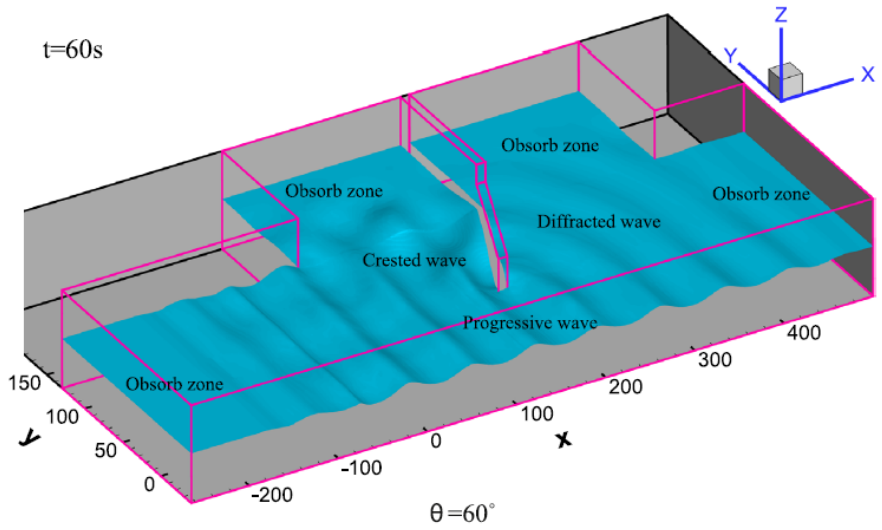


图 1-47 FssiCAS 计算确定的海洋结构物周围的波浪场

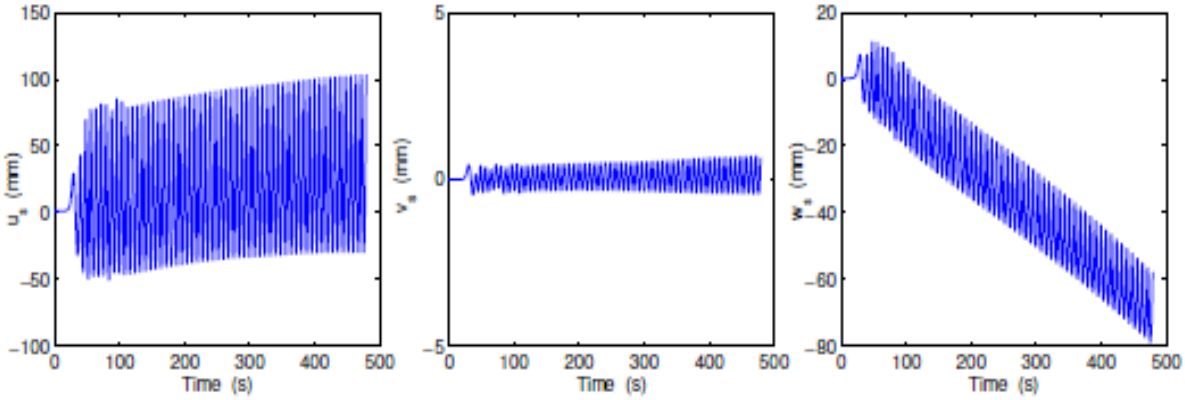


图 1-48 FssiCAS 计算确定的海洋结构物受波浪冲击导致的振动和沉降

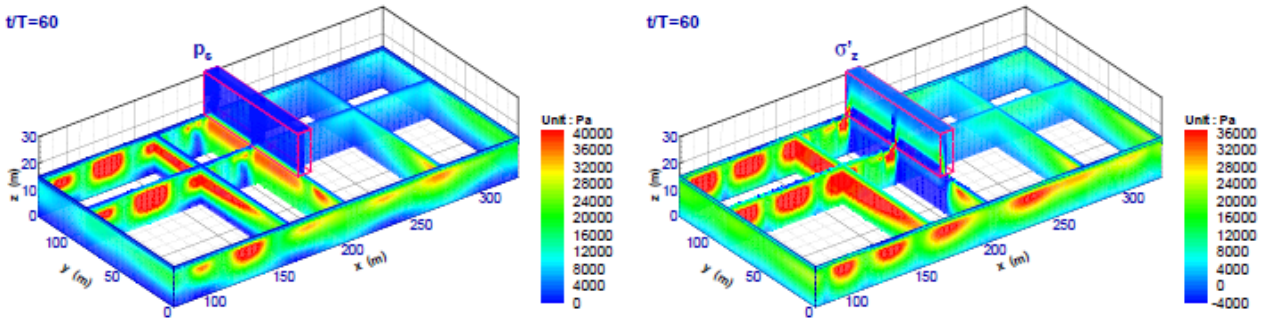


图 1-49 FssiCAS 计算得到的防波堤周围海床地基内的孔隙压力、有效应力分布特征

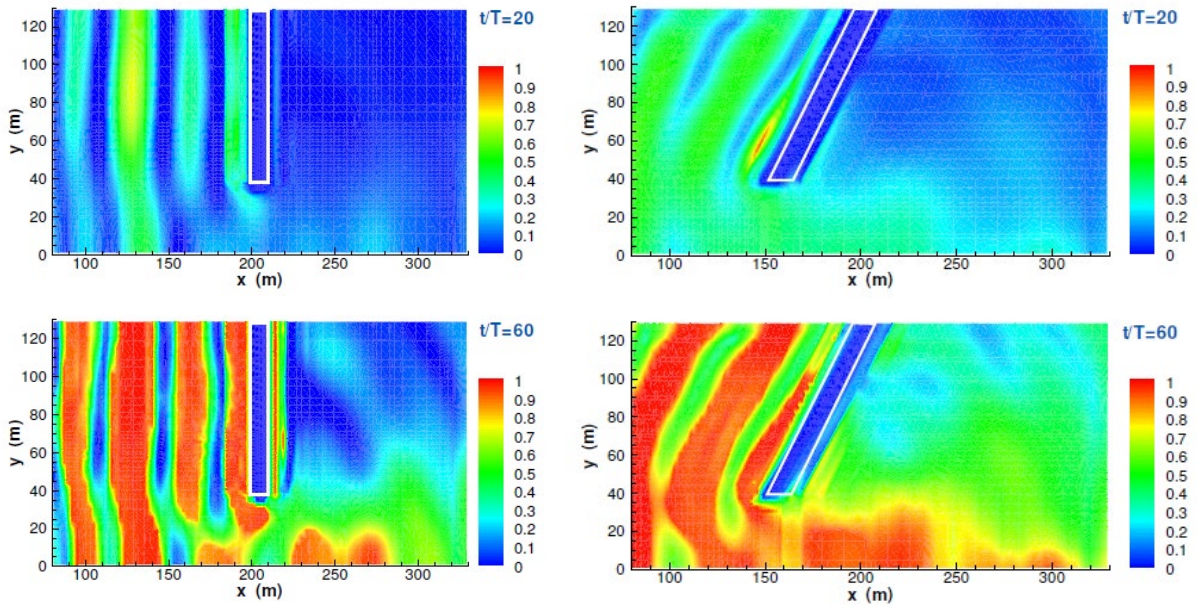


图 1-50 FssiCAS 计算确定的欠密实松散海床地基内累积液化势能的分布

(注:红色表示完全液化)

1.6.3 地震作用下海床及结构的动力响应与稳定性

1.6.3.1 地震作用下极致密弹性海床及复合防波堤的动力响应与稳定性

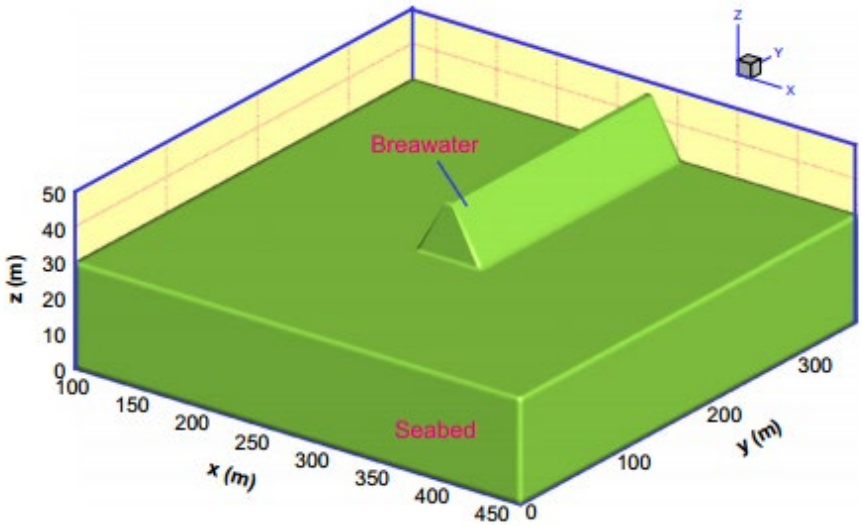


图 1-51 FssiCAS 计算应用的大尺度模型的几何形状与尺寸

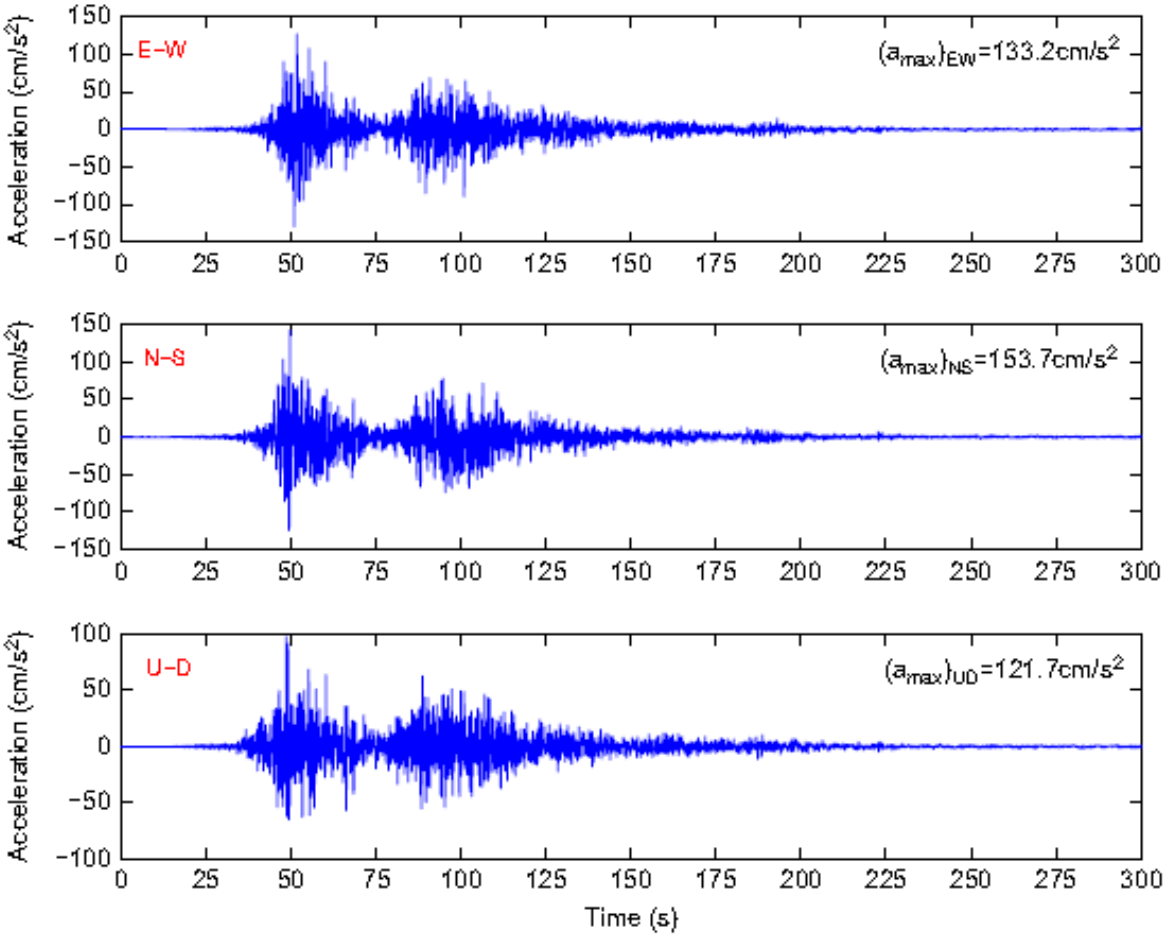
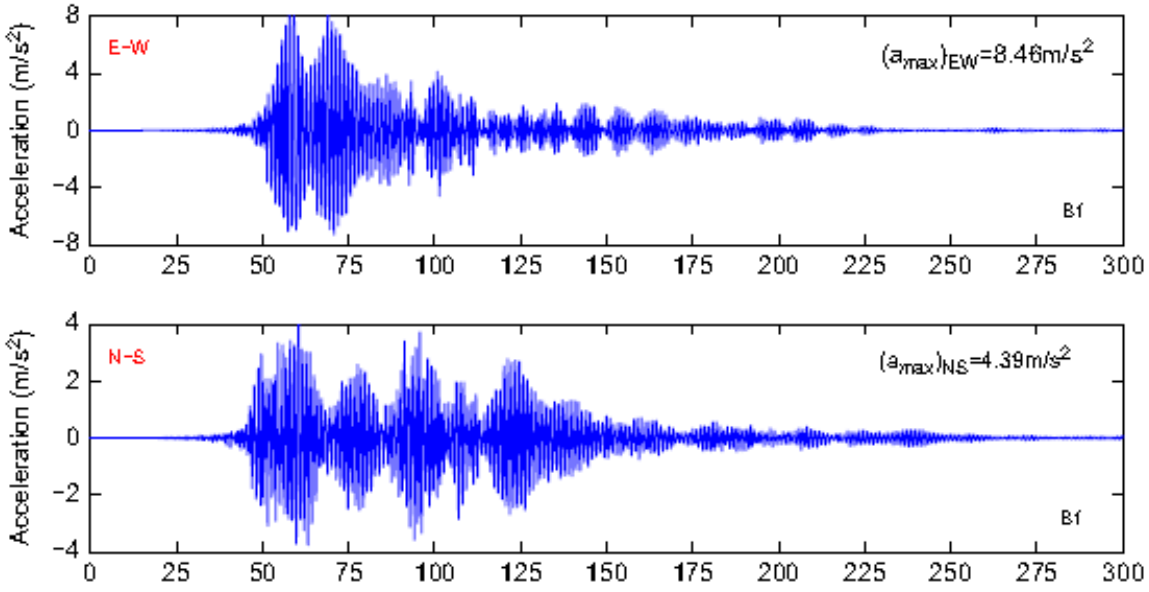


图 1-52 FssiCAS 计算中从底边界输入的地震波（来自日本 311 地震的某地震台站记录）



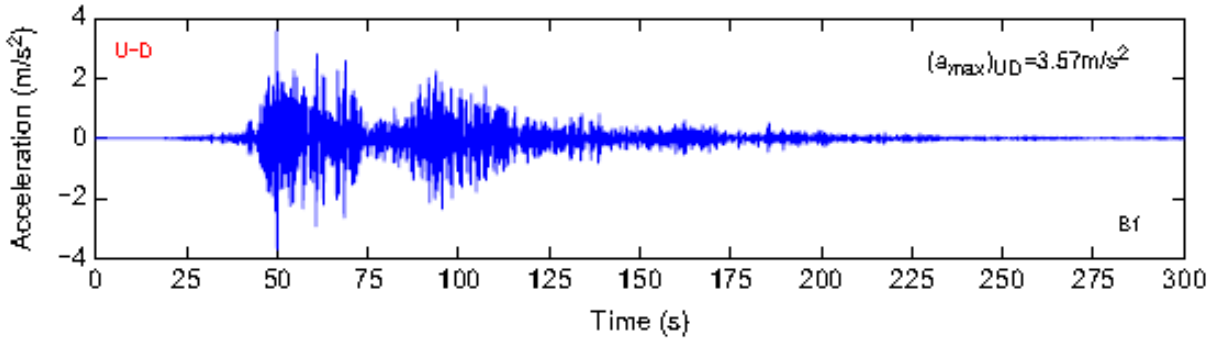


图 1-53 FssiCAS 计算得到的海洋结构物地震动加速度响应时程（注：结果表明，海洋结构物的地震动响应相比入射波在三个方向上都存在大幅度的加速度放大）

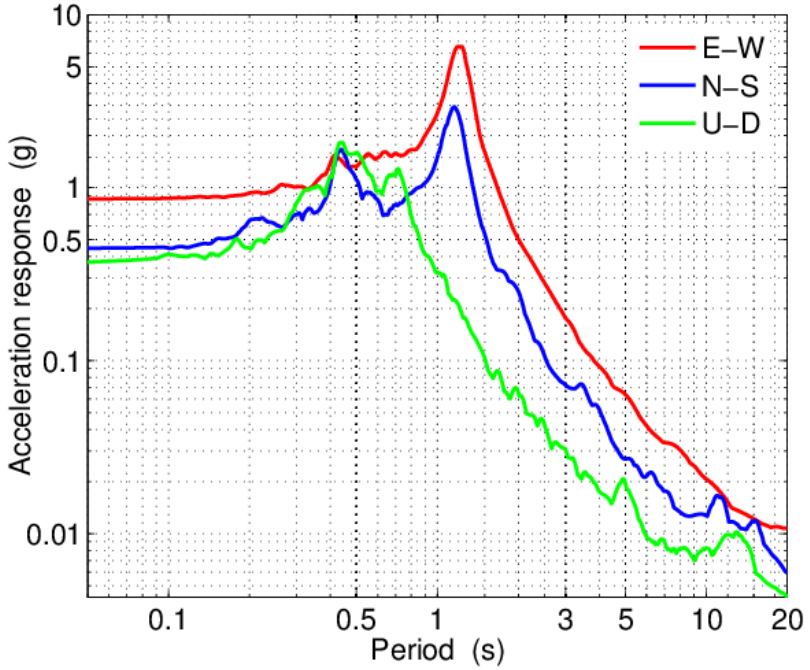


图 1-54 FssiCAS 计算得到的海洋结构物地震动加速度响应谱

（注：结果表明，海洋结构物-海床地基系统的水平方向（E-W 和 N-S 向））的共振大约为 1.0-1.1s，竖向的共振频率大约为 0.4-0.7s）

1.6.3.2 地震作用下松散沉积海床液化机制

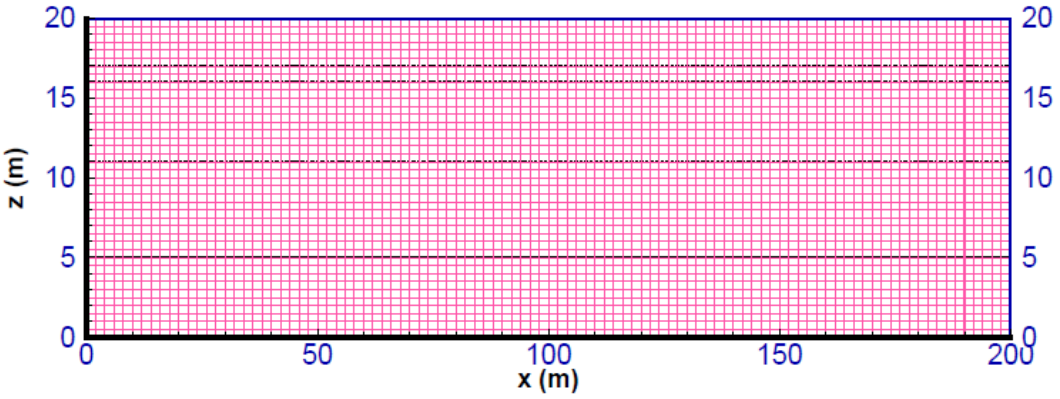


图 1-55 FssiCAS 的计算网格系统

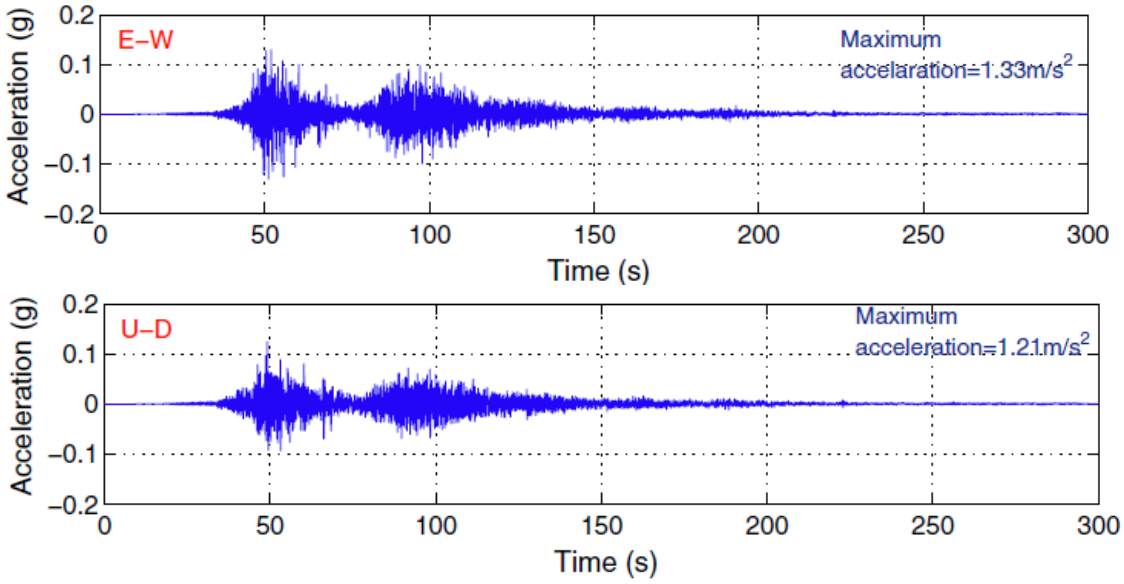
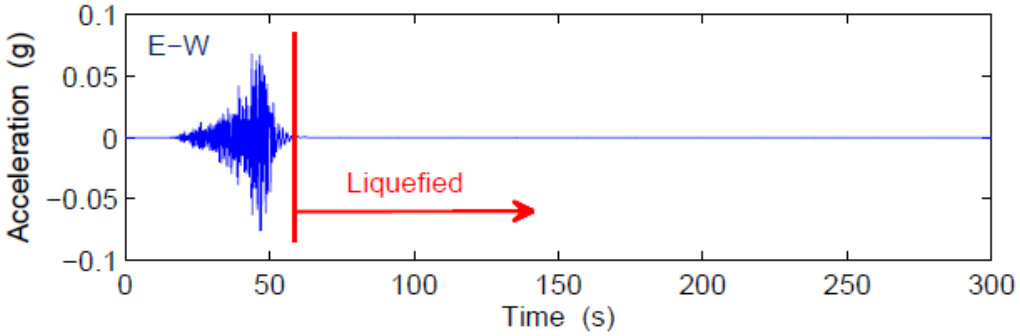


图 1-56 FssiCAS 计算中从底边界输入的地震波（来自日本 311 地震的某地震台站记录）



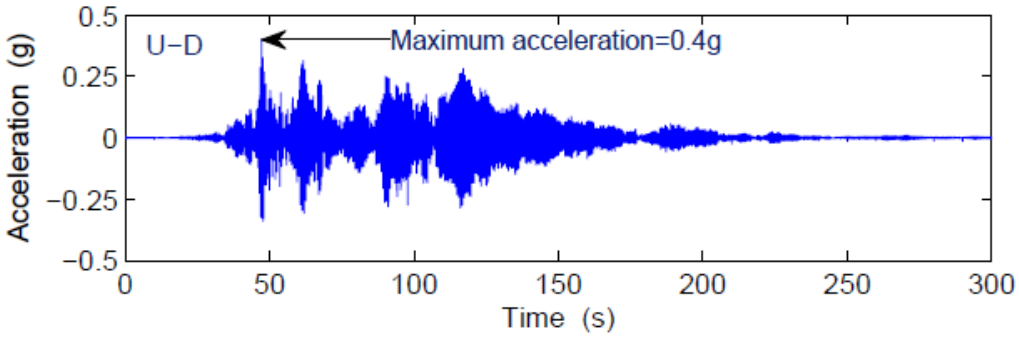


图 1-57 FssiCAS 计算得到的海床表面的地震加速度时程（注：t=60s 之后海床发生了液化，水平方向的剪切地震波突然消失，竖向纵波能够继续传播）

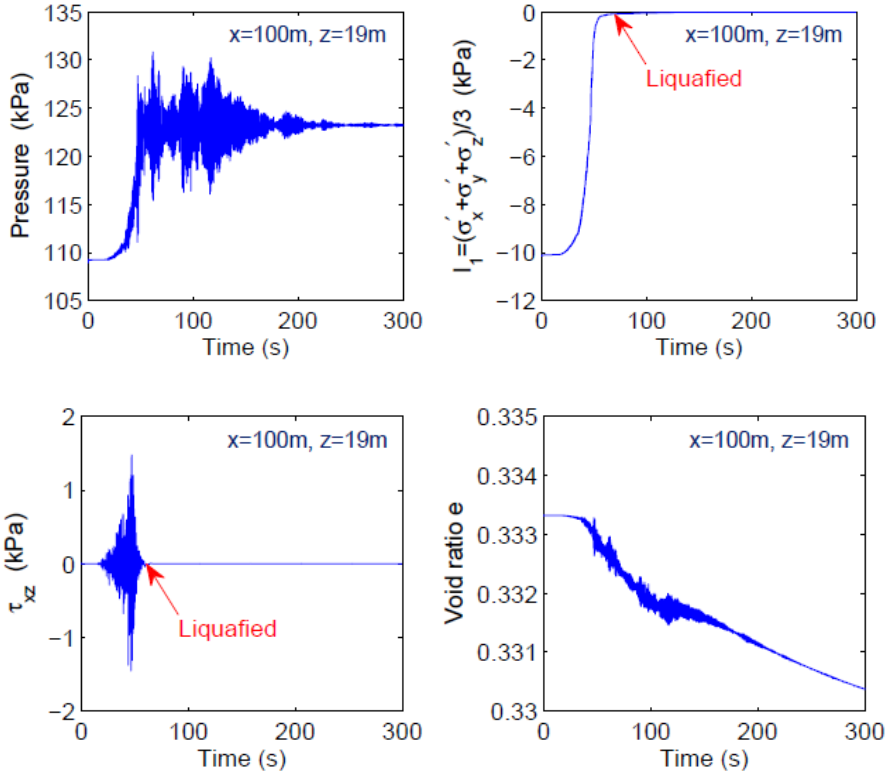


图 1-58FssiCAS 计算得到的海床内某处的孔隙压力、有效应力、孔隙比的时程（注：地震波入射欠密实海床后，孔隙压力急剧上升，有效应力迅速减少到 0 而发生液化，液化后不能传递剪切波，剪应力为 0，整个地震波作用过程中，孔隙比变小，海床土变得越来越密）

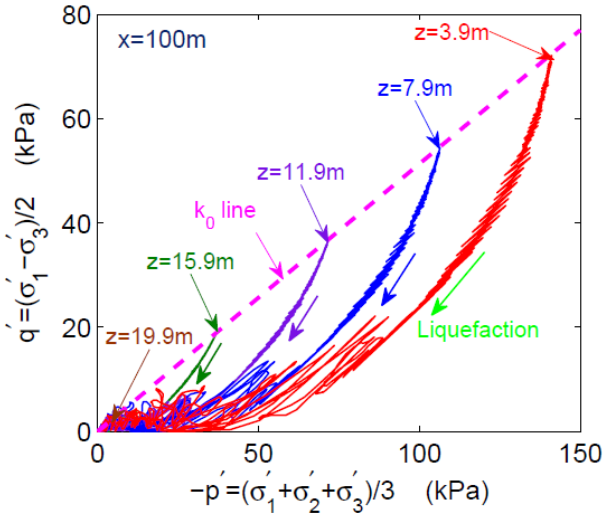


图 1-59 FssiCAS 计算得到的海床内典型位置处的应力路径

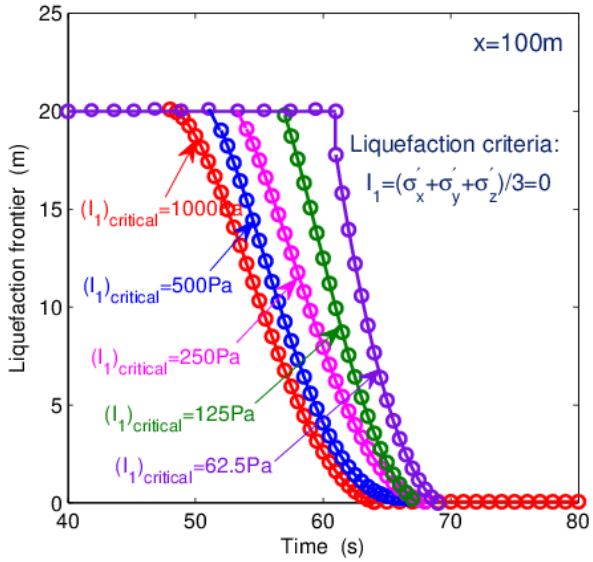


图 1-60 FssiCAS 计算得到的欠密实海床在地震波作用下液化区前缘的深度时程（注：研究表明，地震波导致的欠密实海床液化过程和波浪导致的海床液化过程基本一致，都是从海床表面开始液化，逐渐向海床深部发展）

1.6.3.3 地震作用下松散沉积海床及复合防波堤的动力响应与稳定性

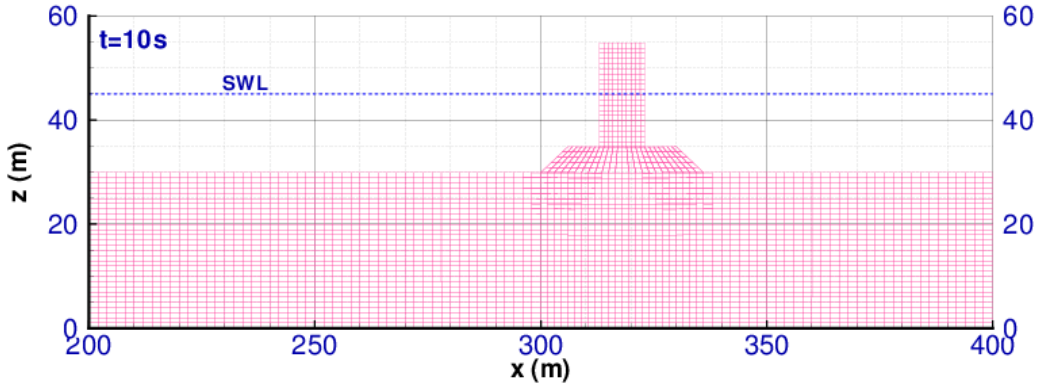


图 1-61 FssiCAS 的计算网格系统

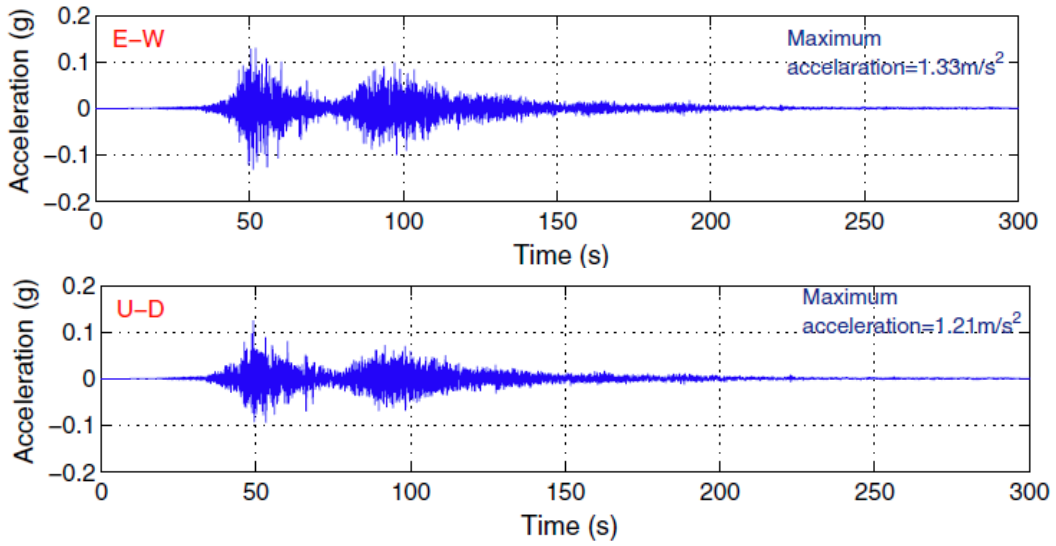


图 1-62 FssiCAS 计算中从底边界输入的地震波（来自日本 311 地震的某地震台站记录）

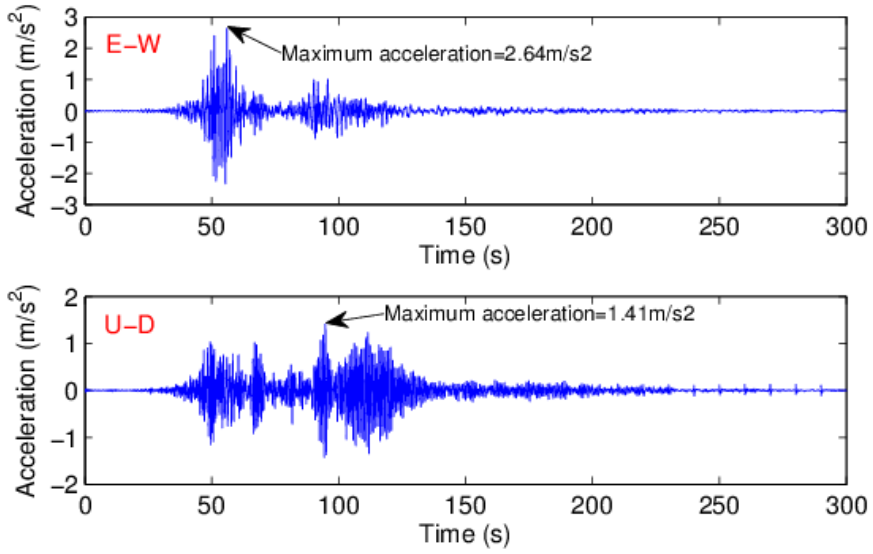


图 1-63 FssiCAS 计算得到的海洋结构物地震动加速度响应时程

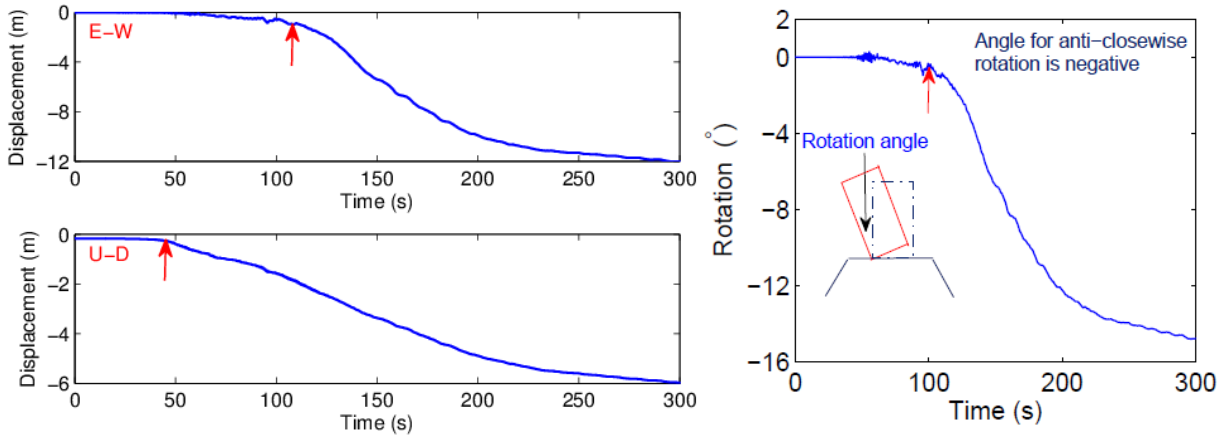


图 1-64 FssiCAS 计算得到的海洋结构物在地震侵袭下的位移、沉降时程（注：结果表明，在地震波的侵袭下，建于欠密实海床地基之上的海洋结构物发生了 12 米的水平滑移，和 6 米的沉降，发生了 15 度的倾斜，结构物已经基本失稳，但未完全倾倒）

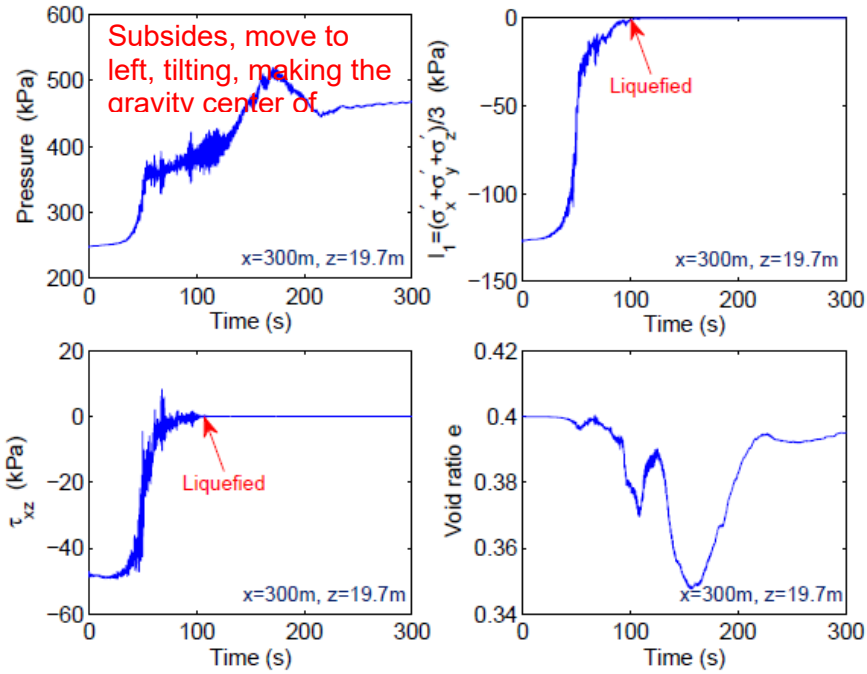


图 1-65 FssiCAS 计算得到的海床地基内某处的孔隙压力、有效应力、孔隙比的时程（注：地震波入射欠密实海床地基后，孔隙压力急剧上升，有效应力迅速减少到 0 而发生液化，液化后不能传递剪切波，剪应力为 0，整个地震波作用过程中，孔隙比有先变小后变大的过程，海床地基的地震动响应具有明显的强烈非线性特点）

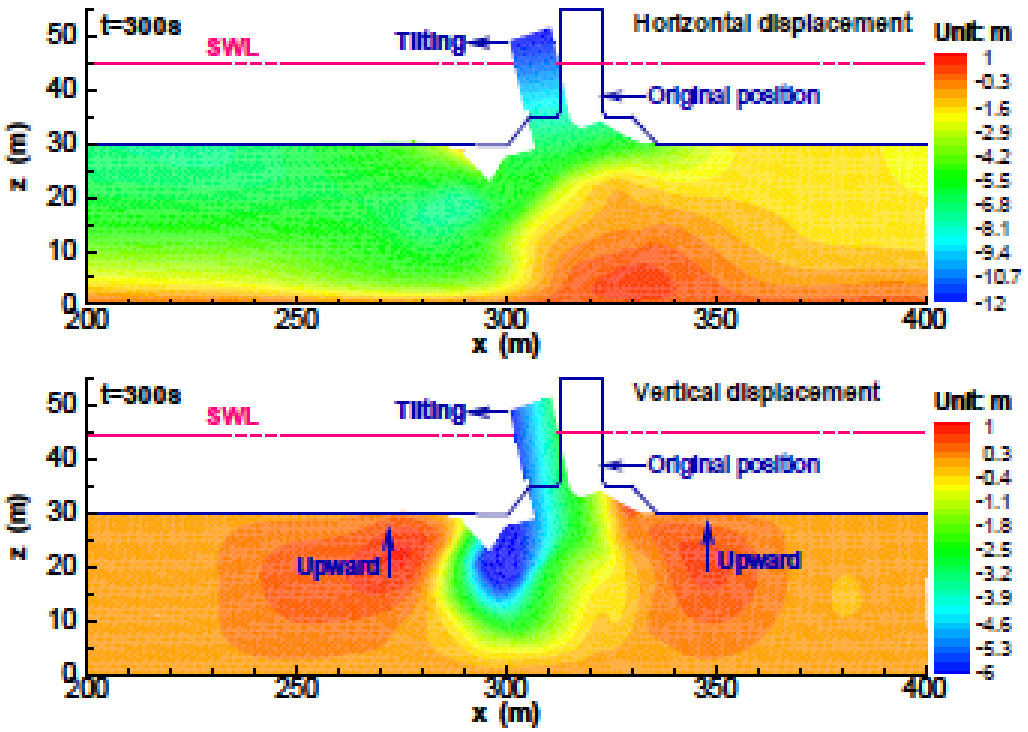


图 1-66 FssiCAS 计算得到的海洋结构物-海床地基内的位移、沉降分布图（注：结构物发生了明显的沉降和倾倒、滑移，海床地基发生了大变形）

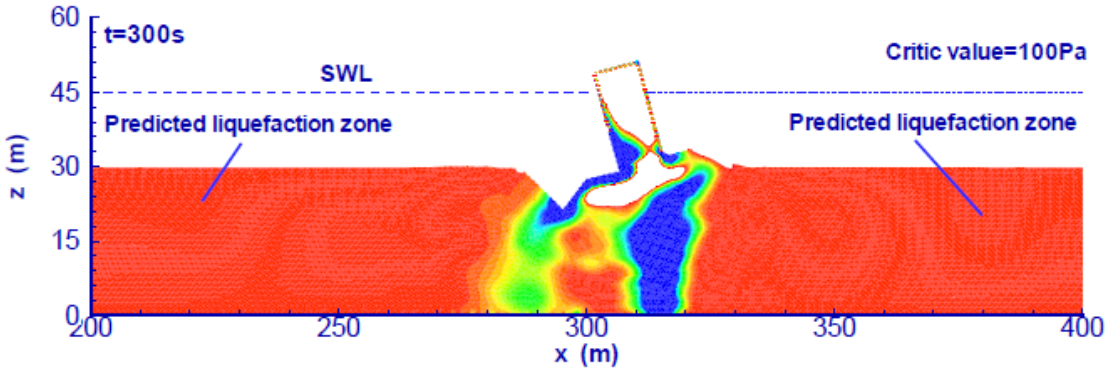


图 1-67 FssiCAS 计算得到的海床地基内的液化区范围（注：结果表明，在地震波侵袭下，远离结构物的海床地基基本都发生了液化，失去承载力；在结构物下方，存在一个高应力区没有发生液化，像一根桩基础一样支撑着结构物最终没有完全倾倒失稳。这表明海洋结构物和其欠密实海床地基之间存在着强烈的非线性相互作用过程）

第2章 用户界面

用户双击桌面图标 Fssi®，可启动 FssiCAS 软件。FssiCAS 软件的操作界面由前处理界面和后处理界面两部分组成。

2.1 前处理界面

用户点击树状菜单栏的 Model，可进入前处理界面。FssiCAS 软件的前处理界面由菜单栏，工具栏 1，工具栏 2，工具栏 3，树状菜单栏的 Model，工作区，命令窗口以及伸缩区组成，如图 2-1 所示。

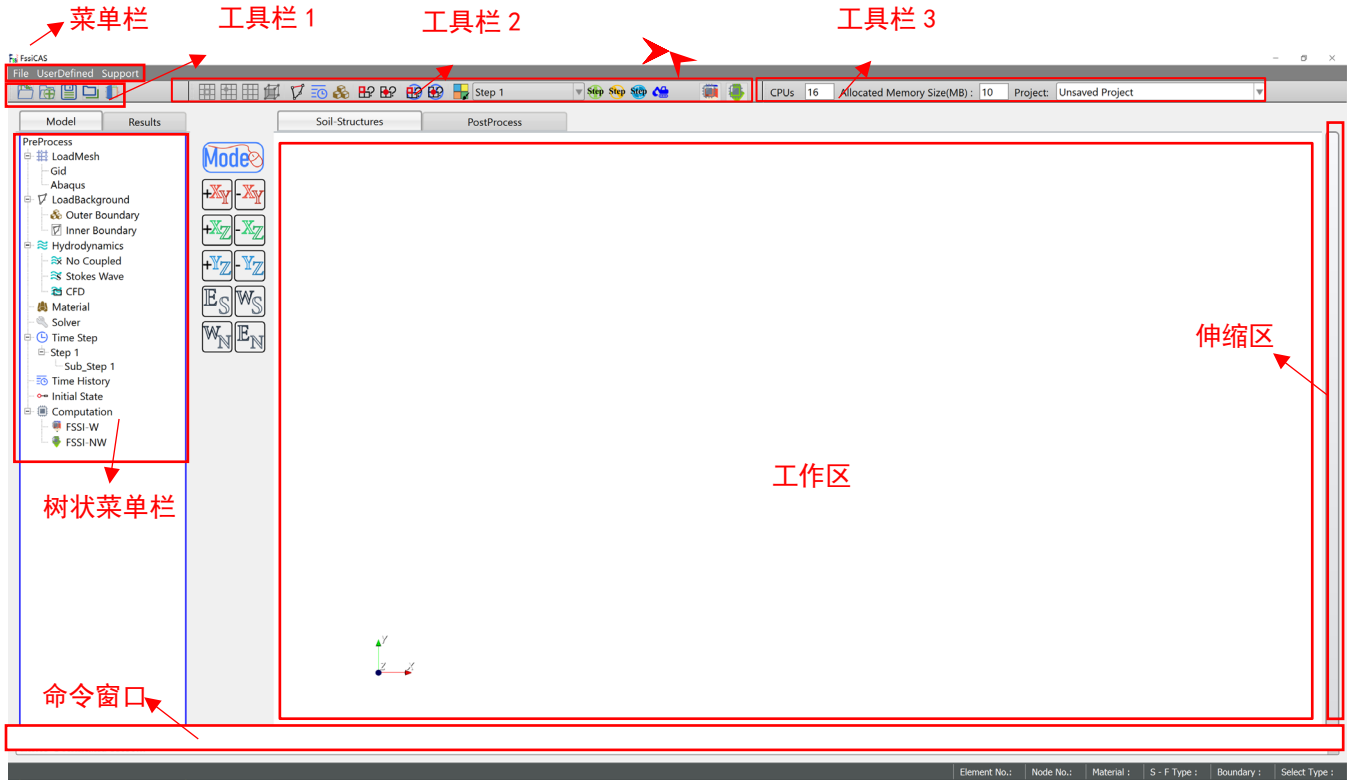


图 2-1 前处理界面

2.1.1 菜单栏介绍

菜单栏位于操作界面的左上方，菜单栏包括 File、UserDefined 和 Support。File 包括 Open，New，Save，Save as（“打开”，“新建”，“保存”，“另存为”），User Defined 包括 Soil Model 和 Boundary Condition（“土体模型”，“边界条件”），Support 包括 Tutotial 、About 和 Check for Updates（使用说明书、关于、检查更新），如图 2-2 所示。

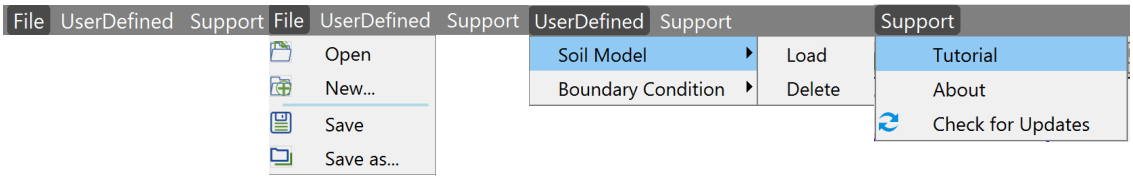


图 2-2 菜单栏

2.1.2 工具栏

工具栏位于操作界面的正上方，由工具栏 1，工具栏 2 以及工具栏 3 组成，如图2-3 所示。

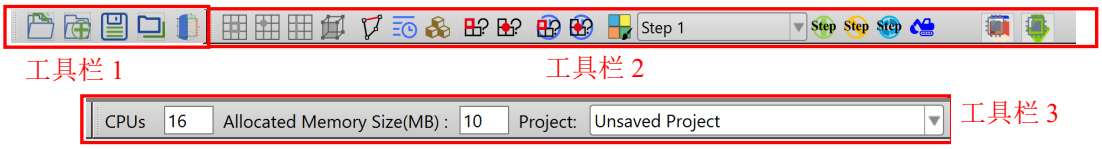


图 2-3 工具栏

2.1.2.1 工具栏 1

工具栏 1 由 Open，New，Save，Save as，Soil Model Verification 五个快捷功能按钮组成，如图 2-4 所示。

五个快捷功能按钮的图标、名称、含义列于 Table 2-1 中。Soil Model Verification 的组成和参数介绍如 Table 2-1、Table 2-2 所示。

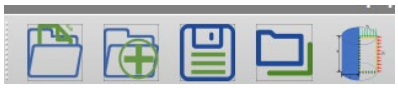


图 2-4 前处理界面上的工具栏 1

Table 2-1 工具栏 1 上的快捷功能按钮的图标、名称和含义

图标	名称	含义
	Open	表示打开文件
	New	表示新建文件
	Save	表示保存文件
	Save as	表示另存为
	Soil Model Verification	用于该软件自带或用户自定义的本构模型的三轴试验的验证和参数标定，见图 2-5，2-6 （本构模型参数见第 5 章节）

Table 2-2 (a) Soil model verification 界面参数介绍

名称			含义
Soil model verification (The Tool Button)	Constitutive Model 本构模型	Elastic	弹性本构模型
		General Elastic	一般弹性本构模型(可考虑模型与围压相关)
		Bi-Modulus Elastic	考虑拉压不同的本构模型
		Mohr Coulomb	莫尔库伦本构模型
		Modified Cambridge Soil	修正剑桥本构模型
		Pastor Zienkiewicz Mark III	PZIII 本构模型
		Burgers	Burgers 蠕变模型
		Cyclic Mobility_Zhang	移动硬化模型
		Elastic_ Truss	弹性杆单元
		Elastic_Beam	弹性梁单元
		Elastic_Cable	弹性绳单元
		Elastic_Spring	弹性弹簧单元
		Elastic_Shell	弹性壳单元
		Elastic_Viscoelastic	粘弹性单元
		Userdefined_SoilModel1	用户自定义本构（最多可定义 5 种）
		Userdefined_SoilModel2	
		Userdefined_SoilModel3	
		Userdefined_SoilModel4	
		Userdefined_SoilModel5	
	Parameter		用于查看本构模型的参数
	Parameters Number		模型参数个数
	Fluid Density (kg/m^3)		流体密度
	Granular Density (kg/m^3)		固体颗粒密度
	Void Ratio		孔隙比
	Initial Back Pressure (Pa)		初始反压力
	Initial Confining Pressure (Pa)		初始围压力
	Draining Type	Drained	排水
		UnDrained	不排水

Table 2-3 (b) Soil model verification 界面参数介绍

<table>
<tr><th colspan="4">名称</th><th>含义</th></tr>
<tr><td rowspan="15">Soil model verification (The Tool Button)</td><td rowspan="4">Time Step</td><td colspan="2">Simulation Time (s)</td><td>总时间步数</td></tr>
<tr><td colspan="2">Interval for Time Steps (s)</td><td>一个时间步的时间步长</td></tr>
<tr><td colspan="2">Maximal Number of Iterations</td><td>最大迭代次数</td></tr>
<tr><td colspan="2">History Plot Interval (s)</td><td>输出时程图的时间间隔</td></tr>
<tr><td rowspan="11">Loading</td><td rowspan="2">Loading Type</td><td>Displacement</td><td>位移控制</td></tr>
<tr><td>Stress</td><td>应力控制</td></tr>
<tr><td rowspan="6">Stress Path
应力路径</td><td>Standard Triaxial Test</td><td>常规三轴</td></tr>
<tr><td>Constant p</td><td>等 P，排水</td></tr>
<tr><td>Constant η</td><td>等 η</td></tr>
<tr><td>q=0</td><td></td></tr>
<tr><td>Dynamic Loading</td><td>加载 σ1 和 σ3 方向的动态荷载</td></tr>
<tr><td>Load File</td><td>加载 σ_1 和 σ_3 方向的荷载的时程文件</td></tr>
<tr><td colspan="2">Stress Path Poimt A</td><td>输入 A 点在 p-q 坐标系中的坐标值</td></tr>
<tr><td colspan="2">Stress Path Poimt B</td><td>输入 B 点在 p-q 坐标系中的坐标值</td></tr>
<tr><td colspan="3">Dll Path-Load Dll</td><td>加载一个用户自定义的本构模型</td></tr>
<tr><td colspan="3">Working Path - Set Path</td><td>把计算结果存在哪个文件</td></tr>
</table>

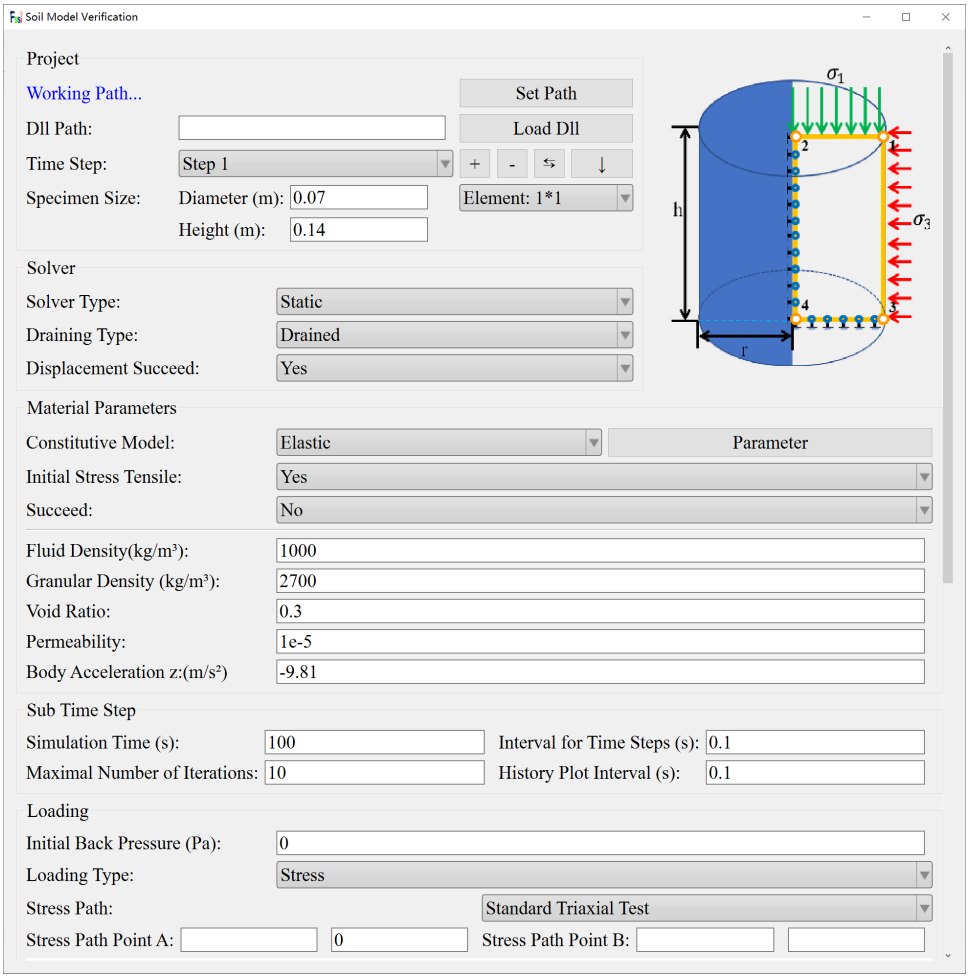
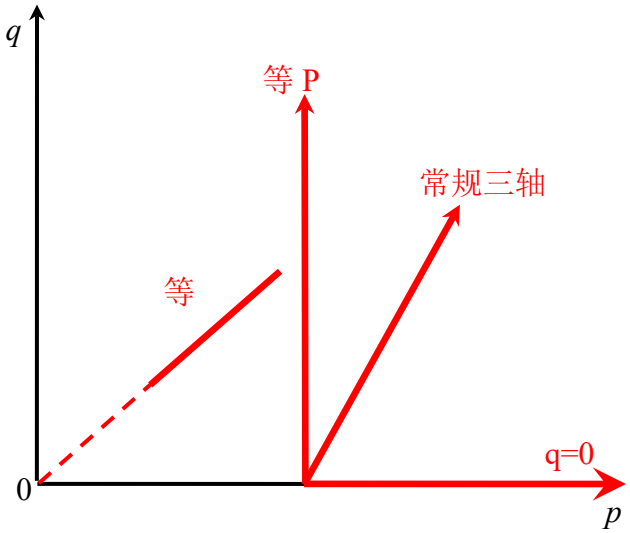


图 2-5　Soil Model Verification 界面图

Note1:四种应力路径图如下：



2.1.2.2 工具栏 2

工具栏 2 由 18 个快捷功能按钮组成，如图 2-6 所示。
18 个快捷功能按钮的图标、名称、含义列于 Table 2-3 中。

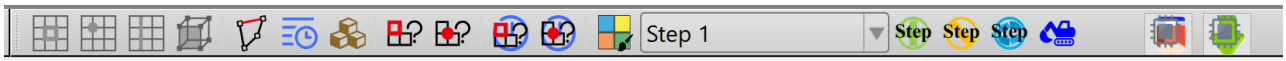


图 2-6 前处理界面上的工具栏 2

Table 2-4 工具栏 2 上的快捷功能按钮的图标、名称和含义

图标	名称	含义
	Select Element	鼠标选择单元
	Select Node	鼠标选择节点
	Select Line	鼠标选择线
	Select Surface	鼠标选择面
	Apply Boundary	鼠标设置边界条件
	Time History	设置输出时程结果的节点和单元
	Set Material Parameter	设置材料参数
	Information Element	查询单元信息
	Node Coordinate	查询节点信息
	Element History Output	查询某个单元输出的时程结果在 dynseq 文件里的列号
	Node History Output	查询某个节点输出的时程结果在 dynseq 文件里的列号
	Color Mesh	是否显示网格颜色
Step 2	Choose Time Step	选择时间步
Step	Add Time Step	添加时间步
Step	Delet Time Step	删除时间步
Step	Ajust Time Step	修改时间步
	Excavation	开挖
	FSSI-NW	启动计算程序时不修改输入文件
	FSSI-W	启动计算程序时修改输入文件

Table 2-5 (a) 前处理界面上的工具栏 2 上的快捷功能按钮的介绍分布图

<table>
<tr><th colspan="3">名称</th><th>含义</th><th>用途</th></tr>
<tr><td rowspan="17">The Second Tool Bar (Tool Buttons)</td><td rowspan="4">Apply Boundary</td><td>Select Element</td><td>选择单元</td><td rowspan="4">用于设置边界条件</td></tr>
<tr><td>Select Node</td><td>选择节点</td></tr>
<tr><td>Select Line</td><td>选择线</td></tr>
<tr><td>Select Surface</td><td>选择面</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Time History</td><td>Select Element</td><td>选择单元</td><td rowspan="4">用于设置输出时程结果的单元或节点</td></tr>
<tr><td>Select Node</td><td>选择节点</td></tr>
<tr><td>Select Line</td><td>选择线</td></tr>
<tr><td>Select Surface</td><td>选择面</td></tr>
<tr><td rowspan="9">Set Material Parameter (Soil Constitutive Models)</td><td>Elastic</td><td>弹性本构模型</td><td rowspan="9">用于设置材料参数</td></tr>
<tr><td>General Elastic</td><td>一般弹性(可以考虑与围压相关)</td></tr>
<tr><td>Bi-Modulus Elastic</td><td>考虑拉压不同的本构模型</td></tr>
<tr><td>Mohr Coulomb</td><td>莫尔库伦本构模型</td></tr>
<tr><td>Modified Cambridge Soil</td><td>修正剑桥本构模型</td></tr>
<tr><td>Pastor Zienkiewicz Mark III</td><td>PZIII 本构模型</td></tr>
<tr><td>UserDefined 1</td><td rowspan="5">用户自定义本构模型</td></tr>
<tr><td>UserDefined 2</td></tr>
<tr><td>UserDefined 3</td></tr>
<tr><td>UserDefined 4</td></tr>
<tr><td>UserDefined 5</td></tr>
<tr><td colspan="2">Information Element</td><td>用于查询单元信息</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Node Coordinate</td><td>用于查询节点信息</td></tr>
</table>

Table 2-6 (b) 前处理界面上的工具栏 2 上的快捷功能按钮的介绍分布图

<table>
<tr><th colspan="4">名称</th><th>含义</th><th>用途</th></tr>
<tr><td rowspan="12">The Second Tool Bar (Tool Buttons)</td><td rowspan="4">Element History Output (查询某个单元输出的时程结果在 dynseq 文件里的列号）</td><td rowspan="3">Solid Element 固体单元</td><td>Effective Stress</td><td>有效应力</td><td rowspan="6"></td></tr>
<tr><td>Void Ratio</td><td>孔隙比</td></tr>
<tr><td>Strain</td><td>应变</td></tr>
<tr><td>Fluid Element 流体单元</td><td>Element Pore Pressure</td><td>孔压</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Node History Output (查询某个节点输出的时程结果在 dynseq 文件里的列号)</td><td rowspan="4">Solid Node 固体节点</td><td>X Displacement</td><td>X 位移</td></tr>
<tr><td>Z Displacement</td><td>Z 位移</td></tr>
<tr><td>X/Z Velocity</td><td>X/Z 方向速度</td><td rowspan="7"></td></tr>
<tr><td>X/Z Acceleration</td><td>X/Z 方向加速度</td></tr>
<tr><td>Fluid Node 流体节点</td><td>Node Pore Pressure</td><td>孔压</td></tr>
<tr><td colspan="3">Color Mesh</td><td>是否显示网格颜色</td></tr>
<tr><td colspan="3">Choose Time Step</td><td>选择时间步</td></tr>
<tr><td colspan="3">Add Time Step</td><td>添加时间步</td></tr>
<tr><td colspan="3">Delet Time Step</td><td>删除时间步</td></tr>
<tr><td colspan="3">Ajust Time Step</td><td>修改时间步</td></tr>
<tr><td colspan="3">Excavation</td><td>启动开挖</td></tr>
<tr><td colspan="3">FSSI-W</td><td>启动计算程序时修改输入文件</td></tr>
<tr><td colspan="3">FSSI-NW</td><td>启动计算程序时不修改输入文件</td></tr>
</table>

2.1.2.3 工具栏 3

工具栏 3 由 CPUs，Allocated Memory Size(MB)组成，如图 2-7 所示，含义列于 Table 2-5 中。

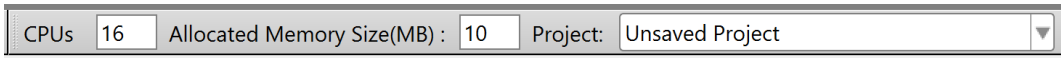


图 2-7 前处理界面上的工具栏 3

Table 2-7 工具栏 3 上的快捷功能按钮的图标和含义

图标	含义
CPUs 3	指定用多少个核参与前后处理
Allocated Memory Size(MB) : 10	指定分配多少内存参与前后处理
Project: Unsaved Project	显示当前工作目录或最近打开的五个项目目录

2.1.3 树状菜单栏

树状菜单栏位于操作界面的左侧，由 Model 和 Results 两个树状菜单组成。Model 菜单系列用于前处理，Results 菜单系列用于后处理（见后面第 2.2.1 章节），Model 区域下设的菜单及其介绍分布图如图 2-8、Table 2-6 所示。

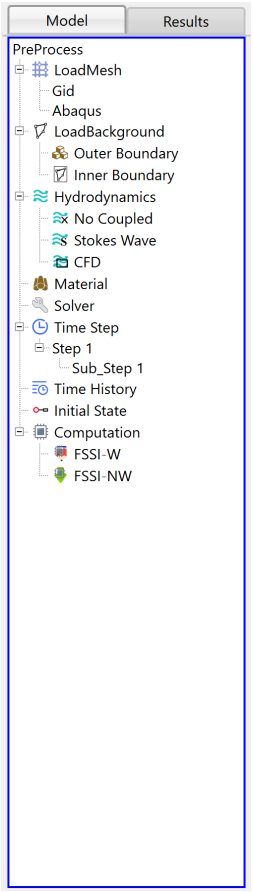


图 2-8 前处理界面上 Model 区域下设的菜单

Table 2-8 (a) 前处理界面上的 Model 区域下设的菜单介绍分布图

名称				含义
Model Menu Tree (Preprocess)	Load Mesh			
	Load Background	Outer Boundary		导入外背景线
		Inner Boundary		导入内背景线
	Hydrodynamics 添加水动力	No Coupled 不耦合	1st Wave	一阶行波
			2nd Wave	二阶行波
			3rd Wave&Current	三阶行波
		Stokes Wave 斯托克斯波	1st STANDING WAVE	一阶驻波
			2nd STANDING WAVE	二阶驻波
			CNOIDAL WAVE	椭圆余弦波浪
			RANDOM WAVE-JONSWAP	
		CFD 加载波浪文件	JONSWAP	波谱随机波浪
			RANDOM WAVE-BM	
			BM	波谱随机波浪
	Material 给定材料属性以及本构模型 (Soil Constitutive Models)	Elastic		弹性本构模型
		General Elastic		一般弹性本构模型 (可考虑模型与围压相关)
		Bi-Modulus Elastic		考虑拉压不同的本构模型
		Mohr Coulomb		莫尔库伦本构模型
		Modified Cambridge Soil		修正剑桥本构模型
		Pastor Zienkiewicz Mark III		PZIII 本构模型
		Burgers		Burgers 蠕变模型
		Cyclic Mobility_Zhang		移动硬化模型
		Elastic_ Truss		弹性杆单元
		Elastic_Beam		弹性梁单元
		Elastic_Cable		弹性绳单元
		Elastic_Spring		弹性弹簧单元
		Elastic_Shell		弹性壳单元
		Elastic_Viscoelastic		粘弹性单元

Table 2-9 (b) 前处理界面上的 Model 区域下设的菜单介绍分布图

名称			含义
Model Menu Tree (Preprocess)	Material 给定材料属性以及本构模型 (Soil Constitutive Models)	Userdefined_SoilModel1	用户自定义本构（最多可定义 5 种）
		Userdefined_SoilModel2	
		Userdefined_SoilModel3	
		Userdefined_SoilModel4	
		Userdefined_SoilModel5	
	Solver 求解器	SolverType	设置求解器类型和相关属性参数
		TimeStep	设置时间步
		TimeHistory	用于列出之前已输出时程结果的节点或单元
	Initial State		指定初始条件
	Computation 计算	FSSI-W	启动计算程序时修改输入文件
		FSSI-NW	启动计算时不修改输入文件

2.1.4 基本操作方式

用户从 GID、Hypermesh、Abaqus 等专业建模软件导入网格后，可以通过使用鼠标查看导入的模型。具体操作方式为：

按住鼠标左键，若为 3D 模型，可使模型在三维空间内旋转。

按住鼠标右键或上下滑动鼠标滑轮，可以放大或缩小模型。

按住鼠标中键或‘Shift’键与鼠标左键(Shift＋)，可以平移模型。

按住键盘‘Ctrl’键与鼠标左键(Ctrl＋)，可以使模型围绕平面中心进行旋转。

2.2 后处理界面

用户点击树状菜单栏的 Results，可进入后处理界面。FssiCAS 后处理界面由菜单栏，工具栏 1，工具栏 2，工具栏 3，树状菜单栏的 Results，工作区，命令窗口以及伸缩区组成，如图 2-9 所示。

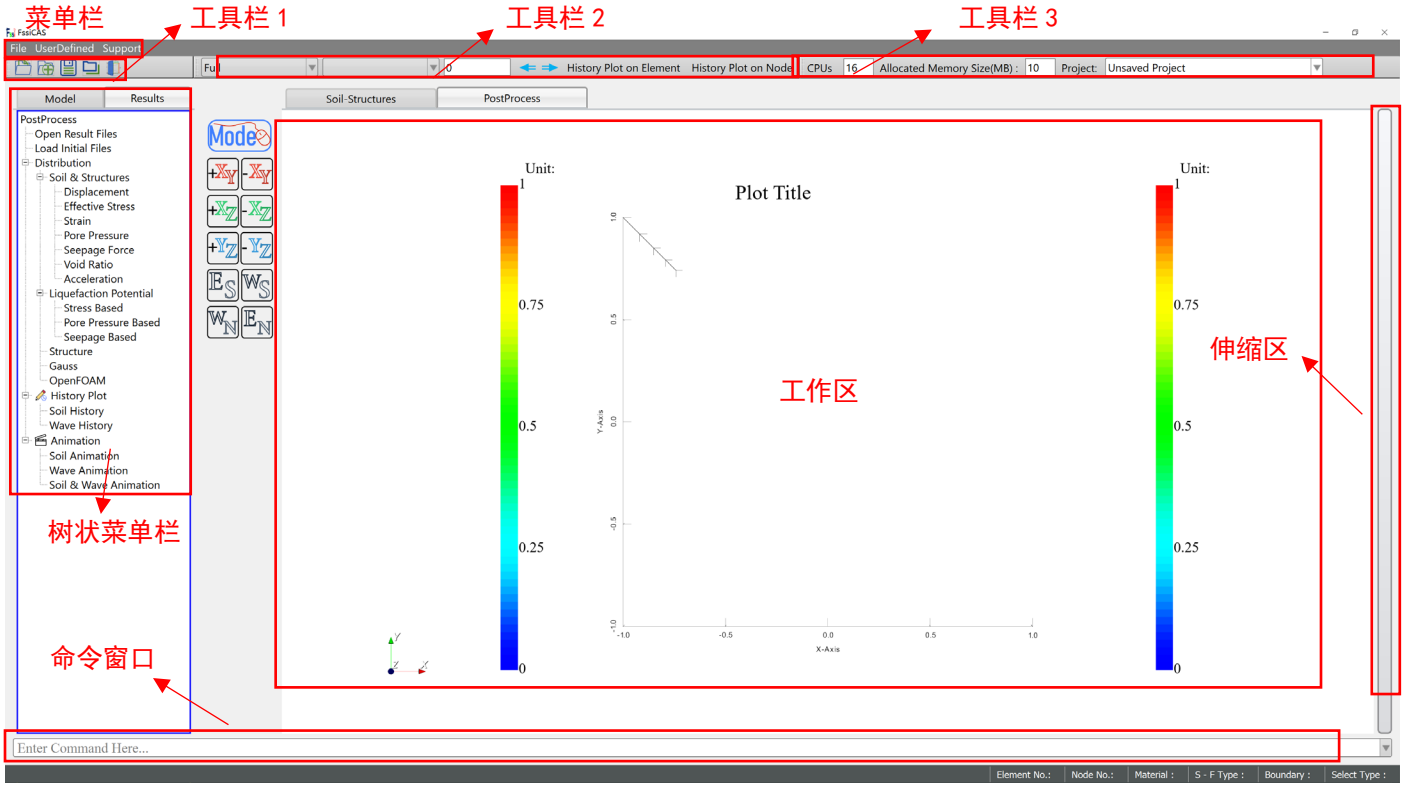


图 2-9　后处理界面

2.2.1　树状结果菜单栏

树状菜单栏位于操作界面的左侧，由 Model 和 Results 两个树状菜单组成。Model 菜单系列用于前处理（见前面第 2.1.3 章节），Results 菜单系列用于后处理，Results 区域下设的菜单以及其介绍的分布图，如图 2-10 所示。

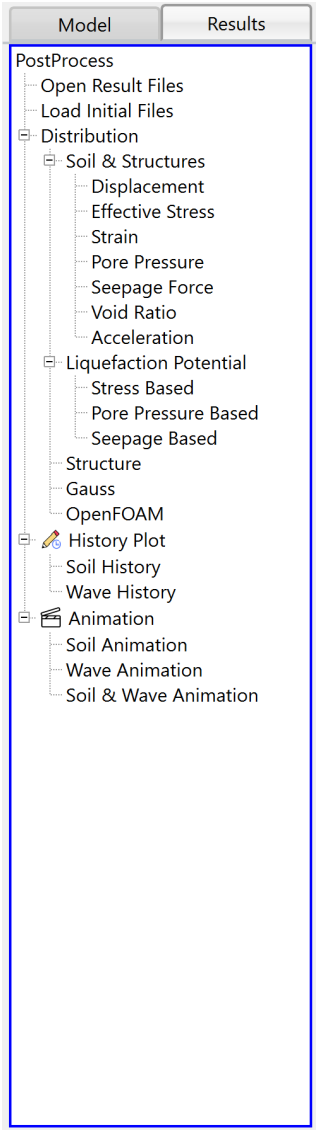


图 2-10　后处理界面上 Results 区域下设的菜单

Table 2-10 后处理界面上 Results 区域下设的菜单介绍分布图

<table>
<tr><th colspan="4">名称</th><th>含义</th></tr>
<tr><td rowspan="19">Results Menu Tree (Post-Process)</td><td colspan="3">Open Results Files</td><td>打开结果文件</td></tr>
<tr><td colspan="3">Load Initial Files</td><td>导入初始状态文件，指定初始条件</td></tr>
<tr><td rowspan="14">Distribution 分布图</td><td rowspan="7">Soil&Structures 土体</td><td>Displacement</td><td>位移</td></tr>
<tr><td>Effective Stress</td><td>有效应力</td></tr>
<tr><td>Strain</td><td>应变</td></tr>
<tr><td>Pore Pressure</td><td>孔压</td></tr>
<tr><td>Seepage Force</td><td>渗透力</td></tr>
<tr><td>Void Ratio</td><td>孔隙比</td></tr>
<tr><td>Acceleration</td><td>加速度</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Liquefaction Potential 液化势</td><td>Stress Based</td><td>基于应力的准则</td></tr>
<tr><td>Pore Pressure Based</td><td>基于孔压的准则</td></tr>
<tr><td>Seepage Based</td><td>基于渗透力的准则</td></tr>
<tr><td>OpenFOAM</td><td colspan="2">加载 OpenFOAM 的结果文件</td></tr>
<tr><td rowspan="2">History Plot 时程曲线图</td><td colspan="2">Soil History</td><td>土体时程曲线</td></tr>
<tr><td colspan="2">Wave History</td><td>波浪时程曲线</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Animation 动画</td><td colspan="2">Soil Animation</td><td>土体动画</td></tr>
<tr><td colspan="2">Wave Animation</td><td>波浪动画</td></tr>
<tr><td colspan="2">Soil & Wave Animation</td><td>土体和波浪联合动</td></tr>
</table>

2.2.2 工具栏 2

后处理界面的工具栏 2 位于操作界面的正上方，工具栏 2 由 1 个输入窗口和 6 个功能按钮组成，如图2-11 所示。

图 2-11 后处理界面上的工具栏 2

Table 2-11 后处理界面上的工具栏 2 上的快捷功能按钮的介绍分布图

名称				含义
The Second Tool Bar (Post-Process)	Pul down list 下拉列表	Choose the state 选择状态	Full	全态(包含初始值和静水压力)
			Dynamic	动态
	Pull down list 下拉列表	Choose type of result		选择要显示的结果类型
	Input window 输入窗口	Input Time Steps		输入时间步，显示在该时间步中的结果分布图
	The Up button	Increase one Time Step		上一个时间步的分布图
	The Down button	Decrease one Time Step		下一个时间步的分布图
	History Plot on Element	Choose a element		用于选择单元出图

2.3 工作区

工作区位于操作界面的中央，由 Soil-Structures、PostProcess 三个工作区组成，如图 2-13 所示。Soil-Structures 工作区用于对土体模型进行操作和显示，Post Process 工作区用于对后处理结果图进行显示、修改等操作。

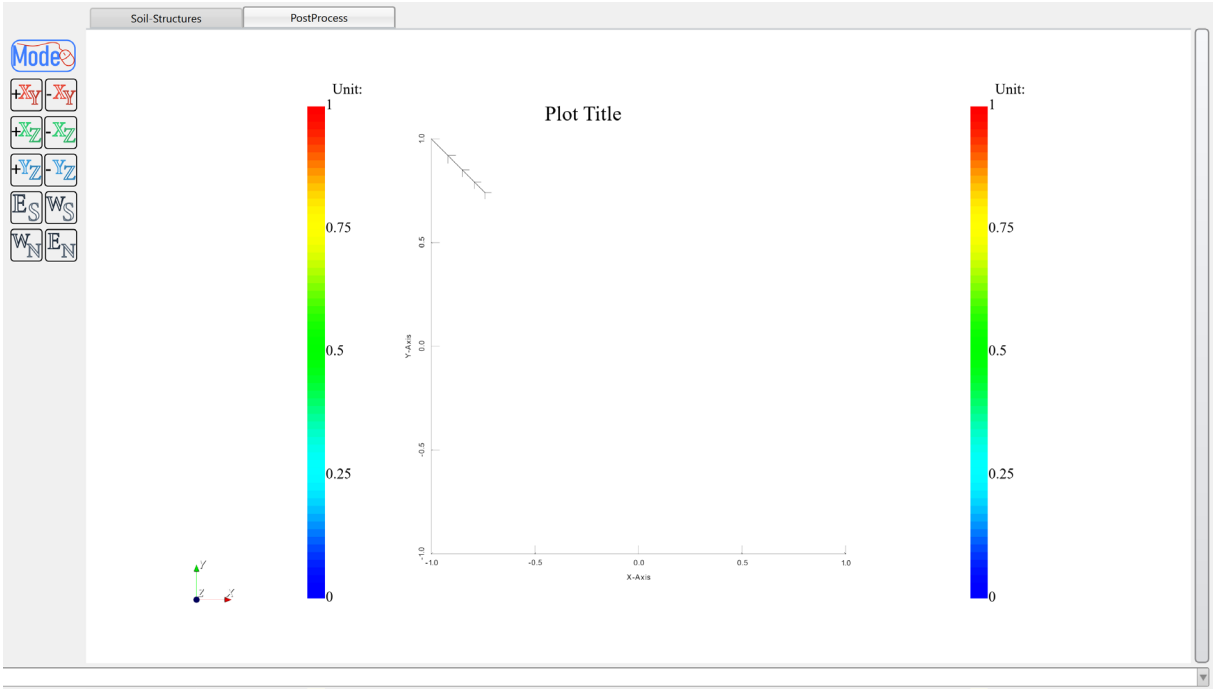


图 2-12 操作界面上的工作区

2.4 命令窗口

命令窗口位于操作界面的正下方，用于快捷输入各种命令，如图 2-14 所示。

图 2-13　操作界面上的命令窗口

快捷命令表列于 Table 2-9 中。

Table 2-12 快捷命令表

快捷命令	含义
Highlight pt coor+节点坐标（坐标之间加空格）	输入节点坐标之后节点高亮
Highlight pt no+单元号	输入单元编号之后单元高亮

2.5　伸缩区

伸缩区位于操作界面的右侧，用于控制绘制分布图或时程图的各种要素，如图 2-15 所示。伸缩区内的各个参数的详细介绍见第 6.5、7.1.4、8.4.2、8.4.4、8.5.2、8.5.4、8.5.6 章节。

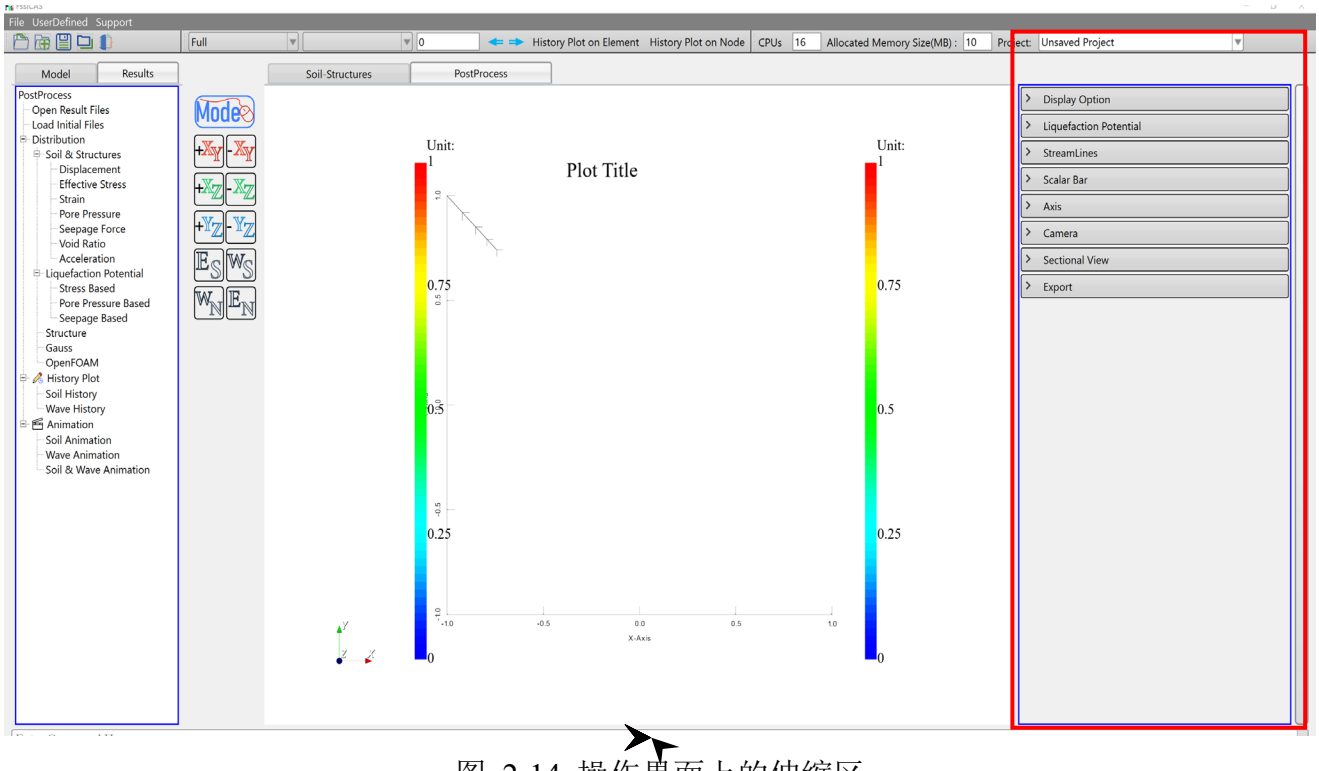


图 2-14 操作界面上的伸缩区

第3章 网格生成、加载和可视化

3.1 网格生成

本软件计算所需要的网格需要借助第三方专业网格划分软件 Gid、Abaqus 、Hypermesh 等建模软件完成，下文将介绍借助 GID 软件、Abaqus 软件和 Hypermesh 软件划分网格后导出网格文件和背景线.igs 文件的方法。

3.1.1 从 GID 软件导入网格和背景线

在 Gid 软件中建立模型并划分网格后，需导出指定格式的网格文件。在 GiD12.0.1 中新建一个 txt 文档，输入以下内容，保存文件在任何路径，文件类型选择所有文件，命名为 Output-Format-Gid.bas；

```
Elements:
*loop elems
*ElemsNum *ElemsMat *ElemsConec
*end elems
0
Nodes:
*set elems(all)
*loop nodes
*format "%i%14.8e%14.8e%14.8e"
*NodesNum *NodesCoord(1) *NodesCoord(2) *NodesCoord(3)
*end nodes
0
```

点击 GiD—Files—Export—Using template .bas(only mesh)—Others…；在文件选择对话框中选择之前已保存的名为：Output-Format-Gid.bas 的.bas 文件，点击 Open；自定义网格文件名，并点击 Save，网格文件可以保存在指定位置。

点击 GiD—Files—Export—IGES...，自定义文件名，点击 Save，可以将文件保存在指定位置，并导出背景线.igs 文件。

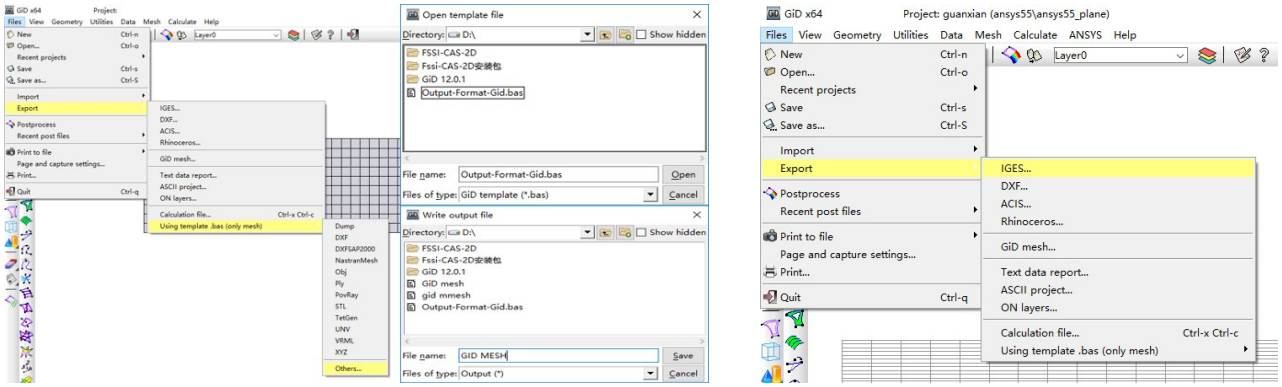


图 3-1 用 GID 软件导出网格文件和背景线.igs 文件的过程图

3.1.2 从 Abaqus 软件中导入网格和背景线

FssiCAS 接受 Abaqus 软件的网格文件格式（*.inp）。当用户使用 Abaqus 划分网格时，以一个简单的例子来说明如何导出*.inp 文件。用户对模型划分网格、设置材料属性（无需为材料设置参数）并完成装配后，得到如图 3-2 的界面。

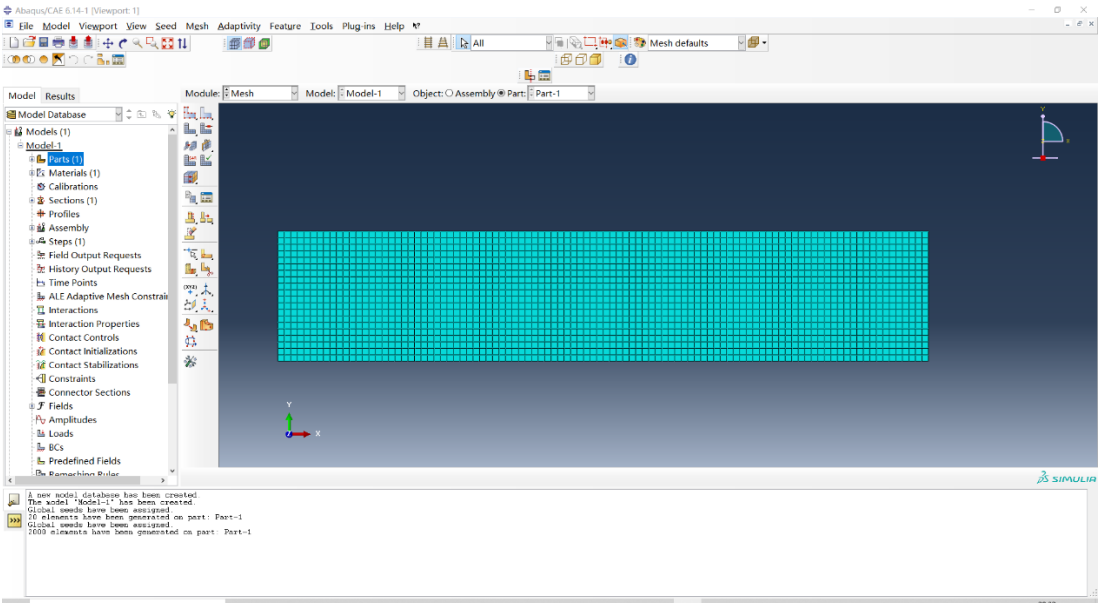


图 3-2 划分网格

在 Model 模块中选择 Job，进入创建工作界面。

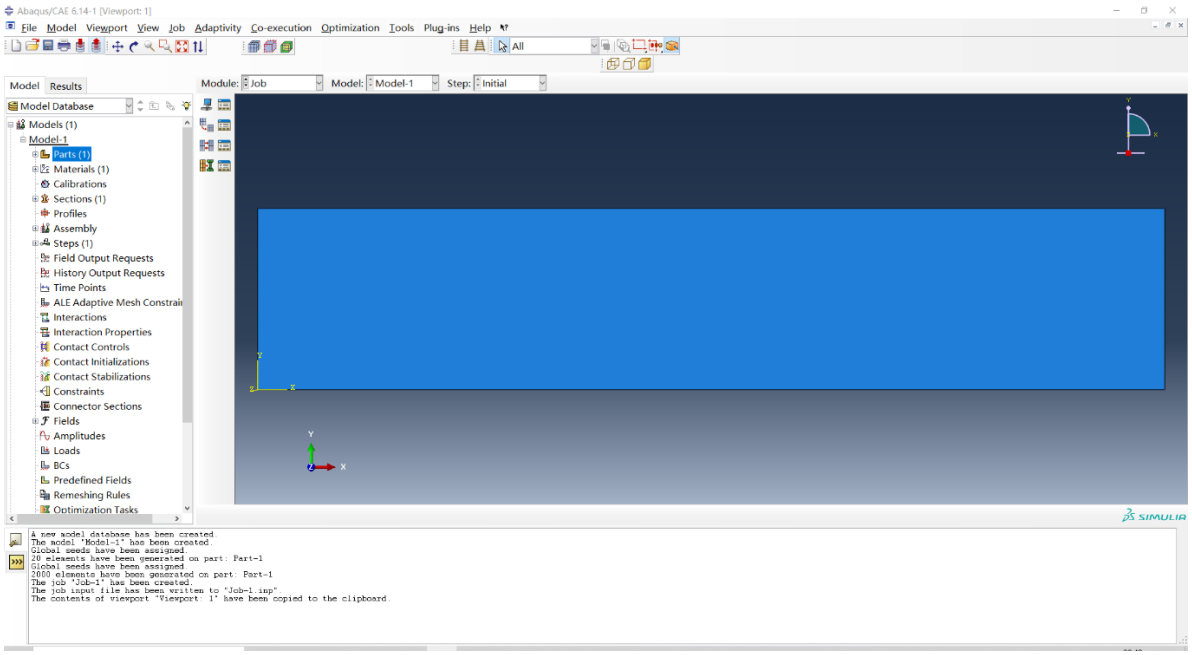


图 3-3 创建 Job

选择工作路径，点击 Write Input 按钮，将会在选择的工作路径下（如未选择工作路径，默认路径在 C:\WINDOWS\system32）生成后缀名为*.inp 的文件即为网格文件。

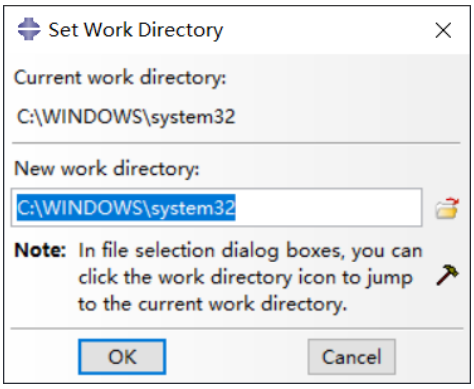


图 3-4 选择工作路径

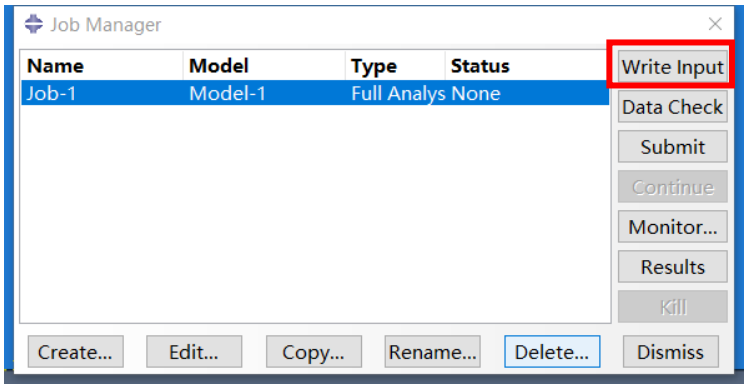


图 3-5 写输入文件

当用户使用 Abaqus 建立模型时，完成实体模型建模后，选择 File-Export-Part，在弹出对话框中选择输出后缀名为.igs 的文件，即可导出背景线.igs 文件。

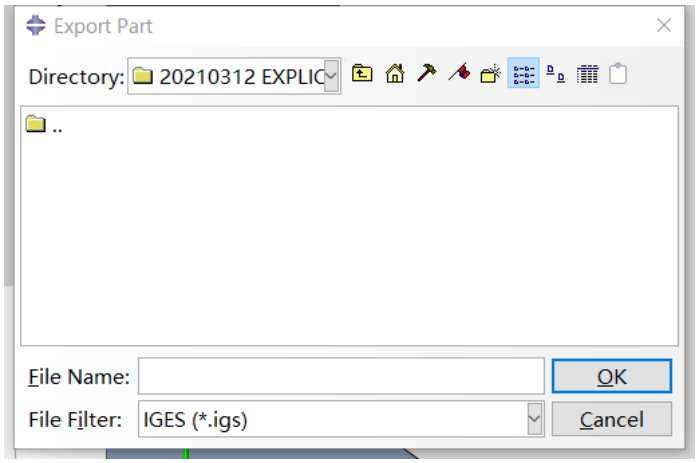


图 3-6 Abaqus 导出.iges 文件

3.1.3 从 Hypermesh 软件中导入网格和背景线

当用户使用 Hypermesh 划分网格时，可以通过如下操作导出.inp 格式的网格文件。

首先，用户进入 HyperMesh 时，选择求解器类型为 Abaqus。

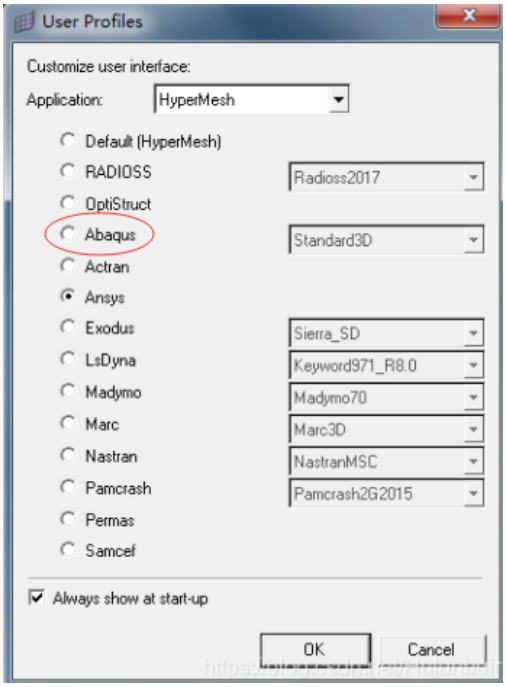


图 3-7 HyperMesh 初始化设置

完成网格划分后，选择导出网格，如果求解模型类型为二维，在 Template 中选择 Standard2D。

当用户使用 Hypermesh 建立模型时，选择输出实体模型，输出文件类型选择 iges，即可导出背景线文件。

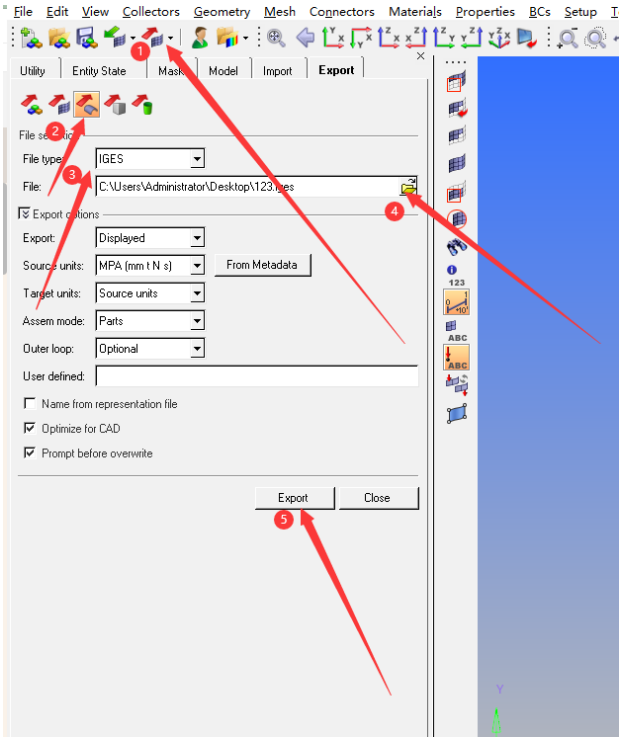


图 3-8 HyperMesh 导出.iges 文件

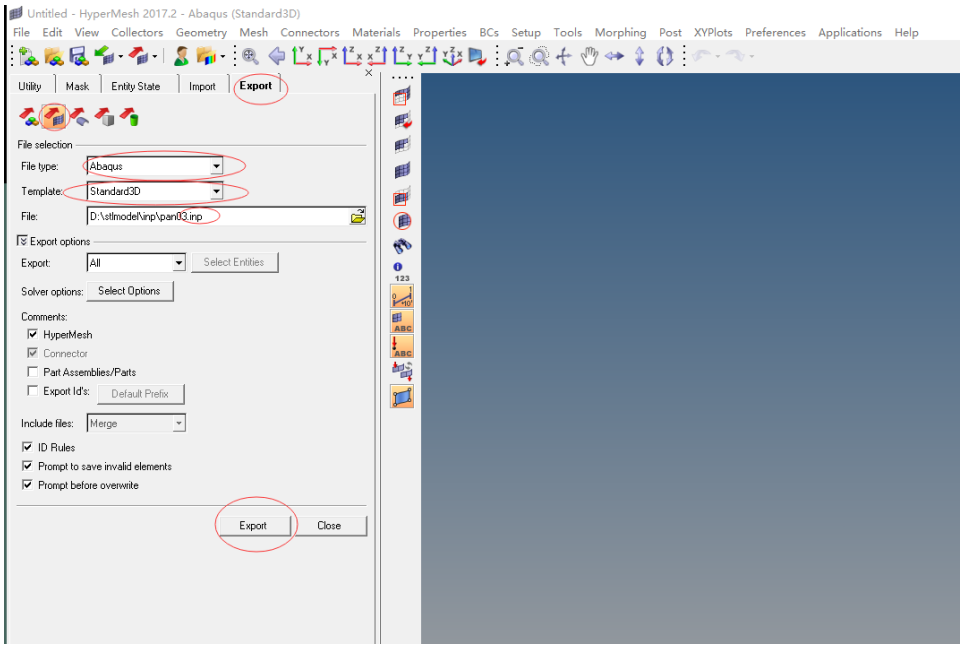


图 3-9 HyperMesh 导出.inp 文件

注：1.几何模型的背景线是为了后续施加边界条件、区分材料以及设置输出时程结果的线；

2.在 Gid 或 Abaqus 等建模软件中建立模型并划分网格后，还需要在软件中提前区分和定义不同的材料，并绘制后续需要施加边界条件和需要输出时程结果的背景线；

3.从 Gid 或 Abaqus 等建模软件中导出并自定义的文件名不能包含中文字，导出的文件的保存路径不能包含中文路径。

3.2 新建项目

在 FssiCAS 软件中新建和保存一个项目的过程如下：

用户首先在任何路径新建一个文件夹，自定义文件名；然后在 FssiCAS 软件中点击 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，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 3-10 所示。

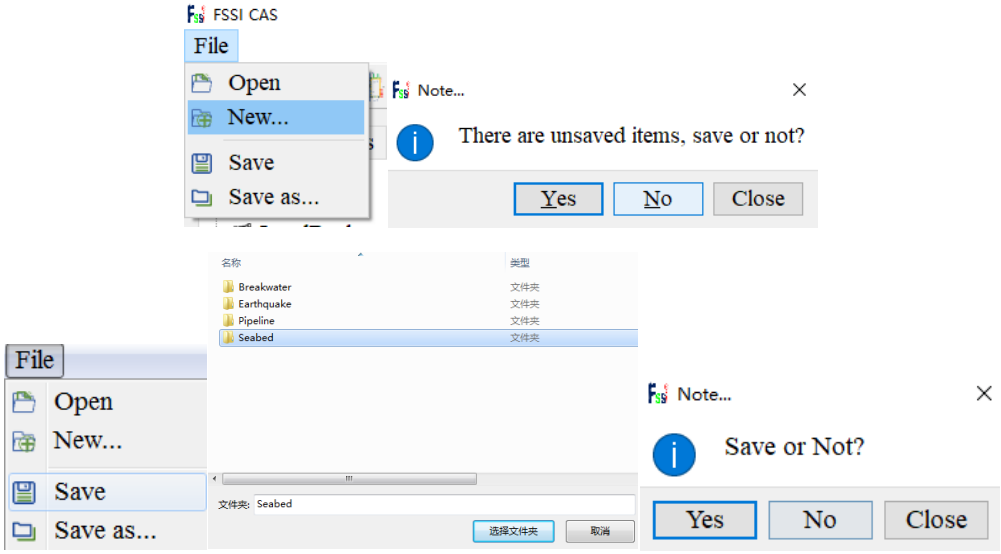


图 3-10 在 FssiCAS 软件中新建和保存一个项目的过程图

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。

3.3 网格加载

点击在前处理界面上 Model 树状菜单栏中的 Load Mesh 选项下的 Gid，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 3-11、3-12 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，比如固体节点采用四边形四节点一阶单元，不设置流体单元阶次，因此，固体节点数设置为 4，流体单元阶次设置为 0，点击 OK，如图 3-13 所示。

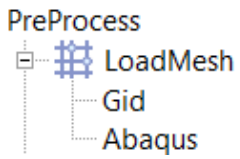


图 3-11 前处理界面上的 Model 树状菜单栏中的 Load Mesh

图 3-12 选择 Gid 输出的网格文件

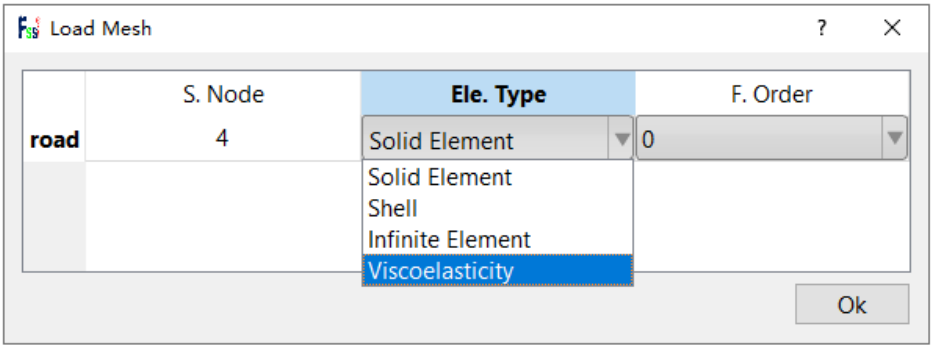


图 3-13 Load Mesh 窗口中的固体节点数和流体节点阶次

注：**1.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、Abaqus 等建模软件导出的网格中固体节点为几阶，那么导入 FssiCAS 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。**

2.Ele.Type 代表单元类型，界面中的四种单元类型 Solid Element、Shell、Infinite Element、Viscoelasticity 依次为实体单元、壳单元、无限单元、粘弹性边界。

3.只有一阶四边形和一阶六面体才有无限单元和粘弹性边界选项，其他类型的单元只有实体单元和壳单元选项。

4.在三维坐标系中，通常规定 X 表示左右空间，Y 表示前后空间，Z 表示上下空间（不可用平面直角坐标系去理解空间方向）。

3.4 加载背景线

Model 树状菜单栏中的 Load Background 由 Outer Boundary 和 Inner Boundary 组成，用于加载几何模型的背景线，便于后续施加边界条件、区分材料以及设置输出时程结果的线等操作，如图 3-14 所示。Outer Boundary 和 Inner Boundary 的含义列于 Table 3-1 中

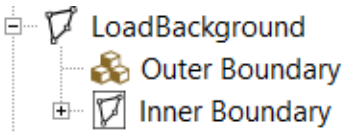


图 3-14 Model 树状菜单栏中的 Load Background 的组成

Table 3-1 Load Background

名称	含义
Outer Boundary	添加外背景线
Inner Boundary	添加内背景线

注：1.请导出背景线.igs 文件时仅保留点、线、面的信息，删除相关体、注释等；
2.内、外背景线一定要分开导入；
3.二维空间不考虑内背景线，三维空间里才考虑内背景线；
4.在三维情况下导出背景线.igs 文件时，请不要保留内边界的信息；
5.背景线.igs 文件格式是属于 GID 软件自带的文件格式，是国际通用格式，属于开发性格式；

在二维的情况下，在 Model 树状菜单栏上的 Load Background 中，点击 Outer Boundary，在弹出的 Outer Boundary 窗口中点击 Choose File，选择从 Gid 或 Solidworks 等建模软件中导出的背景线.igs 文件，点击打开，可导入几何模型的背景线，如图 3-15、3-16 所示。

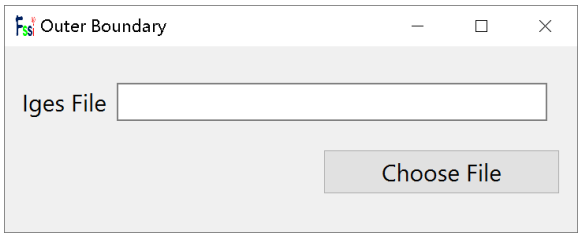


图 3-15 在弹出的窗口中点击 Choose File 导入背景线.igs 文件

图 3-16 选择背景线.igs 文件

下面用一个例子简单说明在三维情况下外背景线与内背景线的区别和导入内外背景线的方法，本案例的三维几何模型如图 3-17 所示。

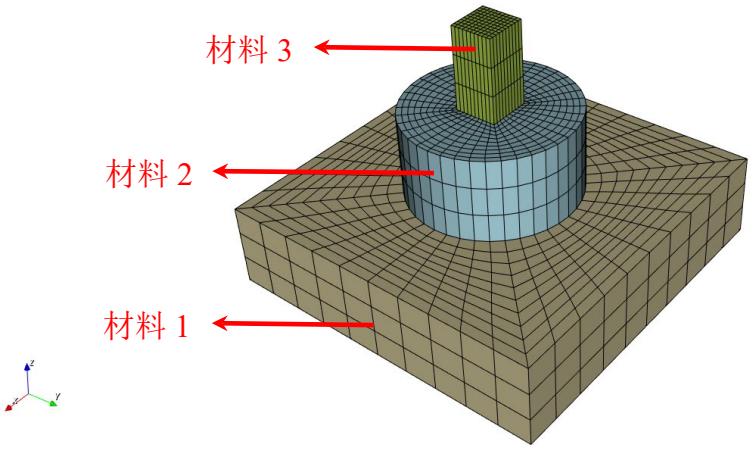


图 3-17 某个三维几何模型图

在本案例的三维几何模型中，外边界属于整个几何模型的外表面，位于整个几何模型的外表面上的线属于外背景线，如图 3-18 所示；内边界属于材料 2 分别与材料 1 和材料 3 相互接触的两个面，位于这两个面上的线属于内背景线，如图 3-19 所示；

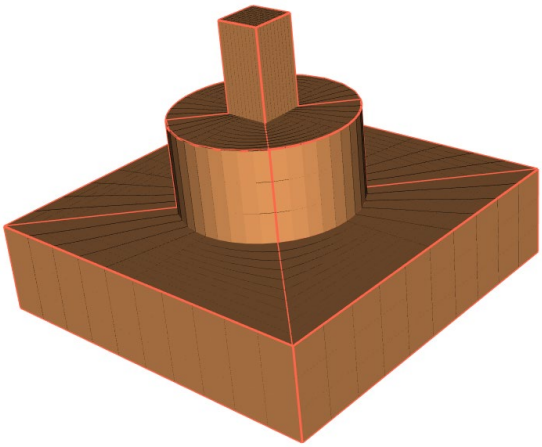


图 3-18 三维几何模型的外边界和外背景线的示意图

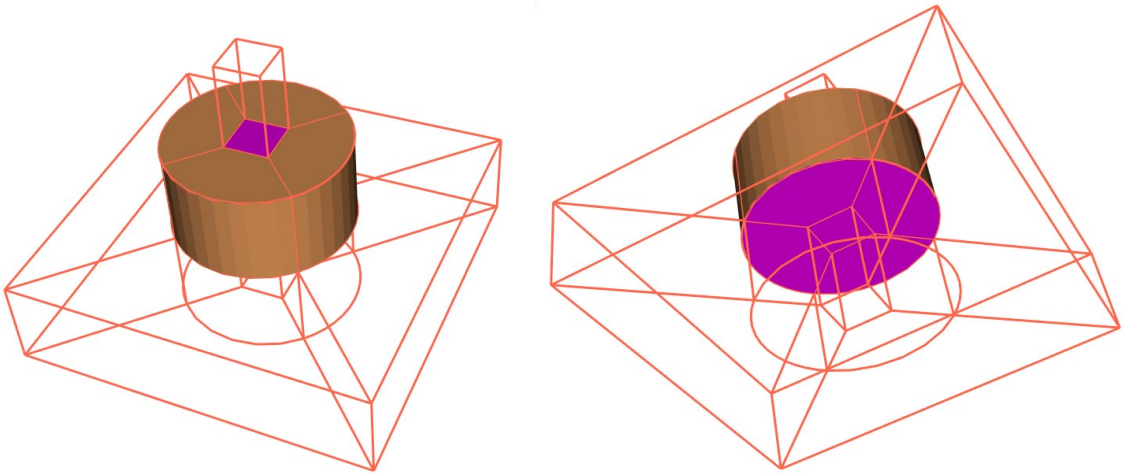


图 3-19 三维几何模型的内边界和内背景线的示意图

在 FssiCAS 软件中导入三维几何模型的网格文件后，在前处理界面上树状菜单栏的 Model 区域中，用户点击 Outer Boundary，在弹出的窗口中点击 Choose File，选择三维几何模型的外背景线.igs 文件，并关闭窗口，即可导入外背景线；

点击前处理界面最右侧的伸缩区，在伸缩区中的第一个下拉列表里选择所有材料（Material All），点击 Mesh；在第二个下拉列表里选择 Boundary All，点击 Boundary，在工作区中可显示导入的外背景线；

在前处理界面上，点击工具栏 2 中快捷功能按钮，进入边界选择模式；

点击工具栏 2 中快捷功能按钮，并点击点击键盘‘R’键，进入背景面选择模式；

点击工具栏 2 中快捷功能按钮，并点击点击键盘‘R’键，进入选择背景线模式；

需要注意的是，不管是进入背景面选择模式还是背景线选择模式，都需要点击键盘‘R’键，才可以开始选择外边界。同时，点击键盘‘R’键后，界面中的模型便不可以进行旋转，平移等操作，此时，按住鼠标左键拖动的操作变为为框选。若需要进行旋转，平移等操作，必须再次点击键盘‘R’键，退出选择模式，才可以进行。如图 3-20 所示；

再次点击键盘‘R’键，或者直接点击按钮关闭边界选择模式，即可结束选择；

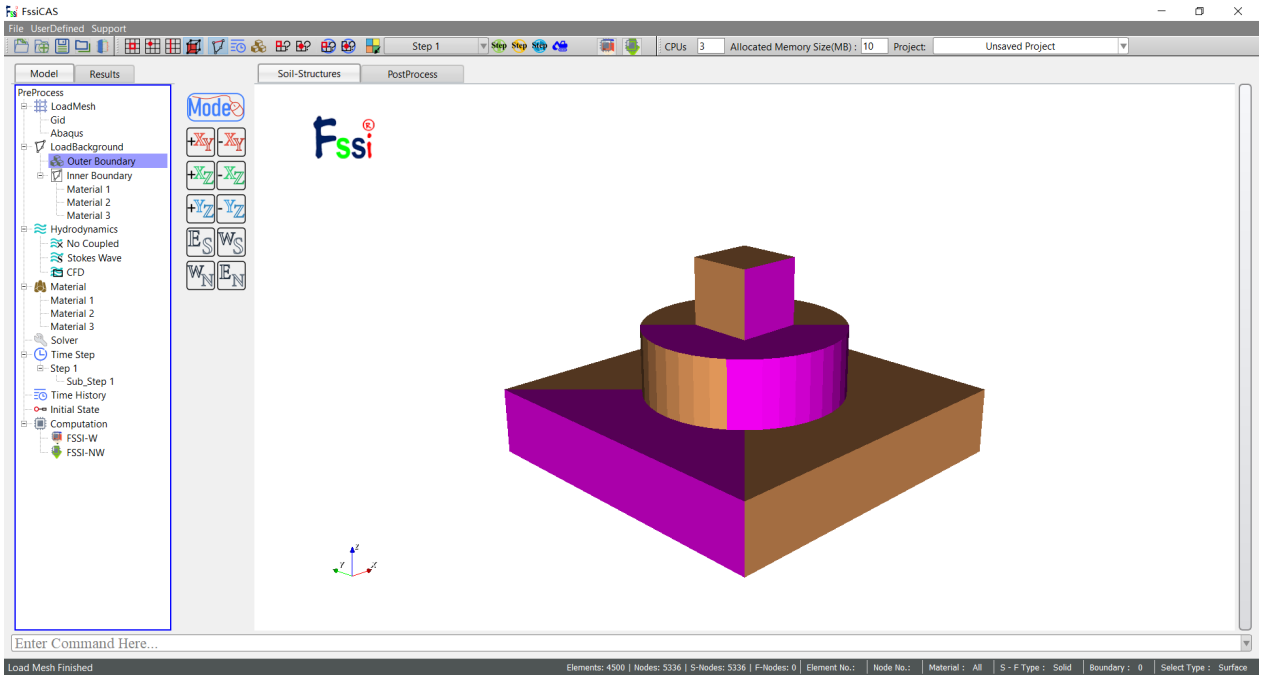


图 3-20 三维几何模型的内边界和内背景线的选择

在前处理界面上树状菜单栏的 Model 区域中，用户点击 Inner Boundary，在弹出的窗口中点击 Choose File，选择三维几何模型的内背景线.igs 文件，并关闭窗口；

点击前处理界面最右侧的伸缩区，在伸缩区中的第一个下拉列表里选择材料 2（Material 2），点击 Mesh；在第二个下拉列表里选择 Boundary 2，点击 Boundary，在工作区中即可显示导入的内背景线；

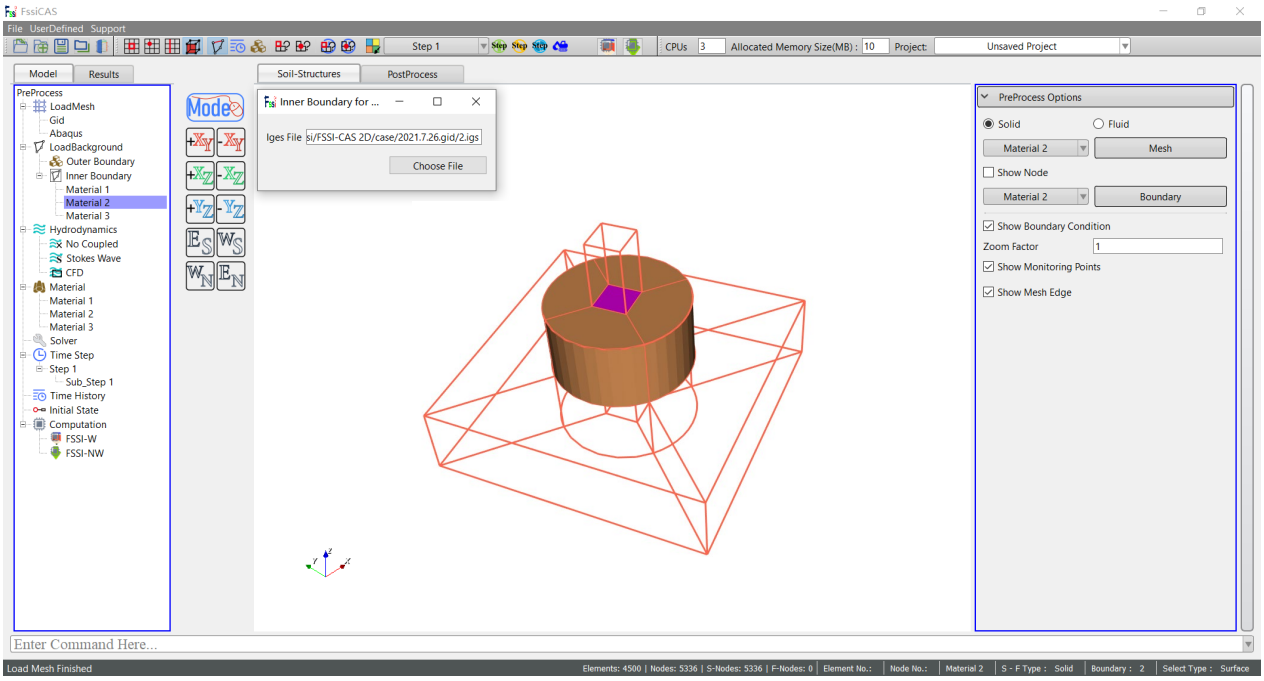
在前处理界面上，点击工具栏 2 中快捷功能按钮 ，进入边界选择模式；

点击工具栏 2 中快捷功能按钮 ，并点击点击键盘‘R’键，进入背景面选择模式；

点击工具栏 2 中快捷功能按钮 ，并点击点击键盘‘R’键，进入选择背景线模式；

需要注意的是，不管是进入背景面选择模式还是背景线选择模式，都需要点击键盘‘R’键，才可以开始选择内边界。同时，点击键盘‘R’键后，界面中的模型便不可以进行旋转，平移等操作，此时，按住鼠标左键拖动的操作变为为框选。若需要进行旋转，平移等操作，必须再次点击键盘‘R’键，退出选择模式，才可以进行。如图 3-20 所示；

再次点击键盘‘R’键，或者直接点击按钮 关闭边界选择模式，即可结束选择；



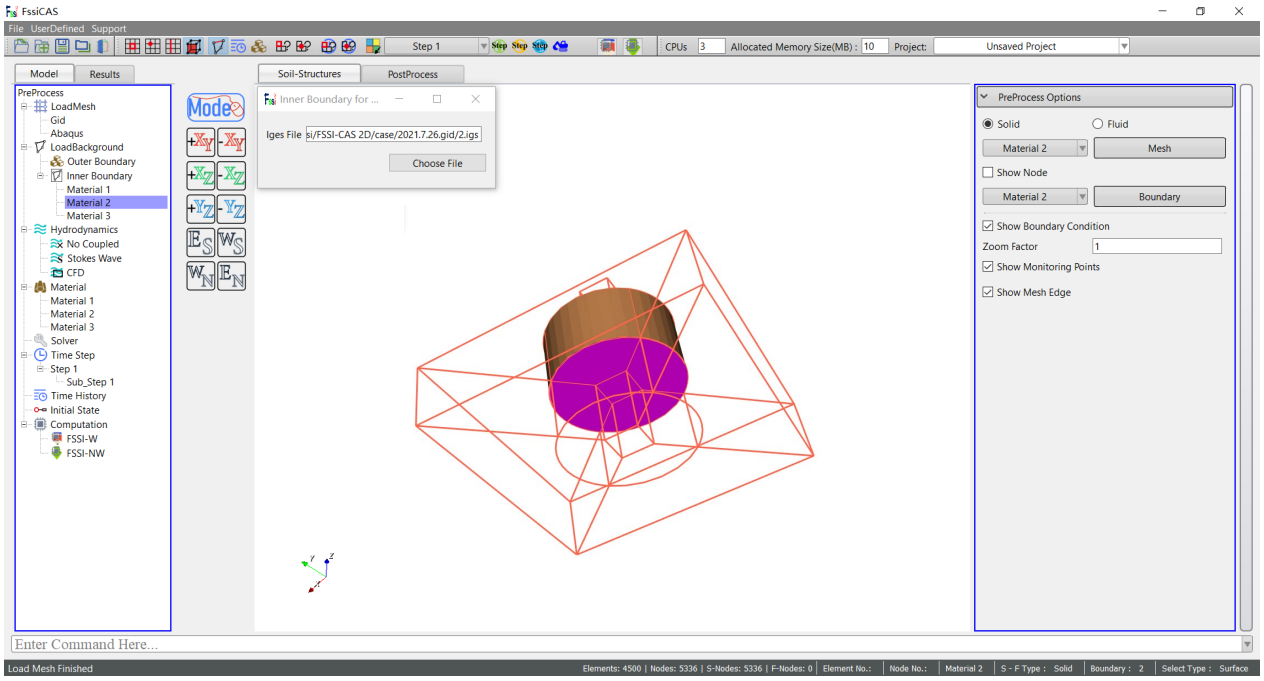


图 3-21 三维几何模型的内边界和内背景线的选择

3.5 显示网格和背景线

导入网格文件和背景线.igs 文件后，网格和背景线将显示在操作界面中的工作区中，如图 3-22 所示。

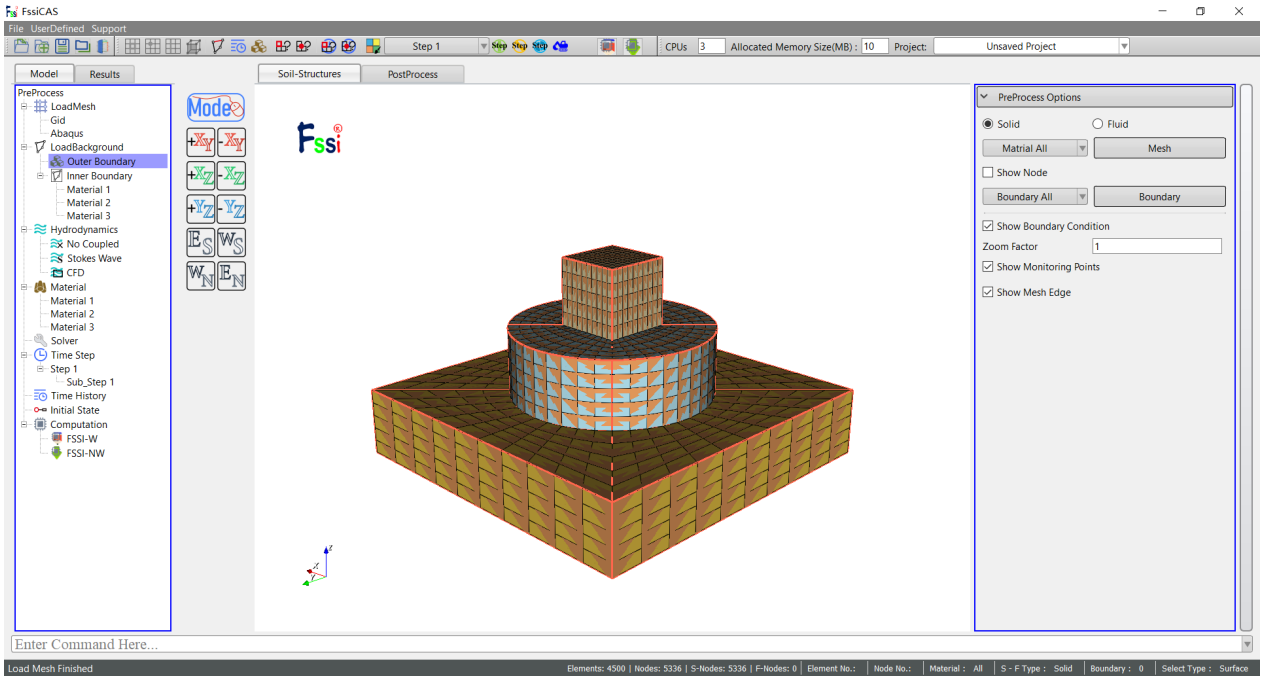


图 3-22 网格和背景线的显示

第4章 设置边界条件与开挖

4.1 边界条件

Apply Boundary 是在前处理界面上的工具栏 2 中从左到右第 5 个快捷功能按钮，用于设置几何模型的边界条件，如图 4-1 所示。FssiCAS 软件可以施加的所有边界条件类型如 Table 4-1 所示。

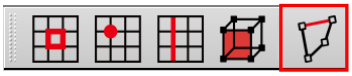


图 4-1 前处理界面上工具栏 2 中的快捷功能按钮 Apply Boundary

比如需要将几何模型的边界条件设置为：左右两侧的边界设置为 X 方向位移固定，底部边界设置为 X、Z 方向位移均固定，顶部边界设置孔压固定和添加水动力边界条件；

用户首先点击工具栏 2 中从左到右第 5 个快捷功能按钮，进入边界选择模式；随后点击工具栏 2 中第 3 个快捷功能按钮，进入选择背景线模式，如图 4-2 所示；点击键盘‘R’键，开始选择边界；

图 4-2 进入选择边界条件模式

在工作区中用鼠标拖动框选几何模型的左右两侧的边界，选中后被选择的线出现高亮；

点击鼠标右键，在显示的边界条件下拉菜单中选择 Displacement—Add，在弹出的窗口中勾选 Constant Displacement XDof 并点击 OK，即可将左右两侧的边界设置为 X 方向位移固定，如图 4-3 所示；

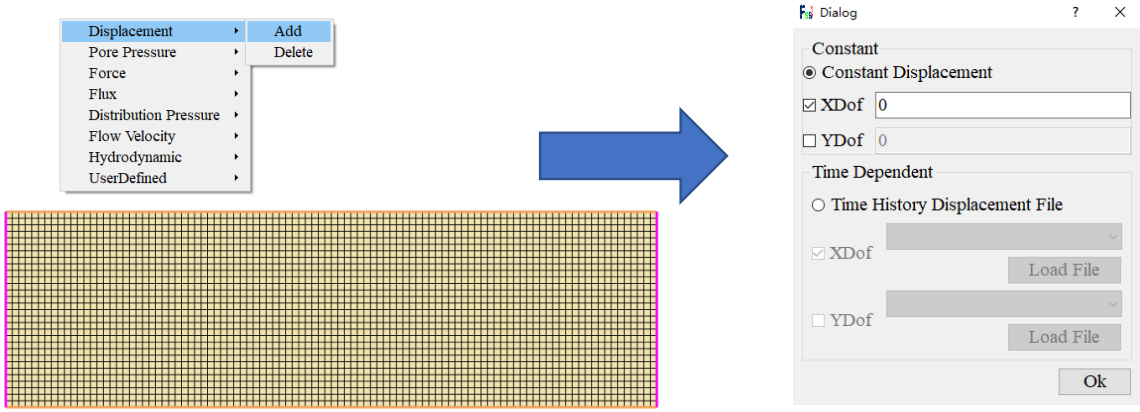


图 4-3 将左右两侧边界设置为 X 方向位移固定

在工作区中用鼠标拖动框选底部边界，选中后被选择的线出现高亮；

点击鼠标右键，在显示的边界条件下拉菜单中选择 Displacement—Add，在弹出的窗口中勾选 Constant Displacement XDof 和 Constant Displacement ZDof 并点击 OK，即可将底部边界设置为 X、Z 方向位移均固定，如图 4-4 所示；

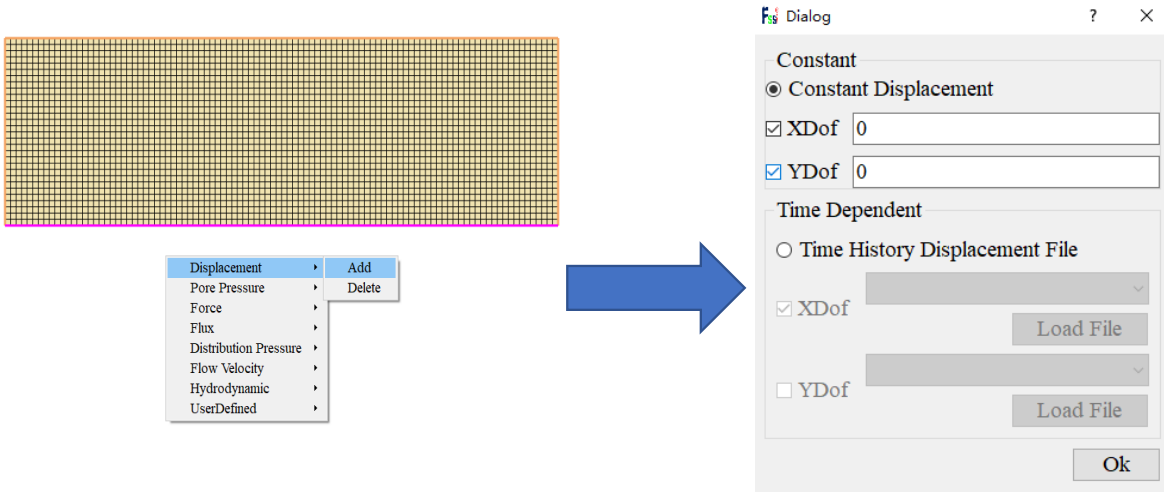


图 4-4 将底部边界设置为 X、Z 方向位移均固定

在工作区中用鼠标拖动框选顶部两边界，选中后被选择的线高亮；

点击鼠标右键，在显示的边界条件下拉菜单中选择 Hydrodynamic—Add，即可将顶部边界设置为孔压固定和添加水动力边界条件，如图 4-5 所示；

再次点击键盘‘R’键，可结束选择；

点击操作界面右侧的伸缩区，勾选 Show Boundary Condition，可以检查是否正确添加边界条件。

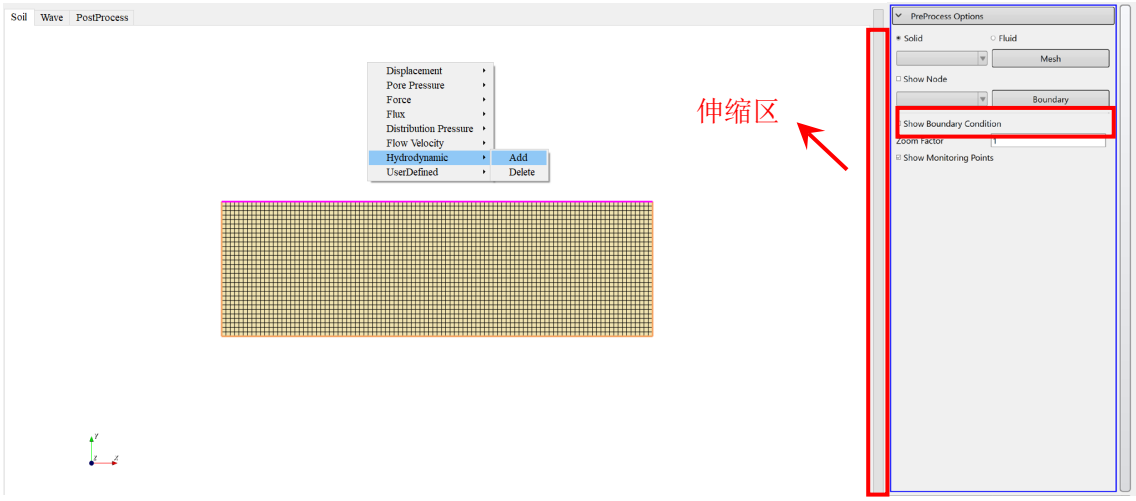


图 4-5 将顶部边界设置为孔压固定和添加水动力边界条件

Table 4-1 可以施加的边界条件的类型

名称				含义
Apply Boundary(The Tool Button)	Select Element	Soil Element	Displacement	位移
			Force	集中力
			Periodic Condition	周期性边界条件
			Distributed Pressure	分布压力
			User Defined on Solid Elements	在固体单元上施加用户自定义的分布压力
		Fluid Element	Pore Pressure	孔压
			Flux	流量
			Periodic Condition	周期性边界条件
			Flow Velocity	流速
			User Defined on Fluid Elements	在流体单元上施加用户自定义的流速
	Select Node	Soil Node	Displacement	位移
			Force	集中力
			User Defined on Solid Nodes	在固体节点上施加用户自定义的位移或集中力
		Fluid Node	Pore Pressure	孔压
			Flux	流量
			User Defined on Fluid Nodes	在固体节点上施加用户自定义的孔压或流量
	Select Line	Displacement		位移
		Pore Pressure		孔压
		Force		集中力
		Flux		流量
		Distributed Pressure		分布力
		Flow Velocity		流速
		Hydrodynamic		水动力条件
		User Defined		用户自定义边界条件
		Periodic Condition		周期性边界条件
	Select Surface			与选择线的可施加的边界条件相同

4.2 开挖与建造功能

点击前处理界面中工具条 2 的 按钮，在 Model 树状菜单栏中会出现 Excavation and Build 目录，如图 4-6 所示。

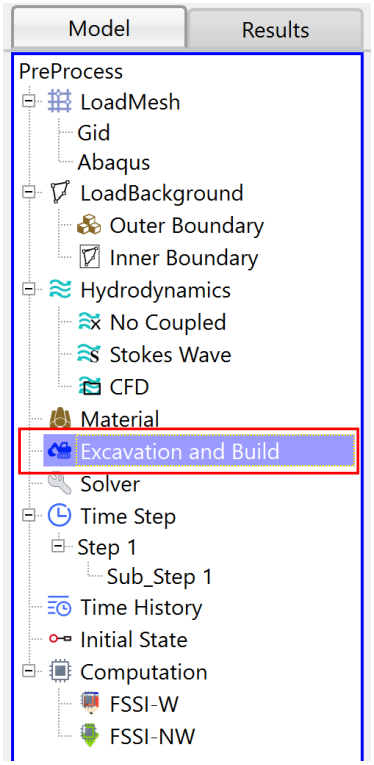
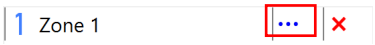


图 4-6 树状菜单栏中开挖与建造目录

点击树状菜单栏中的 Excavation and Build，可创建开挖区域或查看已设置的开挖区域，如图 4-7 所示。点击弹出的窗口中的 Create 按钮，可以创建开挖区域。点击如右图所示红框中的按钮 

，可以设置开挖区域，如图 4-8 所示。

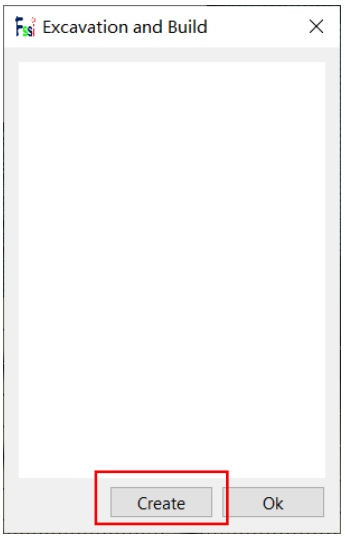


图 4-7 创建开挖区域示意图

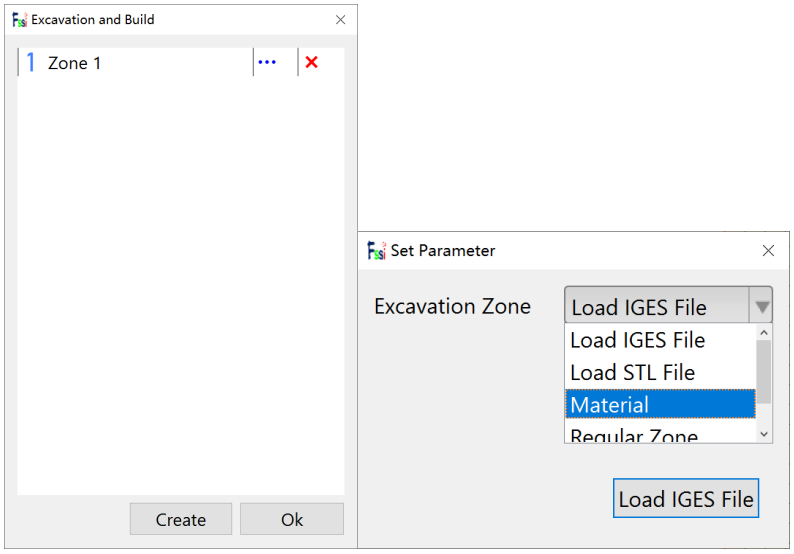


图 4-8 设置开挖区域示意图

以下内容为分别举例说明如何通过导入 Iges 文件、导入 STL 文件、设置材料和设置规则区域四种方式来设置开挖区域。

4.2.1 导入 Iges 文件设置开挖区域

选择导入 Gid 等专业建模软件中导出的.iges 文件来设置开挖区域。如图 4-9 所示。

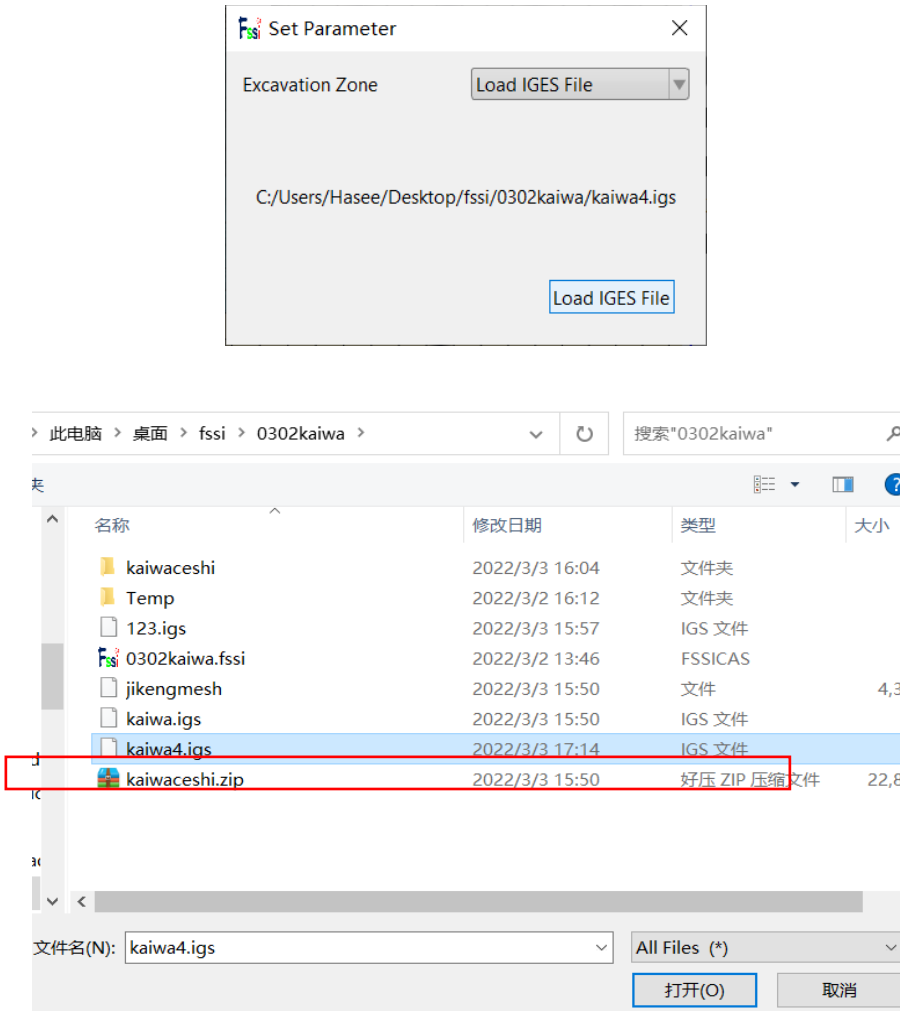
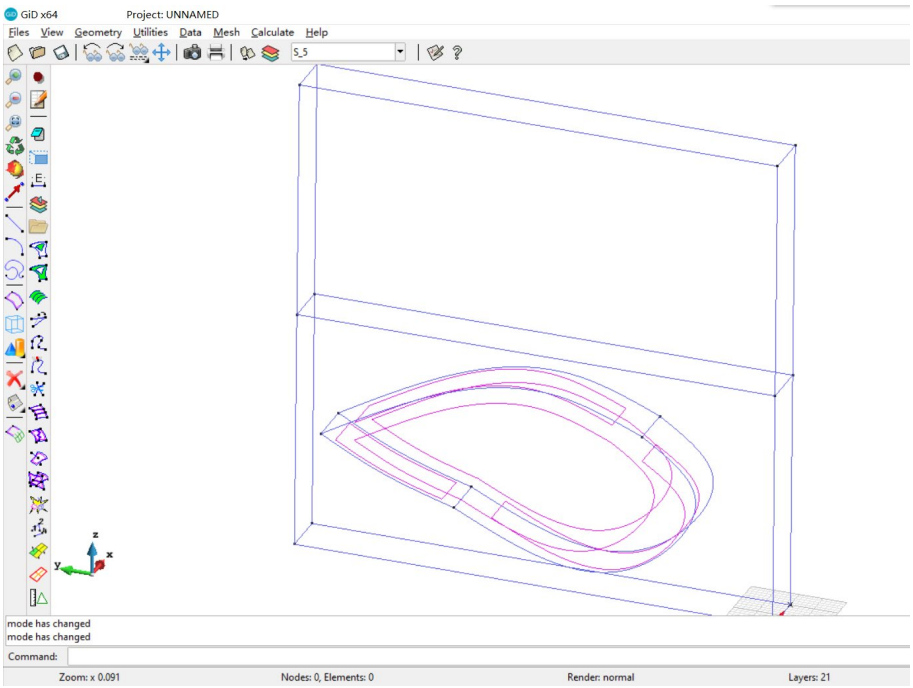


图 4-9 导入 IGES 文件设置开挖区域

也可以在 Gid 等建模软件中提前划分不规则形状的区域，将其导出为.Iges 格式文件，然后导入到 FssiCAS 软件中，以此设置不规则的开挖区域，如图 4-10 所示。



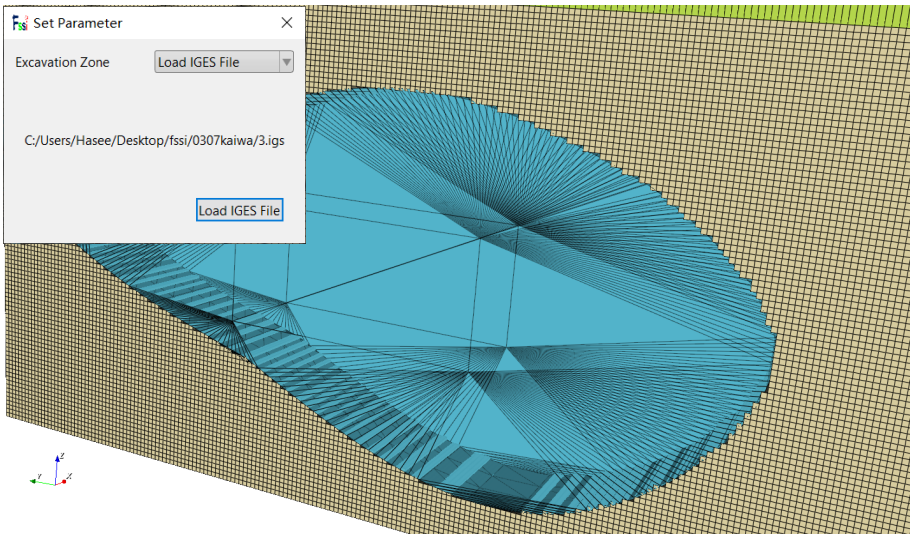


图 4-10 导入 Iges 文件设置不规则开挖区域

注：1.导出.igs 文件仅保开挖区域的点、线、面的信息，删除其他区域的点、线、面的信息，以及相关体、注释等；

2.背景线.igs 文件格式是属于 GID 软件自带的文件格式，是国际通用格式，属于开发性格式；

4.2.2 导入 STL 文件设置开挖区域

导入由 Solidworks 专业建模软件中生成的.STL 文件至 FssiCAS 软件中，设置规则与不规则的开挖区域的步骤，如图 4-11 所示。

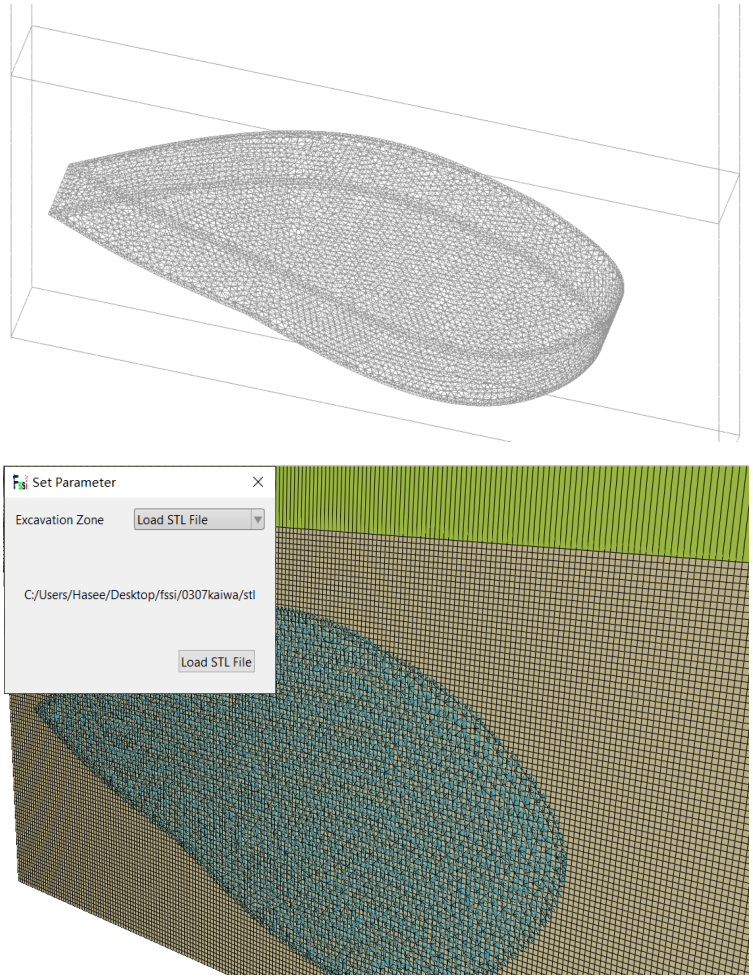


图 4-11 导入 STL 文件设置不规则开挖区域

4.2.3 将一种材料设置为开挖区域

选择将一种材料来设置开挖区域的方法为：勾选需要设置为开挖区域的材料名称即可。如图 4-14，需要开挖区域的材料名称为 subgrade，因此勾选 Set Parameters 界面中的单选框即可。导入步骤与导入后显示的结果如图 4 -12 所示。

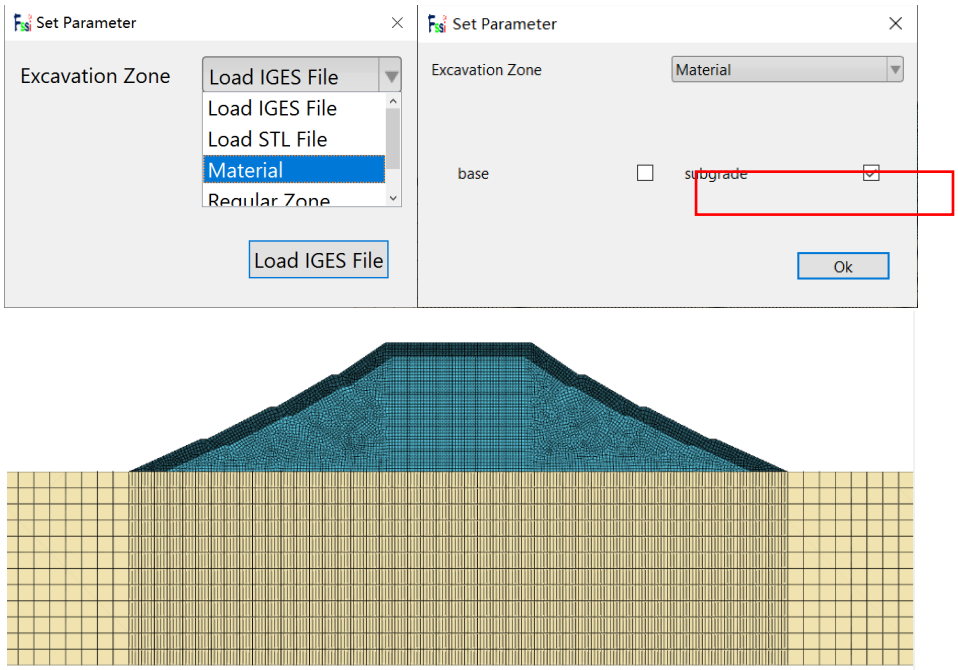


图 4-12 通过选择材料设置开挖区域

4.2.4 输入参数设置开挖区域

输入规则区域的几何尺寸参数，可以设置开挖区域。规则区域的模型可以为箱形或圆柱。例如，选择箱形开挖模型，将六面体的八个节点坐标输入到程序中，确定开挖区域，如图 4-13。

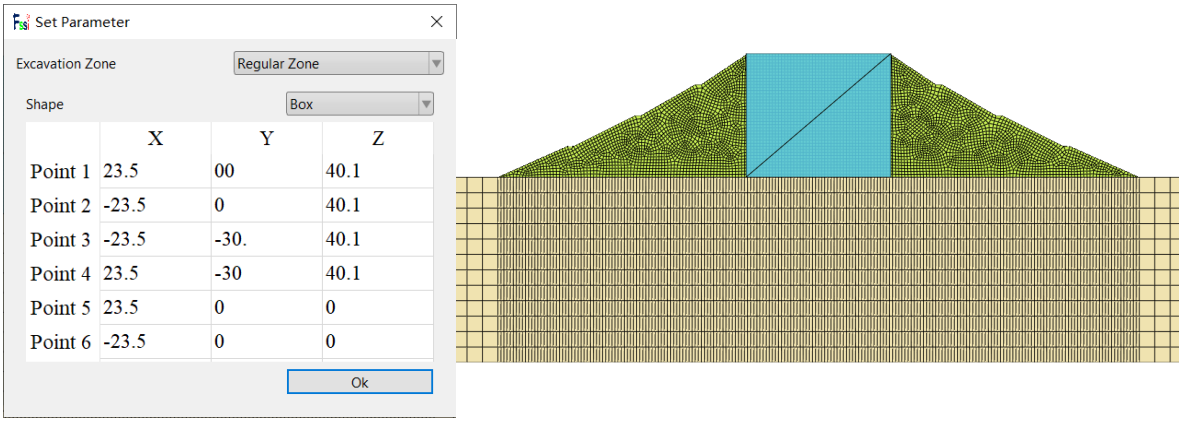


图 4-13 输入规则区域参数设置开挖箱形区域

4.2.5 显示开挖区域

若选择圆柱开挖模型，需要将圆柱底面半径、底面圆心坐标及圆柱中心线等参数输入程序中，即可确定开挖区域，如图 4-14。

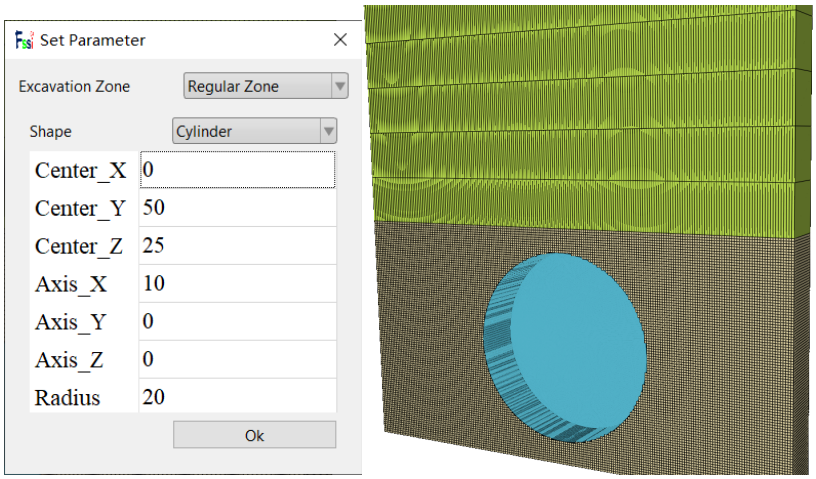


图 4-14 输入规则区域参数设置开挖圆柱形区域

在设置需要开挖区域后，可以选择将开挖区域高亮。显示开挖单元或区域的方法为：勾选前处理界面伸缩区内的 Show Excavation Zone，使开挖区域内的单元变色，如图 4-12 所示。

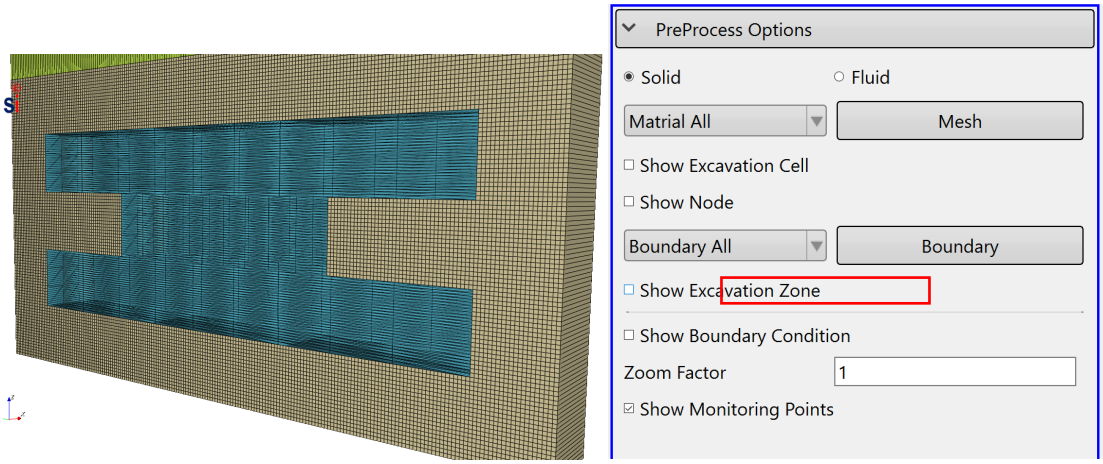


图 4-15 显示开挖区域或单元

第5章 设置材料参数和本构模型

在前处理界面上 Model 树状菜单栏中的 Material 用于添加材料并设置材料属性参数。

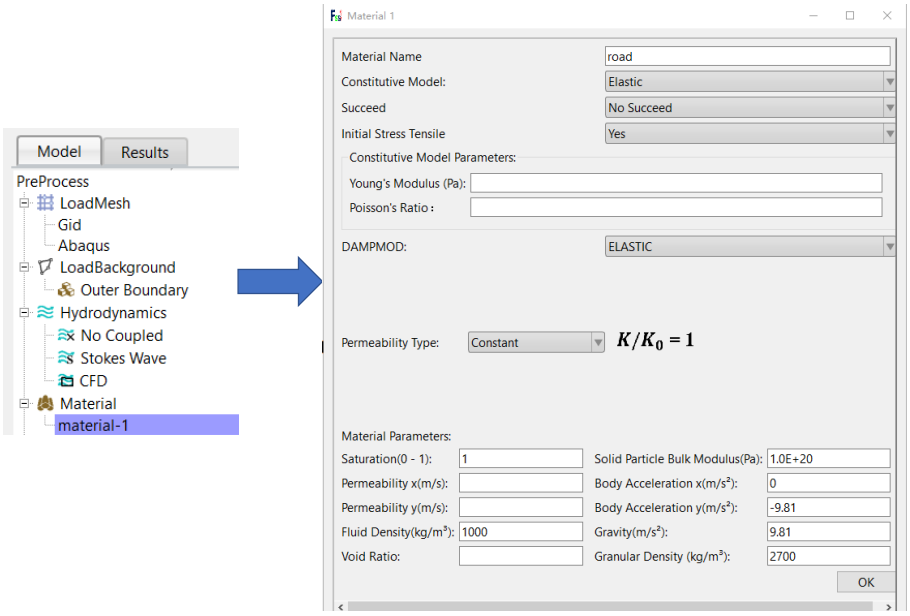


图 5-1　设置材料本构模型、属性参数和名称

添加材料并设置材料属性参数的步骤如下：

在前处理界面正上方的工具栏 2 中，点击从左往右第七个设置材料属性和参数的功能按钮 Material，在工作区中用鼠标左键点击几何模型中相应的区域（材料分区在网格画分时已经确定好了），或者点击树状菜单栏中 Material 下对应的材料名称，然后在弹出的窗口中选择本构模型，并输入材料属性参数，点击 OK，即可设置材料属性和参数，如图 5-2、图 5-3 所示；

图 5-2 前处理界面正上方的工具栏 2 中设置材料属性和参数的功能按钮 Material

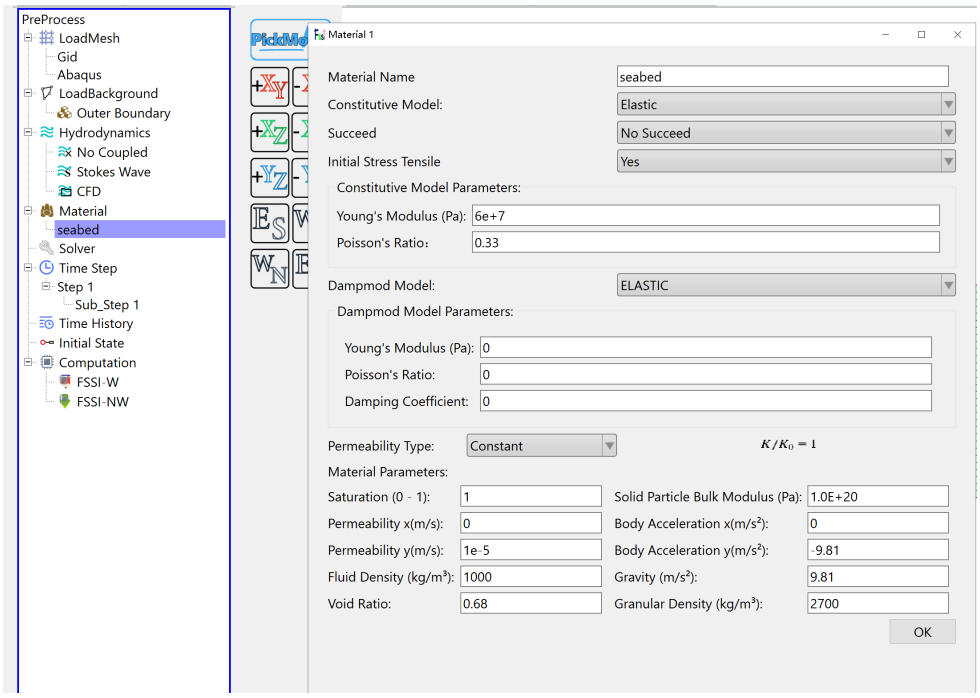


图 5-3 设置材料属性和参数

材料基本参数如 Table 5-1 所示。

Table 5-1 (a) 软件需要的材料基本参数

名称		含义
Permeability Type 透水类型	Constant	$K/K_0 = 1$
	Taylor’s Formulation	$K = C_f \frac{e^3}{1+e}, C_f = \frac{K_0(1+e_0)}{e_0^3}$
	Exponentia…ormulation	$K/K_0 = a \times e^b / a \times e_0^b$

Table 5-2 (b) 软件需要的材料基本参数

名称		含义
Material Parameters	Saturation(0-1)	饱和度
	Soil Partides Bulk Modulus (Pa)	固体颗粒体积模量 (Pa)
	Body Acceleration x (m/s^2)	X 方向加速度，一般为 0 (m/s^2)
	Body Acceleration z (m/s^2)	Z 方向加速度，一般为 9.506/9.81 (m/s^2)
	Permeability x (m/s)	X 方向渗透系数 (m/s)
	Permeability y (m/s)	Y 方向渗透系数 (m/s)
	Permeability z (m/s)	Z 方向渗透系数 (m/s)
	Fluid Density (kg/m^3)	孔隙流体密度 (kg/m^3)
	Gravity (m/s^2)	重力加速度(m/s^2)
	Void Ratio	孔隙比
	Granular Density (kg/m^3)	固体颗粒密度(kg/m^3)
	Succeed	Succeed----继承
		No Succeed----不继承
	Initial Stress Tensile	Yes----抗拉
		No----不抗拉

注：1.流体体积模量为$\frac{1}{\beta}$，单位为 Pa。$\beta = \left(\frac{1}{K_f} + \frac{1-S_r}{p'}\right)$为孔隙流体的压缩系数。$p'=\rho g h'$为绝对静水压力，与水深相关，单位为 Pa。$K_f$为完全饱和孔隙水的体积模量，通常 $K_f=2.24\times10^9$ Pa；

2.固体颗粒体积模量极大，一般为 1×10^{20} Pa；

软件有 17 种土的本构模型可以选择，如 Table 5-2 所示。

Table 5-3 (a) 软件可以选择的土的本构模型

名称		含义
Soil Constitutive Models 本构模型	Elastic	弹性本构模型
	General Elastic	一般弹性本构模型 (可考虑模型与围压相关)
	Bi-Modulus Elastic	考虑拉压不同的本构模型
	Mohr Coulomb	莫尔库伦本构模型
	Modified Cambridge Soil	修正剑桥本构模型

Table 5-4 (b) 软件可以选择的土的本构模型

名称		含义
Soil Constitutive Models 本构模型	Pastor Zienkiewicz Mark III	PZIII 本构模型
	Burgers	Burgers 蠕变模型
	Cyclic Mobility_Zhang	移动硬化模型
	Elastic_ Truss	弹性杆单元
	Elastic_Beam	弹性梁单元
	Elastic_Cable	弹性绳单元
	Elastic_Spring	弹性弹簧单元
	Elastic_Shell	弹性壳单元
	Elastic_Viscoelastic	粘弹性单元
	Userdefined_SoilModel1	用户自定义本构 （最多可定义 5 种）
	Userdefined_SoilModel2	
	Userdefined_SoilModel3	
	Userdefined_SoilModel4	
	Userdefined_SoilModel5	

5.1 弹性本构模型

Elastic 表示弹性本构模型，所需的参数如图 5-4、Table 5-3 所示。

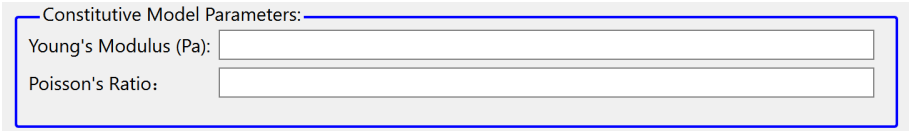


图 5-4 Elastic 弹性本构模型界面图

Table 5-5 Elastic 弹性本构模型所需的参数

名称		含义
Elastic (Constitutive Models)	Young’s Modulus (Pa)	杨氏模量 (Pa)
	Poisson’s Ratio	泊松比

5.2 一般弹性本构模型

General Elastic 表示一般弹性本构模型，该模型的特点是弹性模量与围压相关，而且应力点都在强度线以内，所需的参数如图 5-8、Table 5-4 所示。

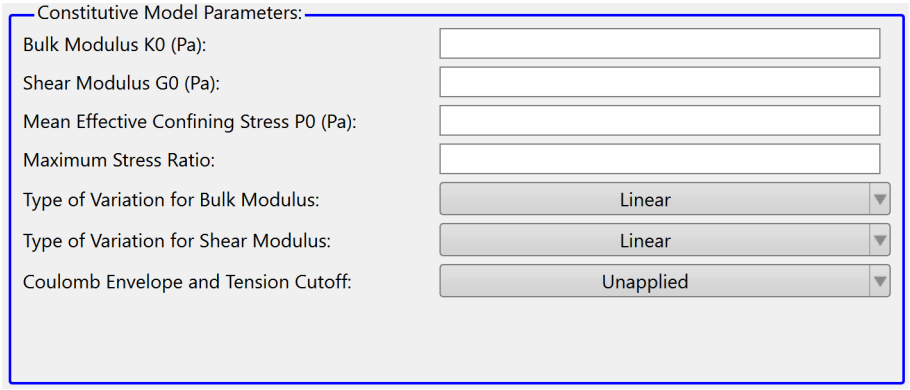


图 5-5 General Elastic 一般弹性本构模型界面图

Table 5-6 General Elastic 一般弹性本构模型所需的参数

名称			含义
General Elastic (Constitutive Models)	Bulk Modulus (Pa)		体积模量 (Pa)
	Shear Modulus (Pa)		剪切模量 (Pa)
	Mean Effective Confining Stress (Pa)		测量体积模量和剪切模量时的平均有效围压(Pa)
	Maximum Stress Ratio		三轴压缩状态下最大应力比 ηmax=(q/p)max
	Type of Variation for Bulk Modulus 体积模量变化类型	Linear	线性
		Square Root	平方根
	Type of Variation for Shear Modulus 剪切模量变化类型	Linear	线性
		Square Root	平方
	Coulomb Envelope and Tension Cutoff 库仑包络和拉力截断	Unapplied	不考虑
		Applied	Cohesion(Pa)----内聚力(Pa)

5.3 考虑拉压不同的本构模型

Bi-Modulus Elastic 表示考虑拉压不同的本构模型，所需的参数如图 5-6、Table 5-5 所示。

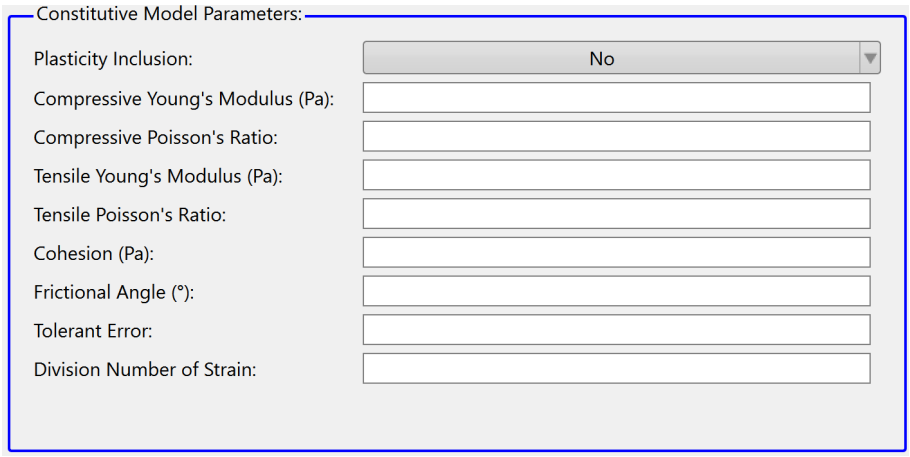


图 5-6 Bi-Modulus Elastic 考虑拉压不同的本构模型界面图

Table 5-7 Bi-Modulus Elastic 考虑拉压不同的本构模型所需的参数

名称			含义
Bi-Modulus Elastic (Constitutive Model)	Model	Elastic	弹性
		SMP	
	Compress Young's Modulus (Pa)		压缩杨氏模量(Pa)
	Compress Poisson's Ratio		压缩泊松比
	Traction Young's Modulus (Pa)		牵引杨氏模量(Pa)
	Traction Poisson's Ratio		牵引泊松比
	Cohesive Forces (Pa)		内聚力(Pa)
	Friction Angle (°)		摩擦角(°)
	Permissible Error		允许误差
	Division Number		划分数量

5.4 莫尔库仑本构模型

Mohr Coulomb 表示莫尔库仑本构模型，该模型实际上是一类模型，包括了 4 种强度准则，所需的参数如图 5-7、Table 5-6 所示。

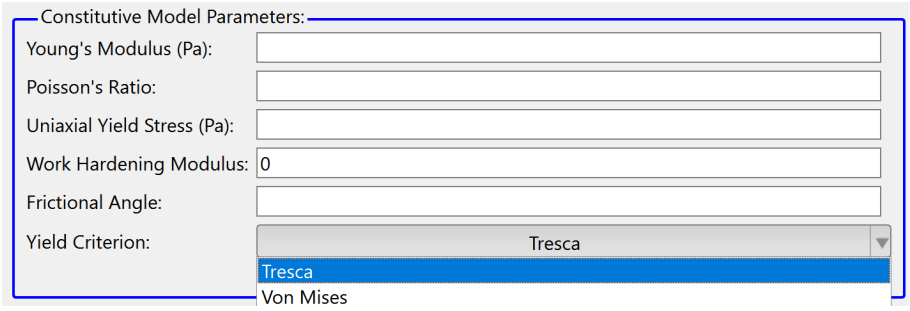


图 5-7 Mohr Coulomb 莫尔库仑本构模型界面图

Table 5-8 Mohr Coulomb 莫尔库仑本构模型所需的参数

名称			含义
Mohr Coulomb (Constitutive Model)	Young's Modulus (Pa)		杨氏模量 (Pa)
	Poisson's Ratio		泊松比
	Uniaxial Yield Stress (Pa)		无侧限屈服应力为 2 倍的内聚力 (Pa)
	Work Hardening Modulus		加工硬化模量（默认为 0，即不考虑硬化）
	Frictional Angle		内摩擦角
	Yield Criterion 屈服准则	Tresca	
		Von Mises	
		Mohr Coulomb	
		Drucker Prager	

5.5 修正剑桥本构模型

Modified Cambridge Soil 表示修正剑桥本构模型，所需的参数如图 5-8、Table 5-7 所示。

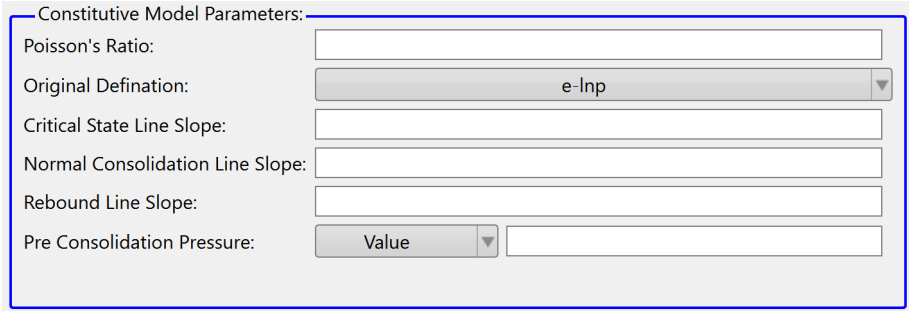


图 5-8 Modified Cambridge Soil 修正剑桥本构模型界面图

Table 5-9　Modified Cambridge Soil 修正剑桥本构模型所需的参数

名称			含义
Modified Cambridge Soil (Constitutive Model)	Poisson's Ratio		泊松比
	Originial Defination 原始定义	lne-lnp	
		e-lnp	
	Critical Sate Line Slope		临界状态线的斜率 M f
	Normal Consolidation Line Slope		正常固结线的斜率 λ
	Rebound Line Slope		回弹线的斜率 k
	Pre Consolidation Pressure 预固结压力	Value	先期固结压力为常值
		OCR	先期固结压力由 OCR 确定
		From File	先期固结压力从重启文件中获得

5.6　PZIII 本构模型

Pastor Zienkiewicz Mark III 本构模型所需的参数如图 5-9、Table 5-8 所示。

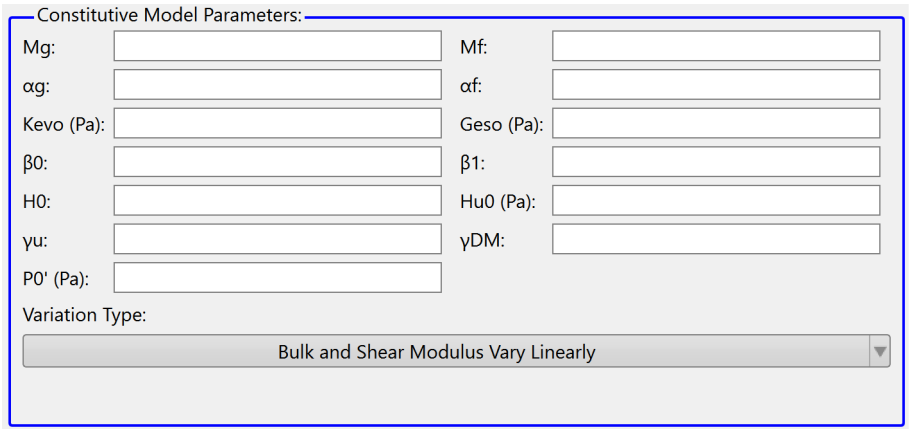


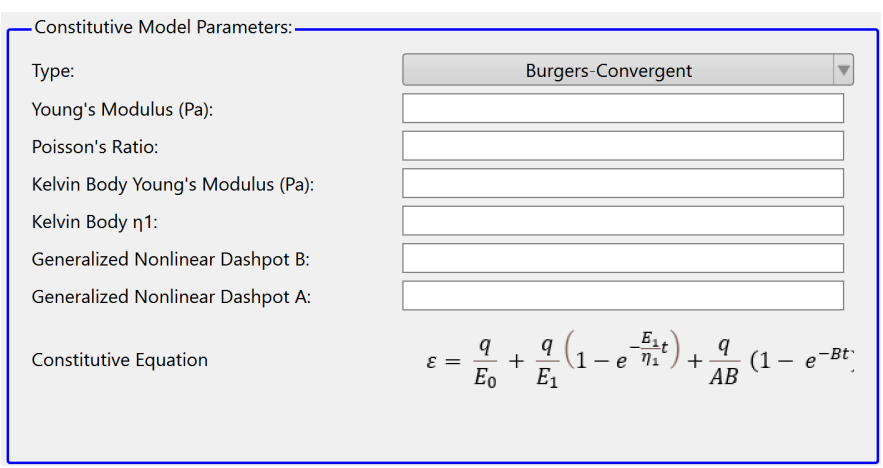
图 5-9 Pastor Zienkiewicz Mark III 本构模型界面图

Table 5-10　Pastor Zienkiewicz Mark III 本构模型所需的参数

名称			含义
Pastor Zienkiewicz Mark III (Constitutive Model)	M f		临界状态线的斜率
	M g		经验公式为 Mf/Mg=Dr
	α f		无量纲参数
	α g		无量纲参数
	Kevo (Pa)		体积模量 (Pa)
	Gevo (Pa)		3 倍的剪切模量 (Pa)
	β 0		无量纲参数
	β 1		无量纲参数
	H 0		初始加载塑性模量
	H u0		初始卸载塑性模量
	γ u		无量纲参数
	γ DM		无量纲参数
	P'0		测量模量时的平均有效围压
	Variation Type-体积/剪切模量的变化类型	Bulk and Shear Modulus Vary Linearly	体积模量和剪切模量线性变化
		Shear Modulus Vary Linearly	剪切模量线性变化
		Bulk Modulus Vary Linearly	体积模量线性变化
		Bulk and Shear Modulus are Constant	体积模量和剪切模量为定值

5.7　Burgers 本构模型

Burgers 本构模型所需要的参数如图所示。



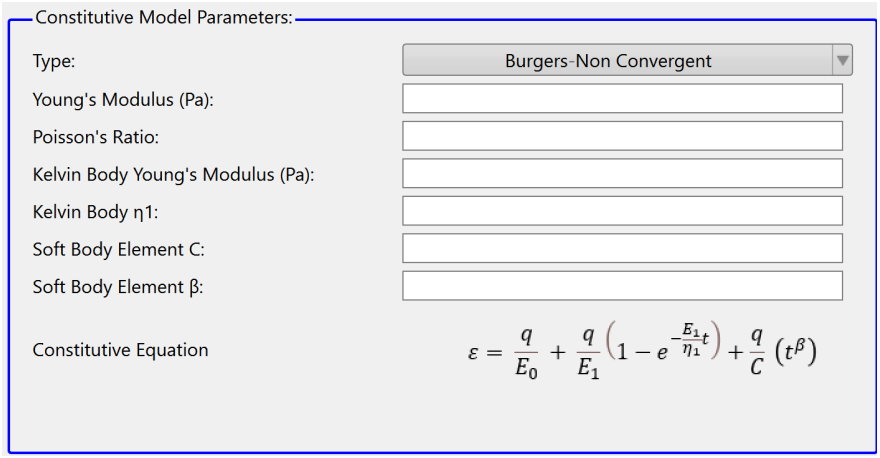


图 5-10 Burgers 本构模型界面图

Table 5-11 Burgers 本构模型所需要的参数

	名称		含义
Burgers	Burgers Convergent 收敛 Burgers	Young’s Modulus (Pa)	杨氏模量(Pa)
		Poisson’s Ratio	泊松比
		Kelvin Body Young's Modulus(Pa)	开尔文体杨氏模量(Pa)
		coefficient of viscosity	粘性系数
		Generalized Nonlinear Dashpot A	广义非线性粘壶参数 A
		Generalized Nonlinear Dashpot B	广义非线性粘壶参数 B
	Burgers Non-Convergent 非收敛 Burgers	Young’s Modulus (Pa)	杨氏模量(Pa)
		Poisson’s Ratio	泊松比
		Kelvin Body Young's Modulus(Pa)	开尔文体杨氏模量(Pa)
		coefficient of viscosity	粘性系数
		the soft body element C	软体单元参数 C
		the soft body element β	软体单元参数 B

5.8 移动硬化模型本构模型

CyclicMobility_Zhang 指移动硬化模型，该本构模型所需的参数如图 5-10、Table 5-9 所示。

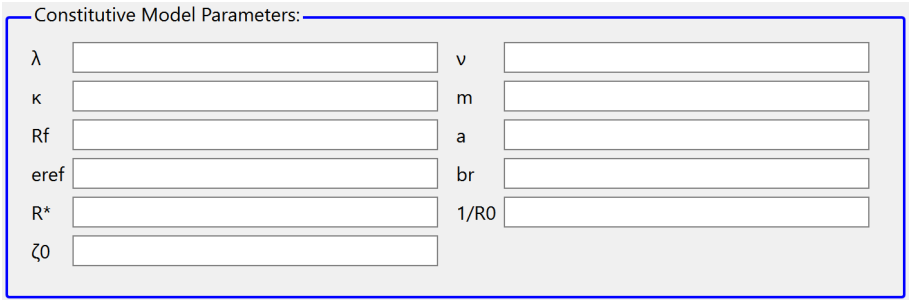


图 5-11 CyclicMobility_Zhang 本构模型界面图

Table 5-12 CyclicMobility_Zhang 本构模型所需要的参数

名称		含义
CyclicMobility_Zhang	λ	正常固结线的斜率
	κ	卸载回弹曲线的斜率
	R_f	临界状态下的主应力比 σ_1/σ_3
	e_{ref}	正常固结孔隙比
	ν	泊松比
	m	超固结状态的衰减参数
	a	结构性状态的衰减参数
	b_r	各向异性的演化参数
	$1/R_0$	初始超固结参数
	R^*	初始结构性参数
	ζ_0	初始各向异性参数

5.9 Bounding Surface_Dafalias(2004)本构模型

Bounding Surface_Dafalias(2004) 本构模型所需的参数如图 5-10、Table 5-9 所示。

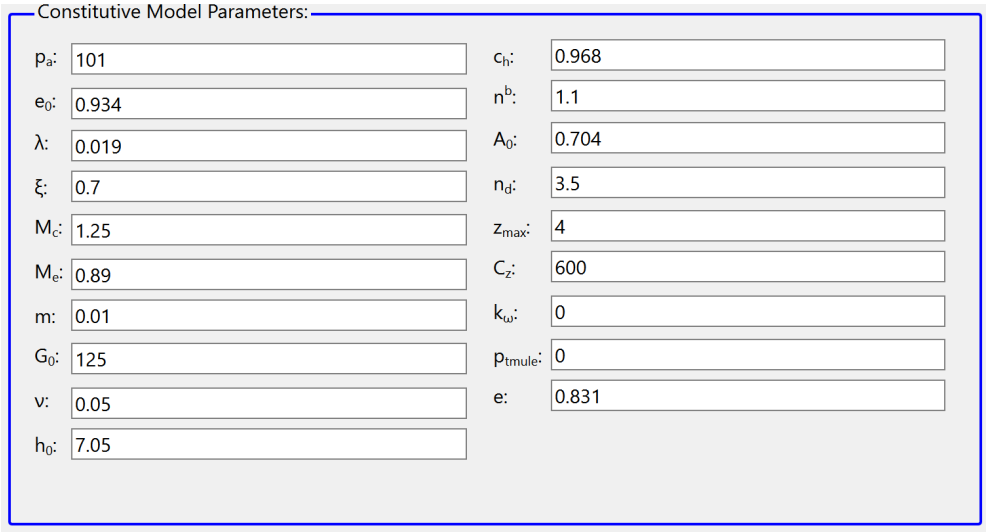


图 5-12 Boundary Surface_Dafalias(2004)本构界面图

Table 5-13 (a) Boundary Surface_Dafalias(2004)需要的参数

名称		含义
Bounding Surface_Dafalias(2004)	P_a	标准大气压
	e_0	临界状态线上 $P=0$ 时的孔隙比
	λ	临界状态线的斜率
	ξ	$e_0 = e_0 - \lambda(P/P_a)^{\xi}$
	M_c	三轴压缩试验，$p' - q$ 坐标系中，临界状态线斜率
	M_e	三轴拉伸试验，$p' - q$ 坐标系中，临界状态线斜率
	m	控制屈服面的开口程度
	G_0	剪切模量
	ν	泊松比
	h_0	塑性模量参数
	c_h	塑性模量参数
	n^b	塑性模量参数

Table 5-14 (b) Boundary Surface_Dafalias(2004)需要的参数

名称		含义
Bounding Surface_Dafalias(2004)	A_0	剪胀参数
	n_d	剪胀参数
	z_{max}	组构参数
	c_z	组构参数
	K_w	孔隙水的体积模量（排水情况下为 0）
	P_{tmult}	平均应力转换系数(一般为 0)
	e	初始孔隙比

5.10 弹性杆单元

Elastic_ Truss 表示弹性杆单元，所需的本构参数如图 5-11、Table 5-10 所示。

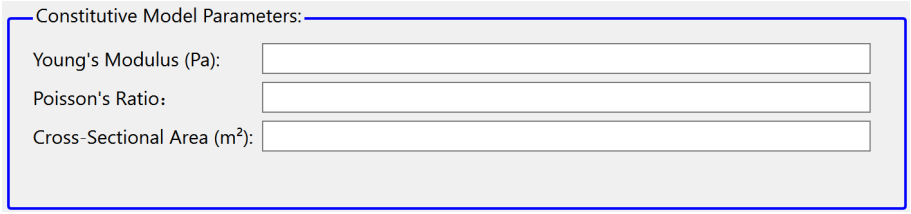


图 5-13 Elastic_ Truss 本构模型界面图

Table 5-15 Elastic_ Truss 本构模型所需的参数

名称		含义
Elastic_ Truss	Young’s Modulus (Pa)	杨氏模量 (Pa)
	Poisson’s Ratio	泊松比
	Cross-Sectional Area(m2)	截面积（m2）

5.11 弹性梁单元

Elastic_Beam 表示弹性梁单元，所需的本构参数如图 5-12、Table 5-11 所示。

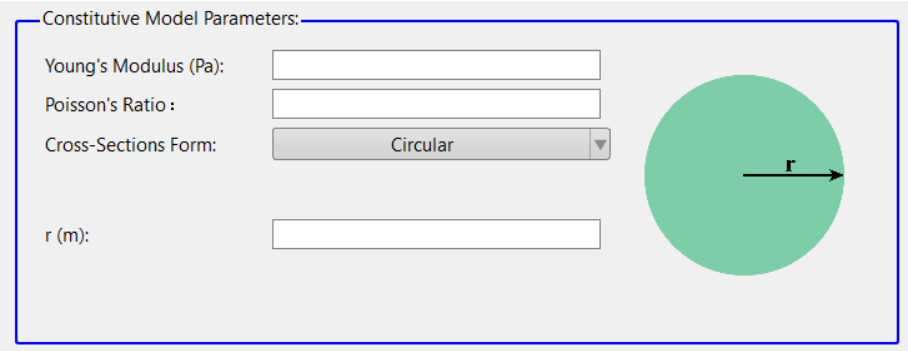


图 5-14 Elastic_Beam 本构模型界面图

Table 5-16　Elastic_Beam 本构模型所需的参数

名称				含义
Elastic_Beam	Young's Modulus (Pa)			杨氏模量 (Pa)
	Poisson's Ratio			泊松比
	Orientation			截面方向与坐标系夹角余弦值
	Cross-Sectional Form 截面类型	Circular 圆形截面	r(m)	半径
		Rectangle 矩形截面	a (m)	长
			b (m)	宽
		Ring 环形截面	r (m)	内径
			R (m)	外径
		Tube-形截面	a (m)	内长
			b (m)	内宽
			A (m)	外长
			B (m)	外宽
		Ibeam 工字梁截面	b (m)	翼板宽
			d (m)	腹板宽
			t (m)	翼板高度
			h (m)	梁高
		Userdefined-自定义截面形状		

5.12 弹性绳单元

Elastic_Cable 表示弹性绳单元，所需的本构参数如图 5-13、Table 5-12 所示。

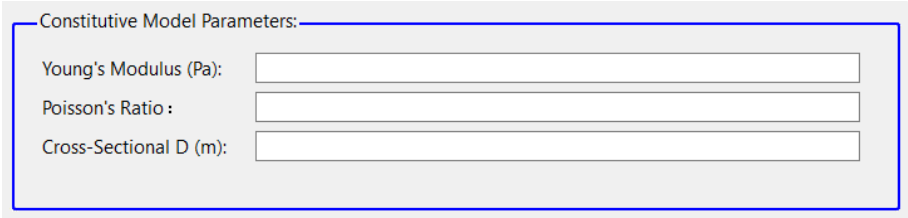


图 5-15 Elastic_Cable 本构模型界面图

Table 5-17 Elastic_Cable 本构模型所需的参数

名称		含义
Elastic_Cable	Young’s Modulus (Pa)	杨氏模量 (Pa)
	Poisson’s Ratio	泊松比
	Cross-Sectional Area(m2)	截面积（m2）

5.13 弹簧单元

Elastic_Spring 表示弹簧单元，所需的本构参数如图 5-14、Table 5-13 所示。

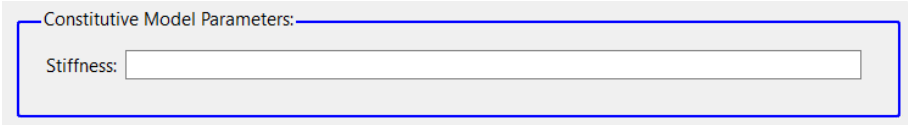


图 5-16 Elastic_Spring 本构模型界面图

Table 5-18 Elastic_Spring 本构模型所需的参数

名称		含义
Elastic_Spring	Stiffness	弹簧刚度 K

5.14 弹性壳单元

Elastic_Shell 表示弹性壳单元，所需的本构参数如图 5-15、Table 5-14 所示。

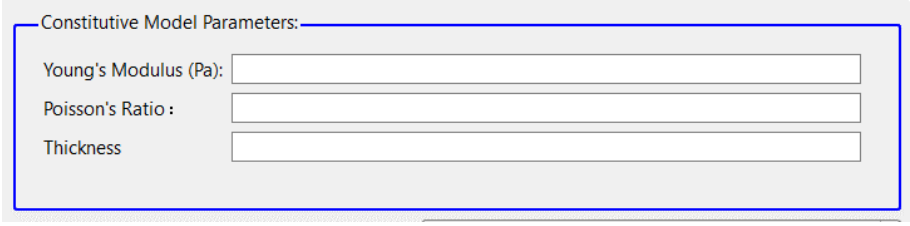


图 5-17 Elastic_Shell 本构模型界面图

Table 5-19 Elastic_Shell 本构模型所需的参数

名称		含义
Elastic_Shell	Young’s Modulus (Pa)	杨氏模量（Pa）
	Poisson’s Ratio	泊松比
	Thickness	厚度（m）

5.15 粘弹性单元

Elastic_Viscoelastic 表示粘弹性单元，所需的本构参数如图 5-15、Table 5-14 所示。

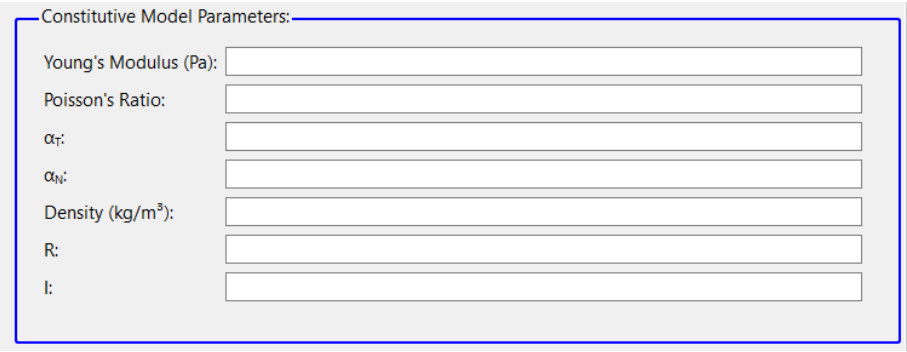


图 5-18 Elastic_Viscoelastic 本构界面图

Table 5-20 Elastic_Viscoelastic 本构所需要的参数

名称		含义
Elastic_Shell	Young's Modulus (Pa)	杨氏模量 (Pa)
	Poisson's Ratio	泊松比
	α_T α_N Density(kg/m^3) R I	密度（kg/m^3）

5.16 用户自定义本构模型

UserDefined Constitutive Models 表示用户自定义本构模型，最多可自定义 5 种本构模型，分别为 Userdefined_SoilModel1、Userdefined_SoilModel2、Userdefined_SoilModel3、Userdefined_SoilModel4、Userdefined_SoilModel5。所需的参数如图 5-16、Table 5-15 所示。

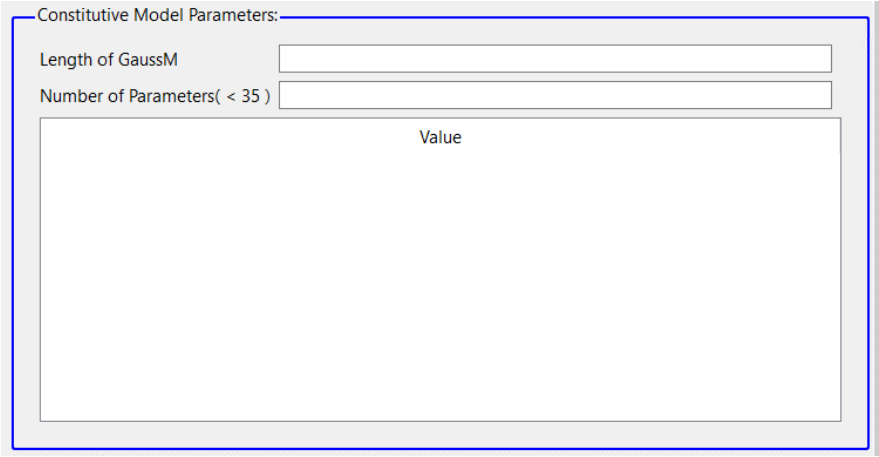


图 5-19 用户自定义本构模型界面图

Table 5-21 用户自定义本构模型所需的参数

名称		含义
User Defined Constitutive Models (Constitutive Model)	Length of GaussM	高斯点上与本构执行相关的参数
	Number of Paramenters(<35)	读入的本构模型参数的个数
	Value	数值

第6章 设置水动力荷载

在前处理界面上 Model 树状菜单栏中的 Hydrodynamics 用于指定计算软件如何考虑水动力荷载，由 No Coupled，Stokes Wave 以及 CFD 组成，如图 6-1 所示。No Coupled，Stokes Wave，以及 CFD 的含义列于 Table 6-1 中。

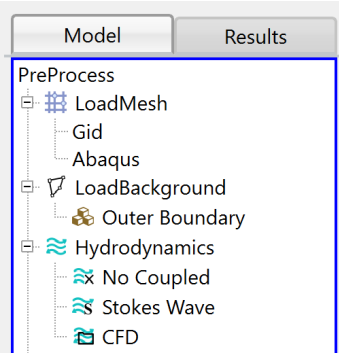


图 6-1 前处理界面上树状菜单栏的 Hydrodynamics

Table 6-1 No Coupled，Stokes Wave，Cobras Wave 以及 Apply Hydro File 的含义

名称	含义
No Coupled	表示不考虑波浪力
Stokes Wave	表示添加斯托克斯解析解波浪力
CFD	表示导入已经计算完成的 Fluent、SPH 或 OpenFOAM 数值解波浪文件

6.1 不考虑波浪力

No Coupled 表示不考虑波浪力，如图 6-2 所示。

当不考虑流体或不考虑流体节点，或不考虑水动力时，选择 No Coupled。

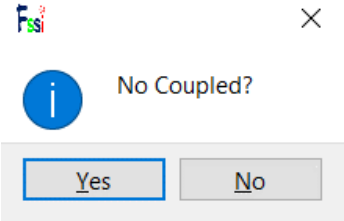


图 6-2 No Coupled 窗口

6.2 添加 Stokes 解析解波浪力

Stokes Wave 表示采用 Stokes Wave 解析解施加波浪作用力，一般只适用于平直海床，所需要的波浪基本参数如下：

Table 6-2 施加 Stokes Wave 所需要的波浪基本参数

名称	基本参数	
Wave Parameters	Wave Period (s)	波浪周期 (s)
	Wave Height (m)	波高 (m)
	Water Depth (m)	水深 (m)
	SWL Position (m)	静态水位线在坐标系中的 Z 坐标

注：水位线是指静态水面与 X 坐标轴 X=0 m 的距离。

Stokes Wave 表示添加斯托克斯解析解波浪作用力，Stokes Wave 有 8 种类型，如 Table6-3、图 6-3 所示。

Table 6-3 软件中可添加的斯托克斯解析解波浪作用力的类型

名称		含义
Stokes Wave	FIRST-ORDER PROGRESSIVE WAVE	一阶行波
	SECOND-ORDER PROGRESSIVE WAVE	二阶行波
	THIRD-ORDER PROGRESSIVE WAVE (Current Velocity(m/s))	三阶行波 海流流速(m/s)
	FIRST-ORDER STANDING WAVE (XOFFSET (m))	一阶驻波 偏移量（只对驻波有效）
	SECOND-ORDER STANDING WAVE (XOFFSET (m))	二阶驻波 偏移量（只对驻波有效）
	CNOIDAL WAVE (Modulus)	椭圆余弦波浪 (模量，一般≥0.95)
	RANDOM WAVE-JONSWAP	波谱随机波浪
	RANDOM WAVE-JONSWAP	

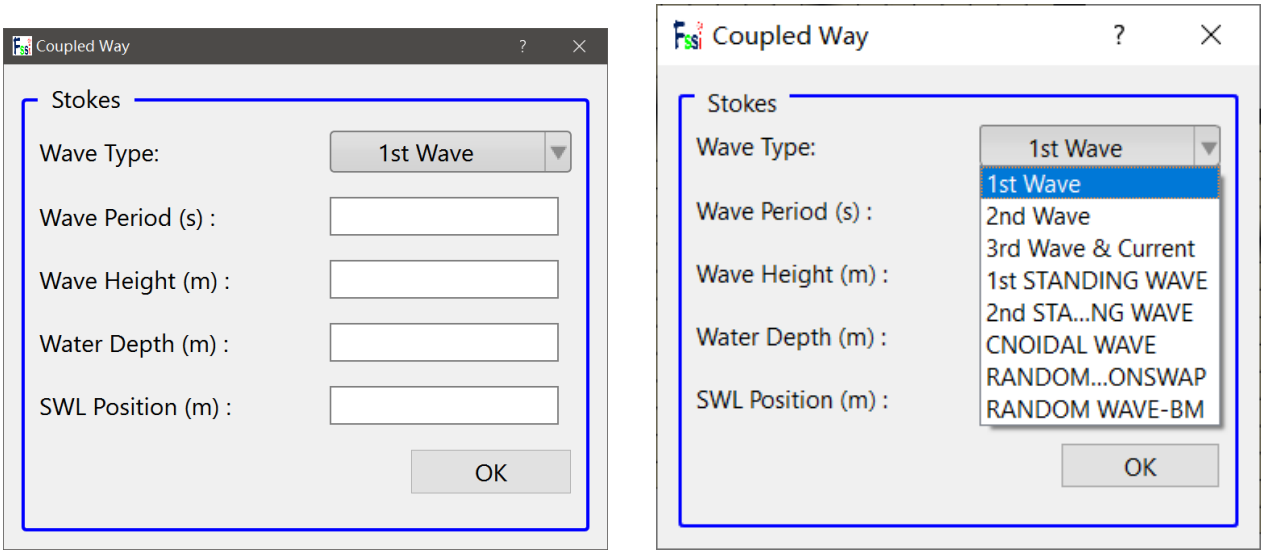


图 6-3 Stokes Wave 可选类型的界面图

6.3 CFD

点击 CFD 可导入已经计算好的 OpenFOAM、Fluent 或者 SPH 波浪文件。

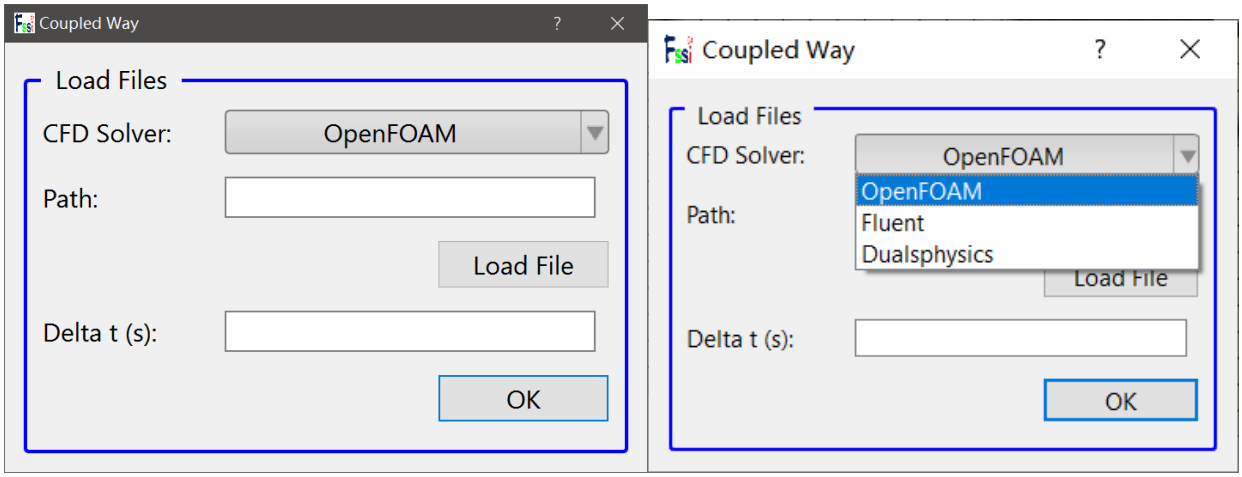


图 6-4 CFD 界面图

Table 6-4 CFD 界面参数的含义

名称	含义
CFD Solver	文件类型（OpenFOAM、Fluent 或者 SPH)
Path	输入待加载的波浪文件的路径
Load File	点击即可加载波浪文件
Delta t(s)	波浪作用力文件输出的时间间隔

第7章 求解器类型、时间步、时程和计算

7.1 求解器介绍

在前处理界面上 Model 树状菜单栏中的 Solver 由 Solver Setup，Time Step 以及 Time History 组成，如图 7-1 所示。

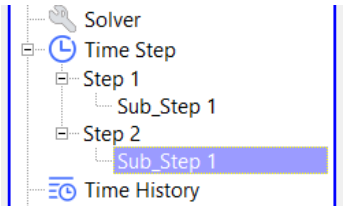


图 7-1 前处理界面上 Model 树状菜单栏中的 Solver 及其组成

7.1.1 求解器设置

Solver Setup 界面图如图 7-2 所示，Solver Setup 界面参数介绍如 Table 7-1 所示。

Solver Setup 有 3 种选择，分别为 Static，Consolidation，Dynamic。

Static 表示与时间无关的静态，Consolidation 表示土的固结分析（与时间一阶导数相关），Dynamic 表示动态分析（与时间二阶导数相关）。

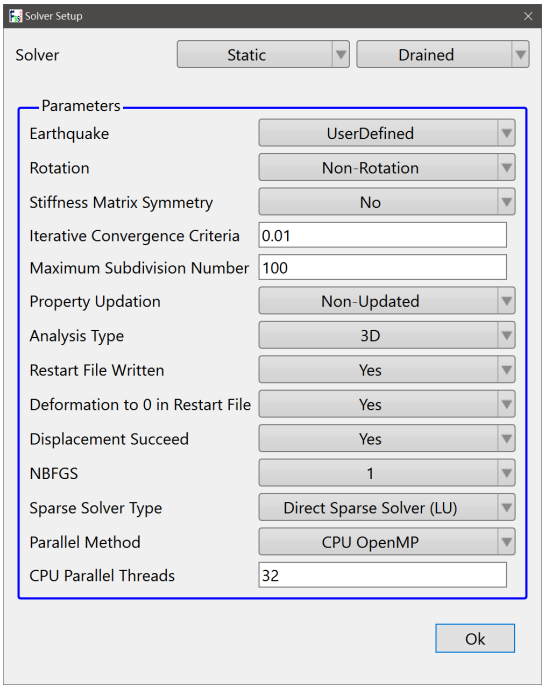


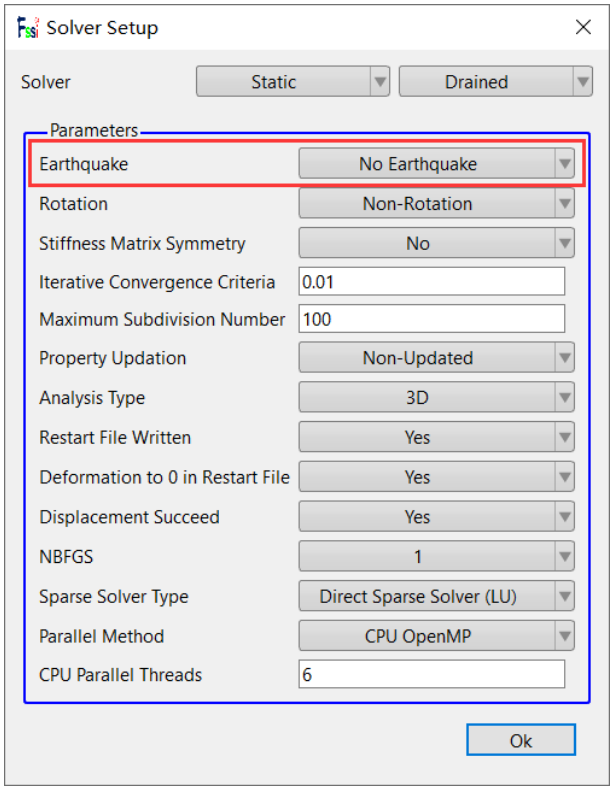
图 7-2 Solver Setup 界面图

Table 7-1 Solver Type 界面参数介绍

名称				含义
Solver Setup	Solver	Pull-down list 求解器类型	Static	静态
			Consolidation	耦合
			Dynamic	动态
		Pull-down list 排水类型	Drained	排水
			UnDrained	不排水
	Analysis Parameters	Earthquake 地震	No Earthquake	不考虑地震
			Sin(t)	正弦地震波
			Earthquake Library	导入库中的地震波
			User Defined	用户自定义地震波
		Rotation 旋转	Non-Rotation	不考虑旋转
			Rotation	考虑旋转
		Iterative Convergence Criteria--节点坐标精度，小于该值时融合为一点		
		Maximum Subdivision Number-- 应变最大划分数量		
		Property Updation 材料属性更新	No-updated	不更新
			Updated	更新
		Analysis type 求解类型	2D-Plane Stress	二维平面应力
			2D-Plane Strain	二维平面应变
			2D-Axial Symmetry	二维轴对称
			3D	三维
		Deformation to 0 in Restar 重启文件中位移和变形是归零	Yes	归零
			No	不归零
		Sparse Solver Type	Direct Sparse Solver(LU)	直接求解
			Iterative Sparse Solver	迭代求解
			Preconditioner Based on LU0	基于不完全 LU0 分解的预条件迭代
			Preconditioner Based on LUt	基于不完全 LUt 分解的预条件迭代
		Parallel Method	CPU OpenMP	基于 OpenMP 的 CPU 并行计算
			GPU CUDA	基于 CUDA 的 GPU 并行计算
		CPU 并行线程数		

7.1.2 地震波

在 Solver Setup 界面中 Earthquake 模块中，可以选择添加地震波的方式。分别有不设置地震、设置正弦地震波、从数据库导入地震波和用户自定义地震波 4 种方式。



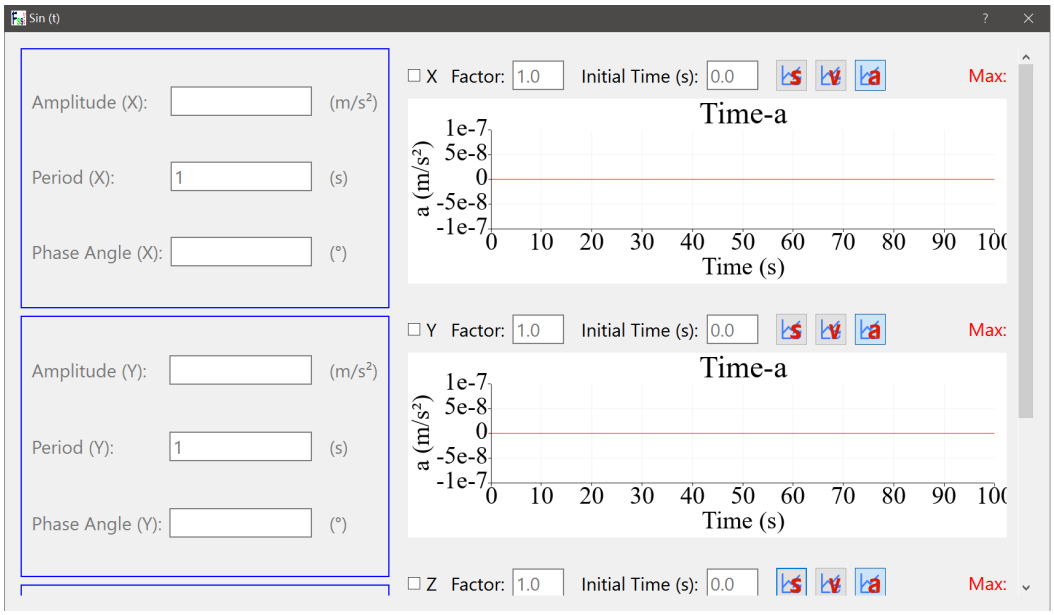


图 7-3 设置正弦地震波的界面图

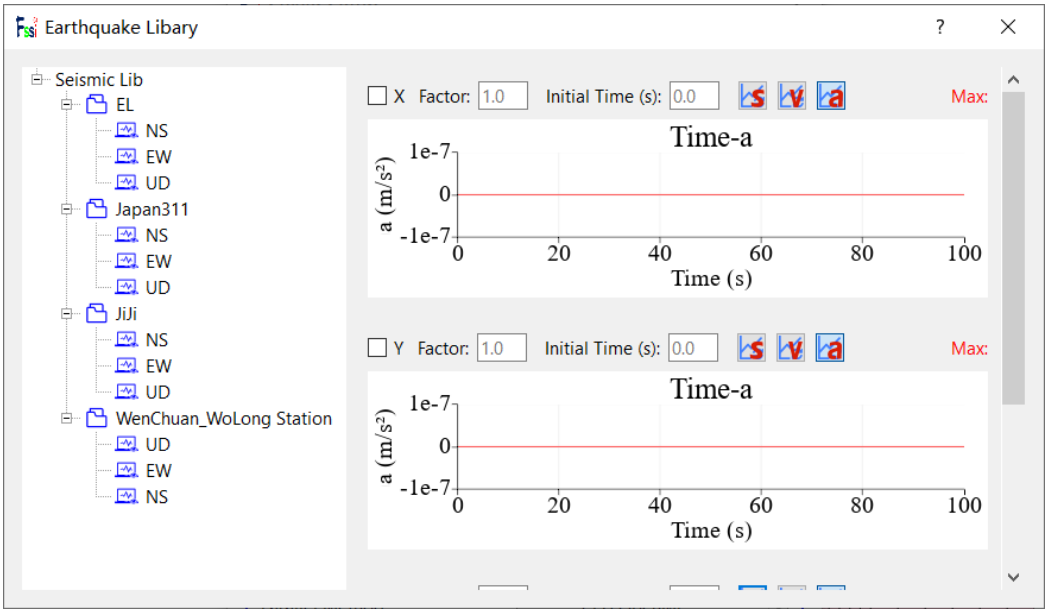


图 7-4 导入数据库中地震的界面图

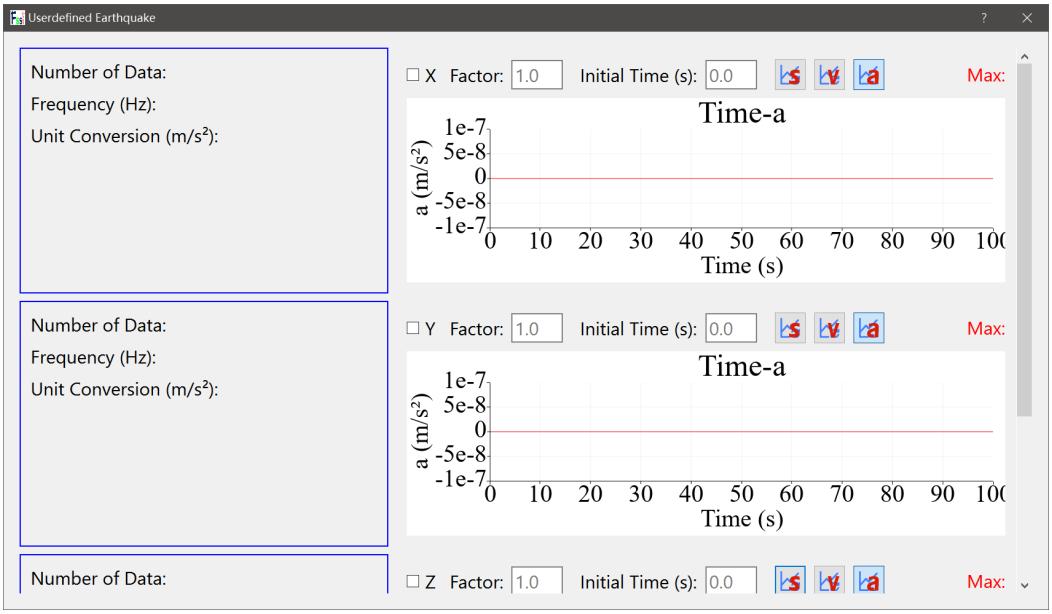


图 7-5 用户自定义地震波的界面图

7.1.3 时间步

Time Step 用于设置时间分析步，如 Table 7-2、图 7-6 所示。其中，Results Sequence 用于设置输出结果序列。如图 7-7 所示。

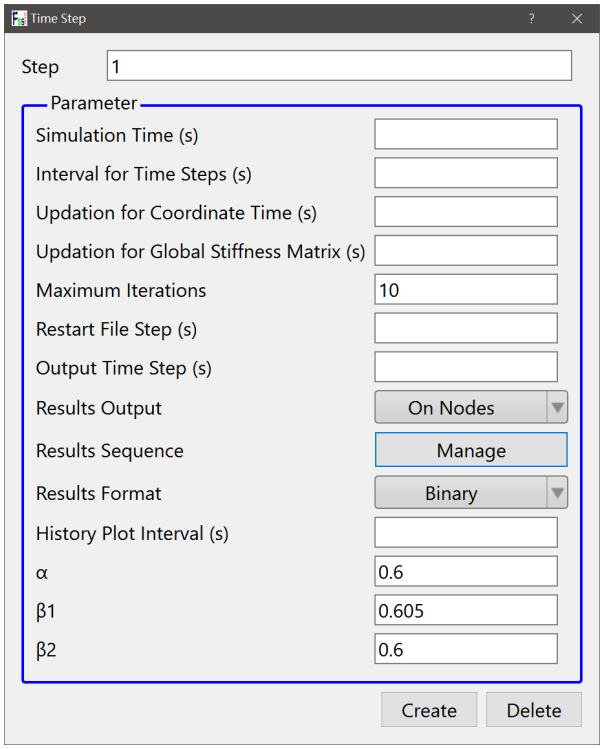


图 7-6 Time Step 界面图

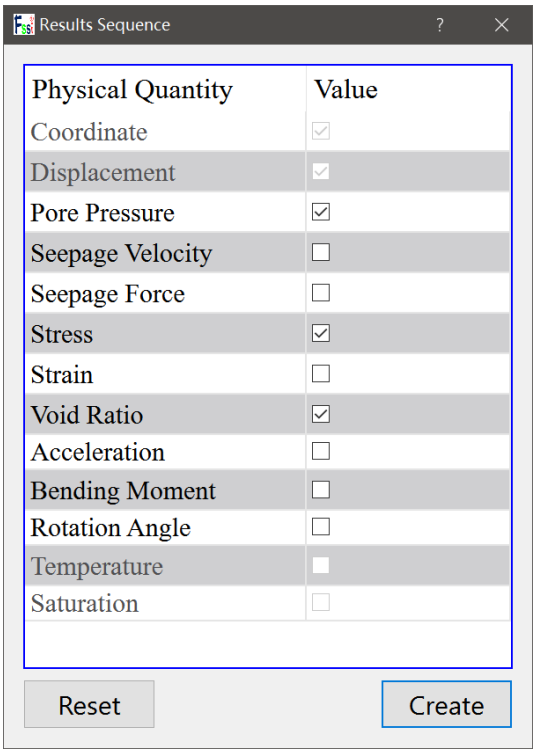


图 7-7 输出结果序列的界面图

Table 7-2 Time Step 界面参数介绍分布图

名称				含义
Time Step	Step			分析阶段
	Parameter	Simulation Time (s)		总时间
		Interval for Time Steps (s)		时间步间隔
		Updation for Coordinate (s)		更新坐标时间间隔
		Updation for Global Stiffness Matrix (s)		更新刚度矩阵的时间
		Maximum Iterations		最大迭代次数
		Restart File Step (s)		输入重启文件的时间间隔
		Output Time Step (s)		多少时间输出一个结果文件
		Results Format 结果文件格式	Binary	二进制
			ASCII	ASC 码
		Results Sequence		输出结果序列
		Results Output Type 结果文件输出类型	On Gauss	输出高斯点上的结果
			On Nodes	输出节点上的结果
		History Plot Interval		输出时程图的时间间隔
		α		
		β_1		
		β_2		

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

用户可以使用前处理界面上的工具栏 2 中的快捷功能按钮，同时设置多个时间步。

图 7-8 前处理界面上的工具栏 2

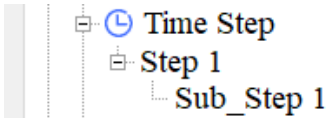


图 7-9 在初始界面上 Model 树状菜单栏中的时间步只有一个

用户点击前处理界面上工具栏 2 中的快捷功能按钮，在弹出的窗口中选择 Yes，即可删除当前时间步；

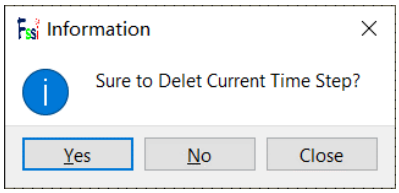


图 7-10 是否删除当前时间步

用户点击前处理界面上工具栏 2 中的快捷功能按钮，在弹出的窗口中输入时间步名字，即可添加一个新的时间步；

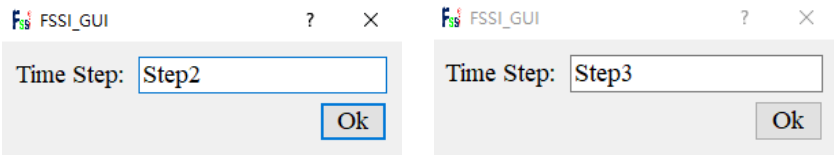


图 7-11 添加一个新的时间步

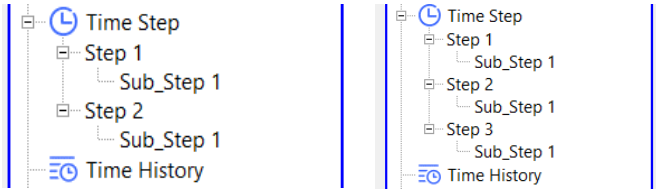


图 7-12 每添加一个新的时间步后树状菜单栏的变化

用户点击前处理界面上工具栏 2 中的下拉列表，在下拉列表中选择一个时间步，即可将某一个时间步设置为当前时间步；

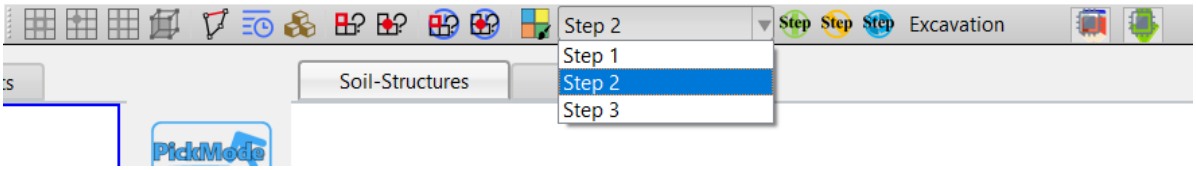


图 7-13 将某一个时间步设置为当前时间步

用户点击前处理界面上工具栏 2 中的下拉列表，在下拉列表中选择第一个时间步，即可将第一个时间步设置为当前时间步，并可在第一个时间步中设置波浪参数、材料参数、求解器类型以及时间步参数；

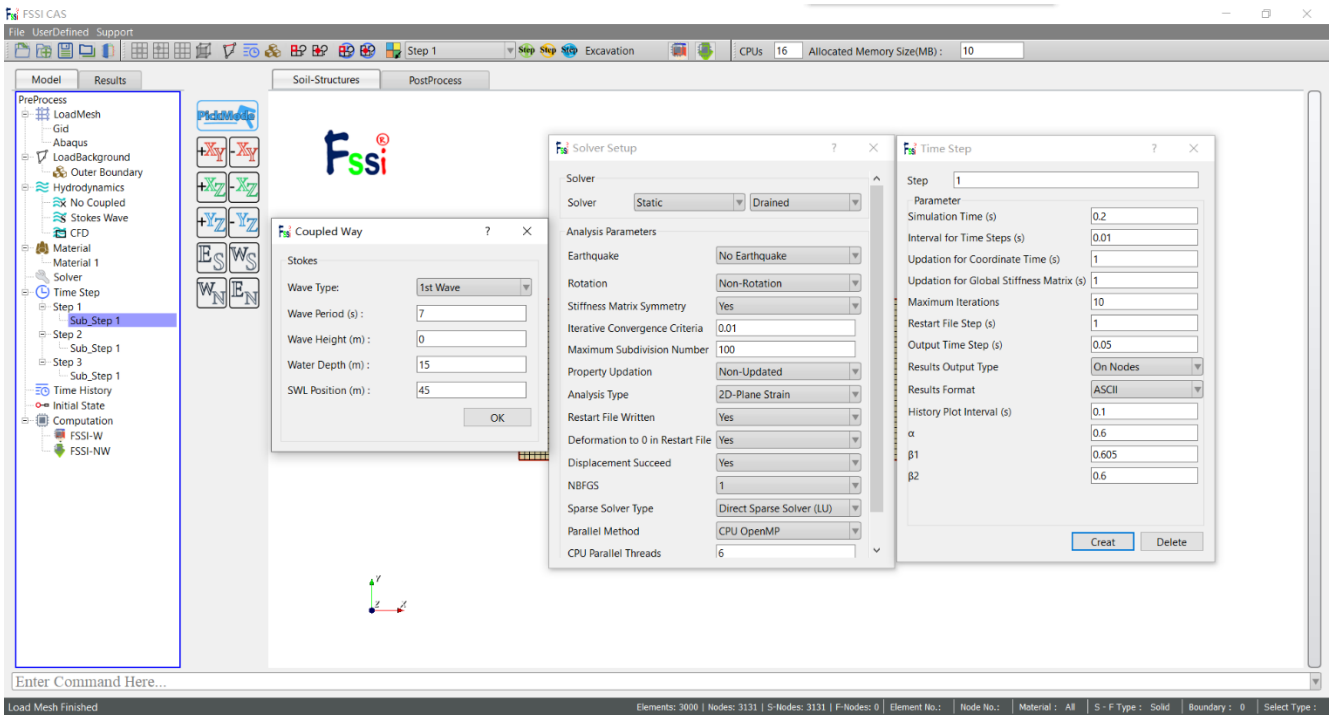


图 7-14 在第一个时间步中设置波浪参数、材料参数、求解器类型以及时间步参数

用户点击前处理界面上工具栏 2 中的下拉列表 Step 1，在下拉列表中选择第二个时间步，即可将第二个时间步设置为当前时间步，并可在第二个时间步中设置与第一个时间步完全不同的波浪参数、材料参数、求解器类型以及时间步参数；

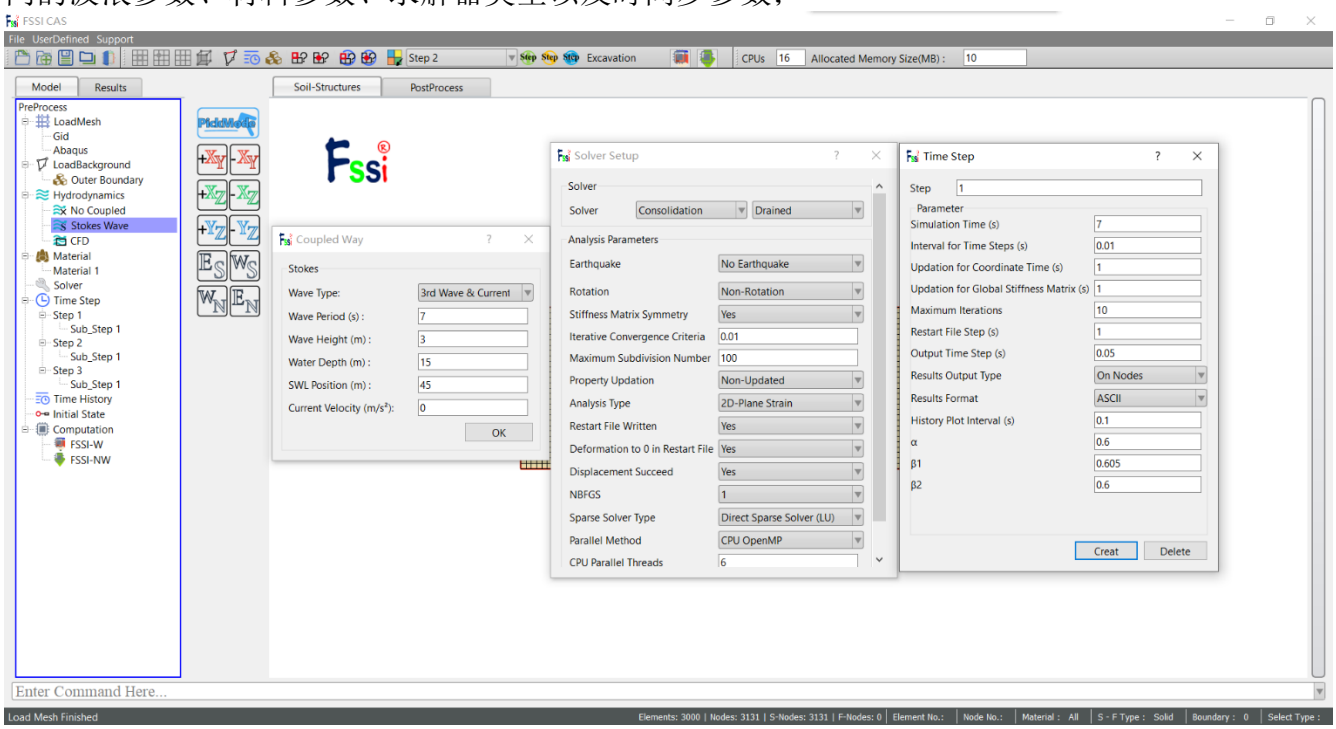


图 7-15 在第二个时间步中设置与第一个时间步完全不同的波浪参数、材料参数、求解器类型以及时间步参数

用户点击前处理界面上工具栏 2 中的下拉列表 Step 1，在下拉列表中选择第三个时间步，即可将第三个时间步设置为当前时间步，并可在第三个时间步中设置与第一个时间步和第二个时间步均完全不同的波浪参数、材料参数、求解器类型以及时间步参数；

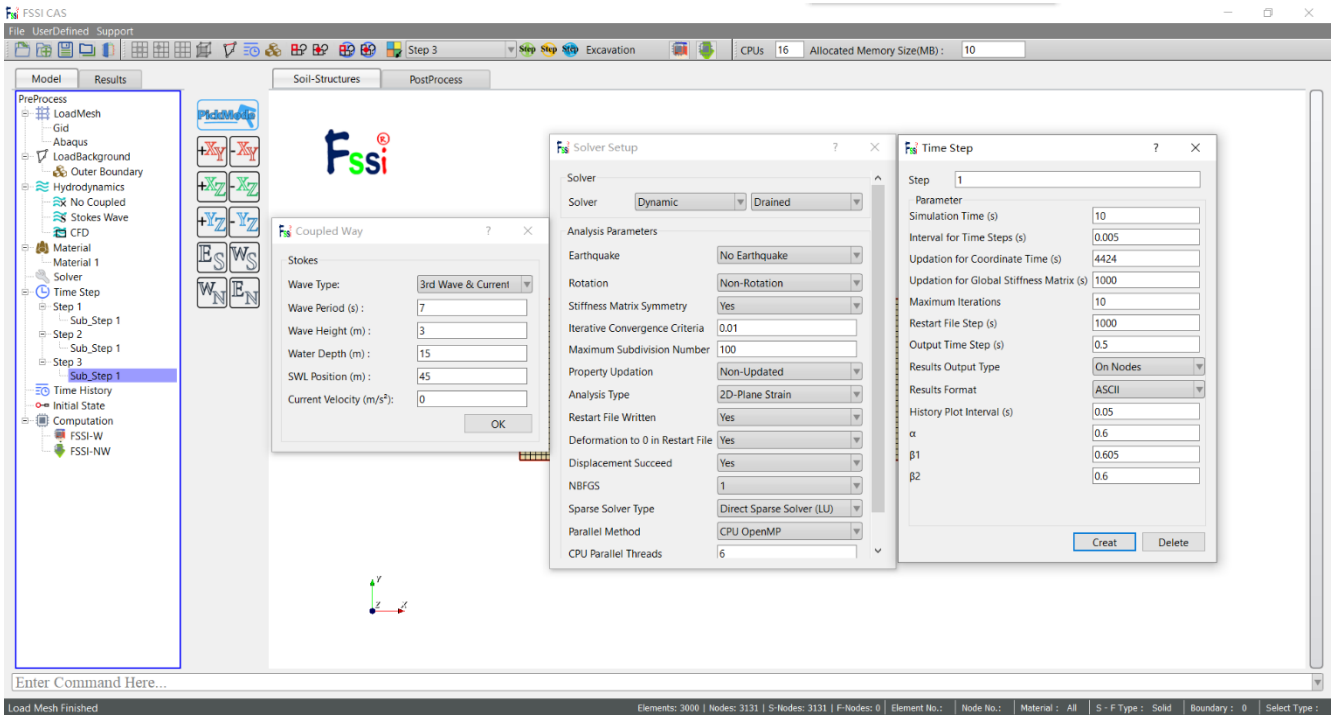


图 7-16 在第三个时间步中设置与第一个时间步和第二个时间步均完全不同的波浪参数、材料参数、求解器类型以及时间步参数

7.1.4 时程

在前处理界面上 Model 树状菜单栏中的 Time History 是用于查看所有之前已经被指定输出时程结果的节点或单元，如图 7-13 所示。

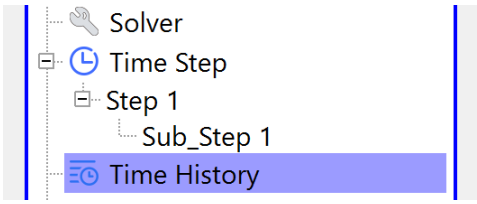


图 7-17 在前处理界面上 Model 树状菜单栏中的 Time History

在前处理界面上工具栏 2 中从左往右的第六个快捷功能按钮 Time History 是用于设置输出时程结果的节点和单元，如图 7-14 所示。在节点和单元上可输出的所有时程结果，如图 7-22 所示。

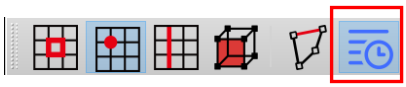


图 7-18 在前处理界面上工具栏 2 中从左往右的第六个快捷功能按钮 Time History

比如需要设置输出时程结果的节点坐标为（50，0，0），固体节点编号为 3481，流体节点编号为 3482。

用户首先点击前处理界面最右侧的伸缩区，在展开的窗口中选中 Solid，勾选 Show Node，点击 Mesh，即可进入固体节点和单元显示模式，再点击伸缩区可收回窗口，如图 7-15 所示；

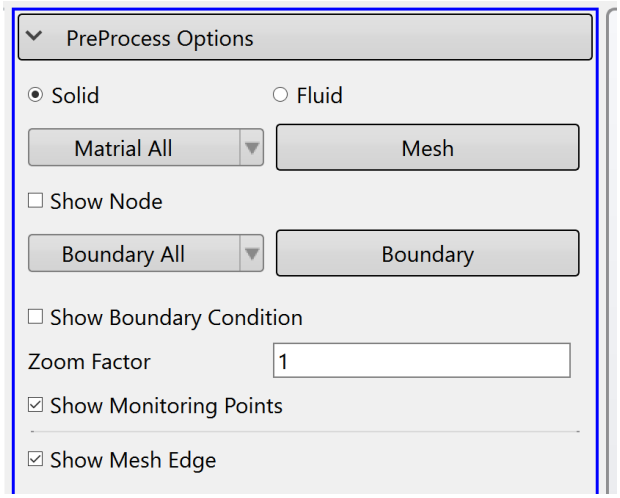


图 7-19 在前处理界面上的最右侧的伸缩区中选中 Solid 进入固体节点和单元显示模式

然后用户点击前处理界面上工具栏 2 中的第六个快捷功能按钮，进入选择输出时程结果的节点或单元模式，如图 7-16 所示。

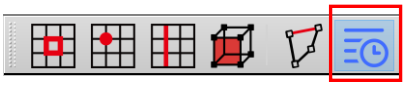


图 7-20 在前处理界面上工具栏 2 中的第六个快捷功能按钮 Time History

点击前处理界面上工具栏 2 中的第二个快捷功能按钮，进入节点选择模式；

在前处理界面正下方的命令窗口中，输入 highlight pt coor/50 0 0 或者 highlight pt no/3481，按键盘上的“Enter”键，即可在工作区中显示坐标为（50，0，0）的点，被显示的节点出现高亮；

点击键盘上的“R”键，进入选择模式；

拖动鼠标框选高亮的固体节点，点鼠标右键，选择 All History Plot，即可输出 X 方向位移、Z 方向位移、速度，如图 7-17 所示；

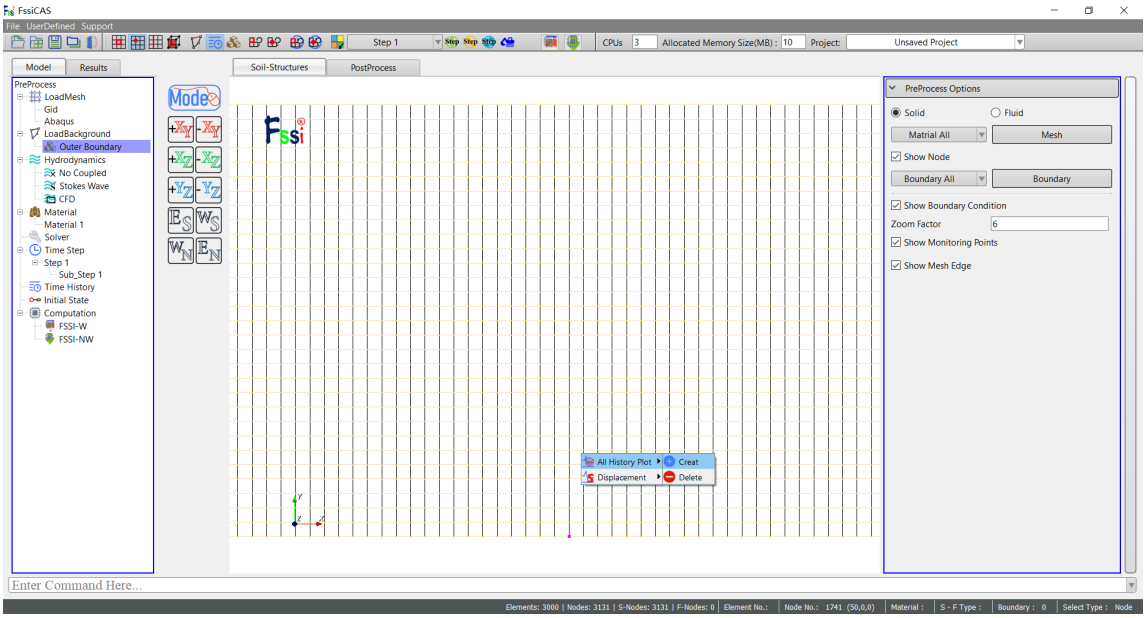


图 7-21 输出固体节点上的 X 方向位移，Z 方向位移的时程结果

再次点击前处理界面上工具栏 2 中的第一个快捷功能按钮，进入单元选择模式；

点击前处理界面最右侧的伸缩区，勾选 Show History Plot，即可在工作区中显示之前已输出时程结果的所有节点或单元，被显示的之前已输出时程结果的节点或单元出现高亮；

点击键盘上的“R”键，进入选择模式；

拖动鼠标框选该固体节点所在的单元，点鼠标右键，选择 All History Plot，即可输出有效应力（σ_x、σ_z、σ_y、τ_{xz}），孔隙比 e，应变（ε_x、ε_z、ε_y、γ_{xz}），如图 7-18 所示；

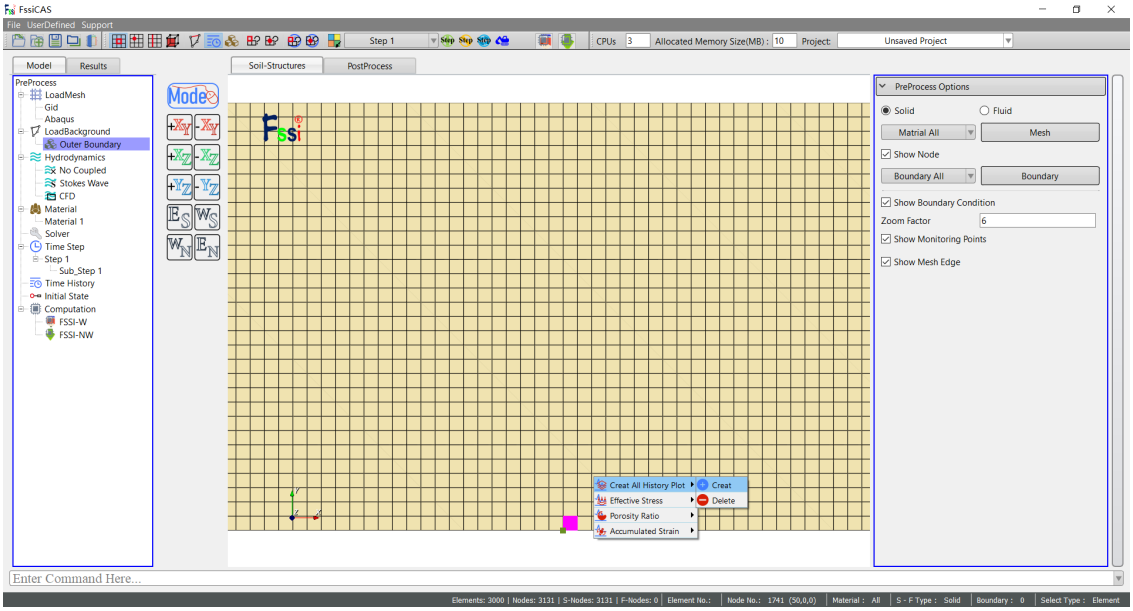


图 7-22 输出固体单元上的有效应力，孔隙比，应变的时程结果

点击前处理界面最右侧的伸缩区，在展开的窗口中点击 Fluid，勾选 Show Node，点击 Mesh，即可进入流体节点和单元显示模式，再点击伸缩区可收回窗口，如图 7-19 所示；

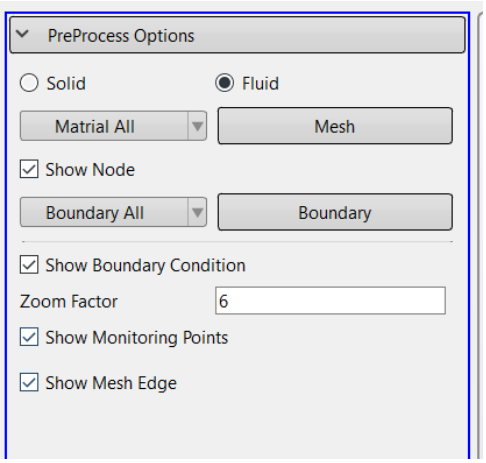


图 7-23 在前处理界面上的最右方侧的伸缩区中选中 Fluid 进入流体节点和单元显示模式

再次点击前处理界面上工具栏 2 中的第六个快捷功能按钮，进入输出时程选择模式；

点击前处理界面上工具栏 2 中的第二个快捷功能按钮，进入节点选择模式；

点击前处理界面最右侧的伸缩区，勾选 Show History Plot，即可在工作区中显示之前已输出时程结果的所有节点或单元，被显示的之前已输出时程结果的节点或单元出现高亮；

点击键盘上的“R”键，进入选择模式；

拖动鼠标框选高亮的流体节点，点鼠标右键，选择输出孔压 Pore Pressure，如图 7-20 所示；

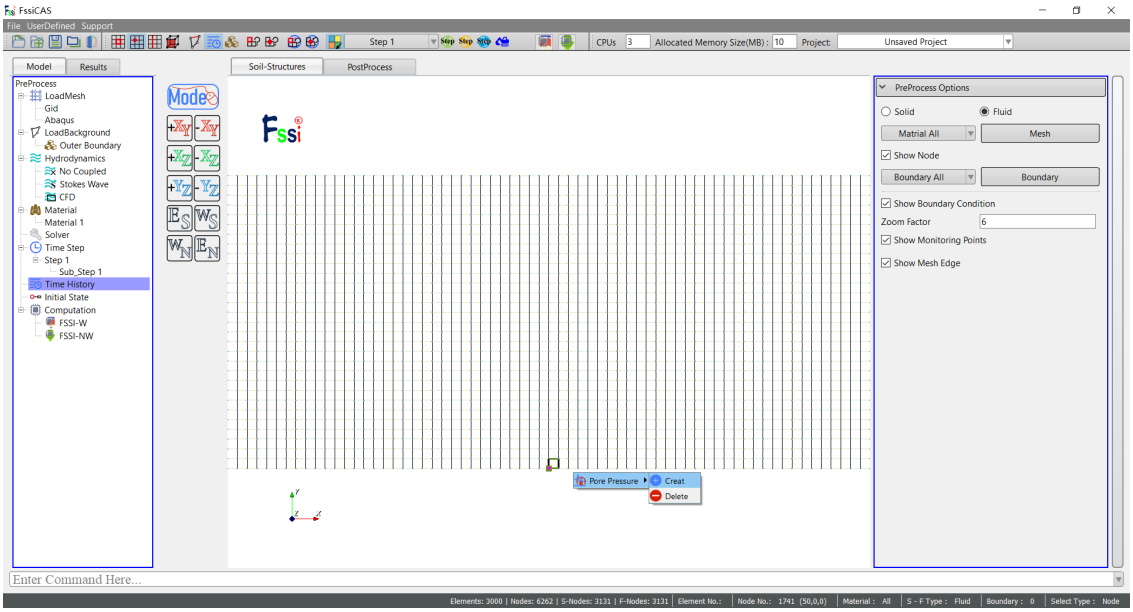


图 7-24 输出流体节点上的孔压的时程结果

再次点击前处理界面上工具栏 2 中的第一个快捷功能按钮，进入单元选择模式；点击前处理界面最右方的伸缩区，勾选 Show History Plot，即可在工作区中显示之前已输出时程结果的所有节点或单元，被显示的之前已输出时程结果的节点或单元出现高亮；

点击键盘上的“R”键，进入选择模式；

拖动鼠标框选该流体节点所在的单元，点鼠标右键，选择输出孔压 Pore Pressure，如图 7-21 所示；

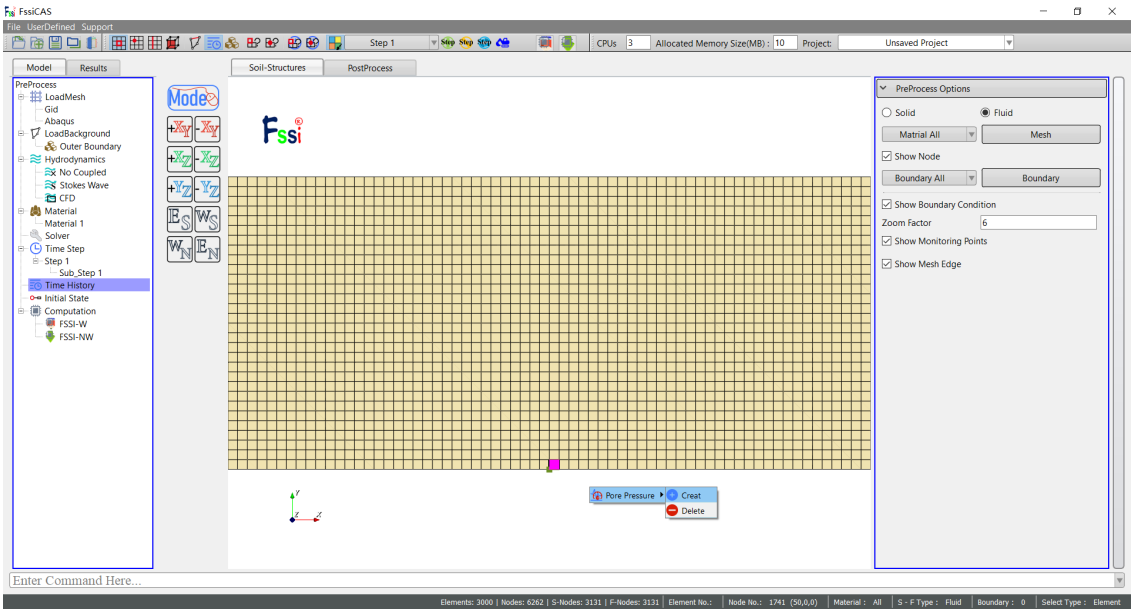


图 7-25 输出流体单元上的孔压的时程结果

在前处理界面最右侧的伸缩区中，点击 Show History Plot 可以显示已输出时程结果的所有节点或单元；

最后用户点击在前处理界面上 Model 树状菜单栏里 Solver 中的 Time History，即可查看所有之前已经被指定输出时程结果的节点或单元，可以显示已经被指定输出的所有时程结果列表，选择列表中的项，点击右键可以进行删除操作，如图 7-22 所示；

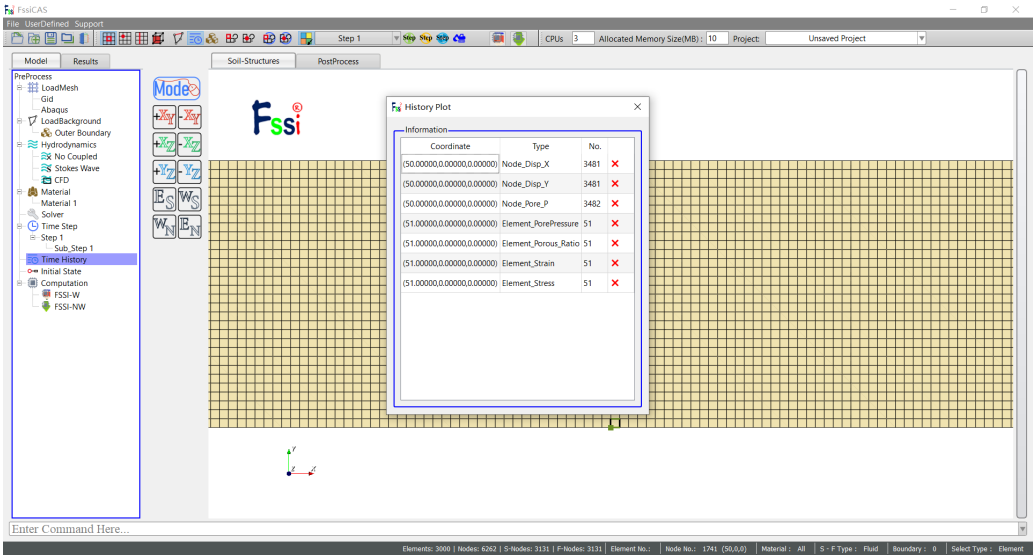


图 7-26 在前处理界面上 Model 树状菜单中的 Time History 界面图

Table 7-3 (a) 前处理界面工具栏 2 中的第六个功能按钮 Time History 可指定输出的所有时程结果

名称					含义
Time History	Select Element 选择单元	Soil Node-固体单元	Effective Stress 有效应力	Effective Stress X	X 方向有效应力 σx
				Effective Stress Z	Z 方向有效应力 σz
				Effective Stress Y	Z 方向有效应力 σy
				Shear Stress	剪应力 τxz
			Porosity Ratio		孔隙比
			Accumulated Strain 应变	Accumulated Strain X	X 方向应变 εx
				Accumulated Strain Z	Z 方向应变 εz
				Accumulated Strain Y	Z 方向应变 εy
				Shear Strain	剪应变 γxz
		Fluid Element-流体单元		Pore Pressure	孔压
	Select Node 选择节点	Soil Node-固体节点	Displacement X		X 方向位移
			Displacement Z		Z 方向位移
			Velocity X		X 方向速度
			Velocity Z		Z 方向速度
			Acceleration X		X 方向加速度
			Acceleration Z		Z 方向加速度
		Fluid Node-流体节点		Pore Pressure	孔压

Table 7-4 (b) 前处理界面工具栏 2 中的第六个功能按钮 Time History 可指定输出的所有时程结果

<table>
<tr><th colspan="4">名称</th><th>含义</th></tr>
<tr><td rowspan="8">Time History</td><td rowspan="7">Select Line 选择线</td><td rowspan="6">Soil Node-固体节点</td><td>Displacement X</td><td>X 方向位移</td></tr>
<tr><td>Displacement Z</td><td>Z 方向位移</td></tr>
<tr><td>Velocity X</td><td>X 方向速度</td></tr>
<tr><td>Velocity Z</td><td>Z 方向速度</td></tr>
<tr><td>Acceleration X</td><td>X 方向加速度</td></tr>
<tr><td>Acceleration Z</td><td>Z 方向加速度</td></tr>
<tr><td colspan="2">Fluid Node-流体节点</td><td>Pore Pressure</td><td>孔压</td></tr>
<tr><td colspan="2">Select Surface-选择面</td><td colspan="2">输出这条面上固体节点/流体节点的时程结果</td></tr>
</table>

注：1.Static 状态时只可输出固体节点上的位移的时程结果；
2.Consolidation 状态时只可输出固体节点上的位移和速度的时程结果；
3.Dynamic 状态时可输出固体节点上的位移，速度和加速度的时程结果；
4.以上三种求解器类型均可输出流体节点上的孔压；

7.1.5 土体模型前处理界面上的伸缩区界面

在对土体模型进行操作时，前处理界面上最右侧的伸缩区可用于显示网格，节点，边界，边界条件以及已经被指定输出时程结果的节点或单元等操作。在对土体模型进行操作时前处理界面上最右侧的伸缩区界面图如图 7-23 所示，其的界面参数介绍如 Table 7-4 所示。

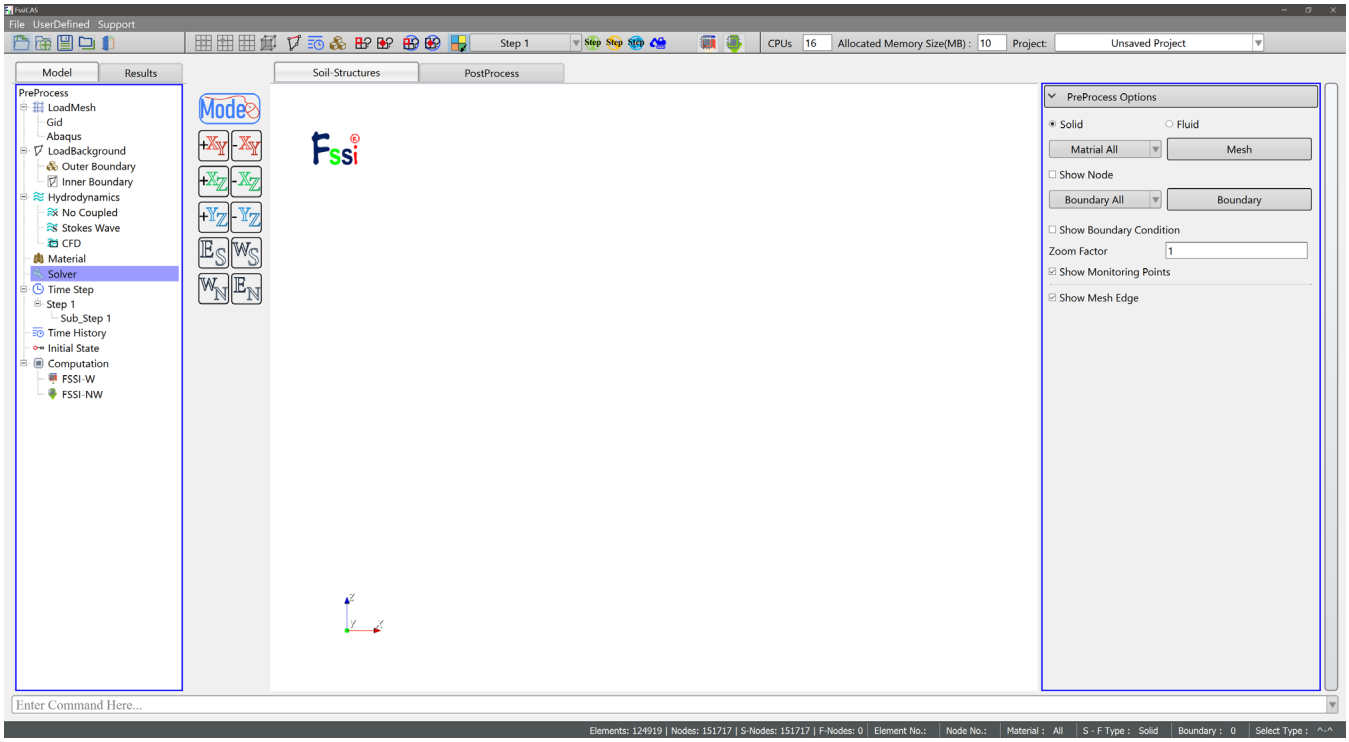


图 7-27 在对土体模型进行操作时前处理界面上最右侧的伸缩区界面图

Table 7-5 在对土体模型进行操作时前处理界面上最右侧的伸缩区界面参数介绍

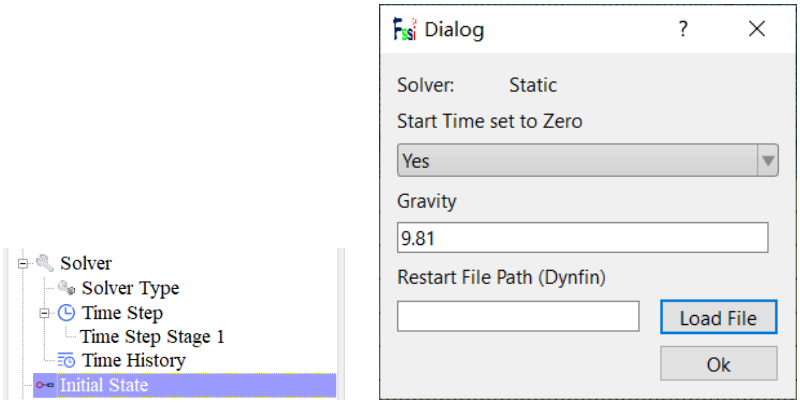
名称				含义
Scalable area for Soil Workspace (Pre-Process)	Show-显示	Solid		选择显示固体网格
		Fluid		选择显示流体网格
		Pull-down list-Mesh 下拉列表-显示网格	Material All	显示所有材料的网格
			Material 1	显示材料 1 的网格
			.....	.....
			Material N	显示材料 N 的网格
		Show Node		显示节点
		Pull-down list-Boundary 下拉列表--显示边界	Boundary All	显示所有边界
			Material 1	显示材料 1 的边界
			.....	.....
			Material N	显示材料 N 的边界
	Boundary and History Plot 边界条件和时程点	how Boundary Condition		显示边界条件
		Show History Plot		显示输出时程结果的节点或单元

7.2 初始状态

在前处理界面上的 Model 树状菜单栏中，点击 Initial State，设置初始条件，之后的操作如下。

处于 Static 状态时，点击 OK，即可完成初始状态设置；

处于 Consolidation 或者 Dynamic 状态时，点击 Load File，在弹出的窗口中选择 Results—Soil_Model—Static—dynfin 文件，点击打开，点击 OK，并在弹出的 Question 窗口中选择 Yes，即可完成指定初始条件设置，如图 7-24 所示。



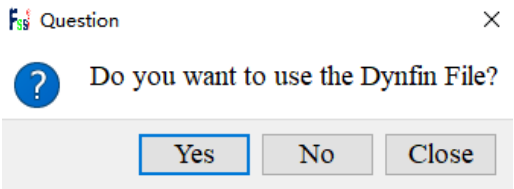


图 7-28 设置初始状态

（1）当当前项目一次都没有进行计算过时，用户可以同时设置多个时间步，随后点击 Initial State，点击 OK，软件将从第一个时间步连续计算到最后一个时间步；

（2）当当前项目计算过一次静态时，如果用户接下来进行计算 Consolidation 状态，用户需要点击 Initial State—Load File，在弹出的窗口中选择 Results—Soil_Model—Static—dynfin 文件，点击打开，点击 OK，并在弹出的 Question 窗口中选择 Yes，完成指定初始条件设置；

（3）当当前项目计算过一次静态或者 Consolidation 状态时，如果用户接下来进行计算 Dynamic 状态，用户需要点击 Initial State—Load File，在弹出的窗口中选择 Results—Soil_Model—Static—dynfin 文件，点击打开，点击 OK，并在弹出的 Question 窗口中选择 Yes，完成指定初始条件设置；

7.3 运行计算

Computation 由 FSSI-NW 和 FSSI-W 组成，如图 7-25 所示，FSSI-NW 和 FSSI-W 的含义列于 Table 7-5 中。

点击在前处理界面上 Model 树状菜单栏里 Computaton 中的 FSSI-W，或者在前处理界面正上方的工具栏 2 中的 WriteCalculate 快捷功能按钮，保存当前项目，即可开始计算。

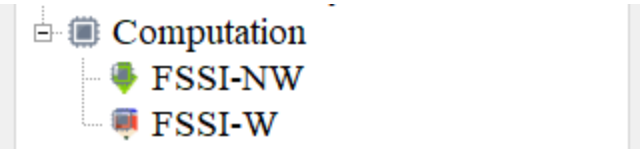


图 7-29 前处理界面上 Model 树状菜单栏里的 Computation

图 7-30 前处理界面正上方工具栏 2 中的从左到右第 24 个快捷功能按钮

Table 7-6 FSSI-NW 和 FSSI-W 的含义

名称	含义
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

第8章 后处理

用户点击树状菜单栏上的 Results，即可进入后处理界面，FssiCAS 后处理界面由菜单栏，工具栏 1，工具栏 2，工具栏 3，树状菜单栏的 Results，工作区，命令窗口以及伸缩区组成，如图 8-1 所示。

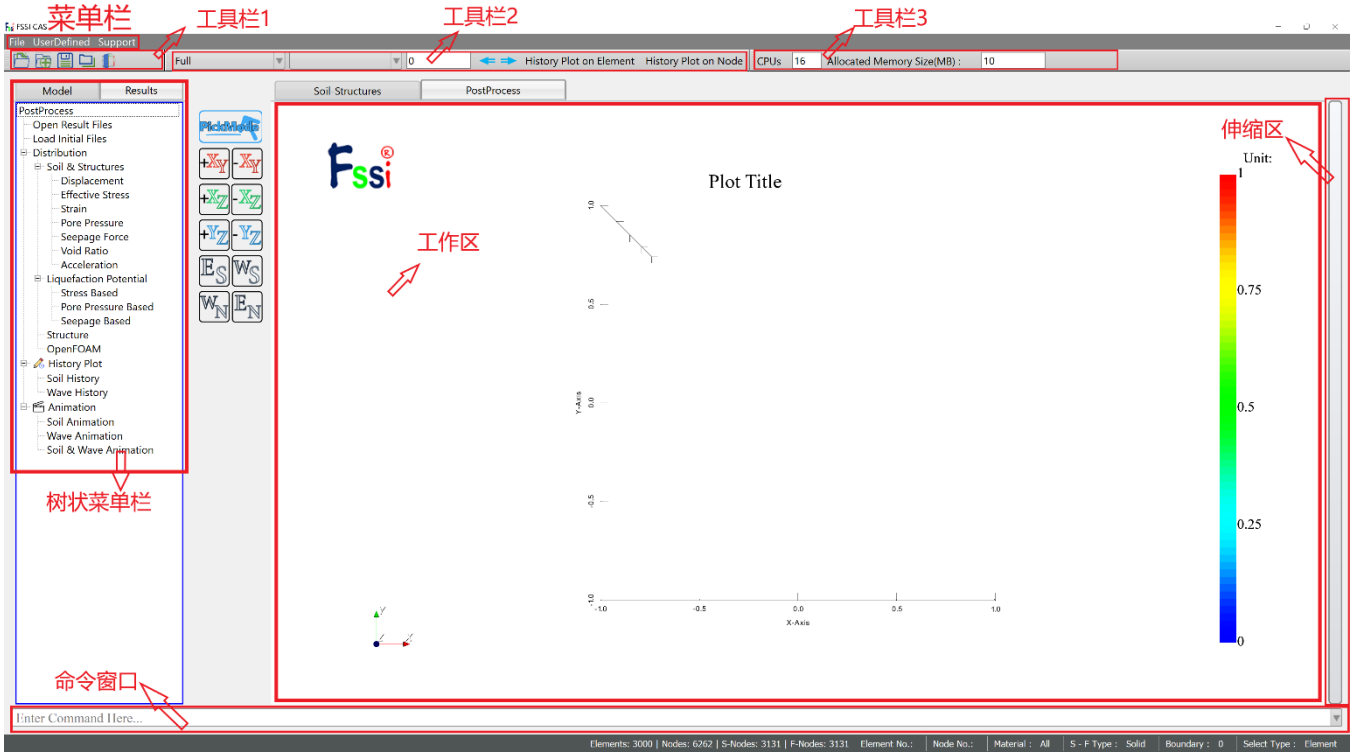


图 8-1 后处理界面

8.1 打开不同状态的结果文件

点击后处理界面上 Results 树状菜单栏中的 Open Result Files，在弹出的窗口中的 Soil Result Files Director 点击 Load Files，之后的操作如下：

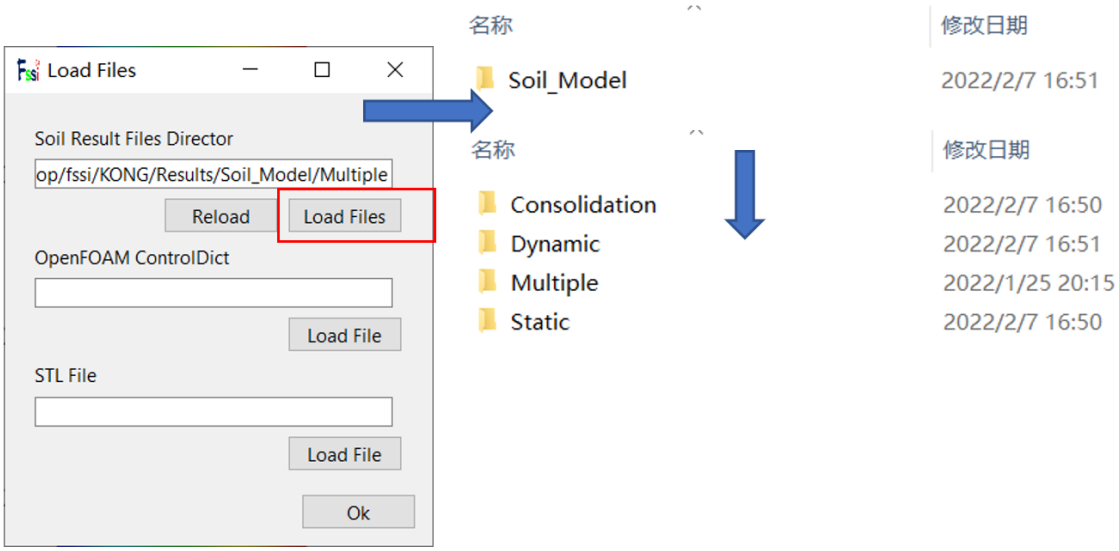


图 8-2 导入土体的结果文件

选择 Results—Soil_Model—Static/Consolidation/dynamic/Multiple 文件夹，即可进入土体的结果图后处理阶段，如图 8-2 所示；

如果用户想要得到指定初始状态的动态土体的结果图，点击在后处理界面上 Results 树状菜单栏中的 Load Initial Files，可加载应力或者位移初始文件。具体方法是，点击 Results—Soil_Model—Static 初始时间步的结果文件夹，加载最后一个时间步的 Stress 或 Displacement 文件，如图 8-3 所示；最后在后处理界面正上方的工具栏 2 中的第一个下拉列表

处选择 Dynamic，即可进入动态土体的结果图后处理阶段，如图 8-2、8-3 所示；

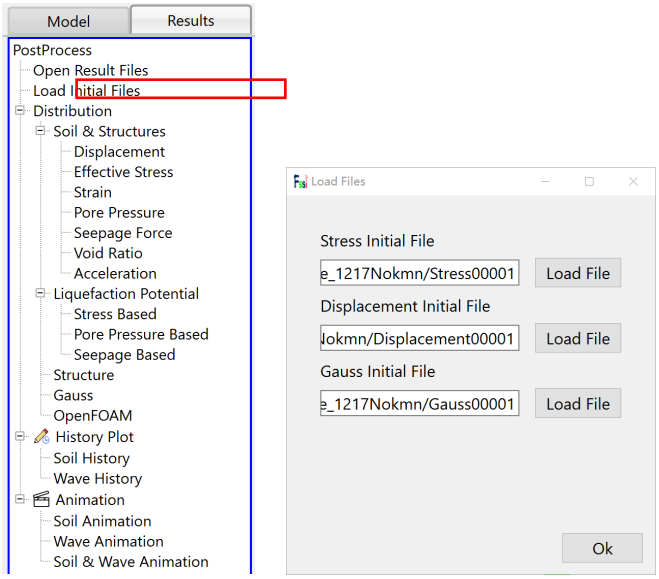


图 8-3 在动态后处理阶段时导入初始状态文件和指定初始状态

8.2 土体和波浪分布图

进入某个状态的后处理阶段后，点击在后处理界面上 Results 树状菜单栏里 Distribution Plot 中的各种结果，在后处理界面正上方的工具栏 2 中的输入窗口 Dynmic 0 处输入时间，按键盘上的“回车键”，即可在工作区中绘制某个状态时该时间步的各种结果分布图；点击快捷功能按钮 或者 ，即可在工作区中绘制某个状态的下一个或者上一个时间的各种结果分布图；

比如绘制某个状态时最后一个时间步为 20 土体的孔压分布图、X 方向有效应力 σ_x 分布图以及 X 方向位移 u_x 分布图：

在后处理界面上 Results 树状菜单栏里 Distribution Plot 中的 Solid 区域，用户点击 Pore Pressure，在后处理界面正上方的工具栏 2 中的输入窗口 Dynmic 0 处输入时间步 20，按键盘上的“回车键”，即可在工作区中显示某个状态时最后一个时间步为 20 的孔压分布图如下：

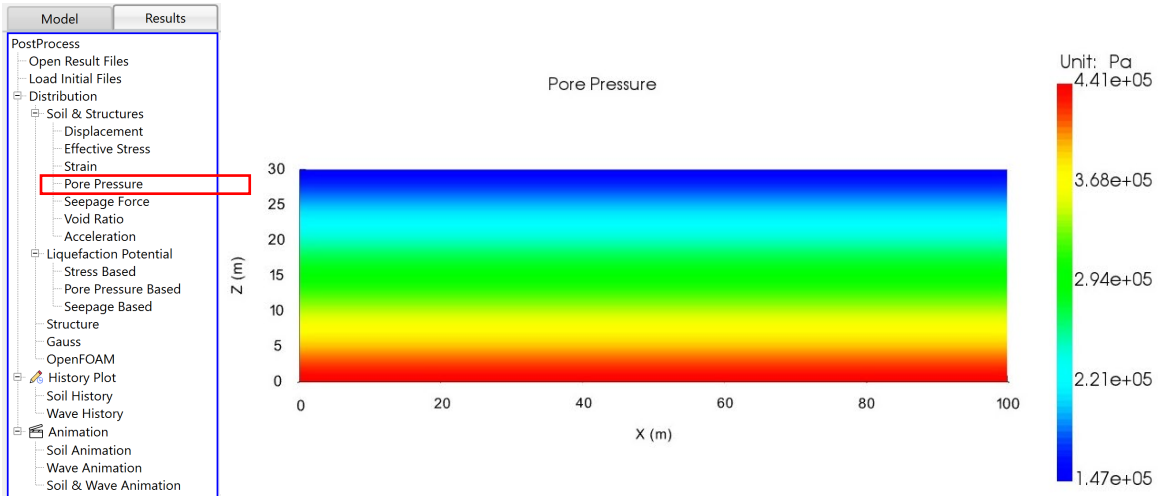
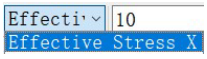


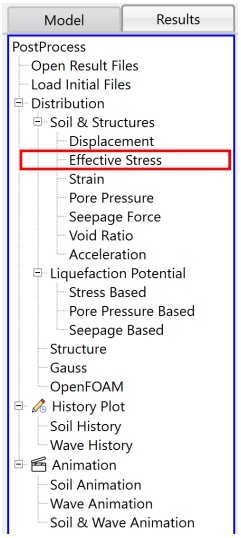
图 8-4 某个状态时最后一个时间步为 20 的孔压分布图

在后处理界面上 Results 树状菜单栏里 Distribution Plot 中的 Soil 区域，用户点击 Stress，在后处理界面正上方的工具栏 2 中的第二个下拉列表

处选择 

，在工具栏 2 中的输入窗口

处输入时间步 20，按键盘上的“回车键”，即可在工作区中显示某个状态时最后一个时间步为 20 的 X 方向有效应力 σ_x 分布图如下：



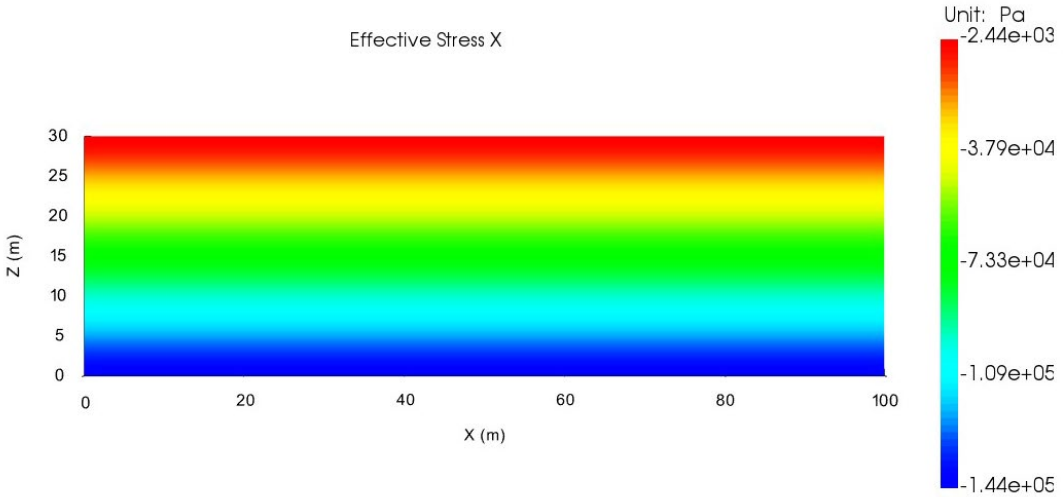
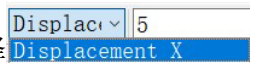


图 8-5 某个状态时最后一个时间步为 20 的 X 方向有效应力 σ_x 分布图

在后处理界面上 Results 树状菜单栏里 Distribution Plot 中的 Soil 区域，用户点击 Displacement，在后处理界面正上方的工具栏 2 中的第二个下拉列表

处选择 

，在工具栏 2 中的输入窗口

处输入时间步 20，按键盘上的“回车键”，即可在工作区中显示某个状态时最后一个时间步为 20 的 X 方向位移 Displacement X 分布图如下：

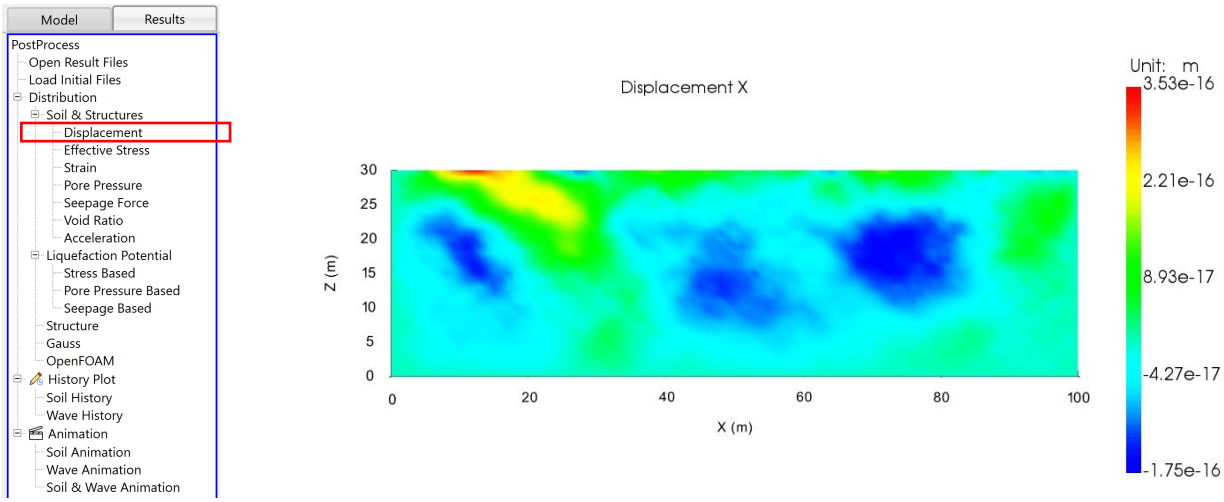


图 8-6 某个状态时最后一个时间步为 20 的 X 方向位移分布图

8.3 绘制分布图时的伸缩区界面

在绘制结果分布图时，后处理界面上最右侧的伸缩区可用于设置画图范围和数值范围，放大网格变形、显示，和输出结果文件或结果图等操作。在绘制结果分布图时后处理界面上最右侧的伸缩区界面图如图 8-7 所示，其界面参数介绍如 Table 8-1 所示。

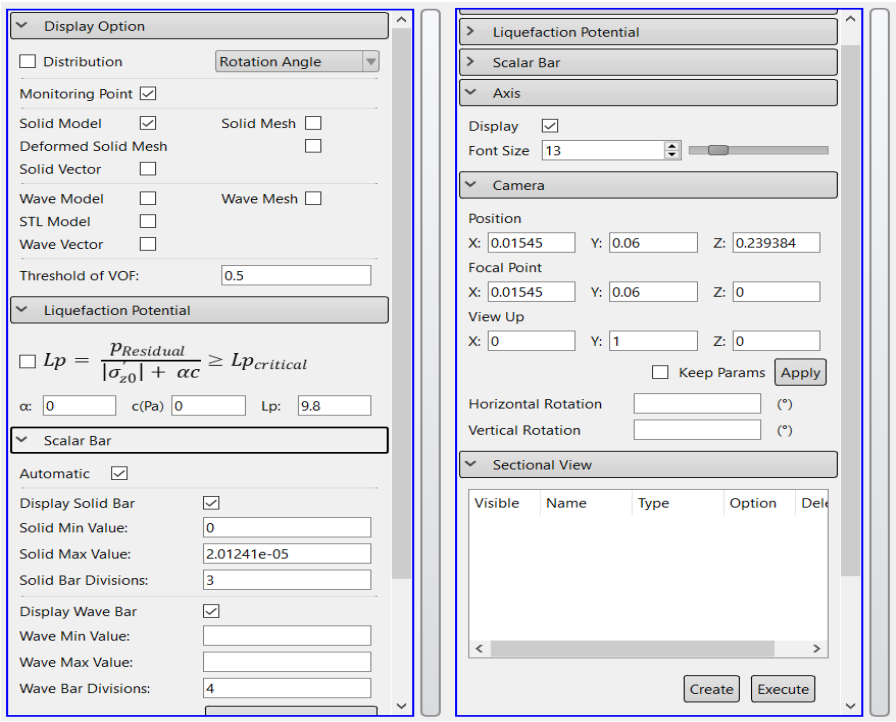


图 8-7 在绘制分布图时后处理界面上最右侧的伸缩区界面图

Table 8-1 在绘制分布图时后处理界面上最右侧的伸缩区界面参数介绍

名称			含义
Scalable area for Distribution Plot (Post-Process)	Plot	Distribution	分布图
		History Output	是否显示时程
		Solid Model	是否显示土模型
		Solid Mesh	是否显示土体网格
		Deformed Solid Mesh	是否显示变形的网格土体
		Vector	是否显示向量
		Wave Model	是否显示波浪模型
		Wave Mesh	是否显示波浪网格
		Axes	是否显示坐标轴
	ScalarBar	Min Value	最小值
		Max Value	最大值
		Divisions	颜色条层数
	Deformation	Amplification	网格变形放大倍数
	Arrow	Amplification	箭头放大倍数
	Liquefacation Potential	α	材料参数
		$c(Pa)$	粘聚力
		L_P	液化判别标
	Geometry	Box	规则六面体
		Hexahedra	六面体
	Clip	X Range	X 坐标值范围
		Y Range	Y 坐标值范围
		Z Range	Z 坐标值范围
	Rotation		旋转
	Horizontal (degrees)		水平
	Vertical (degrees)		垂直
	Export	Export Results Text	输出结果文件
		Export Results Figure	输出结果图

8.4 时程曲线

8.4.1 土体时程结果曲线

进入后处理阶段后，在树状菜单栏的 Results 中用户点击 Soil History 后，绘制土体的时程结果曲线的方法为三类。

在后处理界面上工具栏 2 中的第一个下拉列表处选择 Full，进入全态时程曲线后处理阶段；第一个下拉列表处选择 Dynamic，进入动态时程曲线后处理阶段。

图 8-8 后处理界面正上方的工具栏 2 中的第五个和第六个快捷功能按钮

第一类方法：点击后处理界面最右侧的伸缩区，在伸缩区中勾选 Show History Plot，在工作区中几何模型上之前已经被指定输出时程结果的节点和单元全部出现高亮；

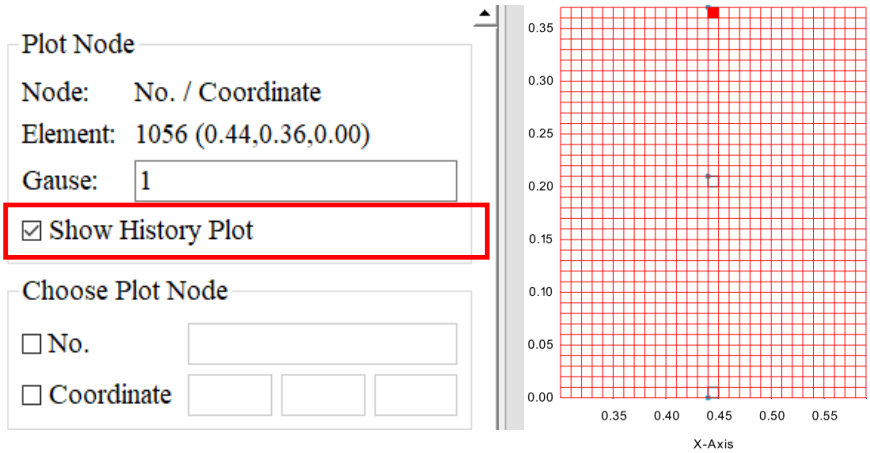


图 8-9 显示已输出时程结果的所有节点和单元

然后点击工具栏 2 中的从左到右第五个快捷功能按钮 History Plot on Element，在工作区中的几何模型上用鼠标左键选择一个出现高亮的单元，并在伸缩区中的 Plot Type 下面，用鼠标左键双击单元上能输出的各种结果参数（有效应力（σ_x、σ_z、σ_y、τ_{xz}），孔隙比 e，应变（ε_x、ε_z、ε_y、γ_{xz}），孔压），即可在工作区中显示单元上能输出的各种结果参数的时程曲线。

随后点击工具栏 2 中的从左到右第六个快捷功能按钮 History Plot on Node，在工作区中的几何模型上用鼠标左键选择一个出现高亮的节点，并在伸缩区中的 Plot Type 下面，用鼠标左键双击节点上能输出的各种结果参数（X 方向位移、Z 方向位移、速度、加速度、孔压），即可在工作区中显示节点上能输出的各种结果参数的时程曲线。

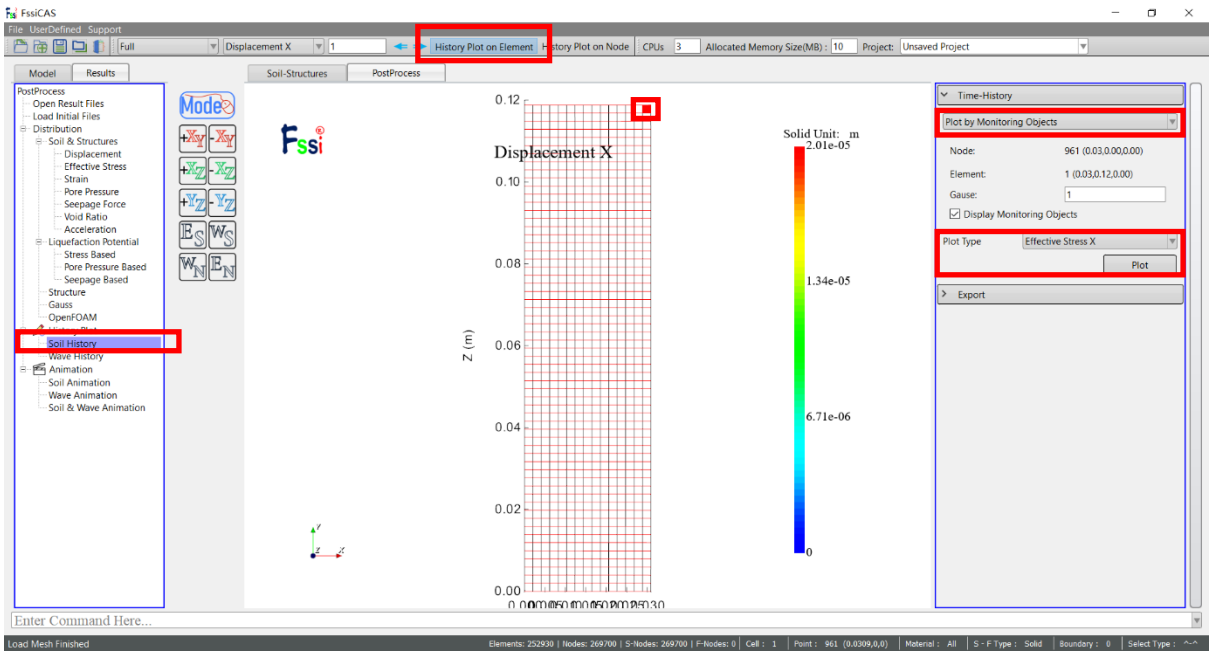


图 8-10 采用快捷功能按钮绘制单元上能输出的各种结果参数的时程曲线

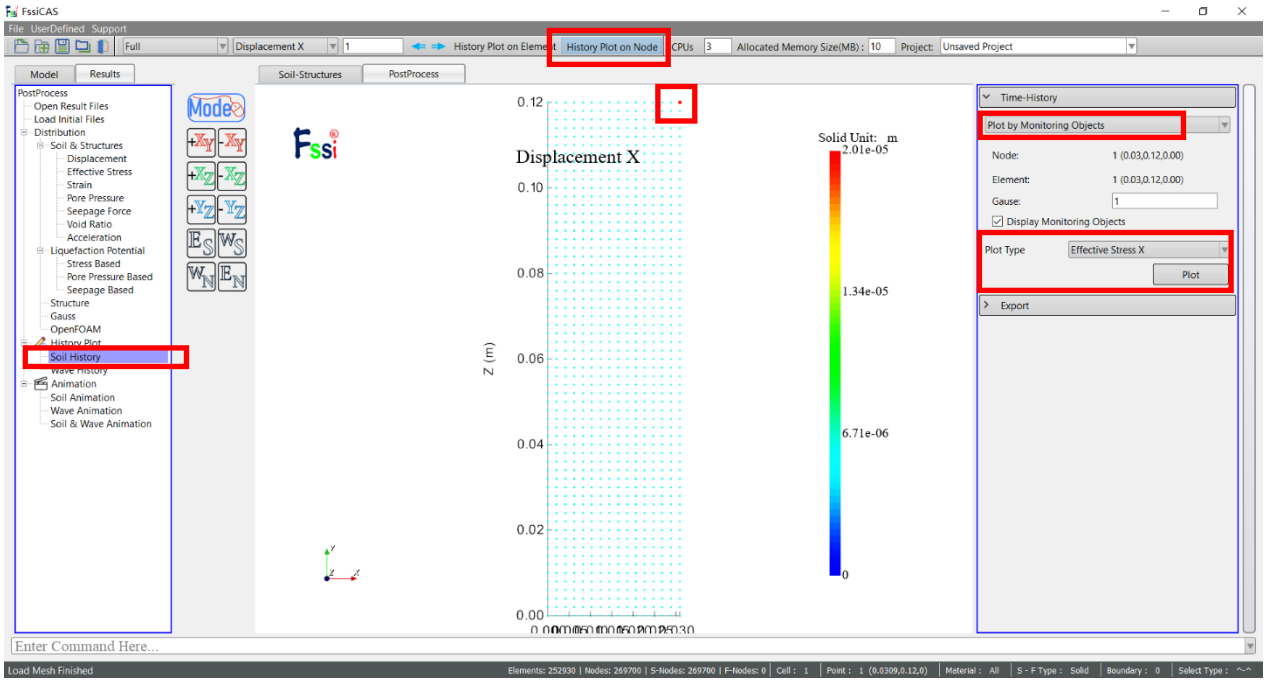


图 8-11 采用快捷功能按钮绘制节点上能输出的各种结果参数的时程曲线

第二类方法：点击后处理界面最右侧的伸缩区，在伸缩区中勾选 Node No. ，并在 Node No. 后面的输入框里输入需要绘制时程曲线的节点编号，在伸缩区中的 Plot Type 下面，用鼠标左键双击节点上能输出的各种结果参数（X 方向位移、Z 方向位移、速度、加速度、孔压），即可在工作区中显示节点上能输出的各种结果参数的时程曲线。

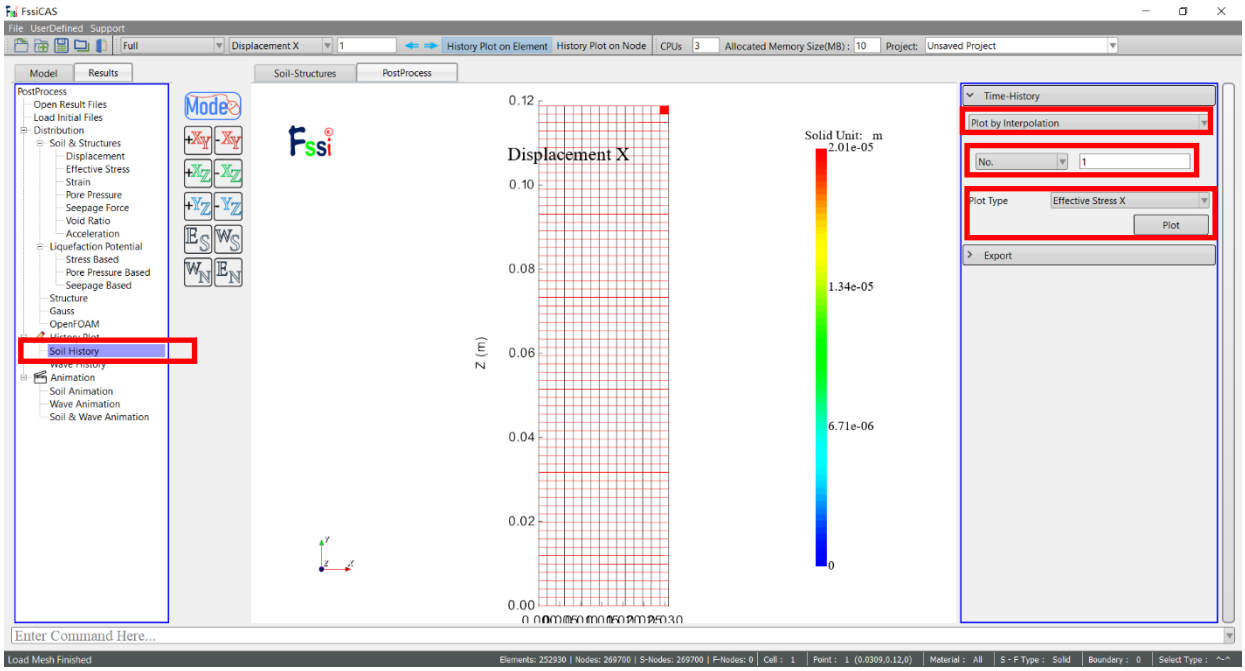


图 8-12 采用输入节点编号绘制节点上能输出的各种结果参数的时程曲线

第三类方法：点击后处理界面最右侧的伸缩区，在伸缩区中勾选 Node Coordinate ，并在 Node Coordinate 后面的输入框里输入需要绘制时程曲线的点坐标，在伸缩区中的 Plot Type 下面，用鼠标左键双击点上能输出的各种结果参数（X 方向位移、Z 方向位移、速度、加速度、孔压），即可在工作区中显示点上能输出的各种结果参数的时程曲线。

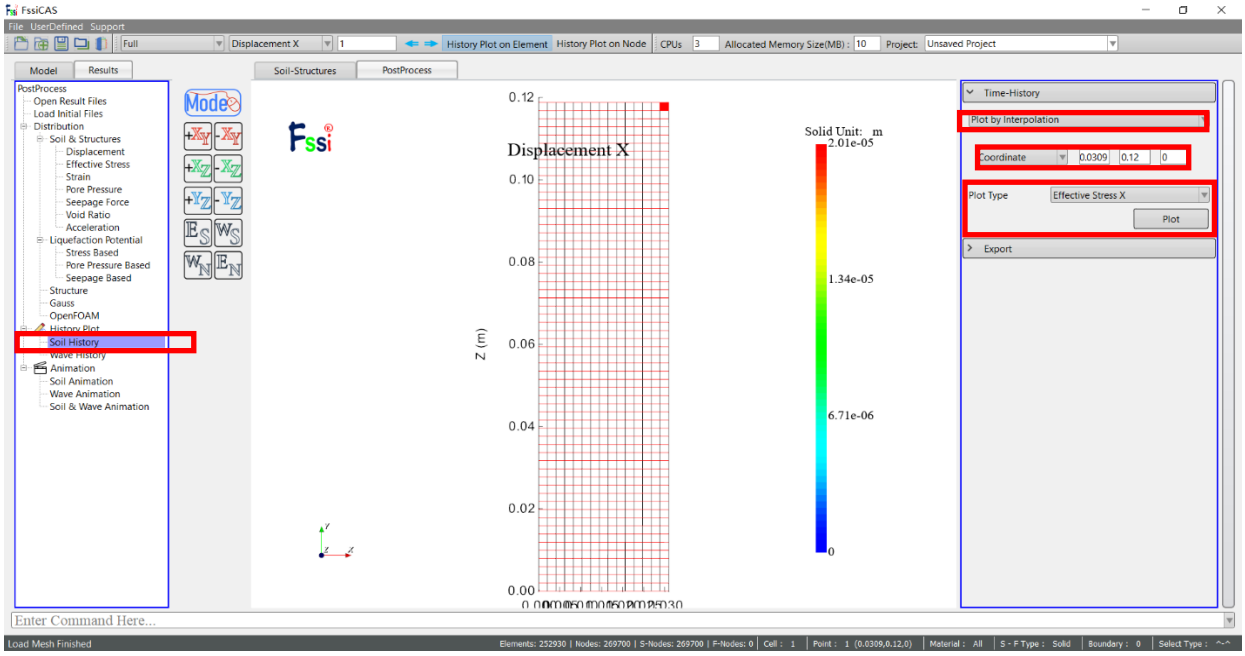


图 8-13 采用输入点坐标绘制节点上能输出的各种结果参数的时程曲线

8.4.2 绘制土体时程图时的伸缩区界面

在绘制土体时程图时，后处理界面上最右侧的伸缩区可用于绘制土体的各种计算结果的时程图和导出结果文件或结果图。在绘制土体时程图时后处理界面上最右侧的伸缩区界面图如图 8-14 所示，其的界面参数介绍如 Table 8-2 所示。

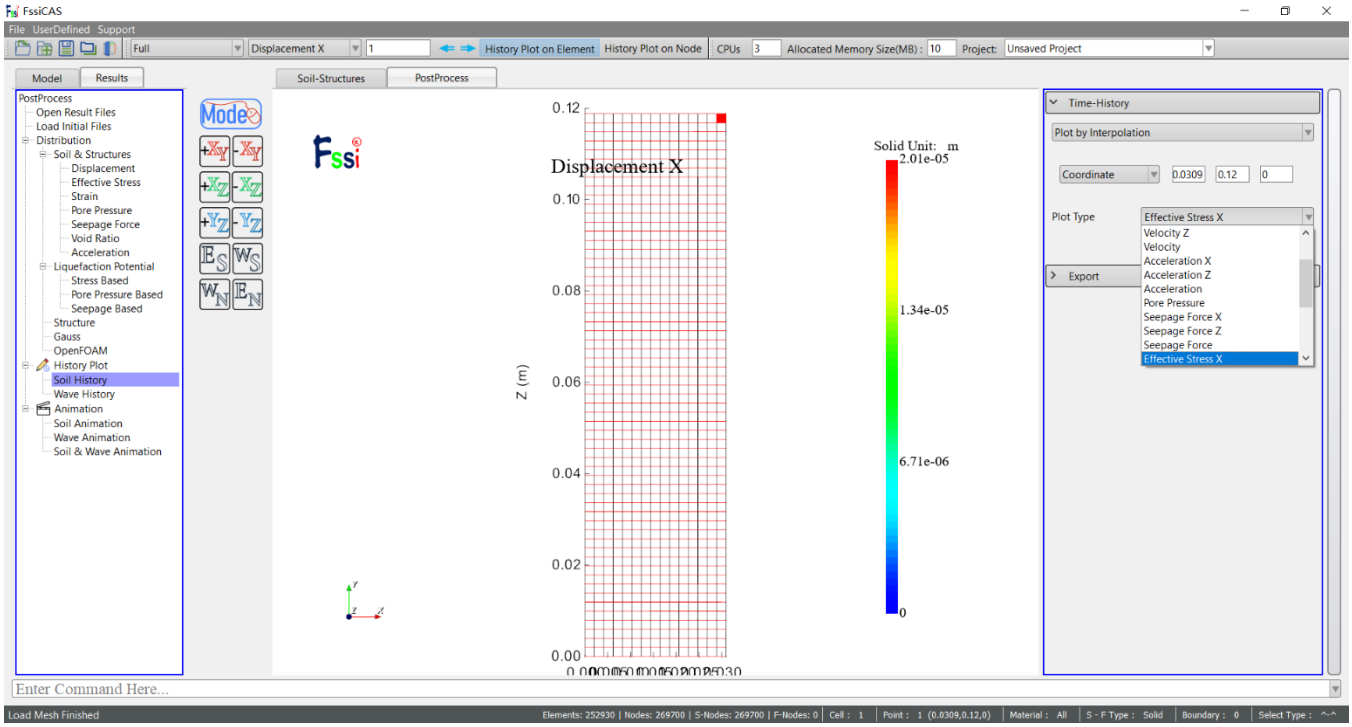


图 8-14 在绘制土体时程图时后处理界面上最右侧的伸缩区界面图

Table 8-2 (a) 在绘制土体时程图时后处理界面上最右侧的伸缩区界面参数介绍

名称				含义
Scalable area for Soil History Plot (Post-Process)	Plot Node	Node：Show information of node		展示节点信息
		Element：Show information of element		展示单元信息
		Gause：		输入高斯点编号
		Show History Plot		显示时程图
	Choose Plot Node	No.		输入节点编号
		Coordinate		输入节点的坐标值(x,y,z)
	Plot Type (Solid History Plot Type)	Displacement 位移	Displacement X	X 方向位移
			Displacement Z	Z 方向位移
			Displacement	（见 Note1）*
		Velocity 速度	Velocity X	X 方向速度
			Velocity Z	Z 方向速度
			Velocity	（见 Note2）*
		Acceleration 加速度	Acceleration X	X 方向加速度
			Acceleration Z	Z 方向加速度
			Acceleration	（见 Note3）*
		Stress 应力	Effective Stress X	X 方向有效应力
			Effective Stress Z	Z 方向有效应力
			Effective Stress Y	Z 方向有效应力
			Shear Stress XZ	剪切应力
		Strain 应变	Strain X	X 方向应变
			Strain Z	Z 方向应变
			Strain Y	Z 方向应变
			Shear Strain XZ	剪切应变
		Liquefaction Potential 液化势（Note4）*	Stress Based-1D	基于 1D 应力准则
			Stress Based-3D	基于 3D 应力准则
			Stress Based- Lp 1D	基于 1D 应力液化势准则
			Stress Based- Lp 3D	基于 3D 应力液化势准则
			Pore Pressure Based-Lp1D	基于 1D 孔压液化势
			Pore Pressure Based- Lp3D	基于 3D 孔压液化势
			Seepage Based	基于渗透力的准则

Table 8-3 (b) 在绘制土体时程图时后处理界面上最右侧的伸缩区界面参数介绍

名称				含义
Scalable area for Soil History Plot (Post-Process)	Plot Type (Solid History Plot Type)	Seepage Force 渗透力	Seepage Force X	X 方向渗透力
			Seepage Force Z	Z 方向渗透力
			Seepage Force	（见 Note5）*
	Axis 坐标轴	AutoControl		自动控制
		X Divisions		X 方向坐标轴标签个数
		Y Divisions		Y 方向坐标轴标签个数
	Export 输出	Export Results Text		输出结果文件
		Export Results Figure		输出结果图

Note1: $\boldsymbol{Displacement = \sqrt{u_x^2 + u_z^2}}$**，$u_x$、$u_z$ 分别表示 X 方向和 Z 方向位移；**

Note2: $\boldsymbol{Velocity = \sqrt{V_X^2 + V_Z^2}}$**，Vx、Vz 分别表示 X 方向和 Z 方向速度；**

Note3: $\mathrm{Acceleration} = \sqrt{A_X^2 + A_Z^2}$**，Ax、Az 分别表示 X 方向和 Z 方向加速度；**

Note4: Stress Based-1D 液化准则为 $\sigma_{zd}^{'} \geq Lp_{critical}$ **；**

Stress Based-3D 液化准则为 $\frac{I_1}{3} \geq Lp_{critical}$ **；**

Stress Based-Lp1D 液化准则为$Lp = \frac{\sigma_{zd}^{'}}{|\sigma_{z0}^{'}| + \alpha c} \geq Lp_{critical}$**；**

Stress Based-Lp3D 液化准则为$Lp = \frac{I_{zd}^{'}}{|I_{z0}^{'}| + \alpha c} \geq Lp_{critical}$**；**

Pore Pressure Based-Lp 1D 液化准则为$Lp = \frac{p_{Residual}}{|\sigma_{z0}^{'}| + \alpha c} \geq Lp_{critical}$**；**

Pore Pressure Based- Lp 3D 液化准则为$Lp = \frac{p_{Residual}}{|I_{z0}^{'}| + \alpha c} \geq Lp_{critical}$**；**

Seepage Based 液化准则为 $J_z \geq Lp_{critical}$ (9.8) **；**

Note5: Seepage Force=$\sqrt{F_X^2 + F_Z^2}$**，F_x、F_z 分别表示 X 方向和 Z 方向渗透力；**

8.5 动画

8.5.1 土体动画

进入后处理阶段后，在树状菜单栏的 Results 中的 Animation 区域中，用户点击 Soil Animation 后，即可绘制全态和动态时土体的各种结果参数的动画，方法如下：

点击后处理界面最右侧的伸缩区，在伸缩区中的 Soil Animation 区域里的 State 处选择 Full，进入全态动画后处理阶段；在 State 处选择 Dynamic，进入动态动画后处理阶段。

在伸缩区中的 Soil Animation 区域里选择完状态后，用户继续输入第一个开始的时间步和最后一个结束的时间步；然后用户在 Plot Type 区域里选择一个需要绘制动画的结果参数，并在 Value Range 区域中设置结果参数的最大值、最小值、放大倍数以及勾选是否显示网格 Show Solid Mesh，点击 OK；

最后点击在伸缩区中的 Plot Type 区域里的 Movie，即可在窗口中展示某个状态时土体的各种结果参数的动画；Plot Type 区域里的 Pause、Stop、Save 分别表示暂停，关闭，保存。

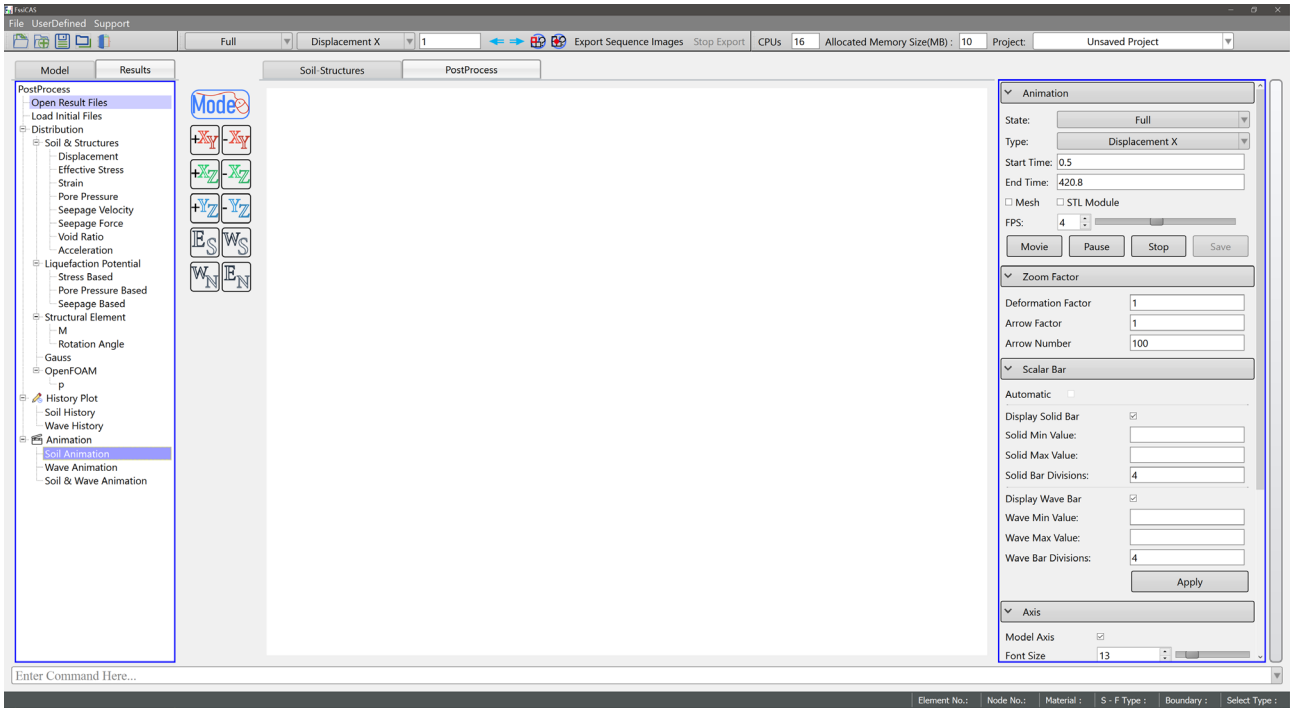


图 8-15 绘制全态和动态时土体的各种结果参数的动画的界面

8.5.2 绘制土体动画时的伸缩区界面

在绘制土体动画时，后处理界面上最右侧的伸缩区可用于控制动画的各种要素。在绘制土体动画时后处理界面上最右侧的伸缩区界面图如图 8-16 所示，其界面参数介绍如 Table 8-3 所示。

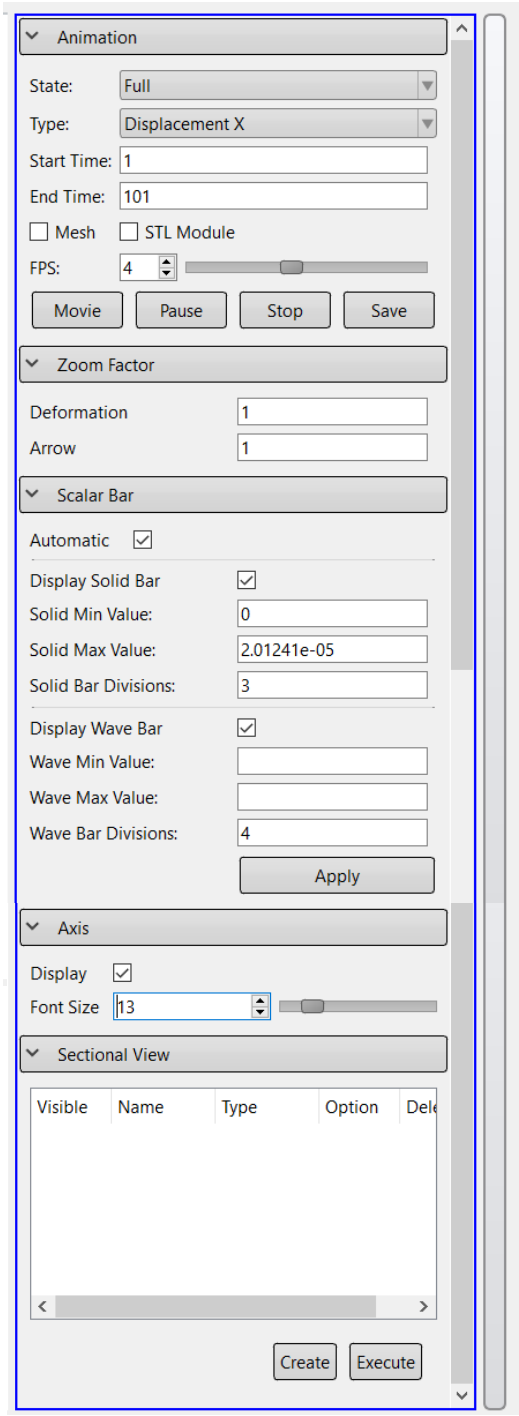


图 8-16 在绘制土体动画时后处理界面上最右侧的伸缩区界面图

Table 8-4 (a) 在绘制土体动画时后处理界面上最右侧的伸缩区界面参数介绍

名称				含义
Scalable area For Soil Animation (Post-Process)	Solid Animation 土体动画	State 状态	Full	全态
			Dynamic	动态
		Begin Step		动画的第一个时间步
		End Step		动画的最后一个时间步
	Plot Type (Solid Animation Plot Type)	Displacement 位移	Displacement X	X 方向位移
			Displacement Z	Z 方向位移
			Displacement	(见 Note1)*
		Velocity 速度	Velocity X	X 方向速度
			Velocity Z	Z 方向速度
			Velocity	（见 Note2）*
		Acceleration 加速度	Acceleration X	X 方向加速度
			Acceleration Z	Z 方向加速度
			Acceleration	（见 Note3）*
		Pore Pressure		孔压
		Seepage Force 渗透力	Seepage Force X	X 方向渗透力
			Seepage Force Z	Z 方向渗透力
			Seepage Force	（见 Note5）*
		Stress 应力	Effective Stress X	X 方向有效应力
			Effective Stress Z	Z 方向有效应力
			Effective Stress Y	Z 方向有效应力
			Shear Stress XZ	剪切应力
		Strain 应变	Strain X	X 方向应变
			Strain Z	Z 方向应变
			Strain Y	Z 方向应变
			Shear Strain XZ	剪切应变
		Void Ratio		孔隙比

Table 8-5 (b) 在绘制土体动画时后处理界面上最右侧的伸缩区界面参数介绍

<table>
<tr><th colspan="4">名称</th><th>含义</th></tr>
<tr><td rowspan="12">Scalable area For Soil Animation (Post-Process)</td><td rowspan="7">Plot Type (Solid Animation Plot Type)</td><td rowspan="7">Liquefaction Liquefaction Potential 液化势</td><td>Stress Based-1D</td><td>基于 1D 应力准则</td></tr>
<tr><td>Stress Based-3D</td><td>基于 3D 应力准则</td></tr>
<tr><td>Stress Based- Lp 1D</td><td>基于 1D 应力液化势准则</td></tr>
<tr><td>Stress Based- Lp 3D</td><td>基于 3D 应力液化势准则</td></tr>
<tr><td>Pore Pressure Based-Lp1D</td><td>基于 1D 孔压液化势准则</td></tr>
<tr><td>Pore Pressure Based-Lp3D</td><td>基于 3D 孔压液化势准则</td></tr>
<tr><td>Seepage Based</td><td>基于渗透力的准则</td></tr>
<tr><td colspan="3">FPS</td><td>动画速度设置</td></tr>
<tr><td colspan="3">ScalarBar</td><td>颜色条</td></tr>
<tr><td rowspan="7">Clip Modules 裁剪模式</td><td colspan="2">Autocontrol</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Min Value</td><td>最小值</td></tr>
<tr><td colspan="2">Max Value</td><td>最大值</td></tr>
<tr><td colspan="2">Divisions</td><td>划分个数</td></tr>
<tr><td colspan="2">Amplification</td><td>放大倍数</td></tr>
<tr><td colspan="2">Solid Mesh</td><td>是否显示土体网格</td></tr>
<tr><td colspan="2">Axes</td><td>是否显示坐标轴</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Geometry</td><td colspan="2">Box</td><td>规则六面体</td></tr>
<tr><td colspan="2">Hexahedra</td><td>六面体</td></tr>
</table>

8.6 OpenFOAM

导入 OpenFOAM 波浪结果文件之后，用户可以通过 Wave History Plot 和 Wave Animation 绘制波浪的时程结果曲线和动画。下面介绍导入 OpenFOAM 结果文件的步骤以及绘制波浪的时程结果曲线和动画的方法。

导入 OpenFOAM 结果文件的步骤如图 8-17 所示。首先点击 Open Result Files，点击 Open FOAM ControlDict 加载栏的 Load File，然后打开 OpenFOAM 软件生成的 ControlDict 文件，加载成功后的后处理界面如图 8-18 所示。

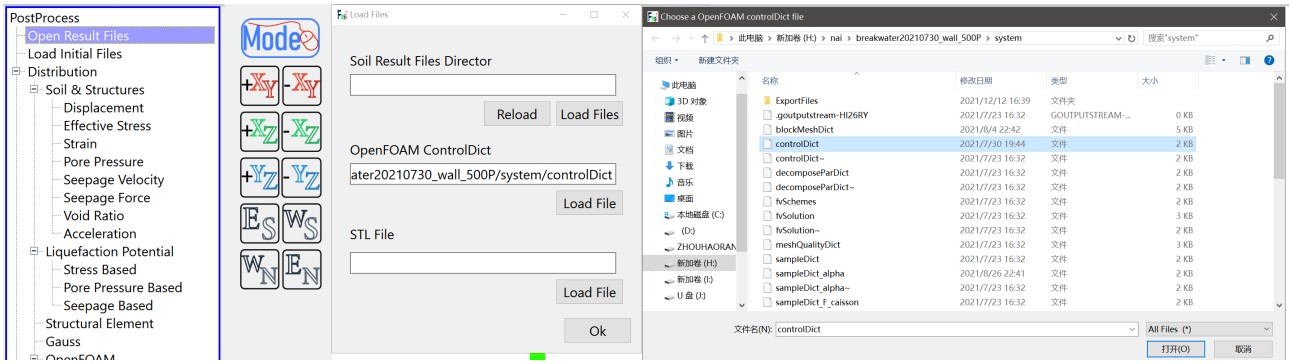


图 8-17 加载 OpenFOAM 结果文件的步骤

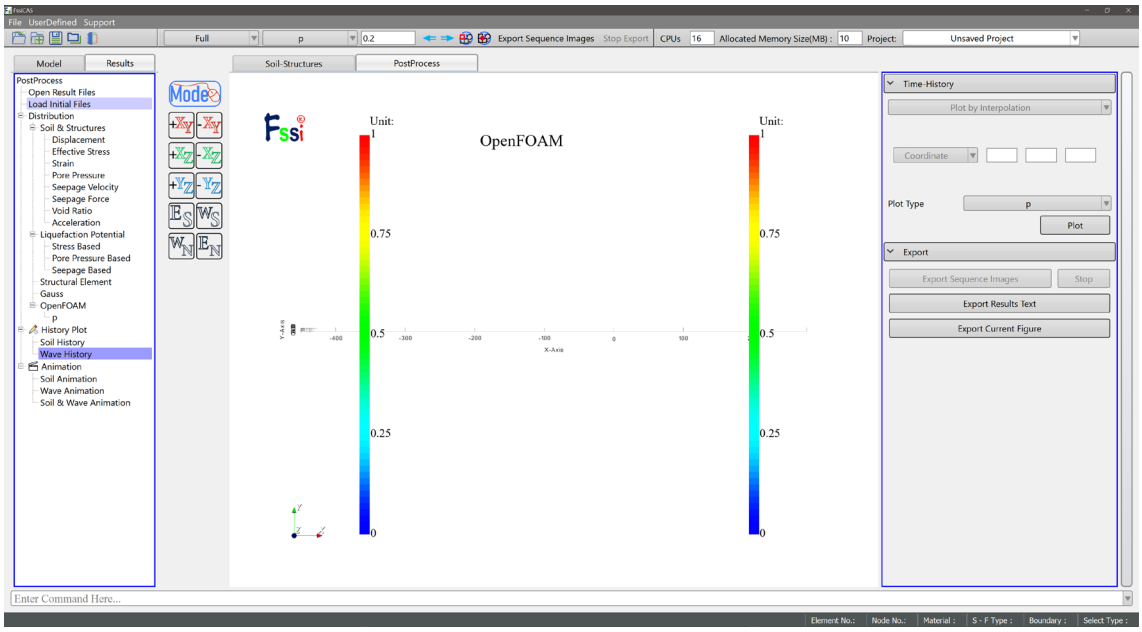


图 8-18 加载 OpenFOAM 结果文件后的后处理界面

8.6.1 波浪时程曲线

加载 OpenFOAM 波浪结果文件后，用户点击 Wave History，即可绘制波浪的时程结果曲线，方法如下：

在后处理界面上工具栏 2 中的第一个下拉列表处选择 Full，进入全态时程曲线后处理阶段；第一个下拉列表处选择 Dynamic，进入动态时程曲线后处理阶段。

图 8-19 后处理界面正上方的工具栏 2 中的第五个和第六个快捷功能按钮

点击后处理界面最右侧的伸缩区，在伸缩区中的 Node Coordinate 后面的输入框里输入需要绘制时程曲线的点坐标，在伸缩区中的 Plot Type 下面用鼠标左键双击点上能输出的各种计算结果，即可在工作区中显示点上能输出的各种波浪结果参数的时程曲线；

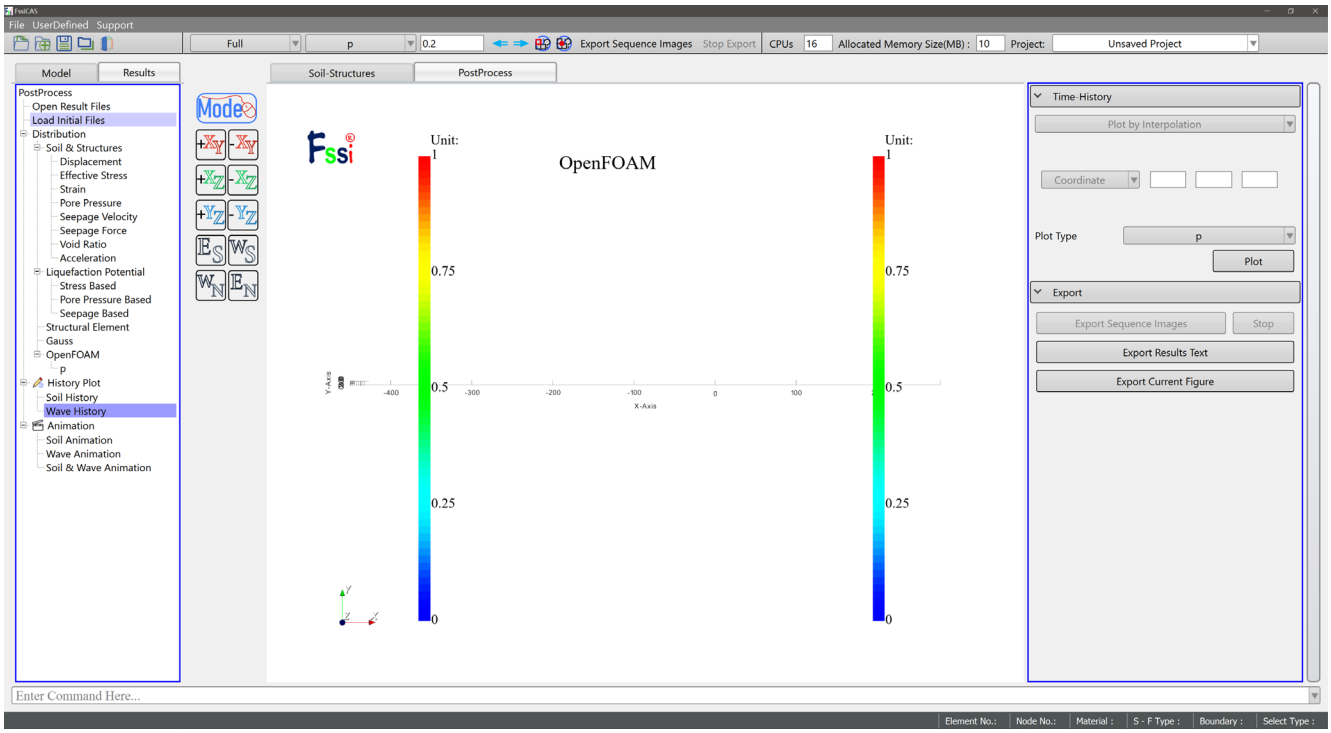


图 8-20 绘制波浪的时程结果曲线的方法

8.6.2 绘制波浪时程图时的伸缩区

在绘制波浪时程图时，后处理界面上最右侧的伸缩区可用于绘制波浪的各种参数的时程图和导出结果文件或结果图。在绘制波浪时程图时后处理界面上最右侧的伸缩区界面图如图 8-21 所示，其界面参数介绍如 Table 8-4 所示。

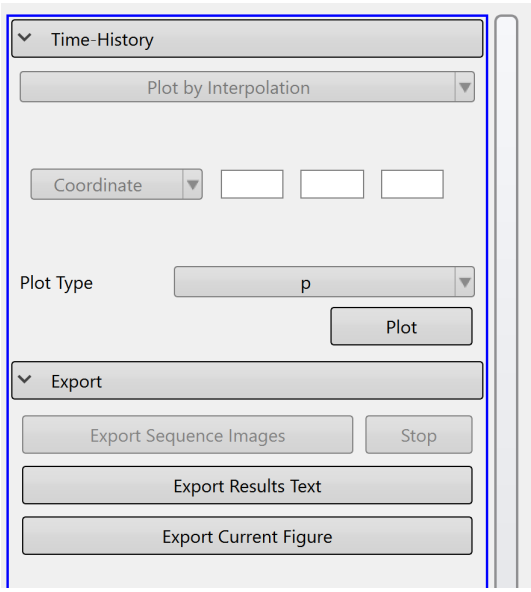


图 8-21 在绘制波浪时程图时后处理界面上最右侧的伸缩区界面图

Table 8-6 在绘制波浪时程图时后处理界面上最右侧的伸缩区界面参数介绍

名称			含义
Scalable area for Wave History Plot (Post-process)	Choose Plot Node	Node Coordinate	输入坐标值(x y z)
	Plot Type (Wave History Plot Type)	U	速度
		alpha.water	相分数
		epsilon	耗散率
		k	湍动能 k
		nut	湍流运动粘度
		p	压力
		p_rgh	参考压力
		porosity	空隙率
		porosityIndex	孔隙参数
	Axis	AutoControl	自动控制
		X Divisions	X 方向坐标轴标签个数
		Y Divisions	Y 方向坐标轴标签个数
	Export 输出	Export Results Text	输出结果文件
		Export Results Figure	输出结果图

8.6.3 绘制波浪动画时的伸缩区

在绘制波浪动画时，后处理界面上最右侧的伸缩区可用于控制动画的各自要素。在绘制波浪动画时后处理界面上最右侧的伸缩区界面图如图 8-22 所示，其界面参数介绍如 Table 8-5 所示。

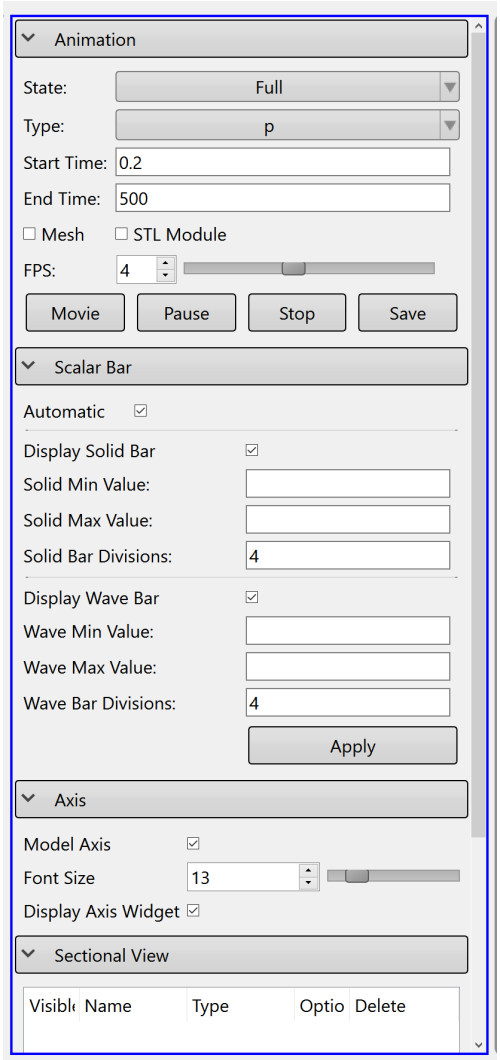


图 8-22 绘制波浪动画时后处理界面上最右侧的伸缩区界面图

Table 8-7 绘制波浪动画时后处理界面上最右侧的伸缩区界面参数介绍分布图

名称				含义
Scalable area for Wave Animation (Post-process)	Wave Animation 波浪动画	Sates	Full	全动态
			Dynamic	动态
		Begin Step		第一个时间步
		End Step		最后一个时间步
	Plot Type (Wave Animation Plot Type)	U		速度
		alpha.water		相分数
		epsilon		耗散率
		k		湍动能 k
		nut		湍流运动粘度
		p		压力
		p_rgh		参考压力
		porosity		空隙率
		porosityIndex		孔隙参
	Movie			展示动画
	Pause			暂停
	Stop			结束
	Save			保存
	FPS			动画速度设置
	ScalarBar			颜色条
	Clip Modules 裁剪模式	Autocontrol		
		Min Value		最小值
		Max Value		最大值
		Divisions		划分个数
		Amplification		放大倍数
		Solid Mesh		是否显示土体网格
		Axes		是否显示坐标轴
	Geometry	Box		规则六面体
		Hexahedra		六面体
	Value Range			数值范围

8.6.4 土体和波浪动画

同时加载相同维度的土体和波浪结果文件，可以绘制全态和动态时土体和波浪的各种结果参数的联合动画。在树状菜单栏的 Results 中的 Animation 区域中，用户点击 Soil and Wave Animation 后，即可绘制全态或动态时土体和波浪的各种结果参数的联合动画，方法如下：

点击后处理界面最右侧的伸缩区，在伸缩区中的 Soil and Wave Animation 区域里的 State 处选择 Full，进入全态动画后处理阶段；在 State 处选择 Dynamic，进入动态动画后处理阶段。

在伸缩区中的 Soil and Wave Animation 区域里设置完土体和波浪的状态后，用户继续输入土体的第一个开始的时间步和最后一个结束的时间步以及时间步间隔，波浪的第一个开始的时间步和最后一个结束的时间步以及时间步间隔；

然后用户在 Soil Animation Type 区域里选择一个需要绘制动画的土体的结果参数，并在 Wave Animation Type 区域里选择一个需要绘制动画的波浪的结果参数；

在 Range Value 区域中设置波浪参数的最大值和最小值，土体参数的最大值和最小值，放大倍数以及其他相关参数），点击 OK；

最后点击 Movie，即可在窗口中展示某个状态时土体和波浪的联合动画。

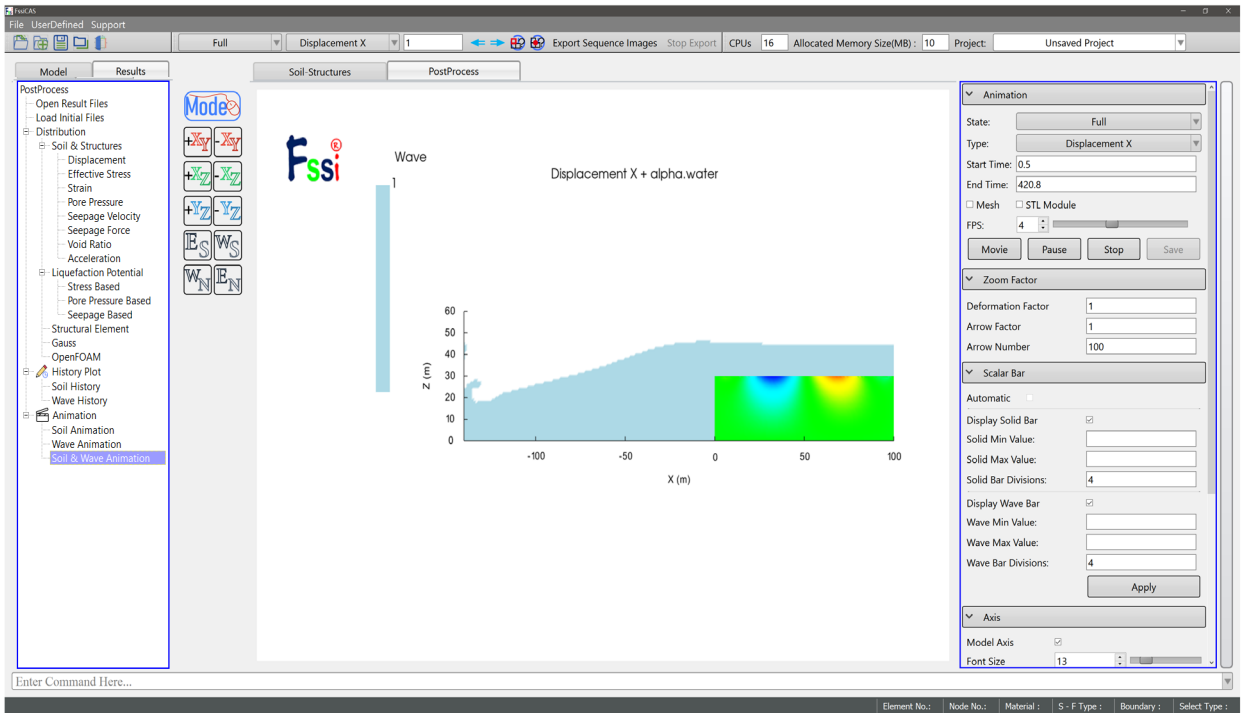


图 8-23 绘制全态和动态时土体和波浪的各种结果参数的联合动画的方法

8.6.5 绘制土体和波浪联合动画时的伸缩区

在绘制土体波浪联合动画时，后处理界面上最右侧的伸缩区可用于控制动画的各种要素。在绘制土体波浪联合动画时后处理界面上最右侧的伸缩区界面的参数介绍如 Table 8-6、Table 8-7 所示。

Table 8-8 (a) 绘制土体波浪联合动画时后处理界面右侧的伸缩区界面参数介绍

名称				含义
Scalable area for Soil and Wave Animation (Post-process)	Solid Wave Animation 土体动画	State	Full	全态
			Dynamic	动态
		Begin Step		动画的第一个时间步
		Inc Step		动画时间步间隔
		End Step		动画的最后一个时间步
		Displacement	Displacement X	X 方向位移
			Displacement Z	Z 方向位移
			Displacement	(见 Note1)*
		Velocity	Velocity X	X 方向速度
			Velocity Z	Z 方向速度
			Velocity	（见 Note2）*
		Acceleration	Acceleration X	X 方向加速度
			Acceleration Z	Z 方向加速度
			Acceleration	（见 Note3）*
		Pore Pressure		孔压
		Seepage Force	Seepage Force X	X 方向渗透力
			Seepage Force Z	Z 方向渗透力
			Seepage Force	（见 Note5）*
		Stress	Effective Stress X	X 方向有效应力
			Effective Stress Z	Z 方向有效应力
			Effective Stress Y	Z 方向有效应力
			Shear Stress XZ	剪切应力
		Strain	Strain X	X 方向应变
			Strain Z	Z 方向应变
			Strain Y	Z 方向应变
			Shear Strain XZ	剪切应变
		Void Ratio		孔隙比

Table 8-9 (b) 绘制土体波浪联合动画时后处理界面右侧的伸缩区界面参数介绍

名称				含义
Scalable area for Soil and Wave Animation (Post-process)	Solid Wave Animation 土体动画	Liquefaction Liquefaction Potential	Stress Based-1D	基于 1D 应力准则
			Stress Based-3D	基于 3D 应力准则
			Stress Based- Lp 1D	基于 1D 应力液化势准则
			Stress Based- Lp 3D	基于 3D 应力液化势准则
			Pore Pressure Based-Lp1D	基于 1D 孔压液化势准则
			Pore Pressure Based- Lp3D	基于 3D 孔压液化势准则
			Seepage Based	基于渗透力的准则

Table 8-6 (c) 绘制土体波浪联合动画时后处理界面右侧的伸缩区界面参数介绍

名称				含义
Scalable area for Soil and Wave Animation (Post-process)	Wave Animation	Sates	Full	全动态
			Dynamic	动态
		Begin Step		第一个时间步
		Inc Step		动画时间步间隔
		End Step		最后一个时间步
		OpenFOAM	U	速度
			alpha.water	相分数
			epsilon	耗散率
			k	湍动能 k
			nut	湍流运动粘度
			p	压力
			p_rgh	参考压力
			porosity	空隙率
			porosityIndex	孔隙参数
		Movie		展示动画
		Pause		暂停
		Stop		结束
		Save		保存
		FPS		动画速度设置
		ScalarBar		颜色条

Table 8-6 (d) 绘制土体波浪联合动画时后处理界面右侧的伸缩区界面参数介绍

名称			含义
Scalable area for Soil and Wave Animation (Post-process)	Setting	Autocontrol	自动控制
		Wave Min Value	波浪参数最小值
		Wave Max Value	波浪参数 最大值
		Wave Bar Divisions	波浪参数条划分个数
		Solid Min Value	土体最小值
		Solid Max Value	土体最大值
		Solid Bar Divisions	土体参数条划分个数
		Amplification	放大倍数
		Wave Color Bar	是否显示波浪的颜色条
		Solid Color Bar	是否显示土体的颜色条
		Solid Mesh	是否显示土体网格
		Wave Mesh	是否显示波浪网格
		Axes	是否显示坐标轴
	Geometry	Box	规则六面体
		Hexahedra	六面体