

iGeoLab 岩土计算实验室

V2.4 产品介绍手册

中仿公司（CnTech Co., Ltd）

www.igeo.cn • 400 888 5100

2026 年 11 月

前言

iGeoLab（岩土计算实验室）是中仿公司自主研发的岩土工程数值分析软件。V2.4 二维版面向边坡、基坑、隧道、坝体与地基等二维岩土工程问题，在同一个工程模型上提供极限平衡与有限元两套自主研发的求解体系：极限平衡部分完成边坡稳定性计算、滑动面搜索、可靠度与参数研究；有限元部分完成原位应力、施工过程、固结、强度折减、渗流、温度场、组分运移、孔隙气体流动与动力时程等分析。软件同时提供几何建模与 CAD 数据导入修复、岩土试验数据处理与本构参数标定、规范计算与参数建议、与主流岩土软件的数据互通、脚本自动化以及 Word / PDF / HTML 计算书输出。

本手册按功能模块介绍 iGeoLab V2.4 二维版的全部功能，各章依次说明该模块解决的工程问题、具备的功能与主要设定，并配以软件实机界面。各项功能的操作步骤、对话框参数说明与计算原理见《iGeoLab V2.4 用户手册》。

二维岩土工程分析 · 极限平衡与有限元双求解体系 · 渗流、温度、运移与动力多场分析

岩土试验与参数标定 · 规范计算与计算书 · 主流岩土软件互通与脚本自动化

目　　录

前言 2

第 1 章　软件概述 1

1.1　产品定位 1

1.2　功能模块一览 1

1.3　主要技术特点 2

1.4　界面组织 3

1.5　典型工作流程 4

1.6　运行环境 5

第 2 章　工程管理与二维建模 6

2.1　工程文件、起始页与自动保存 6

2.2　多场景工作区与求解管理器 7

2.3　主界面与停靠面板 8

2.4　几何绘制与编辑 10

2.5　参数化建模向导 11

2.6　脚本建模 12

2.7　地下水、弱层 / 结构面与荷载 13

2.8　支护与支护组 14

2.9　项目设置 15

第 3 章　材料与参数 17

3.1　材料库面板 17

3.2　材料对话框 18

3.3　极限平衡强度类型 19

3.4　有限元本构模型 22

3.5　水力、热学与其他属性的入口 24

3.6　岩土材料库 25

3.7　加固材料数据库 26

第 4 章　极限平衡边坡稳定分析 27

4.1　适用对象与技术特点 27

4.2　命令入口 27

4.3　条分方法 28

4.4　强度类型 30

4.5　滑动面与搜索方法 30

4.6　滑面限制与搜索约束 32

4.7　地下水与孔隙水压力 33

4.8 荷载与地震作用 34
4.9 支护作用 34
4.10 专项分析 35
4.11 结果视图 37
4.12 边坡稳定性计算书 40
第 5 章 有限元应力—变形分析与强度折减 42
5.1 主要特点 43
5.2 网格划分 43
5.3 网格检查与修复 44
5.4 边界条件与荷载 45
5.5 结构构件与接触面 46
5.6 分析树与分析类型 47
5.7 分步开挖序列 48
5.8 固结分析 49
5.9 强度折减 50
5.10 求解与校核 52
5.11 概率与敏感性、三维分析 53
5.12 结果查看 54
5.13 典型应用 56
5.14 计算报告 57
5.15 本构模型 58
5.16 排水类型、初始状态与接触面 59
5.17 与岩土计算实验室联动 60
第 6 章 渗流分析 62
6.1 功能概览 62
6.2 使用流程 63
6.3 分析类型与分析树 63
6.4 水力属性 64
6.5 渗流边界 65
6.6 求解 66
6.7 结果与后处理 67
6.8 典型应用 68
6.9 结果输出 69
6.10 渗流结果供极限平衡与有限元使用 69
6.11 计算校核 70
第 7 章 温度场分析 71

7.1 功能概览 71
7.2 操作 72
7.3 方法依据 73
7.4 典型应用 73
7.5 计算校核 74
第 8 章 组分运移与孔隙气体流动 75
8.1 组分运移 75
8.2 孔隙气体流动 77
8.3 示例与计算校核 78
8.4 多场相互作用 78
第 9 章 动力分析与地震工程 79
9.1 功能与入口 79
9.2 二维动力时程分析 80
9.3 地震波库 86
9.4 地震波编辑 87
9.5 人工波合成 88
9.6 震后稳定与永久位移 89
9.7 一维场地地震反应与反应谱 90
9.8 抗震规范计算 91
第 10 章 岩土计算实验室 93
10.1 实验室工作环境 93
10.2 单元试验模拟 94
10.3 物理性质试验 97
10.4 力学试验数据整理 99
10.5 土水特征曲线 100
10.6 参数标定与写回工程材料 101
10.7 监测与现场试验分析 103
10.8 数据导入、试验系统与报告 105
第 11 章 规范计算与智能辅助 107
11.1 内置规范计算 107
11.2 参数建议与规范检索 107
11.3 建模向导 108
11.4 模型诊断 109
11.5 AI 建模助手 110
第 12 章 设计工具 111
12.1 挡土墙设计与验算 111

12.2 基坑支护体系设计（弹性支点法）.....114
第 13 章 几何数据导入与 CAD 修复.....116
13.1 DXF / DWG 图纸导入.....116
13.2 批量导入问题几何并修复.....118
13.3 图片生成区域几何.....119
13.4 从等高线生成剖面.....120
13.5 其他软件的模型与几何.....120
13.6 三维地质模型导入与剖面切割.....121
13.7 几何导出与 CAD 编辑.....122
第 14 章 与其他岩土软件互通.....124
14.1 GeoStudio.....124
14.2 Rocscience Slide2.....126
14.3 Rocscience RS2.....127
14.4 PLAXIS 2D.....128
14.5 PLAXIS LE.....129
14.6 Leapfrog.....130
第 15 章 脚本与自动化.....131
15.1 Python 控制台与命令行.....131
15.2 脚本编辑器与脚本建模.....132
15.3 命令流、实时脚本预览与宏.....133
15.4 远程脚本服务器.....134
15.5 批量计算.....135
第 16 章 结果后处理与计算书.....136
16.1 结果工作区.....136
16.2 结果的显示与查询.....137
16.3 成果导出.....138
16.4 计算书.....138
第 17 章 关于中仿公司.....141
17.1 资质与合作关系.....141
17.2 联系我们.....141

第 1 章　软件概述

iGeoLab 岩土计算实验室 V2.4 二维版是一套运行于 Windows 桌面的岩土工程分析软件，覆盖从几何建模、材料与边界条件定义、求解计算到结果查看与计算书输出的完整流程。本章概括软件的定位、功能组成、技术特点、界面组织、典型工作流程与运行环境。

1.1　产品定位

- 面向对象：勘察设计院、工程咨询单位、科研院所与高等院校，以及矿山、交通、水利水电、市政等行业中从事岩土工程分析的技术人员与学生。
- 工程问题：二维（平面应变、轴对称）条件下的边坡稳定、基坑开挖与支护、隧道开挖与支护、土石坝与堤防渗流及稳定、软土地基固结、地温与热传导、污染物运移、场地地震反应与动力稳定等。
- 分析方法：同一工程模型上同时提供极限平衡法与有限元法。极限平衡法用于边坡稳定性系数计算与临界滑动面搜索；有限元法用于应力—变形、施工过程、固结、强度折减、渗流、温度场、组分运移、孔隙气体流动与动力时程分析，各分析之间可传递孔压、应力与温度。
- 工作方式：全中文界面，按“建模 → 极限平衡 → 有限元 → 结果”的工作流组织命令；一个工作区文件可包含多个相互独立的场景，便于方案比选与多工况计算。

1.2　功能模块一览

表 1-1　iGeoLab V2.4 二维版功能模块

模块	主要功能	主要入口
工程管理与二维建模	工作区与多场景、自动保存与恢复、几何绘制与编辑、边坡 / 基坑 / 隧道参数化向导、脚本建模、水位线与测压线、弱层 / 结构面、分布荷载与线荷载、支护	文件、编辑、建模菜单；功能区“建模”页；左侧绘图工具板
材料与参数	材料库、极限平衡强度类型、有限元本构模型、水力 / 热学 / 运移 / 孔隙气参数、支护属性	属性菜单；材料库面板
极限平衡边坡稳定	多种条分法同时求解、圆弧与非圆弧滑动面搜索、滑面限制、地下水与外荷载、拟静力地震、支护作用、快速降水、多工况、可靠度与参数研究、结果视图、边坡稳定性计算书	极限平衡菜单；功能区“极限平衡”页
有限元应力—变形与强度折减	网格划分与检查、边界条件、体荷载、结构构件、分析树（原位应力、荷载-变形、应力重分布、固结、强度折减）、分步开挖、概率与敏感性、截面拉伸三维分析、计算报告	有限元菜单；功能区“有限元”页
渗流与多场	稳态 / 瞬态饱和—非饱和渗流、组分运移、孔隙气体流动、稳态 / 瞬态温度场	渗流菜单、温度菜单
动力与地震	动力时程分析、地震波库、人工波合成、时程曲线与反应谱、场地地震反应	动力菜单

模块	主要功能	主要入口
岩土计算实验室	物理与力学试验数据处理、单元试验模拟、本构参数标定、参数写回工程材料	属性 → 岩土计算实验室
规范计算与智能辅助	参数建议与规范检索、建模向导、模型诊断、AI 建模助手	视图菜单；工具 → AI 辅助
设计工具	挡土墙设计、支护体系设计	设计菜单
数据导入与软件互通	DXF / DWG、图片、等高线、三维地质模型导入与剖面切割；GeoStudio、Rocscience Slide2 / RS2、PLAXIS 2D / PLAXIS LE、GEO5、MIDAS GTS NX、FLAC2D、理正边坡、AutoBank 等数据交换	文件 → 导入 / 导出；互通菜单
脚本与自动化	Python 控制台、脚本编辑器、实时脚本预览、脚本建模、宏录制与回放、远程脚本服务器、命令流导出	工具菜单；视图菜单
结果与计算书	结果工作区、云图与曲线、表格与图片导出、Word / PDF / HTML 计算书	结果菜单；功能区“结果”页

1.3 主要技术特点

- **两套自主研发的求解体系**：极限平衡求解器与有限元求解器均为软件自带，随包示例工程（渗流、边坡稳定、强度折减、基坑分步开挖）全部由软件自身完成计算，不依赖第三方求解器。
- **一个模型、多种分析**：几何、材料、地下水、荷载与支护只定义一次，即可分别进行极限平衡、有限元、渗流、温度、动力等分析；有限元各分析以分析树组织，子分析从父分析继承应力、孔压与施工阶段状态。
- **分析之间的结果传递**：渗流分析的孔压可作为极限平衡与有限元分析的孔压来源；应力—变形、固结与动力分析的应力可用于极限平衡的有限元应力法计算安全系数，动力分析还可给出滑体的 Newmark 永久位移；温度场分析的温度变化可作为荷载-变形分析的温度作用。
- **多场景工作区**：一个工作区文件（.iglw）可包含多个相互独立的场景，场景之间可复制与比较；求解管理器可依次求解全部场景并列出结果。
- **按规范输出计算书**：边坡稳定性计算书按 GB 50330-2013《建筑边坡工程技术规范》评价稳定状态，有限元计算书可按边坡或 JGJ 120-2012《建筑基坑支护技术规程》评价；计算书可输出 Word、PDF 与 HTML 三种格式，带封面、目录与签署栏。
- **与主流岩土软件互通**：可与 GeoStudio、Rocscience Slide2 与 RS2、PLAXIS 2D 与 PLAXIS LE 交换模型，并可调用本机已安装的外部软件求解；可读入 GEO5、MIDAS GTS NX、FLAC2D、理正边坡、AutoBank、DXF / DWG 与 Leapfrog / OMF 三维地质模型。
- **开放的脚本接口**：界面上的建模与分析操作都可通过 Python 脚本完成，支持宏录制回放、远程脚本服务器与命令流导出，便于批量计算与流程自动化。
- **全中文界面**：菜单、对话框、提示与离线帮助均为中文，提供浅色与深色两种主题。

1.4 界面组织

主窗口自上而下依次为菜单栏、功能区、工作区与状态栏（图 1-1）。

- **菜单栏**：文件、编辑、视图、建模、属性、极限平衡、有限元、渗流、温度、动力、设计、结果、互通、工具、帮助共 15 个菜单，汇集软件的全部命令。
- **功能区**：“建模”“极限平衡”“有限元”“结果”四页，按工作流排列常用命令（图 1-2）；切换到“结果”页即进入结果工作区，此时几何锁定，点“返回建模”后恢复编辑。
- **左侧绘图工具板**：选择、绘点、绘线、绘面、分割区域、水位线、孔压、弱层、支护、材料库、适配视图、撤销、移至原点等常用建模工具。
- **停靠面板**：模型树、属性、场景、求解管理器、显示选项、材料库、后处理、Python 控制台等面板，可停靠、浮动、隐藏，布局可在“视图 → 重置面板布局”恢复。
- **二维画布**：显示与编辑几何模型、网格与边界条件，支持平移、缩放、对象捕捉与正交约束；结果工作区中显示云图、滑动面与各类结果图层。
- **状态栏**：显示光标坐标与缩放比例，提供 SNAP、GRID、AXES、ORTHO、OSNAP 开关；命令栏可直接输入并执行脚本命令。

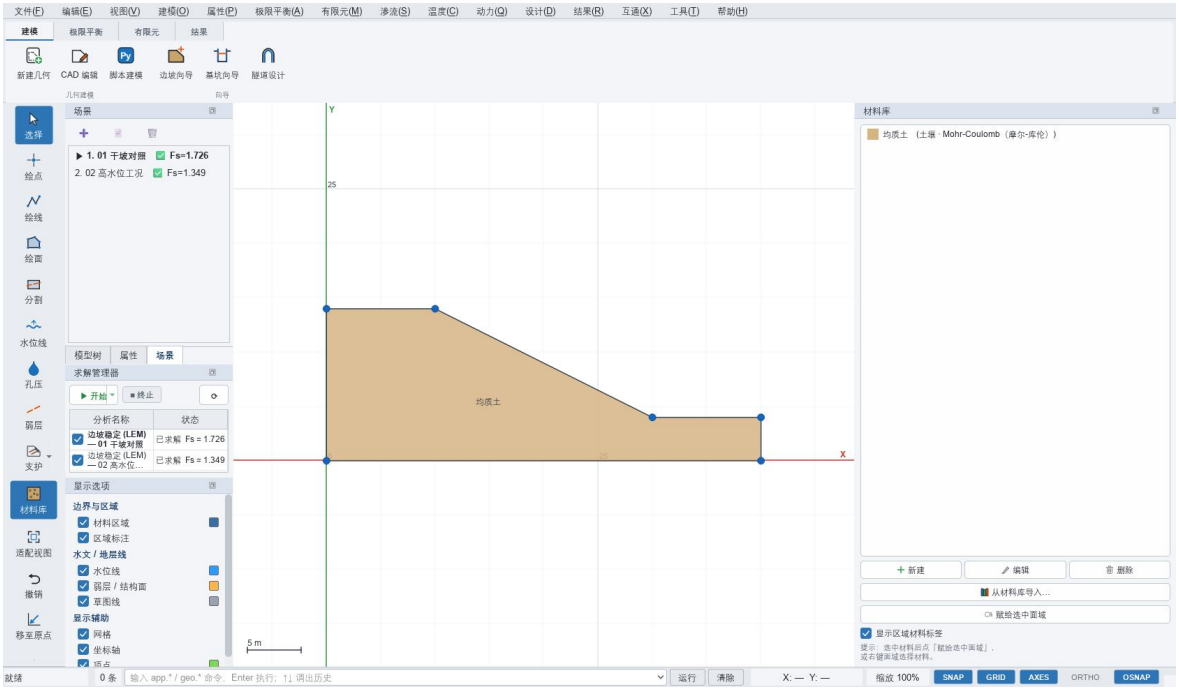


图 1-1 iGeoLab V2.4 主窗口（建模工作区，打开随包示例“边坡稳定 干坡与高水位对比”）



图 1-2　功能区的四页（自上而下：建模、极限平衡、有限元、结果）

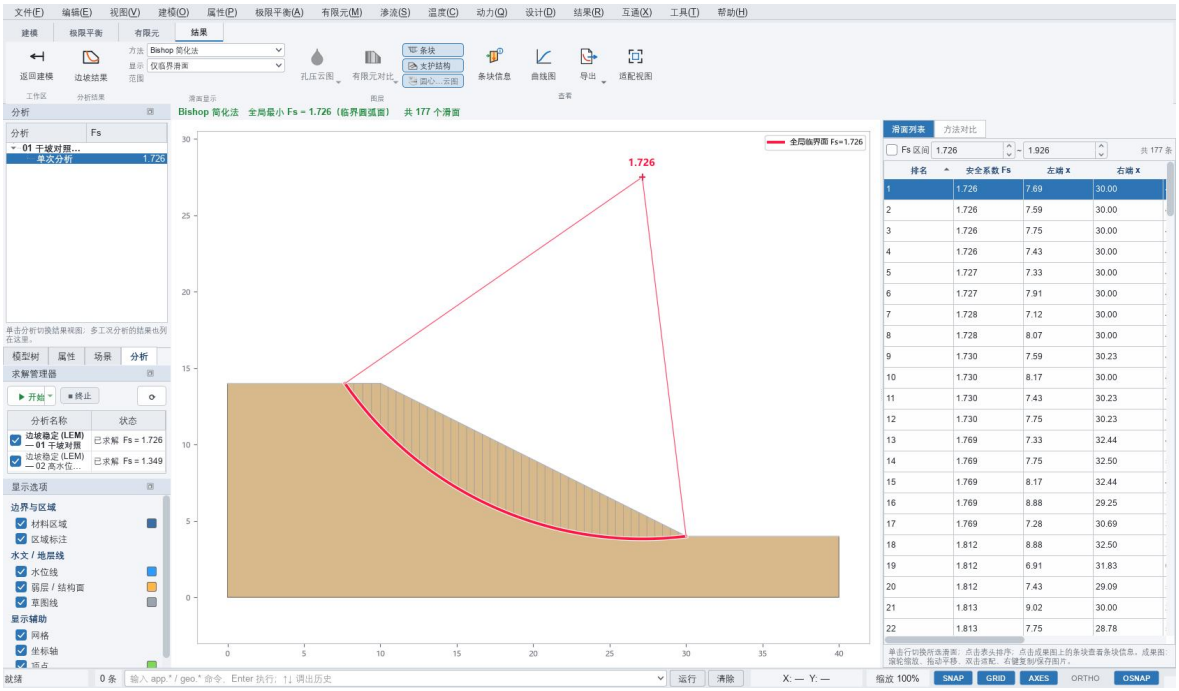


图 1-3　结果工作区（极限平衡结果：临界滑动面、条块与滑面列表）

1.5　典型工作流程

1. 新建工程或打开已有工程；需要多方案比较时在场景面板中新建或复制场景。
2. 建立几何：用绘图工具板绘制外部边界与材料分界，或用边坡、基坑、隧道向导按参数生成，也可从 CAD 图纸、图片、等高线或其他岩土软件的模型导入。
3. 定义材料并赋给各区域；按需要绘制水位线、测压线、弱层 / 结构面，布置荷载与支护。
4. 极限平衡分析：设置条分方法与滑动面搜索方式，运行求解，查看临界滑动面、各方法安全系数与条块受力。
5. 有限元分析：划分网格、指定边界条件，在分析树中依次建立原位应力、施工阶段、固结、强度折减或渗流、温度、动力等分析，求解后查看云图、曲线与构件内力。
6. 专项分析：按需要进行多工况、快速降水、可靠度与参数研究、有限元概率与敏感性等分析。

7. 输出成果：导出结果图、数据表与几何，生成 Word / PDF / HTML 计算书；需要时导出到其他岩土软件复核。

1.6 运行环境

表 1-2 运行环境

项目	要求
操作系统	64 位 Windows 10 或 Windows 11
磁盘空间	安装后约 1.1 GB
显示	推荐分辨率 1920×1080 及以上
安装权限	可为所有用户安装（需管理员权限），也可选择仅为当前用户安装
可选外部软件	调用外部软件求解或生成其格式的计算书时，需要本机安装相应软件（GeoStudio、Rocscience Slide2 / RS2、PLAXIS LE 等，见 第 14 章）；计算书的 Word 后台排版与 PDF 转换优先使用本机的 Word 或 WPS

第 2 章　工程管理与二维建模

二维建模是各类分析的共同起点：几何、材料、地下水、荷载与支护在同一个工程里只定义一次，极限平衡、有限元、渗流、温度、动力等分析都从这里取模型。本章介绍工程与场景的管理、主界面与各停靠面板、几何的绘制与编辑、边坡 / 基坑 / 隧道三个参数化向导、脚本建模，以及地下水、弱层 / 结构面、荷载与支护的定义。材料与参数见 第 3 章。

2.1　工程文件、起始页与自动保存



图 2-1　起始页：新建、打开、最近打开的工程与随包示例工程

- **起始页**：启动后显示，提供“新建工程…”“打开工程…”“直接开始（空白二维工程）”三个入口，并列出最近打开的工程与随包示例工程；有可恢复的自动保存文件时另列“恢复上次未保存的工作”。去掉“启动时显示此页”后，可从「帮助 → 起始页」随时打开。
- **随包示例**：均质坝体稳态渗流、承压矩形解析校核、边坡稳定干坡与高水位对比、均质边坡有限元强度折减、6 m 基坑分步开挖与钢支撑，共 5 个，覆盖渗流、极限平衡、强度折减与施工阶段分析；打开示例时先复制到用户目录，原件不改动。
- **新建工程**：输入工程名称即可创建二维工程。软件采用 kN·m 单位制（长度 m、力 kN、应力 kPa、重度 kN/m³），新建工程对话框列出基本单位与推导单位对照表。
- **工程文件**：工作区文件 .iglw 保存全部场景及其分析设置与结果，是推荐格式；单工程文件 .igl（文本）与 .iglb（二进制）只保存当前场景。工作区有多个场景而另存为单工程格式时，软件先提示只保存当前场景。
- **自动保存与恢复**：工程有未保存的改动时，每 5 分钟把整个工作区写成一份恢复文件，存放在当前用户的应用数据目录中，不覆盖用户自己的工程文件；正常保存后恢复文件自动

删除。程序异常退出后，下次启动在起始页选择恢复。自动保存可在「文件」菜单中开关。

- **最近打开：**「文件 → 最近打开」与起始页列出最近打开的 10 个工程，可一键清空。

2.2 多场景工作区与求解管理器



图 2-2 （左）场景面板：当前场景加粗，已求解的场景显示安全系数；（右）求解管理器：每个场景一行

- **场景：**一个工作区可包含多个相互独立的场景，每个场景有自己的几何、材料、支护、分析设置与计算结果，切换场景时自动恢复该场景的设置与结果，适合天然 / 暴雨 / 地震等工况或不同支护方案的比选。
- **场景操作：**场景面板的工具按钮与右键菜单提供新建空白场景、复制为独立副本、重命名、删除与切换；复制得到的场景与源场景完全独立。工作区至少保留一个场景。
- **求解管理器：**工作区的每个场景占一行，列出该场景当前分析的名称与状态（未求解、已求解及安全系数）。勾选要计算的场景后点“开始”逐个求解，某个场景无法求解时记为跳过并继续下一个；“终止”停止当前求解，“⟳”刷新状态。求解按各场景当前分析的类型进行：极限平衡、应力-变形分析链、渗流、温度、组分运移或孔隙气体流动。

2.3 主界面与停靠面板

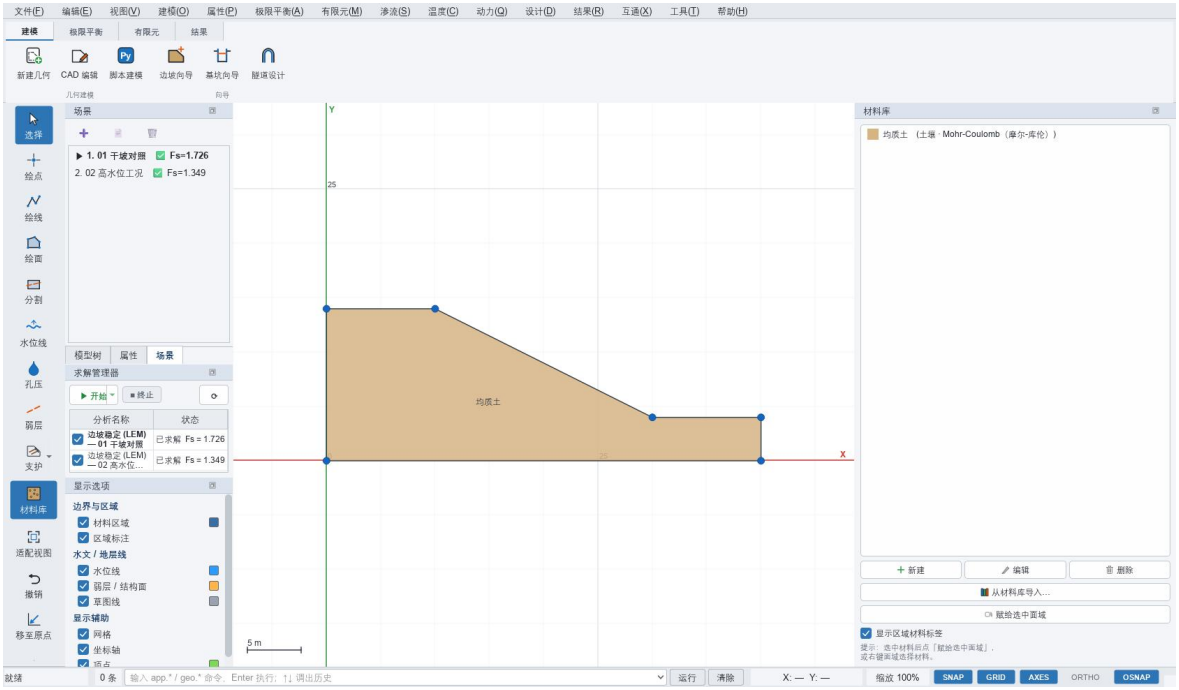


图 2-3 建模工作区：功能区“建模”页、左侧绘图工具板、模型树与求解管理器、二维画布、材料库面板与状态栏

- **功能区**：“建模”“极限平衡”“有限元”“结果”四页按工作流排列命令。“建模”页的“几何建模”组有新建几何、CAD 编辑、脚本建模，“向导”组有边坡向导、基坑向导、隧道设计。切换到“结果”页即进入结果工作区，几何锁定，点“返回建模”恢复编辑。
- **绘图工具板**：选择、绘点、绘线、绘面、分割、水位线、孔压、弱层、支护、材料库、适配视图、撤销、移至原点等，均为单击即用的大图标。
- **模型树**：按几何体、线要素、支护、材料库、荷载、边界条件、网格、分析八类列出工程对象，顶部可按名称搜索；单击对象即在画布上高亮并在属性面板显示其属性。分类节点的右键菜单直接添加该类对象（如“支护”节点可添加支护、支护组，定义与分配支护属性），对象节点可重命名、删除，成组布置的支护归在各自的组下。
- **属性面板**：显示选中对象的属性，名称、面域材料、点坐标、线要素类型可直接修改；支护显示所用的支护属性与单位宽度设计力，面域显示面积与顶点坐标，并可打开顶点坐标表。
- **显示选项**：按“边界与区域”“水文 / 地层线”“显示辅助”三组控制材料区域、区域标注、水位线、弱层 / 结构面、草图线、网格、坐标轴、顶点的显示。
- **其他面板**：求解管理器、场景、材料库、后处理、Python 控制台、实时脚本预览、脚本建模、模型诊断、建模向导、参数建议与规范检索、AI 建模助手、远程脚本服务器等面板均可停靠、浮动、隐藏，F4～F12 一键开关，「视图 → 重置面板布局」恢复默认布局。

- **状态栏**：显示操作提示、光标坐标与缩放比例；SNAP（网格捕捉）、GRID（显示网格）、AXES（显示坐标轴）、ORTHO（正交）、OSNAP（对象捕捉）开关；命令栏可直接输入并执行 app.*、geo.* 脚本命令，↑↓ 调出历史。
- **主题**：「视图 → 暗色主题 / 亮色主题」切换，停靠面板、对话框与功能区图标一起切换，所选主题在下次启动时恢复（图 2-5）。



图 2-4　（左）模型树：几何体、线要素、成组的支护、材料与荷载；（右）属性面板：选中支护时显示其支护属性与参数

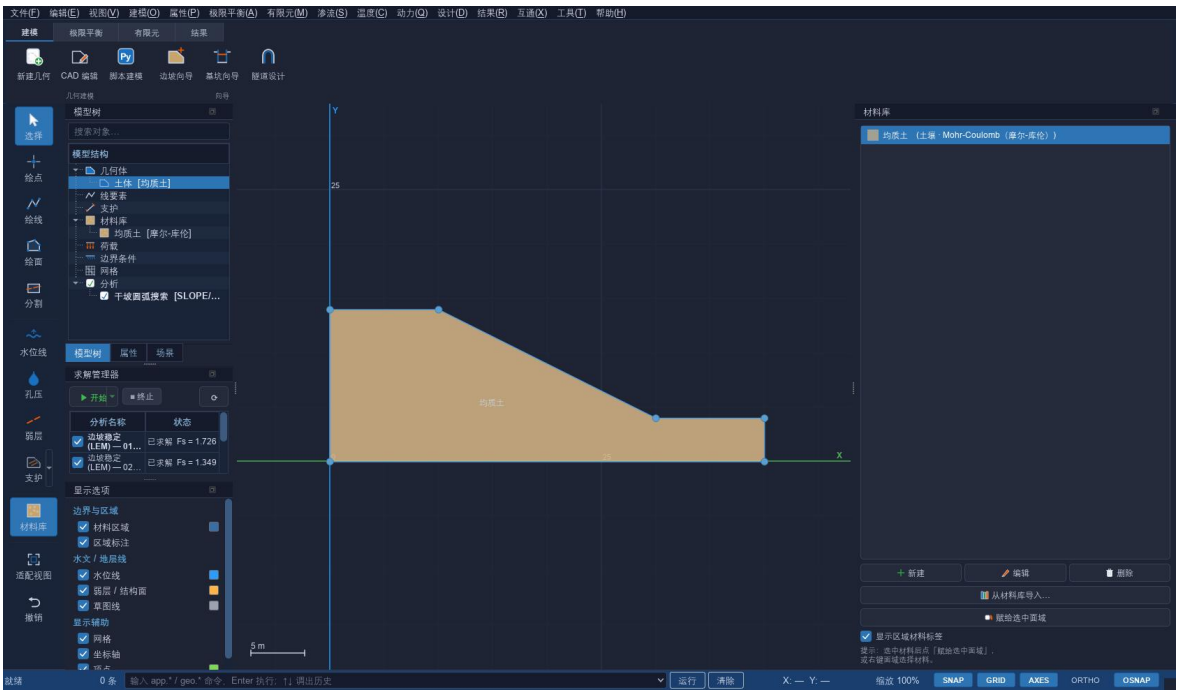


图 2-5　暗色主题下的建模工作区

2.4 几何绘制与编辑

- **绘制工具**：绘点、绘线、绘面、分割四个工具，鼠标在画布上时按 P、L、F、X 即可切换，Esc 取消正在进行的绘制并回到选择工具。绘面时逐点单击，单击首点、双击、按 Enter 或右键闭合成面域；绘线时双击、Enter 或右键结束。
- **捕捉**：对象捕捉依次捕捉已有端点、边与线段的中点、边上的最近点，网格捕捉落在随缩放自动调整间距的网格点上；画布以方框、三角、圆形标出当前捕捉的类型。
- **精确坐标输入**：绘制时直接键入数字即弹出坐标输入框，可输入绝对坐标 x,y、相对上一点的增量 @dx,dy、极坐标 长度<角度 与相对极坐标 @长度<角度，连续回车逐点录入。
- **区域与材料分界**：在已有模型内部再画一个面域时，软件自动把它与原区域划分开（原区域扣除新区域，形成互不重叠的分区）；“分割”工具画一条直线穿过面域即把面域一分为二，两侧子区域沿用原区域的材料，分割线保存为可选择的线。
- **编辑**：选择工具可点选、框选（向右拖为完全包含、向左拖为相交即选）点、线、面，拖动点即移动顶点并同步更新相邻区域；双击点或在属性面板中修改坐标；右键菜单提供编辑坐标表、重命名、设置线型、指定材料、删除，以及“全部 / 仅选择点 / 仅选择线 / 仅选择面”四种选择模式。
- **坐标表**：面域、水位线、弱层等对象的顶点以“#、X、Y”表格编辑，可增、插、删、上移、下移行，可框选后与 Excel 等电子表格互相复制粘贴坐标。
- **整体移动**：「编辑 → 移动整个模型」把模型平移到指定坐标或按偏移量平移，「编辑 → 移动到原点」把模型左下角移到 (0, 0)。
- **撤销与重做**：Ctrl+Z / Ctrl+Y 先撤销画布上的几何改动，再撤销命令历史中的操作（如新建材料）。
- **计算前的区域检查**：运行极限平衡、多工况分析或有限元网格划分前，软件检查区域边界自相交、区域重叠、区域未赋材料等问题，有错误时列出问题与位置并由用户决定是否继续。

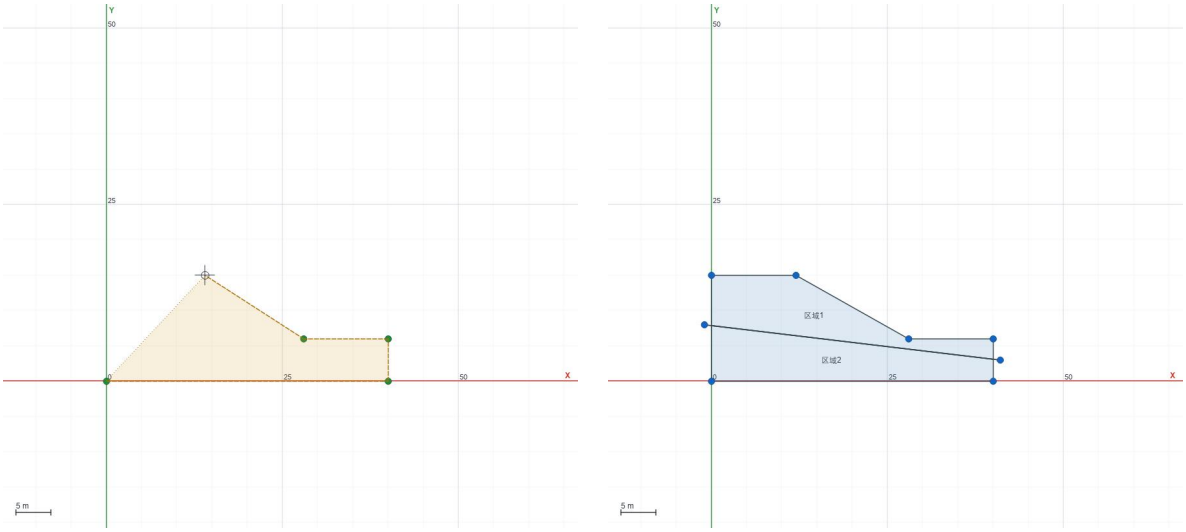


图 2-6 （左）绘面：逐点单击，虚线为待闭合的边；（右）用“分割”画一条材料分界线把外部边界分成两个区域

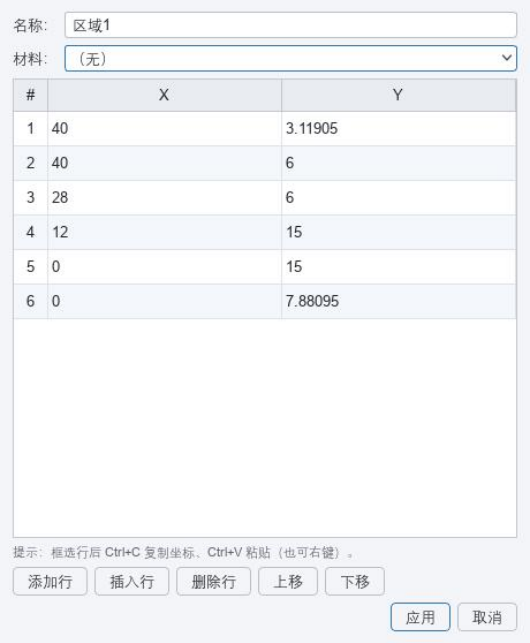


图 2-7 面域的坐标表：一行一个顶点，可与电子表格互相复制粘贴

2.5 参数化建模向导

三个向导按参数生成完整的二维模型，生成后是普通的几何对象，可继续编辑。基坑向导与隧道设计还同时生成施工阶段，并自动建立“原位应力 → 各施工阶段”的应力-变形分析链。

- **边坡向导**：坡形可选 Simple（单坡）、Bench-1～Bench-3（二至四级坡，含马道）、Open-Pit（露天矿台阶边坡，可设台阶数、台阶宽、坡道数与坡道宽）与 Dam（梯形坝体）；各坡段的坡高、坡角与水平投影三者联动，可左右翻转坡向；给定一种材料的 c、φ、γ，生成外部边界并赋材料，右侧为带尺寸标注的剖面示意。
- **基坑向导**：支护形式有放坡开挖、土钉墙、悬臂式排桩、排桩＋内支撑、排桩＋锚索（桩锚）、地下连续墙＋内支撑六种；可设开挖深度、坑底宽度、嵌固深度、桩径 / 墙厚与桩间距，放坡级数、坡比与马道，土钉排距、长度、倾角与水平间距，逐道支撑或锚索（钢筋混凝土支撑、钢管支撑、预应力锚索，含深度、预加力、水平间距、总长、锚固段与倾角），多个土层（γ、c、φ、E、ν），坑内外水位、地表超载与模型范围。施工阶段按“先撑后挖”自动排定，并内置 5 个典型基坑模板。
- **隧道设计**：断面可选三心圆马蹄形、直墙拱、圆形、矩形；工法有全断面法、台阶法、三台阶法、CD 法、CRD 法、双侧壁导坑法、盾构法与 TBM 法，右侧预览按开挖顺序着色并编号；支护体系包括初期支护、二次衬砌、系统锚杆（长度、环向与纵向间距、布置范围）与超前小导管 / 管棚的等效加固圈；可设覆土厚度、地层与地下水、模型范围，内置 6

个典型隧道模板。生成的分析链中开挖后先释放 60% 的不平衡力，其余在施作初期支护后释放。

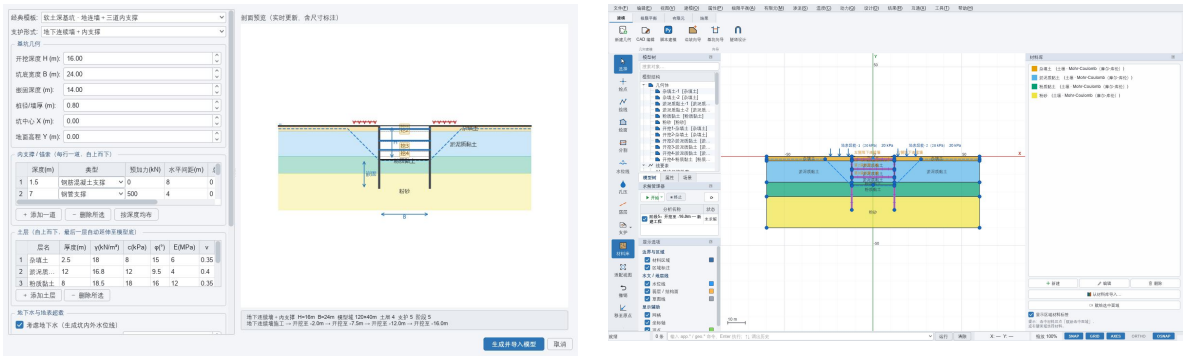


图 2-8 （左）基坑向导：地下连续墙＋三道内支撑模板；（右）生成的模型：分层土体、分步开挖块、围护墙、支撑、水位线与地表超载

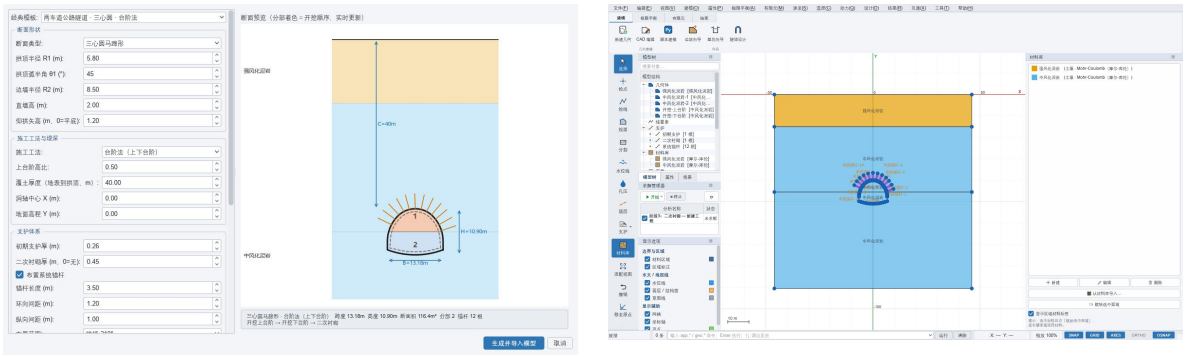


图 2-9 （左）隧道设计：三心圆断面、台阶法；（右）生成的地层、上下台阶开挖块、初期支护、二次衬砌与 12 根系统锚杆

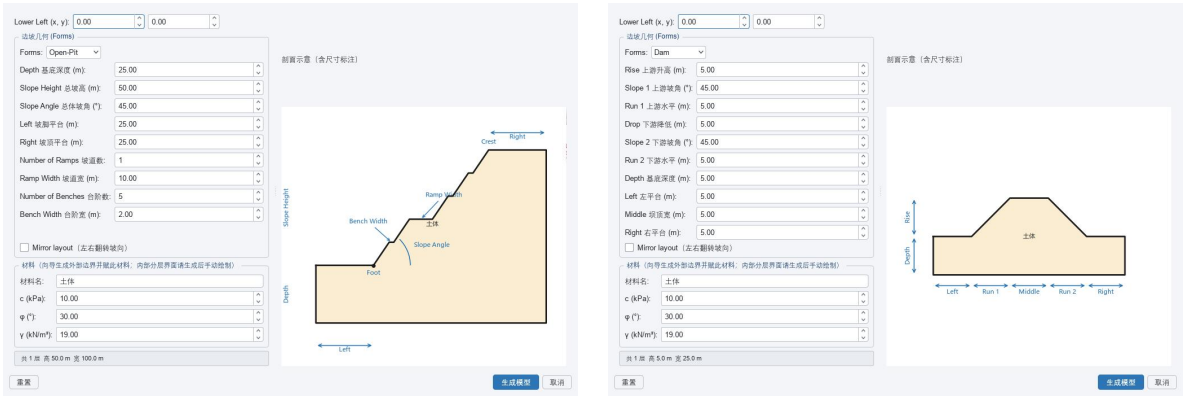


图 2-10 （左）边坡向导：Open-Pit 坡形；（右）边坡向导：Dam 坡形

2.6 脚本建模

- **脚本建模**（功能区“脚本建模”或 F4）：在面板中编写 Python 脚本，用 geo 对象添加点、折线、面域，平移、缩放、移至原点，Ctrl+Enter 运行，结果立即显示在画布上；内置简单边坡、水平层状地层、基坑开挖等模板。画布上的绘制操作同时以命令形式追加到编辑器

中，便于整理成可复用的建模脚本。脚本接口的完整说明见 第 15 章；把几何导出到外部 CAD 程序中编辑的方法见 第 13 章。

2.7 地下水、弱层 / 结构面与荷载

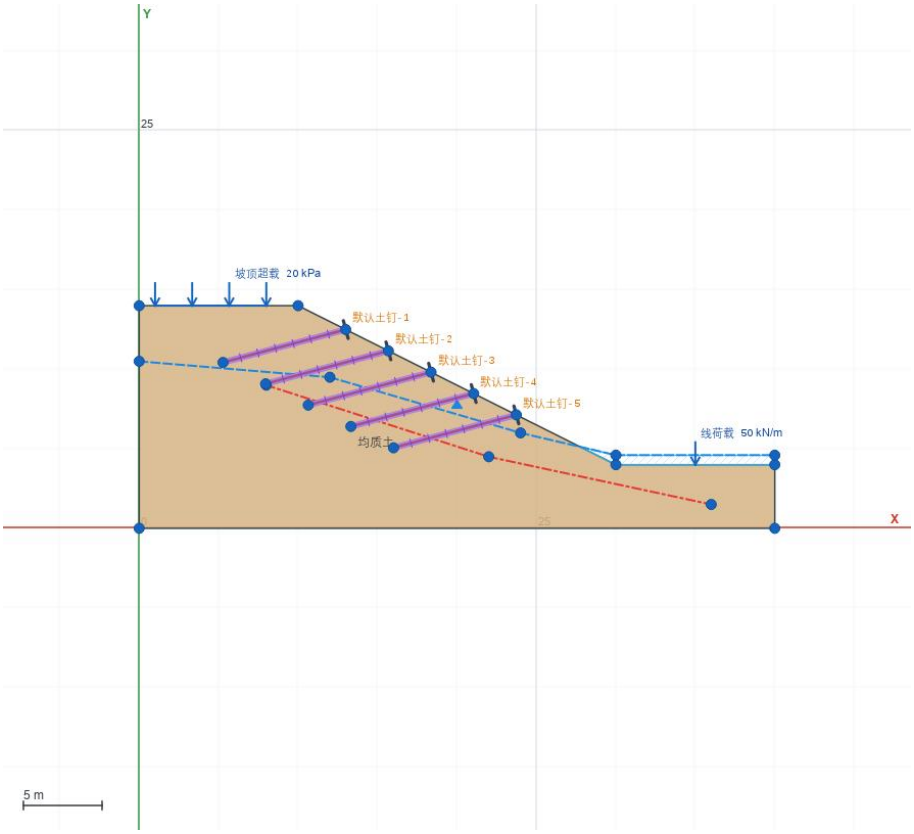


图 2-11 示例边坡上布置的水位线（蓝色虚线）、弱层（红色点划线）、坡顶分布荷载、坡脚线荷载与一组土钉

- **水位线**：用“水位线”工具从左到右逐点绘制，双击或 Enter 结束。工程的第一条水位线是工程水位线；其余水位线可在材料中作为该材料的测压线（“指定水位线”）。水位线高于地表的部分表示坡外积水，画布上以斜线填充显示。
- **孔压的取法**：每种材料可选按工程设置（有渗流分析时取渗流结果，否则取工程水位线）、指定水位线、孔压系数 ru 或不计孔压；水位线给出的孔压可乘系数 Hu，Hu 可取常数或自动取 $\cos^2\alpha$（浸润线修正）。
- **孔压预览**：工具板“孔压”按钮在建模视图上叠加孔隙水压力云图，检查水位线与材料设置是否合理。
- **弱层 / 结构面**：绘制前选择已有材料，或直接填写 c、φ 新建弱层材料；弱层是绑定材料的折线，极限平衡搜索滑动面时沿弱层生成复合滑面。
- **分布荷载与线荷载**：在对话框中给出名称、方向（竖直向下、水平向右、垂直坡面、指定角度）与荷载值（分布荷载为起点、终点强度，可线性变化），确定后在地表上单击作用位置；右键可编辑属性、重新选择位置或删除。

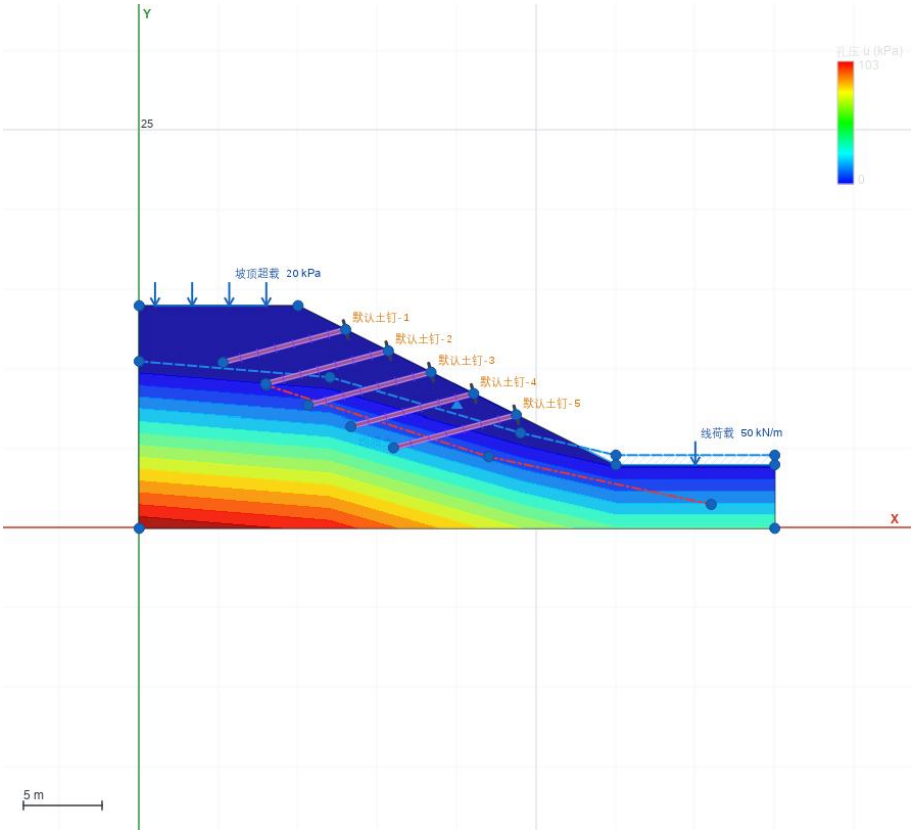


图 2-12　建模视图叠加的孔隙水压力云图

2.8　支护与支护组

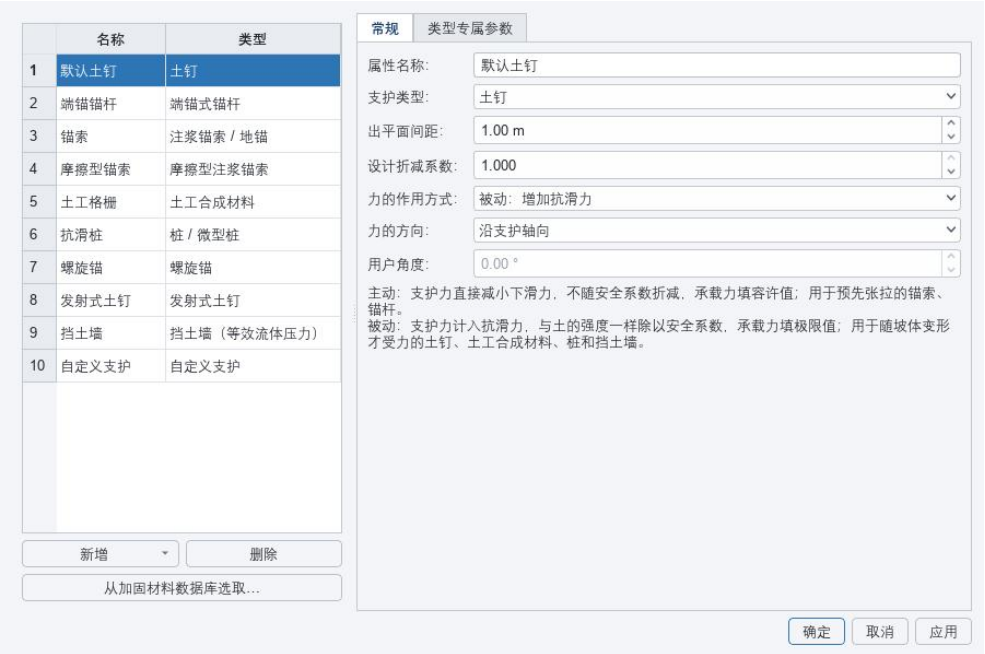


图 2-13　定义支护属性：左侧为工程中的支护属性，右侧为“常规”与“类型专属参数”两页

- **支护类型**：极限平衡可用的支护有端锚式锚杆、注浆锚索 / 地锚、摩擦型注浆锚索、土钉、土工合成材料、桩 / 微型桩、螺旋锚、发射式土钉、挡土墙（等效流体压力）与自定义支护十种。
- **支护属性**：每种属性给出出平面间距、设计折减系数、力的作用方式（主动：减小驱动力；被动：增加抗滑力）、力的方向（沿滑面切向、沿支护轴向、两者的角平分线、水平或指定角度）以及各类型专属的参数，如拉伸 / 托盘 / 剪切 / 压缩承载力、粘结强度与锚固长度、土工合成材料的条带覆盖率与界面强度、桩的横向破坏模式、螺旋锚的叶片参数、挡土墙的压力图、自定义支护的距离—承载力曲线。属性可从加固材料数据库按产品生成（第 3 章）。
- **布置**：“添加支护”先单击坡面端（锚头）再单击嵌固端，可连续布置多根；“添加支护组”按间距或根数沿边界等距布置一组支护，支护长度与方向（与水平面的夹角、垂直于坡面、水平、竖直向下）一次给定，第一次单击后移动鼠标即预览整组。
- **编辑**：支护的右键菜单可编辑单根或整组的属性、长度与方向，把支护组拆分为单根，或删除；「属性 → 分配支护属性」以表格批量改各支护所用的属性。
- 地下连续墙、排桩、内支撑与衬砌等有限元结构构件在“定义支护属性”中只列出，截面与刚度在有限元的支护结构参数中设置，详见 第 5 章。

2.9 项目设置



图 2-14　项目设置（极限平衡分析）的“常规”页

「编辑 → 项目设置」（与「极限平衡 → 项目设置」相同）集中设置极限平衡分析的工程级参数，随场景保存：

- **常规**：滑动方向（自动判别、向左下滑动、向右下滑动）；拟静力地震作用（水平与竖向地震系数、地震惯性力沿高度不变或按土石坝动态分布系数、地震力作用于条块形心或条底）；条底受拉的处理与不平衡推力法的设计安全系数；求解器（内置 GLE 引擎，或调用本机已安装的 Slide 6、GeoStudio SLOPE/W）。
- **方法**：勾选参与计算的竖直条分法（Fellenius、Bishop 简化法、Janbu 简化法、Spencer 法、Morgenstern-Price 法、不平衡推力法、Corps of Engineers #1 / #2、Lowe-Karafiath 法、Sarma 法）并指定主方法，或改用 Sarma 非垂直条分法。
- **地下水**：快速降水分析的开关、方法与降水后水位。

各项的计算含义见 第 4 章。

第 3 章　材料与参数

一种材料同时承载极限平衡与有限元两套参数：极限平衡按所选的强度类型取抗剪强度，有限元按本构模型取刚度与强度，孔压取法、快速降水、暴雨工况、应变软化等专项参数也集中在同一个材料对话框中。本章列出材料库面板、材料对话框、可用的强度类型与本构模型、水力与热学等属性的入口、岩土材料库与加固材料数据库。各强度准则与本构模型的公式与原理见用户手册的相应章节。

3.1　材料库面板

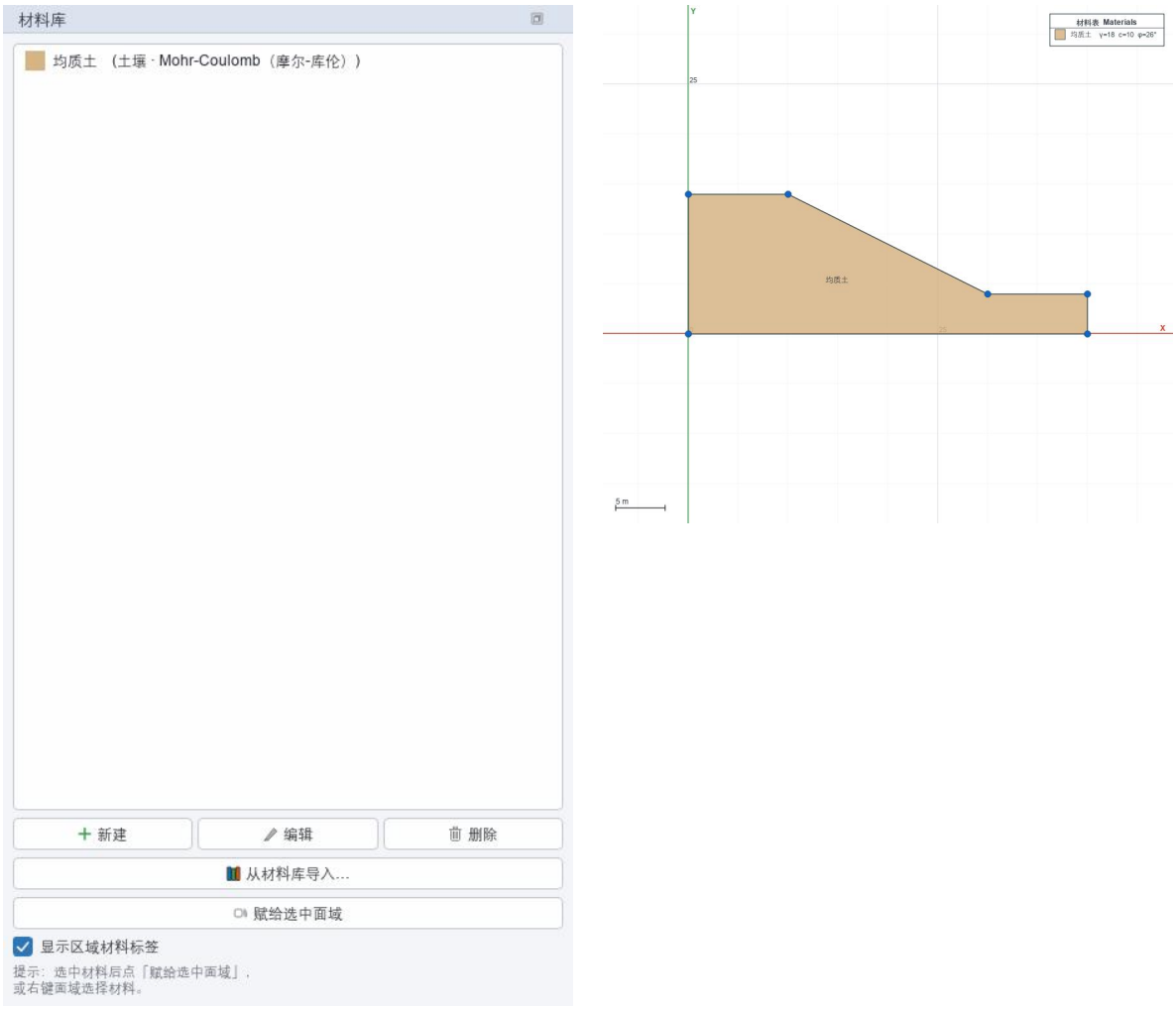


图 3-1　（左）材料库面板；（右）画布右上角的材料表（图例）

- 进入二维建模时材料库面板缺省显示在窗口右侧，也可由工具板“材料库”按钮、「属性 → 材料库」或「视图 → 材料库面板」打开。列表以颜色块、名称、材料类别与强度类型列出工程中的全部材料，双击即编辑。
- 面板按钮：“新建”“编辑”“删除”“从材料库导入…”“赋给选中面域”；未选中材料时编辑、删除与赋材料按钮置灰。删除仍被面域使用的材料时，软件先提示受影响的面域数量。

- 赋材料的三种方式：选中面域后点“赋给选中面域”；在画布上右键面域，从“指定材料”子菜单中选择（也可清除材料）；在属性面板的“材料”下拉框中选择。
- 新建材料按 16 色调色板自动配色，颜色可在对话框中修改；画布分区、结果图与计算书统一使用材料颜色。
- 显示辅助：“显示区域材料标签”在各区域形心标出材料名；「视图 → 材料表 / 图例」在画布右上角列出各材料的颜色与主要参数。
- 新建材料进入命令流，可撤销，也可在宏与命令流中回放。

3.2 材料对话框



图 3-2 （左）材料对话框上部：类别、强度类型、重度、颜色与强度参数；（右）本构模型选硬化土时显示的硬化土参数

材料对话框自上而下分为以下几组，参数区可滚动，随所选的强度类型、本构模型与排水类型只显示适用的输入：

- **基本信息**：名称、材料类别（土壤、岩石、节理、各向异性）、强度类型（随类别变化）、重度 γ（kN/m³）、颜色。
- **强度参数**：随强度类型变化，见 表 3-1。
- **快速降水（极限平衡）**：Mohr-Coulomb 土与岩可设“降水期间不排水（低渗透性材料）”，并给出不排水强度包线（R 包线的 c_R、φ_R，或 Kc = 1 包线的 d、ψ）与孔压系数 $\bar{B}$。
- **孔隙水压力（极限平衡）**：孔压取法（按工程设置、指定水位线、孔压系数 ru、不计孔压）与水位线孔压的系数 Hu（常数，或自动取 $\cos^2\alpha$ 的浸润线修正）。
- **有限元变形参数（FEM）**：本构模型、弹性模量 E、泊松比 ν、剪胀角 ψ、抗拉强度（Rankine 抗拉截断，可关闭）、排水类型、静止侧压力系数 K0（缺省 1 − sinφ）、渗透系数 k。
- **应变软化（残余强度）**：Mohr-Coulomb 与 Hoek-Brown 材料可让强度随累计塑性剪应变从峰值线性降到残余值，残余参数随强度类型与排水类型变化（c、φ、ψ，不排水强度 su，残余 GSI 或 mb、s、a），并给出达到残余强度时的塑性剪应变。
- **本构模型专属参数**：硬化土、小应变硬化土、修正剑桥、软土蠕变、砂土液化各有一组参数，见 表 3-2。
- **饱和（暴雨）工况参数**：多工况极限平衡用的饱和重度 γsat、饱和黏聚力 c_sat、饱和内摩擦角 φ_sat，不填即同天然值；非饱和强度角 φb 使渗流结果中潜水面以上的基质吸力贡献 s·tanφb 的表观黏聚力。
- **输入检查**：确定时检查剪胀角不大于摩擦角、φb 不大于 φ′、残余强度不高于峰值、修正剑桥与软土蠕变的回弹指数小于压缩指数、UBC3D-PLM 的 φ 不小于 φcv 等，不合理时给出提示。

3.3 极限平衡强度类型

表 3-1 极限平衡可用的强度类型

材料类别	强度类型	参数
土壤	Mohr-Coulomb（摩尔-库伦）	黏聚力 c、内摩擦角 φ
土壤	不排水强度（Su）	Su 分布（常数、自土层顶面随深度增长、自基准高程随深度增长）、Su、Su 增长率、基准高程、Su 截断值
土壤	无强度（液体/空区）	无，用于水体或开挖空区
土壤	幂函数	τ = a·(σn′ + d)^b + c 的系数 a、指数 b、常数 c、法向应力平移 d
岩石	广义 Hoek-Brown	完整岩石单轴抗压强度 σci、地质强度指标 GSI、完整岩石常数 mi、扰动系数 D
岩	Hoek-Brown（mb,s,a 直接输入）	σci、mb、s、a

材料类别	强度类型	参数
石		
岩石	Mohr-Coulomb（岩石）	c、φ
节理	Barton-Bandis	节理粗糙度系数 JRC、节理壁抗压强度 JCS、残余摩擦角 φr、法向刚度 kn、切向刚度 ks
节理	Mohr-Coulomb（节理）	节理黏聚力 c、节理摩擦角 φ、kn、ks
各向异性	各向异性强度	平面方向 c1、φ1，其它方向 c2、φ2，各向异性面倾角
各向异性	广义各向异性	基体 c、φ，弱面 c、φ，弱面倾角 A，过渡角范围

非线性强度（广义 Hoek-Brown、Hoek-Brown、幂函数、Barton-Bandis）在条分法中按条底有效法向应力取强度包线的切线强度；各向异性强度按条底方向取值。各类型的计算方法见 第 4 章。





图 3-3 （左）岩石 • 广义 Hoek-Brown 的强度参数；（右）不排水强度自土层顶面随深度增长





图 3-4 （左）节理 • Barton-Bandis 的强度参数与法向、切向刚度；（右）各向异性强度：平面方向与其它方向的 c、ϕ 及各向异性面倾角

3.4 有限元本构模型

表 3-2 有限元本构模型与主要参数

本构模型	主要参数（除 E、ν 等通用参数外）	适用
Mohr-Coulomb（理想弹塑性）	强度取强度类型的 c、φ；剪胀角 ψ、抗拉强度	一般土体与岩体
硬化土 HS	割线模量 E50ref、切线固结模量 Eoedref、卸载再加载模量 Eurref、应力相关幂 m、参考压力 pref、卸载泊松比 νur、破坏比 Rf、正常固结 K0nc、OCR、POP	刚度随应力与应力路径变化的土体，基坑开挖
小应变硬化土 HSsmall	硬化土参数，另加小应变剪切模量 G0ref、剪应变 γ0.7	计入小应变刚度的开挖变形分析
修正剑桥 MCC	压缩指数 λ、回弹指数 κ、临界状态应力比 M（可由 φ 换算）、初始孔隙比 e0、K0nc、OCR、POP	软黏土的固结沉降

本构模型	主要参数（除 E、ν 等通用参数外）	适用
软土蠕变 SSC	修正压缩指数 λ*、修正回弹指数 κ*、修正蠕变指数 μ*、νur、参考面形状参数 M、K0nc、OCR、POP	软土的长期变形与次固结
砂土液化 UBC3D-PLM	标贯击数 (N1)60、常体积内摩擦角 φcv、模量系数 kG、kB、kp（可由 (N1)60 换算）、指数 me、ne、np、pref、Rf、致密化系数、液化后刚度下限	饱和砂土的动力液化
线弹性	E、ν	弹性计算、结构性材料

- **广义 Hoek-Brown**：强度类型为广义 Hoek-Brown 或 Hoek-Brown、本构模型不是线弹性时，应力分析按广义 Hoek-Brown 岩体计算。
- **排水类型**：排水、不排水 A（有效刚度与有效强度，加载产生超孔压）、不排水 B（有效刚度，强度取不排水抗剪强度 su）、不排水 C（总应力分析，模量为不排水模量 Eu）；不排水 B、C 的 su 可随深度线性增长。硬化土、修正剑桥、软土蠕变、UBC3D-PLM 与 Hoek-Brown 只能选排水或不排水 A。
- **应变软化**：Mohr-Coulomb 与 Hoek-Brown 可设残余强度，应力-变形分析与强度折减中强度随塑性剪应变下降。



图 3-5　应变软化组：勾选后给出残余黏聚力、残余内摩擦角、残余剪胀角与残余塑性剪应变

3.5　水力、热学与其他属性的入口

- **渗透系数**：材料对话框中的渗透系数 k（m/s）是渗流分析的缺省值；各向异性渗透系数与土水特征曲线在「渗流 → 水力属性」中设置。
- **热学属性**：导热系数、体积热容、体积热源、线膨胀系数在「温度 → 热学属性」中设置。
- **组分运移与孔隙气体**：弥散度、分子扩散系数、吸附与衰减参数在「渗流 → 组分运移 → 组分运移参数」中设置，孔隙气体的内在渗透率在「渗流 → 孔隙气体 → 孔隙气参数」中设置。
- **试验标定写回**：在「属性 → 岩土计算实验室」中标定的本构参数可写回工程材料，见 第 10 章。

3.6 岩土材料库

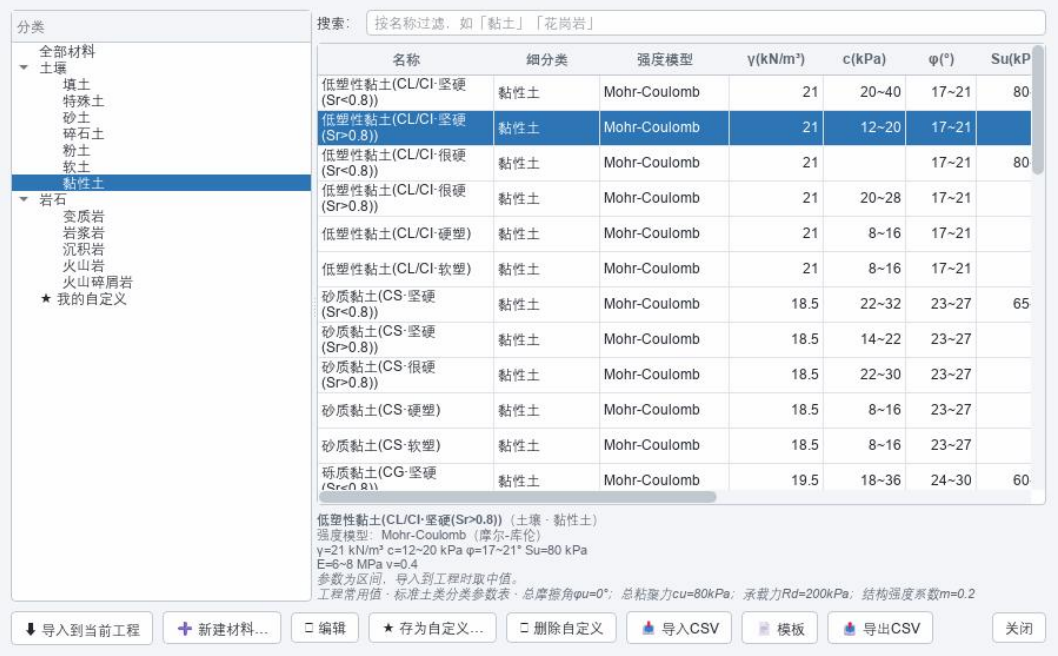


图 3-6 岩土材料库：按分类浏览常用材料的典型参数，下方为所选材料的详情

材料库面板的“从材料库导入…”打开岩土材料库：

- 左侧分类树分土壤（填土、特殊土、砂土、碎石土、粉土、软土、黏性土）、岩石（变质岩、岩浆岩、沉积岩、火山岩、火山碎屑岩）与“我的自定义”；上方可按名称搜索。
- 表格列出名称、细分类、强度模型、γ、c、φ、Su、UCS、mi、GSI、E、ν、k、e、来源与是否自定义；选中后下方显示详情。参数为区间的材料导入工程时取区间中值。
- 按钮：导入到当前工程、新建材料、编辑、存为自定义（把当前工程中的材料存入库，供其他工程使用）、删除自定义、导入 CSV、生成 CSV 模板、导出 CSV。

3.7 加固材料数据库

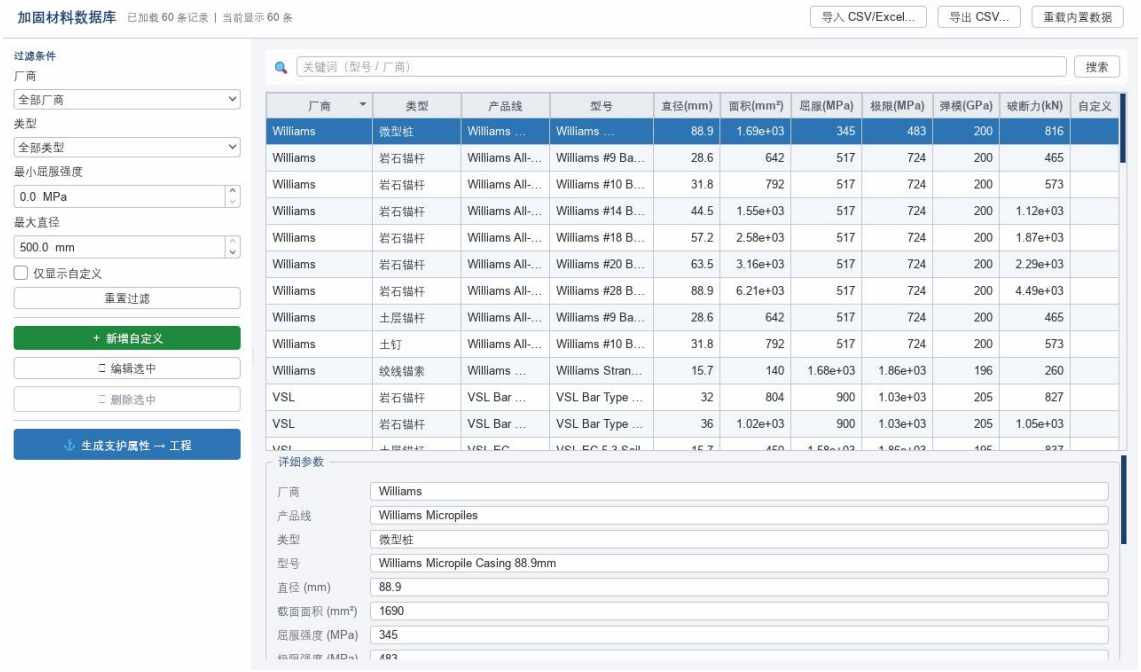


图 3-7 加固材料数据库：按厂商、类型、屈服强度与直径筛选，下方为所选产品的详细参数

「属性 → 加固材料数据库」（也可从“定义支护属性”的“从加固材料数据库选取...”打开）收录锚杆、锚索、土钉与微型桩产品的截面与强度参数：

- 内置 60 条记录，类型分岩石锚杆、土层锚杆、绞线锚索、土钉、微型桩与自定义，字段包括厂商、产品线、型号、直径、截面积、屈服强度、极限强度、弹性模量、破断力等。
- 可按厂商、类型、最小屈服强度、最大直径筛选，按型号或厂商关键词搜索，或只显示自定义记录。
- 可新增、编辑、删除自定义记录，导入 CSV / Excel、导出 CSV，或重载内置数据。
- “生成支护属性 → 工程”把选中的产品转换为当前工程的支护属性：锚杆与锚索生成注浆锚索 / 地锚，土钉生成土钉，微型桩生成桩 / 微型桩（横向剪切），抗拉承载力由产品的屈服荷载与破断荷载推算；生成后可在“定义支护属性”中继续调整，并直接用于布置支护。

第 4 章　极限平衡边坡稳定分析

极限平衡模块用于自然斜坡与工程边坡（路堑、路堤、基坑放坡、坝坡、库岸、排土场与采场边坡等）的二维整体稳定性评价：在建好的剖面模型上设定条分方法与滑动面搜索方式，软件自动搜索临界滑动面，给出各方法的安全系数 Fs、条块受力与沿滑面的应力分布，并可按 GB 50330-2013 生成边坡稳定性计算书。土层、岩体、软弱夹层与结构面可在同一剖面中共存，各区域独立指定强度类型；孔隙水压力可取自水位线、按材料指定的孔压系数，或取自渗流、应力—变形分析的结果；拟静力地震、坡面荷载、支护与快速降水均可计入。求解器由软件自带，不需要第三方程序。

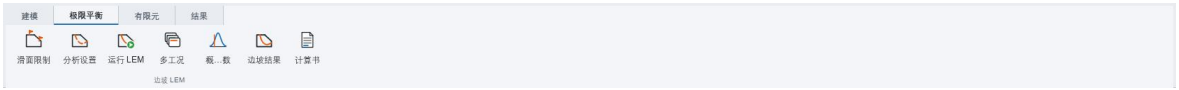


图 4-1　功能区“极限平衡”页

4.1　适用对象与技术特点

- **适用对象**：土质边坡、岩质边坡与土岩组合边坡；含软弱夹层、结构面或基岩顶面控制滑动的边坡；库岸与坝坡的水位变化（含快速降水）；地震区边坡与土石坝坝坡（拟静力法）；锚杆、锚索、土钉、抗滑桩、土工格栅等加固后的边坡；基坑放坡与有支护基坑的整体稳定（墙、桩按不可剪断构件计）。
- **多方法同时求解**：一次求解同时得到 Fellenius、Bishop、Janbu、Spencer、Morgenstern-Price、Corps of Engineers、Lowe-Karafiath、Sarma、不平衡推力法等的结果，各方法在同一批候选滑面上计算，便于按规范或工程习惯选用并相互校核。
- **任意形状滑面的严格力矩平衡**：力矩平衡对拟合圆心取矩并保留条底法向力的力矩，非圆弧、复合滑面同样严格；条块在材料界面、水位线、荷载端点与滑面拐点处自动断条，条块重量按层界与水位线分段精确积分。
- **系统的搜索**：圆弧四种、非圆弧五种搜索算法，加上沿弱层的复合滑面、薄弱夹层块体滑面与沿基岩顶面的滑面，自动在搜索结果中按主方法复核有效性，报告的安全系数一定是主方法在临界面上收敛的值。
- **结果可追溯**：每个候选滑面都保存各方法的安全系数，条块信息与曲线图给出每条的全部受力，严格法给出 Fs–λ 曲线，计算书列出条块计算表与条间力。
- **与其他分析衔接**：孔压可取自渗流或应力—变形分析，剖面可按施工阶段取，安全系数可按有限元应力计算，并可与有限元强度折减结果叠加对比。

4.2　命令入口

- 「极限平衡」菜单：项目设置、滑动面选项、添加滑动面、清除自定义滑动面、滑面限制（定义限制 / 移动限制 / 重置为默认）、进入和退出范围、圆心网格与半径、运行 LEM

（Ctrl+R）、多工况分析、概率与参数研究、边坡结果视图、生成计算书（图 4-2）。“进入和退出范围”“圆心网格与半径”两项随所选搜索方法出现。

- 功能区“极限平衡”页“边坡 LEM”组：滑面限制、分析设置、运行 LEM、多工况、概率与参数、边坡结果、计算书。
- 功能区“结果”页：极限平衡结果的“滑面显示”“图层”“查看”三组命令，以及左侧“分析”树、右侧滑面列表与方法对比。
- 一个工作区可包含多个场景（如天然、高水位、加固方案），求解管理器可依次求解勾选的场景，各场景的设置与结果分别保存。



图 4-2 「极限平衡」菜单（搜索方法为“进入与退出”时）

4.3 条分方法

软件以统一的条间力框架实现各竖直条分法：给定条间力函数 f(x) 与系数 λ，由各条的竖向力平衡求条底法向力，再分别由整体力矩平衡与水平力平衡求安全系数；严格法迭代 λ 使两者相等。一次求解可同时勾选多种方法，所有方法在同一批候选滑面上计算，结果视图中随时切换比较（表 4-1）。

表 4-1 竖直条分法与非垂直条分法

方法（界面名称）	满足的平衡条件	条间力假定
Fellenius（瑞典条分）	整体力矩	不计条间力，孔压项按 $u \cdot l \cdot \cos^2\alpha$ 计
Bishop 简化法	整体力矩、各条竖向力	只计条间法向力
Janbu 简化法（未修正）	各条力平衡	只计条间法向力
Janbu 简化法（含 f_0 修正）	各条力平衡	同上，安全系数乘经验修正系数 f_0
Spencer 法	力矩与力平衡	条间合力倾角沿滑面为常数，$f(x) = 1$
Morgenstern-Price 法	力矩与力平衡	$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E$，$f(x)$ 取半正弦函数
Corps of Engineers #1	力矩与力平衡（求 λ）	$f(x)$ 取滑面两端连线的坡度
Corps of Engineers #2	力矩与力平衡（求 λ）	$f(x)$ 取各条间界面处地表的坡度

方法（界面名称）	满足的平衡条件	条间力假定
Lowe-Karafiath 法	力矩与力平衡（求 λ）	f(x) 取地表坡度与条底坡度的平均
Sarma 法（竖直条分）	力矩与力平衡	条间剪力取条间面可发挥抗剪强度的 λ 倍，同时给出临界加速度系数 Kc
不平衡推力法（ITF）	逐条力平衡	推力方向平行于上一条的条底，隐式求解，并给出设计安全系数下的剩余下滑力
Sarma 非垂直条分法	逐条力平衡	条间面可倾斜，条底与各条间面同时处于极限状态，给出 Kc

- **主方法**：搜索临界滑面、分析树、计算书、可靠度与参数研究都按主方法取值，其余勾选的方法在同一批滑面上一并计算。
- **λ 的求解**：在 λ = −0.8～1.6 的网格上扫描力矩与力平衡安全系数之差的变号区间，逐个精确求根；有多个根时按条间力的合理性（条间合力倾角不过陡、条间法向力不受拉）选根。
- **有效性检查**：条底 mα = cosα + sinα·tanφ/Fs 小于 0.2 的滑面、主方法不收敛的滑面不予采纳；条底受拉可按“不截断”（缺省）或“法向力截为 0”计算。
- **非线性强度**：条底强度按条底有效法向应力取强度包线的切线，迭代至安全系数与法向应力都不再变化，各条分法均可使用。

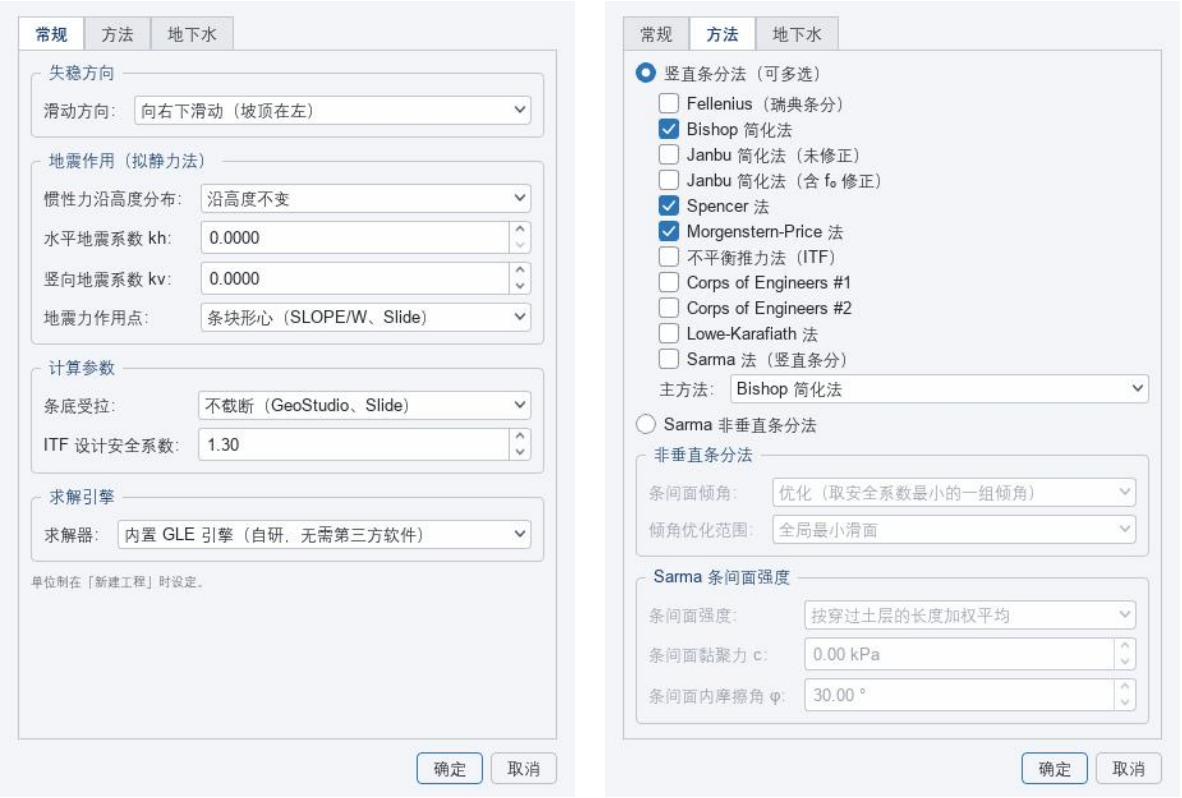


图 4-3　项目设置对话框（左）“常规”页（右）“方法”页

4.4 强度类型

材料的强度类型在材料库中选择（详见第 3 章），极限平衡按以下规则取条底强度：

- **Mohr-Coulomb**（土、岩石、节理）：$\tau f = c' + \sigma n' \cdot \tan\varphi'$。
- **不排水强度（Su）**：$\varphi = 0$；Su 可为常数，或自土层顶面、自基准高程随深度线性增长，可设截断值。
- **广义 Hoek-Brown**（σci、GSI、mi、D）与 **Hoek-Brown**（直接给 mb、s、a）：按条底有效法向应力取包线切线的瞬时 c、φ。
- **幂函数**：$\tau = a \cdot (\sigma n' + d)^{\wedge} b + c$；**Barton-Bandis**：$\tau = \sigma n' \cdot \tan[\varphi r + JRC \cdot \lg(JCS/\sigma n')]$。
- **各向异性强度**：按条底倾角 α 与各向异性面倾角 A 取 $c = c1 \cdot \cos^2(\alpha - A) + c2 \cdot \sin^2(\alpha - A)$，φ 同式。
- **无强度**：用于水体或空区；**非饱和强度角 φb**：渗流结果中的负孔压按 $s \cdot \tan\varphi b$ 计入表观黏聚力。
- **弱层 / 结构面**：条底落在弱层上时改用弱层材料的强度，搜索时自动生成沿弱层的复合滑面。

4.5 滑动面与搜索方法

滑动面形状分为圆弧、非圆弧（任意折线）与用户自定义三类，在「极限平衡 → 滑动面选项」中选择（图 4-4）。

表 4-2 临界滑动面的搜索方法

滑面形状	搜索算法	说明
圆弧	网格搜索	圆心网格（三个角点 + X、Y 增量数）× 半径；半径给范围与数量，或用半径线定义（试算圆与各半径线相切）；输出圆心 Fs 云图
圆弧	进入与退出	在坡顶侧进入区、坡脚侧退出区按增量取点，每对点生成一族过两点的圆弧，再自动加密与连续精修
圆弧	自动细化	沿坡面分段、两两分段间生成圆弧，按分段平均安全系数逐轮收缩搜索区
圆弧	自动	按坡脚、坡顶与坡高确定进出口扫描范围，扫描后多起点连续精修
非圆弧	自动（推荐）	先定位临界圆，再以差分进化全局搜索加模拟退火精修，优化圆心、半径与多个控制点的扰动
非圆弧	差分进化、布谷鸟搜索、模拟退火、粒子群	可设初始滑面顶点数、存储滑动面数量、出入口同高程、仅限凸面、搜索后局部优化；粒子群可开启多极小值模式，同时保留多个潜在破坏模式
用户自定义	—	在画布上逐点绘制或在坐标表中输入多条滑面，逐条计算、取最小者

- **沿弱层的复合滑面**：模型中定义了弱层 / 结构面时，搜索把候选滑面与弱层的交点之间替换为沿弱层的段，形成“滑面—弱层—滑面”复合面；结果只保留含连续沿弱层段的滑面。
- **薄弱夹层块体滑面**：自动识别厚度小、延伸长、强度明显低于上下土层的夹层，生成“坡脚被动楔—夹层—坡顶主动楔”的块体滑面并寻优。
- **沿基岩顶面**：试算圆弧低于模型底面的部分沿底面延伸，形成复合滑面。
- **投影角**：网格搜索与进入—退出搜索可同时启用主动端、被动端投影角，形成“直线—圆弧—直线”滑面。

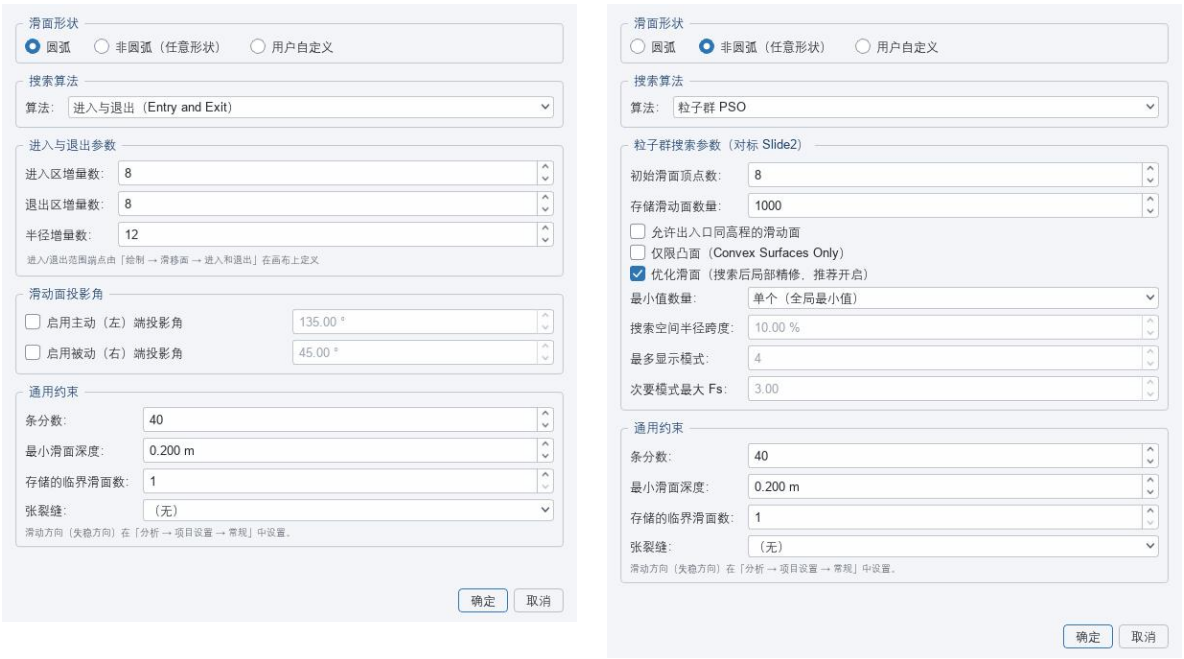


图 4-4　滑动面选项（左）圆弧 • 进入与退出（右）非圆弧 • 粒子群

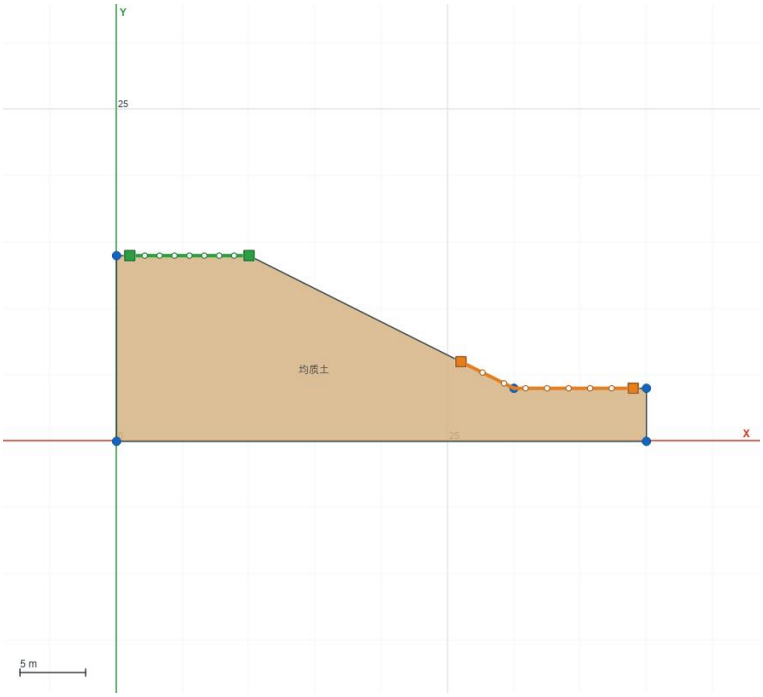


图 4-5　画布上的进入范围（绿色，坡顶侧）与退出范围（橙色，坡脚侧）

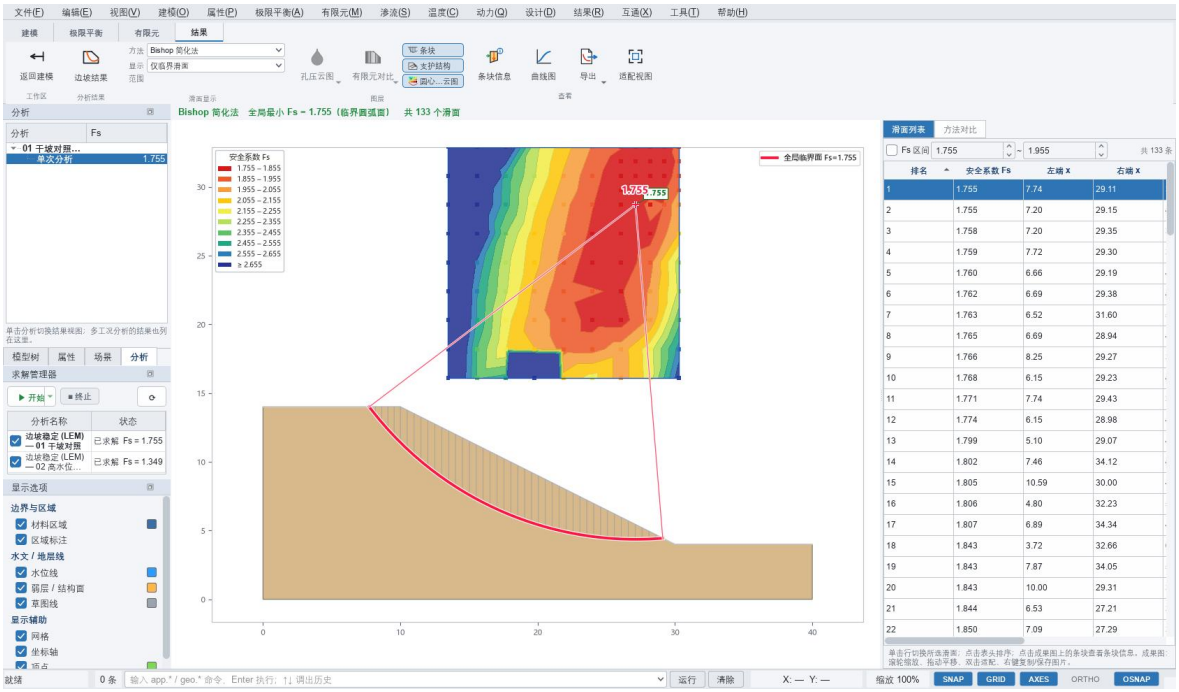


图 4-6 网格搜索结果：圆心安全系数云图与临界圆弧

4.6 滑面限制与搜索约束

- **滑面限制**：给出滑面两端与地表交点允许落在的 x 范围，所有搜索方法都按它筛选。可设一组或两组：两组时可要求滑面一端在第一组、另一端在第二组，也可两端落在两组范围内即可；可在对话框中输入，也可在画布上拖动三角标记，或一键重置为按模型几何确定的默认范围。
- **最小滑面深度**、**条分数**、**滑动方向**（自动判别、向左下或向右下）；谷形剖面（基坑、沟谷）自动判别时两个方向各搜一次，取安全系数小者。
- **不可剪断构件**：有限元中定义的墙、桩、衬砌在极限平衡中按不可剪断计，滑面只能从构件端部以外通过。
- **滑面有效性**：滑面须位于地表与模型底面之间，滑体有足够的切深与体量，并沿下坡方向滑动。

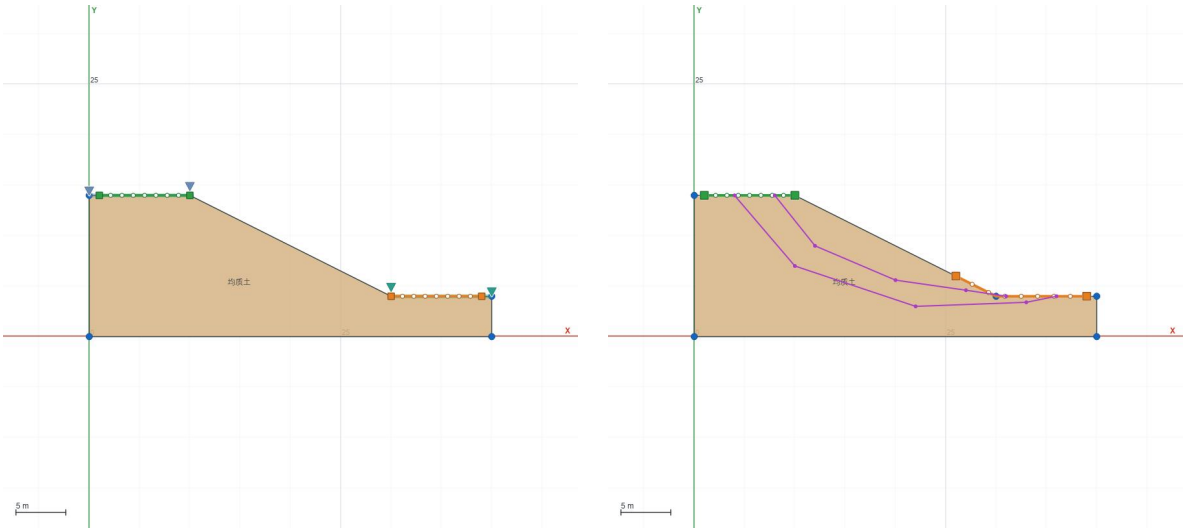


图 4-7 （左）两组滑面限制的三角标记与允许范围（右）画布上绘制的两条自定义滑面

4.7 地下水与孔隙水压力

- **水位线**：条底孔压 u = Hu·γw·hw，Hu 可取常数或自动取 cos²α（浸润线修正）；水位高出地表时，地表积水按垂直于地表的静水压力计入。
- **按材料设置**：每种材料可选按工程设置、指定水位线、孔压系数 ru（u = ru·σv）或不计孔压。
- **取自渗流分析**：边坡稳定分析接在渗流分析之后时，条底孔压取渗流结果（瞬态取选中时刻），负孔压可按 φb 计入吸力强度；库水淹没坡脚时坡面水压按渗流孔压计入；渗流结果缺失或过期时求解前提示先求解。
- **取自应力—变形分析**：接在原位应力、荷载-变形、固结或动力分析之后时，剖面按父分析所在的施工阶段取，孔压取父分析的结果。
- 结果视图可叠加孔隙水压力、压力水头或总水头云图（图 4-8）。

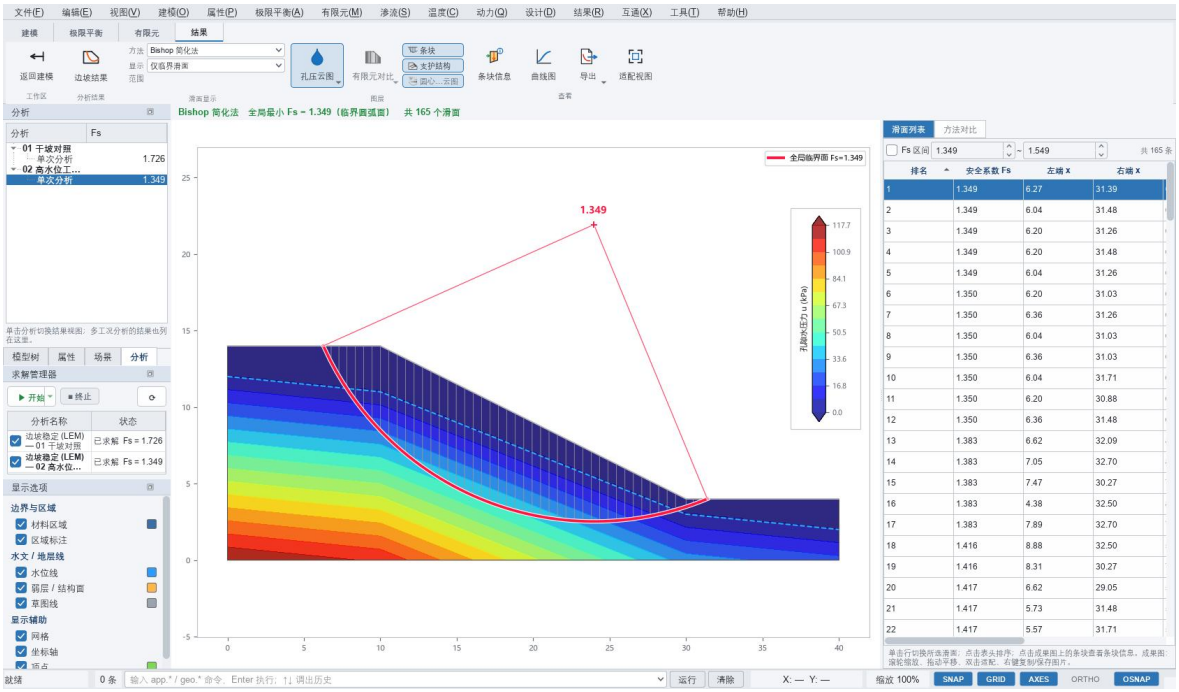


图 4-8　随包示例高水位工况：孔隙水压力云图与临界滑面（Bishop 简化法 Fs = 1.349）

4.8　荷载与地震作用

- **坡面荷载**：分布荷载（可线性变化）与线荷载，方向可为竖直、水平、垂直于地面或指定角度，逐条积分为作用于各条的合力并保留作用点。
- **拟静力地震**：水平地震系数 kh、竖向地震系数 kv；水平地震力作用点可取条块形心或条底（GB 50330 附录 A 的口径）。
- **土石坝惯性力沿高度分布**：按 GB 51247-2018 第 6.1.4 条的动态分布系数（坝顶 αm 按设计烈度取 3.0 / 2.5 / 2.0），坝底 kh = a_h·ξ，竖向惯性力可不计或取水平向的 1/3、2/3（向上、向下）。

4.9　支护作用

支护属性在「属性 → 定义支护属性」中定义，构件在「建模 → 添加支护」中布置（详见第 2 章）。支护与滑面相交时，按各失效模式中的最小可用力计入交点所在条块：

- 类型共 10 种：端锚式锚杆、注浆锚索 / 地锚、摩擦型注浆锚索、土钉、土工合成材料、桩 / 微型桩、螺旋锚、发射式土钉、挡土墙（等效流体压力）、自定义支护。
- 失效模式：杆体拉断、滑面以外粘结段拔出、滑体内粘结段连同托盘剥离；桩可按横向剪切、Ito & Matsui 侧向土压力或等效流体重度计算；挡土墙按压力图自墙顶积分到滑面交点。
- 作用方式分主动（减小下滑力）与被动（增大抗滑力），力的方向可取沿滑面切向、沿支护轴向、两者的角平分线、水平、垂直于桩身或指定角度。

- 结果视图“支护受力”页列出各支护的控制模式、可用轴力与计算作用力，并绘出沿支护的可用力包络。

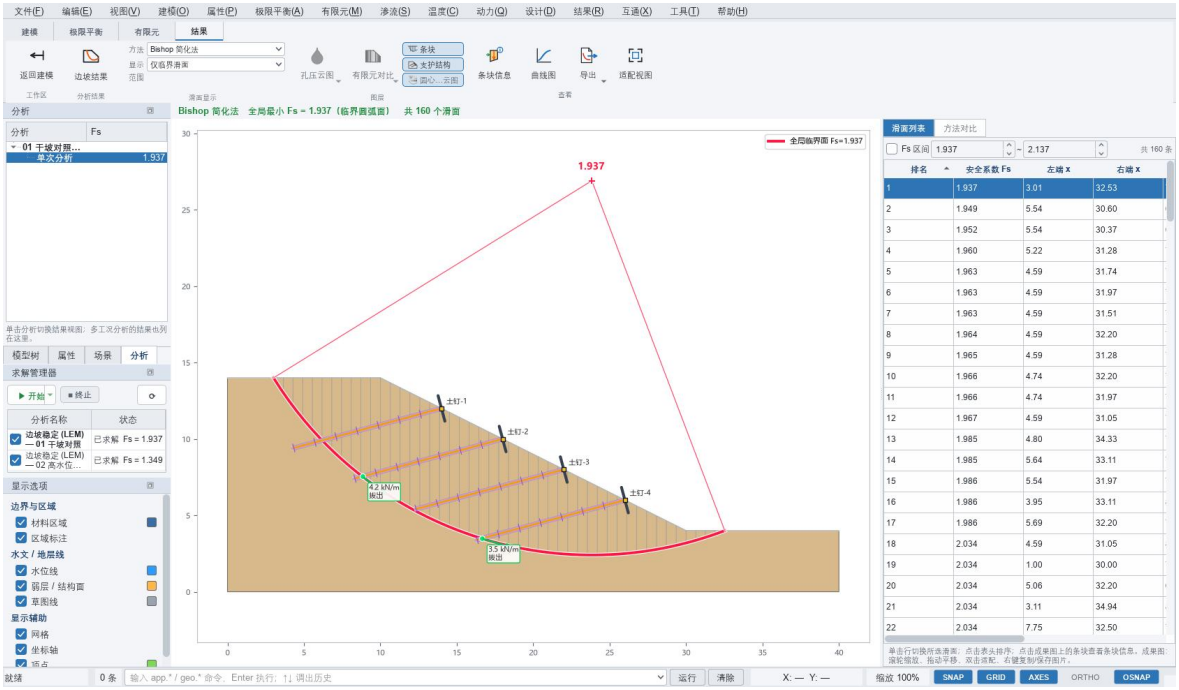


图 4-9 坡面 4 排土钉加固后的结果：Bishop 简化法 Fs 由 1.726 提高到 1.937，交点处标出控制模式与作用力

4.10 专项分析

- **快速降水**：在项目设置“地下水”页启用，方法有 Duncan、Wright、Wong 三阶段法（缺省）、Lowe-Karafiath 两阶段法、美国陆军工程师团两阶段法与有效应力 $\bar{B}$ 法；降水期间不排水的材料在材料中给 R 包线或 Kc = 1 包线。结果标题列出各阶段的安全系数（图 4-10）。
- **Sarma 非垂直条分法**：条间面倾角可取优化、相邻条底法线的角平分线、条底法线的长度加权平均方向或竖直；条间面强度按穿过土层的长度加权平均或指定；自定义滑面的顶点上可固定条间面倾角与强度（图 4-10 右）。
- **多工况分析**：天然、暴雨（饱和）、地震三种工况一次输入、分别求解，容许安全系数按 GB 50330-2013 表 5.3.2 随安全等级预填，表中直接给出“满足 / 不满足”判定（图 4-11）。
- **概率与参数研究**：材料参数与水平、竖向地震系数、水位升降量、附加荷载系数可作随机变量，分布有正态、对数正态、均匀、三角、Beta、指数、Gamma 七种；可靠度方法有 Taylor 级数法、点估计、蒙特卡洛、拉丁超立方（可逐对设相关系数）与响应面法，输出均值、标准差、失效概率、可靠指标与最佳拟合分布；参数研究有敏感性（蛛网图）、设计、反分析与安全系数时程。滑面可取确定性临界滑面，也可每组参数重新搜索。
- **有限元应力法**：边坡稳定分析的方法选“有限元应力法”并接在应力—变形或动力分析之后时，安全系数按父分析沿滑面的应力计算：$Fs = \Sigma(c' + \sigma n' \cdot \tan\varphi') \cdot l \div \Sigma\, \tau \cdot l$；父分析为固结或

动力分析时可给出安全系数时程，动力分析另给出 Newmark 滑块的永久位移（见第 9 章）。

- **与有限元强度折减对比：**同一边坡求过强度折减后，结果图可叠加破坏机构或塑性剪应变，“方法对比”页列出有限元与各条分法的安全系数及相对差值，并核对两者的模型地表与水平地震系数（图 4-13）。

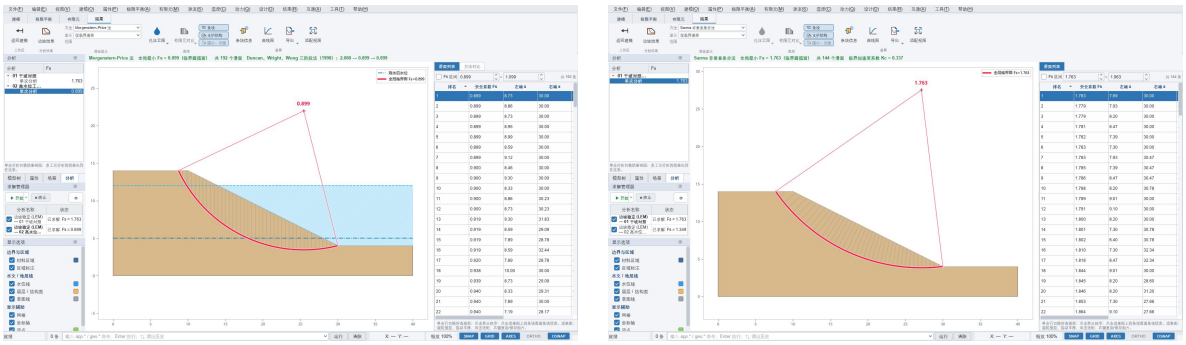


图 4-10　（左）库水位 12 m 骤降至 5 m 的三阶段法结果（右）Sarma 非垂直条分法：倾斜条间面与临界加速度系数 Kc

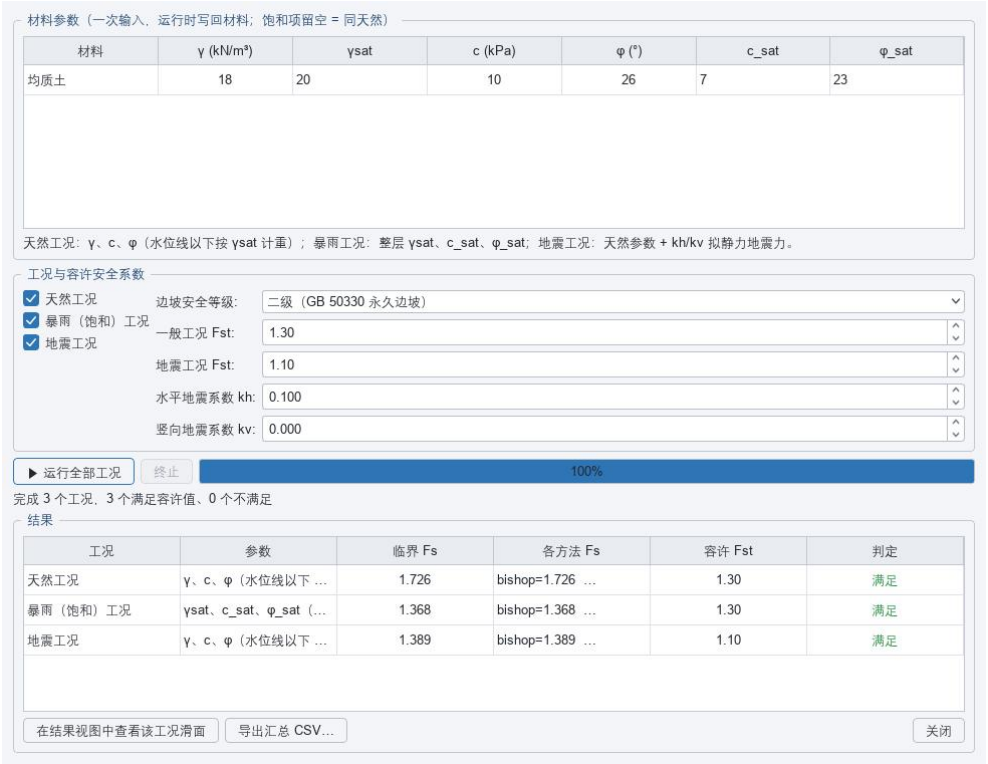


图 4-11　多工况分析对话框：天然、暴雨（饱和）、地震三种工况的安全系数与判定

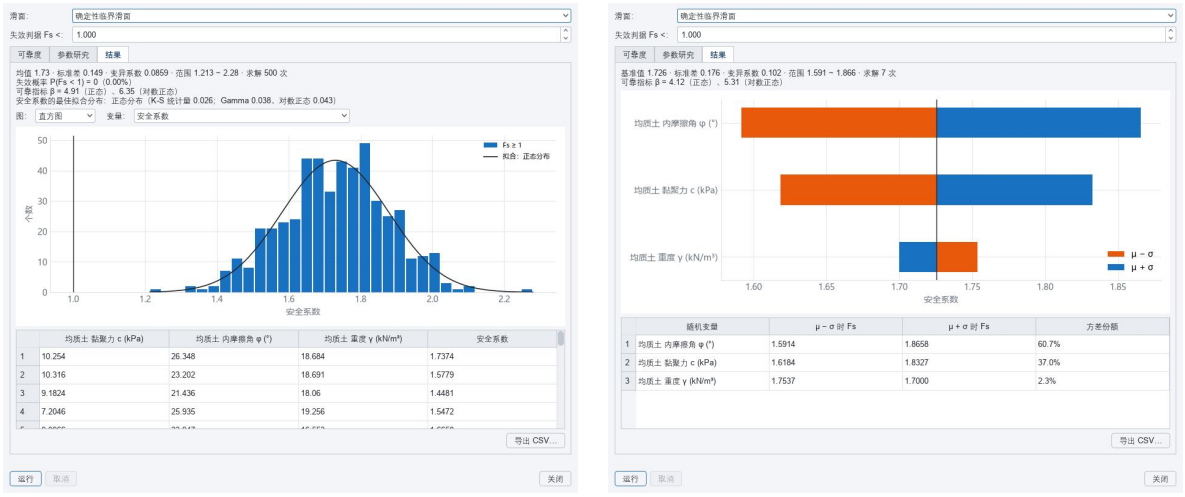


图 4-12　概率与参数研究（左）拉丁超立方抽样 500 次的安全系数直方图与拟合分布（右）Taylor 级数法的旋风图与方差份额

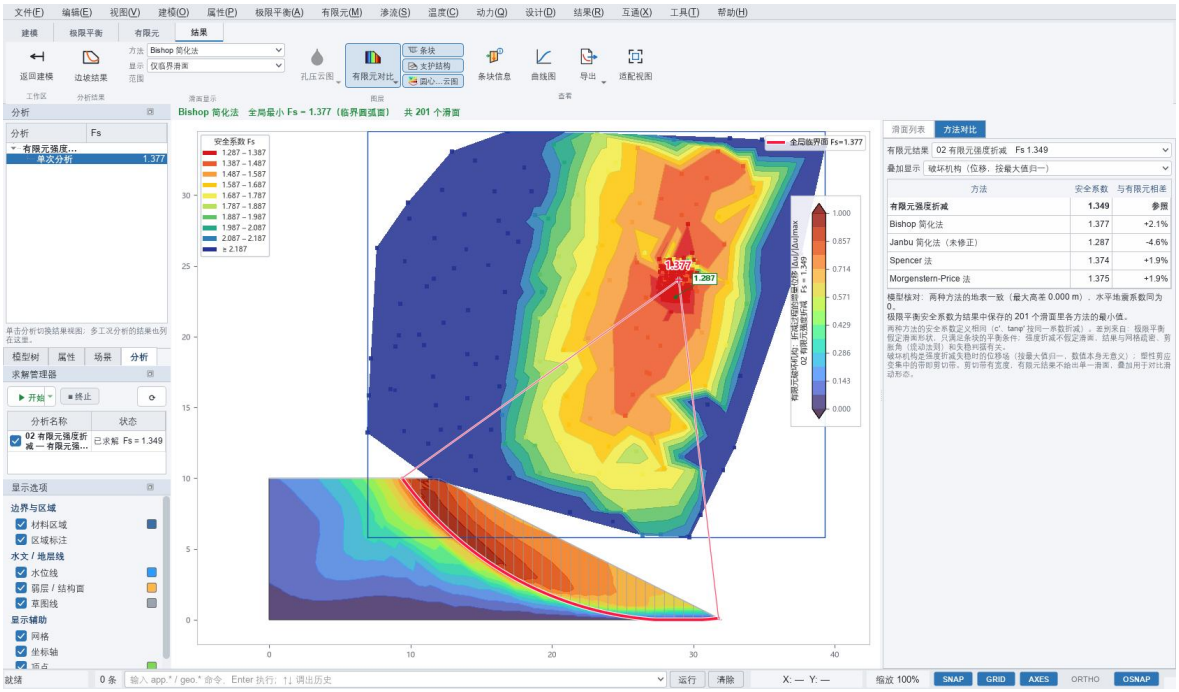


图 4-13　极限平衡临界滑面叠加强度折减的破坏机构，右侧“方法对比”页列出各方法与有限元的差值

4.11　结果视图

求解完成后自动进入独立的结果视图（图 4-14）：

- **标题栏**：当前方法、全局最小 Fs、临界滑面类型与滑面个数；快速降水、Sarma、不平衡推力法、粒子群多极小值等另附各阶段 Fs、Kc、剩余下滑力、潜在破坏模式数。
- **成果图**：剖面、材料分区、水位线、临界滑面、条块与支护；滑面显示可选仅临界滑面、最危险 N 条、Fs 区间、滑面列表筛选或全部滑面（安全图），按 Fs 分级着色并附图例；

圆弧网格搜索可叠加圆心 Fs 云图。成果图可滚轮缩放、拖动平移、双击适配，右键复制或保存图片。

- **滑面列表**：排名、安全系数、左右端 x、最大深度、半径、类型等列，可按任意列排序、按 Fs 区间筛选，单击行即在图上切换所选滑面；“方法对比”页列出各方法的最小安全系数及与主方法之差。
- **条块信息**：逐条列出几何、强度、孔压、重量、法向力、抗剪强度与条间力，绘出自由体图与力多边形；也可直接点击成果图上的条块。
- **曲线图**：沿滑面的法向应力、抗剪强度与发挥剪应力、强度分量、孔压、条间力、条底力与支护力，严格法的 Fs–λ 曲线，横轴可取 x 坐标或沿滑面距离，可导出 CSV。
- **导出**：所选滑面坐标、成果图上的滑面、滑面列表、条块数据、方法对比（CSV），滑面几何（DXF），以及“全部导出到文件夹”。
- **分析树**：左侧“分析”树列出各场景的单次分析与多工况分析结果，单击切换。

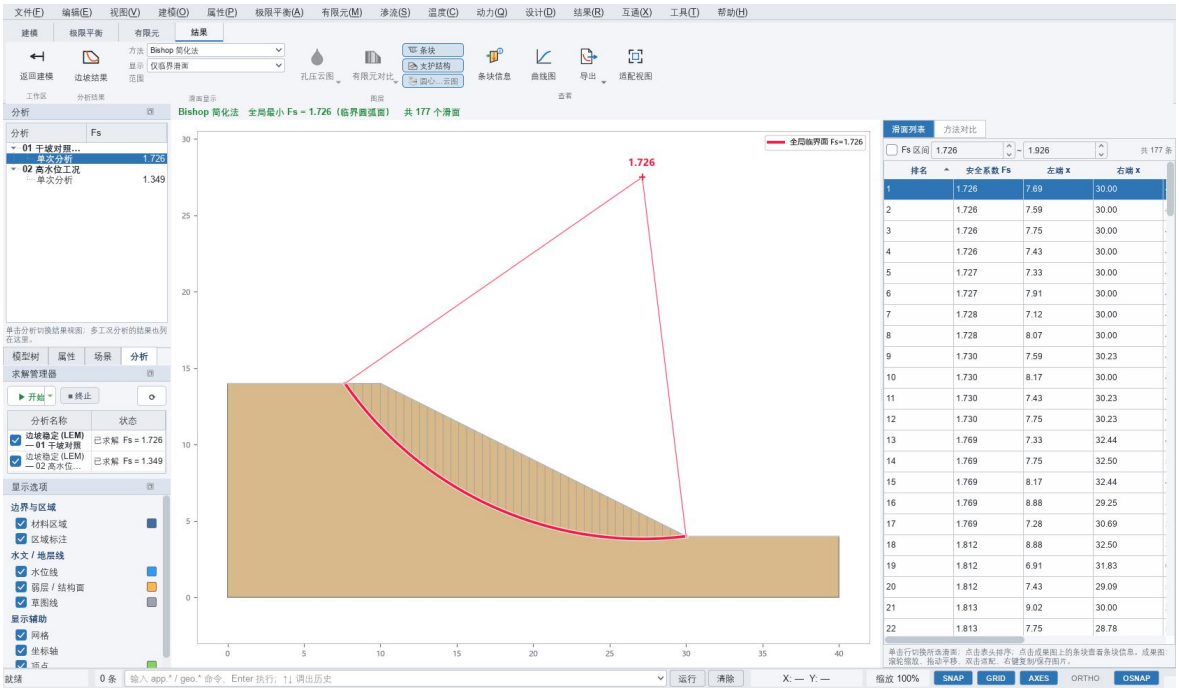


图 4-14 极限平衡结果视图：随包示例干坡工况的临界圆弧（Bishop 简化法 Fs = 1.726）与滑面列表

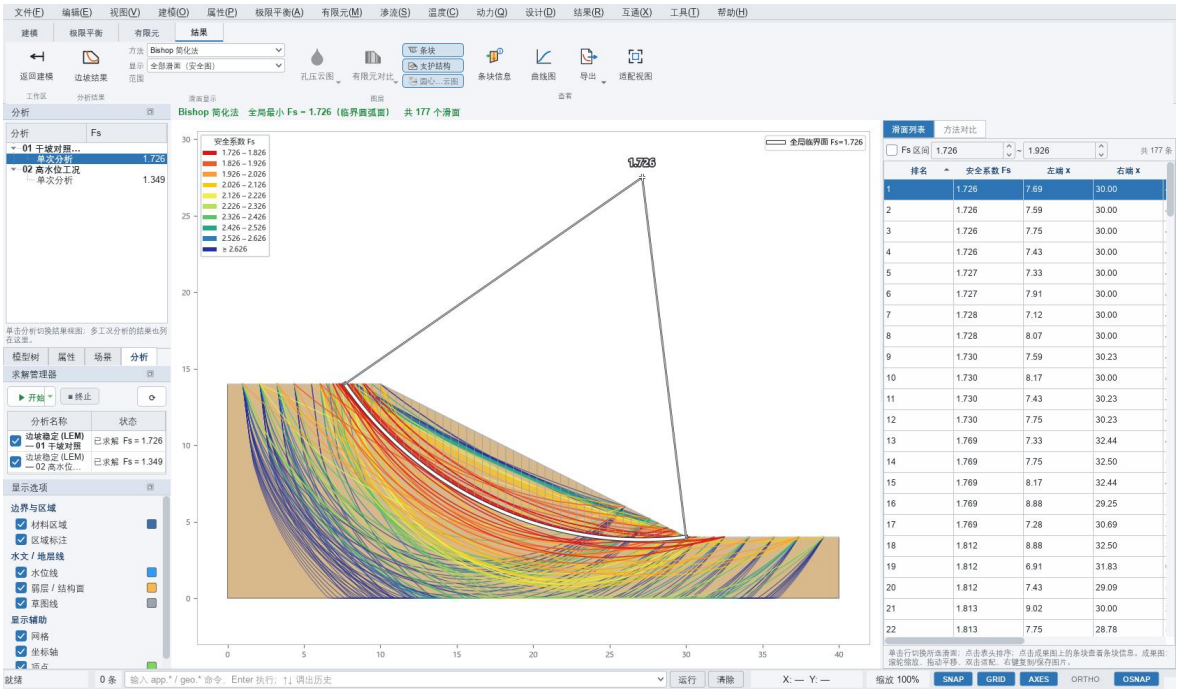


图 4-15 显示全部滑面（安全图），按 Fs 分级着色

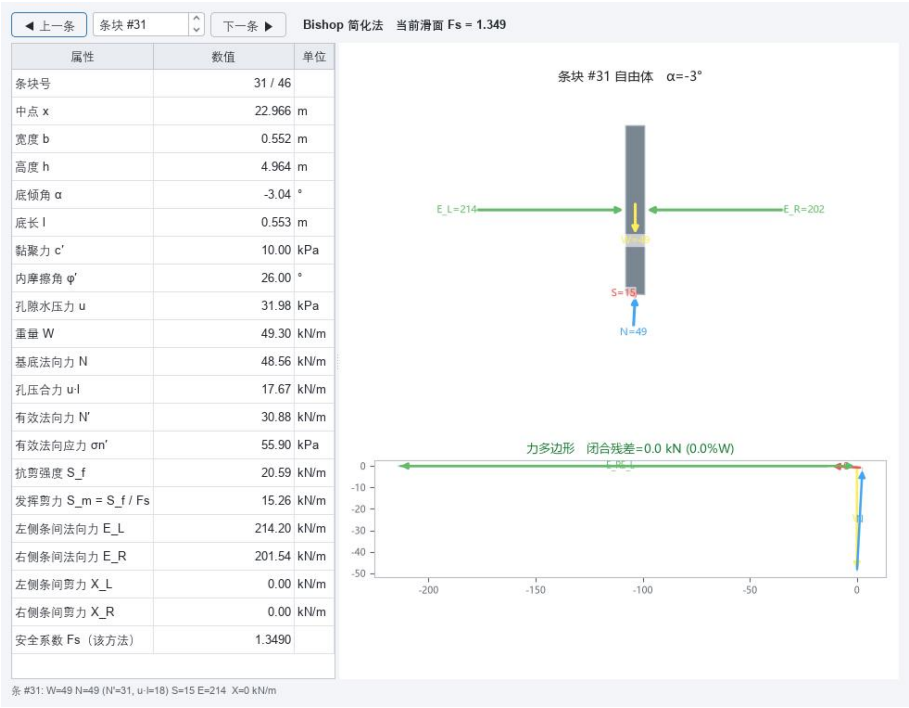


图 4-16 条块信息窗：条块属性、自由体图与力多边形

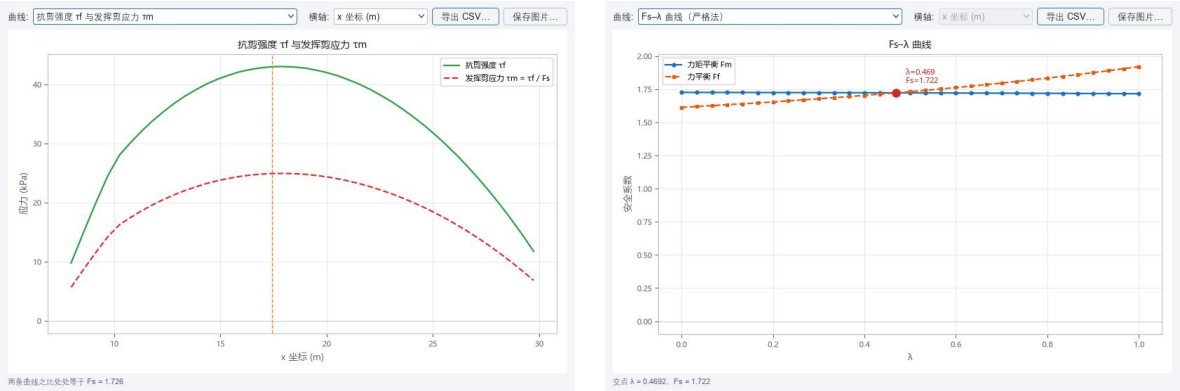
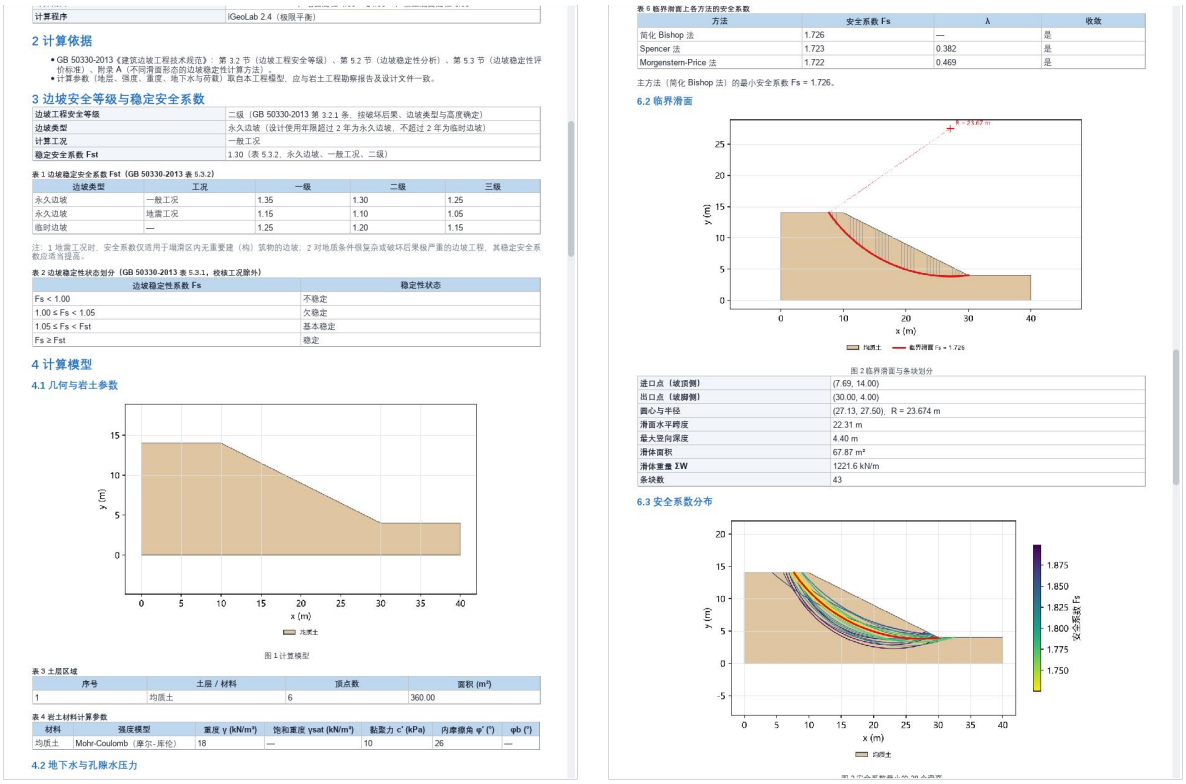


图 4-17　曲线图（左）沿滑面的抗剪强度与发挥剪应力（右）Morgenstern-Price 法的 Fs - λ 曲线

4.12　边坡稳定性计算书

「极限平衡 → 生成计算书」按 GB 50330-2013 评价，生成 Word、PDF 或 HTML 计算书，三种格式内容相同：

- 生成前确认计算、校核、审核签署人，边坡工程安全等级（一级、二级、三级）与边坡类型（永久、临时），稳定安全系数 Fst 按表 5.3.2 自动取值。
- 内容包括工程概况、计算依据、安全等级与稳定安全系数、计算模型（几何与岩土参数、地下水与孔隙水压力、荷载与地震作用、支护与弱层）、计算方法（附录 A 的计算公式、滑面搜索设置）、计算结果（各方法安全系数、临界滑面、安全系数分布、条块计算表、条间力、支护受力、沿滑面的受力分布、Fs–λ 曲线）、多工况与稳定性评价结论。
- 稳定性评价按表 5.3.2 判断是否满足要求，一般工况再按表 5.3.1 划分稳定、基本稳定、欠稳定或不稳定状态；地震工况作为校核工况单独评价。



计算程序	iGeoLab 2.4（极限平衡）

2 计算依据

- GB 50330-2013《建筑边坡工程技术规范》：第 3.2 节（边坡工程安全等级）、第 5.2 节（边坡稳定性分析）、第 5.3 节（边坡稳定性评价标准）；附录 A（不同滑面形态的边坡稳定性计算方法）。
- 计算参数（地层、强度、重度、地下水与荷载）取自本工程模型，应与岩土工程勘察报告及设计文件一致。

3 边坡安全等级与稳定安全系数

边坡工程安全等级	二级（GB 50330-2013 第 3.2.1 条，按破坏后果、边坡类型与高度确定）
边坡类型	永久边坡（设计使用年限超过 2 年为永久边坡，不超过 2 年为临时边坡）
计算工况	一般工况
稳定安全系数 Fst	1.30（表 5.3.2，永久边坡、一般工况、二级）

表 1 边坡稳定安全系数 Fst（GB 50330-2013 表 5.3.2）

边坡类型	工况	一级	二级	三级
永久边坡	一般工况	1.35	1.30	1.25
永久边坡	地震工况	1.15	1.10	1.05
临时边坡	—	1.25	1.20	1.15

注：1 地震工况时，安全系数仅适用于塌滑区内无重要建（构）筑物的边坡；2 对地质条件很复杂或破坏后果很严重的边坡工程，其稳定安全系数应适当提高。

表 2 边坡稳定性状态划分（GB 50330-2013 表 5.3.1，校核工况除外）

边坡稳定性系数 Fs	稳定性状态
Fs < 1.00	不稳定
1.00 ≤ Fs < 1.05	欠稳定
1.05 ≤ Fs < Fst	基本稳定
Fs ≥ Fst	稳定

4 计算模型

4.1 几何与岩土参数

图 1 计算模型

表 3 土层区域

序号	土层 / 材料	顶点数	面积 (m²)
1	均质土	6	360.00

表 4 岩土材料计算参数

材料	强度模型	重度 γ (kN/m³)	饱和重度 γsat (kN/m³)	黏聚力 c′ (kPa)	内摩擦角 φ′ (°)	φb (°)
均质土	Mohr-Coulomb（摩尔-库伦）	18	—	10	26	—

4.2 地下水与孔隙水压力

表 5 临界滑面上各方法的安全系数

方法	安全系数 Fs	λ	收敛
简化 Bishop 法	1.726	—	是
Spencer 法	1.723	0.382	是
Morgenstern-Price 法	1.722	0.469	是

主方法（简化 Bishop 法）的最小安全系数 Fs = 1.726。

6.2 临界滑面

图 2 临界滑面与条块划分

进口点（坡顶侧）	(7.69, 14.00)
出口点（坡脚侧）	(30.00, 4.00)
圆心与半径	(27.13, 27.50)，R = 23.674 m
滑面水平跨度	22.31 m
最大竖向深度	4.40 m
滑体面积	67.87 m²
滑体重量 ΣW	1221.6 kN/m
条块数	43

6.3 安全系数分布

图 3 安全系数最小的 20 个滑面

图 4 安全系数分布

图 4-18　边坡稳定性计算书（左）安全等级与稳定安全系数（右）各方法安全系数与临界滑面

第 5 章　有限元应力—变形分析与强度折减

有限元模块用于计算岩土体在自重、施工过程、外荷载、地下水与地震作用下的应力、变形与稳定性，适用于边坡、基坑、隧道、地基与路堤等二维问题。模型直接取自二维几何建模的材料分区：划分网格、指定位移边界、定义结构构件后，在分析树中把原位应力、施工阶段（荷载-变形）、应力重分布、两种固结与强度折减等分析按工程过程串成分析链，一次求解，逐阶段查看位移、应力、塑性区、孔压与构件内力。强度折减法给出不需要预先假定滑面的安全系数，并可与极限平衡结果叠加对比。全部功能集中在「有限元」菜单与功能区“有限元”页（图 5-1），结果在功能区“结果”页查看。



图 5-1　功能区“有限元”页：模型、分析、计算与结果各组



图 5-2　「有限元」菜单

5.1 主要特点

- 分析链承接施工全过程：应力、位移、塑性状态、孔压、构件内力与区域材料沿分析树逐级承接，强度折减、固结、动力分析可接在任一阶段之后；
- 平衡迭代以力的平衡判定收敛，强度折减不把匀速塑性流动当作收敛；
- 结构构件、接触面与土体在同一组方程中求解，板可形成塑性铰，锚杆、土钉可计粘结滑移，结果直接给出构件屈服位置与承载力校核；
- 两种固结方法覆盖饱和软土的超孔压消散与饱和—非饱和土的全耦合；
- 边界条件与荷载挂在几何上，重新划分网格后不必重新指派。

5.2 网格划分

「有限元 → 网格划分」按当前二维材料分区生成共享界面的有限元网格，生成结果直接叠加在主画布上，对话框非模态，可边调参数边观察网格（图 5-3）。

- 网格生成器：内置生成器与 Gmsh 生成器两种；
- 单元类型：6 节点三角形（推荐）、3 节点三角形、8 节点四边形、8 节点四边形与 6 节点三角形混合（四边形单元由 Gmsh 生成）；分析属性中的“计算单元”还可选 15 节点三角形，三角形网格在计算时自动升阶，工程网格本身不变；
- 网格类型：均匀（按目标单元数或目标尺寸）、分级（由外边界节点数确定边界处单元尺寸，向内部逐级过渡）、径向（另给径向扩展系数）与无内部节点；
- 共形与约束：相邻材料区域在分界处共用节点，墙、桩、衬砌等支护折线与模型内部的结构线自动成为网格约束线，构件端点落在网格节点上；
- 局部尺寸：可按区域给单元尺寸（大于或小于整体尺寸均可），沿折线、在给定点上加密，尺寸从加密处向外逐渐过渡；“坡面局部加密”按倍数加密倾斜的坡面段；局部尺寸随工程保存，重新划分时照用；
- 参与计算的区域：取消勾选的区域不参与网格与求解，可直接得到开挖后的计算域。



图 5-3 网格划分对话框（内置生成器、6 节点三角形、分级网格）

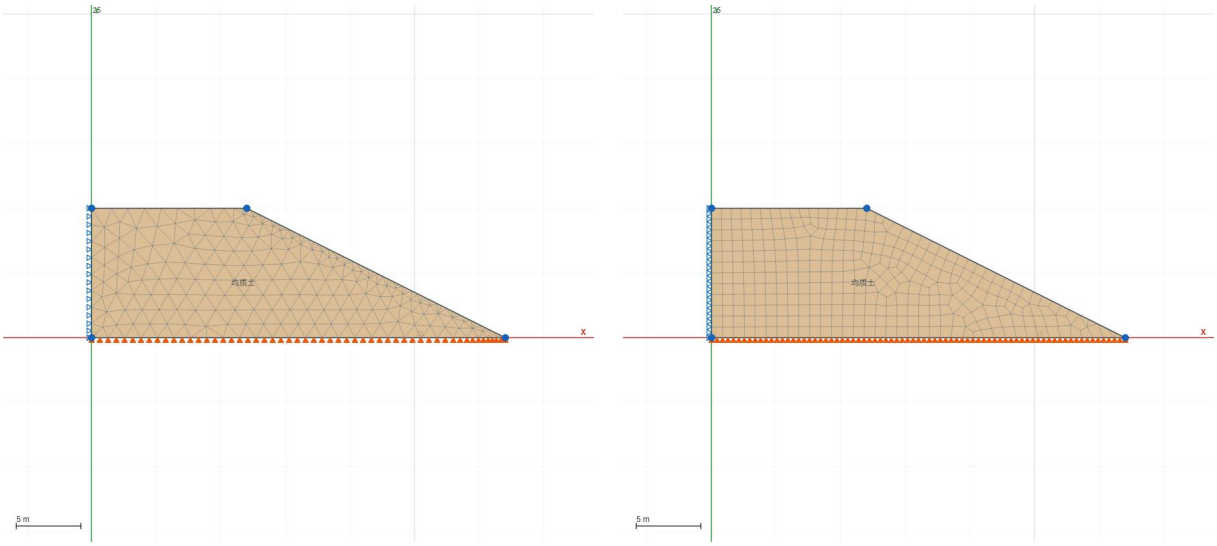


图 5-4　（左）坡面局部加密的 6 节点三角形网格（右）Gmsh 生成的四边形为主的混合网格

5.3　网格检查与修复

「有限元 → 网格检查」检查区域拓扑、单元质量（边长比、最小内角、最大内角）、无效单元、网格连通性与几何缺陷，相连的差质量单元成片报告，并在模型上标出问题位置，列表中选中某项即缩放定位（图 5-5）。修复操作包括细化差质量区、网格光顺、合并重合节点、几何清理（合并过近顶点、吸附贴近边界的顶点、去掉边界尖刺，可撤销）与按原设置重新划分网格。检查准则与几何容差可调，“缺省值”恢复边长比 30、最小内角 2°、最大内角 175°。



图 5-5　网格检查对话框：按准则列出差质量单元并提供修复操作

5.4 边界条件与荷载

- 位移边界：「有限元 → 边界条件」按网格边界节点组指定固定 XY、仅固定 X、仅固定 Y、指定位移（ux、uy）与弹簧支撑（沿边界每米的刚度 kx、ky）；“标准边界（底 XY、侧 X）”一键施加底部固定、两侧水平约束；
- 交互选取：「有限元 → 交互选取边界（点边指派）」在画布上单击边界段（Ctrl 多选），右键指派约束、指定位移或移除约束（图 5-6）；
- 边界挂在几何边上并归属各自的分析，重新划分网格后不丢失；
- 荷载：建模中定义的分布荷载、线荷载在各分析的“施加的荷载”中勾选参与；「有限元 → 体荷载」按区域给单位体积的力 bx、by（kN/m³），可用于附加重力、渗透力等；荷载-变形分析可给拟静力水平、竖向地震系数 kh、kv；
- 孔隙水压力：取渗流分析结果或水位线，可按阶段更换水位线，可选择是否计入水位线以上的吸力。

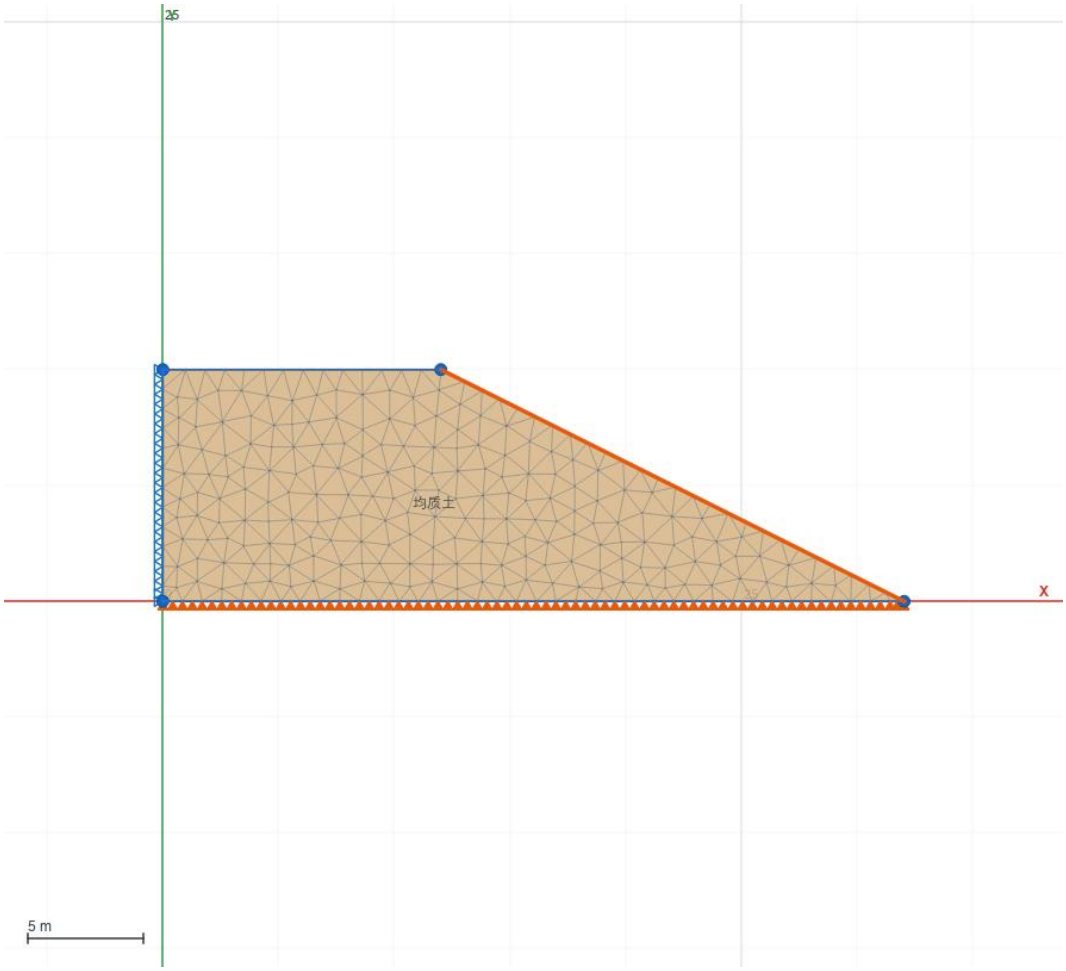


图 5-6　交互选取边界：选中的坡面段高亮显示，右键菜单指派约束

5.5 结构构件与接触面

支护构件在建模中绘制并定义支护属性后，在「有限元 → 支护结构参数」中给出有限元参数（图 5-7），强度折减与应力-变形分析共用。构件类型“自动”时按支护类型取用下表的力学模型，也可手动指定。

表 5-1 结构构件的力学模型

构件类型	力学模型	主要参数	典型用途
板	梁单元（二次网格为 3 节点梁，线性网格为 2 节点梁），沿网格边布置；给定承载力时按理想弹塑性截面计算，可形成塑性铰	E、截面（厚度或桩径）、出平面间距、轴力承载力 Np、弯矩承载力 Mp、M–N 相互作用、端部连接、两侧接触面与 R_inter	地下连续墙、排桩、隧道衬砌、挡墙
杆	两节点杆，两端连接网格节点、单元内的点或空间固定点	E、截面 A、出平面间距、预加力、抗拉与抗压承载力	内支撑、端锚式锚杆
锚杆	自由段为杆、锚固段为嵌入杆，预应力加在自由段	同杆，另有粘结强度、粘结刚度	注浆锚索、桩锚支护
嵌入杆	沿折线逐土体单元与土体黏结，构件线不必落在网格节点上；给定粘结强度时按粘结滑移计算	E、A、粘结强度、粘结刚度	土钉、土工合成材料与其他筋材
嵌入桩	梁单元经桩–土弹簧连到土体，桩侧与桩端阻力有上限	E、截面、桩侧阻力、桩端阻力	抗滑桩、桩基

- 板可在两侧设零厚度接触面，强度取相邻土体强度乘 R_inter；
- 节理、软弱夹层与结构面按零厚度接触面单元计算：弹性—摩尔-库伦滑移与受拉张开，可直接给法向、切向刚度与强度，未给时按相邻土体折减；
- 预加力在构件激活的施工阶段张拉（内支撑为顶推、锚杆为张拉），阶段结束时锁定；
- 「有限元 → 添加衬砌（鼠标交互绘制）」先给衬砌厚度、出平面间距与抗压承载力，再在画布上沿洞周逐点绘制，可闭合成环；
- 轴对称模型中板按回转薄壳计算，另给环向力与环向弯矩。



图 5-7　支护结构有限元参数表（6 m 基坑示例：地下连续墙为板、钢管支撑为杆）

5.6　分析树与分析类型

模型树中的分析树按父子关系组织各分析，子分析以父分析的终态（应力、位移、塑性状态、孔压、激活的区域与支护）为起点（图 5-8）。「有限元 → 新建分析」在当前分析之后添加分析，「有限元 → 分析属性」设置父分析、激活对象、孔压与排水、固结时间与求解控制。

表 5-2　应力—变形相关的分析类型

分析类型	内容
原位应力	K0 过程（$\sigma h' = K0 \cdot \sigma v'$，K0 按材料给定或自动取值，摩尔-库伦取 $1 - \sin\varphi'$，硬化类模型计入 OCR；先期固结应力计入 OCR、POP）、重力加载（施加自重求平衡，适用于起伏地形）、常应力场（深埋洞室，给定主应力大小与方向）
荷载-变形（施工阶段）	激活或移除区域（开挖、回填）、安装或拆除支护、施加荷载、更换区域材料与水位线；可设阶段荷载释放比例 ΣMstage、拟静力地震系数、时间间隔、大变形（更新网格）与弧长法
应力重分布	不加新荷载，在区域、材料或水位线改变后让应力重新平衡
固结（超孔压法）	不排水材料的超孔隙水压力随时间消散，荷载可瞬时或在施工期内线性施加
固结（总孔压耦合）	位移与总孔隙水压力全耦合，饱和—非饱和土，水力边界沿用渗流边界
强度折减	接在任一应力分析之后求安全系数

- 模型类型可选平面应变或轴对称（x 为半径）；
- 「有限元 → 应力-变形求解」求解当前分析所在的整条分析链，逐个分析显示进度（ΣMstage、固结时间比例或已平衡的折减系数）；
- 功能区"有限元"页的"阶段"下拉与"上一阶段""下一阶段"使画布按所选阶段显示激活的区域、安装的支护与施加的荷载（图 5-9）；
- 动力时程分析同样在分析树中接在应力分析之后，见 第 9 章。

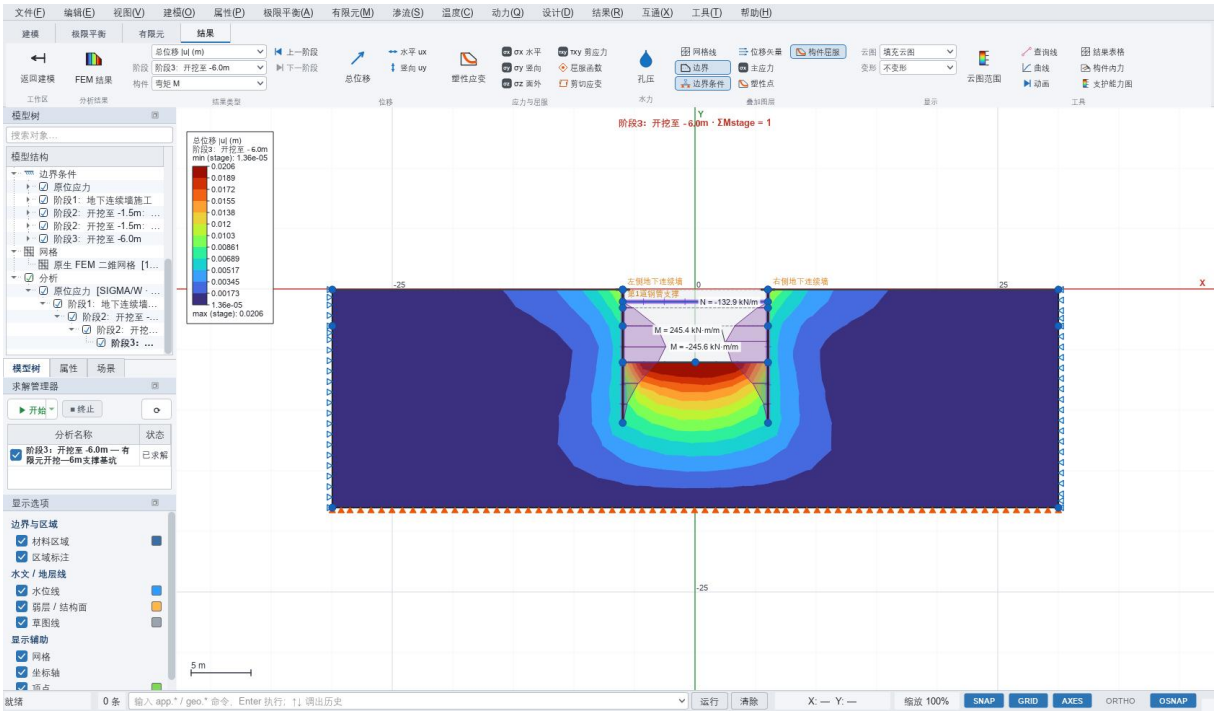


图 5-8　6 m 基坑示例：左侧分析树为“原位应力 → 四个施工阶段”的分析链，画布为开挖到底时的总位移与构件内力

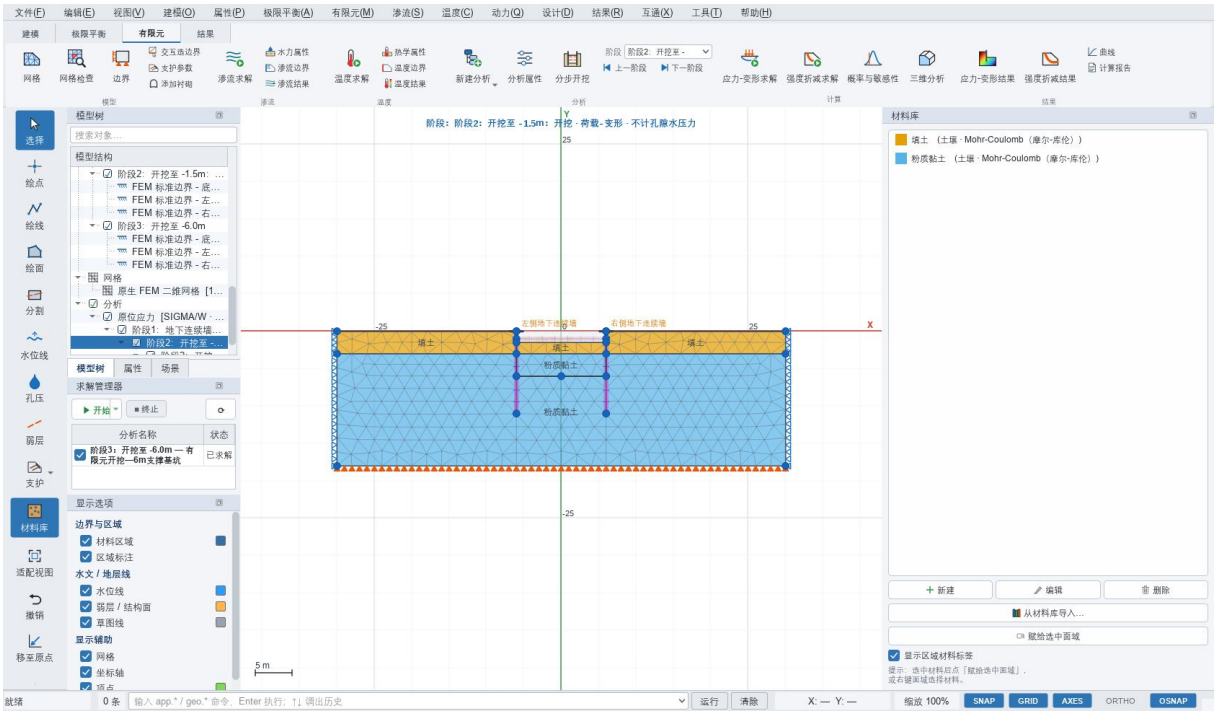


图 5-9　按施工阶段显示模型（第 2 阶段开挖后，未激活的区域淡显）

5.7　分步开挖序列

「有限元 → 分步开挖序列」以“阶段 × 区域 / 支护”勾选矩阵定义施工过程：取消勾选的区域在该阶段已开挖，勾选的支护在该阶段已安装。“运行序列”自动生成“原位应力 → 各阶段荷载-变

形”的分析链并在每个阶段之后做强度折减，结果表列出各阶段的激活单元数、收敛状态与安全系数（图 5-10）。基坑向导、隧道设计向导也可直接生成带施工阶段的模型。



图 5-10　分步开挖序列：三个阶段的勾选矩阵与各阶段之后的安全系数（基坑模型，土层取摩尔-库伦模型）

5.8　固结分析

- 超孔压法：未知量为位移与超孔隙水压力，不排水材料参与渗流，排水材料与排水边界处超孔压为零；未指定渗流边界时地表排水，开挖面与未填筑区域表面排水；
- 总孔压耦合：未知量为位移与总孔隙水压力，所有激活单元参与渗流，渗透系数函数与含水量函数取材料的水力属性，吸力可按有效饱和度计入有效应力；
- 时间控制：固结时长与时间单位、输出时刻数、首个时间步（可自动确定），时间步按几何级数增长；本阶段的荷载与施工变化可开始时瞬时施加（不排水），也可在施工期内线性施加；
- 结果：各输出时刻的位移、超孔隙水压力与应力，阶段曲线可按时间绘制沉降、超孔压过程（图 5-11）。

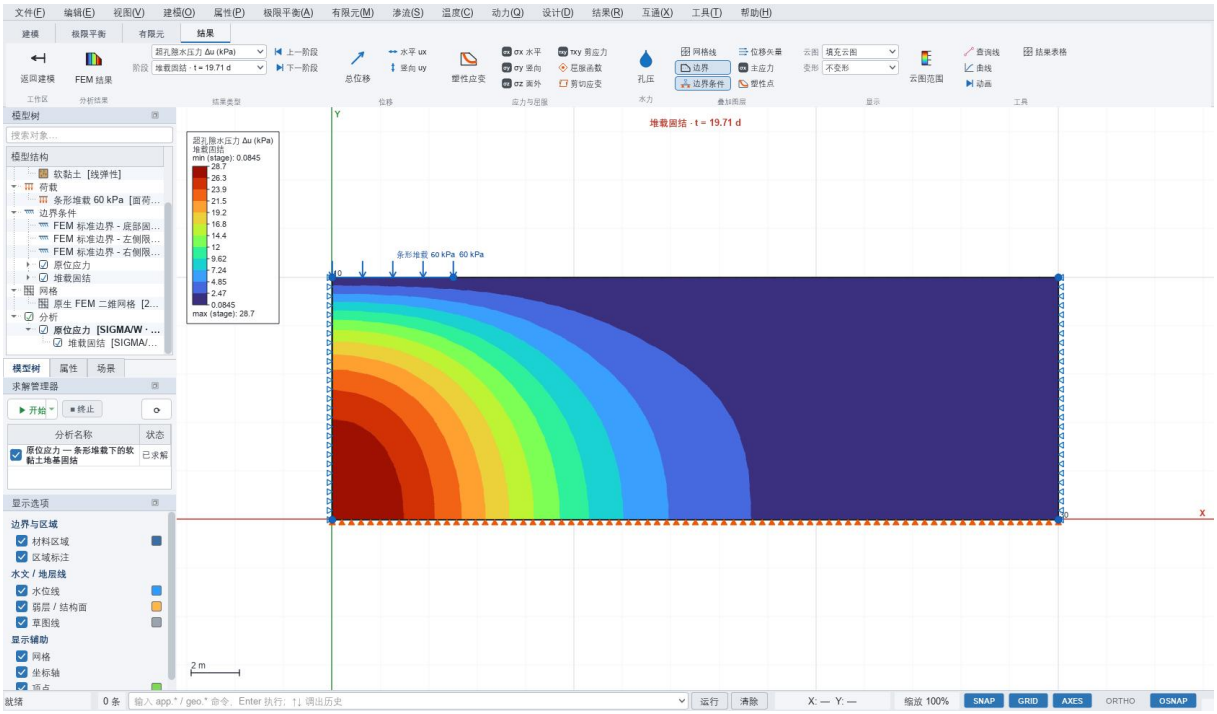


图 5-11　条形堆载下软黏土地基的超孔隙水压力（固结过程中的某一输出时刻）

5.9　强度折减

「有限元 → 强度折减求解」（Ctrl+M）把抗剪强度参数同除以折减系数 F 并求平衡，F 增大到不能平衡时即得安全系数 Fs，不需要预先假定滑面（Griffiths & Lane，1999）。

- 平衡法：沿分析树的应力分析链折减，以父分析（原位应力、施工阶段、固结或动力分析）的终态为起点，在同一网格、边界、荷载与孔压条件下逐级折减；支持全部本构模型与不排水材料；没有分析时自动建立“原位应力 → 强度折减”，有荷载或地震系数时中间加一个荷载-变形阶段；
- 显式黏塑性：直接对当前网格做折减扫描与二分，适用于摩尔-库伦材料；
- 只折减部分材料：强度折减分析的属性中可只勾选部分材料（如软弱夹层），其余材料与相邻接触面强度不变；
- 失稳判据：以力的平衡判定稳定，不平衡力降到容差以下才算平衡，匀速塑性流动不会被当作收敛；
- 结果：安全系数、临界状态的位移与增量位移（破坏机构）、塑性剪应变与塑性点，折减系数—位移曲线与试算记录（图 5-12、图 5-13）；
- 与极限平衡对比：极限平衡结果视图可叠加强度折减的破坏机构或塑性剪应变，“方法对比”页列出两类方法的安全系数及相对差值（图 5-14）。

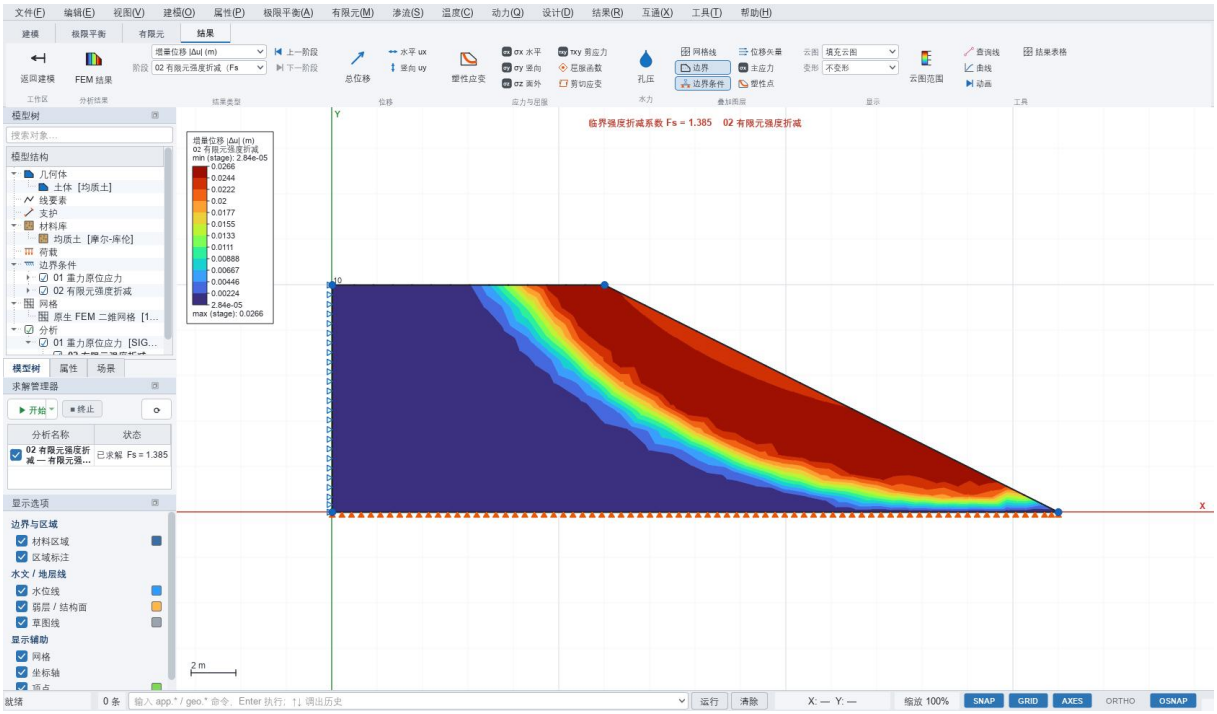


图 5-12 均质边坡强度折减结果：临界状态的增量位移（破坏机构）

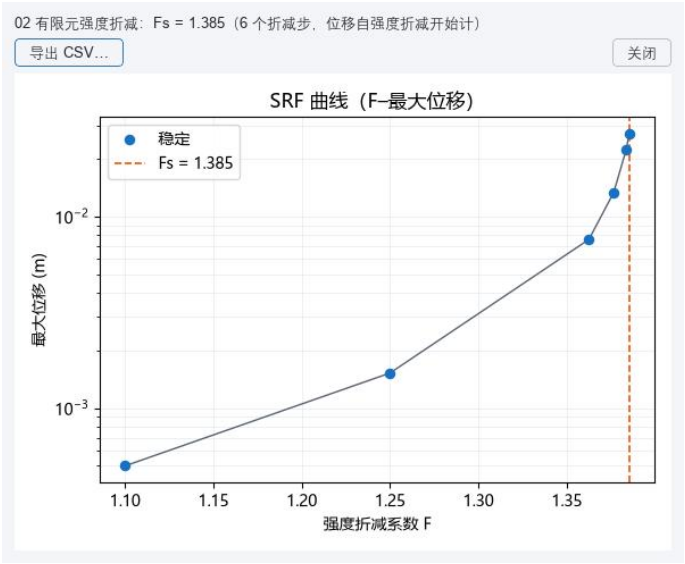


图 5-13 强度折减曲线：折减系数与最大位移

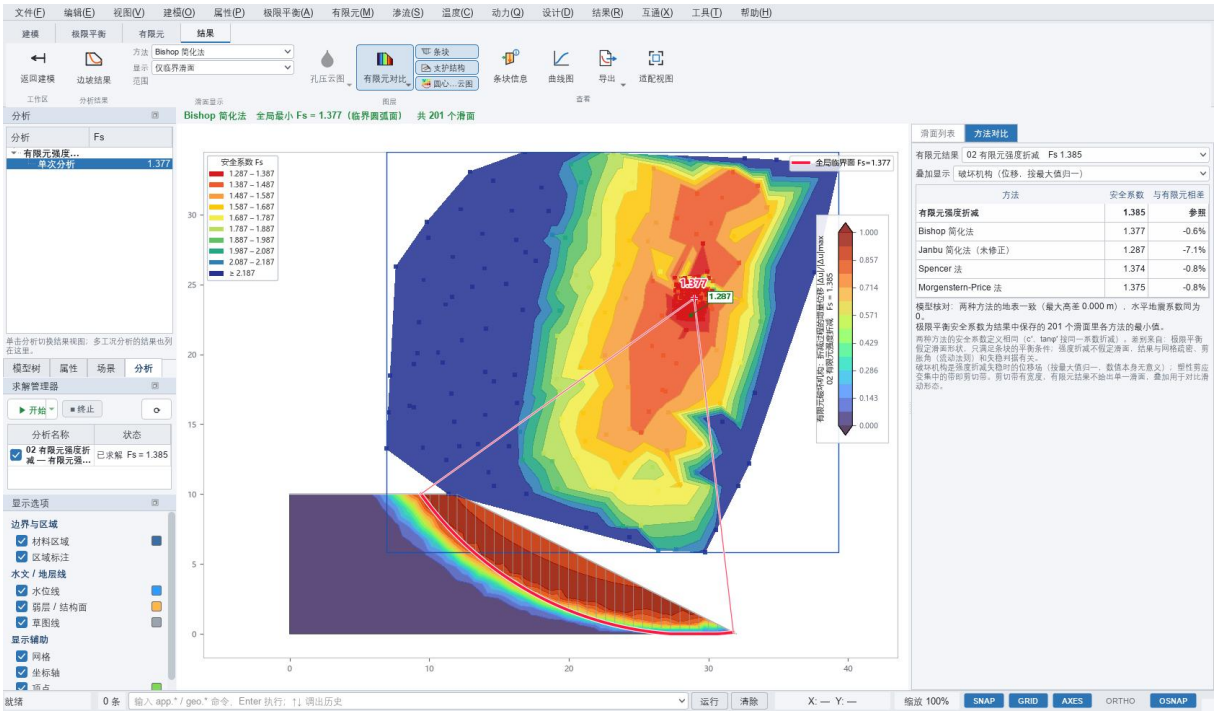


图 5-14　极限平衡结果叠加强度折减破坏机构，右侧为“方法对比”页

以随软件提供的“均质边坡 有限元强度折减”示例为例（坡高 10 m、坡比 1:2，c = 10 kPa、φ = 20°、γ = 20 kN/m³，与 Griffiths & Lane（1999）例 1 相同），按缺省设置划分 466 个 6 节点三角形单元后求解，Fs = 1.385；同一剖面的极限平衡简化 Bishop 法为 1.377。

5.10　求解与校核

- 求解在后台进行，对话框逐个分析显示进度（ΣMstage、固结时间比例或已平衡的折减系数），可随时取消；任何输入改动后从分析链的根重新计算，结果随工程保存，与当前网格不符的结果不再显示；
- 每个荷载增量做完整的 Newton 迭代（一致切线、残差回溯线搜索），步长随收敛快慢自动放大或减半；不收敛的阶段保存已达到的平衡状态与 ΣMstage；
- 轴对称模型、大变形（更新网格）、弧长法（跟踪极限荷载）与 15 节点三角形单元可在分析属性中选用；
- 计算校核：Terzaghi 一维固结的超孔压与级数解的最大偏差为初始超孔压的 0.6%～1.9%；约 2300 个自由度时 Prandtl 极限荷载的误差 15 节点三角形为 0.95%、6 节点三角形为 2.1%；沿接触面滑动的块体安全系数与手算解 2.0 相差 1% 以内，只折减薄弱层时薄弱层上块体的安全系数为 1.98（闭式解 2.0）；三维截面拉伸一层的强度折减安全系数与二维结果相差 0.1%。

5.11 概率与敏感性、三维分析

- 概率与敏感性：「有限元 → 概率与敏感性」把材料参数作为随机变量反复求解整条分析链，响应可选安全系数 Fs 或最大位移；方法有敏感性（逐个取 μ ± σ）、点估计（Rosenblueth）、拉丁超立方抽样与蒙特卡洛抽样，给出响应的统计量、失效概率与可靠指标，敏感性结果以旋风图显示（图 5-15）；求解可在多个进程中并行；
- 三维分析：「有限元 → 三维分析」把二维截面沿 z 拉伸成 10 节点四面体模型，按分析链求解；区域增减与面荷载可只作用于某一 z 区段，用于隧道逐段开挖、有限长度的基础与车道荷载；结果为任一 z 断面的云图与沿 z 的位移曲线（图 5-16）。三维分析适用于线弹性与摩尔-库伦排水材料。



图 5-15 有限元敏感性分析结果：旋风图与统计量

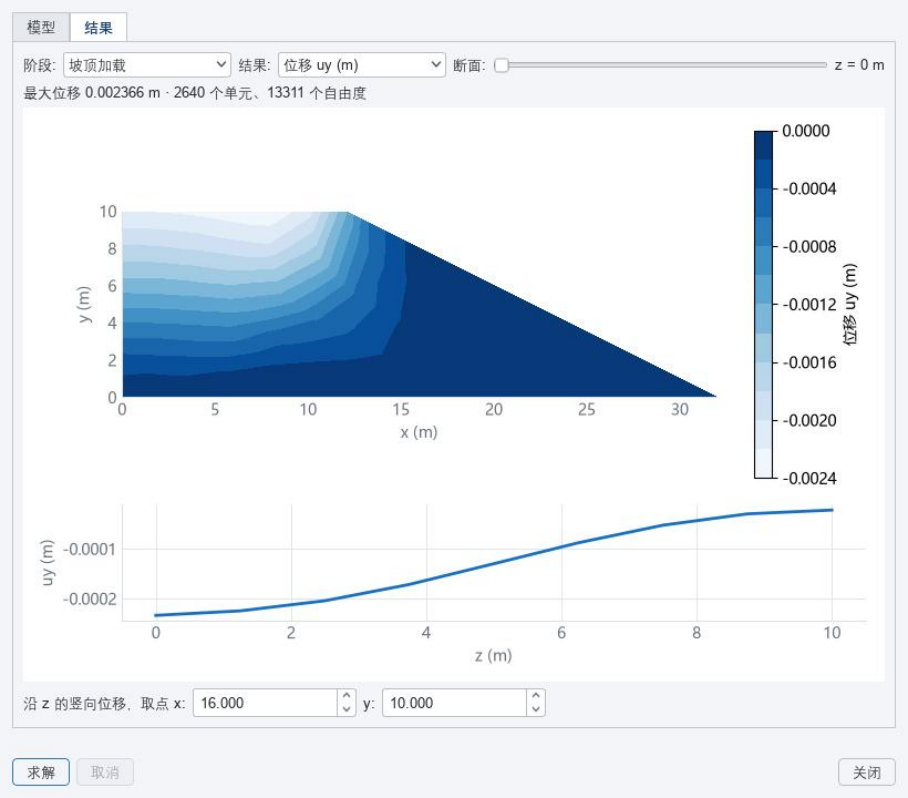


图 5-16　三维分析（截面拉伸）：坡顶荷载只作用于 z = 0～5 m 时的断面云图与沿 z 的竖向位移

5.12　结果查看

有限元结果在功能区“结果”页查看，“阶段”下拉列出分析链上已有结果的各分析，固结与动力分析展开为各输出时刻，强度折减可查看临界状态。

- 云图：总位移、水平与竖向位移、增量位移、有效应力各分量、主应力、平均有效应力 p′、偏应力 q、应变、最大剪应变、塑性剪应变、塑性点比例、相对剪应力、孔隙水压力与超孔隙水压力；有相应材料时另有软化程度、等效超固结比等；
- 显示：填充云图、等值线或两者叠加，云图范围与分级数可自定，变形网格按 1～100 倍放大；
- 叠加图层：网格线、边界、边界条件、位移矢量、主应力方向、塑性点（剪切屈服、受拉、硬化）与构件屈服（塑性铰、达到承载力的杆、粘结滑移节点）（图 5-17）；
- 构件内力：沿墙、桩、衬砌绘制弯矩、剪力、轴力及各阶段包络，支撑、锚杆按拉压着色并标注轴力；构件内力表列出当前阶段或各阶段包络的最大内力（图 5-18）；
- 支护能力图：板的轴力–弯矩、轴力–剪力点与承载力包络及最小安全系数，杆的轴力安全系数，桩侧摩阻与粘结力的发挥程度（图 5-19）；
- 工具：查询线（沿任意直线取结果曲线并导出 CSV）、阶段曲线（监测点位移与超孔压随施工阶段或时间的变化，应力路径 p′–q）、强度折减曲线、动画（按阶段或时刻逐帧播放，导出帧序列或 GIF）与结果表格（节点与单元的全部结果量，导出 CSV）。

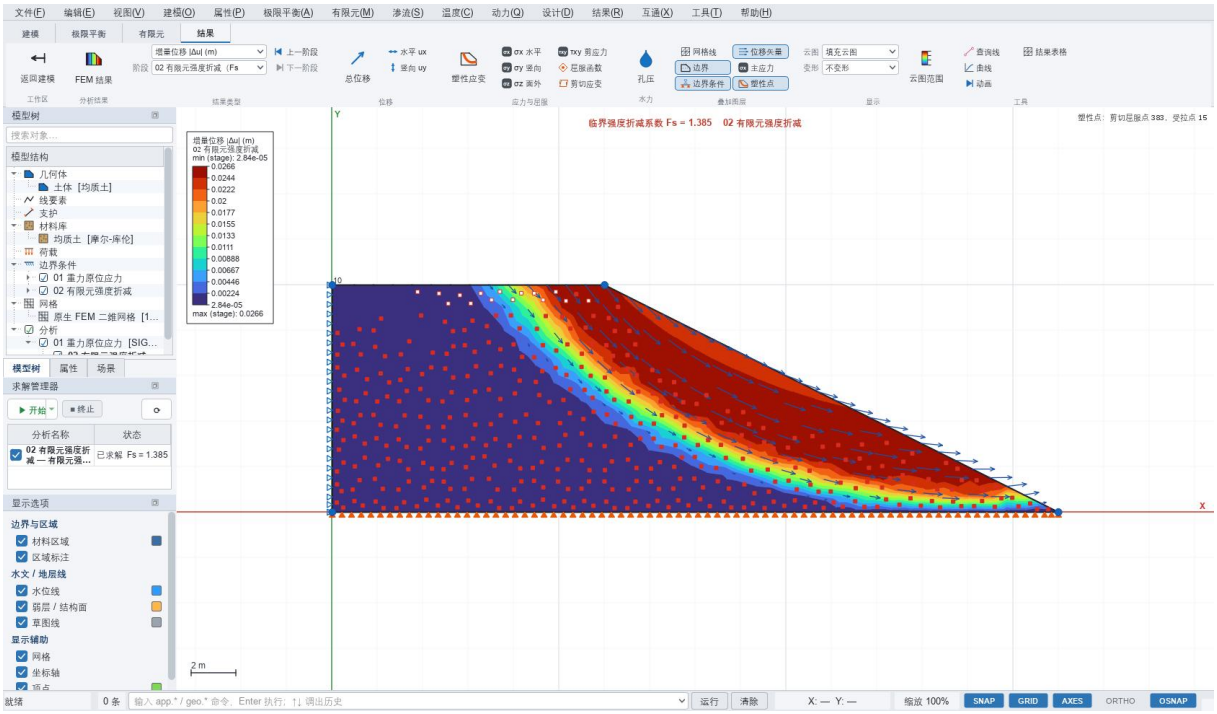


图 5-17 结果页：增量位移云图叠加位移矢量与塑性点

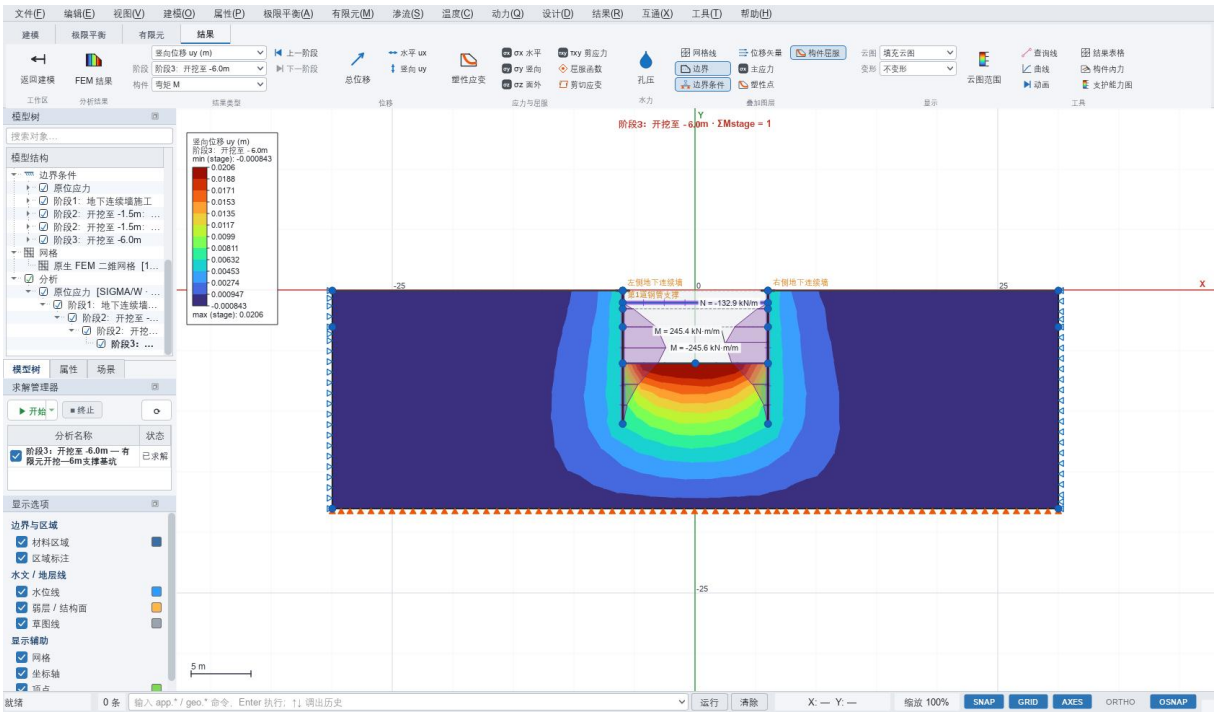


图 5-18 6 m 基坑开挖到底：竖向位移云图、沿墙身绘制的弯矩图与支撑轴力标注

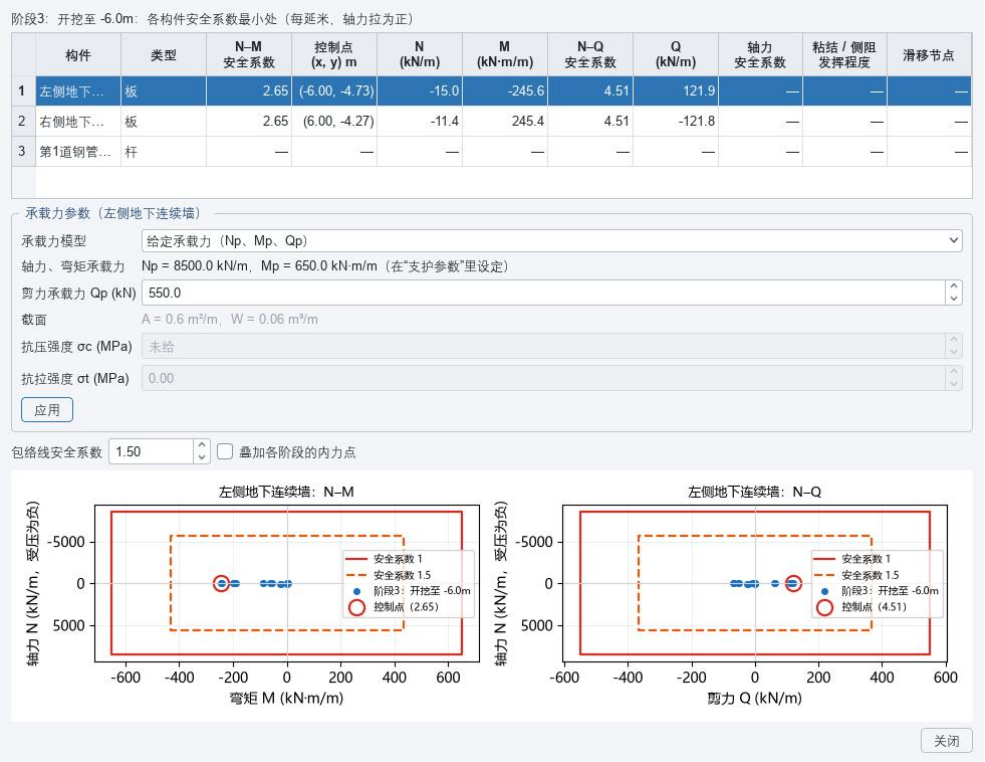


图 5-19　支护能力图：地下连续墙的 N－M、N－Q 承载力校核

5.13　典型应用

- 边坡稳定：重力加载求原位应力后接强度折减，得到安全系数、剪切带与破坏机构，并与极限平衡的临界滑面叠加对比；可只折减软弱夹层，求沿夹层滑动的安全系数；坡顶荷载、拟静力地震作用、渗流孔压都可计入；
- 基坑支护：K0 过程求原位应力，按"围护墙施工 → 分层开挖 → 架设支撑 → 开挖到底"逐阶段计算墙体位移、坑底回弹、地表沉降与墙身、支撑内力，给出各阶段内力包络与承载力校核，任一阶段之后可求整体稳定安全系数；墙的弯矩承载力不足时出现塑性铰，在结果页直接标出（图 5-20）；
- 软土地基与路堤：分级填筑作为施工期内线性加载的固结分析，间歇期与工后期接固结分析，给出超孔压的消散、沉降随时间的发展与各时刻的稳定性；竖向排水体以排水线模拟；
- 隧道与地下洞室：常应力场给出深埋初始地应力，开挖阶段按荷载释放比例 ΣMstage 部分释放、施作衬砌后释放其余，衬砌按板计算内力；截面拉伸的三维分析可模拟逐段开挖；
- 参数不确定性：概率与敏感性分析给出安全系数或位移对各参数的敏感程度、分布与失效概率。

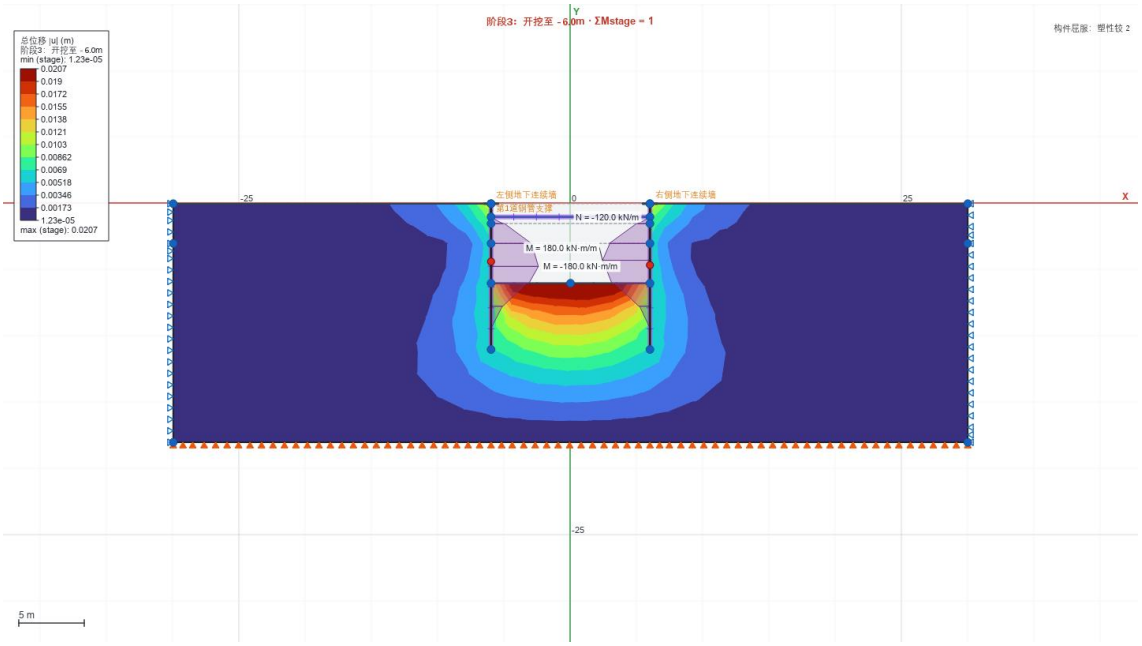


图 5-20　墙的弯矩承载力取 180 kN·m/m 时墙身出现塑性铰（红色实心圆），弯矩在承载力处截断

5.14　计算报告

「有限元 → 导出计算报告」生成有限元计算书，格式可选 Word、PDF 或 HTML，内容相同，带封面、目录与签署栏（图 5-21）。计算书包括工程概况、结果汇总、模型、材料、网格、支护、荷载与边界、分析过程，初始应力，各分析的位移与塑性点，墙身位移、地表沉降，构件内力与包络、内力设计值与承载力校核，强度折减的破坏机构与折减过程，固结、动力、渗流结果与计算提示。评价依据可选自动、边坡（GB 50330-2013，按表 5.3.2 的稳定安全系数评价强度折减安全系数）或基坑（JGJ 120-2012，按 γ0 与综合分项系数 γF 给出内力设计值）。



图 5-21　计算书设置：签署、边坡与基坑评价参数、有限元计算书的评价依据

本构模型（线弹性、摩尔-库伦、广义 Hoek-Brown、硬化土、小应变硬化土、修正剑桥、软土蠕变、砂土液化 UBC3D-PLM 及应变软化）、排水类型与接触面本构见本章“本构模型”“排水类型、初始状态与接触面”两节，材料参数的输入见 第 3 章。

5.15　本构模型

有限元的原位应力、荷载-变形、应力重分布、固结、动力时程与强度折减共用同一套本构模型。每种材料在材料对话框的“有限元变形参数（FEM）”组中选择本构模型，强度参数与极限平衡共用，不同区域可以用不同的模型。

- **线弹性**：E、ν，用于结构区域、完整岩体与模型检查。
- **摩尔-库伦（理想弹塑性）**：c、φ、E、ν 与剪胀角 ψ（非关联流动），主应力空间闭式返回映射，含棱线与锥顶；可设应变软化（峰值与残余 c、φ、ψ 及达到残余强度的塑性剪应变）。
- **广义 Hoek-Brown**：σci、GSI、mi、D，或直接给 mb、s、a（Hoek 等，2002）；按瞬时内摩擦角与黏聚力返回到非线性包络线；可设应变软化（残余 GSI 或残余 mb、s、a）。
- **硬化土 HS**：E50ref、Eoedref、Eurref、m、pref、νur、Rf、K0nc、OCR、POP；剪切硬化面、帽盖与摩尔-库伦破坏面，刚度随应力变化，加载与卸载再加载刚度不同；帽盖参数由侧限压缩模拟自动反算。
- **小应变硬化土 HSsmall**：在硬化土基础上增加 G0ref、γ0.7，小应变刚度按修正 Hardin-Drnevich 曲线衰减，叠加层记忆应变历史，循环加载时给出滞回。

- **修正剑桥 MCC**：λ、κ、M、e0、K0nc、OCR、POP；椭圆屈服面、体积硬化，M 可由内摩擦角自动换算。
- **软土蠕变 SSC**：λ*、κ*、μ*、νur、M、K0nc、OCR、POP；体积蠕变随施工阶段的时间间隔与固结时间发展，破坏由摩尔-库伦面控制。
- **砂土液化 UBC3D-PLM**：(N1)60、φcv 及模量系数，其余参数可由 (N1)60 自动换算；动力时程分析中累积超孔压直至液化，给出超孔压比云图。



图 5-22 （左）可选的本构模型（右）硬化土参数组

5.16 排水类型、初始状态与接触面

- **四种排水类型**：排水；不排水 A（有效刚度、有效强度，由体积应变计算超孔压）；不排水 B（有效刚度、不排水抗剪强度 su）；不排水 C（总应力，不排水模量 Eu 与 su）。su 可自参考高程随深度线性增长。
- **初始状态**：静止侧压力系数 K0 可按模型自动取值（1 − sinφ、ν/(1 − ν)、K0nc·OCR − νur/(1 − νur)·(OCR − 1) 等）；硬化土、修正剑桥、软土蠕变的先期固结状态由超固结比 OCR 或先期上覆压力 POP 给出。
- **接触面与结构面**：弹性-摩尔-库伦滑移与受拉张开；墙、衬砌两侧的接触面按相邻土体乘强度折减系数 R_inter，节理、结构面可直接给法向刚度、切向刚度、c、φ 与抗拉强度。
- **强度折减**：各本构模型都能接在施工阶段之后做强度折减，按各自的破坏强度折减；应变软化材料的残余强度按同一系数折减。



图 5-23 （左）不排水 B 的不排水抗剪强度及其随深度的增长（右）应变软化的残余参数

5.17 与岩土计算实验室联动

- 岩土计算实验室可对同名模型模拟三轴、侧限、直剪等单元试验，用试验数据标定参数，并把参数写回工程材料。
- 写回时自动换算参数定义：硬化土 E50ref = E50/(2 − Rf)，Hoek-Brown 的 σci 由 MPa 换成 kPa；软土蠕变与 Hoek-Brown 在实验室与有限元中是同一个模型。
- 应力-变形结果中可查看塑性点（剪切屈服、受拉、硬化土的硬化点）、相对剪应力、小应变刚度比 G/G0、软化程度、等效超固结比与超孔压比。

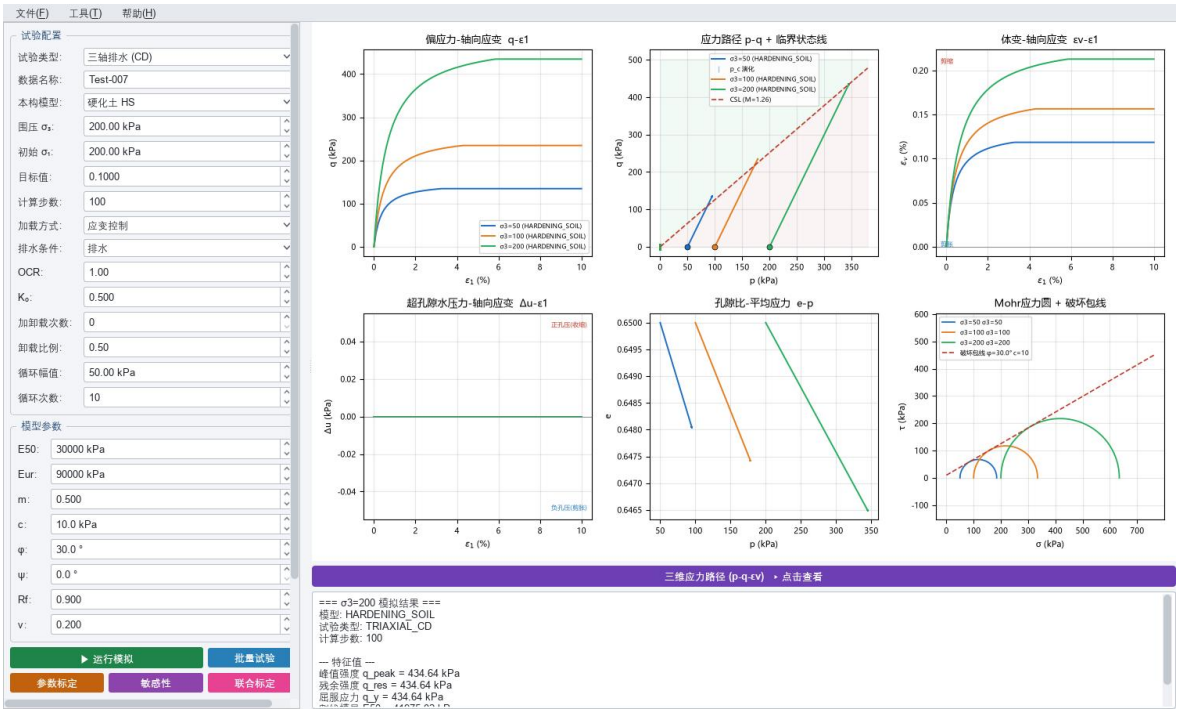


图 5-24 岩土计算实验室：硬化土三种围压的排水三轴模拟

第 6 章　渗流分析

渗流模块用二维有限元求解饱和—非饱和土体中的地下水流动，回答堤坝、边坡、基坑与地基工程中“水从哪里来、到哪里去、走多少、孔压多大”的问题：浸润线（潜水面）位置、出逸点与渗出段、单宽渗流量、水力梯度与流速、孔隙水压力分布，以及水位升降、降雨入渗过程中这些量随时间的变化。渗流结果直接作为极限平衡边坡稳定分析与有限元应力分析的孔压来源。

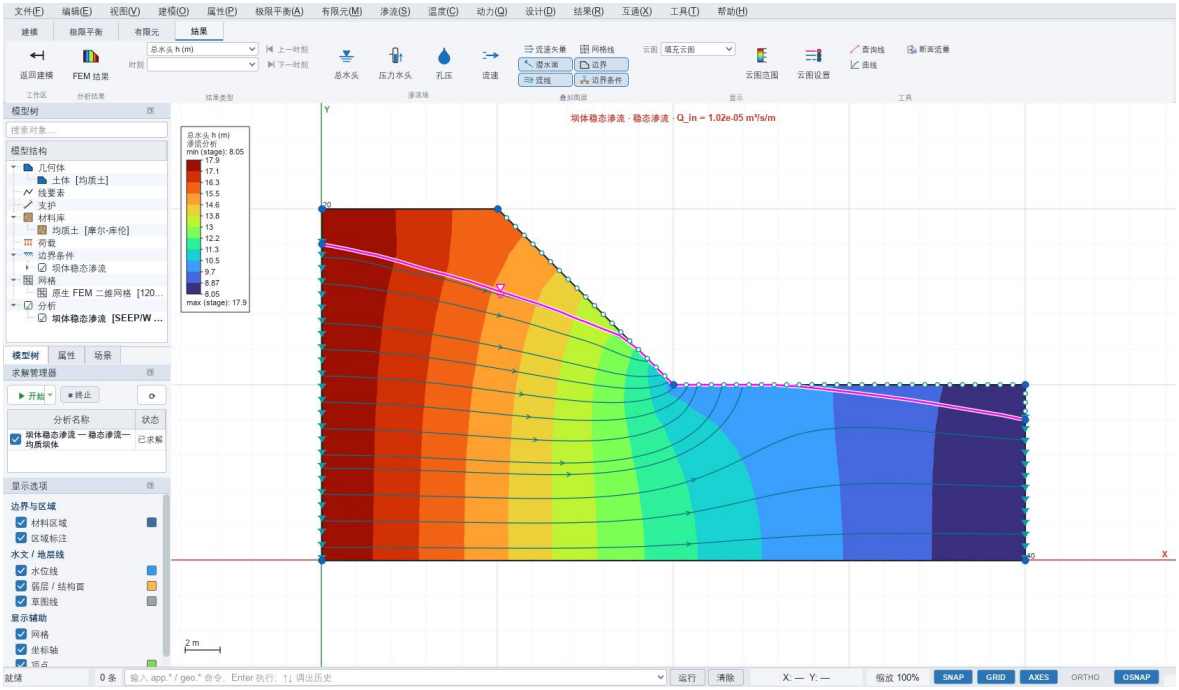


图 6-1　均质坝体稳态渗流：总水头云图、潜水面（浸润线）与流线

6.1　功能概览

表 6-1　渗流分析功能一览

类别	功能
分析类型	自由面稳态（潜水面由迭代确定）、承压稳态（全域饱和）、瞬态饱和—非饱和渗流
介质	各材料独立的水力属性；各向异性饱和渗透系数（kx、ky 与主方向角）；饱和、van Genuchten–Mualem、数据表三种非饱和渗透系数函数；饱和/残余体积含水量与比储水率
边界	总水头、压力水头、零压力、潜在渗出面、节点总流量、单位流量、降雨入渗（可积水转径流）、内部排水线、井（可设最低水头）；边界值可按时间函数变化
求解	稀疏直接法；稳态 Picard 迭代与渗出面迭代判别；瞬态向后差分、质量守恒形式的 Newton 迭代与自适应步长；全程水量平衡检查
结果	总水头、压力水头、孔隙水压力、基质吸力、体积含水量、饱和度、流速及其分量、水力梯度及其分量、渗透系数分量、相对渗透系数共 15 种云图；潜水面、流线、流速矢量叠加；逐边界流量表；断面流量；查询线；瞬态时刻切换与监测点时程曲线
联合分析	渗流结果作为极限平衡、应力—变形、固结与强度折减的孔压来源；可与温度场、孔隙气体流动相互作用，为组分运移提供流场

渗流与有限元应力分析共用同一套网格与分析树：在“有限元”工作流中划分网格后，即可在同一个工程里建立渗流分析，再把它设为边坡稳定分析或应力分析的父分析。



图 6-2 「渗流」菜单



图 6-3 功能区“有限元”页：模型、渗流、温度、分析、计算与结果各组

6.2 使用流程

1. 建立二维几何并给各区域指定材料，在“有限元”工作流中划分网格；排水线、井所在的折线在划分网格前指派。
2. 「渗流 → 水力属性」设置各材料的渗透系数与非饱和函数。
3. 「渗流 → 新建分析」建立稳态或瞬态渗流分析，在分析属性中设父分析、瞬态时长与输出时刻数。
4. 「渗流 → 渗流边界」指派水头、流量、渗出面、降雨、排水线与井等边界，需要时给出时间函数。
5. 「渗流 → 渗流求解」检查设置后运行，查看收敛信息、水量平衡与逐边界流量。
6. 「渗流 → 渗流结果」查看云图、潜水面与流线，取断面流量、查询线与时程曲线。
7. 把渗流分析设为边坡稳定分析或应力分析的父分析，继续做稳定或变形计算。

6.3 分析类型与分析树

渗流分析以“分析”的形式挂在工程的分析树上，每个分析有自己的方法（稳态 / 瞬态）、父分析、边界与求解设置，结果按分析分别保存。

- 新建：「渗流 → 新建分析 → 稳态渗流 / 瞬态渗流」，或功能区“有限元”页 → 新建分析；新分析接在当前分析之后，并复制父分析的渗流边界作为起点。
- 自由面稳态：不需要预先给出浸润线位置，求解器在固定网格上迭代降低潜水面以上土体的相对渗透系数，使潜水面自然浮现，并对潜在渗出面逐节点判别出渗段。
- 承压稳态：全域按饱和计算，一次线性求解，适用于含水层、承压地基与解析校核。

- 瞬态渗流：以父渗流分析末时刻的水头、t = 0 时刻边界的稳态解、水位线静水压力或均一总水头为初始条件；瞬态接在瞬态之后时按累计时间计时，边界时间函数与结果时刻连续。
- 一个工程里可以并列多个渗流分析（如正常蓄水位、骤降、降雨等工况），分别求解、分别查看。



图 6-4 （左）分析树：稳态渗流下接库水位骤降、降雨入渗两个瞬态分析（右）「渗流 → 新建分析」子菜单

6.4 水力属性

「渗流 → 水力属性」对话框按材料设置渗流参数，右侧实时预览 k(ψ) 与 θ(ψ) 两条曲线。

- 饱和渗透系数：kx、ky 与主方向角，可各向同性或各向异性；未单独设置的材料取材料参数中的渗透系数 k。
- 非饱和渗透系数函数：
  - 饱和（自由面用线性斜坡）：潜水面附近在一个过渡带内线性降低相对渗透系数，过渡带缺省取半个平均单元边长，网格加密时收敛到尖锐的自由面；
  - van Genuchten–Mualem：由 α、n 两个参数给出土水特征曲线与相对渗透系数（van Genuchten，1980；Mualem，1976）；
  - 数据表 k(ψ)：逐行输入吸力水头、渗透系数与体积含水量（可空），渗透系数按对数线性插值，用于直接采用试验数据。
- 储水参数：饱和体积含水量 θs、残余体积含水量 θr、饱和区比储水率 Ss，供瞬态分析计算储水量变化。

- kr 下限：相对渗透系数的下限，避免干燥区系数矩阵奇异。

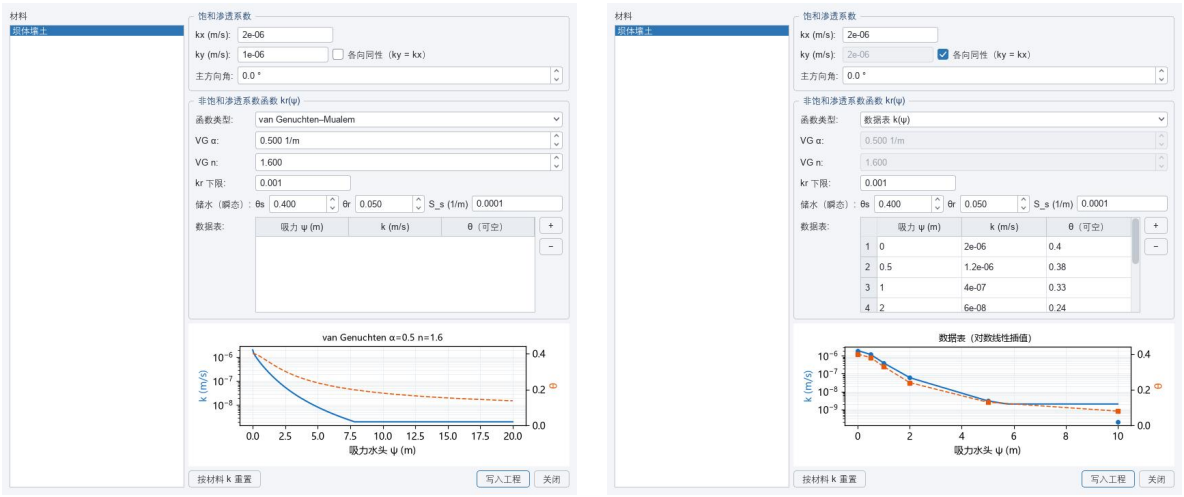


图 6-5　水力属性对话框（左）各向异性渗透系数与 van Genuchten－Mualem 函数（右）以数据表定义 k(ψ) 与 θ(ψ)

6.5　渗流边界

「渗流 → 渗流边界」对话框把边界指派到网格的边界段（节点组）或画布上选中的边界段；排水线与井指派给模型内部的折线，折线随即成为网格约束线。未指定边界的外边界为不透水边界。

- 总水头 H：上下游水位、河渠水位；
- 压力水头 p 与零压力：给定压力水头；零压力用于自由排水面；
- 潜在渗出面：出渗段位置由求解迭代确定，出渗段压力水头为零，其余部分不透水；
- 节点总流量 Q、单位流量 q：入流为正、出流为负；
- 降雨入渗：给竖向降雨强度，按水平投影面积换算为斜坡边界上的法向入渗量；可勾选“积水时超渗雨量转为地表径流”并给积水深度上限，雨强超过入渗能力时多余雨量计为径流；
- 排水线：模型内部的排水沟、盲沟、排水褥垫等，孔压不高于 0 或总水头不高于给定值；
- 井：沿井的折线（滤管段）按长度分配总流量，抽水为负、注水为正；抽水井可给最低水头，水头降到该值时抽水量自动减小。

边界值可以随时间变化：在边界列表中选中一条边界，点“时间函数…”以折线表格给出数值随时间的变化（线性插值，两端保持端值），用于库水位升降、骤降与降雨过程。画布上的边界段也可右键直接指派常用渗流边界。



图 6-6 （左）渗流边界类型（右）时间函数：上游水位 2 d 内由 18 m 降至 8 m

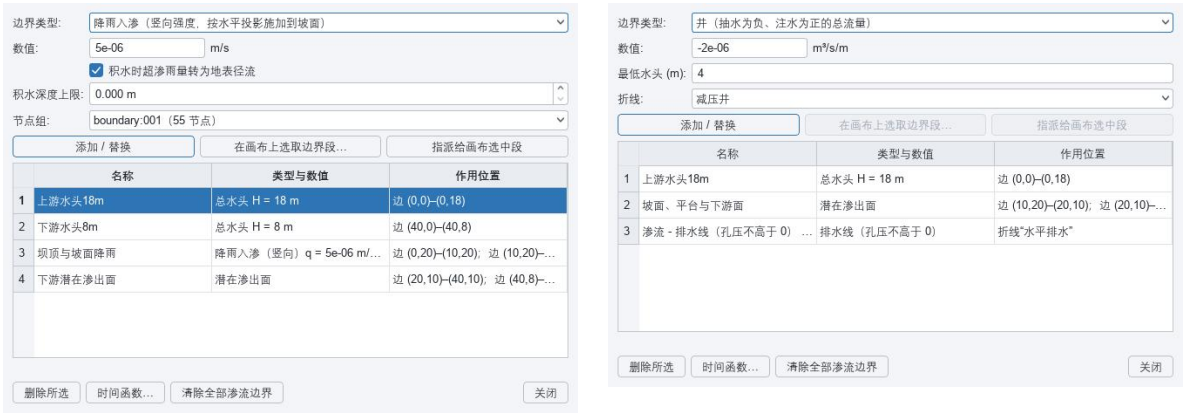


图 6-7 渗流边界对话框（左）降雨入渗与积水转径流（右）井：折线、总流量与最低水头

6.6 求解

「渗流 → 渗流求解」打开求解对话框：在"设置与运行"页选择渗流分析与分析类型、迭代控制、瞬态时间控制与流线条数，点"运行渗流分析"；求解日志给出迭代次数、流入与流出量、水量平衡误差和提示信息。

- 稳态：Picard 迭代，相对渗透系数在对数空间欠松弛、松弛系数自适应；潜在渗出面、排水线、降雨积水节点与限流井在迭代中逐节点判别状态，出渗点附近反复翻转的节点按违反量较小的状态锁定。
- 瞬态：Richards 方程以向后差分离散，残差直接用储水量之差，逐步水量守恒；每个时间步做完整 Newton 迭代，步长按收敛快慢自动放大或减半，输出时刻精确落步；最小步长下仍不收敛的时刻在结果中标出。
- 总水头边界在水位下降后高于水面的节点自动转为潜在渗出面，模拟骤降时上游坡面的出水。
- 求解结束后可在"结果"页查看收敛信息、水量平衡与逐边界流量。



图 6-8　渗流分析求解对话框（左）瞬态分析的设置页（右）稳态结果页：收敛信息与逐边界流量

6.7　结果与后处理

「渗流 → 渗流结果」或功能区“结果”页显示渗流结果，云图与叠加层画在主画布上。

- 云图：总水头、压力水头、孔隙水压力、基质吸力、体积含水量、饱和度、流速大小与水平、竖向分量、水力梯度大小与分量、水平与竖向渗透系数、相对渗透系数；
- 叠加图层：潜水面（压力水头为零的等值线）、流线（从入流边界按等流量间隔追踪）、流速矢量、网格线、模型边界与边界条件符号；颜色、线宽、线型在“云图设置”中修改；
- 断面流量：在画布上点两点画一条断面线，给出穿越该断面的单宽流量；
- 查询线：沿任意直线取所选结果量的分布曲线，可导出 CSV；
- 瞬态结果：功能区“时刻”下拉逐个查看输出时刻；求解对话框列出各时刻的储水量、累计流入、流出、地表径流与最大孔压；“时程曲线”给出监测点的水头、孔压、吸力、含水量、饱和度、流速随时间的变化与水量平衡曲线。

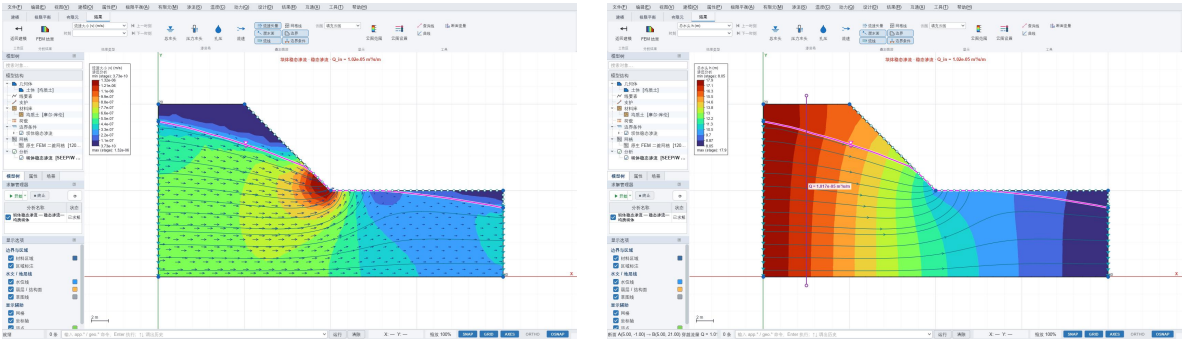


图 6-9　均质坝体（左）流速云图与流速矢量（右）x = 5 m 断面的穿越流量

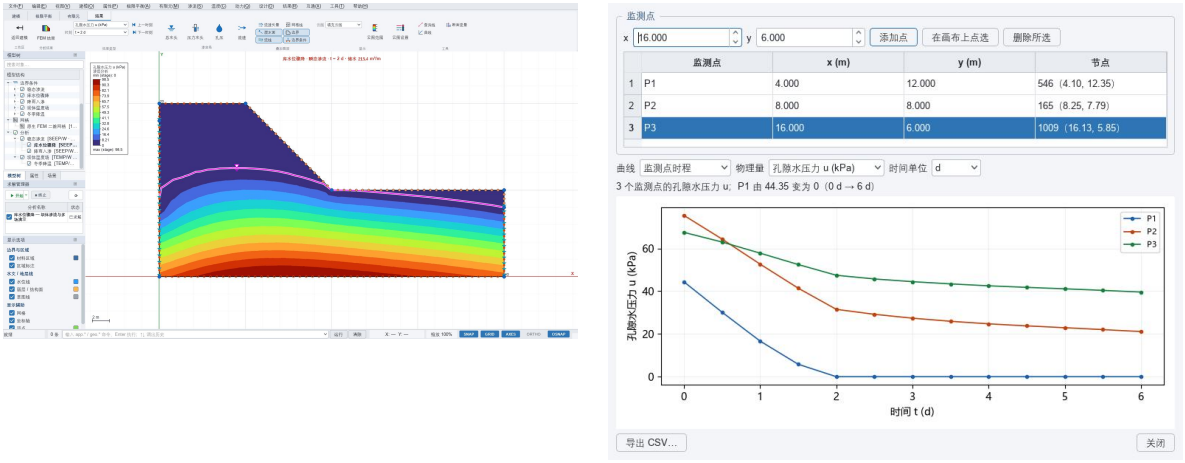


图 6-10　库水位骤降（左）t = 2 d 孔隙水压力与滞后的浸润线（右）三个监测点的孔隙水压力时程

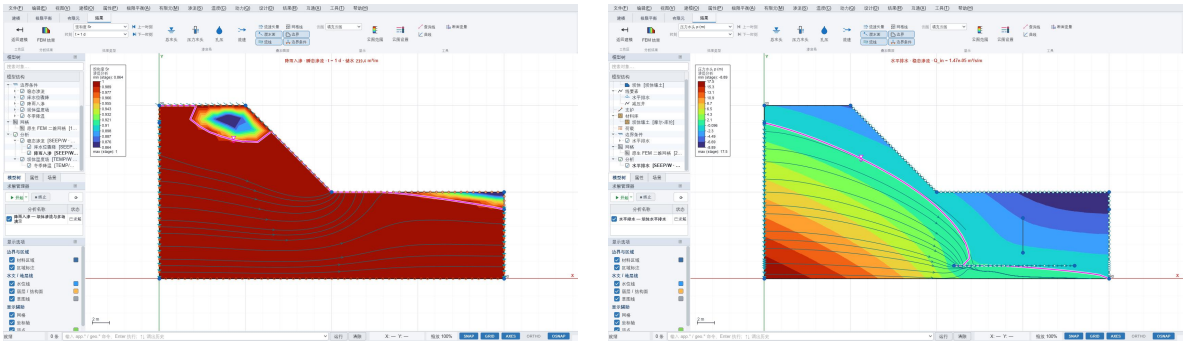


图 6-11　（左）降雨入渗 1 d 后的饱和度（右）坝基水平排水线：压力水头与下降的浸润线

6.8　典型应用

- 堤坝与边坡的稳态渗流：给出上下游水位与可能出水的坡面，求浸润线、出逸点与渗出段、单宽渗流量与逐边界流量。随包示例“均质坝体”中，潜水面在坡面 (18, 12) 处出逸，上游入流 1.017×10^{-5} m³/s/m 中 71% 从坡面与平台的渗出段流出、29% 从下游水下边界流出。
- 渗透稳定复核：水力梯度云图与查询线给出出逸段、坡脚等部位的梯度，示例坝体的最大水力梯度约 0.67，位于坡脚出逸点附近。
- 库水位骤降：上游水位按时间函数下降，坝体内浸润线滞后于库水位，露出水面的上游坡面自动按渗出面出水；示例中水位 2 d 内由 18 m 降至 8 m，坝体下部监测点的孔隙水压力逐步消散，6 d 时仍高于新水位对应的静水压力。
- 降雨入渗与地表径流：坡面施加竖向降雨，雨强超过入渗能力时地表积水、超渗雨量计为径流；示例中坝顶与坡面 2 d 降雨 17.3 m³/m，其中 14.4 m³/m 成为地表径流，坡顶浅层形成暂态饱和带。
- 排水措施：坝基、坡脚的排水褥垫、盲沟按排水线模拟，示例中水平排水体截走 98% 的渗流，浸润线降到排水体附近；降水井、减压井按井模拟，抽水井可设最低水头。

- 基坑与地基：止水帷幕、防渗墙按低渗透性材料分区，坑内降水井与坑外回灌井按井边界，各向异性地层按 kx、ky 与主方向角。

6.9 结果输出

- 结果图可从「结果」菜单复制到剪贴板或导出为 PNG、JPEG 图片；
- 查询线、时程曲线的数据可导出 CSV；
- 有限元计算报告（Word、PDF 或 HTML）含渗流分析一节：水头与孔隙水压力、水力梯度、逐边界流量与水量平衡；
- 求解管理器按各场景当前分析的类型启动求解，渗流、温度、组分运移与孔隙气体流动分析都可由它求解，并可批量求解多个场景。

6.10 渗流结果供极限平衡与有限元使用

- 边坡稳定（极限平衡）分析的父分析是渗流分析时，条底孔压取渗流结果（含潜水面以上的负孔压，材料给出非饱和强度角 φb 时计入吸力强度）；父分析是瞬态渗流时取结果页选中的时刻。渗流分析没有结果或结果已过期时，求解前提示先求解渗流。
- 有限元应力—变形分析的孔压来源选“渗流分析结果或水位线”时，取其分析链上游渗流分析的孔压；强度折减同样取用渗流孔压。
- 渗流结果记录求解时的输入：改动网格、水力属性、渗流边界或求解设置后，结果标为过期，取用时给出提示或先重新求解。

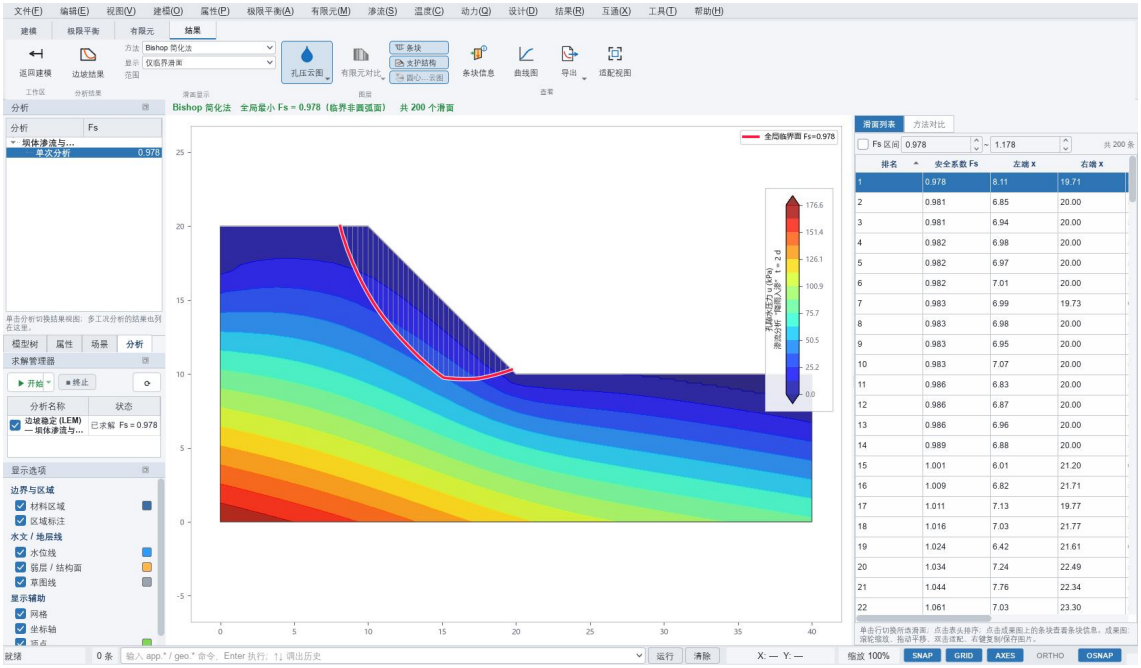


图 6-12 降雨入渗 2 d 后的坡面稳定分析：条底孔压取自瞬态渗流结果

6.11 计算校核

- 承压矩形（随包示例“承压矩形 解析校核”）：20 m × 10 m，左右总水头 20 m 与 12 m，上下不透水，$k = 2\times10^{-6}$ m/s。解析解 $h = 20 - 0.4x$、单宽流量 8×10^{-6} m³/s/m；计算的最大水头误差 8.2×10^{-14} m，流量与解析解相同。
- 矩形坝自由面：长 10 m，上下游水位 9 m 与 3 m，下游面设潜在渗出面。Charny（1951）证明矩形坝的单宽流量精确等于 $k(H_1^2 - H_2^2)/(2L)$；0.4 m 二次三角形网格的计算流量比该值大 1.2%，出渗点高于下游水位。
- 均质坝体（随包示例“均质坝体 稳态渗流”）：26 次迭代收敛，入流 1.017×10^{-5} m³/s/m 等于渗出面与下游边界的出流之和，水量平衡相对误差小于 10^{-12}；坝前 $x = 5$ m 断面的穿越流量与入流相同。
- 瞬态分析逐步按储水量之差计算残差，库水位骤降与降雨入渗算例的全程水量平衡误差分别为 7.9×10^{-9} 与 8.9×10^{-8}。

第 7 章　温度场分析

温度场模块求解岩土体中的稳态与瞬态导热，用于地温场、坝体与库水的热交换、季节性降温、能源桩与地埋管周围土体、隧道与基坑的温度影响等问题。温度分析可以计入孔隙水流动带走的热量，温度结果又可以作用到应力—变形分析（温度应变）以及渗流、组分运移、孔隙气体流动分析（参数随温度修正）。

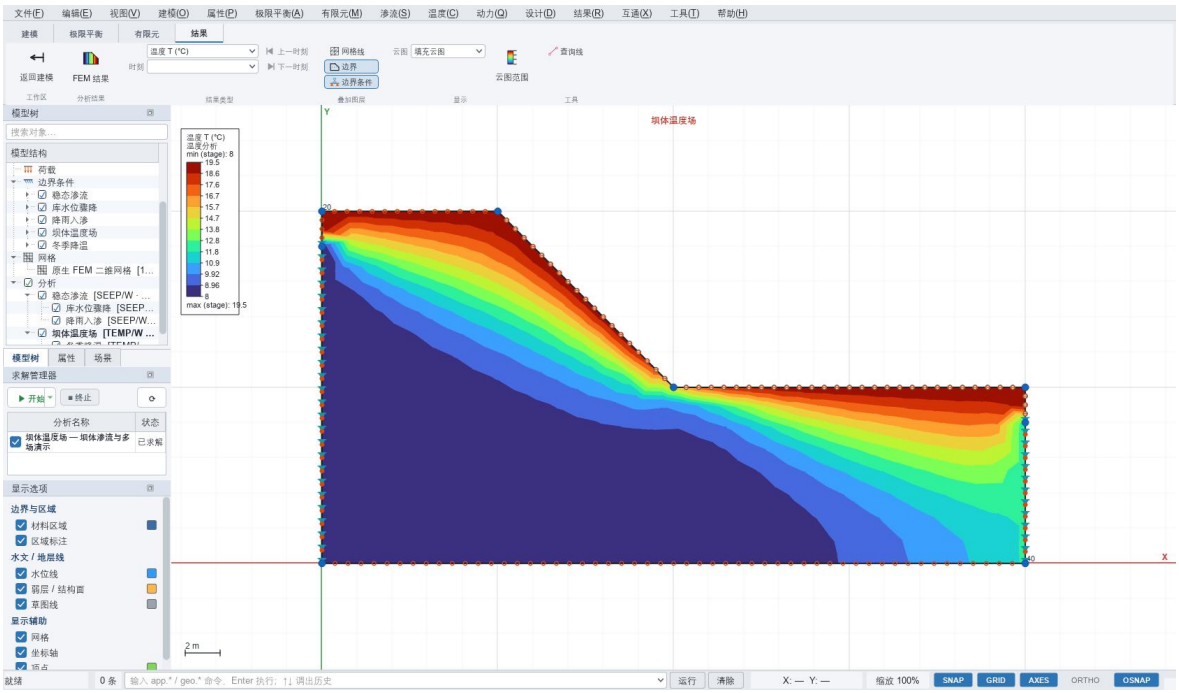


图 7-1　坝体稳态温度场：库水 8 ° C 由上游面渗入，渗流把低温带向下游

7.1　功能概览

- 分析类型：稳态导热、瞬态导热；瞬态分析可接在温度分析之后，以父分析末态为初始温度，时刻接着父分析的结束时刻；
- 热学属性：导热系数 λx、λy 与主方向角（各向异性），体积热容，体积热源，线膨胀系数；
- 边界：定温、热流（流入为正）、对流换热 h·(T∞ − T)；边界值可按时间函数变化（如气温的季节变化）；未指定的外边界为绝热边界；
- 对流传热：在分析属性中指定一个渗流分析后，计入孔隙水流动带走的热量，流速取该渗流分析的结果，瞬态渗流按输出时刻插值；网格 Péclet 数大时沿流向加数值扩散；
- 结果：温度、热流密度大小与水平、竖向分量云图，瞬态按时刻查看，查询线取沿线分布；
- 热—力联合：荷载-变形、应力重分布分析可指定温度分析，本阶段的温度变化 ΔT 按 ε = α·ΔT 产生温度应变，适用于全部本构模型。

7.2 操作

「温度」菜单与功能区“有限元”页的“温度”组提供热学属性、温度边界、新建分析、温度求解与温度结果五个命令，工作流与渗流相同：设属性 → 新建温度分析 → 指派边界 → 求解 → 查看结果。



图 7-2　热学属性表：导热系数、体积热容、体积热源与线膨胀系数



图 7-3　温度边界对话框：定温、热流与对流换热





图 7-4 （左）温度分析属性：初始温度与对流传热所用的渗流分析（右）对流边界环境温度的时间函数

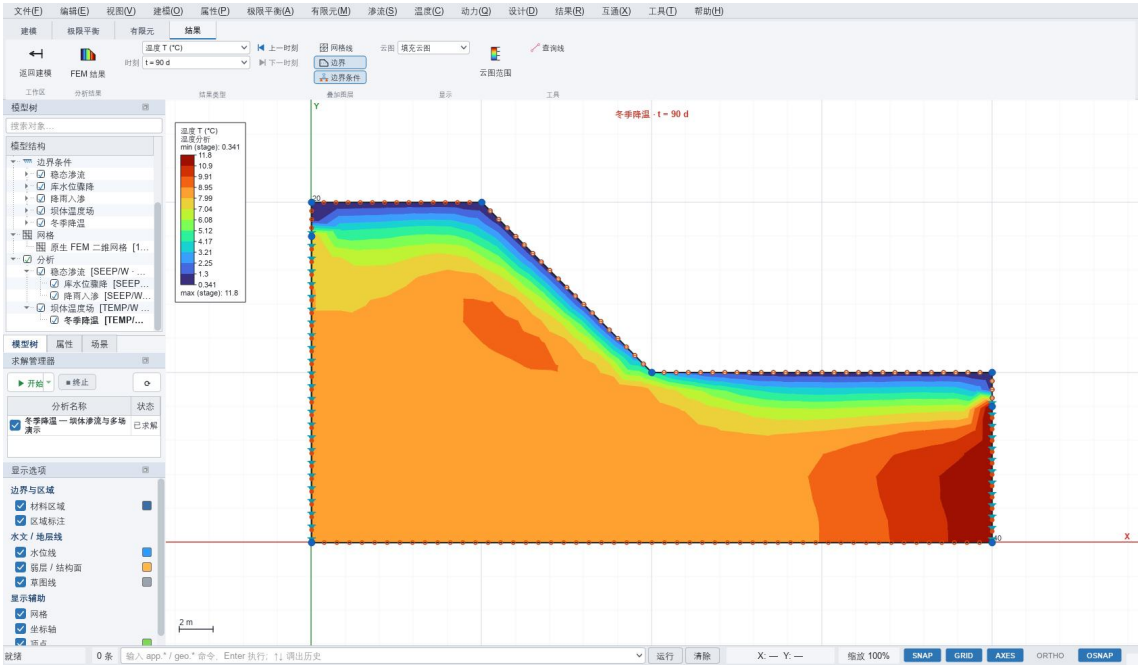


图 7-5 瞬态温度场：气温 30 d 内由 20 ° C 降至 0 ° C 后第 90 d 的温度分布

7.3 方法依据

导热方程 $C\cdot\partial T/\partial t = \nabla\cdot(\lambda\nabla T) + Q$ 用 Galerkin 有限元离散，热容矩阵按一致质量矩阵积分，时间积分取无条件稳定的向后差分，同一步长下系数矩阵只分解一次。对流换热项并入系数矩阵与右端，孔隙水对流项按流线迎风稳定。

7.4 典型应用

- 坝体与库水的热交换：上游库水温度、坝面与大气的对流换热、坝基地热流共同作用；计入渗流的对流传热后，低温库水沿渗流路径进入坝体，坝体下部形成低温区，等温线随流线向下游倾斜。
- 气温的季节变化：对流边界的环境温度按时间函数变化，瞬态分析给出降温自坝面向内传播的过程。示例中气温 30 d 内由 20 °C 降至 0 °C，第 90 d 坝面附近接近 0 °C，坝体内部仍保留稳态时的温度分布。
- 地温场与热源：底边施加地热流、顶面施加年平均气温或对流边界，稳态分析得到地温场；体积热源与热流边界用于发热体、地埋换热管、能源桩周围土体的温度计算。
- 温度应力：温度结果经应力分析的“温度作用”产生温度应变，计算温度引起的应力与变形。

7.5 计算校核

半无限体表面温度阶跃（λ = 2 W/m/K，体积热容 2000 kJ/m³/K，顶面温度阶跃 10 °C）：以等步长计算到 40 d，与解析解 T0·erfc(z/2√(at)) 的最大差在时间步长 1 d、0.5 d、0.25 d 时分别为 0.034 °C、0.017 °C、0.0086 °C，误差随步长线性减小。

第 8 章　组分运移与孔隙气体流动

组分运移模块模拟溶质随孔隙水、气体组分在充气孔隙中的对流—弥散—扩散，考虑线性吸附（阻滞）与一阶衰减，用于污染物迁移、示踪试验、渗滤液扩散与防渗屏障评价。孔隙气体流动模块求解非饱和区的孔隙气压与气体渗流，并能与渗流分析交替或逐时间步耦合求解，用于降雨、水位上升时孔隙气被压缩、地表通气条件对入渗的影响等问题。两类分析都建立在渗流分析之上，工程里有对应分析时，功能区“有限元”页显示“组分运移”“孔隙气”两组命令。



图 8-1　功能区“有限元”页：工程中有组分运移、孔隙气体流动分析时显示的两组命令

两类分析的命令都在「渗流」菜单下：「渗流 → 新建分析」新建稳态或瞬态的组分运移、孔隙气体流动分析；「渗流 → 组分运移」子菜单有组分运移参数、组分运移边界、组分运移求解与组分运移结果；「渗流 → 孔隙气体」子菜单有孔隙气参数、孔隙气边界、孔隙气体流动求解与孔隙气体流动结果。求解对话框给出概要、质量或气量平衡与提示，结果显示在主画布上，可按时刻切换、取查询线并查看监测点时程曲线。



图 8-2　（左）「渗流 → 组分运移」子菜单（右）「渗流 → 孔隙气体」子菜单

8.1　组分运移

- 组分相态：溶质（随孔隙水）或气体组分（在充气孔隙中）；浓度单位可在 mg/L、μg/L、g/L、g/m³、kg/m³、mmol/L、mol/m³、Bq/L、Bq/m³、ppm、% 中选择；
- 运移参数：纵向、横向弥散度，分子扩散系数，曲折因子（留空按 Millington–Quirk 公式随含量变化），孔隙率（留空取饱和体积含水量），干密度与分配系数（线性吸附），半衰期（一阶衰减）与衰减活化能（温度修正）；
- 流场来源：父分析为渗流分析时取其流速与含水量（瞬态渗流按时刻插值），父分析为孔隙气体流动分析时气体组分随孔隙气对流，父分析为组分运移分析时以其末态为初始浓度；没有父分析时为饱和、静止孔隙水中的扩散；
- 边界：定浓度、质量通量、来水浓度；外边界及渗流分析中井、排水线的节点上，水流出处组分按节点浓度随水带出；

- 数值方法：守恒形式的 Galerkin 有限元，储存项按节点集中，与渗流的节点储水量同一口径，均匀浓度在非均匀流场中保持不变；θ 法时间积分（向后差分或 Crank–Nicolson）；网格 Péclet 数大于 2 时按流线方向加数值弥散，结果报告最大网格 Péclet 数与 Courant 数；
- 结果：浓度云图与时刻切换，监测点浓度时程，域内组分量与累计流入、流出、衰减曲线及质量平衡误差；
- 温度修正：指定温度分析后，分子扩散系数按温度修正（溶质按 Stokes–Einstein 关系，气体按 T^1.75），衰减速率按 Arrhenius 关系修正。



图 8-3　运移参数表：弥散度、分子扩散系数、曲折因子、孔隙率、吸附与衰减参数



图 8-4　运移边界对话框：定浓度、质量通量与来水浓度

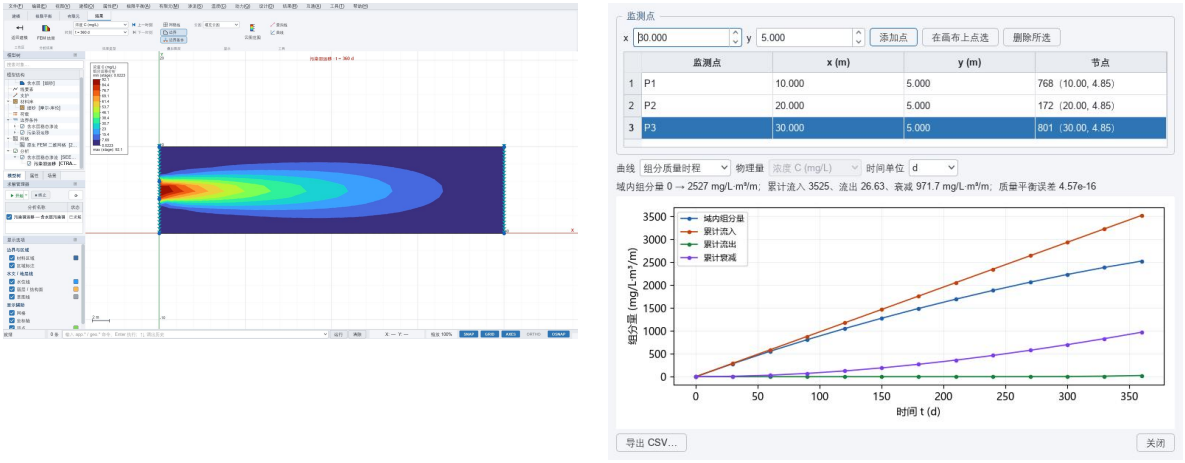


图 8-5　含水层污染羽（左）360 d 的浓度分布（右）域内组分量与累计流入、流出、衰减

8.2　孔隙气体流动

- 控制方程由孔隙气质量守恒与等温理想气体状态方程导出，按质量形式离散，无流动时即 Boyle 定律；孔隙水增减引起的充气孔隙体积变化（水进入孔隙压缩孔隙气）计入方程右端；
- 参数：孔隙率、残余含水量与 van Genuchten n 取自水力属性；内在渗透率缺省由饱和渗透系数换算，也可按材料直接给出各向异性的 κ、κy 与主方向角；相对气体渗透率按 Parker 等（1987）的关系；空气黏度按 Sutherland 公式随温度取值；
- 饱和度不小于 0.9 的节点视为封闭气泡，不参与气体流动；
- 边界：孔隙气压（相对大气压的表压，与大气连通的地表取 0）与气体单位流量，其余外边界不透气；
- 水—气相互作用：渗流分析指定孔隙气体流动分析后，基质吸力按 ua − uw 计；“水—气交替耦合求解”在两者都是瞬态且时长相同时逐时间步耦合，每步内交替求解至孔隙气压一致，其余情况交替求解两个分析至相邻两轮气压差小于容差；
- 结果：孔隙气压、基质吸力、充气孔隙率、气体通量及其分量云图，监测点时程与边界累计气量曲线。

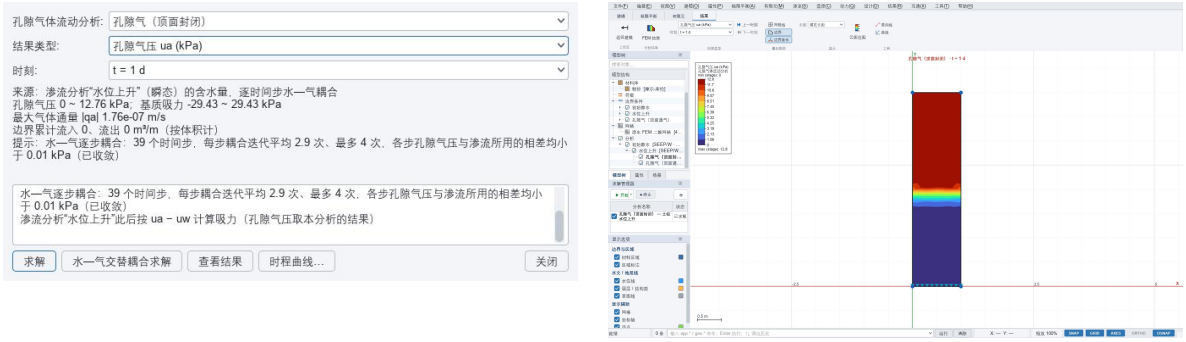


图 8-6　土柱水位上升、顶面封闭（左）水—气逐时间步耦合求解（右）1 d 后的孔隙气压

8.3 示例与计算校核

- 含水层污染羽：40 m × 10 m 承压含水层，左右总水头 12 m、10 m，左边界 4～6 m 段来水含示踪剂 100 mg/L，阻滞因子 1.47、半衰期 365 d。计算 360 d，污染羽前缘约 8 mg/L 等值线到达 x ≈ 33 m；域内组分量 2527 mg/L·m³/m，累计流入 3525、衰减 972 mg/L·m³/m，质量平衡误差 4.6×10^{-16}。
- 土柱水位上升：1 m × 4 m 粉砂土柱，底部水头 1 d 内由 1 m 升到 3 m。顶面封闭时，不计水—气耦合的孔隙气压升到 42.7 kPa，逐时间步耦合求解（每步迭代 4 次以内）的孔隙气压为 12.8 kPa，孔隙气压阻碍了进水；顶面通大气时气压不超过 0.12 kPa。
- 一维对流—弥散与 Ogata–Banks（1961）解：网格 Péclet 数为 1 时，Crank–Nicolson 的最大浓度差为 C0 的 1.4%，缺省设置（向后差分加流线迎风）为 2.4%，质量平衡误差为 10^{-15} 量级；阻滞因子取 1 与 2 时误差相同。
- 地表气压阶跃与线性扩散解：干燥土柱顶面气压阶跃 1 kPa，100 s 时各节点与解析解的最大差为 0.18%。

8.4 多场相互作用

表 8-1　水—热—气—质相互作用

设置位置	作用
渗流分析属性 → 孔隙气体流动分析	吸力按 ua − uw 计，孔隙气压改变含水量与渗透系数
渗流分析属性 → 温度分析	渗透系数按水的动力黏度随温度修正
温度分析属性 → 渗流分析	计入孔隙水流动带走的热量（导热—对流）
组分运移分析属性 → 温度分析	分子扩散系数与衰减速率随温度修正
孔隙气体流动分析属性 → 温度分析	空气黏度随温度取值
应力分析属性 → 温度作用	温度变化产生温度应变 ε = α·ΔT
父分析关系	渗流 → 组分运移（流场）；渗流 → 孔隙气体流动（含水量）；孔隙气体流动 → 气体组分运移（气体流场）

所用分析的结果改动后，下游结果标为过期，求解对话框给出“请重新求解”的提示。

第 9 章　动力分析与地震工程

地震作用下的边坡、地基、挡土结构与土石坝需要回答三类问题：地震动经过土层传到地表后放大了多少，岩土体在地震过程中的加速度、位移、应力与孔隙水压力怎样变化，以及震中、震后的稳定性与永久变形有多大。iGeoLab 的动力与地震模块覆盖从地震动准备到震后评价的完整流程：内置实测强震记录的地震波库与地震波编辑、按规范设计反应谱合成人工波，在有限元分析链上做二维动力时程分析（弹塑性、等效线性与砂土液化），用一维场地反应计算场地放大与反应谱，再接震后静力分析、强度折减、有限元应力法安全系数时程与 Newmark 滑块永久位移；拟静力系数、设计反应谱、场地类别与液化判别按现行规范条文计算。

9.1　功能与入口

动力与地震的命令集中在菜单栏的「动力」菜单（图 9-1）。动力时程分析是分析树上的一种分析，同样可以从功能区“有限元”页的“新建分析”下拉或模型树的分析节点右键添加；极限平衡的拟静力地震系数与水工抗震惯性力分布在「极限平衡 → 项目设置」中设定。



图 9-1　「动力」菜单

表 9-1　动力与地震功能一览

功能	入口	内容
动力时程分析	「动力 → 新建动力时程分析」「动力 → 动力分析设置」	接在原位应力、荷载-变形或固结分析之后的二维有限元动力分析：地震动输入、Newmark 时间积分、Rayleigh 阻尼、动力边界、动荷载、等效线性
地震波库	「动力 → 地震波库」	128 条内置实测记录的检索、预览与来源信息；读入多种格式的记录文件、在线下载、编辑、导出
人工波合成	「动力 → 人工波合成」	按 GB/T 50011 设计反应谱或自定义反应谱合成加速度时程，可一次生成多条
动力求解与结果	「动力 → 动力求解」「动力 → 动力结果」	求解分析链；各输出时刻与全过程峰值的云图、放大系数、超孔压比、等效线性的模量比与阻尼比，结果动画
时程曲线与反应谱	「动力 → 时程曲线与反应谱」	任意点的加速度、速度、位移时程与 5% 阻尼拟加速度反应谱，可叠加输入地震动、导出 CSV
地震动力分析	「动力 → 地震动力分析（场地响应 / 反应谱）」	一维场地反应（线性、等效线性、非线性时域）、反应谱分析与 GB 50011 设计谱对比、单自

功能	入口	内容
		由度时程估算、GB 50330 拟静力地震系数
震后稳定与永久位移	分析树中接在动力分析之后的“边坡稳定”分析（有限元应力法）、强度折减	安全系数时程、Newmark 滑块累计永久位移、震后强度折减
拟静力与水工抗震	「极限平衡 → 项目设置」“地震作用（拟静力法）”组	水平、竖向地震系数，土石坝动态分布系数（GB 51247-2018）

9.2 二维动力时程分析

动力时程分析以静力分析的终态为初始状态，在地震动或随时间变化的荷载作用下逐时间步求解运动方程，得到岩土体与结构构件在整个过程中的位移、速度、加速度、应力、塑性区与超孔隙水压力。它在分析树上接在原位应力、荷载-变形（施工阶段）或固结分析之后，沿用父分析的激活区域、支护构件、孔压与静力约束；其后可以再接震后荷载-变形、固结（超孔压消散）、应力重分布与强度折减分析，以及用有限元应力法求边坡安全系数时程的“边坡稳定”分析，构成“静力 → 地震 → 震后”的完整分析链。

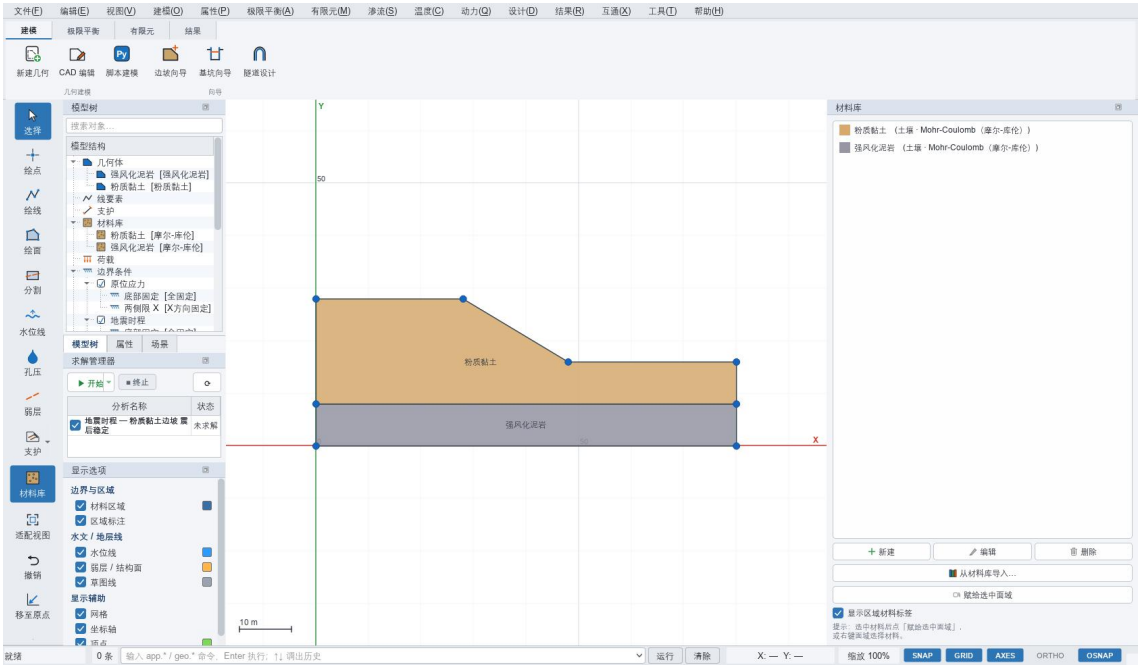


图 9-2　粉质黏土边坡动力分析模型（下卧强风化泥岩），模型树按分析列出边界条件

9.2.1 求解方法

- 运动方程 M·ü + C·u̇ + fint(u) = fstatic + f(t)，质量按材料重度换算（ρ = γ/g），采用一致质量矩阵；板单元的质量集中到节点。
- 时间积分采用 Newmark 法，提供平均加速度法（γ = 0.5、β = 0.25，无条件稳定、无数值阻尼）与带数值阻尼的格式（γ = 0.6、β = 0.3025，抑制高频数值噪声）两种；每个时间步按 Newton 迭代求平衡，先用初始弹性有效刚度迭代、收敛慢时改用一致切线，仍不收敛时自动对分时间步。

- 全部本构模型都可用于动力分析：线弹性、摩尔-库伦、广义 Hoek-Brown、硬化土、小应变硬化土、修正剑桥、软土蠕变与砂土液化模型 UBC3D-PLM（见“材料与参数”一章），应变软化材料在每个时间步内更新强度；不排水材料在动力分析中按不排水响应计算孔压。结构构件（板、锚杆、土钉、支撑、嵌入桩）与接触面随模型一起参与计算。
- 求解信息给出所用的 Rayleigh 系数与频率、场地基频估计、网格可传递的最高频率（每个剪切波长 5 个单元），输入地震动的主要能量高于该频率、时间步大于记录采样间隔、分析结束时模型仍在振动等情况都有提示。

9.2.2 地震动输入

- 输入类型四种：地震波记录（从地震波库选取、读入文件或人工合成，可再编辑）、Ricker 子波（给中心频率）、正弦波（给频率与周期数）、无地震输入（只施加动荷载，如机器振动、冲击）。
- 地震波记录可调幅至指定峰值加速度并做基线校正（记录结束时速度与位移为零），对话框即时显示采样点数、采样间隔、持时、峰值与波形预览，所显示的就是求解所用的输入。
- 竖向分量可按水平分量乘比例（常取 0.65），或单独读入竖向记录（UD 分量）。
- 输入记录随分析设置保存在工程文件里，工程拷到别的计算机照样可算，不依赖原文件路径或地震波库。

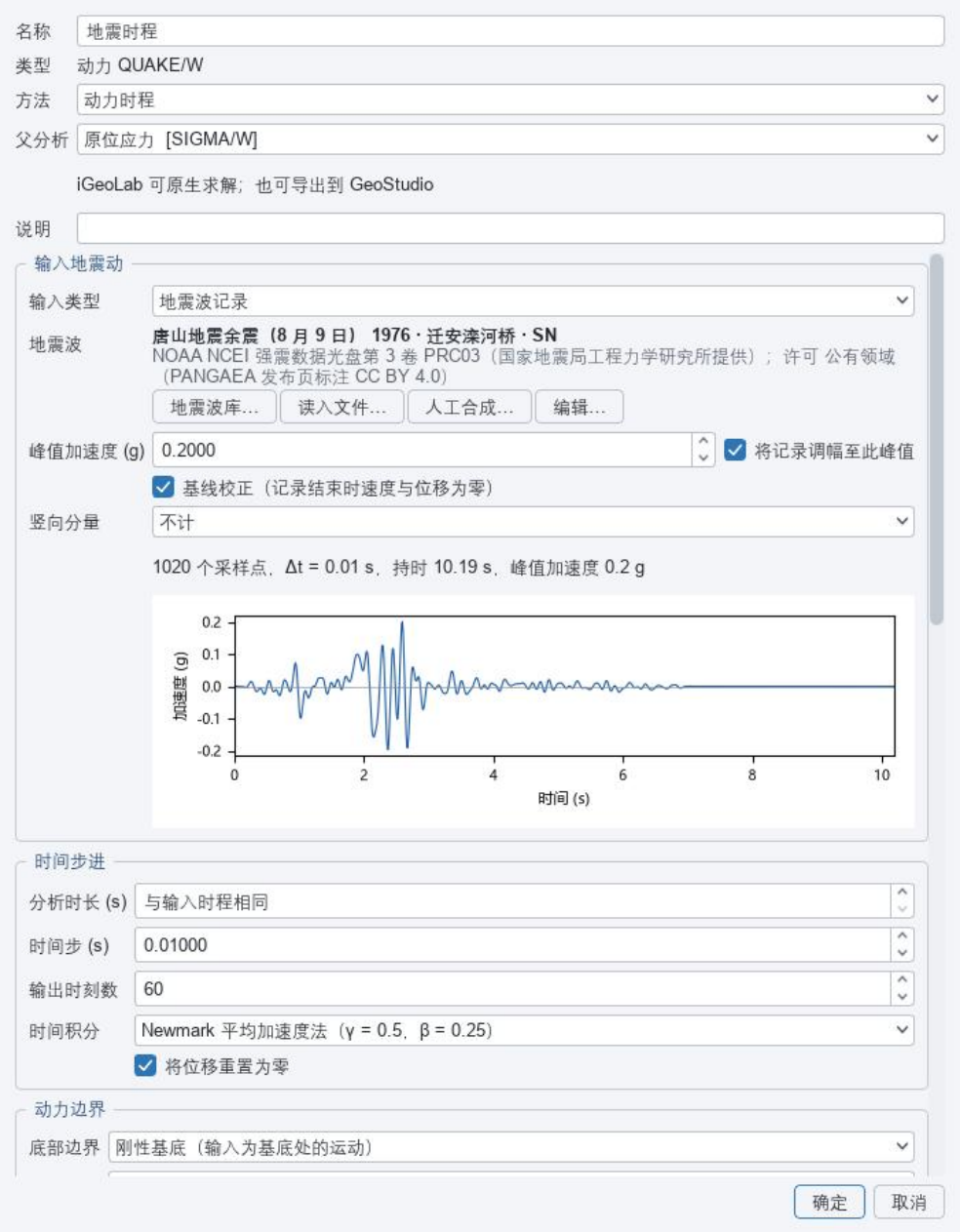


图 9-3　动力分析设置：输入地震动（地震波库记录，调幅至 0.2 g、基线校正）与波形预览

9.2.3　动力边界

- 底部边界：刚性基底（输入为基底处的运动，位移为相对基底的位移）或柔性基底（底边为黏滞边界，输入为基岩露头运动，适合模拟下卧半空间对波的吸收）。
- 侧边界五种：自由场边界（缺省，两侧各接一列一维自由场土柱，竖向传播的地震波原样通过、散射波被吸收，弹塑性分析中侧边不漂移）、黏弹性边界、黏滞边界、绑定自由度（左右两侧同高程位移相同，用于水平成层场地的一维反应）与沿用静力分析的约束。
- 模型宽度相对高度不足、两侧没有竖直边等情况在求解信息中给出说明。

9.2.4 阻尼与动荷载

- Rayleigh 阻尼 $C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K$，由阻尼比与两个控制频率确定。频率可自动按场地基频取：$f_1 = Vs/(4H)$（Vs 为按面积加权慢度平均的等效剪切波速，H 为模型高度），$f_2 = 5f_1$；也可手工给定。
- 动荷载：在分析中勾选工程里的荷载，各给一个时间函数——时间–系数表格（线性插值）或正弦函数（频率、幅值系数、相位、起止时间），荷载值乘以系数随时间施加，可与地震输入同时作用。
- 监测点：地表节点自动记录每个时间步的全时程，另可添加任意位置的监测点。



图 9-4 （左）动力边界设置（右）Rayleigh 阻尼设置

9.2.5 等效线性动力分析

勾选“模量与阻尼比随有效剪应变迭代”后，动力分析按等效线性法计算：每一轮计算全时程，由各单元的有效剪应变（系数 × 最大动剪应变，缺省 0.65）查模量折减曲线与阻尼比曲线，作为下一轮的剪切模量与阻尼比，直到前后两轮相差不超过容差。各材料可选 Seed-Idriss 砂土曲线、Vucetic-Dobry 黏土曲线（按塑性指数 0～200 分 6 组）或自定义表格，曲线可在对话框中查看与编辑。迭代采用 Aitken 动态松弛，窄带输入接近共振、强非线性土层集中变形两类情况都能收敛。结果给出等效模量比 G/Gmax、等效阻尼比与有效剪应变云图，各轮的应变、模量比差与阻尼比差列在求解信息中。



图 9-5 （左）等效线性设置与各材料的曲线（右）Vucetic-Dobry 黏土曲线（PI = 15）

9.2.6 砂土液化与震后孔压消散

饱和砂土采用 UBC3D-PLM 模型，材料只需给定修正标准贯入击数 (N1)60 与常体积内摩擦角 φcv，其余弹性与塑性参数可由 (N1)60 自动换算。不排水砂土在循环荷载下塑性体积收缩、超孔隙水压力累积直至液化，结果有各输出时刻的超孔压比 $r_u = 1 - \sigma_v'/\sigma_{v0}'$ 与全过程最大超孔压比 $r_{u,max}$ 云图，最大超孔压比达到 0.7 的单元在求解提示中按液化计数。动力分析之后接固结分析即可计算震后超孔压的消散与再固结沉降。

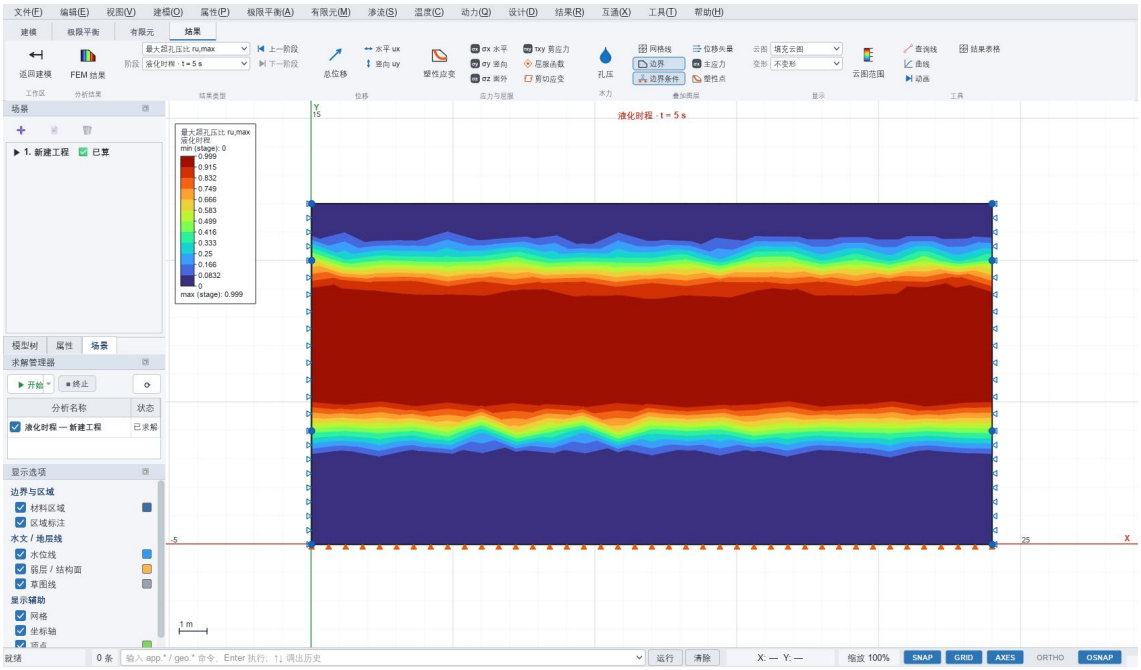


图 9-6　水平场地液化分析：饱和松砂层的最大超孔压比 ru,max 云图

9.2.7　求解与结果

「动力 → 动力求解」打开应力-变形求解窗口，整条分析链在后台依次求解，进度按已完成的时间比例显示，完成后给出水平峰值加速度与最大动位移。结果页的“阶段”下拉按输出时刻列出（“开始”为动力分析开始时的静力状态），“结果类型”除位移、应力、应变、塑性点、孔压外，动力分析另有：

- 各输出时刻的水平、竖向加速度与速度；
- 全过程的水平、竖向峰值加速度，水平峰值速度，水平、竖向最大动位移；
- 水平峰值加速度放大系数（节点水平峰值加速度与输入峰值之比）；
- 超孔压比 ru 与最大超孔压比 ru,max（有不排水材料时），等效模量比、等效阻尼比与有效剪应变（等效线性分析）。

“动画”按输出时刻逐帧播放云图，可调帧间隔、循环播放，导出 PNG 帧序列或 GIF 动画。

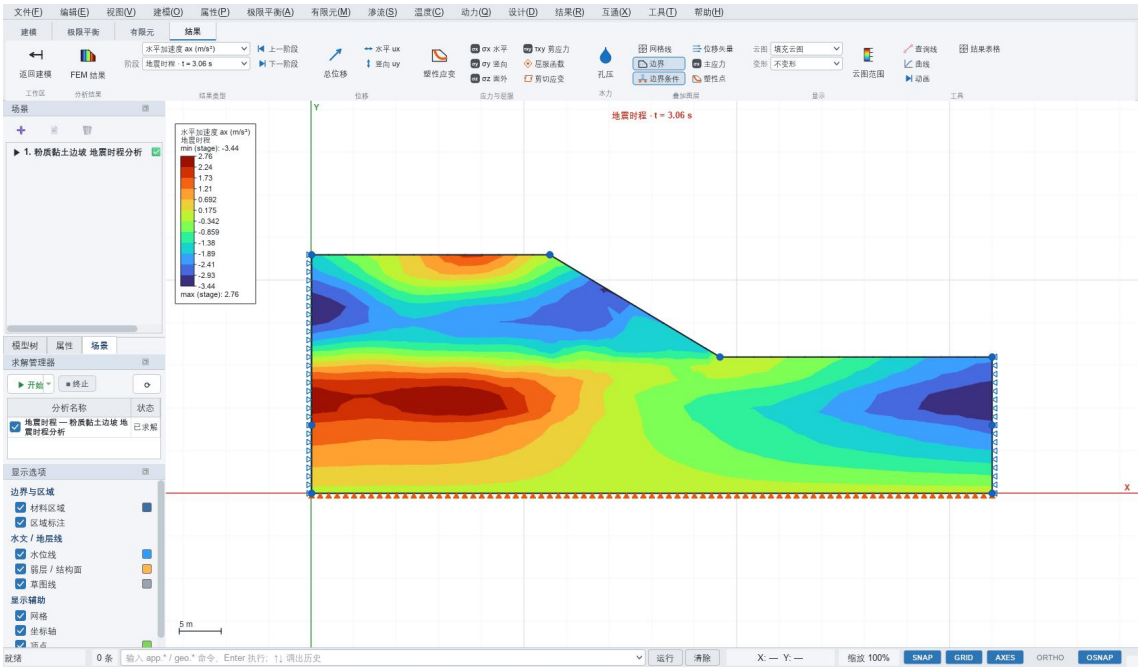


图 9-7　边坡地震时程分析：某一输出时刻的水平加速度云图

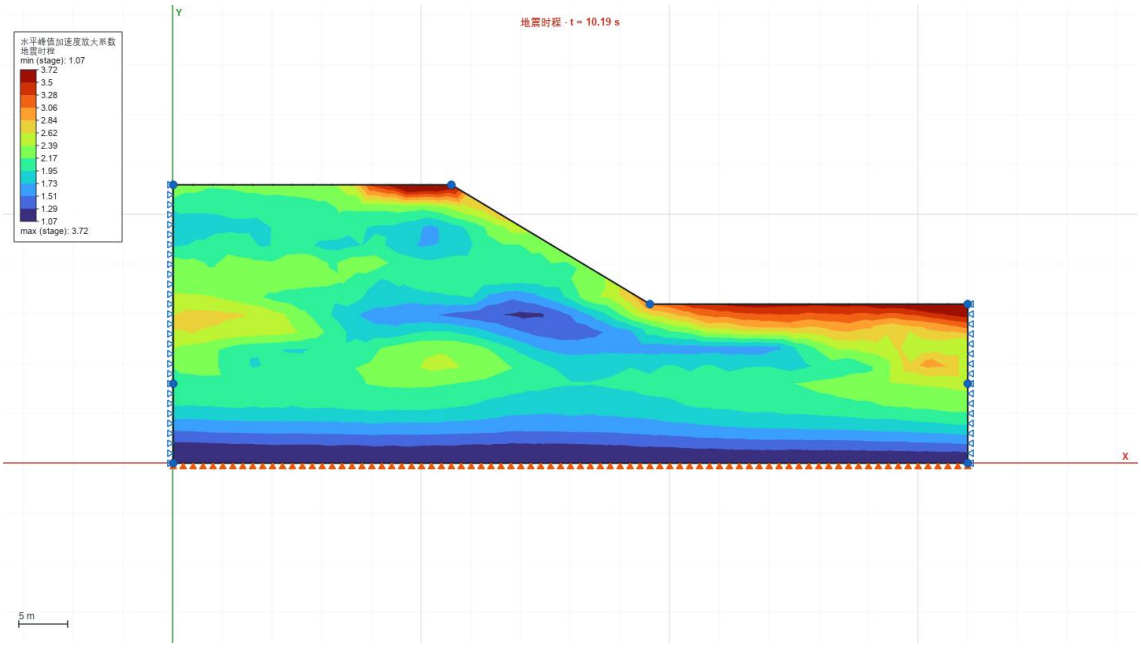


图 9-8　水平峰值加速度放大系数云图（坡顶与坡肩放大最明显）

9.2.8　时程曲线与反应谱

「动力 → 时程曲线与反应谱」对任意点给出水平或竖向的加速度、速度、位移时程，以及 5% 阻尼拟加速度反应谱，可叠加输入地震动对比、导出 CSV。点可在画布上点选、输入坐标，或一键取“地表峰值加速度最大处”。地表节点与监测点按每个时间步记录全时程，其余节点按输出时刻绘制。

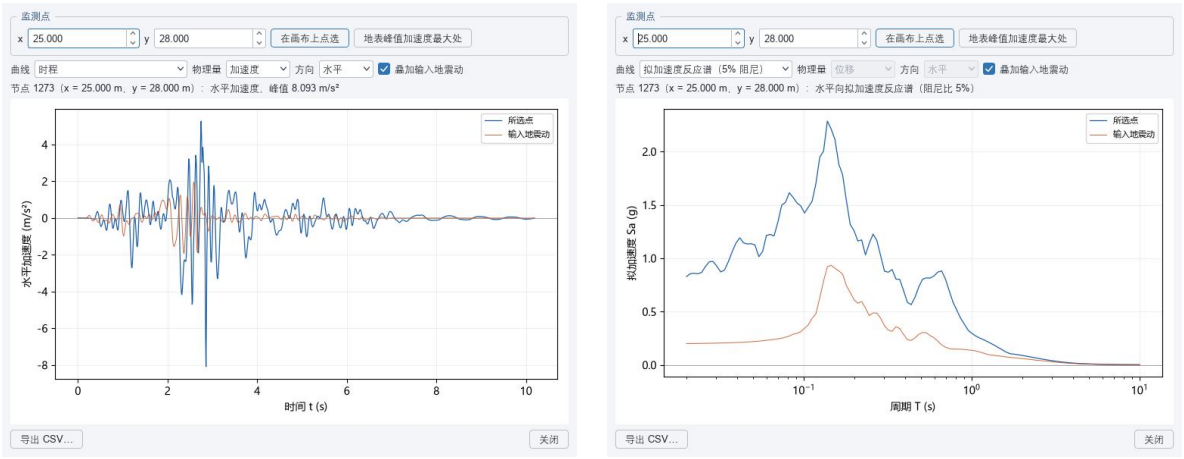


图 9-9 （左）坡顶水平加速度时程与输入地震动（右）坡顶与输入地震动的拟加速度反应谱

9.3 地震波库

地震波库内置 128 条实测强震记录，全部取自许可允许再分发的公开数据库（公有领域或知识共享署名许可），每条记录附数据来源、许可与引用：

- 国内记录 25 条，排在最前：唐山地震序列 12 条（国家地震局工程力学研究所提供，收于 NOAA NCEI 强震数据光盘）、2018 年与 2024 年花莲地震 12 条、2008 年汶川地震恩施台远场记录 1 条；
- 国外经典记录 17 条：1940 年 El Centro、1952 年 Taft、1949 年 Olympia、1966 年 Parkfield、1967 年 Koyna、1968 年八户港、1971 年 Pacoima Dam、1977 年 Bucharest、1985 年墨西哥城等（NOAA NCEI，公有领域）；
- 意大利、新西兰、缅甸等近年地震的 86 条记录（ESM、GeoNet 数据库，CC BY 许可），含 Vs30 与 EC8 场地类别。

记录可按事件、台站、来源关键词检索，按地区、震级、震中距、场地类别、峰值加速度筛选；右侧即时预览加速度时程与 5% 阻尼拟加速度反应谱，并列出事件、日期、震级、震源机制、台站、分量、震中距、Vs30、峰值加速度、采样与数据处理信息。



图 9-10　地震波库：记录列表（国内记录在前）、加速度时程与反应谱预览、记录信息

用户可以把自己的记录加入用户库：

- 读入文件：自动识别 PEER NGA（.AT2）、ESM ASCII、K-NET / KiK-net ASCII、国家强震动台网中心（CSMNC）与工程力学研究所的加速度记录文件、GeoNet Vol2（.V2A 与 CSV），以及两列（时间、加速度）或单列文本（指定单位与采样间隔），多分量文件按分量分别存储；
- 在线下载：按事件名、年份与震级检索 ESM 数据库的事件与台站记录，多选后下载到用户库（使用时需要联网）；
- 人工合成与编辑的地震波可另存为用户记录；用户记录可修改事件、台站、备注等信息，可删除；任一记录可导出为两列文本（时间 s、加速度 g），文件头写明来源、许可与引用。

9.4　地震波编辑

地震波编辑按“操作步骤”处理记录：调幅（至指定峰值或乘以系数）、基线校正（终了速度与位移归零，或速度的一至三次多项式拟合）、零相位 Butterworth 带通 / 低通 / 高通滤波、截取时段、按 Arias 强度截取有效持时、重采样（加大间隔时先低通防混叠）、首尾余弦加窗、末尾补零与反向。步骤自上而下依次施加于原始记录，可随时增删、修改与重排，原始数据不变。窗口对比显示原始与编辑后的加速度、速度、位移时程，Fourier 幅值谱，反应谱与 Arias 强度累计曲线，并列出 PGA、PGV、PGD、Arias 强度、有效持时 D5–95、累积绝对速度 CAV、卓越周期与平均周期。编辑结果可直接用作动力分析的输入、另存到地震波库或导出。

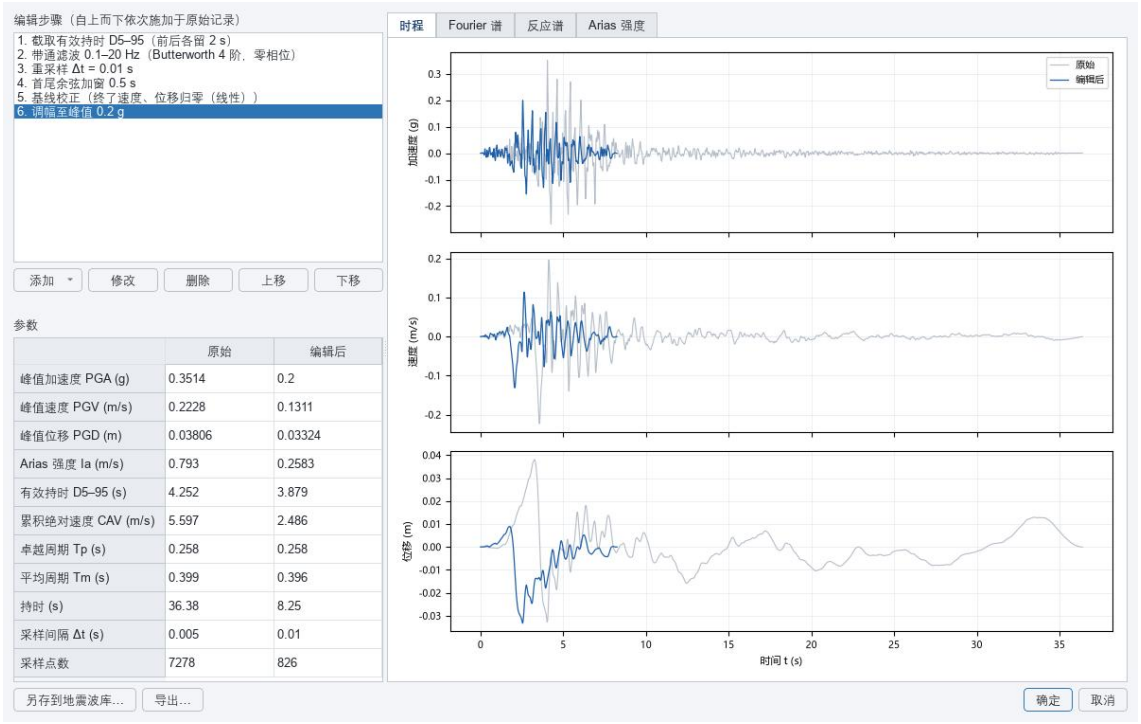


图 9-11　地震波编辑：截取有效持时、带通滤波、重采样、加窗、基线校正与调幅，对比编辑前后的时程与参数

9.5　人工波合成

人工波合成生成与目标反应谱拟合的加速度时程：

- 目标谱可取 GB/T 50011-2010（2024 年版）设计反应谱——按设防烈度（6～9 度，含 0.15g、0.30g）、地震水准（多遇、设防、罕遇）、设计地震分组与场地类别取 αmax 与 Tg，阻尼比可调；场地类别与特征周期也可由等效剪切波速与覆盖层厚度确定，处于场地类别分界线 ±15% 范围内时按插值方法确定特征周期；也可输入自定义反应谱（周期–拟加速度表，可从表格软件粘贴）。
- 合成方法为三角级数叠加、强度包络（上升、平稳、指数衰减三段，可按持时自动确定）与频域迭代调整，随机种子可复现；一次可生成多条（种子递增），对比目标谱、各条反应谱与平均谱，列出峰值、最大误差与平均误差。
- 采用规范谱时，峰值可调至规范时程分析所用的加速度峰值；合成波名称注明“人工合成波”与目标谱参数。

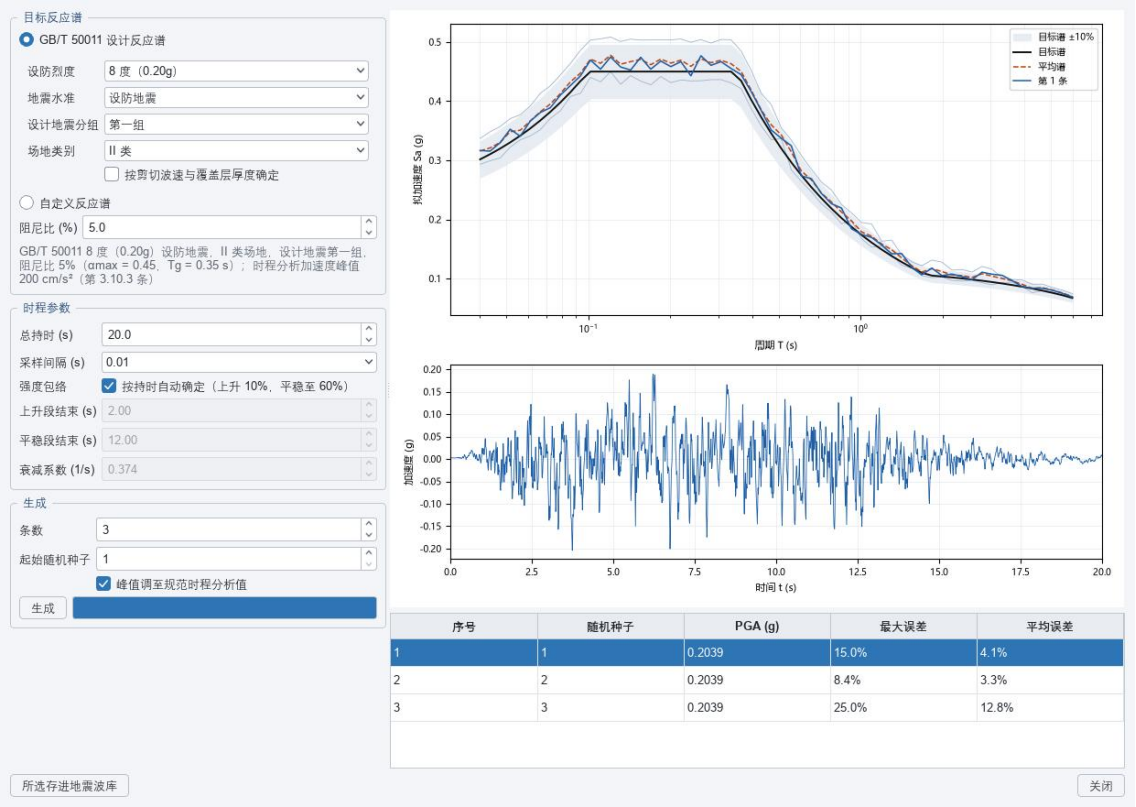


图 9-12　人工波合成：以 8 度（0.20g）设防地震、Ⅱ 类场地、第一组为目标谱合成 3 条 20 s 人工波

9.6　震后稳定与永久位移

- 有限元应力法边坡稳定：分析树中新建“边坡稳定”分析，方法选“有限元应力法（父分析 QUAKE/W）”，父分析选动力时程分析，运行极限平衡即按动力分析各输出时刻的应力沿滑面求安全系数（抗剪强度之和与剪力之和的比），搜索设置与普通条分法相同。结果页“曲线图”给出所选滑面的安全系数时程及其最小值与出现时刻。
- Newmark 滑块永久位移：同一结果页的“曲线图”另有两张图——滑体的平均地震系数 k(t) 与屈服系数 ky、累计永久位移。k(t) 由动力分析各输出时刻滑体内的加速度按质量平均得到，ky 是该滑面拟静力安全系数等于 1 时的水平地震系数（缺省 Morgenstern-Price 法），k 超过 ky 时滑块沿滑面单向滑动，对超出部分积分两次得到累计位移。
- 震后强度折减与震后静力分析：强度折减、荷载-变形、固结可直接接在动力分析之后，以震后的应力、位移与超孔压状态为起点。

示例边坡输入峰值 0.3 g 时，临界滑面的安全系数在 t = 2.5 s 降到最小值 1.055，屈服系数 ky = 0.144，滑体平均地震系数几次超过 ky，累计永久位移 4.68 mm。

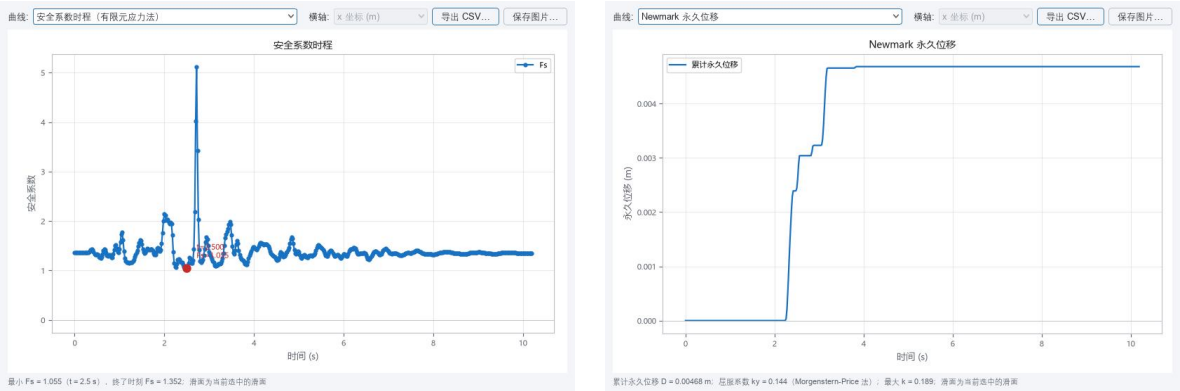


图 9-13 （左）地震过程中临界滑面的安全系数时程（右）Newmark 滑块累计永久位移

9.7 一维场地地震反应与反应谱

「动力 → 地震动力分析（场地响应 / 反应谱）」打开独立的地震动力分析窗口，用于一维水平成层场地的地震反应与反应谱分析。地震动取自地震波库（含用户记录）或导入的单列加速度文件，可缩放到目标 PGA，可做基线校正、带通滤波（Butterworth 或 Chebyshev-I）与按 GB 50011 规范谱的谱匹配。

- 场地响应分析：土层从底到顶逐层给定厚度、剪切波速、密度、阻尼比与抗剪强度，基岩给定剪切波速与密度，输入运动可设为基岩露头运动或基岩面处的列内运动。提供三种方法——线性法（频域传递函数）、等效线性法（频域迭代，Seed-Idriss 砂土、Vucetic-Dobry 黏土或 Darendeli 曲线）与非线性时域法（双曲线骨干曲线与扩展 Masing 准则，逐层可选 Vucetic-Dobry 应变型或 GMP 能量型孔压模型，孔压比上升时模量与强度同时降低）。结果给出输入与地表加速度时程、地表 PGA 与放大系数，以及传递函数（线性法）、峰值加速度沿深度分布（等效线性法）或峰值孔压比沿深度分布（非线性时域法）。
- 反应谱分析：计算给定阻尼比下的谱加速度、谱速度与谱位移，可叠加 GB 50011 设计反应谱对比。
- 时程分析：按土柱的等效单自由度体系（基本周期 $T_1 = 4H/Vs$）估算地表位移与加速度时程，用于初步估计；二维有限元动力分析用动力时程分析。
- 拟静力地震系数：按 GB 50330-2013 表 5.2.6 由地震基本烈度取边坡综合水平地震系数，可给竖向与水平地震系数之比，“应用地震系数到工程”后极限平衡即按拟静力工况计算。

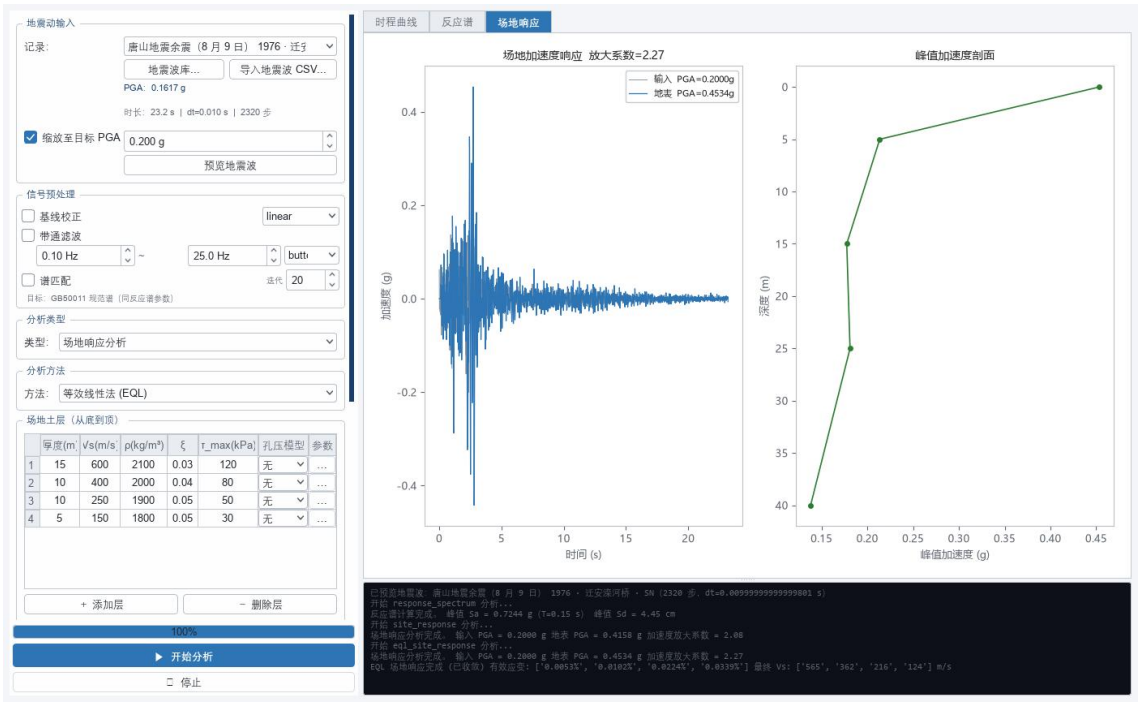


图 9-14　地震动力分析窗口：四层土场地的等效线性场地响应——输入与地表加速度时程、峰值加速度沿深度分布



图 9-15　（左）非线性时域法场地响应与峰值孔压比剖面（右）反应谱分析与 GB 50011 设计反应谱对比

9.8　抗震规范计算

软件中与地震作用有关的规范计算如下，条文出处在界面与计算结果中注明：

- 设计反应谱：GB/T 50011-2010（2024 年版）第 5.1.5 条的地震影响系数曲线（含阻尼调整系数 η_1、η_2 与衰减指数 γ），α_{max} 按表 5.1.4-1 与第 3.10.3 条、T_g 按表 5.1.4-2，计算罕遇地震作用时特征周期增加 0.05 s；α_{max}、T_g 的强制性要求见 GB 55002-2021 第 4.2.2 条。用于人工波合成的目标谱、地震动力分析窗口的谱对比与谱匹配。
- 场地类别与特征周期：覆盖层厚度按第 4.1.4 条、等效剪切波速按第 4.1.5 条、场地类别按表 4.1.6（I0～IV）；等效剪切波速与覆盖层厚度处于分界线 ±15% 范围内时，特征周期按第 4.1.6 条条文说明图 7 插值。

- 时程分析的加速度峰值：多遇、罕遇地震按表 5.1.2-2，设防地震按第 3.10.3 条取设计基本地震加速度。
- 拟静力地震系数：GB 50330-2013 表 5.2.6 的边坡综合水平地震系数（7 度 0.025 / 0.038，8 度 0.050 / 0.075，9 度 0.100）。
- 水工抗震：极限平衡的地震惯性力可按 GB 51247-2018 第 6.1.4 条的动态分布系数沿坝高分布（坝底 1.0，坝顶按设计烈度取 3.0、2.5、2.0），水平向惯性力 $E_i = a_h \cdot \xi \cdot G_E_i \cdot \alpha_i / g$（第 5.5.9 条），竖向惯性力可不计或取水平向的 1/3、2/3，方向在设置中选定（见“极限平衡边坡稳定分析”一章）。
- 液化判别：GB/T 50011-2010 第 4.3.3 条初步判别（地质年代、粉土黏粒含量、浅埋天然地基三款）、第 4.3.4 条标准贯入试验判别、第 4.3.5 条液化指数与液化等级，由规范验算模块提供（见“规范计算与智能辅助”一章）。



图 9-16 （左）由等效剪切波速与覆盖层厚度确定场地类别与特征周期（右）GB 50330 拟静力地震系数

第 10 章　岩土计算实验室

岩土计算参数来自室内试验、原位测试与施工监测，而数值分析用的本构参数往往不能从试验报告直接读出：要把原始记录整理成规范规定的成果，要把强度、压缩指标换算成模型参数，还要用单元试验确认这组参数在模型里给出与试验相符的应力—应变响应。岩土计算实验室把这些工作放在一个窗口里完成——按 GB/T 50123-2019 整理物理性质与力学试验数据，用 25 种本构模型模拟 16 种单元试验，以实测曲线标定参数，并把结果直接写回当前工程的材料，供极限平衡、有限元、渗流与固结分析使用。

10.1　实验室工作环境

- 入口：「属性 → 岩土计算实验室」打开独立的实验室窗口，与当前工程关联；整理与标定得到的参数可通过“写回工程材料”写入工程材料。
- 主界面：左侧为试验配置、模型参数与操作按钮，右侧同屏显示六幅试验曲线——偏应力—轴向应变、p–q 应力路径与临界状态线、体变—轴向应变、超孔隙水压力—轴向应变、孔隙比—平均应力、Mohr 应力圆与破坏包线，另有 p–q–εv 三维应力路径视图。
- 结果管理：每次模拟或导入的曲线进入结果列表，多组结果叠加比较；试验配置与全部结果可保存为实验项目文件，随时重新加载。
- 输出：结果导出为 CSV、Excel、PNG/PDF 图片，试验报告导出为 Word、PDF。
- 工具菜单：GB/T 50123 标准模板（物理性质试验、试验数据整理、力学性质试验模板）、SWCC 土水特征曲线、参数转换工具、沉降监测分析、平板载荷与 CPT 反算、施工应力路径还原、专业三轴试验系统、三轴数据批量导入、多试验实时模拟面板与 Python 脚本控制台。

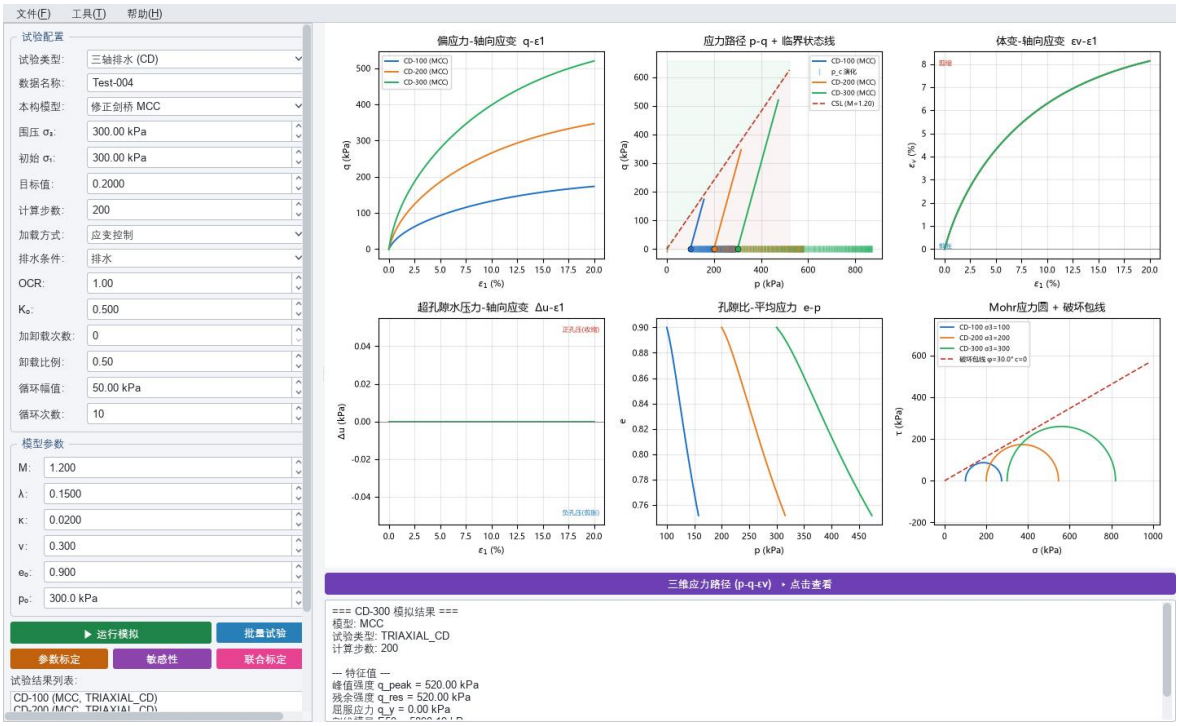


图 10-1　岩土计算实验室主窗口：修正剑桥模型正常固结黏土的三轴排水试验（σ3 = 100、200、300 kPa）

10.2　单元试验模拟

单元试验模拟以单个试样为对象，按试验的加载路径给出应变或应力增量，由本构模型逐增量计算应力，用于检验模型行为与参数取值。

- 16 种试验：三轴排水 (CD)、固结不排水 (CU)、不排水 (UU)、通用三轴；侧限压缩 (OED，含分级加卸载)、等应变速率压缩 (CRS)；直剪试验与快剪、固结快剪、慢剪；等向压缩；旁压试验 (PMT)；循环三轴；循环扭剪；液化试验；吸力控制三轴（非饱和）。
- 25 种本构模型：线弹性、莫尔-库仑、邓肯-张、Drucker-Prager、修正剑桥、软土、硬化土、小应变硬化土、软土蠕变、Hoek-Brown 岩体、PM4Sand、郭氏粗粒土、巴塞罗那基本模型 (BBM)、节理岩体、NGI-ADP、关口-太田、NorSand、CASM、PM4Silt、SANISAND、UBC3D-PLM、亚塑性、Creep-SCLAY1S、各向异性修正剑桥与自定义模型；参数表随模型切换，给出缺省值与取值范围。
- 试验条件：围压与初始轴压（可为各向异性初始应力）、目标应变或应力、计算步数、应变控制或应力控制、K_0、排水条件、循环幅值与循环次数；“批量试验”一次输入多级围压或垂直压力。
- 不排水试验按体积不变计算超孔隙水压力，给出有效应力路径；液化试验给出循环应力比、孔压比发展与液化振次；直剪试验按 GB/T 50123-2019 第 21 章取抗剪强度并回归 c、φ。

- 特征值自动提取：峰值强度、残余强度、屈服应力、割线模量 E50、初始切线模量 Ei，压缩类试验的压缩指数，循环试验的动模量，旁压试验的极限压力与旁压模量。
- 线弹性、莫尔-库仑、修正剑桥、硬化土、小应变硬化土、软土蠕变与 Hoek-Brown 岩体与有限元中的同名模型对应：软土蠕变、Hoek-Brown 与有限元是同一套计算，硬化土、修正剑桥写回时按有限元的参数定义换算，有限元重算的三轴曲线与实验室结果一致。
- GB/T 50123 模板：三轴 CD（松砂、密砂）、三轴 CU、三轴 UU、侧限压缩、直剪快剪、固结快剪、慢剪与循环三轴模板一键设置试验类型、模型、参数与条件。



图 10-2 （左）16 种单元试验与数据整理入口（右）25 种本构模型

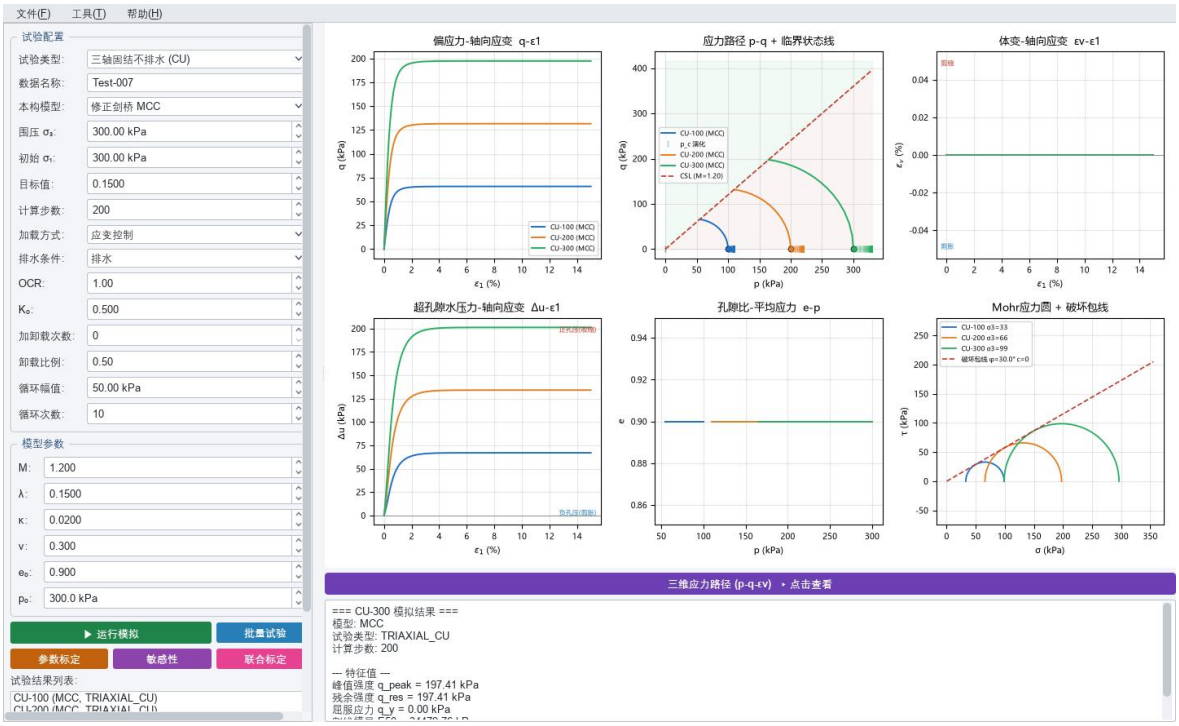


图 10-3　三轴固结不排水试验模拟：有效应力路径趋向临界状态线，超孔隙水压力为正

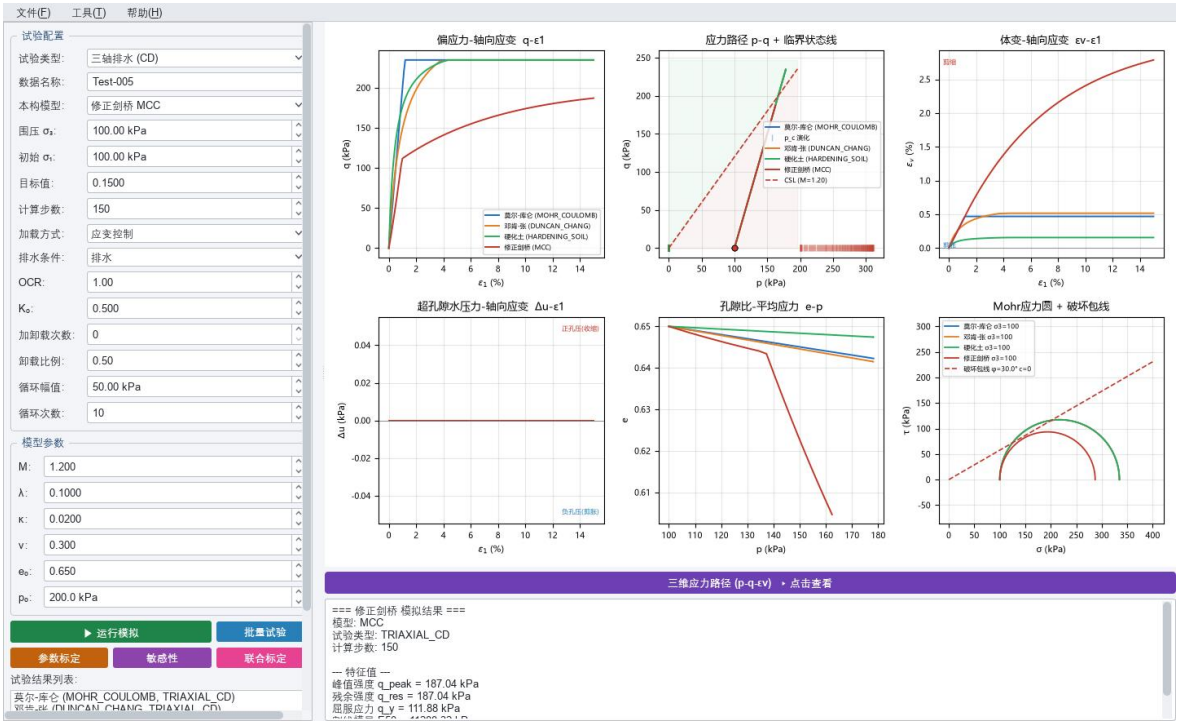


图 10-4　莫尔-库仑、邓肯-张、硬化土与修正剑桥模型的三轴排水试验对比

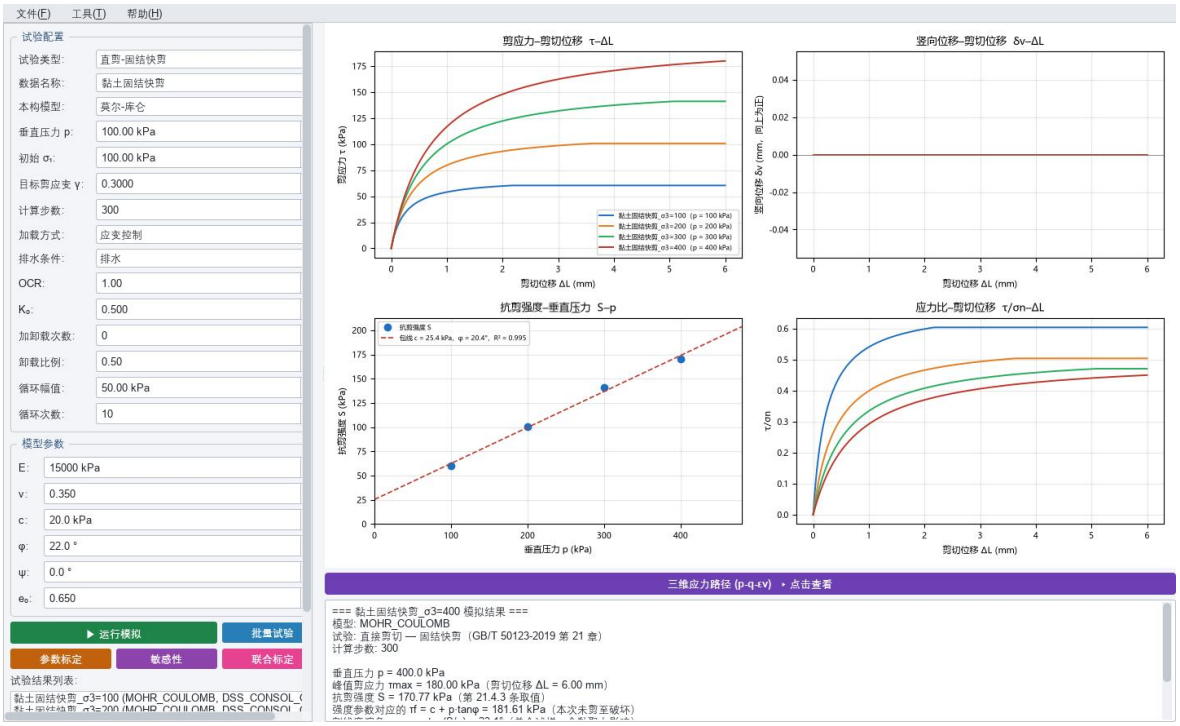


图 10-5 直剪固结快剪模拟：四级垂直压力的剪切曲线与强度包线

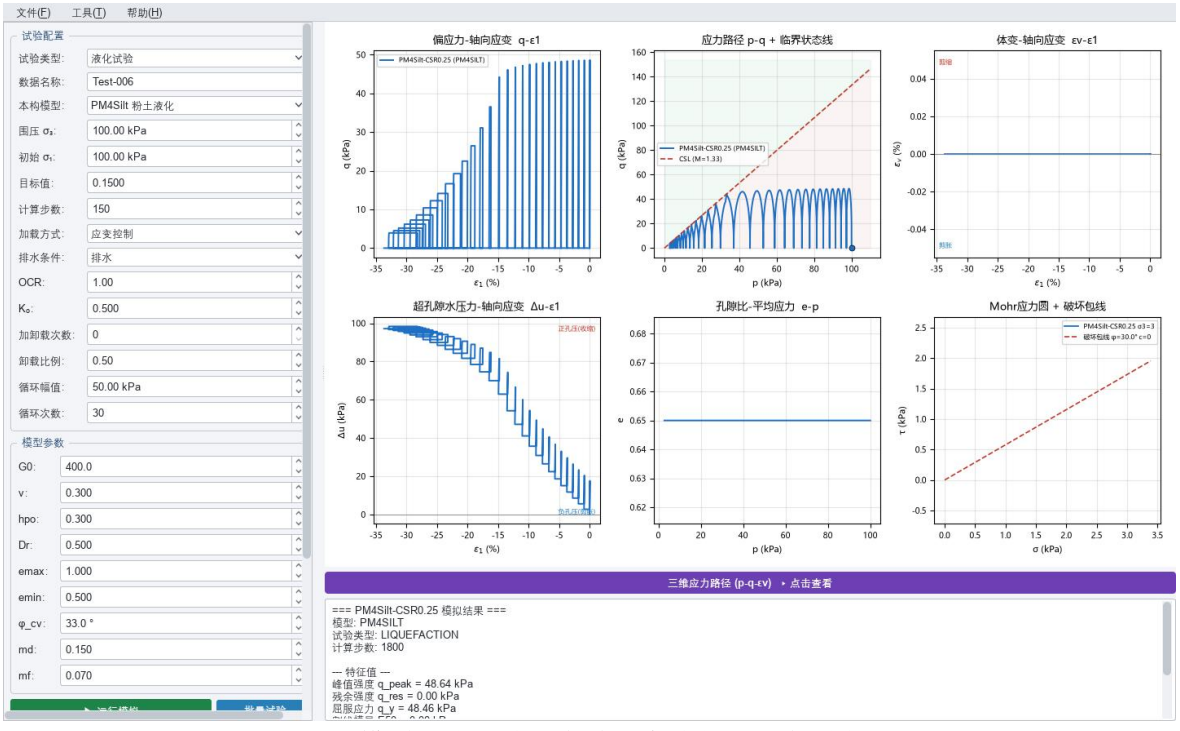


图 10-6 PM4Silt 模型液化试验：有效应力路径逐周向原点移动，孔压累积

10.3 物理性质试验

按 GB/T 50123-2019 由原始记录计算物理指标，界面给出计算结果与曲线：

- 密度试验（环刀法）：湿密度、干密度、重度、干重度、孔隙比、孔隙率与饱和度；
- 含水率试验（烘干法）：水质量、干土质量与含水率；

- 比重试验（比重瓶法）：试验水温下的比重与换算到 20 ℃ 的比重；
- 颗粒分析（筛分法）：60～0.075 mm 十级筛的累计含量与颗粒大小分布曲线，d10、d30、d60，不均匀系数与曲率系数，级配评价；可补充大于 200 mm 含量、小于 0.005 mm 含量与细粒的界限含水率；
- 界限含水率（液塑限联合测定）：锥入深度—含水率双对数回归，17 mm 液限、10 mm 液限、塑性指数 Ip 与 Ip10、液性指数；
- 击实试验（轻型）：击实曲线二次拟合求最优含水率与最大干密度，绘制饱和线，由现场干密度计算压实度。

颗粒分析结果同时按两本标准定名：按 GB/T 50145-2007（2026 年局部修订版）的粒组与第 4 章定名巨粒土、巨粒混合土、砾类土、砂类土（含砂的细分）与细粒土（塑性图）；按 GB 50007-2011 第 4.1 节定名碎石土、砂土、粉土与黏性土，粉土与黏性土使用 10 mm 液限的塑性指数。

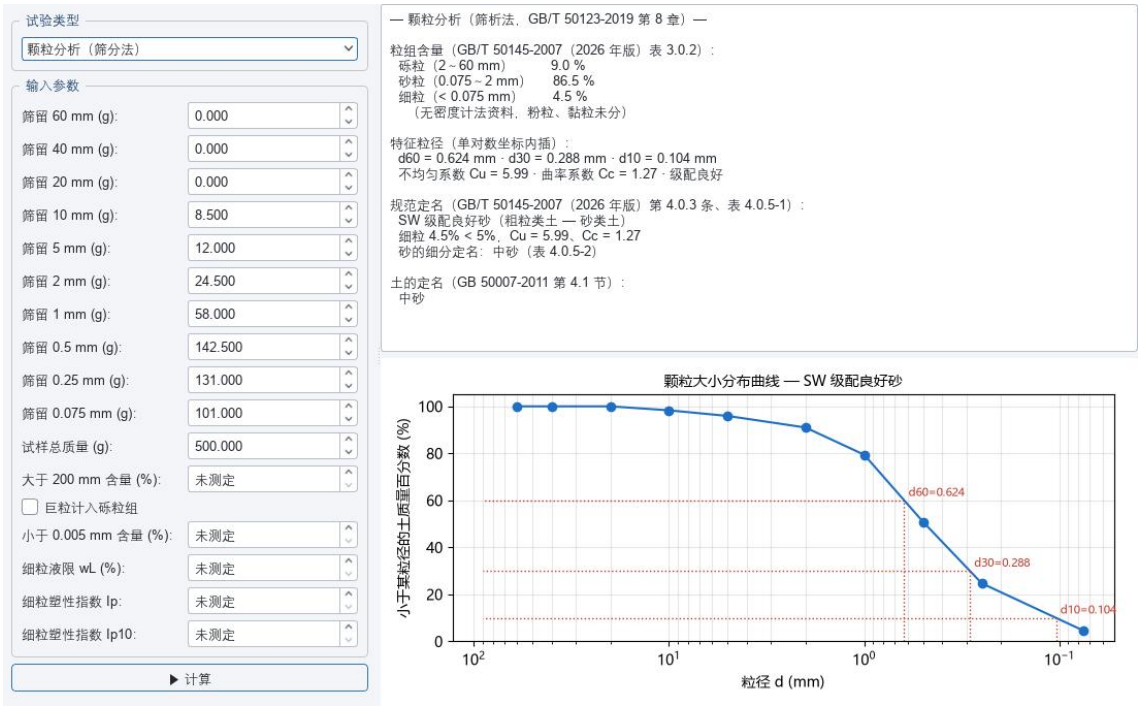


图 10-7　颗粒分析：粒组含量、特征粒径、级配评价与 GB/T 50145、GB 50007 定名

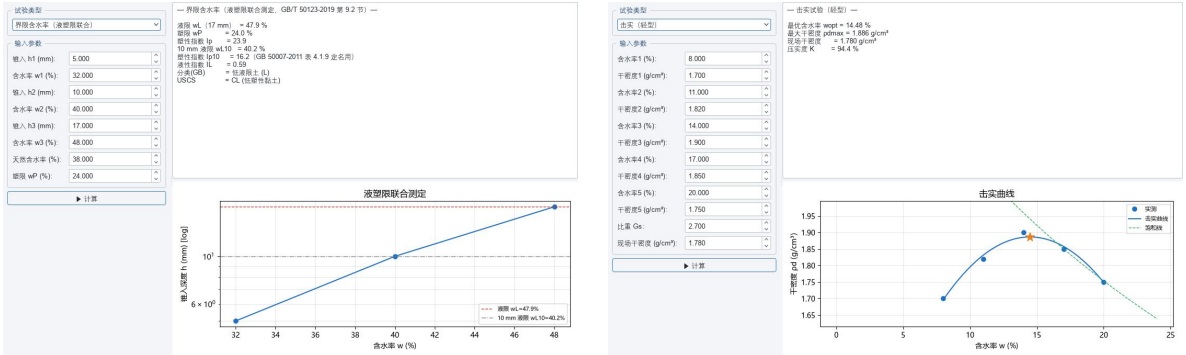


图 10-8　（左）液塑限联合测定（右）轻型击实试验

10.4 力学试验数据整理

渗透、固结、直剪、三轴四项试验的实测数据按 GB/T 50123-2019 整理，结果可写回工程材料：

- 渗透试验：常水头法（第 16.2 节）与变水头法（第 16.3 节），各次测定换算到 20 °C，按第 16.1.3 条取允许差值范围内的 3～4 个测值平均，可写回饱和渗透系数；
- 固结试验：由累计变形量或孔隙比整理 e–p、e–lg p 曲线，各级压缩系数与压缩模量，a1-2、Es1-2 与压缩性评价（GB 50007-2011 第 4.2.6 条），压缩指数 Cc、回弹指数 Cs，按 Casagrande 法（第 17.2.5 条）自动作图求先期固结压力与超固结比，并换算修正剑桥参数 λ、κ、M；
- 直剪试验：快剪、固结快剪、慢剪，由剪切读数按第 21.4.3 条取抗剪强度（峰值、稳定值或 4 mm 剪切位移处），按第 21.4.4 条回归峰值与残余强度参数；
- 三轴试验：UU、CU、CD，可直接输入破坏时的主应力差与孔压，或导入完整曲线按第 19.8.2 条取破坏点；用 p–q 图 Kf 线回归总应力与有效应力强度指标。



图 10-9 固结试验整理：e－lg p 曲线与 Casagrande 作图求先期固结压力

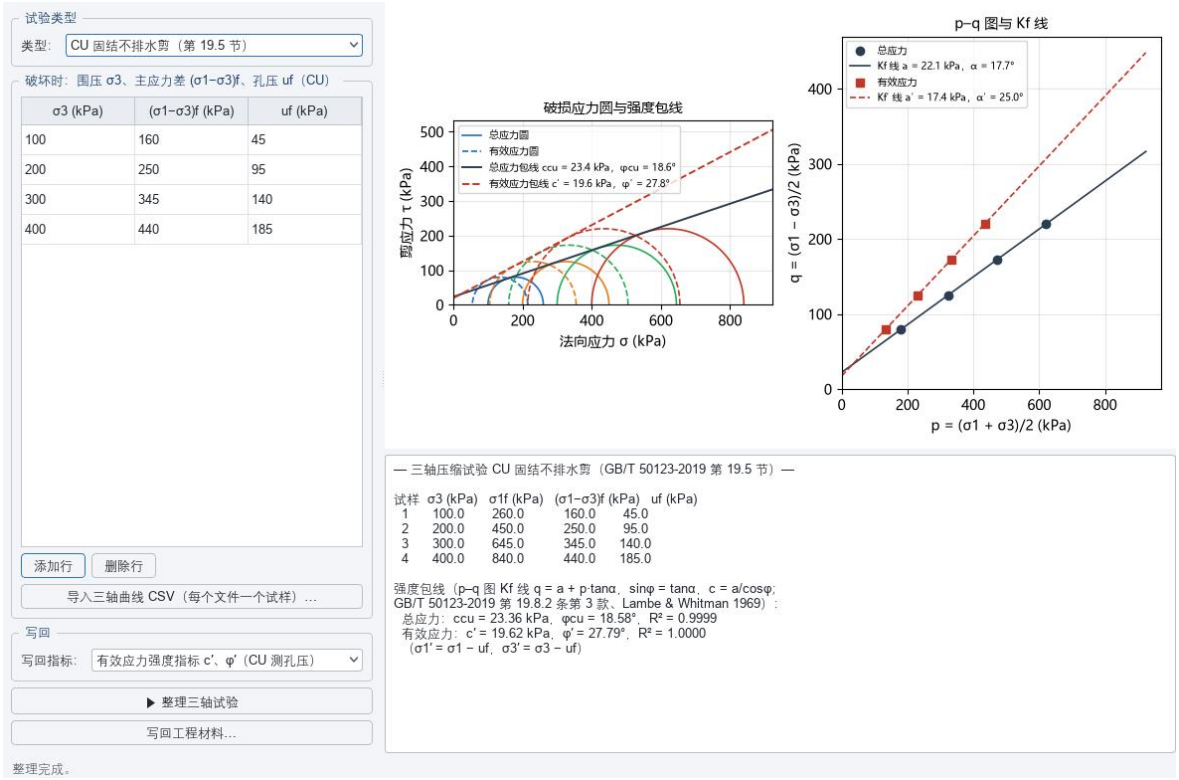


图 10-10　三轴 CU 试验整理：总应力与有效应力破损应力圆、Kf 线

10.5　土水特征曲线

SWCC 工具按 van Genuchten、Fredlund-Xing 或 Brooks-Corey 模型生成体积含水率—基质吸力曲线与相对渗透系数曲线，可同时给出干燥与湿润两条主曲线（滞回），标注进气值，结果导出为图片或 CSV，用于非饱和渗流参数的取值。

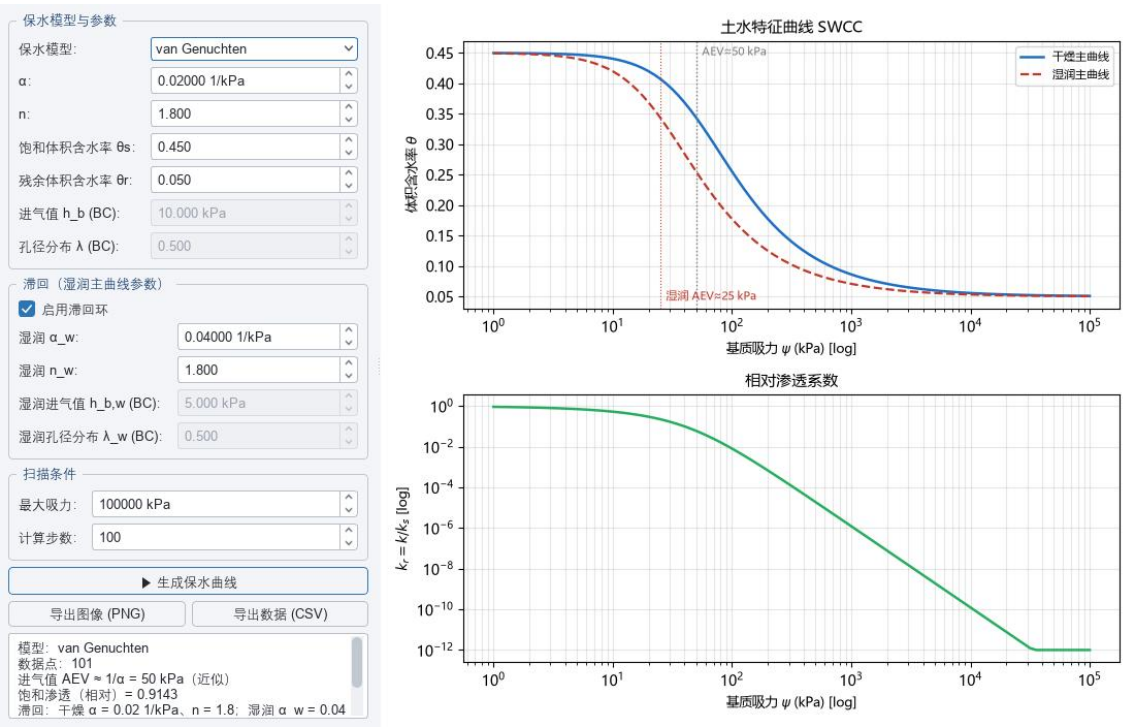


图 10-11　土水特征曲线（干燥、湿润主曲线）与相对渗透系数

10.6　参数标定与写回工程材料

- 单曲线标定：以实测偏应力—轴向应变曲线为目标，勾选待标定参数并设定范围，先用拉丁超立方抽样确定起点，再用 Nelder-Mead 单纯形法使偏差平方和最小，输出最优参数、RMSE 与 R^2，并画出实测与拟合曲线。
- 联合标定：不同围压的多条三轴曲线与侧限压缩曲线用同一组参数同时拟合，各曲线按变化幅度归一化后加权，避免单条曲线标定时参数不唯一。
- 敏感性分析：选定一个参数，在基准值上下按比例取若干水平逐一模拟，给出峰值、终值偏应力随参数的变化与曲线族。
- 写回工程材料：选择工程中的材料或新建材料，勾选要写入的参数，表中对照写入值与现值、注明参数来自标定还是固定初值；线弹性、莫尔-库仑、修正剑桥、硬化土、小应变硬化土、软土蠕变与 Hoek-Brown 岩体可写回本构参数，数据整理结果可只写回强度指标 c、φ 或饱和渗透系数。

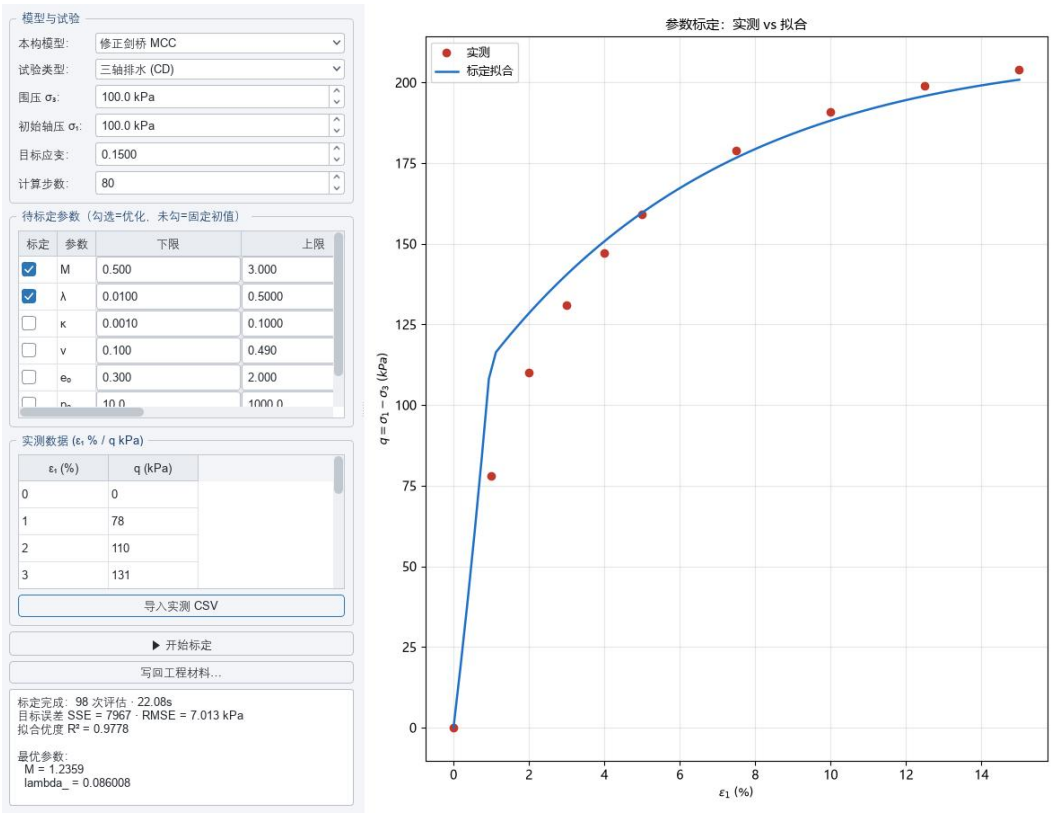


图 10-12　参数标定：修正剑桥模型拟合三轴排水实测曲线

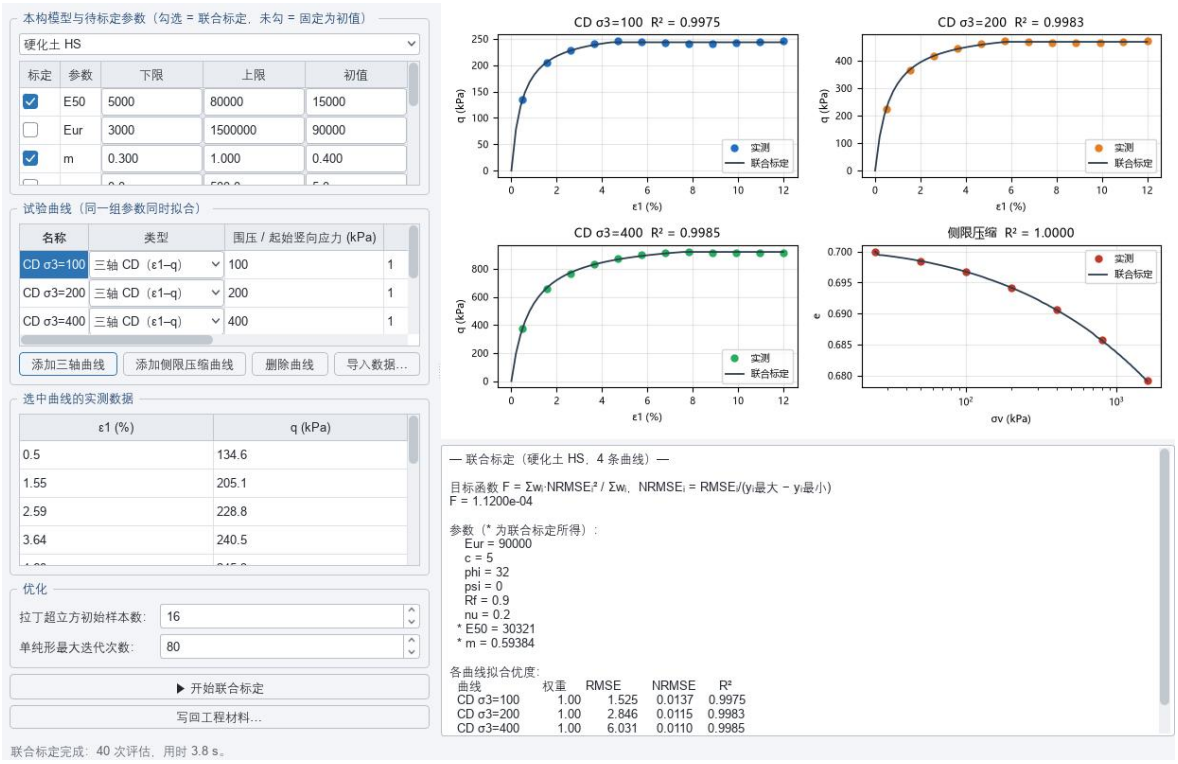


图 10-13　联合标定：硬化土模型同时拟合三条排水三轴曲线与一条侧限压缩曲线



图 10-14　标定参数写回工程材料

10.7　监测与现场试验分析

- 沉降监测预测：双曲线法、指数曲线法、对数曲线法、三点法、浅岗法（Asaoka）、星野法、Verhulst 曲线与扩展蠕变法八种方法同时拟合，按拟合优度、误差与趋势一致性加权评判，给出推荐最终沉降及范围、最优方法、当前固结度、剩余沉降、固结系数与次固结沉降速率；可批量处理多个沉降板，导出成果表与报告。
- 平板载荷试验：由压力—沉降曲线的初始直线段求变形模量 E0，用双曲线拟合求极限荷载，并按土类换算硬化土模型参数。
- CPT 等效标定：按归一化锥尖阻力、摩阻比与土类指数 Ic 分类土层，估计重度、内摩擦角、不排水强度与模量。
- 施工应力路径还原：按基坑开挖、路堤填筑、隧道施工、基础加载、K0 固结的典型应力路径做单元模拟。
- 参数转换工具：三轴试验换算硬化土与小应变硬化土参数，固结试验换算修正剑桥参数（含 N、Γ），直剪试验换算摩尔-库仑与 Drucker-Prager 参数（五种匹配方式），并由标准贯入、静力触探与载荷试验结果给出初步估计值。
- 参数工程校验：由一组土性参数估算承载力、土压力、无限边坡安全系数与沉降，检查参数组合是否合理。



图 10-15　沉降监测数据的八种方法预测与综合评判

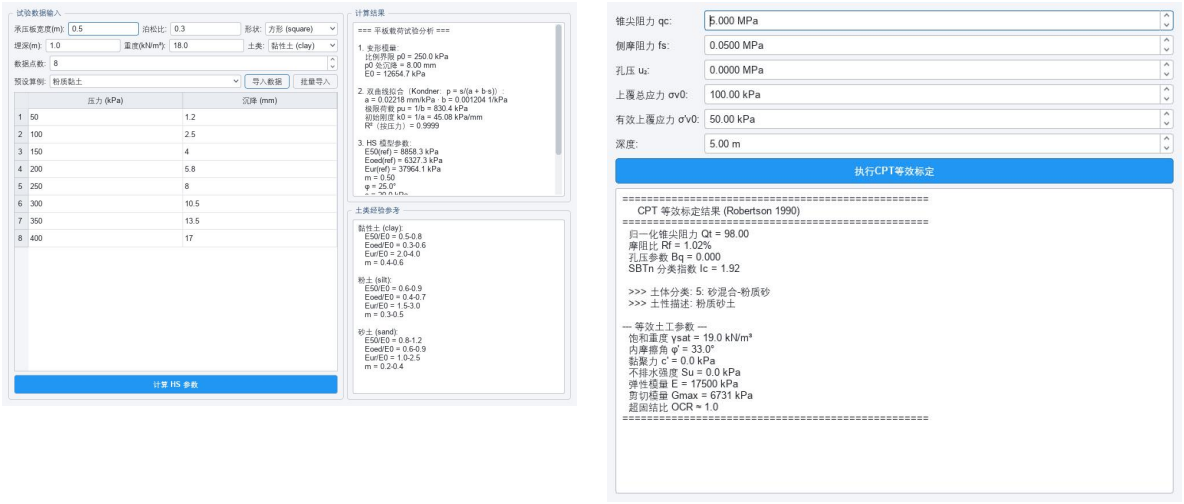


图 10-16　（左）平板载荷试验反算变形模量与 HS 参数（右）CPT 等效标定

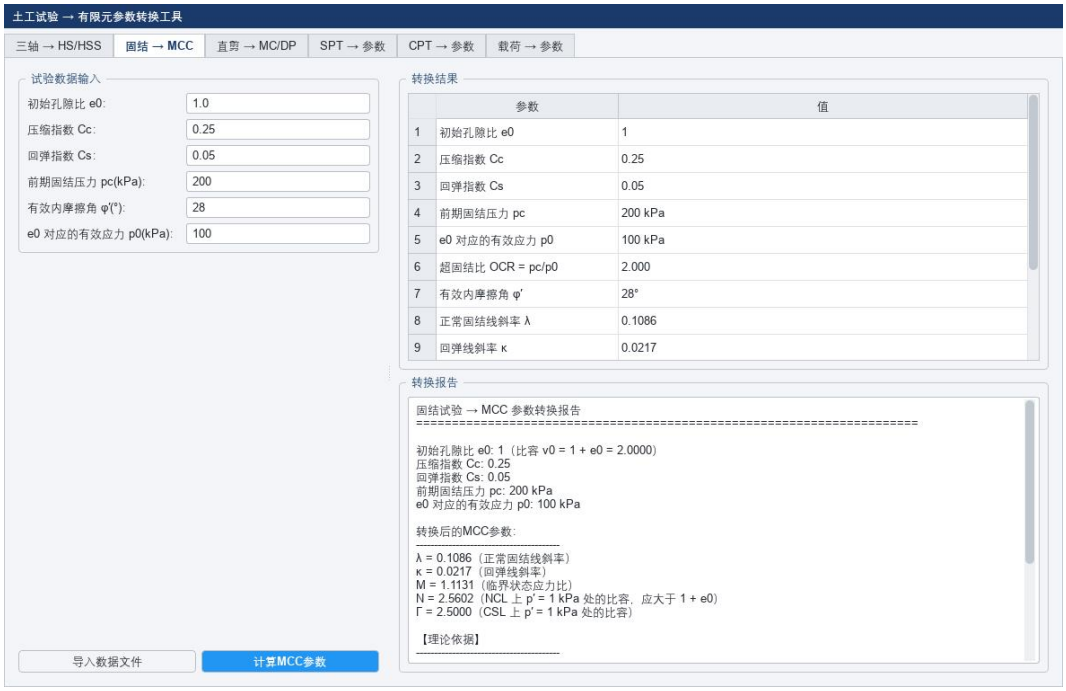


图 10-17　参数转换工具：固结试验指标换算修正剑桥参数

10.8　数据导入、试验系统与报告

- 三轴试验数据批量导入：一次读入多个 CSV、Excel 文件，按列名自动识别轴向应变、偏应力、孔压等列，去除重复行、剔除异常值、插补缺失值并计算派生量，结果可送回主界面与模拟曲线比较或用于标定。
- 专业三轴试验系统：按试样尺寸与物理指标设定试样，模拟反压饱和、等向或 K_0 固结与剪切全过程，四页共十六幅图与八项实时数值随计算逐步更新。
- 多试验实时模拟实验面板：按时间推进显示三轴、侧限、直剪、循环、液化、旁压等试验的过程曲线。
- 试验报告：Word、PDF 报告含封面、签署栏、目录、试验概况、本构模型、特征值、试验曲线与数据摘要。
- Python 脚本控制台：用脚本批量创建三轴、侧限、直剪、旁压、液化、土水特征等试验，读取结果与特征值。

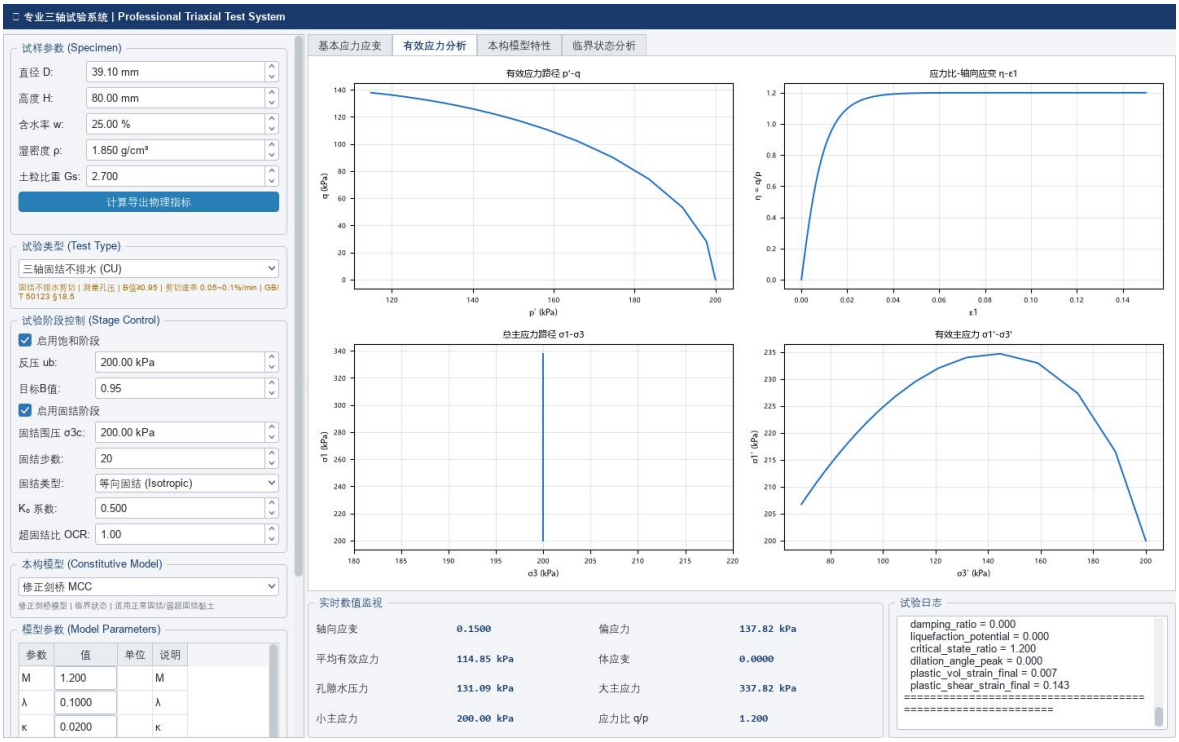


图 10-18　专业三轴试验系统：修正剑桥模型 CU 试验的有效应力分析页

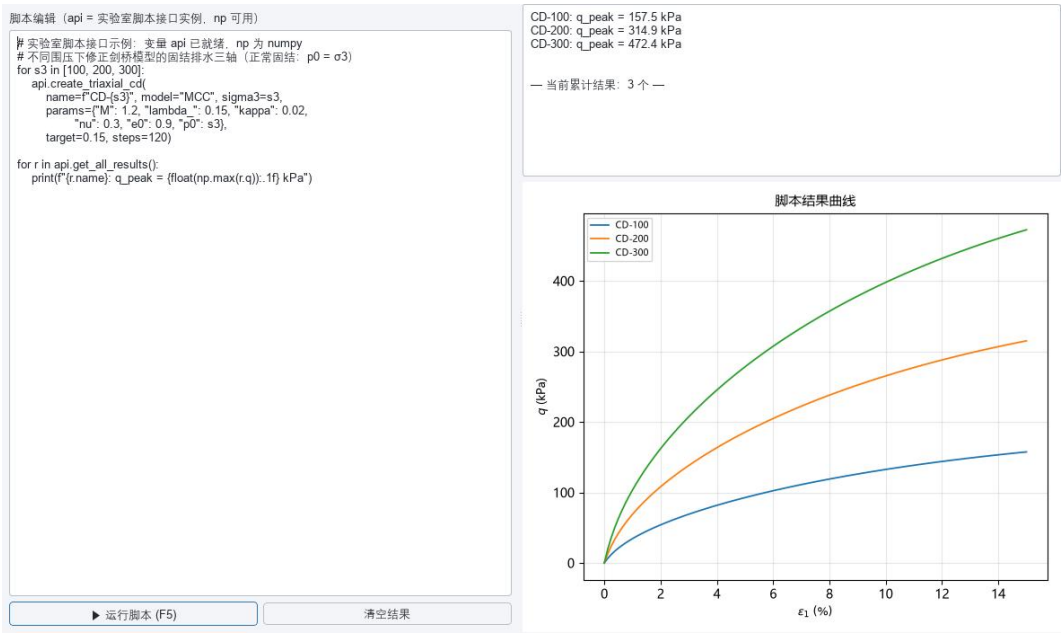


图 10-19　实验室 Python 脚本控制台

第 11 章　规范计算与智能辅助

工程计算要按现行规范取值、评价，建模过程又有大量检查与查询工作。iGeoLab 把常用规范的计算与评价条文内置在相应的分析、计算书与实验室中，另提供四个辅助面板：参数建议与规范检索（F10）给出土层参数的参考范围并检索规范条文，建模向导（F9）跟踪建模进度并提示下一步，模型诊断（F6）检查几何、网格、边界与材料参数中的常见问题，AI 建模助手（F12）把自然语言描述转成建模脚本。

11.1　内置规范计算

表 11-1　软件中的规范条文与使用位置

规范	软件中的计算与评价	使用位置
《土工试验方法标准》GB/T 50123-2019	密度、含水率、比重、颗粒分析、界限含水率、击实试验计算；渗透（第 16 章）、固结（第 17 章，Casagrande 法求先期固结压力）、三轴（第 19 章）、直剪（第 21 章）试验数据整理	岩土计算实验室
《土的工程分类标准》GB/T 50145-2007（2026 年版）	粒组划分与土的定名（巨粒类土、粗粒类土、细粒类土，塑性图）	实验室颗粒分析
《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011	碎石土、砂土、粉土、黏性土的定名；按 a1-2 评价压缩性	实验室颗粒分析、界限含水率、固结试验
《建筑边坡工程技术规范》GB 50330-2013	稳定安全系数（表 5.3.2）、稳定性状态（表 5.3.1）、综合水平地震系数（表 5.2.6）、附录 A 计算公式	极限平衡计算书、有限元计算书、多工况分析、地震动力分析窗口
《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120-2012	支护结构安全等级与内力设计值，支护体系的稳定与承载力验算	有限元计算书、设计工具
《建筑抗震设计标准》GB/T 50011-2010（2024 年版）、《建筑与市政工程抗震通用规范》GB 55002-2021	设计反应谱、场地类别与特征周期（含分界线附近插值）、标准贯入试验液化判别与液化指数	地震动力分析窗口、人工波合成、规范验算模块（脚本）

场地类别与特征周期、液化判别与土工试验整理另以规范验算模块提供，在 Python 控制台或脚本中调用，输出逐项的计算过程、条文依据与结论，适合对多个钻孔、多组参数批量验算。

11.2　参数建议与规范检索

- 参数建议：输入土层描述（如“粉质黏土，可塑”“密实细砂”“淤泥质软粘土”），程序识别土类（软粘土、硬粘土、松散砂土、密实砂土、砾石、粉土、粉质黏土、黄土、软岩、硬岩、填土、泥炭土、膨胀土）与稠度、密实状态，给出置信度、推荐的本构模型（首选、可用）及各参数的最小值、典型值、最大值、单位与敏感性，列出适用条件、建议试验、注意事项与规范依据；粉质黏土按坚硬、硬塑、可塑、软塑、流塑分档取值。右键参数表可把典型值加入材料库。

- 规范检索：用自然语言提问（如“8 度区边坡抗震安全系数最小多少”），在本地规范条文库中按相关度排序返回条文，可按规范与类别（边坡、基坑、地基、抗震）过滤。条文库收录 61 条，涉及 GB 50330-2013、GB 50011-2010、GB 55002-2021、GB 50007-2011、GB 50497-2019、JGJ 120-2012、JGJ 94-2008、EN 1997-1 与 AASHTO LRFD。
- 参数建议给出的是分类状态的经验范围，用于初步设计与教学；工程计算以试验与勘察资料为准。



图 11-1 （左）参数建议：粉质黏土（可塑）（右）规范检索

11.3 建模向导

建模向导按“项目、几何、材料、边界、阶段、网格、计算、结果”八步跟踪当前工程，自动检测每一步是否完成并打勾，当前步骤给出具体操作提示（对应界面上的入口）和等价的脚本命令示例；纯极限平衡工程自动跳过边界、施工阶段与网格三步。材料参数或网格有错误时，提示中列出问题与修改方法。



图 11-2　建模向导：已完成的步骤打勾，当前步骤给出操作提示与脚本示例

11.4　模型诊断

模型诊断检查几何（几何是否创建、区域是否命名与赋材料、标签重复）、网格（是否生成、单元数、退化单元）、边界条件（是否施加、底部与侧面约束、固定与滚动约束冲突）与材料参数（弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角、重度的取值与数量级）共 21 项，按错误、警告、提示分级列出编号、位置、说明与修改建议，可只看某一级，可每 5 秒自动刷新；纯极限平衡工程不检查网格、位移边界与弹性参数。



图 11-3　模型诊断：材料参数问题的检查结果

11.5 AI 建模助手

AI 建模助手把“边坡高 12m，坡比 1:1.5，填土，有限元强度折减”这样的自然语言描述解析为工程类型、几何尺寸、土层材料与分析类型，生成调用 iGeoLab 脚本接口的建模命令流，并在脚本编辑器中打开，核对后即可运行；输入描述时同步给出土层参数建议。

- 离线模式：在本机按规则解析与生成脚本，不需要网络和外部服务。
- 本地大模型：选择“Ollama（本地）”并填写服务地址与模型名后，对话由本机运行的 Ollama 服务回答，提问时自动附带当前模型的概况、建模进度与诊断结果。使用前需在本机安装并运行 Ollama，下载所选模型。

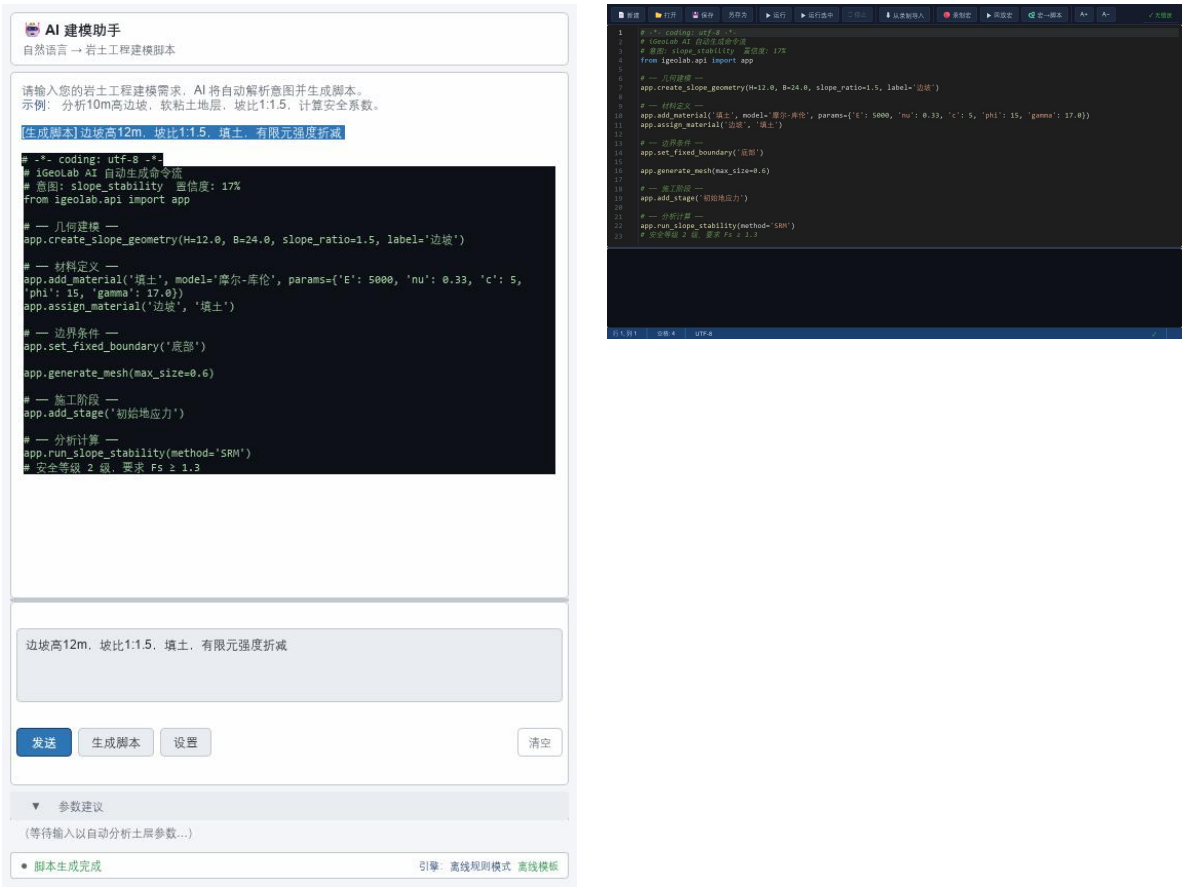


图 11-4 （左）AI 建模助手生成脚本（右）在脚本编辑器中打开的命令流

第 12 章　设计工具

「设计」菜单提供两个专项设计窗口：挡土墙设计与验算、基坑支护体系设计（弹性支点法）。两者都在独立窗口中完成参数输入、计算与验算，参数一改即可重算对比；满意的方案可一键导入建模界面，与已有的边坡或基坑几何结合，继续做极限平衡或有限元分析。

12.1　挡土墙设计与验算

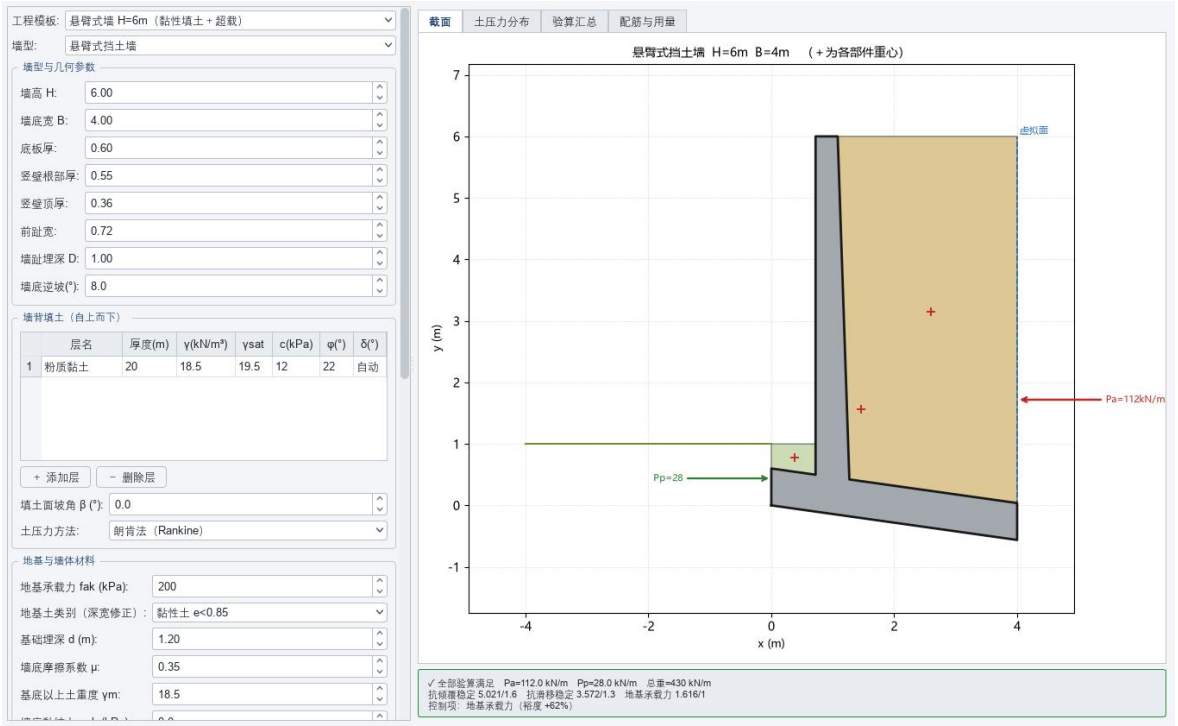


图 12-1　挡土墙设计与验算窗口：左侧为参数，右侧“截面”页显示墙体、墙后填土、虚拟面与主被动土压力合力

12.1.1　墙型与输入

- **五种墙型**：重力式挡土墙、悬臂式挡土墙、扶壁式挡土墙、台阶式石笼墙、加筋土挡土墙，几何参数随墙型变化（墙高、墙底宽、墙顶宽、墙面坡率、墙底逆坡、底板厚、竖壁厚、前趾宽、扶壁厚与间距、石笼层数与层宽、加筋长度与层数、墙趾埋深等）。
- **工程模板**：路堤重力式墙 H=5m（砂性填土）、悬臂式墙 H=6m（黏性填土＋超载）、扶壁式墙 H=10m（分层填土）、石笼墙 H=4m（河岸护坡·含水位）、加筋土墙 H=8m（土工格栅）、地震区重力式墙 H=6m（含 M-O）六个模板，一键填入整套参数作为设计起点。
- **墙背填土**：分层表格给出各层厚度、天然与饱和重度、c、φ 与墙背摩擦角 δ（“自动”取 φ/2），并设填土面坡角 β。
- **地基与墙体材料**：地基承载力特征值 fak、地基土类别（据此取承载力深宽修正系数）、基础埋深、墙底摩擦系数、基底以上土的重度、墙底黏结力、混凝土等级（C20～C50）、钢筋等级（HPB300、HRB400、HRB500）、被动土压力发挥系数。

- **荷载与工况**：地表超载可为均布、条形或线荷载，分别给出强度、距墙背距离与宽度；可考虑墙背、墙前地下水（水土分算或水土合算）与地震工况（水平、竖向地震系数）；加筋土墙另给筋材设计抗拉强度、覆盖率与界面摩擦效率。

12.1.2 计算与验算

- **土压力**：可选库仑法、朗肯法或静止土压力；分层计算竖向有效应力并逐层取土压力系数，黏性土计入顶部零压区，层界处压力跳跃；均布超载并入竖向应力，条形与线荷载按弹性半空间解叠加侧压力；地震工况按 Mononobe-Okabe 法求地震主动土压力系数；主动土压力作用在过墙踵的竖直虚拟面上，被动土压力只在墙前埋深范围内积分并乘发挥系数。
- **稳定性验算**：抗倾覆（绕墙趾的力矩比，要求值静力 1.6、地震 1.3）、抗滑移（沿可倾斜的墙底分解法向与切向力，计入墙底摩擦、黏结力与被动土压力，要求值静力 1.3、地震 1.1）、地基承载力与偏心距（偏心距不超过 B/6、基底最大压应力不超过深宽修正后的承载力特征值）。
- **截面与配筋**：悬臂式与扶壁式墙计算竖壁根部（扶壁式为扶壁间的面板与扶壁肋板）、趾板根部、踵板根部的弯矩与剪力，按单筋矩形截面求受拉钢筋面积并校核相对受压区高度、最小配筋率与无腹筋抗剪承载力，荷载分项系数 1.35。
- **加筋土内部稳定**：逐层验算筋材抗断裂与抗拔出，拔出长度取朗肯破裂面以外的锚固长度，要求值均为 1.5。
- **结果**：右侧四页依次为截面、土压力分布、验算汇总（项目、计算值、要求值、结论与依据）、配筋与用量（设计摘要、各控制截面配筋、混凝土与钢筋用量估算、工程提示）；窗口底部给出是否全部满足与控制项的裕度。

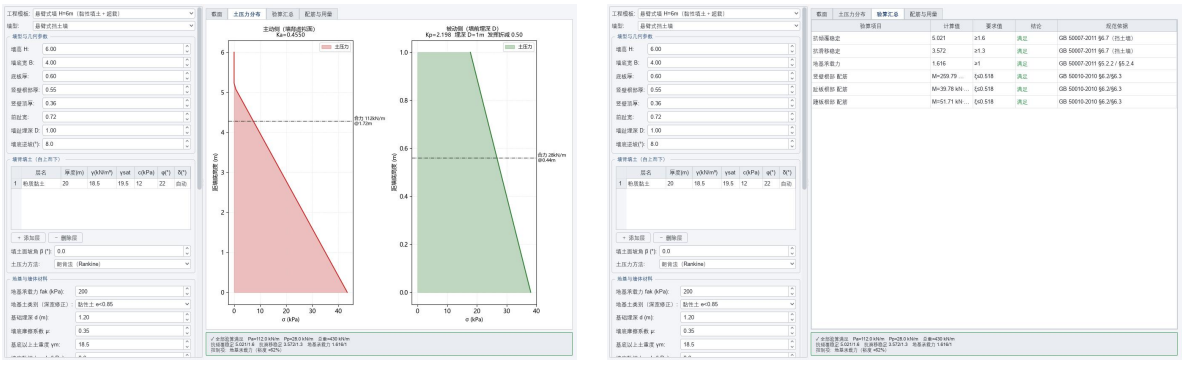


图 12-2 （左）土压力分布：主动侧与被动侧的分布图与合力位置；（右）验算汇总

六个工程模板选中后即给出结果（表 12-1），三项稳定性验算均满足要求。地震区重力式墙按地震工况验算，抗倾覆、抗滑移的要求值为 1.3、1.1；其余模板为静力工况，要求值为 1.6、1.3；地基承载力一项要求不小于 1.0。

表 12-1　挡土墙工程模板的计算结果

工程模板	主动土压力合力 Pa（kN/m）	抗倾覆	抗滑移	地基承载力	控制项
路堤重力式墙 H=5m（砂性填土）	76.8	4.013	2.199	1.364	地基承载力
悬臂式墙 H=6m（黏性填土＋超载）	112.0	5.021	3.572	1.616	地基承载力
扶壁式墙 H=10m（分层填土）	376.3	3.478	1.769	1.565	抗滑移稳定
石笼墙 H=4m（河岸护坡·含水位）	53.2	4.131	1.923	2.032	抗滑移稳定
加筋土墙 H=8m（土工格栅）	199.4	4.209	1.954	1.682	抗滑移稳定
地震区重力式墙 H=6m（含 M-O）	131.9	3.084	2.088	1.603	地基承载力

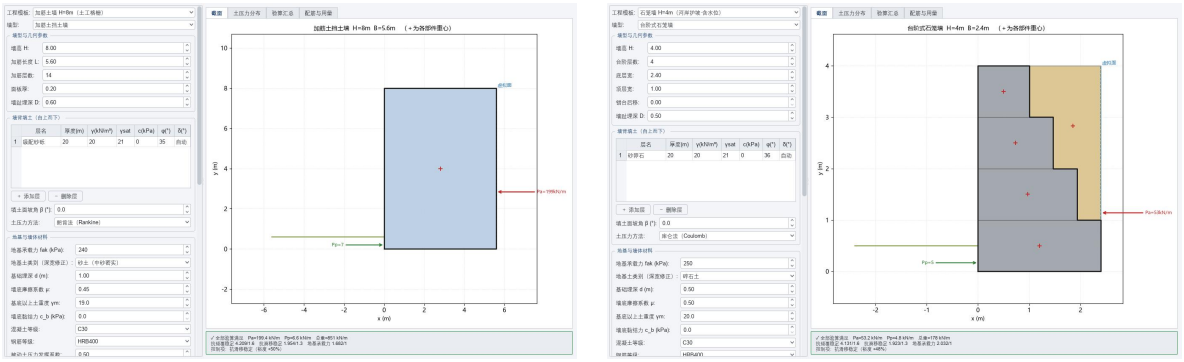


图 12-3　（左）加筋土挡土墙：H = 8 m，加筋长度 5.6 m；（右）台阶式石笼墙：H = 4 m，4 层台阶

12.1.3　导入建模界面

设定墙趾坐标后点“导入当前挡墙模型”，墙身作为混凝土区域、墙后填土作为面域写入当前工程；可贴合现有地表线自动确定标高、填土上边界随坡面，可左右镜像。地表超载同时写入为分布荷载，加筋土墙的筋材写入为土工合成材料支护。

12.2 基坑支护体系设计（弹性支点法）

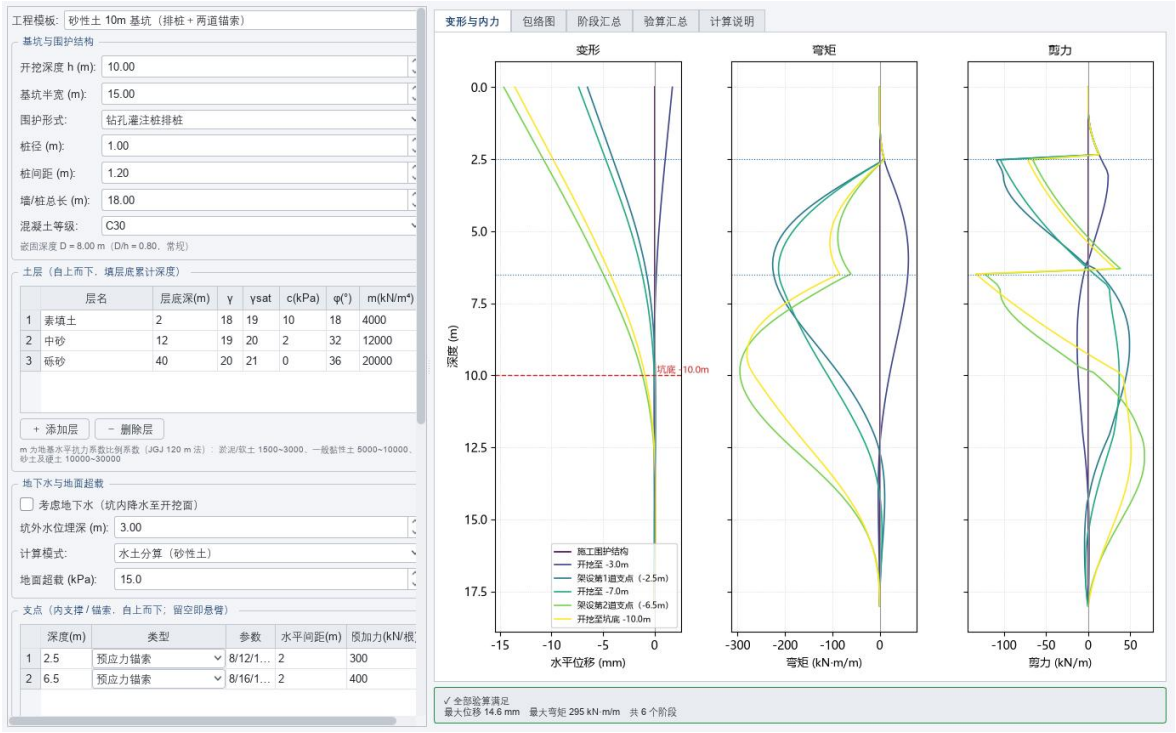


图 12-4 支护体系设计窗口：排桩＋两道锚索基坑各施工阶段的桩身变形、弯矩与剪力

12.2.1 输入

- **基坑与围护结构**：开挖深度、基坑半宽、围护形式（地下连续墙、钻孔灌注桩排桩、旋挖桩排桩）、墙厚或桩径与桩间距、墙 / 桩总长、混凝土等级，窗口实时提示嵌固深度及其与开挖深度之比。
- **土层**：逐层给出层底深度、γ、γsat、c、φ 与地基水平抗力系数的比例系数 m。
- **地下水与超载**：坑外水位埋深（坑内降水至开挖面）、水土分算或合算、地面超载。
- **支点**：逐道给出深度、类型（混凝土支撑、钢管支撑、H 型钢支撑、预应力锚索）、锚索参数（自由段 / 锚固段 / 倾角 / 截面积）、水平间距与预加力，以及支点下超挖深度、锚固体直径与锚固段粘结强度；不设支点即为悬臂式。
- **计算设置**：梁单元数、基坑安全等级（一、二、三级）、被动极限抗力折减；内置五个典型基坑模板。

12.2.2 计算与验算

- **施工阶段**：自动排定“施工围护结构 → 开挖至第一道支点下 → 架设第一道支点 → …… → 开挖至坑底”的阶段序列，逐阶段求解并保留已架设支点的状态。
- **弹性支点法**：围护结构按梁单元计算；开挖面以上作用分层朗肯主动土压力与坑内外水头差产生的净水压力；开挖面以下被动侧为随深度线性增大的土弹簧（m 法），弹簧抗力以

极限被动抗力为上限，超过后按定值抗力迭代计算；内支撑与锚索为弹性支点，锚索刚度按自由段长度与倾角计算，可施加预加力。

- **验算**：嵌固稳定（抗倾覆）、坑底抗隆起、坑底抗流土、水平位移控制、各道支点杆体承载力与锚杆抗拔、墙身受弯配筋与受剪；要求值随基坑安全等级取用，例如二级基坑嵌固稳定 1.20、抗隆起 1.6、水平位移不超过 0.30% 开挖深度且不超过 40 mm。
- **结果**：变形与内力（各阶段位移、弯矩、剪力随深度的分布）、包络图、阶段汇总（各阶段挖深、最大弯矩、最大位移与支点轴力）、验算汇总与计算说明五页。

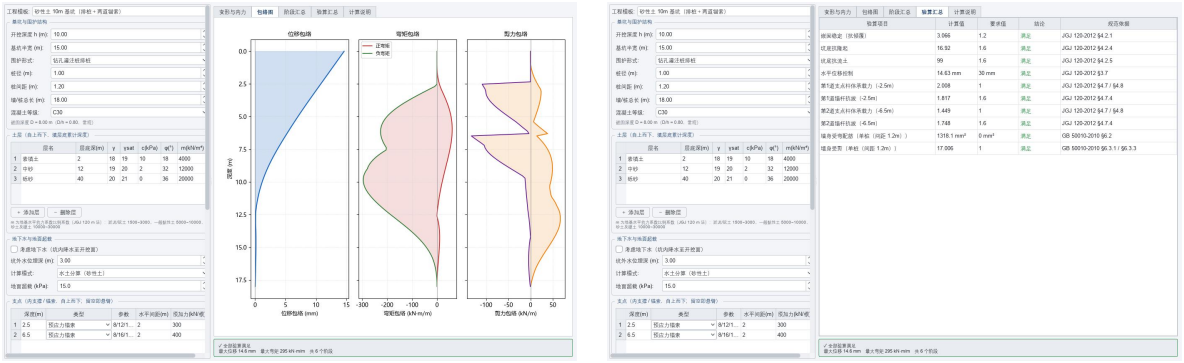


图 12-5 （左）位移、弯矩与剪力包络；（右）验算汇总

以两个工程模板为例：“砂性土 10m 基坑（排桩＋两道锚索）”排定 6 个施工阶段，最大位移 14.63 mm、最大弯矩 295.3 kN·m/m，均出现在架设第 2 道锚索的阶段，嵌固稳定 3.066、坑底抗隆起 16.92；“软土地区 13m 深基坑（地连墙＋两道混凝土撑）”最大位移 5.22 mm、最大弯矩 562.3 kN·m/m，均出现在开挖到坑底时，嵌固稳定 1.904、坑底抗隆起 9.886。两例的全部验算项均满足要求。

12.2.3 导入建模界面

计算完成后点“导入当前支护模型”，把分步开挖块、两侧或单侧围护结构、内支撑与锚索、坑内外水位线与施工阶段写入当前工程，可贴合现有地表线；之后即可在有限元中进行施工阶段与强度折减分析。

第 13 章　几何数据导入与 CAD 修复

工程资料常以 CAD 图纸、扫描或截取的剖面图、平面地形图以及其他分析软件的模型文件给出。iGeoLab 把这些来源的导入集中在「文件 → 导入」菜单：CAD 图纸在导入前先做几何检查与自动修复，修复结果写成 DXF 并回读验证通过后才进入工程；剖面图片、地形等高线和三维地质模型可以直接生成二维剖面；理正边坡、AutoBank、GEO5、MIDAS GTS NX、FLAC2D 的模型或几何可以直接读入。导入得到的区域、水位线、结构面与普通建模对象相同，可继续编辑、赋材料，用于极限平衡、有限元与渗流分析。



图 13-1　“文件 → 导入”菜单

13.1　DXF / DWG 图纸导入

- **读取的实体**：直线（LINE）、多段线（LWPOLYLINE、POLYLINE）、圆弧、圆、椭圆与样条曲线（SPLINE）；块参照（INSERT）展开后一并读取；只有一个外环的 REGION 实体提取其边界。曲线按“曲线离散误差”转为折线，样条可按容差抽稀点数。
- **DWG 文件**：由随软件安装的 LibreDWG 转换器转为 DXF 后导入，不需要安装 AutoCAD；文件名或路径含中文时自动处理。本机装有 ODA File Converter 时作为备用转换器。
- **导入前的检查与自动修复**：端点微缝、未打断的交点、自交与回折、重复区域、新旧修订叠放、共边误差、样条与圆弧离散、REGION 实体、异常 Z 坐标、图框，以及按 GeoStudio 有效数字的精度复核。修复结果写成 DXF 后完整回读验证，通过才允许导入；仍有不能自动确定的几何错误时阻止导入，并在报告中指出位置与原因。

- **处理设置**：三种处理模式（自动识别、已有闭合/近闭合区域、外包络 + 开放地层线网）；输入单位可选米、毫米、厘米、千米、英寸、英尺、美国测量英尺或读取 DXF 单位；节点吸附容差、首尾闭合容差、最小材料区面积等可调；按图层名过滤（支持 * 通配符）；整张施工图同时含平面图、多个剖面、图框和图例时，可只处理指定窗口内的实体。
- **检查结果与报告**：结果对话框列出模式、材料区数、问题记录数、已自动修复数、警告与错误数，逐条给出问题的级别、问题代码、处理状态与说明；TXT、JSON 报告和修复后的 DXF 保存在源文件旁的“<文件名>_iGeoLab_CAD 修复结果”文件夹，修复记录同时随工程保存。
- **导入选项**：闭合多段线转为面域；由开放线段智能检测封闭区域；用开放线段分割已有面域。开放线所在的图层可逐层指定为草图几何、几何区域、水位线、结构面或不导入，程序按图层名预选（例如含 water、水位 的图层预选为水位线，含 fault、断层、joint 的预选为结构面）。



图 13-2　CAD 几何检查与自动修复设置

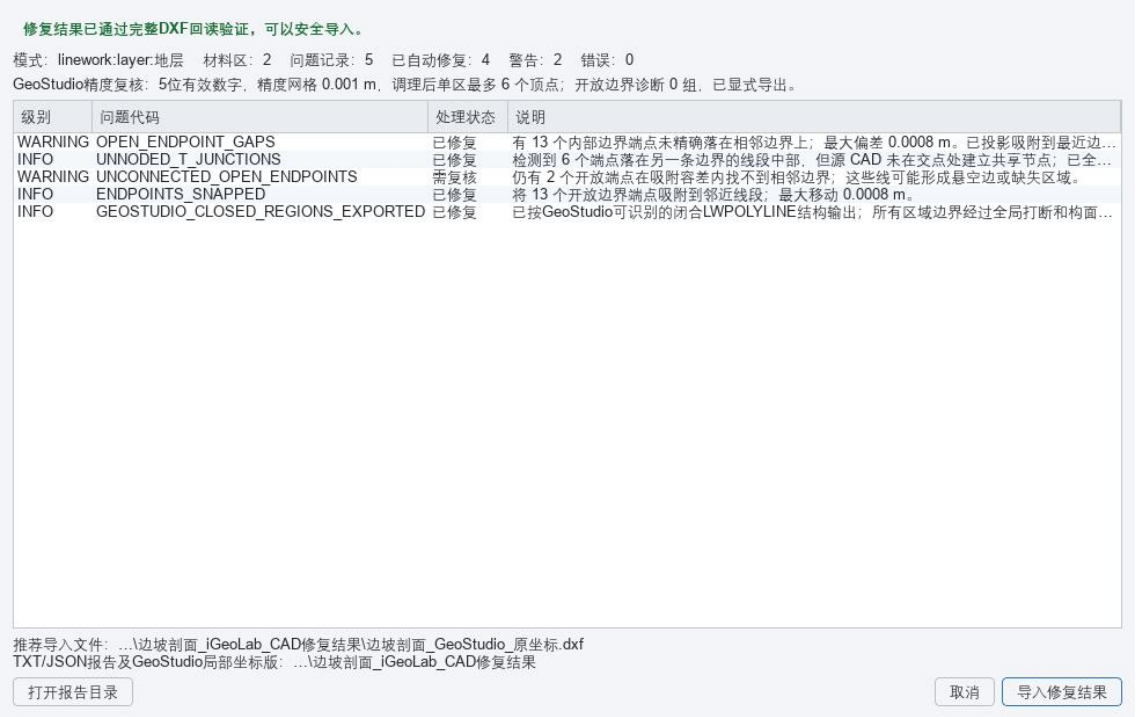


图 13-3　CAD 几何检查与修复结果：问题代码、处理状态与回读验证结论

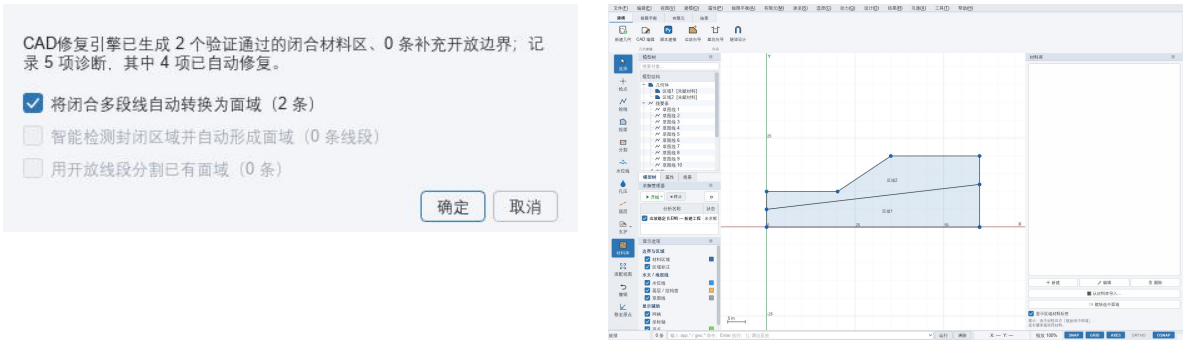


图 13-4　（左）导入选项（右）修复后导入的两个区域与边界线

13.2　批量导入问题几何并修复

- 指定存放问题图纸的文件夹与结果保存文件夹，对其中全部 DXF、DWG（可含子文件夹）逐个执行与单文件导入相同的数据库恢复、地层线构面、GeoStudio 精度调理与 DXF 回读安全检查。
- 每个文件在独立进程中处理，可设并发任务数（1～8）与单文件超时（10～3600 s）；一个文件失败或超时不影响其余文件；未变化且已验证通过的文件可以跳过。
- 结果表逐个列出状态（已修复、已跳过、未通过安全检查、处理失败、超时终止、已取消）、区域数、耗时、警告/错误数与说明，并在输出文件夹写出汇总 JSON 与 CSV。

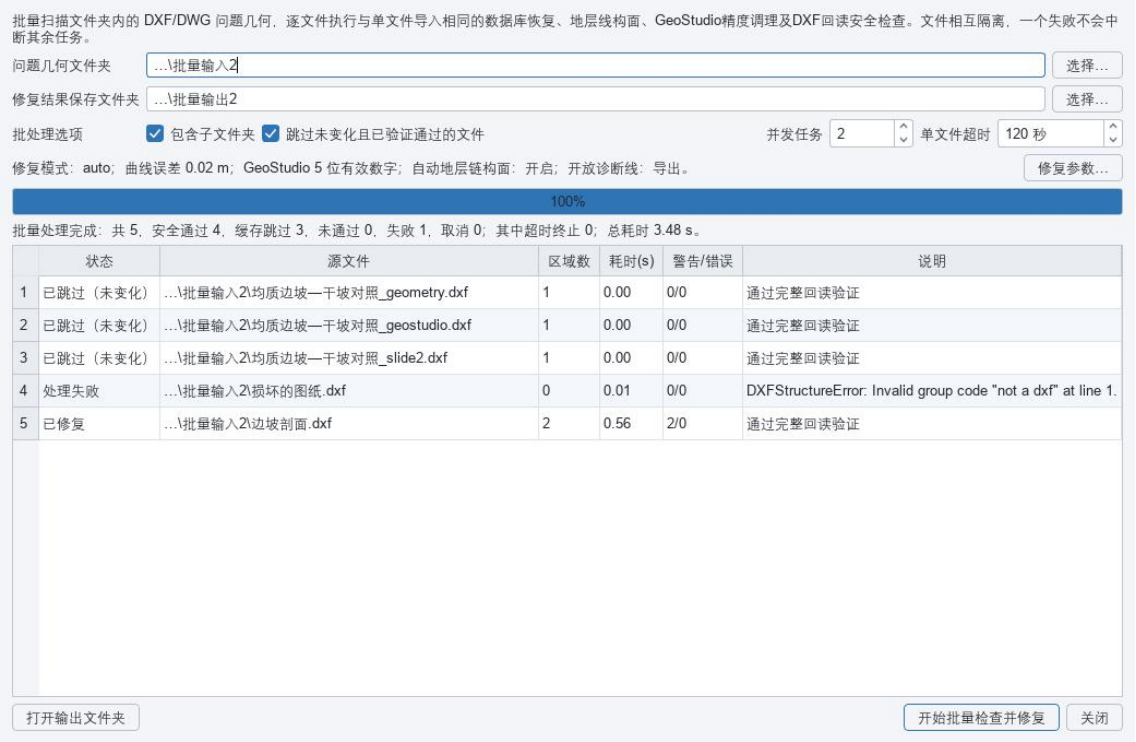
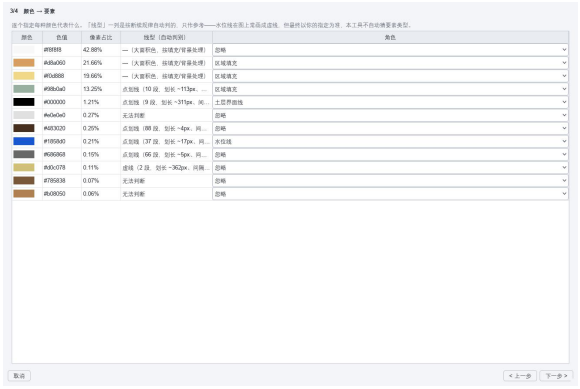


图 13-5　批量导入问题几何并修复：逐文件的处理结果

13.3　图片生成区域几何

- 四步向导：选择图片并裁剪 → 两点标定比例 → 颜色映射到要素 → 预览并并入当前工程；支持 PNG、JPG、BMP、TIF、WEBP 图片。
- 标定：在图上点两个坐标已知的点并输入实际坐标，可选 x、y 等比例；图片 y 轴向下与模型 y 轴向上的换算自动完成。
- 颜色映射：列出图中各主要颜色的色值与像素占比，自动判别线型（实线、虚线、点划线）作参考；每种颜色可指定为区域填充、土层界面线、水位线、节理/结构面或忽略。
- 矢量化参数（简化容差、最小区域面积、接合容差、最短保留线长、最大线宽、闭合区域间隙）可调后重新识别；“论文插图模式”自动剔除图框、坐标轴与文字注记，并用线网络围成面域；自动识别不理想时可在图上手动描绘。
- 生成的面域绑定“待定材料”，导入后在材料库中补充参数。



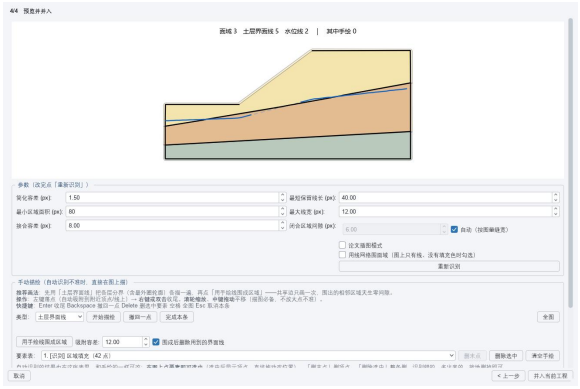


图 13-6 （左）颜色 → 要素映射（右）矢量化预览

13.4 从等高线生成剖面

- 读入带标高的平面等高线 DXF（标高取自多段线的高程），自动列出含等高线的图层及其条数与高程范围；平面图可勾选显示 DXF 中的其他图层（道路、建筑等）作底图。
- 在平面图上点两点确定剖面线，程序由等高线顶点构建地表高程面，沿剖面线等间距采样得到平滑的地表线；基底高程可自定，缺省取地表最低点以下 5 m。
- 闭合成剖面面域导入当前工程，里程为 x、高程为 y。

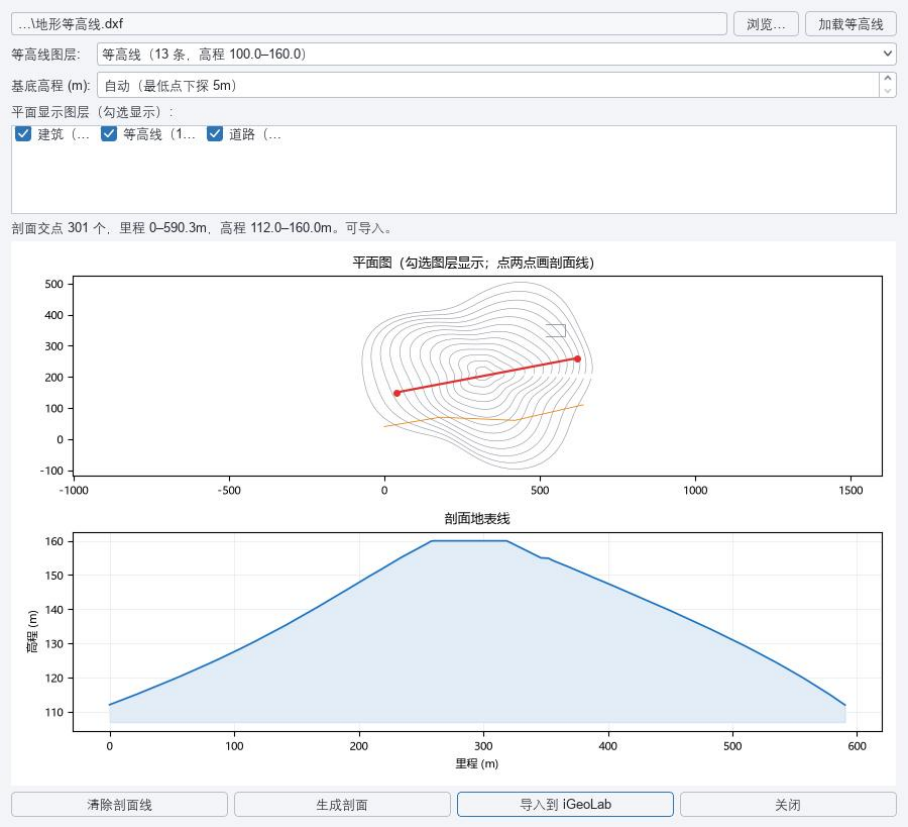


图 13-7 从等高线生成剖面：平面图上画剖面线并生成地表线

13.5 其他软件的模型与几何

表 13-1 可直接导入的其他软件文件

软件	文件	导入内容
理正边坡	计算书 .rtf，计算简图 / 安全系数图 .dxf	坡面线、土性区域（复杂土层按节点表还原，等厚土层按层厚生成）、材料重度与 c、φ、水面线、滑面线、超载；计算书中的安全系数与滑面型式随工程保存；同一目录下同名的另一种文件自动配对读入
AutoBank	导出的 .dxf，工程文件 .ab8	DXF 断面线自动串接并围成面域（材料待定），图上标注为浸润线的曲线识别为水位线；.ab8 取出全部几何折线

软件	文件	导入内容
GEO5	边坡稳定 .gst，导出的 .xml，导出的 .dxf	区域、界面线、材料（重度、c、φ）与地下水位；DXF 按 GEO_AREA、GEO_INTERFACE、GEO_WATER、GEO_ANCHOR、GEO_NAIL 等图层读取
MIDAS GTS NX	.gts、.gmw	二维几何、材料（E、ν、c、φ、ψ、重度）与水位
FLAC2D	Itasca Sketch 命令文件 .dat、.txt、.fis	Sketch 几何（矩形截面、多段线边、点与分割命令）自动围成面域，配待定材料

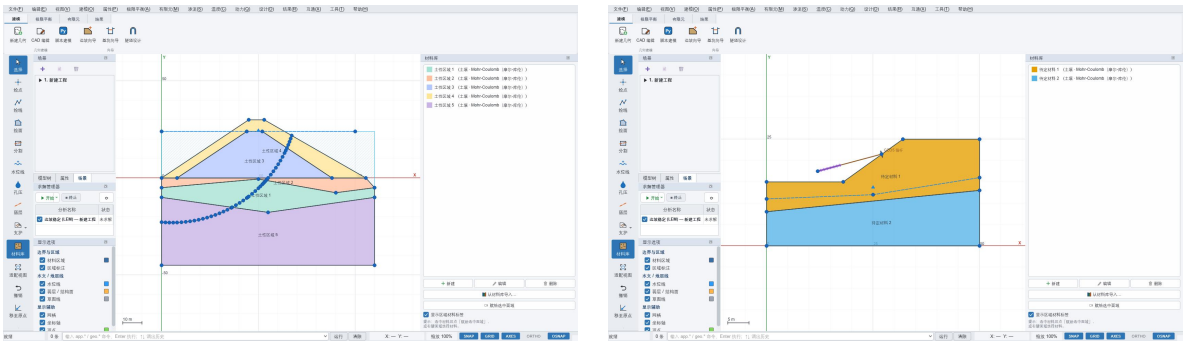


图 13-8 （左）理正边坡“复杂土层”计算书导入结果（右）GEO5 导出 CAD 的导入结果

13.6 三维地质模型导入与剖面切割

- 「文件 → 导入 → 导入三维模型（Leapfrog / OMF）」打开三维模型导入与预览窗口，读取 Leapfrog 导出的 OMF（Open Mining Format）三维地质模型，以及 OBJ、STL、PLY、DXF（3DFACE）三角网格，STEP、IGES 实体和 XYZ、CSV、TXT、PTS、ASC、PCD 点云。
- 导入时可设单位换算与坐标缩放、把 XY 包围盒中心平移到局部原点、指定对象分类（按名称自动识别地形、断层、模型边界与地层接触面）；导入在后台进行，完成后给出质量诊断（封闭或开放、连通体数、自动焊接的点与删除的退化面）。
- 三维视图可旋转、平移、缩放，切换等轴、俯视、正视、侧视；“剖切质量”分高质量、平衡、快速三档。
- 在俯视图上点两点定义竖直剖切面，为各地质体指定 c、φ、γ（内置软黏土、粉质黏土、密实砂、强风化岩、基岩等预设），程序切割生成二维分层剖面：封闭地质体按截面成区，开放接触面按上下顺序成层；预览确认后注入主窗口二维画布，直接开展二维分析。

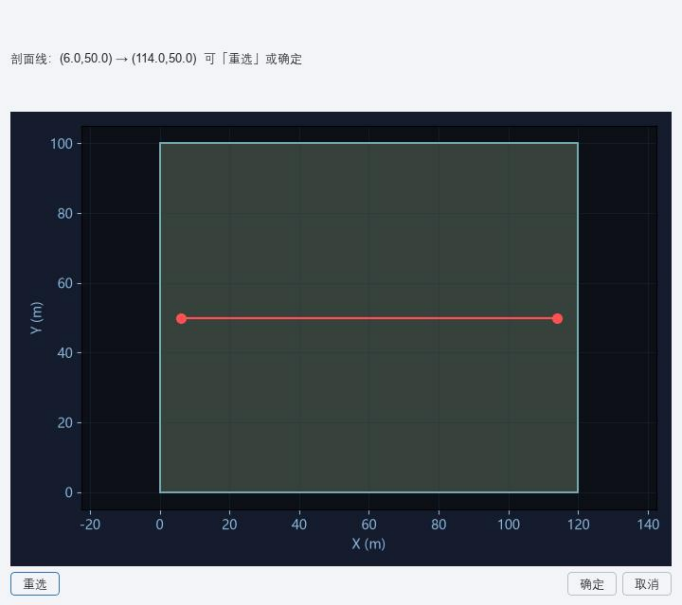


图 13-9　在 OMF 地层曲面的俯视投影上拾取剖面线

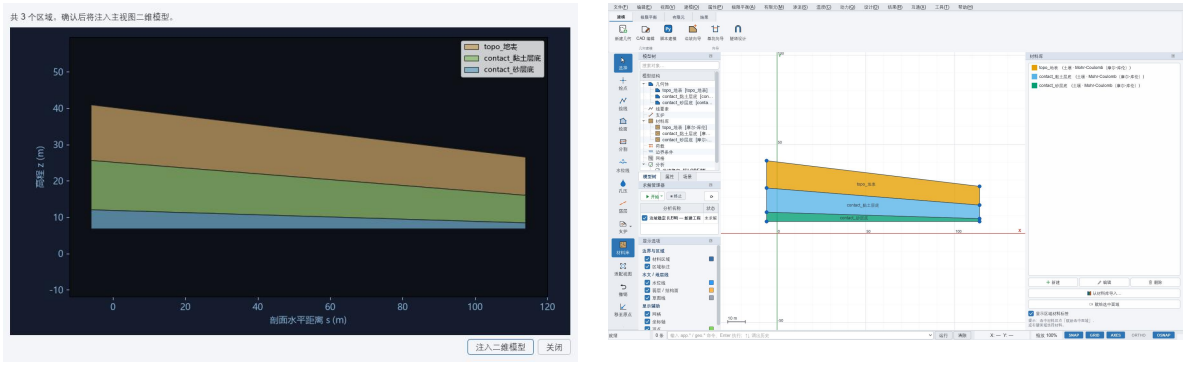


图 13-10　（左）二维剖面预览（右）注入主窗口的分层剖面

13.7　几何导出与 CAD 编辑

- 「文件 → 导出 → 导出几何 (DXF/CSV)」（Ctrl+E）提供四种模式：GeoStudio 格式（每个材料区域一条闭合多段线，图层名为材料名，水位线、弱层各成一层）、Slide2 格式（External Boundary、Material Boundary、Water Table、Weak Layer 图层）、Maptek Vulcan 制图（EXTERNAL 外轮廓与 MATERIAL 内部分界，R12 POLYLINE）与通用分层格式（外部边界、内部材料界面、水位线、结构面、草图线五个图层可选）。
- 通用分层格式还可导出 CSV 坐标表（图层、多段线序号、顶点序号、X、Y、是否闭合），可直接用 Excel 打开。
- 功能区“建模”页的“CAD 编辑”把当前几何按图层导出为 DXF 并在 LibreCAD 中打开，在 CAD 中保存后几何自动同步回 iGeoLab；使用前需在本机安装 LibreCAD 或 QCAD。



图 13-11　导出几何对话框（Slide2 格式）

第 14 章　与其他岩土软件互通

iGeoLab 可与 GeoStudio、Rocscience Slide2 与 RS2、PLAXIS 2D、PLAXIS LE、Leapfrog 交换模型：文件格式的导入导出放在「文件」菜单，调用本机安装的外部软件求解、生成计算书和各软件的 API 工具放在「互通」菜单。导出前程序检查几何完整性并识别坡向与滑动方向，目标文件里没有写入的设置在完成提示中逐条列出。



图 14-1　（左）“互通 → GeoStudio”子菜单（右）“互通 → PLAXIS”子菜单

表 14-1　互通对象与交换方式

软件	读入 iGeoLab	由 iGeoLab 写出	调用对方软件
GeoStudio	.gsz（2007 版 7.x 及 2012 以后各版）、.xml	.gsz 多分析工程（SLOPE/W、SEEP/W、SIGMA/W、QUAKE/W）	求解（GSI API、GeoCmd、GeoStudio 界面）、GeoCmd 批处理、敏感性分析、脚本运行器、计算书
Slide2	.slmd、.sli、.slim	.sli、.slim、.slmd；CAD 图纸直接转 .sli	Slide 求解器、计算书
RS2	计算结果 .fez	原生模型 .fez / .fea	RS2Scripting API 或独立计算引擎求解、批量运算、概率自动化
PLAXIS 2D	命令日志 .p2dxlog、.p2dx	命令脚本 .p2dxlog	模型转换工具（含联机读取、联机建模）
PLAXIS LE	.svm 模型与计算结果	.svm / .svt	官方 API 生成模型与求解
Leapfrog	OMF 三维地质模型	—	—

14.1　GeoStudio

- **导入 .gsz：**读取区域、材料（摩尔-库伦、Hoek-Brown、广义 Hoek-Brown 等）、水位线（测压线）与弱层，合并到当前工程，并给出区域、材料、水位线、弱层数量与分析方法。
- **导出 .gsz：**按分析树写出多分析工程——SLOPE/W（Morgenstern-Price、Spencer、Bishop、Janbu、Ordinary，Corps of Engineers 与 Lowe-Karafiath 法）、SEEP/W 稳态与瞬

态、SIGMA/W 原位应力、荷载-变形、应力重分布、强度折减稳定与耦合固结、QUAKE/W 静力与动力。随之写出材料强度（摩尔-库伦、Hoek-Brown、不排水强度及其随深度增长）、渗流水力函数与各向异性、应力与动力参数、施工阶段的区域激活与材料变更、水头 / 流量 / 渗出面与位移边界、随时间变化的水头与流量、拟静力地震系数、弱层、滑面搜索与计算网格。导出前检查区域拓扑，耗时较长的模型在后台导出、可随时取消。

- **运行 GeoStudio 求解器**：三种方式——GSI API 后台求解（推荐，出错时自动改用 GeoCmd）、GeoCmd 无界面求解、打开 GeoStudio 界面手动计算后读回结果。可选条分方法与滑面搜索方式（进入-退出，或粒子群、布谷鸟、差分进化自动搜索）；只求解当前极限平衡分析及其父分析；同一模型再次求解直接取用上次结果；求解中可随时取消。最小安全系数、临界滑面、全部滑面以及临界滑面的条块受力与条块间力自动进入边坡结果视图；勾选“求解完成后生成计算书”时在 .gsz 旁写出计算书。
- **GSI API 快速求解（预估）**：缩减进入-退出搜索的增量，快速得到安全系数预估值。
- **GeoCmd 批处理工具**：对多个 .gsz 逐个执行 /solve、/report、/results、/clean、/upgrade、/downgrade 等命令，可指定分析工况、输出目录、日志与许可类型；求解成功后可逐个生成计算书，结束时汇总各文件的结果与最小安全系数。
- **计算书**：由 GeoStudio 求解结果生成 Word、PDF 或 HTML 计算书（含输入数据、临界滑面参数、按 GB 50330-2013 的稳定性验算、结果图表与条块明细），可从求解记录中选择任一次求解，也可从已求解的 .gsz 生成。
- **敏感性分析（c/φ 热力图）**：对选定材料的 c、φ 网格逐个组合调用 GeoStudio 重算，绘出安全系数热力图并列出结果表。
- **GeoStudio 脚本运行器**：在 iGeoLab 中编写并运行调用 GeoStudio 脚本 API 的 Python 脚本，预置最近一次求解文件、分析名与当前工程。
- **使用条件**：求解类功能需在本机安装 GeoStudio（适配 GeoStudio 2026.1）；GSI API 方式还需要与本机 GeoStudio 版本一致的 GeoStudio 脚本 API（gsi 包），不可用时求解方式对话框说明原因，仍可用 GeoCmd 求解。

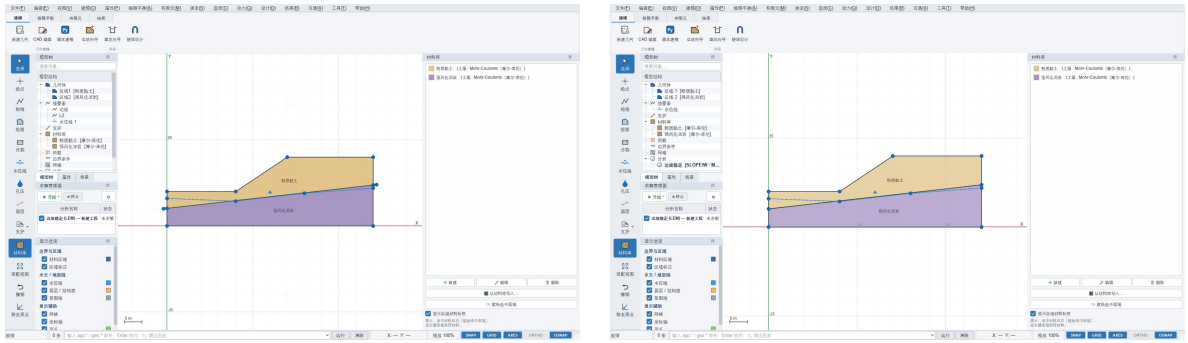


图 14-2 （左）两层土质边坡示例（右）导出为 .gsz 后再导入的结果



图 14-3 GeoStudio 求解模式对话框



图 14-4 GeoCmd 批处理工具

14.2 Rocscience Slide2

- **导入 .slmd、.sli、.slim**：区域、材料与强度类型（摩尔-库伦，不排水强度及其随深度增长与截断值，无强度，Hoek-Brown 与广义 Hoek-Brown，幂函数，Barton-Bandis，各向异性强度）、各材料的孔压取法（水位线、测压线、Hu、Ru）、水位线与测压线、弱层；.slmd 按场景文件读取孔压方法。

- **导出 .sli、.slim、.slmd**：外边界、材料分界与材料区域，最多 20 个材料槽位（同一材料的多个区域共用一个槽位），上述强度类型、测压线与 Ru，以及界面上定义的滑面限制；导出文件可在 Slide2（9.045）中直接打开并计算。
- **CAD 自动转 Slide2**：从 DXF、DWG 图纸自动识别外边界、材料区域、材料分界线、水位线与弱层，逐层填写 c、φ、γ 后生成 .sli；材料参数同时保存为可复用的模板文件，下次转换同名图纸时自动读取。
- **运行 Slide 求解器**：把当前模型写成 .sli 后调用本机 Slide 的求解程序计算，安全系数与临界滑面回到边坡结果视图；使用前需在本机安装 Rocscience Slide（含求解程序 aslidew.exe）。
- **生成计算书（Slide2）**：由 Slide 求解结果生成 Word、PDF 或 HTML 计算书。

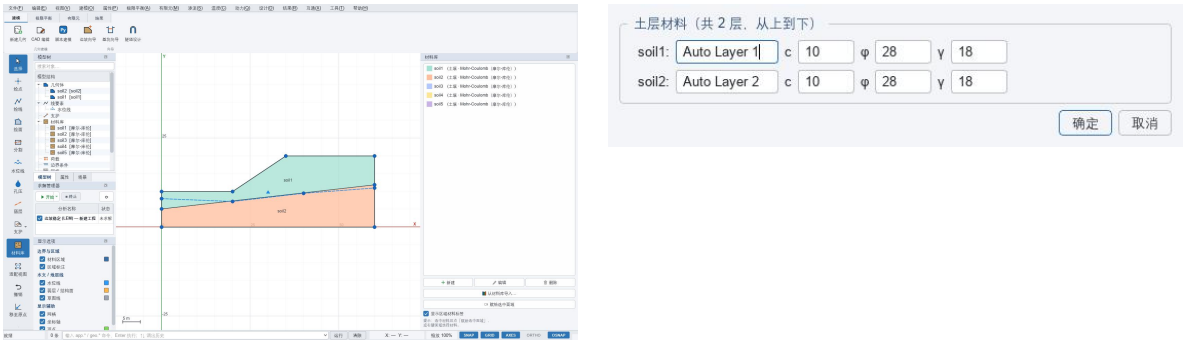


图 14-5 （左）导出为 .sli 后再导入的结果（右）CAD 自动转 Slide2 的逐层材料参数

14.3 Rocscience RS2

- **导出原生模型（.fez / .fea）**：网格（含结构面时用 6 节点三角形并沿结构面生成节理单元）、材料（线弹性 + 摩尔-库伦，参与强度折减）、节理属性、位移约束、节点荷载与边界分布荷载、孔隙水压力，按 RS2 11.029 格式写出，RS2 可直接打开；工程没有网格时自动划分。
- **读取 RS2 计算结果（.fez）**：读入位移、总应力、有效应力、应变、塑性应变、孔压与水头、屈服函数等字段以及临界 SRF，在有限元结果工作区按类别列出并显示云图；查看结果不需要安装 RS2。
- **RS2 API 工具**：API 设置与环境检查、生成并求解当前模型、求解 RS2 模型、批量运算（多个模型排队求解，可多实例并行）；求解可经 RS2Scripting 接口，也可直接调用独立计算引擎 feawin.exe。
- **概率自动化**：以随机参数样本（黏聚力与内摩擦角、饱和渗透系数、饱和含水率、残余含水率）为输入，施加互相关（保秩重排，不改变边缘分布）后批量建模、求解与提取结果，提供汇总与直方图、锚杆与挡墙结果浏览、分布拟合和环境诊断，可暂停续跑、分步执行；另有在浏览器中运行的网页版，界面可切换中英文。

- **使用条件**：求解与 API 功能需在本机安装 RS2（11.023 或更高版本），RS2Scripting 方式还需安装与 RS2 版本匹配的 RS2Scripting 库；网页版需要装有 Streamlit 的 Python 环境。



图 14-6　RS2 API 设置与环境检查

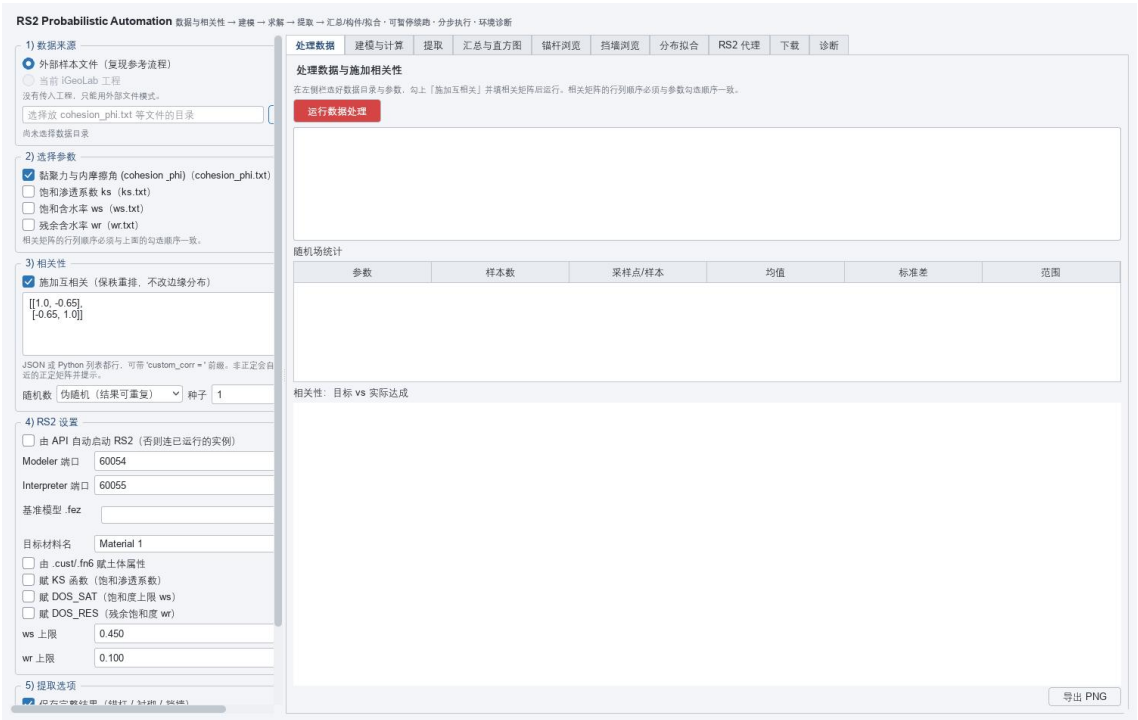


图 14-7　RS2 概率自动化窗口

14.4　PLAXIS 2D

- **导出命令脚本（.p2dxlog）**：土层多边形、材料（摩尔-库伦或 Hoek-Brown 参数）与水位线，在 PLAXIS 2D Input 的命令行逐行粘贴或用“运行命令”执行即可重建模型。
- **导入命令日志（.p2dxlog、.p2dx）**：按 soilmat、polygon、setmaterial、waterlevel 等命令重建土层区域、材料与水位线。

- **PLAXIS 2D ⇄ 极限平衡模型转换工具**：把 PLAXIS 2D 的土层几何、材料强度与水位线转为 PLAXIS LE 模型、PLAXIS LE 官方 API 模型或 GeoStudio SLOPE/W 文件，也可由 PLAXIS LE、SLOPE/W 模型反向生成 PLAXIS 2D 命令脚本；PLAXIS 2D 开启远程脚本服务器时还可联机读取当前模型或联机建模。转换日志逐条记录每一步。



图 14-8 PLAXIS 2D ⇄ 极限平衡模型转换工具

14.5 PLAXIS LE

- **导出 .svm / .svt**：区域、材料（摩尔-库伦；不排水材料按 c = Su、φ = 0）、水位、分布荷载与线荷载、拟静力地震系数、注浆锚杆类支护；模型文件按 PLAXIS LE CONNECT Edition V21 格式写出，同时写出视图文件 .svt。
- **导入 .svm**：区域、材料（摩尔-库伦、不排水强度、Hoek-Brown、Barton-Bandis）、水位线与孔压线、分布荷载与点荷载、地震系数；英制单位模型自动换算为公制。
- **导入计算结果**：从 PLAXIS LE 输出目录或单个结果文件（.sva、.svm、.svmp、.xml、.json）读取安全系数、临界滑面与条块数据，在边坡结果视图中显示。

- **官方 API**：调用 PLAXIS LE 自带的 Python API 生成模型，或直接求解当前模型，安全系数与滑面写回工程并进入结果视图；使用前需在本机安装 PLAXIS LE CONNECT Edition 及其 API。



图 14-9　导出为 PLAXIS LE 模型后再导入的结果

14.6　Leapfrog

- 读取 Leapfrog 导出的 OMF 三维地质模型，在三维视图中剖切生成二维分层剖面，见 第 13 章“三维地质模型导入与剖面切割”。

第 15 章　脚本与自动化

iGeoLab 的建模、参数修改、求解与结果读取都可以用 Python 完成。界面上的建模操作可以实时转写为命令流，命令流可导出成脚本、录制成宏，在新工程中重现；外部程序可经远程脚本服务器调度 iGeoLab；多个场景可在求解管理器中一次排队求解。这些手段用于参数化分析、批量计算、教学演示与二次开发。

表 15-1　自动化手段一览

手段	用途	入口
Python 控制台	逐行执行 Python 语句，访问当前工程、修改参数、调用求解	视图 → Python 控制台（F8）
命令行	主窗口底部的单行命令输入，执行 app.*、geo.* 命令并写入当前场景的命令记录	主窗口状态栏
脚本编辑器	编写、保存、运行完整脚本，语法检查，可中途停止，从录制导入	工具 → 脚本编辑器
脚本建模	用 geo 对象写脚本生成几何，内置边坡、水平层状地层、基坑模板	视图 → 脚本建模（F4）；功能区“建模”页
实时脚本预览	界面建模操作实时转写为 Python 命令流，可导出、验证	视图 → 实时脚本预览（F7）
宏	把命令记录存为 .macro 文件，在新工程中回放，可译为脚本	工具 → 录制宏 / 回放宏
远程脚本服务器	外部程序经 TCP 端口以 JSON-RPC 2.0 协议调用 iGeoLab	视图 → 远程脚本服务器（F11）
求解管理器	勾选多个场景一次排队求解	视图 → 求解管理器

15.1　Python 控制台与命令行

- 控制台在当前工程上执行 Python 语句：用 app.project 访问工程的区域、材料、水位线、分析与结果，可修改参数并调用极限平衡等求解内核，输出区显示返回值、打印内容与报错。
- 主窗口底部的命令行用于执行单条 app.*、geo.* 命令，Enter 执行，↑、↓ 调出历史命令；录制开启时执行成功的命令写入当前场景的命令记录。

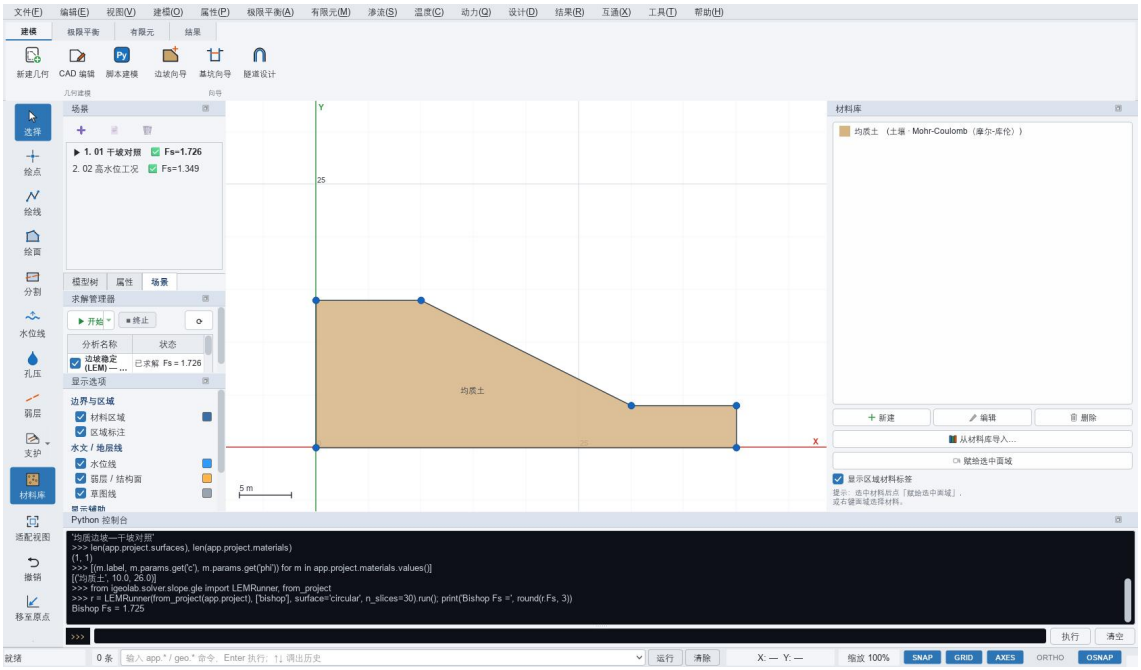


图 15-1　Python 控制台：读取材料参数并调用极限平衡求解

15.2　脚本编辑器与脚本建模

- 脚本编辑器带行号、语法高亮、实时语法检查与字体缩放，可运行全部或选中的代码，运行中可停止；可从命令流录制导入脚本，录制、回放宏并把宏译成 Python 脚本。脚本中的 app 对象提供与界面操作等价的建模、材料、荷载、阶段等函数，每次调用都经命令系统执行、可撤销。
- 脚本建模面板（F4）用 geo 对象添加点、折线、面域，平移、缩放几何，内置“简单边坡”“水平层状地层”“基坑开挖”模板，Ctrl+Enter 运行后画布随即更新。

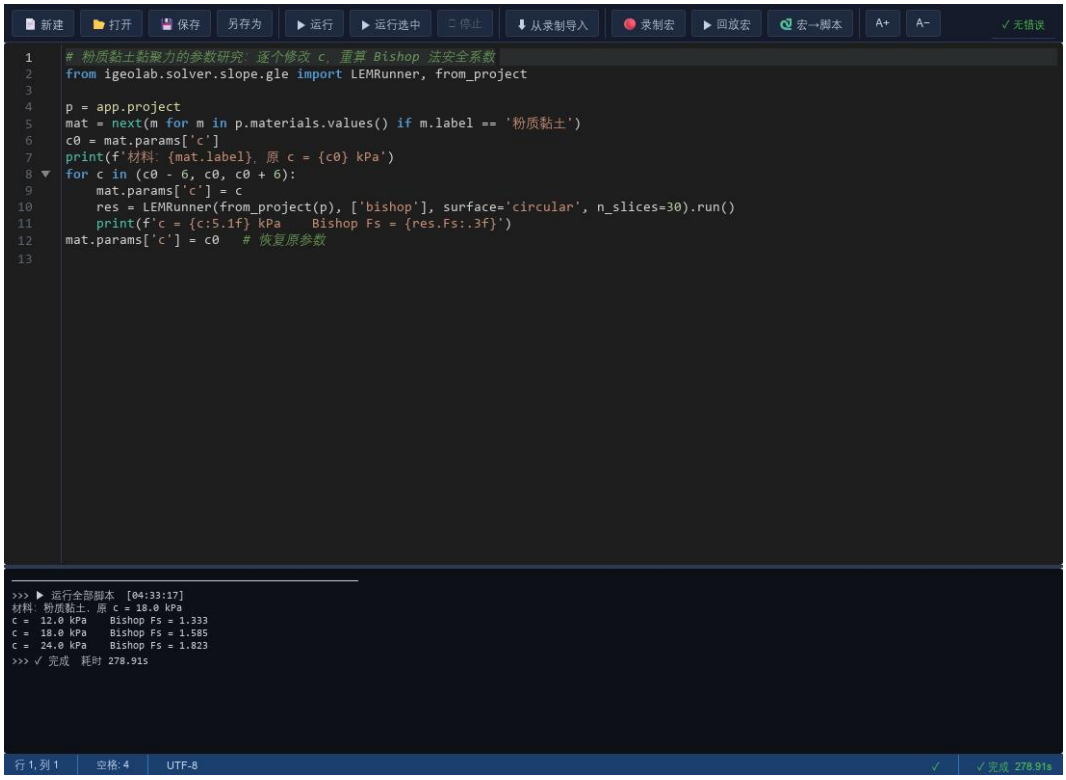


图 15-2　脚本编辑器：粉质黏土黏聚力的参数研究

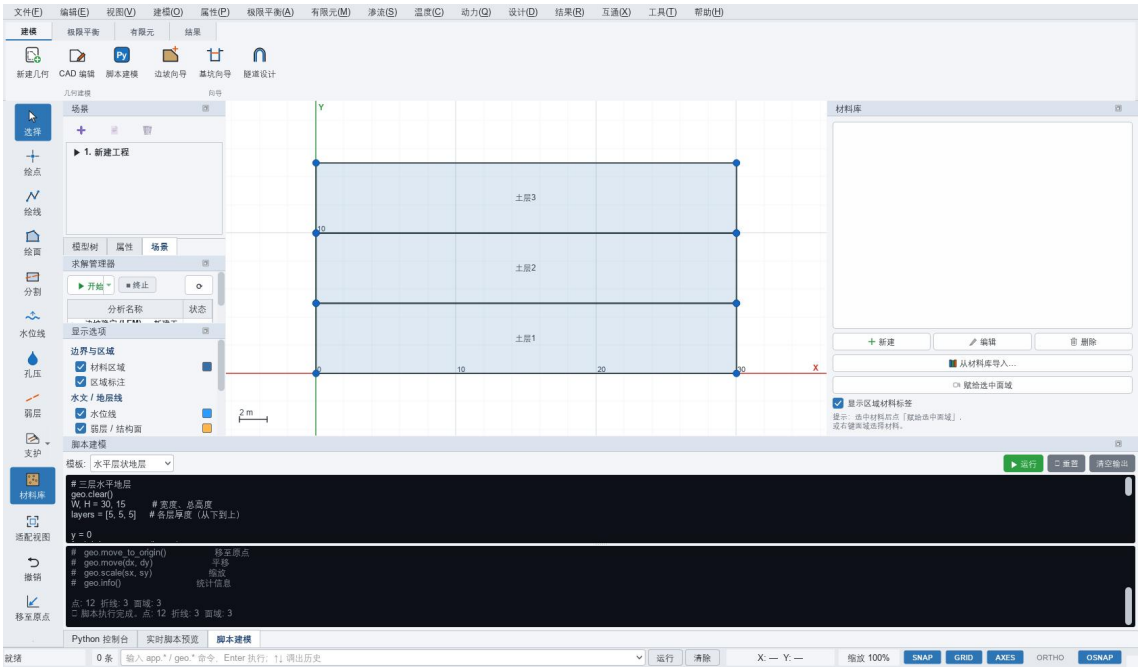


图 15-3　脚本建模面板（F4）用模板生成三层水平地层

15.3　命令流、实时脚本预览与宏

- 开启录制后，绘制区域、分割地层、新建与指定材料、绘制水位线等界面操作实时转写为 Python 命令，在实时脚本预览面板中带行号、语法高亮与命令时间轴显示，可搜索、复制、导出为 .py，并在独立的验证工程中回放检验能否完整重现模型。

- 「文件 → 导出 → 导出命令流脚本」把当前场景的命令记录写成可在脚本编辑器中运行的 Python 脚本。
- 「工具 → 录制宏」把命令记录存为 .macro 文件，「工具 → 回放宏」在当前工程中重放；宏文件可以加循环与条件步骤，批量生成相似模型。

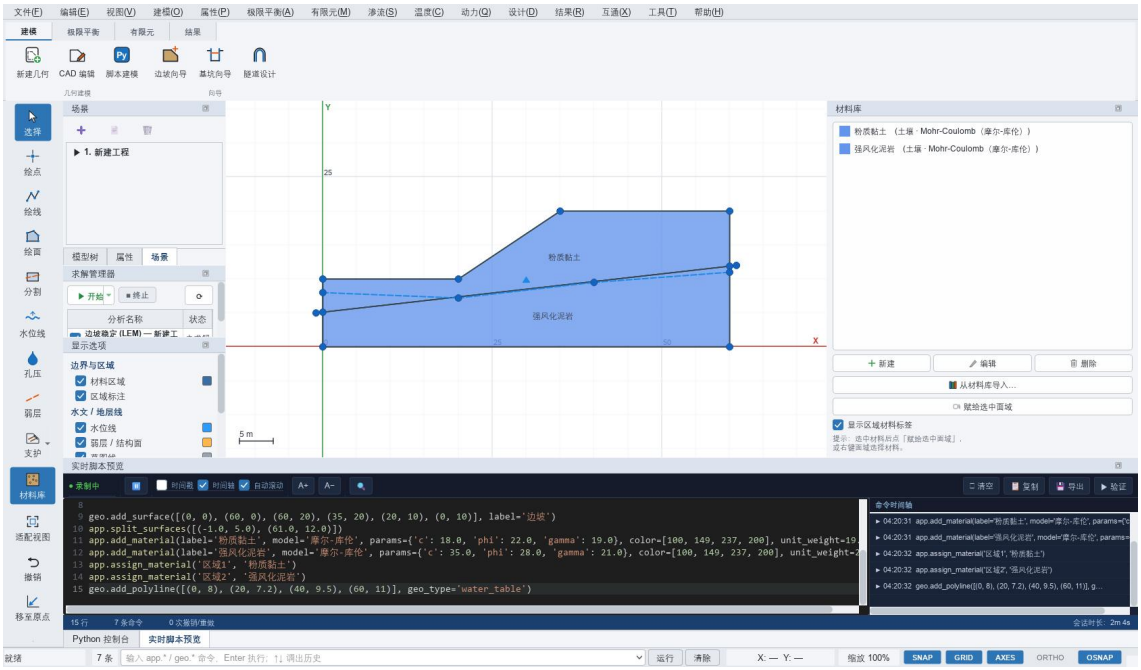


图 15-4　实时脚本预览：界面与命令行操作同步生成的命令流

15.4　远程脚本服务器

- 在本机 TCP 端口（缺省 8099）上监听，每条消息由 4 字节长度前缀与 UTF-8 JSON 负载组成，遵循 JSON-RPC 2.0 规范；外部程序（Python、MATLAB、Excel VBA 等）可调用 app.* 脚本函数，以及 ping、server.info、server.methods 和宏的录制、回放、翻译。
- 安全设置：IP 白名单（缺省只允许本机）、认证令牌、方法权限（全部方法、仅几何建模、仅分析计算或自定义列表）；面板实时显示已连接客户端与请求日志，并给出可复制的连接代码。

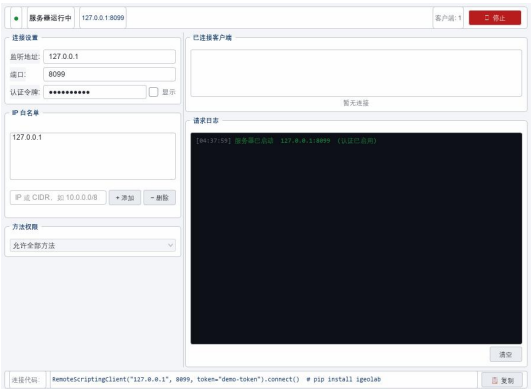


图 15-5　远程脚本服务器面板

15.5 批量计算

- 求解管理器为工作区的每个场景列一行，勾选后点“▶ 开始”逐个求解，按各场景当前分析的类型调用极限平衡、应力-变形、渗流或温度求解，状态与安全系数实时显示，某个场景无法求解时跳过并继续其余场景。
- 其他批量功能：GeoCmd 批处理工具批量求解 GeoStudio 工程，RS2 批量运算，批量导入问题几何并修复，极限平衡与有限元的概率与参数研究自动生成参数组合并批量求解。



图 15-6 求解管理器：两个场景批量求解完成

第 16 章　结果后处理与计算书

各类分析求解后，iGeoLab 在统一的结果工作区中查看结果，并可将结果图、数据表与几何导出，或生成带封面、目录与签署栏的计算书。各模块结果的具体内容见对应章节，本章介绍结果查看与成果输出的公共功能。

16.1　结果工作区

- 进入方式：功能区切换到“结果”页，或在「结果」菜单中选择结果类型（边坡结果（极限平衡）、有限元结果（强度折减）、渗流结果、温度结果、组分运移结果、孔隙气体流动结果）；应力—变形分析的结果由「有限元 → 应力-变形结果」打开。
- 几何锁定：进入结果工作区后几何模型锁定，只能查看结果，避免误改已求解的模型；点“返回建模”后恢复编辑。
- 菜单与功能区同步：「结果」菜单随当前结果类型重建，列出与功能区“结果”页相同的选项，例如极限平衡结果的条分方法、滑面显示、安全系数色带、孔压云图与图层，有限元结果的结果类型、阶段、构件内力、云图模式、变形放大与叠加图层，渗流结果的时刻、流速矢量、潜水面、流线与断面流量。
- 分析树与阶段：有限元结果按分析与施工阶段（或时刻）切换，“上一阶段”“下一阶段”逐个浏览；场景面板中切换场景即查看该场景的结果。



图 16-1 「结果」菜单（当前为极限平衡结果）

16.2 结果的显示与查询

- 极限平衡：临界滑动面与全部试算滑面、安全系数色带、圆心安全系数云图、条块划分、支护作用力、孔压云图，条块信息（属性、自由体受力图与力多边形），沿滑面的应力、强度、孔压与条间力曲线，多种方法的安全系数对比，以及与有限元强度折减结果的叠加对比（见 第 4 章）。

- 有限元：位移、应力、应变、塑性点、屈服函数、孔压等云图，位移矢量、主应力方向、构件屈服标记，构件内力与支护能力图，查询线、阶段曲线、强度折减曲线、动画与结果表格（见 第 5 章）。
- 渗流、温度、运移与孔隙气体：总水头、压力水头、孔压、流速、浓度、温度、气压等云图，流速矢量、潜水面、流线，断面流量与历史曲线、水量与质量平衡（见 第 6 章）。
- 云图设置：可设置云图上下限与分级数、云图模式、变形放大倍数，叠加网格线、模型轮廓与边界条件符号。

16.3 成果导出

- 结果图：「结果 → 复制结果图」复制到剪贴板，「结果 → 导出结果图」保存为图片；极限平衡成果图可存为 PNG（200 dpi）、SVG 矢量图或 PDF，有限元与渗流等结果图存为 PNG 或 JPEG。
- 数据表：极限平衡结果可导出滑面坐标、滑面列表、条块数据与方法对比（CSV），临界滑面几何可导出为 DXF，“全部导出”一次写出各项数据与成果图；有限元“结果表格”列出节点与单元的全部结果量并导出 CSV；构件内力表、断面流量、曲线数据均可导出。
- 动画：按施工阶段、固结或动力的输出时刻逐帧播放云图，导出帧序列或 GIF。
- 几何与模型：几何可导出为 DXF / CSV，模型可导出到 GeoStudio、Slide2、RS2、PLAXIS 2D、PLAXIS LE 等软件（见 第 14 章）。

16.4 计算书

iGeoLab 可生成以下计算书，均提供 Word（.docx）、PDF 与 HTML 三种格式，三种格式内容相同：

表 16-1 计算书类型

计算书	入口	主要内容
边坡稳定性计算书	极限平衡 → 生成计算书；功能区“极限平衡”页 → 计算书	按 GB 50330-2013 评价：边坡工程安全等级与稳定安全系数、计算模型、计算公式、各方法安全系数、临界滑面、安全系数分布、条块计算表、条间力、支护受力、多工况与结论
有限元计算书	有限元 → 导出计算报告；功能区“有限元”页 → 计算报告	工程概况、结果汇总、模型、材料、网格、支护、荷载与边界、分析过程、各分析的位移与塑性点、构件内力与包络、承载力校核、支护能力图、固结、动力、强度折减、渗流结果与计算提示；可按边坡（GB 50330-2013）或基坑（JGJ 120-2012）评价
GeoStudio 求解计算书	互通 → GeoStudio → 生成计算书 / 从 .gsz 生成计算书	由 GeoStudio 求解结果生成，按 GB 50330-2013 评价
Slide2 计算书	互通 → Rocscience → 生成计算书（Slide2）	由 Slide2 计算结果生成，按 GB 50330-2013 评价

计算书	入口	主要内容
岩土试验报告	岩土计算实验室	试验概况、本构模型、特征值、曲线与数据摘要（见 第 10 章）

- 计算书设置：生成前弹出“计算书设置”对话框，填写计算、校核、审核人（留空则打印后手签），选择边坡工程安全等级与边坡类型（永久 / 临时），软件按 GB 50330-2013 表 5.3.2 给出稳定安全系数；有限元计算书另有基坑支护（JGJ 120-2012）的支护结构安全等级与综合分项系数 γF，以及评价依据（自动、边坡、基坑）；极限平衡计算书可设滑面列表行数、是否附临界滑面条块计算表。设置随工程保存，下次生成沿用。
- 版式：统一的封面、目录与页眉页脚，标题与表题不落在页底，图与图题同页，Word 表格的表头跨页重复。
- 目录：Word 版的目录在生成时即写好各级标题与页码域，在 Word 中打开时更新页码；本机装有 Word 或 WPS 时，生成后自动在后台更新页码。
- PDF：本机装有 Word 或 WPS 时由其转换，否则由软件自身排版输出。



图 16-2　计算书设置对话框（左）边坡稳定性计算书（右）有限元计算书



图 16-3　边坡稳定性计算书（PDF 版）的封面、目录与正文页

第 17 章　关于中仿公司

中仿公司成立于 2003 年，是国内较早专注于岩土仿真技术研发与推广的高新技术企业，总部位于上海市松江区临港松江科技城，在武汉设有分支机构。

多年来，中仿公司依托岩土工程专业积累与数字化技术能力，为国内多家岩土工程设计院、科研院所及高校提供技术服务，业务涉及水利水电、公路、铁路、港湾、有色冶金、电力、核工业、市政、轨道交通等领域。

中仿公司是 GEO-SLOPE（GeoStudio）中国区合作伙伴（2004 年起）、Rocscience 中国区合作伙伴（2008 年起），并代理 PLAXIS、Leapfrog（Geo、Works 和 Energy）等国际岩土仿真软件。

iGeoLab 是中仿公司在长期代理国际岩土软件的基础上，面向国内工程实践自主研发的岩土分析平台。

17.1　资质与合作关系

表 17-1　资质与合作关系

类别	内容
企业资质	高新技术企业；上海市重点软件企业；长期服务国内设计院、科研机构及高校客户
GEO-SLOPE 合作关系	GeoStudio 中国区合作伙伴（2004 年起）
Rocscience 合作关系	Rocscience 中国区合作伙伴（2008 年起）
Bentley / PLAXIS 代理	PLAXIS 中国区代理（Bentley Systems）
Leapfrog 代理	Leapfrog（Geo、Works 和 Energy）中国区代理（Seequent / Bentley）

17.2　联系我们

- 上海总部地址：上海市松江区九新公路 877 号临港卓越科技园 3 号楼 1F 中仿
- 电话：+86-21-80399555　　邮编：201615
- 全国客服热线：400 888 5100
- 官方网站：www.igeo.cn
- 电子邮件：info@cntech.com