

New eXperience of GeoTechnical analysis System

**GTSNX**

岩土与隧道有限元分析软件

**用户手册**

## 著作权和商标使用说明

MIDAS 系列软件中文版包含了北京迈达斯技术有限公司开发的建筑/桥梁/岩土/机械领域的 CAE 软件。与 MIDAS 系列软件相关的书籍受计算机软件保护条例和中华人民共和国著作权法保护。对与程序相关的资料的咨询请与下列地址联系。

北京迈达斯技术有限公司

地址：北京市海淀区中关村南大街乙 56 号方圆大厦 21 层

电话：010-5165-9908

传真：010-5165-9909

E-mail: BeiJing@midasuser.com

网站地址：<http://cn.midasuser.com/gts/>

## 程序免责声明(必读)

MIDAS 系列软件在开发时通过数千个例题的计算，与理论值、实验值、其它程序进行了比较验证，程序不仅包含了最新的理论和技术，而且提供了优秀的分析和设计结果。MIDAS 系列软件从 1989 年开发至今在建筑/桥梁/岩土/机械领域被应用于约上万个实际工程项目中，证明了程序的准确性和高效性。

声明：结构分析与设计需要分析和设计人员具有深厚的理论基础和设计经验，因此，对于使用 MIDAS 程序产生的任何利益和损失，MIDAS 系列软件的开发者和技术支持人员不具有任何权利和责任；用户在使用程序之前需要详细并准确地了解程序的内容和操作方法，对分析和设计结果需要详细的验证后方可使用。

## **DISCLAIMER**

Developers and sponsors assume no responsibility for the use of MIDAS family program(midas GTS NX, midas SoilWorks, midas GeoX, midas Civil, midas FEA, midas Building, midas Gen, midas smartBDS, mid as CivilDesigner, midas GenDesigner, midas NFX: hereinafter referred to as “ MIDAS Package” or for the accuracy or validity of any results obtained from the MIDAS package.

Developers and sponsors shall not be liable for loss of profit, loss of business, or other financial loss which may be caused directly or indirectly by the MIDAS package, when used for any purpose or use, due to any defect or deficiency therein.

# 前言

欢迎使用GTS NX程序。

midas GTS NX是一款利用尖端的计算机图形处理和分析技术研发而成的具有全新理念的64位通用岩土有限元分析软件。

GTS NX是“New eXperience of GeoTechnical analysis System”的缩写。

## GTS NX和迈达斯系列软件

---

GTS NX是迈达斯系列软件之一。迈达斯系列软件自1989年开始研发以来，形成了完善的分析与设计软件系统，构成如下：

岩土领域	midas GTS NX	岩土和隧道有限元分析软件
	midas SoilWorks	二维岩土分析与设计软件
	midas GeoX	基坑支护设计平台
桥梁领域	midas Civil	桥梁结构分析和设计软件
	midas FEA	有限元仿真分析软件
	midas SmartBDS	箱形梁桥分析设计自动化软件
	midas UMD	土木结构单体结构设计辅助软件
	midas CivilDesigner	桥涵结构通用设计平台
建筑领域	midas Gen	建筑结构分析和设计软件
	midas Building	建筑大师软件
	midas Foundation	基础大师软件
	midas Modeler	建模师
	midas Drawing	绘图师
	midas ADS	剪力墙住宅专用分析与设计系统
	midas SDS	楼板和筏板结构分析与设计系统
	midas GenDesigner	建筑结构通用设计平台
机械领域	midas NFX	多物理场分析设计软件
	Nastran FX	通用结构仿真分析软件



## GTS NX的优点和特点

---

GTS NX是经过国内外专业技术人员和专家的共同努力，并考虑实际设计人员的需要，基于Windows环境开发的程序，是一款易学习、易使用、功能强大的岩土分析软件。

GTS NX为适应最新计算机软硬件发展，搭载了64位集成求解器。菜单构成非常直观，即便初学者也可很快掌握。经过严格测试并具有品质保证的分析功能、分析速度、卓越的图形表现以及结果整理等功能将为用户提供一个全新模式的分析环境。

另外，GTS NX在开发阶段通过几千种例题的计算，将其计算结果与理论值、及同其他程序的计算结果进行了比较、验证，并在大量的工程项目上得到了运用，证明其准确性和高效性。

在MIDAS主页([www.MidasUser.com](http://www.MidasUser.com))提供了部分最具代表性的例题。在有限元运算原理方面，由于采用了最新理论，故可分析出较同类程序更为精确的计算结果。

## 致谢

---

GTS NX在开发过程中得到了国内岩土设计人员和学术界专家的鼎力支持，借此向国内同行、前辈、专家表示感谢。

最后，对参与开发GTS NX的开发人员及其家属表示感谢，感谢他们一直以来的牺牲与奉献。

# 目录

<b>第一章 概要</b> .....	<b>1</b>
1.1 概要 .....	1
<b>第二章 基本信息</b> .....	<b>3</b>
2.1 文件启动.....	3
2.2 视图工具条.....	12
2.3 建模助手工具条.....	17
2.4 选择工具条.....	20
2.5 添加视图操作工具条.....	28
2.6 节点/单元工具条.....	31
2.7 执行分析工具条.....	33
<b>第三章 几何</b> .....	<b>34</b>
3.1 点和线 .....	34
3.2 曲面与实体.....	56
3.3 布尔运算.....	72
3.4 分割 .....	76
3.5 延伸 .....	80
3.6 转换 .....	86
3.7 子形状 .....	94
3.8 删除 .....	99
3.9 工具 .....	103
<b>第四章 网格</b> .....	<b>112</b>
4.1 属性/坐标系/函数 .....	112
4.2 控制 .....	195
4.3 生成 .....	201
4.4 网格组 .....	213
4.5 转换 .....	216
4.6 转换 .....	238
4.7 节点 .....	245

4.8 单元 .....	252
4.9 工具 .....	279
<b>第五章 分析方法.....</b>	<b>287</b>
5.1 接触 .....	287
5.2 施工阶段.....	290
5.3 边界条件.....	303
5.4 荷载 .....	325
5.5 助手及工具.....	349
<b>第六章 分析.....</b>	<b>378</b>
6.1 分析工况.....	378
6.2 分析 .....	411
6.3 历程 .....	412
<b>第七章 结果与工具.....</b>	<b>414</b>
7.1 结果 .....	414
7.2 一般 .....	416
7.3 高级功能.....	432
7.4 特殊后处理.....	441
7.5 其他 .....	446
7.6 几何 .....	448
7.7 节点/单元 .....	450
7.8 导出 3D PDF.....	451
7.9 飞行模式.....	453

# 第一章 概要

## 1.1 概要

GTS NX (New eXperience of Geo-Technical analysis System) 是一款针对岩土领域研发的通用有限元分析软件, 不仅支持线性/非线性静力分析、线性/非线性动态分析、渗流和固结分析、边坡稳定分析、施工阶段分析等多种分析类型, 而且可进行渗流-应力耦合、应力-边坡耦合、渗流-边坡耦合、非线性动力分析-边坡耦合等多种耦合分析。广泛适用于地铁、隧道、边坡、基坑、桩基、水工、矿山等各种实际工程的准确建模与分析。

GTS NX 提供了多样 CAD 接口程序、CAD 标准的多样几何建模功能、网格划分功能, 以及使用基于 64 位求解器的最新图形处理技术和分析功能, 模型规模越大, 分析速度提升越明显。

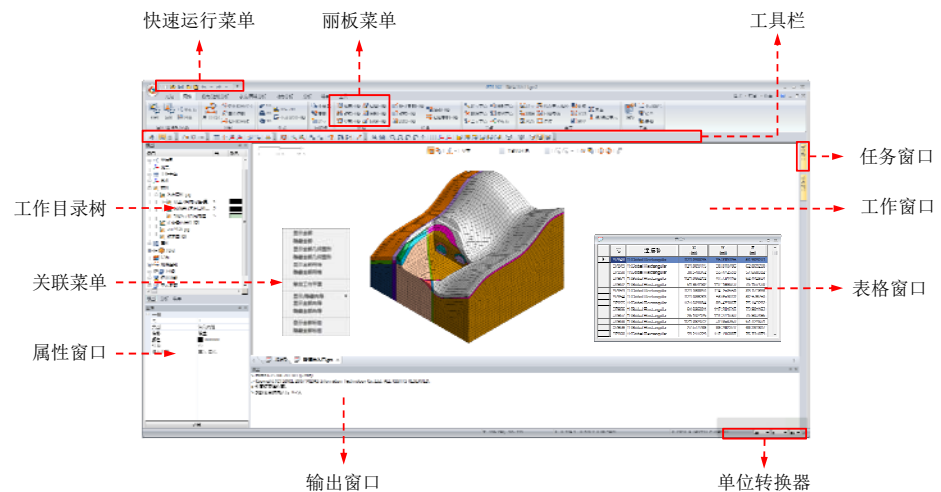


图 1-1 GTS NX 操作界面

GTS NX 《用户手册》由各菜单功能介绍、输入项目、建立几何模型、定义材料属性、生成单元网格、设置边界条件及荷载条件、施工阶段定义、分析工况设定、执行分析及结果分析/输出等, 以及程序提供的单元库和各类数据库的说明等组成。具体功能也可在运行程序时通过在线帮助 (F1 键) 查看。各章节的组成如下:

### 第一章 概要

程序概述和组成手册的内容。

### 第二章 基本信息

本章是对程序的基本菜单和多样的工具进行说明, 包括视图/选择/模型查看等程序操作所需的工具以及界面设置等详细说明。在学习主菜单和功能之前, 必须熟悉整体建模及结果分析时所需的功能。

### 第三章 几何

本章是对建模的第一阶段, 即建立和修改几何形状 (线、面、实体) 的所有功能进行说明, 也包括通过其它 CAD 程序导入的几何模型并修改和编辑的功能, 除此之外还有检查和自动修复错误形状等功能。

### 第四章 网格

本章节是对基于几何形状建立并修改单元的功能进行说明。包括指定到单元（岩土/结构）的材料属性，材料和特性参数的详细说明。网格划分是建模过程中最重要的步骤及需注意的事项，同时了解岩土/结构的单元质量及材料特性也是必需的。有关岩土/结构材料的详细行为特性可参考《分析手册》的材料部分。

## **第五章 分析方法**

本章节是对建模的最后阶段中边界条件和荷载条件的设置功能进行说明，同时也包括施工阶段的设置功能。基于对应的边界和荷载条件的设置对于正确的结果分析来说是十分重要的。正确理解边界条件和荷载条件对于准确的模拟来说是必要的。

## **第六章 分析**

对最终完成的模型选择分析类型，并设置各分析类型的控制选项。各分析类型的控制选项与分析条件同时对结果有很大的影响。详细说明了各分析类型和分析控制选项的作用及对应的结果范围。各分析类型的详细算法可参考《分析手册》的分析篇。

## **第七章 结果与工具**

解释和整理已分析的结果是与实际的分析过程同样重要的。本章节详细地说明了高效地查看分析结果和输出适用于设计的结果。

## 第二章 基本信息



图 2-1 文件菜单

### 2.1 文件启动

#### 2.1.1 建立及保存文件

##### 1. 新建

建立新文件。

建立新文件时，设置分析所需的初始变量（模型类型、重力方向及加速度大小、单位系统）。

模型类型可定义为 2D、3D 或轴对称。二维模型的情况下，重力方向为 Y 方向；三维模型时重力方向可指定为 Y 方向或 Z 方向。

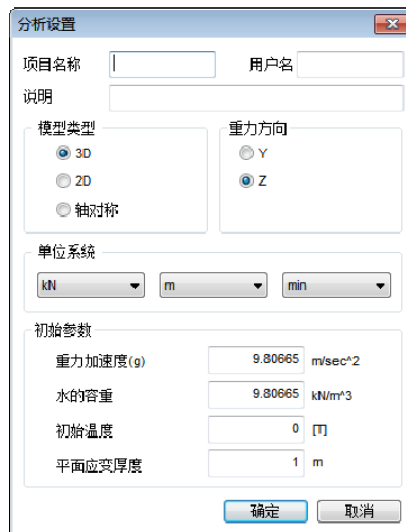


图 2-2 分析设置对话框

# 第一章 概要

## 1.1 概要

GTS NX (New eXperience of Geo-Technical analysis System) 是一款针对岩土领域研发的通用有限元分析软件, 不仅支持线性/非线性静力分析、线性/非线性动态分析、渗流和固结分析、边坡稳定分析、施工阶段分析等多种分析类型, 而且可进行渗流-应力耦合、应力-边坡耦合、渗流-边坡耦合、非线性动力分析-边坡耦合等多种耦合分析。广泛适用于地铁、隧道、边坡、基坑、桩基、水工、矿山等各种实际工程的准确建模与分析。

GTS NX 提供了多样 CAD 接口程序、CAD 标准的多样几何建模功能、网格划分功能, 以及使用基于 64 位求解器的最新图形处理技术和分析功能, 模型规模越大, 分析速度提升越明显。

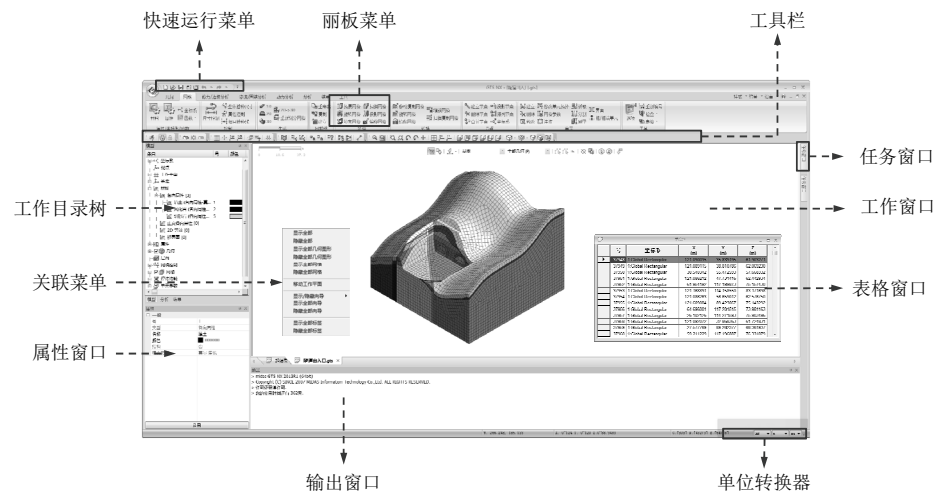


图 1-1 GTS NX 操作界面

GTS NX 《用户手册》由各菜单功能介绍、输入项目、建立几何模型、定义材料属性、生成单元网格、设置边界条件及荷载条件、施工阶段定义、分析工况设定、执行分析及结果分析/输出等, 以及程序提供的单元库和各类数据库的说明等组成。具体功能也可在运行程序时通过在线帮助 (F1 键) 查看。各章节的组成如下:

### 第一章 概要

程序概述和组成手册的内容。

### 第二章 基本信息

本章是对程序的基本菜单和多样的工具进行说明, 包括视图/选择/模型查看等程序操作所需的工具以及界面设置等详细说明。在学习主菜单和功能之前, 必须熟悉整体建模及结果分析时所需的功能。

### 第三章 几何

本章是对建模的第一阶段, 即建立和修改几何形状 (线、面、实体) 的所有功能进行说明, 也包括通过其它 CAD 程序导入的几何模型并修改和编辑的功能, 除此之外还有检查和自动修复错误形状等功能。

### 第四章 网格

本章节是对基于几何形状建立并修改单元的功能进行说明。包括指定到单元（岩土/结构）的材料属性，材料和特性参数的详细说明。网格划分是建模过程中最重要的步骤及需注意的事项，同时了解岩土/结构的单元质量及材料特性也是必需的。有关岩土/结构材料的详细行为特性可参考《分析手册》的材料部分。

### **第五章 分析方法**

本章节是对建模的最后阶段中边界条件和荷载条件的设置功能进行说明，同时也包括施工阶段的设置功能。基于对应的边界和荷载条件的设置对于正确的结果分析来说是十分重要的。正确理解边界条件和荷载条件对于准确的模拟来说是必要的。

### **第六章 分析**

对最终完成的模型选择分析类型，并设置各分析类型的控制选项。各分析类型的控制选项与分析条件同时对结果有很大的影响。详细说明了各分析类型和分析控制选项的作用及对应的结果范围。各分析类型的详细算法可参考《分析手册》的分析篇。

### **第七章 结果与工具**

解释和整理已分析的结果是与实际的分析过程同样重要的。本章节详细地说明了高效地查看分析结果和输出适用于设计的结果。



## 第二章 基本信息



图 2-1 文件菜单

### 2.1 文件启动

#### 2.1.1 建立及保存文件

##### 1. 新建

建立新文件。

建立新文件时，设置分析所需的初始变量（模型类型、重力方向及加速度大小、单位系统）。

模型类型可定义为 2D、3D 或轴对称。二维模型的情况下，重力方向为 Y 方向；三维模型时重力方向可指定为 Y 方向或 Z 方向。



图 2-2 分析设置对话框

定义分析模型时需要结构尺寸或材料的性质等，这些物理量（physical quantity）的信息一般要按特定单位系统（unit system）为基准定义。在 GTS NX 中，可转换力/长度/时间单位，用户在定义分析模型时，可根据建模过程转换单位系统。GTS NX 中支持的单位系统如下。

表 2-1 单位系统

荷载	长度	时间
kgf	mm	sec
tonf	cm	min
N	m	hr
KN	in	day
lbf	tf	
Kips	Um	

## 2. 打开

打开现有保存的文件。用户可打开旧版 GTS 文件和 GTS NX 文件。

按如下文件形式选择分析模型，用户可预先查看相应模型文件的图像和基本的分析模型信息。

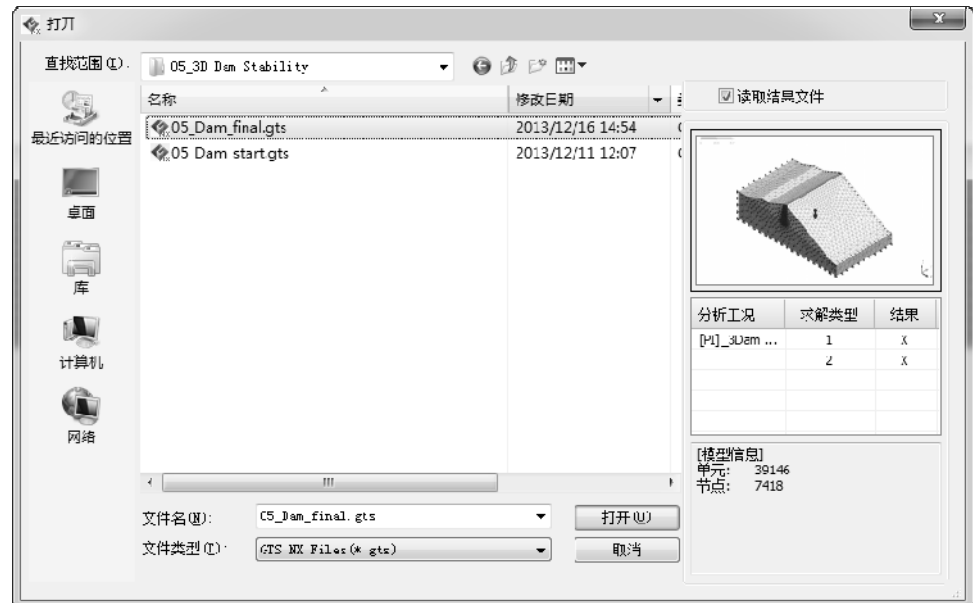


图 2-3 模型打开路径

## 3. 保存

保存当前项目文件。在选项中勾选自动保存文件后，就按设置的时间间隔自动保存。



图 2-4 选项-文件保存设置

#### 4. 另存为

用新名称保存当前项目文件。在建模过程中虽然用撤销/重做功能可以取消或恢复操作，但是如果按建模阶段分别保存最终模型，这个功能可让修改错误模型和变更条件等变得更加简单。

### 2.1.2 导入

#### 1. 导入 CAD 文件



图 2-5 GTS NX 文件导入形式

利用导入 CAD 文件功能时，当前模型的分析信息将被自动无效化。同时，即使没有打开新的文件，也能不限次数地导入新的 CAD 几何形状到新窗口。支持的文件格式有：

表 2-2 GTS NX 支持的导入文件格式

Parasolid (10 to 24)	(*x_t;*.xmt_txt;*.x_b;*.xmt_bin)
ACIS (tp R23) Files	(*sat;*.sab;*.asat;*.asab)
STEP (AP203,AP214) Files	(*stp;*.step)
IGES (Up to 5.3) Files	(*igs;*.iges)

Pro-E (16 to Wildfire 5, Creo 2.0) Files (\*.prt;\*.prt.\*;\*.asm;\*.asm.\*)  
CATIA V4 (CATIA 4.1.9 to 4.2.4) Files (\*.model;\*.exp;\*.session)  
CATIA V5 (R6 to R22) Files (\*.CATPart;\*.CATProduct;\*.CGR)  
SoilWorks (98 to 2013) Files (\*.sldprt;\*.sldasm)  
Unigraphics (11 to 18, NX to NX8) Files (\*.prt)  
Inventor Part (6 to 2013) Files (\*.ipt)  
inventor Assembly (11 to 2013) Files (\*.iam)

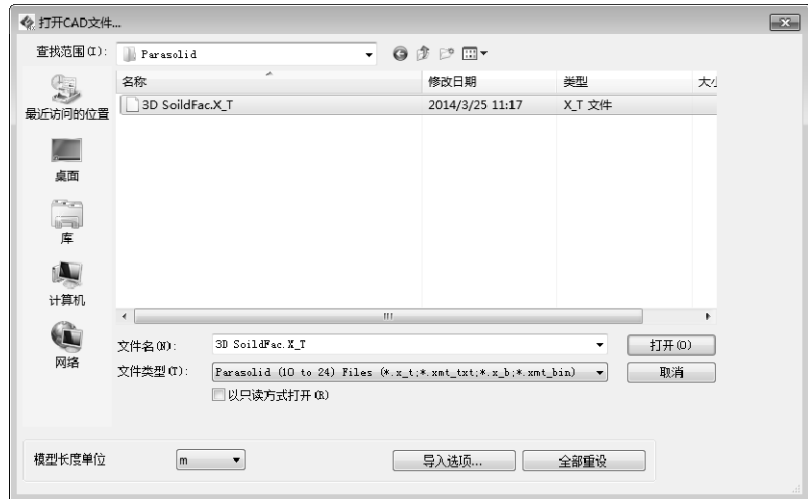


图 2-6 GTS NX 导入文件的路径

因为 CAD 形状没有长度单位，所以用户要设定导入对象的模型长度单位。设定的单位决定 CAD 形状的大小并且支持 m 和 ft 单位。

## 2. DFX 2D (线框)



图 2-7 DXF 2D 线框导入

### 概要

可导入 Auto CAD R13 以上版本建立的 DXF 文件。用户可导入二维平面模型到工作平面上，并且可将 DXF 文件按线框（由边组成的几何模型）形式导入。

### 方法

用 Auto CAD 生成的 DXF 文件没有可判断边与边之间连接性的容差, 看似连接但实际导入后并没有连接或处于交叉状态的情况很多。因此, 在使用 Auto CAD DXF 文件之前, 最好是检查并确认边的交叉点后导入。



图 2-8 端点不正常连接的情况

由多个折线连接的情况下, 也许不能正常导入, 这时最好是在 CAD 上利用 explode 命令线分解后导入。

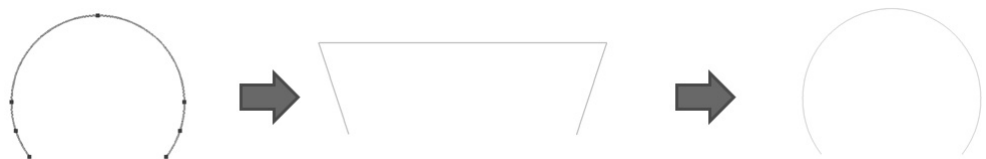


图 2-9 折线连接的情况

导入 DXF 文件的同时也可输入 X 轴方向的移动距离和 Y 轴方向的距离进行平行移动, 或绕 Z 轴进行旋转。

DXF 文件用 GTS NX 导入时, 为了管理上的便利, 线框可捆绑成一个群组, 各线也可以独立导入。通过[交叉分割]功能可对导入线的交叉点进行分割。

### 3. DXF 3D (线框)



图 2-10 DXF 3D 线框导入

#### 概要

可导入 Auto CAD R13 及以上版本建立的 DXF 文件。可在三维工作空间上导入 3D 模型, 并且可将 DXF 文件按线框 (由边组成的几何模型) 形式导入。

#### 方法

用户可导入具有 (X, Y, Z) 值的三维 DXF 文件。用 Auto CAD 生成的 DXF 文件没有可判断边与边之间连接性的容差, 看似连接但实际导入后并没有连接或处于交叉状态的情况很多。因此, 在使用 Auto CAD DXF 文件之前, 最好是检查并确认边的交叉点后导入。

导入 DXF 文件的同时也可输入 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向进行平行移动。

通过[交叉分割]功能可对导入线的交叉点进行分割。

#### 4. 导入 DWG



图 2-11 DWG 文件导入

#### 概要

可导入 Auto CAD R13 及以上版本建立的 DWG 文件。可在二维或三维工作空间上导入模型，并且可将 DWG 文件按线框（由边组成的几何模型）形式导入。

#### 方法

与导入 DXF 文件功能相同，用 Auto CAD 生成的 DWG 文件没有可判断边与边之间连接性的容差，看似连接但实际导入后并没有连接或处于交叉状态的情况很多。因此，在使用 Auto CAD DWG 文件之前，最好检查并确认边的交叉点后导入。

通过[按图层建立几何组]功能可按导入的图层分别生成几何组。

#### 5. 导入 midas Mxt 文件

Midas Family Program 中 Gen, Civil 的模型信息和荷载/边界条件/分析数据可以与 GTS NX 联动。GTS NX 中不存在的单元类型、荷载/边界条件或分析类型除外。

表 2-3 GTS NX 导入 mxt 文件包含的模型信息

GTS NX	Gen/Civil	限制
单位系统 (Unit System)	单位系统 (Unit System)	Cable → Truss,
项目设置 (Project Setting)	结构类型 (Structure Type)	Wall → Plate 单元互换
节点 (Node)	节点 (Node)	SRC 除外
单元 (Element)	单元 (Element)	PSC, Composite 除外
网格组 (Mesh Set)	组 (Group)	
材料 (Material)	塑性材料 (Plastic Material, Material)	
属性 (Property)	截面 (Section, Thickness)	
支承 (Supports)	支承 (Supports)	
点弹簧 (Point Spring)	点弹簧 (Point Spring)	
弹性连接 (Elastic Link)	弹性连接 (Elastic Link)	
释放梁端约束 (Beam End Release)	释放梁端约束 (Beam End Release)	
释放板端约束 (Plate End Release)	释放板端约束 (Plate End Release)	
刚性连接 (Rigid Link)	刚性连接 (Rigid Link)	
荷载组 (Load Set)	静力荷载工况 (Static Load Case)	
节点质量 (Nodal Mass)	节点质量 (Nodal Mass)	
自重 (Self Weight)	自重 (Self Weight)	
集中力, 弯矩 (Force, Moment)	节点荷载 (Nodal Loads)	
强制位移 (Prescribed Displacement)	指定支承位移 (Specified Displacement of Supports)	
梁单元荷载 (Element Beam Load)	梁单元荷载 (Element Beam Load)	
预应力 (Prestress)	梁单元荷载 (Element Beam Load)	
压力荷载 (Pressure Load)	预拉力荷载 (Pretension Load)	

节点温度 (Nodal Temperature)	压力荷载 (Pressure Load)
单元温度 (Element Temperature)	节点温度 (Nodal Temperature)
温度梯度 (Temperature Gradient)	单元温度 (Element Temperature)
反应谱函数 (Response Spectrum Function)	温度梯度 (Temperature Gradient)
谱荷载组 (Spectrum Load Set)	反应谱函数 (Spectrum Function)
时程函数 (Time History Function)	谱荷载工况 (Spectrum Load Case)
时程荷载工况 (Time History Load Case)	时程函数 (Time History Function)
节点动力荷载 (Dynamic Nodal Load)	时程荷载工况 (Time History Load Case)
地面加速度 (Ground Acceleration)	节点动力荷载 (Dynamic Nodal Load)
时变静力荷载 (Time Varying Static Load)	地面加速度 (Ground Acceleration)
时程结果函数 (Time History Result Function)	时变静力荷载 (Time Varying Static Load)
	时程结果函数 (Time History Result Function)

## 6. 导入 FPN 文件

这个格式可将由 Midas 系列软件 (GTS NX、FEA、NFX、SoilWorks 等) 生成模型信息文件与 GTS NX 进行互联, 此格式也可通过文本格式为用户提供不同程序间信息的交换。

### 2.1.3 导出

#### 概要

导出功能可捕捉工作平面图像或导出几何形状、单元网格。



图 2-12 GTS NX 文件导出形式

#### 方法

工作平面内容可按[截图图像], [全屏截图], [所选区域截图]等形式保存。

用[截图图像]只能保存工作区域, 可利用[全屏截图]保存, [所选区域截图]按用户选择的区域保存为图像。支持 PNG, JPG, BMP, GIF 的图像格式。

支持导出工作平面上的几何形状和单元网格。导出的几何形状为 Parasolid 文件格式 (\*.x\_t, \*.x\_b)。单元网格可以用 STL 文件格式 (\*.stl) 导出, 也可以按 Midas 产品 (GTS/NFX/FEA/SoilWorks) 中使用的中性文件 (\*.fnp) 形式导出。

#### 1. 导出 SoilWorks 2D 中性文件



图 2-13 导出 SoilWorks 2D 中性文件

导出 GTS NX 2D 模型几何形状（线）作为 SoilWorks 中性文件。用户可选择屏幕显示的所有形状或直接选择要导出的线。

[单位长度（B-样条曲线）]：分割 B-样条曲线为等间距线段并导出。对于不是 B-样条曲线的形状如直线或圆弧型并不适用。

## 2. 导出 SoilWorks 3D 中性文件

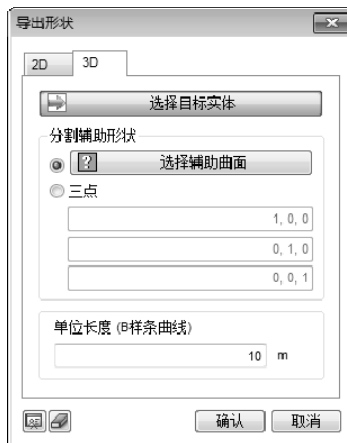


图 2-14 导出 SoilWorks 3D 中性文件

导出 GTS NX 3D 模型几何形状（实体）的剖面作为 SoilWorks 中性文件。用户可选择屏幕显示的所有形状或直接选择要导出的线。

[目标实体]：选择目标 3D 几何形状（实体）。

[辅助曲面]：选择切割实体的辅助曲面。辅助曲面可直接选择，或通过选择 3 个顶点生成切割平面。

[单位长度（B-样条曲线）]：分割 B-样条曲线为等间距线段并导出。对于不是 B-样条曲线的形状如直线或圆弧型并不适用。

## 3. 导出 FPN 文件

这个格式可将由 GTS NX 生成的模型信息文件与 Midas 系列软件（GTS NX、FEA、NFX、SoilWorks 等）进行互联。此格式也可通过文本格式作为用户提供不同程序间信息的交换。



## 2.1.4 关闭文件

### 概要

关闭活动的文件。

#### 1. 关闭

关闭活动项目。项目内如有对模型信息的修改时，就弹出提示信息。

#### 2. 全部关闭

关闭当前打开的所有项目，并弹出询问是否保存修改的提示信息。

## 2.2 视图工具条



图 2-15 视图工具条

一般在 CAD 程序中整体坐标系 Y 轴都指向上边。所以在导入 CAD 中建立的几何模型时，若想在与 CAD 相同的视点上看模型，可利用“等角视图”查看。

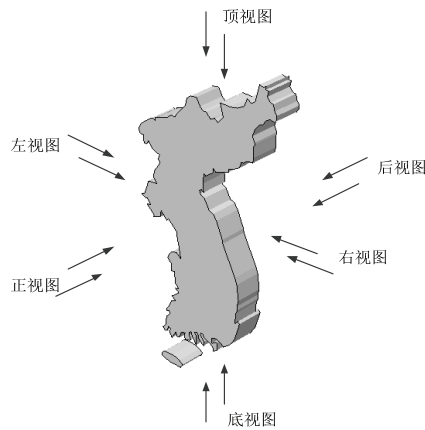









图 2-16 视图模式

### 2.2.1 视图工具条

视点操作功能中使用最多的是动态查看功能。

表 2-4 视图模式说明

	显示整体模型 放大或缩小模型使其适合窗口大小。
	缩放栅格 放大或缩小为合适尺寸的模型使其适合工作平面栅格。
	窗口缩放 放大鼠标指定的四边形区域。
	放大/缩小 放大或缩小模型及工作平面的栅格使其适合窗口大小。 点击图标菜单，在工作窗口上用鼠标左键或鼠标滚轮来放大或缩小模型。 按住左键的状态下，若将鼠标拖动到右侧，则放大模型；若拖动到左侧，则缩小模型。滚轮向上将放大模型，滚轮向下将缩小模型。 按住 Ctrl 键的状态下，若按住鼠标左键拖动，即使没有选择图标也能放大和缩小模型。
	旋转 点击图标菜单，在工作窗口上拖动鼠标左键，模型就按拖拽的方向旋转。 想连续旋转模型时，按住 Ctrl 键的状态下，拖动鼠标右键。
	旋转中心 指定旋转的基准位置，以此点为中心旋转模型。在工作窗口上点击鼠标中间按钮拖动就能以指定的基准点为中心旋转模型。
	平行移动 模型移动到目标位置。 在工作窗口上，按住鼠标左键拖动，模型就按拖拽的方向移动。 在按住 Ctrl 键的状态下，若按住鼠标中间按钮拖动，即使没有选择图标也能移动模型。



**法向视图**

将视图调整到工作平面的法线方向（画面将转化成工作平面的 X 轴在画面的右侧、Y 轴在画面的上侧的二维视图）。



**轴侧图 1**

将视点调整到等轴位置。（指向整体坐标系 Z 轴的上端。）



**轴侧图 2**

将视点调整到等轴位置。（指向整体坐标系 Y 轴上端）。  
一般在 CAD 程序中，整体坐标系 Y 轴指向上端。因此，导入 CAD 中建立的几何模型时，若想在与 CAD 相同的视点上查看模型就用等轴侧视图 2。



**前视图**

将视点调整到模型的正面。  
适合以 Z 轴为基准，整体坐标系基准 YZ 平面旋转 180 度的平面。



**后视图**

将视点调整到模型的背面。适合整体坐标系基准 YZ 平面。



**顶视图**

将视点调整到模型顶面。  
适合以 X 轴、Y 轴为基准，整体坐标系基准的 X、Y 平面各旋转 90 度的平面。



### 2.2.2 视图模式[几何]

为了能够便于用户查看模型状态以及按个人习惯显示模型，GTS NX 提供了多种图形显示模式。

选择几何形状后，点击鼠标右键即可调出显示模式。



图 2-17 几何模型的视图模式

**1. 消隐+边线**

同时用面和轮廓线表现几何体。

**2. 消隐**

仅用面表现几何体。

**3. 线**

隐藏几何体的面，仅用轮廓线表现。

#### 4. 包围盒

不显示几何体的实际形状，仅用几何体外部包围盒显示。

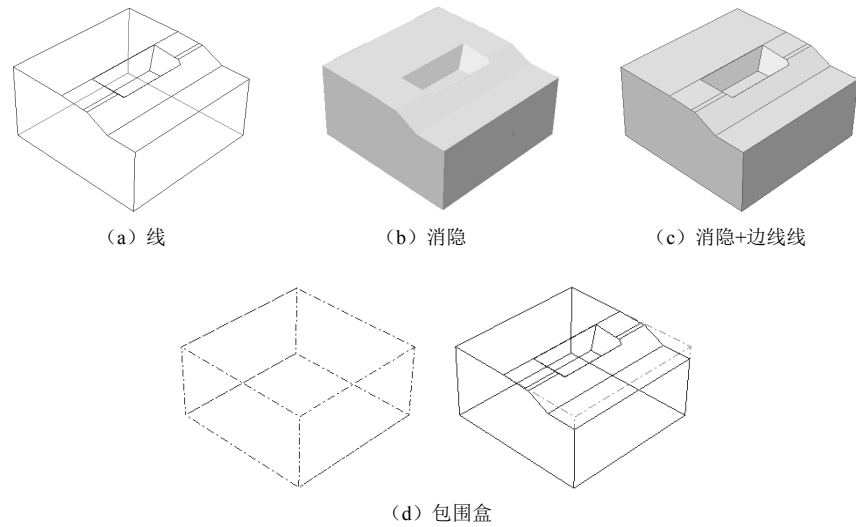


图 2-18 几种视图模式

#### 5. 修改几何颜色

可以修改几何形状、单元网格、材料或其它特性的颜色。用户可直接定义几何形状的颜色，也可通过随机指定颜色功能对几何形状随机赋予的颜色。



图 2-19 颜色修改对话框



几何体按[消隐]或[消隐+边线线]方式显示时，用户可指定消隐透明度以显示图形内部。

几何体的透明度可在选择对象几何体后点击鼠标右键> 关联菜单 > 透明度中指定。

这种指定几何形状的各种显示方式，可有效地表现复杂的几何模型。

### 2.2.3 视图模式[网格]

单元网格的显示方式可按网格组设置。

与设置几何体的显示方式相同，设置网格组的显示方式时先选择网格组，然后在关联菜单中选择显示模式。



图 2-20 网格视图模式

与几何体的显示方式相同，网格组也可以分别定义各自的显示方式。特别是分类和查看已生成单元的特性、材料、坐标系等模型信息时，按颜色区分十分有效。

可按如下多种方式设置网格体的显示方式。

**1. 消隐+网格线**

显示网格组的面 (Face) 和边 (Edge)。

**2. 消隐+特征线**

显示网格组的单元面 (无边线) 和特征线 (Feature Edge)。

**3. 消隐**

同时显示网格组 (Mesh Set) 的所有单元面和轮廓线。

**4. 网格线**

隐藏网格组 (Mesh Set) 的所有单元面 (Face)，仅显示网格线边线 (Edge)。

**5. 自由面网格线**

隐藏所有内部单元，仅显示网格组的自由面网格线。

**6. 特征线**

显示网格组 (Mesh Set) 的特征线 (Feature Edge)。所谓的特征线是指单元的边所属的两个单元面 (自由面) 之间的角度比指定的角度大的单元边。

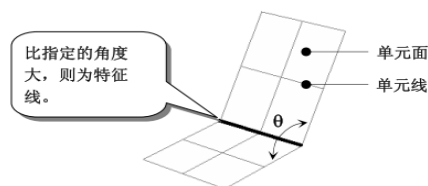


图 2-21 特征线和特征角说明

**7. 网格组颜色**

单元网格用网格组颜色显示。

#### 8. 单元类型颜色

指定网格的单元类型颜色。

#### 9. 属性颜色

用指定的属性颜色显示单元网格。

#### 10. 材料颜色

用指定的材料颜色显示单元网格。

#### 11. 正反面颜色

用不同的颜色显示单元网格的前面和后面。以单元坐标系为基准，用于判断法线方向反转的单元。特别是二维单元时，如果法线方向出现反转则在执行分析时会发生错误。因此，用这个功能容易区分法线反转的单元。

示例如下，反转法线方向生成的单元将用红色区分。这样的单元必须在网格>网格参数中通过修改单元坐标系来统一相邻单元的法线方向。

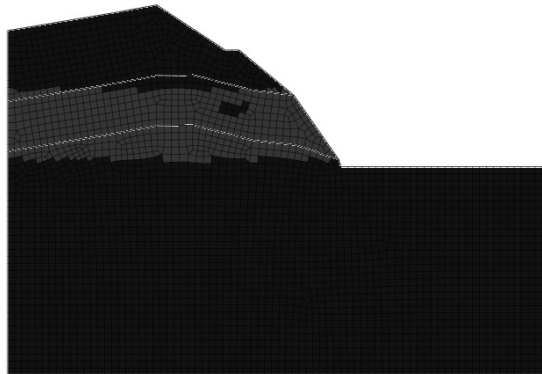


图 2-22 通过正反面颜色显示网格

#### 12. 改变网格颜色

可指定所选择单元网格的颜色或修改成任意随机的颜色。

#### 13. 随机颜色

指定随机的颜色显示所有单元网格。









## 2.3 建模助手工具条



图 2-23 建模助手工具条

### 2.3.1 建模助手工具条

表 2-5 建模助手工具条说明

	<b>显示/隐藏栅格</b> 在界面显示或隐藏栅格。
	<b>显示/隐藏基准轴/面</b> 在窗口显示或隐藏基准。
	<b>显示/隐藏 WCS</b> 显示或隐藏 WCS。 WCS (Workplane Coordinate System) 是指工作平面的坐标系。
	<b>显示/隐藏 GCS</b> 显示或隐藏 GCS。 GCS (Global Coordinate System) 是始终固定的整体坐标系。
	<b>调整网格</b> 将当前工作平面调整到期望的位置。工作平面移动的方法有基于[参考平面]、[三点]、[法向]的方法。 <a href="#">详细的说明请参考下一页</a>
	<b>定义栅格</b> 帮助用户建模的栅格始终处于工作平面的 XY 平面位置上。使用栅格建模时，可以在用网格捕捉功能 (  )，获取所需坐标位置，并可在界面上大概估计模型或单元尺寸等。 栅格设定可根据对象模型的尺寸和易于用户设置。 <a href="#">详细的说明请参考下一页</a>
	<b>定义捕捉</b> 用户直接指定点的位置时，可选择下表的各种捕捉选项。 <a href="#">详细的说明请参考下页</a>

### 2.3.2 显示/隐藏 GCS

显示或隐藏 GCS。

GCS (Global Coordinate System) 是始终固定的整体坐标系。



在 GTS NX 中使用的 2 个基本坐标系为整体坐标系 (GCS) 和工作平面坐标系 (WCS)。

整体坐标系 GCS 是在工作时始终处于固定的坐标系，将在界面右侧下端用红色 (X 轴)、绿色 (Y 轴)、蓝色 (Z 轴) 的箭头表示。

工作平面坐标系 WCS 为可与工作平面一起移动的位于工作平面中间的坐标轴。工作平面是为了便于用户任意移动形状的位置，工作平面的改变，工作平面坐标系也将改变。为了在空间上建立模型，虽然需要三维坐标系，但实际上大部分情况只是给定相对性的坐标，如模型长度。这种情况下，工作平面移动到合理的位置后，输入二维坐标信息 (工作平面上的 XY 平面)，建模会更加简便。

必须注意的是延伸几何形状时，荷载/边界条件或延伸方向应沿着整体坐标系。

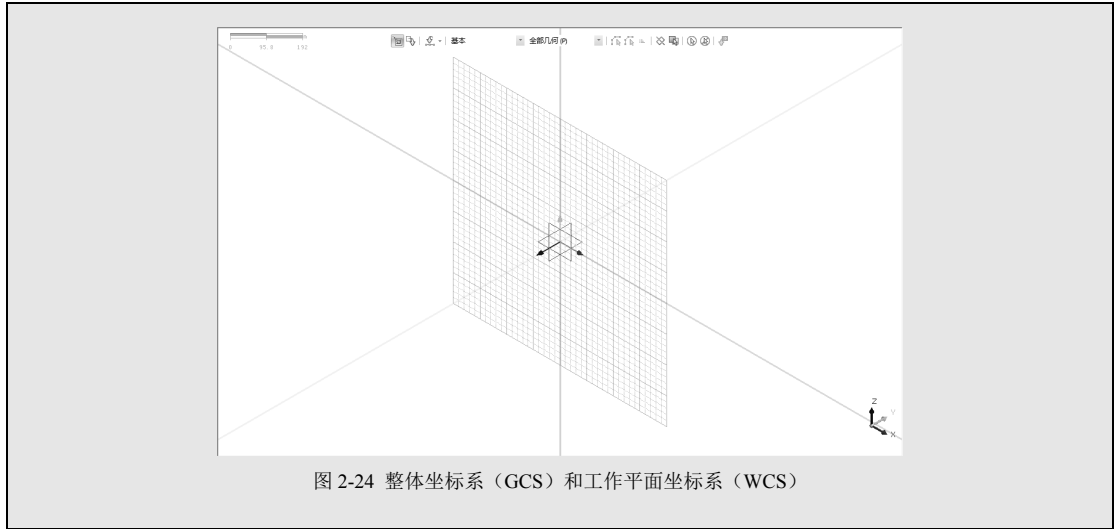


图 2-24 整体坐标系 (GCS) 和工作平面坐标系 (WCS)

### 2.3.3 栅格

#### 1. 移动工作平面



图 2-25 移动工作平面对话框

该功能是将当前工作平面移动到期望的位置。调整工作平面的方法有[参考平面]，[三点]，[法向]的方法。

[参考平面]: 将栅格面调整到与参考平面平行的位置。这个功能在指定的工作平面之外的平面上操作时较方便。

GTS NX 中提供 7 个基本的工作平面 XY (0,0,1), XZ (0,-1,0), ZX (0,1,0), YX (0,0,1), YZ (1,0,0), ZX (0,1,0), ZY (1,0,0)。

当工作平面上距平面一定距离时，通过[偏移]功能，可指定栅格的原点。

[三点]: 可通过选择三个点调整工作平面。工作平面通过选择的点调整到定义的平面，第一个点的位置是工作平面的原点，第一个点到第二个点的向量是工作平面坐标系的 X 轴，第一个点到第三个点的向量是工作平面的 Y 轴。

[法向]: 可通过选择一个向量和参考点调整工作平面。参考点的位置是工作平面的原点，指定的向量法线方向为工作平面的纵轴。

#### 反转



反转工作平面的法向（工作平面坐标系的 Z 轴）。

### 重设为 GCS

栅格回到初始位置。

### 保存

若点击[保存]按钮并输入名称，相应名称就注册在工作目录树 > 工作平面的下方。

## 2.3.4 定义栅格


为了便于用户建模，栅格始终处于工作平面的 XY 平面上。使用栅格建模时，可以在用网格捕捉功能（），获取所需坐标位置，并可在界面上大概估计模型或单元尺寸等。



图 2-26 定义栅格对话框

## 2.3.4 捕捉定义

用户指定点的位置时，可选择使用下表中的多种捕捉功能。

表 2-6 捕捉功能说明

栅格捕捉	捕捉工作平面的栅格点。
顶点捕捉	捕捉顶点。
端点捕捉	捕捉每条线的端点和终点[与鼠标位置接近的地方]。
中点捕捉	捕捉线的中点。
垂足捕捉	捕捉与线垂直的线的垂足。
圆心捕捉	捕捉弧/圆的圆心。
四分点捕捉	捕捉弧和圆的四分点。
交叉点捕捉	捕捉两条线的交叉点。
切点捕捉	捕捉弧和圆的切线。
任意点捕捉	捕捉任意点。
节点捕捉	捕捉节点。



当使用与特征边相关的捕捉时，如端点捕捉或中点捕捉，只需将鼠标位置放到目标线上，而不需要放到对象的端点或中点。

## 2.4 选择工具条

选择工具作为运行各种功能时，选择设置对象的方法，是整个建模操作中必须使用的非常重要的功能。根据操作状态和对象，选择最有效的选择方法是非常必要的。

为了用户能够在所有工作状态下选择最有效的对象，GTS NX 提供了各种选择方法。

选择工具栏上提供了 GTS NX 所有的选择方法。

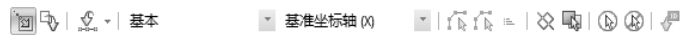


图 2-27 选择工具条

在工作窗口中，鼠标选择操作对象时，指定个体的边界就会变成绿色亮显，可预先确认选择对象是否被正确的检测。选择的对象将变成绿色亮显。

### 2.4.2 选择方式

个别点击选择或拖动鼠标指定区域，选择或解除选择包含区域的对象。

区域选择的方法有四边形、椭圆形、多边形、多段线。

#### 1. 四边行 (Pick/Window)

对当前所有对象进行选择/解除选择。

个别点击或拖动鼠标指定矩形区域，选择或解除选择这个区域内包含的对象。

只有在点击鼠标和鼠标拖动下才能区分拾取 (Pick) 和窗口 (Window)。

[拾取 (Pick) 选择]

单击个体进行选择或解除选择。

在选择 (Select) 模式下重新点击已选择的对象时就将解除该对象的选择。

[窗口 (Window) 选择]

使用鼠标拖动指定矩形对角线的两角，选择或解除选择相应矩形区域中包含的对象。

在拖动鼠标过程中点击 Esc 键时就能够取消矩形区域的定义。

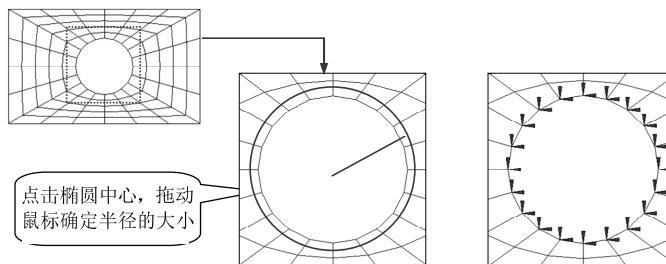


在窗口选择中，鼠标的拖动方向对于选择结果没有影响。对于是否选择交叉的个体，只取决于是否打开了交叉选择的选项。

#### 2. 圆形

选择或解除选择圆形区域包含的对象。

定义圆形时按住鼠标左键拖动指定半径。划过鼠标过程中按 Esc 键时将取消圆形区域的定义。



使用圈选功能选择圆孔周围的节点定义边界条件

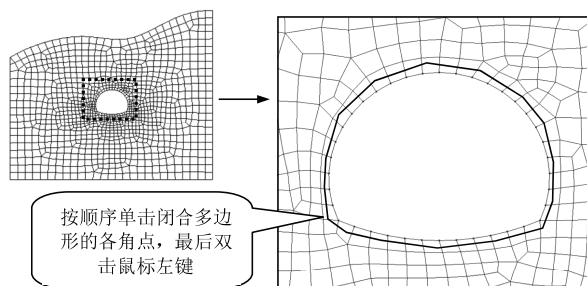
图 2-28 圆形选择的示例

### 3. 多边形

选择或解除选择闭合多边形区域内包含的对象。

定义闭合多边形时，按顺序点击闭合多边形区域的各角点，最后一个点时双击鼠标左键结束。这样就定义了最后点和开始点连接的闭合多边形区域。

用鼠标指定边角点的过程中可点击鼠标右键取消闭合多边形的定义。



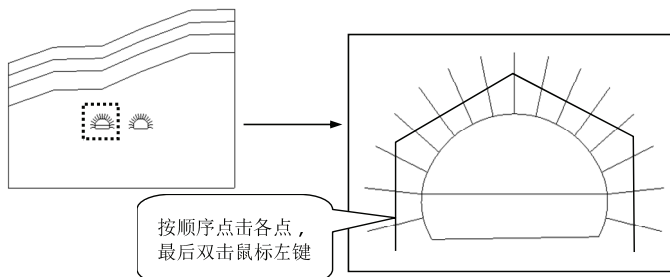
多边形选择隧道周围的节点

图 2-29 多边形选择的示例

### 4. 多段线

画多段线选择或解除选择交叉的对象。

定义多段线时按顺序点击划过各点，点击最后一个点时双击鼠标左键结束。定义多段线各点过程中，点击鼠标右键时将取消多段线的定义。



按顺序选择表示锚杆的线

图 2-30 多段线选择的示例

### 2.4.3 选择过滤

用户可通过对象类型指定选择过滤器，可一次选择所需对象。

选择过滤器由根据当前的操作状态和调出命令的类型所决定的对象类型组成。用户可以在其中指定特定一种类型。

与选择过滤相关联的操作状态基本上按照执行命令的可行性为基准来区分。

#### 1. 主选择过滤

主选择过滤由基本项组成。

在主选择过滤中，只能选择注册在形状组上的几何体（不能选择子对象）、网格组（Mesh Set）以及基准（Datum）。基准是指建模时最基本的点、轴、平面。

#### 2. 子选择过滤

子选择过滤是基于执行命令的可行性重新组成。

不仅可选择属于形状的几何个体，而且对于形状的下级个体（点、线、面等）、荷载边界，以及个别的节点和单元都可以方便地选择。

表 2-8 主选择过滤和子选择过滤的差异。

形状	选择过滤	可选择的个体
面	主选择过滤	1 个 (F-1)
	子选择过滤	1 个 (F-1)
线	主选择过滤	1 个 (E-1)
	子选择过滤	5 个 (E-1, E-a, E-b, E-c, E-d)

形状	类型
F-1	面 (下级线 4 个)
E-1	线



根据不同的命令，选择过滤的组成也会不同。对于第一次使用的命令，最好确认选择过滤的构成。

选择过滤按如下组成。

表 2-9 可选择子选择过滤的单元

选择过滤	可选择对象
基准轴 (X)	选择基准轴 指定方向 (移动/扩展/投影) 和旋转等时使用
基准面 (U)	选择基准平面 指定工作平面和投影/分割/镜像平面等时使用
几何体	
全部几何 (P)	选择属于“形状”的顶级几何个体
实体 (D)	选择实体
面组 (J)	选择面组
面 (A)	选择面

线组 (W)	选择线组
线 (G)	选择线
顶点 (B)	选择顶点
群 (C)	选择群
	相关网格/节点/单元
网格组 (M)	选择网格组, 用于选择包含在网格组中的所有单元和节点
	相关几何个体 (1)
面 (A)	“形状”的下级几何体上选择面
线 (E)	选择线
顶点 (V)	选择顶点
荷载/边界 (L)	选择适用于几何个体的荷载/边界条件。
	相关网格/节点/单元
节点 (N)	选择节点
单元 (T)	选择单元



**\* 主选择过滤功能和子选择过滤功能的差别**

在主选择过滤和子选择过滤下即使使用相同的选择过滤, 其选择的个体也是不同的。即, 在主选择过滤下只能选择“形状”的最顶级几何体, 也许刚开始可能不是很习惯, 但在实际操作中会发现这种差异非常便利。

用如下例子了解主选择过滤。

下图把三维任意形状曲面的截面分解成线, 并将这些线进行插值计算生成地层的面。

生成表示地层的面后, 为了再隐藏 (或者删除) 没有必要的 8 个线, 只选择这 8 个线时的情况。

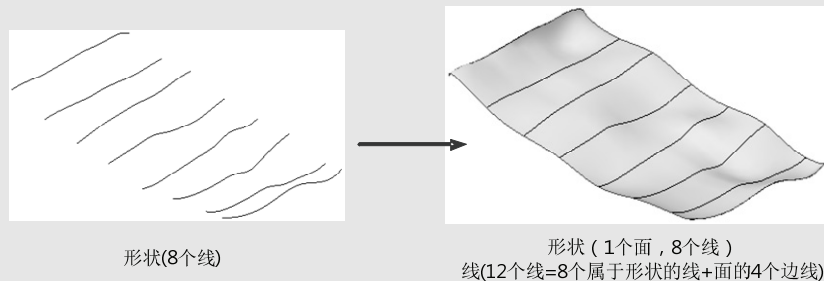


图 2-31 选择的示例

(1) 在主选择模式中, 允许选择不是“形状”的所有几何体。

选择过滤指定为<所有几何形状>, 使用“选择全部”选择, 9 个“形状” (1 个面, 8 个线) 会被选择。

将选择过滤指定为<线>, 并使用显示选择。可以非常便利地选择是需要的 8 个线, 直接进行隐藏即可。

(2) 在子选择模式中, 只允许选择“形状”的几何体的情况。

将选择过滤指定为<线>, 使用“选择全部”, 12 个线会被选择, 其中 4 个从属于面的下级线无法独立隐藏。

为方便实际工作中的选择, 需区分主选择过滤和子选择过滤。



**\* 选择过滤的利用**

**(1) 利用子选择过滤的命令运行模式**

在工作窗口中，可利用子选择过滤在几何形状上直接定义约束条件和荷载条件。

并且也可选择单元来指定材料和网格。在子选择过滤中，选择“形状”的下级个体（顶点，线，面）、节点和单元等。若在工作画面上使用子选择过滤，则不必经过利用几何特征执行另外命令模式的过程，方便地进行定义。

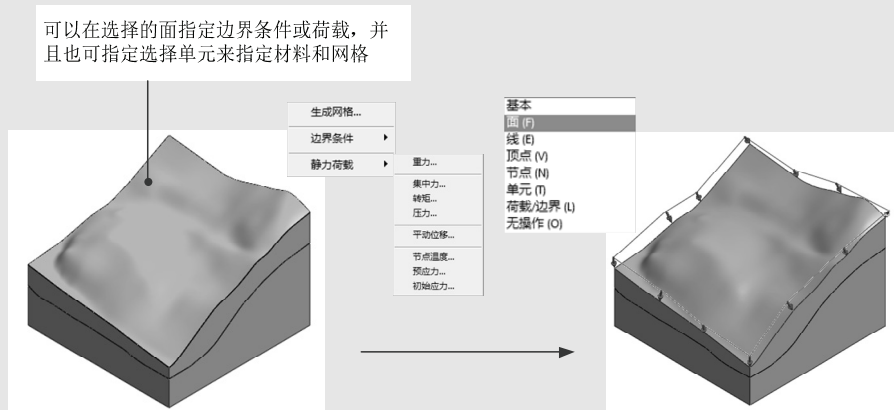


图 2-32 选择的示例

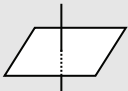
**(2) 指定方向、旋转轴**

像在移动 (Translate)，扩展 (Extrude)，投影 (Project) 等的操作中指定方向或在旋转轴 (Rotate)，旋转扩展 (Revolve) 等操作中指定旋转轴一样，建模过程中指定方向/旋转轴的事情经常发生。

这时，可以利用基准和几何个体的几何特征使用多种方法指定方向或旋转轴。

下面是对该方法的整理。

表 2-10 几何的方向及对应的选择过滤

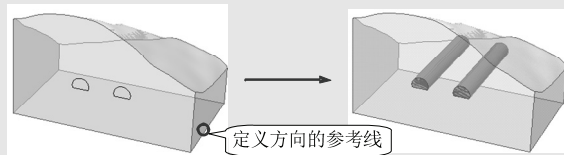
适用个体	使用的几何特征	选择过滤
基准轴	基准轴的方向 基准面的法线方向	基准轴
基准面		基准面
线	直线的方向	线
线 (圆或圆弧)	圆/圆弧的中心点和圆/圆弧平面的法线方向	线
面 (平面)	面的法线方向	面
面 (旋转体)	旋转体 (圆柱等) 的中心轴	面

两点向量	用户指定的两点向量	不需要
轮廓线的法向	扩展等操作中可定义平面的子个体（轮廓线）的法线方向	不需要

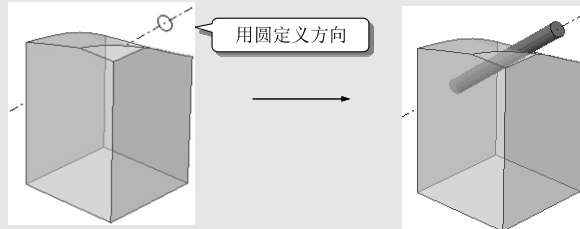
**说明：**

指定方向、旋转轴中，选择过滤可按<基准轴>设定。

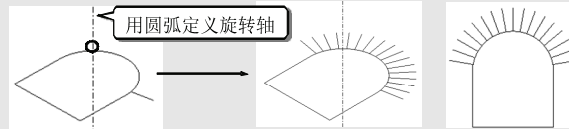
用于与扩展（Extrude）相同的部分功能中。



在三维任意空间上扩展隧道截面生成实体时，可选择相应方向的线(主要是地基的线)做为扩展方向



将圆扩展成管时，参考线指定为圆，则沿着圆所在平面的法线方向扩展



将三维空间上任意位置的隧道截面中的锚杆进行旋转复制时，以构成隧道截面的圆弧作为旋转轴比较方便

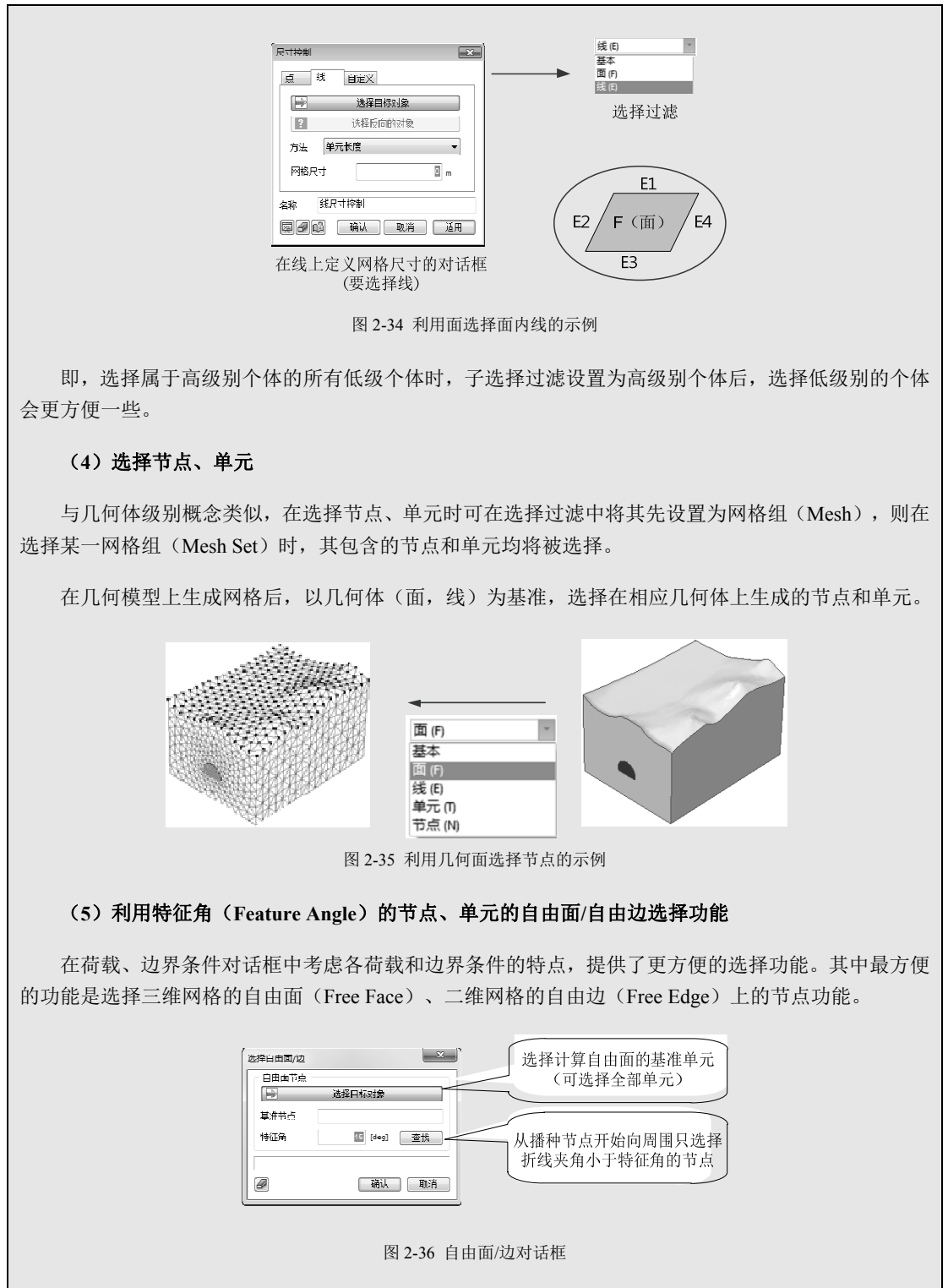
图 2-33 使用方向建模的示例

如上示例，可使用 GTS 独有的借助几何体的几何特征指定方向和旋转轴，这在建立复杂的模型时能够非常方便地指定大部分的方向和旋转轴。

**(3) 利用几何体的级别概念进行选择**

在 GTS NX 中提供利用几何体的级别概念选择下级个体时，以上级个体为基准选择的功能，即若选择高级别的个体就能选择所属该个体的所有下级个体（相应于选择过滤的下级个体）的功能。

如下图所示，子选择过滤若设定为<线>时，只能一个一个地选择线，但在子选择过滤设定为<面>后只要选择相应线所属的高级别的面 F，就可以一次选择 4 个线。



## 2.4.4 交叉选择

使用窗口 (Window)、圆 (Circle)、多边形 (Polygon) 选择目标时，被选择框边界线划过的单元也将被选择。



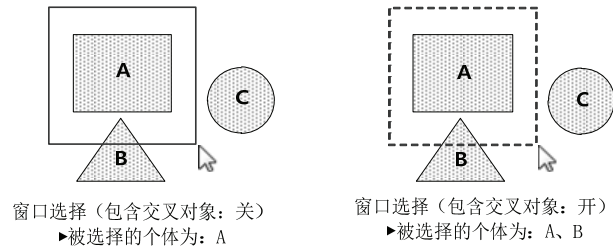


图 2-37 交叉选择的开启和关闭

打开交叉选择项时，区域的边界线为虚线。用鼠标生成选择四边形、圆形、多边形区域的过程中按一下 Ctrl 键后放开，则包含交叉功能将被开或关。

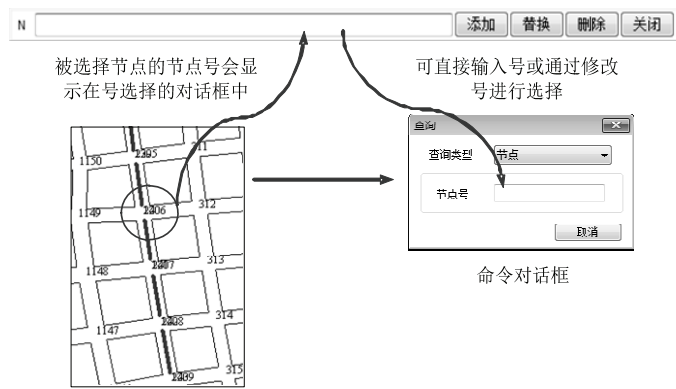
### 2.4.5 通过编号选择

在节点、单元选择模式中直接输入节点或单元号选择或解除选择。

这个选择方法可与其它选择方法一起使用。节点或单元选择模式是指选择过滤被指定为节点或单元的情况，仅在对节点和单元进行操作时（直接选择节点、单元使用的功能）过滤窗口中才会显示节点或单元的过滤项。启动编号选择功能时，在工作窗口的右上端会弹出编号选择窗口，之后可以按以下方式

(1) 在编号选择对话框中直接输入节点或单元号进行选择；

(2) 在工作窗口中使用其它方法（点、窗口、圆等选择方法）选择节点、单元时，被选择的节点、单元号将显示在号选择窗口上。用户可修改其中的号再重新选择节点、单元。只选择重复的节点和单元中的一部分时利用号选择比较方便。



在节点重复的位置，利用选择号，选择需要的节点

图 2-38 利用编号选择节点

选择 ID 对话框起着选择管理和命令对话框的中间作用（选择对象过滤后传达给对话框）。

表 3-1 编号选择按钮说明

添加	将新输入的节点/单元号添加到选择集合中。
替换	将当前已选的对象全部解除选择，只选择新输入的节点/单元号（替换选择）。
删除	清除号输入栏中的内容。
关闭	关闭号选择窗口。



将输入栏里的内容全部删除后，在工作窗口里选择新的节点和单元，编号选择对话框中会将已选的节点和单元的 ID 全部显示出来。

## 2.4.1 选择工具条

表 2-7 选择工具条说明

	<b>拾取/窗口选择</b> 将指定对象添加到选择模式中。
	<b>取消选择</b> 将指定对象设置为解除选择模式。
	<b>拾取或框选</b> 单击个体选择或解除选择。 选择区域的方法有四边形、椭圆形、多边形、连接线。详细的说明请参考下一页
基本 全部几何 (P)	<b>选择过滤</b> 指定选择对象的类型进行过滤。详细说明请参考下一页
	<b>选择所有相邻的边/面 (或单元)</b> 选择边/面 (或单元) 后, 点击鼠标就能自动选择相邻的边/面 (或单元)。
	<b>通过特征角选择相邻的边/面 (或单元)</b> 选择面/线 (或单元) 后, 点击鼠标就能自动选择相邻的已定义特征角度内的边/面 (或单元)。
	<b>定义特征角</b> 定义要选择的相邻的边/面 (或单元) 的特征角度。
	<b>交叉选择</b> 选择四边形、圆形、多边形中包含与区域边界线相交的对象。
	<b>选择正面</b> 在当前视图状态下选择的区域中, 只能选择正面对象。 当目标以多层存在的情况下, 只选择一侧面的对象时使用。
	<b>选择全部</b> 选择当前工作窗口中显示的所有对象。 在显示全部的状态下, 选择当前工作窗口中的所有个体。
	<b>取消全部选择</b> 解除选择当前工作窗口中的所有对象。 在显示全部状态下, 将解除选择当前窗口中的所有对象。
	<b>通过编号选择节点/单元</b> 在节点和单元选择模式中, 输入 ID 选择对象或解除选择。

## 2.5 添加视图操作工具条



图 2-39 添加视图工具条

### 2.5.1 剪切面

几何形状可按照指定的平面方向切割形状, 并可查看剖面。所需的剖面可用点击[添加]按钮保存, 点击图标就可查看剖面。

该功能可用于显示前处理过程中的内部几何形状, 也可用于后处理过程中显示特定的剖面。



图 2-40 剪切面设置对话框

### 平面方向

[X]: 在以 X 轴为法线的平面切割形状。可修改距离和移动平面。

[Y]: 在以 Y 轴为法线的平面切割形状。可修改距离和移动平面。

[Z]: 在以 Z 轴为法线的平面切割形状。可修改距离和移动平面。

[3 点]: 在工作平面上直接定义 3 点，形成剖面后切割形状。

[2 点]: 在工作平面上直接定义 2 点，形成的形状切割形状。

[单元面]: 用包含单元面的平面切割形状。

### 距离

显示平面与原点间的距离。

### 角度

设置剪切面的角度。选择特定轴或 2 点矢量后，输入角度。

### 反向

反转法线方向显示剖面。

### 显示封闭部位

取消勾选时仅显示剖面。

### 在平面上显示网格形状

勾选时在剖面上可显示剖面处的单元网格。

### 显示边线

勾选时显示对象的轮廓线。

### 选择平面颜色

可指定剖面的颜色。

### 面组合

[并集]: 在窗口上显示所有剖面 and 形状。

[交集]: 在窗口上显示剖面 and 形状的交集。

## 2.5.2 镜像面

在窗口上显示以 x, y, z 轴为法线的平面或指定的平面为中心的对称模型。可调整模型与对称模型间的距离。

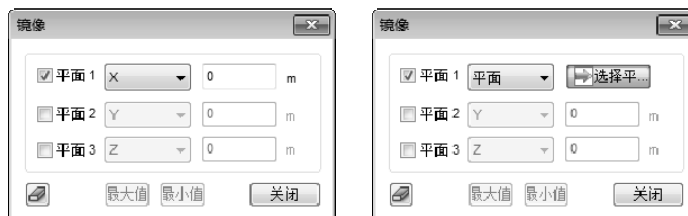


图 2-41 镜像面设置对话框

设置各平面 1,2,3 时, 选择[最大]按钮, 界面上就会显示以相对于原模型距离最远的对称模型; 选择[最小值]按钮, 界面上就会显示较原模型间距离最近的对称模型。

## 2.5.3 等值面



图 2-42 等值面设置对话框

设置结果值的基准, 并在窗口上显示指定范围内/外区域的结果值。勾选仅显示“曲面类型”时, 在界面上就会以面的形式显示相同结果值的区域。

## 2.6 节点/单元工具条



图 2-43 节点/单元工具条





用户可在工作目录树>网格中选择单元网格后，点击鼠标右键>点击想在窗口内显示的选项，设置模型中单元/节点的显示方式。



图 2-44 单元/节点设置关联菜单

	<p><b>显示/隐藏自由边</b> 在工作平面上可显示或隐藏自由边。 自由边是指二维单元间节点不共享的部分。</p>
	<p><b>显示/隐藏单元坐标系</b> 在工作平面上显示或隐藏单元坐标系。 因为根据单元生成顺序和方向决定了单元坐标系，所以为了输出标准荷载，单元坐标系的方向必须一致。可使用网格&gt;单元&gt;网格参数&gt;修改坐标系来修改单元坐标系。</p>
	<p><b>显示/隐藏材料坐标系</b> 在工作平面上可显示或隐藏材料坐标系。 在工作目录树&gt;网格上选择所需网格组，点击鼠标右键&gt;显示&gt;材料坐标系，设置显示材料坐标系。</p>
	<p><b>显示/隐藏节点号</b> 在工作平面上可显示或隐藏节点号。 该功能可用于查看特定节点的结果。</p>
	<p><b>显示/隐藏单元号</b> 在工作平面上可显示或隐藏单元号。 该功能可用于查看特定单元的结果。</p>
	<p><b>查询节点/单元</b> 可查看节点/单元的信息。 用户可输入特定的节点/单元号或者在窗口点击选择节点/单元。信息将在输出窗口中显示。</p>
	<p><b>显示/隐藏单元</b> 可在界面上显示或隐藏整体模型中需要的单元。 利用此功能可只显示部分模型，这在界面上处理复杂的大规模的模型时是十分有效的。</p>

	若选择[全部]，则显示全部单元。通过[前次]按钮，可恢复最近使用的前一阶段单元的激活/钝化状态。
	<b>显示所有单元</b> 只显示特定单元后，想要回到初始状态（显示所有单元）时使用。
	<b>测量距离</b> 测量两点间的距离或角度时使用。 与执行几何>工具>测量的功能相同。

## 2.7 执行分析工具条



图 2-45 分析工具条

### 1. 执行分析

执行分析。选择要执行的分析工况。



图 2-46 分析对话框

### 2. 前处理模式

转换成前处理模式。

在前处理模式下，几何、网格、荷载、边界条件等信息是与 Windows 资源管理器相类似的树形结构形式实时显示。关联菜单提供各种控制功能，实现对象的选择、修改、显示/隐藏等操作。

### 3. 后处理模式

转换成后处理模式。

结束正常分析后，程序会自动的读取分析结果，有效的计算结果将以树形结构显示。用户可执行各种功能，实现如输出图形、输出表格及输出后处理图形状态等各种操作。

对几何形状或单元网格等进一步操作时，用户须转换成[前处理模式]后，再执行重新分析。



## 第三章 几何

### 3.1 点和线

#### 3.1.1 顶点

##### 概要

在二维或三维空间上生成独立的顶点。



图 3-1 顶点建立对话框

#### 1. 生成

有如下 5 种方式生成顶点。

[坐标]: 直接输入坐标。可直接点击工作平面生成点, 也可通过输入坐标值生成点。

[圆或圆弧中心]: 选择已经画好的圆弧, 在圆弧的中心生成点。

[顶点中心]: 选择已经画好的一组点, 在中心位置生成点。

[线-线交叉点]: 在两线交叉的位置生成点。

[线-面交叉点]: 在线和面交叉的位置生成点。

[转换节点为顶点]: 已经生成单元网格的情况下, 在节点位置生成顶点。

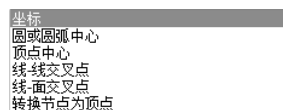


图 3-2 顶点建立的方式

##### 几何组

把生成的顶点注册到几何组, 用户可以为这个几何组重命名。

#### 2. 表格输入


将三维的坐标值直接输入到表格上。在文件中选择导入坐标功能时, 也可以导入包含坐标值的.txt 格式文档。当生成.txt 文件时, 点的坐标须按 X, Y, Z 坐标的顺序, 并以空格隔开。

下图为在 (0,0,0), (1,1,2), (2,2,2), (5,5,5) 的位置生成顶点的输入文件示例。



图 3-3 顶点文本文件格式



为了正确输入的直线交叉点或圆心坐标值，也可通过定义捕捉（）功能，如中心捕捉、交叉点捕捉或端点捕捉功能来获取。

### 3.1.2 线

#### 概要

在工作平面上生成线类型的直线。



图 3-4 直线生成对话框

#### 1. 二维 (2D)

输入起点和终点的坐标建立线。以[绝对值 (x, y)]的格式输入起点，用户可选择如下三种方式之一输入终点。

[绝对值 (x, y)]: 在工作平面上输入二维绝对坐标值。

[相对值 (dx, dy)]: 在工作平面上输入前次输入位置的相对距离。

[长度/角度]: 在前次输入位置的基础上，输入长度和角度。这时的角度是指工作平面上相对 X 轴逆时针旋转的角度。

#### 2. 三维 (3D)

输入起点和终点的坐标建立线。以绝对值 (x, y, z) 的格式输入起点，用户可选择如下二种方式之一输入终点。

[绝对值 (x, y, z)]: 在工作平面上输入三维绝对坐标值。

[相对值 (dx, dy, dz)]: 在工作平面上输入前次输入位置的相对距离。

虽然直接点击工作平面或点击几何形状也可以指定下一个点，但因工作平面 XZ 是二维的，所以不能获取 Y 值。

### 几何组

把生成的线注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.1.3 圆弧

### 概要

在工作平面上线类型的圆弧。



图 3-5 圆弧生成对话框

## 1. 二维 (2D)

### 方法


生成圆弧的方式有如下三种。各方法均可通过直接点击工作平面来指定点。圆弧是以工作平面的法向为基准按逆时针方向生成。

：按顺序输入中心点、圆弧的起点和终点生成二维圆弧

按顺序输入中心点[绝对值 (x, y)]、圆弧的起点[绝对值 (x, y)、(半径, 起始角)]以及终点[绝对值 (x, y)、夹角、结束角]生成圆弧。

：按顺序输入圆弧的起点和圆弧上的任意点以及圆弧的终点生成二维圆弧。

按顺序输入圆弧的起点[绝对值 (x, y)]、圆弧上的任意点[绝对值 (x, y)]以及圆弧的终点[绝对值 (x, y)]生成圆弧。

：从线端开始生成与曲率连续的二维圆弧。

从现有的线端开始到任意的点[绝对值 (x, y)]结束，生成与线曲率连续圆弧。生成的圆弧与连接的线虽然是连续的，但却是不同的线。圆弧的起点为已有线段上距鼠标点击位置最近的端点。

## 2. 三维 (3D)

### 方法

生成圆弧的方式有如下二种。各方法均可通过直接点击工作平面来指定点。圆弧是以工作平面的法向为基准按逆时针方向生成。



：按顺序输入中心点、圆弧的起点和终点生成三维圆弧。

按顺序输入中心点[绝对值  $(x, y, z)$ ]，圆弧的起点[绝对值  $(x, y, z)$ ]以及圆弧的终点[绝对值  $(x, y, z)$ ]的坐标。



：按顺序输入圆弧的起点和圆弧上的任意点以及圆弧的终点生成三维圆弧。

按顺序输入圆弧的起点[绝对值  $(x, y, z)$ ]、圆弧上的任意点[绝对值  $(x, y, z)$ ]以及圆弧的终点[绝对值  $(x, y, z)$ ]

### 几何组

把生成的圆弧注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.1.4 圆

### 概要

在工作平面上生成线类型的圆。



图 3-6 圆生成对话框

### 方法

生成圆的方式有如下四种。各方法均可通过直接点击工作平面来指定点。



：输入中心的坐标和半径生成二维圆。

输入中心的坐标[绝对值  $(x, y)$ ]和半径生成圆。




：输入直径两 endpoint 生成二维圆。

输入直径一端点的坐标[绝对值  $(x, y)$ ]和另一端点[绝对值  $(x, y)$ ，相对值  $(dx, dy)$ ，(长度，角度)]的坐标生成圆。



：输入任意的三点生成二维圆。

指定任意三点[绝对值 (x, y)]的坐标生成圆。

: 夹于两线间且与线相切的二维圆。

夹于两线间且与线相切的圆。用户需输入半径后要选择两条线。

### 生成面

以现有圆的外轮廓为边界生成一个圆形平面。

### 几何组

把生成的圆形注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.1.5 多段线

### 概要

在工作平面上生成线类型的多段线。



图 3-7 多段线生成对话框

### 1. 2D

输入起点和终点的坐标生成多段线。起点按绝对值 (x, y) 形式输入，终点坐标可按如下三种方法中的一种方法选择。各方法均可通过直接点击工作平面来指定点，点击鼠标右键就会停止添加插入点，并生成多段线。

[绝对值 (x, y)]: 在工作平面上输入二维绝对坐标值。

[相对值 (dx, dy)]: 在工作平面上输入前次输入位置的相对距离。

[长度/角度]: 在前次输入位置的基础上，输入长度和角度，这时的角度是指工作平面上相对 X 轴逆时针旋转的角度。

### 2. 3D

输入起点和终点的坐标生成多段线。起点以绝对值 (x, y, z) 的形式输入，终点时可选择下列两种方式中的一种。虽然直接点击工作平面或点击几何形状也可以指定下一个点，但因工作平面 XZ 是二维的，所以不能获取 Y 值。点击鼠标右键就会停止添加插入点，并生成多段线。

[绝对值 (x, y, z)]: 在工作平面上输入三维绝对坐标值。

[相对值 (dx, dy, dz)]: 在工作平面上输入前次输入位置的相对距离。

### 生成面

如果生成的多段线是封闭的，则生成以该多段线轮廓为边界的面。

### 连接起点和终点

自动连接起点和终点。在工作窗口中点击右键就自动连接起点和终点并闭合多段线。

### 几何组

把生成的多段线注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.1.6 四边形

### 概要

在工作平面上生成线类型的四边形。



图 3-8 矩形生成对话框

### 方法



: 输入四边形对角线的两端点生成矩形。

输入四边形对角线的一端点的坐标[绝对值 (x, y)]和对角端点的坐标[绝对值 (x, y)、相对值 (dx, dy)]生成矩形。



: 按顺序输入四边形的第一个角、第二个角、长度，生成矩形。

按顺序输入矩形的第一个角的坐标[绝对值 (x, y)]和第二个角的坐标[绝对值 (x, y)、相对值 (dx, dy)]、长度，生成矩形。

直接点击工作平面或点击几何形状也可以指定下一个点。

### 生成面

如果生成的四边形是封闭的，生成以该四边形轮廓为边界的面，这时将不会生成线类型的四边形。

### 几何组

把生成的四边形注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

### 3.1.7 椭圆

#### 概要

在工作平面上生成线类型的椭圆。



图 3-9 椭圆生成对话框

#### 方法

在工作平面上输入椭圆中心点的坐标[绝对值 (x, y)]和长轴、短轴半径生成椭圆。

在工作平面上输入长轴方向时可按绝对值 (x, y) 输入长轴方向的终点或按长度/角度的形式输入。按长度/角度输入时，输入长度和角度，这时的角度是指工作平面上相对 X 轴逆时针旋转的角度。

通过直接点击工作平面也可以指定点。

#### 生成面

以现有椭圆的轮廓线为边界生成椭圆平面，这时将不会生成线类型的椭圆。

#### 几何组

把生成的椭圆注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

### 3.1.8 B-样条曲线

#### 概要

在工作平面上生成线类型的 B-样条曲线。



图 3-10 样条曲线生成对话框

#### 1. 2D

输入起点和终点的坐标生成 B-样条曲线。起点按绝对值 (x, y) 的形式输入，终点可选择如下三种方式中的一种。

[绝对值 (x, y)]: 在工作平面输入二维绝对坐标值。

[相对值 (dx, dy)]: 在工作平面上输入前次输入位置的相对距离。

[长度/角度]: 在前次输入位置的基础上，输入长度和角度，这时的角度是指工作平面上相对 X 轴逆时针旋转的角度。

通过直接点击工作平面来指定点，点击鼠标右键就会停止添加插入点，并生成 B-样条曲线。

## 2. 3D

输入起点和终点的坐标生成 B-样条曲线。起点按绝对值 (x, y, z) 的形式输入，终点可选择下列三种方式中的一种。

[绝对值 (x, y, z)]: 在工作平面输入三维绝对坐标值。

[相对值 (dx, dy, dz)]: 在工作平面上输入与前次输入三维坐标位置的相对距离。

虽然直接点击工作窗口的工作平面或点击几何形状可指定下一个点，但因是工作平面 XZ 是二维的，所以不能输入 Y 轴的值。点击鼠标右键就会停止添加插入点，生成 B-样条曲线。

生成面

如果生成的 B-样条曲线封闭，则生成以该 B-样条曲线轮廓为边界的面。

### 调整两端相切矢量

完成 B-样条曲线后，通过最后阶段中调整起点和终点的切线矢量，修改 B-样条曲线的整体形状。

### 几何组

把生成的 B-样条曲线注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.1.9 轮廓线

### 概要

在工作平面上生成由直线或圆弧构成的轮廓线。



图 3-11 轮廓线生成对话框



### 方法

直接点击工作窗口的工作平面选择点或输入坐标值。鼠标点击工作平面指定点后，通过点击鼠标右键停止添加插入点生成轮廓线。



: 输入三点生成直线轮廓线。

输入起点的坐标[绝对值 (x, y)]后继续使用输入下一点坐标[绝对值 (x, y), 相对值 (dx, dy)]的方法生成连接的直线。



: 输入两点生成圆弧轮廓线。

生成一个与前一步生成的线有连接关系的弧。由于前一步所生成线的终点自动设置为圆弧的起点，所以只需输入弧的终点坐标[（半径、角度）、（长度，角度）]。圆弧不能通过连接已有线段生成，只能通过与上一步的线连接的方式生成。



: 输入三点坐标生成圆弧轮廓线。

输入三点的坐标生成圆弧。在轮廓线生成轮廓线时，因为前一步生成的线的端点被作为圆弧的起点，只需要输入两个点的坐标[绝对值 (x, y)、相对值 (dx, dy)]。但当只是生成轮廓线的第一步时，必须从起点开始按顺序输入三个的点坐标才能生成圆弧。

### 生成面

如果生成的轮廓线是封闭的，则以现有轮廓为边界生成一个平面，这时不会生成线类型的轮廓线。

### 几何组

把创建的轮廓线注册到几何组，用户可以为这个几何组命名。

## 3.1.10 多边形

### 概要

在工作平面上生成正多边形。



图 3-12 正多边形生成对话框

### 方法



圆上生成内接正多边形。

输入正多边形的边数。输入外接圆的中心坐标 [ (绝对  $x$ 、 $y$ ) ]，选择下列三种方法中的一种输入半径和坐标值。

[绝对值 ( $x$ ,  $y$ ) ]: 在工作平面输入二维绝对坐标值。

[相对值 ( $dx$ ,  $dy$ ) ]: 在工作平面上输入与前次输入二维坐标位置的相对距离。

[长度/角度]: 在前次输入位置的基础上，输入长度和角度，这时的角度是指工作平面上相对 X 轴逆时针旋转的角度。

正多边形的顶点将处于第二个输入点的位置。



圆上生成外接正多边形。

输入多边形的边数。输入内接圆的中心坐标[绝对值 ( $x$ ,  $y$ ) ]，选择下列三种方法中的一种输入半径和坐标值。

[绝对值 ( $x$ ,  $y$ ) ]: 在工作平面输入二维绝对坐标值。

[相对值 ( $dx$ ,  $dy$ ) ]: 在工作平面上输入前次输入位置的相对距离。

[长度/角度]: 在前次输入位置的基础上，输入长度和角度，这时的角度是指工作平面上相对 X 轴逆时针旋转的角度。

正多边形和圆的切点将处于第二个输入点的位置。



输入边的长度和正多边形的中心点、顶点与工作平面坐标的 X 轴的夹角，生成正多边形。

输入要生成的多边形的边数。输入多边形边的长度后输入多边形的中心坐标[绝对值 ( $x$ ,  $y$ ) ]。输入一个顶点与工作平面坐标系的 X 轴的夹角（逆时针方向旋转）生成正多边形。

### 生成面

如果生成的正多边形是封闭的，则生成以该多边形轮廓为边界的面，这时不生成线类型的多边形。

### 几何组

把创建的多边形注册到几何组，用户可以为这个几何组命名。

## 3.1.11 螺旋线

### 概要

生成线型的螺旋线。



图 3-13 螺旋线生成对话框

### 方向

选择基准轴方向或两点矢量，指定生成的螺旋方向。

[选择方向]：指定方向矢量，为螺旋线的基准线。可以选择基准轴、基准平面、面或线。

[2 点矢量]：通过定义起点和终点的坐标定义的方向矢量成为螺旋线的基准线。起点和终点的坐标可以在工作窗口中直接点击输入。

### 其它输入

输入起始坐标 XYZ、间距、圈数、锥角，生成螺旋线。

[起始坐标]：按螺旋线的起点输入三维的绝对值，也可直接点击工作窗口指定。

[间距]：指螺旋纹一周对应的轴向高度增量。

[圈数]：指螺旋的圈数。

[锥度]：指螺旋的基准轴和螺旋侧面的坡度。

生成的螺旋线可能会发生一些误差，如输入的数值与锥度不完全匹配。

### 几何组

把生成的螺旋线注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.1.12 隧道截面

### 概要

在工作平面上生成线型隧道截面形状。

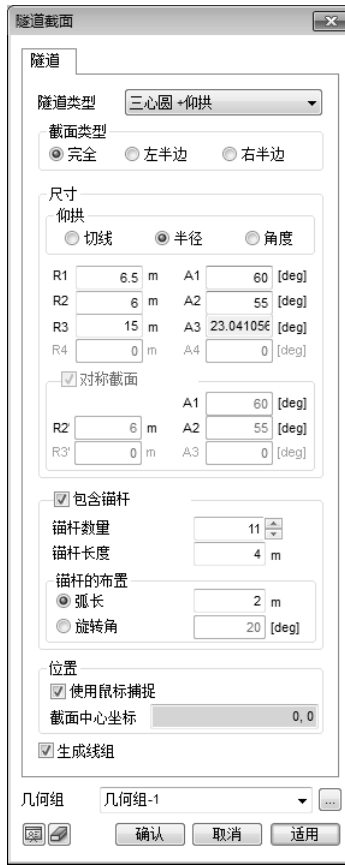
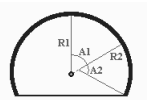


图 3-14 隧道截面生成对话框

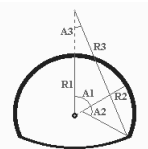
### 隧道类型

隧道截面可以分为[三心圆]，[三心圆+仰拱]，[五心圆]，[五心圆+仰拱]的 4 种类型，截面类型可按 [完全]、[左半边]、[右半边]的三种方式生成。



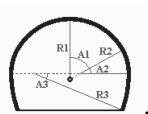
: 三心圆

相互不同的中心和直径的三段圆弧的组生成隧道。



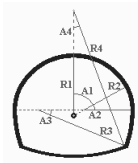
: 三心圆+仰拱

相互不同的中心和直径的三圆弧与一个仰拱组生成隧道。



: 五心圆

相互不同的中心和直径的五个圆弧组成的隧道。



: 五心圆+仰拱

相互不同的中心和直径的五个圆弧与一个仰拱组成的隧道。

### 尺寸

输入要生成的隧道截面的半径 (R1~R4) 和角度 (A1, A4)。左、右侧截面不对称时, 勾选“对称截面”就可生成非对称截面隧道形状。这时输入的 A1' ~A3', R2' ~R3' 将显示左侧半截面的形状。

### 仰拱

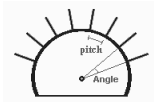
隧道类型为[三心圆+仰拱]或[五心圆+仰拱]设置时被激活。在隧道底面不平时仰拱用圆弧形式建立。可以用下列三种方式生成仰拱。

[切线]: 以指定的仰拱截面半径 (R) 和角度 (A) 为基本信息生成三心圆 (或五心圆)。

[半径]: 如果输入半径 (R), 程序就会自动计算最佳的角度 (A) 后与三心圆 (或五心圆) 的信息组合生成仰拱。

[角度]: 如果输入角 (A), 程序就会自动的计算半径 (R) 后与三心圆 (或五心圆) 的信息组合生成仰拱。

### 包含锚杆



在隧道截面形状上包含锚杆时, 勾选[包含锚杆]选项并设置锚杆线。用户输入锚杆数量和长度, 排列方法使用“弧长”或“旋转角”法分配锚杆。

### 位置

输入已生成的隧道截面形状的中心点位置。

勾选[使用鼠标捕捉]用鼠标点击也可在工作平面上获取隧道截面线的中心点坐标, 也可直接输入截面中心点坐标。

### 生成线组

将隧道截面形状生成单独的线组。如果不勾选, 就会生成由许多线段组成的隧道截面形状。

### 几何组

把生成的隧道截面注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.1.13 圆角&倒角

### 概要

在两条线相交的部位生成圆角或倒角。只有当线处于工作平面内时才可以生成圆角或倒角。

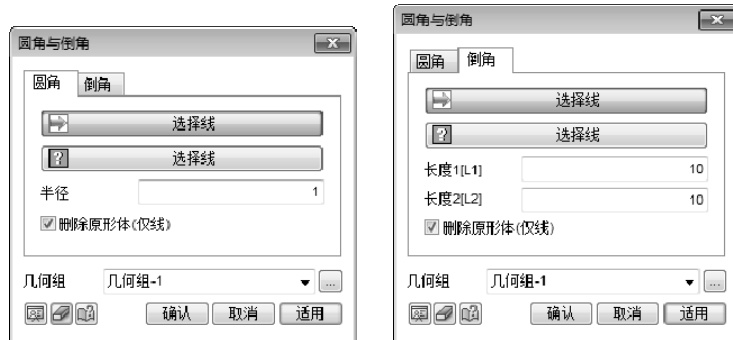


图 3-15 圆角与倒角对话框

### 1. 圆角 方法

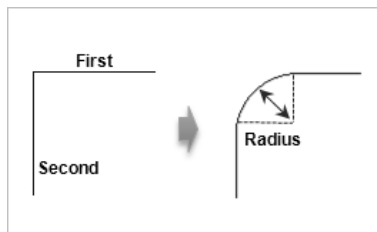


图 3-16 圆角的示例

选择工作平面上想要倒圆角的两条线后输入半径。倒圆角后的曲线变为单独的线组。

#### 删除原形状（仅线）

删除圆角外侧的线。如果选择的线是弧或圆，则不会被删除。

### 2. 倒角 方法

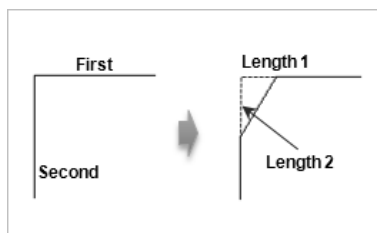


图 3-17 倒角的示例

选择工作平面上想要倒角的两条线后输入长度。倒角后的曲线将生成成为单独的线组。

#### 删除原来线段

删除倒角外侧的线。

#### 几何组

把生成的圆角或倒角线注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

### 3.1.14 生成线组

#### 概要

选择一组线，使其生成单独的线组。



图 3-18 线组生成对话框

#### 方法

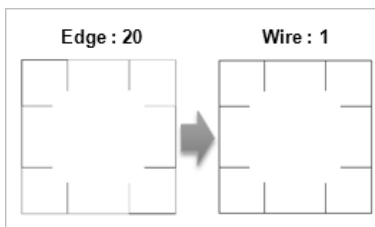


图 3-19 线组的示例

选择容差极限以内的线生成一个线组。

[容差]是指所选择的线在此范围内被认定为完全连接的允许误差。例如，如果两条线间的距离是  $2.0e-006$ ，而不是零，并且如果容差被设定为  $0.0001$ （比距离大的值），这两条线被认定为连接。

执行操作后，所选线将被删除，只保留合并后的线组。

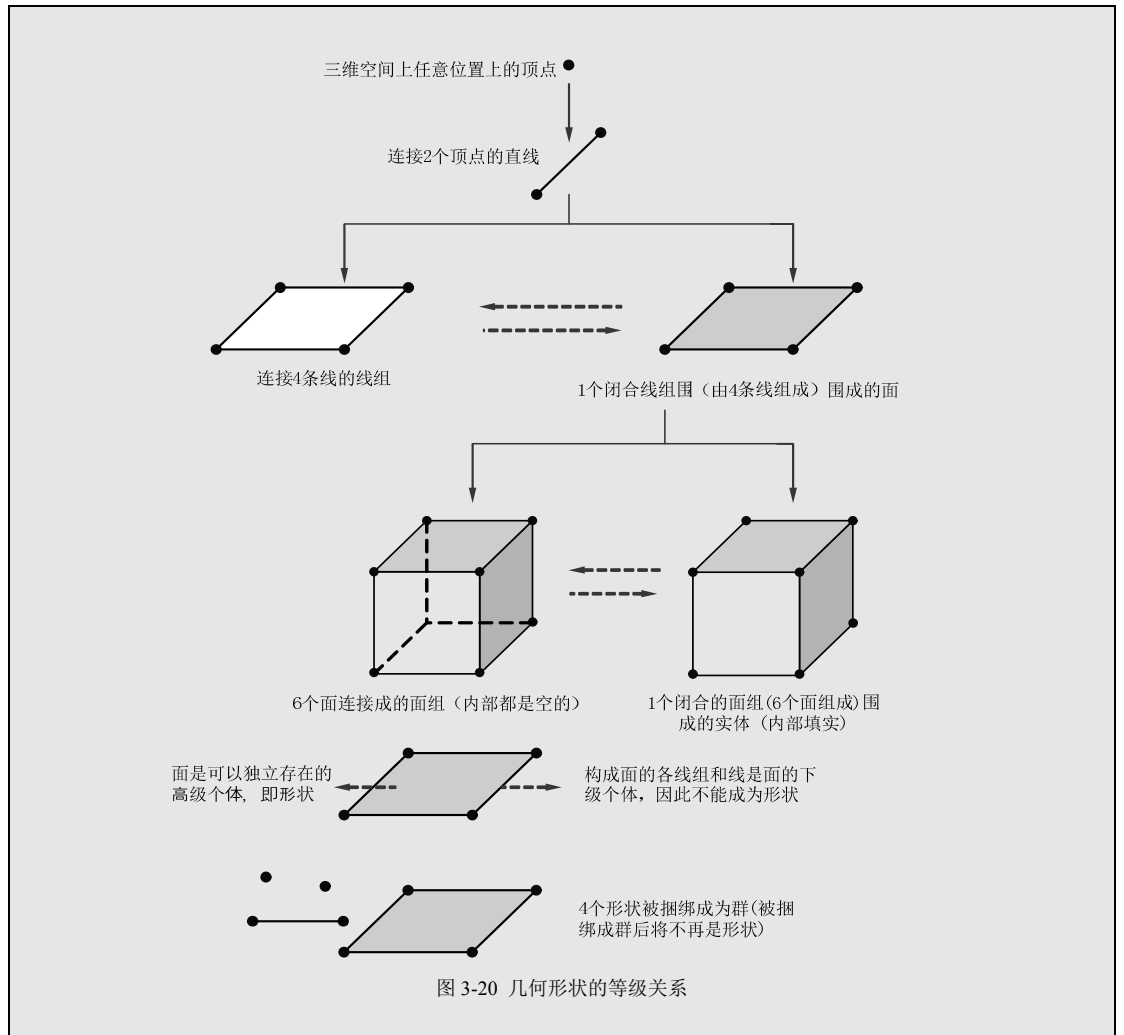
#### 几何组

把生成的线组注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。



线组以线的集合的概念，将包含的线作为子形状。但因为线组是线的组合，所以用户可以用诸如延伸等命令来生成面组（由线组生成的一组面）。

但，延伸多个线生成多个面时，使用线组的功能则不恰当。几何形状的等级关系如下。



### 3.1.15 延伸线

#### 概要

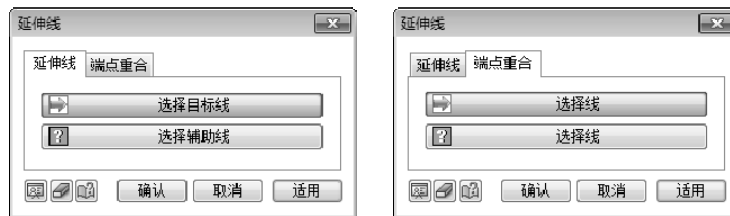


图 3-21 延伸线对话框

选择工作平面内的线，延伸或修剪其长度使之与终点一致。

#### 1. 延伸线

#### 方法



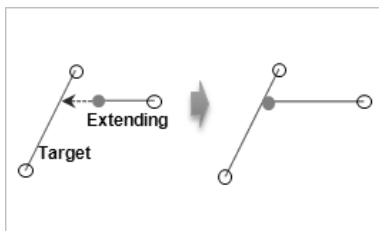


图 3-22 延伸线的示例

选择要延伸到辅助线的直线。

当所选线延伸后不能与辅助线相交时，不能执行延伸功能。B-样条曲线（B-Spline）类型的线不能使用延伸功能。

## 2. 端点重合

方法

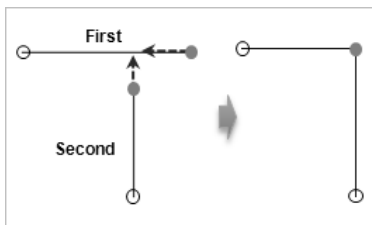


图 3-23 端点重合的示例

选择要重合的线。执行操作后将删除已选择的线只保留延伸的线。

两条线中的一条足够长且只延伸相对较短的线时，短线将延伸到长线且长线在交叉点处被切断。

### 3.1.16 交叉分割

概要

在相交点处剪断相交线。



图 3-24 交叉分割对话框

方法

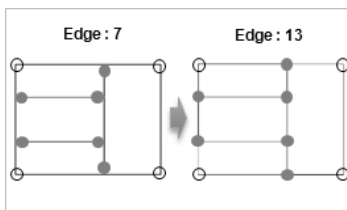


图 3-25 交叉分割的示例

选择要执行交叉分割操作的线。

交叉分割前的线被删除，只保留交叉分割后的线。

### 几何组

把交叉分割后的线注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.1.17 修剪线

### 概要

在交叉点修剪与其它交叉的线，只有存在交叉的线时才能使用修剪线命令。修剪线后删除原存在的线，只保留若干独立的线。



图 3-26 修剪线对话框

### 方法

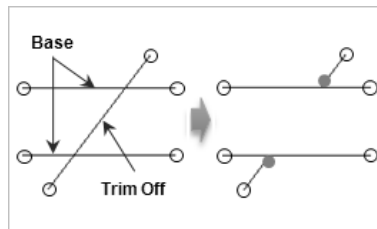


图 3-27 修剪线的示例

选择修剪操作中被当作基准的线，把执行修剪操作的线作为目标线，可以同时选择多条边。基准线在修剪后不改变。

## 3.1.18 打断线

### 概要

在 3D 空间打断线的方法。



图 3-28 打断线对话框

### 1. 百分比

### 方法

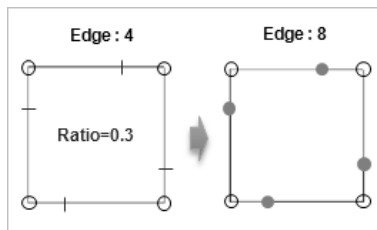


图 3-29 按百分比打断线的示例

根据百分比方法打断线。可以同时选择多条线分割。把线的原始长度看作是 1，输入 0 到 1 之间的百分比打断线。

### 2. 顶点

#### 方法

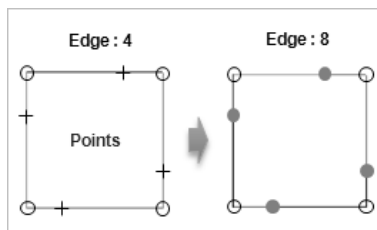


图 3-30 按顶点打断线的示例

根据顶点的方法打断线。在要打断的点上没有几何形状时，可用捕捉功能在工作平面上建立，也可直接输入坐标值。

### 3. 线

#### 方法

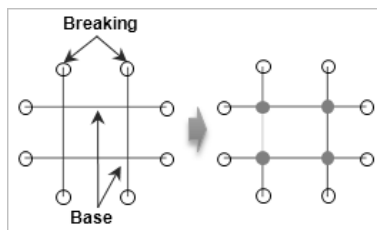


图 3-31 按线打断线的示例

根据线的方法打断线，选择基准线打断目标线。

### 4. 平面

#### 方法

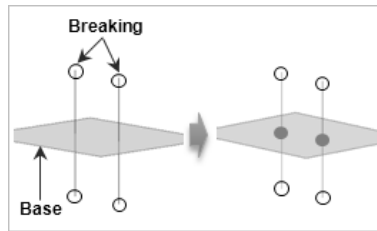


图 3-32 按面打断线的示例

根据面的方法打断线。

### 3.1.19 合并线

#### 概要

选择工作平面上的线，通过合理的延伸或修剪长度使它们的端点重合。



图 3-33 合并线对话框

#### 方法

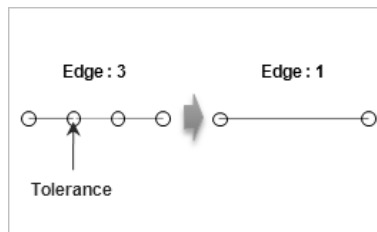


图 3-34 合并线的示例

直接在工作窗口中选择多条线，并把容差内的线合并成一条线。容差是指所选的线段在此范围内被认定为完全连接。例如，如果两条线间的距离是  $2.0e-006$ ，而不是零，并且如果容差被设定为  $0.0001$ （比距离大的值），这两条线被认定为连接。

执行操作后，所选线将被删除，只保留合并后的线。



**合并线和线组**

线合并和线组都是把多条线生成一条线的方法。线合并后中间点消失，而生成线组时中间点被保留。因此，如果存在可以忽略的小点，最好采用线合并功能连接线，否则最好使用生成线组功能线。

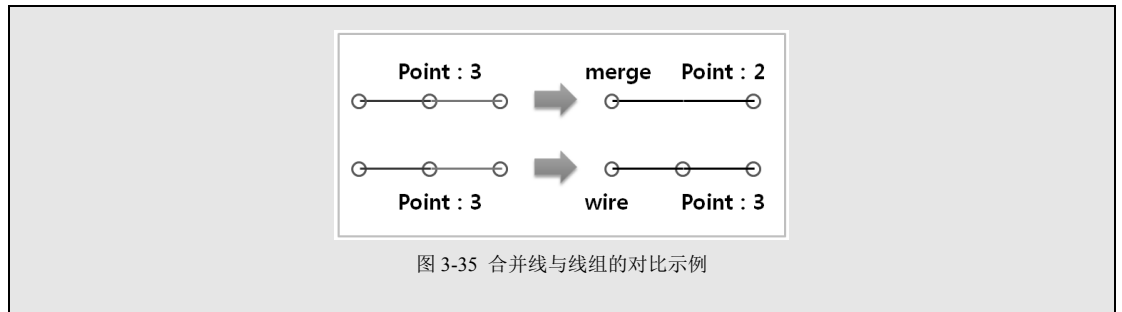


图 3-35 合并线与线组的对比示例

### 3.1.20 偏移曲线

#### 概要

用相同的距离偏移线并生成新的线。



图 3-36 偏移线对话框

#### 方法

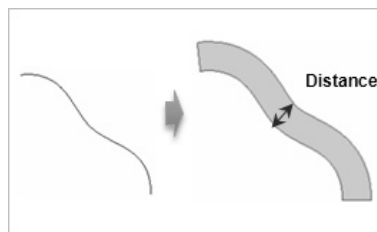


图 3-37 偏移线的示例

选择工作平面上的曲线或直线，也可以选择圆或圆弧。因为偏移目标线总是沿着法线方向，所以没有必要选择方向，只要输入选项距离就会自动偏移。通过点击[生成面]选项，可以生成包含偏移线的平面。

#### 几何组

把生成的线注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

### 3.1.21 最短距离直线

#### 概要

在空间形状之间用最短距离生成直线，当形状交叉时在交叉点生成直线。



图 3-38 最短距离线与曲面交叉线对话框

## 1. 最短距离直线

### 方法

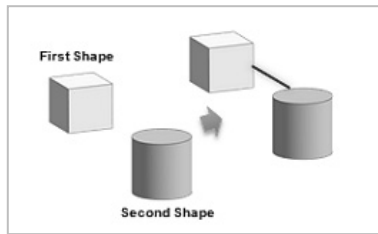


图 3-39 最短距离线的示例

如果按顺序选择两个形状，就会在空间上生成连接相应形状的最短距离的直线。

## 2. 曲面交叉线

### 方法

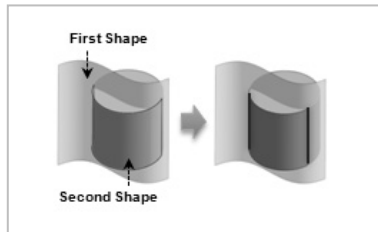


图 3-40 曲面交叉线的示例

如果按顺序选择两个形状，就会在相应形状交叉的位置生成直线。交叉为一条线则生成一条直线，多条线时将生成包含所有线的组合形状。

### 几何组

把生成的线注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.2 曲面与实体

### 3.2.1 圆柱

#### 概要

生成面组或实体类型的圆柱。



图 3-41 圆柱生成对话框

#### 方法

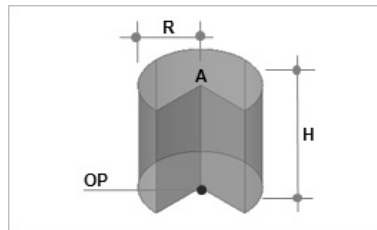


图 3-42 圆柱生成的示例

输入原点坐标 (OP) 和半径 (R)、高度 (H) 及角度 (A)，生成圆柱形状。

#### [原点坐标 (OP)]

是指圆柱底面圆心坐标。原点坐标可以在工作平面内直接点击获取，也可以点击工作窗口中的几何体定义。但因工作平面 XZ 是二维的，所以不能获取 Y 值。

#### [角度 (A)]

输入形成圆柱的顶面和底面圆的旋转角。如果输入 360，会生成具有圆形底面和顶面的典型圆柱。

#### 实体

如果勾选这个选项就会生成实体类型的圆柱。如果没有勾选这个选项，就会生成面组类型的圆柱。

GCS (整体坐标系) 和 WCS (工作平面坐标系) 可参考基本信息-建模助手工具条。

#### • GCS

以整体坐标系为基准输入原点坐标，这时原点坐标将输入三维空间坐标。

#### • WCS

以工作平面坐标系为基准输入原点坐标。这时原点坐标将输入工作平面的二维绝对坐标值。

## 几何组

把生成的圆柱注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

### 3.2.2 圆锥

#### 概要

生成面组或实体类型的圆锥。



图 3-43 圆锥生成对话框

#### 方法

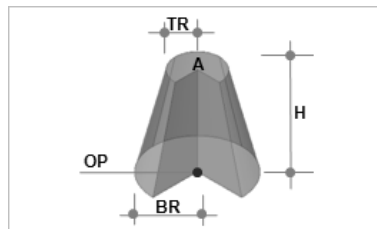


图 3-44 圆锥生成的示例

输入原点坐标 (OP) 和顶部半径 (TR)、底部半径 (BR)、高度 (H) 及角度 (A) 生成圆柱形状。

#### [原点坐标 (OP)]

指圆锥底面的原点坐标。原点坐标可以在工作平面内直接点击定义，也可以点击工作窗口中的几何体定义。但因工作平面 XZ 是二维的，所以不能获取 Y 值。

#### [角度 (A)]

输入形成圆锥的顶面和底面的圆的旋转角度。如果输入 360 度，会生成具有圆形顶面和底面的典型圆锥。

#### 实体

如果勾选这个选项就会生成具有体积的实体类型的圆锥。如果没有勾选这个选项，就会生成面组类型的圆锥。

#### • GCS



以整体坐标系为基准输入原点坐标，这时原点坐标将输入三维空间坐标。

• WCS

以工作平面坐标系为基准输入原点坐标。这时原点坐标将输入工作平面的二维绝对坐标值。

几何组

把生成的圆锥注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。



- 1、GCS（整体坐标系）和 WCS（工作平面坐标系）可参考基本信息-建模助手工具条工具条。
  - 2、在生成圆锥的二维或三维网格时，在顶点位置许多网格会共享同一顶点，其他顶点有时也会产生类似的现象。这时极点在旋转轴附近生成的单元网格会发生倾斜。
- 在一般建模过程中，在曲面上划分网格时也可能出现类似现象。
- 这样的现象在几何体中是无法解决的，只有在划分网格后，通过删除或合并节点编辑。最好的方法是生成单元网格后使用移动节点或合并节点等命令修改。

### 3.2.3 箱形

概要

生成面组或实体类型的箱形。



图 3-45 箱形生成对话框

方法

输入角坐标（OP）和长度 X（WX），宽度 Y（WY）以及高度（H）生成箱形形状。

角坐标（OP）指箱形底面角点的坐标。

原点坐标可以在工作平面内直接点击定义，也可以点击工作窗口中的几何体定义。但因工作平面 XZ 是二维的，所以不能获取 Y 值。

实体

如果勾选这个选项就会生成实体类型的箱形。如果没有勾选这个选项，就会生成面组类型的箱形。

• GCS

以整体坐标系为基准输入角坐标。这时角坐标将输入三维空间坐标。

• WCS

以工作平面坐标系为基准输入角坐标。这时角坐标将输入工作平面的二维绝对坐标值。

GCS（整体坐标系）和 WCS（工作平面坐标系）请参考基本信息-建模助手工具条。

几何组

把生成的箱形注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

### 3.2.4 楔形

概要

生成楔形的非标准六面体。可以生成面组或实体类型的六面体。



图 3-46 楔形生成对话框

方法

输入角坐标（OP）和长度（DX，DY，DZ）、形状宽度（Xmin、Xmax、Zmin、Zmax）生成楔形。

角坐标（OP）是六面体底面角点的坐标。原点坐标可以在工作平面内直接点击定义，也可以点击工作窗口中的几何体定义。但因工作平面 XZ 是二维的，所以不能获取 Y 值。

DX，DY，DZ 分别是六面体底面的 X 方向长度、Y 方向的底面宽度、Z 方向的六面体高度。

Xmin、Xmax 是与顶面起点和终点在 X 轴方向上的相对距离。

Zmin、Zmax 是与顶面起点和终点在 Z 轴方向上的相对距离。



六面体按如下方式生成：角坐标的输入为（X，Y，Z）时，六面体的底面是从（X，Y，Z）开始连接至（DX，DY，DZ）的矩形；六面体的顶面是从（X+Xmin、Y、Z+Zmin）开始连接至（X+Xmax，y，Z+Zmax）的矩形，而六面体以这两个矩形为基准生成。

### 实体

如果勾选这个选项就会生成实体类型的六面体。如果没有勾选这个选项，就会生成面组类型的六面体。

#### • GCS

以整体坐标系为基准输入坐标。这时坐标将输入三维空间坐标。

#### • WCS

以工作平面坐标系为基准输入角坐标。这时角坐标将输入工作平面的二维绝对坐标值。

GCS（整体坐标系）和 WCS（工作平面坐标系）请参考基本信息-建模助手工具条。

### 几何组

把生成的楔形六面体注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.2.5 球形

### 概要

生成面组或实体类型的球体。



图 3-47 球形生成对话框

### 方法

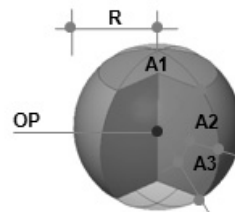


图 3-48 球形生成的示例

输入原点坐标（OP）和角度（A1， A2， A3）生成球形。

### 原点坐标（OP）

指球体原点的坐标。原点坐标可以在工作平面内直接点击定义，也可以点击工作窗口中的几何体定义。但因工作平面 XZ 是二维的，所以不能获取 Y 值。

#### 角度 (A1, A2, A3)

输入生成球体的角度，各个参数如下：

A1：球体垂直面的旋转角度。

A2：球体垂直面开始的角度 ( $0 < A2 \leq 90$ )

A3：球体垂直面结束的角度 ( $-90 \leq A3 \leq 0$ )

#### 实体

如果勾选这个选项就会生成实体类型的球体。如果没有勾选这个选项，就会生成面组类型的球体。

#### • GCS

以整体坐标系为基准输入原点坐标。这时原点坐标将输入三维空间坐标。

#### • WCS

以工作平面坐标系为基准输入原点坐标。这时原点坐标将输入二维绝对坐标值。

GCS（整体坐标系）和 WCS（工作平面坐标系）可参考基本信息-建模助手工具条。

#### 几何组

把生成的球形注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。



在球体上生成实体单元网格或二维单元网格时，在球体的上下位置观察单元网格，可以发现顶点位置许多网格会共享同一顶点，其他顶点有时也会产生类似的现象。这时极点在旋转轴附近生成的单元网格会发生倾斜。

在一般建模过程中，在曲面上划分网格时也可能出现类似现象。

这样的现象在几何体中是无法解决的，只有在划分网格后，通过删除或合并节点编辑。最好的方法是生成单元网格后使用移动节点或合并节点等命令修改。

### 3.2.6 圆环

#### 概要

生成旋转的环形体。如果截面封闭，可以生成环形的面组或实体圆环。如果截面是开放的，可以生成闭合回路的几何体。截面的形状是圆或圆弧。



图 3-49 圆环生成对话框

### 方法

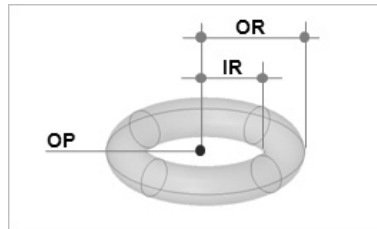


图 3-50 圆环生成的示例

输入圆心坐标（OP）和外半径（OR）、内半径（IR）、角度（A）生成圆环。

#### [原点坐标（OP）]

指定圆环的圆心坐标。原点坐标可以在工作平面内直接点击定义，也可以点击工作窗口中的几何体定义。但因工作平面 XZ 是二维的，所以不能获取 Y 值。

#### [外半径（OR）和内半径（IR）]

分别指圆环面的外半径和圆环面的内半径。应当是  $0 < IR < OR$ 。

#### [角度（A）]

指旋转体截面（圆或圆弧）开始的角度。假设截面角度位于 XZ 平面时，与 X 轴正向形成的角度。

### 生成实体

如果勾选这个选项就会生成实体类型的圆环。如果没有勾选这个选项，就会生成面组类型的圆环。

#### • GCS

以整体坐标系为基准输入原点坐标。这时原点坐标将输入三维空间坐标。

#### • WCS

以工作平面坐标系为基准输入原点坐标。这时中原点坐标将输入工作平面的二维绝对坐标值。

GCS（整体坐标系）和 WCS（工作平面坐标系）可参考基本信息-建模助手工具条。

### 几何组

把生成的圆环注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

### 3.2.7 生成面

#### 概要

当选择的一系列闭合的线时，生成以这些线为轮廓的面。



图 3-51 曲面生成对话框

#### 1. 平面

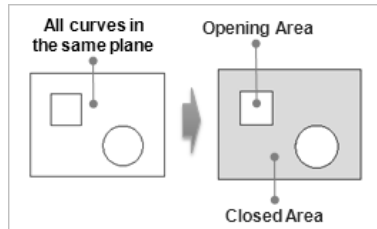


图 3-52 曲面生成的示例

选择要生成面的边部边界线。线的数量没有限制。但是边界不能重合，并且必须闭合以生成面。

[容差]

指所选择的线在此范围内被认定为完全连接。例如，如果两条线间的距离是  $2.0e-006$ ，而不是零，并且如果容差被设定为  $0.0001$ （比距离大的值），这两条线被认定为连接。



在边界线组成的区域内部还有其它边界线的情况下，也可以生成包含内部边界线和外部边界线的平面。

#### 2. 边界面

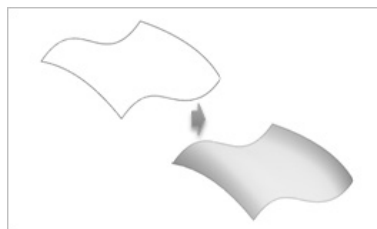


图 3-53 边界面生成的示例

选择 2 条或 4 条线作为边界线使用，生成三维曲面。

选择 4 条线的情况下，选择的边界线只有能够组成闭合的区域，才能正常的生成曲面。

在选择 2 条线的情况下，将选择的两个边界线以用最短距离生成平面或曲面。这时各线的起点间、终点间连接生成面，所以在线方向不一致时会生成扭曲的面。在这种情况下，勾选“反转（在 2 边之间）”功能，就可以在连接各线的起点和终点后，生成正常的面。



边界面的优点是生成速度较快，误差较少，但是只能选择 4 条以下的轮廓线。当要使用 4 条以上的轮廓线时，可使用合并线命令将一些线合并后再使用边界面功能。

当使用预览功能没有观察到生成的消隐面时，要终止生成面。此时如果强行运行“适用”将生成有问题的面（未显示），对后续的建模工作产生影响。预览后最好使用合并等编辑手段重新建立边界面。如果实在没有好的方法解决，在建立了非正常的面之后，进行一些修改和修复后再进行后续的建模工作。

### 3. 栅格面

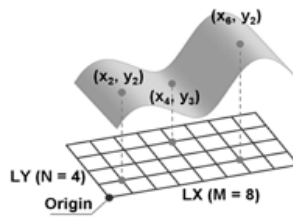


图 3-54 栅格面生成的示例

在整体坐标的 XY 平面上设置虚拟的栅格，每个栅格点都输入高程的数据，生成一个复杂的曲面。

M (X 轴数量), N (Y 轴数量) 是指各轴方向的栅格线数。

原点 X、原点 Y 是栅格起点的 X, Y 坐标, LX、LY 是平面在 X、Y 方向的长度。

标高可以直接导入到表格对话框中，也可以按文本文件输入。

### 4. 顶点面



图 3-55 顶点面生成的示例

生成含全部选择顶点的空间曲面。

可以在窗口上选择顶点，也可以将坐标直接导入到表格对话框中。

当采用表格输入顶点坐标时，将激活[建立顶点]，勾选时生成输入的顶点，如果不勾选只生成面。

#### 几何组

把生成的顶点面注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

### 3.2.8 圆角和倒角

#### 概要

在实体或面组的边生成圆角或倒角。



图 3-56 圆角和倒角对话框

#### 1. 圆角

##### 方法

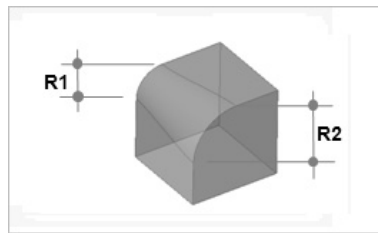


图 3-57 圆角生成的示例

选择要进行圆角操作的边。只有实体或面组下级的边可以选择。

在起点和终点位置，分别输入圆角半径 1 (R1) 和半径 2 (R2)。

虽然不显示边的方向，但可以用预览功能提前确认要生成的形状。

#### 2. 倒角

##### 方法

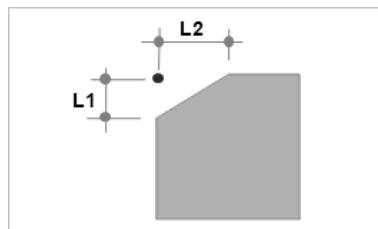


图 3-58 倒角生成的示例

选择要进行倒角操作的边。只有实体或面组下级的边可以选择。

输入倒角边的起点长度 (L1) 和边终点长度 (L2)。

虽然不显示边的方向，但可以用预览功能提前确认要生成的形状。



### 3.2.9 偏移

#### 概要

偏移实体或面组的全部或部分生成面组。

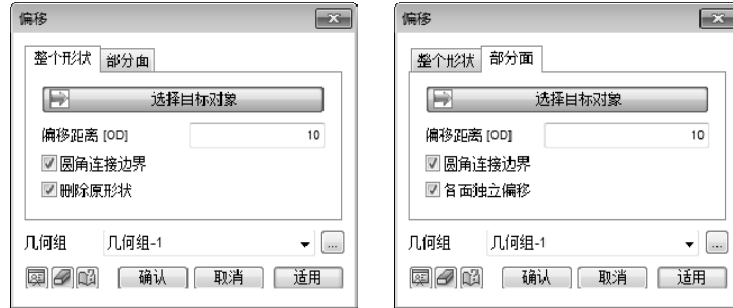


图 3-59 偏移整个形状和部分面对话框

#### 1. 整个形状

##### 方法

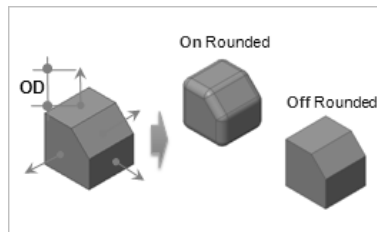


图 3-60 偏移整个形状的示例

按相同的距离（偏移距离（OD））偏移所选目标的所有形状（实体、面组）。

勾选[圆角连接边界]时，偏移所有面之后，不连接的部分通过曲线处理连接。偏移距离（OD）即为圆角上使用的半径大小。

勾选[删除原形状]时，删除进行偏移操作的原形状，只留最终形状。

#### 2. 部分面

##### 方法

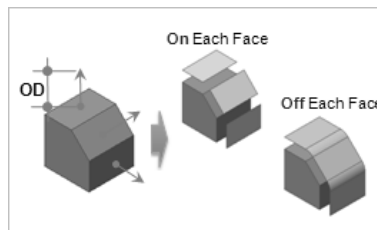


图 3-61 偏移部分面的示例

偏移选择目标的一部分面。

勾选[各面独立偏移]时，独立地偏移各个面。在这个选项关闭的状态下如果选择多个连接的面，就会生成面组类型的的偏移面。



偏移是以各自的面为基准运行的命令。在选择曲面目录树中只偏移群组中部分面组时，将按面的状态偏移。

输入正值的偏移距离，将沿面的法线方向偏移。因此，分别偏移独立的面时，可使用预览功能确认各个面是否被准确地偏移。但是在使用缝合、合并面等功能生成面组时，程序会把面的不同法线方向调整为同一方向，以便执行操作。

### 3.2.10 印刻

#### 概要

把指定的曲线或顶点投影到指定的面上后，基于投影的形状在面内生成线或点。当在面上划分网格时，这些印刻的线和点都会体现出来。



图 3-62 印刻对话框

#### 1. 印刻顶点

##### 方法

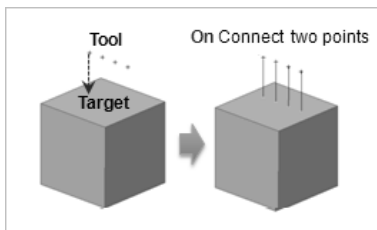


图 3-63 印刻顶点的示例

选择要印刻的面后选择要印刻的顶点。印刻方向可以按以下三种方式设定。

[选择方向]：直接指定印刻的方向。可以选择基准坐标轴、基准面、面或线。

[2 点矢量]：输入起点和终点的坐标定义作为印刻的方向矢量。起点和终点的坐标可以直接在工作窗口中点击定义。

[最短距离方向]：在辅助对象与目标面的最短路径上投影。

勾选[直线连接两顶点]选项时，连接原点和投影点生成直线。

## 2. 印刻线

方法

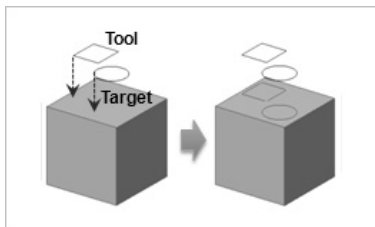


图 3-64 印刻线的示例

选择要印刻的面后选择想印刻的线。印刻方向时可以按如下三种方式设定。

[选择方向]: 直接指定印刻的方向。可以选择基准坐标轴或线。

[2 点矢量]: 输入起点和终点的坐标定义作为印刻的方向矢量。起点和终点的坐标可以直接在工作窗口中点击定义。

[最短距离方向]: 在辅助目标与目标面的最短路径上投影。

## 3. 自动印刻

方法

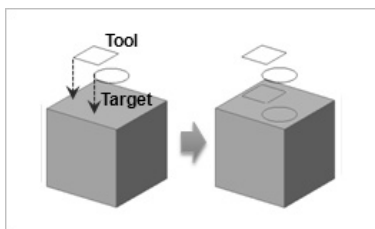


图 3-65 自动的示例

选择要印刻的面后选择想印刻的线或点就会自动的执行印刻。

如果线穿过多种实体时，执行自动印刻功能就会分割每个实体内的线，并在实体连接位置自动地执行印刻。

### 几何组

把生成的线或点注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.2.12 自动连接

概要

自动生成目标形状之间的共享面或做布尔运算。



图 3-66 自动连接对话框

### 方法

选择自动连接的目标形状就会自动生成共享面或进行布尔运算。此功能将自动执行对体与体之间的如下命令：

**[印刻]：**自动生成相连实体的共享面。

**[布尔运算]：**

- (1) 实体内存在实体的情况：嵌入
- (2) 实体和实体相连或部分包含的情况：差集



根据选择的顺序，实体差集后的形态变化会不同。但在执行自动印刻功能的情况下，程序会从内部判断并生成共享面，并不会因选择顺序改变几何形态。而当包含的体并没有印刻时，可采用几何>布尔运算>实体>差集功能。

## 3.2.13 合并面线

### 概要

保留面的同时把选择面的边界线合并成一条线。



图 3-67 合并面线对话框

### 方法

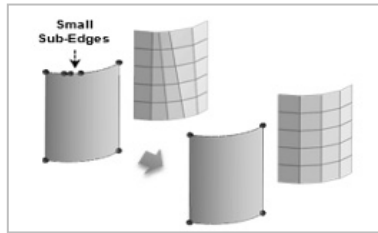


图 3-68 合并面线的示例

单一形状或多个形状可以执行合并面线。单一形状的情况下，只能对一个面执行合并；多个形状的情况下，对选择角度误差范围内包含的所有线，可以自动的执行合并面线命令。

只有当所选择的线的夹角在标准范围内时才能执行合并操作，要合并成的线必须与其它线连接。



在一些顶点上存在退化边线（Degenerated Edge）时，不能使用合并面的线功能。虽然退化边线并不常见，但因为退化边线不能合并，所以要在生成网格后使用删除节点（Move Node）功能修改网格。

缝合（Sew）时，一侧的边线由两个短线构成，另一侧由一个长线构成时，可将长线分割成两个后再缝合。当使用合并面的线功能后再缝合时，应将两个面的线都合并后再缝合。

对大型面组模型实行合并面的线命令速度比较慢，此时可采用缝合和合并面的线功能。

对象形状的边线的开始点用红色的圆表示，结束点用蓝色点表示。

### 3.2.14 层面

#### 概要

层面助手可在利用钻孔数据三维空间上生成多层曲面。

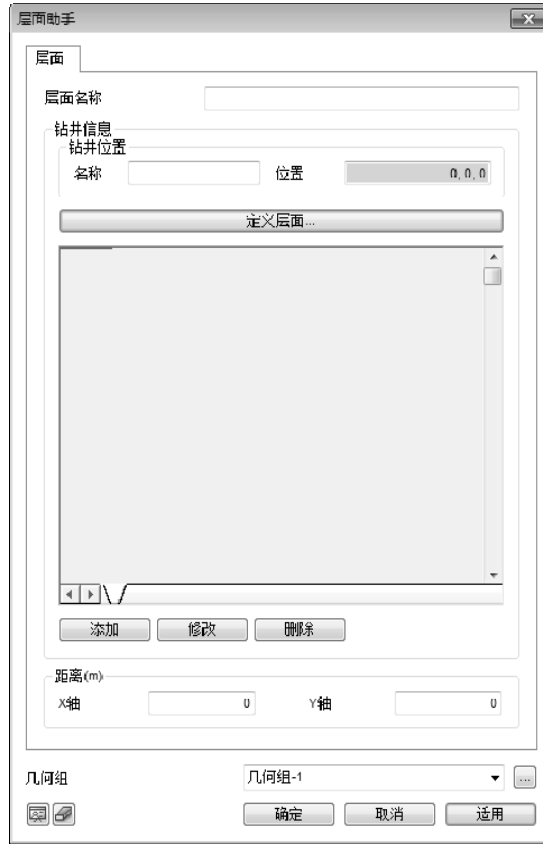


图 3-69 层面助手对话框

### 方法

定义层面名称并指定钻井名称和位置。点击添加按钮可以对每一个钻孔进行添加，并且每个层面的深度可直接输入。这些深度是相对整体坐标系输入并且按照地表面以下计算。例如，输入的地表面深度为-10m，土层为 30m，风化岩为 60m，则土层位于地表面以下 40m，风化岩位于地表面以下 70m。

钻井的位置和数量须为 1 或大于 3（含 3 个）以生成地层面。因此，采用多钻井生成面时，需要输入 3 个或 3 个以上。

通过隔开钻井线，并以一定的间隔距离建立地层面。

### 几何组

建立的层面和钻井线分别以面和线形状注册到模型目录树下的几何组中。用户可指定几何组的名称。

### 3.3 布尔运算

#### 3.3.1 实体

##### 概要

选择的形状进行布尔运算。



图 3-70 实体布尔运算对话框

##### 1. 并集

##### 方法

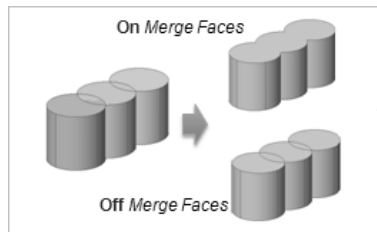


图 3-71 并集的示例

进行并集运算把所选的多个形状合并成一个形状。主要适用于实体对实体。把两形状合并成一个形状的过程中，各形状的外边界线保持不变。但是如果勾选了[合并面]选项，目标位置被定义为一个单独的面，并将边界线自动删除。

##### 2. 差集

##### 方法

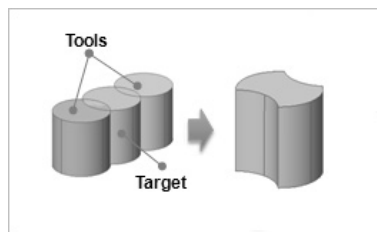


图 3-72 差集的示例

执行差集运算，删除目标形状与辅助形状重合的部分。通常用于实体对实体。

##### 3. 交集

##### 方法

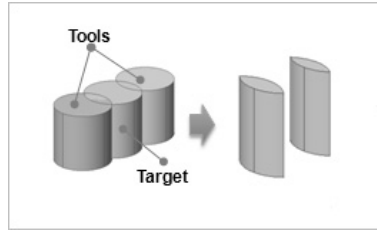


图 3-73 交集的示例

执行交集运算，除了重合的部分，删除所有形状上的其它部分。交集运算主要使用在实体对实体上。如果对两个面进行交集运算，可能会生成不恰当的形状。

#### 4. 嵌入

##### 方法

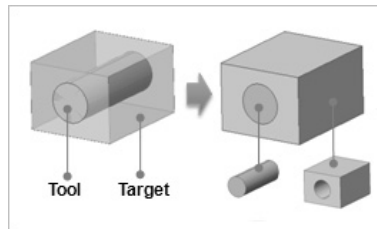


图 3-74 嵌入的示例

在目标形状中插入辅助形状。这个命令通常用于建模时目标形状内存在不同材料的情况下。目标形状和辅助形状首先进行交集运算后，在目标形状的内部插入交集运算后的结果形状。

##### 删除辅助形状

结束操作后，删除辅助对象。

##### 几何组

操作结束后的形状注册到几何组，用户可以给这个几何组命名。



(1) 建议以上操作不要应用到顶点或群上，因为可能会生成不正确的形状。

(2) 形状容差会显著影响并集、差集和交集运算。容差会决定一个形状是否与邻近形状相交。在复杂的建模过程中，误差可能会逐渐积累，最终导致操作不能连续进行。尤其是导入 IGES 文件后，由于缺少与容差有关的数据，可能会出现这个问题。因此，如果并集、差集和交集运算没有正确的执行，建议利用几何>布尔运算>面>缝合功能，修正错误后再重新执行操作。

### 3.3.2 面

#### 概要

选择多个独立面，合并生成一个面组。





图 3-75 面布尔运算对话框

## 1. 并集

### 方法

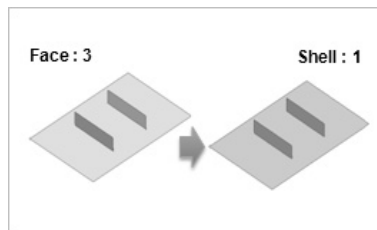


图 3-76 并集的示例

使用并集运算将不能执行缝合操作或重叠或相互贯通的面（面、面组）集合成一个面组。勾选[合并面]删除边界线并将各面合并成一个面。



面之间由边线连接在一起时虽然可以使用并集功能组成面组，但是时间较长，且使用比较多的并集计算可能会使形状不是很稳定，对后续的建模产生影响，此时尽量使用缝合（Sew）功能。

形状之间没有通过边界线连接而是重叠或贯通时，无法使用缝合（Sew）操作，即使加大容差（Tolerance）也无法缝合，这时应当使用并集功能生成面组。

分离的面无法进行并集操作。并集运算后面将被分割后组成面组，各面将成为面组的子形状（Sub-Shape）。当贯通部分非常小时，会产生细长的子形状面，此时尽量使用删除子形状（Remove Sub Shape）功能在形成的面组中删除一定尺寸以下的子形状。

## 2. 缝合

### 方法

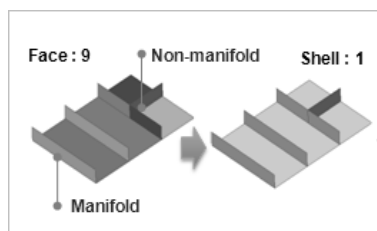



图 3-77 缝合的示例

选择多个独立的面（面、面组）捆绑成一个面组。这个功能在面（面、面组）不重叠，且边界线连接时使用。

[误差]：是指缝合操作中使用的允许极限。如果所选面的外边线间隙在容差范围内，就可生成一个没有自由边的独立面组。

勾选[非流线形]选项时，缝合由 3 个或 3 个以上面共享一条边的非流线形面。如果不使用这个选项，非流线形面不会缝合。

选择[生成实体]选项时，如果生成的面组完全封闭，自动将封闭的面组转换成实体。

点击预览按钮，选择的形状（面、面组）显示执行缝合操作后的结果。这时用深红色显示的部分是超出容许极限不能执行缝合操作的自由线部分。在这种情况下，逐渐的提高容许极限，反复预览，直到不出现自由线。点击确认或适用，生成包含自由线的面组。

需要注意的是使用过大的误差时，可能会生成非正常的形状。

<即使调整误差也不能缝合的情况>

（1）缝合位置有重叠面。

（2）如果有无法缝合的面，先对其它面进行缝合，重新生成无法缝合的面后再进行缝合操作。

（3）不删除自由线的情况下也可以进行缝合操作。这种情况下，在后续的单元网格划分阶段中在自由线上指定种子，在生成单元网格后执行节点合并工作即可。

（4）使用几何>曲面与实体>合并面线功能修改面，使相邻的面都按相同长度的线连接。此时可不做缝合操作，使用相同的网格尺寸生成网格后利用合并节点（Merge Nodes）功能连接。

缝合后有可能有些面无法消隐（Shading）显示。这是因为原面与相邻面在缝合过程中存在有问题造成的。此时可使用修补工具（Repair Factory）修改问题面再进行缝合操作，或者缝合后利用删除子面（Remove Sub-face）功能在面组中删除不好的面，然后重新生成面。

## 3.4 分割

### 3.4.1 实体

#### 概要

分割实体。



图 3-78 分割实体对话框

#### 方法

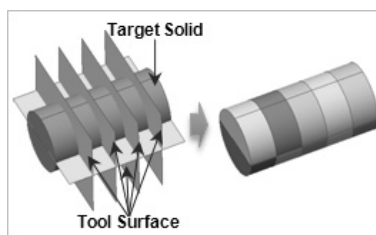


图 3-79 分割实体的示例

选择要分割的目标实体，以辅助面的分割实体。

可以按如下三种方式设定辅助面。

[选择辅助曲面]: 直接选择用于分割实体的面。想使用由多个面分割时，可以将面捆绑成一个面组来完成正确的分割。

[3点平面]: 用一个无限大平面来分割实体，平面通过3点坐标来定义。3点的坐标可以直接点击工作窗口输入。

[分割平面]: 通过与整体坐标系 (GCS) 相关的工作平面来分割目标实体。

#### 分割相邻面

对于多个相邻实体的表面时，可能只有这些实体的一部分需要被分割。在这样的情况中，相邻实体所对应的表面也会被分割。通过分割相邻实体上对应的表面，这些表面上的节点可以实现分割实体与相邻实体的节点耦合。

### 删除原形状

删除分割前使用的所有原形状。

### 删除辅助形状

在分割操作之后删除辅助形状。

### 几何组

把生成的实体注册到几何组，用户可以给这个几何组命名。

## 3.4.2 面

### 概要

用任意的线或面分割多个面。



图 3-80 面分割对话框

### 1. 用线分割

#### 方法

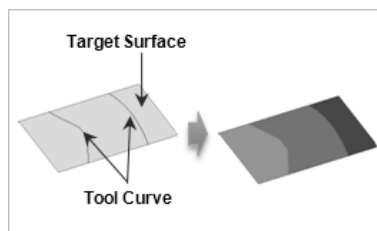


图 3-81 用线分割面的示例

选择要分割的目标面（面、面组），选择用于分割的线。这时如果辅助形状由多条线组成，把多条线合并为一条线会更便于分割操作。

如果目标面与辅助线不在一个平面，则通过投影辅助线来分割目标面。这时用户必须定义投影方向。可以用下列 4 种方式指定方向。

[选择方向]：直接定义辅助线的投影方向。可以选择基准坐标轴、基准面、面和线。

[2 点矢量]：输入起点和终点的坐标来定义用于投影基准轴的方向矢量。起点和终点也可以直接点击工作窗口指定。

[线上的点（比率）]：从辅助线上任意点到目标面的最短距离定义投影方向。定义 0 到 1 之间的比率值从起点到终点来确定辅助线上的任意点。

[最短距离直线的方向]：以辅助线到目标面的最短路径投影辅助线。

### 分离被分割的面

勾选这个选项，面组分成面。

## 2. 用曲面分割

### 方法

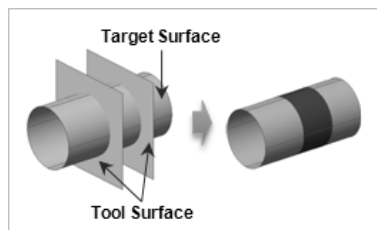


图 3-82 用面分割面的示例

选择分割目标的面（面、面组），选择用于分割的曲面。分割辅助面可以直接选择曲面指定，也可以指定三点坐标的无限大平面。

### 分割相邻面

对于多个相邻实体的表面时，可能只有这些实体的一部分需要被分割。在这样的情况中，相邻实体所对应的表面也会被分割。通过分割相邻实体上对应的表面，这些表面上的节点可以实现分割实体与相邻实体的节点耦合。

### 删除原形状

删除分割前使用的所有原形状。

### 删除辅助形状

在分割操作之后删除辅助形状。

### 几何组

把生成的面注册到几何组，用户可以给这个几何组命名。



在导入的几何体数据文件上进行分割操作时，有时会失败。此时可使用下列方法：



---

(1) 辅助线完全横穿要分割的目标形状时，使用印刻功能可以得到与分割类似的效果。

## 3.5 延伸

### 3.5.1 扩展

#### 概要

按直线方向扩展几何形状（面、线）生成实体、面。这时如果使用面就可以生成实体，使用线就可以生成面。

特别的，也可通过闭合的线或闭合的线组生成实体。



图 3-83 扩展对话框

#### 方法

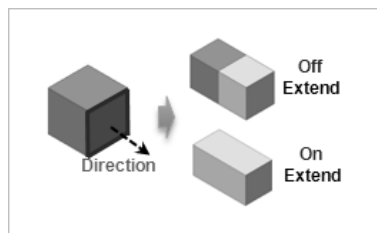


图 3-84 扩展的示例

选择用于扩展直线操作的几何形状（面、线）后，输入要扩展的方向和长度。

要扩展方向时可以按如下三种方式之一指定。

[选择方向]：定义所选截面的扩展方向矢量。可以选择基准坐标轴、基准面、面和线。

[2 点矢量]：输入起点和终点的坐标定义用于扩展的方向矢量。也可以直接点击工作窗口指定起点和终点。

[轮廓法线]: 当扩展的截面可以定义法线方向时, 可在扩展截面的法线方向执行扩展。扩展截面为多个时按各自的法线方向扩展。用于扩展的截面选择曲面或直线时, 不能确定法线方向且无法扩展。

[长度]: 只能输入正值。如果要扩展的方向为反方向时, 勾选[反向]选项扩展。

选择的扩展方向具有长度时(选择直线或指定2点矢量的情况), 点击右侧“<”按钮就会自动计算扩展长度。

### 实体

用闭合线生成实体时使用。要注意没有闭合的线或线组的情况下用这个选项, 虽然不会发生错误, 但可能会生成不正确形状。

[合并]

利用实体间的并集功能, 扩展形状与原形状进行合并。

[截断]

利用实体间的差集功能, 原形状与扩展形状进行差集。

### 几何组

使用扩展生成的几何形状注册到几何组, 用户可以给这个几何组命名。

## 3.5.2 旋转

### 概要

旋转几何形状(面、线)分别生成实体、面。这时, 使用面可以生成实体, 使用线可以生成面。

特别的, 也可通过闭合的线或闭合的线组生成实体。

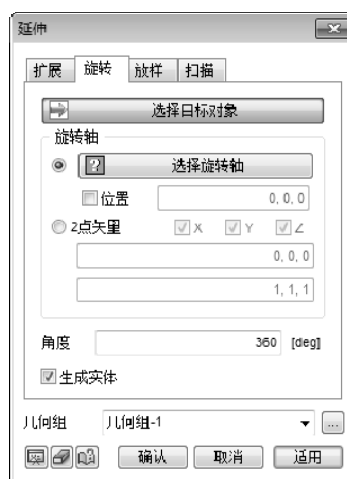


图 3-85 旋转对话框

### 方法



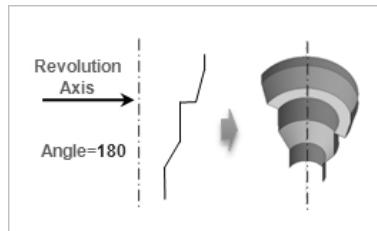


图 3-86 旋转对的示例

选择用于旋转操作的几何形状（面、线）后定义旋转轴和角度。

旋转轴的情况下可以按如下二种方式中之一指定。

[选择旋转轴]：定义截面旋转的轴线。可以选择基准坐标轴、基准面、面或线。勾选[位置]可以直接定义旋转轴的基准点位置。如果输入基准点位置，旋转轴就会移动到指定位置。

[2 点矢量]：输入起点和终点的坐标来定义用于旋转的基准轴方向矢量。起点和终点可以直接点击工作窗口指定。

### 实体

用闭合线生成实体时使用。要注意没有闭合的线或线组的情况下用这个选项，虽然不会发生错误，但可能会生成不正确形状。

### 几何组

把使用旋转生成的形状注册到几何组，用户可以给这个几何组命名。



在生成旋转体的二维或三维网格时，在旋转轴附近许多网格会共享同一顶点，其他顶点有时也会产生类似的现象。在曲面上划分网格时也会出现。

这样的现象在几何体中是无法解决的，只有在划分网格后，通过删除或合并节点编辑。

## 3.5.3 放样

### 概要

按顺序选择已定义的轮廓生成面组或实体，也可选择使用 B 样条曲线或直线连接生成形状。

特别的，也可通过闭合的线或闭合的线组生成实体。



图 3-87 放样对话框

### 方法

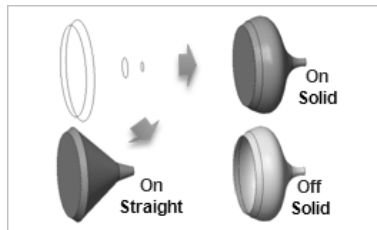


图 3-88 放样的示例

选择要执行放样的形状。这时根据指定的顺序选择方法应当不同。顺序可以按[建立], [选择], [矢量]方式选择。

[建立]: 一次选择多个轮廓线, 程序会根据生成顺序生成形状。

[选择]: 选择轮廓线时用鼠标逐个选择, 按选择的顺序生成形状。

[矢量]: 一次性地选择多个截面后, 根据截面轮廓线在指定的向量方向顺序排序。通过 2 点矢量输入 Pt1 和 Pt2 定义方向矢量的坐标, 也可以用捕捉输入坐标。

### 实体

[生成实体]: 选择该选项就会使用闭合的线生成实体。

用闭合线生成实体时, 要注意没有闭合的线或线组的情况下用这个选项, 虽然不会发生错误, 但可能会生成不正确形状。

### 直线

[直线]: 选项是用直线而不是用曲线连接截面生成目标形状。

### 几何组

将放样命令生成的几何形状注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。



(1) 如果线或线组即使闭合也不能生成平面形状时, 就是使用[生成实体]选项也不能生成实体。

这时，最好是生成各面后经过缝合操作（几何>布尔运算>面>缝合）生成实体。

(2) 有时，在放样后生成扭曲形状的情况。这是因为作为截面轮廓线的线或线组的方向不一致。

### 3.5.4 扫描

#### 概要

沿导向扩展选择的轮廓线、面来生成面、面组或实体。

按面可以生成实体，轮廓线和线组可以生成面组，用线可以生成面。闭合的线或线组可生成实体。



图 3-89 扫描对话框

#### 方法

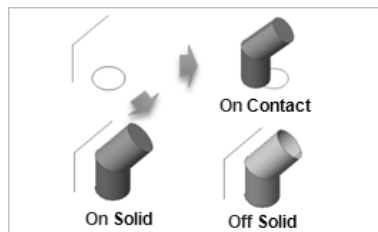


图 3-90 扫描的示例

选择要扫描的截面形状后，选择沿导向线，生成形状。

[比例缩放]：勾选的情况下，可以输入比例大小，对扫描的末端的截面大小按原来形状的大小比例缩放。

[生成实体]：勾选的情况下，截面为闭合形状时会生成实体，否则可能生成不正确的形状。

[正交]：勾选时把所选的截面旋转，使之与导向线正交，执行扫描。

[关联]：勾选的情况下，把选择的截面移动到导向线处执行扫描。

#### 几何组

把由扫描生成的几何形状注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。



扫描轮廓的中心在导向曲线上时生成的形状最好。

有时即使线组或线是闭合的，也不能生成平面的形状时，勾选实体选项也不能生成实体。此时可将各面缝合（Sew）后使用几何>子形状>超级形状>面组—>实体功能再生成实体。

使用预览功能先查看要生成的形状，首先要确认要生成的目标形状，当形状不正确时，调整扫描模式和转换模式后再进行扫描。

因扫描功能的各种特点，用户可能得不到期望的结果。这种情况下，可按照沿导向线用扫描复制功能（几何>转换>移动/复制>扫描复制）复制目标轮廓线后，用放样（几何>延伸>放样）也可以得到一致的结果。

## 3.6 转换

### 3.6.1 移动

#### 概要

以指定距离平移目标形状，平移与目标类型无关。勾选[复制]选项可保留原目标，只移动复制的对象。



图 3-91 移动对话框

#### 方法

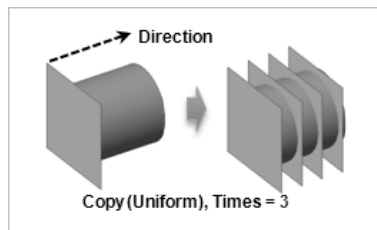


图 3-92 移动的示例

选择执行移动操作的形状后需指定方向。移动方向可以按如下二种方式之一指定。

[选择方向]：指定用于平移目标的方向矢量。可以选择基准坐标轴、基准面、面或线。

[2 点矢量]：输入起点和终点的坐标，指定用于移动的方向矢量。也可以直接点击工作窗口指定起点和终点。

移动/复制目标形状的方法有[移动]，[复制（均匀）]，[复制（非均匀）]。

[移动]

按指定的距离移动目标形状。

[复制（均匀）]

重复命令被激活，按输入的重复个数反复移动，复制目标形状。

[复制（非均匀）]

用空格或逗号（,）指定一系列移动复制的距离。如果距离重复，输入数字@距离（例如：2,3,4,4,4或2 3 3@4）。

### 距离

如果选择的方向具有有限长度（当选择一条直线段或选择2点矢量时），当点击“<”按钮时，会自动计算选择方向的长度。

### 几何组

将使用移动命令生成的形状注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.6.2 旋转

### 概要

旋转或复制目标形状。旋转操作与目标类型无关。勾选[复制]选项以保留原目标，只旋转复制的对象。



图 3-93 旋转对话框

### 方法

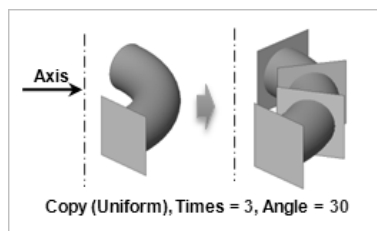


图 3-94 旋转的示例

选择用于旋转的形状后需指定旋转轴。旋转轴可以用下列二种方式之一指定。

[选择旋转轴]：指定要旋转截面的旋转轴。可以选择基准坐标轴、基准面、面或线。勾选[位置]可以直接指定旋转轴的基准点坐标。如果输入位置，旋转轴就会向输入值的位置移动。

[2 点矢量]: 输入起点和终点的坐标, 指定旋转轴的方向矢量。可以直接点击工作窗口来指定起点和终点。

旋转/复制目标形状的方法有[移动], [复制 (均匀)], [复制 (非均匀)]。

[移动]

直接输入角度使之旋转移动。

[复制 (均匀)]

重复选项被激活, 按输入的重复数反复旋转, 复制选择的目标形状。

[复制 (非均匀)]

用空格或逗号(,)指定一系列移动复制的距离。如果角度重复, 输入数字@角度(例如: 10,20,25,25,25 或 10 20 3@25)。

几何组

把旋转生成的形状注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

### 3.6.3 镜像

概要

镜像目标形状, 操作与目标类型无关。用[复制对象]选项保留原目标, 镜像得到目标对象。



图 3-95 镜像对话框

方法

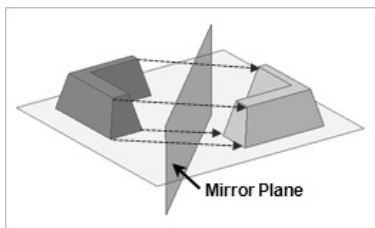


图 3-96 镜像的示例

选择用于镜像操作的形状，选择类型镜像形状。

镜像类型有[顶点]、[轴]、[平面]。

[顶点]：以选择的顶点为基准，进行镜像。镜像点可以直接在工作窗口上点击或勾选“坐标”选项直接输入镜像点的坐标。

[轴]：以选择的轴为基准进行镜像。镜像轴可以直接在工作窗口上点击选择，或勾选 2 点矢量输入起点和终点的坐标来指定用于镜像基准轴的方向矢量。

[平面]：以选择的面为基准镜像面。镜像面可以直接在工作窗口上点击选择，或勾选 3 点平面，输入的三点坐标定义镜像面。

### 几何组

把镜像命令生成的形状注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.6.4 比例缩放

### 概要

以缩放中心为基准放大或缩小目标。比例缩放与目标类型无关。使用[复制对象]选项保留原目标形状。



图 3-97 比例缩放对话框

### 方法

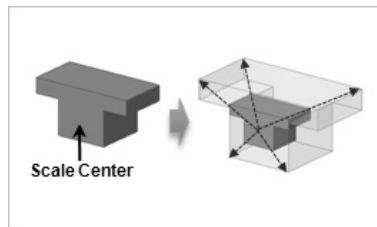


图 3-98 比例缩放的示例

选择进行比例缩放的形状，输入缩放的基准点坐标。

比例缩放的方式有[均匀]，[非均匀]。

[均匀]：所有轴都采用统一的缩放系数。



[非均匀]: 各轴方向（以整体坐标系基准）可以用不同的缩放系数。

### 几何组

把比例缩放命令生成的几何形状注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

## 3.6.5 扫描复制

### 概要

沿导向线复制目标形状，扫描复制操作与形状类型无关。



图 3-99 扫描复制对话框

### 方法

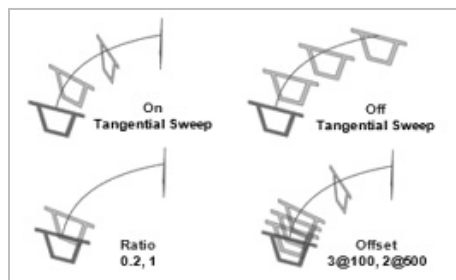


图 3-100 扫描复制的示例

选择要扫描复制的形状，选择导向线（线组或线）来复制目标形状。

勾选[反向]可以沿导向线反方向复制。

扫描复制方式有[偏移]，[比率（0~1）]，[分割数量]。

[偏移]: 指定偏移间距输入复制间距。如果输入的复制间距大于导向线的长度，目标形状在导向线的末端就不再移动。

用空格或逗号“,”输入多个复制间距的情况下，可以移动复制多个形状。

[比率 (0~1)]: 在导向线上指定比率输入复制间距。导向线的起点比率为 0, 终点比率为 1。在输入多个比率的情况下, 可以复制移动多个形状。

[分割数量]: 指定导向线的分割数量, 按分割数量以相同间距分割导向线。

在扫描复制模式下, 如果勾选[保持角度]选项, 就会根据导向线的曲率, 再移动/复制目标形状。如果勾选[关联]选项, 目标形状就会移到导向线的起点 (默认) 后再复制。

### 选择基准顶点

选择“保持角度”和“关联”选项时需设置基准顶点。基准点为选择要扫描复制形状的起点。

### 建立放样形状

根据曲率的变化非连续 (数值不稳定) 导向线生成形状时, 可作为代替放样功能使用。

### 几何组

把使用扫描复制生成的几何形状注册到几何组, 用户可以为这个几何组命名。

## 3.6.6 投影

### 概要

投影已选择的形状。可[曲线到曲面]、[顶点到曲线]、[顶点到曲面]方式投影。



图 3-101 投影对话框

### 1. 曲线到曲面

#### 方法

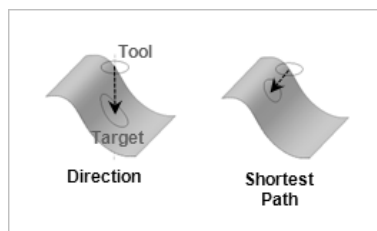


图 3-102 曲线到曲面投影的示例

选择要投影的目标面，选择投影辅助线。

投影方向可以按如下四种方式设定。

[选择方向]：指定投影方向矢量。可以选择基准坐标轴、基准面、面或线。

[2 点矢量]：输入起点和终点的坐标，指定用于投影基准轴的方向矢量。也可以直接点击工作窗口指定起点和终点。

[线上的点（比率）]：选择线上的一点。按选择的点到目标面的最短距离方向投影。

[最短距离直线方向]：按辅助形状到目标形状的最短距离方向投影。

## 2. 顶点到曲线

### 方法

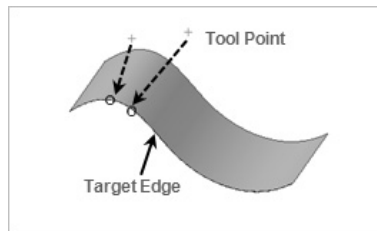


图 3-103 顶点到曲线投影的示例

选择成为投影目标的线和辅助点，把点投影到线上。投影选择的点垂直于线的方向投射。

## 3. 顶点到曲面

### 方法

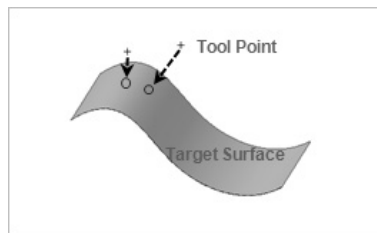


图 3-104 顶点到曲面投影的示例

选择成为投影目标的面（面组或面）和辅助顶点，将点投影到面上。选择的点垂直投影到面上。

### 仅投影到最近目标

因为在选择的方向上将无限投影，所以当目标形状为曲面或面组时可能会在目标形状投影两次以上，勾选该项时将仅向最近的目标位置投影。

### 几何组

把生成的线或点注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。



这个功能没有将顶点投影的同时生成直线的功能，可使用将顶点印记（Imprint）的同时生成直线

的功能。

### 3.6.7 粘贴

#### 概要

把辅助形状粘贴到目标形状上。选择的目标形状以最短距离连接。

有两个以上目标形状时，辅助形状会粘贴到与之最近的目标形状上。



图 3-105 粘贴对话框

#### 方法

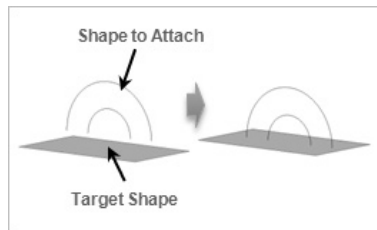


图 3-106 粘贴的示例

选择要粘贴到目标形状的辅助形状。可以选择任何独立形状。

用户可以选择粘贴方向[X-方向]、[Y-方向]、[Z-方向]。

## 3.7 子形状

### 3.7.1 超级形状

#### 概要

选择目标形状使之生成单独的实体和群。



图 3-107 超级形状对话框

#### 1. 面组—>实体

##### 方法

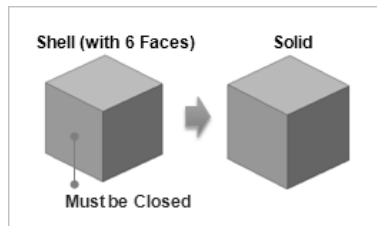


图 3-108 面组生成实体的示例

选择闭合的面组或面，执行操作后自动填充内部生成实体。

#### 2. 群

##### 方法

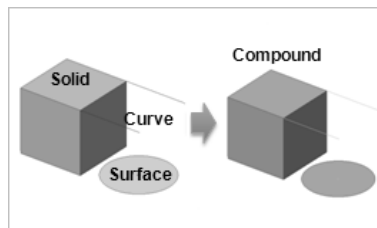


图 3-109 生成群的示例

群是指很难用一个形状（点、线、面、实体）定义的几何组合。选择多个几何形状可以生成群。

通过几何建模过程中的操作，当单一的几何形状分解成两个形状时，此时两个形状形成一个群。例如，如果删除了一个立方体的 4 个侧面，剩下的顶面和底面彼此完全分离，但是这两个面作为一个群存在。

当形状不能连接，但需要被组成单一组合时，也能生成群。例如，对彼此分离的两个实体进行并集的结果就是生成了一个群。

因此，如果群是在建模的过程中生成的，有必要确认是否存在没有连接的几何形状，经过分解命令找出问题。

### 3.7.2 移除

#### 概要

从选择的面组或实体中删除需要移除的外表面。

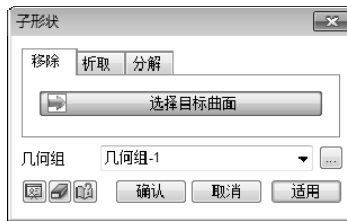


图 3-110 移除对话框

#### 方法

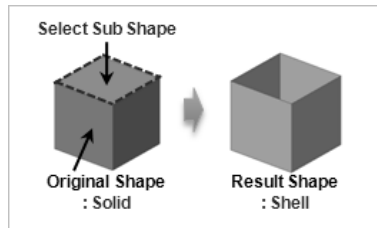


图 3-111 移除实体的面的示例

选择要移除的面后点击[确认]或[适用]按钮移除相应面。实体时如果移除了实体的表面，实体就转换成面组。如果移除了面，就会剩下组成面的线。

#### 几何组

把生成的形状注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。

### 3.7.3 析取

#### 概要

析取目标形状（面，线或点），生成独立的形状。



图 3-112 析取对话框

### 方法

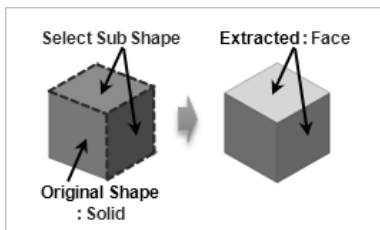


图 3-113 析取的示例

选择要析取的几何形状（面、线、点）。可以从实体形状上析取面，从面上析取线，从线上析取点。如果析取的形状在容差内时勾选[并集]，可以合并成一个独立形状。例如，析取相连接的面，如果所选面的边线间隙在误差内，会建立成没有任何自由边的独立面。

### 几何组

把生成的形状注册到几何组。用户可以为这个几何组命名。



在建模过程中需要使用面的边线时，利用分解面功能，生成边线，但将删除面；如果使用析取功能，不删除面也能生成边线。

## 3.7.4 分解

### 概要

把选择的形状分解成子形状。



图 3-114 分解对话框

### 方法

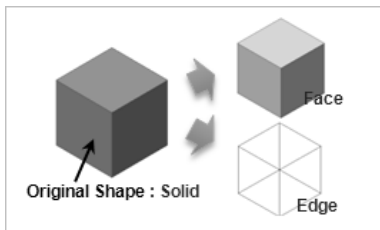


图 3-115 分解的示例

选择形状后设置分解等级，按子形状分解。

分解等级有[子形状]、[实体]、[面组]、[面]、[线组]、[线]、[顶点]。

分解的目标的形状只适用于高一级的个体。实体时只能按实体下一级的子形状[面组]、[面]、[线组]、[线]或[顶点]分解。

[子形状]选项是将形状按等级分解生成下一等级子形状。

群是简单的几何组合，如果选择[子形状]，就会分解成群（Compound）包含的各个独立形状。



各形状从上级到下级的阶段顺序是[实体]>[面组]>[面]>[线组]>[线]>[顶点]。

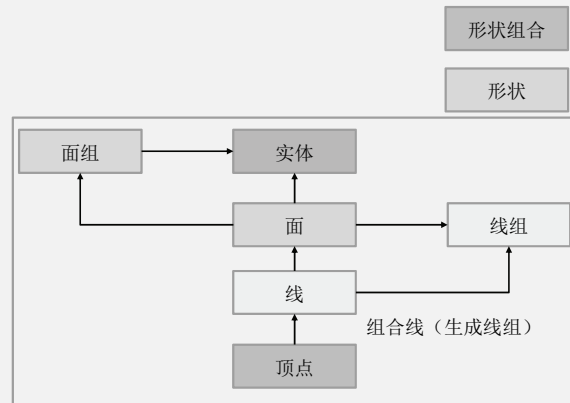
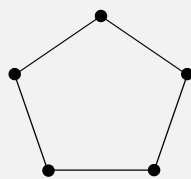


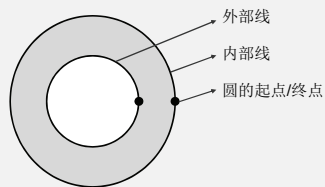
图 3-116 分解的示例

由面和实体组成的形状举例如下。

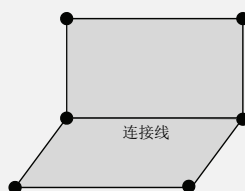
表 3-2 形状的组成说明



形状	面
子形状	线组 1 个
	线 5 个
	点 5 个

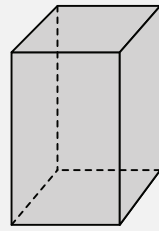


形状	面
子形状	线组 2 个
	线 2 个
	点 2 个



形状	面
子形状	面 2 个
	线组 2 个
	线 7 个
	点 6 个





形状	面
	面组 1 个
	面 6 个
子形状	线组 6 个
	线 12 个
	点 8 个

## 3.8 删除

### 3.8.1 面/线

#### 概要

自动查找选择指定形状并删除。

#### 方法

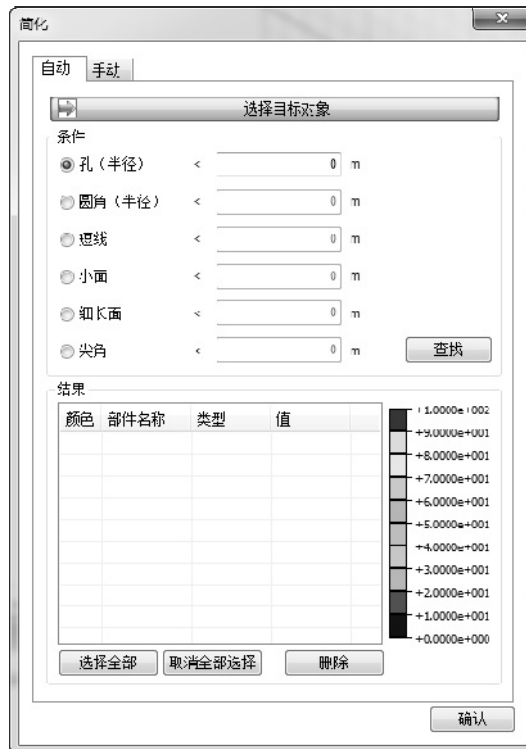


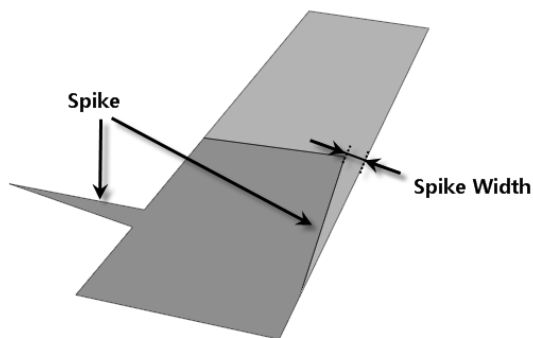
图 3-119 自动简化对话框

#### 选择目标对象

选择对象。选择对象后，在已选择的对象中查找满足条件的形状，未选择时检查整个模型。

#### 条件

- (1) 孔（半径）：输入孔的半径标准。
- (2) 圆角（半径）：输入圆角的半径标准。
- (3) 短线：输入短线的标准长度。
- (4) 小面：输入构成小面的最长边的长度。
- (5) 细长面：输入细长面的幅长。
- (6) 尖角：输入尖角最大宽度。(参考图片)



### 结果

输入已选条件的数值后点击查找键，满足条件的形状会形成列表。单击后会高亮显示该形状，双击后该形状会缩放合适位置后显示。

可以按名称、类型、值分类排序后查看，并在选择后移除。

**小体：搜索小实体。(该功能只能进行搜索)**

## 3.8.2 简化

### 概要

手动在选择的的面或线中搜索并删除小于输入的基准值的面积（面）或长度（线）的小面或短线。或者单独进行面的移除及合并，或对小体进行删除。



图 3-117 手动面/线简化对话框

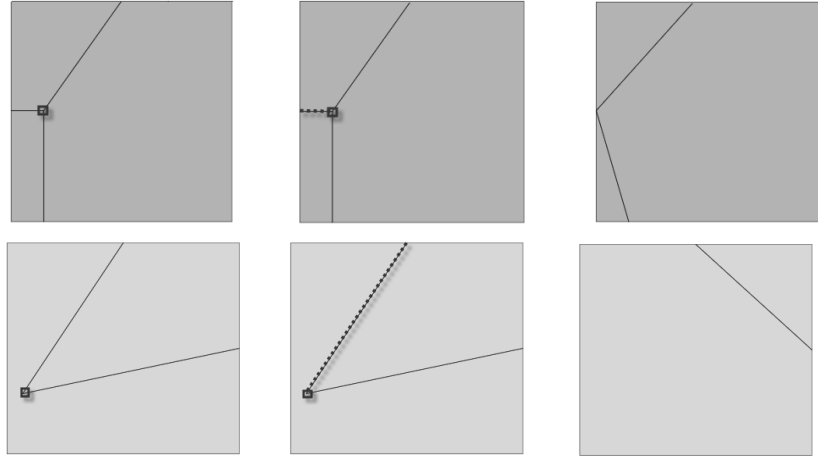
### 方法

选择特定的删除对象。选择后按 **移除/合并** 键删除，假如勾选“立即移除”选项时，会在选择对象的同时移除符合条件的对象。

### 选择目标对象

选择对象。选择对象时在已选择的对象中查找满足条件的形状，未选择时查找全部几何模型。

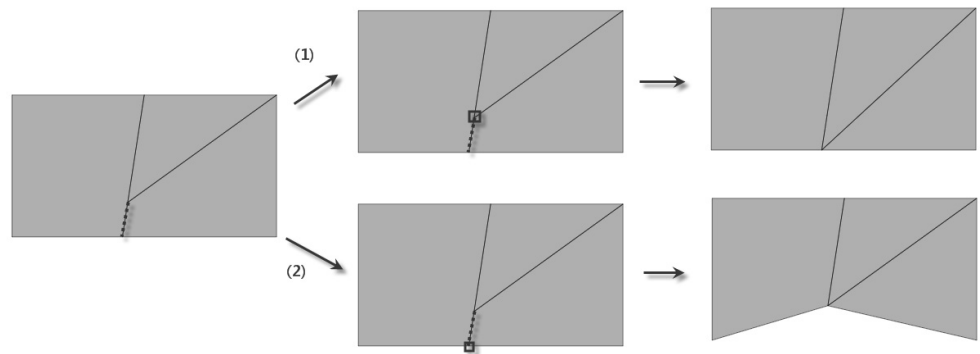
1. **移除顶点：**以顶点移除的最短距离方向缩减模型。将选择的顶点及其连接的最短线一并删除。(顶点和线会消失)



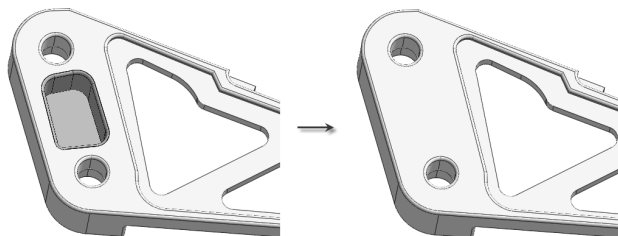
2. **移除边线：**以删除线的方式简化模型。

选择并删除任意与已选择的线连接的顶点。(线和顶点会消失)

(1)和 (2) 中选择任意一点，并删除顶点和线。



3. **移除面：**删除选择的面。



4. **合并面：**删除面之间的线后，合并面。

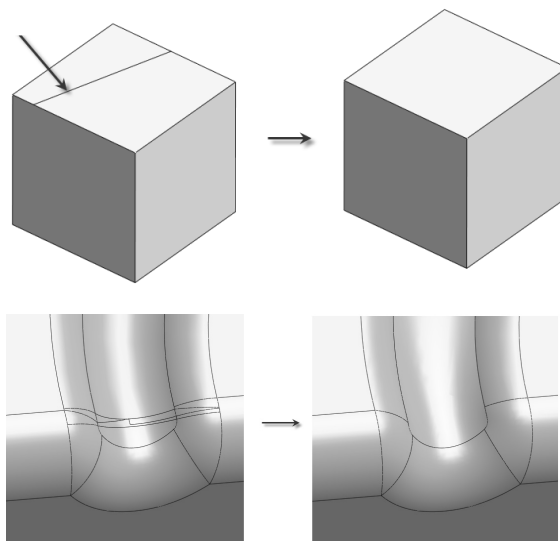


图 3-118 合并面实例

### 3.8.3 删除印刻

#### 概要

删除所选的几何形状内部存在的线或点。



图 3-120 删除印刻对话框

#### 1. 顶点

选择印刻生成的顶点后点击适用按钮，就会自动删除形状上的点。

#### 2. 线

选择目标面后，选择要删除的内部线。选择如下方法中的一种后点击“查找”按钮就会自动选择内部线。

[全部]: 选择可以自动选择的所有内部线。

[半径]: 输入半径，选择小于半径的全部内部线。可以适用于圆弧形态的内部线。

[长度]: 输入线的长度，选择小于长度的全部内部线。

[对角长度]: 输入边界框的对角线长度，选择小于对角线长度的对内部线。

## 3.9 工具

### 3.9.1 选项

#### 概要

设置程序的一般环境。

界面由一般、几何/网格/连接、荷载/边界条件和分析/结果组成。



图 3-121 选项设置对话框

#### 1. 一般

##### [一般]

(1) 应用：指定用户名称，用户公司，临时文件夹，自动保存文件及保存时间间隔。

(2) 许可证：程序注册授权。支持硬件锁认证（单机硬件锁认证和网络硬件锁认证）和网络认证。

(3) 单位系统：为分析指定力/长度/时间单位系统。也可以在分析前后，使用程序主窗口底部的单位转换器转换单位。

##### [图形]

(1) 工作视图窗口：设置窗口相关选项。

① 设置鼠标操作以适用于三维 CAD 滚轮操作。

② 通过“平滑曲面渲染”可控制圆柱曲面的边线分布。有效级别有 1~5 级，级别越高代表的曲面质量和曲面光滑度越高。

(2) “动态视图窗口形状”可设置工作窗口内模型形状的显示方式。

① 选择：指定模型部分相关的设置，如几何轮廓类型等。

② 助手：指定窗口内显示内容，如栅格、坐标系显示/隐藏等。

③ 几何：指定几何类型的颜色。

④ 单元：指定单元类型的颜色。

⑤ 高级：调整图形设置的高级选项。可设置是否使用渲染并可设置渲染阴影，有效的阴影等级为1~5级，级别越高代表几何显示的阴影越暗。

## 2. 几何/网格/连接

[几何]

(1) 普通：调整对所有几何形状相关选项。

(2) 导入：设置导入选项。

[网格组]

(1) 普通：调整网格特性相关的基本选项。

(3) 尺寸控制：当使用网格播种功能时，可调整符号颜色。

(2) 荷载/边界条件

[坐标系]：指定坐标系符号的颜色，符号颜色1、2、3分别代表X轴、Y轴、Z轴的颜色。

[网格]：指定节点和单元号的文本尺寸。

[静力荷载]：指定静力荷载符号的尺寸和颜色。

[动力荷载]：指定动力荷载符号的尺寸和颜色。

[边界条件]：指定边界符号的尺寸和颜色。

## 3. 分析/结果

[分析]

(1) 线程数量：指定用于分析的线程数量。对于双核处理器，则输入2个线程；对于四核处理器，则输入4个线程来提高分析速度。

(2) 单元处理方式：指定单元处理方式。

在速度方面，按照减缩（有效）>标准（稳定）>混合（精度）的次序，可以获得更快的解决方案。在准确性方面，按照混合（精度）>减缩（有效）>标准（稳定）的次序，可以获得更准确的解决方案。

(3) 方程求解（结构）：指定方法求解有限元的联立方程。如果设置为自动，程序会自动决定以下方法之一：多波前、稠密矩阵、AMG（多重网格算法）。

(4) 2D 单元设置（结构）：[生成单一的曲面法向]功能可以判断两个相邻壳单元的不同法向的夹角是否大于输入的值。因为，单元尺寸相对大于曲率，这个数值对粗糙的曲面网格来说有所增大，而考虑几何形状曲率的光滑轮廓则可以计算。[考虑面内转动自由度]功能可以通过考虑面外轴（面内转动自由度）的旋转计算面内变形的刚度。

[结果]

(1) 一般：输入分析结果中极小且可以视为 0 处理的阈值。默认值是  $1e-12$ ，小于这个值的结果将被认为等于 0。

(2) 云图：确定表现分析结果的云图的各种设置。

(3) 矢量：显示矢量代表的结果，这里指定矢量的显示方式。

(4) 变形：指定基本设置来检查分析结果的变形形状。

(5) 无结果：指定如何在显示特定分析结果时表现为无结果实体。

(6) 一维单元结果图：确定一维单元结果的基本设置。

(7) 图形：选择是否显示图形。

(8) 动画：指定动画图片类型和文件的保存位置。

(9) 图例：指定背景颜色和窗口显示的结果条纹数量。

#### 4. 用户定义快捷键：

用户可以将常用的命令设置为快捷键。

### 3.9.2 地形数据生成器

#### 概要

地形数据生成器 (TGM) 可以用 CAD DXF 文件建立实际地形几何模型。在 GTS NX 中，首先用 CAD DXF 文件设定分析区域后，生成地层表面并保存为可以在 GTS NX 上调用的文件 (扩展名.tms)。

#### 方法

**步骤 1:** 工具>地形数据生成器>地形数据生成器。

调用功能，弹出 MIDAS/TGM 的对话框。

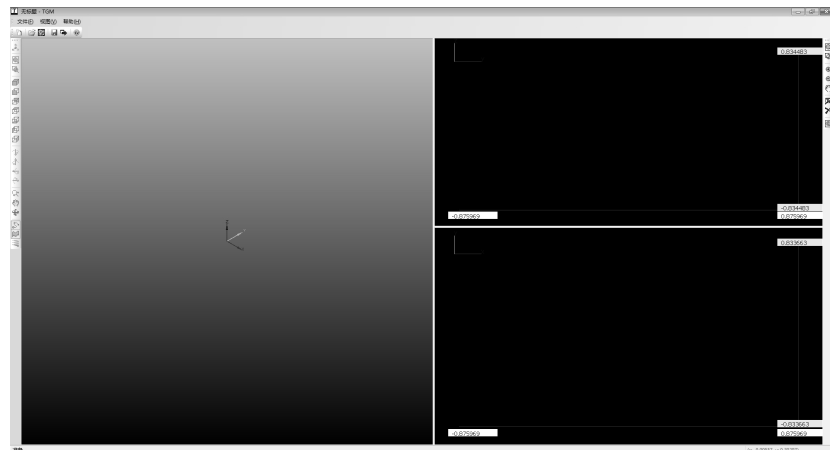


图 3-122 TGM 界面

**步骤 2:** 文件>导入 DXF...



导入需要使用的 AutoCAD DXF 文件。



图 3-123 TGM DXF 文件导入对话框


[可见图层]

仅指 AutoCAD DXF 文件包含的所有层中，地形形状上需要的部分。不使用的层拖放到不可见图层。

[不可见图层]

AutoCAD DXF 文件包含的所有层中，地形形状上不需要的部分。这部分不用于建立地形面。

**步骤 3:** 打开生成地形几何图形对话框

为了设定分析范围，把鼠标放到在平面图区域后，点击右侧工具框的地形几何图（）功能。

**步骤 4:** 设定分析区域



图 3-124 TGM 地形生成设置对话框

[基本云图]

在 XY 平面上拖动选择至少包含分析范围的区域范围。

[几何区域（矩形）]

在地形等高线的范围内，分析范围指定为矩形范围。角点 1、角点 2 是指定矩形范围的对角线方向的顶点。LX, LY 是指定范围的 X 方向和 Y 方向的长度。点击输出区域，输出平面图上指定的范围。

[取样点数量]

在指定的范围内，指定 X 方向和 Y 方向要取样的点的个数。

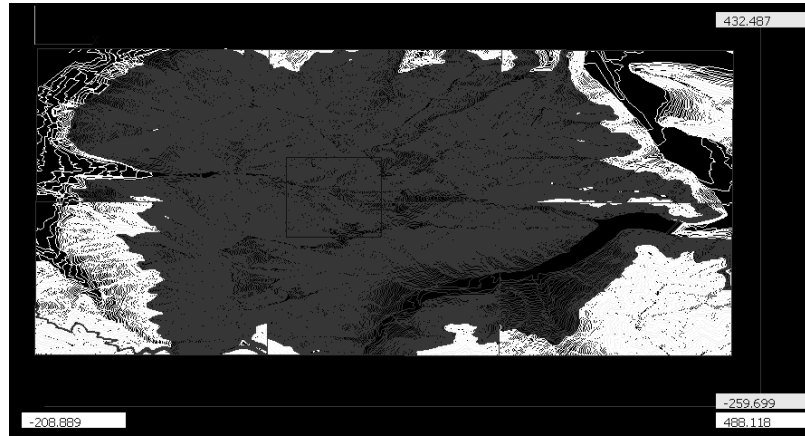


图 3-125 TGM 取样位置设置

#### 步骤 5: 确认几何模型

在模型显示窗口上确认几何形状。

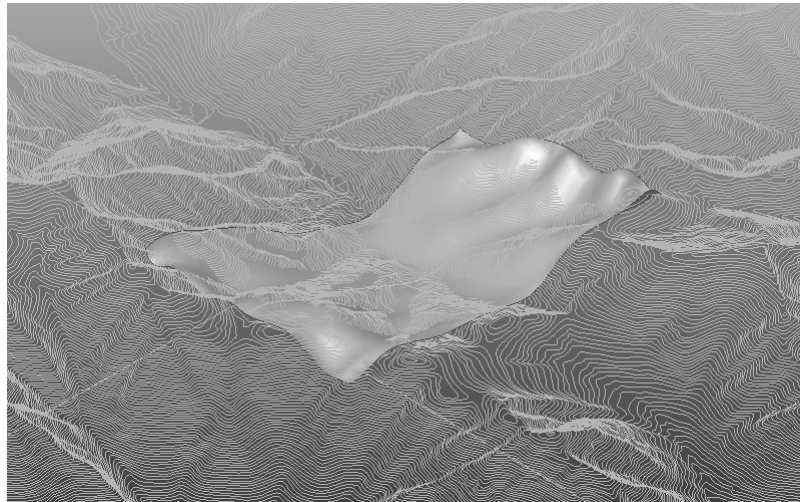


图 3-126 TGM 地形几何曲面生成的示例

#### 步骤 6: 导出曲面...

生成的地形曲面形状按可以在 GTS NX 上使用的曲面文件的形态 (.tms) 保存。

#### 步骤 7: 主菜单: 工具>地形数据生成器>导入 TMS 文件...

导入用 MIDAS/TGM 功能生成的 tms 文件。

### 3.9.3 线框—>实体

#### 概要

将 midas Civil 或 midas Gen 生成的线框数据转换成实体数据。



图 3-127 线框-实体对话框

### 方法

选择 midas Civil 或 midas Gen 生成的线框数据 (\*.mcs) 文件。基于所选的线框单元两端截面的多项式曲线而定义修匀内插（平滑）、线性内插（直线），自动的调用实体单元。

勾选建立网格时，转换的同会在实体上生成单元网格。

## 3.9.4 检查

### 概要

确认选择形状的详细信息。





图 3-128 检查对话框

## 1. 检查形状

### 方法

选择要检查的几何形状后选择检查形状命令，视窗上将显示相应信息。形状的信息也会在输出窗口内显示。

[自由线（红色）]

指形状的边界线，用红色线表示。

[流形线（绿色）]

指 2 个面相接的线，用绿色表示。

[非流形线（蓝色）]

指 3 个以上面连接的边。用蓝色表示。

[短线（橙色）]

小于长度误差的线，在视窗上用橙色表示。

[小面（黄色）]

小于面积误差的面，在视窗上用黄色表示。

## 2. 修复

自动改善并不规则和不精确的几何形状。

### 方法

选择对象，单击 **查找** 按钮会自动查找，显示错误形状的结果列表，选择列表项目后执行修复形状选项。

可以选择“几何整理”，“几何简化”，“拓扑优化”。

(1) 几何整理：修改无效几何形状

(2) 几何简化：修复不规则几何形状

B 样条曲面->平面、圆柱、球体、圆锥和圆环；

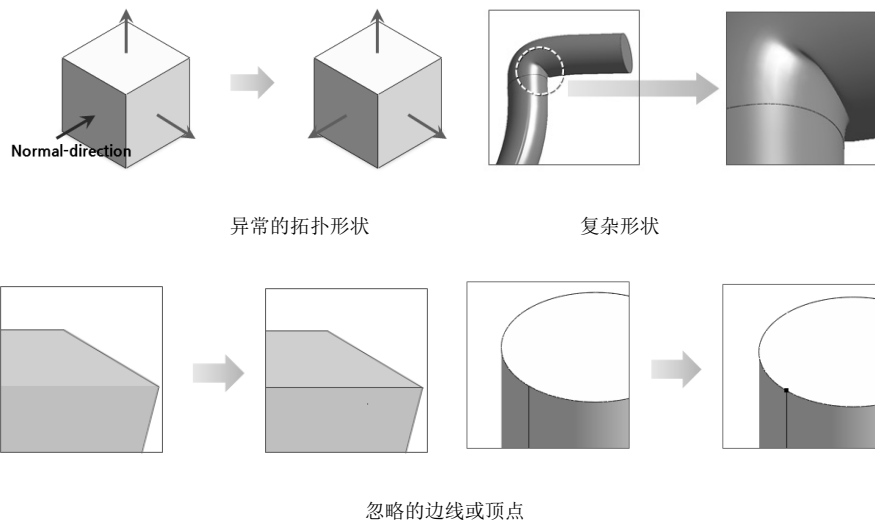
B 样条曲线->直线、圆和椭圆；

不规则几何形状->规则的形状和基本的形状；

(3) 拓扑优化：在创建网格时改善几何形状

简化几何并自动删除重复的线/面；

自动删除不需要的边线或顶点；



### 3. 检查重复

#### 方法

检查同一位置的重复形状。

[仅显示形状]

仅检查屏幕显示范围内的形状，与对象的显示/隐藏无关。

[检查重复顶点]

检查重复输入的顶点。只检查独立存在的点并用黄色显示。勾选[包含子顶点]时，对以子形状存在的点（例：立方体的顶点）也要进行重复检查。

[检查重复线/线组]

检查重复输入的线或线组。只检查独立存在的线或线组，用绿色显示。勾选[包含子边]时，对以子形状存在的边（例：四边形的边）也进行重复检查。

[检查重复面]

检查重复存在的面。只检查独立存在的面，重复的面用绿色线包围的橙色面显示。勾选[包含子面]时，对以子形状存在的面（例：立方体的一面）也进行重复检查。使用[完全相同的面]选项时只能勾选完整一致的面。一致的面是指外部边界存在的点的个数、点的坐标以及线的方向均一致的面。

[删除重复形状]

独立的形状重复存在时只留一个，剩下的重复形状全部删除，不删除子形状。



生成三维几何形状以后需要确认共享面。如果在非共享的实体上生成单元网格，就会存在自由面，在这种情况下执行分析就很难得到准确的结果。因此，这样的共享面可以通过检查形状>检查重复形状确认。如果在检查实体共享面之前，选择按“线”显示模式，更便于对对象的信息进行检查。

不能正常显示相互连接的形状的共享面时，可以通过布尔运算>实体操作后生成共享面。

#### 4. 边-区域

方法

检查选择线是否连接。在导入 CAD 几何形状时，这个功能可以方便地检查区域是否连接。

### 3.9.5 测量

概要

使用各种方法测量形状间的最短距离或角度。




图 3-129 测量对话框

方法

在窗口上选择形状的点、线、面等，可以测量距离或角度。

测量距离的方法有[顶点与顶点的距离]、[顶点与线的距离]、[顶点与面的距离]、[线与线的距离]、[线与面的距离]、[面与面的距离]，角度的情况有[三点角度]方法。



在定义捕捉功能（）上，选择检查操作中必要的捕捉，可以方便地在窗口上选择顶点。

## 第四章 网格

### 4.1 属性/坐标系/函数

#### 4.1.1 材料

##### 概要

定义岩土及结构的一般刚度及非线性材料特性。对于岩土材料，可以额外设置渗透属性及排水/不排水条件。



图 4-1 添加/修改材料对话框

##### 方法

[建立]: 添加岩土及结构材料。按如下 4 种类型的材料选择，模型类型可按材料类型设置。

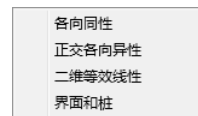


图 4-2 材料类型

各材料类型适用的模型类型如下。岩土及结构的材料特性和材料行为特性的定义要基于各模型类型。岩土建模采用的单元，如平面应变、实体等也可以分配到不考虑  $K_0$  影响和渗透特性的结构材料上。

表 4-1 材料类型说明

材料类型	模型类型	岩土材料	结构材料	材料行为特性
各向同性	弹性 Elastic	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	线弹性
	特雷斯卡 Tresca	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	弹塑性
	范梅塞斯 Von Mises	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	弹塑性
	莫尔-库伦 Mohr-Coulomb	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	弹塑性
	德鲁克普拉格 Drucker Prager	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	弹塑性
	霍克布朗 Hoek Brown	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	弹塑性
	非线性弹性 (邓肯-张) Hyperbolic (Duncan-Chang)	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	非线性弹性
	应变软化 Strain Softening	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	弹塑性
	修正剑桥粘土 Modified Cam Clay	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	弹塑性
	Jardine	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	非线性弹性
	日本中央电力研究所模型 D-min	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	非线性弹性
	修正莫尔-库伦 Modified Mohr-Coulomb	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	弹塑性
	用户定义模型	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	弹塑性
正交各向异性	横观各向同性 Transversely Isotropic	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	线弹性

	节理岩体 Jointed Rock Mass	○	○	弹塑性
二维等效	2D 等效线性	○	○	(等效) 线弹性
	界面	×	○	弹塑性
界面/桩界面	壳界面	×	○	弹塑性
	壳界面的用户设定行为	×	○	弹塑性
	桩界面	×	○	非线性弹性

[各向同性]: 各向同性材料是任意方向的具有相同性质的材料, 用于定义大部分的线弹性/非线性弹性/弹塑性等材料的特性。

[正交各向异性]: 自然岩土一般为层状且倾斜, 这导致在正交方向上可能有不同的强度。如节理岩体, 材料属性的定义是基于因特定的限制条件而不同的方向和行为。

[二维等效线性]: 是二维等效线性分析的专用模型。基于等效线性化方法, 使用收敛强度和阻尼比来考虑材料的非线性和非弹性行为。

[界面/桩界面]: 适用于模拟结构和岩土之间相对行为 (界面行为)。

[修改/复制/删除]

修改添加材料的参数。添加各种材料时, 只改变某些参数, 可以使用复制功能。

[导入/导入 Excel/导出到 Excel]

从已定义材料/属性的其它模型文件中导入材料特性, 可用于分析相似条件下的项目。选择导入功能时, 会弹出包含所有材料的列表, 用户可选择需要导入的材料。



图 4-3 导入材料对话框

除此之外, 用户可通过导出或导入包含材料特性的 Excel 文件, 建立经常使用的材料 DB。

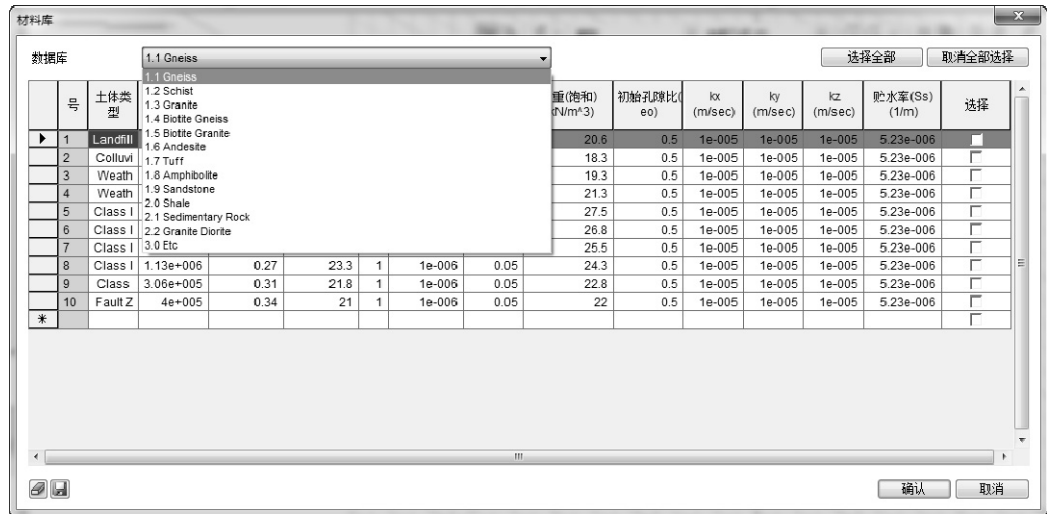
[重新编号]

修改材料的编号。需要反复添加/删除时, 编号会按最近添加的编号+1 自动设置。

[数据库]

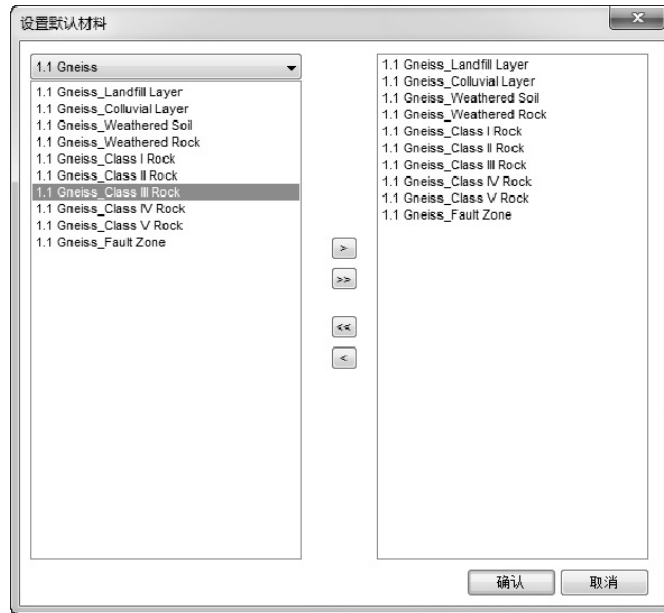
为了方便输入经常使用的材料, 提供具有代表性的材料基本数据。文件在 C:/Program Files/MIDAS/GTS NX/DBase 文件夹中以 \*.gdb 格式保存。





工具>选项





设置新建文件使用常用材料的选项。

为了理解有限元公式及屈服形状，请务必参考理论分析手册第 4 章。各材料模型的输入参数及行为特性如下。

### 4.1.2 一般材料（行为特性）

#### 1. 弹性 Elastic

最简单的模型是应力与应变直接成比例的线弹性模型。比例常数是弹性模量（ $E$ ）和泊松比（ $\nu$ ）。

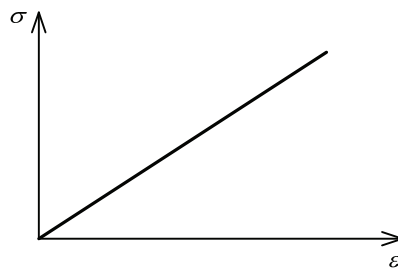


图 4-4 线弹性本构曲线

由于线弹性模型没有定义屈服值，因此其计算的应力及应变可能非常不符合实际。因此，在一般性分析的情况下，推荐使用莫尔-库伦 Mohr-Coulomb 或者其它非线性材料模型。但是，这个模型适用于较岩土材料强度大得多的混凝土或钢材结构。

#### 2. 特雷斯卡 Tresca

Tresca 准则一般用于模拟金属材料的屈服。在岩土工程中，多用于模拟不排水岩土材料的材料行为。该模型不考虑静水压力对屈服面的影响，对于土体材料来说：第一，剪切强度与静水压（或围压）无关的假设是与一般土的行为不符；第二，在准则中抗压强度和抗拉强度相同，但根据试验结果，土体的抗压强度明显大于抗拉强度，有时甚至忽略抗拉强度。

但是，饱和土的不排水条件下进行总应力分析时（该类型的分析称作  $\phi=0$  分析），即使使用 Tresca 破坏准则也能得到恰当的结果。根据试验结果，不排水条件下，饱和土的剪切强度与静水压成分无关，可以使用 Tresca 破坏准则模拟。在这种情况下，最大抗剪应力极限值表示不排水抗剪强度，该值是由非固结不排水三轴压缩试验结果确定。

### 3. 范梅塞斯 Von Mises

Von Mises 模型主要在定义与钢材相同的延性材料行为，即基于剪应力达到临界值时即发生屈服破坏原理的材料。不仅适用于岩土单元，而且也适用于桁架、植入式桁架及梁单元，另外也可用于模拟钢材制作的锚杆、土钉及钢管桩等。

与 Tresca 准则类似，在用于土质材料时，Von Mises 并未考虑静水压的影响并且其抗压和抗拉屈服应力相同。但是，与 Tresca 基准一样，Von Mises 屈服准则可以恰当地表示不排水条件下饱和土的分析。相对于 Tresca 准则，该模型可避免 Tresca 屈服准则在屈服面六边形角点上的数学和数值分析的复杂性。



硬化曲线：硬化曲线一般通过反映材料塑性特性的材料试验得到。试验主要是单轴拉压试验或纯剪切试验。GTS NX 的硬化曲线是输入真实应力-塑性应变曲线。试验结果转换的过程请参考分析理论手册（第四章-材料）。

应力-应变曲线：对于范梅塞斯屈服条件，支持各向同性硬化，随动硬化，混合硬化模型。各向同性硬化模型假定初始屈服面均匀扩展，所以初始屈服曲面的中心轴不变。各向同性硬化模型的硬化因子由有效应变构成，且硬化引起的屈服应力也是有效塑性应变的函数，所以可直接使用输入的硬化函数。混合硬化模型假定塑性变形引起的屈服面同时发生扩展和移动。通过组合系数 ( $\lambda_c$ ) 按计算式  $\sigma_y = \lambda_c h_y(0) + (1 - \lambda_c) h_y(e_p)$  计算屈服应力。 $\lambda_c=0$  时，等同于各向同性硬化， $\lambda_c=1$  时等同于随动硬化。

### 4. 莫尔-库伦 Mohr-Coulomb

Mohr-Coulomb 模型是按理想弹塑性性定义，如下图所示。该行为假定对一般的岩土非线性分析来说结果是充分可靠的，因此被广泛用于模拟大部分岩土材料。

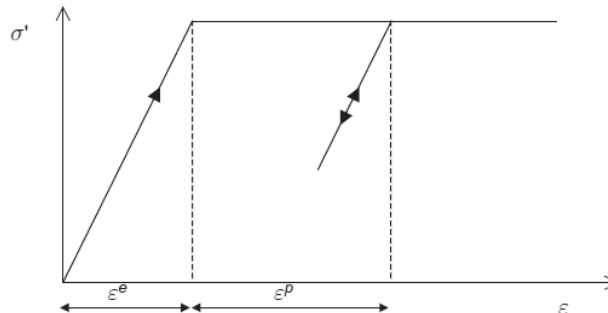


图 4-5 理想弹塑性本构曲线

对于岩土材料 Mohr-Coulomb 破坏准则有两个缺点。第一，中间主应力不影响屈服，这个假设与实际土体试验结果矛盾。第二，莫尔圆的子午线和破坏包络线是直线，强度参数（摩擦角）不会随着围

压（或者静水压力）改变。这个准则在围压有限的范围内是正确的，但是，当真实范围过小或过大时准确度会降低。

但是，因为这个准则在一定围压的范围内可以得到可靠性相当高的结果而且使用方便，所以经常被使用。

粘聚力(C)	<input type="text" value="34"/>	kN/m <sup>2</sup>
粘聚力增量	<input type="text" value="1"/>	kN/m <sup>3</sup>
参考高度粘聚力增量	<input type="text" value="0"/>	m
摩擦角(φ)	<input type="text" value="36"/>	[deg]
<input checked="" type="checkbox"/> 膨胀角	<input type="text" value="36"/>	[deg]
<input checked="" type="checkbox"/> 抗拉强度	<input type="text" value="1"/>	kN/m <sup>2</sup>

图 4-6 模型参数设置对话框

定义 Mohr-Coulomb 破坏准则的主要非线性参数如下。

### 粘聚力 (C)，内摩擦角 (φ)

不同土体有不同的粘聚力和内摩擦角，这些参数对应于剪切强度方程。与其它土木材料不同，土体几乎不抗拉，大部分情况下会发生剪切破坏。即，在自重或外力作用下，岩土内部会产生剪应力，随着应力的增加应变也会增加，继续发展就会沿着某个面破坏，这种破坏叫剪切破坏。剪应力引起抗剪行为和抗剪极限，即剪切强度。土的抗剪强度包括粘聚力和内摩擦角。

根据 Mohr-Coulomb 准则，土的剪切强度按如下直线式表示。

$$\tau = C + \sigma \tan \varphi$$

这里，C：粘聚力；σ：正应力；φ：内摩擦角。

根据破坏准则粘聚力为内摩擦角等于 0 时的剪切强度，通常定义为不排水状态下土体的剪切强度。反之，沙质土几乎没有粘聚力，可定义为 C = 0 定义，但为了避免分析发生错误，建议输入最小 0.2 (kN/m<sup>2</sup>) 以上的值。

如果定义了粘聚力，程序会按定义的粘聚力大小自动计算抗拉强度。一般岩土材料的抗拉强度会被忽略，但是为了避免不真实的抗拉行为，可设置抗拉截断 Tension-Cutoff。

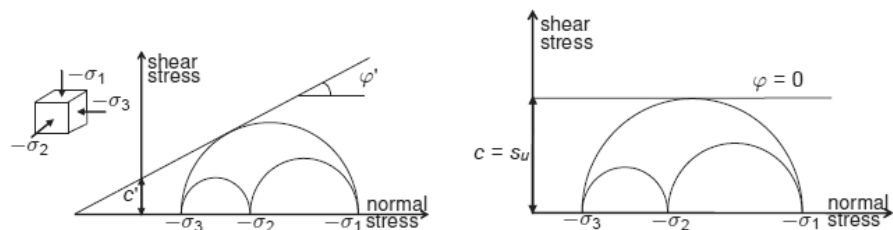


图 4-7 Mohr-Coulomb 破坏包络线（排水/不排水）

### 粘聚力增量参考高度

一般情况下，即使岩土各层材料相同，土体的强度特性也会随着深度和围压的变化。例如：对于数十米深的地层，只定义一个强度参数可能会限制精细地模拟地层行为。虽然可以对地层细分后建模，但这种特征也可以用基于参考高度变化的粘聚力代替。如果根据参考高度的粘聚力增量为 0 时，粘聚力则为常量值；如果粘聚力增量不为 0，相对于标准高度（参考高度）的粘聚力按如下方程计算。

$$C = C_{ref} + (y_{ref} - y)C_{inc} \quad (y \leq y_{ref})$$

$$C = C_{ref} \quad (y > y_{ref})$$

这里， $C_{ref}$ ：的参考位置的粘聚力值； $C_{inc}$ ：粘聚力随深度的增量； $y_{ref}$ ： $C_{ref}$  值的深度（参考位置）。

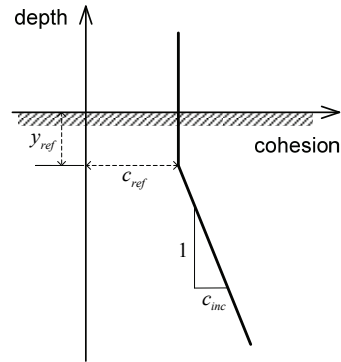


图 4-8 粘聚力增量的概念图

在上式中  $y$  表示当前有限元法中进行计算的单元积分点的位置。如果积分点位置位于高于参考位置  $y_{ref}$  时，粘聚力有可能小于 0。为了防止这种情况，这时的粘聚力值不再减小，设为定值  $c_{ref}$ 。

### 膨胀角

膨胀角可以看做是剪应变的体积增加率，一种与粗糙度有关的强度参数，一般也可定义为膨胀角=内摩擦角-30°。即内摩擦角小于 30°时，膨胀角可以看做接近 0。例如：超固结粘土的情况，膨胀角接近 0；砂质土的情况，膨胀角会随内摩擦角的大小而不同。在实际试验中，非常松散的砂质土，虽然能定义负数的膨胀角，但数值上来说应在 0 到内摩擦角之间取值。

执行不排水分析时，内摩擦角为 0 时，膨胀角必须按 0 设定，重要是剪胀角被认为是分析的本构方程发生一定变化后的参数。如果不考虑膨胀角，膨胀角为与输入与摩擦角相同的数值，即不勾选膨胀角的情况下，程序自动考虑与摩擦角相同的膨胀角执行分析。

### 抗拉强度 (Tension-CutOff)

输入岩土材料的允许抗拉强度。在许多自然现象中可以发现各种地表的破坏形式为张拉裂缝，而非剪切破坏的情况。输入容许抗拉强度来指定岩土材料的抗拉能力。但一般情况下，会忽略岩土材料的抗拉强度，默认设置为 0。不勾选抗拉强度的情况下，程序在分析时，根据粘聚力和摩擦角自动计算抗拉强度。

## 5. 德鲁克普拉格 Drucker Prager

Drucker-Prager 模型是 Drucker and Prager (1952) 为解决在 Mohr Coulomb 模型的屈服形状在边角位置发生的数值性问题而开发的，内部算法与 Mohr Coulomb 一致，材料常数可参考 Mohr-Coulomb 准则的常数粘聚力 ( $C$ ) 和内摩擦角 ( $\varphi$ )。

粘聚力(C)	<input type="text" value="30"/> kN/m <sup>2</sup>
粘聚力增量	<input type="text" value="0"/> kN/m <sup>3</sup>
参考高度粘聚力增量	<input type="text" value="0"/> m
摩擦角(F)	<input type="text" value="36"/> [deg]
<input checked="" type="checkbox"/> 膨胀角	<input type="text" value="6"/> [deg]

图 4-9 模型参数设置对话框

### 6. 霍克布朗 Hoek Brown

岩土材料可以分为两大类岩石和土。岩石的刚度大于土的刚度，强度特性取决于风化程度。岩石的行为特性是基于应力引起的刚度变化是微小的这个事实来区分的。特别的，岩石的剪应力和拉应力对整体行为特性的影响是远大于土的。Hoek 和 Brown（1980 年）为了解释节理岩体破坏时出现应力减小的现象，提出了使用等效连续体的概念。给出区分完整岩石和破碎岩石的屈服函数，并且如果通过函数定义了岩石的破坏，其中的特定参数会变小来模拟应力减小的现象。该模型具有可以定义现有 Mohr-Coulomb 模型中不能考虑的岩石单轴压缩强度，以及可更准确和更简便地反映岩石力学行为的优点。因此，直至今日还被经常用于岩石的分析。岩石的抗剪强度可以用 Mohr-Coulomb 破坏准则式表示。在某一应力范围内，Hoek-Brown 强度参数可用于预测 Mohr-Coulomb 模型的粘聚力和内摩擦角。

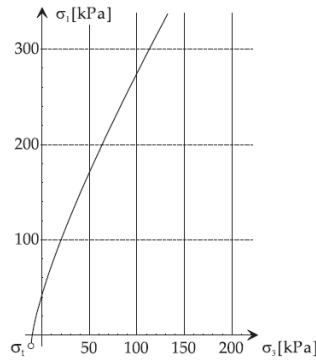


图 4-10 Hoek-Brown 破坏准则

Hoek-Brown 准则的主要非线性参数如下。

初始 $m$	<input type="text" value="10"/>
初始 $s$	<input type="text" value="0.0039"/>
残余 $m$	<input type="text" value="10"/>
残余 $s$	<input type="text" value="0.0039"/>
单轴抗压强度 (Sigma <sub>c</sub> )	<input type="text" value="30"/> kN/m <sup>2</sup>

图 4-11 模型参数设置对话框

#### 初始 $m$ , $s$ 值

根据岩石等级（类型）分类的完整岩石（intact Rock）的 Hoek-Brown 材料常数  $m$  ,  $s$  初始值是 1。通常  $m$  值如下表所示。

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerate (22)	Sandstone 19 Greywacke (18)	Siltstone 9	Claystone 4
		Organic			Chalk 7	
	Non-Clastic	Carbonate	Breccia (20)	Sparitic Limestone (10)	Micritic Limestone 8	
		Chemical		Gypstone 16	Anhydrite 13	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble 9	Hornfels (19)	Quartzite 24	
	Slightly foliated		Migmatite (30)	Amphibolite 25 - 31	Mylonites (6)	
	Foliated*		Gneiss 33	Schists 4 - 8	Phyllites (10)	Slate 9
IGNEOUS	Light		Granite 33		Rhyolite (16)	Obsidian (19)
			Granodiorite (30)		Dacite (17)	
	Dark		Diorite (28)		Andesite 19	
			Gabbro 27	Dolerite (19)	Basalt (17)	
	Norite 22					
	Extrusive pyroclastic type		Agglomerate (20)	Breccia (18)	Tuff (15)	

图 4-12 Hoek-Brown 材料常数 m

常数  $s$  可通过 GSI (Geological Strength Index) 地质强度指标计算, 当岩石为完整时,  $s$  的值为 1。基于岩石等级的 GSI 如下表, 这些值通常可通过计算岩石分类结果 (RMR, RQD) 来预测。

由 GSI 计算的  $s$  的公式如下。

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) (GSI > 25)$$

$$s = 0 (GSI \leq 25)$$







GEOLOGICAL STRENGTH INDEX		SURFACE CONDITIONS				
<p>From the description of structure and surface conditions of the rock mass, pick an appropriate box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index (GSI) from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range of GSI from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38. It is also important to recognize that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of the individual blocks or pieces is small compared with the size of the excavation under consideration. When individual block sizes are more than approximately one quarter of the excavation dimension, failure will generally be structurally controlled and the Hoek-Brown criterion should not be used.</p>		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE – intact rock specimens or massive in situ rock with very few widely spaced discontinuities	90		N/A	N/A	N/A
	BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets		60	50		
	BLOCKY/DISTURBED - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	FOLIATED/LAMINATED – Folded and tectonically sheared foliated rocks. Schistosity prevails over any other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness	N/A	N/A		20	10
						5

图 4-13 GSI (Hoek (1999))

假定  $a=0.5$ , Hoek-Brwon 模型中, 基于 GSI 的  $m$ ,  $s$  关系如下。

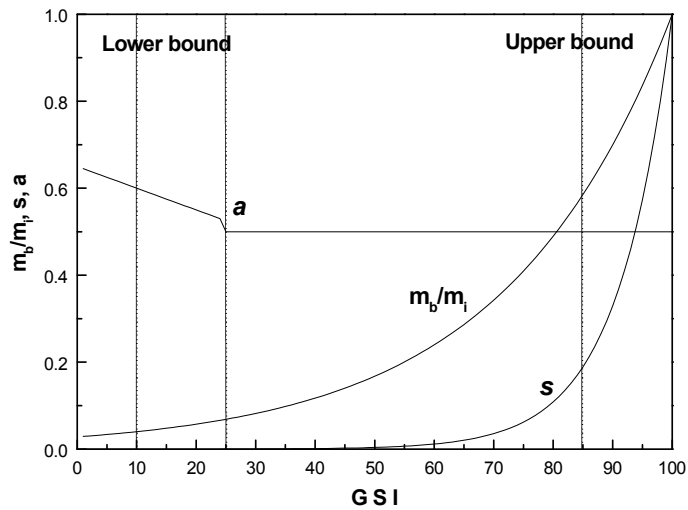


图 4-14 GSI 和  $m$ ,  $s$  的关系

单轴抗压强度



输入完整岩石 (Intact Rock) 的单轴抗压强度试验结果。基于岩石等级的一般数值如下。

Grade	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely strong	> 250	Specimen can be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 – 250	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it.	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff
R4	Strong	50 – 100	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it.	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
R3	Medium strong	25 – 50	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer.	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
R2	Weak	5 – 25	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer.	Chalk, rocksalt, potash.
R1	Very weak	1 – 5	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife.	Highly weathered or altered rock.
R0	Extremely weak	0.25 – 1	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

图 4-15 单轴抗压强度

### 7. 广义霍克布朗



广义霍克布朗模型是通过完整岩的室内三轴试验预测参数或节理的岩石破坏进行预测。广义霍克布朗的破坏显示为非线性特征，其最大/最小有效主应力的关系式如下。

$$\sigma_1^f = \sigma_3^f + \sigma_{c1} \left( m_b \frac{\sigma_3^f}{\sigma_{c1}} + S \right)^a$$

在这里，

$\sigma_1^f, \sigma_3^f$  : 最大/最小有效主应力

$\sigma_{ci}$  : 完整岩的单轴抗压强度

$m_D = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)$  : 完整岩参数 ( $m_i$ ) 的折减系数

$q = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)$  : 岩质常数

$a = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} \left( e^{-GSI/15} - e^{-20/15} \right)$  : 岩质常数

GSI(Geological Strength Index) :地质强度指数

D(Disturbance Factor) : 扰动因子。表示岩质的损伤或应力松弛等的扰动程度。可以从非扰动岩质 (0) 到扰动十分严重的岩质 (1) 之间定义。

### 8. 双曲线模型 (邓肯-张 Duncan-Chang)

岩土 的应力-应变行为越接近破坏条件越会表现非线性, 非线性弹性模型可以通过改变岩土模量来模拟这样的岩土行为。为了计算岩土模量, Duncan and Chang (1970) 提出了计算公式。在这个公式中应力-应变曲线为双曲线, 岩土模量是侧限应力和剪切应力的函数。因为这个非线性弹性材料模型可方便地从三轴抗压试验或相关文献中获得材料特性值, 所以非常实用。Duncan and Chang 的非线性应力-应变曲线表示轴应变与剪应力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 之间的双曲线关系, 根据应力状态和应力路径定义为三种岩土模量 (初始模量  $E_i$ 、切线模量  $E_t$ 、卸载-再加载 (unloading-reloading) 模量  $E_{ur}$ )。

Hyperbolic 模型的主要非线性参数如下。

粘聚力(C)	<input type="text" value="30"/> kN/m <sup>2</sup>
摩擦角(F)	<input type="text" value="36"/> [deg]
初始加载模量系数(K)	<input type="text" value="47"/>
指数(n)	<input type="text" value="0"/>
破坏比(Rf)	<input type="text" value="0.8"/>
Kur <input type="checkbox"/> 用户定义	<input type="text" value="0"/>
Kb <input type="checkbox"/> 用户定义	<input type="text" value="0"/>
指数(m)	<input type="text" value="0"/>
最小切线模量	<input type="text" value="100"/> kN/m <sup>2</sup>
最小侧限压力(Sigmamin)	<input type="text" value="10"/> kN/m <sup>2</sup>
大气压强(Pa)	<input type="text" value="101.3125"/> kN/m <sup>2</sup>

图 4-16 模型参数设置对话框

从三轴压缩试验结果中可以生成如下所示的纵轴为  $E/p_a$  或  $B_m/p_a$ , 横轴为  $\sigma_3/p_a$  的图表。各轴对数刻度对齐后, 在  $\sigma_3/p_a=1$  的点上纵轴值为初始加载模量系数 ( $K$ )。纵轴为  $E/p_a$  时, 可以由斜率求初始刚度指数  $n$ ; 纵轴为  $B_m/p_a$  时可以由斜率求体积模量指数  $m$ 。这里的体积模量  $B_m$  可下式定义, 也可以由与泊松比的关系推算。这里的泊松比是限制在 0 到 0.5 以内的值。

$$B_m = \frac{(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3)/3}{\Delta\varepsilon_v}$$

$\Delta\sigma$  : 主应力的变化量

$\Delta\varepsilon_v$  : 体积应变的变化量

$$B_m = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

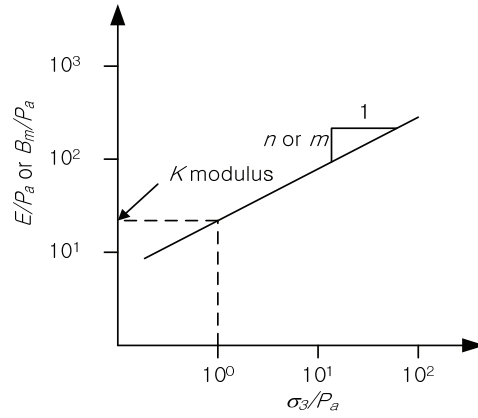


图 4-17 材料属性

Duncan and Chang 的非线性应力-应变曲线，按照应力状态和应力路径定义为三种岩土模量（初始模量  $E_i$ 、切线模量  $E_t$ 、卸载-再加载（unloading-reloading）模量  $E_{ur}$ ）。

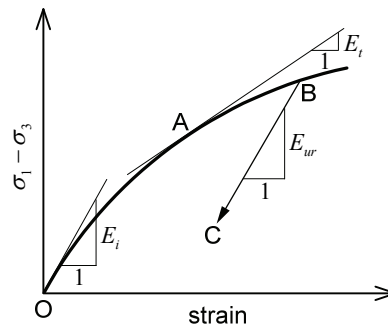


图 4-18 非线性应力-应变响应

这里，可以从初始模量 ( $E_i$ ) 和切线模量 ( $E_t$ ) 的关系中求破坏比 ( $R_f$ )。破坏比为双曲线的渐近线和最大抗剪强度的比，一般取值 0.75~1 之间。切线模量 ( $E_t$ ) 值在非常小的情况下，可能会引起收敛问题，所以最小切线模量的值可设置为大气压 (Pa)。体积模量系数 ( $K_b$ ) 可由体积模量 ( $B_m$ ) 和体积模量指数 ( $m$ ) 计算。

$$B_m = K_b p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m$$

在这里，

$B_m$ ：体积模量 (bulk modulus)； $K_b$ ：体积模量系数； $m$ ：体积模量指数；

卸载-再加载模量系数  $K_{ur}$  可由卸载-再加载模量  $E_{ur}$  计算。

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n$$

如果围压为 0 或负数 (拉伸状态) 时，初始模量可能是 0 或负数。所以需要设置围压下限值，设置的最小围压是 0.01Pa。

基于沙土紧密度的参数建议值如下。(Duncan, J. M. and Chan, C. Y. (1970))。

表 4-2 均匀致密的沙土应力-应变参数汇总

相对密度	$\phi_d$	$R_f$	$K$	$K_{ur}$	$n$
100% (致密)	36.5	0.91	2000	2120	0.54
38% (松散)	30.4	0.90	295	1090	0.65
$C_d = 0$ 致密和松散沙					

说明:  $\phi_d$ 、 $C_d$ : 干燥状态下的内摩擦角和粘聚力。

### 9. 应变软化模型

由最大抗剪强度的线性区间、最大剪切强度到残留剪切强度的软化区间以及常量残余剪切强度的区间构成软化模型。由岩土的最大残余强度、残余强度和软化率的构成关系定义如下。

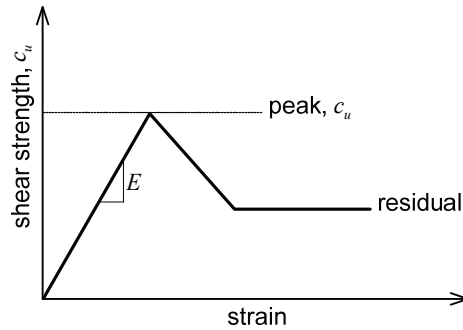


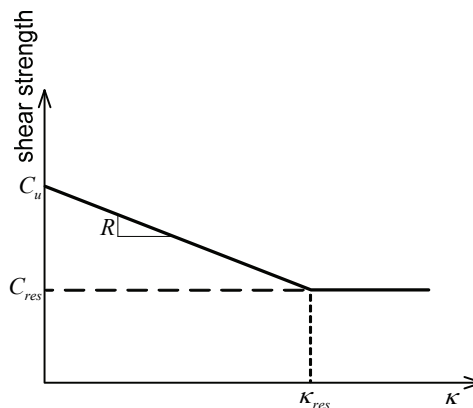
图 4-19 应变软化结构关系

应变软化模型的主要非线性参数如下。

粘聚力峰值(Cp)	<input type="text" value="300"/>	kN/m <sup>2</sup>
残余粘聚力(Cr)	<input type="text" value="300"/>	kN/m <sup>2</sup>
软化率(R)	<input type="text" value="10"/>	kN/m <sup>2</sup>

图 4-20 模型参数设置对话框

用岩土的不排水抗剪强度定义最大粘聚力，并定义残余粘聚力，用应力减小量和软化率来分析强度随着应变和体积的增大而减小。与 Tresca 模型比较，在不排水条件的情况下，Tresca 表现出简单或完全塑性状态，但应变软化模型可以模拟在最大强度处的软化行为以及残余强度的影响。



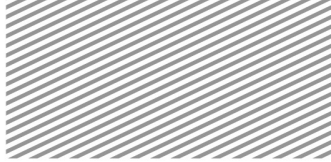


图 4-21 软化响应

### 10. 修正剑桥粘土 Modified Cam Clay

模拟粘土材料时使用的模型。粘土体积变化量与平均有效应力的一般关系如下图，可以用正常固结线（normal consolidation line）和超固结线（over-consolidation line）的概念表示。超固结线也叫回弹线（dwelling line），作用的应力（荷载）的增加会使应力状态按照超固结线向正常固结线移动。通过两线的交叉点继续增加应力，应力状态就会按照正常固结线下降。这类似于弹性-塑性硬化模型的应力-应变曲线的特征，即超固结线可以对应于初始线弹性区间，正常固结线则对应于塑性硬化区间。

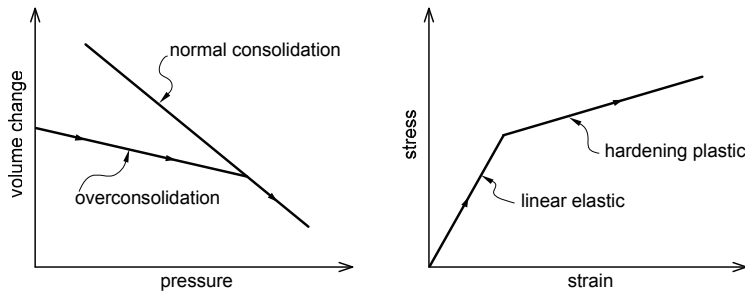


图 4-22 体积-压力 vs 应力-应变关系

对于 Modified Cam Clay 模型，必须定义初始孔隙比、初始应力和初始先期固结压力。先期固结压力可以直接输入或由初始应力和超固结比（OCR）中自动计算。同时输入超固结比和先期固结压力时，优先使用直接输入的先期固结压力。

Modified Cam Clay 模型的主要非线性参数如下。

超固结比(OCR)	<input type="text" value="1"/>
正常固结线斜率( $\lambda$ )	<input type="text" value="0.3"/>
超固结线斜率( $\kappa$ )	<input type="text" value="0.05"/>
临界状态线比率( $M$ )	<input type="text" value="1"/>
Pc <input checked="" type="checkbox"/> 用户定义	<input type="text" value="0"/> kN/m <sup>2</sup>
<input checked="" type="checkbox"/> 抗拉强度	<input type="text" value="0"/> kN/m <sup>2</sup>

图 4-23 模型参数设置对话框

表 4-3 参数及符号说明

符号	意义
$\kappa$	超固结线的斜率
$\lambda$	正常固结线的斜率
$M$	临界状态线的斜率

岩土的特性值通常由一维固结试验得到，压缩指数  $C_c$  和回弹指数  $C_s$  可由孔隙率（void ratio）-  $\log_{10}(p)$  的图形得到。压缩指数和回弹指数与正常固结线的斜率  $\lambda$  和超固结线斜率  $\kappa$  有如下式的关系。

$$\lambda = \frac{C_c}{2.303}, \kappa = \frac{C_s}{2.303}$$

临界状态线的斜率  $M$ ，可以通过与抗剪切摩擦角（基于排水试验）的关系推断。

$$M = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi}$$

$\phi$ ：由三轴抗压试验得到的内摩擦角。

在输入了  $P_c$  的情况下，在求解器内部检查输入的  $P_c$  和初始应力状态是否满足屈服函数。如果不满足就重新计算新的  $P_c$ 。

### 抗拉强度

MCC 材料模型从根本上说是不允许破坏准则（应力-应变关系）出现拉应力，但是各种条件下都可能产生拉应力，如在固结过程中，邻近土层因路堤荷载引起的隆起膨胀，或由于开挖产生的隆起。为克服材料模型限制并加强适用性，可将拉应力限制在“抗拉强度”范围内进行分析。

未指定抗拉强度大小时，需要反复分析，以便输入一个相对大于超载（路堤）或破坏行为产生的拉应力的值。因此，需要设置抗拉强度值，以防止分析过程中因拉破坏造成的分析结果的发散和终止。

但是，当直接输入  $P_c$ （前期固结压力），抗拉强度不能超过  $P_c$  值。当定义使用 OCR 时，程序会考虑输入的抗拉强度的大小自动通过内部计算  $P_c$  值。

## 11. Jardine

Jardine 模型适合在小应变状态下也发生非线性行为的岩土材料。围压范围小时，为模拟与粘土材料一样的非线性行为，Jardine（1984）提出该非线性弹性模型，该模型可模拟材料的应力大于输入的剪切应力时表现出理想塑性行为。模型的主要非线性参数如下。

最大刚度 (F>0)	3000 kN/m <sup>2</sup>
中等刚度 (G<=F)	600 kN/m <sup>2</sup>
粘土抗剪强度	3.5 kN/m <sup>2</sup>
最大刚度的应变 (A)	0.0001
中等刚度的应变 (B)	0.004
最小刚度的应变 (C)	0.008
最大应变 (E <sub>max</sub> > E <sub>min</sub> )	0.004
最小应变 (E <sub>min</sub> >= A)	0.0001

图 4-24 模型参数设置对话框

Jardine 模型广泛适用于粘土。Jardine 模型在开发时考虑了粘土在小应变的状态下也会发生非线性弹性行为的情况。如下图，非线性方程可由不排水三轴压缩试验中测定的割线弹性模量和轴方向应变之间关系式推导。不排水三轴压缩试验是在圆柱型试件轴向施加荷载，圆柱围压保持不变。

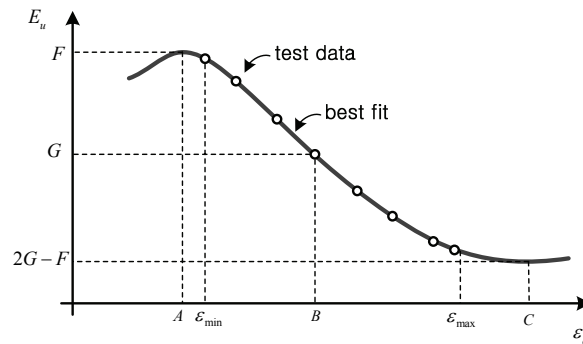
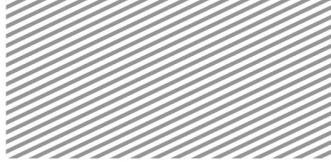


图 4-25 模型试验曲线及拟合



这里 F、G 是满足最佳拟合曲线的最大刚度和平均刚度；A、B、C 为最大、平均、最小弹性模量对应的应变， $\epsilon_{\max}$  和  $\epsilon_{\min}$  为最大应变和最小应变。

而且，在塑性区间内采用的是 Tresca 模型，所以需要定义粘土的剪切强度值。

## 12. 日本电力中央研究所模型 D-min

根据日本电力中央研究所 Hayashi 和 Hibino 提出的适用于普通岩石（硬岩、软岩等）的区间线性模型。模型对应各施工阶段的刚度不同，但在同一个施工阶段内刚度是固定值。即该模型的材料特性值在各荷载阶段是固定的，所以不需要反复计算。

假设莫尔圆接近破坏包络线时，由于岩土内部粘结状态的松弛，弹性模量减小而泊松比增大。因此，弹性模量和泊松比是由莫尔圆和破坏包络线的相对距离决定。

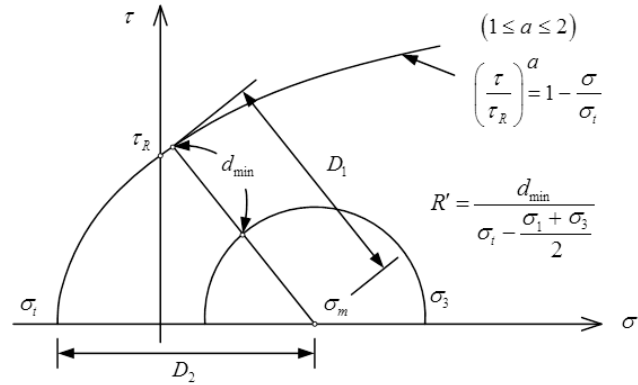


图 4-26 D-min 模型的破坏包络线和摩尔圆

主要非线性参数如下。

初始变形模量(D0)	<input type="text" value="300"/>	kN/m <sup>2</sup>
极限变形模量(Df)	<input type="text" value="600"/>	kN/m <sup>2</sup>
非线性属性系数(m)	<input type="text" value="1"/>	
初始泊松比(u0)	<input type="text" value="0.3"/>	
限泊松比(uf)	<input type="text" value="0.3"/>	
非线性属性系数(Rn)	<input type="text" value="1"/>	
抗剪强度(TauR)	<input type="text" value="3000"/>	kN/m <sup>2</sup>
抗拉强度(Sigmat)	<input type="text" value="3000"/>	kN/m <sup>2</sup>
摩尔包络参数(a)	<input type="text" value="1"/>	
松弛系数(k)	<input type="text" value="1"/>	

图 4-27 模型参数设置对话框

如下列公式，如果输入初始状态和极限状态中的材料特性，数值就会按照塑性程度计算材料特性值。

$$E = R^m (E_i - E_{cr}) + E_{cr}$$

$$\nu = R^n (\nu_i - \nu_{cr}) + \nu_{cr}$$

在这里， $E_i$  为初始弹性模量， $E_{cr}$  为极限弹性模量， $m$ 、 $n$  为非线性材料系数， $\nu_i$  为初始泊松比， $\nu_{cr}$  为极限泊松比。

莫尔圆系数 ( $a$ ) 和松弛系数 ( $k$ ) 随着初始弹性模量 ( $E_i$ ) 的增加而增加。以三轴抗压试验为基础, 日本道路交通管理部门在 1986 年通过整理的各种岩石的莫尔圆系数 ( $a$ )、松弛系数 ( $k$ )、初始弹性模量 ( $E_i$ ) 间的关系如下表。

表 4-4 基于初始弹性模量的参数 (日本道路交通管理部门 1986)

初始弹性模量 ( $E_i$ , $\text{kgf/cm}^2$ )	松弛系数 ( $k$ )	莫尔圆系数 ( $a$ )
$100 \leq E_i < 1,000$	2.0	1.0
$1,000 \leq E_i < 10,000$	4.0	2.0
$10,000 \leq E_i < 100,000$	6.0	3.0
$100,000 \leq E_i$	10.0	4.0

### 13. 修正莫尔-库伦 Modified Mohr-Coulomb

该模型是对 Mohr-Coulomb 模型的改进, 由非线性弹性模型和弹塑性模型组合, 适用于淤泥或沙土行为特性。Modified Mohr-Coulomb 模型可以模拟不受剪切破坏或压缩屈服影响的双硬化行为。

由初始偏应力引起的轴应变和材料刚度的减小, 虽然类似于双曲线 (非线性弹性) 模型, 但相对于弹性理论, 更接近塑性理论, 并且考虑岩土膨胀角及采用屈服帽 (yield cap) 时也会不同。

主要非线性参数如下。

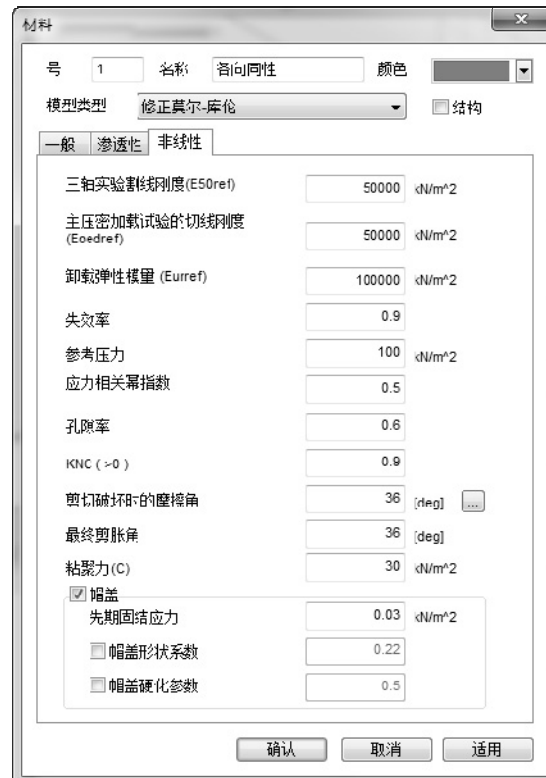
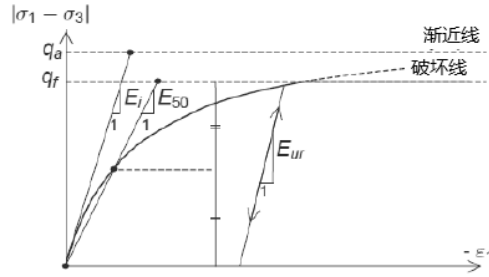


图 4-28 模型参数设置对话框

#### 弹性模量

相对于 Mohr Coulomb 模型, 这是个材料模型更加详细的模型, 弹性模量可根据加载和卸载设置为不同的值。但一般情况下卸载时弹性模量设置更大的值, 以防止开挖模型时由于应力释放引起的过大隆起 (膨胀的现象)。





**参考压力**

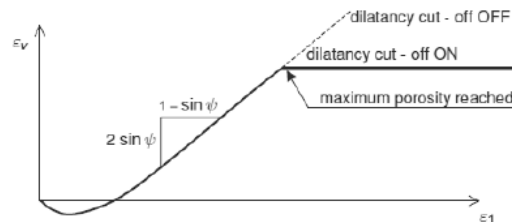
用于三轴试验的参考压力，为非线性弹性曲线上的特定强度。

**应力水平相关幂指数**

该模型的一个基本特征是土体刚度是应力相关的，一般在沙土的情况下取 0.5。

**孔隙率**

孔隙与土壤颗粒之间的体积比值称作孔隙比，这里的孔隙率是指孔隙与包含水的土的体积比。因此，与孔隙比不同，孔隙率不能为 1 以上的值，一般的值为 0.6。当土经过剪切错动，材料剪胀达到临界密度的状态。最大孔隙率需作为高级参数输入。当土受到剪切硬化时，求解器重新计算剪胀角。



**KNC**

KNC 是正常固结土的 K（土压力系数）的百分比。即最大竖直应力作用时的有效水平应力的比。可以用 1-sin（内摩擦角）表示；一般粘土的情况下，因为内摩擦角接近 0，因此该值接近 1。但不能小于 0。

**剪切破坏时的摩擦角/最终膨胀角/粘聚力**

这些参数与 Mohr Coulomb 材料模型中的非线性参数摩擦角、膨胀角以及粘聚力相同。



剪切硬化通过等效塑性应变与抗剪力的关系自动计算。剪切屈服面可以扩大到莫尔破坏面。

粘聚力可以随深度不同而不同设置。参考坐标为整体坐标系。

**帽 Cap**

过高的压力作用在土体上时会发生压缩破坏的情况。通常情况下，引起破坏的压力非常大，采用 Mohr-Coulomb 模型分析时即使不考虑这部分也不会有问题。可是，为了更准确地模拟土体的压缩行为，模型考虑了圆或椭圆的压缩破坏屈服面，称为帽 Cap。

### 先期固结压力

可通过 OCR 计算先期固结压力或直接输入。

### 帽形状系数/硬化参数

利用这个系数可以改变屈服函数帽的形状。更详细的算法请参考理论分析手册第四章。可通过考虑 KNC 与 Eoedref 自动计算而不是直接输入参数。

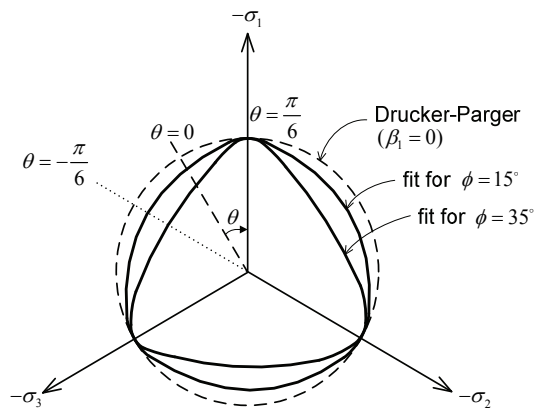


图 4-29 Modified Mohr-Coulomb 模型屈服面 (PI 面)

### [剪切硬化行为]

剪切硬化行为可以根据输入的  $\phi$  和  $\psi$  自动计算或根据等效塑性应变  $\kappa = \sqrt{\frac{2}{3}} \gamma^p \cdot \gamma^p$  的关系来输入，

然后膨胀角  $\sin \psi$  由 Row 的公式 ( $\sin \psi = \frac{\sin \phi - \sin \phi_{cv}}{1 - \sin \phi \sin \phi_{cv}}$ ) 来计算。

$\gamma^p$                        $\gamma^p$ : 偏塑性应变;

$\phi_{cv}$                        $\phi_{cv}$ : 临界状态下的摩擦角。由上述公式根据输入的  $\phi$  和  $\psi$  计算出。

### [压缩硬化行为]

先期固结压力 ( $p_c$ ) 来表示压缩硬化行为。

$$p_c = p_{ref} \left( \left( \frac{p_{c0}}{p_{ref}} \right)^m + \frac{m}{\Gamma} \Delta \epsilon_v^p \right)^{\frac{1}{m}}$$

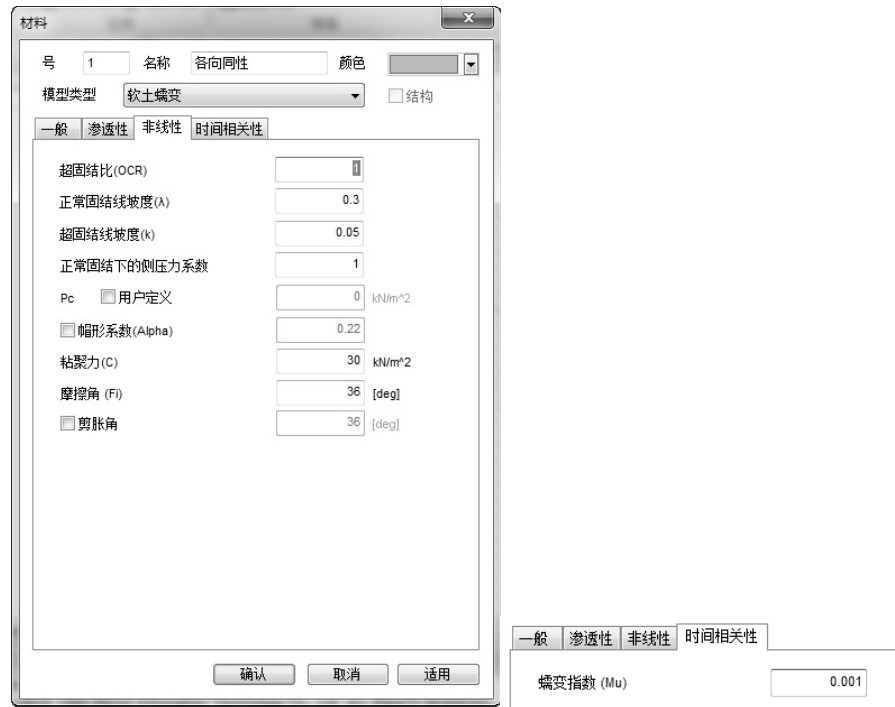
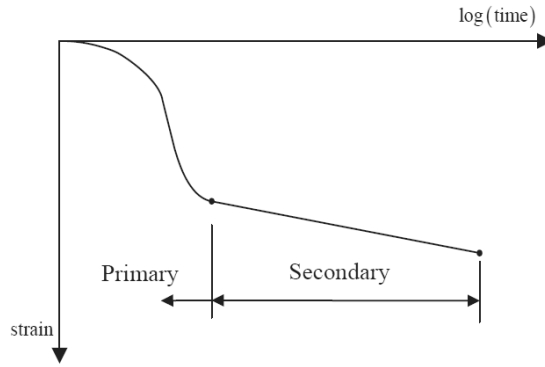
在这里， $p_{c0}$  是初始先期固结压力， $\Gamma$  是帽的硬化参数。

参数	说明	参考值(kN, m)
----	----	------------

土体刚度和破坏相关参数		
E50ref	标准排水三轴试验中的割线刚度	$E_i \times (2 - R_f) / 2$ ( $E_i$ = 初始刚度)
Eoedref	主固结仪加载中的切线刚度	E50ref
Eurref	卸载 / 重新加载刚度	$3 \times E50ref$
m	应力水平相关幂指数	$0.5 \leq m \leq 1$ (硬土取 0.5, 软土取 1)
c	有效粘聚力	莫尔-库伦模型中的破坏参数
$\varphi$	有效摩擦角	莫尔-库伦模型中的破坏参数
$\psi$	最终剪胀角	$0 \leq \psi \leq \varphi$
高级参数(建议使用参考值)		
Rf	破坏比( $q_f / q_a$ )	0.9 (< 1)
Pref	参考压力	100
KNC	正常固结下的侧压力系数	$1 - \sin\varphi$ (< 1)
剪胀截断相关参数		
Porosity	初始孔隙比	-
Porosity(Max)	最大孔隙比	Porosity < Porosity(Max)
帽盖屈服面相关参数		
Pco	先期固结压力(可根据超固结比(OCR)得到)	-
$\alpha$	帽盖形状系数(前期固结应力的比例系数)	根据 KNC 得到 (自动计算)
$\beta$	帽盖硬化系数	根据 Eoedref 得到(自动)

#### 14. 软土蠕变 Soft soil creep

软土蠕变是适用于表示随着时间变化的粘土结构骨架蠕变行为的模型。该模型是由一维蠕变理论延伸到三维模型的。应力相关的刚度参数可类似修正剑桥模型由压缩及次压缩指数得到。不同于 MCC 模型的是该模型可考虑次固结。



总应变率(total strain rate)是依存于弹性行为的弹性应变  $\dot{\epsilon}^e$  (elastic strain)与具有时间依存特性的蠕变应变  $\dot{\epsilon}^c$  (creep strain)的和。蠕变应变是有时间依存特性的塑性应变，即粘塑性应变。

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^c = \mathbf{D}^{-1} \dot{\sigma} + \frac{\mu}{1 + e_0} \frac{1}{p_p^{eq} \tau} \left( \frac{p^{eq}}{p^p} \right)^{\frac{\lambda - \kappa}{\mu}} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma}$$

$$p_p = p_{p0} \exp \left[ - \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \epsilon_v^c \right]$$

$\dot{\epsilon}^e$  : 弹性应变速度

$\dot{\epsilon}^c$  : 蠕变应变速度

$\kappa$  : 回弹参数

$\lambda$  : 压缩参数

$e_0$  : 初始孔隙比

$\mu$  : 蠕变指数(creep index)

$\tau$  : 参考时间(reference time), 默认为一天的时间

**D** : 弹性刚度矩阵

$p^{eq}$  : 等效压力

$P_{p0}$  : 初始前期固结压力(pre-consolidation pressure)

$\alpha$  : 是 Modified Mohr-Coulomb 模型的帽形状系数(cap shape factor), 是用户输入的值或由岩土属性定义的常数。

### 15. 用户自定义模型 (User Supplied Material)

用户可通过程序的前后处理功能, 生成用户自定义材料的材料模型。程序提供积分点上的总应力、内部变量、应变和应变增量, 用于计算用户自定义模型的应力和切线斜率。适用非线性弹性材料 and 非线性弹塑性材料, 支持的单元有平面应变、轴对称和实体单元。相关使用细节请参考理论分析手册附录的“用户自定义子程序”章节。



图 4-30 模型参数设置对话框

#### 用户定义材料文件

在资源管理器中选择用户定义的 DLL 模型文件路径。

#### 参数数量

输入要定义材料所需的参数数量。例如, 输入用户自定义材料的特性, 如弹性模量、泊松比等。

#### 内部状态变量数

保存下一个重复计算所需的变量。这种情况下, 保存类似于塑性应变的实型变量。

#### 整数指标变量数

如果内部状态变量主要是以实数保存, 那么整数指标变量主要以整型变量保存, 如塑性状态指标。

### 16. 修正 UBCSAND

模型类型 **修正 UBCSAND**  结构

一般 渗透性 非线性

参考压力  kN/m<sup>2</sup>

弹性

线弹性  幂法则

弹性剪切模量号

弹性剪切模量指数

塑性/剪切

峰值摩擦角  [deg]

摩擦角体积常数  [deg]

粘聚力  kN/m<sup>2</sup>

塑性剪切模量号

塑性剪切模量指数

失效比率

校正后液化因子

循环过程

压实土校正因子

塑性/压力阈值

抗拉强度  kN/m<sup>2</sup>

塑性/盖帽

盖帽模量号

塑性模量盖帽指数

超固结比(OCR)

修正 UBCSAND 材料模型是以有效应力为基础的塑性理论模拟液化现象而开发的模型。对 2D 应力状态，根据显示法模拟液化材料模型基础上，扩展为可以对 3D 应力状态进行隐式非线性分析。

**参考压力:** 非线性弹性曲线中，对应指定围压的三轴试验基准压力。利用莫尔-库伦的屈服函数，模拟剪切塑性性能。

$$f_s = R_{mc} \sqrt{3J_2} + \frac{1}{3} I_1 \tan \phi_m - c = 0$$

**塑性/盖帽:** 地基中受到过大的压力时，会发生受压破坏。由于引起受压破坏的压力很大，所以不考虑该因素对地基模拟也不会有影响。对于需要更加精确模拟受压状态下的分析结果，可以使用该受压破坏模型。该模型以圆或椭圆形状考虑受压破坏，所以取名为盖帽。

### 17. Sekiguchi-Ohta 关口-太田（非粘性）

超固结比(OCR)

正常固结线坡度(A)

超固结线坡度(k)

临界状态线比率(M)

K0nc

Pc  用户定义  kN/m<sup>2</sup>

抗拉强度  kN/m<sup>2</sup>

作为无时间依存性的塑性模型，与剑桥材料模型有很多相同特性，不过该模型可以考虑正常固结的 Ko 应力状态，模拟非可逆体积膨胀。不过不能考虑弹性模量的增减及各向异性的应力状态。比剑桥模

型更能模拟体积膨胀效果,且体积膨胀系数  $D$  与 临界状态线斜率  $M$ , 正常固结线斜率  $\lambda$ , 超固结线  $\kappa$  及初始孔隙比  $e_0$  有如下关系。

$$MD = \lambda^* - \kappa^*$$

此处按  $\lambda^* = \lambda/(1+e_0)$ ,  $\kappa^* = \kappa/(1+e_0)$  定义。体积膨胀系数  $D$  在 GTS NX 中内部计算实现。

### 18. Sekiguchi-Ohta 关口-太田(粘性)

一般	渗透性	非线性	时间相关性
二次压缩系数		<input type="text" value="0.002"/>	
初始体积应变率		<input type="text" value="1e-008"/> 1/min	

模拟土体徐变的多种粘塑性理论中, Sekiguchi-Ohta 材料模型的粘性类型是遵循非定常流动理论的模型。该理论的模型具有塑性模型的特征,不同之处就是包含时间依存性。粘性类型假定初始状态的岩土在施加荷载之前徐变在进行且处于徐变引起的应力状态。非线性参数与非粘性相同,且需增加输入时间依存参数。粘性类型的流动函数如下。

$$F = \alpha \ln \left[ 1 + \frac{\dot{\nu}_0 t}{\alpha} \exp \left( \frac{\bar{f}(\sigma)}{\alpha} \right) \right] - \varepsilon_v^{vp} = 0$$

$\alpha$  : 二次压缩系数

$\dot{\nu}_0$  : 初始体积应变率

$\varepsilon_v^{vp}$  : 粘塑性体积应变

**19. Ramberg-Osgood (兰贝格-奥斯古德滞回模型)**

Ramberg-Osgood 模型是由金属材料的动力学模型修正的公式。加载初始荷载时，按如下的骨架曲线移动。

$$G_o \gamma = \tau + \alpha |\tau|^\beta \tau$$

$$\beta = \frac{2\pi h_{\max}}{2 - \pi h_{\max}}, \alpha = \left( \frac{2}{\gamma_r G_o} \right)^\beta$$

$G_o$  : 初始剪切模量

$\gamma_r$  : 基准剪切应变

$h_{\max}$  : 最大阻尼系数

时程曲线如下。

$$G_o \left( \frac{\gamma \pm \gamma_1}{2} \right) = \left( \frac{\tau \pm \tau_1}{2} \right) \left( 1 + \alpha \left( \left| \frac{\tau \pm \tau_1}{2} \right| \right)^\beta \right)$$

**20. Hardin-Drnevich (哈丁-唐尼维奇滞回模型)**

主要用于计算土在地震作用下的等效静力应力-应变响应，骨架曲线形状为双曲线。

加载初始荷载时，按下面骨架曲线移动。

$$\tau = \frac{G_o \gamma}{1 + \left| \frac{\gamma}{\gamma_r} \right|}$$

$G_o$  : 初始剪切模量

$\gamma_r$  : 基准剪切应变

**21. 横观各向同性 Transversely Isotropic**

自然岩土一般为层状或倾斜，这使得沿正交方向可能会存在不同的强度。如下图，土层在整体 X 轴和单元坐标轴 x' 轴之间形成夹角，并且在单元的 x' 轴和 z' 轴上表现为正交的各向异性（正交各向异性）。



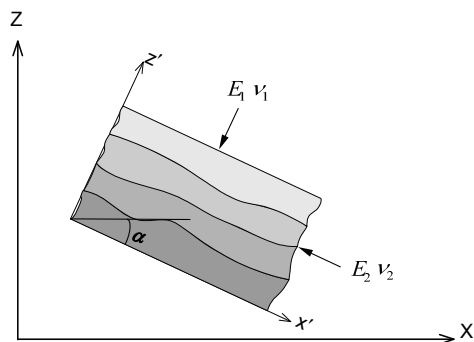


图 4-31 正交各向异性模型

通过分别指定层理（断层）方向的切向和法向刚度来模拟正交各向异性。一般的，层理的法向刚度较切向刚度有减小的趋势，用剪切模量（ $G$ ）定义各向异性的剪切强度。完全各向同性的情况， $E_1$ 、 $\nu_1$  分别与  $E_2$ 、 $\nu_2$  相同， $G$  为  $E_1/2(1+\nu_1)$ 。

弹性模量(E1)	2000000	kN/m <sup>2</sup>
弹性模量(E2)	1000000	kN/m <sup>2</sup>
泊松比(Nu12,Nu13)	0.4	
泊松比(Nu23)	0.2	
剪切模量(G12,G13)	800000	kN/m <sup>2</sup>
剪切模量(G23)	400000	kN/m <sup>2</sup>
倾角(Alpha1)	45	[deg]
倾向(Alpha2)	60	[deg]
倾角	0	[deg]

图 4-32 模型参数设置对话框

横向各向同性材料是由各向同性的横截面和与之垂直的轴定义的材料模型。横截面内的物理特性相同，正交方向的特性则不同。

► 横截面外的特性： $E_1$ ， $\nu_{12}(=\nu_{13})$ ， $G_{12}(=G_{13})$

► 横截面内的特性： $E_2(=E_3)$ ， $\nu_{23}$ ， $G_{23}$

在这里  $E_1$  是横截面正交轴的弹性模量， $\nu_{12}$ 、 $\nu_{13}$  和  $G_{12}$ 、 $G_{13}$  分别是正交轴与横截面的其他轴形成的平面对应的泊松比和剪切模量。

局部坐标系是由倾角  $\alpha_1$  和倾向  $\alpha_2$  定义的，因为倾斜面和水平面（分别为 N 和 X）的参考轴并不一致，所以在构成实际转换矩阵时，使用辅助角  $\alpha_3$  等于  $\alpha_2$  减去偏差角（两轴形成的夹角）。

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \text{declination}$$

## 22. 节理岩体模型 Jointed Rock Mass

岩土材料根据方向不同可能具有不同的物理特性值，并且根据各方向的特定条件，其行为反应也不同，这样的材料特性称作各向异性（Anisotropic）。Jointed Rock 模型是同时具有横观各向同性（Transversely Isotropic）和塑性各向异性（Anisotropic Plastic）的各向异性理想弹塑性模型。Jointed Rock 模型适用于模拟节理、层理岩层，如下图所示。

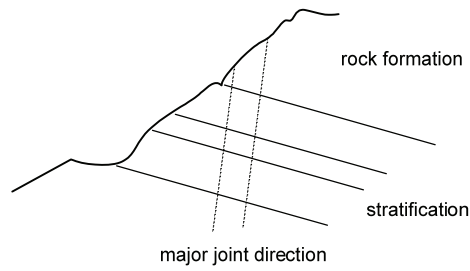


图 4-33 Jointed Rock 模型的概念图

该模型适用于存在连接体或连接体的组合（节理、断层等）。这些连接的组合不能填充断层粘土，并且间距与构造的尺寸相比要足够小。连接的方向最多定义 3 个。

弹性模量(E1)	2000000	kN/m <sup>2</sup>
弹性模量(E2)	1000000	kN/m <sup>2</sup>
泊松比(Nu12,Nu13)	0.4	
泊松比(Nu23)	0.2	
剪切模量(G12,G13)	800000	kN/m <sup>2</sup>
剪切模量(G23)	400000	kN/m <sup>2</sup>
倾角	0	[deg]
节理层数	1	

	节理1	节理2	节理3	
C	30	30	30	kN/m <sup>2</sup>
Fi	35	35	35	[deg] C: 粘聚力
Alpha1	45	45	45	[deg] Fi: 摩擦角
Alpha2	60	60	60	[deg]

图 4-34 模型参数设置对话框

弹性模量、泊松比、各节理的粘聚力、摩擦角与 Mohr-coulomb 模型是一致的。各节理的倾向、倾向角、偏角的定义方式虽然与 Transversely Isotropic 模型相同，但在本模型中可以输入 3 条节理。这里，各向异性弹性行为由第一节理上 Alpha1 和 Alpha2 定义的，剩下 2 条节理仅用于定义塑性变形。

### 23. 2D 正交各向异性

The screenshot shows two overlapping dialog boxes for material properties. The background dialog is for '2D 正交各向异性' (2D Orthotropic) with parameters: E1=2000000, E2=1000000, Nu=0.4, G12=800000, G23=400000, G31=400000. The foreground dialog is for '材料' (Material) with '名称' (Name) '正交各向异性' (Orthotropic), '模型类型' (Model Type) '2D 正交各向异性' (2D Orthotropic), '容重(Gamma)' (Unit Weight) 20 kN/m<sup>3</sup>, '热膨胀系数1' (Thermal Expansion Coefficient 1) 1e-006 1/°C, '热膨胀系数2' (Thermal Expansion Coefficient 2) 1e-006 1/°C, and '阻尼比' (Damping Ratio) 0.05.

对于板、壳、平面应力、土工格栅（2D）的 2D 结构特性，可以对正交方向定义不同的特性。各向异性材料对于材料的主轴体现其特性。

### 24. 二维等效线性 2D Equivalent

把具有复杂的非线性行为的岩土特性按等效线性行为的特性简化,允许动力荷载作用下的岩土-结构协同分析。剪应变因地震或其它动力荷载是持续变化的,这时可用有效剪切应变设置等效线性值。需要输入的参数和分析过程如下。

剪切模量(G)	15000	kN/m <sup>2</sup>
泊松比	0.35	
容重(Gamma)	20	kN/m <sup>3</sup>
阻尼比	0.05	
<input checked="" type="checkbox"/> 应变相容特性	1: 应变相容特性曲线	...

图 4-35 参数设置对话框

表 4-5 分析过程

类别	分析过程
1	假设初始剪切模量和阻尼比
2	由初始值计算岩土响应和应变滞回曲线
3	由应变滞回曲线得到的最大应变计算有效剪应变
4	用与有效剪应变一致的等效线性阻尼比和剪切模量,重新计算岩土响应及应变滞回曲线
5	重复过程 2~4 直至计算的剪切模量及阻尼比达到容许误差。

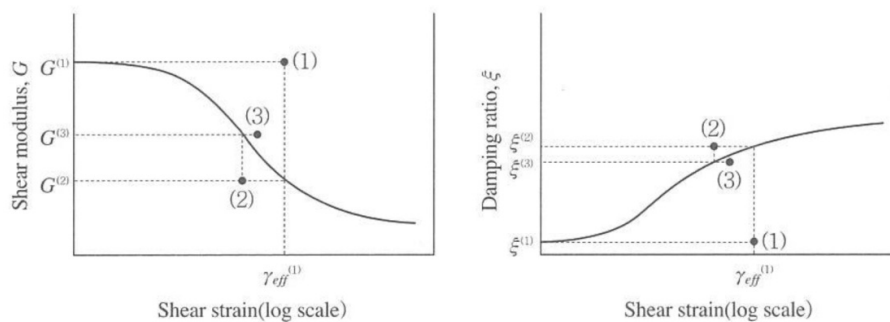


图 4-36 基于等效线性方法的非线性剪切模量和阻尼比收敛过程。

等效线性分析和非线性分析的应力-应变关系图表如下。



等效线性分析和非线性分析的应力-应变关系图表如下。

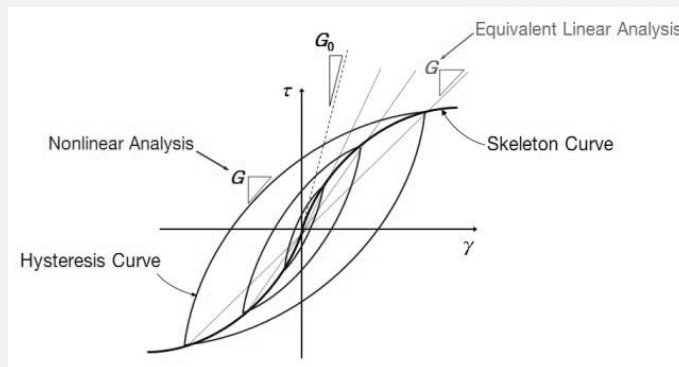


图 4-37 应力-应变关系曲线

在等效线性中，岩土材料的非线性特性可由最大剪切模量与剪切模量的比  $G/G_0$  和剪应变  $\gamma$  的函数以及阻尼比  $h$  和剪应变  $\gamma$  的函数式来表示。这些材料特性可由动力应变试验得到，如下图所示。

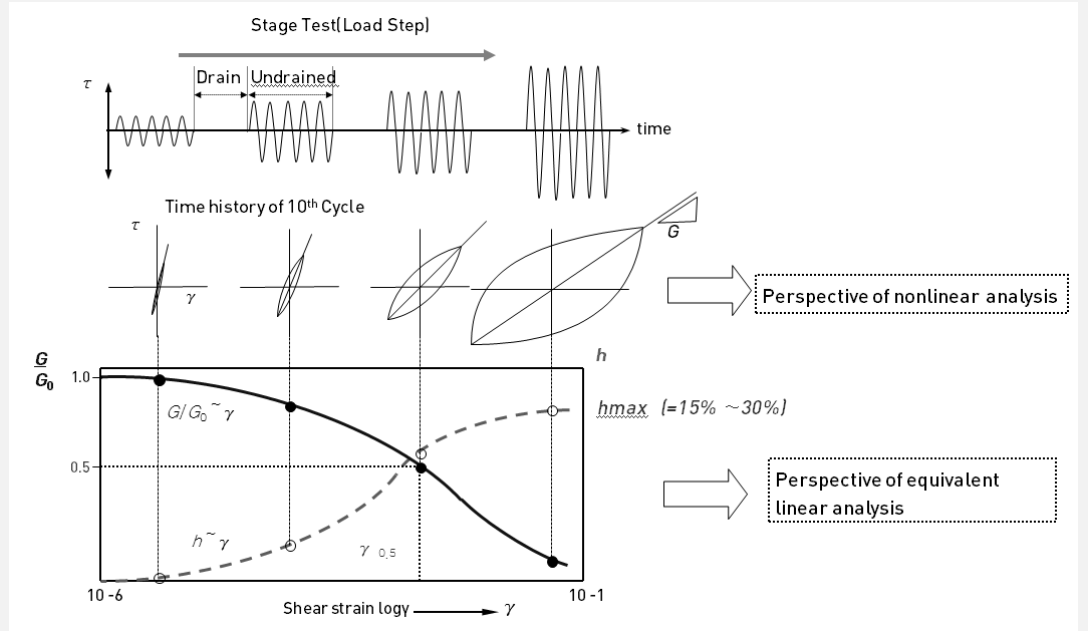


图 4-38 材料参数确定流程

考虑岩土的非线性和非弹性行为时，应变相容特性可通过基于应变的剪切模量和阻尼比的函数设定。如果函数未定义，可假设岩土材料为线性并将输入的（固定的）剪切模量和阻尼比用于分析。同时，按岩土类型提供了各种数据库，更多详细信息可参考“函数”部分。

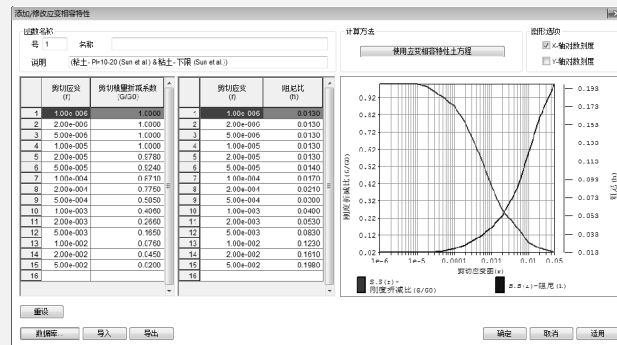


图 4-39 应变相同特性曲线定义对话框

## 25. 界面（界面 Interface/壳界面 Shell Interface）

### 界面

界面模型是为模拟不同材料或相同材料的边界行为。界面模型不仅是适用于岩土模型而且是适用于整个建筑及桥梁领域定义各种界面行为。界面模型根据 Coulomb 摩擦法则（1785），遵循界面摩擦力是与界面的摩擦系数和作用于界面的法向约束力的大小成比例的假设。

模型多用于模拟岩石节理或结构-土的各种界面，如摩擦桩-土的界面、挡土墙-岩石的界面、衬砌岩石的界面等。

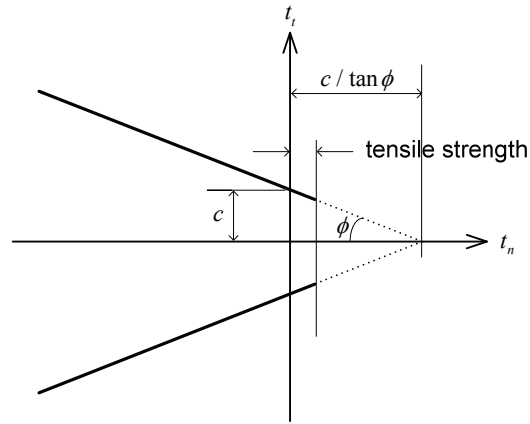


图 4-40 Coulomb Friction 函数

界面模型的主要非线性参数如下。用户也可以定义渗透系数或刚度来模拟界面行为。



图 4-41 界面参数设置对话框

[法向刚度模量 ( $K_n$ ) ]

法向刚度模量是界面单元在法线方向连接及非连接行为的弹性模量。一般取值范围是相邻单元较小的弹性模量值的 10~100 倍。

[剪切刚度模量 ( $K_t$ ) ]

剪切刚度模量是界面单元在切线方向滑动行为的弹性模量。一般取值范围是相邻单元较小的剪切模量的 10~100 倍。

界面的非线性需要通过 Coulomb 摩擦准则并结合试验曲线（相对位移-摩擦力曲线）的刚度参数计算。但也可以利用经验公式来预测两种材料间的界面行为，参数为虚拟厚度系数（ $t_v$ ）和强度折减系数（ $R$ ）。当节理界面单元时，下图所示的助手可结合两个设定的参数（ $t_v$  和  $R$ ）并根据邻近土体单元的单元属性自动进行计算。



图 4-42 界面助手参数设置对话框

**Tip**

界面材料可通过以下公式定义。采用邻近单元的刚度和非线性参数，即虚拟厚度系数  $t_v$  以及强度折减系数  $R$ 。界面材料刚度和参数要根据邻近土体或结构的相对刚度差赋予不同的值。这个过程可用助手进行简化。

$$K_n = E_{oed,i} / t_v$$

$$K_t = G_i / t_v$$

$$C_i = R \times C_{soil}$$

这里， $E_{oed,i} = \frac{2G_i(1-\nu_i)}{1-2\nu_i}$ ；（ $\nu_i$  为界面的泊松比，取值 0.45；界面用于分析非压缩摩擦行为，并采用 0.45 自动计算以避免数值错误）； $t_v$  为虚拟厚度系数（一般取值范围 0.01~0.1，岩土和结构构件的强度差越大，输入的值越小）； $G_i = R \times G_{soil}$ （ $G_{soil} = \frac{E}{2(1+\nu_{soil})}$ ）； $R$  为强度折减系数。

一般结构构件和相邻土体特性的强度折减系数如下。

- (1) 沙土/钢材  $R=0.6\sim0.7$
- (2) 粘土/钢材  $R=0.5$
- (3) 沙土/混凝土  $R=1.0\sim0.8$
- (4) 粘土/混凝土  $R=1.0\sim0.7$

勾选考虑单元尺寸选项时，可考虑界面材料生成界面时邻近土体单元的平均长度（线）、平均面积（面）来计算界面材料的特性。

换言之，根据以下方程，可将平均长度（ $l$ ）或平均面积（ $A$ ）乘以虚拟厚度系数计算界面单元的切向、法向刚度。

$$K_n = E_{oed,i} / (l \times t_v) \text{ 或 } K_n = E_{oed,i} / (\sqrt{A} \times t_v)$$

$$K_t = G_i / (l \times t_v) \text{ 或 } K_t = G_i / (\sqrt{A} \times t_v)$$

如果未勾选此选项，按单位长度（面积）计算。

线界面厚度需单独定义。对于 Modified Mohr-Coulomb 行为的土体材料的界面单元，厚度是重要的参数。一般的，邻近的土体单元尺寸可输入，但如果无法获取准确的数值时，程序会采用默认值。而对于一个三维模型，如在上面的例子，面界面不需要定义厚度。

当定义界面单元渗流的刚度时，可定义与土体渗透系数相同的“渗透系数”。如果未勾选这个选项，则界面不透水。

当定义了土体的膨胀角和抗拉强度时，界面单元需要定义更小或相等的值，粘聚力和内摩擦角可乘以强度折减系数。界面的膨胀角，在土体是无强度折减（ $R=1$ ）的刚体运动时，可定义与土体大小相同的膨胀角。但考虑强度折减时，通常输入 0 来定义刚体运动。

[Mode-II 模型]

Mode-II 模型用于表现界面的剪切行为和界面的切向滑移行为。按照下面两种模型，使用“保持常量剪切刚度”函数在数值分析的稳定性等方面具有适用性，如下图。

(1) 脆性模型 (Brittle model)

如果垂直方向的力大于抗拉强度，结构就不能承受荷载。

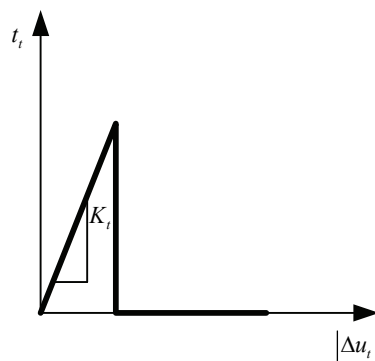


图 4-43 脆性模型

(2) 保持常量剪切刚度 (Constant Shear Retention)

在剪切方向上输入合适的值，使结构能够承受剪切方向的荷载。

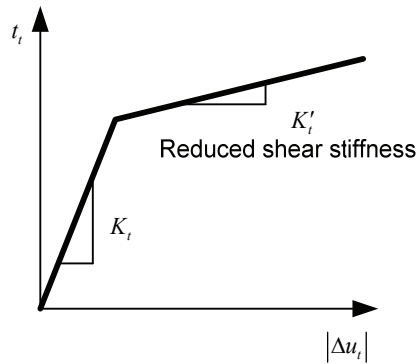


图 4-44 保持常量剪切刚度模型

[多线性硬化]

定义多线性硬化模型函数时，Coulomb 摩擦屈服准则的粘聚力和摩擦角随塑性位移的改变而改变。需要注意的是随着塑性位移的增大粘聚力和摩擦角也应当增大。这个行为特性必须通过试验来定义，并且主要用于研究，其意义大于实际应用。

壳界面 Shell Interface

壳界面单元是为了模拟壳界面行为，与普通的面单元相同。而且，壳界面单元能够承受板间旋转力。

- (1) 拉力不能传递到荷载和弯矩上；
- (2) 小旋转或剪切力线性行为；
- (3) 大旋转非线性弹性行为（Jassen 法则）；
- (4) 大剪切力塑性行为（Coulomb 摩擦）。

壳界面单元中的非线性移动行为遵循 Coulomb 摩擦法则，旋转行为遵循 Jassen 法则。几条限制条件：移动位移和界面力的关系遵循 Coulomb 摩擦模型，抗拉截断 Tension Cut-off 功能指定抗拉强度为 0，膨胀角与内摩擦角相同，并且未定义非对称材料属性矩阵。不需要单独定义硬化函数。



图 4-45 界面参数设置对话框与用户定义材料对话框

用户设定壳界面的功能，与“用户定义”材料模型相同。

26. 桩界面（桩界面 **Pile**&桩端界面 **Pile Tip**）

桩界面单元的行为是指主体单元与桩（如梁或桁架单元）之间的界面行为。桩界面行为可分为两个法向行为和一个切向行为。与界面单元相同，需定义模拟界面行为的剪切/法向刚度，但在这里假设两个法向方向进行刚体运动，与主体单元一致，切向（剪切）遵循非线性弹性运动。



桩端面单元的行为是主体单元和桩端面之间的界面行为。假设相对于桩端面单元坐标轴的法向方向与主体单元一致，进行刚体运动，切向（剪切）遵循非线性弹性运动。对于桩端面单元，可指定多条非线性材料模型曲线或按完全塑性行为输入值。

桩端面单元和桩端面单元是通过默认的刚度和承载力或极限强度来表现非线性行为。而且，也可以用函数定义桩端面的非线性行为，而且提供了按深度空间定义的不同函数。

用屈服强度定义桩端面的剪切刚度时，按如下图，假设基于高度变化的斜率和屈服强度遵循完全弹性行为。当以函数形式定义刚度时，用户可以按高度定义位移-摩擦力的关系曲线。

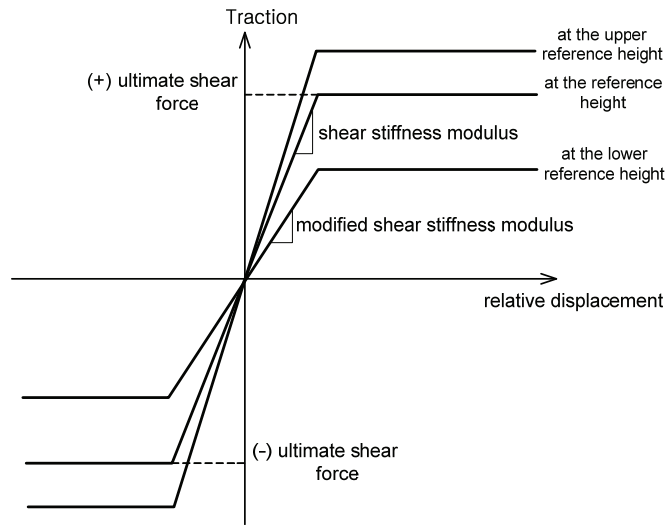


图 4-46 相对位移-摩擦力关系



图 4-47 桩端面单元参数设置对话框

输入正交方向确定的系数，在非线形分析中按线性执行。剪切方向的情况下，在线性中按输入的系数进行线性分析。在非线形分析的情况下，同时考虑极限剪切强度并按完全塑性模型分析。如果按深度分别考虑剪切刚度时，就必须使用函数。

### 最终剪力

沿着轴向按应力单位输入桩端面的最终剪切阻力 (kN)，并除以桩长 (m) 和桩端面单元厚度 (m)。桩端面的摩擦力是按单位长度的力 (kN/m) 输出，最终摩擦力按 [最终剪力 \* 桩端面单元的厚度 (m)]。

### 剪切刚度模量 (K<sub>t</sub>)

剪切刚度模量为摩擦应力 (kN/m<sup>2</sup>) 与相对位移 (m) 曲线中线性部分的斜率，单位为 kN/m<sup>3</sup>。当桩端面的切向摩擦力 (kN/m) 和相对位移 (m) 的分析结果按施加荷载的大小画出来，图形在达到最终摩擦应力前有一个线性的斜率 (kN/m<sup>2</sup>)，这就是输入的 [剪切刚度模量 (kN/m<sup>3</sup>) \* 桩端面单元厚度]。

### 函数

指定切向的非线性弹性行为，定义随深度变化的摩擦应力（ $\text{kN/m}^2$ ）与相对位移（ $\text{m}$ ）曲线，不再输入最终剪力和剪切刚度。

### 法向刚度模量（ $K_n$ ）

法向刚度模量为土体水平承载力关系曲线线性部分的斜率，将荷载除以桩界面的长度（ $\text{m}$ ）、桩界面单元厚度（ $\text{m}$ ）和相对位移（ $\text{m}$ ），并按应力形式表示。与侧向地基反力模量的概念相同，由一般的  $p$ - $y$  分析计算得到。当桩界面的法向反力（ $\text{kN/m}$ ）和相对位移（ $\text{m}$ ）的分析结果按施加荷载的大小画出来，线性部分的斜率（ $\text{kN/m}^2$ ）可表示为[法向刚度模量（ $\text{kN/m}^3$ ）\*桩界面单元厚度]。

采用设计规范的侧向地基反力模量计算公式，输入计算出的系数作为法向刚度模量，桩界面单元厚度可按单位宽度（ $1\text{m}$ ）输入。



因为桩界面的尺寸、长度以及邻近土体的材料特性都会影响桩界面单元的参数，理想的方式是采用荷载试验的结果。但是当无试验结果时，桩界面的极限侧摩阻力、侧向地基反力模量和端承力可由设计规范提供的公式以及邻近土体的参数（容重、粘聚力、内摩擦角等）来计算。

#### （1）采用荷载试验的结果

例如，如果桩界面在加载试验破坏前的荷载为  $1000\text{kN}$ ，并且桩长为  $10\text{m}$ ，则最终剪力为  $[1000\text{kN}/10\text{m}/1\text{m}] = 100\text{ kN/m}^2$ 。

剪切刚度模量为摩擦应力（ $\text{kN/m}^2$ ）与相对位移（ $\text{m}$ ）曲线中线性部分的斜率，直至加载到  $1000\text{kN}$ 。如果假设  $1000\text{kN}$  对应的相对位移为  $0.01\text{m}$ ，则剪切刚度模量为  $[100\text{ kN/m}^2 / 0.01\text{m}] = 10000\text{ kN/m}^3$ 。

#### （2）采用最终侧摩阻力的结果

对于每一个设计规范，建议采用各种公式并根据土体及桩的截面特性来预测桩的极限承载力。例如，如果计算出的极限侧摩阻力为  $50\text{ kN/m}^2$  和桩的轴表面积（相当于周长）为  $3\text{m}$ ，分别输入最终剪力  $50\text{ kN/m}^2$  的和桩界面单元厚度  $3\text{m}$ ，或输入最终剪力  $150\text{ kN/m}^2$  的和单位长度桩界面单元的厚度为  $1\text{m}$ 。桩界面单元长度会自动考虑。

因为荷载-相对位移没有直接关系，如果假定在极限承载能力范围内允许沉降发生，用于分析的剪切刚度模量也可由参考的允许沉降值推断。按前一个例子，如果允许的沉降是  $0.025\text{m}$ ，剪切刚度模量  $[150\text{ kN/m}^2 / 0.025\text{m}] = 6000\text{ kN/m}^3$ 。如果桩界面单元厚度为  $3\text{m}$ ，按照  $[50\text{ kN/m}^2 / 0.025\text{m}] = 2000\text{ kN/m}^3$  给出的结果相同。

但是，如果单位长度对应的桩界面单元厚度按不同的数值输入，需要注意的是法向刚度模量的值是一致的。

#### （3）应用界面助手公式

桩界面单元与界面单元可用来估测土体-结构相互作用行为。因为临近土体材料对桩界面的刚度和截面特性有很大的影响，桩界面单元的剪切/法向刚度可通过界面助手中计算切向/法向刚度的相关方程来推算。

$$K_n = E_{\text{oad},i} / t_v$$

$$K_t = G_i / t_v$$

这里， $E_{oed,i} = \frac{2G_i(1-\nu_i)}{1-2\nu_i}$ ； $\nu_i$  为界面的泊松比，取值 0.45；界面用于分析非压缩摩擦行为，并采用 0.45 自动计算以避免数值错误）； $t_v$  为虚拟厚度系数（一般取值范围为 0.01~0.1，岩土和结构构件的强度差越大，输入的值越小）； $G_i = R \times G_{soil}$ （ $G_{soil} = \frac{E}{2(1+\nu_{soil})}$ ）； $R$  为强度折减系数。

一般结构构件和相邻土体特性的强度折减系数如下。

- (1) 沙土/钢材  $R=0.6\sim0.7$
- (2) 粘土/钢材  $R=0.5$
- (3) 沙土/混凝土  $R=1.0\sim0.8$
- (4) 粘土/混凝土  $R=1.0\sim0.7$

当使用这种方法推算桩界面的剪切/法向刚度，最终剪力可以通过剪切刚度模量计算，如示例 2，并且分析中采用容许位移。

当试验结果不可用时，示例 2 和示例 3 是唯一可以接受的建议。为准确的预测行为，必须进行加载试验，或者通过反复的分析来计算所需的设计参数。

### 4.1.3 材料参数

#### 1. 默认参数（一般）

按定义各材料模型的默认刚度及初始条件输入的参数和单位如下表。

表 4-6 材料属性一般参数说明

输入参数	说明	单位
弹性模量 ( $E$ )	弹性模量	kN/m <sup>2</sup>
弹性模量增量	基于高度（斜率）变化的弹性模量的增量	kN/m <sup>3</sup>
参考高度	弹性模量增减的参考高度	m
泊松比 ( $\nu$ )	泊松比	-
容重 ( $\gamma$ )	非饱和土的容重 ( $\gamma_i$ )	kN/m <sup>3</sup>
初始应力参数 ( $K_0$ )	静止土压力系数（初始应力参数）	-
热膨胀系数	计算温度荷载的参数。	1/[T]
阻尼比	材料阻尼比（只适用于动力分析）	-



图 4-48 材料属性一般参数设置对话框

### 弹性模量 (E)

弹性模量是定义材料的默认初始刚度的参数。用户可指定弹性模量、剪切模量 (G) 或通过固结试验得到压缩模量 ( $E_{cod}$ )。因为岩土材料在加载初始阶段开始表现出非线性行为，因此输入的初始刚度是非常重要的。如下图，初始刚度可以由三轴压缩试验的应力-应变曲线确定。材料发生大应变前表现为线性（弹性）行为阶段使用  $E_0$  是比较现实的，但在一般的岩土材料上，可以把应力达到 50% 时的切线的斜率  $E_{50}$  为初始刚度。而且，在模拟基于一般的施工阶段分析过程中开挖引起的加载卸载时，用  $E_{ur}$  代替  $E_{50}$  使用能够更接近实际地模拟岩土行为。

利用初始刚度模拟岩土行为时，设置应力范围（大小）和应力路径是非常重要的。为了模拟如此详细的行为，可以使用各种非线性材料模型。

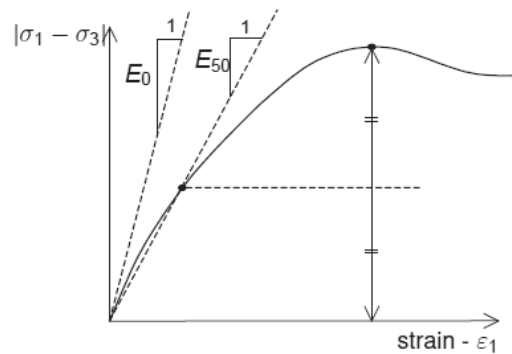


图 4-49 三轴抗压试验结果图示

将体积模量  $K$  (bulk modulus) 和剪切模量  $G$  (shear modulus) 用于岩土相关的连续体，可能有一些争议，但相对于  $E$  或  $\nu$  可以更简单清晰的表示出来，所以更便于使用。下图说明了  $K$  和  $G$  的力学含义。

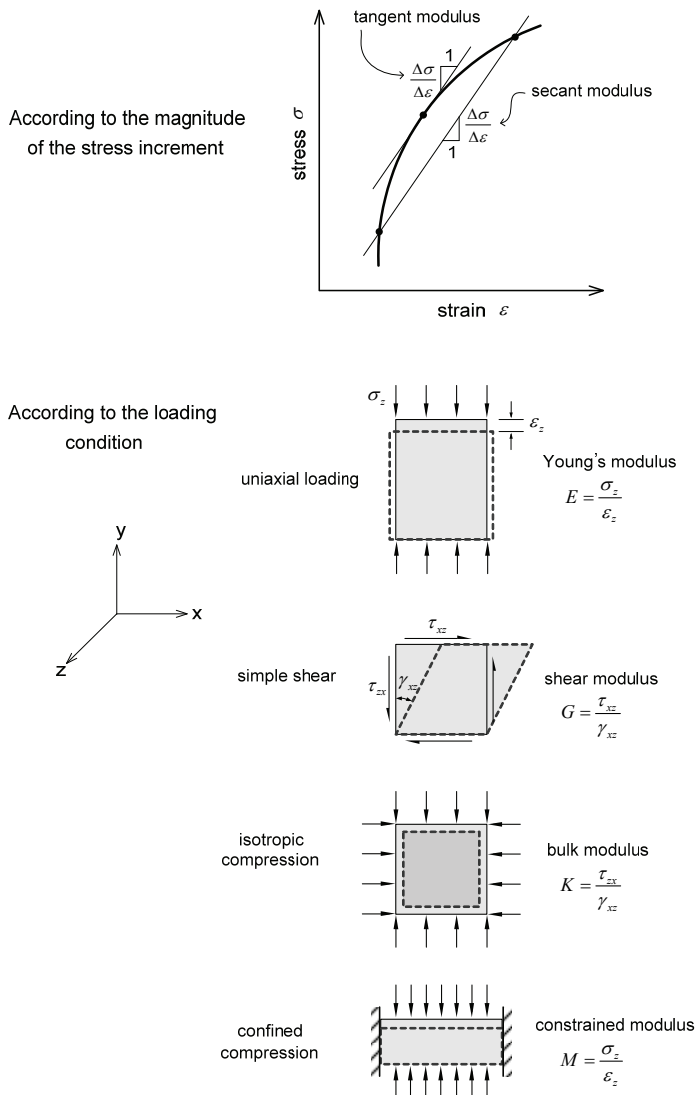


图 4-50 多种类型的弹性模量

基于现场试验得到的弹性模量可以是前面提到的多种弹性模量中的一个，也可通过适当的变换应用于实际情况。

表 4-7 岩石及其它材料的弹性模量和泊松比

岩土材料	弹性模量 (tonf/m <sup>2</sup> )	泊松比
角闪岩 amphibolite	9.4~12.1 (10 <sup>6</sup> )	0.28~0.30
硬石膏 anhydrite	6.8 (10 <sup>6</sup> )	0.30
辉绿岩 diabase	8.7~11.7 (10 <sup>6</sup> )	0.27~0.30
闪长石 diorite	7.5~10.8 (10 <sup>6</sup> )	0.26~0.29
白云石 dolomite	11.0~12.1 (10 <sup>6</sup> )	0.30
橄欖岩 dunite	14.9~18.3 (10 <sup>6</sup> )	0.26~0.28
片麻岩 gneiss	8.3~11.9 (10 <sup>6</sup> )	0.15~0.20
辉长石 gabbro	8.9~11.7 (10 <sup>6</sup> )	0.27~0.31
花岗岩 granite	7.3~8.6 (10 <sup>6</sup> )	0.23~0.27
冰 ice	7.1 (10 <sup>6</sup> )	0.36
石灰岩 limestone	8.7~10.8 (10 <sup>6</sup> )	0.27~0.30
大理石 marble	8.7~10.8 (10 <sup>6</sup> )	0.27~0.30

云母 mica Schist	7.9~10.1 (10 <sup>6</sup> )	0.15~0.20
黑曜石 obsidian	6.5~8.0 (10 <sup>6</sup> )	0.12~0.18
奥长岩 Oligoclaseite	8.0~8.5 (10 <sup>6</sup> )	0.29
石英 quartzite	8.2~9.7 (10 <sup>6</sup> )	0.12~0.15
岩盐 rock salt	3.5 (10 <sup>6</sup> )	0.25
板岩 slate	7.9~11.2 (10 <sup>6</sup> )	0.15~0.20
铝 aluminum	5.5~7.6 (10 <sup>6</sup> )	0.34~0.36
钢 steel	20.0 (10 <sup>6</sup> )	0.28~0.29

上表中的弹性模量是实验室中对小尺寸、完整岩样 (intact rock) 的试验值。因此, 在考虑现场情况时, 应当考虑大尺寸岩体内的不连续面, 可采用折减的弹性模量。下图为基于实际数据的 RQD (岩石质量指标) 与弹性模量折减率关系图。RQD 是在包含裂纹的 100cm 长钻芯上, 把长度大于 10cm 岩芯段长度之和与整体长度用百分比表达的值。即使 RQD 为 100% 也不能看做完整岩石。但是, RQD 越高岩质就可以认为越好, 风化作用越大的岩石 RQD 的数值越小。

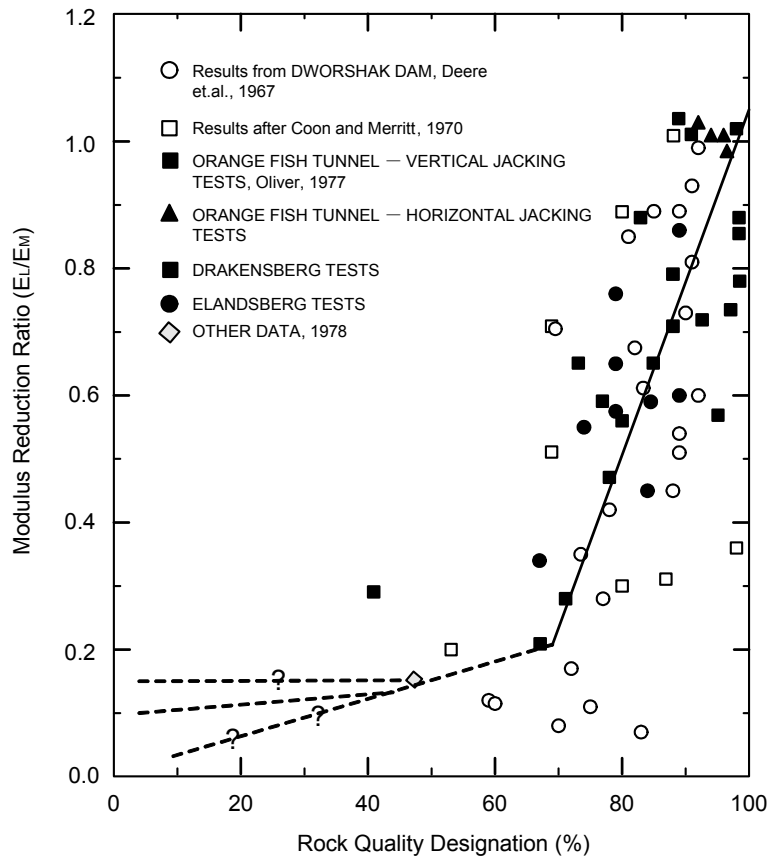


图 4-51 RQD 和弹性模量折减率 (EL/EM) 的关系

如上图, RQD 为 70% 对应的实验室弹性模量折减到 20%。

#### 弹性模量增量

一般情况下, 即使岩土各层材料相同, 土体的强度特性也会随着深度和围压的变化而变化。为了在分析中考虑这样的特性, 可以把参考高度 (标准高度) 作为基准, 按深度变化模拟弹性模量增减。参考高度为 0 时, 弹性模量为常量值; 参考高度不为 0 时, 按如下式公式计算弹性模量。

$$E = E_{ref} + (y_{ref} - y)E_{inc} \quad (y \leq y_{ref})$$

$$E = E_{ref} \quad (y > y_{ref})$$

这里， $E_{ref}$ ：输入的弹性模量值； $E_{inc}$ ：弹性模量的增量斜率； $y_{ref}$ ：测定  $E_{ref}$  值的深度。

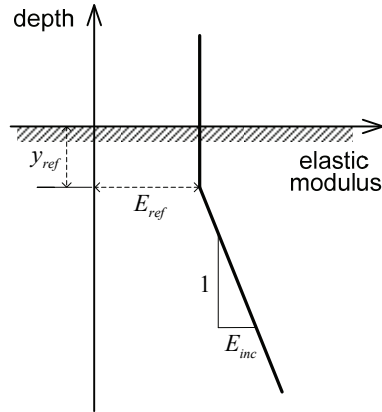


图 4-52 弹性模量增量的概念图

在上式中表示当前有限元法中进行计算的单元积分点的位置。如果积分点位置位于高于参考位置时，弹性模量有可能小于 0。为了防止这种情况，这时的弹性模量  $E$  不再减小，设为定值。

### 泊松比 ( $\nu$ )

泊松比也是应力-应变关系的比例常数，代表加载时材料体积的相应改变。 $\nu$  越接近 0.5，材料的不可压缩性 (Incompressible) 越明显；越接近 0，材料为弹性且表示即使很小荷载作用下也会出现很大的体积改变。根据自重产生的初始应力系数  $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$  与单轴压缩状态中的比率  $K_0 = \nu / (1 - \nu)$  相关。如果不使用设置的  $K_0$  值计算初始应力场，程序将根据输入的  $\nu$ ，通过垂直应力计算水平应力。岩土材料的泊松比范围一般在 0.3~0.4 以内，输入的值大于 0.49 时，可能会发生数值性的错误。因此，如果  $K_0$  大于 1，比如超固结地基，无法通过泊松比计算，因此必须直接输入数值。

### 剪切模量 ( $G$ )

基于胡克定律 (Hooke's law)，利用弹性模量和泊松比，程序自动计算剪切模量，关系式如下。如果直接输入剪切模量，弹性模量值随之改变。

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

### 压缩模量 ( $E_{oed}$ )

基于胡克定律方程 Hooke's law，利用弹性模量和泊松比，压缩模量可由如下关系式计算。

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

### 初始应力系数 ( $K_0$ )

$K_0$  为静止土压力系数，定义为初始水平应力/垂直应力的比值 ( $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$ )。 $K_0$  的各向异性特性可以参考整体坐标系进行设置。



图 4-53 各向异性初始应力系数设置对话框

首先，选择平行/不平行，确定整体坐标系的方向是否与各向异性特性一致，并根据选项设置各轴的方向或任意方向的侧压力系数。

**与整体坐标系方向平行时**，可以设置各轴方向侧压力系数，模型（2D/3D）重力方向的侧压力系数不能定义为“1”以外的值。

**与整体坐标系方向不平时**，侧压系数的方向由相对参考轴的角度设置。参考轴是指在为了设置压力系数的方向。工作环境为 2D 时按“X-Y”平面固定，所以，只能选择“X”轴，初始岩土剪应力都成为 0，3D 时可以分别选择重力方向以外的轴。例如，重力方向设置为“Z”轴，参考轴为“X”轴的情况下，输入角度为“X-Z”平面上的最大侧压力系数的作用角度，XY，YZ 方向的初始地基剪应力都成为 0。

初始应力状态，即岩土未受开挖或堆土干扰的状态下，可以用静止土压力系数和自重表示。即，在大部分的分析过程中，初始场地建模后的施工的第一个阶段中设置  $K_0$ ，可以得到与实际接近的应力状态。但是，在岩土表面平整时采用该方法是对的，对于倾斜的岩土，建议在先进行  $K_0$  计算应力后，再添加一个空的施工阶段，完成收敛平衡。

## 2. 渗流、排水/不排水参数

定义岩土的渗透特性及排水/不排水条件的输入参数和单位如下。

表 4-8 渗透特性参数说明

输入参数	说明	单位
容重（饱和）	饱和状态的容重	kN/m <sup>3</sup>
初始孔隙比（ $e_0$ ）	初始孔隙比	-
非饱和特性	设置非饱和特性函数（负孔隙水压-含水率-渗透率）	-
排水参数	排水/不排水条件	-
渗透系数	整体坐标系方向-饱和状态的渗透系数	m/sec
孔隙比依存系数（ $c_k$ ）	基于孔隙比变化的渗透率系数	-
贮水率（ $S_s$ ）	流入/流出水的体积比	l/m





图 4-54 渗流参数设置对话框

### 初始孔隙比 ( $e_0$ )

初始孔隙比是考虑固结分析及应力-渗流完全耦合分析时岩土体的初始孔隙比，是指孔隙与土中的颗粒部分的体积比，多数土体的孔隙比小于 1。如果是粘土或有机土就可能高于 1，但数值很大程度上依赖于采样方法或压实。一般情况下，粗砾砂孔隙比为 0.6~0.8，密度高且沙粒分布好的沙土为 0.3，细粒土的孔隙比甚至能达到 2~3。

### 非饱和特性

非饱和特性是为考虑岩土的非饱和特性而设定的，是瞬态渗流分析中必需的特性。此外，还用于考虑岩土的部分饱和度的非线性（施工阶段）/固结分析等。由于实际岩土是非饱和的，含有一定比例的空气，因此，为了得到更接近实际的分析结果，应当考虑非饱和特性的瞬态渗流分析。如果不考虑非饱和特性，并假设岩土为饱和状态，就无法进行基于时间变化的渗流分析。

非饱和特性可定义非饱和区域内的基于负孔隙水压大小的渗透率及含水率（饱和度）的变化。定义非饱和特性的方式有 2 个：直接定义（分别定义）基于压力水头（负孔隙水压）的渗透函数和含水率函数；或定义（定义关系）压力水头-体积含水率（饱和度）-渗透率的关系。更详细的说明请参考“函数>非饱和特性函数”。

### 排水参数

在应力分析的孔隙水压力可分为正常状态的孔隙水压力和非正常状态的孔隙水压力，即不排水条件下，由于外部载荷土体颗粒之间产生超孔隙水压力。超孔隙水压力接近 0 的状态称为排水条件，通常用于沙土等的渗透性大的岩土材料。但是，模拟如粘土等渗透性非常小，且瞬间载荷作用下，水并不能及时排出情况，应当执行不排水分析。在初始状态，超孔隙水压力还未消散，被看作是最不稳定的状态，孔隙水压力是由压缩性和渗透系数变化引起的体积变化来决定。

**不排水泊松比和 Skempton (B) 系数**作为计算水体积弹性的参数，不排水泊松比把压缩性接近 0 时的 0.495 作为默认值，Skempton 因子表示饱和的程度，越接近 1 越是完全饱和状态。

执行不排水分析的材料如下。对更详细的说明请参考理论分析手册第四章。

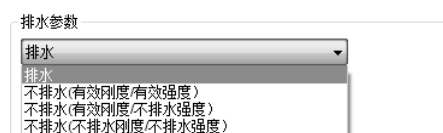


图 4-55 排水参数类型

表 4-9 排水/不排水参数说明

排水/不排水材料	可以使用的材料模型
排水	全部岩土材料
不排水（有效刚度/有效强度）	Elastic, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Duncan-Chang, Hoek-Brown, Strain Softening, Modified Cam-clay, Jardine, D-min, Modified Mohr-Coulomb, 用户定义, Transversely Isotropic
不排水（有效刚度/不排水强度）	Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Modified Mohr-Coulomb
不排水（不排水刚度/不排水强度）	Elastic, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Modified Mohr-Coulomb

**渗透系数 ( $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$ )**

用于执行渗流分析和固结分析，是表示岩石的渗透特性（速度）的指标。各方向渗透系数可以按整体坐标系定义。输入的数值作为饱和状态时的渗透系数，而定义非饱和特性函数时，作为计算基于负孔隙水压力的渗透率 ( $k_{unsat} / k_{sat}$ ) 的基准值。

**孔隙比依存系数 ( $c_k$ )**

渗透系数 (permeability coefficient) 作为岩石中单位时间内地下水移动距离的度量，依赖于岩石的含水率 (water content) 和孔隙比 (void ratio) 改变量  $\Delta e$ 。因为岩石的含水率越大，水可以流动的通道越大，因此饱和状态时的值为最大；因为含水率依存于孔隙水压力，所以，渗透系数也会随孔隙水压力而改变。固结分析及应力-渗流完全耦合分析中考虑孔隙比的变化，可根据初始孔隙比计算出。

在 GTS NX 中，为了表达孔隙水压力的变化，采用取决于饱和状态的渗透系数  $k_{sat}$  和孔隙水压力变化的渗透率函数  $k_r = k_r(p)$ ，孔隙比依存系数  $c_k$  依存于孔隙比改变量  $\Delta e$ 。非饱和状态中渗透系数依存于孔隙比改变量  $\Delta e$  的方程如下。

$$k = 10^{c_k \frac{\Delta e}{e}} k_r(p) k_{sat}$$

**贮水率 ( $S_s$ )**

贮水率是指由于承压含水层水位的上升或下降，单位体积含水层内流入或流出的水的体积。可直接输入系数或自动计算可压缩流体的方程。

在渗流及固结分析中，代表孔隙水压力的体积含水率改变量可以按如下孔隙率和饱和度表示。

$$\frac{\partial \theta}{\partial p} = S \frac{\partial n}{\partial p} + n \frac{\partial S}{\partial p}$$

其中，右边的第一项为饱和条件下的体积含水率坡度，可以用贮水率表示。

$$S \frac{\partial n}{\partial p} = \frac{\partial V_v}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial p} = \frac{S_s}{\gamma}$$

当材料的排水特性设为不排水，贮水率按不排水泊松比  $\nu_u$  自动计算，有效弹性模量  $E'$  和泊松比  $\nu'$  按正常参数输入。

$$K_f = BK_u = \frac{E'(v_u - \nu')}{(1 - 2\nu')(1 + \nu')(1 - 2\nu_u)}$$

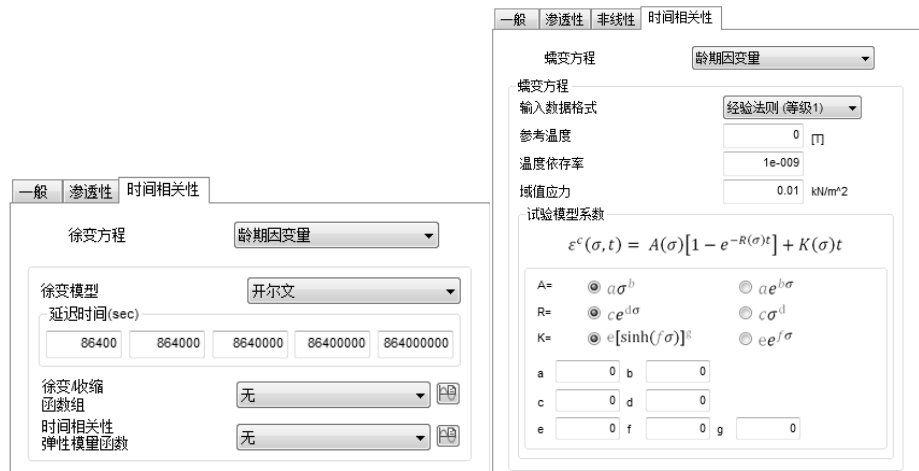
$$S_s = \frac{n\gamma_w}{K_w} = \frac{\gamma_w}{K_f}$$

$$S_s = \gamma_w \frac{(1-2\nu')(1+\nu')(1-2\nu_u)}{E'(\nu_u - \nu')}$$

### 3. 时间相关性

可以定义随着时间变化的材料。下列本构模型可用于混凝土结构材料：弹性，Tresca，von Mises，Mohr-Coulomb，Drucker Prager 和 Hoek Brown。

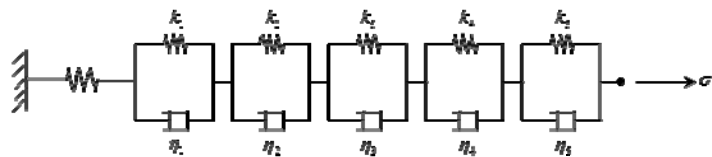
两种类型的蠕变方程可用于定义材料的时间相关性，龄期相关变量和龄期不相关变量。详细参考分析手册第四章第五部分。



#### (1) 龄期相关变量

**材龄依存：**定义材龄依存的徐变材料。混凝土类材料的特性会随着时间发生非受力变化的徐变和干燥收缩。另外，徐变会按照不同的起点应力，随时间有不同的变形量。徐变是当在材龄  $t_0$  的混凝土试件作用轴上加载单位应力，材龄  $t$  时发生的总应变称为徐变函数，徐变函数可以用以弹性应变与徐变的比值表示的徐变系数(creep coefficient)来表示。

**徐变模型：**使用 5 个时间相关的特定徐变曲线来定义 aging-Kelvin 徐变模型，该模型中可以使用不含弹簧的 aging-viscous 徐变模型。



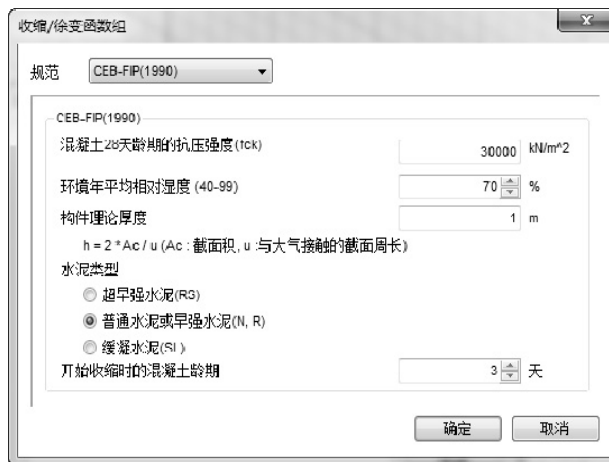


定义混凝土随着时间变化的干燥收缩和徐变的特性。

可以输入该材质初始加载的材龄时间和间隔时间。

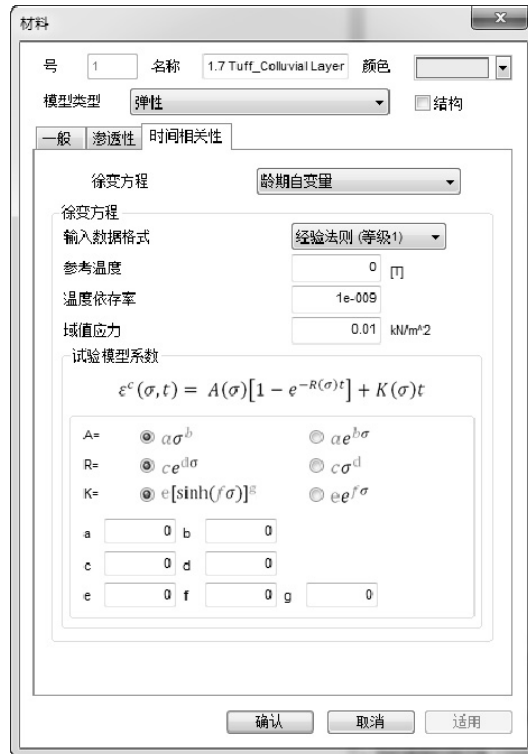
**显示徐变/收缩量：**定义后，可以通过图表确认自动计算的时间依存特性。

### 数据库



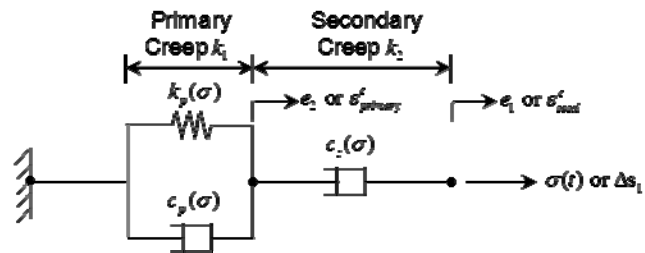
选择规范后，输入最终时间和步骤间隔。

### (2) 龄期不相关变量



**Age Independent:** 材龄不相关。设置独立徐变材料。

在一定的温度和应力条件下，轴向抗拉试验中的粘弹性材料的行为分为三类。第一阶段徐变(primary creep)是随着时间应变速度变慢的区间；第二阶段徐变(secondary creep)是应变速度稳定的区间，第三阶段徐变(tertiary creep)是应变速度增加的区间。GTS NX 中对各项同性材料可以使用第一阶段徐变和第二阶段徐变，设置依靠经验的徐变行为为经验法则(等级 1/2)，或直接输入徐变参数。



#### 4.1.4 属性

##### 概要

添加/定义岩土及结构的属性。修改生成的岩土或结构的属性。对于岩土，要定义采用的材料；对于结构，要添加截面大小、形状（刚度）及水平间距等特性。水平间距是指是在二维模型中的水平方向上的结构件之间的一维间距。还有在梁或板单元的尺寸（厚度）变化时，可以设置变化的变截面（Tapered Section）。



图 4-56 添加/修改属性对话框

方法

[建立]

可以在如下 4 种类型的属性中选择，添加要使用属性的材料类型和截面特性。



图 4-57 建立属性类型

按各属性类型支持的模型类型如下。可定义截面形状/大小、以及依赖于间距和设定的材料的刚度。

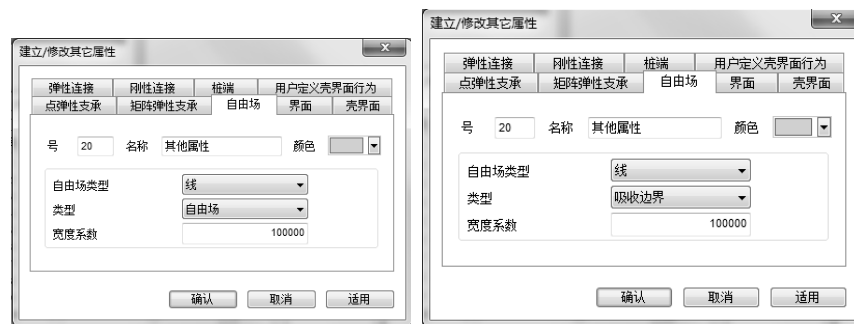
表 4-10 属性类型说明

属性类型	模型类型	岩土属性	结构属性	非线性特性
1D	土工栅格 (1D)	×	○	仅受拉
	仅显示 (1D)	×	×	-
	桁架	×	○	线弹性 仅受拉/钩 仅受压/间隙 非线性弹性
	植入式桁架	×	○	线弹性 仅受拉/钩 仅受压/间隙 非线性弹性
	梁	×	○	-
	植入式梁单元	×	○	-
	桩界面	×	○	-
2D	土工栅格 (2D)	×	○	仅受拉
	仅显示 (2D)	×	×	-
	测量板	×	○	-
	轴对称板	○	×	-
	平面应力	×	○	仅受拉
	平面应变	○	×	-
3D	实体	○	×	-
其它	刚性连接	×	○	-
	桩端界面	×	○	-

壳界面的用户自定义	×	○	-
点弹性支承	×	○	一般 仅受拉 仅受压 钩 间隙 非线性
矩阵弹性支承	×	○	-
界面	×	○	-
壳界面	×	○	-
弹性连接	×	○	一般 刚体 仅受拉 仅受压 非线性弹性

各属性的输入参数及详细说明请参考理论分析手册第三章。

### 自由场



自由场单元用于模拟岩石的边界，模拟岩石无限边界的特性。可在 2D/3D 岩土模型中按线/平面类型生成。不过不能考虑几何非线性。

**自由场**：模拟无限范围的岩土，在岩土边界生成自由场单元。

**吸收边界**：为消除发生在模型边界的反射波，使用吸收边界条件。

**宽度系数**：为最小化关心区域内模型的影响，使用宽度系数，增大宽度。宽度系数乘以实际关心模型的宽度使用，数值要大于  $10^4$  倍。

另外，植入式梁单元的截面形状、坐标系等输入参数及输出结果与梁单元一致。并且同样适用于定义释放端部约束及定义偏移。植入式梁单元不能定义为非线性材料，但可以用于几何非线性分析。(具体事项请参考分析手册第三章 7.3 节梁单元)

梁单元在和其他单元一起使用时必须共享节点（节点耦合），但植入式梁单元和植入式桁架单元一样，不需要共享节点，可用于简化建模。

[修改/复制/删除]

修改添加属性的参数，当添加多个材料且只改变几个确定的参数时，可使用复制功能。

[导入]

从保存材料/属性的其他模型文件中导入材料属性。这个操作在相同的条件下分析现有项目时非常有效。选择导入文件生成包含所有材料的材料列表。用户可选择需要的材料。

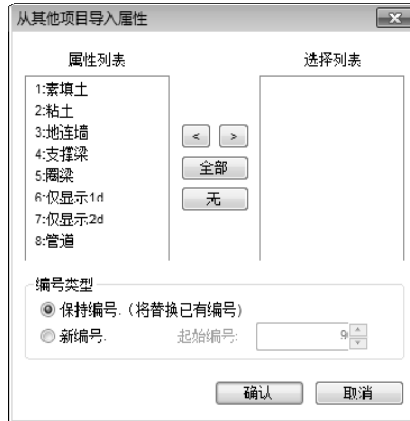


图 4-58 导入属性对话框

[重新编号]

修改材料的编号。需要反复添加/删除时，编号会按最近添加的编号+1 自动设置。

## 4.1.5 截面特性

### 概要

在一维的桁架、植入式桁架、梁单元的情况下，应当定义截面特性。其中桁架和植入式桁架只需要截面面积，但梁单元需要定义截面面积、扭转刚度、第一和第二截面惯性矩，以考虑扭转、弯曲及剪切等材料特性。

定义平面应力单元、2D 土工栅格单元、板单元、平面应变单元、轴对称单元、桩界面单元、界面单元等，需要定义单元的厚度。其中，其中平面应变单元、轴对称单元和界面单元，程序按内部单位取为 1，并且用户可以根据厚度自定义。

平面应力单元、2D 土工栅格单元和板单元的情况下，使用用户直接输入的厚度值。这时，板单元有旋转自由度，因为可以对其进行非线性分析，则要沿厚度方向进行积分。

### 1. 一维单元

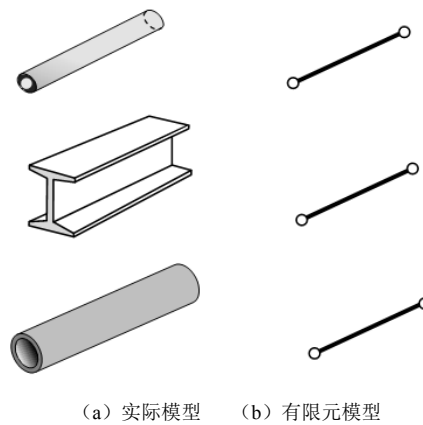
一维单元是拥有长度几何特性，由 2 个（一阶）或 3 个（二阶）的节点构成的单元。因为三维形状按一维单元表示，所以需要定义截面（大小、形状），并在计算时按二维单元建模。

GTS NX 中提供多种形状，如下图所示。在定义截面特性时可以设置位置。



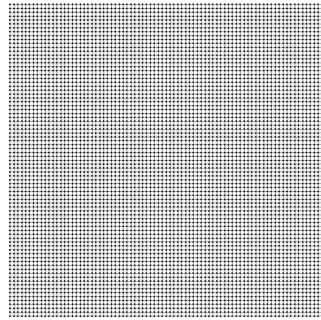


图 4-59 一维单元属性设置对话框

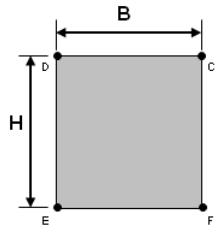


(a) 实际模型 (b) 有限元模型

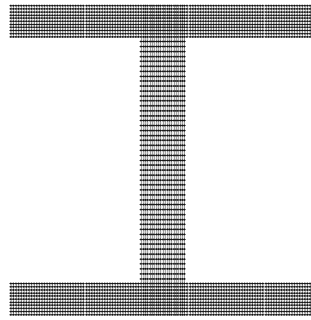
图 4-60 实际模型与一维有限元模型对比



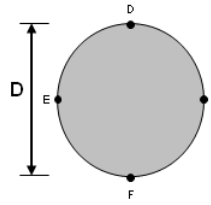
QUAD-4 6400 个单元  
<实心矩形>



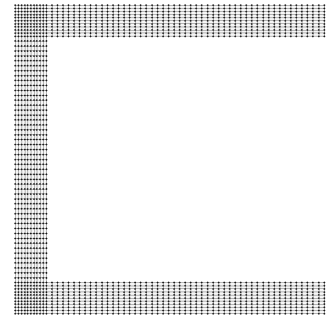
<实心矩形>



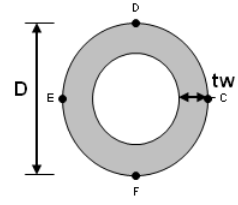
QUAD-4 3400 个单元  
<H 截面>



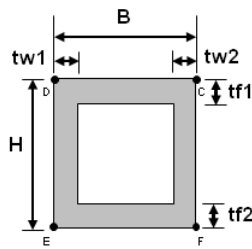
<实心圆形>



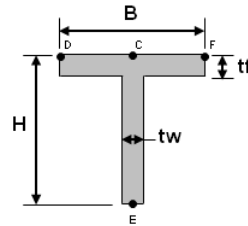
QUAD-4 1700 个单元  
<槽型>



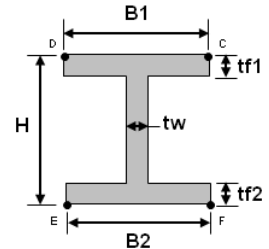
<管型>



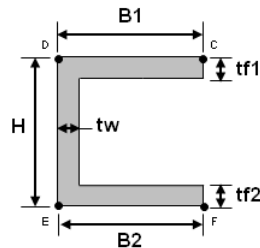
<箱形>



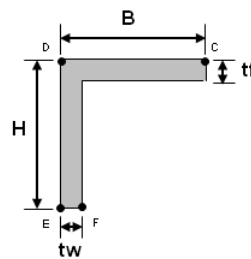
<T 型>



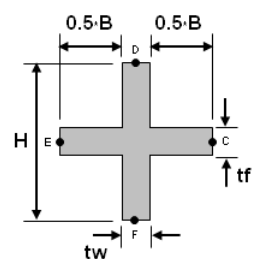
<H 型 1>



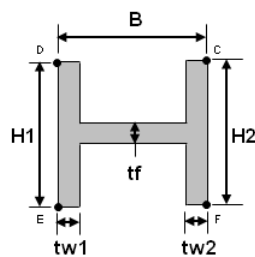
<槽型 1>



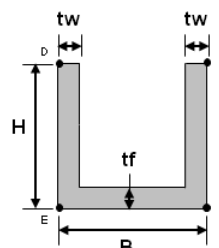
<直角形>



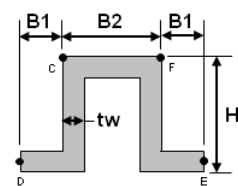
<十字形>



<H 型 2>



<槽型 2>



<帽型>

图 4-61 GTS NX 截面数据库

## 2. 二维单元

二维单元是拥有面积几何特性的三角形（Triangle）或四边形（Quadrilateral）单元。因为三维形状用二维单元表示，所以要定义厚度。厚度可以设定均匀厚度或定义变厚度。

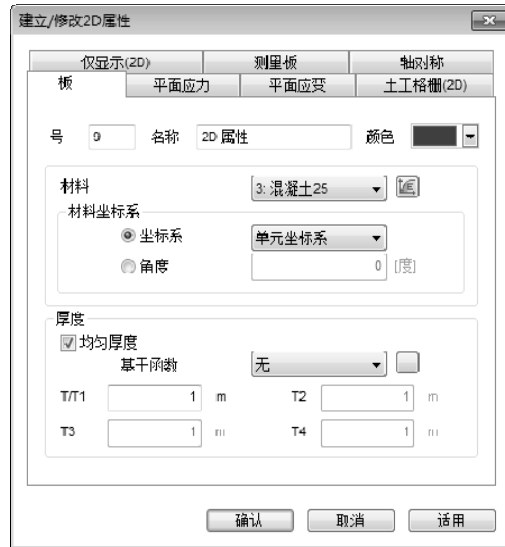


图 4-62 二维单元属性设置对话框

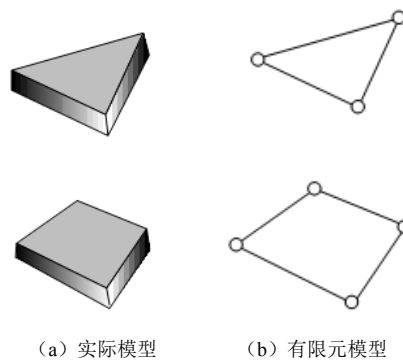


图 4-63 实际模型与二维有限元模型对比

## 3. 三维单元

三维是拥有体积几何特性的四面体（Tetrahedron）或六面体（Hexahedron, Brick）单元。

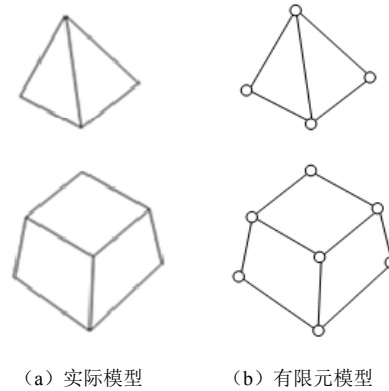


图 4-64 实际模型与三维有限元模型对比

#### 4. 截面积 (A: cross sectional area)

截面积 (cross sectional area) 用于计算构件在承受张拉或轴力 (axial force) 或应力作用时的轴向刚度。以下为 H 型截面的计算方法。

GTS NX 中计算截面积的方法有两种。第一种方法是从提供的截面形状数据库中输入所需的截面尺寸，程序自动计算截面积；第二种方法是用户直接输入计算截面积。第一种方法虽然使用方便，但没有考虑接合处的螺栓或铆钉接合孔等引起的截面积减少，所以，按第二种方法输入用户直接计算的截面积更能表示准确的结果。

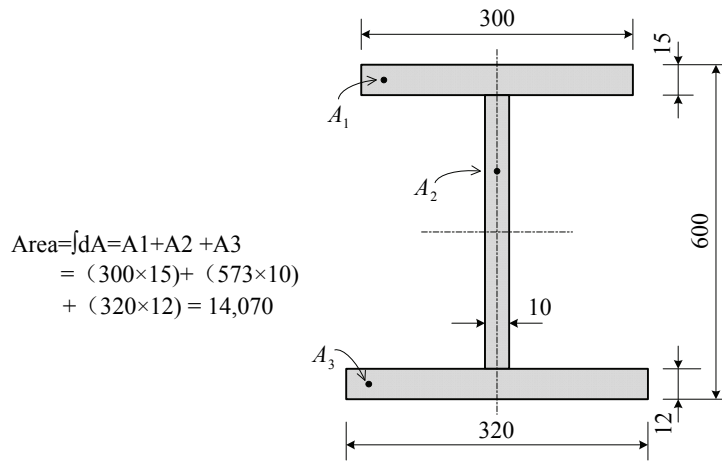


图 4-65 计算截面积的示例

#### 5. 扭转常量 ( $I_{xx}$ : torsional resistance)

扭转常量  $I_{xx}$  代表抗扭的能力，表达式如下。

$$I_{xx} = \frac{T}{G\theta}$$

在这里，

$I_{xx}$ : 扭转常量 (截面惯性矩 (torsional resistance));

$T$ : 扭矩 (torsional moment or torque);

$\theta$  : 扭转角 (angle of twist);

$G$  : 剪切模量。

按上式, 扭转常量是抵抗扭转的能力, 与决定扭转剪应力的极惯性矩 (polar moment of inertia) 不同 (只有在圆形截面或厚圆筒截面时, 二者相同)。

用扭转常量可由圣维南原理 Saint-venant 按下式计算。

$$T = G\theta \int \left[ \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} + y \right) y - \left( \frac{\partial \omega}{\partial y} - z \right) z \right] dA$$

$\omega$  为翘曲函数 (warping function)  $\omega(y, z)$ , 可采用有限元法用下列方程式计算。

$$\int \left( \frac{\partial \delta \omega}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial \delta \omega}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) dA = \int \left( \frac{\partial \delta \omega}{\partial y} z - \frac{\partial \delta \omega}{\partial z} y \right) dA$$

$T = I_{xx} G\theta$  扭转常量可以按如下显示。

$$I_{xx} = \int \left[ \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} + y \right) y - \left( \frac{\partial \omega}{\partial y} - z \right) z \right] dA$$

## 6. 有效剪切面积 ( $A_{sy}$ , $A_{sz}$ : effective shear area)

有效剪切面积 (effective shear area) 用来计算抵抗构件单元坐标系 y 轴或 z 轴方向作用的剪力 (shear force) 的剪切刚度 (shear stiffness)。如果没有输入有效剪切面积, 将忽略相应方向的剪切变形。

$$A_{sy} = S_{ky} A$$

$$A_{sz} = S_{kz} A$$

在这里

$S_{ky}$  : 单元坐标系 y 轴方向抵抗剪力的有效剪切系数;

$S_{kz}$  : 单元坐标系 z 轴方向抵抗剪力的有效剪切系数;

$A_{sy}$  : 单元坐标系 y 轴方向抵抗剪力的有效剪切面积;

$A_{sz}$  : 单元坐标系 z 轴方向抵抗剪力的有效剪切面积。

在计算内截面特性或由数据库输入的情况下, 剪切刚度分量被自动考虑, 有效剪切系数可通过由弯曲产生的剪力得到翘曲函数 (warping function) 和圣维南原理 Saint-venant 中的翘曲函数计算, 表达式如下。

$$\frac{1}{S_{ky}} = \frac{A}{V_y} \left[ \frac{I_{\phi y} I_{yy} - I_{\phi z} I_{yz}}{I_{yy} I_{zz} - I_{yz}^2} + \frac{\nu}{2(1+\nu)} \frac{(C_{zz} I_{yy} - C_{yy} I_{yz})}{I_{yy} I_{zz} - I_{yz}^2} \right]$$

$$\frac{1}{S_{kz}} = \frac{A}{V_z} \left[ \frac{I_{\phi z} I_{zz} - I_{\phi y} I_{yz}}{I_{yy} I_{zz} - I_{yz}^2} + \frac{\nu}{2(1+\nu)} \frac{(C_{zz} I_{zz} - C_{yy} I_{yz})}{I_{yy} I_{zz} - I_{yz}^2} \right]$$

在这里,

$$\begin{aligned}
 I_{\phi y} &= \int \phi y dA & I_{\phi z} &= \int \phi z dA \\
 C_{yy} &= \int \tau_{xz} (y - y_o)^2 dA & C_{zz} &= \int \tau_{xy} (z - z_o)^2 dA \\
 y_o &= \frac{\int \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} + y \right) y^2 dA}{2 \int \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} + y \right) y dA} & z_o &= \frac{\int \left( \frac{\partial \omega}{\partial y} + z \right) z^2 dA}{2 \int \left( \frac{\partial \omega}{\partial y} + z \right) z dA}
 \end{aligned}$$

7. 截面惯性矩 ( $I_{yy}$ ,  $I_{zz}$ : area moment of inertia)

截面惯性矩 (area moment of inertia) 用于计算抵抗弯矩 (bending moment) 的弯矩刚度 (flexural stiffness) 时, 并在截面的中性轴上按下面的式子计算。

(1) 单元坐标系 y 轴的截面惯性矩

$$I_{yy} = \int z^2 dA$$

(2) 单元坐标系 z 轴的截面惯性矩

$$I_{zz} = \int y^2 dA$$

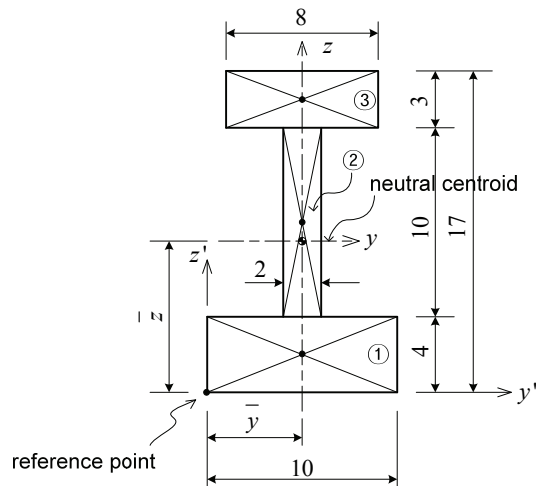


图 4-66 截面惯性矩的计算模型

表 4-11 计算截面静矩及中心

截面单元	$b$	$h$	$A_i$	$\bar{z}_i$	$Q_{zi}$	$\bar{y}_i$	$Q_{yi}$
①	10	4	40	2	80	5	200
②	2	10	20	9	180	5	100
③	8	3	24	15.5	372	5	120
总	-	-	84	-	632	-	420

$A_i$ : 面积;

$\bar{z}_i$ :  $z'$  轴方向上参考点到截面单元中心的距离;

$\bar{y}_i$ :  $y'$  轴方向上参考点到截面单元中心的距离;

$Q_{zi}$ :  $y'$  轴方向上相对于参考点的截面静矩 (一次面矩);

$Q_i$ :  $z'$  轴方向上相对于参考点的截面静矩 (一次面矩)。

(3) 计算中性轴位置 ( $\bar{Z}$ ,  $\bar{Y}$ )

$$\bar{Z} = \frac{\int \bar{z} dA}{Area} = \frac{Q_y}{Area} = \frac{632}{84} = 7.5238$$

$$\bar{Y} = \frac{\int \bar{y} dA}{Area} = \frac{Q_z}{Area} = \frac{420}{84} = 5.0000$$

(4) 计算截面惯性矩 ( $I_{yy}$ ,  $I_{zz}$ )

表 4-12 计算截面惯性矩

截面单元	$A_i$	$\bar{Z} - \bar{z}_i$	$I_{y1}$	$I_{y2}$	$I_{yy}$	$\bar{Y} - \bar{y}_i$	$I_{z1}$	$I_{z2}$	$I_{zz}$
①	40	5.5328	1224.5	53.3	1277.8	0	0	333.3	333.3
②	20	1.4672	43.1	166.7	209.8	0	0	6.7	6.7
③	24	7.9762	1526.9	18.0	1544.9	0	0	128.0	128.0
总		2794.5	238.0	3032.5		0	468.0	468.0	

$$I_{y1} = A_i \times (\bar{Z} - \bar{z}_i)^2, \quad I_{y2} = \frac{bh^3}{12}, \quad I_{yy} = I_{y1} + I_{y2}$$

$$I_{z1} = A_i \times (\bar{Y} - \bar{y}_i)^2, \quad I_{z2} = \frac{hb^3}{12}, \quad I_{zz} = I_{z1} + I_{z2}$$

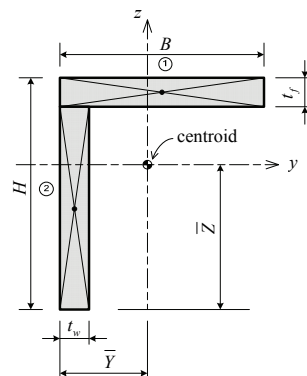
### 8. 截面惯性积 ( $I_{yz}$ : area product moment of inertia)

截面惯性积 (area product moment of inertia) 用于计算非对称截面的应力分量时, 其定义如下。

$$I_{yz} = \int y \cdot z dA$$

H 型, 管型, 箱形, 槽型, T 型截面至少按单元坐标系  $y$ 、 $z$  轴的某一个轴对称, 因此  $I_{yz} = 0$ 。对于角型截面, 并不沿某一个轴对称 ( $I_{yz} \neq 0$ ), 所以应力分量需要计算。

角型截面的截面惯性积计算方法如下图。



$$I_{yz} = \sum A_i \times e_{yi} \times e_{zi}$$

$$= (B \times t_f) \times (B/2 - \bar{Y}) \times \{(H - t_f/2) - \bar{Z}\}$$

$$+ \{(H - t_f) \times t_w\} \times (t_w/2 - \bar{Y}) \times \{(H - t_f/2) - \bar{Z}\}$$

图 4-67 截面惯性积的计算模型

表 4-13 计算角型截面的截面惯性积

截面单元	$A_i$	$e_{zi}$	$e_{zi}$
①	$B \times t_f$	$B/2 - \bar{Y}$	$(H - t_f/2) - \bar{Z}$
②	$(H - t_f) \times t_w$	$t_w/2 - \bar{Y}$	$(H - t_f/2) - \bar{Z}$

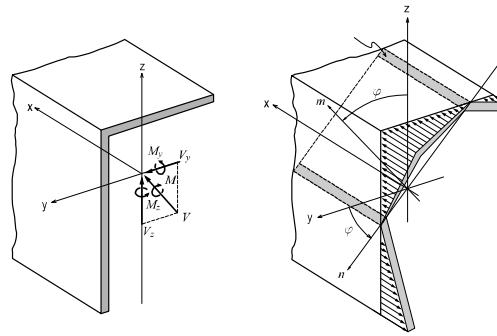


图 4-68 非对称型截面上的弯曲应力分布图

中性轴 (neutral axis) 是指通过构件内弯曲应力为 0 位置的轴。中性轴与  $m$ -轴和  $n$ -轴正交。

在中性轴上基于弯矩的弯曲应力为“0”，可以从下列方程求得中性轴的方向。

$$(M_y \times I_{zz} + M_z \times I_{yz}) \times z - (M_z \times I_{yy} + M_y \times I_{yz}) \times y = 0$$

$$\tan \phi = \frac{y}{z} = \frac{M_y \times I_{zz} + M_z \times I_{yz}}{M_z \times I_{yy} + M_y \times I_{yz}}$$

用于计算基于弯矩的截面弯曲应力的一般式如下。

$$f_b = \frac{M_y - M_z (I_{yz} / I_{zz})}{I_{yy} - (I_{yz}^2 / I_{zz})} \times z + \frac{M_z - M_y (I_{yz} / I_{yy})}{I_{zz} - (I_{yz}^2 / I_{yy})} \times y$$

如果是 H 型截面的情况  $I_{yz} = 0$ ,

$$f_b = \frac{M_y}{I_{yy}} \times z + \frac{M_z}{I_{zz}} \times y = f_{by} + f_{bz}$$

在这里,

$I_{yy}$ : 单元坐标系 y 轴的截面惯性矩 (二次面矩);

$I_{zz}$ : 单元坐标系 z 轴的截面惯性矩 (二次面矩);

$I_{yz}$ : 截面惯性积;

$y$ : 从中性轴到要计算的弯曲应力位置的单元坐标系 y 轴方向的距离;

$z$ : 从中性轴到要计算的弯曲应力位置的单元坐标系 z 轴方向的距离;

$M_y$ : 单元坐标系 y 轴的弯矩;

$M_z$ : 单元坐标系 z 轴的弯矩。

计算沿单元坐标系 y 轴及 z 轴剪力作用下的剪应力的一般式如下。



$$\tau_y = \frac{V_y}{b_z \times (I_{yy} \cdot I_{zz} - I_{yz}^2)} \times (I_{yy} \cdot Q_z - I_{yz} \cdot Q_y) = \left( \frac{I_{yy} \cdot Q_z - I_{yz} \cdot Q_y}{I_{yy} \cdot I_{zz} - I_{yz}^2} \right) \times \left( \frac{V_y}{b_z} \right)$$

$$\tau_z = \frac{V_z}{b_y \times (I_{yy} \cdot I_{zz} - I_{yz}^2)} \times (I_{zz} \cdot Q_y - I_{yz} \cdot Q_z) = \left( \frac{I_{zz} \cdot Q_y - I_{yz} \cdot Q_z}{I_{yy} \cdot I_{zz} - I_{yz}^2} \right) \times \left( \frac{V_z}{b_y} \right)$$

在这里，

$V_y$ ：作用于单位坐标系 y 轴方向的剪力；

$V_z$ ：作用于单元坐标系 z 轴方向的剪力；

$Q_y$ ：单元坐标系 y 轴的截面静矩（一次面矩）；

$Q_z$ ：单元坐标系 z 轴的截面静矩（一次面矩）；

$b_y$ ：在与单元坐标系 y 轴垂直的方向上，要计算剪切应力位置的截面厚度；

$b_z$ ：在与单元坐标系 z 轴垂直的方向上，要计算剪切应力位置的截面厚度。

#### 9. 截面静矩（一次面矩）（ $Q_y$ ， $Q_z$ ：first moment of area）

用于在截面的任意位置上计算剪应力时的截面静矩（first moment of area），按如下计算。

$$Q_y = \int z dA$$

$$Q_z = \int y dA$$

截面关于 y, z 的两轴中对某一轴对称或均对称时，任意位置上的剪切应力按如下计算。

$$\tau_y = \frac{V_y \cdot Q_z}{I_{zz} \cdot b_z}$$

$$\tau_z = \frac{V_z \cdot Q_y}{I_{yy} \cdot b_y}$$

在这里，

$V_y$ ：作用于单元坐标系 y 轴方向的剪力；

$V_z$ ：作用于单元坐标系 z 轴方向的剪力；

$I_{yy}$ ：单元坐标系 y 轴的截面惯性矩；

$I_{zz}$ ：单元坐标系 z 轴的截面惯性矩；

$b_y$ ：在与单元坐标系 y 轴垂直的方向上，要计算剪切应力位置的截面厚度；

$b_z$ ：在与单元坐标系 z 轴垂直的方向上，要计算剪切应力位置的截面厚度。

#### 10. 单元厚度

GTS NX 中为了定义平面应力单元、2D 土工栅格单元、板单元、平面应变单元、轴对称单元、界面单元等单元，需要定义单元的厚度。其中对于平面应变单元和轴对称单元及界面单元，程序按内部单位为 1。

在平面应力单元、2D 土工栅格单元、板单元的情况下，用户直接输入厚度值。这时板单元有旋转自由度，因为可以对其进行非线性分析，则要沿厚度方向进行积分。

### 11. 间距

该功能仅适用于项目设置为 2D 时，激活 1D 单元属性。在 2D 模型中当用户需要沿着水平轴向（厚度方向）定义 1D 单元时，这个选项用于考虑每个单元的一维单元内力。

如果用户未勾选间距选项，在 GTS NX 中，间距将被视为项目设置中定义的平面应变厚度，这意味着单位厚度是基于所选择的单位系统。



图 4-69 间距及平面应变厚度定义对话框

在 GTS NX 中，间距用于计算每个单元刚度以及输出各单元的内力。

$$K^* = K / n = \frac{E \times A / n}{L}$$

这里， $n$  = 间距； $L$  = 长度； $A$  = 面积； $K^*$  = 考虑间距的刚度。

$$f = \sigma A^* = E \varepsilon (nd) \frac{A}{n}, f^* = nf$$

这里， $f^*$  = 内力。

例如，

已知， $E = 1000 \text{ N/m}^2$ ， $L = 10 \text{ m}$ ， $A = 1 \text{ m}^2$ ，间距  $n = 0.5 \text{ m}$ ，并且施加外荷载  $F = 1000 \text{ N}$ 。

$$F = K^* D = \frac{EA}{nL} D = \frac{1000 \text{ N/m}^2 \times (1 \text{ m}^2 / 0.5)}{10 \text{ m}} D = 200 \text{ N/m} \times D$$

$$D = F / K = 5 \text{ m}$$

$$\varepsilon = D / L = \frac{5\text{m}}{10\text{m}} = 0.5$$

$$\sigma = E\varepsilon = 500 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$f = \sigma A^* = 500 \text{ N} / \text{m}^2 \times (1\text{m}^2 / 0.5) = 1000 \text{ N}$$

内力的计算，如下：

$$f^* = nf = 0.5 \times 1000 \text{ N} = 500 \text{ N}$$

### 4.1.6 坐标系

#### 概要

添加 2D/3D 单元的结果输出坐标系。默认定义整体直角/圆柱坐标系，其它坐标系可通过坐标系的三个平面中的任意一个定义。定义 2D/3D 单元的特性时，可通过添加的坐标系设定材料坐标系。对于 2D 结构构件，很难按照单元形状沿着某一个方向统一单元坐标系。可按照相同的方向和符号约定设置输出坐标系，检查整个结构构件的内力。

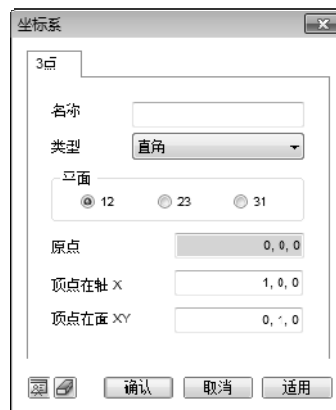


图 4-70 坐标系设置对话框

#### 方法

坐标系有两种类型：直角和圆柱坐标系。坐标系可通过在三个平面 12, 23, 31 (XY, YZ, ZX) 之一上输入三点定义。即，通过输入的三点平面为设定的 12, 23, 31 平面中的一个，其它两个平面会自动根据设定的平面方向确定。

选择平面，按顺序设置原点、平面一轴上的点和平面上的一点，决定参考平面的位置和方向。

### 4.1.7 函数

#### 概要

生成网格以后设定各分析条件（边界条件、荷载等）时，可以把随位置及时间变化的值用函数表示。程序提供的函数类型如下，并按函数设定了特征及使用范围。

一般函数
广义空间函数
曲面函数
徐变函数
收缩应变函数
徐变/收缩函数
弹性模量函数
塑性硬化函数
渗流边界函数
非线性弹性函数（桁架）
非线性弹性函数（点弹簧/弹性连接）
非饱和特性函数
应变相容特性函数
反应谱函数
时程荷载函数

图 4-71 函数类型

表 4-14 函数类型及说明

函数类型	适用范围		
	材料/属性	边界条件	荷载
一般函数（空间）	-	水位条件	集中荷载、强制位移， 压力荷载，预应力，初始应力，节点动力荷载，动力面荷载
一般函数（非空间）	桩界面，桩端面		
广义空间函数	-	水位条件	集中荷载，强制位移， 压力荷载，预应力， 初始平衡力，动力节点荷载， 曲面动力荷载
曲面函数	-	水位条件	-
徐变函数	-	-	-
收缩应变函数	-	-	-
徐变/收缩函数	-	-	-
弹性模量函数	-	-	-
塑性硬化函数	-	-	-
渗流边界函数	-	节点水头， 节点流量， 曲面流量	-
非线性弹性函数（桁架）	桁架， 植入式桁架	-	-
非线性弹性函数（点弹簧/弹性连接）	点弹簧， 弹性连接	-	-
非饱和特性函数	独立， 相关	-	-
应变相容特性函数	二维等效	-	-
反应谱函数	-	-	反应谱
时程荷载函数	-	-	地面加速度，时变静力荷载， 节点动力荷载，曲面动力荷载

### 1. 一般函数（空间）

把随着整体直角以及圆柱坐标系变化而变化的值设定为函数，可以将其用于设定荷载。可在窗口直接指定水位，但把基于坐标变化的水位定义为函数的话，可以在施工阶段中使用水位线。

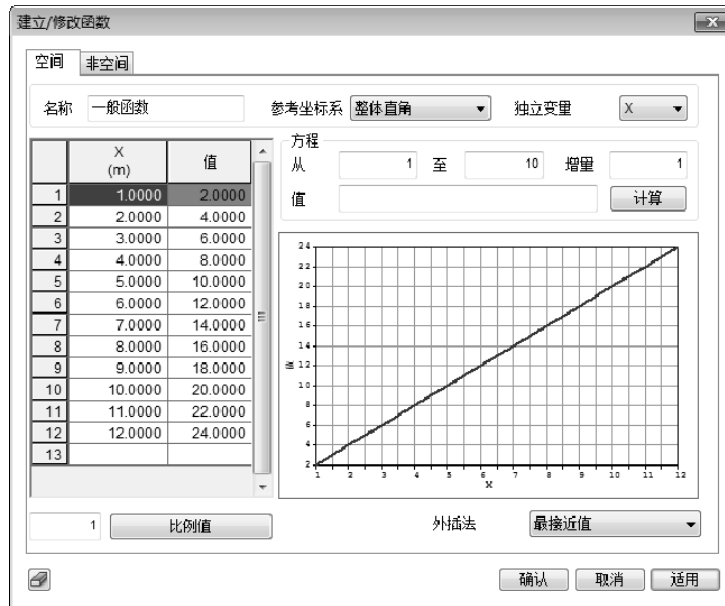


图 4-72 一般函数的示例

设定基于参考坐标系分量的独立变量 (X, Y, Z 或 R, TH, Z), 并且在表上输入的变量值将生成函数。另外, 也可从 Excel 中复制+粘贴生成的函数。

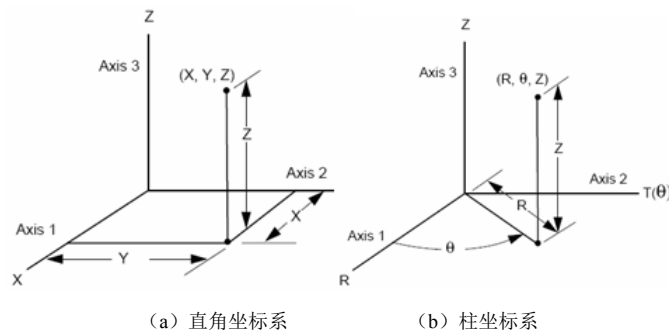


图 4-73 基准参考坐标系

[方程]

可以不直接定义独立变量的值, 而是用方程式指定。

例如, 在笛卡尔坐标系中, 设定与  $Y=2*X$  相同的函数时, 指定 X 坐标范围 (开始, 结束), 输入要计算函数值的 X 坐标增量, 在值上输入  $2*X$  后选择计算按钮就会自动生成和上式一样的函数。

圆柱坐标系的情况下, 以 TH 坐标为基准在一定角度之间定义  $SIN(TH)$  的函数时, 输入角度范围 (开始、结束) 和角度增量后, 在值上输入  $SIN(TH)$  就会在规定的角度范围内生成  $\sin$  函数。

[比例值]

比例值是对定义的函数乘以设定的值。初始值设置为 1。例如, 按 2 倍增加定义的所有函数值, 在比例值上输入 2。

[外插法]

是对超出函数的独立变量范围之外的值设定函数值的方法。用户可以决定把定义区间以外的函数值设定为 0，使用最接近变量的函数值，或采用线性插值。

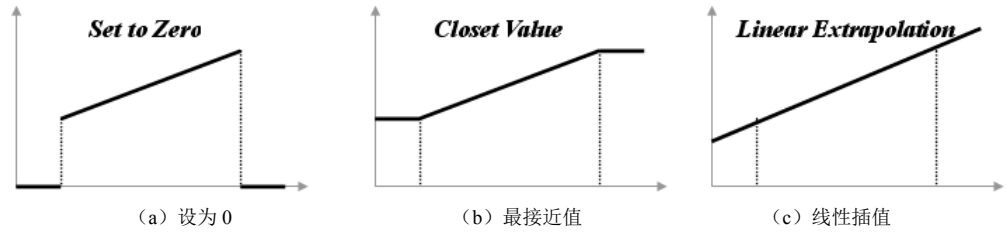


图 4-74 外插法的类型

### 2. 一般函数（非空间）

指定桩界面、桩端界面单元的剪切强度及弹簧刚度为函数时使用。“相对位移 (d) vs 力/面积”用于定义桩界面的剪切刚度函数，“相对位移 (d) vs 力/长度”用于定义桩端界面的弹簧刚度函数。

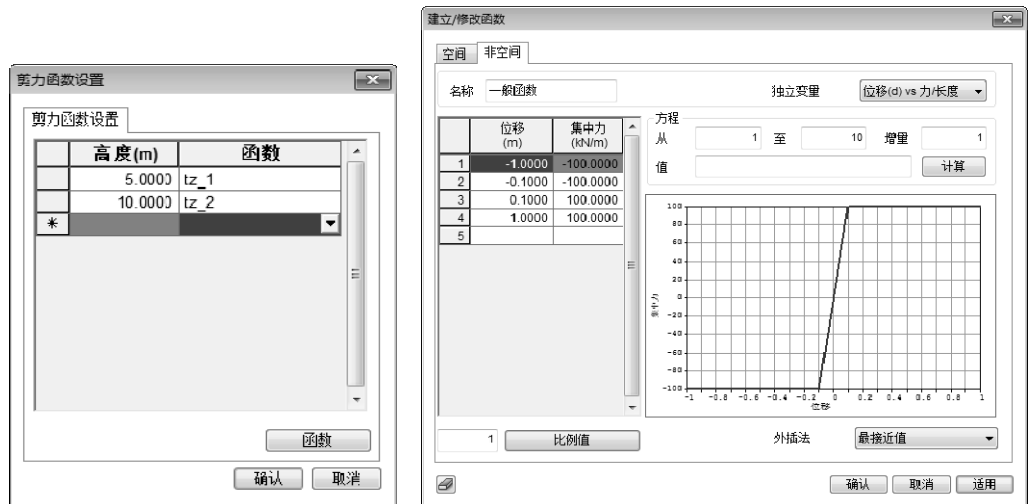


图 4-75 一般函数（非空间）的示例

### 3. 广义空间函数

与一般函数（空间）的使用目的及功能相同。只是在一般函数（空间），只能设定一个独立变量轴的一维空间函数，而广义空间函数可以生成同时考虑三个轴所有方向的函数。输入方式及详细功能与一般函数（空间）相同。

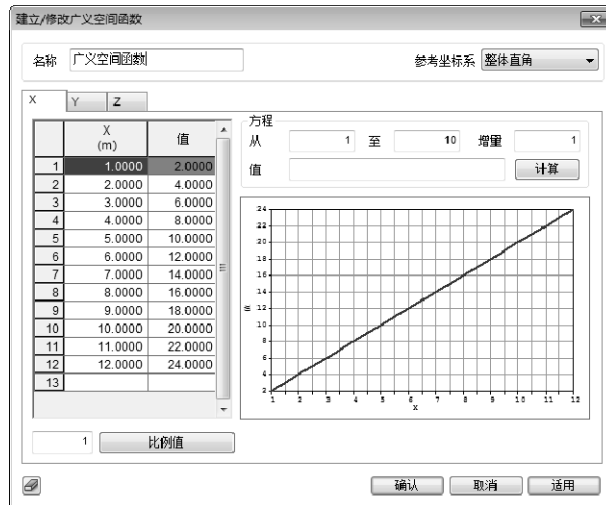


图 4-76 广义空间函数的示例

根据参考坐标输入独立变量 (X, Y, Z 或 R, TH, Z), 并按照表上输入的变量值生成函数。也可从 Excel 中复制+粘贴生成的函数。

#### 4. 曲面函数

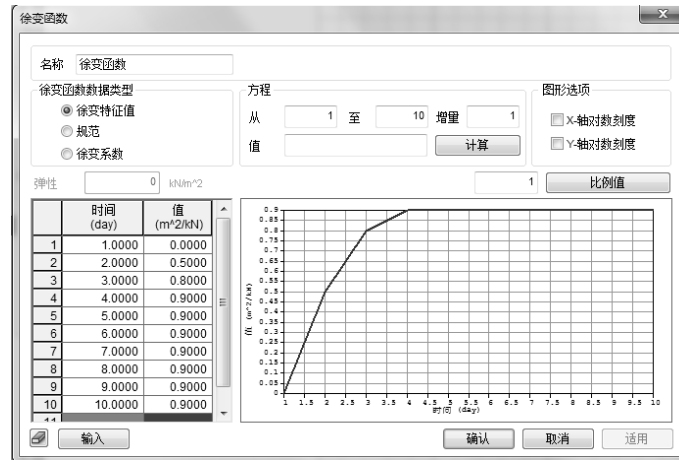
用于指定三维空间上的水位的函数。以整体或圆柱坐标系为基准可以定义变量值生成三维水位面, 也可以在渗流/固结分析>边界>水位中, 直接选择模型上的空间面, 自动提取坐标信息生成水位面。这里, 坐标间距决定水位面的准确度, 对于水位面突变的位置应当按照单元节点位置仔细地设置间距。



图 4-77 曲面函数的示例

#### 5. 徐变函数

定义不同时间的混凝土的徐变特点。用户定义规范时直接定义徐变函数。



有三种徐变函数类型：

**\*指定徐变 Specific Creep**

单位应力产生的应变，不包含直接变形

**\*徐变函数**

单位应力产生的应变，包含直接变形

**\*徐变系数 Creep Coefficient**

关于弹性应变与徐变应变的比值(徐变系数)

**弹性 Elasticity**

分析徐变时会使用指定的徐变(Specific Creep)，指定徐变由输入的徐变系数除以输入的混凝土徐变弹性模量来计算。

**输入 Import**

保存常使用的徐变函数为文件后读取时使用。

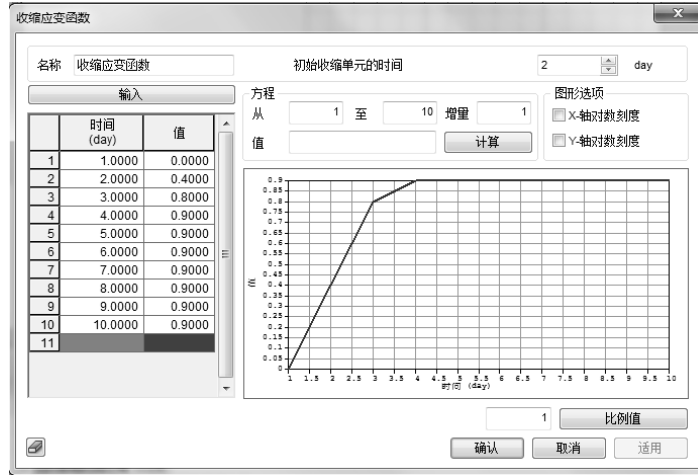
保存常使用的徐变函数为文件后读取时使用，文件格式(fn.TDM)如下。

* Unit, cm, kgf	指定适用单位(选择项)
* Data	-
20, 0.9934	以 day, value 的形式输入 Data (必备项)
40, 1.2182	-
60, 1.3705	-
80, 1.4883	-
100, 1.5854	-

**6. 收缩应变函数**

定义随时间变化的干燥收缩应变。干燥收缩应变以'-'值来表示应变的收缩。用户可以直接设置干燥收缩函数。

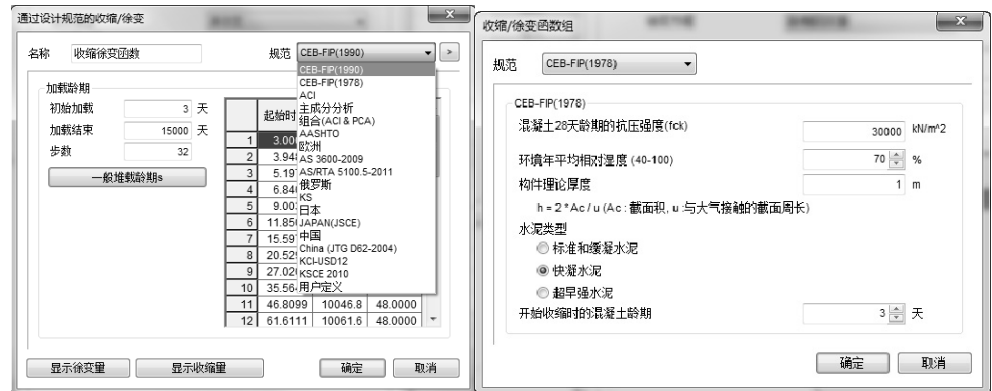




输入 Import: 与徐变函数一致。

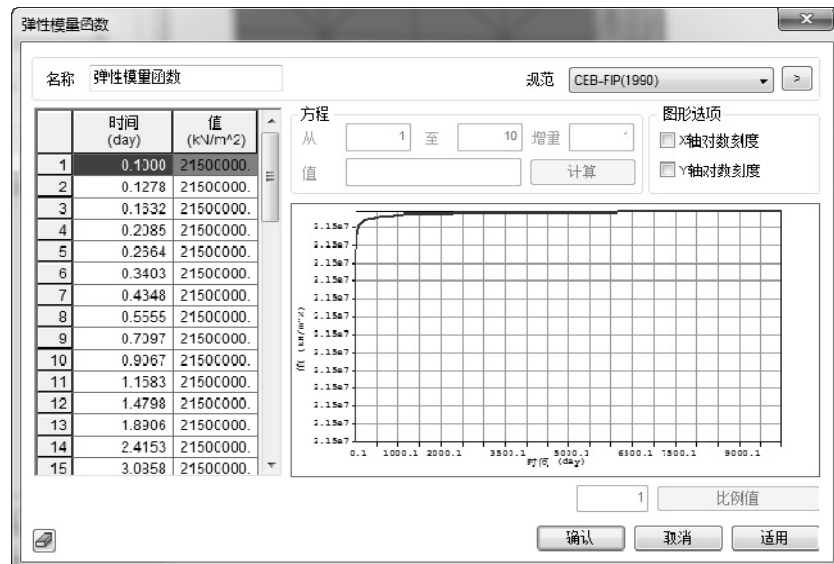
### 7. 徐变/收缩函数组

用户可根据嵌入的规范定义徐变/收缩函数如下:



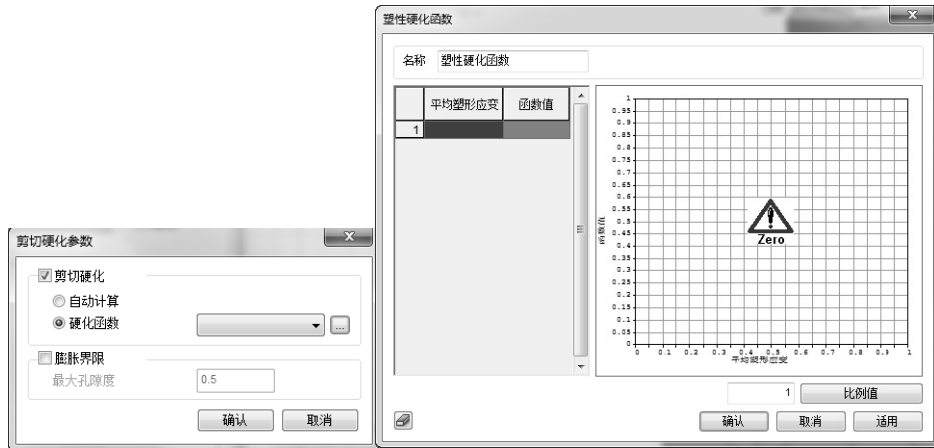
### 8. 弹性模量函数

可基于选择的设计规范定义弹性模量随时间变化的值，用户需输入结束时间及步数。



### 9. 塑性硬化函数

修正摩尔库伦模型的剪切硬化可以用等效塑性应变与随动剪切力关系来定义。使用“自动计算”选项，会根据偏塑性应变重新计算摩擦角。



### 10. 渗流边界函数

用于模拟随时间变化的水头、流量，如节点水头、节点流量、面流量等。按照设定的时间单位输入基于时间推移变化的值（水头/流量）生成函数，可以在执行瞬态渗流分析时使用。

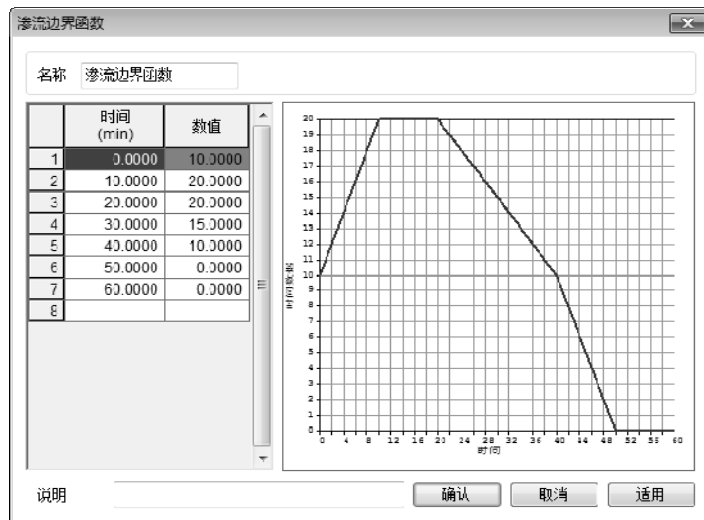


图 4-78 渗流边界函数的示例

在瞬态渗流分析中，结果查看的时间步需另外设置，而时间函数的时间步则用于分析。在这里，时间步函数超出范围时，超出的函数值按照线性插值自动计算。即，对超出函数范围的时间步要设置为 0 的情况下，应当设置任意超出的时间步对应的函数值为 (0)，如上图所示。

### 11. 非线性弹性函数（桁架）

定义桁架单元或植入式桁架单元的特性可以定义为非线性弹性。应力随桁架单元应变的改变可直接用函数生成。这个函数可以用于结构构件（桁架）拉伸（压缩）试验结果或者一般钢构件的变形行为特性。

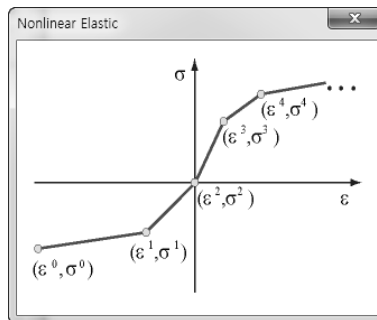


图 4-79 非线性弹性行为（桁架）

### 12. 非线性弹性函数（点弹簧/弹性连接）

点弹簧、弹性连接单元的行为特性可以定义为非线性弹性。基于单元应变的点弹簧/弹性连接刚度定义为函数。

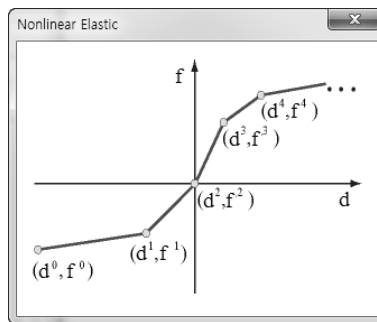


图 4-80 非线性弹性行为（点弹簧/弹性连接）

### 13. 非饱和特性函数

稳态渗流分析假设岩土为饱和状态，即使输入了非饱和特性也不会用于计算。反之，对于时间依存的瞬态渗流分析，必须考虑岩土的非饱和特性。另外，因为实际岩土是非饱和的，且含有一定比例的空气，所以为了接近实际情况，应当采用非饱和特性的瞬态分析。

非饱和特性可定义与岩土的非饱和区域中负孔隙水压力大小相关的渗透率及含水率（饱和度）的变化。定义非饱和特性的方式有 2 种：直接定义（独立）基于压力水头（负孔隙水压力）的渗透函数和含水率函数；定义相关联（相关）的压力水头-体积含水率（饱和度）-渗透率的关系。

#### (1) [独立]

定义渗透率函数和含水率函数数据。基于非饱和土试验数据，可通过曲线拟合输入各函数的系数或用户直接输入数据来定义函数。如果直接输入试验数据时，负孔隙水压力大小按绝对值输入，渗透率比按非饱和状态值与饱和状态值的比值。

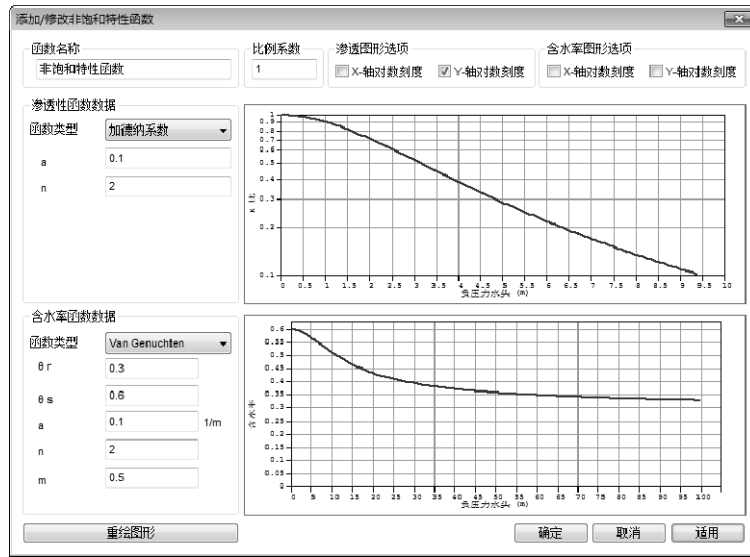


图 4-81 非饱和特性函数对话框

程序提供的渗透率函数及系数如下。

### 加德纳 (Gardner) 系数

$$R_k = \frac{1}{1 + a|h|^n}$$

$R_k$  (即  $K$  比) : 相对渗透率= (基于  $h$  增加的渗透系数) / ( $h=0$  时的渗透系数);

$a, n$  : 通过非饱和和试验数据的拟合曲线估算的试验常数。

### Frontal 函数

$$R_k = \begin{cases} l & \text{if } H = 0 \\ (R_{k0} - l) \frac{H}{H_0} + L\varphi & \text{if } 0 < H < H_0 \\ R_{k0} & \text{if } H \geq H_0 \end{cases}$$

$R_k$  : 相对渗透率 (渗透系数比) = (基于  $h$  增加的渗透系数) / ( $h=0$  时的渗透系数);

$H_0$  : 渗透系数不再减少时的水头。

### Van Genuchten 函数 (相对渗透率)

$$R_k = \frac{\left\{ 1 - (ah)^{n-1} \cdot [1 + (ah)^n]^{-m} \right\}^2}{[1 + (ah)^n]^{m/2}}$$

$R_k$  : 相对渗透率 (渗透系数比) = (基于  $h$  增加的渗透系数) / ( $h=0$  时的渗透系数);

$a, n, m$  : 通过非饱和和试验数据的拟合曲线预测的试验常数。

### Van Genuchten (含水率)

$$\theta_w = \theta_\gamma + \frac{\theta_s - \theta_\gamma}{[1 + (ah)^n]^m}$$

$\theta_w$  : 体积含水率;

$\theta_r$  : 残余体积含水率;

$\theta_s$  : 饱和体积含水率;

$a, n, m$  : 通过非饱和试验数据的拟合曲线预测的试验常数。

(2) [相关]

按照 JICE (Japan Institute of Construction Eng.), 可根据岩土类型设置非饱和材料特性的数据。各岩土类型的压力水头-体积含水率 (饱和度) -渗透率函数关系如下。

表 4-15 相关的非饱和和特性参数说明

压力水头 (P) - 体积含水率 (T) - 渗透率 (K)		压力水头 (P) - 饱和度 (S <sub>r</sub> ) - 非渗透系数 (K)	
(T) - (P)	(T) - (K)	(S <sub>r</sub> ) - (P)	(S <sub>r</sub> ) - (K)
砾石土 [G], [G-F], [GF] (JICE)	砾石土 (JICE)	砾石土 [G], [G-F], [GF] (JICE)	砾石土 [G], [G-F], [GF] (JICE)
沙土 [S], [S-F], [SF] (JICE)	沙土 [S], [S-F], [SF] (JICE)	沙土 [S], [S-F], [SF] (JICE)	沙土 [S], [S-F], [SF] (JICE)
沙土 [SF] (JICE)	粘土 [M], [C] (JICE)	沙土 [SF] (JICE)	粘土 [M], [C] (JICE)
粘土 [M], [C] (JICE)	用户定义	粘土 [M], [C] (JICE)	用户定义
用户定义		用户定义	

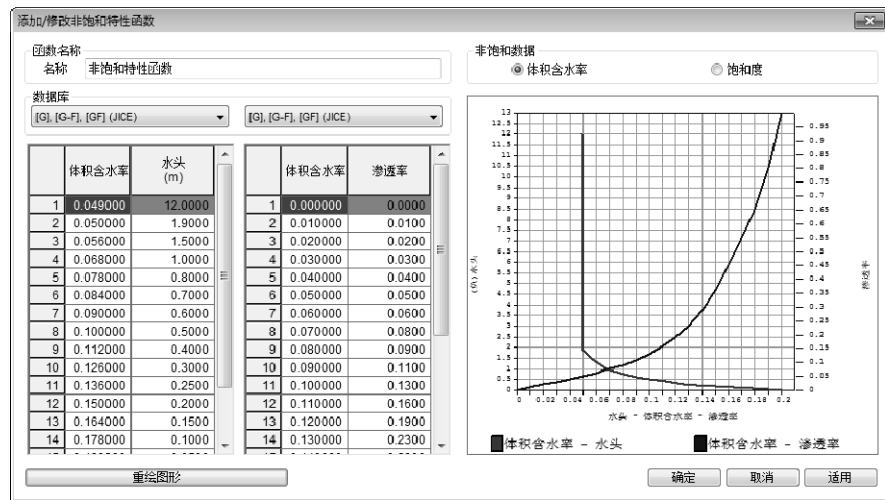


图 4-82 非饱和和特性函数的示例

在瞬态分析中，每个时间步（施工步骤）都会计算负压力水头（负孔隙水压力）并用于更新相对渗透系数。基于求得的压力水头求解体积含水率（饱和度）；基于求得的体积含水率（饱和度），并在每个阶段更新相对渗透系数。

#### 14. 应变相容特性函数

对于二维等效线性分析，为了考虑岩土的线性和非弹性响应，剪切模量和阻尼比定义为应变的函数。在不定义函数的情况下，岩土材料假设为线性，分析采用输入的（固定的）剪切弹性模量和阻尼比。一般地，岩土会表现出剪切弹性模量的减小，阻尼比增大的趋势。复杂的非线性行为的岩土，材料属性简化为等效线性的属性。基于假设的初始值通过反复计算，得到收敛的剪切弹性模量及阻尼比。

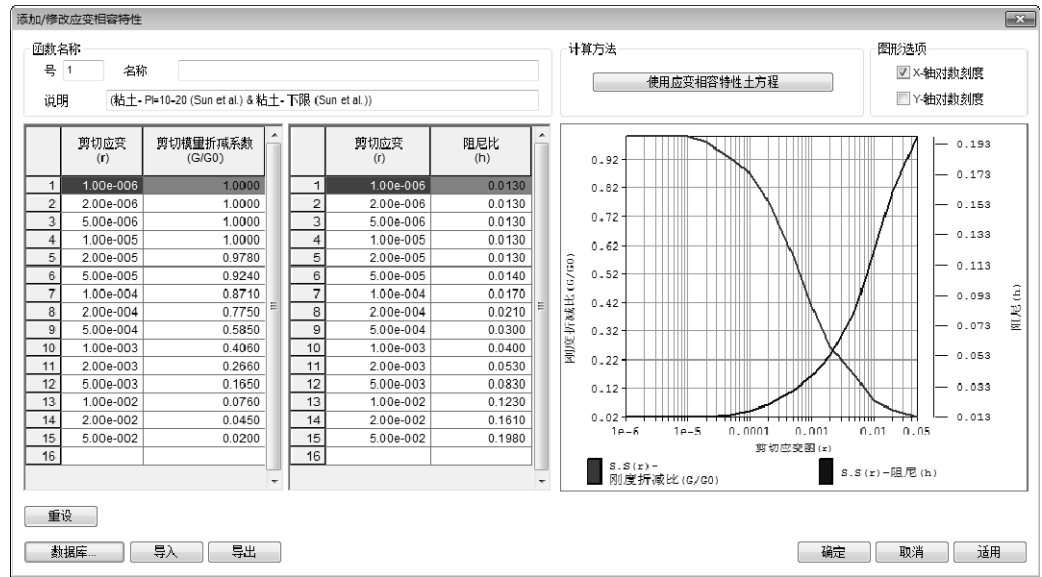


图 4-83 动力应变相容特性函数对话框

材料属性可由多种现有的数据库中定义。可用如下关联式按地层特性建立函数。



图 4-84 相关数据库

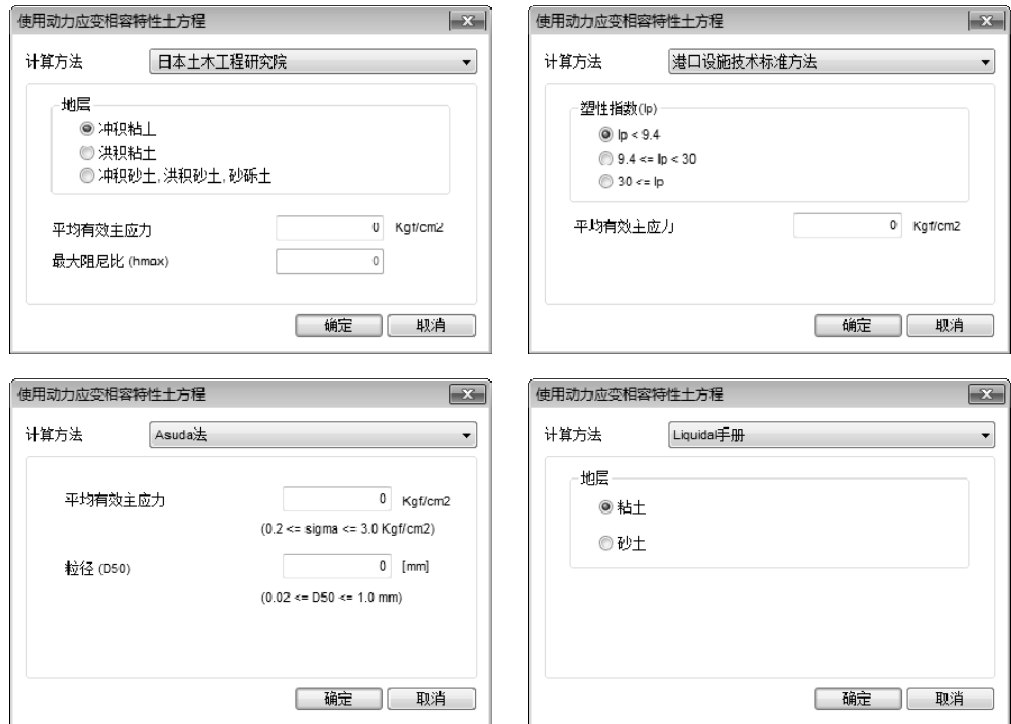


图 4-85 各数据库参数设置对话框

[数据库]

从现有研究积累的数据库中可导入应变相容函数，数据库示例如下。



图 4-86 数据库参数设置的示例

表 4-16 相关参数说明

剪切模量折 减曲线	粘土 - PI=5-10 (Sun et al.)	阻尼比 曲线	粘土 - Lower Bound (Sun et al.)
	粘土 - PI=10-20 (Sun et al.)		粘土 - Average (Sun et al.)
	粘土 - PI=20-40 (Sun et al.)		粘土 - Upper Bound (Sun et al.)
	粘土 - PI=40-80 (Sun et al.)		粘土 (Idriss 1990)
	粘土 - PI=80+ (Sun et al.)		碎石 (Seed et al.)
	粘土 (Seed and Sun 1989)		线性
	碎石 (Seed et al.)		岩石
	线性		沙土 (Idriss)
	岩石		沙土 (Idriss 1990)
	岩石 (Idriss)		沙土 (Seed & Idriss) - Lower Bound
	沙土 (Seed & Idriss) - 下限		沙土 (Seed & Idriss) - Average
	沙土 (Seed & Idriss) - 平均值		沙土 (Seed & Idriss) - Upper Bound
	沙土 (Seed & Idriss) - 上限		Vucetic - Dobry
	沙土 (Seed and Idriss 1970)		-
	Vucetic - Dobry		

## 15. 反应谱函数

定义反应谱分析中的谱函数。因为反应谱分析采用线性内插的谱函数值分析结构固有周期，所以，对于谱曲线的曲率急剧变化的区域，最好采用多个紧凑的谱值。谱函数的周期范围应当包含结构的全部固有周期。

谱数据类型有无量纲加速度（加速度谱/重力加速度）、加速度、速度、位移谱。更改谱数据类型时，只会改变数据的单位形式，不改变数据值。比例系数是输入数据的缩放系数，最大值用于将全部数据按指定的最大值进行调整。在“阻尼比”中输入用于反应谱的阻尼比。当要执行分析的结构阻尼比不同时，将对输入的谱数据进行调整，以符合结构阻尼比。



图 4-87 反应谱函数添加对话框

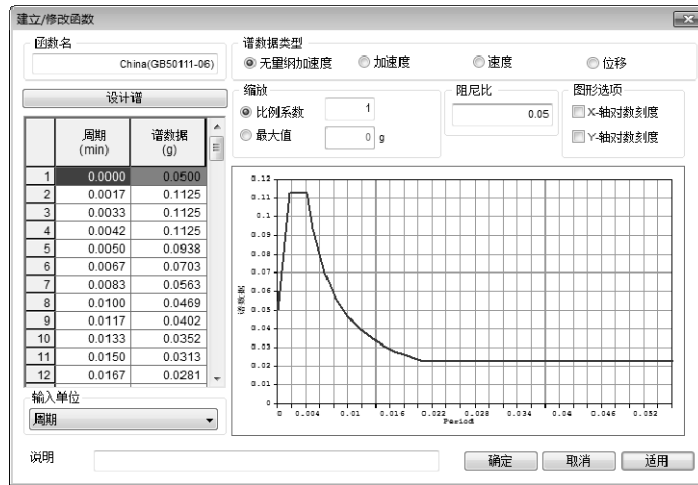


图 4-88 反应谱函数参数设置的示例

[设计谱]

可以使用程序中内置的设计谱。默认的设计谱类型如下。



图 4-89 设计谱对话框及数据库

- ▶ Korea (Bridge): 韩国，道路交通说明书；
- ▶ Japan (Bridge02): 日本，建筑物荷载指南及动力分析；
- ▶ China (JTJ004-89): 中国，公路工程抗震设计规范；
- ▶ KBC 2009: 韩国，建筑结构设计规范，2009；
- ▶ KBC 2005: 韩国，建筑结构设计规范，2005；
- ▶ IBC2000 (ASCE7-98): 美国，国际建筑设计规范，2000；
- ▶ UBC (1997): 美国，统一建筑设计规范，1997；
- ▶ EURO (2004H-ELASTIC): 欧洲，结构抗震设计规范。



## 16. 时程荷载函数

适用于线性/非线性时程分析的荷载条件（地面加速度、时变静力荷载、节点动力荷载、曲面动力荷载）的函数。时程荷载函数数据类型分为加速度、集中力、弯矩及无量纲加速度（时程加速度/重力加速度）、无量纲。更改时程荷载函数数据类型时，只会改变数据的单位，不改变数据值。比例系数是输入数据的缩放系数，最大值用于将全部数据按指定的最大值进行调整。

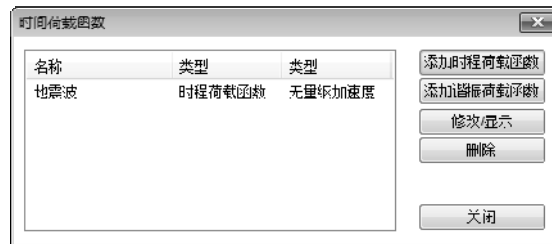


图 4-90 时程荷载函数添加对话框

[添加时间函数]

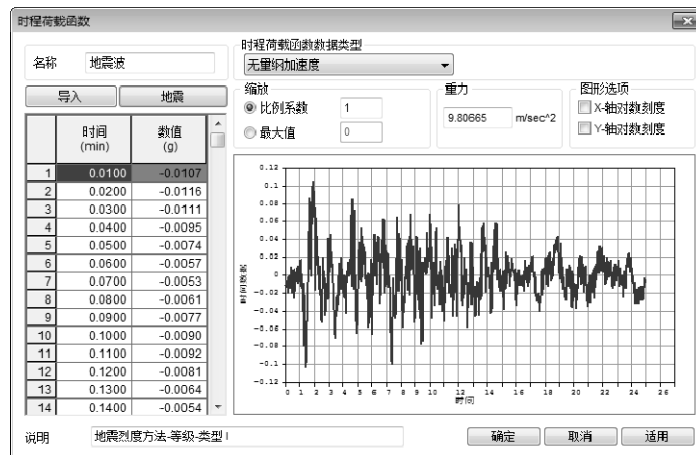


图 4-91 时程荷载函数参数设置的示例

定义的函数不仅用于定义地面加速度，而且可在定义动力节点（曲面）动力荷载、时变静力荷载时使用。指定“集中力”或“弯矩”时程荷载用于定义“节点动力荷载”；指定“无量纲加速度”或“加速度”用于定义“地面加速度”。指定“无量纲”的时程荷载用于定义随着时间变化静态荷载“时变静力荷载”或“曲面动力荷载”。

## 17. 导入/地震波

导入经常使用的时变荷载，或者从程序内置的数据库中选择地震加速度数据。总共内置了 32 类地震加速度。

SGS, DGS, THD 文件(\*.sgs; \*.dgs; \*.thd)

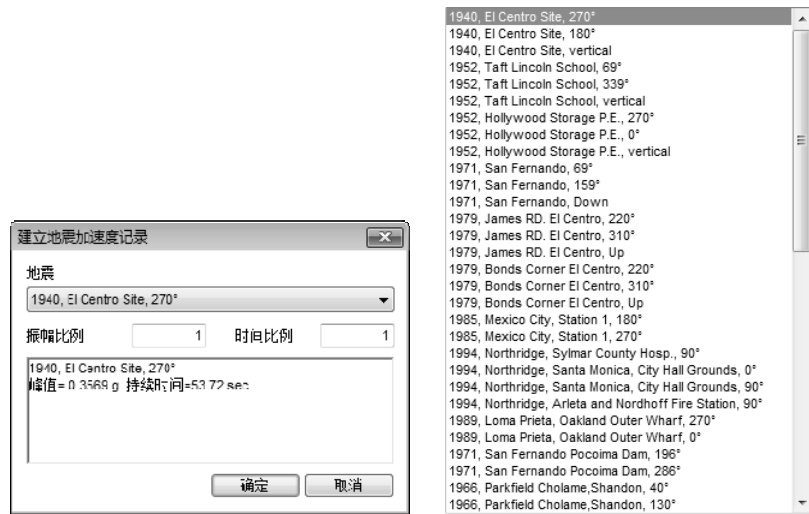


图 4-92 地震加速度参数设置对话框及数据库

[添加谐振荷载函数]

可以利用正弦曲线函数定义时程荷载。A、C 为常数，f 为输入荷载的频率 (Frequency)，D 为阻尼比 (Damping Factor)，P 为相位角。如果时程荷载按谐振函数形式输入时，输入所需的谐振函数变量，点击重绘图形，右侧就会显示时程荷载图形。

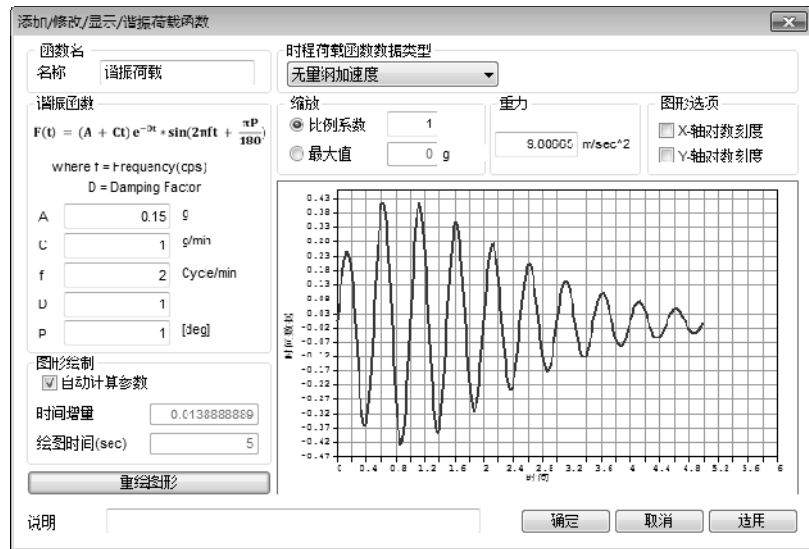


图 4-93 谐振荷载函数参数设置的示例

### 4.1.8 非弹性铰

#### 概要

当受到如地震作用等的非规则反复荷载，构件将产生裂缝和屈服时，这些裂缝和屈服对结构的荷载-位移关系都会产生影响。荷载和位移的关系叫作骨架曲线，基于骨架曲线考虑往复荷载作用下卸载和加载时的荷载-位移关系模型称为滞回模型，在非弹性单元中，用非弹性铰来考虑。

**非弹性铰属性:** 给梁、桁架,弹性连接,点弹性支承类型定义铰特性。



**类型**：根据构件非弹性区域的分布及分析方法区分为集中型和分布型。

**梁-集中铰**：梁集中铰通过在两端设置长度为 0 的平移或转动非线性弹簧来模拟。梁单元内部的其它位置为弹性的非线性单元类型。对于轴向变形，铰的位置在单元的中心。对于弯曲和剪切，铰位于单元两端。对于轴向成分，按照力和位移关系，弯矩通过弯矩与转角之间的关系来定义。

**梁-分布铰**：分布铰假定整个构件均为非弹性特性。分布非弹性铰位置定义为积分点。反映构件内力分布的截面柔度矩阵通过 Gauss-Lobatto 数值积分法计算。积分点个数，可指定的截面积分点数量为 1~8 个。积分点为 2 个时，使用古典高斯积分法。

**桁架**：对于构件的轴方向，构件中心处布置弹簧。弹簧的非弹性滞回模型定义为骨架滞回模型。

**点弹簧/弹性连接**：对于弹簧/弹性连接铰，可以给各成分的弹性特性定义非弹性塑性铰特性。各自由度的线性特性取决于输入的有效刚度，有效刚度在进行非弹性分析时会作为初始刚度来计算。弹簧的非弹性效应可定义为骨架曲线，对于 3 个平移自由度和 3 个旋转自由度都可以定义非弹性特性。

**相关类型**：选择轴力与弯矩间的相关关系。

单轴铰模型时按单轴铰滞回模型来定义，且假定各方向成分的特性是独立来考虑。多轴铰模型按多轴交滞回模型定义，具有可以准确追踪弯矩-曲率关系的特性。

**无**：不考虑轴力与弯矩的相关关系。

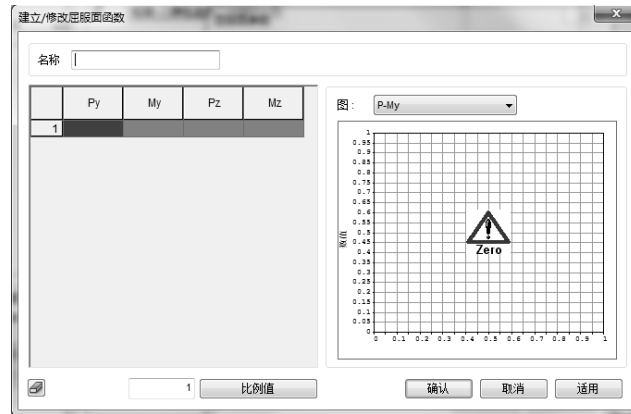
**P-M**：考虑轴力的影响来计算铰的弯曲屈服强度。这种方式对于两个方向弯矩间的相关关系是不考虑的，对于每个时间增量评价铰的状态时，假定轴力和两个方向上的弯矩各自独立。

考虑轴力重新计算弯矩作用下的屈服强度时，荷载工况需满足下列 3 个条件：

- 1) 需为几个连续分析的时程荷载工况中的第一个荷载工况；
- 2) 需进行的是非线性静力分析；

**P-M-M**：这种方式使用的是多轴铰的滞回模型，因此可适用于弹塑性时程分析。即用塑性理论来反映轴力和两个方向上弯矩的相关关系，对于每个时间增量都共同考虑这三种作用的变化，从而来评价铰的状态。GTS NX 支持随动硬化模型。

**屈服面特性值**：对于 P-M、P-M-M，定义屈服面特性值。可以在特性中，指定多个函数。输入 P-M 相关曲线的形状。相关曲线的形状按照曲线上，归一化的坐标来表示。对于轴力成分的计算或坐标表示，受压为(-)，受拉为(+).



**成分**：按内力的成分分别输入非弹性铰的特性。

梁、点弹簧、弹性连接类型，可以输入所有方向的成分。对于桁架类型，只能输入 Tx, Rx 成分。

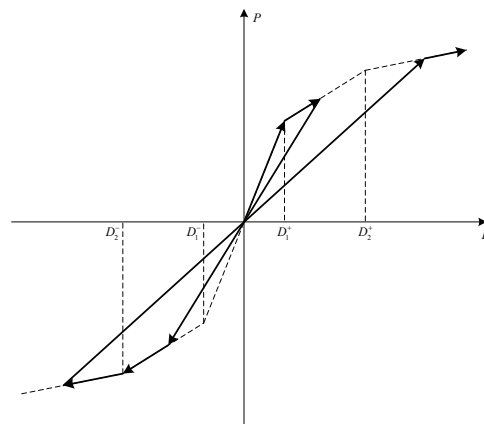
**铰位置**：选择集中铰的位置。轴力成分定在单元的中心。剪力及弯矩成分可以选择 I 端、J 端或两端 (I&J)。

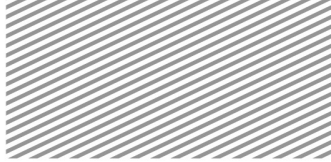
**截面数量**：对于分布铰输入积分点个数。可以输入到 8 个，根据输入的个数，计算各截面的力-位移或变形间的关系。

**滞回模型**：选择非弹性铰的滞回模型。

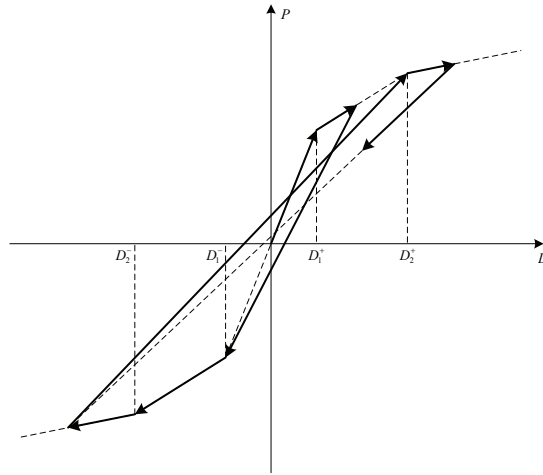
**铰类型**：定义非弹性铰的滞回模型。多轴铰模型只能指定给梁类型。

**指向原点型**：初期加载时沿着 3 条不同斜率的骨架曲线上移动的。卸载时会向着原点移动，到达另一方向（第三象限）的骨架曲线时会重新沿着骨架曲线移动。

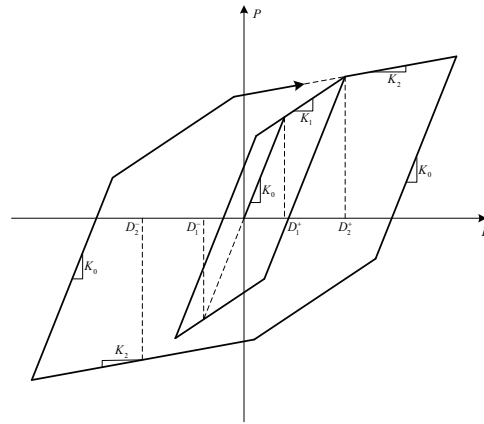




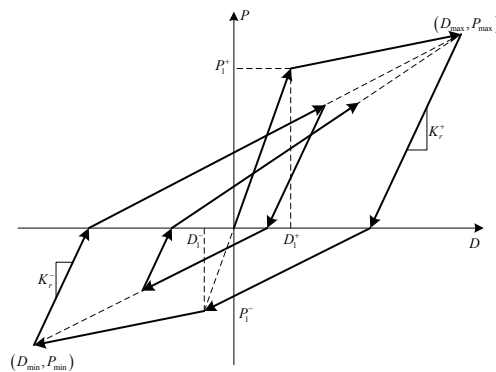
-**指向极值点型**: 初期加载时沿着 3 条骨架曲线上移动的。卸载时指向反向最大变形点移动。另一侧如果还没有发生第一次屈服, 则会向着第一次屈服点的位置移动。



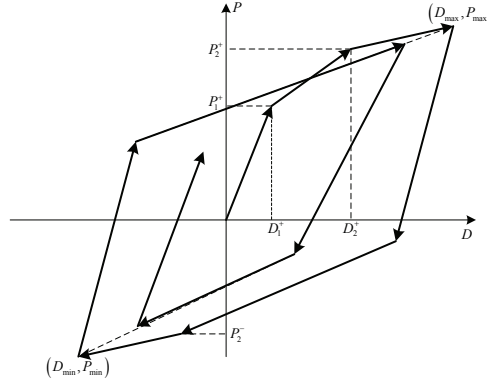
-**随动硬化型**: 初期加载沿着 3 条骨架曲线上移动的。卸载刚度与弹性刚度相同。这种滞回模型的特点要求屈服刚度的折减率在正 (+) 负 (-) 区域对称。随动硬化模型, 根据塑性理论, 考虑轴力与 2 轴弯矩成分的相关关系。



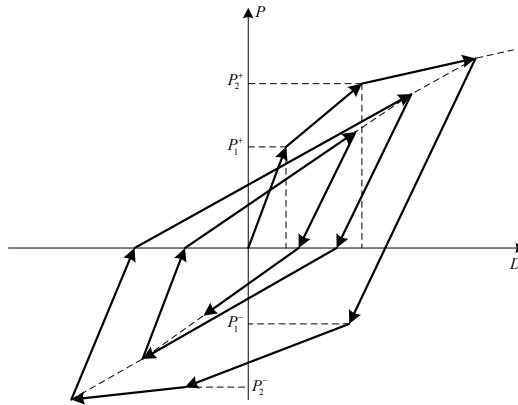
- **克拉夫型**: 初始加载沿着骨架曲线上移动, 屈服后, 根据变形的发展, 刚度逐渐减小。由于混凝土收缩, 容易产生裂缝, 所以忽略裂缝前的状态, 认为整个截面都产生裂缝, 只考虑受拉钢筋在受弯屈服时的刚度变化。



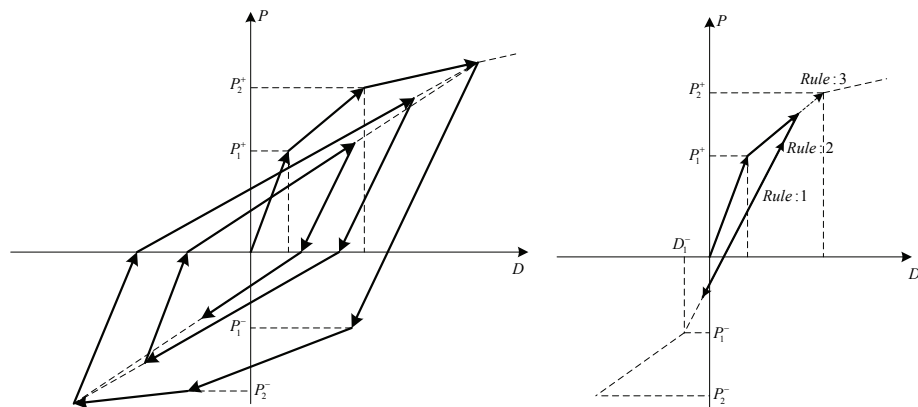
- **退化型**：初始加载沿着骨架曲线上移动，第一次屈服后一直到第二次屈服前，按双折线移动。二次屈服后，根据变形的发展，卸载刚度逐渐减小的模型。



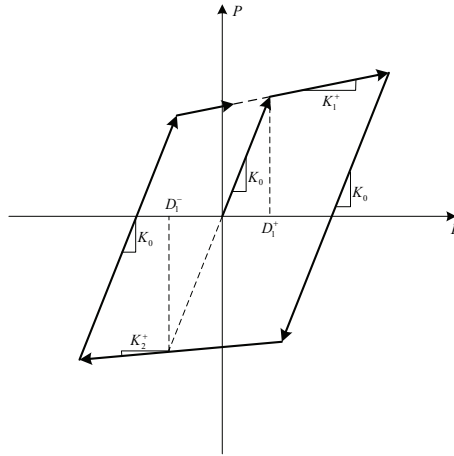
- **武田模型**：根据钢筋混凝土构件实验反映恢复力特性的模型。卸载点位于骨架曲线上。卸载刚度取决于相反侧区域的第一次屈服与否。



- **修正武田模型**：初始加载时沿着3折线骨架曲线上移动。变形D刚刚超过D<sub>1</sub><sup>\*</sup>或者超过目前为止的最大变形时，效应点在3折线型骨架曲线上移动。当从该直线开始卸载，向相反侧移动时，直到恢复力为0，按直线移动，超过0之后，朝向相反侧的最大变形点的移动。



- **标准双折线型**：初始加载沿着双折线骨架曲线上移动。卸载刚度与弹性刚度相同。

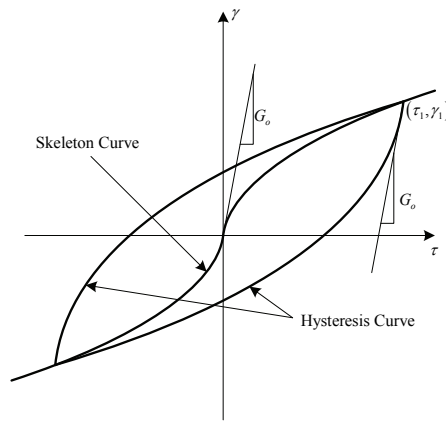


- **兰贝格-奥斯古德**：兰贝格-奥斯古德模型是以原金属材料非线性模型提出，在进行修正得到的模型。

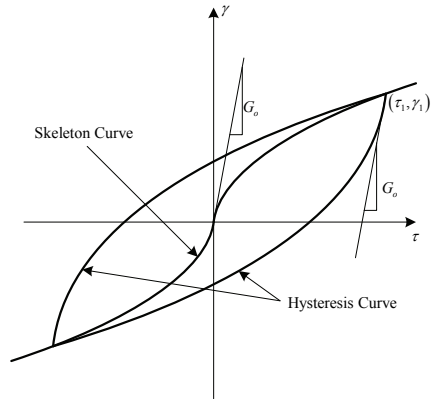
最大阻尼：等效粘性阻尼（滞回阻尼）系数  $h$ ，按下式定义。

$$h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W}$$

对于最大阻尼系数  $h_{max}$ ，一般是使用  $h-\gamma$  曲线上， $h$  收敛于特定值的大变形程度上的值。基准应变 (reference strain) 使用土的剪切强度  $\tau$  与  $G_0$  按  $\gamma_r = \frac{\tau}{G_0}$  计算。



- **哈丁-唐尼维奇模型**：只提出骨架曲线的哈丁-唐尼维奇模型，适用 Massing 法则定义的滞回模型。



**-多轴铰随动硬化**

滞回模型类型 随动硬化

P-M 相关曲线

第一-P-M曲线强度

PC(t)	PC(c)	PCBy	PCBz	MCy,max	MCz,max
0	0	0	0	0	0

第二-P-M曲线强度

PV(t)	PV(c)	PVBy	PVBz	MYy,max	MYz,max
0	0	0	0	0	0

屈服面近似形状

曲面	Beta y		Beta z		Gamma	Alpha
	(t)	(c)	(t)	(c)		
1st	0	0	0	0	0	0
2nd	0	0	0	0	0	0

FX

刚度折减率 Alpha1  Alpha2

初始刚度 弹性刚度  kN

MY

刚度折减率 Alpha1  Alpha2

初始刚度 弹性刚度  kN

MZ

刚度折减率 Alpha1  Alpha2

初始刚度 弹性刚度  kN

**P-M 相关曲线**：输入 P-M 相关曲线数据，用于计算三维屈服面。

**第一 P-M 相关曲线的强度**：第一次屈服相关曲线上的强度

PC(t)：纯拉力作用下的第一阶段屈服强度。

PC(c)：纯压力作用下的第一阶段屈服强度。

PCBy：失稳破坏时的轴力，用于截面上绕 y 轴弯距的第一阶段屈服相关曲线。

PCBz：失稳破坏时的轴力，用于截面上绕 y 轴弯距的第一阶段屈服相关曲线。

MCy,max：最大弯曲屈服强度，用于截面上绕 y 轴弯距的第一阶段屈服相关曲线。

MCz,max：最大弯曲屈服强度，用于截面上绕 z 轴弯距的第一阶段屈服相关曲线。

**第二 P-M 相关曲线的强度**：第二次屈服相关曲线上的强度



PY(t) : 纯拉力作用下的第二阶段屈服强度。

PY(c) : 纯压力作用下的第二阶段屈服强度。

PYBy : 失稳破坏时的轴力, 用于截面上绕 y 轴弯距的第二阶段屈服相关曲线。

PYBz : 失稳破坏时的轴力, 用于截面上绕 z 轴弯距的第二阶段屈服相关曲线。

MYy,max : 最大弯曲屈服强度, 用于截面上绕 y 轴弯距的第二阶段屈服相关曲线。

MYz,max : 最大弯曲屈服强度, 用于截面上绕 z 轴弯距的第二阶段屈服相关曲线。

近似屈服面形状: P-M 相关曲线为基础, 输入三维屈服面的参数。各参数均为下面屈服面计算式中使用的值。

$$\left(\frac{|My|}{My,max}\right)^{\text{Gamma}} + \left(\frac{P-PBy}{Pmax-PBy}\right)^{\text{Betay}} = 1$$

$$\left(\frac{|Mz|}{Mz,max}\right)^{\text{Gamma}} + \left(\frac{P-PBz}{Pmax-PBz}\right)^{\text{Betaz}} = 1$$

$$\left(\frac{|My|}{My,max}\right)^{\text{Alpha}} + \left(\frac{|Mz|}{Mz,max}\right)^{\text{Alpha}} = 1$$

Betay : for the 1st & 2nd surface

Betaz : for the 1st & 2nd surface

Pmax = PC, PY

PBy = PCBy, PYBy

PBz = PCBz, PYBz

My,max = MCy,max, MYy,max

Mz,max = MCz,max, MYz,max

**Beta y, Beta z, Gamma** : P-My 或者 P-Mz 的指数方次。以发生失稳破坏时的轴力为基准, 可以输入比基准轴力大的区域与小的区域的数值。

**Alpha** : 第一和第二屈服 My-Mz 相互作用的指数方次。

**刚度折减率** : 输入骨架曲线的刚度折减率。输入屈服斜率的刚度除以初始刚度的值。Alpha1/2 表示 1/2 次屈服斜率的刚度除以初始刚度的值。

**初始刚度** : 选择或输入用于弹塑性分析的初始刚度。

**弹性刚度** : 使用给单元指定的弹性模量。

**用户定义** : 只能用于退化型, 用户直接输入初始刚度。

带回模型类型 指向原点

---

对称
  非对称

屈服函数 [E]

---

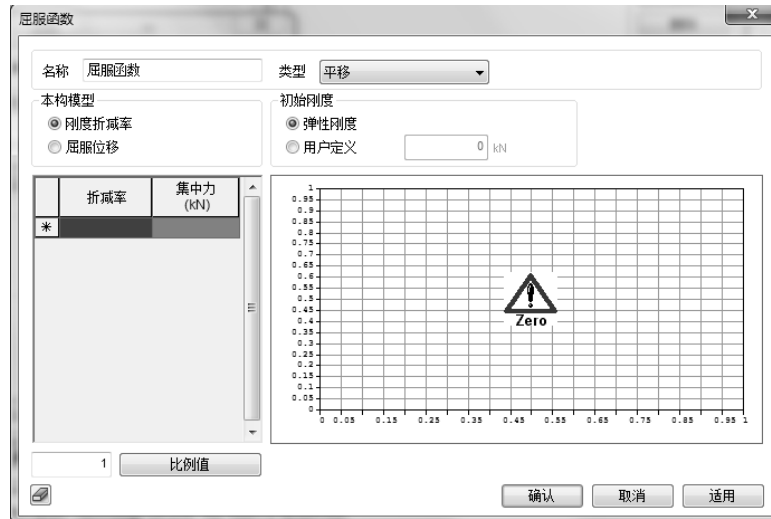
卸载刚度变量

卸载刚度计算指数 0.4

内部循环卸载刚度折减系数 1

**对称/非对称** : 选择骨架曲线的对称与否。

**屈服函数** : 定义屈服函数。



**本构行为：**选择刚度折减或屈服位移类型，定义本构特性。刚度折减类型输入强度与刚度折减率，屈服位移输入强度与屈服位移。

**力：**表示屈服强度。根据材料与截面特性，输入屈服强度。拉力为正值(+)，压力为负值(-)。

**折减率：**输入骨架曲线的刚度折减率。即，屈服斜率的刚度除以初始刚度。

**位移：**输入骨架曲线的屈服位移。

**弹性刚度：**使用给单元指定的弹性模量。

**用户定义：**只能用于刚度折减类型，用户直接输入初始刚度。

## 4.2 控制

### 4.2.1 尺寸控制

#### 1. 点



图 4-94 点尺寸控制对话框

#### 概要

指定选择的点附近单元的尺寸。只适用于类似面上印刻的点或作为内部个体存在的点。对于高级形状上的顶点，如面的边角位置，划分网格过程中会被自动忽略。

#### 方法

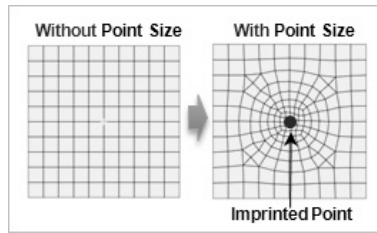


图 4-95 尺寸控制的示例

选择顶点，以当前设定的长度单位为输入网格尺寸，以选择的顶点为中心划分网格。



“播种 (Seeding)” 定义为“将要生成节点的位置”。

如果在形状上设置种子后，修改了形状，全部种子信息就会被删除。因此，设置播种最好是在全部几何形状完成后，及建立网格之前执行。播种信息作为生成网格时最优先使用的值，并被连续使用直至被修改或删除。

生成的播种信息按指定的名称被注册到网格控制目录树中，可以通过调用关联菜单来删除/修改播种信息。

## 2. 线



图 4-96 线尺寸控制对话框

### 概要

选择边 (线)，用如下 5 种方法可以预先设置生成单元节点的位置 (单元的大小)。

节点的间距可直接输入或者选择——可分割为常段数或按线性变化分割。

### 方法

[间距]: 以当前使用的长度单位为基准直接输入节点间距。

[分割数量]: 按输入的数量平均分割选择线。

[线性梯度 (长度)]: 如果输入线的起始和结束的间距，其间距间会按线性插值，自动设置节点位置。

[线性梯度 (比率)]: 按比率 (结束/起始) 输入线的起点和终点的间距。

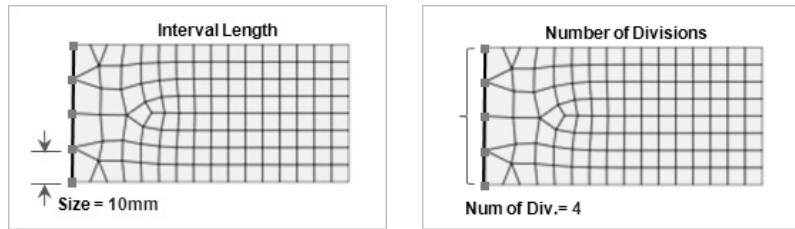


图 4-97 单元长度和分割数量尺寸控制方法的示例

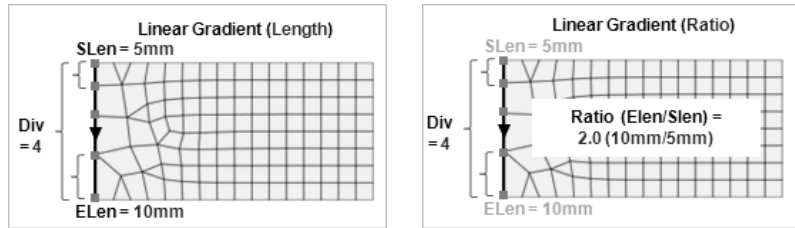


图 4-98 线性梯度（长度）和线性梯度（比率）尺寸控制方法的示例

[双曲正切]: 如果输入起始长度和分割数量, 就会考虑线的全长并匹配分割数量确定节点的位置。

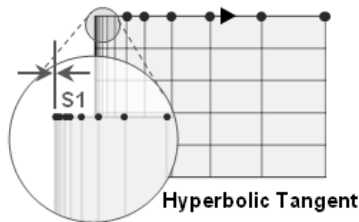


图 4-99 双曲正切尺寸控制方法的示例



线性梯度（长度、比率）方法可以添加设置分割数量和指定间距。如果指定分割数量, 就会优先考虑输入的分割数量。指定间距是在所选择的线中定义要适用线性变化的区域。另外, 对于“常量参数”, 如果输入 0 代表起始, 输入 1 代表结束。例如, 输入 0.3 时, 表示从起始点到整个线长度的比率为 0.3 的点之间的线段按指定的起始长度均分, 之后按线性变化。如果输入负值, 就从结束点开始到整个线长度的比率为 0.3 的点之间的线段按指定的结束长度均分。例如, 输入 -0.3, 就用指定的结束长度值从终点开始到整个线长度的 0.3 部分均匀地播种, 剩下部分按线性变化。勾选对称播种时, 以选择线的中央为基准播种使其达到对称。

### 3. 自定义

通过直接在表上输入数值, 在选择的线上指定节点位置。如果入的比率在 0~1 之间, 就会按照所选择线的长度, 自动计算节点的位置（长度）。

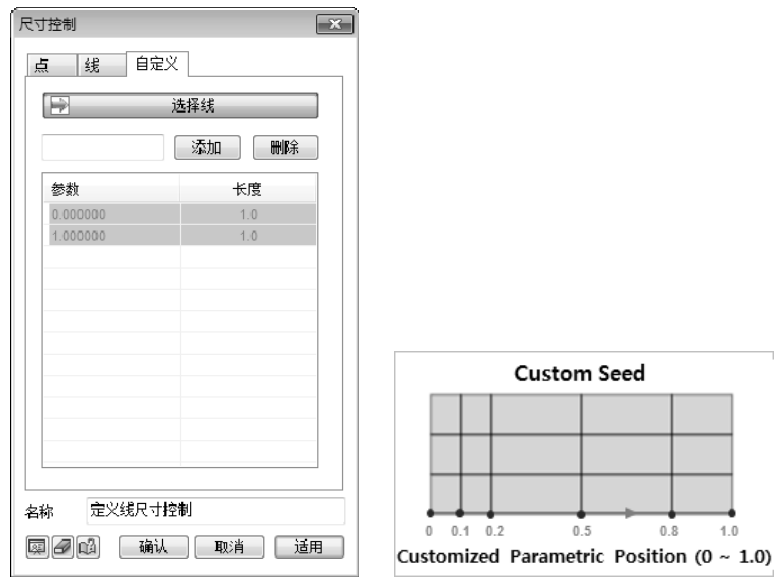


图 4-100 自定义尺寸控制

## 4.2.2 默认尺寸控制

### 概要

用于预先设置生成整个网格过程中的单元大小及分割数量。默认网格尺寸不是强制指定基本单元的大小，而是在生成网格对话框中作为默认值输入。因此，在生成单元过程中，用户可以输入不同值来生成不同尺寸的单元。

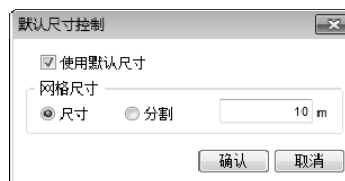


图 4-101 默认尺寸控制对话框

### 方法

勾选“使用默认尺寸”选项时，输入的默认设置适用于所有网格划分对话框。可以用当前使用的长度单位直接设定尺寸，或者按相同的分割数量定义所选形状。

## 4.2.3 属性控制

### 概要

可以在几何形状（线、面、实体）上预先指定属性。



图 4-102 属性控制对话框

方法

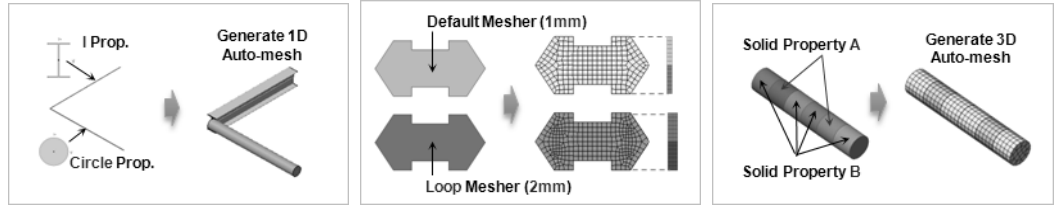


图 4-103 线（属性控制）、面（属性控制）和实体（属性控制）的示例

虽然基本上在生成单元的同时可以赋予单元的属性，但可以用这个功能预先在几何形状上赋予属性，且根据赋予的属性自动生成单元。形状上预先赋予了属性时，即使在生成单元时设置其它特性也优先使用形状中预先赋予的属性。

### 4.2.4 相同播种线

概要

用已播种线的种子信息匹配未播种的线。相同播种线通常让两个分离的线匹配，以生成均匀的网格或简化在极小间隙处的节点共享操作。



图 4-104 相同播种线对话框

方法

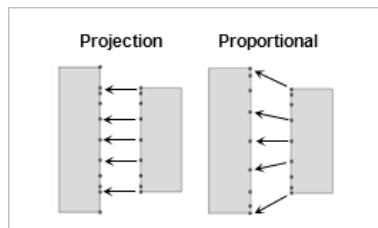


图 4-105 相同播种线的示例

选择要匹配播种的目标线和已经播种的基准线，把基准线的播种信息传递到目标线上。

[投影]：以最近距离方向将基准线的播种信息投影至目标线。

[比例]：以比例的方式将基准线的播种信息匹配至整个目标线，使得目标线的分割节点数与基准线相同。



## 4.3 生成

### 4.3.1 1D

#### 概要

选择线生成 1D 结构单元。主要用于生成不需要与相邻土体单元连接的独立结构单元。



图 4-106 一维网格生成对话框

#### 方法

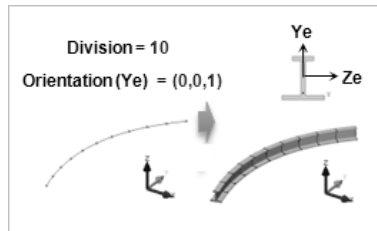


图 4-107 一维网格生成的示例

另外，植入式桁架或桩界面单元的界面单元，不需要与相邻土体单元连接。所以，可以独立地指定这些结构单元的大小或分割数量。

生成网格时可以指定或添加单元属性。

#### [方向（单元 z 轴）]

该功能用于统一 1D 单元的方向特性或设置强轴方向和弱轴方向。检查单元坐标系或参考设置的  $\beta$  角调整单元的 z 轴方向。





图 4-108 单元坐标系调整对话框

- (1) 参考节点：选择 1D 单元方向的基准节点。以选择的节点为基准设置单元的 z 坐标方向。
- (2) 参考矢量（整体坐标系）：设置按整体坐标系（GCS）方向或直接输入的矢量方向，设置单元的 z 坐标方向。
- (3)  $\beta$  角：可以在 0, 90, 180 中选择，按选择的  $\beta$  角，以单元 x 轴为基准旋转。

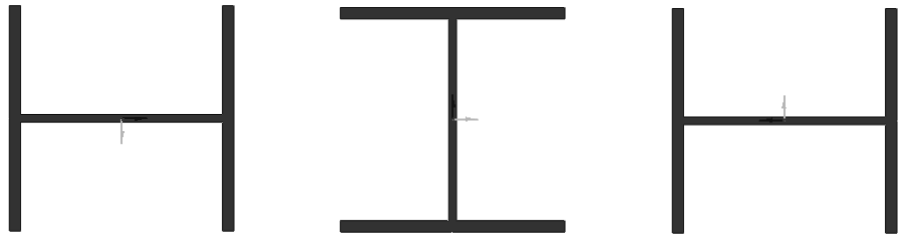


图 4-109 单元坐标系  $\beta$  角调整的示例（0、90、180）

高级选项 (>>)

在生成网格时自动合并容差范围内的极小间隙。2 个以上的线生成网格时，可勾选各网格独立注册。



图 4-110 高级选项对话框

### 4.3.2 2D

#### 1. 自动-面

##### 概要

选择面生成 2D 网格。主要在二维模型中土体或指定区域上生成网格时使用。



图 4-111 自动面网格生成对话框

##### 方法

可以直接定义单元的大小或指定面的线分割数量设置单元大小。生成单元时指定赋予的属性，网格组的名称可以预先定义。

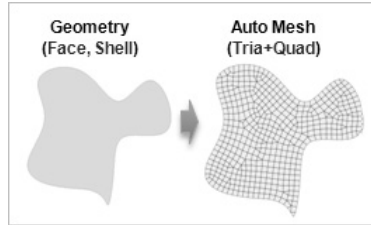


图 4-112 自动面网格生成的示例

### 高级选项 (>>)

按照网格生成方法可以设置如下项目的选项。设定网格的形状、稠密度、生成算法。设置初始要按照几何形状考虑效率性和准确性，以便生成最好的网格。详细的设置如下。



图 4-113 高级选项

#### [合并节点]

当生成网格时合并容差范围内的 2 个以上的节点为 1 个节点。极小间距的分离单元节点是分析时发生错误的主要原因，容差范围以内的节点将自动合并成一个。

#### [细化系数]

指定要在选择的形状内生成的网格的尺寸（网格密度）。越接近“精细”就会在内部生成越稠密的网格。虽然越稠密越分析结果越细致，但重要的是应考虑分析时间和效率性来设置网格密度。

#### [2D 网格生成器]

选择要在生成网格时使用的算法。可以选择循环网格生成器、栅格网格生成器、德劳内网格生成器等 3 种生成器。所选的算法不同，生成形状及过程会不同。

- (1) 循环：网格生成方法和形状基于循环算法。
- (2) 栅格：复杂网格生成基于修正栅格算法。
- (3) 德劳内：间接网格生成基于德劳内三角算法。

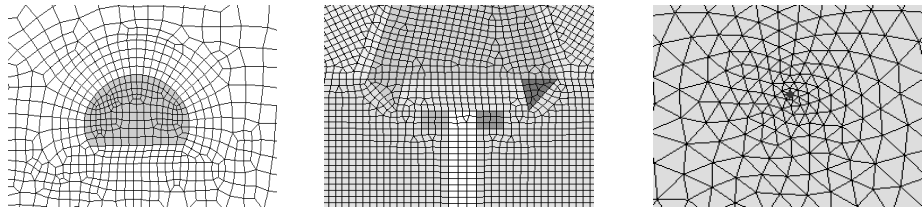


图 4-114 自动面网格生成方法的示例（循环 Loop、栅格 Grid、德劳内 Delaunay）

[单元类型]

生成所选形状的网络。可以选择三角形或四边形，也可以组合三角形和四边形后自动生成。虽然四边形单元比三角形的单元更又有利于分析的稳定性，但对于复杂几何形状很难生成四边形网格时，还是建议生成三角形单元。

[高阶单元]

可以在单元节点之间的中间位置中再生成一个节点生成高阶单元。高阶单元是在分析时添加的计算点，虽然有助于更细致的分析结果，但同时也延长了分析时间。建议参考单元形状及稠密度再生成单元，并根据分析法在有需要时建立高阶单元。例如，在进行边坡的强度折减法分析时，需要进行变形的细致分析，可采用建立高阶单元。

面上存在网格时，避免生成重复单元的面，可以选择“忽略网格面”选项。也可以设置高阶选项使整个网格尺寸尽量均匀化。同时在多个面上划分网格，此时网格组可以根据各面独立注册或合并成一个网格组。

## 2. 自动-区域

### 概要

选择形成闭合区域的线，在相关的区域生成网格。可在复杂的二维形状不生成面时，在所有区域生成网格。



图 4-115 自动-区域面网格生成对话框

### 方法

可以直接定义单元的尺寸或指定区域的线的分割数量来设置单元的大小。

这时，在闭合的区域内部包含其他闭合的区域时，可以通过“划分内部区域”选项分割区域并自动生成网格。选择区域内部线（边）或点时，该功能会识别相应线、点的位置并生成节点。特别的，“包含内部线”选项是用于从边析取生成结构单元时的重要选项。

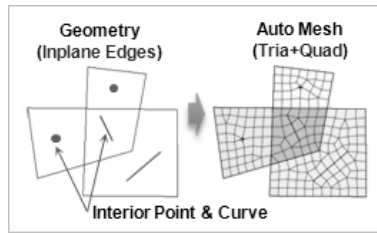


图 4-116 自动-区域面网格生成的示例

### 3. 映射-面

#### 概要

选择面并自动生成矩形的网格。映射网格是把选择的形状按矩形区域映射并在映射的区域生成网格的方法。



图 4-117 映射面网格生成对话框

#### 方法

可以直接定义单元的大小或指定形成面的线的分割数量后设置单元的大小。

目标形状至少要有 4 个以上的轮廓线才可以生成，在目标形状有多个轮廓线或目标形状复杂的情况下，也有不能自动执行映射。这种情况下，应当“选择 4 个角点”手动设置要映射的边。选择的 4 个点为矩形区域的角点，各点之间的线作为矩形区域的某边一起映射。

映射网格时，对于相对的轮廓线（映射后分别相对轮廓线组）间生成单元的个数不同就不能划分网格。因此，预先在边线上输入播种信息后进行映射会比较方便。

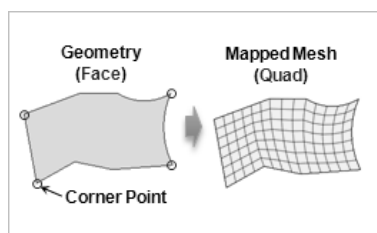


图 4-118 面映射网格生成的示例



选择多个面按随机顺序生成映射网格时，因为左右分割数量不一样，所以可能会出现不能生成网格的情况。为防止这种情况，生成网格应按 X 轴、Y 轴或 Z 轴顺序设置，并按顺序排列目标面后依次生成网格。

#### 4. 映射-区域

##### 概要

选择形成闭合区域的线生成矩形网格。



图 4-119 映射-区域网格生成对话框

##### 方法

可以直接定义单元的尺寸或指定区域的边线的分割数量来设置单元的大小。选择“自动映射边界”或“手动映射边界”选项，按线组合从闭合区域选择线。

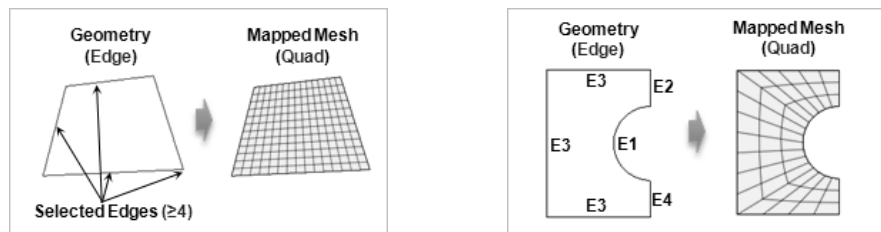


图 4-120 映射-区域网格生成的示例（自动构成线、手动构成线）

##### [自动映射边界]

选择要生成 2D 映射网格的空间区域线自动生成 2D 映射网格。由于算法特性及模型形状的原因，可能存在无法生成 2D 映射网格的情况。

##### [手动映射边界]

用自动映射不能生成 2D 映射网格时，将线分为 4 个明确的边线，并选中。每组边线必须相互连接，边线必须以顺时针或逆时针方向顺序。最终选择的所有边线应当构成一个闭合的区域。

### 4.3.3 3D

#### 1. 自动-实体

### 概要

在三维实体形状上自动生成网格。单元形状可以选择四面体和六面体为主的混合（四面体+六面体组合形状）。

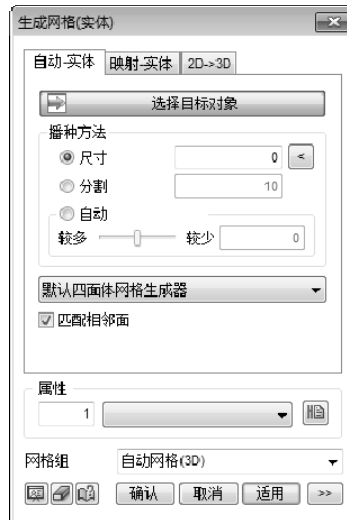


图 4-121 自动-实体网格生成对话框

### 方法

直接输入单元尺寸或指定组成实体的各边线的分割数量来设置单元尺寸。可通过[自动]选项按“较多”或“较少”，设置网格密度来确定网格大小。

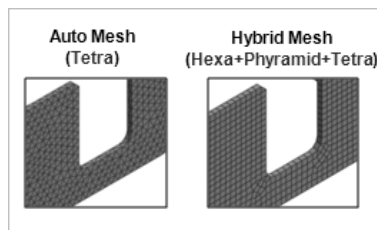


图 4-122 自动-实体网格生成的示例

### [网格生成器]

提供默认的四面体网格和以六面体为主的混合网格。与二维网格划分相似，四边形网格较三角形网格更利于分析的稳定；三维网格划分时，六面体网格比四面体网格的稳定性更好。混合网格是以六面体为主，将四棱锥（五面体）和四面体形状组合后生成单元的方式。

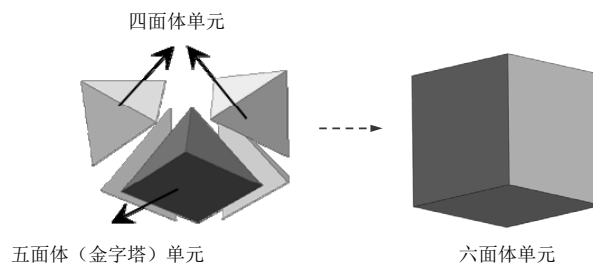


图 4-123 混合网格的构成

### [匹配相邻面]

网格生成时最重要的部分是相邻单元间的节点连接。如果节点未连接，分析就有可能发生错误，不勾选“匹配相邻面”选项时，即使在实体之间有共用面，节点也有可能不连接。除非要单独移除节点，生成网格时，该选项要保持勾选。

高级选项 (<>>)

根据网格生成方法可以添加设置单元形状及密度。详细设置如下，选择“避免节点全在边界的四面体”选项的情况下，避免生成的四面体单元的4个节点都在边界面上。此功能将使得薄实体的厚度方向上至少有两个以上的单元，如果赋予了边界条件就能防止单元的四个节点都被约束的情况。



图 4-124 高级选项

[内部线/点]

生成实体网格时，考虑在实体内部的线的位置及大小生成网格。整个线包含于实体内时，仅选择线就可以生成考虑了内部线的实体网格。但是，当线位于实体的外部边界面或贯穿实体的外部边界面的情况下，需要在实体边界面上印刻交叉点，并在表面生成单元的分割点，这样才能生成包含内部线的实体网格。选择实体内部的点时，可在划分网格时在点的位置生成节点。

添加内部线时，可以在划分网格时赋予 1D 单元结构属性。

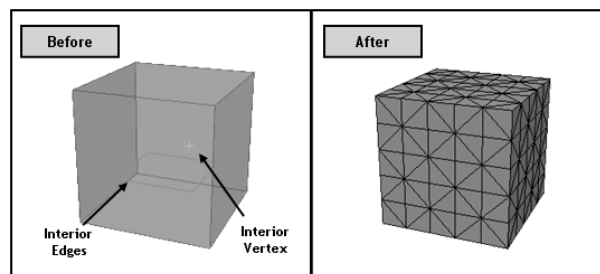


图 4-125 实体网格包含内部边/点的示例

[合并节点]

当生成网格时，合并容差范围内的 2 个以上的节点为 1 个节点。极小间距的单元节点分离是分析时发生错误的主要原因，容差范围以内的节点将自动合并成一个。

[细化系数]

设置单元尺寸之外的网格密度，以生成品质更好的网格。

[高阶单元]

可以在单元节点之间的中间位置中再生成一个节点生成高阶单元。高阶单元是在分析时添加计算点，虽然有助于更细致的分析结果，但同时也延长了分析时间。建议参考单元形状及稠密度再生成单元，并根据分析法在有需要时建立高阶单元。例如，在进行边坡的强度折减法分析时，需要进行变形的细致分析，可采用建立高阶单元。

当同时在多个形状上划分网格，选择[各网格独立注册]此时网格组可以独立注册或合并成一个网格组。

除此之外，其它选项如[几何接近性]可通过在生成网格过程中对单元大小差异的网格进行分割，以改善网格品质。[模式网格]选项用于使网格尺寸尽可能一致。

## 2. 映射-实体

### 概要

在三维实体上自动生成六面体网格。



图 4-126 映射-实体网格生成对话框

### 方法

直接输入单元大小或输入实体的各边线的分割数量来设置单元大小。因为映射网格只用六面体形状生成单元，所以，两个相对面的播种信息必须一致才能生成单元。因此，复杂形状的实体必须适当的分割或预先输入播种信息。

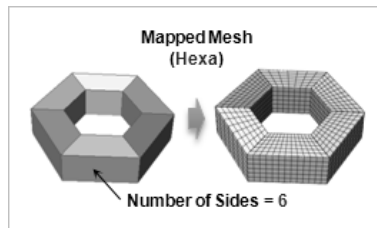


图 4-127 映射实体网格生成的示例

[选择基准面]



在采用完全映射（Full Mapping）算法生成 3D 映射网格失败的情况下，就会自动使用基于映射的网格扫描（Sweep Based Mapped Mesh）的算法生成网格。但是在形状复杂的情况下，因为不能自动找出基准面，用这个方法也可能不会生成网格。所以，这时应当直接选择扫描的基准面。

[匹配相邻面]

将相邻两个实体的节点进行匹配生成网格。选择多个实体按随机顺序生成映射网格时，因为左右分割数量不一样，所以可能会出现不能生成网格的情况。为防止这种情况，生成网格应按 X 轴、Y 轴或 Z 轴顺序设置，并按顺序排列目标实体后依次生成网格。

### 3. 2D—>3D

#### 概要

通过 2D 网格信息，在没有实体的封闭 2D 网格空间生成四面体或混合（六面体中心）网格。



图 4-128 2D-3D 对话框

#### 方法

2D 网格必须完全包围区域，即可无任何自由边生成 3D 网格。可以删除或保留源网格。

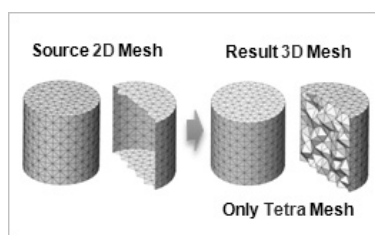


图 4-129 由 2D 生成 3D 单元的示例

#### 高级选项 (>>)

由 2D 单元生成 3D 单元时，可按如下高级选项设置。误差范围内的节点将自动合并，以防止分析错误。可以指定内部实体单元的密度。



图 4-130 高级选项

### 4.3.4 重新生成网格

#### 概要

在已经生成的 2D 网格信息的面上再生成 2D 网格。用于修改网格大小及形状。



图 4-131 重新划分网格对话框

#### 方法

选择要重新生成的目标网格，当前没有生成 2D 网格的曲面不被选择。单元类型可以选择三角形、四边形以及三角形+四边形的组合形状。

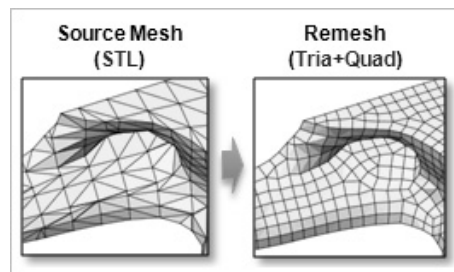


图 4-132 重新生成 2D 单元的示例

#### [最大单元尺寸]

设置重新生成的单元的最大尺寸。但是，在目标面已经播种的情况下，播种信息在网格划分过程中仍被使用。因此，在要重新指定单元大小的情况下，应当删除现有的播种信息后再操作。

[修补角]

输入选择的已有单元与重新生成单元的最大角度，输入的角度应当小于 45 度。

[保持边界节点]

决定是否保留边界的节点。即使修改单元形状及大小，边界节点的位置也可以不改变，以与相邻网格的节点连接。

## 4.4 网格组

### 4.4.1 重命名

#### 概要

按指定的排列顺序添加一系列的后缀编号来修改网格组名称。因为施工阶段可按网格组名称分类，所以，最好预先按区域或属性进行分类。特别是在使用自动设置施工阶段助手时非常有用的。



图 4-133 网格组重命名对话框

#### 方法

全部选择要重命名的网格组，设置排列顺序和名称。例如，选择 3 个任意的网格组后，在名称上输入“开挖”，开始号码输入“3”作为起始号，3 个网格组名称就会按“开挖-003”、“开挖-004”、“开挖-005”分类。

#### [坐标]

以整体直角或圆柱坐标系为基准设置网格组的顺序。基于各坐标轴方向的第一、第二、第三的优先级顺序设置重命名顺序。第一是指最优先考虑的坐标轴；第一坐标轴相同时，以第二坐标轴为参考坐标轴。因此，如果目标按第一坐标轴设置顺序，即使第二坐标轴的坐标不同，顺序也不会改变。第一和第二坐标轴都相同的情况下，按照第三坐标轴顺序确定。

#### [网格组基准点（边框）]

为了比较顺序，指定计算位置的基准点。例如，指定基准点的中心，以网格组边框的中心点为基准，比较网格组的基准点。

#### [顺序]

以规定的顺序增大或减小后缀号。

### 4.4.2 复制

#### 概要

复制已经生成的网格组。复制的网格组可以用多种方式。例如，对比源单元和复制的单元分别赋予了不同的材料/属性的情况，或者相同的单元构件按施工阶段均出现的情况，此时不进行其他几何建模就可以生成单元。



图 4-134 网格组复制对话框

### 方法

选择要复制的网格组，如果设置要添加到的网格组，就会复制源网格组的所有节点和单元，相同位置上的节点和单元将逐一被添加。

## 4.4.3 建立

### 概要

根据设置的名称规则建立多个空网格组。这个功能在将一个网格组分为多个网格组时很有用途。



图 4-135 网格组名建立对话框

### 方法

输入要建立网格组的名称，当建立多个网格组时，指定要在名称后边添加的起始号及网格数量。



用于分析中的数据以网格组来分类。因此，根据施工阶段和分析工况有必要细分网格组。建立空网格组后，选择相应的网格组，用鼠标右键调出关联菜单，对各网格组[包含/排除节点及单元]，如下图所示。



图 4-136 包含/排除单元和节点

## 4.5 转换

### 4.5.1 扩展网格

#### 1. 节点—>1D

##### 概要

按设置的方向扩展节点后生成 1D 单元。该功能可不用画线就能生成结构单元的功能。



图 4-137 节点-1D 扩展对话框

##### 方法

选择要扩展的单元节点，设置扩展方向和扩展长度。单元可按单向或双向扩展。

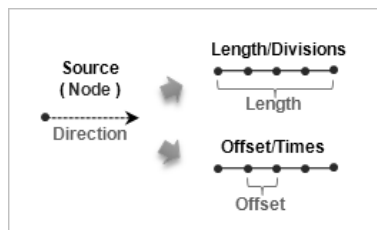


图 4-138 节点-1D 扩展的示例

[方向（单元 z-轴）]

该功能用于统一 1D 单元的方向特性或设置长轴方向和短轴方向。检查单元坐标系或参考设置的  $\beta$  角调整单元的 z 轴方向。



图 4-139 单元坐标系设置对话框

- (1) 参考节点：选择 1D 单元方向的基准节点。以选择的节点为基准设置单元的 z 轴方向。
- (2) 参考矢量（整体坐标系）：设置按整体坐标系（GCS）方向或直接输入的矢量方向，设置单元的 z 坐标方向。
- (3)  $\beta$  角：可以在 0, 90, 180 中选择，按选择的  $\beta$  角，以整体坐标系 x 轴为基准旋转。

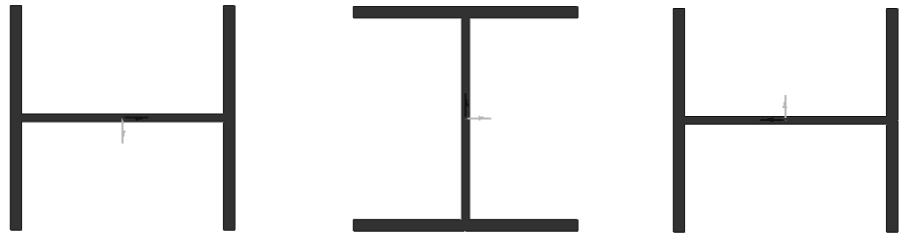


图 4-140 单元坐标系  $\beta$  角调整的示例（0、90、180）

### 扩展方向

以整体坐标系为基准选择节点的扩展方向,或者以 2 点矢量输入方向矢量的起点和终点坐标来定义。可按任意方向扩展。

### 扩展信息

设置要生成 1D 单元的总长度及分割数。分割间距可以选择均匀或非均匀。长度（偏移/次数）中输入负值时，将按照设置的坐标轴或矢量方向的反方向扩展。

#### [非均匀]

同时指定偏移（Offset）长度及数量。长度使用逗号（,）列出，连续反复的扩展距离可使用次数@距离表示。

例如，用 10@3 输入时，连续地生成 10 个长度为 3 的单元，输入为 2,3,4 时，总共生成 3 个单元，长度分别为 2, 3, 4。

#### [均匀]

设置偏移长度或次数，输入总长度和分割数量。

### 高级选项 (<>>)

勾选“用户已定义的网格组”时，根据“偏移每组”输入的数量，生成的单元被分类并注册到不同的网格组。若输入的数字可将单元数等分时，根据输入的数字以均匀的偏移间距注册网格组；输入的数字



字不等分单元数量时，先按照输入的数字偏移生成均匀网格组后，剩余的生成的单元，注册到同一个网格组。



图 4-141 高级选项

## 2. 1D → 2D

### 概要

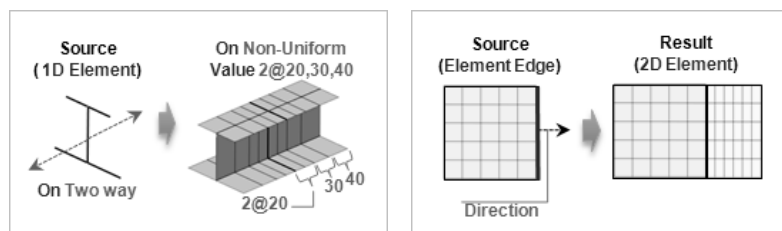
扩展 1D 单元、单元线（单元边界线）以及几何线生成 2D 单元。这时，所用的线应被播种（播种信息）或与网格连接。



图 4-142 1D-2D 网格扩展对话框

### 方法

选择要扩展的 1D 单元、单元线以及线，设置扩展方向和扩展长度及单元分割数量。单元可按单向或双向扩展生成。扩展中使用的源单元可以删除/移动/复制。移动时把使用的单元移动到由扩展生成的单元的末端。



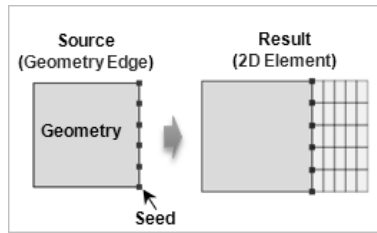


图 4-143 1D-2D 网格扩展的示例（扩展 1D→2D、扩展单元线→2D、扩展线→2D）

### 扩展方向

可以以整体坐标系为基准选择单元扩展方向，或者用 2 点矢量功能输入方向矢量的起点和终点坐标来定义。可按任意方向扩展。

### 扩展信息

设置要生成 2D 单元的总长度及分割程度。分割间距可以选择均匀或非均匀。长度（偏移/次数）中输入负值时，将按照设置的坐标轴或矢量方向的反方向扩展。

#### [非均匀]

同时指定偏移（Offset）长度及数量。长度使用逗号（,）列出，连续反复的扩展距离可使用次数@距离表示。

例如，用 10@3 输入时，连续地生成 10 个长度为 3 的单元，输入为 2,3,4 时，总共生成 3 个单元，长度分别为 2，3，4。

#### [均匀]

设置偏移长度或次数，输入总长度和分割数量。

除此之外，通过高级选项（）可以选择生成的 2D 单元的形状为三角形或四边形。

## 3. 2D → 3D

### 概要

扩展 2D 单元或 3D 单元的一个单元面生成 3D 单元。



图 4-144 2D-3D 网格扩展对话框

### 方法

选择要扩展的 2D 单元以及 3D 单元面，设置扩展方向和扩展长度及单元分割数量。单元可按单向或双向扩展生成。扩展中使用的源单元可以删除/移动/复制。移动时把使用的单元移动到由扩展生成的单元的末端。

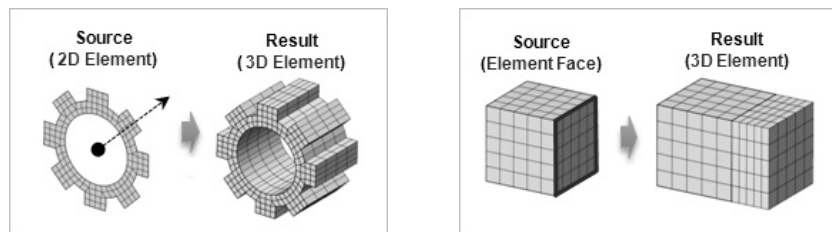


图 4-145 2D-3D 网格扩展的示例（扩展 2D—>3D、扩展单元界面—>3D）

### 扩展方向

可以以整体坐标系为基准选择单元扩展方向，或者用 2 点矢量功能输入方向矢量的起点和终点坐标来定义。可按任意方向扩展。

### 扩展信息

设置要生成 3D 单元的总长度及分割程度。分割间距可以选择均匀或非均匀。长度（偏移/次数）中输入负值时，将按照设置的坐标轴或矢量方向的反方向扩展。

[非均匀]

同时指定偏移（Offset）长度及数量。长度使用逗号（,）列出，连续反复的扩展距离可使用次数@距离表示。

例如，用 10@3 输入时，连续地生成 10 个长度为 3 的单元，输入为 2,3,4 时，总共生成 3 个单元，长度分别为 2，3，4。

[均匀]

设置偏移长度或次数，输入总长度和分割数量。

## 4.5.2 旋转

### 1. 节点—>1D

#### 概要

根据输入的角度以设置的旋转轴为基准旋转节点，生成 1D 单元。可以在无几何形状的情况下生成各种圆弧或圆形 1D 单元。



图 4-146 节点-1D 网格旋转对话框

#### 方法

选择要旋转的单元节点，设置旋转轴和旋转角度及单元分割数量。可按单向或双向旋转生成单元。

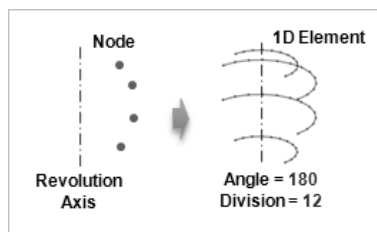


图 4-147 节点-1D 网格旋转的示例

#### 旋转轴

选择以整体坐标系为基准的旋转轴，或者用 2 点矢量功能输入方向矢量的起点和终点坐标定义。可按任意方向设置基准轴。

以整体坐标系为基准设置时，用“定位”选项可以指定旋转轴的坐标位置。把旋转轴平行移动到指定的坐标位置，以移动后的轴为基准旋转节点。

### 旋转信息

设置旋转角度及 1D 单元的分割数。分割间距可以选择均匀或非均匀方法。角度输入正数时按逆时针方向旋转，输入负数时按顺时针方向旋转。

[非均匀]

同时指定旋转角度。角度使用逗号（,）列出，连续反复的角度可使用次数@角度表示。

例如，用 10@20 输入时，以 20 度为基本角度连续旋转生成 10 个单元，输入为 10,20,30 时，别按 10 度，20 度以及 30 度旋转生成 3 个单元。

[均匀]

设置旋转角度和数量，可以按总旋转角度等分设置。

## 2. 1D—>2D

### 概要

旋转 1D 单元、单元线（单元边界线）以及几何线生成 2D 单元。这时，所用的线应被播种（播种信息）或与网格连接。



图 4-148 1D-2D 网格旋转对话框

### 方法

选择要选择的 1D 单元、单元线或几何线，设置旋转轴和旋转角度及单元分割数量。可按单向或双向旋转生成单元。用于旋转的源单元可以删除/移动/复制。移动时，把使用的单元移动到由旋转生成的单元的末端。

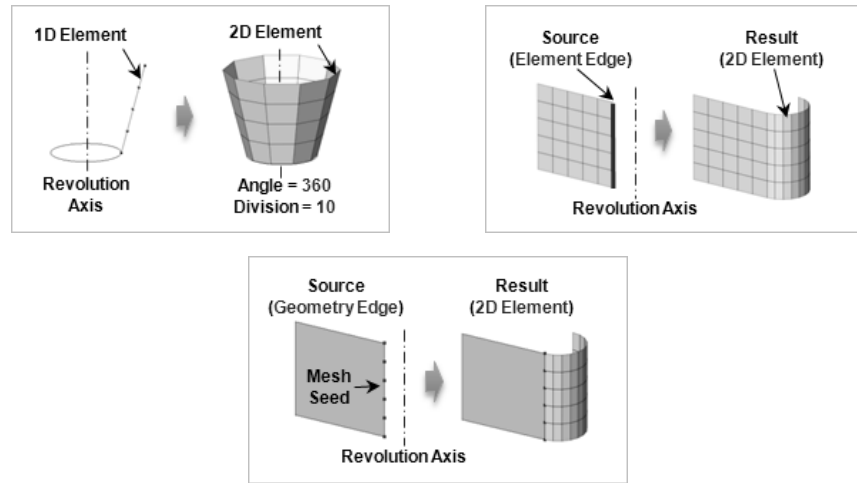


图 4-149 1D-2D 网格旋转的示例（旋转 1D→2D、旋转单元线→2D、旋转线→2D）

### 旋转轴

以整体坐标系为基准选择旋转轴，或者用 2 点矢量功能输入方向矢量的起点和终点坐标来定义。可按任意方向设置基准轴。

以整体坐标系为基准设置时，用“定位”选项可以用坐标指定旋转轴的位置。把旋转轴平行移动到指定的坐标位置，以移动后的轴为基准旋转单元。

### 旋转信息

设置旋转角度及 2D 单元的分割程度。分割间距可以选择均匀或非均匀方法。角度输入正数就按逆时针方向旋转，输入负数就按顺时针方向旋转。

[非均匀]

同时指定旋转角度。角度使用逗号 (,) 列出，连续反复的角度可使用次数@角度表示。

例如，用 10@20 输入时，以 20 度为基本角度连续旋转生成 10 个单元，输入为 10,20,30 时，分别按 10 度，20 度以及 30 度旋转生成 3 个单元。

[均匀]

设置旋转角度和数量，可以按总旋转角度等分设置。

除此之外，通过高级选项 () 可以选择生成的 2D 单元的形状为三角形或四边形。

## 3. 2D→3D

### 概要

旋转 2D 单元或 3D 单元的一个单元面，生成 3D 单元。



图 4-150 2D-3D 网格旋转对话框

### 方法

选择要旋转的 2D 单元以及 3D 单元面，设置旋转轴和旋转角度及单元分割数量。可按单向或双向旋转生成单元。用于旋转的源单元可以删除/移动/复制。移动时把使用的单元移动到由旋转生成的单元的末端。

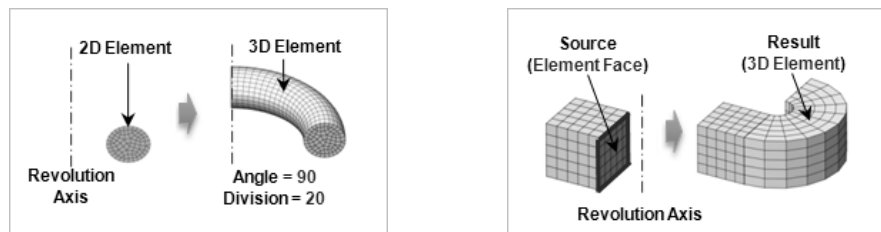


图 4-151 2D-3D 网格旋转旋转的示例 (2D→3D、旋转单元面→3D)

### 旋转轴

以整体坐标系为基准选择旋转轴，或者用 2 点矢量功能输入方向矢量的起点和终点坐标定义。可按任意方向设置基准轴。

以整体坐标系为基准设置时，用“定位”选项，旋转轴的位置可以用坐标指定。把旋转轴平行移动到指定的坐标位置，以移动后的轴为基准旋转节点。

### 旋转信息

设置旋转角度及 3D 单元的分割程度。分割间距可以选择均匀或非均匀方法。角度输入正数就按逆时针方向旋转，输入负数就按顺时针方向旋转。

[非均匀]

同时指定旋转角度。角度使用逗号 (,) 列出，连续反复的角度可使用次数@角度表示。

例如，用 10@20 输入时，以 20 度为基本角度连续旋转生成 10 个单元，输入为 10,20,30 时，别按 10 度，20 度以及 30 度旋转生成 3 个单元。

[均匀]

设置旋转角度和数量，可以按总旋转角度等分设置。

### 5.4.3 填充

#### 1. 节点—>2D

##### 概要

在节点和节点之间生成 2D 平面单元。通过编辑/添加网格功能在特定区域生成单元时是十分有用的。



图 4-152 节点-2D 网格填充对话框

##### 方法

分别选择要生成 2D 单元的顶部和底部节点设置整个区域，直接输入它们之间要生成的单元大小，或者用节点间距的分割数量定义。顶部和底部节点的个数必须相同，选择的多个节点按顺序指定序列号。指定相同编号的节点之间相互对应，生成 2D 单元。要想反转相互对应的顺序时，可以使用“反转端部”选项。

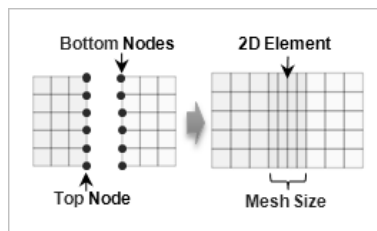


图 4-153 节点—>2D 网格填充的示例

除此之外，通过高级选项 (>>) 可以选择生成的 2D 单元的形状为三角形或四边形。

#### 2. 1D—>2D

##### 概要

生成连接 1D 单元与 1D 单元或者线与线的 2D 单元。这在结构单元之间或者平面单元之间生成 2D 连接单元是很有用处的。





图 4-154 1D-2D 网格填充对话框

### 方法

分别选择要生成 2D 单元的顶部和底部的单元或线，直接输入它们之间要生成的单元大小，或者用选择的 1D 单元或线之间的间距分割数量。当使用 1D 单元时，选择的顶部和底部单元个数应相同；使用线（边）时，选择的顶部和底部的线（边）应输入相同数量的播种信息。分别对应底部单元或线的起点和顶部单元或线的起点，依次生成 2D 单元。

生成底部的起点和顶部的终点对应的单元发生扭曲时，用“反转端部”选项可以反转对应的顺序。

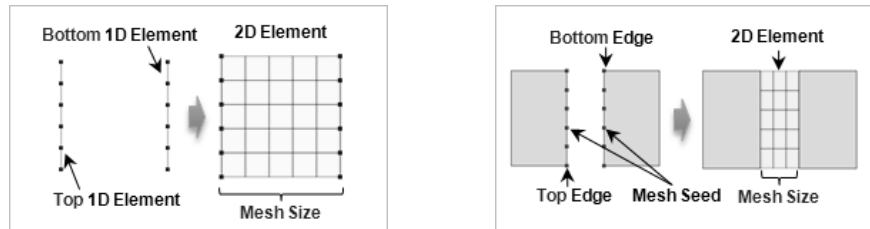


图 4-155 1D-2D 网格填充的示例（1D→2D 单元、几何线→2D 单元）

除此之外，通过高级选项（>>）可以选择生成的 2D 单元的形状为三角形或四边形。

### 3. 2D→3D

#### 概要

生成连接 2D 单元和 2D 单元的 3D 单元。这在部分区域添加单元，修改模型是十分有用的。



图 4-156 2D-3D 网格填充对话框

### 方法

分别选择顶部和底部 2D 单元。直接输入要在它们之间生成的 3D 单元的大小，或者用选择的 2D 单元间距的分割数量定义。顶部和底部单元上的 2D 单元的数量应当相同，尤其是在单元的位置或形状相似时，才能在它们之间填充 3D 单元。不能自动找出相应的配对时，可以手动指定对应的基准节点，各基准节点应当位于相应单元的边界线。

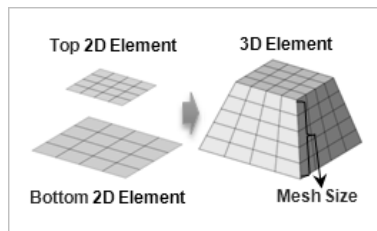


图 4-157 2D-3D 网格填充的示例

## 4.5.4 扫描

### 1. 节点—>1D

#### 概要

基于所选节点沿导向线扫描后生成 1D 单元。有助于连续生成复杂形状的单元。



图 4-158 节点-1D 网格扫描对话框

### 方法

选择要扫描的单元节点，直接选择扫描导向曲线或代替导向曲线的节点位置。可以直接输入网格大小或输入选择曲线的分割数量。

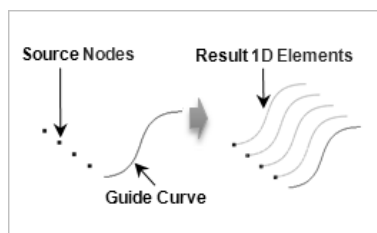


图 4-159 节点-1D 网格扫描的示例

### 扫描导向

#### [曲线]

可以选择一个导向曲线。因此，复杂形状的线应当预先生成一个线组后使用。

#### [顺序节点]

选择多个节点时，按照所选顺序决定扫描方向，因此，要注意选择的顺序。另外直接选择节点时，所选的节点的间距就是要生成单元的大小，所以，不需要另外再设置单元尺寸。

## 2. 1D—>2D

### 概要

基于导向曲线扫描 1D 单元、单元线（单元边界线）以及几何线，生成 2D 单元。这时，所用的线应被播种（播种信息）或与网格连接。



图 4-160 1D-2D 网格扫描对话框

### 方法

扫描目标可选择 1D 单元、单元线，或者已输入播种信息的线，扫描导向可直接选择导向曲线或代替导向曲线的顺序节点。可以直接输入网格大小或输入选择曲线的分割数量。扫描中使用的源单元（1D 单元）可以删除/移动/复制。移动时把使用的单元移动到由扫描生成的单元的末端。

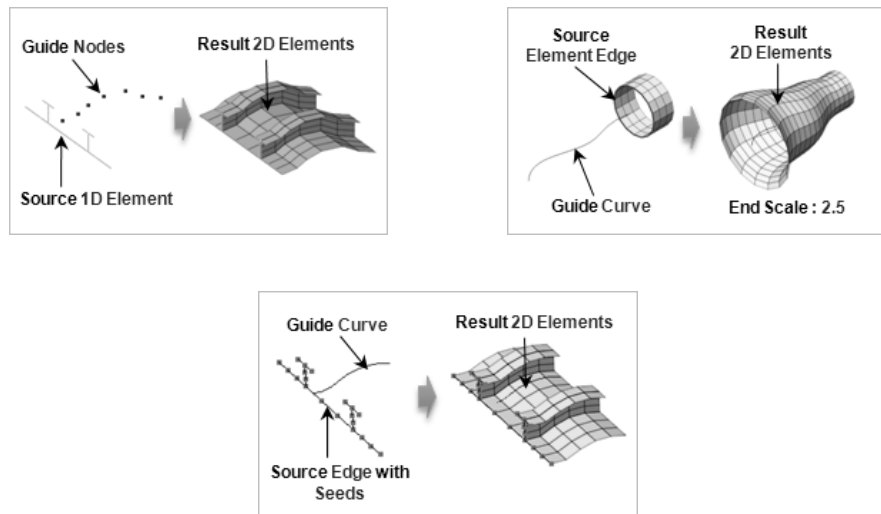


图 4-161 1D-2D 网格扫描的示例（扫描 1D—>2D、扫描单元线—>2D、扫描线—>2D）

### 扫描导向

#### [曲线]

可以选择一个导向曲线。因此，复杂形状的线应当预先生成一个线组后使用。

#### [顺序节点]

选择多个节点时，按照所选顺序决定扫描方向，因此，要注意选择的顺序。另外直接选择节点时，所选的节点的间距就是要生成单元的大小，所以，不需要另外再设置单元尺寸。

#### [端部缩放系数]

调整生成单元末端的缩放比例，可以设置扫描单元的大小比例。

例如，输入 2 时，在扫描结束的位置，按起点位置的 2 倍大小生成单元。

### 3. 2D—>3D

#### 概要

基于导向曲线扫描 2D 单元或 3D 单元的单元面，生成 3D 单元。



图 4-162 2D-3D 网格扫描对话框

#### 方法

扫描目标选择 2D 单元、3D 单元的单元面，扫描导向可直接选择导向曲线或代替导向曲线的顺序节点。可以直接输入网格大小或输入选择曲线的分割数量。扫描中使用的源单元（2D 单元）可以删除/移动/复制。移动时把使用的单元移动到由扫描生成的单元的末端。

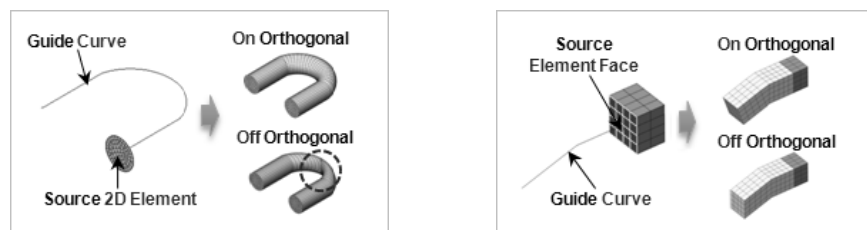


图 4-163 2D-3D 网格扫描的示例（扫描 2D—>3D、扫描单元边界面—>3D）

#### 正交扫描

按照所选的导向线或所选择的节点的正交方向，扫描生成单元。这个选项对于沿着曲线扫描旋转是非常有效的。

#### 扫描导向

[曲线]

可以选择一个导向曲线。因此，复杂形状的线应当预先生成一个线组后使用。

[节点顺序]

选择多个节点时，按照所选顺序决定扫描方向，因此，要注意选择的顺序。另外直接选择节点时，所选的节点的间距就是要生成单元的大小，所以，不需要另外再设置单元尺寸。

[端部缩放系数]

调整生成单元末端的缩放比例，可以设置扫描的单元的大小比例。

例如，输入 2 时，在扫描结束的位置，按起点位置的 2 倍大小生成单元。

## 4.5.5 投影

### 1. 节点—>1D

#### 概要

投影节点生成 1D 单元。这在沿着与目标面（投影目标）相同的方向生成单元时是非常有用的。



图 4-164 节点-1D 网格投影对话框

#### 方法

选择要投影的单元节点，设置投影目标（投影曲面）和投影方向。可以直接输入单元大小或投影距离的分割数量。

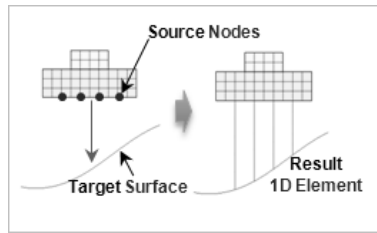


图 4-165 节点-1D 网格投影的示例

### 投影目标

可以按投影目标（目标面）选择预先生成的几何形状的面或单元面。并且可以用“3 点平面”功能设置经过任意 3 点的目标面。

### 投影方向

按整体坐标系轴方向或按连接起点和终点的任意矢量方向设置投影方向。选择“最短路径直线”选项时，按节点到投影目标（目标面）的最短距离投影。

## 2. 1D—>2D

### 概要

投影 1D 单元、单元线（单元边界线）或线到目标面，生成 2D 单元。这时，所用的线应被播种（播种信息）或与网格连接。



图 4-166 1D-2D 网格投影对话框

### 方法

选择要投影的 1D 单元、2D 单元线，或者已播种的的线（边），并设置投影目标（投影曲面）和投影方向。可以直接输入单元大小或定义投影目标距离的分割数量。投影所用的源单元（1D 单元）可以删除/移动/复制。移动时，把使用的单元移动到由投影生成的单元的末端。

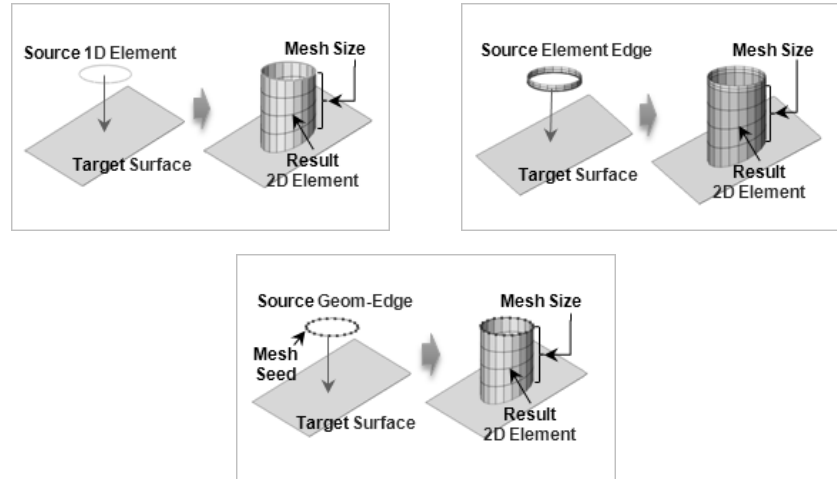


图 4-167 1D-2D 网格投影的示例（投影 1D→2D、投影 单元线→2D、投影 线→2D）

### 投影目标

可以选择按投影目标（目标面）预先生成的几何面或单元面。并且，可以用“3 点平面”设置经过任意 3 点的目标面。

### 投影方向

按整体坐标系轴方向或按连接起点和终点的任意矢量方向设置投影方向。选择“最短路径直线方向”选项时，按节点到投影目标（目标面）的最短距离投影。

## 3. 2D→3D

### 概要

投影 2D 单元或 3D 单元面（单元边界面）到目标面，生成 3D 单元。





图 4-168 2D-3D 网格投影对话框

### 方法

选择要投影的 2D 单元、3D 单元面并设置投影目标（投影曲面）和投影方向。可以直接输入单元大小或定义投影目标距离的分割数量。投影所用的源单元（2D 单元）可以删除/移动/复制。移动时，把使用的单元移动到由投影生成的单元的末端。



图 4-169 2D-3D 网格投影的示例（投影 2D—>3D、投影单元面—>3D）

### 投影目标

可以选择按投影目标（目标面）预先生成的几何面或单元面。并且，可以用“3 点平面”设置经过任意 3 点的目标面。

### 投影方向

按整体坐标系方向或按连接起点和终点的任意矢量方向设置投影方向。选择“最短路径直线方向”选项时，按节点到投影目标（目标面）的最短距离投影。

## 4.5.6 偏移

### 1. 1D—>2D

#### 概要

偏移 1D 单元、单元线（单元边界线）或几何线，生成 2D 单元。这时，所用的线应被播种（播种信息）或与网格连接。



图 4-170 1D-2D 网格偏移对话框

#### 方法

选择要偏移的 1D 单元、单元边以及线，设置偏移方向、偏移长度或单元分割数量。可按单向和双向偏移生成单元。偏移所用的源单元（1D 单元）可以删除/移动/复制。移动时，把使用的单元移动到由偏移生成的单元的末端。

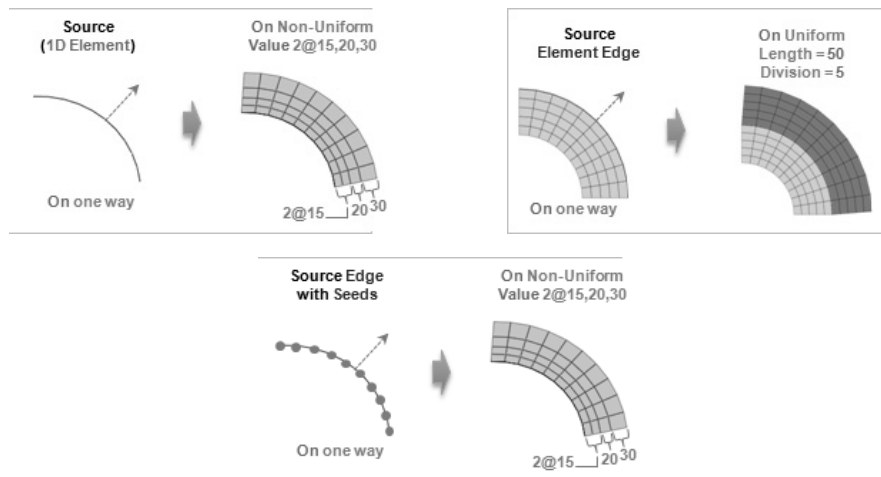


图 4-171 1D-2D 网格偏移的示例（偏移 1D—>2D、偏移单元线—>2D、偏移线—>2D）

#### 偏移方向

可以按选择目标的正向（法线方向）、负向（法线反方向）或者双向设置单元偏移方向。

#### 偏移信息

设置要生成 2D 单元的长度及分割数量。分割间距可以选择均匀或非均匀方法。长度（偏移/次数）输入负数的情况下，按设置的坐标轴以及矢量方向的反方向偏移。

[非均匀]

同时指定偏移（Offset）长度及数量。长度使用逗号（,）列出，连续反复的偏移距离可使用次数@距离表示。

例如，用 10@3 输入时，连续地生成 10 个长度为 3 的单元，输入为 2,3,4 时，总共生成 3 个单元，长度分别为 2，3，4。

[均匀]

设置偏移长度或次数，或输入长度和分割数量。

除此之外，通过高级选项（>>）可以选择生成的 2D 单元的形状为三角形或四边形。

## 2. 2D—>3D

### 概要

偏移 2D 单元以及 3D 单元面，生成 3D 单元。



图 4-172 2D-3D 网格偏移对话框

### 方法

选择要偏移的 2D 单元以及 3D 单元面，设置偏移方向、偏移长度或单元分割数量。可按单向和双向偏移生成单元。偏移所用的源单元（2D 单元）可以删除/移动/复制。移动时，把使用的单元移动到由偏移生成的单元的末端。

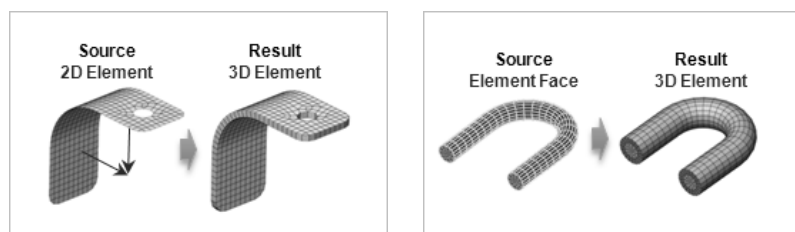


图 4-173 2D-3D 网格偏移的示例（偏移 2D—>3D 偏移、偏移单元面—>3D）

### 偏移方向

可以按选择目标的正向（法线方向）、负向（法线反方向）或者双向设置单元偏移方向。

### 偏移信息

设置要生成 3D 单元的总长度及分割数量。分割间距可以选择均匀或非均匀方法。长度（偏移/次数）输入负数的情况下，按设置的坐标轴以及矢量方向的反方向偏移。

#### [非均匀]

同时指定偏移（Offset）长度及数量。长度使用逗号（,）列出，连续反复的偏移距离可使用次数@距离表示。

例如，用 10@3 输入时，连续地生成 10 个长度为 3 的单元，输入为 2,3,4 时，总共生成 3 个单元，长度分别为 2，3，4。

#### [均匀]

设置偏移长度或次数，或输入长度和分割数量。

## 4.6 转换

### 4.6.1 移动复制

#### 概要

移动/复制节点、单元、网格组。这在指定单元移动位置或复制单元到指定距离时非常有用。



图 4-174 移动复制对话框

#### 方法

选择要移动（或者复制）的节点、单元及网格组后定义方向。

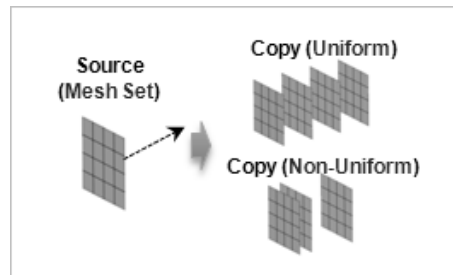


图 4-175 移动复制的示例


#### 方向

按整体坐标系，定义移动/复制方向，或者任意两点的矢量方向。在 2 点矢量功能中，选择（取消选择）特定坐标轴，则按只选择的坐标分量，指定由起点和终点定义的方向矢量。

#### 方法

移动所选单元的位置或者按指定或任意的间距移动/复制单元。

[移动]

直接输入要移动的距离或使用 2 点矢量功能时，选择  按钮就可以起点和终点为基准自动计算实际要移动的距离。

[复制（均匀）]

设置要复制的距离和重复次数。输入负数时，按设置方向的反方向复制。

[复制（非均匀）]

长度使用逗号（,）列出，连续反复的移动（复制）距离可使用次数@距离表示。

例如，用 10@3 输入时，连续地生成 10 个长度为 3 的单元，输入为 2,3,4 时，总共移动/复制 3 个单元，长度分别为 2，3，4。

## 4.6.2 旋转

### 概要

以旋转轴为基准旋转节点、单元、网格组并移动和复制。这对于连续生成形成一定角度的网格非常有效。



图 4-176 网格旋转对话框

### 方法

选择要旋转移动（或复制）的节点、单元及网格组并定义旋转轴。

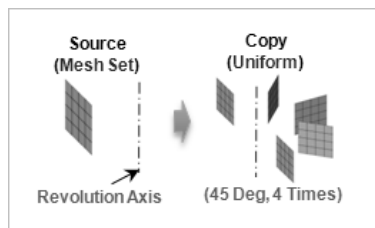


图 4-177 网格旋转的示例

### 旋转轴

用整体坐标系基准选择成为移动/复制基准的旋转轴，或者按 2 点矢量功能，定义方向矢量的起点和终点坐标。可按任意方向设置基准轴。

按整体坐标系基准设置时，旋转轴的位置可以用“定位”选项指定坐标。旋转轴平行移动到指定的坐标位置，以移动的轴为基准旋转移动/复制节点。

在 2 点矢量功能中，选择（取消选择）特定坐标轴，则按只选择的坐标分量，指定由起点和终点定义的方向矢量。

### 方法

设置所选单元的旋转角度及旋转复制角度。可以按均匀角度或任意指定的非均匀角度旋转并移动/复制。

#### [移动]

直接输入要旋转的角度。

#### [复制（均匀）]

设置要旋转的角度和重复次数。输入负数时，按设置方向的反方向旋转。

#### [复制（非均匀）]

长度使用逗号（,）列出，连续反复的旋转移动（复制）角度可使用次数@角度表示。

例如，用 10@30 输入时，连续地生成 10 个角度为 30 的单元，输入为 20,30,40 时，总共旋转移动/复制 3 个单元，角度分别为 20，30，40。

## 4.6.3 镜像

### 概要

镜像移动及复制节点、单元、网格组。截面形状对称时，建模只可以一半，通过镜像（复制）功能，可以简单地对整个截面建模。

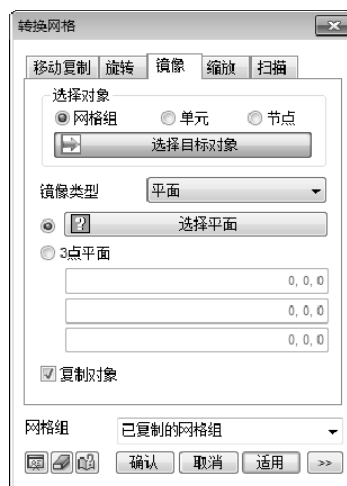


图 4-176 网格镜像对话框

### 方法

选择要镜像移动/复制的节点、单元以及网格组，设置镜像类型。对称类型有作为对称基准的点、轴、平面类型。可以通过复制对象选项，同时执行对称移动及复制。

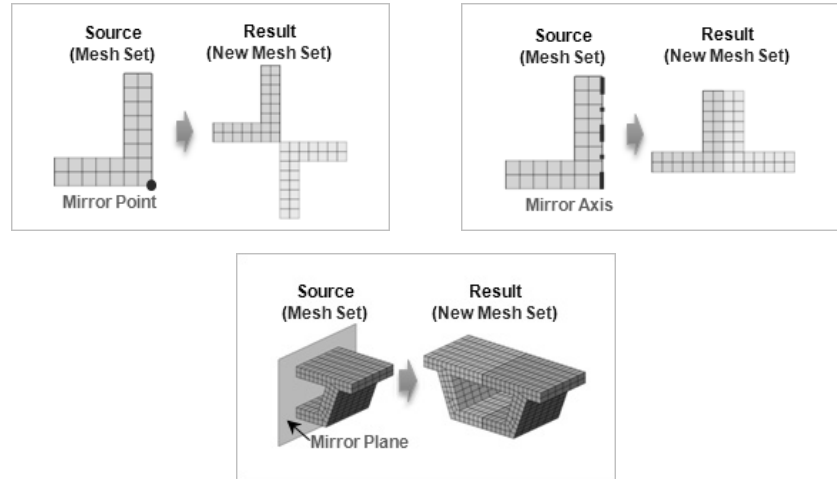


图 4-177 网格镜像的示例（镜像点、镜像轴、镜像平面）

### 镜像类型

[顶点]: 可以直接选择镜像的顶点或输入坐标。

[轴]: 可以在整体坐标系中选择对称轴，或者定义连接起点和终点的任意矢量轴。

[平面]: 可以选择镜像平面，或者定义经过 3 点的任意平面。



按镜像移动操作生成单元的情况下，生成单元的单元坐标系会与源单元的坐标系方向相反。

例如，2D 单元的情况下，如果轴或点进行镜像移动，生成的单元法线方向就会被反转。这会导致执行分析时会发生错误，因此需在网格—>单元—>网格参数中，按一个方向统一单元坐标系。

## 4.6.4 缩放

### 概要

以中心点为基准放大或缩小节点、单元、网格组。





图 4-178 网格缩放对话框

### 方法

选择要放大/缩小的节点、单元或网格组，并设置中心点。以中心点为基准定义缩放系数，或者按整体坐标系的轴向选择性的进行缩放。

勾选“复制对象”选项可以同时执行放大/缩小及复制。

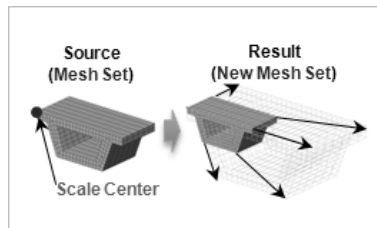


图 4-179 网格缩放的示例

### 缩放类型

[均匀]: 按整体坐标系的各轴向均匀的放大/缩小选择的目标。

[非均匀]: 按整体坐标系的各轴向，可采用不同的缩放系数。

## 4.6.5 扫描复制网格

### 概要

根据扫描导向移动节点、单元、网格组。



图 4-180 扫描复制对话框

### 方法

选择节点、单元或网格组，可以直接选择扫描导向曲线，或者可代替导向曲线的顺序节点。

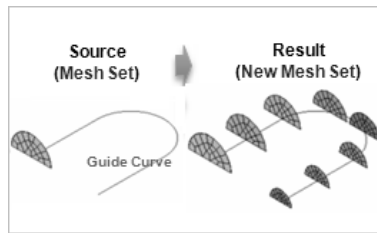


图 4-181 扫描复制的示例

### 扫描导向

#### [曲线]

可以选一个导向曲线。因此，对于复杂形状应当预先生成一个线组。

#### [顺序节点]

选择多个节点的情况下，按照所选的顺序决定扫描的方向，因此，要注意选择顺序。另外，直接选择节点的情况下，所选的节点间的间距就是生成单元的大小，所以，不需要再设置单元大小。

#### [正交]

要使复制的对象总是与扫描导向线垂直，并选择节点指定为参考点。

#### [端部缩放系数]

调整生成单元末端位置的缩放比例，可以设置扫描的单元大小比例。

例如，输入 2 时，在结束扫描的位置上按 2 倍生成单元。

### 播种方法

[大小]: 直接设置单元的大小。扫描移动/复制的情况下，对应于扫描的间距。



[比例]: 按 0~1 之间的比例, 可以定义扫描间距及个数。

例如, 输入 0.3,0.5,1 时, 在扫描导向线整个长度上, 在相对应的 0.3, 0.5, 1 比例的位置上移动/复制网格。

[分割数量]: 用扫描导向线总长度的分割数量定义扫描的间距。

## 4.7 节点

### 4.7.1 建立

#### 概要

在三维空间上的期望位置上生成节点，生成节点的方法有如下 5 种。



图 4-176 建立节点的方法

根据生成方法可以任意调整位置及数量。添加节点编号可按不与当前的节点号重复的未使用的最小号、最大号+1 或用户自定义编号。



图 4-177 节点建立对话框

#### 方法

##### [坐标]

可以直接输入节点坐标，或者用顶点捕捉功能在窗口选择位置。

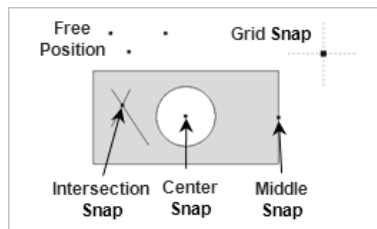


图 4-178 按坐标建立节点的示例

##### [两节点之间]

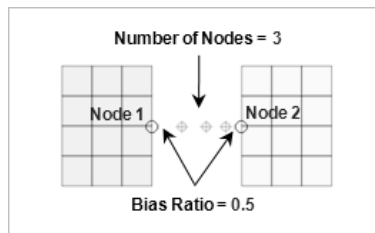


图 4-179 在两点之间建立节点的示例

在所选的两任意节点之间添加生成节点。选择要生成的节点数量。当生成一个以上的节点时，可输入生成节点的终点间距与起点间距的比值。

[节点中心]

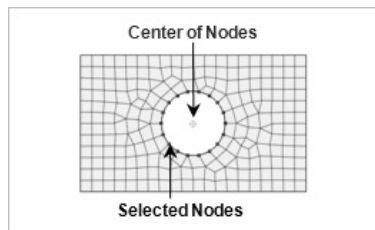


图 4-180 在节点中心建立节点的示例

选择 2 个以上的节点时，在所选节点形成的形状中心位置添加生成节点。

[在线上]

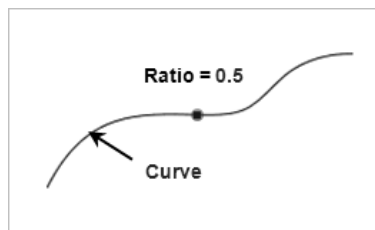


图 4-181 在几何线上建立节点的示例

在选择的线上添加节点。以线的起点和终点为基准直接输入节点的位置，或者按 0~1 之间的比率确定节点的位置；可以用[反向]选项任意修改起点和终点的位置。

[圆心]

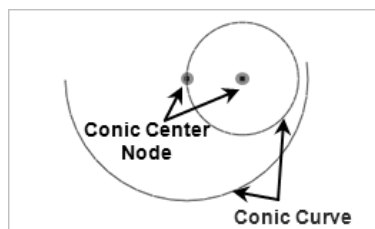


图 4-182 在圆心建立节点的示例

在所选的圆弧（圆）的中心位置上自动生成节点。也可以用圆心捕捉功能的确定的圆心位置生成。

## 4.7.2 删除

### 概要

删除节点。



图 4-183 节点删除对话框

### 方法

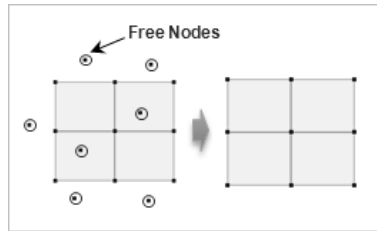


图 4-184 节点删除的示例

可以自动删除整个模型中没有和单元连接的自由节点（Free Node），可以任意删除所选的节点。但是，删除已生成单元的节点时，包含相对应节点的单元也同时被删除。

## 4.7.3 合并

### 概要

把 2 及以上的节点合并为一个节点，或者以一个节点位置为基准合并两个节点。

主要用于连接建模过程中略微分离的单元节点。这个功能可用于检查不与单元连接的自由节点来判断出现自由线的建模错误。



图 4-185 节点合并对话框

### 方法

[选择节点]

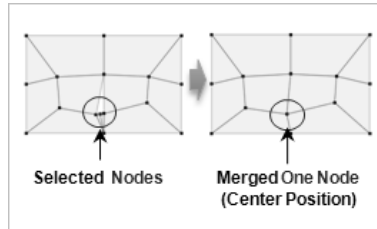


图 4-186 已选择节点合并的示例

选择要合并的节点定义合并误差。误差作为合并的容许极限，只有在节点间的距离小于误差的情况下，才能合并为一个节点。选择“查找”功能就会显示误差范围内的节点。合并的节点的位置可以按最小编号/最大编号的节点设置，或者按节点的中心位置（在合并节点的中心）确定。“闪烁标记”功能，可在窗口上显示自由节点，用于判断建模错误，如自由线等。

[2 节点]

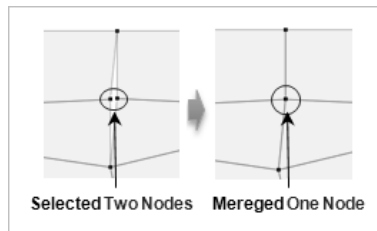


图 4-187 2 节点合并的示例

选择要移动的节点和要保留的节点，两节点合并于要保留的节点位置。在极小的区域存在自由线（Free Edge）时，生成距离极小的节点后，可以简单地用合并 2 节点功能进行修改。

## 4.7.4 投影

### 概要

把节点投影到目标面或线。



图 4-188 节点投影对话框

方法

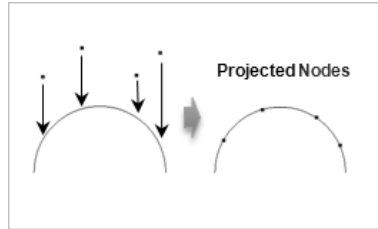


图 4-188 节点投影的示例

选择要投影的节点，可以选择投影的目标形状为面或线。投影方向可按参考整体坐标系，或者用起点和终点定义的任意矢量设置投影方向。选择“最短路径直线方向”选项时，按节点到投影目标（目标面）的最短距离投影。

选择单元的全部节点时，可移动整个网格；选择部分节点时，未被选择的节点按原样留在之前位置上，所以单元形状及大小将基于投影距离自动修改。

### 4.7.5 排列

概要

以目标节点为基准排列/移动所选的对象节点。可用于基于目标节点和排列方向修改单元形状。



图 4-189 节点排列对话框

方法

选择要排列的节点后选择参考节点，就会按照设置的排列方向移动选择的节点。排列方向可以选择整体坐标系的 X, Y, Z 轴方向。

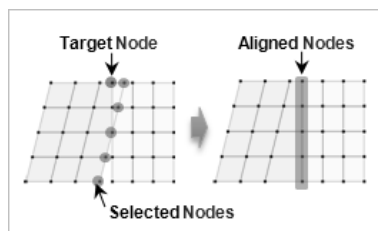


图 4-190 节点排列的示例



## 4.7.6 修改

### 概要

选择个别节点可以修改节点编号及节点坐标系。



图 4-191 节点修改对话框

### 方法

选择要修改的节点或直接输入编号，就会自动输出相应节点的坐标。可以保留节点编号，或者重新输入与已有节点号不重复的节点编号，同时也可以修改所选节点的坐标系。而对于修改多个节点的坐标系，可在“坐标系”功能中实现。

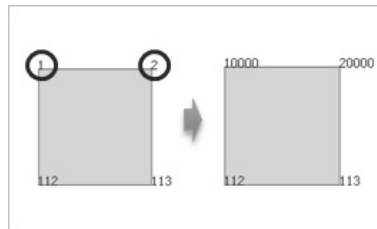


图 4-192 节点修改的示例

## 4.7.7 坐标系

### 概要

修改节点坐标系。



图 4-193 修改节点坐标系对话框

方法

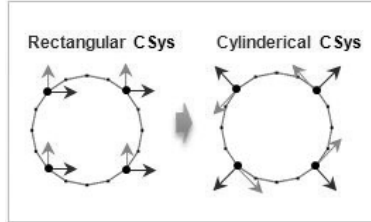


图 4-194 修改节点坐标系的示例

选择要修改坐标系的节点。修改的坐标系可以由整体直角坐标系、整体圆柱坐标系以及任意 3 点平面定义。



直角坐标系和圆柱坐标系可按下图区分。

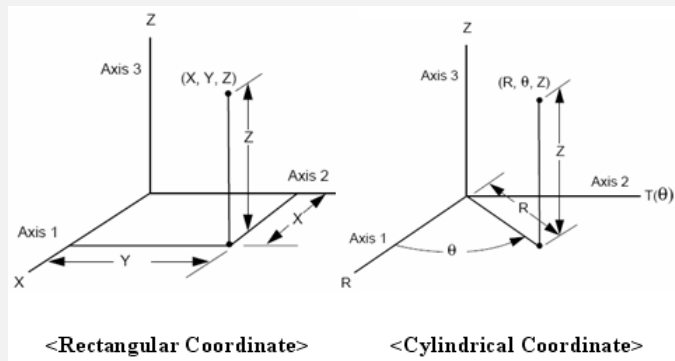


图 4-195 直角坐标系和圆柱坐标系

## 4.8 单元

### 4.8.1 建立

#### 1. 1D

##### 概要

建立连接两节点的 1D 单元。可用于生成与相邻岩土节点不需要连接的结构单元（植入式桁架单元桁架单元等）。



图 4-196 1D 单元建立对话框

##### 方法

输入 1D 单元两端的节点编号。依次选择窗口中已生成的节点可以生成单元。单元号按单元最大编号+1 自动设置；直接输入的情况下，编号不能与之前生成的单元号重复。生成的单元可以设置或添加要赋予的结构属性，同时可独立生成网格组。

##### [方向（单元 z-轴）]

该功能用于统一 1D 单元的方向特性或设置强轴方向和弱轴方向。检查单元坐标系或参考设置的  $\beta$  角调整单元的 z 轴方向。



图 4-197 单元坐标系设置对话框

(1) 参考节点：选择 1D 单元方向的基准节点。以选择的节点为基准设置单元的 z 坐标方向。

(2) 参考矢量（整体坐标系）：设置按整体坐标系（GCS）方向或直接输入的矢量方向，设置单元的 z 坐标方向。

(3)  $\beta$ 角：可以在 0, 90, 180 中选择，按选择的  $\beta$  角，以 x 轴为基准旋转。

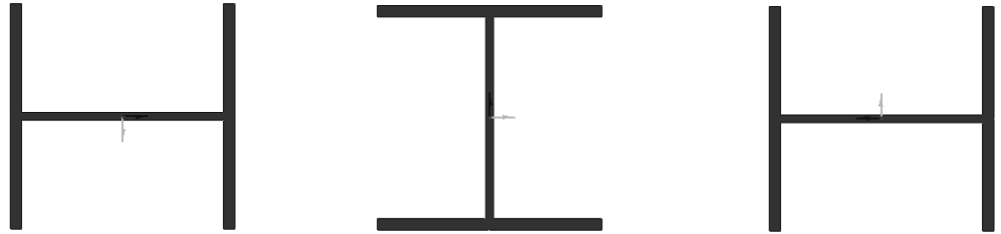


图 4-198 单元坐标系调整的示例 (0、90、180)

## 2. 2D

### 概要

生成连接节点的 2D 单元。可用于在自动生成网格的区域生成任意的平面单元。



图 4-199 2D 单元建立对话框

### 方法

根据选择的节点数量生成三角形或四边形单元。可以直接输入生成 2D 单元角点的节点编号，或者在工作窗口中依次选择已生成的节点生成 2D 单元。单元号按单元最大编号+1 自动设置；直接输入的情况下，编号不能与之前生成的单元号重复。生成的单元可以设置或添加要赋予的属性，同时可独立生成网格组。采用自动生成功能时，结束节点选择后会立即添加网格组。

## 3. 3D

### 概要

生成填充所选节点空间的 3D 单元。可用于生成个别具有复杂形状的 3D 单元。



图 4-200 3D 单元建立对话框

### 方法

根据所选的节点数量生成四面体、金字塔形、五面体、六面体形状的单元。可以直接输入生成 3D 单元顶点的节点编号，或者在工作窗口中依次选择已生成的节点生成 3D 单元。单元号按单元最大编号 +1 自动设置；直接输入的情况下，编号不能与之前生成的单元号重复。生成的单元可以设置或添加要赋予的属性，同时可独立生成网格组。

## 4. 其它

### 概要

按如下所示，建立弹簧、弹性连接等单元。根据生成的单元类型可以定义属性。



图 4-201 其它单元建立对话框及单元类型

### 方法

#### [点弹簧]

在所选的节点中生成具有一定刚度的弹簧。可通过弹簧常数或者阻尼常数定义以整体坐标系为基准的变形及旋转的约束。主要用于岩土柔性支撑条件或者动力分析的约束条件。

#### [矩阵弹簧]

与点弹簧功能相同。但是，在定义属性时，涉及变形及旋转的弹簧刚度，可以矩阵形式直接输入。

#### [刚性连接]



图 4-202 刚性连接建立对话框

生成连接所选两节点的连接单元。选择作为基准的第一个节点，并选择成为连接目标的多个节点。刚性连接可用于模拟在变形或旋转情况下两节点之间的所有刚性行为，约束方向可以整体坐标系为基准定义。

[弹性连接]



图 4-203 弹性连接建立对话框

通过具有一定刚度的弹簧连接所选的两节点。选择成为基准的第一个节点后，选择成为连接目标的一个节点生成连接单元。与点弹簧相同，属性按变形和旋转的常刚度定义。

[插值]



图 4-204 插值单元建立对话框

这个功能通过权衡所选节点的平均行为，模拟标准（参考）节点的行为。与刚性连接单元相似，可约束连接节点间运动。但和刚性连接不同的是插值单元允许发生因其它多个不同节点的运动产生的相对行为。因此，所选的其它多个节点的平均行为将决定参考节点（依存节点）的运动。

选择要约束的节点和自由度后，选择要进行平均的节点。可以定义各节点的权重值。

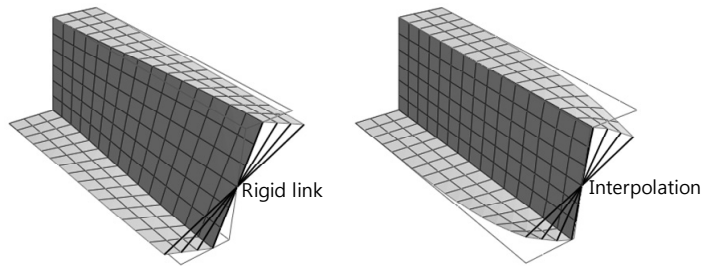


图 4-205 刚体连接和插值单元的对比

[曲面弹簧]

在单元的支撑点输入单位面积的弹簧刚度，建立点弹簧或者弹性连接。

用于考虑岩土柔性支撑条件的基础分析或地下结构分析。如果输入单位面积弹簧刚度后，根据考虑所选单元的面积，自动转换到作用在节点的弹簧或连接。



图 4-206 曲面弹簧建立对话框

曲面弹簧的目标对象如下。

- (1) 线单元：在 1D 单元的节点上生成点弹簧或弹性连接。输入到宽度，计算单位长度梁单元的支撑刚度。
- (2) 面单元：选择 2D 单元，生成弹簧或弹性连接。
- (3) 实体的面：可以指定三维实体的任意面，在与选择的面连接的所有节点建立弹簧或弹性连接。
- (4) 单元线：选择 2D 单元的边界线，在与选择的单元线连接的节点建立弹簧或弹性连接。

除了可按输入单位面积的弹簧刚度定义弹簧常数外，也可以选择“仅受拉”、“仅受压”选项。

[地面曲面弹簧]

自动生成动力分析中所需的弹性/粘性边界单元。选择网格后，就会在选择网格的左/右/底部自动生成边界单元，并基于所选单元的材料/特性自动计算弹簧常量。

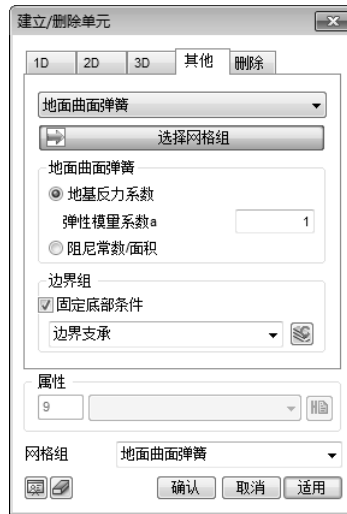


图 4-207 地面曲面弹簧建立对话框

执行动力分析时，为了模拟基岩条件，模型下部（底面）经常按固定条件（位移约束）指定，这里可简单地通过勾选“固定底部条件”选项进行设置。



**\* 弹性边界单元生成方法**

弹簧可用于定义特征值分析、反应谱分析的岩土边界条件。

这样的生成弹簧的方法对初级分析人员是困难的，可以通过下面的步骤生成弹簧单元。

通过岩土的属性定义的弹性模量计算水平和竖直方向的地基反力系数  $K_{v0}$ ， $K_{h0}$  计算公式如下。

$$K_{v0} = \frac{1}{30} \alpha \cdot E_0 \quad K_{h0} = \frac{1}{30} \alpha \cdot E_0$$

表 4-17 系数  $\alpha$  的说明

基于下面试验方法的变形模量 $E_0$ (tonf/cm <sup>2</sup> )	系数 $\alpha$	
	正常时	地震时
基于直径 30cm 刚体圆板的平板载荷试验的循环曲线求得变形模量的 1/2	1	2
在钻孔内测定的变形模量	4	8
在试样的单轴或三轴抗压试验中求得的变形模量	4	8
取标准贯入试验的 $N$ 值，按 $E_0 = 28N$ 计算的变形模量	1	2

这里， $E_0$ ：岩土的弹性模量； $\alpha$ ：基于试验条件的系数（参考上表）。

通过计算的  $K_{v0}$  重新计算水平方向地基反力系数  $K_v$ 。

$$K_v = K_{v0} \cdot \left(\frac{B_v}{30}\right)^{-\frac{3}{4}} \quad K_h = K_{h0} \cdot \left(\frac{B_h}{30}\right)^{-\frac{3}{4}}$$

这里， $B_v = \sqrt{A_v}$ ， $B_h = \sqrt{A_h}$



这时，面积  $A_v$ ， $A_h$  分别为地基反力弹簧在水平和垂直方向的区域面积，单位为  $\text{cm}^2$ 。

有如下图所示，Ground A 的面积  $A_v = 1\text{m}$ （模型左边的长度）\*  $1\text{m}$ （2D 分析时单位宽度）=  $1\text{m}^2$ ，这里，单位须换算成  $1\text{m} = 100\text{cm}$ ，其它参数同样需要转换。

同理，Ground B 的  $B_v = \sqrt{20000\text{cm}^2} = 141.42136\text{cm}$ 。

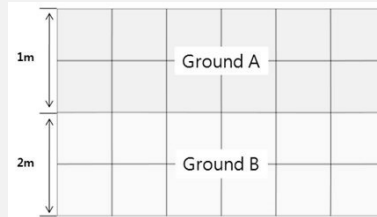


图 4-208 地层模型

最终计算如下的水平地基反力系数  $K_v$  值，在节点上生成考虑了单元面积的点弹簧。

表 4-18 弹性边界计算结果

位置	$E_0 /$ tonf/cm <sup>2</sup>	$K_{v0} /$	$A_v /$ cm <sup>2</sup>	$B_v /$	$K_v /$ tonf/m <sup>3</sup>	$\alpha$
A	0.1	0.003333	10000	100.00	1351.19	1
B	0.2	0.006667	20000	141.42	2083.85	1

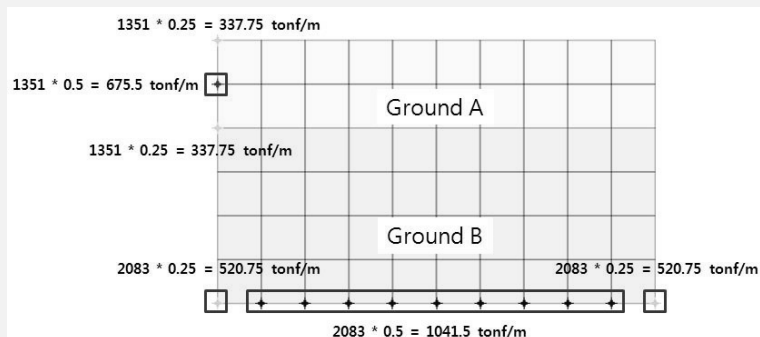


图 4-209 计算结果分配到模型节点的示例

底部（Z 方向）的弹簧系数按与 X 方向相同的方法计算。

（单元的长度×宽度=截面积，只考虑单元的有效长度。）

另外，在土层与土层重叠的部分将生成 2 个弹簧单元。

**\* 粘性边界单元的生成方法**

1、为了执行时程分析，模型的边界需要定义粘性边界单元。

2、粘性边界单元的生成方法如下。

（1）计算 P 波和 S 波对应的  $C_p$ ， $C_s$

$C_p$ ， $C_s$  可通过如下公式计算。

$$C_p = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = W \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{W \cdot 9.81}} = c_p \cdot A$$

$$C_s = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} = W \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{W \cdot 9.81}} = c_s \cdot A$$

这里， $\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$ ， $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$ 。其中， $G$ ：抗剪模量； $E$ ：弹性模量； $\nu$ ：泊松比； $A$ ：截面面积。

截面面积的在生成曲面弹簧时自动考虑，所以只计算  $c_p$ ， $c_s$ 。

表 4-19 粘性边界参数计算结果

	弹性模量	体积弹性模量	抗剪弹性模量	容重	泊松比	P 波	S 波
	$E /$	$\lambda /$	$G /$	$W /$	$\nu$	$c_p /$	$c_s /$
	tonf/m <sup>2</sup>	tonf/m <sup>2</sup>	tonf/m <sup>2</sup>	tonf/m <sup>3</sup>		tonf · sec/m <sup>3</sup>	tonf · sec/m <sup>3</sup>
Ground A	1000	864.1975309	370.3703704	1.8	0.35	17.1605	8.2437
Ground B	2000	1459.531181	751.8796992	2.0	0.33	24.5792	12.381

$c_p$ ， $c_s$  的单位为 tonf · sec/m<sup>3</sup>，乘以节点位置的有效面积，得到粘性单元的弹簧刚度单位变为 tonf · sec/m。

粘性单元的参数是根据用户在建模时输入的岩土的属性计算，其中，体积模量、剪切模量是通过弹性模量和泊松比计算。因此，用户生成粘性边界单元时，不需要额外添加参数。

自动生成粘性边界单元的情况下，考虑单元的面积（有效长度\*单位宽度）后自动生成弹簧。计算得到的  $C_p$  作为生成弹簧的节点位置的法向参数， $C_s$  则作为切向参数。

例如，下图所示的 XZ 平面的二维模型，在模型的左/右侧生成的弹簧系数的  $C_x$  为各地基的  $C_p$  值， $C_z$  等于  $C_s$  值；底部弹簧系数  $C_x$  等于  $C_s$  值，底部弹簧系数  $C_z$  等于  $C_p$  值。

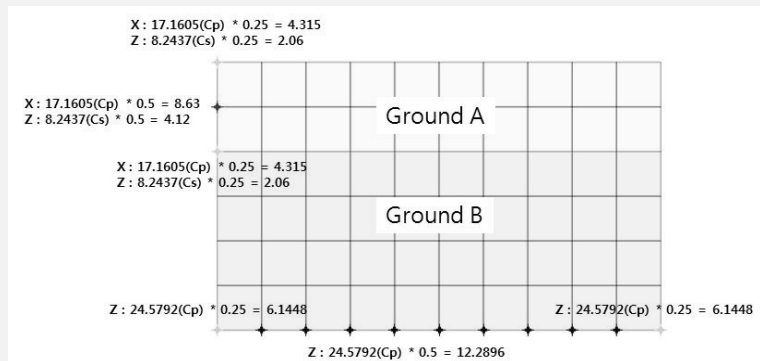


图 4-210 计算结果分配到模型节点的示例

[测量板]

在实体单元表面建立测量板单元，用于检查实体单元表面的力和弯矩。为了生成测量板，选择作为基础的实体单元后，选择在所选实体上用于建立测量板单元的单元面。测量板的刚度是按选择的实体单元的刚度乘以刚度增量系数计算，自动考虑选择的实体形状厚度，计算各测量板单元的厚度。



图 4-211 测量板单元建立对话框

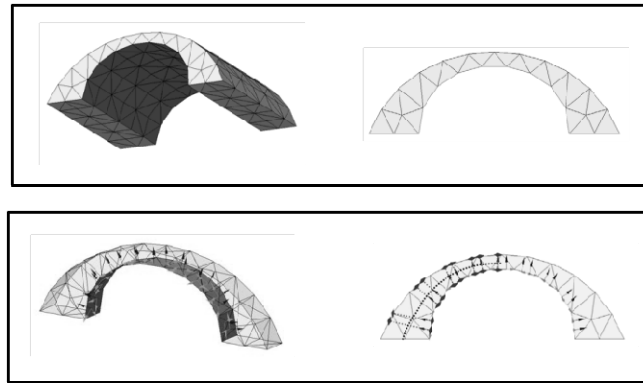


图 4-212 测量板单元建立的示例

[质量]

在任意节点输入集中质量。可把荷载转换为质量并用于分析。



图 4-213 质量单元建立对话框

勾选“总质量”的情况下，根据所选的节点，自动分配“质量属性”选项中输入的集中质量数据。按照“总质量”功能在节点上分配的集中质量数据的总和与在质量属性中输入的集中质量数据相等。将输入的荷载转换为质量并选择“总质量”选项可以简便的用于特征值分析、反应谱分析、时程分析等。参考整体坐标系输入集中质量数据，质量惯性矩 (I) 按照设定的单位系统定义。

## 4.8.2 删除

### 概要

用于删除单元。在模型目录树或者在工作窗口中选择要删除的单元后，可以用 Delete 键删除，但这个功能提供了如下选项。



图 4-214 删除单元对话框

### 删除相关节点

所选的单元被删除，与其它单元不再关联的节点也一并删除。

### 删除空网格组

所选的单元被删除，不再包含单元的空网格组也一并删除。

### 仅删除重复单元

重复的单元是指拥有相同节点但相互不同的单元，这会导致分析错误发生。要修改相同单元的属性时，可以使用修改单元属性的边界条件，所以，最好在建模过程中删除重复单元。在选择的单元中查找重复的单元后，保留一组重复单元后其它单元全部删除。

## 4.8.3 修改

### 概要

修改所选单元的属性以及单元节点连接。可以在工作窗口中选择要修改的单元，或使用 ID 选择功能输入单元号。单元属性也可以采用单元>网格参数修改。

需要编辑的输入信息与所选的单元类型有关，并在选择单元后自动显示，如下图所示。



图 4-215 修改单元对话框

## 4.8.4 修改单元拓扑

### 概要

生成单元以后可以修改单元形状。根据单元类型和修改目的可以使用如下 3 种方法。



图 4-216 修改单元拓扑对话框

### 方法

#### [翻转 2 个三角形]

连续选择两个共用一个边 2D 三角形单元。节点位置保持不变。修改单元形状时，可以忽略几何形状，或者通过自动适用选项在选择两个单元的同时自动更新形状。

#### [合并单元]

连续选择两个连接的三角形单元或四边形单元，合并成一个单元。

但是，在这种情况下，会忽略与相邻单元的节点连接而会出现 B 样条线。

#### [修复反向实体的连接]

有时因网格“导入”或法线方向反向定义而生成错误的实体单元。因此，需要修改这样的实体单元的节点连接。在查看模式（网格）中，用视图模式（网格）的“正反面颜色”选项，在窗口中查看单元的形状，只有处于法线方向反向的单元按其它颜色显示。

## 4.8.5 网格参数

### 1. 1D

#### 概要

可以修改 1D 单元的属性、阶次、坐标系，或者添加偏移或释放梁端约束（固定、铰接等）。可以添加及变更的项目如下。



图 4-217 1D 单元修改属性对话框

**方法**

[修改属性]

修改生成 1D 单元时赋予的属性。选择要修改的 1D 单元并指定要修改的属性。

[修改单元阶次]

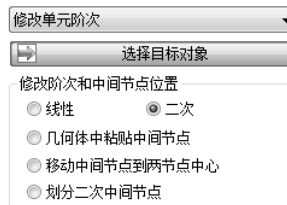


图 4-218 1D 单元修改单元阶次对话框

在 1D 单元之间添加或删除节点，可以修改为高阶单元或低阶单元。而且，可以把中间节点定义到单元起点或终点之间以生成高阶单元，可在几何形状上生成任意的中间节点。也可以中间节点为基准分割 1D 高阶单元为两个低阶单元。

[修改坐标系]



图 4-219 1D 单元修改坐标系对话框

结构单元的情况下，分析结果是按单元坐标系为基准输出。因此，检查结构单元的坐标系后并确保是在一个方向是十分重要的。转换单元的 x 轴方向或指定单元的 z 轴方向，使强轴和弱轴方向统一。除此之外，也有可使之与相邻 1D 单元方向一致。

**方向（单元 z-轴）**

该功能用于统一 1D 单元的方向特性或设置强轴方向和弱轴方向。检查单元坐标系或参考设置的  $\beta$  角调整单元的 z 轴方向。



图 4-220 单元坐标系设置对话框

- (1) 参考节点：选择 1D 单元方向的基准节点。以选择的节点为基准设置单元的 z 坐标方向。
- (2) 参考矢量（整体坐标系）：设置按整体坐标系（GCS）方向或直接输入的矢量方向，设置单元的 z 坐标方向。
- (3)  $\beta$  角：可以在 0, 90, 180 中选择，按选择的  $\beta$  角，以 x 轴为基准旋转。

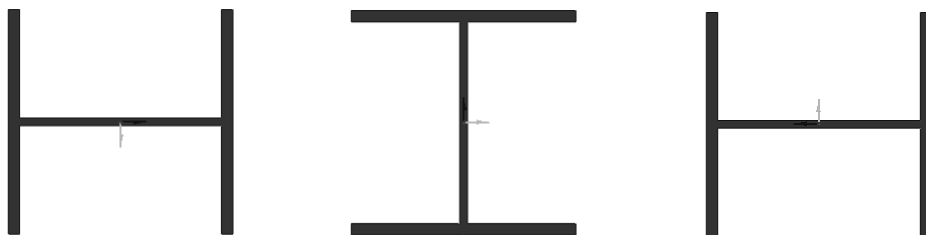


图 4-221 单元坐标系设置的示例（0、90、180）

[添加偏移（梁/植入式梁）]



图 4-222 添加偏移（梁）对话框

考虑结构单元的截面特性（形状）可以定义偏移距离。定义特性时，可以在截面形状范围内设置偏移，也可以通过附加功能在截面形状范围外指定偏移。偏移是在生成结构单元的几何形状（线）与荷载作用及计算结果的基准轴位置之间的偏心距。主要适用于表示结构构件之间的连接或两构件相接位置的组合截面。

设置计算偏移距离的基准坐标，通过输入均匀或非均匀偏移，按各轴方向设置偏移距离。

[添加端部约束释放（梁）]

指定 1D 单元端点约束条件。主要适用于设置结构构件之间的连接条件，如铰接、滚动等。

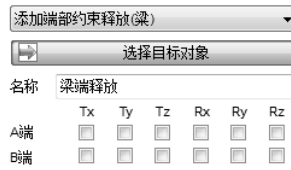


图 4-223 添加端部约束释放（梁）对话框

## 2. 2D

### 概要

可以修改 2D 单元的属性、阶次、坐标系，或者添加偏移距离或释放板端约束（固定、铰接等）。可以添加及变更的项目如下。

材料坐标系定义为 2D 单元的结果输出坐标系，也可以对所选单元添加其他的输出坐标系（材料坐标系）。



图 4-224 2D 单元修改属性对话框

### 方法

#### [修改属性]

修改生成 2D 单元时赋予的属性。选择要修改的 2D 单元，指定要修改的属性。

#### [修改单元阶次]

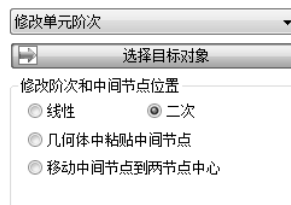


图 4-225 2D 单元修改单元阶次对话框

在 2D 单元之间添加或删除节点，可以修改为高阶单元或低阶单元。而且，可以把中间节点定义到单元起点或终点之间以生成高阶单元，并且可在几何形状上生成任意的中间节点。

#### [修改坐标系]





图 4-226 单元坐标系设置对话框

2D 结构单元的情况下，可以定义结果输出的坐标系（材料坐标系）。输出坐标系（材料坐标系）设置为单元坐标系的情况下，检查结构单元的坐标系后并确保是在一个方向时十分重要的。转换单元的 z 轴方向，或者所选单元的法线方向调整为与基准单元的法线方向一致。使用中心坐标时，通过由基准点到各单元的方向矢量，调整各单元的法线方向。

[添加厚度]



图 4-227 添加厚度对话框

虽然在截面特性中定义了 2D 单元的厚度，但对所选的单元也可以设置添加厚度。选择要修改厚度的 2D 单元，按单元节点的位置定义厚度。

[添加偏移]



图 4-228 添加偏移对话框

考虑结构单元的截面特性（形状）可以定义偏移距离。偏移是在生成结构单元的几何形状（曲面）与荷载作用及计算结果的基准轴位置之间的偏心距。偏移距离可按整体坐标系的函数定义，方向沿着 2D 单元的法线方向 (+, -) 移动。使用函数的情况下，输入的偏移距离为缩放比例系数，并乘以函数定义的值计算。

[添加材料方向]

除了在 2D 单元的属性中定义的材料坐标系之外，对所选单元也可以单独地添加材料坐标系（输出坐标系）。定义坐标系的方法如下。

(1) 坐标系：按照整体坐标系的 X, Y, Z 方向指定材料的 x 方向。可以使用整体直角坐标系和整体圆柱坐标系。

- (2) 角度：通过把单元的法线方向作为旋转轴来定义材料的 x 轴方向，并按指定的角度旋转坐标系。
- (3) 参考矢量：按照输入或选择的空空间矢量方向指定材料的 x 轴方向。
- (4) 坐标系和角度：在所选的坐标平面中，将参考坐标轴的旋转方向指定为材料的 x 轴方向。



图 4-229 添加材料方向对话框

[添加端部约束释放（板）]

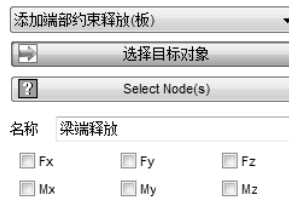


图 4-230 添加端部约束释放（板）对话框

在 2D 单元选择节点的约束条件。可以释放各单元的轴向和旋转条件。

### 3. 3D

#### 概要

修改 3D 单元的属性及阶次。



图 4-231 3D 单元修改属性对话框

#### 方法

[修改属性]

修改生成 3D 单元赋予的属性。选择要修改的 3D 单元，指定要修改的属性。

[修改单元阶次]

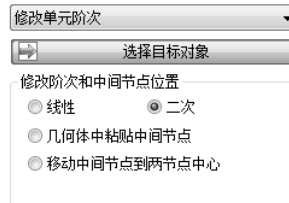


图 4-232 修改单元阶次对话框

在 3D 单元之间添加或删除节点，可以修改为高阶单元或低阶单元。而且，可以把中间节点定义到单元起点或终点之间以生成高阶单元，并且可在几何形状上生成任意的中间节点。

#### 4. 其它

##### 概要

用于修改单元中赋予的其它属性。用于弹簧、连接、界面单元等，选择要修改的单元定义适合的属性。



图 4-233 其它单元修改属性对话框

### 4.8.6 连接

##### 概要

分割共享节点间的连接或在节点之间建立弹性连接或刚性连接单元。分割节点后生成的自由线/面可用来生成界面单元。



图 4-234 节点连接建立对话框

##### 方法

[分割节点]

选择包含要分离节点的单元后，选择要分割或建立连接单元的节点。连接类型可以选择只进行节点分离、建立弹性连接或建立刚体连接。生成弹性连接的情况下，可设置连接单元的坐标系。

[最近的连接]

选择两组的节点，在各组中最接近的节点之间建立弹性连接。

[相同的连接]

在容差范围内的选择节点之间建立刚体连接。容差作为节点连接的容许极限，仅在节点间的距离小于容差的情况下才能适用。主要用于自动连接由于建模错误产生的两节点之间微小分离。

### 4.8.7 析取

#### 概要

从已经生成单元的几何形状还有网格中析取生成子单元。因为析取的单元与现有单元的节点是连接的，所以，可用于生成连接相邻土体节点的结构单元。析取时可以定义或添加要生成的单元特性，1D 单元的情况下，可以定义单元坐标系。



图 4-235 析取单元对话框

析取的网格可按目标形状、所属独立形状或所属的网格组区分可以生成网格组。当在多个实体中同时地析取单元时，可采用这个选项自动区分网格组。

#### 方法

##### [几何]

从用于生成网格的线/面中，在相应节点位置析取 1D/2D 单元。从面中析取 2D 单元时，可以使用“忽略重复面”选项，即可在所选的整体面中，只在不重复的面上析取单元。如果选择目标面以复杂的形式位于多个实体中，则一次性地选择所有实体后，通过“忽略重复面”只在实体的最外围面析取单元。

##### [网格]

从已生成网格的自由线/面上析取 1D/2D 单元。在所选的节点中，只自动析取位于自由线/面位置的节点。选择参考单元时，只在指定网格的所属节点上析取单元。

## 4.8.8 分割

### 1. 1D 单元

#### 概要

按设置的数量分割 1D 单元。可用于将高阶 1D 单元分成两个低阶单元。



图 4-236 1D 单元分割对话框

### 2. 2D 单元

#### 概要

按照模式或输入的数量把 2D 单元分割成多个单元。几何形状复杂的情况下，如果通过自动网格功能生成的同一大小的网格形状（质量）有可能不好。在这种情况下，通过分割功能提高单元纵横比。沿着轴向设置模式或分割数量。分割单元时，为了保证与相邻单元的节点连接，可以勾选“分割相邻单元”选项。



图 4-237 2D 单元分割对话框

## 方法

### [分割模式]

决定要分割的 2D 单元和模式，选择参考节点。

模式-2：选择 11 种模式之一把单元的边线分割为 2 部分。模式中的红色点是指参考节点的位置，白色点是忽略参考节点的点。

模式-3：选择 11 种模式之一把单元的边线分割为 3 部分。模式中的红色点是指参考节点的位置。

### [分割数量]

按输入的分割数量均匀分割 2D 单元的边线。然而，这只适用于按 2 个轴向定义的四边形单元。分别设置轴 1, 2 方向的分割数量，定义轴向的方法如下。输入与指定轴向形成最小角度的单元边线的轴向分割数量。

## 轴向

### [单元坐标系]

单元坐标系的 x 轴方向作为轴 1 使用。

### [坐标轴]

使用坐标系指定轴 1。可以在整体直角坐标系或者整体圆柱坐标系中选择期望的轴。

### [基于方向矢量]

输入的矢量作为轴 1。在“原点”输入矢量的起点后，输入轴 1 上的任意的点生成矢量。

### 3. 3D 单元

#### 概要

按照模式或输入数量分割 3D 单元成多个单元。只能分割六面体单元。



图 4-238 3D 单元分割对话框

#### 方法

##### [分割模式]

选择 4 个模式中的一个进行分割单元。模式中的红色点是指参考节点的位置。决定要分割的 3D 单元和模式，选择参考节点。

##### [分割数量]

按输入的分割数量均匀分割 3D 单元的边线。分别设置轴 1，2，3 方向的分割数量，轴向按如下方法定义。输入与指定轴向形成最小角度的单元边线的轴向分割数量。

#### 轴向

##### [单元坐标系]

单元坐标系的 x 轴方向作为轴 1 使用。

##### [坐标轴]

使用坐标系指定轴 1 和轴 2。可以在整体直角坐标系或者整体圆柱坐标系中选择期望的轴。

##### [基于方向矢量]

输入的矢量作为轴 1 和轴 2。在“原点”输入矢量的起点后，输入轴 1 和轴 2 上的任意的点生成矢量。

### 4.8.9 测量

#### 概要

是测定所选单元的材料及几何信息的功能。可用于检查单元的长度（1D）、面积（2D）、体积（3D）等。选择要测定的单元后执行计算，就可以得到所选的全部单元的总和。对于体积（2D），可通过 2D 单元的特性（厚度）和单元的面积来计算单元的假设体积。



图 4-239 单元测量对话框

### 4.8.10 界面

#### 概要

建立可能会发生滑动或分离的同质或异质材料的界面。主要用在模拟相对刚度差异较大的地基和结构之间的界面行为。界面生成方法要根据工作环境（2D/3D）和目标分类。为了生成界面单元必须定义相关属性。界面属性可直接输入或通过属性助手按相邻单元的属性自动计算。

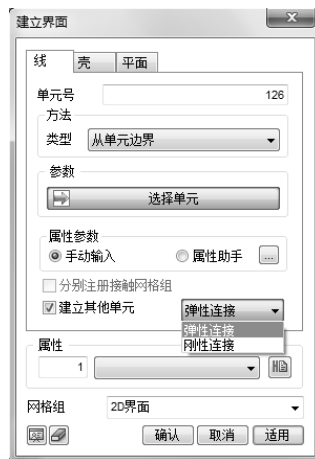


图 4-240 界面单元建立对话框





生成界面单元的同时在相应位置自动分离连接的节点，并按法线方向和切线方向生成拥有指定刚度的单元。因此，生成界面单元以后，在不使用界面单元的阶段（如：初始应力场）中，因为节点为分离状态，所以为了防止分析时发生错误，应通过刚性连接来连接两个节点。程序提供生成刚性连接与弹性连接的选项，且生成弹性连接时，会生成刚度很大的单元。反之，对于使用界面单元的阶段，刚性/弹性连接从分析中除去。利用“生成其他单元”选项，程序自动生成连接单元连接被分割的两个节点。



图 4-241 界面单元材料设置对话框及界面助手对话框

(1) 界面材料可以用如下的关系式定义。根据相邻单元的刚度和非线性参数，虚拟厚度 ( $t_v$ ) 和强度折减系数 ( $R$ )。根据结构构件和地基的相对刚度差异，得到不同的界面材料的刚度及参数。

$$K_n = E_{oed,i} / t_v$$

$$K_t = G_i / t_v$$

$$C_i = R \times C_{soil}$$

这里， $E_{oed,i} = \frac{2G_i(1-\nu_i)}{1-2\nu_i}$ ； $\nu_i$  为界面的泊松比，取值 0.45；界面用于分析非压缩摩擦行为，并采用 0.45 自动计算以避免数值错误)； $t_v$  为虚拟厚度系数（一般取值范围为 0.01~0.1，岩土和结构构件的强度差越大，输入的值越小)； $G_i = R \times G_{soil}$  ( $G_{soil} = \frac{E}{2(1+\nu_{soil})}$ )； $R$  为强度折减系数。

一般结构构件和相邻土体特性的强度折减系数如下。

- (1) 沙土/钢材  $R = 0.6 \sim 0.7$

- (2) 粘土/钢材  $R=0.5$
- (3) 沙土/混凝土  $R=1.0\sim 0.8$
- (4) 粘土/混凝土  $R=1.0\sim 0.7$

### 方法

根据工作环境、构件或形状，可以按如下方法生成界面单元。

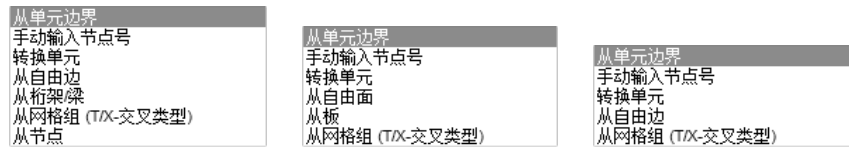


图 4-242 界面单元的类型（线、平面、壳）

#### (1) 从单元边界

在选择单元和相邻单元之间的边界位置生成界面单元，如下图所示。选择全部单元的情况下，因为没有相邻的单元，所以不能生成界面单元。如图所示。

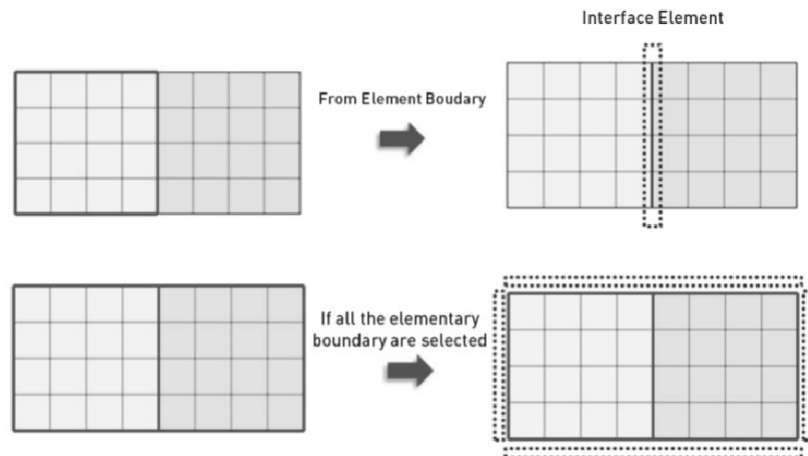


图 4-243 从单元边界中建立界面单元的示例

#### (2) 手动输入节点号

直接输入节点号，生成界面单元。节点分为边 1 和边 2 两组输入，决定界面单元的形状。输入在边 1 和边 2 的节点数量应当一致。

#### (3) 转换单元

把一般的 1D, 2D, 3D 单元变换成界面单元。因为一般单元节点的顺序不固定，所以，需添加基本的参考节点。

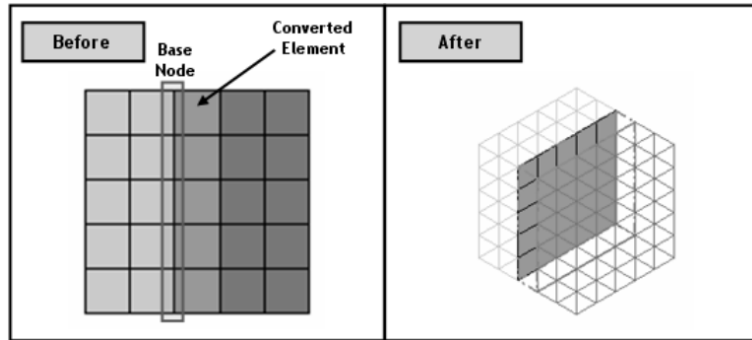


图 4-244 转换单元建立界面单元的示例

(4) 从自由边/从自由面

由相对的自由面/边生成界面单元。应当选择两侧没有连接节点的自由线（3D 时为自由面），没有自由线（自由面）的情况下，可利用单元>连接>分割节点功能预先分割节点。

(5) 从桁架/梁（3D 时，从板）

选择桁架/梁单元生成界面单元，3D 时使用板单元。由桁架/梁/板等结构单元生成界面单元，如下图，会在界面的两侧都生成界面单元。因此，如果按照从桁架/梁生成界面单元的方式，通过“分别注册界面网格组”选项，独立生成各方向的界面单元。



图 4-245 利用结构单元建立界面单元的示例

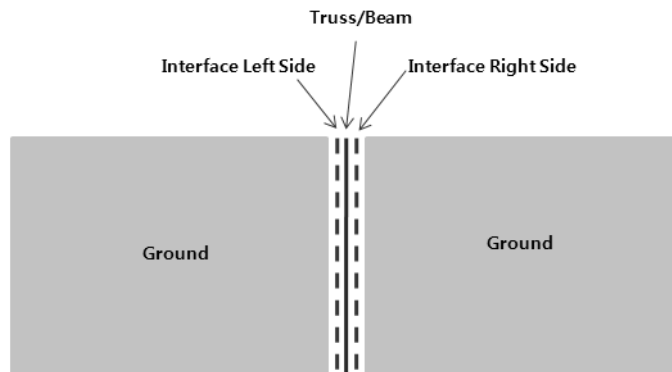


图 4-246 界面单元位置的说明

还有，当与界面单元连接的土体单元在施工阶段中被移除时，与之连接的界面单元也被移除，以防止分析上的错误。

(6) 从节点

根据所选节点的关系，在相邻的单元之间生成界面单元。3D 的情况下，如果无法正常建立界面单元时，最好选择一部分点。

(7) 从网格组（T/X-交叉类型）

选择网格组，在按 T 或 X 形式交叉的网格组中生成界面单元。可建立交叉的界面单元，与砌体结构一样。

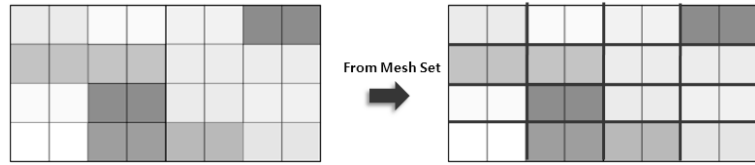


图 4-247 T/X 交叉类型建立界面单元的示例

## 4.8.11 桩界面/桩端界面

### 1. 桩界面

桩界面是植入式梁单元界面附属单元，即不需要节点和相邻土体连接。用于确认梁单元和地基之间的摩擦行为及相对位移。生成梁单元和相邻地基单元后，选择梁单元生成桩界面单元。



图 4-248 桩界面单元建立对话框

### 2. 桩端界面

在定义地基单元和桩端界面的一节点之间的相对行为时，需添加桩端界面单元。生成桩单元后，选择桩端。桩端界面的刚度按桩端承载能力和弹簧刚度定义。



图 4-249 桩端界面单元建立对话框

## 4.8.12 自由场



把岩土单元定义为无限边界时，建立自由场单元。2D 岩土模型选择自由边，3D 岩土模型选择自由面。

### 4.8.13 非弹性铰

对于桁架、梁、点弹簧、弹性连接特性，可以直接定义铰特性。



## 4.9 工具

### 4.9.1 重新编号

#### 概要

重新排列单元和节点的编号。可用于以均匀的顺序查看结果。



图 4-250 重新编号对话框

#### 方法

选择排列的目标节点或单元，并输入起始号。可对整个模型或只对所选节点（单元）执行排列。选择“仅压缩编号”选项的情况下，修改节点（单元）的原号，将节点（单元）号从 1 开始重新编号；选择“用户定义”选项时，可按参考坐标系选择排列的优先顺序。最小编号以第一轴为基准开始，在不影响第一轴的范围范围内，根据第二轴排列编号；最后，在不影响第一个第二轴的范围范围内，根据第三轴排列。

例如，第一轴指定为 X、第二轴指定为 Y、第三轴指定为 Z 的情况下，优先考虑 X 坐标，开始重新排列。按照 X 坐标小的位置向着 X 坐标变大的方向增加编号，如果 X 坐标相同时，就会根据优先级按 Y 坐标继续进行编号。对于单元，可按照重心的 XYZ 坐标重新排列。

编号顺序可以选择升序/降序。

### 4.9.2 检查

#### 1. 检查网格拓扑

#### 概要

按照便于区分的分类，分析网格的信息。选择检查网格菜单，就会查看与网格的显示/隐藏态无关的当前所有网格，并在窗口上显示所有自由线、自由面等。

当选择自由面时，网格显示以线框形式，对于内部存在自由面情况很难检查，这种情况下，可以采取隐藏其他网格形式分别检查部分网格。

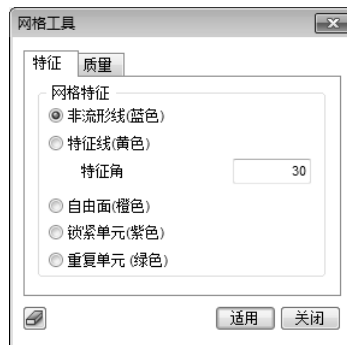


图 4-251 网格特征检查对话框

### 方法

#### [非流形线（蓝色）]

勾选非流形线，用蓝色表示。三个或三个以上单元面相遇的单元线是非流形线。

#### [特征线（黄色）]

勾选特征线，用黄色表示。特征线是指在模型形状上有急剧变化的线，在 2 个单元面之间的夹角大于特征角度。

特征角：输入计算特征线的特征角。

#### [自由面（橙色）]

勾选自由面，用橙色表示。自由面是指 3D 单元之间节点未连接的部分。

#### [锁紧单元（紫色）]

检查锁紧的单元，用紫色表示。搜索 3D 单元中所有节点在自由面上的单元。边界条件全部适用在网格自由面上时，约束的单元不会影响分析。

#### [重复的单元（绿色）]

检查在相同的位置上拥有相同的节点数据的重复单元，用绿色表示，用单元>删除功能可以只删除重复的单元。

## 2. 检查网格质量

### 概要

相连接的单元之间的相对大小及形状（质量）对分析结果的影响大于单元自身绝对大小的影响。因此，生成网格后，检查和修改网格质量是十分重要的，尤其是 3D 单元。输入参考值后，就会按颜色显示未达到此值的单元。

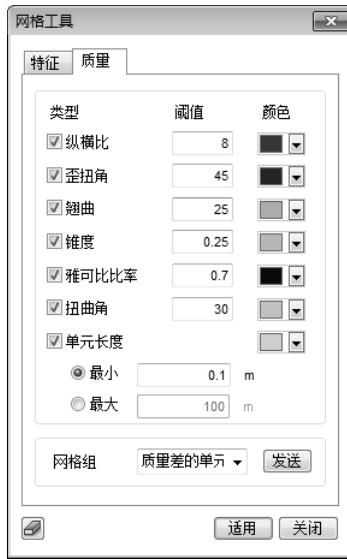


图 4-252 网格质量检查对话框

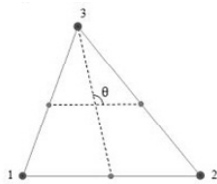
[纵横比 (Aspect Ratio) ]

2D 单元中的宽度和长度的比，或者是最长边和最短边的长度的比。例如，正方形的情况下，因为宽度和长度相等，所以值为 1。形状越偏离正方形，纵横比就越小。值越接近 1 越理想。这对分析结果有重要影响；若值非常小，则很难得到正常的分析结果。

[歪扭角 (Skew Angle) ]

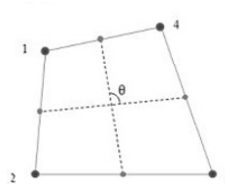
以角度测量形状偏离直角形状（90 度）的程度。四边形的角是 90 度，所以歪扭角度为 0，形状越偏离四边形值越大。就会从 0 度开始逐渐增大。实体单元的情况下，检查各面的歪扭角度，最小的值作为歪扭角。值越接近 0 越好。

1) 三角形



歪扭角 (三角形) =|90-θ|

2) 四边形



歪扭角 (四边形) =|90-θ|

- 3) 四面体  
四个面中各面的最大值
- 4) 五面体  
五个面中各面的最大值
- 5) 六面体  
六个面中各面的最大值

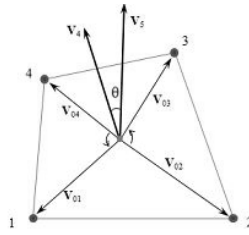
图 4-253 歪扭角示意图

[翘曲 (Warpage) ]

评估偏离平面的程度。四边形 2D 单元的所有节点位于同一平面位置上时，这个值为 0，偏离平面的程度越严重，值越大。实体单元的情况下，检查实体各四边形的翘曲值，最小的值作为翘曲值，值越接近 0 越好。这对分析结果有重要影响；若值非常大，则很难得到正常的分析结果。



1) 四边形



2) 五面体 (楔形)  
4个侧面中各面的最大值

3) 六面体  
6个侧面中各面的最大值

翘曲 (四边形) 转换角  $\theta$  = 角度

$$\mathbf{V}_4 = \frac{\mathbf{V}_{04} + \mathbf{V}_{01}}{\|\mathbf{V}_{04} + \mathbf{V}_{01}\|} \quad \mathbf{V}_5 = \frac{\mathbf{V}_{02} + \mathbf{V}_{03}}{\|\mathbf{V}_{02} + \mathbf{V}_{03}\|}$$

$$\mathbf{V}_4 \cdot \mathbf{V}_5 = \|\mathbf{V}_4\| \cdot \|\mathbf{V}_5\| \cos \theta$$

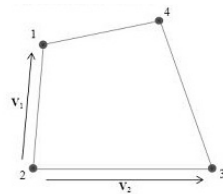
$$\theta = \cos^{-1}(\mathbf{V}_4 \cdot \mathbf{V}_5) \quad (\|\mathbf{V}_4\| \cdot \|\mathbf{V}_5\| = 1)$$

图 4-254 翘曲示意图

[锥度 (Taper) ]

按几何计算偏离四边形的程度。不适用于三角形单元。四边形的值为 1，偏离四边形的程度越严重（越接近三角形形状），值越大。实体单元的情况下，检查各面的锥度，最小的值作为锥度，值越接近 1 越好。

1) 四边形



2) 五面体 (楔形)  
4个侧面中各面的最大值

3) 六面体  
6个侧面中各面的最大值

$$\text{锥度 (四边形)} = \frac{I_{\max} + I_{\text{avg}}}{I_{\text{avg}}}$$

$$\mathbf{V}_3 = \mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2$$

$$J_i = \frac{\|\mathbf{V}_i\|}{4} \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

$$J_{\max} = \max(J_i)$$

$$J_{\text{avg}} = (J_1 + J_2 + J_3 + J_4) / 4$$

图 4-255 锥度示意图

[雅克比比率 (Jacobian Ratio) ]

计算网格的各高斯积分点中的雅克比行列式后，最大的雅克比行列式和最小的雅克比行列式值的比就是雅克比比率。二维单元的情况下，雅克比行列式按投影到平面的单元计算，实体单元的情况下，直接计算雅克比行列式。如果在四边形单元不是凸的，就会出现负数值，将不能正常执行分析。因此，雅克比比率值越大越好。

[扭曲角 (实体, Twist) ]

表示实体单元中相对的两个面的扭转程度。

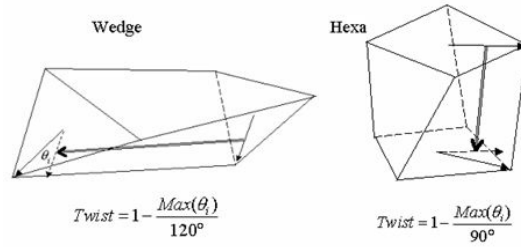


图 4-256 扭曲角示意图

[单元长度]

检查单元线的长度。这里，可以设置最小值、最大值。

### 网格组

完成质量检查的单元，点击“发送”可以定义为其他的网格组。网格组的名称也可以修改为用户期望的名称。

## 4.9.3 表格

### 概要

可以用表格输出模型的所有网格组的节点及单元信息。如下所示，激活生成的所有网格组，选择其中要提取的节点及单元信息的网格组。



图 4-257 表格输出的网格组选择对话框

### 1. 节点表格

选择要输出节点信息的单元。可在表格内添加、编辑、删除，来编辑模型信息。

号	坐标系	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	1.整体直角	24.491773	0.000000	12.245886
2	1.整体直角	24.491773	0.000000	45.579219
3	1.整体直角	24.491773	0.000000	78.912553
4	1.整体直角	24.491773	0.000000	112.245886
5	1.整体直角	24.491773	33.333333	112.245886
6	1.整体直角	24.491773	66.666667	112.245886
7	1.整体直角	24.491773	100.000000	112.245886
8	1.整体直角	24.491773	100.000000	78.912553
9	1.整体直角	24.491773	100.000000	45.579219
10	1.整体直角	24.491773	100.000000	12.245886
11	1.整体直角	24.491773	66.666667	12.245886
12	1.整体直角	24.491773	33.333333	12.245886
13	1.整体直角	24.491773	33.333333	45.579219
14	1.整体直角	24.491773	66.666667	45.579219
15	1.整体直角	24.491773	33.333333	78.912553
16	1.整体直角	24.491773	66.666667	78.912553

图 4-258 节点表格

## 2. 单元表格

单元类型标签，选择要输出单元信息的单元。用于检查单元的节点连接和节点数量，也可在表内添加、编辑、删除单元。

编号	类型	属性	节点1	节点2	节点3	节点4	节点5	节点6	节点7	节点8
1	四面体	1:3D 属性	55	28	56	23				
2	四面体	1:3D 属性	40	13	14	12				
3	四面体	1:3D 属性	18	51	17	27				
4	四面体	1:3D 属性	18	46	27	19				
5	四面体	1:3D 属性	18	19	51	46				
6	四面体	1:3D 属性	18	51	27	46				
7	四面体	1:3D 属性	60	17	3	52				
8	四面体	1:3D 属性	54	56	48	42				
9	四面体	1:3D 属性	60	4	3	17				
10	四面体	1:3D 属性	40	50	34	39				
11	四面体	1:3D 属性	40	34	50	12				
12	四面体	1:3D 属性	59	10	9	35				
13	四面体	1:3D 属性	3	15	4	60				
14	四面体	1:3D 属性	5	15	57	25				
15	四面体	1:3D 属性	17	25	60	5				
16	四面体	1:3D 属性	54	48	47	42				

图 4-259 单元表格



在节点/单元表格内点击鼠标右键，调出关联菜单，可以使用的功能如下。



图 4-260 表格关联菜单

### 复制/粘贴/查找

复制在表格上选择的区域，可以粘贴到不同的 Excel 表格，或用于搜索指定数字。

### 排序对话框



图 4-261 表格数据排序对话框

按照指定的原则排列表格数据。在“表列”中罗列了表格的各栏标题，并按对齐原则移到“排序列”。在“排序列”中勾选了 Asc 的情况下，按升序排列，在“排序列”中的顶部序列优先适用。优先顺序可以用向上、向下键调整。

### 对话框样式



图 4-262 表格对话框样式

调整表格中各数据的表现形式。列出各列的名称，自动列出按整数、实数、字符等字符类型。可以设置各列的宽度、排列方式（左、中心、右）、位数等。数据格式可以在以下 4 种选择。

- (1) 默认：小数点以上、以下所有数据，总共用 11 个数字表示。
- (2) 固定：小数点位数按输入的值确定。
- (3) 科学：输入的值作为重要数字的位数，按指数形式表示。可用于表达极小的数据，如渗透系数。
- (4) 一般：程序内自动按四舍五入确定。

### 重新定义列宽

把各列的列宽按最小化后表示。可用于列数较多时。

### 显示图形

选择两个或两个以上的列生成图表。可以从内置的 25 种图表类型中选择。

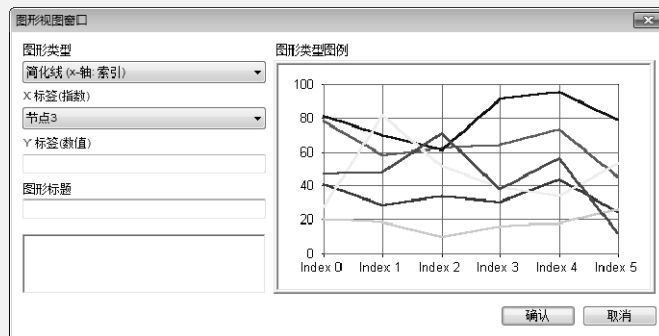


图 4-263 表格图形显示对话框

图形绘制可通过选择图形类型绘制，设置 X 轴、Y 轴标签及点击鼠标右键调出关联菜单实现。可用功能如下菜单所示。



图 4-264 表格图形关联菜单

编辑图表的题目和各轴的标签。用鼠标左键选择图表上的任意点后拖动，就会使拖动的区域放大到整个屏幕。这种情况下，可以缩放全部回到之前状态。除此之外，生成的图形可以另存为.bmp，.jpg 等文件格式。

#### 导出 Excel/激活对话框

以 Excel 文件形式自动保存输出的表格，选择“活动对话框”可以重新设置要输出节点/单元信息的网格组。

## 第五章 分析方法

### 5.1 接触

接触分析从根本上是假设空间中的两个对象可以发生接触，但不能穿透对方（非穿透条件），在物理学角度上是非线性行为或条件。

接触的类型是一般接触（分析中考虑两个物体之间的挤压和摩擦），粗糙接触（不考虑滑动），焊接接触（从分析开始时两个对象是焊接的）和滑动接触（仅考虑在切向的滑动）。这里，一般接触和粗糙接触取决于在分析开始时两个对象的位置并且可以看作是线性的。GTS NX 提供了焊接接触和一般接触的功能。

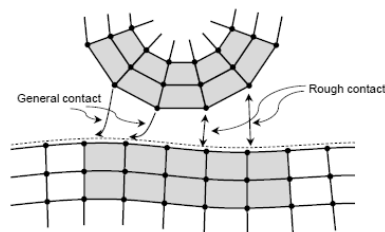


图 5-1 一般接触和粗糙接触

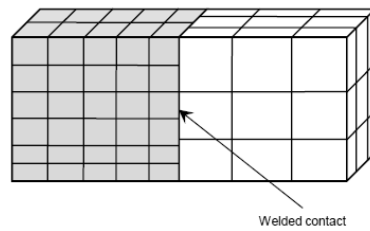


图 5-2 焊接接触

#### 5.1.1 接触对

##### 概要

接触单元用于在单元表面相遇，但节点不耦合的位置，发生相似的行为。

可以用来作为在结构分析、固结分析或渗流分析的相邻对象之间的初始接触条件。经常用于复杂几何上的节点耦合失败的情况。这个功能可以防止分析错误，并类似于节点耦合的情况检查分析的结果。



图 5-3 接触对建立对话框

## 方法

可通过自动接触或手动建立接触对的方式定义接触。

### 1. 自动接触

这个功能自动搜索所选网格相遇位置节点不耦合的面，并建立接触对。接触对分为：焊接接触和一般接触。

**[一般接触]：**接触面间在垂直方向及切线方向存在接触力的类型。不能在线性分析中使用，可用于考虑切线方向的接触力的摩擦行为。

这里可定义一般接触的接触参数。



#### 法向刚度比例系数(Normal Stiffness Scaling Factor)

接触面的法向方向刚度比例系数值。建议使用默认值。

#### 切向刚度比例系数(Tangential Stiffness Scaling)

输入接触面的水平方向刚性系数值。建议使用基本设置值。

#### 接触误差(Contact Tolerance)

为了计算初始接触容许距离设置的系数值。对于滑动接触时，主接触面与次接触面在初始容许距离内将发生接触。一般接触，接触剧烈时，变形中从接触面达到与主接触面的容许距离后就计算为发生接触。

#### **摩擦系数 (Friction Coefficient)**

输入静摩擦系数值。

#### **调整附属节点消除内部贯穿(Remove Initial Penetration by Adjusting Slave Nodes)**

当主接触面与从接触面从一开始就存在相互贯穿的情况时，移动从接触面使双方发生正确接触。这时不计算应力。

#### **渗透系数**

模拟接触的渗流特性。

**[搜索距离]**：输入主接触面和子接触面间的距离。并在此范围内搜索接触面。

## **2. 手动接触对**

用户可以直接指定主接触面和子接触面来建立接触对。可选择面、2D 单元、3D 单元、2D 单元自由面、3D 单元自由面。

手动建立接触面时，可选择节点-曲面接触或曲面-曲面接触来建立接触面。节点-曲面接触耗时最少，但求解准确度相对较低，因为主对象的节点有贯穿子对象的倾向。换言之，曲面-曲面接触的耗时较多，但满足非穿透条件，相对准确，可以进行结构行为的准确模拟。

**[接触参数]**：输入系数值来计算初始接触搜索距离。初始接触搜索距离可以通过系数值乘以最长的长度来求解。如果主和子接触面在这个距离之内，则被视为发生接触。



## 5.2 施工阶段

大部分经过施工过程的岩土数值分析是施工阶段分析。岩土分析通常是材料非线性分析，材料的非线性属性可以从岩土内的初始条件中得到。这里，初始条件是指现场施工前的现场地质条件。

由初始条件中得到初始应力后，进而可以得到开挖荷载以及由材料属性模型，如 Mohr-Coulomb 模型，定义的剪切强度。因此，施工阶段分析，包含了从初始岩土条件开始的连续的施工过程。因为现场的施工阶段非常复杂并且可变，所以在分析上可简化过程，并专注于重要的施工阶段。

例如，隧道的施工阶段如下。

- 1 阶段：初始岩土应力
  - 2 阶段：第一断面开挖
  - 3 阶段：第一断面加固+第二断面开挖
  - 4 阶段：第二断面加固+第三断面开挖
  - 5 阶段：第三断面加固+第四断面开挖
- (重复) .....

在 GTS NX 中，不会按各个施工阶段创建独立的分析模型，而是采用累加模型的概念，即各施工阶段只输入结构或者荷载的变化，并将分析结果按前一阶段分析结果累加。因此，在施工阶段分析中，在当前一阶段发生的结构或荷载的变化，会影响后一阶段施工的分析结果。例如，如果在任意的施工阶段中施加荷载，那么，在以后的施工阶段则继续处于施加荷载的状态直至荷载被钝化。

因此，不必在任意的施工阶段中生成所有单元，而只生成施工阶段所需的单元。

可以通过把网格组、边界组、荷载组、接触组，用激活数据栏或钝化数据栏拖放到激活或钝化栏目中来完成施工阶段定义。在 GTS NX 中，为了便于定义施工阶段，提供[施工阶段助手]、[施工阶段管理]、[模拟施工阶段]、[自动设置]等功能。

### 5.2.1 施工阶段助手

#### 概要

可用于轻松定义施工阶段的助手。为了使用助手定义施工阶段，各组的名称应赋予规则的编号（后缀）。这个编号可以通过网格组[重命名]功能修改。在整个施工阶段过程中只使用一次的组，可以不赋予规则的号码。

这个功能可在施工阶段构成的分析（静力/边坡分析、渗流/固结分析等）中使用。

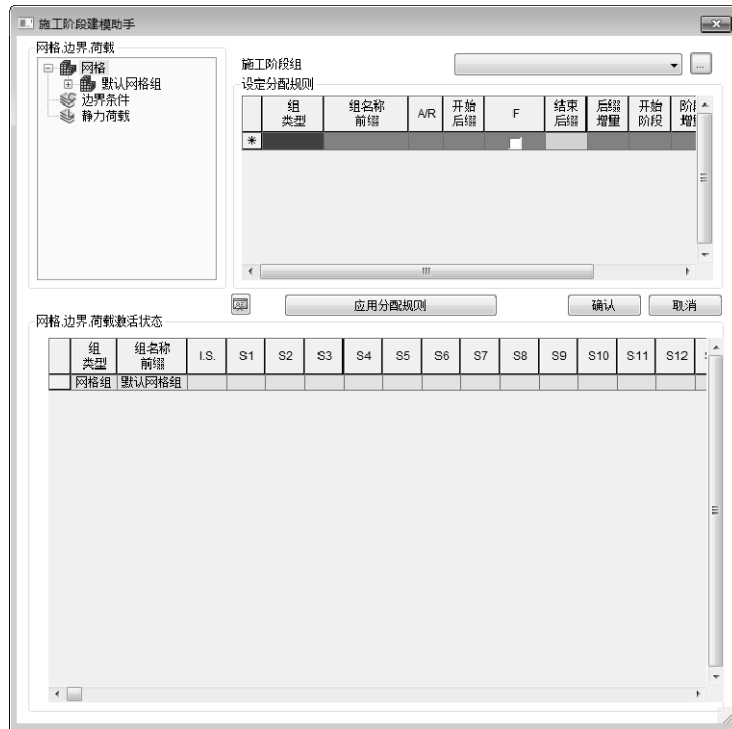


图 5-4 施工阶段建模助手

### 方法

显示可用的网格组、边界条件组以及荷载组。选择期望的数据后，可以按照组分配规则拖动，也可以使用按单元、边界条件、荷载组激活状态拖放的方法。

需要注意的是各组的显示方式与工作目录树完全不同。这里，忽略工作目录树上的网格组与子网格组的关系，所有的网格组都按独立的网格组显示。并且，最顶层显示的是没有后缀的网格组的名称，如果展开一层就会显示包含后缀名称的网格组。

请参考下面例子。

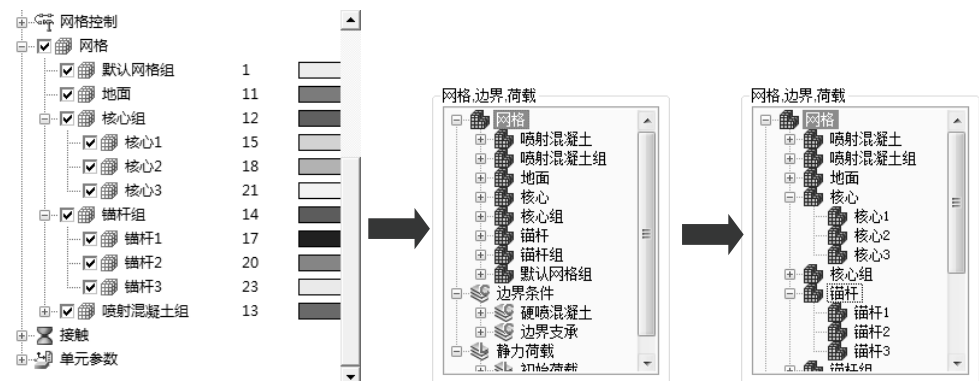


图 5-5 单元、边界条件、荷载的显示形式

### 设定分配规则

指定要定义施工阶段的施工阶段组后，指定分配规则。

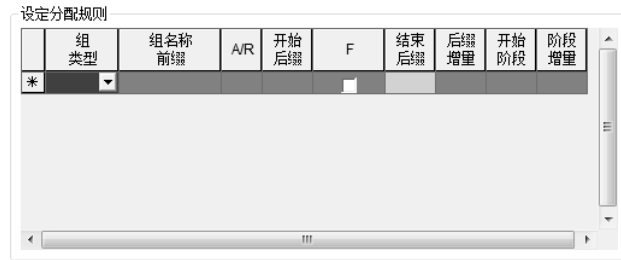


图 5-6 施工阶段建模助手分配规则设置

[组类型]

指要定义的施工阶段的类型。也可以选择网格组、边界组或荷载组。

[组名称前缀]

在要定义施工阶段的无序列号的组的名称。

例如，从“最终核心#001”到“最终核心#012”指定网格组时，选择组名称前缀“最终核心#”。

[A/R]

选择添加 (Add) 或清除 (Remove) 所选组。A 用绿色显示，R 用黄色显示。

[开始后缀]

指定所选组在施工阶段中开始使用的组编号。

例如，选择从“最终核心#001”到“最终核心#012”指定的网格组，其中，“最终核心#001”在施工阶段的第二阶段中被钝化，其它施工阶段依次钝化，则开始使用的组的号码为 001，所以在开始后缀编号中输入“1”即可。

[F]

所选的组没有使用到最后号码，只使用到中间阶段时勾选。勾选后，可输入结束后缀编号。不勾选的情况下，将依次增加进行到最后编号为止。

[结束后缀]

指定所选组在施工阶段中最后使用的组编号。

例如，选择从“最终核心#001”到“最终核心#012”指定的网格组，其中，“最终核心#001”在施工阶段的第二阶段中被钝化，其它施工阶段依次只进行到“最终核心#006”，勾选 F 后在结束后缀编号中输入“6”即可。

[后缀增量]

输入施工阶段过程中要使用的后缀编号增量。

例如，对于“最终核心#001”到“最终核心#012”的网格组，如果网格组按“最终核心#001”、“最终核心#003”、“最终核心#005”的顺序钝化，后缀编号的增量为 2，则在后缀增量中输入 2 即可。

[开始阶段]

指定所选组在施工阶段中开始使用的阶段编号。



例如，选择从“最终核心#001”到“最终核心#012”指定的网格组，其中，“最终核心#001”在施工阶段的第二阶段中被钝化，其它施工阶段依次进行到“最终核心#012”，即网格组开始在第二阶段使用，输入开始阶段为 2 即可。

[阶段增量]

指定所选组的阶段增量，每隔几个阶段使用一个组。

例如，选择从“最终核心#001”到“最终核心#012”指定的网格组，其中，“最终核心#001”在施工阶段的第二阶段中被钝化，“最终核心#002”在第 4 个施工阶段中被钝化，这样的每隔 2 阶段使用一个组，在阶段增量中输入 2 即可。

如果点击[应用分配规则]按钮，就会按指定的规则显示网格、边界条件、荷载组激活状态。点击确认按钮生成施工阶段。

通过预览 (  ) 施工阶段，可以逐阶段确认已激活的网格、边界、荷载组。这个功能是与模拟施工阶段 (  ) 功能相同。

**网格、边界、荷载激活状态**

以表的形式显示当前设置的施工阶段。

越往右表示施工阶段的推进，最前列显示的 I.S. 和 S1 分别代表 Initial Stage (初始阶段) 和 Stage1 (阶段 1) 的简写。激活的数据用淡绿色表示，钝化的数据用橙色显示。并且，按后缀定义的数据在各施工阶段中以数字表示，如下图所示；而不使用前缀的数据（如，地面）用线表示。使用拖放功能将网格、边界条件、荷载数据显示在[网格、边界、荷载激活状态]中，只能用于激活，不能钝化。

组类型	组名称 前缀	I.S.	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
荷载组	初始荷载														
网格组	喷射混凝土			A: 1		A: 2		A: 3							
网格组	喷射混凝土组														
网格组	地面														
网格组	核心		R: 1		R: 2		R: 3								
网格组	核心组														
边界组	硬喷混凝土														
边界组	边界支承														
网格组	锚杆			A: 1		A: 2		A: 3							
网格组	锚杆组														
网格组	默认网格组														

图 5-7 网格、边界条件、荷载的显示形式

若点击[应用分配规则]按钮，显示网格组、边界条件组、荷载组的状态。要清除显示的施工阶段，选择相应数据后，点击键盘的 Delete 键就可以了。

用这种方法虽然可以删除施工阶段数据，但不能删除施工阶段。因此，这样会生成无内容的施工阶段。选择要删除施工阶段的整列后，同时按下键盘的 Ctrl 键和 Delete 键，删除后点击确认。

当 I.S. (初始阶段) 中所有组激活时，即为所有初始网格组全部激活的状态 (原场地状态)。可以在开始阶段中输入 0 (0 阶段是指初始阶段)，并在阶段增量中输入 0 (阶段的增量编号为 0，所以所有单元在一个阶段中被激活)。

在定义施工阶段菜单中，可以设置施工阶段中使用的高级选项 (LDF 等)。因此，对于复杂的模型，可方便地使用施工阶段助手，生成整体性的施工阶段架构；对于各阶段中的个别选项，可使用[施工阶段管理]菜单。

**1. 示例**

以下为简单的定义施工阶段的例子。

定义一个单一岩土材料隧道模型的施工阶段。一次性开挖隧道的整个形状，在开挖的下一个阶段激活锚杆和喷射混凝土。隧道开挖分为 5 个阶段，假设从小编号的后缀向着大编号的后缀进行开挖。

如下所示为生成网格组。

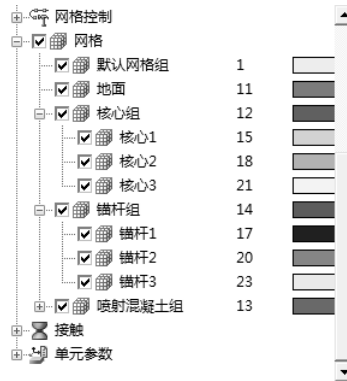


图 5-8 网格组的示例

运行施工阶段助手。

网格组“土”和“隧道#”应当包含在原场地状态。用 Ctrl 键选择后拖放到网格、边界条件、荷载组 I.S.状态栏。

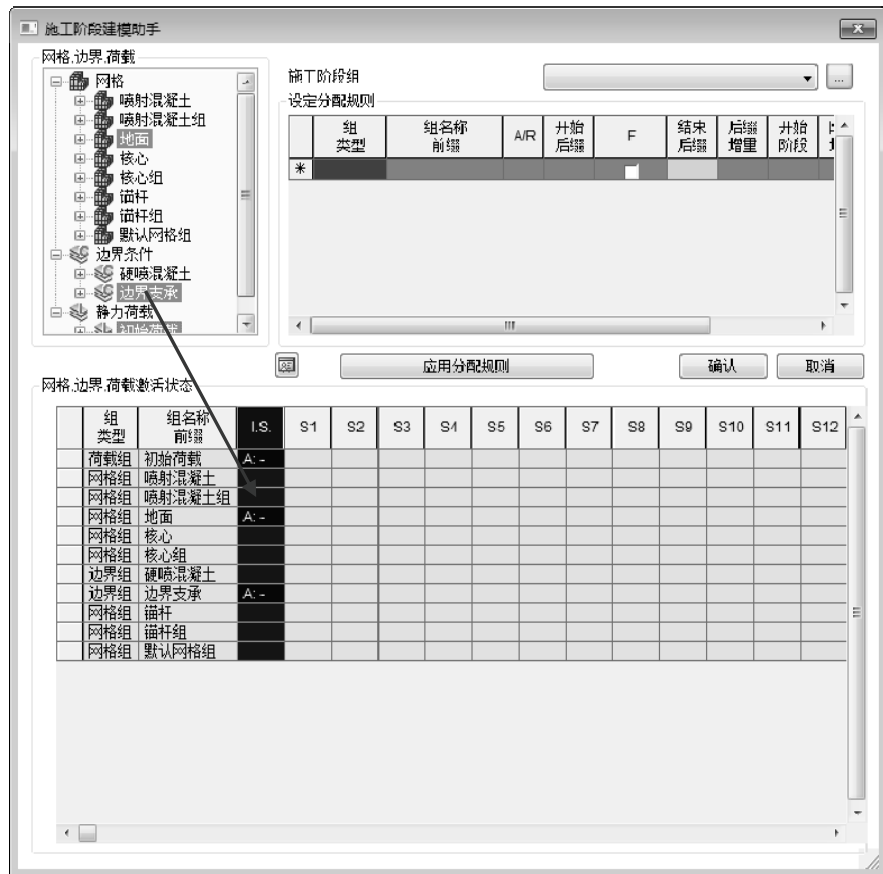


图 5-9 初始阶段定义

在本例题中，按第一掌子面隧道开挖—>第一掌子面锚杆/喷射混凝土布置—>第二掌子面隧道开挖—>第二掌子面锚杆/喷射混凝土布置—>...逐阶段地进行开挖。

选择 R，选择并钝化“隧道#”，开始后缀编号为 1，因为使用到最后编号，所以不勾选 F。开始阶段为 1，在阶段增量中输入 2 以模拟锚杆和喷射混凝土在施工过程中的布置。所有核心的隧道网格组都使用，所以，后缀增量输入 1。输入后，点击[应用分配规则]按钮，指定网格组、边界条件组、荷载组激活状态对应的施工阶段。

在施工阶段中也可指定喷射混凝土和锚杆。

在开始阶段输入 2 后，选择 A，使喷射混凝土和锚杆都能够在第二个施工阶段中激活，并且，为了使从 1 到最后编号都能够使用，在开始后缀中输入 1，不勾选 F，并在后缀增量中输入 1。最后，在开始阶段中输入 2，并在阶段增量中输入 2 以模拟每隔 2 个施工阶段激活一次。

点击[应用分配规则]按钮，就会自动生成网格、边界条件、荷载的激活状态，点击[确认]按钮生成施工阶段。



图 5-10 施工阶段建模助手的示例

## 5.2.2 施工阶段管理

### 概要

定义执行分析的施工阶段组。



图 5-11 施工阶段组添加对话框

可以在由施工阶段构成的分析（静力/边坡分析、渗流/固结分析）中使用。

### 方法

定义施工阶段组后，定义施工阶段。

在一个文件中建立多个施工阶段组。

施工阶段类型中有[应力分析]、[渗流分析]、[应力-渗流-边坡分析]、[固结分析]、[应力渗流完全耦合分析]、[应力非线性时程分析]。[应力非线性时程分析]是根据静力分析结果作为动力分析的初始应力状态，通过施工阶段组可以完成抗震计算。可以通过改变静力分析与动力分析中用到的单元/边界/荷载条件，按实际情况进行模拟。对于，“非线性时程分析”只能分配给最后一个施工阶段，且由于“应力分析”是非线性分析，所以考虑分析的协同性，提供“非线性时程分析”。

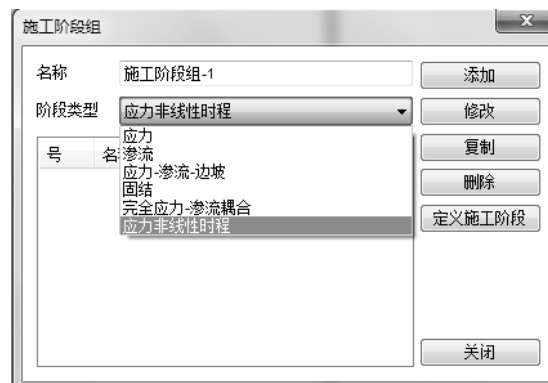


图 5-12 支持施工阶段形式的分析方法

点击定义施工阶段按钮，可以建立施工阶段。施工阶段助手中不能实现的高级选项可在此实现。



图 5-13 施工阶段定义窗口

### 定义施工阶段

#### [阶段名称]

定义施工阶段名称。通过[新建]可以生成新的施工阶段，通过[插入]可以在施工阶段中间插入新的施工阶段。

例如，在阶段 2 中点击插入按钮，当前阶段移到阶段 3，新的施工阶段成为阶段 2。点击向上下按钮，就可以移动到上一个阶段或移动到下一个阶段。

#### [阶段类型]

指定施工阶段类型。需要注意的是不同阶段类型的 [分析控制]、[输出控制]选项不同，边界条件/荷载条件也有差异。

更详细的控制选项相关的内容，请参考分析>分析工况>新建>分析控制/输出控制。

#### [移动到上/下一个]

用于生成多个施工阶段后，修改部分施工阶段的顺序。可以通过移动到上/下一个阶段按钮修改建立的施工阶段的顺序。

#### [组数据]

用目录树形式显示可用的网格组、荷载组、边界条件组。需要注意的是子组也会独立的显示，所以在选择网格组时需留意。

例如，如下图，生成的核心组中注册了若干子网格组（核心 1，核心 2，核心 3）。这种情况下，激活核心组，并不激活核心的子组核心 1，核心 2 和核心 3。因此，没有直接注册到组数据中的网格是无用的，所以在选择网格组过程中应当注意。





图 5-14 施工阶段组数据与目录树的对比


[激活数据]

激活各施工阶段中的组。被激活的组在之后的施工阶段中一直处于激活状态直到被钝化为止。需要在施工阶段中激活的组，可用鼠标左键选择后，拖放到激活数据中。另一种方式是选择组后，在组数据中点击鼠标右键，并调用关联菜单选择激活。

[钝化数据]

被钝化的组在之后的施工阶段中一直处于钝化状态直到被激活为止。需要在施工阶段中钝化的组，可用鼠标左键选择后，拖放到钝化数据中。另一种方式是选择组后，在组数据中点击鼠标右键，并调用关联菜单选择钝化。

[定义整体水位]

按整体坐标系输入随着施工阶段变化的地下水位。点击  设置地下水位函数。同时指定了水位和函数的情况下，输入的水位乘以函数后，直接用于分析中。

[定义网格组水位]

在网格组中分别定义随着施工阶段变化的地下水位。

如果地下水层被岩石或不透水粘土层（承压含水层）包围，分别设置有存在/不存在地下水位的地层后进行分析。

如果输入了总的地下水位的同时也定义了网格组地下水位时，优先考虑网格组地下水位，总水位用于没有定义地下水位的网格组中。

在同时指定水位和函数的情况下，按输入的水位乘以函数后，用到分析中。

[LDF]

设置荷载释放系数，所有释放系数的和应当为 1。

例如，如下图的情况，当前阶段中的释放系数为 0.4，下一阶段和后续阶段的荷载释放系数为 0.3。这时，在后续的两个阶段中没有必要勾选 LDF，并且施工阶段中设置的 LDF 应相互不重叠。



图 5-15 荷载释放系数定义对话框



设置荷载释放系数（Load Distribution Factor）的方法如下。

LDF 是持续伴随被移除的单元的内力（Internal Force），并按各阶段指定的系数加载，而不是一次性加载。

在上部和下部同时采用 LDF 的情况下，在施工阶段中应设置不重叠的 LDF。如下图所示，如果 LDF 重叠，在此阶段中计算单元内力时，在 STG#5 中，基于下部单元内力释放 0.5 时的应力，是由 STG#4 中上部单元内力释放 0.7 时产生。因此，实际上在 STG#4 中上部单元的 1.0 并没有被释放，所以，上部单元的 0.3 对应的单元内力并未考虑到分析中。

表 5-1 荷载释放过程说明

位置	STG #3	STG #4	STG #5	STG #6
顶	0.3	0.4	0.3	-
底	-	-	0.5	0.5

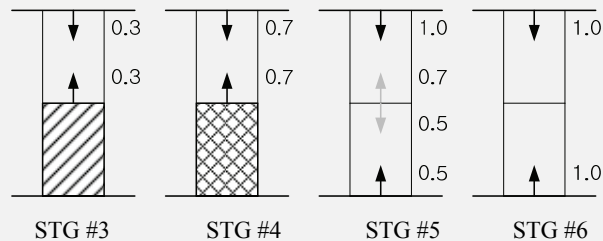


图 5-16 施工阶段荷载释放的示例

于是，在施工阶段中设置 LDF 时，应注意不要重叠，如下表所示。

表 5-2 调整后的荷载释放过程说明

位置	STG #3	STG #4	STG #5	STG #6	STG #7
顶	0.3	0.4	0.3	-	-
底	-	-	-	0.5	0.5

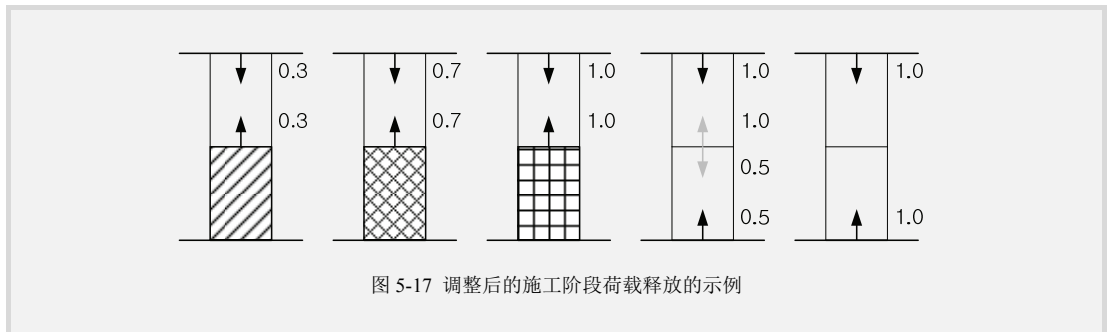


图 5-17 调整后的施工阶段荷载释放的示例

[位移清零]

将当前阶段分析结果中的位移设为 0。用于设置原场地状态的初始条件。应力不会因此初始化为 0。

[边坡稳定分析 (SRM/SAM)]

在当前施工阶段中决定是否执行边坡稳定分析。勾选的情况下，自动注册为一个分析工况并执行分析。换言之，将前阶段非线性分析岩土应力的结果进行耦合，并执行边坡稳定分析。（但是，在分析 SAM 的情况下，仅可用于二维分析，应当设置滑动面边界条件。）

### 5.2.3 模拟施工阶段

概要

以视频的形式查看施工阶段。

可用于由施工阶段构成的分析（静力/边坡分析、渗流/固结分析）中。



图 5-18 模拟施工阶段

方法

指定定义的施工阶段组后，点击 按钮播放生成的施工阶段视频。捕捉整个操作窗口生成视频。如果不同的对话框在模型上方打开，不需要的图像会被自动擦除。

勾选[网格]、[荷载]、[边界]，可查看施工阶段中激活/钝化的数据。

### 5.2.4 自动设置

概要

根据当前模型窗口中显示的网格、边界、荷载，自动设置施工阶段

可用于由施工阶段构成的分析（静力/边坡分析、渗流/固结分析）中。

可在模型上检查每一阶段的数据，并允许直接的阶段组合。

### 方法

施工阶段自动设置功能可按以下步骤激活。

(1) 在建模后添加施工阶段组，并注册添加到工作目录树中，如下所示。

(2) 在注册的施工阶段组上点击鼠标右键，并选择[自动设置阶段]选项。这个选项会激活丽板菜单中的施工阶段—>自动设置，可对所选择的施工组指定施工阶段。



图 5-19 自动设置施工阶段菜单

(3) 点击[自动设置]图标，自动注册显示的网格、边界条件、荷载条件为激活数据，而未显示的（未勾选）的网格、边界条件、荷载条件则注册到钝化数据。换言之，设置组合各阶段模型信息的显示/隐藏后，选择[自动设置]，则自动参考当前显示的模型信息设置为施工阶段。

由于施工阶段是累加的概念，程序通过比较前一阶段的激活/钝化的模型信息，只添加/删除改变的信息。因此，建议施工阶段生成以后，将模型信息显示到初始状态，以完整查看施工过程。



图 5-20 施工阶段自动设置的示例

**Tip**

对于基于窗口中显示的工作环境，自动设置生成施工阶段的功能。这里，要指定各阶段的单独选项（LDF 设置，位移清零等），可在“施工阶段管理”菜单中检查各阶段的选项。

### 5.3 边界条件

GTS NX 中，边界条件区分为应力分析中的位移边界条件、渗流分析中的渗流边界条件及动力分析中的弹簧边界条件和地基边界单元等。

- (1) 应力分析中的位移自由度约束
- (2) 渗流分析中的渗流边界
- (3) 等效线性分析中的传递边界

平动自由度约束功能可用于约束任意节点的平移，或者约束各节点自由度分量有差异的单元（梁单元和平面应力单元、板单元和实体单元等）之间的接合。

以整体坐标系为基准，在任意节点上输入 6 个自由度约束。如果存在节点坐标系，则以节点坐标系为基准。

例如，如下图，在平面框架模型中指定自由度约束条件的方法如下。因为这个二维模型的移动是在整体坐标系 X-Z 平面内，所以，所有节点在整体坐标系 Y 方向的平动自由度和 X 及 Z 方向的转动自由度应被约束。

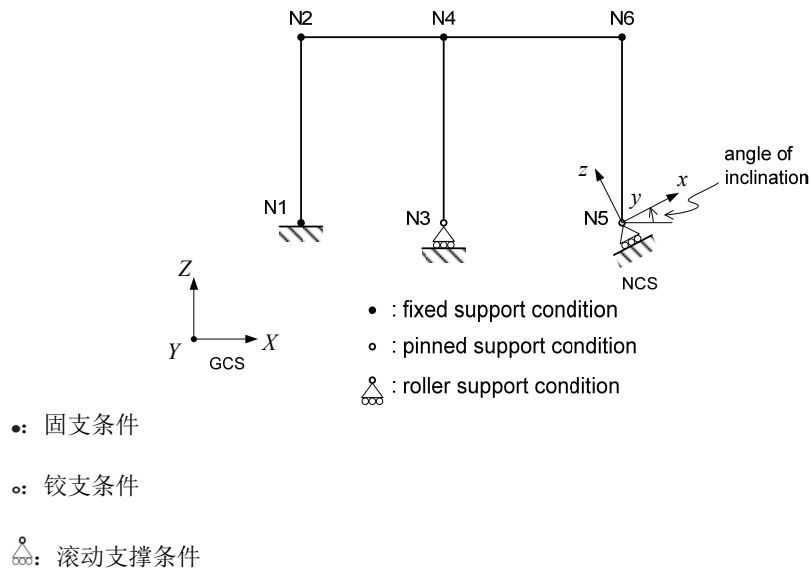


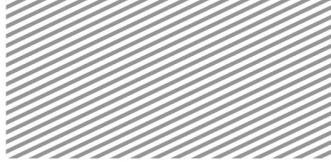
图 5-21 考虑了自由度约束条件的平面框架模型

并且，节点 N1 为固支条件，用[约束]功能可添加约束整体坐标系的 X、Z 方向的平动自由度和 Y 方向的转动自由度。节点 N3 为铰支条件，则约束 X、Z 方向的平动自由度。

节点 N5 为滚动支撑条件，将节点坐标系参考整体坐标系倾斜旋转一定角度后，参考节点坐标系约束 z 方向平动自由度。

约束节点平动自由度的功能主要用于可以忽略平动位移的支撑条件。如果在任意节点指定约束条件，就会在相应节点位置产生反力。节点反力是以整体坐标系为基准输出，如果指定了节点坐标系，则可以按节点坐标系输出反力。

下图是指定二维岩土模型边界条件的方法。



因为在岩土模型是将原来的半空间区域限定为隧道周边区域，所以，应将分析边界定义在位移或应力变化几乎不受隧道施工影响的位置。如图，位于左右边界位置的节点，约束了 X 方向的自由度；位于底部边界的节点，约束 Z 方向的自由度。如果底面边界的水平位移不对称时，常常也会添加约束 X 方向自由度。

顶部边界就像地表面是与大气相连时，不约束任何自由度。但是，如果在分析中省略了上部岩土，且忽略重力的影响，如大深度隧道，为了分析效率均衡地定义模型内部的初始应力时，顶部边界也可约束 Z 方向的自由度。

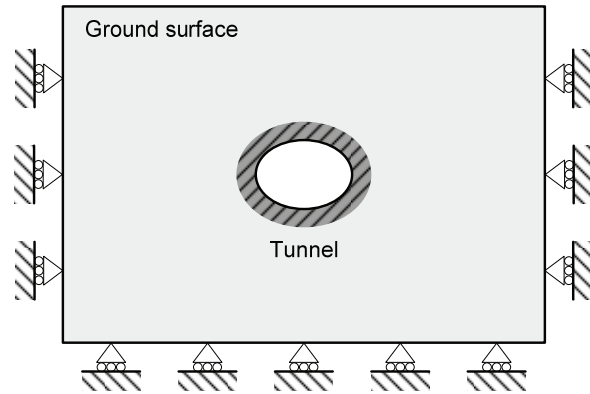
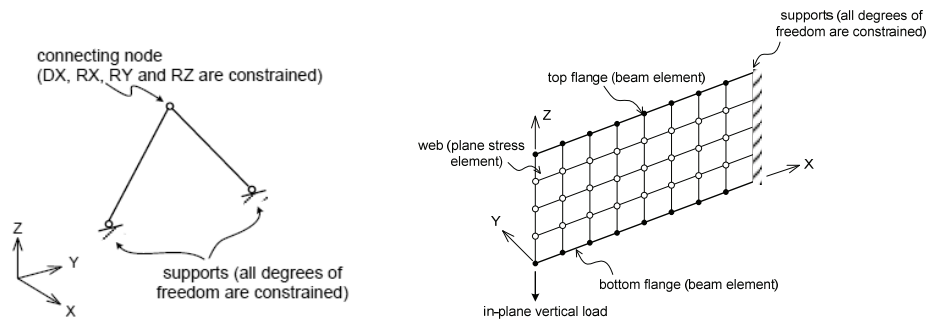


图 5-22 考虑了自由度约束条件的平面岩土模型

三维岩土模型和二维岩土模型一样，自由度按垂直于边界面的方式约束。

下图为三维自由度约束条件的示例。对于桁架连接时，因为桁架单元只有轴向的位移自由度，所以 X 方向的平动和所有旋转方向分量需要被约束。对于上-下部的翼缘为梁单元时，因为梁单元每个节点都有 6 个自由度，因此与梁单元连接的节点不需要定义其它的约束条件；而对于平面应力单元之间相遇的节点，因为平面应力单元只具有的面内行为的自由度，所以要约束面外 Y 方向位移自由度和所有旋转自由度成分。



(a) 桁架单元之间连接的情况 (b) H 形悬臂梁、上/下部翼缘按梁单元建模，腹板按平面应力单元建模的情况。

其中，

●: 节点无约束；

○: 约束 DY、RX 及 RZ；

DX: 整体坐标系 X 方向的位移、DY: 整体坐标系 Y 方向的位移、DZ: 整体坐标系 Z 方向的位移；

RX: 绕整体坐标系 X 轴的转动、RY: 绕整体坐标系 Y 轴的转动、RZ: 绕整体坐标系 Z 轴的转动。

图 5-23 考虑了自由度约束条件的桁架和梁单元模型

### 5.3.1 定义组

#### 概要

定义边界条件组。



图 5-24 边界组添加对话框

#### 定义组

#### 方法

输入名称和说明以后，点击[添加]定义边界组。可以预先创建边界组，也可以输入各边界条件的名称。

创建的边界条件组将自动注册在工作目录树>分析>边界条件下，通过勾选框可以在显示/隐藏组。

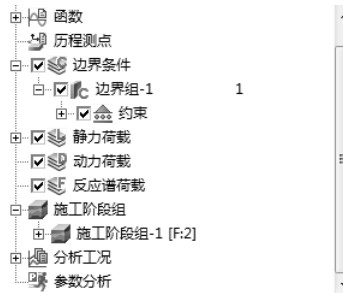


图 5-25 工作目录树-边界条件

### 5.3.2 约束

#### 概要

设置模型的约束条件。





图 5-26 约束设置对话框

### 方法

设置模型约束条件的方法有[基本]、[高级]、[自动]。

#### [基本]

选择目标后，可选择适合分析模型的约束类型[固定]、[铰接]，[无转动]。

#### [高级]

可以指定完全约束或部分约束节点的 6 个自由度。

TX, TY, TZ 指 X, Y, Z 方向的平动约束，RX, RY, RZ 指 X, Y, Z 方向的转动约束。

可以在期望的位置（点、线、面、节点、自由面节点）指定边界条件。

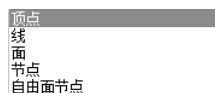


图 5-27 可定义约束的位置

在单元节点上指定约束条件，并反映在分析中。在点、线、面等几何形状上设置约束条件，是一种简便选择包含在所选形状内的单元节点的方式。

#### [自动]

选择要自动建立约束条件的网格组。自动设置一般的应力分析的地基条件，模型的左/右侧约束 X 方向位移，前/后侧约束 Y 方向位移，对于模型的底部约束 X、Y、Z 方向位移。

### 边界组

将设置的约束条件注册到期望的边界条件组内。用户可以为这个边界组命名。



#### \* 对称及反对称约束

边界条件大体上可以分为两种：指定分析目标的实际约束条件；用对称结构只用于分析对称区域，

而非全部模型。

利用对称性可以增加建模的便利性和缩短分析时间。如果结构的几何形状和荷载是对称的，采用 1/2 模型或者 1/4 模型可减少单元数，并且可以创建更经济的模型，以缩短分析时间。但是，局限性在于用对称模型得到的变形或应力分布等分析结果不能按整个模型全部显示。这里，如果这时用添加视图操作工具栏中的镜像的功能，就能按全部模型扩展 1/2 或 1/4 模型的分析结果。



图 5-28 镜像功能

### 定义对称边界条件的方法

如果一个或更多几何形状、材料、荷载、边界条件对称于一个平面或轴，就可以使用对称边界条件。在显示对称模型中，提供扩展 1/2、1/4、1/8 对称模型按全部模型输出结果的功能。如果想要定义对称边界条件，设置的边界条件时应保证结构不会干涉对称面。

下图是指定实体模型的对称约束条件的示例。为了指定 YZ 平面的对称边界条件，则约束平动自由度 TX。如果是 XY 平面，就要约束 TZ，如果是 ZX 平面，就要约束 TY。

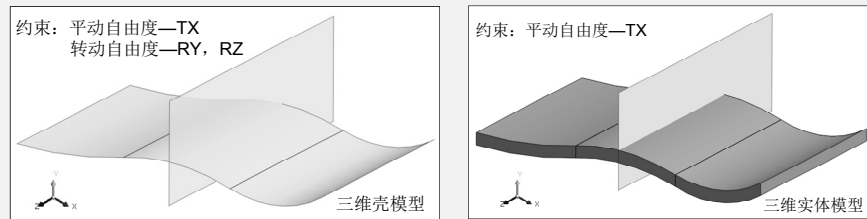


图 5-29 壳和实体模型的对称约束条件

并且，因为实体单元没有旋转的自由度，所以在对称模型的边界条件中只约束平动自由度。但是，对于壳模型，需要约束旋转自由度，使其不干涉对称面。换言之，对于 YZ 平面要约束 TX, RY, RZ；对于 XY 平面要约束 TZ, RX, RY；如果是 ZX 平面就要约束 TY, RX, RZ。

采用对称边界条件的情况下，荷载的大小也应当变换，使其适应对称条件。并且，因为振型形状和屈曲形状会有不对称振动模式或不对称屈曲的可能性，所以不能采用对称条件。

## 5.3.3 约束方程

### 概要

一个节点的自由度约束依存于其它节点的行为。



图 5-30 约束方程对话框

### 方法

将一个节点的行为约束到另外一个节点的行为。在[约束节点/自由度]中，定义影响其它节点变形和自由度的主节点。T1, T2, T3 是指平动自由度，R1, R2, R3 是指转动自由度。在[独立节点/自由度]中为了定义从属节点的自由度及自由度之间的相互关系，要输入独立节点的位移系数。

### 边界组

把设置的约束条件注册在期望的边界组中。用户可以为这个边界组命名。



约束方程的行为特性与模型>单元>生成>其它>刚性连接类似。例如，主节点按一定距离移动时，从属节点可以按照两倍的移动距离的方式约束。当在两个或两个以上节点之间建立复杂的相互作用关系时，约束方程就可以作为便利的工具使用。

## 5.3.4 修改单元属性

### 概要

使用新的属性信息或随着施工阶段的变化替换现有的属性信息。

可用于由施工阶段包含的分析（静力/边坡分析、渗流/固结分析）。

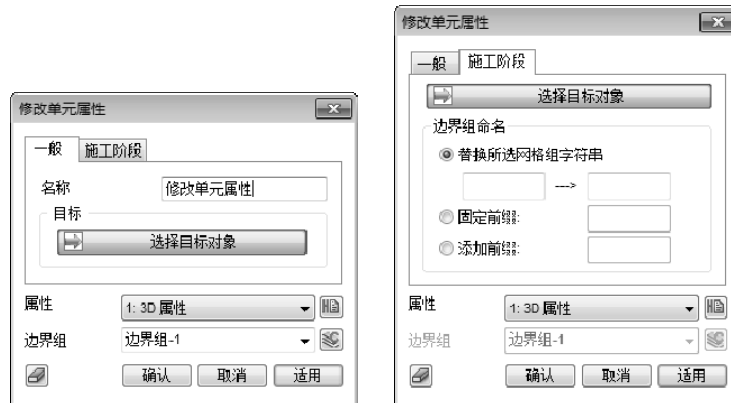


图 5-31 修改单元属性对话框（一般、施工阶段）

### 1. 一般

#### 方法

选择目标单元，指定要修改的单元属性。

### 2. 施工阶段

#### 方法

如果指定了施工阶段，单元的属性将一并修改。

例如，在三维模型中，随着阶段的推进将喷混的属性由软喷改为硬化。网格组中预先定义了喷混 001~喷混 010 时，采用修改单元属性>一般时，需要对每个网格组分别指定修改的单元属性。但是，采用修改单元属性>施工阶段时，如果目标选择为喷混 001~喷混 010 时，只需点击一次就可以生成 10 个边界条件组。

边界组名称可通过[替换所选网格字符串]、[固定前缀]、[添加前缀]设置，可以一并修改生成的网格组的名称。如果不输入任何信息，则按网格组名称定义边界组名称。

[替换所选网格字符串]：替换所选的网格组的名称为不同的字符串，作为生成的边界组名。

[固定前缀]：替换所选的网格组的名称前缀，作为生成的边界组名。

[添加前缀]：增加所选的网格组的名称前缀，作为生成的边界组名。

#### 边界组

把设置的约束条件注册在期望的边界组中。用户可以为这个边界组命名。



[修改单元属性]可用于根据施工阶段的变化修改单元属性。如果岩土在阶段 1 中具有 A 特性，在阶段 2 中属性变为 B，在 3 阶段中属性则变为 C，则需生成如下两个边界条件。

边界 1：A—>B

边界 2：A—>C

在阶段 2 中激活边界条件 1，在阶段 3 中激活边界条件 2 并钝化边界条件 1。

最终，就可以定义 A—>B—>C 的单元属性修改。

### 5.3.5 圆弧滑动面

#### 概要

定义圆弧形态的滑动面。

滑动面是在边坡稳定分析（SAM）中使用的边界条件。可以边坡稳定分析（SAM）是二维分析，滑动面只有在分析设置成为 2D 的情况下才可以设置。

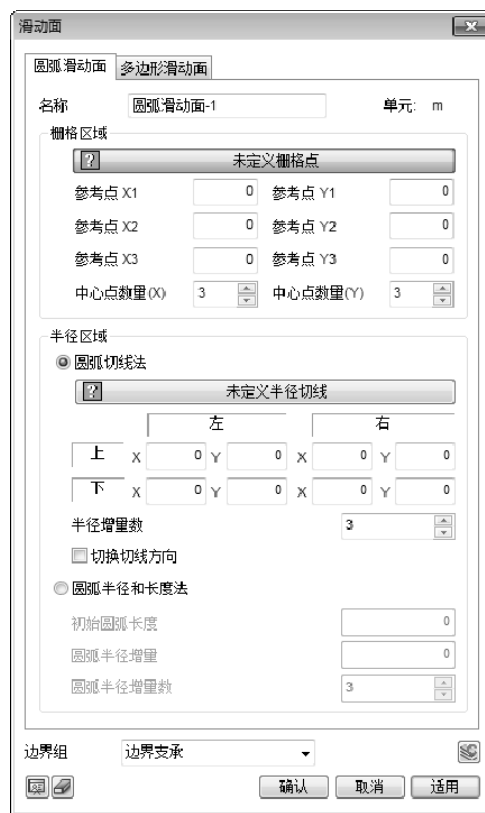


图 5-32 圆弧滑动面定义对话框

#### 方法

以栅格点作为圆弧中心点并以切线定位半径，定义滑动面。

用三点（参考点 X、Y）指定可以定位圆弧中心的矩形的栅格区域，中心数量 X、Y 为栅格区域的划分数量。

例如，中心数量分别按输入 5、4，则生成 5×4=20 个圆弧中心点。

圆弧切线定位的半径可以用[圆弧切线法]、[圆弧半径和长度法]设置。

#### [圆弧切线法]

直接通过绘制范围在工作窗口上指定切线所在位置的四边形区域。“半径增量数”是指按相应数量分割矩形区域，通过“切换切线方向”可以修改圆弧半径区域的切线方向（紫色）。

[圆弧半径和长度法]

通过直接输入初始圆弧长度、圆弧半径增量、圆弧半径增量数的方式定义滑动面。

### 边界组

把设置的约束条件注册到期望的边界条件组上。用户可以为这个边界组命名。

## 5.3.6 多边形滑动面

### 概要

定义非圆弧形态的滑动面。

滑动面是在边坡稳定分析（SAM）中使用的边界条件。可以边坡稳定分析（SAM）是二维分析，滑动面只有在分析设置成为2D的情况下才可以设置。

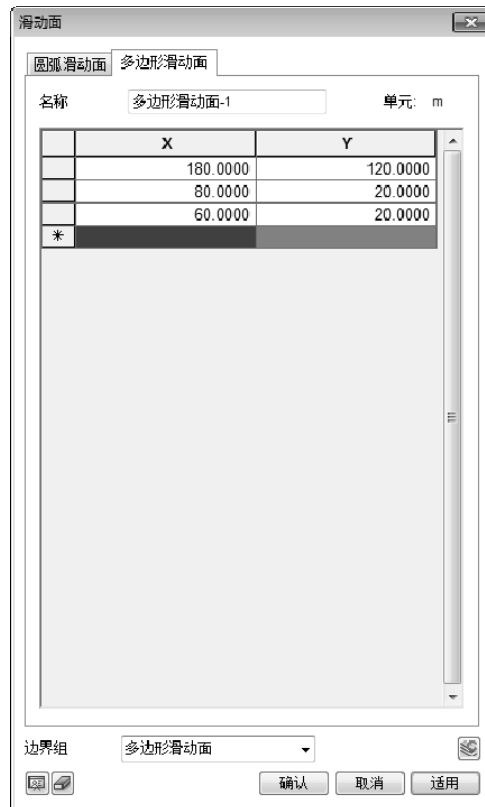


图 5-33 多边形滑动面定义对话框

### 方法

#### 非圆弧滑动面定义方法

- (1) 可在表格中直接输入相应非圆弧滑动面的坐标值。
- (2) 可在工作平面上，点击鼠标的方式定义非圆弧的滑动面区域，右击鼠标终止。

### 边界组

把设置的约束条件注册到期望的边界条件上。用户可以为这个边界组命名。

### 5.3.7 水位

#### 概要

在窗口内选择几何形状，生成变化的地下水位。



图 5-34 水位设置对话框（线、面）

#### 1. 线

##### 方法

选择线可以轻松地生成变化的地下水位。

指定变化的地下水位变量的方向（如果地下水位随着模型的 X 向变化，变量轴就选择 X），并输入间距值（间距为 1m，则按 1m 间隔生成地下水位线）。

生成的水位被注册到工作目录树>分析>函数>一般函数(空间)，可以通过右击鼠标>关联菜单>编辑，以表格形式编辑水位线。

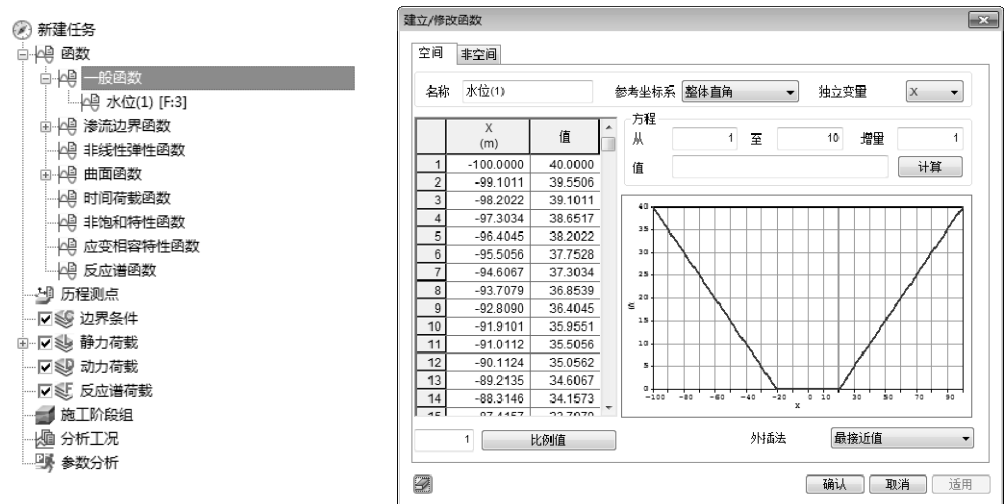


图 5-35 水位线定义的示例

#### 2. 面

##### 方法

选择面后输入间距值可以轻松地生成变化的地下水面。

生成的水位面被注册到工作目录树>分析>函数>曲面函数，可以通过右击鼠标>关联菜单>编辑，以表格形式编辑水位面。

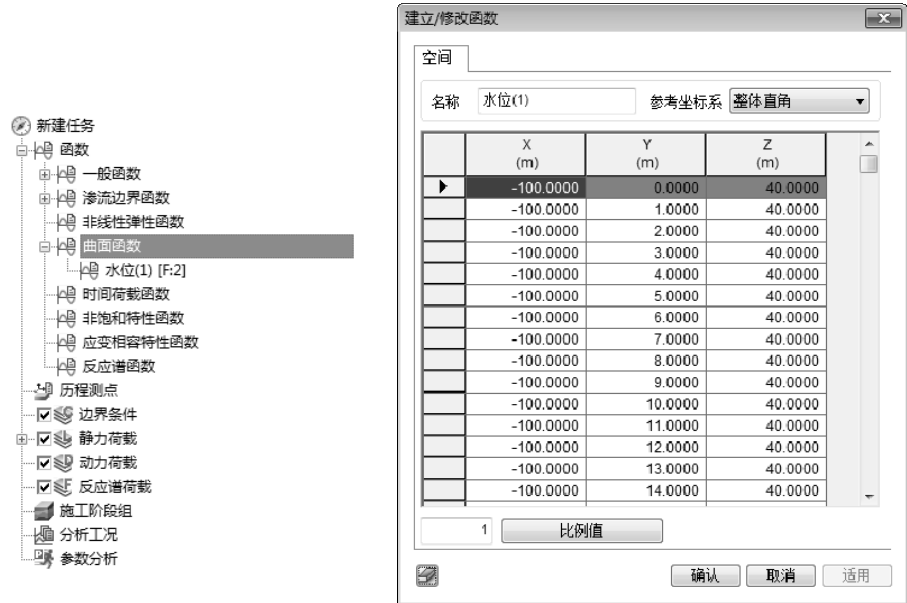


图 5-36 水位面函数定义的示例

### 5.3.8 节点水头

#### 概要

输入模型的水头。不论是稳态时的常量水头，还是瞬态时的变化水头，都可以通过渗流边界条件函数输入。

节点水头可作为渗流/固结分析（完全耦合）的边界条件。



图 5-37 节点水头设置对话框

#### 方法

直接输入已知指定点的水头值。选择目标有[节点]、[线]、[面]、[自由面节点]。



[节点]: 直接选择要定义水头条件的节点, 选择[线]、[面]时, 可对选择的线/面上包含的所有节点定义水头条件。

[自由面节点]: 选择单元自由面内的节点。点击选择参考节点、目标单元和特征角, 自动选择与包含参考节点的单元的特征角小于指定角度节点。

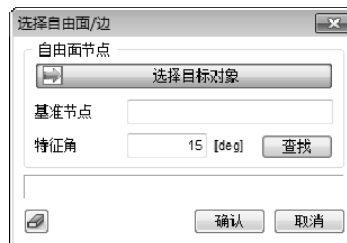


图 5-38 自由面节点选择对话框

水头[总]、[压力]水头两种。

[总]: 输入与模型的位置无关的按原点计算的总水头值。

[压力]: 对应于水面的节点为压力水头为“0”, 设置地下水位条件。

对于水位随时间变化的瞬态分析, 可以用[函数]定义。

使用函数时, 按输入的值乘以函数值后反映到分析中。

定义的函数注册到函数>渗流边界函数, 可以通过右击鼠标>关联菜单>编辑, 以表格形式编辑。

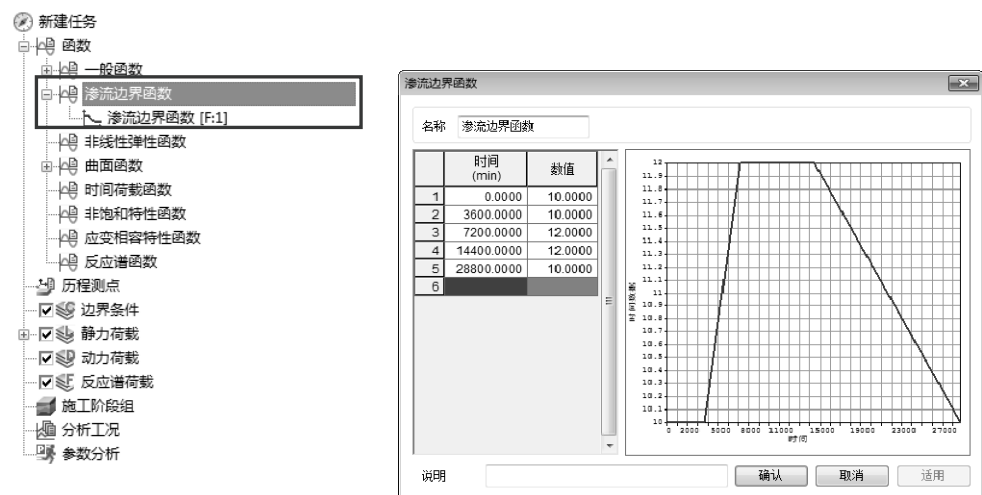


图 5-39 节点水头函数的示例

**如果总水头<位置水头, 则 Q=0。**

用于水位变化分析的水头-流量转换边界条件。

当水位随着时间变化的情况下, 如水位的突降, 会发生虹吸使渗透流发生逆流, 特别是在堤坝、水库水位急剧下降的情况下, 水位下降速度一般快于坝体内的渗流速度。为了模拟这种情况, 水头边界条件应当根据水位变化自动修改。换言之, 因水位下降, 原来处在水位以下的节点暴露在水位以上时, 在相应节点中总水头不是下降水位的总水头值, 而是水位下降前保持一定时间后的总水头值, 之后随着时间推移逐渐减小。

这个选项在水位按周期性变化的位置上使用时很方便，可以同时定义基于时间变化的函数。但是，如果输入的总水头的水位高度高于所选的节点位置，这个边界条件会被自动解除，因此这种情况下必须取消勾选这个选项。

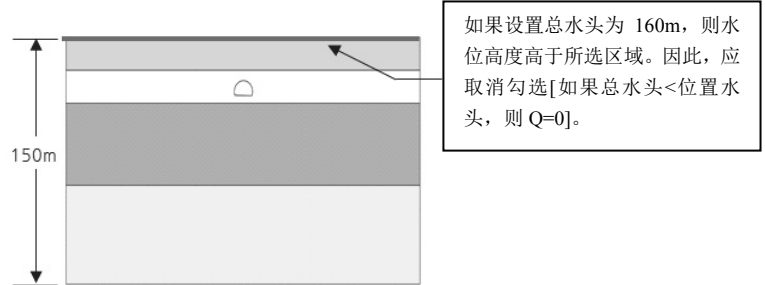


图 5-40 总水头<位置水头说明

**Tip**

节点水头适用于预先知道水位位置的情况。可以模拟不形成自由水面（phreatic surface）的承压流（confined flow）或模拟形成浸润面的自由流动（unconfined flow）。

水头边界条件可以基于分析条件选择性地输入总水头（Total Head）和压力水头（Pressure Head）。如下图，如果从高度为 0 的整体坐标系 Z 轴以上容易确定的边界条件的节点位置，可直接输入总水头。但是，当很难准确确定高度，或高度是变化的情况下，可按压力水头为 0 输入。

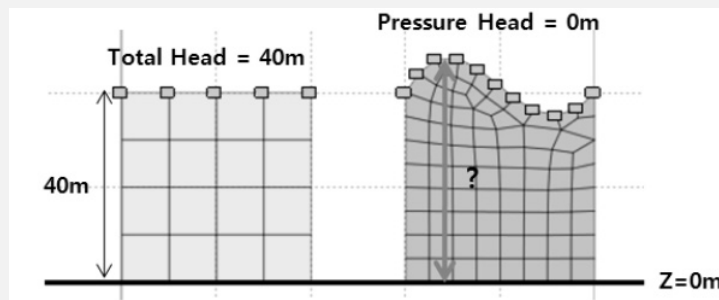


图 5-41 添加节点水头的示例

**边界组**

设置的约束条件注册到期望的边界条件组上。用户可以为这个边界组命名。

**5.3.9 节点流量**

**概要**

在任意的节点输入流量。

节点流量是适用于渗流/固结分析（完全耦合）的边界条件。



图 5-42 节点流量设置对话框

### 方法

按照体积单位输入特定位置的单位时间内的流入/流出量。选择目标有[节点]、[线]、[面]、[自由面节点]。

[节点]: 直接选择要定义节点流量的节点。选择[线]、[面]时, 可对选择的线/面上包含的所有节点定义节点流量。

[自由面节点]: 选择单元自由面内的节点。点击选择参考节点、目标单元和特征角, 自动选择包含参考节点并且特征角小于指定角度的单元上的所有自由面节点。

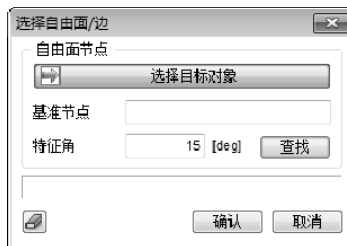


图 5-43 自由面节点选择对话框

对于流量随时间变化的瞬态分析, 可以用[函数]定义。

使用函数时, 按输入的值乘以函数值后反映到分析中。

定义的函数注册到函数>渗流边界函数, 可以通过右击鼠标>关联菜单>编辑, 以表格形式编辑。

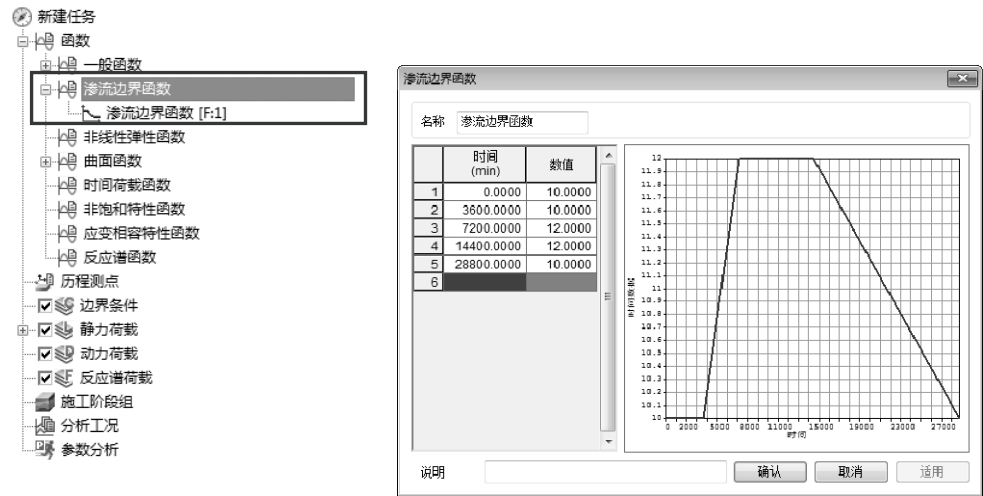


图 5-44 节点水头函数的示例

### 边界组

设置的约束条件注册到期望的边界条件组上。用户可以为这个边界组命名。



节点流量边界条件是模拟在节点上发生的流入和流出的情况。(+)指流入，(-)指流出。随着时间变化的流量边界条件，可通过定义的渗流函数设置。

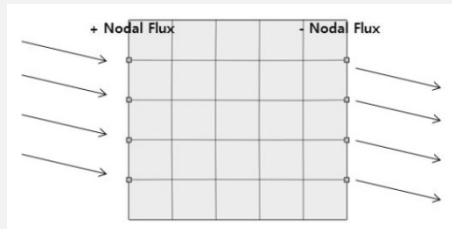


图 5-45 节点流量的说明

### 5.3.10 曲面流量

#### 概要

以单位面积流量的形式输入曲面流量边界条件。

曲面流量适用于渗流/固结分析（完全耦合）中的边界条件。



图 5-46 面流量设置对话框

### 方法

按照单位面积输入特定位置的单位时间内的流入/流出量。可以按照[线流量]或者[面流量]形式定义。一般情况下，在二维模型中输入[线流量]，在三维模型中输入[面流量]。

定义曲面流量时，可以输入在线或曲面的几何形状中，也可以直接选择相应的单元线后输入。

定义降雨等流入时，输入 (+) 值，定义开挖或抽水等时，输入 (-) 值。

对于流量随时间变化的瞬态分析，可以用[函数]定义。

使用函数时，按输入的值乘以函数值后反映到分析中。

定义的函数注册到函数>渗流边界函数，可以通过右击鼠标>关联菜单>编辑，以表格形式编辑。

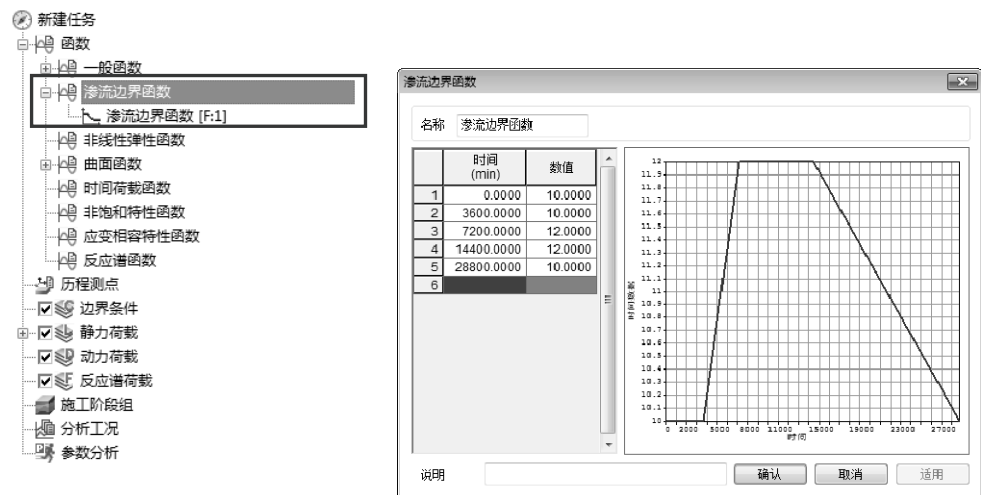


图 5-47 曲面流量函数的示例

如果  $q$  (曲面流量)  $> K_{sat}$  (渗透系数)，则总水头=位置水头。

用于降雨分析的流量-水头转换边界条件。

例如，在地表输入降雨强度时，可以在地表的边界条件中使用面流量定义。

这个功能适用于地表强制定义等于降雨强度的流量。在土层的地表吸收降雨的能力大于降雨强度时，土层可以全部吸收降雨。但在土层地表可以吸收降雨的能力小于降雨强度时，只有部分降雨量按土层的吸收能力被地表吸收，其余的降雨量将沿着地表面流动。

当降雨强度大于地表面可以吸收的能力值时，因为地表面的边界在降雨期间为饱和状态，类似于地下水位存在于表面上，所以应当把降雨的区域变更为水位线。

勾选[如果  $q > K_{sat}$ ，总水头=位置水头]时，自动将地表的边界条件修改为水位条件来执行分析，这个选项只在降雨强度大于地表的吸收能力（输入的渗透系数）时，才能适用。

### 边界组

设置的约束条件注册到期望的边界条件组上。用户可以为这个边界组命名。

## 5.3.11 渗流面

### 概要

在很难查找准确的浸润线的位置下，可通过“渗流面”功能反复计算来确定。

渗流面是适用于渗流/固结分析（完全耦合）的边界条件。



图 5-48 渗流面设置对话框

### 方法

选择要定义渗流面的点。

例如，假设在均质的水库下游面中发生渗流时，无法确定贯穿水库下游的浸润面的位置，这种情况下，可设置渗流面边界，执行反复计算。



图 5-49 指定渗流面边界的示例

选择目标有[节点]、[线]、[面]、[自由面节点]。

[节点]: 直接选择要执行反复计算的节点，选择[线]、[面]时，可对选择的线/面上包含的所有节点执行反复计算。

[自由面节点]: 选择单元自由面内的节点。点击选择参考节点、目标单元和特征角, 自动选择包含参考节点并且特征角小于指定角度的单元上的所有自由面节点。

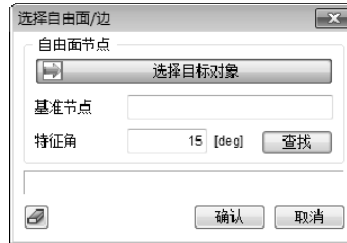


图 5-50 自由面节点选择对话框

在设置了渗流面边界的节点中, 可按如下条件计算的孔隙水压力  $P$ , 并通过以下两种规则自动搜索浸润面。

- (1)  $P > 0$  的情况, 按  $P = 0$  考虑;
- (2)  $P < 0$  的情况, 删除复查节点。

### 边界组

设置约束条件注册到期望的边界组上。用户可以为这个边界组命名。

## 5.3.12 排水条件

### 概要

使用于模拟超孔隙水压力为 0 的排水部分。

排水条件是在固结分析中使用的边界条件。



图 5-51 排水条件设置对话框

### 方法

选择要指定排水条件的点。

选择目标有[节点]、[线]、[面]、[自由面节点]。

[节点]: 直接选择要设置排水条件的节点, 选择[线]、[面]时, 可对选择的线/面上包含的所有节点设置排水条件。

[自由面节点]: 选择单元自由面内的节点。点击选择参考节点、目标单元和特征角, 自动选择包含参考节点并且特征角小于指定角度的单元上的所有自由面节点。

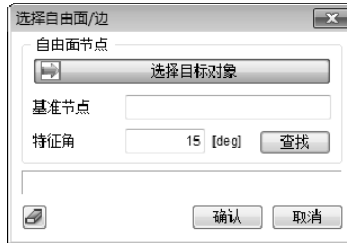


图 5-52 自由面节点选择对话框

指定排水条件的区域中的超孔隙水压力保持为 0, 这意味着因土体上施加的荷载, 水可以流出。排水条件主要用于渗流系数较大或荷载的变化小的情况。

### 边界组

设置的约束条件注册到期望的边界条件组上。用户可以为这个边界组命名。

## 5.3.13 非固结条件

### 概要

用于非固结层分析。

非固结条件是在固结分析中使用的边界条件。



图 5-53 非固结条件设置对话框

### 方法

选择要定义的非固结边界条件的目标。

选择目标有[单元]、[2D 单元]、[3D 单元]、[面]、[形状]。

选择[面]、[形状]时, 对在相应选择的面/形状中包含的所有单元, 采用非固结边界条件。

### 边界组

设置的约束条件注册到期望的边界条件组上。用户可以为这个边界组命名。





在固结分析中，各单元具有一个增加的超孔隙水压力的自由度，并且在节点位置有平动自由度。在 GTS NX 的固结分析中，除了指定了两种边界条件（非固结条件、排水条件）的所有单元均假设拥有孔隙水压力自由度。因此，对于并不直接发生固结行为的填充材料的单元应当按照一般单元定义非固结条件。并且，在固结分析中发生排水的边界必须定义排水条件。如果恰当的定义边界条件，并执行固结分析，定义非固结条件和排水条件的位置的超孔隙水压力 (excess pore pressure) 应当为 0 (zero)。

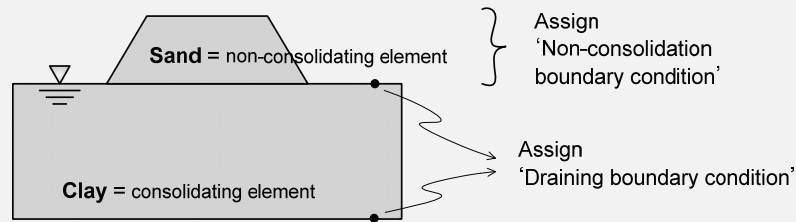


图 5-54 固结条件及排水条件的说明

### 5.3.14 传递边界

#### 概要

为了表现半无限地层，在水平岩层中沿着竖直方向设置虚拟传递面，以考虑表面波在远场地基内传播的功能。

传递边界条件仅用于动力分析>二维等效线性分析。

在岩土建模中边界条件大体上可以分为：[单元边界条件]、[粘性边界条件]、[传递边界条件]。

(1) [单元边界条件]在自由场边界位置可分为：输入地震响应荷载的自由端和输入位移的固定端。[单元边界条件]虽然可以充分地考虑自由场的地震波影响，但是这并不能考虑建筑物基础板产生反射波的影响。随着边界的位置距离基础板越近，这种影响越大。

(2) [粘性边界条件]是为了弥补单元边界条件的缺点，由 Lysmer 和 Kuhlemeyer、Ang 和 Newmark 等人提出的在边界上具有能够吸收一定角度的物质波的边界条件。但是，因为[粘性边界条件]也不能完美地处理复杂的表面波的影响，与单元边界一样，边界也应当距基础板设置一定的间距。

(3) [传递边界条件]修补了[粘性边界条件]的缺点，能够考虑几乎所有形式的物质波和表面波影响，水平方向的土层可以按弹簧和阻尼的频率函数表示。因为传递边界条件一般假设岩土各层的水平方向的属性为均匀的，所以，即使结构物自身存在边界条件时，也可以得到比较满意的结果。但是，为了正确地考虑由水平方向变形引起的属性变化，有效的办法是在边界和基础板之间保持一定的距离。



图 5-55 传递边界设置对话框（一般、自动）

### 1. 一般

#### 方法

选择要设置传递边界的单元边和线。分配到单元上的土层信息可用来生成传递边界。

选择两个不同的单元的交线时，不能生成传递边界。

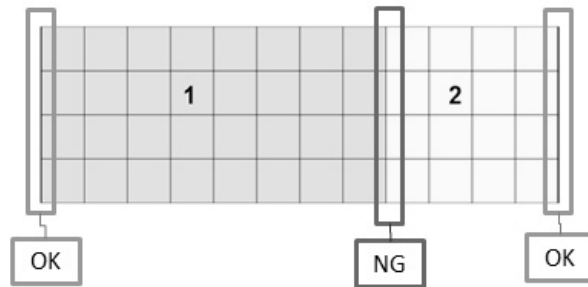


图 5-56 一般传递边界设置的示例

### 2. 自动

#### 方法

如果选择网格，根据用户指定的选项，自动在所选的网格的左/右/底部生成边界条件。根据网格组中定义的岩土属性生成不同的弹簧系数值。

可以把分析模型的左侧和右侧设置为传递边界，在底面和自由面可以生成粘性边界。

用于执行岩土-结构分析的二维模型，很难准确模拟实际上是几乎无限区域的岩土。因此，需在工程上选择合适的方法对设置的边界进行处理，使其尽可能模拟实际场地条件。

#### 边界组

设置的约束条件注册到期望的边界条件组上。用户可以为这个边界组命名。



**\* 粘性边界单元的生成方法**

1、粘性边界单元的生成方法如下。

(1) 计算 P 波和 S 波对应的  $C_p$  ,  $C_s$

$C_p$  ,  $C_s$  可通过如下公式计算。

$$C_p = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = W \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{W \cdot 9.81}} = c_p \cdot A$$

$$C_s = \rho \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{\rho}} = W \cdot A \cdot \sqrt{\frac{G}{W \cdot 9.81}} = c_s \cdot A$$

这里,  $\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$  ,  $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$  。其中,  $\lambda$  : 体积模量;  $G$  : 抗剪模量;  $E$  : 弹性模量;  
 $\nu$  : 泊松比;  $A$  : 截面面积。

截面面积的在生成曲面弹簧时自动考虑, 所以只计算  $c_p$  ,  $c_s$  。

表 5-3 粘性边界参数计算结果

	弹性模量	体积弹性模量	抗剪弹性模量	容重	泊松比	P 波	S 波
	$E /$ tonf/m <sup>2</sup>	$\lambda /$ tonf/m <sup>2</sup>	$G /$ tonf/m <sup>2</sup>	$W /$ tonf/m <sup>3</sup>	$\nu$	$c_p /$ tonf · sec/m <sup>3</sup>	$c_s /$ tonf · sec/m <sup>3</sup>
GroundA	2000	1459.531181	751.8796992	2.0	0.33	24.5792	12.381

$c_p$  ,  $c_s$  的单位为 tonf · sec/m<sup>3</sup> , 乘以节点位置的有效面积, 得到粘性单元的弹簧刚度单位变为 tonf · sec/m 。

粘性单元的参数是根据用户在建模时输入的岩土的属性计算, 其中, 体积模量、剪切模量是通过弹性模量和泊松比计算。因此, 用户生成粘性边界单元时, 不需要额外添加参数。

自动生成粘性边界单元的情况下, 考虑单元的面积 (有效长度\*单位宽度) 后自动生成弹簧。计算得到的  $C_p$  作为生成弹簧的节点位置的法向参数,  $C_s$  则作为切向参数。

例如, 下图所示的 XZ 平面的二维模型, 在模型的左/右侧生成的弹簧系数的  $C_x$  为各地基的  $C_p$  值,  $C_z$  等于  $C_s$  值; 底部弹簧系数  $C_x$  等于  $C_s$  值, 底部弹簧系数  $C_z$  等于  $C_p$  值。

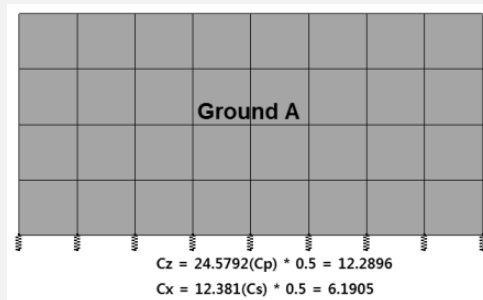


图 5-56 自动生成粘性边界

## 5.4 荷载

### 1. 荷载（静力荷载）

执行线性/非线性静力分析（静力/边坡/固结分析）时，荷载是以外力形式按自重、集中力/弯矩、强制位移、压力、水压力、梁荷载、温度荷载、预应力、初始应力、荷载组合等形式指定。

表 5-4 静力荷载的分类

静荷载类型	概要
自重	输入单元的自重作为荷载
集中力	在模型期望的节点上输入集中荷载（作为 X, Y, Z 轴方向分量）
弯矩	在模型期望的节点上输入弯矩（作为 X, Y, Z 轴方向分量）
强制位移	在模型期望的节点上输入强制位移，输入的强制位移按节点坐标系方向作用
压力	在面或线上输入压力
水压力	根据输入的水位线位置自动输入水压力荷载
连续梁单元荷载	多个梁单元连续连接时，指定相应梁单元的两端，输入为分布荷载
梁单元荷载	在梁单元上定义分布荷载或集中荷载
温度荷载	在任意节点输入节点温度进行热应力分析，在分析条件中输入模型节点上的初始温度值
预应力	在结构/岩土单元上输入预加荷载
初始平衡力	输入原场地的初始状态的力
荷载组合	通过荷载组和各组的系数设置荷载组合

### 2. 荷载（动力荷载）

执行线性/非线性动力分析时，荷载是以外力形式按反应谱、地面加速度、时程静力荷载、节点动力荷载、曲面动力荷载、荷载-质量转换、列车动力荷载等形式指定。一般以指定时变荷载函数的形式，将静力荷载转换为动力荷载或质量的形式以适用于动力分析。

表 5-5 动力荷载的分类

动力荷载类型	概要
反应谱	反应谱分析中输入所需的荷载条件及谱数据
地面加速度	输入时程荷载函数形式的地面加速度（可利用数据库）
时变静力荷载	静（力）荷载乘以时间函数后作为动力荷载
节点动力荷载	在任意节点输入时程荷载函数（荷载成分乘以时间函数）
曲面动力荷载	在面上以压力形式输入时程荷载函数（荷载成分乘以时间函数）
荷载-质量转换	将静力荷载转换为质量
列车动力荷载表	通过表格输入或修改列车移动荷载

#### 5.4.1 自重

##### 概要

输入模型中的单元自重作为荷载，或者修改、删除已经输入的自重。

自重可以沿整体坐标系轴 X, Y, Z 的方向设置，作为静力分析中的体力。当执行动力分析时需要考虑自重的影响时，可以通过项目设置定义。



图 5-57 重力设置对话框

### 方法

根据工作环境（2D/3D）在项目设置中输入自重施加方向的系数。因为根据输入的体积、密度和重力加速度，程序自动计算分析模型中的自重，所以，自重的方向是按单位矢量定义。重力方向的默认值为-1。

## 5.4.2 集中力/弯矩

### 概要

在单元节点施加集中荷载或弯矩荷载。集中力和弯矩荷载作为最基本的荷载，可以对各节点输入 3 个方向的分量。荷载的方向可以按任意坐标系定义。



图 5-58 集中力设置对话框

### 方法

选择要施加荷载的节点，设置大小和方向。荷载方向可以按默认或参考目标的方式设置。按默认的情况下，可参考右下角的坐标系输入 X, Y, Z 方向的分量。按参考目标时，可选择参考目标设置荷载

方向。参考目标为线时，分量方向按照线生成的方向设置；对于面，以面法线方向设置为 Z 分量，左右方向设置为 Z、Y 分量。

所选的目标形状为线、面等几何形状时，在荷载类型中可以选择合力或独立荷载，如下图。“合力”的情况下，输入的荷载为作用于所选线/面上的总荷载，分配到线/面上的所有节点；“独立荷载”的情况，在线/面内的所有节点上统一施加输入的荷载。

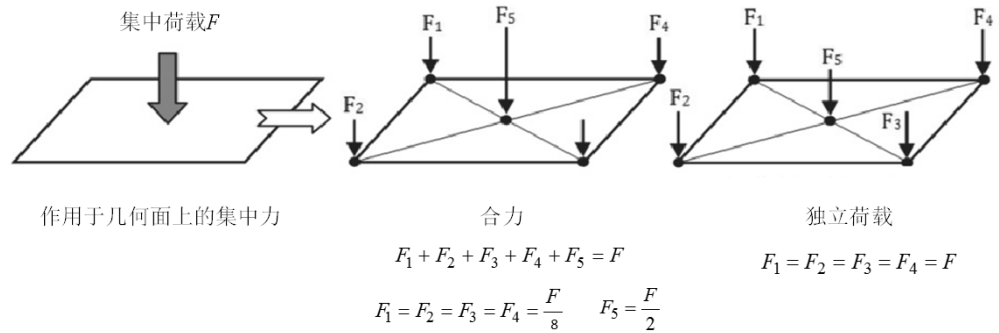


图 5-59 集中荷载的分配方式

当选择的目标为 2 个或 2 个以上时，合力根据长度或面积的比率分配输入的荷载，独立荷载则施加在每个所选目标上。

[目标类型]



图 5-60 集中荷载施加的位置

虽然一般在节点上定义荷载，但是，选择的目标还可以是几何形状（线、面等）以及自由面节点。选择线、面的情况，所选形状应当已经用于单元生成，并且应在所有节点上按照特定的方向/大小施加集中力。对于自由面节点的情况，选择单元自由面内的任意节点，可自动选择包含该节点并且特征角小于指定角度的单元上的所有自由面节点。

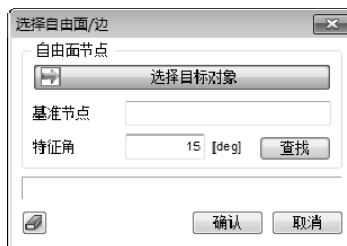


图 5-61 自由面节点选择对话框

[参考目标]

可以根据各种不同的标准设置要施加的荷载的方向。默认以整体直角（圆柱）坐标系为标准输入，也可以选择几何形状（线/面）作为参考方向。选择线/面的情况下，所选的形状坐标系会显示出来，则荷载按照参考显示的坐标系设置；选择矢量时，通过定义 X, Y, Z 方向的矢量分量，指定荷载方向；按法线定义时，可以选择的对象只能是面，并自动按照所选面的法线定义荷载方向。

[分量]

输入基于定义方向的荷载大小。正值 (+) 为沿着设定方向，负值 (-) 为设定方向的反向。通过一般函数，可以定义基于整体坐标系坐标值变化的荷载函数。这时，输入的数值乘以函数值后适用。

### 5.4.3 强制位移

#### 概要

在单元节点上输入强制位移。强制位移用于在指定节点强制施加的位移，因其会引起结构的变形，所以按荷载归类，但其也具有边界条件的特征，如，输入强制位移的节点处会出现约束力。按默认整体坐标系定义的强制位移，是沿着节点坐标系方向起作用。强制位移的功能可用于在分析中施加测量到的位移或者已知单元的塑性（极限）状态。

#### 方法

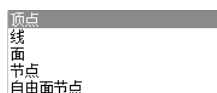


图 5-62 强制位置施加的位置

选择要适用强制位移的节点，设置大小和方向。目标对象的选择类型及设置大小/方向的方式如下。

#### [目标类型]

虽然在节点上定义强制位移，但是，选择的目标还可以是几何形状（线、面等）以及自由面节点。选择线、面的情况，所选形状应当已经用于单元生成，并且在所有节点上按照指定的方向/大小施加强制位移。对于自由面节点的情况，选择单元自由面内的任意节点，可自动选择包含该节点并且特征角小于指定角度的单元上的所有自由面节点。

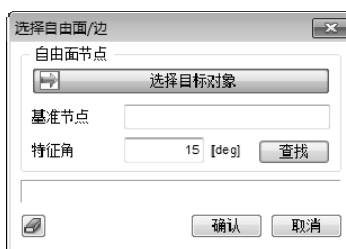


图 5-63 自由面节点选择对话框

#### [分量]

输入基于设置方向的强制位移大小。正值 (+) 为沿着设定方向，负值 (-) 为设定方向的反向。通过一般函数，可以基于整体坐标系定义随坐标值变化的函数。这时，输入的数值乘以函数值后适用。

### 5.4.4 压力

#### 概要

在几何面或面单元、平面应力单元或实体单元的面或线上输入压力荷载。可以定义均布、线性/非线性分布荷载。单位面积的压力荷载是以均匀/非均匀分布状态作用在几何面上，因此单位是[力/面积]。因为是单位面积力，所以，压力以均匀的方式施加在所有选择的目标面上，与集中荷载不同的是集中荷载的单位为[N]。

这里，压力荷载也会施加到所选的目标几何面的子节点上，因为，压力荷载会考虑目标面（单元面）的面积，并在分析时自动换算成节点荷载。因此，这两种荷载对分析结果没有差别。根据分析条件中荷载的施加方式，可以集中/分布荷载中，选择较方便的荷载使用。



图 5-64 压力荷载设置对话框

### 方法

压力荷载是以分布荷载的形式在单元面或线上输入。这可以在二维单元或三维单元中使用，并可按任意坐标轴方向、任意矢量方向或法向输入。与集中荷载的方向设置相似，均布或线性/非线性分布荷载都可以按下图所示方式输入。也可以采用基于坐标方向/间距的函数定义荷载变化，这时，输入的荷载数值按乘以函数值后适用。

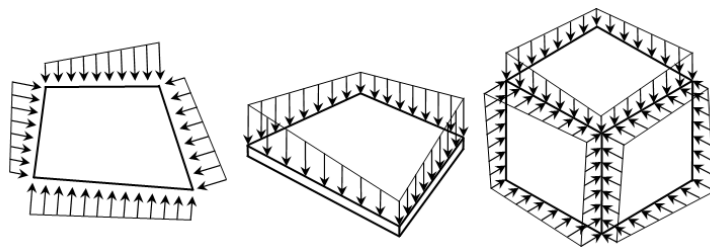


图 5-65 按各单元类型施加的压力荷载

## 5.4.5 水压力

### 概要

是根据水位线位置自动计算单元边界线或面上的水压力的功能。





图 5-66 水压力设置对话框

### 方法

选择要施加水压力的单元边界线或面。在预先设置水位线时，可选择[自动]选项自动根据水位线与单元边界线/面的高度差计算静水压力。选择[手动]选项，按水位高度直接在单元线/面上指定水压力的大小。

## 5.4.6 梁荷载

### 概要

按照整体坐标系或梁单元坐标系，施加集中及分布荷载（弯矩）。连续梁单元荷载是多个梁单元处于连续性连接时，指定相应梁单元的两端并按分布荷载或集中荷载的形式输入连续梁荷载。连续梁单元荷载也可以施加在处于同一平面中的曲线上。而对于梁单元荷载的情况，以分布荷载或集中荷载的形式施加在单独的梁单元上。



图 5-67 连续梁单元荷载设置对话框

## 方法

### [目标类型]

对于梁单元，直接选择单元或在已生成单元的线上施加荷载。对于连续梁单元荷载，可以选择“加载在线上”或“选择单元”的方式。

[加载在线上]功能是在两点确定的直线单元上指定连续梁单元荷载。这种情况下，依次选择两节点，在直线对应的已有单元上输入荷载。

[选择单元]是选择的梁单元的起点和终点后选择单元，直接在选择的单元上施加荷载。可以对不在直线上的单元中输入连续单元梁荷载。

### [方向]

可按整体坐标系 (X, Y, Z) 或单元坐标系 (x, y, z) 设置。另外设置“投影”，可以按加载段内所有梁单元，或按与荷载施加方向垂直的投影长度加载。这个选项只对按整体坐标系方向的[分布]荷载有效。

### [值 (比率/长度)]

比率：按照施加荷载区域长度的相对比率输入连续梁荷载的载荷位置。

长度：以实际长度为标准输入连续梁荷载的载荷位置。

这里，x1 和 x2 分别指梁荷载的开始点和结束点的位置，w1、w2 指在 x1、x2 中的荷载大小。如果在荷载的大小输入负数，就会按设置方向的反方向施加，也可以按大小差异设置线性分布（增/减）荷载。

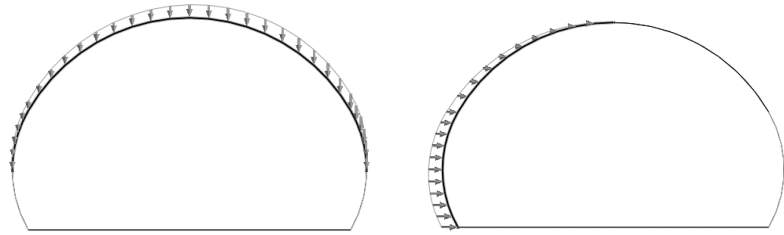


图 5-68 施加连续梁单元荷载的示例

### 5.4.7 温度荷载

#### 概要[节点/单元温度]

为了执行热应力分析在节点以及单元上输入最终温度。基于温度差温度荷载产生变形，全部节点的初始温度可在“设置分析”中指定。如果输入节点温度，就会基于单元的初始温度计算由温度差引起的荷载，但如果没有进行位移约束，则不会产生温度应力。单元温度荷载与节点温度荷载类似。只对指定的单元设置均匀的温度，这与对所有与该单元连接的节点输入温度荷载的效果是相同的。



图 5-69 温度荷载设置对话框

#### 方法

选择节点或单元输入温度。如果选择目标形状为几何形状时，相应几何形状必须是已经用于生成单元的形状。输入所选的形状内包含的所有节点的初始温度，则荷载按基于初始温度的温度差计算。直接输入温度或使用函数可以模拟基于整体坐标系的温度变化。使用函数的情况下，按输入的数值乘以函数值后定义。

#### 概要[温度梯度]

可以用于定义梁单元或板单元的上端及下端的温差。只能对可考虑抗弯刚度的梁单元或板单元执行温度梯度荷载分析。对于梁单元，参考单元坐标系 y 轴和 z 轴，输入最外层部分的温差和距离；对于板单元，输入板的上部面和下部面的温度差和板厚度，考虑温度梯度荷载。



图 5-70 温度梯度设置对话框

### 方法

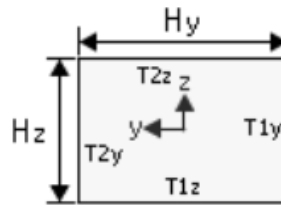


图 5-71 温度梯度参数说明

选择梁（板）单元。可直接选择单元或选择已经用于生成单元的线以及面。选择形状的情况下，按所选形状包含的全部节点输入荷载。对于梁单元，参考单元坐标系  $y$  轴和  $z$  轴，输入最外层部分的温差和距离，勾选“使用截面”选项时，使用分配在单元上的结构截面信息。对于板单元，按厚度方向输入温度差，可以直接使用板单元的厚度或直接输入梯度值。

## 5.4.8 预应力

### 概要

用于需要输入预应力荷载的情况。对于桁架/梁单元，可以施加轴力和弯矩作为初始荷载；可以定义平面应变单元、轴对称单元、实体单元等的初始应力。



图 5-72 预应力设置对话框

对于桁架/梁单元，勾选[先张法类型]选项的情况下，则忽略施工阶段变化的影响，保持输入的预应力。不勾选的情况下，根据输入的应力状态预应力会发生变化。如下图所示，预应力输入 50 时，勾选[先张法类型]的情况下，轴力会保持为定义的预应力，与开挖的应力变化无关；但在未勾选的情况下，假设由于开挖引起的应力变化为 10，那么轴力就会受到的影响并按 40 输出。

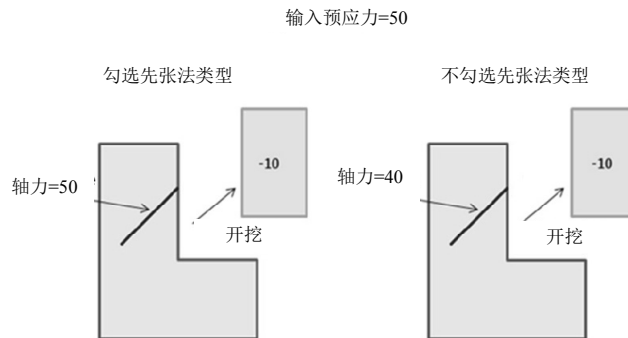


图 5-73 先张法类型的示例

## 方法

[单元类型]

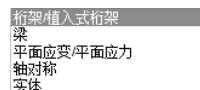


图 5-74 预应力定义的单元类型

可以采用的单元类型如下，不同类型对应的荷载分量也有所不同。根据所选的类型，目标形状可以直接选择单元或选择几何形状（线、面、实体）。选择形状的情况下，所选形状应当是生成单元时使用的形状，并按形状包含的所有单元节点输入荷载。

[分量]

按坐标轴方向定义荷载。基于整体坐标系，通过定义函数模拟荷载的线性增/减。不同单元类型的荷载分量按如下区分。

- (1) Nxx: 作用于一维单元轴的初始轴力

- (2)  $M_x, M_y, M_z$ : 基于各单元坐标系的弯曲作用力（弯矩荷载）
- (3)  $S_{xx}, S_{yy}, S_{zz}$ : 各坐标轴方向正应力
- (4)  $S_{xy}, S_{yz}, S_{zx}$ : 各面内的剪应力

平面/轴对称/实体单元的初始应力荷载的作用方向，可按整体坐标系或单元坐标系设置。

## 5.4.9 初始平衡力

### 概要

按照单元的类型，利用预应力功能，施加内力或应力作为初始条件。如果给定初始应力状态，则就会出现相对的初始力。初始平衡力是把由预应力功能定义的初始应力产生的力作为外力。如果不存在额外的力时，初始应力会与初始平衡力相等，保持初始平衡状态。并且，通过[考虑自重]选项，假设初始应力是由重力引起的。基于这个假设，在施工阶段中钝化的单元，将考虑单元自重的荷载释放系数。



图 5-75 初始平衡力设置对话框

### 方法

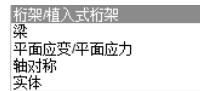


图 5-76 初始平衡力定义的单元类型

#### [单元类型]

可以采用的单元类型如下，不同类型对应的荷载分量也有所不同。根据所选的类型，目标形状可以直接选择单元或选择几何形状（线、面、实体）。选择形状的情况下，所选形状应当是生成单元时使用的形状，并按形状所包含的所有单元节点输入荷载。

#### [分量]

按坐标轴方向定义内力或应力。基于整体坐标系，通过定义函数模拟荷载的线性增/减。不同单元类型的荷载分量可按如下区分。

- (1)  $N_{xx}$ : 作用于一维单元轴的初始轴力

(2)  $M_x, M_y, M_z$ : 基于各单元坐标系的弯曲作用力（弯矩荷载）

(3)  $S_{xx}, S_{yy}, S_{zz}$ : 各坐标轴方向正应力

(4)  $S_{xy}, S_{yz}, S_{zx}$ : 各面内的剪应力

平面/轴对称/实体单元的初始平衡力荷载的作用方向，可按整体坐标系或单元坐标系设置。

### 5.4.10 荷载组

#### 概要

荷载条件可以按组分类。可用于对分析中要使用的荷载数据提前按组进行分类，就像是网格组、边界组等。输入实际荷载时，可以按输入的名称单独添加。荷载组已经分类时，各荷载组可按一定的系数生成组合荷载。



图 5-77 荷载组添加对话框

### 5.4.11 荷载组合

#### 概要

基于已生成的荷载组，创建新的组合荷载组。指定各荷载组系数，可以创建基于荷载系数的组合荷载。通常基于设计规范生成荷载组合。



图 5-78 荷载组合设置对话框

### 5.4.12 荷载表格导入/导出

通过该功能可以将常用的荷载类型在 Excel 中编辑后导入或将定义的荷载信息导出到 Excel。适用的荷载类型是'力'、'弯矩'、'位移'、'压力'、'梁荷载'。不像通过 UI 定义荷载的方法很多，使用 Excel 定义时，会有些限制。具体如下。

- 力/弯矩：只能导入/导出整体坐标系定义的荷载表格。
- 压力：只能导入/导出线/面类型的压力荷载的表格。其中，选择几何形状的方式（面）除外。还有，方向的选择也是只支持法线方向。荷载表格中，只能按方向向量导入/导出。
- 梁荷载：只能导入/导出梁单元荷载类型的荷载表格。
- 其他：导入时，只能一次选择一个 Excel 文件。

### 5.4.13 反应谱

#### 概要

输入反应谱分析中所需的反应谱函数（谱数据）、反应谱荷载的方向。动力荷载作用在结构时，反应谱分析是按固有周期、固有角频率和固有频率对应的物理量的最大响应函数表示。分析可以按位移反应谱、拟速度反应谱或拟加速度反应谱表示。反应谱分析所需荷载、边界条件与静力分析类似，但不同的是反应谱分析的荷载为时间的函数，并且在分析中包含惯性力（Inertial Force）和阻尼力（Damping Force）。可从瞬态响应反应分析中得到的重要结果包括：节点位移、速度和加速度，以及单元的内力和应力。可在分析控制中设置各振型的最大响应物理量（位移、应力、内力等）的振型组合方式和阻尼等。





图 5-79 反应谱设置对话框

### 方法

#### [方向]

按整体坐标设置反应谱荷载的方向。对从特征值分析得到的固有频率，输入[周期调整系数]增减所有固有周期。

#### [谱函数]

设置分析的谱数据。选择  键可以定义谱函数。



图 5-80 反应谱函数添加对话框

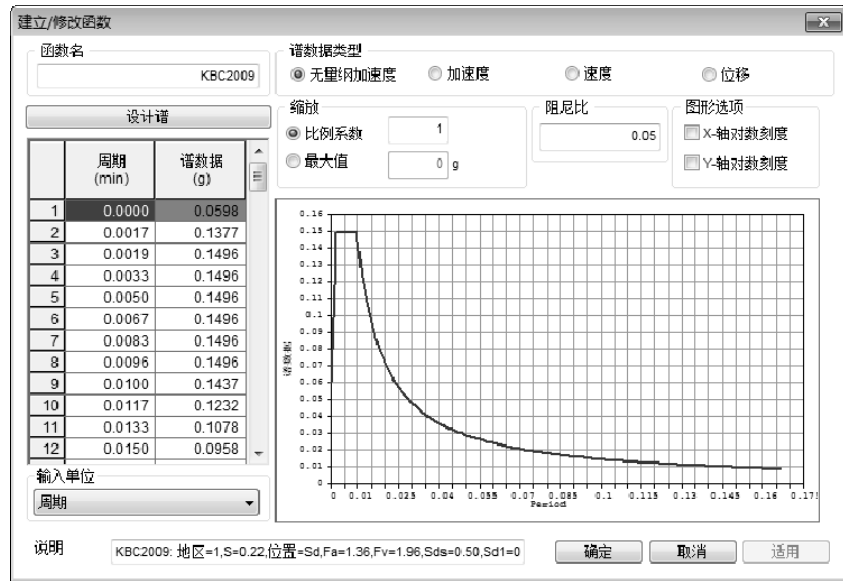


图 5-81 反应谱函数设置的示例

在对话框左侧的输入栏中直接输入周期和谱值。为了便于理解，输入的谱函数按周期-谱数据值的图表形式表示。在反应谱分析中，固有周期对应的谱函数值按线性插值使用。所以，建议对谱曲线急剧变化的部分分成若干个区间的稠密的谱值，谱函数的周期范围应当包含结构的所有固有周期。

谱数据类型分为无量纲加速度（谱加速度/重力加速度）、加速度、速度、位移谱，改变谱数据类型时，只会改变数据的单位形式，不改变数据值。比例系数是输入数据的缩放系数，最大值用于将全部数据按期望的最大值进行调整。

在“阻尼比”中输入用于反应谱的阻尼比。当要执行分析的结构阻尼比不同时，将对输入的谱数据进行调整，以符合结构阻尼比。



**\* 使用设计谱**

可以使用程序中内置的设计谱。默认的设计谱类型如下。



图 5-82 设计谱设置对话框及数据库

► Korea (Bridge) : 韩国，道路交通说明书

- ▶ Japan (Bridge02)：日本，建筑物荷载指南及动力分析
- ▶ China (JTJ004-89)：中国，公路工程抗震设计规范
- ▶ KBC 2009：韩国，建筑结构设计规范 2009
- ▶ KBC 2005：韩国，建筑结构设计规范 2005
- ▶ IBC2000 (ASCE7-98)：美国，国际建筑设计规范 2000
- ▶ UBC (1997)：美国，统一建筑设计规范 1997
- ▶ EURO (2004H-ELASTIC)：欧洲，结构抗震设计规范

### 5.4.14 地面加速度

#### 概要

地面加速度是用于时程分析中的时程荷载函数。主要用于地震导致的地面液化或结构抗震设计。时程分析是指当结构受动荷载作用时，按结构的动力特性和所施加的动力荷载，计算任意时间内结构的响应（位移、内力等）。时程分析的方法有振型叠加法和直接积分法，更详细的设置，如各分析方法的阻尼设置等参考[分析控制]章节。




图 5-83 地面加速度设置对话框

#### 方法

##### [方向]

定义地面加速度的输入（传递）方向。地面加速度荷载可参考整体坐标系，按多个方向（X，Y，Z）组合设置。地面加速度的增减系数可用“比例系数”定义，地面加速度的延迟时间可通过设置“到达时间”来控制。

##### [函数]

选择  键，定义地面加速度函数。

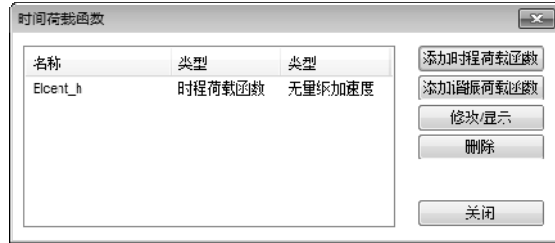


图 5-84 时程荷载函数添加对话框

### 添加时间函数

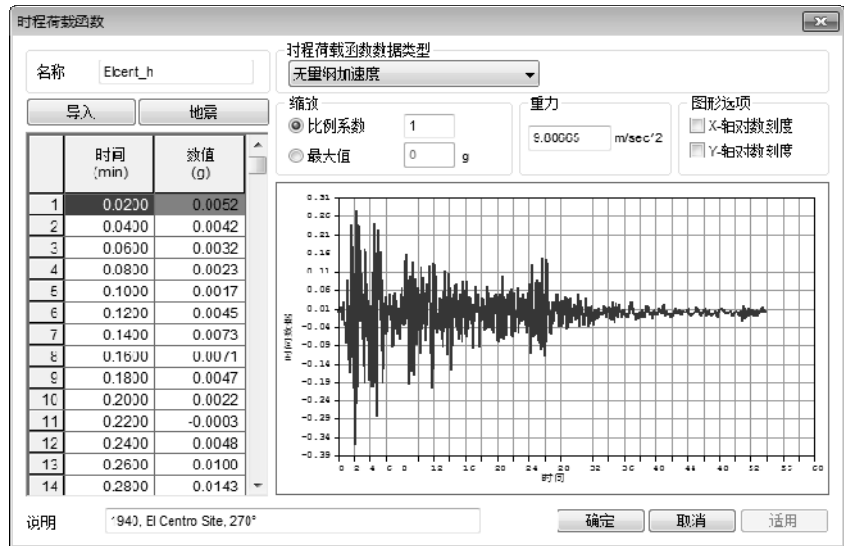


图 5-85 时程荷载函数的示例

在对话框左侧的输入栏中直接输入时间和相应荷载值，可以构成时程荷载。时程荷载函数数据类型分为加速度、集中力、弯矩及无量纲加速度（时程加速度/重力加速度）。更改时程荷载函数数据类型时，只会改变数据的单位，不改变数据值。比例系数是输入数据的缩放系数，[最大值]用于将全部数据按期望的最大值调整。

#### Tip

##### \* 时间函数-适用的荷载

定义的函数不仅用于定义地面加速度，而且可在定义动力节点动力荷载、时变静力荷载时使用。指定“集中力”或“弯矩”时程荷载用于定义“节点动力荷载”；指定“无量纲加速度”或“加速度”用于定义“地面加速度”。指定“无量纲”的时程荷载用于定义随着时间变化“时变静力荷载”或“曲面动力荷载”。

#### Tip

##### \* 导入/地震波

导入经常使用的时变荷载，或者从程序内置的数据库中选择地震加速度数据。总共内置了 32 类地震加速度。

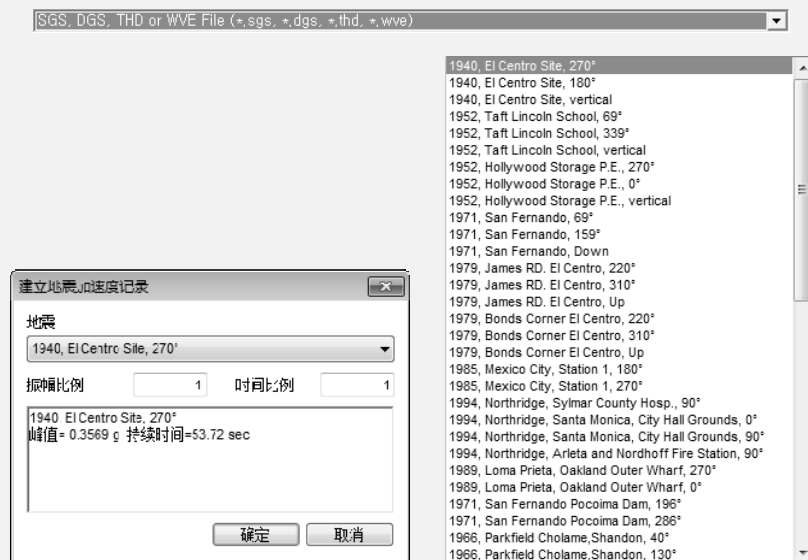


图 5-86 地震地面加速度设置对话框及数据库

### 添加谐振荷载函数

可以利用谐振曲线函数定义时程荷载。A、C 为常数，f 为输入荷载的频率（Frequency），D 为阻尼比（Damping Factor），P 为相位角。如果时程荷载按谐振函数形式输入时，输入所需的谐振函数变量，点击“重绘图形”，右侧就会显示的时程荷载图形。

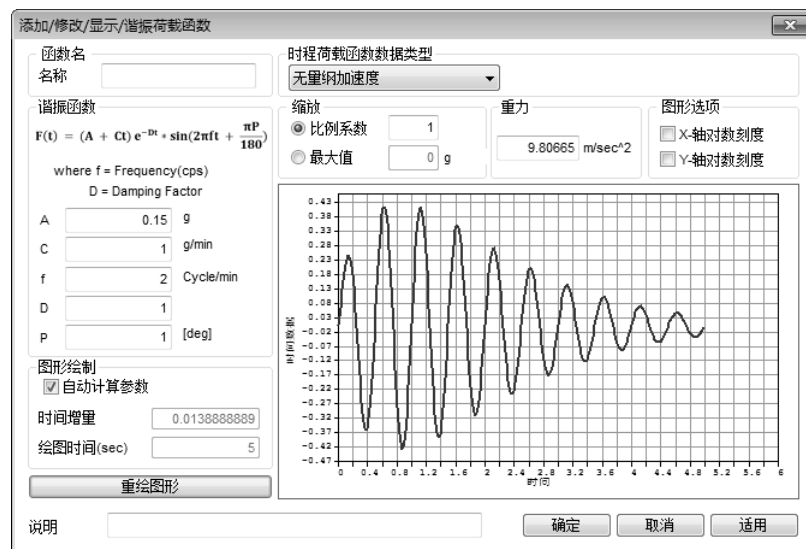


图 5-87 谐振荷载函数的示例

## 5.4.15 时变静力荷载

### 概要


利用预先输入的静力荷载，生成用于时程分析的时程荷载函数。此动力荷载按静力荷载乘以时程荷载函数定义。这里，时程荷载函数应为无量纲，即，在时程荷载函数数据类型中只能选择“无量纲”。这个功能是按照将静力荷载-时程荷载函数组合的方式代替[节点（曲面）动力荷载]的功能。



图 5-88 时变静力荷载设置对话框

### 方法

选择要适用于荷载组的静力荷载。输入静力荷载时，荷载的位置、方向及大小是已经确定的，并选择要使用时程荷载函数。荷载的增减系数可用[比例系数]定义，荷载的延迟时间可通过设置[到达时间]来控制。

选择  键，添加（选择）时程荷载函数。如下图所示，可用的时程荷载函数数据类型只能为“无量纲”。

在对话框左侧的输入栏直接输入时间和相应的数值构成时程荷载函数。[比例系数]是输入数据的缩放系数，[最大值]用于将全部数据按期望的最大值调整。

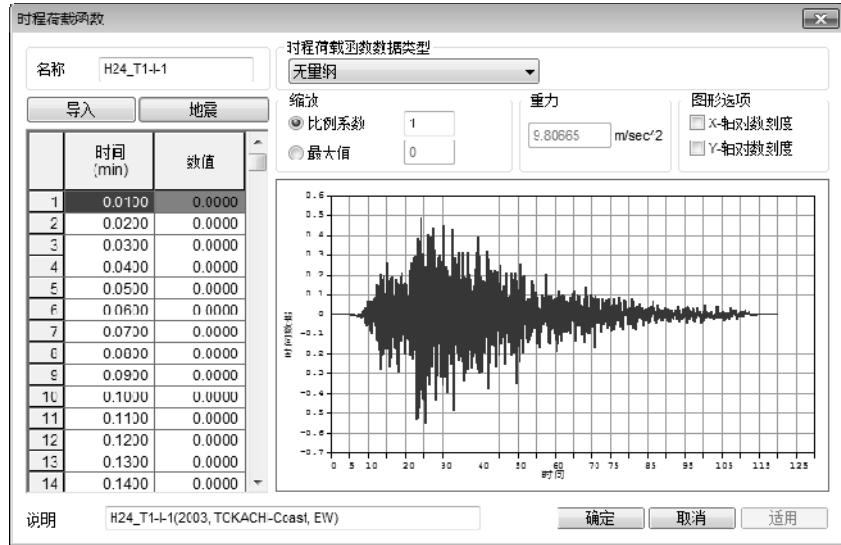


图 5-89 时变静力荷载的示例

### 5.4.16 节点（曲面）动力荷载

#### 概要

直接生成用于时程分析的时程荷载函数。可定义静力荷载（集中力或压力）的时程荷载函数。节点动力荷载的时程荷载函数数据类型应为“集中力”或“弯矩”；曲面动力荷载应为“无量纲”。另外，通过一般函数可定义随位置变化的线性/非线性分布形式的动力荷载。此功能通常可用于定义振动、打桩、爆破、列车移动荷载等。延迟时间可通过设置“到达时间”来模拟。



图 5-90 节点/曲面动力荷载设置对话框

#### 方法（节点动力荷载）

选择要施加荷载的节点，并设置方向。荷载大小为时程荷载函数（基于时间变化的荷载）乘以各荷载分量（比例系数）。

[目标类型]



图 5-91 节点动力荷载施加的位置

虽然在节点上定义荷载，但是，选择的目标还可以是几何形状（线、面等）以及自由面节点。选择线、面的情况，所选形状应当已经用于单元生成并且在所有节点上按照特定的方向/大小施加集中力。对于自由面节点的情况，选择单元自由面内的任意节点，可自动选择包含该节点并且特征角小于指定角度的单元上的所有自由面节点。

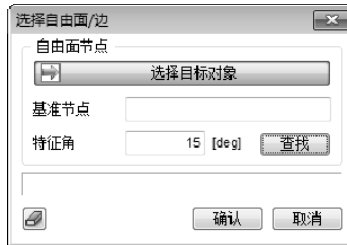


图 5-92 自由面节点选择对话框

[参考方向]



图 5-93 节点动力荷载的参考方向

可以根据各种不同的标准设置要施加的荷载的方向。默认以整体直角（圆柱）坐标系为标准输入，也可以选择几何形状（线/面）作为参考方向。选择线/面的情况下，所选的形状坐标系会显示出来，则荷载按照参考显示的坐标系设置；选择矢量时，通过定义 X, Y, Z 方向的矢量分量，指定荷载方向。


[分量]

输入基于定义方向的荷载大小。在荷载分量中，正值 (+) 为沿着设定方向，负值 (-) 为设定方向的反向。通过一般函数，可以基于整体坐标系定义随坐标值变化的荷载。这时，输入的数值乘以函数值后适用。

基于设置的方向输入荷载的比例系数。一般情况下，在时程荷载函数中会预先定义随时间变化的荷载值；当比例系数设置为 1 时，时程荷载函数中输入的值为实际荷载大小。

[时间依存（时程荷载函数）]

基于实际时间变化定义荷载变化。

选择  键，添加（选择）时程荷载函数，只能选择的时程荷载函数数据类型为“集中力”或“弯矩”。

方法（曲面动力荷载）




曲面动力荷载是在单元面或线上输入基于时间变化的分布荷载。可以用于二维单元或三维单元，并且输入方向可以基于任意坐标系的轴向、任意矢量方向或法线方向。

[分量]

基于设置的方向输入荷载大小的比例系数。可定义随位置变化的线性/非线性分布形式的动力荷载。在荷载分量中，正值 (+) 为沿着设定方向，负值 (-) 为设定方向的反向。并且，通过一般函数，可以基于整体坐标系定义坐标值增加的变化荷载。这时，输入的数值乘以函数值后适用。

[时间依存（时程荷载函数）]

基于实际时间变化定义荷载变化。

选择  键，添加（选择）时程荷载函数，只能选择的时程荷载函数数据类型为“无量纲”。

“无量纲”函数是用没有单位的无量纲函数。因此，直接输入压力荷载分量大小的比例系数时，如果值为 1，则荷载按实际大小输入。

### 5.4.17 荷载-质量变换

#### 概要

执行反应谱、时程分析等动力分析时，可以把预先定义的静力荷载转换成质量后反映到分析中。



图 5-94 荷载-质量转换对话框

#### 方法

[质量方向（整体坐标系）]

指定要转换的质量的方向分量。执行考虑地震影响的分析（反应谱分析、利用地震数据的时程分析）时，因为主要考虑横向响应的影响，通常选择 X、Y 方向，而忽略垂向质量分量。但是，对于打桩或楼板振动的分析，因为重力方向决定主振型，所以，Z 方向应被选择。这样，质量的方向，应按期望的分析类型设置。

[静荷载的转换类型]

选择质量转换的静力荷载组，分为集中力、梁荷载、压力。荷载转换为质量时，可以考虑比例系数，以及定义质量转换时使用的重力加速度值。

## 5.4.18 列车动力荷载表

### 概要

方便生成用于分析模型的列车动力荷载。列车动力荷载也可通过动力分析>工具>动力荷载数据生成器>列车动力荷载的方式生成。

生成的荷载可判断列车速度和节点间距，并自动按节点动力荷载加载到分析模型上。



图 5-95 列车动力荷载对话框

### 方法

[对象]: 选择列车动力荷载通过的线或节点，并选择开始和结束节点。

[名称]: 定义列车名称。

[列车类型]: 选择列车类型。提供 6 种基本数据库 (Mugunghwa 型号列车, 2 车厢柴油车, 韩国; Saemaetul 号列车, 8 车厢, 韩国; KTX, 20 车厢, 韩国; EL-18 标准型, 6 车厢, 韩国; EL-18 标准型, 8 车厢, 韩国; EL-18 标准型, 10 车厢, 韩国), 根据车轮数用户可直接输入轴距/轴荷载。

[车轮数]: 代表列车的车轮数量，与表格中对应的数量相同。

[列车速度]: 输入列车的速度。

[比例系数 (Scaling Factor)]: 输入列车动力荷载的比例系数。

[最大值 (Max.Value)]: 修改列车移动荷载，使最大荷载变为用户期望的值。

[时间 (Time)]: 输入开始施加列车动力荷载的时间。

[方向 (Direction)]: 定义列车动力荷载施加的方向。一般按重力方向施加，所以，用户可以在 3D 模型中按重力方向指定。

[轴距 (Length)]: 输入列车车轮间的距离。第一启动轮的情况，长度输入 0。

[轴荷载 (Force)]: 输入在列车车轮的轴荷载。作用荷载按集中力除以 2 的数值。

[添加 (Add)]: 在列表中添加一行。



[修改 (Modify) ]: 修改列表中的数值。

[删除 (Delete) ]: 删除列表中选择行。

[插入 (Insert) ]: 选择的行前插入一行。

[动力荷载组]: 选择或输入要注册到荷载组的名称。

## 5.5 助手及工具

助手及工具菜单是方便分析、建模及设计的工具箱。

助手菜单包括生成隧道形状及施工阶段的[隧道建模助手]、方便生成锚杆的[锚杆建模助手]。

工具菜单是由动力分析中执行反应谱分析的[地震波数据生成器]、计算爆破及列车振动荷载的[动力荷载数据生成器]、分析一维岩土响应的[一维自由场分析]组成。

### 5.5.1 隧道建模助手

#### 概要

用于生成简单的三维隧道模型。可以建立考虑原状地层和地表的三维隧道模型。

隧道建模助手由 4 部分组成（一般、喷射混凝土及锚杆、开挖、网格），只有在所有对话框中正确地输入数据才能生成隧道模型。因为一切操作到材料选择都可以一次进行，因此可以立即运行隧道建模助手，GTS NX 运行后无需任何单独的流程。助手中用户经常使用的数据按默认值设置，或者创建单独的隧道建模助手的存储文件，这在分析类似的隧道时，只修改现有模型的一部分参数，就可以很快地创建模型。

隧道建模助手在未建模的情况下可以使用。存在模型的情况下，不能运行隧道建模助手。



图 5-96 隧道建模助手

#### 1. 一般

##### 方法

设置隧道的数量和隧道的形状、以及开挖方法。

首先，决定是全部（全断面），还是整体形状的一半（右）。需要注意的是如果对隧道建模助手生成的模型进行修改，会导致无法使用指定的施工阶段和结果数据等。

[形状]

决定隧道断面的形状。支持圆形、三心圆、五心圆。根据指定的隧道形状，定义隧道变化的尺寸也会被改变。按照输入示意图，隧道的形状和输入值的关系就会显示在隧道建模助手对话框中，并可以此为参考输入参数。定义隧道形状方式类似几何>顶点&曲线>隧道截面。

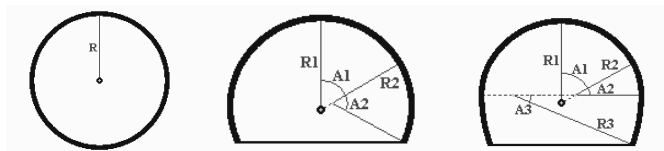


图 5-97 隧道截面类型（圆形、三心圆、五心圆）

[属性]

输入隧道周围岩土的材料属性。如果采用隧道建模助手生成隧道模型，隧道周围为基本的矩形区域岩土形状，岩土上部的地层和地表形状可根据选项添加到模型。基本模型是指隧道周边为矩形区域的岩土形状。可以用单一材料组成基本形状。材料及属性的定义与在“属性/坐标系/函数”菜单中定义的材料/属性相同。

[开挖方法]

决定隧道截面的开挖方法。在 GTS NX 中，除[全断面开挖]之外，还提供[台阶式开挖 1]、[台阶式开挖 2]、[环形开挖 1]、[环形开挖 2]、[CD 法]的开挖方式。

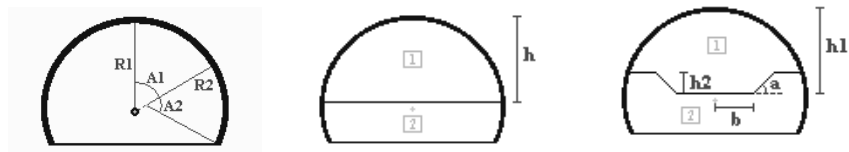


图 5-98 隧道开挖方式（全切面开挖、台阶式开挖 1、台阶式开挖 2）

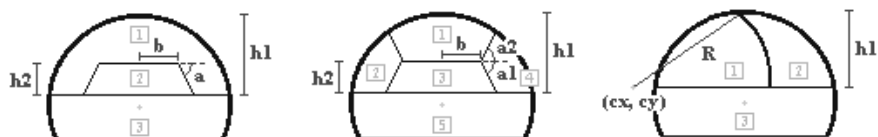


图 5-99 隧道开挖方式（环形开挖 1、环形开挖 2、CD 法）

2. 喷射混凝土及锚杆  
方法



图 5-100 喷射混凝土及锚杆

在喷射混凝土及锚杆对话框中，决定是否喷射混凝土和生成锚杆，以及设置数据信息和材料、布置形状等。

通过复选框，设置是否生成喷射混凝土、软喷混凝土或锚杆，并输入属性。用板单元定义喷射混凝土和软喷混凝土，锚杆用植入式桁架单元定义。

材料及属性与“属性/坐标系/函数”菜单中定义的材料/属性相同。喷射混凝土及锚杆的属性必须按结构属性定义。

[中隔壁喷射混凝土]

隧道的开挖方法为 CD 法时被激活，决定是否在中隔壁上设置喷射混凝土。

[锚杆]

输入数量、分割、长度、弧长（锚杆的间距）。

[交错布置]

决定在各施工阶段的锚杆是否按交错布置的选项。指定为+1 的情况下，在第一个施工阶段中，按指定的数量生成锚杆，在第二个施工阶段中增加一个锚杆，在第三个施工阶段中锚杆数量重新变为指定的数量。指定为-1 的情况下，在第一个施工阶段中，按指定的数量生成锚杆，在第二个施工阶段中减少一个锚杆，在第三个施工阶段中锚杆数量重新变为指定的数量。

[中隔壁锚杆锚杆]选项，在隧道的开挖方法为 CD 法时被激活，决定是否在中隔壁中设置锚杆。

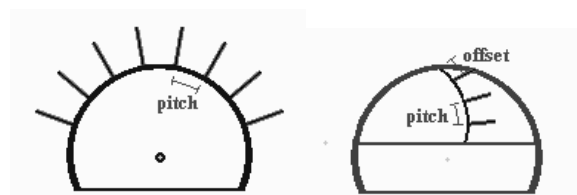


图 5-101 锚杆布置位置

通过[输入示意]或[绘图]，可以实时查看绘制的截面形状。

### 3. 开挖 方法



图 5-102 开挖设置的示例

按各施工阶段决定隧道的开挖。

设置开挖类型，按单向开挖还是双向开挖。双向开挖的情况下，程序会生成施工阶段直到隧道打通。这点之后，用户应需要直接建立施工阶段。

建立 2 个隧道的情况下，指定要先开始开挖的隧道。

[第一开挖隧道]

指定左、右隧道的开挖先后。

[开挖后喷锚阶段]

输入开挖后的喷射混凝土和锚杆的阶段间隔。例如，输入 1 的情况下，开挖后在下一个施工阶段中生成喷射混凝土或锚杆。生成软喷混凝土的情况下，软喷混凝土在基于输入的阶段中激活，并在下一个阶段中硬化。

[第二开挖隧道]

在双隧道的情况下，输入第二个隧道的开挖的起始阶段。例如，输入 2 的情况下，先开挖的隧道开始开挖后，另一个隧道在第 2 阶段后开始开挖。喷射混凝土和锚杆，将根据第一开挖阶段后定义的值生成。

[进尺]

按各施工阶段指定开挖长度。输入进尺后，就会自动计算并显示隧道总长度。各施工阶段的开挖长度按逗号或空格输入。重复的长度可以用次数@长度输入。例如，如果需要按 2、2、2、2、3、4 的进尺方式开挖，就可以输入“2,2,2,2,3,4”，或输入 4@2,3,4。

分割是指在各施工阶段中沿着开挖方向生成的单元个数。需要荷载释放的情况下，点击...键可以输入各阶段的荷载释放系数 LDF。

[锚杆位置]

输入各施工阶段锚杆的生成位置。可以在各阶段的开挖长度的中间位置自动生成锚杆，也可以用户直接输入间距和角度，调整锚杆的生成位置。

[间距]是根据隧道的开始部分和前一阶段锚杆的生成位置，表示锚杆生成的位置。

[角度]是指隧道的长度方向和锚杆形成的角度。

#### 4. 网格

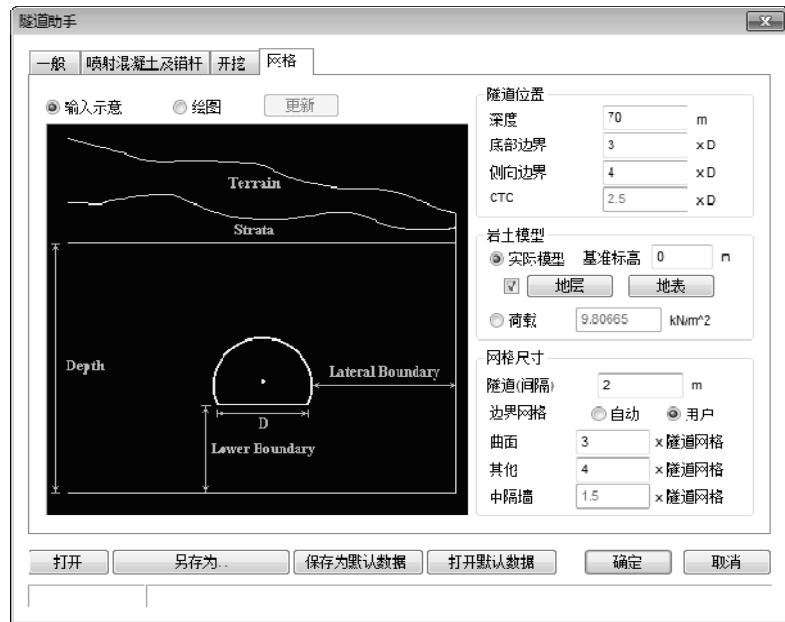


图 5-103 单元网格参数定义

#### 方法

输入网格、地层和地表面形状。

在隧道的位置，由输入模型的深度，在隧道底面到模型的下部边界的距离，到模型的左/右边界的距离，以及双隧道时隧道之间的间距确定。

各边界的距离按隧道的底面宽度的倍数确定。

[岩土模型]

建立上部地层。上部地层建模的方法有实际或荷载方法。

[实际]是按实际生成单元网格进行建模的方法；

[荷载]是不进行地表面形状的直接建模，而是等效为压力荷载的方法处理。

地层或地表形状的位置按输入的高度加上[基准标高]确定。



地层是位于隧道的上方的部分，多层地层可通过点击[新建]按钮添加。各地层的材料及属性与“属性/坐标系/函数”菜单中定义的材料/属性相同。

(1) X

按照模型的宽度方向输入地层的形状。在 X 中输入宽度方向坐标值。从正面查看隧道时，左侧下端的角点为原点。

(2) 值

输入各 X 坐标对应的高度值。如果输入 X 和值，就会在右侧上绘制输入的形状。

(3) Z

按照隧道的方向输入地层的形状。在 Z 中输入隧道的长度方向坐标。从正面中看到隧道时，左侧下端的角点为原点。

(4) 偏移

输入各 Z 坐标对应的高度值。高度值为相对于已经输入的基准值的变化量。

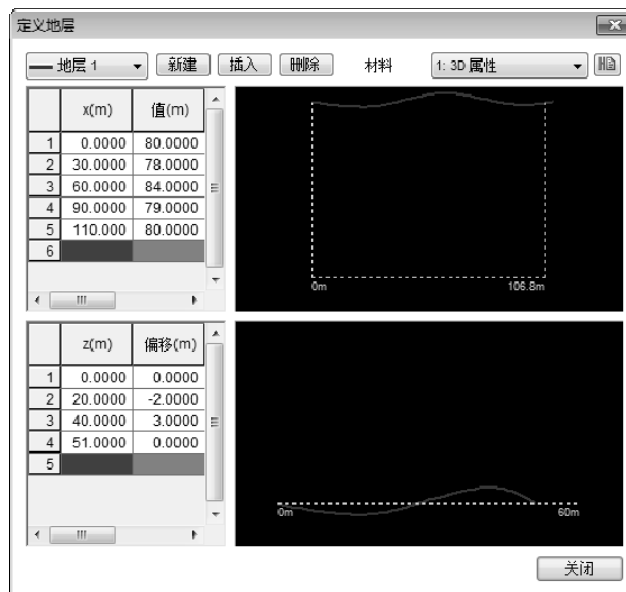


图 5-104 地层定义

[地表]

建立地表面。地表面所采用的虚拟栅格与栅格面时相同的，输入的高度为栅格的交点。地表高度可以通过导入文本文件生成的，也可以直接输入高度。

地形的材料及属性与“属性/坐标系/函数”菜单中定义的材料/属性相同。

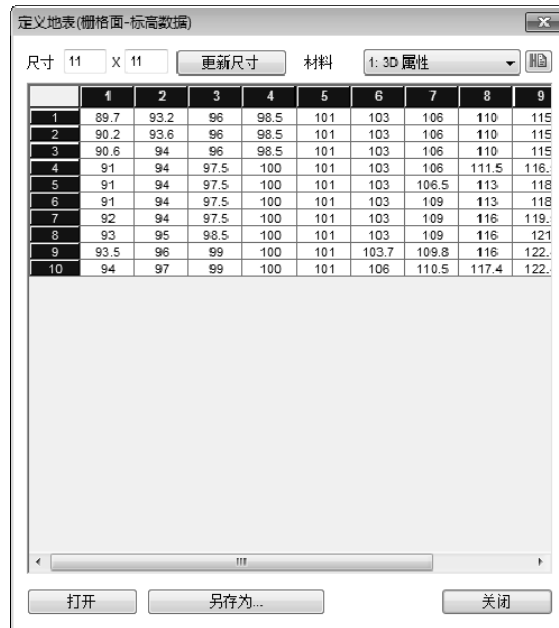


图 5-105 地表定义

[网格尺寸]

输入生成隧道的网格大小。[隧道（间隔）]为用户直接输入隧道网格大小。边界网格部分按与隧道部分的倍数生成的网格。自动设置的情况，程序会自动设置边界网格的大小。

**打开**

导入保存的隧道建模助手的存储文件 (\*.wzd)。

**另存为**

用其它隧道建模助手的存储文件名 (\*.wzd) 保存当前输入的值。

**保存为默认数据**

指定当前输入的值作为隧道建模助手的默认值。

**打开默认数据**

清除当前隧道建模助手输入的值，按隧道建模助手的默认数据重新设置。

## 5.5.2 锚杆建模助手

**概要**

用于能够轻松生成简单的锚杆。



图 5-106 锚杆建模助手

### 方法

用户直接输入开始位置（锚的端部节点位置）或点击工作窗口指定。

锚的布置方向指定方法有[角度，长度]、[相对值 dx， dy]、[绝对 x， y]。

[长度， 角度]：从前一阶段中输入的点开始输入长度和角度。这时， 角度指以工作平面的 X 轴的逆时针方向的旋转角。

[相对值 dx， dy]：按工作平面的二维坐标，相对于前一阶段中点的位置，输入距离。

[绝对 x， y]：在工作平面输入二维绝对坐标值。

锚的长度分为未灌浆长度和灌浆长度。未灌浆长度通常按播种方法定义“分割数量”为 1，生成 1 个单元；灌浆长度按播种方法“单元长度”为 1，生成单位长度的单元。

[预应力]指锚的初始预应力。(+) 值指拉伸，(-) 值指压缩。

勾选[先张法类型]选项的情况，在荷载被激活的施工阶段中，输入的轴力不发生损失。

生成的预应力可以按用户期望的名称注册到指定荷载组。

### 网格组

在期望的网格组中注册生成的锚杆。并且，用户可以为这个网格组命名。

## 5.5.3 UMD

### 概要

对用梁单元建模的构件进行设计的功能。与 midas UMD 联动可以执行构件的设计。

为了执行衬砌设计助手必须设置 midas UMD。



图 5-107 UMD 设计对话框

### 方法

选择进行构件设计的梁单元后指定分析工况。

按照分析的施工阶段，在各阶段结果中能够选择特定阶段。可以设计 RC/梁、RC/墙。根据所选的选项，执行 midas UMD，构件力将自动地输入在 UMD 中。

## 5.5.4 地震波数据生成器

### 概要

利用 GTS NX 中内置的地震波数据库，生成地震加速度、地震反应谱及设计反应谱。

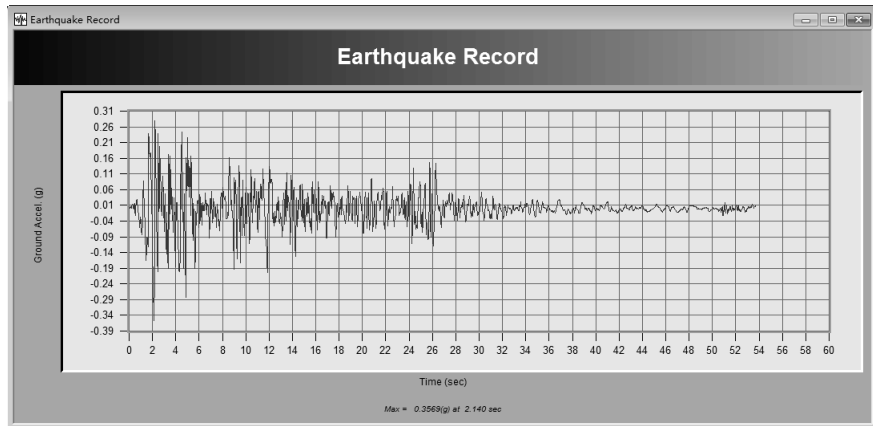


图 5-108 地震波数据生成器

### 方法

#### File (文件)

以各种形式保存 SGS 生成的数据，打印或导入已有数据。

#### Generate (生成)

利用内置于 SGS 中的地震波的数据库，生成地震加速度、地震反应谱及设计反应谱。

#### [Earthquake Record (地震记录)]

用图形显示地震波数据。

从“Earthquake（地震）”列表中选择地震波，输入振幅和时间刻度后点击[OK（确认）]键。

生成的数据全部是无量纲的加速度（Normalized Acceleration），数据的时间间隔分别为：北美的地震波为 0.02 秒、日本的地震波为 0.01 秒。其它地震波数据，可通过点击[Import（导入）]键，从“\*.dbs（\*.dbs 地震波数据生成器的数据库）”文件中导入数据。

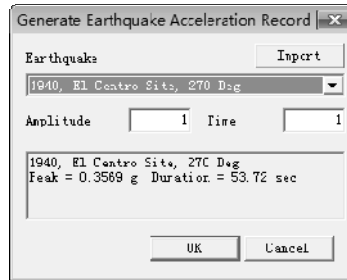


图 5-109 地震记录数据库

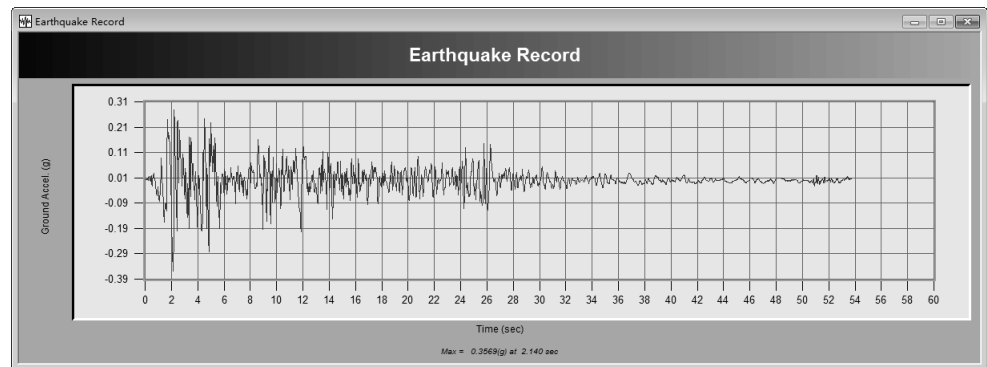


图 5-110 地震波数据生成的示例

### [Earthquake Response Spectra（地震反应谱）]

根据内置的数据库或用户直接生成的地震波数据，以图形的形式显示地震反应谱。

（1）从 Earthquake（地震）列表中选择地震波，输入振幅和时间刻度。其它地震波数据，可通过点击[Import（导入）]按钮，从“\*.dbs（\*.dbs 地震波数据生成器的数据库）”文件中导入数据。

（2）输入 Damping Ratio（阻尼比）。如果想同时输出对应多个阻尼比的图表，就点击[Add（添加）]按钮添加。

（3）在 Output Period（输出周期）中输入要输出的图形的周期范围和间距。

（4）Spectrum type（谱类型）：选择谱的类型。

（5）如果勾选 x-axis log scale（x 轴对数刻度）选项，谱的 x 轴就以对数刻度表示。

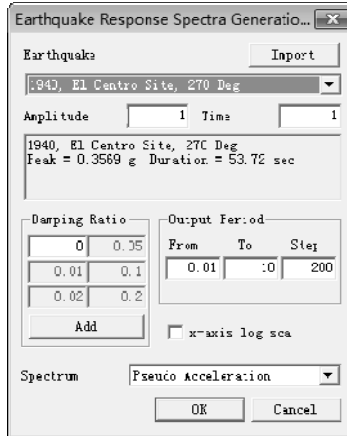


图 5-111 地震反应谱数据库

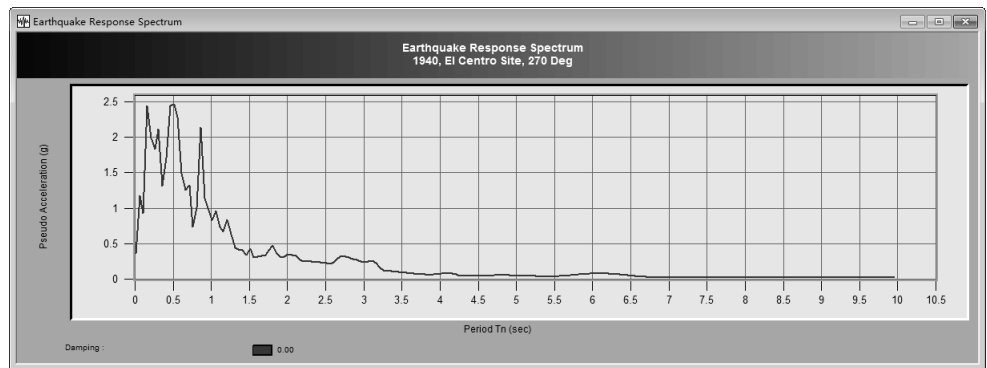


图 5-112 地震反应谱生成的示例

### [Design Response Spectra (设计反应谱)]

生成设计反应谱后，用图形显示。

在对话框中输入生成谱时所需的数据后，输入谱周期的范围，点击[OK]按钮显示图形。

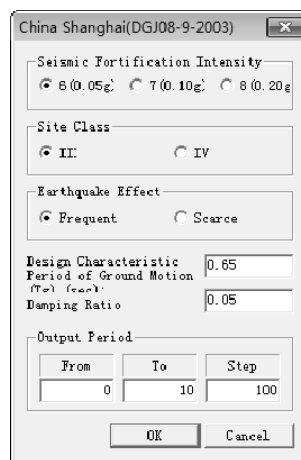


图 5-113 设计反应谱对话框

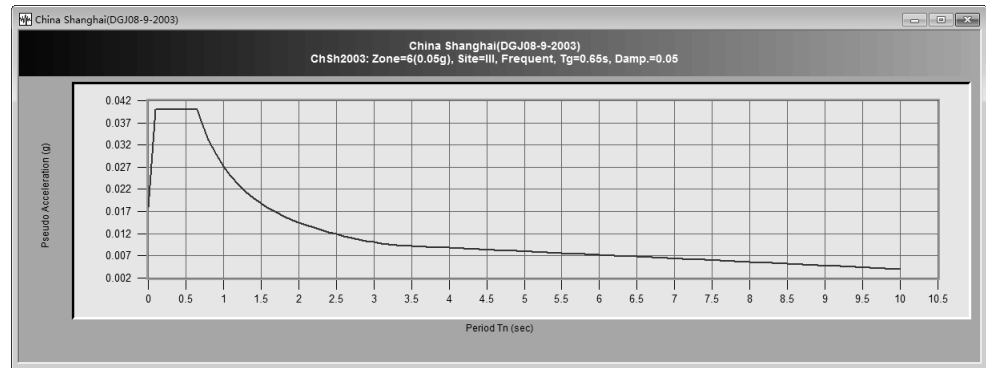


图 5-114 设计反应谱生成的示例

**Option (选项)**

设置图形的各选项。可以用对数刻度或刻度线显示图形的 x 轴和 y 轴。可以修改图形线的粗细，也可以修改标题名。

**View (查看)**

更改工具栏及状态栏的显示/隐藏。并且可以修改图形的缩放功能以及图形的时域或频域。

[Zoom Out All (缩放全部)]

把缩放的显示状态恢复到原状态。

如果想放大图表区域，用鼠标的左键拖动并选择要放大的区域即可。点击鼠标的右键也能把显示状态恢复到原状态。

[Time<—>Frequency (时域<—>频域)]

把图形的 X 轴由时域转换为频域，反之也可以。

**5.5.5 动力荷载数据生成器**

**概要**

以建议的爆破荷载公式生成爆破荷载函数，以及根据铁路荷载数据库，创建列车荷载函数。

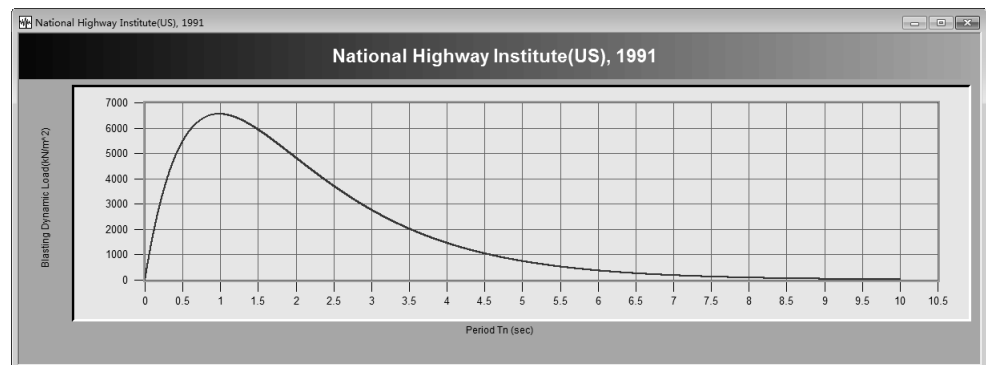


图 5-115 动力荷载数据生成器

**方法**

**File (文件)**

以各种形式保存 DGS 生成的数据，或导入已有数据

[Unit System (单位系统)]

指定动力荷载数据的力和长度单位。在生成动力荷载数据前必须要指定单位系统。

**Dynamic Data Generate (生成动力荷载数据)**

**1. Blasting Dynamic load (爆破动力荷载)**

根据各机构的建议，选择爆破动力荷载公式类型。

各机构提出的公式和使用的单位如下表。

表 5-6 爆破动力荷载相关公式

建议机构	公式	单位
National Highway Institute (US), 1991	$P_D = \frac{4.18 \times 10^{-7} \times S \times V^2}{1 + 0.8 \times S}$	$P_D$ : kbar $V$ : ft/sec $S$ : g/cm <sup>3</sup>
International Society of Explosive Engineers, 2000	$P_D = 2.5 \times 10^{-6} \times S \times V^2$	$P_D$ : kbar $V$ : m/sec $S$ : g/cm <sup>3</sup>
Johannson & Persson, 1973	$P_D = 2.1 \times (0.36 + S) \times V^2$	$P_D$ : kbar $V$ : km/sec $S$ : g/cm <sup>3</sup>
Jones & Hino, 1974	$P_D = 0.000424 \times V^2 \times S \times (1 - 0.543 \times S + 0.193 \times S^2)$	$P_D$ : g/cm <sup>2</sup> $V$ : cm/sec $S$ : g/cm <sup>3</sup>
Liu & Tidman, 1995	$P_D = 1.62 \times (S \times V^2) \times \left( \frac{D \times C}{S \times V} \right)^{0.25}$	$P_D$ : kbar $V$ : km/sec $S$ : g/cm <sup>3</sup>
Atlas powder company, 1987	$P_D = 2.325 \times 10^{-7} \times S \times V^2$	$P_D$ : kbar $V$ : ft/sec $S$ : g/cm <sup>3</sup>

从公式  $P_B = \left( \frac{dc}{dh} \right)^2 \times P_D$  计算爆破压力来考虑解耦的影响。根据是否考虑爆破孔周长的影响，可按  $P' = P_B \times W \times 2\pi \times \frac{dh}{L}$  或  $P' = P_B \times W$  计算。

最终计算的爆破函数可由 Starfield 和 Pugliese (1968) 提出的考虑窗函数 (Window Function) 的公式计算。

$$P(t) = 4 \times P' \times \left\{ \exp\left( \frac{-B \times t}{\sqrt{2}} \right) \right\} - \exp(-\sqrt{2} \times B \times t)$$



### 参数

[爆破速度 (  $V$  )]: 输入爆破速度。根据提出的公式改变固定的单位。

[炸药密度 (  $S$  )]: 输入炸药的密度。单位固定为[ g/cm<sup>3</sup> ]。

[炸药的直径 (  $d_c$  )]: 输入爆炸直径。单位固定为[mm]。

[穿孔径 (  $d_h$  )]: 输入钻孔直径。单位固定为[mm]。

[每次延迟的最大装药量 (  $W$  )]: 输入每次延迟的最大装药量。单位固定为[kg]。

[荷载系数 (  $B$  )]: 输入荷载系数。

[岩石声速 (  $C$  )]: 输入岩石声速。只在“Liu & Tidman, 1995”公式中考虑, 单位固定为[km/sec]。

[岩石密度 (  $D$  )]: 输入岩石密度。只在“Liu & Tidman, 1995”公式中考虑, 单位固定为[ g/cm<sup>3</sup> ]。

### 时间

[结束时间]: 输入生成爆破荷载的最终时间。单位固定为[sec]。

[时间增量]: 输入生成爆破荷载的时间增量。单位固定为[sec]。

### 图表选项

[X-轴对数刻度]: 按对数刻度输出 X 轴。

[Y-轴对数刻度]: 按对数刻度输出 Y 轴。

### 等效转换爆破荷载

考虑等效爆破荷载 (勾选的情况下, 参考上面内容)。

### 爆破孔周长 (L)

输入爆破孔周长。单位固定为[mm]。

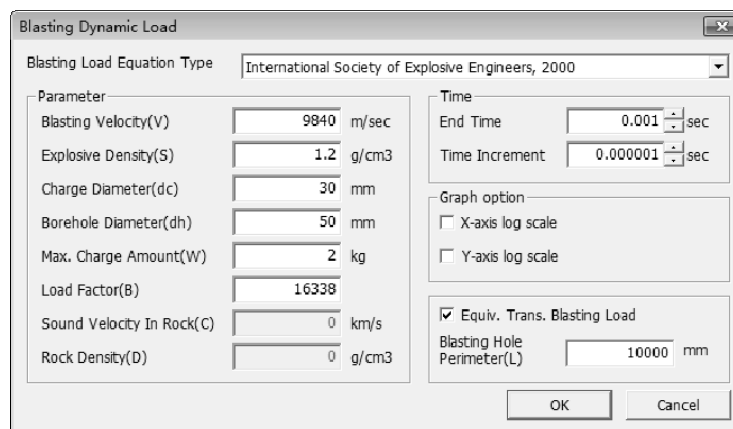


图 5-116 爆破动力荷载生成器

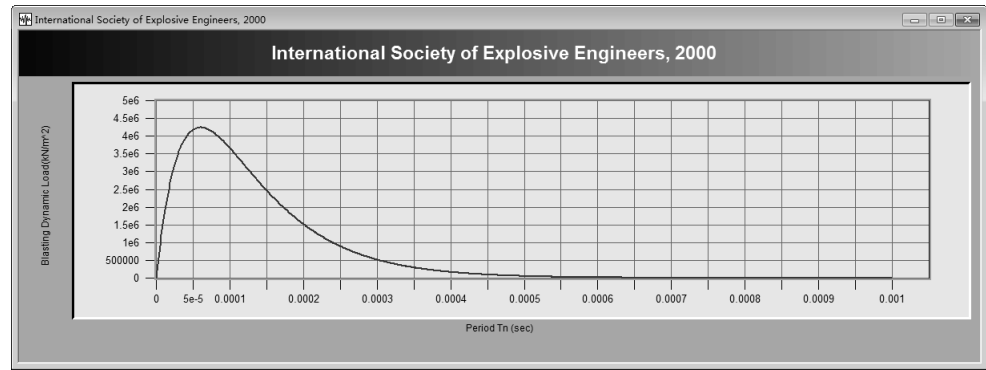


图 5-117 爆破动力荷载的示例

## 2. Train Dynamic Load (列车动力荷载)

[名称 (Name)]: 定义名称。

[列车类型 (Train Type)]: 选择列车的类型, 可用户自定义。提供 6 个数据库 (Mugunghwa 号列车, 2 车厢柴油车, 韩国; Saemaoul 号列车, 8 车厢, 韩国; KTX, 20 车厢, 韩国; EL-18 标准型, 6 车厢, 韩国; EL-18 标准型, 8 车厢, 韩国; EL-18 标准型, 10 车厢, 韩国)。用户可根据车轮数直接输入轴间距和轴荷载。

[车轮数 (Number of Wheels)]: 代表列车的车轮数量, 与表格中对应的数量相同。

[列车速度 (Train Velocity)]: 输入列车的速度。

[单元大小 (Element Size)]: 输入列车经过的单元的大小。单位固定为[m]。根据输入的单元大小及移动速度, 可在绘制影响线函数时, 计算到达时间。列车移动荷载的情况, 在列车到达前没有荷载, 列车到达时在节点施加荷载, 之后荷载重新变为 0 的三角形荷载函数的形态。

表 5-7 列车移动单元大小

编号	时间	荷载系数
t0	0	0
t1	0.03	1
t2	0.06	0

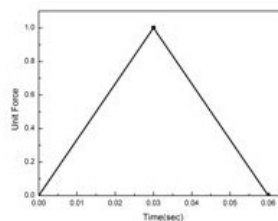


图 5-118 列车荷载单元的示例

[比例系数 (Scaling Factor)]: 输入列车动力荷载的比例系数。

[最大值 (Max.Value)]: 修改列车移动荷载, 使最大荷载变为用户期望的值。

[时间 (Time)]: 输入开始施加列车动力荷载的时间。

[方向 (Direction)]: 定义列车动力荷载施加的方向。一般按重力方向施加, 所以, 用户可以在三维模型中按重力方向指定。

[轴间距 (Length)]: 输入列车车轮间的距离。第 1 启动轮的情况下, 长度输入 0。

[轴荷载 (Force)]: 输入在列车车轮的轴荷载。作用荷载按集中力除以 2 的数值。

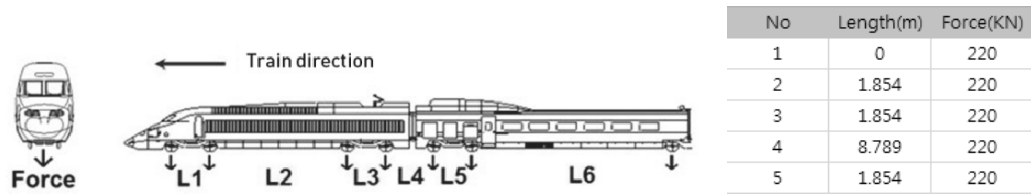


图 5-119 列车参数说明

[添加 (Add)]: 在列表中添加一行。

[修改 (Modify)]: 修改列表中的数值。

[删除 (Delete)]: 删除列表中选择行。

[插入 (Insert)]: 选择的行前插入一行。

[导入 (Import)]: 导入 MS-EXCEL 形式的列车动荷载。只有在用户定义的情况下才能被激活。

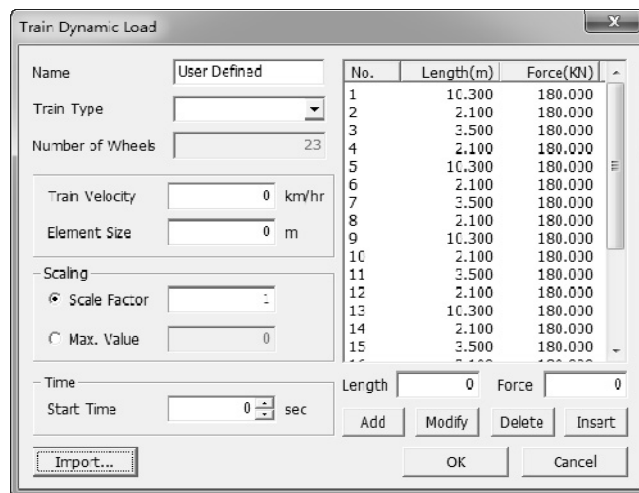


图 5-120 列车动力荷载定义对话框

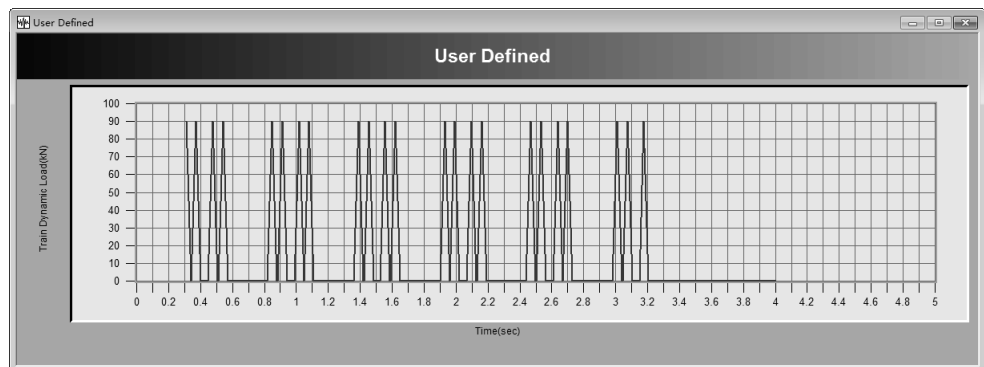
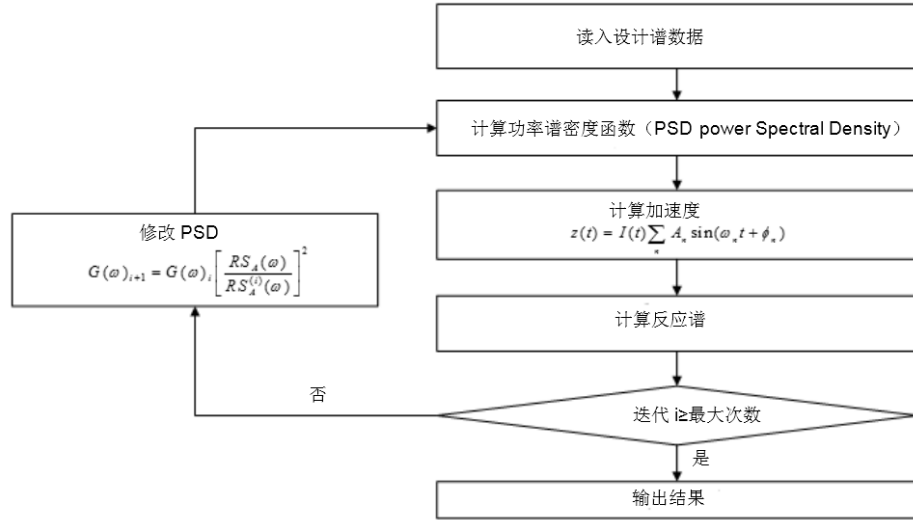


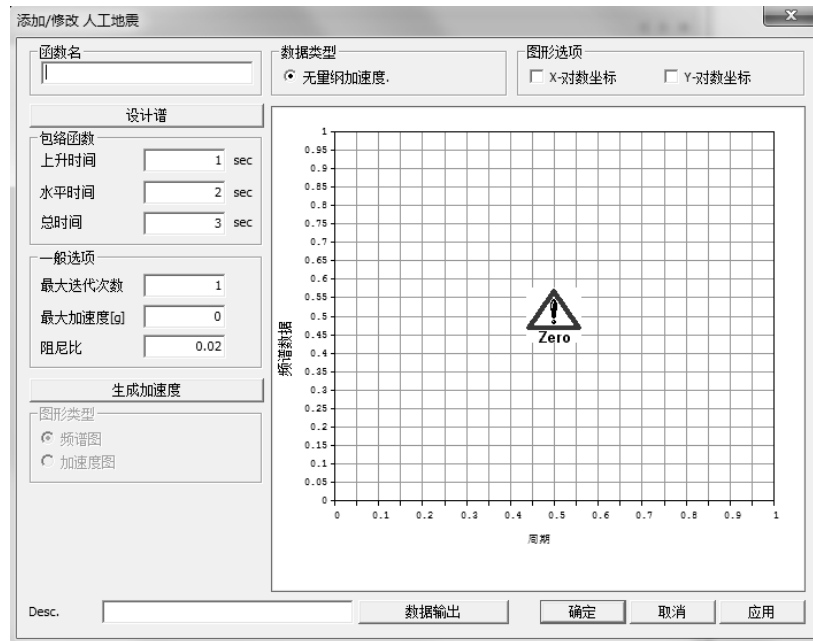
图 5-121 列车动力荷载的示例

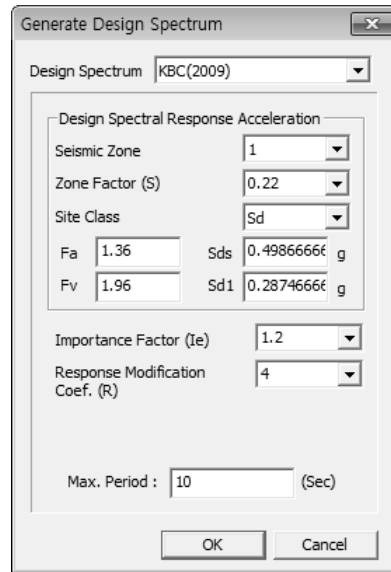
### 5.5.6 人工地震波

可以使用 GTSNX 内置的反应谱数据库，转换数据。其计算过程如下。



[ 人工地震波生成流程图 ]





**Artificial Earthquake** : 使用 AGS 内置的反应谱数据库，生成人工地震波。

**设计谱** : 可以使用程序内置的设计谱。设计用谱的类型如下。KBC(2009), KBC(2005), Korea(Arch,2000), Korea(Arch,1992), Korea(Bridge), IBC2000(ASCE7-98), UBC(1997), UBC88-94, UBC(1995), Eurocode8(2004), Eurocode8(1996) Design/Elastic, China(GB50111-2006), China(GB50011-2001), China Shanghai(DGJ08-9-2003), China(JTJ004-89), China(JTG/T B02-01-2008), China(GBJ11-87), Japan(Arch,2000), Japan(Bridge,2002), Taiwan(2006), TaiwanBrg(89) Horizontal/Vertical, IS1893(2002)

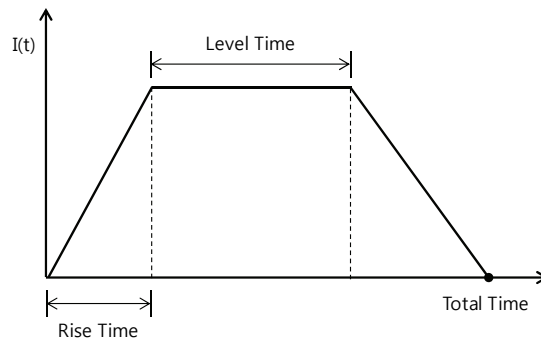
包络函数 (Envelop function) : 按下式计算对应于反应谱的时程加速度。

$$z(t) = I(t) \sum_{n=1}^N A_n \cos(\omega_n t + \phi_n)$$

其中,  $\omega_n$ = 频率,  $A_n$ = 振幅,  $\phi_n$ = 相位角,  $I(t)$ =包络函数。

包络函数是为模拟实际地震的瞬间特性, 乘以稳态运动的函数。可以分为梯型、复合型、指数型。若没有包络函数, 时程加速度将变成开始到结束为特定大小的形状。

AGS 中支持梯型包络函数。梯型包络函数的 Rise Time, Level Time, Total Time 定义如下。



生成选项 :

**最大迭代**：使人工地震波反应谱结果与输入设计谱一致，所输入的最大迭代次数。将执行人工地震波生成流程图中的'修正谱密度函数 (PSD)'过程。

**最大加速度**：定义人工地震波的最大地震加速度。

**阻尼比**：从人工地震波计算反应谱时，适用的阻尼比。

**生成加速度**：从反应谱数据转换加速度数据。

**谱图形**：以谱数据为基准，查看加速度数据。

**加速度图形**：以加速度为基准，查看图形。

### 5.5.7 一维自由场分析

#### 概要

一维自由场分析也叫原场地响应分析 (Site Response Analysis)，是用于开挖或施工前的原场地响应分析的程序。

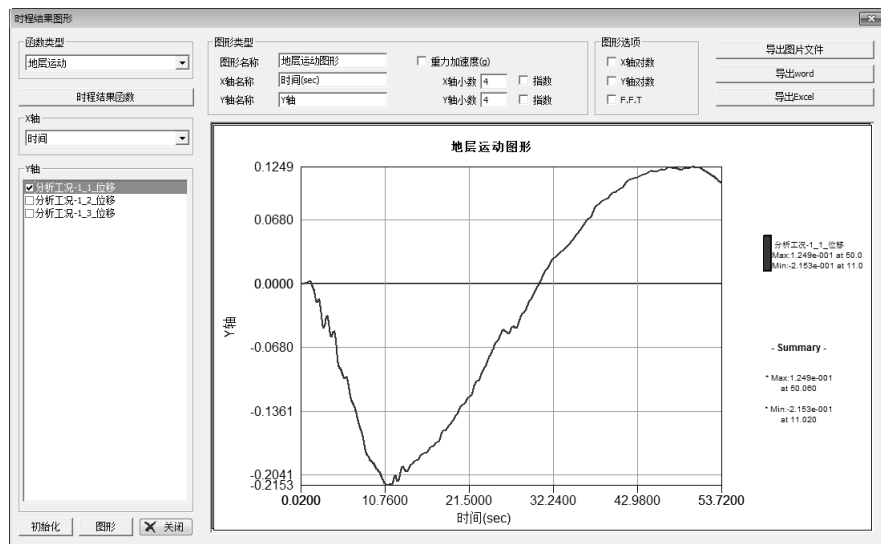


图 5-122 一维自由场分析结果的示例

#### 方法

首先设置项目后，在模型中输入地层信息和材料属性、动力特性函数、地面加速度函数。之后创建分析工况，并执行分析。

#### 文件

设置项目的基本信息。分析结果将受到项目设置的影响，所以在执行分析前要正确地设置项目。在启动新项目之前最好预先设置项目，但在建模过程中也可以改变设置。

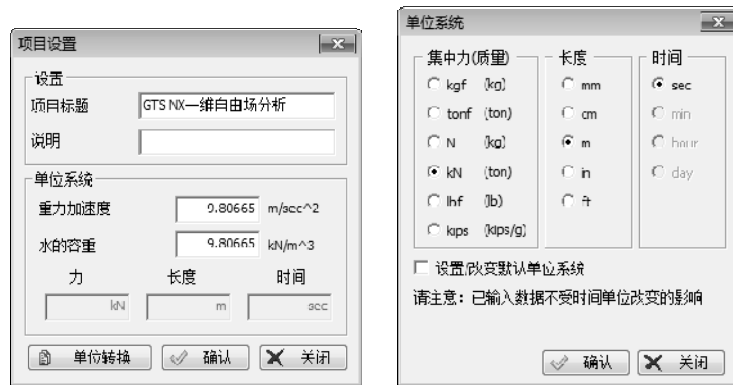


图 5-123 项目设置及变换单位系统

设置项目中要应用的单位系统。如果点击[单位转换]按钮就可以设置不同的单位系统。时间单位设置不可改变。

### 编辑

使用撤销（Undo）命令恢复到之前的状态，或使用重做（Redo）的命令执行前的状态。

## 1. 模型：地层材料

### 概要

建立自由场分析的地层模型。定义各地层的材料属性数据，生成地层属性。



图 5-125 地层建模

### 方法

在“逐层输入地层材料数据”中输入地层的材料属性值。（地层个数最多为 50 个）

[名称]: 输入地层的名称。

[编号]: 从 1 开始连续自动分配固定编号。

[深度 (m)]: 输入地层的深度。深度值应大于 0 并且应累积定义。输入深度后将自动计算地层的厚度。

[容重 (m)]: 输入地层的容重。

[ $V_s$  (m/sec)]: 输入地层的剪切波速度。

[ $G_0$  (kN/m<sup>2</sup>)]: 输入最大剪切模量。

[ $H_0$ ]: 输入岩地层的初始阻尼比。

[动力特性曲线函数]

可以选择考虑地层的非线性和非弹性响应的剪切模量和阻尼比的函数（剪切应变，可参考动力特性函数）。

[输出运动类型]

- (1) 露头: 指定以露头岩形式输出分析结果的地层。
- (2) 内部: 分析完了后, 适用于在地层内反应的形式输出分析结果的地层。

## 2. 模型: 动力特性曲线函数

### 概要

为考虑岩土的非线性及非弹性行为的效果, 点击  定义基于剪切应变的剪切模量和阻尼比的函数。

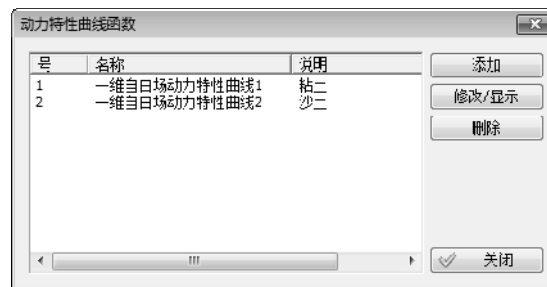


图 5-126 动力特性曲线函数

### 添加/修改/删除

添加新的动力特性曲线函数, 或者对现有输入的数据进行修改或删除。



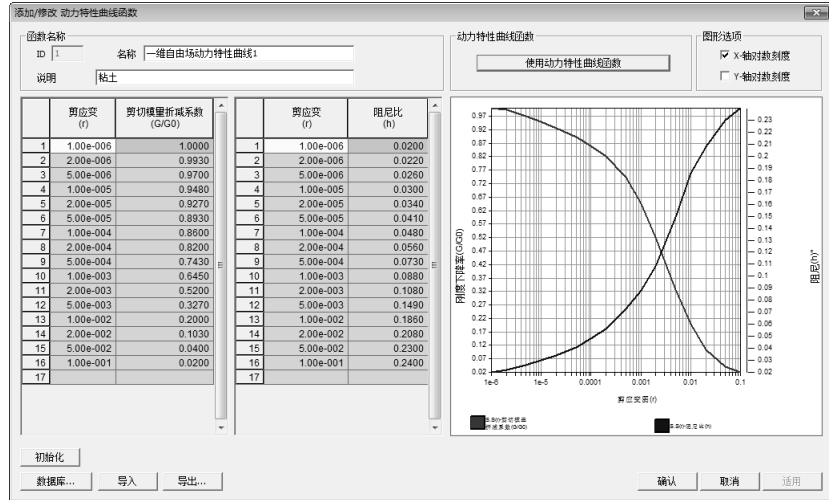


图 5-127 动力特性曲线函数的示例

**函数名称**

[ID]: 定义函数编号。

[名称]: 输入函数名称。

[说明]: 简单描述说明剪切应变函数。

**初始化**

对输入的数据进行初始化。

**数据库**

导入基于当前研究已有数据库。



图 5-128 动力特性曲线函数数据库

**添加/修改动力特性曲线数据库**

一维自由场分析 (FFA) 提供的数据库如下表。

表 5-8 动力特性曲线数据库说明

剪切模量折减曲线	粘土 - PI=5-10 (Sun et al.)	粘土 - PI=10-20 (Sun et al.)	粘土 - PI=20-40 (Sun et al.)	粘土 - PI=40-80 (Sun et al.)	阻尼比曲线	粘土 - Lower Bound (Sun et al.)	粘土 - Average (Sun et al.)	粘土 - Upper Bound (Sun et al.)	粘土 (Idriss 1990)

粘土 - PI=80+ (Sun et al.)	碎石 (Seed et al.)
粘土 (Seed and Sun 1989)	线性
碎石 (Seed et al.)	岩石
线性	沙土 (Idriss)
岩石	沙土 (Idriss 1990)
岩石 (Idriss)	沙土 (Seed & Idriss) - Lower Bound
沙土 (Seed & Idriss) - 下限	沙土 (Seed & Idriss) - Average
沙土 (Seed & Idriss) - 平均值	沙土 (Seed & Idriss) - Upper Bound
沙土 (Seed & Idriss) - 上限	Vucetic - Dobry
沙土 (Seed and Idriss 1970)	-
Vucetic - Dobry	

### 导入

导入已保存的数据文件。

### 导出

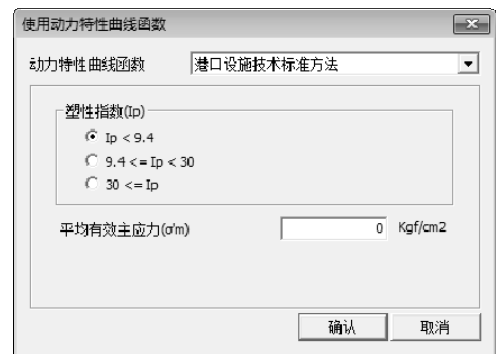
把输入的数据以文件的形式保存。

### 使用动力特性曲线函数

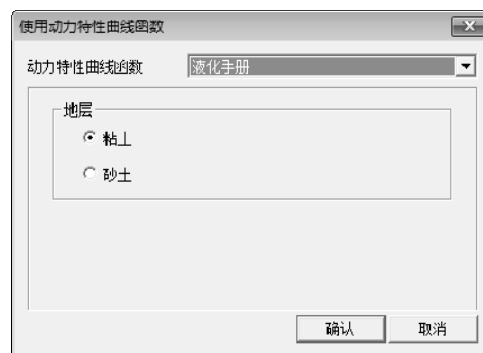
基于现有的各种数据中定义动力特性曲线。下图对话框为日本土木工程研究所、港口设施技术标准、asuda 法、液化手册、日本建筑标准法 1457 号、Yamada 法。



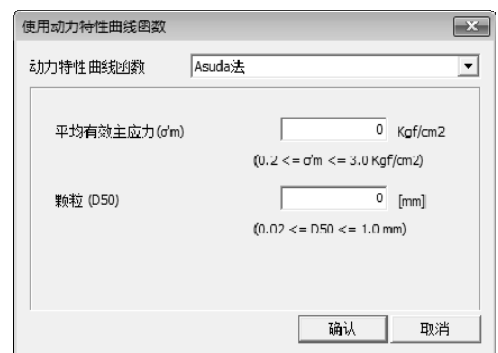
▶日本土木工程研究所



▶▶港口设施技术标准手册



▶Asuda 法



▶▶液化手册

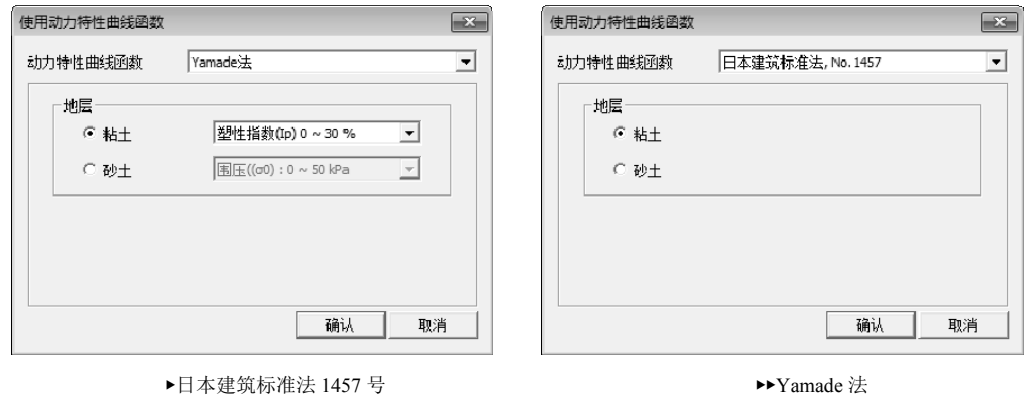


图 5-129 动力特性曲线函数参数定义对话框

### 3. 模型：地面加速度

#### 概要

输入时变荷载，对添加的地层进行地震分析。



图 5-130 地面加速度函数添加对话框

#### 添加/修改/删除加速度

添加加速度数据或对现有的数据进行查看、修改或删除。

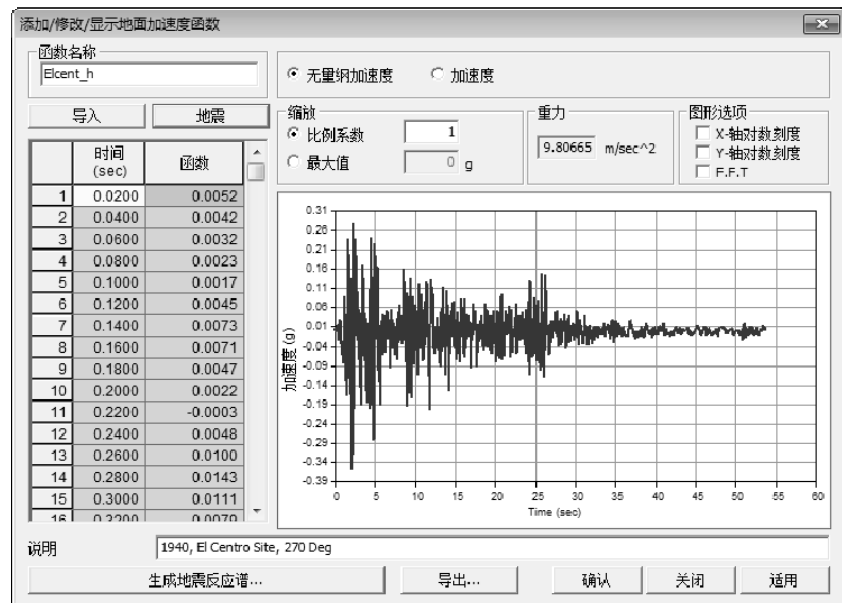


图 5-131 地面加速度函数定义的示例

### 函数名称

输入函数名称。未预先输入的情况下，点击按钮导入相应的函数。

### 时程荷载函数数据类型

[无量纲加速度]：谱数据类型为谱加速度除以重力加速度，不能用于其它类型。

[加速度]：时间相关的加速度谱。

### 缩放

[比例系数]：输入地面加速度函数的增减系数。

[最大值]：用于将全部数据按期望的最大值调整。

### 重力

输入重力加速度。

### 图表选项

指定图表是否按照各轴方向用对数尺度（对数刻度）显示。

[X-轴对数刻度]

指定图形是否按照 X 轴方向按对数刻度显示。

[Y-轴对数刻度]

指定图形是否按照 Y 轴方向用对数刻度显示。

[F.F.T]

指定图形是否根据傅里叶变换式来变换。

### 说明

输入地面加速度函数的简单说明。生成[地震波]的情况下，将按生成的地震波，显示最大加速度、时间等。

### 导出

将地面加速度用文本 (\*.txt) 文件导出。

## 4. 生成地震反应谱

### 概要

根据内置的数据库或者从用户直接定义的地震波数据，计算并显示地震反应谱的图形。并输入阻尼比。如果想同时输出多个阻尼比对应的图表，点击[添加]按钮。输入的周期范围和图形输出结果阶段的间距。

选择谱类型。如果勾选 X-轴对数刻度、Y-轴对数刻度，谱的 X 轴、Y 轴就将按对数刻度显示。

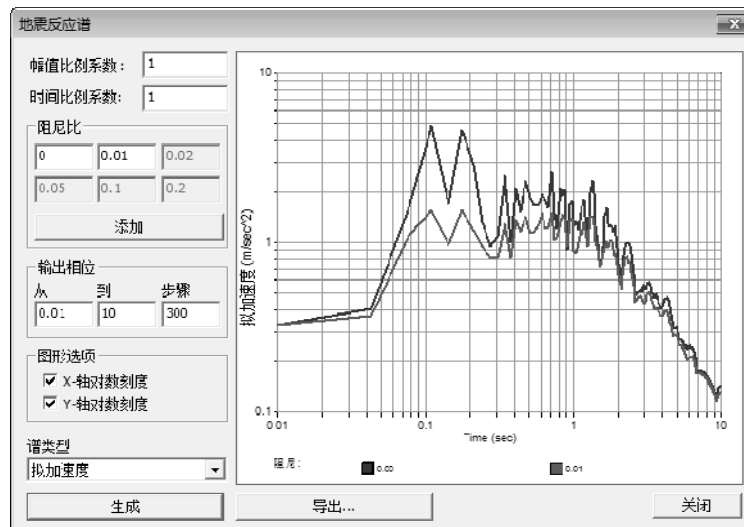


图 5-132 地震反应谱生成的示例

考虑到方便于用户，在 FFA 提供了如下三种时程荷载的输入方法：（1）另存为文件和导入常使用的时程荷载；（2）从数据库中调用时程荷载数据；（3）用户直接输入。

对地震荷载的输入只支持由时程加速度除以重力加速度得到的无量纲值。

（1）另存为文件和导入常使用的时程荷载

[导入]

从已经创建的时程荷载数据中导入已有数据，数据格式为“ .sgs”或“.thd”扩展的文件，文件生成的格式如下。

表 5-9 'fn.sgs'文件格式

*SGS	该文件为 GTS NX 中自动生成地震数据的模块“地震数据生成器”的数据格式。
*TITLE, Elcentro 1940, N-S	-
Component	-
*X-AXIS, Second	-
*Y-AXIS, Normalized Acceleration	-
*UNIT&TYPE, GRAV, ACCEL	-
*FLAGS, 0, 0	-
*DATA	-
1.00000E-010, 3.50102E-001	-
5.00000E-002, 3.82861E-001	-
1.00000E-001, 5.08226E-001	-
1.50000E-001, 5.17459E-001	-
:	-

表 5-10 'fn.thd' 文件的格式-用户输入

<b>选择事项</b>	** 注释符号：可以在任何地方输入
-	*UNIT, M, N - 长度：可以用 MM, CM, M, INCH, FEET, GRAV
-	*荷载：KG, TON, KN, LBF, KIP
-	*类型：ACCEL, 用于加速度，集中力，弯矩
<b>必备事项</b>	*数据
-	X1, Y1 (X: 时间, Y: 时间函数)
-	X2, Y2
-	X3, Y3
-	:

（2）从数据库中调用时程荷载数据

[地震波]

从数据库中读取各种地震数据，生成时程荷载。数据库中共有 32 种类型的地震加速度。



图 5-133 生成地震加速度记录对话框

(3) 用户直接输入

在该对话框的左侧栏中直接输入时间和时间相关的荷载值构成时程荷载。

5. 分析

概要

建立分析工况。

新建一个分析工况，或修改、复制、删除已生成的分析工况。分析工况建立窗口如下。



图 5-134 分析工况设置窗口

### 一般

[名称]: 输入分析模型名称。

[说明]: 输入分析模型的说明。

### 一般设置

[地层材料组]: 选择用于分析的已建地层。

[基岩层号]: 选择对应于基岩的岩层编号。

### 输入运动控制

[出露地表 (2E)]: 设置作为露头岩状态的地面加速度。

[内部地层 (E+F)]: 设置地面加速度作为地层内部响应。

[层号]: 选择地震波输入地层的控制点。

[地面加速度函数]: 选择输入的地震加速度时程荷载。

### 分析

[截止频率]: 设置分析频率的最大频率范围。

[频率间距 (为传递函数)]: 设置传递函数分析的计算频率间距。

[最大迭代数量]: 计算等效线性属性时, 输入最大迭代次数。

[容差]: 输入剪切模量和阻尼比的容许误差, 通过迭代计算中求解等效线性的材料属性值。

[有效剪应变系数]: 输入通过最大剪应变计算有效剪应变所需的系数。

### 反应谱

[阻尼比]: 输入计算反应谱的阻尼比。

## 6. 结果: 地层结果

按图形或表格的形式输出分析结果。

- (1) 收敛的结果和表格 (绝对) (最大加速度, 最大速度, 最大位移)
- (2) 收敛的结果和表格 (相对) (最大加速度, 最大速度, 最大位移)
- (3) 应变/应力结果表格 (平均应变, 最大应变, 最大剪应变)
- (4) 地层结果表格 (收敛阻尼比, 收敛剪切模量, 剪切模量比)
- (5) 地层表格 (剪切波速, 剪切模量, 阻尼比)

## 7. 结果: 时程结果

选择输出图形的函数类型。函数类型为地层运动、反应谱、应力/应变、传递函数。

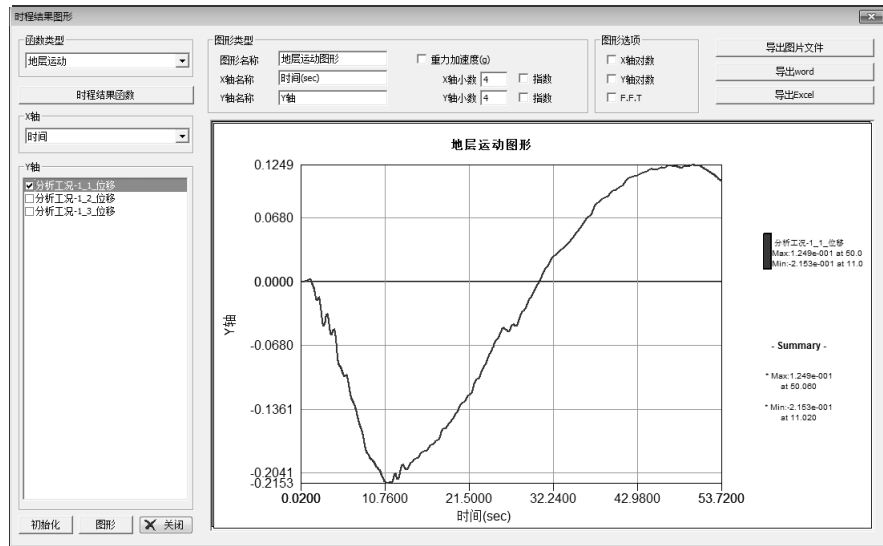


图 5-135 结果曲线

[时程结果函数]

选择函数、地层、输出图形的结果类型。每个结果类型的选择取决于地面运动结果函数类型。

表 5-11 输出结果类型

地层运动结果函数类型	结果类型
地层运动	位移、速度、加速度、相对位移、相对速度、相对加速度
反应谱	相对位移、相对拟速度、相对速度、绝对拟加速度、绝对加速度
应力/应变	应力、应变
传递函数	传递函数

所选结果函数被注册到 Y 轴上。

在[图形类型]中时程图形的图形名称，X 轴名称和 Y 轴名称均可以定义，并且数值也可按指数形式表示。

通过[图形选项]，X 轴、Y 轴可按对数刻度或 F.F.T（傅里叶变换）表示。

对话框口中显示已生成的图形，可导出为各种格式，如图片文件，Word 文件或 Excel 文件。



## 第六章 分析

### 6.1 分析工况

岩土分析可以通过与一般的结构分析的比较来解释。结构分析强调在结构上起作用的不确定性荷载的权重。因此，可对通过系统性地组合各种结果获取最大构件力执行构件设计。与此相反，在岩土分析中，与荷载相比更重视的是施工阶段及材料自身的不确定性，掌握岩土内部的物理性状态是非常重要的。因此，在岩土分析中，建模过程中会采用实体单元，使之最大限度地反映岩土的形状和施工状况。应尽可能地考虑材料的各种非线性、各向异性及原场地应力状态，来反映真实的现场状态。

岩土分析的程序可用于模拟实际现场条件，判断设计或施工条件是否可行。在岩土分析中，涵盖的分析领域从一般性的静力分析，到渗流分析、应力-渗流耦合分析、固结分析、施工阶段分析、动力分析、边坡稳定分析等。

提供的岩土分析功能如下。在这部分简要地概述了分析方法和对分析选项进行说明。详细的分析信息须参考理论分析手册第五章。

#### 1. 静力分析 (Static Analysis)

- (1) 线性静力分析
- (2) 非线性静力分析 (非线性弹性或弹-塑性分析)

#### 2. 施工阶段分析 (Construction Stage Analysis)

#### 3. 渗流分析 (Seepage Analysis)

- (1) 稳定流分析 (Steady State)
- (2) 瞬态流分析 (Transient)

#### 4. 应力-渗流耦合分析 (Coupled Seepage-Stress Analysis)

- (1) 渗流-应力连续分析 (Seepage-Stress Sequential Analysis)
- (2) 固结分析 (Consolidation Analysis)
- (3) 完全应力-渗流耦合分析 (Fully-coupled Seepage-Stress Analysis)

#### 5. 动力分析 (Dynamic Analysis)

- (1) 特征值分析 (EigenValue Analysis)
- (2) 反应谱分析 (Response Spectrum Analysis)
- (3) 线性时程分析 (振型叠加法) (Linear Time History (Modal))
- (4) 线性时程分析 (直接积分法) (Linear Time History (Direct))
- (5) 非线性时程分析 (Nonlinear Time History Analysis)
- (6) 二维等效线性分析 (2D Equivalent Linear Analysis)

#### 6. 边坡稳定分析 (Slope Stability Analysis)

- (1) 边坡稳定分析 (SRM) (Strength Reduction Method)
- (2) 边坡稳定分析 (SAM) (Stress Analysis Method)
- (3) 非线性时程分析 + SRM (Dynamic-Slope Coupled Analysis)

### 6.1.1 新建

#### 概要

创建执行分析的“分析工况”。设置各分析方法的使用的分析条件（网格组、边界条件、荷载条件等）的阶段。特别是施工阶段分析的情况，可以采用5种不同的方法分析并且可设定分析要用的数据。而且，可调整详细的分析选项及输出结果选项，并且可通过设置多个施工阶段组对一个模型进行反复分析。

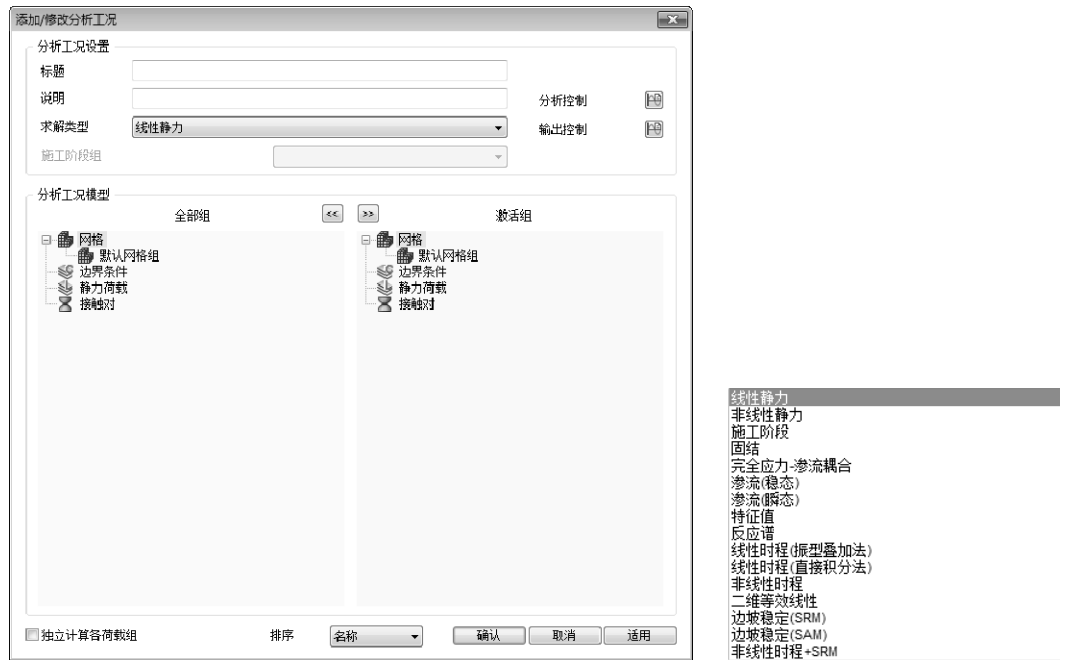


图 6-1 分析工况支持的分析法

#### 方法

输入区分各分析工况的名称（说明）并选择分析类型。应当根据所选的分析类型定义分析模型。只有拖放到激活组中分析条件（单元网格、边界条件、荷载等）才会反映在分析中，而不是所有的组都用于模型中。因此，可在一个模型上修改分析条件边后生成几个分析工况，来比较结果。特别是在线性静力分析中，[独立计算各荷载组]选项可用于独立计算所有荷载组，就可以执行重复分析和结果比较。

根据各分析类型（分析方法），可以添加详细的分析设置（时间步骤、分析控制、输出控制）。各分析方法的设置不同，并且在生成分析工况前必须进行检查。

要把全组都反应在分析中，可通过 >>> 键可以把所有条件移动到激活组内。如果在分析中只反映指定的条件时，可以用拖放的方式移动到期望的激活组中。定义施工阶段时，已设置逐阶段分析中要使用的数据后，应只选择要执行分析的组。

## 6.1.2 分析类型

### 1. 线性静力分析

线性静力分析是假定岩土及岩石材料为线性弹性材料后，基于静力荷载作用假定的分析。岩土材料的线性弹性时期局限于施加荷载后变形率发生微小变化的加载初始阶段。但是，线性弹性分析不考虑破坏，把应力-应变关系按直线形态理想化来执行分析，应用于确认原场地的应力分布或应力集中部位等，或需要简单分析的情况。

广义上，虽然线性行为被看做是非线性行为的特殊形态，但是因为线性分析的方便性和直观性，线性静力分析归类为单独的分析类型。线性分析中，包括线性动力分析，将定义的弹性材料的行为用于分析中。同时，弹性连接单元或桁架单元的非线性行为（仅受拉，仅受压及非线性行为）被忽略，并且单元视为弹性体用于分析中。因此，线性静力分析可用于查看大概的岩土的行为，施工阶段的初期条件或执行隧道衬砌结构等分析。

特别的，线性静力分析因为不需要重复迭代计算，所以计算时间较短。也可以在 GTS NX 线性静力分析中考虑孔隙水压力，也可以指定弹性材料的排水条件和非排水条件。

### 2. 非线性静力分析

所有物理性现象都包含非线性。岩土或结构的行为也不例外。非线性静力分析用于模拟忽略时间变化的非线性的岩土行为。在 GTS NX 中可以考虑如下非线性。

(1) 材料非线性：应力-应变的关系为非线性。大部分的岩土材料具有这种非线性。

(2) 几何非线性：位移-应变的关系为非线性。不再适用线性假设的大位移或大转动变形。

(3) 荷载及边界非线性：包括在界面处的非线性行为或因应变改变引起的力的方向变化，如伴随力。

在 GTS NX 中，可以考虑上面所涉及的所有非线性分析。因为对复杂的非线性系统，非线性分析需要进行反复的计算，分析耗时较长。因此，在岩土分析中，在实用性的方面，考虑合适的非线性来执行分析时，用小的计算成本也能保持准确度，同时得到考虑了非线性性质的结果。

因此，对于实用性而言，选择适当的非线性分析可能会使得非线性特性的分析结果同时保持准确性与小计算量。

### 3. 施工阶段分析

利用施工阶段分析可以模拟岩土的施工过程。施工阶段分析由多个施工阶段构成，可以按各阶段激活或钝化荷载、边界条件或单元，这种荷载、边界或单元的变化适用于任一阶段。在 GTS NX 中，可以使用如下多种分析功能进行施工阶段分析。

#### 应力—边坡分析

施工阶段过程中的应力分析及边坡稳定分析。

#### 渗流分析

按施工阶段的稳定流及瞬态流分析。

#### 应力—渗流—边坡耦合分析

施工过程中进行渗流-应力耦合及边坡稳定分析。

### 固结分析

对施工阶段中堆土及环境变化的固结分析。

### 完全应力-渗流耦合分析

考虑非稳定渗流的完全应力-渗流耦合分析。

施工阶段分析时需要考虑的内容如下：

- (1) 单元的激活及钝化
- (2) 荷载的施加及移除
- (3) 边界条件的变化
- (4) 岩土属性的修改
- (5) 荷载释放系数的定义
- (6) 每个施工阶段的地下水位
- (7) 排水不排水分析
- (8) 位移清零
- (9) 应力分析初始阶段（考虑  $K_0$  条件）
- (10) 重启阶段（Restart）

示例，隧道的施工阶段如下。

- 1 阶段：初始岩土应力
- 2 阶段：第一断面开挖
- 3 阶段：第一断面加固 + 第二断面开挖
- 4 阶段：第二断面加固 + 第三断面开挖
- 5 阶段：第三断面加固 + 第四断面开挖
- （重复）.....

第一阶段用于计算岩土的原场地的初始应力。因为应力分析假设原场地状态为初始状态，因此需要计算原场地应力状态。GTS NX 可采用自重分析来计算原场地的初始应力。

### 单元激活/钝化

在施工阶段分析中激活的单元默认的原场地初始应力为 0。但是如果在单元上定义了预应力，单元按定义的预应力值作为原场地初始应力。如果定义了自重，由于自身的荷载，所添加的单元就会产生体力。如果所添加的单元采用的是修正剑桥粘土材料模型，则其具有由相应阶段的荷载/边界条件确定的初始线弹性属性。

激活单元所对应节点的初始节点位移也是 0。

如果单元被钝化，并且未定义荷载释放系数，则将不考虑钝化单元的内力。总应力状态会在此基础上重新分布。

### 加/卸载

在各施工阶段中可进行荷载的激活或钝化，并且前一阶段的荷载维持不变，除了以下几种情况。

- (1) 当承受荷载的单元被钝化，例如，当单元内存在由重力引起的体力，且在相应阶段被钝化时。
- (2) 当面/线/节点承受的荷载因单元被钝化而钝化时。

激活的荷载按前一施工阶段中施加的荷载进行累加。

边界条件可按相同的方式修改，并且也存在上述相同的例外情况。

### 荷载释放系数

荷载释放系数用于在施工阶段分析中简化模型。荷载释放系数法是一种通过定义荷载释放的系数来表示后续施工阶段中依次钝化单元的影响的数值分析方法。荷载释放系数可用于简化三维模型，或减少三维模型在分析过程中的施工阶段。

例如，假设从开挖的开始，连续三个阶段的应力释放分别为 40%、30%、和 40%，并定义开挖阶段后激活该阶段的荷载释放系数。在选项窗口中的“0、1、2”后分别输入荷载释放系数 0.4、0.3 和 0.3。

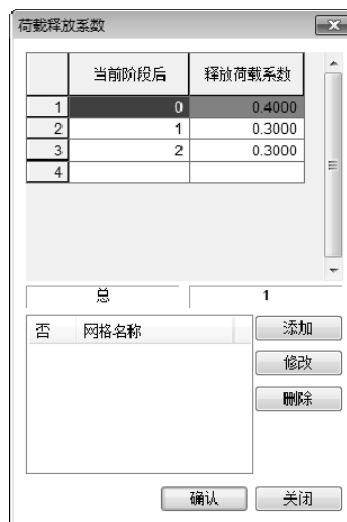


图 6-2 荷载释放系数定义对话框

### 修改单元属性

在施工步分析过程中，模型的岩土材料属性可根据依存时间变化的扰动进行改变，如土壤改良或硬化。同时，也存在结构材料属性在施工阶段期间发生改变的情况，如衬砌喷混的硬化或衬砌厚度的变化等。出于这个目的，特定单元的属性修改的数量无限制。修改的属性会在前一阶段的单元结果（位移、应力、应变等）的基础上进行连续的分析。

### 不排水分析

可对选择的单元和施工阶段进行不排水分析。不排水分析之前需要满足两个条件。第一，应该按不排水的类型设置材料模型的排水参数。第二，应在施工阶段的分析控制中选择不排水条件。如果不满足一个条件，材料就会在相关阶段按排水分析。为了进行不排水分析，材料模型的排水参数应设置为不排水的类型，并且需要在定义施工阶段时，在分析控制中勾选不排水条件。

对于单一的分析工况，如静力线性/非线性分析，或边坡稳定性分析，勾选分析控制>不排水条件>允许不排水材料行为。

### 固结分析

固结分析是计算孔隙水压力抵抗外部荷载的行为，并分析超孔隙水压随时间消散过程的分析方法。

渗流系数小的岩石的孔隙水压力的瞬间行为与不排水条件的行为相似。因此，根据荷载状态的变化，产生的超孔隙水压力将承受大部分的压缩荷载。可是，随着时间的推移，超孔隙水压力会重新分配，特别是在有排水边界的情况，超孔隙水压力将逐渐减小。因此，超孔隙水压力承受的荷载部分将逐渐由土骨架承担。这样，土骨架上的有效应力也会增大。

在固结分析中，一般情况下随着时间推移会发生超孔隙水压力的减小以及有效应力的增加。而且，随着时间的推移，有效应力的增加会导致土体骨架的变形，并且这样的变形在重力方向累积，最终在重力方向上发生沉降的行为。

随着时间推移，变形的增加会引起建筑物基础部分的沉降，并且建筑物基础部位发生的不均匀沉降将影响建筑物的稳定性和安全。

### 单元的固结特性

在固结分析中，使用的固结单元有额外的孔隙水压力自由度，这类似于在节点位置的平动自由度。在固结分析中，假设所有单元具有孔隙水压力的自由度，除非指定了指定两类边界条件（非固结条件、排水条件）。因此，没有直接表现固结行为的堆土材料，应当按照一般的单元定义为非固结条件。并且，需要在固结单元定义排水边界和排水条件。如果定义了恰当的边界条件并执行固结分析，那么，在定义非固结条件和排水条件的位置的超孔隙水压力为0。

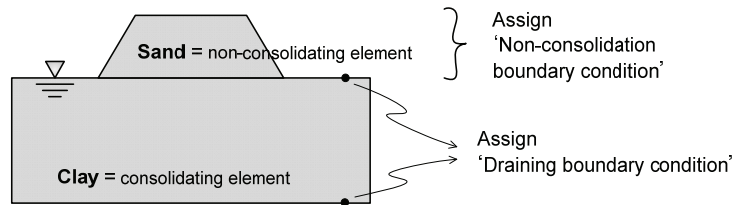


图 6-3 固结单元的边界条件

## 4. 完全应力-渗流耦合分析

渗流与岩石的应力耦合的分析，可以按多种方式归类。

最为简单的方法是首先执行渗流分析得到孔隙水压力分布，再把得到的孔隙水压力反映到将在随后步骤中进行应力分析的总应力/有效应力关系式上。这样的分析称作单向渗流-应力分析。这种方法可用于分析稳态地下渗流的静应力状态。但是，因应力分析产生的变形并不会反过来影响渗流现象，所以不是双向耦合。

完全应力-渗流耦合分析是渗流分析和应力分析的双向耦合分析。两种分析都要计算渗流-应力的耦合方程。而且，可以表示基于时间变化的孔隙水压力、应力及变形的非稳态分析。

固结分析是基于假设稳态的孔隙水压力是恒定的，并且用于查看超孔隙水压力的变化。换言之，这个分析是模拟随荷载/边界条件变化的超孔隙水压力改变现象的分析。

完全应力-渗流耦合分析并不遵循稳态的孔隙水压力恒定的假设。因此，这适用于模拟完全耦合形式的瞬态渗流现象中的应力分析及非稳态条件。与固结分析不同，可以定义随时间变化的渗流边界条件、

边界流量等。换言之，在完全应力-渗流耦合分析中，可以使用非稳态渗流分析的边界条件和结构的荷载及边界条件。

这类分析可以用于降雨条件下的岩土稳定分析、大型水库水位变化的稳定性分析等。特别是可采用全部的渗流边界条件（水头/流量），不仅用于分析超孔隙水压力的变化，而且也可分析固结分析中孔隙水压力的整体变化。

## 5. 渗流分析

渗流分析大体上可以分为 2 类：稳态分析（steady state analysis）和瞬态分析（transient analysis）。

**稳态渗流分析**是岩土内部及外部的边界条件不随时间发生变化的渗流分析。因此，在分析范围内的流入量和流出量在任何时段都是不变的。反过来在瞬态渗流分析中，即使定义与稳态分析相同的边界条件，也可能表现出随时间变化的流入量和流出量。

如果存在地下水可以渗流的渗透性的岩土层（含水层），并且在边界处存在水头差或流量，就会发生渗流现象。

渗流沿着与岩土内部的颗粒之间的孔隙相连接的渗流路径流动。这个流动遵循 Darcy（达西）定律。据此，土的渗流量等于渗透系数与水力坡度及过水断面的乘积。Darcy 定律虽然是根据饱和区域提出，但同样适用于非饱和区域。

所谓非饱和区域是指从完全干燥的状态到几乎接近饱和的状态。饱和度减少到 100% 以下，在孔隙中仍存在除了水之外的气泡。在饱和度非常低的情况下，附着在土体颗粒之间的孔隙水呈凹形。

随着饱和度的减小，孔隙水压力受到表面张力的影响，逐渐达到拉伸的状态。为此，负孔隙水压力有时也表现为吸水压力。大部分情况下，随着饱和度的减小，吸水压力越大。

**瞬态渗流分析**是岩土的内部或外部的边界条件随着时间发生变化的分析。

瞬态渗流分析和稳态渗流分析的差异在于边界条件可随时间发生变化以及瞬态分析需要体积含水率。当地下水位上升或下降时，需要定义非饱和区域的含水率和孔隙率等参数。

对完全干燥的状态和一定程度的饱和状态下的充水情况进行比较，堤体内部的渗流达到稳态的时间会有显著的差异。因此，通过瞬态渗流分析可以预测堤体内部达到饱和状态的时间，或者通过与饱和状态时的结果进行比较，可确定更加经济的设计方案。

## 6. 特征值分析（模态分析）

特征值分析用于分析岩土/结构的固有动力特性，通过特征值分析得到岩土/结构的固有模态（振型形状）、固有周期（固有频率）、振型参与系数等。这些特性取决于结构的质量和刚度。

换言之，结构一旦确定，其固有频率和固有模态也就确定，模态的数量与结构自由度相同。实际情况中，结构几乎并不按照单独一种模态形状振动而是表现出多模态重叠的复杂振型。

这里，所谓的质量参与系数为结构的质量的百分比数，表示当结构按复杂的振动模态振动时，参与到振动的结构比重。例如，如果第一模态的质量参与系数为 60%，就是指在结构总质量中，第一模态的结构质量参与比重为 60%。因此，地震波分析采用质量参与系数高的模态。一般情况下，结构振动模态的质量参与系数和达到 90% 时，也可视为足够正确的分析。

但是，与结构不同，岩土材料材料属性相对较小，所以特征值分析中其质量参与系数很难超过 90%，周期也相对较小，因此具体而言不存在标准。

固有周期定义为结构在自由振动状态下按相应模态形状振动一次所需的时间。

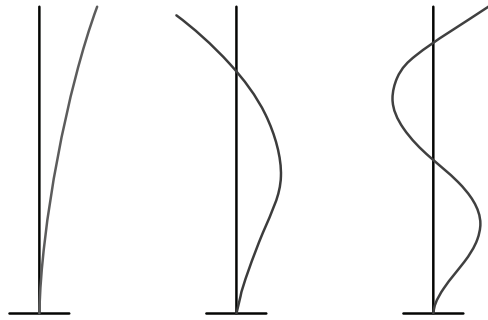


图 6-4 固有振型形状

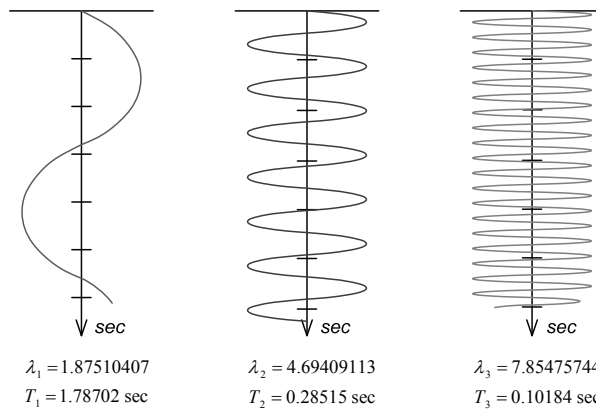


图 6-5 固有周期

通常在抗震设计规范中，要求分析中的各振型（模态）的有效质量之和应确保占总质量的 90% 以上。这是为了要包含影响分析结果的大部分主振型。

## 7. 反应谱分析

反应谱分析法是利用相对应的谱数据并组合与各模态时间响应的绝对最大值的分析方法。因为不考虑各模态最大值的同时性，只组合绝对最大值，所以，其可以看做线性时程分析（振型叠加法）的近似解。但是，考虑各模态的相关关系而进行的振型组合，可以更正各模态同时发生时的误差。

### 谱数据

谱数据是固定单自由度系统的阻尼比，得到位移（速度、加速度）的绝对最大值随周期（质量、刚度）变化的一组数据。因为结构各模态的阻尼比可能不同，所以与一个阻尼比对应的谱数据不同，而是按阻尼比插值生成不同阻尼比对应的多个谱数据。用于生成谱数据的周期可能会与结构的固有周期不同，所以也需要对固有周期进行插值，插值方法包括线性和对数插值方法。并且，与转换给定的数据相比，谱数据通常使用的是通过相关区域的历史地震波统计数据生成的设计反应谱。通常取一个阻尼比对应的设计反应谱，这时采用修正的方式代替插值的方式。



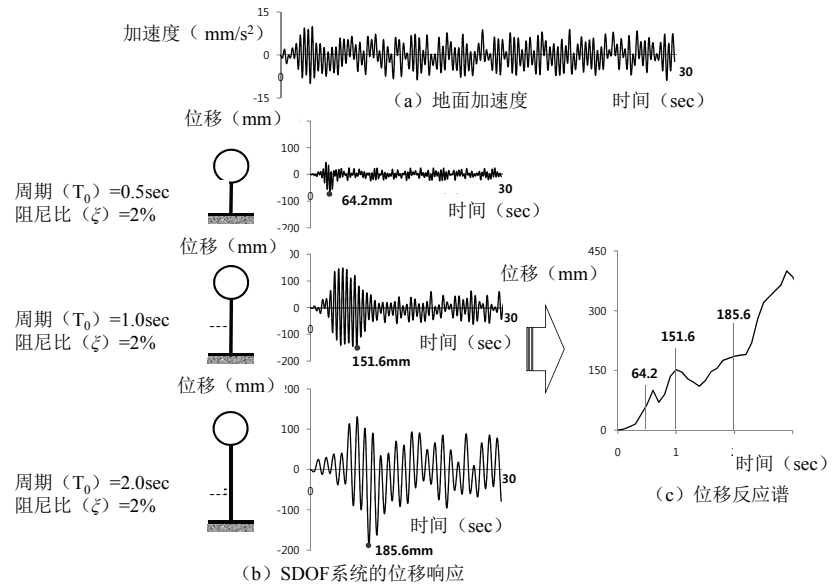


图 6-6 生成单自由度系统的位移反应谱

### 考虑阻尼

为了进行正确的动力分析，必须考虑阻尼。所有实际的结构不能无限地振动，因为能量在分子级别上存在损失或者由于构件单元之间的相互作用也会导致能量损失，因此，施加在系统上的阻尼将逐渐减小结构的振动。

特别的，对于结构在固有频率区域（共振效应）的模拟，阻尼会对分析结果有显著影响。

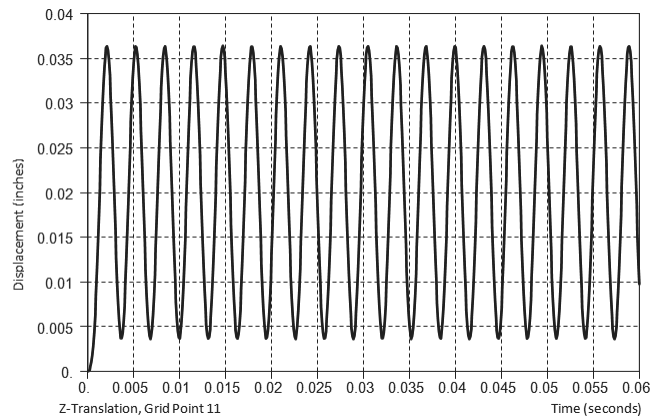


图 6-7 没有阻尼的情况

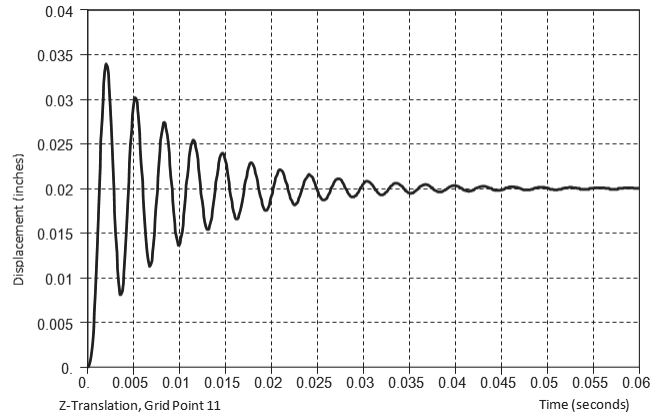


图 6-8 有阻尼影响的情况

准确结构阻尼比应当通过试验确定，通常使用的阻尼比如下表。

表 6-1 各类材料的阻尼比

系统	阻尼比
钢材（弹性区域内）	< 1 %
有接头的钢材结构	3 % ~ 7 %
小直径的管道系统	1 % ~ 2 %
大直径的管道系统	2 % ~ 3 %
橡胶材质	~ 5 %
预应力混凝土结构	2 % ~ 3 %
钢筋混凝土结构	4 % ~ 7 %

通常情况下，在数值分析中为了表现建筑物的阻尼效果，最多使用的是模态阻尼。模态阻尼决定系统中各固有频率的阻尼，大体可以分为比例阻尼和非比例阻尼。比例阻尼可分为质量比例型、刚度比例型及瑞利型阻尼。

质量比例型阻尼用于表示基于外部因素产生的粘性阻尼，如空气阻力等，并假设阻尼矩阵与质量成比例。因为刚度比例型阻尼很难直接表现耗散阻尼效果（岩土对振动能量的释放），所以假定阻尼与刚度成比例，有可能夸大阻尼在高阶模态的效果。

瑞利型阻尼（Rayleigh damping）作为刚度比例型在高阶模态的阻尼常数的修正，可以表示为质量比例型和刚度比例型的和。

## 8. 线性时程分析（振型叠加法/直接积分法）

线性时程分析是指当结构受动力荷载作用的情况下，根据结构的动力特性，并利用动力平衡方程式的解计算任意时间的结构响应（位移、内力等）的过程。时程分析采用振型叠加法（modal superposition method）和直接积分法（direct method）。

因为线性分析的特性，所以非线性是不被考虑的。当使用非线性材料的情况下，材料将转换成等效的线弹性材料执行分析。

可以在线性时程分析中定义水位，并且可查看它的有效应力结果。并且，分析中可以包含对材料的排水/不排水影响的分析。

### 振型叠加法

振型叠加法是把结构位移假设为具有位移正交性的线性组合。据此，对选择的振型，可以利用更简单的时间积分方程计算动力响应。振型叠加法多用于结构分析程序，并且可以用较小的计算量，有效地

计算大型结构的线性动力响应。但是，整体响应的准确性取决于使用的固有振型的数量，所以需要适当地选择计算中所需的固有振型数。

### 直接积分法

直接积分法把整个分析区域的自由度作为未知变量的时程分析，是把整个自由度的动力平衡方程按照时间逐步积分后求解的方法。各时间步的求解过程中没有平衡方程形式的变化，并且可采用多种积分的方法。直接积分法是对所有时间步都执行分析，因此分析所需的时间与时间步长和数量成正比。

### 线性时程分析荷载

用于线性时程分析的随着时间变化的动力荷载（dynamic load）。

### 定义时间步骤

时程分析的时间步在振型叠加法和直接积分法中不同。

直接积分法利用定义的时间步，按照隐式（implicit）积分的方法执行分析。因此，结果的准确度会根据定义的时间步大小而不同。一般情况下，如果时间步小于最小周期的 10%，就可以得到正确的结果。定义过大的时间步就会在时间积分过程中发生误差；相反，过小的时间步产生不必要的计算量。

采用振型叠加法执行积分分析时，时间步对计算结果的准确度没有影响。振型叠加法的时间步用于设置查看时程结果的时间。



### 比较直接积分法和振型叠加法

通常直接积分法比振型叠加法需要更多的分析时间。因此，如果在时间步较多或模型规模较大的情况下，使用振型叠加法是更有效的。但是，如果大量的固有频率接近于分析荷载的频率范围时（例如，存在过多的活动频率等），利用直接积分法可以得到更准确的结果。

表 6-2 直接积分法和振型叠加法比较

要素	直接积分法	振型叠加法
分析时间	分析时间相对较长	分析时间相对较短
事项	设置时间步很重要	设置振型数很重要
模型规模	适用小规模模型	适合大规模模型
分析准确度	分析时间比较长但准确度高	根据所选的振型、准确度有差异

## 9. 非线性时程分析

在时程分析中也能考虑岩土及土木结构的非线性。与非线性静力分析相同，可以全部或选择性的考虑材料非线性、几何非线性或荷载及边界的非线性执行分析。

一般情况下，因为大部分的岩土具有材料非线性特性，所以岩土的动力响应可以通过非线性时程分析来准确模拟。

### 水位

非线性时程分析用于在较短的时间内获得动力响应的分析，所以在动力分析中假设水位为定值。

### 非线性时程分析的荷载

在非线性时程分析中可以使用随着时间变化的动力荷载（dynamic load）。

### 定义时间步骤

非线性时程分析是按照隐式 (implicit) 积分的方法执行分析。因此, 结果的准确度会根据定义的时间步大小而不同。与直接积分法的线性时程分析相同, 通常如果时间步小于最小周期的 10%, 就可以得到正确的结果。定义过大的时间步就会在时间积分过程中发生误差; 相反, 过小的时间步会产生不必要的计算量。尤其是非线性分析的收敛求解是按照迭代的方式, 因此, 需要慎重选择计算的时间步。

### 10. 二维等效线性分析

GTS NX 的等效线性方法 (equivalent linear method) 适用于自由场分析 (free field analysis) 和二维等效线性分析 (2D equivalent linear analysis)。等效线性方法是通过反复的线性迭代分析把岩土材料的非线性近似为等效的线性材料。通常在应变的大小为  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  的程度有效。

等效线性方法的流程为: 首先, 设置各地层以及单元的剪切模量  $G$  和阻尼比  $h$  的初始值。一般使用应变最小时的值。执行频域分析, 计算各地层以及单元的最大剪切应变  $\gamma_{max}$ 。有效剪切应变  $\gamma_{eff}$ , 按取最大剪切应变乘以 0.65 或基于地震规模  $M$  的公式  $(M-1)/10$  的值计算。剪切模量  $G$  和阻尼比  $h$  可通过由各地层以及单元的有效剪切应变  $\gamma_{eff}$  确定的应变相容特性曲线计算。这样的分析过程一直重复到  $G$  和  $h$  收敛为止, 通常在相对误差小于或等于 5% 的情况下判定为收敛, 完成分析后输出计算结果。

求解在结构物施工之前的地基状态中输入地震后的地层响应称作自由场分析 (free field analysis), 自由场分析主要用于通过地面振动确定设计反应谱, 由动力应力-应变关系评估液化以及确定导致地层或结构不稳定的地震荷载等。

二维等效线性分析不但可以分析岩土, 而且支持岩土-结构的相互作用分析 (Soil-Structure Interaction: SSI)。为了把地震破坏降到最低, 需对地下结构实施抗震设计, 应当考虑抗震安全性的结构进行稳定性检查。如果结构建在粘性土或沙土等的软弱地基上时, 基岩中的地震振动可能在地表大幅增大, 所以应当详细评价地震振动引起的岩土-结构的相互作用对结构的影响。地下结构与地面结构不同, 因为地震荷载的结构响应主要由岩土的位移的控制, 所以影响地层位移的动力材料属性和建模方法影响决定分析的结果。下图为分析岩土-结构相互作用时, 通过有限元方法 (FEM) 建立的实际分析区域模型的信息。

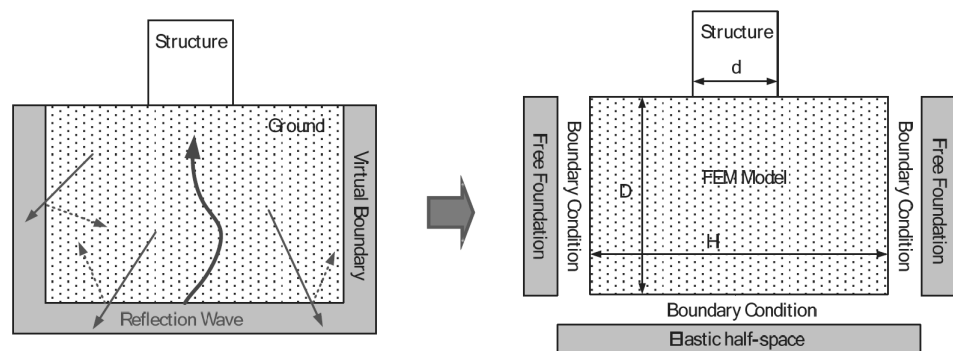


图 6-9 分析区域和有限元模型图

表 6-3 影响分析结果的最小有限元模型的尺寸

边界条件	分析方法	模型的深度	模型的宽度
传递边界	频域	-	$D \geq 2d$
粘性边界	时域	$H \geq d$	$D \geq 5d$
对称边界	有效应力		$D \geq 10d$

岩土-结构相互作用与普通的结构动力学的主要差异在于岩土的无限性会导致辐射阻尼（aggradation damping）现象。由材料摩擦等产生的一般的阻尼特性，会引起结构运动的衰减，但是辐射阻尼是岩土无限区域内放出波动能量，并产生能量衰减的现象。因此，动力分析采用等效线性方法来考虑材料的非线性并且通过频域分析使得辐射阻尼的模拟更加容易。



基于剪切弹性模量  $G$  和剪切应变  $\gamma$  关系的分析方法如下图：

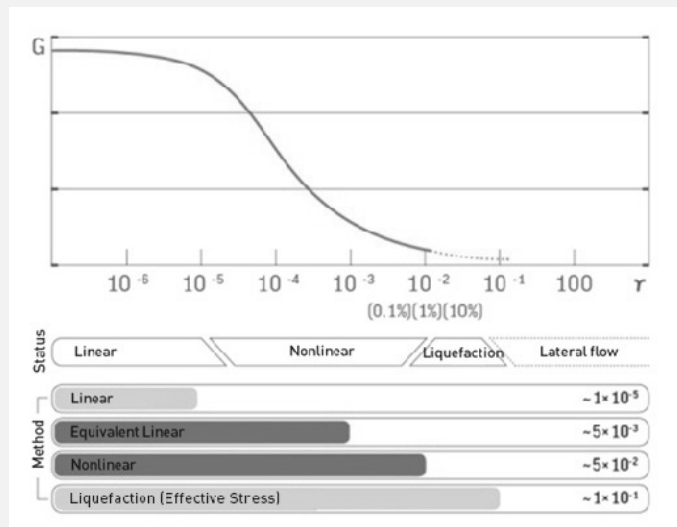


图 6-10 分析方法

## 11. 边坡稳定分析（SRM/SAM）

填土边坡或开挖边坡的稳定分析是在岩土工程中最常见的问题之一。边坡总是处于具有重力产生的重力势能，如果孔隙水压力、加载、地震、波动力等的外力作用在边坡上，边坡的稳定性就会受到很大的影响。这时如果自重及外力产生的内部剪应力大于边坡土体的抗剪强度，就会发生边坡的破坏。这样计算剪应力和剪力引起的边坡破坏相对应的安全系数的分析称作边坡稳定分析。

在 GTS NX 中，边坡稳定分析可以使用如下方法：

- （1）强度折减法（Strength Reduction Method: SRM）：与非线性有限元法结合强度折减方法。
- （2）应力分析法（Stress Analysis Method: SAM）：基于非线性有限元分析法和极限平衡理论（limit equilibrium theory）。

### 强度折减法（SRM）

利用有限元法的边坡稳定分析，根据各种形状、荷载以及边界条件计算边坡的最小安全系数和破坏行为的数值分析方法。特别是强度折减方法，无需预先假定边坡的破坏活动，就能自动地模拟破坏过程的方法（Griffith 等 1999; Matsui, 1990）。并且，具有对三维轴对称问题也适用。

在强度折减方法中，剪切强度和摩擦角逐渐减小直至计算不能收敛为止，此时把这个点当做边坡的临界破坏点。对应于这个临界点的最大强度折减率，作为边坡的最小安全系数。

### 基于极限平衡理论的应力分析法（SAM）

这个方法首先使用有限元法对边坡执行应力分析后，以这个应力分析结果为基础，根据极限平衡理论计算定义各种虚拟滑动面，并计算对应的安全系数。各虚拟滑动面中计算的最小安全系数中即为确定的安全系数，并且得到对应的临界滑动面。SAM 方法是只能二维环境下使用。

### 非线性时程分析 + SRM

基于一般强度折减方法（SRM）的边坡稳定分析可以作为静力状态的稳定性评价。但是，边坡更易受到动力荷载的作用，如地震。在动力状态中，岩土受到的应力不仅由自重，还有振动的惯性力产生。

在 GTS NX 中，可以对这种动力平衡状态的边坡进行稳定分析。以强度折减方法为基础的边坡稳定分析，不仅适用于二维，而且也适用于三维问题。

在非线性时程分析中输入的时间，处于这个时间点的岩土应力状态，可作为计算边坡稳定性的初始值。

## 6.1.3 分析控制（选项）

### 概要

根据所选的分析类型，可以对基本选项、自动设置及各种高级分析选项进行查看和修改。对于施工阶段分析，可以在定义施工阶段时分别进行分析控制。对于分析结果，输出结果列表可按照各单元类型设置，以有效地减少结果文件的大小及输出时间。

对于时间依存的分析，即瞬态渗流、固结、时程分析，用于结果查看和输出的时间步可单独设置。

### 方法

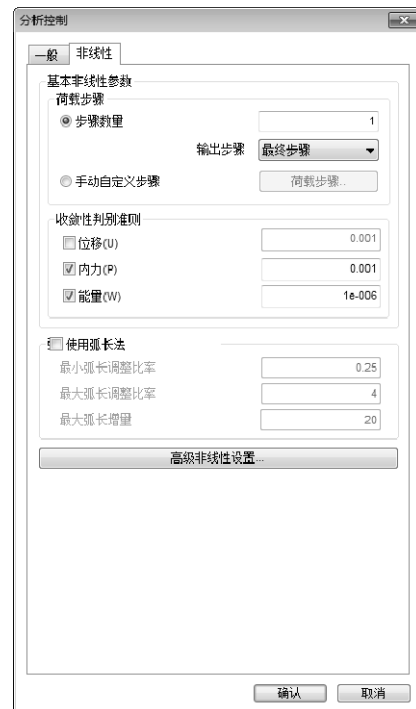


图 6-11 分析控制和输出控制对话框

上图为分析控制和结果控制的设置窗口。如上，各分析类型的控制选项，详细说明如下表。

表 6-4 静力分析-各类分析的控制选项

分类	线性/非线性 静力分析	施工阶段	*固结分析 *完全应力-渗 流耦合	渗流 (稳态流/*瞬态 流)	边坡稳定 (SRM/SAM)
一般	水压力（自动）	水压力（自动）	水压力(自动)	最大负孔隙压力	水压力（自动）
	原场地分析	初始阶段（ $K_0$ ） 最终计算阶段 指定重启阶段 重启选项	原场地分析	-	-
	初始温度	初始温度	-		-
	水位	-	水位		水位
	考虑非饱和影响	考虑非饱和影响	考虑非饱和影响		考虑非饱和影响
	最大负孔隙压力	最大负孔隙压力	最大负孔隙压力		最大负孔隙压力
不排水条件	-	-	不排水条件		
非线性	几何非线性	几何非线性	几何非线性	-	-
	荷载步骤	荷载步骤	-	-	荷载步骤
	收敛标准	收敛标准	收敛标准	收敛标准	收敛标准
	弧长法	-	-	-	使用弧长法
	高级非线性设置	高级非线性设置	高级非线性设置	设置高级非线性	设置高级非线性
龄期	-	龄期	-	-	-
渗流	-	-	-	初始条件	-
边坡稳定 (SRM)	-	-	-	-	非线性参数
	-	-	-	-	安全系数
	-	-	-	-	设置高级非线性（使用弧长法）

<\*: 需要设置时间步的分析类型>

### 1. 水压力（自动考虑水压力）



图 6-12 分析控制对话框

在模型的所有自由面/线上把水压作为外力考虑。水压力是以作用在自由面/线上的孔隙压力为参考计算。

- (1) 若指定水位的情况下，参考水位位置，水压力为常量。
- (2) 若之前阶段已执行渗流分析的情况下，使用计算节点的孔隙水压分布（大小）。
- (3) 若孔隙水压为负（-）的值时，不会自动考虑水压力。

**注意：**建模完成后，模型内部不存在与孔隙水压力相关的外部水压力时，应当取消这个选项。执行应力分析时，若指定水位线，则由自由节点和相应水位位置的水位差计算孔隙水压。为了更准确地确定地下水水位的影响线，建议采用完全应力-渗流耦合分析。

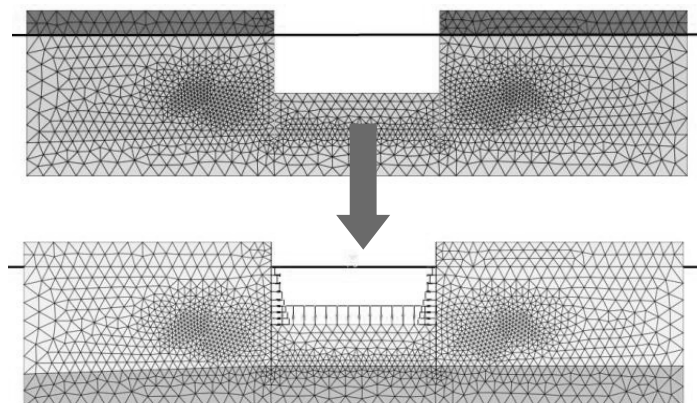
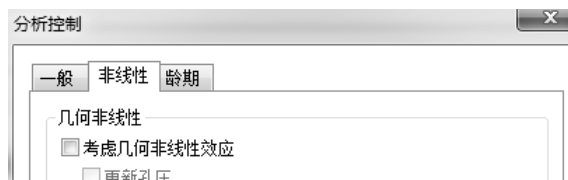


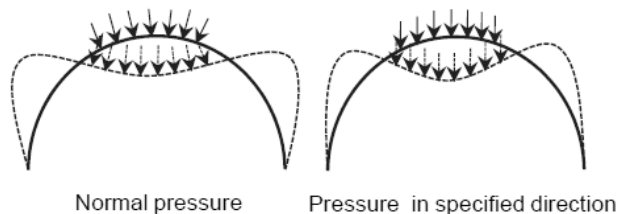


图 6-13 在水位以下开挖时，开挖面自动设置水压力

## 2. 几何非线性



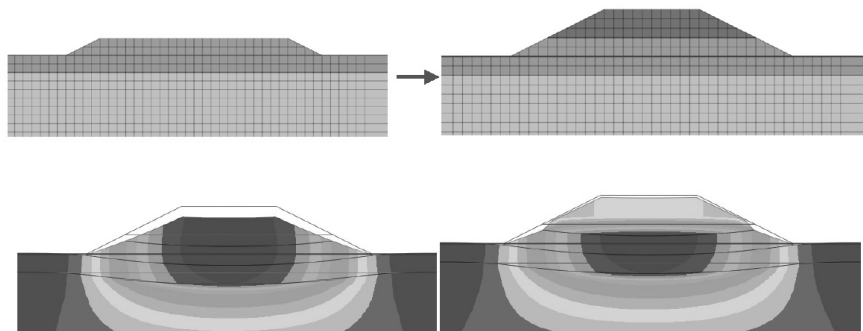
执行考虑大变形的几何非线性分析。适用于非线性应力，固结，边坡 SRM 析等。分析中还可以考虑荷载非线性，譬如荷载方向随变形变化时的情况。可在考虑地下水位的模型中，随着变形重新计算孔隙水压力。



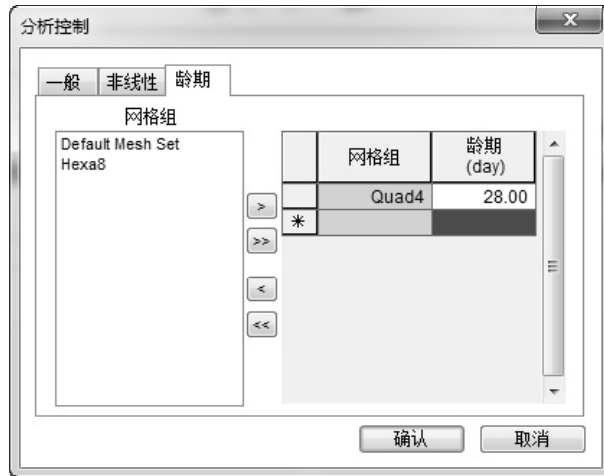
## 3. 节点初始位置判断



施工阶段分析中新激活的节点的位置需要考虑前一阶段的变形位置。以下是路堤分步填土的例子，比较勾选和不勾选选项时，沉降结果如下图。



## 4. 收缩徐变网格组龄期



为了反映该施工阶段前发生的徐变及收缩的效果，可输入材龄。所以在施工阶段开始时，材料的材龄为'0'。一般情况下，铺设混凝土后，可输入考虑的时间因素，即混凝土的凝固时间。

施工阶段分析中可以为不同结构定义不同的材龄。

## 5. 原场地分析

### 考虑自重的原场地分析

这一选项是把岩土分析的场地应力状态重新设置。计算的原场初始应力与自重形成的平衡状态，在分析中定义与单独分析相同的边界条件。当在时程分析中考虑自重的情况下，需要计算初始原场地应力，否则，就会发生因荷载添加引起的振动。特别的，在非线性时程分析中必须包含自重荷载。

### 考虑 $K_0$ 条件

$K_0$  法将按照  $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$  定义的常量通过垂直应力来计算水平应力作为原场地初始应力。

如果使用这个方法，首先通过自重分析求得垂直应力  $\sigma_v$ ，然后根据这个值按公式  $\sigma_h = K_0 \sigma_v$  求得水平应力。这时，剪应力保持由分析结果计算的值。

地面为水平的情况下，该方法没有任何问题。否则，按上所求得的应力状态就不能与自重平衡。

如果应力分布并没有保持平衡，那么在接下来的应力分析中，如果没有外力变化，应力也会向着与外力平衡的方向变化，并由此产生变形。因此， $K_0$  法适用于附加应力变化相对小的情况。一般，应力分析可以按  $K_0$  法的条件如下。

- (1) 岩土形状在水平方向的变化较小；
- (2) 孔隙水压分布在水平方向没有变化；
- (3) 自由线/面边界上的水平边界条件，可以产生水平方向的应力；
- (4) 当使用横观各向同性 (transversely isotropic) 的材料时，材料在垂直/水平轴方向相同。

不考虑  $K_0$  条件的情况，通过自重分析得到的应力状态作为原场地初始应力状态。当地面为水平时，这个方法的结果与采用公式  $K_0 = \nu / (1 - \nu)$  的  $K_0$  法相同。否则，存在水平方向的应变，这样会得到与  $K_0$  法不同的计算结果，同时也会出现剪应力。

一般在岩土存在边坡的情况下，可采用这个方法。但是该方法不能设置大于 1 的  $K_0$  值，当要在不增加其他外部条件的情况下使用大于 1 的  $K_0$  值时，可根据  $K_0$  法，并添加一个空的施工阶段重新分析，以达到计算的平衡状态。但是，这种情况下最终的平衡状态应力不能满足  $K_0$  条件。并且，修改的应力与平衡点有较大的差异，这对于非线性解的收敛计算可能会有困难。

### 位移/应变清零

在分析过程中可能会有需要进行位移/应变清零的情况。例如，在初始分析阶段中，不考虑自重产生的位移及应变时，通过初始化操作，可以把初始状态的位移和应变初始化为 0。

并且，在施工阶段分析中，在执行几次分析阶段后，任意中间阶段可以进行位移初始化后作为基准状态。位移/应变清零是在指定施工阶段分析结束后进行。

**注意：**对于考虑几何非线性的非线性分析，不能保证任意变形修改的连续性。因此，在几何非线性分析的施工阶段中，建议不要使用位移清零的功能。

## 6. 初始温度

设置反映在单一分析模型中的初始温度。在不勾选的情况下，则采用在“分析控制”中定义的初始温度值。用于评估温度荷载的影响，在分析中考虑由输入的温度差产生的荷载。

## 7. 水位

### 定义水位

直接输入地下水位高度或选择预先定义的水位函数设置水位。设置的水位适用于整个模型。当使用水位函数的情况下，将输入的值乘以函数值后适用。

### 定义网格组水位

按网格组定义地下水位。

例如，被岩石或不透水粘土层包围的地下水层（承压含水层）的情况，可分别设置分析中存在/不存在地下水位的地层。

输入了总地下水位并定义了网格组地下水位的情况下，优先按网格组地下水位，只在未定义单元网格组地下水位的网格组上施加总地下水位。

## 8. 考虑非饱和影响

用于正确分析饱和度的值介于干燥状态（ $S_e=0$ ）和饱和状态（ $S_e=1$ ）之间的状态。

非饱和适用于以下两种情况。

- （1）非饱和和用于计算有效应力-总应力的关系（使用 Bishop 的有效应力关系式）；
- （2）考虑非饱和状态材料的容重时，非饱和状态的容重的值为介于饱和容重和干容重之间的值。

在不考虑非饱和的情况下，可采用 Terzaghi 有效应力关系式，根据孔隙水压力的分布，设置容重为饱和容重或干容重（不使用中间值）。饱和度定义为孔隙水压力的函数，如果考虑非饱和，就需要定义用于建立孔隙水压力与饱和度的函数来反映非饱和的材料特性。

## 9. 最大负孔隙压力

输入最大负孔隙压力的限值。不考虑非饱和效应的情况下，使用 Terzaghi 有效应力关系式，非饱和状态岩土孔隙应力 (pore stress) 的计算值过大。因此，在不考虑非饱和效应的情况下，有必要定义负孔隙水压限值。相反，考虑非饱和效应时，使用 Bishop 有效应力关系式，就没有这样的风险。换言之，在非饱和状态中，非饱和函数 (unsaturated property) 限制了孔隙应力的大小，所以无需特别设置负孔隙水压的限值。

## 10. 施工阶段的一般设置



图 6-14 施工阶段一般参数设置

### 初始阶段

设置在施工阶段中作为原场地条件考虑的阶段，勾选是否考虑  $K_0$ 。 $K_0$  的详细信息请参考“线性静力分析”选项。将施工阶段的位移及应变指定为初始状态。

### 最终计算阶段

默认设置是计算至最终阶段，但需要在任意阶段停止分析来查看结果时，可以设置最终计算阶段。

### 指定重启阶段

定义施工阶段时，可以在各阶段的分析控制中勾选[指定重启阶段]选项。勾选这个选项的阶段可以自动保存结果文件，执行一次分析后，需要对相同的模型进行重新分析时，可以在保存结果文件的后一阶段开始执行重新分析。这在定义多个施工阶段的情况下是十分有效的。

### 重启选项

在非线性分析中，不能满足收敛标准时，可能影响结果的可靠性，所以在施工阶段分析中是否满足每个阶段的收敛标准很重要。特别是施工阶段分析要比单一分析需要更多时间，所以当某一阶段不能满足收敛标准时，[如果不收敛，保存前一阶段]选项是非常有效的。这个选项的功能是保存前一阶段为止的结果文件，这样在重启模型后可检查/修改模型。另外，为了防止分析因计算机系统的不稳定而强制终止或检查所有中间阶段结果的情况下，这时可采用[保存所有阶段]选项。但是，保存的所有分析结果文件较大，所以需要确保计算机有足够的储存空间。

## 11. 荷载步骤



图 6-15 荷载步骤设置对话框

在非线性静力分析中可以使用静力荷载 (static load)。可以一次性施加定义的荷载的总量，或者通过多个步骤按增量的形式积累施加。荷载增量非常大时，可能会很难迭代计算收敛；但是荷载增量过小时，可能会浪费一些不必要的计算时间。在考虑时间相关的材料时，用户可以定义时间步来查看随时间变化的结果。

## 12. 收敛标准



图 6-17 收敛标准设置对话框

因为非线性分析采用的是迭代法，所以可采用收敛条件来判断结果是否收敛。通过参考值与前一阶段迭代计算的位移、内力以及能量的变化量比较，判断是否符合收敛条件。如果满足在这三个条件中选择的条件时，迭代计算被认为收敛。

## 13. 使用弧长法



图 6-18 荷载步骤设置对话框

在 GTS NX 中为了计算非线性分析，采用牛顿-拉普森 (Newton-Raphson) 法，反复进行增量迭代以减小误差。按照完全牛顿-拉普森法，在每个迭代计算都会更新刚度矩阵，在此基础上牛顿-拉普森法或初始刚度法可用于更新点的计算。其它选项如可用于提高收敛性的如线性搜索法，或采用弧长法计算不稳定平衡状态（详细的内容参考理论分析手册章节 5.5）。迭代计算一直重复到得到满足收敛条件的增量为止。如果没有确切的数值，建议使用默认设置的值。

### 最小弧长调整比率

输入初始弧长到当前增量弧长的最小变化比率。防止出现弧长无限变小的现象。

### 最大弧长调整比率

输入初始弧长到当前增量弧长的最大变化比率。防止出现弧长度无限变大的现象。

### 最大弧长增量步数

输入最大增量步数。按弧长法执行非线性分析直到荷载系数大于 1 或者增量达到最大步数，因荷载问题可能出现无法执行弧长法的情况，为了防止这种情况可输入最大荷载增量步数。

## 14. 高级非线性设置



图 6-19 高级非线性参数设置对话框

设置基本的非线性分析参数，在大部分问题中选择[使用默认设置]选项。详细的设置如下。

### 刚度参数更新



图 6-20 刚度参数更新方法

按照完全牛顿-拉普森法，每步迭代计算都会更新刚度矩阵；而初始刚度法可以保持初始的刚度矩阵，因此适合非线性不明显的情况。除此之外，其它选项如修正牛顿-拉普森法或者割线刚度法，可提高牛顿-拉普森法材料属性的收敛性和效率。详细的算法请参考理论分析手册第五章。用户自定义的情况下，可以选择迭代法、半自动或自动的方式重新构造刚度矩阵。

### 分析选项

[收敛失败时终止分析]：收敛失败时终止分析。未选择该选项时，即使不收敛也会继续进行分析。

[每次增量的最大迭代次数]：输入单个增量的最大迭代次数。

[最大等分级别]：指定最大等分级别。

[使用线搜索]：使用线搜索功能。这个功能用于柔性结构的问题，包括刚度随荷载增加或在振动情况下的非线性分析的收敛。对于失效的问题，可能只是在分析时间上有所增加。

[每次迭代的最大线搜索次数]：输入每次迭代计算的最大线搜索次数。

[线搜索容差]：输入线搜索容许误差。

[容许发散次数]：不收敛的情况下，可以指定容许的发散次数。修改牛顿-拉普森法在每荷载增量开始会重新构造刚度矩阵。

## 15. 定义施工阶段接触

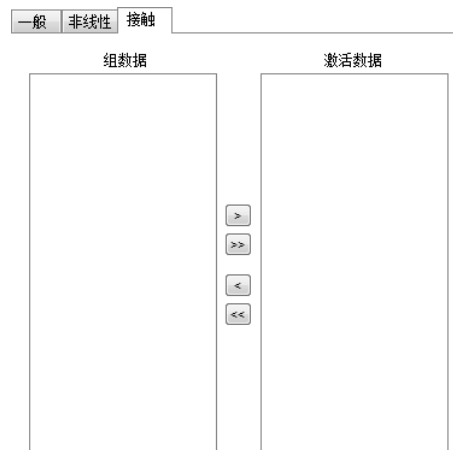


图 6-21 施工阶段接触定义

焊接接触单元可以在不共享节点的单元之间自动生成，是自动搜索相邻单元，并模拟与节点耦合相似的连接行为。这是一种经济的建模方法，可以防止因节点耦合失败而发生的分析错误。但是，生成的焊接接触单元是无法在任意各施工阶段中添加的。换言之，只能决定焊接接触单元是否在整个施工阶段分析中适用或不适用，无法按逐个阶段进行激活/钝化。这里，对于施工阶段分析，在施工阶段分析工况设置中提供了一个单独的选项来决定是否使用焊接接触单元。

### 16. 初始条件（渗流）

用于在执行瞬态渗流分析时定义岩土内初始孔隙水压力分布。瞬态渗流分析必须设置初始条件。可将时间为“0”时的瞬态时间步作为初始条件，或利用任意指定的水位高度或水位函数。



图 6-22 渗流初始条件

### 17. 安全系数（SRM）

输入分析初始安全系数和各迭代计算步的安全系数增量。除此之外，可以设置安全系数的精确度。

[安全系数的精确度]: 基于 SRM 的边坡分析，利用强度折减法，输入安全系数的精确度值，可以指定计算的安全系数精度。安全系数的精确度作为边坡稳定性分析中收敛标准。但是，如果输入过低的安全系数准确度就会大大增加分析时间。所以，可按照如下参考值，输入适当的值。

表 6-5 安全系数的精度的适用性

安全系数的精度	适用
0.05	低（用于初期检查）
0.01	平均
0.005	高

表 6-6 动力分析分析控制选择

制表符	特征值分析 反应谱	*线性时程（振型叠加 法/直接积分法）	*非线性时程 *非线性时程+SRM	*二维等效线性
一般	初始温度	水压力（自动）	水压力（自动）	-
	水位	水位	水位	

	特征向量	特征向量	-	
	非饱和	非饱和	非饱和	
	最大负孔隙压力	最大负孔隙压力	最大负孔隙压力	
	不排水条件	不排水条件	不排水条件	
	质量参数	质量参数	质量参数	
	-	原场地分析	原场地分析	
非线性	-	-	收敛标准	-
			高级非线性设置	
动力分析	振型组合类型	阻尼	阻尼	有效剪切应变
	阻尼			收敛标准
	谱数据内插法	-	-	插值控制
	-			质量参数
边坡稳定 (SRM)	-	-	定义时间	-
			非线性参数	
			收敛标准	
			安全系数	
			高级非线性设置 (使用弧长法)	

<\*: 需要设置时间步的分析类型>

## 18. 特征向量



图 6-23 特征向量参数设置

输入要计算的固有频率的数量（振型数量），指定固有频率的范围。可以用于检查是否存在遗漏的特征值。

## 19. 质量参数

[一致质量]: 使用考虑模态耦合的质量矩阵。勾选时将采用一致质量矩阵，取消勾选时将使用集中质量矩阵。在准确度上，虽然无法判断哪个更准确，但通常在特征值分析中使用集中质量矩阵比使用一致质量时的响应更加灵活。

## 20. 振型组合类型

如果假设最大值的实际物理量即为各振型的最大物理量（位移、应力、内力、反力等的最大值），则各振型态的最大值可以按简单的相加计算。但是，在无法确保各振型的最大值是否在同一时刻出现，所以，通过简单的线性叠加来表示最大的实际物理量是困难的。



因此，需要一个能够近似评估最大值的振型组合方法。这里，给出了各种振型组合的方法，但是没有一种组合可以得到适合于所有情况的近似值，因此需要理解各振型间的组合特征。振型组合类型如下，详细的算法请参考理论分析手册第五章。



图 6-24 振型组合类型

### ABS（绝对值求和法）

这个方法假设所有模态响应发生在相同的相位，判断为各振型的最大绝对值都在相同的时间步出现，从而提供最保守的结果。

### SRSS（平方和开方法）

在各振型充分分离的情况下，这个方法可提供恰当的结果。

### NRL（海军实验室方法）

这个方法是从 SRSS 法中只分离一个拥有最大绝对值的振型（ $m$ ），同 SRSS 方法相似，各振型充分分离的情况下可提供恰当的结果。

### TENP（10%法）

这个方法是考虑 SRSS 法中相邻频率振型影响的方法。换言之，两个振型的频率如果满足频率在 10% 以内相邻时，就认为这两个振型是相邻的。

### CQC（完全二次组合法）

振型间相关系数为 1 的情况下，结果与 SRSS 法一致。

## 21. 修改阻尼



图 6-25 阻尼参数设置对话框

### 直接输入法

按照各模态用户直接定义阻尼比，并根据定义的各模态阻尼比计算各模态响应。直接模态只有在反应谱/时程（模态）分析法中才被激活。

[所有模态的阻尼比]

是根据用户直接输入的各模态阻尼比以外的整个模态基本上适用的阻尼比，除了在下面各模态阻尼比优先顺序输入栏中指定的特征模态的阻尼比之外，剩下的模态都适用。在反应谱函数中，输入的阻尼比不同于用户输入的阻尼比时，以在这里输入的阻尼比为标准调整谱数据后用于在分析中。

[模态阻尼替换]

使用于用户直接分别输入各模态阻尼比，分别输入模态编号和各模态的阻尼比后添加。

### 质量刚度比例法

计算质量比例型阻尼和刚度比例型阻尼的阻尼常数。在阻尼类型中勾选相应项目，直接输入比例系数或可以在模态阻尼中自动计算比例系数。

根据输入的振型频率或周期，并指定阻尼比就会自动计算比例系数。

这里，当由模态阻尼计算质量&刚性系数时，材料的阻尼可反映在分析中。通过勾选“显示指定材料系数”查看各材料的阻尼比和计算阻尼矩阵的阻尼系数（alpha, beta）。

## 22. 谱数据内插法

选择反应谱荷载数据的内插方法。线性内插或对数内插都可用于谱数据周期计算，其中默认的设置是按对数内插方法。内插时，谱数据中包含多个阻尼比，对阻尼比的内插时也应如此。因为谱数据中只有一个阻尼比时是无法进行插值的，只能按下面计算式来修正  $(1.5 / (40 * \text{衰减量} + 1) + 0.5)$ 。

## 23. 定义时间（非线性时程+SRM）

在非线性时程分析中，定义要查看 SRM 分析结果的时间。可以定义多个时间步。采用定义的时间对应的非线性时程应力结果进行 SRM 稳定性评估。



图 6-26 定义时间

## 24. 有效剪切应变（二维等效线性分析）



图 6-27 二维等效线性分析控制对话框

岩土剪切应变随着输入的地震波动或振动荷载持续发生变化。为了适用于等效线性分析，引入有效剪切应变的概念，材料属性简化为等效线性值后计算。

在频域分析中各频率都需具有确定的剪切模量和阻尼，所以不能考虑材料的非线性。因此，二维等效线性分析是根据前一阶段计算中剪切应变引起的岩土刚度和阻尼比的变化，反复执行线性分析，以考虑地层的非线性响应。这里，有效剪切应变是按前一阶段计算的最大剪切应变乘以小于 1 的折减系数（50~70%）定义的。使用有效剪切应变是因为最大剪切应变会产生较实际响应更大的应变能。

通常情况下，有效剪切应变系数为 0.65（65%）或利用地震大小  $M$  按公式  $(M-1)/10$  计算。并且，时域中最大剪切应变的计算方法较在频域中用 RMS (root mean square) 公式计算的最大剪切应变更准确。

$$\gamma_{\max} = \max_t \{ \gamma_{ocf}(t) \}$$

$$\gamma_{ocf}(t) = \frac{1}{3} \sqrt{\varepsilon_x^2(t) + \varepsilon_z^2(t) + \{ \varepsilon_x(t) - \varepsilon_z(t) \}^2 + 6\gamma_{yz}^2(t) + 6\gamma_{xz}^2(t)}$$

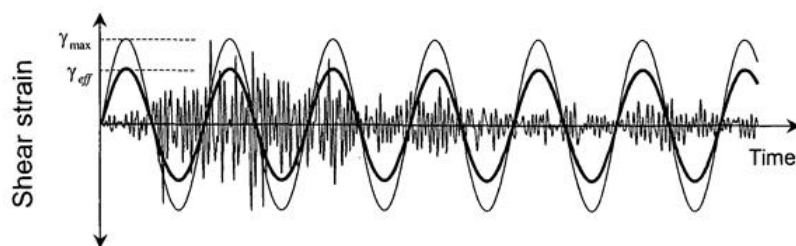


图 6-28 最大剪切应变和有效剪切应变的差异

最大剪切应变计算方式分为：时域和频域。时域方法是根据时间定义荷载（加速度、力等）的变化，并按微分方程的形式构成结构状态。因此，结构的响应（位移、速度、加速度响应）是通过在每个时间间隔对微分方程式进行积分计算。而频域法在确定荷载响应和频率特征之间的关系和比率时是有效的。但是，因为很难掌握这种不规则的关系和比率，如地震响应，此时需要在分析中把时域转换为频域。

### 内插控制

输入频域分析的频率范围。为了进行高效的频域分析，可使用内插法，插值的方式可选择以下四种之一。



图 6-29 内插控制类型

如果选择[一致质量]，对所有频域中频率执行分析。并且，在设置插值间隔的情况下，在相应频域中的频率间隔将按设置的间隔计算。

### 6.1.4 时间步骤

#### 概要

在固结、渗流（瞬态渗流）、动力分析（线性/非线性时程）分析中，为了计算随时间变化的结果需指定时间步骤。分析结果可按设置的时间间隔查看，动力分析的情况下，同时提供时程结果图。

#### 方法

##### 1. 分析的时间依存性



为了考虑岩土及结构物的时间依存性行为，可定义时间步骤。可在规定的时间内一次性计算或通过多阶段分步计算，还可以定义非均匀变化的时间差。用户可以指定只在期望的时间步骤导出分析结果。

##### 2. 固结（单一）分析、完全应力-渗流耦合-加载/维持

指定荷载的时间步骤及荷载系数。在固结分析中，即使不生成施工阶段，也可以通过勾选[维持]选项进行模拟。用户可单独定义荷载和持续时间。在分析中可以根据输入的时间和荷载系数，施加所有荷载，包括自重。[加载]分析结束后，根据定义的时间信息，进行超孔隙水压消散模拟。因此，在[维持]中不能输入荷载系数，时间信息增加到[加载]的最后时间。



图 6-30 时间步骤设置对话框

#### 固结分析-输入时间及荷载

执行固结分析时，添加荷载的合理时间和荷载的分配可通过输入的时间和荷载系数来确定。

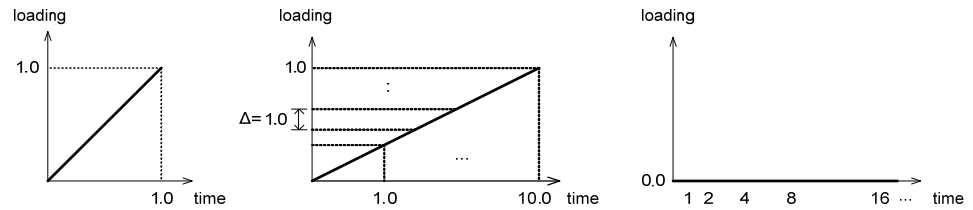


图 6-31 固结荷载变化的示例（初始状态、施加填土荷载、维持周期）

使用 Modified Cam-clay 材料模型时，应当定义原场地初始应力。因此，需要进行排水分析来计算原场地初始应力，这种情况下，施加时间是无意义的。

荷载按上图所示的“施加填土荷载”，在适当的时间内施加。如上图显示，添加的荷载经过 10 天，即按 10 个阶段的等间距荷载。这里，荷载系数的总和为 1.0。

填土结束后，没有荷载增加，可以执行余下的分析。按上图所示的“维持”阶段，定义维持时间。在固结特性分析中，因为分析初期的应力变化剧烈，如上图所示。因此，第一时间步可由小到大，逐渐增加，以期提高收敛性和分析的速度。

### 3. 渗流（瞬态渗流分析）-定义时间步骤

设置执行分析及结果保存的时间步骤。利用与时间步相对应的渗流边界时间函数值（水头、流量等）来执行分析和检查结果。在渗流边界时间函数的时间范围外的值，按线性插值后自动适用。



图 6-32 瞬态渗流时间步骤定义对话框

#### 4. 动力分析-定义时间步骤

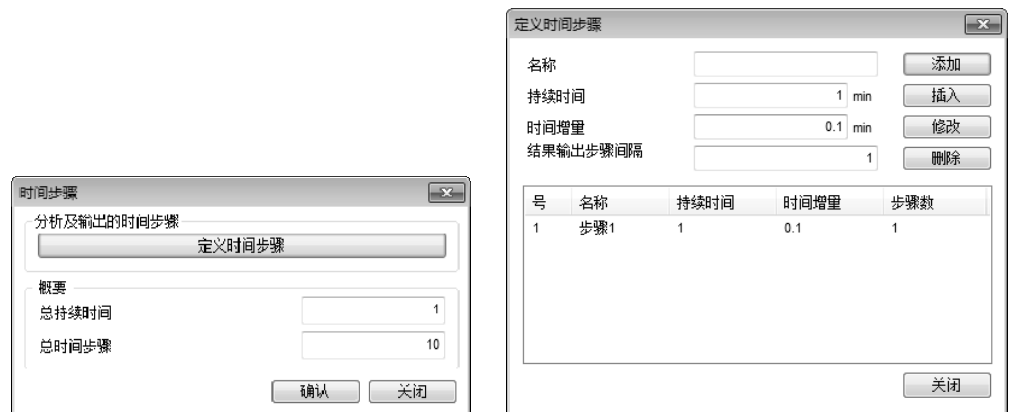


图 6-33 动力分析时间步骤定义对话框

因为可以定义不均匀的时间步骤，目标时间步骤可指定名称。

- (1) 持续时间：输入持续时间。
- (2) 时间增量：在输入的持续时间内计算的时间增量。
- (3) 结果输出步骤间隔：输入要输出分析结果的步骤间隔。每经过一个时间间隔输出一次计算结果。

在每一个定义时间间隔，结果都将输出到结果目录树中。当要输出大量数据时，可能需要耗费大量的时间。当计算机内存不足时，也可能无法生成结果文件。

按照设置的时间步骤，总持续时间（时间步骤中定义的分析时间的总和）和总时间步骤（各计算的时间步骤数的总和），会在定义各时间步骤后显示出来。

### 6.1.5 输出控制

#### 概要

设置分析结果输出类型（单元结果输出坐标系）、动力分析输出选项可以设置要输出的历程。根据分析类型默认设置了节点结果和单元结果项目，各结果列表中只能选择性的保存和输出结果，所以可以有效地管理分析结果文件的大小及输出时间等。



图 6-34 输出控制对话框

### 方法

可以输出分析中使用的所有网格组，或仅选择期望输出的主要网格组。勾选[单元的节点结果]选项后，单元结果将按照各节点计算的结果直接输出；取消勾选这个选项时，将按各节点平均结果输出。勾选时，结果将与按等值线查看的图例结果相似。

要输出壳单元的中性面的结果时，勾选[壳单元中性面结果]选项。

对于梁单元，可以调整单元结果的输出段数。结果可以在 1 (i, j), 2 (i, 1/2, j), 3 (i, 1/3, 2/3, j), 4 (i, 1/4, 1/2, 3/4, j) 等位置输出结果。

分析结果的文本文件将被单独放在模型保存的文件夹下。

## 6.1.6 分析设置

### 概要

设置模型类型（2D/3D）及操作环境。根据设置的环境，可确定可用的功能或单元等的子菜单。单位系统及分析模型的初始变量，可在建模过程中进行修改。

### 方法

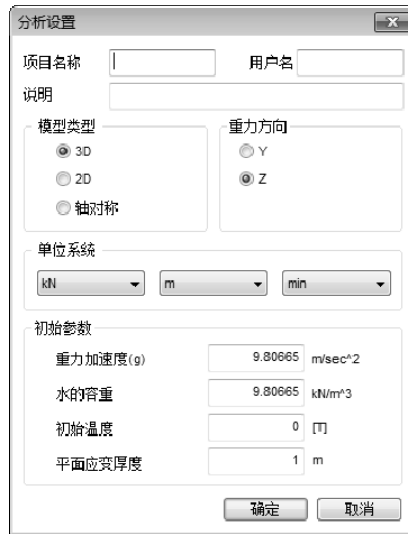


图 6-35 分析设置对话框

[模型类型]

选择模型类型。三维模型可以沿 Y、Z 轴定义重力方向，二维及轴对称模型的重力方向固定为 Y 轴方向。

[单位系统]

设置力/长度/时间的单位。设置的单位系统在建模过程中可随时更改，也可以在右下角的状态栏中简单的修改。

提供的单位系类型如下。

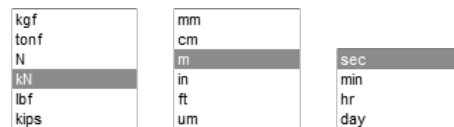


图 6-36 力/长度/时间类型

从 DXF (2D/3D) 文件中导入几何形状时，因为 Auto CAD 没有长度单位，所以导入的形状会按程序中设置的单位。直接导入 CAD 几何形状的情况下，目标模型的长度单位可以在导入文件时单独设置。

[初始参数]

基于材料容重转换动力荷载和自身荷载为质量，或计算孔隙水压力时，需设置重力加速度和水的容重。初始温度是在计算温度荷载时的变量，将由初始温度与输入的温度差值计算的温度荷载转换为重力。

## 6.1.7 参数分析

### 概要

这个功能用于对一个模型修改指定单元的属性（材料）并比较分析结果。代表性的例子是  $K_0$  参数分析。例如，在执行隧道开挖施工阶段分析时，不需要区分计算模型且只需添加分析属性，即可通过改变土压力系数（ $K_0$ ）如 0.5、1.0、1.5，来比较分析结果。只添加属性后执行分析。除了岩土材料之外，也可以修改结构特性（截面特性）等各种条件，执行反复计算，并一次性比较所有结果。



方法

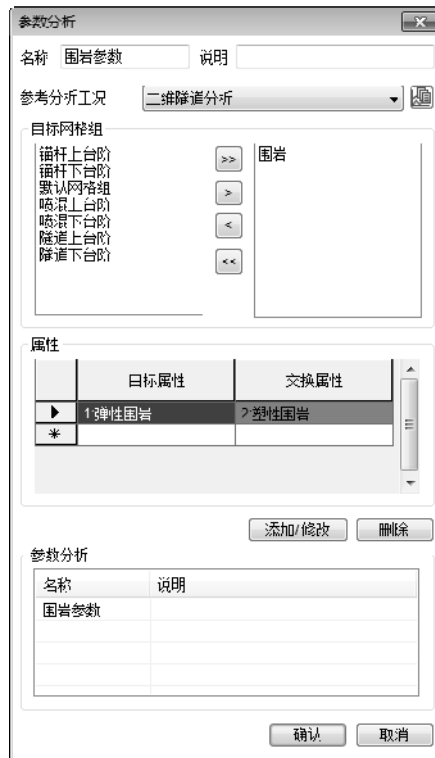


图 6-37 参数分析对话框

首先，选择要参考的分析工况。通过在列表中指定交换属性条件，自动生成参数分析工况。

从参考网格组中选择要修改属性的网格组后，在下列表中依次选择目标属性（已选择单元的当前属性）和要交换的属性。选择添加/修改按钮后，就会生成参数分析工况。最好预先定义要进行属性交换的属性。

## 6.2 分析

### 6.2.1 运行/批量分析

#### 概要

对已生成的分析工况执行分析。生成多个分析工况的情况下，可以选择要执行分析的工况。通过批量分析可以一次性分析多个模型。

#### 方法



图 6-38 运行分析/批量分析

选择分析工况并执行分析。批量分析可用于多个模型执行分析的情况。执行分析时，通过输出窗口可以查看收敛、警告/错误信息等。分析结束后，可根据自动生成的文本文件复查分析结果、收敛以及分析过程中发生的警告信息等。

## 6.3 历程

### 6.3.1 历程测点

#### 概要

对于存在时间变化的分析工况（瞬态渗流、固结、完全应力-渗流耦合、线性/非线性时程分析、二维等效线性）中，可定义模型中特定位置的输出结果。把整个分析结果输出到分析目录树中，从可用性和性能上来看是低效的。换言之，所以在执行分析之前，必须要定义搜索历程结果的节点。

#### 方法

以下流程可用于输出所有具有历程结果的时变分析方法。可输出地层变形、内力和渗流结果等历程结果。

- (1) 选择数据类型（分析>历程测点>数据类型）并选择要查看的结果类型。



图 6-39 搜索历程结果

这个功能可以按数据类型指定，并选择详细成分。单元结果可以按所选单元的中心或者各节点位置输出，但是高阶单元的中间节点不能输出结果。对于“位移/速度/加速度”的类型，以“参考节点”的计算结果为基准，可以减去相对的结果。对于“传递函数”，总是按相对结果计算，此时用户必须定义“参考节点”。

在“历程步骤”中定义要输出结果的步骤。选择“所有输出步骤”时，则按所有分析时间间隔的结果输出，而不只是输出分析工况中定义的输出时间步骤。指定“频率”选项时，结果按执行分析的步骤或时间间隔输出。例如，分析时间间隔为 0.1, 0.2, 0.3sec...执行，如果分析工况中定义的输出时间步骤为 0.3, 0.6sec...，则指定“步骤：2”，则按 0.2, 0.4, 0.6sec...输出结果；如果指定“时间：0.2sec”，则按按 0.2, 0.4, 0.6sec...输出结果。

※需要注意的是不要输出在分析工况没有的数据类型。

(2) 分析>一般类型>输出控制>历程，在历程选项卡中添加历程列表。



图 6-40 历程激活/钝化设置对话框

(3) 结果>特殊>历程>使用图形函数查看历程结果。

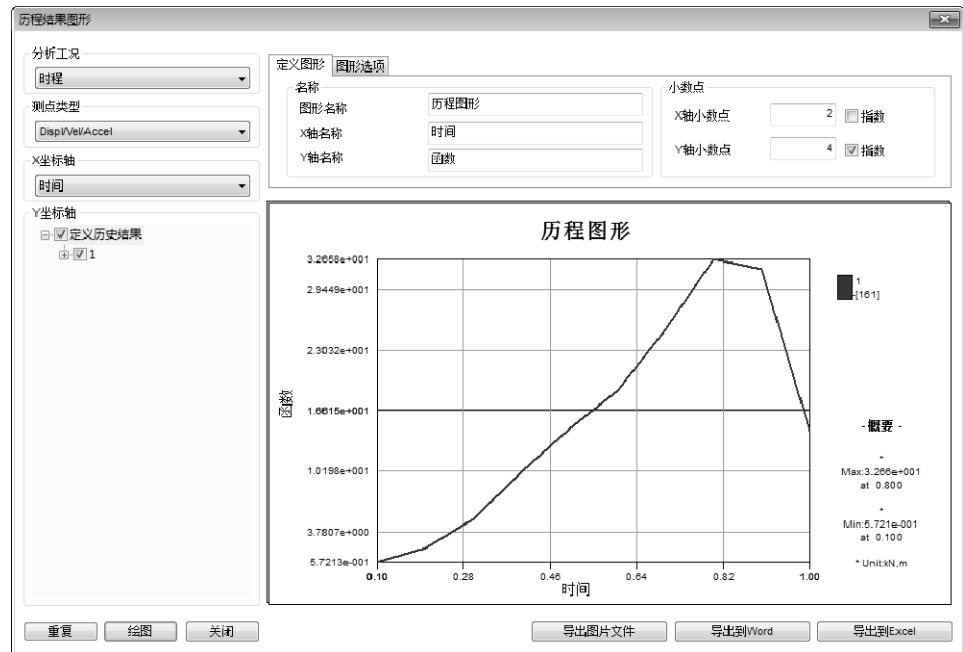


图 6-41 历程结果输出

## 第七章 结果与工具

### 7.1 结果

分析正常结束后，收集分析结果并整理设计所需的各种数值。通过结果组合和用户自定义的公式，可以对输出的结果项进行组合生成新的结果组。

#### 7.1.1 组合/包络结果

##### 概要

在分析工况中线性静力分析时，可以将工况内的荷载组与其他工况的荷载组进行多种组合。工况中荷载组只有在勾选了“独立计算各荷载组”的情况下才适用，并且有输出结果的网格组才可以进行结果组合。

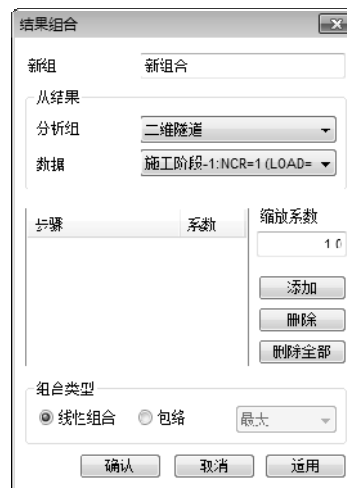


图 7-1 结果组合对话框

##### 方法

定义新的荷载组的名称，指定分析组及荷载结果数据。指定荷载结果时可设置缩放系数。

组合方法分为：线性组合分析结果的[线性组合]法和依赖于数值大小的[包络]法。包络法显示各荷载条件分析结果的最大值、最小值、最大绝对值（不带符号）、最大绝对值（带符号）。

#### 7.1.2 计算结果

##### 概要

生成特定结果分量的组合结果。



图 7-2 结果计算对话框

## 方法

新建组并输入新建组的名称，或选择现有文件添加运算。

公式中使用的运算符可以大小写混用。计算的方法与科学计算器的使用方法相同，运算的优先顺序也按照数学法则。

表 7-1 数学法则

类别	内容	示例
(	开括号	-
)	闭括号	-
+	加	-
-	减	-
*	乘	-
/	除	-
SQRT	$\sqrt{\quad}$	<例> $\sqrt{2} = \text{SQRT}(2)$
SIN	Sine	单位：角度
COS	Cosine	单位：角度
TAN	Tangent	单位：角度
ASIN	Arc Sine	<例> $\sin^{-1}(0.3) = \text{ASIN}(0.3)$
ACOS	Arc Cosine	<例> $\cos^{-1}(0.3) = \text{ACOS}(0.3)$
ATAN	Arc Tangent	<例> $\tan^{-1}(0.3) = \text{ATAN}(0.3)$
EXP	Exponential (指数)	<例> $e^{0.3} = \text{EXP}(0.3)$
SINH	Hyperbolic Sine	<例> $\sinh(1) = \text{SINH}(1)$
COSH	Hyperbolic Cosine	<例> $\cosh(1) = \text{COSH}(1)$
COTAN	Cosine / Sine	<例> $\cotan(1) = \text{COTAN}(1)$
LN	自然对数	-
LOG	常用对数	-

## 7.2 一般

在一般项目中设置分析结果的云图、矢量、一维单元结果图、变形形状等多种图形处理方式。



图 7-3 后处理菜单（一般）

### 7.2.1 云图

#### 概要

已激活单元中的位移、反力、应力、应变的大小及方向可用云图显示。



图 7-4 后处理菜单（云图）

#### 方法

选择 ON/OFF 决定是否显示云图。

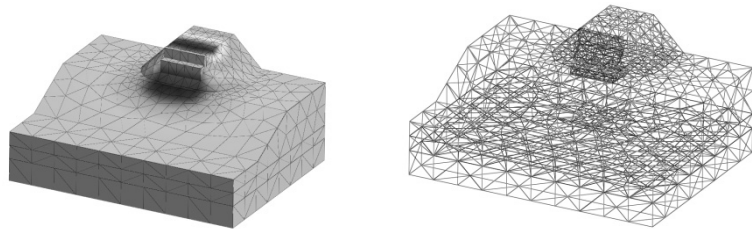


图 7-5 云图打开/关闭效果对比

#### 云图属性

云图显示可与图形显示功能重复设置，以输出多种图形结果。



图 7-6 云图属性设置对话框

#### [颜色]

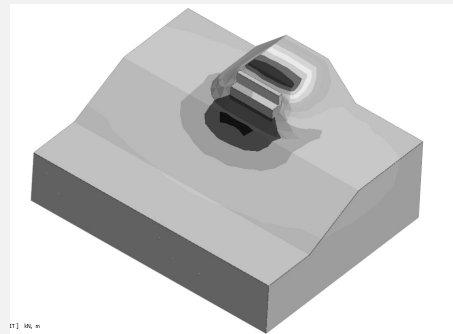
云图：以云图的形式显示结果。

模型（渲染）：按模型网格颜色的形式显示结果颜色。分析颜色可以按线类型、变形类型以及填充类型等非云图形式显示。

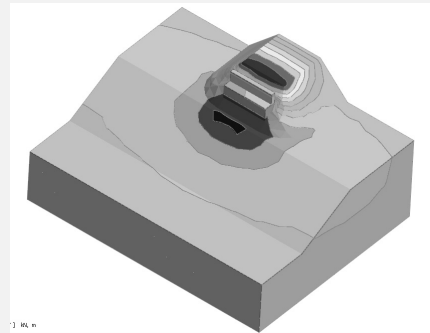


### \* 设置等值线

调整云图显示的线、颜色、线宽以清晰地显示云图分布。



<不勾选等值线>



<勾选等值线>

图 7-7 勾选/不勾选等值线效果对比

## 7.2.2 矢量

### 概要

以矢量的形式显示各节点的位移或反力分量的大小和方向。



图 7-8 云图&矢量设置对话框

### 详细说明



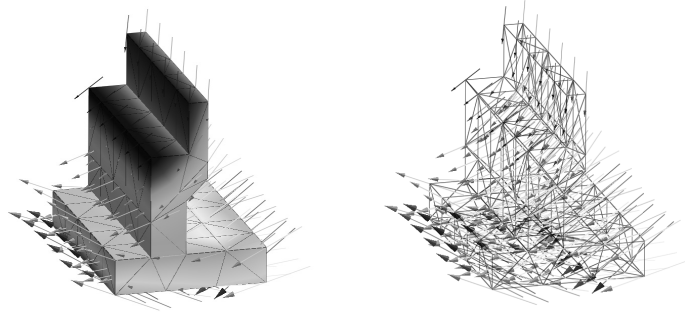


图 7-9 矢量&云图和仅矢量效果对比



### \* 设置矢量属性

在工作窗口内以矢量的形式显示分析结果。这个选项可以设置矢量的显示方式。



图 7-10 矢量设置属性窗口

#### (1) 矢量>缩放系数

显示缩放后的矢量结果。

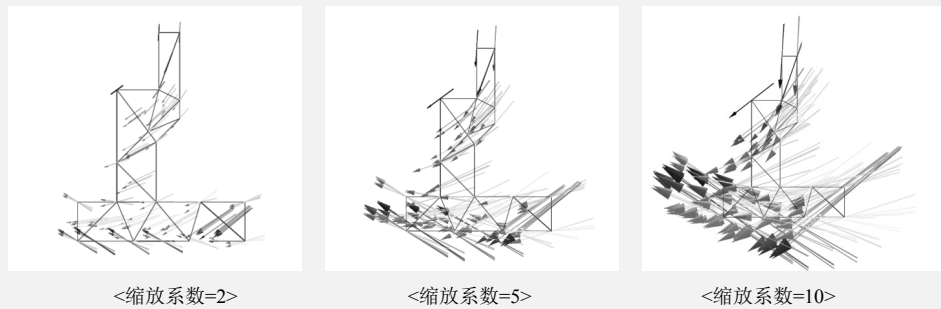
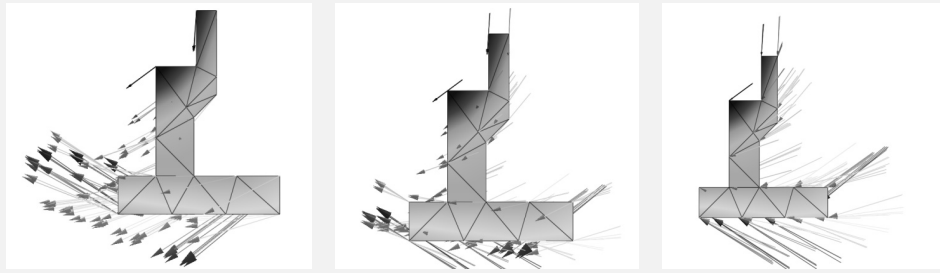


图 7-11 不同缩放系数对应的矢量效果对比

#### (2) 矢量>起点位置

确定在节点处箭头的位置。



<开始位置=起点>

<开始位置=中间>

<开始位置=终点>

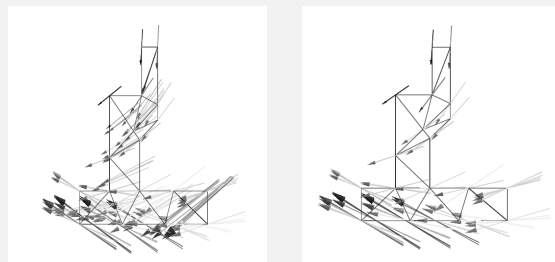
图 7-12 不同开始位置对应的矢量效果对比

(3) 矢量>显示所有分量

输出单元的主应力矢量时，最大主应力和最小主应力均会输出。

(4) 矢量>仅自由面

仅显示位于自由面节点上的箭头。



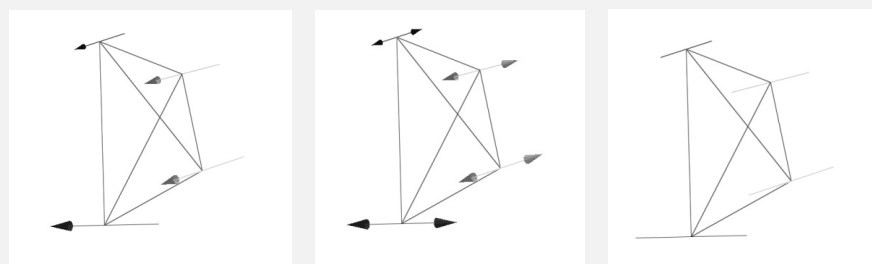
<仅自由面选择 (False) >

<仅自由面选择 (True) >

图 7-13 仅显示自由面的矢量的效果对比

(5) 箭头>类型

设置矢量的箭头方向。(单向/双向/无方向)



<单向>

<双向>

<无方向>

图 7-14 不同矢量方向的效果对比

(6) 箭头>固定尺寸

设置矢量箭头的尺寸设为固定值。(True/False)

(7) 箭头>缩放系数

调整矢量箭头的大小。(Scale Value)

(8) 矢量线>固定尺寸

设置矢量线的尺寸为固定值。(True/False)

(9) 矢量线>缩放系数

调整矢量线的大小。(Scale Value)

(10) 矢量线>线宽

调整是矢量线的线宽。(Scale Value)

(11) 颜色>用户定义颜色

按用户指定的颜色显示正负矢量箭头的颜色 (True/False)

(12) 颜色>正数值颜色

用户设置正矢量箭头的颜色。

(13) 颜色>负数值颜色

用户设置负矢量箭头的颜色。

### 7.2.3 一维单元结果图

#### 概要

显示所选 1D 单元的结果。



图 7-15 一维单元结果图设置对话框



#### \* 设置一维单元结果图的属性

指定一维单元结果图的显示方式。



图 7-16 一维单元结果图属性窗口

(1) 一维单元结果图>缩放系数

显示 1D 单元的内力或应力的缩放图。

(2) 一维单元结果图>线宽

调整显示线的宽度。

(3) 一维单元结果图>图类型

选择反映分析结果的图类型，可选择云图或单色来显示结果。

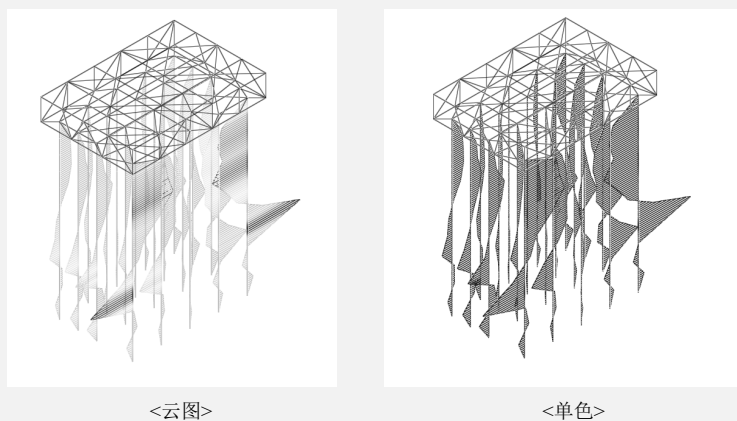


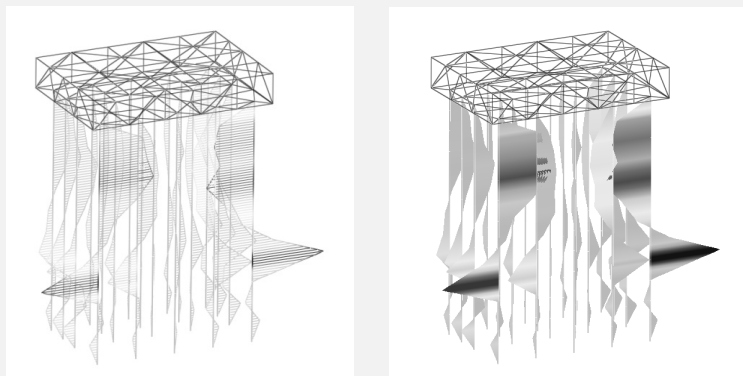
图 7-17 一维单元结果的云图和单色的显示效果对比

(4) 一维单元结果图>图颜色

定义单色类型对应的颜色。

(5) 一维单元结果图>填充类型

按线填充和云图填充的形式填充显示的图。



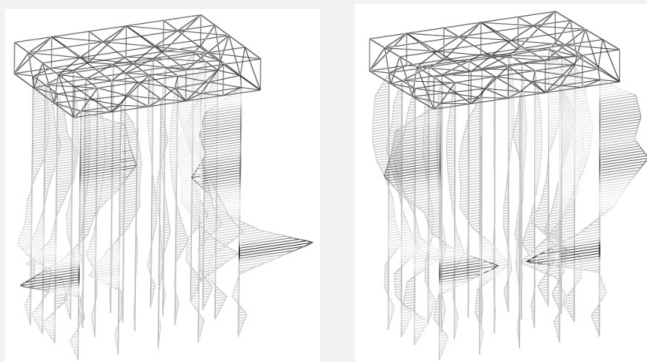
<线填充>

<云图填充>

图 7-18 一维单元结果的线填充和云图填充的显示效果对比

(6) 一维单元结果图>反转

以与默认设置相反的方向显示图。



<反转 (True) >

<反转 (False) >

图 7-19 一维单元结果的反转开关的显示效果对比

(7) 一维单元结果图>参考数值

决定是否按参考数值显示图。

(8) 一维单元结果图>结果方向

按单元坐标系或整体坐标系来设置的图显示方向。

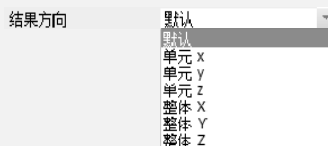
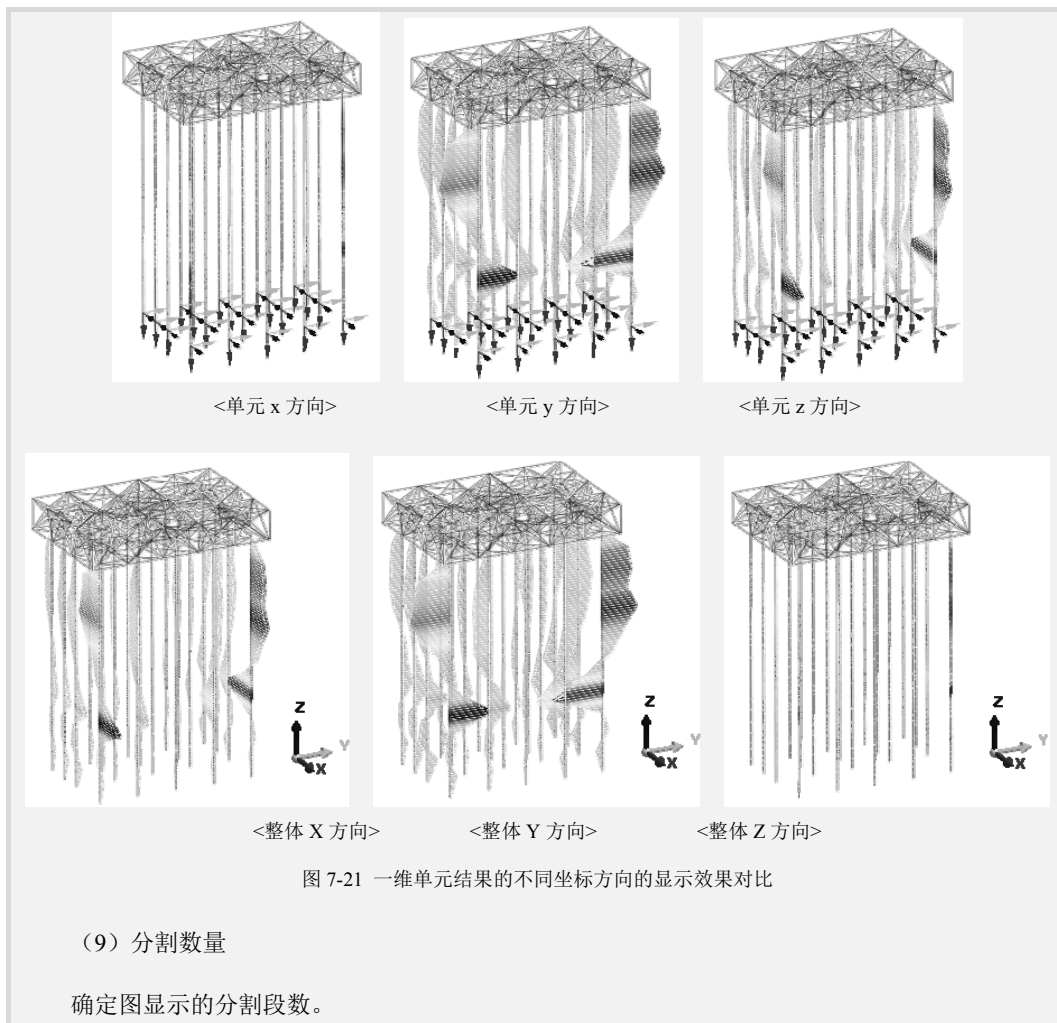


图 7-20 一维单元结果的结果方向



## 7.2.4 平滑

### 概要

以连续或条纹云图的形式显示分析结果。



图 7-22 平滑设置对话框

### 详细说明

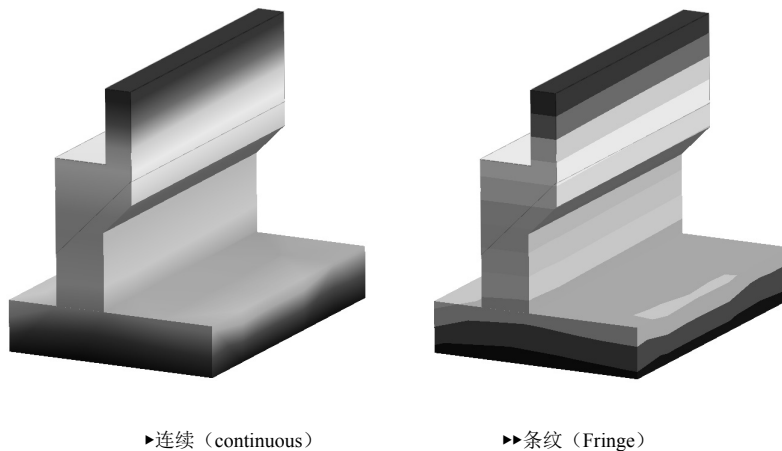


图 7-23 连续/条纹的显示效果对比

1. 连续

平滑的显示云图的轮廓。

2. 条纹

以带状条纹区分来显示云图轮廓。

### 7.2.5 填充

#### 概要

决定云图的填充形式，可以设置为云图填充和线填充。



#### 详细说明

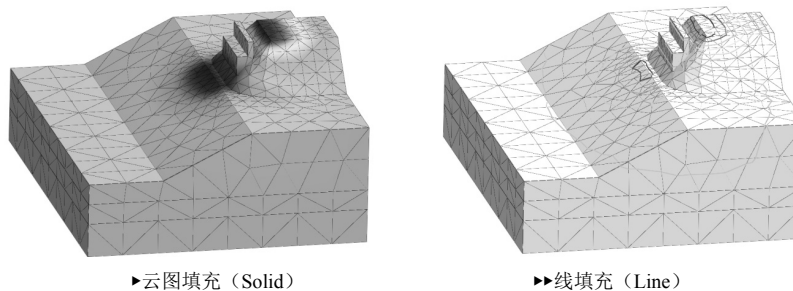


图 7-24 云图填充/线填充的显示效果对比

1. 云图填充

分析结果按连续云图显示。

2. 线填充

以等值线的形式来显示分析结果。



### \* 调节线宽度

选择线填充的形式时，可以在属性对话框的云图设置中改变等值线的宽度。

调整属性>云图>线宽。



图 7-25 云图属性窗口

## 7.2.6 线类型

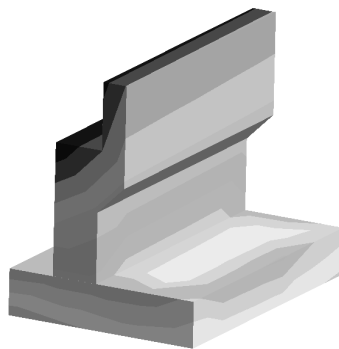
### 概要

在激活的分析结果图形中定义网格组的显示类型。

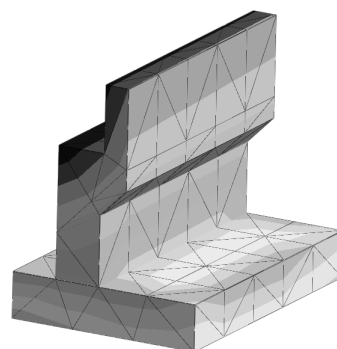


图 7-26 线类型设置对话框

### 详细说明



▶无线



▶▶网格线



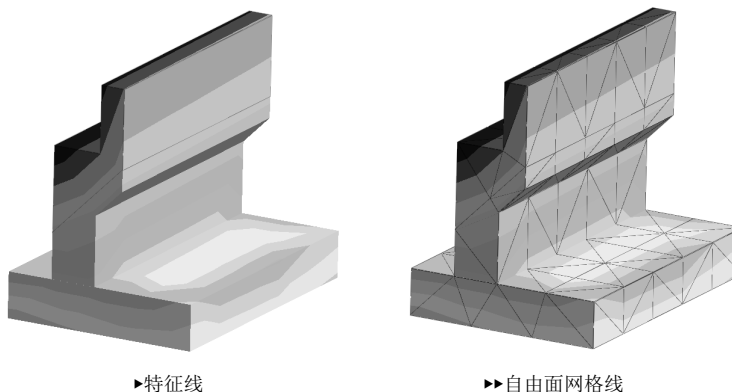


图 7-27 不同线类型的显示效果对比

- 1. 无线**  
图形中无网格。
- 2. 网格线**  
显示网格的线。
- 3. 特征线**  
按网格的特征线显示。
- 4. 自由面网格线**  
按网格线的形式显示网格。

### 7.2.7 变形

#### 概要

基于选择的变形形式，确定图形结果的显示方式。

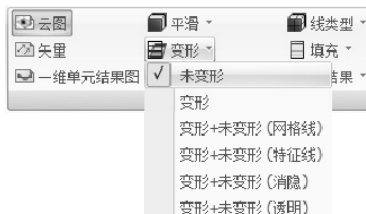


图 7-28 变形设置对话框

#### 详细说明

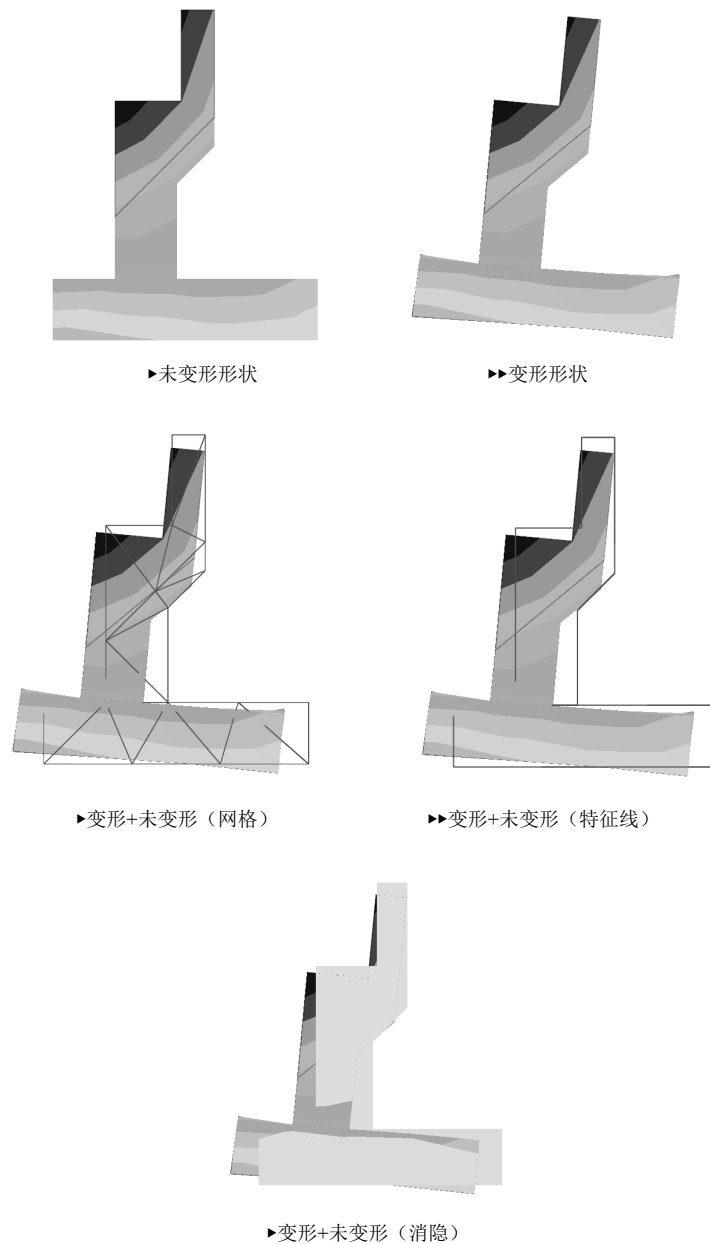


图 7-29 不同变形设置的显示效果示例

#### 5. 未变形

按未变形的形状绘制。换言之，图形结果显示的是变形前的形状。

#### 6. 变形

显示变形后形状。

#### 7. 变形+未变形（网格线）

同时显示变形和未变形的形状（按网格线显示）。

#### 8. 变形+未变形（特征线）

同时显示变形和未变形的形状（按特征线显示）。

### 9. 变形+未变形（消隐）

同时显示变形和未变形的形状（按几何形状颜色显示）。

### 10. 变形+未变形（透明）

同时显示变形和未变形的形状（按透明条件下的几何形状颜色显示）。

### 属性-变形

指定变形形状的图形处理的详细属性。

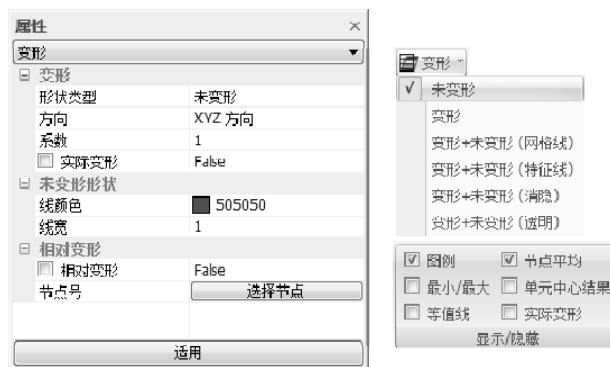


图 7-30 变形属性窗口

#### [变形]

##### (1) 形状类型

以在结果图形表现中选择的变形形状为基准展示。

##### (2) 系数

输入变形形状在窗口中显示的缩放系数。

##### (3) 实际变形

勾选：显示为实际变形。

未勾选：为了便于辨别变形形状，程序按任意的缩放系数设置。（最大变形是整体模型尺寸的 1/20）。

#### [未变形形状]

指定要在窗口中同时显示的变形形状和未变形形状。适用于按变形+未变形（网格线），变形+未变形（特征线）显示的情况。

##### (1) 线颜色

指定显示未变形形状的线颜色。

##### (2) 线宽

指定显示未变形形状的线宽度。

#### [相对变形]

##### (1) 相对变形

在节点号中选择的节点按相对位移显示。

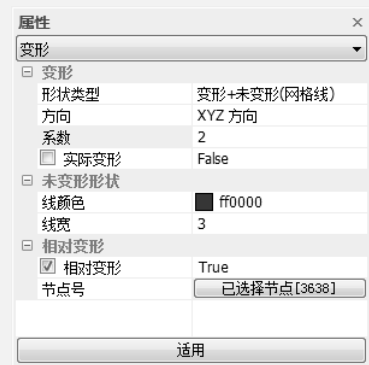
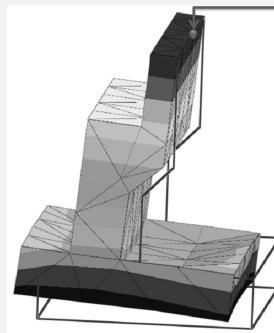
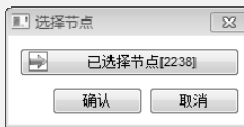
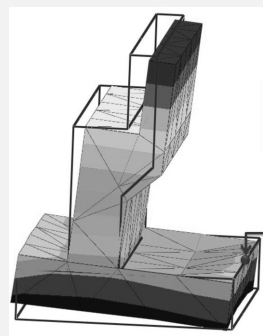
## (2) 节点号

选择相对变形的基准点。



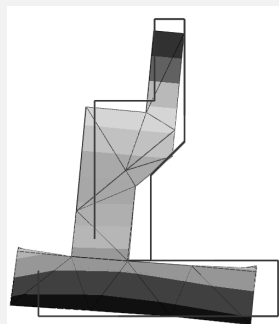
### \* 使用相对变形

选择想要检查的相对位移的基准位置，来查看变形形状。

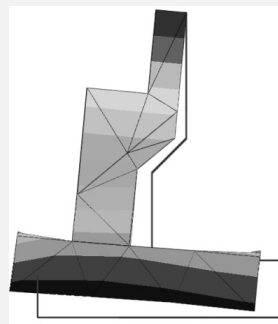


<基准节点位于底部>

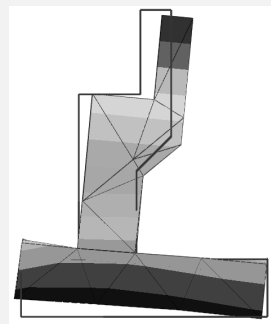
<基准节点位于顶部>



<原点>



<基准节点号 3638>



<基准节点号 2238>

图 7-31 不同节点位置的显示效果对比

## 7.2.8 无结果

### 概要

确定无结果值的对象的显示方式。

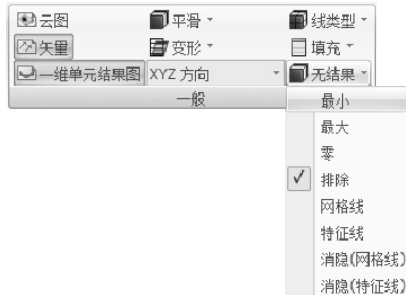


图 7-32 无结果设置对话框



### \* 无结果的属性设置

指定无结果对象的显示设置。



图 7-33 无结果属性窗口

#### (1) 颜色类型

指定按网格组的颜色或用户定义的方式显示无结果的对象。用户定义时，根据显示模式，指定的消隐颜色及无结果的颜色显示在窗口上。

#### (2) 无结果单元宽度

用网格线形式显示无结果对象时，指定网格线的宽度。

#### (3) 无结果实体

最小：在云图中按最小的结果值显示无结果对象。

最大：在云图中按最大的结果值显示无结果对象。

零：在云图中按 0 值显示无结果对象。

排除：在云图中不显示无结果对象。

网格线：在云图中以网格线形式显示无结果对象。

特征线：在云图中以特征线形式显示无结果对象。

自由面（网格线）：在云图中以自由面网格线形式显示无结果对象。

渲染（网格线）：在云图中以渲染网格线形式显示无结果对象。

渲染（特征线）：在云图中以渲染特征线形式显示无结果对象。

## 7.3 高级功能

提供各种特定节点或单元的结果输出形式，如结果标记、提取结果、图形等。输出结果时，提供与MS-EXCEL 联动的结果表格，可以方便查看各阶段的分析结果。



图 7-34 高级功能菜单

### 7.3.1 结果标记

#### 概要

在用户想选择的节点或单元上进行标记并显示标记结果。

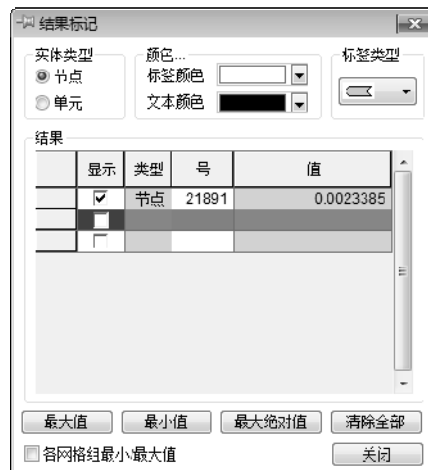


图 7-35 结果标记对话框

#### 方法

在窗口上选择节点或单元生成结果标记。用户可以改变标签的颜色、文本颜色、标签类型等。

可以查看当前结果中节点/单元的信息和值，包括最大、最小、最大绝对值，以及各网格组的最小值和最大值。

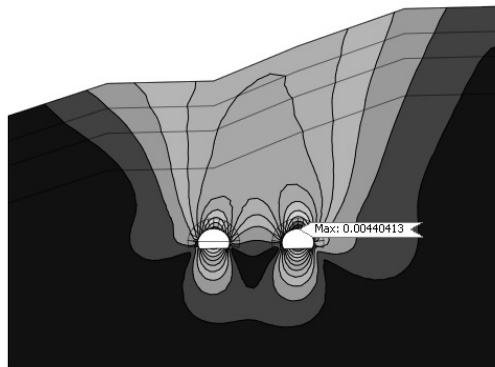


图 7-36 结果标记的示例

## 7.3.2 多步骤等值面

### 概要

同时显示多个分析步骤的等值面。



图 7-37 多步骤等值面

### 方法

选择要显示等值面的分析条件，并指定结果类型、结果值和步骤，输出等值面。等值面可以通过滑动条在介于最大/最小值间的全部结果中选择。

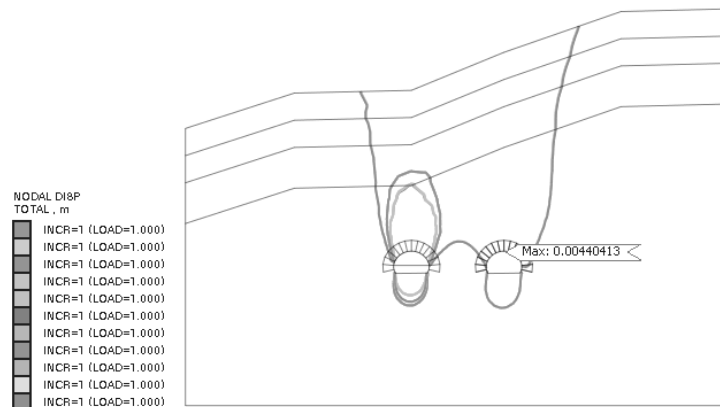


图 7-38 结果显示的示例

## 7.3.3 提取结果

### 概要

从分析结果中提取用户想要的结果。





图 7-39 提取结果

### 方法

选择提取结果的分析组和结果类型，并指定结果。

结果类型与分析模型设定（2D/3D），材料属性（平面应变、板、实体等）的不同而不同。

[步骤：结果]

指定要提取结果值的步骤。选择列表中的所有步骤时，点击[选择全部]。取消全部选择状态时，点击[取消选择全部]。

顺序：[步骤]和[节点]。

选择[步骤]时，提取的结果值在表格中按所属步骤的顺序排列。选择[节点]时，提取的结果值的排列顺序，对于节点结果按节点坐标，单元结果按单元质心坐标。

提取节点的结果值时，用户可以直接输入要提取节点的节点号，也可以通过在窗口中选择节点。另外，也可以分别只提取最大/最小/最大绝对值。勾选[仅显示节点/单元]时提取在窗口中显示的节点/单元中的最大/最小值。

对于 1D 单元，可以直接在单元上指定要提取结果的位置。

## 7.3.4 局部方向的合力

### 概要

计算实体单元或板单元在任意截面的合力。



图 7-40 局部方向构件的合力

## 方法

选择计算局部方向合力的分析工况和分析步骤，并定义截面。

勾选[文本]，并选择平面颜色，以文本文件的形式输出计算截面形心位置的截面力分量，在窗口中显示定义的平面。



局部方向的合力功能能够非常方便地自动计算实体单元或板单元的截面力。根据各节点的内力，这个功能可计算实体或板单元的任意截面形心处的内力和。局部方向的合力功能可用于详细分析结构特定截面后，计算结构设计中所需的内力。

由用户可通过任意 3 点定义的无限大平面，在板单元或实体单元组成的结构间交叉点处确定任意截面。确定截面的形心会自动计算，根据相关分析步骤的应力结果计算与已知方向相同的截面内力。

如果定义的平面内存在并不考虑的结构时，须钝化与结构相关的网格组后再指定平面。

## 7.3.5 线上图

### 概要

以线上图的形式在指定的任意直线或任意平面上查看分析结果。



图 7-41 线上图对话框

### 方法

按[线]或[平面]的方式定义结果图形的显示位置。

[线]: 定义位置时, 可以选择两点线或线。

对于两点线, 用户可直接在窗口上选择坐标, 或者直接输入 2 点坐标。

定义生成结果图形的方向, 并在输入分割数后, 按分割的数量显示结果图形。

结果图形方向是基于整体坐标系 (GCS), 默认方向是 (+)。勾选[反转]选项时, 图形按相反的方向显示。按选择的线显示的情况下, 勾选[仅在节点]就会在节点位置生成结果图形。只能选择一条线。

在二维模型中, 任意线结果图形可用于查看结构的相对沉降形态。

[平面]: 定义位置时, 可以选择 3 点面或平面。

3 点面时, 用户可直接在窗口中选择坐标, 或者直接输入 3 点坐标。

结果图形的方向可以选择[平面], 或者[平面法向]方向。勾选[反转]选项时, 图形按相反的方向显示。

输入分割数后, 按分割的数量显示结果图形。

在三维模型 (例如, 模型衬砌过渡部分) 中, 可指定任意面内的结果图, 以方便地查看特定截面的内力分布。

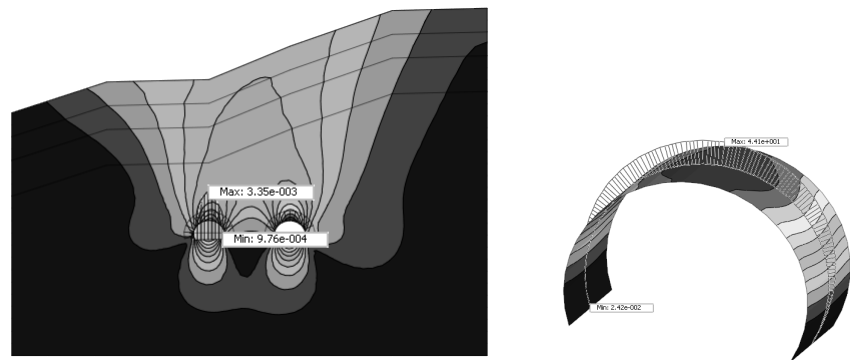


图 7-42 线上图的示例



指定的任意线上图的结果图形会注册在工作目录树>结果列表中, 通过选择在窗口内是否显示/隐藏。鼠标右键调用关联菜单进行编辑。

## 7.3.6 其他-单元云图

### 概要

在窗口上输出不同类型的单元结果。



图 7-43 输出单元云图

### 方法

指定结果组和步骤后，选择要输出的单元类型和单元结果。

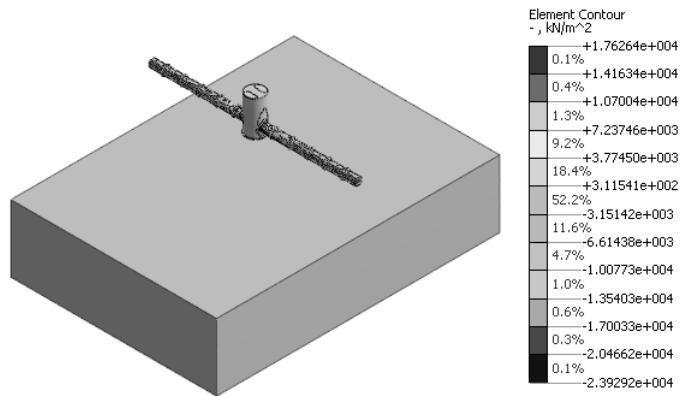


图 7-44 同时显示岩土应力和板单元应力

## 7.3.7 其他 - 反力总和

### 概要

用表格显示反力总和。在结果项目中，可以用表格检查所有可输出反力的分析。



图 7-45 反力总和

### 方法

指定执行分析的分析工况项目和步骤后，点击[更新总和]，反力和就会自动计算并在表格内显示总反力。

## 7.3.8 其他 - 转换为 dB（分贝）

### 概要

将位移、速度、加速度转换为分贝（dB），并以表格显示。



图 7-46 分贝转换

### 方法

指定分析组/步骤/结果后，选择节点并输入参考值，将相关节点的位移、速度、加速度转换为分贝（dB）。

$$N(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{X}{X_{ref}} \right)$$



一般来说，振动级别采用  $g$ （加速度）或  $g^2$ ，但通常更多使用的是 dB（分贝）。这是由于发生噪音或振动时，人所能感觉到的物理量范围非常广，因此按线性尺度来表达物理量是不恰当的。

分贝（dB）可以按常用对数函数并以物理量  $X$  与参考物理量  $X_{ref}$  的比值来表示。

在这里，参考物理量的声压为  $20 \mu\text{Pa}$ ，加速度为  $\mu\text{m}/\text{s}^2$ （KS, JIS）。所谓  $20 \mu\text{Pa}$  的声压是参考“健康人所能听到的最弱声压”。

表 7-2 分贝参考等级(ISO R 1683)

物理量	定义	参考等级
-----	----	------

振动分量	振动加速度级别	$L_a = 20 \cdot \log_{10}(a / a_0)$ dB	$a_0 = 10^{-6}$ m/s <sup>2</sup>
	振动速度级别	$L_a = 20 \cdot \log_{10}(v / v_0)$ dB	$v_0 = 10^{-9}$ m/s
	振动位移级别	$L_a = 20 \cdot \log_{10}(d / d_0)$ dB	$d_0 = 10^{-12}$ m

### 7.3.9 其他 - 3D-2D 助手

#### 概要

3D 分析后查看结果时，可采用剪切面功能来查看任意截面的云图。这里，切割任意截面时，分析结果，可以查看截面上对应的值，如最小、最大、最大绝对值等。因为，所有有限元分析都是以单元节点为参考来计算结果。当任意切面穿过实体单元内部时，节点附近的结果会自动插值输出。



图 7-47 3D-2D 助手（任意截面结果输出）

#### 方法

任意截面内的结果标签按照下面概述的方法输出。

(1) 从添加视图控制工具栏>剪切面（切割视图模型）中添加查看结果的任意截面。可按整体坐标轴方向或任意截面方向添加期望的剪切面。



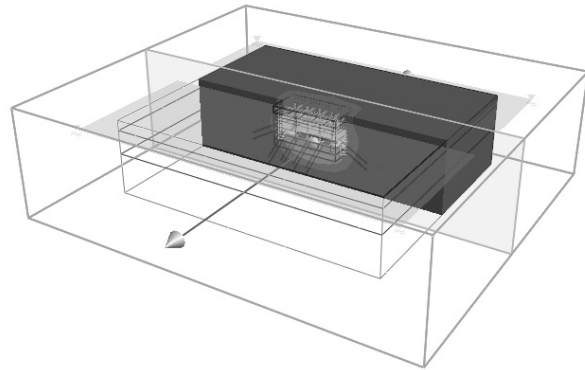


图 7-48 剪切面的示例

(2) 选择结果>高级>其它>3D-2D 助手

选择[显示点]选项，显示任意剪切面上的所有可输出结果的节点。对于结果值标签，通过选择的节点或单元来检查分析的数值，并在截面上最小、最大、最大绝对值的位置显示。

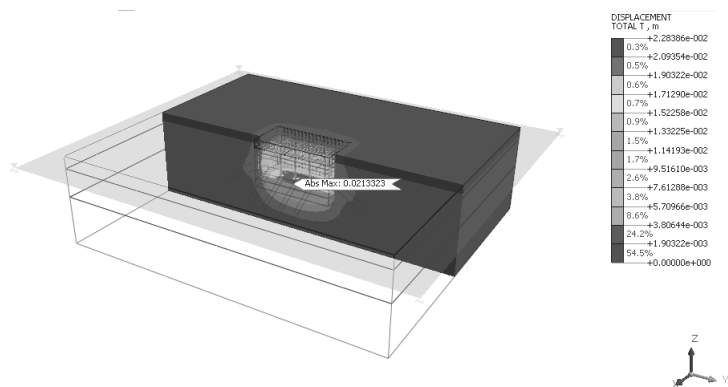


图 7-49 3D-2D 助手的示例

## 7.4 特殊后处理

可以确认渗流分析结果（流量/流径）、边坡稳定分析（SAM）结果、基于时间变化的历程曲线图等。



图 7-50 特殊后处理菜单

### 7.4.1 渗流结果

#### 概要

根据渗流分析结果确认流径和流量。



图 7-51 渗流结果（流径、流量）

#### 1. 流径

##### 方法

指定已执行分析的分析工况和步骤后，输入要显示的流径位置（流径上的任意点）的坐标。可采用捕捉功能输入坐标值。

流径可以按线或管显示，线时可定义线宽、管时可按比例调整管的直径大小。

流径的颜色可以按单色或云图显示。

箭头是显示流径方向的标志。通过缩放系数和分割数量可以调整箭头尺寸和数量。

勾选了[保留以前的流径]时，在窗口中点击的每个位置都会显示流径。取消勾选这个选项时，只在最后点击的位置显示流径。

勾选了[动态显示]的情况下，点击窗口时就会即使显示流径。没有勾选这个选项时，只有点击[适用]按钮才能在窗口上显示。





图 7-52 流径的示例

## 2. 流量

### 方法

指定已分析的分析工况和步骤后，选择要计算流量的节点。

可在窗口内选择并指定节点，或在已知节点号的情况下，勾选[直接输入]可以输入节点号。

点击计算按钮就会自动计算节点流量，计算的流量值就会在对话框上显示。

流量  m<sup>3</sup>/min

图 7-53 流量计算对话框

在各节点的流量值由速率之和确定，(+) 是流入，(-) 是流出。

## 7.4.2 边坡稳定 (SAM) 结果

### 概要

输出考虑极限平衡法指标的边坡稳定分析结果。



图 7-54 边坡安全系数结果对话框

### 方法

选择已分析的分析工况和分析阶段，查看已定义分析阶段的虚拟破坏面的结果。

勾选[边界组标识]，确认虚拟破坏面区域的边界条件。

通过最小、最大能够快速确认破坏安全系数最小或最大的区域，在绘图选项可以更改相应位置的破坏面的线宽、安全系数、字体大小、颜色等。

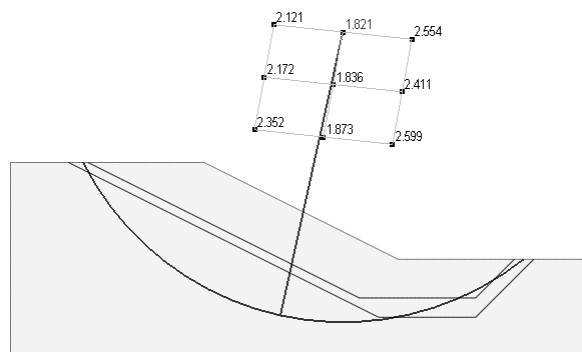


图 7-55 SAM 结果的示例

## 7.4.3 历程

### 概要

确定存在时间相关的分析工况在特定位置的结果，采用时变图形或者在工作窗口按时间显示结果。

#### 1. 图形

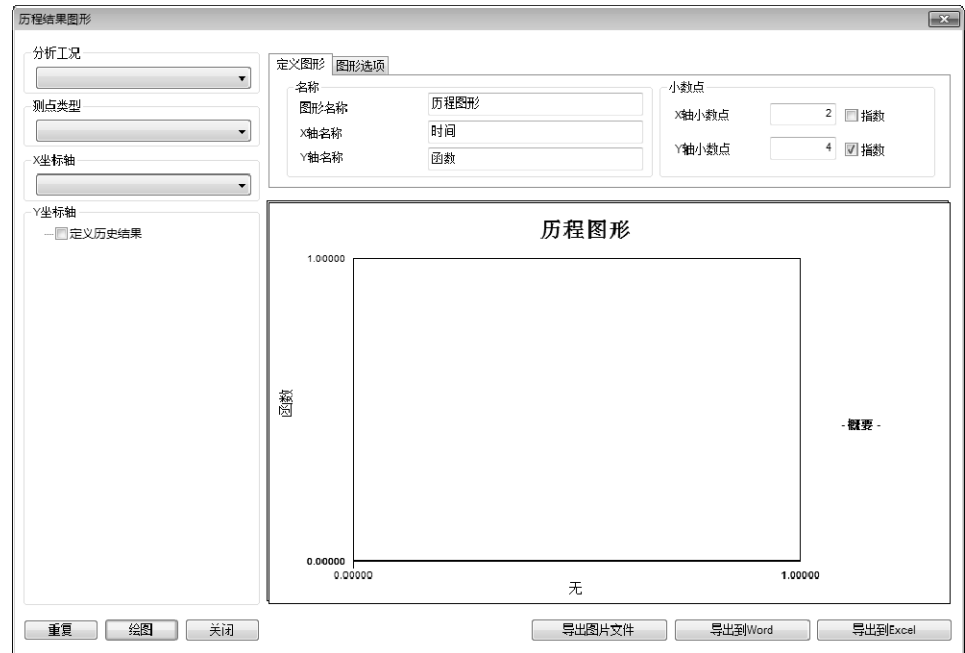


图 7-56 历程结果图形对话框

### 方法

选择要输出结果的分析工况及各分析类型的函数类型。函数类型可以是时间相关的分析工况（瞬态渗流分析、固结分析、线性/非线性时程分析、二维等效线性分析、完全渗流-应力耦合分析）。

Y 测点的类型可在分析>特殊后处理>历程中指定，各测点的类型如下。

※注意不能包含未在分析工况中输出的数据类型。

表 7-3 历程测点类型及说明

测点类型	结果类型
位移/速度/加速度	位移、速度、加速度、相对位移、相对速度、相对加速度
桁架/植入式桁架/土工栅格 (1D)	应变、应力、内力、渗流
梁	应变、应力、内力、渗流
平面应变	应变、应力、内力、渗流
平面应力/土工栅格栅格 (2D)	应变、应力、内力、渗流
轴对称	应变、应力、渗流
板	应变、应力、内力、渗流
实体	应变、应力、渗流
反应谱	相对位移、相对速度、相对拟速度、绝对加速度、绝对拟速度
传递函数	位移、速度、加速度
渗流节点结果	总水头、压力水头、流量

用于结果图形纵轴的输出函数为 Y 轴。这个函数必须在分析>历程中提前定义。

时间历程图形的名称、X 轴和 Y 轴可根据“定义图形”来定义，并且数值可按指数形式表示。

在图表选项中可以详细地设置 X 轴、Y 轴。也可以确定最大/最小值，线条样式、线条宽度、线条类型。

在对话框内会显示生成的图表，可以导出图像文件、导出图像为 Word 文件、导出图像为 Excel 文件等多种形式。

## 2. 云图

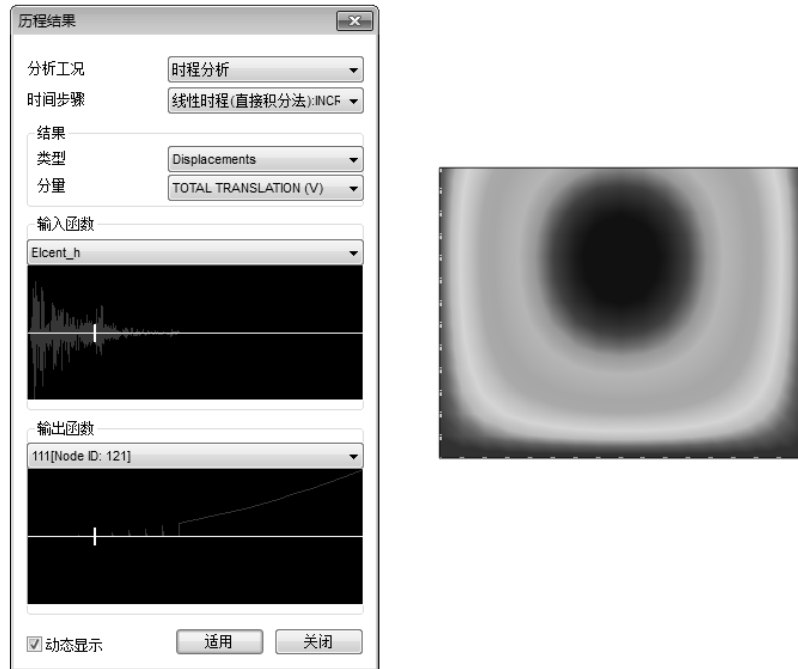


图 7-57 历程结果云图显示的示例

### 方法

选择要查看结果的分析工况并定义时间步骤。

生成的时间步骤数可由分析>分析工况中设定的总时间步骤确定。

选择分析结果的输出类型并在窗口上自动显示结果云图。

分析工况中的历程函数可通过[输入函数]反应。在输入函数中可以查看时间步骤中指定的时间，输入结果则按照选择的时间步反映。

在“历程”菜单中指定[输出函数]，并且可查看结果输出函数。在输出函数中可以查看时间步骤中指定的时间，输出结果则按照选择的时间步反映。

勾选[动态显示]选项，则根据选择的时间步骤可在窗口内及时输出结果。

## 7.5 其他



图 7-58 其它后处理菜单

### 7.5.1 图像文件

#### 概要

按图像文件或包含图像文件的 Word 文件输出已完成分析的结果。

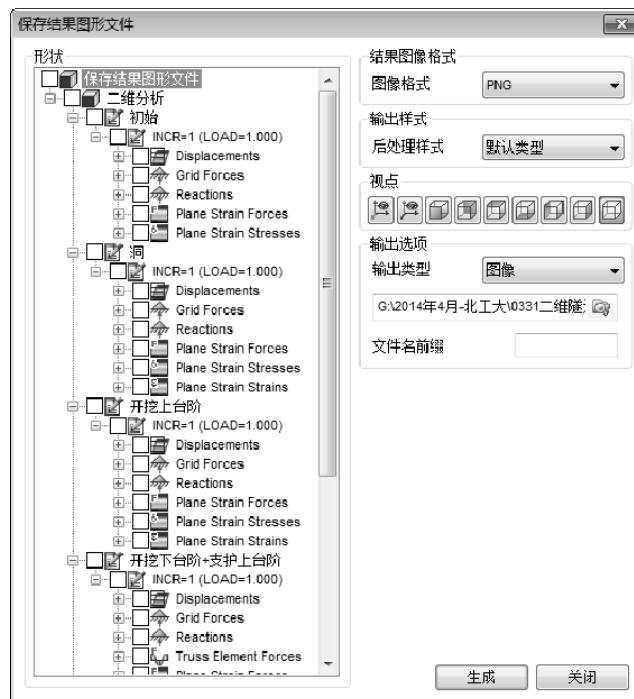


图 7-59 图像文件

#### 方法

在构成子目录树菜单中勾选想要保存结果标题，确定要保存的图像格式。

在 GTS NX 中支持 PNG、JPG、BMP 文件格式的图像。

选择后处理样式。

当前后处理图形显示的各种选项保存在结果目录树中后，后处理样式可用于方便地确认不同的结果数据。

在左侧工作目录树中，点击鼠标右键调出关联菜单后，用[添加新后处理样式]菜单保存当前各种图形的显示设置。双击使用已保存的后处理样式。

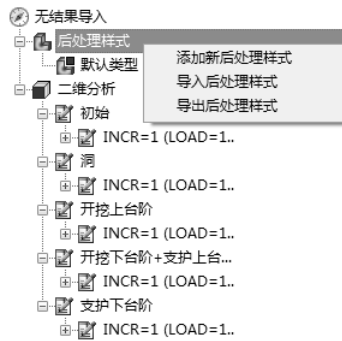


图 7-60 后处理样式管理菜单

后处理方式可以在关联菜单中选择[导入后处理样式]，导入其他模型菜单中使用过的后处理方式。而且可以用[导出后处理样式]功能，保存当前模型文件设置的后处理方式。

[视点]可用于便利地在窗口中捕捉模型的方向。

结果可按图像文件或 Word 文件的输出形式保存，并指定输出路径。

[文件名前缀]是指保存文件时，在文件名前自动附加的前缀。

## 7.5.2 初始化

### 概要

将当前后处理状态设置为程序默认的后处理状态。

### 方法

点击[初始化]就回到默认的后处理状态。

默认初始值是连续的云图，[线类型]是特征线，[变形类型]为未变形。

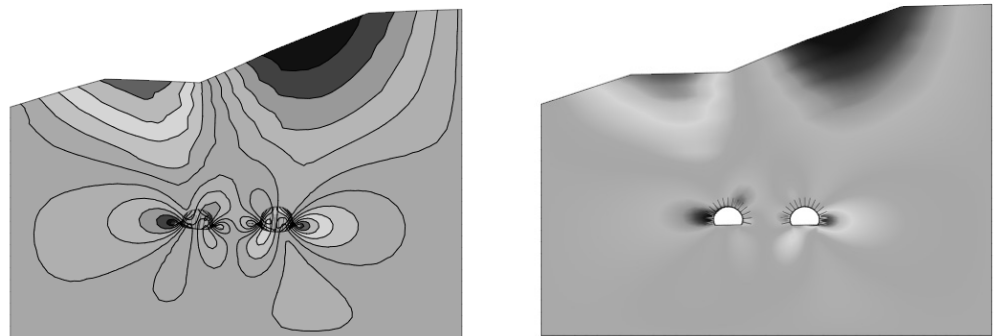


图 7-61 初始化前/初始化后的结果对比

## 7.6 几何

### 7.6.1 改变颜色

#### 概要

编辑几何形状/网格/材料/属性的颜色。

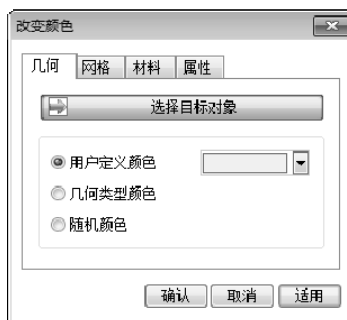


图 7-62 改变颜色对话框

#### 方法

指定要改变的目标和颜色点击适用按钮。

利用此功能，可方便地定义几何/网格/材料/属性的颜色，也可以在属性对话框中改变颜色。



图 7-63 对象颜色及对应的属性窗口示例

[用户定义颜色]: 用户可定义选择对象的颜色。

[几何类型颜色]: 变为几何类型的颜色。

[随机颜色]: 指定选择对象为随机的颜色。

[显示号]: 勾选查看材料/属性号。

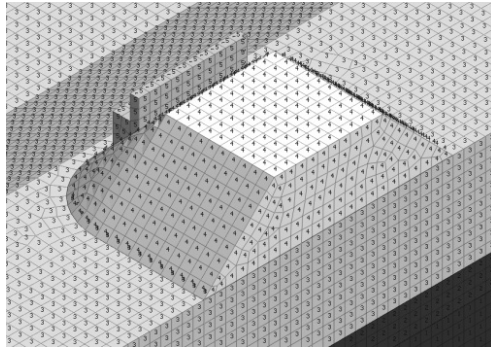


图 7-64 查看材料/属性号

## 7.6.2 颜色类型

### 概要

按几何形状颜色或材料颜色分别显示面/实体等几何形状或网格组形状的颜色。

### 方法

选择形状颜色或材料颜色。

这个工能可用于查看建模过程中已经指定的材料属性类型。

## 7.6.3 随机颜色

### 概要

随机指定面/实体等几何形状或网格组的颜色。

### 方法

在程序中自动指定几何形状或网格组的颜色。

点击工作窗口上端的视图工具栏中点击几何形状  或网格组  就可以对几何形状或网格组设置任意颜色。



## 7.7 节点/单元

### 7.7.1 查询

#### 概要

查看节点或单元信息的功能。

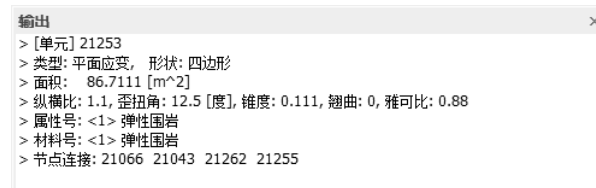


图 7-65 节点/单元查询对话框

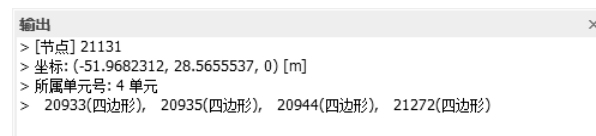
#### 方法

指定要查询的内容（节点或单元）后，输入节点和单元号。也可以在窗口上直接选择特定的节点或单元。

查询的对象为节点时，可输出节点坐标及所属单元相邻单元；选择单元时，显示单元的类型及形状、体积、纵横比、属性/材料、节点连接信息。



(a) 节点信息



(b) 单元信息

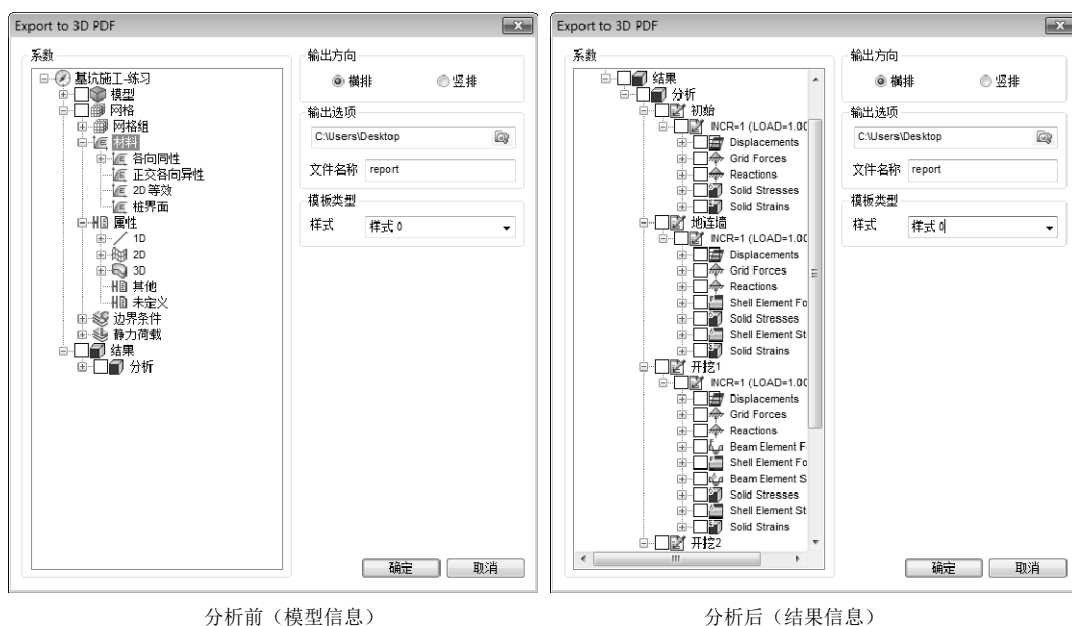
图 7-66 节点/单元信息输出

## 7.8 导出 3D PDF

### 7.8.1 导出 3D PDF

#### 概要

将分析前的模型信息或分析后的结果信息保存为 3D PDF 文件。可实现与程序基本相同的操作，如调整三维视图，查看截面信息等。所以，在不打开模型/结果文件的情况下，可以通过一个 PDF 文件直接查看模型/结果信息。



分析前（模型信息）

分析后（结果信息）

图 7-67 3D PDF 模型信息及结果信息

#### 方法

以 PDF 文件格式导出模型分析前的信息。指定输出方向、路径、文件名并点击确认后，生成 PDF 文件，如上图所示。

与程序类似，这个功能也包括模型树/视图工具等，基本的显示/隐藏、旋转、移动等操作都可用，并且用来查看 3D 模型信息。

特别的，可以对 3D 模型添加模型尺寸线和标注，并且可以查看任意的截面信息。

分析后，可保存结果图像，并且可在树形结构中选择输出结果组成 3D PDF 文件。

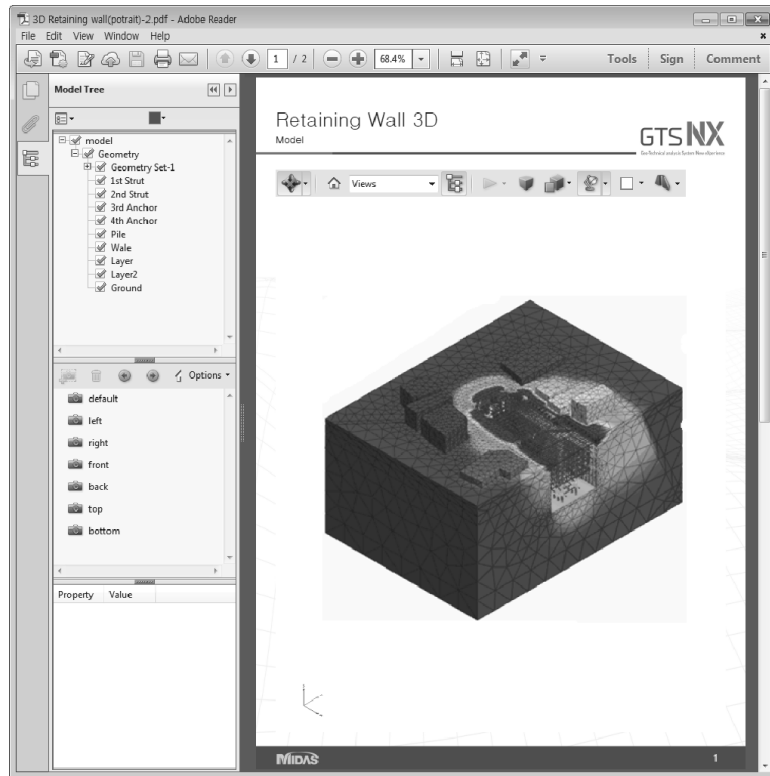


图 7-68 3D PDF 输出结果的示例

## 7.9 飞行模式

### 7.9.1 飞行模式

#### 概要

视图工具栏下方的透视图功能可用来查看 3D 模型的内部信息和结果。



图 7-69 透视图工具按钮

对于透视图功能，查看的位置需要通过鼠标实现，但是对于沿着特定导向曲线的自动模拟时，可采用“飞行模式”功能。

导向曲线可选择线或线组，并可查看模型内部。这个功能在分析前后都适用。



图 7-70 飞行模式设置对话框

#### 方法

选择导向曲线。在模型内部直接绘制路径或者选择已有几何形状的子形状线。

选择线的同时会在处理的方向上显示一个箭头，此方向可以通过[反转]方向的选项来改变。

模拟操作可采用播放、暂停、停止按钮，并可点击保存按钮来保存为视频文件。

#### [控制]

通过滚动条控制处理速度。

特别的，“进/退”按钮只在暂停状态下启动，模型内部的结果可以沿着导向曲线，来回前进或后退进行播放查看。当前查看的模型也可以放大/缩小。

#### [旋转]

该视图的角度可沿着导向曲线向左/右/上/下旋转，并且可以参照导向曲线进行移动（偏移）。因此，当导向曲线的位置和目标位置不同时，通过使用旋转/移动操作，仍然可以查看模型信息。

在飞行模式中的所有按钮可以采用以下的快捷键，并且也可以按每一个按钮的说明进行查看。

表 7-4 飞行模式快捷键的说明

快捷键列表	
A	左视图
D	右视图
S	顶视图
W	底视图
1	旋转到原位置
→	向左移动中心
←	向右移动中心
↑	向上移动中心
↓	向下移动中心
2	移动中心到原位置
F	前进（仅适用于暂停状态）
B	后退（仅适用于暂停状态）

愿 midas GTSNX 软件

能对岩土结构分析和设计领域的技术发展贡献微薄之力

---

制 作： 北京迈达斯技术有限公司

---