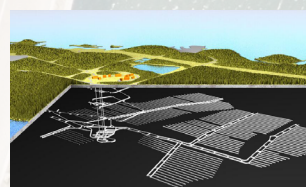
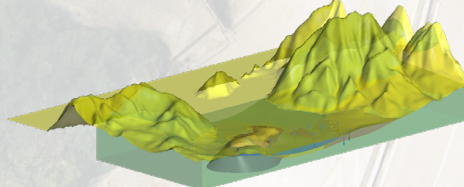
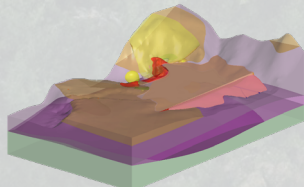
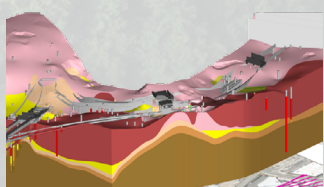


# Leapfrog Works

For civil & environmental projects



- Leapfrog Works 动态三维地质建模软件介绍
- 混凝土结构细部分析与设计软件 IDEA Detail 简介
- ETABS 欧标混凝土框架设计要点详解(二)——框架柱设计
- 模态分析的实现与常见问题
- 工程应用常见问题案例解析



主 办：北京筑信达工程咨询有限公司

主 编：李 立

文字编辑：王 希

美 编：张翠莲、王 蓉

北京筑信达工程咨询有限公司

地址：北京市石景山区古盛路 36 号泰然大厦 4 层 408 室

电话：010-68924600 技术热线：010-68924600-200 传真：

010-68924600-8

网址：www.cisec.cn 在线支持：support.cisec.cn

邮箱：support@cisec.cn（技术支持）

sales@cisec.cn（产品销售）

筑信达武汉技术中心

地址：武汉市洪山区武珞路 717 号兆富国际 1308 室

技术热线：027-8788 6890 / 8788 6891

#### 区域代理

华东区

上海江图信息科技有限公司

联系人：薛平

手 机：137 0172 6345

华南区

广州倍益软件技术有限公司

联系人：田茂金

手 机：137 6071 9009

华中区

武汉百思通科技有限公司

联系人：叶亮

手 机：139 9561 6575

西南区

金橡果科技成都有限公司

联系人：刘宇

手 机：185 1282 0985

# 目 录

## Content

### — 专题文章 —

#### SEEQUENT

Leapfrog Works 动态三维地质建模软件介绍

1

#### IDEA

混凝土结构细部分析与设计软件 IDEA Detail 简介

9

#### CSI

ETABS 欧标混凝土框架设计要点详解（二）

14

——框架柱设计

模态分析的实现与常见问题

24

### — 工程应用常见问题案例解析 —

隔板约束导致弦杆轴力异常

31

荷载模式相同导致阶段施工荷载重复施加

34

连接单元变形与节点位移的关系

37

多边形面对象剖分报错

39

桩基承台受冲切计算结果异常

42

采光顶交汇节点的几何建模

46

GAP 单元产生的异常“拉力”

48

新版发布

50

活动报道

53





# Leapfrog Works 动态三维地质建模软件介绍

筑信达 郭晓通

## 1. Leapfrog Works 概述

Seequent 是一家全球领先的地球科学建模、分析、数据管理与协作领域的软件商，总部位于新西兰。Leapfrog Works 是 Seequent 推出的面向土木工程与环境工程领域的动态三维地质建模软件包。

Leapfrog Works 的主要特点包括：

- 1、动态特性：新的场地数据可以很快地输入到 Leapfrog Works 进行模型更新。这意味着最初创建的地质模型可以随着不同的工程地质勘察阶段快速迭代，而不是重新创建模型。
- 2、数据集成：Leapfrog Works 可以集成多种格式的 GIS、勘探、地球物理、产状、工程设计等数据，并用于三维地质模型、属性模型的构建。
- 3、建模算法：Leapfrog Works 可以帮助用户快速创建形状或分布复杂的地层曲面与地质体，例如溶洞、侵入的岩层、岩脉、地层的互层、地层的尖灭等等。
- 4、剖面切割：Leapfrog Works 可以快速地在三维模型中进行多种类型的剖面切割，剖面既可以用于打印成图，也可以提取几何轮廓用于工程设计与分析。
- 5、模型利用：Leapfrog Works 构建的三维地质模型可以与岩土工程设计与分析、建筑信息模型、地下水流分析、污染物迁移分析等相结合。

Leapfrog Works 采用隐式建模技术，隐式建模是地质建模中的一项重大创新。传统的地质模型往往先要定义二维剖面，然后在剖面上通过连线的方式来绘制地层。以这种方式对地质体进行建模往往耗时耗力，灵活性差，当有更多的数据可用时，更新模型往往会变得困难。而隐式建模采用由数据直接推导模型的方式。首先在三维空间中对数据属性进行可视化，然后基于某种算法来推导要建模的变量，如构建地层表面。隐式建模的优势点包括：易于与最新勘测数据保持同步。新的勘测数据可以很快地集成到模型。工程师可以花更多时间研究复杂的地质结构细节，构建精度更高的模型；隐式建模将实测数据与主观假设分开，允许从数据中快速模拟不同的假设，可以对一系列地质解释进行快速测试。隐式建模提供的一系列可视化地质模型也为用户提供了与其它专业人员针对场地进行沟通的新工具。

Leapfrog Works 使用三维 FastRBF 插值方法，FastRBF 是一种从径向基函数发展而来的数学算法，可以快速插值任何数值数据，描述数据在三维空间中的真实分布情况，且让构建的对象更贴近其自然形态。Leapfrog Works 包含两种主要的插值函数：球面插值函数和线性插值函数。一般情况下，实测数据对未知数据的影响存在一个有限的影响范围，超过该范围，数据的影响应降为零，这种情况下，建模时可采用使用球形插值函数。如果实测数据对未知数据的影响不存在一个有限的影响范围或采样数据稀疏、不规则，建模时可采用线性插值函数。

## 2. Leapfrog Works 数据集成

### 2.1 GIS 数据

Leapfrog Works 支持用户从外部导入点、线、面、图像等形式的 GIS 数据，支持导入的数据格式包括：形状文件 (\*.shp)、MapInfo 文件 (\*.tab\*.mif)、ESRI 地理数据库文件 (\*.mdb、\*.accdb)。GIS 数据可以利用于构建地表曲面模型，也可以快速贴图、叠加到地表曲面。

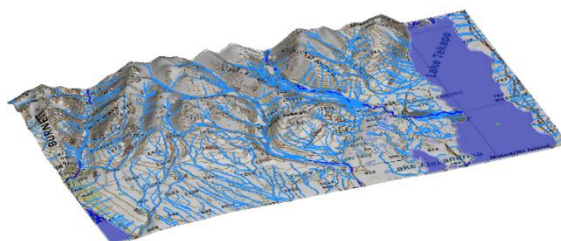


图 2-1 GIS 曲线和图片



## 2.2 钻孔数据

Leapfrog Works 支持从 OpenGround 以及任意的 ODBC、Excel 数据库直接导入钻孔数据，Leapfrog Works 额外支持导入的钻孔数据文件格式包括：CSV 文本文件 (\*.csv)、AGS 文件 (\*.ags)、ASCII 文本文件 (\*.asc)、纯文本文件 (\*.txt)、数据文件 (\*.dat)。

Leapfrog Works 支持给钻孔定义各类属性，除孔口与地层的位置信息、水位信息、揭露地层岩性信息以外，Leapfrog Works 允许用户定义钻孔及地层的各类其它属性（开孔日期、标贯击数、RQD、岩心描述等）及属性类型（数值、字符、时间）。自定义的属性可以在交互式标签中进行查看，并用于可视化模型构建。Leapfrog Works 支持钻孔段贴图功能，允许用户在相应的钻孔段粘贴岩心照片或创建其它图表（如 RQD 分布图）。此外，Leapfrog Works 提供了钻孔统计分析功能，用户可以对钻孔的各项属性信息进行统计评估，并利用散点图、曲线图等方式进行统计数据的可视化。

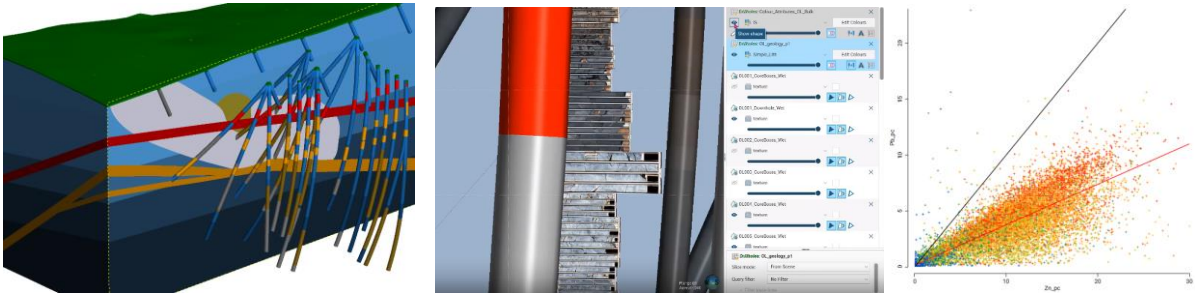


图 2-2 leapfrog Works 钻孔

## 2.3 地球物理

Leapfrog Works 支持多种格式的地球物理数据/图像的导入，支持的文件类型和格式包括：ASCII 文本文件 (\*.asc)、CSV 文件 (\*.csv)、数据文件 (\*.dat)、纯文本文件 (\*.txt)、TSV 文本文件 (\*.tsv)、Arc/Info ASCII 网格 (\*.asc \*.txt)、Arco/Info 二进制网格 (\*.adf)、数字高程模型 (\*.dem)、ESRI.hdr 标记图像 (\*.img\*.bil)、Geosoft 网格 (\*.grd)、网格交换文件 (\*.gxf)、RDAS ER Mapper 2D 网格 (\*.ers)、SRTM .hgt (\*.hgt)、Surfer ASCII 或二进制网格 (\*.grd)、GOCAD 体素文件 (\*.vo)、Geosoft 体素 (\*.geosoft\_voxel)、电磁电阻率 (OUT) 文件 (\*.out、\*.out.gz、\*.mod)、UBC 网状文件 (\*.msh)。

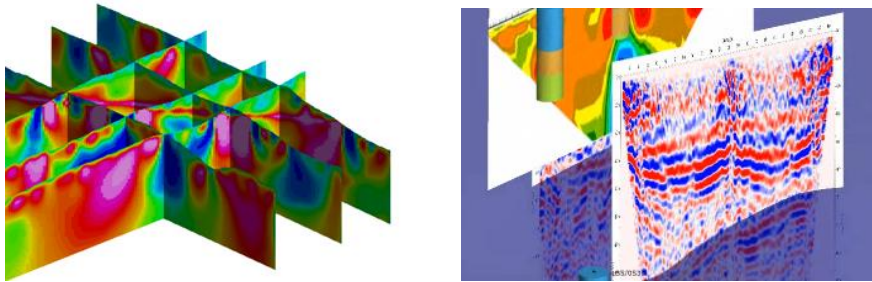


图 2-3 地球物理数据与图像

## 2.4 结构数据

结构数据指调查、勘探过程中发现的方向与产状数据（断层走向、露头产状等），这些数据可以利用于曲面与地质体的构建。Leapfrog Works 支持从外部导入 ASCII 文本文件 (\*.asc)、CSV 文本文件 (\*.csv)、数据文件 (\*.dat)、纯文本文件 (\*.txt)、TSV 文本文件 (\*.tsv) 等格式的位置数据。结构数据以饼状圆柱的方式进行可视化展示。

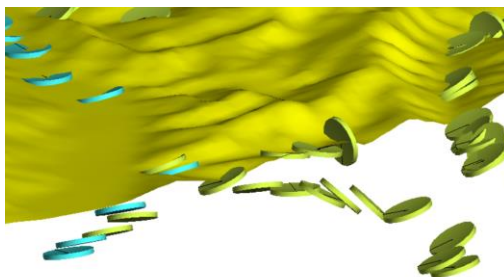
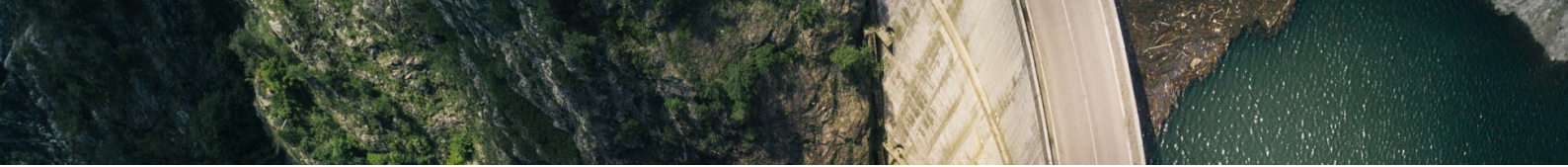


图 2-4 结构数据





## 2.5 设计模型

设计模型指与工程设计相关的 BIM、设计等信息，如：道路线路、隧道路径、计算剖面、结构构件等。Leapfrog 支持导入的设计模型文件格式包括：属性二进制网格格式 (\*.msh)、GOCAD 文件 (\*.ts)、DXF 文件 (\*.dxf)、Gemcom 文件 (\*.tri)、数据挖掘文件 (\*.asc、\*.asc)、Micromine 文件 (\*.MMpt.dat, \*MMtr.dat)、Surpac 文件 (\*.dtm、\*.str)、DXF 文件 (\*.dxf)、WaveFront 文件 (\*.obj)、AutoCAD 图形文件 (\*.dwg)、Bentley 工程图文件 (\*.dgn)。

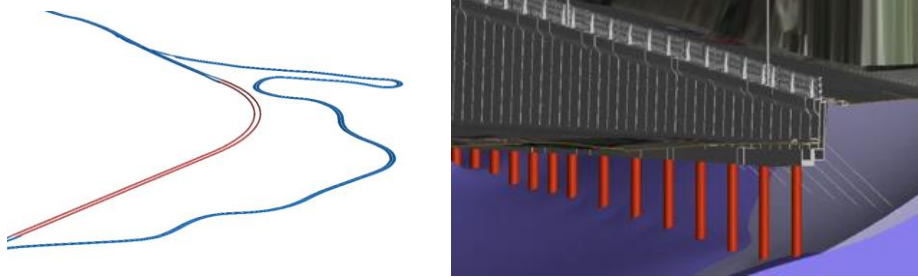


图 2-5 设计模型

## 2.6 点、线、面几何数据

Leapfrog Work 支持创建及外部导入点、多段线、网格面等常规几何模型。支持导入的外部格式包括：CSV Text Files (\*.csv)、ASCII Text Files (\*.asc)、DXF Files (\*.dxf)、Leapfrog Works 3D Point Data files (\*.pl3, \*.ara); WaveFront 文件 (\*.obj)、AutoCAD 图形文件 (\*.dwg)、Bentley 工程图文件 (\*.dgn)、DXF 多面文件 (\*.dxf)、Leapfrog 二进制网格格式 (\*.msh、\*.ara)、Leapfrog 模型文件 (\*.lfn)、DTM 文件 (\*.dtm)。

Leapfrog 支持几何对象间的相互转换及曲面间的布尔裁剪等操作。

## 3. Leapfrog Works 模型创建

### 3.1 地表面模型

任意的几何点线、GIS 点线、以及结构对象可以用于插值构建地表面。Leapfrog Works 支持地表面与 GIS 图像、GIS 线相关联，快速在地表面模型上渲染 GIS 图像材质以及关联等高线；支持在地表面上构建属性，并对地理坐标和自定义属性进行可视化展示。

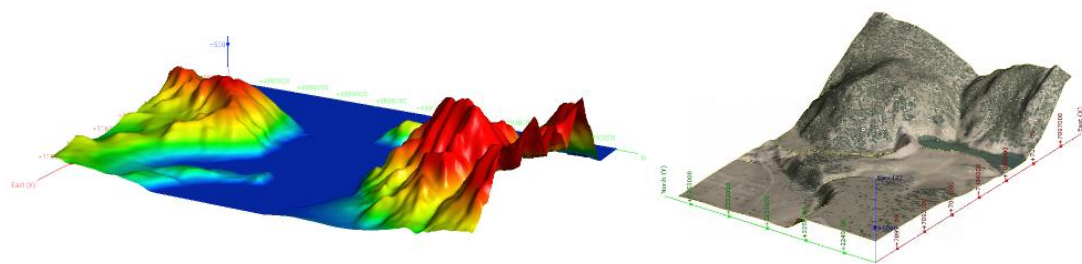


图 3-1 Leapfrog Works 地表面模型

### 3.2 地质模型

Leapfrog Works 的地质模型构建技术采用了三维 RBF 插值与曲面构建算法，在 Leapfrog Works 中，地质模型由四部分组成，分别为：

模型边界——控制三维地质模型的范围

断层系统——为三维地质模型构建断层

地层岩性——模型中包含的地层类型

地层年表——地层曲面及新老关系定义

如图 3-2 所示，在地质模型被初始创建后，模型中所有地层均为未知（灰白色显示），用户应选择合适的地层年表类型及对应数据来定义地层曲面，不断完善模型，直到模型所有未知（灰白色显示）均已消除，所有地层均为已知。

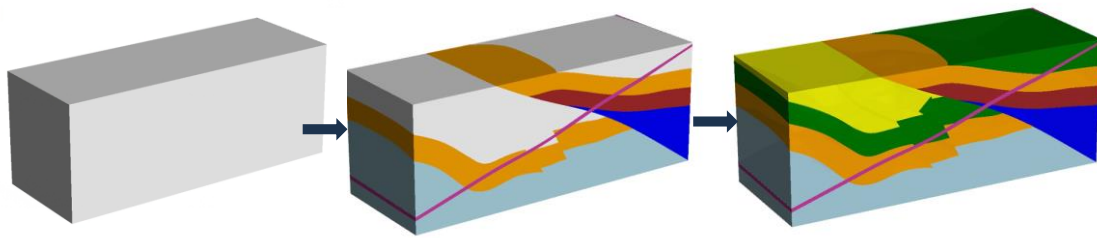
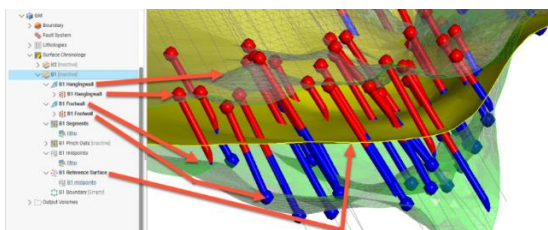
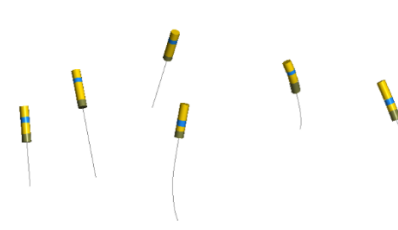


图 3-2 地质模型完善流程

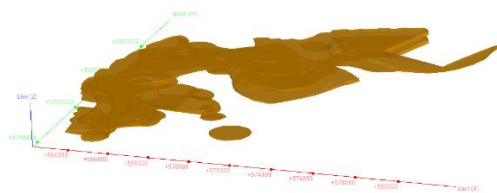
地层年表类型表征岩土体的成因类型、分布特征，每种年表类型对应一种曲面构建算法。Leapfrog Works 中包含沉积、侵蚀、侵入体、岩脉、结构曲面、岩脉系统、地层序列等七种类型。



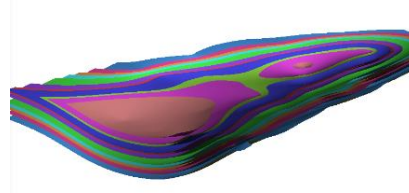
利用“岩脉”类型创建矿脉



利用“沉积和侵蚀”创建互层地层



利用“侵入”类型创建覆盖层透镜体



利用“地层序列”类型快速创建层状分布岩层

图 3-3 地层年表类型的应用

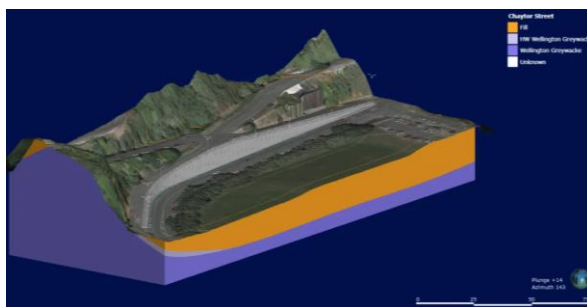
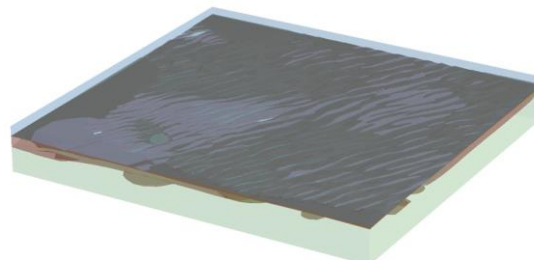
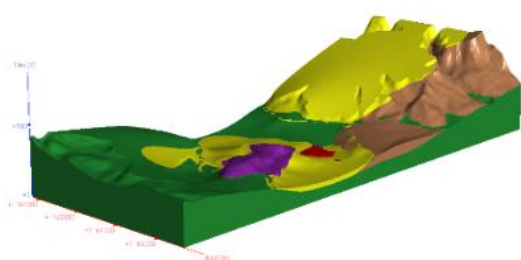
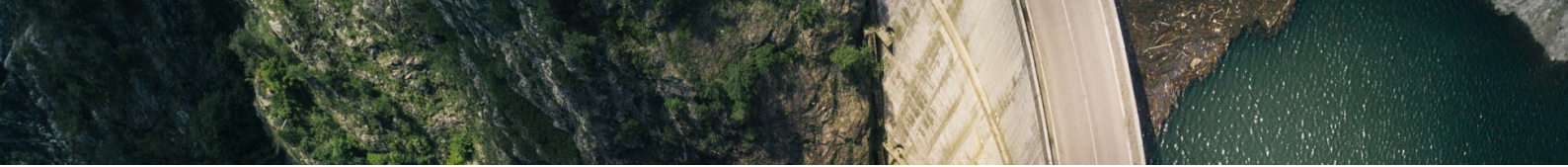


图 3-4 典型三维地质模型





### 3.3 数值模型

数值模型 (Numerical Model) 指属性分布模型。用户可以选择 RBF、多域 RBF 插值、反比例加权法、自定义距离函数等插值方式进行数值模型构建。Leapfrog 中, 数值模型的数据结构类似于体素模型, 在数值模型中, 用户可以看到模型中的属性分布云图及各属性段在模型中的等值面, 用户可自定义属性分布数值与间隔。

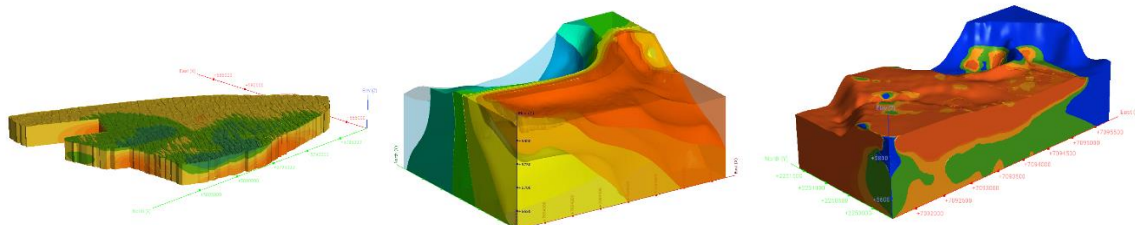


图 3-5 典型数值模型

### 3.4 组合模型

Leapfrog Works 支持地质模型与数值模型进行组合, 组合后的模型同时包含了地层分布信息与属性分布信息。

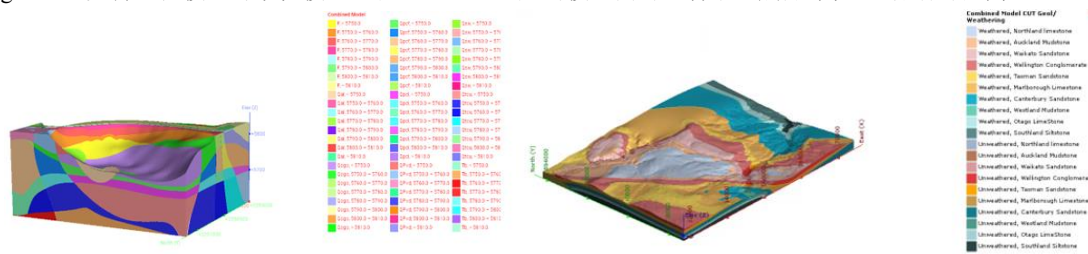


图 3-6 典型组合模型

### 3.5 剖面模型

Leapfrog Works 包含多种剖面类型, 除常规矩形剖面外, Leapfrog 支持弯折剖面 (长剖面)、沿路径分布的连续剖面等剖面类型, 剖面切割后, 用户可用于剖面成图与打印, 也可以提取剖面中的几何信息, 并将集合模型导出为 DXF (\*.dxf)、DWG (\*.dwg)、DGN (\*.dgn)、IFC (\*.ifc) 等格式。

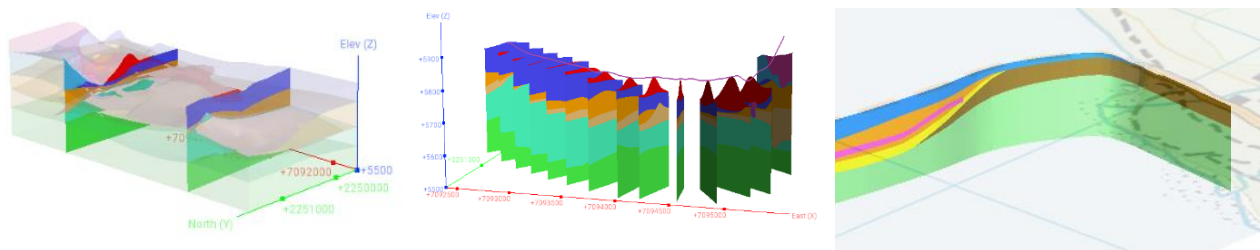


图 3-7 剖面模型

### 3.6 流动与迁移模型

Leapfrog Works 支持将任意地质模型转化为六面体块模型, 并在块模型上插值构建污染浓度分布, Leapfrog 支持将块模型导出到 Feflow 和 Visual Modflow 进行地下水流分析和污染物的迁移分析。

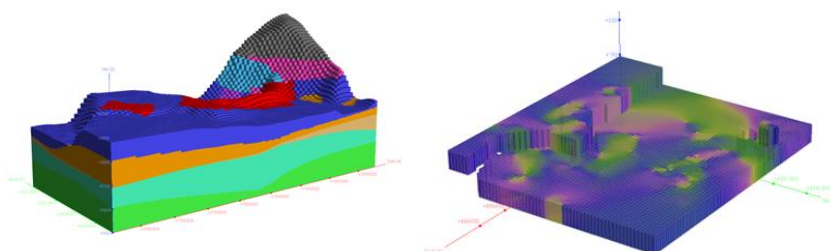


图 3-8 流动与迁移模型



## 4. Leapfrog Works 的价值

### 4.1 提升效率

Leapfrog Works 通过集成的场地数据快速创建精细的三维地质模型。用户通过可视化的三维数据可以轻易发现场地既有风险并用于指导新勘察阶段的勘探布置；新的勘查阶段获取的勘查数据可以导入 Leapfrog Works 项目并快速进行模型更新。

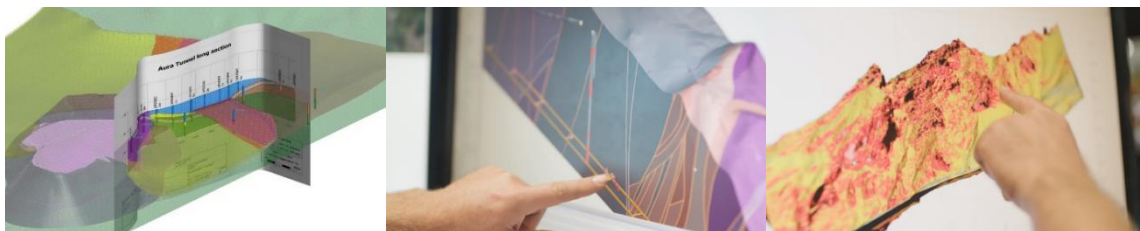


图 4-1 提升效率

### 4.2 增进交流

高精度的三维模型让复杂的数据变得清晰，让用户对场地有着更深的理解，用户可以在三维可视化模型中进行沟通、交流。Leapfrog Works 同时支持输出高精度的图像和视频，方便用户向工程项目所有的利益相关者展示并传达风险。



图 4-2 交流与可视化

### 4.3 与工程设计结合。

Leapfrog Works 可以向工程设计人员提供完整的场地可视化数据集成而不仅仅是二维报告与图表；三维地质模型可以转化为三维数值分析模型用于岩土工程或地下水流分析；剖面图可以导出为计算剖面用于工程设计计算。

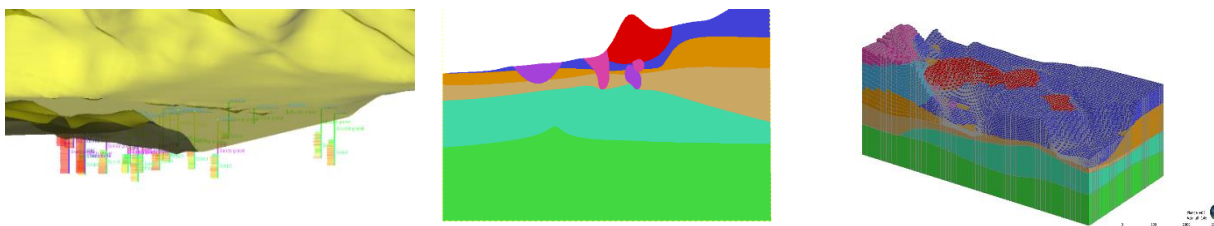


图 4-3 与工程设计结合

### 4.4 与 BIM 结合

Leapfrog Works 提供的地下模型可以与建筑信息模型结合，生成完整的基础设施信息模型，模型可用于规避冲突并指导工程施工和运营。Leapfrog Works 支持将地下模型导出到 Autodesk 平台、Bentley 平台以及导出为通用的 IFC 格式。

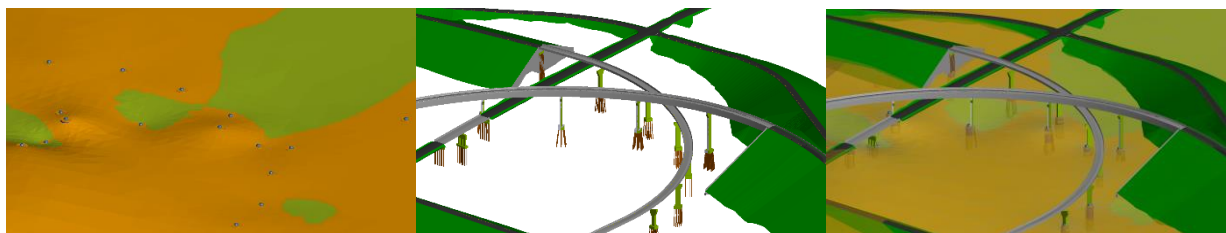


图 4-4 与 BIM 结合



## 5. Leapfrog Works 应用与工程实例

Leapfrog Works 可以应用到工程建设全流程中。

在工程规划阶段，对场地的各项调查、勘察数据可以导入到 Leapfrog Works 进行初步的场地三维地质模型构建，该模型用于指导规划工作。

在工程可行性研究与详细勘察阶段，更丰富的场地数据可以输入 Leapfrog Works 并快速进行模型更新，Leapfrog Works 可以用于集成数据并指导勘察与补充勘察工作。

在工程的设计和分析阶段，集成的地下数据可以帮助设计人员理解场地并进行设计方案的优化，Leapfrog Works 可以将模型导出到 GeoStudio 和 PLAXIS 等岩土工程设计、分析软件用于岩土工程相关的设计和分析，可以将模型导出到 Feflow、Visual Modflow 进行地下水流与溶质运移分析。

在工程的施工阶段，Leapfrog Works 地下模型可用于指导工程施工，同时施工过程中发现的任何与模型不一致的实测数据可用于更新模型；

在工程的运营阶段，Leapfrog Works 可以与工程监测结合，监测过程中的任何场地变动可以反映到地质模型上，让模型与现场保持一致。

在某交通工程中需要进行道路、隧道建设。首先，基于场地的地理信息与工程测量数据，构建了场地的地表面模型（图 5-1 左）。在 Leapfrog Works 中导出历史勘察钻孔和新的勘察钻孔，导入初步规划的隧道路径（红色）和线路路径（蓝色）信息(图 5-1 右)。

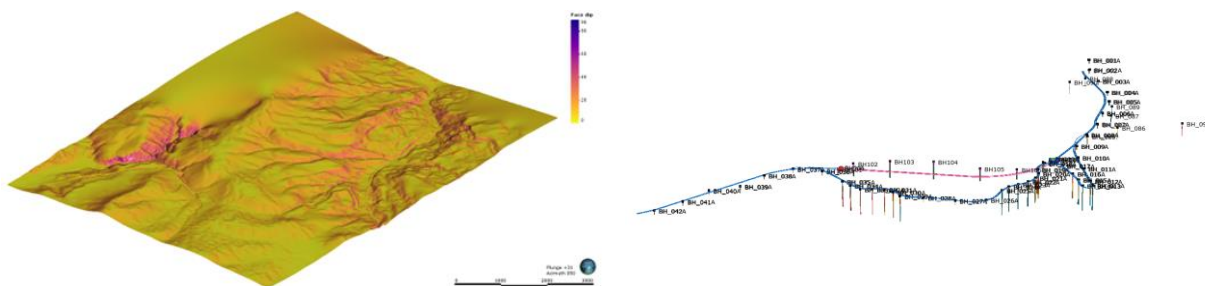


图 5-1 地表模型、钻孔模型与隧道、道路线路模型

利用地表模型和钻孔构建了场地三维地质模型（图 5-2）。

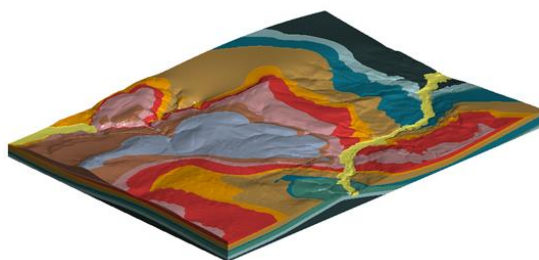


图 5-2 场地三维地质模型

根据前期调查，场地范围内有断层分布。本工程中利用磁法勘探成果来解释断层位置。在 Leapfrog Works 中导入了磁化率分布剖面（图 5-3 左）并插值获得了磁化率分布模型（图 5-3 右）。

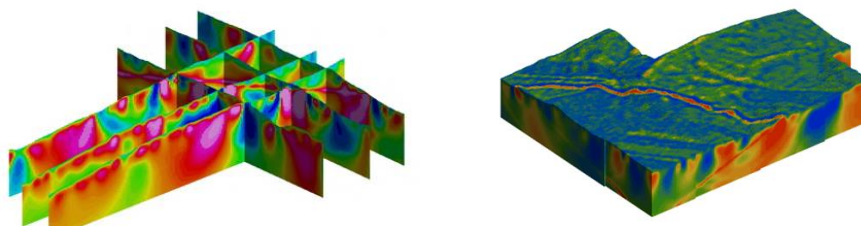


图 5-3 磁法勘探剖面与磁化率分布模型



将磁法勘探获得的精确断层位置反映到地质模型上（图 5-4 左），由于规划的道路线路 A 距离断层较近，进行道路改线，由线路 A 改到线路 B（图 5-4 右）。

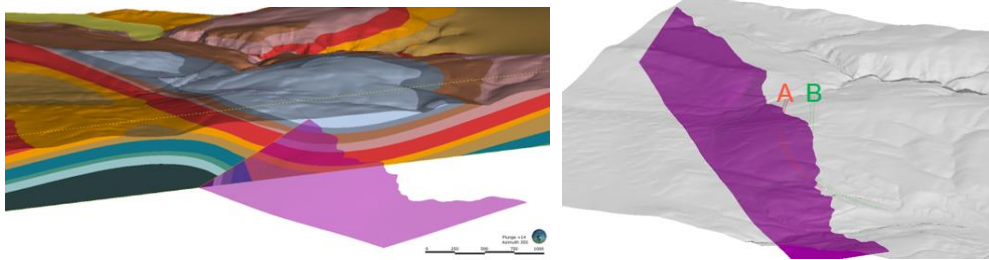


图 5-4 断层构建与道路路线变更

该项目中，道路沿线和隧道口涉及到了边坡稳定性问题。在 Leapfrog Works 快速进行多剖面切割，将获取的剖面导出到 GeoStudio 进行了边坡稳定性的分析，并将分析结果作为设计模型导回到 Leapfrog Works 对应的剖面切割位置进行展示。（图 5-5）

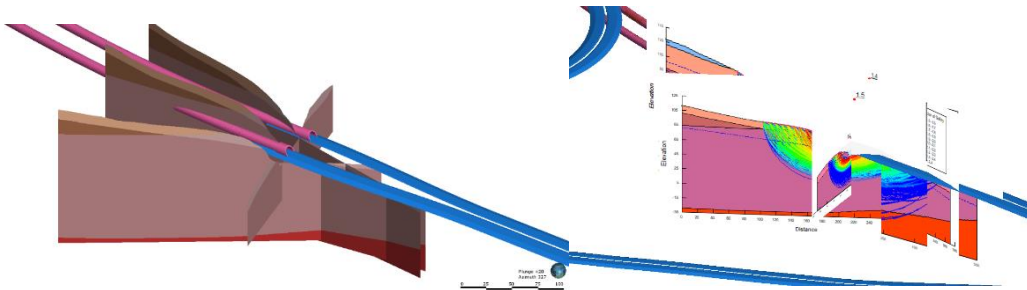


图 5-5 剖面切割与计算成果图粘贴

图 5-6 为整体模型的折叠展示图，包含了地表与地层、规划的线路和隧道、道路沿线和隧道口潜在不稳定斜坡的位置、不利滑动面和安全系数。

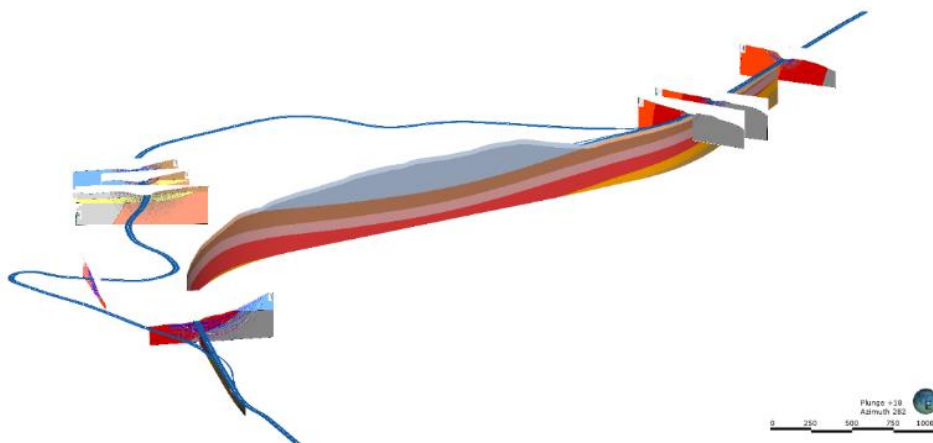


图 5-6 整体展示模型

## 6. 小结

Leapfrog Works 是工程地质条件与环境地质条件的集成与三维可视化工具，Leapfrog Works 以一种更有效的方式帮助地质、岩土工程、环境工程相关的工程师集成场地数据并快速构建三维地质模型、迭代更新三维地质模型，并应用于工程建设各个阶段。





# 混凝土结构细部分析与设计软件 IDEA Detail 简介

筑信达 张志国

目前，我国的混凝土结构设计规范采用以平截面假定为基础的截面分析计算或校核配筋，但这种方法主要针对梁、柱、支撑等细长杆件的主体组成部分（也称为连续区域），如图 1 所示的 B 区。但实际的混凝土结构中存在大量的非连续区域，包括开洞、变截面、牛腿、柱脚、深梁等等，如图 1 所示的 D 区。这些非连续区域的受力状态更复杂，基于平截面假定的截面分析不再适用，工程师们需要借助其它工具或手段处理混凝土结构细部分析与设计的难题。

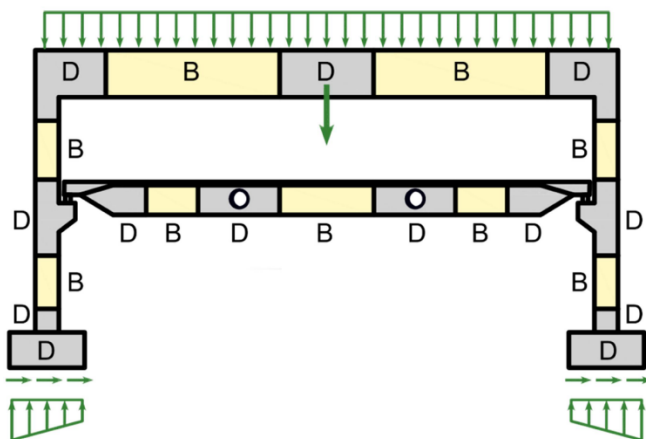


图 1 混凝土结构的连续与非连续区域

## 1 拉压杆模型 (STM Strut-and-Tie Models)

钢筋混凝土结构由钢筋和混凝土两部分组成，而非理想的均质材料。因此，钢筋混凝土结构的实际受力状态与钢筋布置密切相关，而钢筋布置往往依据结构的受力状态而确定。1987 年，施莱希 (Schlaich) 发表论文 *Toward a Consistent Design of Structural Concrete*，1991 年再次发表论文 *Design and Detailing of Structural Concrete Using Strut-and-Tie Models*。这两篇论文完善了钢筋混凝土拉压杆模型的实用设计方法，让 STM 理论进入工程界。

拉压杆模型是从连续体内抽象出来的离散化的桁架模型，由压杆、拉杆和节点三部分组成，用以反映混凝土内部力流的传递。如图 2 所示，蓝色的压杆由开裂后的混凝土组成，红色的拉杆由普通钢筋或预应力钢筋组成，黑色的节点是压杆和拉杆的交点。

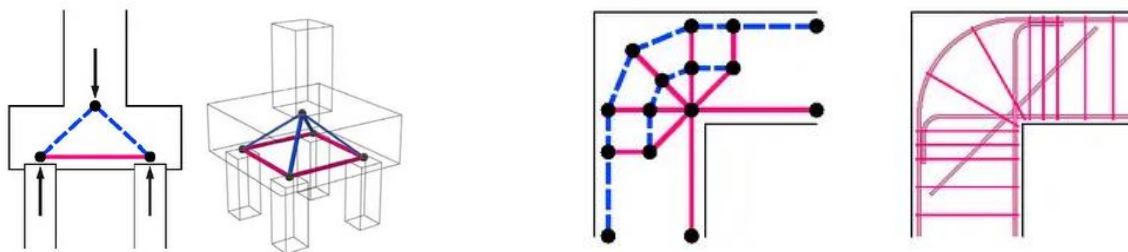


图 2 桩基承台 (左) 和梁柱节点 (右) 的拉压杆模型

拉压杆模型只需满足平衡条件和屈服准则，但没有变形协调的限制。因此，工程师在构建计算模型时可有多种选择，最优的拉压杆模型往往依赖于工程师的专业知识和经验判断。此外，拉压杆模型仅适用于混凝土开裂后的承载能力极限状态，无法用于挠度、裂缝等正常使用极限状态下的分析与设计。

综上，虽然拉压杆模型被广泛认为是混凝土 D 区设计的一种简单而实用的新方法，但在实际应用中往往存在门槛高、上手难、学习成本大等缺点，目前国内也没有成熟的商业软件供工程师选用。

## 2 协调应力场法 (CSFM Compatible Stress Field Method)

协调应力场法是一种基于有限单元法的连续应力场分析方法，既能用于承载能力极限状态，也能用于正常使用极限状态。其中，混凝土采用二维实体单元，非线性的应力-应变曲线可以考虑开裂对抗压强度的影响，如图 3 所示。左图中的系数  $k_c$  用于考虑混凝土开裂对抗压强度的折减，黑色曲线是根据设计规范输入的混凝土单轴力学属性 (Uniaxial behavior)，绿色曲线是考虑混凝土强度折减 (Cracked concrete) 后的单轴力学属性。从图中可以看出，虽然混凝土开裂影响抗压强度，但极限压应变  $\epsilon_{cu}$  保持不变。

如右图所示，随着横向应变  $\epsilon_1$  增大，混凝土开裂后的软化效应 (Cracked softened concrete) 使混凝土抗压强度的折减也越多。MCFT 采用平均应力法 (avg. stresses)，零应变对应强度不折减，如图中黑色实线所示；fib MC 2010 采用最大应力法 (max. stresses)，零应变对应的强度折减系数为 0.65，如图中黑色虚线所示。实际工程应用中采用以上两种方法的结合，即图中的红色实线。

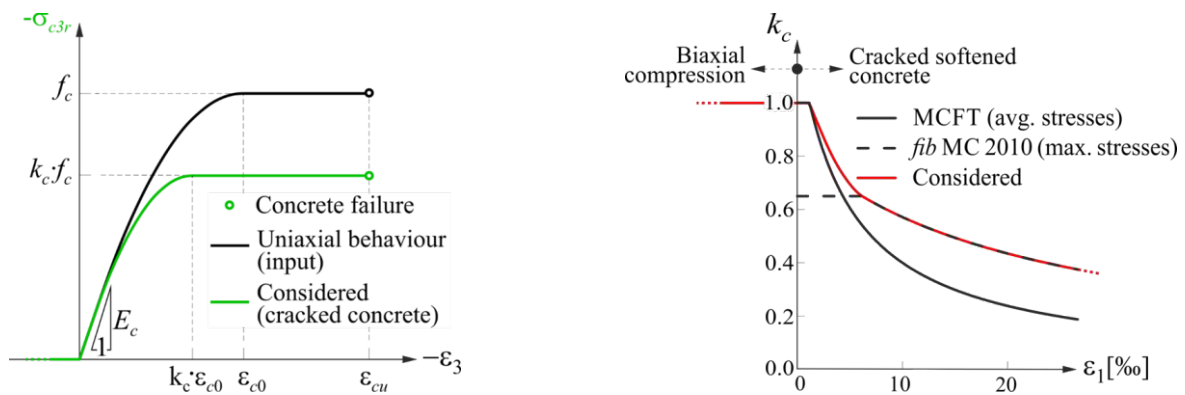


图 3 混凝土的应力-应变曲线 (左) 和抗压强度折减系数 (右)

钢筋采用一维杆单元和曲线形弹塑性本构模型，如图 4 (左) 所示。用户根据设计规范输入的双折线形应力-应变关系并未考虑钢筋在拉力作用下的刚化效应，如图中黑色曲线所示。实际采用的蓝色曲线具有更高的刚度，但钢筋的延性有所降低，极限强度  $f_t$  保持不变。

钢筋和混凝土之间的粘结单元采用理想刚塑性本构模型，用于模拟两种材料之间的相对滑移，如图 4 (右) 所示。虚线是在实验室中测量的真实 (Reality) 的粘结滑移  $\delta$  与粘结剪应力  $\tau_b$  的关系曲线，实际工程中多采用简化的刚塑性本构模型，即：粘结剪应力达到粘结强度  $f_{bd}$  即锚固失效。

除此之外，钢筋端部与混凝土之间的锚固采用弹簧单元，用于模拟钢筋的拔出破坏。

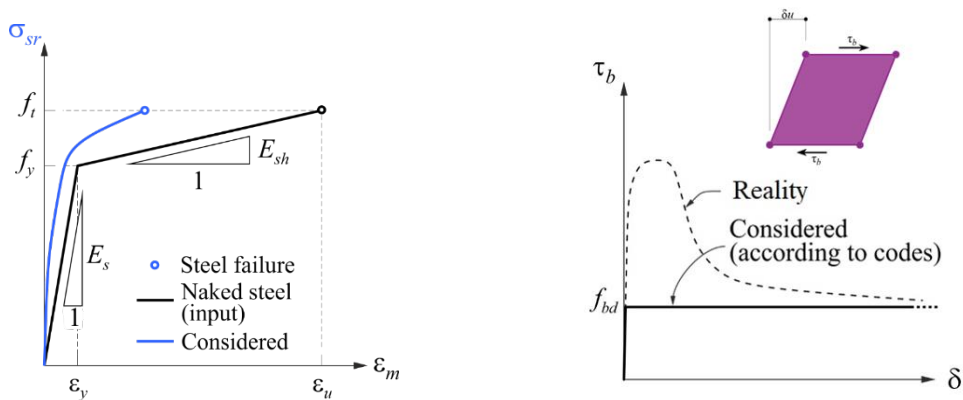


图 4 钢筋的应力-应变曲线 (左) 和粘结单元的应力-滑移曲线 (右)

## 3 IDEA Detail 功能概述

IDEA StatiCa Detail (以下简称“IDEA Detail”)是一款针对混凝土结构细部分析与设计的有限元软件，其理论基础即前文介





绍的协调应力场法。如图 5 所示，IDEA Detail 操作界面可分为主窗口、导航区、校核结果等等，用户也可以根据需求关闭某些窗口或调整窗口位置。在导航区中可以看到，IDEA Detail 主要工作流程可分为建模、加载、配筋和校核。

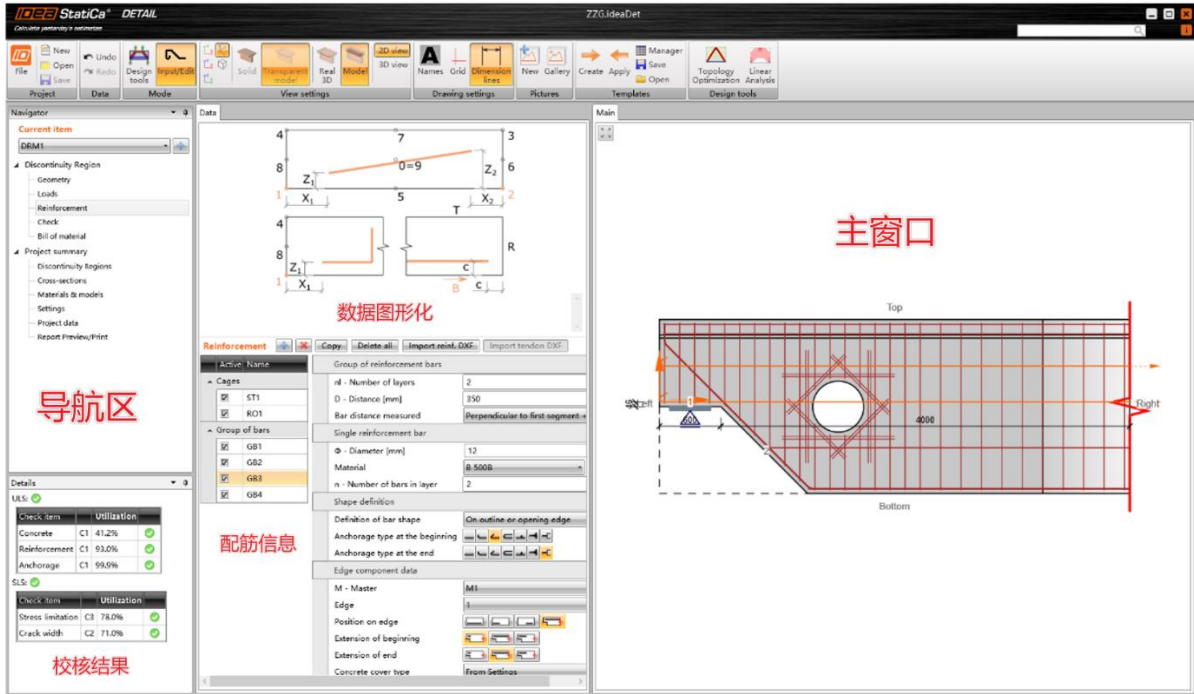


图 5 IDEA StatiCa Detail 操作界面

### 3.1 建模

IDEA Detail 模板库包括常见的墙、梁、节点以及横板四大类，但用户也可以根据自定义任意的混凝土细部模型。以图 6 所示的混凝土梁为例，用户可以选择变截面梁，也可以在梁腹板开洞；支座形式可以选择点支座、分布支座或预埋吊环；荷载传递方式也包括承压板、局部加载或吊环荷载等。需要注意的是，IDEA Detail 只能做二维平面分析而非三维空间分析，如果实际的混凝土结构具有明显的三维受力特点，用户应考虑采用其它通用的有限元软件，如 ANSYS、ABAQUS 等等。

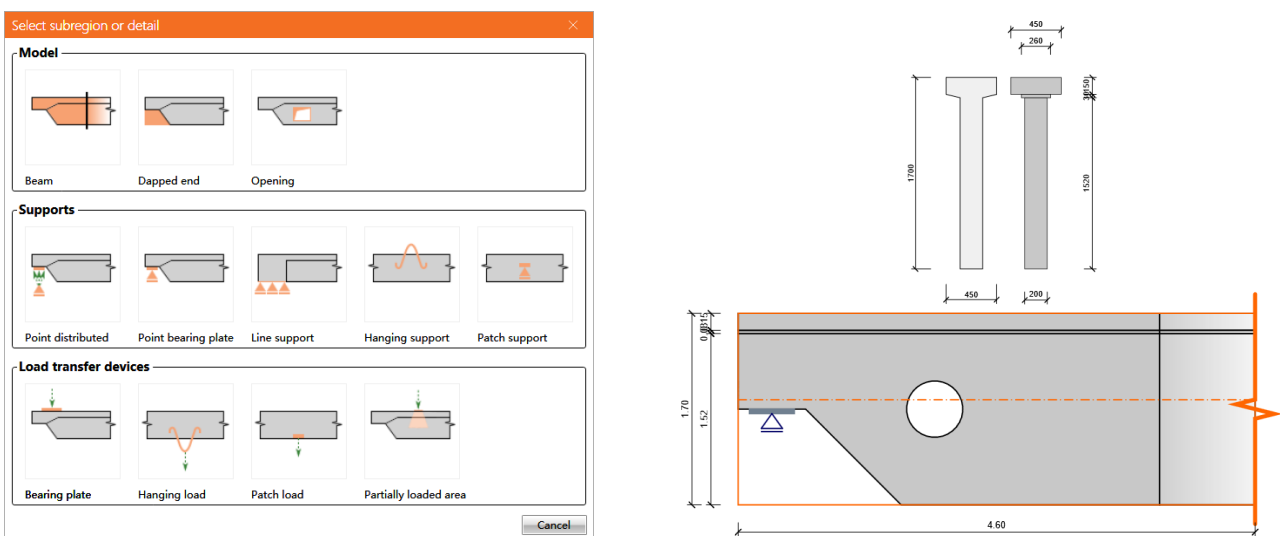


图 6 IDEA StatiCa Detail 几何建模



### 3.2 加载

IDEA Detail 中荷载包含构件断面处的内力和非构件区域的外荷载，内力包括平面内的弯矩、剪力和轴力，外荷载包括点荷载、线荷载、面荷载和自重荷载，如图 7 所示。IDEA Detail 自动考虑外荷载与构件内力的平衡条件，同时显示各个组成部分的内力图，便于用户形象直观地了解混凝土结构的细部受力状态。如图 7（左）所示，在均布线荷载和截断面内力分量共同作用下，蓝色为局部构件的剪力图，粉色为局部构件的弯矩图。

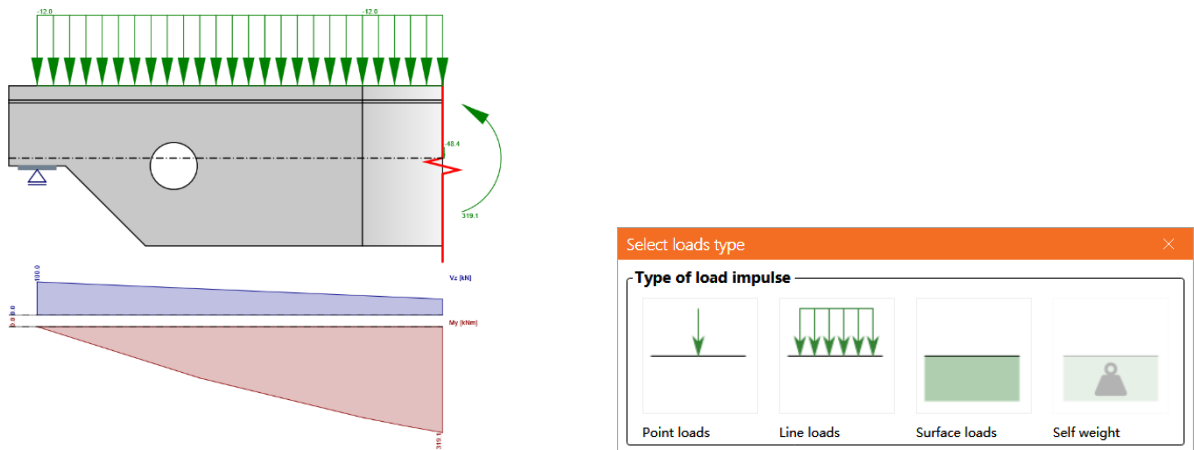


图 7 IDEA StatiCa Detail 施加荷载

### 3.3 配筋

为了辅助用户布置钢筋，IDEA Detail 提供线性分析和拓扑优化两种辅助配筋工具。线性分析只计算采用线弹性本构模型的混凝土部分，忽略钢筋以及钢筋和混凝土之间的粘结和锚固，以云图方式显示的应力流可以帮助用户快速掌握混凝土受拉和受压区域的分布情况，如图 8（左）所示。拓扑优化用于计算在特定区域内混凝土材料的最优分布，优化结果代表荷载作用下的最小总应变能和最大结构刚度。如图 8（右）所示，拓扑优化的形状类似于拉杆和压杆组成的桁架，用户可以以此为基础布置钢筋。

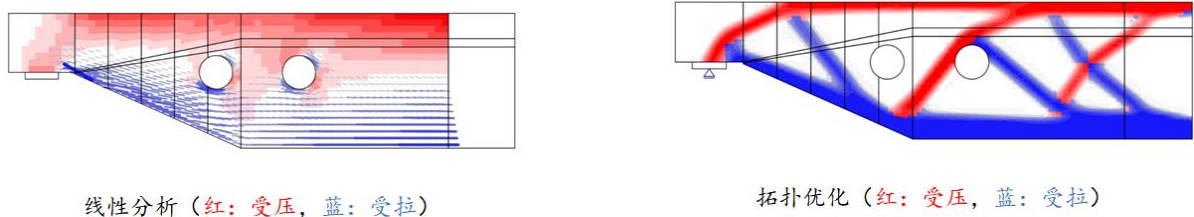


图 8 IDEA StatiCa Detail 辅助配筋工具

混凝土结构细部的配筋形式多样，IDEA Detail 除提供常规的纵筋、箍筋和弯起钢筋外，还可以快速布置方孔或圆孔附近的钢筋网，同时在几何模型中标识钢筋的直径和数量，如图 9 所示。



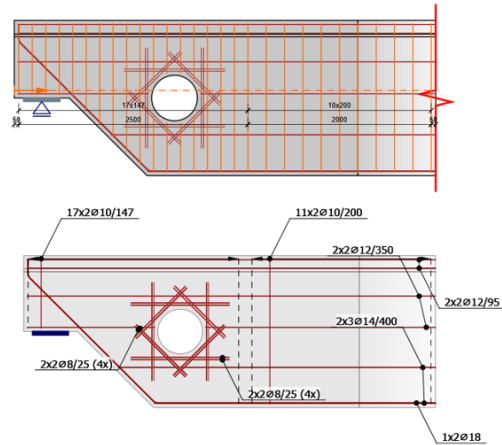
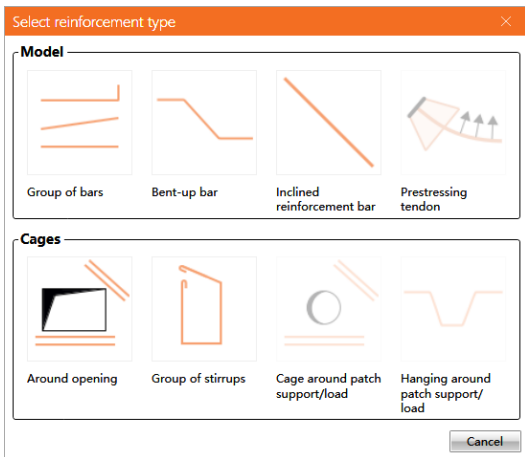


图 9 IDEA StatiCa Detail 布置钢筋

### 3.4 校核

目前，IDEA Detail 只支持基于欧标和美标的校核，后续也会加入基于中国规范的校核。如前文所述，IDEA Detail 采用协调应力法完成有限元分析后，既可以校核承载能力极限状态下的混凝土强度、钢筋强度和钢筋锚固，也可以校核正常使用极限状态下的裂缝宽度、挠度和应力，如图 10 所示。

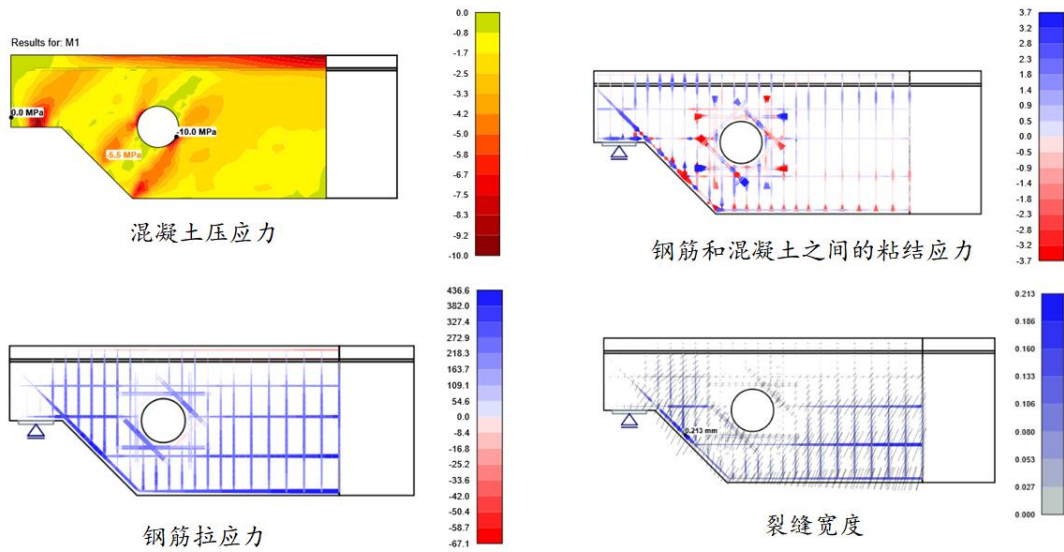


图 10 IDEA StatiCa Detail 计算结果

## 4 总结

在混凝土结构工程中，非连续区域（也称 D 区）的细部分析与设计一直是广大工程师的痛点和难点。虽然理论上可以采用拉压杆模型做承载力校核，但实际应用并不多，主要还是门槛高、难度大，也没有成熟的商业化软件。协调应力场法是处理混凝土细部分析与设计的又一利器，虽然不适合手算，但专业的混凝土结构设计软件 IDEA Detail 可以采用该方法，帮助工程师完成混凝土结构的细部分析与设计。

鉴于篇幅有限，本文无法更加全面具体地介绍 IDEA Detail 的各个功能细节和应用技巧，感兴趣的读者可以登录筑信达网站 ([www.cisec.cn](http://www.cisec.cn)) 或拨打筑信达技术热线了解更多产品功能，也欢迎申请试用软件并提供反馈意见。

# ETABS 欧标混凝土框架设计要点详解（二）——框架柱设计

筑信达 郑翔

本文将基于 EN 1992-1-1 和 EN 1998-1 规范（以下简称 EC2、EC8）讨论钢筋混凝土柱设计在 ETABS 中的实现细节。本文重点介绍程序如何实现规范的相关要求，解释设计细节中表格数据的含义，不涉及软件操作说明。相关的操作请查看联机帮助或程序自带的例题。

## 1. ETABS 柱设计的通用准则

### 1.1 设计流程

钢筋混凝土柱在 ETABS 中的一般设计流程包括：（1）为不同的柱截面分别生成其轴力-双向弯矩相关曲面（即 PMM 相关面）；（2）在每根柱的两端及中间，分别为来自各个荷载组合下的设计轴力及弯矩校核其承载能力，并基于此计算所需配筋（或计算给定配筋方案的能力比率）；（3）根据设计剪力和轴力进行斜截面设计。可以看出，PMM 相关面是柱设计的基础，而柱的配筋信息是生成 PMM 相关面的基础数据之一。所以在定义柱截面时，需要指定纵筋的数量和直径（见图 1）。当柱截面用于设计时，纵筋信息是初始值，程序会自动迭代给出最优结果（此时纵筋的分布数量不会变，直径改变）。当柱截面用于校核时，纵筋信息是确定值，由程序判断其承载力是否满足要求。



图 1 定义柱截面对话框

### 1.2 柱长度

ETABS 中有两个长度系数来控制柱长度：无支撑长度系数（Unbraced length ratio）、有效长度系数（Effective length factor）。

无支撑长度指柱在约束间的净长度。柱端约束可以是与之相连的梁、刚性隔板束缚、支座等等。程序根据是否有约束来自动判断柱在两个方向上的无支撑长度系数，从而识别柱的实际长度。所以，当模型中出现跨层柱、柱被人为打断、柱在主轴有约束而次轴无约束等情况时，程序仍然能正确判断柱长度。

有效长度系数对应于设计规范中基于稳定概念给出的计算长度系数，程序根据所选择的规范自动计算。

以上长度系数都可以通过设计覆盖项人为调整，见图 2 第 4、5、6、7 项。

由上可知，ETABS 进行框架设计时，柱的计算长度=柱对象长度（节点间距离）×无支撑长度系数×有效长度系数。

得到柱计算长度后，程序据其计算绕强轴和弱轴的长细比  $\lambda$ （EC2 5.8.3.2(1)），自动判断长细比是否满足长细比限值要求。用户可通过设计细节查看长细比较核表格：



Slenderness check (governing permutation)

	$\lambda$ Unitless	$\lambda$ limit Unitless	Condition	Governing permutation
Major Bend(M3)	19.052559	147.58635	N/A	N/A
Minor Bend(M2)	19.052559	148.379234	N/A	N/A

如上表所示：当长细比  $\lambda$  小于等于限值  $\lambda$  limit，说明是短柱（short），无需考虑 P- $\delta$  效应（EC2 5.8.3.1(1)）。当长细比  $\lambda$  大于限值  $\lambda$  limit，说明是细长柱（slender），需考虑 P- $\delta$  效应，可采用名义刚度法或名义曲率法由程序自动计算 P- $\delta$  效应。其中长细比限值  $\lambda$  limit 具体计算参见 EC2 5.8.3.1(1)。

## 2. 欧标柱正截面设计要点

### 2.1 考虑二阶 P- $\Delta$ 效应

对因框架侧移产生的 P- $\Delta$  效应，可通过 ETABS 软件预设 P- $\Delta$  选项考虑，也可通过欧标 EC2 附录 H 的方法计算。

ETABS 通过预设 P- $\Delta$  选项来考虑 P- $\Delta$  效应，如图 3 所示（命令路径：定义>预设 P-Delta 选项）。在该对话框中，需要指定用于二阶效应分析的竖向荷载作用，通常我们根据设计荷载组合中，含有侧向荷载的组合里竖向荷载设计值最大的那组，选择其中的竖向荷载及比例系数。对于欧标，一般建议荷载模式取 1.35\*恒载+1.5\*活载，这是偏于保守的。

E 混凝土框架设计覆盖项 - Eurocode 2-2004

选项	数值
01 Current Design Section	C600x600
02 Framing Type	DC High
03 Live Load Reduction Factor	1
04 Unbraced Length Ratio (Major)	0.833333
05 Unbraced Length Ratio (Minor)	0.833333
06 Effective Length Factor (Beta Major)	1
07 Effective Length Factor (Beta Minor)	1
08 Consider Minimum Eccentricity?	Program Determined
09 Correction Factor, Kr Major	0
10 Correction Factor, Kr Minor	0
11 Creep Factor, KPhi Major	0
12 Creep Factor, KPhi Minor	0
13 1st-Order Moment Distribution Coefficient, c M...	0
14 1st-Order Moment Distribution Coefficient, c Mi...	0
15 Reinforcement Contribution Factor, Ks Major	0
16 Reinforcement Contribution Factor, Ks Minor	0
17 Cracking Factor, Kc Major	0

图 2 混凝土框架柱设计覆盖项

E 预设 P-Delta 选项

自动方法

无

基于质量（非迭代）

基于荷载（迭代）

荷载工况

荷载模式	比例系数
DL	1.35
DL	1.35
LL	1.5

相对收敛容差: 0.0001

确定 取消

图 3 预设 P-Delta 选项对话框

### 2.2 考虑二阶 P- $\delta$ 效应

对于单根柱挠曲产生的 P- $\delta$  效应，可通过名义刚度法（EC2 5.8.7）或名义曲率法（EC2 5.8.8）计算。用户可通过混凝土框架设计首选项中第 5 项“Second Order Method”选项，选择在混凝土构件设计阶段采用名义刚度法（图 4）或名义曲率法考虑构件 P- $\delta$  效应（图 5）。

E 混凝土框架设计首选项 - Eurocode 2-2004

选项	数值
01 Design Code	Eurocode 2-2004
02 Country	CEN 默认
03 Combinations Equation	Eq. 6.10
04 Reliability Class	等级 2
05 Second Order Method	名义刚度

图 4 名义刚度法选项

E 混凝土框架设计首选项 - Eurocode 2-2004

选项	数值
01 Design Code	Eurocode 2-2004
02 Country	CEN 默认
03 Combinations Equation	Eq. 6.10
04 Reliability Class	等级 2
05 Second Order Method	名义曲率

图 5 名义曲率法选项

由 1.2 节柱长度可知，当长细比  $\lambda$  小于等于限值  $\lambda$  limit，程序判断是短柱（short），无需考虑 P- $\delta$  效应，此时就算选择了名义刚度法或名义曲率法，程序不会考虑 P- $\delta$  效应，程序设计细节相关计算表格项数据均为空值。当长细比  $\lambda$  大于限值  $\lambda$  limit，说明是细长柱（slender），需考虑 P- $\delta$  效应，可采用名义刚度法或名义曲率法由程序自动计算 P- $\delta$  效应，程序设计细

节相关计算表格项数据均有相应值。

Slenderness Check	N/A	Slender	Short	Slender	Slender
$M_x = M_u$ or $M_{des}$ kN-m	N/A	926.856	-1771.856	630	630
$K_c$ Unitless	N/A	0.169306	N/A	0.169306	0.169306
Buckling Force kN	N/A	17613.8953	N/A	17613.8953	17613.8953
Moment Mag Factor (MMF) Unitless	N/A	3.513016	1	3.513016	3.513016
2nd-Order Moment $M_{2nd}$ kN-m	N/A	2329.2041	0	1583.2002	1583.2002
$M_{2nd} * MMF$ kN-m	N/A	3256.0601	N/A	2213.2002	2213.2002

图 6 名义刚度法输出项（短柱/细长柱）

Slenderness Check	N/A	Slender	Short	Slender	Slender
$M_x = M_u$ or $M_{des}$ kN-m	N/A	926.856	-1771.856	630	630
$K_c$ Unitless	N/A	0.698194	N/A	0.698194	0.698194
$K_d$ Unitless	N/A	1.320316	N/A	1.320316	1.320316
2nd-Order Moment $M_{2nd}$ kN-m	N/A	1810.302	0	1810.302	1810.302
$M_{2nd} + M_{2nd}$ kN-m	N/A	2737.158	N/A	2440.302	2440.302

图 7 名义曲率法选项（短柱/细长柱）

图 6、图 7 分别是构件设计细节中名义刚度法和名义曲率法对应的输出项内容，红框框出的内容分别为程序判定为细长柱、短柱时的输出项，供用户查阅校核。常规的框架结构柱，由于高度不高，以短柱居多；少数截面尺寸较小的跃层柱才可能存在细长柱；并且框架结构柱的控制测站往往在柱端部、该位置也不存在 P- $\delta$  效应。所以需要考虑 P- $\delta$  效应的情况很少。

### 2.3 考虑几何缺陷 (Imperfection Moment)

欧标 EC2 5.2 节规定，框架柱设计要考虑几何缺陷  $e_i$  产生的附加弯矩  $M_{imp}$ 。其中：

$$e_i = \theta_i l_0 / 2 \quad (\text{EC2 Eq.5.2});$$

$$\theta_i = \theta_0 \alpha_h \alpha_m \quad (\text{EC2 Eq.5.1});$$

$$M_{imp} = e_i \square N_{Ed}$$

式中： $\alpha_m$  是构件数量折减系数， $\alpha_m = \sqrt{0.5(1+1/m)}$ ，程序对于单独构件取 1.0； $\alpha_h$  是构件长度折减系数， $\alpha_h = 2/\sqrt{l}$ ； $2/3 \leq \alpha_h \leq 1$ ； $\theta_0$  推荐值为 1/200。

ETABS 程序的设计细节在一阶弯矩表格中，能输出对应 2 轴、3 轴的几何缺陷导致的附加弯矩  $M_{imp}$ 。

First-Order Moments (governing permutation)

	End I Moment kN-m	End J Moment kN-m	Section Moment kN-m	Imperfection Moment kN-m	$M_{02}$ Moment kN-m	$M_{01}$ Moment kN-m
Major Bend(M3)	19.6712	-23.2877	-23.2877	4.5792	-23.2877	19.6712
Minor Bend(M2)	464.606	-531.3489	-531.3489	4.5792	-535.928	460.0268

上表是一阶弯矩信息。其中 End I Moment 指柱 I 端弯矩、End J Moment 指柱 J 端弯矩、Section Moment 指该测站处荷载组合下的截面弯矩，并不是最终设计采用的弯矩。Imperfection Moment 指考虑几何缺陷对应的弯矩值  $M_{imp2} = e_{i2} \square N_{Ed}$ 、 $M_{imp3} = e_{i3} \square N_{Ed}$ ，其中  $e_{i2}$ 、 $e_{i3}$  参见 EC2 Eq5.1、Eq5.2。

程序会分别在 2 轴正方向、2 轴负方向、3 轴正方向、3 轴负方向叠加对应的几何缺陷附加弯矩，然后计算相应的 PMM 应力比。

Design Details for All Permutations Considered - D/C PMM Ratio

Imperfection Direction	空	Positive M3	Negative M3	Positive M2	Negative M2
(M3 <sub>des1</sub> , M2 <sub>des1</sub> ) PMM Ratio	0.882028	0.877417	0.88646	0.873302	0.890751
(M3 <sub>des1</sub> , M2 <sub>des1</sub> ) PMM Governs	无	无	无	无	Yes

如上表所示，Positive M3、Negative M3、Positive M2、Negative M2 即对应  $M_{imp}$  叠加在 3 轴正方向、3 轴负方向、2 轴正方向、2 轴负方向弯矩之后的 PMM 应力比。

### 2.4 最小偏心 (minimum eccentricity)

柱各测站的设计弯矩在两个方向上应分别满足最小偏心矩的要求 (EC2 6.1 (4))，程序默认自动执行，用户也可人为取消 (即图 2 第 8 项 Consider Minimum Eccentricity?选择“否”)。

欧标 EC2 6.1(4)节规定，框架柱承受压力时，需考虑最小偏心  $e_{min} = h / 30 \geq 20mm$ 。



ETABS 程序输出的设计细节中，正截面设计信息表格中，含有对应的最小偏心导致的弯矩值。

**Axial Force and Biaxial Moment Design for  $N_{Ed}$ ,  $M_{Ed2}$ ,  $M_{Ed3}$  (governing permutation)**

Design $N_{Ed}$ kN	Design $M_{Ed2}$ kN-m	Design $M_{Ed3}$ kN-m	Minimum M2 kN-m	Minimum M3 kN-m	Rebar Area mm <sup>2</sup>	Rebar %	D/C 比 Unitless
555.0488	-535.928	-23.2877	11.101	11.101	5401	1.5	0.891

上表是正截面设计信息。其中  $N_{Ed}$  是轴力设计值， $M_{Ed2}$ 、 $M_{Ed3}$  是绕 2 轴、3 轴的设计弯矩，Minimum M2、Minimum M3 是考虑对应方向最小偏心的弯矩值， $M_{min2} = e_{min2} \perp N_{Ed}$ 、 $M_{min3} = e_{min3} \perp N_{Ed}$ 。设计弯矩  $M_{Ed2}$ 、 $M_{Ed3}$  不得小于对应的 Minimum M2、Minimum M3。

**Design Details for All Permutations Considered - Minor Bending M2**

Imperfection Direction	None	Positive M3	Negative M3	Positive M2	Negative M2
$M_{ana}$ kN-m	-70	-70	-70	-70	-70
$M_{imp}$ kN-m	0.0	0.0	0.0	290.472	-290.472
$M_{ai} = M_{ana} + M_{imp}$ kN-m	-70	-70	-70	220.472	-360.472
$M_{min}$ kN-m	N/A	273	273	273	273
$M3_{des1} = M_{ai}$ or $M_{min}$ kN-m	N/A	-273	-273	273	-360.472

以上表为例，红色框中的数值表示，考虑了 2 轴正方向的缺陷对应的弯矩值  $M_{imp}=290.472\text{kN}\cdot\text{m}$ ，分析弯矩  $M_{ana}=-70\text{kN}\cdot\text{m}$ ，叠加了缺陷弯矩后的分析弯矩值  $M_{ai}=220.472\text{kN}\cdot\text{m}$ 。但是最小偏心的弯矩值  $M_{min}=273\text{kN}\cdot\text{m}$ ，因此最终采用的设计弯矩取两者的较大值  $273\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

## 2.5 强柱弱梁验算

对中延性抗弯框架（DCM MRF）和高延性抗弯框架（DCH MRF），程序分别对应柱主方向和次方向进行强柱弱梁验算：

$$\frac{\sum 1.3M_b}{\sum M_c} \leq 1.0 \quad (\text{EC8 4.4.2.3 (4), 5.2.3.3 (2)})$$

其中， $\sum M_c$ ：与节点相连的所有柱的抗弯承载力设计值之和，上柱和下柱抗弯承载力计算时均需考虑轴力设计值对承载力的影响； $\sum M_b$ ：与节点相连的所有梁的抗弯承载力设计值之和。

如图 8 所示，程序输出梁柱的抗弯承载力比（1.3）Beam/Column Capacity Ratio，每根柱子显示其主轴、次轴方向的相应结果，比率小于 1.0 即满足要求，“N/A”代表数据不可得，通常是因为该方向没有梁与之相交，或者该柱为顶层柱。在柱构件的设计细节中可查看强柱弱梁验算数据，除了最终的梁柱抗弯承载力比，还包括节点处梁、柱的尺寸和配筋，以及各自的抗弯承载力等数据。限于篇幅，本文仅列出图 9 为例，其余表格可自行查阅 ETABS 的设计细节。

**(1.3) Beam/Column Capacity Ratio**

Major Ratio	Minor Ratio
0.5	0.899

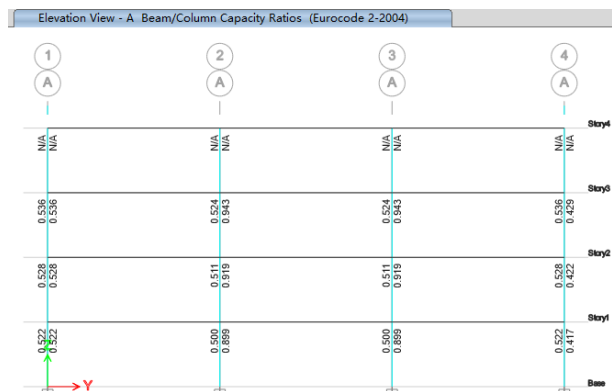


图 8 强柱弱梁输出表格

图 9 强柱弱梁验算结果

## 2.6 PMM 相关面

计算 PMM 相关面是柱设计的前提，典型的 PMM 相关面如图 10 所示。该曲面由若干相关曲线构成，相关曲线上的点对应柱截面的某个受力状态。前提是，柱截面符合平截面假定，且柱截面配筋已知。

程序计算 PMM 相关面时，考虑相应的 Eurocode 2 规范要求包括：（1）忽略混凝土的抗拉能力；（2）混凝土极限压应变对于  $f_{ck} \leq 50MPa$ ,  $\epsilon = 0.035$ ; 对于  $50MPa < f_{ck} \leq 90MPa$ ,  $\epsilon = 0.0026 + 0.0035 \times [(90 - f_{ck})/100]^4$  (EC2 Table3.1); （3）钢筋屈服后应力取为屈服强度  $\epsilon_s E_s \leq f_{yd}$  (EC2 3.2.7); （4）计算混凝土受压区等效矩形应力区 (EC2 3.1.7); （5）考虑材料相关系数  $\gamma_c$ 、 $\gamma_s$ 、 $\alpha_{cc}$ 、 $\alpha_{ct}$ 、 $\alpha_{lcc}$ 、 $\alpha_{lct}$  的影响 (EC2 3.1.6) 等等。

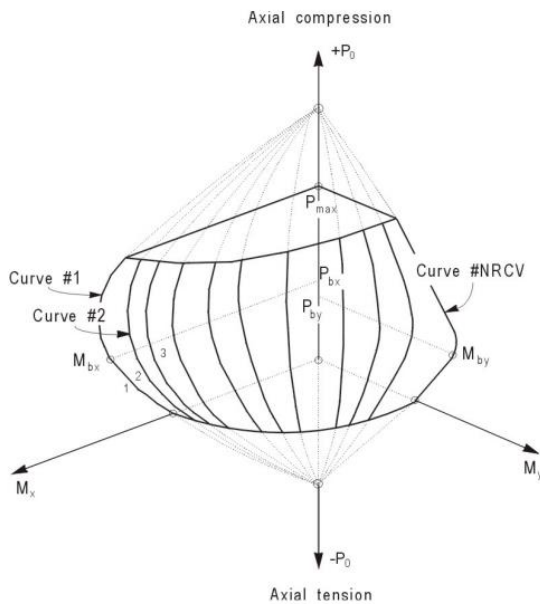


图 10 PMM 相关面

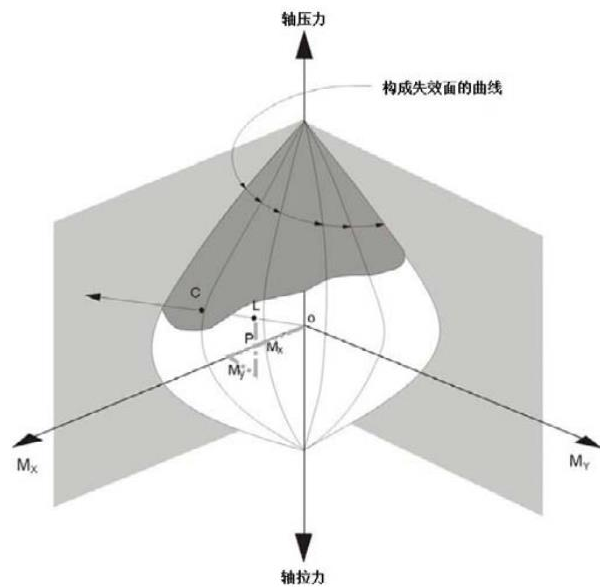


图 11 计算柱的承载力比率的几何示意图

E 相关面, 截面 - C600x600 (Eurocode 2-2004) 测站 - 3.3 m

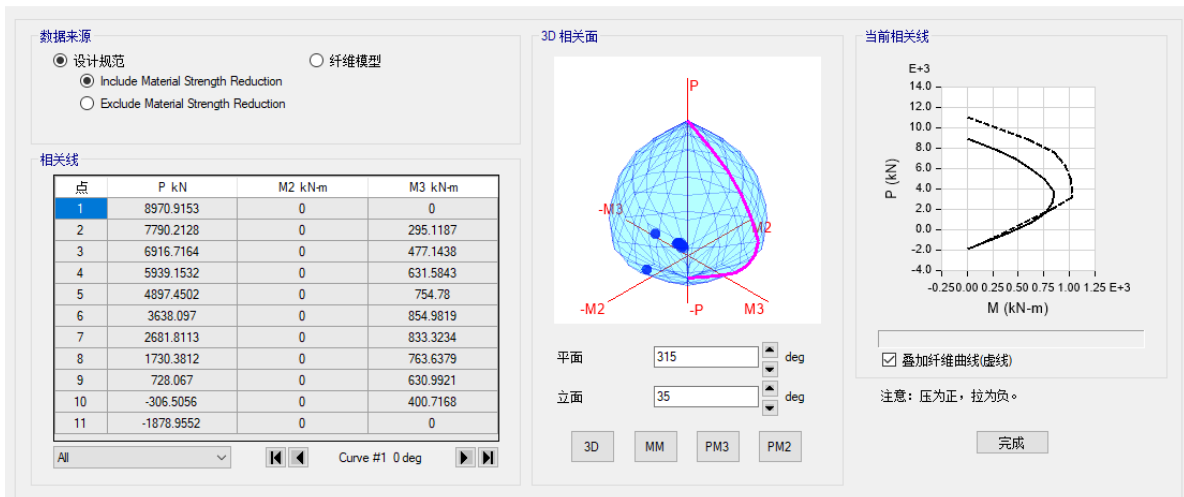


图 12 ETABS 输出的相关面

如图 11 所示，柱的一组设计内力 (P, M2, M3) 对应 PMM 空间的一个点 L, L 与坐标原点 O 的连线为 OL, 沿 OL 方向 L 点在 PMM 相关面上的投影点为 C. 此时，柱的承载力比率 (简称 D/C) 即线段 OL 与线段 OC 的长度比值。若 OL=OC, 则 D/C=1, 代表承载力处于临界状态; 若 OL > OC, 则 D/C > 1, 代表承载力不足。程序将基于柱各个测站位置处所有荷载组合下的 D/C 的结果来计算配筋面积，或校核配筋方案。

完成设计后，可以在 ETABS 中查看所有柱构件的 PMM 相关面数据，如图 12 所示，这里显示了每条 PM 曲线的相关数



据，这些数据可以按考虑材料强度折减、忽略材料强度折减分别计算，也可由纤维模型算得。例如图 12 右侧，实线为考虑材料强度折减（即考虑  $\gamma_c$ 、 $\gamma_s$ ）算得的 PM 曲线，虚线为用纤维模型计算的 PM 曲线，可以看到材料强度折减系数对 PMM 曲面的影响。框架柱进行承载力验算时，使用的是考虑材料强度折减的 PMM 相关面。当框架柱需按 EC8 进行强剪弱弯、强柱弱梁验算时，柱采用的是考虑轴力设计值影响的抗弯承载力，该数值即对应考虑材料强度折减的 PM 曲线上相应轴力设计值处的弯矩。

用户若查看柱的设计细节，会发现输出细节最后有如下表格：

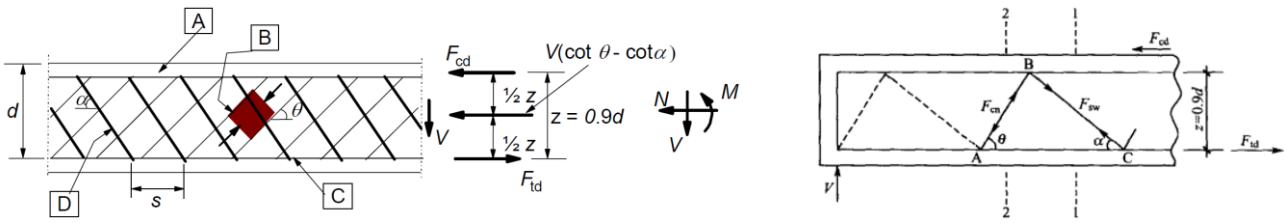
**Design Details for All Permutations Considered - D/C PMM Ratio**

Imperfection Direction	None	Positive M3	Negative M3	Positive M2	Negative M2
(M3 <sub>des1</sub> , M2 <sub>des1</sub> ) PMM Ratio	0.889017	0.887576	0.890371	0.879629	0.898405
(M3 <sub>des1</sub> , M2 <sub>des1</sub> ) PMM Governs	No	No	No	No	Yes

上表中，第一行指的是 Positive M3、Negative M3、Positive M2、Negative M2 分别指将几何缺陷对应的弯矩值  $M_{imp}$  与 M3 的正方向、M3 的负方向、M2 的正方向、M2 的负方向叠加，得到的 PMM 应力比。第二行指的是程序计算得到的控制工况是哪一种，上表中是几何缺陷施加在 M2 的负方向时，柱得到的应力比最大，为控制工况，显示 Yes。

### 3. 欧标柱斜截面设计要点

对于无腹筋的钢筋混凝土构件，欧标考虑了轴力对抗剪截面承载力（无筋承载力）的影响，国标没有相关规定。对于有腹筋的钢筋混凝土构件的抗剪截面承载力（有筋承载力），国标采用混凝土受剪与腹筋受剪承载力之和的形式，欧标则采用了桁架模型（图 13）。桁架由与 AC 角度为  $\alpha$  的拉杆 BC 和角度为  $\theta$  的混凝土压杆 AB，以及纵向受拉钢筋和受压钢筋组成（图 13）。用户若想了解更详细的内容，可参考本文参考资料[1]，限于篇幅，在此不深入展开。本节主要结合 EC2、EC8 规范，介绍 ETABS 程序如何进行框架柱抗剪设计。



A——受压弦杆；B——撑杆；C——受拉弦杆；D——抗剪钢筋

图 13 欧标有腹筋构件的桁架模型（EC2 图 6.5）

(1) 确定施加的剪力设计值  $V_{Ed}$ ：

对低延性框架而言，该值来自荷载组合下的计算结果。对于中延性抗弯框架和高延性抗弯框架，还应满足表 1 的要求。

表 1 抗震框架柱的设计剪力要求

高延性抗弯框架/中延性抗弯框架	低延性抗弯框架
根据框架节点处形成塑性铰时的抗弯能力计算得到的剪力（EC8 5.4.2.3；EC8 5.5.2.2）	荷载组合下的计算结果

注意，根据框架节点处形成塑性铰时的抗弯能力是通过抗弯实配钢筋结果计算而得。当柱配筋按“校核”时，实配钢筋为柱定义的初始配筋；当柱配筋按“设计”时，实配钢筋为柱最终的设计配筋，和柱定义的初始配筋不一定相同。抗弯能力计算时采用的是混凝土和钢筋的设计值，即  $f_{cd}$  和  $f_{yd}$ 。

(2) 确定混凝土的抗剪承载力  $V_{Rd,c}$ ：

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \quad (\text{EC2 Eq. 6.2a})$$

其最小值为:

$$V_{Rd,c} = (v_{\min} + k_l \sigma_{cp}) b_w d \quad (\text{EC2 Eq. 6.2b})$$

其中:  $\rho_l$  为纵向钢筋的配筋率,  $\rho_l = A_s / b_w d \leq 0.02$ 。

(3) 确定截面的最大抗剪设计值  $V_{Rd,max}$ :

为防止混凝土受压层压溃, 剪力设计值  $V_{Ed}$  不应大于最大适应设计剪力  $V_{Rd,max}$ 。若剪力设计值超过此限值, 则会设计失败。最大适应剪力设计值定义如下:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta) \quad (\text{EC2 Eq. 6.9})$$

其中:  $21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ ; 当荷载组合包含地震作用时,  $\theta = 45^\circ$ , 程序默认取  $\theta = 45^\circ$ 。

(4) 确定单位长度所需的抗剪箍筋面积  $\frac{A_{sw}}{s}$ :

当  $V_{Rd,c} < V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$  时, 单位长度所需的抗剪箍筋面积  $A_{sw} / s$  按下式计算:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{z f_{ywd} \cot \theta} \quad (\text{EC2 Eq. 6.8})$$

其中:  $\theta$  取值同上。

关于 ETABS 框架柱抗剪设计输出细节, 用户可查阅设计细节中关于抗剪设计的表格。以下表为例:

Shear Design for  $V_{Ed2}$ ,  $V_{Ed3}$

	Shear $V_{Ed}$ kN	Shear $V_{Rdc}$ kN	Shear $V_{Rds}$ kN	Shear $V_{Rdmax}$ kN	$\tan(\theta)$ Unitless	Rebar $A_{sw} / s$ mm <sup>2</sup> /m
Major, $V_{Ed2}$	378.2952	338.6532	378.2952	1545.3558	1	2229.59
Minor, $V_{Ed3}$	301.1118	258.4282	301.1118	1545.3558	1	1774.69

上表中, Shear  $V_{Ed}$  是该组合的设计剪力值;  $\theta$  是受压层角度, 程序默认取  $\theta = 45^\circ$ ; Shear  $V_{Rdc}$  是混凝土的抗剪承载力; Shear  $V_{Rds}$  是计算抗剪箍筋时的剪力值, 对于地震组合, 该数值是框架节点处形成塑性铰时的抗弯能力计算得到的剪力, 因此可能会比 Shear  $V_{Ed}$  大; Shear  $V_{Rd,max}$  是截面的最大抗剪设计值, Rebar  $A_{sw}/s$  是单位长度所需的抗剪箍筋面积。

注意: ETABS 不会校核箍筋最小间距、体积配筋率等要求, 这部分工作由工程师自行校核。

#### 4. 设计计算书

常规的设计结果通过命令【设计>混凝土框架设计>显示设计信息】, 在视窗中显示。此外, ETABS 还可以输出每个构件在所有荷载组合下的设计细节数据, 这些结果以表格文档的方式显示, 可转化为 Word 格式保存为计算书。操作方式是, 在显示设计结果的视窗中, 选择某根柱, 点击右键, 在弹出的对话框中点击细节按钮, 即出现如图 14 所示的对话框。对话框左上方是细节显示内容的选项卡, 以下对框架柱的设计细节进行说明。

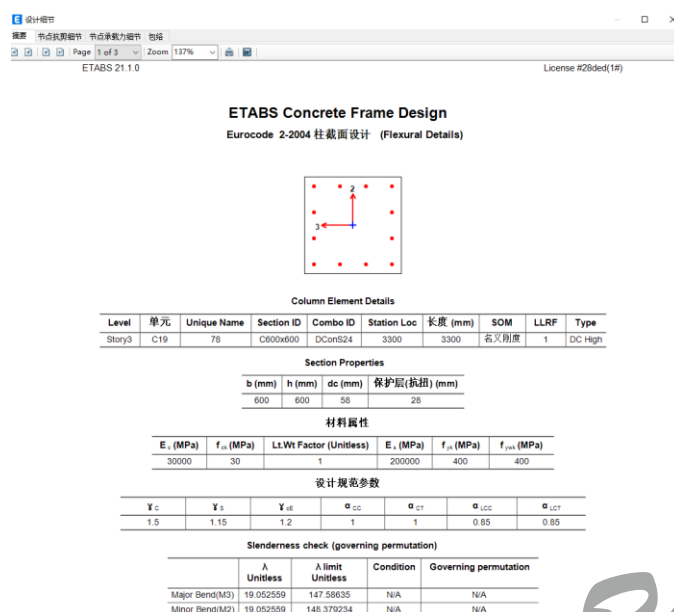


图 14 ETABS 输出的设计细节

#### 4.1 设计细节

Column Element Details

Level	单元	Unique Name	Section ID	Combo ID	Station Loc	长度 (mm)	SOM	LLRF	Type
Story3	C19	78	C600x600	DCons24	3300	3300	名义刚度	1	DC High

该表是柱单元的基本信息，前七项来自模型定义，SOM (Second Order Method) 指二阶 P- $\delta$  效应计算方法采用名义刚度法，LLRF (活荷载折减系数) 由程序计算，Type (框架类型) 来自设计覆盖项定义。

Section Properties

b (mm)	h (mm)	dc (mm)	保护层(抗扭) (mm)
600	600	58	28

该表是截面尺寸信息，来自截面定义。dc 是指截面边缘到纵筋中心的距离，Cover (Torsion)指抗扭计算的箍筋净保护层厚度。

材料属性

$E_c$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)	Lt.Wt Factor (Unitless)	$E_s$ (MPa)	$f_{yk}$ (MPa)	$f_{ywk}$ (MPa)
30000	30	1	200000	400	400

该表是材料信息，来自材料定义。其中 Lt.Wt Factor 指轻质混凝土系数，对于普通混凝土取 1.0。

设计规范参数

$\gamma_c$	$\gamma_s$	$\gamma_{ce}$	$\alpha_{cc}$	$\alpha_{ct}$	$\alpha_{lcc}$	$\alpha_{lct}$
1.5	1.15	1.2	1	1	0.85	0.85

上表是设计规范参数，程序有默认取值，可通过设计首选项或覆盖项修改。这些参数会直接影响设计结果。其中： $\gamma_c$  指混凝土强度分项系数，欧标建议持久和短暂工况取 1.5、对于偶然工况取 1.2、程序默认值为 1.5； $\gamma_s$  指钢筋材料强度分项系数，欧标建议持久和短暂工况取 1.15、对于偶然工况取 1.0、程序默认值为 1.15； $\gamma_{ce}$  指混凝土弹性模量分项系数，程序默认值为 1.2，名义刚度法计算弯矩放大系数时，会用到该数值计算弹性模量设计值，参见 EC2 式 (5.27)； $\alpha_{cc}$  指考虑混凝土抗压强度长期效应不利影响的系数，程序默认值为 1.0； $\alpha_{ct}$  指考虑混凝土抗拉强度长期效应不利影响的系数，程序默认值为 1.0； $\alpha_{lcc}$  指考虑轻质混凝土抗压强度长期效应不利影响的系数，程序默认值为 0.85； $\alpha_{lct}$  指考虑轻质混凝土抗拉强度长期效应不利影响的系数，推荐值为 0.85。

Slenderness check (governing permutation)

	$\lambda$ Unitless	$\lambda$ limit Unitless	Condition	Governing permutation
Major Bend(M3)	19.052559	147.58635	N/A	N/A
Minor Bend(M2)	19.052559	148.379234	N/A	N/A

上表是长细比较核结果。当长细比  $\lambda$  小于等于限值  $\lambda$  limit，说明是短柱 (short)，无需考虑 P- $\delta$  效应。当长细比  $\lambda$  大于限值  $\lambda$  limit，说明是细长柱 (slender)，需考虑 P- $\delta$  效应。可采用名义刚度法或名义曲率法由程序自动计算 P- $\delta$  效应。

Axial Force and Biaxial Moment Design for  $N_{Ed}$ ,  $M_{Ed2}$ ,  $M_{Ed3}$  (governing permutation)

Design $N_{Ed}$ kN	Design $M_{Ed2}$ kN-m	Design $M_{Ed3}$ kN-m	Minimum M2 kN-m	Minimum M3 kN-m	Rebar Area mm <sup>2</sup>	Rebar %	D/C 比 Unitless
555.0488	-535.928	-23.2877	11.101	11.101	5401	1.5	0.891

上表是正截面设计信息。其中  $N_{Ed}$  是轴力设计值， $M_{Ed2}$ 、 $M_{Ed3}$  是绕 2 轴、3 轴的设计弯矩，Minimum M2、Minimum M3 是考虑对应方向最小偏心的弯矩值、 $M_{min2} = e_{min2} \perp N_{Ed}$ 、 $M_{min3} = e_{min3} \perp N_{Ed}$ ，其中  $e_{min2}$ 、 $e_{min3}$  参见 EC2 6.1。

设计弯矩  $M_{Ed2}$ 、 $M_{Ed3}$  不得小于对应的 Minimum M2、Minimum M3。



First-Order Moments (governing permutation)

	End I Moment kN-m	End J Moment kN-m	Section Moment kN-m	Imperfection Moment kN-m	M <sub>02</sub> Moment kN-m	M <sub>01</sub> Moment kN-m
Major Bend(M3)	19.6712	-23.2877	-23.2877	4.5792	-23.2877	19.6712
Minor Bend(M2)	464.606	-531.3489	-531.3489	4.5792	-535.928	460.0268

上表是一阶弯矩信息。其中 End I Moment 指柱 I 端弯矩、End J Moment 指柱 J 端弯矩、Section Moment 指该测站处荷载组合下的截面弯矩，并不是最终设计采用的弯矩。Imperfection Moment 指考虑几何缺陷对应的弯矩值  $M_{imp2} = e_{i2} \square N_{Ed}$ 、 $M_{imp3} = e_{i3} \square N_{Ed}$ ，其中  $e_{i2}$ 、 $e_{i3}$  参见 EC2 Eq5.1、Eq5.2。

M<sub>02</sub>、M<sub>01</sub> 是指叠加了几何缺陷对应弯矩值 M<sub>imp</sub> 后的柱端弯矩，但是要注意：1) 几何缺陷对应的弯矩只能叠加在 2,3 轴中的某一方向，例如本例中 M<sub>imp</sub> 是叠加在 M2 方向；2) M<sub>02</sub> 的绝对值需大于 M<sub>01</sub>。

轴压比

Conc Capacity ( $\alpha_{cc} * A * f_{cd}$ ) kN	Compressive Ratio N <sub>Ed</sub> / ( $\alpha_{cc} * A * f_{cd}$ )	Comp Ratio Limit	Seismic Load?	Ratio ok?
7200	0.159	0.55	Yes	Yes

上表是柱轴压比信息。其中轴压比限值 0.55 对应 DCH 柱（高延性柱）的轴压比，参见 EC8 5.5.3.2.1(3)P。当柱为 DCM（中等延性柱）时，其轴压比限值为 0.65，参见 EC8 5.4.3.2.1(3)P。

Shear Design for V<sub>Ed2</sub> , V<sub>Ed3</sub>

	Shear V <sub>Ed</sub> kN	Shear V <sub>Rdc</sub> kN	Shear V <sub>Rds</sub> kN	Shear V <sub>Rd,max</sub> kN	tan( $\theta$ ) Unitless	Rebar A <sub>sw</sub> /s mm <sup>2</sup> /m
Major, V <sub>Ed2</sub>	378.2952	338.6532	378.2952	1545.3558	1	2229.59
Minor, V <sub>Ed3</sub>	301.1118	258.4282	301.1118	1545.3558	1	1774.69

上表是柱剪切设计信息，Shear V<sub>Ed</sub> 是该组合的设计剪力值； $\theta$  是受压层角度、程序默认取  $\theta = 45^\circ$ ；Shear V<sub>Rdc</sub> 是混凝土的抗剪承载力；Shear V<sub>Rds</sub> 是计算抗剪箍筋时的剪力值，对于地震组合，该数值是框架节点处形成塑性铰时的抗弯能力计算得到的剪力，因此可能会比 Shear V<sub>Ed</sub> 大；Shear V<sub>Rd,max</sub> 是截面的最大抗剪设计值，Rebar A<sub>sw</sub>/s 是单位长度所需的抗剪箍筋面积。

Joint Shear Check/Design

	Joint Shear A <sub>sh</sub> cm <sup>2</sup>	Shear V <sub>Ed, Top</sub> kN	Shear V <sub>jhd</sub> kN	Shear V <sub>Rd, Conc</sub> kN	节点 Area cm <sup>2</sup>	Shear Ratio Unitless
Major Shear, V <sub>2</sub>	47.9	211.2607	1464.273	2071.5311	2623.3	0.707
Minor Shear, V <sub>3</sub>	57.5	230.3412	1588.0192	2071.5311	2623.3	0.767

上表是节点设计信息 Joint Shear A<sub>sh</sub> 是所需节点区约束水平箍筋的总面积，Shear V<sub>Ed</sub> 是该组合的柱剪力设计值 V<sub>c</sub>，Shear V<sub>jhd</sub> 是该组合的最终节点区的水平剪力，Shear V<sub>Rd, Conc</sub> 是该组合的节点区设计抗剪强度，Joint Area 是抗剪节点面积，Shear Ratio Unitless 是节点区抗剪承载力比，是 V<sub>jhd</sub> 与 Shear V<sub>Rd, Conc</sub> 的比值。

Design Details for All Permutations Considered - Major Bending M3

Imperfection Direction	空	Positive M3	Negative M3	Positive M2	Negative M2
Analysis Moment M <sub>ana</sub> kN-m	-23.2877	-23.2877	-23.2877	-23.2877	-23.2877
Imperfection Moment M <sub>imp</sub> kN-m	0.0	4.5792	-4.5792	0.0	0.0
M <sub>ai</sub> = M <sub>ana</sub> + M <sub>imp</sub> kN-m	-23.2877	-18.7086	-27.8669	-23.2877	-23.2877
Minimum Moment M <sub>min</sub> kN-m	N/A	11.101	11.101	11.101	11.101
M <sub>3des1</sub> = M <sub>ai</sub> or M <sub>min</sub> kN-m	N/A	-18.7086	-27.8669	-23.2877	-23.2877
Neg. Moment Strength M <sub>Rd-</sub> kN-m	-592.3918	-592.3918	-592.3918	-592.3918	-592.3918
Pos. Moment Strength M <sub>Rd+</sub> kN-m	592.3918	592.3918	592.3918	592.3918	592.3918



上表是柱设计弯矩 M3 信息，Positive M3、Negative M3、Positive M2、Negative M2 分别指将几何缺陷对应的弯矩值  $M_{imp}$  与 M3 的正方向、M3 的负方向、M2 的正方向、M2 的负方向叠加。上表是 M3 的计算表格，因此第三行  $M_{ai}$  分别指不考虑几何缺陷的弯矩值 M3、考虑几何缺陷在 M3 正方向的弯矩值 M3、考虑几何缺陷在 M3 负方向的弯矩值 M3、考虑几何缺陷在 M2 正方向的弯矩值 M3、考虑几何缺陷在 M2 负方向的弯矩值 M3。Minimum Moment  $M_{min}$  指考虑对应方向最小偏心的弯矩值、 $M_{min3} = e_{min3} \perp N_{Ed}$ ，其中  $e_{min3}$  参见 EC2 6.1。M3<sub>des1</sub> 指设计弯矩取  $M_{ai}$  和  $M_{min}$  两者的较大值。M<sub>Rd</sub> 指根据截面实配钢筋、考虑轴压力设计值的柱截面弯矩设计值。因为是对称配筋，因此 M<sub>Rd+</sub> 和 M<sub>Rd-</sub> 数值一样。

Imperfection Direction	空	Positive M3	Negative M3	Positive M2	Negative M2
$M_{ana}$ kN-m	-531.3489	-531.3489	-531.3489	-531.3489	-531.3489
$M_{imp}$ kN-m	0.0	0.0	0.0	4.5792	-4.5792
$M_{ai} = M_{ana} + M_{imp}$ kN-m	-531.3489	-531.3489	-531.3489	-526.7697	-535.928
$M_{min}$ kN-m	N/A	11.101	11.101	11.101	11.101
$M2_{des1} = M_{ai}$ Or $M_{min}$ kN-m	N/A	-531.3489	-531.3489	-526.7697	-535.928
$M_{Rd-}$ kN-m	-592.3918	-592.3918	-592.3918	-592.3918	-592.3918
$M_{Rd+}$ kN-m	592.3918	592.3918	592.3918	592.3918	592.3918

上表是柱设计弯矩 M2 信息，第三行  $M_{ai}$  分别指不考虑几何缺陷的弯矩值 M2、考虑几何缺陷在 M3 正方向的弯矩值 M2、考虑几何缺陷在 M3 负方向的弯矩值 M2、考虑几何缺陷在 M2 正方向的弯矩值 M2、考虑几何缺陷在 M2 负方向的弯矩值 M2。Minimum Moment  $M_{min}$  指考虑对应方向最小偏心的弯矩值、 $M_{min2} = e_{min2} \perp N_{Ed}$ ，其中  $e_{min2}$  参见 EC2 6.1。M2<sub>des1</sub> 指设计弯矩取  $M_{ai}$  和  $M_{min}$  两者的较大值。

Imperfection Direction	空	Positive M3	Negative M3	Positive M2	Negative M2
(M3 <sub>des1</sub> , M2 <sub>des1</sub> ) PMM Ratio	0.882028	0.877417	0.88646	0.873302	0.890751
(M3 <sub>des1</sub> , M2 <sub>des1</sub> ) PMM Governs	无	无	无	无	Yes

上表是柱 PMM 设计信息，第一行指的是 Positive M3、Negative M3、Positive M2、Negative M2 分别指将几何缺陷对应的弯矩值  $M_{imp}$  与 M3 的正方向、M3 的负方向、M2 的正方向、M2 的负方向叠加，得到的 PMM 应力比。第二行指的是程序计算得到的控制工况是哪一种，上表中是几何缺陷施加在 M2 的负方向时，柱得到的应力比最大，为控制工况。

## 5 小结

本文对基于 Eurocode 2 和 Eurocode 8 规范进行混凝土框架柱设计的 ETABS 实现和输出进行了说明。可以看出，PMM 曲面是柱正截面设计的基础，而规范的细节要求将影响 PMM 曲面的形状。此外，对于不同抗震要求的框架类型，其“强柱弱梁”或抗剪承载力的要求是不同的，这将显著影响设计结果。工程师熟悉程序的技术条件后，有利于更好地理解程序结果来指导设计。

## 参考资料

- [1] 贡金鑫、魏巍巍、胡家顺. 中美欧混凝土结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [2] 贡金鑫、车轶、李荣庆. 混凝土结构设计(按欧洲规范)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [3] Eurocode 2: Design of concrete structures (Part 1-1: General rules and rules for buildings). EN 1992-1-1 [S]. 2004.
- [4] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance (Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings). EN 1998-1 [S]. 2004.
- [5] Computers & Structures Inc. ETABS v21 联机帮助文档 Concrete Frame Design Manual(Eurocode 2-2004 with 8-2004).



## 模态分析的实现与常见问题

筑信达 吴文博

模态是指弹性结构的固有振动形状，也被称为振型，其包含了模态周期和模态形状。模态分析可以帮助用户获取结构的动力特性，判断结构的薄弱位置；也可用于后续的动力分析，如反应谱分析、线性模态叠加法时程分析等；还是模型检查的一种重要手段（参考第 27 期技术通讯文章“ETABS 常见警告及对策”）。可以说模态分析是了解结构的一种非常重要的手段。

用户可以通过【定义>荷载工况】命令添加模态工况，并且 ETABS/SAP2000 提供了两种模态的求解方法：特征值向量法和 RITZ 向量法。下文将对两种方法做详细介绍。

### 1. 特征值向量法

ETABS/SAP2000 中特征值向量法采用的是子空间迭代法进行特征值与特征向量的求解，具体特征值向量法的定义如图 1 所示。用户需要区域 1 中选择工况类型为“Modal”，子类型为“Eigen”，。区域 2 中，表示模态分析时使用的刚度，当结构中不存在索或类似构件时，常常需要通过施工模拟或其它非线性工况模拟出索的真实刚度作为工作态，这时模态分析就可以使用第二个选项继承非线性刚度做后续的分析，但需要注意的是，这种继承仅限于刚度的继承，不包含荷载。区域 3 在一般情况下并不需要设置，只在分析中需要考虑静力修正时，可以打开“高级”勾选项进行设置。用户可以为任何加速度荷载或荷载模式指定程序进行静力修正模态计算，对于地震作用分析可按图中所示，仅考虑加速度荷载即可，关于静力修正选项的具体内容详见后文。区域 4 中，最重要的是设置最大和最小模态数量，而模态数量可依据《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010 5.2.3 条取前 9~15 个模态，或按照《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3-2010 5.1.13 条模态数量使各模态参与质量之和不小于总质量的 90%（即质量参与系数达到 0.9），这也是实际工程中常用的确定模态数量的方法，程序不会自动增加模态数量使其满足质量参与系数达到 0.9，因此用户需要通过查看质量参与系数来确认模态数量是否足够，如果不够需增加模态数量，直至质量参与系数达到 0.9。

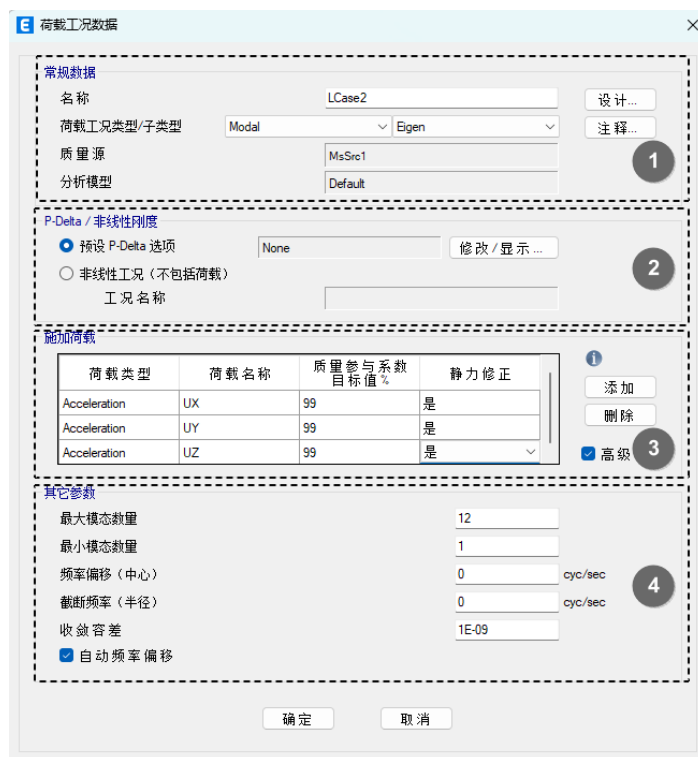


图 1 特征值向量法





## 1.1 静力修正

当使用反应谱法或者线性模态叠加时程分析法时，求出全部模态才可以得到精确的结果，但是对于大型结构，求解出所有的模态是非常困难的，也没有必要，一般情况下只需求解出部分低阶模态，使其质量参与系数达到 90%即可达到较好的精度，这样高阶模态的响应就被舍弃掉了。实际中，对于常见的动力荷载形式，如地震作用、风荷载等，以低频成分为主，高频成分较少，如图 2 所示。并且一些理论分析也指出，在低频荷载作用下，高阶模态引起的动力响应通常很小，如图 3 所示，图中， $\beta$  为荷载频率与结构频率的比值， $D$  为结构位移放大系数。由图 3 可以看出，在低频荷载作用下，当结构频率比较大时， $\beta$  值趋近于 0，此时结构的动力放大系数非常接近于 1，这样就可以使用静力响应近似地替代动力响应，这是一种对截断的高频响应的修正，也是静力修正的主要原理。关于静力修正的具体表达本文限于篇幅不做讨论，用户可参考文献 1 的相关内容。

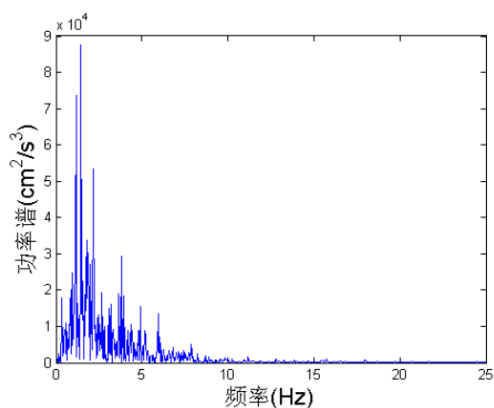


图 2 EL CENTRO 波的功率谱

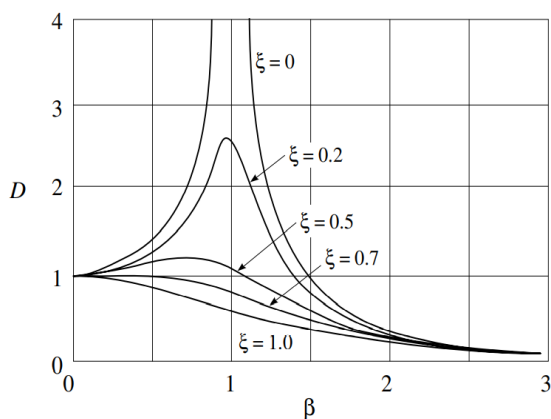
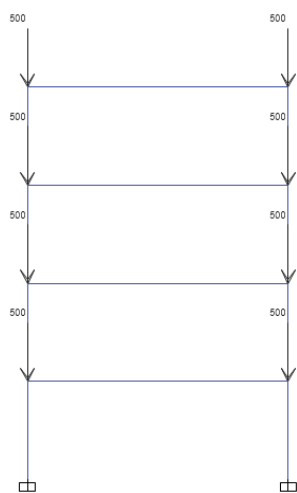


图 3 频率比与动力放大系数的关系

本文通过一个例子来阐述静力修正的作用，模型为的平面框架，框架跨度为 8 米，各层高度为 3 米，梁、柱截面均为 HW300×300×10×15，钢材牌号为 Q235，各层柱顶节点施加竖向荷载  $P$ ，大小分别为 500kN，质量源由荷载  $P$  转化而来，此时结构的基本周期和质量参与系数如图 4 所示：



Case	Mode	Period sec	UY	SumUY
Modal	1	2.516	0.8459	0.8459
Modal	2	0.796	0.1058	0.9518
Modal	3	0.45	0.0376	0.9894
Modal	4	0.324	0.0106	1

图 4 平面框架示意图与各阶模态的质量参与系数

从上图可以看出，当模态数量为 2 时，结构的质量参与系数已经超过 95%，满足规范的要求，现在定义三个模态工况，分别为工况 Modal A，模态数量为 2 个；工况 Modal B，模态数量为 2 个同时考虑 UY 方向加速度的静力修正；工况 Modal C 模态数量为 4 个，基于这三个工况进行线性模态时程分析。输入的加速度时程为正弦函数，周期为 2 秒，加速度峰值为  $1g$ ，因工况 Modal C 包含了所有可能的模态，可视为精确值，具体计算结果如下：



表 1 不同工况下结构楼层剪力/kN

楼层	Modal A	Modal B	Modal C	$\frac{ModalC - ModalA}{ModalC}$	$\frac{ModalC - ModalB}{ModalC}$
4	4108.9	3990.7	3989.5	-2.99%	-0.03%
3	7148.2	7191.3	7173.5	0.35%	-0.25%
2	8815.6	9018.4	8993.0	1.97%	-0.28%
1	9378.7	9126.2	9188.1	-2.07%	0.68%

从上述计算结果可以看出，静力修正用较少的模态数量即可得到较为精确的结果，当作用于加速度荷载时，静力修正模态即为质量丢失模态或残余质量模态，这在美国原子能机构的 REGULATORY GUIDE 1.92 Revision 2 中需要考虑。需要注意的是，当荷载高频成分占主导时，例如碰撞或爆炸分析，静力修正方法将不再拥有更好的精度。

## 2. 力相关的 RITZ 向量法

特征向量法是使用准确的自由振动模态来解决结构动力分析，但是在一些情况下，这并不是最优的方法，根据文献 2 的阐述，可以归纳为以下原因：

(1) 对于大型的结构系统，求解自由振动模态和频率的特征值问题可能需要大量的计算工作。例如，当结构底部质量较大，且刚度也较大的情况，如图 5 所示，结构虽然不大，但是由于底部的水池重量较大，且刚度也较大，仍需要 150 个模态才可以保证 X 和 Y 方向的质量参与系数达到 90%。类似的，如果用户将地下室也带入至模型中进行分析时，常常也需要大量的模态。

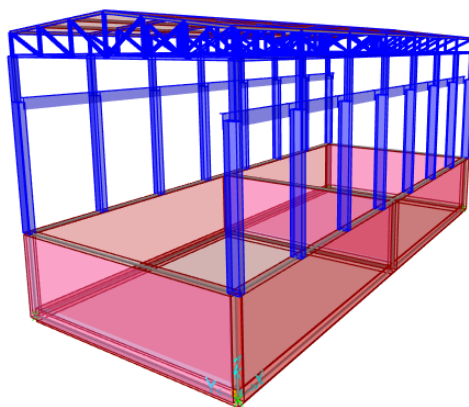


图 5 某泵房结构

再例如，结构需要进行竖向地震作用分析时，由于竖向刚度通常较水平刚度大很多，竖向的振动频率也相对很大，比较靠后，这时就需要非常多的模态数量满足 Z 向质量参与系数达到 90% 的要求。

(2) 在自由振动模态的计算中，完全忽视荷载的空间分布。因此，计算的许多模态对荷载是正交的并且不参与动态响应。例如，对于质量和刚度对称的结构，当进行 X 向水平地震分析时，Y 向的模态与荷载正交，并不会产生动力响应。类似的，当进行水平地震分析时，一些竖向振动的局部模态也不会产生动力响应，这在一些下部为混凝土结构，上部为空间结构的建筑中比较常见。

为解决上述问题，ETABS 提供了 RITZ 向量法求解模态，文献 2 已证明，基于唯一一组荷载相关向量的动力分析，比使用相同数量的特征向量法，可产生更精确的结果，关于 RITZ 向量法的理论部分，可参考文献 2，本文不再复述。类似于特征值向量法，RITZ 向量法的定义如图 6 所示。



图 6 RITZ 向量法的定义

RITZ 向量法的定义与特征值向量法在区域 1、区域 2 和区域 4 的定义是相似，但是区域 3 是有所不同的，用户可以定义任意数量的初始荷载向量。每一个荷载向量可以是如下的一种：

(1) 全局 X、Y、Z 方向的加速度，对应荷载类型为“Acceleration”，一般用于反应谱分析，或者地震激励的线性模态时程分析。

(2) 某种荷载模式，对应的荷载类型为“Load Pattern”，可用于一些力加载的时程分析中，例如，舒适度分析、风时程分析等情况。

(3) 内置的非线性变形荷载，对应荷载类型为“Link”，这种荷载形式多用于使用连接单元的减隔震分析中，常用于 FNA 法中，由于 FNA 法将连接单元的非线性力移动到方程的右端，作为荷载考虑，因此需要考虑连接单元激发的模态。具体可参考文献 2 中 FNA 法的相关内容。

第一代 Ritz 向量是对应于初始荷载向量的静态位移向量，其余的向量由这样的循环关系确定：由先前求得的 Ritz 向量和质量矩阵的乘积作为下次静力求解的荷载向量。每一次静力求解称为一个循环数。某一荷载的循环数越大，那么会生成更多与这个荷载相关的 RITZ 向量，也会得到更多与这个荷载有关的模态。例如，某 8 层混凝土框架结构，如图 7 所示。

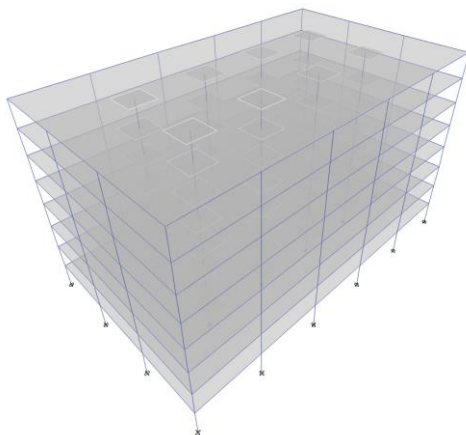


图 7 某框架结构三维模型示意图





使用 RITZ 向量方法进行模态分析，初始荷载考虑加速度 UX 和加速度 UZ，模态总数为 4 个。其中模态工况“Modal A”中，加速度荷载 UX 和加速度荷载 UZ 的循环数均为 2，模态工况“Modal B”中，加速度荷载 UX 和加速度荷载 UZ 的循环数分别为 3 和 1，两个模态工况的定义如图 8 所示：

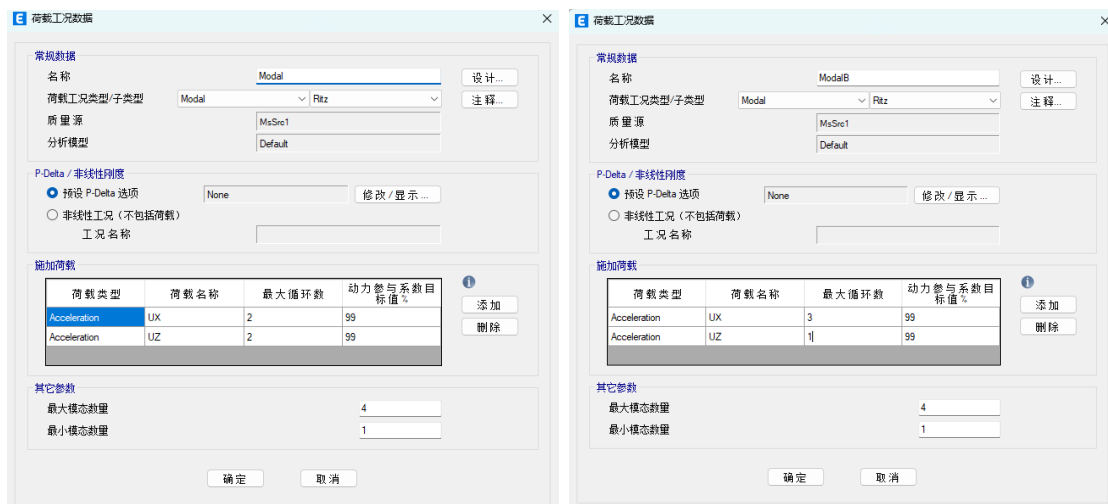


图 8 模态 A (左) 与模态 B (右) 工况定义

计算得到的质量参与系数如图 9 所示，可以看出“Modal A”工况中，前 2 阶模态对应的是 X 向的模态，后 2 阶对应的是 Z 向的模态，“Modal B”工况中，前 3 阶对应的是 X 向模态，第 4 阶对应的是 Z 向的模态，这与工况中各个初始荷载的循环数相吻合。由于“Modal B”工况中加速度 UX 荷载的循环数更多，因此 X 向的质量参与系数也会更多一些。而 Y 方向由于没有相应的初始荷载，所以并未激发出 Y 向的模态，所以 RITZ 向量法包含有静力凝聚的效果。

Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
ModalA	1	2.389	0.844	0	0	0.844	0	0
ModalA	2	0.75	0.1242	0	0	0.9683	0	0
ModalA	3	0.267	0	0.0002	0.7386	0.9683	0.0002	0.7386
ModalA	4	0.157	0	0.0057	0.2042	0.9683	0.0059	0.9429
ModalB	1	2.389	0.844	0	0	0.844	0	0
ModalB	2	0.797	0.0952	2.429E-05	0	0.9392	2.429E-05	0
ModalB	3	0.422	0.0539	0.0004	0	0.9932	0.0004	0
ModalB	4	0.259	0	0	0.8579	0.9932	0.0004	0.8579

图 9 模态 A 工况与模态 B 工况的质量参与系数

用户可以通过调整某个荷载的循环数，使其得到更大的质量参与系数，例如，当需验算竖向地震作用时，可将 X 向和 Y 向加速度荷载的循环代数设置为 10 个，而 Z 向的加速度荷载的循环数设置为 20 个，这样可以得到更多的竖向质量参与系数。默认情况下，循环数为 0，表示不限制循环次数，这对于绝大多数情况是合适的。

RITZ 向量法包含有静力凝聚、Guyan 缩减、高阶模态截断时的静力修正等数字技术的优点，因此 RITZ 向量法比使用相同模态数量的特征向量法，可产生更精确的结果。以图 5 模型为例，分别使用特征值向量法和 RITZ 向量法计算反应谱工况下的基底剪力，其中 RITZ 向量法仅考虑加速度 UX 和加速度 UY 作为初始荷载，计算结果如表 2 所示。



表 2 特征值向量法与 RITZ 向量法在不同模态数量下的计算结果对比

	模态数量						
	特征值向量法		RITZ 向量法				
	150	500	10	20	30	40	50
X 向质量参与系数	0.984	0.997	0.818	0.976	0.990	0.994	0.996
Y 向质量参与系数	0.910	0.997	0.927	0.983	0.989	0.993	0.997
X 向地震基底剪力 (kN)	2624	2625	5000	3201	2607	2710	2616
Y 向地震基底剪力 (kN)	2525	2545	3344	2647	2522	2526	2550

由上表可以看出，RITZ 向量可以使用更少的模态数量得到更高的质量参与系数，进而得到更加精确的基底剪力。

### 3. 模态结果查看

用户可通过【显示>表格>ANALYSIS RESULTS>Structure Output> Modal Information】命令查看模态分析的结果，程序共提供了六种结果。

1) 模态周期与频率 (Modal Periods And Frequencies)。程序会提供各阶模态的周期、频率、圆频率以及特征值。

2) 模态质量参与系数 (Modal Participating Mass Ratios)。模态质量参与系数是模态参与质量与结构总质量的比值，而模态参与质量又被称为基底剪力有效模态质量，用来衡量加速度荷载下，模态对基底剪力的贡献。程序会输出各阶模态下各分量 (UX、UY、UZ、RX、RY、RZ) 下质量参与系数，也会输出累积的质量参与系数。通常情况下，UX、UY、UZ (如果需考虑竖向地震作用)、RZ 的累积质量参与系数应达到 90% 以上，否则应增加模态数量。关于模态质量的定义可以参考文献 1 中的描述，也可理解为质量在单位加速度荷载作用下进行模态展开后，各模态剪力与总剪力的比值，如图 10 所示，对于第一阶模态的剪力为  $1.252m+1.150m+0.956m+0.684m+0.356m=4.398m$ ，总剪力为  $5m$ ，则质量参与系数为  $4.398m/5m=0.8796$ 。

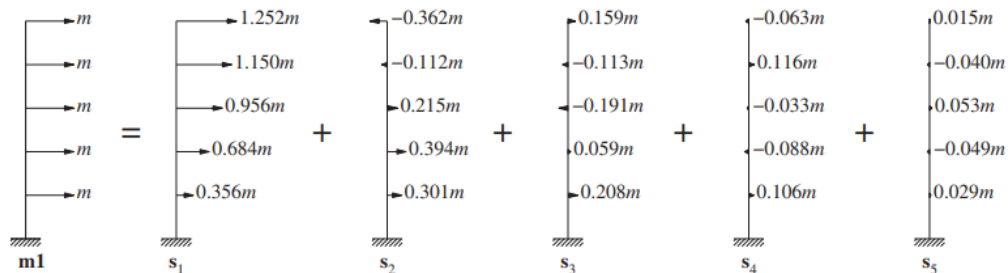


图 10 质量在单位加速度荷载作用下的模态展开

质量参与系数原则上仅适用地震作用的误差估算参数，并不能作为其他类型荷载的误差估算参数，例如结构上的节点荷载，如图 11 所示。

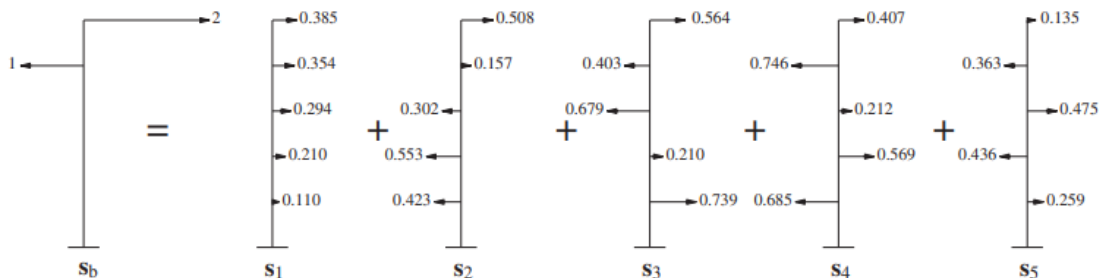


图 11 某节点荷载作用下的模态展开

从上可以看出，对于加速度荷载，高阶模态的贡献不大，可以忽略掉，但是对于某些节点荷载，这些高阶模态仍会对某些楼层剪力或者基底剪力产生重要影响，即便累积质量参与系数已经很大。

3) 荷载参与系数 (Modal Load Participating Ratios)。荷载参与系数提供了如何评价所计算的模态对于表达时程分析响应



的满足程度，这项评价在程序中并不是按照每一阶模态进行评价，而是对每一种荷载类型进行评价。荷载参与系数又分为静力荷载参与系数、动力荷载参与系数，分别用于衡量计算的模态表达给定静力荷载响应的优劣程度和表达给定动力荷载响应的优劣程度。关于静力荷载参与系数和动力荷载参与系数的定义及计算方法请参考文献 2。

静力荷载参与系数是给出了前 N 阶模态所捕捉到的应变能占总应变能的比例，当采用拟静力时程分析求解静力解时，对于任何静力荷载和非线性分析时的所有非线性变形荷载，静力荷载参与系数值应接近于 100%。而对于包含静力修正的特征向量分析以及 RITZ 向量分析，静力荷载参与系数是 100%。

动力荷载参与系数是质量参与系数概念的延伸，当荷载形式为加速度荷载时，动力荷载参与系数与质量参与系数相同。动力荷载参与系数只衡量模态如何捕捉荷载的空间特性，而非其时间的特性。因此，动力荷载参与系数只是一个用于描述是否已计算足够模态的数量。用户仍必须要检查对于不同数量模态的各个动力荷载引起的响应，来确定是否采用了足够的模态。威尔逊教授曾建议对 RITZ 向量法动力荷载参与系数在一般分析中应达到 95%以上，而另一种常用办法是增加一定的模态数量，观察所需的计算结果是否有明显的变化，如果结果稳定，就不必再次增加模态数量。

4) 模态方向因子 (Modal Direction Factors)。模态方向因子主要是用于判断模态的方向。依据《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3-2010 3.4.5 条，高层结构应该控制结构扭转为主的第一自振周期  $T_t$  与平动为主的第一自振周期  $T_1$  之比，而  $T_t$  的判断就可以借助模态方向因子，观察 RZ 输出占主导的模态即可。

5) 模态参与系数 (Modal Participating Ratios)。模态参与系数是三个加速度荷载和模态的点积。程序会输出各方向的模态参与系数以及模态质量和模态刚度。

6) 反应谱分析模态信息 (Response Spectrum Modal Info)。此表仅在反应谱分析之后输出，输出结果包括各阶模态下的阻尼、谱加速度、模态振幅。

#### 4. 小结

本文介绍特征值向量法的基本定义，简单介绍了静力修正的基本原理，静力修正用较少的模态数量即可得到较为精确的结果；还介绍了 RITZ 向量法的基本定义，荷载与循环数的作用机制，RITZ 向量法包含有静力凝聚、Guyan 缩减、高阶模态截断时的静力修正等数字技术的优点，因此 RITZ 向量法比使用相同模态数量的特征向量法，可产生更精确的结果。最后还介绍了模态结果的查看，指出了质量参与系数和荷载参与系数的适用范围。

#### 参考资料

[1] Anil K. Chopra 结构动力学 (理论及其在地震工程中的应用第 5 版) [M]. 2020

[2] Wilson E. L. Static and Dynamic Analysis of Structures [M], Fourth Edition (Revised June 2010). Computers and Structures Inc., Berkeley USA, 2010.



# 工程应用常见问题 案例解析

声明：“工程应用常见问题案例解析”专栏基于工程案例阐释软件应用的常见问题及解决方法，希望为遇到类似问题的工程师提供参考。本栏目中的所有案例均来自筑信达软件用户，软件模型归属设计单位，相关内容仅用于软件应用技术的探讨。如有不妥，请联系我们删除。

## 隔板约束导致弦杆轴力异常

本案例主要介绍 ETABS 中指定隔板约束后导致弦杆轴力异常的原因及其处理办法。

### 使用软件/SOFTWARE

ETABS v21.1.0

### 模型简介/MODEL

如图 1 所示模型为带裙房的钢筋混凝土高层建筑，主楼中包含桁架式钢结构连廊。

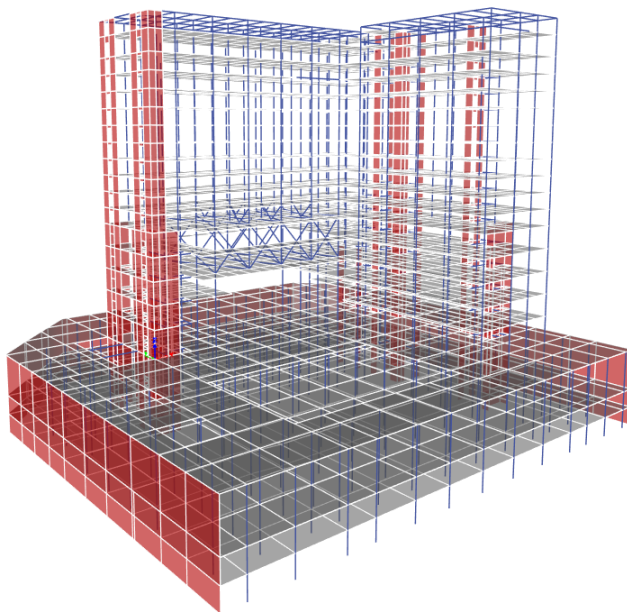


图 1 模型示意图

### 问题描述/PROBLEM

对该模型进行分析时，桁架部分弦杆都没有轴力，如图 2 所示为恒载下的轴力图，请问这是为什么？

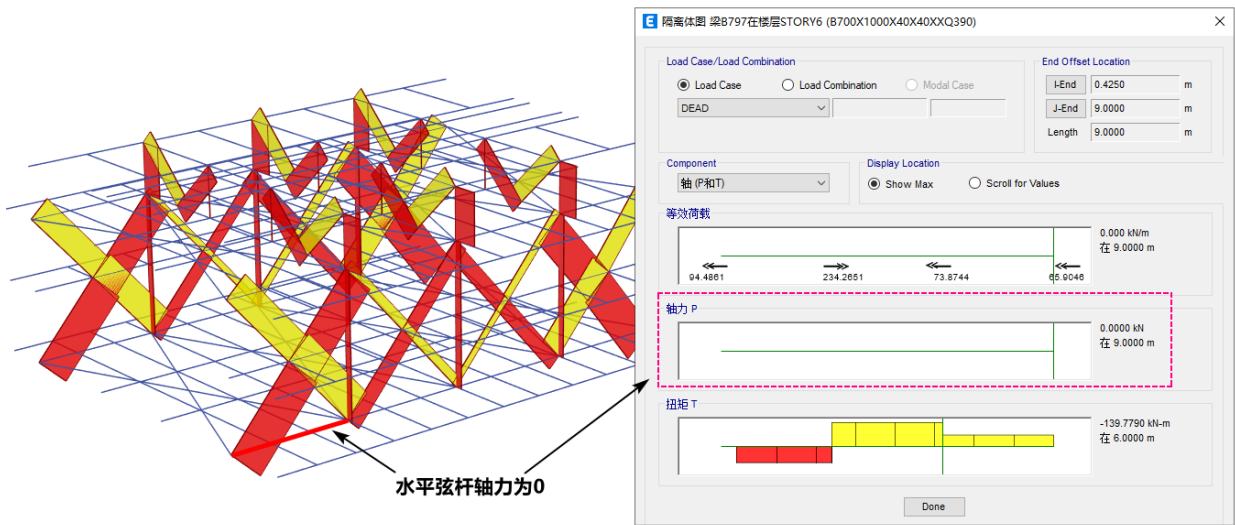


图2 桁架部分轴力图



## 解决办法/SOLUTION

该模型中定义了刚性隔板并通过节点隔板的方式指定。点击【视图>设置视图选项】，勾选“隔板范围”可以显示节点隔板范围；右键单击节点，可以查看节点隔板信息；如图3所示为桁架下弦杆所在楼层的隔板范围和节点信息。刚性隔板常用于实现多高层建筑结构中的刚性楼板假定，可有效降低结构体系的自由度，从而提高计算效率，同时使结构响应变得更加清晰。ETABS中的刚性隔板实际上是限制约束节点间在平面内的相对位移，约束节点作为一个整体进行X、Y平面内的平动和绕Z轴的转动，因此该案例中水平面的弦杆无轴力结果。实际工程中，在进行结构的整体性能指标（位移比、周期比、楼层侧向刚度比）计算时，大多数常规的结构均能采用刚性楼板假定，而进行位移、内力、配筋计算时不宜采用刚性楼板假定。

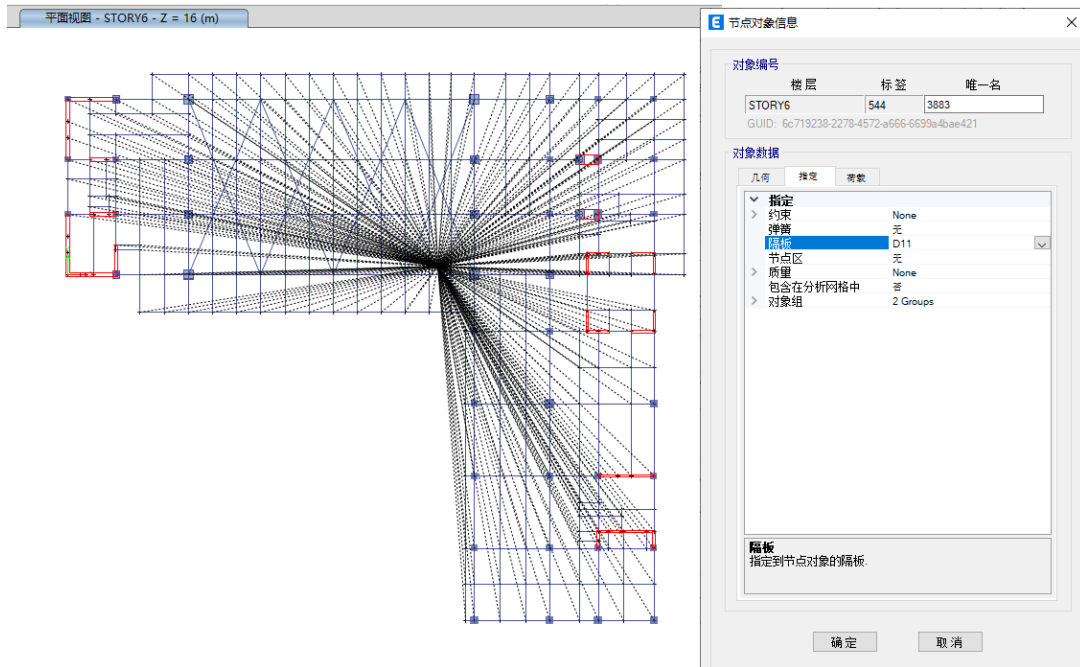


图3 显示隔板范围&查看节点信息

桁架杆件主要承受轴向拉力或压力，本案例中用户关注弦杆轴力，为此我们提供两种解决办法：

1) 取消或删除节点隔板指定。具体操作为：选择所有节点，点击【指定>节点>隔板】，如图 4 所示，选择“From Shell Object”，代表取消节点隔板指定，选择“Disconnect”，代表删除节点隔板指定，二者效果相同。

2) 将隔板类型由“刚性”修改为“准刚性”。交互式数据库编辑可以帮助用户快速批量化修改，如图 5 所示。ETABS 中的准刚性隔板用来模拟弹性楼板，其面内刚度来自于组成隔板的构件。准刚性隔板只用于施加基于隔板的风荷载（确定迎风面宽度）和考虑地震作用中的偶然偏心，不影响分析结果，也就是说如果不考虑这两点，准刚性隔板与无隔板模型计算结果一致。

本案例中由于风荷载基于隔板施加，并且地震作用考虑了偶然偏心，所以综合考虑推荐第二种方法。

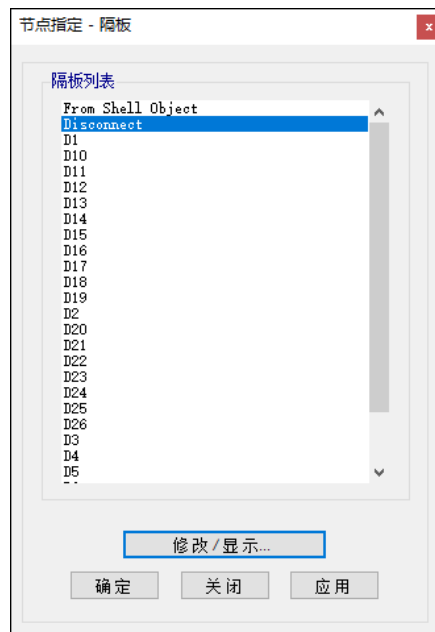


图 4 取消或删除节点隔板指定

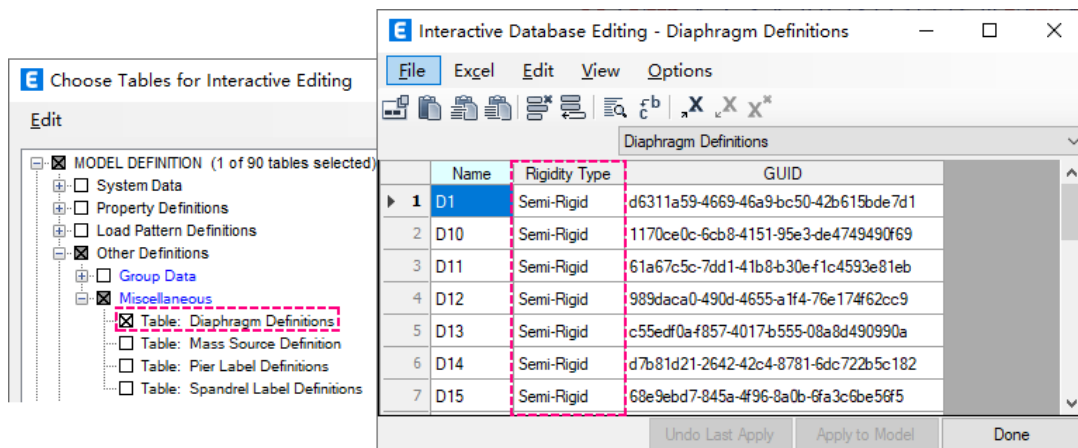


图 5 交互式数据库编辑批量修改隔板类型

将隔板修改为准刚性隔板后，再次运行分析，查看桁架弦杆轴力正常，如图 6 所示。

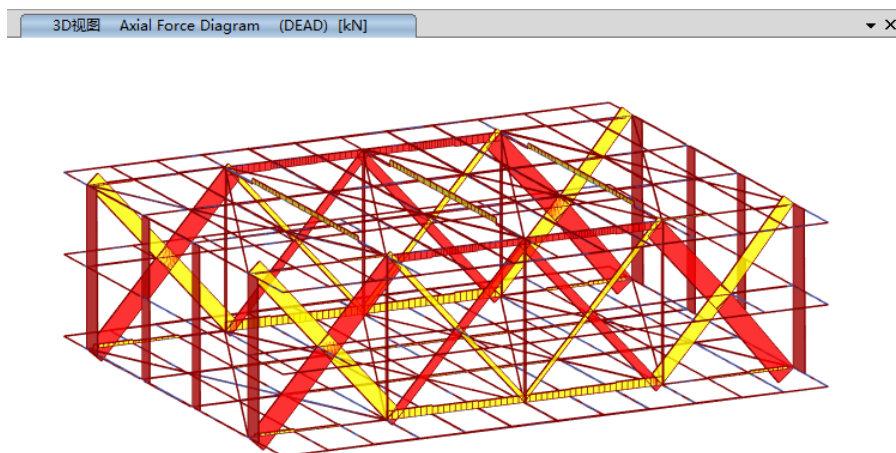


图 6 改为准刚性隔板后桁架部分轴力图



## 荷载模式相同导致阶段施工荷载重复施加

本案例主要介绍了 SAP2000 中阶段施工分析时由于荷载模式相同导致荷载重复施加的现象及其处理办法。



### 使用软件/SOFTWARE

SAP2000 v25.0.0



### 模型简介/MODEL

如图 1 所示模型为某分段安装的地下综合管廊结构。

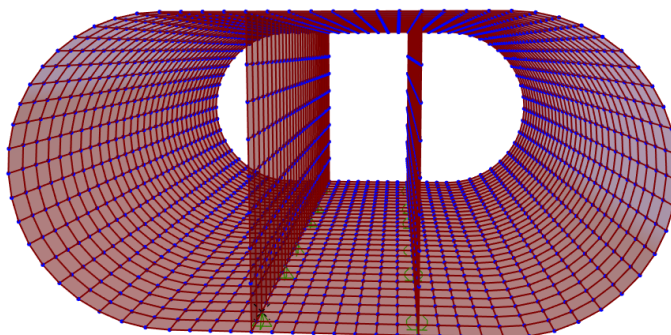


图 1 某综合管廊模型示意图



### 问题描述/PROBLEM

该模型分三个节段进行施工，各节段添加构件的同时需要在支座位置施加集中力，如图 2 所示。以第一节段（黄色部分）为例，该节段包含四个支座，添加构件时，需同时施加该部分结构的自重和支座的节点荷载，其他节段以相同方式进行施工。阶段施工工况的阶段树如图 3 所示。

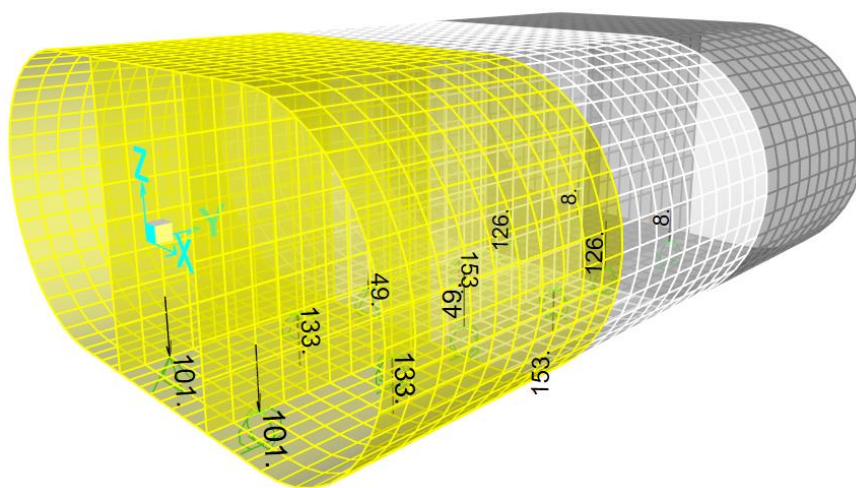


图 2 模型的三个节段及其支座集中力

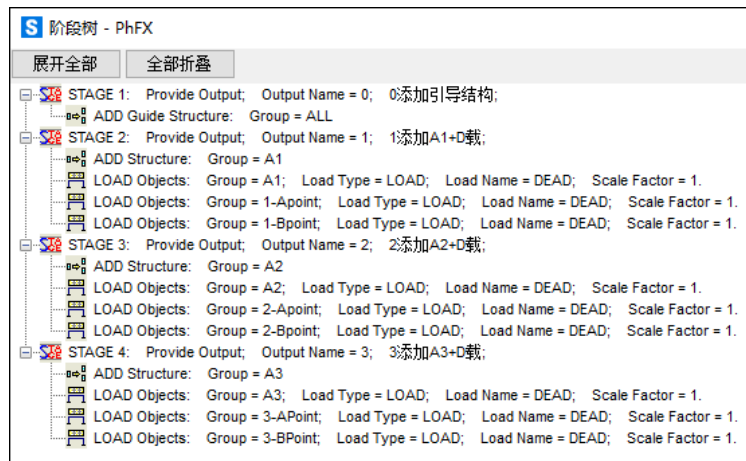


图 3 阶段施工工况的定义

运行阶段施工分析后，查看节点反力与预期值相差较大。以结构第一节段某支座为例，该支座集中力大小为 101KN，方向竖直向下。自重作用下各支座的反力均为 356.43KN，施加节点荷载后，该支座的节点反力应接近  $356.43+101=457.43\text{KN}$ ，但是程序输出的结果为 558.44KN，相差较大，请问这是为什么？

## 解决办法/SOLUTION

以阶段施工分析中的第 2 阶段（STAGE 2）为例进行说明，如图 4 所示。对象组“**A1**”包含第一节段的所有构件，对象组“**1-Apoint**”和“**1-Bpoint**”包含第一节段的 4 个支座。阶段操作中荷载施加（Load Objects）的操作是基于荷载模式或加速度。对于本案例，名称为 **DEAD** 的荷载模式同时包含了结构自重和支座处的节点荷载。程序为对象组“**A1**”施加 **DEAD** 荷载模式时，实际上为对象组“**A1**”施加自重的同时也为对象组“**1-Apoint**”和“**1-Bpoint**”施加了节点荷载，继续为对象组“**1-Apoint**”和“**1-Bpoint**”施加节点荷载会导致荷载重复施加，最终导致支座反力与预期值有偏差。

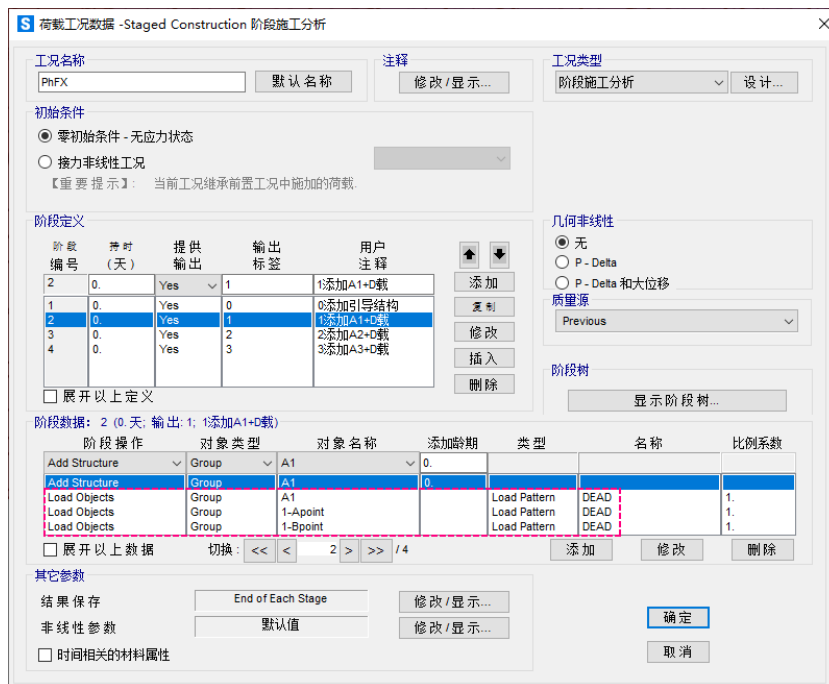


图 4 阶段施工分析中的第 2 阶段

解决该问题的方法为：首先，添加一个新的荷载模式，名称不能相同，类型仍然可以是 Dead，但是注意自重乘数需要修正为 0，否则结构自重将重复考虑，也可以选择其他类型的荷载模式，如图 5 所示。然后，通过交互式数据库编辑批量修改支座处节点荷载的荷载模式，如图 6 所示。

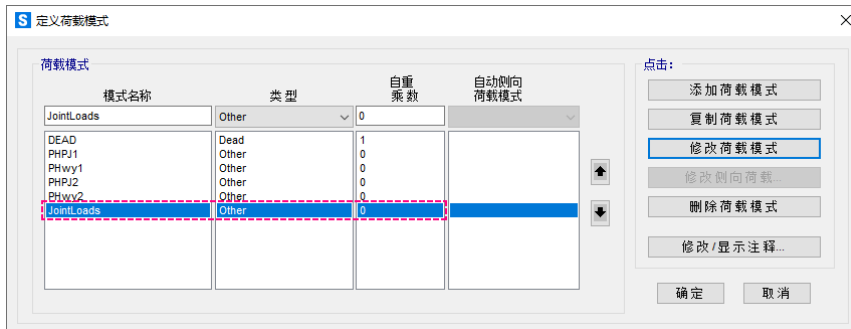


图 5 添加新的荷载模式用于施加节点荷载

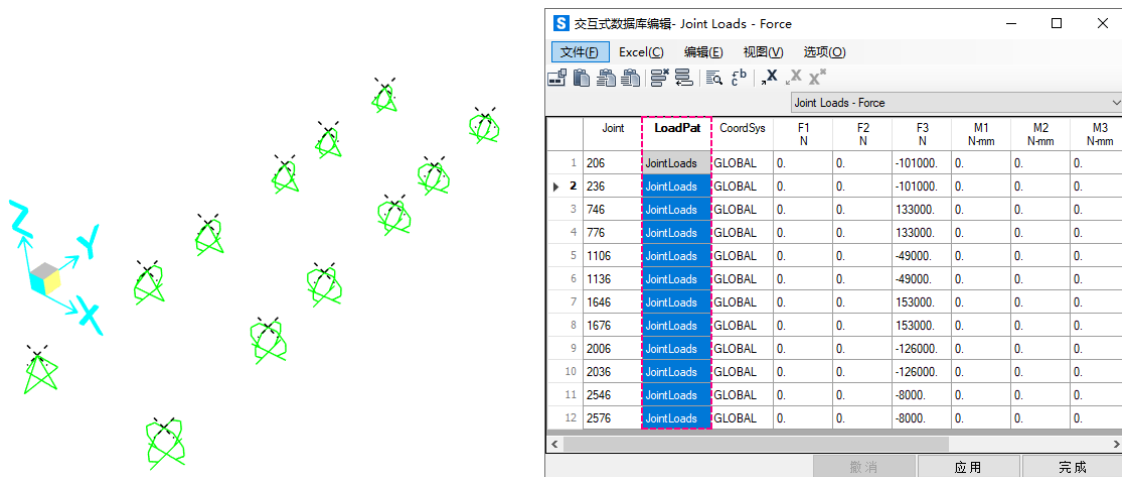


图 6 交互式数据库编辑批量修改荷载模式

再次运行分析，查看支座反力，如图 7 所示。其中问题描述中查看的支座节点反力为 457.44KN，符合预期。

综上，在进行阶段施工分析时，建议将不同分布形式的荷载定义为不同的荷载模式，避免施工阶段荷载重复施加。

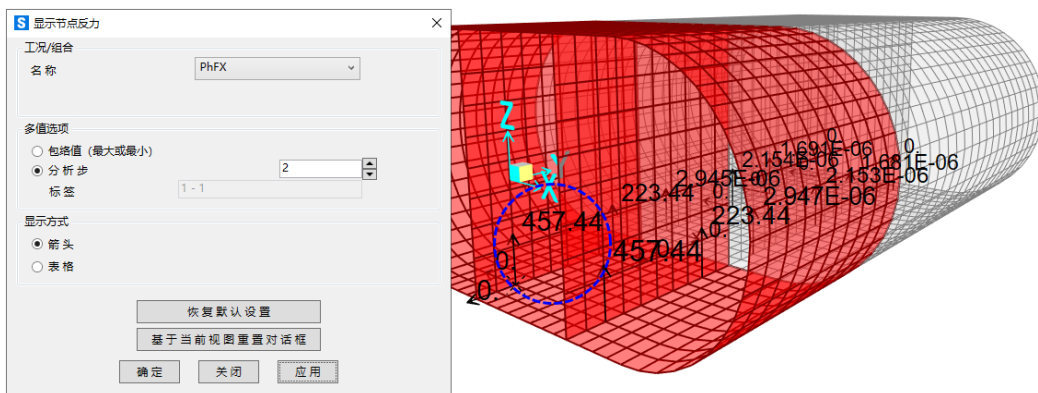


图 7 调整后的节点反力

编写：吕良、王希



## 连接单元变形与节点位移的关系

本案例以某隔震结构模型为例，介绍连接单元变形与两端节点位移之间的关系。



### 使用软件/SOFTWARE

SAP2000 v25.0.0



### 模型简介/MODEL

如图 1 所示模型为混凝土框架结构，二层柱底布置隔震层，支座高度 300mm。在 SAP2000 中采用绘制两点连接单元(Rubber Isolator)的方式绘制隔震支座，对结构进行线性时程分析。

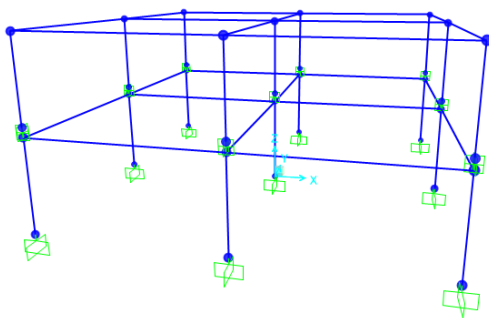


图 1 隔震结构模型



### 问题描述/PROBLEM

查看其中一个隔震支座及其两端节点在时程工况同一时刻的变形值和位移值，并汇总到图 2 所示表格中，同时将两端节点各个位移分量作差，再与对应方向的连接单元变形一一比较（以相同颜色进行标识方便对比）。连接单元及其两端节点的局部轴如图 3 所示。连接单元的 6 组变形分量中，为什么只有 U2 和 U3 与相应的节点位移差有微小误差？

节点位移	U1 (mm)	U2 (mm)	U3 (mm)	R1 (rad)	R2 (rad)	R3 (rad)
j端（上端）	2.394593418	-0.002513091	-0.018040234	-0.000000073	0.000357273	-0.000108143
i端（下端）	0.1479027137	-0.000014	-0.000980876	0.0000000047	0.0000668177	-0.0000011389
位移差	2.246690704	-0.002499091	-0.017059358	-0.0000007347	0.000290455	-0.000107004
连接单元变形	U1 (mm)	U2 (mm)	U3 (mm)	R1 (rad)	R2 (rad)	R3 (rad)
变形值	-0.017059357	2.226645388	-0.002497691	-0.000107004	0.0000007348	0.000290455

图 2 隔震支座及其所属节点的变形和位移

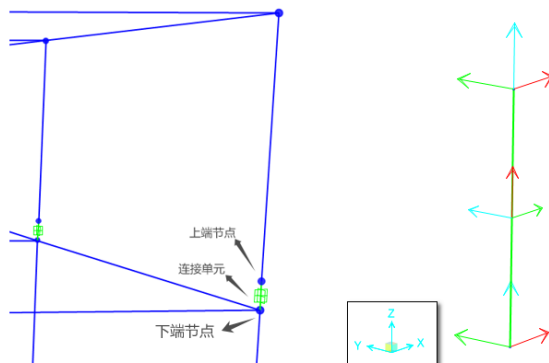


图 3 连接单元及其两端节点局部轴



## 解决办法/SOLUTION

参考《CSI 分析参考手册》(帮助>文档>中文技术文档)第十四章相关内容可知,连接单元的内部变形根据两端节点的转动和平动进行计算,其中对于两节点连接单元,内部变形的定义如图 4 所示。其中轴向、扭转和纯弯变形由节点平动或转动单独引发,而剪切变形由转动和平动共同引发,并且与连接单元长度以及计算剪切变形的位臵有关。因此,问题描述中根据节点位移计算连接单元剪切变形 U2 和 U3 的方法不正确。

对于两节点单元,内部变形如下定义:

- 轴向:  $d_{a1}=u_{1j}-u_{1i}$
- 在 1-2 平面的剪切:  $d_{u2}=u_{2j}-u_{2i}-d_{j2}r_{3j}-(L-d_{j2})r_{3i}$
- 在 1-3 平面的剪切:  $d_{u3}=u_{3j}-u_{3i}+d_{j3}r_{2j}+(L-d_{j3})r_{2i}$
- 扭转:  $d_t=r_{1j}-r_{1i}$
- 在 1-3 平面的纯弯:  $d_{b2}=r_{2i}-r_{2j}$
- 在 1-2 平面的纯弯:  $d_{b3}=r_{3i}-r_{3j}$

其中:

- $u_{1i}, u_{2i}, u_{3i}, r_{1i}, r_{2i},$  和  $r_{3i}$  为在节点  $i$  的平动和转动
- $u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}, r_{1j}, r_{2j},$  和  $r_{3j}$  为在节点  $j$  的平动和转动
- $d_{j2}$  为用户指定的从节点  $j$  至计算剪切变形  $d_{u2}$  位置的距离(默认值为零,意味着在节点  $j$ )
- $d_{j3}$  为用户指定的从节点  $j$  至计算剪切变形  $d_{u3}$  位置的距离(默认值为零,意味着在节点  $j$ )
- $L$  为单元的长度

所有平动、转动和变形用单元局部坐标轴的形式表示。

注意:剪切变形可由转动和平动引发,这些定义确保在单元刚体运动时所有变形为零。

**重要!**注意:  $d_{j2}$  是 1-2 平面内纯弯行为的度量,换句话说,这里由于剪力引起的弯矩为零;同样地,  $d_{j3}$  是 1-3 平面内纯弯行为的度量。

注意:转动  $r_{2i}$  和  $r_{2j}$  的负值用来定义在 1-3 平面的剪切和弯曲变形。这提供对于连接/支座单元和框架单元一致的剪力和弯矩的定义。

图 4 两点连接单元内部变形

对于问题描述中所选连接单元的变形值 U2 和 U3,根据连接单元剪切变形的公式重新进行验算。注意公式中所有平动、转动和变形都以连接单元的局部轴表示,而 SAP2000 输出的节点平动和转动是以节点的局部轴表示。计算过程如下:

$$d_{u2} = u_{2j} - u_{2i} - d_{j2}r_{3j} - (L - d_{j2})r_{3i} = 2.394593418 - 0.1479027137 - (300 - 0) \times 0.0000668177 = 2.226645394$$

$$d_{u3} = u_{3j} - u_{3i} + d_{j3}r_{2j} - (L - d_{j3})r_{2i} = -0.002513091 - (-0.000014) + (300 - 0) \times 0.0000000047 = -0.0024977$$

其中,计算剪切变形的位臵默认在  $j$  端,故  $d_{j2}$  和  $d_{j3}$  均为 0;连接单元长度  $L$  为 300mm。最终按照正确的公式计算得到的连接单元剪切变形与程序输出的数据吻合。

编写:杨硕、王希

## 多边形面对象剖分报错

本案例主要介绍 SAP2000 中多边形面对象剖分时报错并在分析模型中丢失的原因以及处理办法。



### 使用软件/SOFTWARE

SAP2000 V25.0.0



### 模型简介/MODEL

某包含钢楼梯的结构如图 1 所示，所有面对象均采用壳单元模拟，并指定面的自动剖分选项为通用剖分。

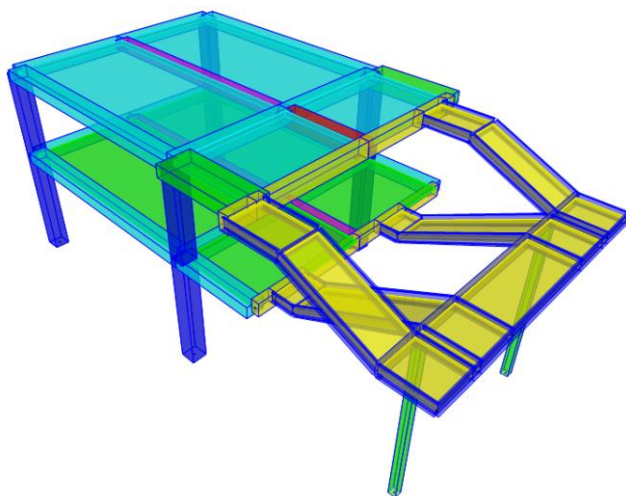


图 1 包含钢楼梯的结构模型



### 问题描述/PROBLEM

建模阶段，对于有梁搭接的楼梯平台板或楼板，均采用绘制多边形的命令生成，如图 2 所示的其中一个面对象，依次点击①~⑤节点绘制；然后为面对象指定自动剖分选项为通用剖分（最大剖分尺寸为 500mm），最后施加均布面荷载。查看分析模型或运行分析的过程中程序弹出报错，并且分析模型中面对象丢失，如图 3 所示。

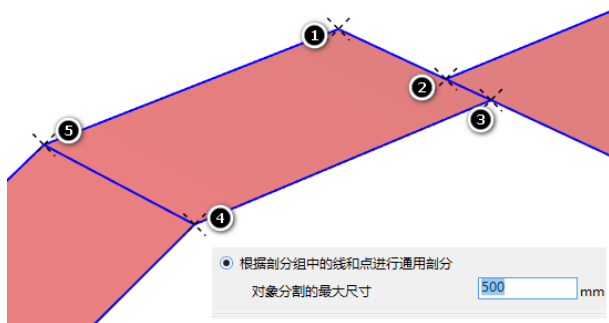


图 2 绘制多边形面对象并指定通用剖分

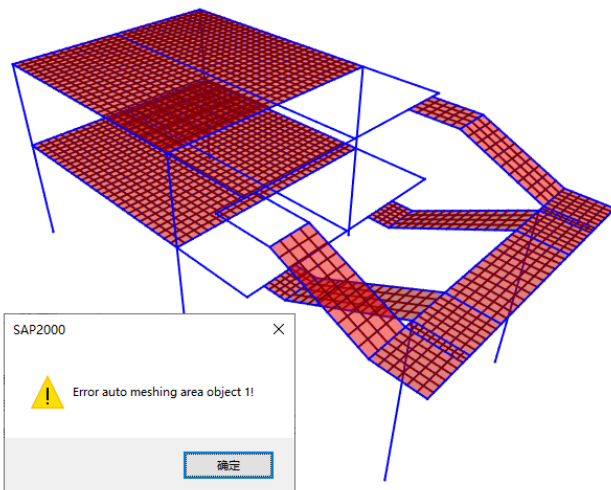


图 3 面对象剖分报错并在分析模型中丢失





## 解决办法/SOLUTION

SAP2000 中面对象的自动剖分方法可以分为三大类，分别是：边分割法、相交线切割法和通用剖分法，如图 4 所示。其中，边分割法仅适用于三角形或四边形面对象，不在本案例解析的讨论范围内；相交线切割法和通用剖分法也适用于多于四条边的多边形面对象。

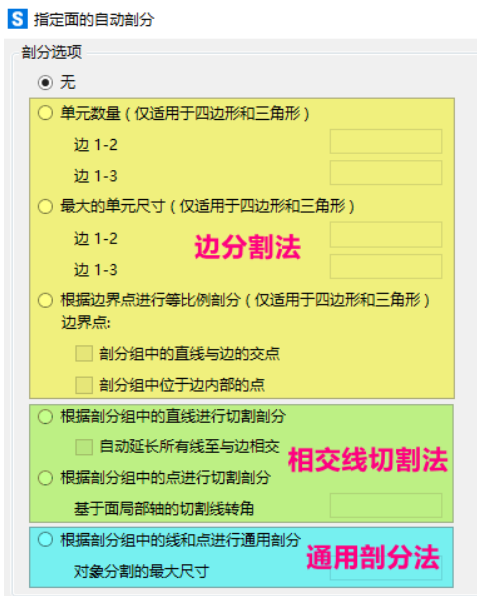


图 4 面的自动剖分选项

当多边形面对象有两个以上节点共线时，在对面对象指定通用剖分后，程序在创建分析模型的过程中就会出现“Error auto meshing area object”的报错，提示面对象无法自动剖分。

然而，对于此类多边形面对象，如果自动剖分选项保持默认的“无”，SAP2000 可以强制对其进行自动剖分，分析模型中面对象不会丢失（参考知识库文档《[多边形的自动剖分](#)》）。选择模型中报错的面对象，重新指定自动剖分选项为“无”，查看分析模型如图 5 所示。或者，如果自动剖分方法为相交线切割法，SAP2000 也可以对其进行自动剖分。选择模型中报错的面对象，重新指定自动剖分选项为“根据剖分组中的点进行切割剖分”，并输入“最大的单元尺寸”为 500mm，查看分析模型如图 6 所示。

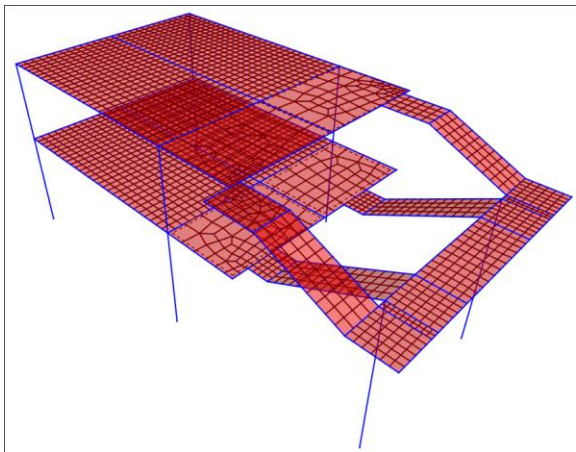


图 5 面自动剖分选项为“无”

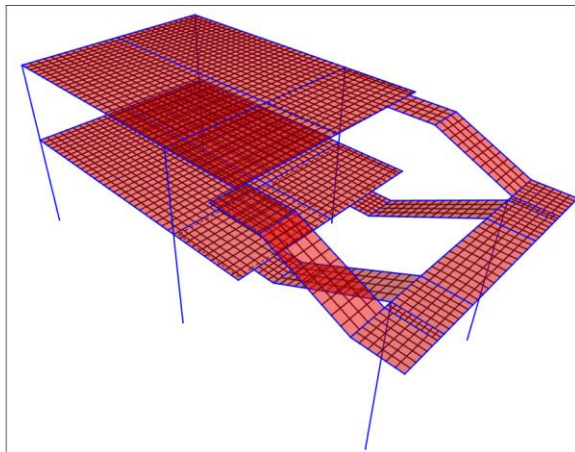


图 6 面自动剖分选项为“相交线切割法”

注意，如果多边形面对象没有多节点共线，那么指定任意方法的自动剖分选项，程序都可以正常自动剖分。

解决此类报错，除以上所述重新指定其他自动剖分选项以外，还有以下两种方法可供选择：

(1) 选择多边形面对象和边上多余节点，点击【编辑>编辑面>移除边上的点】命令。移除多余节点后，面对象变成四边形，程序可以进行自动剖分，并且自动在与梁搭接的位置产生有限元节点，如图 7 所示。注意，如果对四边形面对象直接指定每条边的单元数量或最大单元尺寸，可能会导致面剖分后与框架没有共节点，荷载无法有效传递，应予以避免。

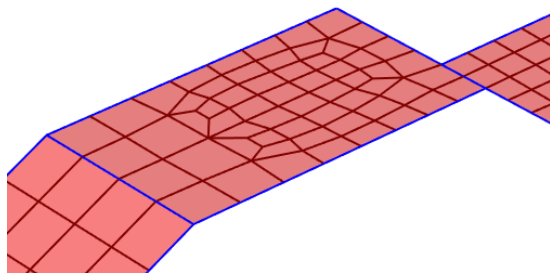


图 7 移除边多余节点后可自动剖分

(2) 选择多边形面对象和边上多余节点，点击【编辑>编辑面>分割面】命令，选择“根据选择的点进行分割”选项，将多边形面分割成四边形面对象。

最后，建议用户在建模时应尽量避免绘制多节点共线的多边形面对象。如果是转换模型产生的此类多边形面对象，在指定自动剖分选项时，应选择“无”或者“相交线切割法”，避免选择“通用剖分法”。

编写：王希

## 桩基承台受冲切计算结果异常

本案例主要介绍 SAFE 中验算桩基承台抗冲切承载力时结果显示 N/C 以及校核不通过的原因，最终给出了 SAFE 中桩基建模和冲切校核的建议。

### 使用软件 / SOFTWARE

SAFE v21.1.0

### 模型简介 / MODEL

如图 1 所示为一个三桩承台桩基模型，包含上柱、承台以及桩。其中桩用“短柱（0.2m 高）结合点弹簧”的方式模拟。

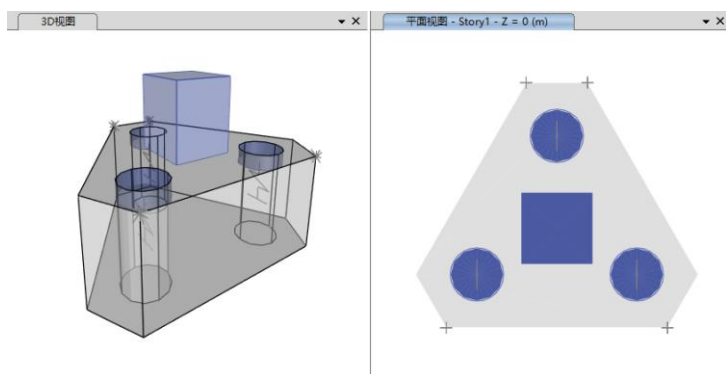


图 1 桩基模型

### 问题描述 / PROBLEM

按照国标对承台进行抗冲切承载力校核，查看抗冲切承载比，如图 2 所示，发现问题：一是柱子和桩的位置都显示一个 N/C；二是校核结果不通过，而同样的模型在国产设计软件中可以校核通过。请问这是什么原因？

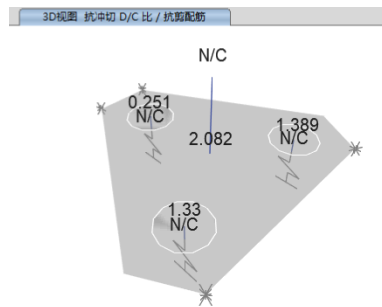


图 2 冲切校核结果

### 解决办法 / SOLUTION

#### 1. 冲切结果显示 N/C

冲切结果显示 N/C 代表程序识别不需要进行冲切验算，对于该模型，建模时承台上绘制了上柱，桩身用短柱模拟，上柱柱顶和短柱柱底的冲切结果会显示 N/C。

这是因为上柱柱顶和短柱柱底没有连接对象，所以程序判断不需要验算冲切，可以忽略。视图中显示冲切结果会重叠，影响图形结果的保存，此时可以将这些节点选中并隐藏。

对于桩基的建模方式，有以下两点建议：

1) 无需额外绘制上柱，但在柱子所在位置，宜通过【绘制>绘制楼板/墙>快速绘制圆形或矩形面】命令绘制刚域考虑承台和桩的连接；刚域的平面尺寸即柱截面尺寸，厚度同承台。上部结构的柱底反力通常由 ETABS 或 SAP2000 导出后再导入 SAFE，如果节点荷载中没有包含尺寸信息，程序将无法计算冲切周长，此时可以通过交互式数据库编辑批量化添加节点荷载的尺寸信息，如图 3 所示。



Interactive Database Editing - Joint Loads Assignments - Force

File Excel Edit View Options

Joint Loads Assignments - Force

	UniqueName	Load Pattern	FX kN	FY kN	FZ kN	MX kN-m	MY kN-m	MZ kN-m	X Dimension mm	Y Dimension mm
1	51	DEAD_ABOVE	85.4587	-14.4095	-4543.028	25.2109	100.4317	-0.2794	800	800
2	51	LIVE_ABOVE	-1.2671	-4.4768	-1543.637	8.6363	-1.5565	-0.1063	800	800
3	51	WIND+X(1/12)_ABOVE	14.7213	0.3911	67.428	-0.9253	60.5705	-0.2811	800	800
4	51	WIND+X(2/12)_ABOVE	-0.2481	8.2869	-122.3316	-36.2788	0.2041	2.6149	800	800
5	51	WIND+X(3/12)_ABOVE	15.2573	0.1086	57.6588	0.4644	60.726	0.168	800	800
6	51	WIND+X(4/12)_ABOVE	6.8246	0.4781	43.4832	-1.8523	30.1297	-0.5896	800	800
7	51	WIND+X(5/12)_ABOVE	0.0287	2.813	-53.5025	-15.4676	2.6768	1.5234	800	800
8	51	WIND+X(6/12)_ABOVE	-0.4008	9.6173	-129.995	-38.9506	-2.3706	2.3989	800	800
9	51	WIND+X(7/12)_ABOVE	3.7916	-3.8405	124.9257	19.23	17.1635	4.4204	800	800
10	51	WIND+X(8/12)_ABOVE	6.3684	6.8572	-23.398	-28.464	30.7395	-9.9425	800	800
11	51	WIND+X(9/12)_ABOVE	4.6407	-4.5462	123.8519	21.3075	20.1528	6.7462	800	800
12	51	WIND+X(10/12)_ABOVE	1.0518	-1.2197	63.7033	7.5632	5.6153	-0.1098	800	800
13	51	WIND+X(11/12)_ABOVE	2.3492	2.3661	19.0649	-11.2088	15.6712	-1.0474	800	800
14	51	WIND+X(12/12)_ABOVE	7.2119	7.9288	-54.1932	-31.5251	30.4791	-13.8796	800	800

Undo Last Apply Apply to Model Done

图 3 交互式数据库编辑批量化添加节点荷载的尺寸信息

2) 桩宜采用“刚域结合点弹簧”的方式模拟。“短柱结合点弹簧”模拟桩相当于短柱和点弹簧串联，会使桩的刚度比实际刚度小，同时短柱的自重会导致计算冲切力时有偏差。建议通过刚域考虑承台与桩的连接，刚域的平面尺寸即换算得到的方桩尺寸（国标设计中圆桩应换算成方桩），厚度同承台。冲切校核中，程序识别点弹簧计算桩的冲切周长，而点弹簧的尺寸为零，所以需要在完成设计后，选择点弹簧节点，点击【设计>混凝土板/梁设计>查看/修改板冲切抗剪校核覆盖项】命令手动设置冲切周长（Specified Perimeter）或支座/荷载尺寸（Specified Support/Load Size），如图 4 所示。

抗冲切校核覆盖项

抗冲切校核 Program Determined

位置类型 Auto

周长 Specified Perimeter

有效高度 Auto

自定义有效高度 Specified Support/Load Size

开洞 Auto

允许配筋 No

配筋样式

钢筋强度 Fy

钢筋直径

钢筋间距

指定

指定

确定 取消

图 4 抗冲切校核覆盖项

## 2. 冲切校核不通过

分别查看承台受柱子和角桩冲切的计算细节，如图 5 所示，可以看到，柱子的位置判断错误，进而冲切周长计算不准确；角桩按圆桩计算得到的冲切周长偏小。导致最终计算得到的柱和角桩的冲切承载力偏小。

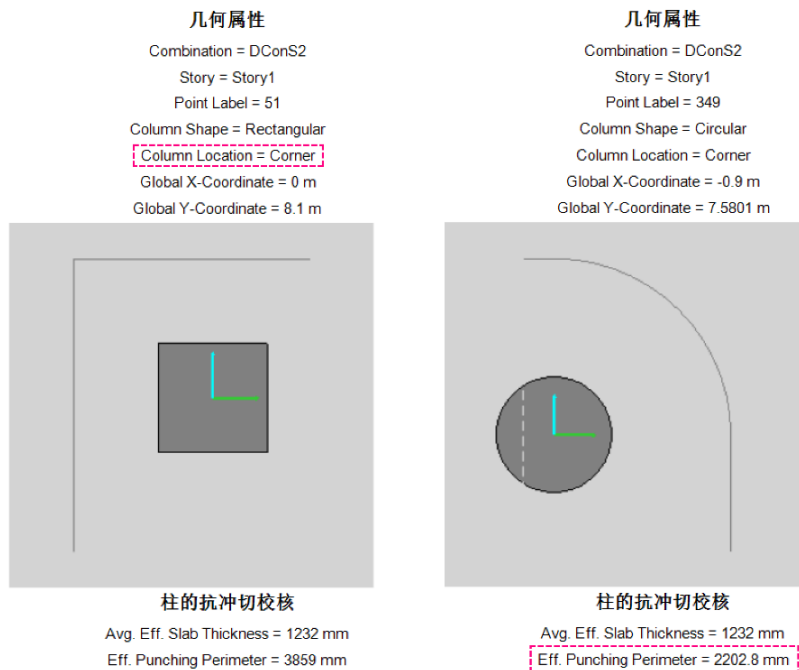


图 5 冲切校核计算细节

程序自动计算冲切周长的方法是按照 45 度对称冲切锥体考虑，这种方法通常用于无梁楼盖体系。当程序识别冲切周长范围相互重叠或超出承台边缘时，判断柱位置、计算冲切周长以及冲切力时都有可能出现问题。桩基承台往往较厚，柱和桩之间的距离相对较近，按照 45 度冲切锥体得到的冲切周长范围很容易相互重叠或超出承台边缘，如图 6 所示（注意按照原模型建模方式圆桩未换算成方桩）。此时需要用户根据规范要求自行考虑各种可能的冲切破坏锥体并通过“抗冲切校核覆盖项”修改位置类型以及冲切周长，最后取最不利结果。

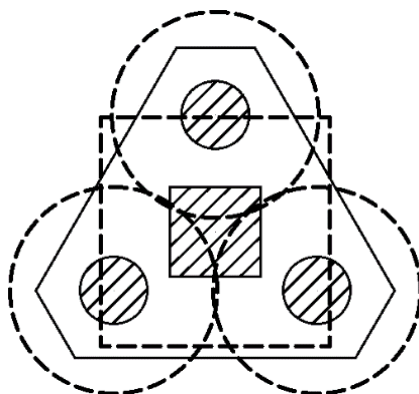


图 6 柱和桩身的冲切周长范围重叠

实际工程中，对于桩基承台的抗冲切计算，无论是柱冲切承台还是桩冲切承台，冲切锥体的锥线与承台之间的夹角不一定是 45 度，冲切周长应取承台冲切破坏锥体一半有效高度处的周长。

- 1) 如果是两个方向对称的 45 度冲切锥体，那么修改冲切周长可以选择“Specified Support/Load Size”直接输入上柱尺寸或换算桩的尺寸，如图 7 所示。



图 7 抗冲切校核覆盖项—指定支座/荷载尺寸

- 2) 如果是不对称的冲切锥体，那么修改冲切周长需要选择“Specified Perimeter”，然后以所选择的节点为原点输入冲切周长控制点的坐标值，如图 8 所示。

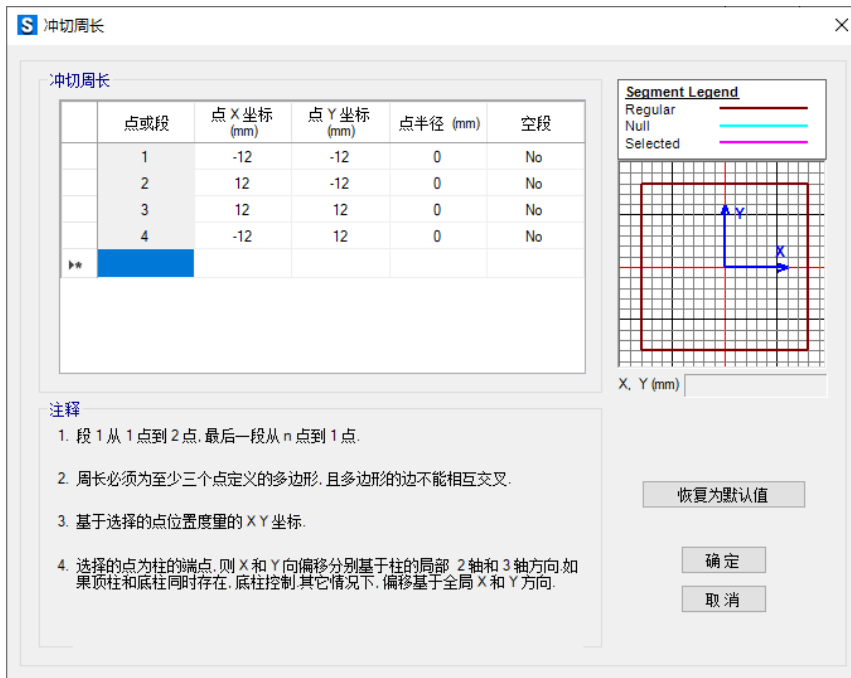


图 8 抗冲切校核覆盖项—指定冲切周长

综上，SAFE 计算冲切周长的方法适合于无梁楼盖体系中冲切周长范围不重叠的情况，而桩基由于承台厚且桩-柱间距小，如果依然按照 45 度冲切锥体考虑很容易发生冲切周长范围重叠的现象，导致程序无法准确计算冲切周长，有时也会导致柱的位置判断错误、桩身反力计算异常等。根据国内的工程习惯，承台冲切锥体的确定需要用户根据规范要求遍历全部或部分桩边到柱边连线，最后取最不利结果输出，程序无法自动修改冲切线，但是用户可以通过抗冲切校核覆盖项人为修改冲切周长。

编写：王希



## 采光顶交汇节点的几何建模

本文以某采光顶交汇节点为例，着重介绍 IDEA 常用的几何建模技巧。

### 使用软件/SOFTWARE

IDEA v23.0.0

### 模型简介/MODEL

如图 1 所示，采光顶 12 个方钢管在交汇处焊接于部分圆钢管，但圆钢管仅为构件之间的连接件，而非结构性构件。

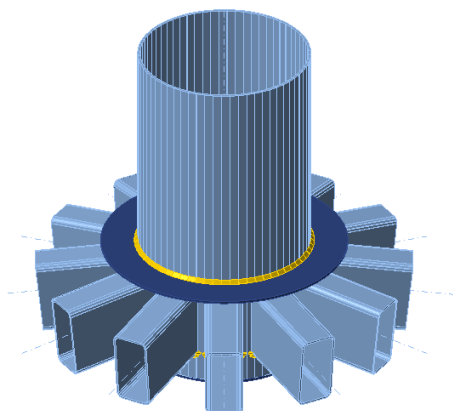


图 1 采光顶交汇节点的错误模型

### 问题描述/PROBLEM

如图 1 所示，中间圆钢管需要“上封顶，下封底”，但目前无法完成上封顶的操作？

### 解决办法/SOLUTION

如图 2 所示，删除当前以结构构件形式添加的中间圆钢管，改用加劲构件（Stiffening Member）。加劲构件可以灵活调整轴向长度和竖向位置，但无法对其施加荷载。考虑到中间圆钢管仅作为连接件而非结构性构件，用户无需对其加载。

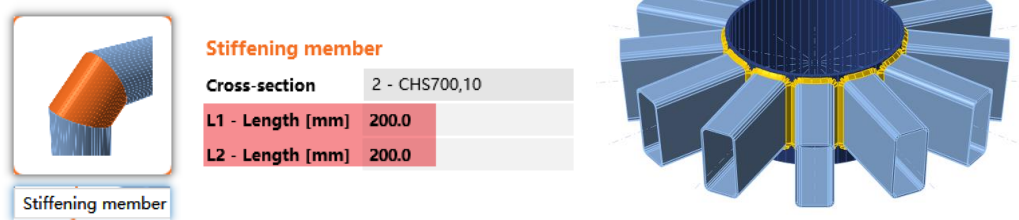


图 2 加劲构件 → 中间圆钢管

如图 3 所示，在方钢管和圆钢管的切割操作中，请将切割方法修改为“Surface（表面）”。如果采用“Bounding box（边界框）”切割方法，计算模型将丢失方钢管的竖向焊缝。

## Cut of member

Member	M2
Cut by	SM1
Cutting method	Surface
Offset [mm]	0.0

图 3 以中间圆钢管逐个切割周围方钢管

## Stiffeners

On member	SM1
Remaining part	+
Material	Q235
Thickness [mm]	12.0
Cap plate	<input checked="" type="checkbox"/>
Cap plate offset [mm]	0.0

图 4 加劲构件的横向加劲板

如图 4 所示，对上述加劲构件添加横向加劲板（Stiffener），选择“盖板”并切换“保留部分”可以分别添加上部和下部的封板。完成上述操作后的采光顶交汇节点如图 5 所示：

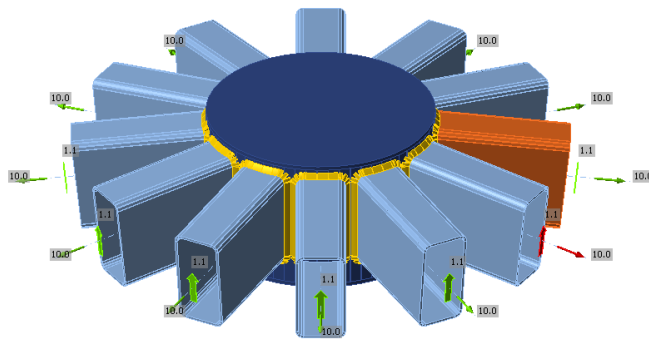


图 5 采光顶交汇节点的正确模型

编写：张志国

## GAP 单元产生的异常“拉力”

本文以某高层建筑结构为例，阐述在部分荷载工况和荷载组合中 GAP 单元产生异常“拉力”的原因。

### 使用软件/SOFTWARE

ETABS v20.3.0

### 模型简介/MODEL

如图 1 所示，某高层建筑结构的底部隔震层采用并联的隔震器和 GAP 单元，GAP 单元用于模拟隔震层的单压属性。

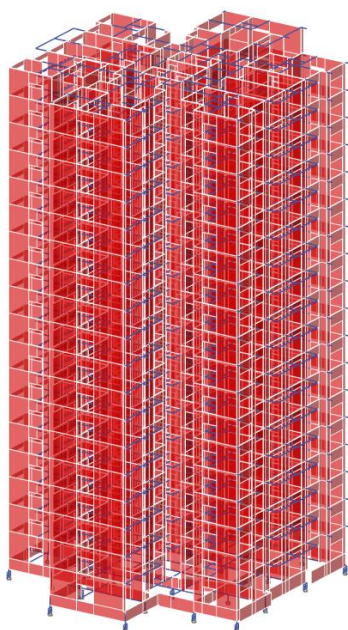


图 1 高层建筑结构的隔震计算模型

### 问题描述/PROBLEM

如图 2 所示，为什么在某些荷载工况和荷载组合中 GAP 单元会出现拉力值呢？

K36	K36	EQX	LinRespSpec	Max	I-End	21364.57498
K36	K36	EQX	LinRespSpec	Max	J-End	21364.57498
K36	K36	EQY	LinRespSpec	Max	I-End	16746.56993
K36	K36	EQY	LinRespSpec	Max	J-End	16746.56993
K36	K36	拉应力-x	Combination	Max	I-End	8622.207827
K36	K36	拉应力-x	Combination	Max	J-End	8622.207827
K36	K36	拉应力-y	Combination	Max	I-End	1089.085162
K36	K36	拉应力-y	Combination	Max	J-End	1089.085162
K37	K37	EQX	LinRespSpec	Max	I-End	18492.2443
K37	K37	EQX	LinRespSpec	Max	J-End	18492.2443
K37	K37	EQY	LinRespSpec	Max	I-End	35943.33073
K37	K37	EQY	LinRespSpec	Max	J-End	35943.33073
K37	K37	~StaticEQY	LinStatic		I-End	31449.82315
K37	K37	~StaticEQY	LinStatic		J-End	31449.82315
K37	K37	~Static+EccEQY	LinStatic		I-End	35432.65591
K37	K37	~Static+EccEQY	LinStatic		J-End	35432.65591
K37	K37	~Static-EccEQY	LinStatic		I-End	27466.99039
K37	K37	~Static-EccEQY	LinStatic		J-End	27466.99039
K37	K37	拉应力-x	Combination	Max	I-End	5455.971497
K37	K37	拉应力-x	Combination	Max	J-End	5455.971497
K37	K37	拉应力-y	Combination	Max	I-End	14242.09217
K37	K37	拉应力-y	Combination	Max	J-End	14242.09217
K38	K38	EQX	LinRespSpec	Max	I-End	11410.80821
K38	K38	EQX	LinRespSpec	Max	J-End	11410.80821

图 2 GAP 单元的拉力值





## 解决办法/SOLUTION

上述“拉力”对应的荷载工况包括反应谱工况、线性静力工况和荷载组合。GAP 单元的单压属性为非线性属性，只有在非线性分析中才能被激活。在线性分析中，GAP 单元会转换为既受拉也受压的线性弹簧，此处的“线性分析”也包括模态分析和反应谱分析。因此，反应谱分析和线性静力分析都无法考虑 GAP 单元的单压属性，出现拉力值属于正常情况。但是，在 FNA 法的非线性时程分析中，GAP 单元不会出现轴向拉力，只有负值（压力）和零，如图 3 所示。

FNA 法的时程分析属于多值工况，即：各个时间点都存在结构的动力响应值。ETABS 在处理多值工况参与的荷载组合时，仅取用该工况的最大值和最小值。对于 GAP 单元的轴力值，在 FNA 法的时程分析中均为零或负值（压力），例如：最大值为 0，最小值为-1000。如图 4 所示，如果 FNA 法的时程工况在荷载组合中的比例系数为负值，代表该工况参与荷载组合的最大值为 1000，最小值为 0，GAP 单元必然出现拉力值。

Unique Name	Output Case	Case Type	Step Number	P kN
K38	RH3TG055_x	NonModHist	4.72	-306.3632
K38	RH3TG055_x	NonModHist	4.72	-306.3632
K38	RH3TG055_x	NonModHist	4.68	-302.534
K38	RH3TG055_x	NonModHist	4.68	-302.534
K38	RH3TG055_x	NonModHist	4.7	-302.2808
K38	RH3TG055_x	NonModHist	4.7	-302.2808
K38	RH3TG055_x	NonModHist	4.88	-297.2462
K38	RH3TG055_x	NonModHist	4.88	-297.2462
K38	RH3TG055_x	NonModHist	4.64	-294.824
K38	RH3TG055_x	NonModHist	4.64	-294.824
K38	RH3TG055_x	NonModHist	4.74	-294.7335

图 3 FNA 法计算的 GAP 单元的压力值

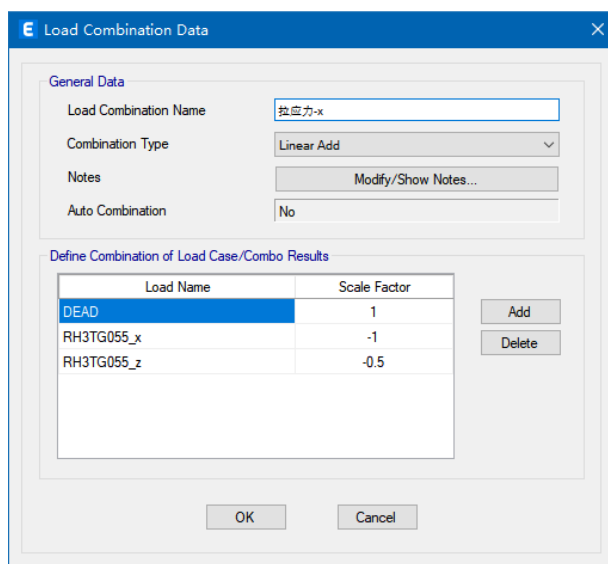


图 4 包含 FNA 法时程工况的荷载组合

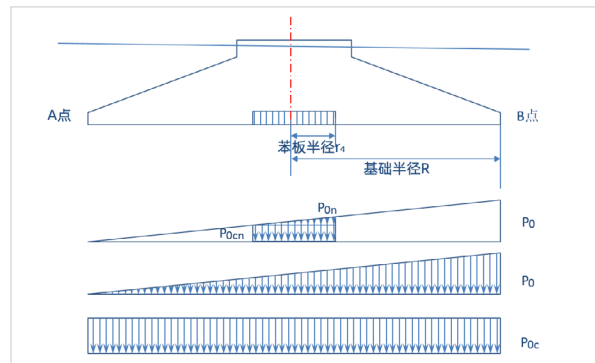
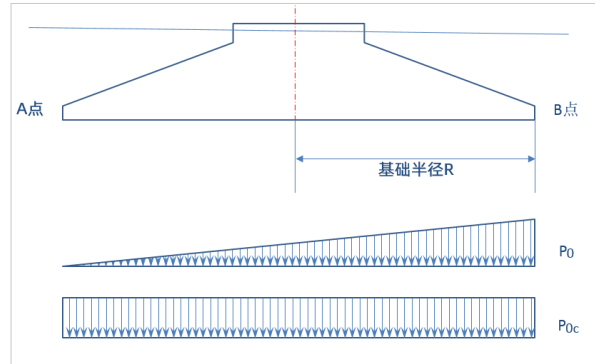
请注意，荷载组合中的比例系数为负值，代表最大值和最小值变号，而不是类似于“荷载工况中的比例系数为负值代表荷载反向施加”。因此，如果不是在荷载组合中输入负的比例系数，而是单独定义两个 FNA 法时程工况并采用负的比例系数，荷载组合中仍保持正值的比例系数，荷载组合中的 GAP 单元也不会出现拉力值。高层建筑结构的隔震分析应采用“非线性静力分析接力 FNA 法时程分析”的方式，而非图 4 所示的线性叠加的荷载组合。

编写：张志国



## WindPower v2.1.3 新增及改进功能

- 增加环形基础设计功能，通过苯板设置功能，实现圆形基础和环形基础的定义；
- 增加了环形基础底部压力计算，基础底部的压力按照《高耸结构设计标准》（GB50135-2019）进行计算取值；
- 增加了环形基础底部沉降计算，基础沉降和倾斜计算按照《烟囱设计规范》（GB 50051-2013）附录 C 进行计算；
- 增加了环形基础内力计算方法；
- 计算书中增加圆形基础和环形基础倾斜计算受力示意图显示；
- 塔筒的地震力计算增加了 SAP2000 有限元复核计算功能；
- 增加了混塔基础预应力锚索排布功能；
- 更新规范版本为《水工混凝土结构设计规范》NB / T 11011-2022；
- 修正了肋梁基础底板配筋率要求的判断标准；
- 修复前期版本出现的 bug。



## CiSGTCAD V2.1.3

# 新增及改进功能

## CiSGTCAD v2.1.3 新增及改进功能

- 计算书中增加杆件长细比超限等信息提示
- 调整施工图优先使用本软件安装目录下的字体文件
- 基础施工图增加地脚螺栓的联合基础形式
- 施工图增加对不等边角钢的尺寸判断
- 调整独立避雷针烈度低于 9 度不考虑抗震等级
- 增加避雷针最后一段是否为针尖选项
- 修复独立基础沉降计算错误
- 修复独立避雷针法兰计算内力取值错误
- 修复避雷针杆件为变截面时不生成计算书的问题
- 修改基础承载力最不利组合筛选错误问题
- 修复避雷针变形验算高度取值错误问题
- 修复 Win10/Win11 下出现杆件截面在 SAP2000 中错误问题



## CiSDesignCenter v2.1.5 新增及改进功能

### 隔震模块

- 新增摩擦摆和滑板支座，新版可自动完成该类支座的定义、布置、等效线性化等内容
- 读取模型时自动完成墙梁标签的标记，完善构件设计流程
- 优化支座显示，以颜色区分支座类型
- 支座面压超限时将高亮显示
- 根据《通规》，风荷载验算时分项系数调整为 1.5
- 转大震弹性模型时补充定义前置重力工况

### 选波功能

- 新增平均谱的显示，同窗口输出平均谱与规范谱的谱值对比
- 导出地震波谱数据时将同步导出规范谱数据
- 支持导出多个阻尼比下的地震波谱和规范谱
- 人工选波时，可自定义周期点，然后对比指定周期点的谱值
- 优化自动选波算法，可考虑各个模态下的不同阻尼比

### 国标模块

- 优化 det 文件与 ETABS 模型的管理。det 文件中之前保存的是 ETABS 模型的绝对路径，新版调整为相对路径，将 det 文件与 ETABS 模型保存在一个文件夹中，整个文件夹可以调整至任意位置，不影响模型读取
- 更新特殊构件地震内力调整系数
- 优化 DC 基于 ETABS 自定义组合设计构件的功能。之前程序只支持对 DC 默认组合考虑地震内力调整，新版支持读取 ETABS 自定义荷载组合后，对其考虑 0.2V0、剪重比、强柱弱梁、强剪弱弯等内力调整
- 报告书中新增钢材构件的统计

### Bug 修复

- 修复读取 YJK 模型后无法正确显示“读入配筋”的问题，该问题不影响施工图绘制和弹塑性模型转换
- 修复美标设计配筋结果读取有误的问题
- 修复用户导入地震波无法显示的问题
- 修复构件设计时，特殊构件地震内力调整系数有误的问题
- .....



## SAFE v21.2.0 新增及改进功能

### 用户界面

- 绘制钢束功能新增允许两点间绘制线性钢束。在绘制钢束时，对象属性对话框中新增“钢束纵剖面（Tendon Vertical Profile）”选项，包含两个选项：全长线性 and 程序确定（默认）。

对象属性	
对象类型	钢束
属性	Tendon1
Tendon Layer	A
偏移 X, mm	0
偏移 Y, mm	0
绘图类型	直线
Tendon Vertical Profile	Linear Throughout

### 云登录许可

- 软件授权许可模式新增云登录许可（Cloud Sign-in licensing）：
  - 1、使用安全的用户凭证访问 CSI 软件——不再需要激活密钥
  - 2、连接互联网即可访问许可
  - 3、可以创建“许可组（License Groups）”以管理访问许可的用户
  - 4、可以远程终止运行中的许可
  - 5、可以与身份提供者（IdP）联合，允许用户使用他们熟悉的公司凭证



## ETABS v21.2.0 新增及改进功能

### 设计功能

- 新增基于美国规范 AISC 360-16 和 AISC 360-10 的钢节点设计模块。设计对象包括梁 - 梁节点、梁 - 柱节点、柱脚节点以及焊接和螺栓连接。
- 进一步完善基于欧洲规范 Eurocode 3-2005 的钢框架设计模块，新增基于 2009 年发布的 Corrigendum 2（针对 Eurocode 3-2005 的修订）进行设计。

### 加载功能

- 定义反应谱函数 TSC-2018 新增参数项，允许输入 R、D 和 I 参数。
- 基于欧洲规范 Eurocode 8-2004 的自动地震荷载和反应谱函数的国家附录新增马来西亚。

### 结构模型

- 指定框架铰的功能进一步增强，新增选择铰布置的类型，有以下选项：
  1. 梁 / 柱铰：在框架对象的端部添加一个弯矩铰或 PMM 铰。
  2. 分布式塑性铰：基于选择的积分类型沿框架对象的长度添加若干塑性铰。
  3. 等间距铰：沿框架对象的长度以固定间距添加塑性铰。
  4. 连续支承铰：在所选框架对象的每个框架单元中点添加一个塑性铰，适用于有连续弹簧支承的构件，如桩、基础梁。

### 分析功能

- SAPFire 高级选项进一步增强，允许用户人为指定“用于分析的（内部）线程数”，用于控制多线程求解器可以使用的线程数量。这样可以减少资源竞争，加快分析速度。
- 对于采用附加模态阻尼考虑了较大模态数量的直接积分时程分析工况，计算速度得到进一步加强。对于建筑结构而言，高频模态通常对地震和风荷载作出静态响应，而刚度比例阻尼对高频段的阻尼更有效。

### 输出与显示

- 增加取消保存 P-M2-M3 框架铰中单根纤维结果的选项。当不需要单根纤维的应力应变结果时，这可以显著减少磁盘存储空间。详细的铰结果仍然可以显示，包括从纤维结果获得的铰塑性发展状态和铰结果。

### 数据库表格

- 对部分“分析结果”的数据库表格进行了并行化，以提高在显示或导出过程中的速度。这些数据库表格包括：Joint Displacements（节点位移）、Joint Displacements – Absolute（节点位移 - 绝对值）、Joint Drifts（节点位移角）、Pier Forces（墙肢内力）、Pier Force Status（墙肢内力状态）、Spandrel Forces（连梁内力）以及 Spandrel Force Status（连梁内力状态）。此外，在显示或导出任何“分析结果”表格时，状态栏都将显示各个表的进度。进度条对于需要较长时间显示或导出的表格非常有效。

### 导入 / 导出

- 新增将 ETABS 中的非线性连接单元导入 Perform3D 的功能。这些连接单元包括：
  1. ETABS 指数型阻尼器 > Perform3D 粘滞阻尼器
  2. ETABS 缝单元 > Perform3D 缝单元
  3. ETABS 钩单元 > Perform3D 钩单元
  4. ETABS 橡胶隔震器 > Perform3D 橡胶隔震器
  5. ETABS 摩擦摆隔震器 > Perform3D 摩擦摆隔震器
- ……

### 云登录许可

- 软件授权许可模式新增云登录许可（Cloud Sign-in licensing）：
  1. 使用安全的用户凭证访问 CSI 软件——不再需要激活密钥
  2. 连接互联网即可访问许可
  3. 可以创建“许可组（License Groups）”以管理访问许可的用户
  4. 可以远程终止运行中的许可
  5. 可以与身份提供者（IdP）联合，允许用户使用他们熟悉的  
的公司凭证



## 美标钢结构混凝土结构精讲 线下实操培训班（上海站）圆满落幕

2024年1月18日~20日由北京筑信达工程咨询有限公司和上海江图信息科技有限公司共同举办的“美标钢结构混凝土结构精讲线下实操培训班”在上海市徐汇区建国西路285号科技大厦13楼悦来集会议中心成功举办。

本次培训共有21家单位37人参加，本次课程结合美标规范，针对混凝土框架设计、钢框架设计、钢框架节点以及基础设计等进行深入的剖析和全面的解读。课程由筑信达技术部技术总监吴文博与技术部技术支持工程师刘慧璇共同讲解。报名单位涵盖了民用、电力、光伏、石油石化、冶金、钢构等行业，来自不同行业的工程师参与其中。

培训现场大家都积极的参与到学习和讨论中来，各工程师纷纷提出自己的疑问，老师耐心一一解答，活跃了课堂气氛，同时也帮助大家更好地掌握知识。



通过三天的学习，工程师们普遍表示培训内容丰富，信息量大，在理论与操作两方面都有较大的收获，认为这次培训能对今后的工作带来积极帮助。会后收到很多工程师的积极反馈，对内容设置和培训老师的精彩讲解都一致的给予好评。



知识点全面，案例可操作性强，培训老师专业，收货满满。

——杭萧钢构股份有限公司 方工

本次的课件内容与实际联系很紧密，很不错，老师讲解得也很透彻，内容丰富，希望后期多举办这样的活动。

——惠生工程(中国)有限公司 杨工

理论与实操安排合理，老师的思路十分清晰，既有理论知识又有软件的实际操作，对我做海外项目的工作有着很大的帮助。

——宝钢工程技术集团有限公司 汪工

在此也感谢参与的各位工程师，你们的认可是对我们努力最大的肯定，也欢迎更多的工程师关注和参与筑信达其他的线上和线下培训课程。

供稿：刘坤杰



# Leapfrog Works与Geostudio的完美结合 引领岩土工程数字化新潮流

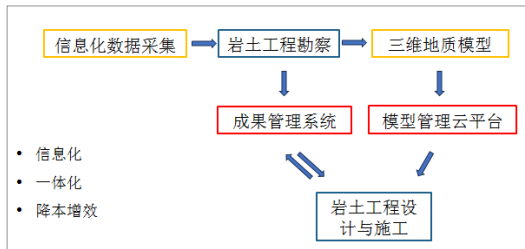
## 探索岩土工程数字化新境界 —— 岩土工程数字化解决方案线上展示会及 Geostudio 2D 培训

### 一、岩土工程数字化的挑战与机遇

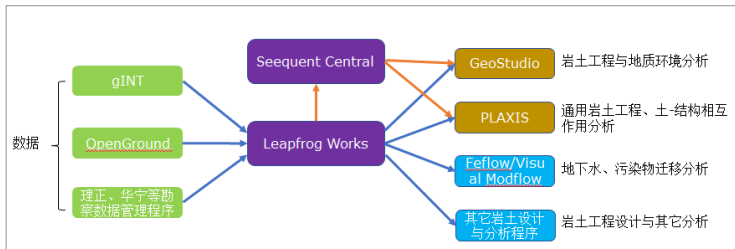
现今，各大勘察设计单位都在探索岩土工程数字化工作流程。经过与各行业龙头单位的沟通，我们发现如何快速的建立复杂地质模型、是否能实时更新模型、如何能为其他专业提供数据支持等成为困扰岩土工程数字化的主要问题。

有鉴于此，我们组织了这次的岩土工程数字化解决方案线上展示会。旨在向土木行业推广基于基于 leapfrog works 动态三维地质建模岩土工程数字化解决方案。

本次培训解决方案实现了动态建模，数字化集成、与分析软件的模型转换，为土木工程的勘察、分析、设计、建造、运维提供了可靠的数据支撑。



岩土工程数字化方案整体设想



Leapfrog 为核心的岩土工程数字化、一体化方案

### 二、实战分享：Leapfrog Works 在水电工程中的应用

中国电建集团北京勘测设计院的地质工程师任君在会上分享了 Leapfrog Works 在水电工程中的应用经验。任总对 Leapfrog Works 在动态建模、多源数据支持和模型导出等方面的技术优势给予了高度评价，并期待我们能尽快支持国内行业规范及中文版。

### 三、Geostudio 2D 培训班：边坡工程的数字化启蒙

筑信达技术部的郭晓通投入大量精力学习和积累 Geostudio 的技术经验。为边坡工程的同行们全面介绍了 slope/w、seep/w、sigma/w 的应用，帮助客户对新版架构有了整体了解。

### 四、结语

此次市场活动受到了海油、中交、核电、矿山、高校等单位的广泛关注。

相信通过不断了解客户需求和市场动态，岩土工程数字化解决方案将取得显著成就。期待更多客户关注并加入我们的数字化探索之旅。

岩土工程数字化不仅是技术的进步，更是行业未来的发展方向。我们期待与您携手，共同推动岩土工程数字化的进程。



# 征稿启事



如果你使用过我们的产品  
如果你喜爱工程分析

或许你正困惑其中  
或许你已成果丰硕

欢迎来这里发声!

这里  
可以提问  
也可以“炫技”

可以严肃  
也可以顽皮

题材不限  
风格不拘

只要与它们相关  
SAP2000、ETABS、SAFE、  
Perform3D、CSiBridge、PLAXIS  
……

请速速

筑信达《技术通讯》是面向广大土木工程  
师的技术刊物，内容覆盖筑信达全线产  
品（CSI结构/桥梁产品、PLAXIS岩土产品  
、筑信达自主开发产品）的最新动态、技  
术知识。旨在帮助工程师们更好地将软件  
产品应用于工程实践，同时也为工程师们  
切磋数值分析技术、分享工程应用经验提供  
平台!

欢迎广大工程师踊跃投稿!

稿件一经采纳，作者将有机会获赠：

- 技术专著
- 产品单机版免费限时使用权
- 高级培训免费名额

## 投稿请寄

[support@cisec.cn](mailto:support@cisec.cn)

(请注明“技术通讯”投稿)

## 期待与你的相识!

你是我的菜



**CiBRIDGE**

**SAP2000**

**ETABS**

**SAFE**

**PERFORM3D**

**CiSDesigner**

**CiSGTCAD**

**CiSModelCenter**

**CiSOpenSteel**

**CiSDesignCenter**

**PLAXIS**



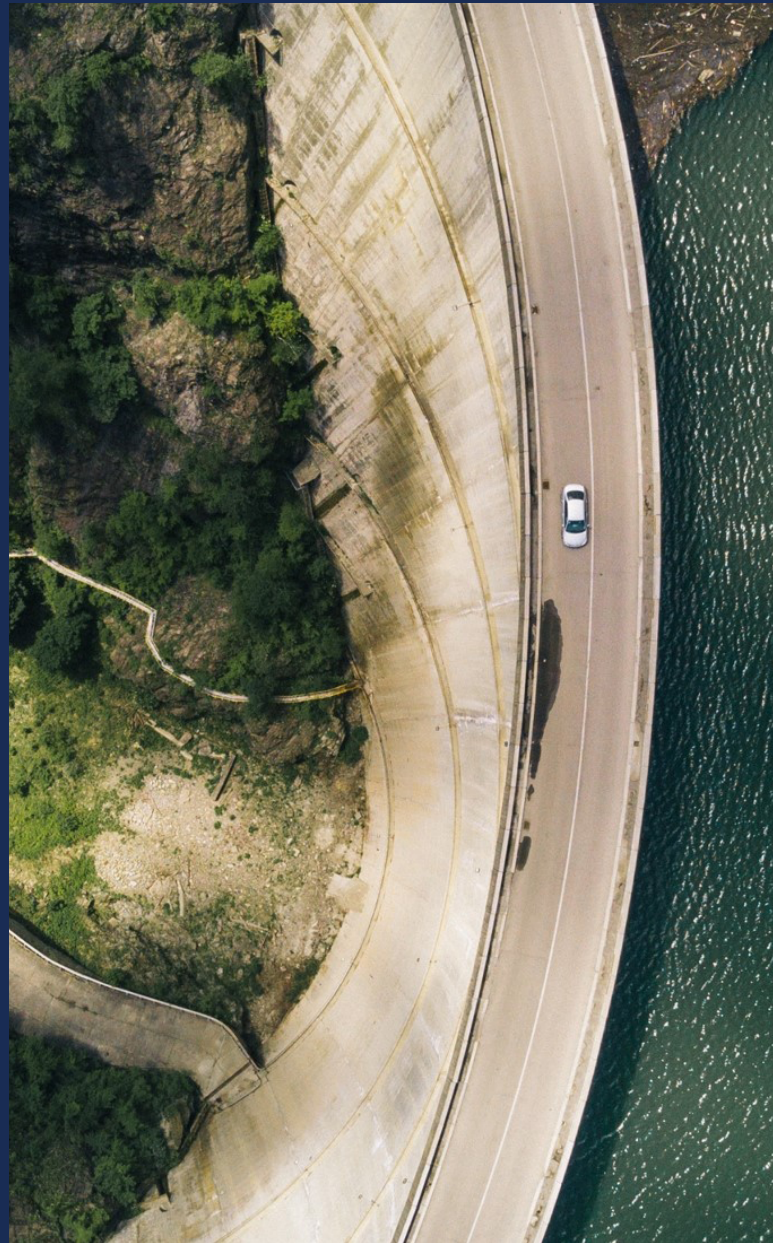
**SPIDER**  
Detailer of Structures

**IDEA**



**WindPower**  
智慧风基

**DEEP  
EX**



在线支持  
[support.cisec.cn](http://support.cisec.cn)



网络课堂  
[www.cisec.cn](http://www.cisec.cn)



知识库  
[wiki.cisec.cn](http://wiki.cisec.cn)



视频教程  
[i.youku.com/bjcisec](http://i.youku.com/bjcisec)