

筑信达 技术通讯

第 1 期

2017年3月

VOL.1 NO.1

www.cisec.cn



- 抗震性能化设计在 ETABS 中的实现
- 提高弹塑性时程分析效率的几点建议
- 由 PKPM 弹性设计模型创建 ETABS 弹塑性模型
- PLAXIS 基坑开挖支护模拟要点解析

筑信达

创刊语

筑信达自 2012 年成立以来，继续与美国 CSI 公司和荷兰 PLAXIS 公司合作，深入打造结构和岩土软件产品的本地化，更加努力地进行相关软件的技术推广工作，与广大工程师一起，为构建宏伟的“中国梦”贡献筑信达人的力量。

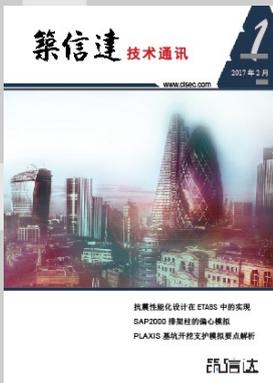
这些年来，在用户的不断鼓励下，软件产品成熟度得到了大幅提升。ETABS 已经从弹性分析设计跨越到了性能设计的水平，最新的 ETABS 2016 整合了 PERFORM-3D 的主要功能，实现了最新的美国性能设计规范 ASCE41-13，同时还集成了 SAFE 中的楼板设计；SAP2000 在分析技术、设计类型、国际规范支持一直引领行业；PERFORM-3D 已得到越来越多的设计院和科研院所的接受与肯定；CSiBridge 正大踏步进入我国的桥梁设计市场；PLAXIS 也被越来越多地应用于我国工程项目的岩土分析。

同时，筑信达积极投身到自主研发中，以弥补国际领先软件在我国落地和深入应用的不足。我们开发了 CiModelCenter，以解决不同软件之间的模型信息转换问题，目前支持与 PKPM、Midas 模型的信息转换；我们开发了变电构架设计软件 CiSGTCAD，实现了从参数化快速建模、计算分析、设计校核、施工图自动生成的完整设计系统；我们开发了钢筋混凝土构件极限承载力设计软件 CiSDesigner，采用通用的 PMM 空间快速算法，目前支持柱、墙、梁正截面的自动配筋优选；我们也一直在 SAP2000 API 平台上为工程师提供了工具集 CiSApps，包括 DXF 导入、格构构件建模、贮料荷载、楼层位移结果、生成计算书、钢管节点验算等实用工具。

随着工程实践的日新月异，软件技术也在不断发展，如何应用好软件，提升设计质量与效率，达到事半功倍的效果，需要我们和广大工程师共同努力。为此，我们打造实时在线的技术支持系统，帮助用户在项目进展中及时解决软件应用存在的问题，并进行个性化的知识管理；我们开通每周一次的网络课堂，就工程师们关心的问题讲解与讨论；我们录制在线教学视频，帮助工程师了解软件的最新功能和应用；我们编写筑信达知识库，帮助工程师了解软件内部实现机制和应用诀窍；我们整理一系列的工程应用教案，帮助工程师在解决某一类特定问题提供完整的技术路线与方案……，尽管做出以上种种努力，我们还在不断思考如何做得更好。

经过数月的策划，这本《技术通讯》应运而生了。我们希望能将工程软件技术与工程实际应用相结合，在我们的用户群以及更广大的工程师朋友圈中进行双向交流。这里面的每一篇短文，凝结了作者的研究认识和使用经验，也许并非都能达到入选专业期刊的水准，但都是针对具体工程应用的“解决之道”，希望能够给工程师们带来启发和收获，当然更希望广大工程师能够贡献和分享自己的应用体会和工程经验，大家携起手来，为中国的工程软件应用做出一份贡献。

李楚舒



主 办：筑信达技术咨询部
主 编：李 立
美 编：张翠莲

北京筑信达工程咨询有限公司

地址：北京市石景山区古城西街19号研发主楼4层西侧
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)

区域代理

北方区

(北京、天津、河北、山东、山西、内蒙、辽宁、黑龙江、吉林)

北京华思维泰克科技有限公司

联系人：王博

手 机：159 1060 8694

华东区

(上海、江苏、浙江、安徽、江西)

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

(广东、广西、福建、海南)

广州信益软件技术有限公司

联系人：田茂金

手 机：137 6071 9009

华中区

(湖北、湖南、河南、陕西)

武汉百思通科技有限公司

联系人：叶亮

手 机：139 9561 6575

西南区

(四川、重庆、云南、新疆、贵州、甘肃、宁夏)

成都西柯建科技有限公司

联系人：周洪烈

手 机：138 0808 3187

目 录

Content

ETABS

抗震性能化设计在 ETABS 中的实现 1

提高弹塑性时程分析效率的几点建议 5

由 PKPM 弹性设计模型创建 ETABS 弹塑性模型 7

SAP2000

SAP2000 排架柱的偏心模拟 11

PLAXIS

PLAXIS 基坑开挖支护模拟要点解析 (一) 14

PLAXIS 建模方法汇总 18

PLAXIS 网格优化方法介绍 21

公司动态

新版发布 23

特别报道 24

活动预告 25

征稿启事 26



weibo.com/cisec



cisec68924600

抗震性能化设计在 ETABS 中的实现

筑信达 李立

性能化设计 (Performance Based Design) 是对传统结构设计概念的一次重大转变, 代表着地震工程学的未来。新的设计方法将帮助工程师确定, 在给定的地震作用下, 设计方案能可靠地满足所需的性能水平。PBD 的基本内容是要明确地模拟构件的屈服后行为, 通过非线性动力分析来捕捉结构在地震作用下的弹塑性行为, 进而解读结构的塑形发展状态和能量耗散来判断结构是否达到预期的性能目标。可以看出, 要完成性能化设计, 必须先了解: 如何模拟构件的屈服后行为? 如何进行非线性动力分析? 抗震性能化设计与常规弹性设计的不同? 下文将结合 ETABS2016 的相关功能来阐释这些问题。

1 构件非线性行为的模拟

常见的结构构件有梁、柱、支撑、剪力墙、楼板等等, 在 ETABS 中对应为框架对象与壳面对象。对于框架对象, ETABS 用塑性铰或纤维铰来模拟其非线性行为。对于壳面对象, ETABS 用墙铰或分层壳来模拟其非线性行为。对于消能减震和隔震结构, 其减隔震装置也是十分重要的非线性构件, ETABS 用相应的连接单元来模拟其非线性行为。

1.1 塑性铰

塑性铰实质是一种力-变形行为的约定, 体现了构件截面的力学属性。根据受力方式, 塑性铰可分为弯矩铰 (M 铰)、剪力铰 (V 铰)、轴力铰 (P 铰) 和轴力-弯矩 (P-M 或 P-M-M) 铰。所以, 构件上布置的铰类型要与该构件的主要受力状态相符。此外, 塑性铰也区分延性铰和脆性铰, 前者监控变形指标 (例如转角), 后者监控力指标 (例如剪切强度)。定义塑性铰的基本内容包括: 屈服后的力-变形行为 (屈服前的行为由截面的弹性属性确定)、性能水准 (也称为可接受准则)、滞回模型等。这些内容可以根据程序内置的规则自动生成, 即自动铰; 也可以逐项人工定义, 即自定义铰。当给框架对象指定自动铰 (Auto) 时, ETABS 会提示用户选择相应铰类型, 然后基于 ASCE41-13 的规定自动生成相应的塑性铰信息。对于非常规截面, 例如组合截面、异性截面等, 则需要用户通过数值模拟或实验来获取构件截面特

性, 从而自定义铰属性信息。

1.2 纤维铰、墙铰

纤维铰是基于材料的非线性本构关系和截面纤维划分来确定构件的非线性行为。对于指定了纤维铰的构件, 程序根据截面特性自动划分纤维、并赋予相应的材料。ETABS 内置了常用材料的非线性本构曲线, 当然本构模型也可以自定义。对于混凝土材料, 如果使用程序内置的 Mander 模型, ETABS 可根据截面箍筋的位置, 自动区分约束区和非约束区, 并分别赋予不同的混凝土模型, 这是非常便利的功能。

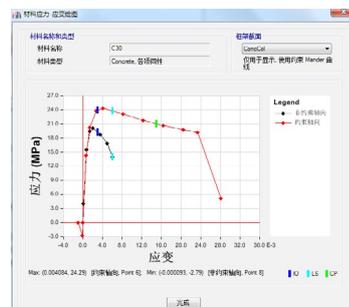


图 1 内置的约束、非约束混凝土本构曲线

ETABS 的墙铰本质也是纤维铰。墙体的配筋可来自设计结果、指定配筋率或指定钢筋布置。图 2 即指定墙体钢筋布置的对话框。通过该对话框能很方便

便的设置边缘构件区域，各区域竖向钢筋、水平钢筋的直径、间距等。基于这些信息程序自动生成墙铰，如图 3 所示。



图 2 自定义墙铰配筋

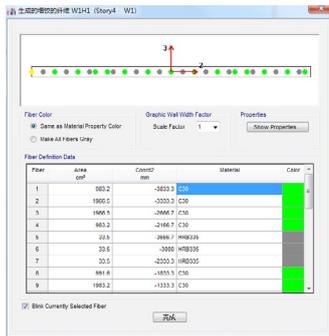


图 3 墙铰纤维

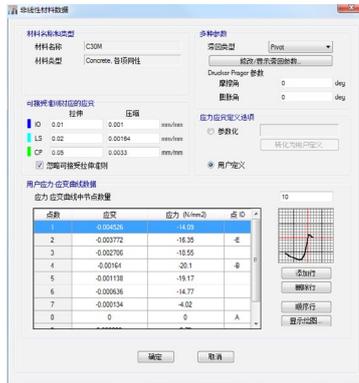


图 4 材料本构定义（含可接受准则）

注意，纤维铰、墙铰的性能水准均来自于材料应变，即使用纤维应变来表征构件的性能状态。如图 4，在材料定义时，需定义材料应变的可接受准则。

1.3 分层壳

分层壳也是广泛用于模拟壳对象弹塑性行为的一种模型，很多年前就已经嵌入 SAP2000，也已嵌入 ETABS 2013 及以上版本。分层壳是基于材料的本构关系和复合层模型的平截面假定来确定构件的非线性行为。使用分层壳最重要的，是注意控制非线性自由度的数量，尽可能减少层数，以及每层激活非线性自由度的数量。这样不仅计算效率更高，也便于解读结果。更多内容请阅读 ETABS 随机技术文档《CSI 分析参考手册》第十章，本文不再赘述。

1.4 连接单元

ETABS 的连接单元是一系列力-变形行为的约定，用来模拟节点间复杂的连接关系。表 1 给出了用于模拟减隔震装置的常见连接单元类型，每种类型的具体属性请查阅 ETABS 随机技术文档《CSI 分析参考手册》第十五章。

此外，ETABS 在框架截面定义中新增了 BRB 类型，能够快速定义 BRB 重量、截面尺寸、弹性段刚度、屈服段长度等信息，并基于截面数据自动计算其非线性属性（也支持用户自定义）从而生成铰属性，大大方便了含 BRB 结构的建模及非线性分析。注意这里 BRB 并没使用连接单元来模拟。

表 1 减隔震装置与连接单元

减隔震产品类型	ETABS 对应连接单元类型
橡胶隔震器	Rubber Isolator
摩擦摆隔震器	Friction Isolator 或 T/C Friction Isolator
三摆隔震器	Triple Pendulum Isolator
指数型粘滞阻尼器	Damper-Exponential
双线性力-速率关系的粘滞阻尼器	Damper-Bilinear
摩擦弹簧阻尼器	Damper-Friction Spring
软钢阻尼器、BRB 等位移型阻尼器	Plastic (Wen)或 Multilinear Plastic

2 非线性分析

抗震性能化设计相关的非线性分析主要指静力推覆分析和动力弹塑性时程分析，限于篇幅这里重点介绍动力弹塑性时程分析相关的功能增强。

2.1 FNA 法拓展应用

对于动力弹塑性时程分析，ETABS 提供两种求解方法：FNA 法和直接积分法。ETABS 的老用户对 FNA 法一定不陌生，这是一种基于模态叠加来求解动力问题的方法，以计算效率高著称，最早由 Wilson 教授提出，并一直应用于 CSI 系列软件中。在早期的 ETABS 中，FNA 法仅用于考虑连接单元的非线性行为；如今，FNA 法被推广应用于考虑塑性铰、纤维铰、墙铰等材料非线性问题，具体通过设置“以连接单元模拟铰”来实现用 FNA 法求解非线性铰的问题（如图 5 所示）。但前提是，有足够的模态数量来确保 FNA 法计算结果的准确性。所以，对于较小规模的弹塑性模型，FNA 法不失为一种快捷高效的计算方法。但如果存在大量的非线性单元，所需计算的模态数量倍增（增加一个非线性自由度，相应增加一个模态数），分析效率的优势不再突出，此时使用通用的直接积分法更加合适。





图5 设置非线性较的分析模型对话框

2.2 生成人工波

ETABS 自带了丰富的地震波文件，可随时调用；也可以导入地震波数据，生成用于时程分析的时程函数。除此以外，ETABS 增加了自动生成人工波的功能。该功能可基于一条参考时程函数和目标反应谱，生成一条新的时程函数（人工波），该时程函数的反应谱将与目标反应谱拟合。图6中，右侧是参考时程函数（蓝色）与新生成的匹配时程函数（红色）的叠合图；左侧是参考时程反应谱（蓝色）、匹配时程反应谱（红色）与目标反应谱（灰色）的叠合图。

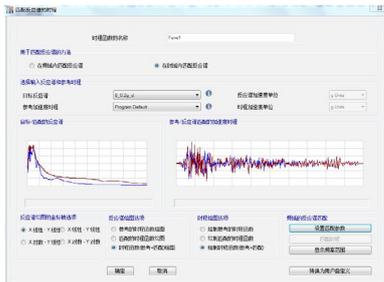


图6 生成人工波对话框

2.3 滞回模型

滞回是通过变形进行能量耗散的过程，当荷载反向或循环加载时，滞回行为将显著影响非线性分析的结果。所以，设置合理的滞回行为是进行动力弹塑性分析重要内容。通过 ETABS 定义材料非线性本构、塑性铰、连接单元时，都需要设置滞回类型。

ETABS 内置了丰富的滞回模型，用以体现不同材料或构件的行为特征。这些滞回模型包括：弹性滞回模型、随动滞回模型、退化滞回模型、Takeda 滞回模型、Povit 滞回模型、素混凝土滞回模型、BRB 强化滞回模型、各向同性滞回模型等。ETABS 的联机帮助可查看各个模型的详细介绍。

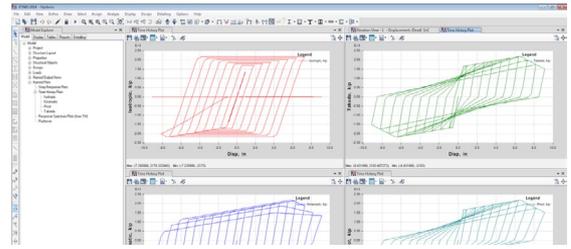


图7 滞回模型

2.4 结果表达

动力弹塑性分析完成后，除了通过视窗显示结构变形及塑形发展状况，还可通过显示菜单下的各项命令便捷查看具体的分析结果，常用显示命令及说明见表2。所有数据也可通过表格便利地查询、筛分、提取。

表2 常用于显示动力弹塑性分析结果的命令

命令	说明
显示-绘图函数	查看各种响应的时程曲线、非线性行为的滞回曲线、能量曲线等，已能满足大多数需要
显示-较结果	查看每个较的滞回曲线、较状态、纤维较每根纤维的应变等
显示-累积能量分量	查看能量耗散图，FNA 法和直接积分法均适用
显示-快速滞回	快速显示连接单元的滞回曲线
显示-楼层响应图	查看楼层响应图，包括楼层力、位移角、倾覆力矩等
显示-楼层响应联动图	动态显示楼层响应（位移/加速度、位移角、楼层剪力、倾覆力矩）随时间的变化。目前对于大模型，图像刷新较慢，正在进一步优化。
显示-性能校核	查看给定性能水准下构件的需求能力比率

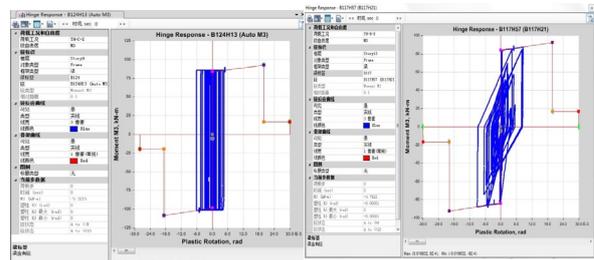


图8 塑性铰滞回结果

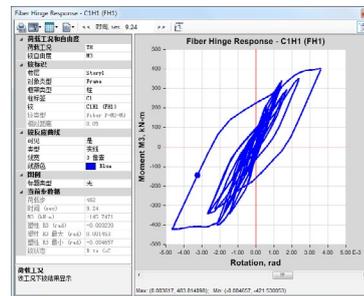


图9 纤维铰滞回结果

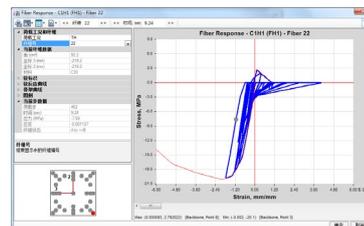


图10 单根纤维结果



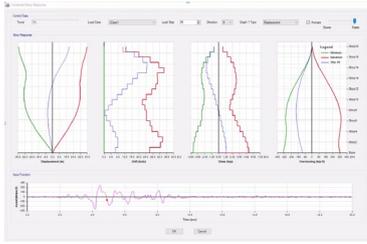


图 11 层位移角最大值

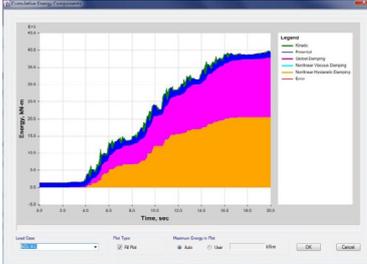


图 12 能量耗散图

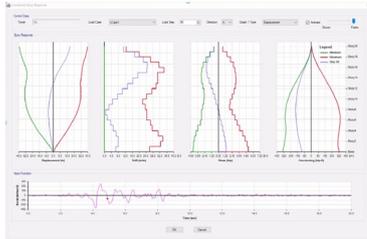


图 13 楼层响应联动图

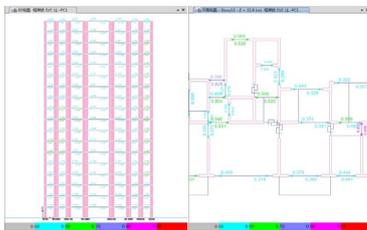


图 14 显示需求 / 能力比率

值得一提的是，“显示性能校核”能够显示给定性能水准下各构件的需求 / 能力比率 (D/C)，这些结果可以是多条地震波的包络值或平均值。如图 14 所示，D/C 越接近 1，代表其性能状态接近给定性能水准的临界值。这是判断构件性能状态最直观的结果表达。

3 求解效率

在分析效率方面，ETABS 近几年的每个新版本都将计算效率带到一个新高度。我们在一些实际工程案例中对比了不同版本的计算效率，下列案例供读者参考。

某消能减震框架结构。抗震设防烈度 8 度 (0.30g)，乙类建筑。结构东西向约 95m，南北向 71m，嵌固面以上结构高度超过 24m。框架塑性铰 4419 个；软钢消能器 212 个，计算耗时对比如下：

地震时程分析单工况计算时间 (直接积分法，地震波时长 20s)		机器配置
ETABS 2013	5.5 小时	Windows 7 64 位；内存 8GB；Intel(R) Core(TM) i5-4570 CPU @3.20GHz
ETABS 2015	2.5 小时	
ETABS 2016	1.0 小时	

4 认识误区

误区一，弹塑性模型等同于弹性模型。

为了快速完成分析，工程师们常常希望将已有的用于弹性设计的模型直接用于弹塑性分析，这其实很难两全。弹性模型是用于截面设计，模型应建得比较具体，反映出每个结构构件的实际受力状况，才能得到完整的设计结果。弹塑性模型是用于分析结构的抗震性能，更关注抗侧力体系、关键构件的行为发展，加之弹塑性分析的复杂性，往往要求合理等效地简化模型，能反映结构的主要传力路径，这不仅提高分析效率，也便于解释结果。所以，直接将用于弹性设计的模型用于弹塑性分析，常常是不合适的。另一方面，不能完全依靠软件来将弹性模型转化为用于性能分析的弹塑性模型。结构构件弹塑性行为的发展，很大程度依赖于模型中的人为设定。例如什么地方布置铰？布置什么样的铰？这类问题需要工程师结合结构方案来把握和判断，而不是全部交给软件去处理。

误区二，设计初期就进行性能化分析。

性能化分析是一种验证而非设计，是在构件截面、配筋、连接关系等确定之后，对结构抗震行为（特别是屈服后行为）发展的模拟，判断其是否符合预期。有时为了赶进度，在还未完成结构设计时，就盲目建立弹塑性模型进行性能化分析，最终往往因为结构方案本身不合理导致结果异常，这时又不得不改方案从头再来。前期的概念设计、弹性分析很重要，前面的工作做扎实了，不仅结构方案合理性有保障，工程师对结构的理解也更到位，这时再进行性能化分析，往往能起到事半功倍的效果。

5 小结

以上从不同方面介绍了 ETABS 2016 实现抗震性能化设计的功能特性，有些内容限于篇幅不能详细展开。希望广大用户在使用过程中，积极与筑信达技术工程师联系，共同用好 ETABS 为工程服务。

更多关于 ETABS 2016 的介绍，请访问筑信达主页 www.cisec.cn。

提高弹塑性时程分析效率的几点建议

筑信达 吴文博

随着人们对弹塑性分析的认识逐渐深入，弹塑性时程分析也越来越多的应用于工程当中。同时设计软件也不断的升级换代，使弹塑性时程分析变得越来越方便。ETABS 2016 具有强大的分析功能，高效的求解速度，同时又提供了方便的前后处理功能，可以满足人们对弹塑性时程分析的各类要求。即便 ETABS 2016 具备诸多好处，弹塑性时程分析仍然十分耗时，因此如何提高弹塑性时程分析的效率仍是用户关注的热点，在此提出几点建议与大家共享。

1 适当的简化模型

当模型的规模很大，节点的数量很多时，适当的简化模型是非常有必要的。简化模型首先应从非抗侧力构件入手，例如：悬挑梁、悬挑板、次梁、不参与抗侧的楼梯以及其他的次要构件。应当注意的是简化掉构件后，应将荷载传递到相邻构件上。

其次，具有可靠嵌固作用的地下室、地下车库以及刚性地坪以下的基础短柱和基础拉梁也可以进行简化。通常结构地下部分受到土体的约束作用具有很大的刚度，并且上部结构的能量可以通过地下结构传递到土体当中，因此简化掉地下部分是偏于保守的。

最后，减少一些不必要的分割与剖分。例如，当次梁被简化之后，被分割开的框架梁可以进行合并。当对面对像（单元）使用了自动边约束功能后，连梁与墙肢交界处可以不必分割等等。而对于剖分，通常来讲框架单元按照默认的剖分即可，设有墙铰的面单元可不必剖分，而设有分层壳的面单元不应进行过细的剖分，过细的剖分可能导致应力与塑性变形过于集中，反而与实际情况不符。

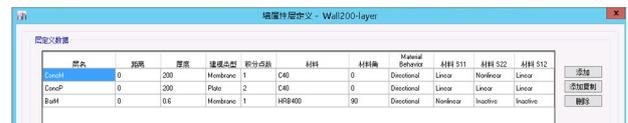
在进行模型简化之后，用户应仔细核对结构的质量、荷载、周期以及其他弹性分析参数，保证弹塑性模型与弹性模型的分析结果基本一致。

2 合理的使用和布置非线性属性

合理的选用非线性属性会大大减少弹塑性分析时间。一般来讲，纤维铰比塑性铰更加耗时，分层壳比墙铰更加耗时。对于框架梁，推荐使用塑性铰；框架柱推荐使用纤维铰，因为纤维铰能够更好的模拟柱轴力与弯矩耦合作用；对于长连梁，推荐使用框架单元进行模拟并在梁两端布置塑性铰，而对于可能发生剪切破坏的短连梁可以采用分层壳单元进行模拟；对于高宽比较大的墙肢推荐采用墙铰，否则应采用分层壳。

特别需要注意的是分层壳单元的使用，分层壳的层数以及非线性行为的数量都会对分析时间产生极大的影响。因此用户需要十分清楚需要用分层壳模拟

构件的那些非线性行为，例如，对于剪力墙我们通常关心其平面内的非线性行为，这样平面外的行为可以设置为弹性，并且可以将多排的竖向钢筋合并为一个钢筋层。而对于高宽比较大的剪力墙我们通常关心其压弯的非线性行为，这时候水平钢筋可以忽略，并且将混凝土剪切方向的材料行为设置为弹性。如下图所示。因此合理的定义分层壳需要抓住构件的主要特征，这样既加快了分析速度，也便于对分析结果进行解读。



另外，非线性属性的数量也会大大影响到弹塑性分析的时间。即便很多构件并未出现塑性变形，仍然会因为铰状态判定与铰状态上传而浪费大量计算时间，如下图所示。用户需要对可能产生塑性变形的部位进行预估的判断，然后再通过短时的试算进行验证。以框筒结构为例，通常底部若干层的墙肢以及大部分的连梁和框架梁可能会屈服，因此可以对底部若干层的墙肢和所有的连梁和框架梁布置非线性属性。而框架柱则需要通过试算确定是否布置纤维铰，例如先在首层与变截面各层布置纤维铰，然后对柱发生明显屈服的位置处向上延伸布置纤维铰，如此反复几次。

TIME FOR INITIALIZING ANALYSIS	=	12.91
TIME FOR CONTROLLING ANALYSIS	=	895.74
TIME FOR FORMING STIFFNESS MATRIX	=	922.40
TIME FOR SOLVING STIFFNESS MATRIX	=	431.23
TIME FOR CALCULATING DISPLACEMENTS	=	642.98
TIME FOR DETERMINING EVENTS	=	395.76
TIME FOR UPDATING STATE	=	17134.01

TOTAL TIME FOR THIS ANALYSIS	=	20495.03

3 检查模型的稳定性

一个不稳定的或数值敏感模型通常会花费更多的时间进行求解，甚至可能因收敛性问题导致分析无法完成，因此建议大家首先检查一下模型是否是稳定的或者是是否是病态的。用户可以使用标准求解器运行模态工况（最好使用特征值向量法），标准求解器可

以给出最为详细的警告信息，如下图所示，这些警告信息可能对线性分析影响不大，但是对弹塑性时程分析可能会有显著影响。



4 非线性时程分析方法的选择

在 ETABS 2016 中有两种非线性时程分析方法，一种为 FNA 法，另一种为非线性直接积分法。由于 ETABS 2016 中增加将较模拟为连接单元的功能，因此 FNA 法的应用范围得到了极大的扩展。一般来讲，FNA 法是一种更为高效的方法，特别是处理减、隔震结构具有十分巨大的优势，因为通常来讲这类结构的非线性构件的数量比较少。当非线性自由度数量超过节点自由度数量的 20%~25% 时，FNA 法在计算效率上的优势将会消失，此时应当转而采用非线性直接积分法。另外 FNA 法在阻尼的处理上更加灵活，可以采用模态阻尼、材料阻尼以及瑞利阻尼，而非线性直接积分法只能采用瑞利阻尼。非线性直接积分法是一种更加普适的方法，可以处理所有类型的材料非线性以及几何非线性，因此在大震弹塑性分析当中有更多的应用。

5 几何非线性的选择

ETABS 2016 提供了两种几何非线性，一种为 P-Δ 效应，一种为大位移效应。对于大多数结构，P-Δ 选项是足够的，特别是当材料非线性控制时。但是对于经历显著变形的索结构应使用大位移选项。P-Δ 效应对结构的影响通常比较显著，特别是对于高层结构。由于考虑了 P-Δ 效应之后会增加计算量，并且可能因部分构件发生屈曲而导致分析不收敛，因此建议用户在试算阶段先进行没有几何非线性的分析，待模型调试基本完成后，再添加 P-Δ 效应进行最后的计算，这样既方便确认问题的根源，也可以节省大量的试算时间。

6 时间积分方法的选择

在 ETABS 2016 中，内置了多种时间积分方法，这里主要介绍两种方法，即 Newmark 法和 Hiber-Hughes-Taylor 法（简称 HHT 法）。

由于 ETABS 2016 中只有隐式积分法，所以推荐大家使用无条件稳定的时间积分方法。对于 Newmark 法，当 $2\beta \leq \gamma \leq 0.5$ 时，此方法是无条件稳定的，因此我们推荐取 $\beta=0.25$ ， $\gamma=0.5$ ，即为大家所熟知的平均加速度法。

HHT 法是无条件稳定的，其中 $-1/3 \leq \alpha \leq 0$ ，带有一定 α 值的 HHT 法对处理收敛性较差的结构是很有效的，并且会提高计算效率。 α 值相当于算法阻尼，与物理阻尼不同，其耗能作用会随着分析步长 Δt 的减小而减小。当 α 取为 $-1/3$ 时，此方法会很大程度上过滤掉周期小于 $10\Delta t$ 的成分；当 α 取为 0 时，此方法退化为平均加速度法，并且不会耗散任何能量，但是可能会高估了高频的响应。通常推荐大家根据分析步长取 α 值为 $-1/24$ 或 $-1/48$ 。若用户的非线性分析收敛有困难，可以使用 $\alpha=-1/3$ 得到一个初始解，然后使用减小的步长和 α 值重新运行分析，来得到更准确的结果。

7 非线性参数

对于大部分非线性参数建议用户使用默认值，唯一需要注意的是事件到事件方法（Event to Event）。程序允许设置一个事件凝聚容差，即当某个塑性铰进入事件时，程序认为状态跟其很接近（小于设置的事件凝聚容差）的其它铰也一同进入这一事件。这样可以减少出现的事件数，从而减少刚度更新的次数，减少求解时间。事件到事件方法在 ETABS 2016 版本中适用于塑性铰、纤维铰、墙铰、分层壳以及部分连接单元等非线性单元。相比于程序默认的迭代方法，此方法在非线性价件数量较少时会提高计算效率，但是对于非线性构件数量非常巨大的结构，可能会增加分析时间。但是对于迭代方法收敛困难的结构，建议使用事件到事件步方法，此方法会显著提高分析的收敛性。

8 求解器选择

ETABS2016 中提供了三种求解器，分别为标准求解器、高级求解器和多线程求解器。其中标准求解器可以提供最为详细的警告信息，但是只能进行处理器单核运算，运行速度最慢；高级求解器可以给出部分警告信息，可以调用处理器所有核心，是程序默认的求解器；多线程求解器不提供任何警告信息，可以最大化利用处理器所有核心以及内存，运行速度最快。因此推荐大家使用标准求解器检查模型的稳定性后，再使用多线程求解器求解以得到最佳的分析效果。

上述建议对于大多数结构是适用的，但是结构模型千变万化，需要具体问题具体分析。希望以上内容能帮助用户理解程序的功能，合理恰当地使用程序完成分析。

更多精彩内容请访问筑信达知识库，如下：

- 1、非线性分析的分析时间报告
- 2、求解器解析
- 3、如何在 FNA 法中合理考虑 P-Delta 效应
- 4、并行计算的应用范围
- 5、不同分析工况对硬件的需求



由 PKPM 弹性设计模型创建 ETABS 弹塑性模型

筑信达 魏旭豪

ETABS 2015 版和 2016 版在性能化设计方面进行了持续更新，从反映构件弹塑性行为的非线性材料属性、剪力墙铰、纤维铰定义到非线性求解规模及效率都得到了极大的增强和提高。ETABS 程序功能的改进和增强为用户提供了更为便利和高效的弹塑性分析工具。

目前，多数工程项目会使用 PKPM 等软件完成详细设计，工程师们希望能使用已有模型和设计结果来进行后续的弹塑性分析。本文以一实际项目的局部楼层为例，展示了从 PKPM 弹性设计模型转换为 ETABS 弹塑性模型的过程，为用户建立 ETABS 弹塑性提供一种便捷方式。

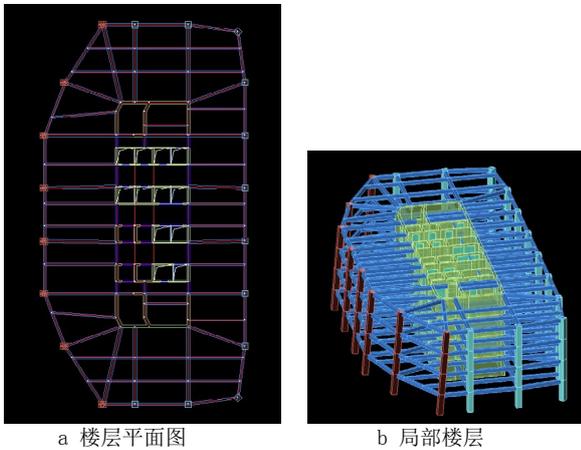


图 1 PKPM 弹性设计模型

由 PKPM 弹性设计模型创建 ETABS 弹塑性模型包含如下主要步骤：1) 弹性模型简化；2) 创建 ETABS 弹性模型；3) 弹性模型预处理；4) 配筋结果导入 ETABS 模型；5) 定义 / 指定材料及构件非线性属性。分别对以上步骤进行描述。

1 弹性模型简化处理

弹塑性分析更关注通过分析确定结构的薄弱部位，验证结构的抗震性能，为弹性设计提供指导性建议，而非进行弹性配筋的计算，故一般情况下，需要在弹性设计模型的基础上进行一定的简化，建立恰当的模型进行弹塑性分析。《高规》(JGJ 3-2010) 5.5.1 中第 2 条规定：梁、柱、斜撑、剪力墙、楼板等结构构件，应根据实际情况和分析精度要求采用合适的简化模型。

合理的简化模型能够用更小的规模清晰的描述结构的受力特性，便于快速计算掌握结构性能。弹性模型简化并无完全统一的规定，通常情况下认为仅需保留对结构性能判断有直接影响的构件。本模型在建立时，分别对悬挑板、弧形梁和剪力墙进行了简化。

1.1 悬挑板

在模型建立时考虑删除外圈的悬挑板，并将其等效为荷载施加在周边的梁上。

1.2 弧形梁

将楼层平面左侧最外圈的弧形梁简化为直线梁建模，简化后的效果如图 2 所示。多段线拟合的弧形梁用直线梁替换后，方便建立弹塑性模型时对梁指定配筋和梁两端的塑性铰，可节省大量的时间和精力。

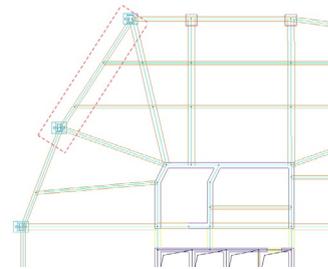


图 2 弧形梁简化后效果

1.3 剪力墙

调整洞口尺寸，消除长度小于墙厚的小墙肢。

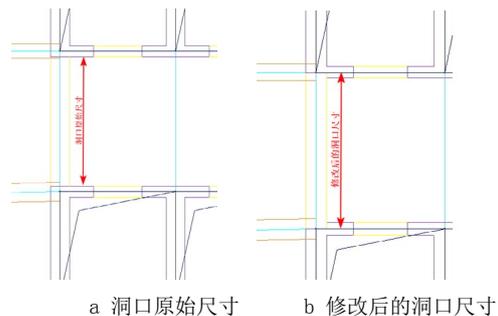


图 3 洞口尺寸调整

注：PKPM 模型中常存在长度小于厚度的小墙肢，对于



此类构件，如果用壳单元来模拟，从有限元层面上来讲不符合面对象的受力特性；消除此类小墙肢，对计算结果的影响不明显，但可显著减小非线性分析的求解规模、提高求解效率。

对于不同的模型，可根据结构的性能水准及不同的分析目的进行合理简化，方便弹塑性模型的建立及求解。

2 创建 ETABS 弹性模型

弹性模型可通过多种途径来创建，常用的包含在 ETABS 中直接建模和通过数据接口转换生成对应的模型。

本模型通过筑信达公司的模型转换器 CiSModelcenter 直接将 PKPM 模型转换生成 ETABS 弹性模型。

2.1 由 PKPM 模型生成“TB”文件

在 PKPM 模型中运行“PMSAP 生成数据”命令，在 PKPM 模型文件夹中生成 PMSAP 模型文件如图 4 所示，该文件以字符“TB”结尾。

名称	修改日期	类型	大小
01_verTB	2017/2/15 20:45	文件	880 KB
01_verTB件关系对应.txt	2017/2/15 20:45	Text Document	43 KB
PDBID.OUT	2017/2/15 20:45	OUT 文件	32 KB
01_VER2-2_PRE.SPS	2017/2/15 20:45	SPS 文件	696 KB
01_ver2-2_Pre.sps.bak6	2017/2/15 20:45	BAK6 文件	696 KB
COM_SECT.SAP	2017/2/15 20:45	SAP 文件	1 KB
ENG_NAME.85	2017/2/15 20:45	85 文件	1 KB
01_ver2-2_Pre.sps.bak5	2017/2/15 20:43	BAK5 文件	696 KB
WORKSPS.FNM	2017/2/15 20:43	FNM 文件	1 KB

图 4 PMSAP 生成的 TB 文件

2.2 运行 CiSModelcenter，读取“TB”文件

运行 CiSModelcenter，通过点击主界面上的图标来设置需转换的“TB”文件及设置目标文件的存储位置。



图 5 CiSModelcenter 界面

2.3 模型转换参数设置

点击 CiSModelcenter 界面上的“转换参数”按钮调出“参数设置”界面，本模型的参数设置如图 6 所示。

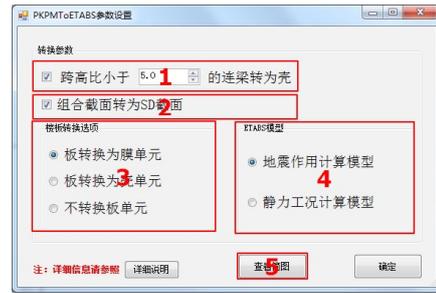


图 6 模型转换参数设置界面

点击“查看简图”按钮，通过可视化的方式显示程序读取到的模型简图，如图 7 所示。

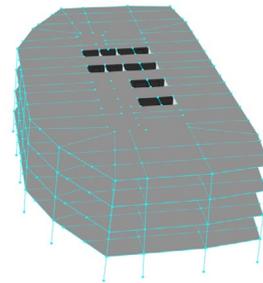


图 7 模型简图

点击主界面（图 5）上的“开始转换”按钮，程序开始执行转换，在转换过程中，可在主界面上查看转换信息，程序会报告异常信息，可根据此类信息进行转换后的模型检查。

PKPMTtoETABS 参数说明：

1. “跨高比小于_的梁转换为壳”选项，勾选此选项后程序会将 PKPM 中跨高比小于设定值的框架梁转换为 ETABS 中的壳对象；

2. “组合截面转换为 SD 截面”选项，勾选此选项后，程序可将 PKPM 模型中的组合截面转换为 ETABS 中的 SD 截面，便于后续塑性铰及纤维铰的指定；若不勾选此选项，则 PKPM 中的组合截面直接转换为 ETABS 中的参数化组合截面，可用于 ETABS 中的组合柱设计；

3. 楼板转换选项，当楼板转换为膜或壳时，程序将分别使用“膜”属性和“壳”属性来进行楼板模拟，并对楼板指定默认网格剖分选项；当选择“不转换板单元”选项时，转换后 ETABS 模型中无楼板，程序将楼板自重及楼板上的荷载传递到周边的梁和墙上，同时在楼板位置自动指定刚性隔板；

4. ETABS 模型包含“地震作用计算模型”和“静力工况计算模型”两个选项，选择“地震作用计算模型”时转换的 ETABS 模型将根据 PKPM 模型中的参数考虑连梁刚度折减系数，选择“静力工况计算模型”时则不考虑。

2.4 导入生成 ETABS 弹性模型

将转换程序生成的模型文件“e2k”导入 ETABS 程序，得到 ETABS 模型如图 8 所示。



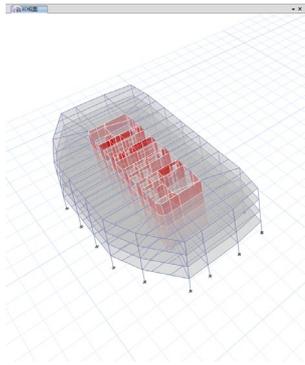
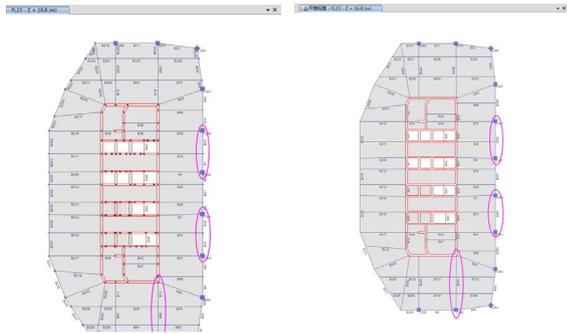


图 8 转换得到的 ETABS 模型

3 弹性模型预处理

转换后的 ETABS 模型中，主梁被与之相交的次梁分成了多段（图 9a），这样的处理对于弹性分析无影响，但为方便后续主梁配筋和塑性铰指定，在本模型中将主梁合并（图 9b），主梁在与柱/墙交点之间保持连续。



a 处理前的主梁 b 处理后的主梁
图 9 ETABS 弹性模型预处理

4 配筋导入 ETABS 模型

配筋信息是混凝土构件塑性铰 / 纤维铰属性计算基础，在进行弹性分析之前，需在 ETABS 中进行弹性设计获取配筋或指定构件的配筋信息。

本模型采用筑信达公司开发的 PKPM 配筋导入 ETABS 工具“CiSP2ERebar”将 PKPM 模型得到的配筋信息导入至 ETABS 模型中用于弹塑性属性的计算。

在使用“CiSP2ERebar”前，请确保 ETABS 模型中主梁在柱间或在柱墙间不能分段，否则程序无法将配筋结果导入给 ETABS 模型。本模型经过第 3 步弹性模型预处理已满足此要求。

4.1 PKPM 模型图纸准备

“CiSP2ERebar”需读取 SATWE 结果中的编号简图、梁计算配筋图和柱施工图文件，三种文件均需为 DWG 格式。可在 PKPM 中运行分析设计后将上述三种结果保存为 DWG 格式。

4.2 读取 PKPM 图纸文件



图 10 CiSP2ERebar 主界面



图 11 图纸信息及参数设置

点击“CiSP2ERebar”图标，在 AutoCAD2012 中显示 CiSP2ERebar 主界面。

点击主界面中的“工程设置”按钮，弹出图 11 的截面，本模型中的相关信息设置如图 11 所示。

CiSP2ERebar 参数说明：

1. 构件截面图文件：由 SATWE 结果中编号简图生成的 DWG 文件；
2. 梁配筋图文件：由 SATWE 结果梁计算配筋生成的 DWG 文件；
3. 柱配筋图文件：由柱施工图生成的 DWG 文件；
4. 梁配筋归并参数：归并系数 β 、最大归并面积 A
 - a. 若同一截面梁的最大配筋面积为 A_{max} ，最小配筋面积为 A_{min} ，则归并面积 S 为 $(A_{max} - A_{min})\beta$ ；
 - b. 当 $(A_{max} - A_{min})\beta > A$ 时，归并面积 S 取 A ；
 - c. 程序自动将此梁的配筋面积分为多个面积区间， $(A_{min}, A_{min} + S)$ ， $(A_{min} + S, A_{min} + 2S)$ ，……， $(A_{min} + nS, A_{max})$ ；
 - d. 程序自动判断梁计算配筋面积取所属的区间，并取此区间的最小值当做此梁的配筋面积导入 ETABS 模型中；
5. PKPM 版本：生成 DWG 文件时所用的 PKPM 版本；
6. 结果图保存路径：配筋导入后生成的构件名称、配筋面积及对应构件位置结果图的保存路径。

4.3 配筋结果导入 ETABS 模型

点击主界面上的“读取配筋”按钮，程序读取配筋结果文件中的相关数据；

点击主界面上的“导入 ETABS”按钮，选择已进行预处理的 ETABS 弹性模型，程序自动将配筋结果导入模型中，生成新的构件截面，并将截面指定给对应的构件。

可通过主界面上的“绘制结果图”按钮可生成包

含配筋导入后截面的名称、配筋值以及对应构件信息的 DWG 文件。

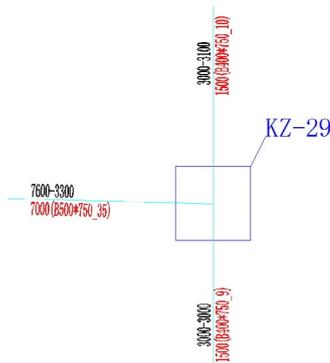


图 12 配筋导入结果图（局部）

CiSP2Erebar 配筋导入部分技术条件：

1. 在同一条直线上的一根或多根梁，程序将柱、墙区间的对象识别为一根框架梁；如图 13 所示的梁 L1、L2、L3，程序可自动识别其为同一根梁，其顶筋配筋值分别取 L1 的左端配筋和 L3 的右端配筋，底筋取 L1、L2、L3 的最大值。



图 13 PKPM 梁截面图

2. 在同一直线上，与同一个柱相连的框架梁端，其顶部配筋取包络做为对应端部的配筋；如图 14 所示的梁 L1、L2 与同一柱相连，则取 L1 右端的顶筋和 L2 的左端顶筋较大值做为这两处的配筋值。

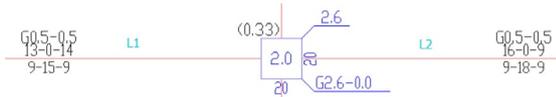


图 14 PKPM 梁配筋图

3. 程序自动识别 PKPM 柱施工图中柱配筋，自动指定给 ETABS 中对应的截面；

- a. PKPM 柱施工图中，柱角筋与分布筋直径相同时，程序直接将 PKPM 配筋形式指定在 ETABS 中；
- b. PKPM 柱施工图中，柱角筋与分布筋直径不同时，程序根据面积不大于单侧分布钢筋总面积的原则，利用角筋直径大小等效出分布

6 结论

本文以某实际项目的局部楼层为例，展示了利用筑信达工具“CiSModelcenter”和“CiSP2Erebar”将 PKPM 弹性设计模型转换为 ETABS 弹塑性模型的过程。利用此方法旨在减少重复工作，提高工作效率。弹塑性模型建立与弹塑性分析及结果解读密切相关，需要大量的理论背景知识和经验支撑。建模工具能起到辅助作用，减小工作量，但是不能完全替代工程师的作用，模型中更多参数设置、细节处理、结果解读等更需要工程师自身的把控，这才是弹塑性分析中更有价值的部分。

钢筋的根数并指定给 ETABS 截面；如图 15 所示的柱施工图，角筋直径 22，分布筋 4 根 20 面积 1256，程序会自动将分布筋等效为 3 根 22 面积为 1140 指定给截面。

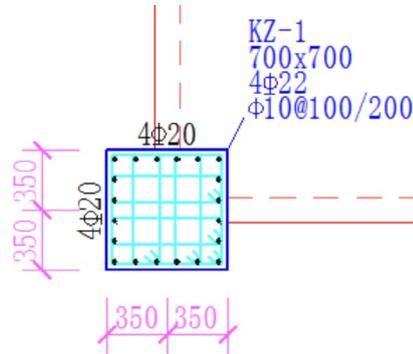


图 15 PKPM 柱施工图

注，由于目前版本 API 的限制，利用程序指定配筋时，仅支持角筋和分布筋直径相同的形式，后续程序会根据 API 的改进而改进。

4.4 检查模型，补充因模型本身问题未导入的主构件配筋信息。

本模型中混凝土主梁和混凝土柱的配筋均通过 CiSP2Erebar 工具导入；组合柱截面配筋导入功能程序目前版本未实现，需要人工在 ETABS 截面定义中添加，后续版本中增加此项功能。至此，配筋信息导入至 ETABS 完毕。

5 定义 / 指定材料及构件非线性属性

按照多次试算、逐步指定、非线性构件数量由少至多的原则，对模型指定非线性属性。本项目中包含的工作有：1) 定义材料非线性属性；2) 主梁两端指定弯矩铰；3) 柱两端指定 PMM 铰 / 纤维铰；4) 剪力墙墙铰（或分层壳）定义指定。

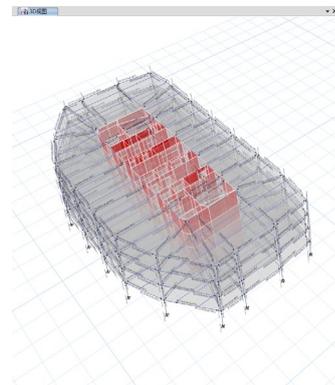


图 16 ETABS 弹塑性模型

SAP2000 排架柱的偏心模拟

筑信达 张志国

排架结构是由屋架、柱子和基础构成横向平面排架，再通过屋面板、吊车梁、支撑等纵向构件将其联结成整体的空间结构。最常见的排架结构即单层工业厂房，结构形式如图 1 所示。其中，单层工业厂房的排架柱是工程中最常见的偏心受力构件之一。从力学角度讲，排架柱具有以下几个特点：

1. 柱底与基础之间刚性连接，即固定约束。
2. 柱顶与屋面梁或屋架之间铰接，即只传递力而不传递力矩。
3. 柱身牛腿处传递的吊车梁为偏心荷载。
4. 柱顶处传递的竖向荷载为轴心或偏心荷载。

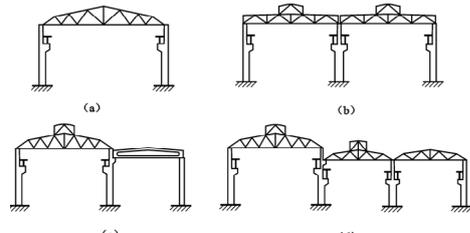


图 1 单层厂房结构

那么，如何才能在 SAP2000 中正确合理地考虑排架柱的力学特性呢？简单来讲，柱底的固定约束可以通过【节点支座】来指定；柱顶铰接也可以借助【框架端部释放】来实现；偏心荷载则可以利用【框架插入点】来模拟。该方法思路明确、操作简单，似乎足以解决排架柱偏心模拟的所有难点。但是，在实际的操作过程中，结构形式的变化以及软件不同功能之间的相互影响，很可能导致上述方法失效。接下来，我们就从最简单的平面排架结构入手，由浅入深地一一介绍排架柱偏心模拟的各种方法。在这个过程中，我们将会看到上述方法的局限性，也会灵活巧妙地寻求新的方法解决新的问题。

方法一：柱端部释放 + 柱插入点



图 2 排架柱的偏心模拟（一）

在图 2 所示的平面排架结构中，我们采用前文提及的方法模拟排架柱的偏心。即：

1. 以柱顶的端部释放（T, M2, M3）模拟梁柱铰接，如图 2-1 所示。
2. 以柱顶和柱底的插入点模拟排架柱的偏心（0.3m），如图 2-2 所示。

在继续阅读下文之前，请读者认真思考一下：您会不会也采用同样的方法创建平面排架结构的计算模型呢？那么，该方法是否有效呢？事实上，我们可以通过简单的理论解来加以验证。简化起见，我们仅考虑作用于横梁（跨度 6m）上的线荷载 10kN/m，不考虑结构自重。从理论上讲，横梁传递给每根排架柱的竖向荷载为 30kN，考虑到 0.3m 的偏心距，柱顶弯矩应为 $30 \times 0.3 = 9.0\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

但是，从 SAP2000 提供的结构弯矩图（图 2-3）来看，排架柱全长的弯矩均为零，而横梁两端却存在非零的弯矩值。这种结果显然与理论解相悖，其原因就在于柱顶的端部释放导致偏心荷载引起的附加力

矩为零。也就是说，在 SAP2000 中框架对象的端部释放和插入点无法同时发挥作用，故以这种方法模拟的排架柱偏心应尽量避免！

方法二：梁端部释放 + 柱插入点

其实，我们完全可以换一种思路来解决这个问题，即：以梁的端部释放模拟梁柱铰接，同时以柱的插入点模拟偏心。这样就可以有效避免同时指定“柱端部释放 + 柱插入点”所带来的问题。基于此模拟的排架柱偏心如图 3 所示，从结构弯矩图可以看出，9kN·m 的柱顶弯矩（外侧受拉）与理论解完全一致。另外，沿排架柱高度线性变化的弯矩值也对应着排架柱的非零剪力值。由此即可证明方法二的实用性和有效性！



图 3 排架柱的偏心模拟（二）

应用方法二模拟排架柱的偏心，无论弯矩、剪力还是轴力，SAP2000 输出的结果与理论解均完全一致。不过，排架柱柱底的节点反力矩似乎与理论解相悖。理论上讲，柱底处的构件内力与节点反力在数值上应保持一一对应。然而，SAP2000 提供的柱底弯矩和节点反力矩在数值上并不相等（0.49 vs 8.51）且

作用方向相反，如图4所示。

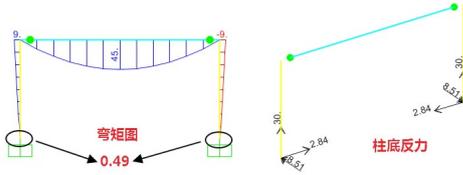


图4 排架柱的偏心模拟（二）

柱底节点反力异常的原因在于：SAP2000 基于节点输出反力，而基于框架单元的截面形心输出单元内力。在将插入点由默认位置（截面形心）“偏心 0.3m”后，截面形心与节点将不再重合。故，节点反力矩与柱底弯矩也会由于 0.3m 的偏心和 30kN 的轴力而出现数值和方向上的差异。

如图5所示，由于截面形心和节点之间以刚臂相连，必然存在“节点反力矩 + 柱底弯矩 = 轴力 x 偏心距”的关系，也就是： $0.49\text{kN}\cdot\text{m} + 8.51 = 30 \times 0.3 = 9.0\text{kN}\cdot\text{m}$ 。换言之，SAP2000 输出的柱底处的节点反力矩并非错误，只是与用户习惯的理解方式有所不同。因此，对于以插入点模拟的排架柱偏心，用户在输出和解读节点反力矩时需要特别谨慎！

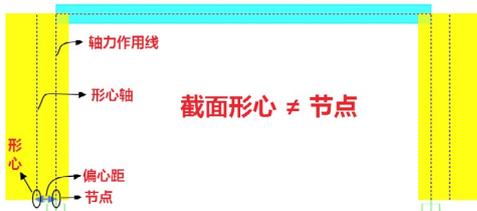


图5 截面形心 vs 单元节点

方法三：梁端部释放 + 柱几何偏移 + 刚体约束

对于方法二，如果用户需要导出节点反力和反力矩作为外荷载进行下部基础设计，那么该方法在使用上将存在诸多不便。在这种情况下，我们可以考虑直接修改排架柱的几何位置来考虑偏心，然后以节点约束考虑柱顶的偏心。这种方法无需修改插入点，故柱底节点反力与柱底内力完全对应。直接导出节点反力后，数值变号（反向）即可作为下部基础的外荷载。具体操作如图6所示：

1. 分别沿水平方向平移排架柱 $\pm 0.3\text{m}$ ，则柱顶与梁端间产生 0.3m 的间隙。
2. 对横梁的两端指定端部释放模拟梁柱间的铰接，这点与方法二相同。
3. 选择柱顶和梁端节点并指定刚体约束。
该操作可采用以下两种方法之一：
 - i. 依次选择左侧和右侧的两个节点并分别指定不同的 Body 约束（勾选全部六个自由度）。
注意：切不可同时选择四个节点并指定同一个 Body 约束！
 - ii. 同时选择四个节点并指定同一个 Weld 约束（勾选全部六个自由度）。**注意：**拼接容差应大于

0.3m ，但又不宜过大（如 10m ）。建议取 0.5m 即可。

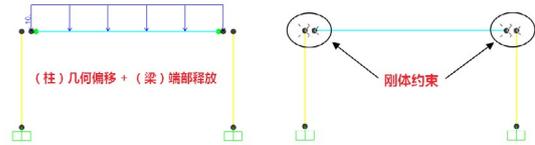


图6 排架柱的偏心模拟（三）

采用上述方法模拟的排架柱偏心，既能保证结构内力的正确性，也能导出正确的节点反力用于下部基础设计，如图7所示。

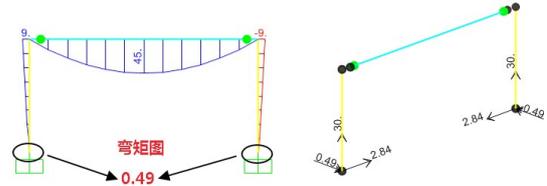


图7 排架柱的偏心模拟（三）

方法四：弦杆端部释放 + 柱几何偏移 + 刚体约束

接下来，我们将排架柱的偏心模拟问题再进一步深化。在之前的计算模型中，我们始终将平面排架结构中的屋架简化为单根屋面梁，故可以以梁的端部释放模拟梁柱铰接。不过，对于跨度较大的桁架体系的屋架，以上方法是否可行呢？以图8所示的平面排架结构为例，屋架的腹杆均指定端部释放，但上弦杆和下弦杆并未指定（左图）。由于我们需要通过对屋架的处理实现其与柱顶的铰接，故必须将下弦杆的两端也指定端部释放，如右图所示。其余操作则方法三完全相同，此处不再赘述。

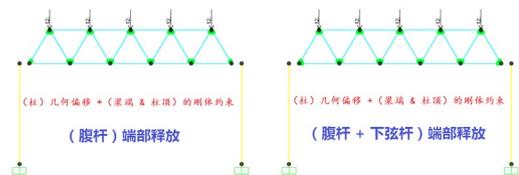


图8 排架柱的偏心模拟（四）

桁架体系的屋架与单根梁的区别在于：前者需要考虑与桁架端部节点相连的所有杆件在该节点处的端部释放。这里的“所有杆件”包括腹杆也包括下弦杆，对于更为复杂的空间桁架或空间网架，可能还包括撑杆、系杆、纵向联系以及托架等等。试想一下，如果不对下弦杆指定端部释放，各个杆件的连接方式将会是怎样的呢？此时，下弦杆将与排架柱刚接，而腹杆则与下弦杆和排架柱所组成的“门式刚架”铰接。如图9所示，柱顶弯矩值 $14.63\text{kN}\cdot\text{m}$ （左图）与理论上的 $9\text{kN}\cdot\text{m}$ （轴力 30kN ，偏心距 0.3m ）相去甚远，前者（左图）显然不是我们需要的排架结构！

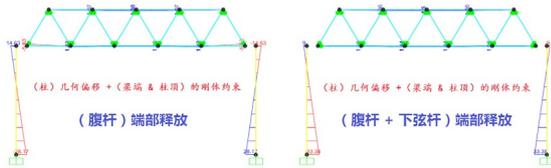


图9 排架柱的偏心模拟（四）

方法五：腹杆端部释放 + 柱几何偏移 + 刚体约束 + 铰接约束

让我们考虑一下图 10 所示的屋架形式，与前述桁架体系不同的是，此处的立杆和弦杆刚性连接。因此，方法四中使用的“下弦杆端部释放”不再适用，否则将破坏立杆与弦杆的刚性连接。那么，在这种情况下，我们又将如何模拟排架柱的偏心呢？

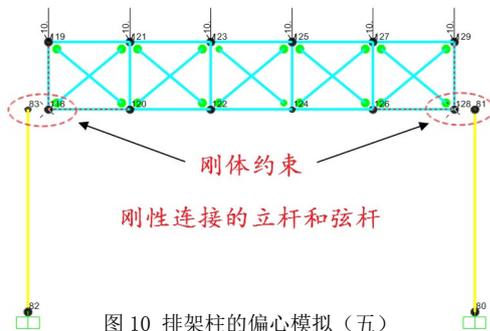


图10 排架柱的偏心模拟（五）

上述问题的难点在于，我们必须摒弃“立杆和下弦杆的端部释放”并寻求其它方法考虑屋架与柱顶的铰接，同时还要考虑柱顶的偏心。在采用“排架柱几何偏移”的基础上，我们可以采用以下方法：

1. 在屋架下弦杆的两个端点处生成新的孤立的节点。
2. 对新节点和柱顶节点指定**刚体约束**，以此模拟框架柱的偏心。
3. 对新节点和屋架节点（注意：二者位置重合）指定**铰接约束**，以此模拟屋架和柱顶的铰接。

以上思路说起来简单，实际操作却较为繁琐。但是，作为我们整个“排架柱偏心模拟”主题的终极解决方案，此方法更具有普遍的适用性。所以，请大家耐心阅读并用心体会以下的每一个操作步骤：

首先，定义两个 Weld 类型的节点约束，分别用于指定刚体约束和铰接约束。具体如下：

- a. Fixed: 勾选全部六个自由度，拼接容差可取为 0.5m。
- b. Pin: 仅勾选三个平动自由，拼接容差可取为 0.01m。

再次强调，Weld 类型的拼接容差**绝对不能过大或过小**，请务必根据节点间的相对距离选择合适的数值！此处也可以采用 Body 类型的节点约束，但操作上更加繁琐，而且不适用复杂的模型。关于 Body 与 Weld 的区别及联系，推荐阅读筑信达官网的知识库

文档《节点约束: Body vs Weld》。

然后，在柱顶节点和屋架节点间绘制 0.3m 长的虚梁，这里的“虚梁”指截面属性为 None 的框架对象。虚梁并不参与结构分析，甚至不会在分析模型中显示。我们可以将虚梁视为一种辅助线，辅助我们在屋架节点处生成新的节点。接下来，我们将通过【编辑 > 编辑点】命令在同一位置处生成两个节点，分别作为虚梁和屋架的端点。具体如下：

1. 选择下弦杆端部的节点并“断开”，命令路径：**【编辑 > 编辑点 > 断开节点】**。该操作会将一个节点分解为相同位置处的四个节点，分别为四根杆件（立杆、斜杆、下弦杆、虚梁）的端点。
2. 同时选择四个节点和除虚梁外的其它三根杆件并重新“连接”，命令路径：**【编辑 > 编辑点 > 连接节点】**。完成该操作后，下弦杆的端点处将只存在两个节点，分别作为虚梁和屋架的端点。其中，屋架的节点可以保证立杆和下弦杆间的刚性连接，而腹杆仍可以指定端部释放。

事实上，以上操作方法与筑信达官网的知识库文档《交叉杆件的销钉连接》中介绍的销钉连接的实现方法非常类似，推荐感兴趣的读者参考阅读。另外，在已有节点的位置处生成新的节点，也可以借助【交互式数据库编辑】来实现，详见另一篇知识文档《如何在已有节点的位置处生成新的节点》。

最后，选择左右两根虚梁的四个端点并指定 Fixed 约束，用于模拟柱顶的偏心；选择屋架端点处的四个节点（即：左右各两个位置重合的节点）并指定 Pin 约束，用于模拟屋架与柱顶的铰接。

完成以上操作并运行分析，SAP2000 输出的结构弯矩图如图 11 所示。其中，9kN·m 的柱顶弯矩可以验证排架柱偏心及屋架与柱顶铰接的有效性，而立杆和下弦杆在交点处的非零弯矩值也可以验证二者之间刚性连接的有效性。

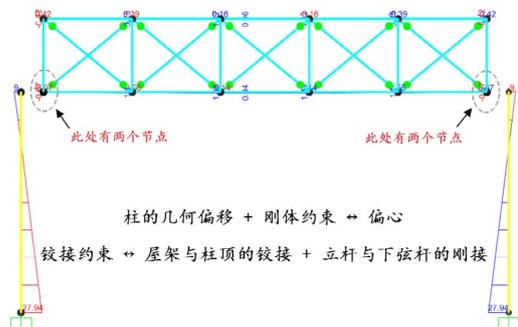


图11 排架柱的偏心模拟（五）

小结

本文以单层工业厂房中常见的排架柱为切入点，由浅入深地介绍了排架柱偏心模拟的五种方法，除方法一外，其它四种方法均可使用且各有优缺点及适用条件。希望通过这种“应用旧方法→提出新问题→寻求新方法”的迭代方式，可以让大家更加深入地理解并灵活使用 SAP2000 的部分功能。SAP2000 作为一款通用的建筑结构分析与设计软件，无法提供太多“一键式”、“傻瓜式”的操作，具体的问题往往需要用户在深刻理解软件功能的基础上进行灵活多变的处理。乐于学习，勤于思考，善于总结，并辅之以结构力学概念和工程实践经验，才能真正做到如鱼得水、游刃有余。

PLAXIS



PLAXIS 基坑开挖支护模拟要点解析（一）

筑信达 章延平

开挖是岩土工程中常见的、普遍的一种工程实践，广泛地在建筑深基础、地铁车站或区间、地下空间开发等建设工程中实施。针对开挖的支护设计，便成了当前岩土工程师面对的一个重要问题。尤其在目前开挖工程周围环境复杂的情况下，要做到安全、经济的设计方案，需要对开挖支护方案做更加详细和全面的分析，有限元软件成为不可或缺的分析工具。

近年来，PLAXIS 软件在开挖工程分析中的应用越来越广泛，受到了广大岩土工程师的信赖和认可。本文就 PLAXIS 软件在基坑开挖支护分析中的相关问题做一些梳理和汇总，首先介绍地基土层模拟中需要注意的问题。

1 本构模型选择

基坑开挖分析中首先解决的问题是对土层的模拟，相较于传统设计方法中将土层作为荷载（抗力）或者线弹性弹簧来考虑，有限元分析中要考虑土层的非线性、弹塑性，以及土中地下水的变化对土层力学行为的影响等，因此涉及到本构模型选择和参

数取值问题。

1.1 摩尔 - 库伦本构模型

我们最熟悉的本构模型是摩尔 - 库伦模型（MC），即理想弹塑性模型，其参数简单、求解速度快，可以较好的模拟土体的破坏特性（摩尔 - 库伦强度破坏准则），应用十分方便，被广泛应用到各种领域的岩土工程计算分析当中。摩尔 - 库伦模型的应力 - 应变关系见图 1，在达到屈服强度之前其表现为线弹性状态，即其模量为常量（模型参数用杨氏模量 E 代表）。

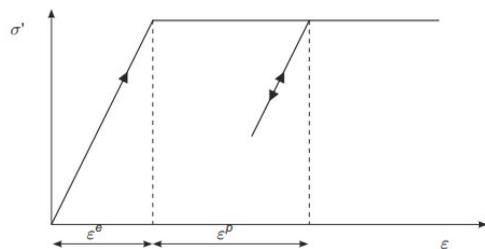


图 1 MC 模型的线弹性理想塑性应力 - 应变关系

对一般土体而言，其应力应变关系往往表现出非线性特征（甚至在一开始加载时），且其模量与应力

路径相关。将加载起始的切线模量定义为 E_0 ，屈服强度一半应力水平所对应的割线模量（实际指土体的平均加载模量）定义为 E_{50} ，而卸载再加载情况下则对应卸载重加载模量 E_{ur} 。三轴排水试验中土体不同模量的定义如图 2 所示。因此，在使用 MC 模型时，要特别注意根据土体的实际应力路径来确定使用合适的模量值，比如对于基坑开挖工程，主要为卸载过程，一般 E_{ur} 可以达到 $3E_{50}$ ，有些软黏土更高。

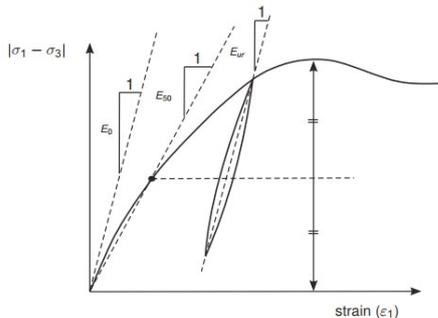


图 2 三轴排水试验的一般应力 - 应变曲线及不同刚度取值

此外，土体的模量与应力水平也具有相关性，一般在高应力水平下我们可以得到更高的模量值，即应力水平越高，土体越“坚硬”。因此，使用 MC 模型时，要注意评估试验指标与实际工程应力水平的关系。对于 MC 模型，可以定义其模量随应力水平（即土层埋深）的增长，表达式如下：

$$E(y) = E_{ref} + (y_{ref} - y)E_{inc} \quad (y < y_{ref}) \quad (式 1)$$

综上所述，MC 模型无法表达土体在屈服前的非线性特征，且无法区分加载应力路径，以及应力水平变化对土体行为的影响。基坑开挖中土体所经历的应力路径复杂，对于地层的变形情况，比如坑外沉降、坑底隆起、墙的位移等，使用摩尔 - 库伦模型相对简单的应力 - 应变关系进行计算，往往存在较大误差。

1.2 硬化土本构模型

为了得到更加准确的变形、内力结果，PLAXIS 高级本构模型——硬化土模型（HS）得到了广泛的重视和应用，其非线性应力 - 应变关系、刚度与应力的相关性、不同应力路径下的不同力学行为等特征，在开挖工程中表现良好，同时不断有国内的相关科研单位对其参数取值进行试验研究（可参见基坑工程手册第二版）。

HS 模型具有双曲线应力 - 应变关系，可表达土体的非线性变形过程，同时区分加载过程和卸载过程等不同应力路径下土体刚度的变化，其刚度参数用加载割线模量 E_{50} ，（一维）压缩切线模量 E_{oed} 和卸载 - 再加载模量 E_{ur} 表达。HS 模型的刚度参数如图 3 所示。关于 E_{oed} 的定义方法，可参见图 4，其余模量的定义方法见图 2。

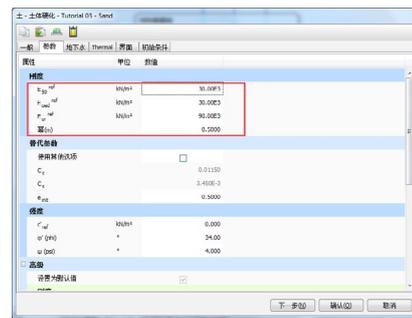


图 3 HS 模型的刚度参数

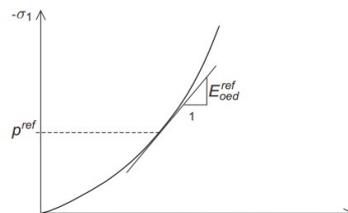


图 4 （一维）固结试验的应力 - 应变曲线

HS 模型的双曲线应力 - 应变关系如图 5 所示。一般可取 $E_{50} \approx E_{oed}$ ， $E_{ur} \approx 3E_{50}$ ，对于有些软土， E_{50} 可达到 $1 \sim 2E_{oed}$ ，而 E_{ur} 可达到 $3 \sim 10E_{50}$ ，需要根据当地经验取值。此时要注意我们由压缩系数得到的压缩模量 E_s ，国内有文献对相同应力水平下的 E_s 与 E_{oed} 做了试验统计研究，对于一般粘性土二者较为接近。

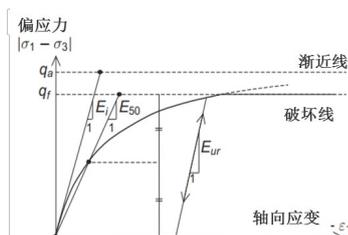


图 5 三轴排水试验中 HS 模型的双曲线应力 - 应变关系

此外，HS 模型还可以考虑刚度与应力水平的相关性，用幂值为 m 的如下函数表达，我们可以给出基准应力水平下的各个刚度参数值，比如 $p^{ref} = 100\text{kPa}$ ，再通过给定的幂值 m 即可得到任意应力水平下的实际模量值。 m 的取值范围一般为 $0.5 \sim 1.0$ ，对于砂土或硬土可取小值，软土可取大值。

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (式 2)$$

选择不同本构模型对某基坑开挖支护工程进行 PLAXIS 数值分析，可见 MC 本构模型将得到较大的坑底回弹，导致坑外地表沉降呈现出墙顶附近隆起，远离墙顶位置处位移难以收敛，如图 6 所示。而 HS 本构模型的计算结果中，坑外地表沉降呈现出合理的沉降槽，并随着与墙顶位置距离增大而逐步收敛。

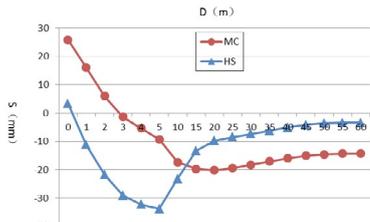


图6 坑外地表沉降曲线 (MC 模型 vs HS 模型)

1.3 考虑小应变刚度的硬化土本构模型

研究表明，土体的刚度会随其应变增大而逐渐衰减，如图7所示。然而，我们所采用的土工试验指标，均是土试样处于较大应变水平时测试所得。从图中可以看出，一般工程中土体的应变水平要远小于土工试验中的应变水平，即在分析中我们采用的土体刚度参数较工程实际情况偏小。为此，PLAXIS 中的另一个高级本构模型——考虑小应变刚度的硬化土模型（HSsmall）也开始得到工程师的关注与研究。

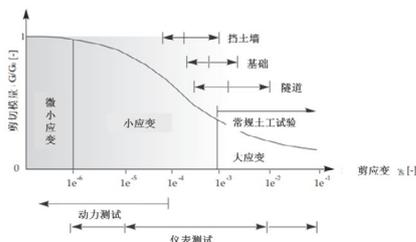


图7 土体的典型刚度（剪切模量）-（剪）应变关系

该模型中利用小应变剪切模量 G_0 和阈值剪应变 $\gamma_{0.7}$ （指剪切模量衰减到 $0.722G_0$ 时对应的剪应变）两个指标来表达土体刚度与应变水平的相关性，如图8所示。与HS模型中其他刚度参数相同，我们需要给定参考应力水平下的小应变剪切刚度值 G_{0ref} ，可由循环单剪试验或者动力试验等方法获取，也可按照经验取值，如国内一些文献中所做的试验统计研究。 $\gamma_{0.7}$ 的数量级一般为 10^{-4} 。

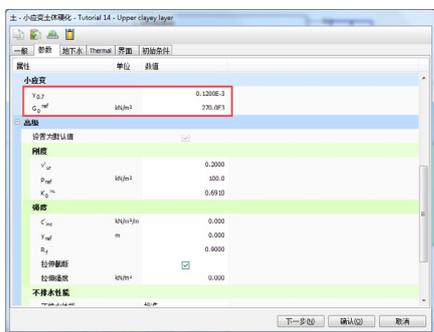


图8 HSsmall 模型的小应变刚度参数

对比HS模型和HSsmall模型的计算结果，如图9所示，可见选择HSsmall模型得到的坑外地表沉降曲线更加合理，具有更好的收敛性，据多个实际工程项目验证，后者的计算结果更接近实际监测结果。

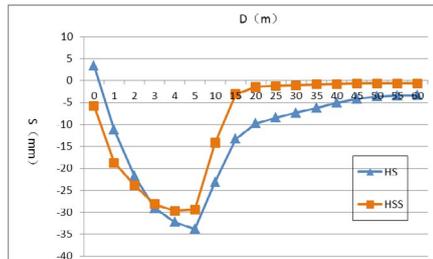


图9 坑外地表沉降曲线 (HS 模型 vs HSsmall 模型)

2 土层排水类型与强度指标

土层的强度指标取值决定了土层塑性区域的发展及其对位移、结构内力的影响。具体的分析当中，要根据实际地层状况及施工状况来确定土层的排水行为，以得到更加符合实际的应力场及其变化规律。在黏土层中，超静孔隙水压力的发展对其变形和强度的影响尤其重要，需要仔细分析。

2.1 土层排水类型

土层在加卸载过程中，随着其应变与孔隙比的变化，孔隙水压力也会随之而改变。对于不同土体类型、不同工况，孔隙水的变化特征也不同，PLAXIS 中用排水类型来表达这种特征。一般的，排水类型主要分为排水、不排水两种，当然还包括针对无孔材料的第三种类型——非多孔材料，比如模拟混凝土材料，或者完整的新鲜基岩等。PLAXIS 土层材料排水类型选项见图10。

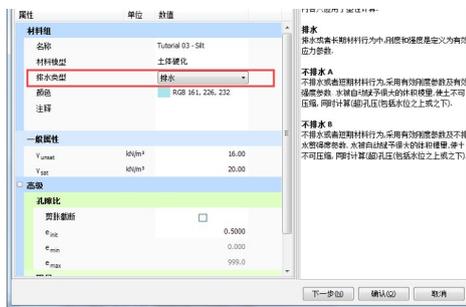


图10 材料排水类型选项

具体来讲，排水指加卸载时，土体孔隙水瞬间排出，不产生超静孔隙水压力。一般情况下，考虑排水的情况有：土层渗透性很强，加载速率很小，忽略短期施工效应等。不排水指加卸载时，土体孔隙水完全不能排出，产生超静孔隙水压力。一般情况下，考虑不排水的情况有：土层的渗透性很弱，加载速率很大，考虑短期施工效应等。非多孔是指材料无孔隙，其内部不存在任何水压力（静水压力和超静水压力）。一般情况下，非多孔与线弹性本构模型结合使用来代表结构材料，如混凝土。不排水情况下计算得到的超静孔压分布如图11所示。

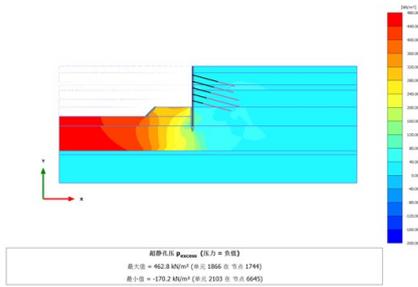


图 11 基坑开挖时黏土地基中的超静孔压

需要注意的是，土体排水类型确定孔隙水是否排出以及是否产生超静孔压，均是假定了上文所述的几种时间效应条件，在孔压计算过程中并未涉及与土层实际透水性能相关的参数及时间指标。因此，该选项仅适用于塑性计算、安全计算和动力计算。而对考虑时间效应和土层实际透水性能指标的固结计算和流固耦合计算，孔压的变化需根据材料的渗透性参数（如渗透系数等）及时间参数来确定，此时材料的排水类型设置则无效。

2.2 土体强度指标

土层的应力分析主要使用有效应力法，特殊情况下也可采用总应力法。上述几种本构模型，均采用摩尔-库伦强度准则，在有效应力分析方法中，其对应的强度指标便是有效强度指标 c' 和 ϕ' ，此时的土体抗剪强度为与应力水平相关的计算值。有效强度指标一般由三轴排水试验测定，如图 12 所示。上述排水类型选择排水或不排水 A 时，对应的强度指标便是有效强度参数。

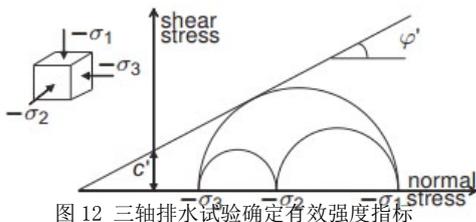


图 12 三轴排水试验确定有效强度指标

对于软黏土层，当其有效强度指标难以测定时，也可采用不排水强度指标 s_u ，代表土的总抗剪强度，即土的抗剪强度为已知的输入值。此时，土体的破坏准则由摩尔-库伦强度准则退化为 Tresca 强度准则，如图 13 所示。不排水强度指标一般由三轴不排水试验测定，也可采用原位十字板剪切试验等方法测定。上述排水类型选择不排水 B 或不排水 C 时，对应的强度指标便是不排水强度参数。注意不排水 C 对应总应力分析法，此时刚度参数也需要采用不排水指标。

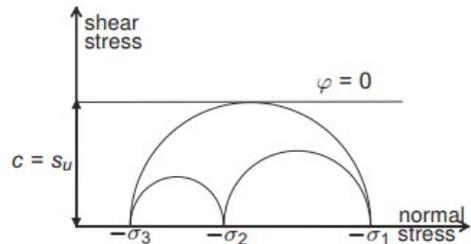


图 13 三轴不排水试验确定不排水强度指标

如果要考虑软黏土层抗剪强度随应力水平的变化（主要指随土层埋深增大其强度的提高），则可定义高级选项中关于强度变化的函数，如式 3 所示。

$$s_u(y) = s_{u,ref} + (y_{ref} - y)s_{u,inc} \quad (y < y_{ref}) \quad (式 3)$$

对于遵循摩尔-库伦强度准则的本构模型，其强度指标取值应符合相应的试验要求，此时需要特别注意有效应力指标（三轴排水试验）与我们在传统设计方法中按照经验使用的直剪试验指标或三轴固结不排水试验指标之间的区别，二者在试验条件和参数取值方面均存在较大差异，这对分析结果有着显著的影响。

3 小结

基坑开挖是一个相对复杂的综合性工程，在数值分析中我们要注重对土体本构模型及其参数取值的仔细研究，这是关系到分析结果合理与否的关键因素。能够考虑土体应力路径、应力水平、应变水平对刚度影响、并反映非线性应力-应变关系的高级本构模型 HS 模型和 HSsmall 模型应得到重视和应用，对其涉及各个参数的取值问题，应结合现有勘察资料中的土工试验数据、原位试验数据、以及地方工程经验来获取，必要时可利用 PLAXIS 软件中的土工试验工具、参数敏感性分析和参数优化工具进行土工参数的研究和确定。同时，利用现场监测数据进行参数反分析也是一种非常实用、有效的方法。

有关 PLAXIS 基坑开挖分析的更多资料，请关注筑信达 (www.cisec.cn) 网络课堂、知识库，以及案例教程：

- > 关于摩尔-库伦本构模型的刚度参数取值问题
- > PLAXIS 在基坑工程中的应用
- > 材料的排水类型与渗透性
- > 摩尔-库伦本构模型的强度参数与排水类型
- > 超静孔隙水压力的产生和影响



PLAXIS 建模方法汇总

筑信达 孙立超

总体来说，建模技术也是一种艺术。不同的人对同样的工程项目会有不同的简化结果。而简化的结果对网格划分和计算时间成本以及计算结果都有很大影响。

建模的一个基本原则就是简化的模型能够反映项目分析的主要问题。在这个基本原则下，尤其是对于 PLAXIS 3D 来说，对于以提交精确计算结果为目的时，模型不要贪大求全，能简化的可以适当简化，比如，不均匀分布地层的等效，排桩等效成板，建筑物等效成荷载等。如果为了使得模型更加真实的反映工程项目三维模型兼顾计算时，建立的地层反映出最主要的不均匀分布情况，建立的建筑物或构筑物对象反映出主要传力体系，能用结构单元模拟的构件最好用结构单元模拟。如果模型中土体单元和结构单元数量过多，网格划分和计算的时间成本较高，而且一些次要的影响因素对计算结果的影响较小。

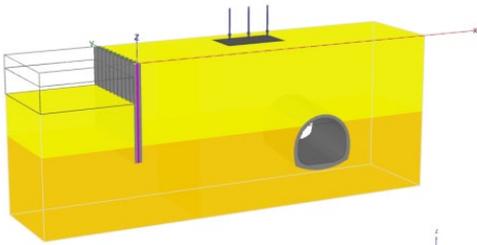


图 1 三维模型

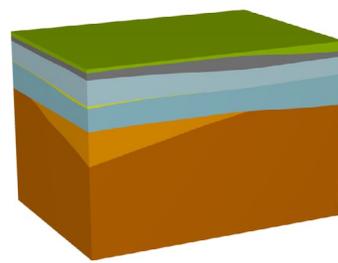


图 3 多钻孔生成的非水平地层

在 2D AE 至 2016 版本和 3D 2013 至 2016 版本中，建模主要包含两个方面，即地层建模和结构建模（结构单元以及荷载）。

1 地层建模

地层建模常用方法主要有两种，即钻孔和外部文件导入（VIP）。

1.1 钻孔

一般情况下，特别是建立三维模型时，为了简化建模以及让网格划分更顺利，都要对实际地层进行简化。此时，地层建模主要利用钻孔工具建模。通过定义钻孔顶部和底部标高，可以生成当前钻孔土层厚度。也可以利用多个钻孔创建非水平地层，如图 2 和图 3 所示。钻孔之间利用内插的方法生成地层。同时，在每个钻孔中可以分别定义水头水力条件，生成初始地下水位。

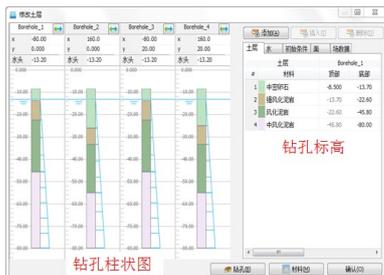


图 2 编辑钻孔

1.2 外部文件导入（VIP）

如果想要创建勘察报告中提供的地质模型，一般通过导入外部文件的方法生成。此时要将外部文件的几何信息进行处理，处理成 PLAXIS 可识别的离散化三角形对象。特别要注意不同软件版本对导入文件的几何信息要求不同，3D2016 版本可以之间导入体，无需离散化三角形对象。导入的文件格式支持 3ds、dxf、txt（2D）、dwg 等，其中 3D 2016 不再支持 dwg 格式。导入形式包括导入土层表面和整个土层，如图 4 和图 5 所示。

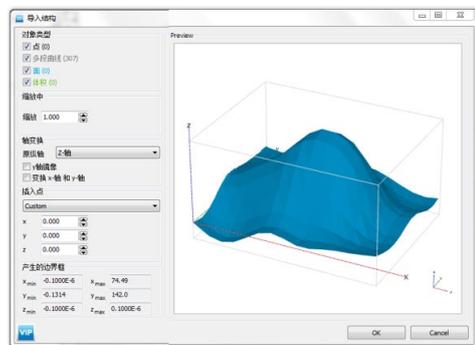


图 4 导入地层表面（3D）

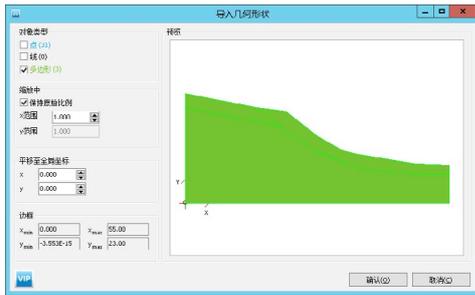


图5 导入整个地层 (2D)

2 结构建模

结构建模有三种方法，即辅助建模工具，命令流和外部文件导入 (VIP)。使用外部文件导入时，尤其要注意如果相邻对象未精确连接，会导致网格划分失败。

2.1 辅助建模工具

- 1) 常用编辑工具：框选对象、移动对象工具、旋转对象工具 (3D) 和创建曲线工具 (3D)。框选工具主要用来选择多个结构对象。可以选择的对象包含点、线、面、体。点、线、面、体又分别包含了各自的结构对象，比如点下拉列表中有 点、点荷载、点位移、点对点弹簧，线下拉列表中包含 了线、梁单元、线荷载、线位移、点对点弹簧、嵌固桩单元、排水线、井单元。移动对象工具可以沿某个矢量方向移动一个或多个对象。旋转对象工具以某一个点为参考点，绕着 X 轴、Y 轴、Z 轴旋转。创建曲线工具可以定义由直线和圆弧组成的线。
- 2) 创建土体多边形、创建土矩形、沿着等高线等建模工具 (2D AE 以后版本)。当结构对象几何比较规则的时候推荐使用这些工具，比如模拟路堤、厚度较大的挡墙等，如图 6 所示。

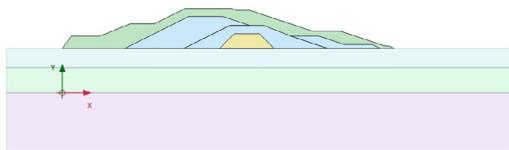


图6 路堤

- 3) 阵列工具。阵列形式包括矩形和环形 (2D 2015 和 3D2016)。矩形布局形状包括沿一维直线，二维平面和三维空间 (3D) 方向阵列。单根桩沿某平面阵列如图 7 所示。环形阵列需要定义在平面中沿某个圆心、圆心角和阵列数量 (包含选中对象)。



图7 对象阵列

- 4) 拉伸对象工具。软件中点可以拉伸成线，线可以拉伸成面，面可以拉伸成体，如图 8 所示。反过来体和面可以分解为轮廓线，即点和线。



图8 对象拉伸

- 5) 沿路径拉伸工具 (3D)。软件中除了利用拉伸工具沿着某个矢量拉伸之外，也可以沿着曲线拉伸，曲线可以使用曲线管理器定义。选中被拉伸的对象横截面，在选中拉伸路径，右键选择挤压，即可沿拉伸路径生成体，如图 9 所示。需要注意的一点是，横截面和拉伸对象各个所在的平面是垂直的关系才能使用该工具。

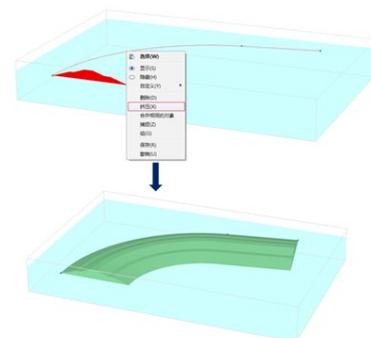


图9 沿路径拉伸

- 6) 隧道设计器。隧道设计器是隧道建模助手。在隧道设计器中可以模拟体积损失率、注浆压力、衬砌、衬砌与岩土相互作用、锚杆、应力释放等。在 3D 2016 中，还可以掌子面压力、千斤顶推力、隧道纵向走向以及分步开挖顺序等。详细信息会在后期文章中介绍。

2.2 命令流建模 (VIP)

软件中的所有操作都会在命令行的模型历史中以命令的形式记录下来。因此只要掌握了相应操作的命令，就可以用命令流建模，如图 10 所示。刚开始使用命令流建模的主要困难在于不清楚想要的操作对应的命令及格式。最简单的方法是先使用交互式方式操作一遍，这样子模型历史中就记录了对应的操作命令。然后根据操作命令去参考命令中了解该命令的使用方法。参考命令中详细介绍了软件可使用的所用命令，如图 11 所示。2D 2015 和 3D2016 可以使用 python 调用程序的前后处理程序，因此可以使用 python 进行复杂的结构化计算，比如反分析等。

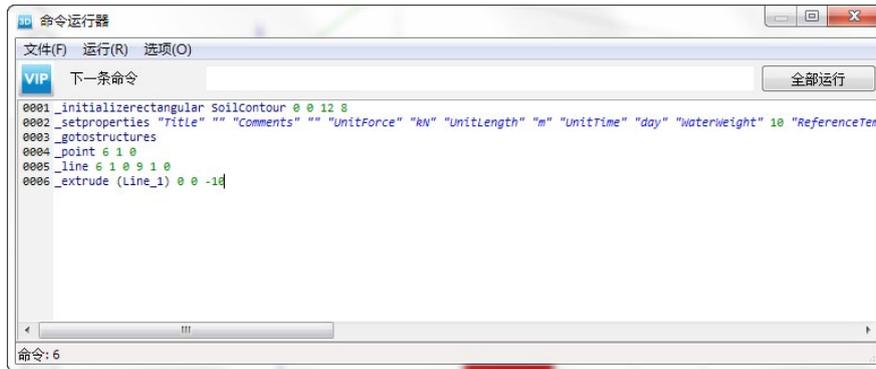


图 10 命令运行器

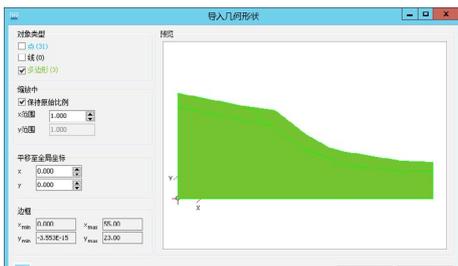


图 11 参考命令

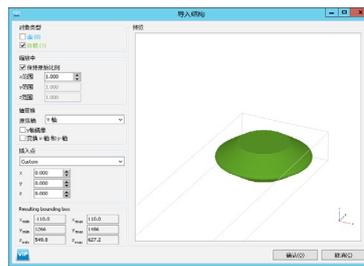


图 12 导入实体

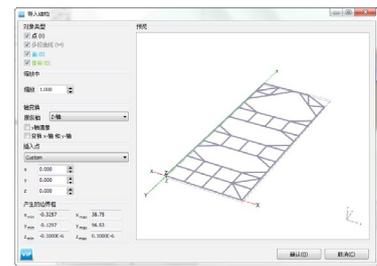


图 13 导入直线

2.3 外部文件导入 (VIP)

3D2013 至 3D2016 中都可以导入实体，如图 12 所示。在 3D2016 版本之前导入实体需要将对面离散成三角面。3D2016 版本中所有几何对象完全是参数化几何。无论是常规项目还是非常复杂项目的网格划分，所需时间更短、单元数量更少、网格质量更好。NURBS 面、实体、样条曲线、直线和点等均可直接导入，如图 13 所示。

3 小结

以上总结了 PLAXIS 常用的建模方法，每种方法都有各自适用条件，需要根据项目的实际情况进行选取。更多相关内容请访问筑信达知识库，如下：

- 1) 2D 多边形工具的应用
- 2) 如何将 AutoCAD 中创建的几何图形导入到 PLAXIS 2D AE 中?
- 3) 如何在 PLAXIS 3D 中创建复杂空间曲面?
- 4) AutoCAD 三维实体导入 PLAXIS 3D
- 5) 在 PLAXIS 中，如何利用命令行快速生成结构单元?



PLAXIS 网格优化方法介绍

筑信达 孙立超

几何信息定义完成之后需要在网格模式中进行网格划分。切换至网格模式时程序会自动根据已建立的几何对象进行布尔运算，结构模式和网格模式中几何对象对比如图 1 所示。

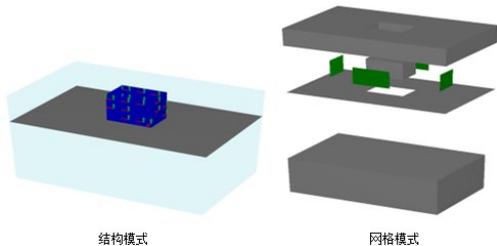


图 1 结构模式和网格模式中几何对象

在网格模式中可以定义网格优化信息，定义完成之后程序将自动划分网格（2D 和 3D 中结构单元和实体单元会根据节点数自动匹配）。网格优化包含两个层面，一个层面是网格可以划分成功，对模型整体或感兴趣的区域进行的优化，如图 2 所示。此时网格优化是在计算精度和计算时间中寻找一种平衡。有限元方法是整体离散成单元，单元任意位置的计算信息利用插值函数根据节点和应力点得到。当划分的单元数量较多时，导致计算时间增长，计算精度提高。另外一个层面是网格划分失败，对几何模型进行处理，如图 3 所示。

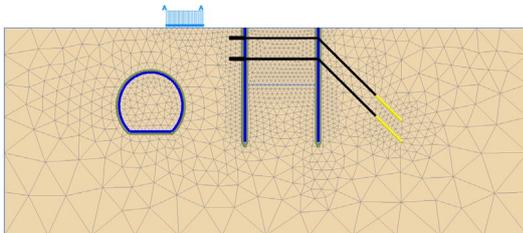


图 2 网格局部细化

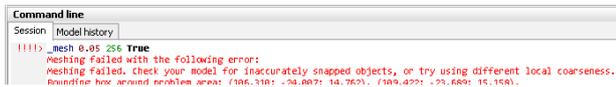


图 3 网格划分失败信息提示

1 网格分布优化

当模型中单元数量较多时会导致计算时间成本增加，尤其是 3D 模型所需单元数量往往较多。因此考虑到计算时间成本，需要控制单元数量。软件中提供了两种方法控制单元数量，一是使用不同层级单元分布，另一个是使用粗糙系数。

1.1 单元分布

根据单元尺寸的大小，软件一共划分了 5 个层级，

即很粗、粗、中等、细、很细，如图 4 所示。同时为了可视化网格粗细，不同粗细网格使用不同颜色显示。颜色越绿，网格越密，颜色越黄，网格越疏，如图 5 所示。初步分析时可以使用很粗或者粗，当后续精细化分析时，需要选择不同层级，然后根据不同层级计算结果差值大小来判断模型对网格的依赖性。



图 4 单元分布选项

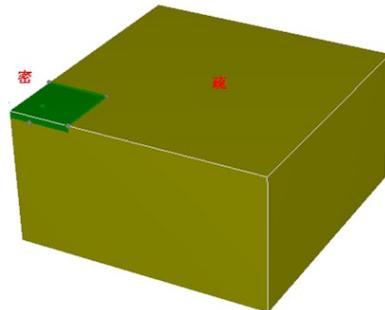


图 5 可视化网格疏密

1.2 粗糙系数

修改粗糙系数，可以对局部对象进行网格优化，如图 6 所示。对于结构单元或者施加荷载的位置往往是我们感兴趣的区域，程序自动在这些位置加密，如图 7 所示。对于 2D 模型来说，结构单元和荷载粗糙系数默认为 0.25，土层默认为 1.0，粗糙系数取值范围 [0.03125 8]。对于 3D 模型，如图中板单元，锚杆和荷载自动加密，粗糙系数默认为 0.5，土层为 1.0，粗糙系数取值范围 [0.0625 8]。对于边界附近地层，这部分区域不是我们感兴趣区域，可以进行粗化。



图 6 粗糙系数

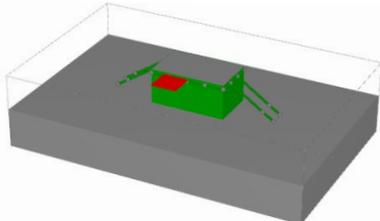


图 7 结构单元和荷载自动加密

1.3 查看网格质量

当网格划分成功后就可以在输出窗口中检查网格划分情况。通过隐藏工具，切面工具等可以查看内部网格划分情况，图 8 显示了模型内部网格划分情况。可以看到在结构单元周边网格进行了加密，在模型边界位置处网格相对来说体积较大。点击网格 >> 性能菜单，将会输出网格质量最大值和最小值。一般情况下网格质量最小值不小于 10^{-6} ，通过推拽图例上的黄色进度条可以显示小于该值的单元分布图，如图 9 所示。

网格质量有两个评价指标，即单元密度和单元形状。单元密度影响差值误差和梯度误差，进而影响计算精度和计算时间。因此计算结构单元时单元密度可以小一些，如果计算应力，则单元密度需要大一些。单元形状影响梯度误差和矩阵质量误差，导致计算时间增加，甚至网格划分不成功。软件假设正四面体网格质量为 1，按照正四面体进行标准化，四面体压扁或拉长，则网格质量变差，如图 10 所示。

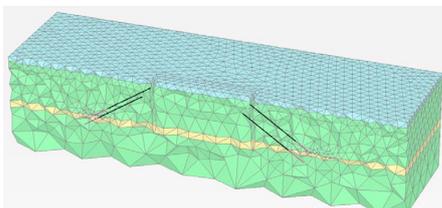


图 8 划分的网格

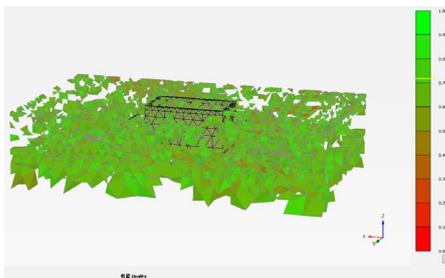


图 9 网格质量性能显示

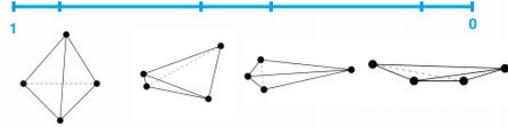


图 10 网格质量定义

2 网格处理方法

单元形状出现畸形时会导致网格划分失败。当网格划分失败时，在命名行的进程中会有信息提示。比如，提示网格划分失败原因以存在问题的区域。如图 3 所示，模型中存在未精确捕捉或者网格使用不同局部粗糙系数，并指出在哪坐标位置处存在问题。

解决这类问题的基本思路是：首先，要仔细阅读错误信息和警告信息提示，找到存在问题的几何对象（切换对象显示和隐藏以及缩放功能可以更好的查看对象）；然后可以选择不同单元分布值、适当修改对象（未精确捕捉时）、移动对象（几何对象相交出现极小对象时）、建立辅助面以及尝试使用较简单的结构单元模拟力学模型，如排桩简化为板单元，梁单元（只考虑轴力）简化为锚杆单元等。建立辅助面的基本思路：由于软件会把面当作网格划分的分割面，如图 1 所示，因此对于形状非规则的位置处，可以建立一些辅助面，将非规则位置用面包住，这样会使得网格划分的质量更高。

网格划分失败常见问题及处理方法：

- 1) 点线面未精确捕捉到指定对象这种情况。这种情况出现比较多的情况是利用导入工具导入几何对象。处理方法：根据错误信息提示找到存在问题的几何对象，再在模型导入的软件中处理存在问题的对象。
- 2) 当模型非常复杂时，可能会由于几何交叉，出现非常小的几何对象。处理方法：一种方法可以尝试使用简单的结构单元，或者建立辅助面。另外一种方法找到出现此种情况的对象，并移动微小距离。

3 小结

根据日常技术支持工作经验以及参考手册相关章节，从两个方面介绍了网格优化方法。更多相关内容请访问筑信达教学视频和网络课堂，如下：

- 1) PLAXIS 2D AE_生成和优化有限元网格
- 2) PLAXIS 网格划分设置





新版发布

SAP2000 V19

更便捷的建模工具，更稳定的求解性能，
更丰富的非线性属性，更多样的 API 工具！

SAFE 2016

增加了地基土弹塑性属性和开裂模量定义；提高了非均匀地基土属性和预应力钢筋定义的便捷性。

CSiBRIDGE 2017

源于 SAP2000，专注于桥梁。高度自动化的快速国标抗震设计。

CiSModelCenter V1.6.2

帮助用户实现不同软件间的数据转换，最大程度减少重复工作，提高工作效率。

CiSDesigner V1.6.0

钢筋混凝土构件（梁、柱、墙）设计校核工具，基于 PMM 面的独创快速算法，丰富的截面类型，快速导入 ETABS 构件。

CiSGTCAD V1.8.5

涵盖变电站构架设计的全过程、丰富的模板、引导式的参数输入、智能化的交互功能。专家的助手，初学者的向导！



特别报道

ETABS 性能化设计高级培训班在上海、广州、北京成功举办

性能化设计（PBD）是对传统结构设计概念的一次重大转变，代表着地震工程学的未来。ETABS 2016 引进了相关选项及算法，在软件中高效实现了性能化设计这一思想。

ETABS 性能化设计高级培训班，由筑信达联合各区域代理商联合举办，面向广大工程师推广性能化设计相关的理论知识和应用实践。课程涵盖性能化设计的基本概念、ETABS 实现方法和设计流程，学员通过“某框架-核心筒结构弹塑性分析”实操案例理解知识点，并掌握 ETABS 的使用方法。此外，课上还分享了一个“双塔高位连体”超限项目和一个消能减震项目的 ETABS 应用经验，以及常见工程问题的处理方法。课程中，学员们展现出极高的学习热情，纷纷与讲师们讨论各自在工程中遇到的问题。

性能化设计是颇具挑战性的课题，对工程师提出了更高的要求。本次培训班向大家提供了一次深入学习的机会。上海班（1月8-9日）、广州班（2月25-26日）和北京班（3月9-10日），在广大工程师的热情参与下成功举办，学员对讲师的授课方式和课程安排给予了积极肯定和有效建议。感谢所有反馈意见的朋友！在此分享部分学员的体会：



“安排紧凑，选取的实例可操作性强”

——殷工，施莱希工程

“授课认真，细致负责”

——李工，中冶华天

“很开心参加本次课程”

——王工，奥雅纳深圳分公司

“集中时间段系统学习，收获巨大，类似专题培训希望能多举办”

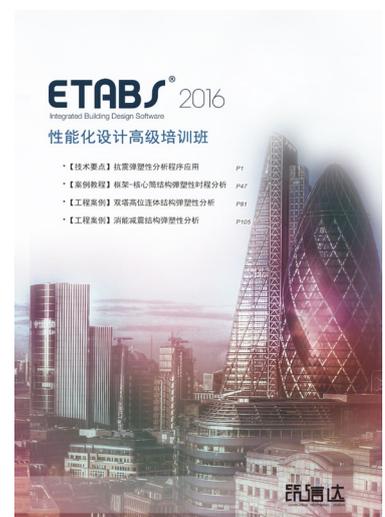
——陈工，中交机场院

“本次学习 ETABS 进步很大，但还需要自己更多的研究”

——吴工，广东省建筑设计院

“专业、细致、耐心”

——刘工，CCDI



欢迎大家继续关注我们下期在昆明（3月25-26日）的课程！



活动预告

Off line 达人分享日

2017年，达人分享日系列线下活动将秉承“从客户中来，到客户中去”的理念，以技术宣讲的形式，第一时间为您传递美国CSI结构/桥梁产品、荷兰PLAXIS岩土产品和筑信达自主开发产品的最新功能；以高级培训的模式，通过专题讲授和案例分享，结合学员实操，帮助您更好地将全球领先的工程软件应用于工程设计；并举办一次技术大会（CTC2017），为广大工程师提供交流、分享的平台。

[点击报名](#)

月份	活动	主题	城市
3月	高级培训	ETABS 性能化设计	昆明
3月	技术宣讲	SAP2000 v19/ETABS 2016/SAFE 2016/Perform 3D v6	天津
4月	高级培训	PLAXIS 基坑专题	北京
4月	高级培训	PLAXIS 基坑专题	广州
4月	高级培训	SAP2000 工程应用进阶	上海
4月	技术宣讲	SAP2000 v19/ETABS 2016/SAFE 2016/Perform 3D v6	沈阳
4月	技术宣讲	SAP2000 v19/ETABS 2016/SAFE 2016/Perform 3D v6	济南

On line 网络课堂

2017年，筑信达网络课堂新增周三PM8:00时段，课程细分为功能介绍、案例演示、专题讲解和应用技巧，帮助您灵活安排学习时间、针对性的提高软件应用技能。

[点击报名](#)

产品	类型	主题	讲师	日期	时间
SAFE	案例演示	SAFE 桩筏基础分析	曾亚	3月15日	PM8:00
PLAXIS	案例演示	风电基础在组合荷载作用下的响应分析	孙立超	3月22日	PM8:00
ETABS	应用技巧	ETABS 弹塑性几何建模的几个问题	魏旭豪	3月29日	PM8:00

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

优秀稿件作者将受邀参加

- “达人分享日”
- “CTC2017技术大会”



投稿请寄

support@cisec.cn
(请注明“技术通讯”投稿)

期待与你的相识!

你是我的菜

CSI BRIDGE

SAP 2000

ETABS

SAFE

PERFORM 3D

PLAXIS

CiSDesigner

CiSGTCAD

CiSModelCenter



在线支持
support.cisec.cn



网络课堂
www.cisec.cn



知识库
wiki.cisec.cn



视频教程
i.youku.com/bjcisec