



- 2017 筑信达技术资料汇编
- 《SAP2000 中文版技术指南及工程应用》新书抢先看
- Edward L. Wilson 教授访谈回忆录（3）



5周年特刊寄语

自筑信达创办《技术通讯》以来，已经面世了两期，每一期都得到我们忠实客户朋友们的好评以及业界的关注，我们共同分享与传播了有关软件的技术解决之道，加强了我们与用户之间沟通纽带，共同推进了工程应用的发展。

今年又恰逢筑信达成立五周年，我们希望通过“特刊”的形式来梳理五年来我们在技术发展和工程应用方面的心得体会，以更加饱满的热情投入到下一个五年发展中去，更好地为我们的用户服务。

限于篇幅，五周年特刊将分二期陆续推出。特刊集萃了下述几方面的内容：

一、筑信达五年来公开发表的论文。在坚持软件开发与技术服务为主线的同时，我们根据工程应用的某些热点问题，撰写了相关技术论文，从结构工程原理出发，结合规范的相关规定，梳理出该问题的实质和解决之道，并将相关成果及时纳入软件的实现，得到了广大工程师的积极反馈，使得相关问题的讨论得以更加深入。譬如有关 P-Delta 效应分析的文章，指出了规范要求的“刚重比”的实质就是低阶线性屈曲因子，不用区分结构形式（混凝土和钢结构要求是不同的），更与侧向力的来源（地震或风）无关；又比如框架承受的倾覆力矩计算问题，指出了规范采用的公式是存在前提假定的，即“框架与剪力墙之间的相互作用只有水平力，而无竖向力及弯矩”，而部分框支、有加强层、梁与墙相连、不能采用刚性隔板假定等情况下是不能够用规范给出的公式；再如，我们经过分析，提出了“等效剪重比”的上限解即为结构第一振型的地震影响系数——这可以非常直观地给我们的工程师去研判规范所给出的“最小剪重比”限值的合理性；另外一篇论述我国规范演化并参照欧美规范亦可让工程师和学者清晰看出我国现行规范在“附加偏心距和 P-delta 效应”中存在的不足；双向地震作用与柱的双偏压问题，在工程界存在较多的歧义，希望我们的工作能够对整个工程界厘清基本概念有帮助，因为宣称正确的东西不一定真的如此，用 Wilson 的话来说“得看假定是否符合基本的物理原理”。此外，我们与山东电力设计研究院合作开发了变电站构架设计系统 CISGTCAD，也有相关的论文呈现。

二、筑信达五年来自主开发的软件及工具介绍。我们一直秉承为工程实践服务的理念，投入了大量精力去开发适合中国国情的设计工具软件，结合强大的 SAP2000、ETABS、PLAXIS 等软件，提升工程设计的质量和效率。为了打通与其他软件之间的模型及数据交换，我们开发了 CiSModelCenter，实现了与 PKPM、YJK、MIDAS 等模型导入；从混凝土柱双偏压设计出发，我们开发了与 ETABS/SAP2000 接力的对梁、柱、剪力墙及异形柱的正截面极限承载

力配筋设计 CiSDesigner，其中的 PMM 包络面快速算法获得了国家发明专利（ZL201510141956.8）；我们还为 SAP2000 开发了 CiSAPPs 工具包，免费提供给我们的广大用户，目前已有十来个功能模块，并还在持续增加中；CiSGTCAD 则是我们花了大量精力专门打造的一个设计系统，从参数化快速建模到自动生成 SAP2000 模型，从节点连接设计到基础设计，从设计计算书自动生成到自动绘制全套钢结构施工图，从截面自动优化到欧美规范的实现，使得 CiSGTCAD 一面世，就得到了业界的高度评价与认可，在主管行业协会——中国电力规划设计协会——的软件评审中，评审专家一致认为 CiSGTCAD 处于国内领先地位。

三、筑信达五年来的第一本新书《SAP2000 中文版技术指南及工程应用》已交付出版社。这本书从筹备、组织编写到成稿经历了一年多的时间，凝结了筑信达人和 SAP2000 资深用户们的智慧与汗水。这本书继承、发展且超越了早年出版、广受欢迎的《SAP2000 中文版使用指南》：继承了完整的内容体系和一部分精华的内容，但对内容和结构进行了优化，将原来的 31 章扩展为现在的 45 章，并且所有章节都是重新编写，删简操作性的说明，强化技术要点的阐释，并融入 SAP2000 最新的发展成果，同时配合新书的知识点，录制了 50 多个视频穿插于不同章节，供读者在线观看。特别值得一提的是，新书增大了“工程应用”部分的比重，邀请十几位来自国内知名设计机构的专家、技术骨干，同时也是 SAP2000 的资深用户，来分享 SAP2000 应用于各种工程行业的实际案例、设计经验。在此，我们特意节选了新书“工程应用”各章的部分内容，连续两期刊登在我们的特刊中，向这些章节的作者们表达我们的敬意，同时，也为广大用户朋友们提前“剧透”新书的部分精彩内容。

四、筑信达在线支持系统已经注册了上千用户，每天收到大量各种各样的技术问题。我们在处理技术问题、研究产品应用的同时，也不断总结方法和经验，以技术短文的形式收录于筑信达知识库，或者通过网络课堂、教学视频、案例教程等方式呈现给更多用户。截止目前，筑信达已积累了四百余篇知识库短文、几十篇案例教程，通过优酷筑信达主页分享了上百条教学视频。我们将梳理这些技术资料，提炼精华、汇编索引，为用户们奉上软件应用的技术宝典。

五年是一小步，亦是一大步。筑信达在广大用户中和业界内已逐渐建立起了良好技术声誉，这种声誉来源于我们的每一次技术支持、每一次技术交流和每一次软件开发实践。我们一定将用户的肯定转化为我们工作的动力，继续在今后的工作中实现应用的价值：一旦实现了客户的价值，也就必将体现我们的价值。

李楚舒



主 办：北京筑信达工程咨询有限公司

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)

筑信达武汉分公司

地址：武汉市洪山区武珞路 717 号兆富国际 805 室

电话：027-8788 6890 / 8788 6891

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)

广州倍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

2017 筑信达技术资料汇编

岩土篇	1
基坑降水开挖的水力条件	6
真空固结模拟方法	9
动力分析时为什么输入的时间步与计算的时间步不同？	11
超静孔隙水压力的产生和影响	12
结构篇	14
ETABS 模型检查常见警告及处理	20
温度作用下的结构内力与变形	24
重叠面对象的处理	25
剪力墙连梁刚度折减	26
桥梁篇	27
如何通过导入 dxf 在 CSI Bridge 和 SAP2000 中定义任意复杂截面	29
多个参数按不同规律变化的变截面定义	31
基础变位作用的自动组合	33

新书抢先看

《SAP2000 中文版技术指南及工程应用》	
第 35 章 复杂空间结构参数化设计及 BIM 应用节选	34
第 36 章 火力发电厂结构物节选	39
第 37 章 海外项目的欧美规范应用节选	43
第 38 章 消能减震结构节选	46
第 39 章 土结相互作用实践节选	50
第 40 章 桥梁结构分析设计及 CSI Bridge 应用节选	56

经典连载

Edward L. Wilson 教授访谈回忆录 (3)	61
------------------------------	----

新版发布	81
------	----

活动报道	82
------	----

征稿启事	83
------	----



weibo.com/cisec



cisec68924600

PLAXIS

2017筑信达技术资料汇编

- 岩土篇

PLAXIS 作为基于有限元方法的岩土工程专业分析软件，广泛应用于基坑工程、隧道工程、边坡工程、基础工程等岩土问题的分析。这里梳理了筑信达关于 PLAXIS 应用的知识库文档、案例教程和视频资料，分专题呈现，便于工程师们查阅、学习。

1. 基坑开挖及地下水模拟

知识库

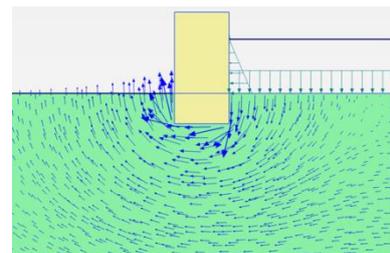
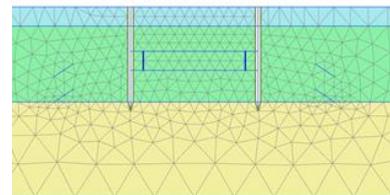
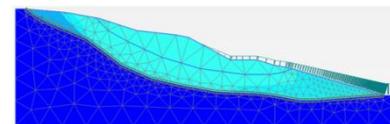
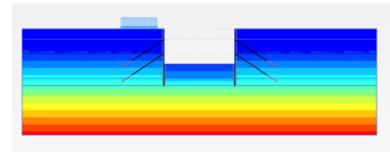
- [基坑降水开挖的水力条件](#)
- [井单元的应用方法](#)
- [锚杆单元及其应用](#)
- [局部土体水力条件的定义](#)
- [渗流分析中定义的水位线与渗流浸润线相同吗](#)
- [如何在不同的施工步定义不同的水位](#)
- [挡土结构两侧主被动区土压力如何输出](#)
- [地下结构的渗透性](#)
- [PLAXIS 渗流分析中结构体的透水性能定义方法](#)
- [锚杆预应力的施加](#)
- [板单元的材料重量参数如何计算](#)
- [板单元轴向刚度和抗弯刚度如何计算](#)

案例教程

- [基坑开挖对邻近隧道的影响分析](#)
- [复杂内支撑基坑开挖支护模拟](#)

教学视频

- [复合土钉支护基坑的稳定性分析](#)
- [地下水模拟和渗流分析](#)
- [锚拉式支挡结构有限元分析](#)
- [PLAXIS 3D 基坑工程有限元分析](#)
- [PLAXIS 2D 基坑工程有限元分析](#)

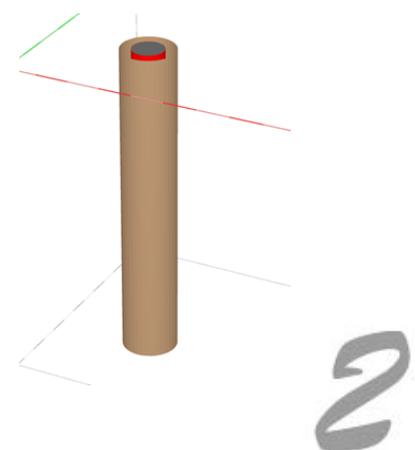


2. 隧道与桩基础模拟

知识库

- [三维隧道设计器之断面设计](#)
- [实体桩模拟方法](#)
- [三维隧道建模的两个问题](#)

案例教程



[双侧壁导坑法隧道施工过程分析](#)

教学视频

[PLAXIS 2D 隧道工程之盾构隧道施工模拟](#)

[PLAXIS 桩与桩筏基础模拟](#)

[PLAXIS 盾构隧道开挖对地表沉降的影响分析](#)

[PLAXIS 2D 桩和锚杆的模拟](#)

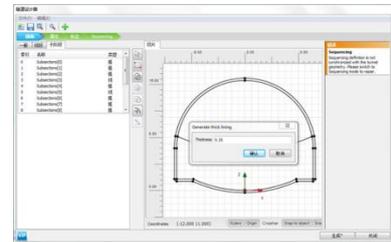
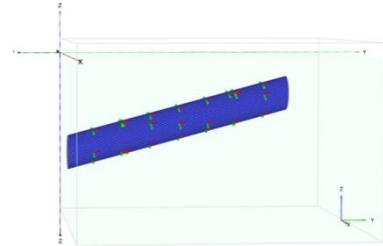
[PLAXIS 桩筏基础有限元分析](#)

[盾构法隧道开挖对桩基影响分析](#)

[PLAXIS 2D 排桩单元的原理及应用](#)

[PLAXIS 3D 隧道开挖有限元分析](#)

[PLAXIS 2D 盾构隧道开挖有限元分析](#)



3. 边坡稳定性与软土地基处理

知识库

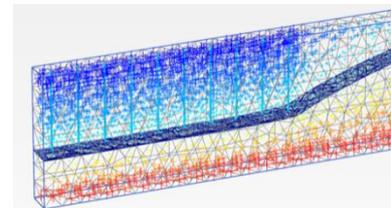
[真空固结模拟方法](#)

[为什么安全计算得到很大的位移](#)

[强化的强度折减选项的应用](#)

[固结分析中可以使用哪些加载方式](#)

[关于忽略不排水行为选项的使用](#)



案例教程

[真空预压法加固软土地基分析](#)

[公路边坡支护与稳定性分析](#)

教学视频

[PLAXIS 道路拓宽工程加筋处治模拟分析](#)

[PLAXIS 真空预压法加固软土地基分析](#)

[PLAXIS 软土地基处理分析](#)

[PLAXIS 考虑降雨条件下边坡稳定性分析](#)

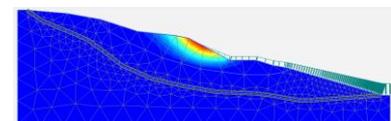
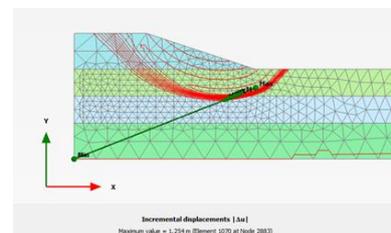
[PLAXIS 边坡工程与稳定性分析](#)

[PLAXIS 软土地基上的路基施工](#)

[水位变化对大坝的影响分析](#)

[PLAXIS 2D 边坡支护工程有限元分析专题](#)

[PLAXIS 2D 填方工程的固结和稳定性分析专题](#)



4. 动力与抗震分析

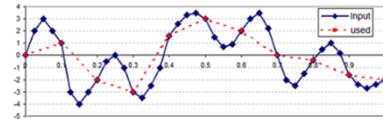


知识库

[动力分析时为什么输入的时间步与计算的时间步不同](#)

[拟静力分析的实现](#)

[计算过程中硬盘空间不足的问题](#)



案例教程

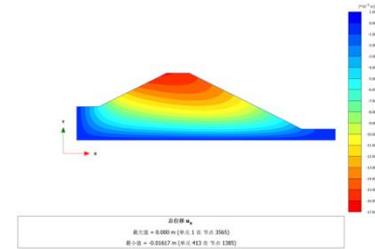
[地铁车站抗震时程分析](#)



教学视频

[PLAXIS 动力分析](#)

[PLAXIS 自由振动和地震作用下建筑物响应](#)



5. 本构模型与基本理论



知识库

[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](#)

[关于初始应力计算](#)

[PLAXIS 中结构-土相互作用的模拟](#)

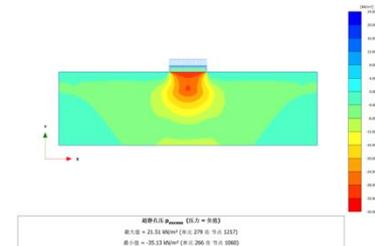
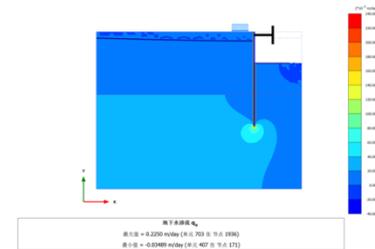
[关于摩尔-库伦本构模型的刚度参数取值问题](#)

[材料的排水类型与渗透性](#)

[界面单元的材料属性](#)

[桩单元与土体的接触关系及承载力定义](#)

[荷载（或对象自重）施加与时间的关系](#)



6. 建模技术与施工步模拟



知识库

[对称模型的边界条件](#)

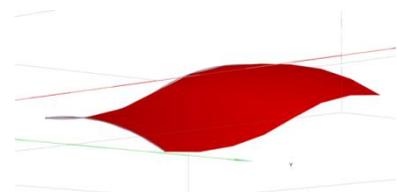
[对象材料属性的修改](#)

[不规则形状几何面对像的建模技巧](#)

[如何在 PLAXIS 3D 中创建复杂空间曲面](#)

[静荷载与动荷载的定义方法](#)

[多个模型文件的自动计算和保存](#)



[点与线对象导入 PLAXIS 3D 模型的方法](#)

[AutoCAD 三维实体导入 PLAXIS 3D](#)

[如何将 AutoCAD 中创建的几何图形导入到 PLAXIS 2D](#)

[在 PLAXIS 中，如何利用命令行快速生成结构单元](#)

[材料属性数据的共享](#)

[PLAXIS 中的边界条件定义方法](#)

[如何在 3D 中自定义板与板之间的连接方式](#)

[结构构件的连接关系--2D 板壳类构件](#)

[2D 多边形工具的应用](#)

[如何定义锚杆自由段和锚固段](#)

 **教学视频**

[PLAXIS 分步施工的基本概念](#)

[PLAXIS 网格划分设置](#)

[PLAXIS 2D 几何建模的基本方法](#)

[PLAXIS 2D AE 全新分析流程](#)

7. 结果分析与处理

 **知识库**

[PLAXIS 3D 中的局部坐标轴及其应用](#)

[如何输出实体单元的结构内力](#)

[选择节点（应力点）绘制相关曲线的问题](#)

[三维实体单元结构的内力输出方法](#)

[如何选择结构单元的节点\(应力点\)绘制曲线](#)

[中间计算结果的输出方法](#)

[如何理解后处理中不同孔隙水压力的概念](#)

[如何查看单个施工步的变形结果](#)

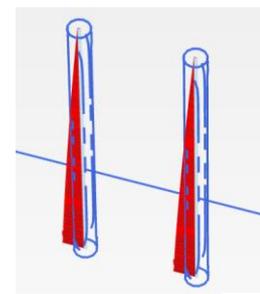
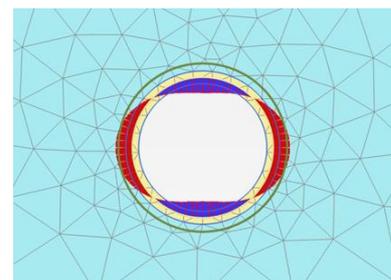
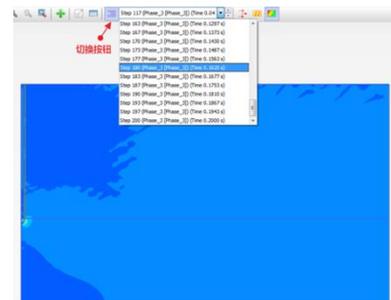
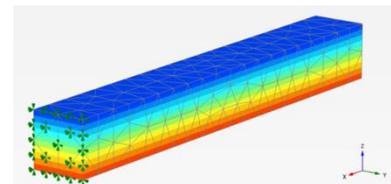
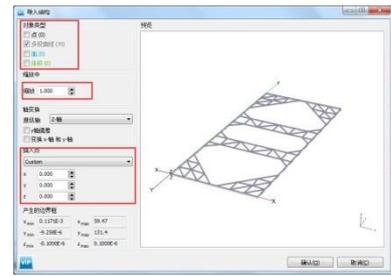
[结构间距与内力计算的关系](#)

[在不同情况下，该如何使用重置位移为零选项呢](#)

[PLAXIS 2D 界面单元正负与局部坐标轴的关系](#)

 **教学视频**

[PLAXIS 后处理常用菜单工具](#)



基坑降水开挖的水力条件

编写者：章延平

问题描述：

一般在高水位地区，都需要在基坑开挖过程中同时降低坑内水位，在分析基坑降水问题的时候，如何对地下水的这种变化进行模拟和计算？

软件版本：

PLAXIS 2D AE; PLAXIS 2D 2015; PLAXIS 2D 2016; PLAXIS 3D 2013; PLAXIS 3D AE; PLAXIS 3D 2016

解答：

除了一些较浅基坑的明排降水之外，大部分深基坑一般采用截水帷幕进行坑内疏干降水。对于挡土结构外侧的截水帷幕，一般不作为受力结构参与分析，我们可以利用界面单元的透水性来实现其截水性能，可参考：[PLAXIS 渗流分析中结构体的透水性定义方法](#)。

1. 封底式截水帷幕

对于封底式截水帷幕，我们一般认为坑内疏干降水对抗外水位的影响很小，因此可以直接定义基坑内外水位差，采用静水压力计算方法（孔压计算类型选择“潜水位”），得到挡土结构两侧的孔压分布。具体来讲，封底式帷幕底部进入弱透水层（相对隔水层），隔断坑内外水力联系，此时坑底含水层内孔压按照坑内低水位计算，而下卧弱透水层内孔压则可按线性插值计算。需要注意的是，此时已开挖土层必须“疏干”，即坑内为“干”开挖。

不同土层内孔压分布的计算，主要通过PLAXIS中土类组的孔压定义来实现，即选择坑底含水层对应的土层，在选择浏览器中修改其水力条件，比如将默认的“全局水位”（指地层初始的地下水位，与坑外水位一致）修改为“水头”，其水头值即对应坑内低水位位置（比如坑底高程，或者坑底以下 0.5m 高程），如图 1 所示。



图 1 坑底含水层的水力条件设置

同样的，下卧弱透水层、已开挖土层的水力条件则可分别修改为“内插”和“干”。坑内各土层的水力条件设置，如图 2 所示。

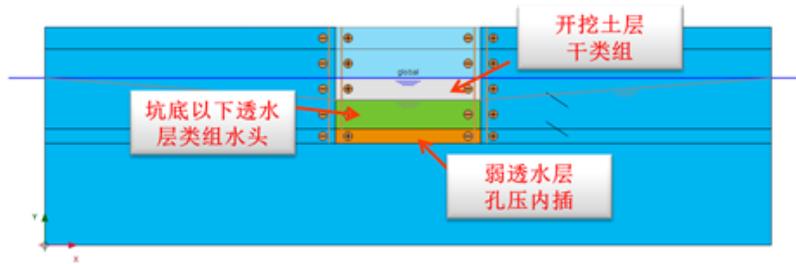


图2 封底式帷幕基坑降水孔压定义方法

此时，要注意在有限元计算中孔压分布的连续性及平衡性，区别于传统设计方法中挡土结构两侧水压力（荷载）各自计算的方式。通过上述方法得到的地层内孔压分布，如图2所示。

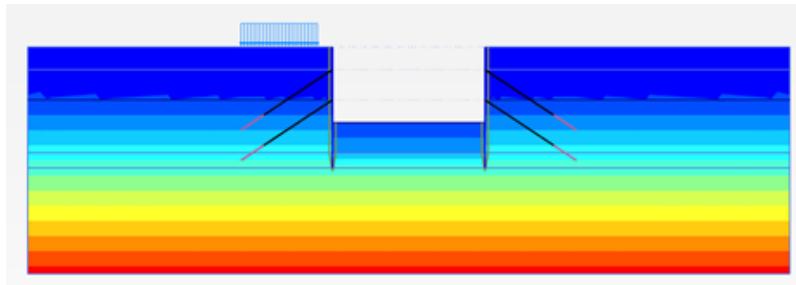


图3 封底式帷幕基坑降水孔压计算结果

2. 悬挂式截水帷幕

对于悬挂式截水帷幕，其底部并未进入相对隔水层，基坑内外的含水层存在水力联系，依然需要通过坑内疏干降水来降低坑内水位，此时一般需要计算渗流场（孔压计算类型选择“稳态地下水渗流”）。渗流计算时，孔压的计算方法不同于静水压力方法，需要首先确定渗流场，再根据渗流场确定孔压的分布。渗流场的确定主要与土层渗透性及模型水力边界条件相关，而与土层类组的孔压定义无关，可参考：[材料的排水类型与渗透性](#)。

基坑内外水位差的存在，也就是基坑降水的水力边界条件。在2D模型中，我们可以利用水位线来直接定义该水力边界条件，如图4所示。但要注意此时所定义的“水位线”与实际地下水渗流浸润线的区别，可参考：[渗流分析中定义的水位线与渗流浸润线相同吗](#)。



图4 使用水位线定义基坑降水的水力边界条件

在3D模型中可以利用“疏干”已开挖土类组、或者在坑内定义面渗流边界等方式得到同样的对应坑内外水位差的水力边界条件。在此基础之上，我们可以得到地下水经过帷幕底部绕流的渗流场分布，如图5所示。

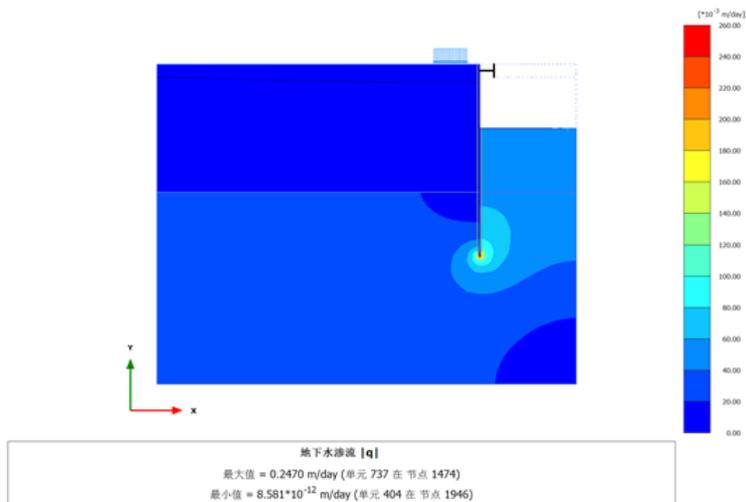


图5 地下水通过悬挂式帷幕底部的绕流

3. 基坑降水对地层位移的影响

在需要评估由于基坑降水引起地层位移的情况下，我们要考虑土层“内部”的降水问题，此时可以利用 PLAXIS 中的“井”和“排水”工具对坑底地下水水位进行“预降水”。井单元作为模型内部的一种水力边界条件，我们需要指定其抽水流量及最大降水深度，如图 6 所示。

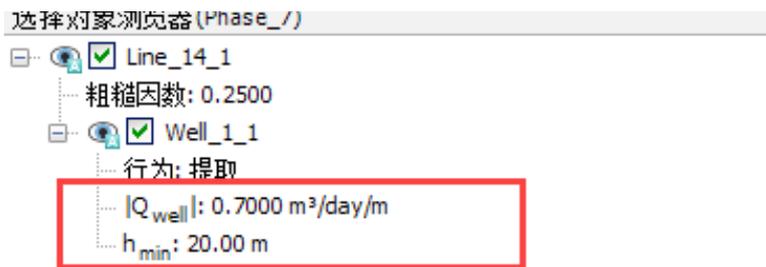


图6 井单元参数

通过抽水井的渗流计算，我们便可得到基坑预降水对地层位移的影响，如图 7 所示。

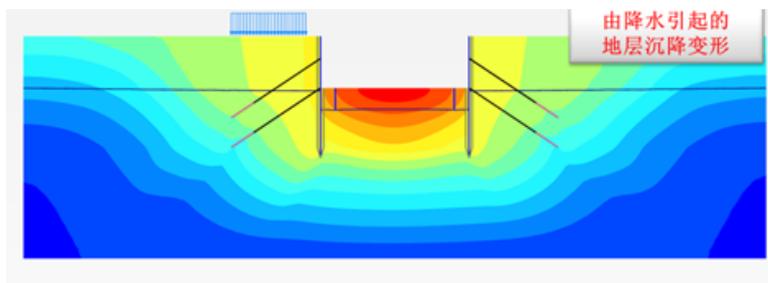


图7 抽水井预降水对地层位移的影响

· 关键词列表

J	基坑 . 降水
K	开挖
L	类组孔压
S	水力条件 . 渗流
W	帷幕



真空固结模拟方法

编写者：章延平

问题描述：

在饱和软土地基（特别是围海工程中的吹填土地基）的处理当中，经常会用到预压（固结）法，如堆载预压，真空预压，以及二者的联合预压。那么在进行真空预压软土地基处理的分析时，如何模拟膜下真空压力（真空度）的作用？

软件版本：

PLAXIS 2D 2015； PLAXIS 2D 2016； PLAXIS 3D AE

解答：

采用真空预压法进行软土地基处理时，需要模拟膜下真空压力（或真空度），来计算分析软土的固结变形情况。真空预压工程中，一般要设置排水竖井（塑料排水带或砂井）来传递膜下的抽真空度。在 PLAXIS 当中，我们使用排水（drain）水力条件来模拟排水竖井。

排水（drain）水力条件代表模型内部的“线”或者“面”，其所在位置的（超）孔压将会降低至指定值。排水水力条件的相关参数如图 1 所示。



图 1 排水水力条件的参数

排水水力条件的性质分为两种：“常规”和“真空”。当设为“常规”时，表示位于其上的所有节点孔压均要降低至由指定水头值 h 所确定的孔压值，即当此处孔压低于水头值 h 确定的孔压值时不再受到该水力条件的影响。当设为“真空”时，指定水头值 h 所对应的即是真空固结的“真空度”。如图 2 所示。

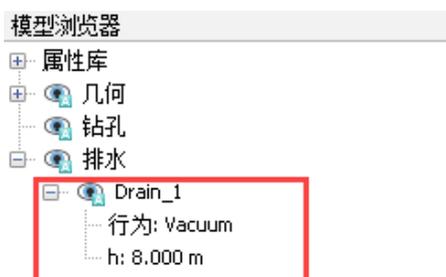


图 2 真空度定义

在模型中的线排水（即排水竖井）中定义真空度之后，代表其中的水头低于周围土层，形成正孔压（吸力），然后将土中孔隙水（和空气）排出，在其周围形成“真空区”，如图 3 所示。

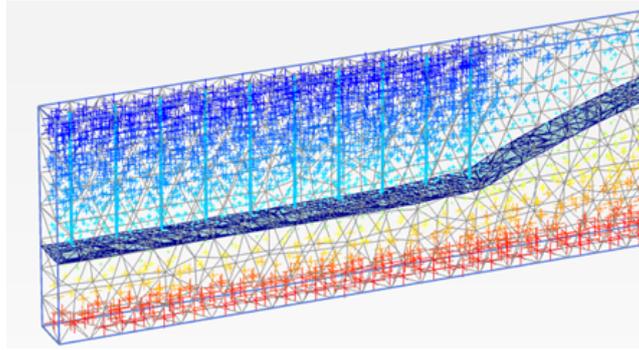


图3 真空线排水形成的正孔压区

在使用“真空”排水水利条件进行真空预压模拟时，需要注意以下问题：

1. 孔压计算类型必须选择为地下水渗流，或者流固耦合计算。
2. 所有土层材料的渗透系数均不能为零。
3. 定义合理的模型水力边界条件。
4. 不勾选“忽略吸力”选项（变形控制参数），因为真空区孔压均为正值（即吸力）。该选项一般默认为勾选状态，见图4。



图4 忽略吸力选项

· 关键词列表

D	地基处理
P	排水竖井
Z	真空预压 . 真空固结 . 真空度 . 真空压力

动力分析时为什么输入的时间步与计算的时间步不同？

编写者：章延平

问题描述：

PLAXIS 进行动力计算时，发现输入的时程信号（如加速度时程等）时间步与计算完成后输出的时程信号时间步不能匹配，计算是否正确呢？

解答：

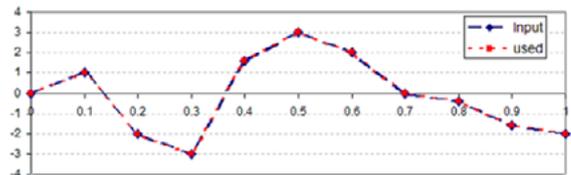
PLAXIS 动力计算中的时间步 δt 为常量，由程序按照临界时间步自动计算。程序计算的动力时间步可由以下几个参数来确定：动力分析的时间间隔 Δt ，附加计算步数 m 和动力子步数 n ，其计算公式为：

$$\delta t = \frac{\Delta t}{m \cdot n}$$

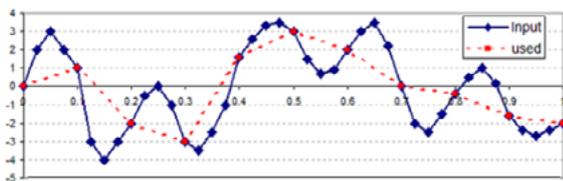
可见，附加计算步数与动力子步数的乘积确定了时间间隔的划分步数。因此，在进行动力计算时，尽量使动力计算时间步 δt 与输入的动力信号时间步相匹配，这取决于上述三个参数的恰当组合。

在确定动力计算的时间间隔 Δt 之后，可以通过调整 m 和 n 值来调整计算动力时间步 δt 。附加计算步数 m 决定了结果输出中可显示的计算步数。对于给定的 m 值，PLAXIS 会根据模型的有限元网格情况和动力计算的临界时间步 $\delta t_{critical}$ 自动估算动力子步数 n 值。在某些特殊情况下，程序自动计算的 n 值会偏大，如模型中波速差异较大或模型中包含尺寸很小的单元。此时，可以通过修改动力子步数来调整计算所使用的 δt 。

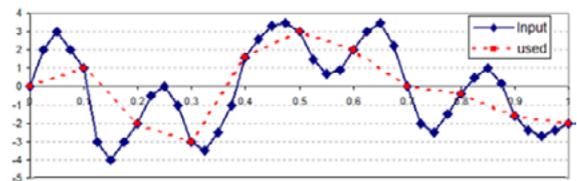
如果程序计算的动力时间步 δt 与用户输入的动力信号的时间步不同，PLAXIS 会根据输入的时程信号按照 δt 进行插值计算，因此计算输出的时程信号与输入信号之间会有一定的差异（见下图）。



输入信号时间步与计算时间步均为 0.1s（完全匹配）



输入信号时间步为 0.025s，计算时间步为 0.1s



输入信号时间步为 0.1s，计算时间步为 0.15s

· 关键词列表

D	动力计算 . 动力子步
F	附加计算步
P	PLAXIS 3D . PLAXIS 2D
S	时程信号 . 时间步

超静孔隙水压力的产生和影响

编写者：章延平

问题描述：

在计算模型的分析结果中，超静孔隙水压力有时为正值、有时为负值，其对变形和应力的影响如何评估？

解答：

根据有效应力原理，土层中的应力分别由土骨架和孔隙水（气）来分担，因此就有有效应力（土骨架承担部分）和孔隙压力（孔隙水和气承担部分）之分。在 PLAXIS 的分析结果中，可以输出不同的孔隙水压力，可参考：[如何理解后处理中不同孔隙水压力的概念](#)。

区别于静孔隙水压力（由土层对应的水头确定），超静孔隙水压力主要在变形分析中产生，即应力的改变导致土骨架与孔隙水对总应力的承担比例发生改变。超静孔压产生的条件是土层的不排水特性和低渗透性（主要对粘性土来讲），即孔隙水短期无法排出、而其压缩刚度很高（一般认为具有不可压缩性），应力增量主要体现在超静孔压的变化上面，可参考：[材料的排水类型与渗透性](#)。

模型中应力变化主要来自加 / 卸载和固结，包括水力条件的变化，可以看做广义的加 / 卸载过程（土体有效自重的变化）。超静孔压的变化（对应到有效应力的变化）直接影响到土体强度和变形，可参考：[摩尔-库伦本构模型的强度参数与排水类型](#)。

比如，黏土地基上的基础加载问题，如果按照短期加载考虑，黏土地基为不排水加载，将在基础下方的地基中产生超静孔压。随着荷载增加，地基中剪应力逐步增大，虽然超静孔压不断增长，但有效应力变化很小（塑性计算），相对于排水加载（超静孔压为零，有效应力增大）的情况，地基承载力降低。

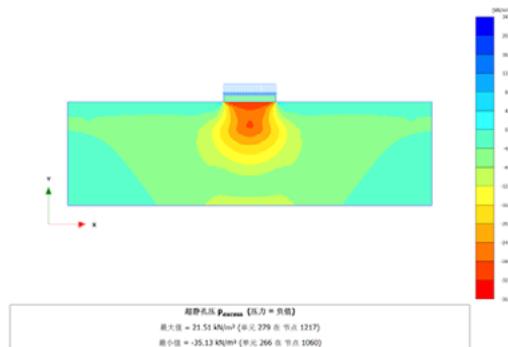


图 1 基础加载时黏土地基中的超静孔压

又如，黏土地基中的基坑开挖问题，考虑黏土的低渗透性和短期施工，黏土地基为不排水开挖，将在开挖（卸载）区域——主要是坑底回弹土层中产生超静孔压。可以看到，不同于基础加载问题，坑底所产生的超静孔压为正值，即孔隙拉力。由于坑底的开挖卸载，土体产生正的体积应变（呈现膨胀状态），孔隙比有增大趋势，因此形成了孔隙拉应力。同样，根据有效应力原理，此时的有效应力为总应力与超静孔压（拉应力）之和，即有效应力不断增长（相当于对坑底的反向压载），对坑底的回弹产生约束。

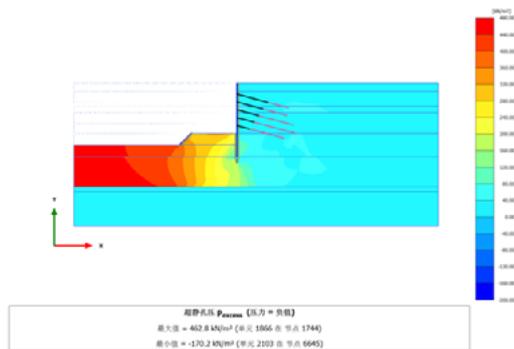


图 2 基坑开挖时黏土地基中的超静孔压

上述两类问题均为塑性计算的情况，即不考虑孔隙水压力随时间的变化，此时超静孔压的产生与变化主要取决于所定义的土层不排水特性。而在考虑孔隙水压力随时间变化的情况下，如固结计算，超静孔压的产生和发展主要取决于所定义的土层渗透性，与土层不排水特性无关。比如，在软黏土地基上的堤坝填筑施工问题中，要考虑地基土强度问题（即地基承载力），此时超静孔压的变化与土层渗透性和时间相关，即孔隙水的流动性。一方面，在加载过程中，由于土层的渗透性，在较短时间内孔隙水来不及排出，超静孔压逐渐升高；另一方面，随着时间的增长，孔隙水发生流动，超静孔压逐渐降低。伴随上述过程的是有效应力的相应变化，从而影响土层强度的变化和变形的发展。因此，在地基固结过程中，地基承载力不断提高，地基变形趋于稳定。

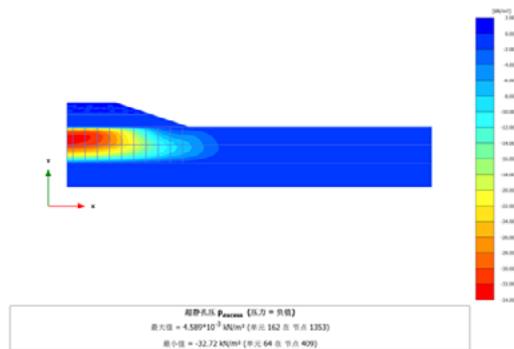


图 3 堤坝填筑时黏土地基中的超静孔压

· 关键词列表

B	不排水
C	超静孔隙水压力
D	地基承载力
G	固结
J	加载
K	开挖
X	卸载

相关文章：

- [如何理解后处理中不同孔隙水压力的概念？](#)
- [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](#)
- [关于忽略不排水行为选项的使用](#)
- [如何检查不排水 A 条件下计算结果中的剪应力？](#)



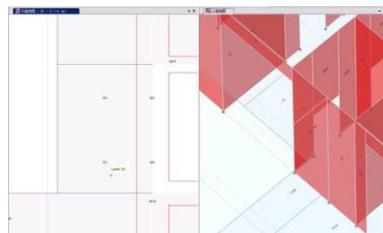
2017 筑信达技术资料汇编

- 结构篇

筑信达结构产品包括 SAP2000、ETABS、SAFE、Perform3D、以及模型转换工具 CiSModelCenter、SAP2000 工具箱 CiSApps、截面设计工具 CiSDesigner 等等。由于产品较多、应用面较广，基于日常技术支持的总结，筑信达官网上发布、积累了大量的技术资料。这里将精选部分有代表性的知识库文档，并汇总教学录像和案例教程的索引，以便工程师朋友们查阅、学习。

ETABS 应用常见问题

- [ETABS 模型检查常见警告及处理](#)
- [ETABS 中各种位移、位移角间的相互关系](#)
- [面荷载丢失的原因](#)
- [模型转换后的质量检查](#)
- [数值进度丢失和病态](#)
- [节点隔板 vs 壳隔板](#)
- [刚性隔板 vs 准刚性隔板](#)



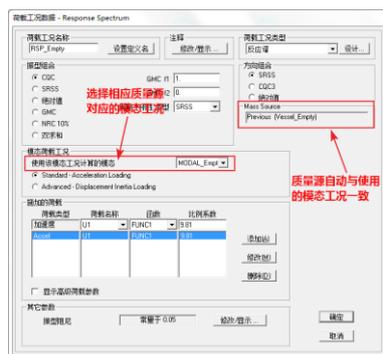
SAP2000 概念辨析

- [温度作用下的结构内力与变形](#)
- [节点约束：Body vs Weld](#)
- [模拟刚性行为的刚度系数取值](#)
- [同一模型中不同质量源的地震分析](#)
- [面弹簧的位置和受拉方向](#)
- [壳单元的内力输出方向](#)
- [面荷载：均布荷载 vs 均匀导荷至框架](#)
- [反应谱分析中的地震作用](#)
- [隔板刚心的计算](#)
- [重力荷载 vs 自重荷载](#)
- [自动边约束与自动合并容差](#)
- [虚功图的原理和意义](#)



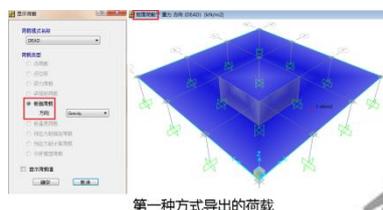
楼板/筏板设计常见问题

- [重叠面对象的处理](#)
- [抗冲切设计细节结果解读](#)
- [抗冲切配筋设计](#)
- [SAFE 中的设计板带](#)
- [地基土对筏板基础约束的施加](#)
- [ETABS 导出 SAFE 的三种方式](#)



绘制截面切割应用系列

- [切割面位置](#)



第一种方式导出的荷载

切割范围

连梁处理系列

[连梁与墙肢的连接：ETABS vs. SAP2000](#)

[连梁刚度折减](#)

[连梁刚度折减的计算模型](#)

[连梁刚度折减&P-Delta 效应](#)

非线性分析相关问题

[塑性铰覆盖项](#)

[非线性分析的分析阶段时间报告](#)

[塑性铰的定义](#)

[钢结构弯矩铰的屈服力矩计算方法](#)

[钢构件轴力铰的屈服力计算方法](#)

[监测位移 vs 共轭位移](#)

[滞回曲线](#)

[滞回曲线的应用](#)

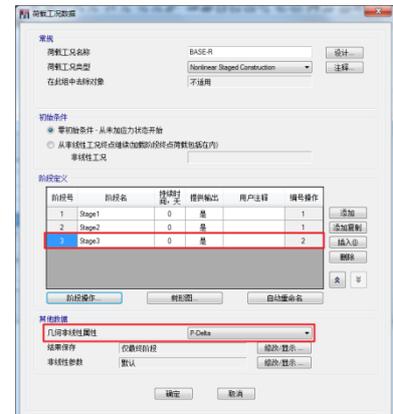
[非线性剪力墙分层壳模型](#)

[非线性时程分析初始条件的定义](#)

[几何非线性的切线刚度](#)

[大位移效应的算例演示](#)

[SAP2000 to PERFORM-3D 的转换规则](#)



结构分析设计常见问题

[楼板开洞及板上线荷载的施加](#)

[包含反应谱工况的设计组合](#)

[如何依据配筋输出结果进行配筋](#)

[钢框架设计的总应力比与各项应力比之和为何不相等？](#)

[钢框架设计中杆件设计类型解析](#)

[钢材的强度设计值](#)

[钢构件铰接及半刚性连接模拟](#)

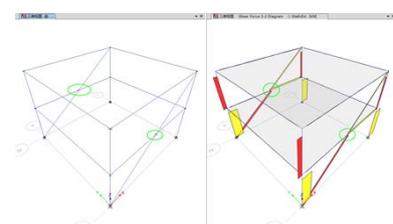
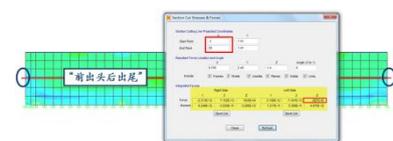
[剪力墙设计细节中墙肢左右的区分](#)

[如何避免屋面荷载导荷至水平支撑](#)

[越层构件处理对 ETABS 楼层力输出的影响](#)

[转换模型的位移表格显示异常](#)

[框架对象的自动端部偏移](#)





[梁/板的默认插入点](#)

[~StaticXX 工况的含义](#)

[柱、墙与实体基础的连接处理](#)

FNA 方法及减隔震应用

[如何判断 RITZ 模态数量是否足够](#)

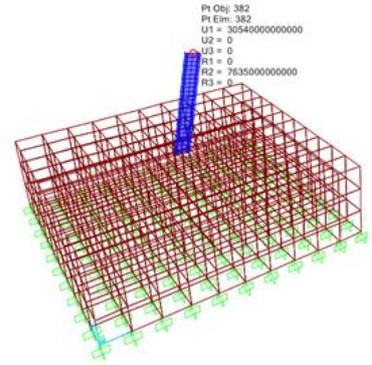
[里兹向量法与非节点荷载](#)

[剪切变形与无质量自由度](#)

[质量源定义与阻尼器布置](#)

[如何在 FNA 法中合理考虑 P-Delta 效应](#)

[进行 FNA 分析时，选择何种模态分析方法？](#)



阶段施工

[阶段施工分析与变支座约束（一）](#)

[阶段施工分析与变支座约束（二）](#)

[阶段施工分析与变支座约束（三）](#)



教学视频

快速入门案例

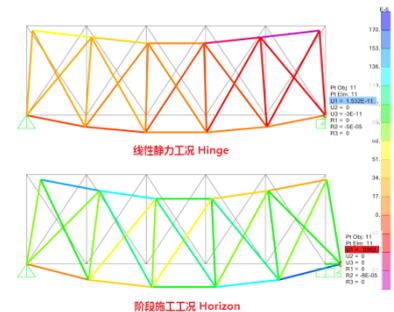
[混凝土框架-剪力墙结构分析及设计流程](#)

[钢框架结构分析及设计](#)

[钢筋混凝土楼板设计流程](#)

[桩筏基础分析](#)

[预应力楼板设计](#)



基本操作系列及原理

[SAP2000 基本操作 01：图形用户界面](#)

[SAP2000 基本操作 02：坐标系与轴网](#)

[SAP2000 基本操作 03：材料属性](#)

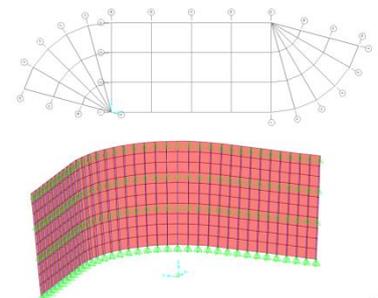
[SAP2000 基本操作 04：框架截面](#)

[ETABS 基本操作 01：几何模型建立](#)

[ETABS 基本操作 02：荷载施加](#)

[ETABS 基本操作 03：地震荷载及运行分析](#)

[ETABS 基本操作 04：分析结果及结构大指标查看](#)



使用技巧及原理

[SAP2000 几何建模技巧](#)

[几何建模常见问题](#)

[节点约束的灵活运用](#)

[复杂面荷载施加和变厚度壳建模](#)

[结构构件模拟及对内力分析的影响](#)

[复杂楼板建模要点及实现](#)

[结构构件模拟及对内力分析的影响](#)

[ETABS 和 SAP2000 对楼板处理的对比](#)

[建筑结构楼面荷载及风荷载](#)

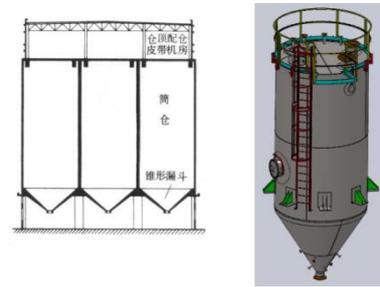
[建筑结构地震荷载](#)

[节点荷载的方向及单元内力的方向](#)

[筒仓结构的贮料荷载](#)

[截面切割的应用](#)

[结构质量相关问题](#)



分析专题

[模态分析](#)

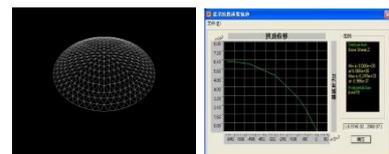
[稳定性分析-特征值屈曲分析](#)

[网壳结构稳定性分析](#)

[施工模拟分析](#)

[稳定性分析](#)

[P-Delta 效应在程序中的实现](#)



设计相关

[结构设计大指标查看及程序实现原理](#)

[混凝土框架设计流程及结果解读](#)

[混凝土框架设计参数详解](#)

[钢筋混凝土柱设计/校核](#)

[设计结果查看与解读](#)

[钢框架设计流程（一）](#)

[钢框架设计流程（二）](#)

[楼板、筏板、独立基础的冲切校核及设计](#)



工程应用

[箱涵结构在 SAP2000 中的应用](#)

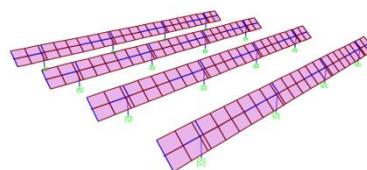
[高桩码头在 SAP2000 中的应用](#)

[SAP2000 在筒仓类结构中的应用](#)

[SAP2000 在玻璃幕墙工程中的应用](#)

[钢货架在 SAP2000 中的应用](#)

[光伏支架在 SAP2000 中的应用](#)



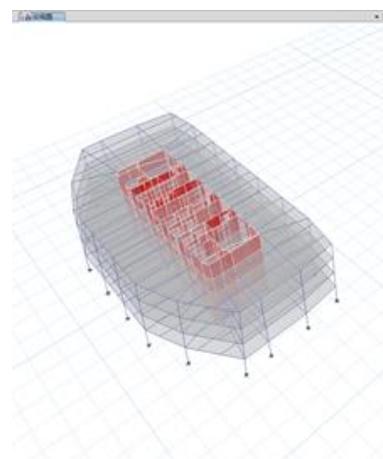
减隔震相关

[隔震设计](#)

[减震结构小震时程分析](#)

[减震结构大震时程分析](#)

[消能减震设计-粘滞阻尼器](#)



弹塑性相关问题

[默认塑性铰参数解读](#)

[钢框架弹塑性分析](#)

[框架-核心筒结构弹塑性分析](#)

[弹塑性几何建模的几个问题](#)

[ETABS 和 PERFORM-3D 弹塑性设置对比](#)



案例教程

快速入门案例

混凝土框架-剪力墙结构

钢结构

钢筋混凝土楼板

后张法预应力混凝土楼板

隔震分析

弹塑性分析

[钢框架 PUSHOVER 分析](#)

[框架-核心筒结构弹塑性时程分析](#)

工程应用

钢框架、

体育场看台、网壳

筒仓、幕墙、环保除尘设备

框架式汽轮机基础、箱涵结构

技术报告

CSI 分析参考手册

中国规范技术报告（荷载、混凝土框架设计、钢框架设计、混凝土剪力墙设计）

CiSDesigner 技术说明书

ETABS 模型检查常见警告及处理

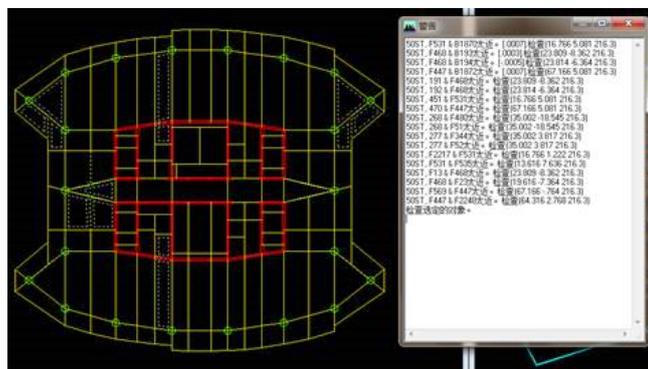
编写者：王龙

问题描述：

模型分析之前，一般要运行模型检查命令，来检查模型中是否存在对象重叠、相交或单元剖分、荷载传递等潜在问题。如果模型存在上述问题，程序会给出相应警告（见下图）。

在运行分析时，有时程序也会给出一些警告（详见案例3）。

在这些警告的含义是什么？如何根据这些警告来修改模型？



解答：

1. 总体来说，模型检查给出的针对对象几何信息的警告大致可分为四类：1) ***&B*** 太近；2) ***&F*** 太近；3) F***&F*** 太近；3) F***&B*** 太近；其中B代表梁；F代表楼板；*** 代表标签号，仅有 * 代表节点。

有时程序会给出类似如下的警告：Check meshing At F1 area F208(1.59% Increment)，意思为：剖分检查发现 F1 层 F208 号楼板出现 1.59% 的重叠。

2. 运行分析过程中给出的警告大致有以下几类：

- 1) 节点精度丢失。
- 2) 约束精度丢失。

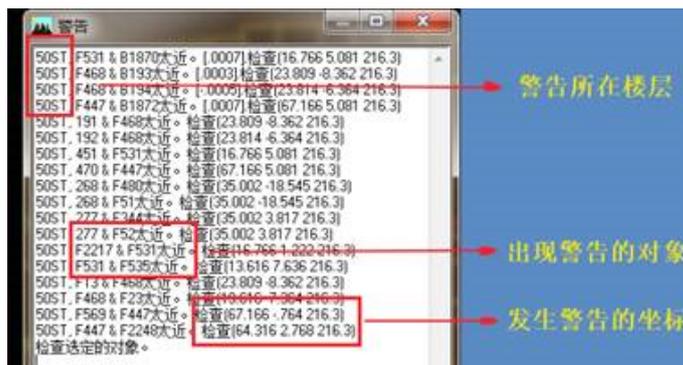
*** WARNING ***
NUMERICAL PROBLEMS ENCOUNTERED DURING EQUATION SOLUTION:

TYPE	LABEL DOF	X-COORD	Y-COORD	Z-COORD	PROBLEM	VALUE
Joint	~83706 UY	34.000019	11.500038	358.850000	Lost accuracy	6.0 digits
Joint	~23495 UX	33.998778	11.501279	358.850000	Lost accuracy	6.6 digits
Joint	~23495 UY	33.998778	11.501279	358.850000	Lost accuracy	6.8 digits

*** WARNING ***
NUMERICAL PROBLEMS ENCOUNTERED DURING EQUATION SOLUTION:

TYPE	LABEL DOF	X-COORD	Y-COORD	Z-COORD	PROBLEM	VALUE
Cnstr	7 U1	21.164767	24.465044	0.150000	Lost accuracy	6.3 digits
Cnstr	7 U2	21.164767	24.465044	0.150000	Lost accuracy	6.2 digits
Cnstr	7 R3	21.164767	24.465044	0.150000	Lost accuracy	6.2 digits

3. 模型检警告的其他含义见下图：



4. 不同的模型、不同的警告信息，需要采取的调整策略也会有所不同。下面通过三个案例，说明一下调整模型过程中的常用的方法和命令。

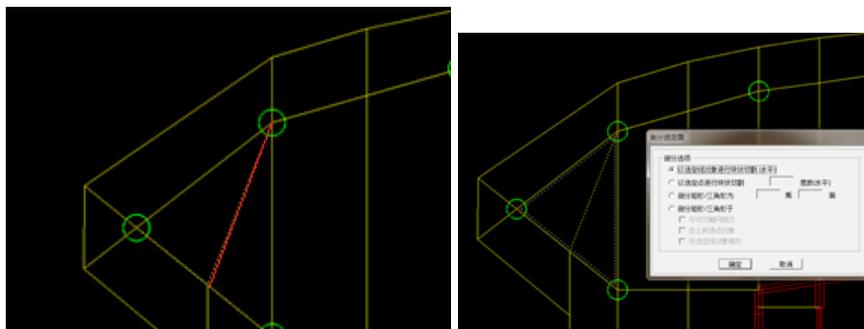
案例 1：运行模型检查后，程序给出如下图所示的警告



由于程序一般会就同一位置给出多条警告，所以建议通过警告中提示的坐标来定位产生警告的位置。坐标 (16.766, 5.081, 216.3) 是图中 451 号节点。由于 451 号节点在面 F531 的一条边上，但该节点不是 F531 的节点，导致了上图中的第二条警告；基于同样的原因，程序还报出了第一、第三条警告。

修改的方法有很多，比如可以先**删除**楼板对象 F531，然后再将其重新**绘制**一次。再次绘制该对象时，除包含原有节点外，还要包含 451 号节点。

较为便捷的一种修改方法为：1) 利用已有节点**绘制**一条辅助线（下图中红线）；2) 利用**分割面 > 以选的线对象进行块状分割**命令，将面对象进行适当分割；3) **删除**辅助线。与第一种方法相比，第二种方法可以免去施加面荷载、指定隔板、自动边束缚等可能需要的操作。



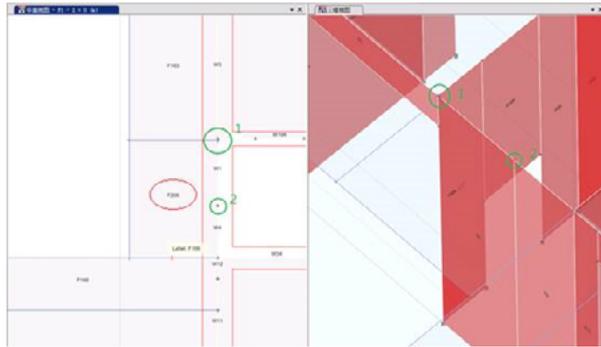
案例 2：模型检查后，程序给出如下所示的警告：



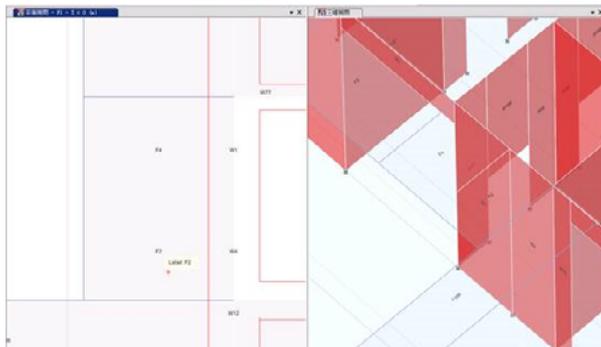
警告的内容为：Check meshing At F1 area F208(1.59% Increment)。

具体含义是：检查网格剖分过程中，发现 F1 楼层中的面对象 F208 存在 1.95% 的重叠。其中，F1 为出现警告的楼层，F208 为出现警告的对象编号，括号里的内容具体说明发生警告的原因。

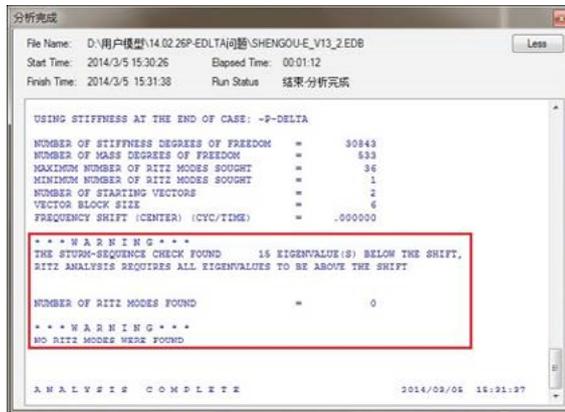
首先根据警告信息确定出现警告的位置，并通过**窗口缩放**查找模型存在的问题。从下面的截图可以发现模型在此处存在两个问题：1) 在楼板 F208 的右上角（下图所示 1 号位置）有两个相邻很近的节点，导致在绘制楼板时出现局部重叠；2) 在下图所示的 2 号位置，F208 右边上存在一个节点，但该节点不属于 F208。



采取如下修改方法：1) 在 1 号点位置利用**带属性复制功能**将梁平移到与下部剪力墙平行的位置，并用重定形命令修改梁两侧楼板的节点位置，使得梁、楼板、剪力墙三者的节点完全对应。2) 在 2 号点位置，利用分割壳命令，将 F208 切割为两块楼板。（修改后的模型见下图）



案例 3：利用高级求解器求解时，模态工况不能正常运行，程序给出如下所示的警告：



为得到更为详细的警告信息，需要在标准求解器下再次运行分析。改变求解器的路径为：分析 > 高级 SAPPFire 选项，选择标准求解器。ETABS2013 具有三个求解器：标准求解器、高级求解器、多线程求解器。三者的求解机制不同，求解效率按照排列次序逐渐提高；标准求解器会给出更为具体的警告和报错信息。

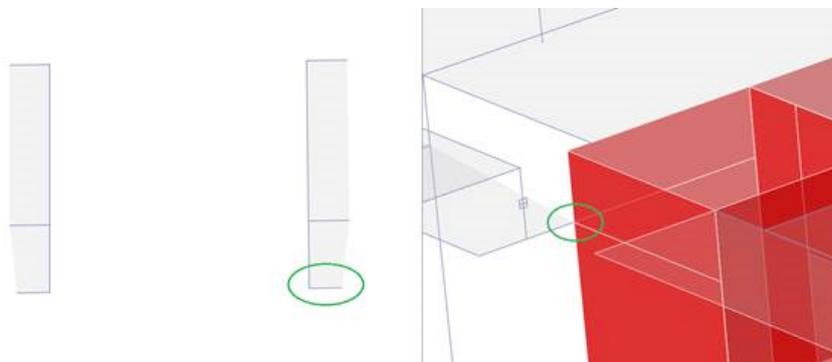
采用标准求解器运行模态工况时，程序给出如下警告：



警告的含义为：求解过程中遇到数值问题，矩阵的主对角元素（Diagonal）小于零。



首先根据警告给出的坐标，确定发生警告的位置。从下面的截图可以发现，模型存在两个问题：1) 在悬挑板所在位置，剪力墙未进行切割或剖分；2) 边梁节点与悬挑板节点位置不重合。上述两个原因导致悬挑板角节点刚度为零，该位置处梁、悬挑板、剪力墙的位移不连续。



具体调整方法为：利用编辑壳 > 分割壳命令，在梁端节点分割剪力墙；利用重定形命令使得悬挑板节点与边梁节点平齐，修改后的模型见下图。

延伸：

模型检查给出的警告信息会提示模型存在的潜在问题。这些问题有可能影响结构的分析结果，比如导致模型局部失稳或荷载传递错误等。所以应重视警告信息，并合理修改模型。

有时，模型会存在一些隐性的问题，它们对于某些分析条件或荷载工况不敏感。所以，在一定情况下，程序可以正常运行；而一旦某些条件改变，比如改变剖分选项、设置初始 P-delta 选项等，就会触发这些隐藏的问题。所以为尽可能排除模型存在的问题，可以在不同的条件下进行模型检查或运行分析。

为提高调整模型的效率，可以用膜单元来模拟楼板，并将其指定为默认剖分（在有楼面梁、剪力墙处剖分）；壳单元来模拟剪力墙，并将其指定为默认剖分（直墙不进行剖分）。这些措施可有效减少单元数量，从而加速模型检查和运行分析的速度。

关键词列表

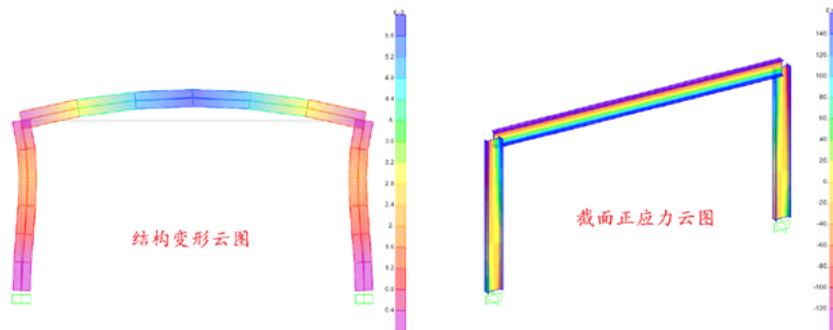
J	警告
M	模型检查

温度作用下的结构内力与变形

编写者：张志国

问题描述：

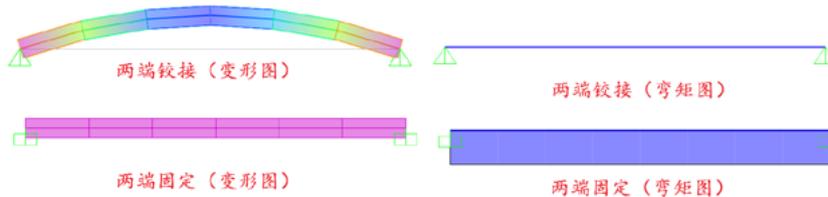
如下所示的平面门式刚架，水平梁外侧升温 50°C ，内侧升温 25°C ，截面高度 0.5m ，故沿截面高度的温度梯度为 $50^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。从结构变形图（左）可以看出，梁的变形曲线为开口向下（即：向上凸出）的抛物线形状；而截面正应力云图（右）却表明，工字形截面的上翼缘受压（负应力），下翼缘受拉（正应力）。请问，为什么水平梁的变形曲线与应力分布不一致呢？以这种变形曲线而言，难道不应该是“上翼缘受拉、下翼缘受压”吗？



解答：

温度作用可以使静定结构自由变形而不产生内力，但对于超静定结构，其变形受到支座限制后必然引起支座反力和结构内力。对于【问题描述】中的分析结果，我们可以采用以下方式加以理解：

如下图所示，假设水平梁的两端不存在立柱，而是换之以固定铰支座或固定支座，同时考虑沿截面高度线性变化的温度作用以及材料的热胀冷缩效应。对于固定铰支座，水平梁上翼缘伸长，下翼缘缩短，故产生自由的弯曲变形（上凸）且弯矩值为零。对于固定支座，水平梁的弯曲变形受到限制（即：两端转角为零），上翼缘无法自由伸长必然处于受压状态并产生压应力；同理，下翼缘无法自由缩短必然处于受拉状态并产生拉应力。



综上，如果考虑梁柱间的刚性连接，水平梁两端的“支座条件”即介于固定铰支座和固定支座之间。非固定铰支座将产生非零的弯矩值，而非固定支座也将产生非零的变形值，这就是【问题描述】中的分析结果。

需要注意的是，温度作用下的结构内力与变形不同于外荷载。前者是先有变形，变形受到限制后才产生内力；后者是先有内力，内力作用下才产生变形。由于因果关系不同，我们不能以常见的外荷载作用下结构内力与变形曲线之间的关系来简单地类比温度作用，否则很有可能会在理解程序输出结果的时候产生困惑和疑问。

关键词列表

B	变形
N	内力
W	温度
Y	应力

重叠面对象的处理

编写者：张志国

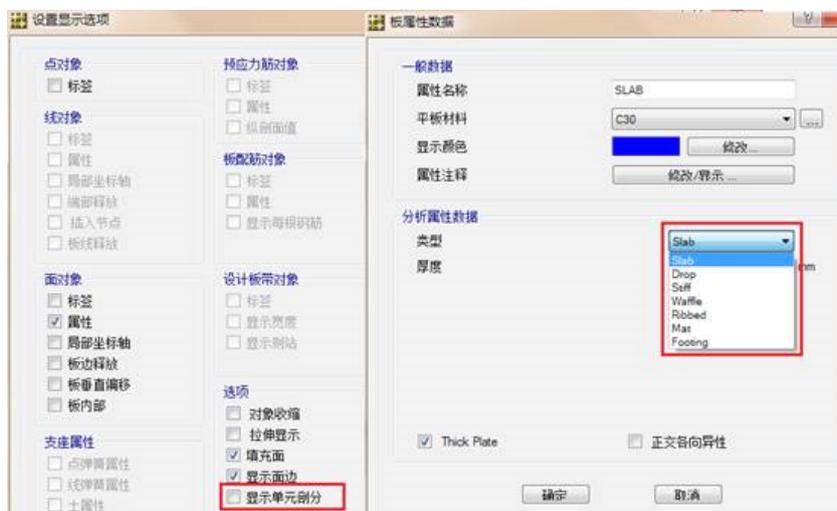
问题描述：

在SAFE模型中经常会出现面对象与面对象的重叠：如无梁楼盖中托板与楼板，剪力墙或柱顶刚域与楼板等。在遇到对象重叠时，程序是如何处理的？如何正确定义板属性呢？

解答：

对于重叠面对象的处理涉及到两个方面：1) 对象属性如何确定；2) 荷载如何确定。

1) 程序是基于分析模型和板的优先级来确定最终采用哪种属性的。用户可以通过**显示 > 设置视图选项**命令，并勾选**显示单元剖分**来查看分析模型。程序一旦检测到分析模型的某个位置出现了面对象重叠，就会利用**对象类型**的优先级来决定采用哪种属性。对象类型是在定义板属性时选择的，见下图。



不同类型的板单元，其**优先级**为 Opening（开洞）>Stiff（刚域）>Drop（托板）>Slab（楼板）；同种类型的板单元，以新（后）绘制的属性为优先。基于上述原因，在定义托板属性时，其厚度应该为从楼板顶面到托板底面的高度。刚域厚度应该与楼板厚度相同。

2) 对于施加的荷载，程序将指定的荷载叠加计算，不会考虑对象的重叠。因此，均布荷载一般指定在主要的板对象上，而不在托板、刚域等面对象上施加。

关键词列表

G	刚域
K	开洞
T	托板
Z	重叠面对象

剪力墙连梁刚度折减

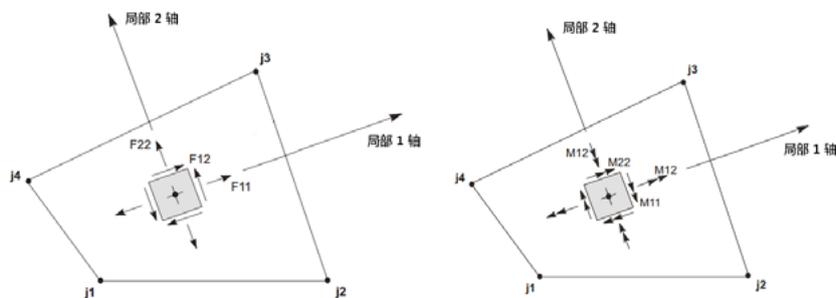
编写者：张志国

问题描述：

《高层建筑混凝土结构技术规程 JGJ 3-2010》5.2.1 条规定：高层建筑结构地震作用效应计算时，可对剪力墙连梁刚度予以折减。那么，当连梁采用壳单元模拟时，该规定应如何实现呢？

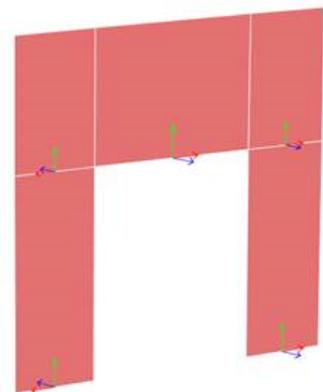
解答：

ETABS 中的壳单元同时具有面内刚度和面外刚度：前者对应内力分量 F_{11} , F_{22} 和 F_{12} ，后者对应内力分量 M_{11} , M_{22} 和 M_{12} ，如下图所示。



以壳单元模拟的剪力墙连梁，抗弯刚度 EI 和轴向刚度 EA 对应于壳单元的面内刚度 f_{11} 或 f_{22} ，抗剪刚度 GA_{shear} 对应于壳单元的面内刚度 f_{12} 。其中， f_{11} 或 f_{22} 的选择与壳单元的局部轴方向有关，用户也可以根据需要进行修改壳单元的局部轴方向。可以看出，如果用户需要折减剪力墙连梁的抗弯刚度或轴向刚度，则指定 f_{11} 或 f_{22} 的修正系数；如需折减连梁的抗剪刚度，则指定 f_{12} 的修正系数。

默认情况下，剪力墙连梁的局部 1 轴沿水平方向，局部 2 轴沿垂直方向，如下图所示。此时，如需折减连梁的抗弯刚度 EI ，则指定 f_{11} 的修正系数；如需折减连梁的抗剪刚度，则指定 f_{12} 的修正系数。事实上，即使同时指定 f_{11} 和 f_{22} 修正系数，其效果与只修正 f_{11} 并无太大区别。这是因为连梁在高度方向上的拉压变形极小，基本可以忽略。



《高层建筑混凝土结构技术规程 JGJ 3-2010》5.2.1 条的条文说明指出：“抗震设计的框架-剪力墙或剪力墙结构中的连梁刚度相对墙体较小，而承受的弯矩和剪力很大，配筋设计困难。因此，可以考虑降低连梁刚度”。可以看出，刚度折减的目的是为了减小连梁的弯矩和剪力，故建议对 f_{11} , f_{22} 以及 f_{12} 同时进行折减。

值得一提的是，上述条文中明确规定“仅在计算地震作用效应时可以对连梁刚度进行折减，对如重力荷载、风荷载作用效应计算不宜考虑连梁刚度折减。”那么，如何在一个计算模型同时考虑连梁刚度折减与否的两种结构分析呢？详见筑信达知识库文档《[连梁刚度折减的计算模型](#)》。

关键词列表

L	连梁刚度折减
S	属性修正

相关文章：

[连梁刚度折减的计算模型](#)

[连梁刚度折减 & P-Delta 效应](#)

2017筑信达技术资料汇编

- 桥梁篇

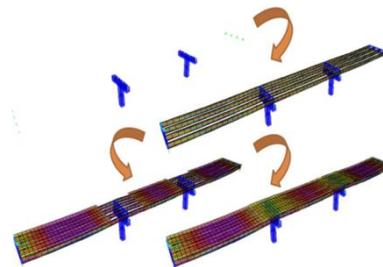
CSiBridge 采用参数化的思路进行建模，程序的功能区域划分概念非常清晰。一般来说从左至右使用布局、构件、荷载和桥梁选项卡即可完成建模。每个选项卡中需要输入对应的参数，以描述桥梁对象。在需要修改模型时只需修改相应的参数即可。布局选项卡中可以定义桥梁的线型和车道；构件选项卡中可以定义构成桥对象的构件；荷载选项卡中定义作用于桥对象的荷载形式；最后桥梁选项卡会以布局线里程为参考系将构件组装成桥梁对象，指定荷载的作用位置。将各个选项卡的相关知识库总结如下文。



知识库

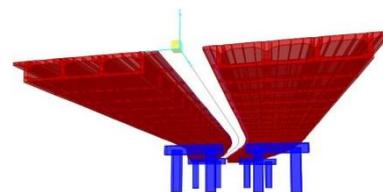
布局线

- [桥梁布局线中的公路曲线](#)
- [水平布局线的定义](#)
- [竖向布局线的定义](#)
- [方位角的用途及指定方法](#)



构件

- [参数变化定义中段类型参数的含义](#)
- [桥约束 \(Restrainer \) 模拟的实际结构](#)
- [如何通过导入 dxf 在 CSiBridge 和 SAP2000 中定义任意复杂截面](#)
- [桥梁中心线与布局线不重合](#)
- [桥台指定对话框参数解释](#)
- [桥墩指定对话框参数解释](#)
- [横隔板定义对话框参数解释](#)
- [变截面高墩的正确模拟方式](#)
- [多个参数按不同规律变化的变截面定义](#)



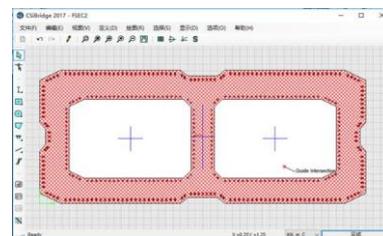
荷载

- [CSiBridge 自定义车辆荷载数据输入](#)



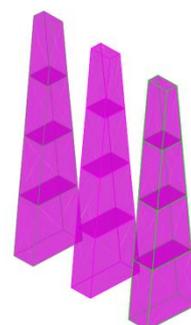
分析

- [基础变位作用的自动组合](#)
- [钢混组合梁桥的施工阶段分析](#)



教学视频

- [CSiBridge 桥梁 Pushover 分析](#)
- [CSiBridge 桥梁自动抗震设计](#)
- [CSiBridge 钢混叠合梁规范设计](#)
- [CSiBridge 任意截面的快速建模](#)
- [CSiBridge 钢混叠合梁桥施工分析](#)
- [CSiBridge 车辆加载分析](#)
- [CSiBridge 桥梁地震时程分析](#)



如何通过导入 dxf 在 CSiBridge 和 SAP2000 中定义任意复杂截面

编写者：魏赞洋

问题描述：

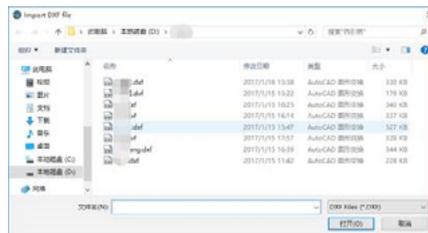
在结构截面比较复杂时 CSiBridge 和 SAP2000 可以通过截面设计器（Section Design）绘制任意几何形状和组合材料截面。截面设计器生成的任意截面除了给线性分析提供必需的截面特性，还可以为非线性分析中赋予相应构件的默认塑性铰提供铰属性数据。但是手动绘制任意界面操作比较繁琐，请问如何快速定义任意截面？

解答：

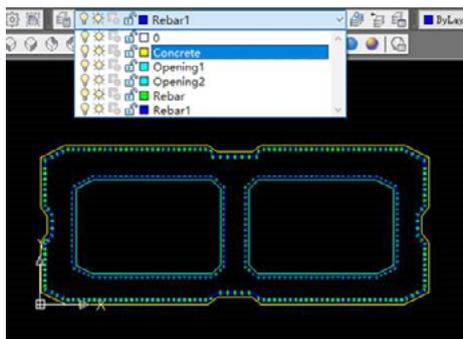
从 SAP2000 v19 和 CSiBridge2017 开始截面设计器添加了 dxf 导入功能。该功能路径为**构件选项卡** > **框架属性面板** > **新建** > **Other 类型** > **截面设计器** > **截面设计器** > **文件** > **Import Section from DXF**。具体操作如下图所示。



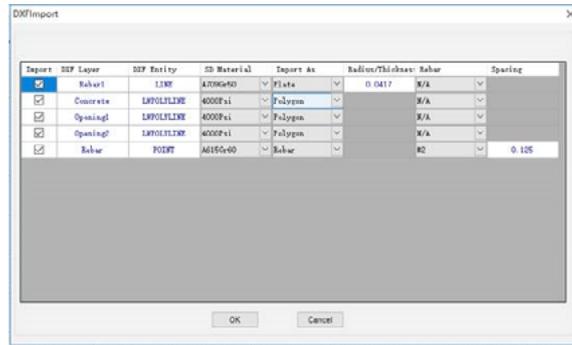
点击 Import Section from DXF 然后可在对话框中选择要导入的 dxf 文件



目前截面设计器 dxf 导入所支持的 CAD 的图元类型包括闭合多段线、直线、圆、点。Dxf 中不同的图元在截面设计器中对应不同的对象，所以建议将每种图元应保存在一个独立的图层里。如下图所示。



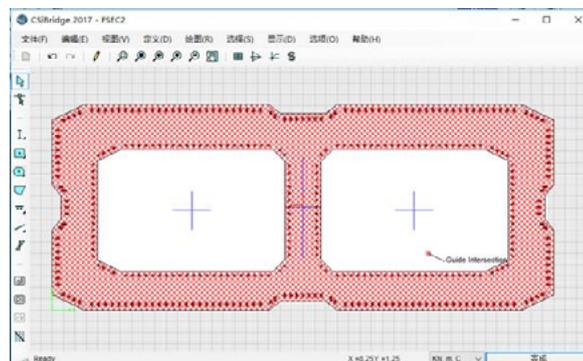
选择导入的 dxf 文件之后，截面设计器会列出所选 dxf 文件中支持导入的图层以及其中所包含的图元。注意这里的闭合多段线是指在特性中是否闭合属性为是。



不同的图元根据所指定材料的种类不同可以模拟为不同的对象。具体对应关系如下表所示。

图元	材料	对象	需要补充信息
闭合多段线	混凝土材料	任意实体多边形截面	无
	钢筋材料		
	钢材材料		
	结构开洞 (Opening)		
	无材料 (None)		
直线	混凝土材料	薄壁截面板中心线	板厚
	钢筋材料	直线排列钢筋	钢筋尺寸、钢筋间距
	钢材材料	薄壁截面板中心线	板厚
	结构开洞 (Opening)	直线参考线	无
	无材料 (None)	直线参考线	无
圆	混凝土材料	圆实体截面	无
	钢筋材料	圆形排列钢筋	钢筋尺寸、钢筋间距
	钢材材料	圆形实体截面	无
	结构开洞 (Opening)	圆形实体截面	无
	无材料 (None)	圆形参考线	无
点	钢筋材料	点状钢筋	钢筋尺寸

最终导入效果如下图所示。



关键词列表

C	CSIBRIDGE
D	DXF 导入
R	任意截面
S	SAP2000

多个参数按不同规律变化的变截面定义

编写者：魏赞洋

问题描述：

混凝土箱梁的梁高、腹板厚度和底板厚度分别按抛物线、多段折线和线性沿桥跨变化。欲对其进行建模，如何在 CSiBridge 中实现？

解答：

CSiBridge 采用基于对象的工作流程，具有强大的几何建模功能，能够轻松完成多参数按多规律变化的上部结构建模。

在 CSiBridge 中实现上部结构变截面的主要步骤如下：

1. 定义桥截面，输入作为基准的主梁截面参数。
2. 根据每个参数的变化规律定义参数变化函数
3. 组装桥梁对象，在桥跨主梁截面的参数中引用对应的参数变化函数

示例连续梁，中支点处梁高 6.65m，跨中梁高为 3.85m，梁底下缘按抛物线变化。箱梁顶宽 13.4m，箱梁底宽 6.7m。顶板厚度 40 cm，底板厚 40 至 100cm，按直线线性变化，腹板厚 48 至 60、60 至 90cm，按折线变化。

在 **构件 > 上部结构 > 桥截面** 下新建桥梁截面。依照软件中的提示图（如图 1）输入描述主梁截面形状的参数。需要变化的参数梁高、底板厚度、腹板厚度分别对应为图中的 Depth、t2、t3。

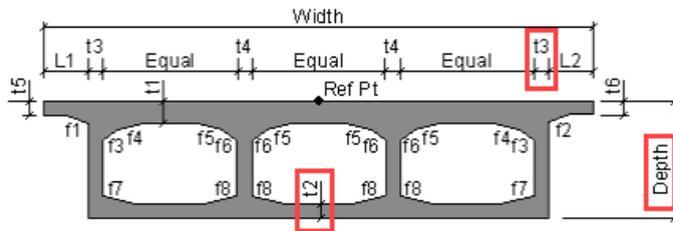


图 1 截面参数提示图

在 **构件 > 上部结构 > 参数变化** 中分别定义梁高、底板厚度和腹板厚度变化函数。函数的横坐标为沿跨度方向的长度，正方向与布局线一致，纵坐标为基于基础截面数据的变化增量，正值为增加、负值为减小。

梁高、底板厚度和腹板厚度的变化函数分别如图 2、3、4 所示。

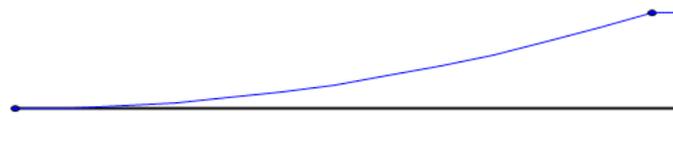


图 2 梁高参数变化函数



图 3 底板厚度参数变化函数

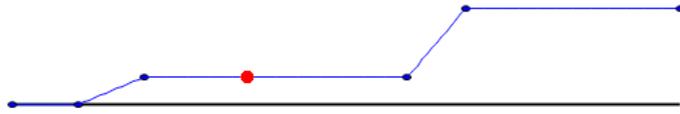


图4 腹板厚度参数变化函数

最后在桥梁 > 桥跨组装桥梁对象时，在对应参数中引用先前定义的变化函数即可完成多参数按多规律变化的上部结构建模。如图5所示。

Parameter	Variation
General Data	
Total Width	Constant
Total Depth	左跨梁高
Slab and Girder Thickness	
Top Slab Thickness (t1)	Constant
Bottom Slab Thickness (t2)	左跨底板
Exterior Girder Thickness (t3)	左跨腹板
倒角竖向尺寸数据	
f1 水平尺寸	Constant
f2 水平尺寸	Constant

图5 引用参数变化函数

最终效果如图6所示。

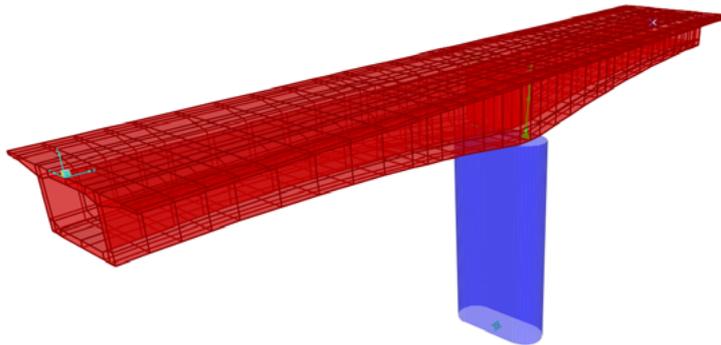


图6 变截面最终效果

关键词列表

B	变截面
C	参数变化

基础变位作用的自动组合

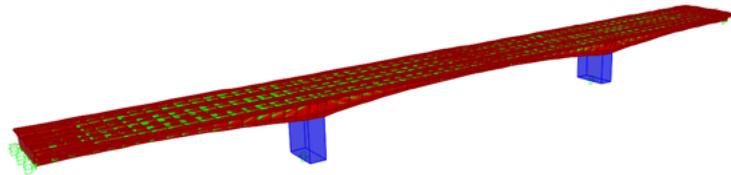
编写者：魏赞洋

问题描述：

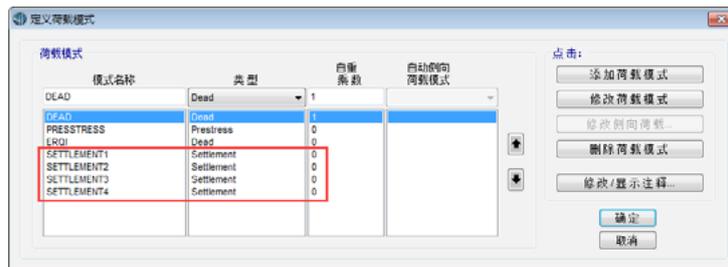
在桥梁设计中要求基础变位作用按照最不利状态组合。程序如何自动做到这一点？

解答：

在CSiBridge中可以在荷载模式中指定“沉降”(Settlement)荷载类型。由程序自动计算产生的最不利荷载。如下图所示的混凝土连续梁桥。桥墩的设计沉降为2cm，桥台的设计沉降为1cm。



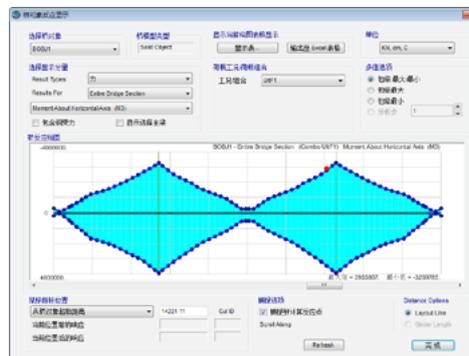
定义4个荷载模式分别为SETTLEMENT1~4，并将荷载模式设置为“沉降”(Settlement)如下图所示：



在4个荷载模式中分别用节点位移模拟基础沉降，当仅包含自重荷载和沉降作用时，自动生成承载力极限状态荷载组合如下表。

名称	组合
U1tFGroup1	Envelope: U1tF2 + U1tF3
U1tF1	Range Add: SETTLEMENT1 + SETTLEMENT2 + SETTLEMENT3 + SETTLEMENT4
U1tF2	1.2DEAD+0.5U1tF1
U1tF3	DEAD+0.5U1tF1

其中U1tF1的上部结构内力图如下图所示。



关键词列表

J	基础变位作用
Z	自动荷载组合

第 35 章

复杂结构参数化设计及 BIM 应用（节选）

陈宇军、段春姣、张霄 清华大学建筑设计研究院

本章目录

- 35.1 概述
- 35.2 参数化设计的特点
 - 35.2.1 参数化设计与项目密切相关
 - 35.2.2 参数化设计侧重于环节应用
 - 35.2.3 参数化设计依赖程序设计技术
- 35.3 模型创建
- 35.4 模型导入
- 35.5 模型编辑
 - 35.5.1 构件局部坐标系设置
 - 35.5.2 模型增量式更新
 - 35.5.3 借助 Excel 设置构件截面及材料
 - 35.5.4 自动形成各类选择集（组）
- 35.6 定义荷载工况与组合
 - 35.6.1 风洞试验数据整理
 - 35.6.2 定义动力时程分析工况
 - 35.6.3 形成荷载组合
- 35.7 分析结果提取
 - 35.7.1 层间位移及层间位移角
 - 35.7.2 基底剪力及层剪力
- 35.8 BIM 应用
 - 30.8.1 BIM 应用概述
 - 30.8.2 数据交换
 - 30.8.3 Revit 接口
 - 30.8.4 Tekla 项目转换

内容节选

35.1 概述

参数化设计更多体现在对结构规律的把握。我们所设计的大多数结构可以归结为层模型，具有单一的结构形式，可以按通常的设计方法，使用通常的设计工具完成建模、分析到设计的全过程。然而，当我们面对复杂结构项目时，需要全新的思考方法、需要重新建立技术手段来保障项目的顺利推进。

SAP2000 是既面向最终用户，也面向开发用户的可定制分析工具，它允许我们针对不同项目，定制特定的建模、分析和结果整理流程，允许定制特定的工具。这些特点使 SAP2000 成为了强大的参数化设计工具。

当然，驾驭好这样一套强大的工具，也需要使用者具备扎实的结构理论基础、丰富的技术手段和强大的分析能力。

35.2 参数化设计的特点

本章将结合实际项目介绍参数化技术应用的一些经验和体会。参数化设计是非常高效，同时也非常灵活多变的技术，因此，首先我们来说明一下参数化设计的几个特点。

35.2.1 参数化设计与项目密切相关

所谓参数化，是指把项目中的规律提炼出来，并把这些规律通过一组参数来控制，从而形成一套参数化的控制方法（或叫逻辑架构）来描述和实现项目任务。这就决定了参数化技术与特定任务的紧密相关性。

当然，这与开发通用的参数化设计工具并不矛盾。通用的参数化设计工具可以解决一些带有普遍性的设计问题。例如，SAP2000 提供了一套参数化的项目模板，可以很方便地用于创建一些造型规则的结构。

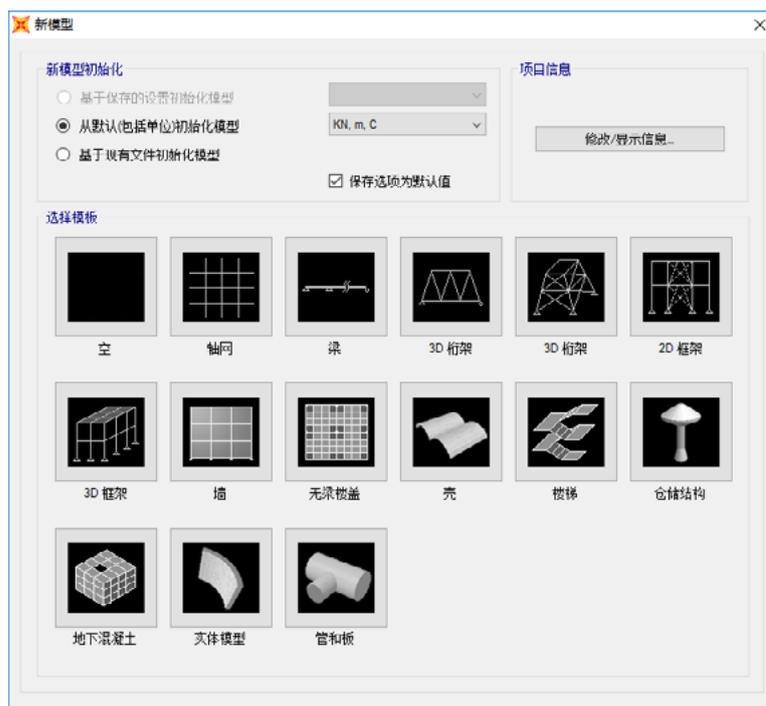


图 35-1 SAP2000 的参数化项目模板

然而对于造型复杂的结构，例如具有自由曲面的轮廓，或是构造逻辑复杂的结构，就需要有针对性地编写特定的代码来完成任务。

35.2.2 参数化设计侧重于环节应用

参数化设计通常不是事先编写出一套完整的全过程程序，而是更加注重环节，例如快速建模，快速提取数据，快速完成加载，或是快速设置约束条件、控制分析流程等。参数化强调环节高效，而并不强调环节之间的连贯。

该特点是容易理解的。因为程序包含的内容越多，灵活性也就越差，运行也就越笨重。而参数化设计强调的是效率和灵活性，所以要短小精悍而不是庞大臃肿。

35.2.3 参数化设计依赖程序设计技术

参数化设计通常要用到 API 编程。SAP2000 提供了强大的 API 编程系统，可全面实现从建模分析到数据提取、结构优化等各环节的代码控制。对于使用者来说，全面掌握这套 API 系统是非常必要的。为了实施 API 编程，使用者必须同时掌握所需的程序设计技术，包括程序设计语言、算法设计、架构设计、编程与调试工具的使用等。

除 SAP2000 API 之外，其它建模工具，如 AutoCAD、Rhino、CATIA 等，往往也提供各自的开发工具。

在面对超高层及空间大跨项目时，通过编写程序的方法来创建模型、进行分析，整理计算结果以及进行后期的设计，可以准确、高效地推动项目的进展。尽管参数化方法需要跨越一定的技术壁垒，把结构分析、设计与程序开发相结合，但获得的却是大幅的效率提升，甚至在有些复杂项目上，参数化程序设计也是唯一可行的解决方案。

本章着重讲述参数化设计方法的原理及应用，关于 SAP2000 API 的使用方法详见本书的第六部分“二次开发”。

35.3 模型创建

SAP2000 API 提供了丰富的建模工具（函数），通过这些 API 函数，我们可以使 SAP2000 借助于专业的建模工具来实现更加复杂的建模过程。专业 CAD 软件通常一方面具备强大的图形编辑功能，一方面它们也具备二次开发能力。对于复杂的曲线、曲面（如 NURBS 曲线、曲面）项目，借助于专业 CAD 软件和 SAP2000 API，可以轻松扩展 SAP2000 的处理领域。

本章的涉及参数化 CAD 软件时主要以 Rhino（犀牛）为主。对 Rhino 不太熟悉的读者可以参考相关的书籍和资料。下面以空间单层网壳结构为例，介绍模型生成及导入的过程。

常见的单层网壳网格划分形式为肋环型、葵花型、短程线型等。由于它们具备很强的规律性，适合于通过程序（Python、RhinoScript）或插件（如 Rhino 的 Grasshopper）创建，下图为在 Rhino 中创建扇形三向网格及葵花形网格的例子。

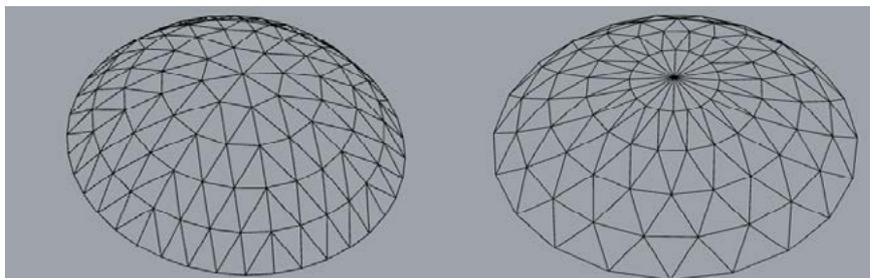


图 35-1 扇形三向网格及葵花形网格

通过 Grasshopper 创建网格。Grasshopper 是在 Rhino 环境下运行的，通过程序算法生成模型的插件。可以通过对参数的控制，直观的显示模型生成的效果，且不需要设计师具备太多程序语言的知识背景。对于逻辑相对简单，功能较单一的模型，可以采取此方法。关于 Grasshopper 的介绍请参见相关书籍。

通过脚本程序（Python，RhinoScript）创建模型。Rhino 不仅提供 RhinoScript 脚本插件实现程序对 Rhino 的控制，在 Rhino5 版本中，更是推出 Rhino.Python 插件，Python 功能更加强大，扩展性也更好。并且语法简洁，操作灵活，易于掌握。下面这段代码用于前述的单层网壳网格剖分：

```
import rhinoscriptsyntax as rs

#分格球体的圆，圆分格得点，连点，得网格
def mesh_1(cirs, numPt_a_cir, num_floors)
    num = int(numPt_a_cir)*2
    for i in range(0,len(cirs)):
        pts = rs.DivideCurve(cirs[i],num)
        ptss.append(pts)

    num_floor = int(num_floors)#len(cirs)
    #横向网格
    for i in range(0,num_floor):
        for j in range(0,num,2):
            line = rs.AddLine(ptss[i][[(j+i)%num],ptss[i][[(j+i+2)%num]])

    #纵向网格
```

```

for j in range(0,num,2):
    for i in range(0,num_floor-1):
        line = rs.AddLine(ptss[i][(j+i)%num],ptss[i+1][(j+i+1)%num])

#纵向网格
for j in range(0,num,2):
    for i in range(0,num_floor-1):
        line = rs.AddLine(ptss[i][(j-i)%num],ptss[i+1][(j-i-1)%num])

```

对于实际项目，网壳的边界形式往往更复杂，控制因素也会更多，相比之下，通过程序代码能够实现更加精准有效的流程控制。我们在浙江奉化的一个单层网壳项目中，所采用的网壳底边界依山势和现状地形而形成，经过加工，形成了一个类似鹅卵形的置于斜平面上的自由曲线，平面尺度约为 190x120 米，在网壳中心部位则形成一圆环形竖井，竖井内是另一栋独立的建筑物。

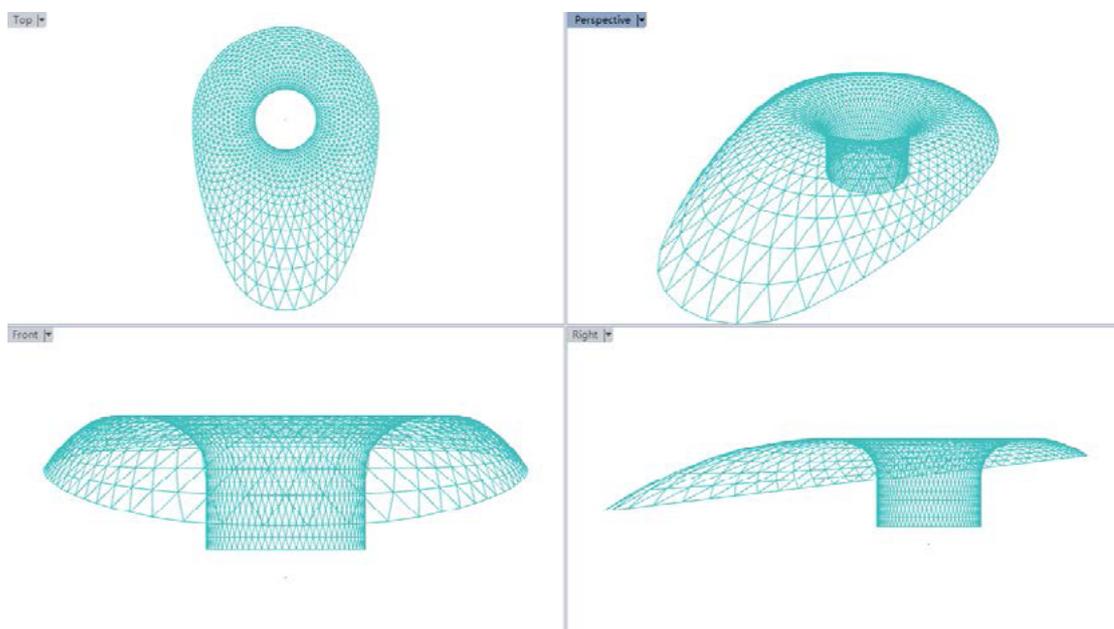


图 35-2 单层网壳结构的 Rhino 模型

此项目为典型的曲面造形，无法通过手工方式创建。实际实施过程中，我们借助于 Rhino 提供的开发接口 Rhino Python，运用程序代码加以实现。实施过程中具体考虑的逻辑关系有以下几点。限于篇幅，这里对编程的细节不予介绍。

- (1) 正确考虑网壳的边界。由于网壳边界并不是简单的二次几何曲线，我们通过作图手段形成边界曲线后，直接把边界曲线作为创建曲面的输入条件；
- (2) 竖井的位置、竖井上方的控制圆环，以及沿环向的分格数均作为几何输入条件；
- (3) 网格环向线条沿径向长轴方向需要形成疏密渐变的过渡效果；
- (4) 网壳表面任意一点的最小坡度均要满足最小排水坡度要求；
- (5) 除几何逻辑外，更重要的是程序要考虑单层网壳的受力特征进行曲面形状优化，使得竖向荷载作用下，壳体内部产生的弯矩最小；
- (6) 在所形成曲面的基础上，形成结构构件，结构构件均为直线构件；
- (7) 在结构布置的基础上，进一步形成幕墙布置方案，探讨多种网格划分形式，如三角形玻璃、四边形玻璃、矩形玻璃等；
- (8) 按构件的逻辑进行图层划分。

按上述逻辑架构逐渐形成和完善后的 Python 项目代码仅为 1778 行，这使得项目组的工作效率获得了巨大的提升。图 35-5 为网壳结构的单元分层情况，应该说明的是，在进行复杂结构建模的时候，将单元按逻辑进行分层归类是非常必要的。良好的分层逻辑会极大地方便后期的处理。在后续导入 SAP2000 时，我们会按照 Rhino 中的分层自动将单元归到不同的组（Group）中，按组赋截面并进行优化。

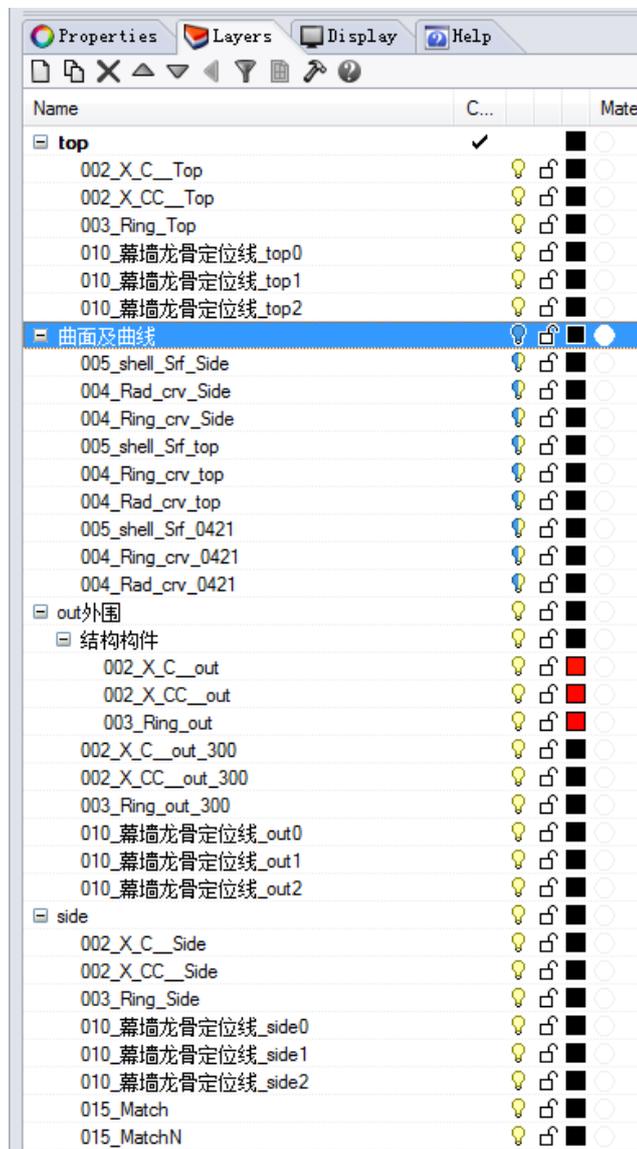


图 35-3 网壳结构的图层划分情况

第 36 章

火力发电厂结构物（节选）

李红星、姜东、刘宝泉、李强波、靳鹏 西北电力设计院有限公司

本章目录

- 36.1 概述
- 36.2 火力发电厂主厂房
 - 36.2.1 SAP2000 模型建立
 - 36.2.2 荷载施加
 - 36.2.3 计算结果
- 36.3 弹簧隔振汽机基座
 - 36.3.1 概述
 - 36.3.2 典型功能实现及案例分析
- 36.4 钢筋混凝土筒仓结构
 - 36.4.1 模型简介
 - 36.4.2 荷载施加
 - 36.4.3 荷载组合
 - 36.4.4 计算结果
- 36.5 钢结构冷却塔
 - 36.5.1 建立模型
 - 36.5.2 荷载施加
 - 36.5.3 结构分析
- 36.6 本章小结

内容节选

36.5 钢结构冷却塔

冷却塔是火力发电厂的标志性建筑之一，传统的冷却塔均采用钢筋混凝土结构，随着技术的发展和需求的多样化，钢结构冷却塔的应用也越来越多。钢结构冷却塔为杆系结构，采用 SAP2000 程序可以较好的完成整体模型的建立及分析计算。

36.5.1 建立模型

不同于传统混凝土冷却塔采用的薄壳结构模型，双曲线型钢结构冷却塔采用空间杆系结构组成。双曲线型钢冷却塔的几何尺寸，由工艺专业根据计算提出。建立模型前，首先根据塔的直径，考虑构件的截面、长度、运输方案等影响因素确定圆周的划分份数。

本例选用的钢结构冷却塔结构方案为：高度 180m，底部直径 150m，顶部直径是 96m，喉部直径 92m，喉部位于离开顶部 38m 处，沿周长 32 等分。

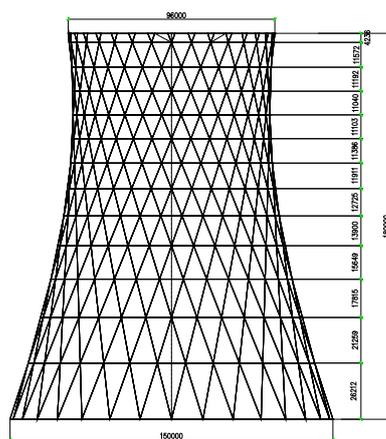


图 36-32 钢结构冷却塔几何尺寸

根据塔几何尺寸及划分份数，计算建模所需的几何模型数据。首先，根据底部直径、顶部直径及份数，计算出母线的空间坐标。画出母线，然后围绕塔中心线三维旋转而成整体模型。

此建模过程可采用 AutoCAD 的方式建立三维的几何模型。将 AutoCAD 中建好的模型保持为 DFX 格式，通过 SAP2000 程序的导入功能，直接转化为 SAP2000 模型，较为方便快捷。具体操作方法可参见第 12 章。

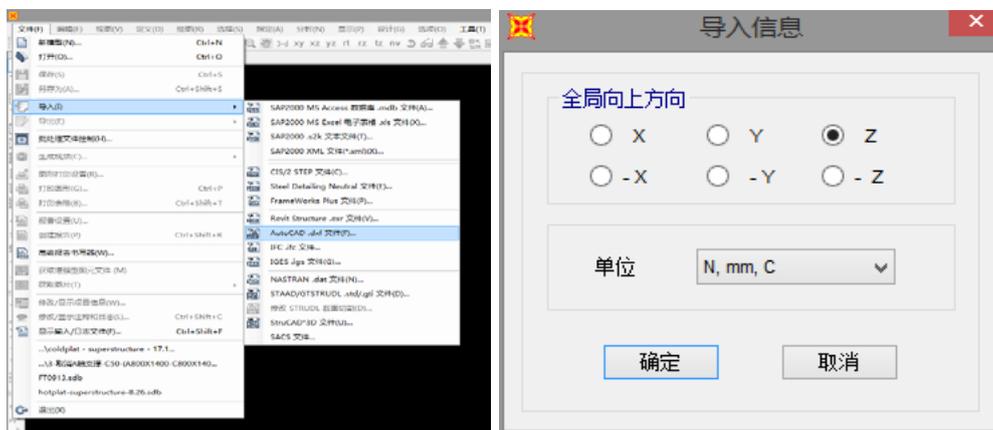


图 36-33 将 AutoCAD 文件导入 SAP2000

注意导入的过程中，全局向上的方向与 AutoCAD 文件保持一致，长度单位与 AutoCAD 建立几何模型时的单位保持一致。

给几何模型赋予构件截面信息，因为冷却塔构件截面沿高度方向变化的规律是一致，建议根据构件的标高和特性进行分类，比如 50m 标高的环梁分为一类，这样方便后期进行编辑修改。

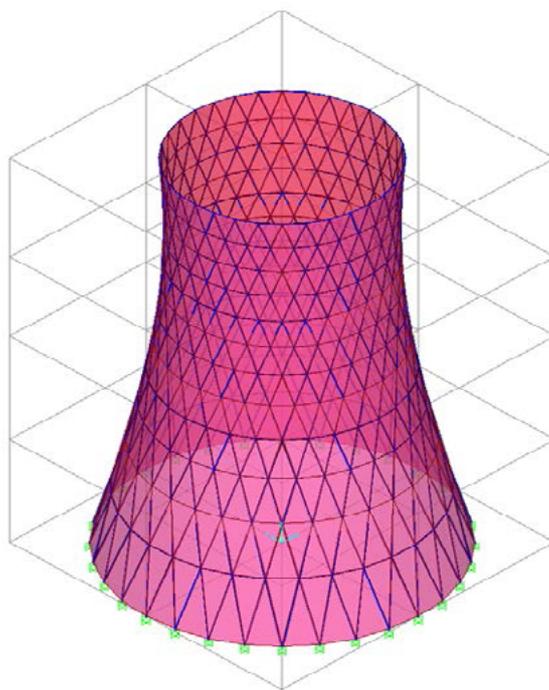


图 36-34 钢结构冷却塔模型

36.5.2 荷载施加

对于冷却塔主要考虑以下荷载作用：

- (1) 结构自重：由程序自动计算，注意根据经验考虑节点自重，一般取 10%左右。

(2) 风荷载：为冷却塔的控制荷载工况，稍后专门阐述。

(3) 温度作用：根据气象条件，考虑季节变温；并考虑不均匀升温的影响，按照日照的情况进行分析。用过 SAP2000 程序的温度荷载即可完成添加，具体详见第 9 章。本算例考虑均匀降温 20 度；不均匀升温，按照日照的情况进行分析，阳面温度 30 度，逐渐过渡到 0 度，即温差 30 度。

(4) 地震作用：地震烈度 7 度，最大影响系数 0.08；场地特征周期 0.4s。具体地震作用施加可参见第 9 章。

(5) 活荷载：包括施工活荷载、楼梯及平台活荷载等。

(6) 不均匀沉降：根据工程地基情况及地基处理方式按实际情况考虑。

关于风荷载，根据《火力发电厂水工设计规范 DLT 5339-2006》的规定，作用在双曲线冷却塔表面的风荷载标准值可按下列公式计算：

$$W(z, \theta) = C_{\theta} \beta_z \mu_z w_0 \quad (36-3)$$

其中： μ_z —— 风压高度变化系数；

β_z —— 风振系数；

w_0 —— 基本风压（单位：kPa）；

C_{θ} —— 平均风压分布系数。

圆柱体的风载沿环向的分布如图 36-35 所示，各角度处的风载体型系数，将其展开为 Fourier 级数：

$$C_{\theta} = \sum_{n=0}^7 a_n \cos n\theta \quad (36-4)$$

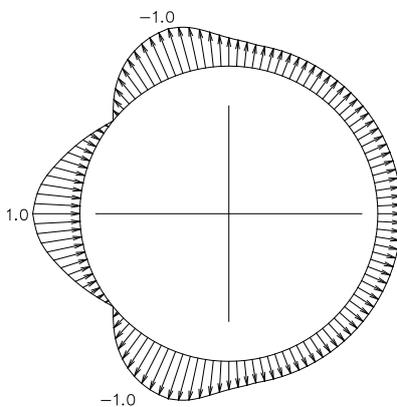


图 36-35 风压环向分布

用离散系数的 Fourier 展开法可得系数 a_n ，如表 36-2 所示：

环向风压分布系数展开项的系数 表 36-2

级数的项次	0	1	2	3	4	5	6	7
a_i	-0.4426	0.2451	0.6752	0.5356	0.0615	-0.1384	0.0014	0.065

风荷载是施加在围护结构上的，钢结构冷却塔的围护采用压型钢板围护，模型中可采用壳单元模拟。由于风荷载沿高度和角度均变化，所以风荷载的施加较为复杂，手工施加风荷载工作量巨大。可根据风荷载变化的规律，对围护结构的壳单元进行统一规则的编号。根据围护单元的编号规则，采用 Excel 表格编制风荷载计算程序，与单元编号结合，计算出每块

单元所承受的风荷载。最后采用交互式数据库编辑功能将风荷载导入模型，完成风荷载的施加。

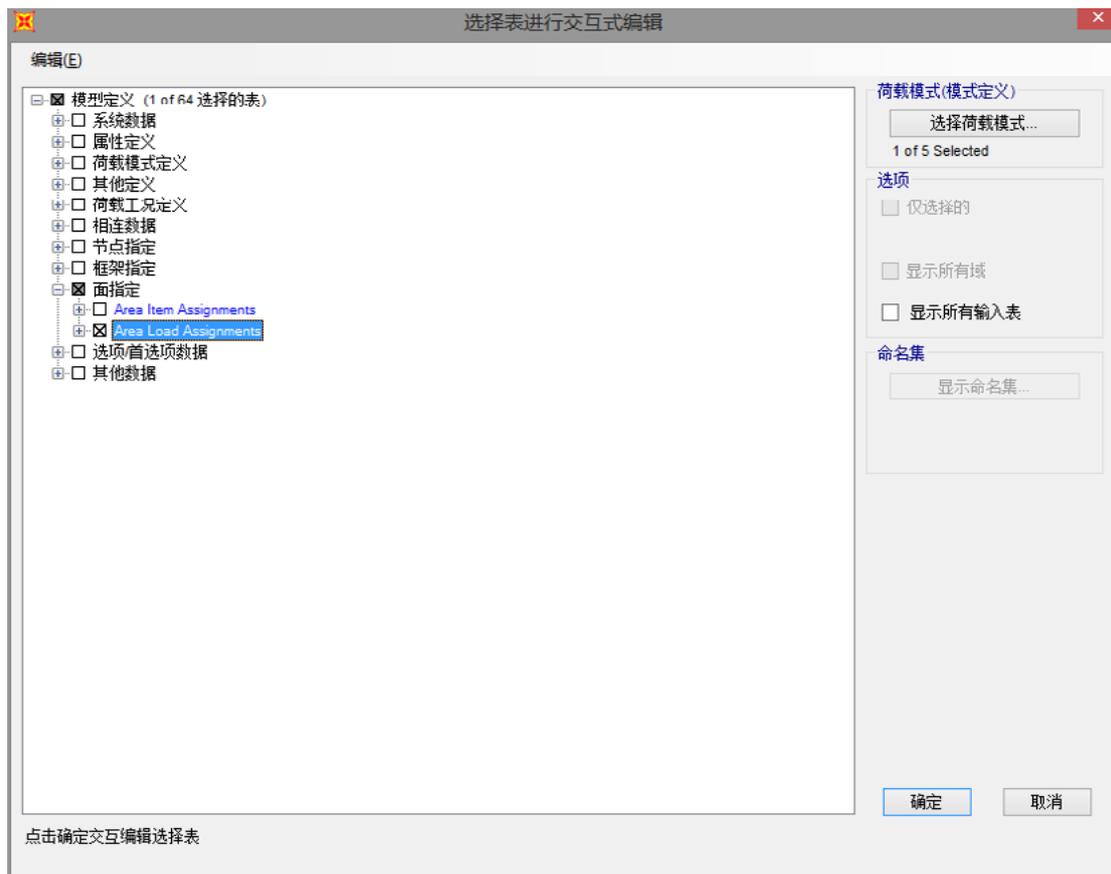


图 36-36 SAP2000 交互式数据库编辑

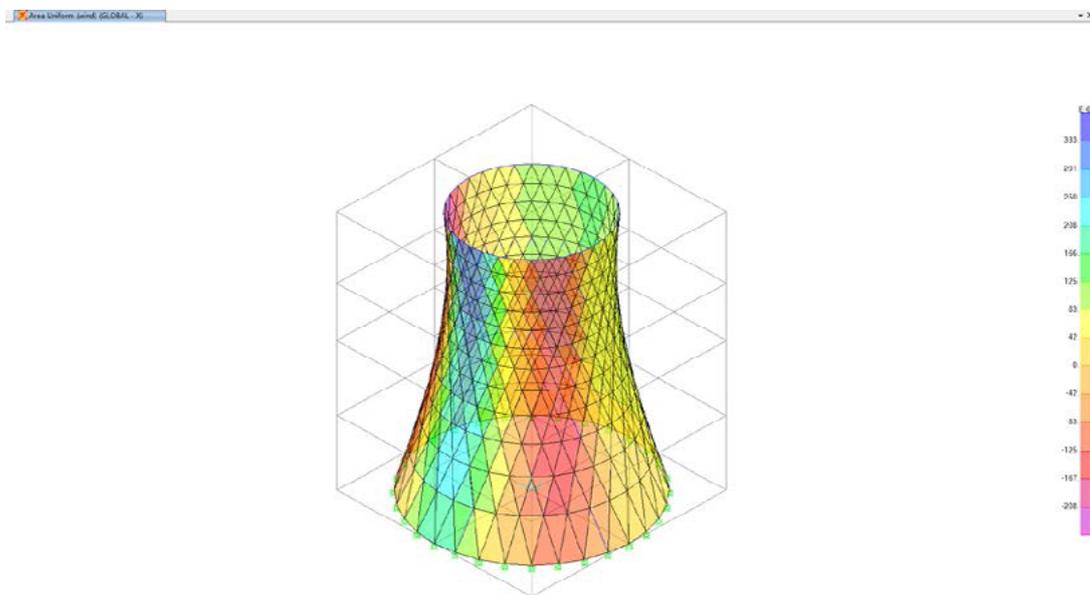


图 36-37 风荷载施加完成

第 37 章

海外项目的欧美规范应用（节选）

戚永乐、周玉 广东省电力设计研究院有限公司

本章目录

- 37.1 概述
- 37.2 欧美标准
 - 37.2.1 欧洲标准的组成体系
 - 37.2.2 美国标准的组成体系
 - 37.2.3 欧标抗震设计
 - 37.2.4 欧标风荷载
 - 37.2.5 欧标钢结构设计首选项
 - 37.2.6 欧标钢结构设计覆盖项
 - 37.2.7 欧标混凝土结构设计首选项
 - 37.2.8 欧标混凝土结构设计覆盖项
 - 37.2.9 美标抗震设计
 - 37.2.10 美标风荷载
 - 37.2.11 美标钢结构设计首选项
 - 37.2.12 美标混凝土结构设计首选项
 - 37.2.13 美标混凝土结构设计覆盖项
- 37.3 结构工程应用实例
- 37.4 动力基础应用实例
 - 37.4.1 动力分析参数
 - 37.4.2 扰力荷载工况定义
 - 37.4.3 振动结果评价

内容节选

37.1 概述

中国设计施工企业在海外工程业务的逐年增多，尤其是在当前“一带一路”的战略构想的引导下，各大设计院纷纷走出国门，参与国际市场竞争。国际工程项目在海外的执行过程中首先遇到的问题就是设计标准的采用。SAP2000 无缝集成了多国规范，可以方便使用多国规范进行整体结构的分析、设计。程序使用者使用 SAP2000 进行欧美规范的设计时，在 SAP2000 中最为关注的是设计首选项、覆盖项的参数设置以及中国和欧美规范的主要差异。编写此章的目的就是要让程序的使用者能够使用欧美标准进行混凝土结构和钢结构的设计，提高国际竞争力。

37.2 欧美标准

37.2.1 欧洲标准的组成体系

主要卷册名如下：

- (1) EN 1990：结构设计基础
- (2) EN 1991：结构上的作用
- (3) EN 1992：混凝土结构设计
- (4) EN 1993：钢结构设计
- (5) EN 1994：钢-混凝土组合结构设计
- (6) EN 1995：木结构设计
- (7) EN 1996：砌体结构设计
- (8) EN 1997：岩土工程设计
- (9) EN 1998：结构抗震设计
- (10) EN 1999：铝合金结构设计

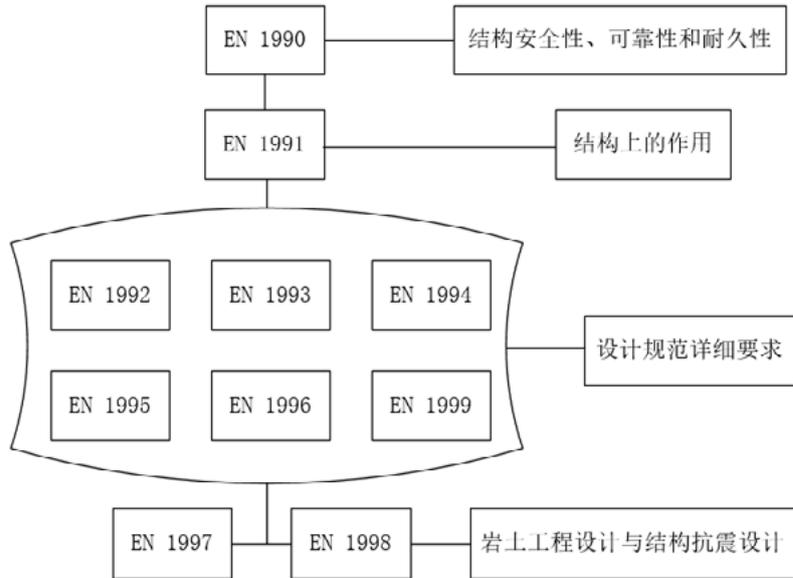


图 37-1 欧洲规范各部分之间的关系

整个欧洲规范共 10 卷 58 分册，EN 1990 为 EN 1991~1999 的指导性文件（EN 为 Euro Norm 欧洲标准的简写），就建筑物的安全性、适用性、牢固性、耐久性、耐火性及消防要求为所有欧洲规范确立了设计的一般准则，一些特殊的结构（如核电站、大坝等）则在 EN1~9 的附加规定中加以考虑。

37.2.2 美国标准的组成体系

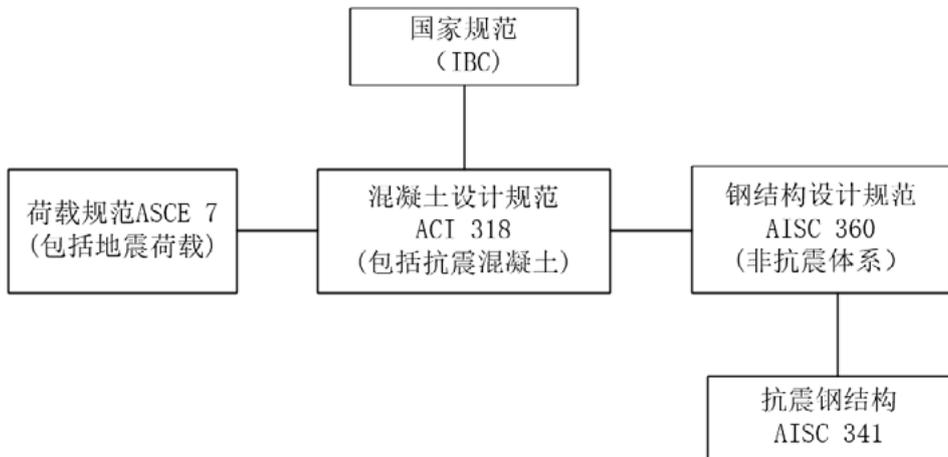


图 37-2 美国规范的基本构成

中美常用标准对照表 表 37-1

中国规范	美国规范
《钢结构设计规范》 《高层民用建筑钢结构技术规程》	AISC 360-2010

《建筑结构荷载规范》	ASCE 7-2010
《建筑抗震设计规范》	AISC 341-2010 IBC 2012
《碳素结构钢》	ASTM A36/A36M-03a
《低合金高强度结构钢》	ASTM A588
《钢结构工程施工质量验收规范》	AISC 303-10
《钢结构焊接规范》	AWS A5.23/A5.23M
《钢结构高强度螺栓连接技术规程》	ASTM A325 A449 A490
《建筑设计防火规范》	NFPA 5000
《火力发电厂与变电站设计防火规范》	NFPA 850
《混凝土结构设计规范》	ACI 318

2000 年以前,美国主要采用四本由各不相同的协会发布的通用建筑规范(Mode Code), NBC (National Building Code), SBC (Southern Building Code), UBC (Uniform Building Code) 及 IBC (International Building Code)。美国各州通过法律分别选用这 4 本通用建筑规范中的一本作为在该州有法律效力的规范使用。到 2000 年,经美国各有关方面的协调,决定在美国全国统一采用由国际规范委员会(International Code Council)制定的 IBC 规范来取代其他三本通用建筑规范。自此,其它三本通用规范便不再更新,IBC 规范逐渐成为了美国全国唯一的通用建筑规范。

在有关抗震设计的内容方面,IBC 规范仍是偏原则性的主要规定了与抗震设防水准相关的内容,而更详细、更具体的抗震设计方法,则指出应参照 ASCE 7 规范来进行。ASCE 7 规范是由美国土木工程师协会(American Society of Civil Engineers)制定的《结构最小设计荷载规范》,其有关抗震设计的内容比较详细的规定了抗震设防水准、地震作用、结构地震反应分析、结构抗震措施等方面的要求和方法。

而针对钢筋混凝土结构的截面抗震验算和抗震构造措施等构件设计方面,ASCE 7 规范则又指出应参照 ACI 318 规范。ACI 318 规范是由美国混凝土协会(American Concrete Institute)制定的《房屋建筑混凝土结构规范》,详细的规定了有关混凝土房屋建筑的设计和施工的方法和要求。

因此,将这三本规范结合在一起,才能对基于 IBC 规范的美 国钢筋混凝土结构抗震设计有较全面的了解。IBC、ASCE 7 及 ACI 318 规范均是每三更新一次。针对钢结构,美国钢结构协会(AISC)制定了钢结构设计规范 AISC 360,但钢结构建筑设计规范(ANSI/AISC 360)是用于普通的钢结构建筑的设计标准,它还并不适用于包括在全范围内的结构设计实践中遇到的所有的特殊和独特的问题。钢结构建筑抗震规定(ANSI/AISC 341-05)是一个单独的统一的标准,该标准提出了这样一个主题:针对高强度地震应用的钢结构和复合钢结构/钢筋混凝土建筑系统的设计和建造。

第 38 章

消能减震结构（节选）

徐自国 建研科技股份有限公司

本章目录

- 38.1 概述
- 38.2 消能减震结构及其工作原理
- 38.3 消能器的类型及应用范围
 - 38.3.1 金属屈服型消能器
 - 38.3.2 金属屈服型消能器消能减震设计方法
- 38.4 工程实例 1
 - 38.4.1 工程概况
 - 38.4.2 屈曲支撑设计
 - 38.4.3 伸臂桁架斜腹杆破坏模式的对比
 - 38.4.4 结论
- 38.5 工程实例 2
 - 38.5.1 结构方案的选择
 - 38.5.2 阻尼器的布置
 - 38.5.3 阻尼器的非线性响应
 - 38.5.4 附加阻尼比的计算
 - 38.5.5 地震作用下结构位移
 - 38.5.6 耗能墙与主体结构的连接与构造
 - 38.5.7 结论
- 38.6 本章小结

内容节选

38.3 工程实例 1

38.3.1 工程概况

工程位于合肥市政务新区，祁门路、星光东路、龙图路和潜山路中间地块，总建筑面积约 548908m²，其中地下部分约 110308m²，地上部分约 438600m²，由 8 栋塔楼（1#楼、2#楼、3#楼、4#楼、5#楼、6#楼、7#楼及 10#楼）、裙房（8#及 9#裙房地上为 2~4 层）、以及 3 层地下室组成。

其中，10#楼为超高层甲级写字楼，结构主屋面高度 223m，地上 50 层，属于超 B 级限高的高层建筑，结构类型为框架-核心筒结构。楼盖采用钢筋混凝土梁-板体系。上部结构嵌固部位取首层楼面。剪力墙均为落地混凝土墙。核心筒钢筋混凝土剪力墙厚度由首层到顶层从 800mm~200mm 逐渐变化。

本楼第 16、28 及 40 层为设备层，此三层设置加强层，由于结构在 X 方向刚度较弱，在加强层内设置沿 X 方向的两道伸臂，并在外框筒三处加强层设置环向桁架。值得指出的是，为了进一步提高结构抗震性能，结构伸臂桁架中的斜腹杆（共 24 根）均采用屈曲约束支撑进行设计。本工程抗震设防烈度为 7 度（0.1g），抗震设防类别为丙类（底部 5 层裙房结构为乙类），设计地震分组第一组，场地类别为 II 类。

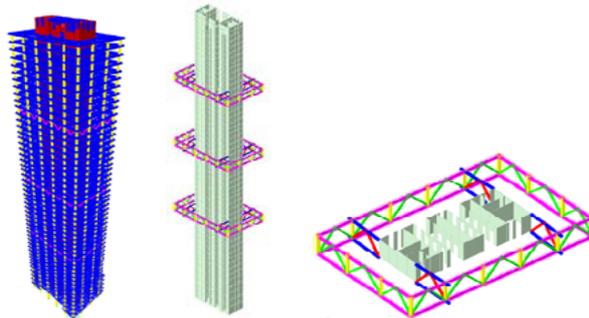


图 38-7 结构 SAP2000 模型示意图

38.3.2 屈曲支撑设计

根据结构设计设定的性能目标以及经验,本工程采用的防屈曲支撑设计原则为保证防屈曲支撑在中震下不屈服,给出防屈曲支撑的主要设计参数如下:

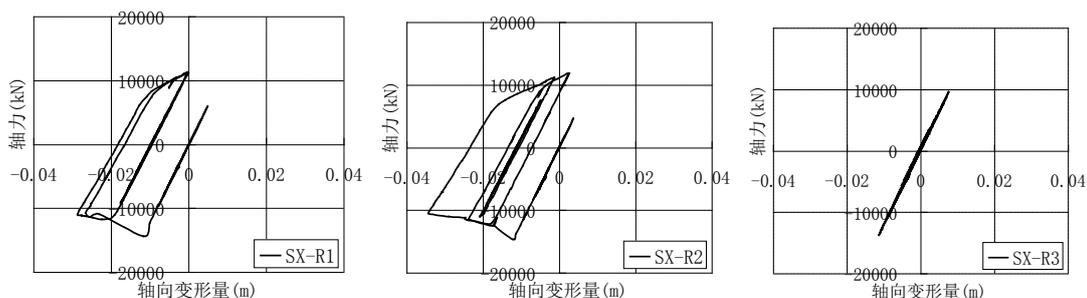
	第 16 层	第 28 层	第 40 层
防屈曲支撑名称	K1300F9000	K1300F10000	K1300F9000
屈服力	9000kN	10000kN	9000kN
刚度	1300kN/mm	1300kN/mm	1300kN/mm
屈服后刚度比	0.05	0.05	0.05

38.3.3 伸臂桁架斜腹杆破坏模式的对比

本节采用结构动力弹塑性分析方法,针对加强层伸臂桁架采用普通钢支撑方案及防屈曲支撑方案在地震波双向输入 X 为输入主方向罕遇地震作用下的动力响应展开进一步研究。其中普通钢支撑按与防屈曲支撑等刚度、等屈服强度的原则进行等代。

图 38-8 为结构加强层伸臂桁架采用防屈曲支撑及普通钢支撑方案斜撑构件轴力与其杆件长度(伸长为+)的变化关系曲线。可以看到,防屈曲钢支撑进均进入塑性耗能阶段,且滞回环面积较大,耗能作用明显;而普通钢支撑方案中相同位置斜撑构件的轴力与其杆件长度的缩短则呈现出显著的非线性退化现象,即出现了杆件长度缩短而承载力持续下降的现象。进一步校核可知,结构第一个加强层位置的普通钢支撑 SX-R1,其构件截面为方钢管 $\square 450 \times 450 \times 25$,截面受拉/压(不考虑屈曲)屈服承载力为 $A_s \times f_y = 42500 \times 345 = 14662.5 \text{ kN}$,在地震作用下 X 为输入主方向时,构件最大轴向拉力为 11343.6kN、最大轴向压力为 14384.1kN,均未达到截面屈服承载力。结构第二个加强层位置的普通钢支撑 SX-R2,在地震输入作用下 X 为输入主方向时,构件最大轴向拉力为 11916.4kN、最大轴向压力为 14642.9kN,亦均未达到截面屈服承载力。然而上述两位置的斜撑构件在受压区均出现了虽未屈服,但变形增大而承载能力下降的现象,即其破坏为受压屈曲模式。

应当指出的是,构件受压屈曲破坏不仅不能充分发挥材料的承载能力(不经济),而且该破坏模式难以保证延性及防止结构倒塌,对结构安全不利,结构设计应给予一定关注。而且本文计算中并未对斜撑构件引入初始缺陷,斜撑产生受压屈曲现象的原因主要是由于斜撑长度较大,地震动作用下其自身质量惯性作用造成的较大侧向位移与所受的轴向压力发生了较强的耦合作用,考虑到实际工程中客观存在的加工与施工误差,该耦合作用将更大,构件的受压屈曲破坏亦将逾为显著。而防屈曲支撑方案中,由于支撑的屈服水准根据结构设计性能要求进行了设定,人为控制其在罕遇地震作用下的屈服后受力与变形行为,滞回曲线饱满,耗能能力良好。



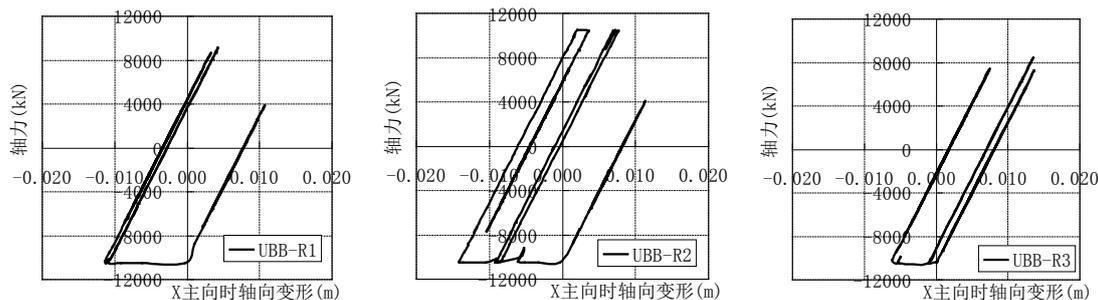


图 38-8 结构加强层伸臂桁架采用屈曲约束支撑与普通钢支撑的轴力-轴向变形滞回曲线对比

通过上述对比分析后，可以看出：普通钢支撑及防屈曲支撑均能为提高结构整体侧向刚度、减小结构侧向变形提供有力保障；但从构件破坏模式及对整体结构的影响情况看，普通钢支撑出现了受压屈曲破坏模式；而防屈曲支撑的变形及破坏形态与预期一致，构件滞回曲线饱满，耗能能力良好，也正是由于上述原因，其为整体结构提供了额外的阻尼耗能作用，有利于减轻罕遇地震作用下主体结构遭受到的破坏。

38.3.4 结论

通过上述对比分析后，可以得到结论如下：

(1) 将本工程中加强层伸臂桁架斜撑采用防屈曲支撑后，罕遇地震作用下其受力及变形行为呈现良好的屈服耗能模式，避免了斜撑在大震下发生受压屈曲的破坏模式，对结构抗震有利；

(2) 根据结构设计设定性能目标设计的防屈曲支撑满足预设的中震不屈服的性能目标；在罕遇地震作用下，设置于结构加强层伸臂桁架位置的防屈曲支撑发生了屈服，其滞回曲线饱满，发挥了良好的耗能性能；

(3) 对比分析表明，本工程加强层伸臂桁架设置防屈曲支撑后，其为整体结构提供了额外的阻尼耗能作用，减轻了罕遇地震作用下主体结构遭受到的破坏，提高了结构的抗震性能。

38.5 本章小结

迄今为止，某些采用消能减震设计的工程已经通过了实际地震的检验，并取得了令人满意的效果，为减轻多、低层房屋水平地震灾害中提供了一条行之有效的新途径。尤其是当第五代《中国地震动参数区划图》实施后，地震力明显放大，某些地区单纯依靠传统设计已难以满足规范要求，为消能减震技术的进一步推广应用提供了机遇。

但应指出的是，采用消能减震技术之后，常规计算方法不再适用，要求设计人员具备较强的分析能力和更加明确的结构设计概念，设计方法抽象难懂、步骤繁琐，同时还需验算罕遇地震下的弹塑性时程分析。设计人员应着重以下问题的把握：

(1) 消能体系的计算最主要在于如何考虑加入消能减震装置后对于原结构体系的刚度和阻尼产生了影响。如何考虑附加的阻尼和刚度是消能减震结构设计需要考虑的核心问题。

(2) 振型分解法主要适用于消能减震结构体系的弹性分析阶段。结构体系在多遇及罕遇地震作用下会进入到弹塑性分析阶段，时程分析法则可以弥补振型分解法的不足，求解结构弹塑性问题。当采用复杂的国际通用有限元分析计算软件时，考虑附加阻尼和刚度后，结构体系的求解方法是设计人员应考虑的关键问题之一。

(3) 在进行消能减震设计时，设计人员还应综合考虑各种因素（如温度、湿度、开裂等）对消能器可靠性、耐久性的影响，应进行多种消能减震方案（消能器）减震效果的定量分析，在确定消能减震方案时除消能器本身造价外，还应考虑消能器与主体结构连接构造方式、施

工安装难度、保养维修方法等因素对综合造价的影响。

(4) 计算分析与设计软件的选择。对于消能减震结构的设计而言，选择计算能力强、集成度高、功能全面的分析软件十分重要。

一方面，从消能器的工作原理来看，设计计算中通常需要针对其非线性特性选择特殊的分析单元进行模拟，因此分析软件除常规分析单元外，还应具备可反映不同类型消能器力学特性的分析单元。

另一方面，对于具体工程案例而言，除根据需要完成线性静力分析（单工况加载分析、反应谱分析等）、非线性时程分析（确定附加阻尼比、验证静力分析结果等）外，往往还需要针对消能减震部件不承受竖向荷载仅承受水平作用的特性，考虑具体施工过程，并在施工模拟分析的基础上完成整个设计的过程。

设计人员应尽量选择能够同时提供上述分析功能的软件（如 SAP2000、ETABS 等），重点掌握其动力非线性时程反应分析方法、消能器单元型式及相应力学特性以及施工模拟计算方法等功能。



第 39 章

土-结构相互作用实践

章延平 筑信达

本章目录

- 39.1 概述
- 39.2 考虑共同作用的 Winkler 弹性地基分析讨论
 - 39.2.1 地基刚度确定方法
 - 39.2.2 迭代分析的实现
 - 39.2.3 地基基础与上部结构共同分析模型
 - 39.2.4 地基刚度的计算结果
 - 39.2.5 SSI 效应对上部结构的影响分析
- 39.3 考虑共同作用的弹塑性地基整体分析讨论
 - 36.3.1 地基基础与上部结构的整体分析模型
 - 36.3.2 地基基础变形对上部结构内力的影响
 - 36.3.3 上部结构刚度对地基基础的影响
 - 39.3.4 变刚度调平设计分析(变形控制设计)
 - 39.3.5 不同地基土本构模型的影响
 - 39.3.6 基坑开挖回弹对地基变形的影响
- 39.4 本章小结

内容节选

39.2 考虑共同作用的 Winkler 弹性地基分析讨论

本节以桩筏基础的筒仓结构为例,利用 SAP2000 结构分析软件建立上部结构-基础-桩土模型。其中桩土地基使用 Winkler 弹性地基模型,即用弹簧单元模拟桩土共同作用,作为筏板基础的支撑。由于弹簧刚度初值设定的不确定性,所得到的弹簧变形(即地基沉降)与实际情况有较大误差。因此,结合 PLAXIS 岩土专业有限元软件,考虑地基土层的成层性和不均匀性,对二者进行耦合分析。通过多次迭代计算,最终通过 SAP2000 软件计算得到的前后两次位移趋于稳定,即可认为地基沉降计算趋于稳定,此时 Winkler 弹簧刚度即为考虑上部结构-地基基础达到位移协调的共同作用下所对应的地基刚度。

39.2.1 地基刚度确定方法

地基刚度的确定是一个非常复杂的问题,它与许多因素有关,如地基土层分布状况及力学特性、基础刚度、上部结构刚度、荷载大小与分布及岩土应力等。

目前确定地基刚度的方法很多,如经验值法,原位(室内)实验法以及迭代分析法。经验法包括经验值法和经验公式法,经验值取值范围大,且经验值和经验公式是基于有限实验数据统计,往往根据具体工程要对其修正。试验法包括原位(室内)试验和模型试验等,试验条件和具体工程条件往往不一致,需要对试验结果进行修正。并且试验点数量有限,单点试验无法体现整体效应。迭代分析法,结构荷载工况及分布反映到地基模型中,地基土层性质及基础形式引起的变形反映到结构模型中,可进行针对性分析计算。因此本例中地基刚度的确定采用迭代分析法。

39.2.2 迭代分析的实现

迭代分析的基本思路:采用 PLAXIS 与 SAP2000 的 API 功能,实现两款软件数据的交互处理。其中, SAP2000 结构模型模拟结构的实际尺寸、形状、材料、结构形式等,以及各种不同工况下的荷载及作用。PLAXIS 地基模型模拟土层材料性质(如非线性等)及土层的实际分布以及实际工程的基础(如桩基)与土层的相互作用。然后对两款软件计算结果进行协同分析。通过迭代计算可以更精确的求解 SSI 效应,得到符合实际工程和场地条件的地基刚度。

基于 PLAXIS 与 SAP2000 软件迭代分析流程图 39-2 如下：

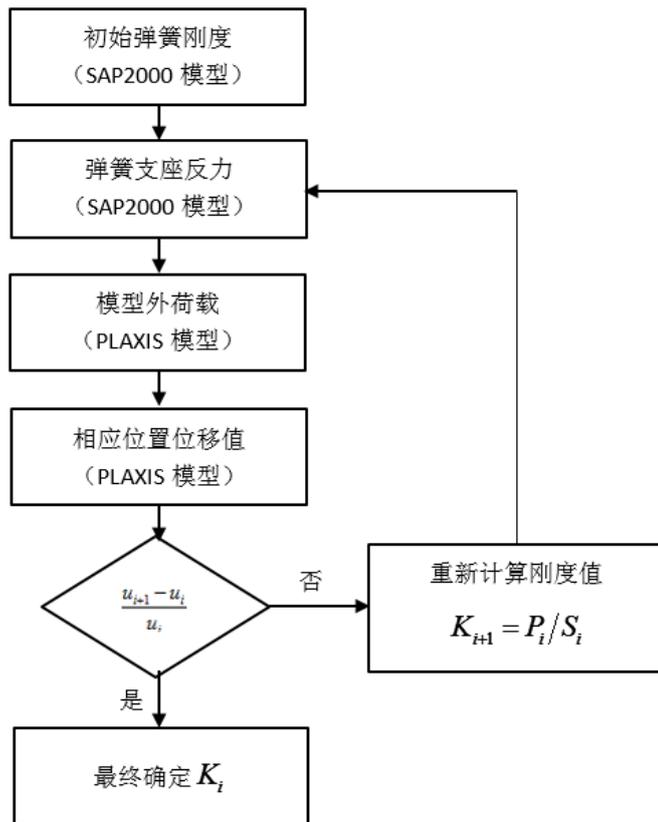


图 39-2 地基刚度迭代分析流程

39.2.3 地基基础与上部结构共同分析模型

(1) SAP2000 结构模型

筒仓结构直径 10m，总高度 20m。底部支撑结构高度 5m，厚度 600mm。漏斗部分高度 5m，厚度 400mm。筒仓部分高度 10m，厚度 400mm。模型材料都采用 C30 混凝土壳，定义完成后的模型见图 39-3。结构底部约束形式采用点约束，约束数量 36 个，约束 X、Y、Z 三个方向，刚度初始值为刚性。荷载组合为 1.2×恒载+1.3×地震荷载。影响系数最大值 0.16，地震烈度 8（0.20g），场地特征周期 0.4，周期折减系数 1。

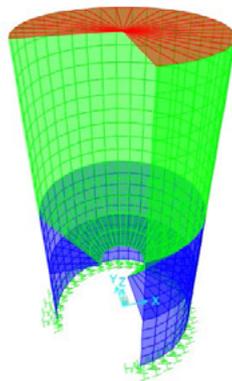


图 39-3 结构整体模型

(2) PLAXIS 地基基础模型

地基特性：模型平面尺寸 40m×40m。对实际土层简化后，地基土层包含两层。上层土为软弱粘性土，下层土较坚硬的砂土，土层材料属性见表 39-1。土层厚度分布非均匀，上层土厚度 5m~9m，模型土层总厚度 15m，地基模型如图 39-4 所示。

地层材料属性 表 39-1

参数	粘性土	砂土	单位
本构模型	MC	MC	\
γ_{sat}	18	20	kN/m ³
E	10000	30000	kN/m ²
ν	0.3	0.2	\
c	19	1	kN/m ²
φ	20	31	°

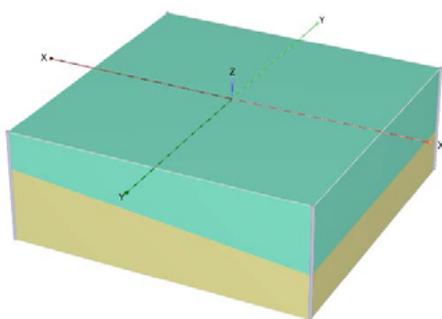


图 39-4 地层分布

基础形式采用环形条基+单排桩。环形条基宽度 2m，厚度 0.6m，材料 C30 混凝土。

桩材料使用 C30 混凝土，桩径 0.8m，桩间距约 2m，桩长 7.5~9.0m，沿基础环向均匀布置，进入持力层（砂土）1m~2m。SAP2000 模型计算得到的底部弹簧反力值导入到 PLAXIS 3D 模型基础顶面作为荷载，如图 39-5 所示。

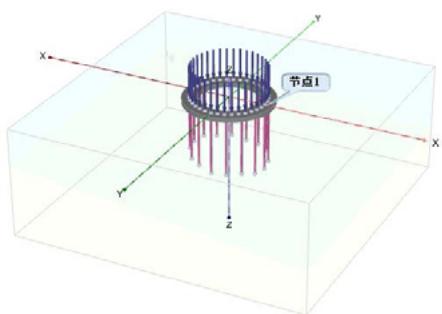


图 39-5 地基基础模型

39.2.4 地基刚度的计算结果

地基刚度 (K) 计算流程如图 39-2 所示。现假设收敛条件为全部计算点的最大位移迭代误差 $Max_dif = (u_{i+1} - u_i) / u_i$ 均不大于 0.1%。上述模型迭代第 3 次时 $Max_dif = 0.09\%$ ，计算终止。从图 39-6 中可知迭代第 3 次时就已经满足收敛条件，迭代 4 次以后基本趋于稳定。

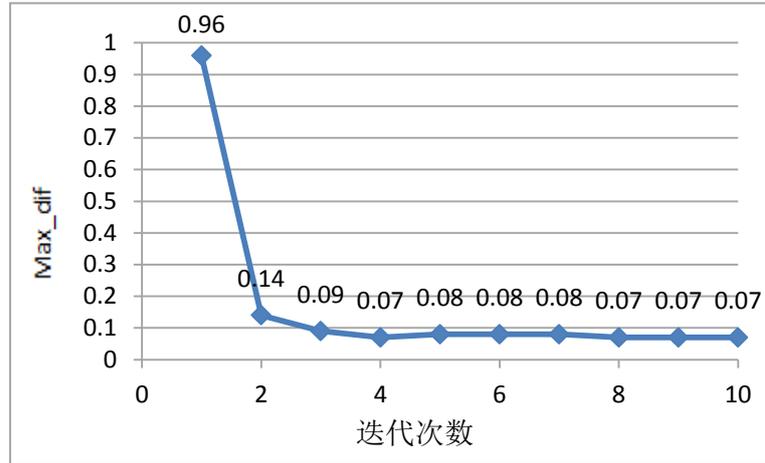


图 39-6 位移迭代收敛过程

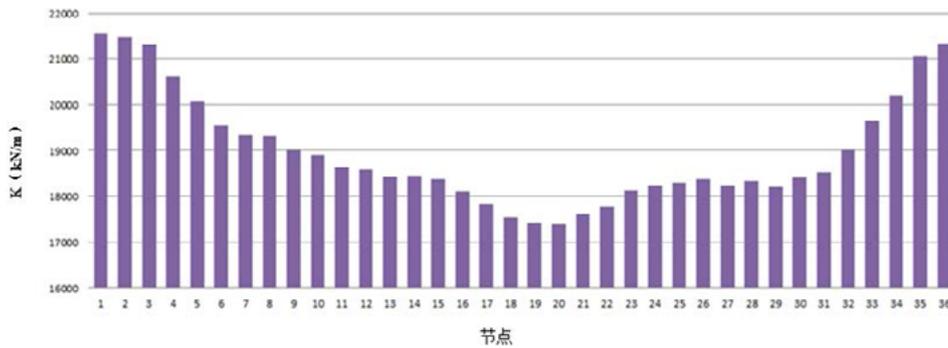


图 39-7 地基刚度分布（迭代 3 次）

图 39-7 是迭代 3 次时地基刚度分布图。假设表现地基土特性的桩（土）刚度初始值为刚性，考虑 SSI 效应后，受地基成层性和不均匀性的影响，地基刚度的分布形式与实际工程地基情况更加接近。

39.2.5 SSI 效应对上部结构的影响分析

图 39-8 显示了考虑 SSI 效应（迭代 3 次）和未考虑 SSI 效应时结构在不同阶模态下自振周期的变化。由于考虑 SSI 效应后，地基刚度变小，使得结构自振周期增大。可以看出考虑 SSI 效应后，结构的前 6 阶模态，特别是前 4 阶模态结构自振周期增长很大，由此可见 SSI 效应的影响非常显著。

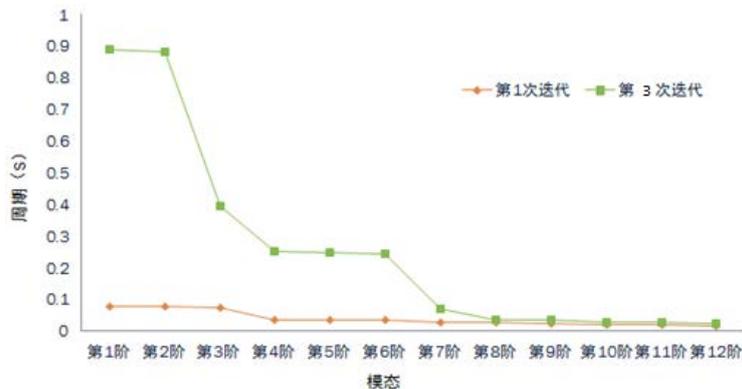


图 39-8 结构自振周期

图 39-9 和图 39-10 显示了考虑 SSI 效应和未考虑 SSI 效应时基础不同节点位置 X 方向地震反力 F_x 和 Y 方向地震反力 F_y 。从图中可以看出两种情况下不同节点计算得到的 F_x 和 F_y 差值有正有负，节点力重新分布。

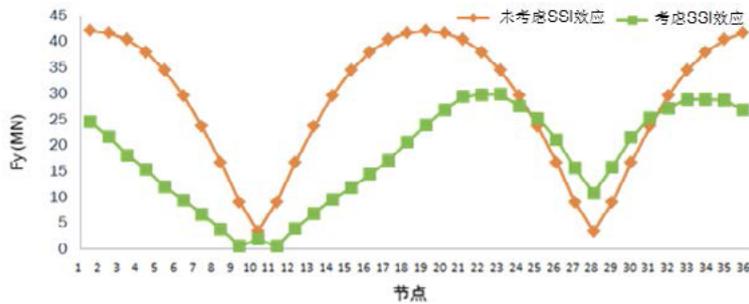


图 39-9 基础 X 方向地震反力

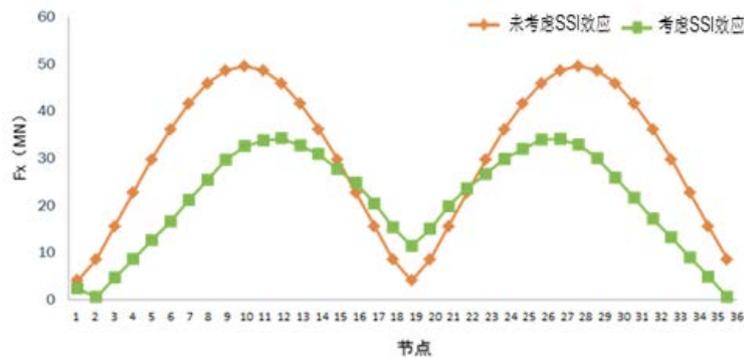


图 39-10 基础 Y 方向地震反力

节点 1 位于 X 轴最大值，其余节点沿着 XY 平面逆时针方向布置，节点 19 正好位于 X 轴负向最大值。从图 39-11 可以看出，由于土层的非均匀分布，桩的长度不一致，导致基础不均匀沉降，短桩侧沉降值大于长桩侧。未考虑 SSI 效应计算得到的沉降值要大于考虑 SSI 效应的沉降值，且两者最大沉降率为 14% 左右。由此可见 SSI 效应的影响（迭代 3 次）较为显著。

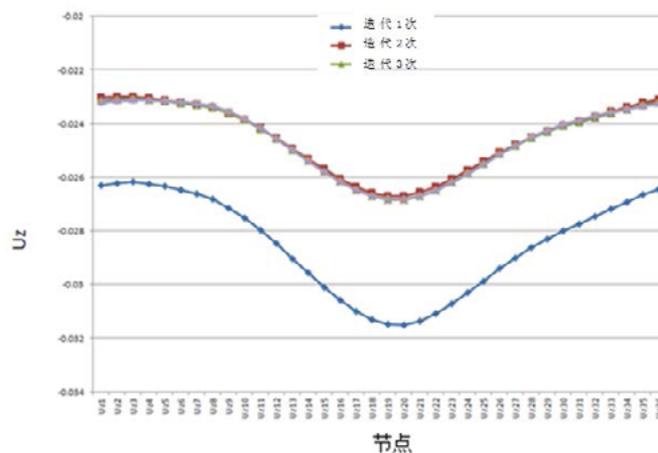


图 39-11 基底竖向沉降

表 39-2 显示了考虑 SSI 效应和未考虑 SSI 效应对筒仓层高为 11m 处结构内力的影响。 F_x 和 F_y 变化率都在 -38% 左右，这说明考虑 SSI 效应后地震对结构的作用是减弱的。这和图 39-9 和图 39-10 结论是一致的，结构自振周期增加，基础所受地震力会减小。

层高 11 米处筒仓所受合力 表 39-2

合力 F (KN)	X	Y	Z
第 1 次迭代	755	642	4351
第 3 次迭代	465	394	4414
变化率	-38.4%	-38.6%	1.4%

综上，对比未考虑 SSI 效应与考虑 SSI 效应，上部结构的周期、地震反力、结构内力等均发生较为明显的变化。

39.4 本章小结

地基-基础-上部结构是一个互联体系，共同作用来承担外部荷载和作用，特别在复杂高层建筑、软土地基情况下考虑 SSI 效应更具有现实意义。本章主要讨论了采用不同地基模型分析土与结构相互作用的方法，以 SAP2000 和 PLAXIS 3D 为工具，分别建立了三维有限元模型，计算并探讨了考虑土与结构相互作用对地基基础和上部结构的影响。

(1) 利用 Winkler 弹性地基模型，可将 SAP2000 上部结构模型底部的刚性约束代之以具有一定刚度的地基弹簧，既可表达地基的阻抗，又可计算与上部结构相协调的地基变形，从而实现上部结构与地基的共同作用分析。该分析方法中弹簧地基刚度的确定至关重要，该刚度值与地基土层分布、桩土相互作用等因素相关，且受到上部结构刚度及荷载分布的影响，一般并非均匀分布。利用 PLAXIS 3D 对地基土层、桩土相互作用的分析优势，通过与 SAP2000 分析模型的交互迭代计算来确定弹簧地基刚度，是对传统经验方法的一种有效补充和验证。

(2) 通过在 PLAXIS 3D 中建立上部结构-地基-基础整体有限元模型，比较充分地考虑了各个部分的相互作用效应，利用软件的多种土体本构模型、复杂地基边界条件、桩土接触作用、地下水条件等分析方法，为此类问题的分析提供了有效便捷的方法和工具。

(3) 从分析模型的计算结果看，相对于 SAP2000 上部结构模型，整体分析模型反映了土与结构相互作用对上部结构内力的影响，同相关文献的研究结果，传统设计方法在上部结构内力计算方面偏于不安全（如例题中的角柱及边柱），而基础内力计算（如倒楼盖法）则偏于不经济。PLAXIS 3D 整体分析模型中，地基土层本构模型的选择和参数确定实为关键，需要了解不同本构模型的特点及其适用性，以及实际工程的地层和荷载情况来综合考虑，参数取值则要充分结合地勘成果与工程经验。

(4) 对于高层建筑桩筏基础的计算，上部结构刚度的贡献不可忽略，但整体分析模型的复杂性将降低计算效率，认识到上部结构刚度贡献的有限性规律，通过建立建筑物底部的部分上部结构模型，在考虑共同作用分析的基础上，可显著提高工作效率，使该方法应用于日常分析设计工作成为可能。深基础的开挖将对地基基础分析产生影响，PLAXIS 3D 可以充分考虑施工过程及相应的地基土层响应，这也是土与结构相互作用分析的一个重要方面。

(5) 随着建筑物体型和周围环境日益复杂、建筑荷载不断增大，对基础设计提出了新的挑战，以变形控制的设计方法得到不断重视和发展，广义复合桩基设计、桩基变刚度调平设计等方法得到了广泛应用，在控制地基基础沉降量及不均匀沉降方面发挥了重要作用。在 PLAXIS 3D 整体模型中，可以灵活调整布桩方案，分析基础变形及内力、桩顶反力、桩土荷载分担比、桩承载力发挥等计算结果，不断优化基础设计方案。

(6) 关于土与结构相互作用的动力分析，也处于不断研究当中。PLAXIS 3D 动力模块可以进行任意边界条件的动力时程分析，具有粘性边界、自由场边界等动力计算边界条件，同时考虑地基土层和上部结构的材料阻尼等，已在高桩码头抗震、桥梁桩基抗震等方面有所应用，可作为研究该题目的有力工具。

第 40 章

桥梁结构分析及 CSiBridge 应用（节选）

魏赞洋 筑信达

本章目录

- 40.1 程序与案例简介
 - 40.1.1 软件操作界面
 - 40.1.2 工程对象概念
 - 40.1.3 背景工程概况
- 40.2 程序建模流程
 - 40.2.1 参数化建模思路
 - 40.2.2 桥梁建模向导
 - 40.2.3 快速全桥建模
 - 40.2.4 复杂结构模拟
- 40.3 施工阶段分析
 - 40.3.1 施工进度规划
 - 40.3.2 施工阶段工况
 - 40.3.3 查看分析结果
- 40.4 规范设计验算
 - 40.4.1 车辆荷载设置
 - 40.4.2 生成荷载组合
 - 40.4.3 上部结构设计
 - 40.4.4 一般框架设计
- 40.5 自动抗震设计
 - 40.5.1 定义地动参数
 - 40.5.2 定义设计请求
 - 40.5.3 自动计算过程
 - 40.5.4 设计结果输出

内容节选

CSiBridge 是一款桥梁三维有限元设计软件，其前身是 SAP2000 桥梁模块。自 v15 版本开始 CSiBridge 成为独立的桥梁专业软件，专注于桥梁结构的分析与设计。相应地，SAP2000 v15 及以后版本不再包含桥梁模块与桥梁设计规范。

CSiBridge 重新整合了 SAP2000 桥梁模块，并涵盖了 SAP2000 的所有建模与分析功能。针对桥梁专业，CSiBridge 进一步深化了 SAP2000 基于对象的概念，使针对桥梁的设计分析更加自动化、人性化，大幅提高工作效率和分析精细程度。

本章共 5 个小节，分别为：程序与背景工程简介、建模流程、施工阶段分析、规范设计验算和自动抗震设计。全章以一座（72+120+72）m 混凝土连续梁桥为背景，简要介绍 CSiBridge 从开始建模、运行分析到规范设计的各种特色功能。本章所有功能介绍均基于 CSiBridge 2017 即 v19 版本。欲了解更多操作细节，请扫描各小节后的二维码观看操作视频。

40.1 程序与案例简介

40.1.1 软件操作界面

CSiBridge 采用与微软 Office 系列软件相同风格的“Ribbon”式操作界面。与 SAP2000 传统界面相比，外观简洁友好、概念清晰。点击从“开始”到“高级”的各个选项卡，下方的功能区会显示相应的功能面板。图 40-1 中所展示的为选中“开始”选项卡时显示的“向导”、“视图”、“捕捉”、“选择”和“显示”功能面板。一般情况下只要从左至右依次使用各个选项卡即可完成整个工程的建模、分析与设计。

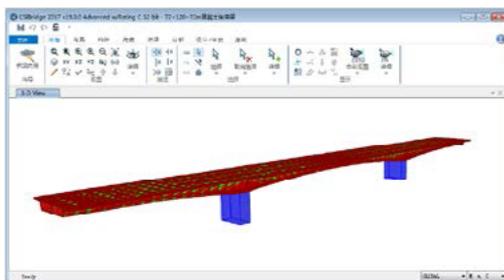


图 40-1 CSiBridge 操作界面（“开始”选项卡）

CSiBridge 操作界面中，各个选项卡和功能面板的隶属关系和对应的功能描述如表 40-1 所示。

CSiBridge 操作界面选项卡功能描述表 表 40-1

选项卡	选项卡描述	功能面板	功能面板描述
开始	集成可视化模型操作所需的基本功能和设计分析结果查看功能；	向导	全局显示已定义对象的树形列表。构成桥梁模型所需的每个对象属性均配有详细文字描述，并可在向导内直接编辑，进而引导用户完成全桥建模，详见 40.2.2 节；
		视图	包含基本图形显示操作，如缩放、平移、旋转、拉伸显示、2D/3D 视图等；
		捕捉	设置选择和绘制等图形操作的捕捉对象（例如捕捉端点、交点、中点、网格点等）；
		选择	通过图形界面或对对象属性执行选择、取消选择等基本选择操作；
		显示	显示模型的属性与荷载指定和查看分析设计结果；
布局	定义桥梁线型和车道；	布局线	定义桥梁所搭载路线的线型，包括道路平面和纵断面线型；
		车道	定义桥梁移动荷载分析所需的车道；
构件	定义构成桥梁对象的各个构件；	属性	定义材料、框架截面、索截面、钢束截面、连接单元和普通钢筋尺寸等基本属性；
		上部结构	定义上部结构构件属性，包括横断面、横隔板、钢板连接和参数化变量；
		下部结构	定义下部结构构件属性，包括支座、限位装置、地基弹簧、桥台和桥墩；
荷载	定义可包含于桥梁对象中的参数化荷载；	车辆	定义移动荷载分析车辆，v19.0 版支持导入 JTG D60-2015 及各国规范车辆；
		荷载模式	定义荷载模式。荷载模式为在荷载工况中施加荷载和后期查看荷载的最小单位；
		函数	分为反应谱函数和时程函数，用于定义地震作用；
		荷载分布	定义作用于桥面的点、线、面参数化荷载和作用于上部结构主梁的温度梯度作用；
桥梁	将构件与荷载组装为桥梁对象，并设置将桥梁对象离散为有限元分析模型时所需的参数；	桥对象	以布局线为基准拼装构件，构成桥对象。面板中的命令包含桥跨(指定上部结构横断面/变截面参数)、跨项(指定位于跨间的横隔板/钢板连接/铰/用户分割点)、支承(指定桥墩/桥台)、超高、预应力钢束、主梁普通钢筋、荷载(指定点/线/面和温度梯度荷载)、成组(定义参数化结构组，可用于施工阶段分析，详见 40.3 节)、施工(定义挂篮/自动生成悬臂浇筑施工阶段，详见 40.2.3 节)；
		更新	实时切换上部结构离散方式(框架/壳/实体)和桥梁对象的离散网格尺寸；
分析	采用 SAPFire [®] 计算分析内核，涵盖 SAP2000 的全部分析功能；	荷载工况	定义数值计算考虑的荷载和分析类型。支持分析类型分为：静力、多步静力、模态、反应谱、时程、移动荷载、屈曲、稳态、功率谱、次内力；
		桥梁	设置移动荷载工况的结果输出范围；
		锁定/分析	锁定/解锁模型； 分析自由度设置/运行分析/显示分析日志；
		找形	包含修改/复位未变形几何。可根据特定工况分析结果设置结构预拱度；
设计/评估	针对桥梁构件对象的规范设计。其中上部结构设计支持中国/美国/欧洲/俄罗斯/加拿大/印度桥梁规范；	荷载组合	当前版本(v19)支持按国内最新桥梁通用规范 JTG D60-2015 自动生成荷载组合；
		上部结构设计	批量执行上部结构横断面规范设计。上部结构离散为壳或实体单元时，可自动将验算截面上的单元应力积分为构件内力，进而引导规范进行设计；
		抗震设计	一键全自动桥梁抗震设计。适用于所有桥梁结构的延性抗震设计，规范规定必须采用时程分析进行抗震设计的桥梁结构除外。(v19 中适用 JTG/T B02-01 2008/AASHTO Seismic 2011) 详见本章 40.5 节；
		荷载评估	基于评估规范 AASHTO Rating 2010 评估桥梁结构的承载能力；
高级	该选项卡用于定义无法用桥梁构件模拟的一般结构。并包含了在前述选项卡没有涵	编辑	可对桥梁构件和一般结构进行几何编辑，如分割、合并、复制、移动、拉伸等；
		定义	前述选项卡未涵盖的 SAP2000 定义功能，如壳/实体/铰属性、质量源、束缚等；
		绘图	在图形界面中绘制桥梁构件以外的一般结构；
		指定/指定荷载	指定一般结构的对象属性/无法参数化的一般荷载；

盖的 SAP2000 其他功能。	分析	生成有限元分析模型/改动模型自动重新分析/非线性较模拟方式;
	框架设计	用于桥梁下部结构和用户自定义一般结构的截面规范设计;
	工具	可添加外部插件工具。默认自带 CSiLoadOptimizer, 可实现斜拉桥索力优化。

40.1.2 工程对象概念

CSiBridge 中的对象对应着工程中实际存在的构件和概念。用于通用结构分析的 SAP2000 中就有框架梁、框架柱对象的概念。而针对桥梁结构, CSiBridge 中对象的概念被进一步扩大。单个独立桥梁工程可被存储为一个桥对象, 桥对象包含上部结构、下部结构等子对象。而有限元分析所需的材料属性、结构几何尺寸、荷载与作用、模型边界和单元网格等有限元参数作为子对象的属性进行存储, 具体如图 40-2 所示。

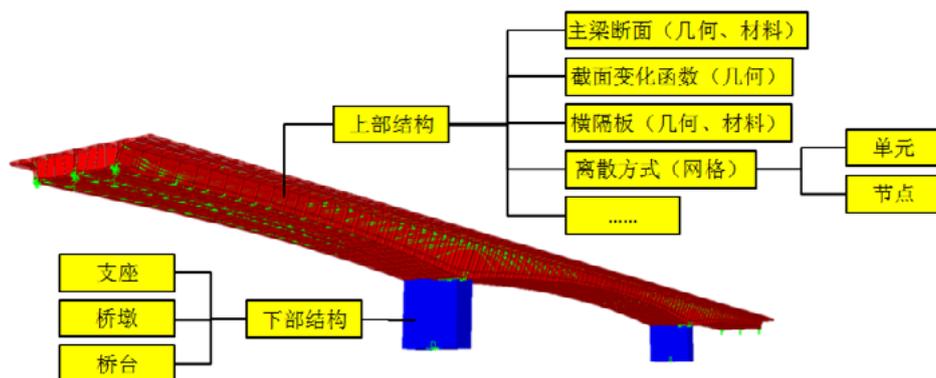


图 40-2 CSiBridge 基于对象的概念——程序内部的数据结构

由于软件中存储了各个对象的实际工程意义, 前后处理更加智能化、自动化。工程师能从繁重的建模与结果处理工作中解放出来, 专注于结构的设计优化。实际运用中, 基于对象概念为上部结构精细分析和自动抗震设计等快捷功能的实现提供了基础。

其中, 上部结构精细分析功能为壳与实体模型的实际工程应用提供了从快速参数建模到批量规范设计的集成解决方案。CSiBridge 可以轻松应对宽、弯、斜桥以及开口薄壁截面桥梁的复杂响应, 大幅提高分析精细程度。由于可以采用壳单元模拟上部结构, CSiBridge 可以清晰直接地模拟钢混叠合梁桥先钢梁后混凝土桥面板的施工过程, 如图 40-3 所示。

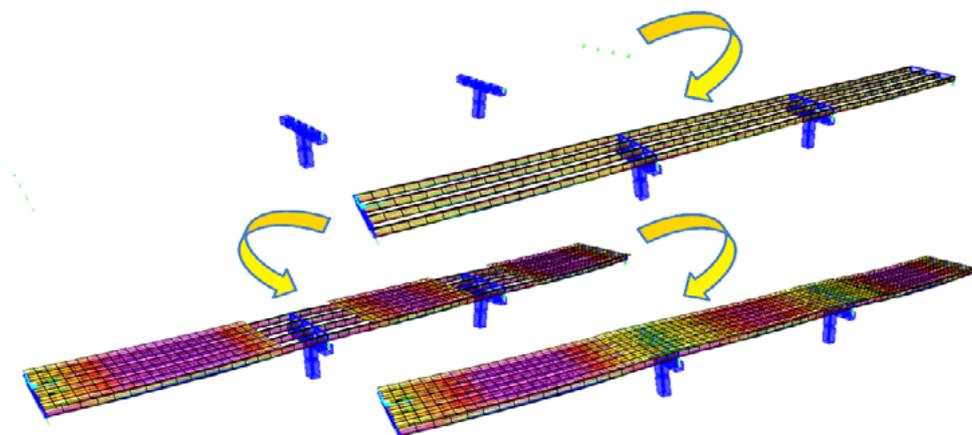


图 40-3 CSiBridge 模拟钢混叠合梁施工阶段分析

针对壳与实体模型建模效率低下的问题, CSiBridge 采用先定义桥对象, 再根据桥对象生成有限元模型的方式建模。其中生成有限元模型划分网格的过程由程序自动完成。在图

40-2 中可见，构件几何尺寸与网格数据在对象中分别储存。所以桥对象的几何尺寸可以独立于网格采用参数化的方式进行定义。用户在修改模型时只需修改几何参数，程序自动重新划分网格，不必基于单元逐个修改。

如图 40-4 所示，通过在布局线窗口中修改线型参数就可以快速修改全桥单元的位置。在实际工程应用中，设计局部优化改动极为频繁，参数化建模可以大幅提高工作效率。而且在新建桥梁模型时，也可以使用程序内默认参数快速生成桥梁对象。

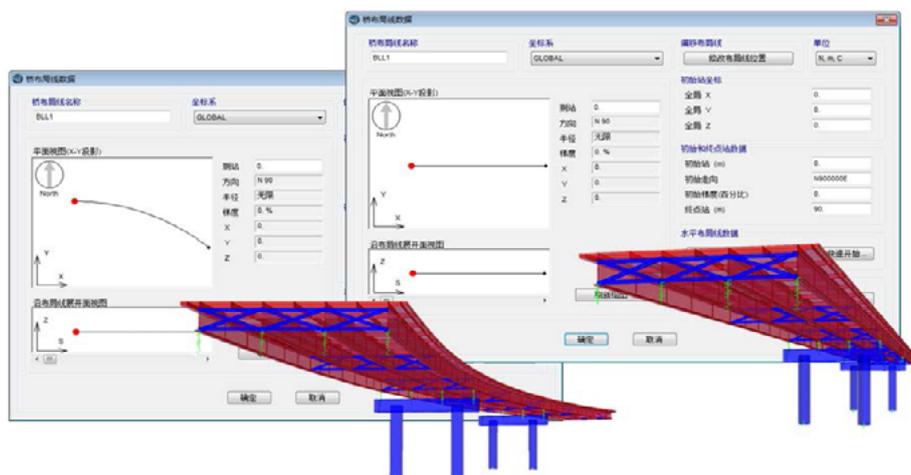


图 40-4 CSiBridge 参数化建模——通过布局线窗口快速实时修改桥梁线型

完成桥对象定义之后，上部结构的离散方式可以通过更新窗口在框架单元、壳单元、实体单元之间任意切换。程序会自动重新生成线、面和实体对象。用户可以根据现阶段设计深度或实际需求灵活地选择模拟精细程度。例如在施工图设计阶段可以直接将方案设计阶段的框架单元模型转换为实体单元模型，以获得更加精细的分析结果。在更新窗口中也可以设置离散网格的最大尺寸，如图 40-5 所示。

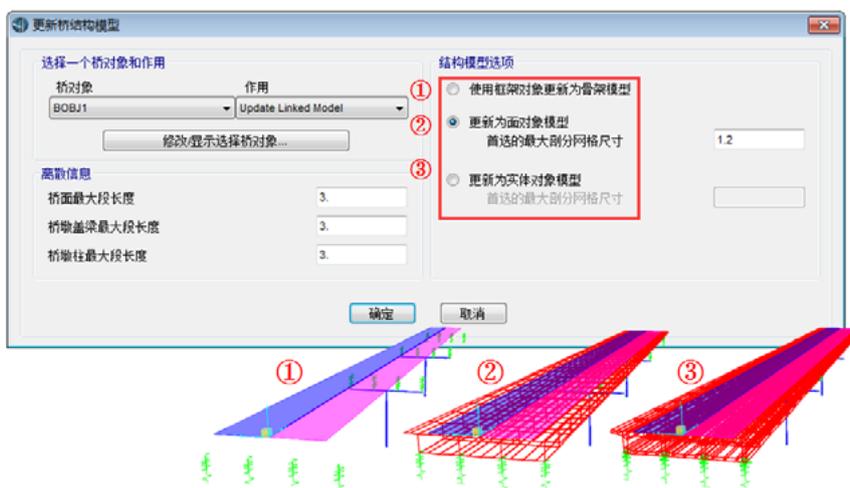


图 40-5 CSiBridge 多种模型离散方式——上部结构可以实时地在框架、壳和实体模型间切换

壳与实体模型难以应用于实际工程的一个主要原因是提取构件内力困难，进而无法批量进行截面规范验算。由于 CSiBridge 中储存了上部结构验算截面的信息，程序会自动对位于验算截面上的框架、壳、实体和钢束单元应力进行积分，获得上部结构对象的内力，进而引导批量规范验算。验算结果输出如图 40-6 所示，程序可以直接绘制荷载组合内力图和承载力包络图查看设计结果更加直观。

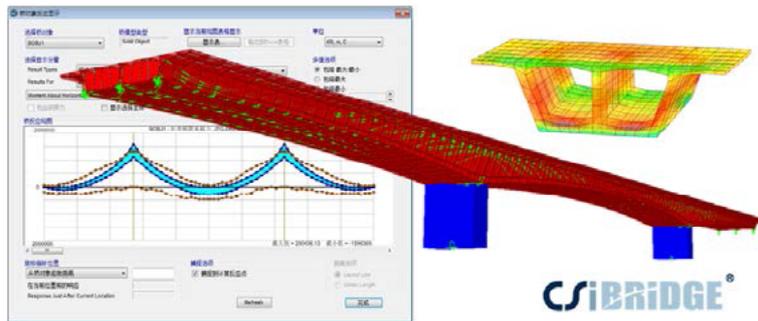


图 40-6 壳与实体模型规范设计——自动积分验算截面上的单元力取得构件内力引导规范验算

在图 40-7 中直观地展示了上部结构精细分析功能与对象概念之间的关系。构件对象采用与规范一致的概念，对工程师更加友好。构件对象封装了有限元单元，隔离了其与几何尺寸的直接联系。进而产生了参数化建模、多种离散方式、壳与实体模型设计等功能，构成了壳与实体模型应用于实际工程的完整解决方案。

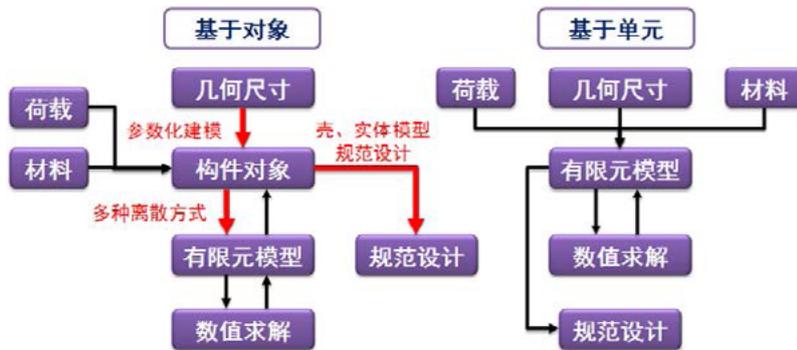


图 40-7 上部结构精细分析功能与对象概念的关系图解

对象概念衍生的另一项功能是自动抗震设计。同样由于对象对应实际工程构件，程序能够识别下部结构中的盖梁和墩柱。所以在用户完成建模并定义反应谱之后，程序能够全自动执行以下步骤：设置桥墩截面有效抗弯刚度>执行反应谱分析获得位移需求>取桥墩为隔离体并定义塑性铰>执行 Pushover 分析判定位移能力>计算需求能力比并生成报告书。具体细节可见 40.5 节。

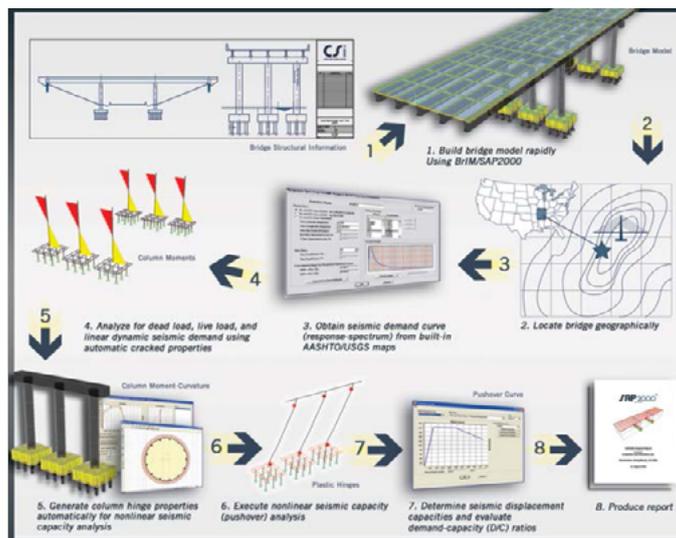
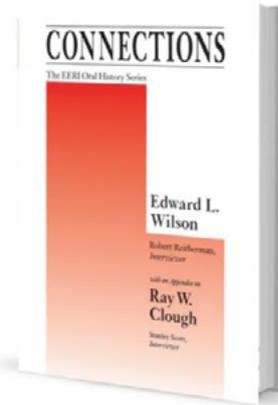


图 40-8 自动抗震设计流程

【编者按】本期为 Edward L. Wilson 教授访谈回忆录（3）。《Connections: The EERI 口述历史系列》是美国地震工程研究所（Earthquake Engineering Research Institute）出版的对地震工程界重要人物现场采访的口述历史系列丛书。Wilson 教授在结构计算分析领域取得了大量令人瞩目的成就与贡献，至今被结构工程界广泛采用，例如“非协调单元”、“Wilson-0 法”、“CQC 法”、“FNA 法”以及对多自由度体系“等位移原理”的否定等等；Wilson 教授获得了无数奖项和荣誉，包括 1985 年当选为美国国家工程院院士；Wilson 教授是 SAP 和 ETABS 系列程序的原开发者，现在依然担任 CSI 公司的高级技术顾问。本书通过访谈的形式回顾 Wilson 教授的成长经历及成就斐然的职业生涯。在本书的附录部分还公开了 Wilson 教授的导师，美国著名结构工程、地震工程学家 Ray W. Clough 的访谈录。在大师们平实、生动的口述中，我们仿佛穿越回上世纪初期，亲历行业先驱们的成长、分享他们的人生体验、目睹一个又一个极具变革意义的重要历史时刻，见证地震工程学、结构工程学的发展之路。希冀钟情于 CSI 结构软件的广大工程师朋友们既能从中获得结构工程专业知识，更能从大师们的学术生涯和人生抉择中汲取精神力量！



第六章

Oroville 大坝模型研究

没有人会相信一个解析解，除了推导的本人；大家都会相信实验结果，除了指导实验的本人。

Wilson: 在 1957 年，有一个谚语用来描述结构工程研究：没有人会相信一个解析解，除了推导的本人；大家都会相信实验结果，除了指导实验的本人。

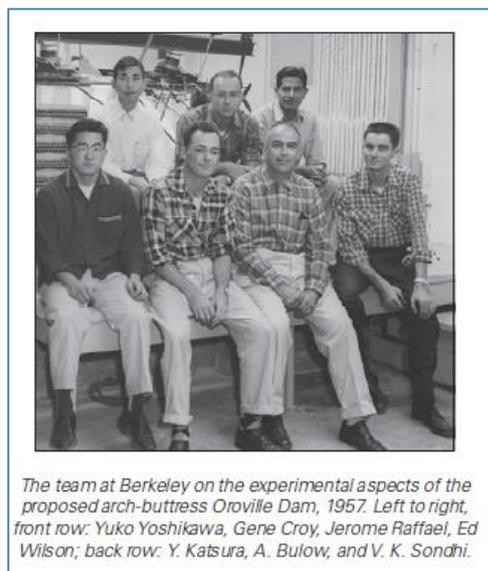
我被认为是一个“玩计算机的家伙”，但我非常自豪参与了 Oroville 大坝项目的实验研究，而事实上，在“实验力学学会”里有一个非常活跃的分部，工程力学实验室的大多数高级别教工都属于这个小组。我的想法是“我两者都做，然后再决定哪个结论最符合结构力学的基本方程”。

Oroville 大坝是加州水利署的大工程，它至今仍是美国的最高坝。对于这个 730 英尺高的大坝，蓄水位为海拔 900 英尺的工程，他们同时考虑五个不同设计方案，分别是：混凝土重力坝（gravity）、支墩坝（buttress）、多拱坝（multiple arches）、支墩拱坝（arch buttress）以及土石坝（rock-fill embankment dam）。

Reitherman: 这种研究是为了比较不同的方案？

Wilson: 正是。支墩拱坝是一种新的坝体形式，需要进行三维分析。因此，咨询委员会推荐了一个支墩拱坝进行模型研究，因为在那时，是不可能完成精确的手工分析求解。它是一个大型混凝土拱坝，中部的侧面有支墩段。Jerry (Jerome) Raphael 教授负责这个大坝的模型分析，Jerry 是在 Raymond (R.E.) Davis 退休后来的，Frank Baron 于 1953 年接替 Davis

成为工程材料实验室的主任。Davis 有一条通向他在学校办公室的私人专线，以便进行咨询工作，我不知道具体是如何运作的，因为你不能通过学校的交换机来接通，这在当时是不寻常的；在实验室需要资金的时候，他还出钱；他在胡佛大坝实验中挣了钱。这就是后来伯克利获得 Oroville 大坝研究项目的原因，因为具备了丰富的经验，实验室也建好了。实验室和研究是需要稳定的收入来支撑的；有一些教工是嫉妒 Davis 的，因为他的咨询办公室雇员有 Kaiser 健康保险，而那时教工是没有的。



The team at Berkeley on the experimental aspects of the proposed arch-buttress Oroville Dam, 1957. Left to right, front row: Yuko Yoshikawa, Gene Croy, Jerome Raffael, Ed Wilson; back row: Y. Katsura, A. Bulow, and V. K. Sondhi.

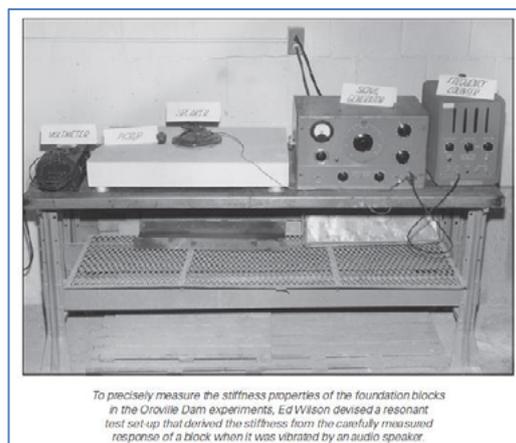
除了模型研究之外，学校和州府的合同还包括其他三个研究领域。Eberhart 教授指导对即将成为世界最大的地下发电厂房进行光弹(photoelastic)分析; David Pirtz 教授指导对建议的混凝土搅拌方案进行绝热温度属性研究，以及利用 4 百万磅试验机对 4 英尺高 0.5 英尺直径的混凝土圆柱体进行测试，试件破坏的时候，会产生极其剧烈的炸裂。

研究合同是从 1957 年 3 月开始的，我是第一个具有初级工程师头衔的雇员。在接下来的两年半时间里，我参与了所有四个研究领域，学到的东西远超实验力学的范畴；我很享受试验工作，还开发了一些新的试验技术；而且，这还只是超过 50 年职业的开端，我非常活跃地从事水电大体积混凝土结构的咨询，针对静力、温度和地震作用。几年后，偶然地与 Ray Clough 合作，在有限

元法上取得了重大进展，就是由于在大坝分析中的应用。

模型材料的设计

Wilson: 州咨询委员会指定的模型比例尺为实际大坝的 1/200。支墩拱坝模型的基础建造是最耗劳力的，因此在 Raphael 教授的指导下，我们的目标是设计模型的材料，在实验期间模型材料应具有稳定和可预测的属性。在材料研究的一开始，我们采用了标准的石膏材料，添加一种较软的填充材料，性能与混凝土相似；混凝土浇筑后，其强度和刚度多年都会增长，而且养护条件对混凝土力学属性将有重大影响。因此 Raphael 教授精心设计了一系列检测和图表，以获得一种具有可预测的线弹性模量的模型材料。那时的填充材料“硅藻土”，由 Johns-Manville 公司生产，是标准的模型材料成分，以降低模型材料的刚度；而且我们发现不同公司生产的石膏材料属性几乎相同；最终，我们发现将重量 25% 的硅藻掺入石膏并加入一定数量的水，放置在 90 华氏度的烘箱二周，就得到了我们想要的弹性模量。



To precisely measure the stiffness properties of the foundation blocks in the Oroville Dam experiments, Ed Wilson devised a resonant test set up that derived the stiffness from the carefully measured response of a block when it was vibrated by an audio speaker.

担任项目工程师

Wilson: 在我开始工作的一个月里，Raphael 教授雇佣了一名全职的项目工程师，叫 Stuart

Bartholomew，他在全球多个地区具有几年的混凝土坝设计与施工经验。作为项目工程师，他的作用是组织对 Oroville 模型的校准，以及监管几个人，包括我。他和 Raphael 教授一起制定了制作实物模型计划，包括模型的主要部分、基础，以及基础与支墩直接的转换接头。利用这些实物结构，用玻璃纤维形成外形，然后浇筑石膏模型材料来分层形成基础。这个阶段将持续大约 15 个月。就在这个时间点，Oroville 顾问委员会决定采用具有粘土核心墙的堆石坝，大坝位于 Sierra 丘陵地带，那里在 1800 年代及 1900 年代早期有大量的采矿，可以用来围成一个湖，将挖掘船开进去挖掘核心墙，掏出大量的岩石；因为附近有如此多的岩石，都不用花钱，很容易修建一条通往坝址的铁路线来运送材料。这是采用何种类型的大坝之决定因素。

Stuart Bartholomew 不想对一项不能建造的工程进行研究。但州府决定资助完成模型研究，为了他们计划建造的其他大坝做技术开发储备。于是 1958 年夏天我完成硕士研究之后就全职工作了，当 Raphael 教授提供给我这个项目经理的位置并把我晋升为助理工程师的时候，我愉快地接受了。随后的 5 年我都拥有这个头衔，当 1991 年从教职上退休的时候，我发现这 5 年可以作为全职教授加到了退休待遇里，这是多么幸运的事啊。



这是我人生第一次有机会负责告诉别人什么时间如何做不同的事。我想起了父亲在 Ferndale 附近的牧场监督四个儿子的情形，有一件事就是，他从不要求我们去做他自己不去做的事情。前些年我上过 Clough 教授的实验应力分析课，因此我清楚模型相似准则、光弹、应变仪及数据采集系统的基本原理，而且我在军队担任无线电修理工的经验也对应变仪测量系统很有帮助。

首先，我们将完整的大坝模型施加静水压力，不让水与硅藻土接触，以免使其由硬变为糊状，因此我们采用充满水的塑料管。

完成静水应力测试后，自顶到底一层一层地将模型切开成水平表面，在每一个表面处施加与一英尺混凝土恒载成比例的竖向荷载，记录其应力；完成整个过程，将应力从底至顶进行积分，这样就生成了每个应变测量处的应力值，是相对此处施工高度的函数。Raphael 教授将此方法命名为“恒载积分分析法 (the method of integration for dead load analysis)”。

这种计算大坝模型恒荷载应力的简单方法被证明是比当时所有的其他方法都要准确。几年后，世界上所有的实验室都采用了这种新方法。Raphael 教授写了一篇非常好的论文介绍了新方法与其他方法的对比。然而，接下来的 15 年时间里，这种模型分析的需求逐渐消失了，被 Clough、Wilson 和其他许多人的有限元软件所取代。

Reitherman: 听起来像是你的计算机程序帮助你放弃了实验方法。

Wilson: 某种程度上，是的。今天，CSI 当前版本的 SAP2000 是世界上最为广泛使用的结构工程软件，可以进行结构地震分析，允许你对任何结构类型进行分析，包括分步施工效应；而且程序可以对于温度改变、徐变、土-结构相互作用、水库-大坝相互作用、先张/后张预应力等等进行应力分析。对 Oroville 大坝模型的实验室工作，是我最有创造力的工作时期之一，我开发了一些新的实验方法，而没有去做计算机数值方法。人们不清楚我所做的这些实验工作，认为我一生只做了计算机软件的开发工作。

1959 年 7 月，我们准备测试完整的模型。那时，大部分学生已完成了他们的学位或离

开放暑假了。我记得是 Raphael 教授、Gene Croy 和我指导实验剩余部分。当加载到最大值的 50%左右时，我们都听到一声巨响，看到拱中部截面向下游移动了大约一英寸。我立即降低了施加荷载的空气包的压力值，实验室里的每个人的反应都是“发生了什​​么？！”在几个小时里，EML 的每个人都清楚了，这个历经 2 年的项目发生了重大失败。

我知道如果不能找到失败的原因的话，是不可能睡得着觉的。我开始在探孔角部附近挖基础，发现下方 6 英寸处，里面的水在增加，在探孔底部附近，材料已经彻底成泥浆了。

如果基础是完全干燥的话，答案就非常简单，我们就只会把拱坝截面用环氧树脂来胶合基础，继续模型实验。没什么大问题。但是，现在看起来应该把基础全部拿走并替换掉。我们把拱断面连同应变计拿掉，切换系统并从探孔移开。在失败后的 3 天里，我计划制作并烘干 20*30*2 英寸的块体，我们的烘箱有能力每天烘干 4 块，我们需要大约 60 块来做新的基础，所以需要大约 15 天来更换基础。

失败后大约 4 周，我们已经第二次施加静水荷载了。在项目的这段期间，我是每周工作七天，没有自己的时间，某些天我工作几个小时，另外的日子得工作 10 个小时。需要两个人的时候，Gene 会来现场帮忙。这种高强度的工作对我来说不是什么大问题，既然我在美国罐头公司连续工作过 57 天，在牧场也做过较长时间的雇工。并且我是一个单纯的人，住在离 EML 仅 50 码的 Hearst Avenue。第二次的模型测试非常顺利。

我发现在军队的无线电训练使得我能够去调整仪器设备，可以得到更精确的测量结果。我走到一个应变计跟前，手上的热量就可以影响它。为了证实我对逐步加载来模拟施工过程的方法是否有效，我会将模型切下一层来，将其均匀比例加压到这层混凝土重量。我们使用铅块来模拟混凝土的重量，铅块是从“山上”的劳伦斯伯克利实验室借来的，他们用铅块做防辐射实验。我们切下每一层后可以精确地把铅块放置在模型上，每次会花几个小时；第二天早上布置上零度数的应变计，然后迅速把模型上的铅块撤掉，再读一次应变计度数；两次应变度数的差别，与添加或去除此层混凝土重量成正比。读出加载层下方的所有应变计，就得到一条由此层上方放置混凝土重量引起的恒荷载应力曲线。

1959 年 8 月，我们的恒荷载实验完成之后，我有关 Oroville 大坝的工作就全部结束了。在随后的几个月里，Gene Groy 完成了所有的数据处理及图表绘制，这样 Raphael 教授就可以完成最终报告。我继续跟着 Eberhart 教授和 Pirtz 教授做 Oroville 项目的其他阶段工作，这些工作持续了好几年。

水库诱发地震

Wilson: 1975 年，在大坝修建 8 年后，Oroville 发生了 5.8 级地震。这很奇怪，因为 Sierra 丘陵并非地震活动带。USGS 从那时起就开始监测此地区，他们确认了每年都会发生许多次小震，这些小震趋向于与夏秋季水库水位快速下降有关。这种现象已被命名为“水库诱发地震”。

Reitherman: 人类自己对地层巨大岩石的应力改变而诱发地震的作用是微不足道的，话又说回来，人类修建的大坝和水库是地球上最大和最重的人造物体。

Wilson: 水库诱发地震现象引起大家注意的是 1967 年 6.0 级的 Koyna 地震，发生在印度 Koymanagar 地区 Koyna 大坝修建完成之后的几年后，也是与大量水体排空又注入有关，这次地震导致 200 多人死亡及大量结构破坏，包括在 Koyna 混凝土重力坝顶部附近的一条大的水平裂缝。1975 年我作为一名国际专家进行大坝抗震分析，所以加州水务署就请我校核 Oroville 大坝混凝土溢洪道的抗震安全性，我就替他们分析了一下，然后我就给他们演示了

如何使用 SAPIV，这样他们就可以检查与大坝相连的其他混凝土结构的安全性。

绝热温度测量

Wilson: 另一项我在加大与 David Pirtz 教授合作的大坝工程研究工作，是州府提供资助的对大体积混凝土搅拌导致的绝对温升研究项目。

Reitherman: 我记不得“绝热 (adiabatic)”的具体含义了——与热传导有关吗？

Wilson: 如果能够将一个系统的热行为大致维持稳定，至少在一个短时间内不向外界损失热量，这就是“绝热”。Oroville 堆石坝的大部分都是采用的混凝土，比如溢洪道和地下电厂，养护过程会产生热。支墩拱坝模型研究结束后就开始了这项研究工作。

我大量参与了绝热测试工作。David Pirtz 教授已在温度控制室建了一个容纳直径 2 英尺高 4 英尺混凝土圆柱体的大型隔热箱。在浇筑混凝土圆柱体的 10 天前，我们储备了所有材料，包括所有的水、石子和水泥，放置在设定为 60 华氏度（约 16 摄氏度）的温控室里。浇筑混凝土之前，我们在模具里的各处都放置了温度计和卡尔森应变计。Dave 建了一个加热系统来加热隔热箱的空气，以保持与混凝土圆柱体中心温度一致。我们就能够在随后的 28 天里周期性地读取仪器的读数了，因为水泥的大部分水化热都是产生在前几天里，需要几小时就读一次数；而且我还要检查所有的电子设备是否正常工作。这些绝热曲线非常重要，用来防止混凝土在建造期间和之后的开裂。Dworshak 大坝建成 8 年后，我编写了一个热传导有限元程序来计算大体积混凝土结构的施工应力，事实上，这个 50 岁高龄的程序至今被许多专业机构所使用。

Reitherman: 请解释一下，为何混凝土养护期间化学过程产生的热会对诸如大坝这种大型结构产生危害。

Wilson: 并非温度本身，混凝土没有像放在火中那么热。这是温差的问题。大坝浇筑时，这部分混凝土比起下面的要热，然后再变冷，这种膨胀和收缩就会影响接触部分的混凝土。以 Norfolk 大坝为例，施工得太快，热使其膨胀，但那时的混凝土强度还很低。养护时的降温使其强度和脆性提高。我记得 Roy Carlson 说过，他们把轨枕压到正在形成的大裂缝上，但大坝依旧开裂。

一个办法是养护时在大体积混凝土中放置水管来降温。在蒙大拿州高纬度的 Libby 大坝，却是相反的一个问题，外部混凝土太冷，因此需要加热保温。要点是，混凝土断面需要处于一个较小范围的温度梯度内。当你在坝体设置了水管，在寒冷地区的养护需要加热，而在温暖地区却需要制冷循环。

以 St. Lawrence 航道（位于美加边境）的水闸为例，我与 Roy Carlson 一起做过咨询，水闸的裂缝最易出现在抽水检修与维护期间，那时混凝土暴露在空气中，而气温又相当低；而那些没有抽水的水闸，很少产生裂缝。

Jerome Raphael 与地震工程

Reitherman: Raphael 为 1956 年第一届地震工程全球大会写了一篇大坝最新进展的论文。

Wilson: 那是在大坝抗震设计尚未完全考虑动力效应之前，采用静力侧向力系数施加在坝体

上。

Reitherman: 他 1956 年的论文是一个有趣的里程碑，涉及到了动力学主题，关注到地震动会影响到水体导致动水荷载，而不是地震直接晃动结构。同时，也率先提出了一个现代观念，土坝中的土力学因素，这个主题在这篇论文中只是非重点地涉及到了。特别是从 1971 年 San Fernando 地震后，土坝的易损性成为大坝设计的一个中心主题。

Wilson: San Fernando 低坝在 1971 年被毁，是用注水法进行施工的。简单地说，在土堤上方建一个围堰，放入一个驳船来把泥浆泵到你需要放置的地方，然后修建坝体断面；随着坝体高度的增加，会需要更多的土和水。地震之后的几天里，Harry Seed 教授和我就去参观了毁坏的大坝，我们都一致认为，如果水库的库容在地震期间是满的话，大坝下游的上万个家庭将会被摧毁，会有大量的人被夺去生命。很幸运水位较低。甚至坝体坍塌下 30 英尺后，水几乎没有漫坝；那个时候，在加州有超过 20 座注水坝，湾区有几座。在地震发生后的十年间，这些坝都被替换掉了。

Jerry Raphael 和我的友谊长达 30 年，直到他 1989 年因心脏问题去世。我们经常坐他的船在旧金山湾区出海，最后一次离他去世仅一个月时间。因为我比他年轻 20 岁，所以在他 70 岁的时候，我就当他的船员，攀爬桅杆。他去世不到 1 个月，1990 年我 58 岁的时候患了心脏病，1991 年我就从教职上退了下来。Jerry 是一个非常独特的人，我至今还怀念他。顺便说一句，25 年来，我的心脏都非常棒。

与 Diane 结婚

Wilson: 1959 年 6 月，我的朋友 Diane Farrington 获得了新闻硕士学位，并返回了她的家乡，加州的 Callahan。几周后，她又返回伯克利，在 Longs Drugs Stores 总部获得了销售经理助理的职位。我对她重回湾区一点都不吃惊，因为她在 Callahan 的工作是帮父母开百货店、加油站和邮局。我前些年去过 Callahan，这是一个小镇，在北加州邻近 Trinity 湖，环境不错，但，是一个生活起来没有兴奋感的地方。

接下来的几个月时间里，我和 Diane 几乎每天都见面。我们于 1960 年结婚。我们在 Dwight Way 靠近 Milvia Street 的地方租了一个两间卧室的公寓，仍然可以走路去校园。Diane 在我们儿子 Mike 1961 年出生前的一周才停止了工作。由于我们只有一个车位，不得不卖掉了一辆车。我们结婚时，Diane 买了一辆 1959 年的福特，而我有一辆老式的 1957 年的雪佛兰；她的更新，就把我的卖掉了。结婚后 55 年后，我们依旧在 Callahan 有一个温馨的家，每年都有好几次去看望在 Farrington 的大家族。只是，不再像之前的样子去打猎和垂钓了。

第七章

与 Ray Clough 教授一起工作 (1959~1963)

完成一个研究项目之后，要写篇论文或报告来总结自己的成果。

一个非常困难的决定

Reitherman: Oroville 模型试验完成之后，你在做什么？

Wilson: 我和 Gene Kroy 一起把 Oroville 大坝混凝土版本模型的应变测量结果转换为应力。而且，我继续与 Pirtz 教授和 Eberhart 教授一起做与 Oroville 大坝相关的常规混凝土测试工作。事实上，在 EML 工作两年后，我认识了所有的工作人员，清楚了大楼里几乎所有的实验设备的使用。某天，Eberhart 教授和我在大厅碰见了，他说停下来去见他。那天下午我在他办公室坐下，期望他给我一个项目做，而他却说“我认为你应该去拿个博士学位”。自从我 1953 年上本科的时候他就一直关注着我，他的结论是，我有能力去解决复杂的结构工程问题。我记得他说过，我可以在伯克利担任教职，并能很好适应。

几天后，Clough 来到我办公室说，他已经收到 NSF（美国自然科学基金）基金，资助他在结构计算分析的研究。他邀请我作为博士生与他一起做这个项目。Eberhart 和 Clough 是结构工程组里我最尊敬的两位教授。那个时候，博士学位需要通过两门不同的外语考试，并完成在其他两个领域的辅修课程。那时离我 28 岁生日仅几周。他建议我们去找 Popov 教授，看看要获得工程博士学位的最低要求是什么。Popov 同意我的申请，只需通过德语考试，把第二门语言的要求更换为我对 Oroville 大坝项目实验应力分析的贡献。我还将上几门动力学和数值方法的课程。

Reitherman: 与 Clough 教授一起工作是什么样子的？

Wilson: 在我开始为博士学位与 Clough 教授一起工作的头几周里，我们一起解决问题。几个月时间我就开发出了在 IBM 704 上的新程序，而且我们的交流非常富有成效，因为他把我当成了对手。我们能够清楚地定义想要解决的问题，然后讨论在我们程序中所采用的最快和最精确的数值方法。对于许多问题需要开发新的数值方法，不可能靠手算。我很享受我们的程序研究工作，耐着性子去上许多陈旧的、忽略了伯克利校园已有现代数字计算机的研究生课程。

Ray 有个独特的个性，他是一个乐观派，他相信任何事皆有可能，你只需要找到解决问题的方法。他一定是从青少年登山的经验中得到这个方法的。他体格非常健壮。1953 年，我还是本科生，教工们会在 Tilden 公园的年度野餐会上打橄榄球；我认为我的体型很棒，因为我是田径队里半英里最快的人。我相信大部分教工都把这个传统的橄榄球比赛视为训导学生的机会。我与他打过乒乓球，很激烈。Ray 是一个优秀的壁球选手。他住在这里（El Cerrito 山，山脊顶）下面的街上，后来搬到 Grizzly Peak 大道在伯克利山一个相似的山顶位置处。如果天气好，他就会骑车到校园。即使他退休后快 70 岁了，天气不错的时候，他依然骑车

往返校园。直到快 80 岁，他还去滑雪。

力的平衡方程、位移协调方程和材料属性方程依旧是结构分析的本质。协调特性是关键：构件变形时，它们仍然协调相处，地震过程中彼此间的相互作用。随着自动化分析的来临，有时人们忘记了结构分析的基本原理，很重要的是要把我们的方法与物理现实假定进行对比，来看我们的方法是否真实地描述了正在发生的事。

Reitherman: 许多人认为 Clough 是一个分析家，而非实验派；同时，许多人认为你是程序开发者，而不知道你的第一个研究项目是做实验。Clough 1980 年写了一篇文章谈到，通过测试结构材料及其组合性能来形成真正理解是如何重要的事情，并把他的研究归功于实验工作（Ray Clough, “The Finite Element Method After Twenty-five Years: A Personal View”, *Computers and Structures*, vol. 12, no. 4, 1980, p. 361-370.）。他写道：“由于计算机处理器能力提升导致有限元的使用急剧增加的趋势，以及对程序输出与研究真实结构所期望行为之间关联性的关注度在降低，对这些现象表达我的深切关注是非常重要的”。

符号矩阵解释系统——SMIS

Wilson: 在波音工作和挪威休假之后，Clough 教授确信“线性力学中的三个基本方程”能够为有限元结构系统写成矩阵形式；进一步，他相信所有的线性连续介质力学系统能够用有限元系统进行精确地来近似。因此，如果我们写出一个简单的程序来处理矩阵及其子矩阵，以用户指定的顺序，学生就可以求解结构工程问题。这个简单的教学软件免去了学生要花大量的时间去学习复杂的计算机编程语言。几个月时间里我们就开发了 SMIS 教学语言的原始版本，首次采用是在 1960 年代早期。我们继续增加了 SMIS 命令来求解模态/振型，及动力运动方程。这些操作清晰地阐释了结构动力问题只是结构静力分析的一个扩展而已。我们随后就发现 SMIS 的后续版本已成为了一个很好的研究工具，因为使用者可以方便地增加或建议新的操作。在接下来的 30 年里，这个程序的各种版本从伯克利传到了全球超过 100 所大学和许多的公司。

ASCE 第二届关于电子计算大会

Wilson: 开始与 Ray 工作的时候，我就搬到了他的另一个博士生 Ari Adini 的办公室，他也用 IBM 704。Ari 正在求解“平面应力分析的有限元法（The Finite Element Method in Plane Stress Analysis）”中所有的例题，这是 Clough 在 1960 年美国土木工程师协会 ASCE 第 2 届电子计算大会（匹兹堡）上发表的论文。这是第一次“有限元法”在一个主要会议中被使用，后来会议中的所有论文都被引用了。

正在编制 SMIS 的同时，我还针对任意形状的平面框架和桁架结构编写一个新的自动化非线性分析程序，采用了 Ramberg 和 Osgood 提出的非线性弯矩—曲率关系方程，开发了一种新型的逐步加载数值算法，我的程序展现出了令人印象深刻的结果。写完论文后，我交给 Ray，他建议我投给匹兹堡大会发表。令我惊讶的是，论文被接收了，其中一个原因也许是我的朋友 Diane 修改了论文提高了可读性。那时，她已经是 Wilson 太太了。

Reitherman: Ray 和你的论文在这次大会上是如何被工程师们所接受的？

Wilson: 令我惊讶的是，似乎这次大会上没有人对 Ray 全新“有限元法”留下极深的印象。大部分算例是在 IBM 701 上求解的，网格非常粗糙；因此每个单元里的常应力图并没有给

人留下什么印象。而且，大部分土木与结构工程师听众对连续介质力学的求解并没有多少兴趣。显然，为了让大家接受这种方法，我们应该采用非常精细的网格来求解。

ASCE的匹兹堡大会是我第一次参加专业的技术会议，大会论文集中收录了37篇论文，375名工程师参加了这次三天的大会。大部分论文都是简单地用计算机来求解某种几何形状的结构，在使用计算机求解方程之前，使用者不得不手算大量的输入数据。在我的论文中，我着重强调了，如果定义了每个节点的几何位置和给每个节点指定了一个独立的编号，就可以使得手算工作量减少到最小；每个框架或桁架单元就可以只引用2个节点编号及材料和截面属性来进行确定；节点表和构件荷载就可以完全定义好任意二维框架或桁架结构。我的非线性程序是基于增量切线刚度法，因此，只施加一次荷载增量也可以用于任何的线弹性结构。我展示了几个不同几何形状的算例结构后，论文就被接收了。同时，这也是唯一的一篇关于非线性分析的论文；没有关于结构抗震分析的论文。

Ray和我是搭乘同一航班往返的，我们还是住的同一个房间，以节省他的研究经费。会议期间，他介绍了几个其他大学的老师给我认识，比如，来自伊利诺伊大学的Nathan Newmark、Al Ang、Steve Fenves、Bill Schnobrich和Andy Veletsos。在回来的飞机上，Ray和我一起讨论了如何提升有限元法的能力。在我上的一门数学系开的数值分析课里，他们建议采用Gauss-Seidel迭代法来求解方程，此法的一个主要优势是，只需在高速存贮器上保存刚度矩阵中的非零项，在那个时代的所有计算机都是短板。从大会回来的第二天，我就开始修改程序框架，添加了平面三角形单元；一个月时间里，我就有了一个“第一个自动化有限元程序”的工作版本，在IBM 704上它绝对比方程直接求解器拥有更大的容量，我所需要的就是一个真实的结构来展示程序的容量和精度。

Norfolk 大坝分析

Wilson: 伯克利的Raymond (R.E.) Davis教授和Roy Carlson教授被美国陆军工程兵团聘为修复Norfolk大坝的咨询委员会委员，大坝位于阿肯色州的Norfolk附近。Roy长期在伯克利担任兼职教授，他与伯克利的联系起始于1930年代对胡佛大坝的混凝土研究；Roy是一个物理学家，参加过二战期间的曼哈顿计划；他将工程兵团导向到我们的工作。Roy是发明静电复印机（施乐）的Chester Carlson的堂兄弟，Roy买了价值\$10,000的施乐公司原始股票。

Reitherman: 哇喔。人们都开玩笑地说希望能抄上这种投资的地板价，不过这是我第一次听说有人真的这么干了。这就解释了Carlson是捐赠自己的钱来修建水力泵站的人之一，当时Ray Clough和Joe Penzien正在建大学的振动台设施。

Wilson: 他还捐赠了两个讲习教授职位，一个是工学院院长，另一个是SEMM领域的教授。我后面会告诉你有关Roy Carlson更多的事情。现在，我们回到Norfolk大坝分析上来。坝体有300英尺高，是在二战时期快速修筑的；由于高绝热温度增加后的寒冷，导致了坝体产生一条大的竖向裂缝，裂缝高达200英尺，从基础一直延伸到超过坝体一半高度。

咨询委员会准备把Norfolk大坝的分析项目交给加州理工，他们用模拟计算机来求解有限差分方程，以确定大坝的安全性；他们尚不能包括基础，亦没有办法计算裂缝顶部的应力集中。Roy知道我指导了Oroville大坝项目的工作，并且Ray 1960年的论文被引入了大坝分析，Roy就让Ray准备一份建议书，采用有限元分析Norfolk大坝。由于Ray计划第二天要出城，他就叫我准备这份建议书。不夸张地说，我在一天时间里就很快用粗网格对大坝进行了分析，不带裂缝，考虑重力和水压力。Roy Carlson把结果拿到咨询委员会会议上，委

员们建议把合同交给加州大学伯克利分校。Ray 和我得到这个机会去做已建大坝的分析，也是一个机会去证明 FEM 能够分析真实的复杂结构。兵团将 Ray 增加进了 Norfolk 大坝咨询委员会，他每次会议都将我们的分析结果传递给委员会。Ray 意识到委员会要求的日常分析工作量超过了作为一名兼职学生的工作量，Ray 就雇了 Ian King——他刚从英国牛津招的博士生——来帮助我绘制应力云图。Ian 和我成为了非常好的朋友，我帮他学习编程，他教我英式幽默。而且，他有板球经验，他成为了我们 SESM 垒球队的主力队员。

Ray、Ian 和我于 1962 年最终完成了 Oroville 大坝分析的所有工作，这个项目大约用了 15 个月的时间。Ray 写了一份优秀的报告，阐述了 FEM 的真正能力。依据我们的分析，委员会建议大坝不需要进行大修。

那时，世界上还没有人能够解决如此复杂的结构分析问题。有限元法使得我们能够对混凝土大坝及岩石基础进行准确的建模，岩石是正交异性材料；三角形单元可以在高应力处进行细分网格，在低应力或常应力的地方采用大的单元；温度变化用来预测裂缝的产生。

在 Ian 加入 Norfolk 大坝项目的时候，IBM 704 已被 IBM 7090 所取代，有了 FORTRAN 语言编译器。因此，Ian 就不用学习复杂的机器语言来写结构分析程序了。我把 SMIS 和有限元程序转换成了 FORTRAN，这样就可以在任何一台支持 FORTRAN 的计算机上运行。

高层建筑分析

Reitherman: 你什么时候开始对高层建筑分析研究的？

Wilson: 这起始于我 1960 年开发完成 SMIS。利用子矩阵，我们可以模拟三十层的建筑。我记得最早应用于一栋二十层混凝土框架剪力墙公寓建筑的静力分析，它位于旧金山，由林同炎公司设计，Ray 是顾问，我准备的数据，只用了几天时间；Ray 和我对结果进行了检查，所有力都是平衡的，位移也是真实的；添加了几张图表之后，我就驾车前往旧金山，把结果交给了 T. Y. (林同炎)。他对一大堆归纳所有构件内力的文件大为惊讶，我向他展示了剪力墙的侧向力图，墙的剪力图显示，在大约 16 层的位置为零，上面的剪力为负。他立即判定这种结果不可能，分析有错。

对于他的反应，我早有准备，正逢其时该我给大师上一堂简短的现代结构分析课了。我画出了只有剪力墙时结构的侧向位移形状，再画出只有框架时结构的侧向位移；这两幅图差别很大，然后我就解释给他听，如果建筑同时具有剪力墙和框架的话，框架和剪力墙一定具有相同的侧向位移，因此，由于需要在各层满足位移协调，两种结构体系之间就一定存在复杂的相互作用，在顶部框架会把剪力墙向后拽，与剪力墙自身的位移模式相反。林同炎是如此聪明，五分钟内就理解了。在他的早期，1931 年，他就做出了弯矩分配法的重大贡献。他根本不是一个顽固的人，对新观念持开放态度。大多数成功人士都是这样的。自己必须承认错误，向前走并从中得到学习。你必须有意愿去改变。

接下来的几年里，作为独立顾问，我为他公司做了好几个项目分析工作；而且，纯粹为了好玩，我还做了几个地震时程响应分析。我还为他们写了一个自动设计预应力连续梁的程序。

1962 年 SOM (Skidmore, Owings and Merrill) 的总工 Steve Johnston (是 Ray Clough 在 MIT 的同学) 需要一些帮助来对付一栋非常高的钢框架建筑，为一家知名保险公司准备在旧金山建造。保险公司的顾问告诉 Steve 说，对比他在东部修建的大楼来说，他的设计用钢量太大。Steve 不得不去说服他，额外的费用是由于旧金山位于大地震环境中。由于 SMIS 不能分析大型结构，Steve 就请求 Ray 能否让 Ian 和我开发一个精确的新的多层建筑程序。我们花了大概一个月来开发，那时我刚完成我的博士论文，基于我能开发出的最快的迭代法。

我推断, 如果我用直接带状矩阵求解法, 可以更快。Ian 和我在新程序里给用户提供了选项: 带状求解器或迭代求解器。我们发现迭代法只对少数荷载工况更快, 而带状法对于多数荷载工况更快。由于迭代法不能用于动力分析, 我们俩都一致同意, 在今后所有的开发工作中使用直接稀疏求解器。这个研究发表在 1963 年在 Boulder 举行的 ASCE 第三届电子计算大会上。

研究生期间的讲座和教课

Reitherman: 你研究生期间讲过课吗?

Wilson: 讲过。完成 Oroville 大坝模型项目之后, 我给 SESM 做过周一下午的讨论会, 有关这个项目和所用到的实验技术; 1963 年春季学期完成我的博士学位后, 在去 Aerojet 之前, 我为 SESM 做了另外一个学术报告, 关于线性和非线性有限元结构分析。而且, 在本地结构工程师协会会员开始使用我们的多层建筑程序后, SEAONC (北加州结构工程师协会) 邀请我去给他们每月一次的晚餐会做了一个报告。

1962 年的春季学期, Clough 教授应邀参与 UNESCO (联合国教科文组织) 在地中海和中东为期 4 周的任务。我被指定为这 4 周 Ray 的矩阵分析课程 (使用 SMIS) 的讲师, 就是那时候我意识到授课是件辛苦的事。关于那门课我最记得的是 Ed Keith 和 Bob Feibush, 他们两个非常聪明的学生; 他们获得硕士学位之后, 把 SMIS 带到了 John Blume 的公司, 开始使用“糖葫芦模型 (stick model)”来对核反应堆进行抗震分析。我 1965 年返回 (伯克利) 执教时, 他们已成立了自己的公司 EDS Nuclear, 并从斯坦福获得了工商管理硕士学位。他们总是从加大找最好的学生; 没几年, 他们就把公司卖掉, 都成了千万富翁。

我的第一篇地震工程论文

Reitherman: 直到这个时候, 你的研究还是在非抗震领域。你什么时候开始的地震工程研究?

Wilson: 读过 Ray Clough 的口述历史 (参见本卷的附录) 你就会发现, 他被伯克利土木工程系聘来是为开创地震工程项目的。因此, 既然我已完成博士学位, 我就回到了他的 NSF 研究项目。他要求我去读 Newmark 1959 年有关逐步 (step-by-step) 动力分析的论文 (Nathan N. Newmark, “A Method of Computation for Structural Dynamics”, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 85, 1959, pp. 67-94), 他想让我去研究是否可以把此方法扩展到非线性地震结构分析。

我们的儿子, Michael Wilson, 出生在 1961 年 6 月, 他现在是一所中学的科学教师。我记得当他一岁大的时候, 在阳光明媚的周日下午, Diane 和我都带他去 Tilden 公园去享受这美好的天气和烤汉堡吃; 当加热的时候, 我决定开始读 Newmark 的论文, 这是一篇非常优秀的论文, 很容易理解; 但它需要在每一步都迭代, 非常耗时。我们吃过汉堡后, 我用矩阵重写了 Newmark 的算法, 发现: 采用带状方程求解器就可以省掉迭代过程。那个时候, 工程师采用的线性动力方程积分的所有方法都是迭代方法。距 Tilden 公园的那个下午已经超过 50 年了, 我依然清晰地记得, 当我仰头望向树梢, 我意识到我已经对结构动力分析领域做出了重大贡献。第二天, 我把新方法给 Ray 看, 他也同样对能够消除迭代感到十分惊奇。我用了几天时间就把这个方法在 SMIS 中实现了。我们仔细对比了新方法与经典的模态叠加法, 用 1941 年 El Centro 地震记录加载到一栋 8 层的建筑。两种方法的结果几乎完全一致。

Ray 和我将这个新方法投到了葡萄牙里斯本的一次会议。

1962 年葡萄牙里斯本大会

Wilson: 土木工程计算机应用研讨会 SUCCE, 是一次由 NATO (北约) 赞助的国际研讨会, 对来自北约国家的年轻研究学者提供旅行资助来参加会议, 会议之前还有一周的课程安排。Ray 受邀担任讲师之一, 我获得旅游经费去参加课程和会议。这是一次极佳的机会, 能与来自全球对结构计算分析进行研究的同行进行交流。

Ray 展示了我们对 Norfolk 大坝的研究 (R.W. Clough and E.L. Wilson, “Stress Analysis of a Gravity Dam by the Finite Element Method”, Proceedings, Symposium on the Use of Computers in Civil Engineering, Lisbon, Portugal, October 1962), 我介绍了逐步地震结构分析的新方法 (E.L. Wilson and R.W. Clough, “Dynamic Response by Step-by-Step Matrix Analysis”, Proceedings, Symposium on the Use of Computers in Civil Engineering, Lisbon, Portugal, October 1962)。Ray 基于我的程序的论文也许是本届大会最重要的文章, RILEM (建筑材料、系统及结构的国际联合实验室与专家) 公报 (bulletin) 编辑听说了这篇论文, 意识到有限元法是求解大量不同类型土木工程问题的一种全新的和非常重要的方法。Ray 和大会主席同意在 RILIM 公报接下来的一期里刊登这篇论文。

RILEM 公报的发表是非常重要的, 被如此范围大且重要的结构工程师国际组织所认识, 是 FEM 在几年间就被接受的一个主要原因。在 1963 年之前, 这类问题的解决是靠实验物理模型、光弹和有限差分法; 在接下来的几年时间里, 大部分这些方法就被 FEM 所取代。

第一个针对高层建筑的非线性动力分析程序

Wilson: 1963 年我为林同炎洛杉矶分部做了另一个咨询项目。加大校友 Lee Benuska 加入到他们洛杉矶分部, 他们承接了一个政府的大项目, 研究高出地面的高层建筑在核爆下的反应。那时, 世界上还没有处理此分析的程序; 我已经完成了博士论文的工作, 作为全职雇员加入了林同炎公司; Ray 依旧是这个项目的首席顾问, 他对这个项目极其有兴趣, 因为他可以用同样的程序来对高层建筑进行地震分析。我可以使用 CDC 奥克兰数据中心, 大部分时间在家工作, Lee Benuska 和我会在需要的时候到 Ray 的办公室碰面。然而, 有些问题并不收敛, Lee Benuska 就会把这些难题交给我做进一步研究。几个月后, 我们增加了一系列的计算选项来大幅提升了程序的可靠性, 项目需要研究的所有结构都一一解决了。

我们的论文发表在新西兰举办的第三届世界地震工程大会 WCEE 上, 在此之前, 有关地震非线性分析的数值方法和工程应用的文章还没有人发表过。

基于对一栋 30 层钢框架建筑的非线性分析, 这篇论文得到了以下三个结论:

- 1、从非线性时程分析得到的位移, 比经历相同地震记录下的线性分析结果要大得多。这个结论与 Veletsos 和 Newmark (S.A. Veletsos and N.M. Newmark, “Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions”, 2nd WCEE in Tokyo in January, 1960) 在东京第二届 WCEE 提出的基于单层建筑的“等位移结论”不相符。
- 2、线性的弯矩-变形并不能对非线性分析得到的变形进行直接估计。而且结构不同部位的构件, 这两者的差异是很大的。
- 3、如果高层建筑设计为: 柱子为弹性, 并将非线性弯曲限制在梁上, 这样整个建筑倒塌的危险性就会降低。这是第一次提到“基于能力的设计 (capacity-based design)”。我们从证明了“等位移法则 (equal displacement rule)”并非理论或实验判断, 时间都已

经过去了 50 年。然而，直到现在，还有如此多的结构工程师和结构工程教师在继续使用这条错误的法则，来为旧的或新的“近似”地震分析方法而辩护。只需要几个小时，使用程序，比如 SAP2000，对一个复杂的结构同时运行线性和非线性的地震时程分析，就可以检查出这个法则的正确与否。根据我的经验，使用非线性分析的时候，非线性行为能够显著地导致设计内力和构件位移的重分布。如果工程师想要做一个“性能化设计（performance-based design）”，必须进行非线性动力分析，这样结构的所有构件才会在所有时刻处于平衡状态。

离开伯克利去 Aerojet

Wilson: 我认为在伯克利的这六年半时间是我一生中最富有成效的时期。我们的女儿 Teresa 1963 年 7 月 18 日出生在伯克利。我于 1963 年 8 月 2 日在 Sacramento 的 Aerojet 开始了阿波罗太空计划的工作。

在 1963 年 7 月底，在我即将要去 Sacramento 的 Aerojet 之前的几天，也是 Ray 第二次学术休假去英国剑桥之前，我们一起回顾了这些年的研究工作。我第一次见他是在 1952 年，还是一个年轻的本科生；他给了我一些个人的建议，他说“完成一项研究之后，要写一篇论文或报告来总结自己的成果”。我并没有始终如一地遵循他的建议。

第八章

在 Aerojet 公司担任航空工程师

如果 Aerojet 不允许我写自己的程序，我将返回湾区继续我的咨询业务。

Wilson: 我于 1962 年 12 月完成了博士学位，那时我妻子 Diane 正怀上了我们的第二个孩子 Teresa，将于 1963 年 7 月出生，因此我们决定在此之前还是住在伯克利。那段时间，我在湾区做咨询工作挣钱不是问题；那时，土木工程博士很难找到合适的工作；几年后，随着核电站的发展，工业界才开始聘用具有博士学位的土木工程师；但在航空领域，已经开始招聘博士了。林同炎那时是伯克利土木工程系结构工程和结构力学学部的主席，想要我担任临时教职，教 Clough 的矩阵分析课程，当时 Ray 在英国休假。我那时已经 32 岁了，Diane 和我都想尽快有自己的家，因此很容易地婉拒了这个薪水非常低的兼职教职。

选择航空公司

Reitherman: 你是如何决定去 Sacramento 附近的 Aerojet 工作的？

Wilson: 在 1963 年的 2 月和 3 月，我参加了三家航空公司的面试。我首先考虑的是 Sacramento 附近的 Aerojet，因为我父母和 3 个姐姐仍住在那里，我对那个地方很熟悉。而且，我以前的同学 Len Herrmann 和 Stan Dong（都是 Karl Pister 的学生）在 Aerojet 的固体火箭工厂的研究团队工作，他们在这个团队给我留有一个位置。

然后我又去了 Sunnyvale 的 Lockheed（洛克希德）面试。他们提供给我在荷载团队的一个职位；我问我是否可以开发航空结构动力分析的数值方法和计算程序，答案是绝对的“不可以”；另外一个部门在做所有的动力分析，位于 Palo Alto 的研究团队在进行程序开发。

接下来，我在与 Douglas（道格拉斯）飞机公司面试前一天飞到了洛杉矶。我租了一辆车，住进了一家不错的酒店，还有几个小时的时间在 LA 开车闲逛；他们支付所有的费用，我享用了一顿很好的晚餐，返回房间看电视。在 1963 年，只有几个本地的电视台可看；看完本地新闻和其他节目之后，我意识到 LA 地区及生活在此的人，与湾区完全大相径庭。而且，到处是雾霾。到第二天面试时间，我就决定了 LA 不适合家庭生活。然而，面试却非常顺利，他们认可我做所有想做的事情；而且，提供的薪水也比 Lockheed 和 Aerojet 高 25%。但我仍然决定接受 Aerojet 提供的职位。在接下来的 30 年中，我多次因咨询工作前往 LA；但几乎每次我都是乘早班飞机抵达，一旦工作完活，就乘下一班飞机回家。

Reitherman: 在地震工程有突出贡献的其他教师同事也如你一样，具有航空研究的经历，包括 Ray Clough、Joe Penzien、Boris Bresler、Egor Popov、Karl Pister、Jerry Sachman 和 Bob Taylor。Maurice Biot 1930 年代在加州理工进行了反应谱法的研究，他的航空论文是在冯卡门的指导下进行的，在这篇论文里地震的内容只有一章。回到你的本科时代，你说过上 Ray Clough 的第一门课就是飞行器结构。在这样的时代背景下，进入航空工程领域然后成为伯克利研究地震工程的教师并不鲜见。

Wilson: 当我进入航空工业的时候，我发现最好的结构分析师都是学土木工程的。如果你理解了动力学，飞机和导弹发射时的荷载、飞行时的荷载、地震荷载等等，它们都是一回事，其基本原理都一样。我 1980 年代最好的博士生之一，Charbel Farhat，现在是斯坦福航空工程的系主任，虽然他获得的是土木工程学位。顺便说一句，Ray 也教授轮船设计中动力特性问题的船舶工程课。在某种程度上，我认为现在伯克利的教师太过于专注在地震工程，而不是去解决各种问题。

Reitherman: 当你去 Aerojet 的时候，你知道将要做哪个具体项目吗？

Wilson: 我有两个伯克利研究生院的同学，Stan Dong 和 Len Herrmann，他们已经在 Aerojet 工作，所以我对搞结构的人在那里做啥有些了解。我加入了他们同一部门，这个研究部门致力于固体火箭。也有一个部门负责液体燃料火箭。Ray Clough 记得他暑期在波音工作时，那里也是不同部门的工程师一起工作，他在飞机位移与内力部门工作，另外一个小组在计算应力。我不去 Lockheed 的一个原因，除了亲戚在 Sacramento 之外，就是他们把我放在荷载部门。我已经分析过了温度应力、动力和其他复杂问题，只计算飞机荷载对我并没有多大兴趣——你必须分析整个结构来理解它。

Reitherman: 火箭推进靠固体燃料与液体燃料有何区别？固体火箭的基本工作原理与烟花一样——点燃爆炸就飞起来？

Wilson: 是的，固体火箭基本上就是控制爆炸，这个炸弹按设计的方式爆炸，飞向指定的方向。

一旦以一个较好的速度升到了太空，所需要的推进力极少，但需要一个巨大的升力以离开地球。

Reitherman: 当在电视上看到火箭升空的时候，会全神贯注于从火箭尾部喷射出的火焰画面带来的震撼，也许会暂时忘记了它的运行是遵循牛顿第三定理，作用力（推进火箭质量向前）等于反作用力（向后喷射质量）。

Wilson: 无论是液体还是固体燃料，都需要质量；必须喷射质量出去，在火箭里不仅只是燃烧产物可以喷射使其前进，不管添注什么特殊混合材料，火箭发动机加速并把它们喷射出去。

Reitherman: 火箭工作时的有什么内力？

Wilson: 发射火箭时，加速度产生很大内力，比如 10g 的加速度，相比较而言，地震加速度是 1g 或许 2g。大震级地震中，晃动的厉害程度会是小震级的许多倍，但加速度不会是相同的倍数。

Reitherman: 火箭的振动如何？

Wilson: 多级火箭已成为了将航天器送入轨道或达到月球的标准方法，在分离和后续火箭发动机点火的时候，振动会带来额外的内力。

在 Aerojet 的第一天

Wilson: 1963 年 8 月的第一周，我开始了在 Aerojet 的工作。拿到我的安全徽章后，与我们研究小组的头儿 John Zickel 博士进行了一个简短的谈话，他在布朗大学获得了连续介质力学的博士学位。这个时候距我得到这个职位已经 5 个月了。他告诉我的第一件事就是，Aerojet 没有从 NASA 获得新式固体火箭的主要开发合同；他同时提到，一些小组已经开始解雇工程师了；他说 Aerojet 正在生产组建民兵火箭集群，挣了大量的钱；然而，他们或许不得不裁剪研究团队的规模。这个冷酷的接待之后，他给了我一些报告去读，我就在一个小隔间里的新办公桌前坐下，与另一个我未曾谋面的工程师在一间办公室。

我的老同学 Stan Dongle 就在附近；我就到他的办公室去了解实情，他证实了 Zickel 告诉我的话。而且，他还告诉我说，布朗大学的一位老教授最近告诉 Zickel，有限元对于连续力学问题理论上是错误的，而且他雇我是个错误的决定。Stan 和我都笑了。Stan 还告诉我，Aerojet 的大部分合同都是与联邦政府按照成本加 7% 来计算的。显然，在我加入的几个月前，他们让许多人都加班，不是因为他们需要额外的劳力，而是因为公司需要在更高的劳动力成本之上获取那个 7%。这就是军工企业的复杂性及糟糕之处。人们告诉我说，他们周六按照要求来加班，有时却在玩牌。

在 Aerojet 使用计算机

Reitherman: 你在 Aerojet 使用的是什么计算机？你能坐在办公室用终端与计算机连接吗？

Wilson: 在 Aerojet，我们有 IBM 360，比我在加大用的 CDC 6400 要稍好些。输入都是靠打孔卡。事实上，直到 1979 年我在家有一台个人计算机，我都没有换为终端。

Reitherman: 你在伯克利如此倚重计算机，做你自己的程序，在 Aerojet 你用计算机来做什么？

Wilson: 我被告知只有计算机中心编程员工才被允许写程序，工程师想要开发程序不得不把方程给程序员，在 6 个月之内能得到任何结果就已很幸运了。那时，我对自己的职业有了一个结论：如果 Aerojet 不允许我写自己的程序，我将返回湾区继续我的咨询业务。

Reitherman: 你去 Aerojet 的时候，知道将具体从事哪个项目吗？

Wilson: 不知道。我所在的小组负责指导固体火箭工厂所有将会盈利的研究项目。然而，我决定去寻找工程师想要解决的一个实际工程问题。我去见了我的老朋友 Gene Kroy，他与我在伯克利一起做过 Oroville 大坝项目；Gene 正在用计算机中心提供的有限差分程序来近似分析二维平面应力问题。我告诉他，我的博士论文程序可以很容易地用最小误差来解决这个问题。Gene 和我拿着我程序的 FORTRAN 卡去到计算机中心，请程序员编译一下并输入系统，这样 Gene 就可以用了。几天时间里，Gene 就解决了问题，写了一个报告，感谢了我的程序和我的研究小组开发了它。几周后，我的老板，John Zickel 给我看了这份报告的副本，说“我们研究小组已成立了 3 年，但这是第一次有人感谢我们的工作”。

轴对称实体分析

Wilson: 我继续与 Gene 一起对他处理的其他问题进行研究。他的问题大部分看起来都是轴对称结构，比如承受大内压的火箭喷管；但为了解决这类结构，需要更改我的程序。我发现能轻而易举地绕开计算机中心为了防止我写或更改程序所做的设计，我只需在我的工作之前添加几张额外的卡片，就可以执行计算机中心的可接受程序，这给了我控制操作系统的机会；程序然后就返回到读卡器执行我真正的工作，这些都是后面的打卡纸所编码的内容。在接下来的几个月里，我继续改进程序，毫无障碍。

而且，我帮助 Len Herrmann 和 Stan Dong 写他们自己的计算程序，而没有用计算机中心的程序员。Len 花了不到一周的时间就掌握了 FORTRAN 语言，我对此并不感到意外。当 Stan Dong、Bob Taylor 和我在加大的时候，我们都认为 Len 是我们遇到的最聪明的工程师之一。而且，他还是那时垒球队的最佳三垒手。

光弹应力分析

Wilson: 当我去 Aerojet 时，正在做光弹分析的工程师小组，与我们力学研究小组在同一栋楼里。我们都对把有限元法计算的结果与光弹实验的结果进行对比充满了兴趣。所以，我们就开始了对同一个问题一起展开了研究。我们这个联合研究的第一个成果是，开发一个专门针对固体燃料推进火箭分析的程序。固体火箭燃料是由若干精心配比的颗粒混合而成，按计

划的方向进行燃烧喷射。

Reitherman: 虽然光弹法已经有些过时，但它相当令人惊讶，因为你加载模型，在某种意义上你可以实际看到应力，而通常你只能看到位移或变形，必须采用数值来概念化表达应力。

Wilson: 加载光弹模型产生的彩色光带并非直接与那个位置的应力成比例。为了将颜色转换成应力，需要大量的手工计算。然而，那时使用的三角形单元能够得到每个单元中心位置应力的较好近似。光弹只对平面应力问题有效，因此你不可能得到其他方向的应力；你可以用 0.25 英寸厚度代表 6 英寸的实际结构厚度。因为没有约束，所以光弹模型得到的应力要小于从我的有限元分析得到的应力。

我们就是用固体火箭颗粒问题来对比有限元法与光弹分析得到应力。光弹法有局限性，不容易计算恒载和温度应力。对于许多问题，光弹法可以得到精确结果，然而，与准备有限元网格相比，制造树脂模型和加载设备是很费时的。这个研究完成后，我开发了一个专门针对火箭颗粒分析的有限元程序，用户只需在内部边界上定义节点的位置，程序自动生成有限元网格，施加荷载到内部边界，生成有限元模型。

光弹几十年来都是标准的实验室方法；我是 1965 年 8 月离开 Aerojet 的，两年之后，光弹分析彻底被有限元模型所取代。

后来我在伯克利教书的时候，一个俄罗斯访问科学家告诉我说，他来自的实验室有 500 名工程师在从事光弹分析工作，他们的改变非常缓慢。冷战结束时，他们还有大量的工厂在生产坦克，为了让工人不失业，继续让工人生产坦克。人们采用技术迟缓，并不想改变，因此他们找到不这样做的理由，总在说“用我熟悉的方法，我也能干这个”。

Reitherman: 与你刚离开的伯克利环境相比，在 Aerojet 的日常生活是怎样的？

Wilson: 没有人在家干活，他们的周末完全都是自由的。在加大做研究生的时候，我周末也工作，每周工作 60 到 80 小时。在 Aerojet 的第一年，我有时间在 Sacramento 州立学院讲授夜间的结构矩阵分析课程，周一和周三晚上各 90 分钟。周末的时候，我准备一周的讲义，复印给所有学生，而且我还布置他们要用 SMIS 来完成的作业。

在 Rosemont 租房一年后，我们在 Sacramento 的郊区 Carmichael 购置了一栋漂亮的房子，因为我干喜欢木工活和庭院劳动，就开始享受在 Aerojet 低压力的工作。1964 年 9 月，在 33 岁时，我得到了生平第一次的带薪休假。Dianie、Mike、Terri 和我去到了山里的 Callahan，这是距北加州很远的一个小镇，位于东西中部。一整周，都和我姐夫 Steve Farrington 去打猎垂钓。那是一种新的感觉，完全处于休假状态，而又有工资。

平面和轴对称实体的通用程序

Wilson: 根据我在加大论文改进的程序在 Aerojet 被许多工程师广泛使用。与固体和液体工厂的工程师们一起工作几个月之后，我决定开发一个全新的结构分析程序，更好地满足工程师们的需要。我老版本程序能解决的一个典型问题就是，我之前提及的火箭喷管分析；用户需要指定每个节点的位置，而且只有三角形单元；同时，计算机的容量也较小，求解的计算时间也相对较长。引进四边形单元后，网格生成非常容易，而且正交异性材料和温度相关材料都可以做了。

我对新程序非常满意，希望从我老版本的用户得到反馈。一完成用户手册，我就约了老朋友 Gene Croy，他是老版本的第一个用户。当我走进他的办公室，他正被他当前项目的最

后期限所焦头烂额。我把新的 ASOLID 程序的用户手册给他，并告诉他程序具有的新的伟大的计算功能；他立即回应道，老版本非常好了，他不想学新程序的使用。我对 Gene 的反应有些沮丧；然而，既然我也是人，能理解他的反应。回到办公室后，我致电给 Aerojet 的其他几个使用者，发现没有人对新程序有兴趣，或是反问：“如果没有问题，为何要修复？”我只好继续其他项目的工作，比如利用新的有限元法来解决热传导问题。

两周后，一天上午 Gene Croy 打电话给我，语气有些恐慌；他请我是否能立即对我的老版本程序进行扩容，显然他的有限元网格超出了老版本的容量，想让我修改老版本来执行现有的网格，这是他花了好几天的时间准备的。我轻声回答说，我不可能去增加老版本的容量；但我有新程序具有更大的容量，我会立即去他的办公室，告诉他如何用。幸运的是，他的网格只需增加几个节点和几张数据卡就可以进行网格划分了；一个小时之内，我们就准备好了所有数据；他只需要把定义大型问题的几张输入数据卡片放入计算机中心，第二天就能取结果。

第二天上午，午餐之前，Gene 打电话给我说“我刚把结果画出来，一切都非常棒。这是世界上最伟大的程序。为何你之前没有告诉我这个程序？”我想，我是多么的幸运啊。许多研究人员写了论文，在他们死后多年才被认识到其重要性；而我的工作完成数周后就被工程界所认可。Gene 很快就告诉了 Aerojet 的其他结构工程师新的 ASOLID 程序具有的能力。我继续在程序里添加更多的功能，直到离开 Aerojet。最后的版本可以使用非线性材料进行加载。

参与阿波罗计划

Reitherman: 你是如何参与阿波罗计划 (Apollo Project) 的？

Wilson: Aerojet 的总部位于 LA 附近的 Azusa，那里的计算机编程小组与 NASA 有个合约，求解阿波罗太空飞船重新进入地球大气层时隔热壳里的温度应力。经过了相当长的时间，他们没有得到任何程序输出结果；Aerojet 的管理层显得就很尴尬，因为他们不能完成这个项目；他们听说我们在 Sacramento 工厂的工作之后，联系我们寻求帮助。隔热壳是轴对称结构，可以用 ASOLID 模拟。但是，我的程序没有考虑非对称的温度加载，Len Herrmann 提议扩展简谐函数到非对称加载，这对 ASOLID 程序只需很小的改动就可以求解隔热壳问题。John Zickel 和我乘坐 Aerojet 的私人飞机到了 Azusa 向总部展示我们的计划，他们批准了。接下来的 3 个月里两次前往休斯顿航空中心之后，我们就交付了完全满足 NASA/Aerojet 合约的计算机程序。我相信 Aerojet 的不允许工程师开发程序的公司政策再也无法执行了。遵照 Clough 教授给我的建议，我对这个工作写了一篇重要的论文“轴对称实体的结构分析 (Structural Analysis of Axisymmetric Solids)”，发表在 1965 年 1 月纽约举办的美国航空航天协会 (AIAA) 第二届空间航天科学大会上。我返回伯克利之后，1965 年 12 月又发表在 AIAA 学术期刊上。

Reitherman: 你对阿波罗计划的印象如何？

Wilson: 当我第一次听说把人类送到月球并安全返回地球，涉及到所有的复杂性，我的第一印象就是：这根本行不通！[笑声]这涉及到太多的问题。随后我了解到从发射到月球着陆的每一个小步骤都在按序进行测试；但是，在月球上的首次着陆和发射却是不能够进行测试的，必须在第一次就要成功。

我只是参与了阿波罗隔热壳的工作，它的用途是防止太空飞船返回地球大气层被烧毁。

对于阿波罗计划，我们采用的剥离层是耐烧蚀材料，把高温带走。这样就显然会随时间改变太空飞船的外形，就像修建大坝，混凝土养护产生的热持续地施加给结构，是太空飞船防热过程的逆过程。我在 Aerojet 说过，太空飞船的防护问题实际上与修建大坝类似，相比而言，太空飞船是一个非常原始的结构。航空工程师并不乐于接受我对大坝与太空飞船的类比。

Reitherman: 你在那里的时候，Aerojet 还参与了其他什么项目？

Wilson: 阿波罗计划进行的同时，Aerojet 正在生产民兵导弹，是固体火箭。固体燃料对于军事火箭的一个优点是固体燃料几乎可以立即点燃发射，而液体燃料火箭要花时间进行发射准备。太空飞船发射的第一个阶段是用固体火箭，但也会使用飞船内部的液体燃料发动机，但固体燃料推进器脱离之后，液体燃料发动机就接管过来进行控制，开机和关机，如此等等。Aerojet 制造大力神火箭，装备了 NASA 的双子座、维京、航海者和卡西尼等计划，也被用于北极星潜艇导弹。

NASTRAN 建议书

Wilson: 1965 年 5 月，我们收到 NASA 想要开发一个通用的结构分析程序的征求建议书（RFP）。Len、Stan 和我看了这个 RFP，这个项目要在 3 到 5 年里开发 NASTRAN（*NASA Structural Analysis computer program*）。NASTRAN 程序具有多种不同类型的单元，可以对许多不同类型的复杂结构体系进行静力和动力分析。你可以在网络上搜索“NASTRAN”，就可以得到有关信息。NASTRAN 的一个版本超过了一百万行代码，而在伯克利开发的 SAPIV 只有二千行代码。

Aerojet 的管理层指示 Len、Stan 和我去准备建议书，我们做了一份。然而，我们都没有人对超过 3 年的全职去做一个项目而感到兴奋，这是我们离开 Aerojet 的一个原因。在 Stan 和我离开 Aerojet 的前两天，NASA 通知我们，Aerojet 被邀请参加面谈，他们以将最终从三家公司做出选择。不用说，Aerojet 没有人去参加这个面谈，因为开发的人都离开了。

重返伯克利

Reitherman: 为何你在 1965 年要离开 Aerojet 重返伯克利？

Wilson: 离开 Aerojet 有几个原因。有一天工作的时候，Len Herrmann 告诉 Stan 和我，他正在更新自己的简历。那天晚上，我也开始更新自己的简历。如果 Len 和 Stan 离开 Aerojet，我就没有人可以去学习了。人总是想同比自己更聪明的人一起工作；而且，显然 Aerojet 在走下坡路：当我进去的时候，有 2 万雇员；20 个月之后，减少到不足 1 万 4 千人。Len Herrmann 获得了加大戴维斯分校的教职，Stan Dong 加入了 UCLA（加大洛杉矶分校），那是 1965 年秋季。十年后的 1975 年，Len 和我都晋升为了正教授，Len 负责戴维斯的结构工程团队，Stan 在 UCLA 也类似，我成了伯克利 SESM 部的主席。

离开 Aerojet 最重要的原因是，Diane 和我们都怀念湾区了，我们在那里有一大群朋友，我挣钱没问题。我们结婚的这 5 年中，我们已经攒下了一笔可观的钱；因此我们决定搬走，而不管有无工作。我就去到伯克利找到 Ray Clough，告诉他我从 Aerojet 辞职了。他说系里需要像我这样的人，我就提交了申请。如果被批准，我就可以在 1965 年的秋季学期开始。

我从 Aerojet 离职，卖掉了 Sacramento 的房子，搬回湾区，在山顶的 Orinda 租了一栋房子，距校园不远。我立即开始了与 Ian King 一起为壳牌石油公司开发近海结构动力分析程序。

我在 Aerojet 时，Jerry Raphael 就已经是 SESM 的主席。学期开始前几周，Jerry 和我在教工俱乐部共进午餐，那时 George Maslach 是工学院院长，他是一名机械与航空工程师，我们正好坐在同一张桌子。工程师们有几张经常坐的桌子。

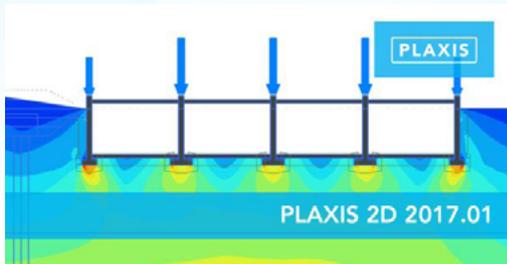
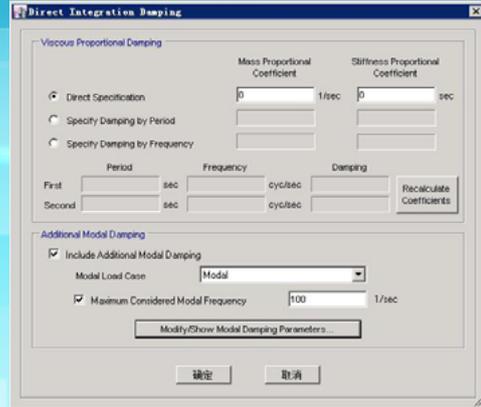
显然，我的任命书卡在他办公室里。我们谈了一些有关系里的事情：新领域，如何发展等等。因为我是这里的本科生和研究生，我对伯克利了解甚多，而不仅仅是自己的工作。

不到一周，我的任命信就到了。我不清楚那顿午餐与之有多少关系。顺便说一下，Maslach 只有机械工程硕士学位，而且那时的加州大学系统的主席 Robert Sproul，也只有土木工程学士学位。

我离开 Aerojet 的时候，年薪大约\$15,000，还有大量福利；当我在加大开始上班的时候，薪水为\$9,200，福利极少。我显然不是为了挣钱而加入伯克利，我从未对此决定而有任何遗憾。我积极地继续我的研究，包括动力学，并且就在湾区。

ETABS v16. 2. 0

- 增加关于收缩、徐变以及刚度随时间变化的规范
- 对于线性和非线性直接积分时程分析，提供附加态阻尼选项，可以使结果更逼真且相对保守
- 基于 Eurocode 2-2004 显示楼板开裂宽度



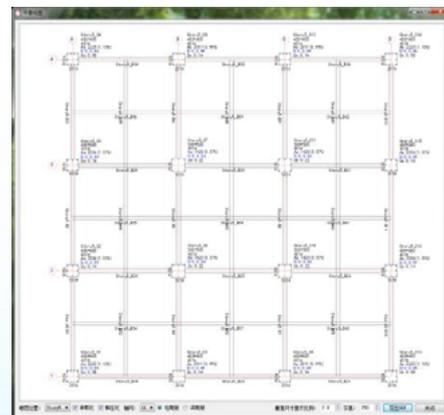
Plaxis 2D 2017. 01

隧道设计器功能增强:

- CAD 隧道断面的导入;
- 隧道衬砌分段的节点连接;
- 几何线与隧道之间的模型捕捉等。

CiSDesigner v1. 6. 1

- 增加 SAP2000 模型导入功能
- ETABS 模型导入支持 2015、2016 版本



CSiXRevit 2018

支持 Revit Structure 2018 与 ETABS (v15.0.0 及更高版本), SAP2000 (v17.2.0 及更高版本) 和 SAFE (v14.0.0 及更高版本) 之间的数据交换。

深基坑设计技术交流会暨 DeepEX 深基坑设计软件中国区发布会成功举办

深基坑设计技术交流会暨 DeepEX 深基坑设计软件中国区发布会于 2017 年 10 月 13 日在北京交通大学如期举办，来自北京、天津、河北、山东、甘肃、江苏等地的 180 余位业内朋友热情参与！

本次交流会围绕深基坑工程，特邀美国 DeepExcavation 公司总裁 DimitriosKonstantakos、清华大学宋二祥教授、北京市建筑设计研究院孙宏伟副总工和北京市勘察设计研究院院士大师工作室张有祥副总工，就我国基坑工程特点及当前基坑支护分析设计方法和不同国家的基坑支护设计方法和规范做了精彩报告，交流探讨基坑对邻近建筑物位移和变形的影响，并分享了北京地区超深基坑支护设计案例。

[点击回顾更多报告细节](#)



DeepEX2017 中文版由美国 DeepExcavation 公司与筑信达联合开发，包含了中国基坑设计规范的内容，为国内广大工程师提供一款既可对国内项目进行优化设计、又可直接用于国外项目设计的有力工具。

[点击申请试用](#)

Deep Excavation 公司总裁 Dimitrios 教授应邀赴北京科技大学讲学交流



2017年10月11日,Deep Excavation公司总裁Dimitrios教授应北京科技大学土木工程系周晓敏教授之邀,开展了主题为“Designand Application of Deep Excavation”(深基坑设计理论及应用)的讲学交流。

作为“2017 土木矿山专业国际化实践系列课程”的第九期,本次课程由周晓敏教授主持,北京筑信达公司章延平工程师应邀参加,学院研究生及留学生 20 余人也积极参与。

赴中铁十四局集团公司桥梁施工应用培训班成功举办

2017 年 10 月 22 日,筑信达应邀赴中铁十四局集团公司沪通项目部,面向集团所属 6 个子分公司 37 名工程技术干部,进行桥梁施工应用高级培训,历时 7 天。中铁十四局集团公司副总工程师夏吉军、山东省科技咨询中心副主任由广堂、集团公司桥梁专业委员会主任李秀东、副主任侯剑等列席会议,为培训会的启动揭开序幕。

中铁十四局是具备工程总承包资质的集团工程单位,本次参训的人员均为项目部施工技术主管人员。在内容上,本次培训紧扣中铁十四局集团公司的实际需求,安排了包含桥梁施工临时结构验算和施工线形监控的相关课程。培训与实际应用紧密结合的方式得到了参训人员的普遍认可。

通过本次培训,参训人员表示自身技术水平得到了提高,掌握了 SAP2000 和 CSiBrigde 基本操作,并初步具备悬臂浇筑挂篮和施工临时支架等施工临时结构的验算能力。



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.ec

(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

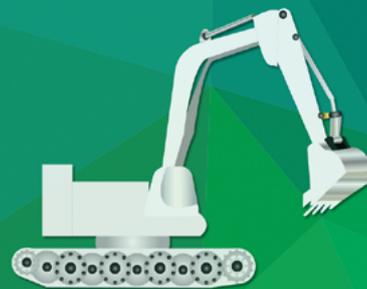
PERFORM 3D

PLAXIS

CiSDesigner

CiSGTCAD

CiSModelCenter



**DEEP
EXCAVATION**



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