



- 开敞式钢结构设计软件 CiSOpenSteel 应用要点解析
- 钢结构节点设计与分析软件 IDEA
- 冷弯薄壁型钢 SAP2000 设计工具功能介绍
- 新钢标“直接分析法”在 ETABS 和 SAP2000 中的实现
- Edward L. Wilson 教授访谈回忆录（6）



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：北京市石景山区古盛路 36 号泰然大厦 4 层 408 室

电话：010-68924600 技术热线：010-68924600-200

传真：010-68924600-8

网址：www.cisec.cn 在线支持：support.cisec.cn

邮箱：support@cisec.cn (技术支持)

sales@cisec.cn (产品销售)

筑信达武汉分公司

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)

金橡果科技成都有限公司

联系人：刘宇

手 机：185 1282 0985

# 目 录

# Content

## 筑信达

开敞式钢结构设计软件 CiOpenSteel 应用要点解析

1



钢结构节点设计与分析软件 IDEA

10



冷弯薄壁型钢 SAP2000 设计工具功能介绍

14

新钢标“直接分析法”在 ETABS 和 SAP2000 中的实现

23

ETABS 美标混凝土框架设计要点详解（一）——框架柱设计

27

CSiBridge 在悬索桥索力优化中的应用

33

桥梁性能化抗震设计在 CSiBridge 中的实现

39



PLAXIS 动力边界条件

44

### 经典连载

Edward L. Wilson 教授访谈回忆录（6）

49

### 新版发布

66

### 活动报道

67

### 征稿启事

71





# 开敞式钢结构设计软件 CiSOpenSteel 应用要点解析

筑信达 孙雪艳

开敞式钢结构设计软件 CiSOpenSteel 是适用于开敞式钢结构的设计软件，可用于各种类型的开敞式钢结构，尤其是石化行业开敞式钢结构的设计工作。

CiSOpenSteel 软件是基于 SAP2000 开发的设计软件，软件安装后以菜单项的形式在 SAP2000 中调用，如图 1 所示。CiSOpenSteel 提供了高效的建模工具，辅助计算，设计参数指定，分析与设计，结果输出等功能，操作界面是常用的菜单加图形显示的模式，如图 2 所示。CiSOpenSteel 与 SAP2000 共享数据模型，在 CiSOpenSteel 中进行的操作会实时更新到 SAP2000，分析与设计直接使用 SAP2000 分析内核。

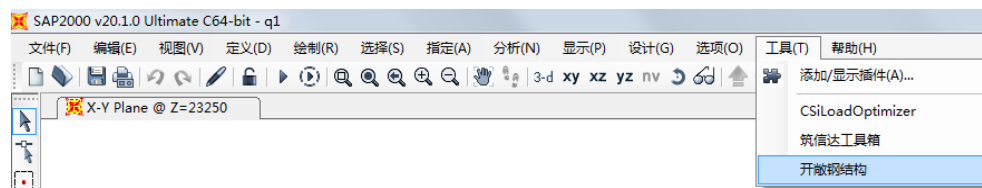


图 1 开敞式钢结构设计软件集成于 SAP2000

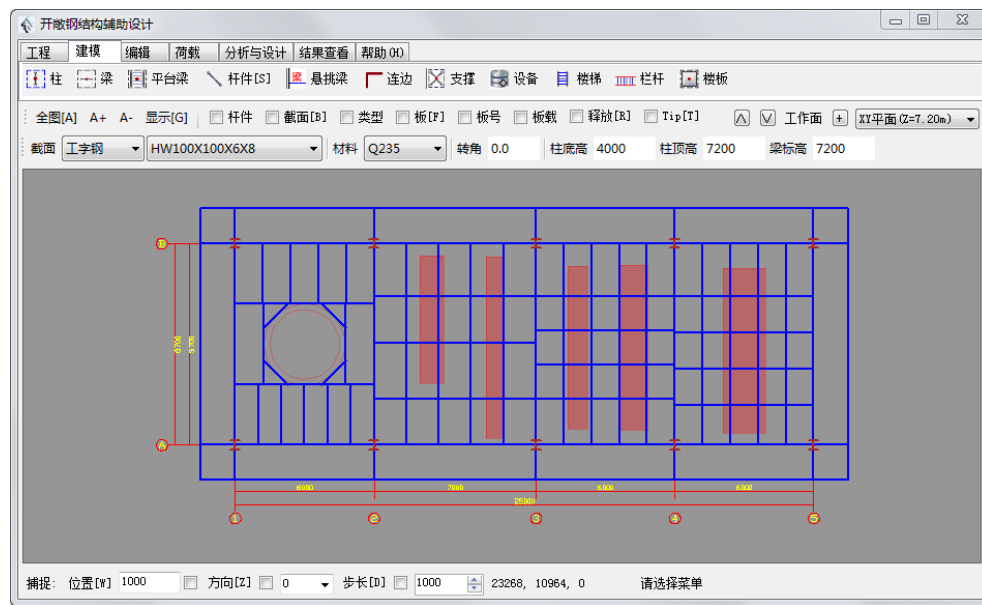


图 2 开敞式钢结构设计软件操作界面

开敞式钢结构用于支撑设备管道，主要特点是设备多、楼板弱、无维护结构。对此种类型的结构进行结构计算需要解决设备的模拟，楼板刚度弱对结构分析的影响以及开敞结构风荷载计算等问题。本文介绍开敞式钢结构设计软件 CiSOpenSteel 对以上问题的解决方法。

## 1 设备模拟

开敞钢结构设备数量多，类型多，通常使用荷载方式模拟。用荷载模拟设备，不能考虑设备质量分布和刚度对结构的影响。在开敞式钢结构设计软件 CiSOpenSteel 中，建立设备整体模型，参与结构整体计算，如图 3 所示。

### 1.1 参数化建模

通过 CiSOpenSteel 可建立立式设备、卧式设备、空冷设备等几种常见设备，在软件中用参数化建模的方式建模型，设备参数对话框如图 4 所示。不同类型的设备描述参数不同，根据设备类型输入相应参数，设备定位点可在视图中选取或直接输



入坐标值。设备作为一个整体在模型中可编辑、选择、显示。

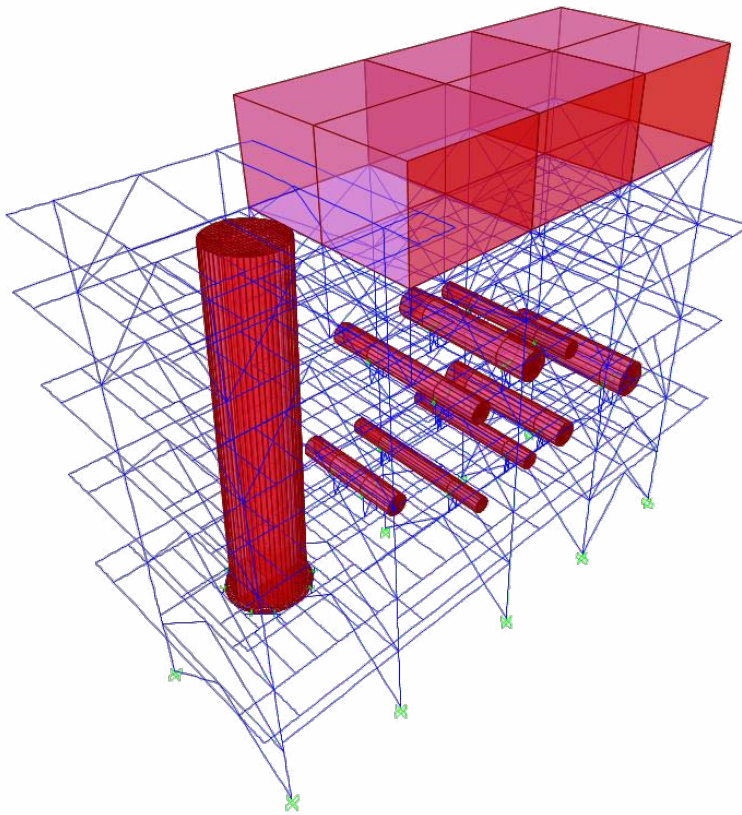


图3 设备布置整体模型

添加设备 ☒

设备类型: 立式设备

---

**基本信息**

设备名称: VE-6700

设备壁厚 (mm): 20

设备自重 (KN): 200

操作介质重 (KN): 101

充水重 (KN): 102

---

**螺栓信息**

螺栓个数: 12

起始螺栓与X轴夹角 (度): 0

设备螺栓分布直径D0 (m): 1.2

---

**设置支座中心坐标**

点击按钮选择基准点 选择基准点

输入总体坐标值

基准点坐标:      相对坐标 (m):

0.0                  0

0.0                  0

0.0                  0

设备底部与支座的高差h0 (m): 0

---

设备下无位置合适的梁

自动创建设备梁    设备梁布置形式: 八字

---

**支座**

支座交接                   限制支座间位移

确认      取消

立式设备

风载系数

设备风荷载扩大系数: 1.0

X向风载体型系数: 0.7

Y向风载体型系数: 0.7

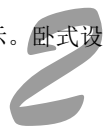
各段尺寸 (分段顺序右下至上, 外径含保温层)

设备外径分段数: 1

段	外径 (m)	高度 (m)
第1段	1	1

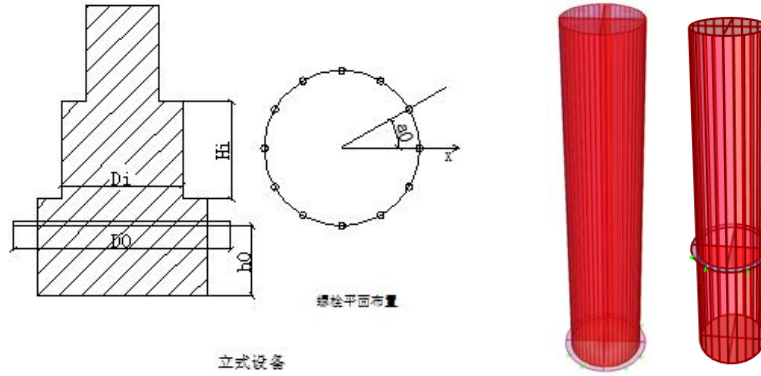
图4 设备参数化建模对话框

立式设备分段建模，每段可设置不同的高度和直径，设备与结构的连接可在设备底部或设备中部，如图5所示。卧式设

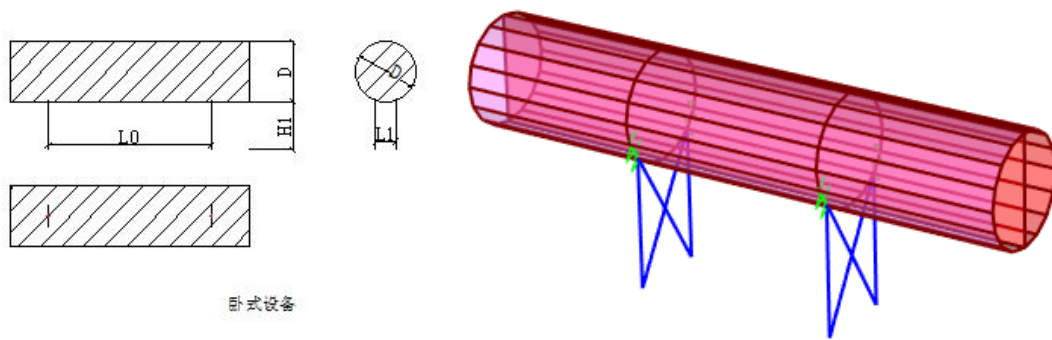




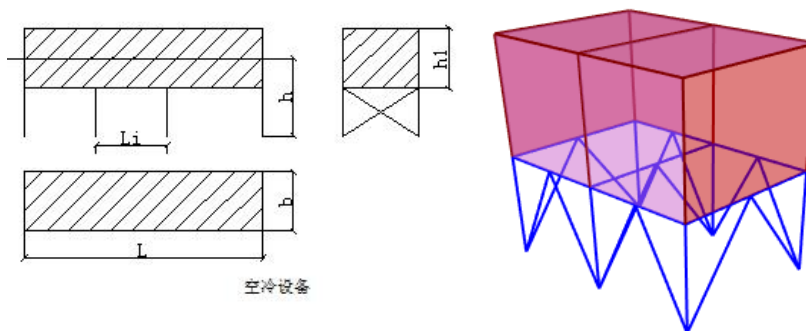
备通过两支座与结构连接，如图 6 所示。空冷设备的长度分节设置，在每节处设置支座与结构连接，支座间设置支撑，如图 7 所示。



立式设备示意与模型



卧式设备示意与模型



空冷设备示意与模型

设备主体使用壳单元模拟，卧式设备和空冷设备的支座使用框架单元模拟。在整体模型中建设备构件，主要是考虑荷载传递和设备刚度对结构的影响，而设备自身的受力分析并不关注，所以默认情况下，模拟设备构件的壳单元并未进行单元细分，在满足工程精度需求的前提下保证计算速度。

## 1.2 设备荷载

设备荷载输入时有设备壁厚、设备自重、操作介质重、充水水重四个参数。设备自重中包含设备壁厚计算的重量和设备内部小杆件的重量，即设备自重数据大于设备壁厚产生的重量。



设备荷载按照均匀分布的方式模拟，所有的荷载均指定为向下的方向，在 SAP2000 软件中使用“重力荷载”指定。重力荷载可施加在每个壳单元，自重按照比例调整，并可选择施加的方向。

基本信息

设备名称: VE-6700

设备壁厚 (mm): 20

设备自重 (KN): 200

操作介质重 (KN): 101

充水水重 (KN): 102

图 8 设备荷载输入参数

指定重力荷载

常规

荷载模式: DEAD

坐标系: GLOBAL

重力乘数

全局 X: 0

全局 Y: 0

全局 Z: 0

选项

叠加现有荷载

替换现有荷载

删除现有荷载

恢复默认设置

确定 关闭 应用

图 9 SAP2000 软件重力荷载定义

设备施加的荷载根据其荷载类型指定到对应的荷载模式，指定壳单元的重力乘数。重力乘数的计算过程为：根据计算得到壁厚产生的重量，即壳单元壁厚重量  $G_t$ ，见公式 1，设备自重产生的重力乘数为差值重量与设备壁厚重量的比值，见公式 2，充水水重力乘数为充水水重与壁厚重量的比值，见公式 3，介质重量为介质与壁厚重量的比值，见公式 4。

$$\text{壁厚计算重量} \quad G_t = f(t) \quad (1)$$

$$\text{设备自重} \quad G = G_t + k_t G_t \quad k_t = (G - G_t)/G_t \quad (2)$$

$$\text{充水水重} \quad L_w = k_w G_t \quad k_w = L_w/G_t \quad (3)$$

$$\text{介质重量} \quad L_m = k_m G_t \quad k_m = L_m/G_t \quad (4)$$

设备的荷载数据如图 10 所示，设备壁厚为 6mm，根据设备几何信息和材料，换算得到设备壁厚重为 72.493kN，设备自重产生的重力荷载乘数为  $(80-72.493)/72.493=0.1036$ ，操作介质产生的重力荷载乘数为  $500/72.493=6.8972$ ，充水水重产生的重力荷载乘数为  $200/72.493=2.7589$ ，荷载的方向为重力方向，所有的系数在 GLOBSL 坐标系下取负值，将计算得到系数指定到对应的荷载模式下，如图 10 所示。

设备壁厚 (mm): 6

设备自重 (KN): 80

操作介质重 (KN): 500

充水水重 (KN): 200

a) 设备荷载数据

荷载模式		DEAD
重力荷载		
坐标系	$k_t$	GLOBAL
UZ		-0.1036
荷载模式		MIDIAW
重力荷载		
坐标系	$k_m$	GLOBAL
UZ		-6.8972
荷载模式		WATERW
重力荷载		
坐标系	$k_w$	GLOBAL
UZ		-2.7589

b) 设备荷载指定

图 10 设备荷载与荷载指定



### 1.3 设备与结构连接

设备与结构连接的模拟要保证荷载的有效传递，设备类型不同，与结构连接的处理方式不同。立式设备通过螺栓与结构连接，卧式设备和空冷设备通过支座与结构连接。结构与设备间的连接可设为铰接或刚结。

立式设备根据螺栓数量、螺栓起始角度、螺栓分布直径确定螺栓位置。螺栓点是结构与设备连接，由于模型中是采用线和面模拟结构构件，所以螺栓点不一定恰好位于设备梁上。当螺栓点位于设备梁上，程序将自动生成相应的节点；当螺栓点不位于设备梁上时，程序将自动生成连接单元确保设备与框架的连接。

立式设备螺栓数据如图 11 所示，设置 12 个螺栓，起始角度为 0 度，分布直径为 3.5m，螺栓的布置在模型中如图 12a 所示，沿圆周均匀分布，根据设备周边梁布置和螺栓布置情况，上下左右的四个螺栓点与梁位置重合，如图 12b 所示，通过节点与结构连接，其余位置的螺栓点通过连接单元与结构连接，如图 12c 所示的 link 单元。

螺栓信息	
螺栓个数：	12
起始螺栓与X轴夹角（度）：	0
设备螺栓分布直径D0（m）：	3.5

图 11 立式设备螺栓布置输入框

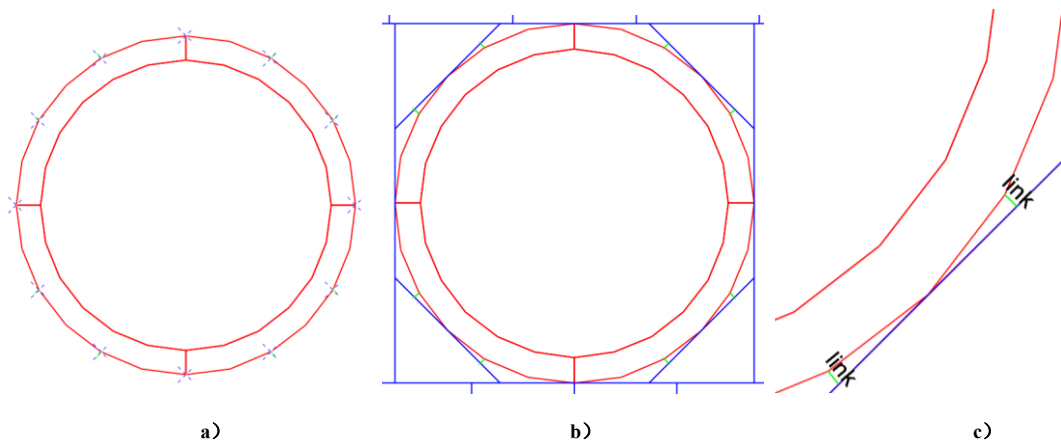


图 12 立式设备支座

卧式设备和空冷设备通过支座与结构相连，结构支座底部节点位于设备梁时，节点直接连接到设备梁或者自动创建设备梁，当节点与设备梁的偏差在一定范围内时，可以通过连接单元进行连接。

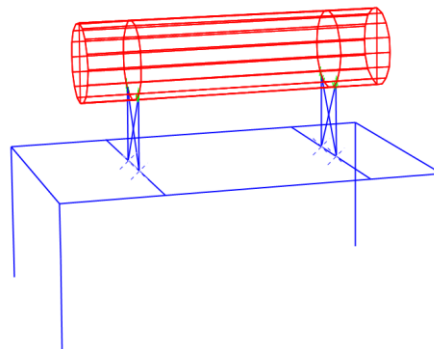


图 13 卧式设备支座

## 2 楼板弱对结构的影响

平台铺板一般采用花纹钢板或格栅板，提供的刚度有限，不满足平面内无限刚假定，对柱计算长度系数的计算和地震内



力调整方式均有影响。

## 2.1 楼板建模

楼板建模采用快速处理的方式，在构件绘制后，根据杆件布置自动在杆件围成的区域内绘制楼板，根据工程信息设置参数指定楼板荷载，如图 14 所示。楼板使用虚面模拟，按照单向板导荷，导荷方向可修正，如图 15 所示。

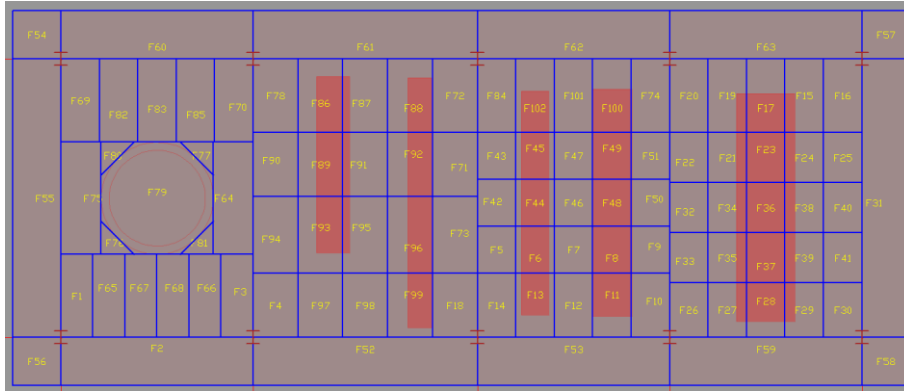


图 14 楼板一键布置

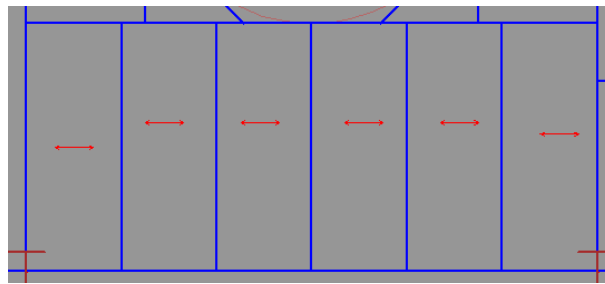


图 15 楼板导荷方向

## 2.2 柱长度计算系数

柱构件计算长度系数在《高层民用建筑钢结构技术规程》JGJ-2015 中给出计算公式，见公式 5、6，根据柱构件的失稳模式采用相应公式计算。开敞钢结构中，存在支撑不连续、跃层、楼板刚度弱等因素，所有柱构件不属于同一种失稳模式，需要对结构进行判断，得到构件的失稳模式再进行计算长度系数计算。

有侧移失稳

$$\mu = \sqrt{\frac{7.5K_1K_2 + 4(K_1 + K_2) + 1.6}{7.5K_1K_2 + K_1 + K_2}} \quad (5)$$

无侧移失稳

$$\mu = \sqrt{\frac{(1 + 0.41K_1)(1 + 0.41K_2)}{(1 + 0.82K_1)(1 + 0.82K_2)}} \quad (6)$$

$K_1$ 、 $K_2$ ——分别为交于柱上、下端的横梁线刚度之和与柱线刚度之和的比值。

在 CiSOpenSteel 中，柱构件失稳模式是根据方向按照樞判断，当该樞某层有支撑时为无侧移失稳模式，无支撑时为有侧移失稳模式。每个方向单独判断，得到柱构件每个方向的失稳模式，根据公式计算柱计算长度系数，在杆件的设计覆盖项中可以查看或修改计算结果。





在图 16 所示的结构中，X 方向，标高 7.2m-12m 之间无支撑布置，其它层间均布置支撑，在 7.2m-12m 之间的柱构件判断为有侧移失稳模式，其他柱构件判断为无侧移失稳模式。在 Y 向，所有层均布置支撑，在此方向，所有构件均判断为无侧移失稳模式。对于标高 7.2m-12m 之间的构件在一方向为有侧移失稳，一方向为无侧移失稳，查看其中一柱的计算长度系数如图 17 所示。

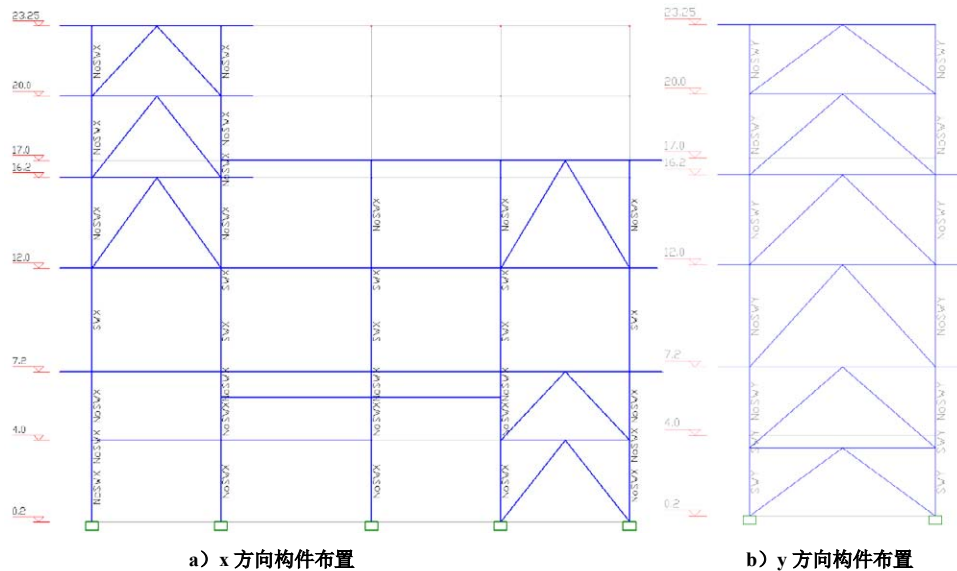


图 16 失稳模式

31	有效长度系数 $\mu$ (主)	0.9664
32	有效长度系数 $\mu$ (次)	2.5563

图 17 计算长度系数结果查看

### 2.3 地震内力调整系数

《建筑抗震设计规范》GB50011-2010 8.2.3 条要对结构进行地震内力调整。民用建筑钢结构按照空间结构调整地震内力系数，在开敞钢结构中，楼板刚度弱，榀与榀之间的影响弱，一般按榀调整地震内力，在 CiSOpenSteel 中默认设置为按照榀调整，如图 18 所示，内力调整结果可以在软件中查看，如图 19 所示。

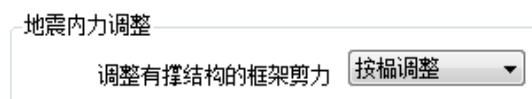


图 18 地震内力调整方法

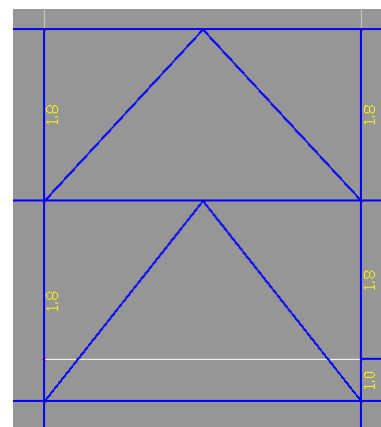


图 19 地震内力调整系数查看

### 3 风荷载计算

《石油化工构筑物抗震设计规范》(SH 3147-2014) 中明确开敞结构风荷载计算时应包括梁、柱、斜撑、栏杆和设备产生





的风荷载。计算风荷载时应考虑前后榀框架间、前后设备间的遮挡。在 CiSOpenSteel 中，结构和设备的风荷载分开处理。

### 3.1 结构整体风荷载计算

结构上的风荷载采用的《石油化工建（构）筑物结构荷载规范》GB51006-2014 规范附录 B 中提供的整体计算方法。根据结构的挡风面积、迎风面宽度、跨度等信息计算查表得到结构整体的风荷载体型系数，在结构的迎风面绘制虚面，并指定计算得到的风荷载体型系数，模型如图 20 所示。

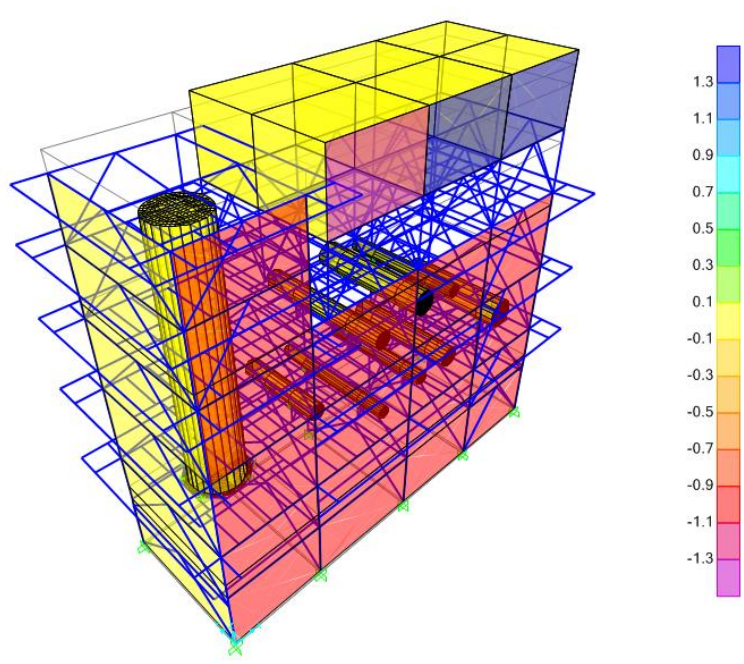


图 20 风荷载体型系数

结构的挡风面积为迎风面第一榀挡风面积和各榀构架挡风面积平均值的最大值。构架的风荷载体型系数根据  $S/B$  的不同取值差别取得。 $S$  为迎风面第一跨度和构件平均跨度的较小值。 $B$  为与风垂直方向构架的轮廓宽度，各层轮廓宽度的平均值，或多数层轮廓的宽度，各参数示意参看图 21。

在 CiSOpenSteel 中，在每个方向，计算每榀框架构件的迎风面面积，包括：柱、梁、支撑、栏杆、楼梯，每榀计算结果如图 22 所示，根据计算的各参数查表得到迎风面风荷载体型系数，计算过程参看图 23。在 SAP2000 软件中绘制迎风面虚面并指定风荷载体型系数，风荷载的具体计算由 SAP2000 完成。

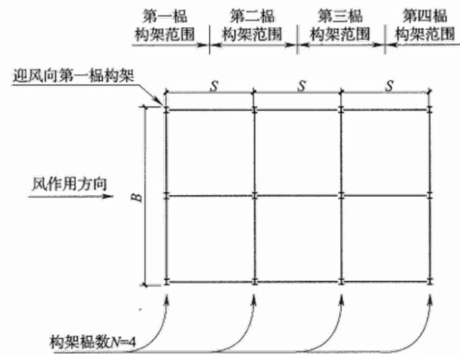


图 21 计算平面示意

标高 (m)	柱	梁	平面内支撑	顺风向支撑	栏杆	梯子	小计
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4.800	9.600	1.200	0.000	0.000	0.000	0.000	10.800
6.000	2.400	23.203	0.000	0.000	0.000	0.000	25.603
12.500	13.000	17.794	0.000	0.000	0.000	0.000	30.794
18.000	11.000	18.634	0.000	0.000	0.000	0.000	29.634
合计							96.830

图 22 面积计算表





计算所有榀的迎风面积后，得到 Y 方向总挡风面积:324.811m<sup>2</sup>

0.00m 处榀框架挡风面积最大:221.981m<sup>2</sup>

$N = 3, S = 6.850m, B = 18.000m, S/B = 0.381$

$$\text{挡风系数 } \phi = \frac{221.981}{18.000 \times 18.000} = 0.685$$

当构架的榀数、挡风系数、S/B 比值超过规范限值时，按照边界值查表计算

查《GB 51006-2014》附录 B 表 B.0.1 得到 Y 方向构架整体体型系数  $\mu_{sw} = 1.504$

图 23 查表得到风荷载体型系数

### 3.2 设备风荷载

设备风荷载处理是在设备迎风面指定风荷载体型系数，设备风荷载体型系数在设备参数化建模对话框中输入，如图 24 所示。多个设备需要考虑设备遮挡，可手动调整风荷载体型系数。

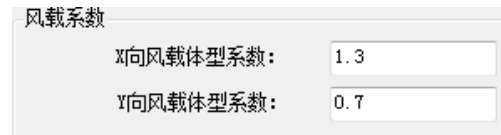


图 24 风荷载体型系数

空冷设备外立面为矩形，在指定风荷载体型系数时能根据设备的布置方向，自动判别迎风面指定风荷载体型系数，对于立式设备和卧式设备，当迎风面为圆形时，只考虑设备整体对结构的影响，程序自动在设备中沿直径剖面绘制虚面并赋予风荷载体型系数，如图 25 所示。

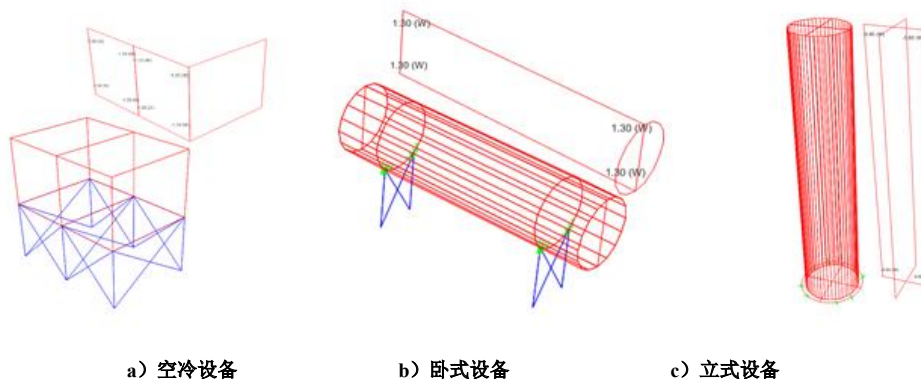


图 25 设备风荷载迎风面示意图

## 4 结束语

CiSOpenSteel 是筑信达专门针对开敞式钢结构定制开发的设计软件，基于 SAP2000 的分析内核，结合国内开敞式钢结构的设计要求，开发完善前处理及后处理模块。用户可通过参数化的建模方式快速建立含有设备的整体分析模型，按照国家规范以及行业标准便捷地进行构件设计。

本文介绍了 CiSOpenSteel 的功能和流程。重点结合开敞钢结构的特点，介绍程序如何处理“弱楼板”模拟及对结构的影响、柱计算长度计算、地震内力调整、风荷载施加等问题。CiSOpenSteel 解决了使用通用结构分析软件进行开敞钢结构设计时的普遍问题，同时设置了多种建模工具和辅助计算，是适合工业开敞钢结构的一体化解决方案。

# 钢结构节点设计与分析软件 IDEA

筑信达 张志国

IDEA StatiCa Connection (后续简称 IDEA) 是一款全新的钢结构节点设计与分析软件, 在数分钟之内即可创建复杂的钢节点模型并完成加载、计算、校核及输出报告等各项工作。如图 1 所示, IDEA 采用的 Ribbon 式图形用户界面共分为 Project、Design、Check、Report 以及 Materials 五个选项卡, 主窗口用于显示三维的钢节点模型和构件、荷载及操作列表。主窗口右侧的属性窗口用于显示当前构件、荷载或操作的各种参数或数据, 供用户选择或修改。

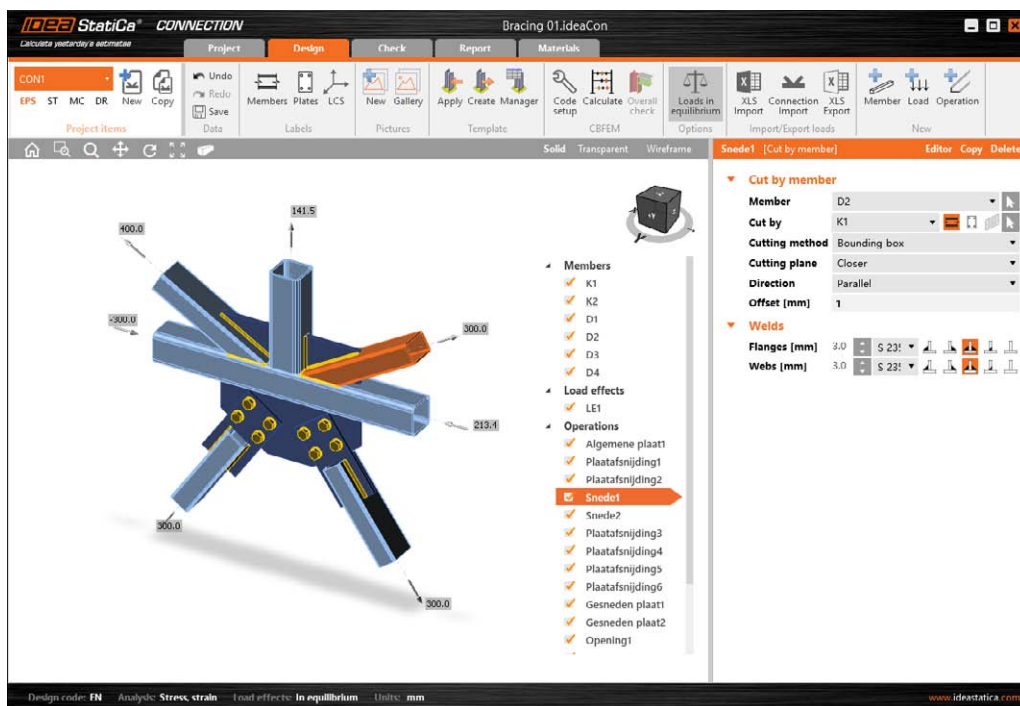


图 1 IDEA 软件的操作界面

## 1 复杂节点的快速建模

IDEA 采用基于构件和操作 (Operation) 的流程化建模, 整个建模过程如同在生产车间内逐步加工制造整个钢节点。对于图 1 所示的平面框架节点, 用户可采用图 2 所示的工作流程生成用于有限元分析的复杂的钢节点模型。其中, ①代表用于整体计算的杆系模型; ②调整部分构件的空间位置; ③添加节点板及构件间的焊缝连接; ④添加连接板及构件间的螺栓连接和焊缝连接。在上述流程化建模的任一环节中, 用户均可修改构件或操作的各种参数和数据 (如板厚、焊缝形式、螺栓数量等), 实时更新钢节点的几何模型。

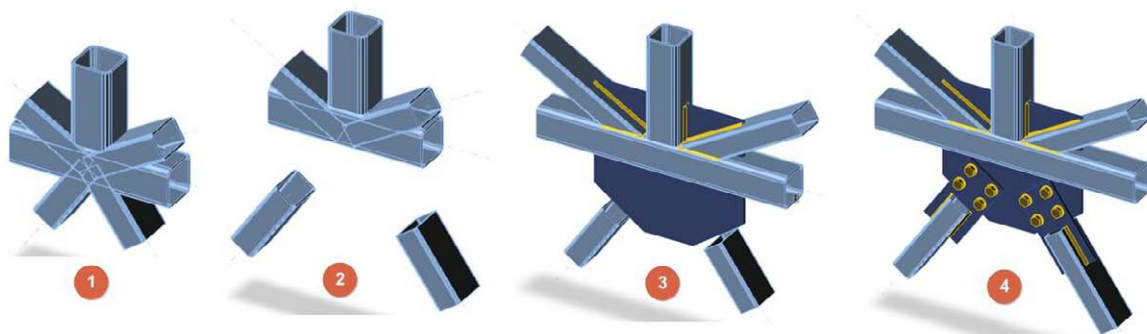


图 2 基于构件和操作的流程化建模



如图 3 所示, IDEA 提供丰富多样的操作类型供用户选择, 用以生成各种各样的复杂节点。此处的 21 个操作从左到右、自上而下依次为: 切割、加劲板、加宽板、肋板、开洞; 端板、偏移端板、变截面连接、构件拼接、拼接板; 节点板、连接板、翘板、角钢连接、底板; 加强件、加强板、切割板、螺栓、焊缝; 工作平面。关于各个操作的相关参数和数据, 鉴于篇幅有限, 此处不再一一展开。感兴趣的读者可申请试用版软件, 切身体验 IDEA 高效快捷的几何建模功能。

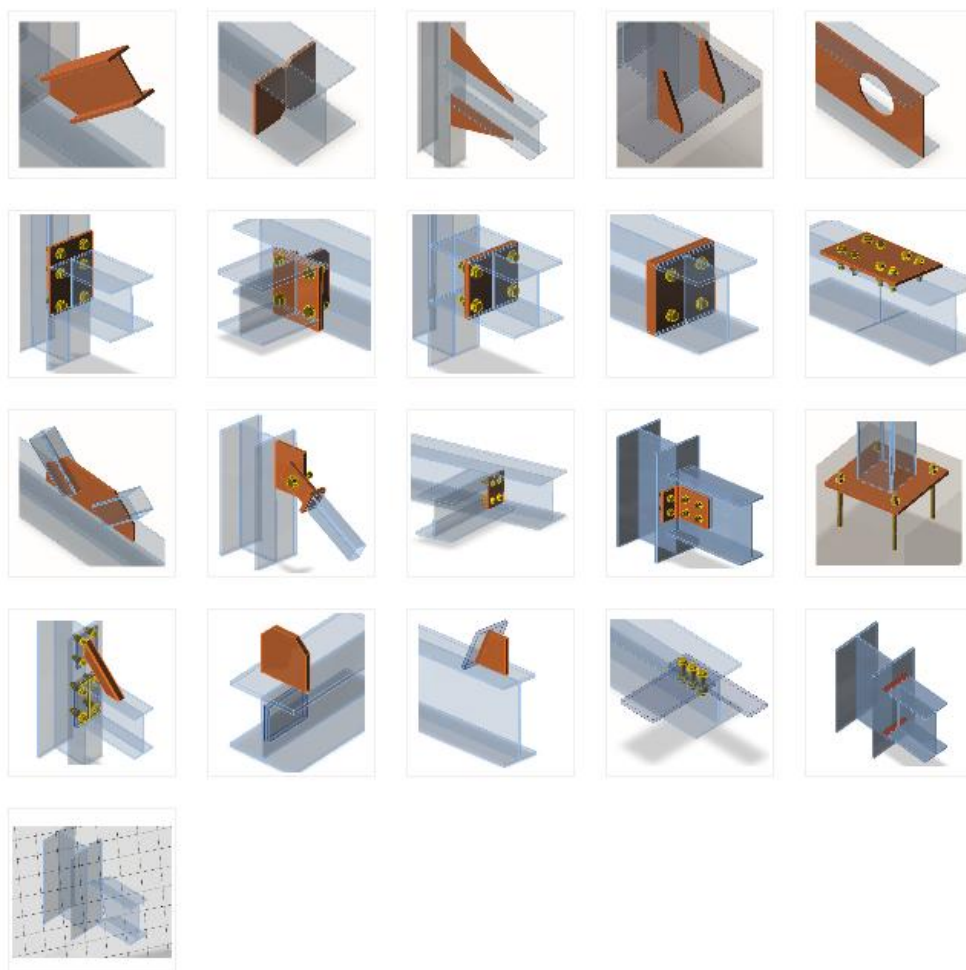


图 3 丰富多样的操作类型

## 2 高效稳定的计算分析

IDEA 采用基于组件的有限元模型 (Component Based Finite Element Model, CBFEM) 进行钢节点的分析与计算。CBFEM 方法在传统的组件法 (CM) 基础上, 利用有限元法 (FEM) 创建和分析各个组件的应力/应变, 如图 4 所示。全新的 CBFEM 方法具有三个显著优势: 1) 通用性, 该方法适用于实际工程中大多数的节点、柱脚及构造细节; 2) 高效性, 该方法在应用于日常工作简单快捷, 短时间即可提供计算和校核结果; 3) 全面性, 该方法可为工程师提供全面的节点信息, 包括应力/应变、组件冗余度以及整体的安全性和可靠性。

如图 5 所示, 用户在 IDEA 中既可以对钢节点进行应力/应变分析、屈曲分析或刚度分析, 也可以进行构件承载力设计、节点抗力设计或节点整体校核。应力/应变分析即钢节点在荷载作用下的非线性弹塑性分析, 同时根据设计规范 (欧标或美标) 校核螺栓、焊缝以及板件的材料强度。屈曲分析可用于计算局部板件 (腹板、翼缘或加劲板等) 的失稳形式和临界荷载, 辅助用户确定有待强化的区域和强化方式。刚度分析则用于确定当前连接形式对构件转动或拉压刚度的影响, 同时为结构的整体分析提供刚性、半刚性或铰接的节点处理方案。

除上述三种常见的分析类型之外, 构件承载力设计多用于抗震计算中以构件传递的最大弯矩校核钢节点; 节点抗力设计则用于判断当前设计荷载与节点最大承载力之间的相对大小, 也就是计算当前节点设计的冗余度。节点整体校核以不同的颜



色区别各个组件的校核状态，红色代表超过极限值，橙色代表超过预警值但低于极限值，绿色代表超过最优值但低于预警值，灰色代表低于最优值。

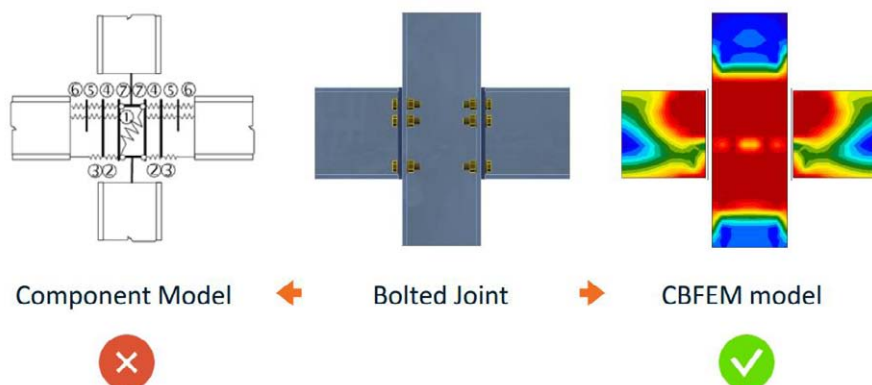


图4 组件法 vs 基于组件的有限单元法

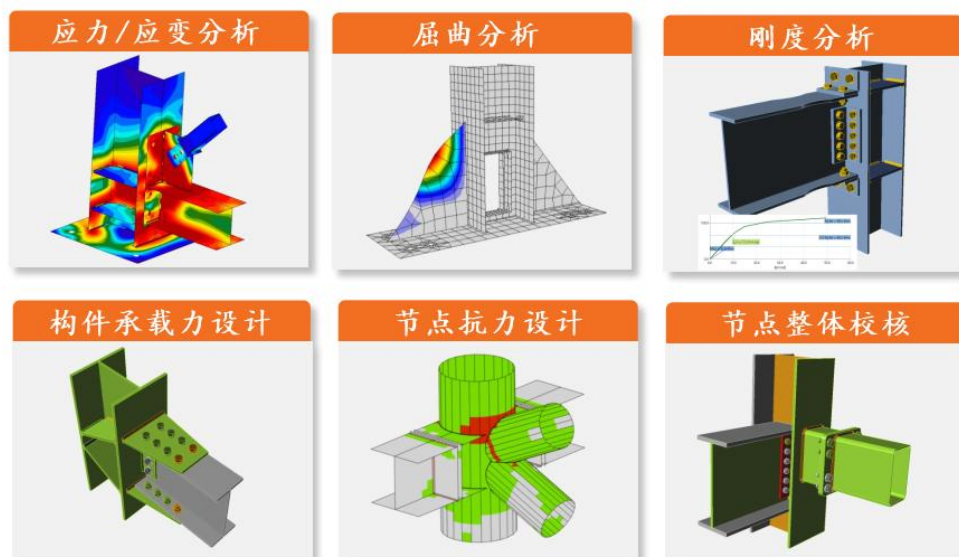


图5 IDEA 支持的各种分析类型

### 3 基于规范的节点校核

目前，IDEA 支持基于美标 AISC、欧标 EN 以及加拿大规范 CISC 的节点校核，具体包括：螺栓或锚栓校核、焊缝校核、柱脚节点的混凝土校核等。用户可在完成计算之后查看任意一个螺栓或任意一条焊缝的校核结果，如图 6 所示。除此之外，IDEA 还可以提供一份详尽的可定制的输出报告，供用户导出为 DOC、PDF 或 DXF 格式。

### 4 丰富多样的 BIM 接口

为了更加高效准确地对复杂钢节点进行建模和加载，IDEA 提供了丰富多样的 BIM 接口供用户选择。目前，IDEA 支持各种主流的 CAD/CAE 软件，如：Tekla、ETABS、SAP2000、Midas、Revit 以及 STAAD.Pro 等。

以图 7 所示的 ETABS 2016 为例，用户只需在 ETABS 中安装并启动 API 插件 ETABS2016ConnectionProjectManager，即可将选中的节点、与节点相连的构件、构件截面以及作用于节点上的构件内力全部一次性地导入 IDEA 之中。成功导入后，用户只需在 IDEA 中定义诸如端板、盖板、加劲板等操作，即可完成建模、计算、校核等全部工作。

值得一提的是，在 ETABS 与 IDEA 保持连接的情况下，用户可在 ETABS 中修改模型（如增减构件、替换截面、移除荷载等）并重新运行分析，之后即可在 IDEA 中更新前述模型以保持二者之间的一致性，但无需重新定义前述的端板、盖板等操作。



**Tension resistance check**

AISC 360-16: J3-1

$$\phi R_n = \phi \cdot F_{nt} \cdot A_b = 115.8 \text{ kN} \geq F_t = 100.7 \text{ kN}$$

Where:

- $F_{nt} = 780.0 \text{ MPa}$  – nominal tensile stress from AISC 360-16 Table J3.2
- $A_b = 198 \text{ mm}^2$  – gross cross-section area
- $\phi = 0.75$  – resistance factor for tension and shear

**Shear resistance check**

AISC 360-16: J3-1

$$\phi R_n = \phi \cdot F_{nv} \cdot A_b = 69.6 \text{ kN} \geq V = 4.4 \text{ kN}$$

Where:

- $F_{nv} = 469.0 \text{ MPa}$  – nominal shear stress from AISC 360-16 Table J3.2
- $A_b = 198 \text{ mm}^2$  – gross cross-section area
- $\phi = 0.75$  – resistance factor for tension and shear

**Bearing resistance check**

AISC 360-16: J3-6

$$R_n = 1.2 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 2.4 \cdot d \cdot t \cdot F_u$$

$$\phi R_n = 108.9 \text{ kN} \geq V = 4.4 \text{ kN}$$

Where:

- $l_c = 50 \text{ mm}$  – clear distance, in the direction of the force, between the edge of the hole and the edge of the adjacent hole or edge of the material
- $t = 10 \text{ mm}$  – thickness of the connected material
- $d = 16 \text{ mm}$  – nominal bolt diameter
- $F_u = 400.0 \text{ MPa}$  – specified minimum tensile strength of the connected material
- $\phi = 0.75$  – resistance factor for bearing at bolt holes

**Interaction of tension and shear check**

AISC 360-16: J3-2

The required stress, in either shear or tension, is less than or equal to 30% of the corresponding available stress and the effects of combined stresses need not to be investigated.

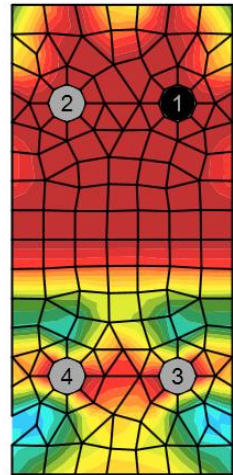


图 6 关于螺栓校核的输出报告内容

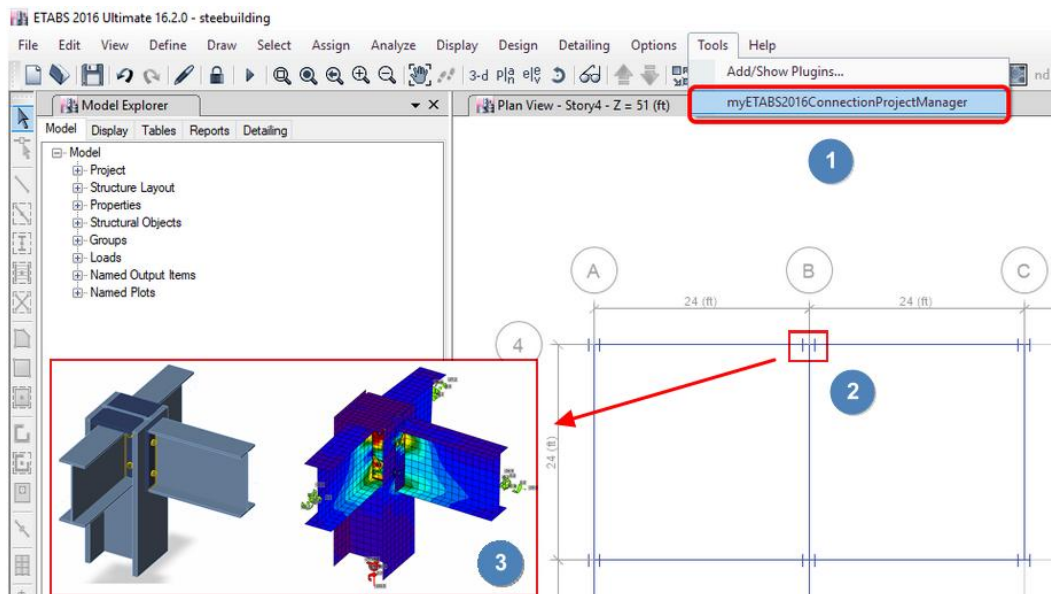


图 7 ETABS 与 IDEA 之间的 BIM 接口

## 5 小结

本文简明扼要地介绍了钢结构节点设计与分析软件 IDEA 的主要功能特点，包括复杂节点的快速建模、高效稳定的计算分析、基于规范的节点校核以及丰富多样的 BIM 接口。鉴于篇幅有限，本文未具体地介绍 IDEA 软件的各个细节和应用技巧，感兴趣的读者可以关注筑信达官网的相关信息或拨打技术支持热线，也欢迎申请试用最新版的 IDEA StatiCa Connection v 9.0.21。

# 冷弯薄壁型钢 SAP2000 设计工具功能介绍

筑信达 孙雪艳

当前，SAP2000 软件可定义冷弯薄壁型钢截面并进行分析，但设计部分不支持中国规范。因此，筑信达开发了冷弯薄壁型钢 SAP2000 设计工具，以插件的方式嵌入 SAP2000（如图 1 所示，目前整合在 SAP2000 筑信达工具箱中），实现薄壁型钢定义，并按照中国规范进行设计。冷弯薄壁型钢 SAP2000 设计工具的功能包括两项：截面定义和构件设计。本文以一项目为例介绍冷弯薄壁型钢 SAP2000 设计工具的使用和功能特点。

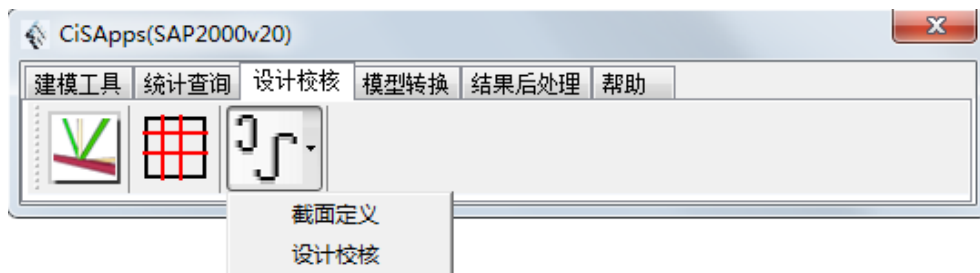


图 1 冷弯薄壁型钢插件功能

## 1 模型概况

某项目模型为一货架，构架 5 层，总高 7.5m，进深 1m，货格宽 2.5m，模型如图 2 所示。立柱采用内卷边槽钢，截面尺寸为高 90mm，宽 60mm，卷边长 24mm，厚度 6mm，横梁为方钢管，截面尺寸为边长 70mm，厚度 4mm，拉梁为方钢管，截面尺寸为边长 70mm，厚度为 6mm，斜撑为内卷边槽钢，截面尺寸为高 40mm，宽 20mm，卷边长 10mm，厚度 4mm。

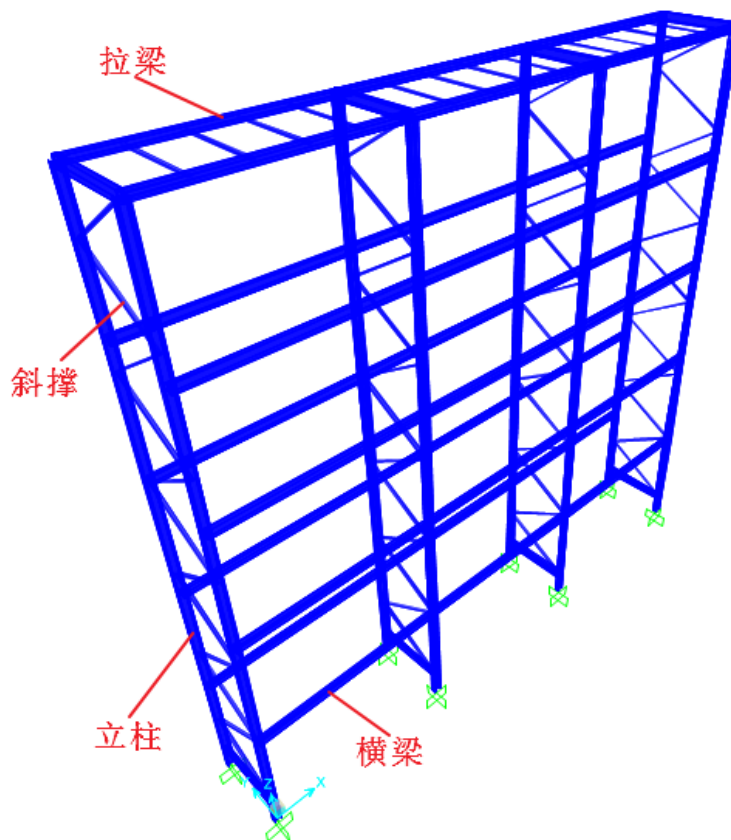


图 2 模型示意图



## 2 截面定义

在冷弯薄壁型钢 SAP2000 设计工具点击截面定义菜单，打开冷弯截面对话框（见图 3），进行截面的定义与编辑。点击添加按钮打开添加截面对话框（见图 4），可定义的截面类型有：方钢管、等边角钢、槽钢、Z 形钢、钢管，如图 5 所示，包括自定义截面和型钢库截面（见图 6），自定义截面，根据截面类型在几何参数中输入截面数据，型钢库截面根据《冷弯薄壁型钢结构技术规范（GB50018-2002）》（以下简称《冷弯规范》）附录 B.1 表格提供的数据形成型钢库文件，可直接导入型钢库数据。



图 3 冷弯截面对话框

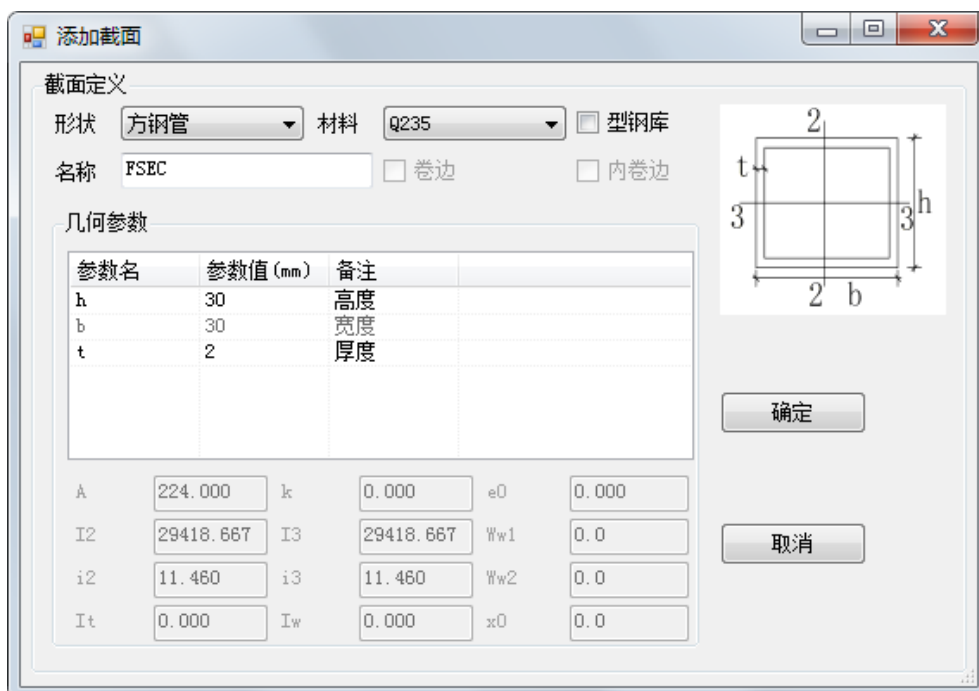


图 4 添加截面对话框

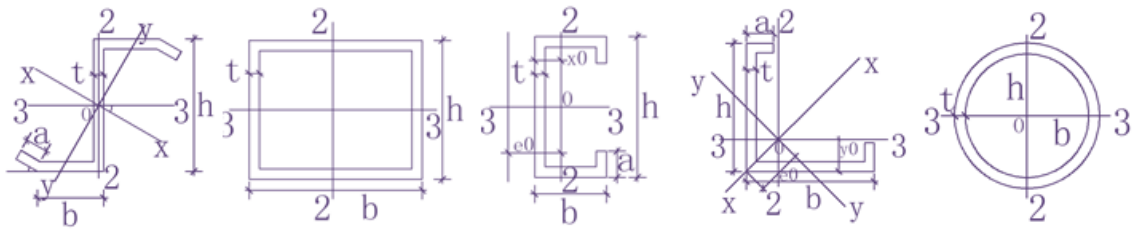
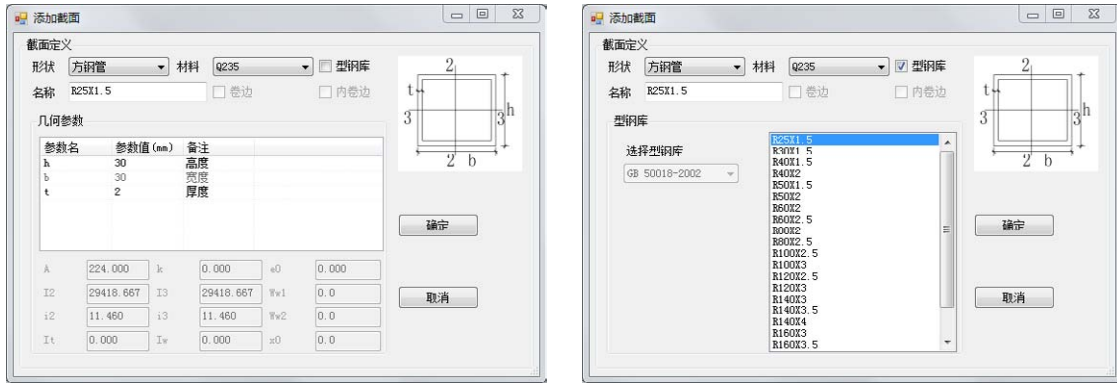


图5 可定义的截面类型



a) 自定义截面

b) 型钢库截面

图6 截面定义

定义的截面数据直接写入 SAP2000 软件的相应截面。设计工具中定义的圆钢管、方钢管、角钢使用型钢截面中的圆钢管、方钢管、角钢定义，槽钢使用冷弯薄壁 C 形钢定义，外卷边槽钢使用冷弯薄壁帽形截面定义，Z 形钢使用冷弯薄壁 Z 形钢定义。

所有需要使用冷弯薄壁型钢 SAP2000 设计工具进行设计的构件，均需使用截面定义中的截面。使用设计工具定义的截面，在截面属性中会写入 Ciseccold 标记，如图 7 所示，以识别杆件类型。

本模型中使用的方钢管使用型钢截面定义，带卷边的槽钢使用冷弯薄壁截面的 C 形钢定义，所有截面定义如图 8 所示。

截面属性使用《冷弯规范》附录 B.2 提供的公式计算，根据截面类型计算得到截面属性，如图 9a 所示，在 SAP2000 使用的对应的截面会计算得到截面属性，如图 9c 所示，两种计算的结果不相等，通过调整截面属性调整，如图 9d，即使用 SAP2000 软件中的截面属性数据和修正系数，得到截面定义中的截面属性。

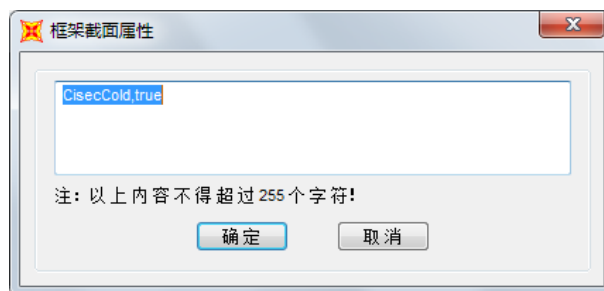
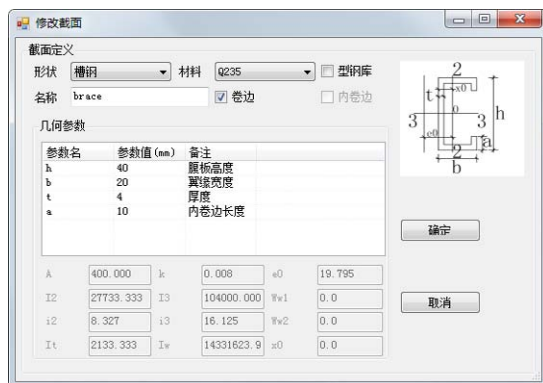


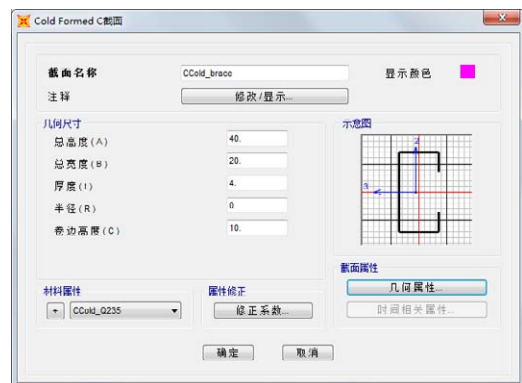
图7 框架属性界面



图 8 截面定义



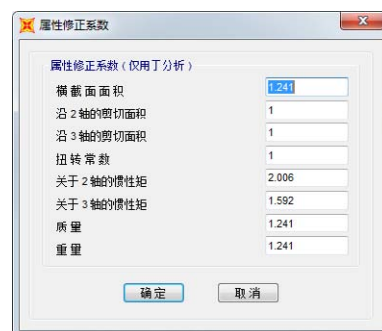
a) 设计工具截面定义



b) SAP2000 截面定义



c) SAP2000 截面属性



d) 修正系数

图 9 属性修正

### 3 杆件设计

在冷弯薄壁型钢 SAP2000 设计工具中选择的设计校核菜单，自动识别模型中的冷弯薄壁杆件，对识别到杆件进行杆件类型的判别，按照构件类型进行设计，设计结果以列表形式显示，如图 10 所示。

冷弯薄壁型钢设计工具根据《冷弯规范》第五章构件的计算进行构件设计，包括杆件的强度和稳定性计算，梁按照受弯

构件计算，柱根据受力状态分为轴拉、轴压、拉弯和压弯五种类型进行计算。

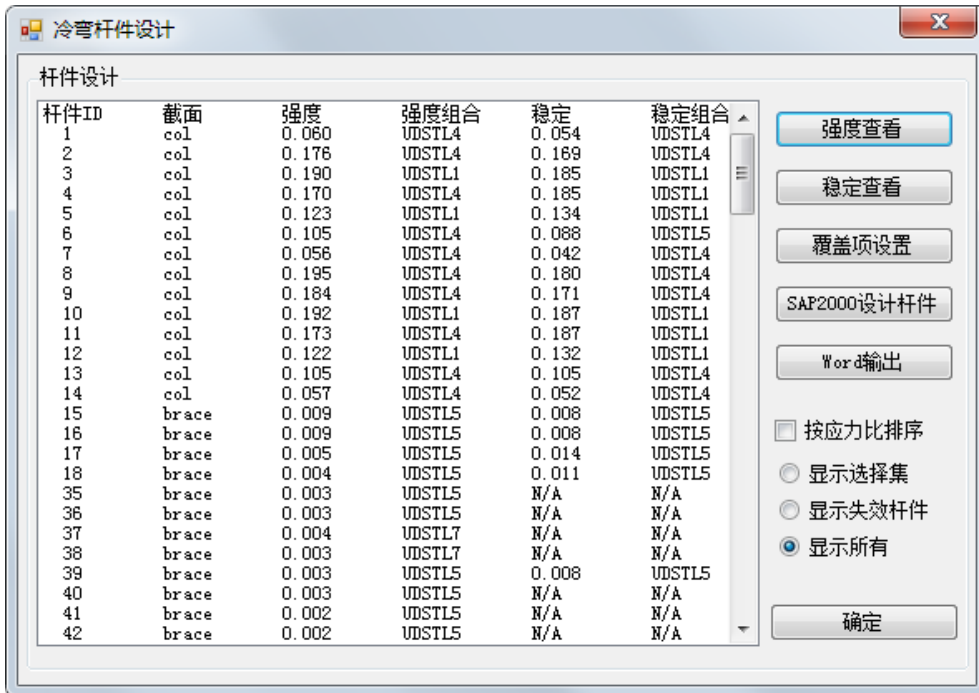


图 10 冷弯杆件设计对话框

默认按照构件标签顺序显示所有杆件的设计结果，显示结果包括强度应力比、强度控制组合、稳定应力比、稳定荷载组合。结果可按照应力比排序，显示的构件可以是全部构件、选择集、失效杆件，如图 11 所示，失效杆件。

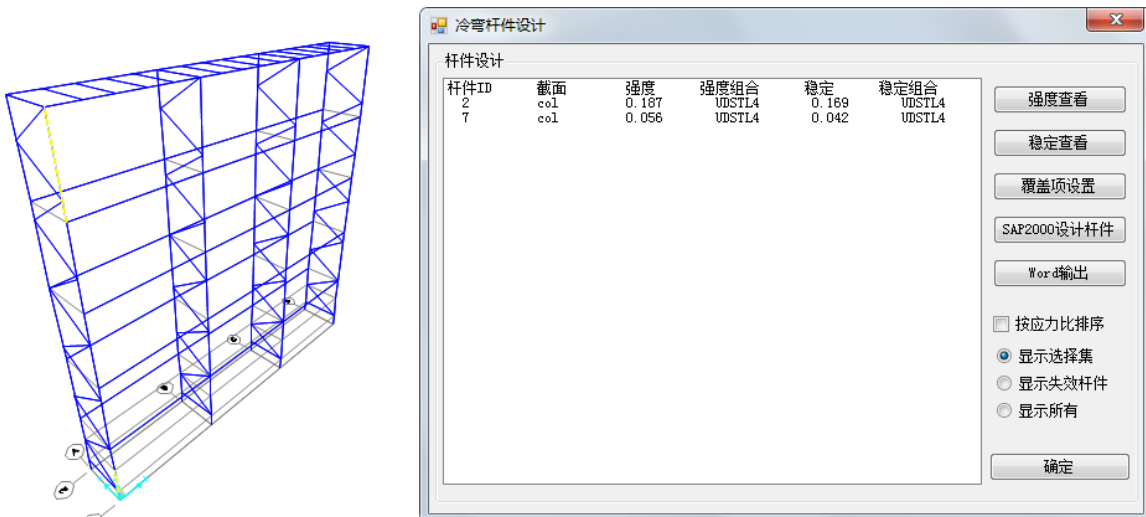


图 11 显示选择集的设计结果

选择任一杆件，点击强度查看按钮，打开强度设计对话框，可查看构件的强度设计结果，显示所有测站的设计结果，当前亮显项为最不利位置，如图 12 所示。选择一测站位置，点击设计过程按钮查看构件的详细设计过程，如图 13 所示。构件的详细设计结果显示构件的属性信息、设计内力、双力矩计算结果、板件的有效宽度、有效截面属性等信息。

构件的设计内力是提取 SAP2000 内力值（输出 2、3 轴内力值）。角钢和 Z 形钢在计算过程中，均采用 X、Y 轴（强、弱轴）截面属性进行计算，如图 14 所示。设计结果中输出的 2、3 轴内力，对角钢、Z 形钢会进行力的分解，输出 X、Y 轴内力。圆钢管将提取的 2、3 轴结果进行平方和开方处理后，再用于强度和稳定计算。

Z 形钢和槽钢设计需要考虑双力矩的影响，目前设计工具只对槽钢考虑双力矩。这是由于在 SAP2000 中，指定的荷载仅通过截面形心，而 Z 形钢的弯心和形心是同一点，槽钢截面形心与弯心不是同一点，所以进行设计时，仅槽钢考虑双力矩。

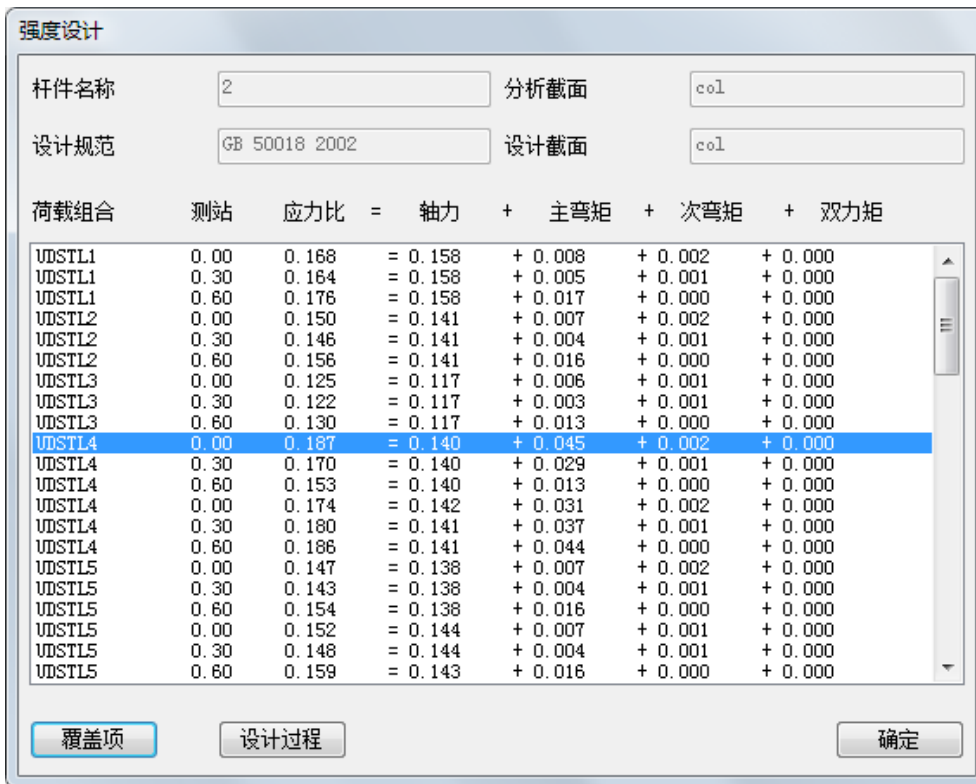


图 12 强度设计结果

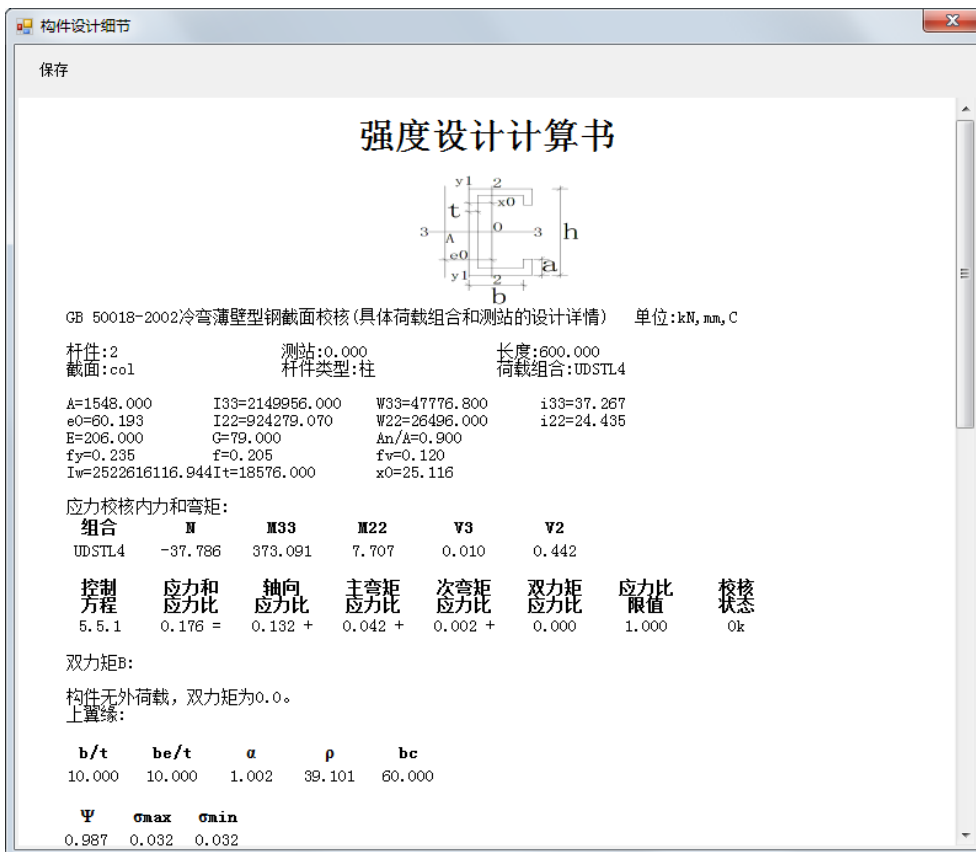


图 13 构件强度设计结果

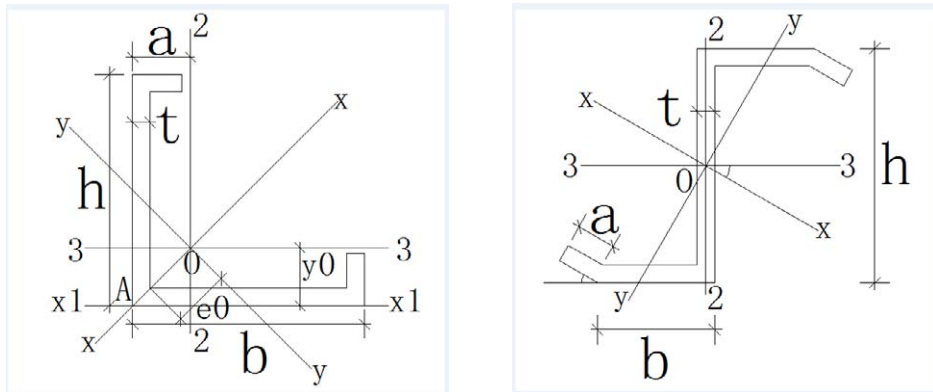


图 14 截面属性示意

点击覆盖项按钮，打开覆盖项对话框（见图 15），可以修改构件的覆盖项，点击覆盖项值显示覆盖项的含义，修改覆盖项值后，构件会重新进行设计。在冷弯杆件设计对话框中，可修改多个构件的覆盖项值，在构件的设计结果查看中，修改当前构件的覆盖项值。

**OverWrites**

	覆盖项	覆盖项值	
1	杆件名称	2	杆件作为什么类型进行设计，程序默认判断杆件两端点z坐标差为杆件长度的是柱，否则为梁！
2	截面名称	col	
3	杆件类型	柱	
4	净截面/毛截面	0.85	
5	梁按压弯构件计算	No	
6	绕弯心旋转方向	顺时针	
7	无支撑长度系数-X	1	
8	无支撑长度系数-Y	1	
9	有效长度系数-X	1.21857505483E	
10	有效长度系数-Y	1.23081979303E	
11	约束系数 $\alpha$	1	
12	约束系数 $\beta$	0.5	
13	荷载及支承情况	1	
14	跨间支承情况	无侧向支承	
15	荷载与弯心方向	Yes	
16	等效弯矩系数 $\beta_m$	无侧移，无F	
17	等效偏心距 $e_x$	No	
18	受压杆件长细比	150	
19	受拉杆件长细比	350	
20	有可靠铺板	No	

图 15 构件设计覆盖项

在冷弯杆件设计对话框选择一杆件，点击稳定查看按钮，可查看构件的稳定设计结果，显示所有测站在所有荷载组合下的设计结果，当前亮显项为最不利位置，如图 16 所示。选择一测站位置，点击设计过程查看构件的详细设计过程，如图 17 所示。构件的详细设计结果显示构件的属性信息，设计内力、双力矩计算结果、板件的有效宽度、有效截面属性、长细比计算、稳定系数等信息。

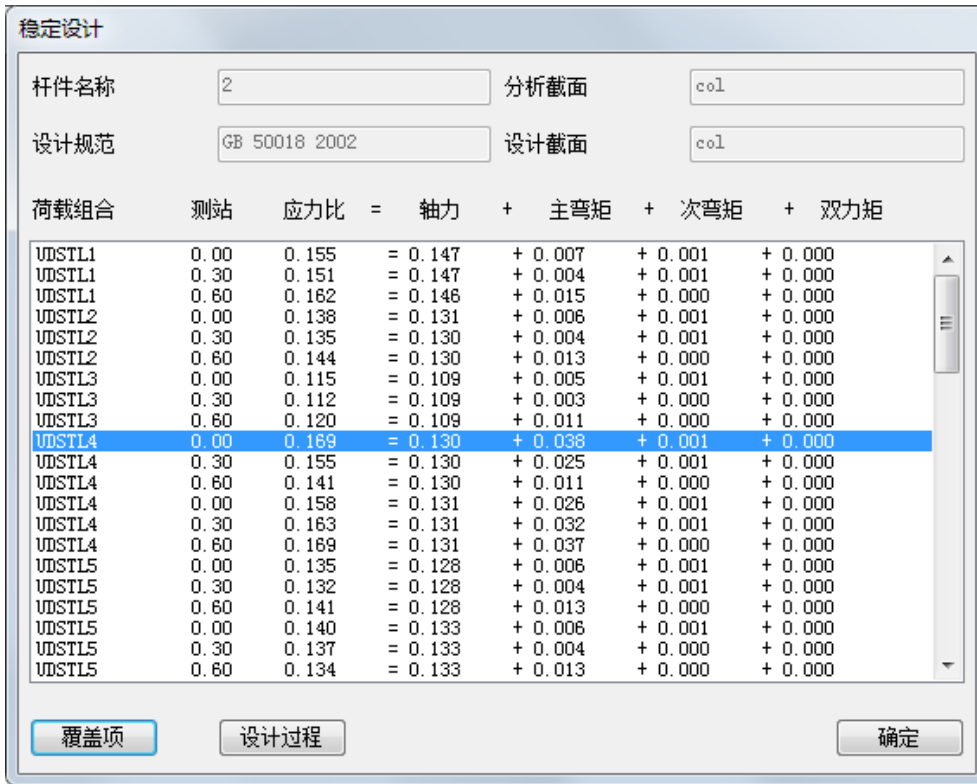


图 16 稳定设计结果

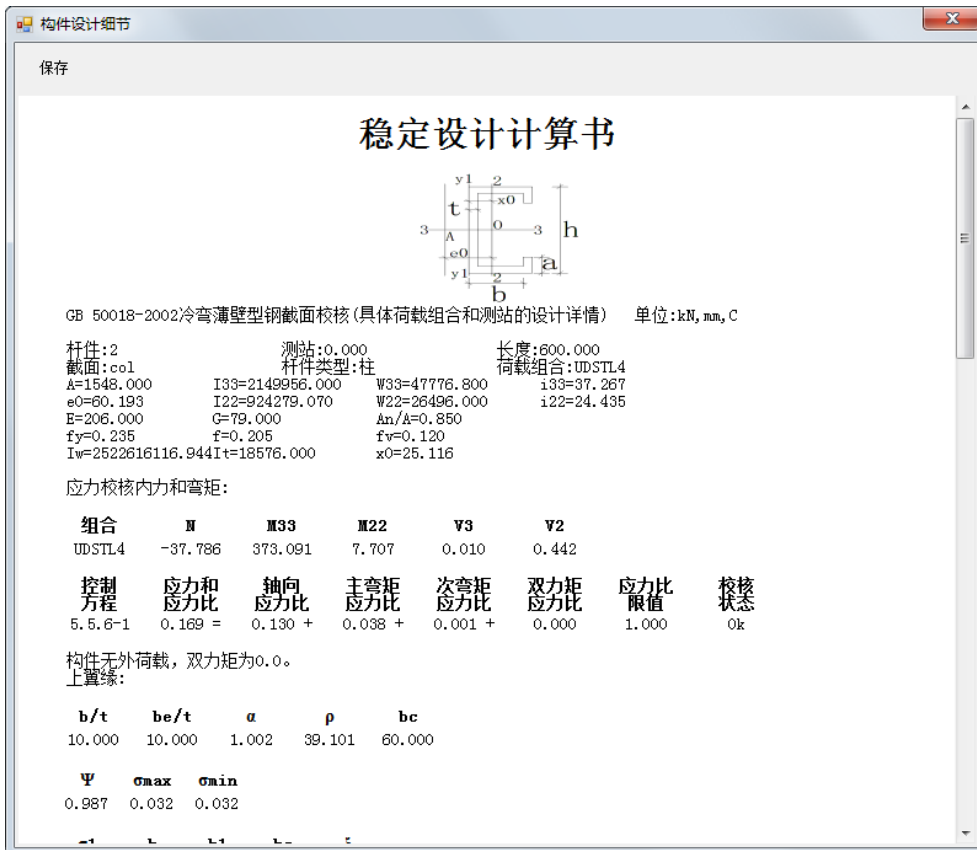


图 17 稳定设计结果

在冷弯杆件设计对话框选择构件, 点击 word 输出按钮, 生成 word 版本计算书, 计算书内容包括材料定义、杆件截面定义、荷载组合、杆件内力、构件的强度设计和稳定设计过程。

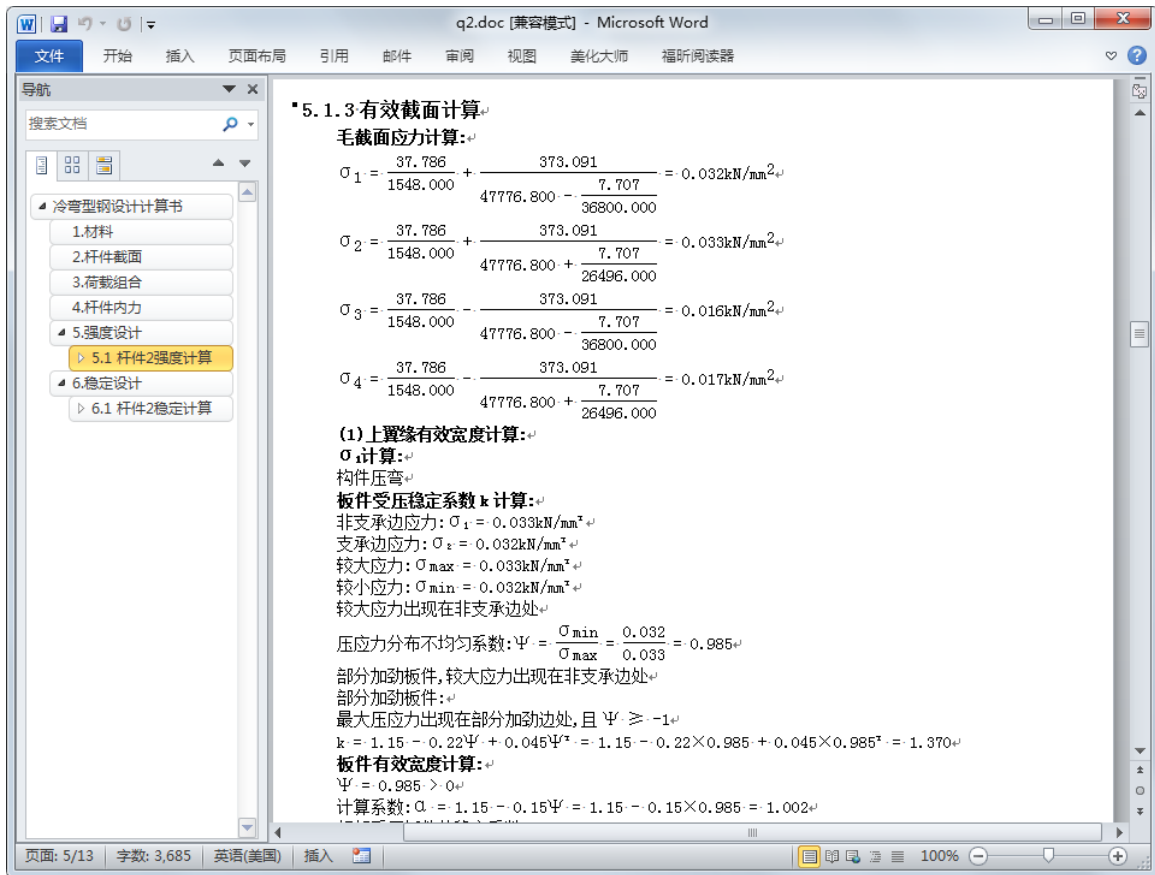


图 18 计算书输出

## 结束语

冷弯薄壁型钢设计工具根据冷弯薄壁型钢构件的特点进行截面定义, 提取 SAP2000 软件的分析结果, 依据《冷弯薄壁型钢结构技术规范 (GB50018-2002)》对构件进行设计, 填补了 SAP2000 软件不能进行中国规范冷弯薄壁型钢构件设计的缺失。



# 新钢标“直接分析法”在 ETABS 和 SAP2000 中的实现

筑信达 吴文博

随着最新的《钢结构设计标准（GB 50017-2017）》实施，ETABS v17 和 SAP2000v20.2.0 也进行了相关的更新，其中最主要的更新是实现了新钢标中稳定设计的四种方法。

用户可以在钢结构设计首选项中选择相应的设计方法。

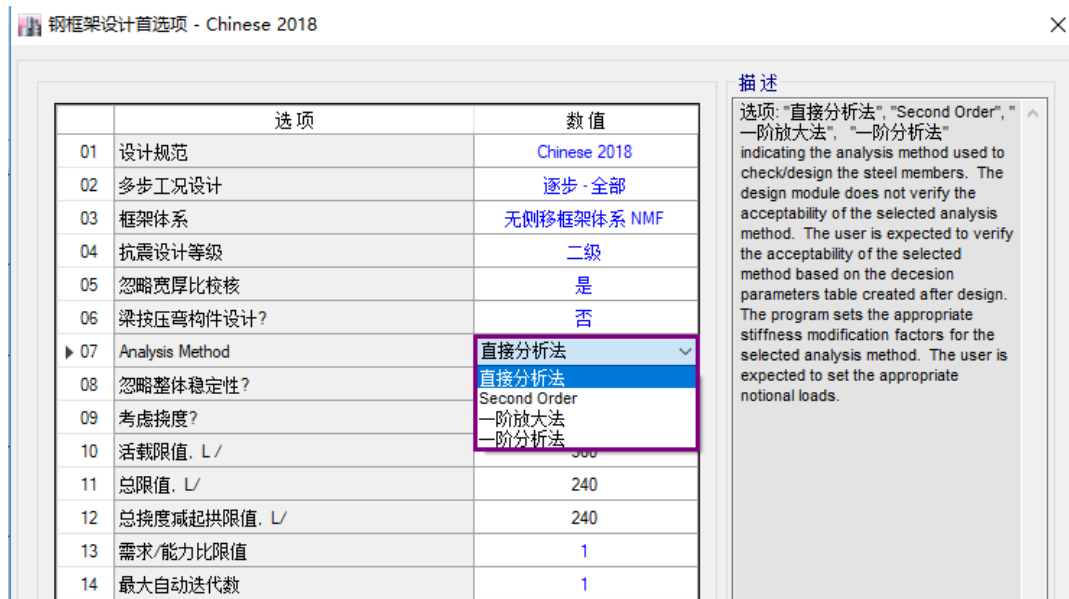


图 1 稳定设计方法选择

对于不同设计方法，用户需要在程序中进行相应的设置，表 1 中，列出了不同设计方法的设置需求。

表 1 各设计方法设置需求

设计方法	初始几何缺陷	P-Δ	构件缺陷	P-δ	计算长度系数	稳定系数 φ	设计弯矩
一阶分析法	无	无	无	无	附录 E	附录 D	分析弯矩
一阶放大法	名义荷载法	内力放大法	无	无	1.0	附录 D	分析弯矩
二阶分析法	名义荷载法	预设 P-Δ 选项或使用非线性工况	无	无	1.0	附录 D	分析弯矩
直接分析法	名义荷载法	预设 P-Δ 选项或使用非线性工况	假想等效弯矩	杆件细分	无	1.0	分析弯矩+假想等效弯矩

本文以直接分析法为例，简单介绍钢结构设计的整体流程。

## 1. 结构整体初始几何缺陷

新钢标允许通过在每层柱顶施加假想水平力等效考虑结构整体初始几何缺陷。在 ETABS 中，用户需要设置名义荷载来考虑结构整体初始几何缺陷。按新钢标公式 5.2.1-2 的要求，用户需要在荷载比率中输入

$\frac{1}{250} \sqrt{0.2 + \frac{1}{n_s}}$  的计算值，如图 2 与图 3。

$$H_{ai} = \frac{G_i}{250} \sqrt{0.2 + \frac{1}{n_s}} \quad (5.2.1-2)$$

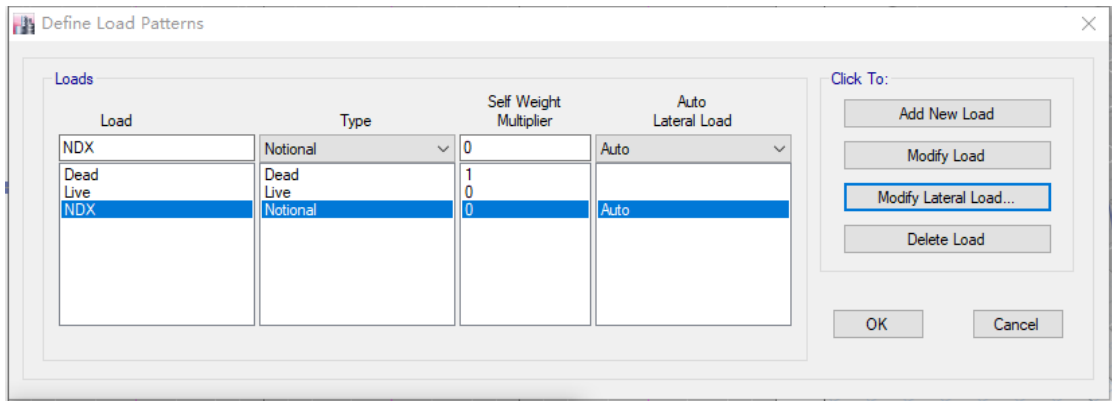


图 2 名义荷载

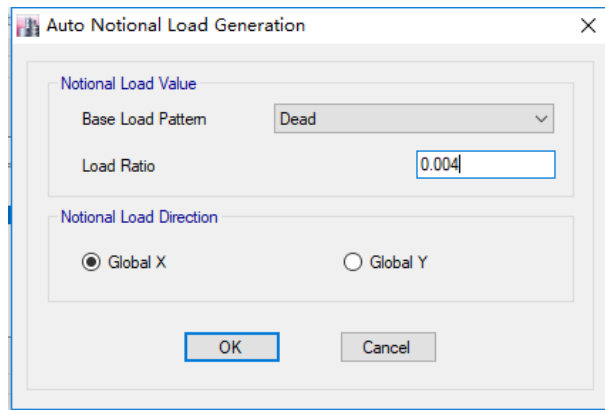


图 3 名义荷载设置

需要注意的是，用户应考虑所有重力荷载的在 X 和 Y 方向的名义荷载，名义荷载在荷载组合中的荷载分项系数与对应的荷载工况是相同的。并且 X 和 Y 方向的初始缺陷同时只考虑一个方向，但需考虑正负方向可能引起的最不利效应，程序中默认荷载组合已考虑以上情况。

同时新钢标也允许框架或大跨结构按最低阶屈曲模态施加初始几何缺陷。用户可以通过修改未变形几何功能实现。如图 4。

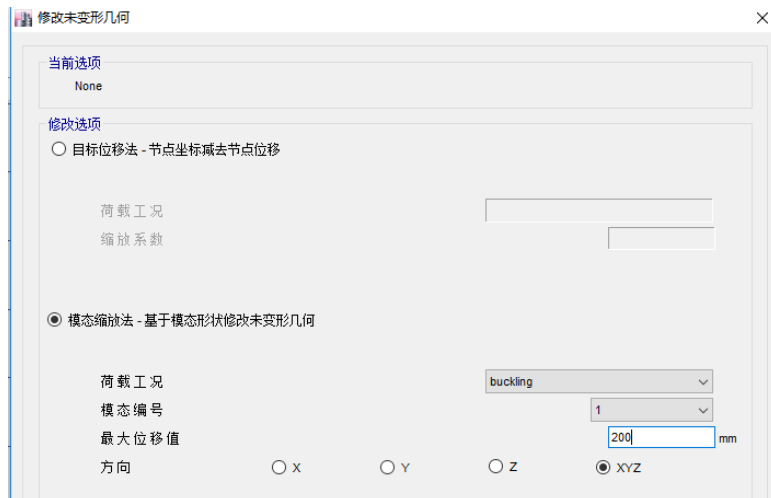


图 4 直接施加初始几何缺陷

## 2. P-Δ 效应

P-Δ 效应通常是指重力荷载在节点的侧向位移下产生的附加效应，如图 5。由于 P-Δ 分析需要考虑几何非线性，对于非线性工况而言，原则上是不可以进行叠加的，因此需要将荷载组合直接转换为非线性工



况进行分析，如图 6 和图 7。

上述方法虽然可以解决非线性工况无法叠加的情况，但是过于繁琐，并且不适用于包含反应谱工况的组合。而对于绝大多数工程，只考虑一组荷载（一般为重力荷载）下的 P- $\Delta$  效应是足够，所有使用这套 P- $\Delta$  荷载产生的刚度矩阵的分析为线性，这使得所有分析结果对于设计是可以叠加的。

一般情况下，预设的 P- $\Delta$  选项中指定的荷载组合为 1.2DEAD+1.4LIVE 是足够保守的。如果可以确定抗震组合为控制组合，指定的荷载组合为 1.2DEAD+0.6LIVE 也是可行的。如图 8。



图 5 二阶效应分析



图 6 非线性静力工况

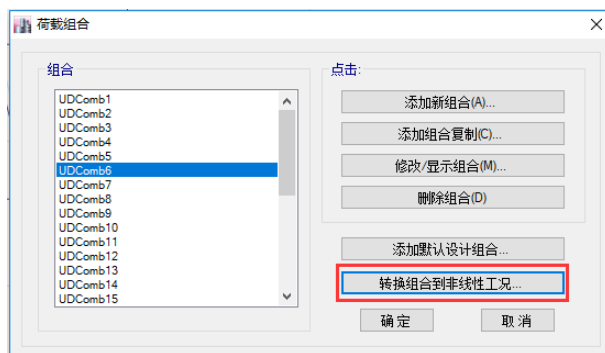


图 7 转换组合到非线性工况

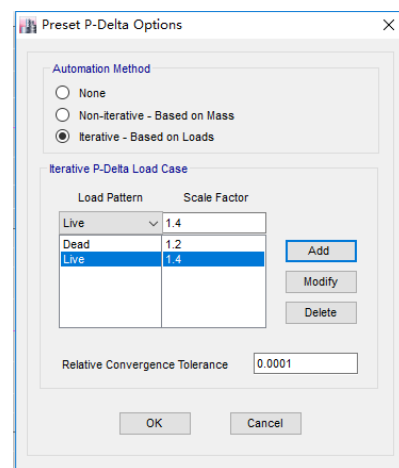
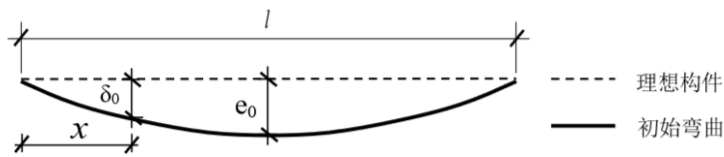


图 8 预设 P- $\Delta$  选项

### 3. 构件初始缺陷

为考虑构件的初始弯曲以及残余应力等的影响，新钢标中要求对构件施加构件的初始缺陷。在程序中，构件的初始缺陷并未直接在分析中进行考虑，而是在设计中以附加弯矩的形式进行考虑的，如图 9 和图 10。



(a) 等效几何缺陷

图9 构件的初始缺陷

Moment Modification						
	Factored Mf	Amplified Mampl	Imperfect. e0/l	Additional Ma = e0*Nk	Adjusted Mampl+Ma	Design Mdesign
Major Bending	8.663E-02	8.663E-02	1/300	12	8.663E-02	8.663E-02
Minor Bending	-8.421E-01	-8.421E-01	1/300	12	-13	-13

图10 考虑构件初始缺陷的附加弯矩

#### 4. P-δ 效应

P-δ 效应通常指在构件轴力在构件挠度下产生的附加效应，如图5。对于承受轴力的柱或梁，当柱或梁上作用有跨间荷载时，构件的 P-δ 效应将不可忽略。用户需要在已考虑 P-Δ 效应的前提下，对构件进行细分来考虑 P-δ 效应。一般情况下，将构件剖分为 3~5 段即可，如图 11。

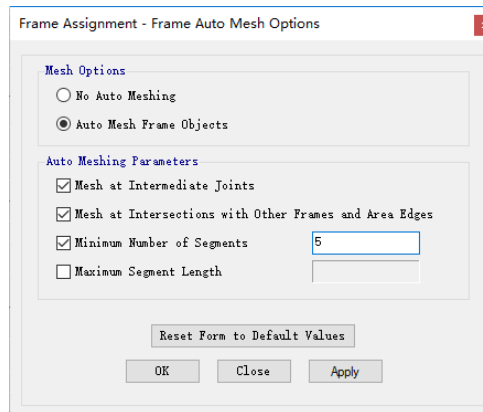


图11 杆件细分

#### 5. 直接分析法截面验算

依照新钢标 5.5.7 条，构件的应力校核可以采用下式计算。

$$\frac{N}{Af} + \frac{M_x''}{M_{cx}} + \frac{M_y''}{M_{cy}} \leq 1.0 \quad (\text{GB50017-2017 5.5.7-1})$$

$$\frac{N}{Af} + \frac{M_x''}{\phi_b W_x f} + \frac{M_y''}{M_{cy}} \leq 1.0 \quad (\text{GB50017-2017 5.5.7-2})$$

新钢标条文说明 5.5.7 条对上述公式进行了进一步的解读，在全面考虑了结构和构件的初始缺陷和几何非线性等对结构和构件内力的影响后，直接分析法截面验算可按下述公式考虑。

$$\frac{N}{A} + \frac{M_x + N(\Delta_x + \Delta_{xi} + \delta_x + \delta_{x0})}{M_{cx}} + \frac{M_y + N(\Delta_y + \Delta_{yi} + \delta_y + \delta_{y0})}{M_{cy}} \leq f$$

其中：

$\Delta_x$ 、 $\Delta_y$ ——由于结构在荷载作用下的变形所产生的构件两端相对位移值。**通过预设 P-Δ 选项考虑。**

$\Delta_{xi}$ 、 $\Delta_{yi}$ ——由于结构的整体初始几何缺陷所产生的构件两端相对位移值。**通过名义荷载考虑。**

$\delta_x$ 、 $\delta_y$ ——荷载作用下构件在 x、y 轴方向的变形值。**通过预设 P-Δ 选项考虑和杆件细分考虑。**

$\delta_{xi}$ 、 $\delta_{yi}$ ——构件在 x、y 轴方向的初始缺陷值。**在设计中，通过附加弯矩考虑。**

# ETABS 美标混凝土框架设计要点详解 (一) —— 框架柱设计

筑信达 李立

梁、柱等构件在 ETABS 中用框架单元来模拟。框架单元的设计类型则由该框架单元的截面属性决定（即图 1 左上方，选择“设计类型”）。所以，无论框架单元在模型中处于何种位置（竖直、倾斜、水平等），只要被赋予柱类型的截面，程序均按所选规范进行柱构件的设计。本文将基于 ACI 318-14 规范（以下简称 ACI）讨论钢筋混凝土柱设计在 ETABS 中的实现细节。

## 1 ETABS 柱设计的通用准则

### 1.1 设计流程

钢筋混凝土柱在 ETABS 中的一般设计流程包括：（1）为不同的柱截面分别生成其轴力-双向弯矩相关曲面（即 PMM 相关面）；（2）在每根柱的两端，分别为来自各个荷载组合下的设计轴力及弯矩校核其承载能力，并基于此计算所需配筋（或计算给定配筋方案的能力比率）；（3）根据设计剪力和轴力进行斜截面设计。

可以看出，PMM 相关面是柱设计的基础，而柱的配筋信息是生成 PMM 相关面的基础数据之一。所以在定义柱截面时，需要指定纵筋的数量和直径（见图 1）。当柱截面用于设计时，纵筋信息是初始值，程序会自动迭代给出最优结果（此时纵筋的分布数量不会变，直径改变）。当柱截面用于校核时，纵筋信息是确定值，由程序判断其承载力是否满足要求。



图 1 定义柱截面对话框

### 1.2 柱长度

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

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

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

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

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

## 2 美标柱设计要点实现

### 2.1 PMM 相关面

计算 PMM 相关面是柱设计的前提，典型的 PMM 相关面如图 2 所示。该曲面由若干相关曲线构成，相关曲线上的点对应柱截面的某个受力状态。前提是，柱截面符合平截面假定，且柱截面配筋已知。

程序计算 PMM 相关面时，考虑相应的 ACI 规范要求包括：忽略混凝土的抗拉能力、混凝土极限压应变  $\epsilon_c = 0.003$  (ACI 22.2.2.1)、钢筋屈服后应力取为屈服强度  $\epsilon_s E_s \leq f_y$  (ACI 22.2.3.1, 20.2.2.1)、计算混凝土受压区等效矩形应力区 (ACI 22.2.2.4)、考虑强度折减系数  $\phi$  的影响 (ACI 21.2.2, Table 21.2.2)、考虑最大受压承载力 (ACI 22.4.2.1, 22.4.2.2) 等等。

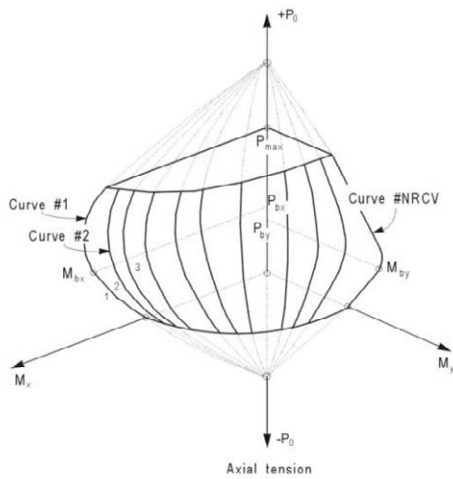


图 2 PMM 相关面

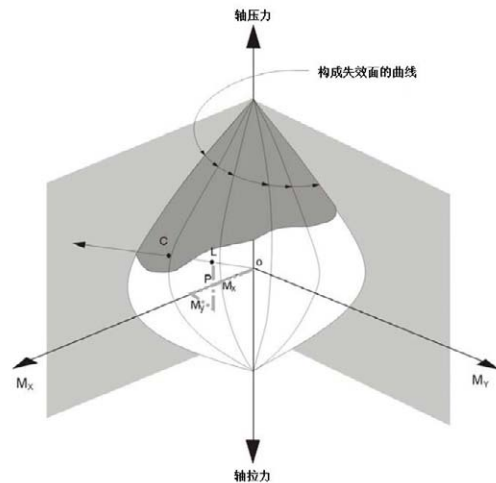


图 3 计算柱的承载能力比率的几何示意图

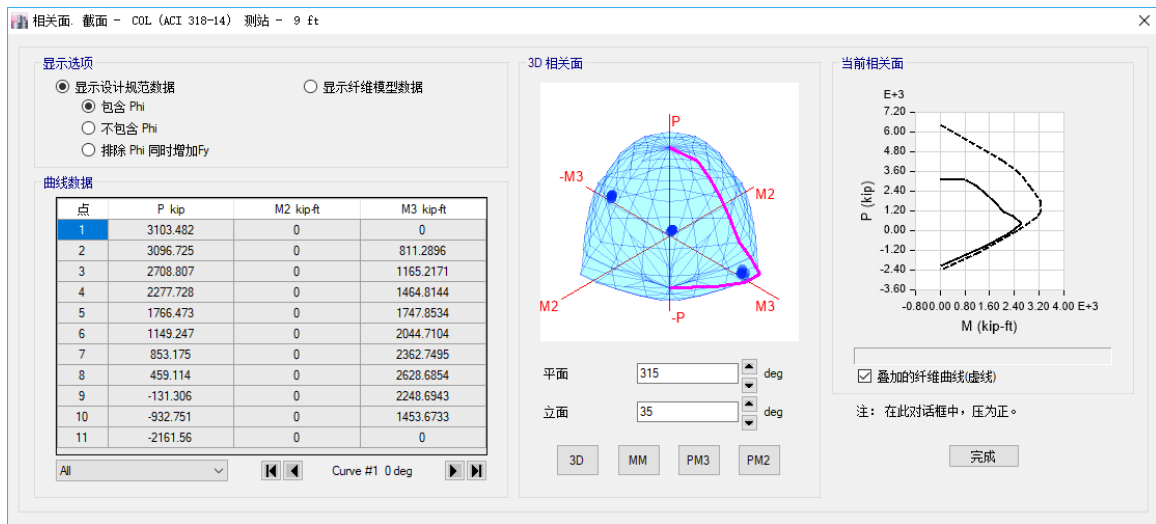


图 4 ETABS 输出的相关面

柱的一组设计内力 (P, M2, M3) 对应 PMM 空间的一个点 L, L 与坐标原点 O 的连线为 OL, 沿 OL 方向 L 点在 PMM 相关面上的投影点为 C。此时, 柱的承载能力比率 (简称 D/C) 即线段 OL 与线段 OC 的长度比值。若 OL=OC, 则 D/C=1, 代表承载能力处于临界状态; 若 OL<OC, 则 D/C<1, 代表承载能力满足要求; 若 OL > OC, 则 D/C>1, 代表承载能力不足。程序将基于柱两端测站位置处所有荷载组合下的 D/C 的结果来计算配筋面积, 或校核配筋方案。

完成设计后, 可以在 ETABS 中查看所有柱构件的 PMM 相关面数据, 如图 4 所示, 这里显示了每条 PM 曲线的相关数据, 这些数据可以按设计强度、名义强度、最大可能强度分别计算, 也可由纤维模型算得。例如图 4 右侧, 实线为由设计强度 (即考虑  $\phi$  值) 算得的 PM 曲线, 虚线为用纤维模型计算的 PM 曲线, 可以看到强度折减系数  $\phi$  对 PMM 曲面的影响

## 2.2 考虑二阶效应的弯矩调整

对于二阶效应的影响, ACI 规定, 对因框架侧移产生的 P- $\Delta$  效应, 柱弯矩按式 (1) (ACI 6.6.4.6.1) 进行调整; 对于因构件挠曲产生的 P- $\delta$  效应, 柱弯矩按式 (2) (ACI 6.6.4.5.2) 进行调整。

$$M = M_{ns} + \delta_s M_s \quad (1)$$

$$M_c = \delta_{ns} M \quad (2)$$

式中, 下标 ns 即 no sway, 下标 s 即 sway, 分别指代重力荷载作用和水平荷载作用下的分量。

由于 ETABS 可以在分析中考虑 P- $\Delta$  效应, 所以放大系数  $\delta_s$  默认值为 1。放大系数  $\delta_{ns}$  与参数  $C_m$  (ACI 6.6.4.5.3)、计算长度系数 k 有关,  $C_m$  由程序自动计算。k 值对于无侧移柱可取为 1, 而有侧移柱则不小于 1。如果在分析中已考虑了 P- $\Delta$  效应,



柱的有效长度系数可直接取为 1，程序的默认值是 1。 $\delta_{ns}$ 、 $\delta_s$ 、 $C_m$ 、 $k$ 都可通过设计覆盖项人为修改（见图 4 红框中的参数），在输出的设计细节中可查看相应的结果。

此外，柱端弯矩在两个方向上应分别满足最小偏心矩的要求（ACI 6.6.4.5.4），程序默认自动执行，用户也可人为取消（即图 4 第 14 项 Consider Minimum Eccentricity?选择“否”）。

ETABS 通过预设 P- $\Delta$  选项来考虑 P- $\Delta$  效应，如图 5 所示（命令路径：定义>预设 P-Delta 选项）。在该对话框中，需要指定用于二阶效应分析的竖向荷载作用，通常我们根据设计荷载组合中，含有侧向荷载的组合里竖向荷载设计值最大的那组，选择其中的竖向荷载及比例系数。对于美标，一般建议荷载模式取 1.2\*恒载+1.6\*活载，这是偏于保守的。

选项	数值	
01	Current Design Section	COL
02	Framing Type	Sway Special
03	Live Load Reduction Factor	0.640149
04	Unbraced Length Ratio (Major)	0.75
05	Unbraced Length Ratio (Minor)	0.75
06	Effective Length Factor (K Major)	1
07	Effective Length Factor (K Minor)	1
08	Moment Coefficient (Cm Major)	1
09	Moment Coefficient (Cm Minor)	1
10	NonSway Moment Factor (Dns Major)	1
11	NonSway Moment Factor (Dns Minor)	1
12	Sway Moment Factor (Dns Major)	1
13	Sway Moment Factor (Dns Minor)	1
14	Consider Minimum Eccentricity?	是
15	Seismic Detailing in CSXCAD?	是

图 5 混凝土框架柱设计覆盖项

荷载模式	比例系数
Live	1.6
Dead	1.2
Live	1.6

图 6 预设 P-Delta 选项对话框

## 2.3 强柱弱梁验算

特殊抗弯框架在含有地震的荷载组合下，柱的抗弯能力应满足下式要求（ACI 18.7.3.2）：

$$\sum M_{nc} \geq (6/5) \sum M_{nb}$$

$\sum M_{nc}$   $\sum M_{nb}$  分别为节点处相应柱、梁的名义抗弯强度。程序自动进行以上判断，分别输出柱的主次轴两个方向的结果，若不满足要求将给出警告。如图 7 是设计细节的输出结果，主轴方向梁柱抗弯承载力比为 0.879，满足要求；次轴方向由于没有梁与柱相交，故无需计算。该结果也可通过图 8 所示的命令在视图中显示。

	梁柱抗弯承载力比			
	(6/5)B/C Major	(6/5)B/C Minor	Col/Beam Major	Col/Beam Minor
顺时针	0.879	0.000	1.365	N/N
逆时针	0.879	0	1.365	N/N

图 7 设计细节输出

图 8 显示设计结果

应该注意的是，美标关于“强柱弱梁”的验算是基于实际配筋进行的，并不是单纯地只调整内力。程序也是根据计算配筋来验算梁柱的抗弯承载力。而且，如果用户在定义截面时输入了实配钢筋，程序将依据输入的实配钢筋来验算强柱弱梁。

## 2.4 设计剪力确定

为了满足不同延性的抗震设计要求，ACI 对于不同类型框架，柱设计剪力的取值要求不同。下表总结了相关的规定，ETABS 按此自动计算。用户可通过设计覆盖项修改框架类型（即图 4 第 2 项 Framing Type）。



表 1 美标框架柱设计剪力取值要求

特殊抗弯框架 SMF Special Moment Frames	中等抗弯框架 IMF Intermediate Moment Frames	普通抗弯框架 Ordinary Moment Frames
取以下两者的小值： a) 根据柱端最大可能抗弯强度计算的剪力值 b) 根据与柱相连的梁端最大可能抗弯强度计算的剪力值  且不小于设计荷载组合下的柱剪力 (ACI 18.7.6.1.1)	取以下两者的小值： a) 根据柱两端最大名义抗弯强度计算的剪力值 b) 根据与柱相连的梁端最大名义抗弯强度计算的剪力值  且不大于按考虑超强系数 $\Omega$ 放大的地震荷载参与的组合中相应的最大剪力值 (ACI 18.4.2.3)	a) 取荷载组合下相应的轴力和剪力值 b) 抗震等级为 B 及以上且跨高比(跨度取柱净高)不大于 5 时, 同 IMF 计算 (ACI 18.3.3)

注：表中“最大可能强度”代表钢筋强度按  $1.25f_y$  取值，强度折减系数取为 1；“名义强度”代表钢筋强度按  $f_y$  取值，强度折减系数取为 1。

## 2.5 计算抗剪箍筋

程序对抗剪箍筋的计算思路如下。其中， $V_u$  即设计剪力， $V_c$  即混凝土部分的抗剪承载力 (ACI 22.5.6.1, 22.5.7.1)， $V_{max}$  为剪力最大限值 (ACI 22.5.1.2)。强度折减系数对于抗震工况默认取 0.6、非抗震工况默认取 0.75 (ACI 21.2.1, 21.2.4)，强度折减系数可以通过设计首选项人为修改。注意，ETABS 不会校核箍筋最小间距、体积配箍率等要求，这部分由工程师自行判断。

If  $V_u \leq (V_c/2)\phi$ ,

$$\frac{A_v}{s} = 0, \quad (\text{ACI 10.6.2.1})$$

else if  $(V_c/2)\phi < V_u \leq \phi V_{max}$ ,

$$\frac{A_v}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{ys} d}, \quad (\text{ACI 22.5.1.1, 22.5.10.1, 22.5.10.5.3})$$

$$\frac{A_v}{s} \geq \max\left(\frac{0.75\sqrt{f'_c}}{f_{ys}} b_w, \frac{50}{f_{ys}} b_w\right) \quad (\text{ACI 10.6.2.2})$$

else if  $V_u > \phi V_{max}$ ,

截面不满足要求 (ACI 22.5.1.2)

此外，根据 ACI 18.7.6.2.1，对于特殊抗弯框架，如果地震作用产生的剪力较大（超过最大剪力需求的一半），且地震组合下的轴力  $P_u < A_g f'_c / 20$ ，须忽略混凝土对抗剪承载力的贡献，即此时  $V_c = 0$ 。这由程序自动执行。

## 3 设计计算书

常规的设计结果通过命令 **设计>混凝土框架设计>显示设计信息**，在视窗中显示。此外，ETABS 还可以输出每个构件在所有荷载组合下的设计细节数据，这些结果以表格文档的方式显示，可转化为 Word 格式保存

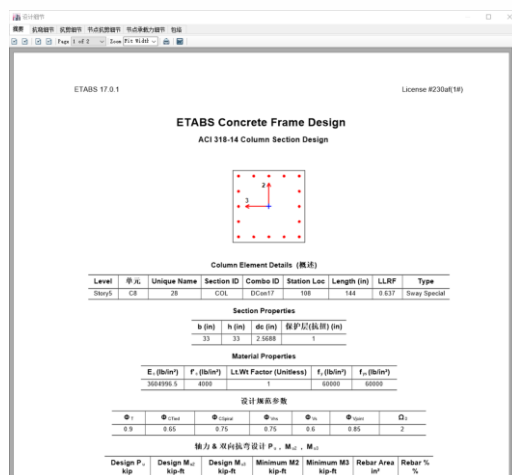


图 9 设计细节



为计算书。操作方式是，在显示设计结果的视窗中，选择某根柱，点击右键，在弹出的对话框中点击**细节**按钮，即出现如图9所示的对话框。对话框左上方是细节显示内容的选项卡，以下分别对框架柱设计的抗弯细节和抗剪细节进行说明。

### 3.1 抗弯细节

**Column Element Details (Flexural Details)**

Level	Element	Unique Name	Section ID	Combo ID	Station Loc	Length (in)	LLRF	Type
Story4	C17	57	COL	DCon20	108	144	0.63	Sway Special

该表是柱单元的基本信息，前七项来自模型定义，LLRF（活荷载折减系数）由程序计算，Type（框架类型）来自设计覆盖项定义。

**Section Properties**

b (in)	h (in)	dc (in)	Cover (Torsion) (in)
33	33	2.5688	1

该表是截面尺寸信息，来自截面定义。dc 截面边缘到纵筋中心的距离，Cover (Torsion)

**Material Properties**

$E_c$ (lb/in <sup>2</sup> )	$f'_c$ (lb/in <sup>2</sup> )	Lt.Wt Factor (Unitless)	$f_y$ (lb/in <sup>2</sup> )	$f_{ys}$ (lb/in <sup>2</sup> )
3604996.5	4000	1	60000	60000

该表是材料信息，来自材料定义。

**Design Code Parameters**

$\Phi_T$	$\Phi_{CTied}$	$\Phi_{CSpiral}$	$\Phi_{Vns}$	$\Phi_{Vs}$	$\Phi_{Vjoint}$	$\Omega_0$
0.9	0.65	0.75	0.75	0.6	0.85	2

上表是设计规范参数，程序有默认值，可通过设计首选项或覆盖项修改。

**Axial Force and Biaxial Moment Design For  $P_u$ ,  $M_{u2}$ ,  $M_{u3}$**

Design $P_u$ kip	Design $M_{u2}$ kip-ft	Design $M_{u3}$ kip-ft	Minimum M2 kip-ft	Minimum M3 kip-ft	Rebar Area in <sup>2</sup>	Rebar % %
-733.586	-1492.1357	-993.533	97.2001	97.2001	44.169	4.06

上表是正截面设计信息。其中设计弯矩是按本文 2.2 节调整后的弯矩，即  $Design M_u = \delta_{ns}(M_{ns} + \delta_s M_s)$ 。Minimum M 即最小弯矩值，对应 ACI 6.6.4.5.4

**Factored & Minimum Biaxial Moments**

	NonSway $M_{ns}$ kip-ft	Sway $M_s$ kip-ft	Factored $M_u$ kip-ft	Minimum $M_{min}$ kip-ft	Minimum Eccentricity in
Major Bending( $M_{u3}$ )	-33.1845	-960.3485	-993.533	97.2001	1.59
Minor Bending( $M_{u2}$ )	18.4973	-1186.7601	-1168.2628	97.2001	1.59

上表是设计弯矩的详细信息。

**Axial Force and Biaxial Moment Factors**

	$C_m$ Factor Unitless	$\delta_{ns}$ Factor Unitless	$\delta_s$ Factor Unitless	K Factor Unitless	Effective Length in
Major Bend(M3)	0.209302	1	1	1	108
Minor Bend(M2)	0.223355	1	1	1	108

上表是正截面设计过程的中间参数， $C_m$  对应 ACI 6.6.4.5.3，K 为计算长度系数。这些参数可通过覆盖项修改。

### 3.2 抗剪细节

抗剪细节的前几张表与抗弯细节一样，也是构件基本信息、截面尺寸信息、材料信息、设计规范参数，不再赘述。以下

对其它几张表进行说明。

Shear Design for  $V_{u2}$ ,  $V_{u3}$

	Rebar $A_v$ /s in <sup>2</sup> /ft	Design $V_u$ kip	Design $P_u$ kip	Design $M_u$ kip-ft	$\Phi V_c$ kip	$\Phi V_s$ kip	$\Phi V_n$ kip
Major Shear(V2)	2.4465	223.349	-733.586	927.164	0	223.349	223.349
Minor Shear(V3)	3.0195	275.661	-733.586	1205.2575	0	275.661	275.661

上表是抗剪设计信息，包括箍筋结果、设计内力、抗剪承载力。

Capacity Shear (Part 1 of 2)

	Shear $V_p$ kip	Long.Rebar $A_{s(Bot)}$ %	Long.Rebar $A_{s(Top)}$ %	Cap.Moment $M_{posBot}$ kip-ft
Major Shear(V2)	230.196	3.98	4.06	2776.1128
Minor Shear(V3)	287.835	3.98	4.06	2776.1128

Capacity Shear (Part 2 of 2)

Cap.Moment $M_{negTop}$ kip-ft	Cap.Moment $M_{negBot}$ kip-ft	Cap.Moment $M_{posTop}$ kip-ft
2842.361	2776.1128	2842.361
2842.361	2776.1128	2842.361

上表总结了柱设计剪力取值的有关数据。包括设计剪力、柱顶和柱底的纵筋数量、柱两端最大可能弯矩（本例的框架类型为特殊抗弯框架）。

Design Basis

Shr Reduc Factor Unitless	Strength $f_{ys}$ lb/in <sup>2</sup>	Strength $f_{cs}$ lb/in <sup>2</sup>	Area $A_g$ in <sup>2</sup>
1	60000	4000	1089

上表为设计基本信息，包含材料强度、构件截面面积。

Concrete Shear Capacity

	Design $V_u$ kip	Conc.Area $A_{cu}$ in <sup>2</sup>	Tensn.Rein $A_{st}$ in <sup>2</sup>
Major Shear(V2)	223.349	1004.23	22.0845
Minor Shear(V3)	275.661	1004.23	22.0845

上表为混凝土部分受剪承载力的相关数据。包括抗剪截面面积、单方向抗弯纵筋面积。

Shear Rebar Design

	Stress $v$ lb/in <sup>2</sup>	Conc.Cpcty $v_c$ lb/in <sup>2</sup>	Uppr.Limit $v_{max}$ lb/in <sup>2</sup>	$\Phi v_c$ lb/in <sup>2</sup>	$\Phi v_{max}$ lb/in <sup>2</sup>	RebarArea $A_v$ /s in <sup>2</sup> /ft
Major Shear(V2)	222.41	0	505.96	0	0	2.4465
Minor Shear(V3)	274.5	0	505.96	0	303.58	3.0195

上表为抗剪设计的相关数据，包括用应力方式表达的设计剪力、混凝土受剪承载力、剪力值上限，和计算得到的箍筋结果。

#### 4 小结

本文对基于 ACI318-14 规范进行混凝土框架柱设计的 ETABS 实现和输出进行了说明。可以看出，PMM 曲面是柱正截面设计的基础，而规范的细节要求将影响 PMM 曲面的形状。此外，对于不同抗震要求的框架类型，其“强柱弱梁”或抗剪承载力的要求是不同的，这将显著影响设计结果。工程师熟悉程序的技术条件后，有利于更好地理解程序结果来指导设计。

# CSiBridge 在悬索桥索力优化中的应用

筑信达 吕良 魏赞洋

大跨桥梁合理的成桥状态可以优化结构设计，充分发挥结构特性，比如斜拉桥，合理优化其成桥索力，可以充分发挥梁、索、塔的材料特性，减少结构用材量减少工程造价。另外也可以指导结构施工、缩短工期。

悬索桥的合理成桥状态可以通过吊索的无应力长度调整来优化，系杆拱桥的梁、拱受力优化问题可以通过调整各吊杆拉力来实现。但如何确定悬索桥各吊索的长度或系杆拱各吊杆的拉力却不是一件容易事情。在 CSiBridge 中，针对上述问题，工程师可通过荷载优化器模块为此类桥梁快速找到最优成桥状态。

荷载优化器基于影响矩阵法，指定优化目标（可以为节点位移、节点反力、上部结构弯矩等）和优化变量（可以为吊索轴力、主缆轴力等），形成影响矩阵。通过多次迭代，使结构的效应值与目标值落入收敛误差之内，完成优化，找到符合目标条件的成桥状态。本文以怒江特大桥为工程背景，简单介绍 CSiBridge 在悬索桥索力优化中的应用。

## 1 概述

怒江特大桥主桥为悬索桥方案，采用 260+800+225m 单跨钢桁架梁悬索桥，主缆矢跨比 1:10，主索中心间距 28m，吊索标准间距 12m，两岸均采用重力式锚碇。主桥加劲梁采用单跨钢桁架梁，端部设有竖向支座、横向抗风支座及纵向阻尼器。桥塔采用门式框架结构，主梁和主塔之间设置支座。塔柱为钢筋砼空心结构，横系梁为预应力空心薄壁结构。全桥总体布置概略图和桥型图如下所示。

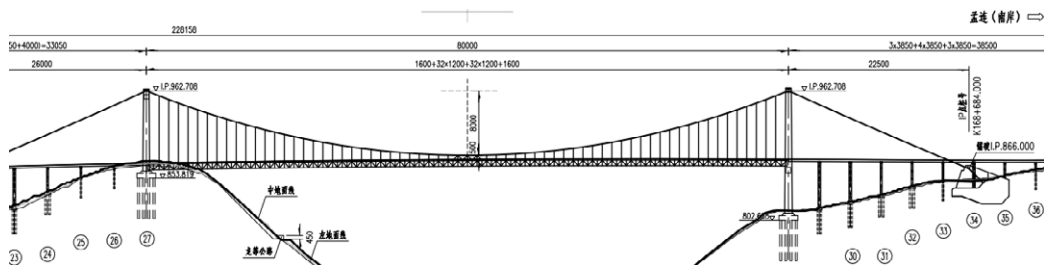


图 1 全桥整体概略布置图

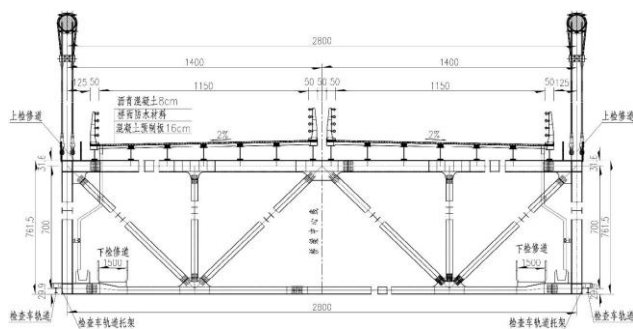


图 2 主梁标准断面图

## 2 建模简介

本桥主桥纵断面位于凸曲线上，给建模造成一定困难。CSiBridge 采用基于对象的建模方式，桥梁线形通过布局线来控制。无论桥梁位于平曲线或竖曲线上，均可通过布局线来快速确定桥梁线形。该悬索桥位于竖曲线段，因此仅需定义布局线在竖直平面内的形状，在相应的里程定义桥梁结构，即可保证桥梁线形。



布局线 段类型	里程 cm	标高 Z cm	纵坡 百分比
1 Initial Station, Elevation Z and Grade	0.	0.	0.
2 Constant At New Grade to Station	16400.	278.8	1.7
3 Circular to New Grade at Station	93400.	740.7441	-0.5
4 Constant at Previous Grade to End	134000.	537.7441	-0.5

图 3 布局线竖向参数

该桥小里程侧桥塔高 95m，大里程侧桥塔高 155m，桥塔为变壁厚矩形单箱单室结构。在 CSiBridge 可采用变截面框架单元来模拟桥塔沿高度方向的属性变化。通过 dxf 导入桥塔各节段截面，定义相邻两截面之间的变化形式，即可完成整个桥塔的变截面设置。

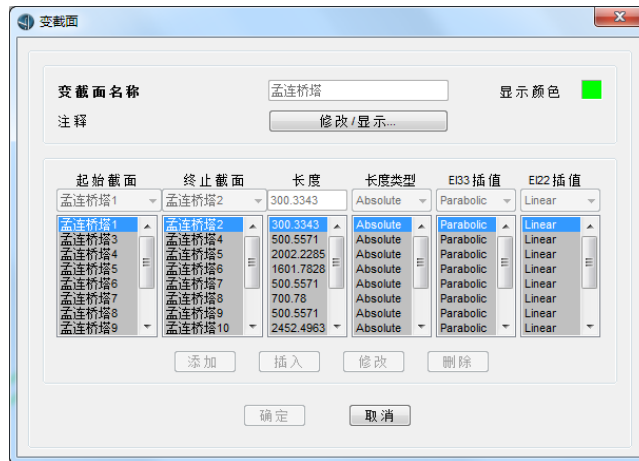


图 4 主塔变截面设置

### 3 确定优化目标及可调变量

一般悬索桥在最优成桥状态下主缆线形接近悬链线，因此设置主缆初始线形为悬链线，以此状态建立初始模型。因结构关于顺桥向中心线对称，故可以将同一对称结构指定到一个组中，减少优化数量。进行荷载优化之前，我们需要确定是优化目标，即达到优化目标时，悬索桥就达到相应的最优成桥状态。依据悬索桥特点，因此我们可以设置以下优化目标：

- 优化前后，吊杆竖直；
- 优化前后，主跨矢高不变。
- 优化前后，两侧主塔柱索鞍位置不变
- 优化前后，主梁标高不变

根据上述原则，可以确定优化的目标约束条件为：索鞍节点和中央扣中间节点顺桥向和竖向位移  $3 \times 2=6$  对、各吊杆顶点顺桥向位移 64 对、加劲梁各支点竖向位移 67 对，共 137 对约束。

另外一个需要确定的是可调变量，通过调整可调变量达到我们所需要的成桥状态。这里可调变量主要有：

- 各主缆分段的无应力长度
- 各个吊杆的无应力长度
- 支座及主塔高度

相应的可以确定可调变量为：各主缆分段的无应力长度（包括左右两侧连接锚碇的主缆） $66+2=68$  对、各吊杆的无应力长度 65 对、支座高度 2 对、索塔高度 2 对，共 137 对变量；

### 4 荷载工况设置

CSiBridge 进行优化前，需要给可调变量指定一个初始的荷载值，一般取单位荷载，此时该指定荷载的

比例系数默认为 1。然后软件会对可调变量进行迭代优化，优化完成后，软件会给出最终的比例系数，该比例系数乘以初始荷载值，就为杆件优化后的最终荷载值。本悬索桥共设置了 137 对可调变量，需要分别指定 137 个组，然后对 137 组可调变量指定单位应变。

悬索桥为非线性结构，结构刚度与荷载值相关。因此在计算优化索力时需要考虑恒载对结构刚度的影响，软件通过考虑恒载刚度来形成影响矩阵。

首先需要定义一个非线性静力工况：**一次成桥**，考虑结构自重及二期恒载，同时考虑 p- $\Delta$  和大位移效应。为了便于后面的索力优化，我们先去除中央扣锁，即在**一次成桥**工况后再添加一个非线性静立工况-**去除扣锁-大位移**，去除三对中央扣锁。

然后再定义一个非线性阶段施工工况：**内力调整-大位移**，继承**去除扣锁-大位移**工况的刚度矩阵，以**去除扣锁-大位移**工况的结束状态为初始状态，进行分析。在阶段定义中，添加一个施工阶段，分别将 137 组可调变量的单位应变荷载添加到一个施工阶段中。勾选 p- $\Delta$  和大位移效应，完成**内力调整-大位移**工况设置。

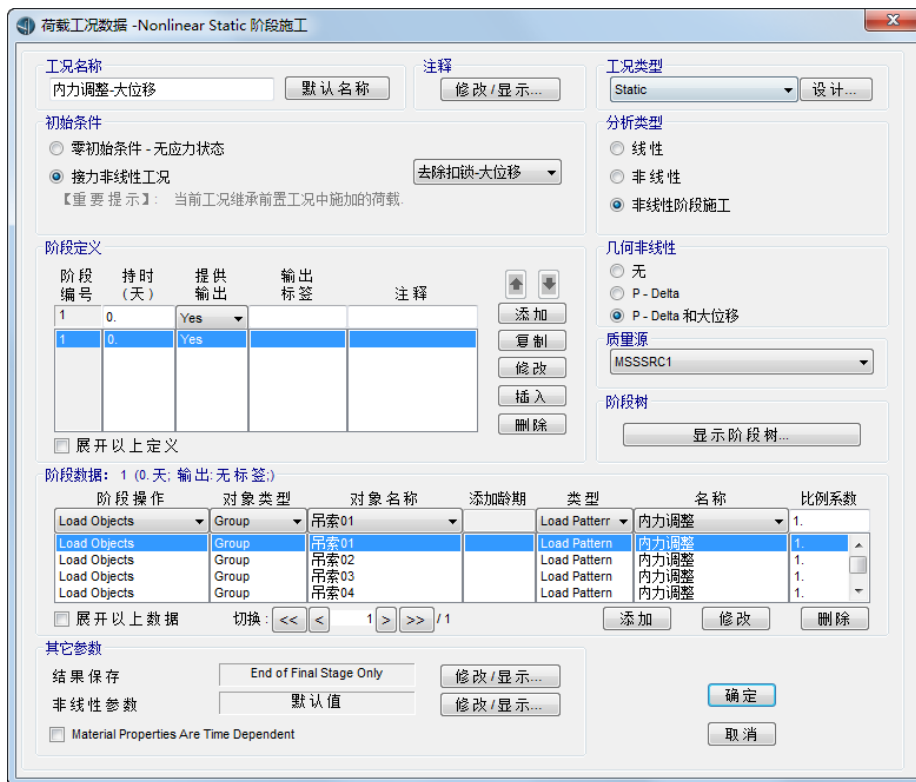


图 5 内力调整-大位移工况

## 5 荷载优化器设置

在荷载优化器界面，选择荷载工况(load case)为**内力调整-大位移**。在 Load Assignment (可调变量) 窗口软件会自动导入该工况下的各阶段操作。如下图所示，显示总变量为 137 个。红色选框 1 中的三个参数主要控制迭代计算，其中 Max Iterations 表示最大迭代次数，如果计算达到最大迭代数依旧没有收敛，软件会停止迭代计算；Accel Factor 对于线性优化问题该参数应设置为单位 1，对于非线性优化问题，如果结果计算收敛时间较长，可以设置为一个大于 1 的值，如果计算难以收敛，可将设置为一个小于 1 的值。Rel Conv Tel 表示相对容差。在该索力优化中，以上参数均保持默认设置即可较好的收敛。

在 Load Assignment (可调变量) 窗口 (即红色选框 2 中的) 的相关参数，需要用户注意的为表格后面的四个参数，这里以吊杆 1 为例进行简要说明。Scale Factor 表示初始荷载的放大系数，与工况设置中的比例系数是对应的，这里保持默认系数 1 即可；Variable 表示该参数是否可以变化，这里吊杆 1 为可调变量，故设置参数为 Variable，如果用户想指定吊杆 1 轴力不变，可以将该参数设置为 Fixed。Relative Cost 和

Perturbation Factor 为可选参数,进行优化时 Relative Cost 与 Scale Factor 相乘后作用于影响矩阵; Perturbation Factor 为影响矩阵的增量系数,对于非线性无法收敛时,可尝试改小该参数,这里均保持默认值即可。

在 Goals and limits (优化目标) 窗口,输入前文所述的优化目标约束条件。以索鞍处节点 1974 为例简要说明相关参数意义。Type 表示,优化目标的类型,可以选择为节点位移、节点反力、框架内力等。优化前后需要保证索鞍节点在顺桥向和竖向节点位置不变,因此在 Type 选项中选择节点位移 (Joint Displacement),然后在 Component 选项卡中选择顺桥向位移 U1,在 Sense 选项卡中选择判定标准为“=”,Target Value 目标值即节点位移设置为 0。Relative Benefit 为可选参数,该系数越大对应优化参数的计算误差越小,这里保持默认值 1。Absolute Tolerance 表示计算的收敛容差,要保证索鞍优化前后顺桥向位移不变,容差设置为  $10^{-6}$ 。

按照上述方式约束索鞍节点和中央扣中间节点顺桥向和竖向节点位移、各吊杆顶点顺桥向位移、加劲梁各支点竖直位移,共 137 个节点约束 (对称结构只需约束一侧节点,另一侧节点会自动调整一致)。定义完成之后即可进行索力优化。

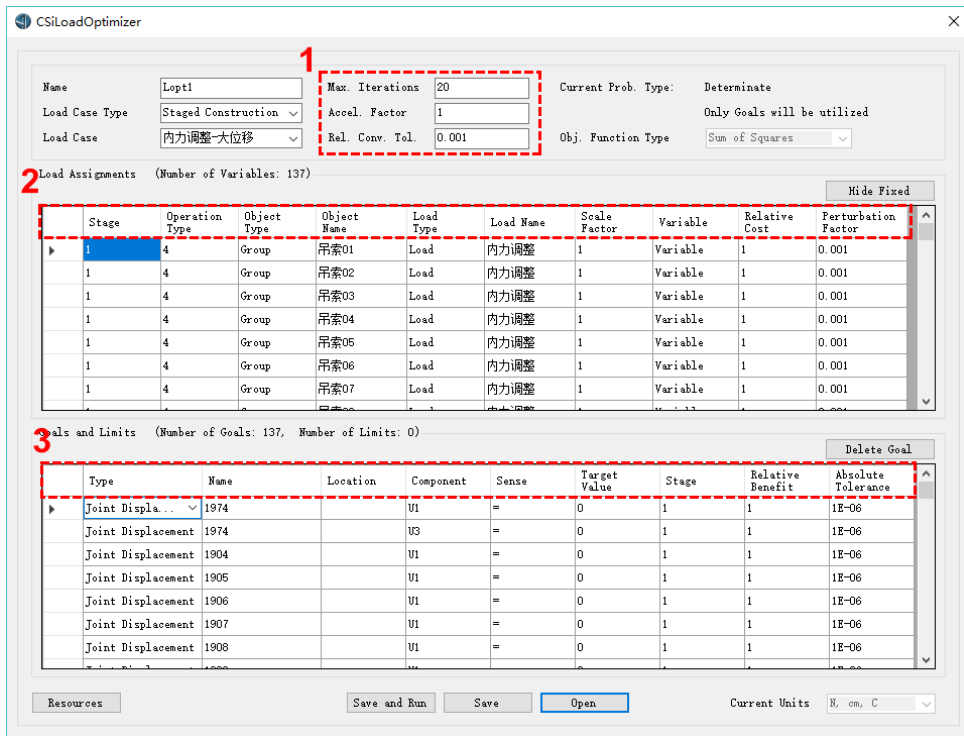


图 6 优化器设置

## 6 结果分析

根据计算量的不同,优化时间长短也不同,该悬索桥整个优化过程大概十五分钟左右。优化完成后软件会自动生成一个优化荷载工况,默认名称为优化工况名称加上后缀\_Lopt1,这里生成的荷载优化的默认名称为:内力调整-大位移\_Lopt1。在比例系数一栏中,系数由之前的 1 全部变成不同的数值,该系数乘以之前施加的单位应变,即为需要对相应的构件施加的荷载,使结构达到最优的成桥状态。

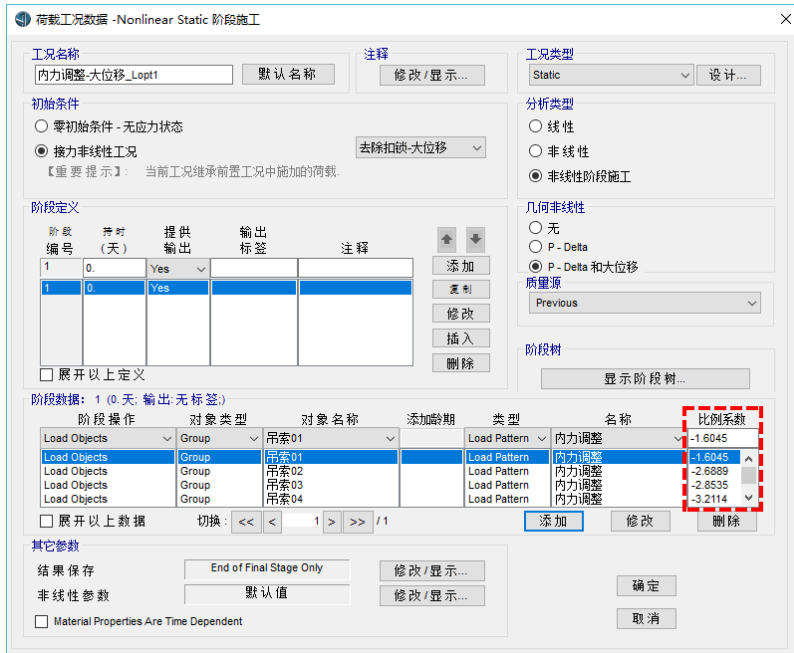


图7 优化结果

为了便于优化，优化前曾拆除了中央扣，此时须添加中央扣锁。重新定义一个非线性阶段施工工况，继承非线性优化工况**内力调整-大位移\_Lopt1**的计算结果，勾选 p- $\Delta$  和大位移效应，在阶段操作中激活中央扣，运行该工况即为所求的最优成桥状态。运行完成后，可以查看中央扣节点的竖向位移为 0.0004m，与未进行优化前，即一次成桥状态下中央扣节点位移 6.65m 相差巨大。

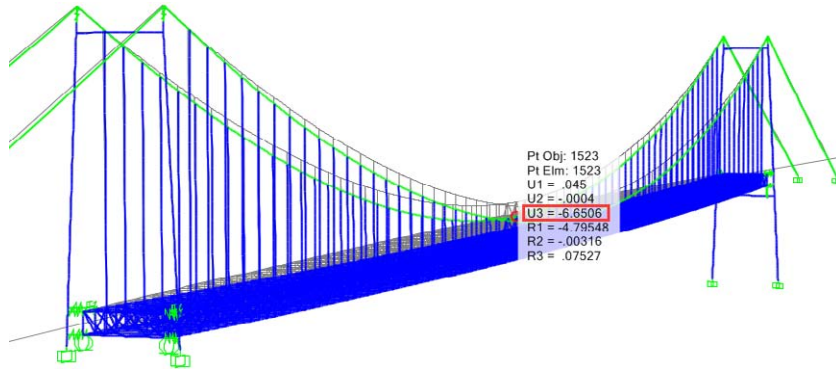


图8 优化前中央锁扣竖向位移

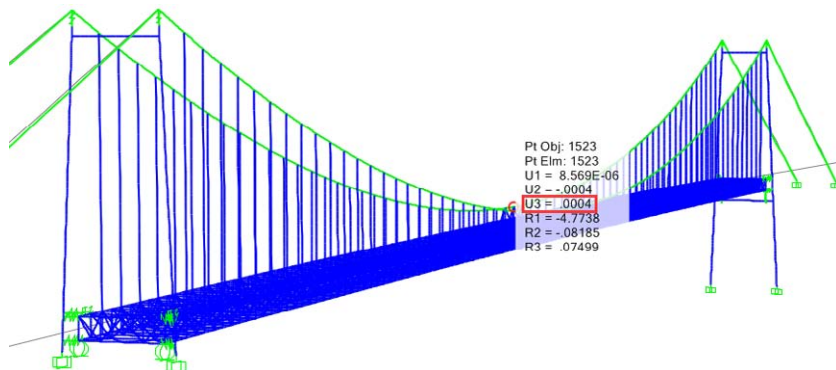


图9 优化后中央锁扣竖向位移

为校核 CSiBridge 计算结果的可靠性，我们将悬索桥每个吊杆的轴力以及主缆的轴力采用表格输出，



并与原设计单位提供的设计结果相比较。绘制图形如下所示。

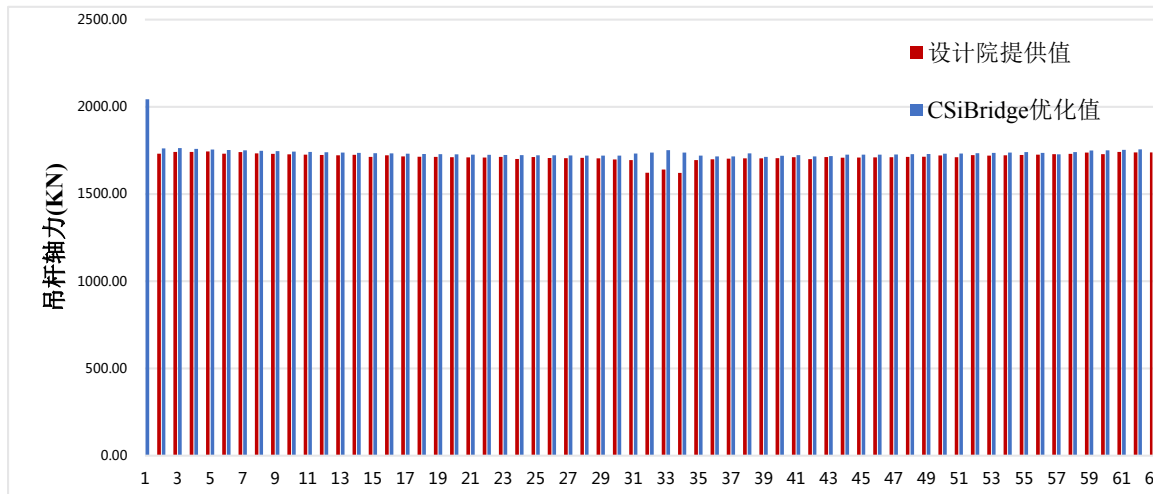


图 10 最优成桥状态下各吊索轴力图

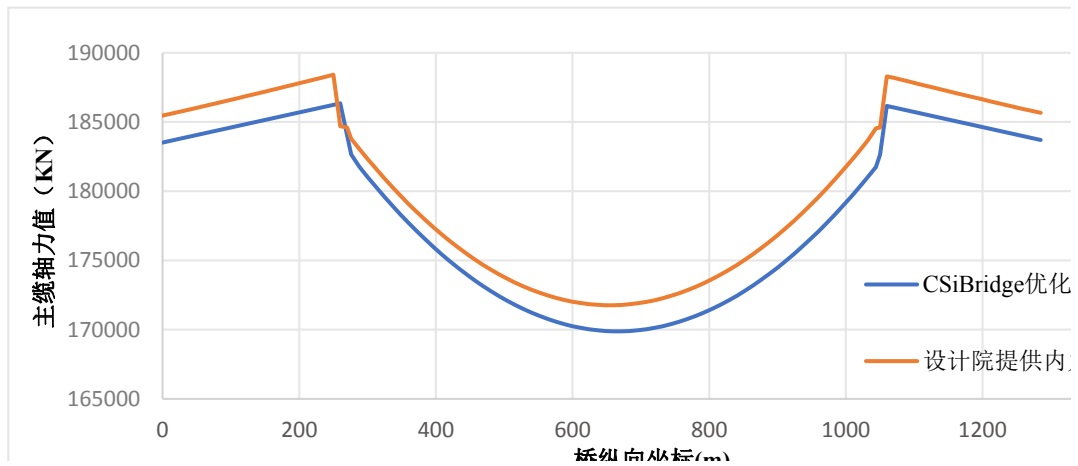


图 11 最优成桥状态下主缆拉力分布图

通过上述图表可知，采用 CSiBridge 优化后的悬索桥主缆内力及吊索轴力与原设计单位提供的的设计结果较为一致，最大误差不超过 5%，满足工程需求。

## 7 小结

CSiBridge 基于影响矩阵的悬索桥索力优化方法。首先在恒载和假定初始索力的作用下，形成悬索桥的初始刚度。然后在初始刚度基础上得到悬索桥的影响矩阵。最后基于影响矩阵迭代更新索力，直至收敛，得到悬索桥理想索力和合理成桥线形。

软件基于对象的建模方式能有效提高建模效率，采用影响矩阵的方法进行索力优化便于工程师理解及操作，计算结果具有较高精度，满足工程应用。针对此类需要进行构件内力优化的桥梁，CSiBridge 提供了一个高效解决方案。



# 桥梁性能化抗震设计在 CSiBridge 中的实现

筑信达 吕良 张振鹏

随着结构安全性要求的提高，桥梁性能化抗震设计逐步受到重视。相较于传统抗震设计，性能化抗震设计可以在节省成本的同时提高结构的使用性能，是一种更加合理的设计方法，但也对工程师的抗震理念与实践能力有了更高的要求。

根据在地震作用下动力响应特性的复杂程度，常规桥梁分为规则桥梁和非规则桥梁两类，在 7 度及 7 度以上地区按规范《公路桥梁抗震细则》(JTGT B02-01-2008) (以下简称《08 抗震细则》) 要求需要验算规则桥梁在 E2 地震作用下的墩顶位移能力。由于时程分析计算效率的问题，在实际工程中对于规则桥梁，大多都选用反应谱分析方法进行设计。常规软件在进行反应谱分析时整个过程较为繁琐，需要用户手动计算处理数据较多，容易出现差错，并且一旦结构形式或配筋发生改变，整个过程就必须重新再做一遍，严重影响工程师的工作效率。另外在需要进行抗震设计的桥梁中，规则桥梁占据了其中很大的一部分。如何高效完成规程桥梁在 E2 地震作用下的抗震设计，是工程师急需解决的问题。

目前，CSiBridge 针对性能化设计提出了系统的解决方案，对于常规桥梁在 E2 地震荷载作用下的反应谱分析，通过简单的参数选择，即可实现“一键式”性能化抗震设计。本文结合一个工程案例，简要的介绍了桥梁性能化抗震设计在 CSiBridge 中的实现。

## 1 工程简述

该桥为 3x30 的连续箱梁桥，上部结构总宽度为 10.98m，梁高为 1.525m；有两个中间桥墩，每座桥墩有两根直径 0.9m 的圆形墩柱组成；分析模型如图 1 所示。桥址抗震设防烈度为 7 度，桥梁抗震设防类别为 B 类桥梁。按规范要求该桥梁需要进行 E2 地震作用下的抗震设计。

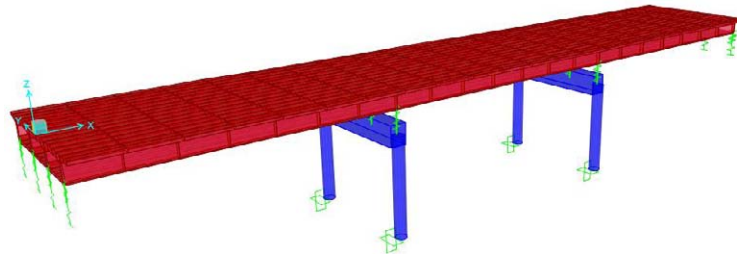


图 1 桥梁分析模型

E2 地震荷载作用下规则桥梁的抗震设计主要验算内容为桥墩顶的位移。该验算内容可以分成两部分，一个是计算桥墩顶部在 E2 地震荷载作用下能产生多大位移，即桥墩的位移需求，以字母 D 表示；另一部分为计算在桥墩不发生破坏前桥墩顶部最大能产生多大的位移，及桥墩的位移能力，以字母 C 表示。如果  $D/C < 1$ ，表示位移需求小于位移能力，即结构在 E2 地震荷载作用下不会发生破坏，通过验算。

## 2 位移需求计算

桥梁性能化抗震设计需要考虑桥梁结构的延性，即在 E2 地震作用下，延性构件（墩柱）可发生损伤，产生弹塑性变形，耗散地震能量。因此在计算位移需求之前需要对桥墩刚度进行折减，考虑构件开裂之后的刚度。然后继承构件开裂后的刚度，对结构施加反应谱荷载，计算位移需求。

### 2.1 桥墩等效刚度

CSiBridge 在执行反应谱分析之前，首先会对分析模型进行等效线性化，即对原桥墩截面相关参数进行折减。在下部结构抗震设计需求参数窗口中，如图 2 所示，程序默认桥墩开裂后的属性由程序默认计算获得。程序在计算桥墩开

裂截面性质时，会依据规范《08 抗震细则》6.1.6 条，考虑由上部结构产生的轴力，依据弯矩—曲率曲线，计算开裂后桥墩的截面性质。



图 2 下部结构抗震设计需求参数窗口

在分析完成后，用户可以查看每一个桥墩依据规范进行刚度折减后的折减系数。操作命令如下：**高级选项卡>定义>命名属性集合>框架属性修正**。该模型共两组桥墩，每组桥墩由两个墩柱，因此需要分别对四个墩柱的刚度进行折减。如图 3 所示，该模型共有四组修正后的数据。选中其中桥墩 BT1C1，点击**修改/显示属性集**。在图 4 中，桥墩 BT1C1 关于 2 轴及 3 轴的惯性矩已按照规范进行了修改。



图 3 框架属性修正

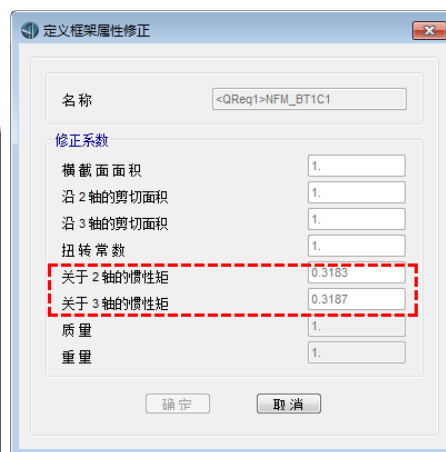


图 4 开裂截面属性修正

## 2.2 反应谱荷载工况计算

基于刚度修正后的模型，软件会依次执行模态分析和反应谱分析。因此需要输入反应谱函数，选项卡：**荷载>函数-反应谱函数>新建**，用户可选择导入标准反应谱函数或采用自定义的方式输入反应谱函数。最后软件会根据规范对各个方向反应谱分析结果进行组合获得位移需求。

## 3 位移能力计算

CSIBridge 在计算墩顶位移能力时，用户仅需定义少量参数，程序既可自动完成规则桥梁的墩顶位移能力计算。下文将对程序自动计算过程做相关介绍。

依据规范《08 抗震细则》第 7.4.7 条及第 7.4.8 条，单柱墩容许位移可通过公式直接计算。但是双柱或多柱排架



墩的横桥向位移能力必须使用 Pushover 分析确定其抗震位移能力。

对于单柱墩，如上图 2 所示，在**下部结构抗震设计需求参数窗口墩柱位移能力**选项中，选择“程序决定”时，软件首先判断桥墩为单柱墩还是多柱墩；然后根据规范，单柱墩与多柱墩顺桥向采用规范公式计算位移能力，多柱墩横桥向采用 Pushover 分析。如选择“Pushover 分析”则所有桥墩均采用 Pushover 分析计算位移能力。本文仅对采用 Pushover 分析求解位移能力过程进行简要说明。

### 3.1 塑性铰布置

采用 Pushover 分析求解墩顶位移能力时，必须确定各个墩柱的塑性铰属性、长度及位置。

在**桥梁抗震设计首选项**窗口中，如图 5 所示。选择设计规范“JTG/B02-01 2008”之后，软件会自动选择混凝土铰的类型为“自动:JTG/T 铰”。软件会根据真实输入的桥墩配筋，区分核心及非核心混凝土，依据 Mander 混凝土本构模型，计算出轴力作用下的弯矩-曲率曲线，并由此确定塑性铰属性。桥墩截面的配筋及相关属性可以在截面设计器中查看，而塑性铰属性也可通过点击**高级选项卡>指定>塑性铰**，选择**自动**，点击**修改/显示**自动塑性铰数据按钮，进行查看，这里不做详细介绍。

通常，桥墩中的轴力由于倾覆效应在 Pushover 的过程中会不断变化。因此，同一截面的屈服弯矩和塑性弯矩会随该截面中 Pushover 分析步的轴力不断变化。软件在进行分析时，会考虑上述因素，并为墩柱指定耦合的 P-M-M 铰。



图 5 抗震设计首选项窗口

依据《08 抗震细则》第 6.2.2 条，软件会自动确定各类桥墩的塑性铰位置，并依据规范第 7.4.3 计算塑性铰长度。在确定塑性铰长度和塑性铰属性之后，塑性铰将被指定在距墩柱端部 1/2 该塑性铰长度的位置，如下图所示。

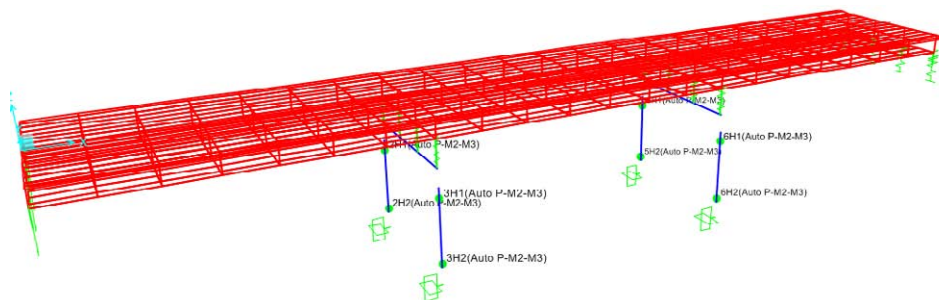


图 6 塑性铰位置

在某些情况下按照规范计算的纵桥向与横桥向塑性铰长度不同，如多柱排架墩。因此用户可以在**桥梁抗震首选项**窗口**铰长度选项**中指定采用两个塑性铰长度中的顺桥向、横桥向、较大值、较小值或平均值。用户也可以在采用其中

一个设置计算之后再另一个设置再次计算，以查看结构对塑性较长度的敏感性。本案例选择的是较小的较长度。

### 3.2 桥墩破坏准则

依据《08 抗震细则》7.4.8 条，当墩柱的任一塑性铰达到其最大容许转角时，盖梁处的横向水平位移即为容许位移。即桥墩破坏准则为第一个塑性铰达到极限转角（**First Hinge At Limit State**）时，下部结构视为破坏，如图 7 所示。

Pushover 目标位移比为 Pushover 分析的位移控制条件。该程序默认值为 4，即进行 Pushover 分析时，墩顶水平位移达到四倍的反应谱分析位移需求时，Pushover 分析停止。在进行 Pushover 分析时，某些情况下桥墩塑性转角很难达极限转角，但是如果达到了 4 目标位移比，程序也将停止 Pushover 分析。但是如果没有在达到四倍的反应谱分析位移需求之前，桥墩塑性铰就达到了极限转角，程序也将停止 Pushover 分析。

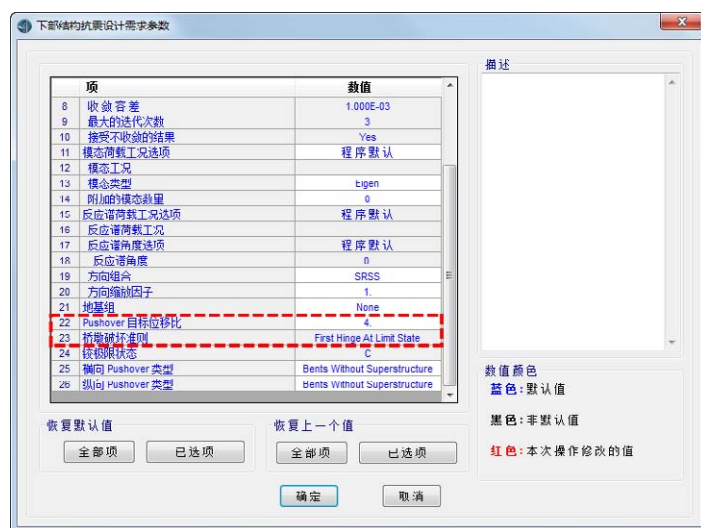


图 7 Pushover 目标位移比和桥墩破坏准则

## 4 分析结果

输入反应谱荷载并将完成相关参数定义即可运行抗震分析，运行完成后会软件自动弹出分析结果表格，如图 8 所示。用户也可通过命令：**开始选项卡>显示表格>设计数据>桥梁>seismic design data>勾选全部**查看结果表格。

DesReqName	BridgeObj	SDCategory	SpanName	Station	Direction	GenDispl	Demand	Capacity	DCRatio	Status
QReq1	BOBJ1	Pushover	Span 1	20	TRANS	<QReq1>GD_TR1	0.063989	0.074614	0.8576	Finished - Hinge 2H2 reaches limit st...
QReq1	BOBJ1	Pushover	Span 1	20	LONG	<QReq1>GD_LG1	0.011277	0.045332	0.2488	Finished - None of the hinges reach...
QReq1	BOBJ1	Pushover	Span 2	40	TRANS	<QReq1>GD_TR2	0.063989	0.074614	0.8576	Finished - Hinge 5H2 reaches limit st...
QReq1	BOBJ1	Pushover	Span 2	40	LONG	<QReq1>GD_LG2	0.011277	0.044887	0.2512	Finished - None of the hinges reach...

图 8 抗震需求/能力比表格

在以上表格中显示了所有 4 个需求/能力比（DCRatio Unitless），即每个桥墩的横桥向（TRANS）和顺桥向（LONG）

(本案例桥梁有 2 个桥墩)。需求/能力比小于 1.0 的值意味着桥墩在抗震设计请求中定义的地震作用下有充足的承载能力;大于 1.0 的值意味着地震作用超出桥墩的承载能力。该案例桥梁两个桥墩的两个方向上的需求/能力比均小于 1, 表明该桥梁墩顶位移能力通过抗震验算。

该表格同时给出了桥墩的位移需求 (Demand) 和位移能力(Capacity), 以及进行 Pushover 分析时桥墩是否达到极限转角。在该窗口右上角下拉选项中, 用户可以得到更多其他信息, 如: 墩柱的弯矩和剪力抗震需求、开裂截面数据、支座反力等信息。在完成设计验算后, 可以使用**设计菜单>桥梁设计>创建抗震设计报告**命令创建一个报告, 将分析计算结果以文档的形式输出。

另外, 软件在进行“一键式”抗震设计计算时, 中间所有的计算步骤及信息, 用户均可查看及检查。在进行自动抗震设计时, 会将每一步的操作都生成一个对应的荷载工况, 如图 9 所示, 自动生成工况均以前缀<QReq1>表示。其中<QReq1>GRAV 表示计算桥墩刚度折减的重力工况; <QReq1>MODAL 表示用于反应谱分析的模态工况; <QReq1>RS\_(X、Y、XY)表示沿三个方向的反应谱分析工况; <QReq1>bGRAV 表示进行 Pushover 分析前, 用于计算上部结构作用于桥墩轴力的重力工况; <QReq1>PO\_(TR1、LG1、TR2、LG2)表示两个桥墩分别沿桥纵向和横向的 Pushover 分析。每个工况的具体细节可点击右侧**修改/显示荷载工况**查看。

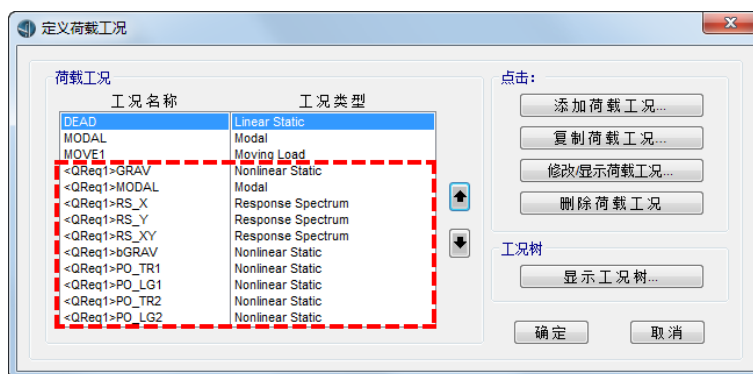


图 9 “一键式”抗震设计时程序生成的相应工况

## 5 总结

对于常规桥梁在 E2 地震荷载作用下的反应谱分析, CSiBridge 给出了“一键式”的解决方案。CSiBridge 将繁琐的模型处理及数据处理全部交由软件完成, 大大降低人为错误; 采用参数化的建模方式, 当桥梁结构信息发生修改时, 能快速调整模型, 而后进行分析, 避免重新建模的困扰; 最后契合中国规范, 基于 SAP2000 的分析内核, 计算高效而且稳定, 可成为从事桥梁性能化抗震设计工程师手中的利器。

限于篇幅, 文章对一些技术细节没有展开说明, 具体可以查看 CSiBridge 附带的技术文档《中美规范抗震设计技术指南》。

# PLAXIS 动力边界条件

筑信达 张志国

岩土工程的有限元分析无法避免针对半无限空间内岩土体的模拟。对于静力计算，由于局部荷载（开挖荷载、上部荷载以及施工荷载等）的影响范围有限，用户只需在远离施工区域处设置人工边界并定义静力边界条件即可。此处的“远离”可取 2~3 倍的施工区域的尺寸（如图 1 所示），但这并非适用于各种情况的绝对取值标准。

通常来讲，岩土体的截取范围越大，计算精度越高，但计算量更大、计算时间更长。建议用户以 2~3 倍的施工区域尺寸作为人工边界的初始截取范围，然后通过试算判断是否需要增加或减少截取范围。

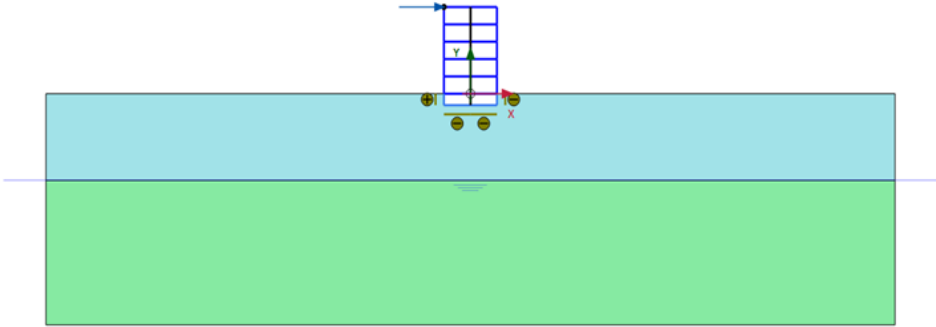


图 1 静力计算的人工边界范围

对于动力计算，由于应力波的传播速度快、影响范围广，简单地采用静力计算的人工边界及边界条件无法正确计算结构或岩土体的动力响应。以图 2 为例，地震波在地基和结构中的传播和衰减过程如下：

由无穷远处的震源发出的地震波，通过地基土以入射波的形式传播至上部结构内并使其发生振动，当结构内的上行波传至结构顶部后将发生反射形成反射波。反射波传至上部结构的基础后，部分能量以透射波的形式传入地基土中，而另一部分能量则再次向上反射形成新的二次上行波并再次在结构顶部发生反射，由此形成地震波在结构内多次的反射和透射。在上述反复的反射和透射过程中，地震波的能量逐渐减小，最后消失殆尽，停止运动。

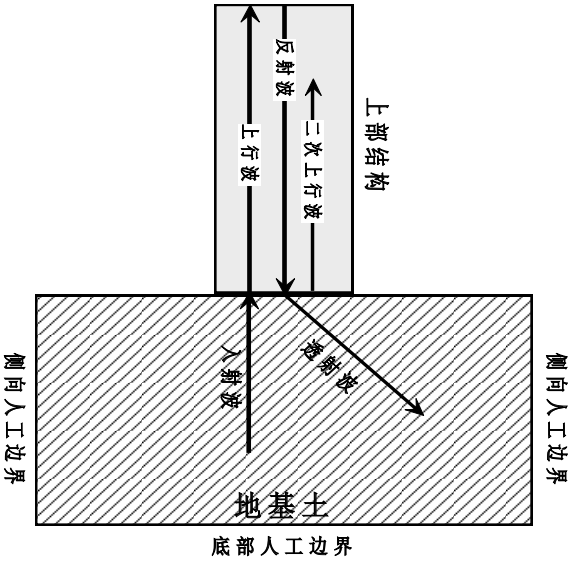


图 2 地震波的传播及衰减

可以看出，真实的半无限地基可以以透射波的形式耗散地震波能量，也称“辐射阻尼”或“几何阻尼”。但是，对于静力计算的人工边界及边界条件，应力波在传播至人工边界时将发生反射而非辐射至无穷远处。因此，由人工边界产生的虚假的人工反射波将在结构或土体的动力分析中引入计算误差，用户应予以避免。

综上，对于有限范围（如 2~3 倍的施工区域尺寸）内的岩土体计算模型，如需正确模拟半无限体的辐射阻尼，用户应考虑在人工边界上定义有别于静力计算的动力边界条件，以此吸收或透射人工反射波或将人工反射波引起的误差控制在计算精度允许的范围之内。

## 1 动力边界条件

严格动力边界条件应满足半无限空间内全部的场方程和边界条件：前者包括位移场、速度场以及应力场等；后者包括支座约束、动力位移以及辐射阻尼等。通常来讲，这种动力边界条件需要先求解半无限空间内波动问题的解析解，然后由解析解的一般表达式或综合控制方程导出动力边界条件。

严格动力边界条件的主要优势在于全局性，也就是全部边界节点在空间和时间上均保持相互之间的耦合关系。但是，该类动力边界条件只有在简化的边界条件和控制方程中才能导出解析表达式，故适用性不强。事实上，远置人工边界就是一种既简单又严格动力边界条件，其基本原理如下：

虽然在静力计算中采用的人工边界对应力波既不透射也不吸收（完全反射），但只要人工边界与施工区域之间的距离足够大，以致人工边界处的反射波在动力荷载的持续时间内未传播至施工区域附近，人工反射波对施工区域内结构和岩土体的影响即可忽略。以常见的纵波波速约 100m/s 的砂土为例，假设地震持续时间取 20s，上述“足够大”的远置边界约为 1000m。可以看出，远置边界往往导致计算模型过大、单元数量过多。

局部的动力边界条件近似模拟应力波，仅将边界节点某一时刻的运动与其邻近节点在邻近时刻的运动相联系，具有局部性或解耦性的特点。局部的动力边界条件计算效率高、适用性强，是目前研究动力边界条件的主要方向。借助于数学和力学原理，目前较为成熟的局部动力边界条件包括透射边界、粘性边界以及粘弹性边界等。

上述各种局部的动力边界条件中，透射边界存在高频振荡和漂移失稳问题，不宜直接在通用的有限元软件中实现。粘性边界是在人工边界上设置阻尼器用以吸收反射波能量，其物理意义清晰、处理方法简单，故多用于大型的商业软件。但是，粘性边界在低频荷载作用下存在严重的整体漂移问题，也无法模拟半无限岩土体的弹性性能。粘弹性边界则是在粘性边界的基础上设置弹簧单元，用以克服粘性边界的低频失稳问题，同时考虑岩土材料的弹性性能。

PLAXIS 支持的动力边界条件包括粘性边界、自由场边界和一致地基边界，详见后文。

## 2 粘性边界

如前文所述，粘性边界即沿人工边界布置阻尼器用于吸收外行波的能量，使其在边界处不发生反射。例如，阻尼器沿 x 方向提供的抗力（正应力和剪应力）如下所示：

$$\sigma_n = -C_1 \rho V_p \dot{u}_x$$

$$\tau = -C_2 \rho V_s \dot{u}_y$$

其中， $\rho$ —材料密度；

$V_p$ 、 $V_s$ —与材料密度和弹性常数有关的纵波和横波波速；

$u_x$ 、 $u_y$ —边界处节点的法向和切向速度；

$C_1$ 、 $C_2$ —法向和切向的松弛系数；

关于上述松弛系数  $C_1$  和  $C_2$  的取值，当仅考虑沿边界法向的纵波时，两者均取 1.0；当考虑沿边界切向的剪切波时，推荐  $C_1=1.0$  和  $C_2=0.25$ 。关于粘性边界及松弛系数的定义，用户可在 PLAXIS 模型浏览器的动力边界条件中完成操作，如图 3 所示。需要注意的是，该粘性边界无法完全吸收剪切波，可能会存在部分反射。除此之外，该粘性边界同样存在低频失稳的问题，用户应避免将其用于静力计算或低频的动力计算。

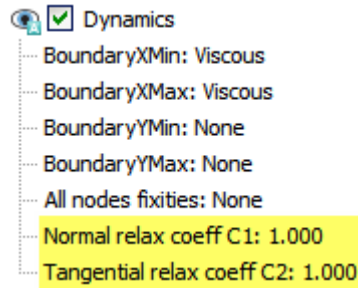


图 3 定义粘性边界和松弛系数

为了验证 PLAXIS 中粘性边界的有效性，现以均匀线弹性土体材料在三角形脉冲荷载作用下的振动分析为例，对比静力边界、粘性边界和远置边界三种条件下各自的动力响应。PLAXIS 模型的基本信息如下：

- 材料参数：弹性模量=2.5Pa，泊松比=0.25，密度=1kg/m<sup>3</sup>；
- 动力荷载：1N/m<sup>2</sup>，持续时间 10s，三角形脉冲荷载，如图 4 所示。

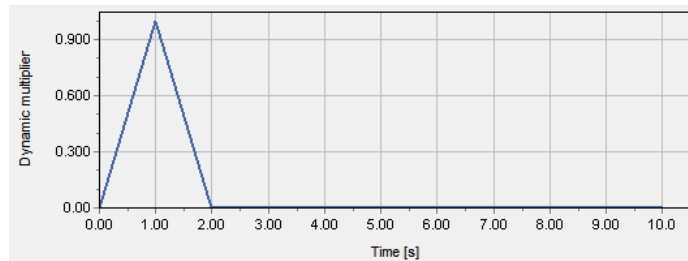


图 4 三角形脉冲荷载

注意，上述模型中的材料参数和动力荷载仅用于验证粘性边界，具体取值无实际的工程意义。其中，关于远置边界的截取范围，可采用以下公式进行计算：

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} = 1.0\text{Pa} \quad \lambda = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} = 1.0\text{Pa}$$

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}} = 1.732\text{m/s} \quad c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = 1.0\text{m/s}$$

$$L \geq cT / 2$$

$$L \geq \max(c_s \times 10 \times 0.5, c_p \times 10 \times 0.5) = 8.66\text{m}$$

如图 5 所示，对比三个计算模型在荷载中心处的节点竖向位移。如果以远置边界的计算结果（红色）作为参照依据，静力边界的计算结果（粉色）在初期（6s 之前）与之偏差较小，后期（6s 之后）则偏差较大；该结果表明人工边界处的反射波在经过约 6s 之后返回荷载中心点并影响其后续的动力响应。粘性边界的计算结果（蓝色）在整个荷载持续时间内与远置边界相近，无明显差异；该结果表明粘性边界可以有效吸收入射波，防止反射波影响加载区域的动力响应。



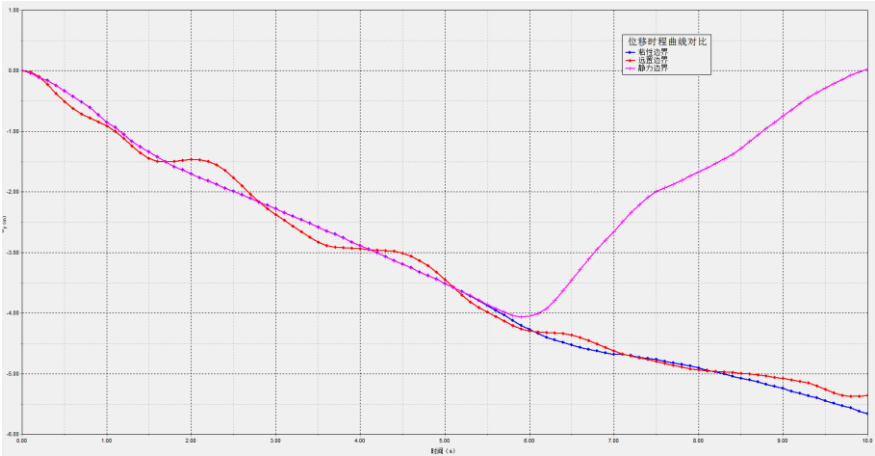


图 5 荷载中心处的节点竖向位移

### 3 自由场边界

前文介绍的粘性边界适用于半无限空间内的动力荷载，如车辆荷载、机器荷载或作用于上部结构的风荷载等等。但是，对于在波动场中作用于人工边界上的动力荷载（如地震荷载），人工边界除了能吸收外行波的能量外，还应将动力荷载传递至土体内部。因此，粘性边界并不适用于地震荷载，但用户可在 PLAXIS 中选用自由场边界或一致地基边界。

自由场边界是在粘性边界（阻尼器）的基础上，通过自由场单元将远场运动以等效正应力和等效剪应力（如下所示）的形式传递至近场土体的内部。此处的自由场单元即布置于土体内部的界面单元，通过阻尼器与土体相连，其力学性能与相邻土体相同，如右图所示。

$$\sigma_n = -C_1 \rho V_p (\dot{u}_x^m - \dot{u}_x^{ff})$$

$$\tau = -C_2 \rho V_s (\dot{u}_y^m - \dot{u}_y^{ff})$$

需要注意的是，自由场边界仅用于竖向人工边界且正负方向的自由场边界必须同时定义，如图 6 所示的 Xmin 和 Xmax 边界。

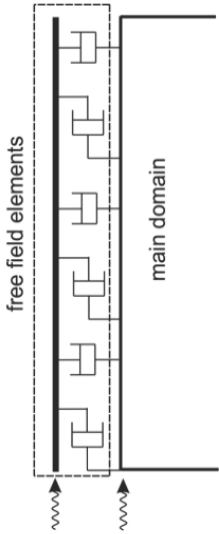
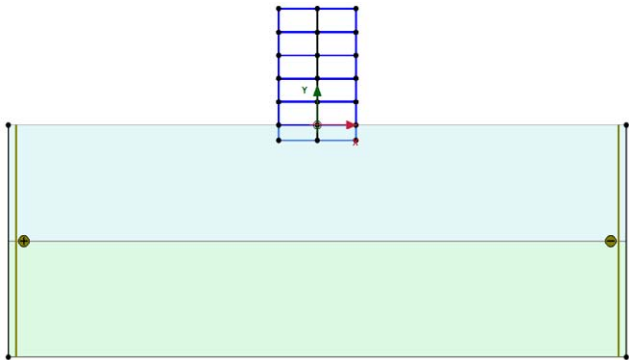


图 6 2D 自由场边界

4 一致地基边界

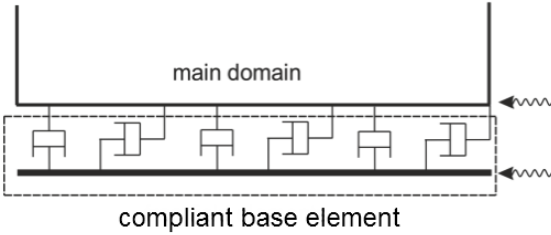


图7 一致地基边界示意图

一致地基边界同样是在粘性边界（阻尼器）的基础上，通过一致地基单元将远场运动以等效正应力和等效剪应力（如下所示）的形式传递至近场土体的内部。一致地基单元即布置于土体内部的界面单元，通过阻尼器与土体相连，其力学性能与相邻土体相同，如图7所示。

$$\sigma_n = -C_1 \rho V_p (\dot{u}_x^d - 2\dot{u}_x^u)$$

$$\tau = -C_2 \rho V_s (\dot{u}_y^d - 2\dot{u}_y^u)$$

需要注意的是，一致地基边界仅用于地基地部的人工边界，如图8（左）所示的 Ymin 边界。由于一致地基边界用于地震动的输入，用户在将地基地部的人工边界定义为一致地基边界的同时，还应指定时间相关的位移边界条件，如图8（右）所示。

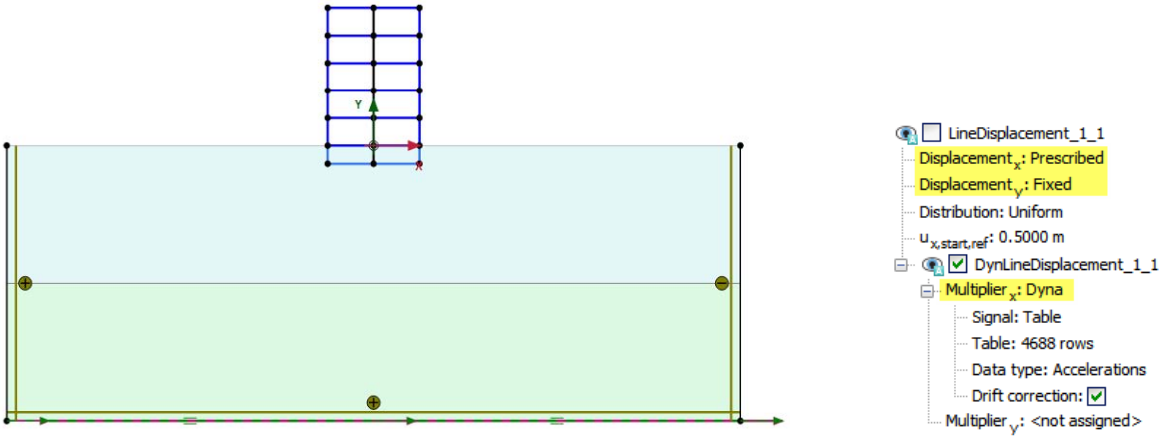
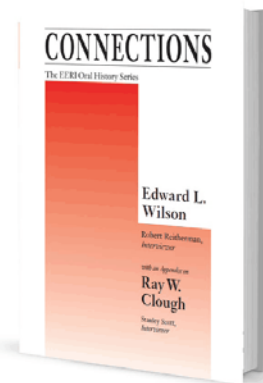


图8 一致地基边界与时间相关的位移边界条件

5 小结

本文以岩土工程有限元分析中的人工边界为切入点，在初步介绍用于静力计算的边界范围后，着重强调了动力计算所特有的辐射阻尼问题。利用有限范围内的人工边界并辅之以有效的动力边界条件，即可在满足辐射阻尼的前提下尽量减小计算量。PLAXIS 提供了粘性边界、自由场边界以及一致地基边界三种动力边界条件供用户选择，粘性边界适用于半无限空间内的动力荷载（如车辆荷载、风荷载、机器荷载等），自由场边界和一致地基边界适用于波动场中作用于人工边界上的动力荷载（如地震荷载）。

**【编者按】** 本期为 Edward L. Wilson 教授访谈回忆录 (6)。《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-θ 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 系列程序的原创开发者, 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!



## 第十三章

# 审查委员会

*搞地震工程的人继续宣扬世界末日的观点, 到处寻找基金, 但我们应该对地震灾害保持正确的观点。*

**Reitherman:** 你在土木、机械和航空工程领域工作超过了 60 年, 由于你的分析程序, 你被广泛地知晓。你会怎样来描述自己?

**Wilson:** 我更希望被称作“一个使用基本力学原理去解决结构工程问题的人”。现代数字计算机的使用是一个工具, 使得工程师能够非常迅速地对结构进行分析和设计。因此, 在短时间里可以对多个可行的设计方案进行比选。但是, 计算机很少执行工程师对于如何解决问题的指令。

**Reitherman:** 在《结构静力与动力分析》一书中, 你有这样一段话: “结构的静力与动力分析现在已经在很大程度上自动化了, 这是因为廉价个人电脑的出现。然而, 在我看来, 结构工程领域绝不会完全自动化。那些具有人工智能的专家系统程序会替代有创造性的人类的想法, 是对所有结构工程师的侮辱。”

**Wilson:** 当有人把我称作“搞计算机的”或程序员的时候, 他们通常是指暗示我不是一个真正的工程师。我的好友兼同事 Joe Penzien 教授经常对我说“任何人都能够写程序——这个理论很重要”; Witelmo Bertero 教授说过“我不想学生们浪费时间在写程序上”。Joe 和 Vit

都没有意识到数字计算机可以产生更精确的结果，也不认为很容易开发。

我把自己的程序发放出去，这样土木、机械和航空工程就可以立即使用我的程序。只有在程序解决了一个实际问题之后，我才会写一篇论文，介绍有关的数值方法精度和用于开发的有限单元。

**Reitherman:** 你介绍了你是如何针对不同类型问题进行研究的，而其中的许多问题并非与地震相关。

**Wilson:** 我记得给教员们说过，想要他们进入风工程领域，但没有人向这方面多元化发展。人们经常是对地震过分担忧。1989年 Loma Prieta 地震后，我们想要聘请某人在伯克利任教，他却对来加州犹豫不决。为什么会发生这样的事？美国有的地方龙卷风会在一年之内毁坏数个城镇，沿海湾和大西洋海岸线有飓风；冰雪导致一年数十人的意外死亡，雷击也如此。搞地震工程领域的人还在继续宣扬世界末日的观点，到处找基金，但我们应该对地震有正确的观点。至少在美国，因地震死亡的人数是相当低的，这与其他国家不同，1976年的唐山地震导致的死亡人数一般认为超过了60万。我在自己的 [edwilson.org](http://edwilson.org) 网站上以此发表了一篇短文“与其他自然灾害相比，我们不应该害怕地震”，在过去的500年里，更多的美国人死于昆虫叮咬，而非地震。

## 工程标准审查委员会

**Wilson:** 从1985至2014这29年里，我无偿在为湾区保护与发展委员会的顾问委员会——工程标准审查委员会 Engineering Criteria Review Board 服务，此委员会是为保护和提升旧金山湾区环境而设立的。在29年的时间里，12位顾问小组成员审查了湾区附近上百个新建或改造的结构施工图设计。1989年 Loma Prieta 地震后，我们超过一半的时间用在与湾区桥梁加固与替换有关的事情上。在 Caltrans 试图加固旧金山—奥克兰大桥东跨的几年后，决定在原址新建一座大桥。

## 东跨湾大桥审查委员会

**Wilson:** 1997年2月，Loma Prieta 地震发生7年多之后，成立了一个特别小组“工程与设计顾问小组 EDAP”。Joe Nicoletti 作为小组主席做出了杰出的贡献，他是本地一个声望极高的工程师；我是32名委员之一。在 Joe 的 EERI 口述历史里总结了顾问小组是如何推荐采用自锚式悬索桥方案的。来自伯克利的 Ben Gerwick 教授、Alex Scordelis 教授和林同炎教授也都是 EDAP 成员。

**Reitherman:** 你对选择自锚式悬索桥方案的反应是什么？这种桥梁很少，我只听说过其他几个例子，比如一座就是一战时期在德国科隆建造的。

**Wilson:** 东跨湾大桥采用自锚式悬索形式的决策是混乱的。就是“自行车游说”（注：骑车游行是旧金山的特色），建筑师过分主张他们狭隘的兴趣爱好了；顾问小组的工程师都只是想要建造一座能够尽可能抵御特大地震的桥梁。

在小组的第一次公开会议上，我说道：“我们眺望湾区，可以看到三座主要的桥梁：Richmond-San Rafael 很丑陋，而采用悬索桥形式的金门大桥和跨湾大桥都很美。就像 Hippocrates（希腊名医，被称医药之父），我们工程师首先要做的是不能导致伤害。”第二天，

我的话被旧金山当地一家报纸所引用了。

然而，从财政的角度来看，自锚式悬索桥会有许多危害，比如其过度的造价将会比预期的要高 5 倍甚至更多，比预定的工期要多出数年。斜拉桥很经济，获得了大多数人的赞成。另外一次会议我由于休假没有参加，我认为没有主见的人决定采用斜拉桥设计；然后建筑师和其他人极度游说并获得了自锚式悬索桥通过投票，根本就不了解其造价和施工的难度。

新东跨湾大桥的设计自己搞出了许多问题来，这是其他大桥设计能够避免的。我认为桥址并没有修建标致性结构的优势。让我们来看看金门大桥，选址很美，悬索桥令其十分优雅；跨湾大桥从 Yerba Buena 岛至旧金山的双层悬索桥结构非常美，但从 Yerba Buena 岛至奥克兰滩的这段却不是。最后，将新东跨湾大桥喷涂为白色，是仅有的一点使其壮观的地方，亮灯时就像圣诞树。最终造价超过了一百万美元每英尺长度，这使得它成为有史以来修建得最昂贵的桥梁，令结构工程界蒙羞。至于抗震可靠性，我对它只承担自己自重荷载都感到有点担忧，自重下桥上部结构中存在巨大的压应变能。我认为工程师检查过桥面板的局部屈曲的可能性，但是，如果一个板发生屈曲，板截面就不再对称，就可能产生初始的较大的侧向位移。大桥项目的建筑师随意变更其外形，使其没有必要的复杂。一个例子是路灯杆，与细长的电缆相比，它显得不必要的突出。

**Reitherman:** 人们通常认为结构的整体功效就是它是怎样地有效地矗立在这里，但它应该以特别的顺序来建造。是不是自锚式比斜拉桥、悬索桥或老桥的悬臂桁架的建造难度更大？

**Wilson:** 自锚式设计的大量花费与施工顺序有关。必须建造一座临时桥梁，端到端，采用支撑，直到自锚式结构的所有部分到位为止；悬索桥和斜拉桥能够更加高效地修建。在小组中的建筑师和几个工程师所驱动下，桥梁的外形成为了所有重要的因素。我的同事林同炎称之为“一座由愚蠢构成的纪念碑”（*The Father of Prestressed Concrete: Teaching Engineers, Bridging Rivers and Borders, 1931 to 1999*, Eleanor Swent, Interviewer, Bancroft Library, University of California at Berkeley, 2001, p. 355.）。而且，新钢桥还出现了锈蚀的迹象。因此，除了建造所耗费的天文数字之外，这座自锚式的东跨湾大桥还将在其存在期间里每年要花费非常庞大的维护费用。

**Reitherman:** 近来“可持续”是一个热词，但看起来你不会对新桥的可持续性给出高的评价。

**Wilson:** 发明的新词其实指的还是老概念。工程师总是要考虑使用最少的材料以及最低的养护费用，这就是可持续性；几十年来考虑对环境的影响，土木工程系都全部更名为了土木与环境工程系了。

## 第十四章

# 退休后的思考

反应谱法非常广泛地在地震分析中使用，大部分工程师不清楚它只是限于线性分析，且不能预测地震下结构的破坏。

### 1990 年患心脏病后从伯克利退休

**Wilson:** 1990 年 4 月 22 日，大约在 Loma Prieta 地震之后 6 个月，我得了心脏病，这是我第一次，也是唯一的一次。在医院呆了 6 天后，以及 6 周之后的血管成形术，我感觉很好。但是，我取消了后面几个月的旅行计划——包括多地的学术讲座和去南非狩猎。并且，我申请并得到了批准，第二年以一半的薪水享受学术休假。

那时，教工退休基金通过高回报的投资已经有很大盈余。大学决定鼓励高级教工退休，在 1991 年 7 月之前退休，可以增加 5 年服务期。这样，大学就可以用较低薪水的年轻教授来替换掉高薪水的资深教授。离 60 岁生日还有 3 个月，我接受了他们的提议，并立即开始思考如何最佳地利用我的时间去更快和更精确地求解结构分析问题。



*Diane and Ed Wilson, 2014.*

### 开发 FNA 法

**Reitherman:** 你得出了提升地震工程分析最重要的需求是什么？

**Wilson:** 就是在 SAP 90 中扩展了线性分析，可以执行非线性分析。完全开发出快速非线性分析 FNA 方法花了近十年时间。90% 的研究与开发工作都是我完成的，其最终的方法由 CSI 整合进了 SAP2000 里。那时，FNA 法比其他的结构工程领域非线性软件要快大约 100 倍，而且更精确和可靠。最新的 FNA 法在我的网站 (edwilson.org) 有详细描述。从伯克利退休后，我有时间密切地与工程界的同行一起工作，没有报酬，指出现有分析方法的诸多局限性。某些局限与基本假定有关，通常都没有深入思考。工程师需要理解分析方法所采用的假定，而不只是去运行程序。

### 地震分析的基本假定

**Wilson:** 到 1991 年，我已经在地震工程分析领域工作了 30 多年时间，开发出了许多线性分析程序和数值方法——比如 ETABS、SAP IV 和 SAP 90——这些程序在全球大多数国家被广

泛使用。然而，我意识到大部分程序都是基于作用在结构基底的地震位移和加速度假定，可以用上部结构的质量乘以基底水平加速度来表示——如果计算机模型采用相对位移的平衡方程的话。这个将位移输入转换为作用在上部结构的力输入的数学方法，是基于结构模型只在两个水平方向和竖向做刚体运动的物理假定。所以，结构的数学模型在结构的基底，三维转动被设置为了零。采用相对位移公式导致的某些误差，如下所述。

不能精确模拟土-结构相互作用，因为相对位移在结构基底被设置成了零。

所有施加给上部结构的地震水平力和能量都高于结构的基础，然而，真实的地震位移和力是施加在结构的基础——在真实地震中，能量是从地面传入结构的，然后再从结构传入地面。

我们的分析与振动台实验有些相似，地震力并不作用在上部结构，而是在结构的基底施加地震位移。

然而，分析模型和振动台实验都忽略了一个重要的能量耗散现象：结构向其下面无限的大地的能量辐射。

## 基于能量的地震分析

**Reitherman:** 工程师总是用加速度乘以质量来计算地震荷载。回到 1956 年，第一届世界大会的一篇论文中，George Housner 对结构地震响应的能量基本问题进行了清晰的描述：“地面运动的效应是将能量传入结构中。一部分能量通过阻尼和非线性行为耗散掉了，其余部分以质量运动动能的形式保存在结构中，以及在结构构件中以变形应变能的形式存在。因此，在任意时刻，动能之和，加上应变能，加上通过常规阻尼耗散的能量，加上永久变形导致的能量耗散，等于总的输入能量。”（George Housner, “Limit Design of Structures to Resist Earthquakes”, Proceedings of the World Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Research Institute, Oakland, CA, 1965, p. 5-4.）在你的 FNA 法里，满足能量守恒吗？

**Wilson:** 我们在每一个时间步尾都检查能量平衡方程，并与系统当前时间的总能量进行比较。我们采用这个式子来评估能量：

$$Tol = (time\ step\ error) / (total\ energy)$$

因为能量总为正值，如果想要具有 6 位有效数字的精度，需要迭代来减小时间步长，使得  $Tol$  小于  $10^{-6}$ 。因为个人电脑不贵且如此快，我们可以采用令我们满意的较小容差，我们满足 Housner 准则，正确地求解了非线性数学模型。然而，存在两个原因使得数学模型也许对真实结构来讲并非是精确的理想化。

首先，输入结构系统的总能量是采用自由场地面加速度和固定基础的结构质量。因此，生成的位移、速度和加速度与固定基础的结构有关，所有的土-基础-结构相互作用能量都被忽略掉了。这个假定是保守的。

其次，承受地震作用的所有真实结构，数学模型中的基础底部的土节点必须可以承受地震运动的三个位移分量。这种模型在 1997 年应用到 Richmond-San Fafael 桥的加固设计中，可以精确地计算三维地震作用的每个方向输入到模型中的总能量；而且每个桥墩的地震位移是不一样的，因为这座桥长度超过了 5 英里。然而，还是不能计算桥开始振动后土节点上产生的“辐射能量”损失。

Housner 的能力守恒准则对所有实际结构都是绝对正确的，然而，在目前，已经思考这个问题超过 50 年了，我们还不能在数学模型中精确满足这个标准；而且，我们继续在数学模型中，对地震响应由于线性粘滞阻尼假定了一个较大的能量耗散。你知道我们从未在非常精确可控的实验条件下做出一个完美的线性粘滞装置或材料来吗？所以，我们必须持续改

进我们的数值方法，来消除数学模型中的线性粘滞阻尼假定。

## 反应谱法

**Reitherman:** 你在自己的网站 [edwilson.org](http://edwilson.org) 上写了反应谱法的局限性，请展开一下这个主题。

**Wilson:** 反应谱法在地震分析中被非常广泛地应用。大部分结构工程师不了解此法只能用于线性分析，不能对结构的地震破坏进行预测。

**Reitherman:** 你批评的基本要点是指其画一个单峰的响应数字就代表结构在几十秒不同输入运动下响应，是吗？

**Wilson:** 是的，对一个构件或连接采用了最坏的情形，但整个结构的最大响应不会同时发生。我是在对横跨旧金山湾的 San Mateo-Hayward 桥抗震加固时，深入这一问题的。地震学家给出了 8 条不同的地震波记录，并做了某种形式的平均处理，这导致这个加固工程造价很高。我告诉他们分别运行不同的地震波。他们做完后，内力减小了三分之一。反应谱并不具备时间要素，而时程具有，这会导致多模态的反应谱分析存在很大差异。你把它应用到非线性的结构，近似性就非常差。只要结构的一部分屈服，荷载就会重新分配。我就是把反应谱法放入程序使其普及的人！但现在，我有责任教育工程师有关反应谱法的局限性。

反应谱法是在 1960 年成为常用方法的，那时我们基本上只有三条正式的地震波可用：1940 的 El Centro 波、1965 年的 Olympia 波和 1952 年 Taft 波。而现在，我们拥有上千条地震记录可以用来进行时程响应分析。

**Reitherman:** 当前抗震设计中还存在哪些其他的局限性？

**Wilson:** 我晃动桌上这个小模型时，你可以感受到振动通过桌子进行了传播，这是因为模型中的能量被辐射进了桌子中。这是在地震工程界依旧没有解决的问题之一，也是你引用 George Housner 在 1956 年世界大会论文中指出的一个问题。能量从晃动的基础土进入到结构中，能量必须去到其他地方并被耗散掉。坦率说，我并不知道如何解决这个问题。这个问题只能通过同时包括了结构和基础的模型中得到解决。业界目前还不是这样做的；但随着廉价计算机近年来速度的提升，我们也许可以在未来数年里解决这个问题。

大部分工程师使用 5% 的阻尼来生成反应谱，这实际上是一个大数值，不能仅靠增加粘滞阻尼来校正；像多层建筑的刚度中心这样一个简单的小问题也没有明确的定义，刚度是在某层施加侧向荷载而其他所有层都固定得到的吗？或是作用在那层的荷载使其不产生扭转？可以找到多种情况，本层没有扭转，而上下层却有扭转。这个概念在规范里一直沿用至今。ASCE 中充斥着大量的这种假定。

标准的设计反应谱具有一个人为的短周期平台。产生相同的单峰响应的一个短持续时长地震被认为是与产生相同的单峰响应的一个长持续时间地震是一样的。我都不敢相信，等位移法已经都使用了 50 年，其出处是 Andy Veletsos 和 Nathan Newmark 在智利举办的世界大会上的论文 (A. S. Veletsos and N. M. Newmark, "Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions," Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering, International Association for Earthquake Engineering, Vol. 2, pp. 895-912.)，他们的结论是基于一个单自由度体系，完全忽视了在真实三维非线性结构中存在的力和变形的重分布。任何一个会用 SAP2000 的工程师都可以验证，线性动力分析与非



线性动力分析的结果之间存在很大差异，等位移近似不具有任何的物理或理论理由。

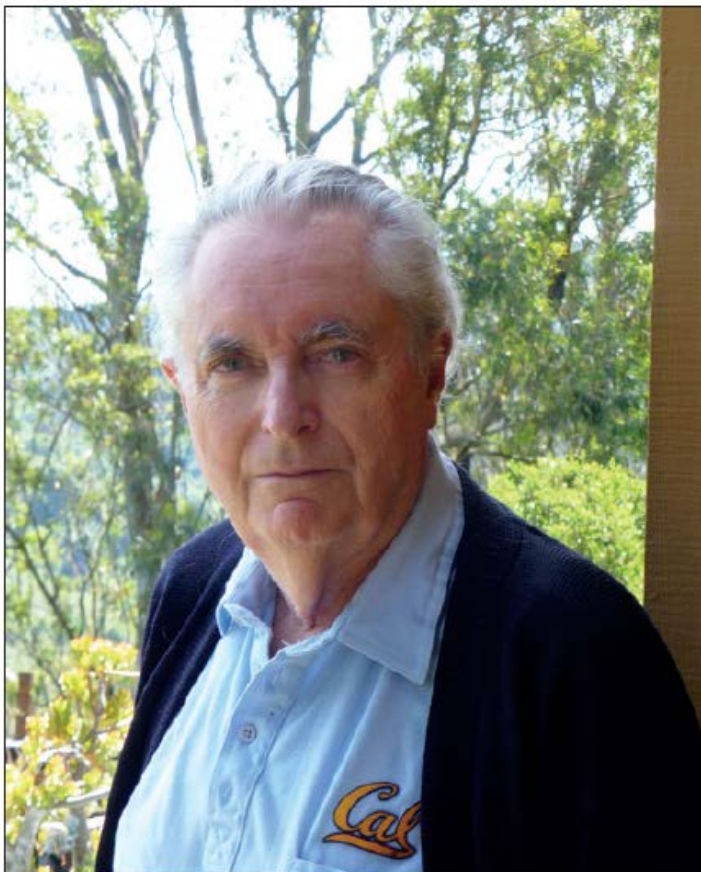
存在太多的被大量工程师采用但没有得到验证的假设。在 1960 年代，像 Clough 这样的人懂得一切，但这种洞察力似乎已丢失掉了。



*Ed and Diane Wilson at the graduation of their daughter Terri (Teresa) in 1984, with their son, Mike.*



*Ed Wilson with his son Mike, after seeing a U.C. Berkeley basketball game, 2015.*



*Ed Wilson on the deck of his home in El Cerrito, California, 2015.*

*The house was new when he moved into it in 1966. Therefore, Ed has spent nearly 50 years landscaping and maintaining a large yard overlooking Wildcat Canyon. This has included building decks, fences, and major remodeling projects. He has finally succeeded in becoming a good carpenter, which was his goal in life when he was 18 years old.*

# Edward L. Wilson 发表的论文及著作

## A. 学术期刊

1. "Stress Analysis of a Gravity Dam by the Finite Element Method" (with R. W. Clough), *RILEM Bulletin* No. 19, (June 1963).
2. "Large Capacity Multistory Frame Analysis Programs" (with R. W. Clough and I. P. King), *Journal of the Structural Division, ASCE* (August 1963).
3. "Structural Analysis of Multistory Buildings" (with R. W. Clough and I. P. King), *Journal of the Structural Division, ASCE* (June 1964).
4. "Structural Analysis of Axisymmetric Solids," AIAA Paper No. 65-143, AIAA 2nd Aerospace Sciences Meeting, New York, January 1965; Also in: *AIAA Journal*, Vol. 3 (December 1965): 2269–2274.
5. "Application of the Finite Element Method to Heat Conduction Analysis" (with R. E. Nickell), *Nuclear Engineering and Design*, No. 4 (1966): 276–286.
6. "Finite-Element Large Deformation Analysis of Plates" (with D. Murray), *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 95 No. EM1 (February 1969).
7. "Finite Element Analysis of Seepage in Elastic Media" (with R. Sandhu), *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 95 EM3 (June 1969).
8. "Finite Element Post-Buckling Analysis of Thin Elastic Plates" (with D. Murray), *AIAA Journal*, Vol. 7 No. 10 (October 1969): 1915–1920.
9. "Dynamic Finite Element Analysis of Arbitrary Thin Shells" (with R. W. Clough). Presented at Conference on Computer Oriented Analysis of Shell Structures, Lockheed Palo Alto Research Laboratory; published, *Computers and Structures*, Vol. 1, Pergamon Press (1971): 33–56.
10. "Automatic Design of Shell Structures" (with Peter G. Smith). Presented at ASCE 5th Conference on Electronic Computation, September 1970; published in: *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 97 (January 1971): 191–201.
11. "Evaluation of Orthogonal Damping Matrices" (with J. Penzien), *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol 97.
12. "Large Eigenvalue Problems in Dynamic Analysis" (with K. J. Bathe), *Proceedings, American Society of Civil Engineers, Journal of the Engineering Mechanics Division*, EM6 (December 1972): 1471–1485.
13. "Variational Formulation of Dynamics of Fluid-Saturated Porous Elastic Solids" (with J. Ghaboussi), *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, EM4 (August 1972): 947–963.
14. "Nonlinear Dynamic Analysis of Complex Structures" (with I. Farhoomand and K. J. Bathe), *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 1 (1973): 241–252.
15. "Stability and Accuracy Analysis of Direct Integration Methods" (with K. J. Bathe), *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 1 (1973): 283–291.
16. "Flow of Compressible Fluid in Porous Elastic Media" (with J. Ghaboussi), *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 5 (March 1973): 419–442.

17. "Solution Methods for Eigenvalue Problems in Structural Mechanics" (with K. J. Bathe), *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 6 (March 1973): 213–226.
18. "Eigensolution of Large Structural Systems with Small Bandwidth" (with K. J. Bathe), *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, EM3* ( June 1973): 467–479.
19. "Three-Dimensional Finite Element Analyses of Dams" (with G. Lefebvre and J. M. Duncan), *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 9857 SM 7 (July 1973): 495–507.
20. "Finite Element for Rock Joints and Interfaces" (with J. Gaboussi and J. Isenberg), *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 10095, SM 10 (October 1973): 833–848.
21. "Seismic Analysis of Earth Dam—Reservoir Systems" (with J. Ghaboussi), *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 10053, SM 10 (October 1973): 849–862.
22. "The Static Condensation Algorithm," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 8 ( January 1974): 198–203.
23. "Direct Solution of Large Systems of Linear Equations" (with K. J. Bathe and W. P. Doherty), *Computations and Structures*, Vol. 4 ( January 1974): 363–372.
24. "Evaluation of the Use of Resonant Frequencies to Characterize Physical Properties of Human Long Bone" (with W. P. Doherty and E. G. Bovill), *Journal of Biomechanics*, Vol. 7 (1974): 559–561.
25. "NONSAP—A Nonlinear Structural Analysis Program," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 29 (1974).
26. "A Non-Conforming Element for Stress Analysis" (with R. L. Taylor and P. J. Beresford), *International Journal for Numerical Methods in Engineering* ( June 1976).
27. "Dynamic Analysis of Large Structural Systems with Local Nonlinearities," *Journal of Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 17/18 (1979).
28. "CAL—A Computer Analysis Language for Teaching Structural Analysis," *Computations and Structures*, Vol. 10 (1979): 127–132.
29. "Solution or Reduction of Equilibrium Equations for Large Complex Structural Systems," *Advances in Engineering Software*, Vol. 1, No. 1 (1979): 19–25.
30. "The Use of Minicomputers in Structural Analysis," *Computers and Structures*, Vol. 12 (1980): 695–698.
31. "A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis" (with A. Der Kiureghian and E. Bayo), *Earthquake Engineering and Structures Dynamics*, Vol. 9 (1981): 187–194.
32. "Three-Dimensional Dynamic Analysis for Multicomponent Earthquake Spectra" (with M. R. Button), *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10 (1982): 471–476.
33. "Dynamic Analysis by Direct Superposition of Ritz Vectors" (with M. Yuan and J. Dickens), *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10 (1982).
34. "An Equation Numbering Algorithm Based on a Minimum Front Criterion" (with M. Hoit), *Computers and Structures*, Vol. 16, No. 1-4 (1983): 225–239.
35. "An Eigensolution Strategy for Large Systems" (with T. Itoh), *J. Computers and*

- Structures, Vol. 16, No. 1-4 (1983): 259–265
36. “Finite Elements for the Dynamic Analysis of Fluid-Solid Systems” (with Mehdi Khalvati), *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 19, (1983): 1957–1668.
  37. “Use of Ritz Vectors in Wave Propagation and Foundation Response” (with E. P. Bayo), *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 12 (1984): 499–505.
  38. “A Computer Adaptive Language for the Development of Structural Analysis Programs” (with M. Hoit), *Computers and Structures*, Vol. 19, No. 3 (1984) 321–338.
  39. “Finite Element and Ritz Vector Techniques for the Solution to Three-dimensional Soil Structure Interaction Problems in the Time Domain” (with E. Bayo), *Engineering Computations*, Vol. 2, No. 4 (December 1984): 298–312.
  40. “A New Method of Dynamic Analysis for Linear and Nonlinear Systems,” *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 1 ( June 1985): 21–23.
  41. “Use of Special Ritz Vectors in Dynamic Substructure Analysis” with E. P. Bayo, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 112, No. 8 (August 1986).
  42. “Solution of Finite Element Systems on Concurrent Processing Computers” with C. Farhat and G. Powell, *Engineering with Computers*, Vol. 2, No. 2 (1987).
  43. “Modal Superposition Dynamic Finite Element Analysis on Concurrent MultiProcessors” with C. Farhat, *Engineering Computations*, Vol. 4, No. 2 ( June 1987).
  44. “Static and Dynamic Analysis of Multistory Buildings, Including P-Delta Effects” with A. Habibullah, *Earthquake Spectra*, Vol. 3, No. 2 (May 1987).
  45. “Concurrent Iterative Solution of Large Finite Element Systems” with Charbel Farhat, *Communications in Applied Numerical Methods*, Vol. 3 (1987): 319–326.
  46. “Generation of Load Dependent Ritz Transformation Vectors in Structural Dynamics” with P. Leger, *Engineering Computations*, Vol. 4, No. 4 (1987): 309–318.
  47. “A New Finite Element Concurrent Program Architecture” with Charbel Farhat, *International J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24 (1987): 1771–1794.
  48. “Linear and Nonlinear Finite Element Analysis on Multiprocessor Computer Systems” with Charbel Farhat, *Communications in Applied Numerical Methods*, Vol. 4 (1988): 425–434.
  49. “Model Summation Methods for Structural Dynamic Computations” with P. Leger, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 16 (1988): 23–27.
  50. “Direct Superposition of Wilson Trial Functions by Computerized Symbolic Algebra” with I. Elishakoff and C. D. Hettenma), *Acta Mechanica*, Vol. 74 (1988): 69–79.
  51. “The WYD Method in Large Eigenvalue Problems” with M. Yuan, P. Chen, S. Xiong and Y. Li, *Engineering Computations*, Vol. 6 (March 1988).
  52. “An Adaptive Finite Element Technique” with K. J. Joo, *Computers and Structures*, Vol. 30 No. 6 (1988).
  53. “Simple Numerical Algorithms for the Mode Superposition Analysis of Linear Structural Systems with Nonproportional Damping” (with A. Ibrahimbegovic), *Computers and Structures*, Vol. 33, No. 2 (1989): 523–531.
  54. “A 4-Node Quadrilateral Membrane Element with In-plane Vertex Rotations and Modified Reduced Quadrature” (with Nielen Stander), *Engineering Computations*,

- Vol. 6 (December 1989): 266–271.
55. “Use of Incompatible Modes for the Calculation of Element Stiffnesses or Stresses” (with A. Ibrahimbegovic), *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 7 (1990): 229–241.
  56. “A Methodology for Dynamic Analysis of Linear Structure-Foundation Systems with Local Non-Linearities” (with Adnan Ibrahimbegovic), *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19 (1990): 1197–1208.
  57. “A Robust Membrane Quadrilateral Element with Drilling Degrees of Freedom” (with Adnan Ibrahimbegovic and Robert Talyor), *Int. J. of Num. Meth.* (1990).
  58. “A Unified Formulation for Triangular and Quadrilateral Flat Shell Elements with Six Nodal Degrees of Freedom” (with Adnan Ibrahimbegovic), *Communications in Applied Numerical Methods*, Vol. 7 (1990): 1–9.
  59. “A Modified Method of Incompatible Modes” (with Adnan Ibrahimbegovic), *Communications in Applied Numerical Methods*, Vol. 7 (1991): 187–194.
  60. “Ritz Method for Dynamic Analysis of Large Discrete Linear Systems with Non-Proportional Damping” (with Adnan Ibrahimbegovic, Harm Chen, and Robert Taylor), *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 19 (1990): 877–889.
  61. “WAVES: An Efficient Microcomputer Program for Site Response Analysis” (with James D. Hart), *Microcomputers in Civil Engineering*, Vol. 6 (1991): 129–147.
  62. “Unified Computational Model for Static and Dynamic Frictional Contact Analysis” (with Adnan Ibrahimbegovic), *International J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 34 (1992): 233–247.
  63. “Efficient Solution Procedures For Systems with Local Non-Linearities” (with Adnan Ibrahimbegovic), *Engineering Computations*, Vol. 9 (1992): 385–398.
  64. “Ritz Vectors and Generation Criteria for Mode Superposition Analysis” (with Kuan-Jung Joo), *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18 (1989): 149–167.
  65. “Automation Truncation of Ritz Vector Bases in Modal Transformation,” *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 116, No. 11 (November 1989).
  66. “Automation of the Finite Element Method—A Personal Historical View,” *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol 13 (1993): 91–104.

## B. 会议论文集

1. “Matrix Analysis of Nonlinear Structures,” *Proceedings, 2nd Conference on Electronic Computations*, ASCE, Pittsburgh, PA, September 8–9, 1960.
2. “Dynamic Response by Step-by-Step Matrix Analysis” (with R. W. Clough), *Symposium on the Use of Computers in Civil Engineering*, Laboratio Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, Portugal, October 1–5, 1962.
3. “Two - Dimensional Stress Analysis of Solid Propellant Rocket Grains,” *Chemical Propulsion Information Agency Bulletin of the 3rd Meeting, Working Group in Mechanical Behavior*, November 1964.
4. “Inelastic Earthquake Response of Tall Buildings” (with R. W. Clough and K. Benuska), *3rd World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, January 1965.

5. "Dynamic Response of Deepwater Structure" (with R. P. Shubinski and L. G. Selna), Proceedings, ASCE Conference on Civil Engineering in the Oceans, San Francisco, CA, September 6–8, 1967.
6. "Finite Element Analysis of Pavements" (with M. Duncan and C. L. Monismith), Proceedings, 1968 Annual Meeting of the Highway Research Board, 1968.
7. "An Approximate Non-Linear Analysis of Thin Plates" (with D. Murray), Proceedings, Conference on Matrix Methods, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, October 1968.
8. "Earthquake Analysis of Reservoir-Dam Systems" (with A. K. Chopra and I. Farhoomand), 4th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, January 1969.
9. "A Method of Analysis for the Evaluation of Foundation-Structure Interaction," 4<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, January 1969.
10. "Finite Element Analysis of Land Subsidence" (with R. S. Sandhu), Proceedings, International Symposium on Land Subsidence, Tokyo, Japan, September 1969.
11. "Finite Element Analysis of Stresses in Mass Concrete Structures" (with R. S. Sandhu), Proceedings, ACI Symposium on Impact of Computers, November 1970.
12. "Earthquake Analysis of Reactor Structures," Proceedings, 1st National Congress on Pressure Vessels and Piping, ASME, San Francisco, CA, May 1971.
13. "Incompatible Displacement Models" (with R. L. Taylor, W. Doherty, and J. Ghaboussi), Proceedings, ONR Symposium on Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics, University of Illinois, Urbana, September 1971. Also published in: Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics, Academic Press, 1973.
14. "Nonlinear Analysis of Deep Ocean Structures" (with T. M. Hsueh and L. R. Jones), Proceedings, International Association for Shell Structures, Hydro-mechanically Loaded Shells. Honolulu, Hawaii, October 1971.
15. "SAP—A General Structural Analysis Program for Linear Systems," Advances in Computation Methods in Structural Mechanics and Design, U.S.-Japan Conference, August 1972.
16. "Time-Dependent Analysis of Underground Cavities Under an Arbitrary Initial Stress Field" (with K. Nair and R. S. Sandhu), Chapter 27 in Basic and Applied Rock Mechanics, 10th Symposium on Rock Mechanics, Austin, Texas, May 20–22, 1968. Printed by Port City Press, Inc., Baltimore, MD, 1972.
17. "Liquefaction Analysis of Saturated Granular Soils" (with J. Ghaboussi), 5<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Rome, June 1973.
18. "Linear and Nonlinear Earthquake Analysis of Complex Structures" (with K. J. Bathe), 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, June 1973.
19. "Diagnosis and Treatment of Dams" (with R. B. Jansen and R. W. Carlson), Proceedings, 11th International Commission on Large Dams, Madrid, Spain, June 1973.
20. "NONSAP—A General Finite Element Program for Nonlinear Dynamic Analysis of Complex Structures" (with K. J. Bathe), 2nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin, Vol. V., Part M. September 1–13, 1973.
21. "Finite Element Analysis of Linear and Nonlinear Heat Transfer" (with K. J. Bathe and F. E. Peterson), 2nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Berlin, Vol. V, Part M. September 1–18, 1973.
22. "Finite Elements for Foundations, Joints and Fluids," Proceedings, International

- Symposium on Numerical Methods in Soil Mechanics and Rock Mechanics, University of Karlsruhe, Germany, September 15–19, 1975.
23. "Special Numerical and Computer Techniques for the Analysis of Finite Element Systems," Proceedings, U.S.-Germany Symposium, Formulation and Computational Procedures in Finite Element Analysis, MIT, August 1976.
  24. "Numerical Methods for Dynamic Analysis," Proceedings, International Symposium on Numerical Methods, Swansea, January 1977.
  25. "Automated Analysis and Design of Complex Structures," Proceedings, 4th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, August 1977.
  26. "Structural Analysis of Linear Elastic Systems Using the Substructure Technique," Proceedings, 6th Australian Conference on Structural Mechanics and Structural Materials, Christchurch, New Zealand, August 1977.
  27. "Linear Dynamic Analysis of Complete Building Systems," Proceedings, Symposium on Research in the Field of Earthquake Resistant Design of Structures, Dubrovnik, Yugoslavia, September 1978.
  28. "Solution of Sparse Stiffness Matrices for Structural Systems, Sparse Matrix Procedures, Siam, 1978.
  29. "Role of Small Computer Systems in Structural Engineering," Proceedings, ASCE 7th Conference on Electronic Computations, Washington University, St. Louis, MO, August 6-8, 1979.
  30. "Dynamic Behavior of a Pedestal Base Multistory Building" (with R. M. Stephen), Proceedings, 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Stanford University, August 22-24, 1979.
  31. "Direct Solution of Equations by Frontal and Variable Band, Active Column Methods" (with R. L. Taylor), Proceedings, U.S.-Europe Workshop: Nonlinear Finite Element Analysis in Structural Mechanics, Ruhr-Universität, Bochum, West Germany, July 28-31, 1980.
  32. "Solution of the Three-dimensional Soil-structures Interaction Problem in the Time-domain," Proceedings, 8th World Conference on Earthquake Engineering, July 25-28, 1984.
  33. "A New Algorithm for Heat Conduction Analysis" (with B. Nour-Omid), Proceedings, 4th International Conference on Numerical Methods in Thermal Problems, Swansea, U.K.; Pineridge Press, 1985.
  34. "An Effective Modified Ritz Vector Direct Superposition Method" (with Du Ruiming), Proceedings, 8th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Brussels, Belgium, August 19-23, 1985.
  35. "Computer Assisted Learning of Structural Engineering," Proceedings, International Conference on Education, Practice and Promotion of Computational Methods in Engineering Using Small Computers, University of Macau, Macau, August 5-9, 1985.
  36. "Generation of Ritz Vectors for Adaptive Finite Element Dynamic Analysis," Proceedings of the U.S.-Korea Seminar Workshop on Critical Engineering Systems, Seoul, Korea, 11-15 May 1987.
  37. "Load Dependent Vector Bases for Earthquake Response Analysis" (with P. Leger), 5th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Canada, July 6-8, 1987

38. "Numerical Methods for Solution of Finite Element Systems," ASCE Seventh Structures Congress, San Francisco, CA, May 1-5, 1989

### C. 研究报告

1. Finite Element Analysis of Two Dimensional Structures, UCB/SESM Report No. 63/2, University of California, Berkeley, June 1963 (PhD Dissertation).
2. Finite Element Analysis of Axisymmetric Structures, Aerojet - General Corporation Technical Paper No. 138 SRP, April 1964.
3. Thermal Strain Analysis of Advanced Manned Spacecraft Heat Shields, Final Report to NASA Manned Spacecraft Center, Houston, Texas; Report No. 5654-02-FS, Aerojet-General Corporation, October 1964.
4. A Digital Computer Program for the Steady-State Temperature Analysis of Plane or Axisymmetric Bodies, Report No. TD-44, Aerojet-General Corporation, March 1965.
5. A Digital Computer Program for the Finite Element Analysis Solids with Non Linear Material Properties, Technical Memorandum No. 23, Aerojet-General Corporation, July 1965.
6. Two-Dimensional Stress Analysis with Incremental Construction and Creep (with R. S. Sandhu and J. M. Raphael), UCB/SESM Report No. 67/34, University of California, Berkeley, December 1967.
7. Maximum Temperature Stresses in Dworshak Dam (with J. M. Raphael), UCB/SESM Report No. 67/14, Structures and Materials Research Laboratory, University of California, Berkeley, August 1967.
8. Finite Element Stress Analysis of Axisymmetric Solids with Orthotropic, Temperature-Dependent Material Properties (with R. M. Jones), Air Force Report No. BSD-TR-228; prepared for Space and Missile System Organization, Air Force Unit Post Office, Los Angeles, California.
9. Structural Behavior of Mass Concrete Beams (with R. S. Sandhu and J. M. Raphael), UCB/SESM Report No. 67/16, Structures and Materials Research Laboratory, University of California, Berkeley, August 1967.
10. A Computer Program for the Dynamic Stress Analysis of Underground Structures, UCB/SESM Report No. 68/1, Structures and Materials Research Laboratory, University of California, Berkeley, January 1968.
11. The Determination of Temperatures within Mass Concrete Structures, UCB/SESM Report No. 68/17, Structures and Materials Research Laboratory, University of California, Berkeley, December 1968.
12. Elastic Dynamic Response of Axisymmetric Structures, UCB/SESM Report No. 69/2, Structures and Materials Research Laboratory, University of California, Berkeley, January 1969.
13. Stress Analysis of Axisymmetric Solids Utilizing Higher - Order Quadrilateral Finite Elements (with W. P. Doherty and R. L. Taylor), UCB/SESM Report No. 69/3, Structures and Materials Research Laboratory, University of California, Berkeley, January 1969.
14. Dynamic Stress Analysis of Axisymmetric Structures Under Arbitrary Loading (with S. Ghosh), UCB/EERC Report No. 69/10, Earthquake Engineering Research Center,



- University of California, Berkeley, September 1969.
15. Large Displacement Analysis of Axisymmetric Shells (with T. Hsueh and L. Jones), UCB/SESM Report No. 69/13, Structures and Materials Research Laboratory, University of California, Berkeley, March 1969.
  16. Dynamic Response Analysis of Two-Dimensional Structures with Initial Stresses and Non-Homogeneous Damping (with I. Farhoomand and E. Rukos), UCB/SESM Report No. 69/21, Structures and Materials Research Laboratory, University of California, Berkeley, November 1969.
  17. Stability Analysis of Axisymmetric Shells (with T. Hsueh), UCB/SESM Report No. 69/22, Structures and Materials Research Laboratory, University of California, Berkeley, November 1969.
  18. Three Dimensional, Steady State Flow of Fluids in Porous Solids (with R. L. Taylor and W. P. Doherty), UCB/SESM Report No. 69/29, University of California, Berkeley, July 1969.
  19. A Nonlinear Finite Element Code for Analyzing the Blast Response of Under Ground Structures (with I. Farhoomand), U.S. Army Waterways Experiment Station, Contract Report N-70-1, Vicksburg, Mississippi, January 1970.
  20. SAP—A General Structural Analysis Program UCB/SESM Report No. 70/20, University of California, Berkeley, September 1970.
  21. A Computer Program for the Analysis of Prismatic Solids (with P. C. Pretorius), UCB/SESM Report No. 70/21, University of California, Berkeley, September 1970.
  22. Non-Linear Heat Transfer Analysis of Axisymmetric Solids (with I. Farhoomand), UCB/SESM Report No. 71/6, University of California, Berkeley, April 1971.
  23. Flow of Compressible Fluid in Porous Elastic Media (with J. Ghaboussi), UCB/SESM Report No. 71/12, University of California, Berkeley, July 1971.
  24. SOLID SAP—A Static Analysis Program for 3-Dimensional Solid Structures, UCB/SESM Report No. 71/19, University of California, Berkeley, September 1971.
  25. Three Dimensional Analysis of Building Systems— TABS (with H. H. Dovey), UCB/ EERC Report No. 72/8, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December 1972.
  26. Finite Element Analysis of Mine Structures, Final Report to U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, September 1972.
  27. Computer Program for Static and Dynamic Analysis of Linear Structural Systems, UCB/EERC Report No. 72/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, November 1972.
  28. SMIS—Symbolic Matrix Interpretive System, UCB/SESM Report No. 73/3. University of California, Berkeley, April 1973.
  29. SAP IV—A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems (with K. J. Bathe and F. E. Peterson), UCB/EERC Report No. 73/11, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, June 1973.
  30. Static and Dynamic Geometric and Material Nonlinear Analysis (with K. J. Bathe and H. Ozdemir), UCB/SESM Report No. 74/4, Structural Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, February 1974.
  31. NONSAP—A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Nonlinear Systems (with K. J. Bathe and R. H. Iding), UCB/SESM Report No. 74/3. Structural

- Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, February 1974.
32. Finite Element Formulations for Large Deformation Dynamic Analysis (with K. J. Bathe and E. Ramm), UCB/SESM Report No. 73/14, Structural Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, September 1973.
  33. Three-Dimensional Analysis of Building Systems (Extended Version) (with J. P. Hollings and H. H. Dovey), UCB/EERC Report No. 75/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1975.
  34. Finite Element Analysis of Nonlinear Heat Transfer Problems (with R. M. Polivka), UCB/SESM Report No. 76/2, University of California, Berkeley, June 1976.
  35. CAL-Computer Analysis Language for the Static and Dynamic Analysis of Structural Systems, UCB/SESM Report No. 77/2, University of California, Berkeley, 1977.
  36. Three to Nine Node Isoparametric Planar or Axisymmetric Finite Element (with J. P. Hollings), UCB/SESM Report No. 78/3, University of California, Berkeley, December 1977.
  37. Dynamic Behavior of a Pedestal-Base Multistory Building, UCB/EERC Report No. 78/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, July 1978.
  38. CAL 78 User Information Manual, UCB/SESM Report No. 79/1, University of California, Berkeley, 1979.
  39. Numerical Methods for Dynamic Substructure Analysis (with J. Dickens), UCB/EERC Report No. 80/20, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, June 1980.
  40. The Design of Steel Energy Absorbing Restrainers and Their Incorporation into Nuclear Power Plants for Enhanced Safety, Volume 2: The Development of Analyses for Reactor System Piping (with others). UCB/EERC Report No. 79/08, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, February 1979.
  41. Numerical Methods for Dynamic Substructure Analysis (with J.M. Dickens), UCB/EERC Report No. 80/20, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, June 1980.
  42. New Approach for the Dynamic Analysis of Large Structural Systems, UCB/EERC Report No. 82/04, Earthquake Engineering Research Center, University of California, May 1982.
  43. "STOCAL—User Information Manual" (with M.R. Button and A. Der Kiureghian), Report No. UCB/SESM-81-02.
  44. New Approach for the Dynamic Analysis of Large Structural Systems, UCB/EERC Report No. 82 - 04, Earthquake Engineering Research Center, University of California, May 1982.
  44. Numerical Techniques for the Evaluation of Soil-Structure Interaction Effects in the Time Domain (with E. Bayo), Report No. UCB/EERC-83-04, February 1983.
  45. New Approaches in the Structural Analysis of Building Systems (with H. Saffarini), Report No. UCB/SESM-83-08, June 1983.
  46. Dynamic Properties of a Thirty-Story Condominium Tower Building (with R. Stephens and N. Stander), Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-85/03, University of California, Berkeley, April 1985.
  47. The Use of Load Dependent Vectors for Dynamic Analysis (with P. Leger and R. Clough), Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-86/04, University of California, Berkeley, March 1986.
  48. CAL-86 Computer Assisted Learning of Structural Analysis and the CAL/SAP Development

- System, Structural Engineering and Structural Mechanics, Report No. UCB/SESM-86/05. August 1986.
49. Comparison of Iterative Methods for Adaptive Mesh Refinement in Finite Element Analysis (with K. J. Joo), Report No. UCB/SEMM-86/14, 1986.
  50. A Triangular Thin Shell Element for the Linear Analysis of Stiffened Composite Shells, NPS 69-88-003, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1973.
  51. CAL-91: Computer Assisted Learning of the Static and Dynamic Analysis of Structural Analysis of Structural Systems, Report No. UCB/SEMM-91/01, January 1991.

## D. 内部资料

1. Discussion: "Solution of Eigenvalue Problems by the Sturm Sequence Method" by K. K. Gupta (with K. J. Bathe), International Journal for Numerical Methods in Engineering, March 1973.
2. "Finite Element Analysis on Microcomputers," Proceedings, ASMC Winter Annual Meeting,, Boston, MA, November. 13-18, 1983.
3. "CAL-80: An Education and Development Environment for Engineering" (with M. Hoit), American Society for Engineering Education Proceedings, 1984 Annual Conference, Salt Lake City, Utah, June 24-28, 1984.
4. "Structural Analysis on Microcomputers" (ed. by B. A. Schrefler, R. W. Lewis, and S. A. Odorizzi), Proceedings, 1st International Conference on Engineering Software for Microcomputers, Venice, Italy, Pineridge Press, 1984: 3-18.
5. "Some Thick Shell Test Problems" (with R. L. Taylor), AIAA/ASME/AHS 26<sup>th</sup> Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Orlando, FL, April 15, 1985.
6. "Structural FE Analysis to Suit the User and Computer," ASME, Computers in Mechanical Engineering, Vol. 3, No. 4, January 1985: 22-28.
7. "TABS 77: A Program for Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Multistory Buildings," Structural Mechanics Software, Series Vol. 2, The University Press of Virginia.
8. "Expert SAP—A Computer Program for Adaptive Mesh Refinement in Finite Element Analysis," Reliability of Methods for Engineering Analysis (ed. by K. J. Bathe and D. R. Owen), Pine Ridge Press, Swansea, U.K., July 1986.
9. "Finite Element Analysis on Computers with Multiple Processors," Supercomputers in Engineering Structures (ed. by P. Melli & C. A. Brebbia), Computational Mechanics Publications, Springer-Verlag, 1988.

## E. 书籍

1. Numerical Methods in Finite Element Analysis (with K. J. Bathe), Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1976.
2. Static and Dynamic Analysis of Structures: A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering, Computers and Structures, Inc. Walnut Creek, CA, first edition 2000, fourth edition 2010.

## ETABS v17.0.1

- 支持 GB50017-2017, GB50011-2010 和 JGJ99-2015
- 新增直接分析设计法
- 新增二阶 P- $\Delta$  弹性分析与设计法
- 新增钢材牌号
- 部分钢材强度设计值调整
- 构件验算公式部分调整

[点击了解更多新特性](#)



## SAP2000 v20.2.0

- 支持 GB50017-2017, GB50011-2010 和 JGJ99-2015

在非线性时程分析中，可以通过拆除构件模拟结构倒塌分析。

[点击了解更多新特性](#)



## 开敞式钢结构设计软件 CiOpenSteel

CiOpenSteel 是适用于开敞式钢结构的辅助设计软件，支持各种类型的开敞式钢结构，尤其是石化行业开敞式钢结构的设计工作。软件提供多种建模手段，满足不同类型构件建模的需求，解决了开敞结构风荷载自动计算、设备与结构整体建模、设备荷载施加、设计参数自动指定、杆件优选截面、设计结果汇总及输出等问题，覆盖结构设计全过程。

[点击了解更多功能特性](#)

## CSiXRevit 2019

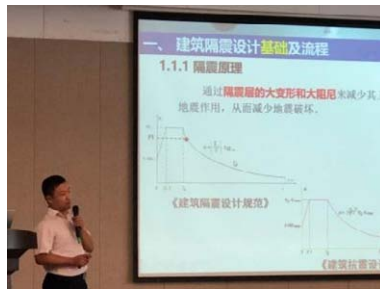
支持 Revit Structure 2019 与 ETABS (v15.0.0 及更高), SAP2000 (v17.2.0 及更高) 和 SAFE (v14.0.0 及更高) 之间的数据交互。

## ETABS 减隔震设计培训班成功举办 (7月5~6日昆明)

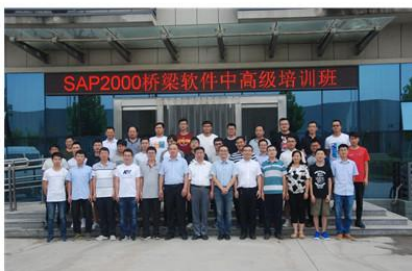
[点击下载抗震干货收藏](#)

为期2天的培训班共分3部分进行：理论实操学习+专家讲座+隔震项目现场参观。上机操作课程注重基本原理及软件实操的结合，着重介绍并解决了工程师在软件使用过程中常遇到的问题，展示了筑信达隔震后处理插件、筑信达模型转换工具、配筋导入工具，利用这些工具辅助工程师进行分析和设计，可极大提高工作效率。同时，筑信达特邀云南省地震工程研究院宋廷苏高级工程师，做主题为《隔震设计若干问题探讨》的报告，与现场工程师和西南林大师生共120余位一起交流了国内外隔震发展现状、隔震设计的要点及现行隔震设计值得讨论的地方、展望了隔震项目未来设计的趋势。最后现场参会人员一起参观了会场附近隔震教学实验楼项目，现场听取了各位专家和项目经理对隔震项目的讲解。

本次活动根据地区特点，以工程师关注的设计点为主线，涵盖了基本理论梳理、分析设计案例实操、专家讲解及工程实际项目参观，涉及到了工程项目的多个环节，对于减隔震设计有极大帮助，参会工程师收获满满，本次活动圆满结束。



## 桥梁施工临时结构 SAP2000 应用培训班应邀举办 (7月21日~28日)



7月21日~28日，筑信达应邀赴中铁十四局集团开展桥梁施工临时结构 SAP2000 应用培训，中铁十四局各个子分公司共37名工程技术人员参与。面对激烈的工程市场竞争和复杂的知识产权保护，中铁十四局集团公司领导对配套技术服务十分重视，通过本期培训，有效提升了十四局工程技术人员结构计算水平，普及了结构设计软件知识产权相关知识，为中铁建储备了强有力的技术力量！

## PLAXIS 新老用户共享会圆满举办 (7月26日天津)

在天津大学的大力支持下，Plaxis 新老用户共享会于7月26日圆满举办！

本次会议分三个环节，第一环节为主题报告：天津大学刁钰副教授的报告以理论讲解为主，同时也分享了用于实际工程中的经验取值；北京市勘察设计院有限公司院士大师工作室孙工就“PLAXIS 在实际

# 活动报道

工程应用案例分享”做了精彩报告。两位嘉宾都分享了 Plaxis 的建模技巧、网格划分等应用经验，理论结合实际，学员表示很受用。

第二环节和第三环节并行，老用户答疑和新手操作练习。答疑部分，参会的用户提前整理了技术问题，现场工程师进行了解答，同时经验丰富的用户还分享了自己的使用心得；新手操作部分，张志国工程师就基坑开挖和边坡稳定性两个案例进行了仔细的讲解，参会用户每一步跟着操作案例，两个案例下来，新用户基本掌握了软件的操作方法和技巧。



## 《SAP2000 中文版技术指南及工程应用》正式出版发行！

本书分为六个部分，共 45 章。每个部分、每个章节开始时，都有内容提要，供读者快速了解核心内容，进而定位所关心的内容。另外，大多数章节在开头部分列出了本章的“基本主题”和“高级主题”，兼顾初学者和高级用户的不同需求，大家可以选择性阅读。

[点击购买](#)



## 新版本新产品综合解决方案技术交流会成功举办（9月12日北京）

9月12日，筑信达在北京成功举办了2018新版本新产品综合解决方案技术交流会，200余位工程师拔冗参与。筑信达工程师很高兴与来自京津冀地区和从上海、山东、江苏等地远道而来的朋友，共聚一堂、分享交流。





本次技术交流会议内容立足“综合解决方案”，筑信达工程师向各位来宾集中精彩展示 ETABS、SAP2000 新版本新功能的同时，更注重多产品与工具集的联合应用，解决工程实际问题，提高工作效率。



ETABS 综合解决方案部分，根据用户完成工程项目的一般顺序，介绍了 [ETABS v17 新特性](#) 和筑信达公司自主研发的 [ETABS 配套工具集](#)。随着 ETABS 软件的不断更新与增强，配合筑信达本地化工具集的应用，彻底改变了多年前 ETABS 用于二套校核的局限性，更逐渐成为更多工程师进行弹塑性分析、减隔震设计的不可或缺的有力武器。

SAP2000 综合解决方案部分，则侧重于不同类型的工程项目，介绍了 [工具箱 CiSApps](#)，包含格构式构件建模工具、空间结构自动蒙皮工具、结构大指标输出工具、冷弯构件设计等接近 20 项功能。除此之外，向大家展示了筑信达近期推出的 [开敞式钢结构专业解决方案 CiSOpenSteel](#)，该软件专注于开敞式钢结构设计，实现了参数化建模、设备参数化建立、荷载自动输入、分析、设计和自动计算书输出等功能，该工具在石油石化行业内，备受关注，并获得好评。

## 活动报道

钢结构设计部分，新钢标在 ETABS/SAP2000 新版本中的实现受到了用户的广泛关注。同时，为解决钢结构节点设计方面的问题，展示了与 ETABS/SAP2000 完美结合的[全新钢结构节点设计软件 IDEA](#)。利用该产品，可导入 ETABS/SAP2000 的节点及相关内力，快速生成有限元模型，进行多种分析，并与各国规范相结合，进行节点设计和校核。



报告提问环节，讨论热烈，除 CSI 产品的功能外，工程师对新钢标的实现、筑信达自主研发产品等也格外关注。会议互动过程中，向参与现场反馈的中奖工程师赠送了筑信达出版的[《SAP2000 中文版技术指南及工程应用》](#)和[《Edward L Wilson 教授访谈回忆录（中译本）》](#)。



此次交流活动圆满成功，感谢莅临会场的朋友，亦感谢对本次交流会予以关注和给予筑信达一贯支持的广大工程师同仁！





# 征稿启事



如果你使用过我们的产品  
如果你喜爱工程分析

或许你正困惑其中  
或许你已成果丰硕

欢迎来这里发声!

这里  
可以提问  
也可以“炫技”

可以严肃  
也可以顽皮

题材不限  
风格不拘

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

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

欢迎广大工程师踊跃投稿!

稿件一经采纳，作者将有机会获赠：

- 技术专著
- 产品单机版免费限时使用权
- 高级培训免费名额

## 投稿请寄

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

(请注明“技术通讯”投稿)

## 期待与你的相识!

你是我的菜



**CSI BRIDGE**  
**SAP 2000**  
**ETABS**  
**SAFE**  
**PERFORM 3D**  
**PLAXIS**  
**CiSDesigner**  
**CiSGTCAD**  
**CiSModelCenter**



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



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



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



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