



SAP2000有限元软件



概述

SAP2000简介

几何建模

常用单元

荷载类型

建筑结构分析



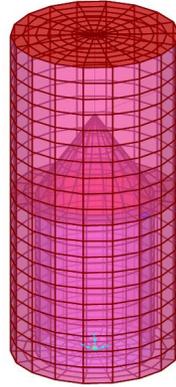
有限单元法

◆ 基本思想：化整为零

- 单元分析 → 整体分析
- 矩阵位移法 → 有限单元法
- 结构力学 → 弹性力学

◆ 理论基础

- 结构力学：直接刚度法
- 固体力学：虚位移原理/最小势能原理
- 多物理场：变分原理/泛函分析



有限单元法

◆ 纵向发展

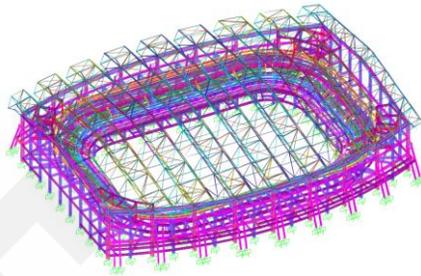
- 平面问题 → 空间问题/板壳问题
- 线性分析 → 几何非线性/材料非线性等
- 弹性分析 → 弹塑性分析/粘弹性分析等
- 静力分析 → 模态分析/反应谱分析/时程分析
- 连续介质力学 → 断裂力学/损伤力学



有限元软件

- ◆ 专业的建筑结构分析与设计软件

PKPM YJK 3D3S ...



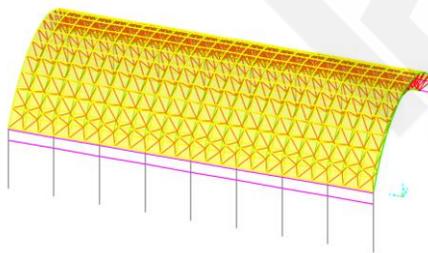
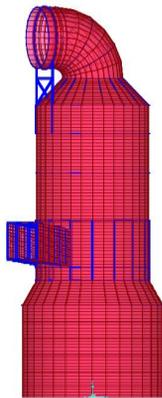
筑信达 CSI



有限元软件

- ◆ 通用的建筑结构分析与设计软件

SAP2000 ETABS Midas ...



筑信达 CSI



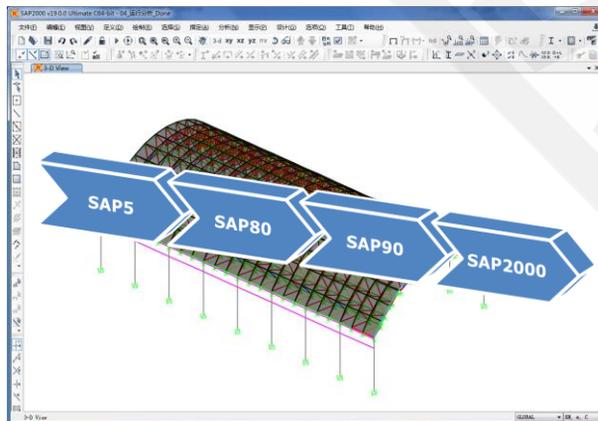
发展历程

- A. 1969 年，美国加州大学伯克利分校的 Wilson 教授开发了针对结构静力与动力分析的计算机程序 SAP。
- B. 1973 年，Bathe 博士 **ADINA** 动力求解器，使其发展成为当时世界上最高效的结构分析程序 SAP4。
- C. 1978 年，Wilson 教授的学生 Ashraf 创建 CSI 公司，致力于 SAP2000、ETABS、SAFE 等建筑结构分析与设计软件的开发、维护及售后服务。



发展历程

- D. 1996 年，CSI 公司发布了第一个完全集成于 Windows 的 SAP 版本 SAP2000。





功能概述

SAP2000 Structure Analysis Program

通用的建筑结构分析与设计软件

- 工业与民用建筑、公共建筑
- 道路与桥梁工程、市政工程
- 水利水电工程、岩土工程
- 石油石化工程、机械工程
- ...

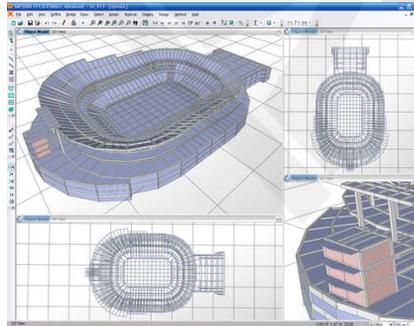


功能概述

SAP2000 Structure Analysis Program

集成化的工作环境

- 创建或导入几何模型
- 定义并指定构件属性
- 施加荷载与求解设置
- 结构分析与结构设计
- 结果后处理





功能概述

SAP2000 Structure Analysis Program

高效稳定的**结构分析**功能

- 几何非线性分析、材料非线性分析
- 模态分析和反应谱分析
- 时域分析和频域分析
- 稳定性分析、Pushover 分析
- 阶段施工分析、移动荷载分析
- ...



功能概述

SAP2000 Structure Analysis Program

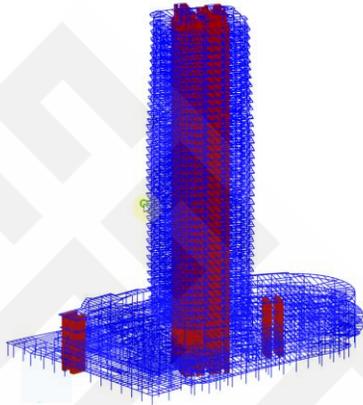
一体化的**结构设计**功能

- 多种结构类型（混凝土结构、钢结构...）
- 多国设计规范（中国规范、欧美规范...）
- 交互式的配筋计算与截面校核
- 自动的钢结构优化设计
- 详细的设计结果输出
- ...





常见应用



高层建筑



筑信达 CSI



常见应用

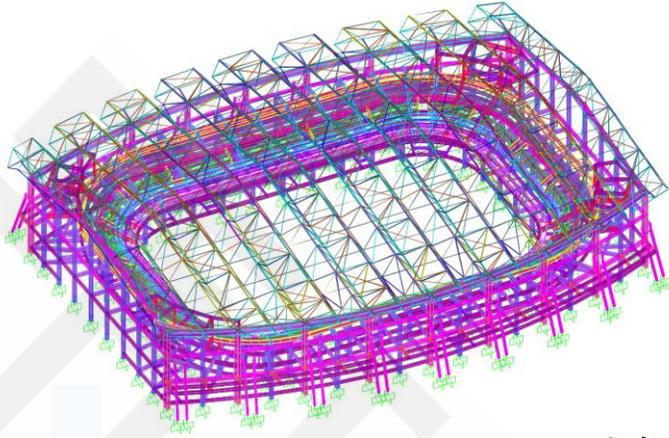


塔架

筑信达 CSI



常见应用

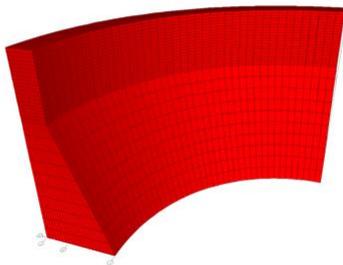


体育场馆

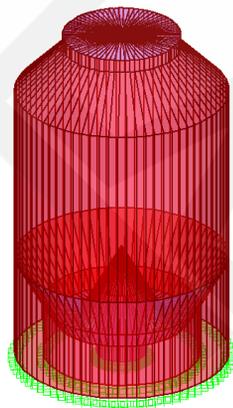
筑信达 CSI



常见应用



挡水坝



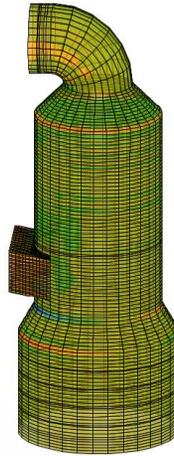
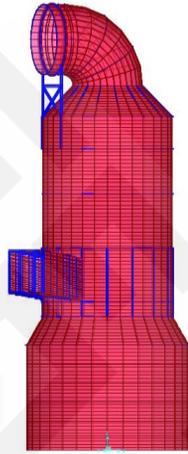
筒仓

筑信达 CSI



常见应用

环保除尘设备



概述

SAP2000 简介

几何建模

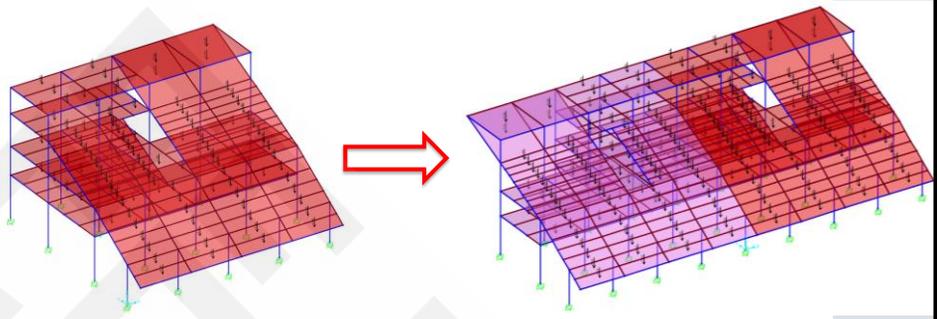
常用单元

荷载类型

建筑结构分析



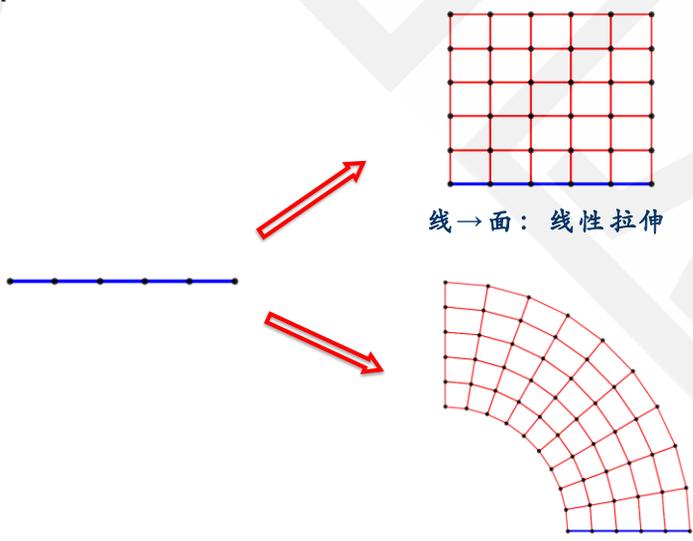
带属性复制



镜像复制



几何拉伸

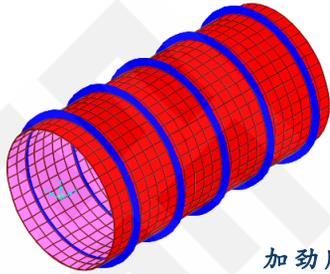


线→面：线性拉伸

线→面：环向拉伸

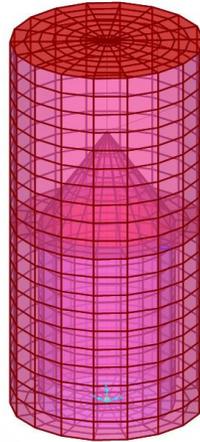


几何拉伸



加劲肋

点→线：环向拉伸

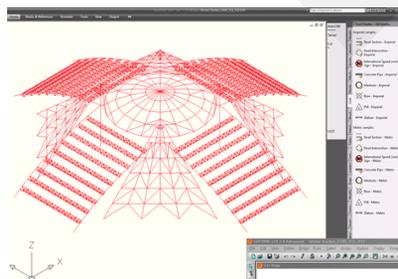


线→面：环向拉伸

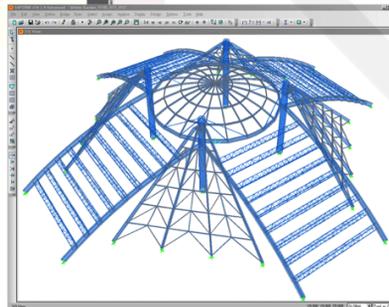
筑信达 CSI



AutoCAD 导入



AutoCAD

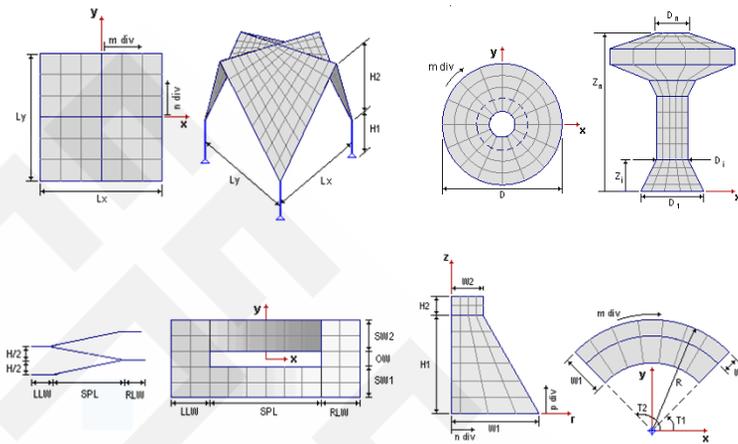


SAP2000

筑信达 CSI



初始化模板



概述

SAP2000 简介

几何建模

常用单元

荷载类型

建筑结构分析



框架单元



理论基础

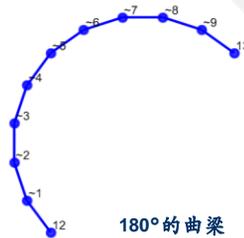
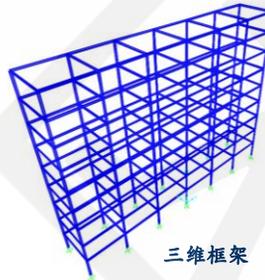
◆ 构件类型

- 梁、柱、支撑等杆件
- 悬索/拉索

◆ 三维梁柱理论

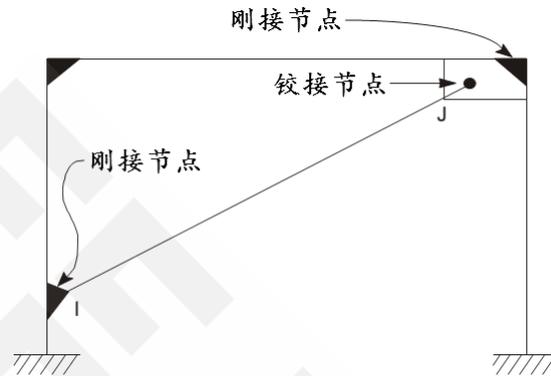
- 拉压弯剪扭变形
- 铁木辛柯梁
- 欧拉-伯努利梁

◆ 曲梁的分段逼近





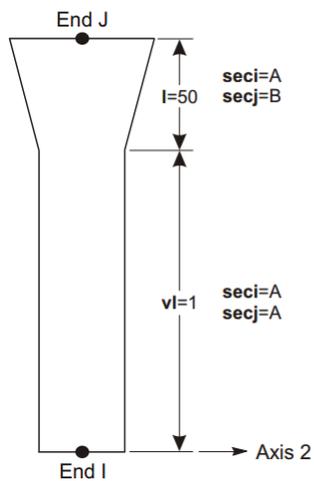
端部释放



扭矩 T	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	kN-m/rad	
弯矩 M22 (次轴)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0	kN-m/rad	0
弯矩 M33 (主轴)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0	kN-m/rad	0



变截面属性



Section B



Section A

截面类型

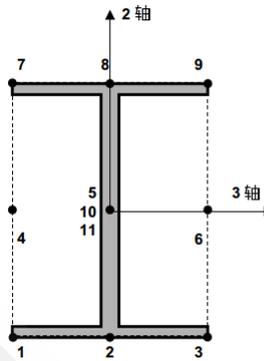
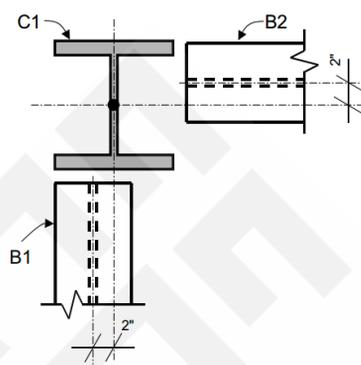
截面类型

其他截面

通用截面	变截面	SD截面



插入点

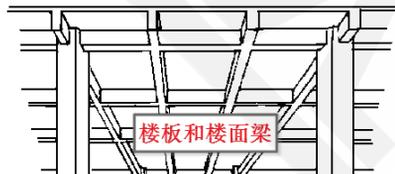


1. 底左
2. 底中
3. 底右
4. 中左
5. 中中
6. 中右
7. 顶左
8. 顶中
9. 顶右

利用**插入点**模拟杆件间的偏心连接



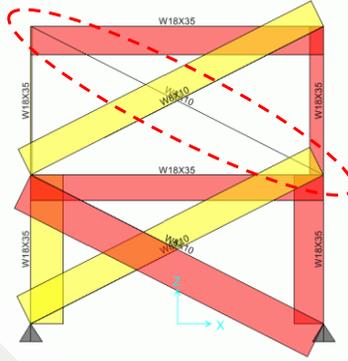
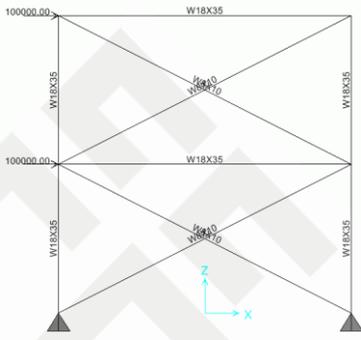
插入点



利用**插入点**模拟梁-板偏心连接



拉压限值



压力限值为零模拟单拉支撑



北京筑信达工程咨询有限公司
Beijing Construction Information Solution Engineering Consulting



壳单元





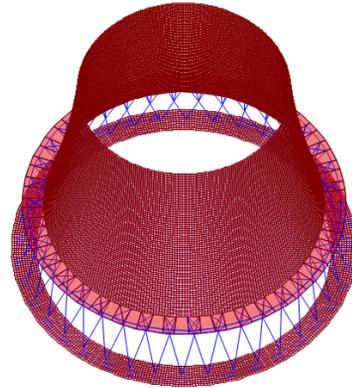
理论基础

◆ 构件类型 / 常见应用

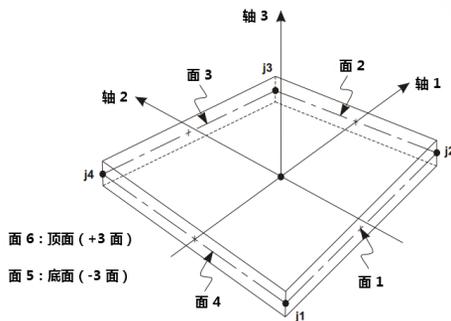
- 楼板、剪力墙、坡道、楼梯
- 水池、筒仓、壳体、穹顶

◆ 板壳理论

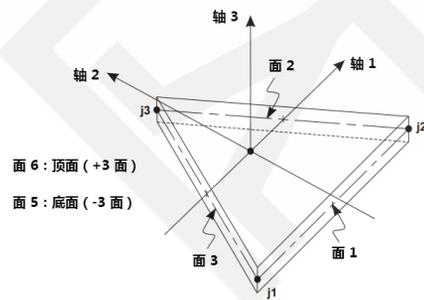
- 薄板（壳） vs 厚板（壳）
- 分层壳：复合材料
- Kirchhoff理论
- Mindlin / Reissner理论



单元形状



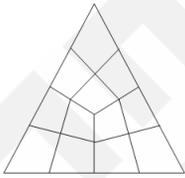
四边形壳单元



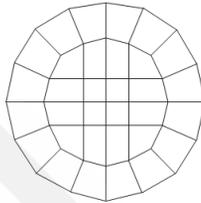
三角形壳单元



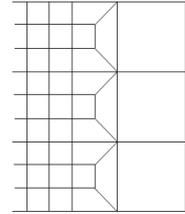
网格剖分



三角形区域



圆形区域

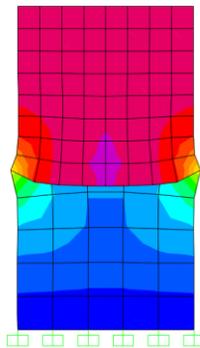


过渡区域

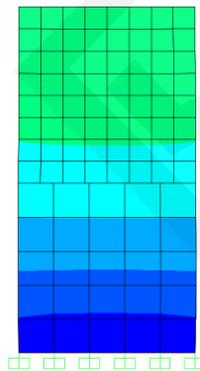
推荐的网格剖分方法



自动边约束



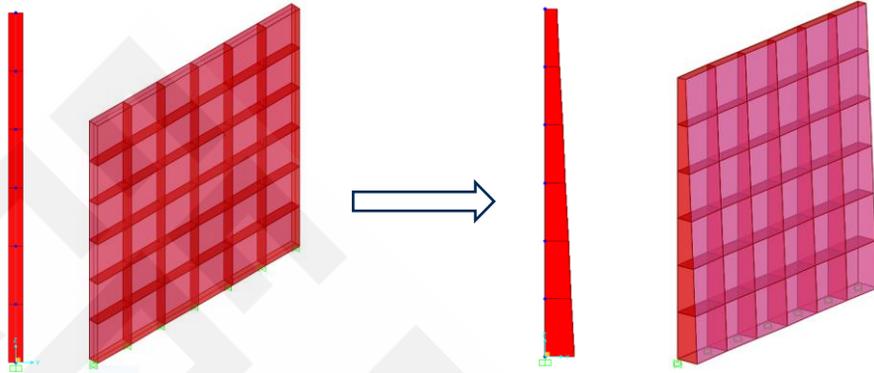
交界面的节点不重合



利用插值约束耦合节点间的位移自由度



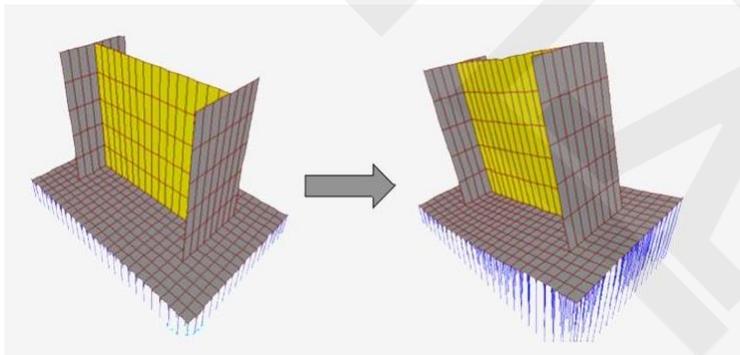
变厚度壳



厚度覆盖项+节点偏移



面弹簧



线性弹簧（拉压弹簧）

非线性弹簧（单压弹簧）

利用面弹簧模拟地基土对基础的约束作用



实体单元



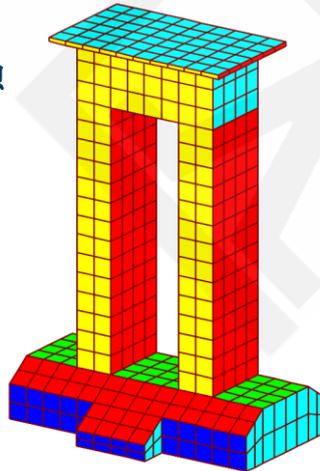
理论基础

◆ 常见应用

- 地基、挡土墙、路堤、水坝

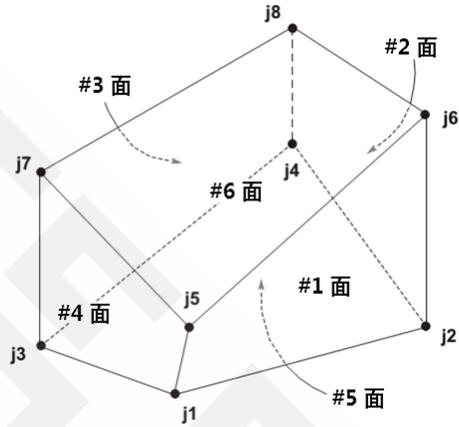
◆ 固体力学

- 六个应力分量
- 三个正应力+三个剪应力
- 平动自由度✓
- 转动自由度×





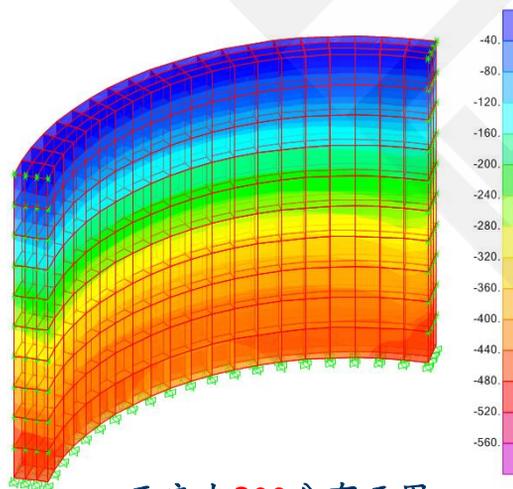
单元形状



六面体实体单元



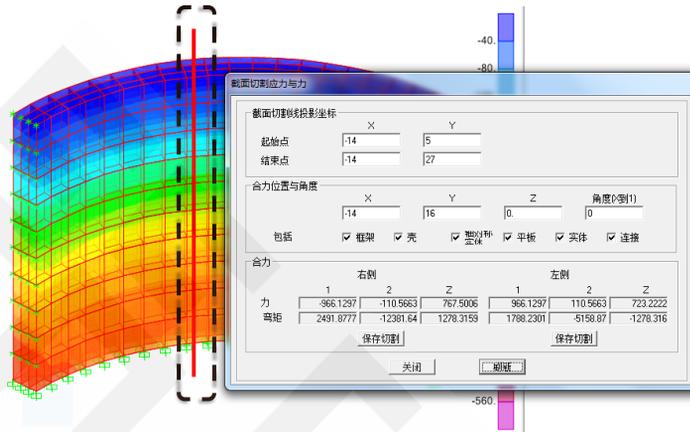
应力显示



正应力 $S33$ 分布云图



截面切割



输出截面内力

筑信达 CSI

北京筑信达工程咨询有限公司
Beijing Construction Information Solution Engineering Consulting



钢束单元和索单元

CSI
COMPUTERS & STRUCTURES INC.

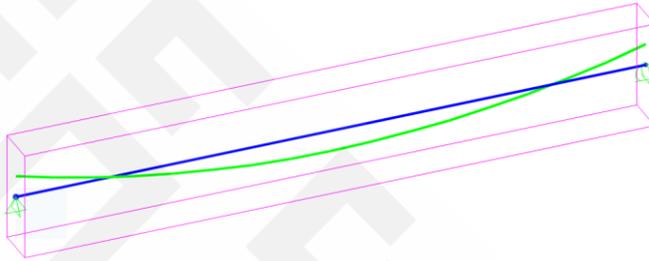


钢束单元

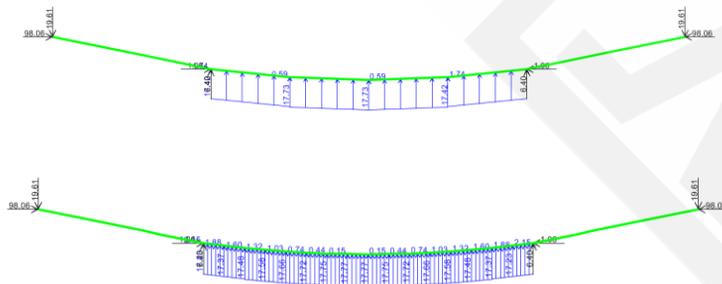
◆ 常见应用

- 预应力钢筋

◆ 嵌入基体单元的内部



钢束单元



等效的自平衡荷载



索单元

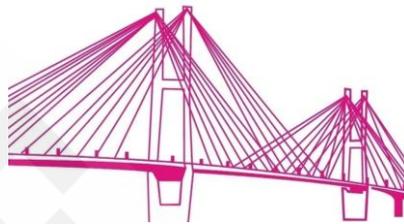
◆ 常见应用

- 悬索桥、悬索屋盖
- 斜拉桥、斜拉塔



◆ 几何非线性

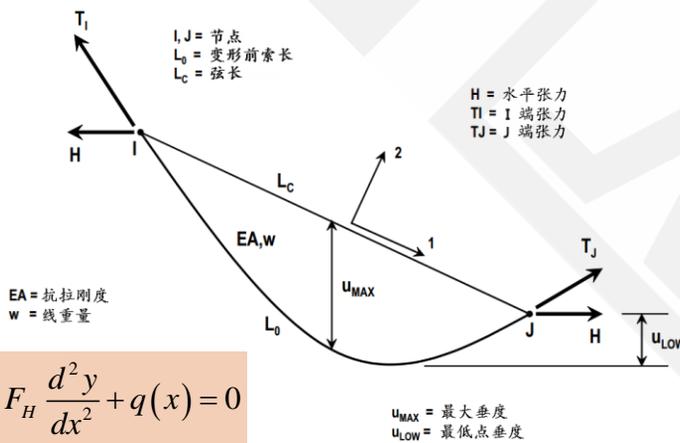
- 应力刚化效应
- 大位移效应



筑信达 CSI



悬链索



$$F_H \frac{d^2 y}{dx^2} + q(x) = 0$$

悬链索的平衡微分方程

筑信达 CSI



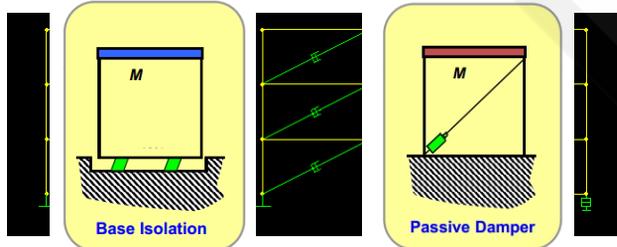
连接单元



理论基础

◆ 力学性能

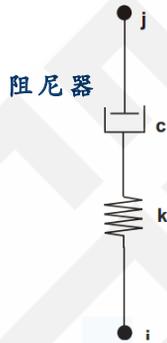
- 两点之间或单点与地面之间特殊的连接关系
- 线性弹簧→剪切型阻尼器...





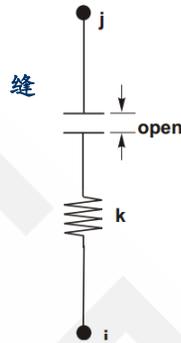
理论基础

◆ 力学性能



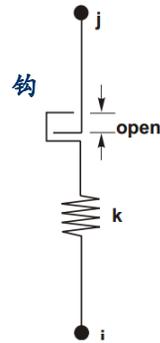
阻尼器

Maxwell模型



缝

单压 (接触)

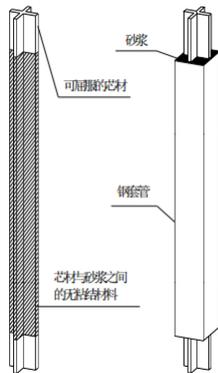


钩

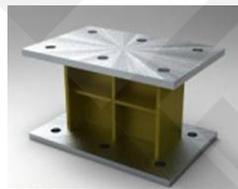
单拉 (索)



工程应用



屈曲约束支撑 (BRB)

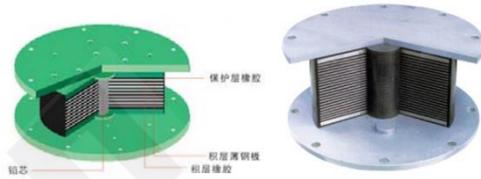


金属剪切型阻尼器

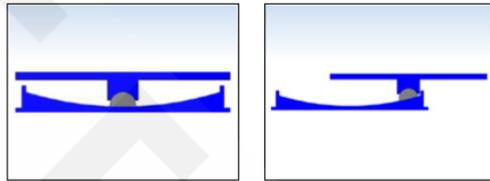




工程应用



橡胶隔震器



摩擦摆隔震器



概述

SAP2000 简介

基本操作

单元库

荷载类型

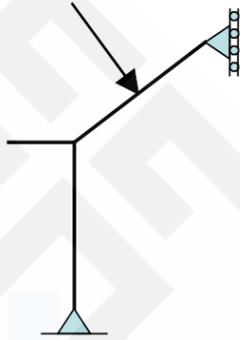
建筑结构分析

API 二次开发

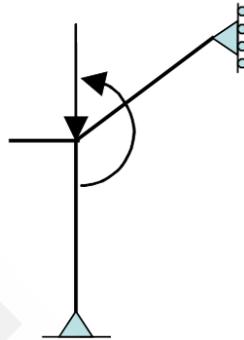


点荷载

◆ 集中荷载



集中力

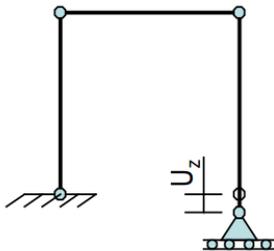


集中力和集中力矩

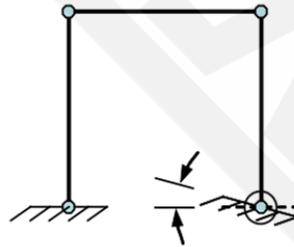


点荷载

◆ 位移荷载



支座沉降

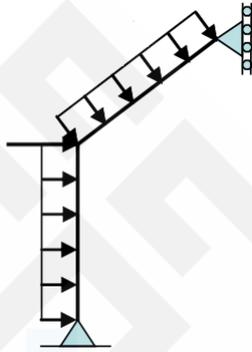


支座转角

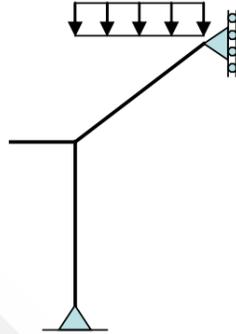


线荷载

◆ 均布线荷载



坐标轴方向

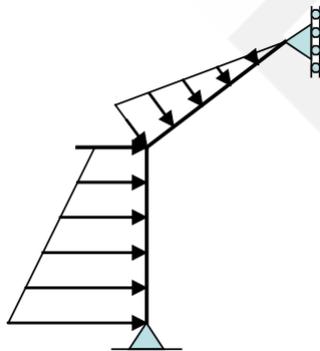


投影方向



线荷载

◆ 非均布线荷载

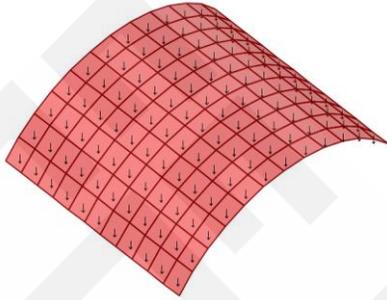


三角形分布和梯形分布

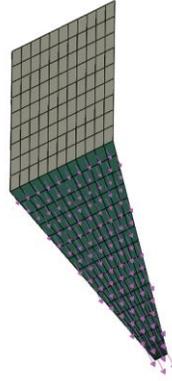


面荷载

◆ 均布面荷载



重力方向

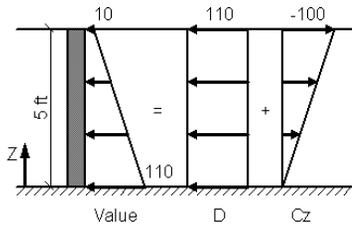


切向力

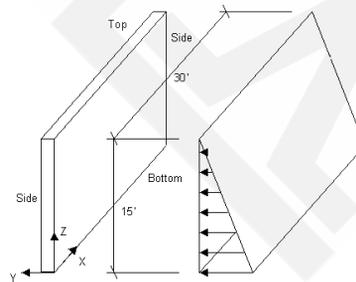


面荷载

◆ 表面压力荷载



侧向土压力

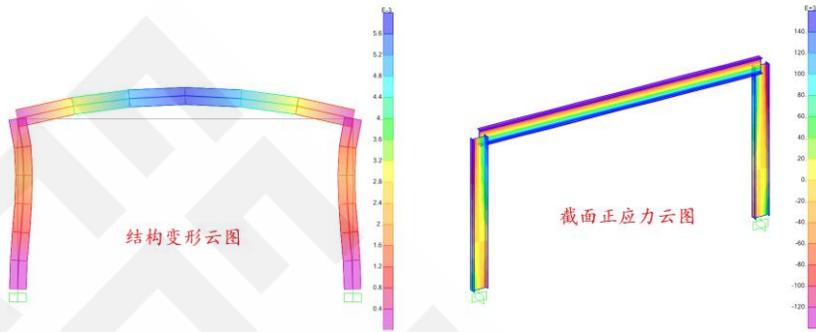


静水压力



温度荷载

◆ 框架单元

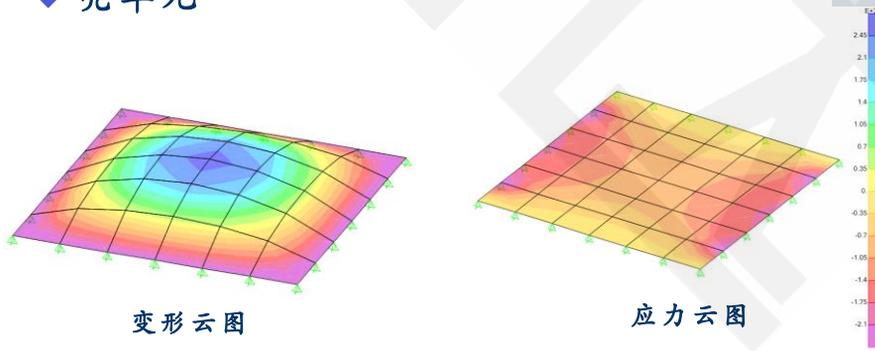


温度梯度荷载



温度荷载

◆ 壳单元



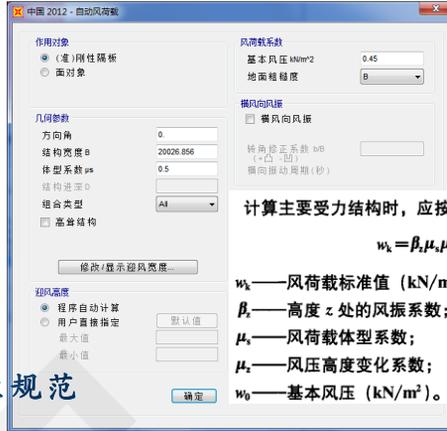
温度梯度荷载



自动风荷载

◆ 各国规范

- 中国 2012
- 美国规范
- 欧洲规范
- 印度规范
- 墨西哥规范
- 意大利规范
- 澳大利亚/新西兰规范
- ...



自动地震荷载

◆ 各国规范

- 中国 2010
- 美国规范
- 欧洲规范
- 印度规范
- 韩国规范
- 土耳其规范
- 意大利规范
- 澳大利亚/新西兰规范
- ...





底部剪力法

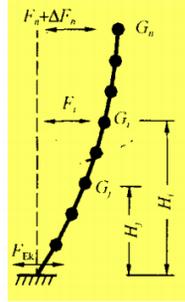
◆ 建筑抗震设计规范 GB 50011-2010

5.2.1 采用底部剪力法时，各楼层可仅取一个自由度，结构的水平地震作用标准值，应按下列公式确定（图 5.2.1）：

$$F_{Ek} = \alpha_1 G_{eq} \quad (5.2.1-1)$$

$$F_i = \frac{G_i H_i}{\sum_{j=1}^n G_j H_j} F_{Ek} (1 - \delta_n) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5.2.1-2)$$

$$\Delta F_n = \delta_n F_{Ek} \quad (5.2.1-3)$$



概述

SAP2000 简介

基本操作

单元库

荷载类型

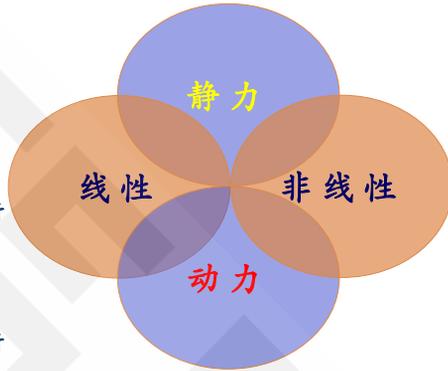
建筑结构分析

API 二次开发



建筑结构分析

线性静力分析
模态分析
反应谱分析
线性时程分析
特征值屈曲分析
移动荷载分析
稳态分析
功率谱密度分析

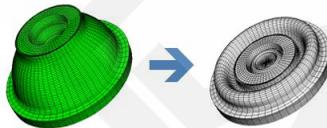


非线性静力分析
➢ 推覆分析
➢ 阶段施工分析
➢ 索分析
➢ ...
非线性时程分析
➢ 模态叠加法
➢ 直接积分法



非线性类型

- ◆ 材料非线性
 - 非线性连接单元
 - 塑性铰/分层壳/拉压限值
- ◆ 几何非线性
 - 应力刚化 (P-Delta)
 - 大位移效应
- ◆ 阶段施工分析
 - 时变属性 (蠕变、龄期)





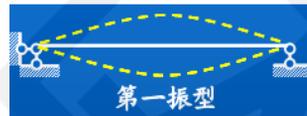
模态分析



模态分析

◆ 特征向量法

- 无阻尼自由振动
- 结构固有的动力学特性



◆ 里兹向量法

- 与**荷载分布**相关的振型
- 基于振型叠加法的时程分析
- 基于振型分解法反应谱分析



特征向量法

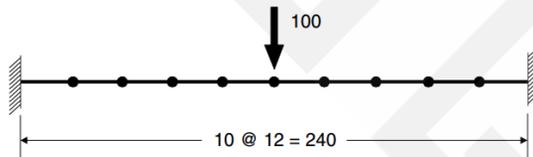
◆ 广义的特征值问题

$$[K - \Omega^2 M] \Phi = 0$$

- 结构刚度矩阵 K
- 结构质量矩阵 M
- 特征向量 (振型) 矩阵 Φ
- 特征值 (圆频率平方) 矩阵 Ω^2



特征向量法 vs 里兹向量法



振型数量	特征向量法		里兹向量法	
	跨中位移	跨中弯矩	跨中位移	跨中弯矩
1	0.004572 (-2.41)	4178 (-22.8)	0.004726 (+0.88)	5907 (+9.2)
2	0.004572 (-2.41)	4178 (-22.8)	0.004591 (-2.00)	5563 (+2.8)
3	0.004664 (-0.46)	4946 (-8.5)	0.004689 (+0.08)	5603 (+3.5)
4	0.004664 (-0.46)	4946 (-8.5)	0.004688 (+0.06)	5507 (+1.8)
5	0.004681 (-0.08)	5188 (-4.1)	0.004685 (0.00)	5411 (0.0)
7	0.004683 (-0.04)	5304 (-2.0)		
9	0.004685 (0.00)	5411 (0.0)		



反应谱分析

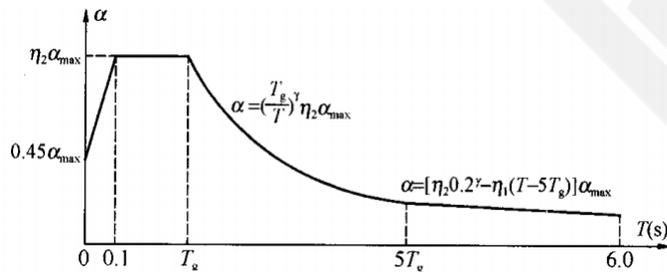


反应谱分析

◆ 单自由度体系的动力平衡方程

$$\ddot{q}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = \frac{1}{M_n} P_n$$

- 反应谱曲线 → 各个振型的峰值响应
- 振型组合 → 整体结构的峰值响应（统计学）

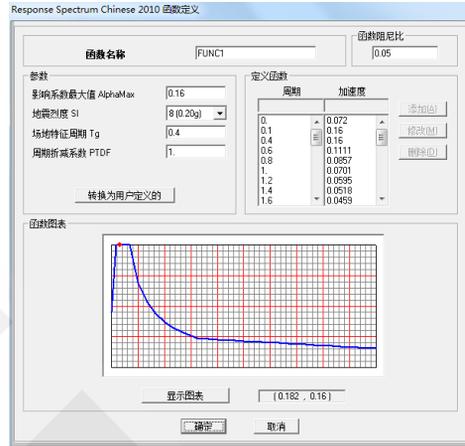




反应谱曲线

◆ 各国规范

- 中国 2010
- 美国规范
- 欧洲规范
- 印度规范
- 韩国规范
- 土耳其规范
- 意大利规范
- 澳大利亚/新西兰规范
- ...



振型组合

◆ 建筑抗震设计规范

$$S_{E_k} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \rho_{jk} S_j S_k}$$

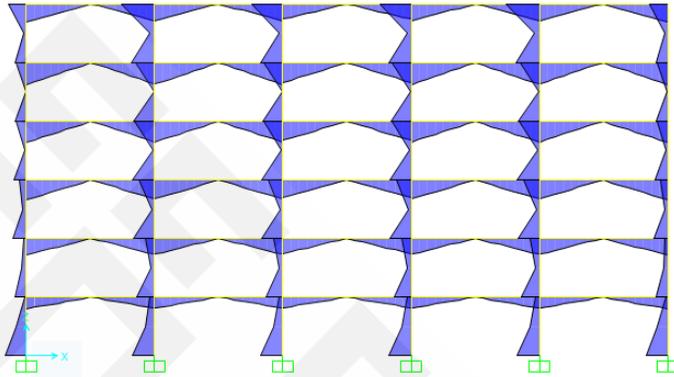
$$\rho_{jk} = \frac{8\sqrt{\zeta_j \zeta_k} (\zeta_j + \lambda_T \zeta_k) \lambda_T^{1.5}}{(1 - \lambda_T^2)^2 + 4\zeta_j \zeta_k (1 + \lambda_T^2) \lambda_T + 4(\zeta_j^2 + \zeta_k^2) \lambda_T^2}$$

SAP2000 默认的完全方根组合 CQC





振型组合



结构内力图

筑信达 CSI

北京筑信达工程咨询有限公司
Beijing Construction Information Solution Engineering Consulting



时程分析

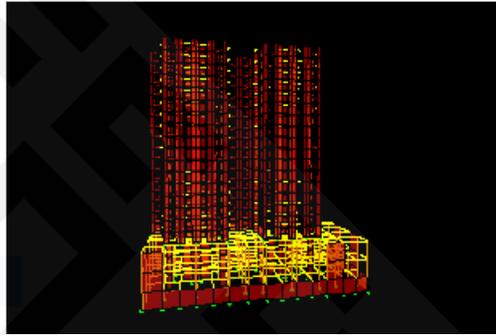
CSI
COMPUTERS & STRUCTURES INC.



动力时程分析

◆ 多自由度体系的动力平衡方程

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\}$$



动力时程分析

◆ 多自由度体系的动力平衡方程

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\}$$

- 线性分析 vs 非线性分析
- 振型叠加法 vs 直接积分法
- 瞬态荷载 vs 周期荷载
 - 地震加速度荷载
 - 机械转子离心力荷载
 - 人行激励荷载
 - ...



时程函数

余弦波

正弦波

齿形波

三角波



时程函数

```

1 IIA004 52.002.0 STATION NO. 095 JULY 21, 1952 - 0453 PDT
2
3
4 KERN COUNTY, CALIFORNIA EARTHQUAKE
5
6 TAFT LINCOLN SCHOOL TUNNEL
7
8 EPICENTER 35 00 00N 119 02 00W
9 COMP S69E 35 09 00N 119 27 00W
10 INSTR PERIOD = 0.0820 SEC DAMPING = 0.552
11 ACCELEROGRAM IS BAND-PASS FILTERED BETWEEN 0.070 AND 25 CYC/SEC
12
13 PEAK VALS ACNLN = 175.9 CM/SEC/SEC AT 3.70 SEC
14 VELO = -17.7 CM/SEC AT 0.56 SEC
15 DISP = -9.2 CM AT 44.12 SEC
16
17 INITIAL VELO = -0.16649 CM/SEC INITIAL DISP = -0.06214 CM
18
19 3963 INSTRUMENT AND BASELINE CORRECTED DATA IN MM/SEC/SEC
20 AT EQUALLY-SPACED INTERVALS OF 0.02 SEC
21
22 时间间隔
23 每行10个数据
24
25 TAFT LINCOLN SCHOOL TUNNEL(S69E)
26
27 -62 -19 40 99 52 -3 -42 -28 12 53
28 39 -28 -85 -83 -60 -8 -3 -2 40 103
29 114 65 44 23 21 19 -39 -74 -11 58
30 28 -102 -113 -47 49 10 -40 -25 58 72
  
```

地震加速度荷载

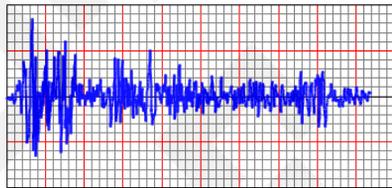


振型叠加法

◆ 单自由度体系的动力平衡方程

$$\ddot{q}_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = \frac{1}{M_n} P_n$$

- 时程函数 → 各个振型的时程响应
- 线性叠加 → 整体结构的时程响应
- 各个时间点上各个动力响应一一对应

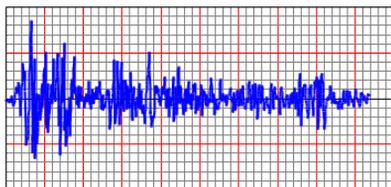


直接积分法

◆ 多自由度体系的动力平衡方程

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\}$$

- 时程函数 → 整体结构的时程响应
- ~~振型分解 & 振型叠加~~
- 各个时间点上各个动力响应一一对应





振型叠加法 vs 直接积分法

◆ 振型叠加法

- 优势：计算效率高，求解稳定性强
- 劣势：仅限于线性分析和部分非线性分析且不适合高速动力分析
- FNA：减隔震（非线性）分析

◆ 直接积分法

- 优势：高速动力分析，各种非线性分析
- 劣势：复杂模型的计算时间较长



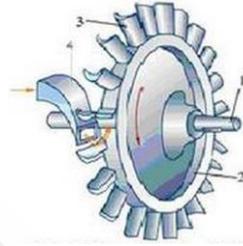
稳态分析



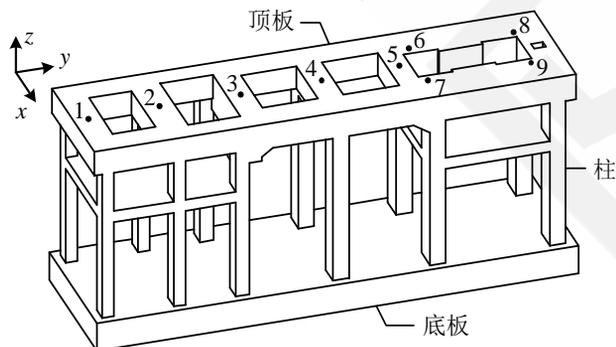
稳态分析

稳态分析的结果能预测结构的**持续动力特性**，从而克服共振、疲劳及其它受迫振动引起的不良影响。因此，稳态分析常用于：

- 旋转机械 → 建筑物
- 运转中的发动机 → 车身
- 人行荷载 → 楼板
- 颠簸的道路 → 车辆
- ...



稳态分析



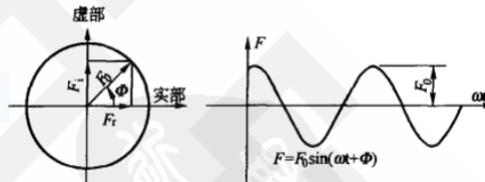
框架式动力机器基础



简谐荷载

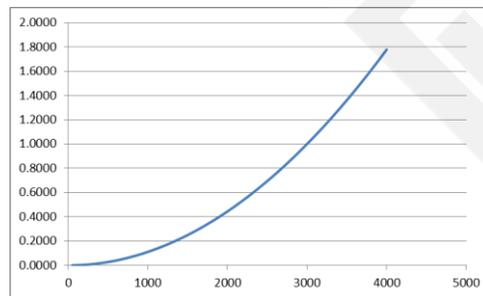
◆ 基本组成

- 幅值：荷载的最大值
 - 由稳态函数确定幅值随频率的变化情况
- 相位角：荷载滞后或领先于参考时间的量度
 - 多个异步荷载同时作用时，必须指定相位角。
- 频率范围：由频率步控制



稳态函数

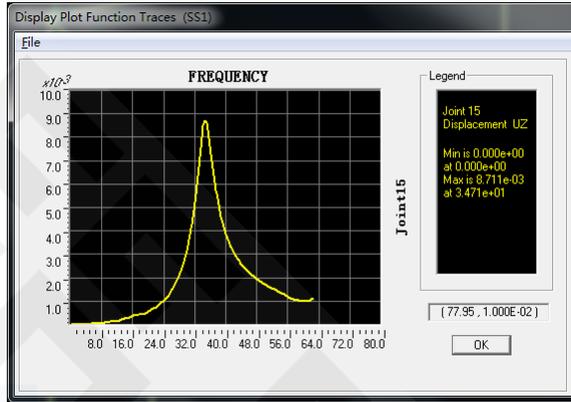
$$F_0 = m\omega^2 e \implies \text{稳态函数: } f(n_0) = \left(\frac{n_0}{3000}\right)^2$$



荷载幅值与频率或转速之间的关系



幅值-频率曲线



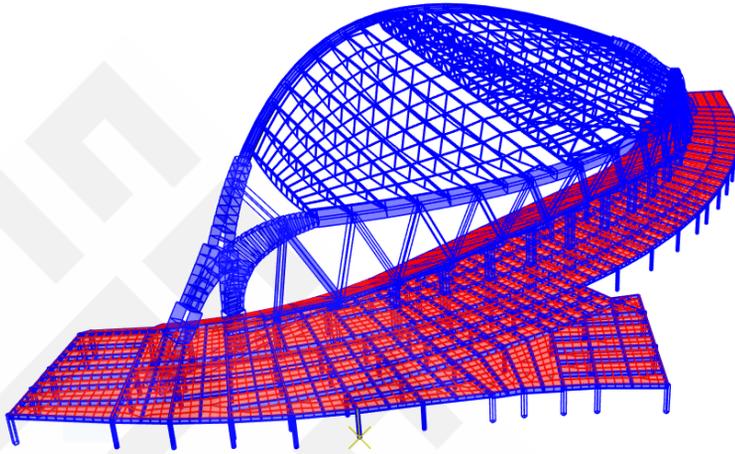
响应幅值与频率之间的关系



稳定性分析



空间大跨结构

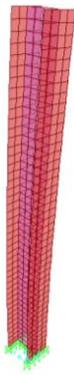


筑信达 CSI

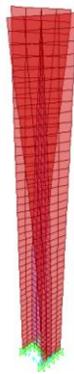


结构失稳类型

I. 特征值失稳



弯曲失稳 1



扭转失稳



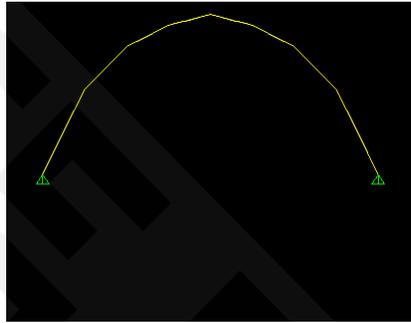
弯曲失稳 2

筑信达 CSI



结构失稳类型

II. 极值点失稳

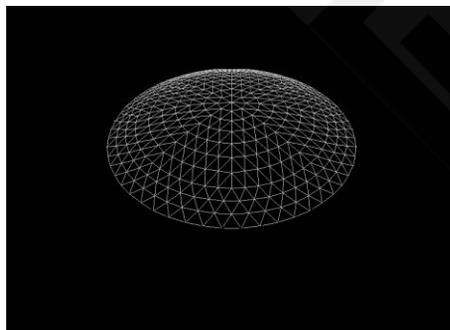


大位移效应+材料非线性



结构失稳类型

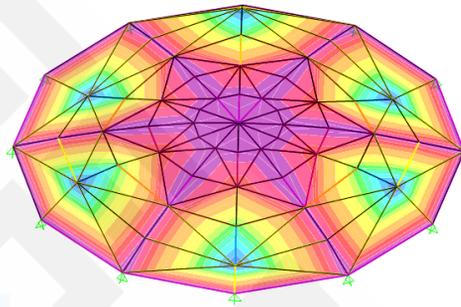
III. 跳跃失稳 (翻转问题)



大位移效应+ (材料非线性)



特征值屈曲分析



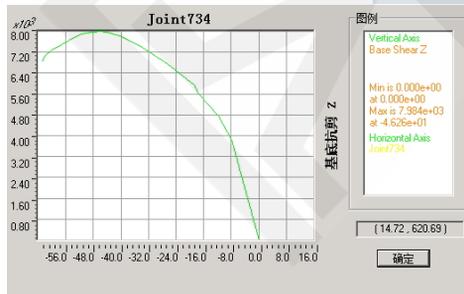
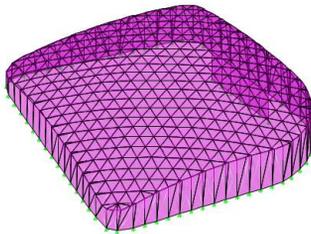
单层网壳结构



非线性稳定性分析

◆ 单层网壳

SAP2000 Filename: 20140429.sdb Deformed Shape Case: FXX-QQ

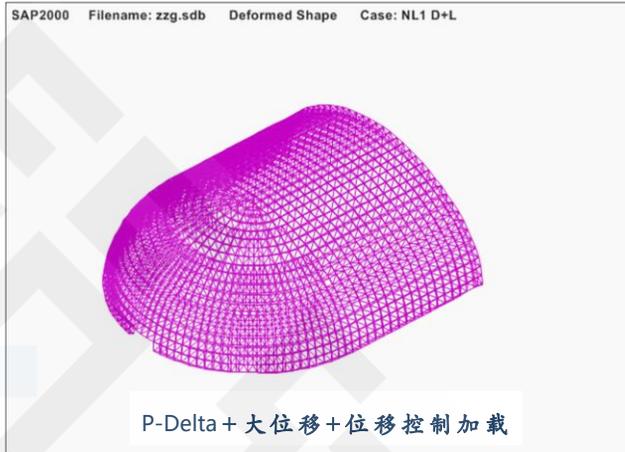


P-Delta + 大位移 + 位移控制加载



非线性稳定性分析

◆ 双层网壳



筑信达 CSI

北京筑信达工程咨询有限公司
Beijing Construction Information Solution Engineering Consulting



阶段施工分析

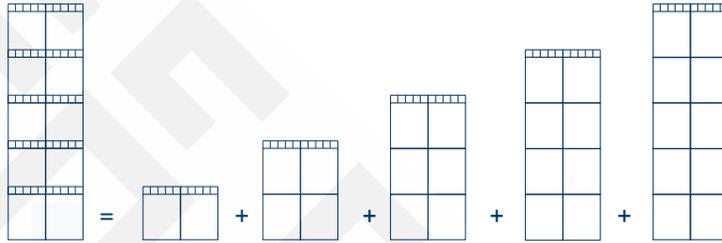
CSI
COMPUTERS & STRUCTURES, INC.



基本原理

◆ 分阶段形成计算模型

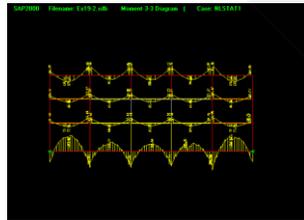
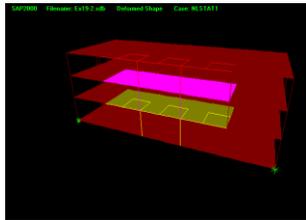
- 结构刚度矩阵：局部→整体
- 外荷载向量：恒载→活载→地震荷载/风荷载...



基本原理

◆ 阶段操作

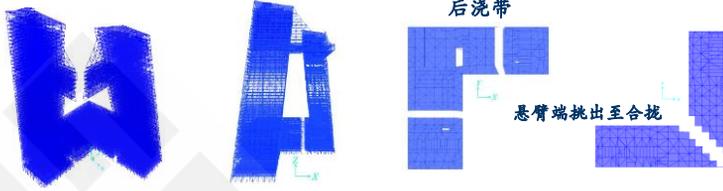
- 添加或移除构件：施工过程模拟
- 改变构件截面或刚度：加固改造工程
- 改变构件端部释放：修改支座条件
- ...



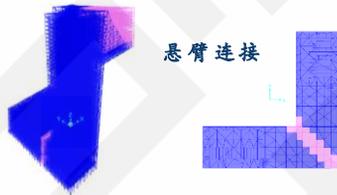


工程应用

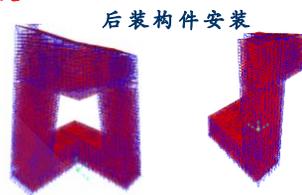
阶段1



阶段2



阶段3



筑信达 CSI

北京筑信达工程咨询有限公司
Beijing Construction Information Solution Engineering Consulting



操作演示

CSI
COMPUTERS & STRUCTURES, INC.



典型操作流程

前处理

- 布置轴网
- 定义材料/截面
- 几何建模
- 指定属性
- 施加荷载

分析求解

- 定义荷载工况
- 设置分析选项
- 运行结构分析

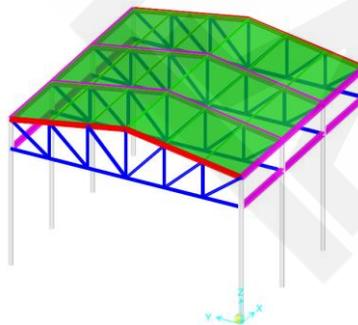
后处理

- 图形显示
- 表格输出
- 运行结构设计



单层工业厂房

1. 创建轴网
2. 定义材料和截面
3. 绘制几何模型
4. 指定构件属性
5. 施加荷载
6. 运行分析
7. 查看分析结果





学习方法



建议一

◆ 巩固有限单元法的**理论基础**

- 有限元理论并非无用的“纸上谈兵”
- 材料力学、结构力学、结构动力学
- 避免“矫枉过正”，点到为止即可



建议二

◆ 明确有限元软件的**工具属性**

“The idea that an expert-system computer program, with artificial intelligence, will replace a **creative human** is an insult to all structural engineers.”



加州大学伯克利分校终身名誉教授 Edward L. Wilson (著名的结构分析设计软件 SAP 的创始人) 在《Three Dimensional Static and Dynamic Analysis Of Structures》(<http://www.edwilson.org/Book/book.htm#Personal>) 一书中提到:

"Don't use a structural analysis program unless you fully understand the theory and approximations used within the program"

"Don't create a computer model until the loading, material properties and boundary conditions are clearly defined"



建议三

◆ **精通**一款有限元软件

- 通用软件 → 专业软件
- 有限元软件 ≠ “所见即所得”
- 软件学习 & 巩固理论



建议四

◆ “两手抓，两手都要硬”

■ 左手：工具软件的精通与熟练



■ 右手：工程问题的抽象与简化



练拳不练功，到老一场空

筑信达 CSI

Thanks



在线支持

support.cisec.cn



网络课堂

www.cisec.cn



视频教程

www.cisec.cn



知识库

wiki.cisec.cn



公众账号: [cisec08924900](https://www.cisec.cn)



钢结构节点交流群
97689961