

建筑设计子结构精细化分析

——基于SAP2000的有限元求解

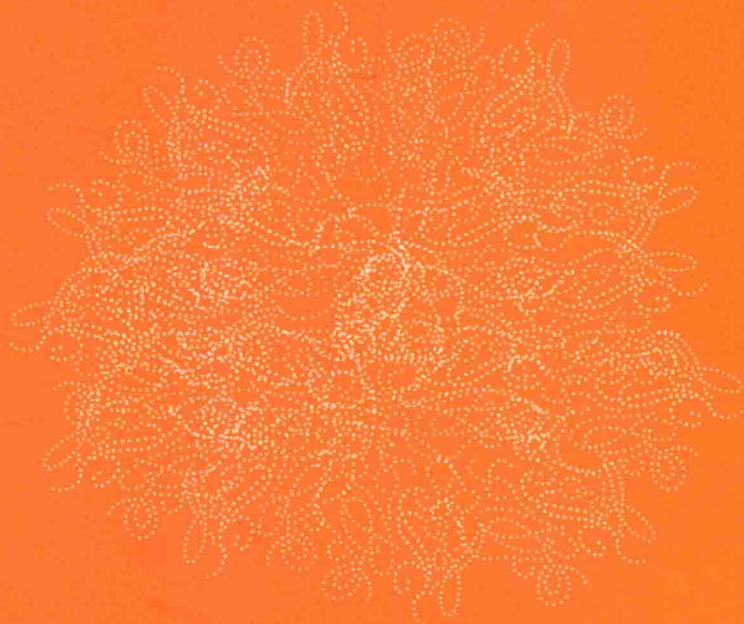
JIANZHU SHEJI ZIJIEGOU

JINGXIHUA FENXI

JIYU SAP2000 DE

YOUXIANYUAN QIUJIE

康永君 张晋芳 编著



中国建筑工业出版社

建筑设计子结构精细化分析 ——基于 SAP2000 的有限元求解

康永君 张晋芳 编著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑设计子结构精细化分析: 基于 SAP2000 的有限元求解/
康永君, 张晋芳编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 6
ISBN 978-7-112-23423-3

I. ①建… II. ①康… ②张… III. ①建筑结构-结构设计-计算机辅助设计-应用软件 IV. ①TU318-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 043634 号

对于复杂的子结构或者非常规设计内容, 目前往往局限于简单的等效计算方法、结构设计工具箱等设计工具, 采用各种简化、构造的方式处理, 无法获得相对准确的求解。本书以 SAP2000 为分析软件, 详细地介绍了地下室侧墙、地下室底板、异形楼板、墙体稳定性、复杂预应力、楼板舒适性等各种常见子结构问题的分析方法, 给出了有限元计算的理论结果与截面抗剪验算、抗弯验算等工程方法之间的换算关系, 并且, 对比了现有的简化分析方法与有限元精细分析的不同之处, 提出了相应的适用条件。

本书适用于设计院、咨询公司的结构设计人员, 高校结构专业师生和其他学习有限元分析的专业人员。

责任编辑: 李天虹

责任设计: 李志立

责任校对: 党 蕾

建筑设计子结构精细化分析 ——基于 SAP2000 的有限元求解 康永君 张晋芳 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)
各地新华书店、建筑书店经销
北京佳捷真科技发展有限公司制版
天津翔远印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 26 $\frac{1}{2}$ 字数: 661 千字
2019 年 6 月第一版 2019 年 6 月第一次印刷
定价: 78.00 元

ISBN 978-7-112-23423-3
(33734)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

建筑之美需要结构来成就。当今，越来越多的建筑突破了常规的结构造型，需要精确深入的分析手段予以应对，而现实是，大量的施工图设计，还依赖于等效简化分析手段，缺乏精准的计算支持。高质量、精细化的设计，是行业发展的主要方向。

本书依托 SAP2000 有限元软件，对实际工程中经常遇到的子结构问题进行了对比分析，诸如地下室侧墙的计算边界条件如何确定，抗浮锚杆对底板与独立基础的共同受力有什么影响，复杂开洞条件下的楼板应力分析和配筋方法，折板屋面的空间力学行为如何表现，如何考虑楼梯间剪力墙与梯板之间的相互支承作用，人行作用的动力荷载模拟以及对对应荷载作用下楼板的加速度响应求解等。针对这一类子结构问题，书中不仅给出了较为详细的有限元分析方法，而且对这些问题的主要力学特点、截面验算方式，都提出了作者自己的见解。

此外，本书还对软件使用中的操作经验进行了说明。解释了从单元节点力到工程内力的计算过程，对不同类型的有限元单元进行了刚度对比，还将软件的板配筋计算与规范配筋计算进行了比较，给出了这些技术条件在使用中的注意事项。

这些对计算原理、分析方法和配筋过程的演示与说明，形成了从问题提出到计算分析，再到施工图设计的一套完整流程和工程对策。

希望本书的出版，能为广大一线工程师实现高质量设计提供帮助和参考。



中国建筑西南设计研究院有限公司 总工程师
全国工程勘察设计大师 冯 远

2019年2月27日

前 言

建筑结构是一个多自由度的复杂力学体系，在分析时，必须对结构进行力学上的简化处理，使其既能反映结构的受力性能，又适应于所选用的计算分析软件的力学模型。对整体结构的分析，已经有相对完善的分析手段，可以适应从简单的弹性分析到复杂的弹塑性非线性分析等不同的设计需要。但是对于复杂的子结构或者非常规设计内容，大量工程师往往局限于简单的等效计算方法、结构设计工具箱等非常有限的设计工具，采用各种简化、构造的方式处理，没有办法获得相对准确的求解，设计既不经济，也不一定保证结构安全。

对子结构精细化分析的方法和应用，予以研究和推广，可以弥补设计人员在基本结构设计和复杂弹塑性分析之间的能力空缺，有效地提升结构设计行业的综合实力，使得普通工程师在面临这些常见结构问题时，能更好地处理，有理有据，游刃有余。

本书以 SAP2000 为分析软件，详细地介绍了地下室侧墙、地下室底板、异形楼板、墙体稳定、复杂预应力、楼板舒适性等各种常见子结构问题的分析方法，给出了有限元计算的理论结果与截面抗剪验算、抗弯验算等工程方法之间的换算关系，并且，对比了现有的简化分析方法与有限元精细分析的不同之处，提出了相应的适用条件。此外，本书还对单元节点力和截面切割等技术条件进行了说明和对比解释。

附录 A 对 SAP2000 的交换文件进行了介绍，对 .S2K 文件的格式进行了详细的说明，可以作为二次开发的参考。

本书总纲由康永君、张晋芳商定，其中第 1~4 章、第 8 章由康永君编写，第 5~7 章由张晋芳编写。感谢冯远大师为本书提出的宝贵意见和精彩序言，这些温暖的鼓励极大地坚定了本书的出版信心。此外，本书的出版得到了中国建筑工程总公司“结构设计数字化交换需求研究（现浇钢筋混凝土结构）”科研课题的大力帮助，在此一并感谢。

由于作者水平有限，不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

康永君

2019 年 1 月 24 日

四川 成都

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 有限元法基本介绍	1
1.2 SAP2000 基本介绍	3
第 2 章 地下室侧墙	5
2.1 简化地下室侧墙	5
2.2 带框架和底板的地下室侧墙	17
2.3 有支撑墙的侧墙	41
2.4 机动车坡道旁侧墙	61
第 3 章 地下室底板	81
3.1 无抗浮问题普通地下室底板	81
3.2 无抗浮锚杆抗水板-详细分析	99
3.3 有抗浮锚杆抗水板-详细分析	108
3.4 有抗浮锚杆抗水板-倒楼盖	122
第 4 章 异形楼板	143
4.1 平面异形楼板	143
4.2 大板开洞楼板	155
4.3 尖塔屋面	168
4.4 折板	182
第 5 章 墙身稳定性	203
5.1 一字形普通剪力墙墙身稳定性验算	203
5.2 带端柱的一字形普通剪力墙墙身稳定性验算	215
5.3 弧形剪力墙墙身稳定性验算	224
5.4 带翼墙剪力墙墙身稳定性验算	227
5.5 楼梯间剪力墙墙身稳定性验算	234
5.6 开洞剪力墙墙身稳定性验算	239
第 6 章 预应力构件	249
6.1 单跨简支预应力梁分析	249
6.2 多跨连续预应力梁分析	278
6.3 预应力板分析	298
6.4 预应力密肋楼板受力分析	319
第 7 章 舒适度验算	342
7.1 大悬挑楼盖舒适度验算	342
7.2 大跨连廊舒适度验算	364

第 8 章 相关计算说明	381
8.1 单元节点力与截面切割	381
8.2 壳单元类型说明	388
8.3 壳单元配筋计算	391
附录 A SAP2000 交换文件说明	396
A.1 SAP2000 输入输出方式	396
A.2 S2k 文件格式说明	397
参考文献	417
后记	418

第 1 章 概论

1.1 有限元法基本介绍

有限元法是当下最流行的高效能数值计算方法，通过将连续体离散化，对有限个单元作分片插值以求解具体问题，方法广泛地应用于力学、物理学等各个领域。

从 20 世纪 40 年代开始，不同的数学家、物理学家和工程师开始逐步涉足有限单元的概念，直到 1960 年 Clough 第一次提出了“有限单元法”的名称，使人们开始认识了有限单元法的功效，几十年来，有限单元法无论在理论深度和应用范围上都得到了迅速、深远地发展^[1]。

作为有限元法最重要的应用领域之一，结构工程中构件类型多、空间关系复杂、荷载类型多、材料非线性强，适合通过有限元手段进行复杂分析，一个典型的结构工程有限元求解主要包括如图 1-1 所示的内容。



图 1-1 有限元法分析的主要过程

以下通过一个简单的例子来示范这个过程：

图 1-2 中是一个变截面杆，一端嵌固，一端承受向外的拉力，忽略自重，只考虑一维的轴向变形。

第一步，对结构进行单元划分，对杆件和节点进行编号，如图 1-3 所示。

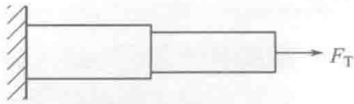


图 1-2 有限元法分析过程的示例

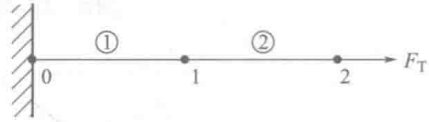


图 1-3 有限元单元划分的分析模型

第二步，形成刚度矩阵（以 Δx_i 表示 i 节点的位移，以 f_{ij} 表示 i 单元在 j 节点的内力）：

$$f_{10} = k_1(\Delta x_0 - \Delta x_1)$$

$$f_{11} = k_1(\Delta x_1 - \Delta x_0)$$

$$f_{21} = k_2(\Delta x_1 - \Delta x_2)$$

$$f_{22} = k_2(\Delta x_2 - \Delta x_1)$$

第三步，平衡节点力，组装矩阵（以 N 表示支座反力）：

$$\sum f_{i0} = N, \quad \sum f_{i1} = 0, \quad \sum f_{i2} = F_T, \quad \text{即:}$$

$$\sum f_{i1} = f_{11} + f_{21} = k_1(\Delta x_1 - \Delta x_0) + k_2(\Delta x_1 - \Delta x_2) = 0$$

$$\sum f_{i2} = k_2(\Delta x_2 - \Delta x_1) = F_T$$

第四步，处理约束条件：

$$\begin{cases} k_1(\Delta x_1 - \Delta x_0) + k_2(\Delta x_1 - \Delta x_2) = 0 \\ k_2(\Delta x_2 - \Delta x_1) = F_T \\ \Delta x_0 = 0 \end{cases}$$

第五步，求解方程得到节点位移：

$$\begin{cases} \Delta x_1 = \frac{F_T}{k_1} \\ \Delta x_2 = \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right)F_T \end{cases}$$

第六步，得到单元节点力和支座反力：

$$f_{11} = k_1(\Delta x_1 - \Delta x_0) = k_1\left(\frac{F_T}{k_1} - 0\right) = F_T$$

$$f_{21} = k_2(\Delta x_1 - \Delta x_2) = k_2\left(\frac{F_T}{k_1} - \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}\right)F_T\right) = -F_T$$

$$N = f_{10} = k_1(\Delta x_0 - \Delta x_1) = k_1\left(0 - \frac{F_T}{k_1}\right) = -F_T$$

可以看到，通过单元划分后，复杂的力学求解过程，转化为规律性极强的矩阵求解，这个过程计算量大，但是算法相对固定，非常适合使用计算机程序，目前各国都编制了众多通用或者专用的有限元分析程序。这些程序应用广泛，计算结果也经过了大量工程的验证，是目前最主要的复杂结构分析手段。

1.2 SAP2000 基本介绍

SAP2000 是由美国 Computer and Structures Inc. (CSI) 公司开发研制的通用结构分析与设计软件, 可以对建筑结构、工业建筑、桥梁、管道、大坝等不同体系类型的结构进行分析和设计。该程序诞生于 1969 年, 美国加州大学 Berkeley 分校的 Wilson 教授原创性地开发了静力与动力分析的 SAP (Structural Analysis Program) 程序, 随后, 经过多次更新, 逐步由 SAP5、SAP80、SAP90 发展到目前最新的 SAP2000 版本^[2]。

SAP2000 采用基于对象的非线性有限元技术, 成为集成化的结构工程软件, 可以方便地模拟: 顺序施工、Pushover 分析、混凝土徐变与收缩、冲击分析、多基激励、基础隔震、大位移分析、屈曲分析、频域分析等各类结构问题。更为难得的是 SAP2000 集合了包含中国规范在内的大多数国家和地区的结构设计规范, 涵盖了结构材料、荷载导算、截面复核、配筋计算等各种内容。最新版的 SAP2000 包含的中国规范有《建筑结构荷载规范》《混凝土结构设计规范》《建筑抗震设计规范》和《钢结构设计规范》等。

SAP2000 界面主要划分为下拉菜单、快捷工具条、显示窗口和状态栏四个部分 (图 1-4)。其中下拉菜单集中了 SAP2000 的全部命令以及帮助文档, 快捷工具条通过分组的方式提供了不同的常用命令的快捷按钮, 显示窗口是程序的具体执行部位, 可以设置不同的视角和多窗口组合, 状态栏提供了当前鼠标位置、选择情况等与窗口操作有关的基本信息, 以及当前物理单位体系切换的方式。

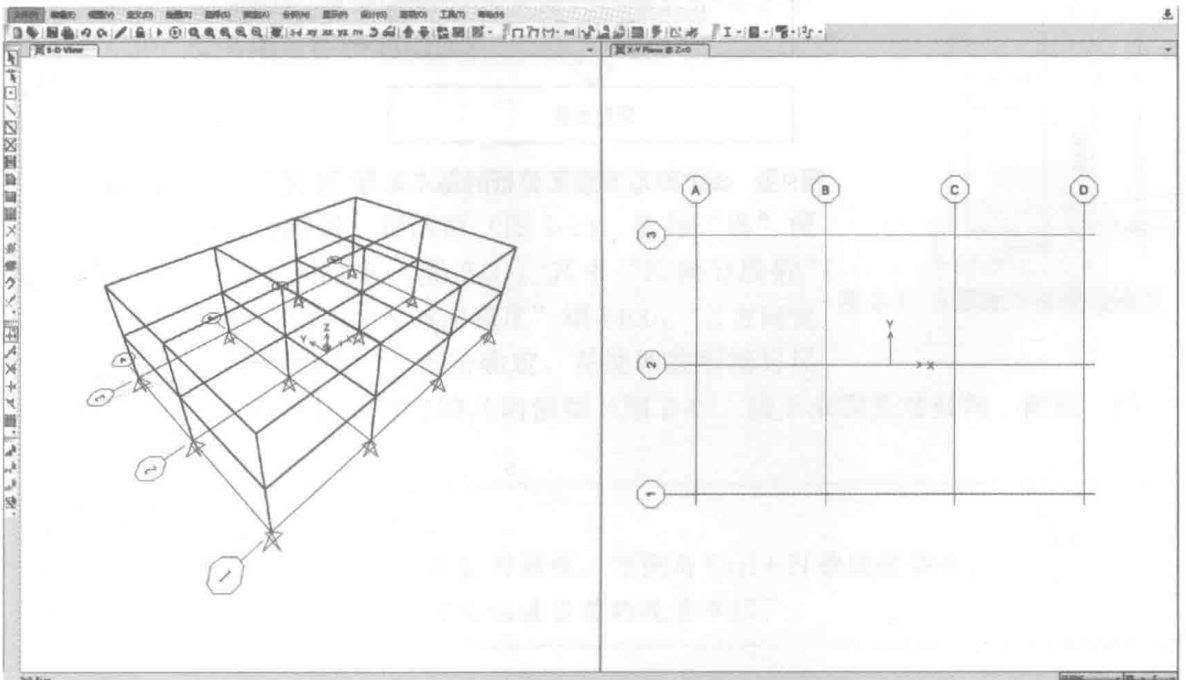


图 1-4 SAP2000 的典型操作界面

一个最基本的 SAP2000 有限元分析过程包括的内容如图 1-5 所示，其余各类复杂计算均是在基本流程之上附加其他的建模、计算或结果模块而成。

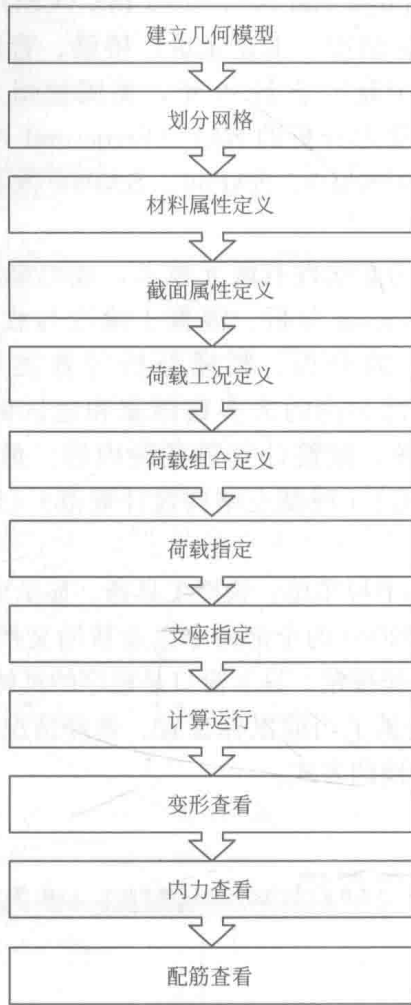


图 1-5 SAP2000 有限元分析的基本过程

第2章 地下室侧墙

地下室侧墙设计是结构设计中常见的内容，在日常设计中往往简化为连续梁，或者四边支撑板来考虑，这种计算通过较为简单的分析工具或者静力手册就可以实现。但是由于建筑功能、设备要求等影响，侧墙与主体结构的关系不会一成不变，常常出现楼板开洞、坡道支撑等复杂的荷载和约束条件，普通的简化分析难以适应，这时采用有限元软件对实际情况建模分析就非常必要了。

2.1 简化地下室侧墙

2.1.1 问题说明

本节以一个3层地下室的侧墙模型为例（图2-1），主要用以示范SAP2000软件的主要操作流程和地下室侧墙计算的边界条件的基本规则。

该模型地下3层，各层层高均为4m，侧墙厚度400mm，各楼层处均有楼板，侧墙底部为条形基础，室外标高即墙顶标高为 ± 0.000 ，仅考虑土压力作用。模型忽略扶壁柱等竖向支撑构件，侧墙简化为竖向受力的单向连续板。混凝土强度等级C30，受力钢筋等级HRB400。

2.1.2 几何建模

本例采用自带模板建模，以便更快熟悉流程。运行SAP2000，出现【新模型】对话框（图2-2），选择“墙”模板，进入【剪力墙】对话框（图2-3）。其中“X向分段数”填3，“Z向分段数”填3，“X方向宽度”填8400，“Z方向宽度”填4000，其余均为默认，点击确定，系统即按所填写尺寸自动生成一个底部嵌固的剪力墙几何模型（图2-4）。接下来需要对材料、截面、约束、荷载等信息进行输入。

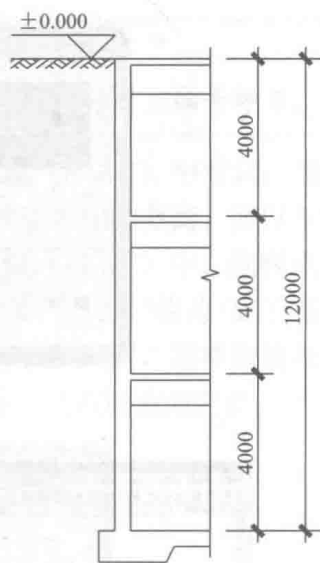


图2-1 3层地下室侧墙模型

Tips:

- 若进入系统后未出现【新模型】对话框，可使用Ctrl+N快捷键调出。
- 输入长度等几何尺寸时，一定要注意当前的度量单位。

2.1.3 材料及截面定义

选择下拉菜单：定义/材料。在【定义材料】对话框（图2-5）中看到，当前的材料有

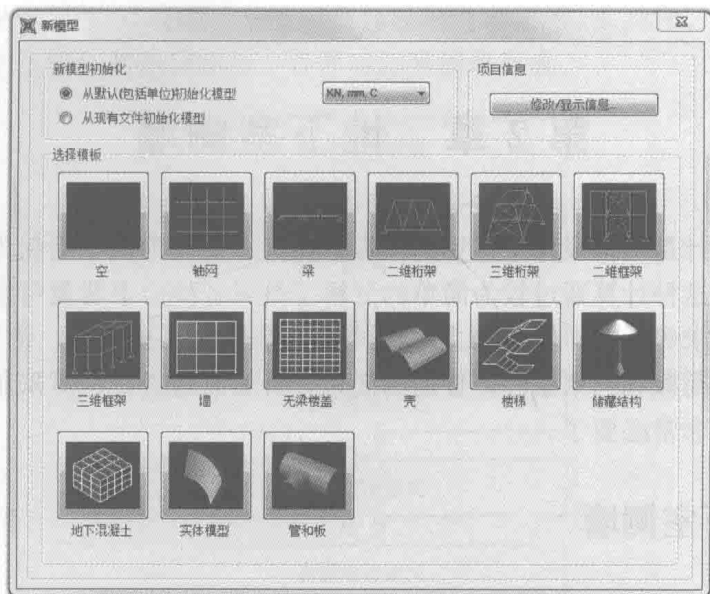


图 2-2 【新模型】对话框

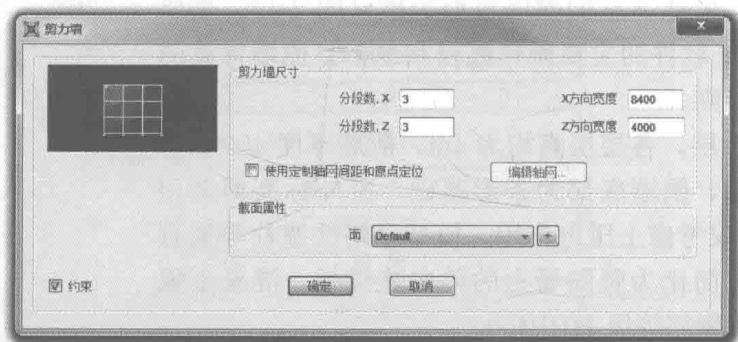


图 2-3 【剪力墙】对话框

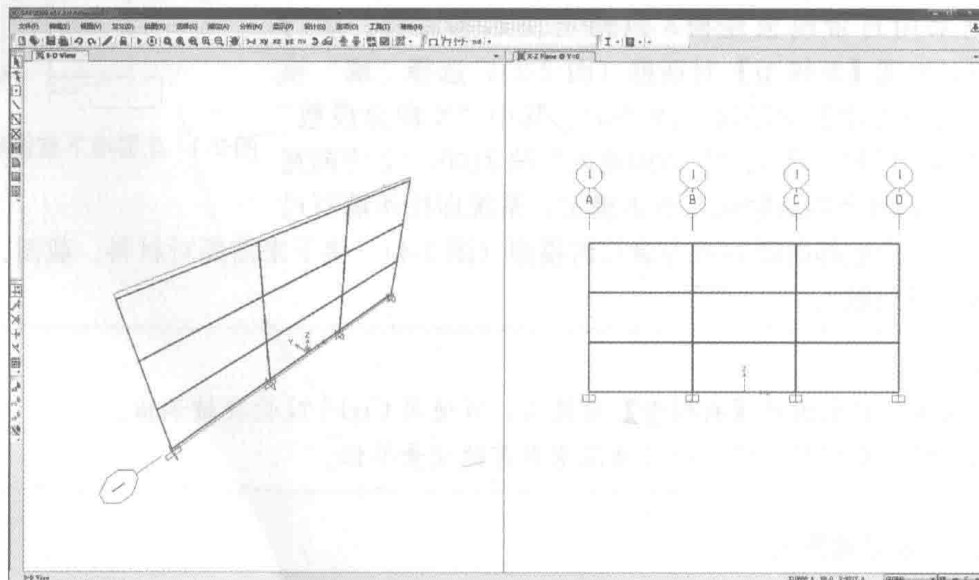


图 2-4 自动生成的侧墙模型

C30 混凝土和 Q345 钢材，需要添加 HRB400 级钢筋。点击“添加新材料”，在【添加材料属性】对话框中（图 2-6），依次选择“China”“Rebar”“GB”“GB50010 HRB400”，点击“确定”，返回【定义材料】对话框，即可看到，新增“HRB400”材料，点击“确定”完成添加。

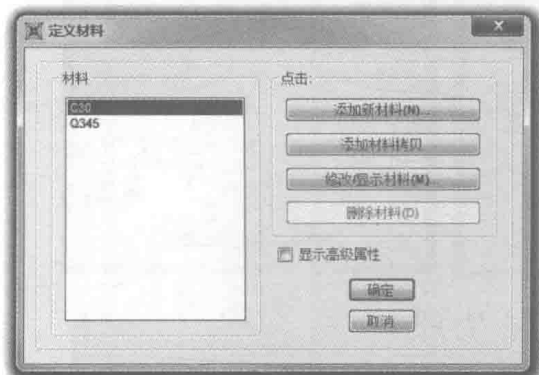


图 2-5 【定义材料】对话框



图 2-6 【添加材料属性】对话框

Tips:

➡ SAP 中已经集成了绝大多数结构材料的定义，可直接根据规范选择对应编号即可。

选择下拉菜单：定义/截面属性/面截面。在【面截面】对话框（图 2-7）中看到，当前的面截面为“ASEC1”，这是在自动生成侧墙模型时，系统默认的壳单元的截面，所以不需要再新加截面，点击“修改/显示截面”，在【壳截面数据】对话框（图 2-8）中，选择壳类型为“壳-厚壳”，修改“膜厚度”为 400，修改“弯曲厚度”为 400，点击“修改/显示壳设计参数”，在【混凝土壳设计参数】对话框中，选择钢筋材料为“HRB400”，选择钢筋布局为“两层”，所有的覆盖到钢质心的距离都填“35”，依次点击确定，完成面截面定义。



图 2-7 【面截面】对话框

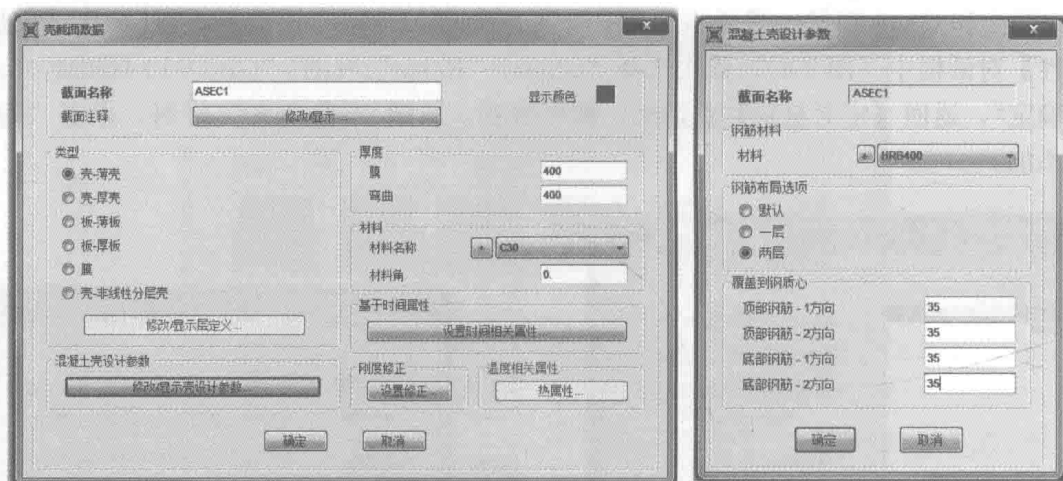


图 2-8 【壳截面数据】对话框

Tips:

► SAP2000 中提供了六种不同的面单元类型（或者说属性），根据是否考虑剪切变形和面内外刚度的计入不同，区分如下：

	考虑剪切变形	不考虑剪切变形
面内刚度+面外刚度	壳-厚壳	壳-薄壳
面外刚度	板-厚板	板-薄板
面内刚度	膜	

简单地讲，板、膜单元是壳单元的退化，薄壳单元是厚壳单元的退化。所以，一般的地下室侧墙选择厚壳即可。

► 关于 SAP2000 壳单元更详细的使用示范可参看第 8 章。

► 壳的厚度分为膜厚度和弯曲厚度，其中膜厚度用以定义壳的自重和面内刚度，弯曲厚度用以定义面外弯曲和横向剪切刚度。在地下室侧墙中，这两者相同。

► 混凝土壳设计参数用以提供 SAP2000 进行壳的配筋设计，其中覆盖（表面）到钢筋质心的距离可近似理解为混凝土规范中正截面受弯公式中的 a_s 。

2.1.4 单元划分

在“3-D View”视图中，框选所有壳单元，选择下拉菜单：编辑/编辑面/分割面。在【划分选择面】对话框（图 2-9）中，选择“按最大尺寸分割面”，两个尺寸均填 1000（注意应为 mm 单位），点击“确定”，完成网格划分，在视图中可看到划分效果（图 2-10）。

Tips:

► SAP 中的框选方法与 AutoCAD 类似，分左框选与右框选。在已经选择的选择对象中直接点击不需要的对象，即可从当前选择集中去掉，这一点与 AutoCAD 需要同时按住 Shift 键不同。更多的选择方法可尝试下拉菜单的“选择”项。

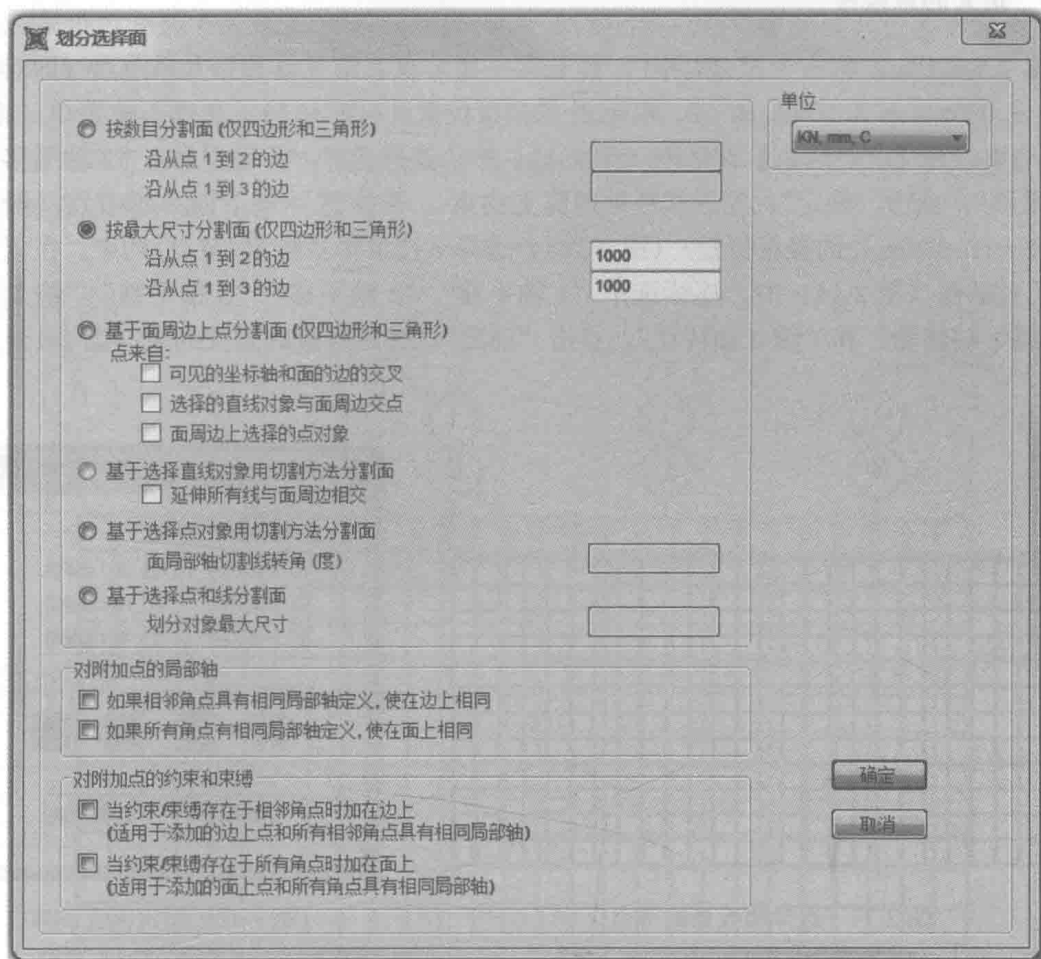


图 2-9 【划分选择面】对话框

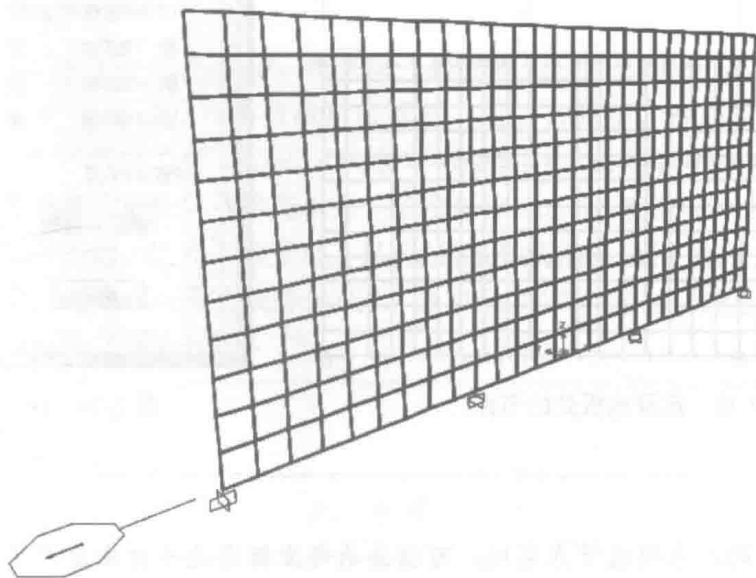


图 2-10 按 1m 间距划分网格后的模型

2.1.5 定义约束条件

在“X-Z Plane @ Y=0”视图中，框选第一排节点、第五排和第九排节点（即对应标高为±0.000m、-4.000m和-8.000m处的楼板位置）（图 2-11），选择下拉菜单：指定/节点/约束，在【节点约束】对话框（图 2-12）中，连续选中“1轴平移”“2轴平移”和“3轴平移”，点击“确定”，完成楼板处的简支约束。再次选择最下面一排节点（即对应标高为-12.000m处的楼板位置）（图 2-13），选择下拉菜单：指定/节点/约束，在【节点约束】对话框（图 2-14）中，连续选中“1轴平移”“2轴平移”“3轴平移”“绕1轴转动”“绕2轴转动”和“绕3轴转动”，点击“确定”，完成底板的固支约束（图 2-15）。

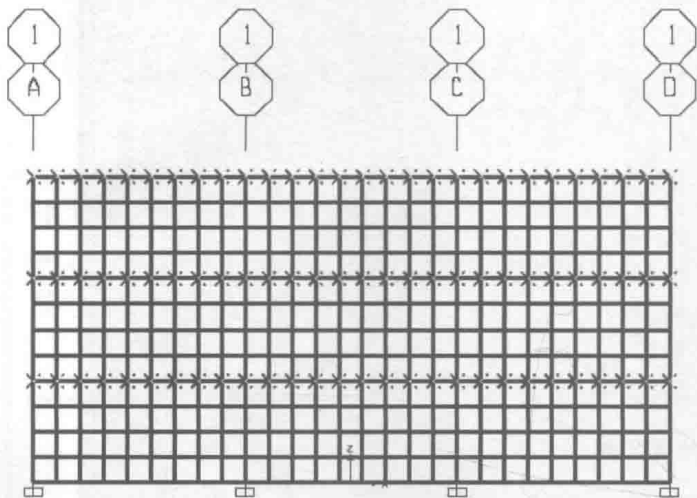


图 2-11 选择楼板处的节点



图 2-12 指定简支约束

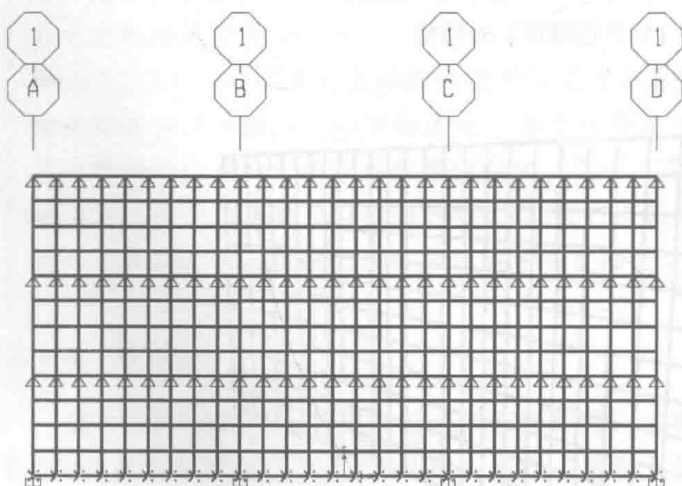


图 2-13 选择底板处的节点



图 2-14 指定固支约束

 Tips:

► SAP2000 中的约束通过节点实现，可以按局部坐标定义 6 自由度的不同组合。系统提供了固支、简支、滑动和自由四种快速设置方式，可直接点取。