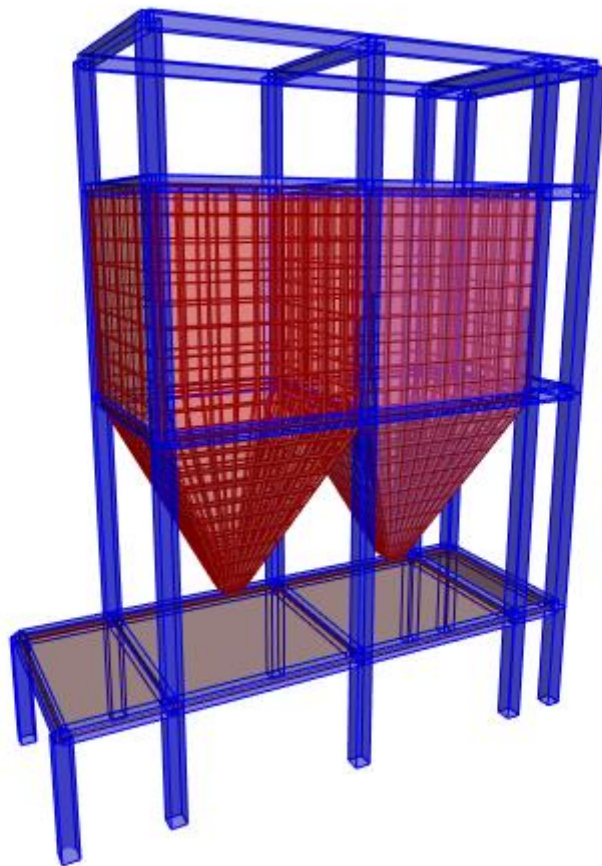


SAP2000 案例教程

筒仓结构



北京筑信达工程咨询有限公司

2020年7月

版 权

SAP2000 软件及全部相关文档均为受专利法和版权法保护的产品，全球范围内的所有权归美国 CSI（Computers and Structures Inc.）公司所有，中文版版权同属于北京筑信达工程咨询有限公司。如未预先取得 CSI 或筑信达公司的书面许可，任何形式的软件应用及文档传播一律禁止！

更多信息及本文档副本可通过以下途径获得：

北京筑信达工程咨询有限公司

北京市石景山区古盛路 36 号院 1 号楼泰然大厦 408 100043

电话：86-10-68924600

传真：86-10-68924600-8

电子邮件：support@cisec.cn

在线支持：support.cisec.cn

网址：www.cisec.cn

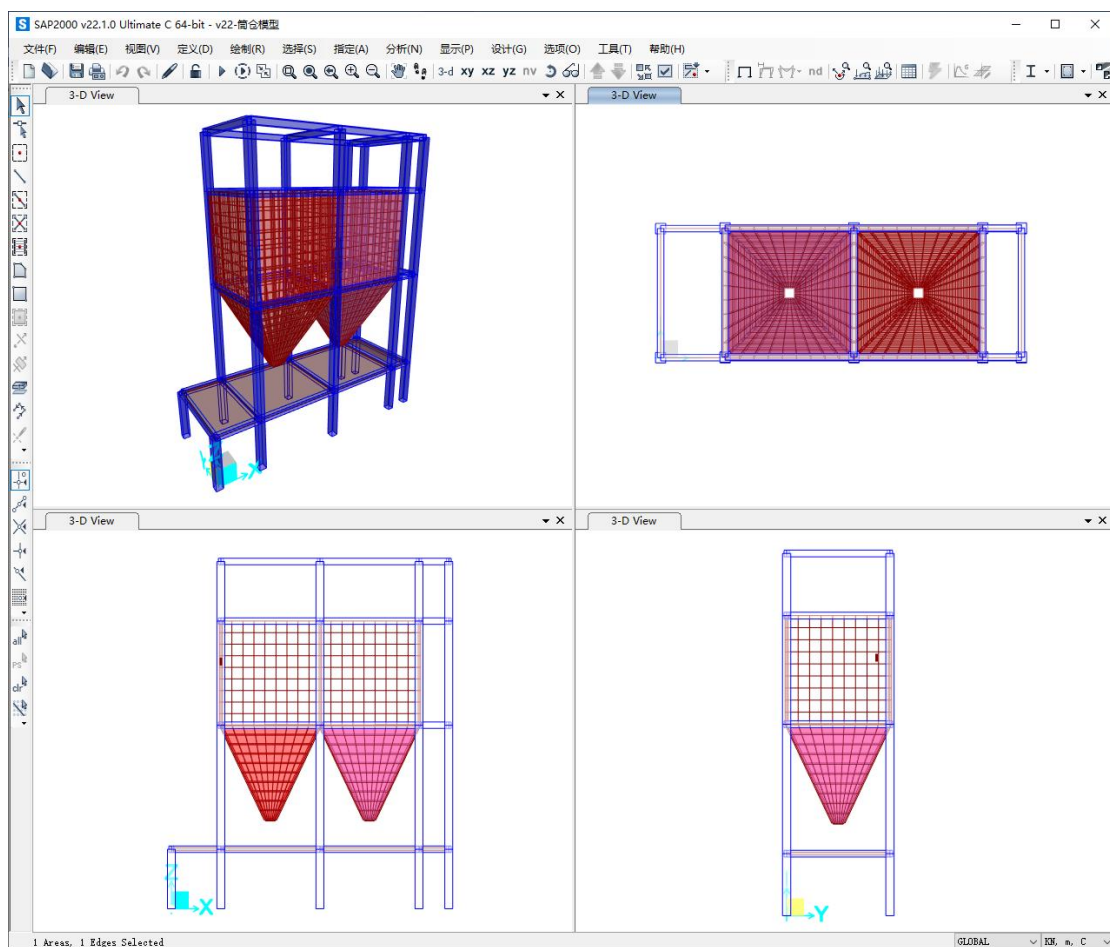
目录

1 模型概况	2
2 几何建模	4
2.1 绘制轴网线	4
2.2 定义材料与截面	4
2.3 绘制框架对象	5
2.4 绘制筒仓	5
3 属性指定	7
3.1 修改面局部轴	7
3.2 面对象的分割	7
3.3 指定支座条件	7
4 施加荷载	8
4.1 恒载	8
4.2 风荷载	8
4.3 筒仓荷载	10
4.4 筒仓工况	11
4.5 地震荷载	12
5 结果查看	15
5.1 振型和周期	15
5.2 刚度校核	16
5.3 强度校核	16
5.4 支座反力	17

筒仓结构

本教程主要以书面文字的形式配合线上操作视频，帮助读者在 SAP2000 中为筒仓结构创建几何模型、指定对象属性、施加结构荷载、运行结构分析以及查看计算结果。在具体操作过程中，读者应熟悉并掌握 SAP2000 软件的诸多功能，如：几何建模技巧、风荷载施加、多质量源定义、筑信达工具箱等。

根据本教程及配套视频完成操作，即可创建如下所示的计算模型。



筒仓结构

1 模型概况

如图 1.1 所示，该筒仓主体结构为钢筋混凝土框架，框架结构总高 35m，内部设有两个方形的混凝土筒仓。筒仓侧壁与框架结构的立柱通过整体现浇的方式施工。该筒仓结构共设有四层框架，第一层框架标高为 6m，设有工作平台，主要布置一些设备。第二层框架标高 18.5m，为筒仓漏斗壁与垂直仓壁的交接位置。第三层框架标高 29m，与筒仓顶部相连接。第四层框架标高 35m。

筒仓框架结构共设有 10 根立柱，分两排布置，排间距为 10m。其中，左侧两根柱仅有 6m 高，右侧八根均为通长 35m。每对立柱分别以 5m、10m、10m、3m 的间距布置，如图 1.1 所示。

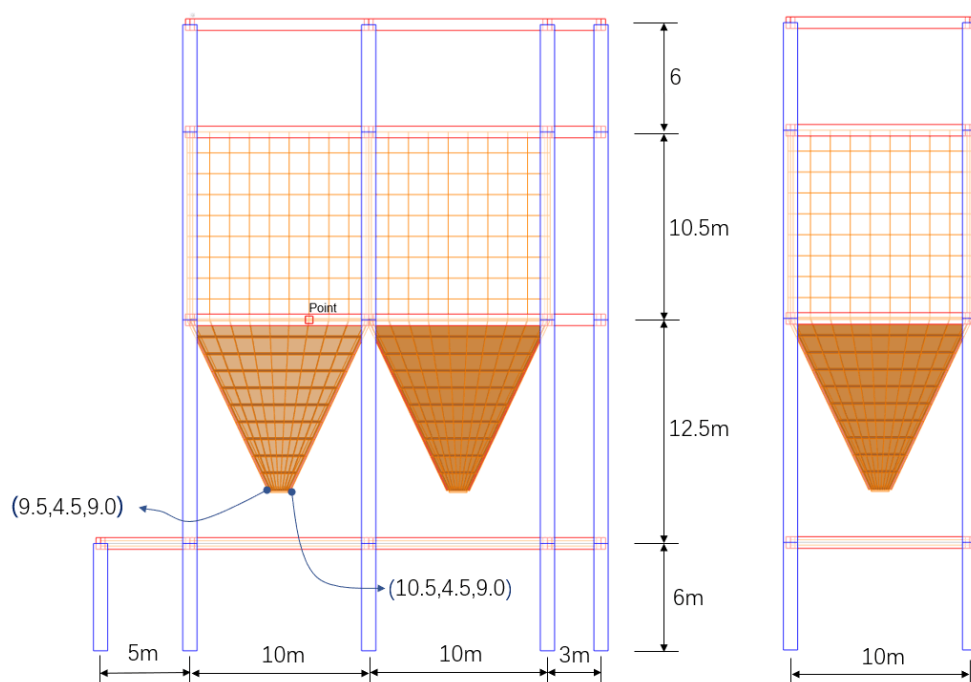


图 1.1 结构布局示意图

该筒仓结构为钢筋混凝土结构，主要使用的材料包括 C30 混凝土和 HRB335、HPB300 钢筋。材料主要属性如表 1.1 所示。截面属性包括 B650X500 混凝土梁、C800X800 混凝土柱以及 120mm 厚的混凝土板，主要数据如表 1.2 所示。

表 1.1 材料属性

材料属性	容重 γ (kN/m ³)	弹性模量 E (GPa)	泊松比 μ	线膨胀系数 α
C30	25.5	20	0.2	1.0×10^{-5}
HRB335	78.5	200	0.3	1.17×10^{-5}
HPB300	78.5	210	0.3	1.17×10^{-5}

表 1.2 截面属性

截面属性	截面类型	截面形状	高度/宽度/厚度 (mm)	材料属性
B650X500	框架	矩形	650X500	C30
C800X800	框架	方形	800X800	C30
120mm 厚混凝土板	薄壳	--	120	C30

该筒仓结构的立柱底端与基础采用混凝土现浇方式施工,因此立柱底端设置为固定支座。筒仓结构主要设有两个筒仓,因此需要分别考虑两个筒仓在满仓及空仓不同状态下的结构受力状态,包括常规荷载和地震作用。该模型需要考虑的荷载条件包括:结构自重,贮料压力荷载,风荷载和地震作用。

2 几何建模

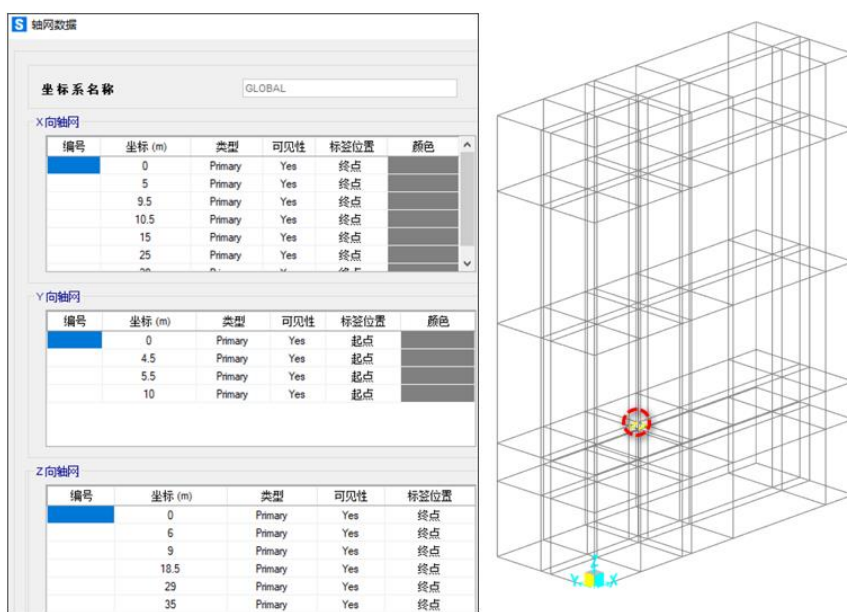
2.1 绘制轴网线

SAP2000 中的轴网线是辅助几何建模的重要工具，合理的轴网布置有助于快速准确地绘制几何模型。根据该模型的空间几何特点，建议先在 EXCEL 中整理轴网信息，然后复制-粘贴至 SAP2000。整理好的轴网信息如表 2.1 所示。

表 2.1 轴网信息（单位 m）

X 向轴网信息				Y 向轴网信息				Z 向轴网信息			
坐标	类型	可见	标签位	坐	类型	可见	标签位	坐标	类型	可见	标签位
0	Primary	Yes	终点	0	Primary	Yes	起点	0	Primary	Yes	终点
5	Primary	Yes	终点	4.5	Primary	Yes	起点	6	Primary	Yes	终点
9.5	Primary	Yes	终点	5.5	Primary	Yes	起点	9	Primary	Yes	终点
10.5	Primary	Yes	终点	10	Primary	Yes	起点	18.5	Primary	Yes	终点
15	Primary	Yes	终点					29	Primary	Yes	终点
25	Primary	Yes	终点					35	Primary	Yes	终点
28	Primary	Yes	终点								

需要注意的是，这里为了便于绘制筒仓漏斗，在标高 9m 位置处多设置了一层轴网用于确定筒仓漏斗底部的四个角点，如图 2.1 所示。



2.1 快速绘制轴网线

2.2 定义材料与截面

根据表 1.1 和表 1.2 中的数据定义三种材料属性：混凝土 C30、钢筋 HRB335 和 HPB300 和三种截面属性：B650X500、C800X800、120mm 厚混凝土板。具体操作见本教程配套视频，

此处不再赘述。

2.3 绘制框架对象

在 SAP2000 中建立轴网后，可依据轴网来快速建立模型。注意，快速绘制命令仅适用于平面视图，并且所绘制的构件会在轴网交点处自动断开。

1. 选择 $XZ@Y=0$ 平面，通过快速绘制命令，框选构件对应的轴网，程序将自动绘制相应的构件，完成该平面内梁柱的绘制。
2. 为了便于绘制筒仓漏斗而建立的轴网会导致在绘制框架对象时，框架在某些轴网交点处断开。用户可通过“合并框架”命令将无需打断的框架进行合并。
3. 绘制完一侧框架结构后，将其沿 Y 向复制 10m，形成另一侧的框架结构。
4. 两侧框架之间的横梁可通过绘制框架命令完成建模。

绘制完成后的框架结构如图 2.2 所示：



图 2.2 绘制平面框架

2.4 绘制筒仓

筒仓同样通过轴网来建立，为了保证筒仓与框架的正确连接，建议先调整视图界限。然后依据轴网确定筒仓壁的各个顶点，完成一侧筒仓的绘制，然后复制形成另一侧筒仓。

1. 点击【视图>设置视图界限】命令，在打开的【设置视图界限】窗口中指定坐标范围，输入 z 轴最小值和最大值分别为 9m 和 18.5m。
2. 选择【绘制多边形面】命令，按顺时针方向依次点击左侧漏斗壁四个顶点，完成一个漏斗壁的绘制。按相同的方法依次绘制左侧漏斗的其余侧壁。
3. 将视图界限恢复至显示所有结构，在【设置视图界限】窗口中点击“恢复默认设置”。

4. 通过【绘制多边形面】命令完成左侧筒仓壁的绘制。
5. 左侧筒仓整个绘制完毕后，通过复制命令将其沿 x 方向复制 10m，形成右侧筒仓。
6. 最后在 6m 平台位置通过【绘制多边形面】命令绘制楼板。

整个模型绘制完成后如图 2.3 所示：

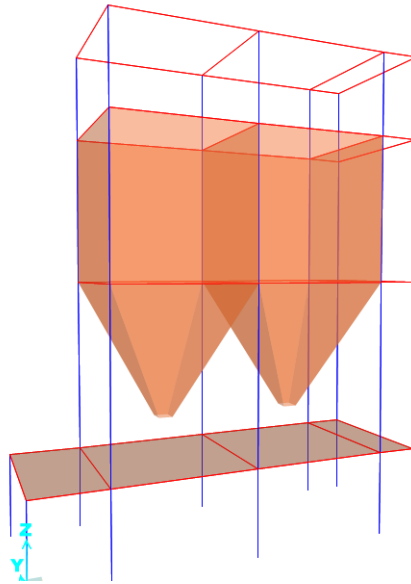


图 2.3 绘制完成后的几何模型

3 属性指定

3.1 修改面局部轴

由于后续操作需要以表面压力的形式施加贮料压力荷载,因此需要统一面对象的外法线方向,以免造成加载方向错误。打开壳单元局部轴,将左侧筒仓仓壁的局部+3 轴均设置为指向筒仓外,右侧筒仓仓壁的局部+3 轴全部设置为指向筒仓内,如图 3.1 所示。

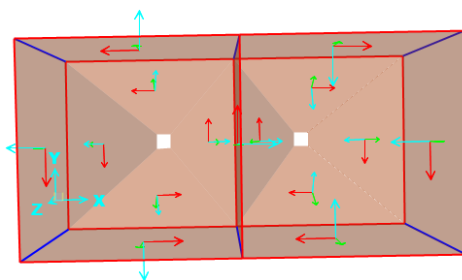


图 3.1 筒仓仓壁的局部轴

3.2 面对象的分割

为便于使用筑信达工具箱添加贮料压力荷载,用户需要对筒仓仓壁进行几何分割。选择所有筒仓仓壁,点击【编辑>编辑面>分割面】命令,在弹出的【分割面】窗口中选择最大的分割尺寸并保持默认值。筒仓仓壁分割完成后如图 3.2 所示。

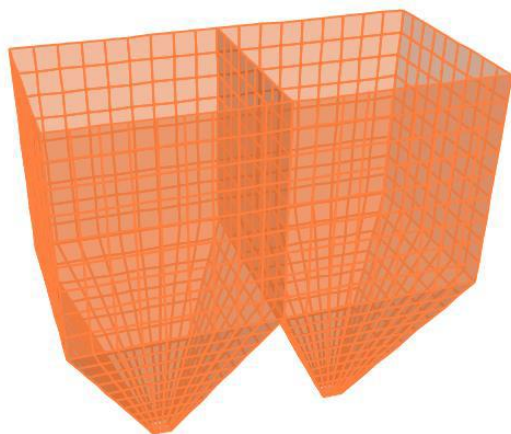


图 3.2 筒仓仓壁的几何分割



图 3.3 指定支座条件

3.3 指定支座条件

选择全部立柱的底部节点,指定固定支座,如图 3.3 所示。

4 施加荷载

根据第 1 章“模型概况”中给定的结构荷载条件，用户需要定义的荷载类型包括：结构自重、贮料压力荷载、风荷载和地震作用。为了便于施加及组合筒仓荷载，这里将左侧筒仓和右侧筒仓分别编号为 1 和 2，分别施加侧壁及漏斗壁的贮料压力荷载，因此会将储料荷载拆分成四个。

风荷载和地震作用应分别考虑 X 方向和 Y 方向，本模型较为规整，风荷载采用准刚性隔板来施加，可以直接由规范计算。地震作用采用反应谱法计算，因此需要在荷载工况中直接定义地震的荷载工况，荷载模式的定义如图 4.1 所示。

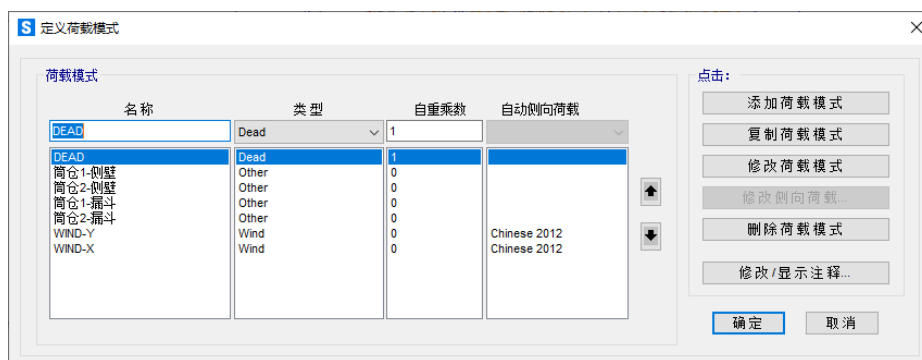


图 4.1 定义荷载模式

4.1 恒载

在 6m 平台处需要考虑 6kN/m^2 的设备荷载，由于该荷载为恒载，可以直接指定到 DEAD 荷载模式中。这里通过均布面荷载施加。选中 6m 平台处的所有面对象，点击【指定>面荷载>均布面荷载】命令，在弹出的【荷载定义】窗口中选择荷载方向为 Gravity，荷载大小为 6kN/m^2 。完成该操作后的面荷载如图 4.2 所示。

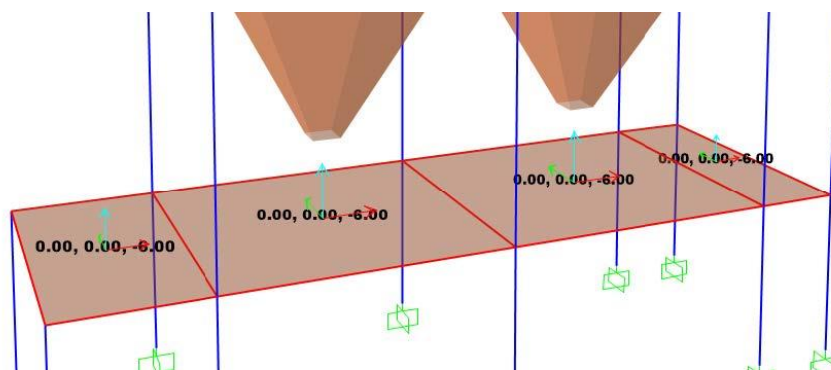


图 4.2 恒载示意图

4.2 风荷载

该模型通过“准刚性隔板”来施加风荷载。在荷载模式中分别定义名称为 WIND-X 和 WIND-Y，荷载类型为 Wind，自动侧向荷载中选择规范为“Chinese 2012”。

1. 设定风荷载参数, 点击荷载模式窗口右侧的【修改侧向荷载】按钮, 打开【中国 2012-自动风荷载】窗口, 将作用对象设为 (准) 刚性隔板, 方向角度设为 0 度 (对应整体坐标系 x 方向), 结构宽度输入 10, 体型系数输入 1.3, 基本风压设为 0.75, 具体如图 4.3 所示。



图 4.3 X 向风荷载定义参数

2. 按相同方式设置 y 方的风荷载 WIND-Y 的参数, 方向角设为 90° (对应整体坐标轴 y 方向), 其余参数与 x 方向风荷载相同。
3. 定义准刚性隔板。在【Diaphragm 约束】窗口中, 勾选隔板约束中的准刚性选项, 同时勾选【根据标高 z 自动指定多个隔板约束】。依次选中 6m、18.5m、29m、35m 标高处所有节点, 指定隔板约束后, 程序将依据高度分别为生成四个准刚性隔板。



图 4.4 定义准刚性隔板

4.3 筒仓荷载

筒仓荷载即贮料压力荷载。当储料状态不同时，结构受力状态也不同。依据筒仓设计规范，该类筒仓结构需要分别计算满仓和空仓下的受力情况。为满足验算要求，这里对左侧和右侧筒仓分别施加荷载，然后通过荷载工况来考虑空仓和满仓条件。

由于筒仓荷载并非均布荷载，并且需要考虑贮料对仓壁的摩擦力。如果直接采用手动加载，整个过程较为繁琐，这里采用筑信达工具箱中的筒仓荷载工具来施加筒仓荷载。依据定义四个荷载模式，分别对筒仓 1 和筒仓 2 的侧壁及漏斗施加筒仓荷载。

首先指定筒仓 1 的侧壁荷载：

1. 选中筒仓 1 所有侧壁，打开筑信达工具箱，选择【贮料压力荷载】插件，依据规范确定该筒仓类别为【深仓】，加载位置为【仓壁】。
2. 依据所存储材料的参数填写【贮料物理参数】。这里重力密度填入 10kN/m^3 ，摩擦系数填入 0.5，内摩擦角填入 35 度；水平压力修正系数的调整系数依据规范填入 1.1。
3. 筒仓几何参数依据规范进行计算，水力半径为 2.5m，贮料计算高度为 10.5m，贮料顶面标高 Z 为 29m。
4. 注意加载面的局部+3 轴方向，由于筒仓 1 局部+3 轴指向筒仓外侧，因此水平压力施加于壳单元的底部，因此这里选择 Bottom。切向摩擦力方向与壳单元局部-2 轴方向一致，这里选择其加载方向为-2。
5. 选择对应的荷载模式，点击确定即可完成定义，如图 4.5a 所示。

图 4.5a 筒仓 1 仓壁荷载设置参数

图 4.5b 筒仓 1 漏斗壁荷载设置参数

指定筒仓 1 的漏斗壁荷载：

1. 选中筒仓 1 所有漏斗壁，然后打开筑信达工具箱，选择【贮料压力荷载】，依据规范确定该筒仓类别为【深仓】，加载位置为【漏斗壁】。

- 依据所存储材料的参数填写【贮料物理参数】。这里重力密度填入 10kN/m^3 ，摩擦系数填入 0.5 ，内摩擦角填入 35 度；竖向压力修正系数 C_v 输入 1.0 。
 - 筒仓几何参数依据规范进行计算，水力半径为 2.5m ，贮料计算高度为 10.5m ，贮料顶面标高 Z 为 29m ，漏斗壁与水平面夹角为 60.3° 。
 - 注意加载面的局部+3 轴方向，由于筒仓 1 漏斗壁局部+3 轴指向筒仓外侧，因此法向压力作用于壳单元的底部，因此这里选择 **Bottom**。切向压力与壳单元局部-2 轴方向一致，这里选择其加载方向为-2。具体参数设置如图 4.5b 所示。
- 采用相同方式添加筒仓 2 荷载，其仓壁及漏斗壁的荷载参数如图 4.6 所示。



图 4.6a 筒仓 2 仓壁荷载设置参数



图 4.6b 筒仓 2 漏斗壁荷载设置参数

4.4 筒仓工况

为了解结构中两个筒仓分别在满仓和空仓时的受力状态，这里可以设定四个荷载工况来查看。以工况“左右均满仓”为例，

- 为了便于调整不同条件下反应谱工况的质量源，工况类型设为 **static**（静力工况），勾选非线性选项，不考虑几何非线性。
- 在施加荷载中依次添加 **DEAD**、筒仓 1-侧壁、筒仓 1-漏斗、筒仓 2-侧壁、筒仓 2-漏斗荷载，比例系数均为 1 。

具体如设置如图 4.7 所示：

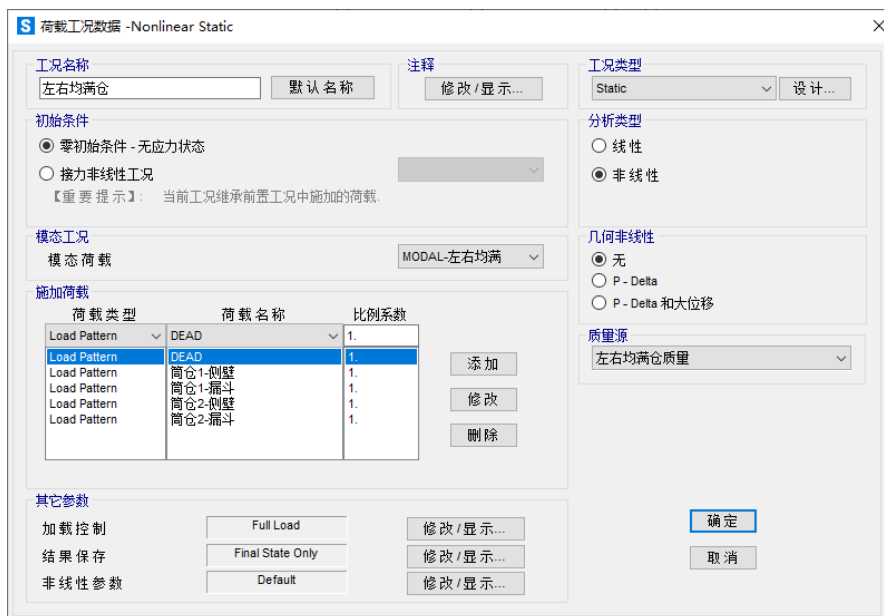


图 4.7 左右均满仓荷载工况设置

筒仓的其他工况设置如表 4.1 所示，此处不再赘述。

表 4.1 筒仓不同工况的设定

工况名称	添加荷载以及系数
左满仓右空仓	$1.0 \times \text{DEAD} + 1.0 \times \text{筒仓 1 侧壁} + 1.0 \times \text{筒仓 1 漏斗}$
左空仓右满仓	$1.0 \times \text{DEAD} + 1.0 \times \text{筒仓 2 侧壁} + 1.0 \times \text{筒仓 2 漏斗}$
左右均空仓	$1.0 \times \text{DEAD}$
左右均满仓	$1.0 \times \text{DEAD} + 1.0 \times \text{筒仓 1 侧壁} + 1.0 \times \text{筒仓 1 漏斗} + 1.0 \times \text{筒仓 2 侧壁} + 1.0 \times \text{筒仓 2 漏斗}$

4.5 地震荷载

该筒仓结构采用反应谱方法进行抗震分析。定义反应谱分析主要的操作有：定义反应谱函数、定义质量源、定义模态工况、定义反应谱工况。需要注意的是，这里考虑筒仓有四种不同的状态：左满仓右空仓、左空仓右满仓、左右均空仓、左右均满仓。在这些状态下，结构的质量分布不同，在地震作用下的响应也不同。因此需要设定多个不同的地震工况，来考虑筒仓在不同状态下的地震响应。

1. 定义反应谱函数。这里依据规范“Chinese 2010”来定义反应谱函数，函数名称修改为“RS-2010”，阻尼比保持默认 0.05，场地特征周期 T_g 调整为 0.45，其余保持默认，具体设置如图 4.8 所示：

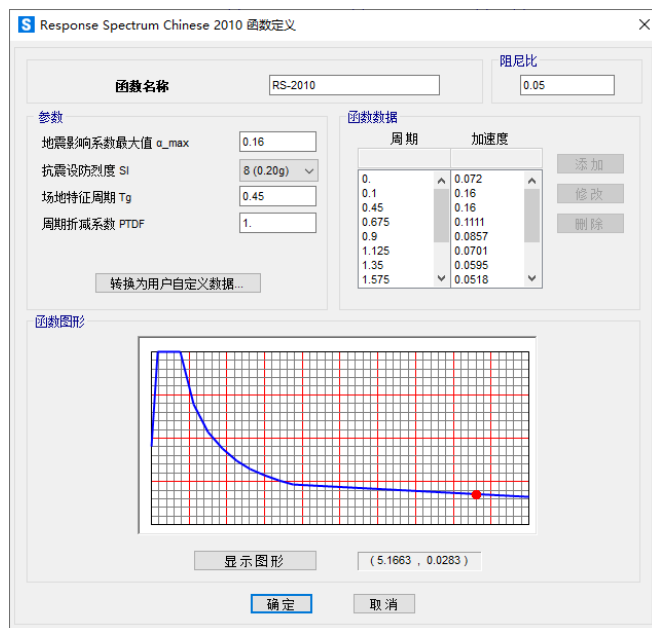


图 4.8 反应谱函数的定义

2. 质量源的定义。在地震作用下，结构的质量分布直接影响结构的响应。为考虑筒仓在不同状态下的地震作用，这里需要定义四个质量源。注意，这里质量源需通过荷载模式来定义，“左右均满仓质量”质量源定义如图 4.9 所示。

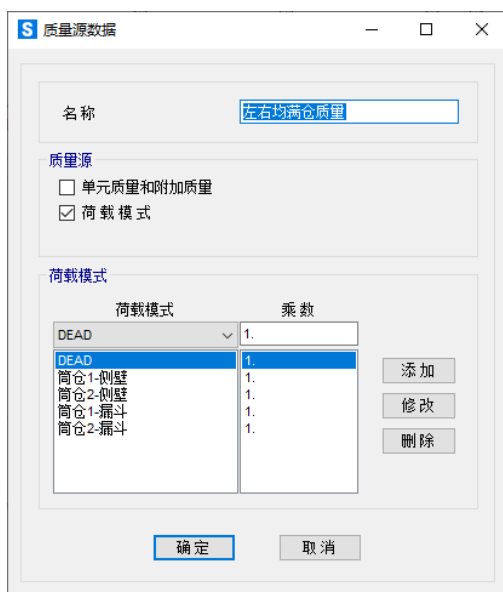


图 4.9 左右均满仓质量源

采用相同的方法还需定义其它三个质量源，其荷载模式及系数表4.2所示：

表 4.2 质量源定义列表

左右均满仓质量	$1.0 \times \text{DEAD} + 1.0 \times \text{筒仓1侧壁} + 1.0 \times \text{筒仓1漏斗} + 1.0 \times \text{筒仓2侧壁} + 1.0 \times \text{筒仓2漏斗}$
左右均空仓质量	$1.0 \times \text{DEAD}$

左满仓右空仓质量	$1.0 \times \text{DEAD} + 1.0 \times \text{筒仓1侧壁} + 1.0 \times \text{筒仓1漏斗}$
左空仓右满仓质量	$1.0 \times \text{DEAD} + 1.0 \times \text{筒仓2侧壁} + 1.0 \times \text{筒仓2漏斗}$

- 调整非线性工况的质量源。SAP2000 中无法直接在模态工况中调整质量源，仅能使模态工况继承非线性工况的终止刚度，以便继承非线性工况的质量源。因此，这里需要通过调整非线性工况的质量源，然后使模态工况继承非线性工况的终止刚度，调整模态工况的质量源。修改上一步定义的四个非线性工况的质量源。如图 4.7 所示，满仓工况对应的为满仓的质量源，其余三个非线性工况的质量源按照该方式一一对应调整。
- 模态工况设置。模态工况所计算的模态将用于反应谱分析中。筒仓有四种不同的受力状态，因此需要定义四种不同的模态工况。这里以左右均满仓状态下模态工况的定义为例，如图 4.10 所示，当选择继承非线性工况“左右均满仓”的终止刚度后，模态的质量源自动切换为“左右均满仓质量”。

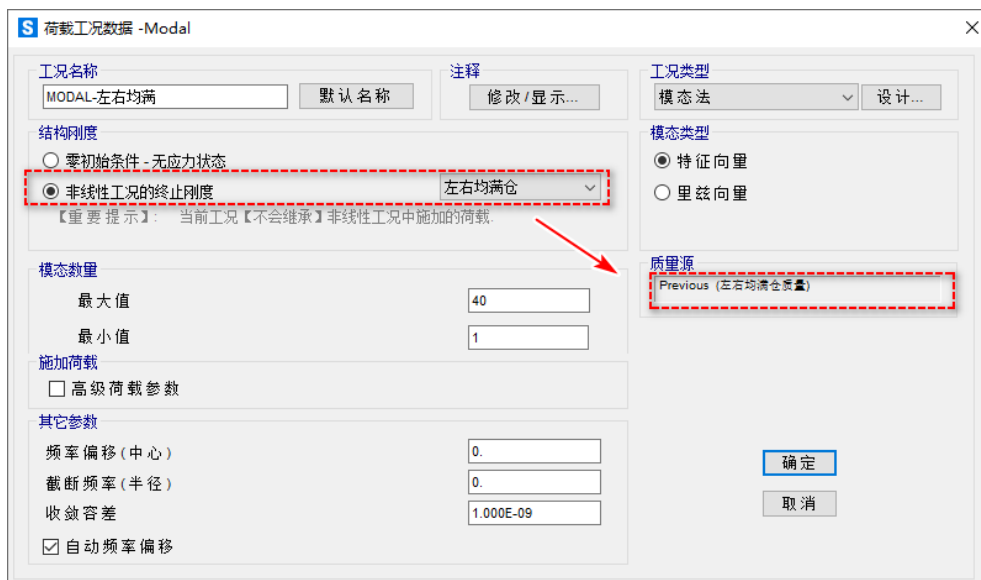


图 4.10 模态工况-左右均满仓

- 反应谱工况的设置。在工况设定中需要手动添加反应谱工况，这里需要定义不同工况条件下 X 及 Y 方向的反应谱工况。以左右均满仓的状态下 X 方向的反应谱工况为例，
 - 将【工况类型】设定为“Response Spectrum”。将模态来源选择为“MODAL-左右均满”，质量源选项会自动变成“左右均满仓质量”。
 - 在【施加荷载】选项框中，添加“U1”方向（对应全局坐标系 x 方向）的加速度荷载，函数选择之前定义的“RS-2010”。比例系数设为 9.8。
 - 模态阻尼保持默认的 0.05，具体设置如图 4.11 所示。

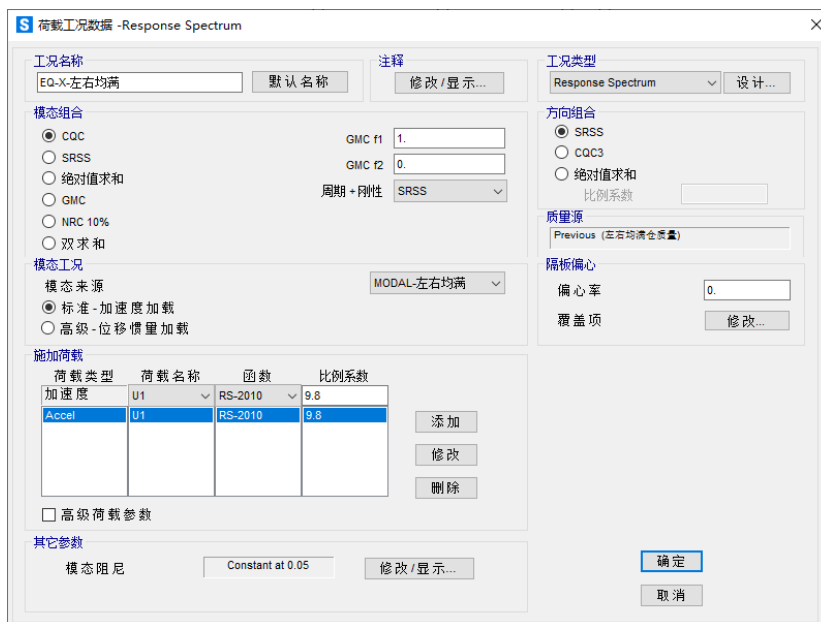


图 4.11 EQ-X 左右满仓

采用相同的方式定义 Y 方向的反应谱工况，与 X 方向工况不同的是将其方向设置为 U2（对应全局坐标系 y 方向），其余参数保持相同即可。其他状态下的反应谱工况定义方式相同，这里不再赘述。

5 结果查看

5.1 振型和周期

点击【显示>变形图】命令显示结构振型图，如图 5.1 所示。

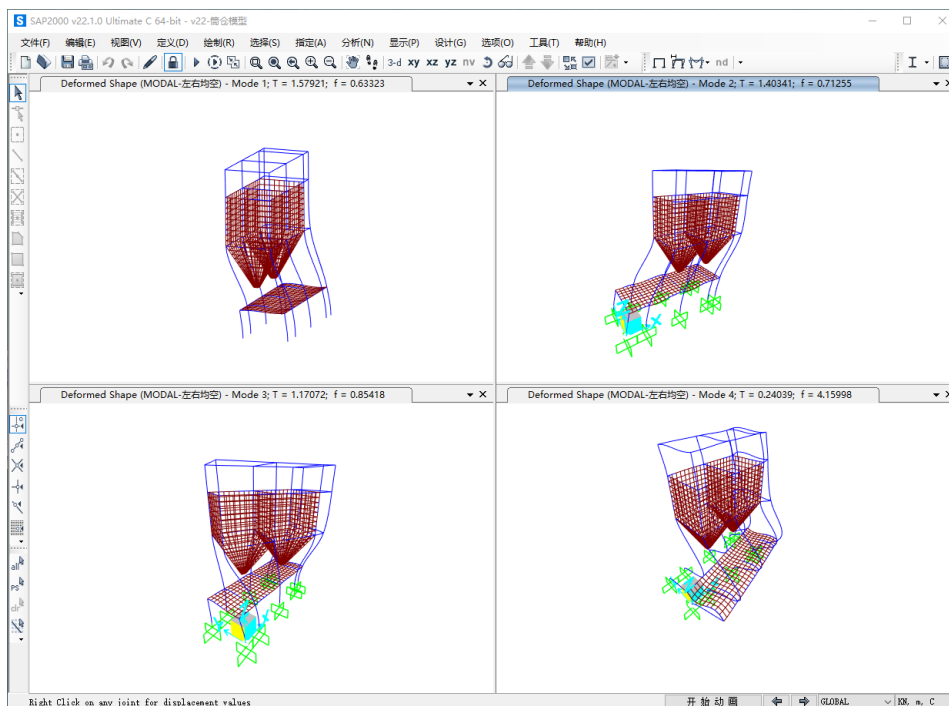


图 5.1 结构振型图

5.2 刚度校核

点击【显示>内力/应力>框架/索/钢束单元】命令，可查看结构在任一工况下的内力，如图 5.2a 所示。在结构内力图中右击任一构件显示隔离体图。构件隔离体图可显示作用于构件的等效荷载和构件内力，也可以显示构件的挠曲线，如图 5.2b 所示。除此之外，读者也可以以数据表格的方式输出节点位移，然后通过排序快速查看和定位最大值。

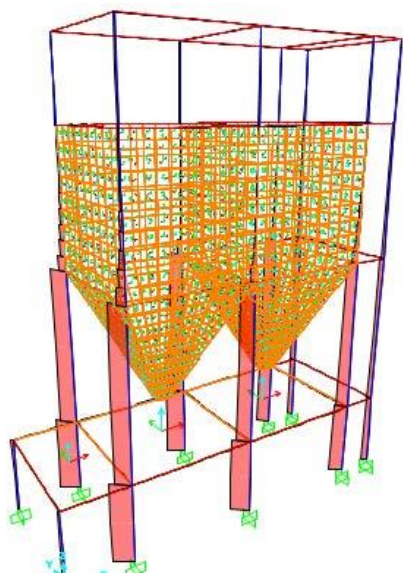


图 5.2a 整体轴力图

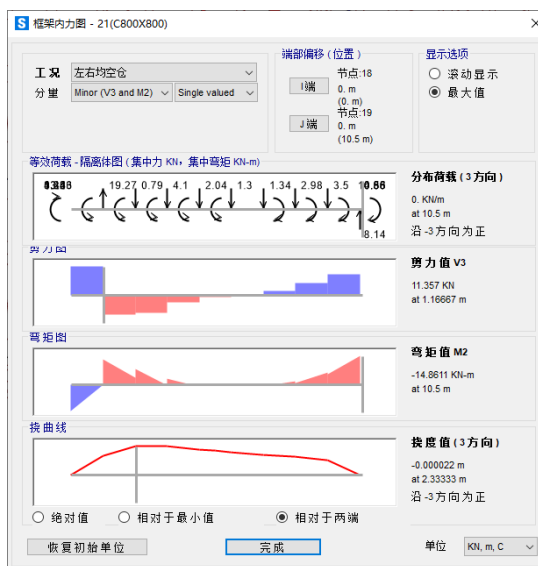


图 5.2b 构件隔离体图

5.3 强度校核

点击【显示>内力/应力>壳】命令，可查看筒仓结构仓壁的内力分布情况。在工况名称中选择“左右均满仓”，分量类型设置为内力，分量设置为“F22”，即可查看仓壁壳单元沿局部 2 轴的膜内力 F22 的分布云图，如图 5.3 所示。

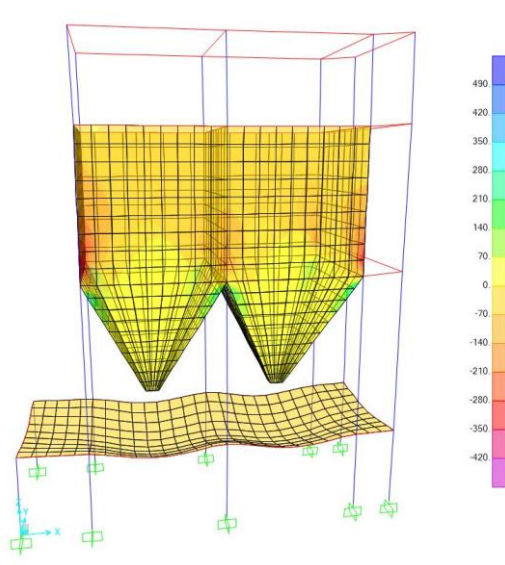


图 5.3 仓壁壳单元的膜内力 F22 云图

5.4 支座反力

点击【显示>内力/应力>节点反力】命令，查看筒仓在各个工况条件下的支座反力，如图 5.4 和 5.5 所示。当然，用户也可采用表格方式查看或输出支座反力和基底反力。

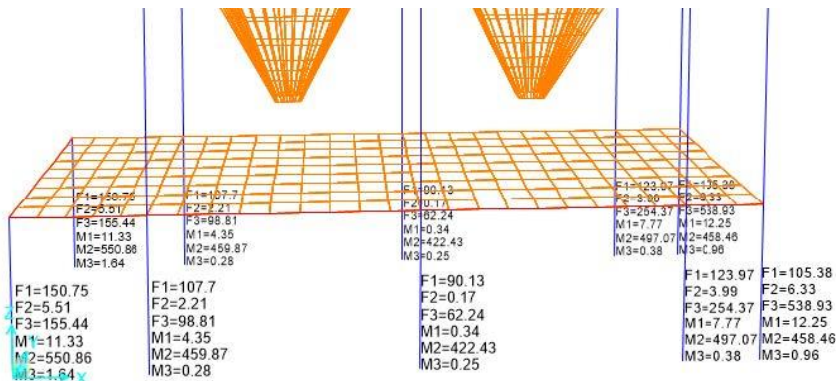


图 5.4 EQ-X 基底反力（左右均空仓）

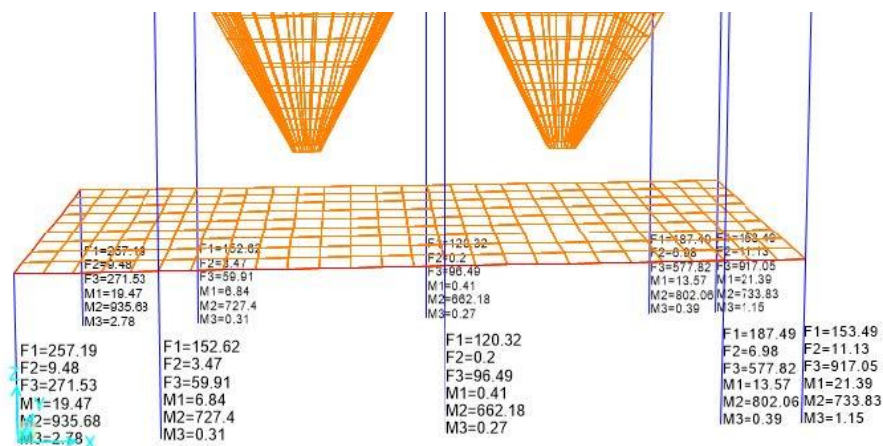


图 5.5 EQ-X 基底反力（左右均满仓）