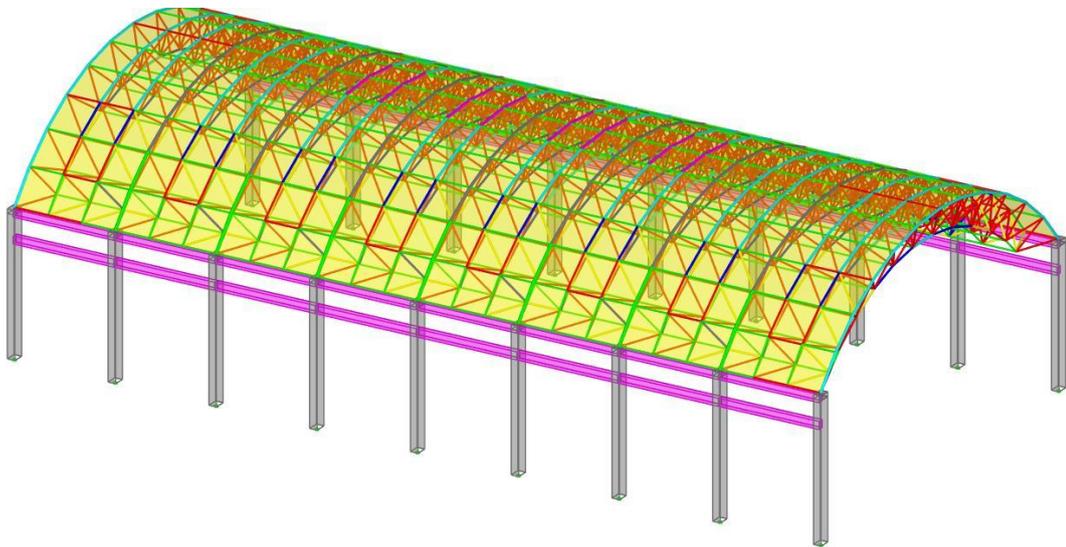


# SAP2000 案例教程

---

## 双层柱面网壳



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](mailto:support@cisec.cn)

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

网址：[www.cisec.cn](http://www.cisec.cn)

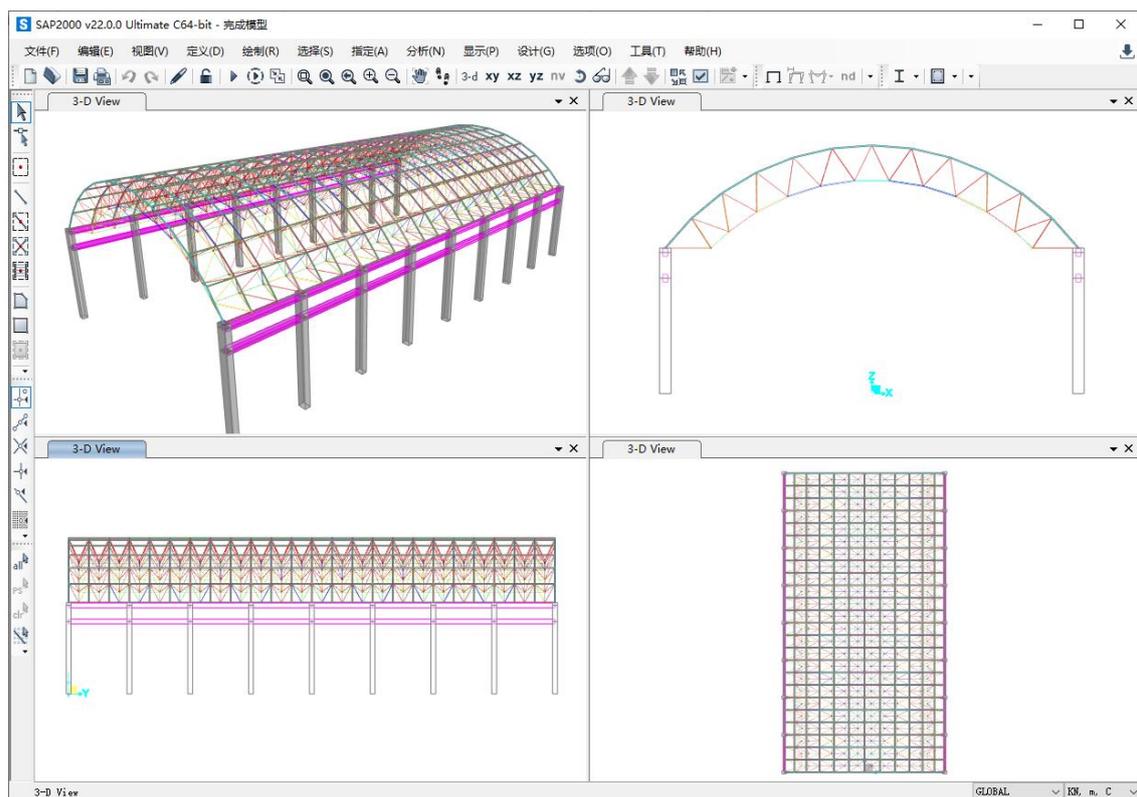
# 目录

1 模型概况 .....	1
2 几何建模 .....	3
2.1 绘制轴网线 .....	3
2.2 定义材料与截面 .....	4
2.3 绘制曲线梁 .....	4
2.4 绘制腹杆及屋面板 .....	5
2.5 绘制下部结构 .....	7
3 属性指定 .....	8
3.1 修改面局部轴 .....	8
3.2 端部释放 .....	8
3.3 指定支座条件 .....	9
4 施加荷载 .....	10
4.1 结构自重 .....	10
4.2 屋面活载 .....	10
4.3 风荷载 .....	11
4.4 地震荷载 .....	12
5 结果查看 .....	14
5.1 振型和周期 .....	14
5.2 刚度校核 .....	14
5.3 强度校核 .....	15

## 双层柱面网壳

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 v22.0.0 中对双层柱面网壳结构进行几何模型的建立、指定对象属性、施加结构荷载、运行结构分析以及计算结果的查看。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、常规荷载的施加、指定边界条件、结果查看等。

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。



双层柱面网壳

## 1 模型概况

双层柱面网壳的上部为钢结构，由不同尺寸的圆钢管构成主要受力体系，屋面板为混凝土板。下部为混凝土结构，每侧设有 9 根立柱，并在 9m 高度和 11m 高度分别设置纵梁。上部结构和下部结构之间通过铰支座连接，支座高度为 0.35m。其形式如图 1.1 所示

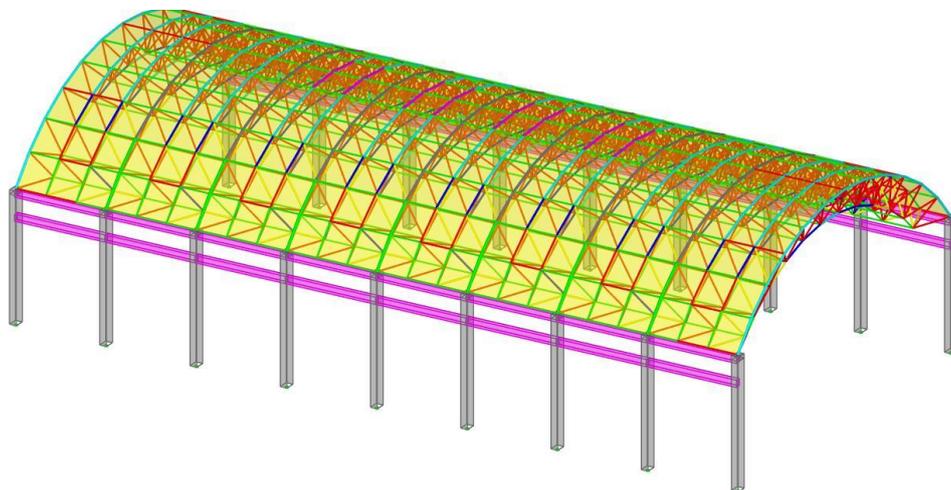


图 1.1 结构示意图

该双层柱面网壳结构的上部为左右对称设计，如图 1.2 所示。跨度为 32m，高度为 8m。每两个外侧曲线框架的纵向间距为 2.5m，在中间 1.25m 位置处设有一个内侧曲线框架。这三个曲线框架之间设有环向和纵向的腹杆，将其构成一个整体。

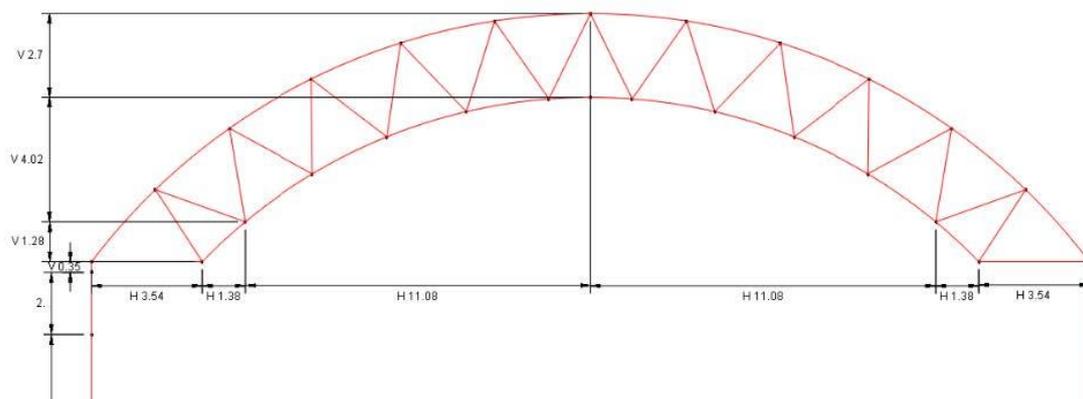


图 1.2 横断面示意图

该双层柱面网壳结构的下部共设有 9 个立柱，如图 1.3 所示。每个立柱之间的间距为 7.5m，高度为 11m。每侧设置两个纵梁，分别设置在 9m 高度处和 11m 高度处。在立柱顶端分别设置支座，用于连接上部结构，支座高度为 0.35m。

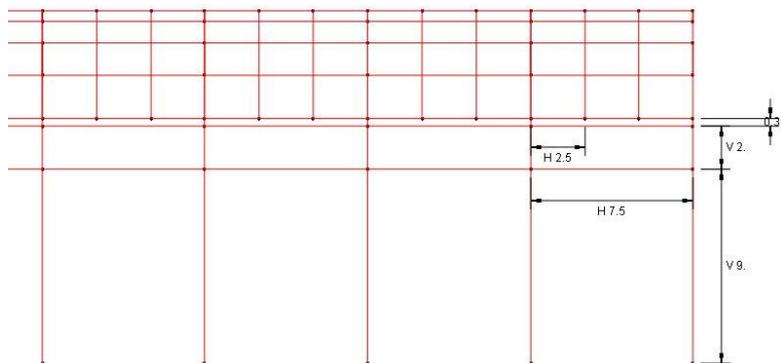


图 1.3 立柱示意图

该双层柱面网壳结构的屋面板和下部梁柱为 C30 混凝土。网壳圆钢管均采用 Q235 钢材。该模型需要定义四种材料属性，两个混凝土框架截面以及八个圆钢管截面，具体如表 1.1~1.2 所示。

表 1.1 材料属性

材料属性	容重 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 E (GPa)	泊松比 $\mu$	线膨胀系数 $\alpha$
C30	25.5	20	0.2	$1.0 \times 10^{-5}$
HRB335	78.5	200	0.3	$1.17 \times 10^{-5}$
HPB300	78.5	210	0.3	$1.17 \times 10^{-5}$
Q235	78.5	210	0.3	$1.17 \times 10^{-5}$

表 1.2 截面属性

截面属性	截面类型	截面形状	尺寸/直径(mm)	壁厚(mm)	材料属性
B600x400	框架	矩形	600x400	\	C30
C900x600	框架	矩形	900x600	\	C30
P1	框架	圆管	48	3.5	Q235
P2	框架	圆管	60	3.5	Q235
P3	框架	圆管	75.5	3.75	Q235
P4	框架	圆管	88.5	4.0	Q235
P5	框架	圆管	114	4.0	Q235
P6	框架	圆管	140	4.0	Q235
P7	框架	圆管	133	6.0	Q235
P8	框架	圆管	159	6.0	Q235

考虑到双层柱面网壳结构与基础之间的连接方式，对混凝土柱底指定固定支座。该模型的荷载条件包括：结构自重，活载（雪荷载和积灰荷载），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。如图 1.1 所示，根据该模型的空间几何特点，建议先绘制单榀网壳结构的轴网，在绘制单榀网壳后利用带属性复制和拉伸功能创建整体模型。

由于该轴网不规则，建议先在 Excel 中整理好轴网信息，然后将其复制到 SAP2000 中建立轴网。整理好的轴网信息如表 2.1 所示：

表 2.1 单榀网壳结构轴网信息

x 方向轴网				
编号	坐标 (m)	类型	可见性	标签位置
A	-16	Primary	Yes	终点
B	-12.46	Primary	Yes	终点
C	-11.08	Primary	Yes	终点
D	0	Primary	Yes	终点
E	11.08	Primary	Yes	终点
F	12.46	Primary	Yes	终点
G	16	Primary	Yes	终点
y 方向轴网				
编号	坐标 (m)	类型	可见性	标签位置
1	0	Primary	Yes	起点
2	1.25	Primary	Yes	起点
3	2.5	Primary	Yes	起点
z 方向轴网				
编号	坐标 (m)	类型	可见性	标签位置
Z1	0	Primary	Yes	终点
Z2	9	Primary	Yes	终点
Z3	11	Primary	Yes	终点
Z4	11.35	Primary	Yes	终点
Z5	12.63	Primary	Yes	终点
Z6	16.65	Primary	Yes	终点
Z7	19.35	Primary	Yes	终点

输入轴网数据，点击确定，此时会出现定义的轴网，如图 2.1 所示。

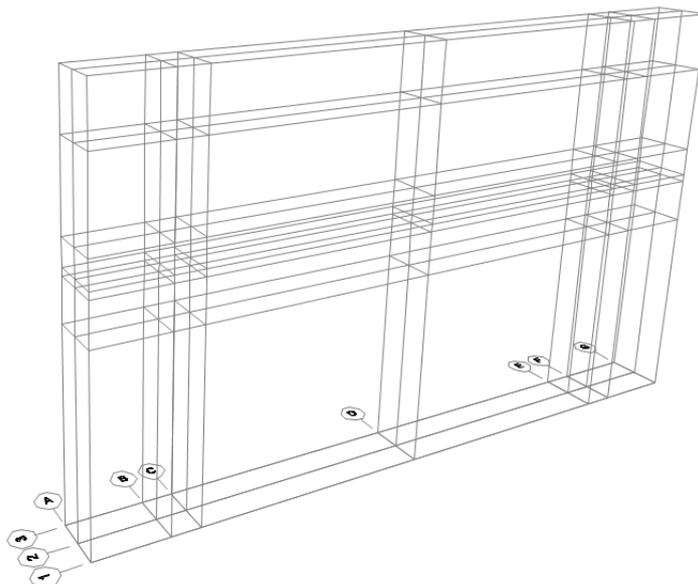


图 2.1 轴网线

## 2.2 定义材料与截面

根据表 1.1 和表 1.2 中的数据定义四种材料属性（C30、HRB335、HPB300、Q235）和十种截面属性（混凝土框架和圆钢管截面）。具体操作见本教程配套视频，此处不再赘述。

## 2.3 绘制曲线梁

在  $X-Z@Y=0$  平面内绘制双层网壳的单榀框架的内侧及外侧的曲线框架。曲线框架为圆弧形，通过三个坐标点控制。

1. 绘制曲线框架时，将“线对象类型”设置为曲线框架，如图 2.2 所示。

对象属性	
线对象类型	曲线框架
截面属性	P1
端部释放	Continuous
局部轴转角	0.
XY 平面内沿法线偏移	0.
绘图控制	无 <空格键>

图 2.2 绘制曲线框架

2. 依据轴网选择曲线框架的两个端点（-16, 0, 11.35）和（16, 0, 11.35），输入第三点坐标为（0, 0, 19.35），截面属性修改为“P5”。设置【分段选项】为“多个对象：等长度”，【分段数量】为“12”，如图 2.3 所示。

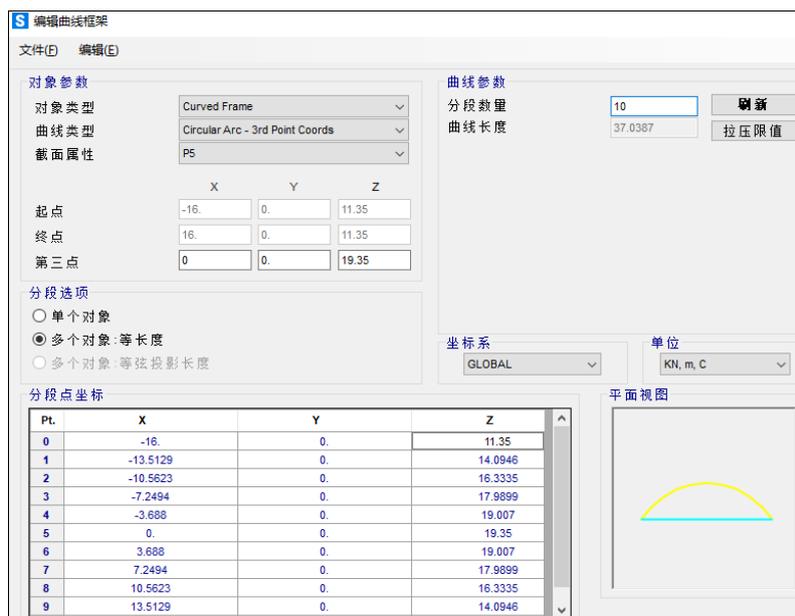


图 2.3 外侧曲线框架定义参数

3. 选择绘制好的曲线框架，沿 y 方向复制 2.5m。
4. 调整视图为 X-Z@Y=1.25m 平面，绘制单榀框架内侧的曲线框架，方法与上述相同。
  - 曲线框架：三个坐标控制点分别为： $(-11.08, 1.25, 12.63)$ ， $(11.08, 1.25, 12.63)$ ， $(0, 1.25, 16.65)$ ，截面属性设为“P2”，【分段选项】为“多个对象等长度”，分为 9 段。
5. 绘制内侧曲线框架两端的短框架。通过绘制命令依次点击轴网交点绘制。绘制完成后，在 3D 视图中可以看到已绘制的三个曲线框架，如图 2.4 所示。

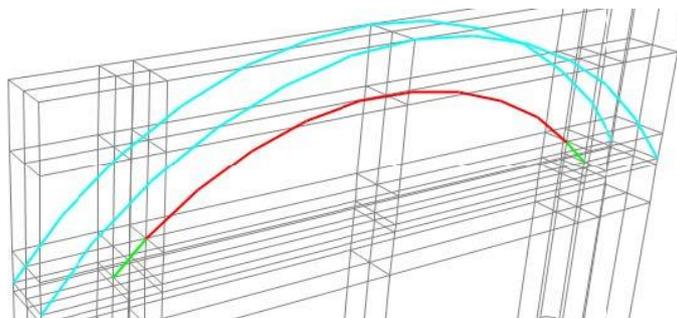


图 2.4 曲线框架绘制完成

## 2.4 绘制腹杆及屋面板

环向腹杆、纵向腹杆及屋面板的绘制，会使用的命令包括：绘制直线框架、拉伸、绘制多边形以及镜像。

1. 环向腹杆直接通过绘制直线框架命令绘制，绘制完成后如图 2.5 所示。

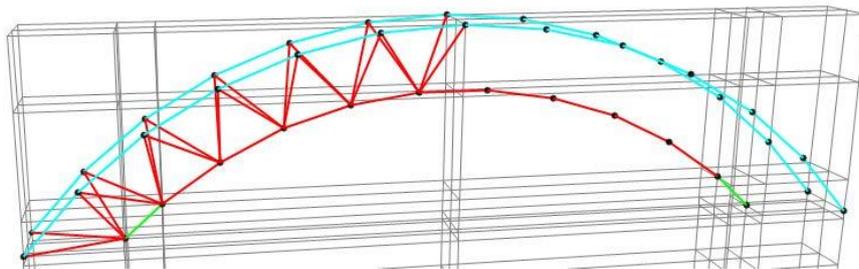


图 2.5 环向腹杆布置

2. 纵向腹杆通过拉伸命令绘制，选择外侧所有环向腹杆的两端点拉伸。
  - 点拉伸成线：直线拉伸，拉伸截面设为“P1”，方向为  $dy=2.5$ ，数量“1”。
3. 屋面板通过无质量无刚度的虚面来模拟，可通过绘制多边形命令绘制，绘制时保证所有虚面均按一个方向绘制。绘制完成后如图 2.6 所示。

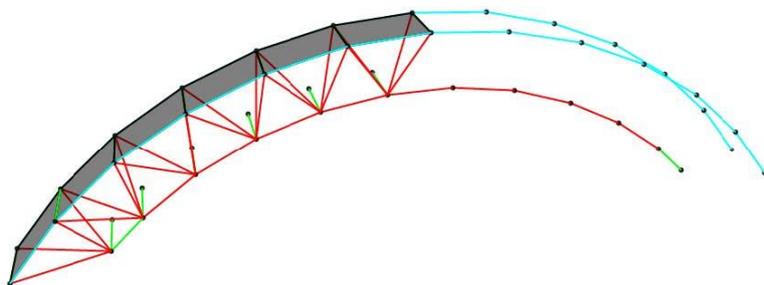


图 2.6 绘制屋面板

4. 依据该网壳结构的截面设计，需通过【指定>框架>框架截面】命令为不同的杆件指定不同的截面，各个杆件截面布置如图 2.7 所示。

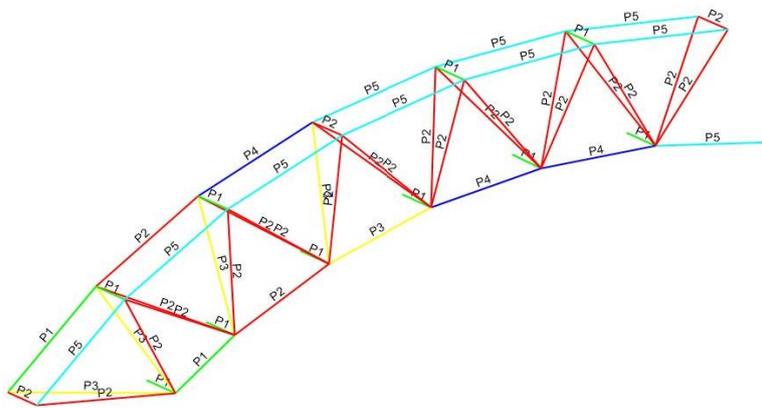


图 2.7 指定杆件截面

5. 选择单榀框架左侧结构，镜像形成右侧模型。
  - 镜像复制：平行于  $z$  轴，镜像面与  $xy$  平面的交线为  $(0,0)$ ， $(0,1)$ ，不删除源对象
6. 选择上一步建立单榀框架，复制形成一个 7.5m 长的节段，如图 2.8 所示。
  - 线性复制： $dy=2.5m$ ，2 次，不删除源对象。

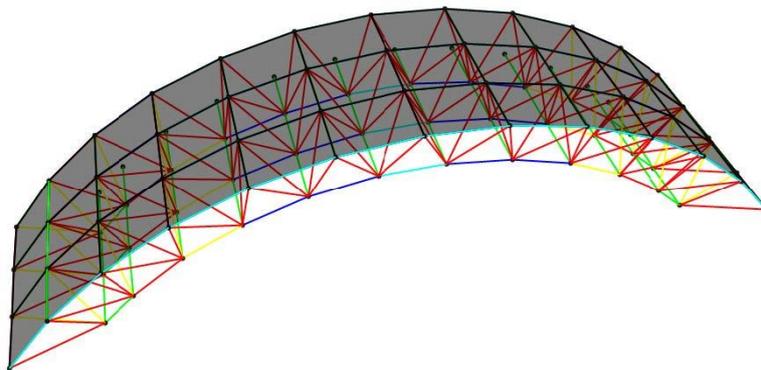


图 2.8 7.5m 长的节段

## 2.5 绘制下部结构

下部结构包括梁柱，可依据轴网通过绘制直线框架绘制，然后通过复制完成整个结构的建立。

1. 调整视图为 X-Z@y=0 平面，依据轴网绘制两侧立柱；
2. 将上一步绘制的立柱沿 y 方向复制一次，复制距离为 7.5m，形成 7.5m 处的立柱；
3. 绘制 9m 高度处和 11m 高度处所有横梁；
4. 选中所有构件，将其沿着 y 轴方向复制 7 次，复制距离为 7.5m，如图 2.9 所示。

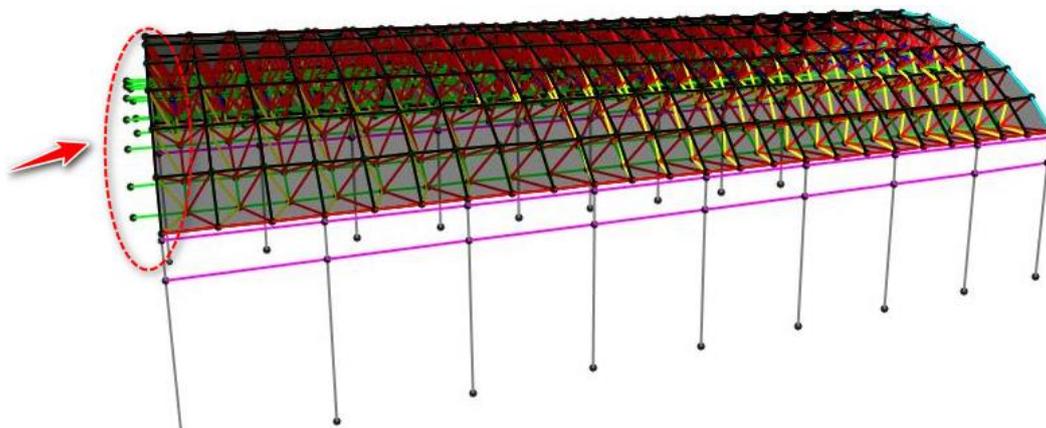


图 2.9 复制后的计算模型

5. 在该模型 y 正方向，由于多出一部分的纵向腹杆，需要删除。至此完成模型的建立。

## 3 属性指定

### 3.1 修改面局部轴

为便于后期施加屋面荷载，需要调整屋面壳单元的局部 3 轴方向，使所有壳单元的 3 轴方向保持一致。这里将所有屋面板的局部 3 轴调整为向上，如图 3.1 所示。

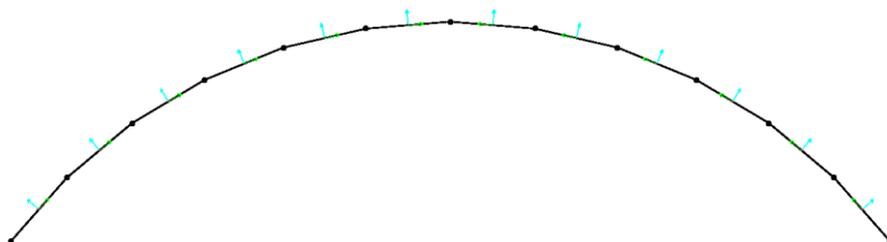


图 3.1 修改后的屋面局部轴

### 3.2 端部释放

上部网壳结构中的所有杆件均为二力杆，无法传递力矩，因此需要对杆件的力矩进行端部释放。端部释放时需要释放两端的弯矩和一端的扭矩。

注意，以模型中任意一个螺栓球节点为例，如图 3.2 所示。由于绕该节点的所有杆件均释放了弯矩，会导致该节点可以绕自身转动，缺少有效约束。在分析时，程序会提示警告。为避免出现该问题，可在端部释放时指定一个较小的刚度值，如图 3.3 所示。该刚度值并不会影响分析结果，但能有效约束该节点的刚体转动。

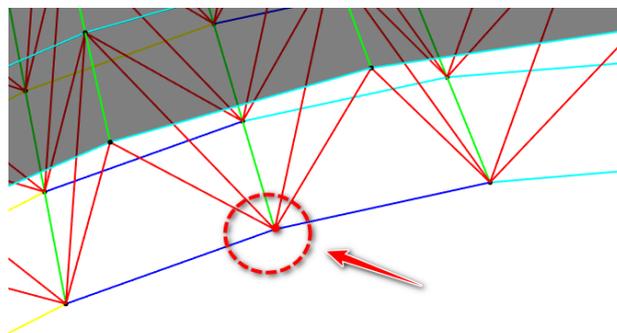


图 3.2 螺栓球节点

	释放端		连接刚度 (0 代表完全释放)	
	起点	终点	起点	终点
轴力 P	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
剪力 F2 (主轴)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
剪力 F3 (次轴)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
扭矩 T	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0.001 kN-m/rad	
弯矩 M22 (次轴)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.001 kN-m/rad	0.001 kN-m/rad
弯矩 M33 (主轴)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.001 kN-m/rad	0.001 kN-m/rad

图 3.3 指定端部释放

### 3.3 指定支座条件

该网壳结构柱与基础连接采用固定支座，如图 3.4 所示。



图 3.4 指定支座条件

## 4 施加荷载

根据第 1 章“模型概况”中给定的结构荷载条件，定义包括结构自重、活载、风荷载、共计 4 个荷载模式，如图 4.1 所示。其中，风荷载应分别考虑+X 方向和-X 方向，抗震计算采用基于中国抗震规范的反应谱法，直接在荷载工况中定义。

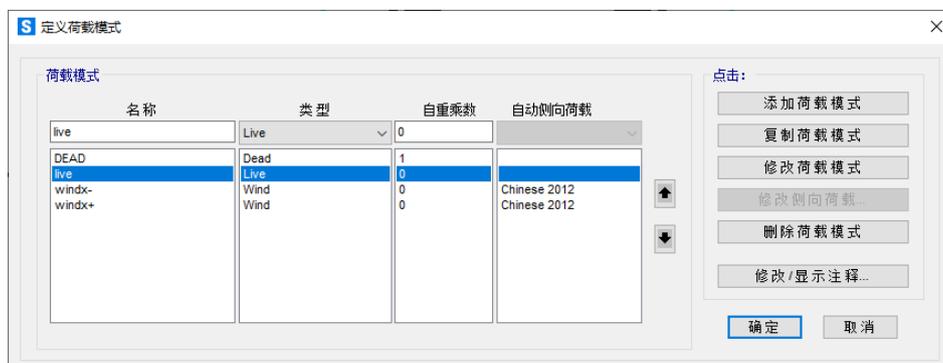


图 4.1 定义荷载模式

### 4.1 结构自重

对于框架构件程序会依据构件的重量密度自动计算其重力荷载。但是网壳结构各个桁架节点位置的螺栓球自重需要用户自己添加。需要注意的是在靠近支座位置处每个节点螺栓球的重力为 0.15kN，其余位置处螺栓球的重力为 0.06kN，如图 4.2 所示。

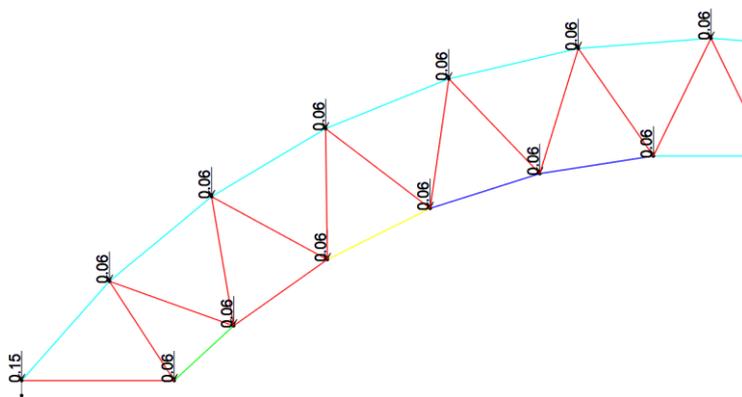


图 4.2 螺栓球节点荷载

另外，由于屋面采用没有质量的虚面模拟，因此还需要添加屋面板的自重。通过屋面板的厚度和重量密度计算出其自重为 0.7kN/m<sup>2</sup>。这里通过重力方向的均布荷载来考虑。

### 4.2 屋面活载

屋面活载主要考虑雪荷载和积灰荷载，在规范中一般是通过在重力的投影方向施加对应的荷载，这里设为 0.5kN/m<sup>2</sup>，注意施加方向为重力投影方向，如图 4.3 所示。



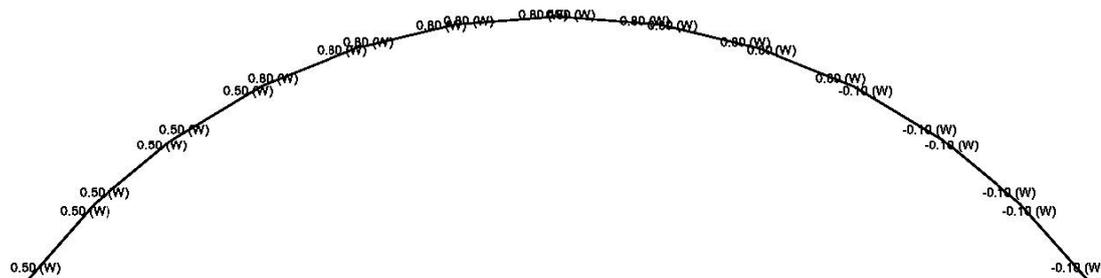


图 4.6 -X 方向的风压系数

## 4.4 地震荷载

该网壳结构通过反应谱方法进行抗震分析。反应谱分析时主要定义四个方面的信息，反应谱函数、质量源、模态工况、反应谱荷载工况。

1. 反应谱函数依据规范定义。选择规范“Chinese 2010”，依据结构特性和场地条件设置反应谱参数。其中，【地震影响系数】为 0.16，【抗震设防烈度  $g$ 】为 8 度 0.2g，【场地特征周期  $T_g$ 】调整为 0.45，【阻尼比】为 0.03，如图 4.7 所示。

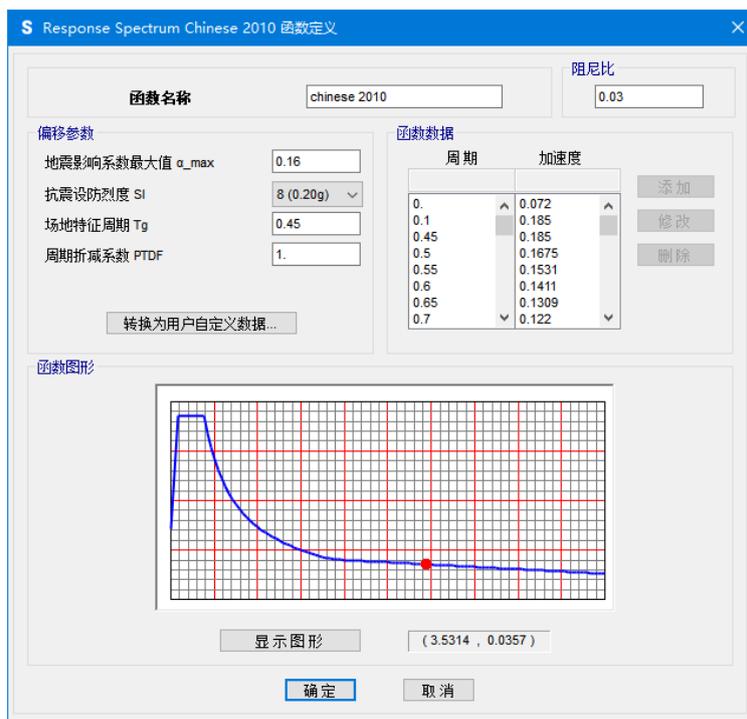


图 4.7 定义反应谱函数

2. 依据规范质量源需要考虑 1 倍的恒载和 0.5 倍的活载，因此需通过荷载模式来定义质量源，如图 4.8 所示。注意，不要勾选“单元质量和附加质量”，以免重复计算结构自重。

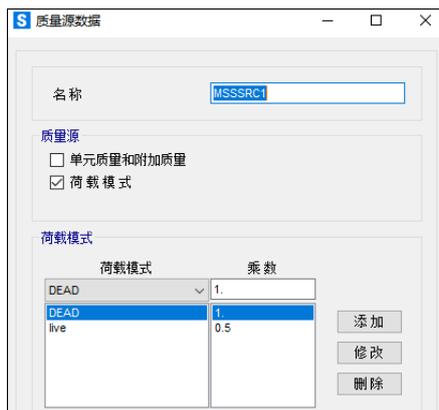


图 4.8 质量源的定义

3. 模态工况采用程序自动生成的 MODAL 工况，该工况所计算的模态将用于反应谱工况。将模态数量修改为“40”，保证结构的质量参与系数达到规范要求。
4. 这里需要分别定义 X 及 Y 方向的反应谱工况。模态组合和方向组合保持默认的“CQC”和“SRSS”。需要注意，对于【施加荷载】选项中参数的填写，“U1、U2、U3”对应整体坐标 x、y、z 轴方向。比例系数需要依据 SAP2000 当前单位确定，反应谱函数中仅包含数值，比例系数表示与数值对应的重力加速度  $g$ 。最后还需要将模态阻尼修改为 0.03，x 方向的反应谱工况设置如图 4.9 所示。

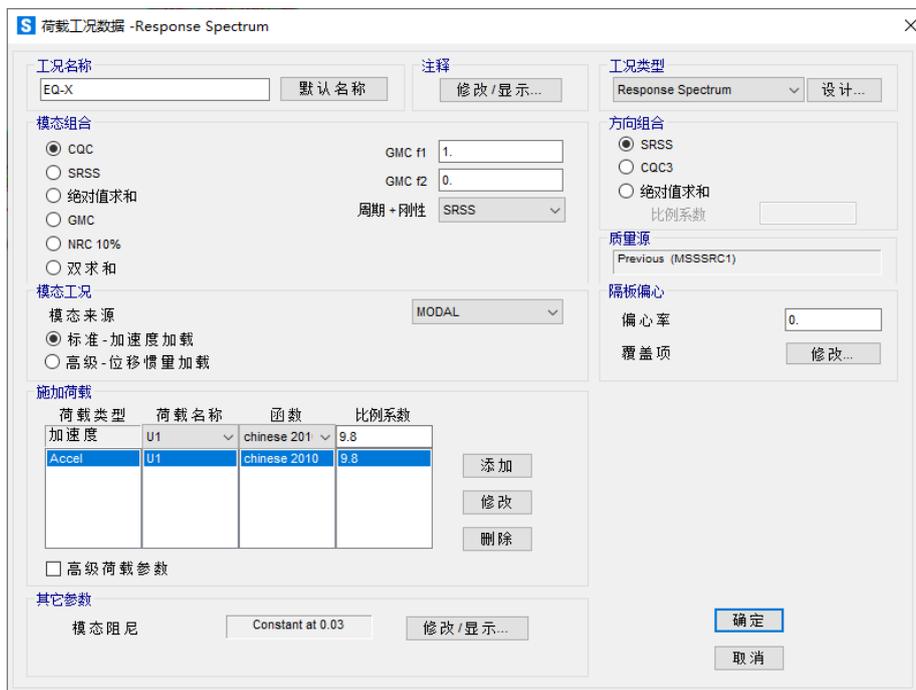


图 4.9 反应谱工况定义

## 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。

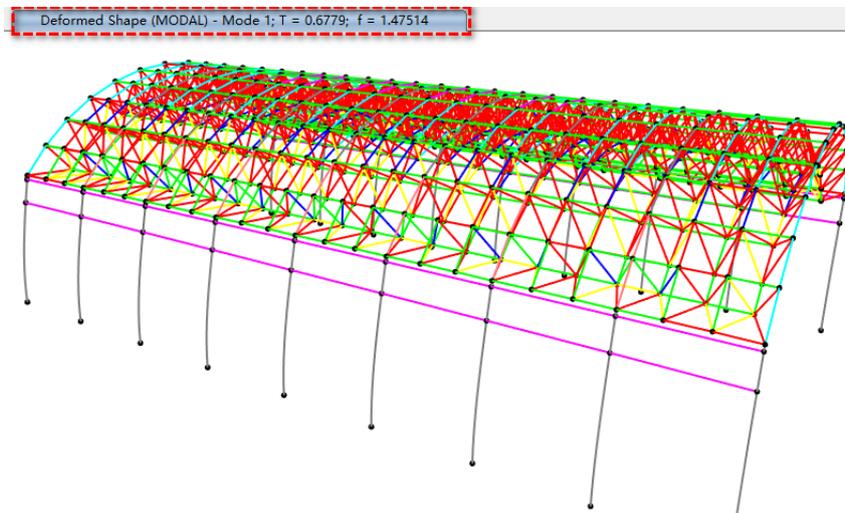


图 5.1 结构振型图

### 5.2 刚度校核

点击【显示>内力/应力>框架/索/钢束单元】命令，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，也可以显示构件挠曲线，如图 5.2 所示。除此之外，读者也可以将节点位移通过表格输出，然后通过排序快速查看和定位节点位移最大值。

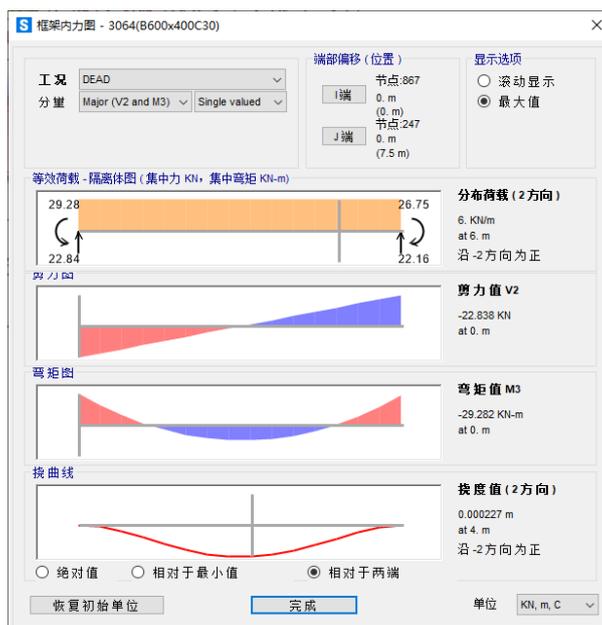


图 5.2 构件隔离体图

### 5.3 强度校核

点击【显示>内力/应力>框架/索/钢束单元】命令显示 S11 应力云图，如图 5.3 所示。建议以数据表格的方式输出全部构件的内力值，然后通过排序快速查看和定位轴力的最大值，以此校核构件强度。

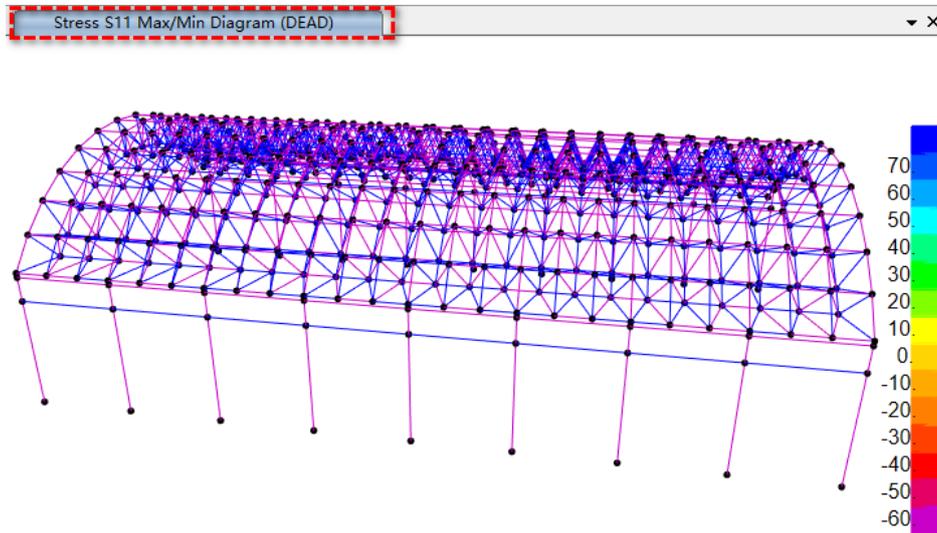


图 5.3 S11 应力云图