

集成化的通用结构分析与设计软件

SAP2000®

案例教程



北京筑信达工程咨询有限公司
北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层, 100043

版 权

计算机程序 SAP2000 及全部相关文档都是受专利法和版权法保护的产品。全球范围的所有权属于 Computers and Structures, Inc.(中文版版权同属于北京筑信达工程咨询有限公司)。如果没有 CSI 和北京筑信达工程咨询有限公司的预先书面许可，未经许可的程序使用或任何形式的文档复制一律禁止。

更多信息和此文档的副本可从以下获得：

北京筑信达工程咨询有限公司

北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层 100043

电话：86-10-6892 4600

传真：86-10-6892 4600 - 8

电子邮件：support@cisec.cn

网址：www.cisec.cn

北京筑信达工程咨询有限公司版权所有©, 2016.

说 明

本教程将通过具体的案例，介绍如何应用 SAP2000 处理一些典型问题。“模型概况”是对案例的简单介绍；“主要工作流程”是对常规建模过程的描述；“要点详解”是对相关一些软件应用技术的详细说明。本教程不涉及软件操作的详细讲解，相关内容请参考 SAP2000 联机帮助或相关使用手册。

我们将持续丰富案例种类。对于本教程的内容和需要增加的案例类型，欢迎您提出您的意见和建议，不胜感谢！联系方式如下：

技术热线：010-6892 4600 - 200

技术邮箱： support@cisec.cn

目 录

箱涵结构.....	1
模型概况.....	2
主要工作流程.....	3
步骤 1 建立轴网.....	3
步骤 2 几何建模.....	3
步骤 3 指定荷载及约束条件.....	4
步骤 4 分析设置.....	8
步骤 5 结果查看及内力提取.....	8
步骤 6 配筋计算.....	11
要点详解.....	13
1 壳截面属性.....	13
2 箱涵底板与垫层建模.....	15
2.1 方式一.....	15
2.2 方式二.....	17
2.3 模型对比.....	19
3 非均匀面荷载的施加.....	21
3.1 节点样式.....	21
3.2 指定侧壁土压和水压力荷载.....	23
3.3 面对象反转局部 3 轴.....	23
4 土体边界条件的处理.....	26
5 壳内力输出.....	28
6 箱涵倒角构造建模.....	30

箱涵结构

本教程旨在指导读者在 SAP2000 中为钢筋混凝土箱涵结构创建模型，并完成相关的属性指定、加载、分析及后处理工作。在具体操作过程中，使读者熟悉并掌握 SAP2000 的诸多功能，如：土体边界条件的处理、非均匀面荷载（土压和水压荷载）的施加、壳单元内力查看及提取、壳配筋计算等等。

依本教程执行操作，可创建如图 0-1 中所示模型（左图）。

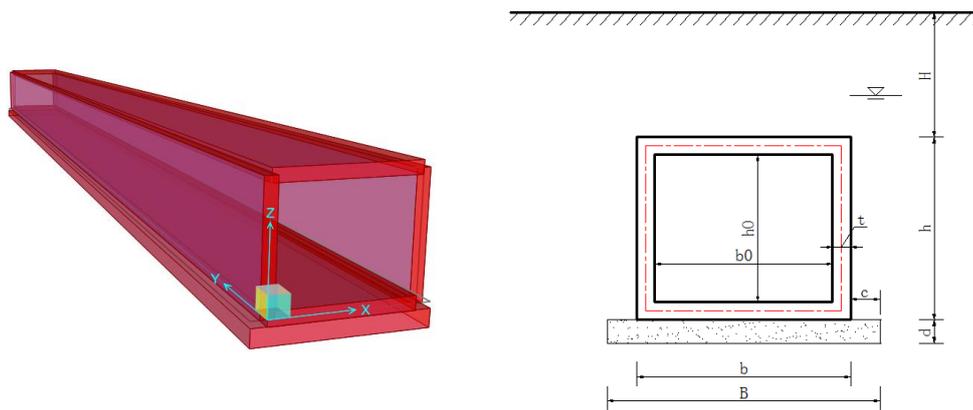


图 0-1 箱涵结构

模型概况

如图 0-1 所示，为某单孔钢筋混凝土箱涵结构。箱涵尺寸如下：

- 孔径 b_0 为 3m，净高 h_0 为 2.5m，壁厚 t 为 0.3m
- 垫层厚度 d 为 0.4m，宽度 B 为 4.5m

箱涵材料信息：

- 箱涵混凝土强度等级：C30
- 钢筋等级：HRB335
- 垫层混凝土强度等级：C20

荷载与边界条件：

- 顶板以上覆土厚度 H 为 4m，土容重取 20kN/m^3
- 地下水位按 -3m 考虑，水容重取 10kN/m^3
- 地面超载 20kPa
- 基床系数取 5000kN/m^3

通常，为了便于进行高效快捷的结构分析，用户需要结合实际对分析模型进行必要且合理的简化。本案例为演示 SAP2000 更多的编辑功能，建模时考虑了箱涵下部的混凝土垫层。将结构覆土换算成上覆土荷载和侧土压力，土侧向压力系数 0.4；将地下水对结构影响换算为对两侧壁的侧向水压力以及对底板的竖向浮力；并采用面弹簧考虑地基土对结构的支承作用，如下图 0-2 所示。

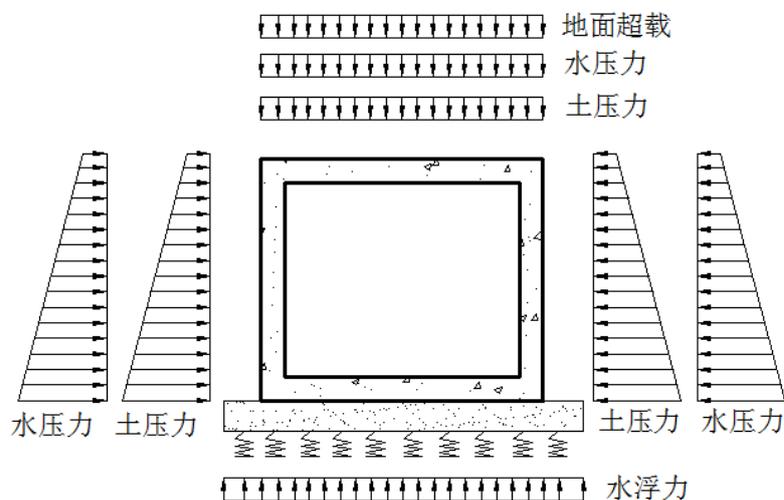


图 0-2 模型简图

主要工作流程

步骤 1 建立轴网

对于图 0-1 所示结构简单的箱涵模型，采用直接建模方式即可快速完成建模。首先，根据结构尺寸直接定义轴网参数，如图 1-1 所示；然后，基于轴网直接绘制面对象。



图 1-1 轴网数据

X 向为箱涵截面的宽度方向，Z 向为截面的高度方向；Y 向为结构的轴向，当箱涵长度较大时，建模长度通常取截面尺寸的 10 倍即可，本案例取箱涵总长为 40m。为了消除长度方向上边界条件对模型的影响，查看结果时选择提取长度中部位置。

步骤 2 几何建模

本案例中所有面单元类型使用“薄壳”，箱涵面对象与垫层所使用的材料和厚度均不同，故分别定义“slab-1”和“slab-2”，参数设置如下图 1-2 所示。关于壳截面属性，更多内容见本文后续的“要点详解”第 1 节。



图 1-2 截面属性定义

将窗口切换到二维视图，分别绘制箱涵底板、顶板以及侧面，如图 1-3 所示。

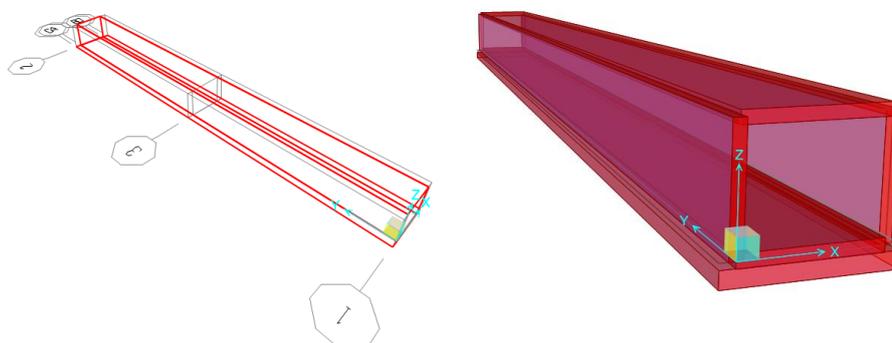


图 1-3 绘制几何模型

箱涵底板与垫层的台阶型位置关系建模，有两种处理方式：方式一，将垫层绘制在箱涵底板中轴线位置，然后对垫层指定向下的节点偏移，使箱涵底板的底面与垫层的顶面平齐；方式二，直接在垫层实际中轴线位置绘制，然后通过节点束缚模拟二者连接关系。更多内容见本文后续的“要点详解”第 2 节。

步骤 3 指定荷载及约束条件

对于箱涵基础的承载力计算，通常考虑的荷载类型包括：结构自重、顶板覆土荷载、侧面土压和水压、底板水浮力、地面超载等。

1. 恒载

$$\text{顶板竖向土压力 } P_{sv}: 20 \times 3 + (20 - 10) \times (4 - 3) = 70 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{侧面水平土压力 } P_{sh}: \text{最小值为 } 70 \times 0.4 = 28 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{最大值为 } (20 \times 3 + (20 - 10) \times (4 + 2.8 - 3)) \times 0.4 = 39.2 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{顶板竖向水压力 } P_{wv}: 10 \times (4 - 3) = 10 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{侧面水平水压力 } P_{wh}: \text{最小值为 } 10 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{最大值为 } 10 \times (4 - 3 + 2.8) = 38 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{底板水浮力 } P_{ww}: 38 \text{ kN/m}^2$$

2. 活载

$$\text{地面超载 } TL = 20 \text{ kN/m}^2$$

对上述荷载分别定义荷载模式如图 1-4 所示，其中结构自重 (Self)、土压 (Soil)、水压 (Water) 荷载类型为恒载 (DEAD)，地面超载 (TL) 荷载类型为活载 (LIVE)。

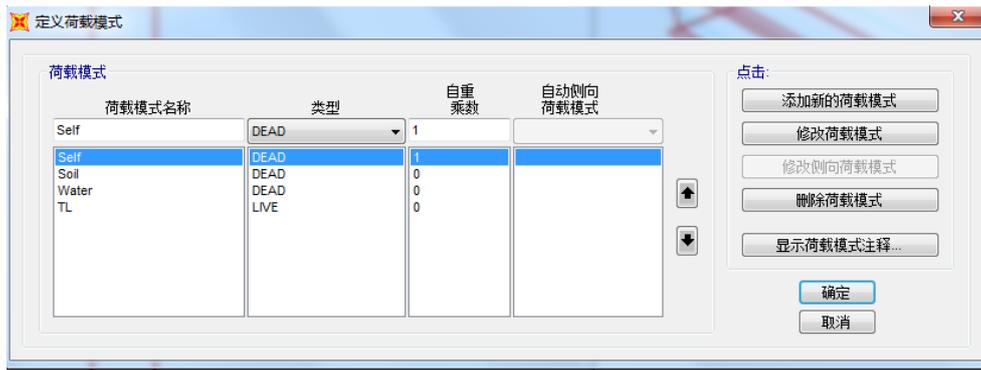


图 1-4 荷载模式对话框

对于顶板承担的土压和水压力、以及底板水浮力都属于均匀面荷载，直接施加类型为“均匀（壳）”的面荷载即可。例如，下图 1-5 对话框为对垫层施加水浮力。

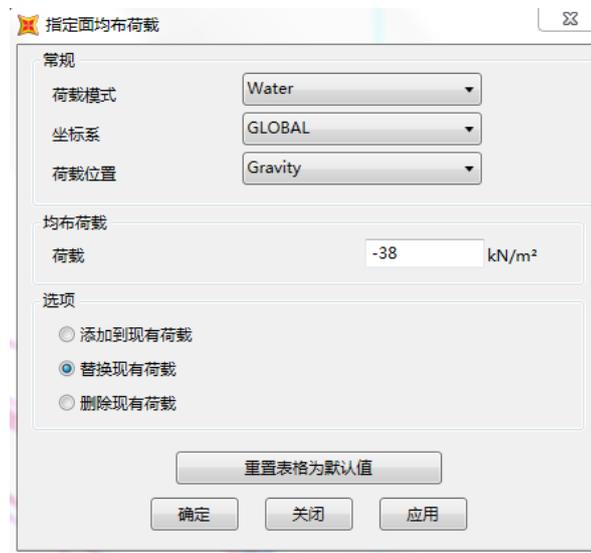


图 1-5 施加底板水浮力

对于施加侧面非均匀土压和静水压力，可采用“节点样式+表面压力”的方式实现；点击菜单**定义>节点样式**命令，定义样式名“**Soil**”代表侧向土压，“**Water**”代表侧向水压。对节点指定与非均匀土压和水压力相匹配的样式值，参数定义如下图 1-7 所示。关于节点样式更多具体细节见本文后续的“要点详解”第 3.1 节。

需分别对左、右侧壁指定土压和水压，图 1-8 和 1-9 对话框中为对左侧壁指定的参数。对于右侧壁由于荷载反向，故注意将“加载面”应修改为“顶”面，或将乘数修改为“-1”。

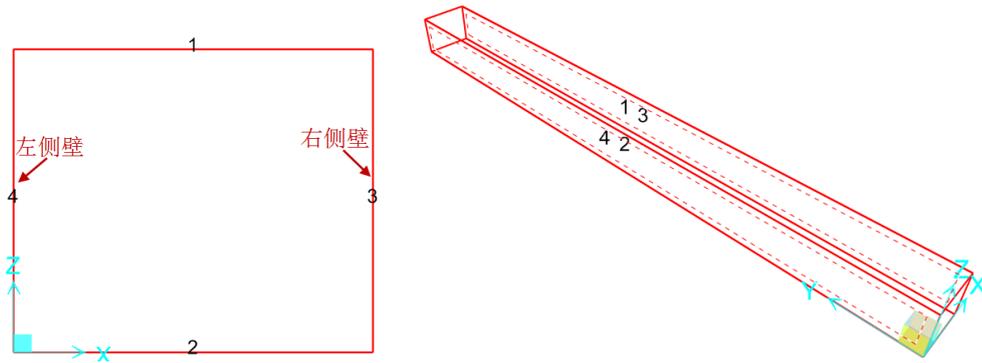


图 1-6 左、右侧壁面对象编号

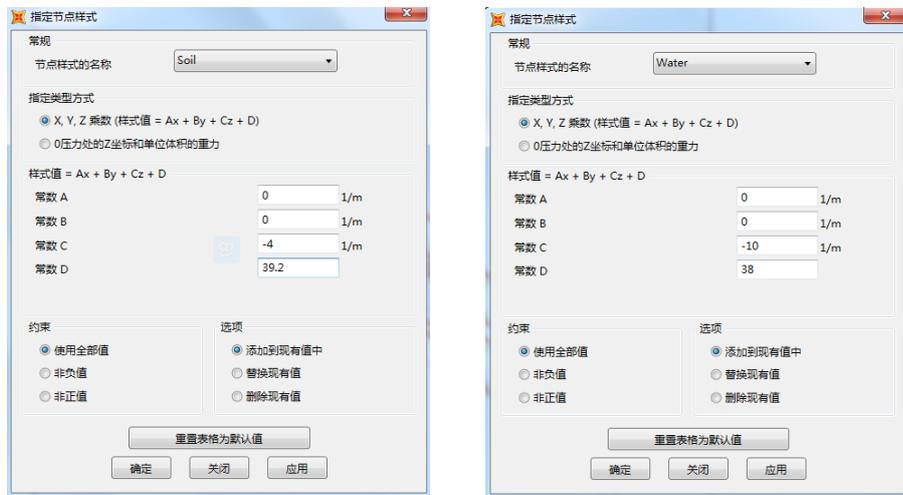


图 1-7 指定节点样式值

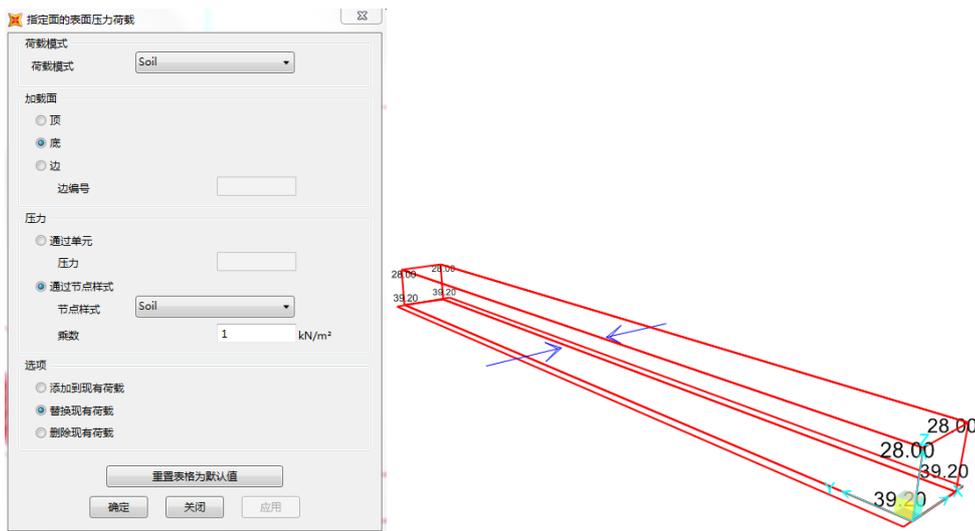


图 1-8 指定侧向土压

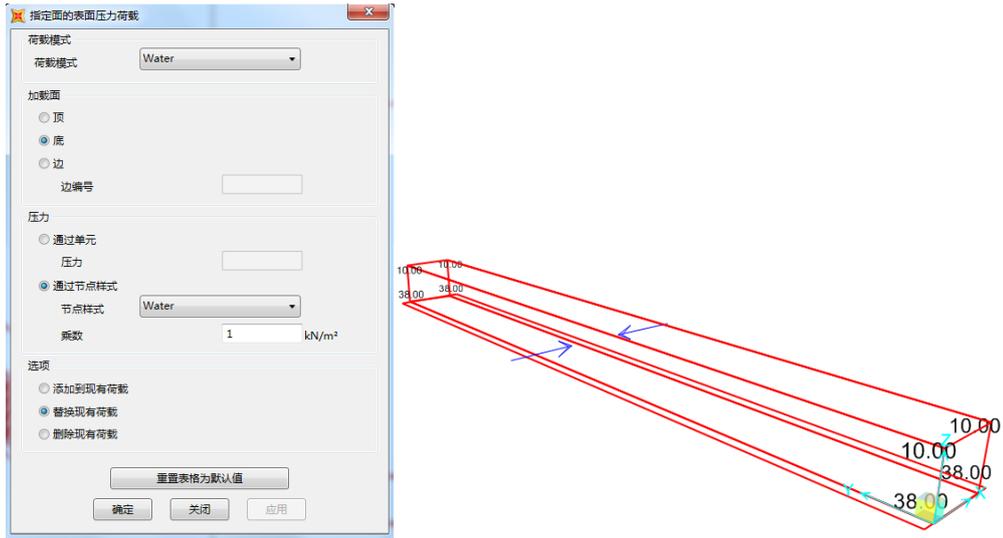


图 1-9 指定侧向水压

图 1-8 和 1-9 中右侧为显示面对象的表面压力值，箭头代表加载方向，数值代表面对象顶、底处的表面压力值。

关于荷载组合的定义本案例仅作示范，用户可根据具体工程需要自定义任意的荷载组合。本案例中定义的两个荷载组合如下表 1 所示，其中 COMB2 土压力和水压力按照永久荷载组合，分项系数取 1.4，地面超载分项系数取 1.6。即：

表 1 荷载组合

荷载组合	组合系数
COMB1	1.0S+1.0W+1.0TL
COMB2	1.4S+1.4W+1.6TL

对垫层指定面弹簧如图 1-10 所示，以考虑基地土对结构的支承作用（土体对箱涵侧面及顶面的作用已转化为荷载考虑，故不再对侧面和顶板指定面弹簧）。弹簧刚度取 5000kN/m³，更多内容见本文后续的“要点详解”第 4 节。

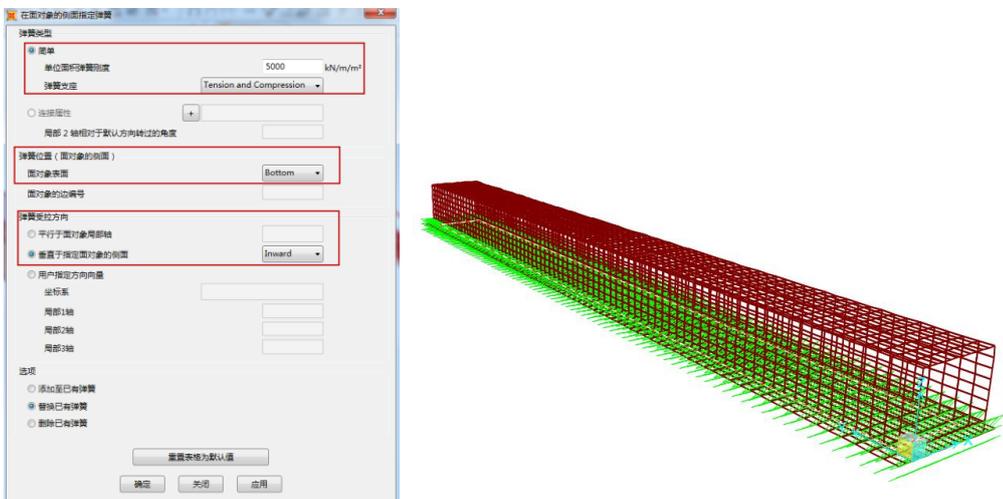


图 1-10 面弹簧指定

为避免出现水平向约束不足而引起刚体位移，对箱涵两端节点指定约束，固定 1、2 方向平动自由度，如图 1-11 所示。

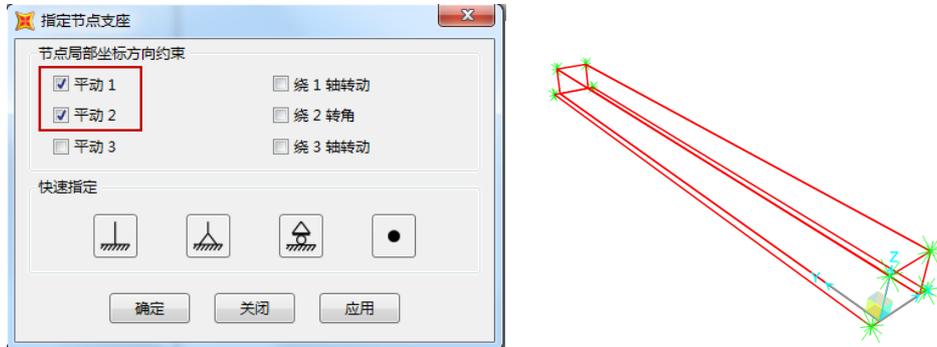


图 1-11 约束条件

步骤 4 分析设置

运行分析之前，需对所有面对象指定网格剖分。箱涵顶板、底板网格剖分数量为 11X80，侧面网格数量为 80X8；垫层网格数量为 15X80。注意，箱涵底板与垫层的网格节点应互相匹配，避免出现变形不协调的情况。面对象的网格剖分越细密，分析结果（内力、应力等）也会更精确，但相应的计算量和计算时间会有所增加，用户应根据需求选择合适的网格数量。

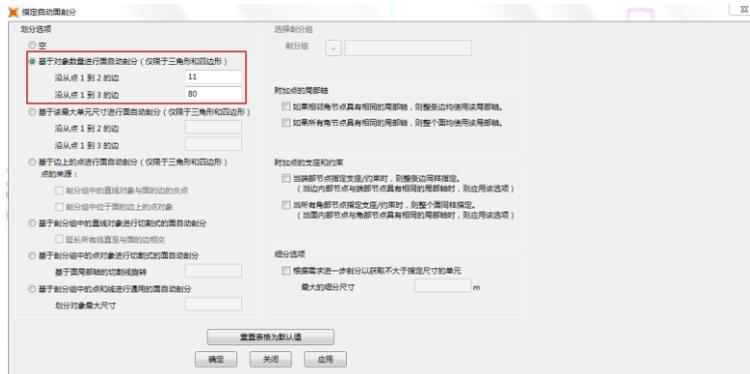


图 1-12 面对象网格剖分

点击 **视图>设置显示选项**，勾选“显示分析模型”，程序将生成分析模型，用户可检查单元网格的划分效果。确认无误后，点击菜单 **分析>运行分析** 命令，开始模型计算。

步骤 5 结果查看及内力提取

1. 分析完成后，通过 **显示>显示力/应力>土压力**，查看荷载组合下垫层土压力结果如下图 1-13 所示。

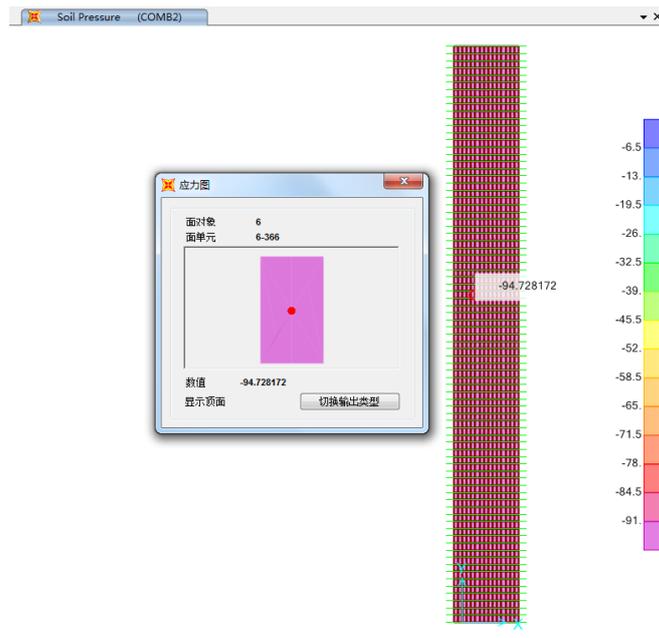


图 1-13 土压力

2. 查看壳内力/应力

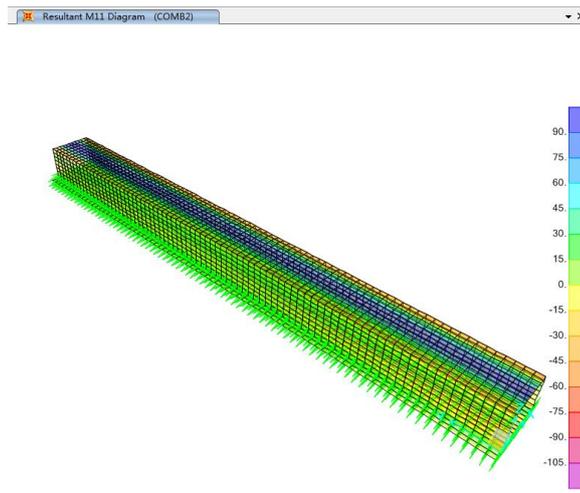


图 1-14 组合 COMB2 下壳内力 M11

关于壳内力/应力输出的更多内容见本文后续的“要点详解”第 5 节。

3. 绘制截面切割，提取壳内力。

本案例中使用绘制截面切割的方式，提取一定长度上箱涵顶板、底板或侧板的合力，用于后续的壳配筋计算。在显示壳内力/应力/变形结果的视图中，点击菜单**绘图>绘制截面切割**，在所关心位置绘制一条切割线，程序将显示该切割面上的应力、内力分布以及合力。

下文以箱涵顶板为例，说明绘制截面切割的方法，以及内力结果的查看。

基于顶板内力分布形式，对顶板长、宽方向，分别在跨中位置和板边位置绘制一定长度的切割线，以提取这些位置的合力，分别如下图 1-15 及图 1-16 所示。注意，进行截面切割操作时，应切换至二维视图，避免切割到其它面对象导致内力结果异常。

SAP2000 案例教程：箱涵结构

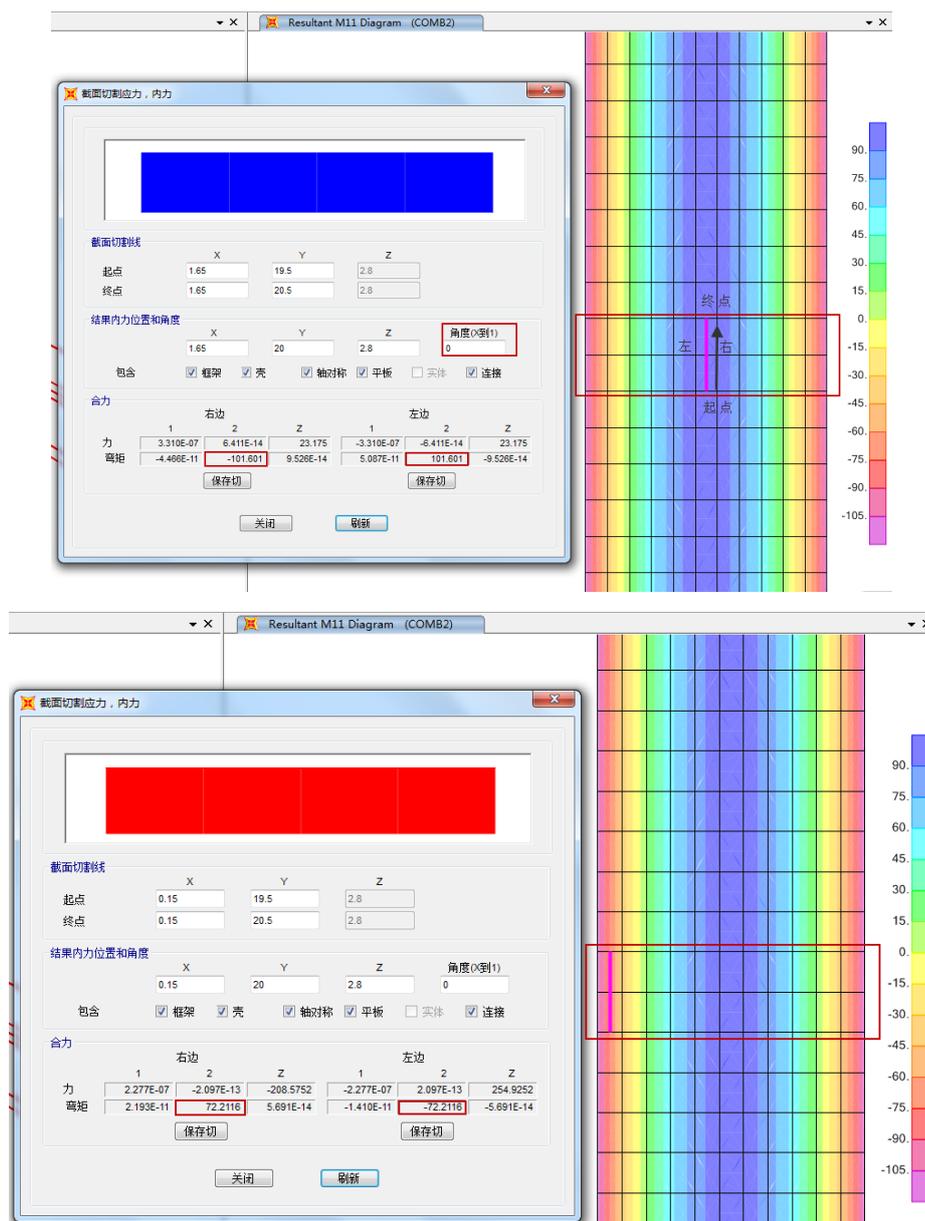


图 1-15 提取板长度方向上跨中、边缘合力

在长度方向上绘制切割线，长度为 1m，完成绘制后弹出的对话框如图 1-15 所示，对话框的上方是当前视图显示的应力沿切割线分布情况，对立面图或变形图不显示。

“截面切割线”区域：切割线起点和终点坐标，用户可编辑。

“结果内力位置和角度”区域：合力位置坐标 X、Y、Z 值，程序基于此坐标点求合力，该坐标默认为起点和终点坐标的平均值，用户可编辑。角度（X 到 1）为截面切割局部坐标的角度，是从整体 +X 轴逆时针旋转到截面切割局部 +1 轴的夹角。用户还可选择合力值中包含哪些类型构件的力。本案例中只有壳对象，故无需选择。

“合力”区域：左侧、右侧指从截面切割线起点向终点方向的左侧和右侧。1、2、Z 分别对应截面切割局部 1、2 轴和 Z 轴。

本案例中，如图 1-15 可以由左侧 2 轴弯矩得到板跨中绕 2 轴方向的弯矩值为 101.601kN*m，以及板边绕 2 轴方向的弯矩值为 -72.2116 kN*m。

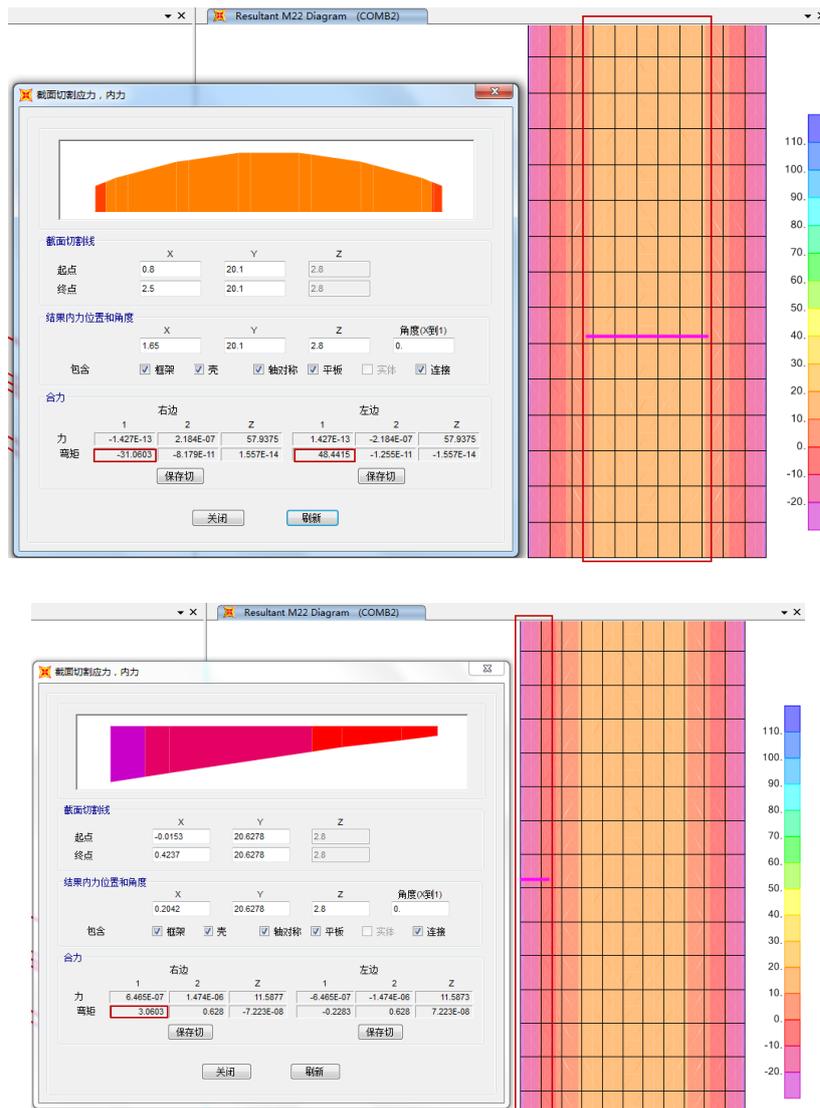


图 1-16 提取宽度方向上跨中、边缘合力

如图 1-16 可以由左侧 1 轴弯矩得到板跨中绕 1 轴方向的弯矩值为 48.4415kN*m，以及板边缘绕 2 轴方向的弯矩值为-3.0603 kN*m。

步骤 6 配筋计算

本案例配筋按照纯弯构件设计进行，仅供读者参考。以箱涵顶板计算配筋过程为例进行说明。

1.设计参数

混凝土等级：C30

$f_c=14.3\text{N/mm}^2$; $f_t=1.43\text{N/mm}^2$

钢筋等级：HRB335

$f_y=300\text{N/mm}^2$

混凝土保护层厚度 25mm.

2.截面尺寸

SAP2000 案例教程：箱涵结构

顶板宽度方向：中间 1mX0.3m；边缘 1mX0.3m

顶板长度方向：中间 1.7mX0.3m；边缘 0.5mX0.3m

3.荷载值

顶板宽度方向：跨中弯矩 101.6 kN*m，边缘弯矩-72.2kN*m

顶板长度方向：跨中弯矩 48.4415kN*m，边缘弯矩-3kN*m

4.计算配筋

板一般按照双层双向进行配筋，下面以计算顶板宽度方向底层钢筋为例说明。

取受拉钢筋形心到受拉混凝土边缘距离 $a_s=40\text{mm}$ ；

则截面有效高度 $h_0 = h - a_s=300\text{mm}-40\text{mm}=260\text{mm}$

$$\alpha_s = \frac{M}{a_1 f_c b h_0^2} = \frac{101.6 \times 10^6}{1.0 \times 14.3 \times 1000 \times 260^2} = 0.105 < \alpha_{s,max} = 0.399, \text{ 满足要求;}$$

则，计算 $\xi = 1 - \sqrt{1 - 2\alpha_s} = 1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.105} = 0.111$

$$A_s = \xi b h_0 \alpha_1 \frac{f_c}{f_y} = \frac{0.111 \times 1000 \times 260 \times 14.3}{300} = 1375.66 \text{mm}^2$$

故板短边方向单位宽度的底层钢筋可选用 $\phi 16@140$ 。

同理，进行其它板的配筋计算。

要点详解

1 壳截面属性



图 1-1-1 面截面属性对话框

图 1-1-1 为定义面截面的对话框,用户可根据需要选择合适的单元类型、输入厚度数据、选择材料等。常用的“类型”和“厚度”区域的参数说明如下:

1. 壳截面类型

不同类型的壳截面具有不同的力学性能:

a) 膜

膜单元只具有平面内刚度,通常用于模拟建筑结构中的楼板,在分析中只考虑其传递荷载的作用,而并不关心单元本身的受力变形情况。由于膜单元不能承受平面外的横向荷载,所以一般不对其进行网格剖分,避免产生无支撑的节点,导致异常的分析结果。

b) 板

与膜单元相反,板单元只具有平面外刚度,只承受弯曲和横向力。通常情况下,建筑结构中很少用到这种纯板类型的面单元。

c) 壳

壳单元具有膜单元和板单元的力学属性之和。所以,壳截面是真正意义上的壳单元,可承受任何力和弯矩,适合模拟任何面对象。通过合理的网格剖分,在分析中能够考虑其刚度、质量对结构的贡献,并且能够得到面单元自身的应力、应变等情况。

另外,壳又分薄壳和厚壳,区别在于是否考虑单元的横向剪切变形。一般地,当面对象的厚度小于其边长 $1/10$ 时,横向剪应力对变形的影响可以忽略,一般采用薄壳单元来模拟。厚壳单元适合用于模拟横向剪切变形为主的面对象,例如:筏板、基础等。用户在不确定剪切变形是否可以忽略的情况下,推荐使用厚壳。

d) 分层壳

分层壳基于复合材料力学原理,将一个壳单元分成多层,每层根据需要设置不同的厚度和材料,一般用于考虑墙体的非线性属性。更多内容可参考知识库文章

SAP2000 案例教程：箱涵结构

<http://www.cisec.cn/Support/knowledgeBase/knowledgeBaseMenu.aspx?menuid=569>，本文不再赘述。

2. 厚度

- a) 膜厚度 (th)：用于计算壳和膜类型截面的膜刚度；用于计算单元体积，进而计算单元自重和质量。
- b) 弯曲厚度 (thb)：用于计算壳和板类型截面的抗弯和抗剪刚度。

一般情况下，两个厚度可输入相同值；但对于某些特殊应用，例如模拟波纹板，需指定不同的膜厚度和弯曲厚度。

2 箱涵底板与垫层建模

本案例中考虑混凝土垫层的建模，是为了展示 SAP2000 更多的编辑功能。用户应结合实际情况对工程模型合理简化，自行选择是否在模型中考虑垫层。

在程序中有两种方式考虑垫层的建模：方式一，是将垫层绘制在箱涵底板中轴线位置，然后对垫层指定向下的节点偏移，使箱涵底板的底面与垫层的顶面平齐；方式二，直接在垫层实际中轴线位置绘制，然后通过节点约束模拟二者的连接关系。下面分别说明两种方式的操作要点，并对比两种建模方式的计算结果。

2.1 方式一

程序提供两种方法指定面对象的厚度偏移，模拟垫层与箱涵底板的台阶型位置关系：方法 1.节点样式+厚度方向节点偏移；方法 2.通过面对象的点指定节点偏移。

采用“方法 1”具体操作步骤如下：

- a) 点击菜单**定义>节点样式**命令，添加节点样式名称：**offset**
- b) 直接在窗口中选择垫层所有节点，点击菜单**指定>节点样式**命令，指定节点样式值，如下图 2-1-1 所示。

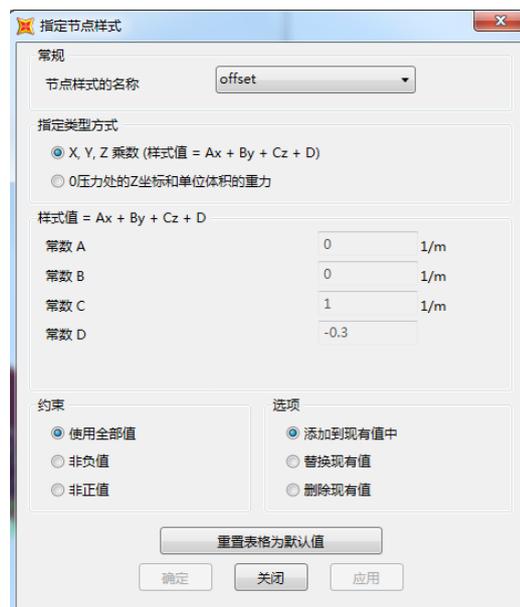


图 2-1-1 指定节点样式值

- c) 鼠标点选垫层，点击菜单**指定>面>面厚度覆盖项(壳)**命令，选择基于节点样式指定厚度方向节点偏移，如下图所示，在激活的“节点样式”下拉列表中选择“offset”，比例系数为 1。构件实际偏移距离为节点样式值与比例系数的乘积。

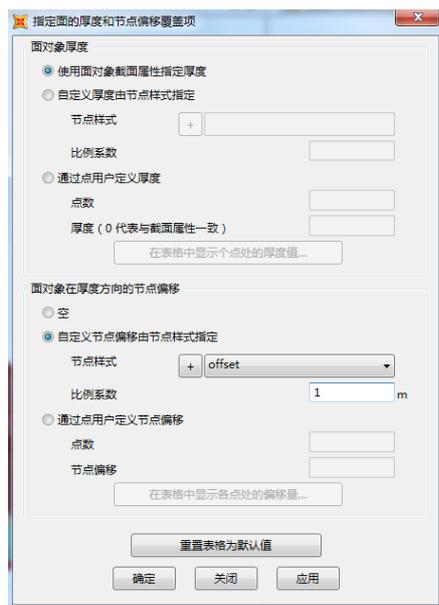


图 2-1-2 指定节点偏移

采用“方法 2”操作步骤如下：

该方式无需用户定义节点样式，鼠标点选垫层，点击菜单**指定>面>面厚度覆盖项(壳)**命令，选择“通过点用户定义节点偏移”直接基于点指定偏移。面对象为 4 节点，点击右侧箭头按钮，分别对每个节点指定“-0.3” m 偏移值，如图 2-1-3。或点击“在表格中显示点处的偏移量”，直接在弹出的表格中输入偏移值，如图 2-1-4 所示。



图 2-1-3 指定节点偏移



图 2-1-4 节点偏移值

节点偏移定位单元参考平面，对于普通壳即为单元的中面。负偏移值代表沿着单元局部 3 轴的反方向。上述两种方式都可达到相同的效果，比较而言，基于节点样式的方法更加灵活，可以轻松实现许多单元节点偏移的连续变化。

2.2 方式二

“方式二”即直接按照实际几何位置绘制垫层，然后指定节点约束模拟连接关系，这是一种更为直观的建模方式。具体操作步骤如下：

1. 为了方便绘制垫层，在 Z 向添加轴线 Z3，标高为-0.3m，如下图 2-2-1 所示。



图 2-2-1 添加轴网

2. 在选择二维平面视图下绘制垫层，为了便于后续处理将垫层分为 3 个对象绘制，如下图所示 2-2-2 所示。

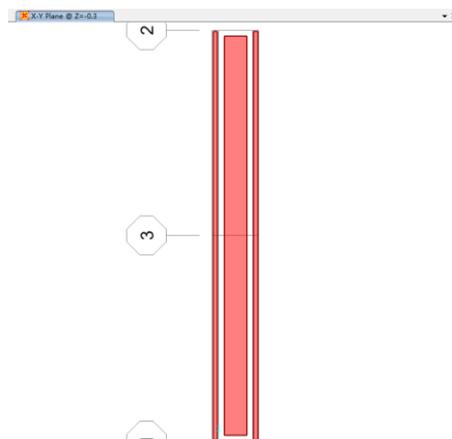


图 2-2-2 分块绘制垫层

3. 选择垫层“中间面对象”及箱涵底板，点击菜单 **编辑>面>分割面**，生成中间节点，这样可以更加准确地考虑两板之间的相互作用（协调变形），按数目将面对象分割为 8X80，如下图 2-2-3 所示。

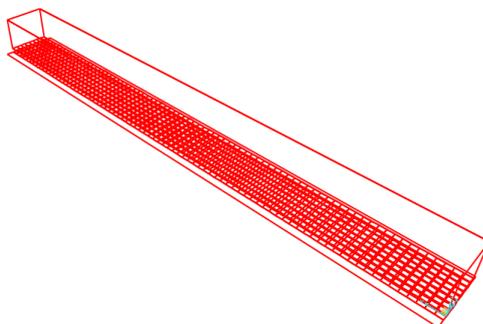


图 2-2-3 分割面对象

4. 定义节点束缚 WELD1，如下图 2-2-4 所示。点击菜单 **指定>节点>束缚** 命令。拼接（Weld）束缚能够批量处理一组节点，程序自动产生用来连接重合节点的多个个体约束。如果节点间的距离小于或等于用户定义的容差值，则程序认为节点重合。本案例，容差值为箱涵底板与基础垫层间距 350mm。



图 2-2-4 定义节点束缚

注意：箱涵底板或基础垫层的节间间距必须大于 350mm，否则将造成额外的刚性约束。

5. 框选新生成的所有内部节点，然后指定 WELD1 节点束缚，程序将根据容差限值自动生成多个 Body 束缚。

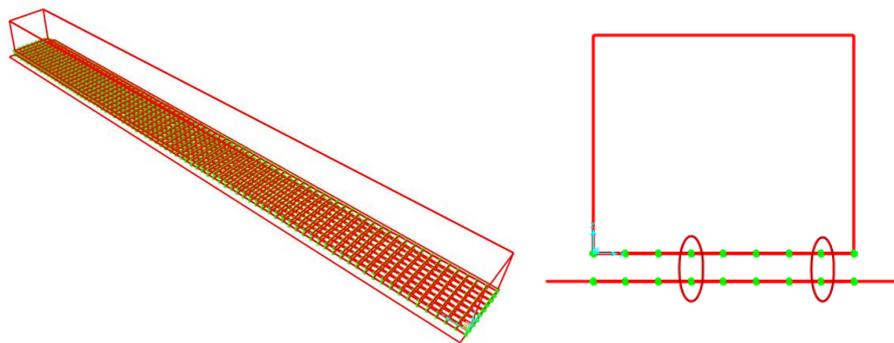


图 2-2-5 显示节点约束

2.3 模型对比

分别采用上述两种方式建立模型如下，对两个模型指定相同荷载和网格尺寸、数量，进行分析对比二者计算结果。

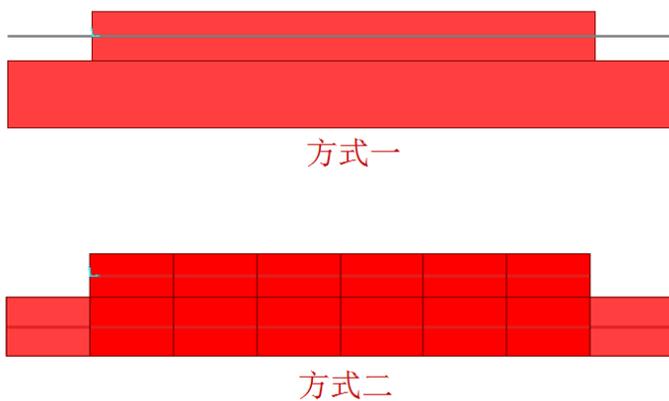


图 2-3-1 模型对比

对比相同组合 COMB2 下壳内力 (M11)，可以看到内力分布基本相同，查看相同位置处内力如下图 2-3-2 所示，可知两种方式对应模型的内力相同。

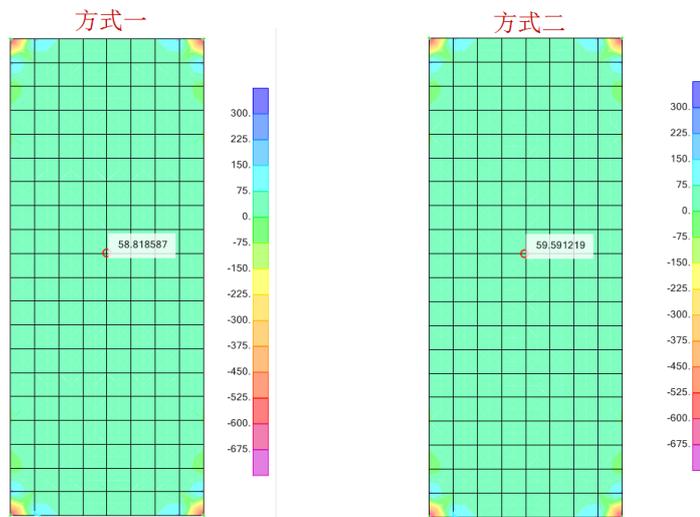


图 2-3-2 壳内力对比

SAP2000 案例教程：箱涵结构

查看相同组合 COMB2 下结构位移，位移大小和分布基本一致如下图 2-3-3 所示，显示相同位置处节点位移，可知分别采用两种方式建立的模型位移相同。

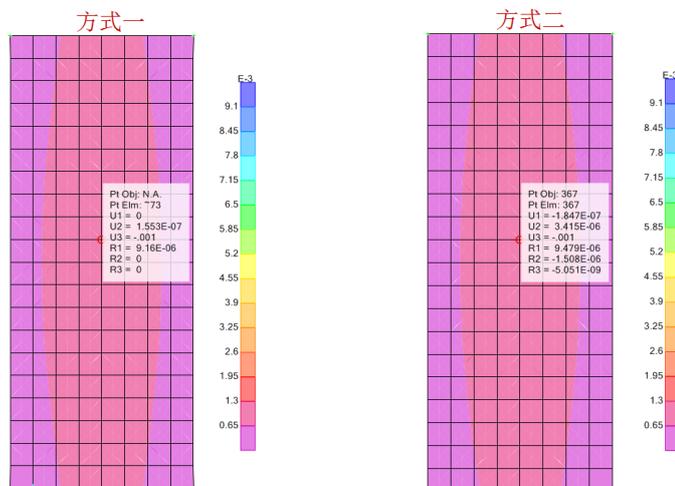


图 2-3-3 位移对比

综上所述，采用两种模拟方法可达到同样的效果，工程师可自行选择模拟方式。

3 非均匀面荷载的施加

本节将详细介绍节点样式的原理及指定的方法,通过节点样式可以容易地施加非均匀表面压力荷载,模拟静水压力、土压力等荷载。表面压力荷载用于壳单元任意 6 个面施加外力荷载,并且表面压力总是垂直于作用表面(即沿加载面的法线方向),正的荷载值沿外法线负方向。因此,表面压力荷载无法指定沿面对象切向的面荷载(如:摩擦力)。

3.1 节点样式

节点样式通过对节点指定样式值的方式描述某物理量在空间的复杂分布。需要注意的是节点样式是一组标量值,本身并无方向性。所以节点样式在具体的应用过程中,其方向性完全取决于应用该节点样式的物理量。比如:用于指定材料温度时,则节点样式代表无方向性的温度的空间分布;用于指定表面压力时,则节点样式代表沿法向的均布面荷载的空间分布。

对于节点样式的指定可以采用两种方法,即:

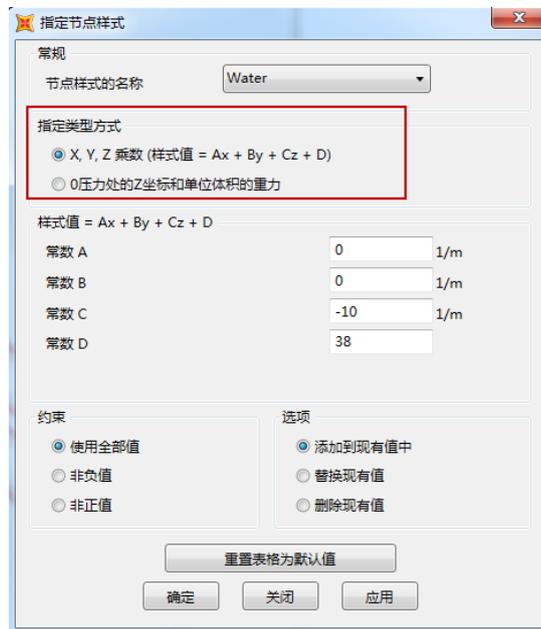


图 3-1-1 节点样式

1) X、Y、Z 乘数法

所谓“乘数”(A、B、C)即节点样式值在当前坐标系(由程序界面右下角的下拉列表设置)下,沿 X、Y、Z 方向的变化梯度。“常数”D为坐标原点(0,0,0)的样式值,故节点样式值的表达式为:

$$v_j = Ax_j + By_j + Cz_j + D$$

根据样式值 V_j 和节点的坐标位置 (x_j, y_j, z_j) , 可求出“乘数”值(A、B、C)和“常数”D值。例如,定义施加侧面静水压力的节点样式如下图 3-1-2。样式值沿着高度方向 Z 向变化,所以乘数 A、B 取为 0, C 为-10, 常数 D 为 38。

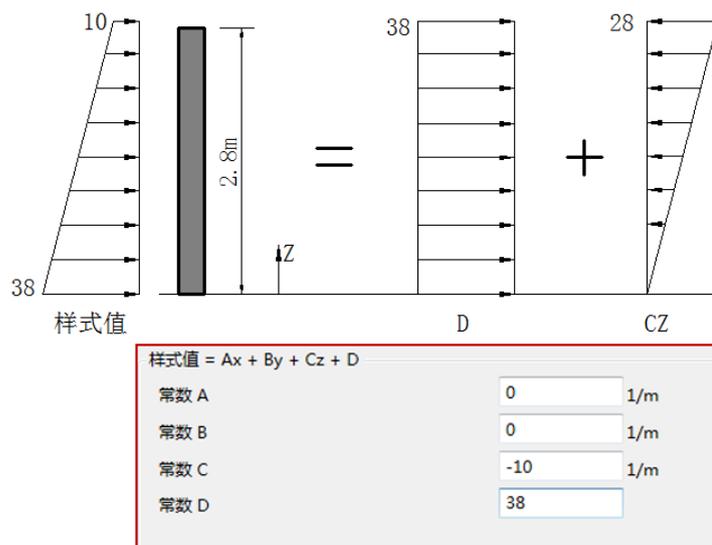


图 3-1-2 X、Y、Z 乘法

2) 指定零压力值的 Z 坐标和材料重度

该方法专门用于静水压力荷载的快速定义，需要注意以下几点：

- 材料重度必须为正值，即样式值沿当前坐标系 Z 方向的变化梯度；
- 程序将随 Z 坐标的减小而自动增大样式值；
- 对于常数部分，则通过均布荷载值进行指定，该值可正可负。

采用该方式指定侧面静水压力对应的样式值，如下图 3-1-3 所示相当于把侧壁水压拆分为两部分：均布面荷载+倒三角荷载，参数设置如下：

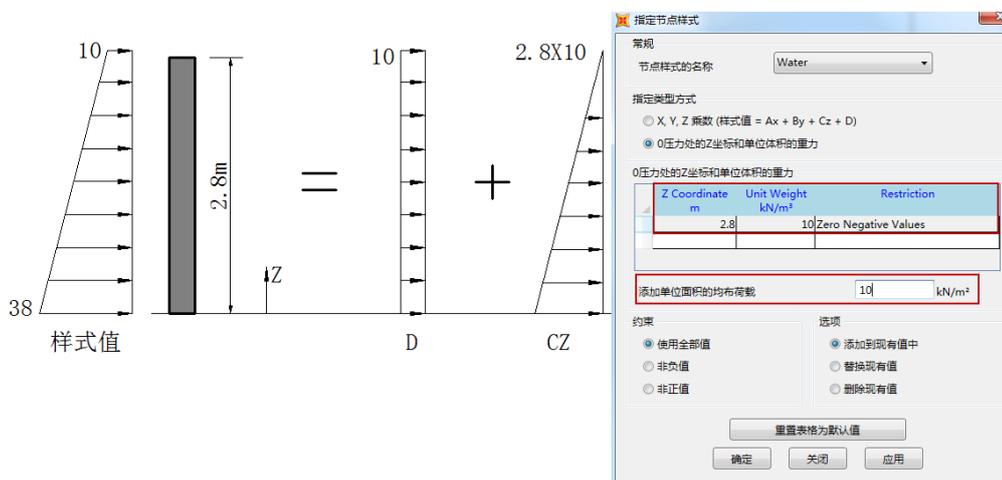


图 3-1-3 指定零压力值的 Z 坐标和材料重度

通过上述节点样式对话框，可以定义随节点位置线性变化的节点样式值。用户如需定义非线性函数的节点样式值，可通过二次开发工具“扩展节点样式”或借助交互式数据库编辑加以实现，更多内容可参考以下链接，本文不再赘述。

<http://www.cisec.cn/Support/knowledgeBase/knowledgeBaseMenu.aspx?menuid=511>

3.2 指定侧壁土压和水压力荷载

以指定侧壁土压力荷载为例进行说明，读者可重复以下操作完成侧壁水压力的指定。

选择 4 号面对象（图 3-2-1 中虚线显示的面），点击菜单 **指定>面荷载>表面压力** 命令，在弹出的对话框中定义加载面为“底”面，选择压力通过节点样式指定，选择节点样式为“Soil”，乘数为“1”，施加的荷载值为节点样式值与乘数的乘积。乘数为正值代表荷载方向与+3 轴方向一致，查看 4 号面对象的土压力荷载值大小和方向，如下图 3-2-1 所示。

同理，对另一侧面（即 3 号面对象）施加土压力荷载。由于荷载反向，故“加载面”应修改为“顶”面，或将乘数修改为“-1”。完成荷载指定后，显示两侧壁加载效果如图 3-2-2，箭头代表加载方向，数值代表面对象顶、底处的表面压力值。

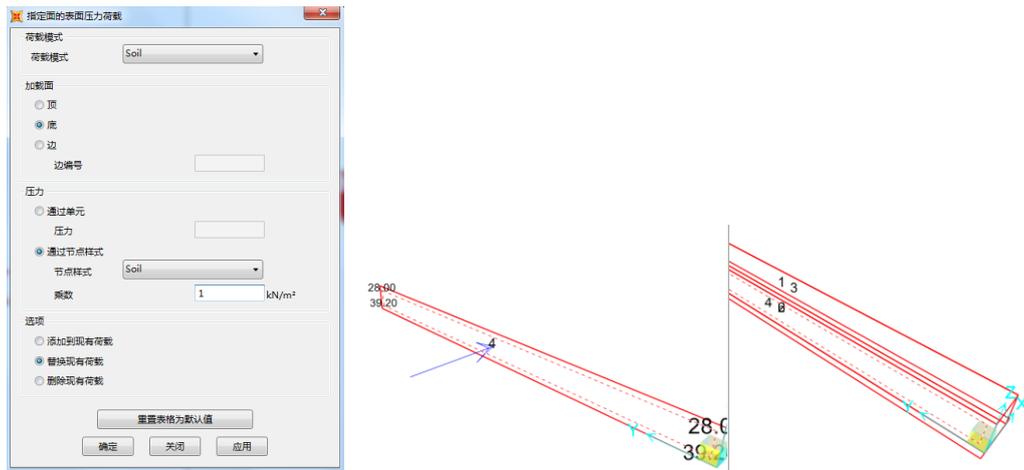


图 3-2-1 施加表面压力

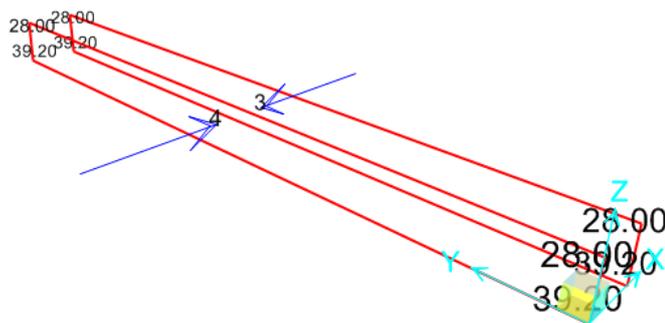


图 3-2-2 显示土压力荷载

3.3 面对象反转局部 3 轴

不难发现本案例中，箱涵两侧面所受荷载为关于竖向中面的对称关系。基于此，加载前利用“反转局部 3 轴”命令，修改面对象局部 3 轴方向，使之也为反对称关系如下图 3-3-1 所示，这样对两个面指定荷载时使用同样的参数设置即可，从而提高操作效率。

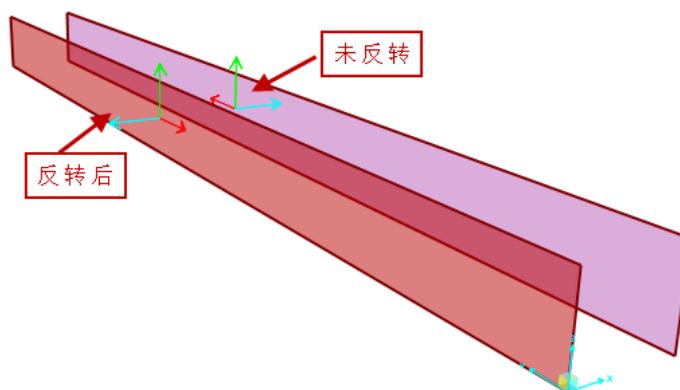


图 3-3-1 反转局部 3 轴快速加载

对对象进行“反转局部 3 轴”的基本原理如下：程序在 $j1$ 编号保持不变的前提下，将其余节点的顺序进行“反向”进而反转局部 3 轴的方向。

如下图 3-3-2 所示，根据四边形壳单元的节点顺序“ $j1 - j2 - j3 - j4$ ”（或三角形壳单元的节点顺序“ $j1 - j2 - j3$ ”），结合右手螺旋法则，可以确定+3 轴方向。同时确定四个（或三个）侧面以及顶面（Top）和底面（Bottom），其中顶面为+3 轴所指的面，底面为-3 中所指的面。

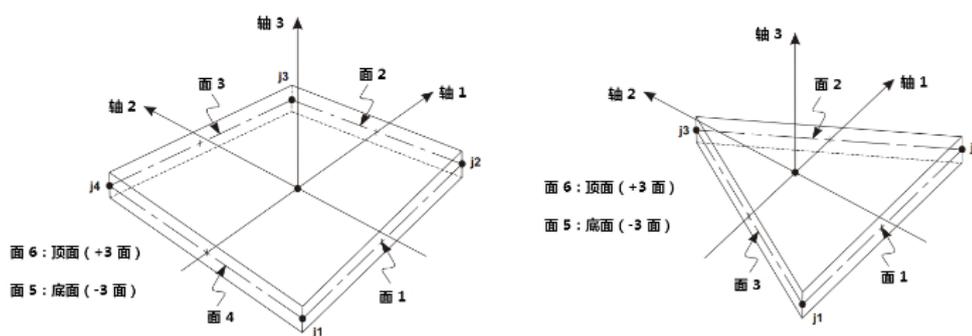


图 3-3-2 面单元示意图

“反转局部 3 轴”时，程序将提示用户选择各种指定（属性及荷载）的方向选项，如图 3-3-3 所示。

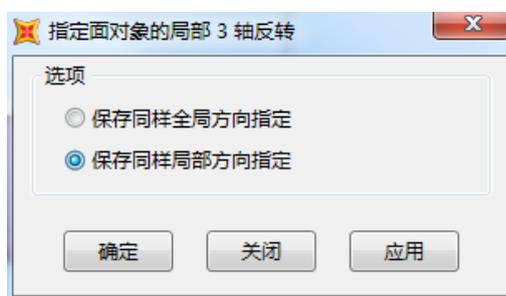


图 3-3-3 反转局部 3 轴对话框

具体包括：

- 保持相同的全局方向，即荷载和属性不随局部轴转动；
- 保持相同的局部方向，即荷载和属性随局部轴转动。

对于在全局坐标系下完成的指定操作，这两个选项无意义。只有对基于局部轴完成的指定操作（如：网格划分、荷载等），该选项才起作用。

4 土体边界条件的处理

土体对结构的作用是采用弹簧模拟，还是将其转化为荷载来考虑，可以基于对土压力状态的判断。如果处于主动土压力状态，则应将其转化为对挡土墙的土压荷载；如果处于被动土压力状态，则采用弹簧来模拟土体对结构的支承作用。本案例中，侧面及顶面的土体边界转化为荷载考虑；而下部土体边界采用面弹簧模拟，具体参数设置如下。

如下图 4-1-1 所示，对于简单的面弹簧，其力学性能分为三种：拉压；单拉；单压。（需要强调的是，考虑单拉或单压弹簧的荷载工况必须定义为非线性工况。否则，程序将视其为拉压弹簧而进行线性分析。并且，非线性分析结果并不符合线性叠加原理，故非线性工况的荷载组合不能使用常规的线性叠加的荷载组合。用户需以非线性荷载工况的方式考虑各个荷载模式的组合，并对各个荷载模式指定相应的比例系数。）除了输入面弹簧刚度（即基床系数）、选择弹簧力学性能之外，用户还需指定弹簧位置和受拉方向。

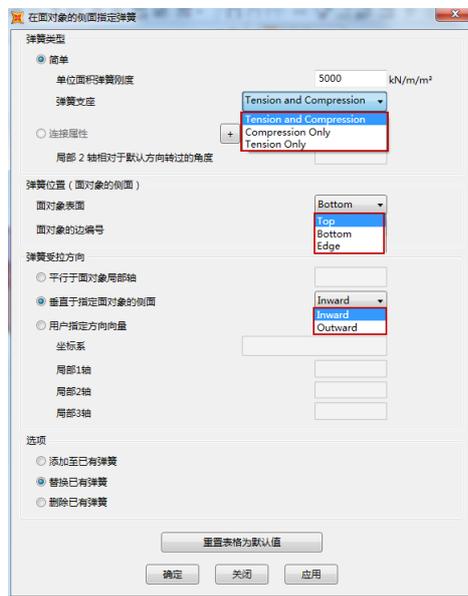


图 4-1-1 面弹簧对话框

1) 弹簧位置

面弹簧不仅可在面单元的平面上指定，也可对侧面指定，对于在侧面上指定的面弹簧，其弹簧刚度与厚度的乘积可视为线弹簧刚度。程序根据面单元的节点数量（三节点或四节点），确定 2 个平面（顶、底）以及 3/4 个侧面，具体见图 3-3-2。为了便于理解，可将每个弹簧视作两节点单元：起始节点 i 为地面，终止节点 j 为面对象所包含的节点。程序将根据以上 5 个或 6 个面确定弹簧位置，即终点 j 的位置。

2) 弹簧受拉方向

起点至终点 ($i \rightarrow j$) 的方向即弹簧受拉方向。由于模型中只有面对象所包含的一个节点（或者说，起点和终点重合），故需要用户明确指明受拉方向。

弹簧的终点 j 由弹簧位置确定后，其起点 i 则由弹簧受拉方向确定。定义矢量 ($i \rightarrow j$) 的方法包括以下三种：

- a) 参考面对象的局部轴
- b) 参考弹簧位置的外法线方向

c) 直接指定矢量 ($i \rightarrow j$)

程序默认采用方法 2，用户需要选择内/外：内即指向单元内部，对应的起点 i 位于单元外部；外即指向单元外部，对应的起点 i 位于单元内部。具体来讲，位于顶面的面弹簧，内即与局部 3 轴指向相反，外则与局部 3 轴相同；位于底面的面弹簧，则反之。事实上，对于拉压弹簧，内/外选项对分析结果并无影响。但对于单拉或单压弹簧必须谨慎指定，否则容易造成结构的约束不足而引起非线性分析不收敛。对于方法 1 和方法 3 比较容易理解，前者可视为后者的快捷方式。

综上，对于本案例而言，如需要模拟弹性地基的单压属性（例如进行抗浮验算），可采用以下方式指定单压土弹簧：

- 单压 + 底面 + 内法线 或 局部 +3 轴 或 全局向量 (0, 0, 1)
- 单压 + 顶面 + 外法线 或 局部 +3 轴 或 全局向量 (0, 0, 1)

另外，程序支持非线性土体属性的模拟，具体可参考《CSI 分析参考手册》第 15 章内容。

5 壳内力输出

关于壳内力的输出对话框如下：



图 5-1-1 壳内力

可知，壳单元的内力由膜内力和板内力共 8 个分量组成，分别为：

膜内力包括：正内力（F11、F22）、面内剪力（F12）

板内力包括：弯矩（M11、M22）、扭矩（M12）、横向剪力（V13、V23）

注意：M11 并非绕局部 1 轴的力矩，而是绕局部 2 轴的力矩。如果采用右手法则确定其方向，由于正的内力矩 M11 应使壳单元的底部（即负 3 轴方向）受拉，故拇指指向沿局部 2 轴的负向。但是，对正的内力矩 M22 应用右手法则，拇指指向则沿局部 1 轴的正向。

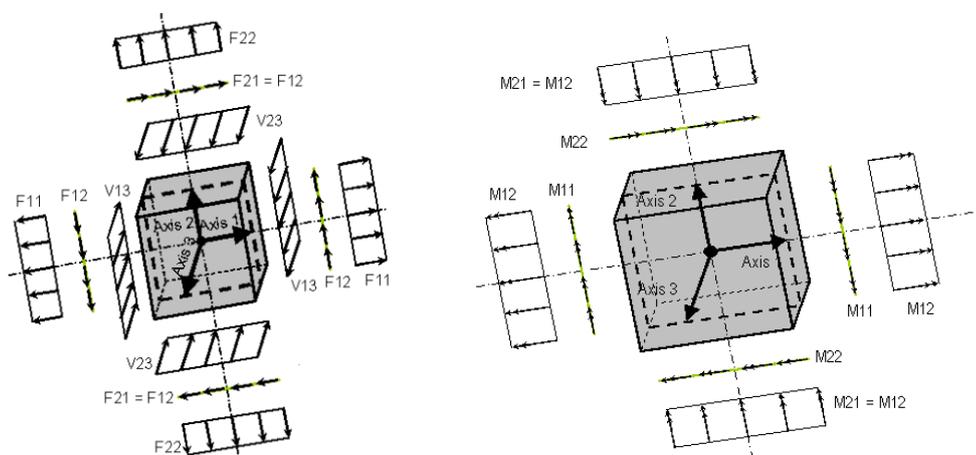


图 5-1-2 壳内力方向

另外，程序还输出 6 个合成内力包括：

FMax 面内最大膜力, FMin 面内最小膜力, FVM 等效 Mises 膜力;

MMax 面外最大弯矩, MMin 面外最小弯矩;

VMax 最大横向剪力。

壳单元的每个内力值皆由相应的应力分量合成,即对应应力分量沿壳单元的厚度进行积分运算。关于壳应力的输出对话框如下:

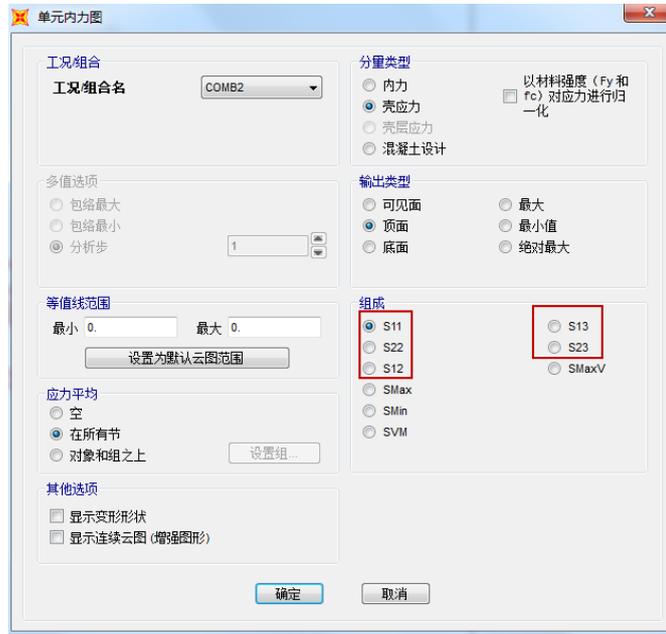


图 5-1-3 壳应力

正应力: S11, S22;

剪应力: S12, S13, S23。

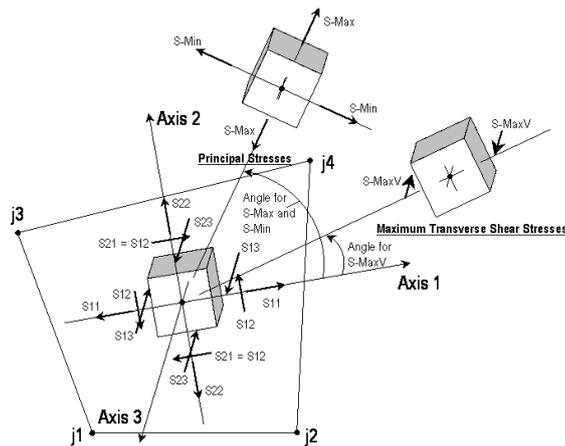


图 5-1-4 壳应力方向

另外,输出 4 个合成应力包括:

SMax 面内最大主应力, SMin 面内最小主应力;

SVM 等效 Mises 应力;

SMaxV 最大横向剪应力。

注意：只有单值工况和单值组合下的合成应力与合成内力才可用，即多值工况（例如：反应谱工况、多步工况的包络结果）或多值组合下的合成应力与合成内力皆不可用，显示为零值。

6 箱涵倒角构造建模

如图 6-1-1 所示，实际多数工程中的箱涵内部带有倒角构造。本小节应部分工程师需求，演示如何在 SAP2000 中实现倒角构造的模拟。用户应结合实际情况对工程模型考虑合理的简化方案，选择是否在模型中考虑倒角构造。倒角构造的模拟，需借助“**面对象厚度覆盖**”选项，具体操作步骤如下：

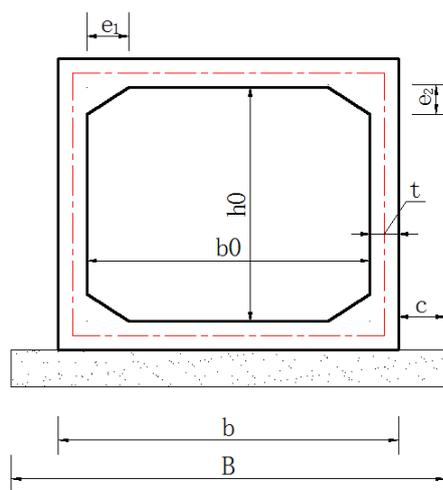


图 6-1-1 带倒角构造

如图 6-1-1 所示，本案例中将“倒角”视作箱涵侧壁局部区域的厚度变化。截面的倒角尺寸如下：

- $e_1=400\text{mm}$, $e_2=300\text{mm}$

【步骤一】：分割面对象

由于倒角只在侧壁两端局部区域引起厚度变化，故在变厚度位置处进行分割操作，效果如图 6-1-2 所示。面对象的分割可通过绘制辅助的点或线对象完成。

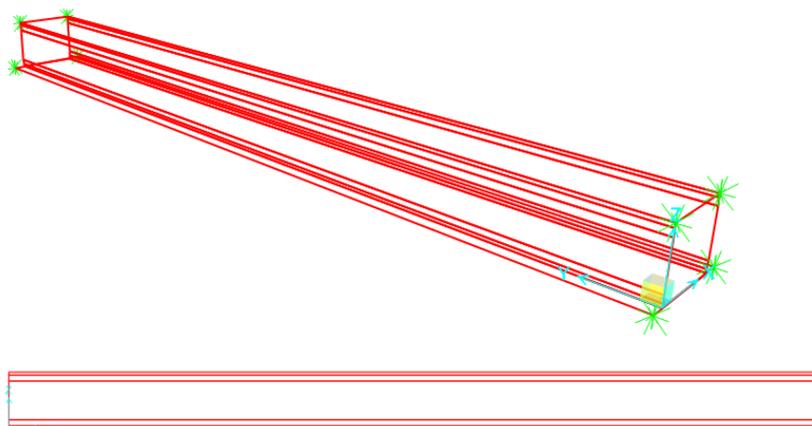


图 6-1-2 分割面对象

【步骤二】：指定“面厚度覆盖项”

选中变厚度的面对象,点击菜单命令**指定>面>面厚度覆盖项**,对话框包含“面对象厚度”和“厚度方向节点偏移”两个区域,选择直接基于面对象的点,指定各点厚度值和偏移值。(读者有兴趣的话也可采用基于节点样式的方法,也能得到相同效果。)

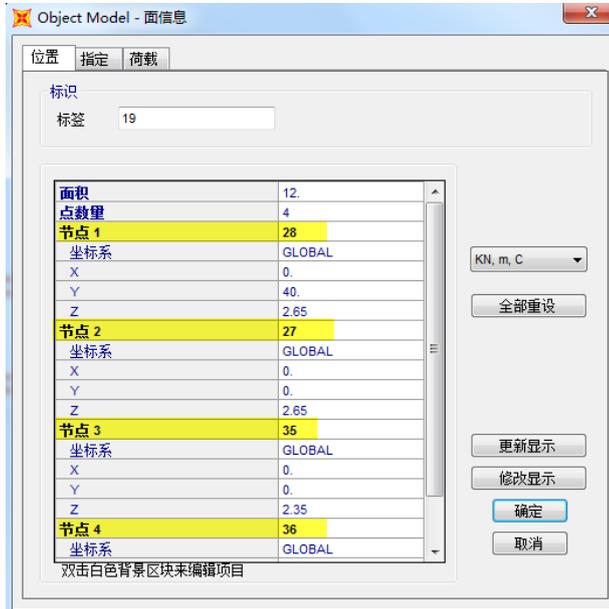


图 6-1-3 查看面对象节点编号

用户可以显示“面对象信息”位置标签如图 6-1-3 所示,查看面对象节点位置坐标或对应的节点标签,以确定不同编号点对应的厚度和偏移值如图 6-1-4 和 6-1-7 所示。



图 6-1-4 基于点指定面厚度

分别对“倒角”区域面对象指定面厚度如图 6-1-4,显示拉伸视图查看效果如下图 6-1-5 所示。可知,仅修改厚度并没有完全达到最终想要的效果,还需同时指定“在厚度方向节点偏移”才能实现厚度在内侧变化、外侧平齐的效果,如图 6-1-6 所示。

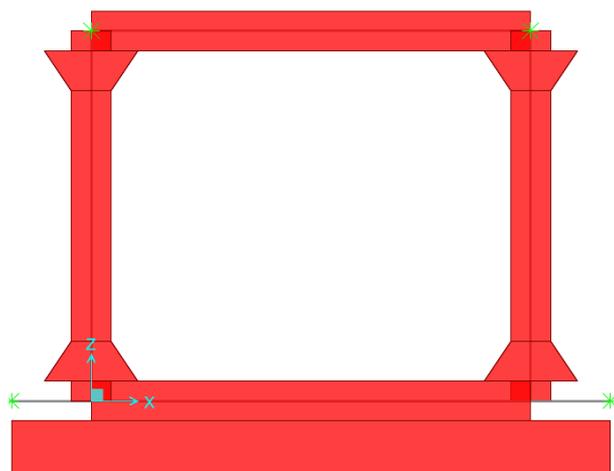


图 6-1-5 指定面厚度拉伸效果

点击“在表格中显示各点处的偏移量”，在表格中指定各节点偏移值如图 6-1-7 所示。节点偏移用于定位单元参考平面，正值代表沿着单元局部+3 轴方向。

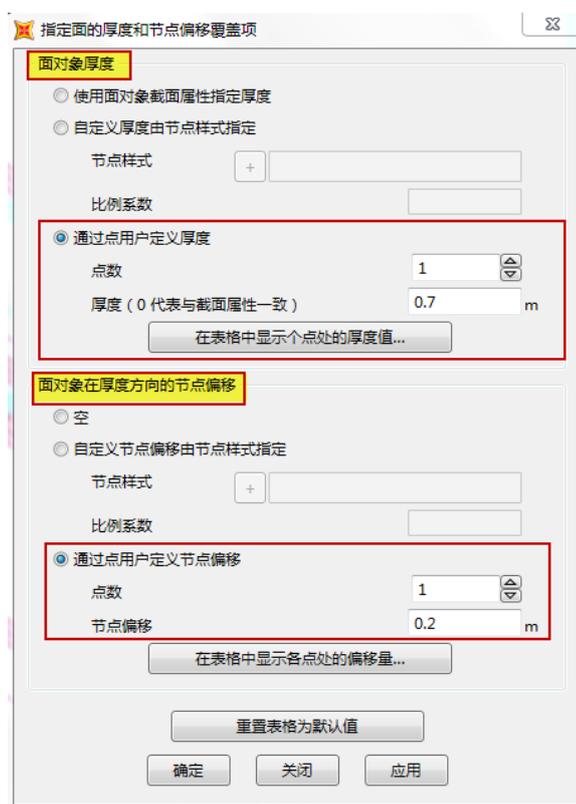


图 6-1-6 指定面厚度和节点偏移



图 6-1-7 节点偏移值

【步骤三】：完成相关指定后，显示拉伸视图效果如下。

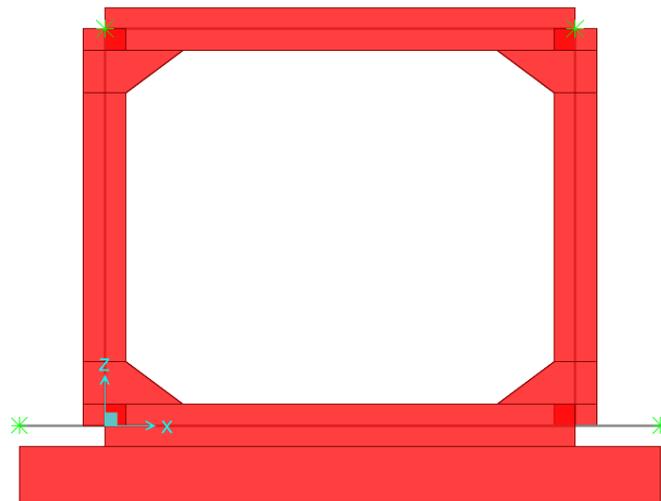


图 6-1-8 拉伸视图下显示效果