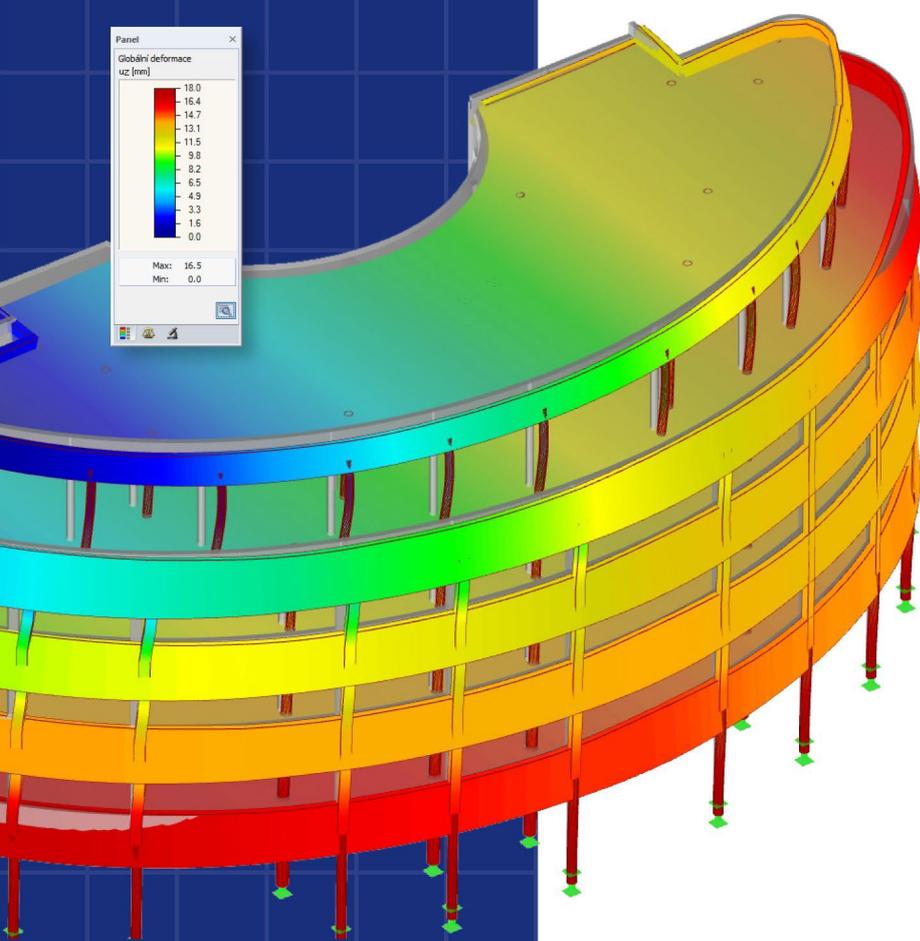


RFEM 6

三维通用有限元分析软件
德儒巴软件(上海)有限公司



案例教程

楼板舒适度分析



Dlubal Software

2023年10月

目录 Contents

1	建立模型	3
1.1	模型概况	3
1.2	新建文件	4
1.3	创建材料	6
1.4	创建截面	7
1.5	创建立柱	10
1.6	创建主次梁	14
1.7	创建厚度	19
1.8	创建楼板	19
1.9	创建支座	20
2	荷载与计算设置	21
2.1	荷载工况	21
2.2	施加恒活荷载	26
2.3	模态分析	27
2.4	加载路径人行荷载	29
2.5	固定位置人行荷载	39
3	时程分析与结果提取	44
3.1	时程分析	44
3.2	结果提取	45

1 建立模型

1.1 模型概况

本例将通过对大跨度楼板进行舒适度分析，为您介绍如何使用 RFEM 的时程分析模块。

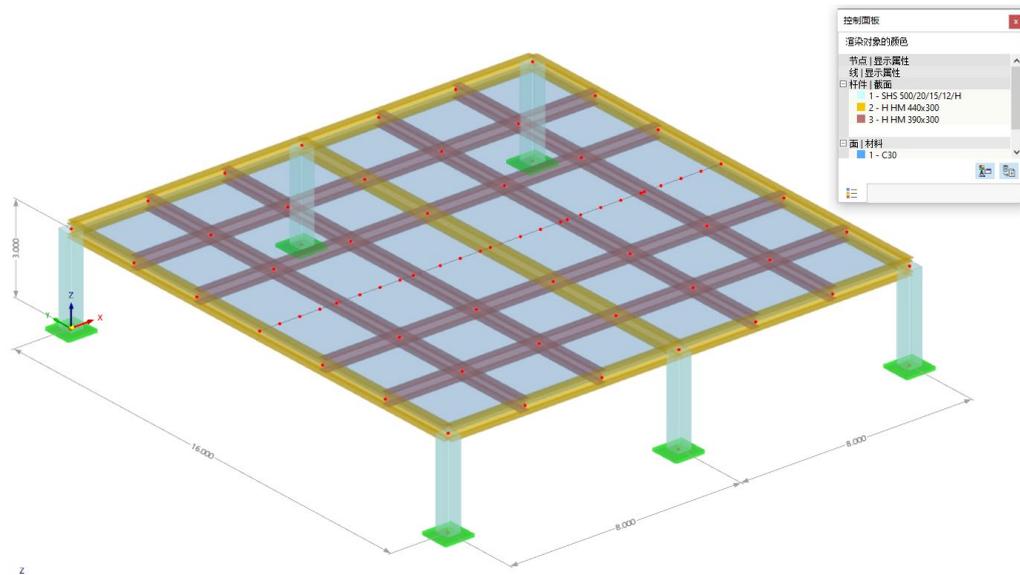


图 1.1 模型概况

楼板跨度 16m，厚 120mm，材料采用 C30 混凝土。主梁截面为 HM 440x300，次梁截面为 HM 390x300，材料采用 Q355。下部立柱截面为 500x20 方钢管，材料也为 Q355。

本例主要针对单人行走激励下的楼板舒适度进行分析。结构自重由程序自动计算，楼板附加恒荷载取 1kN/m^2 ，活荷载取 0.5kN/m^2 。

行人体重取 70kg，步距取 0.7m。人行步频一般为 1~3Hz，本例取 2Hz。在进行舒适度验算时，本文选择以下两种方法进行计算，并对比两种计算方法所带来的差异：

- 沿行走路径加载单步落足函数
- 在结构固定点(一般为最不利点)加载行走激励荷载

1.2 新建文件

1. 双击桌面上的 RFEM6 程序图标，运行 RFEM6 程序。点击菜单栏[文件]-[新建]，打开[新建模型-基本数据]对话框。
2. 在[新建模型-基本数据]对话框的[基本]选项卡中，输入模型名称。

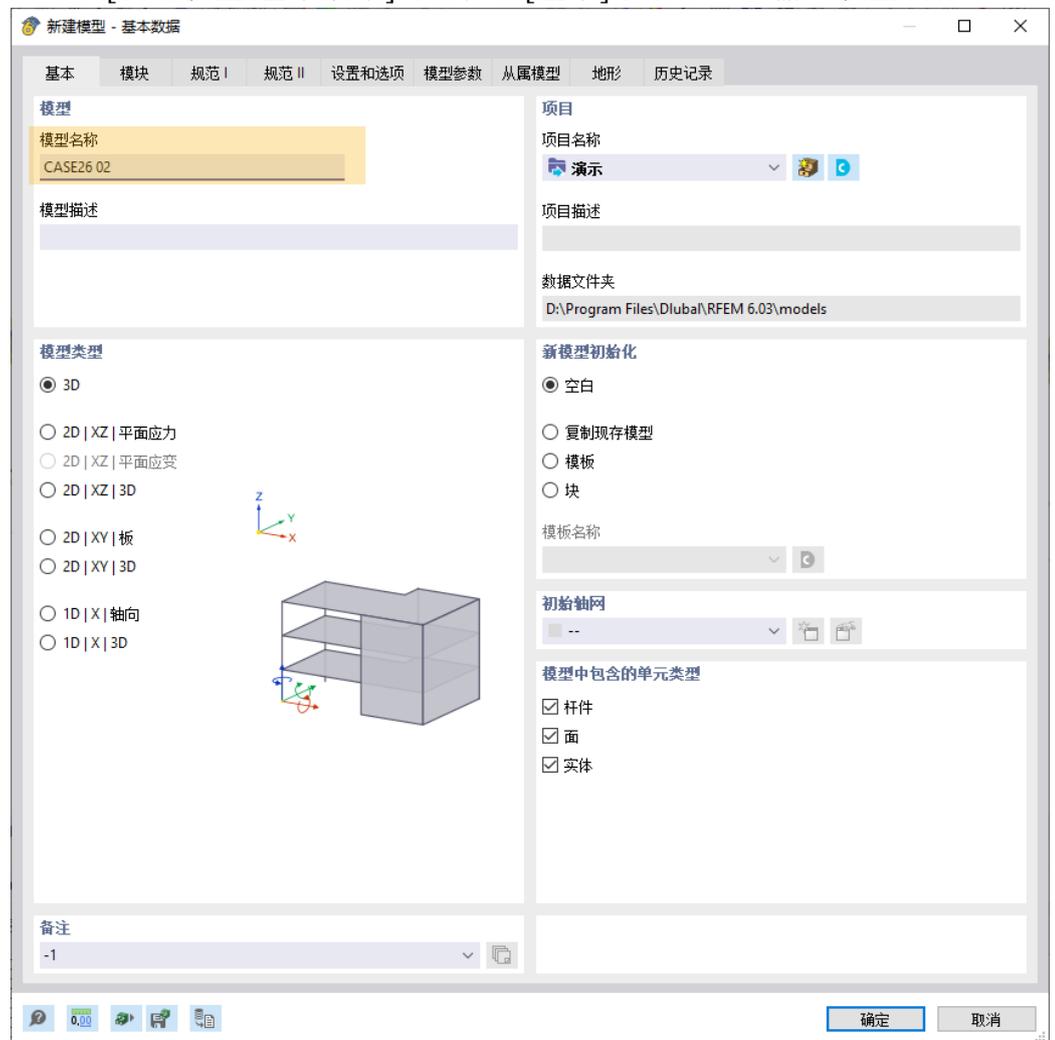


图 1.2 输入模型的名称

3. 切换至[模块]选项卡，我们可以根据项目实际情况勾选所需模块。本例中，我们选择勾选[模态分析]和[时程分析]模块。

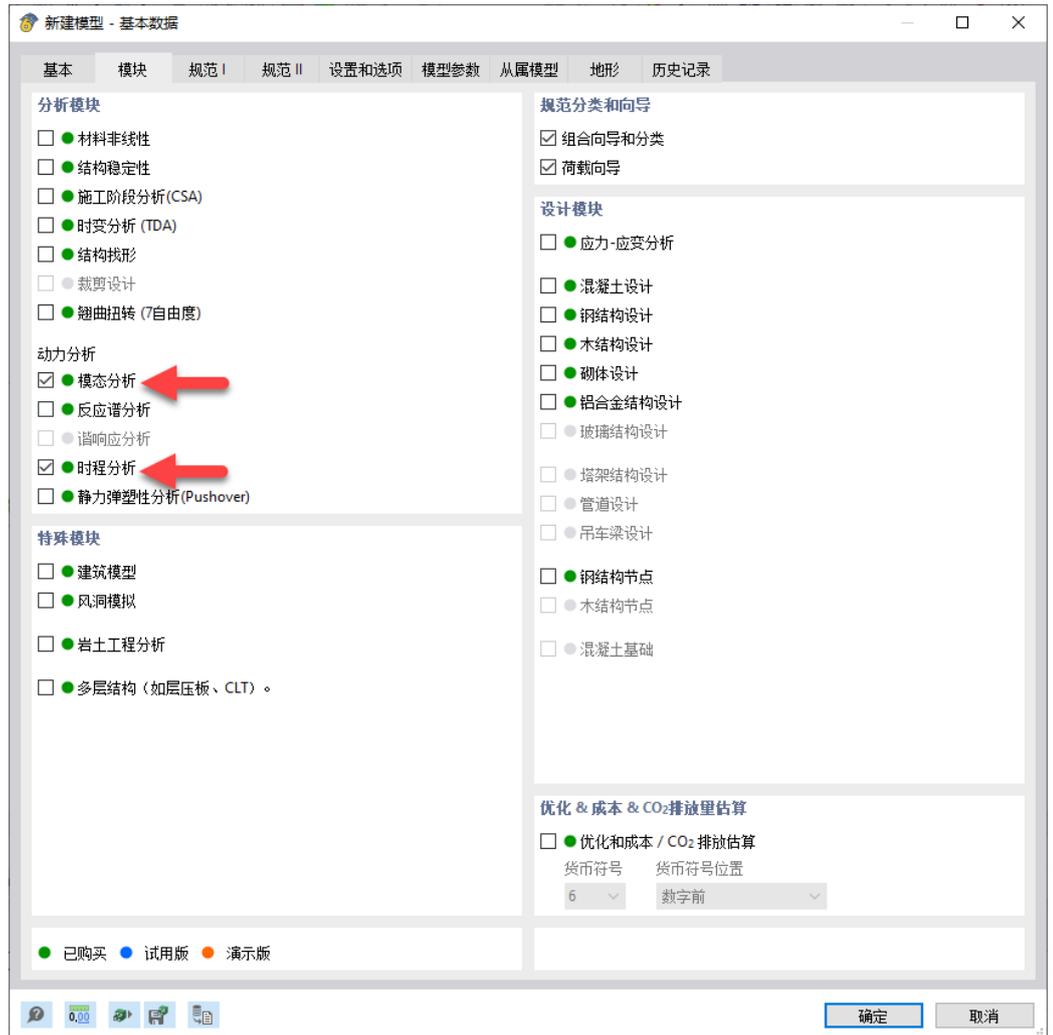


图 1.3 勾选所需的模块

4. 切换至[设置和选项]选项卡，将全局 Z 轴设置为向上为正，构件的局部 z 轴向下为正。

5. 点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成模型文件的创建。

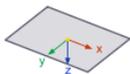
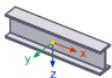
全局坐标系 XYZ

- Z 轴向下
- Z 轴向上

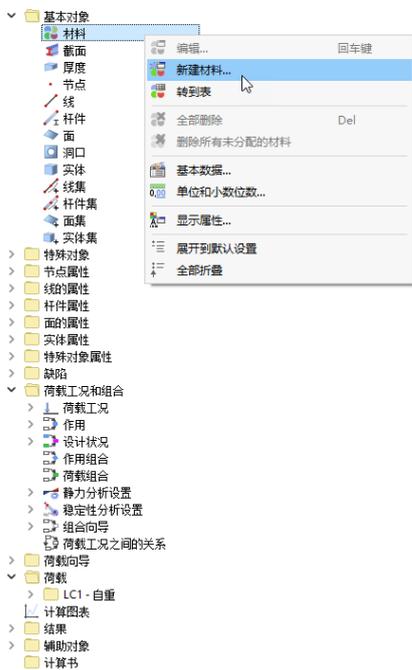


局部坐标系 xyz

- z 轴向下
- z 轴向上
- y 轴向上 | x
- y 轴向上 | z



1.3 创建材料



1. 在左侧[导航器数据]的[基本对象]>[材料]处，右键单击，选择[新建]，打开[新建材料]对话框。

2. 在[新建材料]对话框中，点击按钮，打开材料库。在材料库中选择Q355钢。点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭材料库，导入钢材。

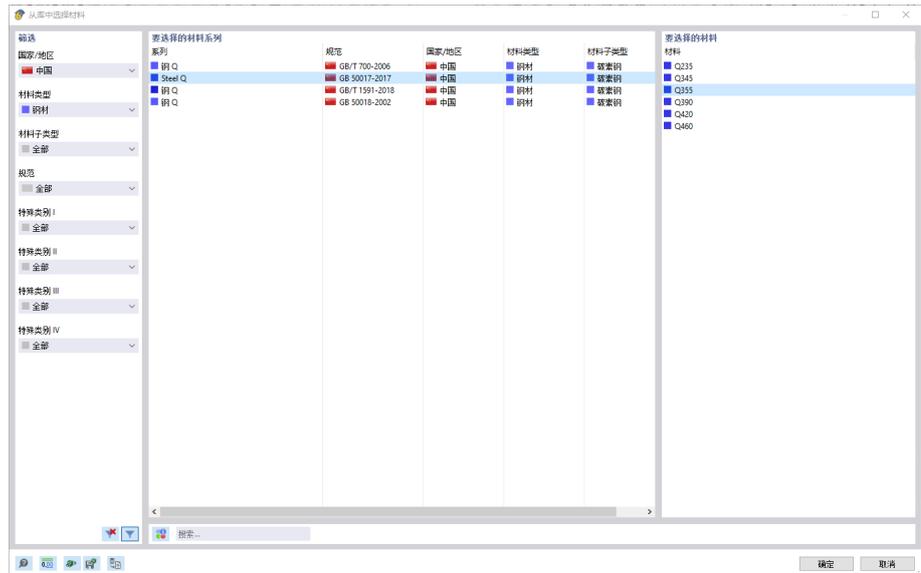


图 1.4 从材料库导入材料

3. 用同样的方法，从材料库中导入 C30。

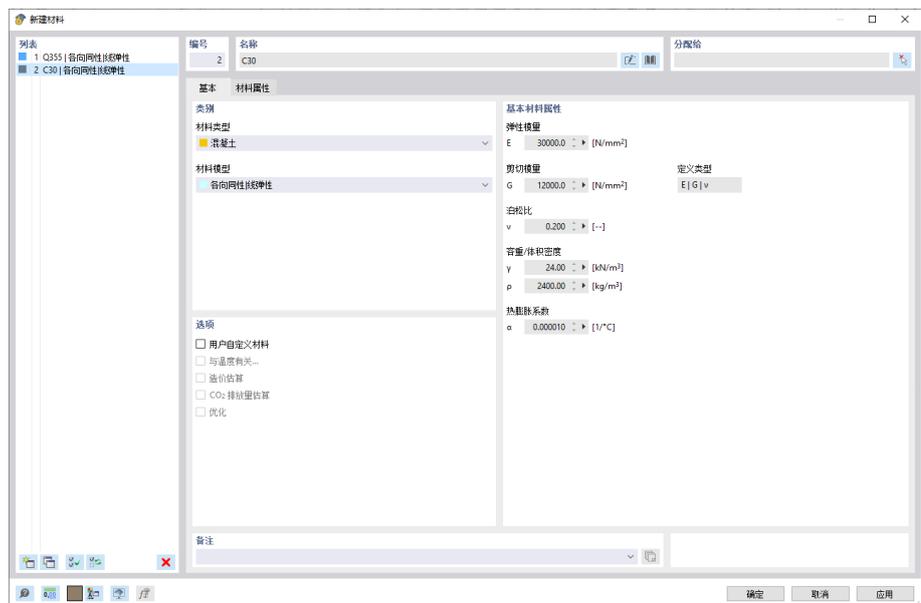


图 1.5 导入 C30 混凝土

4. 点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成材料的导入。

1.4 创建截面

1. 在左侧[导航器数据]>[基本对象]>[截面]处，右键单击，选择[新建]，打开[新建截面]对话框。

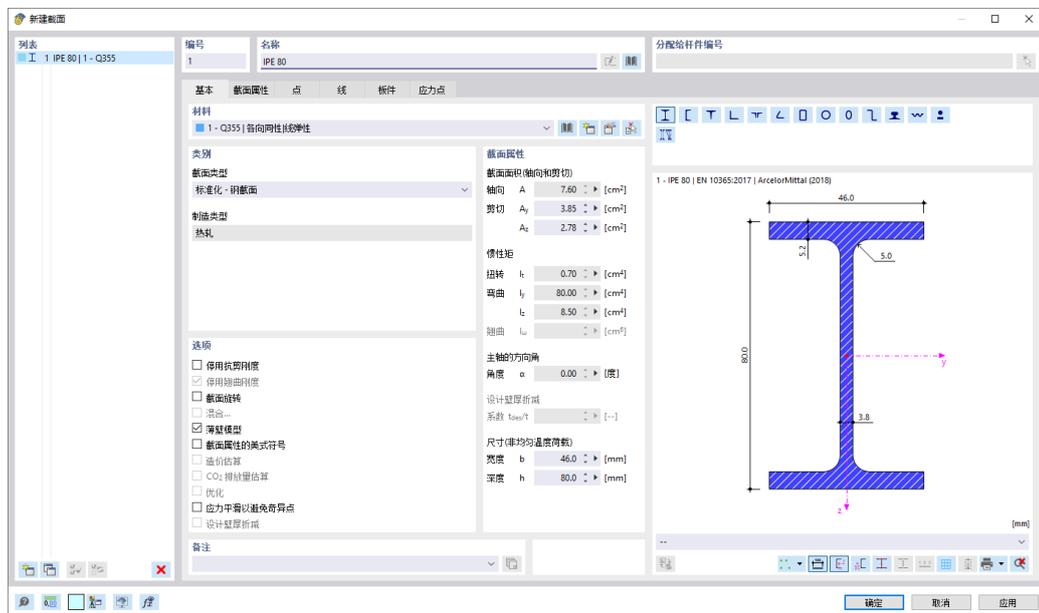
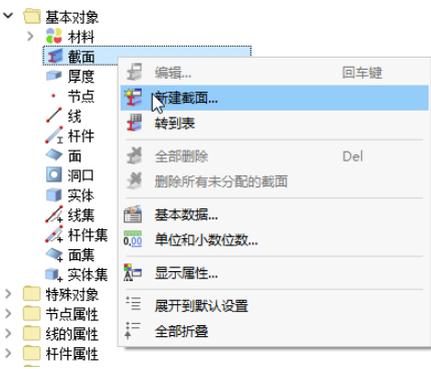


图 1.6 新建截面对话框

2. 将截面 1 的材料选择为 Q355，截面 1 的截面类型选择为“参数化-薄壁”。在对话框右侧将截面形状选择为矩形空心截面。

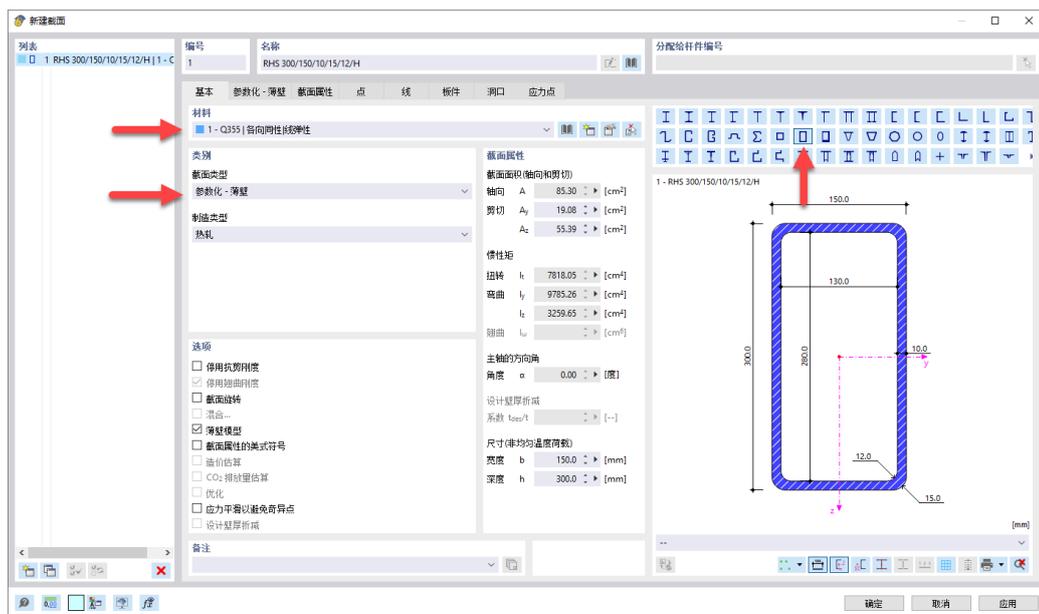


图 1.7 设置截面 1 的参数

3. 切换至[参数化-薄壁]选项卡，设置截面尺寸。将截面宽度和高度设置为 500mm，截面壁厚设置为 20mm。

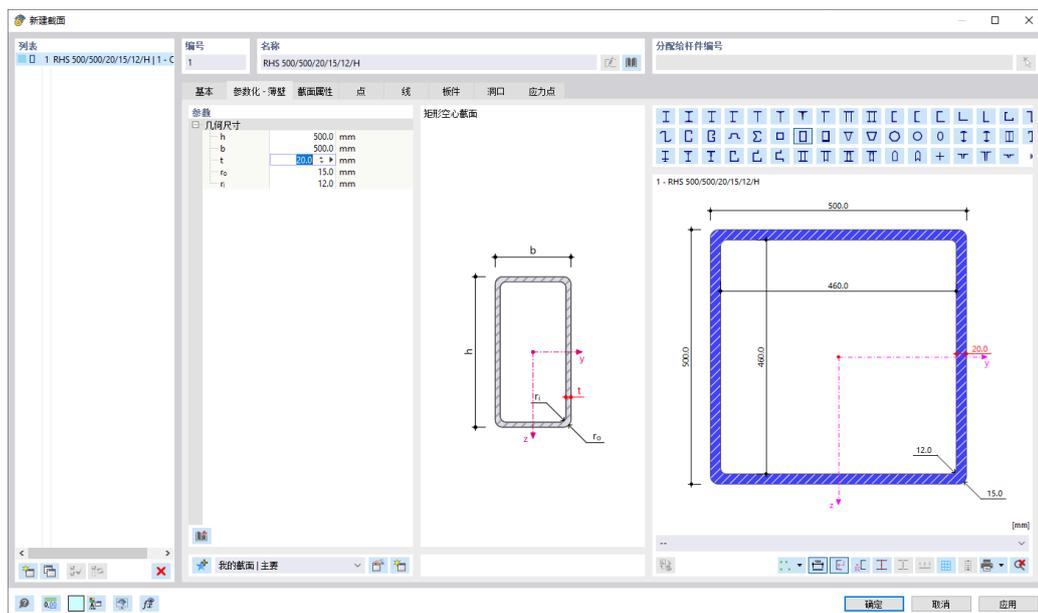


图 1.8 设置截面尺寸

4. 点击对话框左下角的  按钮，新建截面 2。点击截面 2 名称右侧的  按钮，打开[截面库]。在截面库中将截面 2 指定为 HM440x300，材料指定为 Q355。点击对话框右下角的[确定]按钮，完成截面的导入。

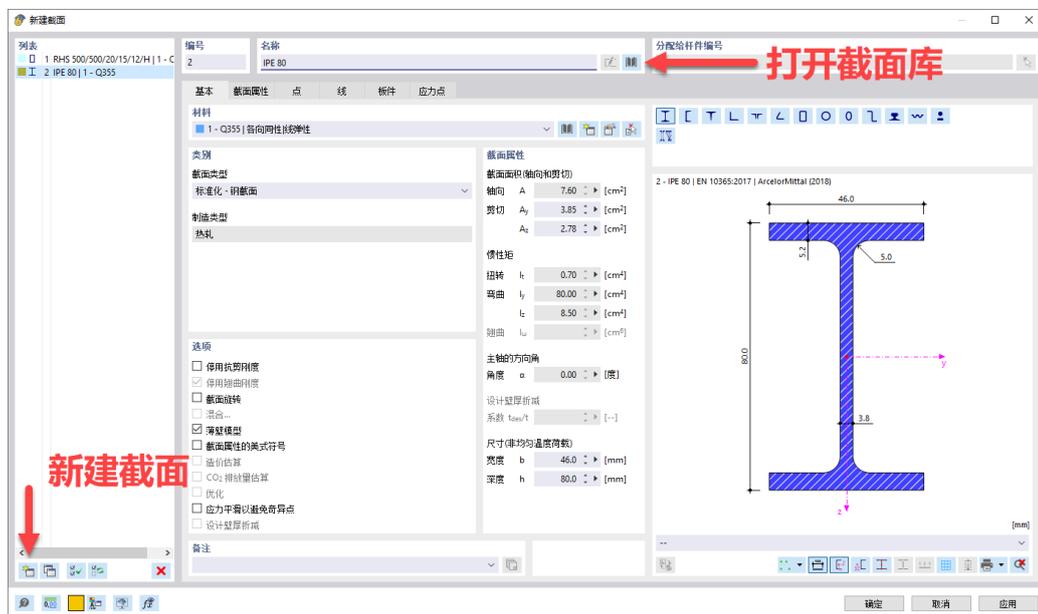


图 1.9 新建截面 2

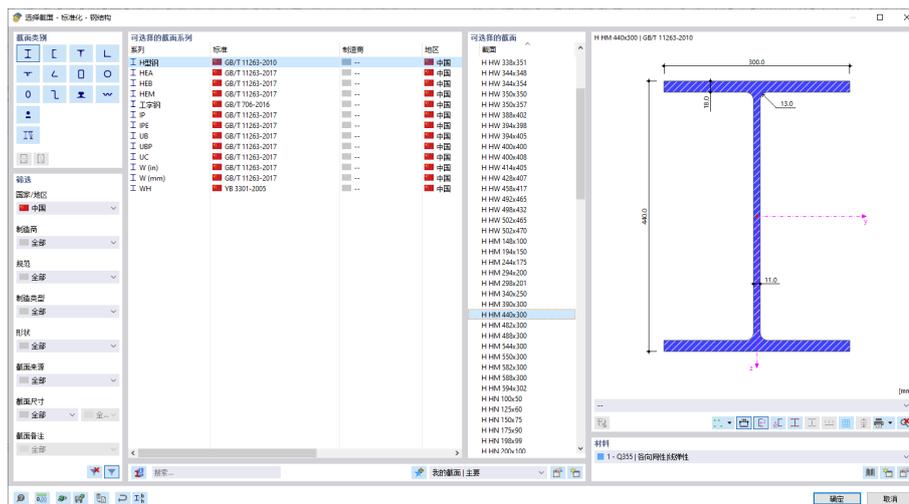


图 1.10 从截面库导入截面尺寸

5. 用同样的方式，创建截面 3，从截面库中导入 HM390x300，作为截面 3 的尺寸。

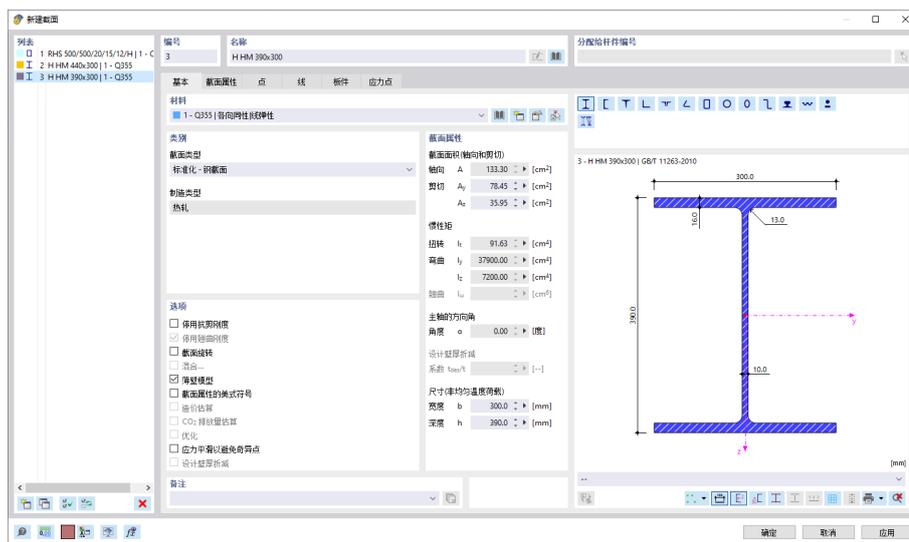


图 1.11 创建截面 3

6. 点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成截面的创建。完成截面的创建后，可以在[导航器数据]中查看模型的所有截面。



图 1.12 查看创建的所有截面

1.5 创建立柱

1. 点击工具栏中的  按钮，打开[新建节点]对话框。此时我们可以通过输入节点坐标的方式来创建节点，或通过鼠标光标在工作区点选来创建节点。

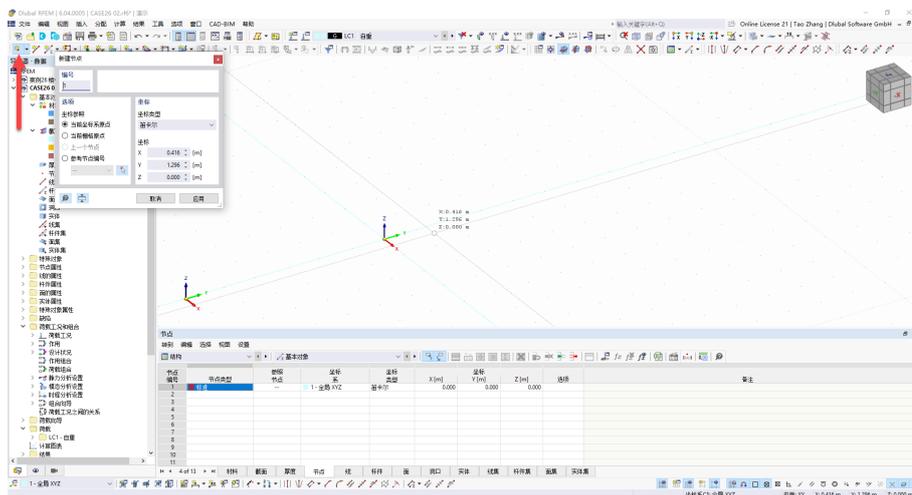


图 1.13 创建节点

2. 将节点坐标输入为 (0, 0, 0)，点击对话框右下角的[应用]按钮，关闭对话框，完成节点的创建。

3. 选中创建的节点 1，点击工具栏中的  按钮，打开[移动/复制]对话框。

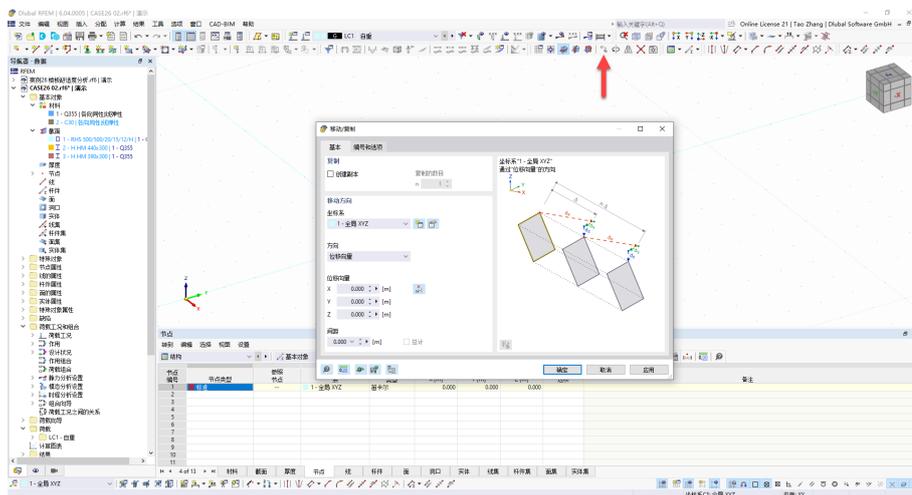


图 1.14 移动复制

4. 勾选创建副本，复制次数设置为 1，位移向量设置为 (0, 0, 3m)。点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成节点的复制。

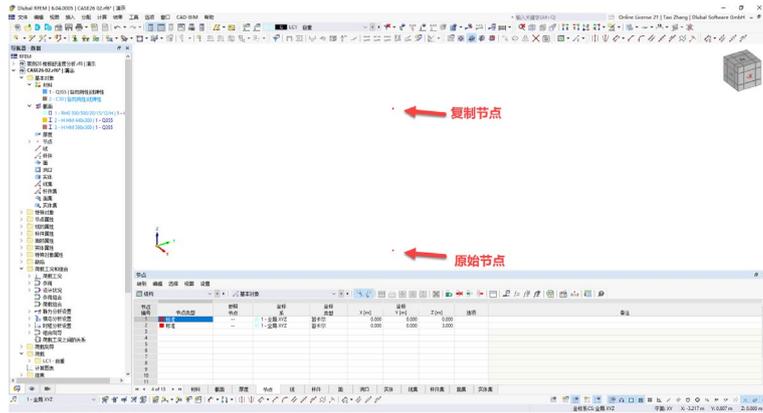


图 1.15 复制节点

5. 点击工具栏中的按钮，打开[新建线段]对话框。连接原始节点和复制节点。

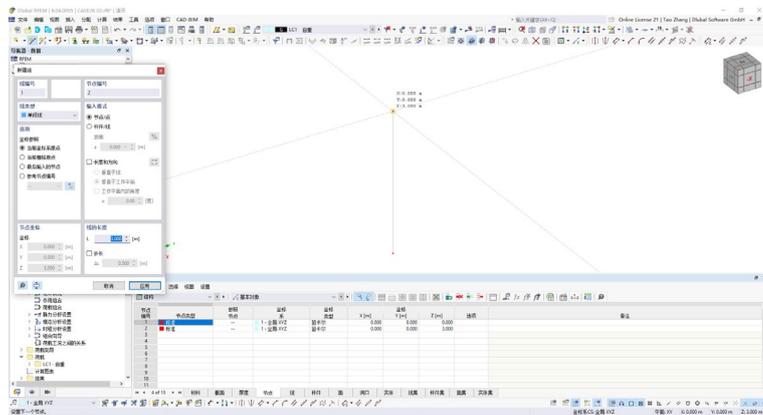


图 1.16 新建线段

6. 选中创建的线段，右键单击，在右键快捷菜单中选择[编辑线]，打开[编辑线]对话框。在[编辑线]对话框的[基本]选项卡中，勾选“杆件”，为线段赋予杆件的属性。

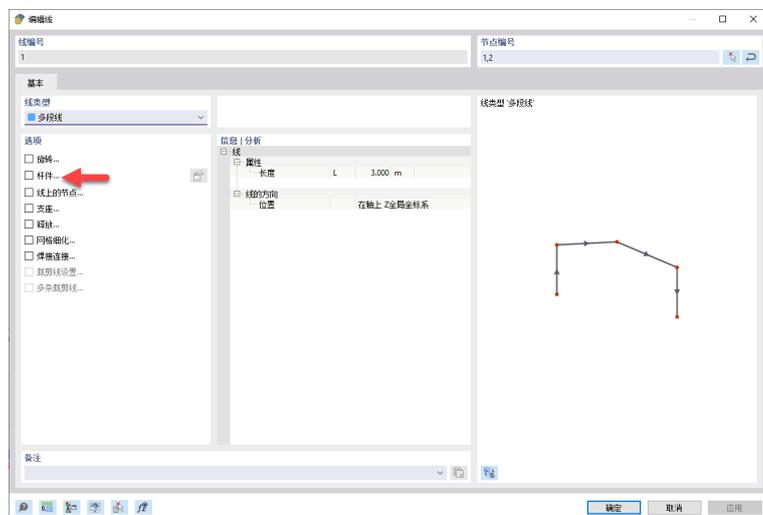


图 1.17 编辑线段

7. 此时程序会自动打开[新建杆件]对话框。在[新建杆件]对话框的[基本]选项卡中，将杆件类型选择为“梁”。

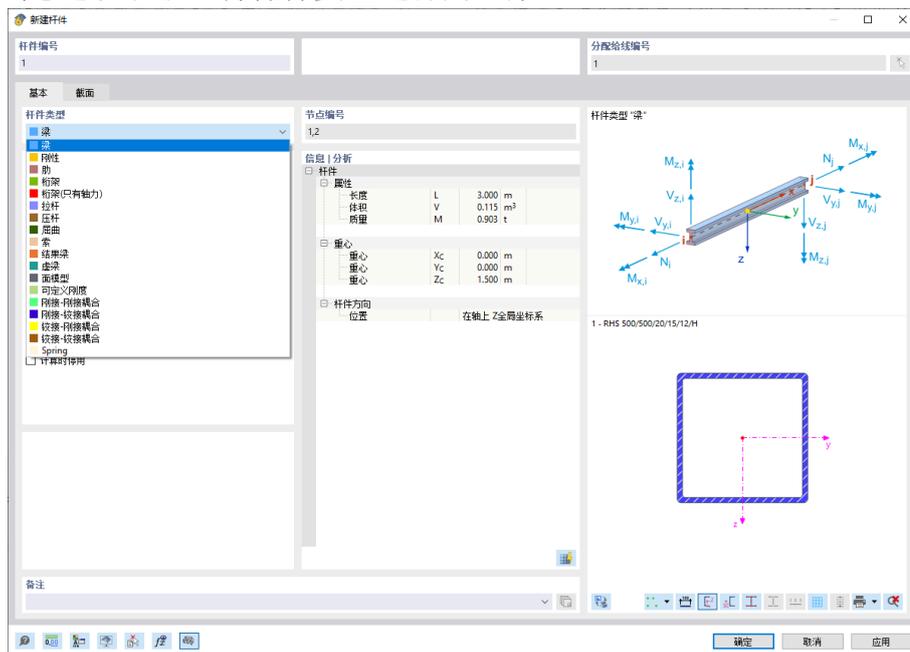


图 1.17 设置杆件类型

8. 切换至[截面]选项卡，将杆件截面选择为 500x20 矩形空心截面。点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成杆件的创建。

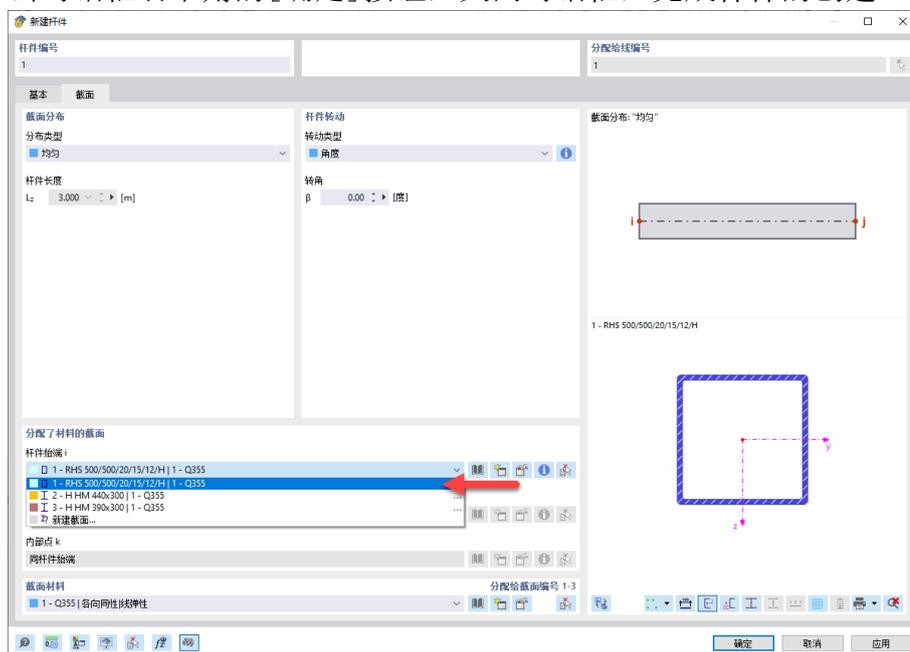


图 1.18 设置杆件截面

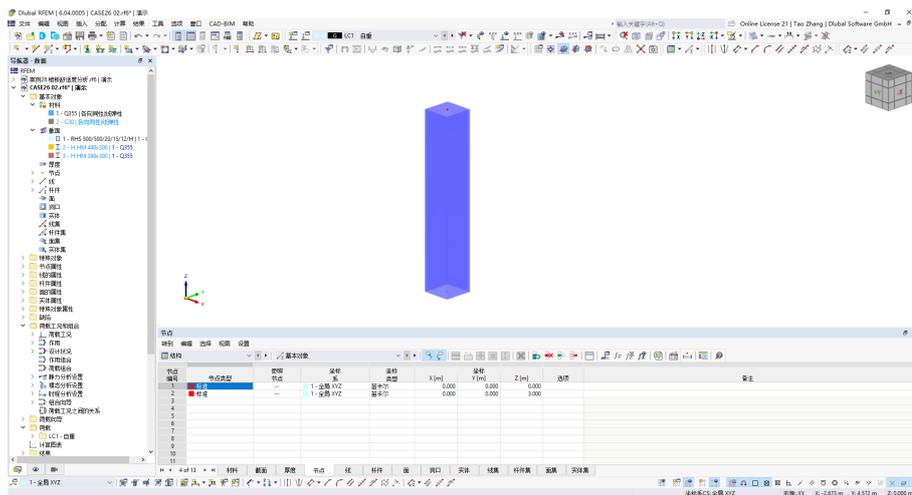


图 1.19 完成立柱的创建

9. 选中创建的立柱，点击工具栏中的  按钮，打开[移动/复制]对话框。在对话框的[基本]选项卡中，勾选创建副本，复制次数设置为 1，位移向量设置为 (16m, 0, 0)。点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成立柱的复制。

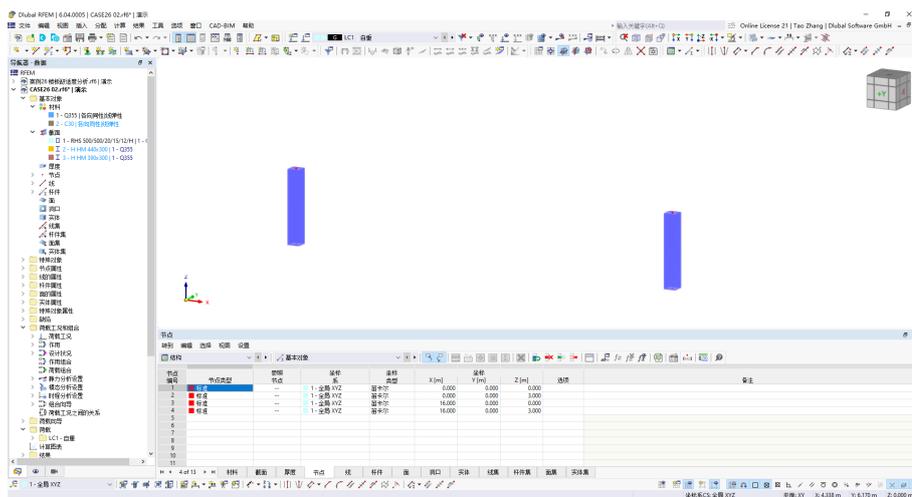


图 1.20 复制立柱

10. 用同样的方法，选中创建的两根立柱，将其沿全局 Y 方向以 8m 的间距复制 2 次。

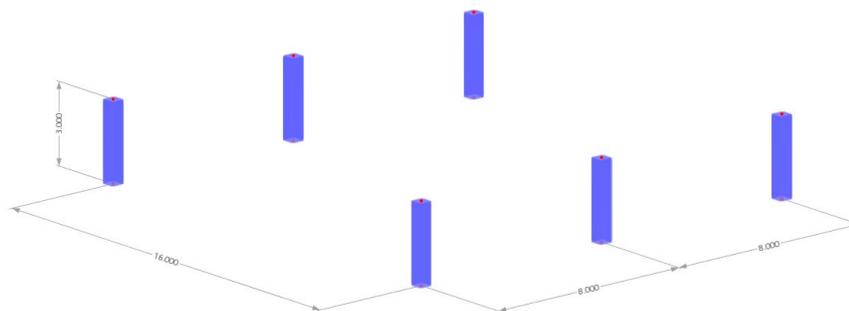


图 1.21 完成立柱的复制

1.6 创建主次梁

1. 点击工具栏中的  按钮，打开[新建线]对话框。连接各个立柱的柱顶，以创建主梁对应的线段。

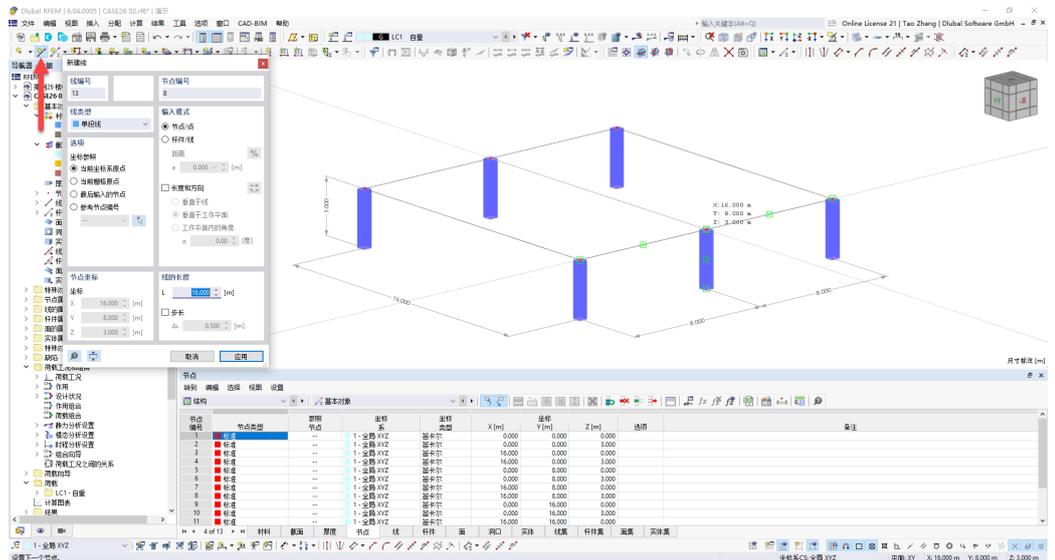


图 1.22 绘制主梁线段

2. 选中横向线段，在线段上右键单击，在右键快捷菜单中，选择[划分线]-[使用 N 个中间节点]，打开[划分线-使用 n 个中间节点]对话框。

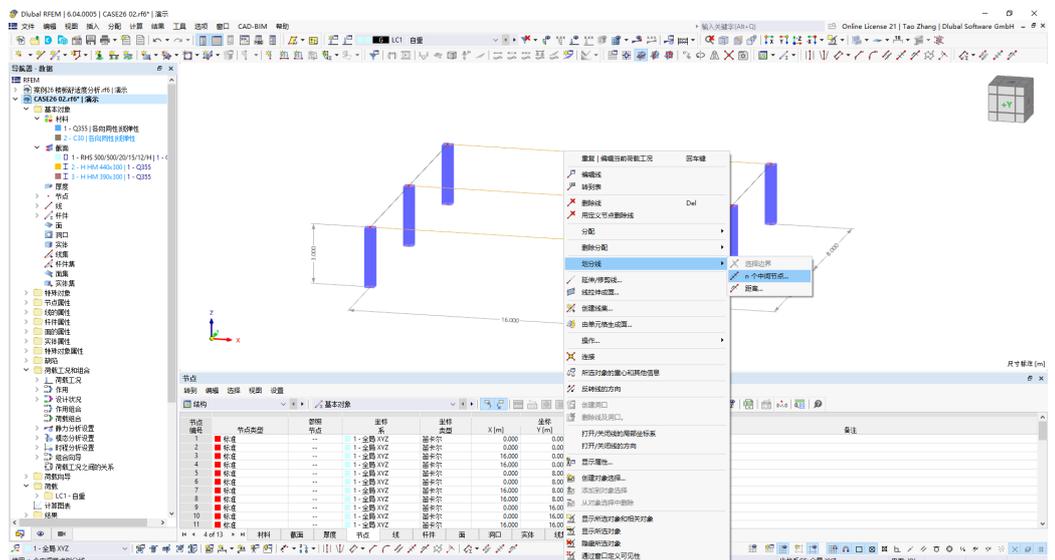


图 1.23 划分线段

3. 在该对话框中，将中间节点数目设置为 5，点击对话框右下角的[确定]按钮，完成杆件的分割。

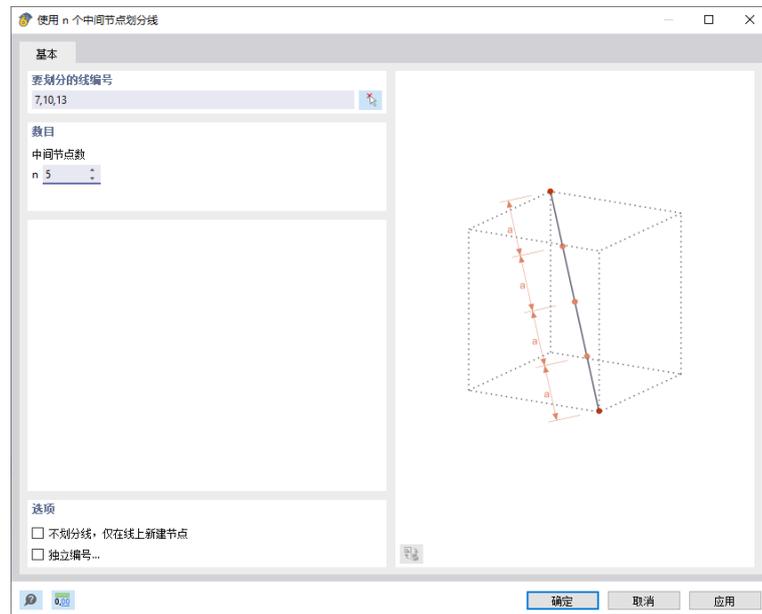


图 1.24 使用 n 个中间节点划分线段

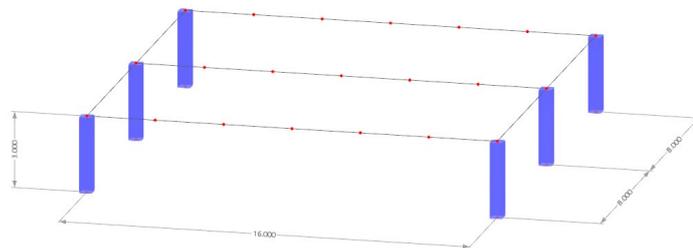


图 1.25 定数等分、划分线段

4. 用同样方法，将横向线段划分成 3 份。

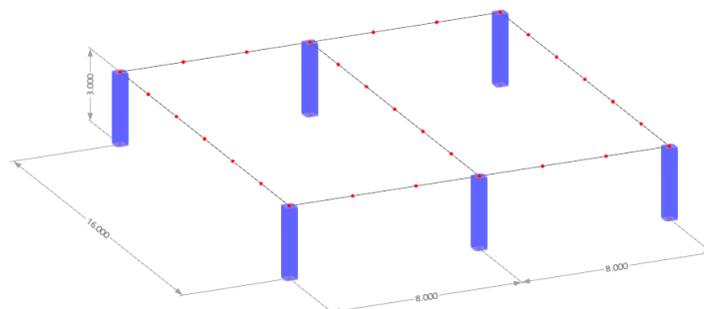


图 1.26 划分横向线段

5. 点击工具栏中的按钮，创建次梁以及行走路径对应的线段。

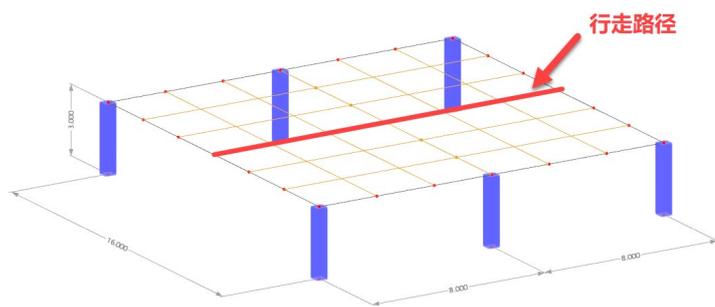


图 1.27 创建主次梁对应的线段

6. 需要注意的是，本例在演示时没有激活“自动连接线/杆件”。这意味着线段与线段交叉时，程序不会自动生成交点节点，也不会把这两根线段打断。此时我们可以手动控制程序何时打断线段。该功能可以在模型空白处右键单击，在右键快捷菜单中选择是否激活。

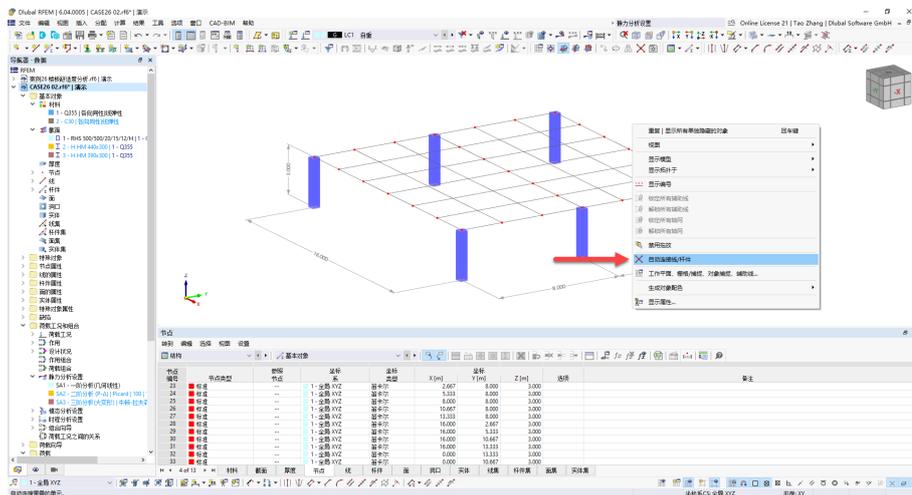


图 1.28 取消激活自动连接线/杆件

7. 选中行走路径对应的线段，右键单击，在右键快捷菜单中，选择[划分线]-[使用 n 个中间节点]。

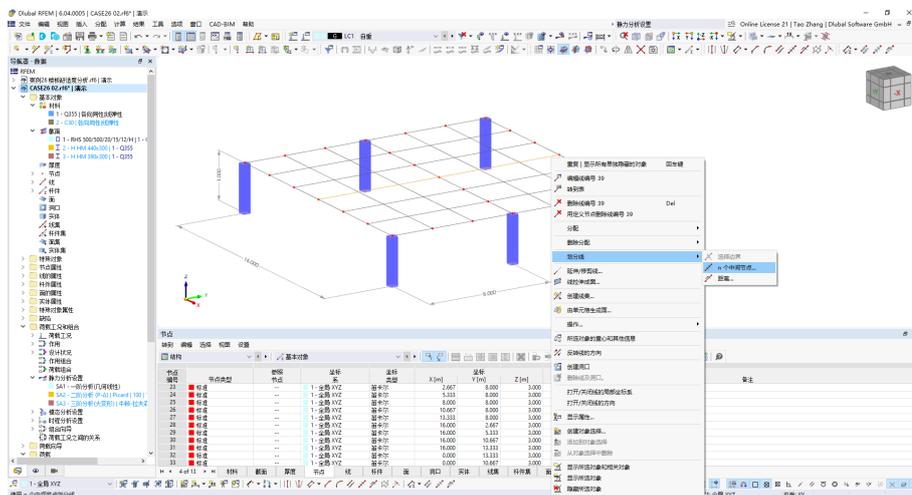


图 1.29 等分行走路程

8. 行走路径共 16m，行走步距为 0.7m，故需要将线段等分成 23 份。将中间节点数设置为 22，点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成线段的定数等分。

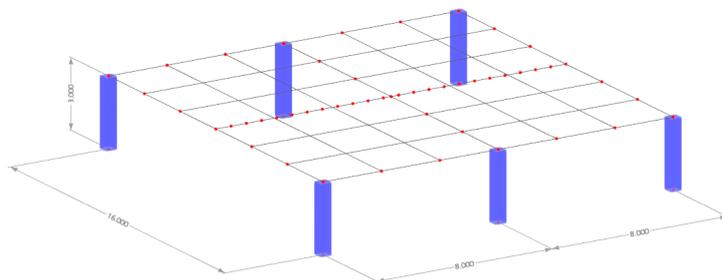


图 1.30 等分行走路径

注：

本教程的目的是演示如何使用 RFEM6 进行时程分析，结构布置并不是本教程的关注点。

9. 选中主梁对应的线段，右键单击，在右键快捷菜单中选择[编辑线]，打开[编辑线]对话框。

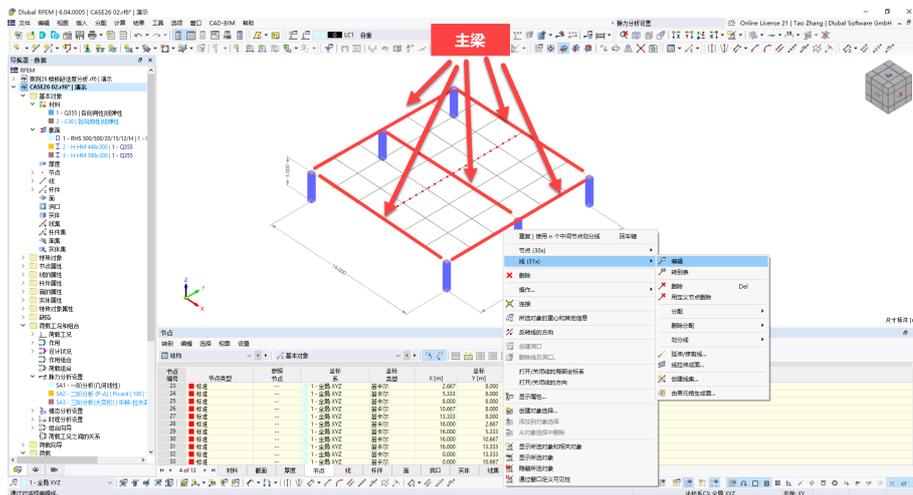


图 1.31 编辑线段

10. 在[编辑线]对话框的[基本]选项卡中，勾选“杆件”，为线段赋予杆件的属性。此时程序会自动打开[新建杆件]对话框。

11. 在[新建杆件]对话框的[基本]选项卡中，将杆件类型选择为“梁”。切换至[截面]选项卡，将杆件截面选择为主梁对应的截面 HM440x300。点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成主梁的创建。

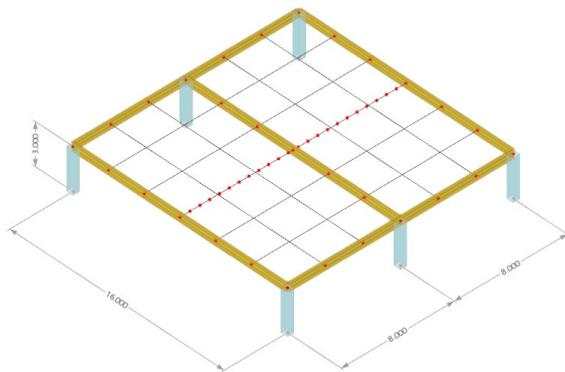


图 1.32 创建主梁

12. 选中次梁对应的线段，右键单击，选择[编辑线]，打开[编辑线]对话框。在对话框的[基本]选项卡中，勾选“杆件”，为线段赋予杆件的属性。

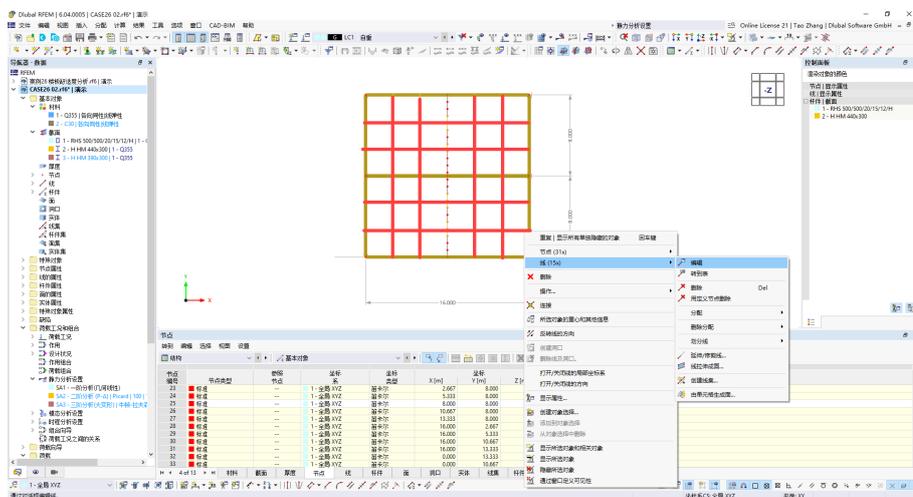


图 1.33 选中次梁对应的线段

13. 此时程序会自动打开[新建杆件]对话框。在[基本]选项卡中，将杆件类型设置为“梁”。切换至[截面]选项卡，将杆件截面选择为HM390x300。点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成杆件的创建。

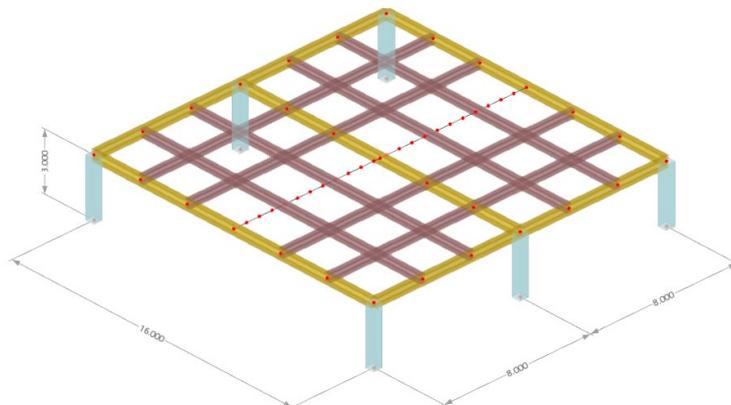


图 1.34 创建次梁

14. 点击工具栏中的✕按钮，此时我们可以手动选择需要交叉打断的区域。框选整个模型，使所有杆件和线段互相打断、生成交点节点。

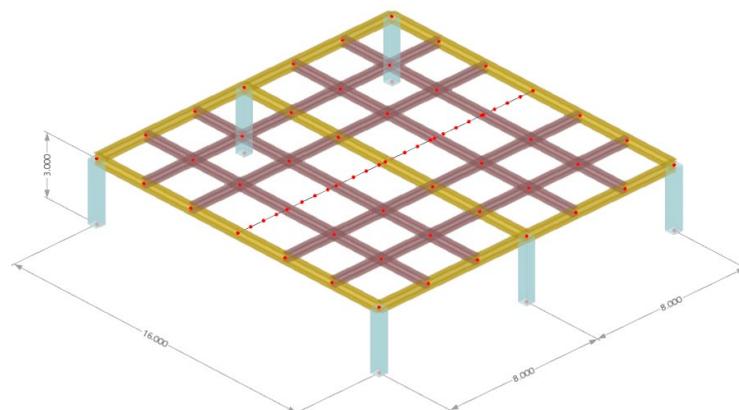


图 1.35 生成交点节点

1.7 创建厚度

1. 在左侧[导航器数据]>[基本对象]>[厚度]处，右键单击，选择新建，打开[新建厚度]对话框。

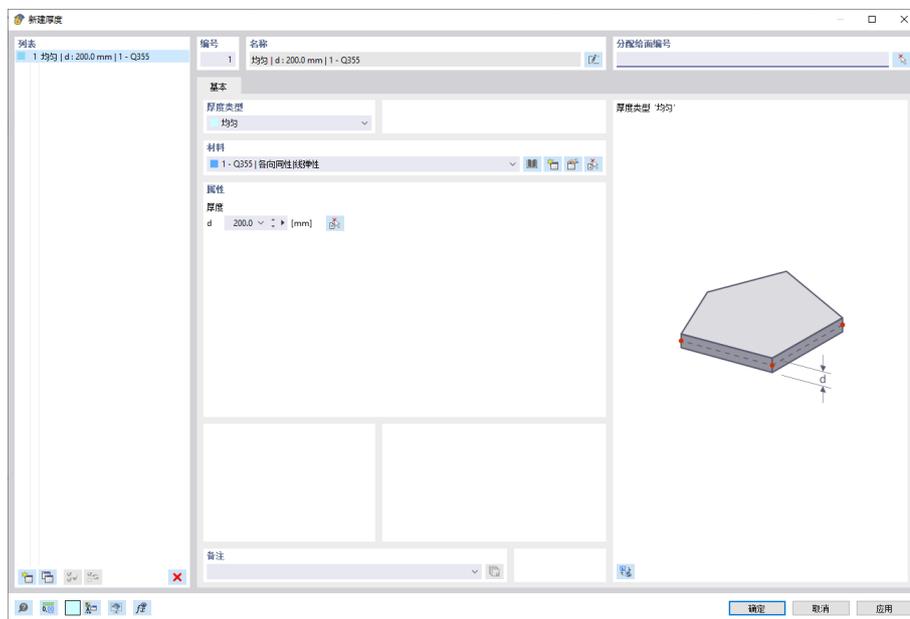


图 1.36 创建厚度

2. 将厚度 1 的材料指定为 C30，厚度大小指定为 120mm，点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成厚度的大小。

1.8 创建楼板

1. 点击工具栏中的  按钮，打开[新建面]对话框。将厚度选取为刚刚创建的厚度，点击对话框右下角的[确定]按钮，通过选取边界线创建面单元。

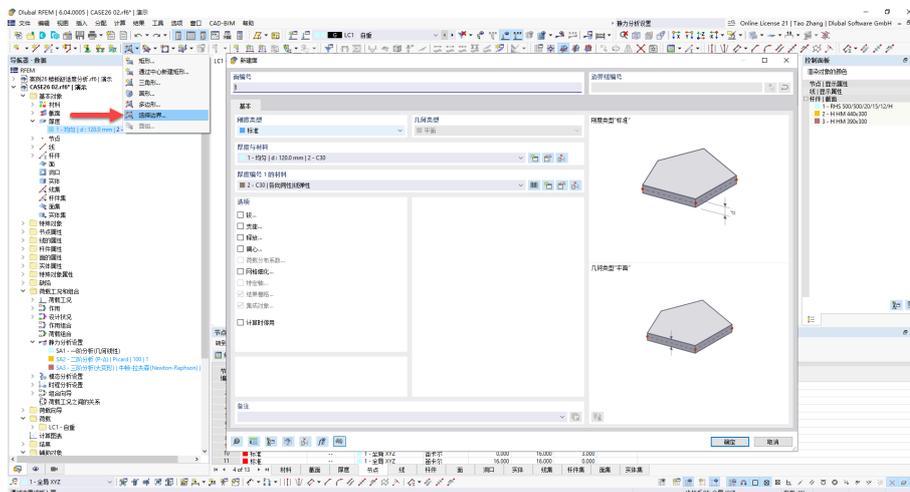
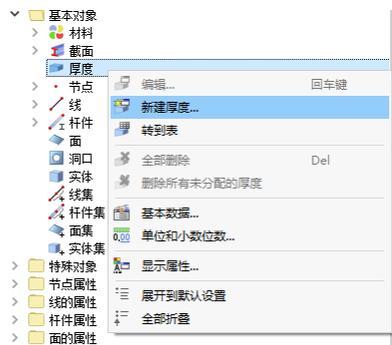


图 1.37 通过边界线创建平面



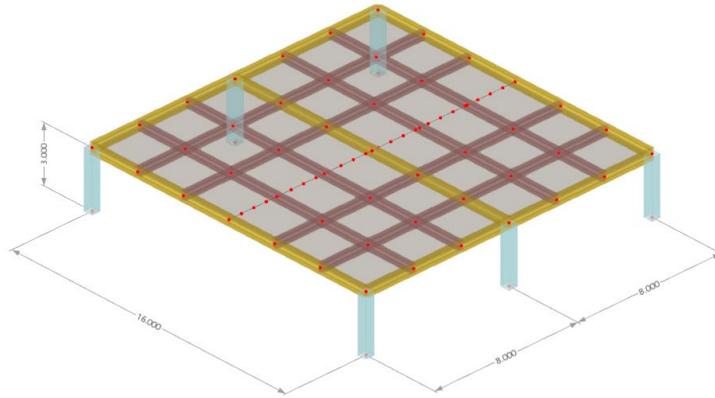


图 1.38 创建楼板

1.9 创建支座

1. 点击工具栏中的  按钮，打开[分配节点支座]对话框。

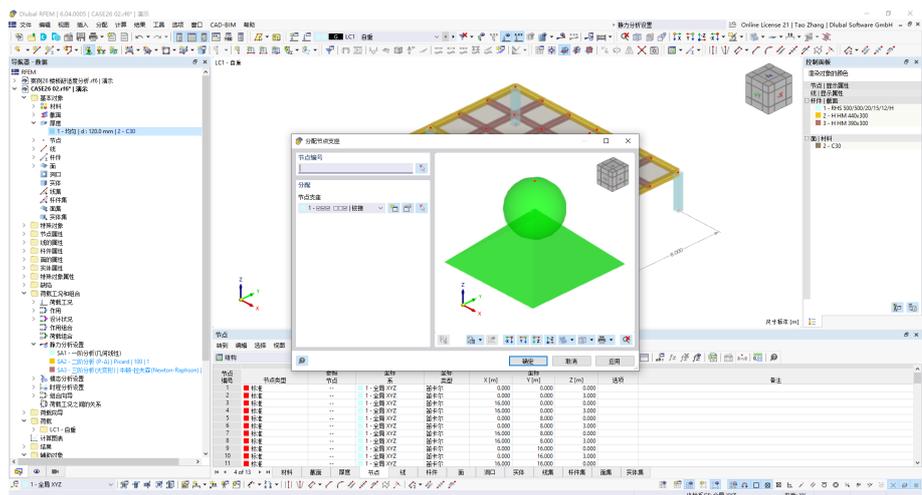


图 1.39 分配节点支座

2. 将支座类型选择为固定支座，点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，将支座分配给柱底节点。

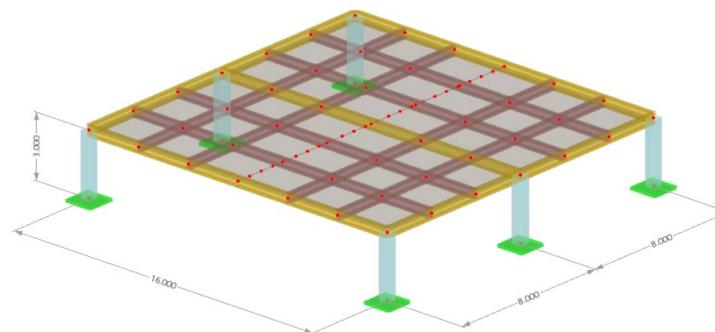


图 1.40 分配节点支座

2 荷载与计算设置

2.1 荷载工况

1. 在左侧[导航器数据]>[荷载工况和组合]处，右键单击，在右键快捷菜单中选择[荷载工况和组合]，打开[荷载工况和组合]对话框。

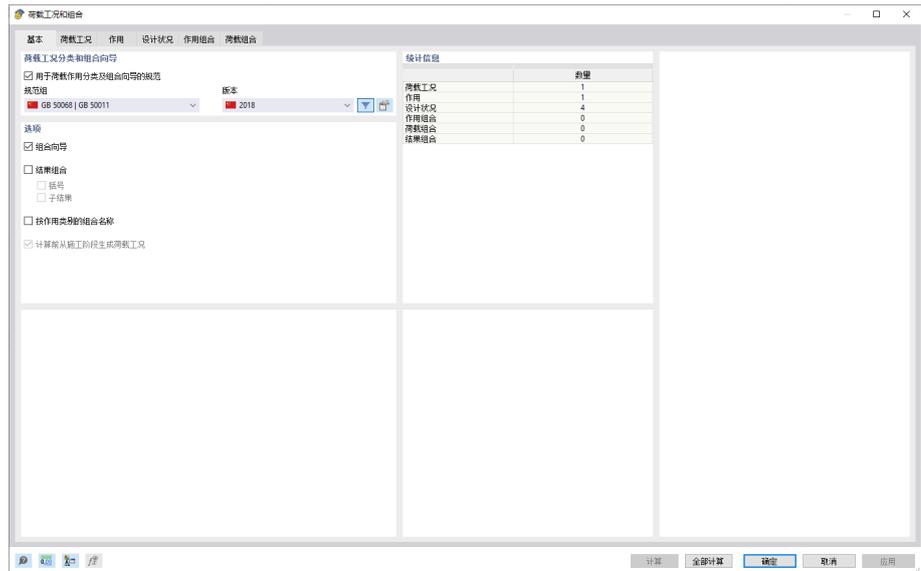


图 2.1 荷载工况和组合对话框

组合向导主要具有以下功能：

- 根据规范自动生成各项荷载组合。
- 使生成的某一类组合都具有某项属性。例如，使所有基本组合都进行二阶非线性分析。

取消激活“组合向导”后，程序无法再自动生成各项荷载组合，需要手动创建各项组合。

2. 在[基本]对话框中，取消勾选“组合向导”。本例选择手动生成荷载组合。

3. 切换至[荷载工况]选项卡，可以看到程序已经预设了一个荷载工况：LC1 自重，并激活了结构构件的自重。

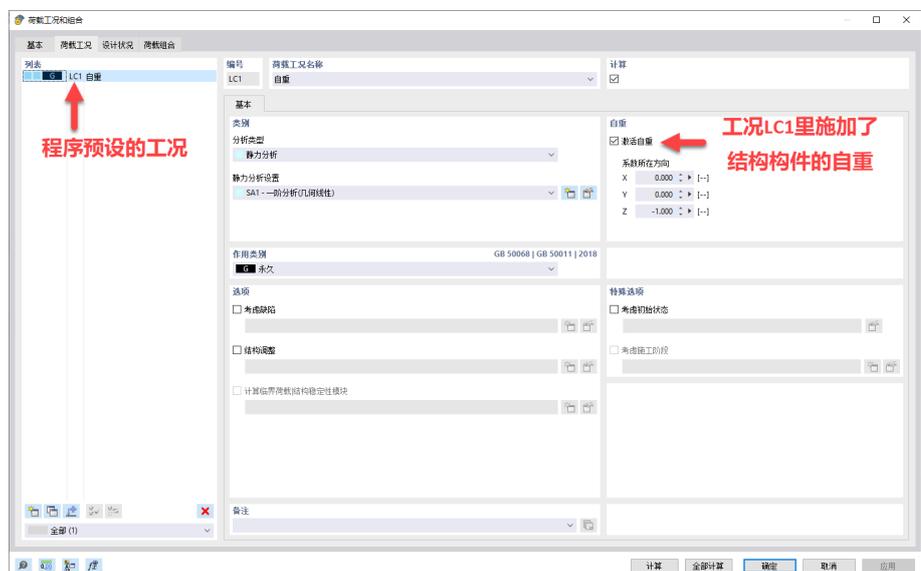


图 2.2 查看预设的荷载工况

4. 点击对话框左下角的  按钮，新建荷载工况。将 LC2 的名称设置为“有效均布活荷载”，荷载作用类别选择为活荷载。

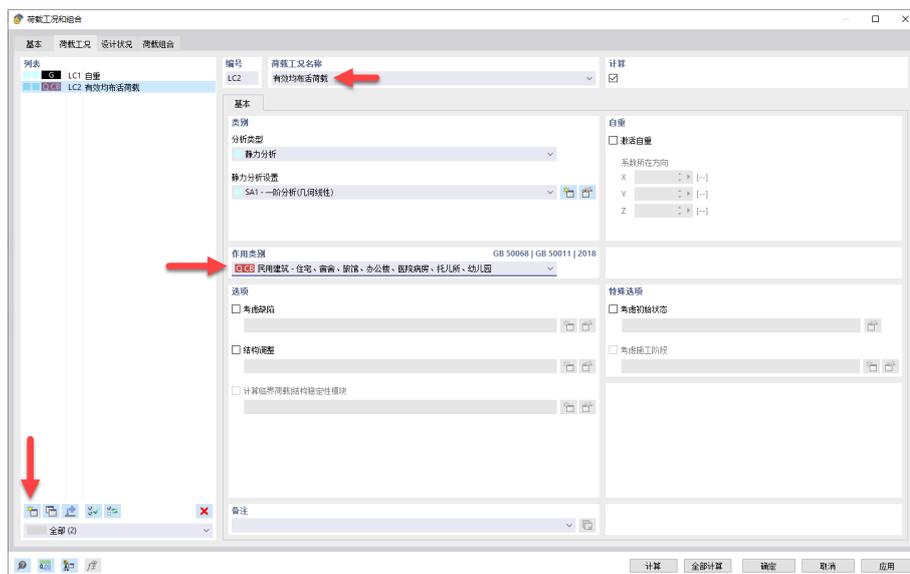


图 2.3 创建荷载工况

5. 切换至[荷载组合]选项卡，点击对话框左下角的  按钮，创建荷载组合，将荷载组合的名称输入为“舒适度质量组合”。切换至[分配]选项卡，将荷载组合设置为 1.0 自重+1.0 有效均布活荷载。

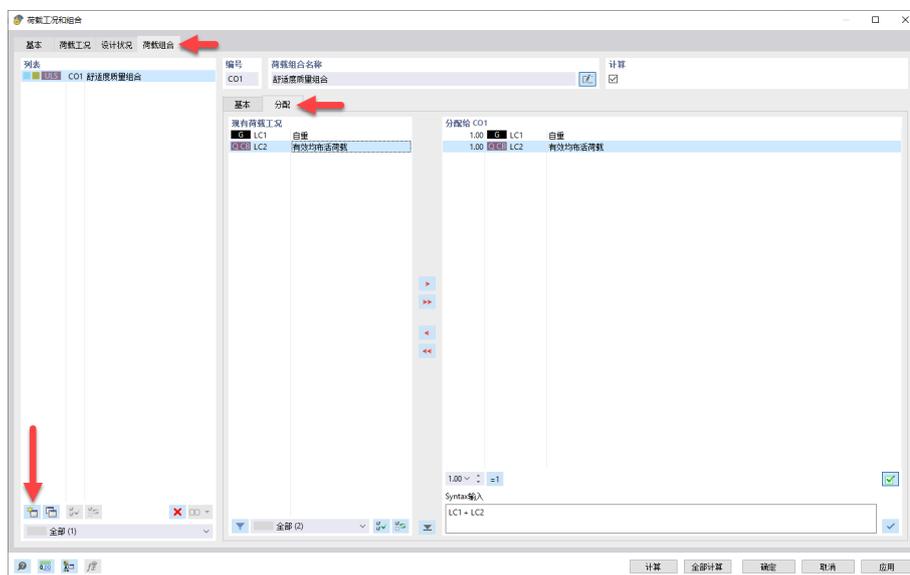


图 2.4 创建质量组合

6. 切换至[荷载工况]选项卡，点击对话框左下角的按钮，创建荷载工况 LC3。将荷载工况的名称输入为“模态分析”。

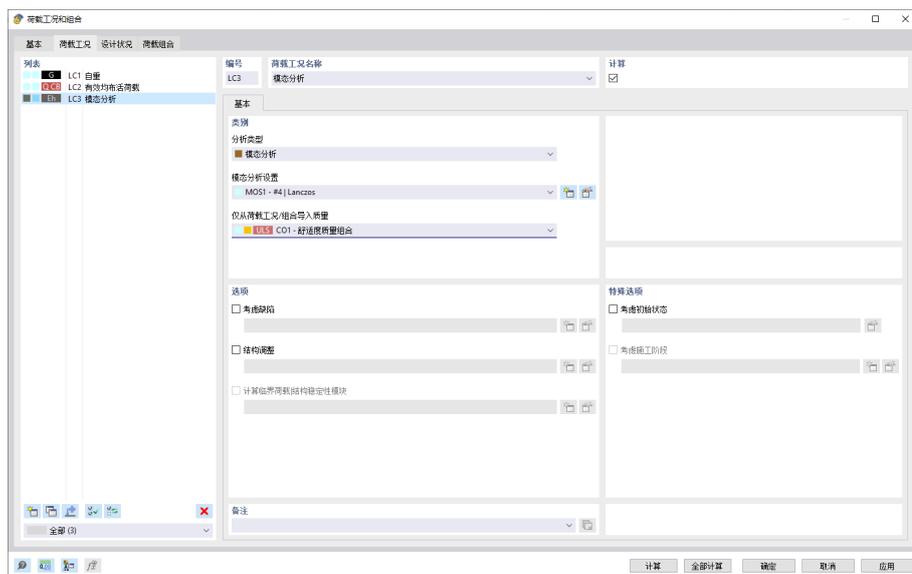


图 2.5 创建模态分析工况

7. 将模态分析的质量源指定为舒适度质量组合。点击模态分析设置右侧的按钮，打开[编辑模态分析设置]对话框。

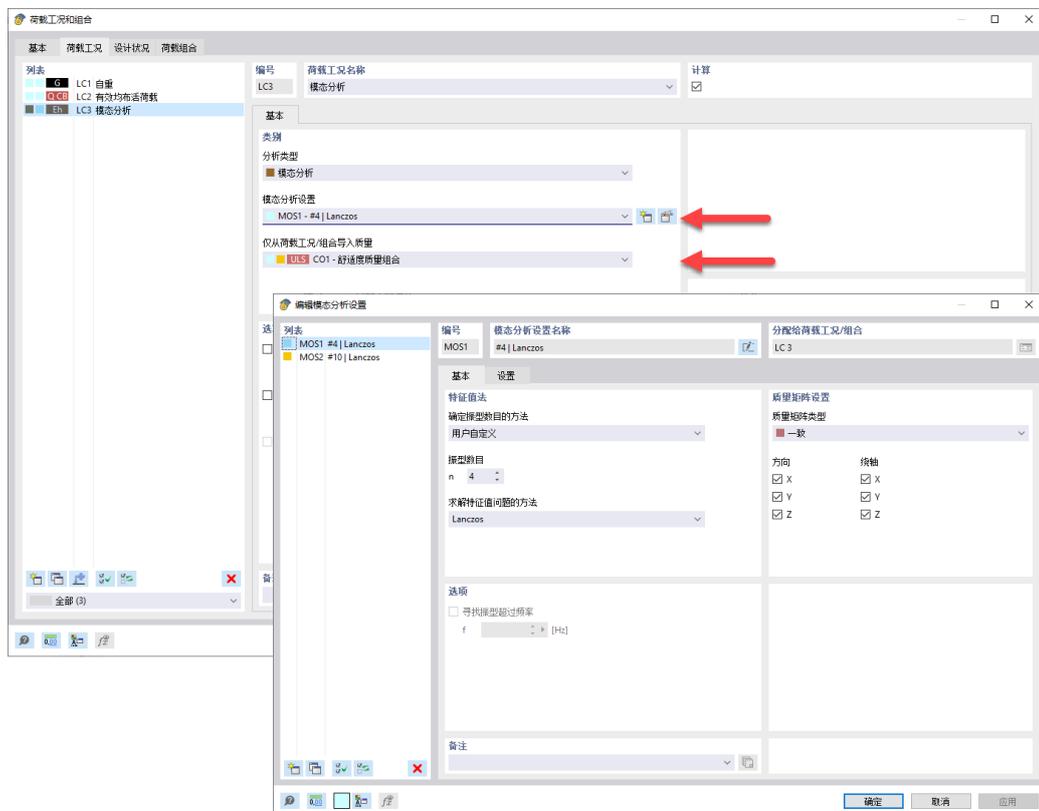


图 2.6 编辑模态分析设置

8.进行舒适度计算时，关注的是结构竖向自振频率和竖向加速度，所以仅考虑结构沿全局 Z 方向的平动质量。点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成模态分析设置的调整。

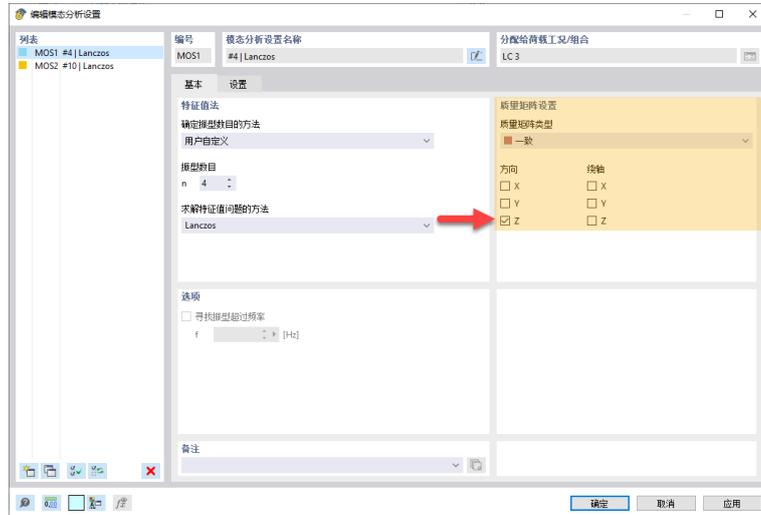


图 2.7 调整质量矩阵

9.在对结构进行动力分析时，需要对混凝土楼板的混凝土弹性模量进行调整。如果是钢-混凝土组合楼板，需要将混凝土的弹性模量放大 1.35 倍。

10.模态分析、时程分析都属于动力分析，在进行这类计算时，都要对混凝土弹性模量进行放大。

11.回到[荷载工况和组合]对话框，为模态分析工况勾选“结构调整”。点击结构调整右侧的[新建]按钮，打开[新建结构调整设置]对话框。

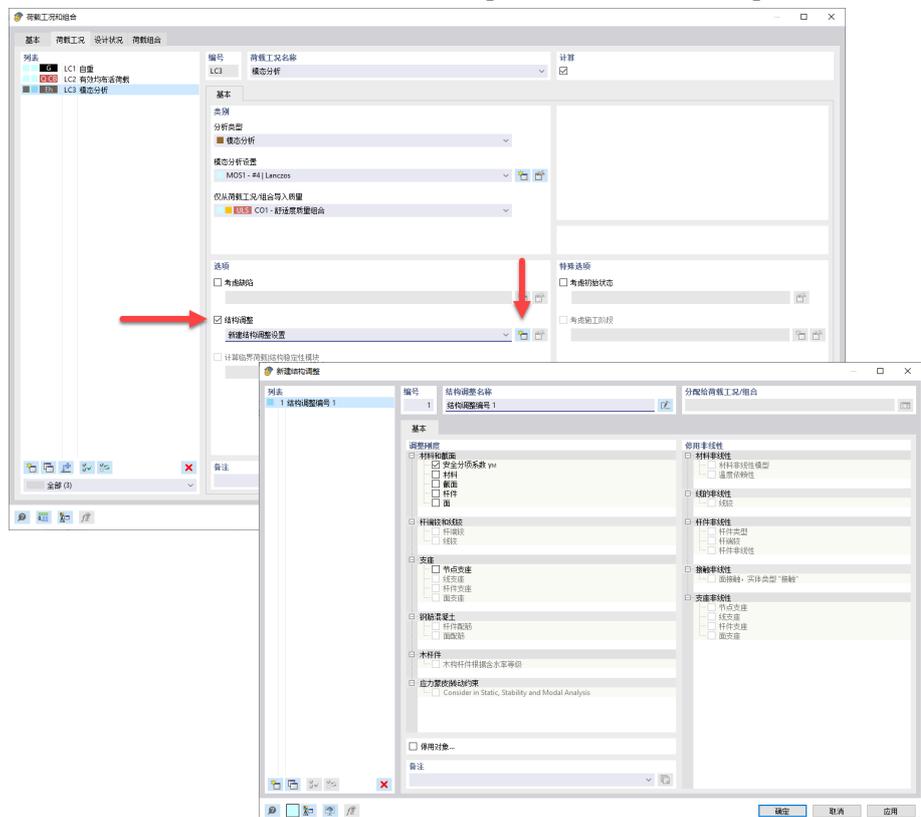


图 2.8 动力分析结构调整

RFEM 可以单独对某个工况和组合进行“结构调整”。结构调整包括：

- 调整某种材料的刚度
- 调整某些杆件的刚度
- 调整边界条件
- 停用某些构件等

这种调整只对当前分配的工况、组合生效。

12.将结构调整的名称设置为“混凝土刚度放大”。在对话框的[基本]选项卡中，勾选调整材料的刚度。

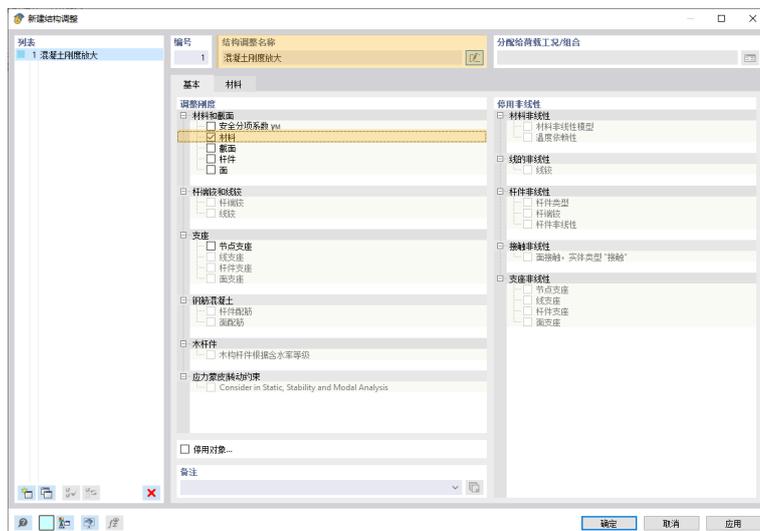


图 2.10 勾选调整材料刚度

13.切换至[材料]选项卡，将混凝土刚度放大 1.35 倍。点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成结构调整设置。

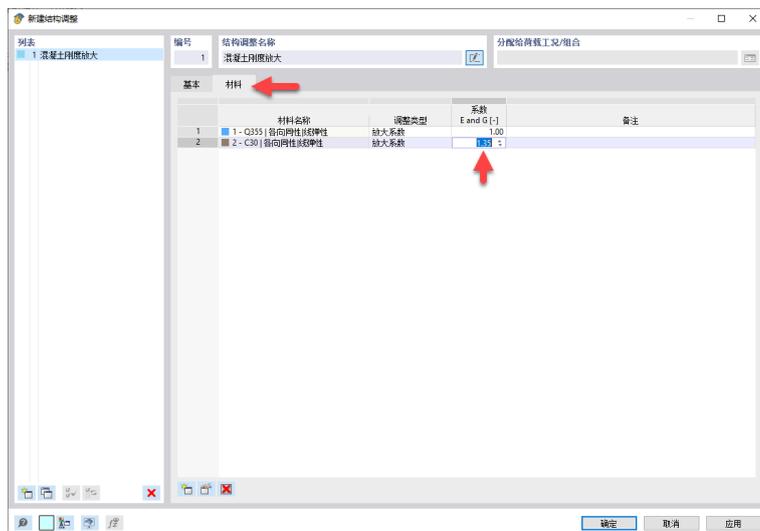


图 2.11 放大混凝土刚度

14.点击[荷载工况和组合]对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成模态分析工况和设置的创建。

2.2 施加恒活荷载

1. 点击工具栏中的  按钮，打开[新建面荷载]对话框。

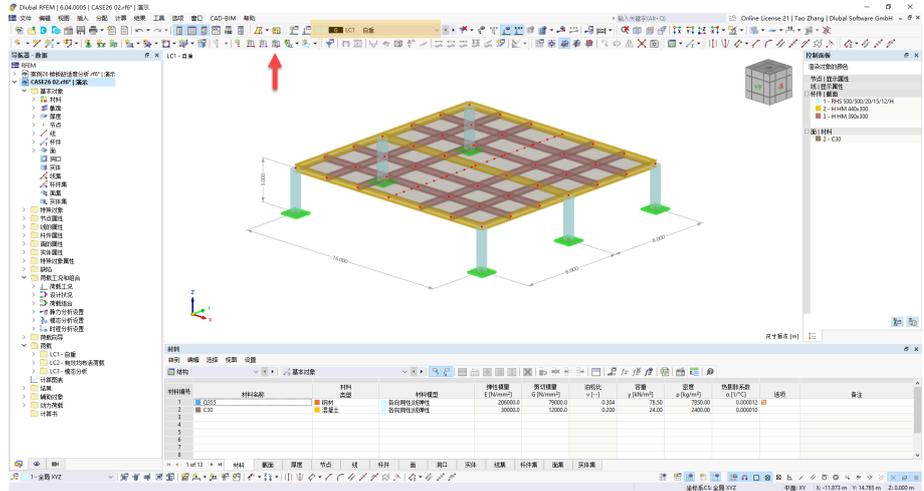


图 2.12 切换当前工况

2. 在[新建面荷载]对话框中，将当前工况切换至 LC1，荷载分布类型选择为沿全局 Z 方向的均布力，荷载大小取 -1kN/m^2 。点击对话框右上角的  按钮，将该面荷载分配给模型中的混凝土楼板。点击对话框右下角的[应用]按钮，完成面荷载的分配。

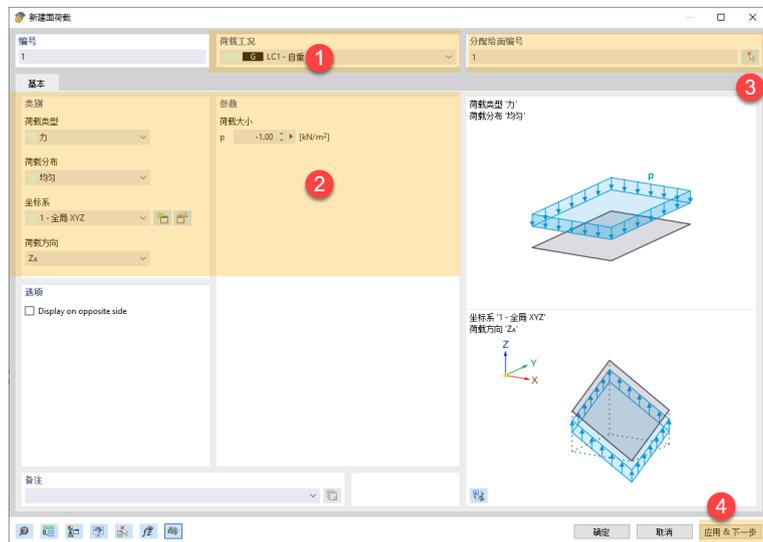


图 2.13 施加荷载

3. 将当前工况切换至 LC2，荷载类型选择为沿全局 Z 方向的均布力，大小设置为 -0.5kN/m^2 。点击对话框右上角的  按钮，将该面荷载分配给模型中的混凝土楼板。点击对话框右下角的[确定]按钮，完成荷载的施加。

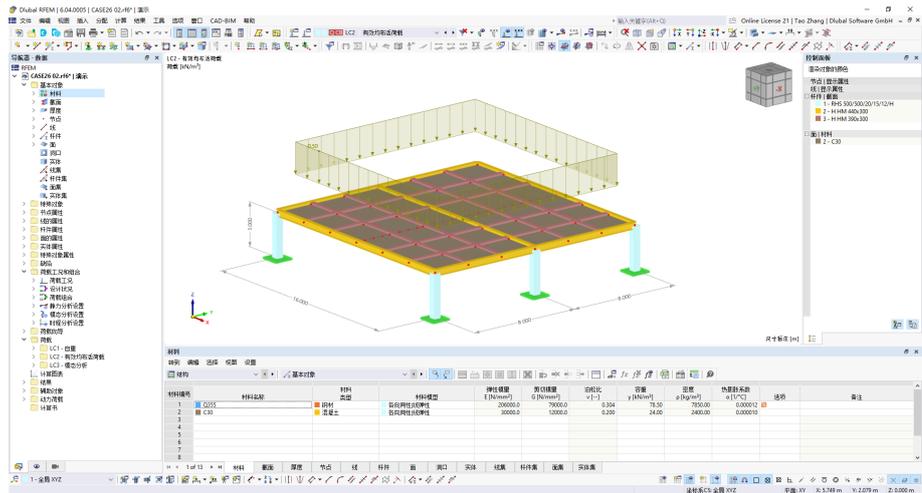


图 2.14 完成荷载的施加

2.3 模态分析

1. 点击菜单栏的[计算], 从中选择[计算...], 打开[计算]对话框。此时我们可以选择计算哪些荷载工况和组合。

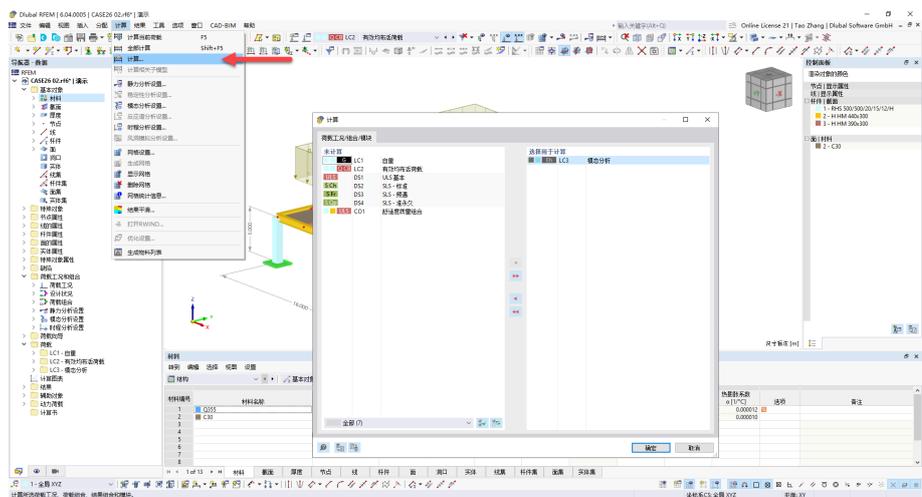


图 2.15 选择计算的工况

2. 在[计算]对话框中, 选择计算模态分析。点击对话框右下角的[计算]按钮, 程序会自动划分网格进行计算, 并打开[计算进度]对话框。

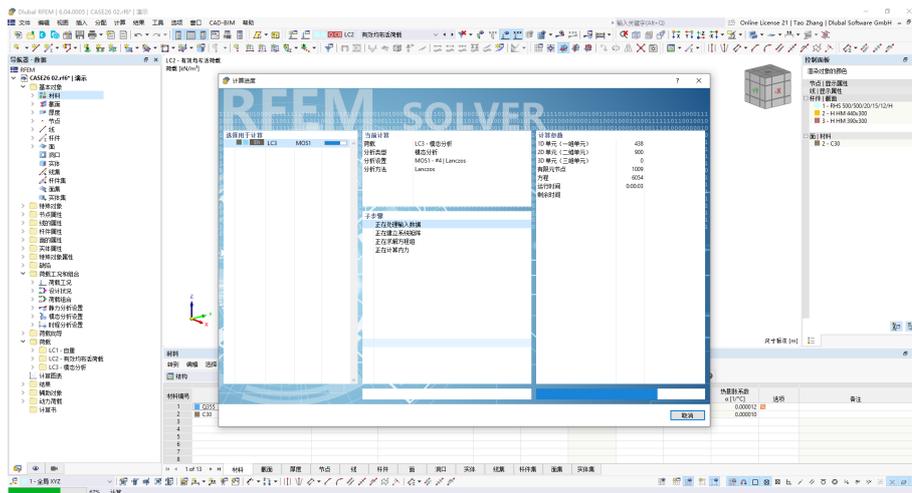


图 2.16 查看计算进度

3.查看模态分析的结果可知，其一阶竖向自振频率为 2.859Hz。规范要求以行走激励为主的楼盖一阶竖向自振频率不宜低于 3Hz，本例结构需要进行调整。

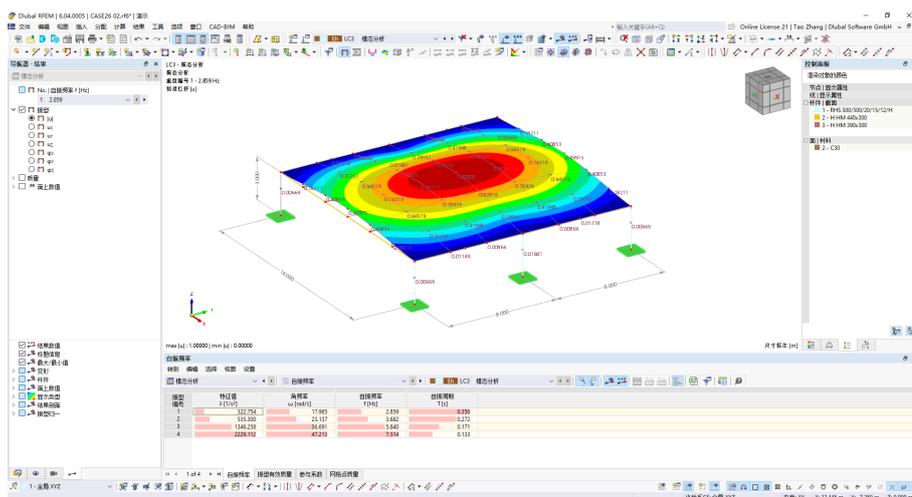


图 2.17 模态分析结果

4.我们可以将一阶模态的振动最大位置作为振动最不利点，后续我们可以在该点施加人行荷载激励、提取该点结果。

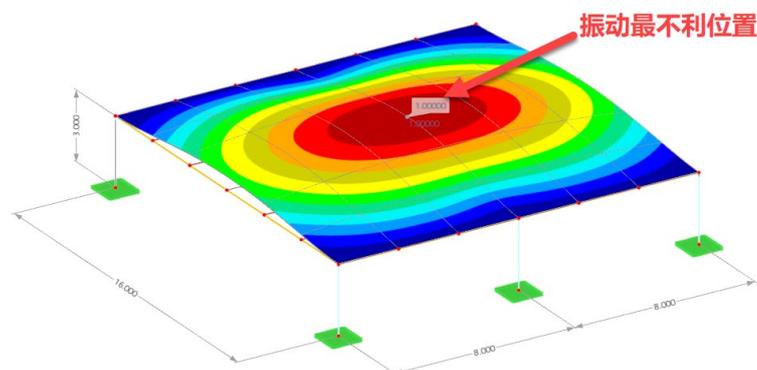


图 2.18 获取振动最不利位置

2.4 加载路径人行荷载

1.本例的行走路径上共有 24 个加载点。每个加载点对应着一个荷载工况。打开[荷载工况和组合]对话框，点击对话框左下角的按钮，新建荷载工况。将 LC4 的名称设置为“单步人行荷载 01”，分析类型选择为[时程分析|荷载系数时间曲线]。

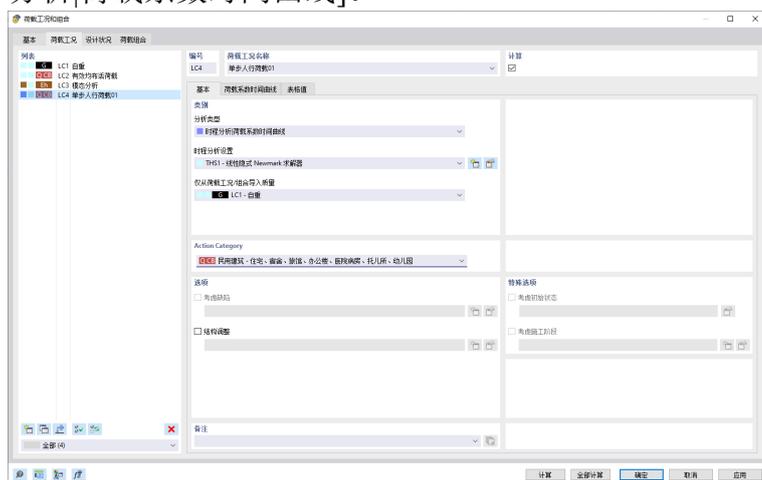


图 2.19 创建时程分析工况

2.下面我们对时程分析的相关设置进行说明。如果一个工况的分析类型是“时程分析|荷载系数时间曲线”，那么这个工况内的所有荷载都将乘以一个荷载系数，该荷载系数会随着时间不断变化。

3.此时，我们主要需要告诉程序两方面的内容：这个荷载系数随时间是如何发生变化的，以及程序采取怎样的计算方法进行求解。

4.我们先告诉程序荷载系数随时间是怎样发生变化的，即定义荷载系数时间曲线。

5.将对话框切换至[荷载系数时间曲线]选项卡。此时我们可以为该工况分配荷载系数时间曲线。

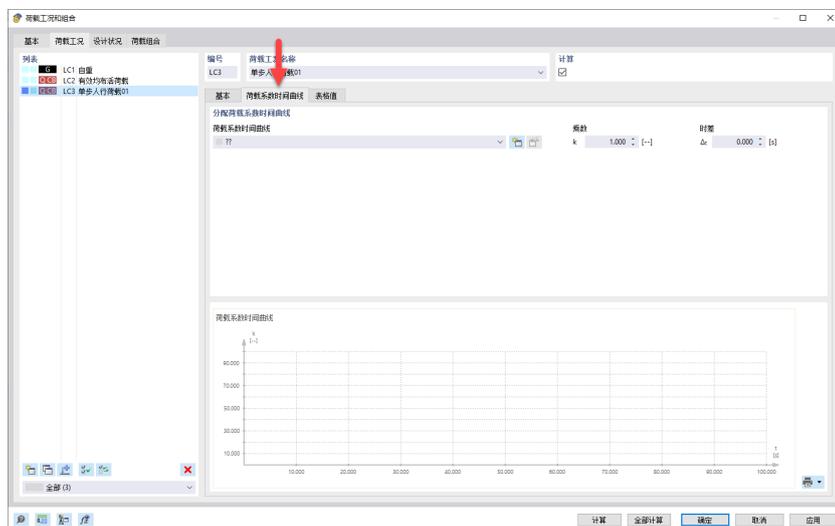


图 2.20 荷载系数时间曲线

6.但是由于我们还未定义任何的曲线，所以需要先创建一条荷载系数时间曲线。点击荷载系数时间曲线右侧的按钮，打开[新建荷载系数时间曲线]对话框。

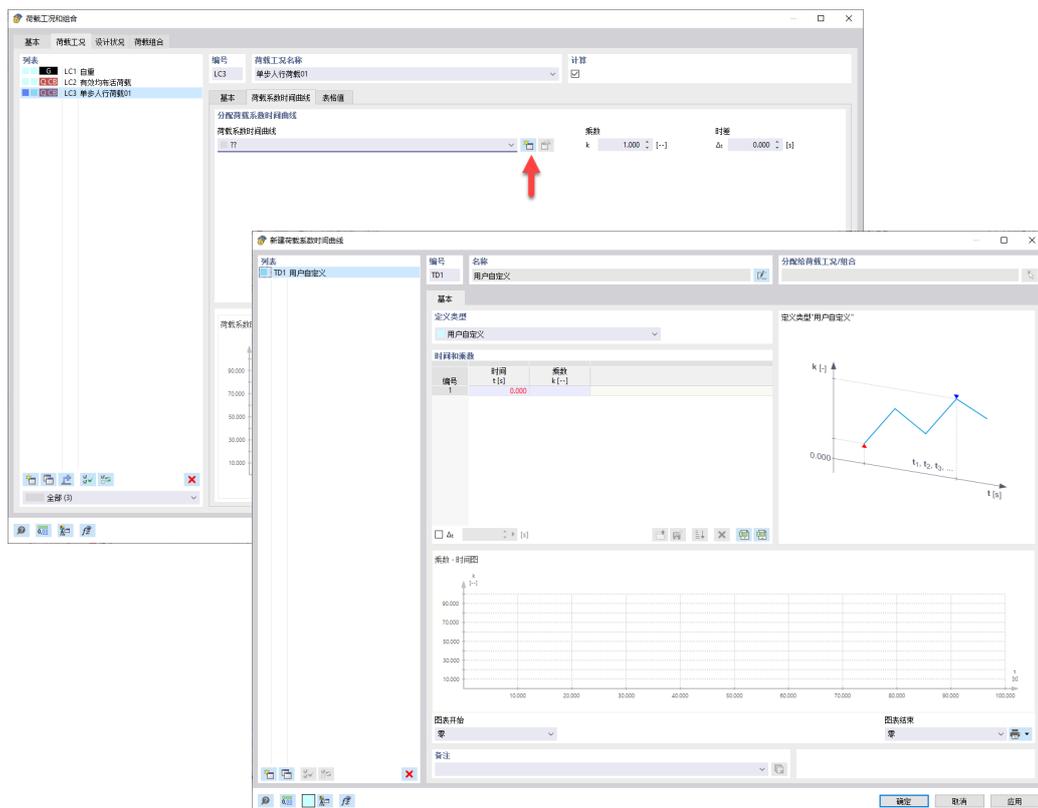


图 2.21 新建荷载系数时间曲线

7.定义曲线时，程序提供了两种定义方式。您可以先在 EXCEL 里手动计算时程分析曲线每个点对应的荷载系数大小，然后复制到 RFEM 中，这种定义方式为“用户自定义”；您也可以在 RFEM6 中通过输入函数表达式的方式来直接定义。

8.本例选择使用第二种，通过输入函数表达式的方式来定义荷载系数时间曲线。当人沿直线行走时，重心会不断下降和上升，地面所受的力会不断波动。对于楼板振动而言，主要关注的时人行走过程中的竖向力，研究的切入点是人的单步落足曲线。

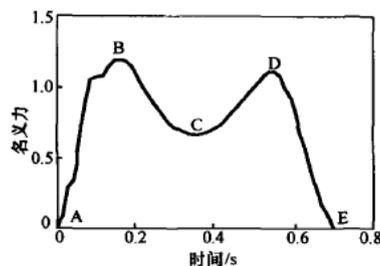


图 2.22 单步落足示意图

单步落足曲线是单足作用在地面上的竖向力与落足时间的关系。根据大量实验结果，单步落足曲线一般有两个峰值。图 2.6 的曲线纵坐标为名义力，是竖向作用力与人体重的比值。

坐标原点 A 表示人的足跟开始接触地面，然后随人体重心的转移曲线逐渐升高，曲线高度达到 1.2~1.25 倍人的体重时，达到第一个峰值点 B，该峰值包含了人的体重和由于运动产生的惯性力的总和。随后随着人屈膝、

摆动另一条腿和重心的转移，该曲线将逐步下降至 C 点，C 点的力一般要小于人的体重，接着人的脚掌蹬地，使得曲线再次升高至 D 点，D 点的作用力大小约为人体重的 1.15 倍，D 点以后，曲线迅速下降至 E 点，此时人的足尖完全离开地面。

当人连续行走时，不会出现双脚同时离地的情况。当左脚还未离开地面时，右脚已经落下。双脚的重叠时间大约是 0.1 秒。

当模拟人在楼板上行走时，需要定义每一个落足点作用力随时间的变化情况。每个落足点对应的函数形状完全一致，但是时间上依次滞后。

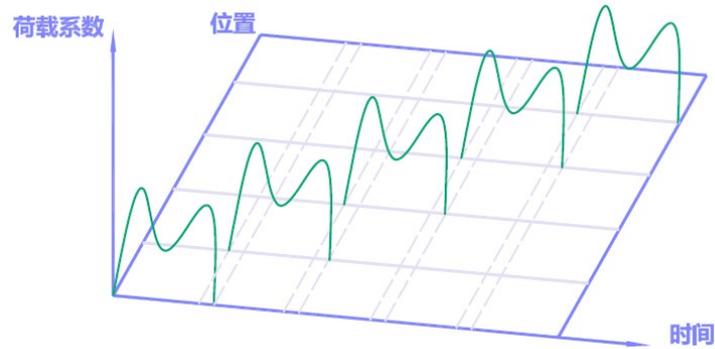


图 2.23 荷载简图

9. 本例选取参考文献[1]给出的曲线，文献利用傅里叶级数形式对单人单步落足曲线构建了函数模型，表达式如下：

$$k(t) = \sum_{n=1}^5 A_n \sin\left(\frac{\pi n}{T_e} t\right)$$

其中， $k(t)$ 为荷载系数， T_e 为单步落足荷载周期。

$$T_e = \frac{1}{0.76f_s}$$

两步之间的重叠时间为：

$$T_e - \frac{1}{f_s}$$

f_s 为步频，本例取 2Hz。文献[2]给出了人行走时步速、步幅和步频之间的关系。

行人运动状态	速度/(m/s)	步幅/m	频率/Hz
慢速行走	1.10	0.60	1.70
正常行走	1.50	0.75	2.00
快速行走	2.20	1.00	2.30

图 2.24 步速、步幅和步频之间的关系

$$A_1 = \begin{cases} -0.0698f_s + 1.211 & 1.6\text{Hz} \leq f_s \leq 2.32\text{Hz} \\ -0.1784f_s + 1.463 & 2.32\text{Hz} \leq f_s \leq 2.4\text{Hz} \end{cases}$$

$$A_2 = \begin{cases} 0.1052f_s - 0.1284 & 1.6\text{Hz} \leq f_s \leq 2.32\text{Hz} \\ -0.4716f_s + 1.210 & 2.32\text{Hz} \leq f_s \leq 2.4\text{Hz} \end{cases}$$

$$A_3 = \begin{cases} 0.3002f_s - 0.1534 & 1.6\text{Hz} \leq f_s \leq 2.32\text{Hz} \\ -0.0118f_s + 0.5713 & 2.32\text{Hz} \leq f_s \leq 2.4\text{Hz} \end{cases}$$

$$A_4 = \begin{cases} 0.0416f_s - 0.0288 & 1.6\text{Hz} \leq f_s \leq 2.32\text{Hz} \\ 0.2600f_s + 0.6711 & 2.32\text{Hz} \leq f_s \leq 2.4\text{Hz} \end{cases}$$

$$A_5 = \begin{cases} -0.0275f_s + 0.0608 & 1.6\text{Hz} \leq f_s \leq 2.32\text{Hz} \\ 0.0906f_s - 0.2132 & 2.32\text{Hz} \leq f_s \leq 2.4\text{Hz} \end{cases}$$

对于本例，

$$k(t) = 1.0714 \sin(4.77t) + 0.082 \sin(9.55t) + 0.447 \sin(14.32t) + 0.0544 \sin(19.10t) + 0.0058 \sin(23.87t)$$

10. 获取函数表达式后，将时程曲线的定义类型选择为“函数”，并在乘数函数处输入函数表达式，在时限处输入荷载周期，本例为 0.658s。需要注意的是，输入时不要略去乘号和括号。例如“4.77t”，在输入时应输入为“4.77*t”；“10sint”，在输入时应为“10*sin(t)”。

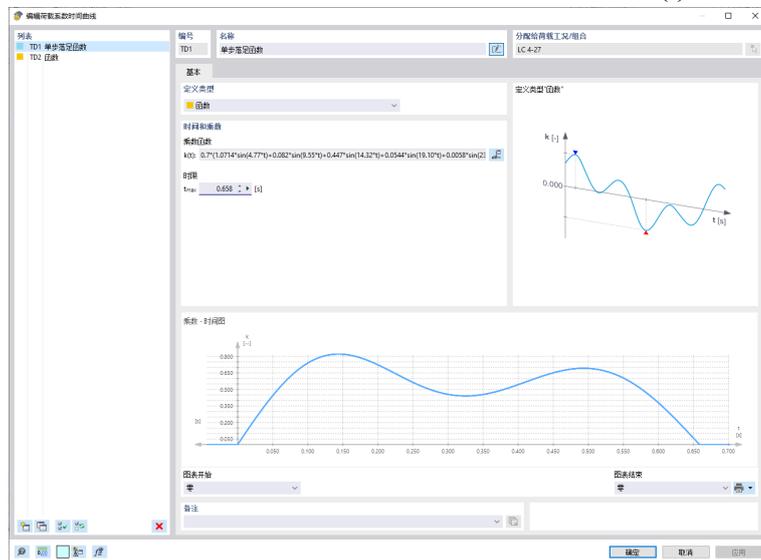


图 2.25 输入函数表达式和时长

11. 将函数名称设置为“单步落足函数”。点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成单步落足荷载曲线的定义。

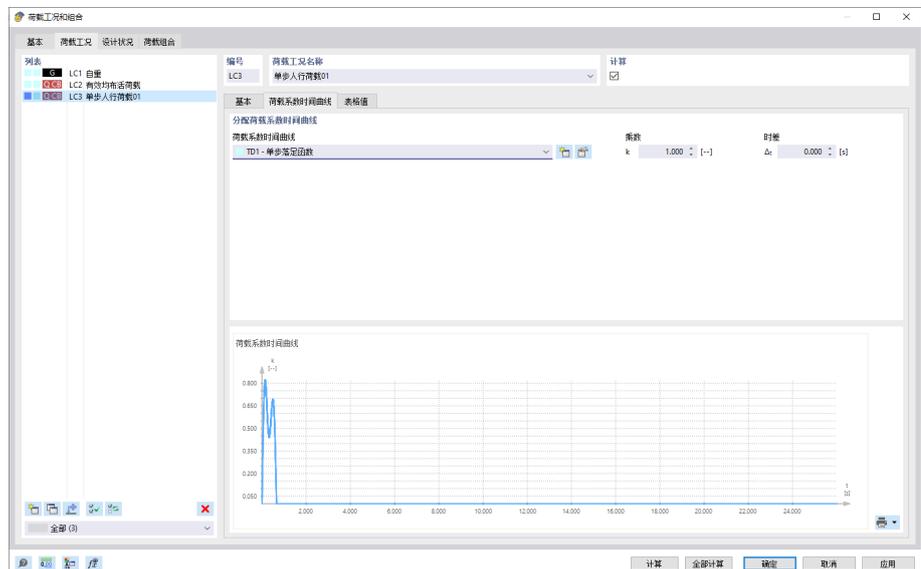


图 2.26 完成荷载函数的定义

12. 切换回[基本]选项卡，下面我们需要告诉程序进行时程分析时采取怎样的方法。点击时程分析设置右侧的按钮，打开[编辑时程分析设置]对话框。

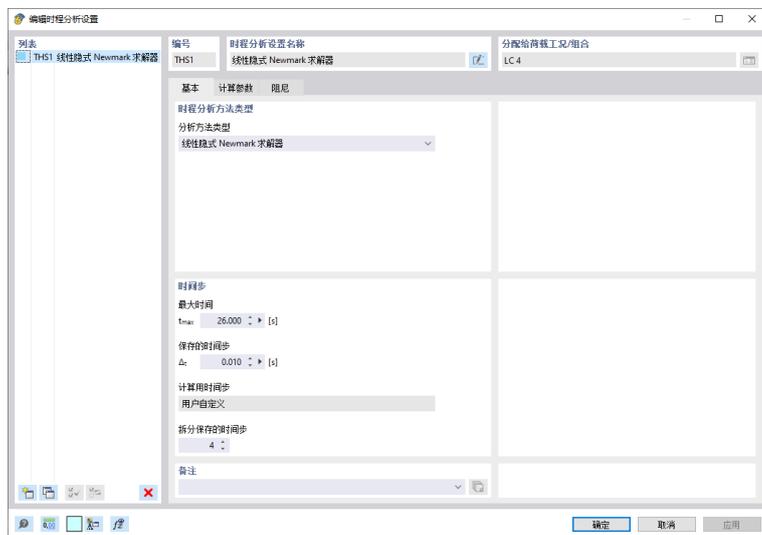


图 2.27 编辑时程分析设置对话框

13. 目前程序提供了两种求解方法：振型叠加和线性隐式 newmark 法。当求解方法选择为振型叠加时，我们需要先创建一个用于模态分析的工况，并需保证计算振型数足够，才能得到比较准确的结果。该方法的好处在于计算速度相对较快。

14. 本例选择分析方法为线性隐式 newmark 法。将该时程分析设置的名称修改为“行走路径”。本例单步落足荷载周期为 0.658s，两步之间的时差为 0.5s，一共有 24 个落足点，计算最大时间应囊括整个行走过程，应大于 $0.658 + 23 \times 0.5 = 12.158s$ ，本例取最大时长为 12.2s。

15. 程序的计算时间步长为保存时间步长/差分保存的时间步数目，例如程序默认的保存的时间步长为 0.01s，拆分保存的时间步数目为 4，则默认的计算时间步长为 0.0025s。

16. 本例的一阶竖向自振频率为 2.859Hz，根据规范建议值，计算时间步长应小于 $1/72f_1 = 0.004s$ ，程序的默认值即可满足要求。

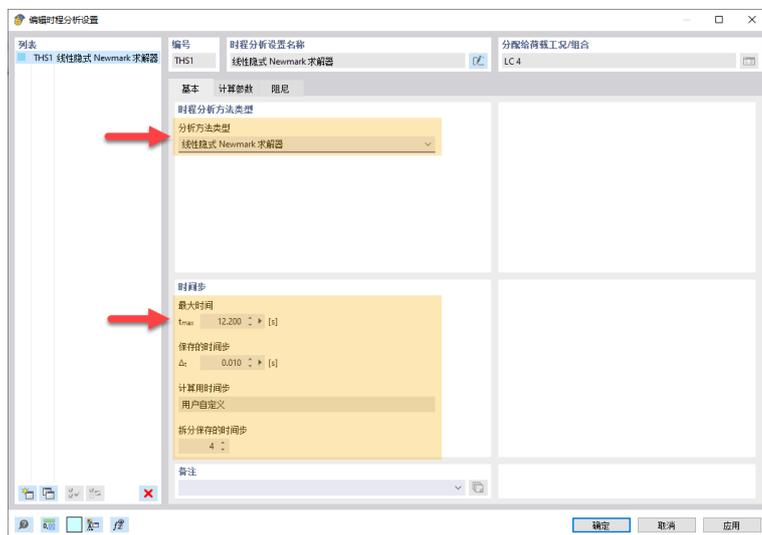


图 2.28 编辑时程分析设置

17.将对话框切换至[计算参数]对话框。可以看到，在进行时程分析时，如果分析方法选择为线性隐式 Newmark 法，程序会像进行模态分析时一样，将荷载转换为质量。本例仅关注楼盖的竖向相应，质量矩阵仅考虑沿全局 Z 方向的平动质量。

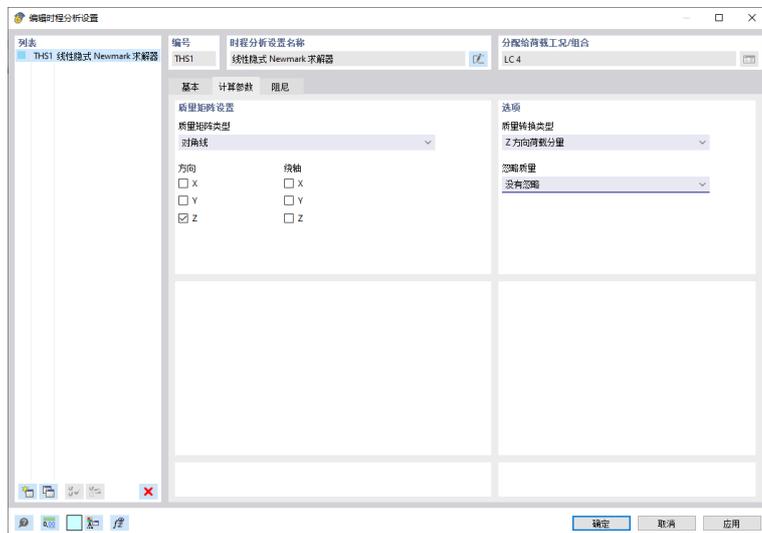


图 2.29 编辑时程分析计算参数

18.将对话框切换至[阻尼]选项卡，此时可以定义结构的阻尼比。当分析方法选择为线性隐式 Newmark 法时，我们需要按照瑞利阻尼的形式定义结构阻尼比。我们平常说一个结构阻尼比取 0.05，指的是这个结构所有振型对应的阻尼比都是 0.05，或者结构的 Lehr's 阻尼取 0.05。

19.Rayleigh 阻尼的参数可根据 Lehr's 阻尼计算，一般可采取这样的策略：先对结构进行模态分析，获取结构的各阶频率，使结构的两个控制振型对应的阻尼比直接取 Lehr's 阻尼。两个控制振型一般为结构的前两阶振型。

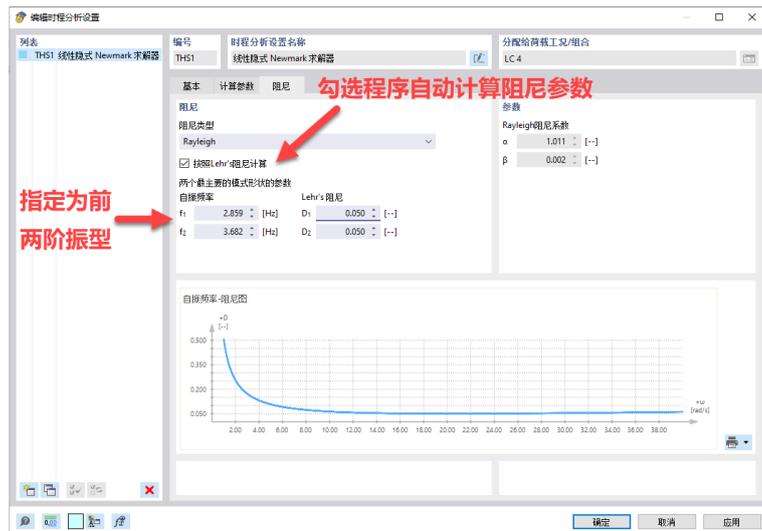


图 2.30 编辑阻尼比参数

20.点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成时程分析设置的调整。

21.将单步人行荷载的质量源指定为舒适度质量组合，并勾选考虑混凝土刚度放大。

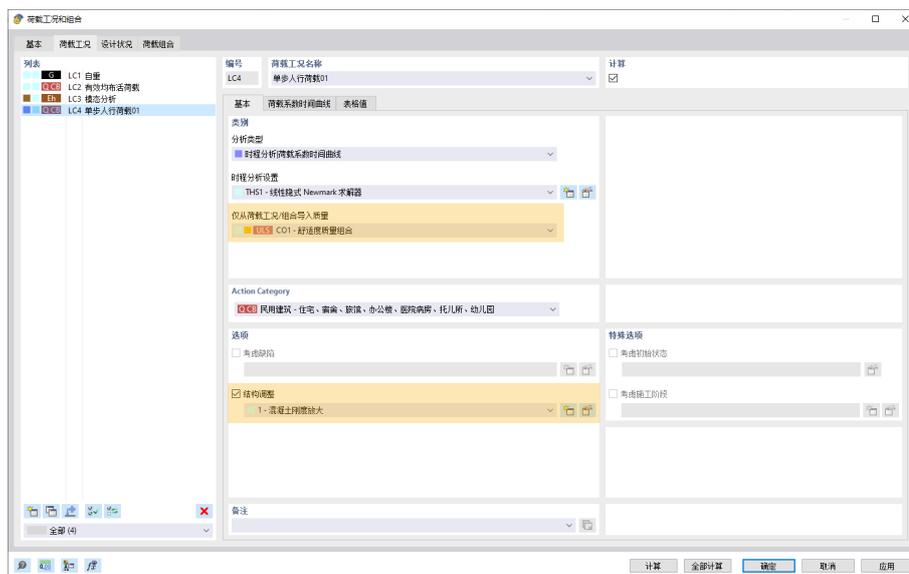


图 2.31 编辑质量源、设置刚度调整

22.点击对话框左下角的按钮，复制 LC4，创建 LC5。将 LC5 的名称修改为“单步人行荷载 02”，并将其时差设置为 0.5s。



图 2.32 复制荷载工况

23.按照相同的方法，依次创建后续加载点对应的荷载工况。



图 2.33 复制荷载工况

24.切换至[荷载组合]选项卡，点击对话框左下角的按钮，创建荷载组合 CO2，将荷载组合的名称设置为“行走路径”，分析类型选择为“时程分析|荷载系数时间曲线”，时程分析设置选择为“行走路径”，质量来源选择为“舒适度质量组合”，勾选进行结构调整，进行混凝土刚度的放大。

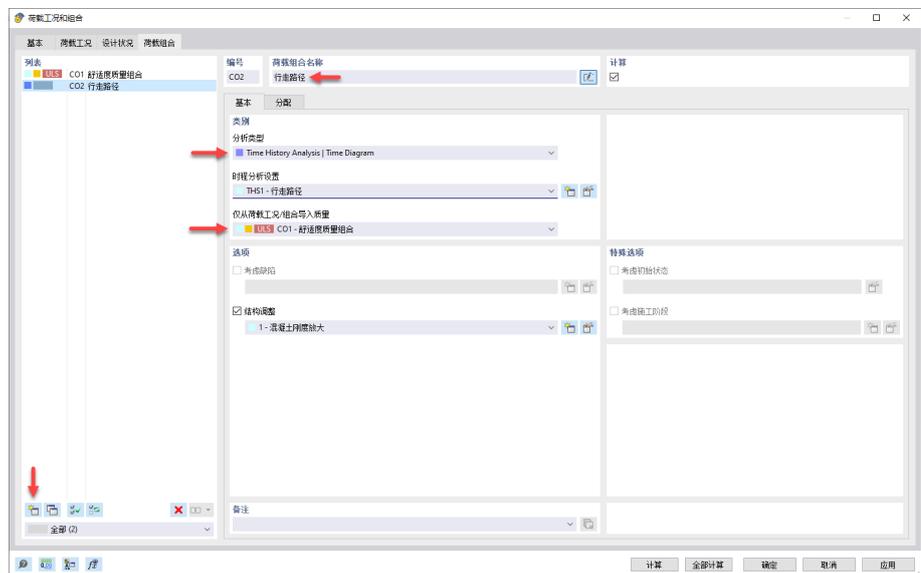


图 2.34 创建荷载组合

25. 切换至[分配]选项卡，将所有单步人行荷载叠加。

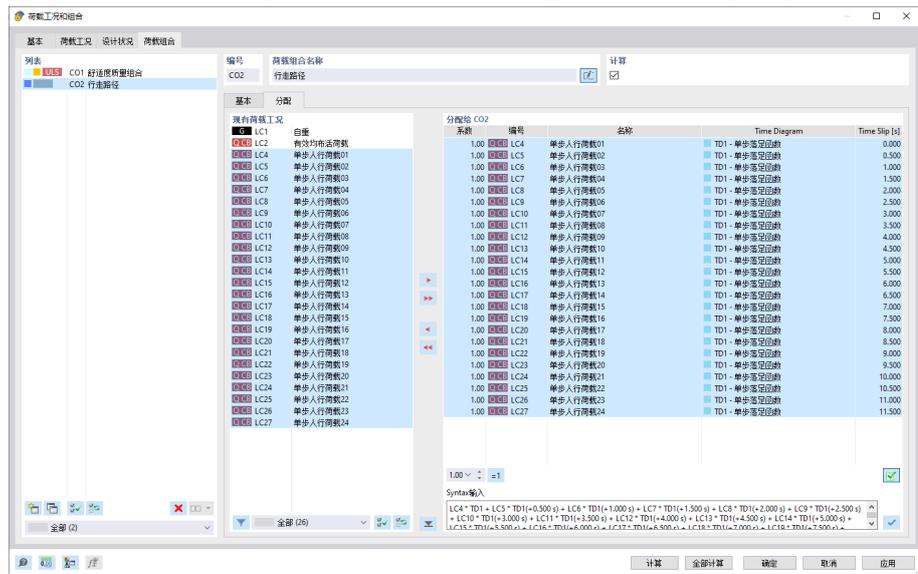


图 2.35 叠加单步人行荷载

26. 您也可以重新在该对话框中，指定每一步对应的时程曲线、滞后时间。

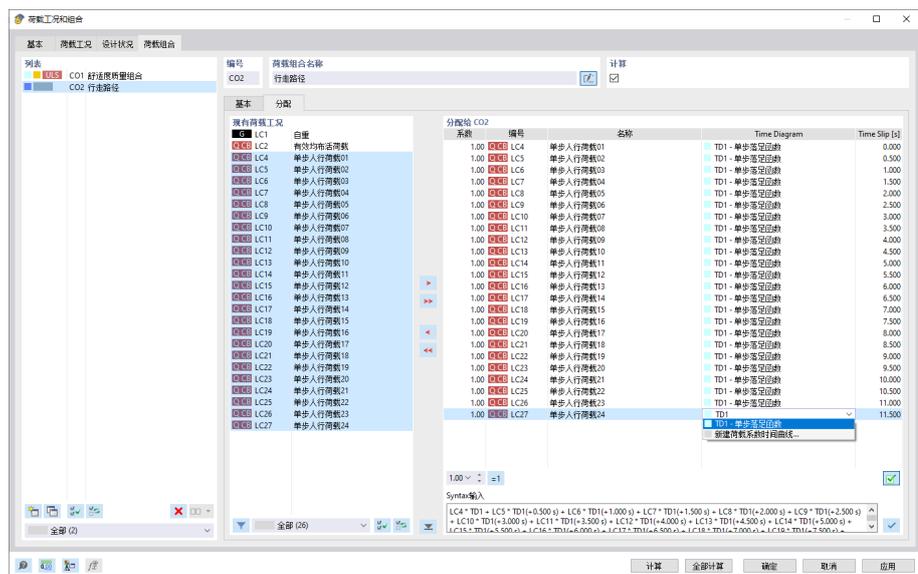


图 2.36 重新指定时程曲线

27. 点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成行走路径人行荷载的工况创建、计算设置调整。

28. 点击工具栏中的  按钮，打开[新建节点荷载]对话框。将荷载工况选择为“单步人行荷载 01”，荷载类型选择为沿全局 Z 方向的集中力，荷载大小设置为-0.7kN。点击对话框右上角的  按钮，将其分配给第一个落足点。点击对话框右下角的[应用]按钮，完成第一个落足点荷载的分配。

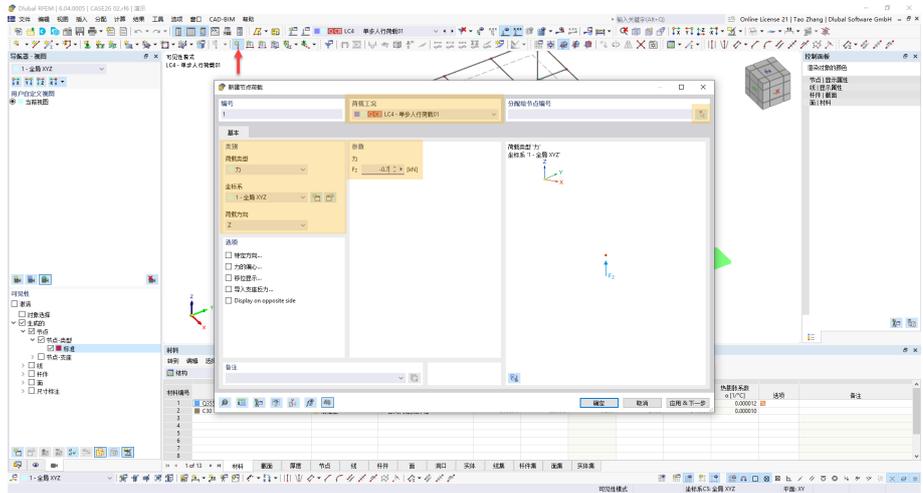


图 2.37 施加人行荷载

29. 用同样的方式，依次为后续的落足点施加荷载。

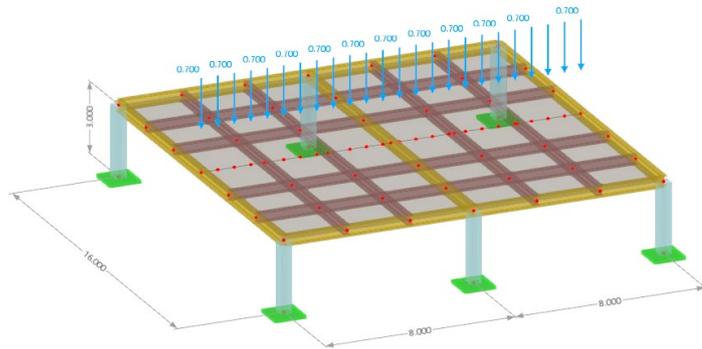


图 2.38 施加人行荷载

2.5 固定位置人行荷载

1. 打开[荷载工况和组合]对话框，切换至[荷载工况]选项卡。点击对话框左下角的按钮，新建荷载工况。将荷载工况名称设置为“固定人行荷载 01”，分析类型选择为“时程分析|荷载系数时间曲线”，质量来源选择为“舒适度质量组合”，荷载作用类别选择为活荷载，勾选考虑结构调整，对混凝土刚度进行放大。

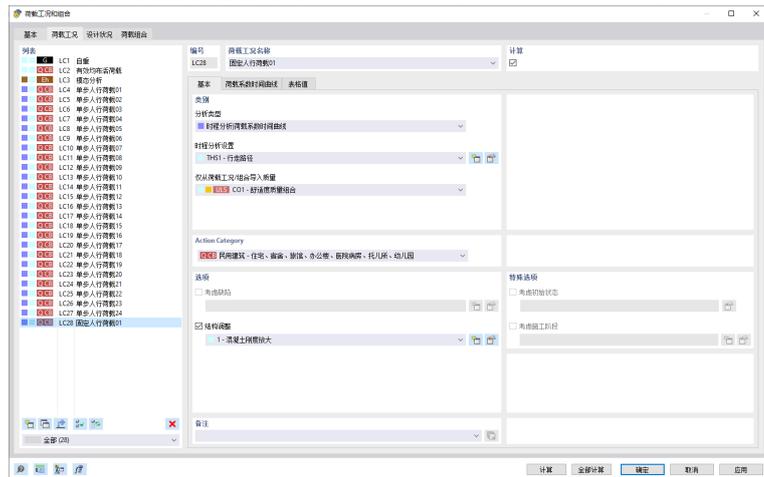


图 2.39 创建固定荷载工况

2. 点击时程分析设置右侧的按钮，打开[编辑时程分析设置]对话框。选中时程分析设置 1，将其复制，创建时程分析设置 2。根据规范要求，在固定点施加人行激励时，时程分析总时长不小于 15s。将时程分析设置 2 的名称修改为“固定位置”，最大时间修改为 15s。点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成时程分析设置的创建。

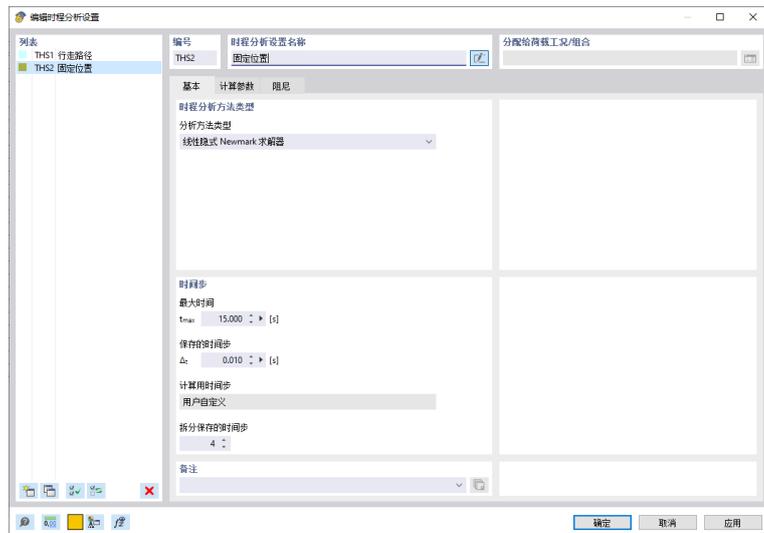


图 2.40 创建时程分析设置

3.回到[荷载工况和组合]对话框，将该工况的时程分析设置指定为“固定位置”。切换至[荷载系数时间曲线]对话框。点击时间曲线右侧的按钮，打开[新建荷载系数时间曲线]对话框。

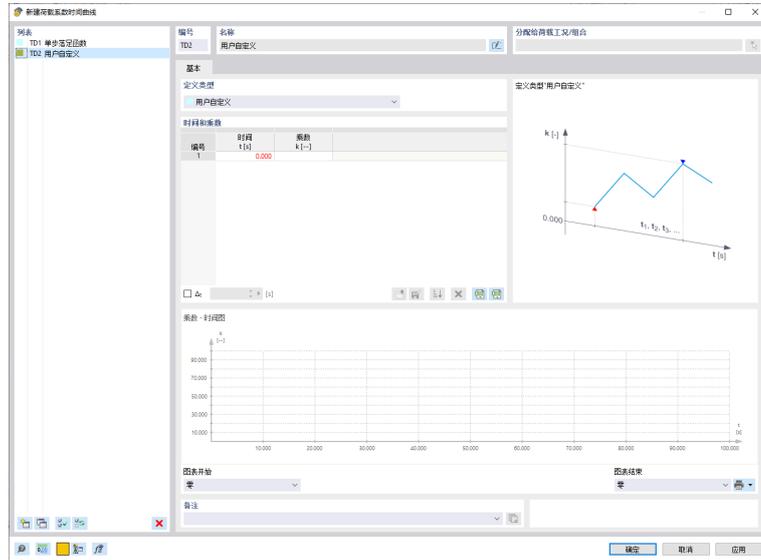


图 2.41 新建时程曲线

4.对于规范规定的人行激励荷载，其表达式为：

$$F(t) = \sum_{i=1}^3 \gamma_i P_p \cos(2\pi i \bar{f}_1 t + \varphi_i)$$

\bar{f}_1 为第一阶荷载频率，与楼盖的一阶竖向自振频率有关：

$$\bar{f}_1 = \begin{cases} 1.6 & \frac{f_1}{n} < 1.6 \\ \frac{f_1}{n} & 1.6 \leq \frac{f_1}{n} \leq 2.2 \\ 2.2 & \frac{f_1}{n} > 2.2 \end{cases}$$

n 为整数，可取 1、2、3。 γ_i 为动力因子， φ_i 为相位角，可按规范表 5.2.2 取值。

对于本例，一阶竖向自振频率 f_1 为 2.859Hz，当 $n=1$ 时， \bar{f}_1 取 2.2，激励荷载为：

$$F(t) = P_p \left[0.5 \cos(4.4\pi t) + 0.2 \cos\left(8.8\pi t + \frac{\pi}{2}\right) + 0.1 \cos\left(13.2\pi t + \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

当 $n=2$ 或 3 时， \bar{f}_1 取 1.6，此时激励荷载为：

$$F(t) = P_p \left[0.5 \cos(3.2\pi t) + 0.2 \cos\left(6.4\pi t + \frac{\pi}{2}\right) + 0.1 \cos\left(9.6\pi t + \frac{\pi}{2}\right) \right]$$

我们需要分别将这两种荷载施加到结构上，取最大的结构响应作为最终的结构响应。

5.将新建的荷载系数时间曲线名称输入为“固定位置 01”，乘数函数为

$$k(t) = 0.5 \cos(4.4\pi t) + 0.2 \cos\left(8.8\pi t + \frac{\pi}{2}\right) + 0.1 \cos\left(13.2\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$$

最大时间输入为 15s。

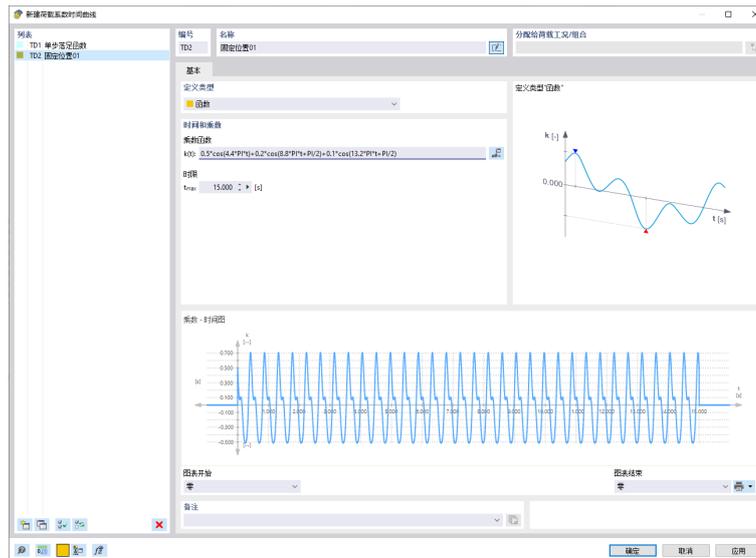


图 2.42 输入时程函数

5. 点击对话框左下角的  按钮，复制 TD2，创建 TD3。将 TD3 的名称输入为“固定位置 02”，并修改其函数为：

$$k(t) = 0.5 \cos(3.2\pi t) + 0.2 \cos\left(6.4\pi t + \frac{\pi}{2}\right) + 0.1 \cos\left(9.6\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$$

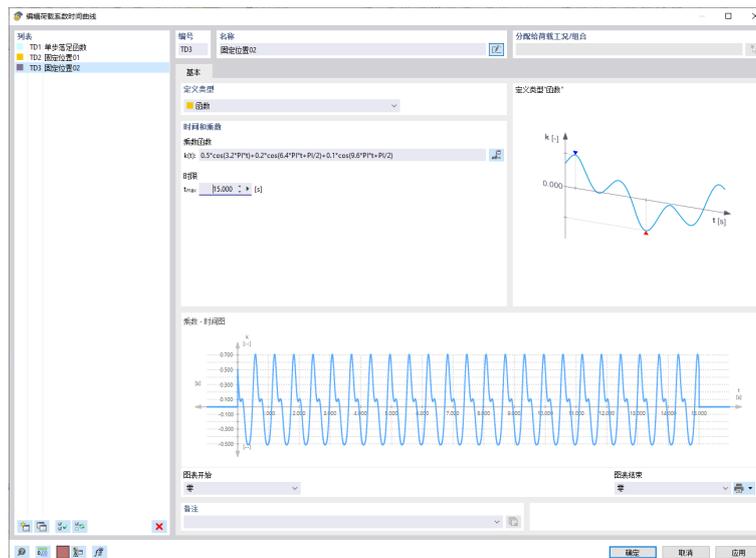


图 2.43 输入时程函数

6. 点击对话框右下角的[确定]按钮，完成时程曲线的创建。回到[荷载工况和组合]选项卡，将工况“固定位置荷载 01”对应的时程曲线“固定位置 01”。

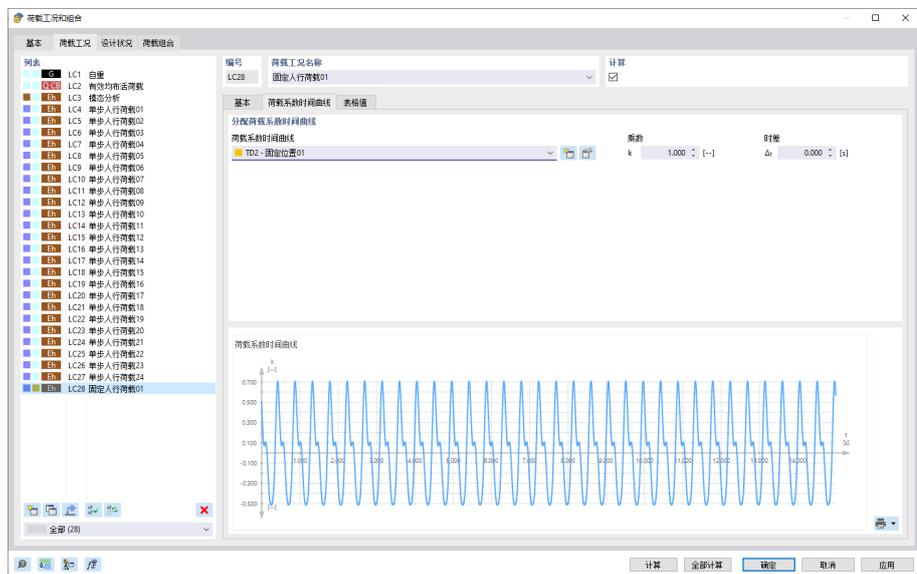


图 2.44 指定时程函数

7. 点击对话框左下角的[复制]按钮，复制荷载工况，将新的荷载工况名称修改为“固定位置荷载 02”，时程曲线指定为“固定位置 02”。

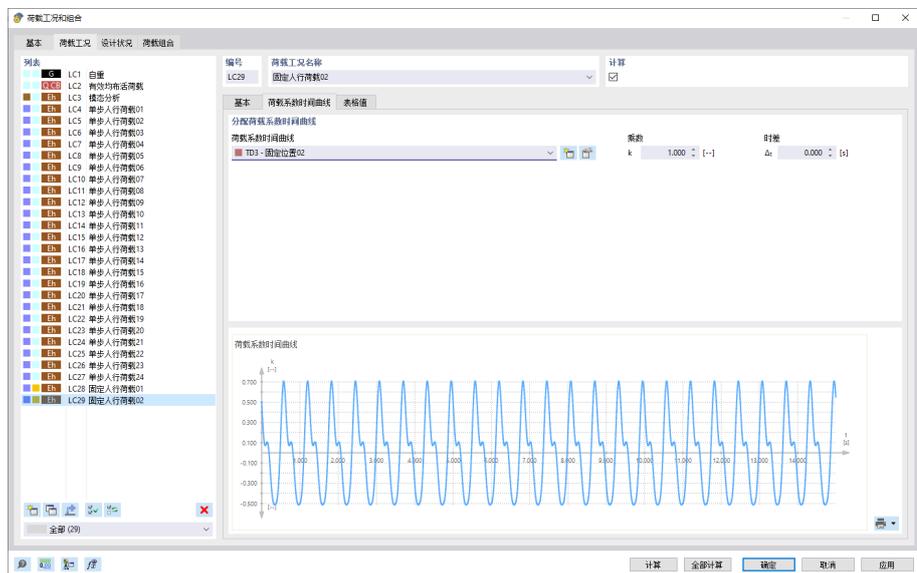


图 2.45 指定时程函数

8. 点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成固定位置荷载计算参数和时程曲线的指定。

9. 点击工具栏中的  按钮，打开[新建节点荷载]对话框。将荷载类型选择为沿全局 Z 方向的集中力，荷载工况选择为“固定位置荷载 01”，荷载大小设置为-0.7kN，点击对话框右上角的  按钮，将其分配给最不利振动点。点击对话框右下角的[应用]按钮，完成荷载的创建。

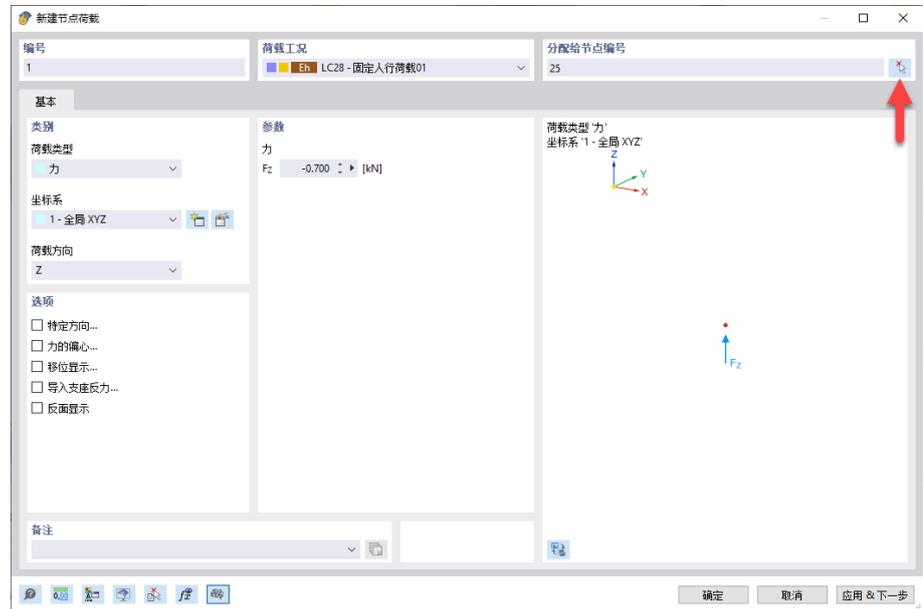


图 2.46 新建节点荷载

10. 将当前工况修改为“固定人行荷载 02”，其余不变，点击对话框右下角的[确定]按钮，关闭对话框，完成荷载的创建。

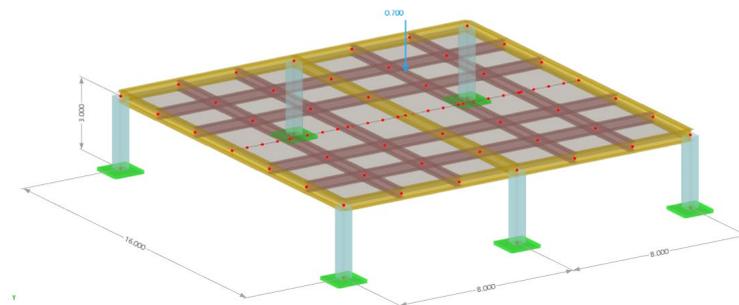


图 2.46 为最不利振动点施加荷载

3 时程分析与结果提取

3.1 时程分析

1. 点击菜单栏[计算]-[计算...], 选取 CO2、LC28、LC29 进行计算。

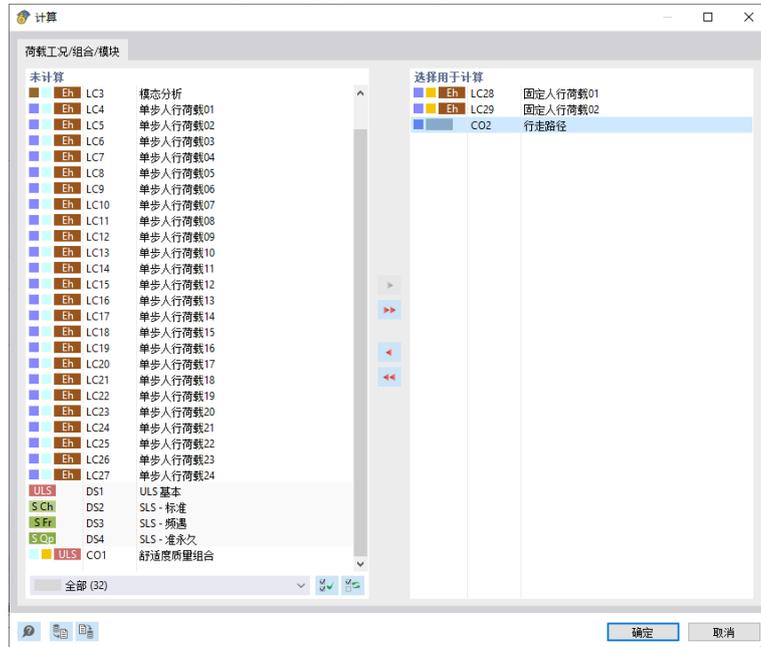


图 3.1 选取计算的荷载工况/组合

2. 程序会自动打开[计算进度]对话框。

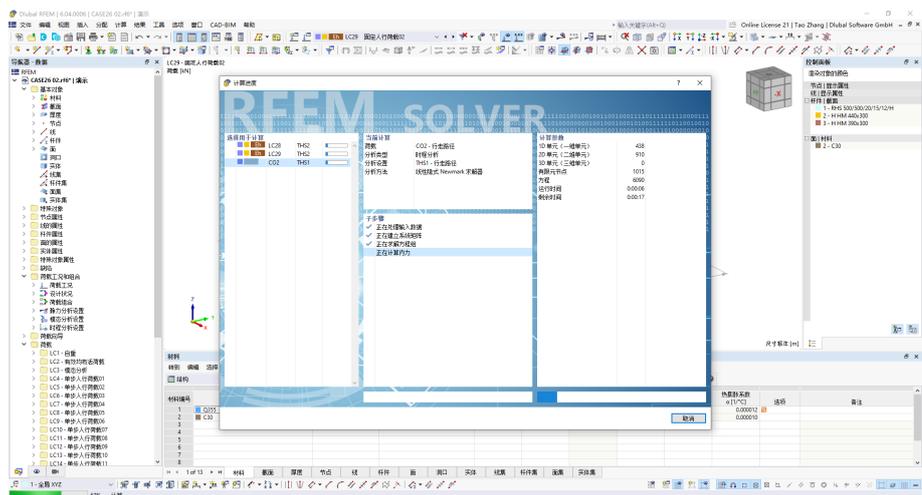


图 3.2 查看计算进度

3.2 结果提取

1. 计算完成后，我们可以通过[导航器结果]和工具栏选择显示哪个工况、哪种结果。

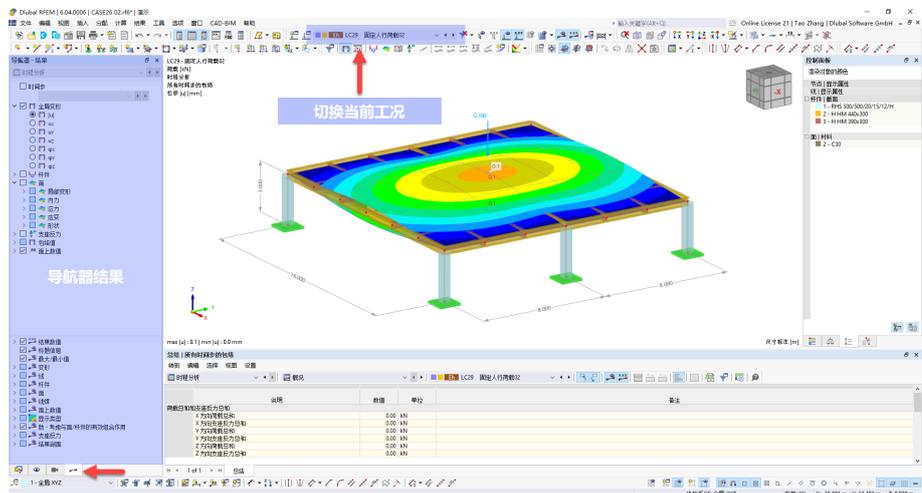


图 3.3 查看计算结果

2. 当不勾选时间步时，程序会显示整个时间段的包络结果。包络结果默认同时显示包络最大值和包络最小值，您可以通过左侧[导航器结果]切换显示包络的结果。

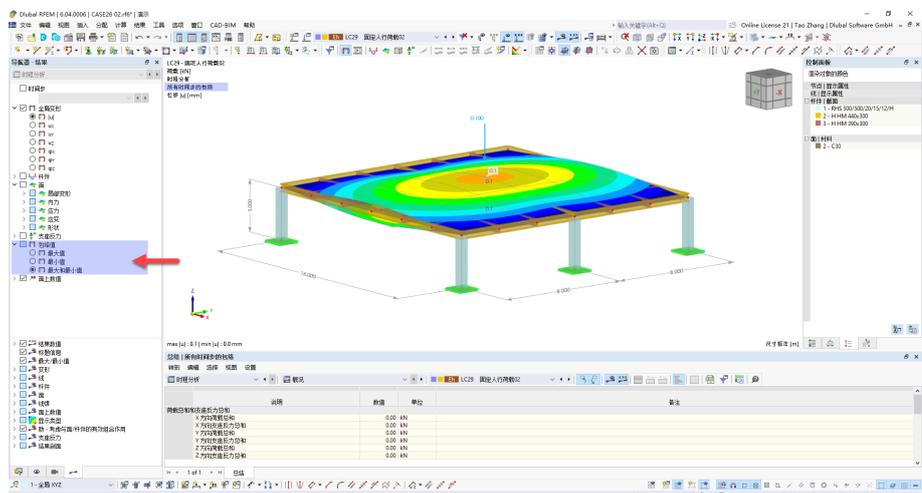


图 3.4 查看包络结果

3.如果原有模型影响了结果查看，您可以在模型空白处右键单击，将当前模型显示风格选择为线框。

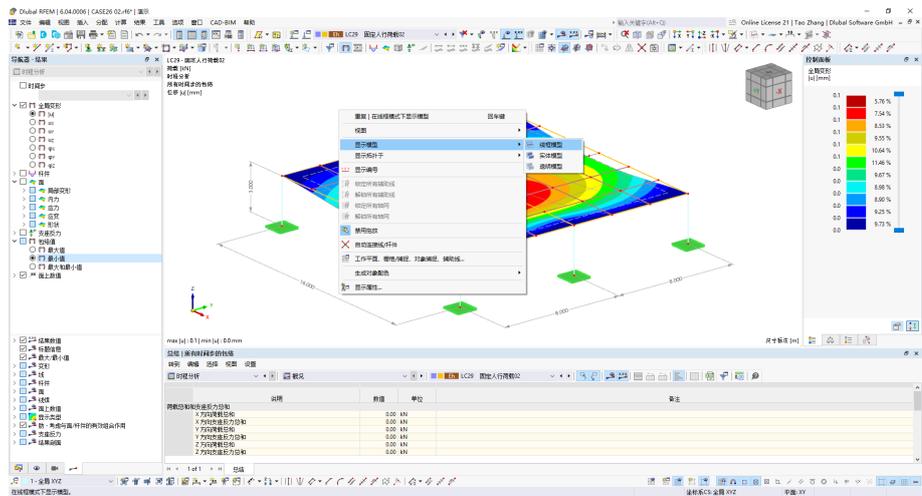


图 3.5 切换模型显示风格

4.当在左侧[导航器结果]中勾选“时间步”后，您可以选择显示某个时间步的结果。您也可以使用右侧的滑块调整当前的时间步。

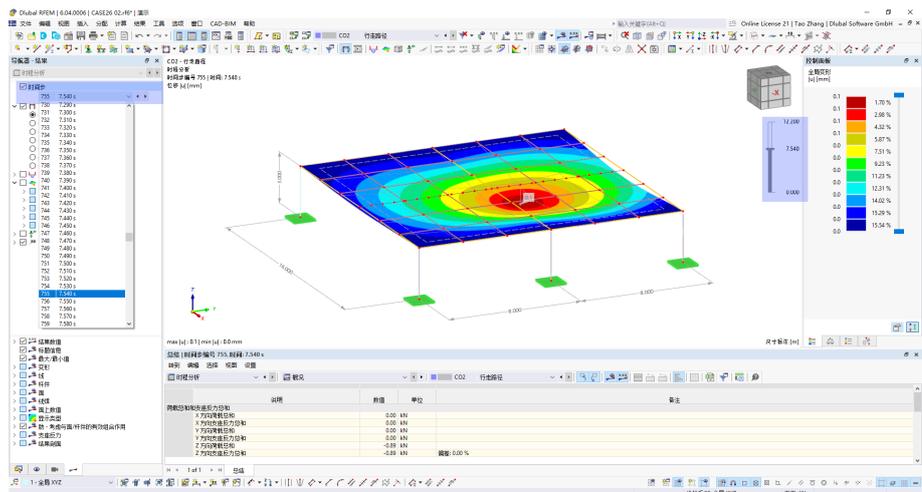


图 3.6 切换当前时间步

5. 我们可以通过计算图表提取更详细的结果。在左侧[导航器数据]-[计算图表]处，右键单击，选择[新建]，打开[新建计算图表]对话框。

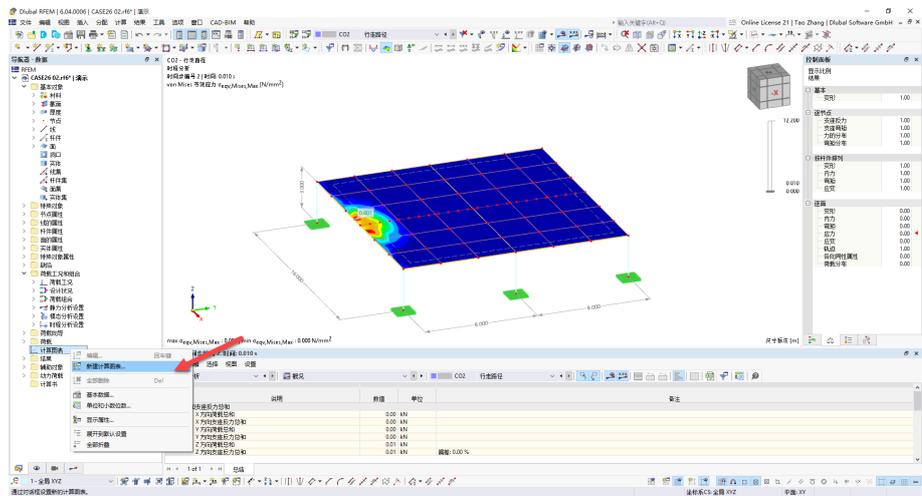


图 3.7 新建计算图表

6. 在对话框的[基本]选项卡中，将计算图表类型选择为“2D\Basic”，类型选择为“时程分析”。选择提取 CO2 的结果，横轴选择为时间，纵轴选择为节点的竖向加速度，并使用对话框中的  按钮，选取振动最不利点。

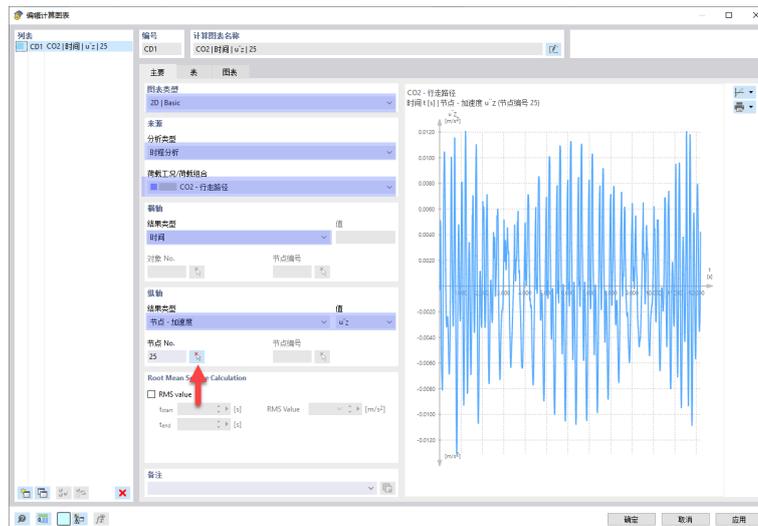


图 3.8 提取最大加速度图表

7.如果加速度精度过低，可以点击对话框左下角的按钮，打开[单位和
小数位数]对话框，将加速度的小数位数调高。

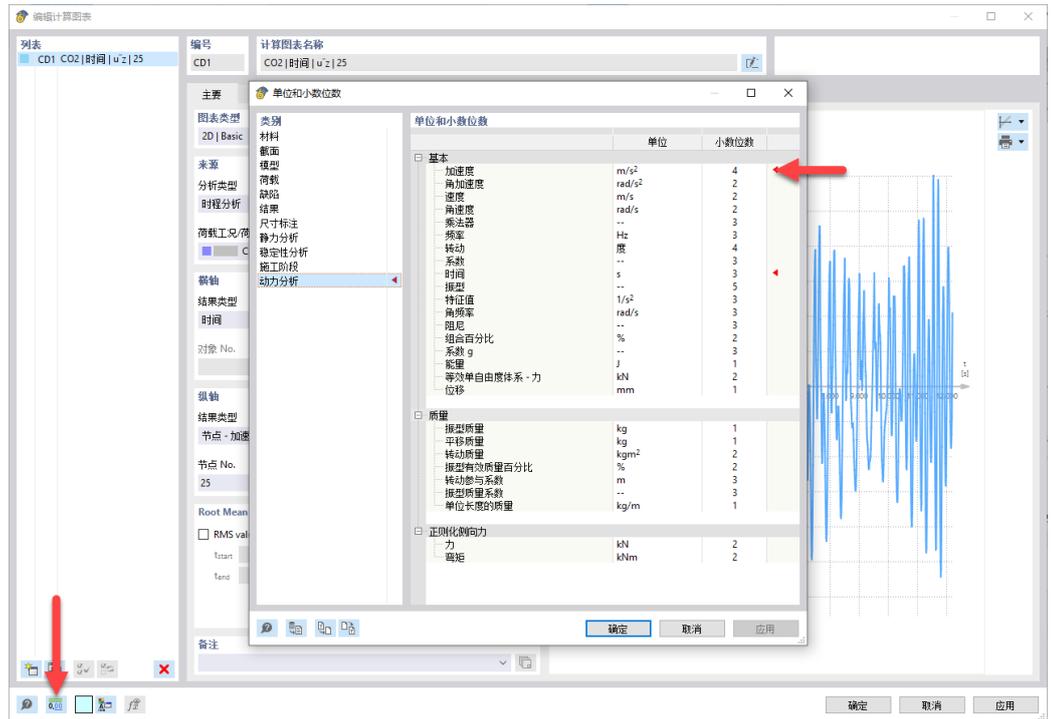


图 3.9 修改加速度精度

8.将对话框切换至[表]选项卡，即可查看每个时间步的详细数据。

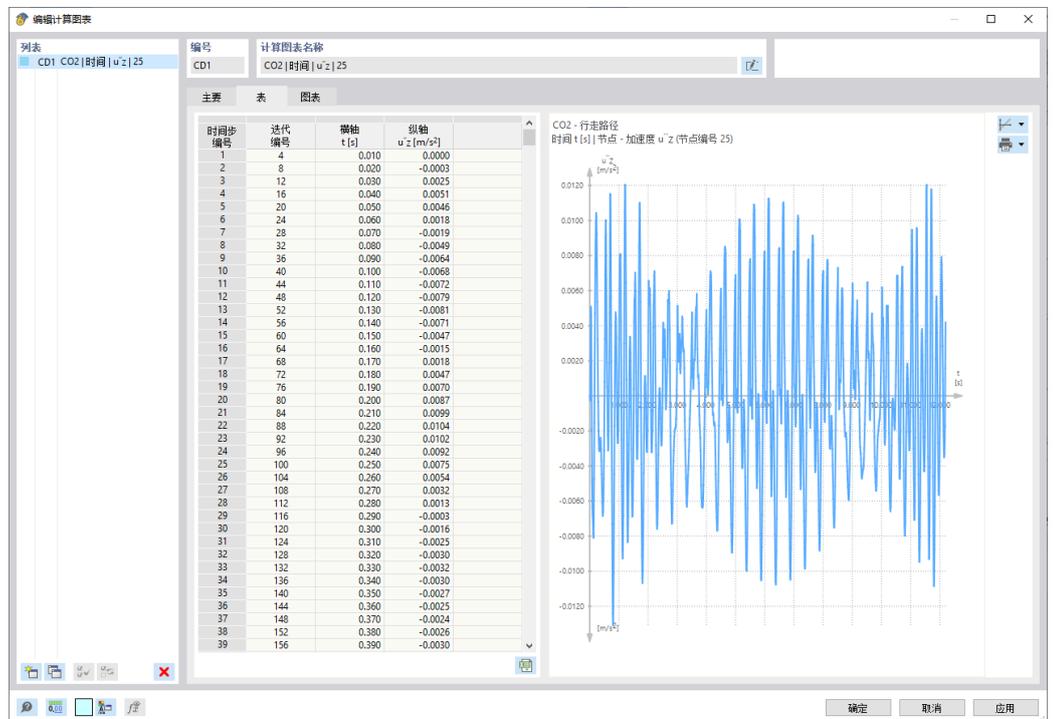


图 3.10 查看时间步详细数据

9. 将对话框切换至[图表]选项卡，可以查看更清晰的图像。将鼠标悬停在曲线上，程序会显示该点的具体数值。

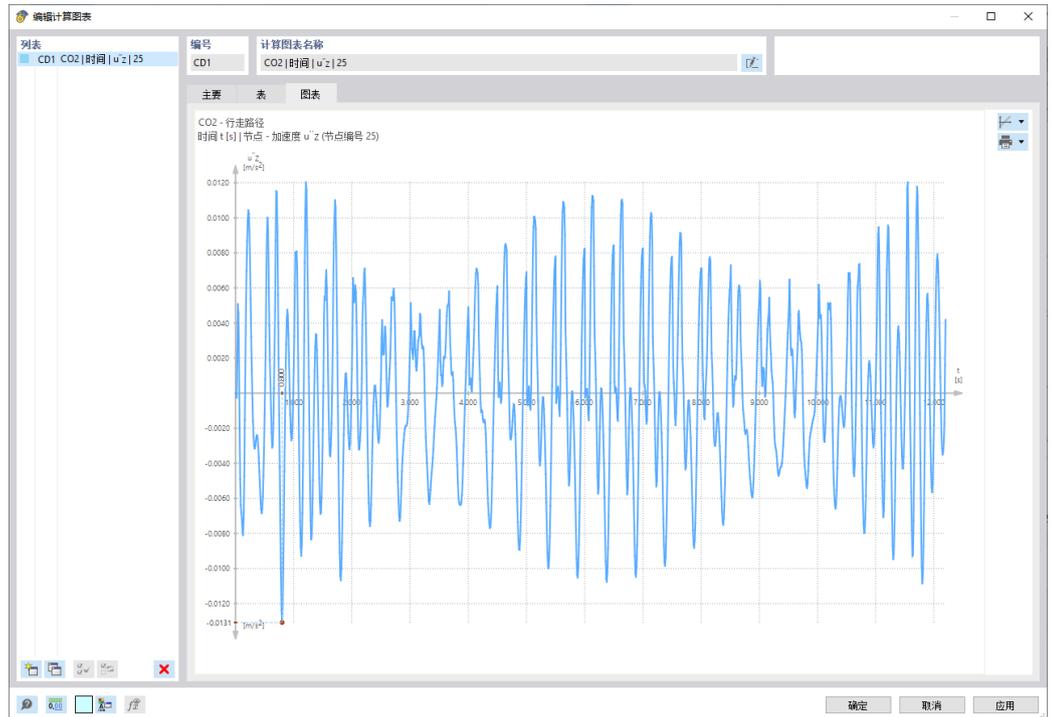


图 3.11 查看最大加速度

10. 将该图表名称输入为“行走路径加速度-时间曲线”。

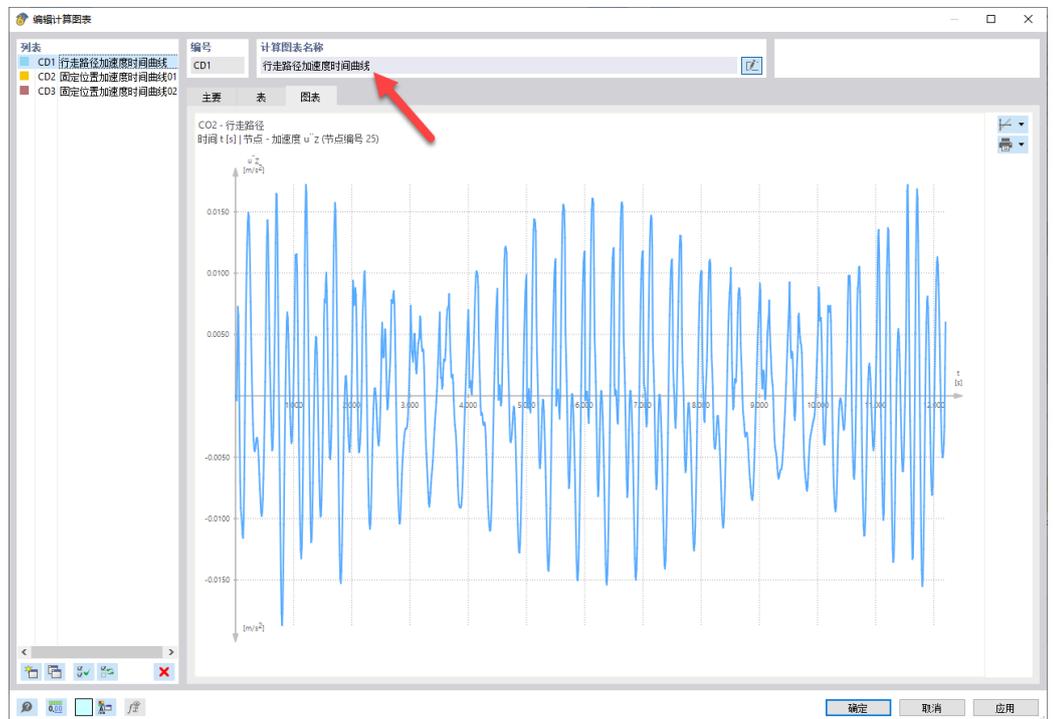


图 3.12 修改计算图表名称

11.用同样的方式，提取固定位置加载对应的加速度时间曲线。

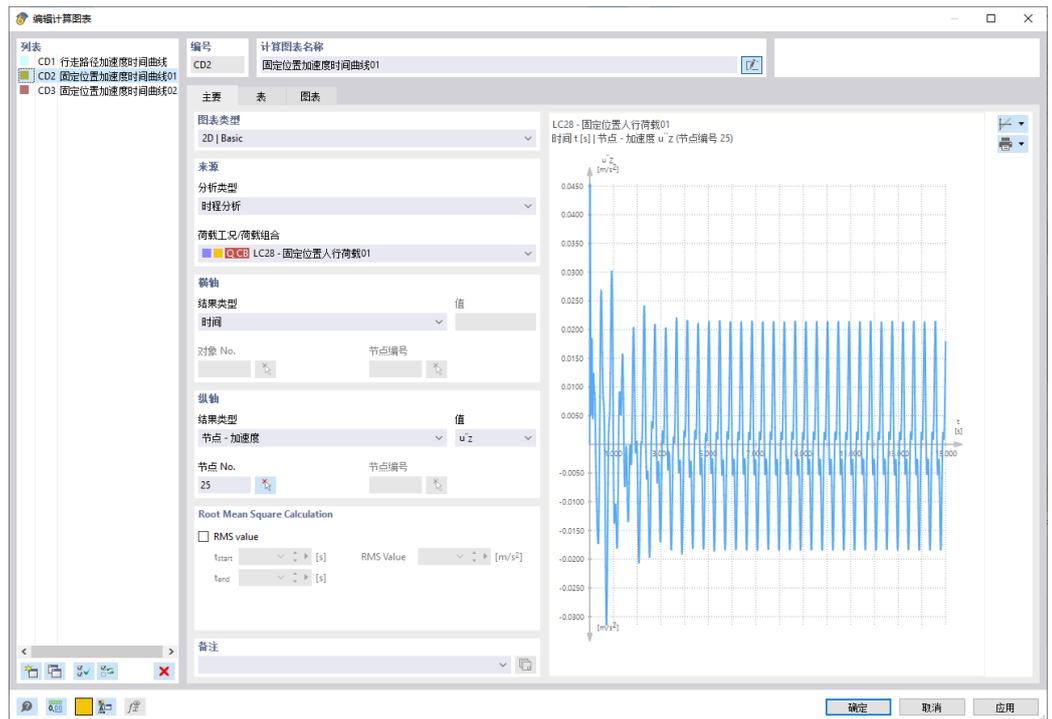


图 3.13 固定加载加速度曲线 01

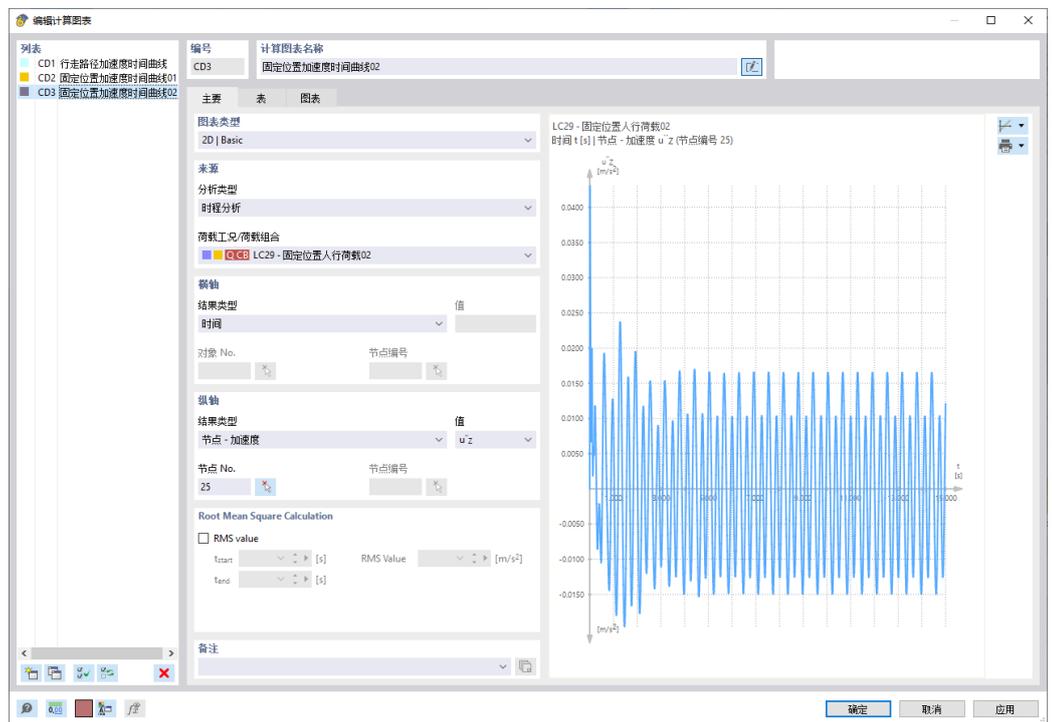


图 3.14 固定加载加速度曲线 02

12.需要注意的是，人行走是一个连续的过程，对于固定位置的加载方式，应取其平稳后的加速度峰值作为最终的峰值加速度。

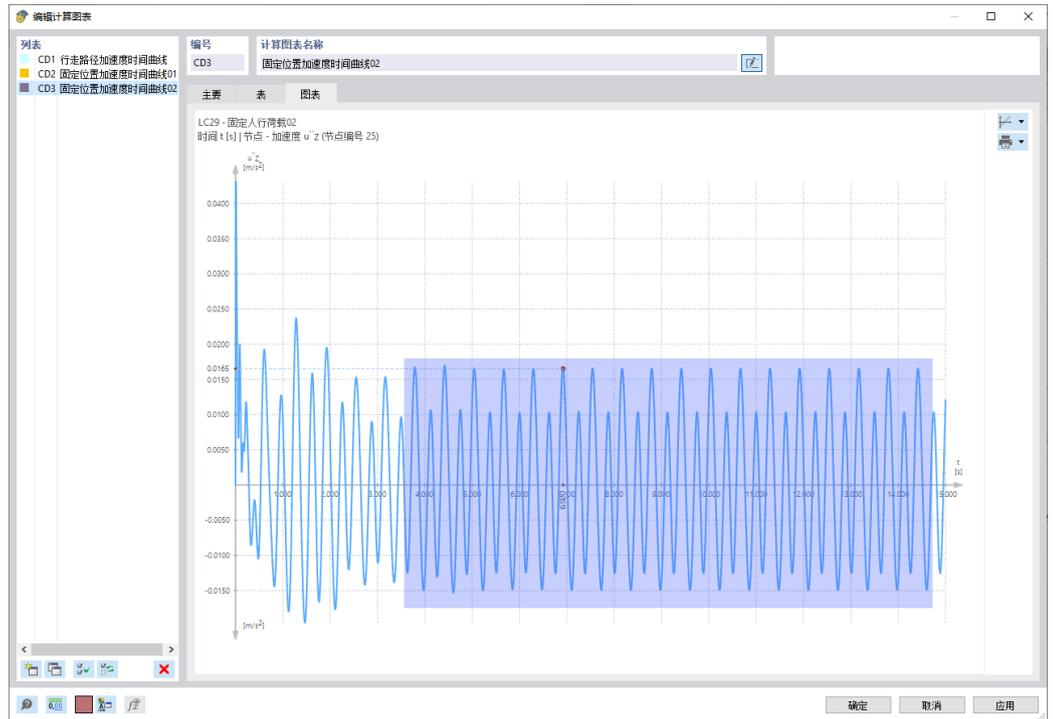


图 3.15 平稳后的加速度峰值

13.对于本例的楼盖结构，舒适度指标汇总如下：

一阶竖向自振频率 $2.859\text{Hz} < 3\text{Hz}$ ，频率不满足规范要求
峰值加速度：

行走路径加载方式： 0.019m/s^2

固定位置加载方式一： 0.021m/s^2

固定位置加载方式二： 0.016m/s^2

取最终的峰值加速度为 0.021m/s^2 ，峰值加速度满足规范要求

参考文献：

[1] 人行桥标准行人激励荷载的构建与验证_樊建生

[2] 楼板体系振动舒适度设计_娄宇