

CSI 软件常见隔震器参数设置及说明

筑信达 曾 亚

正确模拟隔震支座力学性能，是隔震模型得到准确分析结果的关键。CSI 软件为用户提供了类型丰富的减隔震单元用于模拟各类减隔震装置，本文将介绍两类常见隔震支座——橡胶隔震支座和摩擦摆隔震支座在软件中具体模拟方法，使用户了解隔震连接单元各项参数含义和作用，规避常见应用误区。

1 橡胶隔震支座

橡胶支座具有完善成熟的设计理论、稳定的生产工艺技术，以及便捷简单的施工等优点。随着国家抗震减灾措施的落实以及技术的进步，橡胶支座是应用最为成熟和广泛的。

目前在基础隔震技术中所用到的建筑隔震橡胶支座常见的有三种类型：普通天然橡胶隔震支座、铅芯橡胶隔震支座和高阻尼橡胶隔震支座（High Damping Rubber Isolator）。普通天然橡胶隔震支座和铅芯橡胶隔震支座采用 Rubber Isolator 连接单元模拟，下面详细介绍在软件中支座参数的含义。

1.1 普通天然橡胶隔震器模拟

用户根据厂家提供的支座产品参数，模拟普通天然橡胶隔震支座的力学性能。本文以产品型号为 LNR400 的天然橡胶隔震器为例进行说明，产品参数见表 1-1。

表 1-1 橡胶隔震支座产品规格

型号	水平等效刚度 (kN/m)	竖向刚度 (kN/mm)
LNR400	660	1600

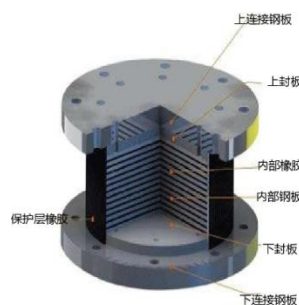


图 1-1 普通天然橡胶隔震支座示意

普通天然橡胶隔震器在分析过程中只考虑其线性性能。故在 Rubber Isolator 定义中，只勾选 U1、U2、U3（如图 1-2），并对此三个方向的属性分别进行定义即可。1、2、3 代表连接单元局部坐标轴方向，其中 1 轴为支座轴向，2、3 轴为支座剪切方向。



图 1-2 普通天然橡胶隔震器模拟



图 1-3 U1 方向属性定义对话框

U1 方向为支座轴向，U1 方向的有效刚度代表竖向变形特性。建筑隔震橡胶支座只承受竖向纯压缩载荷时，竖向载荷位移曲线显示出弹簧特性，在设计面压载荷范围内近似为线性关系。故在程序中，U1 方向仅需输入线性属性（如图 1-3）。

本例中，U1 方向有效刚度输入支座产品参数中的竖向刚度 1600000（注意单位制）；有效阻尼输入 0。



图 1-4 U2、u3 方向属性定义对话框

U2 和 U3 方向有效刚度代表其水平剪切刚度，此数值为线性属性，只用于线性分析工况。一般情况下，U2 方向的属性与 U3 方向属性相同，采用同样的参数。

有效阻尼：隔震器的有效阻尼值，体现线性分析中隔震器的能量耗散能力，与隔震器的剪切应变相关。切记，有效阻尼不能与隔震器的等效阻尼比混为一谈。由于隔震模型一般采用非线性时程分析，此数值在非线形分析中不发挥作用，故通常情况下填写 0。

剪切变形位置：剪切变形发生的位置，注意此处输入的数值为距离 J 端的绝对距离。J 端指沿连接单元轴向，末端位置。更多内容可参考筑信达知识库文章《[剪切变形位置](#)》。

本例中，U2、U3 方向有效刚度输入支座产品参数中的水平等效刚度 660（注意单位制）；有效阻尼输入 0；剪切变形位置取隔震层高度一半的位置，输入 0.8。

最后，关于总质量和重量选项的说明。质量用于计算动力分析中的惯性力，用户可以指定一个总平动质量，程序由连接单元贡献的质量分配到单元两端节点。重量用于考虑连接单元自重，同样用户输入支座自重后，程序自动均分给单元两端节点。

关于转动惯性矩，每个非线性变形荷载都有对应的质量，以生成合适的 ritz 向量来进行非线性时程分析。当单元长度非零或剪切变形位置非零时，对于非线性剪切变形，除了平动质量之外还需要考虑转动惯量。

1.2 铅芯橡胶隔震器模拟

用户根据厂家提供的支座产品参数，模拟普通天然橡胶隔震支座的力学性能。本文以产品型号为 LRB400 的铅芯橡胶隔震器为例进行说明，产品参数见表 1-2。

表 1-2 铅芯隔震支座产品规格

型号	屈服前刚度 kN/m	等效刚度		竖向刚度 kN/mm	屈服力 kN
		100%水平剪切变形 kN/m	250%水平剪切变形 kN/m		
LRB400	8790	1040	820	2200	27.0
LRB500	10910	1270	1010	2400	40.0
LRB600	13110	1580	1580	2800	63.0

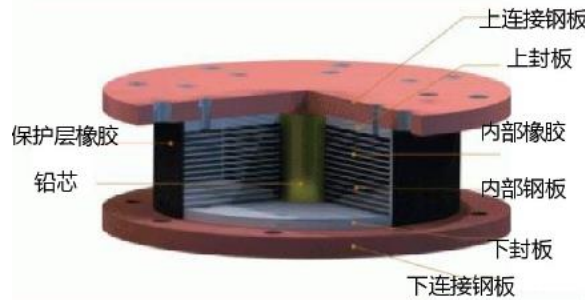


图 1-5 铅芯橡胶隔震支座示意

铅芯橡胶隔震器在分析过程中考虑其水平方向的非线性性能。在 Rubber Isolator 定义中，勾选 U1、U2、U3，并勾选 U2、U3 方向的非线性。分别对此三个方向的属性进行定义完成铅芯橡胶隔震器属性模拟。

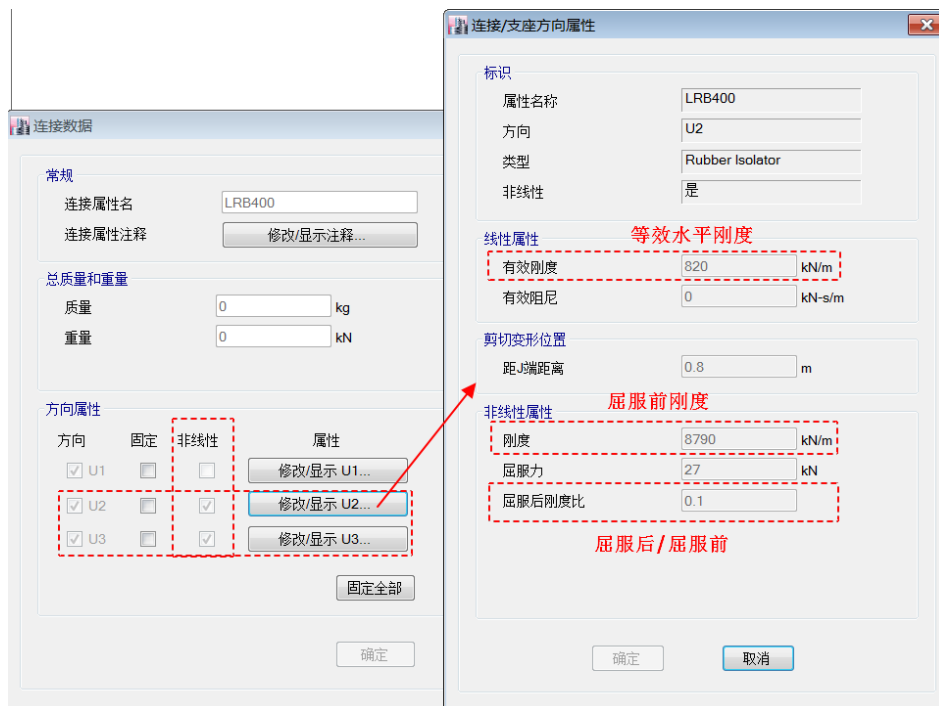


图 1-6 铅芯橡胶隔震支座参数

U1 方向参数填写请参考上节普通天然橡胶支座。同样，U2 与 U3 方向采用相同的参数。



对于考虑 U2、U3 方向非线性属性的含铅芯隔震器，其水平剪切刚度与隔震器的剪切应变相关，在设防地震下取 100%水平剪切变形时对应的等效水平刚度；罕遇地震下，取 250%水平剪切变形时对应的等效水平刚度。

本例中，建立中震下隔震模型 U2、U3 有效刚度取 100%水平剪切变形时对应的等效水平刚度 820；有效阻尼输入 0。

非线性分析工况使用的属性，包含以下内容：

刚度：隔震器的初始刚度 K_i ，即屈服前刚度。

屈服力：由实验确定，来自产品参数。

屈服后刚度比：屈服后刚度与屈服前刚度的比值。参考《橡胶支座第 3 部分：建筑隔震橡胶支座》 GB20688.3-2006 中的规定，一般建筑结构取 1/10，桥梁结构取 1/6.5。

1.3 模拟支座拉压刚度不一致

依据目前大多数隔震工程经验，橡胶隔震支座抗拉刚度一般取为抗压刚度 1/10，或由生产厂家提供具体参数。故存在轴向的抗拉刚度和抗压刚度不一致的情况。

上述隔震器（Rubber Isolator）属性定义中，支座轴向（U1）刚度是在线性属性中输入的有效刚度值（如图 3-4），在分析过程中支座拉、压刚度均采用有效刚度值进行计算。这种方式，适用于模拟支座拉、压刚度一致的情况。

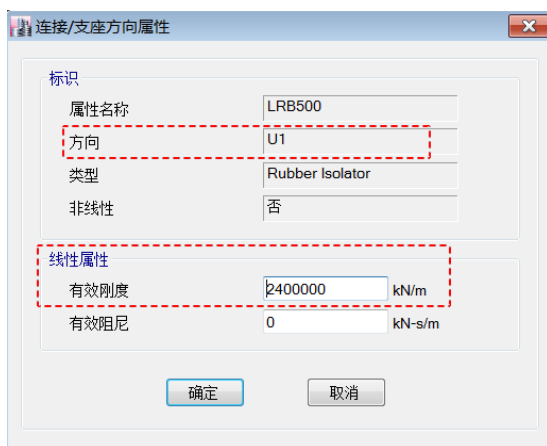


图 1-7 隔震器轴向刚度

当支座存在轴向的抗拉刚度和抗压刚度不一致的情况时，可采用缝（gap）单元并联隔震器的方式模拟。缝（gap）单元也称为单压单元，程序中用户可对每一变形自由度指定独立的单压属性。

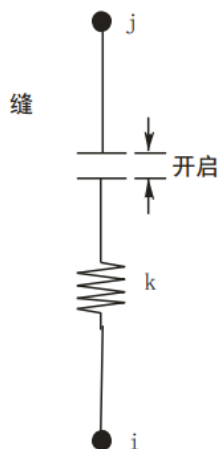


图 1-8 缝单元示意图

缝单元的非线性力-变形关系如下：

$$f = \begin{cases} k(d + \text{open}) & d + \text{open} < 0 \\ 0 & d + \text{open} \geq 0 \end{cases}$$

其中，

k — 弹簧刚度；

d — 单元两端节点相对位移（受拉为正值，受压为负值）；

open — 用户设置的初始缝间隙（必须为零或正值）。

缝单元在初始间隙闭合后开始受压，且不承担任何拉力。若将 open 值为 0，则代表缝单元完全等效为只受压单元。故利用缝单元的特性，将之与隔震支座单元并联共同工作，来等效隔震支座轴向拉压刚度不一致的情况。

以本文中 LRB500 铅芯橡胶支座为例，支座轴向抗压刚度为 2400000kN/m，按前述工程经验取抗拉刚度为抗压刚度 1/10 即 240000kN/m。下面，详细说明程序中参数填写的方法。

将隔震支座单元的 U1 方向的有效刚度设为抗拉刚度 240000kN/m（如图 3-7）。

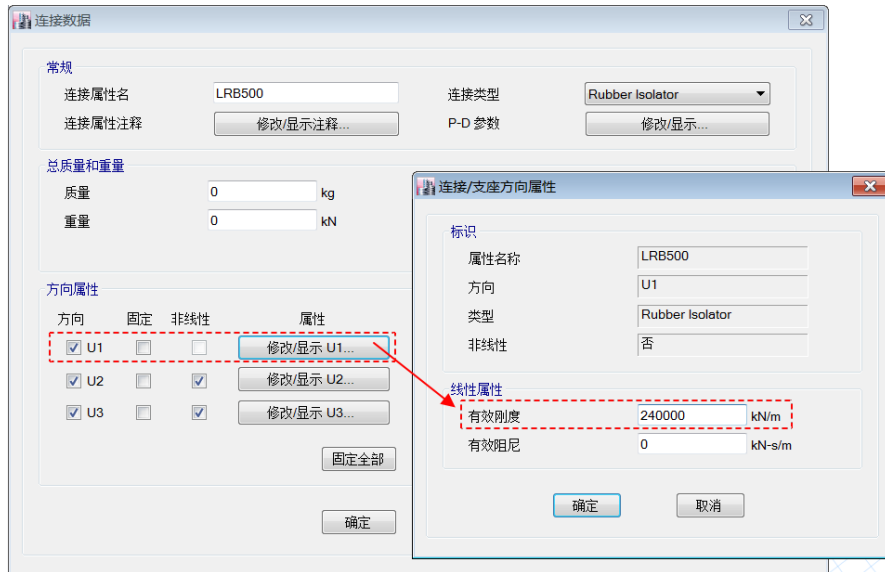


图 1-9 修改隔震单元轴向刚度

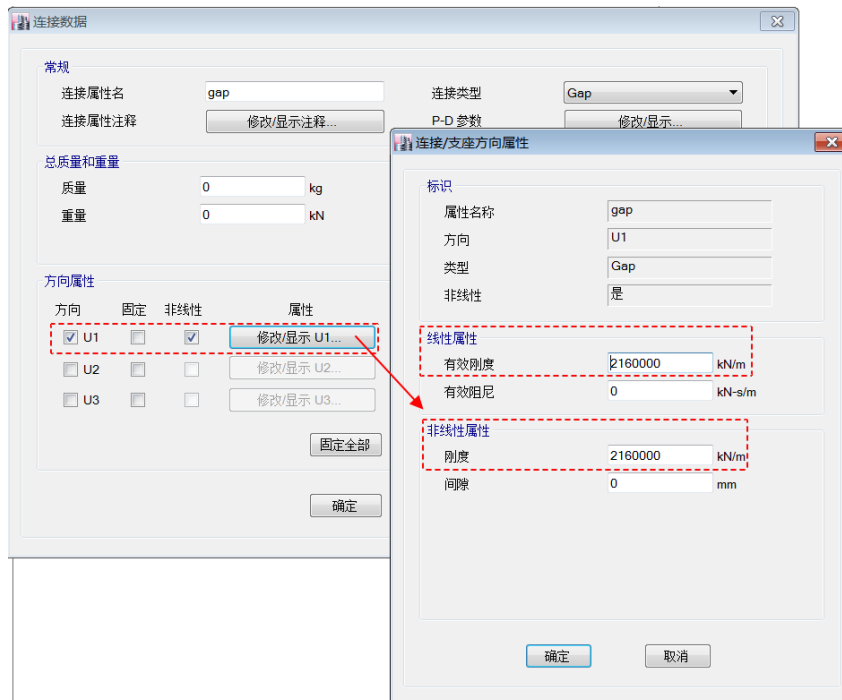


图 1-10 定义缝单元参数



Gap 单元只考虑其轴向（即 U1 方向）属性。勾选方向 U1，并勾选 U1 方向的非线性选项。单元间隙值（open）设为 0，刚度（线性和非线性）均设为 2400000kN/m-240000kN/m=2160000kN/m。

通过上述等效方式模拟，两个单元并联后的刚度表现如下：

抗拉刚度=240000 kN/m（隔震支座单元）+ 0 kN/m（缝单元） = 240000kN/m

抗压刚度=240000kN/m（隔震支座单元）+ 2160000kN/m（缝单元） = 2400000kN/m

注意，隔震支座单元的有效刚度与缝单元的有效刚度之和等于支座抗压刚度。

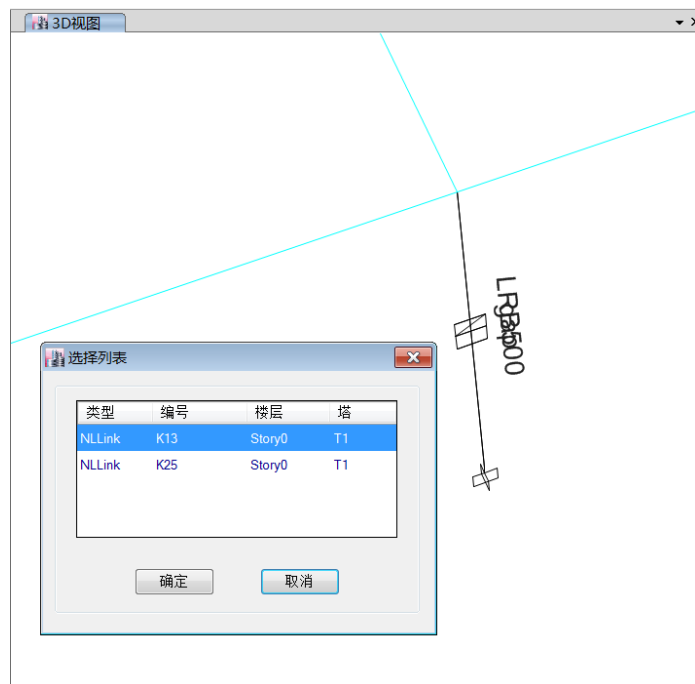


图 1-11 绘制缝单元

最后，连接隔震支座两端节点绘制并联的缝（gap）单元，如图 3-9。按下 Ctrl 键鼠标点击支座位置，弹出对话框中显示同一位置存在两个连接单元。

2 摩擦摆隔震支座

相比橡胶支座，摩擦摆支座具有竖向承载力高、水平容许位移大、周期可控、耐久性好等优点，在工程中得到广泛的关注与应用。随着研究的深入和技术的成熟，逐渐衍生出各类摩擦摆隔震支座。程序中提供 3 种常见支座类型，包括摩擦摆隔震支座（Friction Isolator）、双作用摩擦摆隔震支座（T/C Friction Isolator）、三重摩擦摆隔震支座（Triple Friction Isolator）。

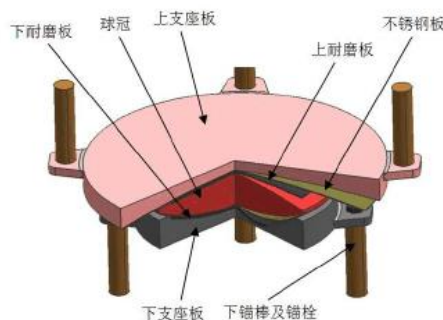


图 2-1 摩擦摆隔震支座示意

本文以产品型号为 FPS-SX8000 的摩擦摆隔震支座为例进行说明，支座产品参数见表 2-1。

表 2-1 摩擦摆隔震支座产品规格

支座型号	摩擦面曲率半径	静摩擦系数	动摩擦系数		支座滑动位移/mm	竖向等效刚度 kN/m	水平等效刚度 kN/m	等效阻尼比 kN s/m	滑动前刚度 kN/m	摩擦系数变化参数 s/m
			慢速	快速						
FPS-SX8000	4.5	0.03	0.085	0.06	200	1X10 ⁷	2977.78	0.26	1200	20

本例采用 Friction Isolator 连接单元模拟双向摩擦摆支座，勾选 U1、U2、U3（如图 2-2），并对此三个方向的属性分别进行定义。



图 2-2 摩擦摆隔震支座模拟



图 2-3 U1 方向参数



U1 方向为支座轴向，Friction Isolator 单元 U1 方向默认为非线性属性（如图 2-2 所示），该单元不承担任何轴拉力即支座受拉时轴向刚度为 0。本例中线性属性中的有效刚度和非线性属性的刚度均输入竖向等效刚度 $1 \times 10^7 \text{ kN/m}$ 。

阻尼系数的作用是减轻在分析中可能存在的数值振荡问题，关于该系数取值的讨论可参考《软件校验手册》。本例中，阻尼系数设为 0。



图 2-4 U2、U3 方向参数

U2 和 U3 方向为支座水平剪切自由度，均勾选非线性属性。本文支座为双向滑动摩擦摆，故 U2 方向的属性与 U3 方向属性相同，采用同样的参数。

线性分析中有效刚度输入支座水平等效刚度，注意该值用于线性分析包括模态分析。

有效阻尼：隔震器的有效阻尼值，体现线性分析中隔震器的能量耗散能力，与隔震器的剪切应变相关。切记，有效阻尼不能与隔震器的等效阻尼比混为一谈。由于隔震模型一般采用非线性时程分析，此数值在非线性分析中不发挥作用，故通常情况下填写 0。

剪切位置请参考 1.1 节的解释，此处不再赘述。

非线性分析工况使用的属性，包含以下内容：

刚度：摩擦摆支座屈服前刚度。本例中输入滑动前刚度 1200 kN/m。

摩擦系数-慢：支座慢速滑动时摩擦系数值。

摩擦系数-快：支座慢快滑动时摩擦系数值。

速率参数：该值用于描述摩擦系数随滑移速度变化的函数关系。比率参数的取值与支座承受压力及接触面条件等因素相关，一般由厂家提供。更多内容可参考筑信达知识库文章《[摩擦摆支座的比率参数](#)》。

净摆半径：该值为实际的有效摆半径，即滑动面半径减去面到铰点距离。本例支座的滑动面为球面，故 U2、U3 方向半径是相等的；程序允许用户指定不同的净摆半径，例如，当滑动面为柱面时，设置其中一个方向摆半径为 0。半径为 0 代表滑动面为平面，可用于模拟缝-摩擦行为，例如滑动平板支座。

3 小结

以上结合各类隔震支座实际产品规格，详细介绍了在 CSI 软件中模拟普通天然橡胶支座、铅芯橡胶支座及摩擦摆支座时各项参数设置的方法。同时，介绍如何模拟橡胶支座轴向抗拉刚度和抗压刚度不一致的情况。希望帮助用户掌握常见隔震连接单元基本原理，并在此基础上灵活运用处理实际工程问题。