

ETABS/SAP2000 减震结构建模注意事项

筑信达 吴文博

减震结构是在结构中某些部位设置消能器，通过该装置产生摩擦或弹塑性（或黏弹性）滞回变形来耗散地震输入结构的能量，以减小主体结构的地震反应，从而避免结构产生破坏或倒塌，达到减震控制的目的。减震结构在高烈度区的学校、医院等项目上备受工程师的青睐，应用也日益增多。本文就此介绍一下减震结构在 ETABS/SAP2000 建模过程中应当注意的一些问题。

1 消能器的单元选择

在 ETABS/SAP2000 中，消能器都是采用连接单元进行模拟，按《建筑消能减震技术规程》（JGJ297-2013）的要求，可分为如下几种情况进行模拟，见表 1。

表 1 消能器类型与单元类型的对应关系

消能器类型	规范要求	单元类型
软钢消能器	双线性模型、三线性模型或 Wen 模型	1) 多段线性塑性(MultiLinearPlastic) 其中，滞回类型选择为 Kinematic 2) Plastic (Wen)
屈曲约束支撑 (BRB)	双线性模型、三线性模型或 Wen 模型	1) 多段线性塑性(MultiLinearPlastic) 其中，滞回类型选择为 BRB Hardening 2) Plastic (Wen)
摩擦消能器	理想弹塑性模型	多段线性塑性(MultiLinearPlastic) 其中，滞回类型选择为 Isotropic
黏滞消能器	麦克斯韦模型	Damper-Exponential
黏弹性消能器	开尔文模型	Damper-Exponential+linear 并联

其中软钢消能器和屈曲约束支撑都有多种单元可供选择，但一般来讲，软钢消能器推荐采用 Plastic (Wen) 单元，而屈曲约束支撑则建议采用多段线性塑性+ BRB Hardening 滞回类型进行模拟。因为 BRB 硬化模型可以更好的模拟出 BRB 的硬化行为。下图为两种消能器的实验滞回与单元滞回的对比。

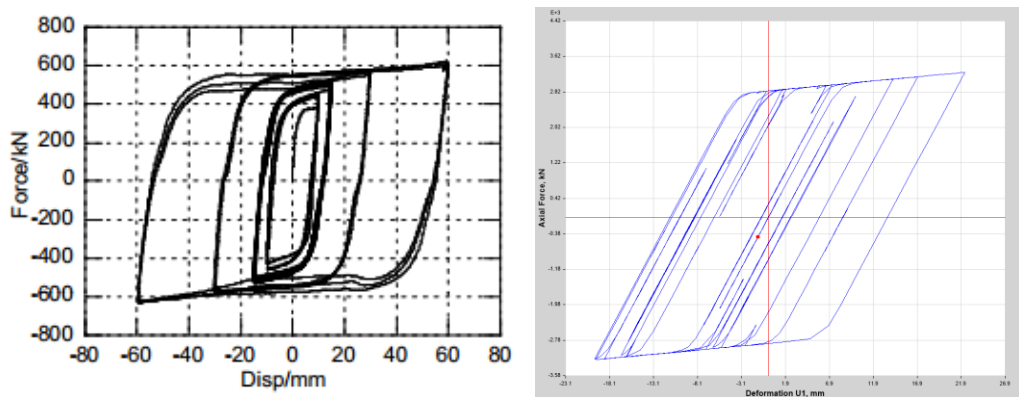


图 1 软钢消能器与 Plastic (Wen) 单元

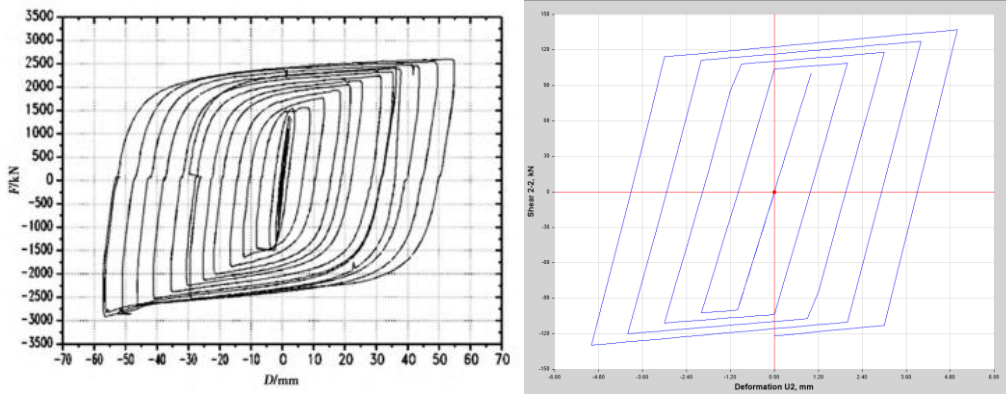


图2 BRB 消能器与 BRB Hardening 滞回

另外，ETABS/SAP2000 中目前并没有开尔文模型对应的单元，只能采用 Damper-Exponential 连接单元与线性（linear）连接单元并联的方式近似模拟。

2 连接单元的定义

2.1 有效刚度

连接单元的有效刚度只用于线性静力分析、线性时程分析、模态分析和反应谱分析中，所以表面上看，有效刚度是否准确填写并不影响 FNA 法（非线性模态分析）或非线性直接积分法的结果。但实际情况并非如此。有效刚度虽然不影响连接单元的非线性滞回，但是会影响到动力分析中的阻尼部分。以 FNA 法为例，FNA 法的阻尼矩阵可以写为对角矩阵，对角项为 $2\xi_n\omega_n$ ，其中 ξ_n 为阻尼比， ω_n 为各阶模态的频率。可以发现，有效刚度越大，频率越大，在相同阻尼比下阻尼的效应越大，如果阻尼比为 0，那么有效刚度的取值就对 FNA 法的计算结果不会产生影响了。

一般情况下，对于黏滞消能器的有效刚度可以填写为 0；对于软钢消能器、BRB 等位移型消能器可以填写初始刚度、期望位移下的割线刚度或者 0。填写初始刚度的话，结构的周期最小，频率最大，模态阻尼耗散的能量最多，可能会低估了结构的响应；如果有效刚度设置为 0，则结构周期最大，频率最小，模态阻尼耗散的能量最少，可能会高估了结构的响应；而使用期望位移下的割线刚度则是一个折中的办法，也是比较推荐的一种方式。

现以某 BRB 支撑框架为例，说明有效刚度对 FNA 法分析结果的影响。如图 3 所示，结构为五层 BRB 支撑框架结构，BRB 非线性参数如图 3 所示，模态阻尼取为 5%。

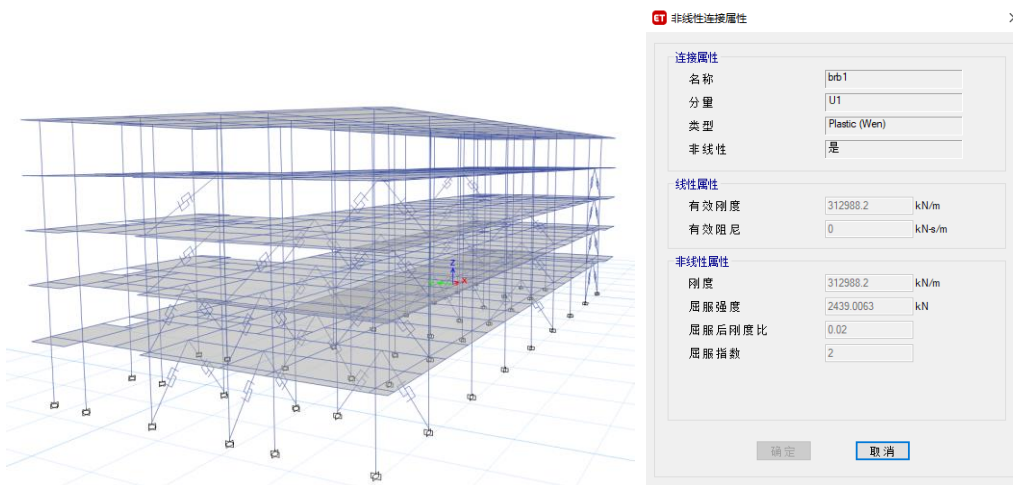


图3 连接单元属性设置

将连接单元的有效刚度分别设置为 312988.2kN/m、62597kN/m 和 0，此时结构的周期分别是 0.65s、0.75s 和 0.80s，最终



结构的顶点位移时程和能量图如下图所示。

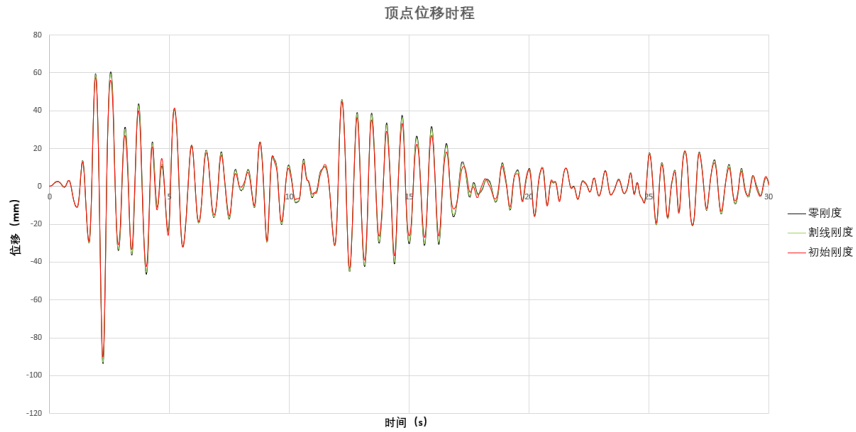
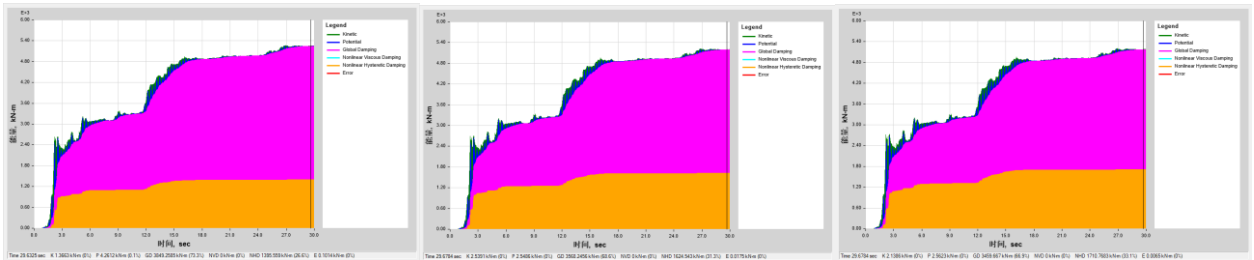


图 4 有效刚度对结构顶点位移时程的影响



初始刚度模型

割线刚度模型

零刚度模型

图 5 有效刚度对能量图的影响

从图 5 中可以看出：对于初始刚度模型，模态阻尼耗能为 3849kN*m，消能器耗能为 1395kN*m，附加阻尼约为 1.8%；对于割线刚度模型，模型模态阻尼耗能为 3568kN*m，消能器耗能为 1624kN*m，附加阻尼约为 2.3%；而对于零刚度模型，模态阻尼耗能为 3459kN*m，消能器耗能为 1710kN*m，附加阻尼约为 2.5%。可知，有效刚度越大，模态阻尼耗能越多，结构响应随之降低，消能器耗能减少，附加阻尼减少；反之，模态阻尼耗能越少，结构响应随之变大，消能器耗能增加，附加阻尼增加。所以，当进行非线性分析时，连接单元的有效刚度推荐使用期望位移下的割线刚度。

2.2 连接单元质量/重量与转动惯量

由于消能器的质量/重量相对于结构的质量/重量很小，所以用户常常会忽略掉连接单元的质量/重量，这一般不会带来明显的误差。不过，如果用户采用 FNA 法进行动力时程分析，我们建议设置连接单元的质量/重量，其数值可以填写为消能器的真实质量/重量，而对于转动惯量也建议设置较小的数值，例如 0.0001ton·m²。这些质量或者转动惯量的设置会避免在里兹向量模式分析时出现警告信息。具体可参考筑信达知识库：[“质量源定义与阻尼器布置”](#)、[“里兹向量法与非节点荷载”](#)、[“节点质量与无质量自由度”](#)。

2.3 Damper-Exponential 单元

Damper-Exponential 单元使用麦克斯韦模型，可以用于模拟黏滞阻尼器，如图 7 所示，麦克斯韦模型由两部分组成，即线性弹簧和阻尼器两部分串联组成。线性弹簧刚度的取值非常重要，其描述的是消能器弹性柔度，包括包裹流体的缸筒以及连接构件等的弹性



图 6 连接单元质量/重量与转动惯量



柔度。通常线性弹簧的刚度取值越大，消能器的滞回曲线越饱满，如图 8 所示。用户可能误认为可输入较大刚度值 k 表示“纯”阻尼，但这将导致偏于不保守及不真实的结果。最好从设备生产厂家获得弹性柔度的实际值，或者从工程角度估一个值。《CSI 分析参考手册》中给出的推荐值是 $c/k = 0.1 \text{ s}$ ， c 为阻尼系数。

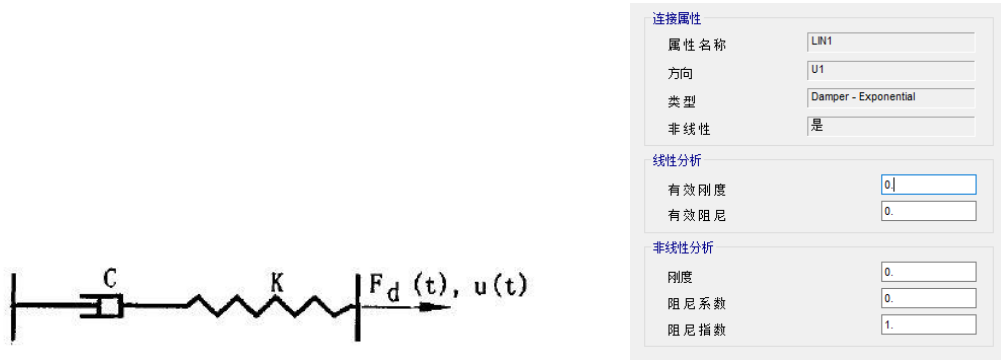


图 7 麦克斯韦模型与参数定义

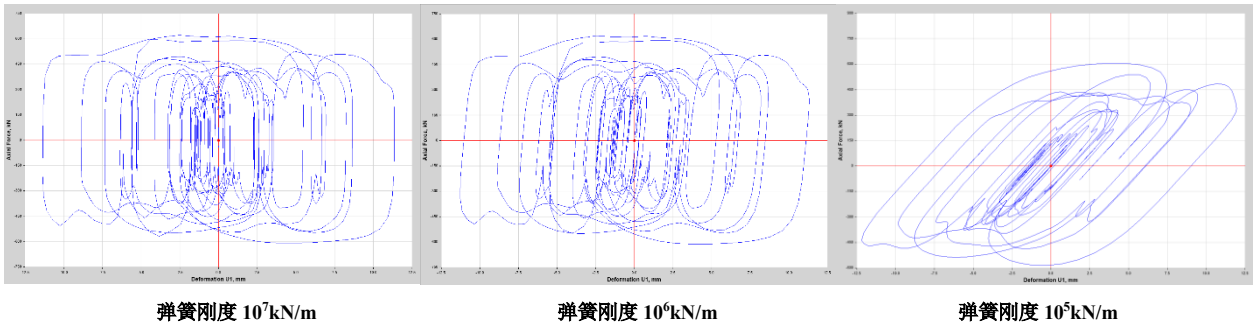


图 8 不同弹簧刚度下消能器滞回曲线

阻尼器部分的内力计算公式为： $F = c \cdot v^\alpha$

其中， c ——阻尼系数。

α ——阻尼指数，阻尼指数越小，每个往复耗散的能量越多，如图 9 所示。

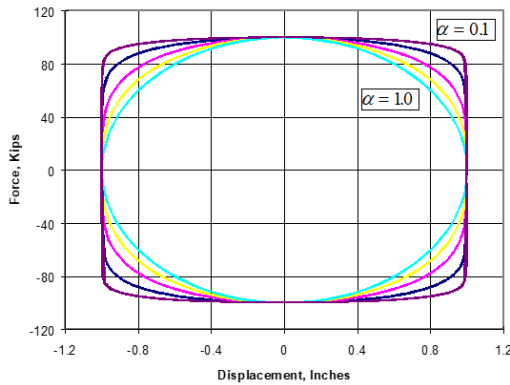


图 9 不同阻尼指数的黏滞消能器的滞回曲线

2.4 Plastic (Wen) 单元

Plastic (Wen) 单元可以用于模拟软钢消能器。其非线性力与变形之间的关系如下式：

$$f = \text{ratio} \cdot k \cdot d + (1 - \text{ratio}) \cdot \text{yield} \cdot z$$

其中：

k ——初始弹性刚度，

yield ——屈服力，



ratio——为指定的屈服后刚度与初始弹性刚度 (k) 的比值，

z ——为一个内部滞后变量，按下式计算，

$$\dot{z} = \frac{k}{yield} \begin{cases} d \cdot (1 - |z|^{exp}) & \text{if } d \cdot \dot{z} > 0 \\ d & \text{其它} \end{cases}$$

exp——屈服指数，屈服指数越大，屈服斜率越陡，如图 10。

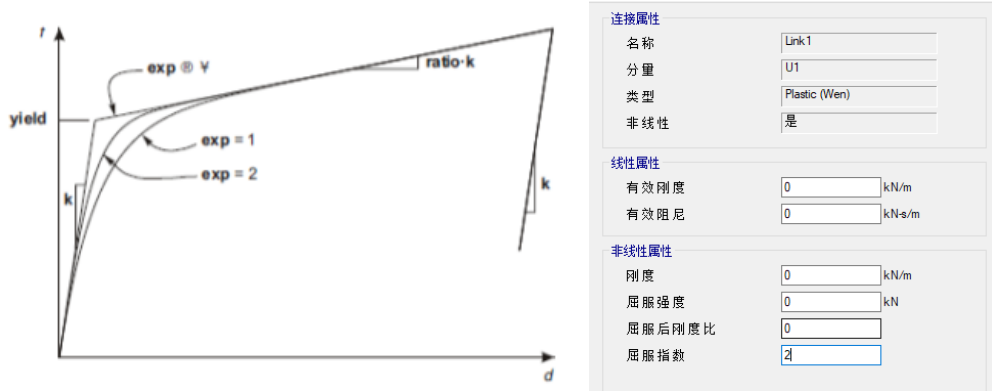


图 10 Plastic (Wen) 单元骨架曲线与参数设置

2.5 多段线性塑性 (MultiLinearPlastic) 单元

多段线性塑性单元是一种适用性较广的单元，可以构造出双折线、多折线或者实验结果的力-变形关系。但是曲线形式应遵循以下限制条件：

- 一个点必须为原点(0,0)
- 至少定义一个有正变形的点，和一个有负变形的点
- 对于指定点的变形必须是单值增加的，没有相等的两值
- 同一点的力（弯矩）必须与变形具有相同符号（可以为零）
- 在正变形轴指定的最后两点所给出的斜率，将外插至正变形的无穷远，或者直至其为零；同样地，在负变形轴指定的最后两点所给出的斜率，将外插至负变形的无穷远，或者直至其为零。

搭配不同类型的滞回关系，多段线性塑性单元可以模拟软钢消能器、BRB 以及摩擦阻尼器等。其中软钢阻尼器可以选择 Kinematic 滞回，BRB 可选择 BRB Hardening 滞回，摩擦消能器可以选择 Isotropic 滞回。

3 建模要点

3.1 消能器的常见布置形式与连接单元自由度选择

消能器的常见的布置形式大致可分为支撑式、墙式和连梁式，如图 11~13 所示。

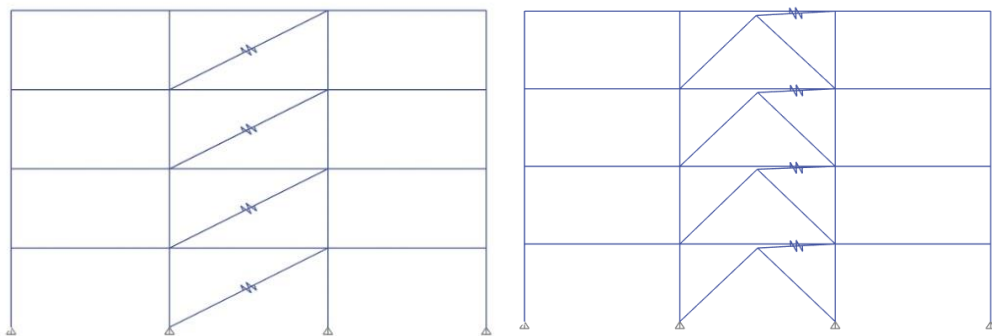


图 11 支撑式布置的阻尼器

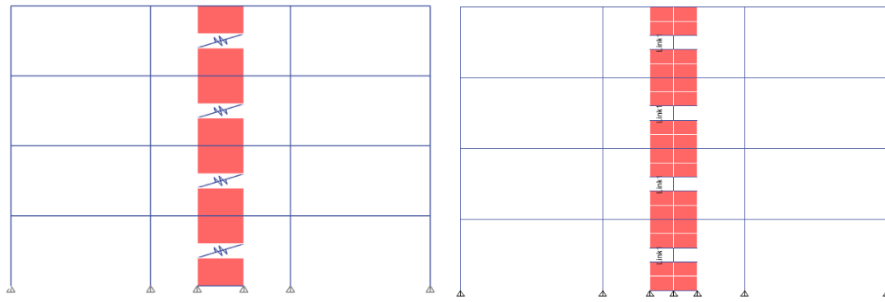


图 12 墙式布置的阻尼器

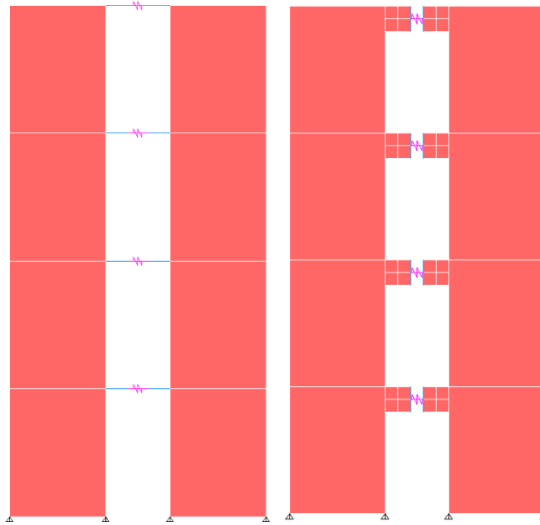


图 13 连梁式布置的阻尼器

一般情况下，如果选择支撑式布置，连接单元在 U1 方向选择非线性，并定义相关参数即可；如果选择墙式布置，当消能器斜放，连接单元在 U1 方向选择非线性，当消能器竖放时，应在 U2 或 U3 方向选择非线性，具体看连接单元的局部轴方向；如果选择连梁式，应在 U2 或 U3 方向选择非线性。通常来讲，我们认为剪切型消能器主要考虑其剪切刚度，转动刚度可以忽略，因此在连接单元定义中也会不选择 R2 或 R3 自由度。但是一些用户误认为忽略 R3 或 R2 自由度，意味着连接单元两端铰接，这样连接单元就不会传递弯矩了。实际并不是这样的，如图 14 所示，剪切和转动自由度是解耦的，程序通过剪力和剪切位置可以计算出相应的端部弯矩，并不会出现无法传递弯矩的情况。相反，如果约束了 R3 或 R2，这会造成图 14 中的转动弹簧刚度无穷大，可能造成结构的刚度异常变大，反而是不推荐的。

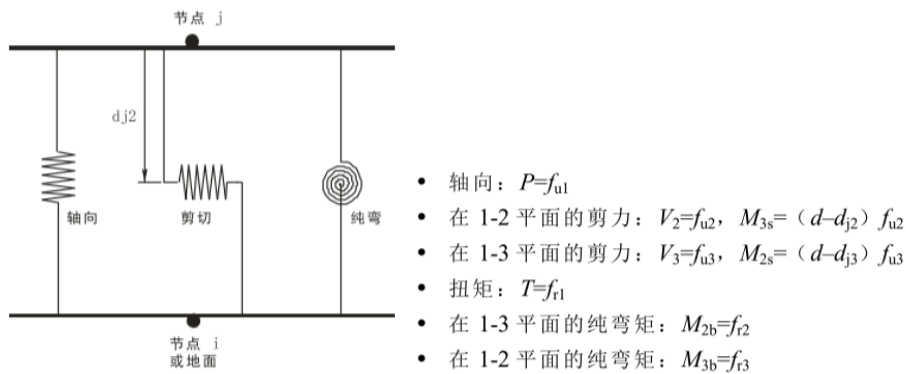


图 14 连接单元非耦合内力计算

3.2 连接单元与墙的连接关系

当连接单元选择 U2/U3 方向是非线性自由度，且与墙连接时，需要用户格外注意连接单元与墙的连接刚度。在



ETABS/SAP2000 中，虽然壳单元在膜行为中包含了一个垂直于单元平面的转动刚度，但是这个转动刚度会随着剖分而逐渐减小，因此建议此时在连接单元与墙连接处增设埋梁。现以一案例说明此问题。

案例为一四层结构，采用墙式布置形式，连接单元为 Plastic (Wen) 考虑 U2 方向为非线性，各层受到一个 100kN 的侧向力，分别对墙采用 4X2 的网格和 8X4 的网格，如图 15。

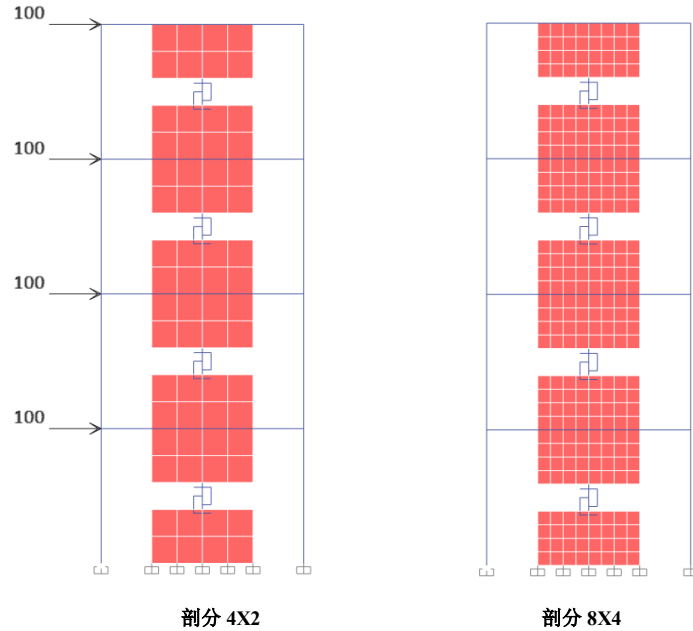


图 15 模型的剖分尺寸

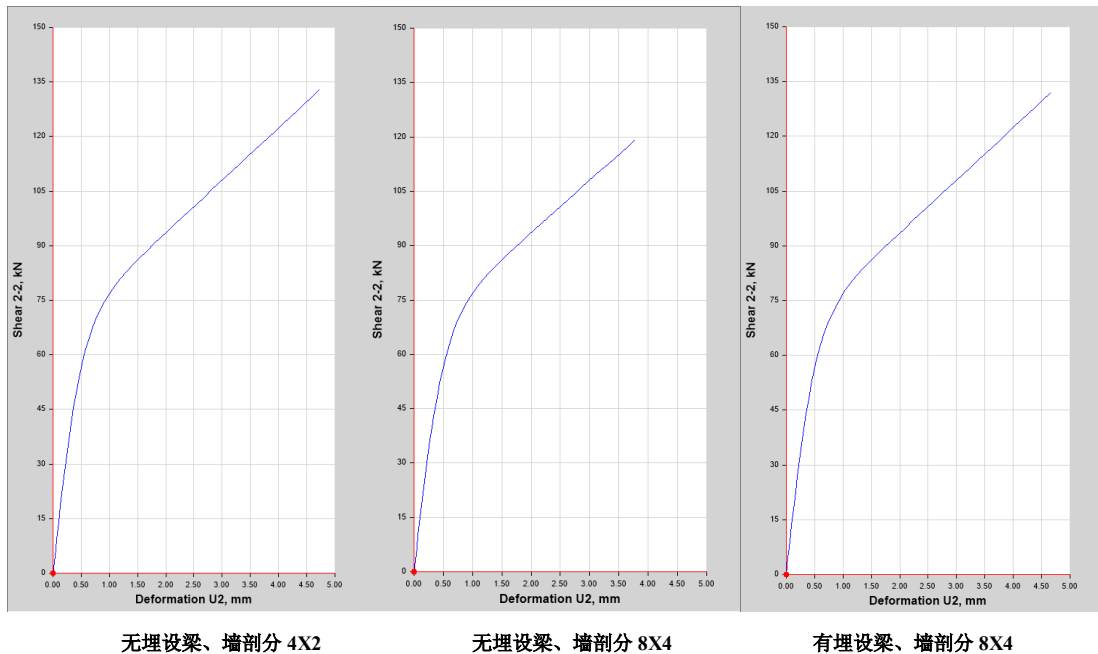


图 16 连接单元剪切变形

通过分析结果可以看出，在无埋设梁的情况下，墙剖分为 4X2 时，连接单元剪切变形约 4.7mm 左右，最大出力约 130kN 左右，而墙剖分为 8X4 时，连接单元变形减小为约 3.8mm，最大出力只有不到 120kN，明显小于墙剖分为 4X2 时；如果添加了埋设梁，即便墙剖分尺寸为 8X4，连接单元的变形和最大出力也与剖分为 4X2 时非常接近。



3.3 放大装置模拟

放大装置可以显著的放大消能器的变形，进而提高消能器的耗能。放大装置通常会被应用到黏滞消能器上，放大装置不对结构提供刚度，一般可采用图 17 的方法进行模拟。应当注意的是，放大装置的杆端，应在面内设置端部释放，否则会对面内刚度造成影响；而面外方向不宜全部释放，否则会造成面外为几何瞬变体系，造成分析不收敛。

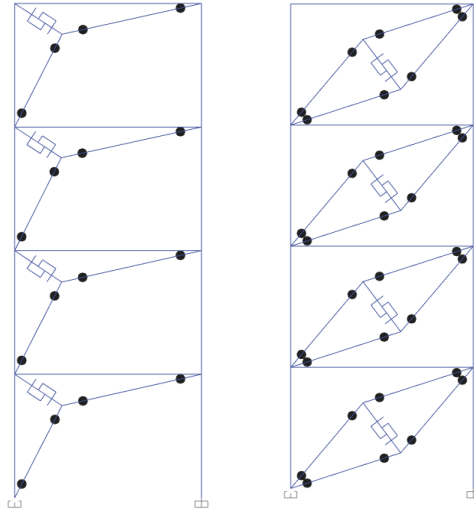


图 17 放大装置的模拟

4 结语

本文首先介绍消能器的常见类型，以及各种类型的消能器的模拟方法。其中黏滞消能器建议采用 Damper-Exponential 单元模拟，软钢消能器建议采用 Plastic (Wen) 单元模拟，而 BRB 和摩擦消能器可使用多段线性塑性单元模拟。

然后，介绍了连接单元的定义，包括有效刚度的取值、单元质量/重量和转动惯量的设置、各类连接单元的非线性参数设置以及参数的设置依据。其中有效刚度取值会影响 FNA 法中阻尼耗能部分，而设置连接单元的质量/重力和转动惯量可以有效的避免分析中出现警告信息。

此外，介绍了在 ETABS/SAP2000 软件中消能器的布置形式和自由度选择。对于剪切变形的消能器，可只考虑 U2/U3 方向的自由度，不必考虑 R3/R2 方向的自由度。

最后，当剪切变形的消能器与墙的连接时，用户宜考虑添加埋设梁，可以避免因墙单元剖分而导致阻尼器变形和出力的差异。

参考资料

- [1] Computers & Structures Inc., 北京筑信达工程咨询有限公司. CSI 分析参考手册. 2019
- [2] Computers & Structures Inc. ETABS v18.1.1 联机帮助文档. 2020
- [3] JGJ297-2013.,建筑消能减震技术规程[S].北京：中国建筑工业出版社, 2013.