

某带粘滞阻尼器框剪结构的减震方案对比

筑信达 刘慧璇 吴文博

近年来，消能减震技术得到快速发展。工程师经常需要面对如何选择合适的阻尼器方案的挑战，其中附加阻尼比是衡量方案可行性的关键指标。本文将介绍借助 ETABS+DC 比选粘滞阻尼器减震方案的方法。

1. ETABS+DC 减震方案比选方法

DC 减震模块是“筑信达结构设计软件 CiSDesignCenter”（简称 DC）最新扩展的模块，该模块以 ETABS 作为分析引擎，可实现参数化布置消能器、时程迭代消能器等等效刚度、自动计算附加阻尼比、反应谱与时程分析包络设计、大震子结构校核等功能，工程师可以借助 DC 完成全流程减震设计。关于 DC 减震模块的详细介绍请参见“[筑信达 DC 减震设计软件的整体解决方案](#)”。

仅需准备好一个 ETABS 抗震模型，便可利用 DC 内置的多种减震方案轻松创建减震工程（.det 文件），减震工程中涵盖了阻尼器参数、减震方案、选波数据以及附加阻尼比结果等数据。可以随时打开该减震工程以查看存储的计算结果，同时也能基于它复制生成新的减震工程。

减震方案比选时，有两种方法供用户参考。

方法一，手动调整 ETABS 有控模型中的阻尼器参数，通过 DC 统计获得调整后的附加阻尼比。

该方法更适用于仅需调整阻尼器参数、无需改变阻尼器布局的情况。对于小震、中震及大震模型，需分别进行阻尼器参数调整。详细的操作流程如图 1 所示，具体步骤如下：

(a) 通过 ETABS 中的【定义>截面属性>连接属性】调整有控模型中的连接单元属性，运行 ETABS 模型；

(b) 通过 DC 统计附加阻尼比。点击【附加阻尼比>规范法/能量比法】，在弹出的【减震结构附加阻尼比计算】对话框中点击【读取模型】，此时将读取当前 ETABS 模型数据，输出附加阻尼比结果，点击【输出计算书】输出当前方案的附加阻尼比结果文件，可自行完成方案比选。



图 1 减震方案比选方法一

方法二，另存得到新的减震工程，通过 DC 调整阻尼器方案，基于新的减震模型统计附加阻尼比。

该方法通过 DC 一次性调整小、中、大震模型，操作更便捷，但创建模型需要一定时间，更适用于需调整阻尼器连接方式或布置位置的情况。详细的操作流程如图 2 所示，具体步骤如下：

(a) 将整个减震工程文件夹复制得到新的减震工程，调整关联的模型路径为当前文件夹；

(b) 打开无控模型，调整减震方案，导出新的减震模型。仅需在【减震器设置>消能器定义】中修改阻尼器参数和布置样式，视图中的阻尼器方案将自动调整，无需重新布置阻尼器；

(c) 点击【分析设计>打开小/中/大震模型>选地震波】，在弹出的对话框中点击【是】，读取减震工程中存储的地震波数据，

生成时程工况。由于粘滞阻尼器不提供线性刚度，减震方案的调整对结构周期没有影响，可以直接继承之前的选波数据；

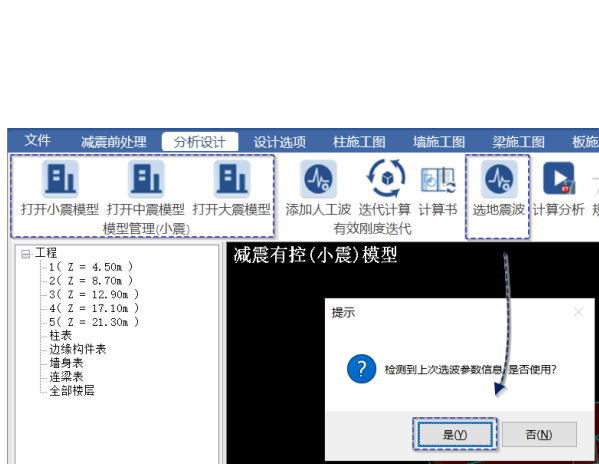
(d)点击【计算分析>规范法/能量比法>计算书】输出当前方案的附加阻尼比结果，自行完成方案比选。



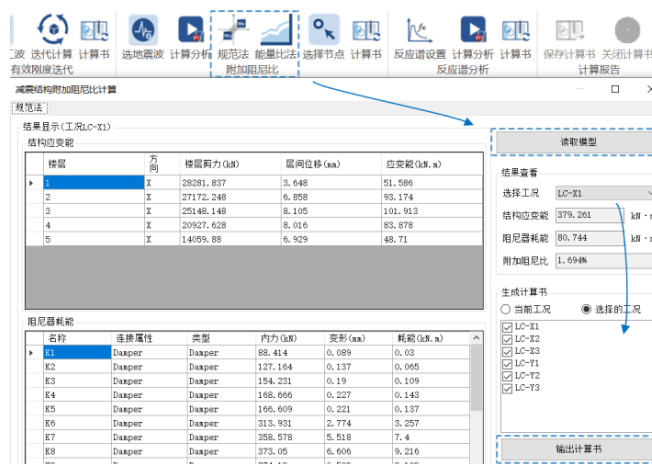
(a) 复制减震工程



(b) 调整减震方案



(c) 接力选波数据



(d) 读取新方案的附加阻尼比结果

图2 减震方案比选方法二



2. 某带粘滞阻尼器框剪结构案例

接下来，采用上述方法，基于 ETABS+DC 完成某带粘滞阻尼器框剪结构的减震方案比选工作。

某学校教学楼，结构类型为框架-剪力墙结构，共 5 层，首层层高 4.5m，标准层 4.2m，建筑面积为 5300m²。设防烈度为 8 (0.2g) 度，设计地震分组为第二组，场地类别 III 类，设防类别为乙类。结构示意图如图 3 所示。

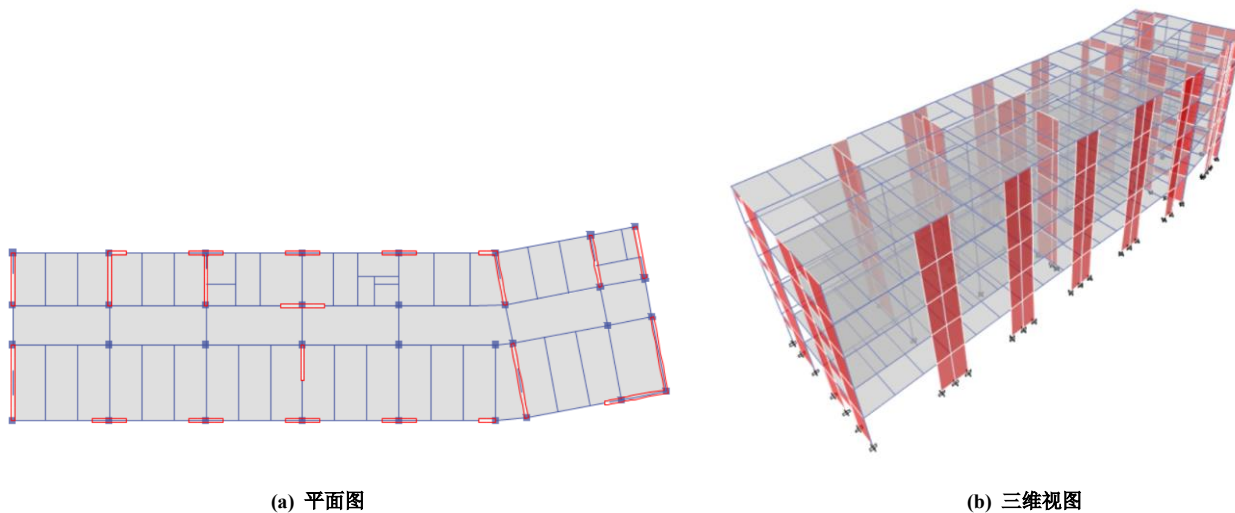


图 3 示意图

初始方案采用斜撑式粘滞阻尼器，阻尼器布置方案如图 4 所示。标准层的建筑平面面积为 1056m²，每层 X 向和 Y 向分别布置两套粘滞阻尼器。阻尼系数取 800kN/(m/s)^c，阻尼指数 c 取 0.2，阻尼器长度 1m，斜撑采用方钢管，截面尺寸为 300×300×16，材料为 Q355。

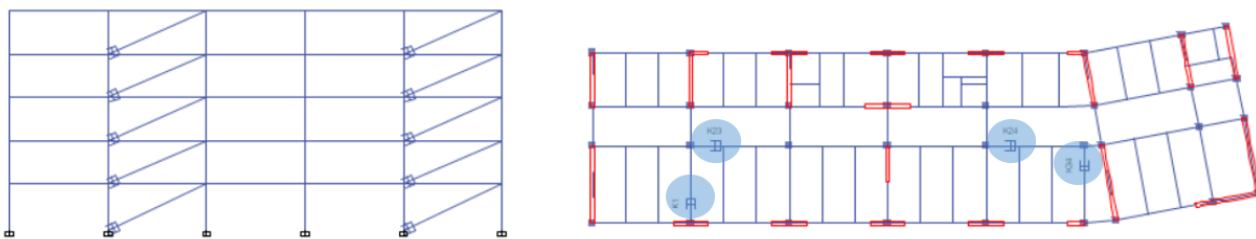


图 4 斜撑式粘滞阻尼器布置方案

2.1 阻尼系数与附加阻尼比的关系

为研究不同地震强度下阻尼系数对附加阻尼比的影响，采用方法一进行方案比选。计算不同阻尼系数下，结构在多遇、设防、罕遇地震下的附加阻尼比。结果如图 5 所示。

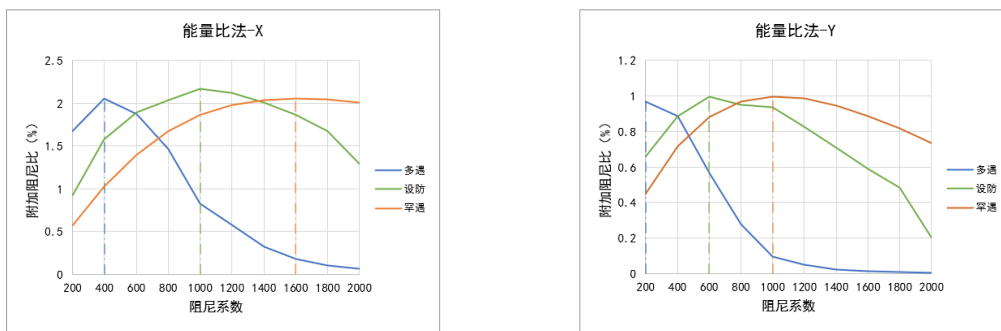


图 5 阻尼系数与附加阻尼比的关系



本例中，X 向平动周期为 0.522s，Y 向平动周期 0.4s，说明两个方向刚度差异较大，故两个方向的附加阻尼比存在差别。对于本例，多遇地震下，X 向最优阻尼系数为 $400 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.2}$ ，Y 向最优阻尼系数为 $200 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.2}$ ；设防地震下，X 向最优阻尼系数为 $1000 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.2}$ ，Y 向最优阻尼系数为 $600 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.2}$ ；罕遇地震下，X 向最优阻尼系数为 $1600 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.2}$ ，Y 向最优阻尼系数为 $1000 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.2}$ 。

从图 5 中可以看见，在不同强度地震下，阻尼系数与附加阻尼比的关系呈现近似抛物线状，先增大后减小，表明阻尼系数存在最优解，且随着地震强度的增加，最优阻尼系数增加。可以总结得出以下规律：当阻尼系数较小时，随着地震强度的增加，附加阻尼比降低；当阻尼系数适中时，设防地震下附加阻尼比较大，多遇地震和罕遇地震下较小；当阻尼系数较大时，罕遇地震下附加阻尼比最大，设防地震次之，多遇地震最小。与文献[1]结论一致。

2.2 连接方式与附加阻尼比的关系

为研究阻尼器连接方式对附加阻尼比的影响，采用方法二进行方案比选，计算采用墙式连接时，在设防地震下的附加阻尼比。阻尼系数固定取 $800 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^{0.2}$ ，墙式连接采用 200mm 厚 2m 长的 C30 混凝土墙，阻尼器布置位置与斜撑式一致，如图 6 所示。

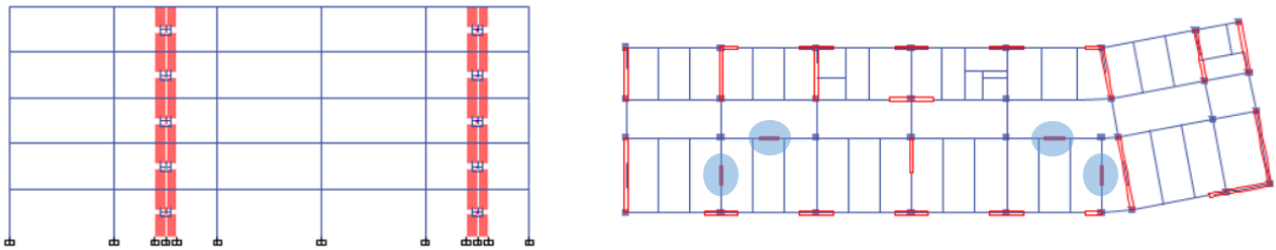
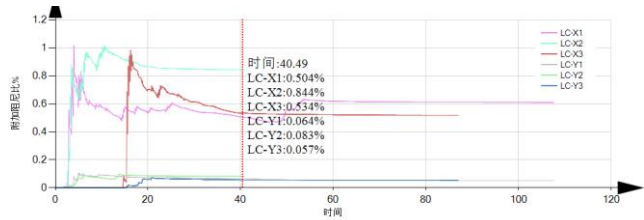


图 6 墙式粘滞阻尼器布置方案

墙式连接和斜撑式连接的附加阻尼比结果分别如图 7 和图 8 所示。

各工况附加阻尼比				
工况	方向	结构应变能 (kN·m)	阻尼器耗能 (kN·m)	附加阻尼比
LC-X1	X	471.01	83.071	1.403%
LC-X2	X	533.763	97.165	1.449%
LC-X3	X	282.317	42.962	1.211%
LC-Y1	Y	263.059	13.174	0.399%
LC-Y2	Y	317.083	17.9	0.449%
LC-Y3	Y	248.838	11.447	0.366%

(a) 规范公式法

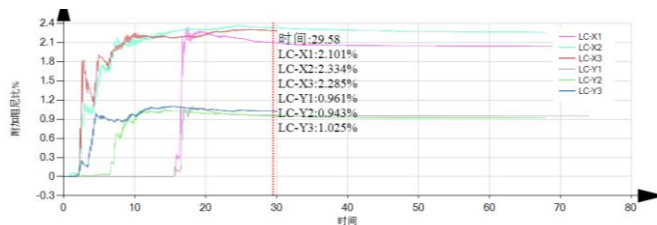


(b) 能量比法

图 7 墙式连接时附加阻尼比结果

各工况附加阻尼比 ²				
工况 ²	方向 ²	结构应变能 (kN·m) ²	阻尼器耗能 (kN·m) ²	附加阻尼比 ²
LC-X1 ²	X ²	348.645 ²	94.278 ²	2.152 ²
LC-X2 ²	X ²	290.254 ²	85.234 ²	2.337 ²
LC-X3 ²	X ²	321.395 ²	88.919 ²	2.202 ²
LC-Y1 ²	Y ²	256.43 ²	46.409 ²	1.44 ²
LC-Y2 ²	Y ²	266.191 ²	50.278 ²	1.503 ²
LC-Y3 ²	Y ²	217.48 ²	43.785 ²	1.602 ²

(a) 规范公式法



(b) 能量比法

图 8 斜撑式连接时附加阻尼比结果



可以看见，相同的阻尼器参数与布置方案下，墙式连接下附加阻尼比较小。文献 2 指出，减震率的大小与支撑构件刚度和阻尼器自身刚度有关，如图 9 所示，在地震作用下，结构的层间变形并不会全部传递给阻尼器，即存在一定的位移损失^[2]。本例中，斜撑式连接直接与梁柱节点相连，其支撑刚度即为斜撑的轴向刚度，而墙式连接的支撑刚度需要考虑墙与框架梁的抗弯刚度，其数值通常较小。因此，当采用阻尼器的阻尼系数较大时，墙式阻尼器由于有效刚度偏小，可能会造成较为明显的位移损失，减低了阻尼器的耗能，减震效果不佳，适当降低阻尼器的阻尼系数，可能会得到更好的减震效果。

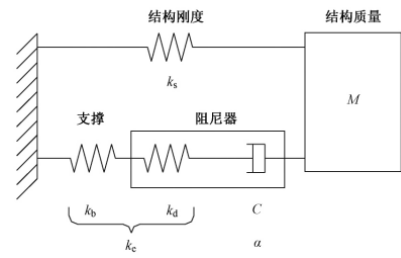
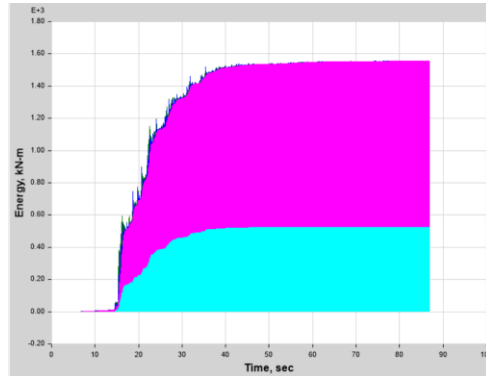
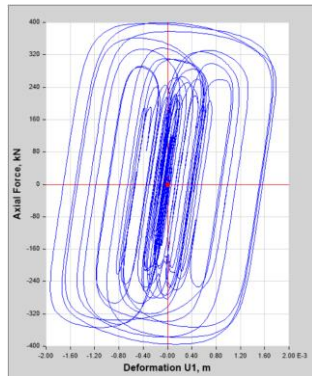
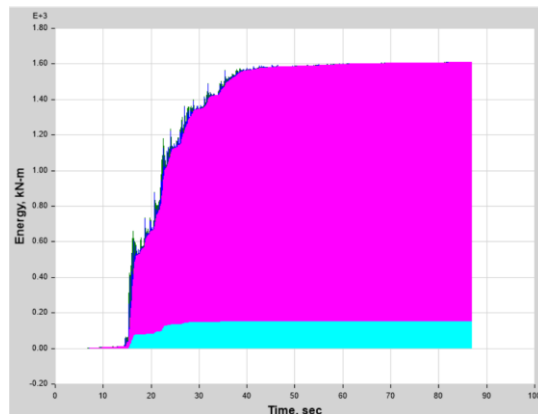
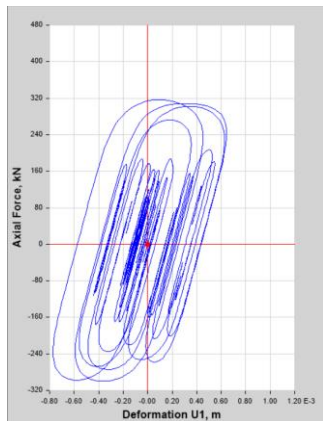


图 9 粘滞阻尼器减震结构的基本体系^[2]

进一步查看不同连接方式下典型阻尼器的滞回曲线和能量图，如图 10 所示，其中青蓝色区域为阻尼器耗能。可以看见，斜撑式连接下阻尼器变形为 2mm，滞回曲线相对饱满，阻尼器耗能占比较多，而墙式连接下阻尼器变形为 0.8mm，阻尼器耗能占比较少，故本例中墙式连接时粘滞阻尼器提供的附加阻尼比相较于斜撑式更小。



(a) 斜撑式连接



(b) 墙式连接

图 10 阻尼器滞回曲线和累积能量图

3. 结语

DC 软件作为减震设计领域的新工具，可助力工程师高效完成粘滞阻尼器减震方案比选。本文介绍了通过 ETABS+DC 实现减震方案比选的两种方法，并用带粘滞阻尼器的框剪结构实例，探讨了阻尼系数与消能器连接方式对附加阻尼比的影响规律，供工程师们参考。



参考资料

- [1] 陈云. 基于阻尼器参数及算法的附加阻尼比计算探讨[J]. 结构工程师, 2023, 39(6).
- [2] 冉田苒, 石诚, 等. 黏滞阻尼器位移损失对结构减震性能的影响研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(3).