

桥梁常用减震装置在 CSiBridge 中的模拟

筑信达 吕良

隔震是通过某种隔离装置将地震动与结构隔开，避免或减少地震能量向上部结构传输，以达到减小结构振动的目的。减震则是通过采用一定的耗能装置或附加子结构吸收或消耗地震传递给主体结构能量，从而减轻结构的振动。两者从不同的角度来提高结构的抗震能力。本文将主要介绍桥梁中常用的耗能减震装置在 CSiBridge 中的模拟。

目前，桥梁上常用的耗能减震装置主要为各类阻尼器，根据其提供的阻尼力和结构反应的关系可分为两类。一类是位移型阻尼器(displacement-dependent)，这类阻尼器只有在大震下才具备耗能能力，其阻尼力和耗能部件两端的相对位移有关，即与结构的位移响应有关，如摩擦阻尼器和金属阻尼器；另一类是速度型阻尼器(velocity-dependent)，它在风振和不同强度地震作用下都能发挥耗能作用，其阻尼力和耗能部件两端的相对速度有关，即与结构的速度响应有关，如粘滞阻尼器和粘弹性阻尼器等。不同的耗能减震装置适用于不同的条件，具有不同的力学属性，在 CSiBridge 中会采用不同的方式来模拟。

1 连接单元属性

在 CSiBridge 中隔震支座及耗能减震装置一般都是通过连接单元来模拟。模拟耗能减震装置常用的单元类型有：Damper-Exponential、Damper-Bilinear、Damper-Friction Spring 等。这些连接单元的基本属性中如①P-Delta 参数、②总质量和总重量、③线弹簧和面弹簧、⑤刚度选项(stiff options)的定义方式基本相同，详细介绍可以查看往期技术通讯文章《[常用的桥梁隔震支座在 CSiBridge 中的实现](#)》。

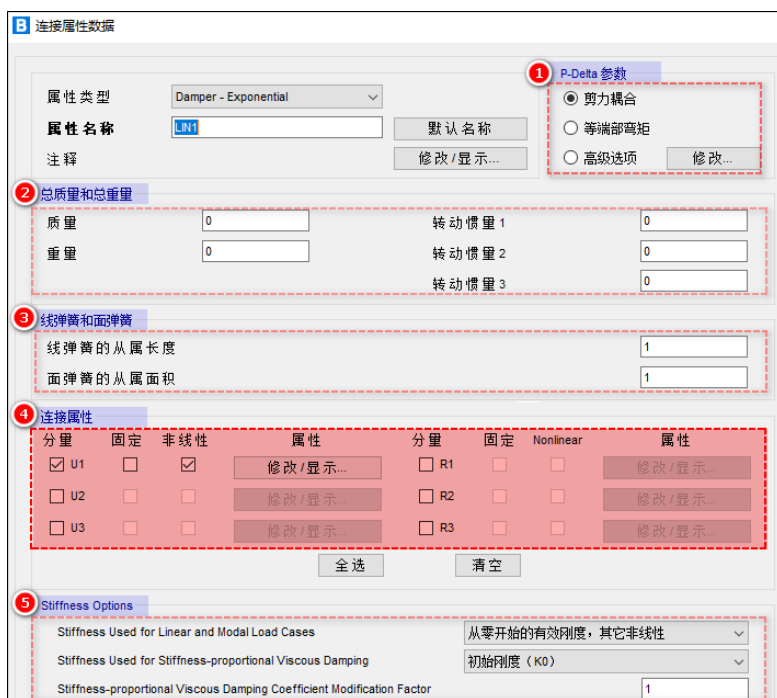


图 1 连接属性定义

一般来说用户主要关注的是连接单元的连接属性(上图红色选框中④的内容)，该属性反应了耗能减震装置在线性分析及非线性分析中的力学性能。对于设置了耗能减震装置的结构，一方面可以利用能量相等原理将非线性阻尼器等效线性化后，采用振型分解反应谱法进行弹性分析。此时程序会使用该单元的“线性分析”属性，有效刚度和有效阻尼，来计算结构的响应。一方面也可以直接采用弹塑性时程分析，程序则会通过连接单元的本构模型及定义的参数确定耗能减震装置在不同状态下的刚度及阻尼，计算出地震过程中每一时刻结构的位移、速度和加速度反应，其分析结果一般也更加接近实际，本文主要介绍的是阻尼器的非线性属性。

2 不同的消能减震装置

2.1 软钢阻尼器

弹塑性钢阻尼装置又称为软钢阻尼器，该类消能减震装置主要是利用金属材料进入塑性状态后具有良好的滞回特性，并在塑性滞回变形过程中吸收大量能量的原理制造的一种减震装置。常见的软钢阻尼装置有：E 型钢阻尼器、弧型钢阻尼器、短刚臂钢阻尼器等^[1]。弹塑性钢阻尼装置为位移型阻尼器，其水平反力依赖于支座的变形(或称连接点之间的相对位移)，变形越大，水平反力越大，其常见的布置方式如图 2-a 所示。实验表明大多数软钢阻尼器的荷载一位移滞回曲线可由双线性来近似，如图 2-b 所示是一个软钢悬臂梁阻尼器的荷载一位移滞回曲线。

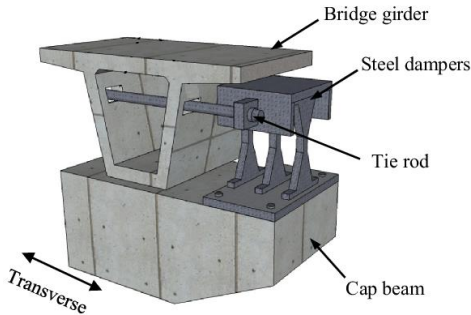


图 2-a 软钢阻尼器的布置

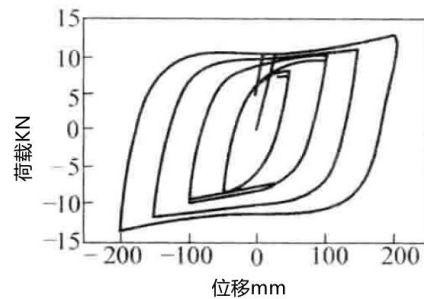


图 2-b 软钢悬臂梁阻尼器的荷载一位移滞回曲线

依据规范《JTT843-2012 公路桥梁弹塑性钢减震支座》^[3]弹塑性钢阻尼装置可采用双线性恢复力模型模拟。实际工程中常通过塑性属性(Plastic Wen)来模拟，在 CSiBridge 中可直接定义 Wen 塑性属性 (Wen Plasticity Property) 连接单元来模拟该弹塑性钢阻尼装置^[2]。Wen 塑性连接单元的属性如图 3 所示，其主要设计参数有：屈服力 F_{max} 、初始刚度 K ，屈服后刚度(或屈服后刚度比) K_d ，以及屈服指数。

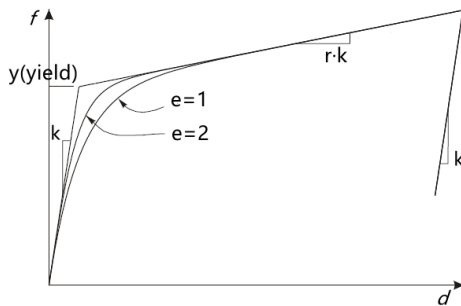


图 3a Wen 塑性属性参数的定义

连接属性	
名称	软钢支座-1
分量	U2
类型	Plastic (Wen)
非线性	是
线性分析	
有效刚度	0.
有效阻尼	0.
剪切位置	
始于 J 端的距离	0.
非线性分析	
刚度	9090.
屈服强度	1200.
屈服后刚度比	0.154
屈服指数	15.

图 3b U2 方向塑性属性参数的定义

软钢阻尼器一般和普通支座并连布置，由普通支座承受桥梁的竖向荷载，软钢阻尼器承受横向或纵向的剪力。因此通过 Wen 塑性连接单元来模拟软钢阻尼器及支座时，可以将其竖向设为一个较大的刚度值(或依据支座承受的最大反力及容许位移来计算)，对应为连接单元的 U1 方向。在默认情况下连接单元的 U2 方向为顺桥向方向，U3 方向为横桥向方向，软钢阻尼器一般沿桥梁纵向 (U2 方向) 布置。屈服力 F_{max} 、初始刚度 K ，屈服后刚度(或屈服后刚度比) K_d 一般依据厂家提供的参数输入。屈服指数(即滞回环参数 exp) 可根据厂家指导输入或输入一个较大值，当 exp 值越大时表示 wen 模型拐点越接近双线性模型，但是其上限不超过 20，图 3b 为某型号软钢阻尼器 U2 剪切方向的参数设定。

2.2 粘滞阻尼器

粘滞阻尼器的减震机理是利用其内部的粘滞阻尼材料所产生的粘滞阻尼力来消散能量，从而达到控制结构能动反应的目的。实践表明粘滞阻尼器减震效果明显，产生阻尼力较大。在一般条件下认为粘滞阻尼器不会向主体结构提供附加刚度，即

主体结构在加设粘滞阻尼器后刚度不会发生改变，也不会因为自振周期的改变而加大地震作用。

粘滞阻尼器是速度相关型阻尼器，阻尼器力的大小基本不受激振频率的影响，关键取决于速度的大小。目前主要是通过试验的方法对每个阻尼器进行物理测试，从而由试验数据构建其恢复力模型。其中使用较广的恢复力模型为 Maxwell 模型，在 CSiBridge 中可以直接选择 Damper -Exponential 连接单元来模拟粘滞阻尼器。该连接单元是将一个指数型粘滞阻尼器与一个线性弹簧相串联^[2]，如下图 4-b 所示。其非线性力-变形关系如下所示：

$$f = kd_k = cd_c^{\dot{d}} \exp$$

弹簧和阻尼变形之和构成总内部变形：

$$d = d_k + d_c$$

需要注意的是，该连接单元中弹簧和阻尼器受到的力是相同的，由于阻尼器不可能发生瞬时变形，所以拉伸最初发生在弹簧上。而后阻尼器伸长，弹簧收缩，使总伸长量保持恒定。最后弹簧中的力完全松弛，阻尼器变形达到最大。因此弹簧刚度 k 不能过大或过小。 k 过小会导致阻尼器在较小的速率下产生较大变形，导致实际产生的阻尼过大。 k 过大会使变形偏小，使实际产生的阻尼过于保守。



图 4-a 粘滞阻尼器的布置

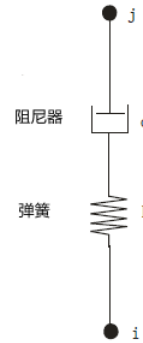


图 4-b Damper -Exponential 连接单元模型

3 实例分析

为了简要说明 CSiBridge 在减震分析中的应用，这里采用一座三跨连续梁桥模型进行具体地分析。图 5-a 为该三跨连续梁桥的拉伸视图，其主梁截面箱型，混凝土标号为 C50。桥墩为圆形截面，混凝土标号为 C40。假设桥墩与地面刚性连接，将主梁和桥墩均采用空间梁单元来模拟。

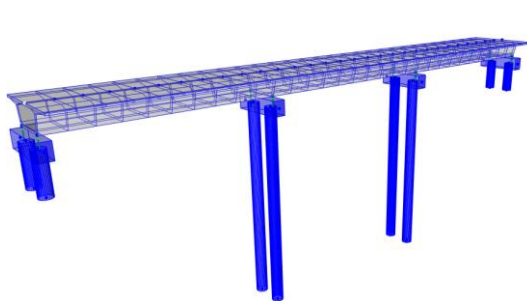


图 5-a 连续梁桥三维视图

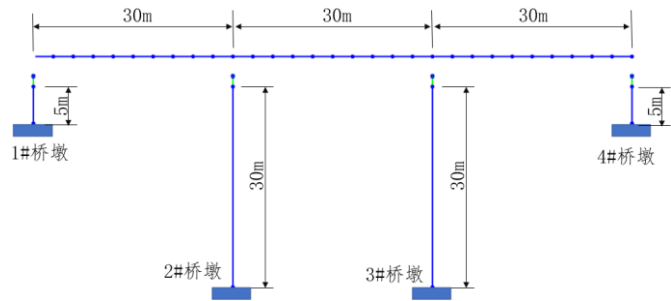


图 5-b 连续梁桥有限元模型

该连续梁的主要参数如下

1#、4#桥墩高 (m)	2#、3#桥墩高 (m)	桥墩直径 (m)	跨径布置 (m)	盖梁质量 (t)	边墩质量 (t)	中墩质量 (t)	梁体质重 (t)
5	30	1.67	3×30	100	29.06	174.43	1752.36

桥墩采用 CSiBridge 中的截面设计器定义，该截面设计器可以直接定义规则截面的配筋信息。由用户指定约束混凝土及

非约束混凝土后，可直接输出截面的弯矩-曲率曲线。关于截面设计器的更多应用可查看技术通讯文档《[利用 SD 截面设计器获取截面分析数据](#)》。运行重力工况后，可分别求出边墩和中墩所承受的主梁荷载。利用截面设计器对桥墩截面进行分析可知，当截面纵向配筋率为 2% 时，在主梁恒载作用下，边墩墩身截面的屈服弯矩为 1.295E+04kNm，中墩墩身截面的屈服弯矩为 1.185E+04 kNm，具体如下图所示。



图 6-a 中墩弯矩曲率曲线



图 6-b 边墩弯矩曲率曲线

在进行地震分析时，这里选取了 2 条地震波，为东西方向和南北方向的 El Centro 地震波；均属于 II 类场地，各地震波的峰值加速度均调整为 0.342g。这里，首先对该连续梁桥不设置任何减隔震装置，直接进行地震作用下的非线性时程分析。在进行分析时，三跨连续梁桥中 1#和 4#桥墩顶采用双向活动支座，2#和 3#桥墩顶采用固定支座。通过计算可以得到的边墩和中墩底部的剪力、弯矩，以及边墩和中墩位置处墩顶与梁的相对位移，统计结果如下所示：

工况	地震波	边墩底剪力 (kN)	边墩底弯矩 (kNm)	中墩底剪力 (kN)	中墩底弯矩 (kNm)	边墩相对位移 (m)	中墩相对位移 (m)
不设置消能减震装置	El Centro-NS	306.6	1686	505.7	8045.3	0.1845	/
	El Centro-EW	274.1	1508.1	1132.7	25665.4	0.6385	/

由上述计算结果可知在不设置隔震支座时，该连续梁桥的边墩位置处墩顶与梁底相对位移过大，在 El Centro-EW 地震荷载作用下，边墩相对位移最大值为 0.6385m，并且中墩弯矩过大，已超过中墩屈服弯矩，不满足结构要求。并且边墩地震荷载作用下弯矩较小，利用率较低。要使桥梁满足要求，必须减小桥墩受力并控制桥墩与主梁的相对位移。对于该桥起控制作用的是中墩墩底截面的受力，而对墩梁相对位移起控制作用的是矮墩。因此，降低高墩底的剪力和弯矩，同时又减小矮墩顶的墩梁相对位移是进行该连续梁桥减隔震设计的目标。

接下来分别为该桥梁设置粘滞阻尼器和金属软钢阻尼，来优化结构在地震荷载作用下的响应。

3.1 采用粘滞阻尼器

依据该桥梁特性，在各桥墩顶布置相同参数的粘弹性减隔震装置，其中液体阻尼器的参数为^[5]：K=1.40E+3kN / m，C=800，cexp=0.35。在程序中采用 Damper-Exponential 连接单元来模拟该粘滞阻尼器，这里主要使用的是其轴向（U1 方向）的属性，其他方向作用不考虑，定义参数如图 7-a 所示。该阻尼器沿桥梁纵向布置，一端和主梁连接，一端直接和下部结构相连接。由于主梁截面插入点和阻尼器端点不在一个水平高度，这里通过钢臂将阻尼器和主梁连接起来，如图 7-b 所示。



图 7-a 粘滞阻尼器参数设置

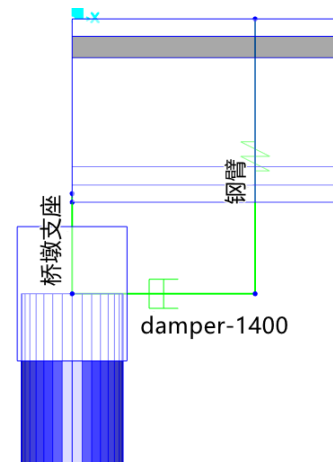


图 7-b 边墩粘滞阻尼器的布置

修改模型后运行分析，同样提取边墩及中墩底部的剪力、弯矩，以及边墩和中墩位置处墩顶与梁的相对位移，统计结果如下所示：

工况	地震波	边墩底剪力 (kNm)	边墩底弯矩 (kNm)	中墩底剪力 (kNm)	中墩底弯矩 (kNm)	边墩相对位移 (m)	中墩相对位移 (m)
设置粘滞阻尼器	EI Centro-NS	454.5	4682.9	478.3	6087.7	0.196	0.188
	EI Centro-EW	420.06	6604.43	757.7	15597.4	0.373	0.194
与不设置消能减震装置差值	EI Centro-NS	147.9	2996.9	-27.4	-1957.6	0.0115	0.188
	EI Centro-EW	145.96	5096.33	-375	-10068	-0.2655	0.194
相差百分比	EI Centro-NS	48%	178%	-5%	-24%	6%	/
	EI Centro-EW	53%	338%	-33%	-39%	-42%	/

对比不设置减震装置的计算结果可以发现，EI Centro-NS 和 EI Centro-EW 波地震作用下，设置粘滞阻尼器后该桥中墩的剪力分别下降了 5% 和 33%；弯矩分别下降了 24% 和 39%。边墩相对位移在 EI Centro-EW 地震作用下降低了 -42%，在 EI Centro-NS 地震作用下反而增加了 6%，但仅增加了 0.0115m，满足规范要求。安装粘滞阻尼器，粘滞阻尼器会限制梁于边墩墩顶的位移，导致边墩的剪力及弯矩都有的增加，但是并没有超过桥墩的屈服弯矩，相比原始结构，设置粘滞阻尼器后该桥梁在地震荷载作用下响应得到优化。

3.2 采用软钢阻尼器

对于该连续梁桥还可以采用软钢阻尼器来实现桥梁减震，优化桥梁地震响应。现在各桥墩顶布置相同参数的软钢阻尼器减震支座。在 CSiBridge 中采用 Wen Plasticity Property 连接单元来模拟该减震支座。对支座的参数取值为^[5]：屈服力 $F_{max}=1200\text{kN}$ 、约为梁体总重的 0.07 倍；屈服后刚度 $K_d=1.4\text{E}+3\text{kN/m}$ ；屈服后刚度与初始剪切刚度之比为 0.154。对于该模型仅考虑该支座顺桥向的阻尼作用，可直接将支座指定为 Wen Plasticity Property 连接单元，无需再绘制单独的阻尼单元，如图 8-b 所示。然后按上述参数设置该单元的 U2 方向（即顺桥向）的非线性属性，具体参数设置如图 8-a 所示。



图 8-a 软钢阻尼器参数设置

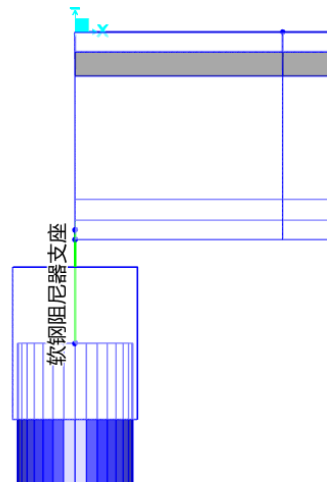


图 8-b 边墩软钢阻尼器支座的布置

运行分析模型，提取边墩及中墩底部的剪力、弯矩，以及边墩和中墩位置处墩顶与梁的相对位移，统计结果如下所示：

工况	地震波	边墩底剪力 (kNm)	边墩底弯矩 (kNm)	中墩底剪力 (kNm)	中墩底弯矩(kNm)	边墩相对位移 (m)	中墩相对位移 (m)
设置软钢阻尼器 支座	EI Centro-NS	393.3	5243.97	403.15	6253.96	0.1307	0.032
	EI Centro-EW	481.7	8037.28	647.77	10433.7	0.162	0.042
与不设置消能 减震装置差值	EI Centro-NS	86.7	3557.97	-102.55	-1791.34	-0.0538	0.032
	EI Centro-EW	207.6	6529.18	-484.93	-15231.7	-0.4765	0.042
相差百分比	EI Centro-NS	28%	211%	-20%	-22%	-29%	/
	EI Centro-EW	76%	433%	-43%	-59%	-75%	/

对比不设置减震装置的计算结果可以发现，在 EI Centro-NS 和 EI Centro-EW 地震作用下，设置软钢尼支座后该桥中墩的剪力分别下降了 20%和 43%；弯矩分别下降了 22%和 59%。边墩相对位移分别下降了-29%和-75%。但是安装粘滞阻尼器后，阻尼器会限制地震作用下墩顶与主梁的相对位移，边墩剪力及弯矩都有的增加，但是并没有超过桥墩的屈服弯矩，相比原始结构，设置软钢尼支座后该桥梁在地震荷载作用下响应得到优化。

4 总结

消能减震装置形式多样，功能不一。CSiBridge 依据不同的理论与假设内置了丰富的连接单元类型，用来考虑不同减震装置在地震荷载作用下的作用。实际工程中减震装置涉及的知识非常丰富，如减震装置类型的选取、参数调节、布置的方式等等，本文仅简要介绍了常用减震装置在 CSiBridge 中的模拟方法及其相关的一些知识。由于时间和经验有限，文中难免存在不足或错误，欢迎各位读者批评与指正。

参考资料

- [1] 庄军生. 桥梁减震、隔震支座和装置[M].中国铁道出版社, 2012.
- [2] Computers & Structures Inc., 北京筑信达工程咨询有限公司. CSI 分析参考手册. 2019.
- [3] 公路桥梁塑性钢减震支座: JTT843-2012[S].人民交通出版社, 2012
- [4] 公路桥梁抗震设计规范: JTGT 2231 - 01 -2020.人民交通出版社, 2020
- [5] 蒋建军. 桥梁几种典型减隔震装置的减震效果比较与研究[D]. 2005.