

双阶屈服屈曲约束支撑在 SAP2000 中的模拟

筑信达 杨硕 吴文博

1. 概述

屈曲约束支撑 (buckling restrained brace, BRB) 作为位移相关型阻尼器, 可有效控制结构的最大层间变形, 在建筑结构消能减震领域广泛使用, 但是 BRB 屈服后刚度小、导致所在楼层刚度降低, 层间变形易集中。文章[1][2]各提出一种面向结构最大层间变形控制和变形集中效应控制双重需求的新型双屈服点 BRB (Double-stage Yield Buckling Restrained Brace, DYBRB)。本文介绍如何在 SAP2000 中对双阶 BRB 的力学特性进行模拟, 使用 SAP2000 已有的连接单元进行串联或并联的方式组合在一起, 实现与双阶 BRB 一致的力学行为。再以一个钢框架模型为例, 比较结构中布置不同减震方案下的减震效果。

2. 双阶 BRB 基本工作原理

如图 1 所示, 屈曲约束支撑由内核单元、约束单元和无黏结层构成, 内核单元是支撑的主要受力耗能元件, 约束单元一般置于内核单元外侧, 用于约束内核单元, 防止其在受压过程中屈曲, 使得支撑在拉压力作用下具有对称饱满的荷载-位移滞回曲线, 可显著提高支撑自身的耗能能力。大多数传统 BRB 框架设计中, 通常只采用单一 BRB 减震装置, 在多遇地震时 BRB 一般被设计为处于弹性状态, 不屈服, 几乎没有耗能; BRB 在设防地震或罕遇地震作用下, 屈服后刚度小, 无法阻止设置有屈曲约束支撑楼层的变形快速增长, 易发生楼层变形集中现象, 造成层屈服破坏。

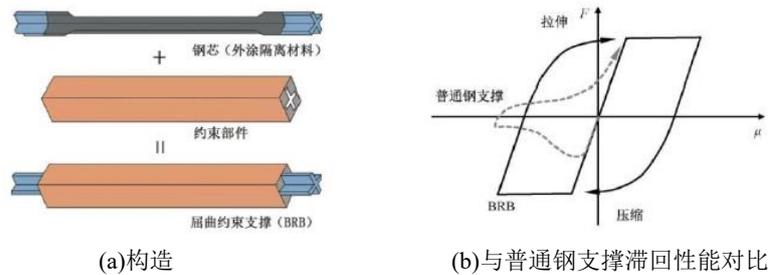


图 1 传统屈曲约束支撑 BRB 构造及滞回性能

传统 BRB 单一屈服点和屈服后刚度较低的特点不能良好的适应不同水准地震作用, 为保证 BRB 能够满足多种变形需求并具有良好的稳定的耗能能力, 诸多学者通过改进传统 BRB 芯板构造或与其它阻尼器等新型装置进行组合, 形成可实现多阶段耗能或提供较大屈服后刚度的复合型 BRB。

根据双阶 BRB 受力特性的组合实现原理, 双阶 BRB 可分为串联型和并联型两种构造方式。潘鹏^[1]提出一种由两个芯板串联组成的双屈服点 BRB, 如图 2 所示, 该双阶 BRB 可通过变形限制装置等约束条件使两个芯板相继屈服, 小芯板达到预设的轴向变形时退出耗能工作, 随着大芯板的屈服, 整个支撑具有两个屈服点。

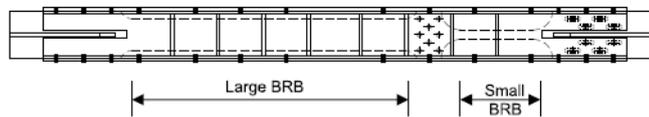


图 2 某串联型双阶屈服点 BRB 构造示意^[1]

阎东东^[2]等提出一种由两个耗能段并联组成的新型全钢 DYBRB, 如图 3 所示, 通过在耗能段两端的连接板上设置长圆形螺栓孔和螺栓连接作为二阶段的启动协同装置, 当第一耗能段变形达到指定变形后, 螺栓与长圆孔接触, 带动第二耗能段协同受力, 此时支撑的刚度和承载力为两个耗能段的总和, 支撑因此可呈现出双屈服点受力特征。

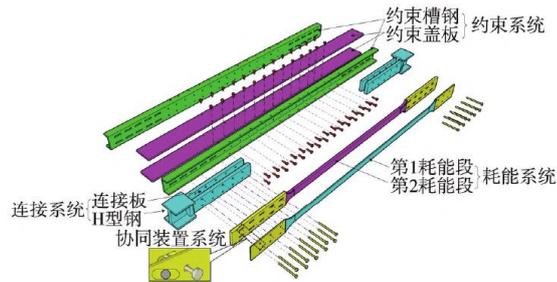


图3 某并联型双阶屈服点 BRB 构造示意^[2]

3. 双阶 BRB 的有限元模拟

3.1 连接单元类型介绍

目前结构分析设计软件 SAP2000 没有专门用于模拟双阶 BRB 的连接单元，下面详细介绍构造双阶 BRB 会用到的连接单元类型，分别有线性 Linear 单元、缝单元 Gap、勾单元 Hook、多段线弹性单元 Multilinear Elastic (MLE)、多段线塑性单元 Multilinear plastic (MLP) 等。

线性 Linear 单元，该单元是一个弹簧，各个方向可以指定刚度和阻尼，刚度和阻尼可以是耦合的也可以是解耦的。也可采用线性连接单元 Linear 并指定相对较大的刚度值模拟刚性杆 Rigid，便于提取结果，详后文。



图4 Linear 单元

缝单元 Gap，带有初始缝隙的弹簧， k 为弹簧常数，open 必须为零或正值，该单元用于模拟只压对象。

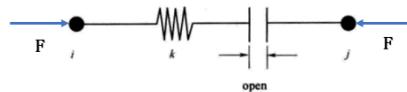


图5 Gap 单元

勾单元 Hook，与缝单元 Gap 的行为相反，该单元用于模拟只拉对象。

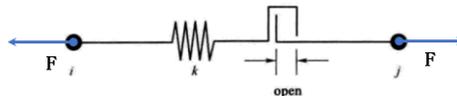


图6 Hook 单元

多段线弹性单元 MLE，可指定多段线弹性属性，正变形轴上的最后两点定义的斜率被外推至无限正变形，类似的，负变形轴上的最后两点定义的斜率被外推至无限负变形。该单元的行为虽是非线性的，但仍然是弹性的，表明单元加载和卸载沿着相同的曲线，且没有能量的耗散。

多段线塑性单元 MLP，与 MLE 单元类似，但是塑性属性展现出不同的加载和卸载行为，在反向加载和循环加载下，会有滞回及能量耗散。滞回类型有随动 Kinematic、退化 Degrading、武田 Takeda、支点 Pivot、混凝土、BRB 强化、各向同性。

3.2 串联式双阶 BRB 模型简介

文章[1]对芯板进行不同截面尺寸的分区处理及连接方式做调整，再将两个不同强度的芯板进行串联，从而达到多个屈服耗能阶段的设计目标，简化的计算模型如图 7 所示。SAP2000 软件中没有单独针对双阶 BRB 的现成单元，因此需要采用不同单元组合的方式来实现简化模拟。

Small BRB 与一个 Hook 勾单元和一个 Gap 缝单元并联为一阶屈服耗能段，Hook 和 Gap 作为 Small BRB 的变形限位装置，以限制一阶耗能段的拉压极限变形，Large BRB 为二阶屈服耗能段，与 Small BRB 串联。当变形限位装置的位移小于某个设定值时，Hook 和 Gap 的刚度为 0，此时承载力由 Small BRB 控制，当变形限位装置的位移超过某个设定值时，Hook 和

Gap 的视为刚体，此时 Small BRB 的变形被锁死，承载力主要由 Large BRB 控制。

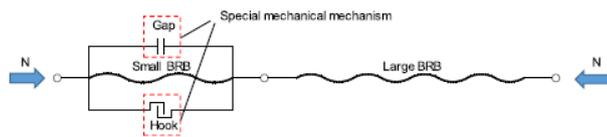


图 7 串联双阶 BRB 简化计算模型^[1]

3.3 串联式双阶 BRB 模拟

在 SAP2000 软件中采用 Wen 塑性单元模拟屈曲约束支撑 BRB，Wen 单元本构模型如图 8 (a) 所示， k 为初始刚度， $yield$ 为屈服力， $ratio$ 为屈服后刚度与屈服前刚度的比值， exp 用于控制从线性到非线性范围的过渡， exp 大于等于 1，随着 exp 增加（不宜超过 20），过渡会更加尖锐。定义 Gap 和 Hook 时，轴向初始间隙值应为 $U1$ ，Gap 和 Hook 的刚度值建议取 1000 倍 BRB 的初始刚度，这样当 Gap 和 Hook 的轴向变形超过 $U1$ 后，其刚度远大于 BRB 刚度，可视为刚体。Gap 和 Hook 两个单元也可以用一个多段线弹性单元 MLE 代替。

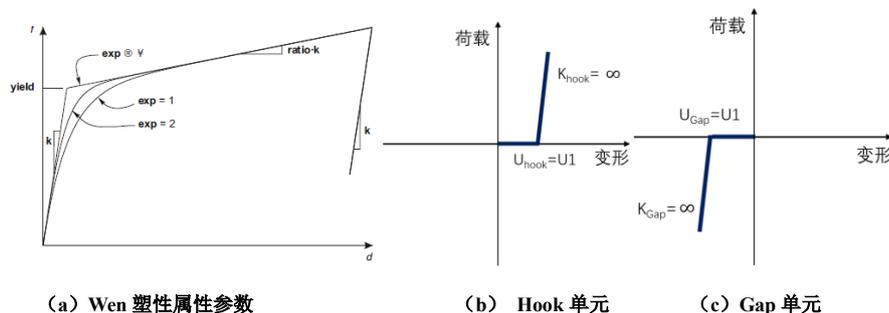


图 8 单元本构模型

定义连接单元的参数，Small BRB 的初始刚度、屈服力、屈服后刚度比分别为 107kN/mm、300kN、0.035，Large BRB 的初始刚度、屈服力、屈服后刚度比分别为 95.2kN/mm、500kN、0.035，Large BRB 的启动位移为 5.6mm，也就是 Gap 和 Hook 的轴向初始间隙值 $U1$ ，该值为 Small BRB 屈服位移的 2 倍。具体的连接单元定义如图 9 所示。



图 9 连接单元参数定义

在 SAP2000 中通过两点连接的方式绘制串联双阶 BRB 模型，对于串联的连接单元，如果仅考虑连接单元轴向 $U1$ 方向的自由度，则相当于二力杆，中间节点约束不足，此时结构为瞬变体系，会导致分析异常，因此剪切和转动方向须指定 fix 约束或合适的刚度值，如图 10 所示。建立模型时，如图 11 上侧所示，在节点 1、2 之间依次绘制 Gap、Hook、Small BRB (Wen) 三个连接单元，默认为并联效果，节点 2、3 之间绘制 Large BRB (Wen) 连接单元。时程分析采用非线性直接积分时程工况，加载方式为在 3 节点处施加 $U1$ 方向的单位位移荷载，时程函数见图 11 下侧。

连接属性							
方向	固定	非线性	属性	方向	固定	非线性	属性
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	修改/显示...	<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	修改/显示...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	修改/显示...	<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	修改/显示...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	修改/显示...	<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	修改/显示...
全选				清除全			

图 10 fix 约束

分析结束后，使用绘图函数下的连接单元函数绘制 Small BRB、Large BRB 的轴力-变形滞回曲线并导出相关数据，具体操作可参考知识库内容《[连接单元的并联及结果提取](#)》，在 Excel 中绘制 Small BRB、Large BRB、双阶 BRB 的滞回曲线，根据连接单元串联时轴力相等，变形相加的规律，其中串联双阶 BRB 的轴力与 Large BRB 的轴力相同，串联双阶 BRB 的变形为 Small BRB 与 Large BRB 的轴向变形之和，如图 12 所示。

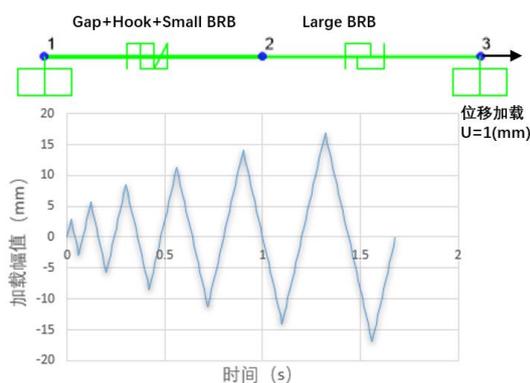


图 11 串联双阶 BRB 模拟与加载

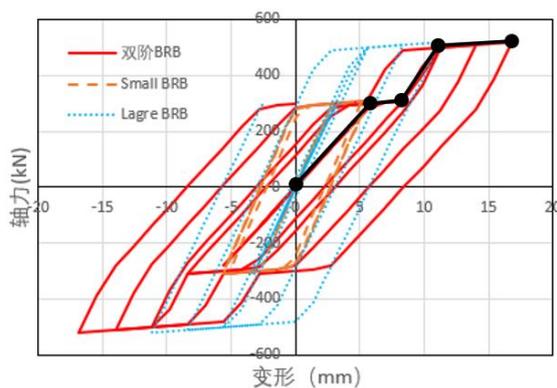


图 12 串联双阶 BRB 滞回曲线

从图 12 的滞回曲线可以看出，Small BRB 屈服后塑性发展直至限制位移 $\pm 5.6\text{mm}$ ，在此之后仅 Large BRB 单独工作，双阶 BRB 的轴力-变形曲线符合预期的双阶屈服特性。

如果认为以上的建模方式较复杂，串联型双阶 BRB 骨架曲线可简化为图 12 中黑色四折线模型，使用多段线性塑性 MLP 单元并指定“随动 Kinematic”滞回类型简化模拟^[3]。

3.4 并联式双阶 BRB 模型简介

并联式双阶 BRB 与前述的串联式双阶 BRB 工作原理类似，将两个不同强度的芯板进行并联并调整连接方式，从而达到多个屈服耗能阶段的设计目标。软件内需采用不同连接单元组合的方式来实现，简化的计算模型如图 13 所示，两个屈服耗能段采用 Wen 塑性单元的 BRB 模拟，协同装置采用 Gap 和 Hook 并联的方式 (a)，或者多段线弹性单元 MLE 代替 (b)，当协同单元达到预设的启动位移时将提供很大的刚度串联第二耗能段的 BRB-2 协同受力，与第一耗能段 BRB-1 形成并联机制，从而模拟两个屈服段的受力机制。

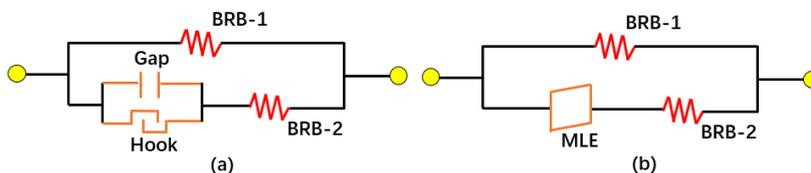


图 13 并联双阶 BRB 简化计算模型

3.5 并联式双阶 BRB 模拟

各连接单元的定义与串联双阶 BRB 中各连接单元的定义保持一致，BRB-1 和 Small BRB 的定义对应，BRB-2 和 Large BRB 的定义对应，采用图 13 (b) 的方式创建模型，如图 14 上侧所示，在 1、2 节点之间绘制 MLE、在 2、3 节点之间绘制 BRB-2、在 1、3 节点之间绘制 BRB-1，在节点 3、4 之间绘制 Linear 单元模拟的刚性杆 Rigid。时程分析采用非线性直接积分时程工况，加载方式为在 4 节点处施加 U1 方向的单位位移荷载，时程函数见图 14 下侧。

分析结束后,使用绘图函数下的连接单元函数绘制 MLE、BRB-1、BRB-2 的轴力-变形滞回曲线并导出相关数据,在 Excel 中绘制并联双阶 BRB、BRB-1、BRB-2 和 MLE 的滞回曲线,根据连接单元并联时轴力相加变形相等的规律,其中并联双阶 BRB 轴力与 Rigid 的轴力相同,并联双阶 BRB 的变形与 BRB-1 的变形相同。绘制所得的滞回曲线如图 15 所示。

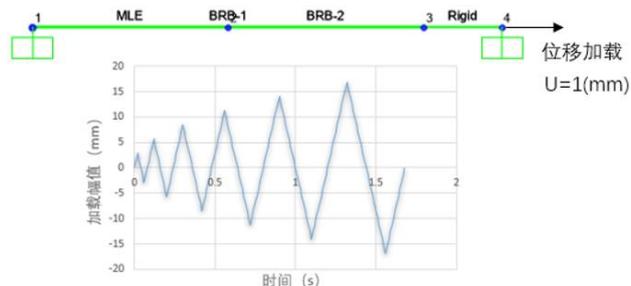


图 14 并联双阶 BRB 模拟与加载

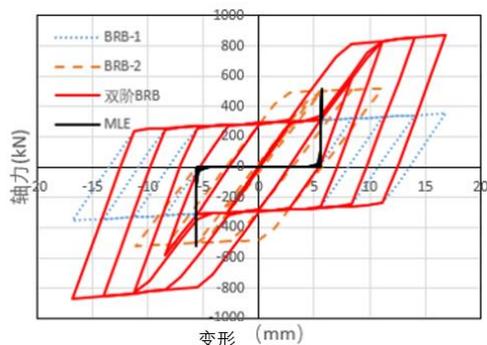


图 15 并联双阶 BRB 滞回曲线

从图 15 可以看出,第一阶段仅 BRB-1 开始工作,双阶 BRB 的滞回行为与 BRB-1 相同,当变形达到预设的 $\pm 5.6\text{mm}$ 后,进入第二阶段, BRB-2 开始工作,双阶 BRB 支撑的滞回行为表现为 BRB-1、BRB-2、MLE 三个连接单元滞回曲线的叠加,单元 MLE 全程无耗能,仅起到推迟 BRB-2 工作的作用。

4. 双阶 BRB 三维框架抗震性能分析

4.1 计算模型与分析方法

本章将双阶 BRB 置于文章[3]描述的三维钢框架结构中,研究双阶 BRB 相比于 BRB 对整体结构地震响应的改善作用。三维钢框架层高 4.5m, 总共 10 层, X 向共 3 跨, 每跨 6m; Y 向共 5 跨, 每跨 6m。整体结构模型及 BRB 支撑的布置位置如图 16 所示。

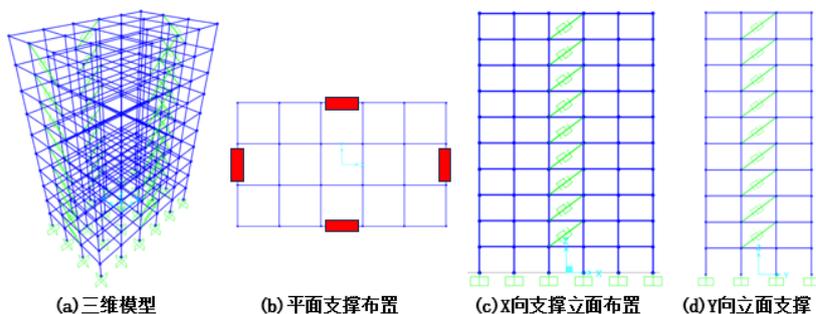


图 16 三维框架整体模型结构示意图

钢框架的尺寸与支撑构件的参数如表 1、2 所示。

表 1. 三维模型构件参数

楼层	框架柱		框架梁	
	截面	钢材等级	截面	钢材等级
1~5	Tube400x400x20x20	Q235	H400x250x10x16	Q235
6~10	Tube350x350x16x16			

表 2. 三维模型 BRB 支撑构件参数

楼层	属性参数	BRB 框架结构-A	BRB 框架结构-B	串连/并联双阶 BRB 框架结构	
		BRB	BRB	Small BRB/BRB-1	Large BRB/BRB-2
2~10 层	初始刚度 (kN/mm)	60	95.2	60	95.2
	屈服荷载 (kN)	168	300	168	300

屈服后刚度比	0.035	0.035	0.035	0.035
--------	-------	-------	-------	-------

按照图 16 的布置方式,设置纯框架结构、BRB 框架结构-A、BRB 框架结构-B、串联双阶 BRB 框架结构、并联双阶 BRB 框架结构 5 组计算模型,指定 X 方向时程工况,采用 FNA 法,输入 EL-Centro 波,如图 17 所示,峰值为 3417cm/s^2 ,结构阻尼比采用模态阻尼 3%。

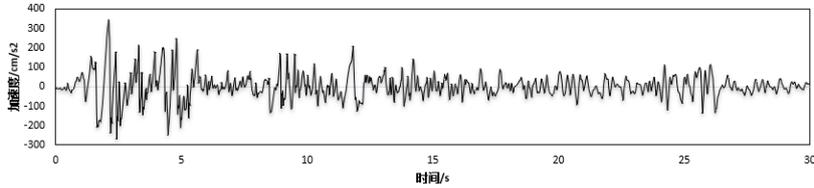


图 17 EL-Centro 地震波

4.2 结构响应

时程工况分析完成后,分别提取 5 组模型在 X 方向楼层位移的最大值和楼层剪力,如图 18、19 所示,串联双阶 BRB 支撑相较于并联双阶 BRB 支撑、常规 BRB 支撑可以显著改善整体结构的楼层位移,串联双阶 BRB 对于楼层位移的控制优于并联双阶 BRB 且结构的基底剪力更小。

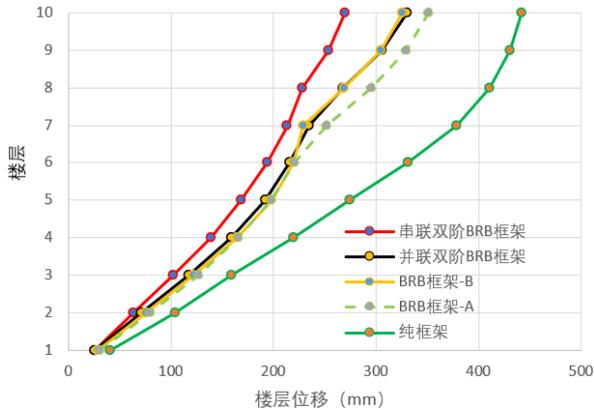


图 18 X 向时程工况下楼层位移

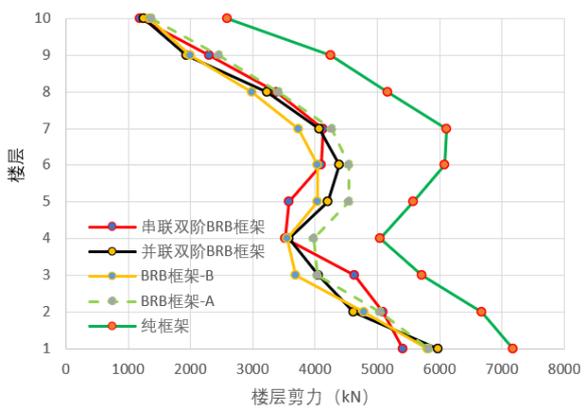


图 19 X 向时程工况下楼层剪力

5. 小结

本文介绍了双阶 BRB 的工作原理,并在 SAP2000 软件内使用已有的连接单元对串联式 BRB 和并联式 BRB 进行了数值模拟,最后以 10 层的钢框架模型为基础,设置了 5 组计算模型,通过各模型的楼层位移与楼层剪力对比,发现串联式双阶 BRB 对结构楼层位移的控制效果最优,设置串联双阶 BRB 支撑的结构基底剪力最小。

参考资料

[1] Pan Peng, Li Wei, Nie Xin, et al. Seismic performance of a reinforced concrete frame equipped with a double-stage yield buckling restrained brace[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2017, 26(04): e1335.

[2] 阎东东,安楠,刘谦敏,等.双屈服点屈曲约束支撑-钢框架结构抗震性能研究[J].地震工程与工程振动, 2023, 43(2):146-154.

[3] 丁洁民,邵聪,刘沛,等.双阶屈服屈曲约束支撑框架结构抗震性能研究[J].建筑结构, 2023, 53(10):1-9.