

# 基于数值模拟的自复位防屈曲支撑滑移节点结构设计

侯明珠<sup>1\*</sup>, 王火炬<sup>2</sup>, 李芷灵<sup>1</sup>

(1.广东理工学院建设学院, 广东省肇庆市, 526100;

2.肇庆市技师学院机电工程系, 广东省肇庆市, 526100;

\*通讯作者, 1160062732@qq.com)

**摘要:**为解决节点板可能会先于支撑发生破坏的问题,以自复位防屈曲支撑钢框架为研究对象,通过开展支撑子框架焊接节点数值模拟,进行支撑复位系统参数分析,给出支撑复位率对框架节点受力性能的影响规律。提出一种自复位防屈曲支撑整体式滑移节点的构造方式,所提构造通过滑移节点避开支撑轴力增大而引起的节点板破坏。研究表明:刚度比 $\beta=1.3$ 时,与焊接节点相比,整体式滑移节点和分离式滑移节点的节点板应力最大值分别减小了8.58%和6.17%;刚度比 $\beta=2.3$ 时,与焊接节点相比,整体式滑移节点和分离式滑移节点的节点板应力最大值分别减小了11.94%和10.44%。滑移节点的节点板屈服面积明显减小,采用整体式滑移节点明显优于分离式滑移节点。

**关键词:** 自复位防屈曲支撑; 节点板; 复位率; 整体式滑移连接

## 引言

自复位防屈曲支撑(Self-Centering Buckling Restrained Brace, SCBRB)是把自复位结合和防屈曲支撑结合起来的一种消能减耗装置,并具有复位功能,可以将结构的地震反应降到最低[1-3]。王涛等提出了一种弹簧式自复位防屈曲支撑[4],他们将弹簧和方钢管串联组成复位系统,复位弹簧无需提前施加预紧力,支撑制作较为方便。徐龙河等以预压弹簧为复位材料[5-8],通过对支撑滞回曲线进行分析,碟簧预压力能够克服耗能系统提供的摩擦力,能有效反应支撑受力情况,支撑自恢复性能更优。钱悦为了使耗能装置方便拆卸[9],以碟簧为复位材料,提出可更换自复位防屈曲支撑。耗能系统便于更换,组合碟簧有效提高了支撑的复位能力,耗能系统震后便于更换,使支撑抗震性能发挥的同时更加经济美观。自复位防屈曲支撑提高了支撑和框架的稳定性,却增大了支撑轴力对节点板的不利影响。节点板可能会先于支撑发生破坏,导致自复位防屈曲支撑无法充分发挥耗能性能和复位性能[10-15]。因此,如何针对支撑复位系统给出支撑复位率对框架节点受力性能的影响规律,检验节点板的抗震性能是亟需解决的问题。为此,笔者以自复位防屈曲支撑钢框架为研究对象,通过开展支撑子框架连接节点数值模拟,进行支撑复位系统参数分析,给出支撑复位率对框架节点受力性能的影响规律,提出一种自复位防屈曲支撑整体式滑移节点的构造方式。

## 1. 提出整体式滑移节点构造方式

焊接节点板中支撑的复位能力和耗能能力难以充分发挥,支撑轴力增大导致子框架和节点板塑性损伤较为严重,为了解决这个问题,本文对自复位防屈曲支撑和节点板之间的连接形式进行了改进,提出了自复位防屈曲支撑滑移节点板构造方式。

滑移连接节点构造主要采用滑移端板、滑移垫板和低摩擦材料板相结合的形式,在梁下翼缘、柱下翼缘、滑移端板、滑移垫板和低摩擦材料板分别开取同等个数小孔,把高强度螺栓施加在上面。为尽量减少梁和柱翼缘的剪切滑动引起的摩擦,梁和柱翼缘之间还采用了丁基橡胶层,按照滑移垫板构造形式的不同,可将滑移垫板分别设置为整体式滑移节点和分离式滑移节点,如图1所示。



图1 滑移垫板构造形式示意图

节点板被焊接到两个端板上，低摩擦丁基橡胶层被设置在了端板的一侧以及垫板的一侧用来使框架节点界面之间的摩擦最小。当梁柱翼缘在框架开合效应作用下发生伸长或缩短，这种材料能在翼缘—端板界面上相对滑动。端板在平面内方向上是开槽的，因此在垫板—端板界面处也可被预测有相对滑动，这样螺栓几乎可以免除受剪，而简单地被视为受拉螺栓，见表1。

角部节点通过接触（压）或螺栓（拉）与框架构件紧密接触。因此，这种滑移行为不会对SCBRB轴向行为产生明显的影响。由剪切相互作用而产生不利的框架开合效应的影响能够被将影响降至最小，因此节点连接的结构性能将由支撑作用来控制。

表1 节点螺栓规格

安装位置	螺栓类型	螺栓数量
滑移节点梁侧	12.9级M18螺栓	10
滑移节点柱侧	12.9级M24螺栓	6

采用这种滑移节点构造方式，假设支撑作用力主要通过接触界面处的法向压力或从螺栓的法向拉力传递到框架构件。SCBRB轴线可设计为通过梁柱节点，以尽量减少支撑轴力对框架构件的影响。

## 2. 模型建立

为模拟真实的滑移节点，避免高强度螺栓在滑移过程中发生剪切断裂，装配时应考虑滑移节点中每个长圆孔和所对应高强度螺栓之间的距离，每个长圆孔和与之对应的高强度螺栓之间需保留间隙，长圆孔槽长度由梁柱翼缘 $\pm 2.5\%$ 的轴向变形所确定，高强度螺栓模型如图2所示。

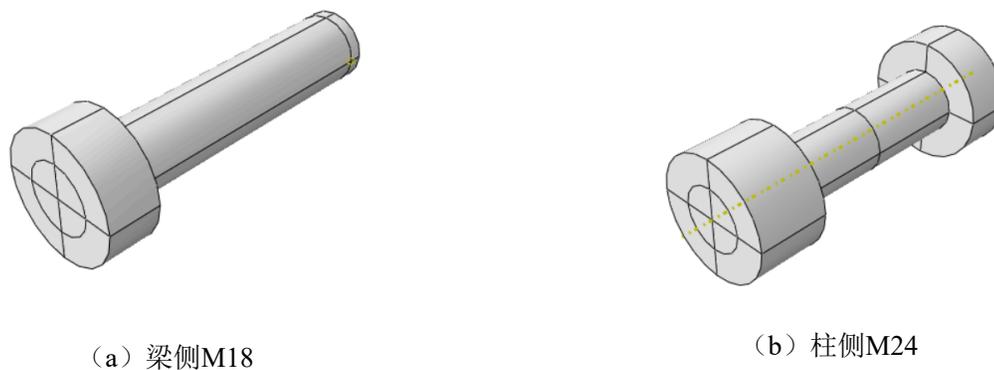


图2 高强度螺栓模型图

采用ABAQUS软件建立自复位防屈曲支撑钢框架滑移节点模型，节点板、子框架和支撑均采用第二章的参数。其余构件建模均采用三维实体单元，构件本构关系与梁板相同，网格密度为默认值。其中螺栓的直径22mm，其预拉力220kN；打孔垫板尺寸为793mm×256mm×20mm，开孔尺寸为螺栓尺寸；焊缝横截面为12mm<sup>2</sup>的等边三角形，横向长度为752mm，纵向长度为200mm；端板起到连接梁柱和节点板的作用，滑移界面板如图3所示。横向端板470mm×200mm×30mm，纵向端板733mm×200mm×25mm，上部开孔横向为螺栓直径三倍，以保证有充分空间进行滑移。自复位防屈曲支撑子框架滑移节点材料均选用钢材，材料力学性能参数见表2。

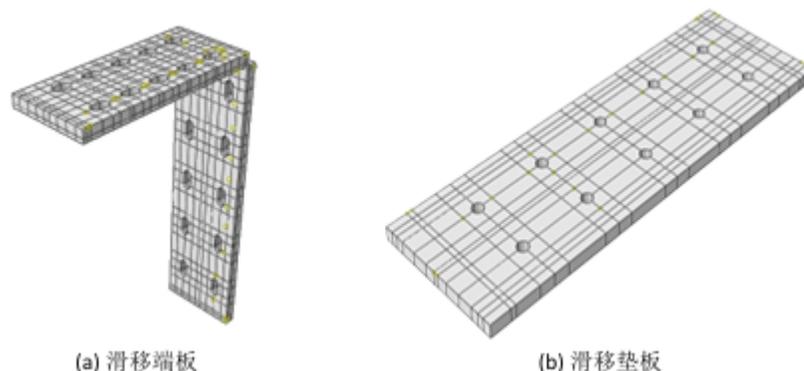


图3 滑移界面板示意图

表2 钢材材料力学性能

构件类型	钢材等级	厚度	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
节点板	Q345-B	16	345	206	0.3
梁翼缘	Q235-B	14	293.8	206	0.3
梁腹板	Q235-B	9	293.8	206	0.3
柱翼缘	Q345-B	19	368.5	206	0.3
柱腹板	Q345-B	12	379.5	206	0.3
高强度螺栓	12.9级	—	940	206	0.3

### 3. 数值模拟

#### 3.1. 有限元建模

为了简化建模，可通过设置滑移节点中的接触关系来实现低摩擦材料的功能，即法向硬接触可分离，切向摩擦系数为0.075。同时，对于没有低摩擦材料的其他钢板之间的非焊接连接，也设置了接触关系，即法向硬接触可分离，切向摩擦系数为0.3。

SCBRB钢框架滑动节点的有限元模型采用面对面接触。滑动垫板与滑动端板的接触面和滑动端板与梁柱翼缘的接触面可采用法向硬接触分离，切向摩擦系数为0.075。高强螺栓与梁柱翼缘的接触面，高强螺栓与滑动底板的接触面，高强螺栓的螺栓杆与梁柱翼缘圆孔的接触面，滑动端板长圆孔与滑动底板圆孔内壁通过法向硬接触可分离，切向摩擦系数为0.3。因此，可以在模型中模拟由于螺栓滑动和弯曲，以及螺栓杆可能会与孔壁挤压导致的螺栓剪切破坏行为，如图4所示。

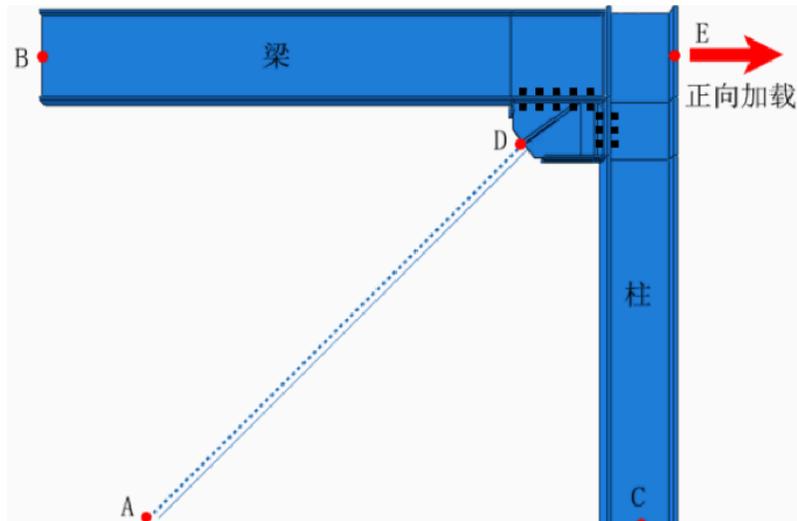


图4 滑移节点子框架有限元模型

### 3.2. 加载制度

加载制度从层间位移角0加载至 $\pm 4\%$ 。首先进行单调加载，对模型施加1000kN的预拉力，不考虑梁柱翼缘的局部缺陷和整体缺陷，仅验证SCBRB单调加载的本构，然后施加竖向往复位移荷载，加载制度如图5所示。

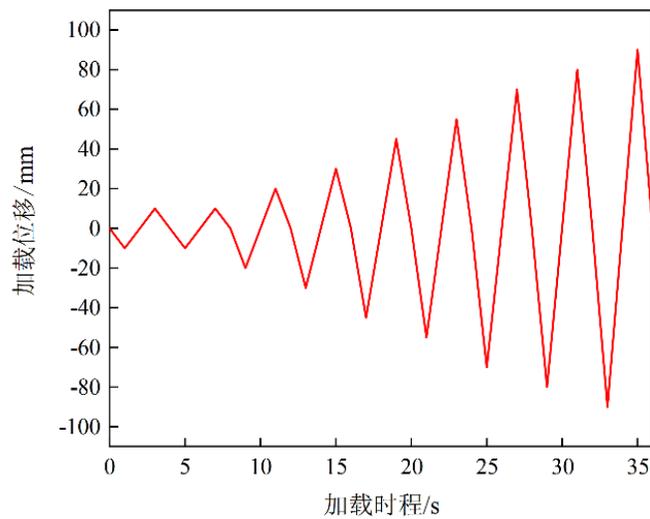


图5 加载制度

### 3.3. 对比方案

以节点连接形式、支撑复位率和刚度比为参数，共建立了18个有限元模型，通过对比验证滑移节点的有效性。具体参数见表3。

表3 模型参数

模型编号	节点连接形式	螺栓预拉力 (kN)		滑移垫板构造形式	
		梁侧 (M18)	柱侧 (M24)	梁侧	柱侧
WC-A1-G1	焊接	—	—	—	—
WC-A2-G1	焊接	—	—	—	—
WC-A3-G1	焊接	—	—	—	—
SC-ZT-A1-G1	滑移	90	212	整体式	整体式
SC-ZT-A2-G1	滑移	90	212	整体式	整体式
SC-ZT-A3-G1	滑移	90	212	整体式	整体式
SC-FL-A1-G1	滑移	140	257	分离式	分离式
SC-FL-A2-G1	滑移	140	257	分离式	分离式
SC-FL-A3-G1	滑移	140	257	分离式	分离式
WC-A1-G2	焊接	—	—	—	—
WC-A2-G2	焊接	—	—	—	—
WC-A3-G2	焊接	—	—	—	—
SC-ZT-A1-G2	滑移	90	212	整体式	整体式
SC-ZT-A2-G2	滑移	90	212	整体式	整体式
SC-ZT-A3-G2	滑移	90	212	整体式	整体式
SC-FL-A1-G2	滑移	140	257	分离式	分离式
SC-FL-A2-G2	滑移	140	257	分离式	分离式
SC-FL-A3-G2	滑移	140	257	分离式	分离式

(其中: WC为焊接; SC为滑移连接; ZT为整体式滑移垫板; FL为分离式滑移垫板; A1为复位率  $\alpha = 0$ ; A2为复位率  $\alpha = 0.5$ ; A3为复位率  $\alpha = 1.0$ ; G1为刚度比  $\beta = 1.3$ ; G2为刚度比  $\beta = 2.3$ 。)

#### 4. 复位率对SCBRB滑移节点板的影响

由表4可知, 随着支撑复位率的增加, 节点板所受应力增大; 支撑刚度比的增大也会导致支撑和节点板之间的相互作用增加。

刚度比为1.3时, 与焊接节点相比, 在  $0 \leq \alpha \leq 0.5$  范围内, 整体式滑移节点和分离式滑移节点的节点板应力最大值分别减小了8.58%和6.17%; 在  $0.5 \leq \alpha \leq 1.0$  范围内, 整体式滑移节点和分离式滑移节点的节点板应力最大值分别减小了6.96%和5.67%。刚度比为2.3时, 与焊接节点相比, 在  $0 \leq \alpha \leq 0.5$  范围内, 整体式滑移节点和分离式滑移节点的节点板应力最大值分别减小了11.94%和10.44%; 在  $0.5 \leq \alpha \leq 1.0$  范围内, 整体式滑移节点和分离式滑移节点的节点板应力最大值分别减小了7.86%和7.37%。相同刚度下, 节点板的受力情况: 整体式滑移节点 < 分离式滑移节点 < 焊接节点。

表4 不同连接形式的节点板应力最大值

刚度比	焊接		滑移连接 (垫板整体式)		滑移连接 (垫板分离式)	
	$\alpha$	$\sigma(\text{MPa})$	$\alpha$	$\sigma(\text{MPa})$	$\alpha$	$\sigma(\text{MPa})$
$\beta = 1.3$	$\alpha = 0$	345.0	$\alpha = 0$	322.0	$\alpha = 0$	324.0
	$\alpha = 0.5$	373.0	$\alpha = 0.5$	341.0	$\alpha = 0.5$	350.0
	$\alpha = 1.0$	388.0	$\alpha = 1.0$	361.0	$\alpha = 1.0$	366.0
$\beta = 2.3$	$\alpha = 0$	368.0	$\alpha = 0$	334.0	$\alpha = 0$	335.0
	$\alpha = 0.5$	402.0	$\alpha = 0.5$	354.0	$\alpha = 0.5$	360.0
	$\alpha = 1.0$	407.0	$\alpha = 1.0$	375.0	$\alpha = 1.0$	377.0

通过计算可以得到节点板最大应力增长速率, 见表5。由计算数据可知, 整体式滑移连接增长速率相对其它两组较为平稳, 且所受的应力均小于焊接和分离式滑移连接。在满足支撑充分发挥复位能力的同时, 还减

小了节点板的塑性损伤,证明了自复位防屈曲支撑钢框架滑移节点的有效性,且采用整体式滑移节点优于分离式滑移节点。

表5 节点板最大应力增长速率

刚度比	焊接		滑移连接 (垫板整体式)		滑移连接 (垫板分离式)	
	复位率	增长率	复位率	增长率	复位率	增长率
$\beta = 1.3$	$0 \leq \alpha \leq 0.5$	8.12%	$0 \leq \alpha \leq 0.5$	5.90%	$0 \leq \alpha \leq 0.5$	8.02%
	$0.5 \leq \alpha \leq 1.0$	4.02%	$0.5 \leq \alpha \leq 1.0$	5.87%	$0.5 \leq \alpha \leq 1.0$	4.57%
$\beta = 2.3$	$0 \leq \alpha \leq 0.5$	9.24%	$0 \leq \alpha \leq 0.5$	5.99%	$0 \leq \alpha \leq 0.5$	7.46%
	$0.5 \leq \alpha \leq 1.0$	1.24%	$0.5 \leq \alpha \leq 1.0$	5.93%	$0.5 \leq \alpha \leq 1.0$	4.72%

## 5. 结论

刚度比  $\beta = 1.3$  时,与焊接节点相比,在  $0 \leq \alpha \leq 0.5$  范围内,整体式滑移节点和分离式滑移节点的节点板应力最大值分别减小了8.58%和6.17%;在  $0.5 \leq \alpha \leq 1.0$  范围内,整体式滑移节点和分离式滑移节点的节点板应力最大值分别减小了6.96%和5.67%。刚度比  $\beta = 2.3$  时,与焊接节点相比,在  $0 \leq \alpha \leq 0.5$  范围内,整体式滑移节点和分离式滑移节点的节点板应力最大值分别减小了11.94%和10.44%;在  $0.5 \leq \alpha \leq 1.0$  范围内,整体式滑移节点和分离式滑移节点的节点板应力最大值分别减小了7.86%和7.37%。相同支撑复位率和刚度比下,整体式滑移连接增长速率相对其它两种节点较为平稳,且所受的应力均小于焊接和分离式滑移连接。在满足支撑充分发挥复位能力的同时,还有效减小了节点板的塑性损伤,证明了自复位防屈曲支撑钢框架滑移节点的有效性,且采用整体式滑移节点的支撑框架优于采用分离式滑移节点的支撑框架。

## 参考文献

- [1] 刘璐,吴斌.自复位防屈曲支撑钢框架减振效果分析[J].建筑结构学报.2016,37(4):93-101.
- [2] XU L, XIE X, YAO S, et al. Hysteretic behavior and failure mechanism of an assembled self-centering brace [J]. Bulletin of Earthquake Engineering. 2019, 17(6): 3573-3592.
- [3] 刘璐,吴斌,李伟,等.一种新型自复位防屈曲支撑的拟静力试验[J].东南大学学报(自然科学版),2012,42(3):536-541.
- [4] 王涛,黄俊奎,孟丽岩,等.弹簧式自复位防屈曲支撑的抗震性能[J].黑龙江科技大学学报.2015(5):557-564.
- [5] 徐龙河,樊晓伟,代长顺,等.预压弹簧自恢复耗能支撑受力性能分析与试验研究[J].建筑结构学报.2016,37(9):142-148.
- [6] 徐龙河,要世乾.自复位耗能支撑滞回性能试验研究与有限元分析[J].建筑结构学报.2018,39(11):158-165.
- [7] 徐龙河,陈鹏.自复位全钢型防屈曲支撑的工作原理与滞回特性研究[J].工程力学.2020,37(12):147-156.
- [8] XU L H, FAN X W, LI Z X. Cyclic behavior and failure mechanism of self-centering energy dissipation braces with pre-pressed combination disc springs [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2017, 46(7): 1065-1080.
- [9] 钱悦.可更换碟簧式自复位防屈曲支撑及支撑结构性能参数分析[D].哈尔滨:黑龙江科技大学,2020.
- [10] 周云,陈真,邓雪松,等.开孔与开槽式三重钢管防屈曲耗能支撑设计方法研究[J].土木工程学报.2012,45(2):20-25.
- [11] 崔瑶,许肖卓,林迟.考虑支撑断裂及节点板作用的中心支撑框架抗震性能研究[J].工程力学.2020,37(10):85-92.
- [12] 陈凌秀,祁皓,蔡储旺,等.考虑节点板刚度的屈曲约束支撑核心段应变的理论及试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版).2019,46(11):43-49.
- [13] 王静峰,高翔,李贝贝,等.屈曲约束支撑与钢框架节点板连接的抗震性能试验与分析研究[J].土木工程学报.2019,52(8):40-48.
- [14] 孔瑜文.考虑钢框架开合效应的防屈曲支撑角部节点板连接受力性能研究[D].广州:广州大学,2016.
- [15] 米晨阳.基于损伤控制的中心支撑框架节点板抗震性能提升研究[D].大连理工大学,2024.