

# 支撑自复位能力对滑移节点钢框架受力性能影响分析

侯明珠<sup>1</sup>, 周小刚<sup>1\*</sup>, 王火炬<sup>2</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, swjtuzxg@163.com)

**摘要:** 自复位防屈曲支撑焊接节点钢框架的复位能力和耗能能力难以充分发挥, 支撑轴力增大导致节点板塑性损伤较为严重。针对以上问题, 为了使支撑的复位性能得以充分发挥, 保证节点板达到弹性的性能目标, 通过采用数值模拟的方法, 以自复位防屈曲支撑钢框架滑移节点为研究对象, 建立有限元模型, 研究支撑复位率、时, 对支撑滞回特性、钢框架塑性损伤、节点板应力分布的受力性能影响进行综合评价。研究表明: 刚度比相同时, 随着复位率的增加, 滑移节点的结构最大层间位移角逐渐减小至0.395%, 小于规范中钢结构的弹性限值0.4%, 滑移节点可以有效减小钢框架的塑性程度, 节点板的屈服面积有明显增加, 支撑的复位能力得以充分发挥。

**关键词:** 自复位防屈曲支撑; 滑移节点; 数值模拟; 复位率; 受力性能

## 引言

自复位防屈曲支撑 (Self-Centering Buckling Restrained Brace, SCBRB) 是一种非常有前景的新型结构构件, 可以减小或者消除结构的残余变形, 解决防屈曲支撑残余变形带来的不利影响。随着可恢复性功能结构的提出和建筑结构的推陈出新, 自复位防屈曲支撑在韧性城市有了更加广泛的应用 [1-5]。支撑的复位能力受复位率和刚度比影响较大, 且支撑达到最大复位程度时, 结构最大层间位移角超过了规范中钢结构的弹性限值0.4%, 支撑的复位能力和耗能能力难以充分发挥, 支撑轴力增大导致节点板塑性损伤较为严重。2019年, 陈凌秀等采用解析法推导了防屈曲支撑焊接节点板刚度表达式, 可用于优化支撑核心构件 [6]。2020年, 齐欣为解决支撑面外失稳的稳定承载力的问题, 改变支撑长细比、节点板厚度等参数来探究板式连接支撑系统对H形支撑面外稳定性能的影响, 为支撑稳定承载力的设计提供了参考 [7]。2021年, 许肖卓为提高延性支撑框架的抗倒塌, 考虑节点板的实际受力, 对局部低强节点板进行改造 [8]。热处理虽能有效提高节点板的强度, 却难以发挥支撑的复位能力。因此, 如何使支撑的复位性能得以充分发挥, 保证节点板达到弹性的性能目标成为亟需解决的问题。为此, 笔者以自复位防屈曲支撑钢框架为研究对象, 通过ABAQUS软件建立滑移节点子框架有限元模型。在支撑轴力和框架开合效应组合作用下, 研究支撑复位率对支撑滞回特性、钢框架塑性损伤、节点板应力分布的受力性能影响进行综合评价。

## 1. 自复位防屈曲支撑工作原理

### 1.1. 支撑工作原理

笔者以复位材料是组合碟簧的自复位防屈曲支撑为研究对象, 对其工作原理进行分析 [9]。当荷载作用于支撑, 支撑处于受拉状态, 原有的自平衡状态被打破, 内管及焊接在上面的内管挡板在外力作用下整体向右运动, 由于外管内部构造等原因使得组合碟簧整体受压。当荷载卸去时, 体系的瞬时平衡又被打破, 由于组合碟簧的弹性特征其会恢复原先的状态而向左移动, 内管及焊接在上面的内管挡板也随之向左移动整体恢复自平衡状态。

同理, 当荷载作用于支撑使支撑受压时, 原有的自平衡状态被打破, 内管及焊接在上面的内管挡板在外力作用下整体向左运动, 由于外管内部构造等原因使得组合碟簧整体受压。当荷载卸去时, 体系的瞬时平衡

又被打破，由于组合碟簧的弹性特征其会恢复原先的状态而向有移动，内管及焊接在上面的内管挡板也随之向右移动，整体恢复自平衡状态。

## 1.2. 参数设计

SCBRB自身具有较好的耗能能力和变形能力，同时作用于结构中还可发挥可恢复能力及复位能力。其中复位装置的初始预压荷载 $F_0$ 和耗能装置荷载的比值是影响支撑复位效果的关键参数 [10]。若复位率太低，支撑将产生较大的残余变形，无法提供足够的复位能力使其复位；若复位率太大，则会引起支撑轴力增大，使节点板和子框架附加作用过大甚至导致局部变形。

$$\alpha = \frac{F_0}{\beta_c \omega f_y A_{\text{core}}} \quad (1)$$

式(1)中  $\alpha$  ——复位率；

$\beta_c$  ——摩擦系数；

$\omega$  ——强化系数；

$f_y$  ——屈服强度；

$A_{\text{core}}$  ——屈服段截面面积。

影响SCBRB复位能力的无量纲因素还有刚度比、强度比、屈服位移比等 [11-14]，其中支撑系统刚度比值  $\beta$  对支撑复位能力的影响尤为重要。SC第一刚度由内、外管刚度共同控制，SC第二刚度由系统刚度比  $\beta$  和BRB第二刚度共同确定。

$$\beta = \frac{K_{S2}}{K_{h2}} \quad (2)$$

式(2)中  $K_{S2}$  ——复位系统第二刚度；

$K_{h2}$  ——耗能系统第二刚度。

支撑的复位能力通过残余变形来衡量，其中支撑复位率和刚度比两个因素相互影响，对支撑复位能力起着决定作用。加载时，承载力主要由  $K_{S2}$  和  $K_{h2}$  控制。卸载时，刚度比可控制支撑的残余变形。令  $K_{h2}$  为定值，取4.3kN/mm，耗能系统屈服段的屈服荷载为260kN。通过数值模拟的方法，分析支撑在支撑复位率  $\alpha = 0$ ， $\alpha = 0.5$ ， $\alpha = 1.0$  时，随着支撑残余变形的减小，支撑复位率对支撑、节点板和梁柱的影响规律。

## 2. 建立SCBRB滑移节点子框架有限元模型

### 2.1. SCBRB模型

为研究支撑复位能力对滑移节点板受力性能的影响，采用ABAQUS软件开展数值模拟，在防屈曲支撑钢框架结构基础上增加复位系统建立SCBRB，自复位防屈曲支撑有限元模型如图1所示，SCBRB的简化模型通过BRB和SC并联实现，BRB采用桁架单元模拟，SC采用ConnSect连接器，其可以实现支撑复位功能。SCBRB的简化模型通过BRB和SC并联实现，且仅对节点板提供支撑轴力。

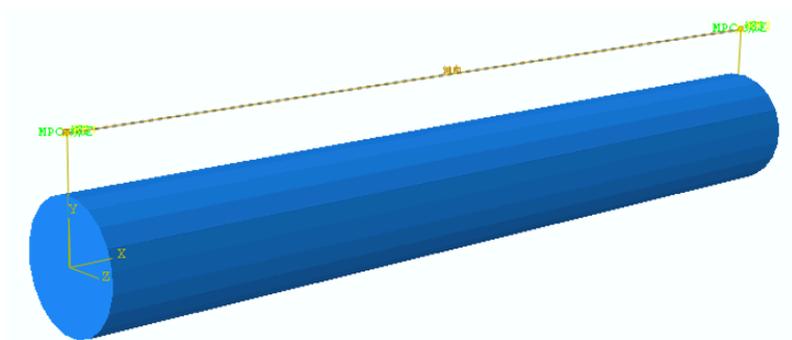


图1 SCBRB有限元模型

## 2.2. 支撑本构模型

耗能系统的耗能能力与屈服段的轴向拉压有关 [15]，可采用桁架单元T3D2模拟，其本构模型如图2所示。

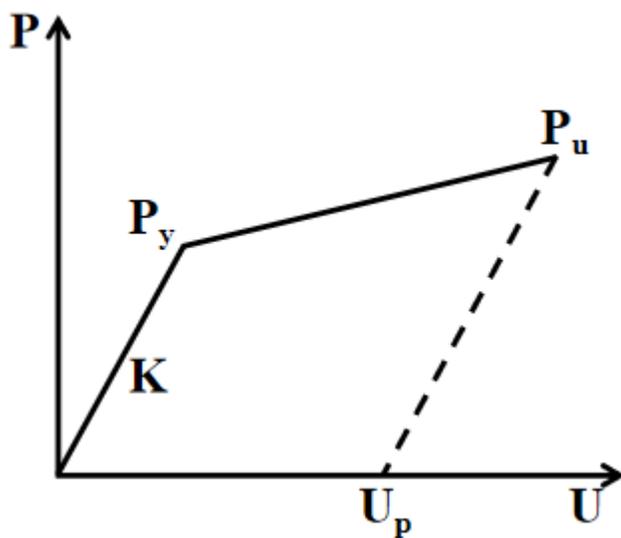


图2 耗能系统的双线性模型

支撑中复位装置的复位能力与复位材料的弹性变形相关，有限元软件模拟时使用ConnSect连接器实现复位能力，其本构模型如图3所示。

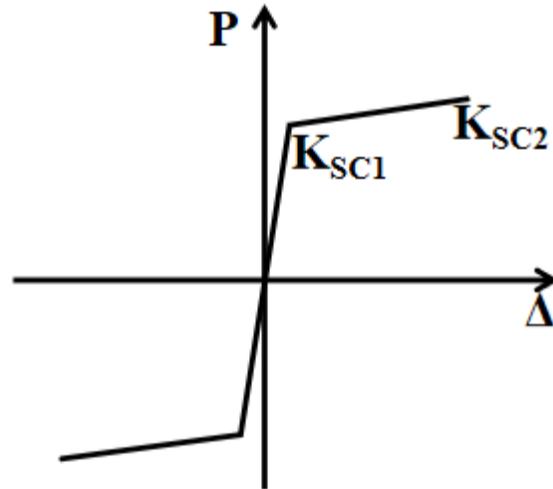


图3 复位系统的双线性弹性模型

### 2.3. 滑移节点板有限元模型

为了简化建模，还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。考虑到滑移节点中受高强螺栓约束的钢板会相互挤压，但高强螺栓预紧力与钢板之间的实际摩擦系数不能使钢板之间的刚性连接形成一个整体。在荷载作用下，钢板之间存在一定的相对切向位移或法向间隙。通过设置接触关系（法向硬接触可分离，并使用切向惩罚函数模拟摩擦行为），法向接触行为（法向硬接触可分离）可用于模拟实际板之间的相互作用，以及由于板的弯曲变形和螺栓的轴向变形导致的板之间的正常间隙，而切向罚函数（被认为符合库仑摩擦准则）可以用来模拟板间切向力的传递以及切向相对位移超过摩擦承载力的行为。

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。滑移节点子框架有限元模型如图4所示。

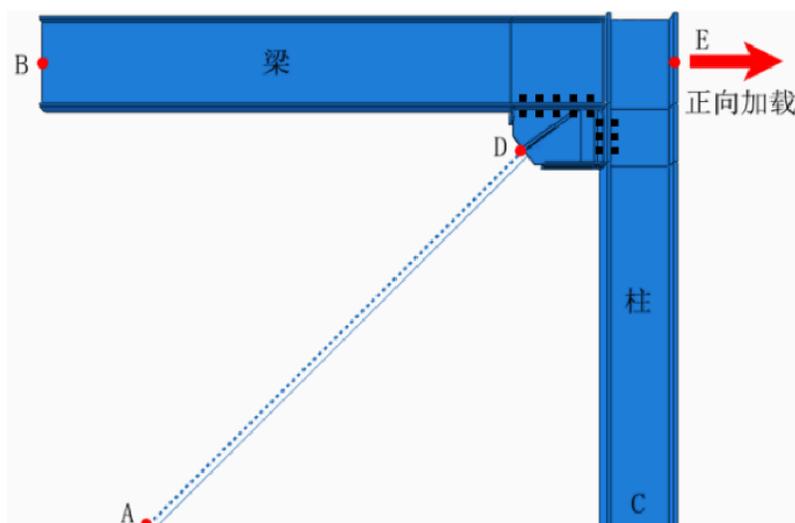


图4 滑移节点子框架有限元模型

## 2.4. 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。

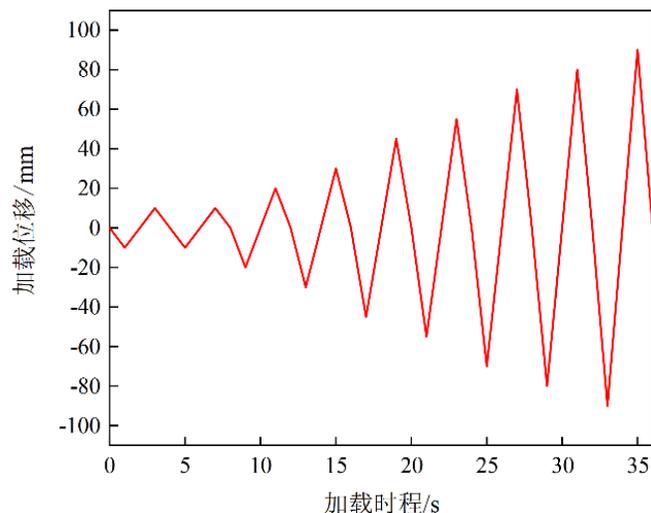


图5 加载制度

## 3. 支撑自复位能力对滑移节点钢框架受力性能影响分析

### 3.1. 支撑滞回性能分析

当支撑复位率  $\alpha = 0$  时，支撑只有耗能系统工作，此时支撑相当于BRB。滑移节点的最大承载力为753.92kN，随着支撑受压卸载，结构最大层间位移角为1.643%。对支撑加载，内外管开始相对运动，复位系统被激活。当支撑复位率  $\alpha = 0.5$  时，滑移节点的最大承载力为1643.87kN，支撑受压卸载，承载力急剧下降。当支撑承载力下降至0时，结构最大层间位移角为0.815%。当支撑的复位性能发挥到最大，复位率  $\alpha = 1.0$  时，支撑仅由碟簧提供承载力。滑移节点的最大承载力为2266.12kN，随着支撑受压卸载，结构最大层间位移角为0.397%。均小于规范中钢结构的弹性限值0.4%，支撑的复位能力得以充分发挥。

### 3.2. 钢框架受力性能分析

支撑复位率  $\alpha = 0$  时，支撑的复位装置尚未被激活。支撑受力，耗能系统的屈服段发挥其耗能性能，此时支撑状态为BRB。滑移节点的钢框架最大应力为326.1MPa，塑性损伤主要集中在梁翼缘，并在与柱连接处的节点域出现了应力最大值。 $\alpha = 0.5$  时，随着支撑复位率的增加，复位系统开始启动，滑移节点的钢框架最大应力值为350.2MPa，梁侧塑性损伤集中在与柱相连接的梁翼缘处，并且柱的应力集中主要在螺栓处。当支撑复位率  $\alpha = 1.0$  时，支撑的复位能力达到最大，此时支撑处于完全复位状态，滑移节点的钢框架最大应力值为376.5MPa，柱侧螺栓处的塑性损伤向外扩移，梁侧和柱侧的塑性损伤范围逐渐扩大。

### 3.3. 节点板受力性能分析

当  $\alpha = 0$  时，此时支撑耗能系统发挥作用，支撑复位系统不工作，滑移节点板的应力最大值为322MPa。节点板应力值减小，节点板-梁柱两侧连接面的塑性损伤向节点板中间移动，应力损伤分布较为均匀，更好均衡了节点板的受力状态。 $\alpha = 0.5$  时，滑移节点板的应力最大值为341MPa。节点板与梁柱相连接处无屈服，其屈服位置出现在远离节点域的节点板端部处。支撑复位率  $\alpha = 1.0$  时，支撑处于最大复位状态，滑移节点板的应力最大值为361MPa，节点板有部分屈服。

## 4. 结论

刚度比相同时,随着复位率的增加,滑移节点的结构最大层间位移角逐渐减小至0.395%,小于规范中钢结构的弹性限值0.4%,支撑的复位能力得以充分发挥。框架的塑性损伤也随着支撑复位率的增加而增大,因此支撑复位能力对框架的影响不可忽略。由梁柱节点的应力变化及梁柱翼缘最大应力可知,滑移连接节点可以有效减小钢框架的塑性程度,节点板的屈服面积有明显增加。

## 参考文献

- [1] 汤孟轲. 同轴组装自复位碟簧内置防屈曲支撑滞回性能与设计方法 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [2] 姜子钦, 王同宽, 张文莹, 等. 一种装配式自复位钢支撑结构体系的抗震性能研究 [J]. 钢结构(中英文), 2024, 39(12): 29-37.
- [3] 鲁军凯, 戴首昆, 许国山, 等. 碟簧-钢绞线组合自复位防屈曲支撑滞回性能 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(07): 83-94.
- [4] 张城. 新型碟簧式自复位防屈曲支撑抗震性能研究 [D]. 山东建筑大学, 2024.
- [5] 杨富雄. 预压组合碟簧—自复位全钢型防屈曲支撑滞回性能与参数影响分析 [D]. 北京交通大学, 2024.
- [6] 陈凌秀, 祁皑, 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.
- [7] 齐欣. 节点板式连接对H形支撑面外稳定性能的影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [8] 许肖卓. 考虑节点板实际受力的延性中心支撑框架抗震性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [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] 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.
- [11] 江浩, 徐龙河. 自复位耗能支撑滞回特性及钢框架抗震性能分析 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版). 2021, 54(3): 237-244.
- [12] Xu L, Fan X, Li Z. Hysteretic Analysis Model for Pre-Pressed Spring Self-Centering Energy Dissipation Braces [J]. Journal of Structural Engineering. 2018, 144(7): 4018073.
- [13] 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.
- [14] 刘璐, 吴斌, 李伟, 等. 自复位防屈曲支撑结构动力位移反应的关键参数 [J]. 工程力学. 2016, 33(1): 188-194.
- [15] 张群杰. 基于 ABAQUS 二次开发的框架及框架—支撑结构优化研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.