

基于自复位双肢剪切型耗能段的 中心支撑结构抗震性能研究

江文明¹, 曾思智², 常丽青³, 邵铁峰³, 胡淑军³

(1. 中国电建集团江西省电力设计院有限公司, 江西 南昌 330096; 2. 江西中煤建设集团有限公司, 江西 南昌 330001;
3. 南昌大学 工程建设学院, 江西 南昌 330031)

摘要:提出一种用于中心支撑结构中钢支撑与支撑连接板之间的自复位双肢剪切型耗能段, 包括自双肢短剪切型耗能段、形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)棒材和碟形弹簧。采用校正的有限元法对自复位双肢剪切型耗能段进行研究, 得到其滞回性能和破坏模式。随后开展带普通支撑、带双肢短剪切型耗能段、带自复位双肢剪切型耗能段的中心支撑结构抗震性能研究。结果表明:自复位双肢剪切型耗能段具有良好的承载能力和较小的残余变形, 拉力下 SMA 棒材受拉且碟形弹簧静止, 压力下 SMA 棒材静止且碟形弹簧受压, 并使构件在拉、压作用下承载力基本相等。多遇地震下, 各结构中所有构件均处于弹性, 抗震性能基本相同; 罕遇地震下, 普通钢支撑发生严重屈曲; 双肢短剪切型耗能段表现出良好的承载力和变形能力, 钢支撑始终处于弹性, 且带自复位双肢剪切型耗能段的中心支撑结构残余变形明显下降, 具有良好的抗震性能和震后功能恢复能力。

关键词:中心支撑结构; 自复位双肢剪切型耗能段; SMA 棒材; 碟形弹簧; 抗震性能

中图分类号: TU391; P315.9

文献标志码: A

Seismic performance analysis of concentrically brace frame with an innovative self-centering shear link

JIANG Wenming¹, ZENG Sizhi², CHANG Liqing³, SHAO Tiefeng³, HU Shujun³

(1. Power China Jiangxi Electric Power Engineering Co., Ltd., Nanchang 330096, China; 2. Zhongmei Engineering Group Co., Ltd., Nanchang 330001, China; 3. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: In this paper, an innovative self-centering coupled shear link (SC-CSL) used between the steel brace and brace connection plate in the concentrically brace steel frame (CBF) is developed by combining the coupled shear link (CSL), shape memory alloy (SMA) bars and disc springs. Firstly, the hysteresis performance and failure mode of the SC-CSL are analyzed using the validated finite element method. Then, the seismic performances of CBF with a steel brace, CSL and SC-CSL are analyzed. Numerical results show that the innovative SC-CSL has excellent bearing capacity and low residual deformation. The SMA bars mainly sustain tension while the disc springs static under tension force, and the disc springs sustain compression while the SMA bars are static under compression force. The tension and compression forces of the SC-CSL can be almost equivalent with reasonable SMA bars and disc springs. In addition, the seismic performances of CBF, CBF-CSL and CBF-SC-CSL are almost the same, and no yielding or damage occurs to the steel beams, steel columns and steel braces during frequent earthquakes. The steel brace in the CBF has a severe buckling phenomenon. The CBFs with an elastic steel brace can have excellent bear capacity and deformation capacity. The residual deformation of CBF-SC-CSL visibly decreases during rare earthquakes, which shows good seismic performance and seismic resilience capacity.

收稿日期:2024-03-04; 修回日期:2024-06-25

基金项目:国家自然科学基金项目(52468025);江西省自然科学基金项目(20224BAB204062)

作者简介:江文明(1984—),男,高级工程师,硕士,主要从事自复位结构研究。E-mail:262497789@qq.com

通信作者:胡淑军(1985—),男,副教授,博士,主要从事可恢复功能结构体系研究。E-mail:hushujun@ncu.edu.cn

Key words: concentrically brace steel frame (CBF); self-centering coupled shear link (SC-CSL); SMA bar; disc spring; seismic performance

0 引言

可恢复功能结构可以利用自复位机制有效减小构件及相应结构因非弹性变形产生的残余变形,进而提高相应结构的抗震性能和震后功能恢复能力^[1-3]。中心支撑结构是一种抗侧刚度大、构造简单、成本较低的结构体系,可用于高层建筑结构中^[4-6]。然而,地震作用下,钢支撑承受往复荷载时容易发生受压屈曲现象,进而降低结构的刚度和承载力^[7-8]。例如,崔瑶等^[7]研究了不同梁柱节点构造形式对中心支撑结构抗震性能的影响,指出节点合理构造会使支撑发生预期受压屈曲破坏,并产生较大震后残余变形;董志骞等^[8]研究指出,双重抗侧力体系中心支撑结构钢支撑失效后,结构抗侧刚度、承载能力和抗震性能明显下降。

采用屈曲约束支撑^[9]和自复位支撑^[10]等取代普通钢支撑,可有效提高支撑受压屈曲能力和减小其残余变形,进而改善中心支撑结构的抗震性能和震后功能恢复能力,但这类构件通常构造复杂、成本较高。基于偏心支撑结构中长度比小于1.0的短剪切型耗能段(very short shear link, VSSL)良好抗侧刚度和承载能力等优点^[11-12],可将其拼接成左、右两肢并形成一种双肢短剪切型耗能段(coupled shear link, CSL),并用于中心支撑结构的钢支撑与梁柱节点之间,具有构造简单、施工方便、耗能能力强、刚度大且承载力高等特点^[13-14]。GHAMARI等^[13]在中心支撑结构中钢支撑一端设置双肢工字型耗能段,可有效提高支撑的承载力和受压屈曲能力,保护支撑不发生破坏;常丽青^[14]提出的双肢短剪切型耗能段可防止支撑受压屈曲和提高支撑耗能能力,但构件的残余变形较大。

形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)具有良好的超弹性、耗能能力和复位性能,可有效减小相应构件的残余变形^[15]。例如,胡淑军等^[16]设计的自复位SMA支撑可使其在拉、压下SMA始终受拉,且具有良好的复位和耗能效果;SUN等^[17]提出的自复位SMA钢支撑,在往复荷载下具有耗能能力强和残余位移小等特点,且SMA始终提供耗能与复位能力。另外,碟形弹簧是一种高强度金属弹簧,在压力作用下弹性复位性能好且始终保持弹性^[18-19]。陈云等^[18]利用复合组合碟形弹簧的弹性恢复力实现了钢结构柱脚在强震作用下的可控摇摆;王宇航等^[19]提出基于碟形弹簧的梁柱连接,可有效降低框架结构的震后残余变形和震后维护成本。

本文首先提出包括双肢短剪切型耗能段、SMA棒材和碟形弹簧的自复位双肢剪切型耗能段(self-centering coupled shear link, SC-CSL)^[20],并用于钢支撑与支撑连接板之间,得到基于自复位双肢剪切型耗能段的中心支撑结构(简称:自复位中心支撑结构)。采用校正的有限元法研究双肢短剪切型耗能段和自复位双肢剪切型耗能段的力学性能,并分别建立带普通支撑、带双肢短剪切型耗能段、带自复位双肢剪切型耗能段的中心支撑结构分析模型,由此研究各结构在多遇和罕遇地震下的抗震性能,以及明确自复位中心支撑结构是否与抗震设防目标相一致,为提高中心支撑结构的抗震性能和震后功能恢复能力提供新的方法和路径。

1 基本性能

1.1 基本组成

自复位中心支撑结构主要包括钢柱、钢梁、钢支撑、自复位双肢剪切型耗能段和支撑连接板,见图1。钢支撑一端通过支撑连接板与梁柱节点之间铰接连接,另一端与自复位双肢剪切型耗能段连接铰接连接。自复位双肢剪切型耗能段主要包括双肢短剪切型耗能段、4根SMA棒材和4个碟形弹簧。双肢短剪切型耗能段包括支撑端板、左端板和右端板、2块上翼缘和2块下翼缘、2块腹板,形成左、右2个短剪切型耗能段。SMA棒材对称设置在中间连接板两侧的短剪切型耗能段腹板两侧,且每根SMA棒材位于上翼缘与支撑端板间;每个碟形弹簧设置在下翼缘与支撑端板间,并套在SMA棒材上。

1.2 工作原理

地震作用下,自复位中心支撑结构在拉力、推力共同作用下使得支撑承载拉、压力作用,见图1。自复位双肢剪切型耗能段承受由钢支撑传递至中间连接板的往复荷载作用。拉力作用下,中间连接板带动双肢剪切型耗能段和SMA棒材受拉,SMA提供复位力且碟形弹簧静止,见图1(d)。压力作用下,中间连接板带动

双肢短剪切型耗能段和碟形弹簧受压,碟形弹簧提供复位力且 SMA 棒材静止,见图 1(e)。当钢柱、钢梁和钢支撑设计合理时,可使构件损伤仅发生在双肢短剪切型耗能段上,且具有足够的耗能能力和复位能力,具有承载能力强、构件损伤小、残余变形小和装配效率高等特点。

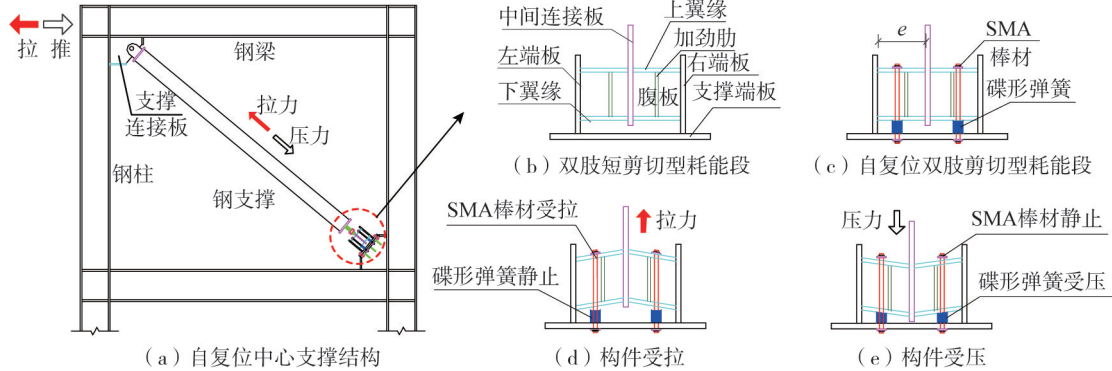


图 1 基于自复位双肢剪切型耗能段的中心支撑结构

Fig. 1 An innovative concentrically brace steel frame with self-centering coupled shear link

1.3 设计方法

双肢短剪切型耗能段中,单个短剪切型耗能段塑性剪力 V_p 、极限承载力 V_{ul} 可表示为^[14]

$$\begin{cases} V_p = f_{yw} h_w t_w \\ V_{ul} = 0.58 f_{uw} t_w h_w + f_{uf} b_f t_f^2 / e + f_{us} b_s t_s^2 / 4e \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{yw} 为腹板屈服剪应力; f_{uw} 、 f_{uf} 、 f_{us} 分别为腹板、翼缘、加劲肋的极限应力; h_w 、 t_w 分别为腹板高度、厚度; b_f 、 t_f 分别为翼缘宽度、厚度; e 、 t_s 、 b_s 分别为耗能段长度、加劲肋厚度和加劲肋宽度。

单根 SMA 棒材-碟形弹簧的最大拉、压承载力 V_{SMA} 、 V_{disc} 为^[14,19]

$$\begin{cases} V_{SMA} = \sigma_f^{AM} A_{SMA} \\ V_{disc} = k_{disc} d_{max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_f^{AM} 、 A_{SMA} 分别为 SMA 马氏体相变结束应力、面积; k_{disc} 、 d_{max} 分别为碟形弹簧刚度、最大位移。

自复位双肢剪切耗能段的受拉极限承载力 V_{uT} 、受压极限承载力 V_{uP} 可分别表示为

$$\begin{cases} V_{uT} = 2 \times V_{ul} + 4 \times V_{SMA} \\ V_{uP} = 2 \times V_{ul} + 4 \times V_{disc} \end{cases} \quad (3)$$

自复位双肢剪切耗能段的超强系数 Ω 可表示为

$$\Omega = \max(V_{u1}, V_{u2}) / V_p \quad (4)$$

钢支撑的受压承载力 N_b 应满足式(5)要求^[21]:

$$\Omega N_b / (\varphi A_b) \leq \psi f / \gamma_{RE} \quad (5)$$

式中: φ 、 A_b 、 ψ 、 f 、 γ_{RE} 分别为支撑稳定系数、面积、循环荷载系数、强度设计值和抗震调整系数; V_{u1} 和 V_{u2} 分别为双肢短剪切型耗能段中单个短剪切型耗能段极限承载力。

另外,中心支撑结构中钢梁与钢柱设计时,也需结合自复位双肢剪切型耗能段超强系数 Ω 进行设计。

2 自复位双肢剪切型耗能段的力学性能

2.1 分析模型

2.1.1 模型描述

在往复荷载下,自复位双肢剪切型耗能段在拉、压极限承载力需基本相等。基于 1.3 节的设计方法,对中间连接板两侧的短剪切型耗能段截面均设计为 H250 mm×125 mm×6 mm×8 mm,长度为 200 mm(长度比为 0.57),且加劲肋设置在距离中间连接板 60 mm 的腹板两侧,厚度为 10 mm。中间连接板、左侧板、右侧板尺寸均为 466 mm×300 mm×30 mm,支撑端板连接板尺寸为 650 mm×350 mm×30 mm。另外,SMA 棒材直径为 18 mm,工作长度为 350 mm;单个碟形弹簧内径为 22.4 mm,外径为 45 mm,厚度为 2.5 mm,整个碟形弹簧刚度为 5 000 N/mm。

2.1.2 分析方法

1) 单元选取。采用 ABAQUS 软件对自复位双肢剪切型耗能段进行分析, 见图 2。其中, 双肢短剪切型耗能段、SMA 棒材均采用 C3D8R 单元进行模拟, 具有 8 个节点, 且每个节点有 3 个自由度等特点。碟形弹簧采用 spring 单元模型^[18]。由于软件中未自带 SMA 的超弹性模型, 故采用 Umat 子程序编制相应程序后嵌入软件中。

2) 材料性能。双肢短剪切型耗能段中, 6 mm 腹板、8 mm 翼缘、10 mm 加劲肋、30 mm 厚其他板的屈服强度分别为 356、361、368、345 MPa, 抗拉强度分别为 535、547、552、540 MPa, 弹性模量分别为 203、206、208、206 GPa。在 SMA 棒材中, 马氏体相变开始应力 σ_s^{AM} 、马氏体相变结束应力 σ_f^{AM} 、马氏体逆相变开始应力 σ_s^{MA} 、马氏体逆相变结束应力 σ_f^{MA} 分别为 450、630、265、125 MPa, 马氏体相变结束应变 ε_L 、初始弹性模量 E_A 分别为 0.06、49 000 Pa^[16]。

3) 边界条件与加载方式。有限元模型中, 约束支撑端板底部截面各节点所有方向位移, 以及中间连接板 A 端截面 X、Y 方向位移, 仅允许 A 端 Z 方向往复变形。SMA 棒材两端分别与双肢短剪切型耗能段的上翼缘、支撑端板之间采用摩擦接触, 且摩擦系数 0.3^[15]。另外, 采用位移加载方式在 A 截面 Z 方向施加往复荷载, 各加载步位移值为 SMA 棒材长度乘以 SMA 的应变值 0.5%、1%、2%、3%、4%、5%、... 逐渐增大, 直至构件发生破坏。

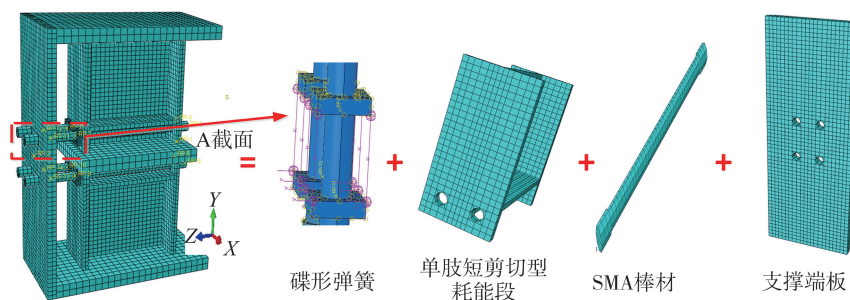


图 2 自复位双肢剪切型耗能段的有限元分析模型

Fig. 2 Finite element analysis model of self-centering coupled shear link

2.2 模型校正

2.2.1 短剪切型耗能段

1) 分析方法

选取课题组前期的短剪切型耗能段试件 VSSL-1^[22] 进行有限元分析校正。截面尺寸为 H210 mm × 110 mm × 6 mm × 8 mm, 长度为 300 mm; 沿腹板对称的加劲肋间距和厚度分别为 100 mm 和 10 mm。不同厚度板件材料性能如 2.1.1 节所述。选取 ABAQUS 软件中的 C3D8R 单元进行建模分析, 见图 3(a)。约束耗能段下端截面各方向的位移和上端 Z 方向的位移, 上端 X、Y 方向位移均分别相等。同时, 沿耗能段上端 X 方向施加水平往复位移时, 各加载步位移值按构件屈服位移 Δ_y 倍数逐渐加载, 直至耗能段发生破坏后停止。

2) 分析结果

破坏模式。试件 VSSL-1 的试验与有限元破坏模式对比见图 3(b)、(c)。极限状态下, 有限元中翼缘与端板连接处应力最大, 与试验中翼缘与端板断裂相同, 即说明有两者的破坏模式基本相同。

滞回曲线。试件 VSSL-1 滞回曲线对比见图 3(d)。有限元和试验所得最大塑性转角和位移均为 0.15 rad 和 45 mm, 所得极限剪力分别为 443.24、445.09 kN, 两者无明显差异, 即可用于相应耗能段的分析中。

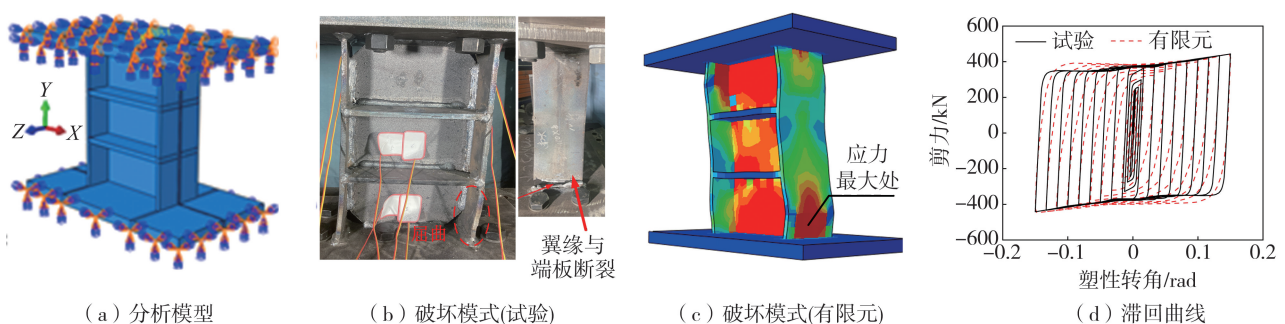


图 3 自复位双肢剪切型耗能段的分析模型与分析结果

Fig. 3 Analysis model and results for specimen VSSL-1

2.2.2 SMA 棒材-碟形弹簧

1) SMA 棒材

李鹏程^[23]对 SMA 棒材试件 10/6-450-30 进行了研究。该 SMA 棒材中间直径为 6 mm,两端直径为 10 mm,热处理温度、时间分别为 450 °C、30 min。有限元模型见图 4(a),约束棒材一端截面上各节点的位移和转动,在另一端沿棒材长度方向施加应变幅值,各加载步的应变幅值如 2.1.2 所述。

该试件的试验及有限元滞回曲线对比图见图 4(b)。各加载步中,2 种曲线的应力和刚度基本相等,且在 5%应变下试验和有限元的应力值分别为 593.32、578.58 MPa,误差仅为 2.32%。

2) 碟形弹簧

陈云等^[18]分析的碟形弹簧外径、内径和厚度分别是 200、102、12 mm,弹簧刚度值为 1 374 N/mm。模型包括上、下连接板、导杆和碟形弹簧见图 4(c)。2 块连接板设置在导杆上,且弹簧单元设置在上、下连接板 4 个角点上。导杆一端各节点位移被约束,仅另一端沿导杆长度方向允许变形。

试验与有限元分析所得力-位移曲线,两者整体拟合较好且误差较小,均呈线性增长趋势,即该有限元法可用于模拟碟形弹簧的力学性能,见图 4(d)。

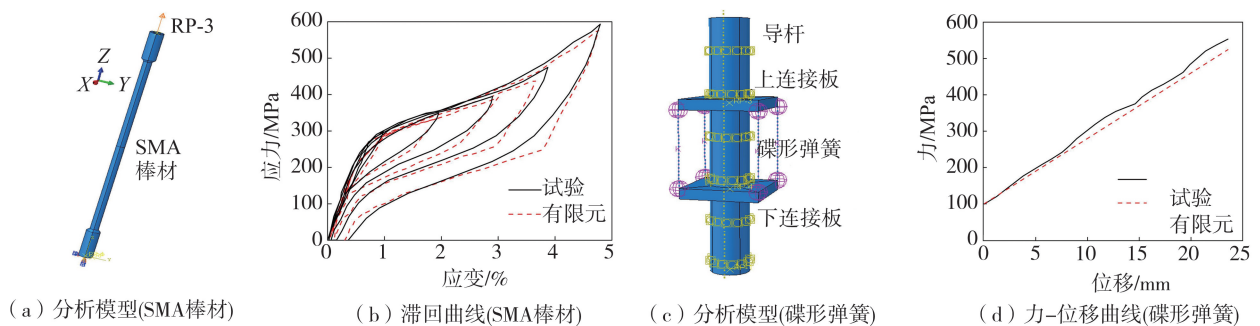


图 4 SMA 棒材-碟形弹簧的分析模型与分析结果

Fig. 4 Analysis model and results of SMA bar-disc springs

2.3 力学性能

2.3.1 滞回曲线

自复位双肢剪切型耗能段 SC-CSL 和双肢短剪切型耗能段 CSL 的滞回曲线对比,见图 5。其中,模型 SC-CSL 曲线较为捏缩,模型 CSL 曲线更为饱满。极限荷载下,SC-CSL 的最大受拉、受压荷载分别为 1 312.53、1 358.71 kN,所对应超强系数值分别为 4.52、4.68,即合理设置 SMA 棒材和碟形弹簧可使承载力相近且明显高于 CSL 对应值;拉、压下的刚度和滞回面积均有所不同,这主要是 SMA 棒材和碟形弹簧力学性能差异所引起的。模型 SC-CSL、CSL 的受压残余塑性转角值分别为 0.074、0.139,降幅为 46.8%。

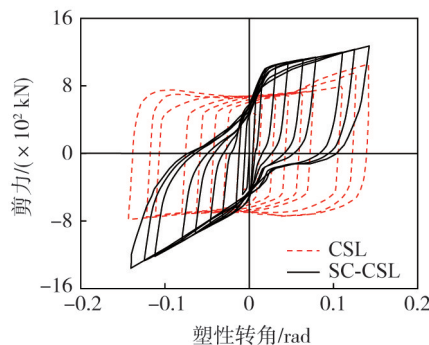


图 5 双肢短剪切型耗能段和自复位双肢剪切型耗能段的滞回曲线

Fig. 5 Hysteresis curves of coupled shear link and self-centering coupled shear link

2.3.2 破坏模式

往复荷载下,模型 SC-CSL 和模型 CSL 的破坏模式见图 6。整个加载过程中,模型 CSL 中的短剪切型耗能段绕中间连接板和左、右端板间达到极限应力值 540.00 MPa,并发生明显的非弹性变形。拉力作用下,模型 SC-CSL 中 SMA 棒材受拉且碟形弹簧静止,SMA 应力为 623.30 MPa,接近应力最大值;压力作用下,SMA 棒材静止且碟形弹簧受压,双肢短剪切型耗能段始终发生非弹性变形和耗能,与预期自复位双肢剪切型耗能段的变形模式相同。

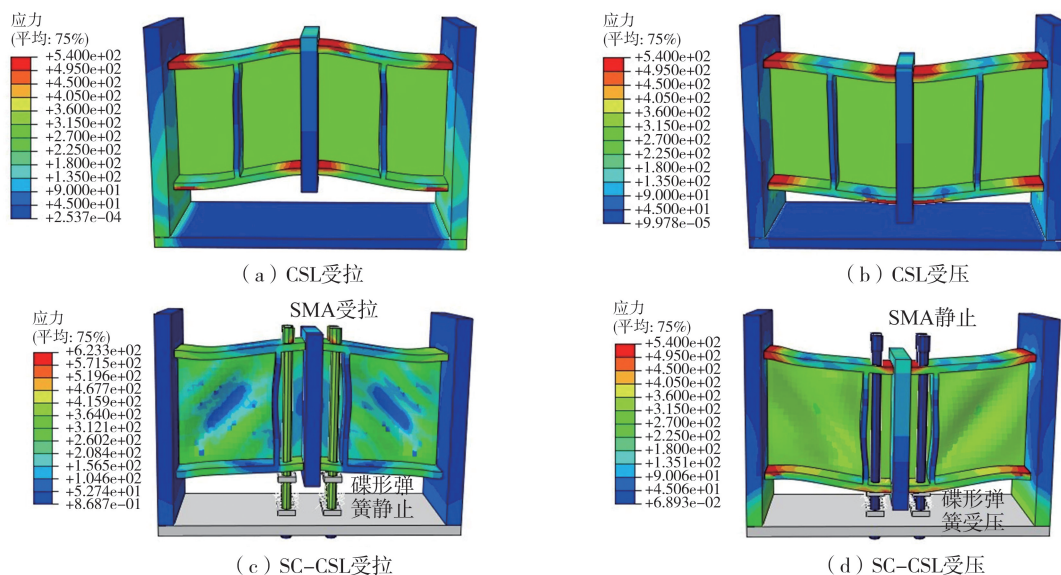


图 6 双肢短剪切型耗能段和自复位双肢剪切型耗能段的破坏模式

Fig. 6 Failure modes of coupled shear link and self-centering coupled shear link

3 自复位中心支撑结构的抗震性能

3.1 分析模型

3.1.1 模型建立

分别设计带普通支撑的中心支撑结构 (concentrically brace steel frame, CBF)、带双肢短剪切型耗能段的中心支撑结构 (concentrically brace steel frame with coupled shear link, CBF-CSL)、带自复位双肢剪切型耗能段的中心支撑结构 (concentrically brace steel frame with self-centering coupled shear link, CBF-SC-CSL), 以研究各结构的抗震性能。各结构的钢柱高均为 2700 mm, 钢梁长度均为 2700 mm, 见图 6。基于 2.3 节设计方法, 可得到各结构中钢柱截面均为 H200 mm×200 mm×8 mm×10 mm, 钢梁截面均为 H250 mm×150 mm×6 mm×8 mm, 钢支撑截面均为 $\Phi 150 \times 8$; CBF-CSL 中的双肢短剪切型耗能段、CBF-SC-CSL 中的自复位双肢剪切型耗能段截面如 2.1.1 节所述。

3.1.2 分析方法

1) 单元选取。采用 ABAQUS 软件各结构进行有限元分析, 见图 7。除 CBF-SC-CSL 结构中的碟形弹簧采用 spring 单元模型外, 其他结构及构件均采用 C3D8R 单元模拟。

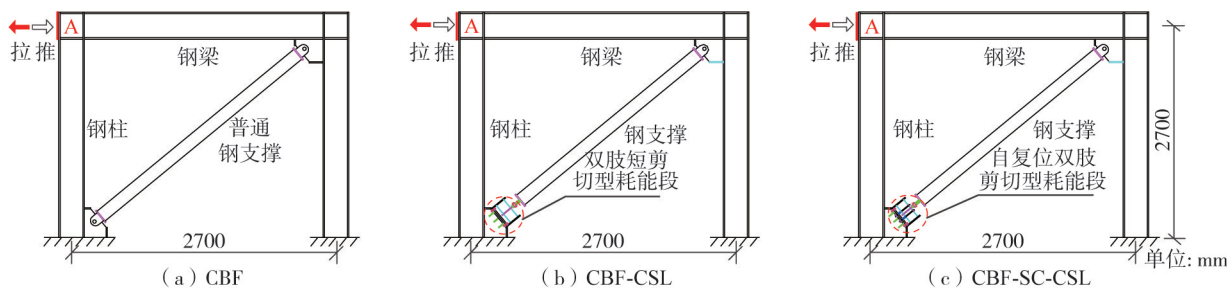


图 7 CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 的分析模型

Fig. 7 Analysis models of CBF, CBF-CSL and CBF-SC-CSL

2) 材料性能。双肢短剪切型耗能段、SMA 棒材和碟形弹簧的材料属性如 2.1.2 节所述。钢梁、钢柱、钢支撑均采用 Q355 钢, 8 mm 厚、10 mm 厚钢材的属性也如 2.1.2 节所述, 14 mm 厚钢材的屈服强度、抗拉强度和弹簧模量分别为 358、539、205 GPa。

3) 边界条件与加载方式。有限元模型中, 约束各结构钢柱底部截面所有节点的 3 个方向位移, 同时各结构的平面外均被约束, 并将梁柱交接处左侧截面耦合至点 A, 见图 7。通过在 A 点施加水平往复荷载, 可模拟结构的地震作用。各加载步位移为 SMA 棒材应变增量转换至水平方向位移值。

3.2 滞回性能

3.2.1 多遇地震

多遇地震下, CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 的滞回曲线对比见图 8(a)。CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 结构最大承载力分别为 1183、507、683 kN, 耗能值分别为 5193.2、10105.2、8966.4 J。多遇地震下, CBF 结构中的支撑的刚度明显大于 CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 结构中的双肢短剪切型耗能段和自复位双肢剪切型耗能段刚度, 使得 CBF 结构承载力最大。由于钢支撑耗能能力弱, 使得 CBF 耗能值最小; CBF-SC-CSL 中的 SMA 棒材和碟形弹簧提供复位能力, 使其耗能值略小于 CBF-CSL 耗能值。另外, 由于碟形弹簧的初始刚度弱于 SMA 棒材的初始刚度值, 使得受压时碟形弹簧的承载力和复位能力较弱, 但拉力时 SMA 棒材为 CBF-SC-CSL 提供了良好的复位能力和承载能力。

3.2.2 罕遇地震

罕遇地震下, CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 的滞回曲线对比见图 8(b)。CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 的最大承载力分别为 1346、1043、1330 kN, 耗能值分别为 56.87、113.49、79.75 kJ。其中, CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 结构的滞回曲线饱满且拉、压作用下受力平衡, 但 CBF 结构支撑受压屈曲使其受压承载力明显降低。另外, CBF 中支撑受压屈曲严重影响其耗能能力, 且由于 SMA 棒材和碟形弹簧的复位力使得 CBF-SC-CSL 曲线更捏缩, 使其耗能值小于 CBF-CSL 耗能值。CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 的残余变形分别为 43.04、19.55 mm, 即 SMA 棒材和碟形弹簧可明显减小结构的残余变形。

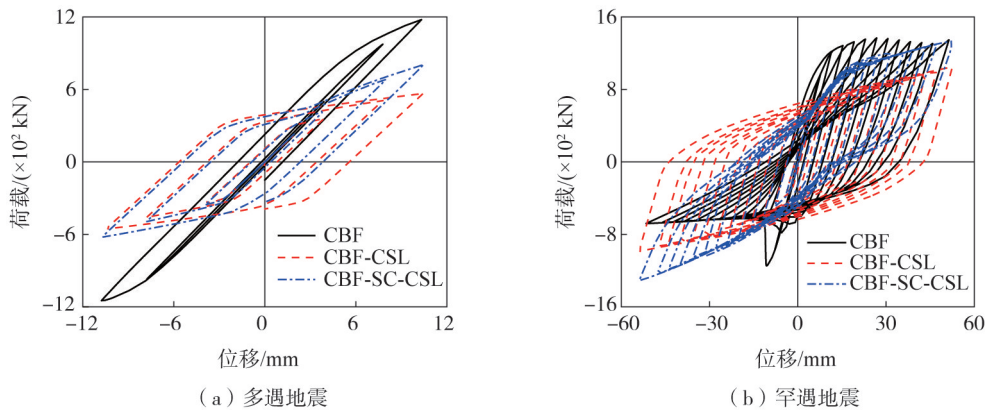


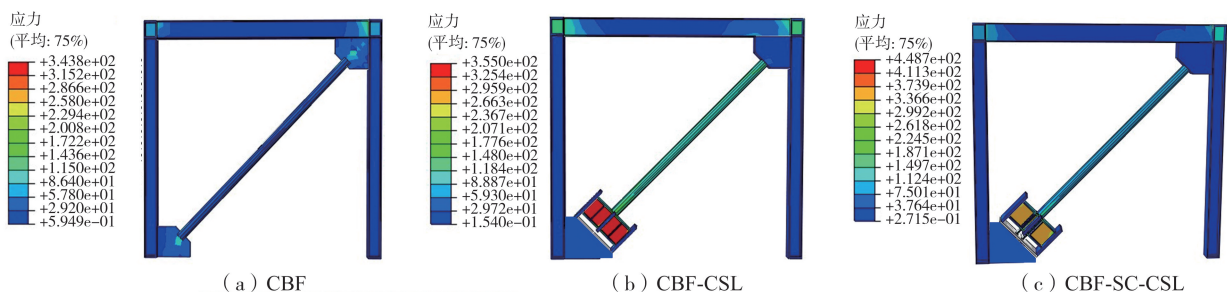
图 8 不同地震下 CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 的滞回曲线对比

Fig. 8 Hysteresis curves of CBF、CBF-CSL and CBF-SC-CSL under different earthquakes

3.3 抗震性能

3.3.1 多遇地震

多遇地震下, CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 的应力对比见图 9。当各结构达到预期位移 10.8 mm 时^[24], CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 中最大应力分别为 343.80、355.00、448.70 MPa。其中, 各结构中主体框架的应力分布基本相同; 相应支撑的最大应力分别为 168.30、199.40、188.70 MPa, 均处于弹性状态且应力差异较小; 支撑伸长量分别为 2.6、1.6、1.4 mm, 即 CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 中双肢短剪切型耗能段和自复位双肢剪切型耗能段均发生了变形, 使得相应支撑变形量减小。CBF-CSL 中, 双肢短剪切型耗能段腹板最大应力为 355.00 MPa, 小于腹板屈服值; CBF-SC-CSL 中, 自复位双肢剪切型耗能段中 SMA 棒材最大应力为 448.70 MPa, 腹板应力约为 352.52 MPa, 均小于弹性屈服值。因此, 3 种结构中各构件均处于弹性, 与预期相符。



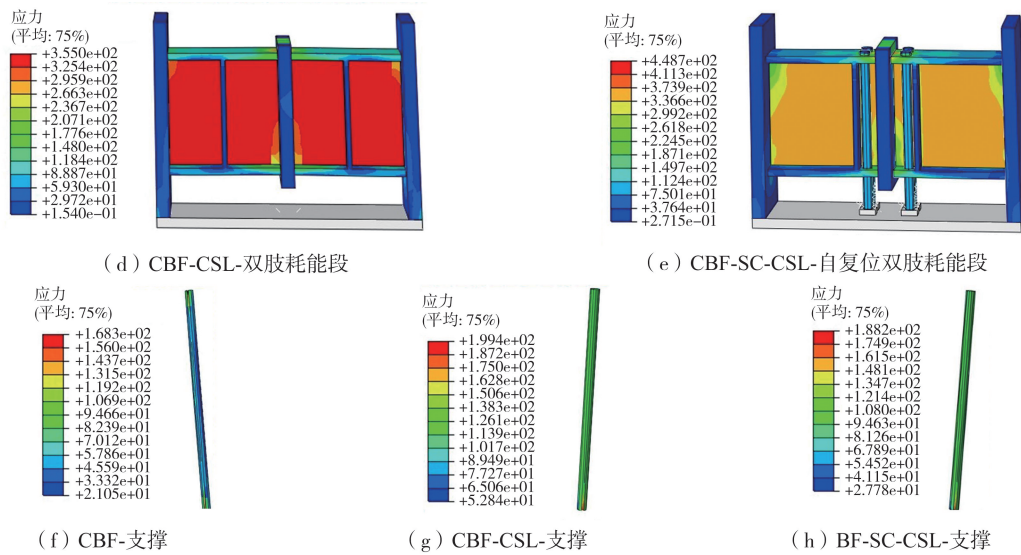


图 9 多遇地震下 CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 的抗震性能对比

Fig. 9 Hysteresis curves of CBF, CBF-CSL and CBF-SC-CSL under frequent earthquakes

3.3.2 罕遇地震

罕遇地震下, CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 的应力对比见图 10。当各结构达到预期位移 54 mm 时^[24], CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 中各框架应力分布基本相同, 最大应力均为 402.53、450.30、470.50 MPa, 均超过屈服值并进入弹塑性状态; 相应支撑的最大应力分别为 540.00、267.90、288.70 MPa, 最大伸长量分别为 7.1、2.3、1.8 mm, 表明 CBF 中钢支撑已达到极限应力值且发生严重屈曲, CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 中双肢耗能段均发生较大变形, 保护支撑处于弹性且不发生受压屈曲现象与预期相符。另外, CBF-CSL 中, 双肢短剪切型耗能段翼缘与左端板、右端板和中间连接板的连接处最大应力为 540 MPa, 即连接处已达到极限应力并产生塑性铰。CBF-SC-CSL 中, SMA 棒材最大应力为 626.70 MPa; 自复位双肢剪切型耗能段翼缘与中间端板连接处最大应力为 540.00 MPa, 但其他部位应力较小, 表明 SMA 棒材与碟形弹簧的设置可有效减小双肢短剪切型耗能段的损伤区域, 进而提高构件的震后功能恢复能力。

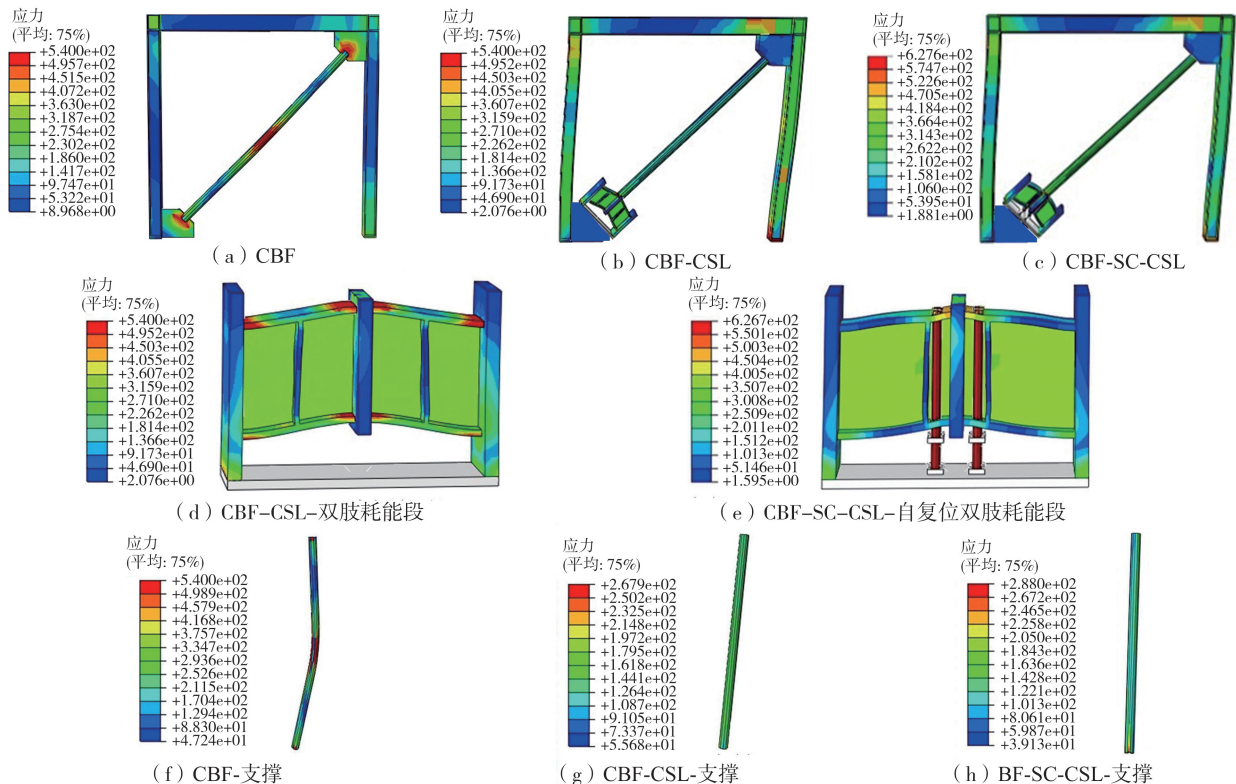


图 10 罕遇地震下 CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 的抗震性能对比

Fig. 10 Hysteresis curves of CBF, CBF-CSL and CBF-SC-CSL under rare earthquakes

3.4 参数对比

多遇、罕遇地震下 CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 各主要构件的位移、应力和承载力值分别见表 1~表 3。由表 1 可知,多遇地震下,3 种结构的主要框架和支撑的变形和应力基本相同,但双肢短剪切型耗能段和自复位双肢剪切型耗能段的设置使用得 CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 的整体刚度下降,进而减小结构的受剪承载力。罕遇地震下,各结构的主体框架应力基本相同,但 CBF 中的普通支撑已发生严重屈曲并达到极限承载力,CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 中钢支撑均处于弹性且未发生屈曲。另外,自复位双肢剪切型耗能段中的双肢短剪切型耗能段的应力和损伤明显降低,使得整体过程中结构的抗侧刚度未有明显下降,且能有效提高结构的震后功能恢复能力。

表 1 不同地震作用下 CBF 的主要参数对比

Table 1 Comparison of main parameters of CBF under different earthquake actions

CBF	结构位移/mm	支撑位移/mm	框架应力/MPa	支撑应力/MPa	极限剪力/kN
多遇地震	10.80	2.60	343.80	196.10	1 183
罕遇地震	54.00	7.10	402.53	534.00	1 346

表 2 不同地震作用下 CBF-CSL 的主要参数对比

Table 2 Comparison of main parameters of CBF-CSL under different earthquake actions

CBF-CSL	结构位移/mm	支撑位移/mm	耗能段位移/mm	框架应力/MPa	支撑应力/MPa	耗能段应力/MPa	极限剪力/kN
多遇地震	10.80	1.60	7.60	222.35	140.88	355.00	507
罕遇地震	54.00	2.30	38.00	450.30	198.00	540.00	1 043

表 3 不同地震作用下 CBF-SC-CSL 的主要参数对比

Table 3 Comparison of main parameters of CBF-SC-CSL under different earthquake actions

CBF-SC-CSL	结构位移/mm	支撑位移/mm	耗能段位移/mm	SMA 位移/mm	框架应力/MPa	支撑应力/MPa	耗能段应力/MPa	SMA 应力/MPa	极限剪力/kN
多遇地震	10.80	1.40	4.56	5.32	213.57	123.51	352.52	448.70	683
罕遇地震	54.00	1.80	38.00	22.80	470.50	158.80	540.00	626.70	1 330

4 结论

1) 自复位双肢剪切型耗能段中的 SMA 棒材和碟形弹簧可有效提高其承载能力和自复位能力,保证构件在拉、压荷载下承载力基本相等,超强系数值可达到 4.68,且残余变形值可下降 46.8%。拉力作用下,自复位双肢剪切型耗能段中的 SMA 棒材受拉且碟形弹簧静止;压力作用下,SMA 棒材静止且碟形弹簧受压,双肢短剪切型耗能段始终发生非弹性变形和耗能,与预期相符。

2) 多遇地震下,钢支撑耗能差使得 CBF 耗能值最小,CBF-SC-CSL 中 SMA 棒材和碟形弹簧提供复位能力,但滞回曲线更捏缩使其耗能值略小于 CBF-CSL 耗能值。各框架、支撑的应力和位移值均无明显差异,且各构件均处于弹性状态,但双肢短剪切型耗能段和自复位双肢剪切型耗能段的设置降低了 CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 结构的抗侧刚度和承载能力。

3) 罕遇地震下,CBF 结构的受压承载力明显降低小于受拉承载力,且耗能能力较差;CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 的滞回曲线饱满且拉、压极限力基本相等。CBF-SC-CSL 的滞回曲线更捏缩,使其耗能值小于 CBF-CSL 耗能值,但两者残余变形分别为 19.55、43.04 mm,即 SMA 棒材和碟形弹簧可明显减小结构的残余变形。

4) 罕遇地震下,CBF、CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 中各框架的主体结构应力无明显差异。CBF 中的支撑已达到极限承载力且发生严重屈曲;CBF-CSL 和 CBF-SC-CSL 中支撑始终处于弹性,且 CBF-CSL 中的双肢短剪切型耗能段发生全截面受剪屈服并耗散输入的能量,CBF-SC-CSL 中设置的 SMA 棒材和碟形弹簧可减小耗能段损伤区域,并提高结构的震后功能恢复能力。

参考文献:

- [1] 叶建峰,刘宪成,颜桂云,等.可恢复功能装配式剪力墙抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2024,44(1):61-72.
YE Jianfeng, LIU Xiancheng, YAN Guiyun, et al. Experimental study on seismic performance of recoverable precast shear wall[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(1): 61-72. (in Chinese)

- [2] 叶建峰, 刘宪成, 颜桂云, 等. 可恢复功能装配式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(1): 61-72.
YE Jianfeng, LIU Xiancheng, YAN Guiyun, et al. Experimental study on seismic performance of recoverable precast shear wall[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(1): 61-72. (in Chinese)
- [3] 陶忠, 叶彩凤, 皇甫双娥, 等. 冷弯薄壁卷边 C 形不锈钢梁的力学性能试验[J]. 南昌大学学报(工科版), 2024, 46(1): 21-28.
TAO Zhong, YE Caifeng, HUANGFU Shuang, et al. Mechanical properties testing of cold-formed thin-walled flanged C-shaped stainless steel beams[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2024, 46(1): 21-28. (in Chinese)
- [4] SHEN P W, YANG P, HONG J H, et al. Seismic performance of steel frame with a self-centering beam[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 175: 106349.
- [5] 靳天蛟, 王纯, 于海丰, 等. 主余震作用下钢框架-中心支撑结构抗震性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(5): 204-212.
JIN Tianjiao, WANG Chun, YU Haifeng, et al. Seismic performance analysis of the concentrically braced frames under main shock-after shock sequences[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(5): 204-212. (in Chinese)
- [6] 田钦, 刘康, 康彩霞. 双向加载下不同因素对 H 型钢构件板壳节段损伤域长度的影响[J]. 南昌大学学报(工科版), 2024, 46(1): 37-44.
TIAN Qin, LIU Kang, KANG Caixia. Effects of different factors on the length of damage domain of H-section steel plate shell segment under biaxial loading[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2024, 46(1): 37-44. (in Chinese)
- [7] 崔瑶, 张薇, 王鑫, 等. 不同梁柱节点构造形式对中心支撑框架抗震性能影响[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(4): 1-8.
CUI Yao, ZHANG Wei, WANG Xin, et al. The influence of beam-to-column connection details on the seismic performance of concentrically braced frames[J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(4): 1-8. (in Chinese)
- [8] 董志骞, 李钢, 刘一赫, 等. 低延性中心支撑钢框架结构振动台试验[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(6): 21-29.
DONG Zhiqian, LI Gang, LIU Yihe, et al. Shaking table test on low-ductility concentrically braced steel frames[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(6): 21-29. (in Chinese)
- [9] ZHAO J X, YAN L J, WANG C, et al. Damage-control design and hybrid tests of a full-scale two-story buckling-restrained braced steel moment frame with sliding gusset connections[J]. Engineering Structures, 2023, 275: 115263.
- [10] HU S, LIU S, ZENG S, et al. Investigating seismic performance of a novel self-centering shear link in EBF utilizing experimental and numerical simulation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 224: 109129.
- [11] 胡淑军, 熊悦辰, 王湛. 偏心支撑结构体系的研究进展及展望[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21(2): 1-14.
HU Shujun, XIONG Yuechen, WANG Zhan. Research status review on eccentrically braced frames[J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(2): 1-14. (in Chinese)
- [12] 胡淑军, 熊进刚, 王湛. 短剪切型消能梁段的力学性能及其影响因素研究[J]. 工程力学, 2018, 35(8): 144-153.
HU Shujun, XIONG Jingang, WANG Zhan. Study of mechanical properties and its influence factors for short shear links[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(8): 144-153. (in Chinese)
- [13] GHAMARI A, KIM Y J, BAE J. Utilizing an I-shaped shear link as a damper to improve the behaviour of a concentrically braced frame[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 186: 106915.
- [14] 常丽青. 基于自复位双肢剪切型耗能段的中心支撑钢框架结构抗震性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
CHANG Liqing. Study on Seismic Performance of an innovative concentrically braced steel frame with self-centering coupled shear link[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024. (in Chinese)
- [15] 金超斌, 张波, 周志钢, 等. 非对称自复位 SMA 连接的力学性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(6): 119-128.
JIN Chaobin, ZHANG Bo, ZHOU Zhigang, et al. Study on the mechanical properties for an innovative asymmetric self-centering SMA connection[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(6): 119-128. (in Chinese)
- [16] 胡淑军, 顾琦, 姜国青, 等. 一种新型自复位 SMA 支撑的抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(1): 109-118, 142.
HU Shujun, GU Qi, JIANG Guoqing, et al. Experimental study on seismic performance of a new self-centering SMA support[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(1): 109-118, 142. (in Chinese)
- [17] SUN G H, LIU H, LIU W Y, et al. Development, simulation, and validation of sliding self-centering steel brace with NiTi SMA wires[J]. Engineering Structures, 2022, 256: 114069.
- [18] 陈云, 陈超, 徐子凡, 等. 装配式自复位摇摆钢框架抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(12): 23-34.
CHEN Yun, CHEN Chao, XU Zifan, et al. Seismic performance study on prefabricated self-centering rocking steel frame[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(12): 23-34. (in Chinese)
- [19] 王宇航, 杨林, 黄小刚, 等. 设置碟形弹簧的自复位梁柱连接受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(6): 71-80.
WANG Yuhang, YANG Lin, HUANG Xiaogang, et al. Research on mechanical behavior of a new self-centring beam-column connector based on disc springs[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(6): 71-80. (in Chinese)
- [20] 曾思智, 胡淑军, 王雪飞, 等. 一种带自复位双肢剪切型耗能段的中心支撑钢框架装置: CN114215412 B[P]. 2022-03-22.
ZENG Sizhi, HU Shujun, WANG Xuefei, et al. An innovative self-centering coupled shear link device for concentrically steel frame: CN114215412 B[P]. 2022-03-22. (in Chinese)
- [21] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
GB 50017—2017 Standard for design of steel structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [22] 曾思智, 张波, 胡淑军, 等. 短剪切型耗能段的力学性能试验研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(11): 72-81.
ZENG Sizhi, ZHANG Bo, HU Shujun, et al. Experimental study of the mechanical property for very short shear link[J]. Building Science, 2023, 39(11): 72-81. (in Chinese)
- [23] 李鹏程. 基于 SMA 棒的摩擦复合阻尼器抗震性能研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2022.
LI Pengcheng. Study on seismic performance of friction composite damper based on SMA rod[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [24] LIU S, CHEN S, ZENG S, et al. Seismic performance analysis of K-shaped EBF with an innovative crack-resistant composition beam[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 101: 111818.