

带 SMA 装置的自复位混凝土梁柱节点 及其抗震性能研究

李 鑫¹, 魏祎旸², 柯洪峰¹, 吴汉彬³

(1. 江西理工大学 土木与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 江西同济建管项目管理股份有限公司,
江西 萍乡 337000; 3. 中山市泰德信工程管理有限公司, 广东 中山 528400)

摘要:为解决现有自复位节点中耗能与连接作用并联协调性不足、高空施工难度大的问题,本文提出一种带 SMA 装置的自复位混凝土梁柱节点,采用有限元软件 Abaqus 对其进行数值分析,系统探究不同参数对该节点抗震性能的影响规律。研究表明:1)该节点具备良好的自复位、承载及耗能能力;2)随着 SMA 复位装置摩擦系数与复位杆坡度的增大,节点各项抗震性能同步提升,但复位杆坡度超过 0.67 后性能提升缓慢;3)螺杆预紧力对节点性能影响较小;4)建议将摩擦系数控制在 0.15~0.25、SMA 螺杆预紧力取 10~20 kN、复位坡度比设定为 0.53~0.67。本文研究成果可为自复位装配式建筑的建设和发展提供借鉴与参考。

关键词:SMA 复位装置; 自复位节点; 抗震性能; 低周期往复荷载; 有限元模拟

中图分类号:TU375.6

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)02-0047-06

doi:10.13402/j.gcjs.2026.02.018

Study on self-centering concrete beam-column joints with SMA devices and their seismic performance

LI Xin¹, WEI Yiyang², KE Hongfeng¹, WU Hanbin³

(1. School of Civil Engineering and Surveying& Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. Jiangxi Tongji Construction Project Management Co., Ltd., Pingxiang 337000, Jiangxi, China; 3. Zhongshan Taidexin Engineering Management Co., Ltd., Zhongshan 528400, Guangdong, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient parallel connection coordination between energy dissipation and connection in existing self-centering joints and the high difficulty of construction at heights, a self-centering concrete beam-column joint with an SMA device is proposed in this paper, a finite element software Abaqus is used for numerical analysis to systematically investigate the influence rule of different parameters on the seismic performance of the joint. The study results show that: 1) The joint has good self-centering, load-bearing, and energy dissipation capabilities; 2) With an increase in the friction coefficient of the SMA self-centering device and the slope of the self-centering rod, each seismic performance of the joint simultaneously improves, but the performance improves slowly when the slope of the self-centering exceeds 0.67; 3) The pre-tightening force of the screw has a minor impact on the performance of the joint; 4) It is recommended to control the friction coefficient between 0.15 and 0.25, set the SMA screw pre-tightening force at 10~20 kN and the slope ratio of self-centering at 0.53~0.67. The findings of this study can provide reference and guidance for the construction and development of self-centering prefabricated buildings.

Key words: SMA self-centering device; self-centering joints; seismic performance; low-cycle reciprocating loads; finite element simulation

收稿日期: 2025-06-10

作者简介: 李 鑫(1998—),男,硕士研究生,从事建筑结构抗震分析方面的研究。

近年来,随着社会人口老龄化加剧、密集型劳动力减少,以及建筑节能环保要求的不断提高,国家亟须从根本上解决相关问题,其中装配式建筑的应用成为一条重要发展路径,因此日益受到重视^[1]。装配式建筑具有施工高效、节能环保、缩短工期等特点,其构件连接工艺可分为湿式连接和干式连接两类。然而,装配式建筑在强震后节点易发生损坏,且存在震后修复困难、造价高的问题。为实现结构震后可修复目标,许多学者针对装配式节点开展了“可恢复功能”研究,提出了自复位节点这一创新方案。

自复位节点的工作机理:在确保自复位梁可靠传递剪力和轴力的前提下,通过放松梁柱连接节点的转动约束,并增设复位和耗能装置以抵抗弯矩^[2]。为进一步提升装配式结构的复位性能,众多学者针对装配式自复位节点展开了深入研究。卢啸等^[3]、马立成等^[4]通过局部削弱梁柱节点区的截面,并在其削弱区嵌入碟簧复位装置或摩擦型复位装置,以提升节点的自复位性能,同时对该节点进行有限元分析以评估其抗震性能。结果表明,该设计可显著控制节点在地震作用下的残余变形,使其表现出良好的损伤可控性与恢复能力。此外,张还阳等^[5]、MOKHTARNEJAD 等^[6]、王怡宁^[7]通过在钢框架梁柱节点中引入形状记忆合金作为复位元件,并辅以摩擦或金属变形机制作为耗能元件,开展了自复位节点的设计研究,且通过有限元分析验证其性能。结果表明,该类节点具备良好的自复位能力与优异的能量耗散性能。俞昊然等^[8-9]提出了由超弹性 SMA 螺杆贯穿钢柱翼缘连接并装配 U 形阻尼器的自复位钢框架梁柱节点,对其关键构件的受力性能进行了分析。研究表明,节点中 SMA 螺杆可有效拉伸变形并提供自复位驱动力, U 形阻尼器的两肢能够产生相对位移从而进行塑性耗能。谢川东等^[10]、曾敏茹等^[11]、李万润等^[12]针对自复位框架进行了相关研究,提出了一种自复位梁柱节点。结果表明,该节点使框架具备了良好的损伤控制机制、可恢复特性和优越的抗震性能。

既有自复位梁柱节点研究虽取得一定进展,但仍存在以下不足:1) 现有自复位节点的耗能部

件不仅需承担耗能功能,还需兼顾连接与受剪作用,功能重叠问题突出;2) 节点施工需在高空完成预应力筋张拉、SMA 螺杆预紧力施加等操作,存在连接工艺复杂、施工难度大的问题。为进一步丰富自复位梁柱节点的构造形式,本文基于“耗能与连接作用分离、施工简便”的理念,提出一种带 SMA 装置的自复位混凝土梁柱节点。采用有限元软件 Abaqus 对其进行静力性能分析,重点研究 3 个关键参数对其抗震性能的影响规律,以期自复位装配式建筑的建设和发展提供借鉴。

1 自复位节点构造特征及其受力机理

自复位节点主要由混凝土梁柱、轴销连接件及 SMA 复位装置(含配套连接件)组成,其构造细节如图 1 所示。轴销连接件与 SMA 复位装置的连接部件采用工厂嵌入式浇筑工艺预埋于混凝土梁、柱中,其余构件则通过螺栓和轴销完成连接。

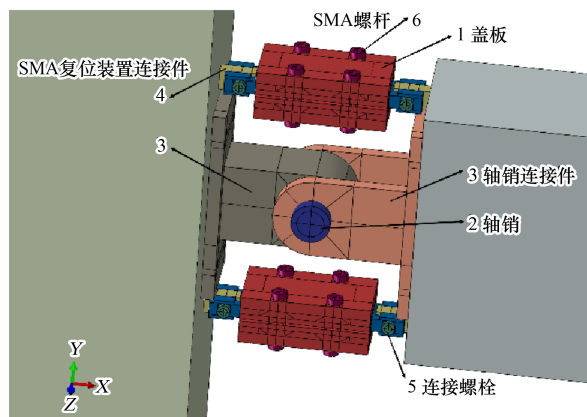


图 1 自复位节点构造示意

自复位节点在竖直往复位移作用下发生转动时,轴销连接件通过与轴销的连接抵抗剪力,促使节点上下两侧的 SMA 复位装置分别产生压缩和拉伸变形。SMA 复位装置的压缩与拉伸会驱动复位杆产生位移,进而顶起盖板并拉伸 SMA 螺杆,利用 SMA 螺杆的弹性恢复力提供复位力,迫使复位杆反向运动以实现节点复位。SMA 复位装置的工作状态如图 2 所示。自复位节点通过复位杆与盖板间的摩擦耗散能量,同时依据 SMA 螺杆的弹性恢复力实现复位。

2 模型建立

采用有限元软件 Abaqus 建立带 SMA 装置的

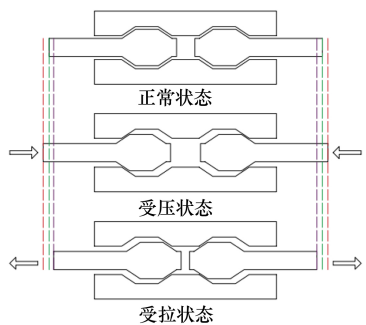


图2 SMA 复位装置受力状态

自复位混凝土梁柱节点模型。其中柱截面尺寸为 350 mm×350 mm、高度为 3 000 mm；梁截面尺寸为 250 mm×400 mm、长度为 1 400 mm。梁、柱混凝土强度等级为 C40，纵向钢筋采用 HRB400 级钢，箍筋采用 HRB335 级钢；轴销连接件等金属部件均采用 Q345 钢材；SMA 螺杆的材料属性如表 1 所示^[13]。

混凝土梁、柱、轴销连接件、自复位装置及螺栓均采用实体单元 C3D8R 建模；梁柱内部钢筋采用桁架单元 T3D2 建模。为简化计算，混凝土梁、柱与轴销连接件和 SMA 自复位装置连接件之间采用“绑定”约束连接。垫片（材质为丁基橡胶）与轴销连接件的接触设置中，法向采用“硬接触”，切向采用“罚”函数（摩擦系数取 0.075），模型其余接触摩擦系数均设为 0.25^[14]。螺栓与轴销均采用 10.9 级高强材料，其中螺栓直径为 12 mm，轴销直径为 42 mm。

在柱顶中心处耦合参考点 RP-2，并于该点施加恒定竖向荷载 100 kN；在梁端截面中心处耦合参考点 RP-1，施加竖向循环位移，循环位移加载制度如图 3 示。柱下端采用完全固定约束，上端释放 Z 轴旋转自由度以模拟铰接；梁端设置约束使其仅在 X-Y 平面内运动。螺栓与轴销通过“螺栓预紧力”方法施加初始预紧力，其中螺栓预紧力为 55 kN，轴销预紧力为 225 kN。

3 参数分析

3.1 SMA 复位装置摩擦系数

为考察 SMA 复位装置摩擦系数对节点抗震性

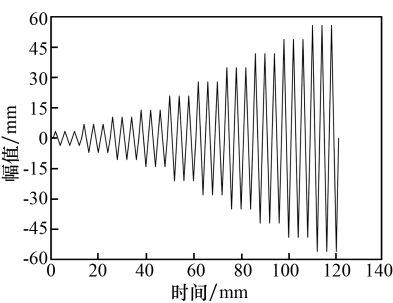
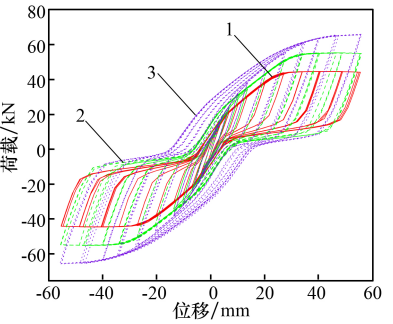


图3 加载制度

能的影响，建立 3 个仅摩擦系数不同的模型，命名为 moca-1 ~ moca-3，其摩擦系数分别为 0.15、0.25、0.35。

设置模型参数：SMA 复位装置摩擦系数为 0.25、SMA 螺杆预紧力为 20 kN、复位坡度比为 0.67，开展循环往复位移试验，所得滞回曲线如图 4 所示。由图 4 可知：自复位节点滞回曲线呈典型“旗帜型”特征，表现出稳定的能量耗散特性、较高刚度及良好恢复能力，且各模型均具备优良的自复位与耗能能力。进一步分析参数影响规律：随着摩擦系数的增大，滞回曲线面积与饱满程度提高，节点承载能力增强，但自复位能力减弱。当摩擦系数增至 0.35 时，节点残余位移达 15.5 mm，较摩擦系数为 0.25 时增大约 50%。因此，需权衡摩擦系数对耗能与复位的双向影响，不可单纯通过增大摩擦系数提升耗能能力。



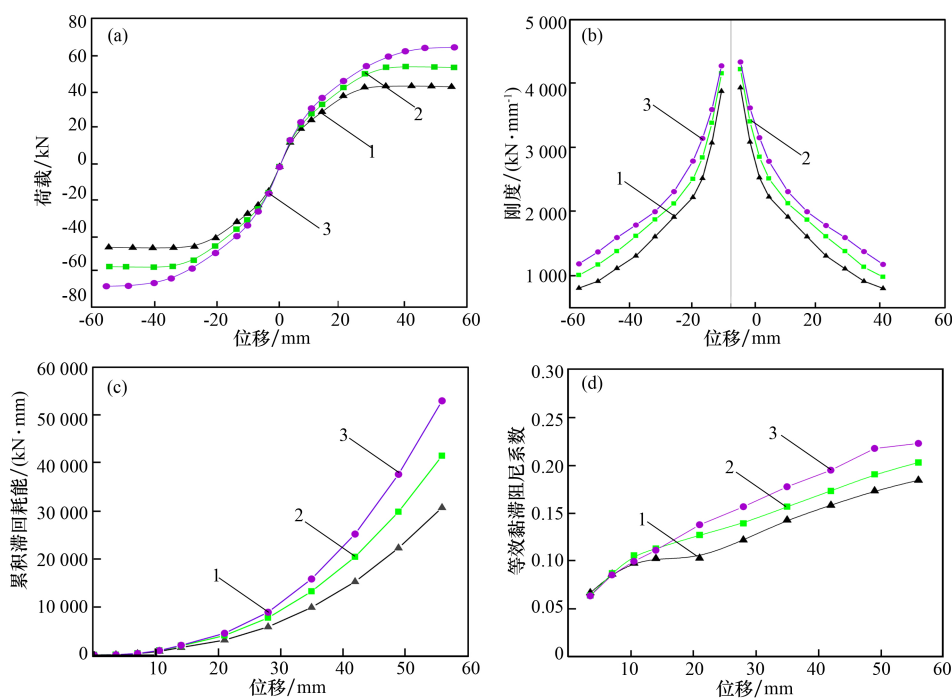
1—moca-1；2—moca-2；3—moca-3。

图4 moca 试件滞回曲线

各 moca 模型（moca-1、moca-2、moca-3）在往复荷载下的骨架曲线、刚度退化曲线、累积耗能曲线及等效黏滞阻尼系数曲线如图 5 所示。

表 1 SMA 材料属性

正相变应力/MPa		逆相变应力/MPa		奥氏体模量/GPa	马氏体模量/GPa	相变应变/%	奥氏体泊松比	马氏体泊松比
初始	结束	初始	结束					
294.4	508.1	272.2	79.1	20.8	21.5	2.5	0.33	0.33



(a) 骨架曲线; (b) 刚度退化曲线; (c) 累积滞回耗能曲线; (d) 等效黏滞阻尼系数曲线

1—moca-1; 2—moca-2; 3—moca-3。

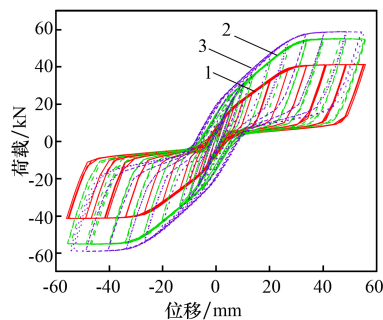
图 5 moca 试件力学性能

由图 5 可知: 骨架曲线整体呈典型 S 形, moca-2 峰值承载力为 55.27 kN, 峰值后出现轻微下降段; 各模型承载力随 SMA 复位装置摩擦系数增大呈递增趋势。刚度退化方面, moca-2 初始刚度为 4 211.63 kN·mm, 退化曲线初期急剧下降后逐渐平缓, 且摩擦系数增大时初始刚度同步提高, 但退化速率基本一致。耗能性能方面, moca-2 在位移为 56 mm 处等效黏滞阻尼系数达 0.184, 累积耗能为 41 364 kN·mm; 随摩擦系数增大, 等效黏滞阻尼系数与累积耗能均呈上升趋势, 表明节点耗能能力的提升。综上, 该节点兼具良好的自复位能力、较高的刚度及承载能力, 综合考量耗能与复位的平衡, 建议工程中摩擦系数选取 0.15~0.25。

3.2 复位杆坡度比

为探究复位杆坡度比对节点抗震性能的影响, 建立仅复位杆坡度比不同的 3 个模型, 命名为 podu-1~podu-3, 其坡度比分别为 0.53、0.67、0.80。

各模型数值模拟所得滞回曲线如图 6 所示。由图 6 可知: 坡度比的增加对节点复位能力影响较小, 但可提升其承载能力; 坡度比增大时, 节点滞回曲线饱满度与面积均提升, 且从 0.53 增至 0.67 时的面积增幅大于从 0.67 增至 0.80 时。



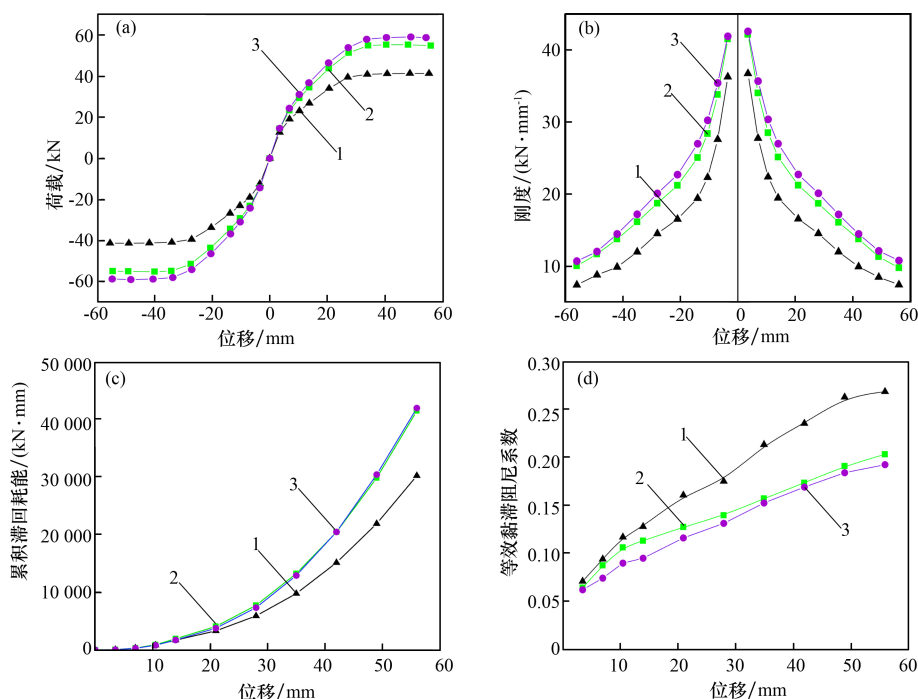
1—podu-1; 2—podu-2; 3—podu-3。

图 6 podu 试件滞回曲线

podu 模型在循环位移下的抗震性能关键曲线如图 7 所示。由图 7 可知: 随坡度比增大, 节点承载能力、初始刚度及累积耗能均提升, 但从坡度比 0.67 增至 0.80 时, 三者增幅微乎其微。等效黏滞阻尼系数则呈相反趋势。坡度比增大时, 其值反而减小。综合各曲线分析, 建议 podu 模型坡度比取值控制在 0.53~0.67, 此时抗震性能最佳。

3.3 SMA 螺杆预紧力

为研究 SMA 螺杆预紧力对节点抗震性能的影响, 建立 3 个仅 SMA 螺杆预紧力不同 (其余参数一致) 的模型, 命名为 yujinli-1~yujinli-3, 对应预紧力分别为 10、20、30 kN。

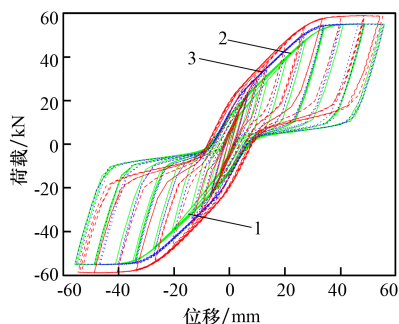


(a) 骨架曲线; (b) 刚度退化曲线; (c) 累积滞回耗能曲线; (d) 等效黏滞阻尼系数曲线

1—podu-1; 2—podu-2; 3—podu-3。

图 7 podu 试件力学性能

各模型数值模拟所得滞回曲线如图 8 所示。由图 8 可知: 预紧力增大对节点抗震性能略有提升, 但相较于 SMA 复位装置摩擦系数和复位杆坡度比的影响, 其作用显著较弱。



1—yujinli-10; 2—yujinli-20; 3—yujinli-30。

图 8 yujinli 试件滞回曲线

图 9 为节点的骨架曲线、刚度退化曲线、累积耗能曲线及等效黏滞阻尼系数曲线。由图 9(c) 可知: 预紧力增加会提升节点承载能力及累积耗能能力, 但预紧力从 20 kN 增至 30 kN 时, 二者增幅极小。由图 9(b) 可知: 预紧力增大会提高节点初始刚度, 但其退化速率基本稳定。综合分析, 建议 SMA 螺杆预紧力取值控制在 10 ~ 20 kN。

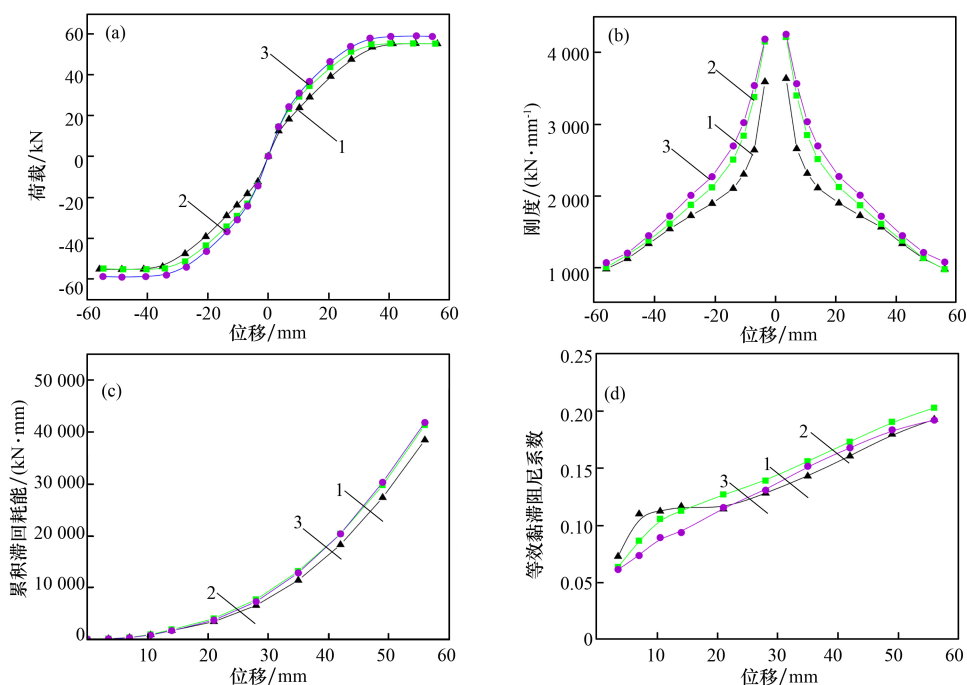
4 结 论

(1) 本文建立了带 SMA 装置的自复位混凝土梁柱节点有限元模型, 通过模拟分析表明: 该节点具备较高的刚度、承载能力和耗能能力, 同时表现出良好的自复位特性。

(2) 研究了 SMA 复位装置摩擦系数、SMA 螺杆预紧力和复位杆坡度比 3 个参数对节点抗震性能的影响规律。结果表明: 增大 SMA 复位装置摩擦系数或复位杆坡度比, 可显著提升节点的承载能力和耗能能力; 但增大 SMA 螺杆预紧力对节点承载能力和耗能能力的影响相对有限。工程应用中需综合考量各参数的影响, 以实现节点最优性能。

(3) 基于上述分析, 建议 SMA 复位装置摩擦系数取值范围为 0.15 ~ 0.25, 复位杆坡度比建议取 0.53 ~ 0.67, SMA 螺杆预紧力建议控制在 10 ~ 20 kN, 此范围内节点综合性能最佳。

(4) 工程应用中, 该节点具备便捷维修特性。由于 SMA 复位装置具有良好的可更换性, 节点受损后修复工作无需破坏主体梁柱结构, 因此可显著缩短维修工期并大幅降低结构修复综合成本。



(a) 骨架曲线; (b) 刚度退化曲线; (c) 累积滞回耗能曲线; (d) 等效黏滞阻尼系数曲线

1— yujinli - 1; 2— yujinli - 2; 3— yujinli - 3。

图 9 yujinli 试件力学性能

参考文献:

- [1] 杨春辉,刘学军,陶源,等. 装配式组合结构节点研究进展综述[J]. 混凝土,2023(3):141-147.
- [2] 徐龙河,谢行思,张格. 用于抗震韧性提升的自复位结构构件研究综述[J]. 东南大学学报(自然科学版),2023,53(6):1177-1188.
- [3] 卢啸,孙伟豪. 带摩擦型自复位节点的混凝土框架结构地震响应与易损性研究[J/OL]. 工程力学,2024,854:1-10[2026-02-05]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.03.20240321.1502.012>.
- [4] 马立成,史庆轩,王秋维,等. 预压碟簧自复位装配式混凝土梁柱节点滞回特性研究[J]. 建筑结构学报,2023,44(3):70-78.
- [5] 张还阳,周绪红,柯珂,等. 配置 SMA 的预应力自复位混合钢框架抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2024,45(8):34-43.
- [6] MOKHTARNEJAD N, GARMEH V, SHARIATMADAR H, et al. Numerical study of a novel SMA-based self-centering beam-to-column connection[J]. Structures, 2023,47:1033-1049.
- [7] 王怡宁. 一种新型自复位装配式梁柱节点及其抗震性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2024.
- [8] 俞昊然,李维滨. 装配 U 形阻尼器的 SMA 自复位钢框架梁柱节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2024,45(4):38-49.
- [9] 俞昊然. SMA 自复位装配式钢框架梁柱节点的抗震性能研究[D]. 南京:东南大学,2022.
- [10] 谢川东,王先铁,郭艺伟,等. 设置开槽耗能板的装配式自复位方钢管混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2024,45(8):154-167.
- [11] 曾敏茹,鲁亮,夏婉秋,等. 梁端弹簧型自复位钢筋混凝土框架基于性能的抗震设计方法[J]. 工程力学,2024,41(增刊1):266-274.
- [12] 李万润,高海旺,王怡宁,等. 一种设置新型自复位节点的钢框架结构体系整体抗震性能分析[J]. 建筑钢结构进展,2023,25(9):53-61.
- [13] 刘家旺,邱灿星,杜修力. 设置 SMA 滑动摩擦阻尼器的自复位摇摆柱滞回行为理论分析与数值模拟[J]. 建筑结构学报,2023,44(3):39-48.
- [14] 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.