#### 文章编号: 1000-4750(2024)11-0116-09

# 新型装配式自复位 RC 剪力墙设计与性能研究

# 肖水晶,冯 鹏

(清华大学土木工程系,北京100084)

**摘 要:**为满足结构施工效率高、震后功能可恢复的多重目标,提出了一种新型装配式自复位 RC 剪力墙。该新型剪力墙主要包含 RC 墙板、碟簧复位装置和摩擦耗能装置,三者仅通过高强螺栓组装而成,施工方便且效率高; 在地震作用下,主要由碟簧复位装置和摩擦耗能装置提供抵抗弯矩和恢复力,能减小整体剪力墙构件的震后残 余变形和损伤,有效提高其震后功能可恢复性。该文分析了新型装配式自复位 RC 剪力墙的截面受力形式,提 出了其截面承载力计算公式;设计了一新型装配式自复位 RC 剪力墙构件进行数值模拟,获得了其滞回性能, 对比分析了其与普通剪力墙的承载力、耗能能力、自复位性能。结果表明:在相同位移角下,新型装配式自复 位 RC 剪力墙的承载力小于普通剪力墙,但其极限承载力与普通剪力墙的峰值承载力相当,且其在超大震 (2.0% 位移角)下的残余位移角仅为 0.31%,具有优异的自复位能力,能使结构在震后具有低损伤、功能可恢复的特 点。增大碟簧复位装置的预压力,可有效提高新型剪力墙构件的承载力和累积耗能,但残余变形也相应增大。 关键词:装配式;自复位 RC 剪力墙;碟簧复位装置;摩擦耗能装置;滞回性能;功能可恢复性 中图分类号:TU375 文献标志码:A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.09.0805

# DESIGN AND PERFORMANCE INVESTIGATION ON NOVEL PREFABRICATED SELF-CENTERING RC SHEAR WALL

#### XIAO Shui-jing, FENG Peng

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A novel prefabricated self-centering reinforced concrete (RC) shear wall, which is mainly composed of RC wall slab, self-centering device with disc springs and friction energy dissipation device, is proposed to meet multiple objectives of high construction efficiency and recoverable function after an earthquake. The three main parts of the novel RC shear wall are assembled through high-strength bolts with convenient and efficient construction. When the wall is subjected to seismic loads, the resisting moment and restoring force is mainly provided by the self-centering devices with disc springs and friction energy dissipation devices, thereby the damage and residual deformation of the component can be reduced and its seismic resilience can be effectively improved. In this paper, the sectional forces of the novel prefabricated self-centering RC shear wall are analyzed and its calculation method of the section bearing capacity is proposed. In addition, a novel RC shear wall is designed and its hysteretic behavior is obtained according to the numerical model. Then the bearing capacity, energy dissipation and self-centering capabilities are compared between the novel RC shear wall and the conventional RC shear wall. The results indicate that the bearing capacity of the novel RC shear wall is less than that of the conventional RC shear wall at the same drift ratios, whereas its ultimate bearing capacity is equal to the peak bearing capacity of the conventional RC shear wall. Additionally, the residual drift ratio of the novel RC shear wall is just 0.31% under strong earthquake (corresponding to 2.0% drift ratio), indicating that the selfcentering capability of the novel RC shear wall is satisfactory, so that the structure has the abilities of low damage and seismic resilience. Increase in the pre-loading of the self-centering device with disc springs can greatly improve the bearing capacity and energy dissipation capability of the novel RC shear wall, while its residual displacement is correspondingly increased.

**Key words:** prefabricated; self-centering RC shear wall; self-centering device with disc springs; friction energy dissipation device; hysteretic behavior; resilience

中国知网 https://www.cnki.net

收稿日期: 2022-09-16; 修改日期: 2023-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208263); 中国博士后科学基金项目(2022M711867)

通信作者: 冯 鹏 (1977-), 男, 陕西耀县人,教授,博士,博导,主要从事结构工程研究 (E-mail: fengpeng@tsinghua.edu.cn).

作者简介: 肖水晶 (1991-), 女, 江西吉安人, 博士, 主要从事结构抗震研究 (E-mail: sjxiao@bjtu.edu.cn).

装配式结构具有施工效率高、环境污染小、 产品质量高、易于标准化生产等优点,符合建筑 工业化的发展方向,满足我国绿色经济可持续发 展的需求,是近年来大力研发推广的一种建筑结 构形式<sup>[1-2]</sup>。目前,装配式 RC 剪力墙多采用"等 同现浇"的方式进行连接,其整体性好,但是, 该类连接存在竖向钢筋数量多、对位困难、套筒 密实度不易保证、施工工艺复杂等问题<sup>[3-4]</sup>。此 外,传统 RC 剪力墙在地震中主要通过连接区域的 连接件、钢筋及混凝土的塑性变形耗散能量,震 后会产生较大的残余变形,使得结构无法修复, 最终造成巨大的经济损失<sup>[5-6]</sup>。

现代城市对地震工程提出了新的要求和挑战: 不仅要求保障生命安全,还要使结构在震后具有 可恢复功能。对于 RC 剪力墙,一般采用自复位技 术来实现功能可恢复,主要的复位材料包含预应 力筋[7-10]、形状记忆合金[11-14]、碟簧[15-20]等。 RESTREPO 等[21] 提出一种采用预应力提供恢复 力、端部连接件提供附加耗能的新型自复位剪力 墙,并通过试验验证了其良好的自复位性能,但 其墙脚处存在明显损伤。WANG 等[22] 将剪力墙端 部纵筋局部替换成形状记忆合金提供恢复力,并 设置角钢增加耗能,数值模拟结果表明这种新型 剪力墙的自复位性能能得到有效提高,但是震后 形状记忆合金的维修和更换较困难。XU 等[23] 提 出在墙脚处设置碟簧装置,由碟簧装置提供恢复 力的同时避免墙脚处提前破坏,试验结果表明其 能在提高自复位能力的同时有效减轻墙体损伤。 需要注意的是,以上自复位剪力墙的施工与现浇 剪力墙类似,现场湿作业较多,不利于绿色施工。

为满足结构施工效率高、震后功能可恢复的 多重目标,本文提出了一种新型装配式自复位 RC 剪力墙。分析了新型装配式自复位 RC 剪力墙的截 面受力形式,提出了其截面承载力计算方法并进 行验证;设计了一新型装配式自复位 RC 剪力墙构 件,提出了其数值模拟方法,获得了其滞回性能, 并对其承载力、耗能能力和自复位性能进行了分析。

# 1 装配式自复位 RC 剪力墙构造

#### 1.1 整体构件

新型装配式自复位 RC 剪力墙的构造如图 1 所示,其主要包含 RC 墙板、碟簧复位装置和摩擦耗能装置,三者在工厂独立加工:加工预制 RC 墙体

时, 先将预埋板与钢筋笼对应位置处的钢筋焊接, 后进行混凝土浇筑; 碟簧装置各部件在工厂加工 并拼装完成; 摩擦耗能装置各部件在工厂加工。 现场安装时, 先将预制 RC 墙板吊装就位, 再将墙 脚两侧的碟簧复位装置进行定位并用螺栓连接其 与 RC 墙板的预埋件, 随后将摩擦耗能装置中的各 部件分别与 RC 墙体和支座 (或其它层墙体) 固 定, 最后将整体构件的所有螺栓拧紧即可完成施 工。新型装配式自复位 RC 剪力墙的现场施工仅采 用螺栓连接, 具有施工方便且效率高的特点。



在竖向外荷载作用下,由 RC 墙体和两侧碟簧 复位装置共同承受荷载;在水平外荷载作用下, 主要由两侧碟簧装置提供抵抗弯矩和恢复力,由 摩擦耗能装置提供附加耗能,能有效减小整体剪 力墙构件的震后残余变形和损伤,从而提高其震 后功能可恢复性。

#### 1.2 碟簧复位装置

碟簧复位装置的构造如图 2 所示,其主要部件包括内管、外管、上挡块、下挡块、上连接板、下连接板、封板、碟簧和碟簧挡板。各部件独立加工成型,先将上挡块焊接在内管端部,再将碟簧套在内管上,且其端部设有可活动的碟簧挡板,若装置设有预压力,则通过下侧碟簧挡板施加预压力,随后将下挡块焊接在内管上固定预压碟簧的初始位置,最后将下连接板焊接在内管另一端即完成内管区域的组装;碟簧复位装置的外管由多段钢板组成(焊接而成或直接成型),其上端焊接上连接板,其在内管区域组装完成后直接套在内管区域的碟簧挡板上;上、下连接板上均开设螺栓孔,方便与 RC 墙板进行连接;为了整体美观和避免内部碟簧受环境影响,在覆盖碟簧



的外管区域设有封板,采用螺栓固定,试验时可 轻松将封板取下观察内部碟簧的状态。

图 2 碟黄复位装置构造 Fig. 2 Configuration of the self-centering device with disc springs

碟簧是主要复位元件,其他部件用于协助压 缩碟簧并传力。单片碟簧呈圆锥碟状,多片碟簧 叠合能成倍增大装置的承载力,多片碟簧对合能 成倍增加装置的变形。由于剪力墙的承载力大, 在墙脚设置的碟簧复位装置通常采用多片碟簧叠 合和对合的复合组合形式,碟簧叠合后其叠合面 会产生摩擦,能为构件提供耗能<sup>[16]</sup>。当碟簧装置 受压时,外管受压并传力至上端碟簧挡板,使碟 簧受压;当碟簧装置受拉时,外管受拉并传力至 下端碟簧挡板,使碟簧仍受压。因此,碟簧复位 装置在受压和受拉时,其组合碟簧均受压,提供 恢复力,协助装置和构件复位。

### 1.3 摩擦耗能装置

摩擦耗能装置的构造如图 3 所示,其主要部 件包括上连接钢板、下连接钢板和摩擦板,各部 件在工厂加工成型,运送至现场安装。上连接钢 板外边缘区域和下连接钢板下部区域均开设连接 螺栓孔,上连接钢板通过螺栓固定在 RC 墙体上, 下连接钢板通过螺栓固定在支座 (或其他层墙体) 上;在上、下连接钢板安装前,先将内、外摩擦 板分别粘贴在上、下连接钢板上,粘贴摩擦板的 上、下连接钢板区域均设有凹槽,便于固定摩擦 板位置;此外,内摩擦板及其所在的上连接钢板 区域均开设摩擦紫长槽孔。



Fig. 3 Configuration of the friction energy dissipation device

安装完成后,上连接板、内摩擦板与 RC 墙体 一体,下连接板、外摩擦板与支座一体,当 RC 墙 体与支座产生相对变形后可通过摩擦板相对运动 附加耗能,避免 RC 墙体产生塑性损伤。

# 2 工作机理与截面设计

### 2.1 工作机理

新型装配式自复位 RC 剪力墙在外荷载作用下 的变形示意图如图 4 所示,剪力墙构件受轴向荷 载 N 和水平荷载 F 共同作用, 传递至墙底截面 时,单个碟簧复位装置和摩擦耗能装置上的荷载 可等效为竖向拉/压。当加载位移较小时,墙脚两 侧碟簧复位装置处的竖向变形  $\delta$  较小 ( $\delta < \delta_0$ ), 碟 簧复位装置受到的外力小于其预压力 N<sub>p</sub>,尚未激 活,其力-位移曲线处于第一阶段,如图 4(b) 所示, 装置的第一刚度 Kimi 主要由其内外管提供,此时摩 擦耗能装置未激活,提供的摩擦力为0;随着加载 位移的增大,竖向变形 $\delta$ 增大( $\delta > \delta_0$ ),碟簧复位 装置受到的外力大于 N<sub>n</sub>,装置被激活,其力-位移 进入第二阶段,如图 4(d) 所示,装置的第二刚度 K<sub>d</sub>主要由组合碟簧提供;当加载位移进一步增大 时,墙脚处碟簧复位装置的承载力和竖向变形 $\delta$ 继续增大,同时,摩擦耗能装置被激活,其受拉 侧边缘区域被抬升,产生竖向变形 $\delta$ ,从而提供 稳定的摩擦力 N<sub>f</sub>,进行附加耗能,其在竖向往复 荷载下的理论力-位移曲线如图 4(f) 所示,此时, 碟簧复位装置和摩擦耗能装置协同工作。卸载时, 碟簧间存在接触摩擦,能耗散能量,且碟簧能提 供恢复力,使装置恢复到加载前的状态;当碟簧 复位装置的预压力 N<sub>p</sub>大于摩擦耗能装置的摩擦力 N<sub>f</sub>时,也能使摩擦耗能装置恢复到加载前的状态。

在反向水平荷载作用下,碟簧复位装置及摩擦耗 能装置的理论力-位移曲线与正向加载时对称,如 图4所示。



图 4 新型装配式自复位 RC 剪力墙变形示意图 Fig. 4 Deformation diagram of the novel prefabricated selfcentering RC shear wall

在水平外荷载作用下,新型装配式自复位 RC 剪力墙的抗力由墙脚两侧碟簧装置和摩擦耗能装 置共同提供,协同作用后整体构件的理论力-位移 关系如图 5 所示。当位移相对较小 (小震和中震) 时,仅依靠两侧碟簧复位装置协同工作提供抗力, 承载力是单个装置的两倍,整体构件行为包含阶 段 I(组合碟簧激活前) 和阶段 II(组合碟簧激活后); 当位移相对较大(大震和超大震)时,碟簧复位装 置和摩擦耗能装置均被激活进行协同工作, 整体 构件力-位移关系进入阶段 III,理论分析时,整体 构件在进入阶段 III 时会出现一小段过渡段,主要 由于摩擦耗能装置瞬时启动与碟簧复位装置的刚 度不一致, 但实际加载时, 摩擦耗能装置是逐渐 被激活,过渡段可能不存在。卸载时,由碟簧复 位装置提供恢复力,可实现减小残余变形的目的, 由碟簧间的摩擦和附加摩擦共同耗散能量,可实 现减轻墙体损伤的目的。



图 5 新型装配式自复位 RC 剪力墙的理论力-位移关系 Fig. 5 Theoretical force-displacement relationship of the novel prefabricated self-centering RC shear wall

### 2.2 截面设计方法

在地震作用下,RC 剪力墙通常受轴力、弯矩 和剪力共同作用,截面受力较复杂,其最不利截 面通常选为底部截面。新型装配式自复位RC 剪力 墙底部截面的受力形式如图 6 所示。在轴力 N 和 水平荷载 F 的共同作用下,底部截面受轴力 N、 弯矩 M 和剪力 V 复合作用,其中,N 由 RC 墙体 底部截面受压区混凝土的压力和碟簧复位装置的 恢复力共同抵抗,M 主要由碟簧复位装置的恢复 力和摩擦耗能装置的摩擦力抵抗,V 主要由摩擦耗 能装置的连接钢板的剪力抵抗。因此,由截面受 力平衡可得:

$$N = N_{\rm dc} + N_{\rm c} - N_{\rm dt} - N_{\rm f} \tag{1}$$

其中:

$$N_{\rm dc} = N_{\rm dt} = nf_1 \tag{2}$$

$$N_{\rm c} = \alpha_1 f_{\rm c} h(x - b_{\rm r}) \tag{3}$$

$$N_{\rm f} = \mu F_{\rm N} \tag{4}$$

联立式 (2)~式 (4), 代入式 (1) 可得:  

$$N = \alpha_1 f_c h(x - b_r) - \mu F_N$$
 (5)

则:

$$x = \frac{N + \mu F_{\rm N}}{\alpha_{\rm 1} f_{\rm c} h} + b_{\rm r} \tag{6}$$

当 $x > b_r$ 时,对受压区中心取矩得:

$$M = M_{\rm N} + M_{\rm dt} + M_{\rm f} + M_{\rm dc} \tag{7}$$

其中:

$$M_{\rm N} = N \left( \frac{l_{\rm s}}{2} - \frac{x - b_{\rm r}}{2} \right) \tag{8}$$

$$M_{\rm dt} = N_{\rm dt} \left( \frac{b_{\rm r}}{2} + l_{\rm s} - \frac{x - b_{\rm r}}{2} \right) \tag{9}$$

$$M_{\rm f} = N_{\rm f} \left( l_{\rm s} - \frac{x - b_{\rm r}}{2} \right) \tag{10}$$

$$M_{\rm dc} = N_{\rm dc} \frac{x}{2} \tag{11}$$

化简后得: し

$$M = \frac{l_{\rm s}}{2}(N + 2N_{\rm dt} + 2N_{\rm f}) + \frac{b_{\rm r}}{2}(N + 2N_{\rm dt} + N_{\rm f}) - (N + N_{\rm f})\frac{x}{2}$$
(12)

当 *x*≤*b*<sub>r</sub> 时,认为混凝土不受压,仅碟簧装置 受压,对受压区碟簧装置中心取矩得:  $M = M_{\rm N} + M_{\rm f} + M_{\rm dt} \tag{13}$ 

$$M_{\rm N} = N\left(\frac{l_{\rm s}}{2} + \frac{b_{\rm r}}{2}\right) \tag{14}$$

$$M_{\rm f} = N_{\rm f} \left( l_{\rm s} + \frac{b_{\rm r}}{2} \right) \tag{15}$$

$$M_{\rm dt} = N_{\rm dt} \left( l_{\rm s} + b_{\rm r} \right) \tag{16}$$

化简后得:

$$M = (N + 2N_{\rm dt}) \cdot \frac{l_{\rm s} + b_{\rm r}}{2} + N_{\rm f} \left( l_{\rm s} + \frac{b_{\rm r}}{2} \right)$$
(17)

式中: $N_{dc} 与 N_{dt}$ 分别为碟簧复位装置的受压承载 力和受拉承载力; $N_c$ 为受压侧混凝土的抗压承载 力; $N_f$ 为摩擦耗能装置的摩擦力; $M_{dc}$ 、 $M_{dt}$ 、 $M_N$ 和 $M_f$ 分别为 $N_{dc}$ 、 $N_{dt}$ 、 $N 和 N_f$ 对受压侧碟簧复位 装置中心或对混凝土受压区中心的对应弯矩; $\alpha_1$ 为与混凝土等级有关的等效矩形应力图形系数;  $l_s$ 为墙体底部截面长度;x为剪力墙截面的等效矩 形应力图受压区高度; $f_c$ 为混凝土抗压强度; $b_r$ 为 碟簧复位装置的长度;n为碟簧复位装置中单组碟 簧叠合的数量; $f_1$ 为单片碟簧提供的恢复力,组合 碟簧的承载力和变形计算可参考文献 [18]; $\mu$ 为摩 擦板的摩擦系数; $F_N$ 为通过高强螺栓施加在摩擦 板区域的正应力。



图 6 新型装配式自复位 RC 剪力墙截面受力示意图 Fig. 6 Sectional forces diagram of the novel prefabricated self-centering RC shear wall

综上,通过式(1)~式(17)的计算即可求得新 型装配式自复位 RC 剪力墙的截面承载力。需要注 意的是,以上公式推导需要满足基本假定(如截面 变形符合平截面假定、不考虑混凝土受拉作用、 受压区混凝土的应力图用等效矩形应力图替换), 另外,由于 RC 墙体一般墙脚处变形较大,底部中 间区域的摩擦耗能装置仅端部变形大,激活后假 定摩擦力 N<sub>f</sub>作用在 RC 墙体底部截面端部进行计算。

在进行截面承载力计算前,应先确定构件几 何尺寸并设计碟簧复位装置和摩擦耗能装置,新 型装配式自复位 RC 剪力墙的参数设计流程如图 7 所示。首先,根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2020)<sup>[24]</sup>和《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2020)<sup>[25]</sup>确定 RC 剪力墙的几何尺寸和配筋形式, 再参考文献 [18] 确定墙脚两侧碟簧复位装置几何 尺寸,剩余中间区域设置摩擦耗能装置,其长度 为 l,, 高度取为 0.5l,(仅根据摩擦片有足够接触面 的情况下施工方便进行考虑)。为了使新型装配式 自复位 RC 剪力墙具有与几何尺寸相同的普通 RC 剪力墙相当的承载力和刚度,本文按等强度原 则确定碟簧复位装置和摩擦耗能装置的力学 参数,N<sub>du</sub>取为墙脚区域混凝土抗压承载力和钢 筋极限受拉承载力之和, Np 参考摩擦力 Nf 取值,  $K_{\text{ini}}$  和  $K_{\text{d}}$  分别按  $N_{\text{p}}/\delta_0$  和  $(N_{\text{du}}-N_{\text{p}})/(\delta_{\text{u}}-\delta_0)$  取值,  $\delta_0$  对应小震时构件脚部的竖向位移, $\delta_u$  对应大震 时构件的脚部竖向位移,由于碟簧复位装置的摩 擦力是碟簧叠合间的接触摩擦提供, 对其复位性 能无影响,卸载时,其卸载刚度与加载时第一刚 度 K<sub>ini</sub>和第二刚度 K<sub>d</sub>基本一致,因此,设计时仅





需确定  $N_p$ 、 $K_{ini}$ 和  $K_d$  三个参数,即可确定其滞回 性能;参考普通剪力墙竖向钢筋的贡献,近似将  $N_f$ 取为  $l_s/2$ 范围内竖向分布钢筋的屈服承载力,  $\mu$ 为摩擦板的摩擦系数,根据所购买批次的材性试 验确定, $F_N$ 取为  $N_{f}/\mu$ ,通过扭矩扳手施加在高强 螺栓上。

以上力学参数确定后,即可根据本文 2.2 节的 方法计算新型装配式自复位 RC 剪力墙的理论水平 承载力 F,若不小于普通 RC 剪力墙的承载力,则 满足初步设计要求,否则重新设计各装置的力学 参数,直至满足要求。最后,对新型装配式自复 位 RC 剪力墙进行数值模拟,评估其抗震性能,若 抗震指标不满足要求,则需对各装置几何参数和力 学参数进行调整,直至满足抗震目标,完成设计。

# 3 构件滞回性能

### 3.1 有限元模型

本文参考文献 [15] 中自复位剪力墙构件尺寸, 除 RC 墙体中钢筋未伸入支座仅通过摩擦耗能装置 的钢板对 RC 墙体与支座进行装配连接外,新型墙 体几何尺寸和配筋、墙脚洞口几何尺寸、材料属 性均与文献 [15] 相同,并根据 2.2 节提出的方法 对碟簧复位装置和摩擦耗能装置的参数进行设 计。为了评估本文设计的新型装配式自复位 RC 剪 力墙的滞回性能,在 OpenSees 软件中进行数值模 拟,其数值模型如图 8 所示。RC 墙体采用分层壳 单元模拟,能分别赋予混凝土层和钢筋层材料属 性和厚度,如图 8(a)所示;其中,混凝土材料采 用 LU 等<sup>[26]</sup> 开发的 PlaneStressUserMaterial 平面应 力多维材料,该材料需要定义的关键参数包含混 凝土峰值抗压强度fc、抗拉强度f、极限抗压强度  $f_{\rm u}$ 、峰值压应变  $\varepsilon_{\rm c}$ 、极限压应变  $\varepsilon_{\rm u}$ 、抗拉应变  $\varepsilon_{\rm c}$ 及剪力传递系数,如图 8(b) 所示;钢筋单轴材料 采用 Steel02 材料,其应力-应变关系如图 8(c) 所 示。RC 墙体边缘约束区纵筋采用纤维单元模拟, 赋予 Steel02 材料本构。

碟 簧 复 位 裝 置 采 用 杆 单 元 模 拟, 赋 予 SelfCentering 本构 (图 8(d)),定义的关键参数包含 第一刚度  $K_{ini}$ 、第二刚度  $K_d$ 、激活力  $F_y$ (对应碟簧 复位装置的预压力  $N_p$ )和正向与反向激活力的比 值  $\alpha$ ;本文按 2.2 节方法计算得碟簧复位装置的关 键参数  $K_{ini}$ 、 $K_d$ 、 $F_y$ 和  $\alpha$ 分别取为 182.3 kN/mm、 5.5 kN/mm、100 kN 和 1.0 (考虑碟簧复位装置卸载 后能完全复位,无残余变形)。摩擦耗能装置采用 均匀分布的杆单元模拟,赋予 Steel02 材料本构近 似模拟摩擦耗能,如图 8(e)所示,每根杆单元的 屈服力即为摩擦力,取值为 45 kN。需要注意的 是,RC 墙体底部仅通过碟簧复位装置与摩擦耗能 装置进行干式连接,位移较大时,RC 墙体底面与 支座顶面会张开,因此该界面采用零长度单元进 行模拟,对其赋予只受压不受拉的 ENT 材料,如 图 8(f)所示。

### 3.2 滞回特性

新型装配式自复位 RC 剪力墙的滞回曲线如 图 9 所示。可以看出,新型剪力墙构件展现出类 旗形滞回响应,与理论预测形状基本一致。新型 剪力墙构件的滞回环较饱满,表明其具有良好的 耗能能力;此外,新型剪力墙构件的残余变形很 小,表明墙脚两侧碟簧复位装置能有效提供恢复 力,协助RC墙体恢复到加载前的位置,使构件具 有良好的自复位能力。当水平加载位移达到 65 mm (对应位移角为3%)时,新型剪力墙构件的承载力 未出现下降,表明新型构件中 RC 墙体未出现明显 塑性损伤,主要由碟簧复位装置和摩擦耗能装置 提供抗力,整体构件的破坏主要取决于墙脚两侧 的碟簧复位装置,其破坏后能快速进行修复或更 换。因此,本文提出的新型自复位 RC 剪力墙中 的 RC 墙板能得到较好保护,避免混凝土过早发生 破坏而使整体构件和结构失去使用功能。

#### 3.3 性能指标对比

为了更好的评估新型装配式自复位 RC 剪力墙 的抗震性能,本文进一步将其抗震性能指标与文 献 [15] 中的普通剪力墙的试验结果进行对比。图 10 和图 11 分别对比了不同剪力墙构件的滞回曲线和 骨架曲线。结果表明:在相同加载位移下,3.2节 中初步设计的新型剪力墙 1 的承载力低于普通剪 力墙,当普通剪力墙达到峰值荷载 (169.3 kN) 时, 新型剪力墙 1 的荷载为 121.2 kN,降低约 28.4%, 但新型剪力墙 1 能一直加载至 3% 位移角,其对应 承载力为 154.4 kN,相比普通剪力墙的峰值荷载 降低约 8.8%。此外,新型剪力墙 1 具有显著的自 复位性能,残余变形明显小于普通剪力墙,有助 于震后修复。

当增大碟簧复位装置的预压力 N<sub>p</sub>(取值为 150 kN) 时,新型装配式自复位 RC 剪力墙 (记为剪力墙 2) 的滞回环更加饱满 (图 10),其承载力显著提升 (图 11);在相同位移下,新型剪力墙 2 的承载力 与普通剪力墙相当,其极限承载力可达 185.9 kN,





值取为每一级加载位移下第一圈滞回环面积的累 加值。构件的累积耗能均随着加载位移的增大而 增大,当位移角小于1.4%时,新型剪力墙的累加 耗能大于普通剪力墙,随着位移角的增大,普通

centering RC shear wall 相比新型剪力墙 1 的极限承载力和普通剪力墙的 峰值承载力分别提高 16.9% 和 8.9%。

图 9 新型装配式自复位 RC 剪力墙滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic curve of the novel prefabricated self-

图 12 对比了不同剪力墙构件的累积耗能,其



剪力墙的塑性损伤明显,其耗能能力显著提升, 大于新型剪力墙。当增大碟簧复位装置的预压力 *N*<sub>p</sub>时,新型剪力墙的累积耗能显著提升,在位移 角为 3%时,新型剪力墙 2 的累积耗能比新型剪力 墙 1 和普通剪力墙分别提高 17.9% 和 18%。





图 13 对比了不同剪力墙构件的残余变形,其 值取为每一级加载位移下反力卸载为零时对应正 负向位移的平均值。从图 13 中可以看出,构件的 残余变形均随着加载位移的增大而增大,表明构 件损伤在逐渐累积。在相同的位移角下,普通剪 力墙的残余位移明显大于新型剪力墙,其破坏(对 应位移角 2.1%) 时, 残余位移为 1.15%, 远大于可 修复的残余位移角限值 0.5%, 而新型剪力墙 1 的 残余位移角为 0.31%, 降低约 73%; 当加载至 3% 位移角时,新型剪力墙1的残余位移角仍小于0.5%, 表明新型剪力墙具有良好的自复位性能, 震后可 修复。当增大碟簧复位装置的预压力时,新型剪 力墙的残余位移会显著增大; 当预压力增大 33.3% 时,在不同位移角下,新型剪力墙2的残余位移 角比新型剪力墙1增大了42.5%~66%,但相比普 通剪力墙仍显著降低。



因此,可采用增大碟簧复位装置的预压力的 方法有效提高新型装配式自复位 RC 剪力墙的承载 力和耗能能力,但也会同时增大构件的残余变形, 设计时应考虑碟簧复位装置预压力限值使新型剪 力墙构件满足残余变形的限值要求,便于震后修 复和更换。

# 4 结论

本文研发了一种新型装配式自复位 RC 剪力墙, 其通过碟簧复位装置和摩擦耗能装置与 RC 墙体进 行干式连接,并提供恢复力和耗能。介绍了新型 装配式自复位 RC 剪力墙的构造和工作机理,并提 出了其滞回性能模拟方法,得出了主要结论如下:

(1)新型剪力墙构件中各主要部件分开加工, 在施工现场通过高强螺栓连接,具有组装方便、 施工效率高的特性。

(2)根据理论截面受力分析,新型剪力墙构件可展现出类旗形滞回响应,理论预测结果与数值 模拟结果吻合较好,均表明新型剪力墙具有良好 的自复位性能和耗能能力,验证了本文设计方法 和数值模拟方法的有效性。

(3) 与普通剪力墙相比,在相同加载位移下, 初步设计的新型剪力墙的承载力降低,最大降低 约 28.4%,但其承载力未出现下降趋势,能一直加 载至 3% 位移角,此时荷载与普通剪力墙相当;在 小位移下,新型剪力墙的累积耗能略大于普通剪 力墙,随着位移增大,普通剪力墙塑性损伤明 显,耗能更大;而普通剪力墙破坏时,新型剪力 墙的残余位移角远小于 0.5%,降低约 73%,表明 其损伤能得到有效控制。

(4) 当增大碟簧复位装置的预压力,新型剪力 墙的承载力和耗能能力均显著提升,在 3% 位移角 下分别提高 16.9% 和 17.9%,但其残余变形也相 应增大。因此,需对增大碟簧复位装置的预压力 进行合理设计,以提升综合抗震性能。

#### 参考文献:

- YUAN Z M, SUN C S, WANG Y W. Design for Manufacture and Assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings [J]. Automation in Construction, 2018, 88: 13 – 22.
- [2] 王心宇,杨参天,李爱群,等. 预制剪力墙震损修复抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2024, 41(10): 24 32.
  WANG Xinyu, YANG Cantian, LI Aiqun, et al. Experimental investigation of seismic performance of precast shear wall repaired after earthquake damage [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(10): 24 32. (in Chinese)
- [3] JIA L G, LI Q R, ZHANG Y G, et al. Experimental study of the hysteretic behavior of prefabricated frame-shear wall structures with grouting sleeve connections [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 57: 104704.
- [4] 李然,田春雨,马云飞. 竖向接缝钢锚环灌浆连接装配式多层剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增刊 2): 123 132.
  LI Ran, TIAN Chunyu, MA Yunfei. Experimental study on seismic performance of precast low-rise concrete shear wall with steel anchor-ring connection [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Suppl 2): 123 132. (in Chinese)
- [5] 周颖, 吴浩, 顾安琪. 地震工程: 从抗震、减隔震到可恢复性[J]. 工程力学, 2019, 36(6): 1-12.
  ZHOU Ying, WU Hao, GU Anqi. Earthquake engineering: From earthquake resistance, energy dissipation, and isolation, to resilience [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 1-12. (in Chinese)
- [6] VETR M G, SHIRALI N M, GHAMARI A. Seismic resistance of hybrid shear wall (HSW) systems [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 116: 247-270.
- [7] 鲁亮, 叶雨立, 夏婉秋, 等. 体外预应力自复位钢筋混凝 土框架抗震性能振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊 2): 68 - 73, 108.
   LU Liang, YE Yuli, XIA Wanqiu, et al. Study on the

seismic performance of a 3D external prestressed selfcentering reinforced concrete frame by shaking table test [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Suppl 2): 68 - 73, 108. (in Chinese)

- [8] LU X L, JIANG C, YANG B Y, et al. Seismic design methodology for self-centering reinforced concrete frames [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 119: 358 – 374.
- [9] LU X L, DANG X L, QIAN J, et al. Experimental study of self-centering shear walls with horizontal bottom slits [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(3): 04016183.
- [10] MI P, TAN P, LI Y M, et al. Seismic behavior of unbonded post-tension wall with replaceable energy dissipator [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 166: 107737.
- [11] GHASSEMIEH M, BAHAARI M R, GHODRATIAN S M, et al. Improvement of concrete shear wall structures by smart materials [J]. Open Journal of Civil Engineering, 2012, 2(3): 87 – 95.
- [12] WANG W, FANG C, LIU J. Self-Centering beam-tocolumn connections with combined superelastic SMA bolts and steel angles [J]. Journal of Structural Engineering, 2017, 143(2): 04016175.
- [13] SONG G, MA N, LI H N. Applications of shape memory alloys in civil structures [J]. Engineering Structures, 2006,

28(9): 1266 - 1274.

- [14] HOULT R D, DE ALMEIDA J P. Residual displacements of reinforced concrete walls detailed with conventional steel and shape memory alloy rebars [J]. Engineering Structures, 2022, 256: 114002.
- [15] XU L H, XIAO S J, LI Z X. Experimental investigation on the seismic behavior of a new self-centering shear wall with additional friction [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(5): 04021056.
- [16] XIAO S J, XU L H, LI Z X. Design and experimental verification of disc spring devices in self-centering reinforced concrete shear walls [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(7): e2549.
- [17] HU S L, WANG W, ALAM M S. Hybrid self-centering rocking core system with fiction spring and viscous dampers for seismic resilience [J]. Engineering Structures, 2022, 257: 114102.
- [18] 徐龙河,肖水晶.内置碟簧自复位混凝土剪力墙基于性能的截面设计方法[J].工程力学,2020,37(4):70-77,86.
   XU Longhe, XIAO Shuijing. A performance-based

section design method of a self-centering concrete shear wall with disc spring devices [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 70 - 77, 86. (in Chinese)

[19] 金双双,李盈开,周建庭,等. 全装配式自复位防屈曲支 撑滞回模型及其性能试验研究[J]. 工程力学, 2022, 39(7): 49-57.
JIN Shuangshuang, LI Yingkai, ZHOU Jianting, et al. Hysteresis model and experimental investigation of assembled self-centering buckling-restrained braces [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(7): 49 - 57. (in

Chinese) [20] 陈曦, 徐龙河, 肖水晶. 碟簧装置恢复力模型及其在自 复位RC剪力墙中的应用[J]. 工程力学, 2021, 38(9): 100-109.

CHEN Xi, XU Longhe, XIAO Shuijing. Restoring force model of disc spring devices and its application in self-centering RC shear wall [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(9): 100 - 109. (in Chinese)

- [21] RESTREPO J I, RAHMAN A. Seismic performance of self-centering structural walls incorporating energy dissipators [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11): 1560 – 1570.
- [22] WANG B, ZHU S Y, ZHAO J X, et al. Earthquake resilient RC walls using shape memory alloy bars and replaceable energy dissipating devices [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(6): 065021.
- [23] XU L H, XIAO S J, LI Z X. Hysteretic behavior and parametric studies of a self-centering RC wall with disc spring devices [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 476 – 488.
- [24] GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国 建筑工业出版社, 2010.
  GB 50010-2010, Code for design of concrete structures
  [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [25] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
  GB 50011-2010, Code for seismic design of buildings
  [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [26] LU X Z, XIE L L, GUAN H, et al. A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2015, 98: 14 - 25.