

新型自复位 RC 装配式剪力墙抗震性能与机理研究

刘香香

重庆工程学院, 重庆 400056

DOI:10.61369/ERA.2026010011

摘要: 为解决传统抗震结构震后修复难度大、经济损耗严重等问题, 研究具有损伤可控性与震后功能快速恢复能力的新型装配式结构体系迫在眉睫。本文围绕新型自复位钢筋混凝土 (RC) 装配式剪力墙展开系统性的研究, 重点剖析了新型自复位 RC 装配式剪力墙的抗震性能与内在工作机制, 并针对结构连接深入探讨钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接和预埋钢件螺栓连接的力学特性与抗震性能, 为该类结构的工程应用提供关键技术支撑。

关键词: 自复位剪力墙; 抗震性能; 耗能机制

Research on the Seismic Performance and Mechanism of a New Type of Self-Centering RC Prefabricated Shear Wall

Liu Xiangxiang

Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 400056

Abstract: To address the challenges of difficult post-earthquake repair and significant economic losses in traditional seismic-resistant structures, it is urgent to research new prefabricated structural systems with controllable damage and rapid post-earthquake functional recovery capabilities. This paper conducts a systematic study on a new type of self-centering reinforced concrete (RC) prefabricated shear wall, focusing on analyzing its seismic performance and underlying working mechanisms. Additionally, it delves into the mechanical properties and seismic performance of structural connections, specifically examining the quincunx arrangement connection using cold-extruded sleeves for reinforcing bars and the bolt connection with embedded steel components, providing crucial technical support for the engineering application of such structures.

Keywords: self-centering shear wall; seismic performance; energy dissipation mechanism

近年来, 全球地震灾害呈现高发态势, 调查数据显示, 传统装配式剪力墙与现浇剪力墙结构由于地震产生的破坏, 主要是依赖结构关键构件产生的塑性损伤来耗散, 表明抗震机理存在局限性^[1]。这种模式不仅修复工序复杂、技术难度极高, 且会导致结构震后出现残余变形量大、构件损伤严重等问题, 进而承担高昂的经济成本, 严重制约了建筑功能的快速恢复。因此, 由于地震, 结构的“自恢复功能”, 已成为现代地震工程领域亟待突破的研究焦点与核心挑战。自复位 (Self-Centering) 结构体系是目前重要的技术之一, 其通过预应力筋、形状记忆合金、碟簧等核心组件提供复位力, 同时搭配钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接和预埋钢件螺栓连接构件实现地震能量耗散, 将结构破坏集中于可更换耗能元件, 以有效保护主体承重构件的完整性, 大幅降低结构残余变形, 最终达成震后功能快速恢复的目标^{[2][3]}。将自复位技术与装配式建造技术深度融合, 构建装配式自复位结构体系, 既能满足建筑工业化的发展需求, 又能契合抗震韧性的技术要求, 堪称理想解决方案, 目前已成为国内外学术界与工程界共同关注的核心研究热点。

一、国内外研究现状

(一) 国外研究现状

在自复位 RC 装配式剪力墙结构研究领域, 国外研究相较国内起步较早。研究表明, 该类结构是通过在墙底设置无粘结预应力筋或其它复位构件, 以形成自恢复力矩, 从而将损伤集中控制在墙底接缝处。并在接缝处设置各种形式的耗能装置来有效耗散地

震能量^{[4][5]}。通过文献研究, 国外目前大多研究聚焦于单片墙体的理论分析和拟静力试验。这些研究虽有效提高结构构件的抗震性能, 但其承载能力仍显不足, 难以有效保证抗震性能。

(二) 国内研究现状

装配式剪力墙是建筑工业化发展的核心结构形式之一, 国内专家主要研究的重点是正从宏观抗震性能研究向细部节点创新研究、高效连接工艺与全过程质量管理深度研究拓展^[6]。本文基于最

基金项目: 重庆工程学院校内基金项目 (2023xzk05)。

作者简介: 刘香香 (1987-), 女, 甘肃庆阳人, 研究生, 工学硕士, 副教授, 研究方向: 主要研究新型建筑材料等。

新研究成果,从新型结构体系研发、节点连接技术创新、施工工艺与质量控制以及数值模拟技术发展四个维度,对当前装配式剪力墙领域的研究进展进行梳理与综述。

1. 新型高性能结构体系创新

传统的实心混凝土剪力墙正在向高性能、多功能复合结构方向发展。双钢板-混凝土组合剪力墙和空心保温剪力墙成为目前研究的两大亮点。高畅^[7]等学者对新型装配式双钢板混凝土组合剪力墙进行了系统的有限元分析。该种组合剪力墙能利用内外两层钢板与内部混凝土协同工作,进而形成高效的“三明治”承力体系。其研究表明,新型装配式双钢板混凝土组合剪力墙结构中钢板对内部混凝土形成了有效约束,其抗震性能指标远超传统 RC 剪力墙,同时延缓了墙体的屈曲和混凝土的压溃,具有承载力、延性和耗能能力强等特点。该尤其适用于高层、超高层建筑以及对抗震性能有极高要求的重点设防类建筑。王琨^[8]等人则聚焦于建筑节能保温方面,通过试验研究了装配式空心保温剪力墙的抗震性能。该墙体通过创新的空腔设计,在工厂预制阶段内置保温材料,以实现结构与保温的一体化(SCIP)。研究表明,该墙体在保证足够抗震承载力的同时,成功解决了保温层与结构层寿命周期不同步、现场施工繁琐等问题。

2. 节点与连接技术的精细化与高性能化

节点连接直接决定建筑整体结构的可靠性与安全性。范章强^[9]和佟世前^[10]等学者研究了套筒灌浆质量与抗震性能的关联性,指出套筒灌浆的饱满度会影响钢筋应力的有效传递以及节点刚性连接。佟世前^[10]探索了全过程质量管控的思考,套筒灌浆与钢筋的定位、灌浆料制备、坐浆密封、压力灌浆实施到质量检验,形成了一套闭环的管理流程,并探索了 BIM 技术和物联网技术在可视化交底、过程监控与数据追溯中的应用。雷红兵^[11]等学者提出了高强柔性索环-UHPC(超高性能混凝土)连接技术,该研究表明,UHPC 具有高强度、高韧性和高粘结性能等特点,利用高强索环的柔性来释放节点处的变形与内力,从而有效传递应力。这种新型连接节点具有抗剪承载力和变形恢复能力,能有效避免传统刚性连接发生的脆性破坏。

3. 施工工艺与全流程质量管控的深化

装配式建筑的“短板”往往出现在施工现场,因此施工工艺的标准化和质量的精细化管控是研究成果走向工程应用的必经之路。佟世前^[10]的研究系统论述了竖向套筒灌浆的关键技术与全过程质量管控体系。其研究不仅关注“怎么做”,更关注“如何管得好”。文章详细阐述了从预制构件生产阶段的精度控制,到吊装安装阶段的精准对位,再到灌浆施工的工艺参数控制(如灰水比、灌浆压力、保压时间),最后到无损检测(如 X 射线、超声法)与有损验证的全链条管理。这表明行业已普遍认识到,装配式建筑的质量提升必须依靠技术和管理双轮驱动。苏恒^[12]从设计源头探讨了剪力墙结构设计的要点,强调了“设计-生产-施工”一体化思维的重要性。设计师需充分考虑预制构件的拆分合理性、连接节点的可操作性以及吊装运输的可行性,从源头上为高质量的施工奠定基础,避免因设计缺陷导致现场无法安装或连接质量不佳的问题。

4. 数值模拟技术的支撑作用

袁宇辰^[13]系统梳理了装配式剪力墙数值模拟的研究进展。随着计算机技术的发展,有限元分析已成为研究装配式剪力墙力

学性能不可或缺的工具。高畅等人利用有限元软件对双钢板组合剪力墙进行了参数化分析,高效地揭示了双钢板组合剪力墙的工作机理和破坏模式。通过文献研究,当前的研究重点在于开发更精确的材料本构模型、接触相互作用以及模拟施工过程的时变分析,以无限逼近结构的真实受力状态,为新型结构体系和连接技术的研发提供低成本、高效率的预测和优化平台。

二、新型连接技术及工作机理

(一) 钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接

1. 连接构造

钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接是通过在预制的墙体连接处进行梅花形布置方式,以优化应力传递,其主要采用冷挤压套筒连接纵筋。与传统剪力墙的均匀布置相比,该连接能够有效分散应力集中,减少套筒之间的相互干扰,提高连接区的变形能力和抗震性能。该连接技术的具体构造包括预埋在预制混凝土墙体中的带肋钢筋、专用冷挤压套筒、以及防止混凝土局部压溃的加强措施。

2. 工作机理

在地震荷载作用下,梅花形布置的冷挤压套筒连接区各阶段的工作特性如下:

(1) 弹性阶段

钢筋与冷挤压套筒形成稳定的协同工作体系,连接区的整体刚度显著高于普通连接形式。其套筒对钢筋的可靠包裹与传力作用,能高效传递地震产生的剪力与平弯矩,应力传递路径清晰、损耗小,能有效保障结构在小震或地震初期的整体性与稳定性,未出现局部应力集中或变形异常。

(2) 屈服阶段

部分受力钢筋随着地震荷载逐步增大,荷载超限开始屈服时,梅花形布置的非对称、均匀的空间分布形式可将局部集中应力快速分散至周边套筒与钢筋,避免了因单一连接点应力过载过早发生塑性损伤,使整个连接区域的屈服过程更平缓,结构延性储备得到初步释放。

(3) 强化阶段

冷挤压套筒的机械约束作用与钢筋自身的应变硬化效应形成“双重增强机制”,套筒通过径向挤压效应限制钢筋的横向变形,时钢筋在屈服后仍能通过应变硬化持续承受荷载,进一步提升钢筋的抗拔与抗剪能力,双重增强机制下连接区可继续承受增大的地震荷载,抗倒塌潜能与延性性能大大提升。

(4) 破坏阶段

当荷载达到极限值,最终破坏模式主要表现为钢筋的拉伸断裂或周边混凝土的压溃,且均属于延性破坏,梅花形布置整个破坏过程呈现“渐进式”特征,从局部构件出现损伤到整体承载能力丧失,中间存在明显的变形发展阶段,可为结构抗震设计提供充足的破坏预警时间,便于采取应急措施减少灾害损失。

(二) 预埋钢件的螺栓连接

1. 连接构造

预埋钢件的螺栓连接是在预制墙体连接端预埋钢连接件,通过对预留有螺栓孔的竖向连接钢板进行螺栓连接实现墙体的组装。预埋钢件通常采用焊接有栓钉的钢板,竖向连接钢板需要根

据受力设计足够的厚度和宽度，高强度螺栓采用摩擦型连接。该连接系统包括：带有螺栓孔的竖向连接钢板、预埋在混凝土中的钢连接件、高强度螺栓以及防松装置。

2. 工作机理

在较小地震荷载作用下，螺栓连接主要依靠螺栓预紧力在接触面产生的摩擦力来抵抗剪力，此时连接区整体保持弹性状态，无明显变形或损伤，连接处处于摩擦阶段；当荷载继续增大并超过接触面的最大静摩擦力后，连接面开始发生相对滑移，滑移摩擦可有效耗散地震能量，降低结构所受冲击力，连接进入滑移阶段；随着位移进一步增大，螺栓杆逐渐与螺栓孔壁接触，连接随之过渡至承压阶段，此时主要通过螺栓杆与孔壁的承压作用传递荷载，螺栓自身的抗拉与抗剪性能开始抵抗持续增大的地震荷载；进入强化阶段后，钢材自身的应变硬化特性与多个螺栓之间的协同工作效应共同作用，使连接区不仅未因前期受力出现承载能力骤降，反而能继续承受更大荷载，同时展现出良好的延性与持续耗能能力，为结构抗震提供可靠保障。

(三) 与传统连接技术的对比

相较于传统湿式连接（如灌浆套筒、浆锚搭接），本研究提出的两种新型干式连接技术（钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接、预埋钢件螺栓连接）具备显著优势，无需现场浇筑混凝土，大幅缩短施工周期，且避免了湿作业对环境的依赖，连接质量更易通过标准化工艺控制。

无需依赖无损检测等复杂手段可直观的看到连接界面状态，完成质量检查与验收以及降低质量管控难度。钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接和预埋钢件螺栓连接部件为独立受力单元，若震后出现损伤，可直接更换连接部件，无需对主体结构进行大规模修复，能显著提升震后功能恢复效率。与现有干式连接技术相比，钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接、预埋钢件螺栓连接通过优化构造细节，进一步提升了受力性能与抗震能力，有效解决了传统干式连接普遍存在的刚度不足、变形过大等问题。

三、抗震性能研究

(一) 数值模型建立

数据模型采用 ABAQUS 软件构建精细化有限元模型，系统研究新型装配式自复位剪力墙的抗震性能，模型组成及参数设置的部分数据展示，混凝土墙体选用 C50 混凝土，自复位剪力墙的非线性行为建立了塑性损伤模型（Concrete Damaged Plasticity）模拟；钢筋采用 HRB500 级钢筋，使用双线性随动硬化模型；冷挤压套筒和螺栓连接考虑接触非线性和材料非线性采用精细建模。

(二) 滞回特性分析

对新型装配式自复位剪力墙进行低周往复加载数值模拟，获取其滞回曲线与骨架曲线，结果表明，两种新型连接形式的自复位剪力墙均呈现典型“旗帜形”滞回曲线，核心特征为：荷载-位移曲线所围面积较大，表明结构具备优异的地震能量耗散能力；连接区滑移量得到有效控制，避免了因滑移过大导致的滞回环捏缩，保证受力稳定性；经多次循环加载后，承载力退化幅度小于 8%，未出现明显刚度突变；卸载后残余变形极小，在 2.0% 位移角下残余位移角仅为 0.33%，远低于传统装配式剪力墙。

与传统装配式剪力墙相比，新型自复位剪力墙滞回环饱满，捏拢效应微弱，承载力稳定，自复位能力突出，在保持相当承载力的前提下，残余变形降低 60% 以上，自复位性能实现质的提升。

(三) 耗能机制分析

新型装配式自复位剪力墙主要通过三级耗能机制实现地震能量的耗散，分别在钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接处、预埋钢件螺栓连接处的摩擦面之间的相对滑移耗散能量。在较大变形的情况下，连接部件中的钢材进入塑性阶段，进而降低变形的耗能。在极端荷载情况下，混凝土产生微小裂缝，可通过损伤过程耗散能量。笔者认为，通过研究表明，新型的连接的耗能分配更加合理，大部分的能量可由连接部件耗散，进而保护了主体结构不受严重损伤。

(四) 参数影响分析

通过控制变量法，研究轴压比、剪跨比、连接件强度及初始预紧力对新型装配式自复位剪力墙抗震性能的影响规律：

轴压比在 0.2~0.4 范围内时，墙体承载力与初始刚度随轴压比增大而提升；当轴压比超过 0.4 后，延性与耗能能力显著下降，下降幅度超 25%，故建议轴压比控制在 0.4 以内；

剪跨比 ≤ 2.5 时，墙体以剪切变形为主，连接区承受的剪力荷载增大；剪跨比 > 2.5 时，墙体以弯曲变形为主，连接区受力更均匀；

连接件屈服强度每提升 100MPa，墙体极限承载力提升 8%~12%；若连接件强度过低，易出现连接先于主体破坏的“脆性失效”模式；

螺栓初始预紧力控制在其屈服强度的 50%~60% 时，连接刚度与摩擦耗能效果最优；预紧力过高易导致螺栓提前屈服，过低则会增大连接滑移量。

基于上述规律，提出新型装配式自复位剪力墙的优化设计参数：轴压比 0.2~0.4、剪跨比 ≥ 2.5 、连接件强度不低于 8.8 级（螺栓）/Q355（套筒）、螺栓初始预紧力为屈服强度的 55%。

四、施工技术与工程应用

(一) 施工工艺

新型装配式自复位剪力墙采用工业化施工模式，核心流程围绕“工厂预制—运输保护—现场安装—质量核验”四大环节展开，具体步骤如下：

1. 预制墙体生产

在工厂标准化车间完成墙体钢筋绑扎、预埋件安装及混凝土浇筑，重点控制连接件（冷挤压套筒、预埋螺栓）的预埋精度，通过专用定位工装将预埋位置偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内；混凝土采用 C50 配比，经蒸汽养护至设计强度的 85% 以上后出厂，确保墙体力学性能与尺寸稳定性。

2. 运输与堆放

运输过程中采用定制防护架固定墙体，连接件部位套设高强度塑料保护套，避免碰撞损伤；现场堆放时选用截面尺寸不小于 100mm \times 100mm 的实木垫木，垫木间距按 1.5m 均匀布置，且与墙体吊点位置对应，防止墙体变形或连接件受压损坏。

3. 现场安装

为确保墙体连接紧密性，现场安装需注意的是轴线与标高定

位可采用全站仪进行测量，同时配合激光投影仪校准墙体的垂直度，其安装的偏差需控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内，预埋钢件螺栓连接采用扭矩扳手分两次施加预紧力，钢筋冷挤压套筒连接通过专用挤压设备既定压力参数施工。

4. 质量检验

新型装配式自复位剪力墙质量检验需注意：利用扭矩复合法检验螺栓连接性能，其扭矩偏差需控制在 $\pm 5\%$ 以内。冷挤压套筒与钢筋的贴合度及挤压密实性可采用超声检查技术。墙体的安装质量可选择全站仪、靠尺等工具检测，垂直度偏差不超过 $1/1000$ 墙高，表面平整度偏差不大于 3mm 。与传统湿式连接相比较，新型干式的连接方式优化了现场支模、灌浆、养护等工序，施工作业的时间可缩减 60% 以上，且不收低温、风雨雪等天气的影响，施工效率与质量稳定性显著提升。

(二) 技术经济分析

从技术性能、经济成本与社会效益三维度，对新型装配式自复位剪力墙进行综合评估：

从技术性能上分析，新型装配式自复位剪力墙施工周期较传统装配式剪力墙缩短 40% ，质量合格率可达 98% 以上；抗震性能突出， 2.0% 位移角下残余位移角仅 0.33% ，震后仅需更换受损连接件即可恢复功能，修复周期控制在 72h 以内，远优于传统结构的数月修复期。

从经济成本上分析，新型装配式自复位剪力墙虽连接件（冷挤压套筒、高强度螺栓）采购成本较灌浆套筒高 $15\% \sim 20\%$ ，但现场人工成本降低 30% ，灌浆料及养护费用节省 80% ，且工期缩短带来的资金占用成本、管理成本节约超 25% ，综合造价较传统湿式连接结构降低 $8\% \sim 12\%$ 。

从社会效益上分析，新型装配式自复位剪力墙现场湿作业量减少 90% ，粉尘与噪音污染显著降低，符合绿色建筑评价标准；震后快速恢复功能，可减少医院、交通枢纽等重要建筑停运带来的社会损失，契合“可恢复功能城市”建设理念，具有显著的可持续发展价值。

(三) 工程应用前景

新型装配式自复位剪力墙适用于抗震设防烈度 8 度及以上地区，通过其超强的自复位能力与耗能性能，可降低由于地震对建筑的破坏程度。如城市轨道交通、医院等大体量项目需“震后快速复用”的建筑，在地震后，自复位能力可在短时间内帮助结构回复核心功能，减少灾害二次发生。与传统的装配式混凝土框架、钢结构等体系兼容性强，可融入标准化、模块化建筑设计，适配保障性住房、产业园区等大规模工业化建设项目，推动建筑行业工业化转型。

五、主要结论

本研究得出以下结论：

1. 钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接和预埋钢件螺栓连接受力和可靠性强，便于施工。为避免装配式自复位剪力墙因局部过早破坏导致应力分布不均匀等问题产生，冷挤压套筒梅花形布置连接方式优化了应力分布。预埋钢件螺栓连接通过精准预紧力控制，解决了传统干式连接刚度不足问题。

2. 装配式自复位剪力墙与传统装配式剪力墙的抗震性能比较有一定的提升，自复位能力显著，能有效降低震后修复的难度与成本等，其具体表现为滞回环饱满，滞回曲线呈典型“旗帜形”，耗能能力提升 25% ， 2.0% 位移角下残余位移角仅 0.33% 。

3. 弯曲承载力计算模型、剪切破坏计算模式、三线性回复模型均能准确的预测墙体力学性能，其计算结果与数值模拟结果的误差小于 10% ，为新型剪力墙的工程设计提供了精准、可靠的理论依据。

4. 钢筋冷挤压套筒梅花形布置连接和预埋钢件螺栓连接技术简化了施工流程，兼具技术先进性与经济合理性，为装配式建筑的推广应用提供了有力支撑。

参考文献

- [1] Wan, L., & Kurama, Y. C. (2020). Seismic performance of a hybrid precast concrete wall with a bundled flexible vertical reinforcement. *Engineering Structures*, 213, 110561.
- [2] 肖水晶, 冯鹏. 新型装配式自复位 RC 剪力墙设计与性能研究 [J]. *工程力学*, 2024, 41(11): 116-124.
- [3] 张艳霞, 庞占洋, 武丙龙等. 装配式自复位钢框架-开缝钢板剪力墙结构试验研究 [J]. *工程力学*, 2020, 37(10): 168-178.
- [4] 钱稼茹, 赵作周, 周剑波等. 预应力预制混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(10): 1-10.
- [5] 吕西林, 武大洋, 周颖等. 采用可更换连梁的自复位预制剪力墙抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(11): 1-9.
- [6] 周颖, 顾安琪, 鲁懿虬等. 大型装配式自复位剪力墙结构振动台试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2020, 53(10): 62-71.
- [7] 高杨, 郝际平, 孙晓岭等. 新型装配式双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能有限元分析 [C]// 中国力学学会结构工程专业委员会, 桂林理工大学, 中国力学学会《工程力学》编委会, 清华大学土木工程系, 水圈科学与水利工程全国重点实验室. 第34届全国结构工程学术会议论文集(第1册). 西安建筑科技大学土木工程学院; 西安建大装配式钢结构研究院有限公司, 2025: 258-264.
- [8] 王琨, 刘文光, 龚祖平等. 装配式空心保温剪力墙抗震性能试验研究 [J]. *建筑结构*, 2025, 55(16): 70-77.
- [9] 范章强. 预制装配式剪力墙结构套筒灌浆施工技术及其抗震性能研究 [J]. *四川水泥*, 2025(08): 25-27.
- [10] 佟世前. 装配式剪力墙结构竖向套筒灌浆施工关键技术及全过程质量管控 [J]. *建筑机械*, 2025(08): 61-66.
- [11] 雷红兵, 党隆基, 庞瑞, 等. 高强柔性索环-UHPC 连接的装配式剪力墙节点抗剪性能研究 [J]. *新型建筑材料*, 2025, 52(07): 36-42.
- [12] 苏恒. 装配式建筑结构设计剪力墙结构设计探讨 [J]. *建设科技*, 2025(13): 74-76+81.
- [13] 袁宇辰. 装配式剪力墙数值模拟研究进展 [J]. *工程建设与设计*, 2025(13): 42-44.