

城市老旧建筑改造中韧性化结构加固技术优化与应用

张淑芳¹ 蒙核量²

1. 武汉市洪山区城市更新服务中心 湖北 武汉 430070
2. 武汉市测绘研究院 湖北 武汉 430022

摘要：为解决城市老旧建筑结构韧性不足、传统加固技术适配性差的问题，本文剖析老旧建筑结构病害与韧性缺陷，分析传统加固技术的应用局限。依托韧性结构理论，优化消能减震、外附子结构、复合材料及地基加固等关键技术与施工工艺，通过数值模拟与实体工程验证方案有效性。结果表明，优化后的韧性加固技术可显著提升建筑结构抗灾、耗能与可修复能力，兼顾风貌保护与功能活化，具备良好的工程应用与推广价值。

关键词：城市老旧建筑改造；韧性化结构；加固技术；优化；应用

引言：随着城市有机更新进程推进，大量老旧建筑因设计标准偏低、长期自然侵蚀与荷载作用，出现结构老化、承载力不足、韧性薄弱等问题，存在极大安全隐患。传统加固技术侧重强度提升，存在延性不足、不可逆、易破坏建筑风貌等短板，难以适配现代化保护性改造需求。基于此，本文围绕老旧建筑韧性化结构加固技术展开优化研究，结合工程实际验证技术成效，为老旧建筑安全提质与可持续更新提供技术参考。

1 城市老旧建筑结构韧性理论与现存病害分析

1.1 建筑结构韧性核心理论

(1) 结构韧性定义与核心内涵。老旧建筑结构韧性是指建筑结构在灾害与复杂荷载作用下，具备的综合抵抗与恢复能力，核心包含抗灾、耗能、自愈、快速恢复四大特征，可有效降低结构损伤、规避坍塌风险，保障建筑服役稳定性。(2) 韧性结构与传统加固结构的差异。传统加固以强度、抗震加固为主，核心是提升结构承载力、满足基础抗震需求，技术侧重补强构件强度，优势是施工简便、适配常规病害整治。而韧性加固以结构整体性能优化为核心，侧重提升结构耗能、冗余与自愈能力，可应对突发复杂荷载，适配老旧建筑长期服役的复杂工况。(3) 老旧建筑韧性改造设计原则。改造需严格遵循五大核心原则，坚持最小干预减少对原有结构的破坏，采用可逆改造技术保留后续优化空间，兼顾原有建筑风貌保留，同步实现结构性能提升，选用绿色耐久材料保障改造后结构长期稳定。

1.2 城市老旧建筑常见结构类型与特性

(1) 砌体结构老旧建筑。该类建筑整体性极差，墙体抗剪、抗拉能力薄弱，结构无多余受力冗余，荷载传递单一，在地震、沉降作用下易出现墙体开裂、整体坍塌等问题。(2) 钢筋混凝土结构老旧建筑。长期服役易

出现混凝土碳化、保护层脱落、钢筋锈蚀等问题，构件老化严重，结构延性大幅不足，耗能与抗变形能力持续衰减。(3) 混合结构老旧建筑。不同结构构件受力性能差异大，整体受力不均，节点连接薄弱，结构体系杂乱无序，荷载传递紊乱，整体稳定性较差。

1.3 老旧建筑结构病害与韧性缺陷分析

(1) 材料层面病害。普遍存在混凝土剥落、砌体风化粉化、钢筋锈蚀膨胀等问题，各类建筑材料强度持续衰减，彻底丧失原始设计性能。(2) 构件层面缺陷。梁柱普遍存在裂缝、墙体破损脱落、地基不均匀沉降、构件变形超标等病害，核心承重构件损伤严重。(3) 体系层面韧性短板。整体结构冗余不足，耗能、抗突发荷载能力弱，灾害发生后损伤扩散快，灾后检测、修复难度大，改造成本高^[1]。

1.4 老旧建筑改造加固的韧性需求指标

(1) 安全韧性指标。以抗震、抗风、抗不均匀沉降为核心，保障结构极限承载能力，抵御各类突发灾害荷载。(2) 功能韧性指标。满足建筑功能更新需求，保障改造后结构长期稳定服役，适配日常使用与工况变化。(3) 修复韧性指标。实现结构损伤可控、损伤范围可预判，同时保证修复施工便捷、改造成本可控，提升建筑灾后快速恢复能力。

2 城市老旧建筑韧性化结构加固技术优化研究

2.1 传统结构加固技术及局限性分析

(1) 传统加固核心技术。现阶段老旧建筑改造常用传统加固技术主要包括增大截面法、包钢加固法、FRP包裹法与注浆加固法。增大截面法通过增设混凝土层提升构件承载力，工艺成熟、适用性广；包钢加固法依靠外包钢材提升构件强度，施工速度快；FRP包裹法利用碳纤维材料轻质高强的特性补强构件性能；注浆加固法主要

用于砌体与地基裂隙填充,实现结构密实度补强,是老旧建筑病害整治的常规技术手段。(2)传统技术应用痛点。传统加固技术多以单纯提升结构极限承载力为核心,存在明显的韧性缺陷。多数加固方式刚度提升显著,但结构延性、耗能能力与受力冗余不足,灾害荷载下易发生脆性破坏。同时传统工艺普遍施工扰动大,易损伤原有建筑结构构件,多数加固方式具备不可逆性,改造后无法二次优化,极易破坏建筑原有风貌,难以适配现代城市老旧建筑保护性更新的改造需求^[2]。(3)传统技术韧性优化方向。针对传统加固技术重强度、轻韧性的短板,本次研究明确由单一强度加固向强度-延性-冗余协同加固的优化思路。在保障结构基础承载安全的前提下,重点提升结构耗能能力、变形适配能力与灾后冗余储备,兼顾加固可逆性、风貌保护性与可修复性,实现老旧建筑结构安全、韧性、耐久性的全方位升级。

2.2 韧性化结构加固关键技术优化设计

(1)消能减震加固技术优化。结合老旧建筑室内空间受限、构件布局紧凑的特点,优化阻尼器与耗能支撑的布设位置与数量,摒弃传统集中式布设方式,采用分散对称布设方案。有效提升结构在地震、风荷载作用下的能量耗散能力,减小结构变形损伤,大幅提升建筑整体抗灾韧性,同时避免占用建筑使用空间。(2)外附子结构加固技术优化。对传统外附加固体系进行轻量化改良,优化外附钢支撑与辅助框架结构体系,简化构件构造、降低结构自重。采用可逆式连接工艺,无需大规模破除原有建筑构件,实现低扰动加固,在提升结构整体稳定性与冗余度的同时,完整保留建筑原有外立面与整体风貌。(3)复合材料韧性加固技术优化。基于碳纤维、高强聚合物复合材料特性,优化基层处理、粘贴锚固、表层防护等施工工艺,解决传统复合材料加固易脱粘、抗疲劳性差的问题。有效提升梁柱等核心构件的延性与抗变形能力,增强结构损伤自愈与可修复性能,提升结构长期服役韧性。(4)地基基础韧性加固技术优化。改良传统注浆与微型桩基加固工艺,优化注浆压力、浆液配比与桩基布设参数,针对性解决老旧建筑地基不均匀沉降、基础密实度不足等问题。提升地基基础的整体性、稳定性与受力冗余,避免基础局部损伤引发整体结构破坏^[3]。

2.3 韧性加固技术施工工艺优化

(1)精细化微创施工工艺。优化钻孔、植筋、注浆等核心施工流程,采用小型微创施工设备,精准定位施工区域,减少对原有墙体、梁柱构件的开凿与损伤。严控施工精度,降低施工扰动对原生结构的二次破坏,适配保护性改造要求。(2)分区分段加固施工方法。根据

建筑结构病害分布、构件损伤程度及结构受力特点,划分差异化施工区域,制定针对性施工顺序与加固方案。对核心承重构件优先补强,对薄弱区域重点加固,有效控制施工过程中的结构风险,保障改造期间建筑整体稳定性^[4]。(3)绿色耐久施工优化。选用低碳、抗老化、高耐久的新型加固材料,替代传统高损耗材料。优化后期养护工艺,根据温湿度调整养护周期与防护措施,减少施工污染,提升加固构件的耐久性与稳定性,延长建筑整体服役寿命。

2.4 韧性加固技术数值模拟优化验证

(1)建立老旧建筑结构数值模型。依托建筑原始图纸与现场检测数据,精准还原建筑结构尺寸、材料性能、构件损伤与地基受力状态,构建贴合实际工况的数值分析模型,为加固方案模拟分析提供精准基础。(2)加固前后结构性能对比模拟。通过数值模拟对比分析加固前后结构的极限承载力、变形能力、延性指标与抗震性能,明确韧性加固技术对结构整体性能的提升效果,验证优化技术的有效性与合理性。(3)技术参数最优取值确定。设置多组梯度化设计参数开展对比模拟试验,分析不同布设方式、材料参数、施工参数对加固效果的影响,筛选出适配老旧建筑改造的最优技术参数,为实际工程应用提供标准化参考依据。

3 工程应用与韧性效果综合评价

3.1 工程概况与改造需求

(1)项目基本信息。本次改造对象为城市城区典型老旧民用建筑,建设年代较早,主体采用钢筋混凝土混合结构,整体建筑面积适中,长期投入常态化服役。建筑历经多年自然环境侵蚀与荷载作用,原始结构设计标准偏低,长期服役下出现不同程度的结构老化问题,整体服役状态趋于薄弱,已无法完全适配现行结构安全与抗震设计规范要求。(2)结构病害检测结果。结合现场专项检测结果可知,建筑主体结构存在混凝土碳化、表层剥落、局部钢筋锈蚀等材料病害,部分梁柱构件存在细微开裂、变形超标等构件缺陷。地基存在轻微不均匀沉降现象,结构节点连接老化、整体性较弱。整体结构受力冗余不足、耗能能力较差,存在明显韧性缺陷,极端荷载下易出现损伤扩散问题。(3)改造设计目标。依据现行建筑加固与抗震设计规范,结合建筑保护与更新需求,确立多重改造目标。在保障结构安全的基础上,提升建筑整体抗灾韧性与耐久性能;采用低扰动改造方式保留建筑原有整体风貌与外观特征;优化内部结构体系,适配现代使用功能需求,实现老旧建筑安全提质、风貌留存、功能活化的综合改造效果。

3.2 韧性化加固技术方案实施

(1) 整体加固方案设计。结合建筑结构体系特点、病害分布情况与空间布局条件,整合前文优化后的消能减震、外附子结构、复合材料加固与地基加固技术,制定复合型韧性加固方案。摒弃传统单一强度加固模式,以补强结构薄弱区域、提升整体延性与受力冗余为核心,兼顾施工可行性与建筑风貌保护性要求,形成系统性改造体系。(2) 关键部位专项加固施工。针对结构病害集中、受力薄弱的关键部位开展专项精细化加固。对开裂、锈蚀损伤梁柱采用复合材料韧性加固工艺,提升构件延性与抗疲劳能力;对薄弱墙体实施微创注浆补强,增强结构整体性;对梁柱节点进行专项加固,优化节点受力性能;同时改良地基加固工艺,有效控制不均匀沉降问题,强化基础稳定性。(3) 施工质量控制要点。施工全过程落实精细化质量管控,严格把控材料进场、基面处理、施工操作及养护验收等关键环节,确保加固工艺贴合技术优化标准。落实施工现场安全防护措施,规避老旧建筑改造施工风险。采用分区分段施工模式,合理规划施工工序与进度,保障施工过程中结构安全与改造工程有序推进^[5]。

3.3 加固后结构韧性性能检测与分析

(1) 现场性能检测。改造完成后开展全方位结构性性能现场检测,重点测试建筑主体结构极限承载力、抗震耗能性能、抗变形能力及整体刚度,核查加固构件粘结质量、地基沉降稳定性等关键指标,确保各项性能参数符合韧性改造设计标准与国家规范要求。(2) 模拟与实测结果对比。将现场实测数据与前期数值模拟结果进行比对分析,校验结构数值模型的精准度,修正模型参数偏差。结果表明优化后的韧性加固技术实际应用效果与模拟规律高度吻合,验证了技术优化方案的科学性与可靠性。(3) 结构韧性提升效果分析。从多维度综合评估改造成效,加固后结构抗灾承载能力显著提升,构件延性与耗能能力明显改善,结构损伤具备可控性与可修复性。同时建筑耐久性大幅提升,可长期适配现代使用功能,彻底解决了原结构韧性不足、抗风险能力弱的核心问题。

3.4 综合效益与应用推广分析

(1) 安全效益。经韧性化加固改造后,建筑结构受力冗余显著提升,整体抗震、抗变形、抗突发荷载能力大幅增强,有效规避了老旧建筑服役期间的结构坍塌、局部破损等安全风险,极大提升了建筑长期服役安全性。(2) 经济与社会效益。相较于传统加固方案,韧性加固技术施工扰动小、后期运维成本低、服役寿命更长,可有效降低重复改造的经济投入。同时兼顾建筑风貌保护与功能更新,契合城市有机更新发展理念,具备良好的民生价值与城市更新效益。(3) 技术推广适用性。本次优化的韧性加固技术适配钢筋混凝土、砌体、混合结构等各类老旧建筑改造场景,可兼顾安全加固、风貌保护与功能升级多重需求,工艺成熟、适配性强,可广泛应用于城市老旧建筑更新改造工程,具备极高的工程推广价值。

结束语

本文完成了老旧建筑结构韧性理论、病害缺陷、技术优化与工程应用的系统性研究,改良了传统加固技术的韧性短板,形成了一套低扰动、可逆性、高耐久的韧性加固体系。工程实践证明,该技术可有效提升结构综合抗灾能力与服役稳定性,兼顾安全、功能与风貌保护。研究成果可适配多类型老旧建筑改造场景,能够有效降低改造成本,为城市老旧建筑韧性化改造提供标准化、可推广的技术方案。

参考文献

- [1]邱顺花.基于既有老旧建筑的加固与改造技术实践研究[J].中国高新科技,2023,11(21):134-136.
- [2]乔雄威.老旧建筑改造中建筑结构加固技术探讨[J].新疆钢铁,2025,8(4):66-68.
- [3]夏兰兰,赵阳.城市老旧建筑改造中的结构加固与性能提升策略[J].居舍,2025,15(26):47-50.
- [4]赵宇.建筑结构加固技术在老旧建筑改造中的应用设计[J].建设科技,2025,5(11):75-77.
- [5]韩天.老旧小区改造中建筑结构加固技术探讨[J].住宅与房地产,2025,20(13):87-89.