

既有钢筋混凝土结构修复加固技术研究综述

陈维雅

西南科技大学土木工程与建筑学院, 中国·四川 绵阳 621000

摘要: 我国城镇化已进入存量提质改造与增量结构调整并重的新阶段, 大量既有钢筋混凝土结构因设计标准偏低、材料性能退化、使用功能变更及遭受地震等偶然作用影响, 亟需进行补强加固。随着研究的深入和工程实践进步, 新型材料和修复加固技术不断发展。本文系统综述了既有钢筋混凝土结构修复加固技术领域的研究进展, 并展望了未来发展方向, 以期为结构加固改造的理论研究与工程实践提供参考。

关键词: 既有钢筋混凝土结构; 修复加固技术; 绿色低碳; 研究进展

Review of Research on Repair and Reinforcement Techniques for Existing Reinforced Concrete Structures

Chen Weiya

School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, China Sichuan Mianyang 621000

Abstract: China's urbanization has entered a new stage of emphasizing both stock upgrading and incremental structural adjustment. A large number of existing reinforced concrete structures urgently need to be reinforced due to low design standards, material performance degradation, functional changes, and accidental effects such as earthquakes. With the deepening of research and the development of engineering practice, new materials and repair and reinforcement technologies are constantly evolving. This article systematically reviews the research progress in the field of repair and reinforcement technology for existing reinforced concrete structures, and looks forward to future development directions, in order to provide reference for theoretical research and engineering practice in structural reinforcement and renovation.

Keywords: Existing reinforced concrete structure; Repair and reinforcement technology; Green and low-carbon; Research progress

0 引言

目前, 我国城镇化率已突破 67%, 城市建设正由大规模增量建设转向存量提质改造与增量结构调整并重的新阶段。截至 2025 年底, 全国既有建筑面积约为 850 亿平方米。其中钢筋混凝土结构占比约 60%-70%。受早期设计标准偏低、混凝土碳化与钢筋锈蚀等材料性能劣化、结构使用功能调整以及地震等偶然作用影响, 大量既有结构存在安全隐患与性能退化问题, 亟待补强加固。肖从真等^[1]指出, 面向高质量发展的既有建筑结构加固改造与性能提升, 已成为当前及未来较长时期内建筑工程领域的核心工作。

从损伤机理来看, 钢筋混凝土结构的性能退化是材料、环境与荷载多因素耦合的渐进过程。开展既有钢筋混凝土结构修复加固研究, 不仅是保障建筑结构安全、提升结构抗震韧性的重要举措, 也是落实“双碳”战略、推动城市更新与可持续发展的关键路径。本文综述了既有钢筋混凝土结构修复加固技术的研究进展, 并进行总结和展望,

以期为持续推进钢筋混凝土结构加固改造的理论研究与工程实践提供参考。

1 加固技术研究进展

1.1 增大截面加固法

增大截面法通过在原构件外侧支设模板配置钢筋并浇筑新混凝土, 有效提高构件截面刚度与极限承载力, 是应用最广的传统加固技术之一。周希茂等^[2]系统总结了增大截面法加固钢筋混凝土框架的设计方法, 明确指出新老混凝土界面的良好粘结是实现共同工作的关键。李红等^[3]开展了增大截面法加固钢筋混凝土(RC)偏心受压构件正截面承载力研究, 为工程设计提供了理论依据。

黄炎生等^[4]推导了大、小偏心受压构件在对称配筋下增大截面加固后的计算公式, 分析了在初始偏心距、荷载比和纵筋配筋率变化下, 不同截面偏心受压构件增大截面加固后的可靠度。

张琛^[5]提出钙镁膨胀自密实混凝土作为新增材料来实

现钢筋混凝土柱的增大截面主动加固技术。

蒋济同等^[6]在考虑应力滞后效应的基础上,探究了新增加部分混凝土收缩对增大截面法加固混凝土受弯构件抗弯承载力的影响。研究表明,混凝土收缩对加固受弯构件承载力的影响较小,实际工程中可以忽略。

张济圣^[7]推导得出了增大截面法加固梁的高度系数计算方法,并分析了受一期荷载和加固截面高度两种因素影响受压区增大截面加固梁高度系数的变化规律。

1.2 粘钢加固技术

粘钢加固通过在构件表面粘贴钢板或外包型钢骨架,利用结构胶与锚固螺栓实现与原构件的协同受力,进而提升结构承载力、刚度与抗震性能。屈大梁等^[8]较早综述了粘钢加固技术的研究进展。

卢哲安等^[9]通过对粘贴不同壁厚型钢加固的足尺钢筋混凝土梁受弯性能试验,揭示了外粘型钢加固钢筋混凝土梁的有效性和受力机理。

潘志宏等^[10]基于纤维模型开展了外粘型钢加固混凝土柱的静力弹塑性分析,探究了不同加固参数对构件受力性能的影响。

周鼎^[11]通过模型试验、参数分析和理论分析相结合的方法,对锚粘钢板组合界面分析模型进行了综合研究。

王振山等^[12]提出了一种全螺栓预应力格构钢加固方法。该方法结合预应力技术和全螺栓连接方式,采用异形格构钢代替普通角钢。通过拟静力试验研究了利用该方法加固震损钢筋混凝土柱的抗震性能。结果表明:预应力格构钢加固可更加有效地约束混凝土变形,减少裂缝发展;加固后柱的极限荷载、位移延性系数和耗能能力均显著提高,较传统角钢加固优势明显。

《钢结构加固设计标准》(GB51367-2019)对型钢加固混凝土构件的承载力计算和构造措施作出了系统规定^[13]。

1.3 体外预应力加固技术

体外预应力加固指通过在构件外部布置预应力筋并施加主动预应力,同步提升构件承载力、刚度与抗裂性能,且对原结构损伤较小。Komarizadeh 等^[14]分析了体外预应力筋加固混凝土梁的抗剪性能。结果表明,体外预应力可提供主动约束,延缓斜裂缝的产生与扩展,在合理的预应力水平与配筋方式下,梁的极限抗剪承载力可提升 20%-70%。王新玲等^[15]针对体外预应力加固超静定混凝土梁,研究了局部张拉预应力筋对超静定梁内力分布的影响。通过分析连续梁的次弯矩与综合弯矩,提出了考虑二次效应的内力计算方法,为体外预应力加固超静定结构的设计提供

了理论依据。

1.4 粘贴纤维增强材料 (FRP) 加固法

FRP 材料具有轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳和施工便捷等优点,其中碳纤维增强复合材料 (CFRP) 应用最为广泛。

李书蓉等^[16]开展了磷酸镁无机胶粘贴碳纤维加固钢筋混凝土柱的低周往复加载试验,重点分析了不同加固方式、碳纤维布用量及用胶类型对试件破坏模式、承载力、延性、强度退化及耗能性能的影响。

周洋等^[17]采用 CFRP 加固钢筋混凝土框架柱,通过抗震拟静力对比试验,研究了碳纤维布加固对钢筋混凝土柱破坏模式、耗能滞回曲线、刚度和承载力退化规律以及延性等方面的影响。

程东辉等^[18]通过试验、数值模拟和理论分析相结合的方法探究了 CFRP 布对不同截面混凝土柱的加固性能,并提出了 CFRP 条带约束状态下方形截面钢筋混凝土柱和角钢锚固 CFRP 条带约束状态下 T 形截面钢筋混凝土柱极限承载力的计算公式。

王廷彦等^[19]通过对 3 根 RC 短梁进行抗弯性能试验,研究了普通 RC 短梁、CFRP 布加固未损伤及损伤 RC 短梁的破坏形态、混凝土应变、抗弯承载力、挠度变形、曲率和抗弯刚度变化规律。

白玉磊等^[20]采用试验和数值模拟方法研究了地震作用下高延性纤维增强复合材料 (LRS FRP) 加固非延性钢筋混凝土方柱的抗震性能。通过分析不同试件的破坏形态、抗震性能参数、FRP 应变,探究了 FRP 种类和加固层数对其破坏形态和抗震性能的影响。

刘春阳等^[21]系统综述了 FRP 约束再生混凝土构件的研究进展,分析了不同再生骨料取代率、FRP 种类、侧向约束刚度等参数下约束试件的力学性能变化规律。

徐文远等^[22]探究了碳纤维 / 玄武岩纤维 / 玻璃纤维 / 芳纶纤维增强混凝土在强碱溶液和冻融耦合作用下的劣化规律。结果表明,碳纤维和芳纶纤维强化试件在质量损失率、动弹性模量、抗压强度损失等方面均优于玻璃纤维和玄武岩纤维试件。

1.5 复合加固技术

近年来,随着科学研究深入和工程实践发展,外套钢管自密实混凝土加固技术、高强钢绞线网-超高韧性水泥基材料 (ECC) 加固技术、超弹性形状记忆合金 (SMA) 和 ECC 复合加固等新技术不断涌现。

卢亦焱等^[23-25]提出外套钢管自密实混凝土加固 RC 柱

的复合加固方法,并系统研究了不同加固方法、钢管壁厚、后浇自密实混凝土强度和加载方式对加固柱力学性能的影响,并给出了外套钢管夹层混凝土加固 RC 短柱轴压承载力计算方法。研究表明,采用外套钢管自密实混凝土复合加固法能显著提高原柱的承载力和延性。

廖天^[26]通过低周往复试验和数值模拟方法研究了采用外套钢管自密实混凝土加固 RC 柱的抗震性能,并分析了轴压比、新旧混凝土界面处理方式、原柱缺陷以及钢管截面形式等因素的影响。结果表明,采用外套钢管自密实混凝土加固法效果明显,在承载力、延性、刚度及耗能能力等方面均得到显著提升。

卫垚鑫等^[27]开展了高强钢绞线网-超高韧性水泥基材料(ECC)加固 RC 柱的拟静力试验。结果表明,经加固后 RC 柱破坏模式由弯剪破坏转变为弯曲破坏,滞回曲线更为饱满,变形能力显著提高。

钱辉等^[28]提出采用超弹性形状记忆合金(SMA)和 ECC 复合加固钢筋混凝土梁的方法。通过低周单向循环加载试验,分析了不同材料加固试验梁的破坏形态、承载力、耗能性能和自修复能力等性能。研究表明,SMA/ECC 复合加固梁提高了承载能力,且有较好的延性、变形能力和优越的自修复性能。

王勃等^[29]研究了采用 CFRP 布-超高性能混凝土(UHPC)组合约束加固 RC 柱的轴压性能。试验表明,CFRP 布-UHPC 组合约束柱极限承载力显著高于 RC 柱、CFRP 布或超高性能混凝土单一约束柱;CFRP 布外包组合约束方式的加固效果优于 CFRP 布内包及内外包组合约束方式。

刘一江等^[30]提出了一种将复合板中纤维织物端部绕开缝板缠绕自锁锚固加固 RC 梁的方法,并通过受弯试验,研究了端部自锁效应和加固板长度对加固效果的影响。

赵德博等^[31]对 ECC+玄武岩纤维复材(BFRP)格栅复合加固 RC 梁的静力与冲击动力行为进行了试验研究,并分析了 ECC 强度、混凝土强度、FRP 格栅种类、FRP 格栅厚度等因素的影响。

2 结论与展望

本文梳理了既有钢筋混凝土结构修复加固技术的研究进展,主要结论和展望如下:

(1) 传统加固技术持续深化,全螺栓预应力格构钢加固等方法通过引入预应力技术和全螺栓连接方式,显著提升了加固效果与施工效率。

(2) 新型加固材料和复合加固技术发展迅速。FRP 约

束再生混凝土研究为固废资源化利用与结构性能提升提供了有效路径;钢套管自密实混凝土加固技术、高强钢绞线网与 ECC、ECC 与 SMA、FRP 与 UHPC、纤维增强材料网与 ECC 等的复合使用,为修复加固提供了新思路,加固补强效能显著。

(3) 强化加固结构长期性能与全寿命设计研究。系统开展荷载与环境等多因素耦合作用下不同加固体系的长期性能退化研究,建立加固结构的全寿命周期设计理论与评估方法。

(4) 加强绿色低碳高性能加固材料体系研发。推广再生骨料混凝土、压缩浇筑混凝土、低碳型 ECC、高延性纤维复合材料等在加固工程中的应用,实现结构安全提升与碳减排协同发展。

(5) 推进标准化与模块化加固技术的研究与工程应用。推动全螺栓连接加固构件、模块化纤维复材增强构件、标准化钢-混凝土组件等模块化加固技术的研发与标准编制,促进加固技术从“手工定制”向“工业化生产”转型升级。

参考文献:

- [1] 肖从真,李建辉,马天怡等.既有建筑结构加固改造与性能提升现状与发展[J].工业建筑,2024,54(1): 20-30.
- [2] 周希茂,苏三庆,赵明等.增大截面法加固钢筋混凝土框架的设计与展望[J].世界地震工程,2009,25(1): 153-158.
- [3] 李红,刘胜春.增大截面法加固钢筋混凝土构件的正截面承载力研究[J].北京交通大学学报,2015,39(4): 96-100.
- [4] 黄炎生,宋欢艺,蔡健.钢筋混凝土偏心受压构件增大截面加固后可靠度分析[J].工程力学,2010,27(8): 146-151.
- [5] 张琛.增大截面法主动加固钢筋混凝土柱承载力研究[D].江南大学,2025.
- [6] 蒋济同,景思玉,杜德润等.新增混凝土收缩对增大截面法加固混凝土受弯构件抗弯承载力影响研究[J].建筑科学,2023,39(11):89-96.
- [7] 张济圣.增大截面法加固混凝土梁受压区高度系数研究[D].吉林建筑大学,2023.
- [8] 屈大梁,侯发亮.粘钢加固技术的研究状况及展望[J].武汉水利电力学院学报,1992(6):581-585.
- [9] 卢哲安,符晶华.外粘型钢加固钢筋混凝土梁受力机理试验研究[J].武汉理工大学学报,2001(9): 40-43.

- [10] 潘志宏, 李爱群. 基于纤维模型的外粘型钢加固混凝土柱静力弹塑性分析[J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2009, 39(3): 552-556.
- [11] 周鼎. 锚粘钢板加固混凝土结构组合界面分析模型研究[D]. 青岛理工大学, 2025.
- [12] 王振山, 翟凯佳, 卢俊龙等. 全螺栓预应力格构钢加固震损 RC 柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2026, 47(2): 71-82.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构加固设计标准 (GB51367-2019) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [14] Komarizadeh S, Shen Z, Xia Y, et al. A comprehensive review and analysis of shear strengthening of RC beams with external prestressing bars[J]. Prestress Technology, 2025, 3: 1-19.
- [15] 王新玲, 曹双寅. 局部张拉预应力筋加固混凝土超静定梁的内力计算[J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2004, 34(1): 89-91.
- [16] 李书蓉, 荣令强, 张鑫等. 磷酸镁无机胶粘贴碳纤维布加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J/OL]. 建筑结构学报, 1-10.
- [17] 周洋, 刘翔宇, 张学坦. CFRP 加固钢筋混凝土框架抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动, 2025, 45(4): 180-190.
- [18] 程东辉, 姚宇航, 王丽. CFRP 布对不同截面混凝土柱加固性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(3): 40-49.
- [19] 王廷彦, 吴玉祥, 赵顺波等. CFRP 布加固损伤 RC 短梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(12): 80-86.
- [20] 白玉磊, 杨凯, 韩强等. 高延性 FRP 加固 RC 矩形柱抗震性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(4): 82-91.
- [21] 刘春阳, 闫凯, 李秀领等. FRP 约束再生混凝土构件研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(7): 3490-3502.
- [22] 徐文远, 李微, 王大洋等. 碱冻耦合作用 FRP 加固混凝土性能损伤机理[J]. 吉林大学学报 (工学版), 2025, 55(6): 2050-2062.
- [23] 卢亦焱, 龚田牛, 张学朋等. 外套钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土圆形截面短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(6): 121-128.
- [24] 卢亦焱, 梁鸿骏, 李杉等. 方钢管自密实混凝土加固钢筋混凝土方形截面短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(7): 43-50.
- [25] 卢亦焱, 赵晓博, 李杉等. 外套钢管夹层混凝土加固 RC 短柱轴压承载力统一计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(12): 70-81.
- [26] 廖天. 外套钢管自密实混凝土加固 RC 圆柱抗震性能研究[D]. 西南科技大学, 2021.
- [27] 卫焱鑫, 李可, 朱俊涛等. 高强钢绞线网-ECC 加固 RC 柱抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(6): 141-152.
- [28] 钱辉, 陈程, 张庆元等. 自修复 SMA/ECC 复合材料加固 RC 梁受弯性能试验研究[J]. 工程力学, 2023, 40(6): 73-84.
- [29] 王勃, 韩宇飞, 王子诚. CFRP 布-超高性能混凝土组合约束钢筋混凝土柱轴压性能研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2026, 43(1): 27-36.
- [30] 刘一江, 周朝阳, 肖逸鹏等. 纤维织物增强 UHPC 板混锚加固 RC 梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2026, 47(1): 160-171.
- [31] 赵德博, 黄峰, 陈湘生等. ECC+BFRP 格栅复合加固钢筋混凝土梁弯曲抗冲击性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2025, 58(4): 24-36.

作者简介: 陈维雅 (2005.05-), 女, 汉族, 四川省中江县, 本科生, 主要研究方向: 建筑结构修复加固。