Hans Journal of Civil Engineering 土木工程, 2024, 13(9), 1697-1703
Published Online September 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjce
https://doi.org/10.12677/hjce.2024.139184

Hans汉斯

基于城市更新的混凝土结构加固改造研究综述

吴　健[1]，周　剑[2]，胡超群[1]，杨新茁[2]，王玉喜[1]，任建洲[2]，胡良杰[1]

[1]西京学院土木工程学院，陕西　西安
[2]中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西　西安

收稿日期：2024年8月9日；录用日期：2024年8月30日；发布日期：2024年9月12日

摘　要

随着城市化步伐的加快以及建筑老化问题的日益凸显，对现有混凝土结构实施加固与改造已成为推动城市复兴与实现可持续发展的核心策略之一。这一领域的深入探索，不仅旨在强化建筑物的安全防线，更着眼于城市风貌的美化、居民居住品质的飞跃，以及资源节约与高效利用的目标达成。近年来，混凝土结构加固改造技术领域取得了长足进展，孕育了一系列成熟且多元化的技术方案，如碳纤维布粘贴加固、钢外包加固、截面增大法以及粘钢加固等，这些方法各具特点，充分展现了改造加固技术的丰富性与适应性。其中，包钢加固法凭借其工艺上的成熟性和广泛的适用性，成为了近些年来研究的热点。尽管该方法在实践中展现出显著效果，但尚存在理论层面的瓶颈，如钢板与混凝土之间相互作用机制尚未充分厘清，相应的力学分析模型也有待完善。因此，为了进一步挖掘包钢加固法的潜力，提升加固改造效果的科学性与可靠性，亟待开展更为深入细致的试验研究与理论分析，以期破解现有难题，推动该技术在未来的城市更新与建筑加固改造工程中发挥更加重要的作用。

关键词

城市更新，加固改造，包钢加固

Overview of Research on the Reinforcement and Renovation of Concrete Structures Based on Urban Renewal

Jian Wu[1], Jian Zhou[2], Chaoqun Hu[1], Xinzhuo Yang[2], Yuxi Wang[1], Jianzhou Ren[2], Liangjie Hu[1]

[1]College of Civile Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi
[2]Northwest Engineering Corporation Limited, PowerChina, Xi'an Shaanxi

Received: Aug. 9th, 2024; accepted: Aug. 30th, 2024; published: Sep. 12th, 2024

文章引用: 吴健, 周剑, 胡超群, 杨新茁, 王玉喜, 任建洲, 胡良杰. 基于城市更新的混凝土结构加固改造研究综述[J]. 土木工程, 2024, 13(9): 1697-1703. DOI: 10.12677/hjce.2024.139184

Abstract

With the acceleration of urbanization and the increasingly prominent problem of building aging, the reinforcement and renovation of existing concrete structures has become one of the core strategies to promote urban revitalization and achieve sustainable development. The in-depth exploration in this field not only aims to strengthen the safety defense line of buildings, but also focuses on beautifying the urban landscape, improving the quality of residents' living, and achieving the goals of resource conservation and efficient utilization. In recent years, significant progress has been made in the field of the reinforcement and renovation technology of concrete structures, giving birth to a series of mature and diversified technical solutions, such as carbon fiber cloth bonding reinforcement, clad steel reinforcement, section enlargement method, and steel bonding reinforcement. These methods have their own characteristics, fully demonstrating the richness and adaptability of renovation and reinforcement technology. Among them, the clad steel reinforcement has become a hot research topic in recent years due to its mature technology and wide applicability. Although this method has shown significant results in practice, there are still theoretical bottlenecks, such as the unclear interaction mechanism between steel plates and concrete, and the corresponding mechanical analysis models need to be improved. Therefore, in order to further explore the potential of the clad steel reinforcement method and improve the scientific and reliable effectiveness of reinforcement and renovation, it is urgent to carry out more in-depth and detailed experimental research and theoretical analysis, so as to solve the existing problems and promote the technology to play a more important role in the future of urban renewal and reinforcement and renovation of building projects.

Keywords

Urban Renewal, Reinforcement and Renovation, Clad Steel Reinforcement

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

在当今快速城市化与城市更新的背景下，随着大量既有建筑物步入其生命周期的中后期，混凝土结构作为现代建筑体系中的主体结构形式，其安全性、耐久性及功能性面临着前所未有的挑战。随着社会对建筑环境可持续发展要求的提升，如何高效、经济地加固改造这些既有混凝土结构，以延长其使用寿命、提升使用性能、适应新的功能需求，已成为土木工程领域亟待解决的重要课题。

2. 研究背景

经过 40 余年的高速增长，我国经济发展进入结构性减速时期，城市发展逐步由“增量扩张”向“存量优化”转变[1]。习近平总书记在党的十九大报告中明确提出，我国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段[2]。根据国家统计局网站数据，截至 2021 年底，我国既有建筑总量约为 800 亿平方米，其中，2000 年以前建造的建筑总量约为 300 亿平方米；我国有 120 亿平方米左右的既有建筑物将逐步进入“老龄期”，待改造的城镇老旧小区数量达到 22 万个，而建筑物的老龄化、小区的老旧化等“城市病”几乎分布于我国的每一个城市[3]。

为解决“城市病”问题，并保证城市高质量发展，城市更新的概念应运而生。对于欧美发达国家，城

市的发展一般都经历了推倒重建、社区更新、旧城开发、有机更新四个阶段；东京、新加坡等亚洲城市也在大力推进城市更新，对代表城市竞争力的重要区域的更新举措甚至可以称为“再城市化”；而我国在经历了大规模、快速化的旧城改造之后，也逐步进入城市有机更新的新阶段[4] [5]。2020 年 7 月，国务院办公厅发布的《关于全面推进城镇老旧小区改造工作的指导意见》(国办发[2020]23 号)明确指出，城镇老旧小区改造是重大民生工程和发展工程[6]。2020 年 10 月，党的十九届五中全会通过的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二零三五年远景目标的建议》(以下简称《建议》)明确提出，实施城市更新行动，要加强城镇老旧小区改造和社区建设[7]。住房和城乡建设部党组书记、部长王蒙徽在其发表的《实施城市更新行动》一文中，解读了《建议》中实施城市更新行动的重要意义、目标任务和工作要求[8]。由此可见，既有建筑改造已备受关注，城市更新已是大势所趋。

钢筋混凝土结构(RC 结构)是建筑工程中应用最多的一种结构形式，而框架节点是框架结构中的重要受力部位。框架节点主要是指框架梁与框架柱相交的节点核心区与邻近核心区的梁端和柱端，其在框架结构中起着传递和分配内力、保证结构整体性的作用[9]。因此，相较于梁、柱等构件，框架节点的受力情况更为复杂，在地震作用下也更容易发生破坏，而节点的破坏将对整个框架结构的受力性能产生极大影响，严重的甚至会导致整个结构的倒塌。

我国从唐山大地震之后开始重视建筑抗震设计，目前现存的大量框架结构建筑有很多是建设于这一时期，并未进行抗震设计；在抗震规范颁布后设计的部分钢筋混凝土框架结构建筑，也存在设计人员对规范理解不当或设计失误而导致不能满足抗震规范规定的情况[10]。对于这些存在问题的结构，为使其满足正常使用和现行规范要求，必须对其进行加固补强。

21 世纪以来，随着经济的快速发展，我国不断增大对基础设施建设的投入，工业与民用建筑在此期间得到飞速发展，城镇化进程持续加快。大批于上世纪中期建造的钢筋混凝土框架结构即将接近或达到其设计使用年限，且其中部分建筑在设计时并未考虑地震作用，或并未按照最不利荷载组合进行设计，从而造成节点核心区箍筋配置过少或并未配置箍筋；还有一部分建筑物在建造时虽然考虑了地震作用，但由于规范不断更新，导致其抗震等级不能满足现行规范要求，因此以现行规范来评定早期建筑，大都存在抗震承载能力不足的情况[11]；对于近年来新建的框架结构建筑，由于施工失误造成节点处混凝土浇筑不密实或由于气候条件等原因导致节点核心区混凝土强度不满足设计要求，从而导致节点承载力不满足要求，在遭遇地震作用时也容易发生损坏。

从上述分析中可以看出，框架结构既有建筑普遍存在节点承载能力不足的情况，而近些年的地震造成的损失也说明了部分现存框架结构梁柱节点存在抗震性能不足的情况。对于这些建筑物，如果全部拆除，不仅会导致环境污染，更会造成资源浪费，因此需对其中经加固后可以继续正常使用的建筑进行加固补强，保证这些建筑物的正常使用功能。故目前亟需通过对建筑物的损伤程度和破坏规律进行正确的分析，以采取及时有效的措施来延缓建筑物的损伤发展，因此，探索和研究建筑结构加固技术势在必行[12]-[14]，而对现有 RC 框架结构中抗震承载能力不足的梁柱节点进行抗震加固试验研究也就有着非常重要的实际意义。

3. 工程应用及研究现状

目前针对混凝土构件、结构力学性能的试验研究和理论分析方法已经比较成熟，也逐步开展了框架节点加固方法的相关研究，现行的节点加固方法主要包括以下几类。

3.1. 增大截面法

增大截面法是通过增大 RC 结构试件的截面尺寸和配筋，达到提高试件承载力目标的技术。节点的

增大截面法主要包括增大柱截面、增大梁截面、同时增大梁柱截面及八角形增大节点截面等形式。Ghernouti 等[15]利用增大截面法对损伤柱进行了加固修复试验研究。研究结果显示，该法可以显著提升柱的强度和延性。陆洲导等[16]和余琼[17]对四个钢筋混凝土框架节点采用加大柱截面法进行加固试验，包含一个对比试件与三个加固试件。研究结果表明，增大截面加固法改善了核心区的极限强度、延性、刚度及耗能能力，脆性破坏情况也得到了改善，节点核心区的开裂荷载也有提高。

河南省驻马店市某厂房因使用用途改变，采用增大截面法对梁进行了加固处理，并采用 PKPM 软件对加固效果进行了分析。结果表明，增大截面法具有受力合理、效果明显、成本低、可避免在梁上钻孔等优点，但其也具有减少建筑使用空间、施工时湿作业量大、施工难度较大等缺点[18]。

3.2. FRP 增强纤维法

FRP (Fiber Reinforced Plastic)增强纤维加固法是通过使用高性能粘接剂将纤维粘贴于待加固试件表面，从而提高构件承载能力和延性的加固技术。Ghobarah 等[19]研究了采用玻璃纤维加固四个边节点核心区后的力学性能变化。结果表明，加固虽然没有提高试件承载力，但是能够有效的将试件破坏方式由核心区破坏转变为梁端破坏，且加固后试件的延性和抗震性能明显改善。王作虎[20]、欧阳利军[21]分别用芳纶纤维和玄武岩纤维加固节点核心区及梁端和柱端，研究不同纤维、不同加固方式加固后节点的性能。研究结果表明，无论采用何种加固方法，破坏形式将从核心区域的剪切破坏变为柱端的弯曲破坏，试件由脆性破坏变为延性破坏。

上海市五角场万达广场采用纤维加固法对梁、板、柱构件进行了加固处理。结果表明，增强纤维加固法具有轻质高强、耐腐蚀性能好等优点，但粘结剂的耐久性和较差的耐火性是其最大的不足[22]。

3.3. 粘贴钢加固法

粘钢加固法是通过结构胶，将钢板粘贴在混凝土外表面，使混凝土与钢板共同工作的复合构件。Biddah 等[23]开展了粘贴波形钢板加固外节点的试验研究。研究结果表明，在加载的后期，试件的耗能性能较差，而且用这种方法加固后，试件的承载力和刚度有较大退化。余琼[24]使用粘钢加固法对四个钢筋混凝土框架节点进行加固试验，其中一个为对比试件，另外三个为加固试件。研究结果表明，加固提高了节点核心区的承载力、延性、耗能能力等性能指标，并且缓解了节点核心区的脆性破坏，极限承载能力和延性提高较大，刚度提高较少，但加固后的耗能能力提高明显。

晋江华美国际花园酒店附楼因使用功能改变，采用粘钢加固法对梁、板、柱进行了加固处理。结果表明，该法施工速度快，现场湿作业量少和占用建筑物有效空间少，但钢板锈蚀以及加固所用胶粘剂的老化是亟需被解决的问题[25]。

3.4. 外包钢加固法

外包钢加固法是指使用型钢(槽钢或角钢等)包裹 RC 试件的四角或两角，然后通过横向缀条或缀板连接使外包型钢成为一个钢框架，使之与被加固试件紧密相连，保证钢框架和原 RC 试件共同受力，从而改善试件的承载能力和延性性能。Yen 等[26]采用外包钢加固梁柱节点并进行循环加载试验，然后通过有限元模型计算梁的抗弯强度，提出利用 SRI 和 DRI 指标估计震后构件强度和延性的方法，并验证了其适用性。胡强等[27]研究了角钢加固混凝土柱的抗震性能。结果表明，试件的延性和耗能能力提升明显。

北京某纺织车间厂房采用包钢加固方法对柱进行了加固。结果表明，采用外包钢加固时施工简单，试件截面尺寸增加少，对生产、生活影响较小，但外露钢框架的防火性能和防腐性能差是其存在的主要问题[28]。

上述研究成果表明，不同加固方法各具特色，但在城市更新过程中，更重要的是在保证加固效果的前提下，减轻对居民正常生活、使用空间的影响，而外包钢加固法的缺陷可以采用涂抹防火涂料等措施进行处理，故外包钢加固法是一种比较合适的、值得推广的节点加固形式。

4. 外包钢加固法在工程应用中存在的问题

上述研究现状表明，国内外学者已对城市更新过程中钢筋混凝土框架结构加固改造的一些关键问题进行了大量、深入的研究，并取得了一系列研究成果，但当前研究多集中在破坏过程及破坏现象方面，而对于加固后钢筋混凝土构件/结构力学性能的退化机理与实际工程应用方法等方面仍缺乏针对性的研究，理论研究滞后于工程实践，还存在以下问题值得深入研究。

4.1. 钢筋混凝土构件/结构与外包钢的协同工作机理

目前的研究主要针对某一种加固方法，没有考虑不同加固方法对加固效果的影响，而加固构件/结构的力学性能又受构件/结构与外包型钢连接性能的影响，但目前对于节点试件与外包型钢之间的荷载传递路径并不明确，包钢加固节点的包钢与混凝土协同工作机理还未被完全掌握。

4.2. 包钢加固构件/结构的力学分析模型

国内外对包钢加固构件/结构的力学性能开展了一系列研究，但这些研究主要针对某一种加固方法或某一种粘结方式，没有系统分析包钢加固构件/结构力学性能的影响因素。已有研究表明，加固方法、粘结方式、损伤程度、材料强度等级、地震损伤程度等参数均对加固构件/结构的力学性能产生影响，但加固构件/结构在这些参数耦合作用下的力学性能还缺乏深入、系统的研究，不利于建立包钢加固构件/结构的力学模型。

4.3. 可用于实际工程的构件/结构包钢加固方法

以工程结构“设计→建造→使用→维护→修复→加固”寿命周期为研究对象，针对不同服役环境、受力状态开展材料与结构的时变性能研究，把握工程结构劣化机理，评估工程结构可靠性，一直是土木工程学科研究的热点问题。该问题在未加固混凝土结构与钢结构等现代结构中发展较为系统、完善，但加固后的混凝土框架结构在性能评价指标方面与未加固结构有所区别，应充分考虑包钢加固节点对框架结构力学性能的影响，提出可应用于实际工程的加固措施。

5. 结论及展望

1) 随着城市化进程的加速和建筑老龄化问题的加剧，对既有混凝土结构进行加固改造已成为城市更新与可持续发展的关键举措。这一领域的研究不仅关乎建筑安全性的提升，还直接关联到城市面貌的改善、居民生活质量的提高以及资源的高效利用。

2) 近年来，混凝土结构加固改造技术取得了显著进展，形成了包括粘贴碳纤维布、外包钢、增大截面法、粘结钢等在内的多种成熟技术体系。这些技术各具特色，适用于不同损伤程度和结构形式的加固需求，体现了技术方法的多样性和灵活性。

3) 作为一种工艺成熟、应用场景广泛的加固方法，包钢加固法是近些年来研究比较深入的方法，但其仍存在钢板－混凝土作用机理不明确、力学分析模型不明确等问题，还需进一步的试验和理论研究。

4) 将智能化和自动化融入到加固改造技术中，利用传感器和计算机控制技术，对加固改造过程进行实时监测和精确控制，从而提升施工效率和改造效果。例如，智能监测系统能够实时反馈结构状态，提供精确的数据支持；自动化施工设备则有助于减少人工操作，提高施工的精度和安全性。

5) 将其他工程技术应用到加固改造过程中，以应对更复杂的工程挑战。例如，结合地质勘探技术和数值模拟技术，可以实现更加精准的加固设计和效果预测，以提升加固改造的科学性和可靠性。

基金项目

陕西省教育厅政企联合资助项目《城市更新背景下的混凝土框架新型包钢节点加固技术应用研究》(22JE017)。

参考文献

[1] 唐燕, 杨东, 祝贺. 城市更新制度建设: 广州、深圳、上海的比较[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.

[2] 习近平. 决胜全面建成小康社会 夺取新时代中国特色社会主义伟大胜利[R]. 北京: 全国人民代表大会常务委员会, 2017.

[3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.

[4] 秦虹, 苏鑫. 城市更新[M]. 北京: 中信出版集团, 2018.

[5] 同济大学建筑与城市空间研究所, 株式会社日本设计. 东京城市更新经验: 城市再开发重大案例研究[M]. 上海: 同济大学出版社, 2019.

[6] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于全面推进城镇老旧小区改造工作的指导意见[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-07/20/content_5528320.htm, 2020-07-20.

[7] 中国共产党第十九届中央委员会. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2020-11/03/content_5556991.htm, 2020-10-29.

[8] 王蒙徽. 实施城市更新行动[J]. 建筑机械, 2020(12): 6-9.

[9] 唐九如. RC 框架节点抗震[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.

[10] 王焕杰. 外包钢套法加固混凝土框架节点抗震性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2011.

[11] 伍彩. 喷射 FRP 加固 RC 梁柱节点抗震受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.

[12] 田飞. 钢筋混凝土结构改造施工中加固方法优选研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.

[13] 曲哲, 张令心. 日本钢筋混凝土结构抗震加固技术现状与发展趋势[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 61-74.

[14] 何军, 苏恒强, 何锦超. 震区既有建筑的抗震评估、鉴定和加固措施研究综述[J]. 建筑结构, 2013, 43(S1): 1358-1361.

[15] Ghernouti, Y., Li, A. and Rabehi, B. (2012) Effectiveness of Repair on Damaged Concrete Columns by Using Fiber-Reinforced Polymer Composite and Increasing Concrete Section. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **31**, 1616-1629. https://doi.org/10.1177/0731684412458552

[16] 陆洲导, 宋彦涛, 王李果. 碳纤维加固混凝土框架节点的抗震试验研究[J]. 结构工程师, 2004, 20(5): 39-43.

[17] 余琼, 陆洲导. 粘钢加固框架节点与碳纤维加固框架节点方法探讨[J]. 工业建筑, 2003, 13(12): 77-80.

[18] 周恒芳. 钢筋混凝土梁正截面加固设计研究[J]. 河南科技, 2023, 42(20): 58-62.

[19] Ghobarah, A. and Said, A. (2002) Shear Strengthening of Beam-Column Joints. *Engineering Structures*, **24**, 881-888. https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00026-3

[20] 王作虎, 杜修力. AFRP 加固混凝土梁柱节点抗震性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(1): 30-35.

[21] 欧阳利军, 余江滔. 玄武岩纤维加固震损混凝土框架节点承载力计算分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(6): 33-36.

[22] 权清鹏. 结构加固技术在城市更新中的应用-以五角场万达广场改建项目为例[J]. 绿色建筑, 2024, 16(3): 182-185.

[23] Biddah, A. and Ghobarah, A. (1997) Upgrading of Nonductile Reinforced Concrete Frame Connections. *Journal of Structural Engineering*, **123**, 1001-1010. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:8(1001)

[24] 余琼. 框架节点加固方法探讨[J]. 结构加固与改建, 2004(1): 62-70.

[25] 刘小清. 某酒店附楼加固设计[J]. 福建建筑, 2018(1): 31-34.

[26] Yen, J.Y.R. and Chien, H.K. (2010) Steel Plates Rehabilitated RC Beam-Column Joints Subjected to Vertical Cyclic Loads. *Construction and Building Materials*, **24**, 332-339. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.029

[27] 胡强, 贾松林, 况哲阳, 等. 自密实混凝土与外包角钢联合加固混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(10): 92-103.

[28] 刘小锐, 卫碧洋. 结构加固施工技术在老旧建筑中的应用研究[J]. 科学技术创新, 2024(13): 117-120.