

结构加固技术研究进展、挑战与未来趋势

王粒澎, 黄毅, 郑洪涛, 李东博

延安大学建筑工程学院, 陕西 延安

收稿日期: 2025年5月9日; 录用日期: 2025年6月2日; 发布日期: 2025年6月10日

摘要

在既有建筑与基础设施性能劣化及功能升级需求背景下, 结构加固技术成为保障安全、提升效能的关键手段。本文系统梳理了常见加固方法的作用机理、工程应用及技术局限, 探讨了不同类型结构的加固策略, 分析了当前技术面临的挑战, 对未来发展前景进行了展望。研究成果为既有结构改造提供技术参考, 推动建筑行业可持续发展。

关键词

结构加固技术, 加固方法, 可持续发展

Research Progress, Challenges and Future Trends of Structural Retrofitting Technology

Lipeng Wang, Yi Huang, Hongtao Zheng, Dongbo Li

School of Architectural Engineering, Yan'an University, Yan'an Shaanxi

Received: May 9th, 2025; accepted: Jun. 2nd, 2025; published: Jun. 10th, 2025

Abstract

Against the backdrop of performance degradation in existing buildings and infrastructure, as well as the growing demand for functional upgrades, structural retrofitting technology has become a critical means to ensure safety and enhance efficiency. This paper systematically reviews the working mechanisms, engineering applications, and technical limitations of common retrofitting methods, discusses retrofitting strategies for different types of structures, and analyzes the challenges faced by current technologies. The future development prospects are also prospected. The research results provide technical references for the renovation of existing structures and promote the sustainable development of the construction industry.

文章引用: 王粒澎, 黄毅, 郑洪涛, 李东博. 结构加固技术研究进展、挑战与未来趋势[J]. 土木工程, 2025, 14(6): 1362-1368. DOI: 10.12677/hjce.2025.146145

Keywords

Structural Strengthening Technology, Strengthening Methods, Sustainable Development

Copyright © 2025 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

随着时间的推移, 全球范围内的大量既有建筑结构及基础设施面临诸多问题。一方面, 自然环境的侵蚀(如风雨、温度变化及地震等)和人为因素(如过度使用、随意改造等)导致大多数既有结构性能处于持续衰退的状态。另一方面, 社会的可持续性发展促使建筑功能发生改变, 需进行相应的转型, 例如将陈旧的厂房改造成创意园区, 把传统的办公楼升级为智能化的办公空间等, 这些转变通常要求既有结构能够承受更大的荷载, 营造更为舒适的使用环境。

在发达国家, 大多数的建筑结构已达到或临近设计使用年限, 发展中国家城市化进程相对较快, 对既有结构的性能提出了更高的要求。结构加固技术作为保障安全、提升效能的关键手段, 在不拆除原有结构的情况下, 结构的承载能力可以得到增强, 建筑的使用性能能够获得改善, 新的功能需求也能够得以满足。该技术不但能够保留建筑所蕴含的历史文化价值, 还能够节约拆除重建所需要的成本、减少建筑垃圾给环境造成的污染, 对推动建筑行业实现可持续发展具有十分重要的意义。

2. 常见的结构加固方法

2.1. 增大截面加固法

增大截面加固法通过在既有构件的表面增设混凝土及钢筋, 使原结构构件的截面尺寸及配筋量增大, 进而提高结构的承载能力、刚度以及耐久性[1]。以钢筋混凝土梁加固为例, 增大截面加固法是在梁的底部或者侧面配置钢筋并且浇筑混凝土, 使梁的截面尺寸得以增加, 从而起到加固的效果。从力学角度来看, 新增的钢筋和混凝土与原有构件形成整体, 共同承担荷载。在梁处于受弯时, 加固之后钢筋混凝土梁截面的有效高度及受压区面积均有所增大, 进而提高了梁的抗弯承载能力; 在梁处于受剪时, 新增的箍筋和混凝土共同承受荷载, 提高了梁的抗剪能力。对于混凝土柱, 增大截面加固法通过在既有混凝土柱外围配置钢筋或型钢, 并浇筑新增混凝土, 使得柱的截面惯性矩增大, 长细比减小, 抗压能力得到提高[2]。

该方法可适用于梁、板、柱、墙等各类混凝土结构构件。如: 北方某集团建设的办公楼, 因建筑使用功能调整, 5~8层采用混凝土加大原梁、柱构件, 增大截面加固法显著提高了该结构的整体承载能力, 该办公楼已经顺利施工和验收[3]。增大截面加固法也存在一定的局限性, 如施工过程复杂、工期较长, 截面增大导致结构自重增加, 在空间受限的情况下减少了建筑的使用面积。

2.2. 置换混凝土加固法

置换混凝土加固法采用高性能新混凝土替换原结构中的劣质或损伤混凝土, 提升材料的强度等级, 使结构性能得到恢复。该方法适用于承重构件受压区混凝土强度偏低, 或有严重缺陷的局部加固, 如受火灾烧损、介质腐蚀及地震、人为破坏后的修复。但该方法中新旧混凝土弹性模量差异大, 界面易实效, 且施工周期相对较长。

2.3. 粘贴纤维增强复合材料加固法

粘贴纤维增强复合材料加固法借助结构胶将碳纤维布、玻璃纤维布等高性能纤维材料牢固粘贴于原结构表面。纤维材料具备强度高、质量轻及耐腐蚀等显著优势,以碳纤维布加固混凝土结构为例,其抗拉强度相较于普通钢筋具有极为突出的优势[4]。在结构承受荷载时,碳纤维布能够与原结构协同工作,有效分担拉应力,提高结构的承载能力。同时,纤维布还能对混凝土起到约束作用,改善混凝土的受力特性,增大结构的延性[5]。

粘贴纤维增强复合材料加固法中,结构胶的性能直接影响纤维布与原结构之间应力的有效传递。施工时应严格遵循施工工艺:首先将原结构表面清理干净,打磨去掉油污、疏松层等杂质,确保结构胶与原结构能够实现良好的胶结,然后按要求制备结构胶,均匀涂在处理后的结构表面和纤维布上,最后进行粘贴,要求粘贴时不能有气泡、空鼓。

该加固方法具有广泛的适用性,可应用于多种结构类型,尤其对外观和空间要求较高的建筑加固工程。例如,我国大量以木结构为主的古建筑,近年来采用纤维增强复合材料进行加固得到了越来越广泛的研究和应用[6]。然而,该方法对施工环境的温度和湿度较为敏感,若施工环境潮湿或温度过高,结构胶的粘结性能将会显著降低。

2.4. 体外预应力加固法

体外预应力加固法通过在原结构外部增设预应力筋,预拉预应力筋为原结构施加反向荷载,优化结构的受力状态。在桥梁加固中,体外预应力加固法是在梁体底部或侧面设置体外预应力钢束,张拉钢束,产生的预应力反力能够有效抵消一部分荷载引起的拉应力,使梁体受压区的应力分布更均匀,提高了梁的抗裂性能与承载能力,有效地减小了结构的变形,改善了结构的使用性能[7]。

体外预应力加固法能够显著提高结构的承载能力,且体外预应力筋易于维护和更换,在很多大型桥梁加固工程中得到了广泛应用。然而,体外预应力加固法对施工精度要求极高,在预应力筋的布置、张拉控制应力的确定以及锚固端的处理,都需要严格把控。施工时需要精确计算预应力损失,并借助专业的张拉设备及实时监测系统,以保障预应力施加的准确性。此外,施工过程面临交通疏导难度大、施工空间狭小等问题,需施工团队精心组织和合理安排,方可顺利推进施工。

2.5. 其他加固方法

外包钢加固法通过在混凝土构件外围包裹型钢(如角钢、槽钢等)形成钢套箍,与原有结构共同承载荷载,提升结构构件的承载力及抗震性能。如对混凝土柱加固,在柱的四角或周边包裹角钢,通过焊接缀板,形成钢套箍,与原有混凝土柱共同承担荷载。该加固方法利用型钢分担荷载、约束核心混凝土显著提高了混凝土柱的延性和抗震性能,适用于需要大幅增强承载能力的混凝土柱加固。但该方法钢材用量大、成本较高,施工过程涉及焊接工艺,对施工人员的技术要求较高。

植筋加固法通过在原结构构件中钻孔并植入钢筋,利用结构胶实现新旧材料的可靠粘结,从而有效提升结构的承载力。该方法主要应用于新增构件与原结构的连接,如在既有混凝土主梁上增设次梁时,通过精确控制植筋参数(深度、间距、胶体饱满度),将次梁荷载可靠传递至主梁。工程实践中需重点规范施工工艺,并确保结构胶灌注饱满,保障植筋的锚固性能。

粘钢加固法通过高性能结构胶粘剂,将钢板粘贴在原结构构件表面,使钢板与原构件形成整体,共同受力,提高构件的承载力、刚度及延性,原理与粘贴纤维增强复合材料加固法类似。该方法中钢板的强度和刚度更高,适用于加固效果要求高、受力较大的部位。由于钢板自重较大,该方法在高空或复杂环境下施工难度较大,同时,为保证其耐久性,需对钢板采取必要的防锈处理并定期维护。

阻尼加固法通过安装耗能减震装置(如粘滞阻尼器、金属屈服阻尼器、摩擦阻尼器),利用阻尼器的滞回耗能特性降低结构地震作用下的结构响应,改善结构的动力性能。对比传统加固方法,该方法单位面积成本较低,且无须改变原结构体系,在文物建筑加固中应用较为广泛。

基础托换技术通过新增基础工程,将既有建筑物的部分或全部荷载转移到新的基础结构上,从而实现对原有基础的加固和更换。如通过桩基托换法将上部结构荷载传递至深层稳定土层,从而提高基础承载力并减少沉降。该方法能够有效解决地基承载力不足,施工中对上部结构的扰动较少,广泛应用于城市地下空间开发、既有建筑加固改造、新建工程影响下的地基处理、历史建筑保护以及复杂地质条件下的工程等。但该方法涉及复杂的力学计算和施工工艺,技术难度大、成本高、施工周期长。

3. 结构加固在不同类型结构中的应用

3.1. 混凝土结构加固

在混凝土结构加固领域,梁、板、柱的治理需根据不同构件的特征与功能需求,合理选择加固方法。

对于因配筋不足导致抗弯能力不足的混凝土梁,若现场空间条件允许时,可采用增大截面加固法,通过新增混凝土与钢筋提升截面抗弯刚度;若对空间占用和外观保护存在严格要求时,可采用粘贴碳纤维布或粘钢加固法,该方法轻质高效、施工便捷且不改变原结构外形。

针对混凝土板裂缝问题,需依据裂缝宽度分级处理:当裂缝宽度较窄时,采用表面封闭法;若裂缝宽度较大,则需先进行压力灌浆修复,再结合粘贴纤维布或增设钢筋网片喷射混凝土等手段,从根本上恢复结构的承载性能。如商业建筑中,因荷载增加导致楼板出现大量裂缝且抗弯能力显著下降时,通过压力灌浆修复裂缝+楼板底部粘贴碳纤维布的组合加固方案,可有效提升楼板的承载能力与抗裂性能[8]。

混凝土柱的加固需求主要聚焦于受压承载力不足和抗震性能缺陷两大方面。对于受压承载力不足的情况,增大截面法、外包钢加固法或设置套箍等技术可通过增强柱体截面强度与约束效应,直接提升其抗压承载能力;针对抗震性能不足的柱体,粘贴纤维增强复合材料进行环向约束,限制混凝土横向变形,有效提高柱体的延性与耗能能力,从而满足抗震设计要求。在地震设防区的既有建筑改造工程中,可通过在混凝土柱表面环向粘贴碳纤维布,约束混凝土横向变形,提高柱的极限变形能力,使其满足抗震设计要求。

3.2. 钢结构加固

随着钢结构在建筑工程中的广泛应用,钢材锈蚀、构件变形及连接松动等问题日益凸显,严重威胁结构安全性能。在实际工程中,钢结构构件因腐蚀导致截面削弱,进而引发承载能力下降的现象尤为常见。针对此类问题,增大截面加固法可有效恢复结构性能:对于一般钢构件,可通过焊接钢板或型钢直接增大截面;对于受拉构件,增设预应力拉杆能够利用主动施加的预拉力提升承载能力。以钢结构桥梁吊杆为例,当出现锈蚀导致截面减小、承载能力不足时,采用外套钢管并灌注高强灌浆料的增大截面加固工艺,结合锈蚀部位的除锈防腐处理,可显著恢复吊杆的承载性能[9]。

连接节点作为钢结构体系中的关键传力部位,其可靠性直接关系到结构的整体安全。当节点出现螺栓松动、焊缝开裂等病害时,必须及时采取加固措施。针对螺栓连接松动问题,可采用更换高强度螺栓或增设防松装置进行修复;对于焊缝开裂问题,采用清理打磨裂缝后补焊,并增设加劲肋,以此增强节点的承载能力与延性。在大型钢结构厂房检测中,若发现梁柱连接节点焊缝存在裂缝时,需清理打磨裂缝、补焊,并在节点增设加劲肋,提高节点的承载能力与结构的可靠性[10]。

3.3. 砌体结构加固

砖、砌块、石材等砌体构件或结构服役期相对较长,普遍存在强度退化、开裂及整体性差等问题。

砌体结构加固针对整体承载力不足、抗震性能差、裂缝损伤等问题进行修复与增强。针对不同病害特征,可采取不同的加固方法:

当砌体强度或承载力不足时,可采用增大截面加固法,在砌体表面绑扎钢筋网,喷射混凝土(或抹水泥砂浆)面层,形成砌体-混凝土组合墙体。该方法中钢筋网与面层材料共同受力,同时混凝土面层对砌体横向变形起到约束作用,进而提高砌体结构构件的承载能力及延性。该方法适用于大面积强度不足的砌体结构加固。

当墙体开裂时,可根据裂缝类型和成因合理选择加固方法。当为受力裂缝时,先对裂缝灌注结构胶或高强砂浆闭合,再采用增大截面加固法、粘贴纤维增强复合材料或外加构造柱与圈梁加固法;当为非受力裂缝时,采用压力灌浆法、表面封闭法或置换砂浆法进行处理,恢复墙体完整性。如在老旧砌体住宅加固中,常采用压力灌浆处理裂缝,然后在墙体两侧绑扎钢筋网片喷射混凝土,最后在房屋四角和纵横墙交接处增设构造柱以及每层楼设置圈梁。这样的组合加固方式不仅能有效修复裂缝,还可显著提升建筑的抗震性能与整体稳定性。

在抗震设防区,砌体结构加固通过构造措施增强结构的整体性,并采用加固材料提升其承载力,通过耗能设计改善其延性。设置构造柱和圈梁是砌体结构抗震加固较为常用的办法,此方式能够增强结构的抗倒塌能力,还可以限制墙体裂缝的开展。此外,还可以采用夹板墙加固墙体,在砌体墙体的两侧或者单侧设置钢筋网并且喷射高强砂浆、混凝土或者聚合物砂浆,进而与原墙体形成一个整体,提高墙体的抗震能力。对于高烈度区需要重点保护的建筑物而言,可在砌体结构的层间设置黏滞阻尼器、金属阻尼器等,也就是砌体结构采用阻尼器来进行加固。针对楼梯间、门窗洞口等容易出现破坏情况的薄弱部位,采取针对性构造措施,例如在门窗洞口的两侧设置边框柱,在楼梯间的四角增设构造柱等。

4. 结构加固技术面临的挑战

当前结构加固材料种类繁多,但仍面临诸多问题。例如,部分纤维增强复合材料受紫外线辐射、温度改变等的影响,随着使用时间的增加,其力学性能就会大幅降低。结构胶是连接加固材料与原结构的重要材料,在潮湿或者化学侵蚀的情况之下,耐久性不足,粘结性能变差,加固效果也不稳定^[11]。此外,部分新型加固材料的性能标准及检测规范尚不健全,实际应用时存在潜在安全风险,且加固后结构的力学性能评估更为复杂。

在加固结构力学性能评估方面,加固材料和原结构的协同机制不明确,很难建立准确的力学模型来分析。如粘贴纤维增强复合材料加固混凝土结构时,对纤维布与混凝土界面粘结滑移关系的描述,现有的理论模型并不精准。另一方面,既有结构的使用时间长,损伤效果显著,准确评估初始性能状态较难,使加固结构力学性能评估变得更复杂。

结构加固工程一般是在已有建筑环境里进行,施工空间小,环境复杂。如在建筑物内部施工时,需综合考虑现有设施、人员安全与施工质量。此外,加固施工往往涉及多工种的交叉工作,如结构拆除、混凝土浇筑、钢结构焊接等,这就对施工人员的技术水平提出更高的要求。同时,大部分加固工程规模小、工期短,技术要求高,施工单位需在有限时间内合理规划施工进度,严格控制施工质量。

5. 结构加固技术的发展趋势

结构加固技术在应对既有建筑安全隐患、提升抗震性能和延长服役寿命等方面发挥着重要作用。随着工程需求和技术的发展,结构加固技术仍有较大的发展空间。

在材料研发方面,高强度、高耐久性且环保的纤维增强复合材料(如新型碳纤维材料、玄武岩纤维材料等)极具潜力,这些材料以高性能纤维为增强体,搭配环保型树脂基体,兼具力学性能优势与绿色特性。

智能型加固材料(如形状记忆合金,自愈合材料等)同样也是重要的发展方向。形状记忆合金材料具备形状记忆效应,还具有超弹性,允许材料加载过程中产生的较大应变,卸载后能依据温度或者应力的变化自动恢复初始形状,对结构内力分布起到有效的调节作用[12]-[14];自愈合材料借助自身机制主动、自动地对损伤部位进行修复,从而减少桥梁、隧道、建筑墙体等的裂缝渗水问题,材料的耐久性及力学性能,降低维护成本[15]。此外,纳米技术能够调控材料在纳米尺度的结构,进而使加固材料的强度、耐久性和功能逐渐提高,如开发纳米改性的水泥防水材料[16]、混凝土、钢材以及纤维复合材料时,可调控材料的微观结构,优化材料性能,从而满足更高标准的建筑加固需求。

在加固理论方面,深入探究加固材料与原结构的协同工作机理,建立更完善、精准的力学分析模型,并结合人工智能、大数据技术,更加精准地预测与评估加固结构的力学性能。如将有限元分析软件与机器学习算法相结合,对大量加固工程案例数据加以分析,优化加固设计参数,提升加固设计的科学性与合理性。同时,发展全寿命周期结构加固理论也很重要,综合考虑结构在使用时的性能变化、维护成本以及经济效益,为加固决策提供科学依据[17]。

随着环保意识持续增强,绿色可持续加固技术也会成为发展的核心方向。在材料选择方面,推广采用可回收且可重复使用的加固材料,以降低建筑垃圾的产生[18]。如植物纤维具备天然的抗拉强度、抗剪强度等,在混入黏土中后充当加强筋的作用,应用于建筑墙体地基的施工中,提升建筑的整体强度和耐久性[19]。施工工艺方面,需优化加固施工工艺,采用绿色施工,在保证工程质量、施工安全、经济合理等基本要求的前提下,通过科学管理和先进技术等方法,最大限度地节约资源,减少对环境的影响[20]。如装配式加固技术能够减少现场作业量,提升施工效率,降低粉尘与噪声污染。此外,还可以借助结构加固提升建筑能源利用效率,如对建筑外墙进行保温加固,改善其热工性能,降低能源消耗,推动建筑的绿色可持续发展。

6. 结论

结构加固技术对保障既有结构安全、提升其使用功能极为重要,各种加固方法都有自己的优点和适用范围,现有结构加固技术在材料性能、力学性能评估和施工管理方面仍面临很多挑战。展望未来,随着新型材料研发、加固理论和分析方法创新以及绿色可持续理念的贯彻,结构加固技术会更高效、安全、环保,为既有结构改造升级提供更可靠的技术支持,推动建筑行业可持续发展。

基金项目

陕西省大学生创新训练计划项目(项目编号: S202410719102)。

参考文献

- [1] 梁坦,王永维,陆竹卿,等. GB 50367-2006 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [2] 李静薇,张浩宇,滕振超. 既有 RC 变截面柱加固前后的力学性能[J]. 黑龙江科技大学学报, 2024, 34(4): 564-571.
- [3] 项玫. 混凝土增大截面加固法在某工程改造中的运用[J]. 山西建筑, 2023, 49(24): 61-63.
- [4] 崔文斌,陈煊,陈超,等. CFRP 超高周疲劳损伤演化过程[J]. 航空学报, 2020, 41(1): 203-209.
- [5] 陈涛,刘秀杰,张圣武. 预应力 CFRP 布加固混凝土梁的抗弯性能分析[J]. 内江科技, 2009, 30(5): 122, 137.
- [6] 于毅,夏宗发,张博,等. 纤维增强复合材料加固木结构研究[J]. 科技资讯, 2015, 13(21): 49-50, 52.
- [7] 韩建明. 桥梁加固处理锚喷混凝土加固技术研究[J]. 运输经理世界, 2023(36): 92-94.
- [8] 杨佳,王连广. 内嵌 CFRP 板条加固超载损伤钢筋混凝土梁试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 907-912.
- [9] 翟玉华. “高强环氧灌浆料 + 钢板”加固施工技术的应用探究[J]. 中国公路, 2021(16): 118-119.

-
- [10] 唐波, 余江滔, 陆洲导, 等. 加劲肋对焊接球节点力学性能影响的数值分析[J]. 结构工程师, 2011, 27(1): 40-46.
- [11] 易富, 杨纪, 马泽宇, 等. 湿热酸雨环境对 CFRP-混凝土界面剪切粘结性能影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(8): 4757-4767.
- [12] 孙丽, 周建鸿, 倪伟宁. 形状记忆合金在结构加固中的应用[C]//Intelligent Information Technology Application Association. Applied Computing, Computer Science, and Computer Engineering (ACC 2011 V4). 沈阳: 辽宁省沈阳市沈阳建筑大学土木工程学院, 2011: 42-46.
- [13] 徐立丹, 赵继涛, 史明方, 等. 形状记忆合金及其复合材料的应用[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(33): 23-25, 31.
- [14] 高晓轲, 安旭龙, 孙文文. 形状记忆合金研究进展与高熵形状记忆合金[J]. 中国材料进展, 2024, 43(2): 124-135.
- [15] 应齐明, 等. 裂缝自愈合型新材料在码头耐久性设计与维修加固中的技术及应用研究[Z]. 浙江省交通规划设计研究院, 2018-03-31.
- [16] 范宗帅, 冯西龙, 刘航. 新型纳米防水水泥在改造加固工程中“堵防排结合”应用技术[J]. 建筑工人, 2024, 45(9): 42-45.
- [17] 韩明祥, 黎希. 桥梁养护检测加固一体化技术[J]. 交通世界, 2022(25): 145-147.
- [18] 石秀峰. 绿色环保材料在长江堤岸加固工程中的应用[J]. 水利建设与管理, 2003, 23(3): 63-64.
- [19] 黄易铭, 郭震, 陈宇源, 等. 植物纤维加筋黏土作用机理在地基加固中的应用研究[J]. 造纸科学与技术, 2024, 43(10): 110-112, 116.
- [20] 蔡志立, 陈兆荣, 白忠奎, 等. 基于绿色施工的停建续建工程桩基检测及加固技术[C]//《施工技术》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2021 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(上册). 北京: 中建五局第三建设有限公司, 2021: 565-569.