

# 建筑结构抗震加固技术的应用与发展趋势

邓杰

浙江工程建设管理有限公司第十分公司

DOI:10.12238/btr.v7i3.4428

**[摘要]** 本文针对钢筋混凝土结构,分析了粘贴钢板/复合材料加固、包钢加固、外包混凝土加固等传统技术的优缺点;针对砌体结构,讨论了增设钢筋网水泥面层、碳纤维布加固的特点。重点介绍了基础隔震技术(铅芯橡胶隔震支座、滑移阻尼隔震支座、弹簧阻尼隔震支座)、阻尼耗能技术(黏滞阻尼器、金属屈服阻尼器、摩擦阻尼器)、智能结构控制技术(主动控制、半主动控制)等新型抗震加固技术的原理、应用及优势。展望了建筑结构抗震加固技术在材料、设计、施工、监测、韧性等方面的发展趋势。

**[关键词]** 建筑结构; 抗震加固; 基础隔震; 阻尼耗能; 智能结构控制

中图分类号: TU3 文献标识码: A

## Application and development trend of seismic strengthening technology for building structures

Jie Deng

Zhejiang Engineering construction management Co., Ltd. tenth company

**[Abstract]** For reinforced concrete structures, the advantages and disadvantages of traditional techniques such as steel plate/composite reinforcement, steel cladding reinforcement and outsourced concrete reinforcement are analyzed. For the masonry structure, the characteristics of adding reinforced concrete surface layer and carbon fiber cloth are discussed. The principle, application and advantages of new seismic strengthening technologies such as foundation isolation technology (lead core rubber isolation, slip damping isolation, spring damping isolation), damping energy dissipation technology (viscous damper, metal yield damper, friction damper), intelligent structure control technology (active control, semi-active control) are introduced. The development trend of seismic strengthening technology in materials, design, construction, monitoring and toughness of building structures is prospected.

**[Key words]** building structure; Seismic reinforcement; Foundation isolation; Damping energy dissipation; Intelligent structure control

### 引言

我国部分地区频发地震灾害,造成重大人员伤亡和经济损失,加强既有建筑结构抗震加固刻不容缓。2022年,住房和城乡建设部发布《“十四五”建筑业发展规划》,明确大力发展绿色建筑,提升建筑工程品质安全,加快新型建筑工业化发展。在此背景下,研究建筑结构抗震加固技术的应用现状与发展趋势,对于指导工程实践、提升建筑安全性能具有重要意义。

### 1 传统建筑结构抗震加固技术的应用

#### 1.1 钢筋混凝土结构加固技术

钢筋混凝土结构抗震加固常用粘贴钢板/复合材料加固、包钢加固和外包混凝土加固等技术。粘贴钢板/复合材料加固利用高强度材料粘贴于构件表面,提高承载力和刚度,改善延性和耗能能力,但易发生界面脱粘。包钢加固采用型钢或钢板连接于构

件,提高抗弯、抗剪和抗压性能,但施工难度大。外包混凝土加固在构件外侧增设钢筋混凝土,利用新旧混凝土共同工作,提高整体刚度和承载力,但易增加自重。选择加固技术需综合考虑结构特点、损伤程度、施工条件等因素,科学合理地制定方案。

#### 1.2 砌体结构加固技术

砌体结构在我国既有建筑中占比大,抗震性能差,亟需加固。常用的加固技术包括增设钢筋网水泥面层和碳纤维布加固。前者通过在墙面焊接钢筋网并浇筑水泥砂浆,形成整体的面层,提高墙体抗震性能,但会显著增加墙厚,影响使用功能。后者利用碳纤维布粘贴于墙面,提高抗剪切、抗拉伸和抗弯性能,但材料成本高,对施工质量要求严格。实际工程中需权衡加固效果、经济成本和施工便捷性等因素,选择最优方案。

#### 1.3 传统加固技术的优缺点分析

传统抗震加固技术经实践积累形成成熟的设计施工体系,具有可靠性高、适用范围广、工艺简单等优点。如粘贴钢板/复合材料加固可显著提高承载力和刚度,对原结构干扰小;包钢加固适用高宽比大构件,能有效约束混凝土,提高延性和耗能;外包混凝土加固可整体提升抗震性能,施工简便;钢筋网水泥面层和碳纤维布加固可有效提升砌体抗震能力,操作简单。但部分技术施工难度大,对原结构损伤大;材料成本高,经济性差;有些技术提升抗震性能有限;部分还会影响建筑使用功能和美观。选用时需全面考虑结构特点、加固目标、经济条件、施工环境等因素,优化方案,规范施工,确保效果,提高综合效益。

## 2 新型建筑结构抗震加固技术的应用

### 2.1 基础隔震技术

基础隔震技术通过在建筑基础与上部结构间设置隔震装置,将地震能量阻隔在基础,减小地震作用于上部结构的影响,提高整体抗震性能。铅芯橡胶隔震支座利用铅芯屈服和橡胶弹性变形提供水平向刚度和阻尼,具有刚度可调、阻尼比适中、变形能力强等优点。滑移阻尼隔震支座通过滑移面摩擦耗散地震能量,减小地震力,具有刚度高、阻尼大、耗能稳定等特点。弹簧阻尼隔震支座利用弹簧提供水平刚度,阻尼器提供耗能,可灵活调节隔震周期,适用于不同类型结构。基础隔震技术需深入研究隔震机理和结构动力响应,优化隔震参数和布置,严格控制材料性能和加工质量,并考虑施工工艺和运维管理,确保隔震效果和安全性。

### 2.2 阻尼耗能技术

阻尼耗能技术通过在结构中合理配置阻尼器,利用其滞回特性和耗能机制,消耗地震输入能量,减小结构震动,提高抗震性能。黏滞阻尼器采用特殊黏弹性材料,利用剪切变形产生速度相关阻尼力,对各种频率和幅值振动均有良好控制效果,适用于新建和既有建筑,但力学性能对温度敏感。金属屈服阻尼器利用金属材料塑性变形耗能,具有滞回曲线饱满、耗能能力强、工作稳定可靠等特点,但大变形下可能发生低周疲劳破坏。摩擦阻尼器利用摩擦面相对运动提供库仑阻尼,耗能效率高、温度影响小、易于更换,适用于高层建筑,但可能产生噪音。阻尼器选型、配置、布局应与结构特性相适应,并通过分析试验优化参数,采用可靠连接,同时考虑检修维护方案。

### 2.3 智能结构控制技术

智能结构控制技术融合结构动力学、传感器技术、计算机和控制理论,通过布置传感器和控制器,实时监测结构振动,根据最优控制算法实施主动或半主动控制,有效抑制结构响应,提高安全性和舒适性。主动控制系统利用外部能源,通过执行机构施加与运动反向同步的控制力,可显著降低位移和加速度响应,控制效果好、适应性强,但需大功率动力源和复杂维护。半主动控制系统引入智能可调阻尼器,利用小功率能源实时调节阻尼,兼具主动和被动控制优点,具有能耗低、可靠性高等特点。智能控制技术需开展多学科交叉研究,发展实时反馈控制算法,研制

高性能执行器,优化传感器和控制器布局,实现结构抗震控制智能化,推动从被动向主动抗震演进。

### 2.4 新型加固技术的优势与挑战

新型抗震加固技术较传统技术的优势:注重结构整体性能优化,强调体系协同和鲁棒性;采用高性能智能材料和元件,如高阻尼材料、自复位装置等,在降低响应的同时,提高延性、耗能和自恢复能力;融合多学科前沿理论方法,实现性能精准评估和动态控制;更加重视生命周期成本和社会效益,强调抗震加固与使用功能协调,注重环保性、快速性和装配化施工。但新技术应用也面临挑战:基础理论有待深化,需大量试验和数值模拟;设计规范和标准有待完善,需制定性能评定准则、设计计算方法和构造措施;专业队伍亟需壮大,要培养复合型人才;经济成本和技术门槛仍需攻克,需加强产学研联合,提高性价比和可及性;公众认知和接受度有待提高,需加大科普宣传力度。新型抗震加固技术需政府、市场、产业、学界等多方协同,在服务国家重大需求中实现关键核心技术自主创新。

## 3 建筑结构抗震加固技术的发展趋势

### 3.1 材料创新

未来,高性能材料将在提高结构强度、刚度、韧性等力学性能的同时,兼具轻质、耐久、环保等优点。碳纤维复合材料以其高强度、高模量、抗疲劳、耐腐蚀等特性,在结构加固和抗震改造中大有可为。形状记忆合金因具备超弹性、应变自恢复等独特性能,有望用于开发新型阻尼器和隔震装置。自修复材料通过内置的微胶囊、微通道等,在结构微观损伤初期即可自主修复,延长结构使用寿命。此外,纳米材料、智能材料、绿色材料等也将为建筑结构抗震加固注入新的活力。多功能复合材料将集成传感、驱动、自诊断等功能于一体,实现材料、结构、功能的一体化设计。新材料技术与结构设计、施工工艺、监测维护等深度融合,将助推建筑结构由传统的被动抗震向智能主动控制的方向发展。但新材料的工程应用仍面临标准规范滞后、长期性能数据缺乏、成本较高等挑战,需要加强基础研究和工程实践,建立完善的评价、设计应用和质量控制体系,实现建筑结构抗震加固材料的创新变革。

### 3.2 数字化设计

数字化设计技术正深刻影响着建筑结构抗震加固的方方面面。BIM技术可在虚拟环境中对既有建筑进行精细化三维建模,集成结构、材料、设备等多维信息,为加固方案制定、性能评估、施工模拟等提供数字化平台。结构优化设计利用拓扑优化、进化算法等,在满足抗震性能约束下求解结构的最优形态和参数,提高加固效率和经济性。参数化设计通过将设计参数化、模块化,建立参数关联逻辑和规则库,自动生成多套加固方案,供设计人员比选论证。基于性能的设计从结构的变形、耗能、震损等性能目标出发,借助非线性分析和动力弹塑性分析,制定适应结构特点的抗震加固措施。数字孪生技术通过构建结构的高精度数字映像,实现加固全过程的精细化映射、实时同步和虚实交互,优化资源配置,提升项目管理水平。数字化设计技术的应用

需建立完善的软件平台、参数数据库和标准规范,培养既懂结构工程又精通数字技术的复合型人才。

### 3.3 施工工艺革新

装配式技术通过工厂化预制构件,现场快速拼装,标准化连接,可减少现场湿作业,提高施工效率和质量稳定性,尤其适用于新建筑的同步抗震设计施工。3D打印技术利用高性能混凝土等材料,通过数字化建模和智能化喷印,可实现构件的快速成型和精细化制造,在加固工程中可用于构造异形构件、填充加固和快速修复等。机器人施工利用智能化机械臂等设备,协同感知、运动规划和自主作业,可替代人工完成高空作业、精密装配、表面处理等高风险、高难度的加固施工任务。激光扫描、实景建模等数字化测绘技术,可快速获取既有建筑的精确几何信息,为加固设计提供高质量的基础数据。新型连接技术,如预应力连接、粘结连接等,可实现新老结构的可靠传力和一体化受力。施工过程的数字化管理、智能化监测和信息化追溯,将全面提升加固工程的施工品质和运维水平。但新工艺推广应用还需突破核心装备制约,完善标准规范,强化专业人才培养,推动建筑结构抗震加固施工向工业化、智能化、精益化方向升级。

### 3.4 监测诊断智能化

结构健康监测系统利用传感器网络实时采集结构的力学性能参数,评估结构的动力特性、受力状态和损伤程度,及时发现结构的劣化和破坏隐患,为加固维护决策提供依据。光纤传感、压电材料、MEMS传感器等新型监测元件,具有体积小、灵敏度高、耐久性好等特点,可实现结构内部应变、裂缝等细观力学量的精细化监测。无线传输、自供电、集成封装等技术进步将推动监测系统的无线化、智能化和一体化发展。监测大数据融合物联网、云计算、BIM等技术,通过海量异构数据的存储、挖掘、融合和智能分析,可深度剖析结构动力性能的退化规律,评价加固工程的长期效果,优化运维维护策略。人工智能在监测诊断中的应用方兴未艾,机器学习可智能识别结构的振动模态和损伤模式,深度学习可端到端映射监测数据和结构性能状态,智能诊断算法可自主分析结构的健康退化过程,现有的抗震加固结构亟须建立全寿命周期智慧运维平台。监测诊断智能化需进一步突破共性关键技术,创新体制机制,培养跨学科复合型人才,将为建筑结构抗震加固后的长效运维管护赋能增效。

### 3.5 抗震韧性提升

地震韧性是指建筑结构经历破坏性地震后快速恢复功能、维持使用的能力,强调“减灾+恢复”并重的防灾理念。功能可恢复性是韧性的核心要义,加固设计应保证关键结构构件、设备管线等的连续可靠,合理布置避难疏散空间,降低损伤对建筑使用功能的影响。快速修复是韧性的重要保障,加固方案应便于震后快速检修,易损构件应采用标准化、模块化设计,提高更换维修效率,新型高强快硬材料可用于震后应急加固。灾后自恢复也是韧性的研究方向,自愈混凝土、形状记忆合金等新材料有望实现结构的自主修复。抗震韧性与可持续发展理念相契合,抗震加固应在全生命周期内统筹兼顾结构安全、修复重建、资源消耗、环境影响等因素,推广绿色节能技术,提高加固工程的友好性和循环利用水平。抗震韧性设计还需纳入社会经济因素,统筹考虑结构损伤对社会服务功能的影响,并制定恢复重建财政金融政策。我国现有建筑存量巨大,提升建筑结构抗震韧性任重道远,亟须强化基础研究,突破关键技术,创新设计理念,完善标准规范,强化宣传教育,将抗震韧性理念落到实处。

## 4 结束语

建筑结构抗震加固技术的创新发展,离不开材料、设计、施工、监测等多方面的持续进步和协同作用。未来,新材料、数字化设计、装配式施工、智能监测等技术将不断突破,为建筑结构提供更加经济、高效、可靠的抗震加固方案。同时,加强基础研究、完善技术标准、培养复合型人才,也是推动建筑结构抗震加固技术长远发展的关键所在。建筑结构抗震加固技术的不断进步,将为提升建筑抗震韧性、保障人民生命财产安全、服务国家社会经济高质量发展贡献更大力量。

## [参考文献]

- [1]王东旭,齐华伟.超高层装配式建筑结构设计及抗震性能分析[J].住宅产业,2024,(05):51-53.
- [2]孙晋博,黄嘉伟.基于BIM技术的建筑结构抗震加固强度自动检测分析[J].现代制造技术与装备,2022,58(12):199-201.
- [3]夏仕洋,孙逊,方立新,等.减震技术在优秀近代建筑更新中的应用研究[J].建筑结构,2023,53(02):55-61.
- [4]倪波涛,汪文祥,王作成.建筑钢筋混凝土框架结构抗震加固技术探析[J].福建建材,2021,(06):76-78.
- [5]郭丽娟,杨琴.浅谈BIM技术在结构抗震加固中的应用[J].中小企业管理与科技(中旬刊),2021,(05):184-185.