

引用格式 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. XIAO C Z, LI J H, MA T Y, et al. Current Situation and Development of Retrofitting and Performance Improvement for Existing Building Structures[J]. Industrial Construction, 2024, 54(1): 20-30 (in Chinese). DOI: 10.3724/j.gyzG23120812

既有建筑结构加固改造与性能提升现状与发展

肖从真 李建辉 马天怡 魏越 巫振弘 乔保娟

(中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

摘要 我国城市发展已经从增量规划转向存量规划, 以高质量发展为目标的既有建筑结构加固改造与性能提升将成为当前甚至相当长时期内建筑领域的主要工作。文章介绍了既有建筑结构从加固改造到性能提升的发展历程, 从安全性和抗震性能鉴定、加固改造与性能提升技术、韧性评价三个方面系统阐述了国内外关于既有建筑结构改造的最新研究成果, 并指出了既有建筑结构安全性和抗震性能鉴定中存在的技术问题。最后, 对未来既有建筑结构加固改造与性能提升未来发展方向做出了展望。

关键词 既有建筑; 加固改造; 性能提升; 鉴定; 韧性评价; 技术问题; 展望

Current Situation and Development of Retrofitting and Performance Improvement for Existing Building Structures

XIAO Congzhen LI Jianhui MA Tianyi WEI Yue WU Zhenhong QIAO Baojuan

(China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: China's urban development has shifted from incremental planning to inventory planning. With the goal of high quality development, retrofitting and performance improvement for existing building structures have become the main task of building sector at present or even for a quite long time. The paper introduced the developmet process from retrofitting to performance improvement of existing building structures, systematically expounded the latest research results of existing building structure reconstruction at home and abroad from three aspects: safety and seismic performance appraisal, retrofitting and performance improvement technology, and resilience evaluation. Moreover, the technical problems existing in the safety and seismic performance evaluation of existing building structures were pointed out. Finally, the future development of retrofitting and performance improvement for existing building structures was prospected.

Key words: existing building; retrofitting; performance improvement; appraisal; resilience evaluation; technical problem; prospect

*北京市自然科学基金项目(8212019)。

第一作者: 肖从真, 男, 1967年出生, 博士, 研究员, 主要从事高层建筑结构的研究。

通信作者: 李建辉, 主要从事高层建筑结构的研究, lijh@cabr-design.com。

收稿日期: 2023-12-08

0 引言

党的十八大以来,国家的新型城镇化建设取得重大历史成就,城镇化水平和质量大幅提升,城镇发展迈上新的历史性台阶。2022年,我国城镇化率已达到65.22%,从国际经验上看,城镇化率在接近或者超过70%时,城镇化速率将明显放缓,城镇化发展模式将从“高速发展”转向“高质量发展”^[1]。当前,城镇化发展面临的问题挑战和机遇动力并存,城镇的生态质量、安全韧性、治理能力等方面,仍存在较大的提升空间。2023年,全国住房和城乡建设工作会议提出,我国将以实施城市更新行动为抓手,着力打造宜居、韧性、智慧城市^[2]。我国城市发展已经进入城市更新的重要时期,由大规模增量建设转为存量提质改造和增量结构调整并重的阶段。推动高质量发展,以既有建筑改造为主要内容的城市更新逐渐成为我国基本建设的主旋律。

截至2022年底,我国既有建筑面积接近700亿m²。不同于新建建筑,既有建筑改造受到限制更多,实施相对困难,同时,面临新旧技术标准不统一的难题。因此,需要系统开展既有建筑结构加固改造标准、技术的研究,通过性能化设计的手段,达到性能提升的目标。本文简要介绍了既有建筑结构抗震鉴定、加固改造标准的发展历程,总结了既有建筑加固改造与性能提升技术与韧性评价方法的最新成果,并对未来发展方向进行了展望。

1 既有建筑加固改造思路与发展历程

我国的既有建筑结构抗震鉴定与加固工作已开展了将近60年,始于1966年邢台地震后,期间国家有三次大的投入用于房屋建筑与基础设施抗震加固工作^[3]。

1) 1995年底共加固各类建筑物2.4亿m²,支出经费44亿元,关系国计民生的能源、交通、通信、水利等国家重点工程基本加固完成。

2) 1998年鉴于北京及周边地区地震形势严峻,中央启动了“首都圈抗震加固示范区项目”,安排国债资金13.1亿元的专项经费,用于首都圈中央国家机关行政事业单位办公楼、大型公共建筑及部分医院与学校的抗震加固,共完成了357个项目600多万m²的抗震加固任务。

3) 2008年汶川地震后,鉴于中小学校舍倒塌造成不少学生死亡、社会反响极大,国务院启动了“全国中小学校舍安全工程”,中央投入280亿元,在全国近3亿m²的中小学校舍开展抗震加固、提高综合防灾能力建设,使学校校舍达到重点设防类抗震设防标准。

1.1 既有建筑结构抗震加固的发展历程

1.1.1 20世纪60年代

1966年3月8日邢台地震后,当地农村一些简易民房对前后墙采用简单的钢丝绳进行了拉结处理,这些房屋在3月22日发生的地震中并未遭到严重破坏,由此开

始了我国对现有房屋的抗震鉴定与加固工作,首先在北京、天津地区开展了房屋的抗震普查与鉴定。

1968年原国家建委京津地区抗震办公室发布了五本标准草案,并在京津地区开展了抗震鉴定与加固的试点工作。

1.1.2 20世纪70年代

1975年发布了《京津地区工业与民用建筑抗震鉴定标准》(试行),该标准中按结构类型分类编写了抗震鉴定要求和加固处理意见,修改了有关圈梁的加固意见和单层空旷砖房带壁柱墙高厚比的规定等。

1977年发布了TJ 23—77《工业与民用建筑抗震鉴定标准》,配合该标准编制了一些抗震加固图集。标志着抗震鉴定与加固工作已成为防震减灾的重要组成部分,逐步进入规范化、制度化的轨道。

1.1.3 20世纪80—90年代

1977年—1978年间,许多单位相继进行了夹板墙、组合柱、外加柱、砖墙裂缝修复和墙体压力灌浆等项目的试验研究,并于1978年12月召开了全国抗震加固科研成果交流会。会后编制了《民用砖房抗震加固技术措施》,这对提高砖房抗震加固设计质量起到了一定的指导作用。

1980年后,抗震加固技术的研究不断深入,在此期间编制了《工业与民用建筑抗震加固技术措施》《冶金建筑抗震加固技术措施》,这段时间内的试验规模和研究深度,均已标志着我国抗震加固技术的研究已进入世界先进行列。

1988年,完成了《房屋抗震鉴定与加固设计规程》(送审稿)。之后该标准被分为两本,就是后来的GB 50023—95《建筑抗震鉴定标准》与JGJ 116—98《建筑抗震加固技术规程》。

1.1.4 21世纪初期

汶川地震后,根据住房城乡建设部的要求,并配合全国中小学校舍安工程的顺利开展,GB 50023—95《建筑抗震鉴定标准》、JGJ 116—98《建筑抗震加固技术规程》进行了紧急修订,修订过程中吸纳了TJ 23—77《工业与民用建筑抗震鉴定标准》实施以来抗震鉴定与加固的最新研究成果,总结了国内外历次大地震、特别是汶川地震的震灾经验教训,GB 50023—2009《建筑抗震鉴定标准》^[4]、JGJ 116—2009《建筑抗震加固技术规程》^[5]于2009年正式发布实施。

与GB 50023—95《建筑抗震鉴定标准》、JGJ 116—98《建筑抗震加固技术规程》相比,GB 50023—2009《建筑抗震鉴定标准》在以下几个方面有了技术上的重大进步:1)引入了后续使用年限的概念;2)抗震鉴定的设防目标更加明确;3)提高了学校、医院等重点设防类建筑的设防标准;4)增加了消能减震、粘贴碳纤维布、钢绞线聚合物砂浆等抗震加固新技术。

1.1.5 最新情况

《建设工程抗震管理条例(草案)》已于2021年5月12日获国务院批准,它是建筑抗震工作的法律性文件,同年,GB 55021—2021《既有建筑鉴定与加固通用规范》^[6]、GB 55022—2021《既有建筑维护与改造通用规范》^[7]正式颁布实施。当前,国家标准《建筑消能减震加固技术标准》已经通过审查,这将为提高建筑物抗震能力发挥重要作用。

1.2 既有建筑绿色改造、综合性能提升的发展

随着经济的发展和科技的进步,特别是为了应对能源危机的形势和可持续发展的战略要求,改造不仅仅是从结构的安全性出发,还对整体建筑乃至整个区域从空间、功能和效能上进行改造,改造后可以实现建筑空间的扩展、使用功能的提高、能耗的降低和使用舒适度的提升。目的是更好地满足人们生活工作的需求,达到节能降碳的目标,符合可持续发展的理念^[8]。

2005年,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》(国发〔2005〕44号)颁布,将城市功能提升与空间节约利用、建筑节能与绿色建筑、城市生态居住环境质量保障等作为城镇化与城市发展领域的优先主题。从2006年开始,既有建筑的改造主要围绕安全性改造、节能节水改造、功能性改造、环境改善等绿色化改造内容,关注气候变化,强调建筑低碳发展。《国家新型城镇化规划(2014—2020年)》提出改造提升中心城区功能,推动新型城市建设,要求按照改造更新与保护修复并重的要求,健全旧城改造机制,优化提升旧城功能。2015年中央城市工作会议提出优化存量的重点任务,推进城市既有建筑节能及绿色化改造,北方地区城市全面推进既有建筑节能改造^[9-10]。

从2016年至今,我国既有建筑改造进入到综合性能

提升改造阶段,2016年2月6日颁发《中共中央国务院关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》,要求有序实施城市修补和有机更新,解决老城区环境品质下降、空间秩序混乱等问题,通过维护加固老建筑等措施,恢复老城区功能和活力。2021年9月,《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》(中发〔2021〕36号文)正式发布,明确了我国做好碳达峰、碳中和工作的重要意见。我国城镇总建筑存量约740亿m²,体量巨大,其碳排放约占我国碳排放总量的20%。因此,推动既有建筑低碳绿色化提升改造成为未来很长一段时间我国城市更新领域的主要工作。

2 既有建筑结构安全性和抗震性能鉴定

既有建筑的鉴定包括安全性鉴定与抗震鉴定,安全性鉴定指仅考虑永久荷载与可变荷载作用下的结构承载能力鉴定,抗震鉴定则为在鉴定过程中考虑地震作用影响的抗震能力鉴定^[6]。二者的发展历程、鉴定思路与方法均不同。

2.1 安全性鉴定发展历程

1984年颁布的《房屋完损等级评定标准》^[11]是我国最早对既有房屋建筑进行整体完好性或损坏程度等级评定的标准,标志着我国房屋安全鉴定的开端^[12]。1990年,我国出台了首部可靠性鉴定标准——GBJ 144—1990《工业建筑可靠性鉴定标准》,创立了基于故障树(Fault Tree)理论的工业建筑结构可靠性鉴定传力树模型,解决了长期以来我国缺少可靠性量化评定方法的现状^[13],9年后发布的GB 50292—1999《民用建筑可靠性鉴定标准》^[14]是我国首部民用建筑鉴定标准,并于2015年发布了最新版^[15]。

2021年发布的GB 55021—2021《既有建筑鉴定与加固通用规范》^[6]在安全性鉴定方面依然延续了上述两本鉴定标准的思路,其内容和程序如图1所示,属于根据分

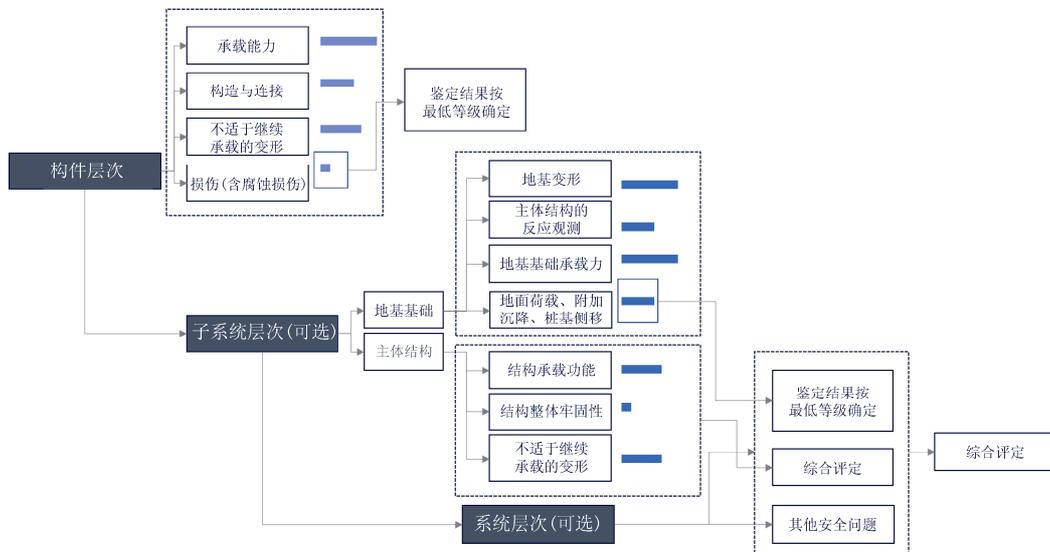


图1 安全性鉴定的内容

Fig.1 Content of safety appraisal

级模式设计的评定程序,分为构件层次、子系统层次、系统层次三级,可以根据实际需要仅进行至某一级,每一层级划分为不同的安全性等级,按最低等级项目鉴定结果或综合评定结果确定层级的最终安全等级。由上所述,可靠性鉴定标准跨越的三十年间,鉴定的整体思路与方法没有发生根本性的变化。

2.2 抗震鉴定发展历程

我国首部抗震设计标准 TJ 11—74《工业与民用建筑抗震设计规范(试行)》于 1974 年发布,此前的建筑在设计时均未考虑抗震设防,因此六七十年代发生的数次大地震造成了巨大的人员伤亡及财产损失,直接推动了我国抗震鉴定标准的发展。

我国抗震鉴定的发展大致可分为两个阶段:第一阶段是起步阶段:以《京津地区工业与民用建筑抗震鉴定标准》(试行)、TJ 23—77《工业与民用建筑抗震鉴定标准》为代表,该时期对于抗震构造措施、抗震承载力的鉴定是分别进行的,震害预测工作量极大。GB 50023—95《建筑抗震鉴定标准》基于筛选法的原理提出了两级鉴定方法,并提出了综合抗震能力的概念,通过第一级宏观鉴定筛选出不需要加固的建筑,第二级鉴定则以抗震承载力验算为主,减少了不必要的工作,也标志着我国抗震鉴定进入了成熟发展阶段(图 2)。我国现行 GB 50023—2009《建筑抗震鉴定标准》中基本沿用了 GB 50023—95《建筑抗震鉴定标准》的鉴定思路^[3-4,16]。

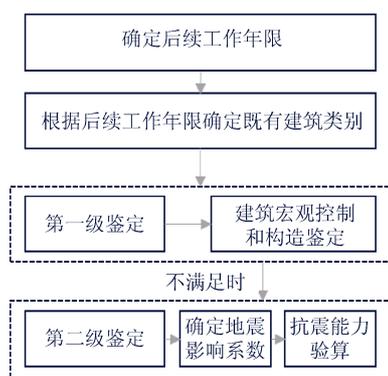


图 2 抗震鉴定的内容与流程
Fig.2 Content and process of seismic appraisal

2.3 存在的问题

2.3.1 执行标准的选择

近年来,我国工程建设标准的底线要求逐步提高,2008 至 2016 年间,我国抗震设计规范修订了 3 次,2018 年发布的 GB 50068—2018《建筑可靠性设计统一标准》^[17]提高了永久荷载与可变荷载的分项系数,2021 年发布的抗震新规进一步将重力荷载分项系数由 1.2 调整为 1.3,提升了新建建筑的安全性。

但是这些调整对于既有建筑的鉴定工作带来了一定

的影响,GB 50292—1999《民用建筑可靠性鉴定标准》中规定,用于承载力验算的抗力作用效应比中的抗力和效应均应按现行标准执行,这会造成构件按承载力评定等级降低,进而有可能导致鉴定单元评级为结果需要“必须立即采取措施”,出现安全性鉴定结论与现场检测结果不符的情况。GB 55021—2021《既有建筑鉴定与加固通用规范》中对此进行了改进,规定执行标准应根据鉴定目的进行选择,但在具体执行过程中仍存在一些细节问题。

2.3.2 安全性与抗震鉴定的关系

二者的关系问题一直以来存在较大的争议,结构的安全性从广义上来说包含抗震安全性,GB 55021—2021《既有建筑鉴定与加固通用规范》中也规定“既有建筑的鉴定应同时进行安全性鉴定和抗震鉴定”。但是对于具体工程情况,如局部加固与改造,仅涉及到个别构件承载力的复核问题,是否需要对整个结构同时进行安全性与抗震鉴定?对此,程绍革^[18]指出,由于 GB 55021—2021《既有建筑鉴定与加固通用规范》中同时规定了安全性鉴定可只进行到构件层次,此时的鉴定不属于对整体结构的鉴定,因此也就自然不必同时对整体结构进行抗震鉴定,对 GB 55021—2021《既有建筑鉴定与加固通用规范》中第 2.0.4 条的正确理解应为:安全性鉴定后不一定要做抗震鉴定,抗震鉴定前必须要进行整体结构安全性鉴定。

2.3.3 鉴定等级评定方法

既有建筑的鉴定工作中现场调查与检测占很大比重,而现场调查的结果主要依据视觉判断和专家经验,尚未建立宏观损伤现象与客观损伤指标的关系^[19],受主观意识和认知偏差的影响大,对于构件层次的安全性鉴定、抗震构造鉴定,仍采取“短板控制”的鉴定方法是否合理有待进一步研究^[20]。

2.3.4 使用设计规范验算既有建筑

拟建建筑与既有建筑的主要区别在于拟建建筑具有不确定性,随机因素非常多,而既有建筑是客观存在的,可以通过现场调查、检测等手段“去随机性”,因此,在抗力计算时,荷载分项系数、材料强度分项系数等与设计考虑的不确定性完全不同,刘立渠等^[21]指出,直接采用设计规范的计算公式进行既有建筑的验算是造成鉴定结论与现场调研结论不符的深层原因。

3 既有建筑结构加固改造与性能提升技术

3.1 常用技术

3.1.1 增大截面加固法

增大截面加固法是在混凝土构件外增加混凝土和钢筋,可以提高构件承载力和刚度。通常用于受弯加固(梁、板构件)、压弯拉弯加固(柱、墙构件)及复杂受力构件(压弯剪构件、节点区加固)^[22]。该方法采用同时增加钢

筋和混凝土的方式进行加固, 最小加固厚度取决于材料和工艺。经过加固, 截面的刚度和承载力都有显著提高。加固中采取钢筋搭接、焊接和混凝土粗糙面连接的方式, 保证加固后构件基本满足平截面假定。承载力验算时, 多按照平截面假定合理估计原有钢筋应力, 计算整个截面的承载能力。

增大截面加固法的研究主要集中于增大截面加固法对于受弯、压弯和拉弯正截面承载力^[23-25]、斜截面承载力^[26]、抗震延性^[27]和可靠度^[28]的影响。增大截面法对于原先存在劣化或损伤的混凝土构件也有良好的效果, 较新的研究包括高温损伤^[29-30]、震后损伤^[31-32]、锈蚀损伤^[33]、静力损伤^[34]后的混凝土构件, 采用增大截面加固法后的承载力研究。对于其他加固方法不易解决的节点核心区加固问题也常采用增大截面加固法。同时, 为提高加固性能, 也有采用高性能混凝土对截面进行加固等大相关研究^[35]。增大截面法中, 采用高性能易浇筑的混凝土材料、新旧混凝土界面传力机制、截面疲劳性能和考虑原劣化混凝土的承载力分析尚需要进一步研究。

3.1.2 包钢、粘钢加固

包钢加固和粘钢加固是两种不完全相同的加固思路。其中包钢加固是在混凝土构件外包型钢及缀板连接成架构与原混凝土结构共同受力, 包钢加固构件更接近于组合构件受力方式。包钢加固方式包括外包角钢加固^[36-37]、外套钢管加固^[38]、型钢混凝土组合梁^[39]等。外包型钢材具有单独受力能力, 与原混凝土材料复合受力。外包钢材起到骨架作用承担部分受力, 对原混凝土构件起到支撑作用, 被附着的混凝土构件改善了钢骨架的受压稳定问题, 合理受力的构件可以起到类似组合结构一“1+1>2”的效果。其计算方式也与组合结构类似, 按照平截面假定考虑钢材贡献, 同时考虑加固构件的二次受力问题。研究表明, 外包型钢材可以对原混凝土构件产生约束效应, 起到改善混凝土受力、提高构件延性^[36, 40-41]的作用。

粘钢加固是在混凝土构件外皮粘贴钢板以补强钢筋, 提高局部受拉承载力。通过粘贴界面传力, 新粘贴与原被加固构件共同受力。粘贴钢板可以控制弯曲、受拉产生的直裂缝, 也可以控制受剪产生的斜裂缝, 可以有效提高构件正截面和斜截面承载力, 通常适用于受弯、受拉和大偏心受压构件^[42], 也有用于节点加固^[43-45]。由于粘钢加固通过钢板黏结界面应力^[46-48]提高构件受弯和受剪承载力^[38, 48-51], 其加固极限承载力不仅取决于外加钢板的数量, 同时受制于黏结界面的传递能力, 在粘钢加固的破坏试验中会出现黏结界面破坏^[48, 52-53], 因此通常会限制粘钢加固的承载力上限, 且需要考虑新增钢板二次受力效率问题。

3.1.3 纤维复合材料粘贴加固

常用于混凝土结构加固的纤维包括碳纤维^[54]、玄武

岩纤维^[55]、芳纶纤维^[54]等。对于受拉、受弯和受剪构件, 纤维复合材料粘贴加固的原理与粘钢加固类似, 主要通过黏结界面传递应力, 控制被加固构件的裂缝开展, 起到共同受力的效果。相比钢板, 纤维复合材料具有重量轻、强度高、耐腐蚀、粘贴贴合性好和施工便利等优点。纤维布粘贴加固可以类似粘钢加固使用^[56], 通过在混凝土构件外皮粘贴高强度纤维复材以提高局部受拉承载力, 提高构件受弯^[56-60]或受剪承载力^[61-63]。类似粘钢加固, 碳纤维布与混凝土黏结界面的剥离破坏^[64]和加固前初始应力^[65-66]应给予重视。通常需要限制纤维复合材料加固的承载力上限, 且在考虑二次受力的情况下按应力分配考虑粘贴纤维承担的应力对其承载力进行折减。

纤维复合材料加固不仅适用于受弯、受拉和大偏心受压构件, 也适用于轴心受力构件和抗震构件^[67]。纤维复合材料可以较为方便地对柱构件进行包裹, 提高混凝土的周围约束。按照约束混凝土理论, 受约束的混凝土可以有效提高其轴心极限承载力和延性。较多研究表明, 采用纤维复合材料包裹加固后的柱构件的受压、压弯承载力^[68]和延性^[69]得到了显著的提升。纤维复合材料加固圆柱构件的约束效应更好, 对于方柱需要将柱边角改圆之后再用纤维复合材料进行包裹。由于受力依赖于界面连接, 对于构件母材易破碎的情况下, 试验表明纤维复合材料粘贴加固对砌体墙的加固作用有限^[58]。

3.1.4 高强钢绞线砂浆加固

高强钢绞线砂浆加固, 其加固方式类似于加大截面法, 是将网片作为受拉构件与混凝土变形协调、共同受力, 在待加固构件外增加一层加固覆盖层。高强钢绞线砂浆加固在混凝土外表面附加较小直径的钢筋网, 采用涂抹的方式将砂浆涂抹到待加固构件表面。相比加大截面法, 其涂抹的方式施工效率更高, 完成面最小厚度更薄; 相比粘钢和粘碳纤维加固, 由于有水泥砂浆的包裹, 加固材料的防火和耐腐蚀性可得到保障, 加固成本更低。为提高加固效率, 通常采用高强钢绞线, 并在钢绞线上施加预应力。

高强钢绞线砂浆加固应用较为广泛, 是砌体墙抗震加固^[70-71]的一种常用技术手段。当钢绞线的含钢率较高时, 可以显著地改善砂浆的受力性能。对于混凝土梁、柱和墙等构件复杂受力状况下的加固均有研究和应用。对于混凝土构件, 常用高强钢绞线砂浆加固的方式包括混凝土楼板加固^[72]、混凝土梁加固^[73-75]、框架节点加固^[75-77]、裂缝控制^[76]。高强钢绞线砂浆加固方式加固的方式同样会受到附着截面的影响, 因此加固的厚度不宜太厚, 通常需限制提升承载力上限。同时, 高强钢绞线包裹柱身也可以达到类似于纤维复核材料包裹的作用, 通过提高混凝土的周围约束, 显著提高柱在轴心受压、偏压下的极限承载力和延性^[78]。

3.2 减隔震加固技术

3.2.1 消能减震加固

消能减震技术是一种高效的抗震手段,在结构的合理位置设置耗能能力优异的阻尼器^[79],提高结构的耗能能力和抗侧延性^[80]。在20世纪70年代从机械控制领域引入土木工程,经过近50年的发展,在被动控制、半主动控制和主动控制方面有大量研究,同时适用于新建和加固结构。当前应用最为广泛的是被动减震技术。在20世纪90年代的一批首都圈防震减灾示范区建设中,北京火车站、北京饭店和北京展览馆等标志性建筑即采用了消能减震技术进行加固,2008年汶川地震及后续的震后建筑加固中亦采用了减震技术。国务院、住建部、北京市等各级主管部门都发布了在加固结构中推广使用减隔震的要求。

经过多年的研究、产线迭代和工程实践,消能减震已经由当初90年代完全依赖进口,到如今国内已经发展出了非常成熟、丰富的消能减震产品生产链。国产产品的质量和性能不次于进口产品,种类和型号尚在不断更新迭代中。常用的消能减震产品包括,屈曲约束支撑^[81-84]、黏滞阻尼器^[85]、摩擦阻尼器^[86]、黏弹性阻尼器^[87]等。消能减震加固对于多层框架结构的抗震加固效果最佳,可以显著改善结构的整体抗震性能,将加固集中于安装阻尼器的跨附近,避免了常规加固方式下大量的加固,节约加固时间和加固造价,方案具有一定优势。

消能减震设计方法也在不断发展中,可以通过附加阻尼比和等效刚度考虑阻尼器对结构抗震能力的贡献^[88-89],降低了设计难度。另外,对于原结构构造不满足的情况,尚可以采用体系性能化设计的方法^[84, 90-91],扩展了消能减震加固的适用范围。

3.2.2 隔震加固

隔震技术通过隔震垫延长结构自振周期并提高耗能能力,可以显著提高上部结构抗震能力。与减震技术同样起源于20世纪70年代,90年代在我国得到应用。在多次地震检验中,隔震建筑表现出良好的抗震性能。采用隔震的建筑内装修损伤小、家具不宜倒伏和人员舒适度较高等优点使得其在医院、学校类对抗震要求高的建筑中得到了大量应用。同减震技术类似,当前隔震产品已实现国产化,并有各级主管部门的政策支持,发展较快。隔震层、隔震沟、外装饰、楼梯、电梯和通风井等的隔震构造措施^[92]影响了隔震建筑的完成度,应当予以关注。

隔震加固的适用范围较广,对大多数高宽比不大、抗震能力不足的结构都有非常优异的加固效果。经过隔震加固的建筑,其抗震性能和震后易恢复性都可以得到极大提升,在大量框架结构^[93]、框架剪力墙、剪力墙结构和砖混结构^[94]都有大量的隔震加固应用。但由于隔震层、隔震沟和管线改造等方面的需求,隔震加固的造价偏高和周期相对较长,相对适合于抗震要求较高的建筑

加固,该加固方式对于历史建筑^[94-97]、需要位置平移的建筑、底部损伤的建筑^[97-98]尤其适用。

3.3 结构抗震加固韧性技术

3.3.1 附加子结构技术

附加子结构的加固方式^[99-100]是结构整体体系加固方式的一种,传统加固中常有采用,如增加剪力墙、增加受力框架和增加支撑的方式。其思路是对结构附加一个额外的结构体系以提升原结构的抗震性能,在中国国家博物馆的加固中就采用的是增加受力框架的方式;在一些砌体结构和框架结构中,常采用增设剪力墙或增加支撑的方式。

除了传统硬抗的思路,还有采取改善结构变形耗能性能的思路,如采用附加消能框架、摇摆墙体系和自复位体系,通过子结构协调原结构变形能力,使得原结构整体抗震性能得到极大提升。摇摆墙体系通过与原结构并联一个底部交接墙体,可以有效控制结构变形和损伤的离散性^[100]。自复位体系可以附加在子结构上以实现结构自动复位^[101]。

3.3.2 可恢复功能的防震技术

随着人们对抗震要求的不断发展,对抗震建筑的要求已经从单一的保障生命、财产安全发展到需考虑震后恢复效率的阶段。根据多次地震灾害经验,对于城市遭受地震冲击后,大量建筑的加固需求将对城市加固维修能力形成冲击。此时需要快速恢复城市中重要建筑的功能,因此韧性城市概念被提出。对于城市重要建筑,控制其震时反应、减少其震后损失、实现快速可恢复成为越来越关注的话题。对结构抗震的评估,也从单一的力学概念,发展到经济学、系统控制和全生命期范围。结构鲁棒性、防倒塌能力、中震下正常使用性能和震后可恢复性成为关注焦点。

可恢复功能的防震技术是指在设计初即充分考虑结构在震后快速恢复使用功能的技术^[102]。通过合理设计损伤集中部位,在地震发生后,可以通过快速更换或加固损伤部位从而快速恢复使用功能。通过合理设计的隔震和减震手段可以有利于提高建筑的震后可恢复性,更加广义的概念是在结构的一些易损部位实现高延性和可更换功能,当前在研究的可更换部位包括可更换连梁^[101,103]、可更换柱^[104-105]、可更换节点^[106-107]和可更换剪力墙角^[108-109]等。通过精细化设计、系统性分析,以及完善的部品部件系统,有望在将来的发展中实现这一目标。

4 既有建筑结构韧性评价

既有建筑结构抗震性能评估方法主要经历了西二大阶段。第一代抗震性能评估方法以美国联邦紧急事务管理署(Federal Emergency Manage Agency, FEMA) FEMA 273、FEMA 356和ASCE/SEI 41—06等为代表,采用确

定性方法, 依据由地震强度等级和结构性能等级构成的性能水准矩阵来评估单体建筑的抗震性能, 该方法有一定的局限性: 1) 采用确定性分析方法, 未考虑地震动的随机性对评估结果进行概率分析; 2) 往往忽略了非结构构件及设备损伤对整体结构性能的影响; 3) 以结构层间位移角、材料应变等专业术语反映评估结果, 对于非专业人士难以理解, 增加了决策难度^[110]。

第二代抗震性能评估方法开始于 2002 年, FEMA 发起了 ATC—58 计划, 旨在发展新一代建筑抗震性能设计和评估方法。

2003 年, Deierlein 等^[111]学者建立了全概率韧性评估框架, 将地震性能概率分析分为四个部分: 1) 地震危险性分析, 根据某一区域内一定时间内某强度地震发生的概率, 确定地震强度参数 IM (Intensity Measure) 和年平均超越概率 $\lambda(IM)$ 的关系, 即地震危险性曲线; 2) 结构响应分析, 根据地震的危险性曲线, 选取具有代表性的地震动, 进行结构动力分析, 获取工程需求参数 EDP (Engineering Demand Parameter), 如最大层间位移角、楼面加速度等参数; 3) 损伤分析, 根据地震需求参数 EDP, 结合构件易损性数据库, 确定损伤指标 DM (Damage Measure); 4) 损失分析, 根据损伤指标 DM 计算出决策者更容易理解的决策变量 DV (Decision Variable), 如修复成本、修复时间等。可表示为三重积分的形式:

$$\lambda(DV) = \iiint G\langle DV|DM \rangle dG\langle DM|EDP \rangle dG\langle EDP|IM \rangle d\lambda(IM) \quad (1)$$

式中: $\lambda(DV)$ 是决策变量 DV 超越某个特定值的概率; $G\langle DV|DM \rangle$ 、 $G\langle DM|EDP \rangle$ 、 $G\langle EDP|IM \rangle$ 是条件概率函数, 如 $G\langle DV|DM \rangle$ 指在特定损伤状态 DM 时决策变量超越某个特定值的概率。

2012 年, 美国联邦紧急事务管理署和美国技术应用委员会基于全概率韧性评估框架提出了 FEMA P-58 建筑性能评估方法^[112], 并开发了配套评估工具 PACT^[113] (Performance Assessment Calculation Tool)。FEMA P-58 方法引入了概率分析方法, 增强了评估结果的可信度, 建立了包括人员伤亡、修复费用和修复时间等性能指标的评价方法, 比第一代方法所采用的专业性结果更便于决策方理解。人员伤亡、修复费用和修复时间等性能指标反映了建筑维持与恢复原有建筑功能的能力, 也被称为韧性评价指标。FEMA P-58 方法根据工程需求参数(层间位移角、楼面加速度等)和构件易损性数据库确定构件损伤状态, 再根据构件损伤状态通过损失函数计算性能评估指标, 奠定了建筑抗震韧性评价的理论基础。

2013 年, 奥雅纳工程咨询有限公司联合多家单位基于 FEMA P-58 方法依托 PACT 工具发布了 REDi Rating

System^[114], 改进了修复时间计算方法(计入震后延迟开工时间及公共设施中断时间), 首次引进了评级系统, 建立了一套 4 个维度(组织韧性、建筑韧性、环境韧性、损失评估)、3 个等级(白金级、金级、银级)和 65 个指标的建筑抗震韧性指数评估体系。

2015 年, 美国韧性委员会建立了建筑性能评价系统 USRC Rating System^[115], 建立一套 3 个维度(安全、损伤、可恢复)、5 个等级(白金级、金级、银级、铜级和成员级)的韧性评级体系, 对建筑进行挂牌评价及交易评价, 推动了建筑结构韧性评级在社会范围内的普及。USRC 本身并不提供新的韧性评估方法, 而是基于 ASCE 41-13 问卷调查或 FEMA P-58、REDi 提供的评估结果获得韧性评级。

2021 年, 由清华大学牵头相关单位编制的 GB /T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》^[116]正式实施。该标准根据我国试验数据和震害调查修正了结构构件和部分非结构构件易损性数据, 建立了三星制韧性评级体系。潘鹏团队基于该标准设计并开发了适用于我国的建筑抗震韧性评价系统^[117], 极大地推动了我国建筑抗震韧性评价工作的发展。

总体来说, 以上四种抗震韧性评估方法在工程需求参数的获取、需求参数矩阵扩充及构件损伤状态判定方面基本一致, 评价流程如图 3 (a) 所示。建筑信息包括结构构件和建筑非结构构件的种类、数量、材料、几何尺寸, 设备的种类、数量、安装方式等。对于既有建筑, 宜进行振动测试, 依据测试结果进行模型修正, 并在给定地震水准下进行非线性动力时程分析。

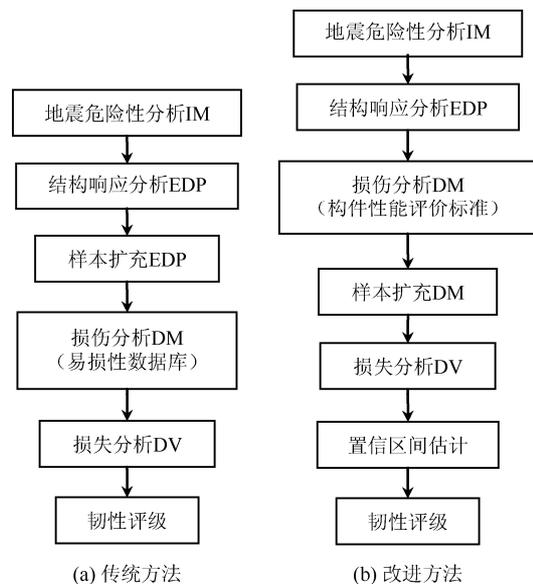


图 3 建筑抗震韧性评价流程

Fig.3 Flow diagram of building seismic resilience evaluation

由于式 (1) 所表征的是一组复杂的积分函数关系,

无法直接求得解析解,可采用蒙特卡洛方法求解。非线性动力时程分析往往需要耗费大量的时间,一般只做少量地震动的时程分析,这就需要对原始样本进行扩充,得到大量的模拟样本。假定原始样本矩阵满足联合对数正态分布,扩充后的矩阵与原始矩阵具有相同的均值与协方差。对于工程需求参数数目大于时程分析的地震动数目或工程需求参数线性相关的情况,协方差矩阵非满秩, Yang 等^[118]提出的方法中 Cholesky 分解算法将变得不稳定,可采用 FEMA P-58^[112]附录 G 方法进行样本矩阵扩充。

以上四种传统的抗震韧性评估方法预测精度多停留在性能组,而非构件组。换言之,评估方法针对的是一类构件而非一个构件,而不同位置、布置方式的构件损伤状态可能相差较大。比如,对于存在楼层变形不均匀、扭转不规则等情况的结构,同一楼层不同位置的构件变形是不同的,通过一个统一的层间位移角难以准确反映同楼层所有构件的变形。对于没有层概念的空间结构,无法定义层间位移角,因而传统的根据层间位移角判断构件损伤状态的方法无法对该类结构进行抗震韧性评价。为增强建筑抗震韧性评价方法对没有层概念的空间结构的适用性,提高楼层变形不均匀、扭转不规则结构的构件损伤状态判断的准确性,使之可以更灵活地适用于复杂建筑,肖从真等^[119]参照 GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》对韧性评价流程进行了改进,提出了基于构件损伤状态的抗震韧性评价方法,并开发了配套软件 SAUSG-RES,韧性评价流程如图 3(b)所示,详细步骤如下:

1) 地震危险性分析,确定地震动强度,选取合适的地震动记录。

2) 采用纤维梁和分层壳模型或塑性铰模型进行非线性动力时程分析获取结构响应。

3) 根据非线性时程分析结果,采用基于材料应力应变或者损伤的构件性能评价标准或者基于构件转角或位移角的构件性能评价标准来判定构件损伤状态。

4) 提取构件损伤状态作为原始样本,并对构件损伤状态矩阵进行扩充。

5) 根据扩充后的构件损伤状态矩阵,按照 GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》计算修复费用、修复时间及人员伤亡指标。

6) 计算修复费用、修复时间及人员伤亡指标给定置信水平的置信区间,估计置信上限。

7) 根据修复费用、修复时间及人员伤亡指标的置信上限进行韧性评级。

根据非线性时程分析材料应力、应变或构件转角判断结构构件损伤状态的方法,增强了抗震韧性评价方法对于没有层概念的空间结构的适用性,提高了存在楼层

变形不均匀、扭转不规则等情况的结构的构件损伤状态判断结果的准确性。采用抗震韧性评价指标给定置信水平的置信上限进行抗震韧性评级,考虑了地震动数目及时程分析结果离散性的影响,提升了韧性评价结果的可靠性。

5 结论与展望

5.1 结论

1) 我国既有建筑结构抗震鉴定与加固工作始于 1966 年,目前历经了 20 世纪 60 年代、20 世纪 70 年代、20 世纪 80—90 年代、21 世纪四个阶段,当前既有建筑改造已由单一的结构加固进入到功能、节能、绿色、低碳等综合性能提升改造阶段。

2) 鉴定是既有建筑加固前的必要程序,也是工程师制定科学合理的加固方案的技术依据,我国既有建筑鉴定发展的几十年间,鉴定标准与方法逐渐完善,但在工程实践中仍存在一些问題。

3) 经过多年发展,既有建筑结构加固改造与性能提升技术有了显著进步,该技术已经从构件局部加固发展到了体系加固和性能化加固方法,从被动式的损伤后修复发展到预估损伤实现可快速替换恢复技术,从单一力学概念发展到城市建筑群概念。

4) 建筑抗震韧性评价方法在第一代抗震性能评价方法基础上引入了概率分析方法,增强了评估结果的可信度,考虑了非结构构件的影响,建立了包括人员伤亡、修复费用和修复时间等性能指标的评价方法,便于决策方理解。以 FEMA P-58、REDi、USRC 和 GB/T 38591—2020《建筑抗震韧性评价标准》为代表的抗震韧性评价方法极大地推动了国内外建筑抗震韧性评价工作的发展。

5.2 展望

1) 既有建筑改造以满足建筑功能需求为前提,在保证结构安全的基础上,提升消防性能、绿色改造、降低能效、减少碳排放是未来发展方向,需重点研究有效的消防补偿措施、高效的绿色改造和能效提升技术。

2) 随着我国既有建筑存量的逐年提升,鉴定需求也将逐步增长,亟需针对目前工程实践中发现的具体问题,从鉴定理论、技术方法等方面进一步细化、完善我国既有建筑鉴定标准,为既有建筑鉴定工作提供理论依据与技术支撑。

3) 随着经济发展和技术进步,既有建筑结构加固改造与性能提升技术的需求也在增长中,更先进准确的体系化和性能化加固设计方法,更高性能的可更换部品部件和减隔震产品,以建筑群为目标的更高鲁棒性、更快震后恢复功能的建筑技术等将是未来的重点研究方向。

4) 既有建筑抗震韧性评价体系及基于韧性的性能提

升设计理论亟待完善相关基础性研究工作,包括:制定合理的既有建筑抗震韧性目标、完善结构构件及非结构构件易损性数据库、与建筑信息模型(BIM)结合获取精细化结构构件和非结构构件信息、研究不同加固方案对既有建筑抗震韧性评价指标的影响规律,建立和完善既有建筑抗震韧性评价体系及相关规范等。

参考文献

- [1] 宋春华. 关注新趋势开创城市更新新局面[J]. 工程建设标准化, 2022(12): 15-23.
- [2] 中国日报网. 全国住房和城乡建设工作会议在京召开[EB/OL]. [2023-01-17] <https://cn.chinadaily.com.cn/a/202301/17/WS63c66049a3102ada8b22bb8d.html>.
- [3] 程绍革. 中国建筑抗震鉴定加固五十年[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震鉴定标准: GB 50023—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震加固技术规程: JGJ 116—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 既有建筑鉴定与加固通用规范: GB 55021—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 既有建筑维护与改造通用规范: GB 55022—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [8] 许溶烈, 陈明中, 黄坤耀. 既有建筑综合改造的社会需求与发展前景[J]. 建筑结构, 2008(5): 120-125.
- [9] 王俊, 李晓萍, 李洪凤. 既有公共建筑综合改造的政策机制、标准规范、典型案例和发展趋势[J]. 建设科技, 2017(11): 12-15.
- [10] 王俊. 我国既有公共建筑综合性能提升与改造的思考[J]. 建筑, 2020(17): 12-15.
- [11] 城乡建设环境保护部. 房屋完损等级评价标准[S]. 北京: 1985
- [12] 王金鹏. 既有房屋安全鉴定方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [13] 岳清瑞, 幸坤涛, 惠云玲. GB 50144《工业建筑可靠性鉴定标准》(报批稿)的修订及主要内容[J]. 工业建筑, 2016, 46(11): 152-156+167.
- [14] 国家质量技术监督局. 民用建筑可靠性鉴定标准: GB 50292—1999[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑可靠性鉴定标准: GB 50292—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [16] 罗开海, 黄世敏. 我国抗震防灾技术标准的发展进程与展望[J]. 建筑科学, 2018, 34(9): 18-25.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [18] 程绍革. 大型公共建筑加固改造若干问题的思考[J]. 建筑结构, 2021, 51(17): 91-97.
- [19] 罗张飞. 既有结构安全性评定的通用方法[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [20] 程绍革. 通用规范实施后既有建筑鉴定的几点思考[J/OL]. 建筑结构, 2023. [2023-12-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2833.tu.20230105.1051.002.html>.
- [21] 刘立渠, 彭立新, 赵振红, 等. 基于可靠指标对既有建筑结构安全性鉴定中分项系数的调整研究[J/OL]. 建筑结构学报, 2023. [2023-12-08]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2022.0863>.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 杨斌, 安关峰, 单成林. 增大截面加固受弯构件的正截面承载力计算方法[J]. 公路交通科技, 2015, 32(6): 81-88.
- [26] 杨斌, 陈世宏. 增大截面加固受弯构件的斜截面抗剪承载力计算方法[J]. 公路交通科技, 2016, 33(8): 99-105.
- [27] 陆超超, 王铁成, 赵海龙, 等. 增大截面法加固低配箍率钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(6): 23-30.
- [28] 杨建江, 张运祥. 增大截面加固后钢筋混凝土轴心受压柱的可靠度研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2014, 36(6): 100-107.
- [29] 刘利先, 时旭东, 过镇海. 增大截面法加固高温损伤混凝土柱的试验研究[J]. 工程力学, 2003, 20(5): 18-23.
- [30] 刘利先, 时旭东, 过镇海. 增大截面法加固高温损伤钢筋混凝土压弯构件承载力和变形的计算[J]. 工业建筑, 2005(增刊1): 881-885.
- [31] 黄建锋, 朱春明, 龚治国, 等. 增大截面法加固震损钢筋混凝土框架的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 9-17.
- [32] 许成祥, 彭威, 许凯龙. 震损混凝土框架结构加固修复研究现状及展望[J]. 长江大学学报(自然版)理工上旬刊, 2014, 11(2): 68-71.
- [33] 李金波, 贡金鑫, 王利欢. 增大截面和碳纤维布包裹复合加固锈蚀钢筋混凝土柱的抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 17-26.
- [34] 褚云朋, 贾彬, 姚勇, 等. 增大截面法加固损伤混凝土板试验研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(9): 70-75.
- [35] 卢春玲, 欧阳康, 王强. UHPC加固混凝土圆柱轴压性能试验研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(3): 108-117.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 童光兵, 卢亦焱. 钢筋混凝土梁粘钢加固承载力设计分析[J]. 特种结构, 2004(1): 59-61.
- [40] 陆洲导, 王李果, 那杰. 型钢-混凝土组合梁在改造加固中的试验研究[J]. 工业建筑, 2000(2): 1-3+7.
- [41] 卢亦焱. 外套钢管混凝土加固RC柱技术研究进展[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(12): 90-100.
- [42] 许成祥, 马作涛, 王辰飞, 等. 外包角钢加固震损型钢混凝土节点试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(2): 631-640.

- [43] 马乐为, 刘瑛, 周小真, 等. 钢筋混凝土框架中节点粘钢加固抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 1996(04): 62-66.
- [44] 彭述权, 樊玲. 粘钢与碳纤维布加固框架中节点对比试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(11): 108-111.
- [45] 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, 33(12): 77-80.
- [46] 高轩能, 周期源, 陈明华. 粘钢加固 RC 梁承载性能的理论 and 试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(8): 38-44.
- [47] 张敬书, 潘宝玉. 现行抗震加固方法及发展趋势[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(1): 56-62.
- [48] 曹双寅, 孙永新, 朱海峰, 等. 粘钢加固梁粘钢锚固性能的试验研究及建议[J]. 工业建筑, 2000, 30(2): 4-7.
- [49] 刘祖华, 朱伯龙. 粘钢加固混凝土梁的解析分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1994(1): 21-26.
- [50] 张继文, 吕志涛, 滕锦光, 等. 外部粘贴碳纤维或钢板加固梁中粘钢界面应力分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(6): 1-4, 33.
- [51] 曹双寅, 孙永新, 朱海峰, 等. 粘钢加固钢筋混凝土梁斜截面承载能力的试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(8): 45-48.
- [52] 黄勤, 朱茂法, 张建荣, 等. 粘钢加固钢筋混凝土梁的受力机理[J]. 结构工程师, 1996(4): 24-29.
- [53] 刘艳军, 肖贵泽. 混凝土框架节点粘钢加固及抗剪承载力计算[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(3): 36-39.
- [54] 高丹盈, 王廷彦, 何亚军. 碳纤维布加固钢筋混凝土短梁受弯试验及承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(11): 122-131.
- [55] 吴刚, 魏洋, 吴智深, 等. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土矩形柱抗震性能比较研究[J]. 工业建筑, 2007, 37(6): 14-18, 69.
- [56] 刘相. 碳纤维布加固损伤混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(4): 114-120, 86.
- [57] 潘毅, 胡文豪, 郭瑞, 等. 碳纤维增强复合网格-聚合物水泥砂浆加固 RC 梁的抗弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(4): 119-128.
- [58] 褚少辉, 赵士永, 赵存宝. 碳纤维布加固砌体墙有限元分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(1): 122-127.
- [59] 吴刚, 安琳, 吕志涛. 碳纤维布用于钢筋混凝土梁抗弯加固的试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 3-6, 10.
- [60] 叶列平, 崔卫, 岳清瑞. 碳纤维布加固混凝土构件正截面受弯承载力分析[J]. 建筑结构, 2001, 31(3): 3-5, 12.
- [61] 代岩, 赵均海, 张常光. CFRP 和角钢复合加固钢管混凝土叠合柱轴心受压承载力分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(17): 96-103.
- [62] 吴刚, 安琳, 吕志涛. 碳纤维布用于钢筋混凝土梁抗剪加固的试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 16-20, 51.
- [63] 叶列平, 赵树红, 李全旺, 等. 碳纤维布加固混凝土柱的斜截面受剪承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(2): 59-67.
- [64] 杨勇新, 岳清瑞, 胡云昌. 碳纤维布与混凝土粘结性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(3): 36-42.
- [65] 王文伟, 赵国藩, 黄承逵, 等. 碳纤维布加固已承受荷载的钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究及抗弯承载力计算[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 172-178.
- [66] 胡孔国, 陈小兵, 岳清瑞, 等. 考虑二次受力碳纤维布加固混凝土构件正截面承载力计算[J]. 建筑结构, 2001(7): 63-65.
- [67] 赵彤, 刘明国, 谢剑. 碳纤维布用于改善斜向受力高强混凝土柱抗震性能的研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(3): 13-19.
- [68] 赵海东, 赵鸣, 张誉. 碳纤维布加固钢筋混凝土圆柱的轴心受压试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 26-30.
- [69] 张轲, 岳清瑞, 叶列平, 等. 碳纤维布加固混凝土柱改善延性的试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(2): 16-19.
- [70] 刘航, 兰春光, 华少锋, 等. 多层砖砌体建筑预应力抗震加固新技术研究进展[J]. 建筑结构, 2016, 46(5): 67-74.
- [71] 张蔚, 李爱群, 姚秋来, 等. 高强钢绞线网-聚合物砂浆抗震加固既有建筑砖墙体试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4): 55-60.
- [72] 聂建国, 陶巍, 张天申. 预应力高强不锈钢绞线网-高性能砂浆抗弯加固试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(8): 1-7.
- [73] 郭俊平, 邓宗才, 卢海波, 等. 预应力钢绞线网加固钢筋混凝土柱恢复力模型研究[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 109-119.
- [74] 林于东, 宗周红, 林秋峰. 高强钢绞线网-聚合物砂浆加固混凝土及预应力混凝土梁的抗弯性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(9): 141-149.
- [75] 曹忠民, 李爱群, 王亚勇, 等. 高强钢绞线网-聚合物砂浆抗震加固框架梁柱节点的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(4): 10-15.
- [76] 高丹盈, 房栋, 祝玉斌. 体外预应力 FRP 筋加固混凝土单向板抗裂及刚度计算方法[J]. 土木工程学报, 2015, 48(3): 34-41.
- [77] 王新玲, 赵要康, 王利超, 等. 高强钢绞线网/ECC 加固 RC 柱小偏心受压性能研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(1): 29-36.
- [78] 郭俊平, 邓宗才, 林劲松, 等. 预应力钢绞线网加固混凝土圆柱的轴压性能[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 129-137.
- [79] 周云, 商城豪, 张超. 消能减震技术研究与进展[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 33-48.
- [80] 马晨光. 防屈曲单斜支撑加固钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- [81] 高向宇, 李自强, 李建勤, 等. 用外贴 BRB 减震框架加固既有混凝土结构的研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 116-125, 153.
- [82] 谢强, 赵亮. 屈曲约束支撑的研究进展及其在结构抗震加固中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 100-103.
- [83] 黄海涛, 高向宇, 李自强, 等. 用附加防屈曲支撑钢筋混凝土框架加固既有钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(12): 52-61.
- [84] 张超, 黄炜元, 徐昕, 等. 扇形铅黏弹性阻尼器综合设计及加固框架抗震性能分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增刊 1): 87-92.
- [85] 程选生, 贾传胜, 杜修力. 消能减震技术在结构抗震加固改造中的应用[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增刊 1): 253-257.
- [86] 吴波, 李惠, 林立岩, 等. 东北某政府大楼采用摩擦阻尼器进行抗震加固的研究[J]. 建筑结构学报, 1998(5): 28-36.
- [87] 王亚勇, 薛彦涛, 欧进萍, 等. 北京饭店等重要建筑的消能减振抗震加固设计方法[J]. 建筑结构学报, 2001(2): 35-39.
- [88] 翁大根, 张超, 吕西林, 等. 附加黏滞阻尼器减震结构实用设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(21): 80-88.
- [89] 巫振弘, 薛彦涛, 王翠坤, 等. 多遇地震作用下消能减震结构附加阻尼比计算方法[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(12): 19-25.
- [90] 薛彦涛, 程小燕. 建筑消能减震加固技术规程介绍[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(6): 30-40.
- [91] 翁大根, 张瑞甫, 张世明, 等. 基于性能和需求的消能减震设计方法在震后框架结构加固中的应用[J]. 建筑结构学报,

- 2010, 31(增刊 2): 66-75.
- [92] 吴应雄, 黄净, 林树枝, 等. 建筑隔震构造设计与应用现状[J]. 土木工程学报, 2018, 51(2): 62-73.
- [93] 张亚飞, 刘德稳, 李利平, 等. 云南鲁甸某既有框架结构在长周期地震动作用下隔减震加固研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(5): 148-154.
- [94] 梁佶, 文兴红, 杨铭钊, 等. 昆明某老建筑的隔震加固设计[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(1): 132-136, 131.
- [95] 张亚英, 魏平, 王里. 隔震技术在砖砌体结构加固工程中的应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(5): 102-105.
- [96] 张鑫, 刘涛, 董华. 济南历史建筑平移保护与加固改造[J]. 工业建筑, 2010(增刊 1): 920-925.
- [97] 潘鹏, 曹海韵, 齐玉军, 等. 底部薄弱层结构的柱顶隔震加固改造设计[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(6): 69-73.
- [98] 董军, 宋玮, 练剑峰, 等. 震损底框房屋层间隔震加固设计及性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(4): 85-93.
- [99] 曲哲, 和田章, 叶列平. 摇摆墙在框架结构抗震加固中的应用[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 11-19.
- [100] 曲哲, 叶列平. 附加子结构抗震加固方法及其在日本的应用[J]. 建筑结构, 2010, 40(5): 55-58.
- [101] 邵铁峰, 陈以一. 采用耗能角钢连接的部件可更换梁试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(7): 38-45.
- [102] 吕西林, 武大洋, 周颖. 可恢复功能防震结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 1-15.
- [103] 张浩, 连鸣, 苏明周, 等. 带可更换低屈服点耗能梁段-端板连接的钢框筒结构抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(7): 28-42.
- [104] 刘阳, 郭子雄, 贾磊鹏, 等. 震损可更换组合柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 45-54.
- [105] 吕英婷, 郭子雄, 黄婷婷, 等. 装配式震损可更换组合柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 1-10.
- [106] 潘钦锋, 张鹏起, 颜桂云, 等. 装配式可更换钢制耗能连接节点抗震性能试验研究[J/OL]. 工业建筑. [2023-12-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2068.TU.20230707.1454.002.html>.
- [107] 颜桂云, 余勇胜, 吴应雄, 等. 可恢复功能预制装配式损伤可控钢质节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(8): 87-100.
- [108] 王浩祚, 蒋欢军. 带新型可更换墙脚部件剪力墙的抗震性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(2): 159-165.
- [109] 董晓微, 程小卫, 李易, 等. 带可更换脚部件装配式剪力墙压弯数值研究[J]. 工程力学, 2023, 40(增刊 1): 81-91.
- [110] 王涛. 建筑抗震韧性评价研究进展[J]. 城市与减灾, 2021, (4): 33-38.
- [111] DEIERLEIN G G, KRAWINKLER H, CORNELL C A. A framework for performance-based earthquake engineering[C]// Proceedings of the 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering. Christchurch. New Zealand: 2003.
- [112] FEMA. Seismic performance assessment of buildings: volume 1: Methodology: FEMA P-58-1[S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2018.
- [113] FEMA. Performance assessment calculation tool[EB/OL]. [2021-11-08]. <http://femap58.atcouncil.org/pact>.
- [114] ALMUFTI I, WILLFORD M. REdiTM rating system: resilience-based earthquake design initiative for the next generation of buildings[R]. Arup Co., 2013.
- [115] U.S. Resiliency Council. Rating building performance in natural disasters[EB/OL]. [2021-11-08]. <https://www.usrc.org/usrc-rating-system>.
- [116] 国家市场监督管理总局. 建筑抗震韧性评价标准: GB/T 38591—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [117] 潘鹏. 建筑抗震韧性评价系统[EB/OL]. [2021-11-08]. <http://kangzhenhulian.com>.
- [118] YANG T Y, MOEHLE J, STOJADINOVIC B, et al. Seismic performance evaluation of facilities: methodology and implementation[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(10): 1146-1154.
- [119] 乔保娟, 肖从真, 杨志勇. 基于构件损伤状态的复杂建筑抗震韧性评价方法研究[J]. 工程力学, 2023, 40(11): 21-30.