

建筑抗震韧性研究进展综述

——概念体系、评价方法、提升技术与城市韧性

宋粉丽^{1,2*}, 康广朝³, 司丽娜⁴, 刘海宽¹

¹郑州大学土木工程学院, 河南 郑州

²河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南 郑州

³河南交建第一工程建设有限公司, 河南 郑州

⁴郑州市产品质量检验检测中心, 河南 郑州

收稿日期: 2026年6月15日; 录用日期: 2026年7月7日; 发布日期: 2026年7月17日

摘要

地震灾害对城市建筑系统的影响, 已超越单纯的结构安全范畴, 更关乎震后城市功能的快速恢复与社会经济的稳定运行。近十年来, 建筑抗震韧性成为国际地震工程领域的核心议题, 其内涵从传统“抗倒塌”拓展至建筑与城市系统在地震中维持功能、快速恢复的综合能力。本文基于国内外权威文献, 从韧性概念与理论框架、评价方法体系、抗震韧性提升、城市区域韧性及新技术前沿五个维度, 系统梳理了该领域最新进展。研究表明: 韧性概念正向多尺度功能连续性延伸; 抗震韧性评价体系逐步完善, 但本土化脆弱性数据仍待加强; 自复位结构、隔减震与可更换构件等提升技术效果显著, 而大规模应用仍需成本效益分析支持; 区域韧性研究从单体评估转向多系统耦合分析, 机器学习与数字孪生为实时评估提供了新路径。

关键词

抗震韧性, 建筑结构, 评价方法, 功能恢复, 城市韧性, 韧性提升技术

A Review of Research Advances in Seismic Resilience of Buildings

—Conceptual Frameworks, Assessment Methodologies, Enhancement Technologies, and Urban Resilience

Fenli Song^{1,2*}, Guangchao Kang³, Lina Si⁴, Haikuan Liu¹

¹School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan

²Henan Transportation Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou Henan

*通讯作者。

文章引用: 宋粉丽, 康广朝, 司丽娜, 刘海宽. 建筑抗震韧性研究进展综述[J]. 土木工程, 2026, 15(7): 43-58.
DOI: 10.12677/hjce.2026.157177

³Henan Communications Construction No. 1 Engineering Construction Co., Ltd., Zhengzhou Henan⁴Zhengzhou Product Quality Inspection and Testing Center, Zhengzhou Henan

Received: June 15, 2026; accepted: July 7, 2026; published: July 17, 2026

Abstract

The impact of seismic hazards on urban building systems extends beyond structural safety, critically affecting the post-earthquake rapid recovery of urban functionality and socio-economic stability. Over the past decade, seismic resilience of buildings has emerged as a central research focus in international earthquake engineering. Its core concept has evolved from the traditional objective of “collapse prevention” to encompass the integrated capacity of buildings and urban systems to maintain essential functions and recover rapidly following seismic events. This paper systematically reviews the latest advancements in this field based on authoritative domestic and international literature, focusing on five key dimensions: resilience concepts and theoretical frameworks, assessment methodologies, seismic resilience enhancement techniques, urban/regional resilience, and emerging technological frontiers. The analysis indicates that: the connotation of resilience is expanding towards multi-scale functional continuity; standardized seismic resilience assessment frameworks are becoming increasingly mature, although the development of localized vulnerability data remains insufficient; resilience enhancement technologies, such as self-centering structures, seismic isolation and energy dissipation systems, and replaceable components, have demonstrated significant effectiveness, yet their widespread application requires further substantiation through cost-benefit analyses; research on regional resilience is shifting from single-building assessment towards multi-system coupled analysis, with emerging technologies like machine learning and digital twins offering new pathways for real-time resilience evaluation.

Keywords

Seismic Resilience, Building Structures, Assessment Methodology, Functional Recovery, Urban Resilience, Resilience Enhancement Technology

Copyright © 2026 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

地震灾害是对人类生命财产安全威胁最为严重的自然灾害之一。全球地震活跃带上的人口密集区域正面临着日益增加的地震风险，而现代城市建筑高度集中与功能互联，使得震后功能中断连锁效应更为凸显。1994 年北岭地震、1995 年阪神地震、2008 年汶川地震以及 2011 年新西兰基督城地震等重大震害不断表明，仅以实现“大震不倒”为目标的传统抗震设计，已难以满足现代社会对安全与功能连续性的双重需求。即使建筑未发生倒塌，其使用功能的丧失仍会引发严重的社会经济损失，这推动着抗震理念从单纯结构防倒塌，向保障功能可快速恢复的“韧性”目标不断演进[1][2]。

在此背景下，“抗震韧性”理念逐渐成为国际地震工程领域的核心议题。“韧性”一词源于拉丁文“Resilio”，本意为物体受力后恢复原状的能力。Bruneau 等[3]于 2003 年在城市地震工程领域率先提出了社区抗震韧性的系统化框架，将韧性定义为社会单元在地震中吸收破坏、适应变化并迅速恢复至震

前或更高功能水平的能力。该框架以功能损失随时间变化的曲线下面积(即“韧性三角形”)作为核心量化指标,并确立了鲁棒性、冗余性、可恢复性与快速性四个关键评价维度。该框架具有里程碑意义,为近二十年来的抗震韧性研究奠定了理论基础。

近年来,中国在抗震韧性领域的研究与实践持续推进。2020年,《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 38591-2020)正式发布[4][5],首次在国家标准层面建立了建筑抗震韧性评价体系,标志着中国在该领域从学术研究迈向工程应用。中国“十五五”规划将韧性城市建设纳入国家战略,进一步为相关研究提供了政策支持[6]。研究指出,建筑抗震韧性的核心是在合理工程代价下,最大限度减少功能损失、缩短恢复时间,其中可恢复功能结构被视为实现高韧性的关键路径[1][7][8]。

薄景山等[9]通过梳理百年抗震设计理论的演进,指出其经历了从烈度系数法、反应谱理论、基于性能抗震设计到韧性设计的阶段性发展,反映了对地震作用与结构响应认知的持续深化。本文认同这一观点,并进一步认为,韧性设计并非对性能化设计的简单替代,而是在时间与功能维度上的双重拓展:性能化设计关注“地震中结构的表现”,而韧性设计则延伸至“震后功能何时恢复、以何种代价恢复”。

基于上述背景,本文系统梳理了建筑抗震韧性研究的主要进展。文献筛选兼顾理论深度与工程实践,重点围绕以下五个主题展开:① 韧性概念与理论体系的演进;② 评价方法与标准化进展;③ 抗震韧性提升技术的工程实践;④ 城市建筑群区域韧性的多尺度评估方法韧性研究;⑤ 新技术与前沿探索。通过对近年来的研究梳理,力求在综述现有成果的基础上,揭示该领域的前沿动态并展望未来发展趋势。

2. 韧性概念与理论框架

2.1. 韧性内涵的溯源与工程界定

“韧性”(Resilience)作为一个跨学科概念,其内涵在不同学科中存在差异。杨林等[10]系统梳理了其多学科定义,明确了扰动分类与韧性阶段特征,并辨析了韧性与容错性、生存性、安全性及鲁棒性等相关概念的区别与联系。在此基础上,研究进一步将韧性要素融入系统工程理论,提出了“韧性系统工程”框架,从而将预防、抵御、适应、恢复与演进等能力纳入系统全生命周期设计。在各学科中,韧性内涵有所不同:材料科学中,它表征材料塑性变形至断裂过程中吸收能量的能力;生态学领域,薄景山等[11]将其定义为生态系统吸收扰动并维持基本功能与结构的能力,后衍生出强调恢复速度的“工程韧性”与强调状态维持的“生态韧性”两个分支。

中国学者薄景山等[11]通过词义溯源,明确了“Resilience”在中文语境下从“弹性”“恢复力”到“韧性”的术语演进,其核心始终围绕“系统受冲击后维持功能与恢复的能力”。研究还将概念拓展至“场地韧性”,指出场地条件(如土层特性、地形效应、液化势)会显著影响建筑群整体韧性表现,是造成震害空间非均匀性的关键因素[12]。

2.2. 韧性三角形的理论扩展

Bruneau等[3]提出的“韧性三角形”模型,以建筑系统功能 $Q(t)$ 在震前(t_0 时刻)至完全恢复(t_1 时刻)期间的时变轨迹为基础,将韧性量化为功能损失面积,即 $R = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt$ 。该模型的突出贡献在于将复杂的韧性概念凝练为一个可计算的单一指标,为后续定量研究建立了统一的理论框架。韧性三角形的概念示意图如图1所示,其中100%表示基础设施韧性没有退化,0%表示基础设施韧性完全丧失。

在此基础上,Cimellaro等[13]进一步推进了该理论框架,将其扩展为包含响应函数、修复函数与损失函数的三要素体系,并引入蒙特卡罗模拟量化各环节的不确定性。Cimellaro等[13]指出,韧性评估不仅应关注功能恢复的最终时间,也应重视恢复路径的形态特征——例如“先急后缓”与“线性匀速”两

种恢复曲线，在到达相同终点的同时，所体现的系统韧性机制却存在显著差异。Sharma 等[14]则从系统工程视角出发，将系统韧性形式化分解为三个正交维度：吸收能力、适应能力和恢复能力，每个维度均可独立建模与优化，丰富了韧性分析的层次结构。

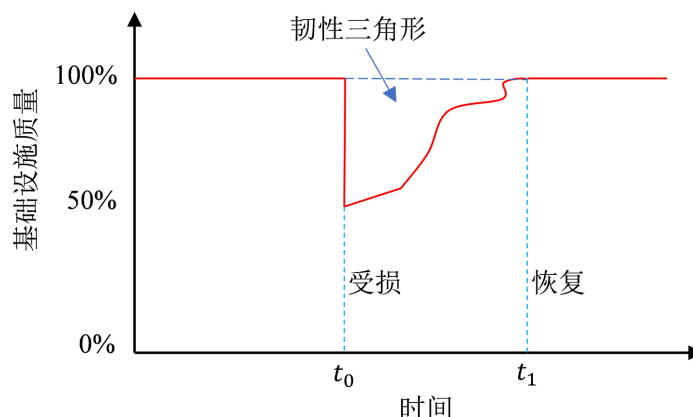


Figure 1. Resilience triangle concept map: function loss and recovery time
图 1. 韧性三角形概念图——功能损失与恢复时间

尽管韧性三角形模型直观简明，但其假设前提是震前系统功能处于“完全正常”的单一稳定状态，这在实际城市系统中往往难以成立。现实中的建筑群功能常处于动态波动中，如季节性负荷变化、设备性能退化等因素均会影响基准功能。因此，未来有必要发展能够适应“非稳态基准”的韧性度量方法，以更好反映城市系统的实际运行复杂性。

2.3. 从“不坏”到“可用”——抗震设计理念的转换

薄景山等[9]通过对百年抗震设计理论发展史的梳理，清晰地勾勒出了五代抗震设计理念的发展演进：第一代(1920~1940 年代)为烈度系数法阶段，以静力等效侧向力为设计依据；第二代(1940~1960 年代)引入反应谱理论，初步考虑结构动力特性；第三代(1970~1980 年代)发展了地震动分析的动力理论，可实现大震下的结构弹塑性分析；第四代(1990~2010 年代)发展为基于性能的抗震设计，以结构的使用功能为控制目标替代单一的“不倒”目标；第五代(2010 年代至今)则进入韧性设计阶段，将震后功能恢复的时间和代价纳入设计考量[6] [9]。

翟长海等[15]在阐述建筑抗震韧性内涵及其与传统抗震设计区别的基础上，提出通过概念设计与计算设计相结合的韧性设计思路，明确了以保证结构安全、满足预定功能和实现快速恢复为核心的“三目标”设计要求。进而构建了涵盖韧性目标确定、结构安全设计、抗震韧性概念设计、震后功能验算和功能快速恢复策略的“五环节”设计流程，形成了一套系统完整的建筑抗震韧性设计方法。为实现预设建筑抗震韧性目标，向历霓等[16]通过建立韧性评价指标与工程需求参数之间的量化关联，将韧性目标转化为可用于抗震设计的直接参数；在此基础上，综合考量韧性等级要求、多遇地震下的正常使用功能以及罕遇地震下的结构安全，确定了满足“三水准”抗震设防要求的结构合理设计区间；结合损伤控制设计理念，最终发展出一套以韧性目标为导向的结构抗震设计方法。

未来抗震韧性设计的核心价值在于将工程决策的边界从“建筑本身”推向“建筑-用户-社区”的复合系统，这本质上是一种“由内向外”的视角转换——不再只考虑结构是否安全，还要考虑用户何时能返回、社区服务何时能恢复等系列问题。

3. 抗震韧性评价方法体系

3.1. 国际主流评价体系

在国际上, FEMA P-58 [17]和 REDi [18]构成了当前建筑抗震韧性定量评价的两大支柱。FEMA P-58 采用“性能化地震工程”(PBEE)的完整分析链:地震危险性分析→结构响应分析→构件损伤分析→损失计算(修复费用、修复时间、伤亡人数),以全概率方法计算建筑的地震损失期望。其核心创新在于以构件脆弱性函数(Fragility Function)和后果函数(Consequence Function)为桥梁,将工程需求参数(如层间位移角、楼面加速度)映射为可量化的经济损失和修复时间指标。

REDi 体系在 FEMA P-58 的基础上做了两项关键改进。第一,引入“修复时间”(Downtime)系统分析框架,将震后建筑功能中断分解为评估阶段(Assessment Phase)、动员阶段(Mobilization Phase)和修复阶段(Repair Phase),并分别建立了概率性与时间估算模型。第二,REDi 建立了面向业主和公众的铂金/金/银三级韧性评级体系,以易于理解的等级标识替代了纯数值指标,显著提升了韧性概念的公众可接受度。然而,Molina Hutt 等[19]对 REDi 的修复时间模型进行了深入剖析,发现“动员阶段”的持续时间在实际震害中往往被严重低估:在区域性大震发生后,承包商、材料和设备的可获得性可能成为“系统性瓶颈”,导致多栋建筑同时等待修复资源,形成修复时间的“串联拥堵”效应。

3.2. 中国标准及工程化应用

GB/T 38591-2020《建筑抗震韧性评价标准》[4] [5] [20]是中国在该领域的首部专项标准。该标准以“修复费用比”“修复时间”和“人员伤亡”为三大定量控制指标,采用一星至三星的三级评级制度综合评价建筑抗震韧性。杜美余等[2]从评价范围、损伤状态划分、损失计算方法和评级标准四个维度,系统对比了 GB/T 38591 与 FEMA P-58、REDi 的异同,指出在韧性指标计算上中国标准与 FEMA P-58 有所不同,但二者采用的韧性评价方法都基本遵循图 2 所示的评价流程。

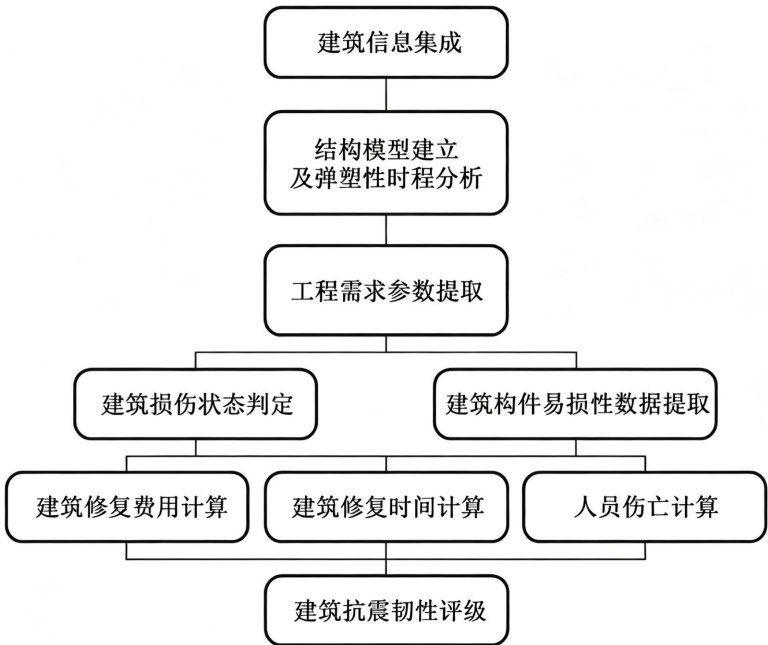


Figure 2. Framework for seismic resilience assessment of buildings
图 2. 建筑抗震韧性评价流程

在建筑抗震韧性评价方法的工程应用与对比研究方面, 近期研究呈现从简化评估、标准对比到针对性改进的多元研究路径。康现栋等[21]提出了一种基于 GB/T 38591 标准的工程简化方法, 通过建立“结构类型-地震烈度-韧性等级”的映射关系, 将复杂的非线性分析流程简化为查表插值, 显著降低了应用门槛, 但其对特殊建筑与地震动输入的适用性仍待进一步界定。周颖等[22]通过对比国内外标准对一栋减震建筑的评估发现, 国内一星级韧性大致对应 REDi 银级, 且国际标准估算的修复费用较国内低约 60%, 修复时间差异尤为显著, 凸显了不同标准体系间的量化差异。王啸霆等[23]基于同一标准开发配套软件评估了 6 栋建筑, 结果表明隔震技术更易获得高韧性等级, 而非结构构件性能对常规抗震与消能减震建筑的韧性影响显著。面向超高层建筑, 王翠坤等[24]对评价方法进行了针对性改进, 评估发现高烈度区超高层实现高韧性仍面临挑战, 并提出了与经济性挂钩的韧性分级建议。为提升方法对不规则及无楼层结构体系的适用性, 乔保娟等[25]引入了基于应力-应变或转角的构件损伤评估方法, 并结合蒙特卡洛模拟与置信区间分析, 增强了概率性评价的可靠性。这些研究共同推动抗震韧性评价向更实用、更精细的方向发展。

3.3. 修复时间预测与不确定性量化

修复时间(Downtime)的准确预测是建筑抗震韧性评价的核心与难点, 也是决定最终韧性等级的关键指标。在预测方法上, Terzic 等[26]建立了基于离散事件模拟的随机修复模型, 将修复过程分解为损伤评估、工程规划与施工恢复三阶段, 并指出修复资源的可获取性对功能中断时长具有决定性影响; 杨吉智等[27]对某隔震框架的评估亦证实, 建筑整体修复时间主要由结构构件的修复阶段控制。在系统级模拟方面, 梁黄彬等[28]以某变电站工程系统为例, 提出了融合修复资源供需关系的震后功能恢复模拟方法, 并形成了概率化抗震韧性评估框架。为系统量化不确定性, 卜海峰等[29]提出了基于构件组装与蒙特卡洛模拟的评估方法; 崔明哲等[20]进一步指出, 评估中考虑的不确定性范围及构件易损性组的归并方式对结果有显著影响。乔保娟等[25]通过定量分析揭示, 建筑地震损失预测的总变异系数可达 0.6~0.8, 其中结构响应、构件脆弱性及修复过程三类不确定性的贡献比约为 4:3:3, 这意味着在 95%置信水平下, 预测修复费用可能在实际值的 0.4~1.6 倍间波动。因此, 韧性评价结论应从“点估计”转向提供明确置信区间的“区间估计”, 以避免资源错配。

国际上, 相关研究亦在持续深化。Mieler 等[30]系统综述了基于 REDi 方法的建筑地震修复时间评估进展; Hu 等[31]提出了一种考虑劳动力约束的通用功能恢复轨迹模拟方法, 通过将关键路径法嵌入活动网络来优化资源分配, 实现了修复过程与资源调度的动态耦合。总体而言, 修复时间预测正从确定性模型向概率性、资源感知且明确量化不确定性的方向发展, 未来需进一步开发通用恢复模型并完善不确定性传播机制。

3.4. 机器学习驱动的快速评估方法

近年来, 机器学习技术在建筑地震损失和韧性评估领域的应用呈爆发式增长。Hu 等[32]基于 Scopus 数据库的科学计量分析表明, 机器学习在地震工程中的发文量自 2018 年以来呈现指数级攀升, 研究热点已从早期的单一损伤识别逐步扩展至涵盖损失预测、韧性量化与恢复优化等全链条评估体系。李爽等[33]提出一种基于机器学习的城市建筑群震害实时模拟方法, 通过简化模型实现自动化建模与快速时程分析, 生成代理模型训练数据集; 该方法利用地震动参数而非特定地震动记录作为输入, 突破了对特定地震类型的依赖, 并通过统一的集中质量层模型消除建筑结构类型差异, 从而建立具有高普适性与实时计算能力的地震动-结构响应映射关系。在基于机器学习的抗震韧性评估中, 常通过建立从建筑信息与地震动参数到韧性指标的非线性映射来实现快速预测。然而, 面对大规模训练数据时, 传统方法的计算效率与

内存占用往往成为瓶颈。为此,施文凯等[34]提出基向量引导的支持向量机回归模型,通过从原始样本中提取并映射小规模子样本作为高维特征空间中的基向量,替代原有大规模基向量,从而在保持预测能力的同时显著提升了建模效率。

在快速地震风险评估方面,Tang 等[35]提出了基于机器学习的建筑结构快速地震风险评估框架,利用机器学习代理模型替代传统非线性时程分析,将单栋建筑的风险评估计算耗时从小时级压缩至秒级,同时保持了与传统方法高度一致的计算精度,为大规模建筑群的震前筛查与震后快速评估提供了高效工具。在此基础上,Li 和 Gardoni [36]进一步发展了面向区域建筑群的地震经济损失评估模型,通过整合经验易损性函数与多维非线性拟合方法,为区域抗震韧性量化奠定了方法论基础。

在建筑抗震韧性评估领域,深度学习方法的应用尤为活跃。Xie [37]在全面综述中指出,多层感知机(MLP)、卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN)及强化学习(RL)等深度学习架构已被广泛引入地震预测、损伤状态判别与震后功能恢复评估等环节,其中 RL 在社区韧性动态决策中展现出独特优势。Salama [38]则聚焦竖向不规则建筑的抗震韧性优化,采用 XGBoost 算法耦合猫头鹰搜索算法(OSA)进行超参数调优,构建的预测模型测试准确率达 98.8%,揭示了结构不规则性特征与基底剪力承载力及抗震性能之间的强依赖关系,为 AI 驱动的建筑韧性加固设计提供了新范式。

4. 建筑抗震韧性提升技术

4.1. 建筑隔震技术

隔震技术作为成熟的被动控制手段,通过设置隔震层以延长周期、耗散能量,被广泛证实可有效提升结构抗震安全性。随着抗震设计理念从“生命安全”向“功能可恢复”与“抗震韧性”演进,隔震技术在韧性提升方面的潜力日益凸显。

在技术综述与前沿分析方面,Xu 等[39]系统梳理了韧性提升技术体系,将隔震归类为被动控制并指出其机制明确、可靠性高的特点,强调了其在韧性设计中的基础地位;Bermann 等[40]进一步分析了传统隔震体系在近断层与长周期地震动下面临的位移过大、复位不足等挑战,并提出结合智能控制与地震预警的混合隔震系统作为发展方向。在新型装置研发方面,Wang 等[41]开发了一种结合铅芯橡胶支座与形状记忆合金(SMA) U 型阻尼器的自复位隔震系统,其核心在于利用 SMA 的超弹性与自复位特性,试验表明该系统可降低 90%以上残余位移,显著提升震后功能恢复能力;Chen 等[42]则从韧性表现维度,基于修复时间、修复费用等多指标系统对比了高阻尼橡胶支座与铅芯橡胶支座,为隔震支座选型提供了量化依据。在韧性设计方法与应用层面,李爽等[43]提出了两阶段韧性设计方法,通过对教学楼案例的对比分析,证明隔震方案不仅更快达到韧性目标,其建造成本降低主要源于上部结构地震作用减小带来的构件截面优化;翟长海等[44]则面向既有建筑,建立了包含评估、目标确定、设计、施工与检验的“五步骤”韧性提升实施框架,其中隔震加固方案需专门评估其对建筑后续工作年限内功能恢复时间的具体影响。

综上所述,隔震技术从传统的安全防护手段逐步发展为提升建筑抗震韧性的关键技术。当前研究在自复位装置、多指标评估框架与针对性设计方法等方面已取得积极进展。未来研究将聚焦智能材料与自适应系统的融合、震后功能恢复时间的精准预测,以及从单体建筑到城市尺度的韧性集成评估。

4.2. 消能减震技术

消能减震技术通过在结构中设置耗能装置,将地震输入能量集中耗散于阻尼元件,从而保护主体结构免受严重损伤,是实现建筑抗震韧性提升的关键技术路径之一。近年来,国内外学者围绕消能减震装置的类型优化、多目标协同设计以及既有建筑韧性加固等方面开展了系统研究。

Al-Janabi 等[45]对隔震与消能减震技术的全球实践进行了全面梳理,涵盖国际设计规范与基于性能的设计框架,指出消能减震系统在提升建筑韧性与可持续性方面具有不可或缺的地位。李爱群等[46]则聚焦于多目标协同减震技术,提出了“结构最大响应与损伤集中协同控制”“多地震水准响应协同控制”和“结构刚度与耗能能力协同控制”三种协同策略,标志着消能减震设计正从单一层间位移角控制向多维度韧性目标协同优化演进。

在具体装置韧性表现对比方面,刘谦敏等[47]以一栋9层钢框架为原型,系统对比了无控钢框架(SF)、传统防屈曲支撑(SFBRB)、黏滞流体阻尼器(SFVFD)和新型并联式双屈服点防屈曲支撑(SFPDYBRB)四种方案的抗震韧性。研究表明,SFPDYBRB在罕遇地震下修复费用最低(比SFVFD低8.4%),修复时间最短(72.4天),综合韧性最优,有效克服了传统BRB在中震下和VFD在大震下韧性提升不足的短板。张浩等[48]则从黏滞阻尼器对RC框架结构韧性影响的角度切入,对设置黏滞阻尼器的RC框架进行了系统的抗震韧性评价,揭示了阻尼器参数优化对修复费用和修复时间等韧性指标的调控规律。

在抗震韧性体系方面,周云等[49]从韧性建筑的系统构建角度出发,提出了由韧性结构系统、韧性非结构系统和韧性设备系统构成的抗震韧性建筑体系,并率先定义了“韧性减震装置”的概念——即具备震后功能可恢复机理的消能减震装置,为消能减震技术从“控制响应”向“保障韧性”转型奠定了概念框架。

综上所述,消能减震技术在建筑抗震韧性提升领域正经历从单一响应控制向多目标协同优化、从新建建筑向既有建筑加固拓展、从结构安全向功能恢复延伸的多维度演进。未来研究需进一步关注韧性导向的减震装置参数优化方法、混合减震体系的多层级韧性匹配设计,以及消能装置可更换性与震后快速修复策略的一体化集成。

4.3. 自复位结构技术

自复位结构技术通过引入预应力筋、形状记忆合金等复位元件,使结构在地震后能自主恢复至初始位置,从根本上控制残余变形,是提升建筑抗震韧性的关键技术之一。Fang 等[50]对该领域进行了系统评述,指出自复位技术正从节点向整体结构体系发展,但针对其全生命周期的韧性量化评估体系仍有待完善。

在构件层面,徐龙河等[51]系统梳理了自复位梁柱节点、支撑及剪力墙等构件的研究进展,指出实现“旗帜形”滞回特性与低残余变形是核心,当前残余位移角可控制在0.5%以内。王斌等[52]针对传统剪力墙震后损伤集中的问题,提出了内置碟簧式自复位阻尼器的开缝剪力墙,试验表明当预压力达到耗能钢板屈服剪力1.25倍时,体系具有优异自复位能力。王伟等[53]将环簧与黏滞阻尼器并联,形成兼具耗能减震与变形恢复功能的自复位黏滞阻尼器。

在结构体系层面,Wang 等[41]提出了LRB与SMA U型阻尼器耦合的新型自复位隔震系统,地震响应分析表明该系统可有效降低隔震层残余位移并增强震后自复位能力。Wang 等[41]基于FEMA P-58框架对SCBRB加固钢框架进行了地震损失与韧性评估,发现SCBRB虽可显著降低结构残余变形和修复时间,但可能增大楼面加速度从而加剧非结构构件损伤,揭示了自复位技术应用中“结构-非结构”韧性协同优化的必要性。施乔译等[54]依据国内标准对比研究表明,自复位支撑在残余位移控制方面具有明显优势,建议在评价体系中纳入相应指标。

综上所述,自复位结构技术已形成从材料、构件、体系到评估的完整研究链条。当前该领域需重点解决以下问题:复位能力与耗能能力的解耦与协同、结构与非结构构件韧性目标的统筹优化,以及将残余变形等关键指标系统纳入抗震韧性评价标准,以推动抗震设计向“可恢复性”深化发展。

4.4. 可更换构件与装配式韧性结构

可更换构件与装配式韧性结构是实现建筑震后功能快速恢复的关键技术,其核心在于将地震损伤集中于预设的可更换耗能元件,从而保护主体结构,并通过快速更换损伤构件实现功能恢复。王龙梅等[55]对该方向进行了系统综述,指出该技术通过解耦耗能与承重功能,有效缩短修复周期、保护主体安全。

在可更换连梁与剪力墙方面,Gong 等[56]提出配备混合耗能装置的可更换连梁,非线性分析表明其可将损伤集中于可更换段,实现震后快速修复。Li 等[57]进一步将可更换连梁与可更换角部构件集成于 RC 剪力墙中,实现了多水准地震下主体墙肢的弹性设计目标。Wang 等[58]研发了适用于剪力墙底部的可更换自复位耗能组件,兼具高耗能与自复位能力,显著提升了结构的可修复性。

在装配式韧性框架体系方面,颜学渊等[59]提出带复式钢管混凝土柱的自复位装配式框架,通过摩擦装置耗能、预应力筋复位,试验表明其具备优异的自复位与可修复性能。钟乾等[60]研究了自复位装配式 RC 框架的可更换梁柱节点,验证了装配施工与震后快速更换的可行性。

在体系评估与工程应用层面,Ramezandoust 等[61]证实了可更换连梁在混合联肢剪力墙体系中的有效性,Ye 等[62]则将可更换构件理念拓展至装配式模块化增压建筑,通过隔震支座与可更换组件的结合,为特殊环境下的韧性建设提供了新思路。

总体来看,可更换构件与装配式韧性结构已形成从构件、节点到体系集成的完整技术链条。当前研究重点应聚焦于可更换构件的标准化与模数化设计,在提升更换便捷性的同时保障连接可靠性,并开展全生命周期成本效益的系统量化分析,以推动其从技术可行迈向工程普及。

4.5. 既有建筑韧性提升技术

随着既有建筑存量规模的持续扩大,以高质量发展为目标的既有建筑抗震韧性提升已成为地震工程领域的核心议题。肖从真等[63]在系统梳理既有建筑结构加固改造发展历程后指出,中国城市发展已从增量规划转向存量规划,既有建筑的性能提升需求正推动加固改造技术从传统的安全性保障向涵盖韧性评价的全生命周期性能提升转变。Ghafar 等[64]的综述则聚焦隔震技术在既有结构加固中的应用,系统分析了天然橡胶支座、高阻尼橡胶支座、铅芯橡胶支座及摩擦摆支座等隔震系统在既有建筑改造中的适用性与实施策略,指出隔震技术虽初始成本较高,但其在显著降低地震惯性力和保护非结构构件方面的优势正在推动其从新建工程向既有建筑改造领域加速拓展。

在加固方案层面,Hsiao 等[65]通过足尺 RC 框架循环加载试验,对五种加固策略(包括 RC 翼墙、钢斜撑、屈曲约束支撑 BRB 等)进行了系统对比评估,从强度、刚度、延性和耗能能力等维度揭示了不同方案对既有框架结构抗震韧性的差异化提升效果,为既有建筑加固方案的优选提供了关键试验依据。孙澳等[66]以 8 度区某既有框架结构为对象,基于 GB/T 38591-2020《建筑抗震韧性评价标准》,从修复费用、修复时间和人员伤亡三个维度评价了黏滞阻尼器与 BRB 混合减震方案的韧性提升效果,结果表明加固后层间位移角最大降幅达 76.9%,加固收益率分析验证了方案的经济可行性。在单一加固装置的对比方面,郑雄辉等[67]以某高层 RC 框架为对象,分别采用黏滞阻尼器和 BRB 进行加固,基于韧性评价标准对比分析了两种方案对修复费用、修复时间及人员伤亡指标的影响差异。

近年来,既有建筑韧性提升技术呈多目标融合的发展趋势。Karaki 等[68]提出的综合改造框架将抗震韧性提升与环境可持续性目标相融合,通过结构、环境、社会、治理四维分析框架,揭示了抗震-环境一体化改造在全球范围内的研究热点与实践趋势。Sao 等[69]对既有结构抗震加固技术进行了综述,从传统加固(增大截面、外包钢)到现代技术(隔震、消能减震、FRP 加固)进行了系统分类与性能评估,并指出标准化设计指南的完善是推动既有建筑韧性提升技术大规模应用的关键瓶颈。翟长海等[15][44]则聚焦于

既有建筑震后功能恢复能力提升,从减隔震装置选型、加固设计方法到韧性评价标准进行了全流程分析,为既有建筑的抗震韧性提升提供了系统性的技术路径。

综上所述,既有建筑抗震韧性提升技术正经历从单一安全加固向多目标综合性能提升的范式转变。隔震、消能减震及混合减震等现代技术在既有建筑改造中展现出显著的韧性提升效果,而一体化综合改造框架的提出则为该领域开辟了抗震-环境-社会多维协同的新方向。未来研究需重点关注加固技术的标准化设计指南、全寿命成本效益分析以及韧性评价指标体系的进一步完善。

5. 城市建筑群区域韧性评价

5.1. 从单体到区域——评估尺度的跨越

城市建筑群区域抗震韧性评估,是韧性研究从工程尺度向城市尺度拓展的核心环节。相较于单体建筑,区域韧性评估面临三重挑战:首先,建筑存量规模庞大,一座中等城市即包含数万至数十万栋建筑,逐一进行精细化非线性时程分析在计算上难以实现;其次,不同建筑通过生命线系统(水、电、燃气、交通、通信等)形成深度功能耦合,单体建筑结构修复并不等同于区域整体功能恢复;最后,地震动在空间上具有随机性,场地效应与传播路径差异导致不同区位建筑所受地震作用强度可相差数倍[36] [70] [71]。

在区域地震损失评估方法方面,Li 和 Gardoni [36]针对大规模建筑群的经济损失量化难题,提出了基于经验易损性函数的区域地震损失评估模型。该研究收集并处理了 1993~2022 年间云南省 57 次破坏性地震中五类典型建筑(总计约 5694 万平方米)的震害数据,更新了易损性数据库,并通过多维非线性拟合实现了大尺度区域损失的高效评估。Lin 等[70]则从精细化时程分析入手,提出了基于区域尺度非线性动力时程分析的建筑物地震损伤风险评估方法,涵盖自动建模、响应计算、结果分析与三维可视化模块,并以鲁甸地震震中区 192 栋建筑的实测震害数据验证了模型精度。陈楠等[71]针对区域建筑群参数化建模的瓶颈,提出了适用于多种结构体系的统一弯剪耦合建模方法,结合结构周期与粒子群优化算法实现参数标准化标定,在保持与精细有限元模型相近精度的同时,将计算效率提升了三个数量级,为大规模城市建筑群的灾害模拟提供了高效计算范式。

在区域韧性集成评估框架方面,Hu 等[72]提出了基于城市建筑群功能恢复分析的实用抗震韧性评估方法,通过量化建筑物物理损伤与功能中断延迟时间,建立了从单体损伤到区域功能恢复的完整评估路径。该方法将震后功能恢复分解为“损伤评估→修复排序→资源调度→功能恢复”四个阶段,实现了区域韧性的量化评估。Xie 等[73]系统阐述了从抗震结构到韧性城市的理论演进路径,指出城市抗震韧性评估须以城市抗震能力评估为基础,并将功能损失纳入评估准则。该研究构建了涵盖建筑与生命线、环境、社会、经济与制度五个维度共 20 项指标的城市抗震韧性评估体系,采用层次分析法确定权重,并以中国某中等规模城市为例验证了框架的适用性。

综合上述研究可见,当前区域韧性评估方法学正经历从“经验驱动”向“物理驱动”的范式转型。早经验-半经验方法虽效率较高,但对震害数据的强依赖性限制了其在数据匮乏地区的适用性;而以非线性时程分析为代表的物理驱动方法虽精度更优,但计算成本制约了其在大规模区域评估中的应用。陈楠等[71]提出的统一参数化建模方法,正是在精度与效率之间寻求平衡的重要尝试——通过适度牺牲单体分析精度,换取区域评估的可行性。未来该方向的发展,关键在于建立“精度-效率”可控的权衡机制,使评估者能根据目标灵活选择分析程度。

5.2. 城市功能韧性的多维度评价

城市抗震韧性具有天然的多维性,仅以建筑结构损伤程度衡量韧性已无法满足现代城市综合防灾的

需求。翟长海等[74]在国内率先系统梳理了城市抗震韧性评估的研究进展,明确了其定义,将韧性构成要素概括为“一个根本(建筑与基础设施安全)、两个保障(社会应急能力与经济恢复能力)”,并系统提出了建设抗震韧性城市所面临的关键科学技术问题。在此基础上,从工程实践出发,建立了基于震后损失与恢复时间的双参数城市抗震韧性评估方法[75],提出了“设定目标→评估→提升→再评估”的韧性城市闭环建设路径,为中国韧性城市的工程化实施提供了方法论依据。

在国际上,Chae Yin 等[76]对社区抗震韧性研究进行了系统综述,指出有效的社区韧性评估必须采用多学科交叉方法,综合考虑物质系统(建筑、基础设施)、社会系统(人口、组织)和制度系统(应急管理、政策法规)间的耦合关系。Ghaffarian 等[77]以土耳其伊斯坦布尔为例,构建了涵盖社会、经济、社区、环境与物理五个维度共 28 项指标的多灾种韧性评估模型,采用贝叶斯最优-最劣法进行分析,揭示了各行政区韧性的显著空间差异,最高得分为 0.58,最低为 0.34,城市整体韧性得分仅为 0.48,表明这座特大城市在地震应对方面仍存在明显短板。Wang 等[78]基于危机管理理论,构建了涵盖减灾、备灾、响应与恢复四阶段的城市地震应急能力评估框架,包含 4 个主维度和 15 项辅助指标,并以长春市为例进行实证,识别了其在应急物资储备与预案编制方面的优势,同时揭示了在地震备灾、监测预警、经济韧性与公众教育等方面的不足。

Xie 等[73]提出的五维评估体系代表了当前城市抗震韧性多维度评价的主流范式。综合现有研究可见,区域韧性多维评价正面临“指标膨胀”的挑战:当体系包含过多指标时,不仅数据成本剧增,指标间的多重共线性也会导致信息冗余,从而削弱评估结果的解释力与决策价值。未来研究应致力于“核心指标的凝练”,通过敏感性分析等方法筛选出具有主导影响的少数关键指标,构建精简而有效的评价体系。此外,当前评估多以静态为主,未能充分体现韧性的动态演化特征。将时间维度纳入评价,建立“韧性基线-动态监测-趋势预警-适应性调整”闭环机制,是未来发展的重要方向。

6. 新兴技术应用与前沿探索

6.1. 数字孪生与智能监测

数字孪生技术通过构建与物理建筑实时同步的数字化镜像,为抗震韧性的动态感知与实时评估提供创新性途径。该技术有机融合结构健康监测传感器网络、数值仿真模型与可视化平台,形成了覆盖震前风险预判、震中实时感知与震后快速评估的闭环管理框架[79][80]。Lauria 等[80]以建筑全生命周期地震安全为目标,将数字孪生技术嵌入建筑运维管理体系,通过 BIM 平台与有限元模型的动态联动,构建了“震前感知-震后即时评估-韧性恢复决策”三位一体的智能系统。研究指出,目前该技术在地震安全领域的技术成熟度处于 5~6 级,即已完成原型验证,但尚未在真实震害场景中得到充分检验,且传感器网络的安装与维护成本较高,仍是实际工程推广的主要制约因素。

在区域尺度应用方面,Rezvan 与张云峰[79]提出了面向自复位学校建筑抗震韧性评估的区域数字孪生模型,以旧金山湾区近 2000 栋校舍为对象,建立了从结构非线性分析到损伤可视化呈现的全流程数字孪生框架。该模型集成区域建筑清单生成、简化数值建模、非线性地震响应分析、易损部件定义及基于 FEMA P-58 方法的地震损失概率评估五大模块,并借助 Python 实现与机器学习模型的无缝衔接——即利用历史地震数据训练的模型替代部分仿真计算,实现强震后区域建筑损伤实时预测与功能恢复快速评估,为上述“三位一体”系统提供了从方法到实践的完整路径。

从工程应用视角看,数字孪生的核心价值不仅在于可视化呈现,更在于其作为“韧性决策神经中枢”的能力——通过融合多源监测数据与物理仿真模型,实时更新建筑状态,推动韧性评估从“灾后静态快照”向“震中至震后全过程的动态连续追踪”演进。

6.2. 人工智能与大数据方法

人工智能与机器学习在抗震韧性领域的应用，正经历从“替代模型”向“智能决策”的角色深化。早期研究主要利用神经网络替代耗时的非线性时程分析，以提升区域风险评估效率；近期则逐步扩展至灾损自动识别、应急资源调度与韧性恢复路径规划等更具决策支撑意义的环节。

在结构状态识别方面，黄永等[81]系统综述了机器学习在模态识别、损伤诊断与可靠性评估中的应用，指出其核心优势在于处理高维、非线性映射问题，为结构健康监测从“数据采集”迈向“智能诊断”提供了方法论依据。在替代模型方向，Yan 等[82]通过神经网络代理高保真有限元模型，在损失精度不足 5% 的前提下实现计算效率数百倍提升，为大规模城市韧性评估提供了可行路径。Li 等[83]进一步提出基于条件生成对抗网络的区域地震动场合成方法，将风险评估整体效率提升两个数量级。

在灾损自动识别方面，2023 年土耳其双震为 AI 评估提供了真实检验场景。Yu 等[84]融合多源遥感与地震动数据，构建多级损伤自动分类模型，识别性能较单一数据方法提升 11.25%，支持救援优先级决策。Aisjahbana 等[85]提出的 DeepDamageNet 在公开评估中表现显著优于基线，验证了深度学习方法在多灾种损伤识别中的实用性。徐俊祖等[86]基于国内多次地震的无人机影像，训练 Mask R-CNN 模型进行震害识别，平均精度达 87.28%，说明相关技术已具备国内震害场景的适用性。

综上所述，AI 赋能的震害评估已从“概念验证”逐步走向“应急实战”，逐步展现出支撑大规模灾后科学决策的潜力。

7. 结论与展望

基于对领域内权威研究的系统梳理，本文从理论体系、评价方法、技术路径、区域应用与智能技术前景五个维度，对当前建筑抗震韧性研究的整体发展态势形成以下综合研判：

1) 理论框架初步建立，但尚未形成完整体系。以“韧性三角形”和“鲁棒性 - 冗余性 - 可恢复性 - 快速性”为核心的量化评价框架已获国际学界广泛接受，理论研究基础已确立。然而，现有理论对“功能”的定义仍侧重于工程物理属性，未能充分纳入社会、经济与行为等维度，制约了其解释复杂系统恢复过程的能力。如何实现从“建筑韧性”到“城市韧性”的理论贯通与尺度衔接，是当前面临的核心挑战。

2) 评价标准逐步完善，但本土化数据支撑薄弱。以中国《建筑抗震韧性评价标准》、美国 FEMA P-58 及 REDi 规程为代表的评价体系已相继建立，为工程实践提供了关键依据。然而，适用于中国建筑材料、构造工艺和施工质量的本土化构件与系统脆弱性数据库仍严重缺失，导致大量评估工作不得不借鉴国外数据，可能引入显著偏差，制约了评价结果的准确性与指导价值。

3) 提升技术路径清晰，但全生命周期经济性论证不足。隔震与消能减震、自复位结构、可更换构件等韧性提升技术在试验与示范工程中已展现出显著优势。然而，目前研究多集中于技术可行性验证，缺乏从建造、维护到震后修复的全寿命周期成本效益定量分析。经济性论证的缺失，成为这些高性能技术从“示范应用”向“普通工程”大规模推广的关键瓶颈。

4) 区域韧性研究起步，但多系统耦合建模能力有待加强。区域尺度韧性评估的重要性已成为共识，相关研究日益活跃。但现有工作多聚焦于建筑群物理损伤的模拟与评估，对于与社会系统、经济系统及基础设施网络深度耦合的复杂恢复过程，其建模方法仍处于初级阶段。发展能够融合物理破坏、功能互赖、资源约束与社会行为的多学科动态耦合模型，是深化区域韧性研究、支撑科学决策的必然方向。

5) 智能技术应用前景广阔，但成熟度与集成度有待提高。数字孪生、人工智能等智能技术为韧性研究从静态评估转向动态感知与决策提供了新路径。然而，这些技术目前多处于从实验室验证到工程实用的过渡阶段，仍面临真实灾害数据匮乏、多源信息融合困难、模型可解释性不足及初期成本较高等挑战。

未来需推动物理模型与数据驱动方法的深度融合,构建城市尺度的智能韧性平台,以实现全周期、系统化的韧性管理能力提升。

基金项目

河南省工程建设领域科技计划项目(项目编号:YJKJP-202507)。

参考文献

- [1] 潘楚云,曲激婷,张东旭.国内外建筑抗震韧性研究进展[J].建筑结构,2021,51(S2):432-441.
- [2] 杜美余,陈建兴,张瑞斌,等.超高层建筑抗震韧性国内外评价方法对比研究[J].结构工程师,2025,41(3):70-81.
- [3] Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., *et al.* (2003) A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, **19**, 733-752.
<https://doi.org/10.1193/1.1623497>
- [4] 任军宇,潘鹏,王涛,等.GB/T 38591-2020《建筑抗震韧性评价标准》解读[J].建筑结构学报,2021,42(1):48-56.
- [5] 肖意,周颖,吴浩,等.GB/T 38591-2020《建筑抗震韧性评价标准》与国际相关标准对比研究[J].建筑结构学报,2021,42(7):194-202.
- [6] 薄景山,王玉婷,薄涛,等.城市和建筑抗震韧性研究的进展与展望[J].地震工程与工程振动,2022,42(2):13-21.
- [7] 朱立猛,杜岐山,肖红梅,等.装配式框架柱及梁柱节点抗震韧性研究进展[J].建筑结构,2025,55(13):51-58.
- [8] 孙智,裴顺顺,翟长海,等.医院抗震韧性研究进展[J].工业建筑,2024,54(2):106-116.
- [9] 薄景山,张毅毅,郭晓云,等.结构抗震设计理论与方法的沿革和比较[J].震灾防御技术,2021,16(3):566-572.
- [10] 杨林,王强,匡洪宇,等.韧性系统工程:概念、方法与挑战[J].中国工程科学,2026,28(3):233-248.
- [11] 薄景山,段玉石,王玉婷,等.“韧性”的词义解析及其应用[J].世界地震工程,2023,39(1):38-48.
- [12] 薄景山,张毅毅,薄涛,等.场地韧性的概念及有关问题的讨论[J].世界地震工程,2022,38(3):1-9.
- [13] Cimellaro, G.P., Reinhorn, A.M. and Bruneau, M. (2010) Framework for Analytical Quantification of Disaster Resilience. *Engineering Structures*, **32**, 3639-3649. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.008>
- [14] Sharma, N., Tabandeh, A. and Gardoni, P. (2017) Resilience Analysis: A Mathematical Formulation to Model Resilience of Engineering Systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, **3**, 49-67.
<https://doi.org/10.1080/23789689.2017.1345257>
- [15] 翟长海,宋伟茹,谢礼立.建筑抗震韧性设计方法[J].建筑结构学报,2025,46(1):124-133.
- [16] 向历霓,李刚,李海江.考虑罕遇地震重尾分布的建筑抗震韧性设计方法[J].力学与实践,2025,47(6):1121-1129.
- [17] Applied Technology Council (2018) Seismic Performance Assessment of Buildings, Volume 1—Methodology.
- [18] Almufti, I. and Willford, M. (2013) REDi™ Rating System: Resilience-Based Earthquake Design Initiative for the Next Generation of Buildings.
https://www.researchgate.net/publication/326331951_REDi_Rating_System_Resilience-based_Earthquake_Design_Initiative_for_the_Next_Generation_of_Buildings
- [19] Molina Hutt, C., Vahanvaty, T. and Kourehpaz, P. (2022) An Analytical Framework to Assess Earthquake-Induced Downtime and Model Recovery of Buildings. *Earthquake Spectra*, **38**, 1283-1320.
<https://doi.org/10.1177/87552930211060856>
- [20] 崔明哲,王翠坤,陈才华,等.基于《建筑抗震韧性评价标准》的既有高层剪力墙建筑抗震韧性评价[J].建筑科学,2023,39(7):47-53.
- [21] 康现栋,付浩然,赵光,等.单体建筑抗震韧性评估方法研究与应用[J].土木工程学报,2021,54(8):37-42.
- [22] 周颖,赵佳美,肖意.基于不同评价标准的屈曲约束支撑-钢框架建筑抗震韧性评价研究[J].建筑结构学报,2023,44(4):204-215.
- [23] 王啸霆,潘鹏,王涛,等.基于《建筑抗震韧性评价标准》的算例分析[J].建筑结构,2020,50(16):57-63.
- [24] 王翠坤,陈才华,崔明哲,等.我国典型超高层建筑的抗震韧性评价研究[J].建筑结构学报,2025,46(5):1-14+43.
- [25] 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.

- [26] Terzic, V., Villanueva, P.K., Saldana, D. and Yoo, D.Y. (2021) Framework for Modelling Post-Earthquake Functional Recovery of Buildings. *Engineering Structures*, **246**, Article 113074. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113074>
- [27] 杨吉智, 王心宇, 李爱群, 等. 多塔大底盘 RC 框架隔震建筑抗震韧性设计研究[J]. 地震研究, 2024, 47(1): 114-122.
- [28] 梁黄彬, 谢强. 工程系统震后功能恢复模拟与抗震韧性风险评估方法——以变电站系统为例[J]. 工程力学, 2026(7): 108-122.
- [29] 卜海峰, 蒋欢军, 和留生. 基于构件功能组装的建筑抗震韧性评价方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 1127-1135.
- [30] Mieler, M., Paul, P., Almufti, I. and Lee, J. (2018) Predicting Earthquake-Induced Downtime in Buildings: An Overview of the State of the Art. *11th National Conference on Earthquake Engineering*, Los Angeles, 25-29 June 2018, Paper No. 0890.
- [31] Hu, B., Li, S. and Zhai, C. (2025) Seismic Resilience Assessment of Buildings: A Generalized Method for Functional Recovery Trajectory Simulation Considering Labor Constraints. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **23**, 6623-6651. <https://doi.org/10.1007/s10518-025-02281-z>
- [32] Hu, Y., Wang, W., Li, L. and Wang, F. (2024) Applying Machine Learning to Earthquake Engineering: A Scientometric Analysis of World Research. *Buildings*, **14**, Article 1393. <https://doi.org/10.3390/buildings14051393>
- [33] 李爽, 李长青, 黄钰文, 等. 基于机器学习的城市建筑群震害实时模拟方法[P]. 中国专利, CN117034707A. 2023-11-10.
- [34] 施文凯, 周宇, 王尉阔, 等. 基向量引导的支持向量机 RC 框架抗震韧性评估[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(5): 81-91.
- [35] Tang, Q., Dang, J., Cui, Y., Wang, X. and Jia, J. (2022) Machine Learning-Based Fast Seismic Risk Assessment of Building Structures. *Journal of Earthquake Engineering*, **26**, 8041-8062. <https://doi.org/10.1080/13632469.2021.1987354>
- [36] Li, S. and Gardoni, P. (2024) Seismic Loss Assessment for Regional Building Portfolios Considering Empirical Seismic Vulnerability Functions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **22**, 487-517. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01793-w>
- [37] Xie, Y. (2025) Deep Learning in Earthquake Engineering: A Comprehensive Review. *ASCE OPEN: Multidisciplinary Journal of Civil Engineering*, **3**, 03125001-1-03125001-21. <https://doi.org/10.1061/aomjah.aeeng-0080>
- [38] Salama, A.H.E. (2024) Optimization Seismic Resilience: A Machine Learning Approach for Vertical Irregular Buildings. *Asian Journal of Civil Engineering*, **25**, 6233-6248. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01173-y>
- [39] Xu, G., Guo, T., Li, A., Zhang, H., Wang, K., Xu, J., et al. (2024) Seismic Resilience Enhancement for Building Structures: A Comprehensive Review and Outlook. *Structures*, **59**, 105738. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105738>
- [40] Bermann, T.H.R., Osman, S.A. and Yatim, M.Y.M. (2025) A State-of-the-Art Analysis of Base Isolation Systems and Future Directions for Developing a Novel Multi-Directional Smart-Hybrid Isolation System Integrated with Earthquake Early Warning System for Building Structures. *Results in Engineering*, **25**, Article 104501. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104501>
- [41] Wang, B., Chen, P., Zhu, S. and Dai, K. (2023) Seismic Performance of Buildings with Novel Self-Centering Base Isolation System for Earthquake Resilience. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **52**, 1360-1380. <https://doi.org/10.1002/eqe.3820>
- [42] Chen, P., Lu, Y., Wang, B., Zhuang, P. and Dai, K. (2025) Enhancing Seismic Resilience in Base-Isolated Structures: A Performance-Based Comparison of HDRB and LRB Isolation Systems. *Engineering Structures*, **342**, Article 120945. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120945>
- [43] 李爽, 胡彬彬, 赵建军, 等. 建筑抗震韧性设计中减隔震技术的应用研究[J]. 工程力学: 1-13. <https://engineeringmechanics.cn/article/doi/10.6052/j.issn.1000-4750.2025.09.0445>, 2026-05-07.
- [44] 翟长海, 丁俊男, 史铁花, 等. 既有建筑抗震韧性提升方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2025, 45(1): 18-27.
- [45] Al-Janabi, M.A.Q., Al-Jeznawi, D., Yang, T.Y., Bernardo, L.F.A. and Andrade, J.M.D.A. (2025) Enhancing Structural Resilience for Sustainable Infrastructure: A Global Review of Seismic Isolation and Energy Dissipation Practices. *Sustainability*, **17**, Article 7314. <https://doi.org/10.3390/su17167314>
- [46] 李爱群, 解琳琳, 杨参天. 多目标协同建筑结构消能减震技术研究进展[J]. 工程力学, 2025, 42(1): 1-9.
- [47] 刘谦敏, 刘强, 杨参天, 等. BRB、VFD 和并联式双屈服点 BRB 减震钢框架结构抗震韧性对比[J/OL]. 工程力学: 1-11. <https://www.engineeringmechanics.cn/article/doi/10.6052/j.issn.1000-4750.2024.03.0196>, 2026-05-07.
- [48] 张皓, 阮鹏飞, 李宏男, 等. 附设黏滞阻尼器的 RC 框架结构抗震韧性评估[J]. 振动与冲击, 2024, 43(14): 172-179+210.

- [49] 周云, 李定斌, 邓雪松. 抗震韧性建筑构建与实现[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(1): 1-11.
- [50] Fang, C., Qiu, C., Wang, W. and Alam, M.S. (2023) Self-Centering Structures against Earthquakes: A Critical Review. *Journal of Earthquake Engineering*, **27**, 4354-4389. <https://doi.org/10.1080/13632469.2023.2166163>
- [51] 徐龙河, 谢行思, 张格. 用于抗震韧性提升的自复位结构构件研究综述[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(6): 1177-1188.
- [52] 王斌, 张烨, 史庆轩, 等. 自复位阻尼器及其连接下的开缝 RC 剪力墙抗震性能研究[J/OL]. 工程力学: 1-13. <https://engineeringmechanics.cn/article/doi/10.6052/j.issn.1000-4750.2024.03.0166>, 2026-05-04.
- [53] 王伟, 李俊霖, 曹纵. 自复位黏滞阻尼器的构造设计与抗震韧性提升[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(3): 59-69.
- [54] 施乔译, 肖意, 吕西林. 屈曲约束支撑与自复位支撑-框架结构抗震韧性评估对比研究[J]. 结构工程师, 2025, 41(4): 57-68.
- [55] 王龙梅, 蒋姗, 田砾. 可更换构件结构抗震性能研究进展[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(6): 119-126+147.
- [56] Gong, N., Shi, Z., Li, P. and Lei, Y. (2025) Seismic Performance of RC Coupled Shear Wall Structure with Hysteretic-Viscous Replaceable Coupling Beams: Experimental and Numerical Investigations. *Engineering Structures*, **326**, Article 119493. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119493>
- [57] Li, S., Jiang, H. and Liu, X. (2025) Seismic Performance of Earthquake Resilient Structure with Replaceable Components. *Journal of Building Engineering*, **99**, Article 111597. <https://doi.org/10.1016/j.jobec.2024.111597>
- [58] Wang, H., Li, X., Jiang, H. and Huang, W. (2025) Development of Replaceable Self-Centering Energy-Dissipation Component for Seismic Resilient RC Shear Wall. *Engineering Structures*, **334**, Article 120237. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120237>
- [59] 颜学渊, 郑欣颖, 金贤洪, 等. 带复式钢管混凝土柱的新型自复位装配式框架结构抗震性能研究[J/OL]. 工程力学: 1-18. <https://www.engineeringmechanics.cn/article/doi/10.6052/j.issn.1000-4750.2025.04.0178>, 2026-05-06.
- [60] 钟乾, 陶忠, 曹万林, 等. 自复位装配式 RC 框架可更换梁柱节点抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2026, 45(1): 279-289.
- [61] Ramezandoust, Z., Tajaddini, A. and Zarfam, P. (2024) Seismic Performance Evaluation of Hybrid Coupled Shear Wall System with Shear and Flexural Fuse-Type Steel Coupling Beams. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **23**, 691-712. <https://doi.org/10.1007/s11803-024-2266-4>
- [62] Ye, Z., Bu, H., Liu, Z., Lu, D., Min, D. and Shan, H. (2025) Seismic Resilience Design of Prefabricated Modular Pressurized Buildings. *Resilient Cities and Structures*, **4**, 53-70. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2025.02.002>
- [63] 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.
- [64] Ghafar, W.A., Zhong, T., Lai, Z., Pingle, Z., Yang, Y. and Hasan, M.M. (2025) Seismic Isolation for Existing Structures: A Review of Retrofitting Techniques, Case Studies, and Trends. *Discover Civil Engineering*, **2**, Article No. 137. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00300-1>
- [65] Hsiao, F., Lin, C., Weng, P., Haryanto, Y., Nugroho, L. and Huang, C. (2026) Alternative Strengthening Strategies to Improve the Seismic Resilience of RC Frame Structures. *Journal of Building Engineering*, **119**, Article 115078. <https://doi.org/10.1016/j.jobec.2025.115078>
- [66] 孙澳, 陈鑫, 傅文炜, 等. 基于混合减震技术的既有建筑抗震韧性提升[J]. 振动与冲击, 2024, 43(16): 238-246.
- [67] 郑雄辉, 刘文锋, 秦艳慧. 既有 RC 框架建筑 BRB 与黏滞阻尼器加固抗震韧性对比分析[J]. 青岛理工大学学报, 2024, 45(5): 1-9.
- [68] Karaki, G. and Hawileh, R. (2025) Integrated Building Retrofit for Seismic Resilience and Environmental Sustainability: A Critical Review. *Buildings*, **15**, Article 3800. <https://doi.org/10.3390/buildings15203800>
- [69] Sao, S., Hariramani, A., Kumar, A. and Pandey, R.K. (2025) Seismic Retrofitting of Existing Structures: A Comprehensive Review of Techniques, Performance, and Challenges. *Communications on Applied Nonlinear Analysis*, **32**, 2337-2345. <https://doi.org/10.52783/cana.v32.5456>
- [70] Lin, X., Liu, X., Hui, J. and Shan, W. (2024) Assessment on Detailed Regional Seismic Damage Risk of Buildings Based on Time-History Dynamic Analyses. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **22**, 2903-2923. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01883-3>
- [71] 陈楠, 项梦洁, 庞云升, 等. 城市区域建筑群震灾分析的统一参数化建模方法[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(7): 12-21.
- [72] Hu, B., Li, S., Hou, Z. and Zhai, C. (2024) A Practical Method for Functional Recovery Analysis Based on Seismic Resilience Assessment of City Building Portfolios. *Journal of Building Engineering*, **95**, Article 110304. <https://doi.org/10.1016/j.jobec.2024.110304>

- [73] Xie, L., Zhao, Y., Wen, W. and Zhai, C. (2025) From Earthquake Resistance Structure to Earthquake Resilience City-Urban Seismic Resilience Assessment. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **24**, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11803-025-2294-8>
- [74] 翟长海, 刘文, 谢礼立. 城市抗震韧性评估研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 1-9.
- [75] 翟长海, 岳清瑞, 谢礼立. 抗震韧性城市评估与构建[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(5): 1-13.
- [76] Chee Yin, H., Kassem, M.M. and Mohamed Nazri, F. (2022) Comprehensive Review of Community Seismic Resilience: Concept, Frameworks, and Case Studies. *Advances in Civil Engineering*, **2022**, Article ID: 7668214. <https://doi.org/10.1155/2022/7668214>
- [77] Ghaffarian, S., Shafapourtehrany, M., Lagap, U., Batur, M., Özener, H., Kılıcı, R.E., *et al.* (2025) Earthquake-Based Multi-Hazard Resilience Assessment: A Case Study of Istanbul, Turkey (Neighborhood Level). *npj Natural Hazards*, **2**, Article No. 15. <https://doi.org/10.1038/s44304-025-00065-8>
- [78] Wang, Y., Zhang, Y., Zhang, J., Li, M., Ma, M. and Li, J. (2024) Multidimensional Evaluation of Seismic Emergency Capabilities in Chinese Cities: The Case of Changchun. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 30898. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81765-5>
- [79] Pooya Rezvan, 张云峰. 自复位学校建筑抗震韧性区域评估用数字孪生模型(英文) [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(12): 1879-1899.
- [80] Lauria, M. and Azzalin, M. (2024) Digital Transformation in the Construction Sector: A Digital Twin for Seismic Safety in the Lifecycle of Buildings. *Sustainability*, **16**, Article 8245. <https://doi.org/10.3390/su16188245>
- [81] 黄永, 鲍跃全, 李惠. 结构状态识别与评估的机器学习方法研究进展[J]. 力学进展, 2023, 53(4): 774-792.
- [82] Yan, Y., Xie, Y., Xia, Y. and Sun, L. (2026) Systematic Investigation on Surrogate and Active Learning-Based Multivariate Seismic Fragility Analysis under Multiple Sources of Uncertainties. *Reliability Engineering & System Safety*, **265**, Article 111588. <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111588>
- [83] Li, S., Farrar, C. and Yang, Y. (2023) Efficient Regional Seismic Risk Assessment via Deep Generative Learning of Surrogate Models. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **52**, 3435-3454. <https://doi.org/10.1002/eqe.3849>
- [84] Yu, X., Hu, X., Song, Y., Xu, S., Li, X., Song, X., *et al.* (2024) Intelligent Assessment of Building Damage of 2023 Turkey-Syria Earthquake by Multiple Remote Sensing Approaches. *npj Natural Hazards*, **1**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00003-0>
- [85] Alisjahbana, I., Li, J., Strong, B. and Zhang, Y. (2024) DeepDamageNet: A Two-Step Deep-Learning Model for Multi-Disaster Building Damage Segmentation and Classification Using Satellite Imagery. arXiv: 2405.04800.
- [86] 徐俊祖, 张方浩, 戈云霞, 等. 基于卷积神经网络的建筑物震害特征提取与识别研究[J]. 地震工程学报, 2025, 47(4): 851-863.