

填充墙RC框架结构抗震性能研究现状

范永锋, 刘 猛

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年6月22日; 录用日期: 2025年7月12日; 发布日期: 2025年7月25日

摘 要

砌体填充墙RC框架是建筑工程中广泛应用的体系之一。过去几十年, 国内外学者通过试验和有限元模拟等方法, 深入研究了填充墙与框架的相互作用机理及其对结构受力性能的影响, 并提出了多种适用于整体抗震分析的简化模型。本文结合国内外理论和试验研究成果, 从不同类型填充墙的不同连接方式和不同构造措施等方面, 总结了填充墙RC框架结构抗震性能的研究现状, 并对未来发展方式进行了展望。

关键词

框架结构, 填充墙, 抗震性能, 研究现状

Research Status of Seismic Performance of Infilled RC Frames

Yongfeng Fan, Meng Liu

College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: Jun. 22nd, 2025; accepted: Jul. 12th, 2025; published: Jul. 25th, 2025

Abstract

The RC frame with masonry infill walls is one of the most common structural systems in construction engineering and is widely applied in both domestic and international projects. Over the past few decades, scholars at home and abroad have conducted extensive research on the interaction mechanisms and structural performance of infill walls and frames through experiments and finite element simulations, proposing various simplified models suitable for overall seismic analysis. This paper summarizes the current research status of the seismic performance of RC frame structures with infill walls by considering various connection methods and construction measures for different types of infill walls, and offers insights into future development directions.

Keywords

Frame Structure, Infill Wall, Seismic Performance, Research Status

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

带填充墙的 RC 框架结构是指在钢筋混凝土(RC)框架中设置填充墙所形成的组合结构体系。填充墙主要用于建筑物的围护与空间分隔,并不承担结构荷载。该体系的主要优点为能为建筑提供灵活的使用空间布局。这些填充墙通常采用轻质材料(如预制加气混凝土板、膨胀珍珠岩板、空心砖、多孔砖、浮石砌块、陶粒混凝土板等)砌筑或装配而成。这种设计允许建筑内部的空间布局更加灵活,能够满足不断变化的功能需求,提供更大的设计自由度,使得建筑内部可以根据使用需求进行灵活的改造和重新规划。该建筑结构凭借布置灵活、建造便捷等优势,在中国乃至世界范围内都得到了广泛应用。

在框架结构中,填充墙虽为主要组成部分,但在设计中常被视为非结构构件,其与周边框架在地震作用下的相互作用亦未得到充分考虑。2008年汶川地震震害分析[1]揭示了一个关键问题:填充墙与框架的强相互作用显著改变了结构的受力性能和破坏模式。这主要表现在:(1)填充墙往往率先严重破坏;(2)其提供的附加刚度改变了框架内力分布,抑制了理想的“强柱弱梁”破坏机制的形成,反而可能导致“强梁弱柱”、短柱剪切破坏等不利模式;(3)现行规范(如 GB 50011-2010 [2])主要通过周期折减系数近似考虑其刚度影响,但纯框架计算模型仍无法准确反映墙-框相互作用。因此,深入探究填充墙与 RC 框架的相互作用机理及其对抗震性能的影响,是提升此类结构抗震安全性的关键。本文针对填充墙材料类型、连接方式及构造措施等因素,系统梳理国内外研究现状,并探讨未来发展方向。

2. 不同材料填充墙 RC 框架结构抗震性能研究现状

不同于纯框架结构,填充墙框架的抗震性能受多重因素影响,包括填充墙的材料类型、高宽比、开洞情况、连接方式及墙-框相对刚度等。其中,由于填充墙材料的弹性模量、耗能能力等有所不同(如表 1),其对框架抗震性能的影响也有所差异,对此国内外学者已开展了大量试验研究。李建辉等[3]对足尺蒸压加气混凝土砌块填充墙 RC 框架进行了抗震性能试验,研究表明,相比纯框架,采用蒸压加气混凝土填充墙的框架试件能显著提高其水平承载力,其屈服荷载、峰值荷载和极限荷载均得到提升。黄思凝、郭讯等[4]基于 1:4 缩尺比例,设计并制作了三层两跨轻质填充墙框架结构模型,在振动台上开展了不同烈度地震动输入下的抗震性能试验。研究分析了填充墙与框架结构的协同工作机理,结果表明:填充墙作为结构的第一道抗震防线,通过耗散地震能量延缓了主体框架开裂;然而,其与框架主体结构之间的柔性连接节点易发生破坏而形成塑性铰,不利于实现“强柱弱梁”的抗震设计原则。Mehrabi 等[5]测试了 12 个单层单跨砌体填充墙对 RC 框架结构抗震性能的影响,结果表明填充墙可以显著提高 RC 框架的抗震性能,在承载能力和能量耗散能力方面,强填充墙-强框架比弱填充墙-弱框架表现出了更好的性能。Kakaletsis 等[6]对 8 个单层单跨空心砌块填充墙 RC 框架缩尺模型的试验研究表明,洞口大小和位置均会影响结构刚度,但砂浆层数的减少(因缩尺所致)可能导致其失效模式与原型填充墙框架结构存在差异。

地震工程领域常将填充墙破坏程度作为评估结构功能正常性与生命安全保障的重要判据。基于当前

禁用烧结砖、大力提倡节能的政府政策, 并且抗震性能理论日益成熟的背景下, 对新型砌块填充墙框架的抗震性能的深入研究是有必要的。黄群贤等[7]通过空心砌块填充墙框架结构抗震实验, 对比试件之间的受力特征、破坏机制, 得出了不同砌块填充墙对框架结构的刚度效应有很大影响, 填充墙的存在提高了框架整体的抗震性能, 在相同位移幅值下, 混凝土空心砌块填充墙比粘土砖填充墙更容易遭受破坏。沈萍、唐兴荣等[8]针对两种框架形式(强框架、弱框架)和混凝土砖(空心砖、实心砖), 开展了以下研究: (1) 研究砌块对 RC 框架地震反应的作用机理; (2) 研究墙框相互作用对框架的抗震性能的影响。结果表明强填充墙对纯框架结构的水平承载力和初始刚度的提升作用显著大于弱填充墙, 强框架试件的水平承载力衰减更快, 而弱填充墙与弱框架组合试件的衰减最为缓慢。研究为新型砌块填充墙框架基于性能抗震设计提供了依据。为节约资源、保护生态并提升填充墙抗震性能, 过去广泛使用的粘土实心砖已被新型墙体材料取代, 其中新型混凝土横孔空心砌块具有优异的保温隔热性能和轻质高强等特性, 同时兼顾了施工便捷、经济环保等优点, 但对其抗震性能研究尚不全面。为此, 吴方伯教授[9]设计了 4 榀足尺框架, 对新型横孔空心砌块填充墙框架结构进行了抗震性能试验, 结果表明填充墙明显提高了框架的整体刚度, 混凝土横孔空心砌块填充墙框架属于强框架、弱填充墙类型, 其存在显著提高了框架的抗侧刚度和耗能能力。

不同材料填充墙均能提高框架刚度和承载力, 但提升幅度、破坏形态(脆性程度)、耗能能力及对“强柱弱梁”机制的影响存在显著差异。对于新型环保材料的抗震性能及其破坏机理还需更深入的研究。

Table 1. Comparison of performance of different material parameters

表 1. 不同材料参数性能对比

材料类型	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	耗能能力(等效黏滞阻尼系数)	典型破坏模式
蒸压加气混凝土	500~700	2.0~4.0	0.15~0.20	剪切斜裂缝
混凝土空心砌块	800~1000	4.0~6.0	0.12~0.18	角部压溃
新型横孔空心砌块	600~800	3.0~5.0	0.20~0.25	柔性连接耗能破坏

3. 不同连接方式的填充墙 RC 框架抗震性能研究现状

填充墙与框架结构之间的连接方式影响了建筑的抗震性能、变形协调能力和墙体裂缝控制, 常见的连接方式有刚性连接、柔性连接以及半刚性连接。为减小墙框相互作用, 《砌体结构设计规范》(GB 50367-2006)和《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)中均建议采用柔性连接。目前国内外已有的研究大多数针对刚性连接的填充墙, 而对柔性连接填充墙框架结构抗震性能研究的相对较少。周晓洁等[10]通过低周反复加载试验, 对比了不同连接方式下全墙填充和半墙填充 RC 框架的性能, 研究表明柔性连接能有效减弱填充墙与框架的相互作用, 显著提升结构的抗震性能。熊峰等[11]针对不同连接形式的纤维石膏填充墙 RC 框架进行了抗震试验, 发现刚性连接会大幅降低结构变形能力, 导致墙体呈现明显脆性破坏特征, 不利于抗震; 而采用柔性连接则能有效克服这一缺陷。李凯等[12]对 6 榀足尺试件进行拟静力试验, 对比分析了纯框架结构、带 PVC 拉缝板柔性连接以及无拉缝板刚性连接三种不同连接方式现浇填充墙框架结构的抗震性能指标, 实验结果表明 PVC 拉缝板的存在降低了现浇空心填充墙对框架结构的抗侧性能和极限承载力的影响, 使得结构的变形和耗能能力得到提升; 在一定程度上保护了填充墙在地震作用下不被破坏; 但其存在仍会对框架的抗侧刚度和极限变形有很大的影响。蒋欢军教授[13]通过试验研究了不同连接方式(刚性与柔性)下加气混凝土砌块填充墙对 RC 框架结构抗震性能的影响, 研究完成了 6 榀足尺带填充墙框架和 1 榀足尺空框架在低周反复荷载下的对比试验。结果表明: 不同连接方式的填充墙框架结构的耗能能力有很大差异, 柔性连接填充墙框架结构中不同构造措施填充墙对整体抗震性能的影响并不显著。

填充墙作为非结构构件, 其对框架结构抗侧刚度的影响通常被忽略。MM Erdem [14] 设计了三种不同柔性连接元件的砌体填充墙框架结构, 对其抗震性能进行了实验与数值研究, 并与空框架结构进行比较, 结果表明在初始位移阶段, 柔性连接的框架表现出与空框架相近的特性, 这与完全填充框架的行为形成鲜明对比: 后者在初始位移中会显著降低其抗侧刚度, 且能在无损伤状态下维持其残余抗力直至发生更大位移。T. Rousakis [15] 对一栋全尺寸钢筋混凝土(RC)框架结构进行了振动台地震模拟试验, 该结构采用改进型正方形砌体填充墙, 并创新性地应用了聚氨酯树脂柔性接缝(PUFJ)置于框架-填充墙界面处, 结果表明该技术有效提升了填充墙在地震作用下的面内和面外抗震性能。为模拟框架结构的设计与施工行为, Bikçe M [16] 通过反向循环荷载试验, 对传统空框架和非交互式填充墙框架的平面内抗震性能进行了试验研究, 结果表明, 相较于空框架, 非交互式填充墙框架在初始层间位移角下的力学性能与空框架基本相同, 采用非交互节点构造填充墙可显著改善框架体系的平面内力学性能。

综上所述, 连接方式是调控填充墙-RC 框架相互作用的关键。刚性连接虽能最大化利用填充墙的刚度和承载力, 但会显著增大框架内力, 加剧填充墙脆性破坏, 抑制结构整体延性和耗能, 易导致不利破坏模式。柔性连接(包括预留缝隙、使用柔性材料/元件如 PVC 板、聚氨酯树脂接缝、以及“非交互式”连接)有效弱化了墙框间的强约束, 被认为是改善带填充墙框架抗震性能、特别是控制不利相互作用的重要手段, 在新建工程和既有建筑加固中具有广阔应用前景。未来需进一步研究不同柔性连接构造的定量设计方法、长期性能及其对结构整体响应影响的精细化模拟。

4. 不同构造措施的填充墙 RC 框架抗震性能研究现状

通过设置构造柱、拉结钢筋、水平系梁或增设阻尼层等构造措施, 使砌体填充墙有效发挥结构体系首道抗震防线的作用, 可有效增强填充墙与主体框架的协同工作性能, 提高其抗裂和抗倒塌能力(如表 2)。唐兴荣教授课题组近些年对填充墙框架结构的抗震性能进行了大量试验研究, 重点探讨了不同构造措施砌体填充墙[17]、填充墙竖向不连续布置[18]、带竖向裂缝槽砌体填充墙[19]等因素对钢筋混凝土框架结构抗震性能的影响。课题组进行了 5 榀框架结构模型的低周反复荷载对比试验, 研究结果表明: 设置构造柱、水平系梁的填充墙能够改善结构的位移延性和耗能能力, 并有效减缓其刚度退化过程; 带竖缝槽的砌体填充墙框架表现出了良好的延性和耗能能力; 砌体填充墙沿框架层不连续布置仍能使框架结构保持较好的抗震性能, 但由于其不连续性, 会造成层间侧移刚度和受剪承载力突变, 并改变破坏形态。郭子雄等研究了砌体填充墙[20]和楼板[21]对框架结构抗震性能的影响, 实验揭示填充墙布置形式对框架结构的延性和耗能能力有很大的影响, 带楼板的墙框结构由于其纵筋与梁共同承担了梁端弯矩, 梁端实际承载力有了很大提升, 进而阻碍了“强柱弱梁”破坏机制的实现。

Table 2. Cost and applicability of different construction measures

表 2. 不同构造措施成本及适用性

构造措施	抗震需求等级	施工难度	成本效益	适用场景
构造柱 + 水平系梁	中低烈度	低	高(经济性好)	多层住宅加固
阻尼层	高烈度	中	中(耗能显著)	医院、生命线工程新建
预制混凝土墙板	中高烈度	高	低(初期投入大)	装配式建筑新建

蒋欢军教授[22]分析了框架结构中砌体填充墙的受力机理和破坏模式, 提出了两种提升砌体填充墙框架抗震性能的思路: 一种是将填充墙作为结构构件对待, 即加强填充墙与框架的整体性, 使其与结构构件协同工作, 共同抵抗地震作用; 另一种是将填充墙作为非结构构件对待, 即通过构造措施使填充墙与结构构件分离, 不参与抵抗侧向荷载, 从而控制墙体破坏并减轻对结构刚度分布的影响。周云等[23]-

[25]基于前人方法,提出了一种在填充墙中植入阻尼层的新型墙体(如图1),并对其抗震性能做了实验研究,结果表明加入合理设计的耗能装置后具有良好的耗能效果,为框架提供了一定的抗侧力和抗侧刚度,具有良好的延性和变形能力,可以显著减轻砌体填充墙破坏。除了以上几种方法外,一些学者还提出采用抗震性能更好的预制混凝土墙板来代替传统的砌体填充墙。黄宇星等人[26]基于 ABAQUS 软件建立结构模型,对比分析了悬挂式预制混凝土墙板框架、纯钢筋混凝土框架及普通砌体填充墙框架的抗震性能。研究指出悬挂式预制混凝土墙板对框架结构的影响显著,若布置不合理,易导致框架结构形成薄弱层,从而对抗震产生不利影响。李升旗[27]通过试验研究了预制复合墙板填充墙对 RC 框架结构的影响,结果表明,复合墙板具有良好的抗弯承载力和延性性能,显著提高了框架结构的承载力和刚度;同时,不同连接构造方式对该类结构延性性能的影响较大。张令心等人[28]综述了以上几种砌体填充墙的构造方法,将其归纳为柔性连接、设置阻尼耗能装置及增强整体性三类。通过整理国内外试验成果并对比试件的初始刚度、承载力、位移延性系数及等效黏滞阻尼系数等参数,分析了不同构造措施对钢筋混凝土框架抗震性能的影响。结果表明:三类方法虽各有优劣,但均能有效提升填充墙框架的整体抗震性能。综合而言,增强墙体整体性适用于既有结构的抗震加固;柔性连接与增设耗能装置在成本可控的情况下,则更适用于新建建筑。

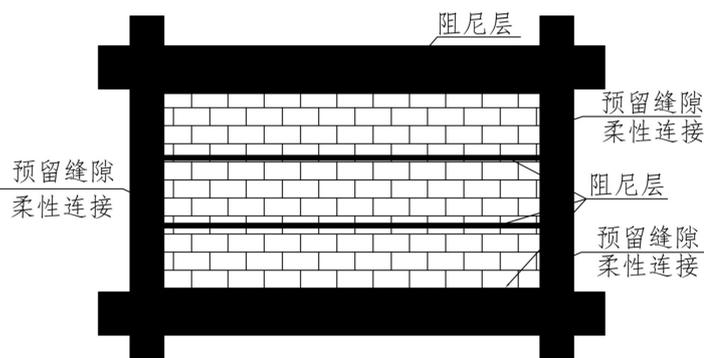


Figure 1. Construction schematic diagram of damped masonry infill wall
图 1. 阻尼砌体填充墙构造示意图

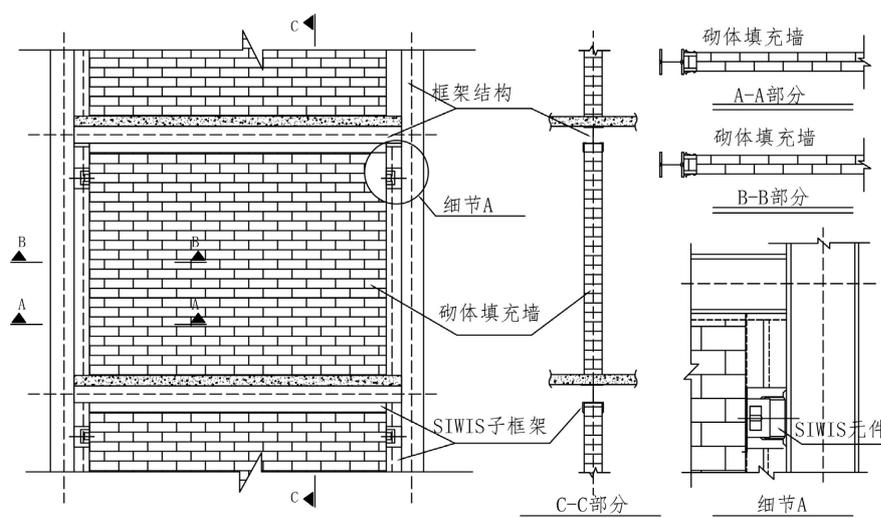


Figure 2. An example of SIWIS subframe system used in a building frame
图 2. 建筑框架中使用的 SIWIS 子框架系统示例

国外对填充墙框架结构的研究相较我国而言比较全面, 对于不同构造措施的填充墙对 RC 框架抗震性能影响的研究也相对较早。Sasota 等[29]提出在填充墙顶部设置铜碲铅层, 以此来减轻垂直荷载对填充墙的传递, 即减少框架结构对填充墙的影响, 结果表明, 铅层可以显著减少荷载的传递, 不会导致填充墙的性能在短期内遭到恶化。Calvi 等人[30]对在填充墙砂浆层或外部灰泥层中插入轻质增强材料所带来的好处进行了一些详细的研究, 对不同类型的单层框架进行了试验, 然后进行了一系列参数模拟, 评估了不同填充模式下不同面板特性对整个建筑响应的影响; 结果发现在墙两侧浇筑钢筋混凝土板极大地提高了填充墙 RC 框架的抗震性能。为防止柱或填充墙的损坏, 并在破坏性地震期间最大限度地减少生命安全危害, Mohammad Aliaari 于 2005 年提出了隔震子框架系统(SIWIS) [31] (如图 2), 该结构由两个垂直和一个水平夹层轻钢螺柱组成, 垂直构件中有“刚性-脆性”元件, 设计用于在风荷载和小到中等地震下填充墙与框架之间相互作用, 以减轻建筑物位移, 但在建筑物被破坏时使之脱离。为了解横向荷载对系统的影响, Mohammad Aliaari 对两种情况(单舱单层钢框架和两舱三层钢框架)进行了非线性有限元模型, 包括空框架结构、带和不带 SIWIS 系统的框架结构。分析结果表明该系统与预期中一致, 证明了隔震子框架结构的实用性, 并且提出了实用的设计原则。Mohammadi [32]通过测试 6 种不同的单层钢框架来发现提高填充框架延展性的方法, 发现在填充墙中加入滑动保险丝可有效提高延性; 在此基础上又研究了保险丝滑动强度对填充墙 RC 框架性能的影响, 结果表明, 具有摩擦滑动保险丝的填充墙框架结构具有更好的延性与抗侧力, 并且该结构可以根据所需强度进行调整。

构造措施是提升填充墙框架抗震性能的有效途径。从传统增强整体性到创新性的设置阻尼装置、隔震系统、采用预制墙板等, 方法多样。关键在于明确不同措施的适用条件、设计参数、性价比及其对整体结构性能(特别是破坏机制)的影响。阻尼耗能装置和预制墙板是前景广阔的研究方向。

5. 研究展望

结合国内外已有研究成果, 本文进行总结并得出以下结论及展望:

(1) 填充墙的存在提高了框架结构的抗侧刚度, 充当了结构抗震的第一道防线, 在震害中往往会第一个被破坏, 但在现代建筑设计中, 填充墙大多数被当作非结构构件对待, 而忽略其对框架梁和屋盖的增强作用, 容易形成“强梁弱柱”型破坏, 这严重违反了框架结构的设计原则。本文建议在建筑结构设计应酌情考虑框架结构与填充墙之间的相互作用, 明确填充墙在结构抗侧力体系中的角色, 在设计阶段确定其是否参与结构受力, 避免出现“强梁弱柱”型破坏; 对于参与结构受力的填充墙, 要能够给出反映其受力机理的计算模型, 采用合理的抗震设计方法, 避免发生薄弱层、软弱层等不利的破坏模式; 对于不考虑参与结构受力的填充墙, 应尽量采取合理的构造措施减小框架与填充墙的相互作用; 对于考虑楼板和空间框架效应的填充墙 RC 框架结构, 由于楼板会显著影响梁端受力, 阻碍“强柱弱梁”机制实现, 未来模型和试验需更真实地模拟三维空间结构体系。

(2) 目前, 为提升砌体填充墙钢筋混凝土框架的抗震性能, 众多学者提出了多种新型构造方式, 如设置水平系梁的填充墙、带竖向缝槽的填充墙、阻尼砌体填充墙及预制混凝土墙板等。然而, 针对这些新型墙体的性能研究尚不充分, 且缺乏不同构造方式适用性及其对框架抗震性能影响的系统对比研究, 导致其性能优势未能充分发挥, 相关规范标准也有待完善。因此, 应对阻尼填充墙[23]-[25]、高性能预制墙板[26][27]、自复位填充墙等新型体系进行系统的试验研究、数值模拟和理论分析, 全面评估其抗震性能、耐久性、施工便捷性及经济性。建立其设计方法和施工技术标准, 推动工程应用。

(3) 在当前填充墙的有限元模拟中, 采用最为广泛的等效模型虽能将系统简化并提高分析效率, 但其难以充分反映地震作用下砌块与砂浆间的黏结性能和摩擦作用。为提升模拟精度, 使之更贴近砌体真实受力状态, 还需深入研究砌块与砂浆间的微观作用机制。基于细观力学的填充墙-砂浆界面模型构建,

建议采用离散元法(DEM)模拟砌块与砂浆的黏结滑移, 结合 CT 扫描技术获取真实微裂缝发展数据, 提升有限元模拟精度。

(4) 突破现有等效斜撑模型的局限, 发展能更真实反映砌块 - 砂浆界面粘结滑移、摩擦效应、填充墙复杂开裂与压碎过程、以及墙框接触 - 分离 - 碰撞行为的宏 - 微观多尺度模型。探索人工智能与机器学习在模型参数识别、复杂行为预测和快速性能评估中的应用。

参考文献

- [1] 清华大学土木工程结构专家组, 西南交通大学土木工程结构专家组, 北京交通大学土木工程结构专家组, 等. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008(4): 1-9.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [3] 李建辉, 薛彦涛, 肖从真, 等. 足尺蒸压加气混凝土砌块填充墙 RC 框架抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(8): 12-18.
- [4] 黄思凝, 郭迅, 孙得璋, 等. 轻质填充墙框架结构抗震性能的振动台试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 182-189+202.
- [5] Mehrabi, A.B., Benson Shing, P., Schuller, M.P. and Noland, J.L. (1996) Experimental Evaluation of Masonry-Infilled RC Frames. *Journal of Structural Engineering*, **122**, 228-237. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1996\)122:3\(228\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1996)122:3(228))
- [6] Kakaletsis, D.J. and Karayannis, C.G. (2008) Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames under Cycling Loading. *Journal of Earthquake Engineering*, **12**, 197-221. <https://doi.org/10.1080/13632460701299138>
- [7] 黄群贤, 郭子雄, 朱雁茹, 等. 混凝土空心砌块填充墙 RC 框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 110-118.
- [8] 沈萍, 唐兴荣, 皮淑萍. 混凝土砌体填充墙钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(5): 18-28.
- [9] 吴方伯, 朱惠芳, 欧阳靖, 等. 混凝土横孔空心砌块填充墙-RC 框架抗震性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(5): 7-13.
- [10] 周晓洁, 李忠献, 续丹丹, 等. 柔性连接填充墙框架结构抗震性能试验[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(2): 155-166.
- [11] 熊峰, 王盼, 张维渤, 等. 纤维石膏填充墙-钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(4): 1-9.
- [12] 李凯, 苏何先, 赖正聪, 等. 同主体柔性连接现浇填充墙 RC 框架结构抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(4): 125-135.
- [13] 蒋欢军, 毛俊杰, 刘小娟. 不同连接方式砌体填充墙钢筋混凝土框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(3): 60-67.
- [14] Erdem, M.M., Emsen, E. and Bikçe, M. (2021) Experimental and Numerical Investigation of New Flexible Connection Elements between Infill Walls-RC Frames. *Construction and Building Materials*, **296**, Article ID: 123605. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123605>
- [15] Rousakis, T., Papadouli, E., Sapalidis, A., Vanian, V., Ilki, A., Halici, O.F., et al. (2020) Flexible Joints between RC Frames and Masonry Infill for Improved Seismic Performance—Shake Table Tests. In: *Brick and Block Masonry—From Historical to Sustainable Masonry*, CRC Press, 499-507. <https://doi.org/10.1201/9781003098508-68>
- [16] Bikçe, M., Emsen, E., Erdem, M.M. and Bayrak, O.F. (2021) An Investigation on Behavior of RC Frames with Non-Interacting Infill Wall. *Engineering Structures*, **245**, Article ID: 112920. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112920>
- [17] 唐兴荣, 杨亮, 刘利花, 等. 不同构造措施的砌体填充墙框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 75-83.
- [18] 唐兴荣, 周振轶, 刘利花, 等. 多层砌体填充墙框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(11): 72-81.
- [19] 唐兴荣, 刘利花, 周振轶, 等. 带竖缝砌体填充墙钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 84-93.
- [20] 郭子雄, 黄群贤, 魏荣丰, 等. 填充墙不规则布置对 RC 框架抗震性能影响试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 46-54.

-
- [21] 郭子雄, 黄群贤, 魏荣丰, 等. 带楼板填充墙 RC 框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(S2): 127-132.
- [22] 蒋欢军, 段延锋. 改善砌体填充墙抗震性能的研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(5): 86-94.
- [23] 周云, 郭阳照, 杨冠男, 等. 阻尼砌体填充墙框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(7): 89-96.
- [24] 周云, 郭阳照, 廖奕发, 等. 带 SBS 层阻尼砌体填充墙钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(9): 21-28.
- [25] 周云, 郭阳照, 杨冠男, 等. 摩擦型阻尼填充墙单元的设计及性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(4): 210-217.
- [26] 黄宇星, 祝磊, 王元清, 等. 悬挂式预制混凝土墙板框架抗震性能分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(S1): 137-142.
- [27] 李升旗. 预制复合墙板填充墙对 RC 框架抗震性能影响研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [28] 张令心, 陈子平, 谢贤鑫. 不同填充墙构造方法对 RC 框架抗震性能影响研究[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(4): 26-36.
- [29] Sahota, M.K. and Riddington, J.R. (2001) Experimental Investigation into Using Lead to Reduce Vertical Load Transfer in Infilled Frames. *Engineering Structures*, **23**, 94-101. [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(00\)00025-0](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(00)00025-0)
- [30] Calvi, G.M. and Bolognini, D. (2001) Seismic Response of Reinforced Concrete Frames Infilled with Weakly Reinforced Masonry Panels. *Journal of Earthquake Engineering*, **5**, 153-185. <https://doi.org/10.1080/13632460109350390>
- [31] Aliaari, M. and Memari, A.M. (2005) Analysis of Masonry Infilled Steel Frames with Seismic Isolator Subframes. *Engineering Structures*, **27**, 487-500. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.11.008>
- [32] Mohammadi, M., Akrami, V. and Mohammadi-Ghazi, R. (2011) Methods to Improve Infilled Frame Ductility. *Journal of Structural Engineering*, **137**, 646-653. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000322](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000322)