

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201801073

砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能研究现状及展望

翟长海^{1,2}, 王晓敏³, 孔璟常⁴, 魏雨良⁴, 金薇⁴, 赵艳⁵

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 2. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 3. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080; 4. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 5. 佳木斯大学 建筑工程学院, 黑龙江 佳木斯 154007)

摘要: 砌体填充墙 RC 框架结构作为建筑工程中最常见的一种结构体系, 在中国以及世界范围内都有着广泛的应用. 由于填充墙与框架之间复杂的相互作用, 到目前为止依然缺乏合理的分析和设计方法来评估结构的抗震性能. 在过去的几十年里, 国内外许多学者通过试验、有限元模拟等方法对填充墙 RC 框架结构的相互作用机理和受力性能进行了大量分析, 提出了适用于整体抗震分析的各式简化模型. 本文从平面内、平面外以及新型填充墙框架结构的抗震性能 3 个方面论述了砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能的研究现状, 介绍了当前的最新研究进展, 指出了砌体填充墙 RC 框架结构抗震研究中尚存的一些问题, 并对其发展趋势进行了展望.

关键词: 砌体填充墙; RC 框架结构; 抗震性能; 有限元模拟; 简化模型

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)06-0001-13

Progress and prospect of seismic performance of masonry-infilled RC frames

ZHAI Changhai^{1,2}, WANG Xiaomin³, KONG Jingchang⁴, WEI Yuliang⁴, JIN Wei⁴, ZHAO Yan⁵

(1. Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 2. Key Laboratory of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disaster (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China; 3. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 4. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 5. School of Architecture and Civil Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, Heilongjiang, China)

Abstract: The infilled RC frame, one of the most common structural systems, is applied widely, but there is no rational method for analysis and design to evaluate the seismic-resistant ability due to the complicated interaction between the frames and walls. Many studies on the interaction between frames and walls and the performance of infilled RC frames were performed based on the experimental study and finite element analysis, and a variety of simplified models were proposed in the past few decades, which are capable for the overall seismic response analysis. The research status of seismic performance of infilled RC frames was discussed from the following aspects: in-plane behavior, out-of-plane stability, and seismic retrofitted infilled RC frames. The latest research progress is presented, the existing problems are pointed out, and the research trend is prospected.

Keywords: masonry infill wall; RC frame; seismic performance; finite element modeling; simplified models

填充墙 RC 框架结构是指钢筋混凝土框架结构中为了维护和分割房间在柱间砌筑砖或其他砌体等填充墙而形成的一种复杂组合结构, 由于其具有平面布置灵活、建造方便等优点, 在中国及世界范围内均是一种应用较为广泛的建筑结构形式. 世界上大多数国家在进行 RC 框架结构设计时, 均将填充墙视为非结构构件, 忽略填充墙与框架之间的相互作用, 即使依据现代抗震设计规范设计的填充墙 RC 框架结构, 在大地震中也出现了很多不可预测的失

效模式, 发生了严重震害. 填充墙的存在不仅改变了结构体系的刚度、强度及其分布, 而且对主体结构构件的局部约束条件产生不利影响, 填充墙的破坏倒塌还会造成财产的重大损失, 甚至可能影响紧急疏散并危及生命安全. 因此, 科学认识填充墙对 RC 框架的影响以及两者之间的相互作用机制对保障结构的地震安全至关重要.

本文从试验研究、有限元模拟方法及简化分析模型 3 个方面对砌体填充墙 RC 框架结构在平面内及平面外作用下的受力性能研究现状, 以及新型填充墙 RC 框架结构的最新研究进展及应用进行总结分析, 介绍了本课题组在这些方面的研究工作及取得的成果, 同时对砌体填充墙 RC 框架结构在未来的发展趋势进行了展望.

收稿日期: 2018-01-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0701108);

国家自然科学基金(51238012, 51322801, 51708161);

黑龙江省教育厅人才项目(2016-KYYWF-0112)

作者简介: 翟长海(1976—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 翟长海, zch-hit@hit.edu.cn

1 砌体填充墙框架结构平面内抗震性能

1.1 砌体填充墙框架结构平面内试验

多年来,国内外学者对实体砌体填充墙 RC 框架结构进行了大量的试验研究,从静力试验到动力试验,从小比例模型试验到大比例模型试验,从砖砌体填充墙到混凝土砌块砌体填充墙,基于试验现象和试验数据,分析了实体填充墙的存在对 RC 框架结构抗震性能的影响。20 世纪 80 年代童岳生等^[1-2]通过缩尺拟静力试验研究了单层单跨黏土砖砌体填充墙 RC 框架结构的抗震性能,提出了填充墙承载力和刚度的简化计算公式。近年来,黄思凝等^[3]等对轻质填充墙框架结构进行了振动台试验研究。黄群贤等^[4]对 6 个单层单跨混凝土空心砌块填充墙 RC 框架试件进行循环往复加载抗震性能试验,研究了新型砌体填充墙 RC 框架结构的共同作用机理与抗震性能。唐兴荣等^[5]通过拟静力试验,对多层多跨加气混凝土砌块填充墙空间框架结构与单层单跨填充墙平面框架结构的抗震性能进行了对比研究。李雁军^[6]通过振动台试验研究了砌体填充墙 RC 空间框架结构的抗震性能。吴方伯等^[7]研究了混凝土空心砌块填充墙 RC 框架结构的抗震性能。填充墙与框架之间的连接方式影响了墙框之间的相互作用。周晓洁^[8]通过拟静力试验系统研究了柔性连接粉煤灰空心砌块砌体填充墙框架结构的抗震性能。李大禹^[9]研究了刚性连接和柔性连接对空心砌块填充墙框架结构抗震性能的影响。蒋欢军等^[10]和吴方伯等^[11]对不同连接方式下加气混凝土砌块和空心混凝土砌块砌体填充墙 RC 框架结构的抗震性能进行了试验研究。

国外学者对实体砌体填充墙 RC 框架结构的抗震性能进行了大量的试验研究^[12-19]。Hashemi 等^[14]设计了一个缩尺比例三维框架结构,在中间一榀框架中设置砖砌体填充墙,对结构进行平面内振动台试验研究,验证了填充墙对框架结构抗震性能的显著影响。Al-Chaar 等^[16]对 5 个单层混凝土砌块和砖砌体填充墙框架结构模型进行了推覆试验,结果表明填充墙对结构的延性没有影响,结构跨数对结构的承载力和失效模式具有一定的影响。从已有的试验现象可以看出,强度较高的填充墙会导致柱子端部的剪切失效,属于不理想的失效模式。Mehrabi 等^[13]对 12 个单层单跨实体填充墙 RC 框架结构进行了拟静力试验研究,砌块类型有混凝土空心砌块和实心砌块,研究结果表明,相对于弱填充墙-弱框架,强填充墙-强框架在承载力和能量耗散方面表现更好。Kakaletsis 等^[18]对空心混凝土砌块砌体填充墙 RC 框架结构进行了缩尺试验研究,结果表明不

同强度的填充墙会引起不同的结构失效模式。Zovkic 等^[19]对黏土砖砌体和加气混凝土砌块砌体填充墙进行了拟静力试验研究,发现强度较低的填充墙主要表现出 X 型开裂形式,而强度较高的填充墙失效模式为砂浆的剪切滑移失效。

出于功能需求,在 RC 框架建筑结构中,经常要在砌体填充墙中设置门窗洞口,洞口使填充墙与 RC 框架之间的相互作用更加复杂。一些学者^[20-24]研究了单层单跨开洞填充墙框架结构的抗震性能,Al-Chaar 等^[25]、Mosalam 等^[26]以及 Buonopane 等^[27]对多层多跨开洞填充墙框架结构进行了试验研究。Kakaletsis 等^[22]通过对 8 个单层单跨空心砌块填充墙 RC 框架结构进行试验研究,结果表明洞口大小和位置对填充墙框架结构的刚度均有一定的影响,但是试验模型是缩尺模型,与原型填充墙相比,砂浆层数的减少可能会影响其失效模式。Mansouri 等^[24]建立了两个两跨的混凝土砌块填充墙钢框架试件,由试验结果发现窗洞使填充墙的初始刚度变小,门洞使结构承载力减小 20%。Liauw^[28]进行了 4 层填充墙钢框架结构试验,结果表明填充墙中心开洞使结构刚度降低,利用钢筋混凝土对洞口周边进行加固会增大结构刚度。Dawe 等^[29]、Polyakov^[30]和 Raj 等^[31]研究了不同的 RC 加固洞口方法对填充墙框架结构刚度的影响。曹万林等^[32-33]通过试验研究了轻质填充墙对异形柱框架结构的影响,根据试验结果提出了带门洞异形柱框架结构高度的计算方法和填充墙刚度折减系数的建议。朱荣华等^[34]利用拟动力试验,对两层两跨实体砖填充墙和开门洞砖填充墙框架进行了抗震性能试验,结果发现开洞填充墙破坏最严重的地方在门洞两侧及洞口上方,建议在门洞边缘进行钢筋混凝土加固,将拉结筋延长至洞口边缘并与加固框的钢筋相连接。

孔璟常等^[35-36]通过 4 个单层单跨足尺拟静力试验,研究了实体和开洞混凝土空心砌块砌体填充墙 RC 框架结构的抗震性能,分析了不同填充墙 RC 框架结构的失效模式、滞回性能、刚度、延性、耗能能力等抗震性能。图 1 给出了 4 个试件的最终破坏现象,其中开洞填充墙框架 1 的高宽比与实体填充墙框架的高宽比相同,而开洞填充墙框架 2 的高宽比较小。试验所采用的 RC 框架进行了抗震设计,填充墙采用的砌体材料强度较弱,因此试验过程中没有发现 RC 框架柱的剪切破坏现象。图 2 给出了 4 个不同试件的荷载-位移滞回曲线,可以看出不同试件的滞回曲线特性相差较大。试验结果表明,实体和开洞填充墙均能较大幅度地提高结构的承载力和侧向刚度;纯框架的延性较好,而实体填充墙框架的延性

系数大大降低,由于窗洞和过梁的存在使得填充墙裂缝分布较均匀,发展较缓慢,故开洞填充墙框架的延性表现较好;填充墙增加了结构的累积滞回耗能,

窗洞的存在使得等效黏滞阻尼比比实体填充墙框架的等效黏滞阻尼比大.该足尺拟静力试验结果为精细化有限元模型的验证提供了有力依据.



图 1 混凝土空心砌块砌体填充墙 RC 框架结构拟静力试验破坏现象

Fig.1 Damage phenomena of hollow concrete block masonry-infilled RC frames in quasi-static experiments

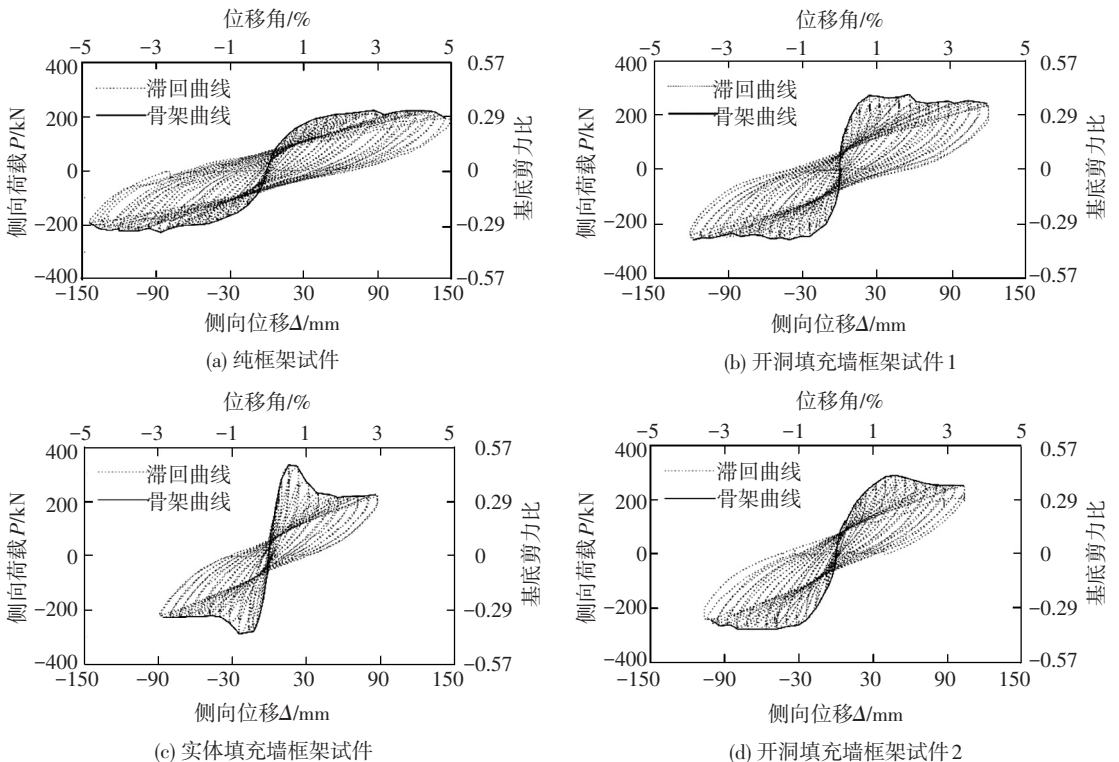


图 2 混凝土空心砌块砌体填充墙 RC 框架结构滞回曲线

Fig.2 Lateral load versus drift ratio response of hollow concrete block masonry-infilled RC frames

1.2 砌体填充墙框架结构平面内有限元模拟方法

试验研究可以真实反映填充墙框架结构的失效行为,但是试验研究需要耗费大量的时间和费用,因此,数值模拟逐渐成为了研究填充墙框架结构抗震性能的有效工具.由于填充墙框架结构的失效模式十分复杂,这给数值模拟带来了极大的挑战,精准的数值模拟方法应能够综合考虑填充墙框架结构所有可能的失效机制:框架梁柱构件的受弯裂缝或者剪切裂缝、砂浆的抗拉开裂或者受压破坏、砌块沿着砂浆层的剪切滑移以及砌块本身的受压失效等破坏行为.此外,材料特性、几何布局以及砌筑方式的不确定性也进一步增加了问题的复杂性.从 Mallick 等^[37]在 1967 年首次采用有限元方法模拟填充墙 RC 框架结构的受力性能以来,各国学者经过不懈努力,提出了各种不同精细程度的数值模拟方法.

最初,填充墙体一般被视为均质材料,仅从平均意义上考虑墙体灰缝的影响,框架与填充墙之间的相互作用一般采用接触、弹簧或者界面单元来模拟,这种方法实施方便而且计算效率较高,可以成功获得填充墙框架结构的承载力和大体失效性能,因此得到了非常广泛的应用.Liau 等^[38]、Chiou 等^[39]、Amde 等^[40]、Asteris^[41]及国内的大多数研究^[42-43]都采用了这种均质材料假设,然而该模拟方法捕获结构失效机制的能力有限,Rots 等^[44]指出这种方法在模拟开裂时存在应力锁效应,因此,该方法虽然可以成功捕捉到结构的受弯和受压破坏,但是对于灰缝的剪切滑移以及对角裂缝的形成则显得无能为力,而且会高估结构的承载力.近些年来,有些学者提出了一些精细化的均质化方法^[45-47]来模拟砌块和灰缝的复合行为,具有不错的发展前景,但在捕获结构复杂的开裂失效性能方面的能力还有待进一步验证.目前在数值模拟中直接引入灰缝的薄弱效应应该是一个简单而有效的方法.为此,有些方法^[48]采用连续体单元来模拟墙体中的砌体材料和灰缝,这种模型需要非常多的单元,砌块和灰缝的力学性能需要分别定义,而且砌块和灰缝之间还需要插入界面单元模拟两者之间的相互作用,计算量巨大.实际上,灰缝的厚度明显小于其他维度的尺寸,对填充墙 RC 框架结构(包括砌体结构)进行数值模拟时,可采用界面单元来模拟灰缝的性能以及框架和填充墙之间相互作用^[49-57].采用这种方法可以精准地捕获填充墙框架结构各种不同的失效模式,如:墙体的对角开裂、滑移以及局部压碎,混凝土柱的受弯破坏等.

有限元模拟中采用界面单元需要预先知道结构中裂缝的位置和开裂方向,这对于填充墙中的灰缝来说是显而易见的,并不会造成任何困难;但是对于

混凝土和砌块等材料的破坏来说情况就复杂多了,裂缝的开裂位置和方向一般是未知的.在试验观察的基础上,Mehrabi 等^[51]、Shing 等^[58]及 AI-Char 等^[59]通过在指定位置插入界面单元来模拟混凝土柱的剪切失效性能,但裂缝的具体位置信息很难预先知道.为了能够在裂缝信息未知的情况下模拟裂缝的开裂问题,Stavridis 等^[54]在钢筋混凝土柱的网格划分中添加了一系列水平向、竖向以及对角界面单元来考虑柱中可能出现的受弯和对角剪切裂缝,采用该方法得到的两个典型填充墙 RC 框架结构试验的失效模式见图 3.考虑到离散界面单元固有的网格依赖性问题,这一改进措施并不能完全满足裂缝扩展的任意性问题,而且界面单元过多的加入加大了有限元网格划分以及钢筋杆单元连接的复杂性,因此,Zhai 等^[60-61]在国内外首次基于扩展有限元方法(XFEM)考虑框架混凝土以及砌块单元受压屈服和开裂性能,以及多裂缝分布式开裂的情况,并结合离散界面单元来模拟砌块之间以及框架和填充墙之间砂浆灰缝的性能,提出了可以精准捕捉框架梁柱以及填充墙体裂缝扩展的有限元模型,克服了裂缝扩展的网格依赖性问题,实现了对结构复杂失效模式的精准捕获.图 4 给出了采用扩展有限元方法得到的相同填充墙 RC 框架试件的失效模式数值模拟结果,可以看到该方法无论是在裂缝的表征还是整体的失效模式上,均能更真实地反映实际中的破坏情况.

除了有限元方法外,对于混凝土等脆性材料裂缝开裂破坏过程还可以采用多种数值方法来模拟,如:离散单元法、无网格法、边界元法、流形元法、刚体弹簧法、分形几何法及比例边界有限元法等,这些方法都有着自身的优势,然而目前将这些方法用于分析填充墙 RC 框架结构的文献还较少,精确性也较低,Muhlhaus 等^[62]、苗吉军^[63]以及 Mohebkah 等^[64]尝试采用离散单元法对砌体填充墙框架结构进行了数值模拟.

1.3 砌体填充墙框架结构平面内简化模型

精细的数值模拟方法可以模拟填充墙框架结构的整个受力破坏过程,但对计算机计算能力的要求也较高,并且涉及的参数也较多.因此寻找一种可用于工程实际的简化分析方法一直是国内外学者共同努力的方向.基于 Polyakov^[30]提出的等效对角撑杆概念发展起来的各种等效撑杆模型应用最为广泛,模型包括单撑杆与多撑杆、同轴支撑与偏心支撑以及线弹性本构与非线性滞回本构等.

等效单撑杆模型的一个关键问题是撑杆有效宽度的确定,一般可以根据填充墙与框架间的相对刚

度计算得到或者通过两者间的接触长度间接得到. Holmes^[65]假定等效宽度等于等效撑杆长度的 1/3 保持不变,计算了填充墙的刚度、最大承载力以及失效时的变形. Stafford-Smith^[66]定义了一个无量纲的参数 λh 来表示框架和填充墙之间的相对刚度,并通过这一参数来计算框架填充墙之间的接触长度以及等效撑杆宽度.参照相对刚度的概念很多研究者通过试验研究和理论分析提出了一系列的撑杆等效宽度计算公式^[67-69]. Fiorato 等^[70]提出可以采用一个对角等效撑杆和一个竖向杆来模拟填充墙的侧向承载力. Mehrabi 等^[13]采用极限状态分析对填充墙不同失效模式下的承载力进行了计算.曹万林等^[32]提出了并联简化模型来模拟填充墙框架结构的性能. Klingner 等^[71]通过试验观察提出了一个等效撑杆模型的非线性滞回关系,考虑了强度和刚度在循环往复加载过程中的退化,这是较早明确给出撑杆的力-位移关系的模型. Saneinejad 等^[72]将填充墙体等效为斜压杆采用极限状态分析方法给出了填充墙框架结构的分析和设计方法,考虑了多种参数(墙体高宽比、梁柱刚度、材料强度等)对结构性能的影响,对墙体的力-位移关系曲线建议采用抛物线来表示刚度折减.在此模型基础上, Madan 等^[73]引入

撑杆的滞回本构模型来进行循环往复加载分析. Fardis 等^[74]同样采用了两种滞回规则来表征填充墙的性能,随后还通过数值分析研究了填充墙不规则布置对结构性能的影响.赵欣等^[75]通过试验研究提出了一种新的等效斜撑模型的力-位移滞回模型.刘建毅^[76]对国内外广泛存在的各种填充墙分析模型进行了分析对比.为了描述填充墙与外围框架之间局部的相互作用,尤其是梁柱接触区域弯矩和剪切应力的变化,一些学者尝试采用更多数量的撑杆以及不同的布置方式来改进填充墙和框架之间的相互作用. Thiruvengadam^[77]提出采用大量的横向、竖向和对角撑杆相互连接来代表整个填充墙的性能. Syrmakizis 等^[78]通过采用 5 根平行的受压撑杆来考虑框架与填充墙之间的相互作用. Zarnic 等^[79]将撑杆上端支点偏向框架柱来考虑这种相互作用. Chrysostomou^[80]提出了 3 根撑杆平行布置的模型. Crisafulli^[81]提出了一个由两根平行撑杆并连接一个弹性剪切弹簧单元组成的模型来考虑填充墙的受压和剪切性能. El-Dakhkhni 等^[82]在 Saneinejad 方法的基础上提出了非平行布置的三撑杆模型以考虑梁柱接触长度的影响, Fiore 等^[83]发展了非平行布置的双撑杆模型.

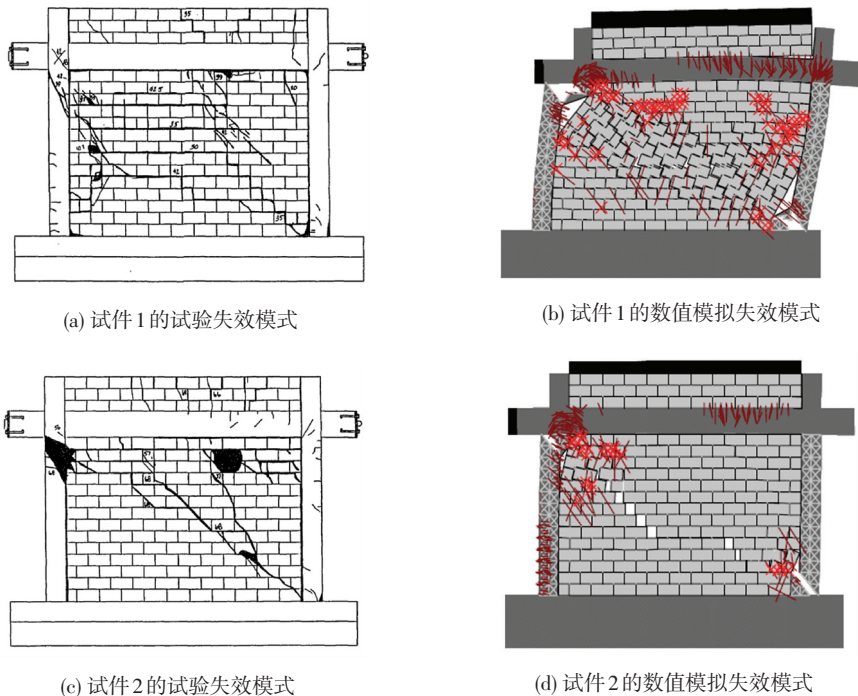


图 3 两个典型填充墙 RC 框架试件的失效模式^[54]

Fig.3 Failure patterns for two typical masonry-infilled RC frames^[54]

对于带有门窗洞口的填充墙,通常认为洞口减小了填充墙的有效受力面积而使结构刚度和承载力降低^[23,25,84-89].用于分析开洞填充墙框架结构受力性能的简化分析模型包括多撑杆模型和单撑杆模型等. Al-Chaar 等^[16], Buonopane 等^[27]提出了多撑杆模

型来模拟洞口的存在造成的局部效应.对于开洞填充墙单撑杆宽度的确定,较为简单有效的方法是基于实体填充墙的撑杆宽度乘以折减系数. Durrani 等^[85]基于有限元分析结果,提出了基于洞口宽度的刚度和承载力折减系数经验公式,但工程设计应用

较为复杂。Al-Chaar 等^[25]通过一系列的试验研究和分析,提出了同时适用于刚度和强度折减系数的表达式 $R = 1 + 0.6\alpha^2 - 1.6\alpha$, 其中 $\alpha = A_0/A$ 为开洞率, A_0 为洞口面积, A 为填充墙面积。Mondal 等^[86]基于有限元研究和填充墙 RC 框架结构试验数据的分析,提出了一个刚度折减系数的线性关系式, $R = 1 - 2.6\alpha$, 并且建议当洞口面积大于填充墙面积的 38% 时,忽略充墙对刚度的影响。Tasnimi 等^[23]基于开洞黏土砖砌体填充墙钢框架结构的平面内抗震试验研究,提出了以下强度折减系数表达式, $R = 1 + 1.49\alpha^2 - 2.238\alpha$, 建议 α 的上限为 0.4。Asteris 等^[87]提出的刚度折减系数公式为 $R = 1 - 2\alpha^{0.54} + \alpha^{1.14}$, 开洞率大于 0.5 时填充墙的影响忽略不计。Mohammadi 等^[88]通过对试验数据的统计分析发现洞口对填充墙承载力和刚度的折减是不一样的,并提出开洞填充墙的强度折减系数为 $R = 1 + 1.1859\alpha^2 - 1.6781\alpha$, 刚度折减系数的表达式为 $R = 1 - 1.085\alpha$ 。苗凤^[89]采用 El-Dakhkhni 提出的三撑杆模型对实体填充墙 RC 框架结构进行了模拟,在此基础上提出了开洞填充墙 RC 框架结构的简化模型。

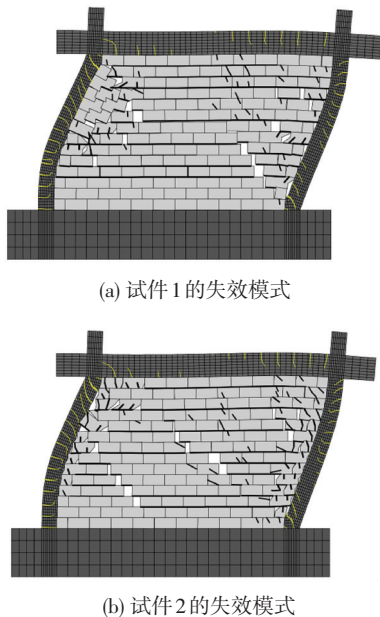


图 4 采用扩展有限元方法得到的两典型填充墙 RC 框架试件的失效模式^[60-61]

Fig. 4 Failure patterns for two typical masonry-infilled RC frames based on XFEM^[60-61]

学者们经过不断地努力,提出了各种各样的简化分析模型,但由于填充墙与框架间相互作用的复杂性,影响结构性能的因素众多,在受力过程中填充墙与框架的接触范围不断变化,多撑杆模型中撑杆的具体布置难以确定,填充墙中的荷载传递路径也难以准确预测。现有的方法往往以极限状态分析为主,对影响填充墙 RC 框架结构性能的因素分析不

够系统全面,对结构承载力的评估还不够精确,撑杆模型中的撑杆等效面积计算也不够准确。为此,王晓敏^[90]基于结构实际所处的受力状态,通过试验结果分析和精细化有限元模拟进行的大量参数分析提出了实体填充墙的刚度和承载力等计算公式,给出了一个五折线荷载-位移曲线的确定方法。该方法系统考虑了填充墙的高宽比、竖向荷载大小和分配比例、框架与填充墙之间相对刚度和强度的变化等因素的影响。对填充墙开窗洞和门洞的情况,孔璟常^[35]分别提出了关于开洞率的刚度和承载力折减系数计算公式,建立了适用于开洞填充墙的等效撑杆的简化荷载-位移曲线。利用填充墙简化分析模型,研究了不同的填充墙布置和填充墙开洞对多层多跨整体框架结构抗震性能的影响。发现无填充墙布置的楼层易出现薄弱层破坏,即使填充墙开洞降低了其刚度,结果也发生了不理想的薄弱层破坏;填充墙竖向布置规则的情况下,由于填充墙急剧的脆性失效而退出工作,也出现了不理想的薄弱层破坏,对结构抗震性能不利。

2 砌体填充墙框架结构平面外抗震性能

由于结构在地震中不可避免的遭受双向地震作用的影响,因此实际地震中填充墙框架结构除平面内破坏外,填充墙发生平面外破坏的现象同样较为常见,这往往会影响到人员疏散并造成人员伤亡等严重后果。2010 年玉树地震中,许多教学建筑中的填充墙体出现了严重的平面外坍塌^[91]。2017 年九寨沟地震中,在可查出具体信息的 11 名遇难者中,便有 3 人是因为填充墙的平面外坍塌而丧生^[92]。虽然早在 20 世纪 50 年代国内外学者就开始了对于填充墙框架结构平面外抗震性能的研究,但现有研究仍然远落后于平面内填充墙框架结构的抗震性能研究。

2.1 砌体填充墙框架结构平面外试验

试验是研究砌体填充墙框架结构平面外抗震性能的重要手段。根据施加填充墙平面外荷载的方法,可将试验分为 3 种类型(如图 5 所示):1) 气囊施加平面外均布荷载的拟静力试验^[93-95],气囊加载是平面外试验中最为常见的一种加载方式,可以较好的模拟地震作用下填充墙所受的平面外惯性力作用;2) 液压装置施加平面外集中荷载的拟静力试验^[96-97],液压加载也是平面外试验中一种重要的加载方式,相比气囊加载,液压加载在荷载控制上更具优势,但是在模拟平面外惯性力作用上不及气囊加载;3) 平面外振动台试验^[98-101],振动台可以真实地还原地震作用,但由于振动台的试验条件等限制,采用的相对较少。

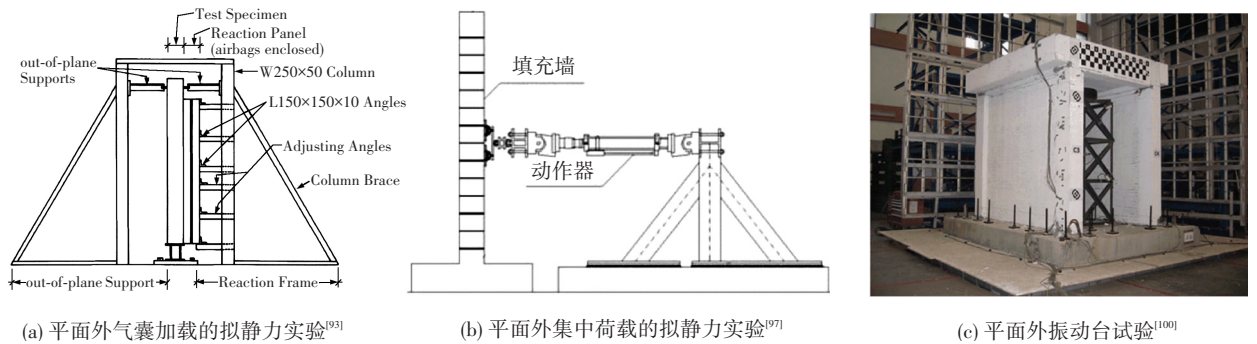


图 5 平面外加载方式

Fig.5 The out-of-plane loading methods

拱承载机制是砌体填充墙框架结构平面外试验的一个重大发现。早期学者基于板壳理论,运用塑性铰线法对填充墙平面外的承载力进行估算,得出填充墙平面外承载力的决定因素是其抗拉强度。Hendry^[102]在试验中发现填充墙平面外的承载力实际上是由于拱承载机制而产生,这表明填充墙平面外承载力实际上是由其抗压强度所主导的。Dawe等^[93]、Angel等^[94]通过气囊加载试验,并基于拱承载机制,分别给出了填充墙平面外承载力的简化计算公式。Dafnis等^[98]通过对石灰砂岩砖填充墙墙体的平面外振动台试验发现墙体顶部的约束条件对填充墙平面外的稳定性影响较大,并进一步验证了平面外作用下墙体中的拱承载机制。Tu等^[96,100]先后进行了4个足尺单层黏土砖填充墙框架结构的平面外振动台试验和2个黏土砖填充墙框架结构的两层学校建筑的平面外现场推覆试验,发现填充墙在平面外作用下的受力类似于一个两铰拱。汶川地震后,程云等^[99]对新型节能混凝土空心砌块填充墙框架结构进行了平面外抗震性能的振动台试验研究,考察了填充墙与RC框架之间的不同连接方式对其平面外稳定性的影响。

真实地震中,由于地震作用方向的随机性,填充墙框架结构受到的是平面内外荷载共同作用,但针对平面内外荷载共同作用下填充墙的损伤破坏的研究起步较晚,直至1994年,Angel等^[94]才首次进行了黏土砖与混凝土空心砌块填充墙框架平面内外组合加载试验。试验发现填充墙平面内损伤会引起平面外承载力降低,平面内损伤引起的平面外承载力降低可高达50%。Calvi等^[95]考虑了不同平面内损伤水平对混凝土多孔砌块填充墙单调递增荷载下平面外承载力的影响。Pereira等^[103]对欧洲常见的黏土多孔砖填充墙框架结构形式进行平面内外双向拟静力加载试验,重点研究填充墙砌块间灰缝构造措施对结构的影响。Porto等^[104]对不同高厚比、不同砌块类别的填充墙的平面内外损伤耦合效应进行了试验研究,对比了新旧砌块材料对填充墙平面外承载力与

位移延性的影响。

2.2 砌体填充墙框架结构平面外有限元模拟方法

数值方法是研究填充墙平面外抗震性能的有效手段。填充墙框架结构平面外有限元模拟需要考虑界面的复杂三维力学行为,砌块与砂浆之间以及填充墙与框架间的相互作用将导致有限元模型的高度非线性,使有限元模型的收敛存在困难。为解决有限元模型的收敛问题,Mohyeddin等^[56]提出了在填充墙厚度方向的中心部位设置弹性砂浆带的方法,以避免两个相邻砌块单元之间出现“穿透”等不合理现象,但该做法也存在弊端,由于弹性砂浆带的约束使砌块中部的单元难以损坏,砌体模型将不能形成连续的裂缝。Yuen等^[105]对接触界面本构进行了改进,但改进后的模型仍然不能反映砂浆的剪胀效应和摩擦角的退化。

利用填充墙框架的三维有限元模拟方法,学者们对填充墙框架结构平面外抗震性能进行了分析。Rabinovitch等^[101]提出了分析填充墙平面外非线性动力特性的有限元方法。于敬海等^[106]基于ANSYS有限元软件进行建模,研究了填充墙平面外承载力的影响因素。Mohyeddin等^[107]对平面内外地震作用下填充墙框架对砂浆界面摩擦系数、砌体峰值抗压强度对应的应变大小等进行了系统的参数分析。Yuen等^[105,108]通过对平面内损伤程度不同的填充墙框架结构进行平面外加载分析,发现平面外加载会降低填充墙的平面内承载力,并削弱边界框架的支撑作用。对填充墙RC框架结构平面外抗震性能已经有了一定的研究,但对于平面内外地震作用下填充墙RC框架损伤破坏研究十分有限,对于平面内外损伤破坏的耦合效应缺乏深入的认识和把握。

2.3 砌体填充墙框架结构平面外简化模型

填充墙框架结构简化模型的研究已逾60年,但早期撑杆模型只适用于填充墙框架结构平面内荷载的分析,不能反映平面外荷载作用下填充墙框架结构的力学行为。近年来有学者在撑杆模型的基础上,提出了考虑平面内外损伤破坏耦合效应的填充墙框架结构简化模型。Hashemi等^[109]首先提出了在撑杆

模型上施加平面外方向自由度的简化模型,为了考虑填充墙平面内外的耦合作用,该模型由 8 根压杆和 1 根具有平面外质量的拉杆组成,体系略显复杂. Kadysiewski 等^[110]开发了可以考虑平面内外响应的离散纤维单元模型,填充墙平面内的力学行为由纤维梁柱单元表示,平面外的受力使用集中质量进行控制. Furtado 等^[111]在等效双对角撑杆模型的基础

上进行改进,定义了一个由 4 个撑杆和 2 个平面外集中质量构成的简化模型,上述 3 种简化模型见图 6. 需要指出的是,由于缺乏填充墙框架结构在平面内外荷载作用下力学行为的数据资料,现有的三维简化模型虽然在弹性范围内模拟填充墙的刚度、强度以及平面内外相互作用等方面比较准确,但在模拟弹性范围外的力学行为仍存在较大偏差.

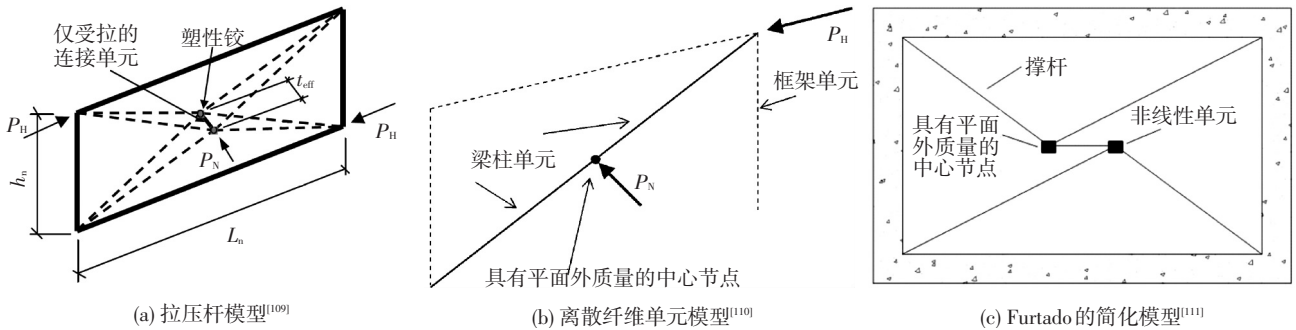


图 6 填充墙简化模型示意

Fig.6 Infill wall simplified macro-model general view

Günay 等^[112]对意大利 L' Aquila 地震出现的平面内外地震作用下填充墙框架结构破坏进行了详细分析,发现震区的填充墙框架结构存在由平面内外荷载共同控制的失效模式. 为揭示此类震害的典型破坏特征, Mosalam 等^[113]和 Furtado 等^[114]分别将不同的三维简化模型应用于填充墙框架结构的整体分析,发现平面内外损伤破坏耦合效应会对整体结构的抗震性能产生显著影响,导致结构的最大层间位移角增加. 在国内,仅有个别学者关注该方向的研究,孟庆利^[115]和韩建平^[116]采用离散纤维单元模型对结构在平面内外地震作用下的破坏进行了初步分析,但对平面内外地震作用下填充墙对框架结构的影响还缺乏深入细致的研究.

3 新型填充墙框架结构抗震性能

为了改善填充墙 RC 框架的抗震性能,目前国内外通常采用增强填充墙或减弱填充墙两种方式^[117]. 前一种思路比如利用 FRP 加固填充墙或者构造次框架,加强对于墙体的约束,提高墙体对于框架刚度和强度的贡献. 后一种思路又可以分为以下两种: 1) 采用新型的材料代替砌体,从而改变填充墙的受力路径,比如薄钢板填充墙; 2) 削弱墙体刚度,避免对主体结构造成应力重分布,其中包括“阻尼器型”墙体,即根据耗能减震中阻尼器的思路来设计墙体使墙体具有类似阻尼器的性能. 国内外科研工作者遵循以上几种思路,提出了以下几类新型墙体,并进行了抗震性能的研究.

第一类新型墙体是 FRP 加固填充墙. Santa-Maria 等^[118]对砌体填充墙进行了几种不同黏结方

式的 CFRP 外贴加固; 经过试验研究,说明对角粘贴方式对抗剪承载力和刚度有很大的提升. Elgawady 等^[119]通过对 7 组 1 : 2 缩尺的砌体填充墙进行不同类型的 FRP 加固,结果表明 FRP 加固墙体的耗能性能优于普通填充墙. Yuksel 等^[120]对采用 CFRP 加固方式的填充墙框架以及纯框架和普通填充墙框架进行循环往复加载试验研究,加固后的承载力和刚度都远大于纯框架和普通填充墙框架的承载力和刚度,其中利用 CFRP 条带加固的填充墙,有效避免了对角开裂以及角部压碎的破坏形式. Erdem 等^[121]通过对交叉粘贴 CFRP 的填充墙框架的受力特点进行研究,发现交叉粘贴 CFRP 对框架整体承载力、刚度以及耗能能力均有所提升. Almusallam 等^[122]对普通框架填充墙、FRP 修复 X 型开裂填充墙框架和 FRP 加固的填充墙框架 3 组试件进行了对比试验,说明未加固的普通框架填充墙破坏以横向灰缝的滑移和对角受压破坏为主,而 FRP 加固后的试件破坏以 FRP 和墙体交界处的水平裂缝为主,以水平 FRP 纤维开裂或者 FRP 脱离墙体为辅. Altin 等^[123]对填充墙框架结构进行对角粘贴 CFRP 加固,研究其在循环往复加载下的抗震性能,并探究了 FRP 固定铆钉数量、FRP 单双面粘贴以及 FRP 条带宽度对于结构抗震性能的影响. Yuksel 等^[124]以 4 种 CFRP 粘贴方式对填充墙框架进行加固(图 7),研究其在循环往复加载下的抗震性能,并在试验中研究了 FRP 上铆钉多少、FRP 单双面粘贴以及 FRP 条带宽度对于加固后结构抗震性能的影响.

第二类新型墙体通过削弱填充墙对框架的影响来加强填充墙框架结构的抗震能力. Mohammadi

等^[125]采用 3 种方式来改善填充墙钢框架的延性,其中带滑移层的填充墙取得了较好的结果,如图 8 所示.Preti 等^[126]对比了无烧制泥土砖和黏土砖分层填充墙钢框架结构抗震能力,发现墙体分层有效增强了填充墙钢框架结构的延性以及耗能能力.Preti 等^[127]在前文的基础上,改用木板作为分层隔板,采用无烧制砖进行了分层墙体的循环往复加载试验,并进行了大量参数分析,对于分层墙板的研究与设计具有指导性的意义.Bolis 等^[128]对上文的木板嵌入框架的方式做了一些改进,研究了分层墙体提升框架延性的作用,并利用弥散砌体单元和砂浆

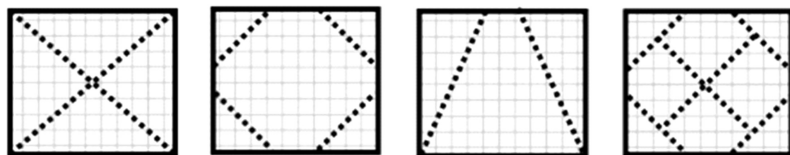


图 7 4 种 FRP 加固方式^[124]

Fig.7 Strengthening methods for infilled walls with FRP^[124]



图 8 分层式填充墙^[125]

Fig.8 Infilled wall with sliding joints^[125]

考虑到填充墙平面外倒塌可能造成的安全隐患以及财产损失,国内学者提出了多种针对填充墙平面外倒塌的改造方式.程云等^[99]对填充墙 RC 框架面外稳定性进行了研究,采用了拉结筋增强填充墙和框架的连接的方法,增强了填充墙 RC 框架的面外稳定性和抗倒塌能力.吴建良^[135]提出了斜钢板带加固填充墙的方法,利用斜钢板约束填充墙的平面外位移,从而加强填充墙 RC 框架的平面外抗倒塌能力.

4 展 望

填充墙 RC 框架结构由于其具有布置灵活、经济适用的特点,在中国以及世界范围内均有着广泛的应用.历次地震震害现象以及大量的试验研究均表明,填充墙对框架结构的整体破坏以及局部损伤有重大影响.本文建议,在建筑设计中应避免填充墙在平立面的不规则布置,对于重要的 RC 框架结构建筑物,有必要将填充墙作为结构构件对整个结构进行抗震分析,杜绝结构发生薄弱层破坏或扭转破坏等不理想的失效模式.对于填充墙材料,应尽量选

界面单元相结合的方式,对分层墙体进行有限元模拟.Memari 等^[129]和 Aliaari^[130]提出了设置副框架改善钢筋混凝土填充墙框架抗震性能的思路,通过设置副框架,在大震时副框架破坏,由框架单独承担地震荷载,避免填充墙破坏导致的结构脆性破坏,从而保证框架结构的延性.Arima 等^[131]提出了黏滞阻尼墙,在较窄的立方体钢容器中填充黏滞液体,显著提升了结构的阻尼性能,改善了结构的抗震性能.周云等^[132-134]使用橡胶或者 SBS 防水沥青卷材作为分层材料,增大了结构阻尼,从而为填充墙框架结构的抗震提供有利影响.

择强度较低,同时延性相对较好,能够保证较好整体性的材料.

地震中填充墙与框架之间存在相互作用,有限元模拟是研究填充墙框架结构受力性能最为经济有效的手段,需要解决的关键科学问题是,墙框相互作用下填充墙和框架构件从开裂至失效的全过程模拟.本课题组开发的基于扩展有限元的精细化有限元模拟方法可以精准捕捉框架梁柱和填充墙裂缝的发展,虽然克服了传统有限元模拟裂缝扩展的网格依赖性问题,但是还需要进一步解决裂缝扩展过程中的交叉和汇合等问题,用于模拟填充墙框架结构循环往复加载和动力加载下的开裂响应情况.

填充墙 RC 框架结构平面内抗震性能决定了整体结构在地震作用下的表现,同时填充墙的平面外倒塌也是一种常见的震害现象,并会造成人员伤亡等严重后果.地震作用方向是随机的,填充墙 RC 框架结构在平面内外的响应存在耦合作用.国内外学者在填充墙 RC 框架结构在平面内外荷载共同作用下力学行为以及考虑平面内外损伤耦合效应的简化模型等方面进行了研究,但对平面内外荷载共同作用下填充墙与 RC 框架的破坏机理、耦合作用程度的影响因素等缺乏定量的、系统的研究.因此,建立准确可靠的填充墙 RC 框架结构的三维有限元模型,研究平面内外地震作用下填充墙和框架的相互作用机理,提出高效的简化分析模型,揭示实际地震中的典型震害现象,对结构的抗震设计提出可操作性的建议,具有重要的理论意义和工程意义,是当前急需攻克的研究方向.

试验研究和数值模拟研究结果表明,填充墙能够增大结构刚度和承载力,对结构产生有利影响,但是

同时也存在使结构产生不理想失效模式的可能性。探索一种能够发挥填充墙有利作用而规避不利作用的方法,具有重要的工程意义。对填充墙 RC 框架结构抗震性能的改进,可以通过加强填充墙性能,提高地震作用下框架结构承载力和刚度的同时而不发生脆性破坏;也可以削弱填充墙使其对结构的刚度效应减小。近年来,国内外学者提出大量的新型填充墙方案,包括墙体分层,添加副框架,砌体配筋等,其中分层墙体由于形式简单,抗震性能良好,具有较好的应用前景。随着新型填充墙改进方案的不断提出和深入研究,其对结构抗震性能的改善作用逐渐受到广泛关注,新型填充墙已经成为当前一个研究热点。

致 谢

本文研究主要得到国家重点研发计划(2016YFC0701108)、国家自然科学基金项目(51238012, 51322801, 51708161)以及黑龙江省教育厅人才项目(2016-KYYWF-0112)的支持。

参考文献

- [1] 童岳生, 钱国芳. 填充墙框架的工作性能及设计计算[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1983(3): 17-32.
TONG Yueheng, QIAN Guofang. Performance and design of infilled frames[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 1983(3): 17-32.
- [2] 童岳生, 钱国芳. 砖填充墙钢筋混凝土框架的变形性能及承载能力[J]. 西安冶金建筑学院学报, 1985(2): 4-24.
TONG Yueheng, QIAN Guofang. The deformability and bearing capacity of masonry infilled RC frames [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 1985(2): 4-24.
- [3] 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, 9: 182-189.
HUANG Sining, GUO Xun, SUN Dezhong, et al. Shaking table seismic teston performance of frame-structure with light-weight infilled walls[J]. Engineering Mechanics, 2014, 9: 182-189.
- [4] 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.
HUANG Qunxian, GUO Zixiong, ZHU Yanru, et al. Experimental study on seismic behavior of RC frames infilled with concrete hollow blocks[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 110-118.
- [5] 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.
TANG Xingrong, ZHOU Zhenyi, LIU Lihua, et al. Experimental study on seismic behavior of multi-story masonry infilled reinforced concrete frame structures[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(11): 72-81.
- [6] 李雁军. 砌体填充墙 RC 空间框架振动台试验与抗震性能评定[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LI Yanjun. Shaking table tests and seismic performance assessment of RC space frames with infilled masonry walls [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [7] 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.
WU Fangbo, ZHU Huifang, OUYANG Jing, et al. Experiment on seismic behavior of concrete horizontal-hole hollow blocks infilled wall-RC frames[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(5): 7-13.
- [8] 周晓洁. 柔性连接新型砌体填充墙框架结构抗震性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
ZHOU Xiaojie. Study on seismic behavior of flexible connection frame structure infilled with new masonry [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [9] 李大禹. 不同连接形式新型砌体填充墙框架结构抗震性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
LI Dayu. Study on seismic performance of new masonry infilled wall under different connection form [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [10] 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.
JIANG Huanjun, MAO Junjie, LIU Xiaojuan. Experimental study on seismic performance of masonry infilled RC frame with different types of connections[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3): 60-67.
- [11] 吴方伯, 李大禹, 欧阳靖, 等. 不同连接方式下新型砌体填充墙框架结构的抗震性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3): 28-35.
WU Fangbo, LI Dayu, OUYANG Jing, et al. Seismic performance of new masonry infilled RC frame with different types of connections[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(3): 28-35.
- [12] MAINSTONE R J. On the stiffness and strengths of infilled frames [C]//Proceedings Institution of Civil Engineers. London, UK: supplement IV, paper 7360S, 1971: 57-90.
- [13] MEHRABI A B, SHING P B, Schuller M P, et al. Experimental evaluation of masonry infilled RC frames[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(3): 228-37.
- [14] HASHEMI S A, MOSALAM K M. Seismic Evaluation of reinforced concrete buildings including effects of infill masonry walls [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER 2007/100.
- [15] LEITE J, LOURENCO P B. Solutions for infilled masonry buildings: shaking table tests [C]//Proceeding of 15th International Brick and Block Masonry Conference. Florianópolis, Brazil: [s.n.], 2012.
- [16] AL-CHAAR G, ISSA M, SWEENEY S. Behavior of masonry-infilled nonductile reinforced concrete frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128: 1055-1063.
- [17] STAVRIDIS A, KOUTROMANOS I, SHING P B. Shake-table tests of a three-story reinforced concrete frame with masonry infill walls [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 2012, 41: 1089-1108.
- [18] KAKALETSIS D J, KARAYANNIS C G. Influence of masonry strength and openings on infilled R/C frames under cycling loading [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2008, 12: 197-221.
- [19] ZOVKIC J, SIGMUND V, GULJAS I. Cyclic testing of a single bay reinforced concrete frames with various of masonry infill [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 2013; 42(8): 1131-1149.
- [20] MALLICK D V, GARG R P. Effect of openings on the lateral stiffness of infilled frames[J]. ICE Proceedings, 1971, 49(2): 193-209.
- [21] KAKALETSIS D J, KARAYANNIS C G. Experimental investigation of infilled R/C frames with eccentric openings [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2007; 26(3): 231-250.
- [22] KAKALETSIS D J, KARAYANNIS C G. Experimental investigation of infilled reinforced concrete frames with openings [J]. ACI Structural Journal, 2009 106(2): 132-141.
- [23] TASNIMI A A, MOHEBKHAH A. Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches[J]. Engineering Structural, 2011, 33(3): 968-980.
- [24] MANSOURI A, MAREFAT M S, KHANMOHAMMADI M. Experimental evaluation of seismic performance of low-shear strength masonry infills with openings in reinforced concrete frames with deficient seismic details [J]. Structural Design and Tall Special Buildings, 2013, 23(15): 1190-1210.
- [25] AL-CHAAR G, LAMB G E, ISSA M A. Effects of openings on structural performance of unreinforced masonry infilled frames [J]. ACI Special Publication, 2003, SP-211-12: 247-261.
- [26] MOSALAM K M, WHITE R N, GERGELY P. Static response of infilled frames using quasi-static experimentation [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(11): 1462-1469.
- [27] BUONOPANES G, WHITE R N. Pseudo-dynamic testing of

- masonry infilled reinforced concrete frame[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(6): 578-589.
- [28] LIAUW T C. Tests on multistory infilled frames subject to dynamic lateral loading[J]. *ACI Journal*, 1979, 76(4): 551-564.
- [29] DAWE J L, SEAH C K. Behaviour of masonry infilled steel frames [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1989, 16(6): 865-76.
- [30] POLYAKOV S V. *Masonry in framed buildings* [M]. Moscow: [s. n.], 1956.
- [31] RAJG B P. Experimental investigation of RC frames with brick masonry infill walls having central opening subjected to cyclic displacement loading[D]. Kanpur: Indian Institute of Technology, 2000.
- [32] 曹万林, 庞国新, 李云宵, 等. 轻质填充墙异形柱框架弹性阶段地震作用计算[J]. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(3): 44-51. CAO Wanlin, PANG Guoxin, LI Yunxiao, et al. Calculation of earthquake action on frame with special-shaped columns and light-weight filled walls at elastic stage[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1997, 17(3): 44-51.
- [33] 曹万林, 庞国新, 李云宵, 等. 轻质填充墙异形柱边框架抗震性能试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(2): 106-112. CAO Wanlin, PANG Guoxin, LI Yunxiao, et al. Test research on a seismic behavior of edge frame with special-shaped columns and light-weight filled walls [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1997, 17(2): 106-112.
- [34] 朱荣华, 沈聚敏. 砖填充墙钢筋混凝土框架拟动力地震反应试验及理论分析[J]. *建筑结构学报*, 1996, 17(4): 27-34. ZHU Ronghua, SHEN Jumin. Pseudo-dynamic earthquake response test and theoretical analysis of RC frame with brick masonry infilling [J]. *Journal of Building Structures*, 1996, 17(4): 27-34.
- [35] 孔璟环. 开洞砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. KONG Jingchang. Seismic performance of masonry infilled RC frames with openings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [36] ZHAI Changhai, KONG Jingchang, WANG Xiaomin, et al. Experimental and finite element analytical investigation of seismic behavior of full-scale masonry infilledrc frames [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2016, 20(7): 1171-1198.
- [37] MALLICK D V, SEVERN R T. The behavior of infilled frames under static loading [J]. *Proceedings of Institution of Civil Engineering*, 1967, 38(2): 639-656.
- [38] LIAUW T C, LO C Q. Multibayinfilled frames without shear connectors[J]. *ACI Structural Journal*, 1988, 85(4): 423-428.
- [39] CHIOU Y J, TZENG J C, LIOU Y W. Experimental and analytical study of masonry infilledframes [J]. (*ASCE*) *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(10): 1109-1117.
- [40] AMDE A M, GHOSH A K. Finite element analysis of infilledframes [J]. (*ASCE*) *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(7): 881-889.
- [41] ASTERIS P G. Finite element micro-modeling of infilledframes [J]. *Electron Journal of Structural Engineering*, 2008, 8: 1-11.
- [42] 陈卓英, 熊进刚, 虞锦晖. 红石填充墙钢筋混凝土框架结构抗侧性能有限元非线性分析[J]. *工程力学*, 1996: 98-102. CHEN Zhuoying, XIONG Jingang, YU Jinhui. Finite element nonlinear analysis for lateral behavior of RC frame structures with red stone walls[J]. *Engineering Mechanics*, 1996: 98-102.
- [43] 傅军, 金伟良, 岳增国, 等. 框架填充墙开裂的数值模拟分析 [J]. *新型墙材*, 2008, 6: 29-32. FU Jun, JIN Weiliang, YUE Zengguo, et al. Numerical analysis of cracking of infilledframes [J]. *Wall Materials Innovation and Energy Saving in Buildings*, 2008, 6: 29-32.
- [44] ROTS J G, BLAAUWENDRAAD J. Crack models for concrete; discrete or smeared? fixed, multi-directional or rotating? [R]. Delft: Delft University of Technology, 1989, 34(1): 1-46.
- [45] GAMBAROTTA L, LAGOMARSINO S. Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. part ii: the continuum model and its applications [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamic*, 1997, 26(4): 441-462.
- [46] ZUCCHINI A, LOURENCO P B. A Micromechanical model for the homogenisation of masonry [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2002, 39(12): 3233-3255.
- [47] MILANI G, LOURENCO P B, TRALLI A. Homogenised limit analysis of masonry walls. part ii; structural examples [J]. *Computers and Structures*, 2006, 84(3/4): 181-195.
- [48] 张炎圣, 马千里, 陆新征, 等. 填充墙震害数值模拟与对策讨论 [C]//汶川地震建筑震害分析与重建研讨会.北京:中国工程院, 国家自然科学基金委员会, 中国土木工程学会, 中国建筑学会, 2008:293-300. ZHANG Yansheng, MA Qianli, LU Xinzhen, et al. Numerical simulation and countermeasure discussion for seismic hazard [C]//Wenchuan Earthquake Building Seismic Hazard Analysis and Rebuilding Workshop. Beijing: Chinese Academy of Engineering, National Natural Science Foundation of China, China Civil Engineering Society, Architectural Society of China, 2008: 293-300.
- [49] LOTFI H R, SHING P B. An interface model applied to fracture of masonry structures [J]. (*ASCE*) *Journal of Structural Engineering*, 1994, 120(1): 63-80.
- [50] LOURENCO P B. *Computational strategies for masonry structures* [D]. Porto: Universidade do Porto, 1996.
- [51] MEHRABI B, SHING P B. Finite element modeling of masonry-infilled RC frames [J]. (*ASCE*) *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123(5): 604-613.
- [52] OLIVEIRAD V, LOURENCO P B. Implementation and validation of a constitutive model for the cyclic behaviour of interface elements [J]. *Computers and Structures*, 2004, 82: 1451-1461.
- [53] ATTARD M M, NAPPI A, TIN-LOI F. Modeling fracture in masonry [J]. (*ASCE*) *Journal of Structural Engineering*, 2007, 133(10): 1385-1392.
- [54] STAVRIDIS A, SHING P B. Finite element modeling of nonlinear behavior of masonry-infilled RC frames [J]. (*ASCE*) *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(3): 285-296.
- [55] KOUTROMANOS I. Numerical analysis of masonry-infilledreinforced concrete frames subjected to seismic loads and experimental evaluation of retrofit techniques [D]. San Diego: Department of Structural Engineering, University of California at San Diego, 2011.
- [56] MOHYEDDIN A, GOLDSWORTHY H M, GAD E F. FE modelling of RC frames with masonry infill panels under in-plane and out-of-plane loading [J]. *Engineering Structures*, 2013, 51: 73-87.
- [57] SATTAR S. Influence of masonry infill walls and other building characteristics on seismic collapse of concrete frame buildings [D]. Boulder: Department of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, University of Colorado, 2013.
- [58] SHING P B, SPENCER B. Modeling of shear behavior of RC bridge structures [C]//Proceedings of the US-Japan Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads-Recent Advances and Challenges of Analysis and Design, NSF-JSPS-JCI. Tokyo, Japan; [s.n.], 1999: 315-333.
- [59] AL-CHAAR G, MEHRABI A B, MANZOURI T. Finite element interface modeling and experimental verification of masonry-infilled R/C frames [J]. *The Masonry Society Journal*, 2008, 26(1): 47-66.
- [60] ZHAI Changhai, WANG Xiaomin, KONG Jingchang, et al. A sophisticated simulation for the fracture behavior of concrete material using XFEM [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2017, 16(4): 859-881.
- [61] ZHAI Changhai, WANG Xiaomin, KONG Jingchang, et al. Numerical simulation of masonry-infilled RC frames using XFEM [J]. (*ASCE*) *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(10): 1-14.
- [62] MUHLHAUS H, SULEM J, UNTERREINER P. Discrete and continuous models for dry masonry columns [J]. (*ASCE*) *Journal of Engineering Mechanics*, 1997, 4: 399-403.
- [63] 苗吉军. 地震作用下砌体结构倒塌反应的计算机仿真分析 [D]. 上海: 同济大学, 2003. MIAO Jijun. Numerical simulation analysis for the collapse response of masonry structures under earthquakes [D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [64] MOHEBKHAH A, TASNIMI A A, MOGHADAM H A. Nonlinear analysis of masonry-infilled steel frames with openings using discrete element method [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64: 1463-1472.

- [65] HOLMES M. Steel frames with brickwork and concrete infilling [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1961, 19(4): 473-478.
- [66] STAFFORD-SMITH B. Lateral stiffness of infilled frames [J]. (ASCE) Journal of the Structural Division, 1962, 88(ST6): 183-199.
- [67] MAINSTONE R J. Supplementary note on the stiffness and strengths of infilled frames [J]. Proceedings of Institution of Civil Engineering, 1974, 49(2): 230-231.
- [68] LIAUWT C, KWAN K H. Unified plastic analysis for infilled frames [J]. (ASCE) Journal of Structural Engineering, 1985, 111(7): 1427-1448.
- [69] FLANAGAN R D, BENNETT R M. In-plane behaviour of structural clay tile infilled frames [J]. (ASCE) Journal of Structural Engineering, 1999, 125(6): 590-599.
- [70] FIORATO A E, SOZEN M A, GAMBLE W L. An investigation of the interaction of reinforced concrete frames with masonry filler walls [R]. Urbana: Technical Report No. IULU-ENG 70-100, Dept. of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana, Champaign, 1970.
- [71] KLINGNER R E, BERTERO V V. Earthquake resistance of infilled frames [J]. (ASCE) Journal of the Structural Division, 1978, 104: 973-989.
- [72] SANEINEJAD A, HOBBS B. Inelastic design of infilled frames [J]. (ASCE) Journal of Structural Engineering, 1995, 121(4): 634-650.
- [73] MADAN A, REINHORN A M. Modeling of masonry infill panel for structural analysis [J]. (ASCE) Journal of Structural Engineering, 1997, 10(123): 1295-1302.
- [74] FARDIS M N, PANAGIOTAKOS T B. Seismic design and response of bare and masonry-infilled reinforced concrete buildings. part ii: infilled structures [J]. Journal of Earthquake Engineering, 1997, 1(3): 475-503.
- [75] 赵欣, 李国强. 轻质砌块填充墙对钢框架地震反应影响分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(3): 159-161.
- ZHAO Xin, LI Guoqiang. Analysis of influences of lightweight infilled walls on seismic responses of steel frames [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(3): 159-161.
- [76] 刘建毅. 填充墙框架结构基于性能的抗震评估研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- LIU Jianyi. Performance-based seismic evaluation for infilled frames [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.
- [77] THIRUVENGADAM V. On the natural frequencies of infilled frames [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 1985, 31(2): 44-46.
- [78] SYRMAKEZIS C A, VRATSANOY V Y. Influence of infill walls to R.C. frames response [C]// Proceedings of 8th European Conference on Earthquake Engineering. Lisbon: [s.n.], 1986, 3: 47-53.
- [79] ZARNIC R, TOMAZEVIC M. An Experimentally obtained method for evaluation of the behavior of masonry infilled RC frames [C]// Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo and Kyoto: [s.n.], 1988: 163-168.
- [80] CHRYSOSTOMOU C Z. Effects of degrading infill walls on the nonlinear seismic response of two-dimensional steel frames [D]. Ithaca: Cornell University, 1991.
- [81] CRISAFULLI F J. Seismic behavior of reinforced concrete structures with masonry infills [D]. New Zealand: University of Canterbury, 1997.
- [82] EL-DAKHAKHNI W W, ELGAALY M, HAMID A A. Three-strut model for concrete masonry-infilled steel frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2): 177-185.
- [83] FIORE A, NETTI A, MONACO P. The influence of masonry infill on the seismic behavior of RC frame buildings [J]. Engineering Structures, 2012, 44(6): 133-145.
- [84] 汪恒, 叶燕华, 葛海蓉, 等. 长高比和墙体开洞对填充墙倒塌影响的数值模拟 [J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2013, 35(6): 74-78.
- WANG Heng, YE Yanhua, GE Hairong, et al. Numerical simulation on collapse of infill walls with different length-height ratios and opening in the wall [J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 35(6): 74-78.
- [85] DURRANI A J, LUO Y H. Seismic retrofit of flat-slab buildings with masonry infills [R]. San Francisco: Proceedings of the NCEER Workshop on Seismic Response of Masonry Infills, Technical Report NCEER-94-0004, 1994: 1-8.
- [86] MONDAL G, JAIN S K. Lateral stiffness of masonry infilled reinforced concrete (RC) frames with central opening [J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(3): 701-723.
- [87] ASTERIS P G, GIANNOPOULOS I P, CHRYSOSTOMOU C Z. Modeling of infilled frames with openings [J]. Open Construction and Building Technology Journal, 2012, 6(1): 81-91.
- [88] MOHAMMADI M, NIKFAR F. Strength and stiffness of masonry infilled frames with central openings based on experimental results [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(6): 974-84.
- [89] 苗凤. 填充墙对钢筋混凝土框架结构动力性能的影响 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- MIAO Feng. The effect of infill walls on the dynamic behavior of reinforced concrete frames [D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [90] 王晓敏. 基于 XFEM 的砌体填充墙 RC 框架结构数值模拟研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- WANG Xiaomin. Research on numerical simulation of masonry-infilled RC frames using XFEM [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [91] 李巨文, 薄景山, 卢滔, 等. 玉树 7.1 级地震学校建筑震害分析 [J]. 自然灾害学报, 2013(1): 123-129.
- LI Juwen, BO Jingshan, LU Tao, et al. Seismic damage analysis of school buildings in Yushu Ms 7.1 earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2013(1): 123-129.
- [92] 许镇, 刘畅. 九寨沟 7.0 级地震人员死亡原因初步调查与工程对策 [EB/OL] (2017-08-10). <http://mp.weixin.qq.com/s/fQg9rGBU13VcSZdBxKPQjg>.
- XU Zhen, LIU Chang. Preliminary investigation and engineering countermeasures on death causes of Jiuzhaigou Ms 7.0 earthquake [EB/OL]. (2017-08-10). <http://mp.weixin.qq.com/s/fQg9rGBU13VcSZdBxKPQjg>.
- [93] DAWE J L, SEAH C K. Out-of-plane resistance of concrete masonry infilled panels [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1989, 16(6): 854-864.
- [94] ANGEL R, ABRAMS D P, SHAPIRO D, et al. Behavior of reinforced concrete frames with masonry infills [R]. Urbana: University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1994.
- [95] CALVI G M, BOLOGNINI D. Seismic response of reinforced concrete frames infilled with weakly reinforced masonry panels [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2001, 5(2): 153-185.
- [96] TU Y H, LIU P M, LIN H P. Out-of-plane experimental response of strong masonry infills [C]// Structures Congress: New Horizons and Better Practices. Long Beach: ASCE, 2007: 1-10.
- [97] HAK S, MORANDI P, MAGENES G. Out-of-plane experimental response of strong masonry infills [C]// European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Istanbul: [s.n.], 2014: 139-144.
- [98] DAFNIS A, KOLSCH H, REIMERDES H, et al. Arching in masonry walls subjected to earthquake motions [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(2): 153-159.
- [99] 程云, 刘明, 王长玉, 等. 新型混凝土砌块填充墙平面外稳定性研究 [J]. 新型建筑材料, 2009, 36(11): 55-59.
- CHENG Yun, LIU Ming, WANG Changyu, et al. Study on the out-of-plane stability of new concrete block infill wall [J]. New Building Materials, 2009, 36(11): 55-59.
- [100] TU Y H, CHUANG T H, LIU P M, et al. Out-of-plane shaking table tests on unreinforced masonry panels in RC frames [J]. Engineering Structures, 2010, 32(12): 3925-3935.
- [101] RABINOVITCH O, MADAH H. Finite element modeling and shake-table testing of unidirectional infill masonry walls under out-of-plane dynamic loads [J]. Engineering Structures, 2011, 33(9): 2683-2696.
- [102] HENDRY A W. The lateral strength of unreinforced brickwork [J]. Structural Engineer, 1973, 51(2): 43-50.
- [103] PEREIRA M F P, PEREIRA M F N, FERREIRA J E D, et al. Behavior of masonry infill panels in RC frames subjected to in plane and out of plane loads [C]// 7th International Conference on

- Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures. Kraków; [s.n.], 2011.
- [104] PORTO F, GUIDI G, BENETTA M D, et al. Combined in-plane/out-of-plane experimental behaviour of reinforced and strengthened infill masonry walls [C]//12th Canadian Masonry Symposium, Vancouver, British Columbia. Vancouver; [s.n.], 2013.
- [105] YUEN Y P, KUANG J S. Masonry-infilled RC frames subjected to combined in-plane and out-of-plane loading [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2014, 14(2): 1350066.
- [106] 于敬海, 徐洪茂, 孙琼. 自承重填充墙平面外承载力有限元分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 35(4): 27-31.
YU Jinghai, XU Hongmao, SUN Qiong. Nonlinear FEA on bearing capacity of out of plane of self-supporting infilled wall [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2013, 35(4): 27-31.
- [107] MOHYEDDIN A, GOLDSWORTHY H M, GAD E F. Sensitivity analysis of nonlinear behaviour of infill-frames under in-plane and out-of-plane loading [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(10): 1729-1747.
- [108] YUEN T Y P, KUANG J S, ALI B S M. Assessing the effect of bi-directional loading on nonlinear static and dynamic behaviour of masonry-infilled frames with openings [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2016, 14(6): 1721-1755.
- [109] HASHEMI S A, MOSALAM K M. Seismic evaluation of reinforced concrete buildings including effects of masonry infill walls [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2007.
- [110] KADYSIEWSKI S, MOSALAM K M. Modeling of unreinforced masonry infill walls considering in-plane and out-of-plane interaction [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2009.
- [111] FURTADO A, RODRIGUES H, ARÊDE A, et al. Simplified macro-model for infill masonry walls considering the out-of-plane behaviour [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45(4): 507-524.
- [112] GÜNAY M S, MOSALAM K M. Structural engineering reconnaissance of the April 6, 2009, Abruzzo, Italy, earthquake, and lessons learned [R]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2010.
- [113] MOSALAM K M, GÜNAY S. Progressive collapse analysis of reinforced concrete frames with unreinforced masonry infill walls considering in-plane/out-of-plane interaction [J]. Earthquake Spectra, 2015, 31(2): 921-943.
- [114] FURTADO A, RODRIGUES H, ARÊDE A, et al. Influence of the in plane and out-of-plane masonry infill walls' interaction in the structural response of RC buildings [J]. Procedia Engineering, 2015, 114: 722-729.
- [115] 孟庆利. 框架结构中填充墙平面内外地震作用效应 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(5): 129-139.
MENG Qingli. Study on infilled walls IP-OOP earthquake effect in RC frame infilled wall structure [J]. Earthquake Engineering And Engineering Dynamics, 2014, 34(5): 129-139.
- [116] 韩建平, 黄林杰, 孙小云. 考虑填充墙平面内外相互作用评估 RC 框架-填充墙结构抗整体性倒塌能力 [J]. 工程力学, 2016, 33(9): 146-154.
HAN Jianping, HUANG Linjie, SUN Xiaoyun. Global collapse resistance capacity investigation of infilled RC frame considering in-plane and out-of-plane interaction of infill walls [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(9): 146-154.
- [117] 周云, 彭水淋, 郭阳照, 等. 提高框架填充墙结构抗震性能的新途径和新方法 [J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(5): 469-476.
ZHOU Yun, PENG Shuilin, GUO Yangzhao, et al. New methods to improve the seismic resistance of infilled RC frames [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(5): 469-476.
- [118] SANTA-MARIA H, DUARTE G, GARIB A. Experimental investigation of masonry panels externally strengthened with CFRP laminates and fabric subjected to in-plane shear load [C]//8th US National Conference on Earthquake Engineering. San Francisco: [s.n.], 2004 (1042).
- [119] ELGAWADY M A, LESTUZZI P, BADOUX M. Analytical model for the in-plane shear behavior of URM walls retrofitted with FRP [J]. Composites Science & Technology, 2006, 66(3/4): 459-474.
- [120] YUKSEL E, ILKI A, EROL G, et al. Seismic retrofit of infilled reinforced concrete frames with CFRP composites [J]. Advances in earthquake engineering for urban risk reduction, 2006, 66: 285-300.
- [121] ERDEME I, AKYUZ U, ERSOY U, et al. An experimental study on two different strengthening techniques for RC frames [J]. Engineering Structures, 2006, 28(13): 1843-1851.
- [122] ALMUSALLAMT H, AL-SALLOUM Y A. Behavior of FRP strengthened infill walls under in-plane seismic loading [J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(3): 308-318.
- [123] ALTIN S, ÖZGÜR A, KARA M E, et al. An experimental study on strengthening of masonry infilled RC frames using diagonal CFRP strips [J]. Composites Part B Engineering, 2008, 39(4): 680-693.
- [124] YUKSEL E, OZKAYNAK H, BUYUKOZTURK O, et al. Performance of alternative CFRP retrofitting schemes used in infilled RC frames [J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(4): 596-609.
- [125] MOHAMMADI M, AKRAMI V, MOHAMMADI-GHAZI R. Methods to improve infilled frame ductility [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(6): 646-653.
- [126] PRETI M, BETTINI N, PLIZZARI G. Infill walls with sliding joints to limit infill-frame seismic interaction: large-scale experimental test [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2012, 16(1): 125-141.
- [127] PRETI M, BETTINI N, MIGLIORATI L, et al. Analysis of the in-plane response of earthen masonry infill panels partitioned by sliding joints [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45(8): 1209-1232.
- [128] BOLIS V, STAVRIDIS A, PRETI M. Numerical investigation of the in-plane performance of masonry-infilled RC frames with sliding subpanels [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 143(2): 04016168.
- [129] MEMARI A M, ALIAARI M. Seismic isolation of masonry infill walls [C]// Structures Congress. Boston; [s.n.], 2014: 1-10.
- [130] ALIAARI M. Development of seismic infill wall isolator subframe (SIWIS) system [D]. Pennsylvania: Pennsylvania State University, 2004.
- [131] ARIMA F, MIYAZAKI M, TANAKA H, et al. A study on building with large damping using viscous damping walls [C]// Proc. Ninth-WCEE. Tokyo and Kyoto; [s.n.], 1988: 163-168.
- [132] 周云, 彭水淋, 吴从永, 等. 新型框架阻尼填充墙的设计与分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(4): 79-84.
ZHOU Yun, PENG Shuilin, WU Congyong, et al. Design and analysis of a new infilled damping wall [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(4): 79-84.
- [133] 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(9): 21-28.
ZHOU Yun, GUO Yangzhao, LIAO Yifa, et al. Experimental study on seismic behaviors of damped masonry in-filled reinforced concrete frame structures with SBS layers [J]. China Civil Engineering Journal, 2014(9): 21-28.
- [134] 周云, 郭阳照, 廖奕发, 等. 阻尼填充墙简阻尼层性能试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2014(3): 229-236.
ZHOU Yun, GUO Yangzhao, LIAO Yifa, et al. Experimental performance study on simple damping layers of damping infill wall [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014(9): 21-28.
- [135] 吴建良. 斜钢板带加固单跨 RC 框架-内填充墙结构滞回性能试验研究与有限元分析 [D]. 苏州: 苏州科技学院, 2011.
WU Jianliang. Experimental investigation and FEM modeling on inclined steel plate-strengthened RC frames [D]. Suzhou: Suzhou Institute of Technology, 2011.