

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.066



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



损伤可控型构造措施对砌体填充墙-RC 框架 受力性能的影响

池斌¹, 董知想¹, 全玉湖², 杨旭², 王诗雨¹

(1. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要:为评估现有砌体填充墙可实现损伤可控构造措施的适用性,搜集包含空框架、刚性连接以及损伤可控型连接措施在内的 17 组 63 片砌体填充墙-RC 框架拟静力试验数据建立数据库,并分析试件初始刚度、峰值承载力、位移延性以及墙体损伤形态等对整体结构受力性能的影响规律。结果表明:损伤可控型构造措施主要集中于墙-框界面和墙体内部构造两个区域,其中墙-框界面构造旨在减弱墙-框相互作用,而墙体内部构造则通过墙体分区控制改善墙体破坏模式。损伤可控型构造措施能改善传统刚性方案中整体构件初始刚度过大和延性降低的不足,但牺牲了一定的承载力储备。相较于墙-框界面构造措施,墙体内部构造措施在改善试件位移延性、墙面损伤率和过峰值点后力学性能等方面具有显著优势,可作为提升墙体韧性水平的首选方案。

关键词:砌体填充墙;损伤可控型;受力性能;构造措施;墙体损伤形态

中图分类号:TU398 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Influence of different damage-controllable construction method on mechanical performance of masonry-infilled RC frames

CHI Bin¹, DONG ZhiXiang¹, QUAN Yuhu², YANG Xu², WANG Shiyu¹

(1. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China)

Abstract: To evaluate the applicability of commonly used damage-controllable construction methods for masonry-infilled reinforced concrete (RC) frames, a comprehensive pseudo-static test database comprising 63 specimens in 17 groups of masonry-infilled RC frames was established, including bare frames, rigid connections, and damage-controllable specimens. The discussion on the influence of these construction methods on the mechanical performance of the specimens was systematically analyzed in terms of initial stiffness, maximum load-bearing capacity, displacement ductility, and wall damage patterns. The results indicate that current damage-controllable construction methods are primarily concentrated in two areas: the wall-frame interface and the internal structure of the wall. The design of the wall-frame interface aims to weaken the wall-frame interaction, while the design of the internal structure of the wall seeks to achieve zoning damage control within the wall, thereby improving failure modes. These damage-controllable construction methods can

收稿日期:2025-03-05

基金项目:国家自然科学基金(52208190)

作者简介:池斌(1992-),男,博士,主要从事新型砌体结构抗震研究,E-mail:usts-tmcb@mail.usts.edu.cn。

Received: 2025-03-05

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52208190)

Author brief: CHI Bin (1992-), PhD, main research interest: seismic performance of novel masonry structure, E-mail: usts-tmcb@mail.usts.edu.cn.

effectively mitigate the excessive initial stiffness and reduce ductility of the specimens observed in traditional rigid connections, albeit at the cost of some load-bearing reserve. Furthermore, compared to the wall-frame interface construction methods, the internal construction methods of the wall show more significant improvements in the displacement ductility, the post-peak mechanical performance, and damaged area ratio of the specimens, rendering it a preferred choice for enhancing the resilience of the wall.

Keywords: masonry infilled wall; damage-controllable; mechanical performance; construction method; wall damage pattern

砌体填充墙作为钢筋混凝土(Reinforced concrete,简称RC)框架结构中常见的非结构构件,因其优良的保温、隔热及隔声性能而被广泛应用。然而,近年来的地震震害调研显示,采用传统刚性连接方式的砌体填充墙不仅存在影响整体结构刚度分布和改变结构受力构件破坏模式的弊端,还易出现墙体开裂甚至于倒塌的破坏现象,导致震后修复成本较高^[1-2]。因此,在RC框架结构抗震变形过程中有效控制砌体填充墙损伤演化,构建墙体与框架间合理的协同工作机制,提升整体结构抗震韧性,已成为当前填充墙抗震性能研究领域的热点问题之一^[3-4]。

近年来,学者们围绕砌体填充墙与RC框架结构之间的相互作用关系开展了大量的试验研究与理论分析,并以控制墙体损伤为目标提出了多种新型构造方法^[5-26]。张令心等^[6]将现有新型填充墙构造措施划分为3类:增强型填充墙、柔性连接型填充墙和增设耗能部件型填充墙。研究表明,3种类型在控制墙体损伤开展均具有一定效果,然而增强型填充墙刚度显著提高可能会导致整体结构刚度分布不均匀,推荐应用于既有框架的加固工程中;而柔性连接型和增设耗能构件型能够改善墙体变形性能和损伤形态,被推荐应用于新建建筑中。笔者以墙体损伤控制及优化墙-框协同工作机制为目标,依据墙体构造区域对上述两类墙体构造措施进一步细化为以下两类:第1类构造(定义为Type I)聚焦于砌体填充墙与RC框架界面间的构造连接^[7-17],如Morandi等^[7-8]、张永兵等^[9]、周晓洁等^[10]、Erdem等^[11]、Bikçe等^[12]、Tsantilis等^[13],通过在墙体与框架之间预设缝隙,并采用柔性材料填充,以弱化砌体填充墙在整体结构受水平荷载作用时的“支撑效应”,墙体在大变形时能够通过预设缝隙与RC框架结构脱离,实现墙体低损伤目标;第2类构造(定义为Type II)聚焦于砌体填充墙构造优化^[18-26],如刘利花^[18]、周云等^[19-20]、魏雨良^[22]和Lu等^[25-26]等,通过在墙体中设置变形缝或者阻尼层、耗能构件等耗能构造,改变墙体在整体结构受水平荷载时的传力机制和破坏模式,使耗能构件代替墙体在大变形下起主导作

用,从而控制甚至避免墙体损伤。此外,砌体填充墙的损伤形态是目前建筑震害评估和韧性评价的关键指标之一,国内外众多学者针对不同墙体砌筑材料的砌体墙损伤形态开展研究,如谢贤鑫等^[27-28]、滕睿等^[29]、贺安琪等^[30]、王卓鑫^[31]、Morandi等^[7]、Chiozzi等^[32],结合墙体在试验过程裂缝开展过程、破碎坠落现象和修复成本等给出墙体损伤程度划分准则,并建立了以墙体层间位移角或者墙体等效斜撑杆应变变形为工程需求的易损性曲线^[7,33]。然而,现有研究主要集中于传统刚性连接构造的砌体填充墙,各类损伤可控型构造措施对于砌体填充墙易损性的对比研究相对缺乏,相关类型墙体的损伤指标定义尚未形成统一标准,亟需进一步深入探讨。

笔者基于17组63片实现损伤可控的砌体填充墙-RC框架试验数据,系统整理并归纳了各类型构造措施的关键特征。通过对试件初始刚度、峰值承载力、位移延性以及墙体损伤形态等性能指标的分析,深入探讨不同构造措施对整体结构受力性能的影响规律。

1 损伤可控型墙体试验数据库

1.1 损伤可控型墙体构造方案

当砌体填充墙-RC框架整体共同承受水平荷载时,传统刚性连接构造下墙体受到框架的梁柱变形形成等效斜撑的传力机制。此类受力模式不仅导致墙体出现开裂、倒塌等不可控损伤,框架的损伤形态也相较无填充墙的空框架较为严重。以上现象表明,现有填充墙-框架受力模式与传统设计假设中将填充墙作为非结构构件的理念存在显著偏差。为便于后续分析,统一将空框架定义为Bare Frame(简称BF),将传统刚性连接的填充墙-框架定义为Infill Frame(简称IF)。此外,基于现有可实现填充墙体损伤可控的构造措施以及其对比试验研究总结可知,墙体损伤可控型构造措施通常集中于墙与框架柱的竖向界面(IF-Column,简称IF-C)、墙与框架梁的水平界面(IF-Beam,简称IF-B)和墙体内部构造(IF-Wall,简称IF-W)3个关键区域。若试件中

采用多区域新型构造措施,则通过符号组合进行标识(如 IF-CB 代表试件采用了 IF-C 和 IF-B 两区域新型构造措施)。因此,现有损伤可控型构造措施布置区域如图 1 所示,各区域的构造措施具有以下特点:

1) 填充墙与框架柱的竖向界面设置变形缝。变形缝宽通常取 30 mm 或层高的 1/50 以满足框架的自由变形要求^[19],缝隙中通常填充柔性多孔材料或耗能材料。相比之下,柔性多孔材料主要起到框架与填充墙受力过程分离的目的,而耗能材料则通过材料滞回耗能实现框架柱与墙体间的变形差,从而降低墙体的损伤开展。

2) 填充墙与框架梁的水平界面分为传统构造和设缝两种方案。传统构造措施为墙与框架梁间不设缝并采用立砖斜砌,该形式多用于墙-柱间已设变形缝的情况中;另一种在墙与框架梁间设变形缝并通过柔性多孔材料或耗能材料填充,其作用机理与前述墙-柱间构造措施相似,可降低墙体的受损程度。

3) 填充墙内部设置新型构造措施。通过在墙体内部设置变形缝提高墙体高宽比,以改变墙体脆性破坏形态^[15],或将墙体分区域增设阻尼层或者耗能构件,通过材料耗能从而降低墙体受力或使墙体处于不受力状态,实现墙体损伤控制目的^[24]。

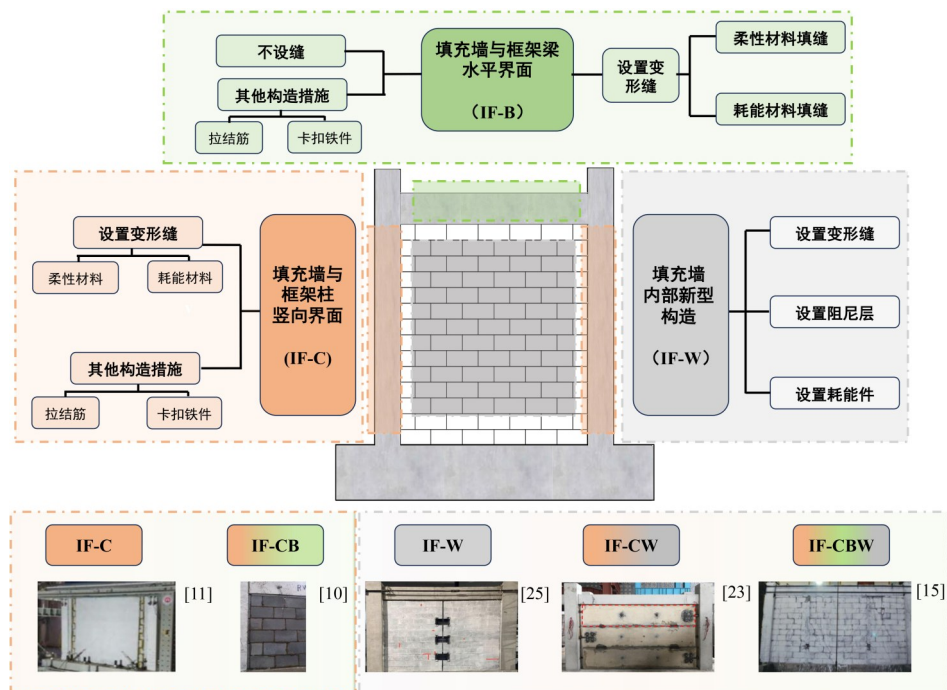


图 1 损伤可控型砌体填充墙构造方案特点

Fig.1 Characteristics of damage controllable masonry infill wall construction schemes

此外,为增强墙体的平面外稳定性,部分研究推荐填充墙与框架柱、梁之间增设拉结筋、卡口铁件或预埋件等。试验研究表明,墙体平面外稳定性对其平面内受力性能有明显影响^[8],因此在墙体构造方案设计中应重点考虑。

相对于传统刚性连接,采用损伤可控型墙体构造措施后,试件的墙-框协同工作机制和墙体损伤状态具有以下特征(如图 2 所示):1)削弱墙体在 RC 框架中等效斜撑作用,填充墙损伤程度降低或基本无损伤,该特征主要出现于采用 IF-C 类型以及其相关组合类型试件中;2)改变墙体与框架的传力机制,显著改变填充墙破坏模式,墙体损伤程度可控或基本无损伤,此类特征主要出现于采用 IF-W 类型以及其相关组合类型试件中。上述相关描述将在后续试件骨架曲线中进一步验证。

1.2 试验数据库信息

收集整理包含空框架、刚性连接以及损伤可控型砌体填充墙-RC 框架在内的共 17 组 63 片试件拟静力试验数据,建立相关数据库。为保证构造措施对比分析的有效性,试验数据库中各组试件均包含刚性连接型试件作为基准对象,且组内其余构造措施试件在 RC 框架尺寸、配筋形式、加载方式等方面均与刚性连接型试件一致,仅存在填充墙构造措施设置的不同。各组试件构造措施参数信息(包括墙-柱界面、墙-梁界面、墙内部构造以及砌块类型等)及其数据来源如表 1 所示,各组试件类型分布如图 3 所示。此外,依据构造措施作用区域分类标准,将 Type I 型(包括 IF-C、IF-CB)和 Type II 型(包括 IF-W、IF-CW 和 IF-CBW 等)试件分别归类为对比组,相关试件组号如表 2 所示。

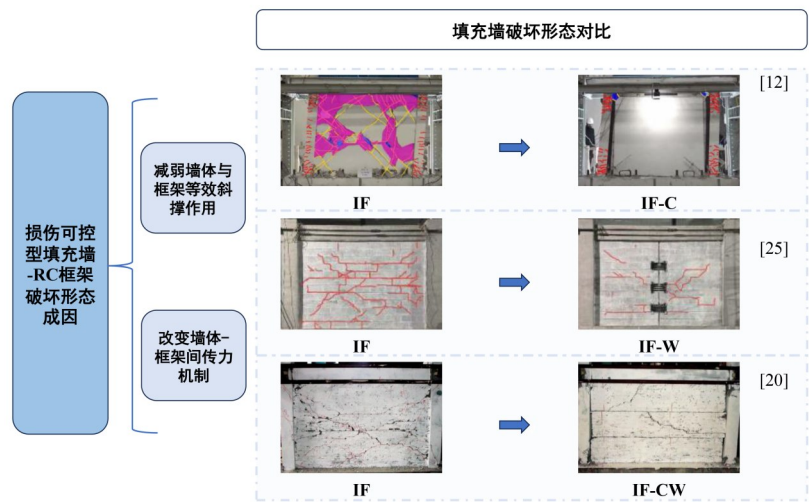


图 2 损伤可控型砌体填充墙破坏形态

Fig.2 Failure mode of damage controllable masonry infill wall construction schemes

表 1 试件来源及分组情况

Table 1 Source and grouping of test specimens

组号	本文定义	原文编号	墙-柱界面	墙-梁截面	墙内部构造	砌块类型	数据来源	发表时间
1	BF	TNT						
	IF	TA2	刚性连接	刚性连接	无	多孔砖	[7-8]	2018
	IF-CBW	TSJ1	挤塑板塞缝	挤塑板塞缝	砂浆层设滑动构件	多孔砖		
2	BF	BF						
	IF	RFP	刚性连接	刚性连接	无	多孔砖		
	IF-CB-1	DRFFP1	高阻尼橡胶塞缝	高阻尼橡胶塞缝	无	多孔砖	[9]	2022
	IF-CB-2	RRFFP	高弹性橡胶塞缝	高阻尼橡胶塞缝	无	多孔砖		
3	BF	BF						
	IF	RFH	刚性连接	刚性连接	无	空心砖	[9]	2022
	IF-CB	DRFFH	高阻尼橡胶塞缝	高阻尼橡胶塞缝	无	空心砖		
4	BF	PF						
	IF	GWF1	刚性连接	刚性连接	无	空心砌块	[10]	2014
	IF-CB	RWF1	泡沫聚苯板塞缝	泡沫聚苯板塞缝	无	空心砌块		
5	BF	PF						
	IF	GWF2	刚性连接	刚性连接	两端设置构造柱	空心砌块	[10]	2014
	IF-CB	RWF2	泡沫聚苯板塞缝	泡沫聚苯板塞缝	两端设置构造柱	空心砌块		
6	BF	NF						
	IF	TF	刚性连接	刚性连接	无	加气砖		
	IF-CB	FF	岩棉塞缝	岩棉塞缝	无	加气砖	[11-12]	2021
	IF-C-1	FF1	U型卡件+岩棉塞缝	刚性连接	无	加气砖		
	IF-C-2	FF2	T型卡件+岩棉塞缝	刚性连接	无	加气砖		
	IF-C-3	FF3	互锁砌块+岩棉塞缝	刚性连接	无	加气砖		
7	IF	C0	刚性连接	刚性连接	无	多孔砖		
	IF-CB	C1.5□	聚乙烯条塞缝	聚乙烯条塞缝	无	多孔砖	[13]	2018
	IF-C	C1.5//	聚乙烯条塞缝	刚性连接	无	多孔砖		
8	BF	KK						
	IF	GQK	刚性连接	刚性连接	无	空心砌块		
	IF-CB-1	RQK1	模塑聚苯板塞缝	模塑聚苯板塞缝	无	空心砌块	[14]	2016
	IF-CB-2	RQK2	模塑聚苯板塞缝	模塑聚苯板塞缝+墙-梁拉结筋	无	空心砌块		

续表							
组号	本文定义	原文编号	墙-柱界面	墙-梁截面	墙内部构造	砌块类型	数据来源 发表时间
9	BF	BF					
	IF	AFKJ1	刚性连接	刚性连接	Ⅲ型构造柱(1根)	加气砌块	[15] 2014
	IF-CBW-1	AFKJ2	模塑聚苯板塞缝	模塑聚苯板塞缝	Ⅰ型构造柱(3根)	加气砌块	
	IF-CBW-2	AFKJ3	模塑聚苯板塞缝	模塑聚苯板塞缝	Ⅱ型构造柱(3根)	加气砌块	
	IF-CBW-3	AFKJ4	模塑聚苯板塞缝	模塑聚苯板塞缝	Ⅱ型构造柱(2根)	加气砌块	
	IF-CBW-4	AFKJ5	模塑聚苯板塞缝	模塑聚苯板塞缝	Ⅱ型构造柱(2根)	加气砌块	
	IF-CBW-5	AFKJ6	模塑聚苯板塞缝	模塑聚苯板塞缝	Ⅱ型构造柱(2根)+中部竖缝	加气砌块	
10	BF	PF					
	IF	PIA-RC-IWF1	刚性连接	刚性连接	无	加气砌块	[16] 2019
	IF-C	PIA-FC-IWF1	模塑聚苯板+细石混凝土塞缝	刚性连接	无	加气砌块	
11	BF	PF					
	IF	PIA-RC-IWF2	刚性连接	刚性连接	无	加气砌块	[16] 2019
	IF-C	PIA-FC-IWF2	模塑聚苯板+细石混凝土塞缝	刚性连接	无	加气砌块	
12	BF	GPF-0					
	IF	GFP-1	刚性连接	刚性连接	无	加气砌块	[18] 2010
	IF-C	FPF-1	聚氨酯泡沫塞缝	刚性连接	无	加气砌块	
	IF-W-1	FPF-2	刚性连接	刚性连接	沿墙长中部设一道竖缝	加气砌块	
	IF-W-2	FPF-3	刚性连接	刚性连接	沿墙长三分线各设一道竖缝	加气砌块	
13	BF	BF					
	IF	CIWF	刚性连接	刚性连接	无	实心砌块	[19-20] 2013
	IF-CBW-1	DIWF	预留缝隙(未填缝)	阻尼层塞缝	沿墙高三分线各设阻尼层	实心砌块	
	IF-CBW-2	DIWF-C	砂浆塞缝	阻尼层塞缝	沿墙高三分线各设一道阻尼层	实心砌块	
	IF-CBW-3	DIWF-R	聚氨酯泡沫塞缝	阻尼层塞缝	沿墙高三分线各设一道阻尼层	实心砌块	
14	IF	FIW-1	刚性连接	刚性连接	无	空心砖	[21] 2022
	IF-W	FIW-2	刚性连接	刚性连接	沿墙高三分线各设一道阻尼层	空心砖	
15	IF	试件 1	刚性连接	刚性连接	无	实心砌块	[22] 2023
	IF-CW	试件 2	砂浆塞缝	刚性连接	沿墙高三分线各设一道 H 形滑轨	实心砌块	
16	BF	BF					
	IF	CWF	刚性连接	刚性连接	无	预制墙板	[23-24] 2023
	IF-CW-1	DWF	聚氨酯塑料塞缝+T 型卡件	刚性连接	墙板接缝设阻尼层	预制墙板	
	IF-CW-2	SWF	聚氨酯塑料塞缝+H 型卡件	刚性连接	墙板接缝设阻尼层	预制墙板	
17	IF	普通填充墙	刚性连接	刚性连接	无	空心砌块	[25-26] 2024
	IF-W	低损伤填充墙	刚性连接	刚性连接	中部设耗能件	空心砌块	

表 2 不同构造类型试件对比分组情况

Table 2 Grouping of specimens of different construction types

类型	试件组成	组号
Type I	BF、IF、IF-C、IF-CB	2、3、4、5、6、7、8、10、11、12
Type II	BF、IF、IF-W、IF-CW、IF-CBW	1、2、9、12、13、14、15、16、17

2 构造措施对砌体填充墙-RC 框架抗侧性能的影响讨论

砌体填充墙对于 RC 框架的抗侧性能具有显著

影响,当两者作为整体结构协同受力时,其初始刚度和峰值承载力相对于原空框架呈现明显提升。因此,为系统分析不同构造措施对于砌体填充墙-RC 框架抗侧性能的影响规律,基于各试验试件骨架曲线,提取其初始刚度 K_0 和峰值承载力 $F_{\max}$,并参考张令心等^[6]的研究,引入参数变化率 γ (如式(1)所示),以 IF 试件为对比基准开展定量评估,并结合统计检验方法探讨各类型构造措施对于设计参数影响是否存在显著性差异。此外,对于同一试件组中包含多种相似构造措施不同试件的情况(如 IF-CB-1、IF-CB-2)时,采用各相似构造措施试件计算

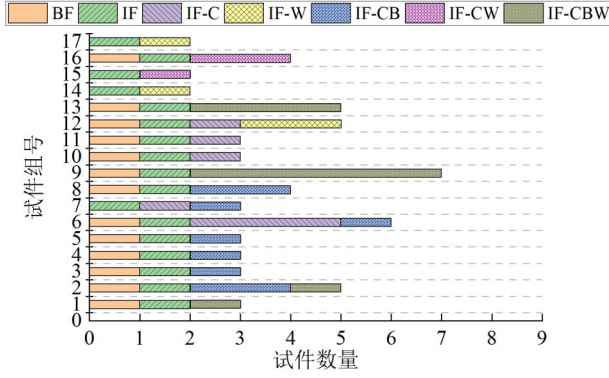


图3 试验数据库样本分布

Fig.3 Distribution of sample types in the experimental database

参数变化率的平均值进行统计分析,以准确反映不同构造措施对于试件性能参数的影响规律。

$$\gamma = \frac{x_i - x_{IF}}{x_{IF}} \quad (1)$$

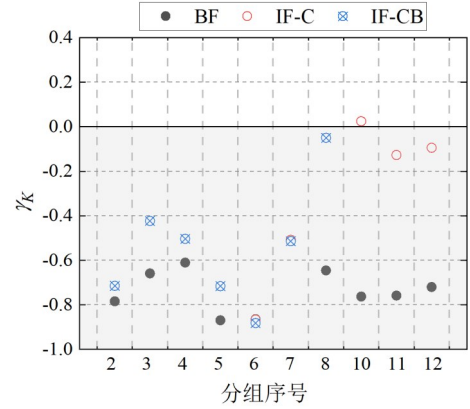
式中: γ 为参数变化率; x_i 为不同构造措施下试件的参数值; x_{IF} 为IF试件的参数值。

2.1 试件初始刚度

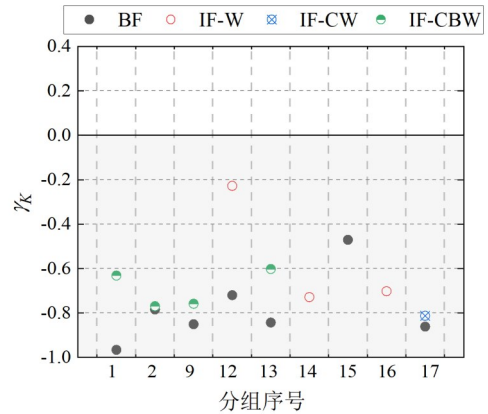
初始刚度反映了结构抵抗变形的能力,是影响整体结构刚度与应力分布的重要参数。为统一标准,以试件正向加载至位移角0.1%时所对应的承载力割线刚度作为试件的初始刚度 K_0 ^[34],并根据构造类型分组绘制试件的初始刚度变化规律如图4所示。

从图4可见,相较于IF试件,损伤可控型(Type I和Type II型)试件的 K_0 变化率为负值,且其绝对值小于BF相对于IF的 K_0 变化率,表明损伤可控型试件的 K_0 位于BF和IF之间(第10组除外,后续单独讨论)。具体来看,图4(a)显示Type I型试件相对于IF的 K_0 变化率 γ_K 在+2.43%~-88.13%之间(平均值-44.78%),而其中IF-CB试件的 γ_K (-54.32%)低于IF-C试件的 γ_K (-31.42%),表明IF-CB试件相对于IF-C试件在削弱初始刚度方面更为有效,更接近于BF试件。图4(b)显示Type II型试件相对于IF的 γ_K 在-22.78%~-81.25%(平均值-65.39%),相较于Type I型试件表现出更大的初始刚度削弱幅度。此外,为检验Type I型和Type II型构造措施对试件刚度影响规律是否存在显著差异,采用SPSS软件进行独立样本 t 检验分析。检验结果显示两种构造措施对于试件初始刚度影响的显著性水平为 $p=0.164>0.05$,说明两者对试件初始刚度的影响差异不具有统计学意义。

值得注意的是,分组10中Type I型试件的初始刚度相对于IF的初始刚度提高+2.43%,基于原



(a) Type I 类型



(b) Type II 类型

图4 试件初始刚度变化规律对比

Fig.4 Comparison of initial stiffness variation patterns of specimens

文献分析,该填充墙采用榫卯互锁式砌块,因砌块榫卯精度难以保证,墙体整体性存在较大不确定性,从而影响了试件的初始刚度。

由此可见,损伤可控型构造措施可以显著降低传统刚性连接构造措施中砌体填充墙引起的整体结构初始刚度升高现象,部分构造措施能够实现接近于空框架初始刚度的效果,从而降低砌体填充墙的加入对于整体结构刚度分布的影响。尽管墙体新型构造措施(Type II型)相较于墙-柱、墙-梁区域构造措施(Type I型)在试件初始刚度降低幅度变化较大,但基于现有数据分析表明两者之间的差异在统计学上不显著,仍需通过进一步试验研究予以深入验证。

2.2 试件峰值承载力

峰值承载力反映了结构在受力过程中所能承受的最大承载能力,是评估试件抗侧性能的重要参数之一。统计了试件正向加载时获取的峰值承载力 F_{max} ,并根据构造类型分组绘制试件的峰值承载力变化规律如图5所示。

从图5分析可知,相对于IF试件,损伤可控型

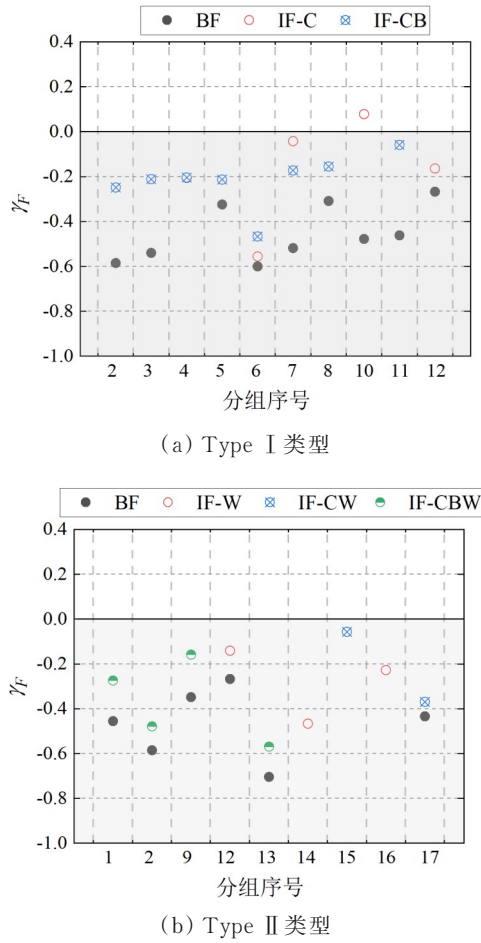


图5 试件峰值承载力变化规律对比

Fig.5 Comparison of max capacity variation patterns of specimens

(Type I 和 Type II 型)试件的 $F_{\max}$ 变化率 γ_F 为负值,且绝对值小于 BF 相对于 IF 的 γ_F ,表明损伤可控型试件的 $F_{\max}$ 整体介于 BF 和 IF 之间(第 10 组除外,其异常原因与前文分析一致)。具体而言,图 5(a)显示 Type I 型试件相对于 IF 的 γ_F 在 $+7.82\% \sim -46.67\%$ (平均值 -20.12%),其中 IF-CB 试件的 γ_F 相对于 IF-C 试件的 γ_F 变化不大。图 5(b)显示 Type II 型试件相对于 IF 的 γ_F 在 $-5.68\% \sim -56.87\%$ (平均值 -30.44%),相对于 Type I 型试件的 γ_F 降低变化幅度更大,表明其对于试件 $F_{\max}$ 的削弱更明显。同理,将 Type I 型和 Type II 型试件的峰值承载力变化率 γ 进行独立样本 t 检验,计算结果显示两者的显著性水平为 $p = 0.501 > 0.05$,表明 Type I 型和 Type II 型构造在试件峰值承载力变化率方面差异不具有统计学意义。

由此可见,损伤可控型构造措施降低了传统刚性连接措施中砌体填充墙对于整体结构峰值承载力的增强作用,表现为一定程度牺牲了整体结构的承载力储备。尽管墙体新型构造措施(Type II 型)

相较于墙-柱、墙-梁区域构造措施(Type I 型)在试件峰值承载力降低幅度较大,但现有数据未能表明两者在试件峰值承载力影响方面存在显著性差异,仍需通过更多试验研究加以验证。

3 不同构造措施对砌体填充墙-RC 框架损伤形态影响讨论

砌体填充墙的损伤形态是开展易损性分析的基础之一,传统刚性连接构造下砌体填充墙损伤破坏形态相对较为严重,研究中多采用墙体的裂缝宽度或墙面完整度用于评价墙体的损伤形态。收集的损伤可控型填充墙构造方案能够在一定程度上有效改善墙体损伤形态,特别是对于整体结构过峰值点后的力学性能影响较为明显。因此,从试件延性系数、墙体损伤形态和骨架曲线下落段 3 方面展开不同构造措施对于砌体填充墙-RC 框架损伤形态的定量和定性讨论。

3.1 试件延性系数

延性系数 μ 反映结构从屈服到出现显著破坏的变形能力, μ 越高表明试件具有更强的抗震变形能力。基于试件的骨架曲线,提取极限位移和屈服位移,并以二者之比计算延性系数。屈服位移通过能量法确定,极限位移则取试件承载力下降至其峰值承载力 85% 时对应的位移^[35]。以 IF 试件为基准绘制,根据构造类型分组绘制试件延性系数变化规律如图 6 所示。部分试件组由于在最终结束加载时其并未下降至其峰值承载力的 85%,不计入讨论。

从图 6 分析可知,相对于 IF 试件,损伤可控型(Type I 和 Type II 型)的 μ 变化幅度 γ_μ 为正值,说明该类型试件的延性优于同类型刚性连接试件。其中,Type I 型试件相对于 IF 试件的 μ 变化幅度 γ_μ 为 $+6.40\% \sim +98.47\%$ (平均值 $+31.32\%$),Type II 型试件延性系数相对于 IF 试件的 μ 变化幅度 γ_μ 为 $+23.81\% \sim +159.00\%$ (平均值 $+65.11\%$),相对于 Type I 型试件的 γ_μ 更大。同理,将 Type I 型和 Type II 型试件的位移延性变化率 γ 进行独立样本 t 检验,结果显示两者的显著性水平为 $p = 0.05$,表明 Type II 型构造措施在提高延性方面表现更优。

此外,部分 BF 试件相对于 IF 的 μ 变化 γ_μ 出现下降异常情况(如第 4 组、第 5 组和第 12 组)。结合原文分析,第 4 组、第 5 组和第 12 组均采用了低强度的蒸压加气混凝土砌块,在墙-框协同受力变形时墙体对于 RC 框架的变形约束较小,尽管采用了刚性连接方式但填充墙的加入仍能提高墙-框作为整体

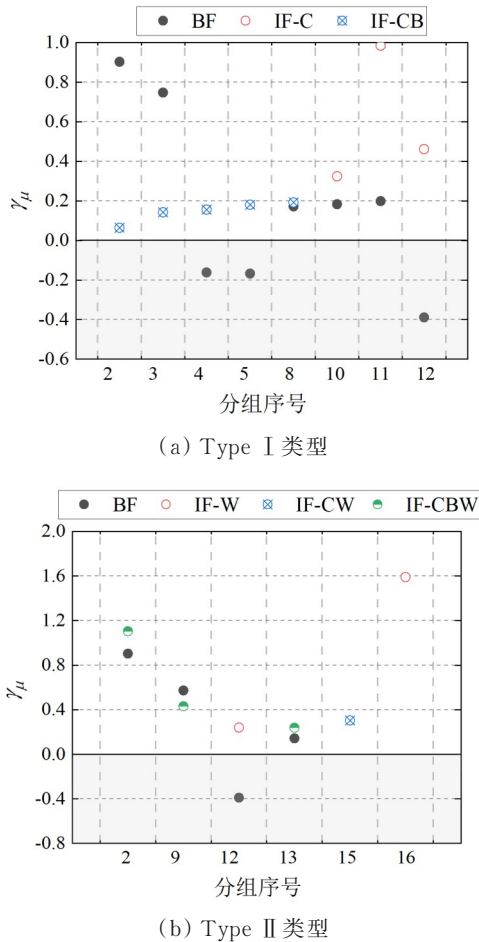


图6 试件延性系数变化规律对比

Fig.6 Comparison of coefficient of ductility variation patterns of specimens

结构的延性系数。由此可知,填充墙的加入并不一定会导致整体结构延性系数的降低,合理的墙-框强度匹配也能够提升整体结构的延性^[36]。

3.2 试件损伤状态

砌体填充墙的损伤形态是结构易损性评估的基础指标之一。图2现象表明,Type I型试件的墙体中裂缝出现数量、区域和开展宽度等相对于IF试件有所降低;而Type II型试件不仅展现出墙体较低的损伤水平,部分构造措施甚至于实现了墙体无损伤状态,显著改变了墙体损伤形态。因此,参考苏启旺等^[21]的研究提出的墙体损伤率定义($\delta = \text{损伤面积} / \text{墙面总面积}$),选取具有完整损伤形态的试件组(包含IF以及各类新型构造试件),计算各试件组在相同位移角条件下的墙面损伤率,并绘图如图7所示。图中数值为各类型措施试件相较于IF试件的墙面损伤降低幅度。从图7所示可知,采用整体性好的墙体材料(如墙板、实心砖等)相对于空心砖的墙体损伤较低,Type I型和Type II型构造措施可显著降低刚性连接构造的墙体损伤率(均在30%以上),实现墙体低损伤或无损伤目标。然而,受限

于现有样本数量,暂未开展构造措施对墙面损伤率影响规律的统计分析,未来将基于更多样本数据深入探讨,为损伤可控型构造措施的优化设计提供了理论依据。

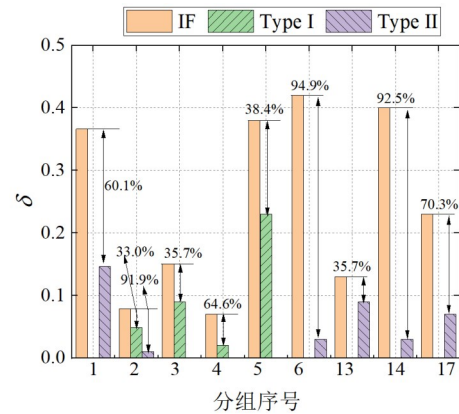


图7 试件墙面损伤率对比

Fig.7 Comparison of damaged area ratio of specimens

3.3 试件骨架曲线下降段

试件骨架曲线下降段可直观反映结构过峰值点后的退化性能与墙-框相互作用机制。选取具有代表性的试件组,以IF试件的峰值承载力为基准,绘制各组内试件的归一化骨架曲线如图8所示。部分试件组中因不包含BF试件而不计入讨论。结合各组试件中填充墙的破坏形态,归纳总结3种具有代表性的下降段曲线特征,具体如下:

1) 墙体持续受力型。过峰值点后填充墙继续参与工作,下降段试件的承载力高于同位移角下BF承载力,并随着位移角的增大该差异化逐渐降低,最终接近于BF(见图8(a))。此类型骨架曲线多出现于采用墙-框界面构造措施的Type I型试件,墙-框界面采用设缝并通过柔性材料或耗能材料填充等方案(如Type I型所包含所有分组)。此类构造措施减弱了填充墙对RC框架的等效斜撑作用,但墙-框仍保持一定程度的协同工作,直到填充墙彻底脱离或RC框架发生破坏,最终墙体出现一定程度损伤。

2) 墙体退出受力型。过峰值点后填充墙不参与工作,下降段试件的承载力下降趋势与BF一致,且最终接近于BF(见8(b))。该类型骨架曲线多出现于采用墙体内部构造措施的Type II型试件,墙体内设置了具有变形能力但无承载力的耗能材料(如Type II型中分组2、9、12、13)。此类构造措施中耗能材料协调了墙-框间的变形差,墙体不再参与受力,最终墙体出现较少损伤。

3) 耗能构件替代型。过峰值点后填充墙不参与工作,下降段试件的承载力始终高于同位移角下

BF,且最终仍高于BF(见8(c))。该类型骨架曲线多出现于采用墙体内容构造措施的Type II型试件中,墙体内设置了具有承载能力的耗能构件(如Type II型中分组1、16)。此类构造措施中耗能构件替代墙体参与试件受力,墙-框间不再协同工作,且耗能构件提供一定承载力,最终墙体基本不发生损伤。

综上所述,3类骨架曲线分别代表着不同构造措施下墙-框相互作用机制的改变,验证了构造措施

与结构损伤状态之间存在明显关联。损伤可控型构造措施能够优化传统刚性连接下墙-框间的相互作用关系,提升墙体位移延性和损伤控制能力。特别是当墙体采用阻尼材料或者耗能构件时能够改变墙-框间的相互作用关系从而显著提高试件的位移延性,相较于仅采用墙-柱、墙-梁区域新型连接措施对于墙体的改善效果更佳。以上构造措施可显著提高砌体填充墙不同损伤水准对应的层间位移角,有效实现墙体韧性水平的提升。

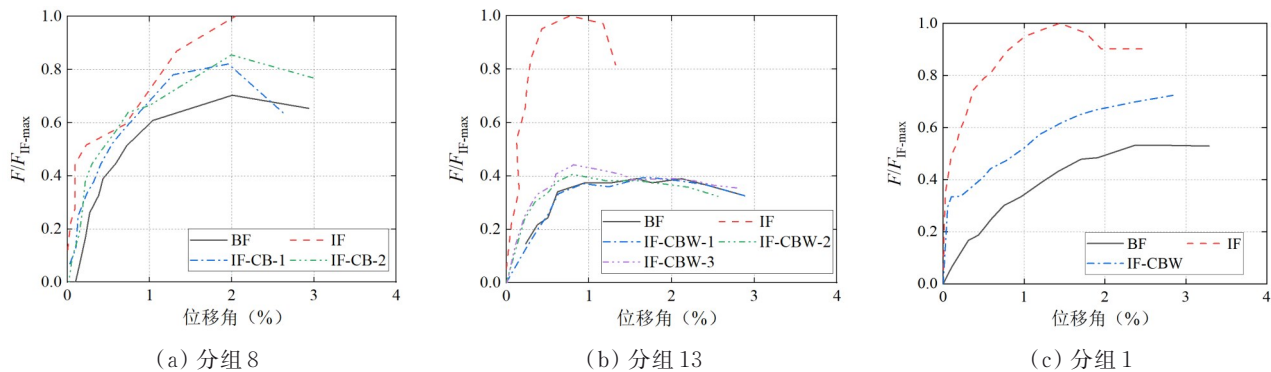


图8 试件归一化骨架曲线变化规律对比

Fig.8 Comparison of normalized skeleton curve patterns of specimens

4 结论

通过对17组63片实现损伤可控的砌体填充墙-RC框架拟静力试验数据进行分析,系统总结各类型构造措施特点,对比不同类型措施对试件受力性能的影响规律,得出以下结论:

1)实现砌体填充墙损伤可控构造措施主要集中于墙-框(包含墙-柱、墙-梁)界面和墙体内部构造两个区域。在墙-框界面区域,通过设置变形缝并采用柔性材料或耗能材料填充,有效减弱了墙-框间的相互作用,降低墙体因框架变形而产生的附加损伤;在墙体内部构造区域,通过设置变形缝、柔性材料或耗能构件方式,实现对墙体的分区损伤控制,改变了墙体的破坏模式,墙体损伤程度可控或显著降低。

2)损伤可控型构造措施有效降低了砌体填充墙对整体结构刚度提升的影响,但一定程度上牺牲了墙-框承载力储备。虽然相对于墙-框界面构造措施,墙体内部构造措施对于试件的刚度和峰值承载力具有更大的降低幅度,然而经独立样本 t 检验表明两者之间未表现出显著性差异,仍需进一步试验验证。

3)相较于墙-框界面构造措施,墙体内部构造措施在试件延性提升方面更为显著,且两者相较传统刚性连接措施试件的墙面损伤率降低超过30%。

通过试件骨架曲线下降段分析表明,损伤可控型试件在过峰值点表现出3种典型特征:墙体继续参与工作、墙体不参与工作和耗能构件替代墙体参与工作等。以上构造措施均优化了墙-框协同工作关系,实现了墙体低损伤或无损伤目标。因此,损伤可控型构造措施能够有效提高砌体填充墙的抗震性能和韧性水平,墙体内部构造措施相较于墙-框界面构造措施对于砌体填充墙-RC框架受力性能改善较优,未来可作为实现墙体韧性水平提升的首选方案。

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,2008,29(4):1-9.
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Xi'an Jiaotong University, Beijing Jiaotong University. Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9. (in Chinese)
- [2] 郭子雄,吴毅彬,黄群贤.砌体填充墙框架结构抗震性能研究现状与展望[J].地震工程与工程振动,2008,28(6):172-177.
GUO Z X, WU Y B, HUANG Q X. Research and development in seismic behavior of infilled-frame structures

- [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(6): 172-177. (in Chinese)
- [3] 翟长海, 王晓敏, 孔璟常, 等. 砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能研究现状及展望[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(6): 1-13.
- ZHAI C H, WANG X M, KONG J C, et al. Progress and prospect of seismic performance of masonry-infilled RC frames [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(6): 1-13. (in Chinese)
- [4] 周云, 陈章彦, 李定斌. 抗震韧性非结构构件研究与应用[J]. 土木工程学报, 2022, 55(6): 15-25, 35.
- ZHOU Y, CHEN Z Y, LI D B. Research and application of seismic resilient non-structural component [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(6): 15-25, 35. (in Chinese)
- [5] 林超, 郭子雄, 黄群贤, 等. 足尺砌体填充墙 RC 框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 30-37.
- LIN C, GUO Z X, HUANG Q X, et al. Experimental study on seismic behavior of full-scale infilled RC frames [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(9): 30-37. (in Chinese)
- [6] 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.
- ZHANG L X, CHEN Z P, XIE X X. Effect of different infill wall construction methods on the seismic performance of RC frames [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(4): 26-36. (in Chinese)
- [7] MORANDI P, MILANESI R R, MAGENES G. Innovative solution for seismic-resistant masonry infills with sliding joints: In-plane experimental performance [J]. Engineering Structures, 2018, 176: 719-733.
- [8] MORANDI P, HAK S, MAGENES G. Performance-based interpretation of in-plane cyclic tests on RC frames with strong masonry infills [J]. Engineering Structures, 2018, 156: 503-521.
- [9] 张永兵, 郭新华, 李勇, 等. 柔性连接填充墙 RC 框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 187-195.
- ZHANG Y B, GUO X H, LI Y, et al. Experimental study on seismic performance of masonry-infilled RC frame building with flexible connection [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6): 187-195. (in Chinese)
- [10] 周晓洁, 程昌辉, 杜金鹏, 等. 蒸压加气混凝土砌块砌体填充墙框架结构抗震性能试验[J]. 世界地震工程, 2022, 38(2): 46-57.
- ZHOU X J, CHENG C Y, DU J P, et al. Seismic performance test of frame structure infilled with steaming gassed concrete masonry [J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(2): 46-57. (in Chinese)
- [11] ERDEM M M, EMSEN E, BIKÇE M. Experimental and numerical investigation of new flexible connection elements between infill walls-RC frames [J]. Construction and Building Materials, 2021, 296: 123605.
- [12] BIKÇE M, EMSEN E, ERDEM M M, et al. An investigation on behavior of RC frames with non-interacting infill wall [J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112920.
- [13] TSANTILIS A V, TRIANTAFILLOU T C. Innovative seismic isolation of masonry infills using cellular materials at the interface with the surrounding RC frames [J]. Engineering Structures, 2018, 155: 279-297.
- [14] 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 D Y. Study on seismic performance of new masonry infilled wall under different connection form [D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)
- [15] 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 H J, MAO J J, LIU X J. 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. (in Chinese)
- [16] 肖震宇. 带预制 AAC 砌块填充墙的 RC 框架结构的抗震性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- XIAO Z Y. Experimental research on behavior of reinforced concrete frame structure with prefabricated interlocking autoclaved aerated concrete block infilled wall [D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)
- [17] 砌体结构设计规范: GB 50003—2011 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Code for design of masonry structures: GB 50003—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)
- [18] 刘利花. 柔性连接砌体填充墙框架结构的抗震性能试验研究和非线性分析 [D]. 江苏 苏州: 苏州科技学院, 2010.
- LIU L H. Experimental study on seismic behavior and nonlinear analysis of flexible connection infill wall frame structure [D]. Suzhou, Jiangsu: Suzhou University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [19] 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.
- ZHOU Y, GUO Y Z, LIAO Y F, 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, 47(9): 21-28. (in Chinese)
- [20] 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.
- ZHOU Y, GUO Y Z, YANG G N, et al. Experimental study on seismic behavior of frame structure with damped infill wall [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(7): 89-96. (in Chinese)
- [21] 苏启旺, 李义, 卜庆涛, 等. 带水平滑移层的空心砖填充框架抗震性能试验[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(1): 223-228, 234.
- SU Q W, LI Y, BU Q T, et al. Experimental study on seismic behavior of fired hollow bricks infilled reinforced concrete frame with horizontal slip layers [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(1): 223-228, 234. (in Chinese)
- [22] 魏雨良. 新型分层填充墙 RC 框架结构抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- WEI Y L. Seismic performance of RC frame structures with innovative layered infill walls [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023. (in Chinese)
- [23] ZHANG C, YANG Z, YU T H, et al. Experimental and numerical studies of improving cyclic behavior of infilled reinforced concrete frame by prefabricated wall panels with sliding joints [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 77: 107524.
- [24] ZHANG C, YU T H, CHEN Z Y, et al. Seismic behavior of novel low-damage precast infill walls with sliding joints for reinforced concrete frame [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2022, 51(15): 3730-3754.
- [25] LU X, ZHA S M. Full-scale experimental investigation of the in-plane seismic performance of a novel resilient infill wall [J]. Engineering Structures, 2021, 232: 111826.
- [26] LU X, LEI J H, HAN M M. Seismic responses and loss evaluation of RC frame with slotted infill walls [J]. Engineering Structures, 2024, 311: 118214.
- [27] 谢贤鑫, 张令心, 曲哲. 基于修复性的砌体填充墙易损性研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(12): 159-167.
- XIE X X, ZHANG L X, QU Z. Repairability-based fragility analysis of masonry infills in buildings [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(12): 159-167. (in Chinese)
- [28] 谢贤鑫, 张令心, 曲哲. 面内往复荷载作用下足尺砌体填充墙的易损性研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(6): 161-169.
- XIE X X, ZHANG L X, QU Z. Seismic fragility of full-scale masonry infill subjected to in-plane cyclic loading [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(6): 161-169. (in Chinese)
- [29] 滕睿, 尚庆学, 钟湘, 等. 基于试验数据的砌体填充墙易损性研究[J]. 世界地震工程, 2018, 34(2): 96-103.
- TENG R, SHANG Q X, ZHONG X, et al. Fragility studies for masonry infill walls based on experimental data [J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(2): 96-103. (in Chinese)
- [30] 贺安琪, 赵作周. 蒸压加气混凝土砌块填充墙的易损性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(6): 178-185.
- HE A Q, ZHAO Z Z. Study on fragility of autoclaved aerated concrete block infills [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(6): 178-185. (in Chinese)
- [31] 王卓鑫. 新型柔性框架填充墙抗震性能试验与地震易损性分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022.
- WANG Z X. Seismic performance and fragility analysis of infilled frames with the improved flexible connection [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022. (in Chinese)
- [32] CHIOZZI A, MIRANDA E. Fragility functions for masonry infill walls with in-plane loading [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(15): 2831-2850.
- [33] 范阔, 张令心, 马加路. 基于试验现象的砖砌体墙体损伤状态划分及易损性研究[J]. 世界地震工程, 2023, 39(4): 185-193.
- FAN K, ZHANG L X, MA J L. Damage state definition based on experimental phenomena and fragility analysis of brick masonry walls [J]. World Earthquake Engineering, 2023, 39(4): 185-193. (in Chinese)
- [34] ALWASHALI H, TORIHATA Y, JIN K, et al. Experimental observations on the in-plane behaviour of masonry wall infilled RC frames; focusing on deformation limits and backbone curve [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(3): 1373-1397.
- [35] 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [36] PALLARÉS F J, PALLARÉS L. Experimental study on the response of seismically isolated masonry infilled steel frames during the initial stages of a seismic movement [J]. Engineering Structures, 2016, 129: 44-53.

(编辑 XXX)