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实现损伤可控构造措施的适用性,收集包含空框架、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不足的问题,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;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(2026)05-0024-11

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

CHI Bin[1], *DONG Zhixiang*[1], *QUAN Yuhu*[2], *YANG Xu*[2], *WANG Shiyu*[1]
(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: In order to evaluate the applicability of commonly used damage-controllable construction methods for masonry-infilled reinforced concrete (RC) frames, a comprehensive pseudo-static test database was established. The database under consideration comprised 63 specimens, which were divided into 17 groups of masonry-infilled RC frames. These groups included bare frames, rigid connections, and damage-controllable specimens. 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 findings of the present study indicate that damage-controllable construction methods are predominantly concentrated in two areas: the wall-frame interface and the internal structure of the wall. The configuration of the wall-frame interface is intended to mitigate 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

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.

failure modes. These damage-controllable construction methods can 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 with 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 the damaged area ratio of the specimens, rendering them a preferred choice for enhancing the resilience of the wall.

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

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，砌体填充墙因具有优良的保温、隔热及隔声性能而被广泛应用。然而，近年来的地震震害调查显示，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之一[3-4]。

近年来，学者围绕砌体填充墙与 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 类构造措施对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的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；柔性连接型和增设耗能构件型能改善墙体变形性能和损伤形态，被推荐应用于新建建筑中。以墙体损伤控制及优化墙-框协同工作机制为目标，上述两类墙体构造措施可进一步细化为两类：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”，墙体在大变形时能通过预设缝隙与 RC 框架结构脱离，实现墙体低损伤的目标；第 2 类构造(定义为 Type Ⅱ)聚焦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]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，众多学者针对不同墙体砌筑材料的砌体墙损伤形态开展了研究，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]结合墙体在试验中的裂缝开展过程、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，现有研究主要集中在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砌体填充墙易损性影响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，亟须进一步深入探讨。

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，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约束，呈现等效斜撑的受力特征。此类受力模式不仅导致墙体出现开裂、倒塌等不可控损伤，框架的损伤程度也比无填充墙的空框架更严重，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，总结现有可实现填充墙体损伤可控的构造措施及其对比试验研究可知，墙体损伤可控型构造措施通常集中在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)。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:

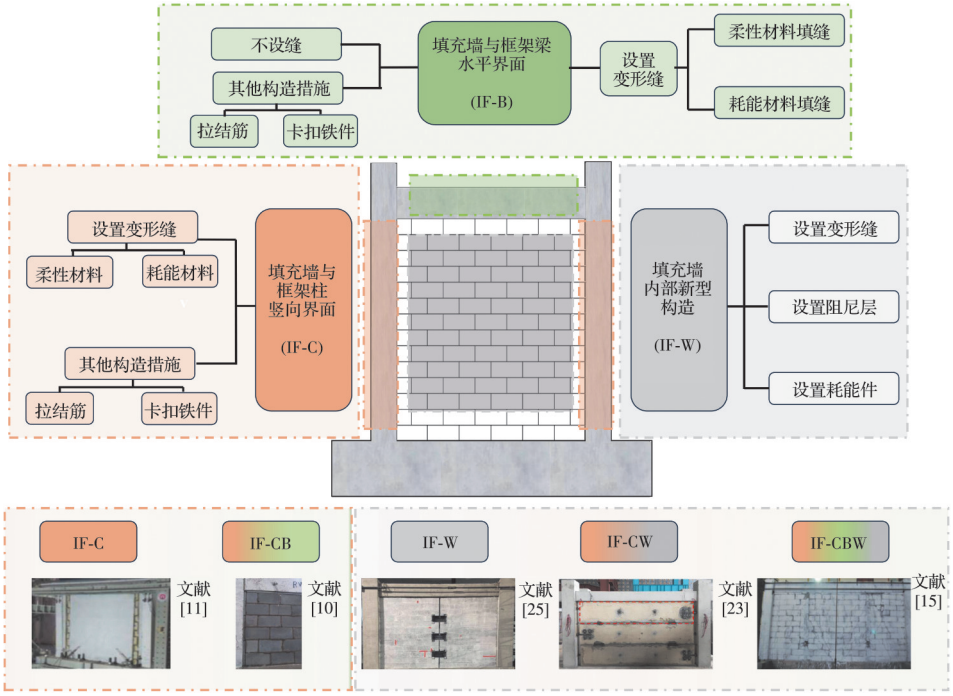


图1 损伤可控型砌体填充墙构造方案

Fig. 1 Damage-controllable masonry-infilled wall construction schemes

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。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,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;另一种构造措施为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以提高墙体高宽比,改变墙体脆性破坏形态[15],或将墙体分区域增设阻尼层或耗能构件,通过材料耗能来降低墙体受力或使墙体处于不受力状态,以实现墙体损伤控制的目的[24]。

此外,为增强墙体的平面外稳定性,部分研究推荐在填充墙与框架柱、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框架中的等效斜撑作用,填充墙损伤程度降低或基本无损伤,该特征主要出现在采用IF-C类型及相关组合类型的试件中;2)改变墙体与框架的传力机制,显著改变填充墙的破坏模式,墙体损伤程度可控或基本无损伤,此类特征主要出现在采用IF-W类型及相关组合类型试件中。

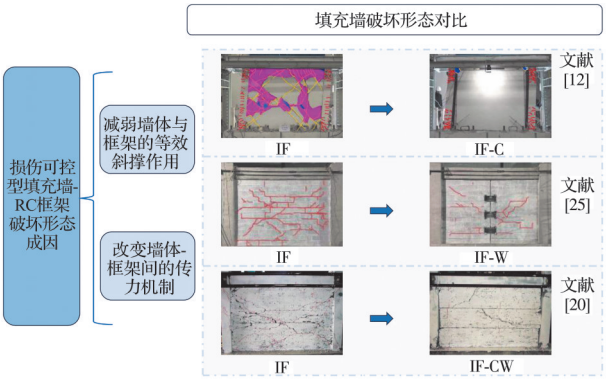


图2 损伤可控型砌体填充墙破坏形态

Fig. 2 Failure modes of damage-controllable masonry-infilled wall construction schemes

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17组63片试件拟静力试验数据,建立数据库。为确保构造措施对比分

析的有效性，试验数据库中各组试件均以刚性连接型试件为基准对象，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。

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					文献[7-8]	2018年
	IF	TA2	刚性连接	刚性连接	无	多孔砖		
	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					文献[9]	2022年
	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		
	IF-CB-2	RRFFP	高弹性橡胶塞缝	高阻尼橡胶塞缝	无	多孔砖		
	IF-CBW	DRFFP2	高弹性橡胶塞缝	高阻尼橡胶塞缝	变砂浆强度	多孔砖		
3	BF	BF					文献[9]	2022年
	IF	RFH	刚性连接	刚性连接	无	空心砖		
	IF-CB	DRFFH	高阻尼橡胶塞缝	高阻尼橡胶塞缝	无	空心砖		
4	BF	PF					文献[10]	2014年
	IF	GWF1	刚性连接	刚性连接	无	空心砌块		
	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					文献[10]	2014年
	IF	GWF2	刚性连接	刚性连接	两端设置构造柱	空心砌块		
	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					文献[11-12]	2021年
	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		
	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	文献[13]	2018年
	IF-CB	C1.5□	聚乙烯条塞缝	聚乙烯条塞缝	无	多孔砖		
	IF-C	C1.5//	聚乙烯条塞缝	刚性连接	无	多孔砖		
8	BF	KK					文献[14]	2016年
	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		
	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		
9	BF	BF					文献[15]	2014年
	IF	AFKJ1	刚性连接	刚性连接	Ⅲ型构造柱（1根）	加气砌块		
	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					文献[16]	2019年
	IF	PIA-RC-IWF1	刚性连接	刚性连接	无	加气砌块		
	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		

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
11	BF	PF					文献[16]	2019年
	IF	PIA-RC-IWF2	刚性连接	刚性连接	无	加气砌块		
	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					文献[18]	2010年
	IF	GFP-1	刚性连接	刚性连接	无	加气砌块		
	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					文献[19-20]	2013年
	IF	CIWF	刚性连接	刚性连接	无	实心砌块		
	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	文献[21]	2022年
	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	文献[22]	2023年
	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					文献[23-24]	2023年
	IF	CWF	刚性连接	刚性连接	无	预制墙板		
	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	文献[25-26]	2024年
	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		

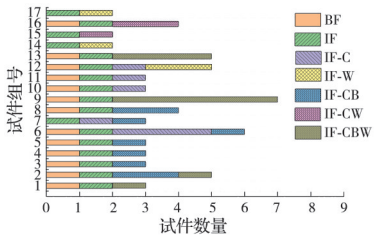


图3 试验数据库样本分布

Fig. 3 Distribution of sample types in the test database

表2 不同构造类型试件分组情况

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

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比原空框架明显提升。因此,为系统分析不同构造措施对砌体填充墙-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设计参数的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),采用各相似构造措施试件计算参数变化率

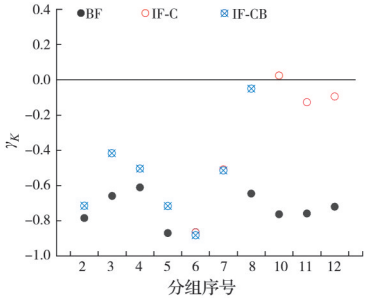
的平均值，然后进行统计分析，以准确反映不同构造措施对试件性能参数的影响规律。

$$\gamma=\frac{x_i-x_{\mathrm{IF}}}{x_{\mathrm{IF}}} \tag{1}$$

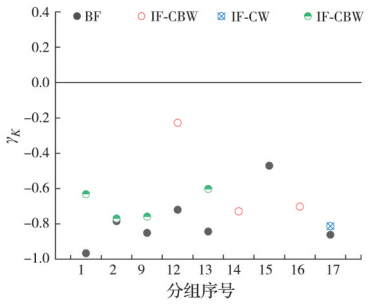
式中：γ为参数变化率；x_i为不同构造措施下试件的参数值；x_{IF}为 IF 试件的参数值。

2.1　试件初始刚度

初始刚度K_0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% 时对应的承载力割线刚度为试件的初始刚度K_0[34]，并根据构造类型分组绘制试件的初始刚度变化率分布对比图，如图 4 所示。



(a) Type Ⅰ



(b) Type Ⅱ

图 4　试件初始刚度变化率分布对比

Fig. 4　Comparison of the distribution of initial stiffness change rate of specimens

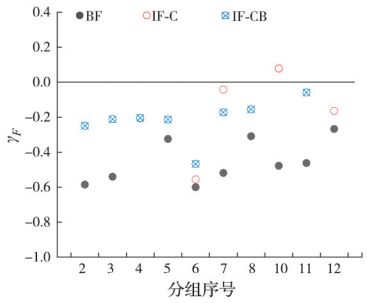
由图 4 可见，相较 IF 试件，损伤可控型（Type Ⅰ和 Type Ⅱ）试件的K_0变化率为负值，且其绝对值小于 BF，表明损伤可控型试件的K_0位于 BF 和 IF 之间（第 10 组除外，后续单独讨论）。具体来看，图 4(a)显示，相对于 IF，Type Ⅰ试件的K_0变化率γ_K在+2.43%～−88.13% 之间（平均值为−44.78%），而其中 IF-CB 试件的γ_K（−54.32%）低于 IF-C 试件（−31.42%），表明 IF-CB 试件相对于 IF-C 试件在削弱初始刚度方面更为有效，更接近于 BF 试件。图 4(b)显示，相对于 IF，Type Ⅱ试件试件的γ_K在−22.78%～−81.25% 之间（平均值为−65.39%），相较于 Type Ⅰ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构造措施对试件刚度的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，两种构造措施对试件初始刚度影响的显著性水平$p=0.164>0.05$，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，第 10 组中 Type Ⅰ试件的初始刚度相对于 IF 提高了+2.43%，对原文献分析发现，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。

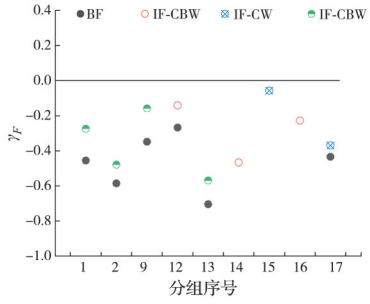
由此可见，损伤可控型构造措施能显著改善传统刚性连接构造措施中砌体填充墙引起的整体结构初始刚度升高现象，部分构造措施能实现接近于空框架初始刚度的效果，从而降低砌体填充墙的加入对整体结构刚度分布的影响。尽管墙体新型构造措施（Type Ⅱ）比墙-柱、墙-梁区域构造措施（Type Ⅰ）的试件初始刚度平均降低幅度更显著，但基于现有数据分析发现，两者之间的差异在统计学上不显著，仍需通过进一步试验研究予以验证。

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峰值承载力变化率分布对比图，如图 5 所示。



(a) Type Ⅰ



(b) Type Ⅱ

图 5　试件峰值承载力变化率分布对比

Fig. 5　Comparison of the distribution of maximum load-bearing capacity change rate of specimens

分析图5可知,相对于IF试件,损伤可控型(Type Ⅰ和Type Ⅱ)试件的F_{max}变化率γ_F为负值,且绝对值小于BF,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,相对于IF,Type Ⅰ试件的γ_F在+7.82%~-46.67%之间(平均值为-20.12%),其中IF-CB试件的γ_F相对于IF-C试件变化不大。图5(b)显示,相对于试件IF,Type Ⅱ试件的γ_F在-5.68%~-56.87%之间(平均值为-30.44%),相对于Type Ⅰ试件,降低变化幅度更大,表明其对试件F_{max}的削弱更明显。同理,将Type Ⅰ和Type Ⅱ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$p=0.501>0.05$,表明Type Ⅰ和Type Ⅱ构造在试件峰值承载力变化率方面的差异不具有统计学意义。

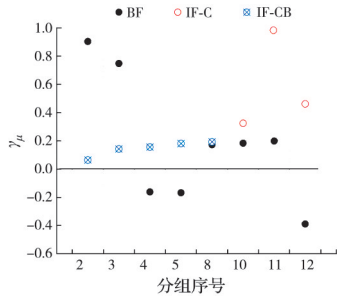
由此可见,损伤可控型构造措施降低了传统刚性连接措施中砌体填充墙对整体结构峰值承载力的增强作用,表现为一定程度上牺牲了整体结构的承载力储备。尽管墙体新型构造措施(Type Ⅱ)相较于墙-柱、墙-梁区域构造措施(Type Ⅰ)的试件峰值承载力变化率平均降低幅度较显著,但现有数据未证实两者在试件峰值承载力影响方面存在显著性差异,仍需通过更多试验研究加以验证。

3 不同构造措施对砌体填充墙-RC框架损伤形态的影响

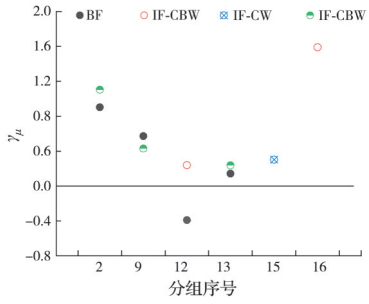
砌体填充墙的损伤形态是开展易损性分析的基础之一,传统刚性连接构造下砌体填充墙损伤破坏相对较为严重,研究中多采用墙体的裂缝宽度或墙面完整度来评价墙体的损伤形态。收集的损伤可控型填充墙构造方案能在一定程度上改善墙体损伤形态,特别是对整体结构过峰值点后的力学性能影响较为明显。因此,从试件延性系数、墙体损伤形态和骨架曲线下降段3方面对不同构造措施对砌体填充墙-RC框架损伤形态的影响进行定量和定性讨论。

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越高表明试件抗震变形能力越强。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的85%时对应的位移[35]。以IF试件为基准,根据构造类型分组绘制试件延性系数变化率分布对比图,如图6所示。部分试件组在最终结束加载时未下降至其峰值承载力的85%,不计入讨论。



(a) Type Ⅰ



(b) Type Ⅱ

图6 试件延性系数变化率分布对比

Fig. 6 Comparison of the distribution of ductility coefficient change rate of specimens

分析图6可知,相对于IF试件,损伤可控型(Type Ⅰ和Type Ⅱ)试件的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,相对于IF试件,Type Ⅰ试件的μ变化幅度γ_μ在+6.40%~+98.47%之间(平均值为+31.32%),相对于试件IF,Type Ⅱ试件延性系数μ变化幅度γ_μ在+23.81%~+159.00%之间(平均值为+65.11%),相对于Type Ⅰ试件γ_μ更大。同理,将Type Ⅰ和Type Ⅱ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$p=0.05$,表明Type Ⅱ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试件μ变化幅度γ_μ出现下降异常情况(如第4组、第5组和第12组)。结合原文进行分析发现,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 所示现象表明，Type Ⅰ试件的墙体裂缝出现数量、区域和开展宽度等相对于 IF 试件有所降低；而 Type Ⅱ试件不仅展现出墙体较低的损伤水平，部分构造措施甚至实现了墙体无损伤，显著改变了墙体的损伤形态。因此，参考苏启旺等[21]提出的墙体损伤率定义（损伤率 δ = 损伤面积/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制成图，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。由图 7 可知，相对于空心砖，整体性好的墙体材料（如墙板、实心砖等）墙体损伤较低，Type Ⅰ和 Type Ⅱ构造措施能显著降低刚性连接构造的墙体损伤率（降低均超过 30%），实现墙体低损伤或无损伤目标。然而，受限于样本数量，未开展构造措施对墙面损伤率影响规律的统计分析。

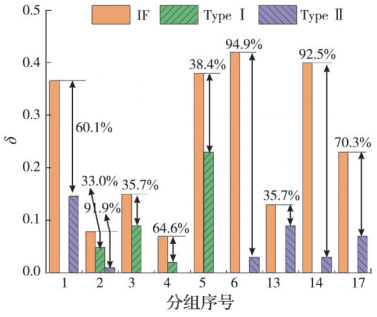


图 7　试件墙面损伤率对比

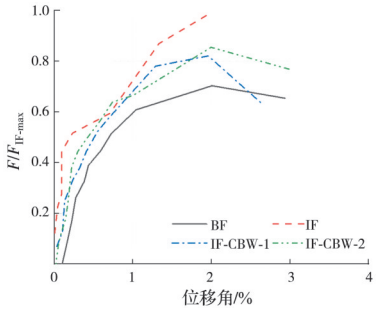
Fig. 7　Comparison of wall damage ratio of specimens

3.3　试件骨架曲线下降段

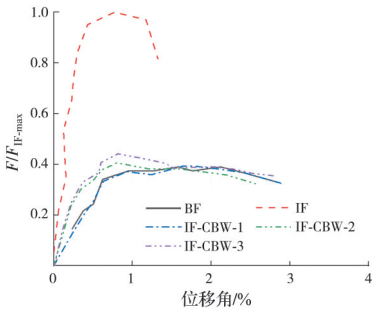
试件骨架曲线下降段能直观反映结构过峰值点后的退化性能及墙-框的相互作用机制。选取具有代表性的试件组，以 IF 试件的峰值承载力为基准，绘制各组内试件的归一化骨架曲线，如图 8 所示。部分试件组中因不包含 BF 试件而不计入讨论。结合各组试件中填充墙的破坏形态，归纳总结出 3 种具有代表性的下降段曲线特征。

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 的承载力，且随着位移角的增大，该差异逐渐降低，最终接近 BF（见图 8(a)）。此类型骨架曲线多出现在采用墙-框界面构造措施的 Type Ⅰ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包含的所有分组）。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。

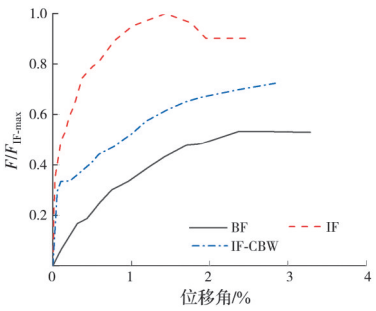
2）墙体退出受力型。过峰值点后填充墙不参与工作，下降段试件的承载力下降趋势与 BF 一致，且最终接近 BF（见 8(b)）。该类型骨架曲线多出现在采用墙体内部构造措施的 Type Ⅱ试件，墙体内设置了具有变形能力但无承载力的耗能材料（如 Type Ⅱ中 2、9、12、13 组）。此类构造措施中耗能材料协调了墙-框间的变形差，墙体不再参与受力，最终墙体出现较少损伤。



(a) 第 8 组



(b) 第 13 组



(c) 第 1 组

图 8　不同构造措施下试件归一化骨架曲线对比

Fig. 8　Comparison of normalized skeleton curves of specimens under different construction methods

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的 BF，且最终仍高于 BF（见 8(c)）。该类型骨架曲线多出现在采用墙体内部构造措施的 Type Ⅱ试件中，墙体内设置了具有承载能力的耗能构件（如 Type Ⅱ中第 1、16 组）。此类构造措施中耗能构件替代墙体参与受力，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耗能构件时,能改变墙-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,该构造措施对墙体的改善效果更佳。以上构造措施能显著提高砌体填充墙不同损伤水准对应的层间位移角,实现墙体韧性水平的提升。

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在墙-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,降低了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-框的承载力储备。相对于墙-框界面构造措施,虽然墙体内部构造措施对试件的刚度和峰值承载力降幅更大,但独立样本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表现更为显著,且与传统刚性连接措施试件相比,两者的墙面损伤率均降低超过30%。对试件骨架曲线下降段分析发现,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、墙体不参与工作及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有效提高砌体填充墙的抗震性能和韧性水平,相较于墙-框界面构造措施,墙体内部构造措施对砌体填充墙-RC框架受力性能的改善更优,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, Xinan 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, 程昌恽, 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] GB 50003—2011 砌体结构设计规范[S].
GB 50003—2011 Code for design of masonry structures [S]. (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 flexiable 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. Reparability-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] JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验规程[S].
JGJ/T 101—2015 Specification for seismic test of buildings[S]. (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 胡英奎)