

# 不同填充墙构造方法对 RC 框架抗震性能影响研究

张令心<sup>1,2</sup>, 陈子平<sup>1,2</sup>, 谢贤鑫<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**为定量评估不同填充墙构造方法对钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)框架抗震性能的影响,搜集整理国内外砌体填充墙 RC 框架拟静力试验数据,筛选出 19 篇文献中共 68 个数据较为详尽的试件作为样本,分析对比柔性连接填充墙、增强填充墙整体性及设置阻尼耗能装置三类构造方法对试件的峰值点承载力、初始刚度、位移延性系数和等效黏滞阻尼系数 4 个参数的影响程度。结果表明:相较于传统构造方法,柔性连接填充墙框架的承载力和刚度均有所下降,变形能力提升;增强整体性的方法可提升试件承载力、刚度和变形能力,可作为一种较好的既有框架结构的加固方法;设置阻尼耗能装置虽然结构的承载力和刚度有所降低,但提升了结构的变形能力和耗能能力,在建造成本可接受的情况下可作为新建建筑的韧性提升方案。

**关键词:**砌体填充墙;钢筋混凝土框架;抗震性能;拟静力试验;构造方法  
**中图分类号:**TU375.4 **文献标识码:**A

## Effect of different infill wall construction methods on the seismic performance of RC frames

ZHANG Lingxin<sup>1,2</sup>, CHEN Ziping<sup>1,2</sup>, XIE Xianxin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In order to quantitatively assess the effect of different infill wall construction methods on the seismic performance of reinforced concrete (RC) frames, domestic and foreign pseudo static test data of masonry infilled RC frames were collected, and a total of 68 specimens with detailed data in 19 literatures were selected as samples to analyze and compare the effects of three types of construction methods, namely, flexible connection of infill walls, integrity enhancement of infill walls, and installation of damping devices, on the strength, initial stiffness, ductility factor and equivalent viscous damping factors of the specimens. The results show that compared with the traditional construction methods, the strength and stiffness of specimens with flexible connection infill walls decrease, and the deformation capacity increases. The method of enhancing integrity can improve the strength, stiffness and deformation capacity, and it is a better method to reinforce the infill walls of existing buildings. The strength and stiffness of the structure with damping energy dissipation devices are reduced, but the deformation and energy dissipation capacity of the structure are improved, which can be used as a resilience improvement for new buildings if the construction cost is acceptable.

**Key words:** masonry infill wall; reinforced concrete frame; seismic performance; pseudo static test; construction method

收稿日期:2024-04-23; 修回日期:2024-06-03

基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2021B04);国家自然科学基金项目(U2139209);黑龙江省头雁行动计划

作者简介:张令心(1967—),女,研究员,博士,主要从事结构抗震和防灾减灾研究。E-mail:lingxin\_zh@126.com

通讯作者:谢贤鑫(1988—),男,副研究员,博士,主要从事建筑地震损失控制与评估研究。E-mail:xiexianxin1988@163.com

## 0 引言

砌体填充墙因具有施工方便、取材容易和隔音保温性能好等优点,一直是我国钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)土框架结构中隔墙和围护墙的主要形式。然而,砌体填充墙在设计中视为非结构构件,不承担竖向荷载,但在地震中参与抵抗侧力和耗能,常最先发生破坏且程度最为严重。以往的震害经验和研究表明,填充墙的破坏一方面影响整体框架结构的刚度分布,可能造成薄弱区域;另一方面,高昂的修复拆除成本和建筑使用功能中断会导致较高的直接和间接地震损失。因此,如何减轻地震中砌体填充墙的破坏,从而有效提升框架结构的整体抗震性能,是现阶段研究的主要方向。

蒋欢军等<sup>[1]</sup>将砌体填充墙框架抗震性能提升方法分为2种:一种为加强填充墙与框架的整体性,使其与结构构件协同工作,共同抵抗地震作用;另一种为通过构造措施使填充墙与结构构件分离,不参与抵抗侧向荷载,从而控制墙体破坏并减轻对结构刚度分布的影响。周云等<sup>[2-5]</sup>在以上方法的基础上,提出了另一种在墙体中加入阻尼耗能装置的思路,研究表明加入合理设计的耗能装置后可以显著减轻砌体填充墙的破坏。除上述提升砌体填充墙框架抗震性能的方法外,一些研究还建议直接采用抗震性能更好的预制混凝土墙板替代传统砌体填充墙<sup>[6-8]</sup>,但墙体与梁柱的连接强度难以保证,且受限于自身尺寸,其布置并不灵活,制约了此类墙体的应用。

综上所述,虽然目前对提升砌体填充墙框架抗震性能的填充墙构造方法的研究较多,但不同方法的适用性及其对框架抗震性能影响的效果并未开展详细的对比研究,需要以客观试验数据为基础,对比不同填充墙构造方法的抗震性能提升效果。为此,本文按照设计思路的不同将砌体填充墙构造方法分为柔性连接填充墙、增强填充墙整体性及设置阻尼耗能装置三类,搜集整理国内外采用上述三类方法的砌体填充墙框架拟静力试验研究结果,对比各试验试件的承载力、初始刚度、位移延性系数及等效黏滞阻尼系数等参数,研究三类填充墙构造方法对框架结构抗震性能的影响,以期对砌体填充墙RC框架韧性提升方法的选用与完善提供参考,为此类建筑的地震损失评估提供数据支持。

## 1 砌体填充墙RC框架拟静力试验数据库

本文收集了大量砌体填充墙RC框架拟静力试验资料,从中筛选出19篇文献中数据较为详实的共68个砌体填充墙框架试件作为样本,建立了数据库。为了便于比较,分别以柔性连接、增强墙体和增设耗能部件代表柔性连接填充墙、增强填充墙整体性和设置阻尼耗能装置三类砌体填充墙构造方法,并据此将数据库分为3组。每组试件的具体构造方法及设计信息见表1~表3。表1中共24个试件,其中,对比试件9个,其余15个试件构造方法为在墙体两侧、顶部或中间设缝;表2中共35个试件,其中,对比试件9个,其余26个试件构造方法可分为设置水平系梁或构造柱和对墙体进行面层加固两类;表3中共9个试件,其中,对比试件3个,其余6个试件构造方法可分为采用金属连接件或阻尼层作为耗能构件两类。由于各文献中均有采用传统构造方法的对比试件,因此可通过对比分析,研究各类填充墙构造方法对框架抗震性能的提升效果,三类构造方法的示意图分别如图1~图3所示。

表1 采用柔性连接试件及对比试件的设计信息

Table 1 Design information of flexible connection specimens and comparison specimens

试件编号	文献中编号	填充墙构造	竖向连接构造	与梁连接构造	是否有拉结筋	数据来源
A1	GPF-1	—	刚性连接	立砖斜砌	与柱有拉结筋	文献[9]
A2	FPP-1	两端设缝	缝内聚氨酯泡沫填缝剂	立砖斜砌	与柱有拉结筋	文献[9]
A3	FPP-2	内部一道缝	缝内聚氨酯泡沫填缝剂	立砖斜砌	与柱有拉结筋	文献[9]
A4	FPP-3	内部两道缝	缝内聚氨酯泡沫填缝剂	立砖斜砌	与柱有拉结筋	文献[9]
A5	GQK	—	刚性连接	顶砖斜砌	与柱有拉结筋	文献[10]
A6	RQK1	两端及上部设缝	缝内模塑聚苯板	缝内模塑聚苯板	与柱有拉结筋	文献[10]
A7	RQK2	两端及上部设缝	缝内模塑聚苯板	缝内模塑聚苯板	与梁、柱有拉结筋	文献[10]
A8	GF	—	刚性连接	立砖斜砌	与柱有拉结筋	文献[11]
A9	RF1	两端及上部设缝	缝内泡沫聚苯板	缝内泡沫聚苯板	与梁、柱有拉结筋	文献[11]

续表

试件编号	文献中编号	填充墙构造	竖向连接构造	与梁连接构造	是否有拉结筋	数据来源
A10	RF2	两端及上部设缝并设 X 形斜撑	缝内泡沫聚苯板	缝内泡沫聚苯板	与梁、柱有拉结筋	文献[11]
A11	RFP	—	刚性连接	顶砖斜砌	与柱有拉结筋	文献[12]
A12	RFH	—	刚性连接	顶砖斜砌	与柱有拉结筋	文献[12]
A13	DRFFP1	两端及上部设缝	缝内高阻尼橡胶	缝内高阻尼橡胶	与柱有拉结筋	文献[12]
A14	RRFFP	两端及上部设缝	缝内高弹性橡胶	缝内高弹性橡胶	与柱有拉结筋	文献[12]
A15	DRFFH	两端及上部设缝	缝内高阻尼橡胶	缝内高阻尼橡胶	与柱有拉结筋	文献[12]
A16	DRFFP2	两端及上部设缝	缝内高阻尼橡胶	缝内高阻尼橡胶	与柱有拉结筋	文献[12]
A17	GWF1	—	刚性连接	立砖斜砌	与柱有拉结筋	文献[13]
A18	RWF1	两端及上部设缝	缝内聚苯乙烯泡沫板	缝内聚苯乙烯泡沫板	与柱有拉结筋和钢筋网片	文献[13]
A19	GWF2	两端设芯柱	刚性连接	立砖斜砌	与柱有拉结筋	文献[13]
A20	RWF2	两端设芯柱, 两端及上部设缝	缝内聚苯乙烯泡沫板	缝内聚苯乙烯泡沫板	与梁有拉结筋, 与柱有拉结筋和钢筋网片	文献[13]
A21	PIA-RC-IWF1	—	刚性连接并后浇细石混凝土	砂浆填实	与柱有 U 形拉结筋	文献[14]
A22	PIA-RC-IWF2	—	刚性连接并后浇细石混凝土	砂浆填实	与柱有拉结钢丝绳	文献[14]
A23	PIA-FC-IWF1	两端设缝	缝内模塑聚苯板并后浇细石混凝土	砂浆填实	与柱有 U 形拉结筋	文献[14]
A24	PIA-FC-IWF2	两端设缝	缝内模塑聚苯板并后浇细石混凝土	砂浆填实	与柱有拉结钢丝绳	文献[14]

注: 试件 A13、A15、A16 砌块抗压强度分别为 7.8、4.8、7.8 MPa, 砂浆抗压强度分别为 5.1、5.1、2.1 MPa; 试件 A21 和 A23 中的拉结筋直径 6 mm, 试件 A22 和 A24 中的拉结钢丝绳直径 4 mm。

表 2 采用增强墙体试件及对比试件的设计信息

Table 2 Design information of enhanced wall specimens and comparison specimens

试件编号	文献中编号	填充墙构造	加强位置	数据来源
B1	MD3NSR	—	—	文献[15]
B2	MD3N	系梁和构造柱	填充墙四周及 $l_w/2$	文献[15]
B3	MD3NRH	系梁和构造柱且有拉结筋	填充墙四周及 $l_w/2$	文献[15]
B4	MD6NSR	—	—	文献[15]
B5	MD6N	系梁和构造柱	填充墙四周及 $l_w/2$	文献[15]
B6	MD6NRH	系梁和构造柱且有拉结筋	填充墙四周及 $l_w/2$	文献[15]
B7	GPF-1	—	—	文献[16]
B8	GPF-2	构造柱	$l_w/2$	文献[16]
B9	GPF-3	系梁	$h_w/2$	文献[16]
B10	GPF-4	构造柱和系梁	$l_w/2$ 及 $h_w/2$	文献[16]
B11	W2	—	—	文献[17]
B12	W3	构造柱	$l_w/2$	文献[17]
B13	W4	构造柱和水平带	$l_w/2$ 及 $h_w/2$	文献[17]
B14	Infilled Wall	—	—	文献[18]
B15	Cross-Braced	交叉粘贴 CFRP	墙体两侧	文献[18]
B16	Diamond-Braced	菱形粘贴 CFRP	墙体两侧	文献[18]
B17	Off-Diagonal-Braced	非对角粘贴 CFRP	墙体两侧	文献[18]
B18	Cross Diamond-Braced	交叉菱形粘贴 CFRP	墙体两侧	文献[18]
B19	1	—	—	文献[19]
B20	2	交叉粘贴 CFRP, 宽 200 mm	墙体两侧	文献[19]
B21	3	交叉粘贴 CFRP, 宽 300 mm	墙体两侧	文献[19]
B22	4	交叉粘贴 CFRP, 宽 400 mm	墙体两侧	文献[19]
B23	5	交叉粘贴 CFRP, 宽 200 mm	墙体内侧	文献[19]
B24	6	交叉粘贴 CFRP, 宽 300 mm	墙体内侧	文献[19]
B25	7	交叉粘贴 CFRP, 宽 400 mm	墙体内侧	文献[19]
B26	8	交叉粘贴 CFRP, 宽 200 mm	墙体外侧	文献[19]
B27	9	交叉粘贴 CFRP, 宽 300 mm	墙体外侧	文献[19]

续表

试件编号	文献中编号	填充墙构造	加强位置	数据来源
B28	10	交叉粘贴 CFRP,宽 400 mm	墙体外侧	文献[19]
B29	K-W	—	—	文献[20]
B30	K-SW1	预应力钢板带加固	墙体两侧正交	文献[20]
B31	K-SW2	预应力钢板带加固	墙体两侧正交	文献[20]
B32	IF	普通砂浆面层	墙体两侧	文献[21]
B33	DIF1	HDC 面层	墙体两侧	文献[21]
B34	KJ-1	—	—	文献[22]
B35	KQ-1	钢板带加固	墙体两侧 X 形	文献[22]

注: $l_w$ 为填充墙宽度; $h_w$ 为填充墙高度;试件 B1~B3 模拟 3 层框架,试件 B4~B6 模拟 6 层框架;试件 B19~B28 墙体偏心砌筑。

表 3 采用增设耗能部件试件及对比试件的设计信息

Table 3 Design information of energy-consuming specimens and comparison specimens

试件编号	文献中编号	耗能装置	填充墙构造	是否有拉结筋	数据来源
C1	普通填充墙	—	—	与柱有拉结筋	文献[23]
C2	低损伤填充墙	金属连接件	墙体中间竖向通缝,沿竖缝布置金属连接件	与柱有拉结筋	文献[23]
C3	CIWF	—	—	与柱有拉结钢线	文献[24]
C4	DIWF	SBS 层	阻尼层将填充墙分为 3 个砌体单元	与柱有拉结钢线	文献[24]
C5	DIWF-C	SBS 层	阻尼层将填充墙分为 3 个砌体单元,缝隙用砂浆填充	与柱有拉结筋并通长布置	文献[25]
C6	DIWF-R	SBS 层	阻尼层将填充墙分为 3 个砌体单元,缝隙用发泡聚氨酯填充	与柱有拉结筋并通长布置	文献[25]
C7	HDIWF	高性能砂浆阻尼层	阻尼层将填充墙分为 3 个砌体单元	与柱有拉结钢线	文献[26]
C8	FIW-1	—	墙与梁间顶砖斜砌	与柱有拉结筋	文献[27]
C9	FIW-2	SBS 层	阻尼层将填充墙分为 3 个砌体单元,每个砌体单元与框架柱刚性连接	与柱有拉结筋	文献[27]

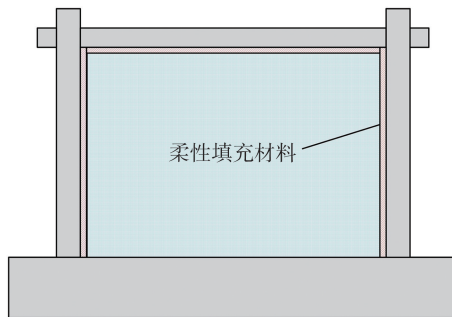
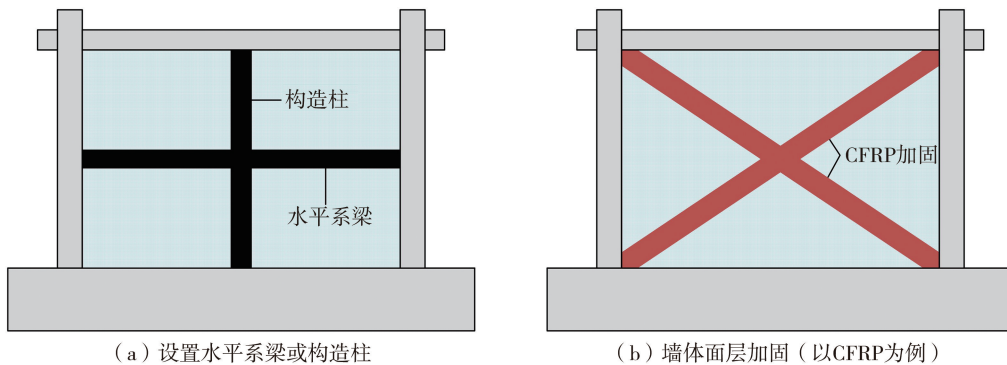


图 1 采用柔性连接试件构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimens applied flexible connection



(a) 设置水平系梁或构造柱

(b) 墙体面层加固(以CFRP为例)

图 2 采用增强墙体试件构造示意图

Fig. 2 Schematic diagram of specimens applied enhanced wall

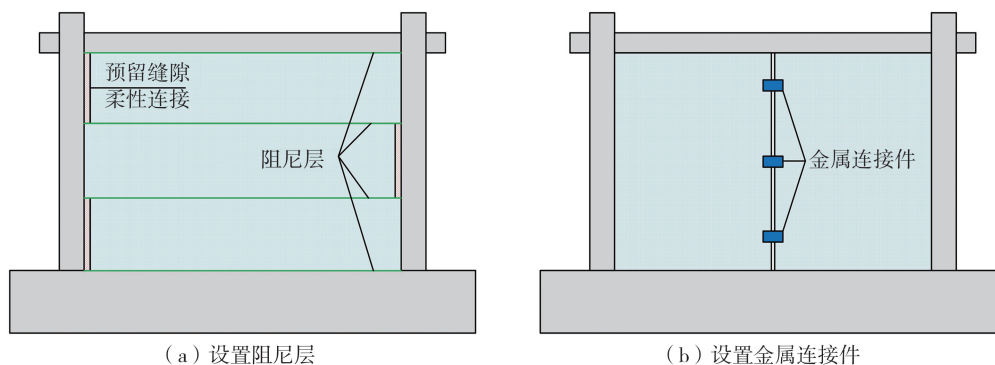


图 3 采用增设耗能部件试件构造示意图

Fig. 3 Schematic diagram of specimens applied energy-consuming component

## 2 三类方法抗震性能提升效果对比研究

评价结构抗震性能的指标主要有刚度、承载能力、变形能力和耗能能力等。为此,本文从各试验试件的滞回曲线和骨架曲线中提取和计算得到了峰值承载力、初始刚度、位移延性系数和等效黏滞阻尼系数等参数,然后将采用不同构造方法的试件结果与同组中采用传统构造方法的试件结果进行对比,根据式(1)计算各参数对比的变化率,以定量分析三类填充墙构造方法对框架抗震性能的提升效果。

$$\eta = \frac{(d_2 - d_1)}{d_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\eta$ 为各参数的变化率; $d_1$ 为填充墙采用传统构造方法试件的参数值; $d_2$ 为填充墙采用提升抗震性能构造方法试件的参数值。

### 2.1 峰值承载力及初始刚度的对比

提取数据库中每个试件的骨架曲线,采用等能量法确定试件的屈服位移 $\delta_{ys}$ 及屈服荷载 $P_{ys}$ ;提取骨架曲线上最大荷载作为峰值承载力 $P_m$ ,对应的位移作为峰值位移 $\delta_m$ ;提取骨架曲线上荷载下降至最大荷载的85%时的荷载作为极限荷载 $P_u$ ,若骨架曲线终点未下降至最大荷载85%时,则取骨架曲线上终点处的荷载作为极限荷载, $P_u$ 所对应的位移作为极限位移 $\delta_u$ 。

由于数据库中的试验均采用对称的拟静力加载,因此峰值承载力取正负方向荷载绝对值的平均值,按式(2)计算:

$$P_m = \frac{|+P_m| + |-P_m|}{2} \quad (2)$$

式中: $+P_m$ 、 $-P_m$ 分别为骨架曲线正、负向最大荷载。

试件的初始刚度 $k_e$ 采用割线刚度表示,按式(3)计算:

$$k_e = \frac{|+P_e| + |-P_e|}{|+\delta_e| + |-\delta_e|} \quad (3)$$

式中: $+P_e$ 、 $-P_e$ 分别为第一个加载工况正、负向最大荷载; $+\delta_e$ 、 $-\delta_e$ 分别为 $+P_e$ 、 $-P_e$ 所对应的位移。

采用柔性连接、增强墙体、增设耗能部件试件的峰值承载力和初始刚度变化率,如图4~图6所示。

由图4可知,采用柔性连接的试件共15个,其中14个试件的峰值承载力及初始刚度下降,下降幅值范围分别为9.07%~47.27%和2.37%~77.85%。其中,试件A23的填充墙采用预制互锁AAC砌块砌筑,其峰值承载力及初始刚度均有小幅提升,这是由于这类砌块的榫卯精度难以保证,具有较大不确定性。采用传统构造方法的试件砌块间的缝隙较大,造成初始刚度和承载力下降,而试件A23砌块砌筑紧密,缝隙小于采用传统构造方法的对比试件,因此即使采用柔性连接的构造方法,其初始刚度和承载力仍大于对比试件。

由图5可知,采用增强墙体的试件共26个,其中24个试件的峰值承载力提升,提升幅值范围为4.37%~177.59%,24个试件的初始刚度提升,提升幅值范围为1.43%~540.00%。其中试件B21和B22均为在墙体两侧粘贴CFRP的构造方法,是峰值承载力和初始刚度提升幅值最大的2个试件,分别为157.11%、177.59%和500.00%、540.00%,表明采用在墙体两侧粘贴较大宽度CFRP的面层加固措施能有效提升试件的承载能力

和刚度。此外,26 个试件中 2 个设置水平系梁或构造柱的试件 B2 和 B9 峰值承载力下降 8.08%和 8.60%, 1 个同时设置水平系梁和构造柱的试件 B6 和 1 个采用高延性混凝土进行面层加固的试件 B33 的初始刚度下降 2.03%和 6.30%,说明此两类增强整体性的构造方法对试件承载能力和刚度的提升效果并不稳定。

由图 6 可知,所有 6 个采用增设耗能部件试件的峰值承载力及初始刚度均下降,下降幅值分别为 19.86%~59.86%和 37.46%~76.15%。其中,试件 C2 采用金属连接件作为耗能装置,其峰值承载力和初始刚度下降幅度较小,分别为 19.86%和 37.46%,明显小于同组其他采用阻尼层的填充墙试件,说明采用金属连接件作为耗能装置对试件的承载力和刚度削弱较小。

三类试件的峰值承载力变化率均值分别为-17.34%、48.19%和-47.35%,初始刚度变化率均值分别为-31.25%、218.01%和-58.55%。上述参数的变化与三类填充墙构造方法有关,由于柔性连接方法的改造思路为将墙体与框架分离,因此削弱了试件的强度和刚度。增强墙体方法通过增加水平系梁和构造柱或在墙面增加补强材料以加强墙体的整体性和受力性能,可有效提升填充墙的承载力和刚度,从而也提升了试件的承载力和刚度。增设耗能部件方法的改造思路为将脆性砌体墙改造为变形能力和耗能能力较好的柔性构件,牺牲了强度和刚度以保护填充墙不遭受严重破坏,从而试件的承载力和刚度均下降。值得注意的是,虽然提升刚度有利于减小结构的变形从而达到控制填充墙及梁柱构件损伤的目的,但构件刚度的提升往往导致其承担更大的地震作用,当采用刚度提升效果较强的构造方法时,应在设计时保证结构刚度分布的均匀性。同时,削弱填充墙的刚度和承载力可以减小填充墙约束对框架产生的附加应力,从而减轻框架的破坏。

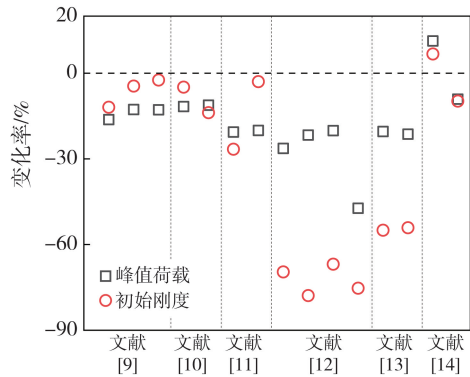


图 4 采用柔性连接试件峰值点荷载和初始刚度变化率  
Fig. 4 Change rate of peak load and initial stiffness of specimens applied flexible connection

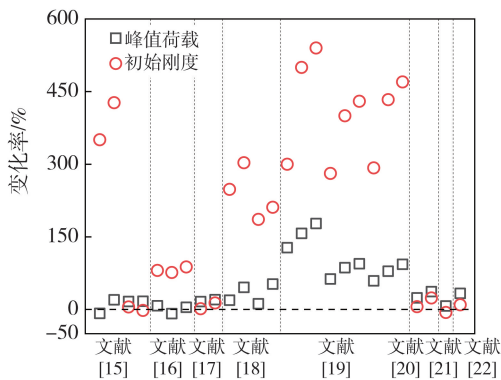


图 5 采用增强墙体试件峰值点荷载和初始刚度变化率  
Fig. 5 Change rate of peak load and initial stiffness of specimens applied enhanced wall

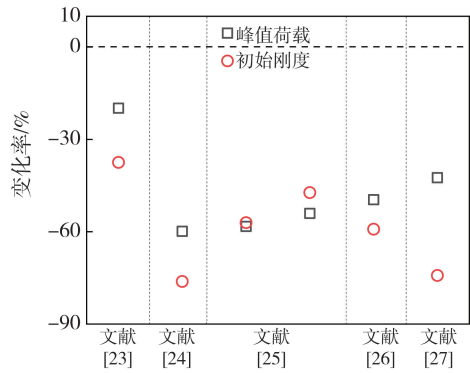


图 6 采用增设耗能部件试件峰值点荷载和初始刚度变化率  
Fig. 6 Change rate of peak load and initial stiffness of specimens applied energy-consuming component

### 2.2 位移延性系数的对比

通常利用位移延性系数  $\mu$  来表征试件的变形能力,根据式(4)计算,得

$$\mu = \frac{|\delta_u| + |\delta_{ys}|}{|\delta_{ys}|} \quad (4)$$

式中:  $+\delta_u$ 、 $-\delta_u$  分别为试件的正反方向的极限位移;  $+\delta_{ys}$ 、 $-\delta_{ys}$  分别为试件正反方向的屈服位移。

采用柔性连接、增强墙体和增设耗能部件试件的位移延性系数变化率,如图 7~图 9 所示。

由图 7 可知,采用柔性连接的试件共 15 个,其中 11 个试件的位移延性系数提升,提升幅值范围为 2.85%~109.92%。其中,试件 A16 采用高阻尼橡胶填充墙体与框架间的缝隙,并且砂浆强度远低于砌块强度,开裂的砌体沿灰缝摩擦耗能,位移延性系数提高最多。15 个试件中 4 个试件位移延性系数降低,下降幅值范围为 5.35%~17.09%。其中 A4、A18 和 A20 这 3 个试件的屈服位移较对比试件大幅增大,试件 A23 的极限

位移较对比试件大幅减小,导致这4个试件的位移延性系数小幅下降。

由图8可知,采用增强墙体的试件共26个,其中22个试件位移延性系数提升,提升幅值范围为1.33%~194.03%。其中B15和B33分别采用在墙体两面交叉粘贴CFRP和涂抹HDC面层的构造方法,其延性系数提升最大,分别为194.03%和192.45%,说明该方法可使填充墙的损伤发展更为均匀,避免发生脆性破坏,大幅提升试件的延性。同时,此组中4个试件位移延性系数小幅降低,其中试件B22下降18.06%,这可能是因为在填充墙两侧粘贴的CFRP在达到峰值点后突然断裂,导致极限位移减小。试件B30和B31分别下降33.34%和9.12%,这是由于施加了预应力的水平钢板带有效地推迟了砖砌体填充墙的开裂,提高了试件的屈服荷载和屈服位移。试件B35下降40.32%,这是由于斜钢板带对墙体约束十分明显,限制了墙体的位移,导致极限位移减小。

由图9可知,采用增设耗能部件的试件共6个,其中5个试件位移延性系数提升,提升幅值范围为16.07%~68.36%。试件C4采用SBS阻尼层将填充墙分成3个砌体单元,其位移延性系数小幅下降,下降幅度为6.66%,这是因为分层的填充墙竖向缝隙未用材料填充,仅用钢绞线进行连接,试件的屈服位移增幅大于极限位移,最终导致位移延性系数下降。此外,采用金属耗能连接件的试件C2位移延性系数变化率高于同组其他采用阻尼层填充墙的试件。

三类试件的延性系数变化率均值分别为21.93%、39.68%和30.28%,均表现出较好的变形能力。

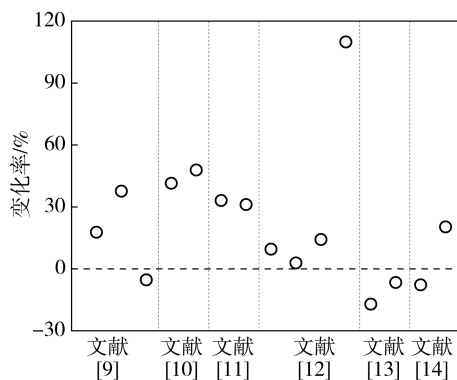


图7 采用柔性连接试件位移延性系数变化率

Fig. 7 Change rate of ductility factor of specimens applied flexible connection

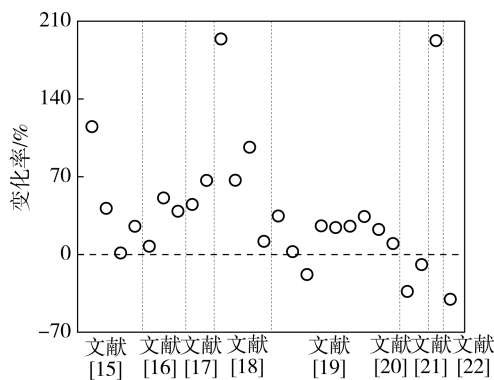


图8 采用增强墙体试件位移延性系数变化率

Fig. 8 Change rate of ductility factor of specimens applied enhanced wall

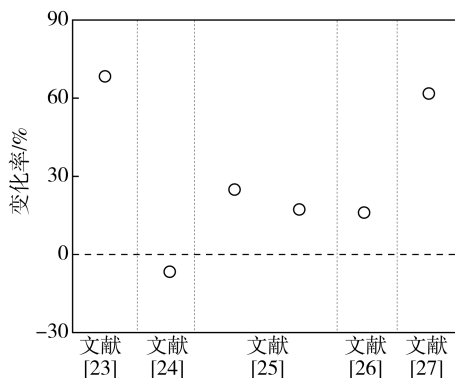


图9 采用增设耗能部件试件位移延性系数变化率

Fig. 9 Change rate of ductility factor of specimens applied energy-consuming component

### 2.3 等效黏滞阻尼系数的对比

通常利用等效黏滞阻尼系数 $\zeta_{eq}$ 来反映试件的耗能能力,根据式(5)计算<sup>[28]</sup>:

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (5)$$

式中: $S_{(ABC+CDA)}$ 为滞回曲线围成的面积; $S_{(OBE+ODF)}$ 为三角形OBE与三角形ODF的面积,如图10所示。

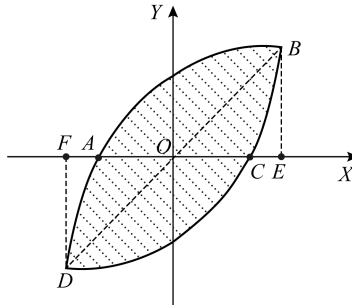


图 10 等效黏滞阻尼系数计算示意图

Fig. 10 Calculation schematic of equivalent viscous damping factor

采用柔性连接、增强墙体和增设耗能部件试件峰值点和极限点工况的等效黏滞阻尼系数变化率,如图 11~图 13 所示。

由图 11 可知,采用柔性连接的试件共 15 个,其中 9 个试件峰值点等效黏滞阻尼系数下降,下降幅值范围为 2.60%~33.57%,其余 6 个试件提升,提升幅值范围为 2.79%~90.32%,可见柔性连接方法对试件峰值点等效黏滞阻尼系数的影响规律并不一致。15 个试件中有 13 个试件极限点等效黏滞阻尼系数提升,提升幅值范围为 2.34%~47.56%。其余 2 个试件 A9 和 A24 极限点等效黏滞阻尼系数小幅度下降,下降幅度分别为 1.11%和 5.26%,其中 A9 采用泡沫聚苯板填充墙体与框架间的缝隙并用拉结筋拉结,A24 采用模塑聚苯板与细石混凝土填充墙体与框架柱缝隙并用钢丝绳拉结。该组试件峰值点和极限点的耗能影响规律不一致的结果表明,对于柔性连接填充墙框架,试件荷载达到峰值荷载后,墙体才开始发挥耗能作用,虽然保护了填充墙前期不受破坏,但也削弱了结构在小震下的耗能能力。

由图 12 可知,采用增强墙体的试件共 26 个,其中有 14 个试件峰值点等效黏滞阻尼系数下降,下降幅值范围为 5.06%~80.62%,其余 12 个试件提升,提升幅值范围为 2.03%~79.23%。26 个试件中有 17 个试件极限点等效黏滞阻尼系数下降,下降幅值范围为 3.13%~67.20%,其余 9 个试件提升,提升幅值范围为 3.87%~23.40%,增强墙体方法对试件的耗能能力影响规律并不一致,说明采用增强填充墙整体性的方法无法有效提升试件的耗能能力。

由图 13 可知,采用增设耗能部件的试件共 6 个,其中试件 C5、C6、C7 和 C9 的峰值点等效黏滞阻尼系数有所提高但提升幅值不大,这可能是由于试件达到峰值点时砌体单元的相对位移较小,阻尼层并未充分参与工作。而试件 C4 下降了 9.49%,这是由于该试件采用 SBS 阻尼层将填充墙分成 3 个砌体单元,加载中砌体单元破坏较重,形成贯穿裂缝,SBS 层剪切变形量减小,无法充分发挥耗能作用。所有 6 个采用增设耗能部件试件的极限点等效黏滞阻尼系数均增大,提升幅值范围为 16.59%~66.66%。说明此类构造方法实现了提升试件耗能能力的主要目的。

采用三类方法的试件平均峰值点等效黏滞阻尼系数变化率分别为-1.49%、-14.61%和 16.87%,平均极限点等效黏滞阻尼系数变化率分别为 17.56%、-11.78%和 45.86%,可见仅增设耗能部件方法可有效提升填充墙框架的耗能能力,其他二类方法并无有效提升效果。

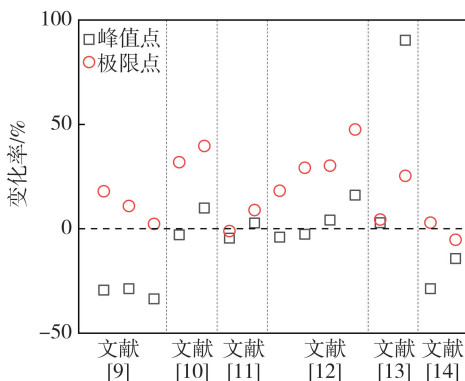


图 11 采用柔性连接试件等效黏滞阻尼系数变化率

Fig. 11 Change rate of equivalent viscous damping factor of specimens applied flexible connection

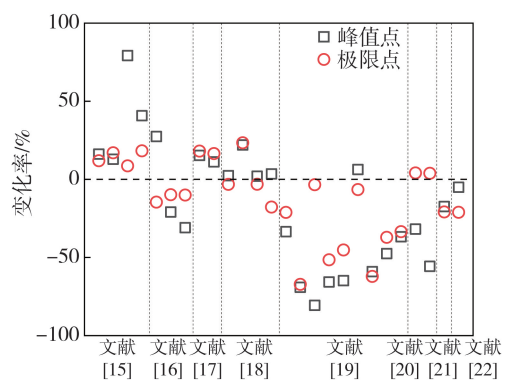


图 12 采用增强墙体试件等效黏滞阻尼系数变化率

Fig. 12 Change rate of equivalent viscous damping factor of specimens applied enhanced wall

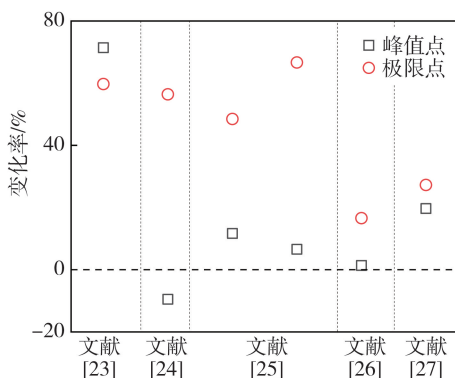


图 13 采用增设耗能部件试件等效黏滞阻尼系数变化率

Fig. 13 Change rate of equivalent viscous damping factor of specimens applied energy-consuming component

## 2.4 综合评价

综合对比采用三类构造方法试件的各项力学性能参数,将对对比结果汇总列于表 4。

表 4 墙体构造方法对 RC 框架抗震性能影响对比

Table 4 Comparison of the effects of wall construction methods on the seismic performance of RC frames %

构造方法	承载力	刚度	变形能力	耗能能力	
				峰值点	极限点
柔性连接	整体降低(-17.34)	整体降低(-31.25)	整体提升(21.93)	有升有降(-1.49)	整体提升(17.56)
增强墙体	整体提升(48.19)	整体提升(218.01)	整体提升(39.68)	有升有降(-14.61)	有升有降(-11.78)
增设耗能部件	整体降低(-47.35)	整体降低(-58.55)	整体提升(30.28)	整体提升(16.87)	整体提升(45.86)

注:表中括号内数值为平均变化率。

由表 4 可知,采用柔性连接方法试件的峰值点承载力和初始刚度的平均变化率分别为-17.34%和-31.25%,试件的承载力及刚度整体降低;位移延性系数的平均变化率为 21.93%,试件的变形能力整体提升;峰值点和极限点处的平均等效黏滞阻尼系数变化率分别为-1.49%和 17.56%,试件在峰值点和极限点处的耗能能力分别为有升有降和整体提升。由此可见此类构造方法虽然牺牲了刚度和承载力,但削弱了墙体对框架的约束效应,可以一定程度上减弱填充墙对框架的不利影响。同时,此类方法提升了试件的变形能力,对极限点耗能能力也有一定提升,但对峰值点耗能能力的影响结果多数降低少数提升,影响规律不明确。

采用增强墙体方法试件的峰值点承载力和初始刚度的平均变化率分别为 48.19%和 218.01%,试件的承载力及刚度整体提升;位移延性系数的平均变化率为 39.68%,试件的变形能力整体提升;峰值点和极限点处的平均等效黏滞阻尼系数变化率分别为-14.61%和-11.78%,试件在峰值点和极限点处的耗能能力均有升有降。由此可以看出,此类方法多数试件的承载力与初始刚度、位移延性系数均有所提升,但峰值点和极限点耗能能力多数降低少数提升,影响规律不明确。但需要注意的是,刚度的提升往往导致其承担更大的地震作用,当采用此类构造方法时,应在设计时保证结构刚度分布的均匀性。

采用增设耗能部件方法试件的峰值点承载力和初始刚度的平均变化率分别为-47.35%和-58.55%,试件的承载力及刚度整体降低;位移延性系数的平均变化率为 30.28%,试件的变形能力整体提升;峰值点和极限点处的平均等效黏滞阻尼系数变化率分别为 16.87%和 45.86%,试件在峰值点和极限点处的耗能能力均整体提升。由此可见此类方法可提升试件的变形能力和耗能能力,但与柔性连接方法类似,牺牲了试件的刚度和承载力,但也因削弱了填充墙的约束效应从而减轻了对框架的不利影响。

综合来看,三类构造方法均对填充墙框架试件的整体抗震性能有较好的提升效果。增强墙体方法虽然对结构耗能能力的影响规律不明确,但提升了承载能力、刚度和变形能力,是对于既有结构而言较好的抗震性能提升方法。柔性连接方法和增设耗能部件方法虽然牺牲了承载力和刚度,但同时削弱了墙体对框架的不利影响,并且提升了结构的变形能力和耗能能力,在建造成本可接受的情况下,可作为新建建筑的填充墙构造方法。

### 3 结论

通过对三类共68个国内外砌体填充墙RC框架拟静力试验结果进行分析,对比不同墙体构造方法对填充墙框架抗震性能的影响规律,得出以下结论:

1) 柔性连接填充墙虽然牺牲了刚度和承载力,但削弱了墙体对框架的约束效应,可以一定程度上减弱填充墙对框架的不利影响。同时,此类方法提升了试件的变形能力,对极限点耗能能力有一定提升,但对峰值点耗能能力的影响结果多数降低少数提升,影响规律不明确。

2) 对于增强墙体整体性的方法,多数试件的承载力与初始刚度、位移延性系数均有所提升,但峰值点和极限点耗能能力多数降低少数提升,影响规律不明确。其中在填充墙两侧粘贴CFRP的方法较其他方法而言,对RC框架的承载能力、初始刚度以及变形能力的提升效果最佳。但需要注意的是,当采用此类构造方法时,应在设计时保证结构刚度分布的均匀性。

3) 设置阻尼耗能装置的方法可提升试件的变形能力和耗能能力,与柔性连接方法类似,牺牲了试件的刚度和承载力,但也因削弱了填充墙的约束效应从而减轻了对框架的不利影响。其中,相较于采用阻尼层作为耗能装置的方法,采用金属连接件作为耗能装置的方法对RC框架的变形能力和耗能能力提升效果更佳。

4) 三类构造方法均对填充墙框架试件的整体抗震性能有较好的提升效果。综合来看,增强墙体方法可作为既有结构的抗震性能提升方法。柔性连接方法和增设耗能部件方法在建造成本可接受的情况下可作为新建建筑的填充墙构造方法。

### 参考文献:

- [1] 蒋欢军,段延锋.改善砌体填充墙抗震性能的研究进展[J].地震工程与工程振动,2019,39(5):86-94.  
JIANG Huanjun, DUAN Yanfeng. State-of-the-art of methods to improve seismic performance of masonry infill walls[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(5): 86-94. (in Chinese)
- [2] 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 ways and methods to improve the seismic performance of frame structures with infilled walls[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(5): 469-476. (in Chinese)
- [3] 周云,陈章彦,郭阳照,等.新型减震填充墙(板)抗震性能、机理及应用研究进展[J].防灾减灾工程学报,2021,41(4):753-767.  
ZHOU Yun, CHEN Zhangyan, GUO Yangzhao, et al. Advances on the seismic performance, mechanism and application of innovative damped infilled wall/wallboard[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 753-767. (in Chinese)
- [4] 周云,郭阳照,张兴富.新型阻尼填充墙的构造原理与减震性能研究[J].武汉大学学报(工学版),2015,48(3):327-333,338.  
ZHOU Yun, GUO Yangzhao, ZHANG Xingfu. Construction principle and aseismic performance of new-type damped infill wall[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(3): 327-333, 338. (in Chinese)
- [5] 周云,郭阳照,杨冠男,等.摩擦型阻尼填充墙单元的设计及性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2013,33(4):210-217.  
ZHOU Yun, GUO Yangzhao, YANG Guannan, et al. Design and performance experimental study of frictionally damped infill wall unit[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(4): 210-217. (in Chinese)
- [6] 黄宇星,祝磊,王元清,等.悬挂式预制混凝土墙板框架抗震性能分析[J].建筑结构学报,2014,35(增刊1):137-142.  
HUANG Yuxing, ZHU Lei, WANG Yuanqing, et al. Seismic performance analysis of reinforced concrete frame with hanging precast concrete infill walls[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(S1): 137-142. (in Chinese)
- [7] 李升旗.预制复合墙板填充墙对RC框架抗震性能影响研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.  
LI Shengqi. Study on influence of precast composite infill wall on seismic performance to RC frame[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese)
- [8] 卞文军.半柔性连接复合墙板填充墙RC框架抗震性能及计算模型研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.  
BIAN Wenjun. Study on seismic behavior and calculation model of RC frame with semi-flexible connected composite wallboard[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021. (in Chinese)
- [9] 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].苏州:苏州科技学院,2010.  
LIU Lihua. Experimental study on seismic behavior and nonlinear analysis of flexible connection infill wall frame structure[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 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 Xiaojie, CHENG Changyun, DU Jinpeng, 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)
- [12] 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 Yongbing, GUO Xinhua, LI Yong, 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)
- [13] 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. (in Chinese)
- [14] 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 Zhenyu. 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)
- [15] LEAL G J M, PÉREZ GAVILÁN J J, CASTORENA G J H, et al. Infill walls with confining elements and horizontal reinforcement: An experimental study[J]. *Engineering Structures*, 2017, 150: 153–165.
- [16] 杨亮. 砌体填充墙框架结构的抗震性能试验研究与非线性分析[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2010.  
YANG Liang. Experimental study on seismic behavior and nonlinear analysis of masonry-infilled RC frames structure[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [17] 李建辉, 薛彦涛, 肖从真, 等. 足尺蒸压加气混凝土砌块填充墙 RC 框架抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(8): 12–18.  
LI Jianhui, XUE Yantao, XIAO Congzhen, et al. Experimental study on seismic performance of full-scale RC frame infilled with autoclaved aerated concrete blocks[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(8): 12–18. (in Chinese)
- [18] YUKSEL E, OZKAYNAK H, BUYUKOZTURK O, et al. Performance of alternative CFRP retrofitting schemes used in infilled RC frames[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(4): 596–609.
- [19] ALTIN S, ANIL Ö, 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.
- [20] 敬登虎, 乔墩, 朱明吉, 等. 钢板带加固砖填充墙 RC 框架抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(3): 29–37, 45.  
JING Denghu, QIAO Dun, ZHU Mingji, et al. Experimental investigation on seismic performance of RC frame infilled with brick wall strengthened by steel strips[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(3): 29–37, 45. (in Chinese)
- [21] 成媛. 高延性混凝土加固足尺砌体填充墙框架抗震性能试验及理论研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.  
CHENG Yuan. Experimental and theoretical study on seismic behavior of full-scale infilled RC frame strengthened with high ductility concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020. (in Chinese)
- [22] 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. Test study and FEM analysis on hysteretic behavior of one bay RC frame-clad brick infill wall with seismic retrofit using steel strips[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [23] 卢啸, 查淑敏. 一种新型分缝耗能砌体填充墙的抗震性能试验与有限元分析[J]. *工程力学*, 2021, 38(11): 105–113.  
LU Xiao, ZHA Shumin. Seismic performance test and finite element analysis of a new slotted energy dissipation masonry infill wall[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(11): 105–113. (in Chinese)
- [24] 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 Yun, GUO Yangzhao, YANG Guannan, 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)
- [25] 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 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, 47(9): 21–28. (in Chinese)
- [26] 汪梦甫, 王强. 高性能砂浆阻尼填充墙框架抗震性能研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(5): 21–34.  
WANG Mengfu, WANG Qiang. Study on seismic behaviors of damped infill wall frame with high performance mortar of damped layers[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 36(5): 21–34. (in Chinese)
- [27] 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 Qiwang, LI Yi, BU Qingtao, 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)
- [28] JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
JGJ/T 101—2015 Specification for seismic test of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)