

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220902003

基于试验数据的填充墙RC框架性能指标限值研究*

陈卫民^{1,2}, 张令心^{1,2}, 谢贤鑫^{1,2}

(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重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为了建立我国砌体填充墙RC框架结构性能水准与性能指标间的对应关系, 通过收集整理国内填充墙RC框架拟静力试验数据, 建立了本土化填充墙RC框架试件试验数据库。参考《建(构)筑物地震破坏等级划分》(GB/T 24335—2009), 定义了填充墙RC框架的5个性能水准及其破坏状态描述, 根据试验现象提取试件首次达到每个性能水准时的层间位移角作为样本, 通过统计分析, 分别给出刚性连接和柔性连接填充墙RC框架具有84%保证率的层间位移角限值, 并与《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)和现有研究中给出的限值进行对比, 最后进一步分析了采用不同类型砌块的填充墙RC框架结构性能水准限值的差异。结果表明, 相较于规范限值, 刚性连接的填充墙RC框架限值在轻微破坏和中等破坏的性能水准下均偏小, 而在严重破坏的性能水准下远大于规范限值; 相较于现有限值, 作者研究得出的限值具有性能水准判定标准统一、数据更符合我国国情的特点; 相较于传统的黏土砖和普通混凝土砌块, 采用加气混凝土砌块砌筑填充墙的RC框架结构侧向变形能力更好。

关键词: 砌体填充墙RC框架结构; 性能水准限值; 破坏现象; 砌块类型

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1322-09

Performance Level Limits of Infilled RC Frames Based on Test Database

CHEN Weimin^{1,2}, ZHANG Lingxin^{1,2}, XIE Xianxin^{1,2}

(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 obtain the correspondence between the performance levels and performance of infilled RC frame structures in China, a localized test database of infilled RC frame specimens was established by collecting the domestic pseudo-static tests on infilled RC frames. Five performance levels of infilled RC frames and their damage state descriptions were defined with reference to GB/T 24335-2009, 'Classification of earthquake damage to buildings and special structures'. The IDRs (Inter-story Drift Ratios) of specimens first reaching each performance level were extracted according to the test phenomena, and the IDR limits for the performance levels of rigidly-connected and flexibly-connected infilled frames with an 84% guarantee rate were given through statistical analysis. The limits were

* 收稿日期:2022-09-02;修回日期:2022-11-15

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(2019A01)、国家自然科学基金(U2139209)、黑龙江省头雁行动计划资助

作者简介:陈卫民(1994—),男,硕士研究生。主要从事工程结构抗震研究。E-mail:chenweimin0718@163.com

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

compared with those given in the GB 50011-2010, 'Code for Seismic Design of Buildings,' and existing studies. Finally, the differences in the performance level limits of RC frames, infilled with various types of blocks, were further analyzed. The results show that compared with the code limits, the limits of rigidly-connected RC frames with infilled walls in this paper are lower for the performance levels of slight and moderate damage, but much larger than the code limits for the performance levels of severe damage; compared with the existing limits, the limits in this paper have the characteristics of unified criteria for determining the performance levels and the data are more in line with the domestic conditions; compared with traditional clay bricks and common concrete blocks, the lateral deformation capacity of RC frames infilled with aerated concrete blocks is better.

Keywords: masonry infilled RC frames; performance level limits; damage phenomenon; types of block

0 引言

我国是地震多发国家,历史震害表明,砌体填充墙在地震中容易发生破坏且对RC框架结构的抗震性能有显著影响。因此,对填充墙RC框架结构进行抗震性能化设计和地震损失评估时需要考虑砌体填充墙的破坏及其对结构抗侧刚度的提高。合理的性能水准判定是实现建筑抗震性能设计、准确评估地震灾害损失的基础,而目前国内外规范中,对RC框架结构建筑性能水准的判定及层间位移角限值的确定均未考虑砌体填充墙的影响。如我国规范^[1]中规定RC框架结构弹性和弹塑性层间位移角限值分别为1/550和1/50,FEMA356^[2]中针对RC框架结构定义了立即使用、生命安全和防止倒塌三个性能水准,对应层间位移角限值分别为1%、2%、4%。

国内外学者通常采用试验方法针对砌体填充墙RC框架结构的损伤发展规律展开研究,并基于试验结果给出了砌体填充墙RC框架结构发生典型破坏现象时的层间位移角。谢贤鑫等^[3]搜集整理了16个有代表性、数据相对比较详细的砌体填充墙RC框架试件的试验结果,统计出不同砌体填充墙达到简单修复状态及不易修复状态时的层间位移角参考值。李旭东^[4]通过足尺轻质砌体填充墙RC框架的低周往复加载试验得到轻质砌体填充墙RC框架的开裂位移角大约为1/1 000。胡艳容^[5]参考相关文献并结合填充墙RC框架结构的变形特征及试验统计结果,总结给出填充墙RC框架结构各性能水准的层间位移角限值。童岳生等^[6]通过大量试验,得到了砌体填充墙RC框架发生不同特征破坏

现象时的层间位移角限值,并对比了开洞与否对填充墙RC框架层间位移角限值的影响。刘建毅^[7]基于大量已有的国内外填充墙框架实验结果,综合考虑破坏状态、安全性及修复经济可接受性,定义了填充墙框架五种破坏状态及相应性能指标限值。贺安琪等^[8]搜集了41片蒸压加气混凝土填充墙RC框架的试验数据,对比了填充墙与框架间采用刚性连接和柔性连接的填充墙RC框架在不同破坏状态下的层间位移角限值。谢贤鑫等^[9]进行了6个足尺填充墙RC框架试件的面内往复加载试验,建立了普通黏土砖和混凝土空心砌块填充墙的易损性曲线,并给出了在达到我国规范规定的框架结构弹性层间位移角限值时,黏土砖填充墙和空心砌块填充墙达到或超过一定破坏状态的概率。黄群贤^[10]进行了6榀单层单跨填充墙RC框架拟静力试验,试验结果表明填充墙RC框架的初裂位移角基本处在1/900~1/1 000。

综上所述,国内外规范对RC框架结构的性能水准限值已有规定,各研究中对填充墙RC框架结构性能水准限值研究也有了一定的基础。但早期对RC框架结构性能水准限值的研究更多关注结构构件,并未考虑非结构构件填充墙的影响。后期陆续有学者开展针对各类砌体填充墙RC框架的性能水准研究,但其特征破坏现象与层间位移角的对应关系多是基于单一类型墙体试验得到的,考虑到填充墙砌块类型多样,且高宽比、高厚比等设计参数众多,急需根据现有的大量试验数据建立我国填充墙RC框架试件试验数据库,并基于数据库统计得到符合我国国情的砌体填充墙RC框架性能水准限值,为此类结构抗震性能化设计的实现和地震灾害损失评估方法的完善提供依据。

本文通过建立一个大型本土化的填充墙 RC 框架拟静力试验数据库,同时考虑 RC 框架和填充墙的损伤情况,定义了 5 个填充墙 RC 框架的性能水准。依据性能水准的破坏现象描述确定数据库中各试件达到相应性能水准时的层间位移角,并统计得到填充墙 RC 框架的性能指标限值。进一步地,比较了采用不同类型砌块的填充墙 RC 框架结构性能水准限值的差异。

1 砌体填充墙 RC 框架结构的性能水准定义

我国标准《建(构)筑物地震破坏等级划分》(GB/T 24335—2009)^[11]中对各类结构类型的破坏

等级进行了定义,包括对不同构件宏观破坏现象的描述及每类构件相应的破坏比例。其中对于 RC 框架结构的破坏等级描述中,以梁、柱等结构构件的破坏程度为主,同时兼顾了非结构构件的破坏情况。规范中将 RC 框架结构的破坏划分成五个等级,在前四个等级的描述中,均包含了填充墙的破坏情况。本文参考该标准中的内容,同时考虑 RC 框架结构中梁柱构件及填充墙的破坏情况,结合我国砌体填充墙 RC 框架试件拟静力试验中对砌体填充墙及梁柱构件的破坏现象描述,给出了砌体填充墙 RC 框架结构性能水准的描述,见表 1。其中,DS₁和 DS₂中的破坏主要以填充墙为主,DS₃和 DS₄中的填充墙的破坏已经较为严重,梁柱构件的不同程度破坏是其主要特征。

表 1 填充墙 RC 框架的性能水准定义

Table 1 Definition of performance levels for infilled RC frames

性能水准	损伤状态描述
基本完好(DS ₁)	个别填充墙角部出现轻微裂缝,个别填充墙与框架交界处出现轻微裂缝。
轻微破坏(DS ₂)	个别框架梁、柱构件出现细微裂缝;部分填充墙与框架交界处出现明显裂缝,个别填充墙出现轻微斜裂缝。
中等破坏(DS ₃)	多数框架梁、柱有轻微裂缝,部分有明显裂缝,个别梁、柱端混凝土剥落;多数填充墙有明显裂缝,个别填充墙有严重裂缝,角部开始掉落甚至出现空洞。
严重破坏(DS ₄)	多数框架梁、柱端混凝土剥落、主筋外露,个别柱主筋压屈;填充墙砌块大面积破坏,形成多条明显的贯通裂缝,部分外闪倒塌。
倒塌(DS ₅)	结构濒临倒塌或已倒塌。

2 砌体填充墙 RC 框架的试验数据

本文收集整理 36 篇文献^[4,6,10,12-44]中砌体填充墙 RC 框架试件的拟静力加载试验数据,提取每个试件的设计参数、材料力学性能、试验加载制度、试验过程中破坏现象描述等数据建立了填充墙 RC 框架试验数据库。所有试验均采用低周往复加载,加载制度采用全程位移控制或力和位移混合控制加载,典型的加载装置图如图 1 所示。数据库共包含 119 个试件,均为单层,其中单跨试件 114 个,双跨试件 5 个。试件尺寸方面足尺试件占 35%,采用 1:2 比例缩尺的试件占 46.6%,采用 1:3 比例缩尺的试件占 14.2%,采用小于 1:3 缩尺的试件占比不到 3%。

我国墙改政策实施以来,新型墙体材料得到广泛应用,本文根据砌块类型不同对数据库中

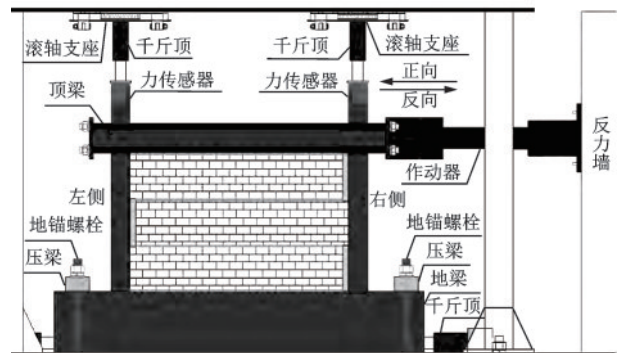


图 1 典型填充墙 RC 框架拟静力试验加载装置^[12]

Fig.1 Typical pseudo-static test loading device^[12]

试件进行分组,共分为黏土砖、粉煤灰空心砌块、烧结页岩非实心砌块、普通混凝土砌块和加气混凝土砌块等,每组试件的基本特征,如填充墙尺寸、砌块类型、砌体强度和砂浆强度等信息,见表 2。

表2 数据库中试件信息概述

Table 2 A summary of the characteristics of specimens in database

试件数量	砌块类型	砌体抗压强度/ MPa	砂浆强度/ MPa	墙厚/mm	墙长/mm	墙高/mm	层高/mm
20	黏土砖	0.73~10.62	2.60~9.78	55~170	800~5 000	780~3 700	840~3 950
6	粉煤灰空心砌块	2.40	6.39	240	2 060	660/1 230	1 380
10	烧结页岩非实心砌块	10.62~25.20	2.10~5.10	110/115	3 500/2 000	3 000/1 285	3 225/1 400
44	普通混凝土砌块	1.00~10.00	4.15~25.05	80~200	1 500~5 000	1 000~3 700	1 100~3 950
37	加气混凝土砌块	1.61~5.2	4.19~16.92	100~250	1 500~4 000	1 000~3 000	1 100~3 200

3 砌体填充墙 RC 框架性能水准限值

3.1 性能指标限值提取

整理文献中对试件破坏过程的相关描述,选取层间位移角作为衡量填充墙框架结构损伤程度的性能指标,根据表1提取每个试件首次出现符合表1中描述的破坏现象时的层间位移角。具体方法为,当文献中填充墙或梁柱构件出现某个破坏现象描述与表1中定义的性能水准相符时,则认为结构达到了此种破坏状态,记录此时的层间位移角作为此性能水准的性能指标下限值。因多数试件均为单层单跨填充墙框架,因此忽略构件破坏率的影响。如文献中未直接给出目标破坏状态所对应的层间位移角,则根据骨架曲线提取相应位移并计算层间位移角,具体的流程如图2所示。

值得说明的是,尽管多数文献记录了详尽的试件损伤发展过程,但个别试件仍无法获取所有损伤状态发生时所对应的层间位移角,部分是因为所需的损伤状态没有发生,部分特别是早期的一些试验研究文献中并未对其进行记录。此外,由于在文献中有关结构濒临倒塌或已倒塌的描述极少,故未获得此状态对应的层间位移角数据,本文只对前四种性能水准的层间位移角限值进行了统计。

3.2 我国砌体填充墙 RC 框架性能指标限值

考虑柔性连接对填充墙框架变形性能的显著影响,将数据库分为填充墙与框架采用刚性连接的试件和采用柔性连接的试件两组,其中刚性连接试件83个,柔性连接试件36个。根据上节方法确定每个试件不同性能水准的层间位移角限值,并计算其均值及标准差,参考《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 38591—2020)^[45]中的规定,给出具有84%保证率的砌体填充墙 RC 框架结构性能水准限值。各参数计

算结果如表3、表4所示,为了便于应用,表5中以分数形式给出刚性连接和柔性连接填充墙 RC 框架结构具有84%以上保证率的层间位移角限值。

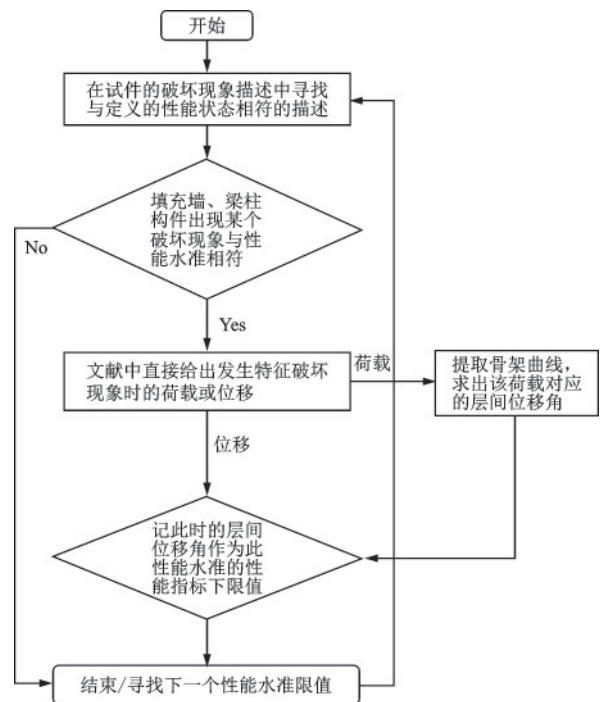


图2 层间位移角限值提取流程

Fig.2 The flow chart of finding IDR limits

表3 刚性连接填充墙 RC 框架各性能水准下的层间位移角统计参数

Table 3 Statistical parameters of IDRs for different performance levels of RC frames with rigid connected infills

性能水准	性能指标下限			
	均值 $\theta_i/\%$	标准差 β_i	84% 保证率 限值 $\theta_{i1}/\%$	有效试件/ 个
DS ₁	0.094	0.037	0.057	45
DS ₂	0.196	0.100	0.096	69
DS ₃	1.034	0.714	0.319	66
DS ₄	2.688	0.909	1.779	62

表4 柔性连接填充墙 RC 框架各性能水准下的层间位移角统计参数

Table 4 Statistical parameters of IDRs for different performance levels of RC frames with flexible connected infills

性能水准	性能指标下限			
	均值 $\theta/\%$	标准差 β_r	84% 保证率限值 $\theta_i/\%$	有效试件/个
DS ₁	0.064	0.042	0.022	7
DS ₂	0.209	0.128	0.082	34
DS ₃	1.425	0.878	0.547	30
DS ₄	3.240	0.865	2.376	22

我国规范《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[1]中给出了不考虑填充墙的 RC 框架结构性能水准定义及对应的层间位移角限值,将其与本文给出的具有 84% 保证率的刚性连接填充墙 RC 框架性能水准层间位移角限值对比于表 6 及图 3。从图 3 和表 6 中可见,对于基本完好性能水准,本文将“填充墙与框架交界处开裂”视为基本完好的界限破坏

状态,规范中并未给出这一限值,而这一破坏的出现说明填充墙框架进入可能需要维修的状态,是具有参考意义的。对于轻微破坏和中等破坏性能水准,规范给出的纯框架结构限值均大于刚性连接填充墙 RC 框架结构,这是由于填充墙的变形能力较差,在较小的层间位移下即会发生破坏。在严重破坏的性能水准下,填充墙 RC 框架结构限值远大于纯框架结构限值,甚至已经超过了规范中倒塌状态的限值,而多数试验中并未出现试件濒临倒塌的破坏状态,说明规范中给出的严重破坏和倒塌状态的限值可能偏于保守,这与许多学者基于试验^[14-17]和数值分析^[46]的研究结果相符。

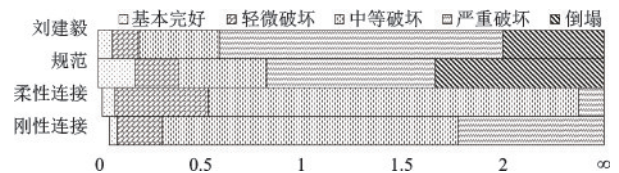


图3 填充墙 RC 框架结构层间位移角限值对比

Fig.3 Comparison of IDR limits of RC frames

表5 填充墙 RC 框架各性能水准下的层间位移角限值

Table 5 IDR limits for different performance levels of infilled RC frames

84% 以上保证率的层间位移角限值				
性能水准	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏
刚性连接	1/1 760~1/1 250	1/1 250~1/320	1/320~1/60	>1/60
柔性连接	1/4 470~1/1 220	1/1 220~1/190	1/190~1/50	>1/50

表6 填充墙 RC 框架结构层间位移角限值对比

Table 6 Comparison of IDR limits of infilled RC frames

单位: %

性能水准	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	坍塌
刚性连接	0.057~0.096	0.096~0.319	0.319~1.779	>1.779	/
规范 ^[1]	0~0.182	0.182~0.400	0.400~0.833	0.833~1.667	>1.667
刘建毅 ^[7]	0~0.07	0.07~0.20	0.20~0.60	0.60~2	>2
柔性连接	0.022~0.082	0.082~0.547	0.547~2.376	>2.376	/

与本文研究类似,刘建毅^[7]根据大量国内外刚性连接填充墙 RC 框架拟静力试验结果给出了各性能水准下的层间位移角限值,具体限值见表 6,并与本文限值对比于图 3。其认为基本完好时的特征破坏现象为墙面初裂,发生轻微破坏时的特征破坏现象为墙缝连贯,而中等破坏与严重破坏状态分别根据骨架曲线上的峰值荷载点对应位移和极限位移确定。其基本完好与轻微破坏的定义方法与本文一致,对比可知在基本完好与轻微破坏两种性能水准下本文的层间位移角限值略大于刘建毅所提出

的限值。由于其数据库中包含了大量国外试件,而本文数据库均为国内试验样本,这可能是导致两者轻微破坏限值不同的原因。对于中等破坏和严重破坏两个性能水准,通过对比可以看出,本文限值与刘建毅提出的限值差异较大,这是两者对性能水准的判定依据不同所造成的。有研究表明^[47]填充墙框架试件的破坏与骨架曲线特征点的对应关系尚不明确,因此本文并未采用此方法确定相应性能水准限值。综上所述,本文所提出的性能水准均由我国填充墙 RC 框架试件的试验破坏现象确定,其

标准更为统一,也与我国国情更为相符。同时,本文给出了采用柔性连接的填充墙 RC 框架结构性能指标限值,考虑的设计参数更为全面。

两种不同连接方式的填充墙 RC 框架限值的对比同样在表 6 和图 3 中给出,对于基本完好性能水准,采用柔性连接结构的限值远小于采用刚性连接的结构,几乎是其 1/2,这是因为基本完好的界限破坏特征为填充墙与框架连接处开裂,柔性连接试件由于只采用抹灰覆盖墙体与框架间的填充材料表面,更容易产生裂缝,这也说明采用柔性连接的填充墙 RC 框架结构虽然分隔了墙体与框架,极大延后了填充墙的开裂,但因接缝处更易开裂也可能在小震下即需要维修。对于轻微破坏的性能水准,两者限值相差不大,说明填充墙与框架的连接方式对于梁、柱开裂的影响并不明显。对于其他破坏状态,柔性连接填充墙 RC 框架的限值均大于刚性连接填充墙 RC 框架,表明柔性连接可以显著提高填充墙 RC 框架结构的侧向变形能力。

3.3 不同砌块类型填充墙 RC 框架的性能水准限值

数据库中填充墙材料种类较多,根据砌块中是否有孔洞可分别为实心砌块和空心砌块,根据制作砌块的材料可分为黏土砌块、粉煤灰砌块、混凝土砌块等,根据制作工艺不同可分为普通烧结砌块、普通养护砌块和蒸压养护砌块等。本文综合制作砌块的材料和加工工艺,将选取数据库中黏土砖、普通混凝土砌块和加气混凝土砌块三类试件,分析比较不同类型的填充墙对性能水准限值的影响。由于柔性连接试件数量较少,本文仅对刚性连接试件的砌块类型影响进行分析,其中,采用黏土砖填充墙的试件 17 个,采用普通混凝土砌块填充墙的试件 37 个,采用加气混凝土砌块填充墙的试件 18 个。表 7 和图 4 分别为不同墙体各性能水准的层间位移角限值及其对比,为了便于应用,表 7 中同时给出了小数和分数形式的限值结果。由图 4 可以看出,在

基本完好和轻微破坏状态下,三类墙体的层间位移角下限值接近,说明墙体砌块材料对这两个破坏状态的影响并不显著。对于中等破坏和严重破坏状态,黏土砖、普通混凝土砌块和加气混凝土砌块填充墙 RC 框架的层间位移角限值依次增大,说明三者的侧向变形能力也依次增强。根据表 1 可知,中等破坏和严重破坏状态的性能水准描述中,主要的破坏特征为框架梁、柱的轻微裂缝,明显裂缝以及混凝土剥落、主筋外露甚至压曲等现象,而黏土砖填充墙框架的相应层间位移角限值更小,说明黏土砖填充墙虽然能在地震中提供更大的侧向刚度,但同时也因其更显著的斜撑作用,对梁、柱端部施加了更大的附加轴力和剪力,增大了梁、柱内力,导致梁、柱更早发生破坏。类似地,相较于普通混凝土砌块,加气混凝土砌块的质量更小,砌体强度也更低,因此其斜撑作用弱于普通混凝土砌块,对梁、柱的影响更小。综上所述,新型的加气混凝土砌块相较于普通混凝土砌块和传统的黏土砖更有益于提高填充墙 RC 框架结构的变形能力。

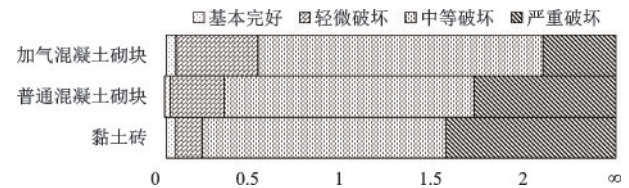


图 4 不同材料刚性连接填充墙 RC 框架结构层间位移角限值对比

Fig.4 Comparison of limit values of IDRs of rigid connected RC frames with different infilled walls

4 结 论

(1)对以往填充墙 RC 框架拟静力试验的试件基本信息及试验结果进行整理分析,参考我国规范定义了 5 个填充墙 RC 框架结构的性能水准及相关

表 7 不同材料刚性连接填充墙 RC 框架结构层间位移角限值对比

Table 7 Comparison of limit values of IDRs of rigid connected RC frames with different infilled walls 单位: %

砌块类型	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏
黏土砖	0.062~0.109(1/1 613~1/917)	0.109~0.256(1/917~1/391)	0.256~1.578(1/391~1/63)	>1.578(>1/63)
普通混凝土砌块	0.051~0.081(1/1 961~1/1 235)	0.081~0.375(1/1 235~1/267)	0.375~1.729(1/267~1/58)	>1.729(>1/58)
加气混凝土砌块	0.060~0.112(1/1 667~1/893)	0.112~0.557(1/893~1/180)	0.557~2.105(1/180~1/48)	>2.105(>1/48)

注: 为了方便应用,括号中给出各限值的分数形式

描述,根据试验现象提取出数据库中试件首次到基本完好、轻微破坏、中等破坏和严重破坏性能水准的层间位移角,建立了一个本土化填充墙 RC 框架试验数据库。

(2)根据填充墙与框架的连接方式,将数据库中的试件分为刚性连接和柔性连接两组,对试件达到不同性能水准时的层间位移角进行统计分析,得到刚性连接和柔性连接两类填充墙 RC 框架结构不同性能水准对应的具有 84% 保证率的层间位移角限值,可作为抗震设计和抗震性能评估中此类结构的性能水准判定标准。

(3)本文限值与规范限值对比表明,规范中给出的严重破坏和倒塌状态的限值可能偏于保守。与已有研究相比,本文提出的性能指标限值具有性能水准判定标准统一、数据更符合我国国情的特点。此外,相较于刚性连接,柔性连接可以显著提高填充墙 RC 框架结构的侧向变形能力,但墙体与框架连接处更易开裂,将更早进入需要维修的状态。

(4)对比分析了三种不同砌块类型的刚性连接填充墙 RC 框架结构性能水准限值的差异,相较于传统的黏土砖和普通混凝土砌块,采用新型加气混凝土砌块的填充墙 RC 框架结构具有更好的侧向变形能力。同时,给出了刚性连接不同材料填充墙 RC 框架结构不同性能水准的层间位移角限值。

参考文献:

- [1] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [2] ASCE.FEMA 356 Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings[R]. Washington, D. C.:Federal Emergency Management Agency,2000.
- [3] 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)
- [4] 李旭东.轻质砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013. Li X D. Experimental and analytical study of seismic performance of lightweight masonry-infilled RC frames [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [5] 胡艳容.钢筋混凝土框架填充墙结构抗震性能分析及设计[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010. Hu Y R. Seismic performance analysis and design of reinforced concrete infilled frame structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] 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].西安建筑科技大学学报,1985(2):1-21. Tong Y S, Qian G F. Deformation performance and load-bearing capacity of brick-infilled RC frames [J]; Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 1985(2): 1-21. (in Chinese)
- [7] 刘建毅.填充墙框架结构基于性能抗震评估研究[D].西安:西安建筑科技大学,2008. Liu J Y. Performance-based seismic evaluation for infilled frames [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 黄群贤.新型砌体填充墙框架结构抗震性能与弹塑性地震反应分析方法研究[D].泉州:华侨大学,2011. Huang Q X. Study on seismic behavior and elastic-plastic analysis method for seismic responses of RC frame infilled with new masonry [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2011. (in Chinese)
- [11] 建(构)筑物地震破坏等级划分:GB/T 24335—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [12] 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 Z Y, 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)
- [13] 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 J H, Xue Y T, Xiao C Z, 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)
- [14] 林超. 新型砌体填充墙框架抗震性能与共同作用机理研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2019.
- Lin C. Seismic performance and interaction mechanism of infilled RC frames using new masonry blocks [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2019. (in Chinese)
- [15] 黄靓, 滕瀚思, 施楚贤, 等. 装配式混凝土砌块填充墙 RC 框架结构抗震性能试验研究[J]. 结构工程师, 2020, 36(3): 141-150.
- Huang L, Teng H S, Shi C X, et al. Experimental research on seismic behavior of RC frame structure with prefabricated concrete block infill wall [J]. Structural Engineers, 2020, 36(3): 141-150. (in Chinese)
- [16] 张永兵, 郭新华, 朱腾飞, 等. 新型砌体填充墙 RC 框架结构抗震性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(5): 1166-1176.
- Zhang Y B, Guo X H, Zhu T F, et al. Seismic performance of new masonry-infilled reinforced concrete frame building[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2021, 46(5): 1166-1176. (in Chinese)
- [17] 谢贤鑫. RC 框架中砌体填充墙的受力性能和地震易损性研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2020.
- Xie X X. The seismic behavior and fragility of masonry infills in reinforced concrete frame structures [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2020. (in Chinese)
- [18] 吕超. 轻质条板填充墙 RC 框架结构抗震性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- Lyu C. Study on seismic behaviors of lightweight wall-board-infilled RC Frames [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018. (in Chinese)
- [19] 金焕. 填充墙 RC 框架结构地震破坏机理及关键抗震措施研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014.
- Jin H. Research on seismic failure mechanisms and key aseismic measures for masonry-infilled RC frame structures [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2014. (in Chinese)
- [20] 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 L H. 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)
- [21] 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 Z Y, 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)
- [22] 蒋利学, 郑乔文. 砖填充墙加固前后钢筋混凝土框架抗震性能试验[J]. 工业建筑, 2009, 39(10): 40-47.
- Jiang L X, Zheng Q W. Tests of seismic behavior of reinforced concrete frames with infilled wall or strengthened infilled wall [J]. Industrial Construction, 2009, 39(10): 40-47. (in Chinese)
- [23] 李柏强. 现浇泡沫混凝土填充墙 RC 框架抗震性能试验研究[D]. 广州: 广州大学, 2021.
- Li B Q. Research on seismic performance of RC frame filled with cast-in-place foamed concrete [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2021. (in Chinese)
- [24] 陈国钦. 蒸压加气混凝土砌块填充墙抗震性能试验研究[J]. 福建建设科技, 2007(6): 58-60.
- Chen G Q. Experimental study on seismic performance of autoclaved aerated concrete block filled walls [J]. Fujian Construction Science & Technology, 2007(6): 58-60. (in Chinese)
- [25] 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.
- Su Q W, Li Y, Bu Q T, et al. Experimental and simulative study of seismic performance on fired hollow bricks infilled reinforced concrete frames with horizontal slip layers [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(1): 223-228. (in Chinese)
- [26] 卞文军, 范力, 李升旗. 不同连接方式预制复合墙板填充墙对框架抗震性能的影响[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增1): 196-203.
- Bian W J, Fan L, Li S Q. Influence of prefabricated composite infilled wallboard with different connection modes on seismic behavior of frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Sup1): 196-203. (in Chinese)
- [27] 郭子雄, 黄群贤, 魏荣丰, 等. 填充墙不规则布置对 RC 框架抗震性能影响试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 46-54.
- Guo Z X, Huang Q X, Wei R F, et al. Experimental study of the seismic behavior of irregularly brick infilled

- RC frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(11): 46-54. (in Chinese)
- [28] 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)
- [29] 熊立红, 罗明康, 陈国武, 等. BFG增强蒸压加气混凝土砌块填充墙框架抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(3): 134-141.
Xiong L H, Luo M K, Chen G W, et al. Experimental study on seismic performance of BFG autoclaved aerated concrete block infilled frame[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(3): 134-141. (in Chinese)
- [30] 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 Q X, Guo Z X, Zhu Y R, 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. (in Chinese)
- [31] 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 X, Zha S M. 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)
- [32] 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 X J. Study on seismic behavior of flexible connection frame structure infilled with new masonry[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [33] 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 L. Experimental study on seismic behavior and nonlinear analysis of masonry-infilled RC frame structure[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [34] 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)
- [35] 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)
- [36] 孙跃东, 肖建庄, 周德源, 等. 再生轻质砌块填充墙再生混凝土框架抗震性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(5): 126-133.
Sun Y D, Xiao J Z, Zhou D Y, et al. Experimental research on seismic behavior of recycled concrete frame filled with recycled lightweight masonry blocks[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2005, 25(5): 126-133. (in Chinese)
- [37] 李艳艳, 陈艳凤, 韩红霞, 等. 带缝填充墙框架结构抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(2): 14-17, 23.
Li Y Y, Chen Y F, Han H X, et al. Experimental study on seismic behavior of infilled frame structures with slit[J]. Industrial Construction, 2013, 43(2): 14-17, 23. (in Chinese)
- [38] 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)
- [39] 王春武. 钢筋混凝土框架-砌体墙结构性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2002, 32(7): 71-73, 86.
Wang C W. Experiment study on mechanical behaviors of reinforced concrete frame structure with masonry walls filling up[J]. Industrial Construction, 2002, 32(7): 71-73, 86. (in Chinese)
- [40] 汪裕洲, 赵羽习, 赵云, 等. 钢筋混凝土框架-再生填充墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(3): 53-62.
Wang Y Z, Zhao Y X, Zhao Y, et al. Experimental study on seismic behavior of RC frame with infilled recycled wall[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(3): 53-62. (in Chinese)
- [41] 朱惠芳. 混凝土横孔空心砌块填充墙对RC框架结构抗震性能影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
Zhu H F. Research on the influence horizontal-hole hollow blocks infilled wall on seismic performance of reinforced concrete frame structure[D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)

(本文编辑: 张艺)

(下转第 1357 页)