

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.130



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 砌体墙转动变形现象及其对抗震性能的影响 研究综述

郭猛<sup>1</sup>, 李薇薇<sup>2</sup>, 贾英杰<sup>2</sup>, 范旺生<sup>2</sup>

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 为了解砌体墙破坏过程中的转动现象及转动变形对砌体墙抗震性能的影响, 对普通砌体墙、设置构造柱砌体墙、加固砌体墙等在试验过程中的转动现象进行提炼, 综述不同试件设计、受力条件、加固方式等因素下转动变形对砌体墙破坏模式的影响, 探讨转动变形对砌体墙抗震性能的影响规律。结果表明: 在砌体墙受力过程中, 转动现象普遍存在, 甚至出现转动变形控制的破坏现象; 转动变形降低了砌体墙承载力及等效抗侧刚度, 发生转动破坏时砌体墙变形能力有所提高。目前, 有关砌体墙抗震试验方面的文献资料普遍缺乏关于转动现象的描述, 但这并不代表没有出现转动变形, 建议后续相关研究中对砌体墙转动变形现象及其对抗震性能的影响予以重视。

**关键词:** 砌体结构; 砌体墙; 转动变形; 破坏模式; 抗震性能; 承载力

**中图分类号:** TU362      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2023)02-0100-11

## Rotational deformation of masonry walls and its influence on seismic performance

GUO Meng<sup>1</sup>, LI Weiwei<sup>2</sup>, JIA Yingjie<sup>2</sup>, FAN Wangsheng<sup>2</sup>

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China)

**Abstract:** In order to understand the rotation phenomenon in the failure process of masonry wall and the influence of rotation deformation on the seismic performance of masonry wall, rotation of ordinary masonry wall, masonry wall with constructional column and reinforced masonry wall are extracted, and the rotation deformation under different specimen designs, stress conditions, reinforcement methods and other factors are summarized. The influence of rotational deformation on the seismic performance of masonry wall is discussed. The results show that: rotation is common in the stress process of masonry wall, and even appears the failure phenomenon of rotation deformation control; rotation deformation reduces the bearing capacity and equivalent lateral stiffness of masonry wall, and the wall deformation capacity is improved when rotation failure occurs. At present, the literature of masonry wall seismic test generally lacks description of rotation phenomenon, but it is

**收稿日期:** 2021-02-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(51778594)

**作者简介:** 郭猛(1982-), 男, 博士, 研究员, 主要从事建筑结构抗震设计理论研究, E-mail: guomeng673@163.com。

**Received:** 2021-02-24

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51778594)

**Author brief:** GUO Meng (1982-), PhD, research fellow, main research interest: theory of structural seismic design, E-mail: guomeng673@163.com.

not without rotation deformation. In the subsequent research work, it is suggested to pay attention to the rotation deformation phenomenon of masonry wall and its impact on seismic performance.

**Keywords:** masonry structure; masonry wall; rotational deformation; failure mode; seismic performance; bearing capacity

在中国,砌体结构广泛存在,由于具有就地取材、经济方便、便于施工等优点,普遍应用于工业及民用建筑中。由于材料自身抗拉强度低、脆性等特点,未进行抗震设防或经历大震作用时,砌体结构容易发生严重破坏甚至倒塌,危害人民生命财产安全<sup>[1-3]</sup>。作为块体和砂浆砌筑而成的整体构件,砌体墙受力时内部应力分布、变形性能和破坏形态较复杂,破坏过程中多种变形机制兼有发生。

水平与竖向荷载作用下,砌体墙破坏形式主要有3类<sup>[4]</sup>:剪切破坏、转动失效、剪切滑移失效。剪切破坏包括两种具体破坏形态,当砌体墙截面上正应力 $\sigma$ 与剪应力 $\tau$ 比值较大时,砌体沿阶梯形裂缝受剪,因剪切变形和裂缝处的滑移变形而破坏;当 $\sigma/\tau$ 比值更大时,砌体将沿压应力作用方向产生裂缝,带有明显的受压破坏特征,发生斜压破坏。在试验中,竖向力较小时,剪切滑移失效偶有出现,但由于房屋结构布置的复杂性,实际房屋遭受地震时,其很少单独出现。

砌体墙的转动失效或转动破坏是另一类典型的破坏模式,尤其当砌体墙高宽比较大时,可能发生沿齿缝或水平通缝的转动变形,视为转动破坏。砌体墙具有“压力传递、拉力截断”的特点,在水平荷载作用下,墙体底部及顶部受拉区边缘灰缝砂浆很快达到受拉极限应变,出现水平裂缝,此时,出现砌体墙绕着受压区转动的现象。对于砌体墙的转动破坏模式,学者们进行了一定的试验研究和理论分析<sup>[4-5]</sup>,但对砌体墙转动变形现象和转动破坏模式的关注相对较少。

在中国,目前对砌体结构的抗侧刚度、承载力计算和抗震验算仅考虑了弯曲和剪切作用,没有计入转动变形的影响。影响砌体墙转动变形的因素、转动变形对砌体墙抗震性能的影响规律、如何在抗震设计中考虑转动变形等是完善砌体结构抗震设计理论需要进一步深入研究的问题。笔者查阅砌体墙抗震试验相关的文献资料,对砌体墙破坏过程中的转动现象进行提炼,探讨转动变形对砌体墙抗震性能的影响,为后续研究转动变形影响下的砌体结构抗侧刚度、承载力计算方法等提供参考。

## 1 砌体墙的转动变形现象

在拟静力试验中,砌体墙存在不同程度的转动变形现象,包括普通砌体墙试件、构造柱砌体墙试件及加固砌体墙试件等。由于试件设计、墙体材料、加载条件等影响因素不同,因此,砌体墙转动变形现象存在差异,各试验研究的目的及文献介绍的侧重点也不同。

矩形立面形状砌体墙的转动变形与弯曲变形存在明显区别,几种变形机制示意如图1所示。弯曲变形大致均匀且连续地分布在最大弯矩对应的局部范围内;而转动变形开裂裂缝一般只有一条,开裂后裂缝两侧的砌体墙基本不会再发生弯曲变形,该裂缝处的开裂和闭合引起砌体墙顶部发生水平位移。

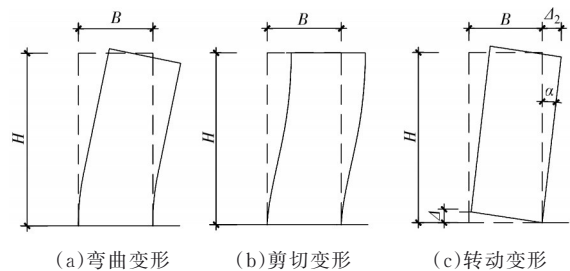


图1 几种变形机制示意

Fig. 1 Several deformation mechanisms

### 1.1 试验中普通砌体墙的转动变形现象

普通砌体墙指未设置构造柱、未配置钢筋的砌体墙,由于砌体材料的脆性性质、约束不足,容易出现转动变形现象。

试验过程中矩形立面砌体墙的宏观变形表现为:试件一侧底部(顶部)略微翘起,反向加载时另一侧底部(顶部)微微翘起,出现转动变形;试件底部往往存在水平贯通裂缝,角部转动轴处砖块或砂浆被压碎。石杰等<sup>[6]</sup>进行了嵌筋加固技术对砌体抗震性能的影响试验,加载过程中素墙片(普通砌体墙)试件底部两侧先后翘起,底部形成水平贯通裂缝,底角砖块被压碎,呈现典型的转动变形现象。

吴昊<sup>[7]</sup>进行了砌体结构纵向窗间墙抗震试验,联肢墙ZQ1的破坏简图见图2。根据对该试件破坏

过程的描述可知,水平位移达到 $0.36\text{ mm}$ ( $1\Delta$ )时,窗间墙A出现水平受弯裂缝;水平位移达到约 $1.08\text{ mm}$ ( $3\Delta$ )时,窗间墙B出现水平受弯裂缝,两片窗间墙开始呈现以转动变形为主的变形机制; $5\Delta\sim 12\Delta$ 加载阶段窗间墙以转动变形为主,期间窗间墙A的墙身中部斜裂缝有所发展; $13\Delta$ 加载时,窗间墙A形成明显的斜裂缝,随后再加载时斜裂缝宽度变宽,此时该墙肢变形以剪切变形为主,而窗间墙B仍以转动变形为主,直至窗间墙B破坏严重,停止试验。

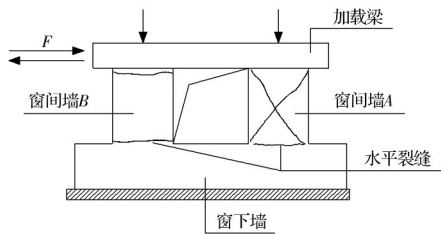


图2 文献[7]中联肢墙ZQ1破坏示意

Fig. 2 Damage schematic of joint wall ZQ1 in reference [7]

文献[6]中的砌体墙试件和文献[7]中两侧带窗下墙的窗间墙其立面均是普通的矩形立面,从转动变形的形成机制来看,竖向荷载下墙体或窗间墙底部形成受压区,而水平荷载下弯矩作用则导致底部一侧受拉、另一侧受压;当弯矩在受拉一侧形成的拉应力超过竖向荷载在该处的压应力且灰缝砂浆达到受拉极限应变时,出现水平裂缝,随之墙体开始出现轻微的转动现象,随着水平荷载或位移的增加,转动现象愈加明显。

Choudhury等<sup>[8]</sup>研究了门窗洞口对砌体墙抗震性能的影响,对3片砌体墙试件及1栋单层砌体房屋模型进行了加载试验,其中,2片砌体墙试件分别开门洞口、窗洞口,砌体房屋模型试件中1片外墙开门洞,相邻2片外墙均开窗洞。结果表明,砌体墙开设门洞口形成高宽比较大的独立墙肢或者开设窗洞口形成“L”形墙肢时,无论单片砌体墙还是房屋模型中的砌体墙,均表现出明显的转动变形现象,如图3所示。

在受力过程中,带有门洞口、窗洞口的普通砌体墙形成的主裂缝位于门窗间墙范围内,但存在受洞口影响而形成的其他斜向裂缝,如沿门洞口顶角斜向开展的裂缝,这预示着窗间墙在过梁位置存在转动变形。Wang等<sup>[9]</sup>对设置预制混凝土砌块构造柱砌体墙进行了抗震性能对比试验,设置门洞口的试件W-2破坏情况见图4。主要破坏区域为门洞口

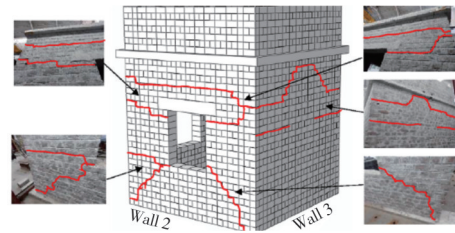


图3 文献[8]中砌体房屋开裂情况

Fig. 3 Cracking of masonry building in reference [8]

两侧墙肢,但洞口顶面角点均存在斜向上开裂的裂缝,符合倒“L”形墙体的开裂及转动规律。



图4 文献[9]中砌体墙W-2开裂情况

Fig. 4 Cracking of masonry wall in reference [9]

对于文献[8]、文献[9]等非对称立面砌体墙,其转动变形的成因与普通矩形立面墙体类似,但其转动变形的主体与墙体立面形状密切相关。“L”形砌体墙中,自窗间墙与窗下墙的交点处形成之后,裂缝斜向下方开展,其转动主体包括窗间墙及下部近似三角形的区域;倒“L”形墙体中,转动主体则包括门间墙及上部近似三角形或梯形的区域。

分析文献中砌体墙破坏特征可知,非矩形立面砌体墙或者带有门洞口、窗洞口砌体墙转动变形规律与矩形立面砌体墙区别较大。房屋尽端带有窗洞口的砌体墙计算单元简化后呈非对称立面的“[”形状。当水平荷载作用方向由右向左(相应于“[”形)时,转动变形规律为窗间墙与窗下墙的角点处首先开裂,裂缝斜向下方延伸,转动主体呈梯形形状。从应力角度分析,在水平与竖向荷载作用下,“L”形或“[”形墙体的窗下墙与窗间墙重叠的节点区域最大主拉应力轨迹线沿着节点区呈对角线分布,墙体转动与裂缝的斜向下方开展是同时进行的,该现象可在试验中明显观察到。

随着砂浆强度等级的提高,砌块之间的粘结程度增强,墙体开裂产生转动的水平荷载值就越大。唐曹明等<sup>[10]</sup>进行了单面水泥砂浆面层加固低强度砖墙抗震性能试验,砂浆设计强度为 $0.4$ 、 $1.0\text{ MPa}$ 的多片砌体墙试件均出现了转动变形现象,砂浆强度

低的试件转动变形出现得更早。竖向压应力是影响砌体墙转动变形发生、发展的重要因素,从概念上分析,竖向压应力越大,砌体墙越不易发生转动变形,竖向压应力越小,则越容易出现转动变形,且变形幅度越大。在文献[10-15]进行的砌体墙抗震性能试验中,均涉及到变化竖向压应力对砌体墙抗震性能的影响,压应力与转动变形的关系基本符合上述规律。唐曹明等<sup>[10]</sup>试验显示,砂浆强度为0.40 MPa的5片试件中,竖向压应力为0.10 MPa时,墙体均产生转动变形,竖向压应力为0.30 MPa时,部分墙体出现转动变形,而竖向压应力为0.60 MPa时,墙体均未出现转动变形。

杨元秀等<sup>[15]</sup>进行了蒸压粉煤灰实心砖墙片抗震性能试验研究,试验中竖向压应力为0.45、0.3 MPa时,砌体墙底部出现了明显的水平裂缝,墙体一端有被抬起的趋势,墙角砖出现局部受压破碎现象,开裂后试件出现较为明显的转动变形,而竖向压应力为0.6 MPa时,墙体没有出现明显的转动现象。因此,当竖向压应力足够大时,砌体墙以常见的“X”形裂缝或斜裂缝破坏为主,不会出现明显转动变形现象。

综合上述文献,在试验过程中,普通砌体墙的转动变形现象客观存在,尤其在“L”形、“[”形等非对称立面试验中,存在明显的转动变形现象。

### 1.2 设置构造柱砌体墙试验中的转动变形现象

设置构造柱、圈梁是砌体结构抗震设防的重要措施之一,构造柱一般设置在纵横墙交接处或墙体端部,可以提升墙体的整体性及承载力。设置构造柱砌体墙是否存在转动变形现象,与构造柱的位置及砌体墙是否开设门窗洞口等有关。

学者们对设置构造柱砌体墙进行了较多的试验研究,所设计试件大多将构造柱设置在砌体墙两侧,墙体为实心砌体墙,由于构造柱纵筋向下锚入底梁,受拉侧构造柱纵筋承担拉力,很难出现砌体墙整体转动现象<sup>[9, 16-18]</sup>。

文献[19]进行了“丰”字形构造柱砌体墙抗震试验,试件中部设置构造柱,厚度为240 mm,高度为2 000 mm,主体墙肢宽度为2 200 mm,两侧带长度为600 mm、高度为400 mm的窗下墙。构造柱单独设置和“丰”字形构造柱砌体墙试件的底部均出现水平裂缝,随着水平荷载的增加,向中部延伸并发展为水平通缝。

文献[7]进行了砌体结构纵向窗间墙抗震性能

试验,在试件ZQ2~ZQ5窗间墙中部设置构造柱,以构造柱的截面及配筋最大的ZQ5为例,破坏过程简述见表1。可以看出,在出现水平裂缝至位移6.6 mm时,试件存在转动变形现象。中部设置构造柱的砌体墙转动程度介于普通砌体墙和两侧构造柱砌体墙之间。对于构造柱设置在墙体中部或构造柱设置在砌体墙两侧但墙体中部设置门窗洞口的情况,仍存在较明显的转动变形现象。

表1 文献[7]中砌体墙ZQ5试验结果

Table 1 Test results of masonry wall ZQ5 in reference [7]

| 加载阶段            | 主要试验现象                         |
|-----------------|--------------------------------|
| 0~100 kN/0.6 mm | 窗间墙受拉部位出现水平裂缝                  |
| 加载至3.6 mm       | 以水平形状裂缝为主,部分水平裂缝延伸至构造柱并贯穿构造柱截面 |
| 加载至4.2 mm       | 两片窗间墙均有3条主水平裂缝,内侧窗间墙开始出现斜向裂缝   |
| 加载至6.6 mm       | 水平裂缝不断延伸、变宽,外侧窗间墙开始出现斜向裂缝      |
| 加载至10.8 mm      | 两片窗间墙均出现斜裂缝,并沿对角发展为斜裂缝         |

两侧设置构造柱、中部设置门窗洞口时,砌体墙整体不会出现转动变形,但洞口两侧墙肢可能存在特定加载方向下的局部转动变形现象。图5所示为Wang等<sup>[9]</sup>进行的设置构造柱及窗洞口试件开裂情况,特定加载方向下的局部转动变形是指,水平荷载自左向右加载时,窗洞口右下角出现斜裂缝并向斜下方延伸,转动主体呈梯形;同样,水平荷载自右向左加载时,也存在这类斜裂缝及转动变形现象。



图5 文献[9]中砌体墙BC2W-4开裂情况

Fig. 5 Cracking of masonry wall BC2W-4 in reference [9]

文献[20]进行了带多构造柱开洞砌体墙的抗震性能试验,试件形状如图6所示(试验时间大约是1999年或之前,未给出试件破坏照片或裂缝分布)。根据对带边框构造柱开洞试件WH-1b的破坏过程描述,门洞口外侧墙肢主要是洞口顶部、底部水平

开裂,窗洞口沿洞口角点斜下方(洞口对角方向)开裂,加载过程中,裂缝形状及走向表明试件存在转动变形现象。

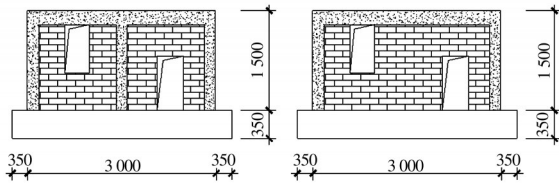


图 6 文献[20]中砌体墙试件示意(WH-1a、WH-1b)

Fig.6 Sketch of masonry wall specimen in reference [20]

综上所述,砌体墙中部设置构造柱,加载过程中存在转动变形现象;砌体墙两侧设置构造柱但中部设置了门窗洞口,则洞口两侧墙肢可能存在特定加载方向下的局部转动变形现象。窗间墙形成斜裂缝后,以斜裂缝延伸、变宽为特征的整体剪切变形逐渐取代转动变形,成为窗间墙的主要变形方式,但转动变形参与了破坏过程并对试件的整体或局部破坏产生一定影响。

### 1.3 加固砌体墙试验中的转动变形现象

既有砌体结构常见加固方法包括钢筋网-砂浆面层加固、混凝土板墙加固、外加圈梁-构造柱加固等,还有玄武岩纤维(BFRP)格栅加固、高延性纤维增强水泥基复合材料(ECC)面层加固等较新加固方式。加固后砌体墙整体性增强,开裂荷载及极限承载力提高。

从转动变形角度来看,当加固方案以提高砌体墙受剪能力为主时,加固后砌体墙在水平荷载作用下仍可表现出转动变形特点,相对未加固砌体墙,转动变形出现的时间有不同程度延后。在受剪加固砌体墙破坏过程中,转动变形客观存在,甚至会出现受转动变形控制的现象。

张斯等<sup>[21]</sup>采用玄武岩纤维布对砖砌体墙进行加固,进行加固试件与未加固试件的对比试验,加固试件两片,“X”形对角粘贴玄武岩纤维布加固预损砖墙 BW1-1 及未损砖墙 BW1-2,对主要试验现象的描述见表 2。可见,在加载的大部分时间,开裂损伤后,无论加固砌体墙还是未损加固砌体墙,均存在明显的转动变形现象。

表 2 文献[21]中砌体墙试验结果

Table 2 Test results of masonry wall in reference [21]

| 编号             | 阶段                  | 主要试验现象                     |
|----------------|---------------------|----------------------------|
| W1             | 推 0.60 mm           | 底层角部出现水平裂缝并贯通              |
|                | 推拉 2.4 mm           | 角端出现多条平行且向中心延伸的阶梯形裂缝       |
|                | 推 3.04 mm/拉 3.63 mm | 各角端出现多条平行且向中心延伸的阶梯形裂缝      |
| BW-1<br>(预损加固) | 推 89.83 kN          | 下部出现水平裂缝,上部未加固区出现阶梯形裂缝     |
|                | 推 8 mm              | 既有阶梯形裂缝缝宽增大,下部未加固区新增多条水平裂缝 |
| BW-2<br>(未损加固) | 拉 91.17 kN          | 下部未加固区出现水平裂缝               |
|                | 推 4.23 mm/拉 6.54 mm | 未加固区内裂缝不断沿水平和阶梯方向延伸        |

赵少伟等<sup>[22]</sup>进行了 BFRP 加固砖砌体墙试验,试件高度为 1 100 mm、宽度为 1 600 mm、高宽比为 0.69,试件厚度为 240 mm,竖向压应力设计值为 0.6 MPa,砖强度等级为 MU10,砂浆强度等级为 M10;采用 BFRP 材料,粘贴方式为“X”形和井字形。根据试验结果,未加固砌体墙 W-1、加固试件 W-2、W-3、W-4 及 W-1 破坏后再加固试件 W-5 均存在一定的转动现象,破坏模式可视为转动失效破坏。从试件设计与加载装置来看,虽然试件属于低矮墙,竖向压应力也较大,但砂浆强度高且竖向荷载施加在试件中部,仍然发生了转动失效破坏。

唐曹明等<sup>[10]</sup>、赵成文等<sup>[23]</sup>、翁大根等<sup>[24]</sup>、石杰等<sup>[6]</sup>、焦晨晓等<sup>[25]</sup>、吴建锋<sup>[26]</sup>及 Guerreiro 等<sup>[27]</sup>分别进

行了不同砌体墙加固试验研究,加固方法包括水平配筋加固、GFRP 粘贴墙面加固、钢筋网-砂浆面层加固、CBF 格栅增强加固、嵌筋加固、预制 RC 板墙-碳纤维布加固等。

上述学者从研究目标出发,重点介绍加固前后墙体承载力、变形等抗震性能的差异,并未关注试验中墙体试件的转动变形现象。但分析可知,以提高试件抗剪能力为目标的加固,多数试件存在不同程度的转动变形现象,与普通砌体墙(未加固砌体墙)转动现象相似。

从加固作用机理角度分析,抗剪加固后,砌体墙自身抗剪承载能力得到提高,相同水平与竖向荷载作用下,不容易再发生自身受剪破坏;另一方面,加

固时如果不通过增设两侧端部纵向配筋等方式增强砌体墙抗弯能力,随着水平荷载的增加,在试件底部/顶部必然出现水平开裂而发生转动变形现象。

对于自身受剪能力较低的砌体墙,采用粘贴碳纤维布等方法加固时,加固材料与原墙体存在变形协调及先后受力问题,水平荷载作用下也可能首先出现剪切斜裂缝,加固材料发挥作用后,在墙体顶部/底部出现水平裂缝。

## 2 转动变形对砌体墙抗震性能的影响

### 2.1 转动变形对砌体墙破坏模式的影响

砌体墙发生破坏时不仅存在剪切破坏,也会发生弯曲破坏、滑移破坏和转动失效。以外纵墙的窗间墙为例,转动变形出现后,砌体墙存在两种典型破坏模式,如图7所示。转动失效是较常见的一种砌体墙破坏模式,与墙体立面形状、材料强度、竖向荷载作用方式、高宽比、窗下墙约束条件等因素有关,发生何种破坏模式的关键在于窗间墙水平截面的实际受剪能力是否大于其受到的水平荷载。一般来说,立面形状复杂、高宽比大、竖向压应力小、材料强度高的砌体墙容易出现整体转动或局部转动失效,而竖向压应力大、材料强度低、高宽比小尤其是低矮砌体墙,容易出现受剪破坏。

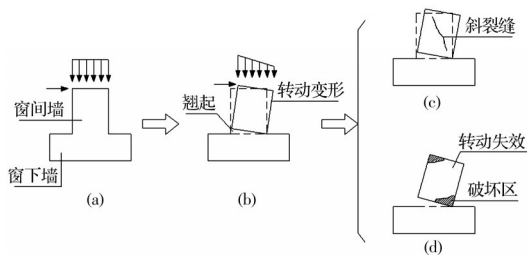


图7 窗间墙的破坏模式

Fig. 7 Failure mode of wall between windows

两种典型破坏模式的前期变形特征相差不大,区别主要表现在加载的中后期。第1种破坏模式,如图7(a)、(b)、(c)所示,首先在砌体墙墙底角部产生水平裂缝,初始水平裂缝发展贯通,继续加载,墙身中部产生斜裂缝,并最终沿斜裂缝剪切破坏。第2种破坏模式,如图7(a)、(b)、(d)所示,砌体墙底部出现水平裂缝,水平裂缝沿横向贯通,墙体一侧顶部和底部同时翘起,最终因墙体顶部侧移过大而出现转动失效现象,即墙体没有发生斜裂缝破坏,而是由于转动变形幅度过大,失去继续承载能力。

在文献[28]进行的拆除窗下墙对砌体墙抗震性

能影响的试验研究中,L形砌体墙的破坏及裂缝开展情况如图8所示。L形砌体墙主要分布在一侧为门洞口、另一侧为窗洞口及砌体房屋尽头转角处。试验结果表明,加载方向不同时呈现两种不同破坏模式,正向加载(自右向左)时,砌体墙的转动主体为窗间墙,窗间墙出现斜裂缝,破坏模式为剪切破坏;反向加载(自左向右)时,砌体墙的转动主体为窗间墙及其下部三角形区域,窗间墙与窗下墙交界处出现斜向下方的斜裂缝,破坏模式为转动失效破坏。

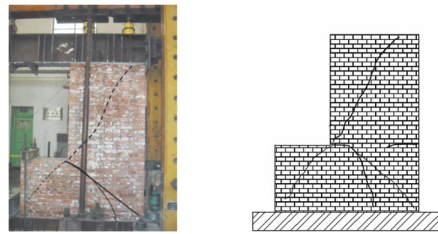


图8 L形砌体墙裂缝开展情况

Fig. 8 Crack development of L-shaped masonry wall

根据文献[28]的试验数据分析,从转动变形参与砌体墙总变形程度来看,在加载过程中,窗间墙同时存在剪切变形、弯曲变形、转动变形3种变形机制的时间约占受力全过程的36%以上,而自墙体开裂后,窗间墙转动变形持续存在至试验结束,约占受力全过程的90%以上。

文献[29]进行了开洞口砌体墙抗震性能有限元分析,模拟砌体墙的转动现象,认为砌体墙的转动行为可能导致轴向荷载的变化,进而改变其抗侧性能。文献给出了以数值形式和简图形式表达的转动破坏模式,如图9所示。砌体结构中门窗洞口上方大多设置过梁,且过梁的支撑长度有严格要求,实际很少会出现自洞口端上下方向的竖向开裂模式,而多类似于图3、图4所示形式,或出现过梁(含过梁上方窗下墙)自身的交叉裂缝破坏,但其对门窗间墙的转动模拟仍有一定参考意义。

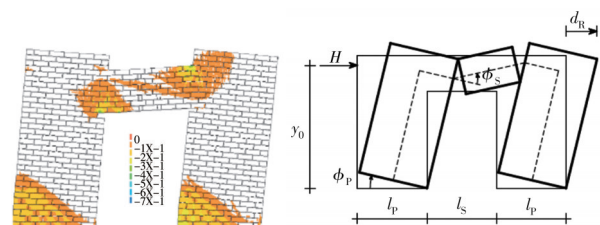


图9 开洞砌体墙的转动行为

Fig. 9 Rocking behavior of masonry wall with opening

分析图 3、图 5、图 7 所示窗间墙受剪破坏和图 8 所示破坏现象可知,虽然砌体墙的最终裂缝表现为斜裂缝特征,但自开裂初期至斜裂缝出现前,墙体转动变形都不同程度存在。然而,由于砌体墙往往最终出现斜向裂缝或 X 形裂缝,使得研究者们将其归入剪切破坏类型,忽视了转动变形及转动变形影响下墙体的实际破坏机制。

## 2.2 转动变形对砌体墙承载力的影响

通过影响变形及破坏过程,转动变形对砌体墙承载力产生影响,一般来说,转动变形出现后,砌体的骨架曲线向位移轴偏转,极限荷载及破坏荷载均出现不同程度降低。转动变形对承载力的影响程度与砌块材料、高宽比、是否开洞、砂浆强度及竖向压力等因素有关。当砌体墙尺寸参数等因素发生改变时,其直接影响墙体承载力,同时,转动变形发生幅度随相关因素的变化而变化,亦进一步影响到砌体墙承载力,形成二阶效应。

高宽比通过影响砌体墙转动变形而影响其承载力,出现转动变形时,高宽比大的试件对应的荷载值更小,但因为极限荷载同样减小,出现转动变形时相对极限荷载的比例变化规律尚不清楚,可能会有所提高,也可能变化不大。

除试件自身条件外,受力条件也会影响砌体墙承载力,竖向压应力是影响砌体墙转动变形的另一个重要因素。砌体墙所承担的竖向压应力增加时,转动变形在总变形中所占比例减小,极限承载力相应提高;反之,则墙肢容易出现转动变形,相应地,承载力降低。

杨元秀等<sup>[15]</sup>和孙云来<sup>[30]</sup>分别进行了蒸压粉煤灰实心砖墙片抗震性能试验,砌体墙尺寸参数、竖向压应力相同,砌筑砂浆强度及水平加载方式不同。前者砂浆强度等级为 M10,水平加载方式为试件顶部水平加载;后者砂浆强度等级为 M5,水平加载方式为 L 形加载梁加载,该水平荷载加载方式可以在一定程度上限制试件的转动。

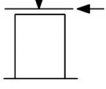
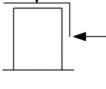
为表达方便,将上述文献试验数据汇总于表 3,对比分析试验结果可知:

1) 竖向压应力均为 0.3 MPa 时,文献[15]中试件 Q1 存在明显的转动变形,最终破坏模式为转动失效,而文献[30]中试件 Q-1、Q-2 转动现象不明显,破坏模式为剪压破坏。虽然前者砂浆强度等级更高,但由于转动变形的存在,极限承载力反而低于后者。

2) 竖向压应力均为 0.6 MPa 时,4 片试件(Q2、

表 3 文献[15]、[30]试验结果

Table 3 Test results in reference [15] and [30]

| 试件                  | 压应力/<br>MPa | 砂浆<br>强度 | 加载<br>装置  | 极限<br>荷载/kN | 破坏<br>模式 |
|---------------------|-------------|----------|---|-------------|----------|
| Q1 <sup>[15]</sup>  | 0.3         | M10      |  | 263.5       | 转动       |
| Q4 <sup>[15]</sup>  | 0.45        | M10      |   | 408.2       | 剪压       |
| Q2 <sup>[15]</sup>  | 0.6         | M10      |   | 460.8       | 剪压       |
| Q3 <sup>[15]</sup>  | 0.6         | M10      |   | 485.6       | 剪压       |
| Q-1 <sup>[30]</sup> | 0.3         | M5       |  | 276.0       | 剪压       |
| Q-2 <sup>[30]</sup> | 0.3         | M5       |   | 310.0       | 剪压       |
| Q-3 <sup>[30]</sup> | 0.6         | M5       |   | 480.0       | 剪压       |
| Q-4 <sup>[30]</sup> | 0.6         | M5       |   | 437.0       | 剪压       |

Q3、Q-3、Q-4)最终破坏模式为剪压破坏,虽然砂浆强度等级不同,但由于 Q-3、Q-4 的水平荷载加载方式对试件转动变形的限制程度更好,两批试件的平均极限荷载差别并不大。

开门窗洞口造成砌体墙墙体整体性降低,局部削弱,出现应力集中,使得开洞墙体较未开洞墙体更早地出现裂缝,转动变形出现得更早且变形幅度相对更大。在文献[31]进行的预应力加固无筋砖砌体墙体抗震性能试验研究中,控制荷载加至 75 kN 时,未开洞的普通砌体墙墙底角出现水平裂缝,产生转动变形;而当控制荷载加至 40 kN 时,开洞普通砌体墙即开裂并产生转动变形。对比分析试验数据,与未开洞墙体相比,开洞墙体出现转动变形时的荷载值降低了近 50%,并且由于开洞墙体的转动变形幅度更大,与未开洞墙体相比,其极限位移提高了近 50%。

对于两侧带窗下墙的“凸”形砌体墙,拆除一侧、两侧窗下墙之后,分别形成“L”形砌体墙、矩形立面砌体墙,由于转动变形的参与,砌体墙的水平承载力存在不同程度的下降,文献[32]给出了试验条件下砌体墙承载力降低的程度。

对于矩形立面砌体墙发生转动失效时的水平承载力计算方法,如图 6 所示的破坏模式, Magenes 等<sup>[4]</sup>、Bosiljkov 等<sup>[5]</sup>进行了理论研究。随着水平荷载的增加,矩形立面砌体墙出现转动且幅度增大,底部受压区长度减小。Magenes 模型的力平衡关系见图 10,假定底部受压区压碎时墙体达到极限平衡状态,将受压区非矩形应力通过等效原理简化为矩形应力,再通过力学平衡条件得到墙体发生转动破坏的承载力。

从砌体房屋的墙体平面布置来看,房屋由相互垂直的纵墙、横墙组成,当砌体墙高宽比较大、竖向

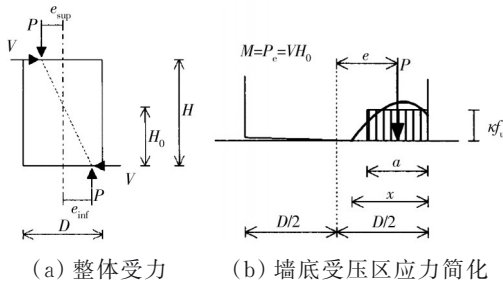


图 10 转动承载力计算模型

Fig. 10 Calculation model of rotational bearing capacity

压应力较小时,转动变形幅度过大,仍可能未达到极限承载力,然而与之相连的垂直方向的墙体会出现过大的平面外倾斜,因而导致竖向承载失效。因此,基于力学模型的转动承载力计算方法的适用性还需要进一步研究,以避免垂直相连砌体墙出现严重的平面外变形或破坏情况。

另一方面,矩形立面砌体墙是最简单的一种立面形状,无论对其进行受剪承载力分析还是转动受力分析,影响因素较少,力学模型较明确。但受门洞口、窗洞口位置及尺寸变化影响时,砌体房屋往往表现为非对称立面形状,破坏模式复杂,转动变形参与程度大,这时如何考虑转动变形对其承载力的影响,还缺乏相关的研究。

### 2.3 转动变形对砌体墙延性的影响

砌体墙顶部总变形量全部或部分包括以下几部分:剪切变形、弯曲变形、转动变形和墙体底座位移,转动变形可按计算式  $\Delta_2 = (\Delta \times H) / B$  简化计算<sup>[11]</sup>,参数含义及简图见图 1(c)。转动变形对砌体墙延性的影响主要体现在受力各阶段转动变形幅度差异方面。

对于发生剪切破坏的砌体墙,转动变形可能存在于其受力破坏过程中,但并非主要破坏形式。一般来说,转动变形占总变形比例较小时,砌体墙的破坏呈脆性,转动变形对延性系数的影响较小。当转动变形占总变形比例较大,甚至转变为转动失效模式时,破坏阶段对应的极限位移明显增加,破坏模式呈延性性质。Penna 等<sup>[33]</sup>采用两节点宏模型对砌体墙进行了数值模拟分析,所给出的宏模型能够模拟砌体墙的剪切及弯曲、转动行为,发生转动破坏墙体的滞回曲线呈“S”形,极限位移较大,具有良好的延性,而剪切破坏墙体表现出明显的脆性。

从砌体墙破坏机理来看,当水平荷载作用下砌体墙以整体转动为主要变形方式时,表明其受剪承

载力大于抵抗转动的承载力;而出现受剪破坏时,表明抵抗转动的承载力更大。转动失效以砌体墙底部受压区边缘局部压碎为判定依据,其变形能力以及延性显然优于呈现脆性的剪切破坏模式。

水平荷载作用下砌体墙发生明显转动变形时,较未发生明显转动变形的墙体,极限阶段和破坏阶段对应的总变形量(水平位移)有不同程度提高。高宽比是影响砌体墙转动变形发生、发展的重要因素之一,高宽比越大,越易出现转动变形,变形能力相对越大。纵览现有砌体墙试验研究的相关文献,可以从概念上做出上述判断,但难以对影响程度进行合适的量化。

### 2.4 转动变形对砌体墙刚度的影响

等效抗侧刚度可用水平荷载与对应位移的比值表示,反映了构件所受荷载大小与位移的关系。砌体墙出现转动变形后,其等效抗侧刚度降低,即同样荷载对应的位移相对变大,或同样位移对应的荷载相对变小,表现在砌体结构抗震方面,则该砌体墙因过大变形而无法承担设计分配的水平荷载,意味着部分水平荷载将由其他砌体墙分担。

砌体墙带有门窗洞口时,弹性抗侧刚度采用“串并联”计算方法,但弹性阶段不能区分外力作用的方向,导致弹性刚度计算结果与墙肢的实际抗侧刚度误差过大。文献[28]给出了不同位移时砌体墙等效抗侧刚度相对值的降低幅度,如表 4 所示。对比表中“弹性结果”一列及“3 mm”计算结果一列可知,试件 MW-5 两个方向的弹性刚度降低幅度与 MW-3 相同,仅为 7%,而根据试验数据,水平位移 3 mm 时,试件 MW-5 正向加载等效抗侧刚度降低了 5%,而反向加载等效抗侧刚度降低了 24%,明显超出弹性结果。

对于转动变形对砌体墙抗侧刚度的影响,在既有刚度模型基础上,文献[34]引入高宽比及转动变

表 4 试件等效刚度降低幅度

Table 4 Equivalent stiffness reduction of test piece

| 试件编号 | 试件条件    | 3 mm |      |        | 弹性结果/% |
|------|---------|------|------|--------|--------|
|      |         | 6 mm | 9 mm | 弹性结果/% |        |
| MW-1 | 窗下墙端无约束 | 100  | 100  | 100    |        |
| MW-2 | 拆除两侧窗下墙 | 41   | 31   | 17     |        |
| MW-3 | 窗下墙端有约束 | 100  | 100  | 100    | 100    |
| MW-4 | 拆除两侧窗下墙 | 63   | 56   | 53     | 53     |
| MW-5 | 拆除一侧 正向 | 5    | -4   | -7     | 7      |
|      | 窗下墙 反向  | 24   | 14   | 12     | 7      |

注:MW-1、MW-2为一组试件;MW-3、MW-4、MW-5为一组试件。



形调整系数,对弹性刚度计算模型中的弯曲变形部分进行修正,提出了基于弯曲变形修正的砌体墙抗侧刚度计算模型。刚度退化规律方面,以剪切破坏为主和以转动失效破坏为主有着较明显的区别。剪切破坏模式下刚度退化曲线大多为陡降形,而转动失效破坏模式下刚度退化曲线的前半段为陡降形,后半段为缓降型,与钢筋混凝土构件的刚度退化曲线类似。

目前,砌体墙转动变形与抗侧刚度的研究很少,砌体墙抗震性能相关的研究文献虽较多,但由于试验目的、考虑因素等不同,转动变形对砌体墙抗侧刚度的影响程度有待进一步研究。

### 3 转动变形影响砌体墙抗震性能研究的展望

从试件设计、高宽比、轴压应力、构造措施等多个角度探讨了试验过程中砌体墙的墙体转动变形现象及转动变形对砌体墙承载力、抗侧刚度及延性等抗震性能的影响,在文献综述基础上,建议进一步开展砌体结构转动变形的相关研究。

1)复杂立面形状砌体墙受力至破坏全过程不同阶段的转动变形机制有待进一步研究。复杂立面形状指非对称立面、非对称边界约束条件的端部转角墙、门连窗墙、错层窗所对应的砌体、同一计算层高内开双层洞口砌体墙等,墙体立面形状复杂,不同立面形状决定了墙体的转动变形机制不同。此外,目前砌体墙抗震试验的文献中很多缺少关于转动变形试验现象的描述,但并不代表没有转动变形,建议对砌体墙特别是复杂立面砌体墙转动变形现象予以重视。

2)转动变形对砌体墙承载力、抗侧刚度等抗震性能影响的量化研究。转动变形的存在降低了同样水平位移下砌体墙的水平承载力和抗侧刚度,考虑转动变形影响后,可能出现部分砌体墙实际承载力不满足设计要求的情况,增加了地震作用下砌体房屋局部墙体破坏的风险。对此,建议开展量化分析转动变形对砌体墙承载力影响的研究,以期完善砌体结构承载力计算方法。

3)砌体结构的层间抗侧刚度“串并联”计算方法不能区分外力作用的方向性,导致刚度计算结果与墙肢的实际刚度误差过大。砌体墙立面形状越复杂,转动变形的影响越大,两个方向加载时等效抗侧刚度差异更大。地震作用在砌体房屋楼层各墙体之间按弹性刚度比例分配原则并不适用于开

裂后砌体墙的实际剪力分配规律,对此,尚需进一步的试验和理论研究。

### 参考文献

- [1] 李宏男,肖诗云,霍林生.汶川地震震害调查与启示[J].建筑结构学报,2008,29(4):10-19.  
LI H N, XIAO S Y, HUO L S. Damage investigation and analysis of engineering structures in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29 (4): 10-19. (in Chinese)
- [2] 史庆轩,杨坤,王秋维,等.汶川大地震村镇中小学建筑的震害调查和分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2008,40(5):601-607.  
SHI Q X, YANG K, WANG Q W, et al. Earthquake damage investigation and analysis of rural primary and middle school buildings in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2008, 40(5): 601-607. (in Chinese)
- [3] 曲哲,钟江荣,孙景江.芦山7.0级地震砌体结构的震害特征[J].地震工程与工程振动,2013,33(3):27-35.  
QU Z, ZHONG J R, SUN J J. Seismic damage to masonry structures in M7.0 Lushan earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(3): 27-35. (in Chinese)
- [4] MAGENES G, CALVI G M. In-plane seismic response of brick masonry walls [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1997, 26(11): 1091-1112.
- [5] BOSILJKOV V, PAGE A W, BOKAN-BOSILJKOV V, et al. Evaluation of the seismic performance of brick masonry walls [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2010, 17(1): 100-118.
- [6] 石杰,王万江.嵌筋加固技术对砌体抗震性能的影响[J].建筑技术,2013,44(11):973-977.  
SHI J, WANG W J. Anchorage reinforcement on masonry seismic performance [J]. Architecture Technology, 2013, 44(11): 973-977. (in Chinese)
- [7] 吴昊.砌体结构教学楼抗震性能及地震破坏机制控制研究[D].成都:西南交通大学,2013.  
WU H. Study on seismic performance and earthquake damage mechanism control of masonry school buildings [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [8] CHOUDHURY T, MILANI G, KAUSHIK H B. Experimental and numerical analyses of unreinforced masonry wall components and building [J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: 119599.
- [9] WANG G J, LI Y M, ZHENG N N, et al. Testing and modelling the in-plane seismic response of clay brick

- masonry walls with boundary columns made of precast concrete interlocking blocks [J]. *Engineering Structures*, 2017, 131: 513-529.
- [10] 唐曹明, 罗瑞, 程绍革, 等. 水泥砂浆及钢筋网水泥砂浆单面加固低强度砖墙抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(10): 157-167.
- TANG C M, LUO R, CHENG S G, et al. Experimental study of seismic performance of low strength masonry walls reinforced with one-side cement mortar splint [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(10): 157-167. (in Chinese)
- [11] 邬逸夫. 竖向压应力对蒸压粉煤灰多孔砖组合墙抗震性能影响的试验研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- WU Y F. Experimental studies on seismic behavior of autoclaved fly ash perforated composite brick walls in vertical compressive stress [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2017. (in Chinese)
- [12] 白国良, 浮广明, 权宗刚, 等. 页岩烧结保温砌块超薄灰缝墙体抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(10): 111-121.
- BAI G L, FU G M, QUAN Z G, et al. Experimental study on seismic behavior of shale fired heat-insulation block walls with ultra-thin mortar joint [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(10): 111-121. (in Chinese)
- [13] 黄靓, 王路. 无砂浆配筋砌体剪力墙抗震试验的滑移研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(4): 794-800.
- HUANG L, WANG L. Study on slide phenomenon of mortarless reinforced masonry shear walls seismic experiment [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(4): 794-800. (in Chinese)
- [14] 王正刚, 薛国亚, 高本立, 等. 约束页岩砖砌体墙抗震性能试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2003, 33(5): 638-642.
- WANG Z G, XUE G Y, GAO B L, et al. Experimental research on the seismic behavior of confined shale brick masonry walls [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2003, 33(5): 638-642. (in Chinese)
- [15] 杨元秀, 朱宇峰, 骆万康, 等. 蒸压粉煤灰实心砖墙抗震性能试验研究[C]//2007年全国砌体结构基本理论与工程应用学术会议论文集, 长沙, 2007: 310-313, 454.
- [16] GANAPATHI S C, MURTHY A R C, IYER N R, et al. Experimental and numerical study on in-plane behavior of brick masonry wall panels [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2011, 11(3): 431-450.
- [17] 史庆轩, 易文宗. 多孔砖砌体墙片的抗震性能试验研究及抗倒塌能力分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2000, 32(3): 271-275.
- SHI Q X, YI W Z. Tentative studies on the aseismic behavior and investigation of collapse resistant capacity of porous masonry walls [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2000, 32(3): 271-275. (in Chinese)
- [18] 陈伯望, 唐楚, 邬逸夫, 等. 构造柱对蒸压粉煤灰多孔砖砌体抗震性能影响的试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, 36(5): 116-125.
- CHEN B W, TANG C, WU Y F, et al. Experimental studies on seismic behavior of autoclaved fly ash perforated brick walls with constructional columns [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2016, 36(5): 116-125. (in Chinese)
- [19] 高枫, 谢镭, 查支祥. “丰”字形构造柱砌块组合墙体抗震性能试验研究[J]. *炼油技术与工程*, 2008, 38(6): 6-9.
- GAO F, XIE L, ZHA Z X. Experimental study on anti-seismic behavior of combination block walls with “丰”-shape construction column [J]. *Petroleum Refinery Engineering*, 2008, 38(6): 6-9. (in Chinese)
- [20] 王天贤, 陈庆华, 李新忠. 带多构造柱开洞墙片抗震性能的试验研究[J]. *西北建筑工程学院学报(自然科学版)*, 2000, 17(1): 5-8.
- WANG T X, CHEN Q H, LI X Z. The experimental investigation of antiseismic behavior on the holed brick masonry wall with many structural columns [J]. *Journal of Northwestern Institute of Architectural Engineering*, 2000, 17(1): 5-8. (in Chinese)
- [21] 张斯, 徐礼华, 胡晓斌. 玄武岩纤维布加固砌体墙抗震性能试验[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2015, 48(3): 294-299, 312.
- ZHANG S, XU L H, HU X B. Seismic performance of masonry walls strengthened with BFRP [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2015, 48(3): 294-299, 312. (in Chinese)
- [22] 赵少伟, 胡霖嵩, 裴文博. BFRP加固砌体墙抗震性能试验研究[J]. *河北工业大学学报*, 2016, 45(2): 104-110.
- ZHAO S W, HU L S, PEI W B. Experimental study on aseismic behavior of masonry walls strengthened with BFRP [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2016, 45(2): 104-110. (in Chinese)
- [23] 赵成文, 梁海泉, 柳扬. 水平配筋煤矸石多孔砖砌体抗震性能试验[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2011, 27(6): 1053-1057, 1098.
- ZHAO C W, LIANG H Q, LIU Y. Research on seismic performance of horizontally reinforced gangue porous brick masonry [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2011, 27(6): 1053-1057, 1098. (in Chinese)

- [24] 翁大根, 吕西林, 任晓崧, 等. 砖砌体墙片抗震修复与加固伪静力试验[J]. 世界地震工程, 2003, 19(1): 1-8.  
WENG D G, LV X L, REN X S, et al. Experimental study on seismic resistant capacity of repaired and strengthened masonry walls [J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(1): 1-8. (in Chinese)
- [25] 焦晨晓, 沙吾列提·拜开依, 阿肯江·托呼提, 等. CBF 格栅增强砖砌体墙抗震性能试验研究[C]//第25届全国结构工程学术会议论文集. 包头, 2016: 330-339.  
JIAO C X, BEKEY S, TUOHUTI A, et al. Seismic performance experimental research of CBF mesh reinforced masonry wall [C]//Proceedings of the 25th National Conference on Structural Engineering, Baotou, 2016: 320-329. (in Chinese)
- [26] 吴建锋. 单面预制RC板墙-碳纤维布加固老旧砖砌体结构住宅抗震性能研究[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2017.  
WU J F. Seismic performance study on brick masonry structure of old residence strengthening with single-sided pre-cast RC panels and CFRP sheets [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2017. (in Chinese)
- [27] GUERREIRO J, PROENÇA J, FERREIRA J G, et al. Experimental characterization of in-plane behaviour of old masonry walls strengthened through the addition of CFRP reinforced render [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 148: 14-26.
- [28] 郭猛, 徐福泉, 朱莹, 等. 拆除窗下墙对砌体墙抗震性能影响的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(8): 120-126.  
GUO M, XU F Q, ZHU Y, et al. Experimental research on seismic performance influence of masonry wall removed spandrel wall [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(8): 120-126. (in Chinese)
- [29] PARISI F, LIGNOLA G P, AUGENTI N, et al. Rocking response assessment of in-plane laterally-loaded masonry walls with openings [J]. Engineering Structures, 2013, 56: 1234-1248.
- [30] 孙云来. 蒸压粉煤灰实心砖墙片抗震性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.  
SUN Y L. Experimental study on seismic performance of autoclaved fly ash solid brick walls [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. (in Chinese)
- [31] 刘航, 班力壬, 兰春光, 等. 后张预应力加固无筋砖砌墙体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(8): 142-149.  
LIU H, BAN L R, LAN C G, et al. Quasi-static test of unreinforced brick walls retrofitted with post-tensioning tendons [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(8): 142-149. (in Chinese)
- [32] 郭猛, 张瀛, 徐福泉, 等. 基于承载力修正的砌体结构窗下墙拆除后抗震能力分析[J]. 建筑结构, 2015, 45(4): 90-93, 13.  
GUO M, ZHANG Y, XU F Q, et al. Seismic capacity analysis of masonry structure with removal of spandrel wall based on bearing capacity modification [J]. Building Structure, 2015, 45(4): 90-93, 13. (in Chinese)
- [33] PENNA A, LAGOMARSINO S, GALASCO A. A nonlinear macroelement model for the seismic analysis of masonry buildings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(2): 159-179.
- [34] 郭猛, 李薇薇, 贾英杰. 基于弯曲变形修正的砌体墙抗侧刚度计算模型[C]//第28届全国结构工程学术会议论文集. 南昌, 2019: 324-330.  
GUO M, LI W W, JIA Y J. Modified lateral stiffness model of masonry wall based on the effect of rotational deformation [C]// Proceedings of the 28th National Conference on Structural Engineering, Nanchang, 2019: 315-321. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)