

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.127



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 内嵌纤维增强复合材料加固砌体结构研究进展

景杰婧, 周长东

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 砖石作为建筑材料在世界范围内广泛使用, 由砖石和砂浆组成的砌体结构抗拉、抗剪强度较低, 抗震性能不足, 地震作用下容易破坏甚至倒塌, 需进行补强加固, 以改善砌体结构的力学性能。由于抗拉强度高、重量轻、安装方便和耐腐蚀等优势, 纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer, 简称 FRP)在砌体结构加固领域具有广阔的应用前景; 由于对结构的重量和外观影响很小, 在历史砌体建筑加固中, 内嵌 FRP(Near-Surface Mounted FRP, 简称 NSM-FRP)加固法更有优势。总结学者们对 NSM-FRP 加固砌体结构的相关研究进展, 并对其未来发展进行展望。

**关键词:** 砌体结构; 纤维增强复合材料; 内嵌加固; 力学特性; 抗震性能

**中图分类号:** TU365; TU599

**文献标志码:** R

**文章编号:** 2096-6717(2023)01-0209-16

## Research progress on masonry structures strengthened with near-surface mounted fiber reinforced polymer

JING Jiejing, ZHOU Changdong

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China)

**Abstract:** Brick and stone are widely used as building material in the world. Masonry structure composed of brick, stone and mortar has low tensile and shear strength, insufficient seismic resistance, and is prone to damage or even collapse under earthquake action. Therefore, strengthening is needed to improve the mechanical properties of masonry structure. Due to high tensile strength, light weight, easy installation and corrosion resistance, fiber reinforced polymer(FRP) has been widely used to strengthen the masonry structure. Near-surface mounted FRP(NSM-FRP) has more advantages in strengthening historic masonry buildings because it has little influence on the weight and appearance of the structures. In this paper, the research progress of masonry structures strengthened with NSM-FRP is summarized, and the development of masonry structures strengthened with NSM-FRP is prospected.

**Keywords:** masonry structure; fiber reinforced polymer; near-surface mounted strengthening; mechanical performance; seismic resistance

**收稿日期:** 2020-12-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(52078030、51678039)

**作者简介:** 景杰婧(1995-), 女, 博士生, 主要从事工程结构加固技术研究, E-mail: 19115024@bjtu.edu.cn。

周长东(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhouchangdong@163.com。

**Received:** 2020-12-29

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52078030, 51678039)

**Author brief:** JING Jiejing (1995-), PhD candidate, main research interest: reinforcement technology of engineering structure, E-mail: 19115024@bjtu.edu.cn.

ZHOU Changdong (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhouchangdong@163.com.

砌体结构作为最古老的建筑形式之一,在现有的工业、民用及古建筑中占有较大比重。组成砌体结构的砖、石、砂浆属于脆性材料,其抗压强度高,抗拉、抗剪性能较差。一些现存的砌体结构是在相关设计理论和抗震规范建立之前设计和建造的,属于无筋砌体结构,不符合抗震规范要求,抗震性能较差。在地震作用下,由于刚度、强度和耗能能力的快速退化,无筋砌体结构会产生突然脆性破坏,在历次地震中损伤较为严重<sup>[1-6]</sup>。

为了提高无筋砌体结构的抗震性能,外包型钢加固法、钢筋网水泥砂浆面层加固法、钢筋混凝土面层加固法、外加预应力撑杆加固法、增设砌体扶壁柱加固法等传统加固方法被应用于砌体结构的加固,但这些方法都在不同程度上改变了原建筑的外观和尺寸,增加了结构的重量<sup>[7]</sup>。由于具有轻质、高强、加固增厚量低、耐腐蚀、耐疲劳、施工方便等优势,纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer,简称FRP)已被广泛应用于砌体结构加固领域<sup>[8-13]</sup>。

从结构的角度看,由于几乎没有增加重量,因此,加固后结构的动力特性保持不变,并且可以根据具体情况设计刚度的变化<sup>[14-15]</sup>。目前FRP加固砌体结构的方法主要包括外部粘贴加固法(Externally Bonded FRP,简称EB-FRP)和嵌入式加固法(Near-Surface Mounted FRP,简称NSM-FRP)两种。EB-FRP加固法是通过黏结胶体将FRP片材粘贴在结构表面。NSM-FRP加固法是预先在结构表面开槽,将FRP筋或者FRP板用黏结材料嵌入结构表面的凹槽中,并向槽中注入黏结胶体,使之形成整体。与EB-FRP相比,NSM-FRP方法使FRP与砌体有更大的黏结面积,不易与砌体基体剥离,脱黏前在FRP中产生更高的应变,提高了FRP材料的强度利用率;由于受到黏结胶体的保护,FRP可以避免因碰撞而产生损伤,还可以有效避免紫外线等环境因素对FRP长期性能的影响,提高结构的耐久性<sup>[16-19]</sup>;并且用黏结材料将FRP嵌入既有水平灰缝中加固砌体结构,可以使加固后砌体结构的颜色和纹理与原有表面基本一致,对结构的原有立面效果影响较小,可以保留建筑的完整性,故此方法在历史砌体建筑加固方面更有优势。

在NSM-FRP加固砌体结构中,FRP的主要作用是承受拉力,以弥补砌体结构抗拉强度的不足。与钢筋相比,FRP重量更轻,极限拉伸强度更大,更能提高FRP的利用率。充分发挥FRP的抗拉性能是有效提升砌体结构性能的关键。然而,由于目前

对于NSM-FRP加固砌体结构的黏结、抗压、抗剪、抗弯以及抗震性能等研究尚不充分,还没有用于指导实际工程的相应规范,这在一定程度上限制了NSM-FRP加固技术在砌体结构加固领域的进一步推广应用。

笔者对NSM-FRP方法加固砌体试件的黏结、抗压、抗剪、抗震性能方面的相关研究成果进行总结,并在此基础上对NSM-FRP加固砌体结构的未来发展趋势进行展望,提出需要进一步深入研究的问题。

## 1 NSM-FRP加固砌体试件的黏结性能

在NSM-FRP加固体系中,外部荷载通过黏结材料从砌体传递到FRP。因此,黏结材料的力学性能(抗剪性能、抗拉性能)、黏结材料与砌体的黏结性能以及FRP与黏结材料的黏结性能对FRP能否充分发挥其力学性能具有重要影响。

由于碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer,简称CFRP)的弹性模量较高,在受拉时不易断裂,在砌体结构加固中应用广泛,因此,目前的研究主要集中于CFRP与砌体的黏结性能,常见的试验方法有单面中心拉拔试验和梁式黏结试验。因耗时长且昂贵,梁式黏结试验不便广泛用于研究影响黏结性能的各个参数;由于试件制备方便、允许考虑的变量范围更广,单面中心拉拔试验较为常用,通常是将FRP板或FRP筋用黏结材料嵌入单砖或由几块砖组成的棱柱体试件,试件示意图如图1所示。其中,图1(b)用于研究垂直嵌入FRP加固砌体结构的黏结性能,图1(c)用于研究水平嵌入FRP加固砌体结构的黏结性能<sup>[19-20]</sup>。

通过单面中心拉拔试验得到的NSM-FRP加固体系中黏结破坏模式可分为3种:1)黏结材料与砌体界面出现裂纹,产生剥离破坏,裂缝在砌体中发展;2)FRP与黏结材料脱黏破坏;3)FRP断裂破坏。其中,黏结材料与砌体界面出现裂纹,产生剥离破坏是最主要的破坏模式,黏结材料与砌体界面的脱黏荷载直接影响NSM-FRP加固结构截面的承载能力和延性;FRP与黏结材料脱黏破坏常见于黏结材料层较厚和FRP黏合不良的试件中,由于未充分利用黏结材料的性能且破坏比较突然,因此,应该尽量避免此类破坏模式发生;FRP的断裂破坏说明其充分利用了FRP材料的强度,但破坏也比较突然,因此,在实际砌体加固中应该尽量避免<sup>[19-24]</sup>。

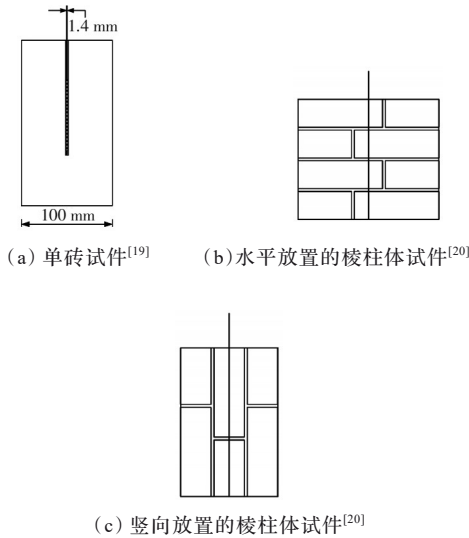


图 1 单面中心拉拔试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-sided central pull-out test

FRP与砌体界面黏结性能的大小主要取决于以下因素:黏结的长度、凹槽的尺寸、FRP的尺寸、砌体和黏结材料的强度、FRP在砌体中被放置的位置和加载装置。在其他变量保持不变的情况下,黏结荷载随FRP板宽度以及砖石块体强度的增加而增加,增加FRP的嵌入黏结长度比增加宽度能更有效地提高黏结强度,随着黏结长度的增加,黏结强度的增长速率逐渐减小,FRP与砌体间存在有效黏结长度,达到有效黏结长度后,黏结强度将不再增加<sup>[19-24]</sup>。Dizhur等<sup>[23]</sup>研究表明,增加凹槽宽度时黏结荷载基本不变,但对破坏模式有影响,与具有较窄凹槽宽度的试件相比,凹槽宽度为9、12 mm的试件在黏合层内表现出滑动破坏;随着凹槽深度的增加,在CFRP板几何形状保持不变的情况下,会导致黏结材料强度利用不足和砖过早开裂,而黏结荷载并未增加。Yu等<sup>[24]</sup>研究表明,当黏结材料抗拉强度降低时,破坏模式可能从砌体开裂变为黏结材料开裂。郭子雄等<sup>[25]</sup>进行了26个表面嵌入CFRP筋花岗岩试件的直接拉拔试验,考虑了CFRP筋的直径大小、嵌埋长度以及黏结胶体保护层厚度等参数的影响,研究了CFRP筋、黏结胶体与花岗岩石材之间的黏结性能。研究表明,较长的嵌埋长度将导致CFRP筋被拉断,较大直径的CFRP筋更容易导致黏结胶体表面劈裂破坏,极限黏结荷载的大小与破坏方式有关。

既有的研究表明,表面嵌入FRP加固砌体及加

固混凝土的破坏模式主要是黏结材料与基体界面出现裂纹,产生剥离破坏,二者的黏结性能和荷载传递机理相似<sup>[20-23]</sup>。目前,对于表面嵌入FRP加固混凝土结构黏结强度的计算模型较多,采用NSM方法加固砌体结构的黏结强度计算模型较少。Willis等<sup>[21]</sup>、Kashyap等<sup>[22]</sup>、Dizhur等<sup>[23]</sup>、Maljaee等<sup>[19]</sup>基于表面嵌入FRP加固混凝土结构的黏结荷载计算模型,提出了表面嵌入FRP加固砌体结构的黏结荷载计算模型。Willis等<sup>[21]</sup>基于Seracino等<sup>[26]</sup>提出的表面粘贴和嵌入矩形截面板材加固混凝土试件最大黏结荷载的通用计算公式,用砌体的弯曲抗拉强度代替混凝土圆柱体的抗压强度,得到了NSM-FRP加固砌体试件的最大黏结荷载计算公式。

$$P_{\max} = 1.45\varphi_f^{0.263} f_{ut}^{0.6} \sqrt{L_{\text{per}}(EA)_p} \quad (1)$$

$$\sqrt{f_c'} = \frac{f_{ut}}{0.53} \quad (2)$$

$$\varphi_f = \frac{d_f}{b_f} \quad (3)$$

$$L_{\text{per}} = 2d_f + b_f \quad (4)$$

式中: $f_c'$ 为混凝土圆柱体抗压强度; $f_{ut}$ 为砌体的弯曲抗拉强度; $L_{\text{per}}$ 为剥离脱黏破坏面的周长; $E$ 为FRP板的弹性模量; $A$ 为FRP板的横截面积; $\varphi_f$ 为垂直于和平行于混凝土表面的破坏面深度和宽度的比值; $d_f$ 和 $b_f$ 分别为垂直于和平行于混凝土表面的破坏面的深度和宽度。图2为剥离脱黏破坏平面示意图。

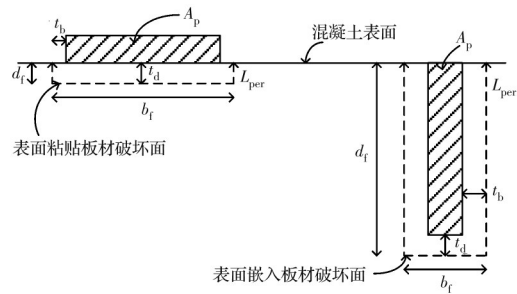


图 2 脱黏破坏平面示意图<sup>[26]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of debonding failure plane

Kashyap等<sup>[22]</sup>对现有EB-FRP加固试件和NSM-FRP加固试件中心拉拔试验结果进行了统计分析和数据拟合,提出了FRP加固砌体构件黏结荷载的两个计算公式,其中,式(5)既适用于EB-FRP加固方法,也适用于NSM-FRP加固方法,是通用计算模型;式(6)只适用于NSM-FRP加固方法。

$$P_{\max} = 1.99\varphi_f^{0.19} f_{ut}^{0.47} \sqrt{L_{\text{per}}(EA)_p} \quad (5)$$

$$P_{\max} = 2.63\varphi_f^{-0.12} f_{ut}^{0.47} \sqrt{L_{\text{per}}(EA)_p} \quad (6)$$

黏结长度是影响黏结荷载的重要因素之一,当黏结长度不超过有效黏结长度时,黏结荷载随着黏结长度的增加而增加,当黏结长度大于有效黏结长度时,黏结荷载趋于稳定,不再增加。Willis等<sup>[21]</sup>采用Seracino等<sup>[26]</sup>提出的式(7)~式(10)来计算有效黏结长度。

$$L_e = \frac{\pi}{2\lambda} \quad (7)$$

$$\lambda^2 = \frac{\tau_{\max} L_{\text{per}}}{\delta_{\max}(EA)_p} \quad (8)$$

$$\tau_{\max} = (0.802 + 0.078\varphi_f) f_c^{0.6} \quad (9)$$

$$\delta_{\max} = \frac{0.976\varphi_f^{0.526}}{0.802 + 0.078\varphi_f} \quad (10)$$

式中: $\tau_{\max}$ 为黏结-滑移本构中的最大剪应力; $\delta_{\max}$ 为对应于 $\tau_{\max}$ 的滑移值; $L_e$ 为有效黏结长度。

Kashyap等<sup>[22]</sup>采用式(7)、式(8)、式(11)、式(12)来计算有效黏结长度,与文献[26]不同的是 $\tau_{\max}$ 和 $\delta_{\max}$ 的计算方法,Kashyap等<sup>[22]</sup>认为 $\delta_{\max}$ 取决于 $f_{ut}$ 和 $\varphi_f$ ,而文献[26]的公式中 $\delta_{\max}$ 只与 $\varphi_f$ 有关。

$$\tau_{\max} = 8.83\varphi_f^{0.15} f_{ut}^{0.2} \quad (11)$$

$$\delta_{\max} = 0.45\varphi_f^{0.23} f_{ut}^{0.74} \quad (12)$$

Dizhur等<sup>[23]</sup>将Lumantarna等<sup>[27]</sup>提出的砖抗压和抗拉强度换算公式带入式(6)中,得到了采用砖的抗压强度表示、适用于NSM-FRP加固老式黏土砖的黏结荷载计算公式。Hamid等<sup>[19]</sup>通过对文献中现有NSM-FRP加固体系的黏结试验的结果进行统计分析,发现Willis等<sup>[21]</sup>和Kashyap等<sup>[22]</sup>提出的计算公式不能很好地预测短黏结长度试件的黏结荷载;进一步考虑黏结长度、凹槽尺寸、加载装置和加载方式的影响,通过单砖单面拉拔试验研究了表面嵌入CFRP板加固砌体的黏结性能,根据试验结果和文献数据,对现有的黏结强度分析模型进行了改进。基于Zhang等<sup>[28]</sup>提出的用于NSM-FRP加固混凝土体系的黏结荷载和有效黏结长度的解析计算公式,提出了适合于黏结长度较短的砌体试件的黏结强度和有效黏结长度的计算公式。

$$P_{\max} = \beta_L \sqrt{2G_f(EA)_p C_{\text{failure}}} \quad (13)$$

$$G_f = 1.424\varphi_f^{0.422} f_{ut}^{1.238} \quad (14)$$

$$\beta_L = \frac{L_b}{L_e} \left( 2.36 - 1.36 \frac{L_b}{L_e} \right) \quad (15)$$

$$L_e = \frac{1.66}{\eta} \quad (16)$$

$$\eta^2 = \frac{\tau_{\max} C_{\text{failure}}}{2G_f(EA)_p} \quad (17)$$

$$\tau_{\max} = 4.09\varphi_f^{0.138} f_{ut}^{1.226} \quad (18)$$

式中: $G_f$ 为界面断裂能; $\beta_L$ 为考虑黏结长度影响的参数; $C_{\text{failure}}$ 为破坏面的周长,该周长为凹槽3个边长之和; $L_b$ 为实际黏结长度。

地震作用是随时间快速变化的动荷载,研究在高加载速率下的拉拔性能对判断FRP在地震等动荷载作用下的脱黏机制有重要意义。Türkmen等<sup>[29]</sup>通过14个直接拉拔试验研究了用低弹性模量柔性黏结材料将CFRP板条嵌入黏土砖砌体表面的加固体系在不同加载速率下的黏结性能,结果表明,将加载速率从0.5 mm/min增加到100 mm/min时,在黏结长度约为1 m的情况下,最大黏结强度增加了67%;与已有文献中使用高弹性模量的刚性黏结材料相比,使用柔性黏结材料的试件峰值黏结应力较低,但会产生更高的界面断裂能和更大的滑移值。

在耐久性研究方面,Vaculik等<sup>[30]</sup>研究了水浸泡和湿热循环作用下表面嵌入FRP加固砌体的黏结性能,结果表明,经多次高温循环后,由于硬化速度加快,砂浆的抗压强度有所提高。在高温下,由于外界温度超过了环氧树脂的玻璃化转变温度点,导致其热软化,以环氧树脂为黏结胶体的试件黏结强度有所降低,而长期的水浸泡和湿热条件对以水泥胶凝剂为黏结材料试件的黏结强度没有显著影响。

选取部分相关文献中52个NSM-FRP中心拉拔试验结果,分别用Willis模型、Kashyap通用计算模型、Kashyap特定模型计算并与试验得到的黏结荷载进行对比。表1为黏结强度试验值 $P_{\text{exp}}$ 与计算值 $P_{\text{cal}}$ 的对比结果,表2为 $P_{\text{exp}}/P_{\text{cal}}$ 的平均值、标准差、变异系数和平均绝对误差,图3为黏结强度试验值与计算值的对比图,表3为部分试件的试验有效黏结长度( $L_{\text{exp}}$ )与计算有效黏结长度( $L_{\text{cal}}$ )的对比。4、5、6号试件为FRP水平嵌入的中心拉拔试件,与试验值相比,Willis和Kashyap计算模型计算得到的最大黏结强度偏大。图4为水平嵌入FRP拉拔试件受力简图,图5为竖直嵌入FRP试件拉拔受力简图。 $\tau_e$ 为黏结材料与砖砌体之间的剪应力, $\tau_m$ 为剪切破坏面上的砂浆剪应力。对于水平嵌入的试件,当拉拔力 $P$ 增加到 $P_1$ 时,FRP与黏结材料之间的黏结力和黏结材料与砌块之间的黏结力尚未达到临界黏结力,而砖与砌体灰缝之间的应力达到了临界黏结应力,外层砖与砂浆脱黏,水平灰缝中产生裂

表 1 相关文献中黏结强度试验值与计算值的对比结果  
 Table 1 The ratio of experimental value and calculated value of bond strength in related literature

数据来源	试件 编号	试验结果 $P_{\text{exp}}/\text{kN}$	Willis 模型		Kahsyap 通用模型		Kahsyap 特定模型	
			$P_{\text{cal}}/\text{kN}$	$P_{\text{exp}}/P_{\text{cal}}$	$P_{\text{cal}}/\text{kN}$	$P_{\text{exp}}/P_{\text{cal}}$	$P_{\text{cal}}/\text{kN}$	$P_{\text{exp}}/P_{\text{cal}}$
文献[13]	1	78.67	72.03	1.09	81.37	0.97	74.05	1.06
	2	64.89	72.03	0.90	81.37	0.80	74.05	0.88
	3	72.60	72.03	1.01	81.37	0.89	74.05	0.98
	4	54.07	72.03	0.75	81.37	0.66	74.05	0.73
	5	63.50	72.03	0.88	81.37	0.78	74.05	0.86
	6	75.14	72.03	1.04	81.37	0.92	74.05	1.01
文献[14]	7	46.80	40.80	0.75	49.65	0.94	39.84	1.17
	8	44.00	40.80	0.55	49.65	0.89	39.84	1.10
	9	38.30	40.80	0.70	49.65	0.77	39.84	0.96
	10	46.70	40.80	0.88	49.65	0.94	39.84	1.17
	11	50.00	53.38	1.21	68.41	0.73	50.46	0.99
	12	51.20	53.38	1.61	68.41	0.75	50.46	1.01
文献[15]	13	65.00	51.56	1.03	51.56	1.26	55.27	1.18
	14	56.20	56.29	0.75	55.21	1.02	61.09	0.92
	15	67.20	77.53	1.39	70.55	0.95	88.21	0.76
	16	59.40	47.88	1.04	43.94	1.35	54.19	1.10
	17	44.80	34.74	0.86	29.84	1.50	41.00	1.09
文献[16]	18	45.80	39.91	1.15	50.15	0.91	40.24	1.14
	19	62.90	57.39	1.10	67.88	0.93	60.12	1.05
	20	47.20	39.91	1.18	41.95	1.13	33.67	1.40
	21	40.00	39.91	1.00	41.95	0.95	33.67	1.19
	22	35.10	39.91	0.88	41.95	0.84	33.67	1.04
	23	35.70	39.91	0.89	41.95	0.85	33.67	1.06
	24	23.30	27.57	0.85	26.99	0.86	24.33	0.96
	25	26.60	27.57	0.96	26.99	0.99	24.33	1.09
	26	41.90	52.22	0.80	57.81	0.72	42.64	0.98
	27	49.80	64.51	0.77	74.38	0.67	51.35	0.97
	28	32.90	39.91	0.82	41.95	0.78	33.67	0.98
	29	35.50	39.91	0.89	41.95	0.85	33.67	1.05
	30	53.40	57.39	0.93	56.79	0.94	50.30	1.06
	31	34.50	39.91	0.86	41.95	0.82	33.67	1.02
	32	24.90	39.91	0.62	41.95	0.59	33.67	0.74
	33	44.70	76.81	0.58	91.56	0.49	59.85	0.75
	34	38.60	39.91	0.97	41.95	0.92	33.67	1.15
	35	25.20	27.57	0.91	26.99	0.93	24.33	1.04
	36	34.90	39.91	0.87	41.95	0.83	33.67	1.04
	37	17.80	52.22	0.34	57.81	0.31	42.64	0.42
	38	60.40	64.51	0.94	84.37	0.72	58.25	1.04
	39	43.30	39.91	1.09	47.59	0.91	38.19	1.13
	40	48.50	39.91	1.22	47.59	1.02	38.19	1.27
	41	34.10	39.91	0.85	41.19	0.83	33.05	1.03
	42	28.40	57.39	0.49	49.01	0.58	43.41	0.65
	43	20.25	39.91	0.51	29.17	0.69	23.41	0.87
	文献[12]	44	11.02	6.84	1.61	5.60	1.97	5.15
45		14.03	13.68	1.03	11.20	1.25	10.29	1.36
46		15.48	20.52	0.75	16.81	0.92	15.44	1.00
47		9.51	6.84	1.39	5.60	1.70	5.15	1.85

续表1

数据来源	试件编号	试验结果 $P_{exp}/kN$	Willis模型		Kahsyap通用模型		Kahsyap特定模型	
			$P_{cal}/kN$	$P_{exp}/P_{cal}$	$P_{cal}/kN$	$P_{exp}/P_{cal}$	$P_{cal}/kN$	$P_{exp}/P_{cal}$
	48	14.20	13.68	1.04	11.20	1.27	10.29	1.38
	49	17.72	20.52	0.86	16.81	1.05	15.44	1.15
	50	20.15	27.36	0.74	22.41	0.90	20.58	0.98
	51	20.71	30.84	0.67	23.76	0.87	21.82	0.95
文献[23]	52	27.80	37.13	0.75	40.18	0.69	44.26	0.63

缝,仅由FRP和中间砖组成的试样继续承受载荷。此时FRP周围砌体保护层厚度减少为  $C_1$ ,砂浆缝阻断了中间层砖中斜向裂纹的开展,开裂区域减小。继续增加拉拔力  $P$ ,FRP与砖砌体剥离,发生单转锥体破坏,灰缝中的裂缝减少了砌体在荷载传递中的有效区域,使黏结强度降低。竖直嵌入的试件整体性较好,没有与加载方向平行的灰缝,周围砌体保护层的厚度  $C_2$  大于  $C_1$ ,在拉拔荷载作用下,裂缝可以在砌体内较为充分地开展,最终产生多砖锥体破坏。对于锥体破坏,可用式(19)计算最大黏结拉拔力,竖直嵌入FRP试件的锥体破坏面积大于图4中水平嵌入的试件,当砌体的力学性能相同时,锥体破坏面的面积越大,最大拉拔力越大。Willis和Kahsyap计算模型中没有考虑这一因素的影响,因此,得到的黏结强度偏高。

$$P = (\tau_{b1} \cos \theta + \sigma_{b1} \sin \theta) A_b + \tau_{b2} A_p \quad (19)$$

式中:  $\tau_{b1}$  为破坏锥体截面上的剪应力;  $\tau_{b2}$  为破坏锥体侧面上的剪应力;  $\sigma_{b1}$  为破坏锥体截面上的正应力;  $A_b$  为破坏锥体截面面积;  $A_p$  为破坏锥体侧面面积。

37、44、45、47、48号试件为黏结长度较短的试件,对于短黏结长度试件的最大黏结强度的预测,Willis等<sup>[21]</sup>和Kahsyap等<sup>[22]</sup>提出的计算公式误差较

表2  $P_{exp}/P_{cal}$ 的统计结果

Table 2 Statistical results of  $P_{exp}/P_{cal}$

模型	平均值	标准差	变异系数	平均绝对误差
Willis模型	0.94	0.22	0.23	0.16
Kahsyap通用模型	0.90	0.29	0.33	0.19
Kahsyap特定模型	1.03	0.28	0.27	0.17

表3 部分试件试验有效黏结长度与计算有效黏结长度对比

Table 3 The ratio of the experimental effective bond length to the calculated effective bond length of some specimens

试件编号	加载速率/(mm·min <sup>-1</sup> )	$L_{exp}/mm$	Willis模型		Kahsyap通用模型	
			$L_{cal}/mm$	$L_{exp}/L_{cal}$	$L_{cal}/mm$	$L_{exp}/L_{cal}$
1	0.3	300	218.04	1.38	255.02	1.18
3	0.3	300	218.04	1.38	255.02	1.18
5	0.3	330	218.04	1.51	255.02	1.29
6	0.3	300	218.04	1.38	255.02	1.18
13	0.5	250~300	208.11	1.20~1.44	235.37	1.06~1.27
14	0.5	250~300	222.38	1.12~1.35	250.49	1.00~1.20
15	0.5	250~300	276.82	0.90~1.08	306.92	0.81~0.98
16	0.5	250~300	224.11	1.12~1.34	248.93	1.00~1.21
17	0.5	250~300	205.89	1.21~1.46	225.52	1.11~1.33
44	0.3	120~150	135.28	0.89~1.11	127.25	0.94~1.88
45	0.3	120~150	135.28	0.89~1.12	127.25	0.94~1.89
46	0.3	120~150	135.28	0.89~1.13	127.25	0.94~1.90
47	0.3	120~150	135.28	0.89~1.14	127.25	0.94~1.91
48	0.3	120~150	135.28	0.89~1.15	127.25	0.94~1.92
49	0.3	120~150	135.28	0.89~1.16	127.25	0.94~1.93
50	0.3	120~150	135.28	0.89~1.17	127.25	0.94~1.94
51	0.3	120~150	135.28	0.89~1.18	127.25	0.94~1.95

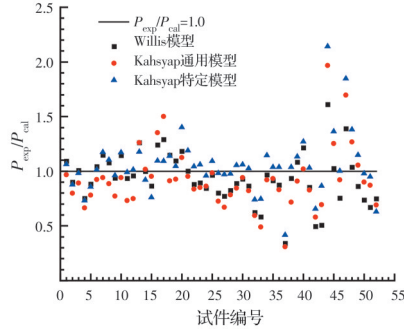


图 3 黏结强度试验值与计算值的对比图

Fig. 3 Comparison between experimental value and calculated value of bond strength

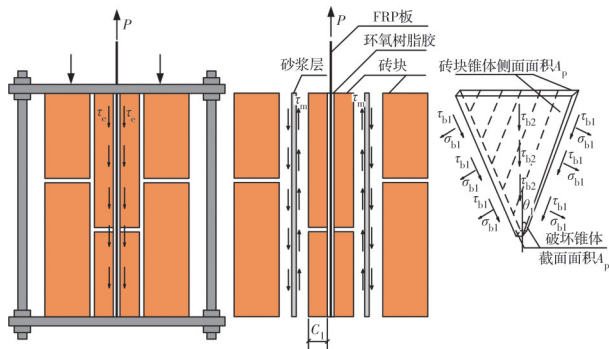


图 4 水平嵌入 FRP 拉拔试件的受力简图

Fig. 4 Schematic diagram of horizontal NSM-FRP specimen under drawing force

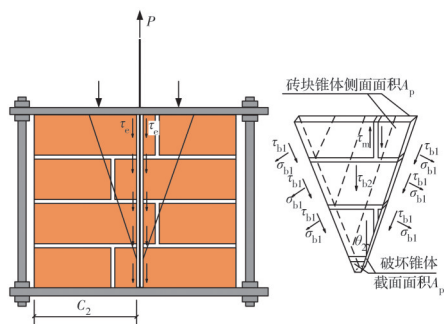


图 5 垂直嵌入 FRP 拉拔试件的受力简图

Fig. 5 Schematic diagram of vertical NSM-FRP specimen under drawing force

大, Maljaee 等<sup>[19]</sup>提出的计算公式计算更准确。与 Kashyap 通用计算模型相比, Kahsyap 特定模型和 Willis 模型对黏结强度的预测更准确。对于黏结长度较长的试件, Willis 模型对有效黏结长度的计算比 Kashyap 通用计算模型误差小。

综上所述, 砌体结构是一种由组合材料构成的结构, 影响砌体与 FRP 黏结性能的因素众多, 外界环境、加载装置、加载速率、试件尺寸、凹槽尺寸、FRP 的尺寸、黏结长度、砌体和黏结材料的强度、

FRP 的嵌入方向均会影响 NSM-FRP 加固砌体结构的黏结性能。目前, 对于表面嵌入 FRP 加固砌体结构的耐久性能的相关研究还很少, 不利于实际应用。在 NSM-FRP 加固方法中, 可以在砌体表面开槽, 也可以只在灰缝中开槽, 嵌入 FRP, 在砌体表面开槽对于将 NSM 技术用于空心砖砌体有所限制, 只在灰缝表面开槽可最大程度地减小对原结构的损坏, 更适用于加固古建砌体结构。目前已经开展的试验主要研究在砌体表面开槽的加固方法的黏结性能, 而沿灰缝开槽嵌入 FRP 加固砌体结构黏结性能的研究还很少。水平嵌入 FRP 和竖直嵌入 FRP 的破坏模式不同, 水平嵌入 FRP 的试件灰缝中的裂缝减少了砌体在荷载传递中的有效区域, 使试件周围约束砌体的厚度减小, 黏结强度降低。现有模型没有考虑嵌入方向的影响, 因此, NSM-FRP 加固砌体结构的黏结性能仍需要进一步深入研究。

## 2 NSM-FRP 加固砌体构件的抗压性能

砖墙、砖柱作为砌体结构中的承重构件, 需要承受上部结构传来的压应力。砌体结构在轴心受压荷载作用下发生破坏的原因主要是由于受压竖向裂缝的出现和发展。在轴心受压荷载作用下, 由于砂浆的泊松比一般大于砖, 在竖向变形相等时, 砂浆的横向变形大于砖, 由于黏结力的存在, 砖和砂浆界面产生一定的剪应力, 砖处于受压、受拉、受剪的复杂应力状态, 砌体结构在轴压荷载作用下的破坏具有典型的脆性特征<sup>[31]</sup>。

Valluzzi 等<sup>[32]</sup>提出一种在砌体结构水平灰缝中嵌入钢筋的加固技术, 研究表明, 钢筋能够对砌体施加约束作用, 从而减少由压应力引起的砌体柱侧面膨胀开裂现象。魏智辉等<sup>[33]</sup>研究表明, 勾缝加固砌体墙可以提高其抗压强度, 且勾缝深度越深, 抗压强度提高越明显, 加固砂浆对原砂浆有一定的约束作用, 故原砂浆的抗压强度有一定提高, 从而使构件的抗压强度有所提高。将钢筋或者加固砂浆代换成 FRP 材料进行加固, FRP、黏结材料和原砌体协同受力, 一方面, FRP 可以承受部分横向拉应力, 限制构件的横向膨胀开裂, 另一方面, FRP 和黏结材料可以对原砂浆和砌块施加一定的约束作用, 使构件的抗压强度有所提高。NSM-FRP 加固法也能显著改善砌体结构的受力性能, 与 EB-FRP 加固法相比, NSM-FRP 加固法中 FRP 不容易与砌体界面发生剥离, 而目前对于 NSM-FRP 方法加固砌体

结构的轴压性能研究相对滞后,只进行了少量研究。Witzany等<sup>[34]</sup>通过试验研究和数值模拟,研究了用环氧树脂胶表面粘贴FRP布和用聚合物砂浆嵌入FRP片材双面加固砌体墙的轴心受压性能。研究表明,砌体表面粘贴FRP布加固砌体墙的破坏机理受加固区域内砌体应力状态变化的影响显著。在墙体顶面全截面施加均匀轴向荷载时,由于嵌入FRP片材加固区域的刚度大于未加固区域,导致加固区域应力集中,过早产生裂缝,嵌入FRP片材加固砌体墙轴向承载力降低了18%,但由于FRP约束了墙体的横向变形,墙体的竖向和横向极限位移明显增加;在墙体顶面中部1/3截面范围内施加均匀轴向荷载时,与未加固墙体相比,表面粘贴FRP布加固墙轴向承载力增加了2%,而嵌入FRP片材加固砌体墙轴向承载力增加了55%。

图6为NSM-FRP加固砌体砖柱的约束区域分布。类似于矩形箍筋混凝土柱的作用机理,当砖柱轴心受压时,竖向受压裂缝产生,试件同时出现横向变形,FRP、黏结材料和砖之间存在摩擦力和黏结力。FRP的弹性模量和抗拉强度大于砌体,可以承受较大的横向拉应力,由于受到四周FRP板的约束,中心部位的砌体处于三向受力状态,4个角的FRP板叠放刚度比较大,变形小,两个垂直方向的拉力合成对中心部位砌体的强约束,非角部区域相对约束较小,属于弱约束区。沿试件高度方向,在FRP板加固平面内约束最强,相邻的两个加固FRP板截面的中间位置约束作用最弱,所以,轴向极限抗压承载力由强约束区和弱约束区两部分砌体承担,计算公式可表示为

$$N_u = f_n A_n + f_c A_c \quad (20)$$

式中: $N_u$ 为砖柱轴压极限承载力; $f_n$ 为弱约束区砌体的极限抗压强度; $f_c$ 为强约束区砌体的极限抗压强度; $A_n$ 为弱约束区面积; $A_c$ 为强约束区面积。

基于上述现状,目前关于NSM-FRP加固砌体构件的抗压性能研究相对较少,在NSM-FRP加固

砌体构件的受力机理和抗压承载力计算模型方面,需进一步深入研究。

### 3 NSM-FRP 加固砌体构件的抗剪性能

砌体静力抗剪强度是砌体结构的基本力学性能指标之一,目前研究砌体静力抗剪强度的试验方法主要有单剪试验法、双面剪切试验法和对角剪切试验。由于施加的荷载容易产生偏心,使得单剪试件的试验结果离散性较大。《砌体基本力学性能试验方法标准》(GB/T 50129—2011)<sup>[35]</sup>规定了砖砌体沿通缝截面抗剪强度的试验方法,采用9块砖组成的双剪试件可以消除荷载偏心带来的试验误差。美国材料试验协会<sup>[36]</sup>和国际材料与试验协会<sup>[37]</sup>建议采用对角剪切试验研究砌体的静力抗剪强度。基于主拉应力破坏理论,对角剪切试验认为,砌体在压剪复合作用下的破坏是由于砌体中间部位的主拉应力超过了砌体的抗拉强度。相对而言,对角剪切试验可以有效评估砌体加固方法的有效性。

李保亮等<sup>[38]</sup>通过三砖双面剪切试验研究了FRP嵌入方式、嵌入尺寸、嵌入数量、嵌入部位等对CFRP嵌入式加固砌体结构抗剪性能的影响,结果表明,CFRP条嵌入式加固砌体结构可以显著提高砌体结构的抗剪性能,砌体抗剪强度随FRP嵌入尺寸、嵌入数量的增加而增大。

Turco等<sup>[39]</sup>通过弯曲抗拉试验和对角剪切试验,分别使用聚合物改性水泥基膏体和环氧树脂胶将圆形和矩形截面的FRP筋嵌入到不同尺寸的凹槽中,对加固后混凝土砌块砌体试件的抗弯和抗剪性能进行了研究,结果表明:加固后试件的强度和延性大大提高;对角剪切试验表明,由于黏结强度低,使用聚合物改性水泥基膏体作为黏结材料的试件在试验中出现了一些滑动,可以重新分配应力,从而表现出较好的抗剪性能;使用环氧树脂单面加固时,试件两侧产生的刚度差导致加载过程中墙体发生面外弯曲,而使用聚合物改性水泥基膏体单面加固的试件只出现了面内剪切破坏,没有出现面外弯曲破坏。Petersen等<sup>[18]</sup>研究表明,墙体两侧非对称配筋加固也会导致面外弯曲变形,水平嵌入FRP加固抑制了对角线裂缝的张开,垂直嵌入FRP可以抑制滑动破坏和对角裂纹的扩展。Mahmood等<sup>[40]</sup>通过对角剪切试验研究了用环氧树脂胶表面粘贴玻璃纤维增强复合材料(Glass Fiber Reinforced Polymer,简称GFRP)布、表面粘贴CFRP板以及嵌

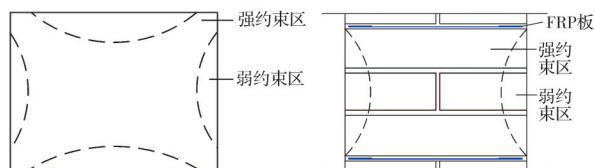


图6 NSM-FRP加固砌体砖柱的约束区域分布

Fig. 6 Constraint zone distribution of NSM-FRP reinforced masonry brick columns



入 CFRP 筋加固砌体墙的抗剪性能,结果表明:表面粘贴和嵌入 FRP 均使砌体墙的剪切强度、延性和韧性大幅提高;水平向 FRP 加固不能减小砌体墙的滑动变形,使用垂直或对角线 FRP 加固可以限制墙体的滑动;在水平向 FRP 加固墙体中,抗剪强度的增加与水平配筋率和 FRP 弹性模量的乘积之间存在线性关系。Dizhur 等<sup>[41]</sup>通过对角剪切试验研究了表面嵌入 CFRP 板加固完好和受损黏土砖砌体墙的抗剪性能,结果表明:NSM-FRP 加固法可以显著提高强度不足和受损无筋砌体墙的抗剪强度和变形能力,垂直向 CFRP 板增加了对角剪切裂纹张开的摩擦阻力,抑制了裂纹的扩展,垂直 CFRP 配筋率的增加与墙板抗剪强度的增加呈线性关系。Jafari 等<sup>[42]</sup>通过对角剪切试验研究了表面粘贴 GFRP 板和 CFRP 板及表面嵌入钢筋和 GFRP 筋加固砌体墙的抗剪性能,结果表明:加固后墙板的承载能力和延性均有所提高,表面嵌入 GFRP 筋加固的墙板抗剪强度最高,对角线粘贴 CFRP 板加固的墙板延性最好。

Li 等<sup>[43]</sup>对 NSM-FRP 法加固的无筋混凝土砌块砌体墙进行了对角剪切试验,提出了一种计算加固后抗剪承载力的分析模型,加固后墙体的抗剪承载力由未加固墙的抗剪承载力和 FRP 对于抗剪承载力的贡献两部分组成。

$$V_n = V_m + V_f \quad (21)$$

式中: $V_m$ 为未加固墙的抗剪承载力; $V_f$ 为 FRP 筋对墙体抗剪强度的贡献。

在对角剪切试验中,墙体有 4 种类型的破坏机制,分别为剪切滑动破坏、剪切摩擦破坏、对角拉伸破坏、角部压碎破坏。当剪切荷载达到最小剪切荷载  $V_m$  时,试件发生破坏。对角剪切荷载下,未加固砌体墙的抗剪承载力采用式(22)~式(28)计算。

$$V_m = \min \{V_{m,1}, V_{m,2}, V_{m,3}, V_{m,4}\} \quad (22)$$

$$V_{m,1} = \frac{\tau_0}{1 - \mu \tan \theta} A_n \quad (23)$$

$$V_{m,2} = \frac{\tau_0^*}{1 - \mu^* \tan \theta} A_n \quad (24)$$

$$\tau_0^* = \frac{\tau_0}{1 + 1.5\mu b/d} \quad (25)$$

$$\mu^* = \frac{\mu}{1 + 1.5\mu b/d} \quad (26)$$

$$V_{m,3} = \frac{f'_{tb}}{2.3} \sqrt{1 + \frac{\sigma_n}{f'_{tb}}} A_n \quad (27)$$

$$V_{m,4} = \frac{2df'_m}{3b + 2d \tan \theta} A_n \quad (28)$$

式中: $\tau_0$ 为剪切黏结强度; $\mu$ 为内摩擦系数; $\sigma_n$ 为墙体上的法向压应力; $\theta$ 为墙水平线和主对角线之间的角度; $\tau_0^*$ 为修正剪切黏结强度; $\mu^*$ 为修正内摩擦系数; $b$ 和  $d$ 分别为砌块的高度和长度; $f'_m$ 为砌体的抗拉强度; $f'_m$ 为砌体的抗压强度。 $V_{m,1}$ 、 $V_{m,2}$ 、 $V_{m,3}$ 、 $V_{m,4}$ 分别为剪切滑动破坏、剪切摩擦破坏、对角拉伸破坏、角部压碎破坏时的抗剪承载力。

假定黏结材料和砌体之间的黏结应力沿有效黏结长度均匀分布。假设 FRP 筋与黏结材料之间黏结良好,则 FRP 筋中产生的拉力等于黏结材料与砌体之间的黏结强度,根据静力平衡条件,得到有效黏结长度的计算公式为

$$L_e = \frac{f_u A_f}{(2D + t_m) \tau_b} \quad (29)$$

式中: $L_e$ 为砌体中 FRP 筋的有效长度; $\tau_b$ 为砌体和黏结材料之间的平均黏结强度; $f_u$ 为 FRP 筋的最大拉应力; $A_f$ 为 FRP 筋的横截面积; $t_m$ 为灰缝的厚度; $D$ 为凹槽的深度。

对角剪切荷载下,假定在砌体墙中存在  $45^\circ$  恒定倾角的剪切裂缝,所有与斜裂缝相交的 FRP 筋都达到了极限黏结应力。因此,FRP 提供的抗剪强度可计算为与对角剪切裂缝相交的 FRP 筋黏结力的总和。

$$V_f = \sum_{i=1}^n A_i f_i = \tau_b (2D + t_m) \sum_{i=1}^n L_i, \quad L_i \leq L_e \quad (30)$$

式中: $f_i$ 为第  $i$  根钢筋所承受的抗剪强度; $n$ 为与对角裂缝相交的 FRP 筋总数; $L_i$ 为与对角裂缝相交的第  $i$  根钢筋的有效黏结长度。

Li 等<sup>[43]</sup>的研究也表明:NSM-FRP 加固技术可以有效提高无筋砌体墙的面内强度和延性,抗剪强度的增加最大约为 80%;与未加固墙相比,加固后墙的延性更高,并且在破坏后整体性更好,从而可降低塌陷的风险;在分析模型中,由于未考虑墙单面加固时平面外弯曲的情况,建议的模型会过高预测试验的极限载荷,因此为墙的抗剪承载力提供了上限,需进一步研究评估所提出的分析方法的有效性。

Casacci 等<sup>[44]</sup>进一步研究了嵌入玄武岩纤维增强聚合物 (Basalt Fiber Reinforced Polymer, 简称 BFRP) 筋加固砌体墙的平面内剪切性能,结果表明:加固后墙体的抗剪承载力、抗剪刚度和延性都有所提高,而抗剪承载力和延性的提高与配筋率不

成正比,存在最优的配筋率使墙板达到最佳的抗剪性能。Casacci等<sup>[44]</sup>研究发现,嵌入BFRP加固试件的破坏机制为BFRP与周围的黏结材料发生了脱离,因此,对Li等<sup>[43]</sup>提出的抗剪承载力计算公式进行了修改,假定构件破坏时黏结材料和FRP筋之间的黏结应力沿有效长度均匀分布,根据力学平衡条件,FRP筋中产生的拉力等于黏结材料和钢筋之间的黏结强度,有效黏结长度可由式(31)表示,FRP筋对抗剪承载力的贡献可由式(32)表示。

$$L_e = \frac{f_{l, \text{BAR}} R_{\text{BAR}}}{2\tau_b} \quad (31)$$

$$V_f = \sum_{i=1}^N A_{\text{BAR}i} f_i = \tau_b 2\pi R_{\text{BAR}} \sum_{i=1}^n L_i, \quad L_i \leq L_e \quad (32)$$

式中: $f_{l, \text{BAR}}$ 为FRP筋的最大拉应力; $R_{\text{BAR}}$ 为FRP筋的半径; $N$ 为与对角裂纹相交的FRP筋的总数; $A_{\text{BAR}}$ 为FRP筋的横截面积。

将FRP进行预张拉,给结构施加预应力,能够重新调整原结构内力状态和应力水平,使得FRP与原结构更好地协同变形,提高FRP的利用率。Yu等<sup>[45]</sup>研究了内嵌预应力GFRP筋加固砌体墙的平面内剪切性能,发现用内嵌预应力GFRP筋加固无筋砌体墙可以促使砌体结构中原有的一些裂缝闭合,用预应力筋加固的墙体抗剪承载力高于未加固墙体或用无预应力筋加固的墙体。

综上所述,在NSM-FRP加固砌体墙的对角剪切试验中,常用CFRP和GFRP;单面加固墙体的破坏机制由两个阶段组成:面内破坏阶段和影响墙体稳定性的面外破坏阶段。面外破坏阶段的特征是裂纹从未加固面向加固面发展,导致墙体倾斜。单面嵌入加固时,由于使用环氧树脂加固侧墙体的刚度比较大,墙体两侧刚度分布不均匀,产生了面外的弯曲。目前的计算公式没有考虑这一破坏模式对加固后砌体墙抗剪承载力的影响,得到的理论计算值与试验值相比偏大,因此,可以引入环氧树脂与砂浆的刚度比对原有抗剪承载力计算公式进行修正。

#### 4 NSM-FRP加固砌体墙的抗震性能

在地震作用下,无筋砌体墙可能会发生平面内的沿水平砂浆缝的滑动破坏、对角剪切破坏、弯曲摇摆破坏或者这些破坏模式的组合,产生的破坏模式取决于墙的高宽比、轴压力大小、墙体的边界条件及砌体材料的力学性能。当墙体的剪应力超过砂浆与砖界面间的摩擦力时,会发生沿水平砂浆缝

的滑动破坏。对角剪切破坏主要取决于砌体和砂浆的强度,当地震作用在墙体内引起的主拉应力超过砌体的抗拉强度时,就会产生对角剪切破坏。当墙体高宽比较大、水平力在墙体底部引起的附加弯矩超过砂浆的抗拉强度时,则发生弯曲摇摆破坏<sup>[46]</sup>。与水平砂浆缝滑动破坏和弯曲摇摆破坏模式相比,对角剪切破坏墙体的能量耗散能力有限,呈脆性破坏,所以,通过加固使墙体的破坏模式由脆性剪切破坏转变为延性滑动破坏和弯曲破坏,可以提高墙体的抗震性能。

已有研究表明<sup>[47-55]</sup>,表面嵌入钢筋加固砌体墙可以提高墙体在低周反复荷载下的抗震性能。郭子雄等<sup>[53]</sup>、刘小娟<sup>[54]</sup>、胡奕东等<sup>[55]</sup>研究表明,钢筋-聚合物砂浆嵌缝加固方法可有效提高石墙的抗震、抗剪强度和变形性能。与钢筋相比,FRP抗拉强度更高,且具有轻质、抗腐蚀等优点,将钢筋替换为FRP嵌入砌体结构加固也可以有效提高砌体结构的抗震性能。Konthesingha等<sup>[56]</sup>设计了不同高宽比、不同轴压力、不同加固方案的23片墙体,通过单调和拟静力试验研究了表面嵌入CFRP板对砌体墙抗震性能的影响,结果表明:宽高比为1的墙体构件主要由于对角剪切而破坏,宽高比为0.5的墙板主要由于墙体底部滑移而破坏。高宽比为1的墙体试验结果表明,加固后墙体的变形能力和耗能能力明显提升,仅在水平向用CFRP条加固的墙体最大荷载没有明显增加,但能够抵抗更大的位移;水平和垂直内嵌组合加固在增强极限承载力、位移能力和能量耗散能力方面总体表现最佳。Konthesingha等<sup>[57]</sup>进一步研究表明,表面嵌入CFRP板加固震损墙体可有效恢复墙体在低周反复荷载作用下的抗剪强度,同时提高墙体的变形能力和耗能能力;相比仅水平向加固的方案,水平和垂直方向组合加固的方案表现出更好的抗震性能。Li等<sup>[58]</sup>研究了表面嵌入GFRP筋加固开洞墙体在低周反复荷载作用下的抗震性能,结果表明:使用水平和垂直GFRP筋组合内嵌加固,显著改善了无筋砌体墙的整体结构性能,包括侧向承载能力、刚度和最大侧向位移能力。周长东等<sup>[59]</sup>研究了CFRP板嵌缝加固砖墙的抗震性能,结果表明,CFRP板材嵌缝加固可以改变墙体的破坏模式,使破坏模式由脆性的剪切破坏转为延性破坏,显著提高了墙体的承载能力、变形能力、延性和耗能能力等抗震性能。

NSM-FRP加固砌体构件的主要作用是在墙体开裂后提供承载力。在初始加载阶段,FRP通过黏

结材料与砌块的黏结力与砖墙共同工作,FRP与砌体协同变形,应变值很小。随着水平荷载的增大,构件出现斜裂缝,与裂缝相交的FRP应力增加,应变值快速增大。由于FRP的约束拉结作用,构件抗主拉应力强度增大,可以有效抑制墙体裂缝的快速开展和贯通,提高了墙体的强度和延性。

潘磊等<sup>[48]</sup>、张广泰等<sup>[49]</sup>、刘小娟<sup>[54]</sup>参考中国现行《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)<sup>[60]</sup>及水平配筋砖砌体的相关研究成果<sup>[61-63]</sup>,将嵌筋加固砌体墙的抗剪强度分为两个部分,即未加固砌体的受剪承载力和钢筋提供的受剪承载力。刘廷滨<sup>[47]</sup>将嵌筋加固砌体墙的抗剪强度分为4个部分:开槽后原砂浆剩余面积的抗剪强度、嵌筋后嵌缝砂浆提供的抗剪强度、竖向压应力提供的抗剪强度以及后嵌入的钢筋提供的抗剪强度。两种计算方法中均假设嵌入的钢筋达到了屈服强度,忽略水平钢筋沿墙体不同部位的强度的不均匀分布,然后通过引入钢筋参数与工作系数,考虑高宽比对钢筋强度发挥程度的影响。参考既有水平配筋砖砌体相关计算理论<sup>[60-63]</sup>和后植筋加固砌体墙的计算方法<sup>[48-49]</sup>,水平嵌入FRP加固砌体墙截面抗震受剪强度的计算公式可表示为

$$V = f_v A_m + \zeta_f \epsilon_{fu} E_f A_f \quad (33)$$

$$f_v = f_{v,m} + \alpha \mu \sigma_0 \quad (34)$$

式中: $f_v$ 为压应力作用下砌体抗剪强度的平均值; $A_m$ 为砌体墙的水平截面积; $\zeta_f$ 为FRP参与工作系数; $\epsilon_{fu}$ 为FRP的极限拉伸应变; $E_f$ 为FRP的弹性模量; $A_f$ 为FRP的横截面积; $f_{v,m}$ 为砌体抗剪强度的平均值; $\alpha$ 为不同种类砌体的修正系数; $\sigma_0$ 为竖向压应力; $\mu$ 为剪压复合受力影响系数。

周长东等<sup>[59]</sup>研究表明,在低周反复荷载作用下,CFRP板嵌缝加固砖墙构件时,CFRP板的应力沿墙高分布不均匀。由于FRP的抗拉强度远高于普通钢筋,NSM-FRP加固砌体构件由原构件、黏结材料和FRP三部分组成,其脱黏机制不同于配筋砖砌体,已有的研究还不能建立FRP参与工作系数与高宽比、配筋率和FRP嵌入位置等因素之间的关系,如何准确考虑FRP对NSM-FRP加固砌体构件的抗剪承载力的贡献?目前还没有合适的方法,需要进一步研究。

综上所述,目前关于NSM-FRP加固砌体墙抗震性能的研究已取得一定进展。NSM-FRP加固可以提高墙体的面内剪切强度和变形性能。在拟静力荷载作用下,NSM-FRP加固砖墙中FRP对于抗

剪承载力的贡献还需进一步研究确定。

## 5 NSM-FRP 加固砌体构件的抗弯性能

无筋砌体结构在承受地震或风引起的平面外荷载时容易失效,面外破坏可能导致墙体倒塌和结构大范围破坏,产生严重的安全隐患,砌体墙的平面外弯曲性能也是评价加固后砌体结构抗震性能的重要指标之一。

常用的试验方法为小尺寸砌体梁或者全尺寸砌体墙的四点弯曲试验或者三点弯曲试验,FRP的嵌入方向有垂直和平行于水平灰缝两种,NSM-FRP垂直水平灰缝加固砌体构件常见的破坏模式有:FRP从砖石基底上剥离、砌体的弯曲剪切破坏、受压区砌块破碎、FRP断裂破坏或者这几种破坏模式的组合。其中,FRP断裂破坏较突然,延性较差,在设计构件过程中应通过增加FRP的截面积予以避免;FRP从砖石基底上剥离破坏模式的试件强度和延性提高最为显著,FRP的利用率最高<sup>[64-67]</sup>。Willis等<sup>[64]</sup>研究表明,平行于水平灰缝嵌入FRP构件的破坏机理不同于垂直于水平灰缝嵌入FRP的构件。垂直于水平灰缝嵌入FRP的构件,主要薄弱面位于水平灰缝,然而,平行于水平灰缝嵌入FRP的构件,破坏模式可能为竖直灰缝弯曲受拉破坏(图7中破坏模式①)或砌块的弯曲受拉破坏(图7中破坏模式②),或发生在水平灰缝的扭转破坏(图7中破坏模式③),或这3种模式的组合,具体情况取决于这几个部位的相对强度。

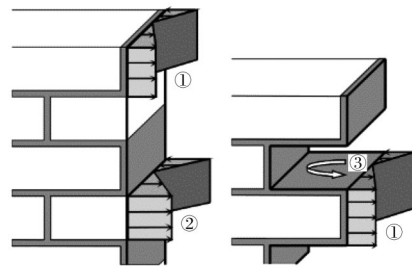


图 7 砌体墙单向水平弯曲破坏模式<sup>[63]</sup>

Fig. 7 Unidirectional horizontal bending failure mode of masonry walls

NSM-FRP加固法是一种提高URM墙体平面外抗弯能力的有效加固技术。加固后砌体构件的破坏方式由脆性破坏转为延性破坏,抗弯性能明显改善,极限荷载、极限弯矩和极限挠度随着FRP配

筋率的增加而显著增加<sup>[64-70]</sup>。Griffith等<sup>[65]</sup>的研究进一步表明,在配筋率相同时,减小FRP筋间距可以避免相邻FRP之间砌体的剪切破坏,使砌体墙的抗弯承载力和变形能力增强;当配筋率过高时,墙体的破坏模式由FRP从砖石基底上剥离破坏转为与FRP板方向垂直的剪切劈裂破坏,需进一步研究这一破坏模式的黏结性能。在实际工程中,墙体上部会承受来自上部结构的自重,存在一定的轴压力,文献[61-62]的研究表明,墙体的刚度和最大弯曲荷载随着墙体顶部轴压力的增加而增加。

Galati等<sup>[67]</sup>研究了FRP筋的类型和数量、FRP筋的形状、凹槽的尺寸和嵌入材料的类型(环氧树脂或水泥砂浆)对NSM-FRP加固无筋砌体墙平面外抗弯性能的影响。建议NSM-FRP加固无筋砌体墙的最大弯矩按式(35)计算。

$$M_n = A_f \varepsilon_{fe} E_f \left( t_m - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (35)$$

式中: $A_f$ 为FRP的横截面面积; $\varepsilon_{fe}$ 为FRP的有效应变; $E_f$ 为FRP的弹性模量; $t_m$ 为砌体墙的厚度; $\beta_1$ 为等效矩形应力图中受压区高度和中和轴高度的比值; $c$ 为中和轴高度,即受压区理论高度。

文献[67]还建议,使用嵌入矩形FRP板加固砌体墙时,FRP的有效应变为0.65倍极限应变,当凹槽直径为圆形FRP筋直径的2.25倍时,FRP的有效应变为0.55倍极限应变;当凹槽直径为圆形FRP筋直径的1.5倍时,FRP的有效应变为0.35倍极限应变。可见,当黏结材料厚度减小时,FRP筋的利用率有所降低,因此,应该保证黏结材料有足够的厚度,以保证黏结强度。然而,由于结论是基于有限的试验结果得出的,需要更多的试验和统计分析来进一步验证。基于上述研究,不同破坏模式的FRP的最大应变值需进一步量化,以更准确地计算NSM-FRP加固砌体构件的最大弯矩。

## 6 结论与展望

NSM-FRP作为一种经济、高效的砌体结构加固方法,具有广泛的应用前景。目前,学者们在该领域已开展了一些研究,取得了一定进展,通过综述NSM-FRP加固砌体结构的研究成果,得到以下主要结论:

1)已有的研究表明,NSM-FRP加固是一种有效的加固方法,可以显著增强砌体结构的抗压、抗剪、弯曲抗拉及抗震性能。

2)由于黏结材料、FRP、砌体三者协同作用的

复杂性,影响NSM-FRP加固砌体结构力学性能变量较多,目前尚无完善的NSM-FRP加固砌体结构的设计理论;已有的黏结强度计算模型没有考虑FRP嵌入方向和环境因素的影响,不具有广泛的适用性,仍需开展一系列的试验及理论研究,形成统一的设计理论,为完善相关规范提供依据。

3)目前对于NSM-FRP加固砌体柱、砌体墙抗压性能的研究还很少,需要在加固后的破坏模式和加固设计理论等方面继续开展深入研究。

4)水浸泡、湿热循环和冻融循环等环境因素作用对砖石和砂浆界面以及FRP和黏结胶体的黏结强度会产生影响,使NSM-FRP砌体加固体系抗压、抗拉、抗剪及抗震的破坏模式和破坏强度发生改变;而目前对于NSM-FRP加固砌体结构耐久性能的相关研究还很少,不利于实际工程应用,尚需针对NSM-FRP加固砌体结构在环境作用下的长期力学性能进一步深入研究。

5)很多建造年代久远的古建砌体结构,由于在长期使用过程中累积了不同程度的损伤,造成砖石块材性能劣化、砂浆粉化、墙体开裂等现象;此外,由于古建砌体结构和现代砌体结构的砖、石、砂浆材料性能上的差异,对其进行加固时,要完全还原出古建筑的砌筑工艺和材料存在一定困难,对于NSM-FRP加固古建砌体结构的力学性能,有待进一步研究。

6)古建砌体结构加固应遵循“最小干预”和“修旧如旧”的原则,在达到加固效果的同时,最大程度减少对原历史建筑的影响。只在水平灰缝中开槽嵌入FRP加固后的砌体结构与原有结构表面的颜色和纹理基本一致,对结构的原有立面影响较小,更适合加固古建砌体结构。目前已经开展的研究主要集中于在砌体表面开槽加固方法的力学性能,而对只沿灰缝开槽嵌入FRP加固砌体结构性能的研究还较少,仍需进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] 潘毅,陈建,包韵雷,等.长宁6.0级地震村镇建筑震害调查与分析[J].建筑结构学报,2020,41(Sup1):297-306.  
PAN Y, CHEN J, BAO Y L, et al. Seismic damage investigation and analysis of rural buildings in Ms 6.0 Changning earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Sup1): 297-306. (in Chinese)
- [2] 杨玉成,杨柳,高云学,等.唐山地震多层砖房震害与强度的关系[J].地震工程与工程振动,1981,1(1):

- 21-33.
- YANG Y C, YANG L, GAO Y X, et al. Relation between damage to multistory brick buildings and their strength during the Tangshan earthquake [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1981, 1(1): 21-33. (in Chinese)
- [3] 王威,周颖,梁兴文,等.砌体结构在2008汶川大地震中的震害经验[J].*地震工程与工程振动*, 2010, 30(1): 60-68.
- WANG W, ZHOU Y, LIANG X W, et al. Lessons learnt from masonry structural damage in 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2010, 30(1): 60-68. (in Chinese)
- [4] 谢启芳,薛建阳,赵鸿铁.汶川地震中古建筑的震害调查与启示[J].*建筑结构学报*, 2010, 31(Sup2): 18-23.
- XIE Q F, XUE J Y, ZHAO H T. Seismic damage investigation and analysis of ancient buildings in Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(Sup2): 18-23. (in Chinese)
- [5] 蔡晓光,孙有为,郭晓云.芦山地震建筑震害统计分析[J].*自然灾害学报*, 2015, 24(6): 112-119.
- CAI X G, SUN Y W, GUO X Y. Statistical analysis of building damage in  $M_s$ 7.0 Lushan earthquake [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(6): 112-119. (in Chinese)
- [6] INGHAM J, GRIFFITH M. Performance of unreinforced masonry buildings during the 2010 darfield (Christchurch, NZ) earthquake [J]. *Australian Journal of Structural Engineering*, 2010, 11(3): 207-224.
- [7] WANG C L, SARHOSIS V, NIKITAS N. Strengthening/retrofitting techniques on unreinforced masonry structure/element subjected to seismic loads: A literature review [J]. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2018, 12(1): 251-268.
- [8] 尹世平,成帅安,荆磊.FRP和TRC加固砌体墙受剪性能试验研究[J].*建筑结构学报*, 2020, 41(Sup1): 315-322.
- YIN S P, CHENG S A, JING L. Experimental research on shear performance of masonry wall strengthened with FRP and TRC [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(Sup1): 315-322. (in Chinese)
- [9] 陶毅,古金本,信任,等.CFRP网格修复后多层砌体结构墙体的抗震性能[J].*西南交通大学学报*, 2019, 54(6): 1258-1267.
- TAO Y, GU J B, XIN R, et al. Seismic performance of multi-storey masonry wall repaired by carbon fiber reinforced polymer grids [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(6): 1258-1267. (in Chinese)
- [10] 陈良,袁建力.微弯碳纤维板加固古砖塔模型试验研究[J].*建筑结构学报*, 2019, 40(11): 64-72.
- CHEN L, YUAN J L. Experimental study of ancient brick pagoda strengthened with light bended CFRP plate [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(11): 64-72. (in Chinese)
- [11] BABATUNDE S A. Review of strengthening techniques for masonry using fiber reinforced polymers [J]. *Composite Structures*, 2017, 161: 246-255.
- [12] PARGHI A, ALAM M S. A review on the application of sprayed-FRP composites for strengthening of concrete and masonry structures in the construction sector [J]. *Composite Structures*, 2018, 187: 518-534.
- [13] ZAMPIERI P, SIMONCELLO N, TETOUGUENI C D, et al. A review of methods for strengthening of masonry arches with composite materials [J]. *Engineering Structures*, 2018, 171: 154-169.
- [14] VACULIK J, VISINTIN P, BURTON N G, et al. State-of-the-art review and future research directions for FRP-to-masonry bond research: Test methods and techniques for extraction of bond-slip behaviour [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 183: 325-345.
- [15] BARROS J A O, FERREIRA D R S M, FORTES A S, et al. Assessing the effectiveness of embedding CFRP laminates in the near surface for structural strengthening [J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(7): 478-491.
- [16] SERACINO R, JONES N M, ALI M S, et al. Bond strength of near-surface mounted FRP strip-to-concrete joints [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 11(4): 401-409.
- [17] DE LORENZIS L, TENG J G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2007, 38(2): 119-143.
- [18] PETERSEN R B, MASIA M J, SERACINO R. In-plane shear behavior of masonry panels strengthened with NSM CFRP strips. I: Experimental investigation [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(6): 754-763.
- [19] MALJAE H, GHIASSI B, LOURENÇO P B. Bond behavior in NSM-strengthened masonry [J]. *Engineering Structures*, 2018, 166: 302-313.
- [20] PETERSEN R B, MASIA M J, SERACINO R. Bond behavior of near-surface mounted FRP strips bonded to modern clay brick masonry prisms: Influence of strip orientation and compression perpendicular to the strip [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2009, 13(3): 169-178.

- [21] WILLIS C R, YANG Q, SERACINO R, et al. Bond behaviour of FRP-to-clay brick masonry joints [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(11): 2580-2587.
- [22] KASHYAP J, WILLIS C R, GRIFFITH M C, et al. Debonding resistance of FRP-to-clay brick masonry joints [J]. *Engineering Structures*, 2012, 41: 186-198.
- [23] DIZHUR D, GRIFFITH M C, INGHAM J M. Pullout strength of NSM CFRP strips bonded to vintage clay brick masonry [J]. *Engineering Structures*, 2014, 69: 25-36.
- [24] YU P Y, SILVA P, NANNI A. Bond behavior of near-surface mounted FRP bars to masonry [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2018, 22(4): 04018024.
- [25] 郭子雄, 刘宝成, 刘阳. 石材表层嵌埋CFRP筋粘结性能试验研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(7): 59-64.  
GUO Z X, LIU B C, LIU Y. Experimental study on bond behavior between nsm CFRP rods and stone for composite stone beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(7): 59-64. (in Chinese)
- [26] SERACINO R, RAIZAL SAIFULNAZ M R, OEHLERS D J. Generic debonding resistance of EB and NSM plate-to-concrete joints [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 11(1): 62-70.
- [27] LUMANTARNA R, BIGGS D T, INGHAM J M. Compressive, flexural bond, and shear bond strengths of in situ New Zealand unreinforced clay brick masonry constructed using lime mortar between the 1880s and 1940s [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(4): 559-566.
- [28] ZHANG S S, TENG J G, YU T. Bond strength model for CFRP strips near-surface mounted to concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 18(3): A4014003.
- [29] TÜRKMEN Ö S, WIJTE S N M, VACULIK J, et al. High-speed pullout behavior of deep-mounted CFRP strips bonded with a flexible adhesive to clay brick masonry [J]. *Structures*, 2020, 28: 1153-1172.
- [30] VACULIK J, VISINTIN P, LUCAS W, et al. Durability of near-surface-mounted FRP-to-clay brick masonry retrofits under environmental exposure [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2020, 24(1): 04019058.
- [31] 施楚贤. 砌体结构[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017: 17.  
SHI C X. *Masonry Structure* [M]. 4th Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017: 17. (in Chinese)
- [32] VALLUZZI M R, BINDA L, MODENA C. Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing [J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19(1): 63-73.
- [33] 魏智辉, 潘毅, 邱洪兴, 等. 勾缝加固砖砌体墙的抗压性能试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(12): 184-188.  
WEI Z H, PAN Y, QIU H X, et al. Experimental study on compressive behavior of masonry walls strengthened with pointing mortar [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(12): 184-188. (in Chinese)
- [34] WITZANY J, ZIGLER R, KROFTOVÁ K. Strengthening of compressed brick masonry walls with carbon composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 112: 1066-1079.
- [35] 砌体基本力学性能试验方法标准: GB/T 50129—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Standard for test methods for basic mechanical properties of masonry: GB/T 50129-2011 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese)
- [36] Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages: ASTM E519/E519M-20 [S]. USA: ASTM International, 2020.
- [37] RILEM T C 76-LUM. Diagonal tensile strength tests of small wall specimens [M]//RILEM Technical Recommendations for the testing and use of construction material, London, UK: CRC Press, 1994.
- [38] 李保亮, 丁百湛, 朱强强. CFRP嵌入式加固砌体结构抗剪性能试验研究[J]. *砖瓦世界*, 2014(7): 33-35.  
LI B L, DING B Z, ZHU Q Q. Experimental study on shear performance of masonry structure reinforced with CFRP embedded [J]. *Brick & Tile World*, 2014(7): 33-35. (in Chinese)
- [39] TURCO V, SECONDIN S, MORBIN A, et al. Flexural and shear strengthening of un-reinforced masonry with FRP bars [J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(2): 289-296.
- [40] MAHMOOD H, INGHAM J M. Diagonal compression testing of FRP-retrofitted unreinforced clay brick masonry wallettes [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(5): 810-820.
- [41] DIZHUR D, GRIFFITH M, INGHAM J. In-plane shear improvement of unreinforced masonry wall panels using NSM CFRP strips [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2013, 17(6): 04013010.
- [42] JAFARI A, OSKOU EI A V, BAZLI M, et al. Effect of the FRP sheet's arrays and NSM FRP bars on in-plane behavior of URM walls [J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 20: 679-695.

- [43] LI T, GALATI N, TUMIALAN J G, et al. Analysis of unreinforced masonry concrete walls strengthened with glass fiber-reinforced polymer bars [J]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(4): 569-577.
- [44] CASACCI S, GENTILINI C, DI TOMMASO A, et al. Shear strengthening of masonry wall using structural repointing and FRCM composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 206: 19-34.
- [45] YU P Y, SILVA P, NANNI A. In-plane performance of unreinforced concrete masonry strengthened with prestressed GFRP bars [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(1): 04016064.
- [46] TOMAZEVIC M. Earthquake-resistant design of masonry buildings [M]. London: Imperial College Press, 1999: 109-150.
- [47] 刘廷滨. 水平嵌筋加固砖砌体墙粘结机理及抗震性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.  
LIU T B. Research on bonding mechanism and seismic performance of horizontal reinforced brick masonry wall [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [48] 潘磊, 刘廷滨, 裴先科, 等. 水平嵌筋加固砖砌体墙抗震性能试验研究[J]. *世界地震工程*, 2019, 35(2): 157-164.  
PAN L, LIU T B, PEI X K, et al. Experimental study on seismic performance of brick walls strengthened with embedded horizontal steel bars [J]. *World Earthquake Engineering*, 2019, 35(2): 157-164. (in Chinese)
- [49] 张广泰, 侍克斌, 李元吉. 后植筋加固砖墙体抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(5): 145-150.  
ZHANG G T, SHI K B, LI Y J. Experimental study on seismic behavior of brick walls strengthened with embedded bars [J]. *Journal of Building Structures*, 2013, 34(5): 145-150. (in Chinese)
- [50] 孟凡龙, 赵建昌. 嵌筋墙体抗剪破坏机理分析[J]. *河南城建学院学报*, 2011, 20(2): 19-22.  
MENG F L, ZHAO J C. Analysis on shear failure mechanism of embedded bars reinforced wall [J]. *Journal of Henan University of Urban Construction*, 2011, 20(2): 19-22. (in Chinese)
- [51] MIRABI BANADAKI H, MORSHED R, ESLAMI A. In-plane cyclic performance of adobe walls retrofitted with near-surface-mounted steel rebars [J]. *Engineering Structures*, 2019, 194: 106-119.
- [52] SOTI R, BARBOSA A R. Experimental and applied element modeling of masonry walls retrofitted with near surface mounted (NSM) reinforcing steel bars [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2019, 17(7): 4081-4114.
- [53] 郭子雄, 柴振岭, 胡奕东, 等. 嵌缝加固条石砌石墙抗震性能试验研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(Sup1): 136-141.  
GUO Z X, CHAI Z L, HU Y D, et al. Study on seismic behavior of stone walls strengthened by mounting bars in bed joints [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(Sup1): 136-141. (in Chinese)
- [54] 刘小娟. 钢筋-聚合物砂浆嵌缝加固石墙抗震性能试验研究[D]. 福建 泉州: 华侨大学, 2011.  
LIU X J. Experimental study on seismic behavior of stone masonry walls strengthened by mounting bars in bed joints [D]. Quanzhou, Fujian: Huaqiao University, 2011. (in Chinese)
- [55] 胡奕东, 郭子雄, 柴振岭, 等. 嵌缝加固条石砌石墙的抗震性能初探[J]. *工程抗震与加固改造*, 2009, 31(6): 24-27, 41.  
HU Y D, GUO Z X, CHAI Z L, et al. Study on seismic behavior of stone wall strengthened by mounting bars in bed joints [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2009, 31(6): 24-27, 41. (in Chinese)
- [56] KONTHESINGHA K M C, MASIA M J, PETERSEN R B, et al. Experimental evaluation of static cyclic in-plane shear behavior of unreinforced masonry walls strengthened with NSM FRP strips [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(3): 04014055.
- [57] KONTHESINGHA K M C, MASIA M J, PETERSEN R B, et al. Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips - An experimental evaluation [J]. *Engineering Structures*, 2013, 50: 126-136.
- [58] LI T, GALATI N, TUMIALAN G, et al. FRP strengthening of URM walls with openings - experimental results [J]. *The Masonry Society Journal*, 2005, 23(1): 47-57.
- [59] 周长东, 张腾, 景杰婧. 碳纤维板嵌缝加固砖墙抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(Sup1): 323-330.  
ZHOU C D, ZHANG T, JING J J. Experimental study on seismic performance of brick wall strengthened with seam embedded CFRP plates [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(Sup1): 323-330. (in Chinese)
- [60] 砌体结构设计规范: GB 50003—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Code for design of masonry structures: GB 50003-2011 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese)
- [61] 施楚贤, 周海兵. 配筋砌体剪力墙的抗震性能[J]. *建筑结构学报*, 1997, 18(6): 32-40.

- SHI C X, ZHOU H B. Research on seismic behavior of reinforced masonry shear walls [J]. *Journal of Building Structures*, 1997, 18(6): 32-40. (in Chinese)
- [62] 朱伯龙, 陈玲俐. 水平配筋砌块墙抗剪机理分析与实验验证[J]. *四川建筑科学研究*, 1998, 24(3): 5-9.
- ZHU B L, CHEN L L. Analysis of the strengthening mechanism of brick masonry with horizontal reinforcement [J]. *Building Science Research of Sichuan*, 1998, 24(3): 5-9. (in Chinese)
- [63] 周炳章, 夏敬谦. 水平配筋砖砌体抗震性能的试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 1991, 12(4): 31-43.
- ZHOU B Z, XIA J Q. Experimental study on seismic behaviour of brick masonry with horizontal reinforcement [J]. *Journal of Building Structures*, 1991, 12(4): 31-43. (in Chinese)
- [64] WILLIS C R, SERACINO R, GRIFFITH M C. Out-of-plane strength of brick masonry retrofitted with horizontal NSM CFRP strips [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(2): 547-555.
- [65] GRIFFITH M C, KASHYAP J, MOHAMED ALI M S. Flexural displacement response of NSM FRP retrofitted masonry walls [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 1032-1040.
- [66] DIZHUR D, GRIFFITH M, INGHAM J. Out-of-plane strengthening of unreinforced masonry walls using near surface mounted fibre reinforced polymer strips [J]. *Engineering Structures*, 2014, 59: 330-343.
- [67] GALATI N, TUMIALAN G, NANNI A. Strengthening with FRP bars of URM walls subject to out-of-plane loads [J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(1/2): 101-110.
- [68] TÜRKMEN Ö S, WIJTE S N M, DE VRIES B T, et al. Out-of-plane behavior of clay brick masonry walls retrofitted with flexible deep mounted CFRP strips [J]. *Engineering Structures*, 2021, 228: 111448.
- [69] 李保亮, 丁百湛, 黄国君, 等. CFRP嵌入式加固砌体结构抗弯性能试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2014, 41(9): 91-94.
- LI B L, DING B Z, HUANG G J, et al. Experimental study of out-of-plane flexural performance of masonry structures strengthened with near-surface mounted carbon fiber reinforced polymer [J]. *New Building Materials*, 2014, 41(9): 91-94. (in Chinese)
- [70] 刘阳, 郭子雄, 刘宝成, 等. 嵌埋CFRP筋组合石梁受弯性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(3): 75-81.
- LIU Y, GUO Z X, LIU B C, et al. Experimental study on flexural behavior of NSM CFRP-stone composite beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(3): 75-81. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)