赖震宇,万欢.农村新型复合材料加固下的墙体地震易损性研究[J].地震工程学报,2027,49(1):176-184.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250512001

Lai Zhenyu, Wan Huan. Seismic vulnerability of masonry walls in rural buildings retrofitted with a novel composite material[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 176-184. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250512001

农村新型复合材料加固下的墙体地震易损性研究

赖震宇,万 欢

(南昌大学 科学技术学院,江西 共青城 332020)

摘要:在农村砖砌体结构中,墙体与构造柱、圈梁等节点的连接常因施工质量缺陷而存在薄弱环节。当遭受不同方向比例的地震作用时,这些节点易成为结构破坏的起始部位,导致整体稳定性下降。为此,以农村砖砌体房屋为对象,在确定结构基本参数的基础上,采用新型复合材料碳纤维增强聚合物(CFRP)对其进行加固处理,以提升其抗震性能。利用ABAQUS有限元软件建立典型农村砖砌体建筑模型,并输入4种不同峰值加速度(PGA)的地震波进行动力时程分析。结合DYNAMO平台,实现不同工况下结构倒塌预警的可视化模拟。结果表明,随着地震波强度的降低,CFRP加固砖砌体的最大主应力呈递减趋势,说明该复合材料能有效耗散地震能量,显著提升墙体的抗震能力,从而降低农村建筑的地震易损性。

关键词:不同比例地震波;农村房屋建筑;砖砌体结构;地震易损性;ABAQUS

中图分类号:TU362 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2027)01-0176-09

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250512001

Seismic vulnerability of masonry walls in rural buildings retrofitted with a novel composite material

Lai Zhenyu, Wan Huan

(*Science and Technology College of Nanchang University, Gongqingcheng 332020, Jiangxi, China*)

Abstract: In rural brick masonry structures, the connections between walls and structural elements, such as tie columns and ring beams, are often insufficiently strong. Under seismic ground motions with varying directional ratios, the overall structure tends to fail at these weak connection points. To address this issue, this study identifies the foundational parameters of these structures and employs a novel composite material—carbon fiber-reinforced polymer (CFRP)—to enhance their seismic resilience. Using the finite element software ABAQUS, a brick masonry structure commonly used in rural housing is modeled, and four types of seismic waves with different peak ground accelerations are applied. DYNAMO software is used to derive visual collapse warnings for the brick masonry structure under different seismic conditions in rural buildings. The results show that the maximum stress of the

收稿日期:2025-05-12

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2203920)

第一作者简介:赖震宇(1985-),男,硕士,副教授,主要从事建筑结构、工程管理、土木工程方面的研究。E-mail:laizhenyu1122@163.com。

CFRP-reinforced brick masonry decreases gradually with the decrease in the energy of the seismic wave, which demonstrates the effectiveness of the CFRP-reinforced brick masonry in absorbing seismic energy. This results in a significant improvement of the seismic performance of the walls and reduces the vulnerability of rural walls to seismic action.

Keywords: seismic waves with different scaling ratios; rural masonry buildings; brick masonry structure; seismic vulnerability; ABAQUS

0　引言

在农村房屋建筑领域，砖砌体结构作为一种广泛应用的传统建筑形式，主要由砖块通过砂浆等黏结材料砌筑而成。其核心优势在于材料易得、施工简便且综合成本较低，因而成为农村地区自建房的首选结构形式[1]。该结构具备良好的抗压性能和一定的整体性，能够满足农村居民的基本居住需求。然而，砖砌体结构在抗震性能方面存在显著缺陷，在遭遇多向复合地震动作用时，其破坏模式呈现高度复杂性和非确定性，极易发生严重损毁[2]。特别是由于砌体材料抗剪强度不足，墙体在水平荷载作用下常出现剪切裂缝，进而引发局部坍塌甚至整体倾覆。当墙体主拉应力超过材料极限时，将产生具有破坏性的斜向裂缝，且在地震往复作用下持续扩展，最终导致结构完全失效[3]。针对这一突出问题，已有学者开展了大量关于砖砌体结构抗震性能优化的研究。

吴乐乐等[4]基于30片低强度砖墙的拟静力试验，探讨了钢筋网水泥砂浆面层加固砖砌体结构的极限承载力和层间位移角限值，并通过有限元分析验证了模型的可靠性。结果显示，加固能显著提升结构的抗震性能并降低失效概率。Karic等[5]基于克罗地亚萨格勒布2020年3月22日地震中奥匈帝国时期（1840—1918年）砖砌建筑的损毁数据，结合现场测试校准的数值分析结果，对奥地利维也纳同期历史砖砌建筑的抗震脆弱性进行了深入评估。张倚天等[6]利用ABAQUS软件，建立了砌体墙片的有限元模型，并通过与试验结果对比，验证了模型的准确性，揭示了各因素对墙片承载力、延性及破坏形式演变的影响规律。Karimzadeh等[7]采用随机有限断层法和宽带随机法，模拟1998年法亚尔地震，通过分析砌体立面和历史建筑的结构响应，评估了模拟地震记录在实际工程应用中的有效性。杨锐等[8]针对双曲砖拱结构进行有限元分析，研究了下弦拉杆系统对其抗震性能的影响。研究发现，下弦拉杆系统对维持双曲砖拱的稳定性至关重要，配备完整拉杆体系的双曲砖拱表现出较强的抗震性能。Saygili等[9]通过对伊斯坦布尔进行概率地震危险性分析，模拟了石塔的地震响应；结果表明，在评估地震危险及多发区的建筑结构性能时，必须充分考虑区域的构造地震特征。Bernardo等[10]采用自动单元法，评估了里斯本混合砌体-钢筋混凝土建筑群的地震易损性，得出的易损性曲线表明，在符合规范设防烈度的地震作用（对应475年重现期及近场地震）下，建筑群遭受中等至严重破坏的概率较高。周强等[11]基于九江—瑞昌地震序列，通过弹塑性有限元分析，对比了主震与主余震序列对砌体结构的影响；结果表明，余震会显著加剧受损结构的破坏程度，且损伤累积效应与主震损伤及余震强度密切相关。Park等[12]通过数值建模、振动台试验及理论分析，研究了倾斜U型砖石围墙结构的地震响应机制，揭示了由倾斜导致的结构不对称性所引发的新型地震脆弱性问题，为评估此类结构的地震风险提供了重要依据。

农村墙体多采用传统的砖、石、土坯等材料。这些材料虽具有就地取材、成本低廉等优势，但普遍存在强度较低、韧性较差的缺点，在地震产生的水平及竖向作用力下极易发生脆性破坏。碳纤维增强聚合物（Carbon Fiber-Reinforced Polymer，CFRP）具有高强度、高模量、轻质、耐腐蚀及施工便捷等优异性能，其抗拉强度可达普通钢材的数倍，而密度仅为钢材的1/4左右。将其粘贴于墙体表面，可显著提高墙体的抗弯、抗剪承载力，增强结构整体性和延性，从而有效改善其抗震性能。此外，CFRP优异的耐腐蚀性能，使其能在恶劣环境下长期服役，大幅降低了后期维护成本。

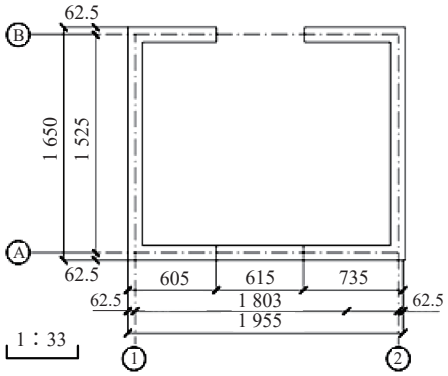
基于此，本文采用CFRP新型复合材料对砌体结构进行加固，利用ABAQUS建立精细化有限元模型，系统分析结构在4种不同强度等级地震波作用下的动力响应（包括应力分布、倾覆弯矩及滞回特性），并对CFRP加固后墙体的地震易损性开展综

合评估,以期为农村建筑的抗震加固提供理论依据和技术参考。

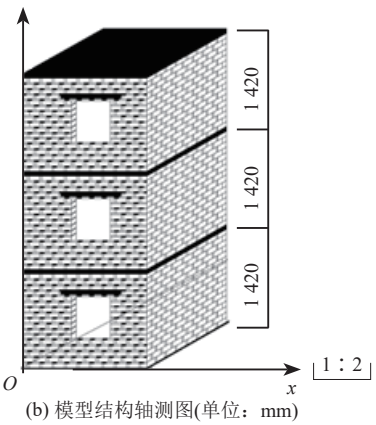
1 研究对象概况及有限元建模

1.1 农村房屋建筑结构示意

本文选取的研究对象为一栋位于典型乡村居民区的三层砖砌体建筑,总占地面积约为3 500 m^2。该建筑采用地上2层、地下1层的空间布局,主体结构为砖砌体[13-14]。为提升抗震性能,建筑上部结构设置了构造柱,并采用纵横墙承重体系。该农村房屋建筑的结构模型如图1所示。



(a) 模型结构平面图(单位：mm)



(b) 模型结构轴测图(单位：mm)

图1 砖砌体结构模型

Fig. 1 Brick masonry structure model

1.2 有限元模拟

选取ABAQUS有限元软件开展模型构建工作。针对农村房屋砖砌体结构,采用宏观建模视角,并结合实际工程参数完成模型设置[15]。农村房屋砖砌体结构涉及混凝土、砖体、配筋及碳纤维增强聚合物(CFRP)等新型复合材料,且实际受力状态复杂。鉴于此,在建立有限元模型时需考虑材料非线性、接触行为及边界条件等多重因素[16]。

(1) 墙体结构组成

农村房屋砖砌体结构可视为均质连续体,因此在建模过程中,将混凝土与砖砌材料作为一个整体。墙体采用强度等级为MU10的黏土砖,并引入CFRP作为加固材料。为明确加固效果,本研究采用统一的CFRP布加固方案:在所有楼层的墙体底部、门窗洞口边缘及构造柱与墙体连接处等应力集中区域,采用单层CFRP布进行双向("十"字形)固定。CFRP布条宽度为200 mm,沿墙体竖向间距为500 mm;底层墙体在离地600 mm高度范围内增设一道水平封闭箍带。所有CFRP布均通过指定厚度的环氧树脂胶层与黏土砖表面可靠黏结,形成复合墙体结构。该复合形式充分发挥了黏土砖的承压性能与CFRP材料的高强特性,显著提升了墙体的整体力学性能和抗震性能。

砌筑施工所采用的砂浆为市购M7.5水泥砂浆。构造柱与墙体连接处砌筑成马牙槎,并沿高度每500 mm设置2Φ6拉结筋;圈梁闭合布置,截面高度不小于120 mm,纵筋不少于4Φ10,箍筋最大间距为250 mm。研究对象的各项参数列于表1。

表1 研究对象主要材料参数

Table 1 Main material parameters of the masonry structure

参数内容	数值
混凝土标号	C20
弹性模量/GPa	26
轴心抗压强度/MPa	10
弯曲强度/MPa	11
抗压强度/MPa	1.1
钢筋型号	25MnSi钢
CFRP材料弹性模量/GPa	200
CFRP材料抗拉强度/MPa	3 000
CFRP材料厚度/mm	0.1
环氧树脂黏结层厚度/mm	0.5
环氧树脂黏结层抗剪强度/MPa	10

在构建有限元模型时,假定砖砌材料与混凝土之间为完全黏结,不考虑两者间的相对滑移[17]。基于表1所列参数,采用整体式建模方法完成了农村房屋砖砌体结构的有限元模型。

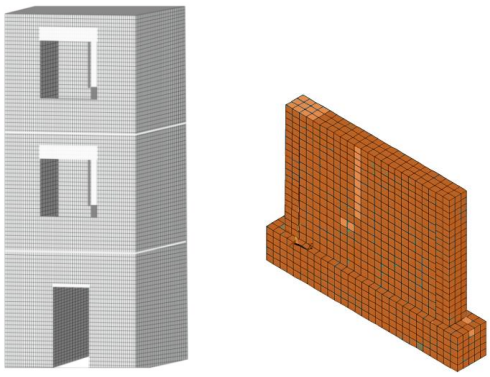
(2) 单元选取

在农村房屋建筑中,砖砌体结构在地震作用下面临损伤或倒塌风险,数值模拟分析需聚焦于墙体响应。为构建墙体模型,优先选用实体单元(Solid)进行整体表征;而与之连接的柱结构则采用梁单元

(Beam)以简化计算。为提升模拟精度，需对C3D8R单元进行优化处理：该单元基于三维8节点减缩积分技术，可在降低计算复杂度的同时保障墙体建模精度。针对砖砌体内部钢筋结构，采用T3D2桁架单元进行离散化模拟。在材料建模与装配阶段，调用有限元软件的CAE前处理模块完成材料属性定义，并借助Assembly模块实现砖砌体与钢筋等独立结构的空间组装[18]。此外，不可忽视钢连接件对结构的约束作用，建议采用Solid45单元进行精细化模拟，以确保模型完整反映实际受力行为。通过上述方法，可显著提升地震作用下砖砌体结构动态响应的数值模拟准确性。

(3) 网格划分

在模型网格划分阶段，需在保证计算精度的前提下尽可能提升计算效率。综合考虑求解精度与计算成本，设定砖砌体结构区域的网格尺寸为100 mm，钢筋结构区域的网格尺寸为50 mm。划分所得的砖砌体结构有限元网格模型如图2所示。



(a) 整体　　(b) 局部砖砌体结构墙体

图2　砖砌体结构网格划分结果

Fig. 2　Mesh generation results for the brick masonry structure

2　不同方向比例地震动响应设置

为使数值模拟结果能够真实反映农村房屋砖砌体结构在地震作用下的实际响应，需对结构与基础的连接边界进行合理模拟。考虑到实际工程中砖砌体结构通过锚固构件固定于地面，在有限元模型中对该锚固效应进行复现：即在模型底部区域对x、y、z三个方向的自由度施加完全约束，并在模型顶部施加地震荷载。鉴于地震波在传播过程中会在结构节点处引发应力集中现象，在建模时采用面荷载形式进行加载。

为进一步探究不同强度地震波对砖砌体结构倒塌机制的影响[19]，以地震加速度峰值作为划分依据，设定不同比例的地震波输入。该比例划分严格参照《中国地震动参数区划图(GB 18306—2015)》[20]，并结合农村房屋所在区域的历史地震统计数据，综合考量不同强度地震对砖砌体结构可能造成的破坏程度差异，最终确定了4种不同工况的地震作用。地震波的具体设定如图3所示。

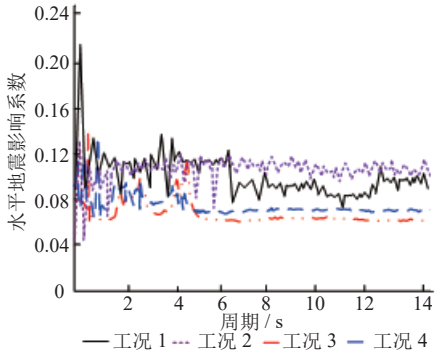


图3　不同比例地震波时程曲线

Fig. 3　Time-history curves of seismic waves with different scaling ratios

采用峰值加速度(Peak Ground Acceleration，PGA)作为衡量地震强度的量化指标，各工况按不同PGA水平进行设定。不同工况下地震作用在各方向的分量比例如表2所列。基于上述工况，计算得到4种地震动作用下的加速度反应谱曲线如图4所示。

从图4中知，在特高等级地震(工况1)作用下，地震波能量极高，表现为振幅大、频率成分复杂。

表2　不同工况地震作用在不同方向的分量比例

Table 2　Component ratios of seismic actions in different directions under various loading cases

工况	峰值加速度(PGA)/g	地震烈度等级	不同方向的分量比例/%		
			x方向	y方向	z方向
1	0.4	Ⅸ度	40	26.64	13.36
2	0.3	Ⅷ～Ⅸ度	31.08	23.31	15.54
3	0.2	Ⅷ度	30	18	12
4	0.15	Ⅶ～Ⅷ度	25	16.65	8.35

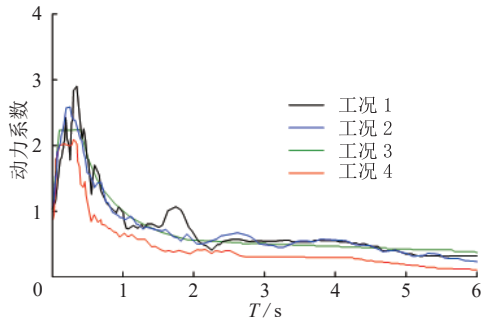


图 4 地震动加速度反应谱曲线

Fig. 4 Acceleration response spectra of ground motions

这种强烈的能量输入导致地面运动剧烈，结构在地震作用下的响应显著增强，加速度反应谱整体幅值位于高位。具体而言，在短周期段，由于地震波能量充沛且高频成分相对丰富，结构惯性力响应尤为突出，加速度反应值较大；在长周期段，受地震波持时长、总能量高的影响，结构振动响应依然显著，致使加速度反应谱在长周期区间仍维持较高水平。相对于工况 1，高等级地震（工况 2）的能量显著降低，地震波强度与复杂性同步减弱，地面运动剧烈程度下降，结构所受地震作用相应减小。此时，反应谱曲线幅值整体回落，但仍维持较高水平。具体表现为：短周期段加速度反应因高频成分减少而有所降低；长周期段则因能量衰减呈现更显著的下降趋势——这是因为地震能量降低削弱了高频振动分量，弱化了短周期结构的响应，同时长周期结构在能量较低的地震波激励下，其响应增幅亦不及工况 1 显著。

随着地震等级进一步降低（工况 3），地震波能量持续衰减，地面运动的强度与频率特征发生明显改变。结构地震响应整体减弱，加速度反应谱幅值随之下降。具体表现为：短周期段的加速度反应保持相对平稳，而长周期段的加速度反应下降更为明显。这一现象表明，地震波能量的衰减削弱了高频成分对短周期结构的影响；同时，长周期结构在相对较弱的地震波作用下，其振动响应的增长受到更强约束，体现出能量衰减对不同周期结构响应的差异化影响。

在中等强度地震（工况 4）作用下，地震释放能量有限，地面运动相对温和，结构承受的地震作用较小。相应地，加速度反应谱曲线幅值整体处于较低水平：短周期段加速度响应明显减弱，长周期段加速度响应不仅数值较低，且随周期增加趋于平缓。这主要是由于中等地震的能量规模较小，地震波强度与频率成分相对单一，导致结构的振动响应强度显著降低。

3 结构易损性分析

依据《建筑结构可靠性设计统一标准（GB 50068—2018）》[21]，计算本文研究的农村房屋砖砌体结构的极限承载力。表达式为：

$$N=\varphi\alpha fhb \tag{1}$$

式中：φ 表示砖砌体结构的纵向弯曲系数；α 表示轴力作用下砖砌体的偏心影响系数；f 表示砖砌体的极限抗压强度；h 表示结构截面宽度；b 表示结构截面厚度。

在极限承载力作用下，结构沿竖向产生的变形分布如图 5 所示。

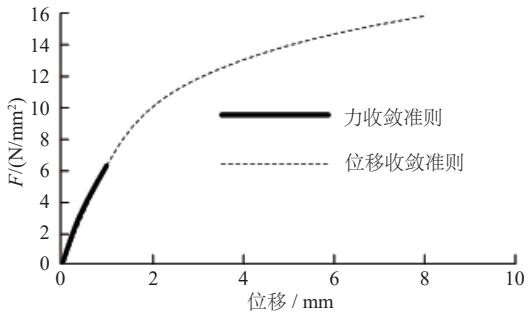


图 5 竖向位移结果

Fig. 5 Vertical displacement results

据此，借助 DYNAMO 软件，结合前述不同峰值加速度水平的地震波输入及极限承载力计算结果，提取并分析农村房屋砖砌体结构在各工况下的竖向位移响应，进而评估不同强度地震作用下结构的破坏形态及损伤演化规律。

3.1 不同比例地震波下砖砌体应力变化

在有限元数值模拟中，分析不同比例地震波作用下砖砌体结构的应力分布演化规律，计算结果如图 6 所示。

通过分析图 6 可知，不同比例地震波作用下砖砌体结构的应力响应呈现显著差异。在较高能量地震波环境（工况 1）下，结构内部应力迅速攀升并产生显著的局部集中现象，特别是在墙体与构造柱连接处及圈梁等关键部位，过高的应力集中极易诱发严重损伤甚至引发倒塌。引入 CFRP 加固后，凭借其高强度与高韧性，材料能够有效吸收并耗散地震能量，显著减缓应力上升速率，削弱关键部位应力集中程度，从而抑制裂缝扩展并改善结构延性。

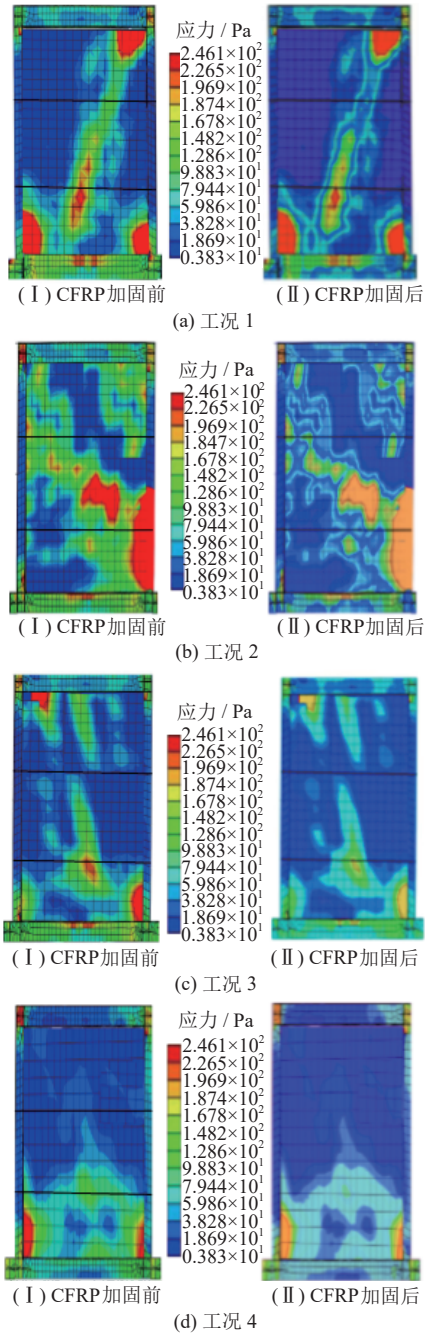


图 6　不同比例地震波下砖砌体应力变化

Fig. 6　Stress variation of the brick masonry structure under seismic waves with different scaling ratios

当地震波能量比例降至70%[图6(b)]时，虽然结构整体应力水平有所下降，但在局部区域仍可能超出限值；CFRP加固进一步优化了全墙应力分布，利用其优异的抗拉性能限制裂缝开展，增强了结构的抗震稳定性。当能量比例降至60%[图6(c)]时，应力分布趋于均匀，CFRP的约束作用使关键部位的应力集中现象得到有效缓解，结构响应的可控性显著提升。在能量比例为60%，但频谱特性不同的较低强度工况[图6(d)]下，材料性能与结构整体性成为控制因素，CFRP的耐腐蚀性与高强度特性有效抑制了长期或多次地震作用下的累积损伤，降低了维护需求。这一系列结果表明，CFRP加固实现了“性能提升”与“风险控制”的平衡——类似于BIC中通过正则化项平衡模型复杂度与泛化能力的逻辑，在不显著增加结构复杂度的前提下，最大限度地提升了抗震性能。

综上所述，在不同工况下，CFRP加固砖砌体的应力主要集中在墙体中下部，但应力集中现象明显减弱，分布更加均匀。随着地震波能量降低，CFRP加固砖砌体的最大应力值逐渐减小。这表明CFRP加固显著提升了砖砌体的抗震性能，降低应力集中风险，提高了结构整体稳定性。

3.2　不同比例地震波下砖砌体倾覆弯矩的对比

图2所示结构在4种地震波作用下的底部倾覆弯矩平均值分布如图7所示

从图7中可以看出，地震波能量及多向地震动分量比例对结构及墙体的受力性能具有显著影响。工况1(特高等级地震)下，地震波能量极高，水平向地震动尤为突出，导致底层柱和墙体承受巨大的地震力，底层倾覆弯矩达到峰值。随着楼层升高，地震作用逐渐衰减，倾覆弯矩沿竖向呈递减趋势，且层间差值较大。同时，高能量输入引发结构整体变形剧增，裂缝多始于墙体根部并向上延伸，导致墙体刚度和承载力退化。此外，多向地震动的耦合效应进一步加剧了结构和墙体变形及裂缝开展，扩大了倾覆弯矩的空间差异。相比之下，在工况2(高等级地震)、工况3(较高等级地震)和工况4(中等等级地震)中，随着地震波能量逐渐降低，多向地震动分量比例减小，结构整体变形和墙体裂缝发展得到有效抑制，各层柱和墙体的倾覆弯矩分布趋于均匀，数值逐层递减，且多向耦合效应对结构整体变形和层倾覆弯矩分布的影响也逐渐减弱。引入CFRP加固后，其约束作用显著抑制了柱、墙等构件的裂缝开展和侧向变形。数据显示，不同工况下农村房屋砖砌体结构倾覆弯矩平均值曲线的离散性显著缩小，表明CFRP加固有效提升了砖砌体结构在不同地震强度下的受力均匀性和稳定性，大幅增强了墙体的抗震性能。

综上所述，采用CFRP加固显著增强了原结构中相对独立的构件间的连接，提升了结构整体协同工作能力。这一改进优化了结构在地震作用下的

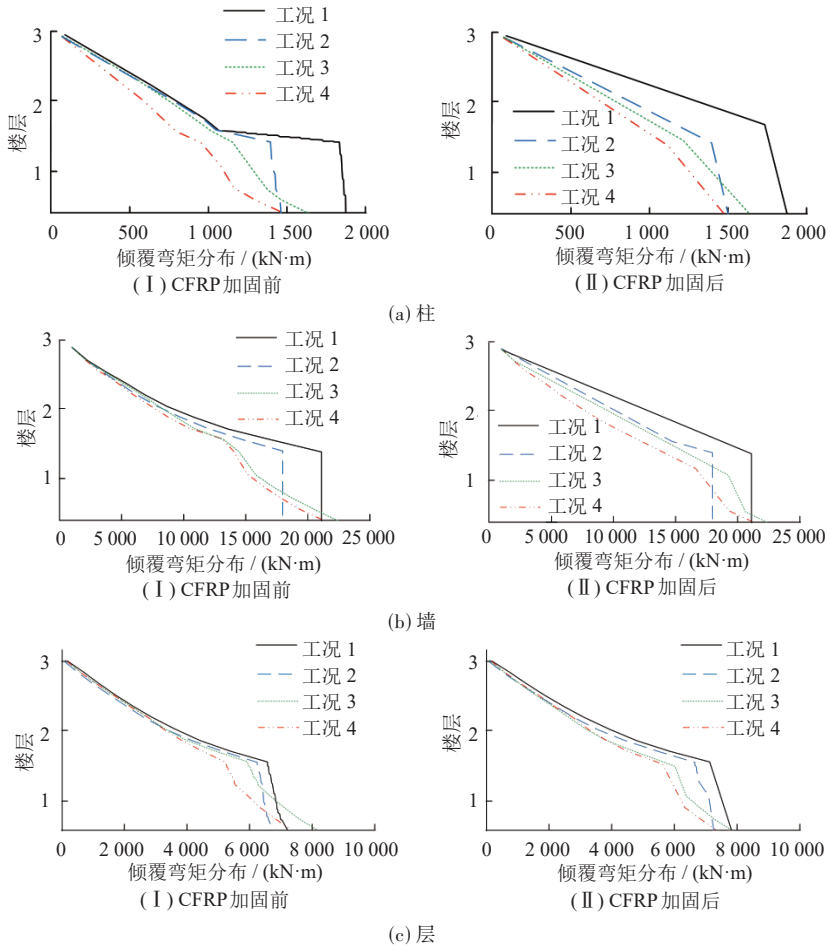


图 7 CFRP加固前后砖砌体结构倾覆弯矩分布平均值

Fig. 7 Average overturning moment distribution of the brick masonry structure before and after CFRP strengthening

受力机制:一方面,各构件协同承担荷载,避免局部应力集中导致的早期破坏;另一方面,加固后结构的倾覆弯矩分布更为均匀,各构件的平均倾覆弯矩值显著降低,整体抗震性能得到系统性提升。

3.3 不同比例地震波下砖砌体滞回曲线的对比

在4种工况地震波作用下,砖砌体结构的滞回曲线特征如图8所示。

由图8(a)可知,砖砌体结构的滞回曲线形态和非线性特征受地震波能量及多向地震动分量比例的共同调控。在工况1中,地震波高达80%,且水平方向(x和y向)分量占比较大,结构遭受强烈激励,迅速进入非线性阶段,表现为变形急剧增加、滞回曲线饱满且耗能面积大,非线性特征显著。从工况2到工况4,地震波能量逐级衰减(分别为70%、60%、50%),结构所受激励减弱,进入非线性阶段的阈值提高,变形随之减小,滞回曲线面积逐渐收缩,非线性特征趋于弱化。同时,水平向分量比例的减小直接降低了结构的层间位移角,导致滞回曲线向线性区域靠拢。尽管竖向(z向)分量比例相对较小,但在高能量工况下,其与水平向地震动的耦合作用仍可能加剧结构的非线性变形。然而,随着地震波能量衰减,竖向分量的影响亦逐渐减弱。

分析图8(b)可知,经CFRP加固后,农村房屋砖砌体结构在不同地震工况下的滞回行为发生显著改变。在特高等级地震(工况1)中,滞回曲线更加饱满,耗能面积进一步扩大,但仍保持显著的非线性特征;同时,结构变形明显受限,进入非线性阶段的阈值提高,刚度退化速率减小。原因在于:CFRP的高抗拉强度和优异延性有效分担了地震作用产生的拉力和弯矩,抑制了裂缝的萌生与扩展;同时,其对核心混凝土的约束作用增强了结构的整体性,提升了耗能能力和延性性能。在高等级、较高等级和中等等级地震(工况2~4)中,CFRP加固效果更为突出:滞回曲线趋于狭长,结构变形进一步减小,弹性响应占比显著增加,滞回行为更接近线性特征。这表明CFRP加固不仅适应不同强度的

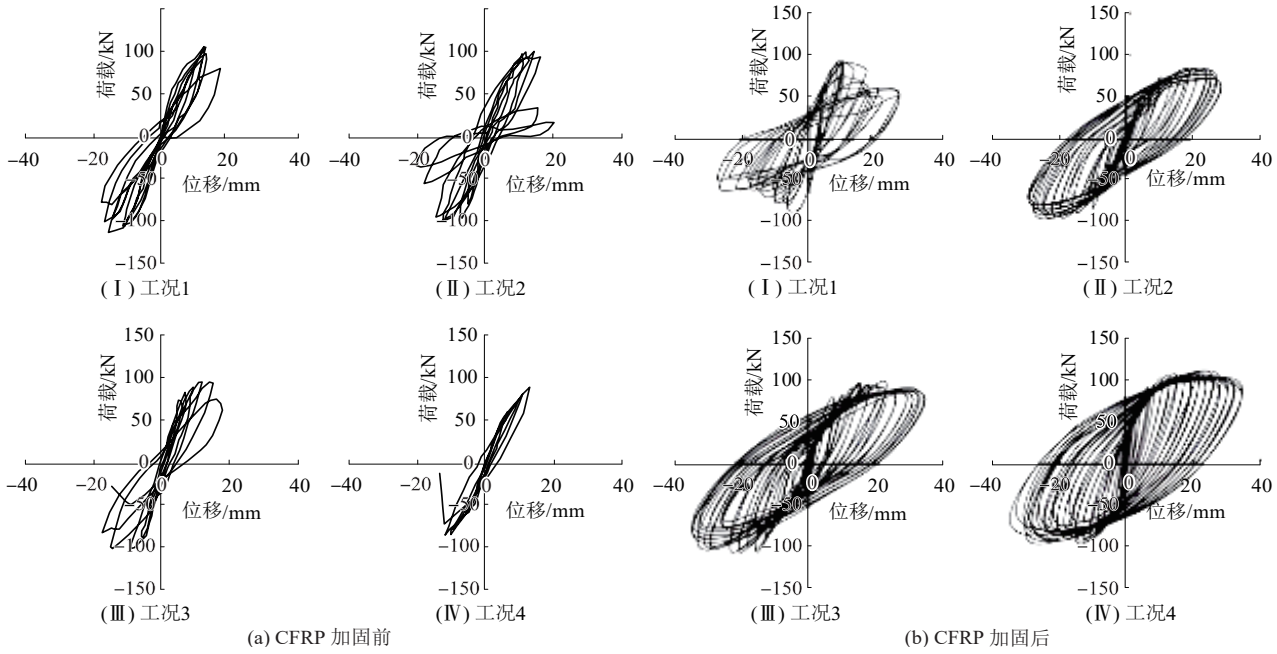


图 8　CFRP加固前后不同比例地震波下砖砌体的滞回曲线

Fig. 8　Hysteretic curves of the brick masonry structure under seismic waves with different scaling ratios before and after CFRP strengthening

地震输入，还通过限制裂缝开展和侧向变形，有效提升了结构的初始刚度和承载能力。

综合试验与模拟结果，CFRP的引入显著优化了农村房屋砖砌体结构在地震作用下的滞回性能，提升了耗能能力和延性水平，为农村房屋建筑提供了更为可靠的抗震安全保障。

4　结论

本研究基于数值模拟与软件分析，系统探讨了新型复合材料(CFRP)加固农村砖砌体结构的抗震性能，得出以下主要结论：

(1) 在不同比例地震波作用下，CFRP加固技术能够显著缓解农村房屋砖砌体结构的应力集中现象，该效应在墙体与构造柱连接处、圈梁等关键传力路径上表现尤为突出。随着地震波能量的减弱，CFRP加固体的最大主应力呈递减趋势，且应力分布趋于均匀。这种应力重分布机制显著提升了结构的整体稳定性和抗震承载力。

(2) CFRP加固显著优化了结构在地震作用下的内力传递路径。具体表现为：不同地震工况下，结构的倾覆弯矩沿高度分布趋于均匀，各层柱与墙体倾覆弯矩平均值的离散程度明显降低。CFRP通过对构件的侧向约束，有效抑制了裂缝开展与侧向变形，增强了结构整体性，使地震作用下的内力传递更趋协同，从而大幅度降低了局部构件因应力集中而率先破坏的风险。

(3) CFRP加固显著抑制了结构在地震作用下的裂缝开展和扩展，特别是在高能量地震波作用下，有效延缓了裂缝的萌生与发展速度。此外，CFRP材料优异的耐腐蚀性与高强度特性，不仅提升了结构在恶劣环境下的耐久性，还减少了长期或多次地震作用下结构的累积损伤，从而降低了农村建筑在全生命周期内的维护和修复成本。

(4) CFRP加固技术在不同地震强度下均表现出良好的适应性，能够有效应对从特高等级到中等等级的地震激励。其加固作用显著减小了结构的水平位移和残余变形，优化了结构的动力响应特性，为提升农村房屋建筑的抗震安全性与韧性提供了更可靠保障。

参考文献(References)

[1] 王景玄，章煜烽，沈亚军. 采用纤维模型的钢管混凝土框架-中心支撑结构抗连续倒塌非线性分析[J]. 地震工程学报，2023，45(6)：1264-1273.
Wang Jingxuan，Zhang Yufeng，Shen Yajun. Nonlinear analysis of progressive collapse resistance of concrete-filled steel tube frame-concentrically brace structures based on fiber model[J]. China Earthquake Engineering Journal，2023，45(6)：1264-1273.

[2] 刘卉，刘明. 强震影响下多层建筑层间结构抗倒塌数值模拟[J]. 计算机仿真，2023，40(5)：369-373.

Liu Hui, Liu Ming. Numerical simulation of collapse resistance of interstory structure of multi-storey buildings under influence of strong earthquakes[J]. Computer Simulation, 2023, 40(5): 369-373.

[3] 周彬. 采用外加钢筋混凝土围套方法的“内浇外砌”结构加固设计与分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2023, 45(2): 128-135, 146.
Zhou Bin. Structural renovation design and analysis of the external masonry-internal concrete hybrid structure reinforced by post-encircled RC elements[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2023, 45(2): 128-135, 146.

[4] 吴乐乐, 唐曹明, 黄世敏, 等. 钢筋网水泥砂浆面层加固低强度砖砌体结构的地震易损性分析[J]. 建筑科学, 2023, 39(5): 54-65.
Wu Lele, Tang Caoming, Huang Shimin, et al. Seismic fragility analysis of low-strength brick masonry structures reinforced by steel meshed cement mortar layer[J]. Building Science, 2023, 39(5): 54-65.

[5] Karic A, Atalić J, Kolbitsch A. Seismic vulnerability of historic brick masonry buildings in Vienna[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2022, 20(8): 4117-4145.

[6] 张倚天, 解圆聪, 张望喜, 等. 考虑现浇楼板影响的砖砌墙体抗震性能研究[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(4): 64-77.
Zhang Yitian, Xie Yuancong, Zhang Wangxi, et al. Seismic performance of brick masonry walls considering the influence of cast-in-situ floor slabs[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2023, 46(4): 64-77.

[7] Karimzadeh S, Funari M F, Szabó S, et al. Stochastic simulation of earthquake ground motions for the seismic assessment of monumental masonry structures: source-based vs site-based approaches[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2024, 53(1): 303-330.

[8] 杨锐, 毋剑平, 孙洁, 等. 既有双曲砖拱结构抗震性能分析与加固对策研究[J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(6): 171-183.
Yang Rui, Wu Jianping, Sun Jie, et al. Seismic performance analysis and strengthening strategies of existing double-curvature brick structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, 42(6): 171-183.

[9] Saygili Ö. Probabilistic seismic risk assessment of a masonry tower considering local site effects[J]. Earthquakes and Structures: An International Journal,2024,26(3):191-201.

[10] Bernardo V M S, de Noronha Campos Costa A P, de Oliveira Xavier Candeias P J, et al. Ambient vibration testing and seismic fragility analysis of masonry building aggregates[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2022, 20(10): 5047-5071.

[11] 周强, 陈东, 肖晖, 等. 主余震序列型地震动下典型村镇砌体结构抗震性能分析[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(2): 84-92.
Zhou Qiang, Chen Dong, Xiao Hui, et al. Seismic performance analysis of masonry structure in typical villages and towns under mainshock-aftershock sequence ground motion[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(2): 84-92.

[12] Park D, Kim S, Jin S, et al. Seismic vulnerability assessment of leaning U-shaped masonry fence walls[J]. Earthquake Spectra, 2025, 41(3): 2177-2202.

[13] 卢俊龙, 程成, 张晨, 等. 往复荷载作用下开洞砖塔子结构受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 176-186.
Lu Junlong, Cheng Cheng, Zhang Chen, et al. Research on mechanical properties of sub-structure of brick masonry pagoda with holes under hysteretic load[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6): 176-186.

[14] 范阔, 张令心, 马加路. 基于试验现象的砖砌体墙体损伤状态划分及易损性研究[J]. 世界地震工程, 2023, 39(4): 185-193.
Fan Kuo, Zhang Lingxin, Ma Jialu. Damage state definition based on experimental phenomena and fragility analysis of brick masonry walls[J]. World Earthquake Engineering, 2023, 39(4): 185-193.

[15] 刘祖强, 梁钰强, 张风亮, 等. 聚丙烯网水泥砂浆面层加固砖砌体结构振动台试验及数值模拟[J]. 振动与冲击, 2023, 42(23): 112-123.
Liu Zuqiang, Liang Yuqiang, Zhang Fengliang, et al. Shaking table tests and numerical simulation for brick masonry structure reinforced with polypropylene mesh cement mortar coating[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(23): 112-123.

[16] 杨彦东, 卢博, 田浩, 等. 超高延性混凝土(ECC)加固砌体墙抗剪性能的数值分析[J]. 材料导报, 2024, 38(增刊1): 261-267.
Yang Yandong, Lu Bo, Tian Hao, et al. Numerical analysis of shear behavior of masonry panels strengthened with engineered cementitious composites(ECC)[J]. Materials Reports, 2024, 38(S1): 261-267.

[17] 郑士举. 砌体与钢筋混凝土框架平面混合结构抗震性能评估及加固方法研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(8): 60-65.
Zheng Shiju. Research on seismic performance evaluation and strengthening method of planar mixed structure by masonry and reinforced concrete frame[J]. Building Structure, 2022, 52(8): 60-65.

[18] 吉蔚, 李国强, 楼国彪. 火灾下门式钢刚架倒塌预警可靠度研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(2): 154-164.
Ji Wei, Li Guoqiang, Lou Guobiao. Research on reliability of early-warning methods for collapse prediction of steel portal frames under fire[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(2): 154-164.

[19] 宋晋东, 朱景宝, 李水龙, 等. 基于机器学习预测模型的现地警报级别地震预警试验: 以2022年9月5日四川泸定6.8级地震为例[J]. 地球物理学报, 2024, 67(8): 3004-3016.
Song Jindong, Zhu Jingbao, Li Shuilong, et al. Test of on-site alert-level earthquake early warning based on machine learning prediction models: a case for the Sichuan Luding M6.8 earthquake on September 5, 2022[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(8): 3004-3016.

[20] GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S].
GB 18306—2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S].

[21] GB 50068—2018 建筑结构可靠性设计统一标准[S].
GB 50068—2018 Unified standard for reliability design of building structures[S].

(本文编辑:张向红)