

高韧性混凝土加固普通混凝土砖墙抗震性能研究

朱国良¹,陈尚伟^{1*},涂开胜¹,高文艺¹,聂晓鹏¹,孔德文²

(1. 贵州中建建筑科研设计院有限公司, 贵州 贵阳 550006; 2. 贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 砌体结构具有抗拉、抗剪、抗弯及抗震性能差等显著特点,为提高砌体结构抗震性能,试验团队采用机制砂高韧性混凝土(MSHDC)作为结构加固特种材料,该材料具有高延性、高强度等显著性能,通过在砌体试件表面压抹面层加固方法,提高砌体结构加固后的承载能力及抗震性能。试验共制作了四片砌体墙,墙体材料为普通混凝土砖+水泥砂浆,试验空白组和试验条件组采用未加固、35 mm厚钢筋网水泥砂浆单面加固和15 mm厚MSHDC单、双面加固等方法分别对同期制作的砖墙进行加固,通过低周往复荷载试验探究MSHDC面层对砌体结构抗震加固效果。结果表明,未加固的墙体在低周往复荷载作用下呈无预兆、延性差的脆性剪切破坏,MSHDC面层加固墙体破坏形态呈有预兆的、延性较好的剪压破坏;同时,MSHDC面层加固可以有效增强墙体抗压承载能力、变形能力、刚度、延性和耗能能力。相较于未加固试件,MSHDC双面加固试件的极限荷载、延性分别提升了44%、49.4%,增强效果都为最强,综合评判,MSHDC双面加固方法对墙体抗震性能的增强效果最强,MSHDC单面加固方法最弱。

关键词: 普通混凝土砖墙;机制砂高韧性混凝土;低周往复荷载试验;加固;抗震性能

中图分类号: TU362; TU352

文献标识码: A

Research on Seismic Behavior of Ordinary Concrete Brick Wall Strengthened with Sand High Ductility Concrete

ZHU Guoliang¹, CHEN Shangwei^{1*}, TU Kaisheng¹, GAO Wenyi¹, NIE Xiaopeng¹, KONG Dewen²

(1. Guizhou Zhongjian Architectural Research and Design Institute Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550006, China;

2. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: The masonry structure has significant characteristics such as poor tensile, shear, flexural and seismic performance. To improve the seismic performance of the masonry structure, the experimental team used mechanism sand high toughness concrete (hereinafter referred to as MSHDC) as a special material for structural reinforcement. This material has remarkable properties such as high ductility and high strength. Through the method of pressing and coating a surface layer on the surface of the masonry specimens for reinforcement, the bearing capacity and seismic performance of the reinforced masonry structure were improved. This experiment produced four masonry walls. The wall material was ordinary concrete bricks+cement mortar. The blank test group and the test condition group were respectively unreinforced, 35mm thick reinforced mesh cement mortar single-sided reinforcement, and 15mm thick MSHDC single-sided and double-sided reinforcement methods were used to reinforce the brick walls made at the same time. Through the low-cycle repetitive load test, the effect of the MSHDC surface layer on the seismic reinforcement of the masonry structure was explored. The results showed that the unreinforced wall exhibited a non-signaled, poor ductility brittle shear failure under low-cycle repetitive load, while the wall reinforced with the MSHDC surface layer exhibited a signaled, better ductility

收稿日期:2024-07-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51968009);中建四局科技研发项目(CSCEC4B-2022-KTA-6)

第一作者:朱国良(1982—),男,贵州贵阳人,硕士,正高级工程师,主要从事新型建筑材料、主体结构检测鉴定等方面的研究。

*通信作者:陈尚伟(1986—),男,贵州贵阳人,硕士,高级工程师,主要从事无机非金属材料、新型建筑材料和高性能材料方面的研究。

shear-compression failure. At the same time, the MSHDC surface layer reinforcement could effectively enhance the compressive bearing capacity, deformation capacity, stiffness, ductility and energy dissipation capacity of the wall. Compared with the un-reinforced specimens, the ultimate load and ductility of the MSHDC double-sided reinforced specimens increased by 44% and 49.4% respectively, and the enhancement effect was the strongest. In summary, the MSHDC double-sided reinforcement method had the strongest effect on enhancing the seismic performance of the wall, while the MSHDC single-sided reinforcement method was the weakest.

Key words: ordinary concrete brick walls; machine-sand high ductility concrete; low cycle reciprocating load test; reinforce; seismic behavior

砌体结构是把砖、砌块和石材等块体与砂浆通过砌筑而成的结构^[1],在我国有着悠久的历史。由于砌体材料成本低廉、取材方便并具有较高的抗压强度和良好的长期耐久性能^[2],我国在20世纪修建了大量砖砌体结构建筑。时至今日,砖砌体结构在我国村镇建筑中仍占有相当大的比例^[3]。但是砖砌体具有显著脆性特征,其抗拉、抗剪和抗弯能力弱,变形能力差,自振周期短,地震时破坏严重,再加上村镇建筑施工质量良莠不齐,抗震设计不合理,导致村镇砌体建筑的抗震性能普遍无法满足现行规范要求^[4-5]。因此,针对现有砌体结构,研发经济且有效的加固方式提高其抗震性能,对于增强我国乡村城镇的抗震防灾能力具有重要意义。

针对砌体结构加固方法,国内外学者开展了大量理论和试验研究。目前已经证实有效的加固方法有钢筋网水泥砂浆面层加固^[6]、纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Plastics, FRP)加固^[7-9]、钢筋混凝土墙板加固^[10]、高延性混凝土(High Ductility Concrete, HDC)加固^[11-12]、嵌缝加固^[13-14]、外加圈梁构造柱^[15]等。其中,钢筋网水泥砂浆加固法、钢筋混凝土墙板加固法和外加圈梁构造柱加固法湿作业耗时长、工序多,成型后对原有空间占用较多^[16];嵌缝加固法需破坏原有建筑,并且施工较慢;使用FRP加固时FRP面层容易与墙体剥离^[17];HDC加固可以有效抑制墙体开裂和脆性破坏,但是,配制HDC的原材料为石英砂和进口纤维,成本昂贵,无法在村镇建筑中大范围使用。

本文使用一种新型水泥基复合材料——机制砂高韧性混凝土(Machine-made Sand High Ductility Concrete, MSHDC)面层加固砌体结构。MSHDC原材料为机制砂和国产聚乙烯醇纤维,可大大降低制作成本,同时具有较高的强度和延性。本文对试件进行低周往复荷载试验,研究单双面MSHDC面层加固和钢筋网水泥砂浆单面加固对普通混凝土砖墙抗震性能的影响,分析在不同的加固方式下墙体的破坏模式、承载能力和滞回特性等。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

本试验设计并制作了4片普通混凝土砖砌体墙试件,试件由钢筋混凝土底梁、砖砌体墙体两部分组成。为增强底梁锚固效果,在底梁表面留有长1520mm、宽260mm、厚15mm的凹槽,使用M5水泥砂浆将墙体砌筑于底梁之上。未加固墙体尺寸均为1500mm×1500mm×240mm,高宽比为1.0,将尺寸为240mm×115mm×53mm的MU10普通混凝土砖和M5水泥砂浆按“三顺一丁”方法砌筑。各试件编号及加固方式见表1,试件尺寸如图1所示。

将单面钢筋网水泥砂浆加固墙体作为条件对照,与MSHDC面层的加固效果进行对比。根据规范^[18-19],钢筋网片水泥砂浆面层厚度为35mm,水泥砂浆使用M10等级,钢筋网采用 $\phi 6@240$ 。MSHDC单面与双面加固面层厚度均为15mm。

表1 试件加固方案

Tab. 1 Specimen reinforcement scheme

试件编号	墙体尺寸/mm	加固方式	备注
OCB-0	1500×1500×240	未加固	空白对照组
OCB-SMCM	1500×1500×275	单面钢筋网水泥砂浆加固	条件对照组
OCB-HDC-1	1500×1500×255	单面MSHDC加固	试验组
OCB-HDC-2	1500×1500×270	双面MSHDC加固	试验组

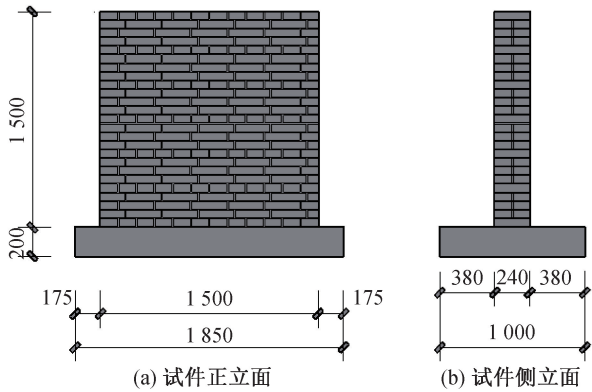


图1 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of specimen(unit:mm)

1.2 材料性能

依据国家现行规范^[20-21],对试验材料的强度进行测试。经测试, MU10 普通混凝土砖非成型试样抗压强度平均值为 9.6 MPa; M5 级和 M10 级水泥砂浆边长为 70.7 mm 立方体试块抗压强度平均值分别为 4.2、9.5 MPa; MSHDC 边长为 100 mm 立方体试块抗压强度平均值为 30.7 MPa; $\phi 6$ 钢筋屈服强度实测值为 300 MPa。

1.3 加载与测量

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[22],本文采用拟静力试验开展研究。结合实际试验条件,对试件进行竖向荷载和水平荷载,竖向荷载由千斤顶通过分配钢梁施加,加载装置

如图 2 所示。由于在试验中试件会发生平面内转动^[23],在分配钢梁两端设置 2 个钢墩以限制墙体翘起。水平荷载由 MTS 电液伺服作动器通过加载钢梁施加,分配钢梁与加载钢梁之间使用钢滚轴填充,使二者可以平行移动以保证水平荷载正常施加。

加载时首先施加 0.6 MPa 竖向荷载并保持恒定,之后施加低周往复水平荷载。正式加载前先施加开裂荷载的 20% 进行预加载试验。

水平荷载采用位移控制,MTS 电液伺服作动器设置初始加载位移角 θ ($\theta=1/1000、1/500、1/250、1/125\dots$),试件高度为 h ,由 $u=\theta \cdot h$ 计算出拟施加的各循环内的水平位移。前三级循环 1 次,其余每级循环 3 次,最终得到加载制度如图 3 所示。当荷载下降至峰值荷载的 85% 或者墙体破坏时停止加载,位移与荷载向左为正方向,向右为负方向。

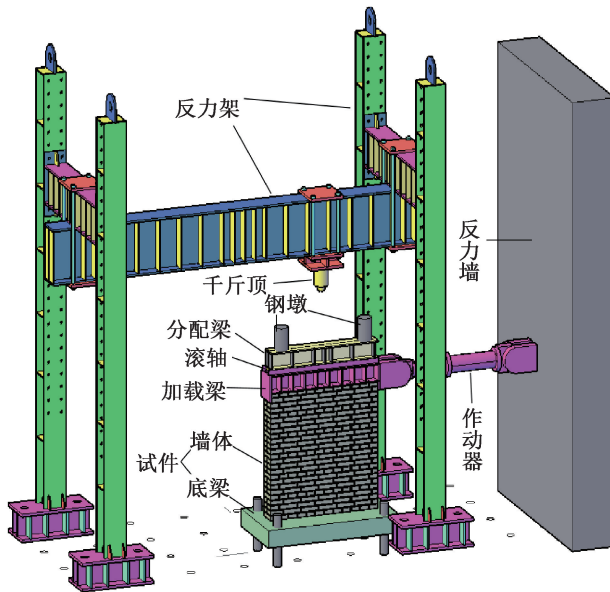
在加载梁端部、1/2 墙高、墙体底部、试件底部各设置 1 个位移计,测量墙体顶部、中段、底部和试件整体的水平位移,在墙底梁端部布置 1 个竖向位移计,测量试件整体翘起程度,位移计布置如图 4 所示。

2 破坏过程及分析

2.1 破坏过程

2.1.1 试件 OCB-0

未加固试件 OCB-0 的墙体开裂前基本处于弹性



(a) 加载装置示意图



(b) 加载现场

图2 加载装置

Fig. 2 Loading device

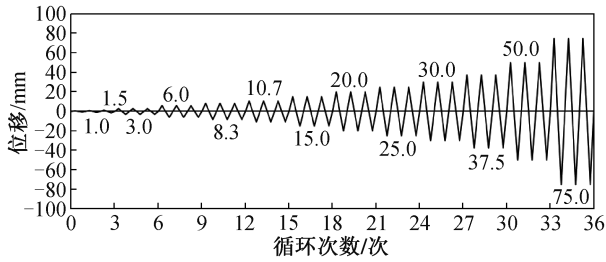


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading regime

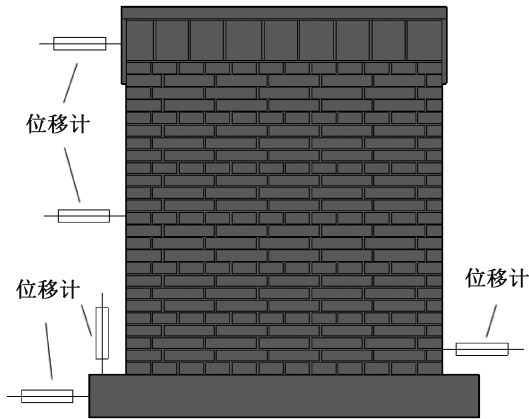
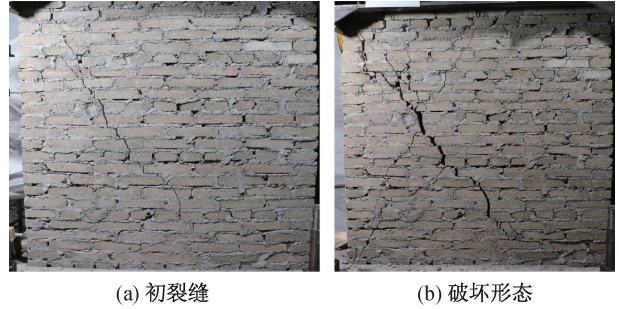


图 4 位移计布置图

Fig. 4 Displacement gauge layout

阶段,且开裂几乎没有任何预兆,当位移角为 1/50 的第三次循环加载、位移为 -30 mm 时,突然出

现一条沿对角线方向的长斜裂缝,同时在墙体左上角伴随主裂缝出现细密斜裂缝,如图 5(a)所示。随着加载的进行,裂缝逐渐扩大,当位移角为 1/40 时出现另一条对角方向的斜裂缝,当第二次循环加载、位移为 37.5 mm 时出现主裂缝。最终裂缝处大量砖块受到剪切破坏,试件失效,最终破坏形态如图 5(b)所示。



(a) 初裂缝

(b) 破坏形态

图 5 试件 OCB-0 的失效过程

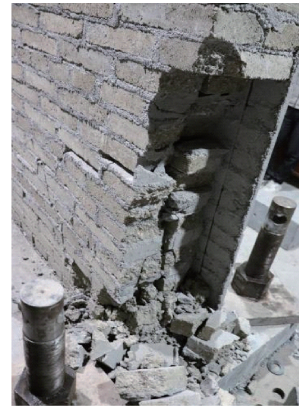
Fig. 5 Failure process of specimen OCB-0

2.1.2 试件 OCB-SMCM

从位移角 1/75 开始,试件 OCB-SMCM 左右两侧墙角相继翘起,墙体出现平面内转动。随着加载的进行,墙体平面内转动愈加明显,如图 6(a)所示。当位移角为 1/60 的第一次循环加载时,墙体左下端部出现竖向裂缝。当位移角为 1/30



(a) 墙角翘起



(b) 墙角部垮塌



(c) 无面层侧破坏形态



(d) 面层侧破坏形态

图 6 试件 OCB-SMCM 的失效过程

Fig. 6 Failure process of specimen OCB-SMCM

的第一次循环加载、位移为 50 mm 时,墙体下部突然出现一条横向主裂缝。当位移角为 1/20 的第一次循环加载时,墙体角部出现大块垮塌,当位移为 -58.8 mm 时,另一方向出现阶梯型主斜裂缝。试件最终破坏形态如图 6(b)~(d)所示,墙体被剪压破坏,面层除角部外无明显破坏。

2.1.3 MSHDC 单面加固试件 OCB-HDC-1

当位移角为 1/60 的第一次循环加载、位移为 25 mm 时,墙体无面层一侧出现阶梯型斜裂缝和竖向裂缝,如图 7(a)所示。墙体左上角端部出现细小竖向裂缝,墙体右上角端部加固面层与墙体剥离,如图 7(b)所示。随着加载的进行,各裂缝逐渐扩展。当位移角为 1/50 的第一次循环加载、位移为 30 mm 时,加固面层左上角出现微小斜裂缝,墙体左下角底端出现多条竖向裂缝。当位移角为 1/40 的第二次循环加载、位移为 37.5 mm 时,面层出现一条主斜裂缝。试件最终破坏形态如图 7(c)(d)所示。

2.1.4 MSHDC 双面加固试件 OCB-HDC-2

当位移角为 1/75 的第一次循环加载、位移为 20 mm 时,墙体右侧端部出现受压竖向裂缝,裂缝如图 8(a)所示。随着加载的进行,裂缝逐渐扩大,且左侧也开始出现受压裂缝。当位移角为 1/60 的第一次循环加载、位移为 25 mm 时,前侧面

层右上角出现细小裂缝,如图 8(b)所示。当位移角为 1/50 的第一次循环加载时,后侧面层也出现裂缝。当位移角为 1/30 的第一次循环加载时,面层逐渐开裂并伴随咔嚓声,裂缝逐渐扩大,最终于 24 s 后、位移为 40.1 mm 时裂缝完全贯通对角线形成一条巨大主斜裂缝。当位移为 -50 mm 时,出现另一条对角方向主斜裂缝,墙体最终失效,破坏形态如图 8(c)(d)所示。

2.2 破坏分析

根据墙体破坏过程以及最终破坏形态,对墙体的破坏过程进行分析。

(1) 试件 OCB-0 发生了明显的脆性破坏,破坏突然,几乎没有任何预兆,并且从墙体开裂到最终破坏时间很短,最终裂缝呈“X”形,是标准的脆性剪切破坏。

(2) 试件 OCB-SMCM 同样发生了脆性破坏,在试验过程中发生了很明显的平面内转动现象。由于墙角翘起,墙体初裂缝呈水平方向,发生了剪压状态下的剪切滑移破坏。钢筋网水泥砂浆面层强度大于墙体,与墙体共同作用时,墙体率先达到极限荷载并破坏,钢筋网水泥砂浆面层除了角部受压出现破坏外并未有其他明显破坏。

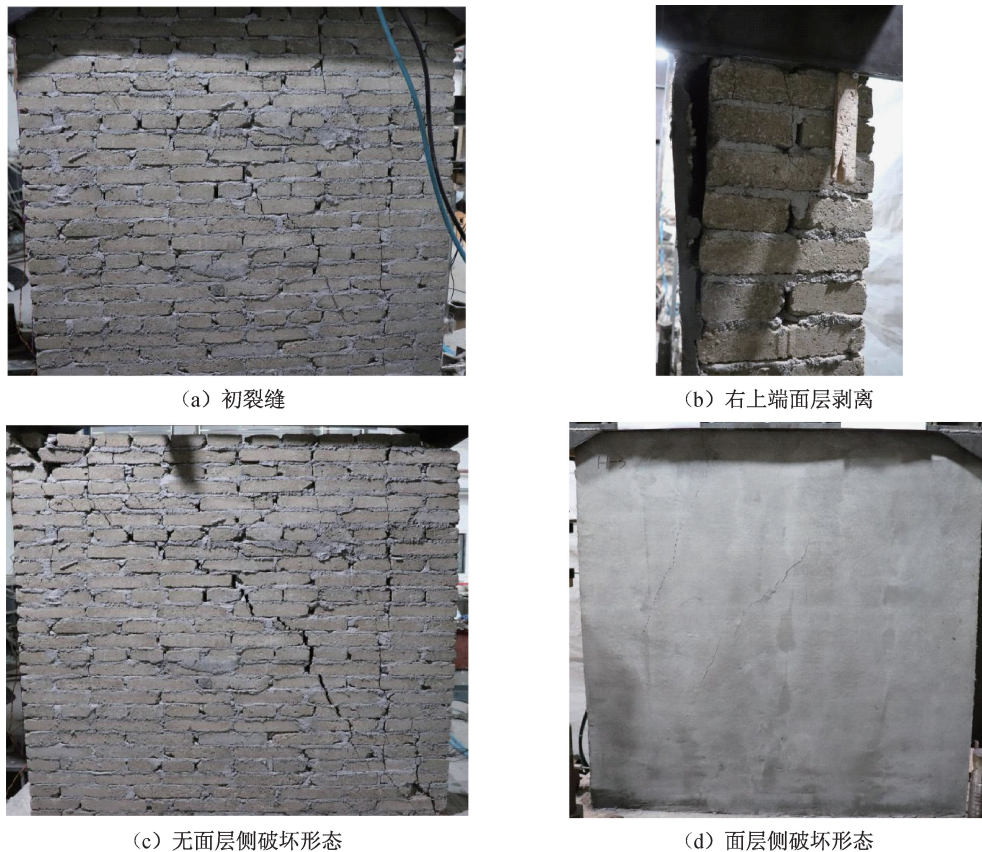


图 7 试件 OCB-HDC-1 的失效过程

Fig. 7 Failure process of specimen OCB-HDC-1



图8 试件 OCB-HDC-2 的失效过程

Fig. 8 Failure process of specimen OCB-HDC-2

(3) 单面 MSHDC 加固试件 OCB-HDC-1 同样有平面内转动的趋势,但是墙顶两端使用钢墩限制墙体转动,墙角产生较大的压应力,墙角受压劈裂破坏,最先出现裂缝。试件在加载过程中墙体率先出现受剪、受压微小裂缝,之后面层出现微小裂缝,随着加载进行,裂缝逐渐扩展。相较于试件 OCB-0 和 OCB-SMCM, OCB-HDC-1 破坏缓慢且主裂缝旁伴有细小裂缝,最终剪压破坏。

(4) MSHDC 加固试件 OCB-HDC-2 与 OCB-HDC-1 同为剪压破坏,前期墙角处出现受压竖向裂缝,随着加载的进行,面层出现微小裂缝。两个试件的区别在于双面加固试件裂缝扩展速度较单面加固更快,面层主斜裂缝是一整条粗大裂缝。双面加固极大提高了墙体的受剪承载力,导致墙体面内转动趋势更强,角部压应力更大,最终墙角的破坏也更为严重。

3 抗震性能分析

为探究 MSHDC 面层对混凝土普通砖墙抗震

性能的影响,本文通过拟静力试验对 4 片试件进行低周往复加载。通过各试件的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化曲线、耗能曲线以及延性系数,综合对比试件的抗震性能。

3.1 滞回曲线

在拟静力试验中,滞回曲线是试件在反复循环荷载作用下,荷载与位移之间形成的闭合环形轨迹,是试验直接记录的数据图形,也是分析结构抗震性能的核心载体。本次试验 4 片试件的滞回曲线如图 9 所示。图 9(a) 为未加固墙体(试件 OCB-0)的荷载-位移曲线,可以看出,加载初期滞回曲线近似呈一条直线,滞回曲线包围的面积较小,试件还处于弹性阶段;随着加载的进行,试件出现残余变形,滞回曲线面积开始增大,曲线斜率也开始减小,试件进入弹塑性阶段;试件达到峰值荷载后,承载力快速下降,墙体破坏突然,具有明显的脆性特征。

图 9(b) 为钢筋网水泥砂浆面层单面加固墙体(试件 OCB-SMCM)的荷载-位移曲线。加载初期

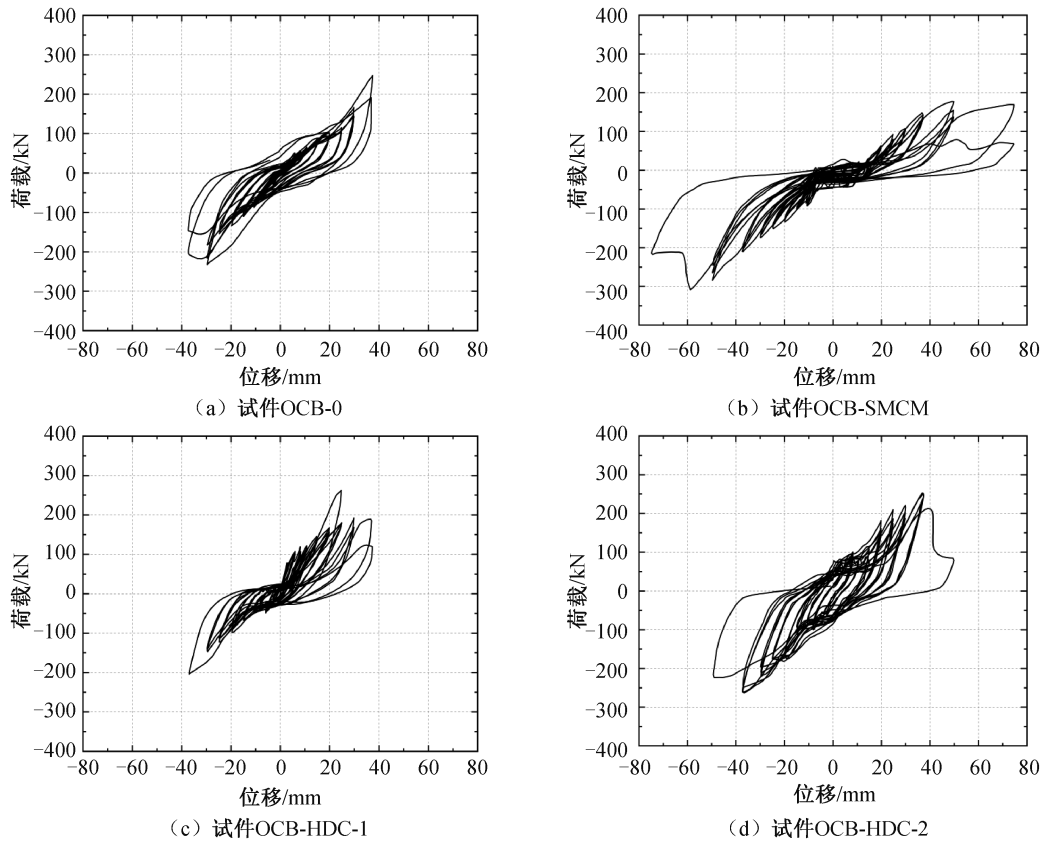


图9 各试件滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curve of each specimen

该试件滞回曲线与未加固墙体相似,但是最终整体结果呈“反 S”形,存在明显捏缩效应,这是在加载过程中地锚松动引发试件整体滑移导致的。相较于未加固墙体,试件 OCB-SMCM 在达到峰值荷载后荷载并未迅速降低,而是进入一段平稳期。起初墙体与钢筋网水泥砂浆面层共同承担荷载,当墙体开裂后加固面层较于墙体承受更多荷载,直至墙体完全破坏面层仍未明显破坏。

图 9(c)为 MSHDC 单面加固墙体(试件 OCB-HDC-1)的荷载-位移曲线,加载初期滞回曲线近似呈线性。与试件 OCB-SMCM 相同,曲线存在捏缩效应,由于捏缩效应的影响,滞回环面积与未加固试件相似,甚至略有降低,最终试件的极限荷载、极限位移与未加固试件相近;当位移角为 $1/60$ 时,曲线正向荷载急剧增加,这是因为此时试件平面内转动趋势十分明显,而钢墩限制其位移,导致荷载剧增。

图 9(d)为 MSHDC 双面加固墙体(试件 OCB-HDC-2)的荷载-位移曲线,加载初期曲线与未加固试件基本一致,随着加载的进行,两者差异逐渐增大。由于双面加固面层对墙体有较好的约束与增强效果,滞回环饱满,面积远大于未加固试

件,试件的刚度随加载有规律地降低;试件达到峰值荷载时的位移大于试件 OCB-0 和 OCB-HDC-1,并且在峰值荷载后荷载下降速度较为缓慢。

3.2 骨架曲线

为了直观体现结构在反复荷载下的强度、刚度和变形等特征,绘制各个试件的骨架曲线,即滞回曲线各级加载第一次循环的峰值点所连成的包络线,见图 10。在加载初期,各试件骨架曲线近似线性增长,随着加载的进行,4 条曲线呈现不同发展趋势。试件 OCB-0 在位移为 25 mm 后曲线斜率增加,此时墙体出现平面内转动现象;试件 OCB-SMCM 曲线在初期线性增长后出现一个斜率较低的平稳期,试件在加载中发生滑移,导致荷载较小;试件 OCB-HDC-1 在加载后期曲线斜率再次提高,因为试件在平面内发生转动;试件 OCB-HDC-2 曲线较为标准,前期斜率很大,随着加载的进行,斜率逐渐降低,直到试件破坏。

通过各曲线对比可以看出,加固试件的极限位移和峰值荷载均大于未加固试件,钢筋网水泥砂浆面层加固试件的极限位移和峰值荷载大于 MSHDC 面层加固试件。但是 MSHDC 双面加固试

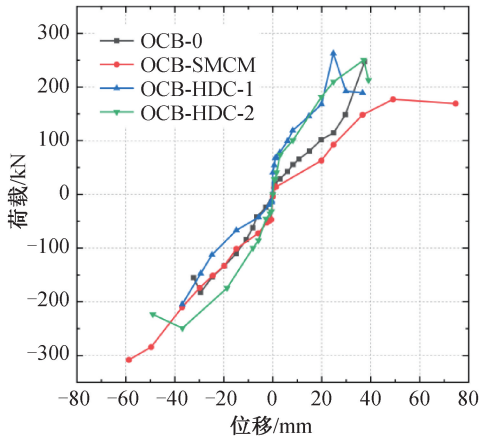


图 10 骨架曲线

Fig. 10 Skeletal curves

件的极限荷载最大, 相较于未加固试件 OCB-0, 试件 OCB-SMCM、OCB-HDC-1、OCB-HDC-2 的极限荷载分别提高 14.2%、5.0%、44.0%。

除此之外, 各试件骨架曲线形状明显中心不对称, 出现这种现象的原因主要是砖砌体墙在砌筑过程中砂浆层与砖块出现不确定缺陷, 无法保证墙体连续均匀与各向同性; 另外, 试件在沿某一方向加载过程中出现损伤, 其整体刚度和承载力减弱, 而沿反向加载时, 由于刚度的减小, 相同位移时的荷载值必然更小。

3.3 延性分析

延性反映了试件在低周往复作用下的变形能力, 本文采用延性系数 μ 评价试件的延性。

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

式中: Δ_u 为试件的极限位移, mm; Δ_y 为试件的屈服位移, mm。

各试件屈服位移使用能量等效面积法进行计算, 试件荷载下降到峰值荷载的 85% 视为极限荷载^[24], 各试件关键试验结果和计算得到的延性系数见表 2, 表中数据取试件两个加载方向中峰值荷载较小的方向。由表可以看出, 相较于未加固试件 OCB-0, 试件 OCB-SMCM、OCB-HDC-1

和 OCB-HDC-2 的延性系数分别提高了 33.6%、68.9%、49.4%, MSHDC 面层单面加固对于墙体延性的提升效果最明显, 其次是 MSHDC 面层双面加固和钢筋网水泥砂浆面层单面加固。这是由于钢筋网水泥砂浆面层强度与刚度过大, 墙体是薄弱点, 率先发生脆性破坏, 延性提升有限; 而 MSHDC 面层本身具有一定延性, 其单面加固可以与墙体共同承担荷载以发挥面层作用, 更好地提高墙体延性。

3.4 刚度退化

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[22], 试件刚度可用割线刚度 K_i 来表示。

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (2)$$

式中: $|+P_i|$ 、 $|-P_i|$ 分别为第 i 次正、负向峰值点荷载, kN; $|+X_i|$ 、 $|-X_i|$ 分别为第 i 次正、负向峰值点位移, mm。

试件的刚度退化曲线如图 11 所示, 可以看出, 在加载初期试件刚度退化迅速, 在位移角 1/500 后曲线趋于平稳。加固试件中 OCB-SMCM 初始刚度最大且刚度退化速率最大, 最终平稳阶段的刚度最小; OCB-HDC-2 初始刚度最小且刚度退化速率最小, 最终平稳阶段刚度最大。说明 MSHDC 面层加固更能有效减缓砌体墙在低周往复作用下的刚度退化速率, 并且双面加固效果优于单面加固。

3.5 耗能能力

试件的耗能可以用滞回曲线所包围的面积表示, 累计耗能为各加载级滞回曲线包围的面积总和, 各试件的累计耗能如图 12 所示。

在前三次循环加载级条件下, 各试件处于弹性阶段, 累计耗能非常小, 小于 0.1 kJ。当位移角为 1/250 时, 各试件的累计耗能开始明显增长, 此时加固试件的加固面层开始发挥作用, 耗能速度与累计耗能均大于未加固试件。当位移角为

表 2 试件试验结果和延性

Tab. 2 Test results and ductility of the specimens

试件编号	屈服荷载 P_y /kN	屈服位移 Δ_y /mm	峰值荷载 P_{max} /kN	峰值位移 Δ_{max} /mm	极限荷载 P_u /kN	极限位移 Δ_u /mm	延性系数
OCB-0	-166.62	-26.87	-230.61	-29.52	-155.09	-32.36	1.098 4
OCB-SMCM	176.61	50.87	177.16	49.11	177.16	49.11	1.465 7
OCB-HDC-1	-156.59	-17.27	-192.18	-29.84	-163.35	-32.03	1.855 1
OCB-HDC-2	-195.89	29.89	-249.10	-36.91	-223.36	-39.04	1.640 9

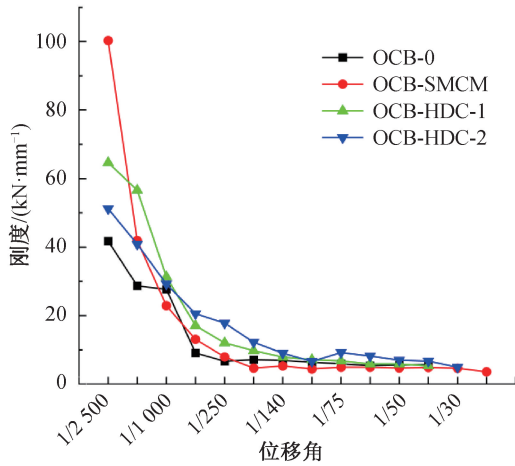


图 11 刚度退化曲线

Fig. 11 Stiffness degradation curves

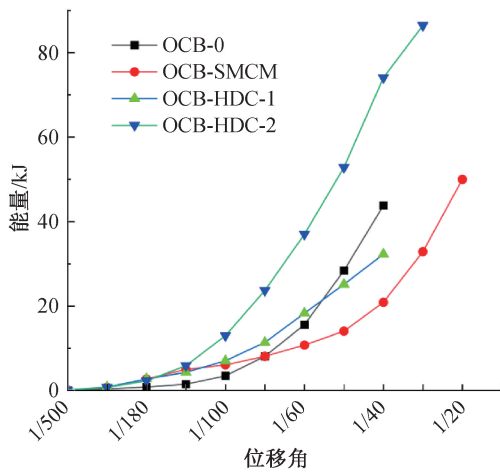


图 12 耗能曲线

Fig. 12 Energy dissipation curves

1/140 以后, 试件 OCB-SMCM 与 OCB-HDC-1 耗能速度趋于平缓, 这是由于此时试件开始出现滑动, 最终试件 OCB-HDC-1 的累计耗能小于 OCB-0。试件 OCB-HDC-2 的耗能速度和累计耗能都显著强于其他试件, 其耗能曲线呈“S”形。因为在加载过程中, MSHDC 面层与墙体共同作用, 耗能速度较快, 加载末期试件开裂严重, 面层对墙体约束性降低, 耗能速度减缓。

4 结论

为探究机制砂高韧性混凝土面层加固普通混凝土砖墙的抗震性能, 并与钢筋网水泥砂浆加固方法作对比, 本文通过拟静力试验方法对 4 片试件的滞回性能、承载力、延性、刚度退化和耗能性能进行研究, 得出结论如下:

1) MSHDC 面层可以显著改善墙体在低周往

复作用下的破坏形态, 试件由脆性剪切破坏变为延性剪压破坏。

2) 加固层可以增强砌体墙的极限荷载, 相较于未加固试件 OCB-0, 试件 OCB-SMCM、OCB-HDC-1、OCB-HDC-2 的极限荷载分别提高了 14.2%、5.0%、44.0%, MSHDC 双面加固试件的增强效果显著强于另外 2 个加固试件。

3) 加固层对砌体墙的延性起到显著增强作用, 相较于未加固试件 OCB-0, 试件 OCB-SMCM、OCB-HDC-1、OCB-HDC-2 的延性系数分别提高了 33.6%、68.9%、49.4%, 其中 MSHDC 单面加固试件的增强效果最强。

4) MSHDC 双面加固试件的累计耗能能力与抵抗刚度退化能力显著大于其他试件。综合评判 3 种加固方法对砌体墙抗震性能的增强效果: MSHDC 双面加固试件最强; SMCM 单面加固试件次之; MSHDC 单面加固试件最弱。

参考文献:

- [1] 苏小卒. 砌体结构设计[M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.
SU X Z. Design of masonry structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2013.
- [2] HOU Y, DUAN K, CAO S, et al. Experimental research on the shear behavior of brick walls reinforced with dry-connected steel plate frames[J]. Engineering Structures, 2021, 249: 113336.
- [3] 马丹. 钢丝网面层砂浆加固砌体窗下墙子结构抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
MA D. Experimental study on seismic behavior of masonry window wall substructure strengthened with steel mesh surface[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.
- [4] 曾银枝, 李保华, 徐福泉, 等. 村镇砌体结构住宅抗震性能现状分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(3): 121-126.
ZENG Y Z, LI B H, XU F Q, et al. Seismic behavior analysis of masonry structures in rural area[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(3): 121-126.
- [5] 王毅红, 韩岗, 卜永红, 等. 村镇既有砌体结构民居建筑抗震性能现状分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(12): 101-104.
WANG Y H, HAN G, BU Y H, et al. Existing research on seismic behavior of masonry structure in village buildings[J]. Building Structure, 2010, 40(12): 101-104.
- [6] 许清风, 江欢成, 朱雷, 等. 钢筋网水泥砂浆加固旧

- 砖墙的试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 77-84.
- XU Q F, JIANG H C, ZHU L, et al. Experimental study of old brick masonry wall strengthened with steel-meshed cement mortar [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(4): 77-84.
- [7] REBOUL N, MESTICOU Z, LARBI A S, et al. Experimental study of the in-plane cyclic behaviour of masonry walls strengthened by composite materials [J]. Construction and Building Materials, 2018, 164: 70-83.
- [8] SUBRAMANIAM K V, CARLONI C, NOBILE L. An understanding of the width effect in FRP-concrete debonding [J]. Strain, 2011, 47(2): 127-137.
- [9] WILLIS C R, YANG Q, SERACINO R, et al. Damaged masonry walls in two-way bending retrofitted with vertical FRP strips [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(4): 1591-1604.
- [10] 林婷婷, 叶林伟, 杨相如. 钢筋混凝土墙板加固石砌体结构抗震性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(6): 188-194.
- LIN T T, YE L W, YANG X R. Seismic performance of stone masonry structures reinforced with RC wallboard [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022, 20(6): 188-194.
- [11] DONG F Y, WANG H P, JIANG F M, et al. In-plane shear behavior of masonry panels strengthened with ultra-high ductile concrete (UHDC) [J]. Engineering Structures, 2022, 252: 113609.
- [12] 邓明科, 董志芳, 樊鑫森, 等. 高延性混凝土面层加固受弯无筋砌体墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(3): 46-55.
- DENG M K, DONG Z F, FAN X M, et al. Experimental investigation on the seismic behavior of flexural unreinforced masonry walls strengthened by high ductility concrete overlays [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(3): 46-55.
- [13] 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 the bond mechanism and seismic behavior of brick masonry walls strengthened with embedded horizontal steel bars [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [14] 赵亚军, 吴昊, 许岩, 等. 钢带嵌缝加固砌体结构抗剪性能试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024, 41(1): 9-16.
- ZHAO Y J, WU H, XU Y, et al. Experimental study on shear resistance of masonry structure strengthened with embedded steel strip [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2024, 41(1): 9-16.
- [15] 宣卫红, 吴刚, 左熹, 等. 外加预制圈梁构造柱加固砌体结构技术与工程应用[J]. 施工技术, 2016, 45(16): 69-74.
- XUAN W H, WU G, ZUO X, et al. Construction technology and engineering application of masonry structure with posted-prefabricated ring beams and constructional columns [J]. Construction Technology, 2016, 45(16): 69-74.
- [16] 涂开胜, 朱国良, 陈尚伟, 等. 砌体结构抗震加固材料的应用研究综述[J]. 绿色建筑, 2023(1): 96-98.
- TU K S, ZHU G L, CHEN S W, et al. Review on application of seismic strengthening materials for masonry structures [J]. Green Building Materials, 2023(1): 96-98.
- [17] 敬登虎, 乔墩, 邢凯丽. 预应力钢板带加固砖砌体墙抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(7): 19-27.
- JING D H, QIAO D, XING K L. Experimental investigation on seismic performance of brick masonry walls strengthened by prestressed steel strips [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(7): 19-27.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 砌体结构加固设计规范: GB 50702—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of strengthening masonry structure: GB 50702—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [19] 中国工程建设标准化协会. 高韧性混凝土加固砌体结构技术规程: T/CECS 997—2022 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for strengthening masonry structures with toughness-concrete: T/CECS 997—2022 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 砌体砖试验方法: GB/T 2542—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for wall bricks: GB/T 2542—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.

- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of basic properties of construction mortar: JGJ/T 70—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [23] 陈道申, 韦芳芳, 朱有华, 等. 双钢板-再生混凝土组合剪力墙抗震性能有限元分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(1): 15-22.
CHEN D S, WEI F F, ZHU Y H, et al. Finite element analysis of the seismic performance of recycled aggregate concrete-filled double steel plate composite shear walls [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2022, 39(1): 15-22.
- [24] 袁朝庆, 代晓辉, 宋爽, 等. 底部加强双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(2): 11-18.
YUAN C Q, DAI X H, SONG S, et al. Study on seismic resistance of double steel concrete at the bottom [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2022, 39(2): 11-18.
(责任编辑 张爱丽)
-
- (上接第9页)
- [19] BELAID T, AMMARI F, ADMAN R. Influence of load position on critical lateral torsional buckling moment of laterally restrained beam at tense flange[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2018, 19(7): 839-848.
- [20] 曹宇翔, 马宁, 冯树国, 等. 考虑侧向支撑刚度影响的蜂窝钢梁临界弯矩计算研究[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(4): 24-27+46.
CAO Y X, MA N, FENG S G, et al. Effect of lateral bracing stiffness on the critical flexural torsional buckling moment of castellated steel beams[J]. Progress in Steel Building Structures, 2013, 15(4): 24-27+46.
- [21] 王新敏, 李义强. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
WANG X M, LI Y Q. ANSYS structural analysis elements and applications[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [22] 成博. 上翼缘为矩形钢管混凝土的工字形梁静力性能的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
CHENG B. Experimental reasearch on static behavior of I-beam with a rectangular concrete-filled tube top flange [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [23] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
HAN L H. Concrete filled steel tubular structures: from theory to practice[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [24] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
LIU W. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.
- [25] 严新江. 带矩形管翼缘的钢-高性能混凝土组合梁抗弯性能试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
YAN X J. Experimental investigation of bending behavior for steel and high performance concrete composite girders with concrete filled rectangular tubular up-flanges [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [26] 方天寿. 五边形钢管混凝土翼缘组合梁抗弯性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
FANG T S. Research on flexural behavior of concrete-filled pentagonal flange beam [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [27] JI J, LI Y H, JIANG L Q, et al. Axial compression behavior of strength-gradient composite stub columns encased CFST with small diameter: experimental and numerical investigation [J]. Structures, 2023, 47: 282-298.
(责任编辑 张爱丽)