文章编号:1674-2974(2024)11-0053-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024107

超高延性混凝土加固砌体的抗弯性能试验研究与理论计算

蒋芳明[1],董方园[1],余江滔[1,2†],王汉鹏[1]
(1. 同济大学 土木工程学院,上海 200092;
2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

摘 要:为提升砌体墙的抗弯性能,降低墙体平面外脆性破坏的风险,采用超高延性混凝土(Ultra-high Ductile Concrete,UHDC)面层加固砌体墙段,并开展了7个加固后墙段的四点弯曲加载试验,对比分析了各试件的破坏模式、承载力和变形能力等特性.结果表明:单面和双面UHDC面层加固改变了传统砌体墙的脆性破坏状态,加固后试件呈现延性弯曲破坏模式;UHDC面层对砌体受弯构件具有良好的约束增强作用,显著提升了抗弯承载力和变形能力;UHDC面层厚度的增加更有利于提高构件的极限承载力;受压区UHDC面层对砌体的抗弯承载力贡献小于受拉区面层.最后,提出了单面和双面UHDC面层加固砌体受弯构件的抗弯承载力计算公式,为UHDC面层加固砌体受弯构件提供了设计依据.

关键词:超高延性混凝土;砌体结构;加固;延性;抗弯承载力
中图分类号:TU362;TU528 **文献标志码**:A

Experimental Study and Theoretical Calculationon Flexural Properties of Masonry Structures Strengthened by Ultra-high Ductile Concrete (UHDC)

JIANG Fangming[1], DONG Fangyuan[1], YU Jiangtao[1,2†], WANG Hanpeng[1]
(1. Department of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To improve the flexural properties and reduce the risk of brittle out-of-plane failure in masonry walls, ultra-high ductile concrete (UHDC) layers were introduced to strengthen the masonry members. Four-point bending tests were carried out on seven strengthened masonry members in this study. The failure mode, bearing capacity and deformability of the specimens were comparably analyzed. The experimental results indicated that ductile failure modes were achieved in masonry specimens strengthened with single- and double-sided UHDC layers, and the strengthened specimen showed ductile bending failure modes. The UHDC layers had satisfied restraint effect on masonry flexural members, which can significantly improve their flexural capacity and deformability. The increase of the thickness of UHDC layer could effectively improve the ultimate bearing capacity. The contribution of UHDC layer in tension zone to the flexural bearing capacity was less than that of UHDC layer in

* **收稿日期**:2023-12-30
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978504), National Natural Science Foundation of China(51978504)
作者简介:蒋芳明(1995—),男,黑龙江牡丹江人,同济大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail:yujiangtao@tongji.edu.cn

compression zone. Finally, the formulas of calculating the flexural capacity of masonry flexural members strengthened with single- and double-sided UHDC layers were individually proposed, providing a design basis for masonry flexural members strengthened with UHDC.

Key words: ultra-high ductile concrete (UHDC); masonry structure; strengthening; ductility; flexural capacity

砌体房屋的施工工艺简单且材料成本低,在我国得到了广泛应用.然而砌体结构存在抗拉强度低、脆性易裂等缺点[1-2].历次灾害调查表明,除了典型的平面内剪切破坏和角部压碎等破坏形态外,砌体墙段还可能发生平面外弯拉破坏[3-5].事实上,平面外破坏导致的后果比平面内破坏要严重得多.当墙体的平面外变形过大时,楼板会因失去支承而脱离墙顶,而墙体在失去楼板的水平约束后,稳定性急剧降低,很可能出现相邻墙体的连锁失稳,最终导致整栋房屋坍塌.因此,提升砌体墙段平面外弯拉承载力和延性有重要的工程意义.

加固改造是有效保障既有砌体结构住房安全使用的基本手段,可改善住房居住使用功能、消除住房安全隐患.已有研究证明,FRP(Fiber Reinforced Polymer)布能够改变砌体的破坏形态,提升砌体墙的承载力、变形能力、刚度和耗能能力[6-7],但FRP布存在变形能力有限且耐久性差、施工受环境影响较大等问题.水泥砂浆-钢筋网面层加固砌体作为另一种应用较广的加固方法,能提升砌体结构的承载力、延性、耗能能力及抗侧刚度[8],但是需要多道施工工序,施工进度较慢,经济性较差,而且面层厚度大(一般≥35 mm)会大幅减小建筑内部使用面积.

密歇根大学的Li等[9-10]采用细观力学和断裂力学基本原理提出了高延性水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites,ECC)的基本设计理念,考虑纤维特性、基体特性以及纤维基体界面特性对复合材料的配比进行设计调整,使其硬化后具有准应变硬化和多缝开展的特征.在拉伸荷载作用下,ECC的极限拉应变可稳定地达到3%以上,其延伸率远高于普通纤维混凝土.国内的张君等[11]和徐世烺等[12]学者对聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料的力学性能和工程应用进行了深入探究,证明了ECC材料的高延性和高韧性有利于提升结构的力学性能和抗震性能[13-14].本课题组通过优化配合比制备了极限拉伸应变达到5%以上、轴拉强度超过6 MPa的超高延性混凝土[15-17].通过UHDC加固砖木结构的振动台试验[18]和UHDC加固砌体墙的抗剪试验[19],证明了UHDC面层能够显著提高结构的抗震性能,以及砌体墙的抗剪性能和变形能力.

国内外学者开展了一系列加固砌体平面外抗弯性能试验研究,包括FRP加固[20-21]、水泥砂浆钢筋网加固[22-23]和纤维混凝土加固[24]等.此外,陈升平等[25]采用30 mm厚的钢纤维增强水泥砂浆面层对4片1 000 mm×1 000 mm×115 mm的砌体墙受拉侧进行加固.Dehghan等[26]通过四点弯曲试验研究了纤维增强混凝土面层厚度、单双面加固、纤维掺量和砌体试件厚度对加固后砌体平面外性能的影响.上述研究初步证明了对砌体加固能不同程度改善砌体的平面外性能.

然而,国内外仍缺少对UHDC新型建筑材料加固砌体构件的平面外抗弯性能试验研究和加固后砌体结构抗弯强度系统的理论分析.基于此,为探究UHDC面层加固砌体的平面外抗弯性能并提出抗弯承载力设计计算方法,本文采用UHDC面层加固砌体梁式构件,通过四点弯曲加载试验,研究了UHDC面层厚度和单双面加固对砌体构件的抗弯承载力、破坏模式和变形能力的影响,并建立了UHDC面层加固砌体构件的抗弯承载力计算方法.

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

本试验依据《砌体基本力学性能试验方法标准》(GB/T 50129—2011)[27],共设计了9个抗弯试验用砌体试件,包括2个未加固试件和7个UHDC面层加固试件(S1~S7),尺寸为230 mm×230 mm×1 034 mm,如图1所示.所有试件所用烧结黏土砖为同一批次生产,尺寸为230 mm×108 mm×48 mm,强度等级为MU30,灰缝厚度为10 mm.试件S1的砌筑砂浆强度等级为M2.5,S2~S7的砌筑砂浆强度等级为M1.

S1~S4均采用UHDC双面加固,其中S1和S2每侧面层设计厚度15 mm,用于研究砂浆强度对砌体构件抗弯性能的影响. S3和S4的面层设计厚度分别为10 mm和20 mm,并与S2形成对比,研究UHDC面层厚度对砌体抗弯性能的影响. 试件S5~S7均采用UHDC单面加固,面层设计厚度分别为10 mm、15 mm和20 mm,以研究采用单面UHDC面层厚度对加固效果的影响. 7个加固试件设计参数见表1.

所有试件均采用立砌和立式加固的方式进行施工,试验时将试件平放并置于试验支座上. 为方便施工,UHDC搅拌过程中加入适量的化学外加剂(减水剂与增稠剂),使得UHDC可以快速方便地涂抹在砌体结构表面. 此外,为增强加固面层与砌体之间的界面连接,在砌体试件的加固面每隔5匹砖进行嵌缝处理,抠缝深度为10 mm(见图1).

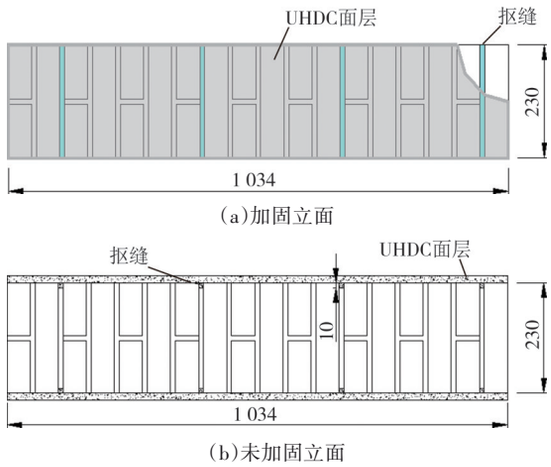


图1　砌体试件砌筑和加固示意图(单位:mm)

Fig.1　Schematic diagram of masonry specimens and strengthened measures (unit:mm)

表1　试件设计

Tab.1　Specimen design

编号	试件尺寸/(mm×mm×mm)	砂浆强度/MPa	加固形式(单/双面)	设计面层厚度/mm	实测面层厚度/mm	
					受压区	受拉区
S1	230×230×1 034	M2.5	双面	15	15	15
S2	230×230×1 034	M1	双面	15	17	15
S3	230×230×1 034	M1	双面	10	10	15
S4	230×230×1 034	M1	双面	20	15	25
S5	230×230×1 034	M1	单面	10	—	15
S6	230×230×1 034	M1	单面	15	—	15
S7	230×230×1 034	M1	单面	20	—	20

1.2　砌筑材料和UHDC的力学性能试验

1.2.1　黏土砖和砌筑砂浆抗压强度

依据《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)[28],从购买的同一批砖块中抽取10块黏土砖进行抗压强度试验,实测黏土砖的抗压强度为31.91 MPa,标准差为1.62 MPa,推定其强度等级为MU30.

砌筑砌体时,每种配比的砂浆各浇筑1组试样,每组6个,尺寸为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm. 在与抗弯试件相同的环境下进行养护,开展抗弯试验时对砂浆试块进行轴压试验,测得的M1和M2.5强度等级砂浆的抗压强度平均值分别为1.48 MPa和3.02 MPa.

1.2.2　UHDC的力学性能

UHDC是由水泥、细砂、粉煤灰、化学外加剂和水按照一定比例搅拌而成,聚乙烯(Polyethylene,PE)纤维的体积掺量为1.5%,如表2所示. 本试验所用水泥为普通硅酸盐水泥P·O 52.5,粉煤灰等级为一级.

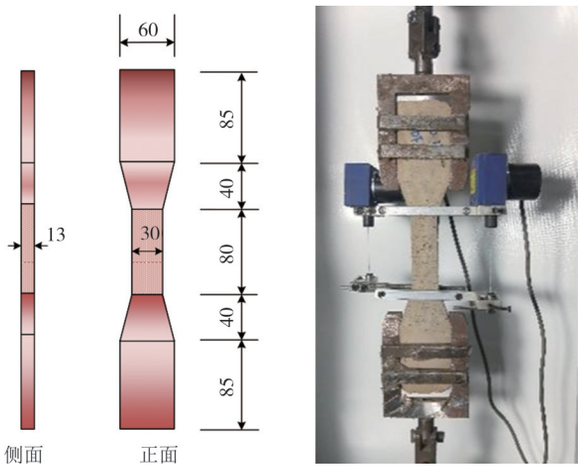
表2　UHDC配合比

Tab.2　Mix proportion of UHDC

水泥/g	硅灰/g	石英砂/g	水胶比/g	减水剂/g	增稠剂/g	18 mmPE纤维体积掺量/%
1 000	435	435	0.32	5	1	1.5

UHDC的轴压试验用试件尺寸均为100 mm×100 mm×100 mm;轴拉试验用狗骨形试件的尺寸和加载装置如图2所示. 四点弯曲试验用棱柱体尺寸为40 mm×40 mm×160 mm,支座与加载点之间的距离为40 mm. 采用100 t电液伺服万能试验机进行轴压试验,加载速率为2 mm/min;采用10 t万能试验机进行轴拉试验和四点弯曲试验,加载速率分别为2 mm/min和1 mm/min.

UHDC的实测立方体抗压强度为45.90 MPa;在拉伸荷载作用下,UHDC的应力-应变曲线如图3(a)所示,表现出拉伸应变硬化和多缝开裂的特点. 峰值抗拉强度为6.25 MPa,对应的拉伸应变为5.0%;四点

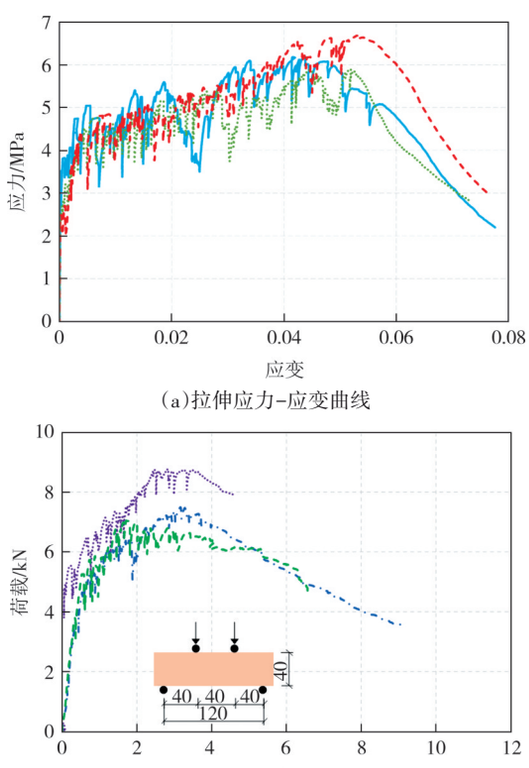


(a)狗骨形试件尺寸 (b)轴拉试验加载装置

图 2 狗骨形试件和加载装置示意图(单位:mm)

Fig.2 Schematic diagram of dog bone-shaped specimen and loading device (unit: mm)

弯曲试验中,荷载-挠度曲线如图3(b)所示,峰值抗弯强度为15.36 MPa,对应的跨中挠度为3.37 mm,此时的挠跨比为1/36.



(a)拉伸应力-应变曲线

(b)荷载-挠度曲线

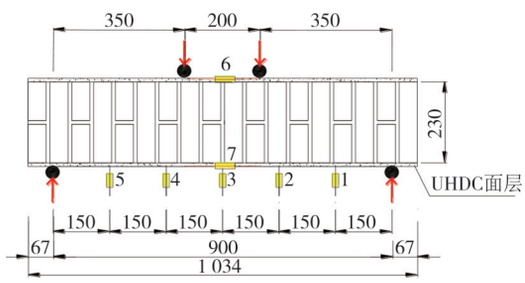
图 3 UHDC 的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of UHDC

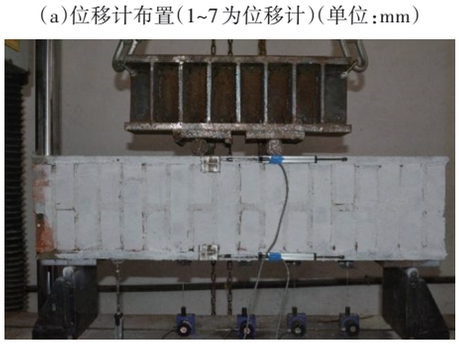
1.3 试验装置及加载制度

在移动和放置于试验机上的过程中,2个未加固试件均发生断裂破坏,无法进行加载试验. 这表明未加固的砌体墙段平面外抗弯承载力极低,甚至无法承受自身的重力荷载,故后续的试验介绍仅针对加固试件.

除S4试件采用三分点加载外,其余试件均采用四点弯曲加载,加载装置和位移计布置见图4,试件加载点与同侧支座的水平距离为350 mm,两加载点的间距为200 mm. 加载模式为位移控制单调加载,加载速率为0.5 mm/min. 当承载力下降到极限荷载的50%时,停止加载.



(a)位移计布置(1~7为位移计)(单位:mm)



(b)试验加载装置

图 4 UHDC 加固砌体试件的加载装置

Fig.4 Loading device for masonry specimens strengthened with UHDC

在试件底部布置了5个位移计,以测量构件底部的竖向位移变化,各测点的间距为150 mm,左右侧两个位移计与支座的距离为150 mm;在试件正面的上下部面层上各布置了一个水平位移计,标距为100 mm,以测量试件底部面层的水平变形.

2 试验结果与理论分析

2.1 破坏形态

在加载初期,加固砌体试件均呈弹性状态,随着加载位移的增加,荷载呈线性增长;随着荷载的增加,有砌体开裂的脆响,纯弯段或弯剪段的砌体出现沿灰缝的竖向裂缝并逐渐发展;继而听到“嘶嘶”的UHDC基体开裂和纤维拔出的声音,在开裂灰缝下

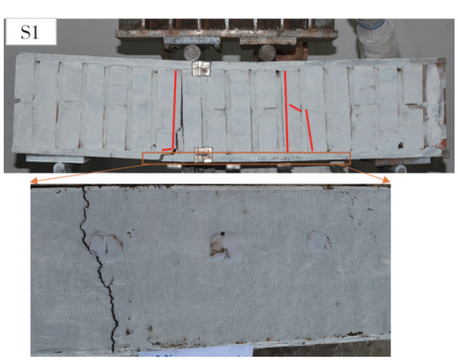
方的加固面层出现细密裂缝并逐渐向两边扩散,荷载继续增加;最后,试件底部的UHDC面层形成一条平行于灰缝的主裂缝,面层被拉断,荷载下降.

对于S1试件,加载过程中,加载点下方的砌块两侧的灰缝先开裂,裂缝向下扩展,然后试件底部UHDC层在开裂灰缝下方出现细密裂缝,加固层上的裂缝宽度小于100 μm. 达到峰值荷载后,在左侧加载点下灰缝的左下方,UHDC层发生撕裂破坏,之后承载力开始逐渐下降. 最终由于弯剪段的砌体材料和面层先达到极限抗拉强度而破坏,试件的破坏模式为弯曲破坏,受拉侧面层出现细密的裂缝,如图5(a)所示.

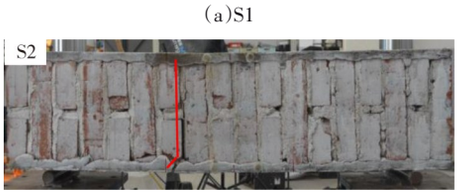
对于S2试件,其破坏模式同S1,最终发生弯曲破坏,如图5(b)所示. 由于加载过程中,裂缝主要分布在试件左侧加载点下方. 试验结束后,将试件的主裂缝左侧部分切割,对右部试件(S2-1)进行三点弯加载试验,支座间距为500 mm. 试验过程中,采用数字图像分析(Digital Image Correlation, DIC)技术[29]捕捉裂缝开展过程,最终破坏形态如图5(c)所示,加载点下方砌块的两侧灰缝开裂且裂缝宽度不断增大,中间砖块与面层出现部分剥离,受拉侧面层出现细密的多裂缝,最终由于受拉侧面层撕裂试件发生弯曲破坏.

对于S3试件,亦采用DIC技术进行了裂缝开展分析,最终破坏模式如图5(d)所示,为弯曲破坏. S4试件(三分点处加载)发生了弯剪破坏,如图5(e)所示.

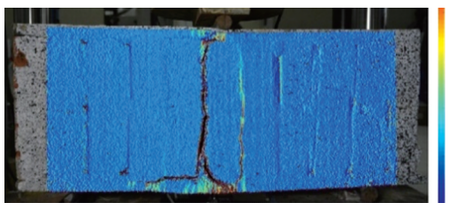
对于试件S5,荷载为23 kN时,纯弯段的砌体首



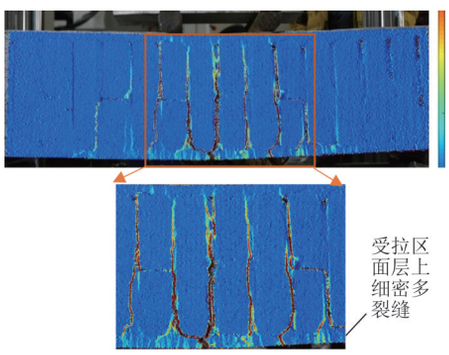
(a)S1



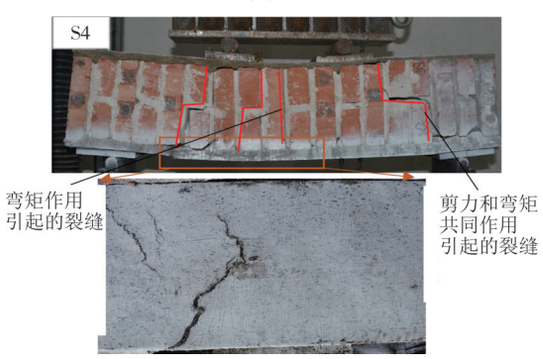
(b)S2



(c)S2-1



(d)S3



(e)S4

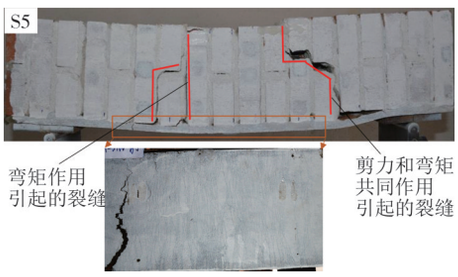
图5　UHDC双面加固砌体的破坏形态

Fig.5　Failure mode of masonry specimens strengthened with double-side UHDC

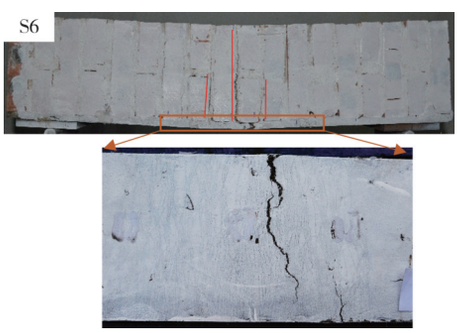
先沿灰缝出现竖向裂缝,并由砌块与UHDC面层的界面处由下向上发展;25 kN时,右侧加载点的右下方形成剪切斜裂缝,由于面层阻止了裂缝向下继续开展,试件承载力略下降后继续上升,此处面层开始与砌体脱开,听到“嘶嘶”声,此处面层上出现细密多裂缝并以此为中心发生弥散;随后左侧加载点的左下方形成剪切斜裂缝,同样由于面层阻止裂缝向下发展,荷载下降后继续上升,到达峰值荷载25.1 kN后,由于此处面层发生撕裂破坏,荷载下降,试验停止,其破坏形态如图6(a)所示.

试件S6和S7的失效破坏形态分别如图6(b)和图6(c)所示. 试件S6发生弯曲失效破坏,极限承载力为23.35 kN. 试件S7的左侧加载点下方出现剪切斜裂缝,为剪切失效破坏,极限承载力为30.8 kN.

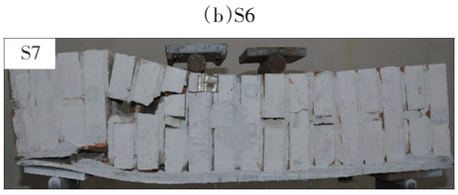
UHDC面层加固试件在四点弯曲加载试验中均



(a)S5



(b)S6



(c)S7

图 6 UHDC 单面加固砌体的破坏形态

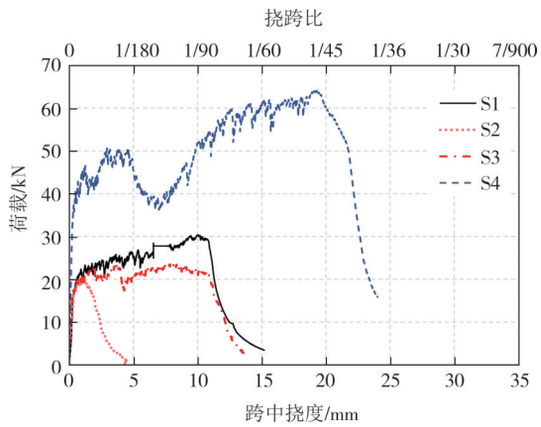
Fig.6 Failure mode of masonry specimens strengthened with single-side UHDC

表现出延性破坏的特点,首先在砌体的加载点两侧的灰缝处形成竖向裂缝,发展到受拉侧 UHDC 层与砖块的界面处,受到面层阻碍,UHDC 的应变硬化特性增强了灰缝诱导的薄弱区,此处面层开裂且裂缝以此为中心向两边发生弥散,充分发挥了面层的高抗拉强度和超高变形能力. 对比 UHDC 单面加固试件和双面加固试件,发现单面加固试件在失效破坏后存在砌体部分断裂的现象,而双面加固试件在失效后仍具有良好的完整性,上下部面层约束了砌体发生脆性断裂.

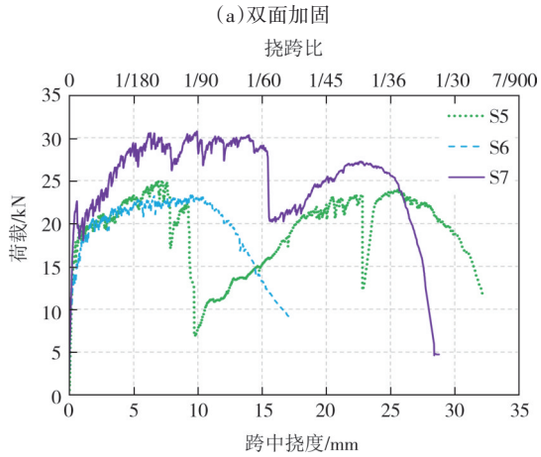
2.2 抗弯性能

2.2.1 荷载-跨中挠度曲线

各试件的荷载-跨中挠度曲线见图 7. 在加载初期,7 个试件的荷载随位移的增加呈线性增长,处于弹性阶段;随着位移的进一步增加,砌体上开始出现沿灰缝开展的竖向裂缝;随位移的增加荷载增加变缓,之后荷载-跨中挠度曲线有一个下降,面层开始阻挡裂缝进一步向下发展,并保证了试件的整体性;面层上出现细密裂缝,对应曲线上的“锯齿状”波动,荷载维持缓慢上升的趋势. 直至试件底部的面层发生整体撕裂破坏,荷载开始下降,达到极限状态.



(a)双面加固



(b)单面加固

图 7 荷载-跨中挠度曲线

Fig.7 Load versus displacement of mid-span curves

受弯砌体构件的弯矩 M 由竖向荷载和构件自重两部分转换而成,计算如式(1).

$$M = \frac{1}{2}PL_0 + \frac{1}{8}GL \tag{1}$$

式中:P 为机器荷载,L_0 和 L 分别为剪切段长度和两支座之间的距离,G 为试件自重.

UHDC 面层加固试件的抗弯承载力包括砌体和 UHDC 面层的贡献,UHDC 面层不仅能够直接抗拉,还能大幅度增强试件的整体性. 试件 S1~S7 的极限承载力、跨中挠度、极限弯矩和破坏模式见表 3. 试件 S1 采用抗压强度为 3.02 MPa 的砂浆砌筑而成,其抗弯承载力为 30.4 kN,比由抗压强度为 1.48 MPa 的砂浆砌筑的试件 S2 提高了 49.0%. S1 比 S2 承载力的提升主要是砌体的贡献,即高强度砂浆能够为砌体提供更强的抗弯能力. S2-1 试件在三点弯加载试验中的承载力为 40.4 kN,极限弯矩达到 5.1 kN·m.

对 UHDC 双面加固砌体,试件 S3 的上部面层厚

表 3　UHDC 加固砌体试件的力学性能

Tab.3　Mechanical properties of masonry specimens strengthened with UHDC

试件编号	极限承载力/kN	跨中挠度/mm	挠跨比	极限弯矩/(kN·m)	破坏模式
S1	30.4	10.1	1/90	5.3	弯曲破坏
S2	20.4	1.1	1/849	3.6	弯曲破坏
S3	23.6	7.7	1/117	4.2	弯曲破坏
S4	64.0	19.3	1/47	9.6	弯剪破坏
S5	25.1	6.9	1/130	4.4	弯剪破坏
S6	23.4	9.6	1/94	4.1	弯曲破坏
S7	30.8	9.9	1/91	5.4	剪切破坏
S2-1	40.4	1.5	1/332	5.1	—

度大于试件 S2,但二者的底部面层实际厚度相同,其抗弯承载力相近;由于试件 S4 为三分点处加载,其剪跨比小于其他试件,其极限弯矩比试件 S2 和 S3 分别提高了 166.7% 和 128.6%. 在承载力极限状态下,试件 S2 和 S3 的跨中挠度分别为 1.1 mm 和 7.7 mm,对于面层厚度较大的试件 S4,峰值荷载对应的跨中挠度达到 19.3 mm,挠跨比为 1/47,表明砌体的承载力和变形能力均随 UHDC 面层厚度的增加而提高.

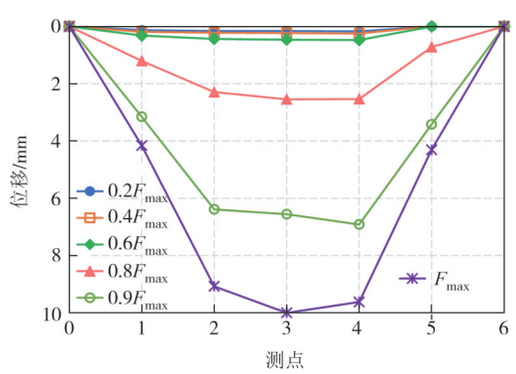
对 UHDC 单面加固砌体,试件 S5 和 S6 底部的 UHDC 面层实测厚度相同,其抗剪承载力相近,但是试件 S5 发生了剪切破坏,试件 S6 为弯曲失效破坏. 由于底部面层厚度的增加,试件 S7 的极限承载力和极限弯矩分别达到 30.8 kN 和 5.4 kN·m,极限承载力比试件 S5 和 S6 分别提升了 22.7% 和 31.6%. 试件 S7 的跨中挠度达到 9.9 mm,比试件 S5 提高了 43.5%. 这是由于底部 UHDC 面层对砌体中裂缝的发展限制作用变强,面层厚度越大,对砌体的约束作用越强,且面层的承载力贡献和变形增加. 此外,对比单面加固和双面加固试件,发现受压区 UHDC 面层对砌体的抗弯承载力贡献较小,而受拉区面层的贡献较大.

2.2.2　竖向位移

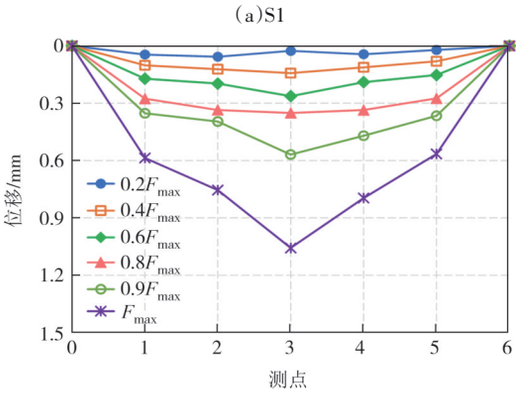
本文取荷载上升段 0.2、0.4、0.6、0.8、0.9 倍峰值荷载处和峰值荷载 F_{max} 时测点 1~5 处的竖向位移绘制点线图,各试件不同测点处的竖向位移随荷载的变化如图 8(a)~(f)所示. 由于试件 S4 仅在跨中底部布置了竖向位移计,其数据未在图中进行对比. 由试验结果可以发现,所有试件底部测点的竖向位移随荷载的增加而增大,但在 0.6 倍峰值荷载及之前,各测点的位移均较小,说明此时试件未发生明显开裂,仍处于弹性阶段. 在 0.8 倍峰值荷载之后,各测点的竖向位移随荷载的增加而明显增大,此阶段试件出现弯曲或剪切破坏.

测点 3 在纯弯段的跨中处,而测点 1~2 和测点 4~5 均位于剪切段. 对于 UHDC 面层加固砌体受弯构件,在底部受拉区的竖向位移变化应该与试件的弯矩分布规律相似,即纯弯段的竖向位移大于剪切段的位移. 在本文的四点弯加载中,除 S7 之外的试件均表现出相似的变化趋势,即测点 3 的竖向位移最大,其次为测点 2 和测点 4,而测点 1 和测点 5 的竖向位移最小,见图 8(a)~(e). 试件 S7 的测点 4 处竖向位移大于跨中挠度,是由于该试件一侧发生了明显的剪切破坏,导致该处下部的竖向位移较大.

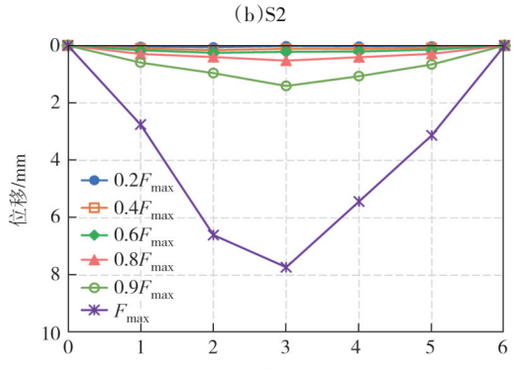
在各试件达到峰值荷载时,不同测点处的竖向



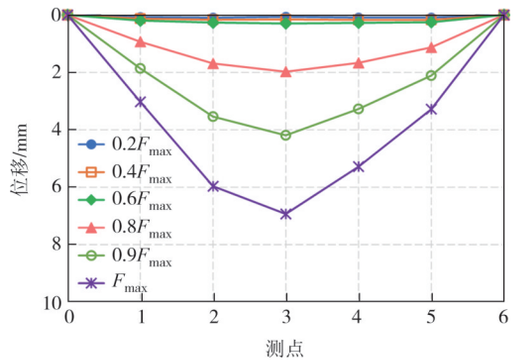
(a)S1



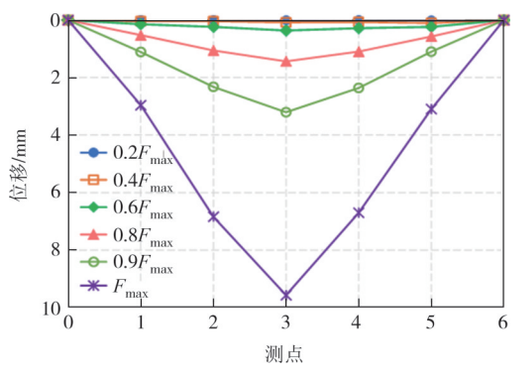
(b)S2



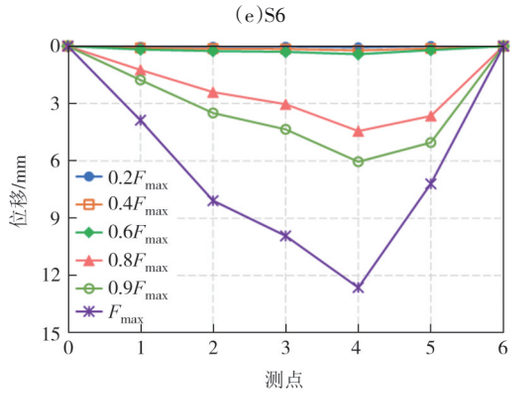
(c)S3



(d)S5



(e)S6



(f)S7

图 8 不同测点处的竖向位移

Fig.8 Vertical displacement at different measure points

位移对比如图 9 所示(测点 0~6 分别对应左侧支座、由左向右的 5 个位移计测点和右侧支座处,测点 3 对应跨中挠度). 试件 S2 的变形能力最差,其跨中挠度仅为 1.06 mm,远小于试件 S2 对应位置处的竖向位移;试件 S3 和 S5 各测点的位移相近,峰值荷载下的挠跨比分别为 1/90 和 1/117;试件 S6 和 S7 跨中挠度相近,其挠跨比分别为 1/94 和 1/91. 基于 3.1 节所述的试件失效破坏模式,由于试件 S6 跨中处砌体灰缝开裂且跨中面层最终发生撕裂破坏,两侧测点的位移由跨中向两侧近乎线性减小. 而其余试件的底部面层撕裂位置多偏离跨中位置,虽然出现了跨中大两侧小的趋势,但没有线性变小的规律.

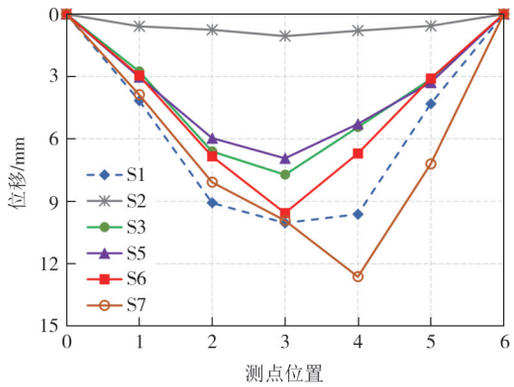


图 9 峰值承载力时的竖向位移

Fig.9 Vertical displacement at peak bearing capacity

2.2.3 受压区和受拉区的水平位移

峰值荷载作用下,各试件在跨中顶部和底部测得的水平变形如图 10 所示. 下部水平位移计安装在底部面层侧面,对于 UHDC 双面加固试件,即 S1~S4,上部水平位移计安装在顶部面层侧面,而 UHDC 单面加固试件,即 S5~S7,上部水平位移计安装在顶部砌块侧面,位移计读数为正说明受拉,为负说明受压,位移计标距为 200 mm.

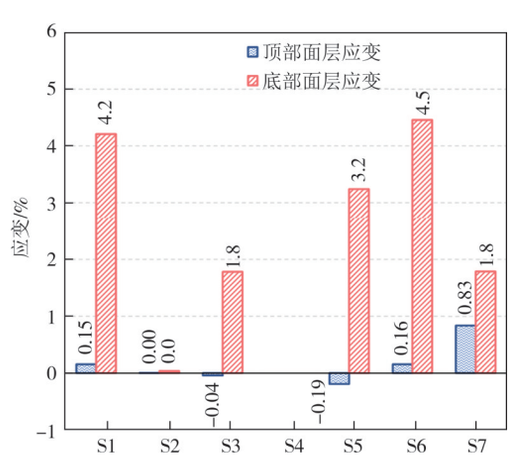


图 10 受压区和受拉区的水平应变

Fig.10 Horizontal strain in compression zone and tension zone

由于试件 S2 的变形稍差,达到峰值荷载时,下部水平位移计标距段的变形较小;试件 S4 未布置水平位移计. 其余试件底部 UHDC 面层与砌体在荷载作用下发生弯曲变形,标距段内面层受拉变形,采用双面加固的试件 S1 和 S3 的水平变形分别达到 8.42 mm 和 3.56 mm,对应的应变分别为 4.2% 和 1.8%;单面加固的试件 S5~S7 的水平变形分别为 6.48 mm、8.91 mm 和 3.58 mm,对应应变分别为 3.2%、4.5% 和 1.8%.

试件 S1 和 S6 顶部位移计示值为正,表明顶部受压区由于灰缝贯通出现了砌体拉裂;S2 的标距段内出现破坏,故位移计示值较小;S3 和 S5 的位移计示

值为负,受压区标距段内灰缝受压变形;而S7左侧发生明显的剪切变形,上部没有面层约束,左侧砌块存在拉断和剪坏,导致上部标距段内砌体灰缝开裂,进而引起了拉伸变形.由此可见,上部面层对砌体试件的变形具有约束作用,双面加固不仅能够提升试件的承载力,还可约束试件变形,改变其原有的脆性失效破坏模式.

2.3　UHDC加固砌体抗弯承载力理论计算

本文涉及的UHDC面层加固砌体抗弯试件,UHDC面层与砌体通过界面黏结和嵌缝来传递应力,协调变形实现共同抵抗荷载的作用.如3.1节所述,UHDC面层加固砌体抗弯试件会出现正截面受弯破坏、斜截面受剪破坏和弯剪破坏3种破坏模式.正截面受弯破坏包括UHDC面层达到极限应变被拉断和受压区砌体或UHDC层被压溃.为计算UHDC面层加固砌体发生正截面受弯破坏的抗弯承载力,作出以下的基本假设:1)符合平截面假定;2)UHDC为弹塑性材料;3)砌块为受压弹性材料;4)抗弯试件截面仅发生小变形;5)UHDC面层与砌体的变形协调;6)忽略砌块和砂浆的抗拉强度.

UHDC面层加固砌体的抗弯承载力计算参照钢筋混凝土梁的承载力计算方法[30],将试件受压侧和受拉侧的UHDC面层分别等效为钢筋混凝土梁中的受压和受拉钢筋.UHDC单面加固砌体受弯构件和UHDC双面加固砌体受弯构件的正截面承载力的计算示意分别如图11和图12所示.β为受压区等效矩形应力图形的高度与界面中和轴的比值,取0.8;ε_m为砌体的极限压应变,取0.003[31];ε_t为UHDC的峰值拉应变;σ_c'为UHDC材料的压应力.对于双面加固砌体试件,依据混凝土结构中双筋矩形截面受弯构件正截面的受力分析方法计算其极限承载力.不同破坏情况下,UHDC面层加固砌体的抗弯承载力计算方法如下.

本研究提出的承载力计算方法适用于UHDC面层在合理厚度范围内.UHDC面层加固砌体试件的底部面层达到极限拉应变,同时受压区砌体(单面加固)/UHDC面层(双面加固)达到极限应变,从而导致受拉侧UHDC面层拉伸断裂,充分利用砌体材料抗压性能和UHDC材料的高抗拉强度与高延性的优势.对于UHDC面层加固砌体受弯试件,为提升试件的变形能力,应避免试件上部的砌体出现压溃的情况,故UHDC底部面层不宜过厚,实际工程中一般控制UHDC面层厚度为10~40 mm.与钢筋混凝土受弯

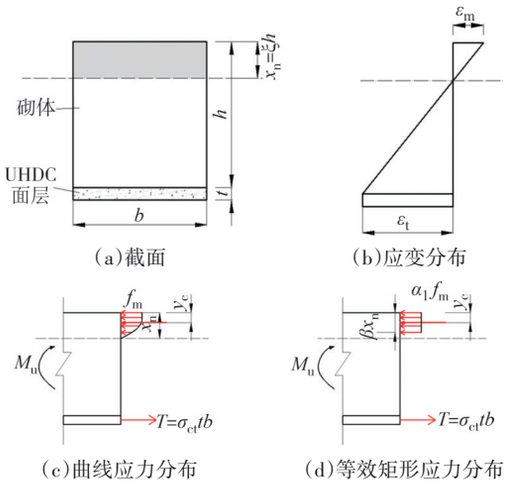


图11　UHDC单面加固砌体受弯构件正截面承载力计算简图

Fig.11　Calculation diagram of normal section bearing capacity of masonry flexural members strengthened with single-side UHDC

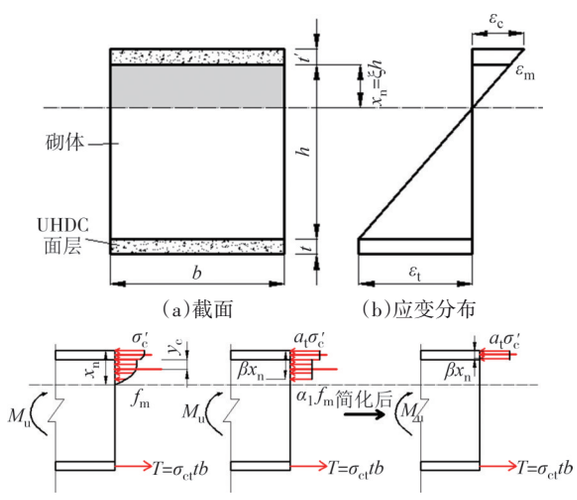


图12　UHDC双面加固砌体受弯构件正截面承载力计算简图

Fig.12　Calculation diagram of normal section bearing capacity of masonry flexural members strengthened with double-side UHDC

构件类似,弯曲荷载作用下受压区砌体和面层的应力呈曲线分布,为简化计算,将曲线应力分布等效为矩形应力分布.α_1和α_2分别为UHDC和砌体的等效抗压强度系数,两个系数的计算参考了文献[24],见式(2)、式(3).应力等效过程中,保证截面的合力C与合力作用点y_c位置不变,等效后矩形应力图形的高度为$x=\beta x_n$,依据平截面假定和内力平衡可得式(4)和式(7),则界限受压区相对高度ξ_b见式(5).

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.001\,5 f_m \tag{2}$$

$$\alpha_2 = 0.85 - 0.001\,5 f_c' \tag{3}$$

UHDC面层单面加固:

$$\alpha_1 f_m b x = \alpha_t f_{ct} b t \tag{4}$$

$$M_u = \alpha_1 f_m b x (h - x/2) = \alpha_t f_{ct} b t (h + t/2 - x/2) \tag{5}$$

UHDC面层双面加固:

$$\alpha_1 f_m b (x - t') + \alpha_2 f_c' b t' = \alpha_t f_{ct} b t \tag{6}$$

$$\begin{aligned} M_u = {} & \alpha_1 f_m b (x - t') \left[h + t/2 - (x - t')/2 \right] + \\ & \alpha_2 f_c' b t' (h + t/2 + t'/2) = \\ & \alpha_t f_{ct} b t \left[h + t/2 - (x - t')/2 \right] + \\ & \alpha_2 f_c' b t' \left[(x - t')/2 + t'/2 \right] \end{aligned} \tag{7}$$

对于等厚度双面加固的情况,受压区高度一般小于受压侧面层的厚度,即$x<t'$,砌体试件中裂缝沿灰缝贯通,仅有受压侧UHDC面层受压,故不计入砌体的抗压贡献[24],此时,式(6)和式(7)简化如下:

$$\alpha_2 f_c' b x = \alpha_t f_{ct} b t \tag{8}$$

$$\begin{aligned} M_u = {} & \alpha_2 f_c' b t' (h + t/2 + x/2) = \\ & \alpha_t f_{ct} b t \left[h + t/2 + x/2 \right] \end{aligned} \tag{9}$$

式中:M_u为极限弯矩;f_m为砌体的抗压强度平均值;依据《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)[32]计算;f_c'和f_{ct}为UHDC材料的抗压强度平均值和抗拉强度平均值;α_t为UHDC的抗拉强度利用系数,本文取为0.8;b和h分别为砌体抗弯试件横截面的宽度和高度;t和t'分别为受拉区和受压区UHDC面层的厚度.

对于单面加固试件,当砌体受弯试件底部的UHDC面层过厚时,在弯曲荷载作用下受压区的砌块会发生压溃的现象;试件达到极限承载力时,受压区的砌块达到其极限压应变,而受拉区的UHDC小于其极限拉应变,不能充分发挥其抗拉强度,在加固设计时,应避免此类破坏.对于双面加固试件,实际工程中通常考虑等厚度双面加固,故基本不会出现受压区面层压溃而受拉区未拉裂的情况.

由试验结果可知,UHDC面层加固受弯试件在荷载作用下均发生了底部UHDC面层的拉断破坏,而受压区砌体和UHDC面层未压溃.故依据式(2)~式(9)和实测面层厚度,得到UHDC面层加固砌体受弯试件的抗弯承载力计算值,见表4,试验值与计算值对比如图13所示.此外,采用本文提出的计算公式,对文献[24]、[26]和[33]中的相关试验数据进行分析计算,发现计算值与试验值的拟合度较高,进一步验证了本文提出的抗弯承载力计算方法的可行性.

表4 UHDC加固砌体受弯试件的抗弯承载力试验值与计算值对比

Tab.4 Comparison between experimental and calculated values of flexural capacity of masonry specimens strengthened with UHDC

试件编号	试验值/(kN·m)	计算值/(kN·m)	试验值/计算值
S1	5.3	4.08	1.30
S2	3.6	4.64	0.78
S3	4.2	2.69	1.56
S4	9.6	4.08	2.35
S5	4.4	3.94	1.12
S6	4.1	3.94	1.04
S7	5.4	5.23	1.03

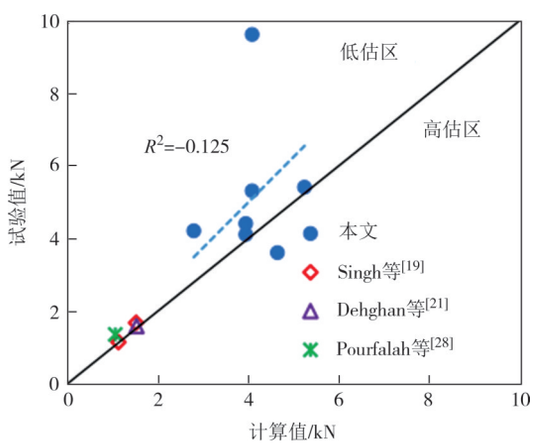


图13 抗弯承载力计算值与试验值对比

Fig.13 Comparison of calculated and test values of flexural load capacity

由表4可知,对于单面加固试件(S5~S7),理论计算值与试验值的误差均小于12%,采用式(6)计算的UHDC单面加固砌体的抗弯承载力与试验值吻合较好;双面加固试件S3和S4的抗弯承载力计算值与试验值的误差较大,这是由于试验过程中,裂缝沿砌体灰缝开展后受底部UHDC面层阻碍,由于施工误差,该处UHDC面层较设计厚度不均匀,利用本文提出的抗弯承载力计算公式得到的计算值小于试验值,低估了UHDC加固砌体受弯构件的承载力.由图13可知,计算值与试验值的拟合优度为87.1%,本文提出的承载力计算方法对预测UHDC加固砌体的抗弯承载力是安全保守的.

在实际设计过程中,为保证UHDC面层加固砌体受弯构件具有足够的安全储备,可将UHDC材料的极限抗拉强度进行二次折减,二次折减系数可取0.6~0.7.上述设计计算方法能够较好地指导UHDC加固砌体结构设计和工程应用.由上可知,UHDC材

料可用于对砌体进行抗弯加固,且可提升砌体构件的面外承载力和变形能力,改变砌体结构的脆性破坏特征.该加固方法施工工艺简单、施工周期短、加固成本低,具有广阔的应用前景.

3 结 论

1)UHDC面层约束砌体试件并增强了阻碍沿灰缝的裂缝发展,底部面层受拉出现细密裂缝,在弯曲荷载作用下表现出延性破坏的特点,从而改变了砌体构件的脆性破坏模式.

2)20 mm厚UHDC单面加固和双面加固试件的抗弯承载力分别达到5.4 kN·m和9.6 kN·m,分别比10 mm厚UHDC单面加固和双面加固试件提高了23%和129%.加固后试件的承载力随面层厚度的增加而提升.

3)对于双面加固试件,上部面层对砌体抗弯承载力的贡献明显小于下部面层的.

4)UHDC加固砌体受弯构件具有良好的变形能力,20 mm厚UHDC双面加固砌体的挠跨比达到1/47;峰值荷载后加固试件的仍具有一定的承载能力,UHDC面层对砌体构件的抗弯加固效果明显.

5)提出了UHDC面层加固砌体构件的抗弯承载力计算方法,理论计算值与试验值具有较好的吻合性,可用于指导UHDC面层加固砌体受弯构件的工程设计.

参考文献

[1] LIU H B, GUO X, YU Y Y. Analysis of seismic resistance capability of masonry structure [J]. Advanced Materials Research, 2011, 255/256/257/258/259/260: 2380-2387.

[2] 蒋利学,蒋璐,李向民,等. 无筋砌体结构多层住宅振动台试验与抗震性能评估[J]. 建筑结构学报,2021,42(8):25-35.
JIANG L X, JIANG L, LI X M, et al. Shaking table test and seismic performance assessment of unreinforced multi-storey masonry residence [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(8): 25-35. (in Chinese)

[3] 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(增1):297-306.
PAN Y, CHEN J, BAO Y L, et al. Seismic damage investigation and analysis of rural buildings in MS6.0 Changning Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Sup.1): 297-306. (in Chinese)

[4] 曲哲, 钟江荣,孙景江. 四川芦山7.0级地震中非抗震设防民居震害特征[J]. 建筑结构学报,2014,35(5):157-164.
QU Z, ZHONG J R, SUN J J. Seismic damages of non-seismic design residential houses in the M7.0 Lushan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35 (5): 157-164. (in Chinese)

[5] 张文芳. 砌体墙的面内受弯损坏形态及其抗震优势实例剖析[J]. 土木工程学报,2010,43(增刊1):130-135.
ZHANG W F. Researches on in-plane flexural destruction modes and earthquake resistant advantages by way of representative examples[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Sup.1): 130-135. (in Chinese)

[6] 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(增刊1): 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(Sup.1): 315-322. (in Chinese)

[7] SANTA-MARIA H, ALCAINO P. Repair of in-plane shear damaged masonry walls with external FRP[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(3): 1172-1180.

[8] 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)

[9] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2246-2264.

[10] LI V C, MISHRA D K, WU H C. Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites [J]. Materials and Structures, 1995, 28(10): 586-595.

[11] 张君,公成旭,居贤春,等. 延性纤维增强水泥基复合材料的抗弯性能[J]. 工程力学,2010,27(3):112-115.
ZHANG J, GONG C X, JU X C, et al. Bending performance of ductile fiber reinforced cementitious composite[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(3): 112-115. (in Chinese)

[12] 徐世烺,李贺东. 超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研究[J]. 土木工程学报,2009,42(9):32-41.
XU S L, LI H D. Uniaxial tensile experiments of ultra-high toughness cementitious composite [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 32-41. (in Chinese)

[13] 张远淼,余江滔,陆洲导,等. ECC修复震损剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2015,32(1):72-80.
ZHANG Y M, YU J T, LU Z D, et al. Experimental test on aseismic behavior of damaged reinforced concrete shear wall repaired with ECC[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(1): 72-80. (in Chinese)

[14] YU K Q, LI L Z, YU J T, et al. Feasibility of using ultra-high ductility cementitious composites for concrete structures without steel rebar[J]. Engineering Structures, 2018, 170: 11-20.

[15] YU K Q, YU J T, DAI J G, et al. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers [J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 217-227.

[16] YU K Q, WANG Y C, YU J T, et al. A strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8% [J]. Construction and Building Materials, 2017, 137: 410-419.

[17] 王义超,侯梦君,余江滔,等. 聚乙烯纤维制备超高延性水泥基复合材料的试验研究[J]. 材料导报, 2018, 32(20): 3535-3540.
WANG Y C, HOU M J, YU J T, et al. Experimental study on mechanical properties of ultra-high ductile cementitious composites [J]. Materials Review, 2018, 32(20): 3535-3540. (in Chinese)

[18] DONG F Y, LI Z H, YU J T, et al. Shaking-table test on a two-story timber-framed masonry structure retrofitted with ultra-high ductile concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(1): 04021226.

[19] 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.

[20] GUERREIRO J, FERREIRA J G, PROENÇA J, et al. Strengthening of old masonry walls for out-of-plane seismic loading with a CFRP reinforced render [J]. Experimental Techniques, 2018, 42(4): 355-369.

[21] REBOUL N, SI LARBI A, FERRIER E. Two-way bending behaviour of hollow concrete block masonry walls reinforced by composite materials [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 137: 163-177.

[22] 陈升平,张茫茫,TAN K H, 等. 钢丝网水泥砂浆加固砌体墙的平面外受力性能[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(1): 83-85.
CHEN S P, ZHANG M M, TAN K H, et al. Out-of-plane behavior of masonry walls strengthened with Ferrocement [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(1): 83-85. (in Chinese)

[23] KADAM S B, SINGH Y, LI B. Out-of-plane behaviour of unreinforced masonry strengthened using ferrocement overlay [J]. Materials and Structures, 2015, 48(10): 3187-3203.

[24] SINGH S B, PATIL R, MUNJAL P. Study of flexural response of engineered cementitious composite faced masonry structures [J]. Engineering Structures, 2017, 150: 786-802.

[25] 陈升平,TAN K H. 钢纤维水泥砂浆加固砌体墙的平面外受力性能[J]. 工程力学, 2010, 27(4): 169-172.
CHEN S P, TAN K H. Out-of-plane behavior of masonry walls strengthened with SFRC overlays [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(4): 169-172. (in Chinese)

[26] DEHGHAN S M, KARAMIAN M R, NAJAFGHOLIPOUR M A. An experimental and analytical study on the out-of-plane behavior of URM prisms strengthened with SFRC overlays [J]. Structures, 2021, 33: 1216-1234.

[27] 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, 2012.
Standard for test method of basic mechanics properties of masonry: GB/T 50129—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

[28] 砌墙砖试验方法: GB/T 2542—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
Test methods for wall bricks: GB/T 2542—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)

[29] YU J T, WANG Y C, LI Z H, et al. Using DIC technique to characterize the mode II interface fracture of layered system composed of multiple materials [J]. Composite Structures, 2019, 230: 111413.

[30] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 3版. 上海: 同济大学出版社, 2015.
GU X L. Basic principles of concrete structure [M]. 3rd ed. Shanghai: Tongji University Press, 2015. (in Chinese)

[31] 阮积敏. 普通玻璃纤维布加固多孔砖砌体的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
RUAN J M. Experimental research of hollow brick masonry strengthened with common GFRP sheet [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese)

[32] 砌体结构设计规范: GB 50003—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Code for design of masonry structures: GB 50003—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)

[33] POURFALAH S, SURYANTO B, COTSOVOS D M. Enhancing the out-of-plane performance of masonry walls using engineered cementitious composite [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 140: 108-122.