



纤维增强复合墙板研究进展

王 晨¹, 孙洪军¹, 杨宇康¹, 卞虹霏¹, 唐显喆²

(1. 辽宁工业大学 土木建筑工程学院, 辽宁 锦州 121001; 2. 锦州水务(集团)有限公司, 辽宁 锦州 121000)

摘要: 研究发现, 纤维材料可以有效解决传统复合墙板强度低、整体性差的问题。本文以查阅大量文献为基础, 总结了不同呈现形式的纤维在增强复合墙板中的应用与影响、墙板设计与试验方法, 指出了现有研究存在的不足, 并对未来提出展望。结果表明: 纤维筋与格栅主要通过外附筋条、内外叶内置格栅以及增加配筋率的方式实现对墙板承载力的增强; 纤维布多用于受损墙板的加固与使用功能的增强, 其黏贴方式、黏贴层数和黏贴位置需要注意; 纤维增强复合材料作为一种新型材料, 对墙板性能上的增强是全方位的, 多体现在夹芯墙板的基体部分, 是实现墙板轻质与高强的理想材料。本文结果可为装配式复合墙板的发展提供有力支撑。

关键词: 复合墙板; 呈现形式; 剪切试验; 抗冲击试验

中图分类号: TU599

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)01-0001-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.01.001

Research progress of fiber-reinforced composite wallboard

WANG Chen¹, SUN Hongjun¹, YANG Yukang¹, BIAN Hongfei¹, TANG Xianzhe²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China;

2. Jinzhou Water Affairs (Group) Co., Ltd., Jinzhou 121000, Liaoning, China)

Abstract: It is found that fiber materials can effectively solve the problems of low strength and poor integrity of traditional composite wallboard. Based on a large number of literatures, the application and influence of different forms of fibers in reinforced composite wallboard, the design and experimental methods of wallboards are summarized, the shortcomings of existing research are showed clearly, and prospects for the future are proposed. The results show that, fiber reinforcement and grille realize the enhancement of the bearing capacity of the wallboard through such modes as the external reinforcement strips, the built-in grille of the inner & outer leaves, and the increase of the reinforcement ratio. Fiber cloth is mostly used for the reinforcement of damaged wallboard and the enhancement of use function, and it is necessary to pay attention to the fiber cloth sticking method, the number of adhesive layers and the adhesive position; As a new type of material, fiber reinforced composite material is all-round to enhance the performance of the wallboard, which is mostly reflected in the matrix part of the sandwich wallboard, and is an ideal material to achieve lightweight and high strength of the wallboard. The results can provide strong support for the development of prefabricated composite wallboard.

Key words: composite wallboard; presentation form; shear test; impact resistance test

复合墙板(composite wall panel, CWP)是由两种及以上材料复合而成, 集轻质高强、保温隔热于一体的新型墙板^[1]。作为装配式墙板的理想组织^[2], 在实际的设计过程中, CWP因存在黏结与

滑移(整体性差)、轻质与高强^[3-4](强度低)的对立问题而发展受限。为此, 国内外相关学者展开了大量的研究, 通过多方案对比发现, 纤维材料是解决CWP两大对立问题的关键。近年来, 纤维

收稿日期: 2024-05-06

作者简介: 王 晨(1999—), 男, 硕士研究生, 从事装配式轻质复合墙板方面的研究。

增强复合墙板的研究成果已有很多,本文基于文献分析,围绕纤维增强复合墙板的具体形式、试验方法进行详细分析和探讨,指出研究上存在的不足,并根据现阶段智能建造的发展对纤维增强复合墙板进行展望,以期为装配式复合墙板的进一步研究提供一点借鉴。

1 不同呈现形式的纤维在增强 CWP 中的运用及影响

纤维增强作为一种简单、低成本、高效率的手段^[5],对提高 CWP 的延性^[6]、耐久性^[7]以及抗冲击性等性能具有重要作用。常见的形式有 4 种,即纤维筋、纤维格栅、纤维布与纤维增强复合材料。

1.1 纤维筋与格栅/网格

纤维筋的出现减少了建材对自然资源的索取和对自然环境的影响。为了进一步验证纤维筋是否具备替代钢筋的性能,刘华新等^[8-12]进行了大量的研究,最先开始并系统研究了纤维筋与混凝土的黏结性、纤维筋在梁中的抗剪性以及柱中的抗压性能,为纤维筋的发展做下了铺垫。而后的一些研究^[13]也指出纤维筋替代钢筋的可行性,但仍需要注意一些问题,比如纤维筋是线弹性材料,易发生脆性破坏等。此外,纤维筋的使用不仅限于替代钢筋,在装配式结构领域,它还是增强 CWP 的一种有力方法,具体表现在对墙板的加固,研究汇总如表 1 所示。

不同时代的建筑,往往保留着不同时代的烙印,成为人类宝贵的精神财富。CORRADI 等^[19]

为了让历史建筑重现生机,通过采用一种创新的历史墙板的加固技术,即在无机基质中插入 GFRP 网络的护套,对历史墙板进行剪切测试,发现相比未加固的墙板,用玻璃纤维网格加固的面板横向承载能力明显提高,最高可达原来的 10.6 倍。然而,当前已被广泛使用的夹芯墙板普遍存在一些亟待解决的问题,如墙板饰面在外界环境侵蚀下易造成脱落,产生安全事故。对此,尹世平等^[20]提出有效方法,将纤维编织网与水泥基体结合作为墙板的饰面,以饰面厚度为变量研究其性能,结果发现纤维网与水泥基的结合能有效解决墙板长期饰面脱落的问题。另外,饰面厚度的增加有助于提升墙板的抗弯刚度和承载能力,但同时墙板的延性也会随之降低,这一点需要特别注意。

1.2 纤维布

建筑结构中,墙体是暴露在外界环境里面积最大的构件^[21],同时也是受外界影响因素最多的构件,因此墙体的维修与加固对延长建筑使用寿命至关重要。当前,墙体加固的方法大体分为增大构件的截面、增加共同受力的元件以及使用新型材料 3 类^[22],具体如图 1 所示。其中新型材料因具有轻质、成本低、强度高、施工便捷等优点在建筑加固领域中得到广泛应用,其中以纤维布为代表。

在砌体墙抗弯性能的表现上,最早刘骥夫^[23]对纤维布的铺贴效率进行了探索,发现单层纤维布的铺贴强度发挥效率最高,铺贴多层时则额外注意采取锚固和抗剪加固措施;KHAN 等^[24]研究了

表 1 有关纤维筋增强 CWP 的研究汇总

研究内容	研究成果	参考文献
玻璃纤维筋加固对开孔单向混凝土板抗弯性能的影响	与未加筋板相比,墙板的抗弯承载力和刚度得到了有效提升,使用荷载下的挠度也大幅度降低	[14]
在弯曲试验中,对比玻璃纤维筋与钢筋在加固混凝土实心板中的差异	与钢筋相比,在普通混凝土中使用玻璃纤维筋加固的构件往往表现出更高的挠度和裂缝宽度	[15]
使用玻璃纤维筋加固双向混凝土板的冲剪行为	即使在最小配筋状态下,玻璃纤维筋双向混凝土板也能满足设计规范规定的使用荷载下的允许挠度和裂缝宽度	[16]
以开口尺寸和位置为参数,对比玻璃纤维筋加固有无开孔的混凝土板的效果	玻璃纤维筋的加入使加固试件的承载能力和刚度均有较大幅度提高	[17]
以玄武岩纤维筋或玻璃纤维筋加筋并浇筑含有玄武岩宏观纤维的混合料的新型单向板体系的抗弯性能	玻璃纤维加筋板的应变值低于玄武岩纤维加筋板的应变值。在延性和承载能力方面,玄武岩宏观纤维有望提高受试板条的抗弯性能	[18]

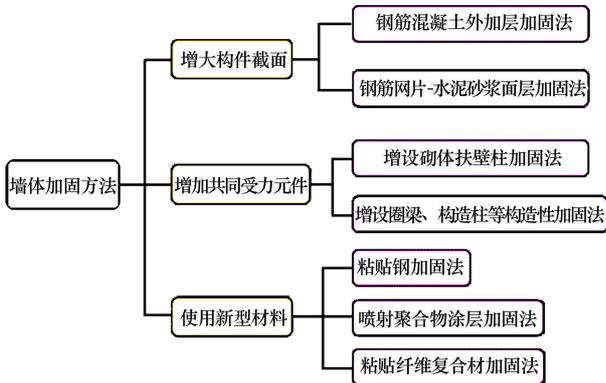


图1 墙体加固方法

纤维布的3种不同粘贴方式(平行、对角线、交叉)在墙体抗弯强度的表现,其中交叉拉扯的粘贴效果最佳。在抗爆性能上,喻忠操^[22]进一步对比了不同粘贴方式下纤维布对墙体性能的影响,再次强调了双向铺贴的优势,同时发现双层的叠加效果好于单层。在CWP的表现上,郝际平等^[25]具体细化了纤维布铺设角度对墙板承载力的影响,发现45°和90°的组合是最佳的铺层设计。针对开洞墙板性能低等问题,PETKUNE等^[26]发现,纤维布能有效提高墙板的抗弯承载力、延性、刚度以及利用效率。MOHAMMED等^[27]继续对纤维布加固开洞墙板的具体位置进行了深层次研究,指出在墙板开口角45°处铺贴,其破坏荷载要高于沿开口铺贴。有关纤维布的使用量问题,AMAN等^[28]指出3层铺贴墙板可以承受更大的载荷;ENOCHSSON等^[29]则引入一种简约的估算方法,在高效利用的同时兼具实用。需要特别指出的是,纤维布加固开洞墙板无法恢复到实心板的承载力^[30],它只能最大限度地接近实心板。

1.3 纤维增强复合材料

在复合夹芯墙板中,纤维增强复合材料(fiber reinforced composite material, FRCM)大体位于墙板内外叶和夹芯层两处。在墙板内外叶,RAJ等^[31]、SCALICI等^[32]、PARK等^[33]先后进行了抗弯、抗盐雾以及抗震试验,对比验证了FRCM在增强CWP上的优越性。然而,合成纤维存在生产过程高度依赖原材料资源、难以降解造成环境污染等问题,使得人们不得不思考替代合成纤维的新材料——天然纤维。天然纤维是一种可再生、可回收、可降解的材料,它具有稳定的机械性能、

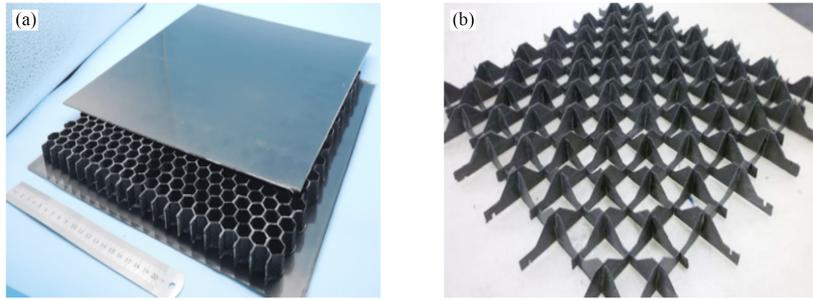
良好的热工性能和一定的自愈能力,成了复合夹芯墙板最佳的保温材料。为了进一步对比天然和合成FRCM在夹芯板中的区别,VITALE等^[34]进行三点弯曲试验对比力学性能和破坏模式,同时验证模型预测的正确性。在天然FRCM的应用上,JUSOH等^[35]对夹层结构的波纹芯进行了研究,指出发展优异力学性能夹芯板的潜力;SUN等^[36]研究了弯折芯碳纤维增强复合材料夹芯板的抗压性能;ANANDA等^[5]在综述FRCM进展的同时,指出了从农业残留物中提取生物纤维作为混凝土中钢筋和骨料的潜力,拓展了天然纤维的获取方式;WU等^[37]、LI等^[38]根据增强材料的最新进展,指出天然FRCM存在的不足(耐久性差、纤维与疏水基质之间的相容性差、高吸水性等),并提出通过改性以增加纤维表面的不均匀。DU等^[39]基于折纸得到启示,制作了一种碳纤维增强复合材料折纸芯板,并根据力学性能探究出该类墙板不仅轻质而且还具有高强度和高能量吸收能力。近些年,随着建筑仿生领域的发展,出现了纤维增强复合蜂窝材料(图2)。该材料抗弯能力强、重量轻,区别于传统蜂窝材料,它的设计增加了芯材的内部流通,改善了闭孔结构因湿度累积所导致的芯材损坏和分层,如XIONG等^[40]制作的三维蜂窝网格芯碳纤维增强了复合材料夹芯板。然而,蜂窝、折纸芯等新型材料固然很好,但其制作工艺复杂、成本高的特点,阻碍其发展。因此,为了降低复杂程度以及制作成本,HOU等^[41]和ZENG等^[42]通过引入3D打印技术,探索新的制作方法并成功验证了其可行性,为未来新材料的制作提供了新的思路。

2 纤维增强CWP相关试验

2.1 剪切试验

剪切试验是研究CWP界面黏结、剪切等内层力学性能的重要试验。根据不同情况,常见的剪切试验方法有直剪试验法、剪切压缩试验法和三点弯曲试验法3种。

(1) 直剪试验法。该方法是检测CWP界面黏结和剪切性能最直接、形象的方法,大多针对高度不超过1m的条板,加载方式如图3(a)所示,其中: v 为剪切力,N。EGBON等^[43]和YAMAN等^[44]通过直



(a) 蜂窝芯; (b) 锥体蜂窝网芯

图 2 纤维增强复合蜂窝材料

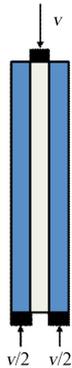


图 3 直剪试验加载示意

剪试验研究了连接件在墙板中的剪切传递机理; CHOI 等^[45-46]和 HODICKY 等^[47]则根据工程决策使用的置信区间修改了较为保守的 ICC-ES 方程, 有效地扩展了连接件的效率, 也较为具体地计算出连接件上的剪切流量, 为墙板的优化设计做下铺垫。

(2) 剪切压缩试验法。该方法是检测墙板抗剪强度的一种方法, 主要针对方形墙板, 试验常见的尺寸为 1 000 mm × 1 000 mm 和 1 200 mm × 1 200 mm, 具体加载如图 4 所示。目前根据现有文献, 剪切压缩试验大多用于研究纤维材料对传统砖墙的加固, 如 GOLHAM 等^[14]和 DIZHUR 等^[48]分别对纤维条、格栅加固砖墙的面内抗剪性能进行研究, 指出了纤维在加固砖墙上的效果和优势。

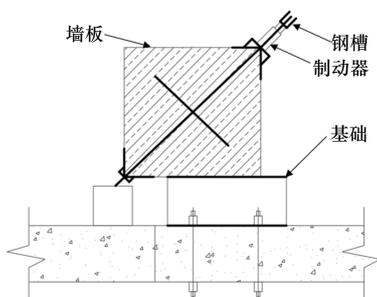


图 4 剪切压缩试验加载示意

(3) 三点弯曲试验法。该方法加载示意如图 5 所示, 其中 P 为剪切力, N 。该方法多针对板条, 一方面可以测试板条的抗弯性能, 另一方面可以测试其剪切性。CAO 等^[49]设计纤维材料作为饰面的墙板, 通过三点弯曲试验, 研究了其剪切性能、破坏模式和荷载-挠度变化规律, 发现纤维材料作为墙板饰面可有效提高墙板的延性、抗剪承载力, 解决了传统轻质夹芯板界面脱落的问题。

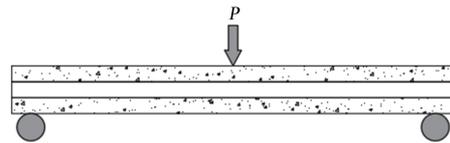
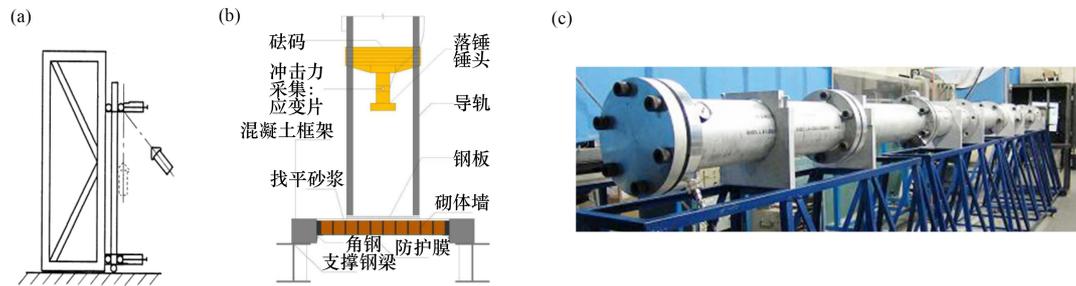


图 5 三点弯曲试验加载示意

2.2 抗冲击试验

当前, 与冲击载荷有关的建筑物和基础设施的极端事件或威胁呈增加趋势。这些引发了关于提高结构抗冲击载荷能力的深入研究工作。近些年来, 研究人员进行了大量的试验, 探究了纤维材料对墙体抗冲击性能提升的作用, 常见的试验方法有摆锤冲击试验法和落锤冲击试验法。摆锤冲击试验法是一种软体冲击试验法, 它以软皮壳制成的沙袋为撞击器, 通过将沙袋提升一定高度后释放产生对墙体的冲击力, 如图 6(a) 所示。同时, 该试验常以长板条为对象, 结合纤维材料。李方贤等^[50]研究了不同结构 CWP 的抗冲击性能。根据 CWP 的破坏形态可以明显观察出, 玻璃纤维网格布增强方式的 CWP 抗冲击性能最佳。此外, MENG 等^[51]在研究聚丙烯纤维增强石膏板的抗冲击能力上也取得了一定的成效。对于砌体砖墙抗冲击性能的研究, 落锤冲击试验法常常是首选。在结合纤维布的加固, 喻忠操等^[22]采用落锤试验机[图 6(b)]测试不同黏贴方式下砖墙的抗冲击性



(a) 摆锤冲击试验装置示意; (b) 落锤冲击试验装置示意; (c) 激波管冲击试验装置

图 6 抗冲击试验加载装置示意

能, 发现双向交织贴法最佳。此外, 值得注意的是霍普金森杆冲击试验法, 它与前面的方法不同, 使用了特殊的试验机——URI 激波管[图 6(c)]。它通过由气缸压力差形成的冲击波对试样施加动态荷载, 使试件保持良好的冲击受力状态。TEKALUR 等^[52]研究了三维编织 e-玻璃纤维表皮和未缝合/缝合芯结构对复合材料夹层在冲击波载荷下性能的影响, 并第一次在激波载荷下的理论与试验结果中, 对这种复杂的夹层结构进行了直接比较, 结果发现, 表层纤维材料的加固显著提高了墙板的抗冲击能力和损伤容限, 且随着拼接密度的增大, 理论和试验结果越来越接近。

3 结 语

纤维增强复合墙板作为一种创新型材料, 展示了其在建筑领域的广阔应用前景。随着各形式纤维材料试验研究的不断更新, 如何有效地利用这些新型材料, 需要人们在不断收集最新文献的基础上进行及时总结和分析, 以此更快地实现从试验到实际应用的转变, 从而达到产教融合的效果。未来在绿色建筑的发展背景下, 仍需积极探索纤维等新型材料的使用, 为工程实践提供宝贵经验。

参考文献:

- [1] 徐玉峰. 混凝土-聚苯板复合墙板抗震性能试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.
- [2] WEI X Y, XIONG J, WANG J, et al. New advances in fiber-reinforced composite honeycomb materials[J]. Science China: Technological Sciences, 2020, 63(8): 1348-1370.
- [3] POZO-LORA F, MAGUIRE M. Thermal bowing of concrete sandwich panels with flexible shear connectors[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 29: 101124.
- [4] AREVALO S, TOMLINSON D. Experimental thermal bowing response of precast concrete insulated wall panels with stiff shear connectors and simple supports[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 30: 101319.
- [5] ANANDA M A, GUNA V, ILANGO VAN M, et al. A review of fibrous reinforcements of concrete[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2017, 36(7): 519-552.
- [6] 高舒羽, 郭小农, 刘青, 等. 预制复合墙板承载性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 48-57.
- [7] KAZEM H, BUNN W G, SELIEM H M, et al. Durability and long term behavior of FRP/foam shear transfer mechanism for concrete sandwich panels[J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 722-734.
- [8] 刘华新, 邢宪才, 孟文静. BFRP 筋与玄武岩纤维再生混凝土黏结性能试验研究[J]. 混凝土, 2015(12): 93-96.
- [9] 刘华新, 朱伯衡. 高温对玄武岩纤维筋混杂纤维再生混凝土黏结性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(5): 2049-2054.
- [10] 刘华新, 柳根金, 王学志, 等. BFRP 筋再生混凝土无腹筋深梁抗剪承载力[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(5): 17-22.
- [11] 刘华新, 柳根金, 孔祥清, 等. 纤维增强复合材料抗剪加固混凝土梁试验研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 94-98.
- [12] 刘华新, 韩定杰, 杨龙, 等. BFRP 混合加固预损偏心受压短柱试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(9): 75-80.
- [13] 闫清峰, 张纪刚. 纤维增强复合材料在土木工程中的应用与发展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15314-15322.
- [14] GOLHAM M A, ALI-AHMED A H. Behavior of GFRP reinforced concrete slabs with openings strengthened by CFRP strips[J]. Results in Engineering, 2023, 18:

- 101033.
- [15] EL-ZAROUG O, FORTH J, YE J Q, et al. Flexural performance of concrete slabs reinforced with GFRP rebars [J]. *Civil and Environmental Research*, 2013, 5(6): 6–11.
- [16] JU M, PARK K, PARK C. Punching shear behavior of two-way concrete slabs reinforced with glass-fiber-reinforced polymer (GFRP) bars [J]. *Polymers*, 2018, 10(8): 893.
- [17] ANIL Ö, KAYA N, ARSLAN O. Strengthening of one way RC slab with opening using CFRP strips [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 48: 883–893.
- [18] ATTIA K, ALNAHAL W, ELREFAI A, RIHAN Y. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with BFRP and GFRP bars [J]. *Composite Structures*, 2019, 211: 1–12.
- [19] CORRADI M, BORRI A, CASTORI G, et al. Shear strengthening of wall panels through jacketing with cement mortar reinforced by GFRP grids [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 64: 33–42.
- [20] 尹世平, 李雨珊, 徐世焱, 等. 纤维编织网增强 ECC 夹心保温复合墙板抗弯性能 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2023, 50(5): 123–135.
- [21] 李必瑜, 王雪松. 房屋建筑学 (第 5 版) [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2014.
- [22] 喻忠操. 基于落锤冲击试验机的砌体填充墙抗爆加固试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [23] 刘骥夫. GFRP 加固砌体墙力学性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [24] KHAN H A, NANDA R P. Out-of-plane bending of masonry wall strengthened with geosynthetic [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 231: 117198.
- [25] 郝际平, 冯啸天, 于金光. FRP-钢复合板剪力墙力学性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2023, 56(9): 1–14.
- [26] PETKUNE N, DONCHEV T, HADAVINIA H, et al. Comparison of the behaviour of steel, pure FRP and hybrid shear walls under cyclic seismic loading in aspect of stiffness degradation and energy absorption [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 621–630.
- [27] MOHAMMED B S, EAN L W, MALEK M A. One way RC wall panels with openings strengthened with CFRP [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 40: 575–583.
- [28] AMAN S S, MOHAMMED B S, WAHAB M A, et al. Performance of reinforced concrete slab with opening strengthened using CFRP [J]. *Fibers*, 2020, 8(4): 25.
- [29] ENOCHSSON O, LUNDQVIST J, TÄLJSTEN B, et al. CFRP strengthened openings in two-way concrete slabs-An experimental and numerical study [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(4): 810–826.
- [30] EL-MANDOUH M A, OMAR M S, ABD EL-MAULA A S. RETRACTED: Behaviour of RC flat slabs with openings strengthened with CFRP [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 15: 00587.
- [31] RAJ S, RAMESH KUMAR V, BHARATH KUMAR B H, et al. Flexural studies on Basalt Fiber Reinforced Composite sandwich panel with profile sheet as core [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 82: 391–400.
- [32] SCALICI T, FIORE V, VALENZA A. Experimental assessment of the shield-to-salt-fog properties of basalt and glass fiber reinforced composites in cork core sandwich panels applications [J]. *Engineering (Composites Part B)*, 2018, 144: 29–36.
- [33] PARK S H, DINH N H, KIM S H, et al. Seismic retrofit of unreinforced masonry walls using precast panels of fiber-reinforced cementitious composite [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 53: 104548.
- [34] VITALE J P, FRANCUCCI G, XIONG J, et al. Failure mode maps of natural and synthetic fiber reinforced composite sandwich panels [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 94: 217–225.
- [35] JUSOH A F, REJAB M R M, SIREGAR J P, et al. Natural fiber reinforced composites: a review on potential for corrugated core of sandwich structures [J]. *MATEC Web of Conferences*, 2016, 74: 00033.
- [36] SUN Y G, LI Y X. Prediction and experiment on the compressive property of the sandwich structure with a chevron carbon-fibre-reinforced composite folded core [J]. *Composites Science and Technology*, 2017, 150: 95–101.
- [37] WU H S, SHEN A Q, CHENG Q Q, et al. A review of recent developments in application of plant fibers as reinforcements in concrete [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 419: 138265.
- [38] LI Y, YANG E H, TAN K H. Flexural behavior of ultra-high performance hybrid fiber reinforced concrete at the ambient and elevated temperature [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 250: 118487.
- [39] DU Y T, SONG C P, XIONG J, et al. Fabrication and mechanical behaviors of carbon fiber reinforced composite foldcore based on curved-crease origami [J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 174: 94–105.

- [40] XIONG J,VAZIRI A, GHOSH R, et al. Compression behavior and energy absorption of carbon fiber reinforced composite sandwich panels made of three-dimensional honeycomb grid cores[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2016,7:114 – 120.
- [41] HOU Z H,TIAN X Y, ZHANG J K, et al. 3D printed continuous fibre reinforced composite corrugated structure[J]. *Composite Structures*,2018,184:1005 – 1010.
- [42] ZENG C J,LIU L W,BIAN W F,et al. Bending performance and failure behavior of 3D printed continuous fiber reinforced composite corrugated sandwich structures with shape memory capability[J]. *Composite Structures*, 2021, 262:113626.
- [43] EGBON B,TOMLINSON D. Experimental investigation of longitudinal shear transfer in insulated concrete wall panels with notched insulation[J]. *Journal of Building Engineering*,2021,43:103173.
- [44] YAMAN S T, LUCIER G. Shear transfer mechanism between CFRP grid and EPS rigid foam insulation of precast concrete sandwich panels[J]. *Buildings*, 2023, 13(4):928.
- [45] CHOI K B,CHOI W C, FEO L, et al. In-plane shear behavior of insulated precast concrete sandwich panels reinforced with corrugated GFRP shear connectors[J]. *Composites Part B:Engineering*,2015,79:419 – 429.
- [46] CHOI W,JANG S J, YUN H D. Design properties of insulated precast concrete sandwich panels with composite shear connectors[J]. *Engineering(Composites Part B)*,2019,157:36 – 42.
- [47] HODICKY K,SOPAL G,RIZKALLA S, et al. Experimental and numerical investigation of the FRP shear mechanism for concrete sandwich panels[J]. *Journal of Composites for Construction*,2015,19(5):04014083.
- [48] 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.
- [49] CAO Y,FANG H, SHI H Y, et al. Experimental and numerical studies on shear behavior of lattice-web reinforced PET foam sandwich panels[J]. *Engineering Structures*,2023,290:116316.
- [50] 李方贤,李建新,肖民,等. 轻钢龙骨-泡沫混凝土复合墙板的抗冲击性能[J]. *硅酸盐通报*,2022,41(1):68 – 75.
- [51] MENG Q F,ZHANG X H,HAO H,et al. An investigation of impact resistance capacity of polypropylene(PP) added plasterboard subjected to soft-body impact[J]. *Composite Structures*,2021,275:114370.
- [52] TEKALUR S A, BOGDANOVICH A E, SHUKLA A. Shock loading response of sandwich panels with 3-D woven E-glass composite skins and stitched foam core[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(6):736 – 753.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。