

DOI:10.11784/tdxbz202505022

BFRP-MPCM 复合材料加固混凝土阻裂性能试验研究

李 伟^{1,2}, 谢 剑^{1,3}, 金凌翼¹, 佟成龙⁴

- (1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300354; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730070;
3. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300354;
4. 中建五局第三建设有限公司, 天津 300300)

摘要: 磷酸镁水泥砂浆(MPCM)具有凝结硬化快和黏结性能好等优点,在快速加固领域具有广阔的应用前景.基于材料-结构一体化设计思想,提出玄武岩纤维增强聚合物改性磷酸镁水泥砂浆(BFRP-MPCM)复合材料,包括微筋增强 MPCM 和复合增强 MPCM;通过 BFRP-MPCM 薄板 4 点弯曲试验,揭示玄武岩微筋和 BFRP 网格的协同增强机制,初选加固混凝土用复合材料类型及配比;通过外贴 BFRP-MPCM 薄层加固既有混凝土梁并开展 3 点弯曲试验,基于混凝土断裂理论,量化分析复合材料类型和被加固混凝土强度对 BFRP-MPCM 加固混凝土阻裂性能的影响规律,探究 BFRP-MPCM 对既有混凝土的阻裂加固机理.试验结果表明:纤维掺量 2.0%(体积分数)的微筋增强 MPCM 流动度可达 178 mm,纤维掺量 2.0%(体积分数)并配置 BFRP 网格的复合增强 MPCM 薄板(龄期 3 d)弯曲峰值荷载比素 MPCM 提高了 128%,峰值韧性指数为 173.65,适用于快速加固既有混凝土;复合增强 MPCM 中的玄武岩微筋主要影响试件弯曲受力前期,使试件破坏形态向延性破坏转变,BFRP 网格主要影响试件开裂后性能,显著提高 BFRP-MPCM 薄板的弯曲峰值荷载和韧性;BFRP-MPCM 加固试件的混凝土起裂滞后,配置 BFRP 网格使复合增强 MPCM 加固试件的起裂荷载应力强度因子比微筋增强 MPCM 加固试件提高 22%,复合增强 MPCM 加固试件的裂缝失稳扩展破坏过程显著延长,荷载-裂缝口张开位移曲线呈现双峰形态;复合增强 MPCM 加固混凝土阻裂性能提高,起裂荷载应力强度因子、阻裂荷载应力强度因子和断裂能相比未加固混凝土分别增大了 3.9 倍、18.9 倍和 37.2 倍;复合增强 MPCM 加固层对不同强度混凝土阻裂性能均具有良好的提升效果.

关键词: 磷酸镁水泥砂浆;玄武岩微筋;BFRP 网格;混凝土加固;阻裂性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)04-0430-13

Experimental Study on Crack Resistance Performance of Concrete Strengthened with BFRP-MPCM Composite Materials

Li Wei^{1,2}, Xie Jian^{1,3}, Jin Lingyi¹, Tong Chenglong⁴

- (1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China;
2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
3. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300354, China;
4. The 3rd Construction Co., Ltd. of China Construction 5th Engineering Bureau, Tianjin 300300, China)

Abstract: Owing to its advantages of fast setting and hardening, as well as a good bonding performance, magnesium phosphate cement mortar(MPCM) has a broad application prospect in the field of rapid reinforcement. Based on the idea of material-structure integrated design, basalt fiber reinforced polymer modified MPCM(BFRP-MPCM) composites including basalt minibar reinforced MPCM and combined reinforced MPCM were proposed in this paper. Four-point bending tests on BFRP-MPCM sheets were carried out to reveal the collaborative enhancement mechanism between the basalt minibar and BFRP grid, and the types and proportions of composites for strengthening

收稿日期: 2025-05-13; 修回日期: 2025-09-11.

作者简介: 李 伟(1978—),男,博士研究生,讲师,liwe-605@lzjtu.edu.cn.

通信作者: 谢 剑, xiejian@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52068043); 甘肃省建设科技攻关项目(JKR2021-07).

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52068043), the Construction Science and Technology Project of Gansu Province, China(No. JKR2021-07).

concrete were preliminarily selected. Afterwards, the existing concrete beams were strengthened by bonding BFRP-MPCM sheets, and three-point bending tests were conducted. Based on the fracture mechanics of concrete, the effects of BFRP-MPCM sheet types and the existing concrete strength on the crack resistance performance of strengthened concrete were quantitatively analyzed, and the reinforcement mechanism of BFRP-MPCM for the existing concrete was also studied. Experimental results show that the fluidity of basalt minibar reinforced MPCM with fiber content of 2.0% (volume fraction) was 178 mm, and the flexural peak load of combined reinforced MPCM sheet (age 3 d) with fiber content of 2.0% (volume fraction) and BFRP grid was 128% higher than that of the plain MPCM, with a peak toughness index of 173.65. Therefore, the composite materials were suitable for rapid reinforcement of the existing concrete. The effects of basalt minibars in the combined reinforced MPCM were mainly at the early stage of the stress development process, causing the failure mode of the specimen to transit into a ductile failure. In comparison, the BFRP grid mainly affected the post-cracking performance of the specimen, which significantly improved the flexural peak load and toughness of the BFRP-MPCM sheet. The concrete crack initiation of specimens strengthened with BFRP-MPCM was delayed. For the specimen strengthened with combined reinforced MPCM, its stress intensity factor under crack initiation load was 22% higher than that of the specimen strengthened with basalt minibar reinforced MPCM owing to the configuration of BFRP grid. In addition, the corresponding failure process of crack instability propagation was significantly prolonged, and the load-crack mouth opening displacement curves presented a double-peak shape. The crack resistance performance of the concrete strengthened with combined reinforced MPCM sheets were improved; for example, the stress intensity factor under crack initiation load, the stress intensity factor under crack resistance load and the fracture energy of the concrete specimen strengthened with combined reinforced MPCM sheet were improved by 3.9, 18.9 and 37.2 times respectively compared with those of the concrete specimen which was not strengthened. By bonding the combined reinforced MPCM sheet to concrete, the crack resistance performances of the existing concrete with different types of strength were all well improved.

Keywords: magnesium phosphate cement mortar (MPCM); basalt minibar; basalt fiber reinforced polymer (BFRP) grid; concrete reinforcement; crack resistance performance

混凝土是 1 种准脆性材料,具有易开裂、韧性差和裂缝宽度难控制等缺点^[1-2]. 提高既有混凝土阻裂性能对于城市更新建设与韧性城市规划均具有重要的工程意义. 同时,交通生命线系统需严格控制中断时间,快速提升混凝土性能成为交通工程结构加固的关键需求.

因施工便捷和对原结构尺寸影响小,外贴纤维增强聚合物 (fiber reinforced polymer, FRP)^[3-4]或水泥基材料薄层^[5-6]是当前广泛应用的混凝土加固技术,众多学者对其增韧阻裂效果开展了研究. 范向前等^[3]发现 FRP 加固带裂缝混凝土梁的起裂荷载和失稳荷载均提高,FRP 对带裂缝混凝土梁阻裂加固效果显著. 朱榆等^[5]以超高韧性水泥基复合材料 (ultra-high toughness cementitious composite, UHTCC) 作为止裂带加固混凝土,利用 3 点弯曲试验研究了 UHTCC 在混凝土裂缝扩展过程中的阻裂作用. 然而,上述加固技术均存在一定的弊端,如外贴 FRP 易剥离且对黏结界面要求高,而 UHTCC 等高延性水泥基材料因黏结硬化慢,不能很好地达到快速补强的目标. 既有混凝土结构性能提升对外贴薄层加固技术提出了更高要求.

由磷酸镁水泥和细集料配置的磷酸镁水泥砂浆 (magnesium phosphate cement mortar, MPCM) 具有凝结硬化快和黏结性能强等优点,可用于快速加固^[7-8],但 MPCM 的脆性特征限制了其更好的工程应用^[9-10]. 为此,部分学者利用碳纳米管^[11]、聚乙烯醇^[12]和钢纤维^[13]等纤维对磷酸镁水泥基材料进行改性,发现掺加纤维可以在多种尺度上增韧磷酸镁水泥基材料. 玄武岩微筋是 1 种带有表面肋纹的新型树脂基加捻纤维,在 MPCM 材料改性方面也取得了较好的应用效果^[14]. 陈柯宇等^[15]通过疲劳试验发现玄武岩微筋表面肋纹可以提高纤维与基体间的机械咬合作用,使得玄武岩微筋增强 MPCM 具有作为交通工程修复材料所需的抗疲劳性能. 笔者课题组在前期研究中发现,将玄武岩纤维增强聚合物 (basalt fiber reinforced polymer, BFRP) 网格沿钢纤维增强 MPCM 基体主拉方向布置,可进一步定向提升钢纤维增强 MPCM 基体的力学性能^[16]. 然而,钢纤维存在自重大、易结团和锈蚀敏感性等不足,使钢纤维增强 MPCM 在结构加固工程中使用受限.

基于上述研究成果和材料-结构一体化设计思想^[17],本文以 MPCM 为基体,采用玄武岩微筋和

BFRP 网格对其进行混合增强,制备新型水泥基快速加固复合材料 BFRP-MPCM;通过薄板 4 点弯曲试验,测定 BFRP-MPCM 的弯曲承载能力和韧性,评价其加固性能,揭示玄武岩微筋和 BFRP 网格的协同增强机制,确定薄层加固用 BFRP-MPCM 类型及配比;为了进一步评估 BFRP-MPCM 对既有混凝土的阻裂加固效果,通过开展 BFRP-MPCM 薄层加固既有混凝土梁 3 点弯曲试验,分析其裂缝发展全过程,探究玄武岩微筋和 BFRP 网格在提升混凝土阻裂性能中的协同工作机理,并基于混凝土断裂理论计算断裂参数,研究 BFRP-MPCM 类型和被加固混凝土强度对 BFRP-MPCM 加固混凝土阻裂性能的影响规律,为 BFRP-MPCM 在混凝土快速补强加固工程中的应用提供技术支撑。

1 试验准备

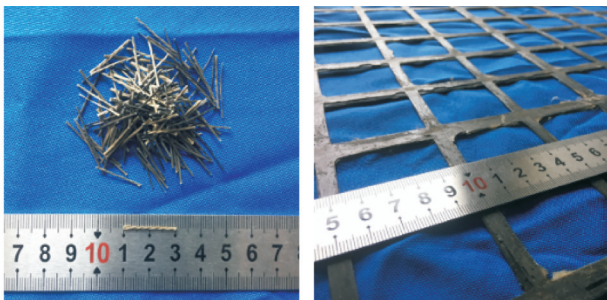
1.1 试验原材料

针对试验所用 MPCM,磷酸镁水泥、水、石英砂和硼砂的质量配合比为 1.00 : 0.15 : 0.60 : 0.02,其中磷酸镁水泥为贵州磷镁材料有限公司生产的磷酸镁 U 型水泥,石英砂选用 0.125~0.178 mm (80~120 目)市售普通石英砂,硼砂为天津市鼎盛鑫化工有限公司生产。为体现 MPCM 的快速补强材料属性,试验龄期取 3 d。参照《磷酸镁修补砂浆》^[18]测得 MPCM 性能指标如表 1 所示。玄武岩微筋(图 1(a))由浙江石金玄武岩纤维有限公司提供,BFRP 网格(图 1(b))由江苏绿材谷有限公司生产,性能指标分别见表 2 和表 3。

表 1 MPCM 性能指标

Tab.1 Performance indexes for MPCM

参数	数值
凝结时间/min	20
密度/(kg/m ³)	2 320
抗折强度/MPa	11.5
抗压强度/MPa	55.7



(a) 玄武岩微筋

(b) BFRP 网格

图 1 玄武岩纤维制品

Fig.1 Basalt fiber products

表 2 玄武岩微筋性能指标

Tab.2 Performance indexes for basalt minibar

参数	数值
长度/mm	20
直径/mm	0.8
密度/(g/cm ³)	2.1
抗拉强度/MPa	≥380

表 3 BFRP 网格性能指标

Tab.3 Performance indexes for BFRP grid

参数	数值
网格厚度/mm	1.0
弹性模量/GPa	25.37
抗拉强度/MPa	493
伸长率/%	1.9

1.2 BFRP-MPCM 复合材料比选

弯曲性能和韧性可作为衡量加固材料补强性能的重要指标^[19]。考虑到 BFRP-MPCM 复合材料拟应用于薄层加固工程,本文参照美国材料与试验协会标准 ASTM C 1018^[20]和文献[21],采用矩形薄板试件开展 4 点弯曲试验评估复合材料的弯曲性能,为加固混凝土用 BFRP-MPCM 复合材料提供比选依据。

参照文献[21]的试件设计方法,以 MPCM 为基体,考虑玄武岩微筋掺量(体积分数分别为 0、1.0% 和 2.0%)和 BFRP 网格配置情况(0 层和 1 层)的影响,设计制作 4 组 BFRP-MPCM 复合材料薄板试件,具体试验参数见表 4,其中编号中的 F0、F1 和 F2 分别表示纤维掺量为 0、1.0% 和 2.0%,G0 和 G1 分别表示 0 层和 1 层。后文未做特殊说明时,掺量均为体积分数。

试件尺寸为 400 mm × 100 mm × 20 mm,每组设 3 个平行件。

表 4 BFRP-MPCM 薄板参数设计

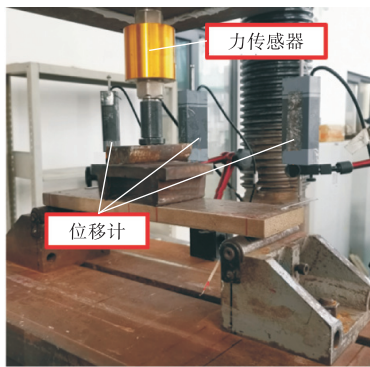
Tab.4 Parameter design of BFRP-MPCM sheets

试件编号	玄武岩微筋掺量/%	BFRP 网格层数
F0G0	0	0
F1G0	1.0	0
F2G0	2.0	0
F2G1	2.0	1

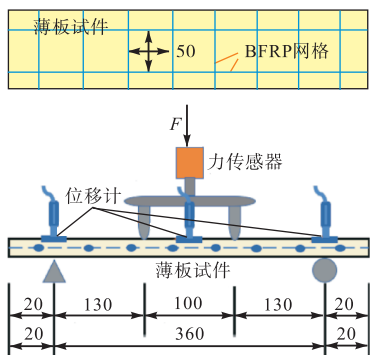
BFRP-MPCM 薄板试件制作流程为:首先,使用大扭矩手持式搅拌机将 MPCM 干料搅拌 1 min;然后,加水搅拌 2 min;最后,依据试验参数添加纤维分别制作不同类型 BFRP-MPCM 试件。最后 1 步的具体步骤为:不添加纤维继续搅拌 2 min,得到素 MPCM(实测流动度^[18]达 247 mm 且黏聚性良好),浇筑于钢模内制作试件 F0G0;在 MPCM 浆体中缓慢均匀地撒入玄武岩微筋,继续搅拌 2 min,制成微筋增强 MPCM(其中纤维掺量 2.0%的微筋增强 MPCM 实

测流动度达 178 mm), 浇筑于钢模内制作试件 F1G0 和 F2G0; 按照前述步骤制作微筋增强 MPCM 后, 在模具内先浇筑 5 mm 厚的微筋增强 MPCM, 铺设 BFRP 网格后再浇筑 15 mm 厚微筋增强 MPCM, 抹平收光试件表面, 制成复合增强 MPCM 试件 F2G1. BFRP-MPCM 试件均于浇筑完毕 2 h 后脱模并置于室内常温养护 3 d. 需要说明的是, 由于制作 BFRP-MPCM 所使用的 MPCM 浆体具有良好的流动性和黏聚性, 玄武岩微筋分散性优良; MPCM 浆体在掺入纤维后, 使用大扭矩搅拌机对其进行高剪切力搅拌. 以上因素使大掺量玄武岩微筋在 MPCM 浆体中也能够分散均匀, 这可以保证试件的浇筑质量和性能稳定性.

BFRP-MPCM 复合材料薄板 4 点弯曲试验装置如图 2 所示. 试验以位移控制模式 (0.5 mm/min) 进行加载, 加载设备使用电液伺服压力试验机, 试件跨中挠度 (后文简称为挠度) δ 和荷载大小 F 分别由位移计和力传感器量测.



(a) 实景照片



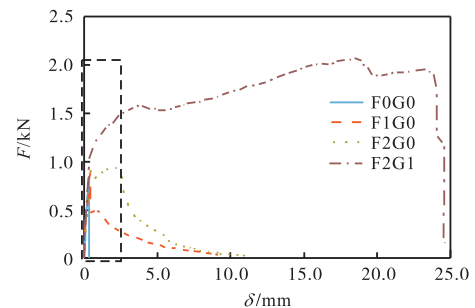
(b) 示意(单位:mm)

图 2 薄板 4 点弯曲试验装置

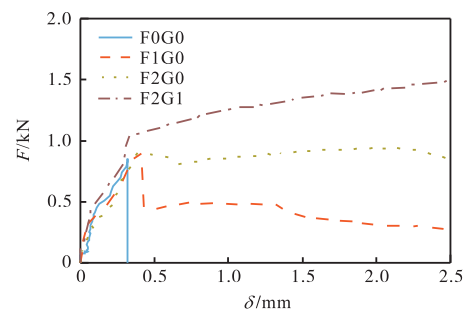
Fig.2 Four-point bending test device for sheet

各组试件荷载-挠度典型曲线如图 3 所示. 由图 3 可见, 各条荷载-挠度曲线在起始阶段基本呈线性上升; 随着荷载增大, 曲线走势出现差异. 素 MPCM 试件 (F0G0) 的荷载-挠度曲线仅有上升段, 试件在弯

曲荷载达到峰值后瞬间破坏. 由于存在纤维桥接作用, 玄武岩微筋增强 MPCM 试件 (F1G0 和 F2G0) 不再瞬间发生破坏, 其荷载-挠度曲线出现明显的软化下降段; MPCM 基体开裂后, 开裂面处弯拉应力主要由玄武岩微筋承担^[14]. 对于纤维掺量为 1.0% 的试件 F1G0 而言, 其弯曲荷载突降并维持在较低水平, 这是由于纤维掺量小, 纤维增强应力不足以弥补 MPCM 基体应力软化下降值; 纤维掺量提高为 2.0% 时, 纤维桥接作用增大, 试件 F2G0 荷载-挠度曲线出现 2 次上升段, 当纤维完全脱黏开始滑移后, 软化下降段呈凹曲线形态, 直至破坏. 对于同时掺加玄武岩微筋和设置 BFRP 网格的复合增强试件 (F2G1) 而言, MPCM 基体开裂后, 开裂面处弯拉应力由玄武岩微筋和 BFRP 网格共同承担, 荷载-挠度曲线弯折, 呈现应变硬化现象, 曲线下包围面积显著扩大; 随着荷载增加, 试件多缝开裂, 弯曲刚度不断降低, 其中 1 条裂缝发展成主裂缝 (如图 4 所示); 当裂缝处纤维脱黏后, 弯拉应力转由 BFRP 网格主要承担, 此阶段荷载-挠度曲线近似呈线性上升; 最终, 裂缝处 BFRP 网格被拉断, 试件破坏.



(a) 荷载-挠度曲线



(b) 图(a)的局部放大

图 3 BFRP-MPCM 薄板荷载-挠度曲线

Fig.3 Load-deflection curves for BFRP-MPCM sheets

MPCM 薄板 4 点弯曲开裂状态和峰值状态的测量结果分别如图 5 和图 6 所示. 由图 5 和图 6 可知, 掺入玄武岩微筋和配置 BFRP 网格有助于提升 MPCM 薄板的弯曲荷载和变形能力, 且峰值状态下的增强效果要优于开裂状态下的增强效果.

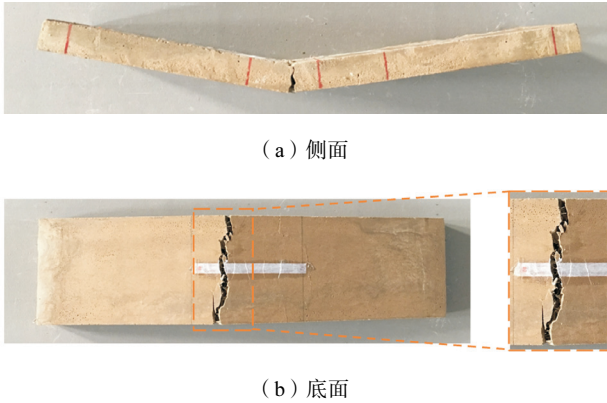


图 4 复合增强 MPCM 薄板弯曲破坏形态

Fig.4 Bending failure of combined reinforced MPCM sheet

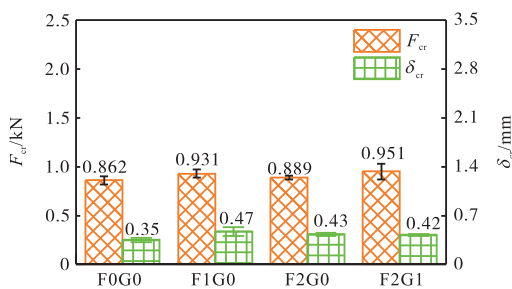


图 5 开裂荷载与开裂挠度

Fig.5 Cracking load and cracking deflection

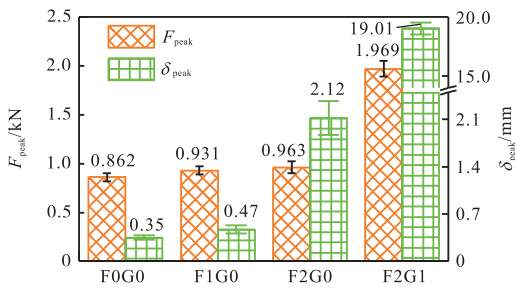


图 6 峰值荷载与峰值挠度

Fig.6 Peak load and peak deflection

在开裂状态时,相较于素 MPCM 薄板试件 (F0G0),纤维掺量为 1.0% 和 2.0% 的微筋增强试件 F1G0 和 F2G0 的开裂荷载 F_{cr} 分别提高了 8% 和 3%, 掺加玄武岩微筋且配置 BFRP 网络的复合增强试件 (F2G1) 的 F_{cr} 提高了 10%; 微筋增强试件和复合增强试件的开裂挠度 δ_{cr} 相对素 MPCM 试件的提高幅度接近,这是因为试件在开裂临界状态的弯曲性能主要受玄武岩微筋影响,试件开裂时分散在试件开裂处的玄武岩微筋可桥接裂缝并限制其开展。

在峰值状态时, F1G0、F2G0 和 F2G1 试件的峰值荷载 F_{peak} 相比试件 F0G0 分别提高了 8%、12% 和 128%, 峰值挠度 δ_{peak} 相较于试件 F0G0 分别提高了 0.3 倍、5.1 倍和 53.3 倍。复合增强试件 F2G1 的峰值

荷载和峰值挠度均显著提升,这是因为当试件弯曲达到峰值状态时,玄武岩微筋随裂缝扩展脱黏拔出而退出工作;此时,主要由 BFRP 网格承担试件的弯拉应力,直至 BFRP 网格被拉断。沿试件主拉应力方向布置的 BFRP 网格可显著提高试件开裂后的弯曲荷载和变形能力。

为进一步评价 BFRP 对 MPCM 韧性的改善效果,本文依据 ASTM C 1018^[20]和文献[22]计算了峰值韧性指数 (T_{peak})。试件 F0G0、F1G0、F2G0 和 F2G1 的 T_{peak} 分别为 1.00、1.53、10.35 和 173.65,表明掺加玄武岩微筋和配置 BFRP 网格可提高 BFRP-MPCM 复合材料的韧性,配置 BFRP 网格对韧性的提高幅度最大。这是由于玄武岩微筋的桥接作用能够抑制裂缝扩展,减弱试件破坏时的脆性特征^[14];复合增强 MPCM 在掺入玄武岩微筋的基础上增配 BFRP 网格,当玄武岩微筋拔出后,BFRP 网格可继续承担试件裂缝处的弯拉应力,使荷载-挠度曲线更加饱满,显著提高了复合增强 MPCM 的韧性。

综上所述,掺加玄武岩微筋和配置 BFRP 网络均可提升 MPCM 薄板的弯曲性能和裂缝控制能力。玄武岩微筋桥接作用主要影响试件弯曲前期受力,随着微筋掺量增大,试件的开裂荷载、开裂位移和峰值荷载略有增加,当第 2 次上升段峰值荷载超过开裂荷载时,试件的峰值位移大幅提高;在掺加玄武岩微筋的基础上增配 BFRP 网格主要影响试件开裂后的弯曲性能,显著提升了试件弯曲峰值荷载和韧性。BFRP-MPCM 复合材料薄板韧性提升,可用于混凝土快速加固,其中纤维掺量为 2.0% 的微筋增强薄板在第 2 次上升段峰值荷载超过开裂荷载,试件的韧性提升较为显著;同时掺加 2.0% 玄武岩微筋和配置 1 层 BFRP 网络的复合增强 MPCM 薄板 (龄期为 3 d) 的弯曲峰值荷载和韧性最高。

2 BFRP-MPCM 加固混凝土断裂试验设计

2.1 试件设计与制作

参照文献[5],本文以薄层加固带预制裂缝梁式试件(见图 7)的方式来评估 BFRP-MPCM 加固混凝土的阻裂效果。依据《水工混凝土断裂试验规程》^[23]开展 3 点弯曲试验,考虑的试验变量为 BFRP-MPCM 类型 (F2G0 和 F2G1) 和被加固混凝土强度 (C20 和 C40)。本试验设计 4 组共计 12 个试件,其中 1 组为未加固试件 (编号为 C40), 3 组为 BFRP-MPCM 加固混凝土试件 (编号 C40-F2G0 为微

筋增强 MPCM 加固试件, 编号 C40-F2G1 和 C20-F2G1 为复合增强 MPCM 加固试件).

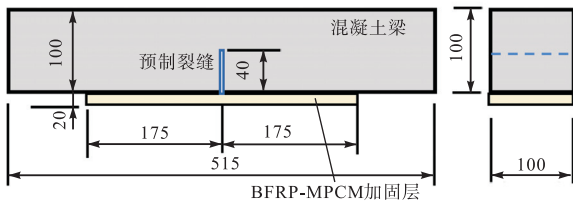


图7 预制裂缝梁式试件示意(单位:mm)

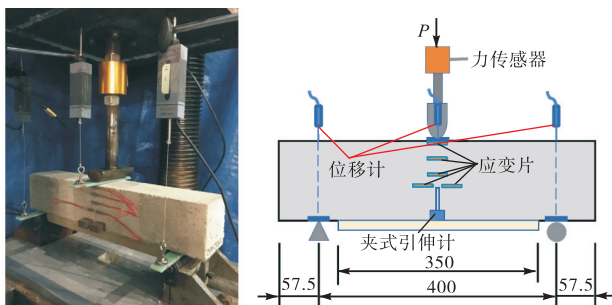
Fig.7 Schematic of beam specimen with pre-crack (unit: mm)

为保证加固层与被加固混凝土共同工作, 加固区长度延伸至支座边缘, 加固宽度与混凝土试件底面宽度相同. 加固层厚按照被加固混凝土试件截面高度的 1/5 取为 20 mm, 以接近实际的薄层加固工程应用. 拟被加固的混凝土试件在室内自然养护 1 a, 试验时实测其立方体抗压强度分别为 35.7 MPa (C20) 和 45.4 MPa (C40).

BFRP-MPCM 加固混凝土试件制作步骤为: 首先, 对预制混凝土梁底面拟加固区进行凿毛处理(灌砂法测得平均粗糙度为 0.80 mm)并在跨中锯切裂缝(裂缝高度与宽度分别为 40.0 mm 和 2.0 mm); 然后, 制作 BFRP-MPCM 复合材料; 最后, 将 BFRP-MPCM (对于复合增强 MPCM 材料还需预先铺设 BFRP 网格)浇筑于预先支设在混凝土梁底加固位置的模具内, 2 h 后脱模并置于室内常温养护 3 d.

2.2 试验装置与量测方案

3 点弯曲试验在天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室进行, 试验装置见图 8. 使用电液伺服压力试验机进行加载, 加载模式为位移控制 (0.1 mm/min), 外加荷载(其大小为 P)通过联结于加载端的 50 kN 力传感器量测. 利用位移传感器和夹式引伸计分别测量试件挠度 δ 和裂缝口张开位移 (crack mouth opening displacement, CMOD). 在加固



(a) 实景照片

(b) 示意(单位:mm)

图8 断裂试验装置

Fig.8 Fracture test device

层底面、混凝土裂缝尖端两侧及裂缝中心延长线上布置应变片监测混凝土断裂过程.

3 试验结果与分析

3.1 断裂破坏现象

在大小为 P 的荷载作用下, 未加固试件 C40 首先在预制裂缝尖端出现受拉裂缝而形成断裂过程区, 随后发生裂缝失稳扩展破坏. BFRP-MPCM 加固混凝土试件 (C40-F2G0、C20-F2G1 和 C40-F2G1) 断裂破坏始于加固层底面受拉开裂, 由于纤维桥接作用, BFRP-MPCM 加固层延缓了混凝土在预制裂缝尖端处的起裂和断裂过程区的裂缝延伸进程, 加固试件最终破坏均为加固层开裂失效引发的混凝土裂缝失稳扩展破坏. 破坏过程中, 试件 C40-F2G0 加固层在断面处的玄武岩微筋不断脱黏并被拔出, 致使其对混凝土的阻裂作用削弱; 试件 C20-F2G1 和 C40-F2G1 的复合增强 MPCM 加固层中同时设置了玄武岩微筋和 BFRP 网格两种增强材料, 当玄武岩微筋被拔出后, BFRP 网格可提供全部桥接作用, 两者在不同阶段桥联裂缝, 提升了对混凝土的阻裂效果. 破坏过程中, BFRP 网格与 MPCM 界面以及 BFRP-MPCM 加固层与既有混凝土界面均黏结良好, 如图 9 所示, 这表明界面黏结力可保证各部分协同工作.

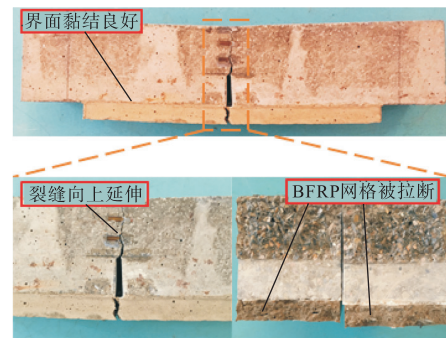


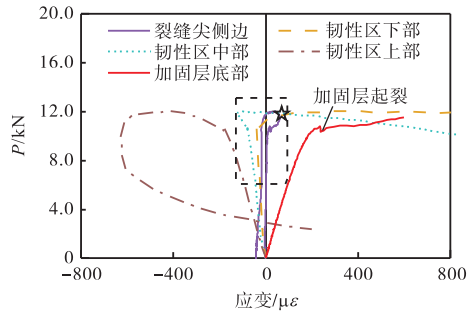
图9 复合增强 MPCM 加固混凝土断裂破坏形态

Fig.9 Fracture failures of concrete strengthened by combined reinforced MPCM

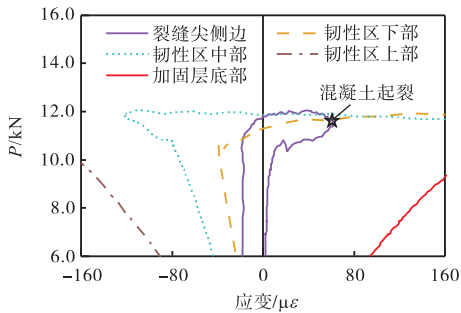
3.2 荷载-应变曲线

图 10 为 BFRP-MPCM 加固混凝土典型试件的荷载-应变曲线. 由图 10 可见, BFRP-MPCM 加固层底面和混凝土预制裂缝尖端侧边应变片测量的拉应变值均随荷载增大而增大, 加固层底面拉应变增加速度快于裂缝尖侧边处混凝土拉应变增加速度; 当荷载增大到一定数值时, 加固层底面拉应变曲线偏折, 表明加固层底面受拉开裂; 随后, 裂缝尖侧边混凝土拉应变增加速度加快, 当该拉应变出现反向变化时, 由

应变片法^[24]可知,此时预制裂缝尖端处混凝土起裂,对应的荷载即为混凝土起裂荷载;当混凝土在预制裂缝尖端起裂后,裂缝上部韧性区内的应变片由下至上依次出现拉应变,裂缝在韧性区内向上不断延伸,直至试件破坏.



(a) 荷载-应变曲线



(b) 图(a)的局部放大

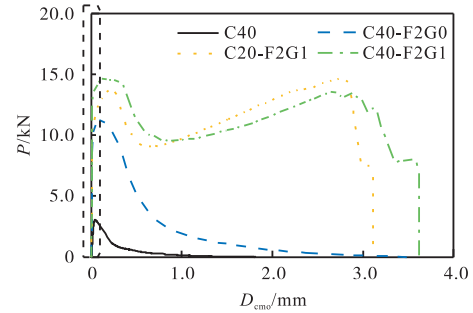
图 10 典型荷载-应变曲线

Fig.10 Typical load-strain curves

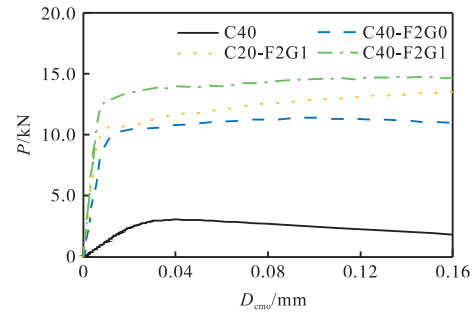
3.3 荷载-位移曲线

BFRP-MPCM 加固混凝土断裂试验得到的荷载-位移曲线如图 11 所示,其中图 11(a)和(c)分别为荷载-裂缝口张开位移曲线和荷载-挠度曲线.由图 11 可知,荷载-挠度曲线形状与荷载-裂缝口张开位移曲线大致相同,后续分析将主要基于荷载-裂缝口张开位移曲线进行.依据曲线的形状,荷载-裂缝口张开位移曲线全过程可划分为 3 个典型阶段,即线性上升段(第 I 阶段)、非线性上升段(第 II 阶段)和破坏段(第 III 阶段),曲线阶段划分示意如图 12 所示.

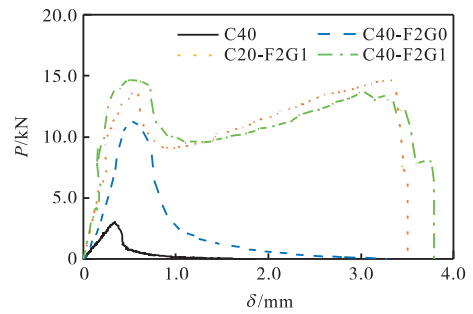
在起始加载阶段,荷载-裂缝口张开位移曲线均呈线性上升(第 I 阶段).通过比较图 11(a)所示各条曲线可知,未加固试件(C40)线性上升段斜率最小,微筋增强 MPCM 加固试件(C40-F2G0)次之,复合增强 MPCM 加固试件(C20-F2G1 和 C40-F2G1)的线性上升段斜率大于 C40 和 C40-F2G0 的对应值.加固试件的线性段斜率大于未加固试件的对应值,这是由于加固层增大了试件截面高度而使得刚度得到了提高;复合增强 MPCM 加固试件的线性段斜率大于微筋增



(a) 荷载-裂缝口张开位移曲线



(b) 图(a)的局部放大



(c) 荷载-挠度曲线

图 11 典型试件荷载-位移曲线

Fig.11 Typical load-displacement curves of specimens

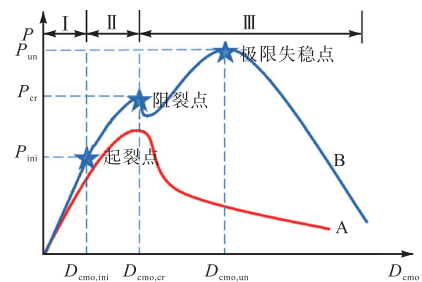


图 12 荷载-裂缝口张开位移曲线阶段划分示意

Fig.12 Schematic of stage division for P - D_{cmo} curves

强 MPCM 加固试件的对应值,这是因为复合增强 MPCM 加固层在掺入玄武岩微筋的同时又增配了 BFRP 网格,依据复合材料理论,其刚度最大,对试件弯曲刚度的提高效果最显著.随着荷载的增加,荷载-裂缝口张开位移曲线偏折,此时未加固试件在预制裂缝尖端起裂,荷载-裂缝口张开位移曲线上的对应点为起裂点($D_{cmo,ini}$, P_{ini});加固试件此时仅在

BFRP-MPCM 加固层底面开裂,随后混凝土预制裂缝尖端处才出现微小裂缝,混凝土起裂滞后,表明加固层中玄武岩增强材料的桥接作用^[19]延缓了加固试件在预制裂缝尖端处的起裂。

在混凝土起裂后,荷载-裂缝口张开位移曲线进入第Ⅱ阶段。由于混凝土微裂缝处黏聚力和加固层纤维桥接均可提供阻裂作用^[5],在预制裂缝尖端形成混凝土断裂过程区。当荷载继续增加至阻裂临界状态时,混凝土裂缝扩展过程即将进入破坏阶段,荷载-裂缝口张开位移曲线出现峰值,此峰值点可定义为阻裂点^[25]($D_{\text{cmo,cr}}, P_{\text{cr}}$);随后,荷载-裂缝口张开位移曲线进入第Ⅲ阶段。

在荷载-裂缝口张开位移曲线的第Ⅲ阶段,未加固试件(C40)和微筋增强 MPCM 加固试件(C40-F2G0)的荷载-裂缝口张开位移曲线均呈软化形态,荷载持续下降(如图 12 中曲线 A 所示),曲线峰值点唯一,此峰值点也是试件 C40 和 C40-F2G0 的混凝土裂缝极限失稳点($D_{\text{cmo,un}}, P_{\text{un}}$),由于裂缝处混凝土黏聚力及微筋增强 MPCM 内的玄武岩微筋拔出作用提供的阻裂效应不足以抑制混凝土裂缝的失稳扩展,荷载随裂缝的扩展而持续减小。复合增强 MPCM 加固试件(C20-F2G1 和 C40-F2G1)的荷载-裂缝口张开位移曲线呈现双峰形态,如图 12 中曲线 B 所示,荷载陡降后出现再次上升,裂缝继续平稳开展,荷载-裂缝口张开位移曲线形成第 2 峰值,该峰值点为复合增强 MPCM 加固混凝土试件的裂缝极限失稳点。形成双峰形态的原因是复合增强 MPCM 加固层中的玄武岩微筋和 BFRP 网格在提升混凝土阻裂性能中的协同工作机制,如图 13 所示,其中局部放大图里只显示了有代表性的部分微筋。玄武岩微筋和 BFRP 网格存在纤维桥接作用,能够阻裂加固混凝土,玄武岩微筋

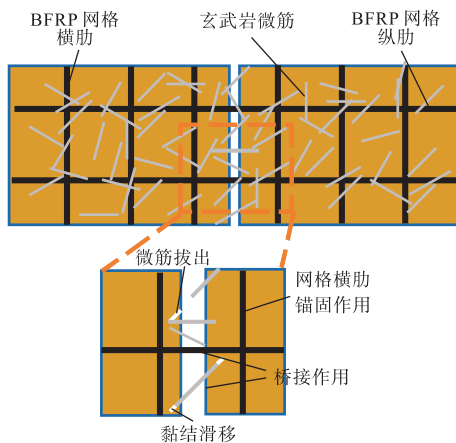
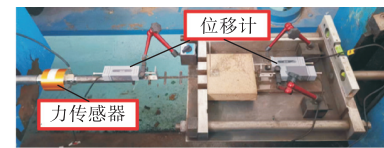


图 13 玄武岩微筋与 BFRP 网格协同工作机制

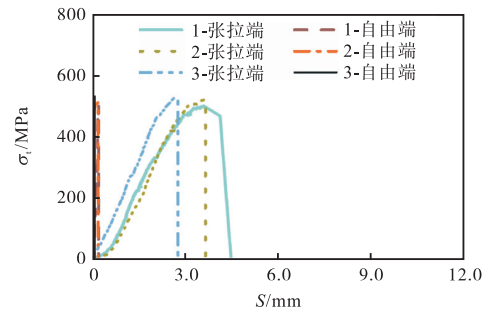
Fig.13 Cooperative working mechanism between basalt minibar and BFRP grid

通过滑移过程中的微筋-MPCM 界面黏结力形成桥接作用,随着裂缝扩展,微筋被拔出,界面黏结力减小,微筋桥接作用逐渐削弱,荷载-裂缝口张开位移曲线形成第 1 峰;BFRP 网格则是由网格横肋锚固纵肋,利用跨越裂缝的纵肋提供桥接作用,在裂缝进一步扩展过程中,纵肋桥接作用逐渐显著,直至网格纵肋被拉断,荷载-裂缝口张开位移曲线形成第 2 峰。

参照《纤维增强复合材料工程应用技术标准》^[26]测试了 BFRP 网格在 MPCM 中的黏结性能,如图 14 所示,其中图 14(b)为 BFRP 网格拉应力-滑移曲线。



(a) 装置照片



(b) BFRP 网格拉应力-滑移曲线

图 14 BFRP 网格黏结性能测试

Fig.14 Bonding test for BFRP grid

由图 14 可见,BFRP 网格拉应力随张拉端滑移量增大而增大,网格峰值拉应力为 517.83 MPa,网格张拉端峰值滑移量为 3.63 mm,最终 BFRP 网格被拉断。根据文献[14],纤维埋深为 10 mm 的玄武岩微筋在 MPCM 中发生拔出破坏,玄武岩微筋峰值拉应力为 231.18 MPa,峰值滑移量为 1.43 mm。由于玄武岩微筋峰值滑移量比 BFRP 网格的峰值滑移量小,两者在桥接裂缝时,玄武岩微筋先拔出失效,BFRP 网格后被拉断。

BFRP-MPCM 加固混凝土断裂试验测试结果如表 5 所示,每组结果取 3 个平行试件的平均值。

3.4 断裂参数

I 型裂缝端部应力强度因子 K_I 能反映裂缝端部局部区域内应力场的强弱情况,可作为混凝土裂缝稳定性的评价指标^[5]。在裂缝扩展过程中,荷载应力强度因子 $K_{I,P}$ 与材料的裂缝扩展阻力相对应。本文针对 BFRP-MPCM 加固混凝土断裂,依据混凝土断裂力学理论计算荷载(大小为 P)在混凝土裂缝尖端处

表 5 断裂试验测量结果

Tab.5 Measurement results of fracture tests

试件编号	P_{ini}/kN	C_V	P_{cr}/kN	C_V	P_{un}/kN	C_V	$D_{emo,ini}/mm$	C_V	$D_{emo,cr}/mm$	C_V	$D_{emo,un}/mm$	C_V
C40	2.616	0.09	3.476	0.13	3.476	0.13	0.020	0.03	0.044	0.08	0.044	0.08
C40-F2G0	10.699	0.06	11.551	0.04	11.551	0.04	0.028	0.08	0.108	0.15	0.108	0.15
C20-F2G1	11.937	0.04	14.085	0.04	14.268	0.04	0.062	0.07	0.199	0.02	2.720	0.03
C40-F2G1	13.023	0.07	14.571	0.02	14.076	0.04	0.027	0.11	0.212	0.14	2.958	0.12

注: P_{ini} 、 P_{cr} 和 P_{un} 分别为起裂点、阻裂点和极限失稳点所对应的荷载大小; $D_{emo,ini}$ 、 $D_{emo,cr}$ 和 $D_{emo,un}$ 分别为起裂点、阻裂点和极限失稳点所对应的混凝土裂缝口张开位移大小; C_V 为变异系数, 其为标准差和算术平均值的比值。

的应力强度因子 $K_{I,P}$, 以评价 BFRP-MPCM 加固层对混凝土的阻裂效果。

在 BFRP-MPCM 加固混凝土 3 点弯曲梁试验中, BFRP-MPCM 加固作用可视为施加在混凝土梁底的 1 对相向的集中荷载^[5], 如图 15 所示。

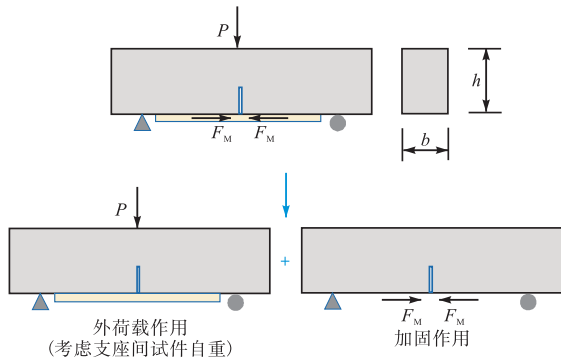


图 15 BFRP-MPCM 加固混凝土梁断裂计算简图

Fig.15 Simplified diagram of fracture calculation for BFRP-MPCM reinforced concrete beam

加固作用并未改变原有混凝土 3 点弯曲梁跨中截面弯矩最大的受力特点, BFRP-MPCM 加固混凝土 3 点弯曲梁试验是在荷载和加固作用双重影响下的混凝土断裂试验^[5,25]。由混凝土断裂力学可知, BFRP-MPCM 加固混凝土裂缝尖处的净应力强度因子可由荷载应力强度因子和加固作用应力强度因子叠加得到, 其中, 荷载应力强度因子可依据《水工混凝土断裂试验规程》^[23]进行计算^[24-25]。各组试件的荷载应力强度因子如图 16 所示。

在试件受力第 I 阶段末, 混凝土起裂, 荷载在混凝土裂缝尖端产生的应力强度因子 $K_{I,P}^{ini}$ (起裂荷载应力强度因子) 的计算式为

$$K_{I,P}^{ini} = \frac{1.5 \times 10^{-3} (P_{ini} + 0.5mg) S'(a_0)^{1/2}}{bh^2} f(\alpha_0) \quad (1)$$

$$f(\alpha_0) = \frac{1.99 - \alpha_0(1 - \alpha_0)(2.15 - 3.93\alpha_0 + 2.7\alpha_0^2)}{(1 + 2\alpha_0)(1 - \alpha_0)^{3/2}} \quad (2)$$

$$\alpha_0 = a_0 / h \quad (3)$$

式中: m 为支座间试件质量, 对于 BFRP-MPCM 加固试件而言, m 为混凝土梁与加固层质量之和, kg; g 为重力加速度值, m/s^2 ; S' 为试件跨度, m; b 和 h 分别为混凝土横截面的宽度与高度, m; a_0 为初始裂缝长度, m。

在试件受力第 II 阶段末, 荷载-裂缝口张开位移曲线达到阻裂点。由线性渐进叠加假定^[24]可知, 此时荷载应力强度因子 $K_{I,P}^{cr}$ (阻裂荷载应力强度因子) 按式(1)计算, 其中 P_{ini} 和 a_0 分别由 P_{cr} 和 a_{cr} 代替, a_{cr} 为等效裂缝长度, 参照文献[3]计算。

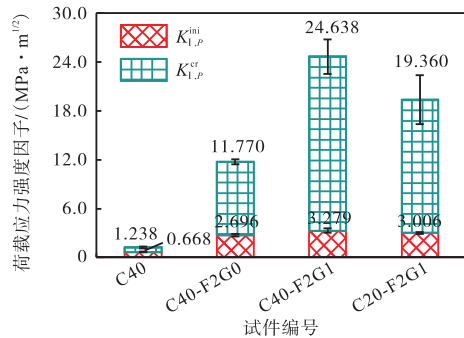


图 16 荷载应力强度因子

Fig.16 Stress intensity factors under load

试件受力第 III 阶段主要表现试件在断裂破坏过程中的耗能能力, 通过计算第 III 阶段末的断裂能 G_f 评价外贴 BFRP-MPCM 加固混凝土的断裂耗能能力。各组试件的断裂能如图 17 所示。

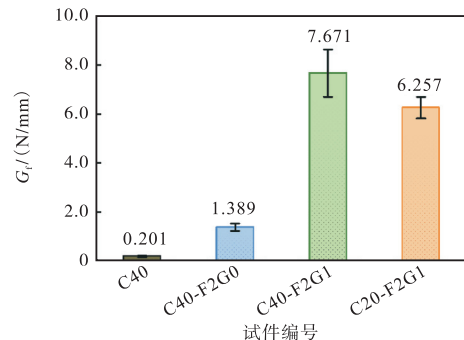


图 17 试件的断裂能

Fig.17 Fracture energy of specimens

断裂能 G_f 的计算式^[24]为

$$G_f = \frac{W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (4)$$

式中: W_0 为外荷载所做功, 取 $P-\delta$ 曲线下所包围面积, $N \cdot mm$; W_1 为支座间试件自重所做功, $N \cdot mm$; A_{lig} 为混凝土梁断裂韧性区面积, mm^2 .

3.5 阻裂性能的影响因素分析

混凝土的阻裂性能一般用起裂荷载、阻裂荷载、应力强度因子和断裂能等指标来分析评价^[5,25]. 本节将通过这几个指标来分析加固材料类型和被加固混凝土强度这两个因素对 BFRP-MPCM 加固混凝土阻裂性能的影响.

3.5.1 BFRP-MPCM 类型的影响

由表 5 可见, 与未加固试件(C40)相比, 微筋增强 MPCM 加固试件(C40-F2G0)和复合增强 MPCM 加固试件(C40-F2G1)的起裂荷载 P_{ini} 分别提高了 3.0 倍和 3.9 倍, 阻裂荷载 P_{cr} 分别提高了 2.3 倍和 3.2 倍, 对应的 $D_{cmo,cr}$ 分别提高了 1.4 倍和 3.8 倍, 表明外贴 BFRP-MPCM 加固层提高了混凝土的抗裂能力. 这是由于加固层存在纤维桥接, 改善了其对混凝土裂缝的闭合作用, 提升了混凝土裂缝平稳扩展能力, 尤其是复合增强 MPCM 加固层同时掺入玄武岩微筋和 BFRP 网格两种增强材料, 显著提高了其对混凝土的阻裂效果. 同时可以发现, 复合增强 MPCM 加固试件的起裂荷载 P_{ini} 比微筋增强 MPCM 加固试件提升了 22%, 相比 BFRP-MPCM 薄板弯曲试验中 BFRP 网格对试件起裂前性能的影响更加显著. 这是由于 BFRP-MPCM 加固层先于被加固混凝土起裂, 加固试件混凝土起裂时, 加固层表现为 BFRP-MPCM 开裂后性能; 此时, BFRP 网格对其影响显著提高, BFRP-MPCM 加固层中的玄武岩微筋和 BFRP 网格共同提供桥接作用抑制混凝土起裂, 提高了加固试件的起裂荷载.

试件 C40、C40-F2G0 和 C40-F2G1 的起裂荷载与阻裂荷载比值 (P_{ini}/P_{cr}) 分别为 0.75、0.93 和 0.89, 两组加固试件的 P_{ini}/P_{cr} 均大于未加固试件的对应值, 加固试件的起裂荷载更接近其阻裂荷载, 这表明 BFRP-MPCM 加固混凝土起裂时刻推迟, 阻裂效应增强. C40-F2G1 的 P_{ini}/P_{cr} 低于 C40-F2G0 的对应值, 这是由于加固层增配 BFRP 网格进一步提升了阻裂荷载 P_{cr} , 改善了复合增强 MPCM 加固混凝土试件的延性.

由图 16 可知, 试件 C40-F2G0 和 C40-F2G1 的起裂荷载应力强度因子 $K_{I,P}^{ini}$ 比试件 C40 的对应值分别增大了 3.0 倍和 3.9 倍, 阻裂荷载应力强度因子

$K_{I,P}^{cr}$ 分别增大了 8.5 倍和 18.9 倍, 这表明外贴 BFRP-MPCM 加固层对混凝土具有显著的阻裂效应. 文献 [5] 使用 UHTCC 加固混凝土梁, 其中 20 mm 厚 UHTCC 加固混凝土试件的荷载应力强度因子 $K_{I,P}^{ini}$ 和 $K_{I,P}^{cr}$ 比未加固试件的对应值分别提升了 1.5 倍和 2.7 倍, 其荷载应力强度因子提升幅度不及 BFRP-MPCM 加固试件, 这表明 BFRP-MPCM 加固层对混凝土阻裂性能的提升效果更优.

未加固试件 C40 的 $K_{I,P}^{cr}$ 与 $K_{I,P}^{ini}$ 差值为 0.570 $MPa \cdot m^{1/2}$, 由三参数定律^[27]可知, 此差值为混凝土黏聚力在混凝土裂缝尖端所产生的约束应力强度因子; 加固混凝土试件 C40-F2G0 和 C40-F2G1 的对应差值分别为 9.074 $MPa \cdot m^{1/2}$ 和 21.359 $MPa \cdot m^{1/2}$, 远大于未加固试件, 这是因为外贴 BFRP-MPCM 加固层在混凝土裂缝尖端提供附加约束应力强度因子^[5], 可与混凝土黏聚力的约束应力强度因子叠加, 使加固后混凝土的阻裂性能大幅提升.

由图 17 可知, BFRP-MPCM 加固混凝土试件 C40-F2G0 和 C40-F2G1 的断裂能 G_f 分别达到 1.389 N/mm 和 7.671 N/mm , 比试件 C40 的对应值分别增大了 5.9 倍和 37.2 倍, 这表明 BFRP-MPCM 加固混凝土试件的断裂耗能能力提升, 其中复合增强 MPCM 加固试件 C40-F2G1 的断裂能提升最为显著. 混凝土断裂能是混凝土材料固有参数, 基本保持不变, 未加固试件 C40 的断裂能即为混凝土材料固有参数. BFRP-MPCM 加固混凝土的断裂能由混凝土材料断裂能和 BFRP-MPCM 加固作用耗能两部分组成, BFRP-MPCM 加固混凝土断裂能提升机制是 BFRP-MPCM 加固作用改变了混凝土的裂纹发展过程、破坏模式和能量耗散机制, 显著提高了 BFRP-MPCM 加固混凝土断裂过程中所消耗的能量. 与未加固试件 C40 相比, 试件 C40-F2G0 和 C40-F2G1 的断裂能分别增大了 1.188 N/mm 和 7.470 N/mm , 上述的断裂能增大量即为混凝土断裂过程中 BFRP-MPCM 加固作用所消耗的能量.

由以上结果可知, 敷设 BFRP-MPCM 加固层可提升混凝土的阻裂性能, 加固后的混凝土起裂荷载和阻裂荷载均增大, 外荷载应力强度因子 $K_{I,P}^{ini}$ 、 $K_{I,P}^{cr}$ 和断裂能 G_f 亦大幅提高. 由于复合增强 MPCM 加固层中的玄武岩微筋和 BFRP 网格可在不同阶段提供桥接作用, 复合增强 MPCM 加固混凝土的阻裂性能提升效果最为显著.

3.5.2 被加固混凝土强度的影响

由表 5 可知, 当被加固混凝土强度由 45.4 MPa

降低至 35.7 MPa 时,复合增强 MPCM 加固混凝土试件 C20-F2G1 的起裂荷载 P_{ini} 和阻裂荷载 P_{cr} 与 C40-F2G1 的对应值相比分别降低了 8% 和 3%。复合增强 MPCM 加固试件的 P_{ini} 和 P_{cr} 随被加固混凝土强度降低而降低,但变化幅度不大。这是由于复合增强 MPCM 加固试件的阻裂作用由混凝土自身材料性能和复合增强 MPCM 加固层附加约束共同提供,混凝土自身提供的阻裂作用随混凝土强度降低而降低,但复合增强 MPCM 弯曲性能好,且加固层至混凝土裂缝尖端的力臂大,其提供的附加约束对阻裂性能起主导作用,降低了混凝土强度对加固试件 P_{ini} 和 P_{cr} 的影响幅度。试件 C20-F2G1 与 C40-F2G1 的极限荷载 P_{um} 也十分接近,这是因为两组加固试件的加固层类型完全相同,且其最终破坏均由加固层中的 BFRP 网格拉断所控制。

由图 16 和图 17 可知,试件 C20-F2G1 的 $K_{I,P}^{ini}$ 和 $K_{I,P}^{cr}$ 比试件 C40-F2G1 的对应值分别降低了 8% 和 21%,表明复合增强 MPCM 加固试件的 $K_{I,P}^{ini}$ 和 $K_{I,P}^{cr}$ 随混凝土强度的降低而降低。试件 C20-F2G1 的断裂能 G_f 比试件 C40-F2G1 的对应值降低了 18%,这是因为混凝土自身的断裂耗能能力随混凝土强度降低而降低^[24]。

C20-F2G1 的 $K_{I,P}^{ini}$ 、 $K_{I,P}^{cr}$ 和 G_f 比未加固试件 C40 的对应值分别提高了 3.5 倍、14.6 倍和 30.1 倍。由于素混凝土断裂性能随混凝土强度降低而降低,未加固试件 C20 的 $K_{I,P}^{ini}$ 、 $K_{I,P}^{cr}$ 和 G_f 比试件 C40 的对应值小,因此可推断 C20 混凝土试件经复合增强 MPCM 加固后,断裂性能指标 $K_{I,P}^{ini}$ 、 $K_{I,P}^{cr}$ 和 G_f 相较于未加固的 C20 试件的对应值亦显著提高。由此可知,对于本试验中两种不同强度的混凝土试件,敷设复合增强 MPCM 加固层均可显著提高其阻裂性能。

4 结 论

通过 12 个 BFRP-MPCM 薄板 4 点弯曲试验和 12 个 BFRP-MPCM 加固混凝土断裂试验,研究了 BFRP-MPCM 复合材料加固对混凝土阻裂性能的影响规律,得到如下结论。

(1) 掺加玄武岩微筋和配置 BFRP 网格均可提升 MPCM 材料的弯曲性能,掺加玄武岩微筋主要影响试件破坏形态,使其由脆性破坏转变为延性破坏;配置 BFRP 网格对 BFRP-MPCM 的弯拉峰值荷载和韧性提升更显著。掺入 2.0% 玄武岩微筋并配置 BFRP 网格的 BFRP-MPCM 复合材料(复合增强 MPCM)薄板弯曲峰值荷载(龄期 3 d)相较于素磷酸

镁水泥砂浆的对应值提高了 128%,峰值韧性指数达到了 173.65,表明复合增强 MPCM 是 1 种性能优越的快速加固补强材料。

(2) BFRP-MPCM 加固混凝土试件的裂缝控制能力高,裂缝失稳扩展破坏过程显著延长,裂缝失稳时的裂缝口张开位移增大,荷载-位移曲线更为饱满。复合增强 MPCM 中的玄武岩微筋和 BFRP 网格在不同受力阶段桥联裂缝,使复合增强 MPCM 加固混凝土试件的荷载-裂缝口张开位移曲线呈现双峰形态。

(3) BFRP-MPCM 加固试件的混凝土起裂滞后,在混凝土起裂时加固层表现为 BFRP-MPCM 开裂后性能,BFRP 网格对其影响显著,与微筋增强 MPCM 加固试件的对应值相比,复合增强 MPCM 加固试件的起裂荷载应力强度因子 $K_{I,P}^{ini}$ 提高了 22%。

(4) 复合增强 MPCM 加固对混凝土阻裂性能提升显著。与素混凝土试件 C40 的对应值相比,复合增强 MPCM 加固混凝土试件 C40-F2G1 的起裂荷载应力强度因子 $K_{I,P}^{ini}$ 、阻裂荷载应力强度因子 $K_{I,P}^{cr}$ 和断裂能 G_f 分别增大了 3.9 倍、18.9 倍和 37.2 倍;复合增强 MPCM 加固对不同强度混凝土的阻裂性能提升效果良好。

参考文献:

- [1] Khalilpour S, Baniasad E, Dehestani M. A review on concrete fracture energy and effective parameters[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 120: 294-321.
- [2] 刘加平, 汤金辉, 韩方玉. 现代混凝土增韧防裂原理及应用[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(10): 47-54, 63.
Liu Jiaping, Tang Jinhui, Han Fangyu. Toughening and crack prevention of modern concrete: Mechanisms and applications[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(10): 47-54, 63(in Chinese).
- [3] 范向前, 刘决丁. FRP 增强预制裂缝混凝土的断裂性能[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(2): 328-333, 371.
Fan Xiangqian, Liu Jueding. Fracture characteristics of FRP reinforced precast cracked concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(2): 328-333, 371(in Chinese).
- [4] Nie X F, Zhang S S, Yu T. Behaviour of RC beams with a fibre-reinforced polymer(FRP)-strengthened web opening[J]. *Composite Structures*, 2020, 252: 112684.

- [5] 朱榆, 徐世焱. 超高韧性水泥基复合材料加固混凝土三点弯曲梁断裂过程的研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 69-77.
Zhu Yu, Xu Shilang. Study on fracture process of concrete three-point bending beams retrofitted with UHTCC[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 69-77(in Chinese).
- [6] Safdar M, Matsumoto T, Kakuma K. Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete(UHPFRC)[J]. Composite Structures, 2016, 157: 448-460.
- [7] Wang C, Zhang H S, Zhou G Y, et al. Rapid repair of road surface with magnesium phosphate cement: Case study of pavement repair in Qingdao[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2024, 36(1): 05023006.
- [8] 秦继辉, 钱觉时, 宋庆, 等. 磷酸镁水泥的研究进展与应用[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(6): 1592-1606.
Qin Jihui, Qian Jueshi, Song Qing, et al. Research progress on magnesium phosphate cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(6): 1592-1606(in Chinese).
- [9] 马越, 周新涛, 黄静, 等. 矿物掺合料对磷酸镁水泥性能影响及机理研究现状[J]. 过程工程学报, 2021, 21(6): 629-638.
Ma Yue, Zhou Xintao, Huang Jing, et al. Research status of mineral admixtures on properties and mechanism of magnesium phosphate cement[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2021, 21(6): 629-638(in Chinese).
- [10] Xu B W, Winnefeld F, Kaufmann J, et al. Influence of magnesium-to-phosphate ratio and water-to-cement ratio on hydration and properties of magnesium potassium phosphate cements[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 123: 105781.
- [11] Li Y, Lin H. Experimental study on the effect of different dispersed degrees carbon nanotubes on the modification of magnesium phosphate cement[J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 240-247.
- [12] Feng H, Yao C G, Yu Z Y, et al. Mechanical properties of sprayable ultra-high ductility magnesium phosphate cement-based composites[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 78: 107576.
- [13] Haque M A, Chen B, Ahmad M R, et al. Mechanical strength and flexural parameters analysis of micro-steel, polyvinyl and basalt fibre reinforced magnesium phosphate cement mortars[J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117447.
- [14] 李伟, 谢剑, 佟成龙. 玄武岩微筋对磷酸镁修补砂浆弯曲性能的增强增韧效应研究[J]. 材料导报, 2024, 38(17): 23120021.
Li Wei, Xie Jian, Tong Chenglong. Study of flexural strengthening and toughening effect of basalt minibar on magnesium phosphate cement repair mortar[J]. Materials Reports, 2024, 38(17): 23120021(in Chinese).
- [15] 陈柯宇, 张抒扬, 闵万林, 等. 树脂基改性玄武岩纤维增韧海水-海砂磷酸镁水泥砂浆性能[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(5): 1532-1542.
Chen Keyu, Zhang Shuyang, Min Wanlin, et al. Properties of seawater sea-sand magnesium phosphate cement mortar reinforced with resin-based modified basalt fibers[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(5): 1532-1542(in Chinese).
- [16] 谢剑, 刘家旺, 李伟, 等. 玄武岩纤维网格增强磷酸镁水泥砂浆复合材料力学性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(10): 5492-5503.
Xie Jian, Liu Jiawang, Li Wei, et al. Mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer grids reinforced magnesium phosphate cement mortar composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(10): 5492-5503(in Chinese).
- [17] 胡张莉, 刘加平, 赵羽习, 等. 数据驱动的混凝土材料-结构一体化设计研究进展[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(8): 20-33.
Hu Zhangli, Liu Jiaping, Zhao Yuxi, et al. Recent progress on data-driven concrete material-structure integrated design[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(8): 20-33(in Chinese).
- [18] JC/T 2537—2019 磷酸镁修补砂浆[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2019.
JC/T 2537—2019 Magnesium Phosphate Repairing Mortar[S]. Beijing: China Building Materials Press, 2019(in Chinese).

- [19] 王庆轩, 丁一宁. 玄武岩纤维耐碱性能及其网格布对混凝土的增强效应[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 54-62, 70.
Wang Qingxuan, Ding Yining. Alkali resistance of basalt fiber and strengthening effect of its textile on concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 54-62, 70(in Chinese).
- [20] ASTM C 1018 Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete[S]. West Conshohocken, USA: ASTM International, 1997.
- [21] 李传秀, 尹世平, 赵俊伶. 纤维编织网增强 ECC 的拉伸和弯曲性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4): 736-741.
Li Chuanxiu, Yin Shiping, Zhao Junling. Tensile and bending properties of textile reinforced ECC[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4): 736-741(in Chinese).
- [22] 霍琳颖, 毕继红, 王照耀, 等. 单向受拉状态下钢纤维混凝土的二次峰值强度[J]. 水力发电学报, 2021, 40(2): 223-233.
Huo Linying, Bi Jihong, Wang Zhaoyao, et al. Second peak strength of steel fiber reinforced concrete under uniaxial tension[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(2): 223-233(in Chinese).
- [23] DL/T 5332—2005 水工混凝土断裂试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
DL/T 5332—2005 Norm for Fracture Test of Hydraulic Concrete[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006(in Chinese).
- [24] 徐世烺. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Xu Shilang. Fracture Mechanics of Concrete[M]. Beijing: Science Press, 2011(in Chinese).
- [25] 刘决丁, 范向前, 叶宇霄, 等. 基于解析方法的 FRP 增强混凝土梁失稳前断裂过程分析[J]. 工程力学, 2023, 40(10): 129-140.
Liu Jueding, Fan Xiangqian, Ye Yuxiao, et al. Fracture process analysis of FRP reinforced concrete beams before instability based on analytical method[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(10): 129-140(in Chinese).
- [26] GB 50608—2020 纤维增强复合材料工程应用技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
GB 50608—2020 Technical Standard for Fiber Reinforced Polymer (FRP) in Construction[S]. Beijing: China Planning Press, 2006(in Chinese).
- [27] Yin X, Li Q H, Wang Q M, et al. The double-K fracture model: A state-of-the-art review[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 277: 108988.

(责任编辑: 武立有)