

文章编号:1007-9629(2022)04-0353-07

车桥耦合振动对钢纤维与磷酸镁水泥砂浆界面黏结性能的影响

高国旗^{1,2}, 陈达章³, 王顺风^{1,2}, 刘思佳^{1,2}, 杨正宏^{1,2,*}

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804; 3. 广东省高速公路有限公司, 广东 广州 510180)

摘要: 制备了一种超早强型纤维增强磷酸镁水泥(MPC), 通过对纤维拔出性能及孔结构的研究, 系统地分析了车桥耦合振动的振幅和频率对钢纤维与 MPC 砂浆之间界面黏结性能及微观结构的影响. 结果表明: 钢纤维与 MPC 砂浆的黏结性能随着振幅、频率的增加呈现先增大后减小的趋势; 与静置条件下相比, 振幅为 2、3 mm, 频率为 3、6 Hz 时, 钢纤维与 MPC 砂浆的最大黏结强度和拉拔能提升最大; 一定程度振动可以降低 MPC 砂浆的孔隙率, 细化宏观孔, 优化钢纤维与 MPC 砂浆的界面黏结性能.

关键词: 车桥耦合振动; 磷酸镁水泥; 钢纤维; 界面黏结性能; 孔结构

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.04.004

Effect of Vehicle-Bridge Coupled Vibration on Interface Bond Performance between Steel Fiber and Magnesium Phosphate Cement Mortar

GAO Guoqi^{1,2}, CHEN Dazhang³, WANG Shunfeng^{1,2}, LIU Sijia^{1,2}, YANG Zhenghong^{1,2,*}

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Guangdong Provincial Highway Co., Ltd., Guangzhou 510180, China)

Abstract: An ultra-early-strength fiber-reinforced magnesium phosphate cement(MPC) was prepared. The influence of the amplitude and frequency of vehicle-bridge coupling vibration on the interface performance and microstructure between steel fiber and MPC was systematically analyzed through the study of fiber pullout performance and pore structure. The results show that the bond performance between steel fiber and MPC based materials increases at first and then decreases with the increase of amplitude and frequency. Compared with the static condition, when the amplitude is 2, 3 mm and the frequency is 3, 6 Hz, the maximum bond strength and pullout energy between steel fiber and MPC mortar increase maximumly. Under a certain degree of vibration, the porosity of MPC mortar can be reduced, the macroscopic pores can be refined, and the interface bond performance between steel fiber and MPC mortar can be optimized.

Key words: vehicle-bridge coupled vibration; magnesium phosphate cement; steel fiber; interface bond performance; pore structure

随着交通量与车辆荷载的增加, 公路桥梁所受的荷载强度不断增大, 在自然环境的耦合作用下,

桥梁混凝土构件出现不同程度的损伤, 因此在不中断交通的情况下进行旧桥的扩建、加固和修补已成

收稿日期: 2020-12-27; 修订日期: 2021-02-21

基金项目: 广东省高速公路有限公司科研项目(MZKJ-SY-001)

第一作者: 高国旗(1997—), 男, 山西吕梁人, 同济大学硕士生. E-mail: gguoqi@126.com

通讯作者: 杨正宏(1967—), 男, 安徽六安人, 同济大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: tjzhy92037@163.com

为桥梁工程建设常态.尽量减少行车振动带来的负面影响、保障修复材料早期性能发挥便是其中关键环节之一.

磷酸镁水泥(MPC)是一种由氧化镁、可溶性磷酸盐、矿物掺合料和缓凝剂组成的高性能胶凝材料,具有快硬、早强和耐高温特点^[1-4],作为混凝土工程快速修补材料而广泛应用于机场跑道、桥梁、公路等重要基础设施的建设和维护^[5-7].但因MPC脆性大、变形能力差,常掺入钢纤维通过桥接作用发挥其增强、增韧的效果^[8-9],为其在大跨度结构领域的修补应用奠定了基础^[5].Péra等^[5]、汪宏涛等^[10]和Aminul Haque等^[11-12]研究了不同类型纤维对MPC砂浆抗压强度、弯曲韧性、劈裂抗拉强度及弹性模量的影响,表明钢纤维能够显著提高MPC砂浆的力学性能.Hu等^[13-14]和李振等^[15]发现钢纤维的端钩形状和适量的硅灰能够显著提高钢纤维与MPC砂浆的平均黏结强度和拉拔能.上述研究均在静态下进行,而在不中断交通的情况下,行车荷载引起的车桥耦合振动^[16-18]是否会对钢纤维与MPC砂浆的界面特性产生不利影响,进而影

响纤维增强水泥基材料实际应用效果,还缺乏系统深入的理论研究.本文通过钢纤维拉拔试验和压汞法探究车桥耦合振动条件(振幅、频率)对钢纤维与MPC砂浆黏结性能影响规律和机理,为纤维增强MPC砂浆用于桥梁混凝土构件的修补奠定基础.

1 试验

1.1 原材料

试验采用一种超早强型磷酸镁水泥(MPC),包含A组分(MPC-A)和B组分(MPC-B),其化学组成¹⁾如表1所示;并采用硼砂(B)作为缓凝剂;集料采用0~3 mm连续级配的石英砂.纤维拔出试验所用MPC砂浆配合比如下:MPC-A、MPC-B组分为1:1,砂胶比为1:1,水胶比为0.16,硼砂掺量3%(以MPC质量计).

试验采用2种类型钢纤维:(1)直径0.2 mm、长度20 mm的直型钢纤维(S);(2)直径0.3 mm、长度20 mm的端钩型钢纤维(H),其物理力学性能如表2所示.

表1 磷酸镁水泥的化学组成
Table 1 Chemical composition of MPC

Material	F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	w/%
MPC-A	1.21	0.15	44.82	0.97	2.80	44.90	2.32	0.13	1.55	0.03	0.97	
MPC-B		1.81	54.15	10.82	22.35	1.90	0.69	0.68	1.91	0.99	4.51	

表2 钢纤维物理力学性能
Table 2 Physical and mechanical properties of steel fibers

Type	Length/mm	Diameter/mm	Length diameter ratio	Density/(kg·m ⁻³)	Tensile strength/MPa
S	20	0.2	100	7 800	>2 000
H	20	0.3	65		

1.2 试验方法

1.2.1 MPC砂浆基本性能测定

MPC砂浆制备工艺流程如下:将MPC-A、MPC-B、石英砂、硼砂加入搅拌锅内低速搅拌1.0 min,加水后先低速搅拌0.5 min,再高速搅拌2.5 min.根据JC/T 2537—2019《磷酸镁修补砂浆》测定其凝结时间;根据GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》测定其在自然流动状态下的扩展度.

根据GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》,制备40 mm×40 mm×160 mm的MPC砂浆试件来测定其抗折强度,采用抗折试验后的半棱柱体试件来测试其抗压强度.

1.2.2 界面黏结性能测定

桥梁由于动荷载作用引起的结构动态响应参数主要包括:冲击系数、频率、振幅、阻尼和刚度,本文主要研究材料受到的振动影响,选取频率和振幅这2个参数,振幅一般指铅锤振动方向,故选取振动方向为铅锤振动方向.根据瑞士联邦研究实验室1956~1981年间调查224座桥梁频率测得值 $f_d=1.23\sim 14.00$ Hz,平均频率 $f_m=3.62$ Hz,标准振幅值为0.3~5.0 mm^[19],确定车桥耦合振动参数如表3所示.振动模式采用固定振动时间与间歇时间模式,即振动15 s后停置45 s.

根据CECS 13:2009《纤维混凝土试验方法标

1)文中涉及的组成、掺量和组分比等均为质量分数或质量比.

表3 车桥耦合振动参数
Table 3 Vehicle-bridge vibration parameters

Code	Frequency/Hz	Amplitude/mm
f0-A0	0	0
f6-A2	6	2
f6-A3	6	3
f6-A4	6	4
f3-A3	3	3
f9-A3	9	3

准》中关于钢纤维与水泥砂浆黏结强度的试验方法,测定钢纤维与MPC砂浆的界面黏结性能,MPC砂浆采用“8”字形试件。

钢纤维与MPC砂浆试件制备过程如下:(1)采用厚度0.3 mm、中心带孔的塑料板将模具分隔成2个部分;(2)将钢纤维穿入小孔,浇筑模具的一侧,作为固定端,用铁棒敲击轻微振实之后将钢纤维调直,且其嵌入长度为钢纤维长度的1/2;(3)室温条件下养护1 h后,再浇筑另一侧,作为拉拔端;(4)试件完全成型后,立即放置于车桥耦合振动试验台上,按照表3中振动参数振动40 min。振动结束后继续养护1 h后脱模,并置于实验室室温环境下养护7 d后进行测试。钢纤维与MPC砂浆试件编号方式为在车桥耦合振动参数编号后面加钢纤维型号。

采用500 N测压元件的MTS电子万能试验机对钢纤维进行拉拔试验,以0.5 mm/min的加载速率加载,采用标距20 mm、变形量5 mm的引伸计。每组5个样品,结果取平均值。通过拉拔荷载-滑移($F-s$)曲线可以得到最大黏结强度 τ_{\max} 和拉拔能 W_{con} 。最大黏结强度按下式计算:

$$\tau_{\max} = \frac{F_{\max}}{\pi d l_{\text{em}}} \quad (1)$$

式中: F_{\max} 为钢纤维拔出的最大荷载; d 为单根钢纤维的直径; l_{em} 为钢纤维的嵌入长度, $l_{\text{em}}=10$ mm。

钢纤维增强MPC水泥基材料在受荷的情况下,破坏产生的裂纹萌生及扩展是一个能量耗散的过程,因此研究钢纤维从MPC砂浆拔出所需的拉拔能是十分有必要的。本文采用位移控制量为2.5 mm的拉拔能 W_{con} 来评价其能量耗散,其计算式如下:

$$W_{\text{con}} = \int_0^{2.5} F(s) ds \quad (2)$$

1.2.3 微观测试

在不同车桥耦合振动条件下的试件拉拔端选取压汞测试样品,采用Quantachrome Autoscan-60型压

汞仪测试MPC砂浆的孔隙率和孔径分布。采用中微科创科技有限公司生产的ZWSP-4KCH型显微镜观察从MPC砂浆基体拔出的钢纤维表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 MPC砂浆的基本性能

新拌MPC砂浆的基本性能如下:流动度270 mm;凝结时间33.5 min;抗折强度7.1 MPa;抗压强度54.8 MPa。这说明MPC砂浆的流动性满足工作要求,并根据MPC砂浆的凝结时间确定车桥耦合振动时间为40 min。

2.2 车桥耦合振动对钢纤维拉拔行为的影响

2.2.1 振幅对钢纤维拉拔行为的影响

图1为试件在不同振幅下(振幅为0、2、3、4 mm)钢纤维的拉拔荷载-滑移($F-s$)曲线。不同振幅下钢纤维的拉拔能 W_{con} 如图2所示。

由图1、2可见:在静置条件(振幅为0 mm)下,直型钢纤维与MPC砂浆的最大黏结强度和拉拔能分别为2.85 MPa、35.7 N·mm;端钩型钢纤维与MPC砂浆的最大黏结强度和拉拔能分别为12.07 MPa、192.0 N·mm,其最大黏结强度和拉拔能分别为直型钢纤维的4.2、5.4倍。通过对比分析可知:端钩型钢纤维与MPC砂浆的黏结性能优于直型钢纤维,主要是由于端钩型钢纤维与MPC砂浆的黏结力不仅包含化学黏结力和摩擦力,还有端钩与MPC砂浆的机械锚固力,显著提高了拉拔行为的最大黏结强度和拉拔能。

与静置条件下相比,在车桥耦合振动条件下,钢纤维与MPC砂浆的最大黏结强度和拉拔能均优于静置对照组,且随着振幅的增加呈现先增加后降低的趋势。由图1(a)和图2可知:在2、3、4 mm振幅下直型钢纤维与MPC砂浆的最大黏结强度分别为4.40、5.08、5.10 MPa,拉拔能分别为59.4、67.6、65.8 N·mm;在振幅为3 mm时直型钢纤维与MPC砂浆的最大黏结强度和拉拔能最大,与静置条件下相比,分别增加了78.2%和89.4%。

由图1(b)和图2可知:端钩型钢纤维与MPC砂浆的最大黏结强度分别为16.82、15.62、13.54 MPa,拉拔能分别为301.0、278.1、237.6 N·mm;在振幅为2 mm时端钩型钢纤维与MPC砂浆的最大黏结强度和拉拔能达到最大值,与静置条件下相比,分别增加了39.4%和56.8%。当振幅为2、3 mm时,钢纤维与MPC砂浆的黏结性能最好,振幅变化对直型钢纤维拉拔性能的影响大于对端钩型钢纤维拉拔性能的影响。

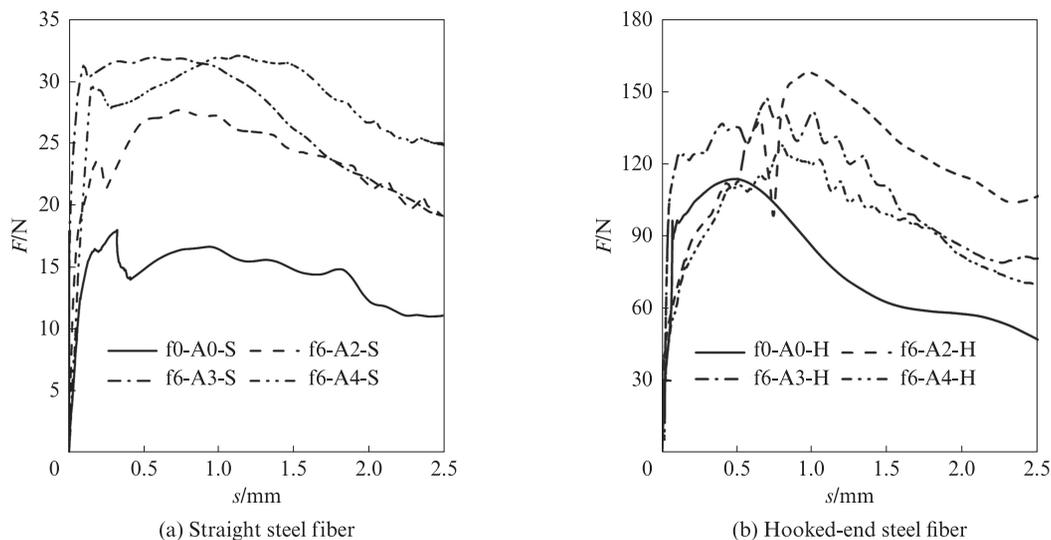


图1 不同振幅下钢纤维的拉拔荷载-滑移曲线
Fig. 1 Pullout load-slip curves of steel fibers under different amplitudes

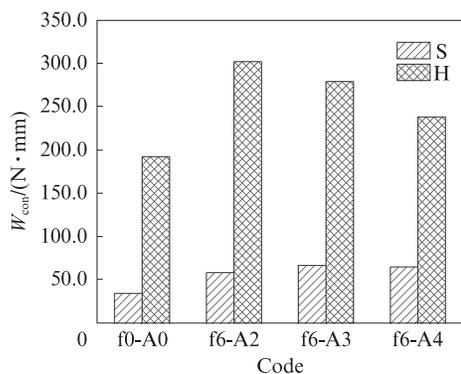


图2 不同振幅下钢纤维的拉拔能
Fig. 2 Pullout energy of steel fibers under different amplitudes

2.2.2 频率对钢纤维拉拔行为的影响

图3为试件在不同频率下(频率为0、3、6、9 Hz)

钢纤维拉拔荷载-滑移曲线. 在不同频率的车桥耦合振动作用下, 钢纤维与MPC砂浆的黏结性能优于静置条件下. 图4为不同频率下钢纤维的拉拔能.

由图3、4可知, 随着频率的增加, 钢纤维与MPC砂浆的最大黏结强度和拉拔能先增加后降低, 但均大于静置条件下. 由图3(a)和图4可知: 在3、6、9 Hz振幅下, 直型钢纤维与MPC砂浆的最大黏结强度分别为5.56、5.08、4.12 MPa, 拉拔能分别为78.8、67.6、56.7 N·mm; 在频率为3 Hz时, 直型钢纤维与MPC砂浆的最大黏结强度和拉拔能最大, 与静置条件下相比, 分别增加了95.1%和12.1%. 由图3(b)和图4可知, 端钩钢纤维与MPC砂浆的最大黏结强度分别为15.09、15.61、12.32 MPa, 拉拔能分别为275.3、278.1、225.6 N·mm; 在频率为6 Hz时端钩钢纤维与

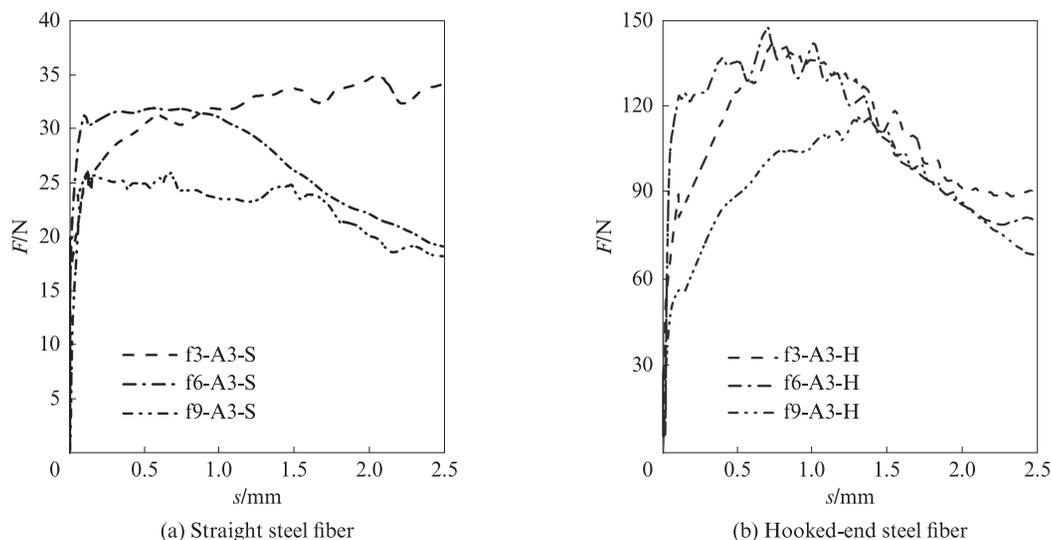


图3 不同频率下钢纤维的拉拔荷载-滑移曲线
Fig. 3 Pullout load-slip curves of steel fibers under different frequencies

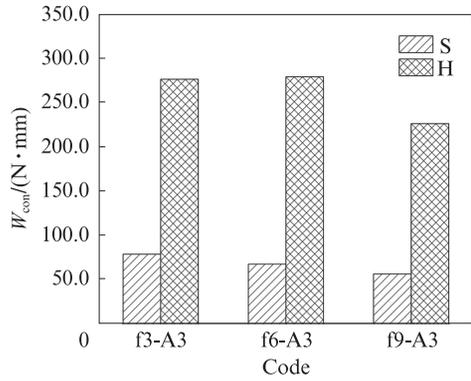


图4 不同频率下钢纤维的拉拔能

Fig. 4 Pullout energy of steel fibers under different frequencies

MPC 砂浆的最大黏结强度和拉拔能达到最大值,与静置条件下相比,分别增加了 29.3% 和 44.8%. 当频率为 3、6 Hz 时,钢纤维与 MPC 砂浆的黏结性能最好,频率变化对直型钢纤维拉拔性能的影响大于端钩型纤维.

2.3 影响机理分析

2.3.1 MPC 砂浆孔结构

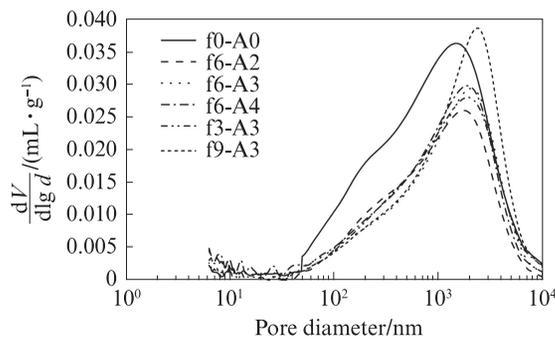
在车桥耦合振动条件下,砂浆孔隙率和孔径分布不仅影响基体的性能,还对钢纤维与 MPC 砂浆的界面黏结性能影响较大. 图 5 为“8”字形试件 MPC 砂浆的孔径分布和总孔隙率. 由图 5 可知:在车桥耦合振动条件下,随着振幅的增加,MPC 砂浆基体的最可几孔径先增大后减小,总孔隙率逐渐升高;随着频率的增加,最可几孔径逐渐增大,3、6 Hz 时总孔隙率变化较小,9 Hz 时总孔隙率出现增大. 与静置条件下相比,车桥耦合振动作用下 MPC 砂浆的总孔隙率均降低,车桥耦合振动作用下钢纤维与 MPC 砂浆的黏结性能均优于静置条件下.

图 6 为“8”字形试件 MPC 砂浆孔体积占比. Mehta 等^[20]根据其孔径 d 将硬化水泥基体的孔划分为

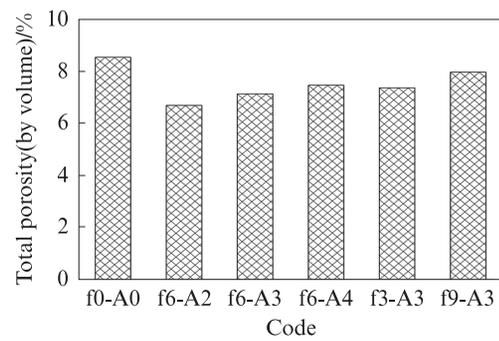
3 种:凝胶孔($d < 10$ nm)、微孔($d = 10 \sim 50$ nm)和宏观孔($d > 50$ nm). 硬化水泥基体的孔隙率和孔径分布对力学性能有显著影响^[21]. 由图 6 可知:在静置条件下,MPC 砂浆中宏观孔的体积分数为 85.6%;当振幅为 2、3 mm 时,MPC 砂浆中宏观孔的体积分数分别为 84.6%、79.0%,当振幅为 4 mm 时,宏观孔的体积分数为 69.1%,表现为钢纤维与 MPC 砂浆的最大黏结强度和拉拔能均优于静置组,随振幅增加出现增大的趋势;当频率为 3、6 Hz 时,MPC 砂浆中宏观孔的体积分数分别为 79.0%、79.0%,当频率为 9 Hz 时,宏观孔的体积分数为 93.6%,显著增加,表现为钢纤维与 MPC 砂浆的最大黏结强度和拉拔能显著降低.

总体而言,车桥耦合振动可以降低 MPC 砂浆的总孔隙率,但过高频率和过大振幅均不利于孔隙结构进一步优化,不利于提升钢纤维与 MPC 砂浆的界面黏结性能. 主要原因是:MPC 材料组成为磷酸二氢氨,氧化镁与磷酸二氢氨发生酸碱反应会产生一定气泡,振动作用有助于细化气泡形成的宏观孔,进一步提高钢纤维与 MPC 砂浆的黏结性能.

钢纤维拔出过程主要分为 3 个阶段:(1)完全黏结阶段,也叫弹性阶段,钢纤维与基体的化学黏结力起主要作用,其表现为基体萌生微裂纹并向钢纤维表面扩展;(2)脱黏阶段,随着拉拔荷载的增加,钢纤维与基体的化学黏结力达到最大,部分界面开始破坏,拉拔阻力由钢纤维与基体的摩擦力和化学黏结力提供,拉拔荷载达到最大值,直至钢纤维与基体的界面完全失效;(3)摩擦滑移阶段,拉拔阻力由钢纤维与基体的摩擦力提供,随着钢纤维的拔出,钢纤维与基体的接触面积逐渐减小,拉拔荷载值逐渐减小到零. 车桥耦合振动细化了 MPC 砂浆的宏观孔,增加了钢纤维与 MPC 砂浆的化学黏结力,改善了钢纤维拔出过程的完全黏结阶段和脱黏阶段.



(a) Pore size distribution



(b) Total porosity

图5 “8”字形试件 MPC 砂浆的孔径分布和总孔隙率

Fig. 5 Pore size distribution and total porosity of “8” shaped MPC mortar specimens

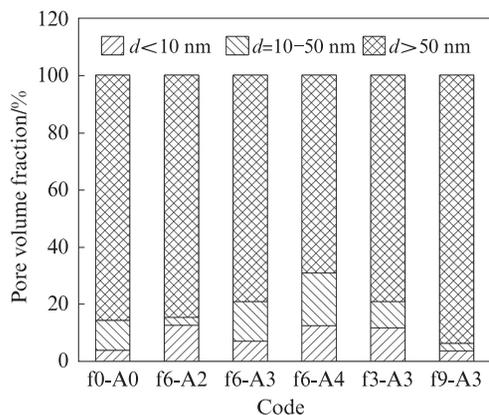


图6 “8”字形试件MPC砂浆的孔体积分数
Fig. 6 Pore volume fraction of “8” shaped MPC mortar specimens



(a) Straight steel fiber



(b) Hooked-end steel fiber

图7 f0-A0组试件中2种钢纤维拔出后的表面形貌

Fig. 7 Surface morphology of steel fibers in f0-A0 group after pulling out

3 结论

(1) 由于端钩与MPC砂浆的机械锚固作用提升了钢纤维的拉拔荷载,端钩型钢纤维与MPC砂浆的黏结性能显著优于直型钢纤维。

(2) 车桥耦合振动作用下钢纤维与MPC砂浆的黏结性能显著优于静置条件下,在车桥耦合振动作用下,MPC砂浆总孔隙率降低,由气泡形成的宏观孔得到细化,钢纤维与MPC砂浆的黏结性能提高。

(3) 车桥耦合振动作用对端钩型钢纤维与MPC砂浆黏结性能的影响小于直型钢纤维,在振幅为2、3 mm,频率为3、6 Hz的情况下,车桥耦合振动作用对钢纤维与MPC砂浆黏结性能的提高最大。一定程度的振动还可以细化宏观孔,从而优化钢纤维与MPC砂浆的黏结性能。

(4) 行车荷载引起的车桥耦合振动在频率小于6 Hz、振幅小于3 mm时不会对钢纤维与MPC砂浆的黏结性能产生不利影响。

参考文献:

[1] HAQUE M A, CHEN B. Research progresses on magnesium

2.3.2 钢纤维表面形貌

钢纤维拔出过程通常有2种破坏形式:钢纤维断裂和界面失效(纤维拔出)^[22]。图7为f0-A0组试件中2种钢纤维拔出后的表面形貌。由图7可见:钢纤维拔出后其表面有明显的划痕,部分镀铜层已经消失,且表面附着MPC砂浆颗粒。这是由于MPC砂浆颗粒与钢纤维的磨损和挤压产生的楔形效应使钢纤维与MPC砂浆之间具有良好的黏结性能;由于端钩在MPC砂浆中的机械锚固作用,端钩型钢纤维拔出后端钩逐渐被拉直,可以显著提高钢纤维与MPC砂浆的黏结性能。

phosphate cement: A review [J]. Construction and Building Materials, 2019, 211:885-898.

[2] 高明,刘宁,陈兵.微硅粉改性磷酸镁水泥砂浆试验研究[J].建筑材料学报,2020,23(1):29-34.

GAO Ming, LIU Ning, CHEN Bing. Effect of silica fume on properties of magnesium phosphate cement mortar [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):29-34. (in Chinese)

[3] 张爱莲,张林春,俞金艳,等.磷酸镁水泥基材料力学性能研究[J].硅酸盐通报,2020,39(2):422-427.

ZHANG Ailian, ZHANG Linchun, YU Jinyan, et al. Research on mechanical performance of magnesium phosphate cement-based materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(2):422-427. (in Chinese)

[4] 孟芹,廖梓珺,李云涛.磷酸镁水泥的研究现状及发展趋势[J].硅酸盐通报,2017,36(4):1245-1253.

MENG Qin, LIAO Zijun, LI Yuntao. Research status and development trend of magnesium phosphate cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(4):1245-1253. (in Chinese)

[5] PÉRA J, AMBROISE J. Fiber-reinforced magnesia-phosphate cement composites for rapid repair [J]. Cement and Concrete Composites, 1998, 20(1):31-39.

[6] 薛伶俐,黎红兵,高云龙,等.磷酸镁水泥基材料与混凝土黏结性能研究进展[J].硅酸盐通报,2020,39(9):2724-2731.

XUE Lingli, LI Hongbing, GAO Yunlong, et al. Research progress on bonding performance of magnesium phosphate

- cement-based materials and concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(9):2724-2731. (in Chinese)
- [7] 俞家欢,闫林伟. 磷酸镁混凝土路面快速修补材料的耐水性试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(5):855-863. YU Jiahuan, YAN Linwei. Water resistance of magnesium phosphate concrete pavement with rapid repairing materials[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2018, 34(5):855-863. (in Chinese)
- [8] 吴洲,沙建芳,徐海源,等. 磷酸镁水泥增韧改性研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(增刊1):454-457. WU Zhou, SHA Jianfang, XU Haiyuan, et al. Research progress on toughening of magnesium phosphate cement[J]. Materials Reports, 2016, 30(Suppl 1):454-457. (in Chinese)
- [9] 肖炳斐,陈玥,房琦,等. 磷酸镁水泥复合材料的研究进展[J]. 功能材料, 2020, 51(8):7-13. XIAO Bingfei, CHEN Yue, FANG Qi, et al. Research progresses on magnesium phosphate cement-based composites: A review[J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(8):7-13. (in Chinese)
- [10] 汪宏涛,钱觉时,曹巨辉,等. 钢纤维增强磷酸镁水泥砂浆的性能与应用[J]. 建筑技术, 2006, 37(6):462-464. WANG Hongtao, QIAN Jueshi, CAO Juhui, et al. Properties and application of steel fiber reinforced magnesia phosphate cement mortar[J]. Architecture Technology, 2006, 37(6):462-464. (in Chinese)
- [11] AMINUL HAQUE M, 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, 235:666-679.
- [12] AMINUL HAQUE M, CHEN B, AHMAD M R, et al. Evaluating the physical and strength properties of fibre reinforced magnesium phosphate cement mortar considering mass loss[J]. Construction and Building Materials, 2019, 217:427-440.
- [13] HU F, SHEIKH M N, HADI M N S, et al. Interface bond performance of steel fibre embedded in magnesium phosphate cementitious composite[J]. Construction and Building Materials, 2018, 185:648-660.
- [14] HU F, SHEIKH M N, HADI M N S, et al. Pullout behaviour of different types of steel fibres embedded in magnesium phosphate cementitious matrix [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2019, 13(1):33.
- [15] 李振,秦继辉,尤超,等. 渗浆法钢纤维增强磷酸镁水泥基复合材料的力学性能[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(11):1559-1565. LI Zhen, QIN Jihui, YOU Chao, et al. Mechanical properties of steel fiber reinforced magnesium phosphate cement-based composite by slurry infiltrating[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(11):1559-1565. (in Chinese)
- [16] 魏建军,邢姣秀,付智. 行车荷载引起桥梁振动对修复混凝土性能影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(5):1057-1060. WEI Jianjun, XING Jiaoxiu, FU Zhi. Effect of traffic load induced bridge vibrations on concrete tensile properties[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2010, 40(5):1057-1060. (in Chinese)
- [17] 蒋正武,任强,袁政成. 车桥耦合振动对混凝土早期性能的影响及其损伤机理[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(3):471-476. JIANG Zhengwu, REN Qiang, YUAN Zhengcheng. Effects of vehicle-bridge coupled vibration on early-age properties of concrete and its damage mechanism [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(3):471-476. (in Chinese)
- [18] 潘慧敏,潘会滨,赵庆新. 车桥振动对新浇筑混凝土性能的影响研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(2):449-452,457. PAN Huimin, PAN Huibin, ZHAO Qingxin. Development on influence of vehicle bridge vibration on the performance of young concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(2):449-452,457. (in Chinese)
- [19] 谌润水,胡钊芳. 公路桥梁荷载试验[M]. 北京:人民交通出版社, 2003:65-67. SHEN Runshui, HU Zhaofang. Load test of highway bridge[M]. Beijing:China Communications Press, 2003:65-67. (in Chinese)
- [20] MEHTA P K, MONTERIO P J M. Concrete: Microstructure, properties and materials[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2006:281-315.
- [21] LIAN C, ZHUGE Y, BEECHAM S. The relationship between porosity and strength for porous concrete[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(11):4294-4298.
- [22] ABDALLAH S, FAN M, REES D W A. Bonding mechanisms and strength of steel fiber-reinforced cementitious composites: Overview[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(3):040180013.