

磷酸镁水泥基混凝土立面修补剂试验

俞家欢,白晓彤

(沈阳建筑大学交通工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究磷酸镁水泥胶砂的收缩性、抗剪性能及抗开裂性能增长规律,为高层房屋外墙立面、桥墩立面、桥跨底面等特殊部位修补提供优化的组分配合比。方法 通过水泥胶砂干缩试验研究氧化镁活性、水胶质量比、氧化镁与磷酸二氢铵质量比、粉煤灰掺量对 MPC 砂浆干缩应变的影响规律;外加剂掺和比对“水泥胶砂—基材”界面抗剪强度的影响规律以及聚丙烯纤维掺量对其抗裂性的影响规律。结果 随着水胶质量比、氧化镁与磷酸二氢铵质量比的降低,MPC 砂浆的干缩应变减小;随着粉煤灰掺量的增加,MPC 砂浆的干缩应变减小,抗剪强度降低;随着聚丙烯纤维掺入量的提高,MPC 砂浆正方形板状试样的裂缝数量减少,当纤维掺量达到 1.5 kg/m^3 时,其 A_{cr} 为 0, η 为 100%。结论 磷酸镁水泥基混凝土立面修补剂具有抗收缩抗开裂和高粘结性的特点,满足修补施工及耐久性要求。

关键词 磷酸镁水泥;干燥收缩性;抗剪强度;抗裂性

中图分类号 TU502

文献标志码 A

Research and Engineering Application on Magnesium Phosphate Cement-based Concrete Patching Agent of Vertical Facade

YU Jiahuan, BAI Xiaotong

(School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: To study the property of shrinkage and shear strength of Magnesium Phosphate Cement (MPC) and regulation of its crack growing and to provide the optimal mix proportion of Magnesium Phosphate Cement suitable for some special parts of buildings such as facade of high-rise buildings, bridge piers, and the bottom of bridge span, the dry shrinkage tests of cement mortar have been done. Through the tests, the effect of magnesia activity, water/cement ratio, magnesium / phosphorus ratio and the percent of the fly ash on the regulation of the shrinkage strain of MPC and the effect of admixtures on the shear strength of the “cement mortar — base material” interface and the effect of polypropylene fiber admixture amount on crack growing have been studied. The drying shrinkage of magnesium phosphate cement decreases with the increase of the activity of

收稿日期:2018-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51078242);辽宁省自然科学基金项目(201602602)

作者简介:俞家欢(1974—),男,教授,主要从事道路桥梁修补材料与技术方面研究。

Magnesium Oxide,the decrease of water binder ratio,the decrease of magnesium phosphorus ratio and the increase of fly ash content. When the content of fly ash is 20% ,it would be less drying shrinkage and higher shear resistance strength. The addition of polypropylene fiber can improve the crack resistance of magnesium phosphate cement based patching agent. When the fiber content reaches 1.5 kg/m³ ,is 0,η is 100% . In summary ,while the MgO is 1 300 ℃ ,M/P is 4 ,Water/cement ratio is 0.18 ,the Fly ash content is 20% ,it can be applied to practical engineering and meet the construction and durability requirements.

Key words: magnesium phosphate cement;drying shrinkage;shear resistance strength;crack resistance

磷酸镁水泥胶砂(Magnesium phosphate cement mortar,MPC)是一种镁质新型气硬性胶凝材料,具有水化固结快、前期强度高、粘结力强、体积安定性好、耐磨、耐火以及防冻胀等优点^[1-4],因此被广泛应用于快速修补加固工程、有害物质固化及国防建设工程等领域^[5].但随着服役期结构物立面、底面等特殊部位混凝土保护层碳化剥落问题的出现,对MPC砂浆的粘结性、抗裂性、体积稳定性等提出了更高的要求.苏柳铭^[6]利用纤维改性磷酸镁水泥提高修补路面的抗冲击性和耐磨性.郑旭光^[7]利用聚合物和超细填料改性CRM胶结料对高速公路桥梁伸缩缝进行快速修补,经长期检验,改性CRM胶结料具有较强的耐磨性和体积稳定性.为实现对特殊位置的修补,要求修补材料具有不流动、速凝快硬、体积稳定、粘结力强等特性.MPC砂浆与被修补面的粘合依赖于浆体本身的粘结作用.收缩会导MPC砂浆与被修补面间的微错动,从而脱粘并开裂,轻则不能达到修复标准,重则摧毁全部修复工作^[8-10].为了提高MPC砂浆的体积稳定性,通常增大粉煤灰掺和比,反而导致MPC砂浆粘结力降低.为了协调掺合料对MPC砂浆体积稳定性的贡献和对其粘结强度的削弱,笔者通过水泥胶砂干缩试验、抗剪强度试验、平板开裂试验,探索特殊位置MPC修补砂浆的合理配合比,并通过工程实例加以验证.

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

试验采用辽宁海城金恒菱镁生产的重烧氧化镁(MgO,简称M),物理参数见表1.采用辽宁双鼎化工厂生产的工业级白色结晶性粉末状磷酸二氢铵(NH₄H₂PO₄,简称P),纯度为97.8%,在空气中性状稳定.粉煤灰为F类Ⅰ级,密度为2 150 kg/m³,比表面积为368.0 m²/kg,化学成分见表2.细集料采用天然河砂,细度为3.5.

表1 重烧氧化镁基本性质

Table 1 Properties of dead burnt magnesia			
材料	煅烧温度/ ℃	平均粒径/ μm	氧化镁质量 分数/%
M1	1 300	30.6	88.74
M2	>1 500	32.8	93.65

表2 粉煤灰组成成分

Table 2 Chemical composition of fly ash %						
w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(CaO)	w(MgO)	w(K ₂ O)	w(else)
48.65	24.76	12.56	5.67	3.45	2.25	2.66

1.2 试验方法

1.2.1 干燥收缩性能试验

试件长宽高为25 mm×25 mm×250 mm,把已制备好的水泥胶砂装入两端装有测钉的三联试模内,用捣棒捣压均匀,试件表面用刮平尺抹平,30 min后拆除试模.在试件的一个25 mm×250 mm的表面上用长度200 mm的设置棒记录两个标记点,再将两枚直径6 mm带参照孔的不锈钢圆片粘贴

于标记点处,完成测量点设置.使用水泥胶砂干缩试验仪进行初值的量测,然后置于室内温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度 $(50 \pm 5)\%$ 的环境中养护,测量相应龄期时试件两个标记点间距.注意在使用干缩试验仪测定时,首先用标准杆校正仪器的零点,并确保试件每次在仪器上放置的位置和方向是相同的,每个试件测量三次,取平均值,计算结果精确至0.000 001.试验分别测试每个试件养护至60 d龄期的干缩应变,前10 d每天测一次,之后隔天测量一次.每次测量前,需对应变测量仪进行校准.

干缩率公式为

$$S_t = \frac{L_0 - L_t}{L_0} \tag{1}$$

式中: S_t 为 t 天龄期试件的干缩率; L_t 为 t 天龄期试件的测量读数平均值,mm; L_0 为试件初始测量读数平均值,mm;250为试件有效长度,mm.

1.2.2 抗剪强度试验

试件形状和尺寸如图1所示.

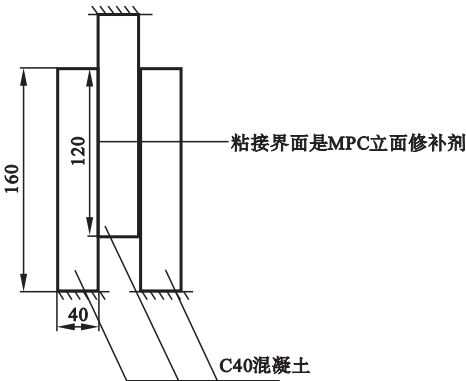


图1 试件

Fig. 1 Test block

每个试块选用混凝土强度等级C40的混凝土制作,长宽高均为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$,试块之间用粉煤灰掺量分别为0、10%、20%、30%的磷酸镁水泥基立面修补剂粘接,受剪截面 $40\text{ mm} \times 120\text{ mm}$.采用微机控制电液伺服压力试验机竖向单轴加压,加载速度控制在 $0.02 \sim 0.04\text{ kN/s}$,将试件安

置于加载台面上,调整千斤顶使之接触到试件上表面,预加载使之接触紧密,消除虚位移后,正式开始加载,记录试件破坏时抗剪强度峰值.

1.2.3 平板开裂试验及抗裂性评定方法

试验中磷酸镁水泥基混凝土立面修补剂试件的制备均采用煅烧 $1\,300^\circ\text{C}$ 的氧化镁粉末,水胶质量比为0.18,镁磷质量比分别为4:1,粉煤灰掺量20%以及5种不同掺量规格的聚丙烯纤维^[11],将试样制成 $600\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 63\text{ mm}$ 正方形平板(见图2).

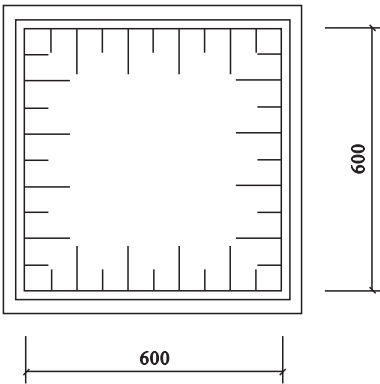


图2 模具

Fig. 2 Mode

试验过程中控制环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度不大于60%,风速为 0.5 m/s 左右,使风平行于试件吹拂,并记录试件表面首条裂缝的出现时间.由于磷酸镁水泥的早期抗裂性效果非常好,加之聚丙烯纤维的掺入,前期基本无裂缝出现,所以试验观察28 d试件的裂缝情况并记录肉眼可见的裂缝数目、裂缝总长度,同时使用裂缝宽度观测仪测量裂缝最大宽度.对于未明显弯折的裂缝,其长度近似为两端点的直线距离;而明显弯折的裂缝,裂缝长度取几段折线长度的累加值.最终通过试件裂缝的名义总面积 A_{cr} 及裂缝降低系数来评价聚丙烯纤维对MPC修补剂的阻裂效果^[12].

$$A_{cr} = \sum_{i=1}^n w_{i,\max} l_i \tag{2}$$

式中: A_{cr} 为裂缝名义总面积, mm^2 ,纤维混凝

土记作 A_{fcr} ,素混凝土试件记作 A_{mcr} ; $w_{i,max}$ 为第 ρ 条裂缝名义的最大宽度,mm; l_i 为第 i 条裂缝的长度,mm;

利用式(3)计算裂缝降低系数 η :

$$\eta = \frac{A_{mcr} - A_{fcr}}{A_{mcr}}.$$

(3)

限裂标准见表 3^[13].

表 3 限裂等级评定标准

Table 3 Evaluation criteria for cracking limits	
限裂效能等级	评定标准
一级	$\eta \geq 70\%$
二级	$55\% \leq \eta < 70\%$
三级	$40\% \leq \eta < 55\%$

2 试验结果与分析

2.1 MgO 活性对 MPC 立面修补剂干燥收缩性的影响

试验中磷酸镁水泥基修补剂试件采用两种不同活性的氧化镁制备,M1 为煅烧 1 300 ℃ 的氧化镁制备的 MPC 试件,M2 为煅烧 1 500 ℃ 以上的氧化镁制备的 MPC 试件,暂定氧化镁与磷酸二氢铵质量比(以下简称镁磷比,M/P)为 4,水胶质量比为 0.18,粉煤灰掺量为 30%,水胶比中的“胶”为氧化镁、磷酸二氢铵和粉煤灰的总质量.

由于氧化镁活性的控制因素是煅烧温度,当煅烧温度上升,其活性逐渐下降,所以 M1 试件的活性高于 M2 试件. MgO 活性对 MPC 修补剂干燥收缩性能影响曲线见图 3,可以看出,M1 试件的干燥收缩应变较小,而 M2 试件的干燥收缩应变明显较大. 当龄期达到 15 d 之后,两者的收缩应变值基本保持不变. 参考 15 d 的收缩应变,M2 试件的收缩应变为 127×10^{-6} ,而 M1 试件为 76×10^{-6} ,收缩应变缩小了约 40%. 当不掺加缓凝剂时,采用活性指数较高的 MgO 配制 MPC 立面修补剂,其水化反应可瞬间完成并且固定大量自由水,减少磷酸镁水泥砂浆基体各个空隙中水分,从而降低干燥收缩^[14].

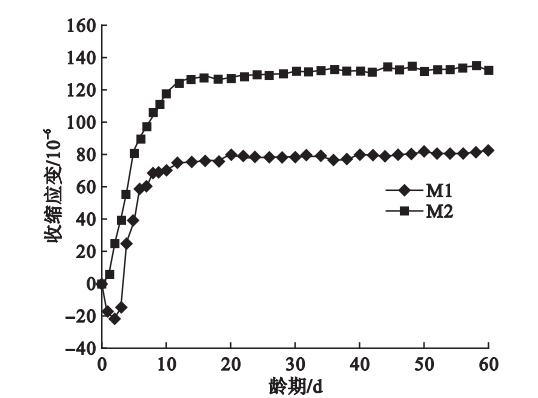


图 3 MgO 活性对 MPC 修补剂干燥收缩性能影响

Fig. 3 Influence of MgO reactivity on the drying shrinkage

2.2 水胶质量比对 MPC 立面修补剂干燥收缩性的影响

MPC 立面修补剂试件采用煅烧 1 300 ℃ 的 MgO 粉末制备,镁磷比为 3,粉煤灰掺量为 30%,水胶质量比分别为 0.18、0.2 和 0.22,影响曲线见图 4.

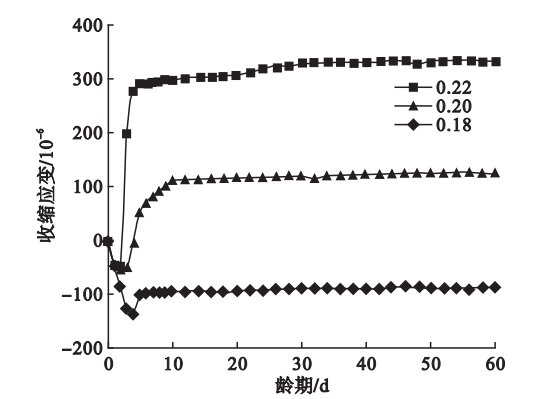


图 4 水胶质量比对 MPC 修补剂干燥收缩性能影响

Fig. 4 Influence of W/B on the drying shrinkage

由图 4 可知,水胶质量比对 MPC 立面修补剂干燥收缩性的作用效果非常明显,随着水胶比的增大,试件的收缩应变逐渐增大. 当养护期持续至 26 d 之后,随着养护时间的增加,收缩应变基本保持不变. 参考 26 d 的收缩应变值,水胶比为 0.18 的试件,其干燥收缩应变为 -91×10^{-6} 说明试件发生一定的膨胀;水胶质量比为 0.2 的试件产生收缩现象,其收缩应变为 117×10^{-6} ;而水胶质量比为 0.22 的试件产生了极大收缩现象,收缩应变

高达 321×10^{-6} . 由于水胶质量比增大直接导致磷酸镁水泥基体中的自由水分增多,当毛细孔径处的自由水分经过蒸发之后便会形成凹液面,残留在毛细孔道处,从而由于负压作用发生收缩现象,修补料收缩值随着水胶质量比值的升高而降低^[15].

2.3 镁磷比对 MPC 立面修补剂干燥收缩性的影响

MPC 立面修补剂试件采用煅烧 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 的氧化镁粉末,制备水胶的质量比为 0.18,粉煤灰掺量为 30%,磷镁比分别为 3:1、4:1、5:1,影响曲线见图 5.

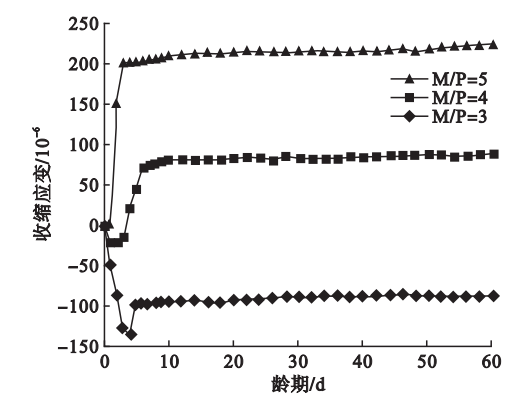


图 5 M/P 对磷酸镁水泥基修补剂干燥收缩性能的影响

Fig. 5 Influence of M/P on the drying shrinkage

由图 5 可知,镁磷比对磷酸镁水泥基修补剂干燥收缩性能的影响显著,随着镁磷比的减小,试件的收缩应变逐渐减小.当试件龄期达到 7 d 以后,随着龄期的增加,收缩应变基本保持不变.以 7 d 的收缩应变为例,镁磷比为 5 的试件,其干燥收缩应变为 204×10^{-6} ,说明试件产生明显的收缩现象;镁磷比为 4 的试件,其收缩应变为 75×10^{-6} ,说明试件产生收缩但并不明显,满足修补工程的最低要求;而镁磷比为 3 的试件,其收缩应变为 -97×10^{-6} ,产生微膨胀现象,这是修补工程的最理想状况.提高镁磷比,就意味着单位质量氧化镁用量增多,单位质量的磷酸盐用量减少,从而导致磷酸镁水泥凝结硬化反应总量减少.在水胶质量比不变的情况下,较少

的凝结硬化反应会导致磷酸镁水泥基体中的自由水分过剩,当毛细孔径处的自由水分经过蒸发之后便会形成凹液面,残留在毛细孔道处,从而由于负压作用发生收缩现象^[16];镁磷比越大,其干燥收缩越明显.

2.4 粉煤灰掺量对 MPC 立面修补剂干燥收缩性的影响

磷酸镁水泥基混凝土修补剂试件的制备均采用煅烧 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 的氧化镁粉末,水胶质量比为 0.18,镁磷比分别为 4:1,粉煤灰掺量分别为 10%、20% 和 30%,影响曲线见图 6.

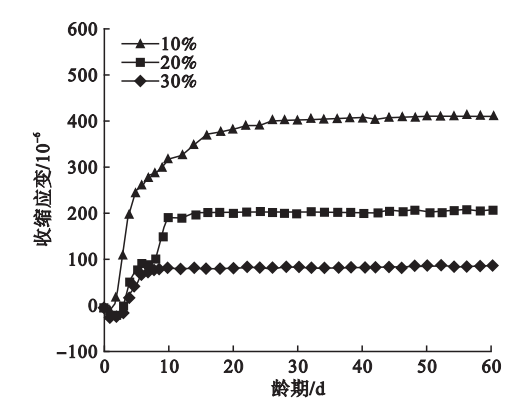


图 6 粉煤灰掺量对磷酸镁水泥基混凝土修补剂干燥收缩性能的影响

Fig. 6 Influence of fly ash content on the drying shrinkage

由图 6 可知,加入越多的粉煤灰,修补料干燥收缩应变值越小.当粉煤灰掺量为 30% 时,试件 7 d 以后的干燥收缩应变基本不变,且收缩应变仅为 75×10^{-6} ,所以粉煤灰能够有效抑制修补剂的干燥收缩.由于粉煤灰粒径很细,可以充满较宽大的氧化镁缝隙,使材料颗粒级配更合理,一定程度上优化材料基体内的空隙分布,从而固结水分防止水过度流失.此外,粉煤灰的加入有助于提高材料的化学增强效应,从而提高磷酸镁水泥基修补剂的密实性,保留水分防止水分流失.

2.5 粉煤灰掺量对 MPC 立面修补剂抗剪强度的影响

磷酸镁水泥基修补剂掺入粉煤灰可以降低干燥收缩,但过多的粉煤灰会造成磷酸镁

水泥基修补剂抗剪强度的降低,笔者采用粉煤灰掺量分别为 10%、20% 和 30%,煅烧 1 300 ℃的氧化镁粉末,水胶比质量为 0.18,

镁磷比分别为 4:1 的 MPC 立面修补剂进行试验.MPC 修补剂立面抗剪强度随粉煤灰掺量的变化结果见表 4.

表 4 MPC 修补剂立面抗剪强度随粉煤灰掺量的变化规律

Table 4 Effect of fly ssh content on caking property of magnesium of phosphate mortar

编号	粉煤灰掺量/%	抗剪强度/MPa					
		3h	1d	7d	10	21d	30d
1	0	0.65	0.72	3.58	4.12	4.22	4.31
2	10	0.57	0.66	2.92	4.02	4.12	4.15
3	20	0.51	0.58	2.24	3.88	3.93	4.01
4	30	0.37	0.39	1.16	1.28	1.35	1.42

由表 4 可知,随着粉煤灰掺量的增加,MPC 立面修补剂的抗剪强度逐渐降低,当粉煤灰掺量≤20%,养护龄期达到 10 d 的试件,其抗剪强度峰值均达到了 4 MPa,在试件龄期延长至 30 d 时,其抗剪强度基本不变,无明显提高.当粉煤灰掺量为 30%时,随着试件养护龄期延长,MPC 立面修补剂抗剪强度没有明显提高,且与编号 1、2、3 组试件相比,编号 4 试件的抗剪强度下降明显.分析原因是与磷酸镁水泥修补剂相比,粉煤灰的颗粒和密度较小,且含有球形玻璃珠,起到了填充密实磷酸镁水泥砂浆孔隙和润滑的作用,从而增加了磷酸镁水泥修补剂的流动度^[17].磷酸镁水泥高强度特性主要是由水化产物($\text{MgNH}_4\text{PO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$)决定的^[18],当粉煤灰掺量增加后,其水化产物包含杂质成分就增多,从而降低磷酸镁水泥修补的粘结强度.

2.6 聚丙烯纤维掺量对 MPC 立面修补剂的抗裂性能的影响

图 7 为未掺入聚丙烯纤维试件破坏形态,图 8 为纤维体积质量 1.3 kg/m³ 混凝土试件破坏形态.从图中可以看出,通常情况下,裂缝会先在栓钉周围发生,慢慢往平板中心位置扩展,少见的有裂缝在局部出现,当多条裂缝交叉时裂缝宽度最大.试验过程中,通过裂缝的条数可以明显看出,掺入聚丙烯纤维试件的抗裂性能明显优于未掺入聚丙烯纤维试件,可以形象地解释为聚丙烯纤维对于

磷酸镁水泥基混凝土修补剂的作用类似于钢筋对于混凝土结构的作用,起到了抑制裂缝扩展的作用^[19].

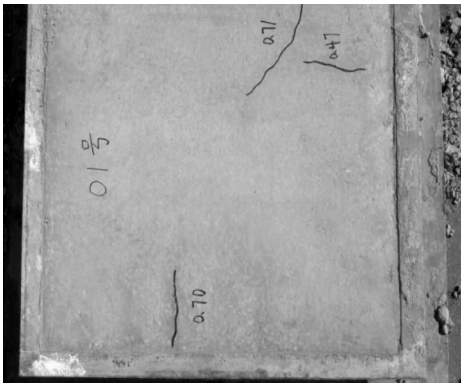


图 7 未掺入聚丙烯的试件破坏形态

Fig. 7 The specimen failure pattern without polypropylene



图 8 聚丙烯体积质量为 1.3 kg/m³ 试件破坏形态

Fig. 8 The specimen failure pattern of 1.3 kg/m³ polypropylene

在抗裂性能试验中,28 d 裂缝试验结果见表 5. 由表可知,随着纤维掺量的增加,裂缝的数量和裂缝的面积逐渐减小,其中裂缝数量由未掺入聚丙烯纤维的磷酸镁水泥基修补剂的 3 条减小到 1.5 kg/m^3 的 0 条,裂缝的面积由未掺入聚丙烯的磷酸镁水泥基修补剂的 215.73 mm^2 减小到 1.5 kg/m^3 的 0 mm^2 ,而聚丙烯纤维对 MPC 立面修补剂的裂缝降低系数由纤维体积质量为 0.9 kg/m^3 时的 35.8% 提高到 1.5 kg/m^3 的 100%.

表 5 28 d 裂缝试验结果

Table 5 28 d fracture test data

试件 编号	纤维体积 质量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	裂缝数 量/条	$A_{\text{cr}}/\text{mm}^2$	$\eta/\%$
A	0	3	215.73	—
B	0.9	3	138.54	35.8
C	1.1	1	65.15	69.8
D	1.3	1	43.68	79.8
E	1.5	0	0	100

3 工程应用

2016 年 4 月,笔者应用磷酸镁水泥基混凝土立面修补剂对沈阳市白山立交桥底板破损处进行快速修补. 修补前后对比效果见图 9 和图 10.



图 9 修补前
Fig. 9 Before the repair



图 10 修补后
Fig. 10 After the repair

对白山桥梁底板顶面的修补效果分别进行为期 1 个月、3 个月、6 个月、12 个月的定期检验,通过检验发现修补位置的保护层均无开裂、剥落等破损现象,说明笔者研究的磷酸镁水泥基混凝土立面修补剂具有抗收缩抗开裂和高粘结性的特点,且修补后工程有一定的耐久性. 此外,该修补工艺操作简单,无需大型机械,人工即可操作,节省工时,节省成本,节省人力;修补后养护 1 h 即可清场撤离,恢复正常的人车通行,避免封闭交通而造成的交通阻塞情况,降低因长时间施工操作带来施工人员和行人车辆通行的危险性,从而降低事故发生率;同时延长了桥梁维修维护的周期,降低了桥梁养护的费用.

4 结 论

- (1)磷酸镁水泥基混凝土立面修补剂的干燥收缩性能随着氧化镁活性的提高、水胶比的降低、镁磷比的降低、粉煤灰掺量的增加而减小.
- (2)粉煤灰的掺加可以抑制磷酸镁水泥基修补剂的干燥收缩,但粉煤灰掺量过多会降低其抗剪强度,当粉煤灰掺量为 20% 时,能够保证较小的干燥收缩和较高的抗剪强度.
- (3)聚丙烯纤维的掺入可以提高磷酸镁水泥基修补剂的抗裂性能,当纤维掺量达到

1.5 kg/m³ 时,其 A_{cr} 为 0, η 为 100%。

(4)通过实际工程应用验证了磷酸镁水泥立面修补剂可应用于建筑物外墙立面、桥梁底板顶面等修补工程,从而保证建筑物和构筑物的耐久性,延长维修周期,是一种应用前景广阔快速修补料。

参考文献

- [1] MESTRES G, AGUILERA F S, MANZANARES N, et al. Magnesium phosphate cements for endodontic applications with improved long-term sealing ability [J]. International endodontic journal, 2014, 47 (2): 127 - 139.
- [2] PAN Z, HE L, QIU L, et al. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite [J]. Cement & concrete composites, 2015, 58: 140 - 147.
- [3] YANG Q B. Durability and applications of magnesium phosphate material for rapid repair of pavements [J]. Advanced materials research, 2014, 857: 81 - 89.
- [4] MECHTCHERINE V. Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures [J]. Construction & building materials, 2013, 41 (41): 365 - 373.
- [5] 孟芹, 廖梓珩, 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.)
- [6] 苏柳铭. 磷酸镁水泥纤维改性及其路面修补应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
(SU Liuming. Research of magnesium phosphate cement modified by fiber and application in pavement repair [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.)
- [7] AHMED L, DAVID C, ABDELHAFID K, et al. A new approach to determine autogenous shrinkage of mortar at an early age considering temperature history [J]. Cement and concrete research, 2000, 30 (6): 915 - 922.
- [8] FILHO R D T, GHAVAMI K, SANJUÁN M A, et al. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibers [J]. Cement & concrete composites, 2005, 27 (5): 537 - 546.
- [9] 杨楠. 磷酸镁水泥基材料粘结性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
(YANG Nan. Research on the bonding properties of magnesium phosphate cement based materials [D]. Changsha: Hunan University, 2014.)
- [10] 陈兵, 吴震, 吴雪萍. 磷酸镁水泥改性试验研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33 (4): 29 - 34.
(CHEN Bing, WU Zhen, WU Xueping. Experimental research on the properties of modified MPC [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2011, 33 (4): 29 - 34.)
- [11] 黄承逵, 赵国藩. 《纤维混凝土结构技术规范》(CECS38: 2004) 介绍 [J]. 建筑结构, 2005 (4): 74 - 79.
(HUANG Chengkui, ZHAO Guofan. Brief introduction of technical specification for fiber reinforced concrete structures (CECS38: 2004) [J]. Building structure, 2005 (4): 74 - 79.)
- [12] 王玉柳. 一种新的砂浆抗裂性能评价方法 [J]. 福州大学学报, 2009 (3): 419 - 422.
(WANG Yuliu. A new evaluation method for anti-cracking performance of mortar [J]. Journal of Fuzhou university, 2009 (3): 419 - 422.)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
(The ministry of housing and urban-rural development of the People's Republic of China. Specification of concrete structure design: GB 50010—2010 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.)
- [14] BISSONNETTE B, PIERRE P, PIGEON M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials [J]. Cement & concrete research, 1999, 29 (10): 1655 - 1662.
- [15] MEHTA P K. Influence of fly ash characteristics on the strength of port land-fly ash mixtures [J]. Cement & concrete research, 1985, 15 (4): 669 - 674.
- [16] ZHU D, LI Z. Study of high early strength cement based on fly ash, magnesia and phosphate [J]. Materials technology, 2005, 20 (3): 136 - 141.
- [17] 林玮, 孙伟, 李宗津. 磷酸镁水泥中的粉煤灰效应研究 [J]. 建筑材料学报, 2010, 13 (6): 716 - 721.
(LIN Wei, SUN Wei, Li Zongjin. Study on the effects of fly ash in magnesium phosphate cement [J]. Journal of building materials, 2010, 13 (6): 716 - 721.)
- [18] 黄义雄. 磷酸镁水泥的粉煤灰改性与修补性能研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
(HUANG Yixiong. Study on the modified and repair properties of magnesium phosphate cement [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.)
- [19] 俞家欢, 熊攀辉, 汲野, 等. 聚丙烯纤维掺量对磷酸镁水泥混凝土性能影响 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33 (2): 266 - 274.
(YU Jiahuan, XIONG Panhui, JI Ye, et al. Effect of polypropylene fiber content on properties of magnesium phosphate cement concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2017, 33 (2): 266 - 274.)