

聚丙烯纤维掺量对磷酸镁水泥混凝土性能影响

俞家欢¹,熊攀辉¹,汲野¹,顾章义²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学理学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究聚丙烯纤维掺量对磷酸镁水泥混凝土力学性能和耐久性能的影响,得出其在磷酸镁水泥混凝土中的最佳掺量. 方法 在磷酸镁水泥混凝土中掺入不同掺量的聚丙烯纤维,通过抗折、抗压、耐磨、抗冻等试验,分析其产生的影响. 结果 当聚丙烯纤维掺量分别为 0.9 kg/m^3 和 1.1 kg/m^3 时,磷酸镁水泥混凝土试块的抗折强度比不掺加聚丙烯纤维时分别提高了 33.3% 和 18.5%;当聚丙烯纤维掺量为 1.1 kg/m^3 时,磷酸镁水泥混凝土的单位面积磨损量比不掺加聚丙烯纤维的混凝土试块降低了 25.4%;当磷酸镁水泥混凝土试块中聚丙烯纤维掺量为 1.1 kg/m^3 时,混凝土的相对动弹性模量损失最小,抗冻性能最好;聚丙烯纤维在磷酸镁水泥混凝土中的最佳掺量为 1.1 kg/m^3 . 结论 聚丙烯纤维是一种弹性模量低、强度高、耐磨、耐腐蚀的合成纤维,掺入到磷酸镁水泥混凝土中可以有效地提高混凝土的抗压强度、抗折强度、耐磨和抗冻等性能.

关键词 聚丙烯纤维;磷酸镁水泥混凝土;力学性能;耐久性能

中图分类号 TU525 文献标志码 A

Effect of Polypropylene Fiber Content on Properties of Magnesium Phosphate Cement Concrete

YU Jiahuan¹, XIONG Panhui¹, JI Ye¹, GU Zhangyi²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Mathematics and Physics, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The aim of this paper is to investigate the effect of polypropylene fiber content on mechanical properties and durability of magnesium phosphate cement concrete. With the different amount of polypropylene fiber added into magnesium phosphate cement concrete, the bending, compression, abrasion resistance, frost resistance tests are done to analyze the impact on magnesium phosphate cement concrete. When the polypropylene fiber content are respectively 0.9 kg/m^3 and 1.1 kg/m^3 , the flexural strength of magnesium phosphate cement concrete test block was increased by 33.3% and 18.5% compared with that without polypropylene fiber. When the polypropylene fiber content is 1.1 kg/m^3 , the wear rate of the unit area of magnesium phosphate cement concrete is 25.4% lower than that of concrete without adding polypropylene fiber. When the content of polypropyl-

收稿日期:2016-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51478276)

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

ene fiber is 1.1 kg/m^3 , the relative dynamic elastic modulus of concrete is the least, and the frost resistance is the best. The best mixing amount of polypropylene fiber in magnesium phosphate cement concrete is 1.1 kg/m^3 . Polypropylene fiber is a kind of synthetic fiber with low elastic modulus, high strength, wear resistance and corrosion resistance. It can effectively improve the compressive strength, wear resistance and frost resistance of magnesium phosphate cement concrete.

Key words: polypropylene fiber; magnesium phosphate cement concrete; mechanical properties; durability

20世纪80年代初,国内外的一些专家和学者就开始着手将纤维加入到混凝土中以提高混凝土的力学性能和耐久性能.聚丙烯纤维具有较高的抗塑性收缩性能和抗裂性能,加入到混凝土中能够横跨混凝土中的裂缝防止混凝土中微裂缝的产生和发展^[1-8].

日本研究者在混凝土拌合过程中加入适量的网状聚丙烯纤维,改善了混凝土的承载能力^[9].美国专家在混凝土中掺入一定比例的微纤维,增强了混凝土的抗拉极限承载力;德克萨大学的 D. W. FOWLER^[10]将聚合物加入到普通混凝土中,提高了混凝土的抗折、抗压强度和耐久性能;J. H. LEE 等人^[11]的研究表明,聚丙烯纤维掺入混凝土中对构件的抗弯承载力提高显著;代兵权^[12]对聚丙烯纤维混凝土的耐久性试验研究表明,聚丙烯纤维掺入会对混凝土的流动性有降低效果,并随着纤维掺量的增长而降低,28 d 的聚丙烯纤维混凝土的抗压强度影响基本无变化,对混凝土的开裂和渗透性有很强的抑制效果.

掺加一定量的聚丙烯纤维可以有效提高水泥混凝土的抗折强度、耐磨性能、抗冻性能以及干缩性能^[13-18].基于此,笔者通过在磷酸镁水泥混凝土中掺入不同掺量的聚丙烯纤维,研究聚丙烯纤维对磷酸镁水泥混凝土力学性能和耐久性能的影响,并通过分析找出了聚丙烯纤维在磷酸镁水泥混凝土中的最佳掺量为 1.1 kg/m^3 .

1 试验原材料与配合比

试验原材料:沈阳美洋新材料科技有限公司生产的磷酸镁水泥;I级粉煤灰,细度为17.8%,需水量比为98%;4.75~26.5 mm连续级配石灰岩碎石;砂为中砂,产自北京,细度模数2.67;缓凝剂用硼砂^[19];符合《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2006)的自来水;萘系减水剂;北京融耐尔工程材料有限公司所生产的网状聚丙烯纤维,具有耐酸碱、不吸水、抗腐蚀,其性能指标见表1.

配合比:磷酸镁水泥混凝土的配合比见表2.

表1 聚丙烯纤维的技术指标

Table 1 Fiber main technical parameters

长度/mm	形状	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	直径/ μm	熔点/ $^{\circ}\text{C}$
12	束状单丝	0.91	276	3 793	18	165

表2 磷酸镁水泥混凝土的配合比

Table 2 Mix ratio of magnesium phosphate cement concrete

磷酸镁水泥	粉煤灰	硼砂	砂	石子	减水剂	早强剂	引气剂
385	165	44	605	1 200	4.4	2.75	0.385

2 试验方法

磷酸镁水泥混凝土的抗压、抗折、耐磨、

抗冻以及干缩性能试验严格按照《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)中的试验步骤进行操作.抗压、抗折试

块分别采用长宽高为 100 mm × 100 mm × 100 mm 和 100 mm × 100 mm × 400 mm 的非标准试块,并分别乘以尺寸换算系数 0.95 和 0.85 换算成标准尺寸试件强度.特种水泥早期强度高,凝结时间短,因此,磷酸镁水泥混凝土试块可在成型后 30 min 进行脱模.混凝土的耐磨性能指标用单位面积磨损量来表示,磨损量越低,表明混凝土的耐磨性能越好.磷酸镁水泥混凝土的抗冻试验采用 TDR2-A 多功能混凝土抗冻试验机,每次冻融循环控制在 2~5 h,冻和融之间的转换不应超过 10 min,每隔 25 次冻融循环测量一次混凝土试块的横向基频,当混凝土的相对动弹性模量降低到 60% 以下时,即停止冻融循环试验.干缩试验,控制干缩间的温度为(20±2)℃,相对湿度 60%±5%,千分表的初始读数以居中为宜.试件成型 3 d 后从养护间移到干缩间,并读取混凝土试块从移动到干缩间起 1 d、3 d、7 d、14 d、28 d 的千分表的数值.

3 试验结果与分析

3.1 聚丙烯纤维对磷酸镁水泥混凝土抗压抗折强度的影响

控制磷酸镁水泥混凝土的原材料、配合比和用量不变,在混凝土中分别掺入 0、0.7 kg/m³、0.9 kg/m³、1.1 kg/m³、1.3 kg/m³ 的聚丙烯纤维,聚丙烯纤维的形貌如图 1 所示.研究聚丙烯纤维掺量对混凝土抗压、抗折强度的影响.



图 1 聚丙烯纤维的形貌

Fig. 1 Morphology of polypropylene fiber

混凝土立方体抗压强度计算:

$$f_{cu} = \frac{F_{\max}}{A} \quad (1)$$

式中: f_{cu} 为方体抗压强度,MPa; F_{\max} 为最大荷载,N; A 为试件承压面积,mm².

试件的试验结果为 3 个试件的算数平均值,精确到 0.1 MPa,若其中最大值或最小值与中间值之差大于中间值的 15%,则将中间值取为该组试件的抗压强度值,若其中最大值和最小值与中间值之差均大于中间值的 15%,则该组数据无效.抗压试验机的生产厂家为东京试验机制作厂,型号为 AC-300DE,如图 2 所示.

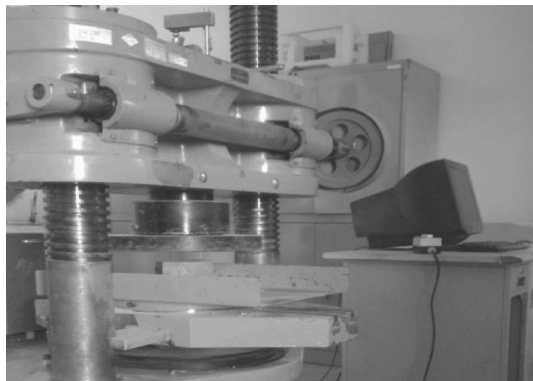


图 2 抗压试验机

Fig. 2 Compression test machine

混凝土抗折强度计算:

$$f_{ic,m} = \frac{F_{\max}l}{bh^2} \quad (2)$$

式中: $f_{ic,m}$ 为混凝土抗折强度,MPa; F_{\max} 为最大荷载,N; l 为支座间距,mm; b 为试件截面宽度,mm; h 为试件截面高度,mm.

3 个试件中如果有一个折断面位于两个集中荷载之外,则混凝土抗折强度值按该组另外两个试件的试验结果计算.若有两个试件的下边缘断裂位置都位于两个集中荷载作用线之外,则该组试件结果无效.以 3 个试件的算术平均值作为该组试件抗折强度值,若其中最大值或最小值与中间值之差大于中间值的 15%,则取中间值作为该组试件的抗折强度值,若其中最大值和最小值与中间值之

差均大于中间值的15%,则该组数据无效.抗折试验机采用山东省荣成市石岛仪器厂的产品,如图3所示.

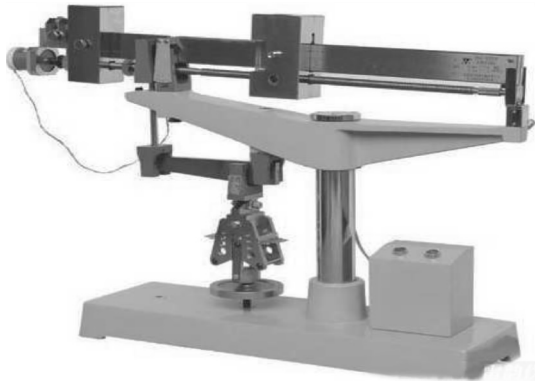


图3 抗折试验机

Fig. 3 Bending test machine

抗压、抗折试验所得数据分别如图4和图5所示.

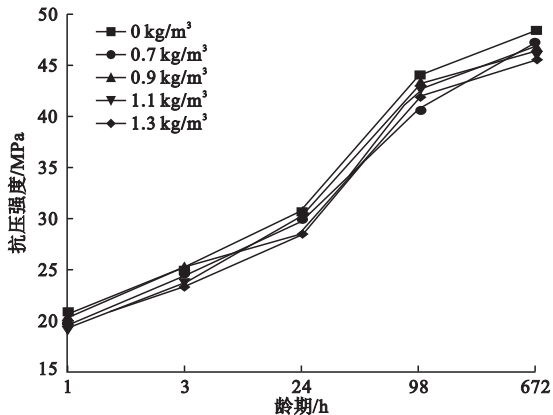


图4 抗压强度

Fig. 4 Compressive strength

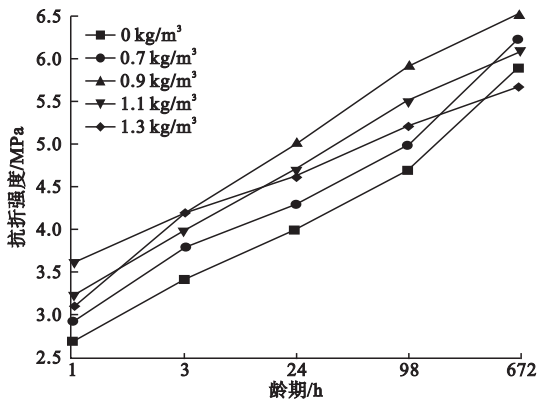


图5 抗折强度

Fig. 5 Flexural strength

从图4中可以看出,随着聚丙烯纤维掺

量的增加,磷酸镁水泥混凝土试块的抗压强度变化并不明显.纤维掺量分别为 0.9 kg/m^3 和 1.1 kg/m^3 的磷酸镁水泥混凝土试块1 h的抗压强度比不参加聚丙烯纤维的混凝土试块强度分别降低了2%和7%,28 d的抗压强度比不参加纤维的抗压强度分别降低了4%和3%.这是因为聚丙烯纤维的弹性模量较低,加入到混凝土中增加了混凝土的稠度并产生了弱界面效应,阻碍了混凝土强度的增长.但由于聚丙烯纤维在磷酸镁水泥混凝土中的掺量较低,影响不太明显.因此,在磷酸镁水泥混凝土中掺入少量的聚丙烯纤维对磷酸镁水泥混凝土试块的抗压强度没有太大的影响甚至有使强度降低的趋势.

从图5中的数据看出,磷酸镁水泥混凝土中掺入适量的聚丙烯纤维可以显著提高混凝土的抗折强度,且磷酸镁水泥混凝土的抗折强度随着纤维掺量的增加整体呈先增加后减小的趋势.当聚丙烯纤维掺量达到 0.9 kg/m^3 和 1.1 kg/m^3 时,磷酸镁水泥混凝土试块1 h的抗折强度分别能够达到3.6 MPa和3.2 MPa,比不参加纤维的磷酸镁水泥混凝土试块的抗折强度分别增加了33.3%和18.5%.因为纤维掺量为 0.9 kg/m^3 时的磷酸镁水泥混凝土1 d(24 h)、7 d(98 h)、28 d(672 h)的抗折强度都高于其他纤维掺量的抗折数据.因此,在磷酸镁水泥混凝土中掺入适量的聚丙烯纤维能够比较明显的提高混凝土的抗折强度,且从抗折强度的角度分析,聚丙烯纤维的最佳掺量为 0.9 kg/m^3 .

3.2 聚丙烯纤维对磷酸镁水泥混凝土耐磨性能的影响

磷酸镁水泥混凝土耐磨性的指标以 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 标准试块受磨损侧面单位面积的磨损量 G_c 来表示.聚丙烯纤维在磷酸镁水泥混凝土中的掺量分别为 0 、 0.9 kg/m^3 、 1.1 kg/m^3 、 1.3 kg/m^3 、 1.5 kg/m^3 .本试验方法依据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTJ E30—2005)之水泥混凝土耐磨性试验方法.按下式计算每一试

件的磨损量,以单位面积的磨损量来表示:

$$G_c = \frac{m_1 - m_2}{0.0125} \quad (3)$$

式中: G_c 为单位面积的磨损量, kg/m^2 ; m_1 为试件的初始质量, kg ; m_2 为试件磨损后的质量, kg ; 试件磨损表面积为 0.0125 m^2 .

试验结果为3个试件单位面积磨损量的算数平均值,磨损量的结果精确到 $0.001 \text{ kg}/\text{m}^2$, 其中一个试件单位面积磨损量大于平均值的15%时,试验的结果为其他两个试件的算数平均值,当有两个试件单位面积磨损量都大于平均值的15%时,则作废此次试验,另做试件. 试验结果如图6所示.

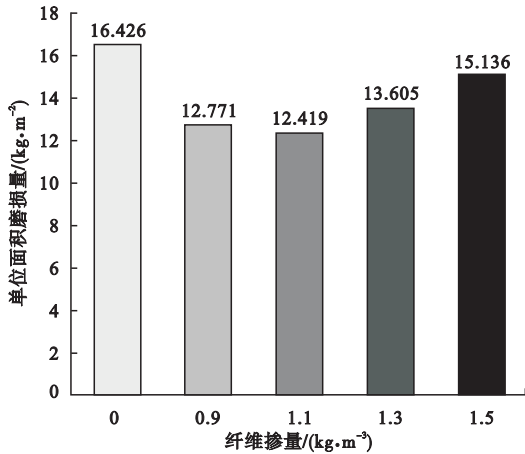


图6 不同纤维掺量的磷酸镁水泥混凝土试块单位面积的磨损量

Fig. 6 Wear capacity of the unit area of magnesium phosphate cement concrete with different fiber content

当负荷和磨损次数一定时,混凝土试块越坚硬,单位面积磨损量越小,表明混凝土的耐磨性能越好. 从图6可以看出,掺加聚丙烯纤维一定程度上降低了磷酸镁水泥混凝土试块单位面积的磨损量,提高了磷酸镁水泥混凝土的耐磨性能. 随着聚丙烯纤维掺量的增加,混凝土试块单位面积的磨损量呈先降低后升高的趋势. 当纤维掺量增加到 $1.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时,混凝土试块的单位面积磨损量迅速降低到了 $12.419 \text{ kg}/\text{m}^2$, 低于掺量为 $0.9 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的试块. 与此同时,对比不掺加聚丙烯纤维的混凝土试块,单位面积磨损量降低了25.4%.

综上所述,在磷酸镁水泥混凝土试块中掺入适量的聚丙烯纤维可以大幅度提高混凝土试块的耐磨性能. 随着纤维掺量的继续增加,混凝土试块的单位面积磨损量呈上升趋势,耐磨性能降低. 因此,单从混凝土耐磨性能这一方面考虑,聚丙烯纤维在磷酸盐水泥混凝土中的最佳掺量为 $1.1 \text{ kg}/\text{m}^3$.

3.3 聚丙烯纤维对磷酸镁水泥混凝土抗冻性能的影响

本试验试件共分为5组,每组3个试块,试块的长宽高为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,纤维掺量依次为 $0, 0.9 \text{ kg}/\text{m}^3, 1.1 \text{ kg}/\text{m}^3, 1.3 \text{ kg}/\text{m}^3, 1.5 \text{ kg}/\text{m}^3$,试验方法依据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)中的抗冻性能试验(快冻法),利用全自动冻融仪进行试件的冻结和融化,试件中心温度控制在 $(18 \pm 2)^\circ\text{C}$,每次冻融循环时间3 h完成,每隔25次冻融循环对试件进行一次横向基频的测试并称重,试件在冻融试验过程中均全部浸于水中,冻融试验结果均采用拍照记录,并测定试件的相对动弹性模量和重量损失率.

主要仪器设备:快速冻融试验装置、试件盒和动弹性模量测定仪. 图7为冻融装置的运行界面,图8为冻融箱,图9为动弹性模量测定仪.



图7 冻融装置的运行界面

Fig. 7 Operation interface of freezing thawing device

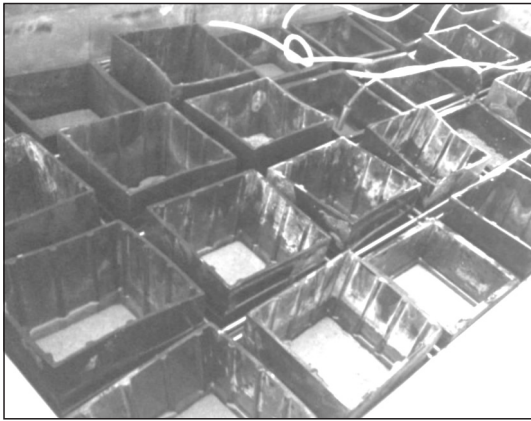


图8 冻融箱

Fig. 8 Freezing thawing box

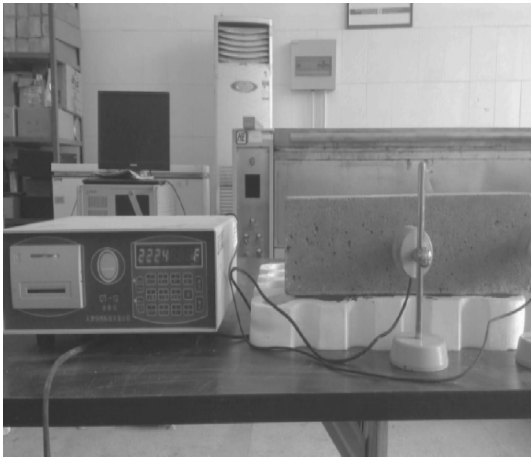


图9 动弹性模量测定仪

Fig. 9 Dynamic elastic modulus measuring instrument

对磷酸镁水泥混凝土试块进行了100次冻融循环,聚丙烯纤维掺量对磷酸镁水泥混凝土相对动弹性模量的影响如图10所示,不同冻融循环次数后的相对动弹性模量见表3.

表3 不同冻融循环次数后磷酸镁水泥混凝土的相对动弹性模量

Table 3 Relative dynamic elastic modulus of magnesium phosphate cement concrete after different freeze-thaw cycles

编号	相对动弹性模量			
	循环25次	循环50次	循环75次	循环100次
A	82.84	79.99	73.01	69.72
B	92.34	90.01	80.94	76.37
C	92.96	88.07	84.00	78.50
D	68.72	50.11	—	—
E	42.21	—	—	—

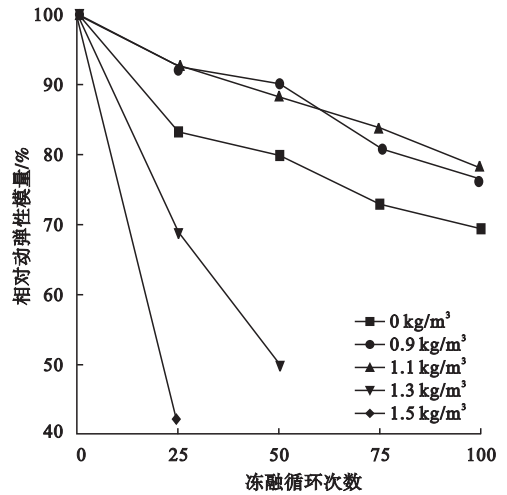


图10 聚丙烯纤维掺量对磷酸镁水泥混凝土相对动弹性模量的影响

Fig. 10 Effect of polypropylene fiber content on the relative dynamic elastic modulus of magnesium phosphate cement concrete

从图10和表3可以看出,随着冻融循环次数的增加,相对动弹性模量都呈现出下降趋势.当磷酸镁水泥混凝土试块中不掺入纤维,25次冻融循环时相对动弹性模量为82.84%,降低幅度比较大,这与磷酸镁水泥本身的特性有关,100次冻融循环后相对动弹性模量降低到了69.72%,抗冻性能比较差.

从图10和表3中亦可看出,当纤维掺量为0.9~1.1 kg/m³时,磷酸镁水泥混凝土的相对动弹性模量比较高,没有明显出现下降趋势,平均高出参加纤维的磷酸镁水泥混凝土10个百分点左右.显然,聚丙烯纤维掺

量为 $0.9 \sim 1.1 \text{ kg/m}^3$ 时,可使磷酸镁水泥混凝土的抗冻性能有一定幅度的提高. 究其原因:一方面,聚丙烯纤维能够缓解温度变化引起的混凝土内部的应力作用,阻止微裂缝的产生和发展,从而抑制水渗入到试块中,减少外界温度和水对混凝土试块强度和质量的影 响;另一方面,掺入适量的聚丙烯纤维能提高磷酸镁水泥混凝土的极限抗拉强度,从而抵抗混凝土内部水分在较低温度下体积膨胀时对孔隙壁产生的拉应力.

另外,虽然纤维掺量在 0.9 kg/m^3 、冻融循环次数为 50 次时,磷酸镁水泥混凝土的相对动弹性模量为 90.01%,略大于纤维掺量为 1.1 kg/m^3 时的数据,但在冻融循环 25 次、75 次、100 次后,纤维掺量为 1.1 kg/m^3 的混凝土的相对动弹性模量都比纤维掺量为 0.9 kg/m^3 时的相对动弹性模量高. 随着聚丙烯纤维掺量的逐渐增加,当纤维掺量达到 1.3 kg/m^3 和 1.5 kg/m^3 时,冻融循环 50 次后,3 组试件的相对动弹性模量降低到 60% 以下,立刻停止冻融循环,抗冻性极差. 这是因为混凝土试块中如果掺加了过量的聚丙烯纤维,会导致混凝土试块的密实度减小,过多的水渗入到混凝土试件的空隙中,从而降低了混凝土试块的横向基频,导致混凝土试块的相对动弹性模量骤然降低,不具有良好的抗冻性. 因此,少量的聚丙烯纤维能够提高磷酸镁水泥混凝土的抗冻性能,从相对动弹性模量的角度来分析,聚丙烯纤维在磷酸镁水泥混凝土中的最佳掺量为 1.1 kg/m^3 .

3.4 聚丙烯纤维对磷酸镁水泥混凝土干缩性能的影响

干缩试验以 3 个试件为一组,混凝土的拌合和成型按《水泥混凝土试件制作与硬化水泥混凝土现场取样方法》(T0551—2005)的规定进行. 试件在空气中养护 3 d 后取出,马上将试件放到试件架上,然后调整千分表,使其初始值调至 0.5 mm 左右. 主要仪器设备有试模、千分表和试件架等(见图 11、12).



图 11 千分表

Fig. 11 Dial indicator



图 12 干缩试验

Fig. 12 Air shrinkage test

某一龄期混凝土的干缩率计算:

$$S_i = \frac{X_{01} - X_{i1}}{L_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: S_i 为龄期 i 天的混凝土干缩率,%; L_0 为混凝土试件的长度,mm; X_{01} 为千分表的初始数值,mm; X_{i1} 为龄期 i 天时千分表的数值,mm.

取 3 个试件干缩率的算术平均值作为试验结果,干缩率计算精确至 0.0001% .

在磷酸镁水泥混凝土试块中聚丙烯纤维的掺量分别为 0 、 0.7 kg/m^3 、 0.9 kg/m^3 、 1.1 kg/m^3 、 1.3 kg/m^3 时,分析聚丙烯纤维的掺量对磷酸镁水泥混凝土干缩性能的影响. 不同龄期不同纤维掺量的磷酸镁水泥混凝土试块的干缩率如图 13 所示.

由图 13 可以看出,当聚丙烯纤维用量达到 0.9 kg/m^3 时,3 d 和 7 d 的干缩率分别为 0.00274% 和 0.00649% ,约为普通混凝土相同龄期干缩率的 $1/10$,对比不掺加聚丙烯

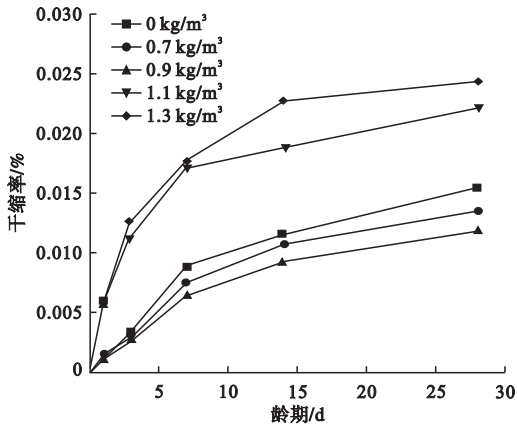


图 13 聚丙烯纤维掺量对磷酸镁水泥混凝土干缩率的影响

Fig. 13 Dosage of polypropylene fiber shrinkage effect on magnesium phosphate cement concrete

纤维时的磷酸镁水泥混凝土试块,干缩率分别降低了 15.5% 和 25.7%。这是因为聚丙烯纤维的弹性模量本身就低,断裂伸长率也大于普通混凝土,且聚丙烯纤维乱向分布削弱了混凝土的塑性收缩,提高了混凝土的延性,改善了混凝土的收缩变形。但是,过量的聚丙烯纤维也容易使磷酸镁水泥混凝土的干缩率增大,造成不必要的影响。从混凝土干缩性能的角度分析,聚丙烯纤维在磷酸镁水泥混凝土中的最佳掺量为 0.9 kg/m^3 。

4 结 论

(1) 在磷酸镁水泥混凝土中掺入少量的聚丙烯纤维对混凝土的抗压强度没有太大的影响甚至有使强度降低的趋势,但掺入少量的聚丙烯纤维能够显著提高磷酸镁水泥混凝土的抗折强度。当聚丙烯纤维掺量分别为 0.9 kg/m^3 和 1.1 kg/m^3 时,磷酸镁水泥混凝土试块的抗折强度比不掺加聚丙烯纤维时分别提高了 33.3% 和 18.5%。

(2) 磷酸镁水泥混凝土单位面积磨损量随聚丙烯纤维掺量的增加呈先减小后增大的趋势,掺入适量的聚丙烯纤维能够较大程度上提高混凝土的耐磨性能。当聚丙烯纤维掺

量为 1.1 kg/m^3 时,磷酸镁水泥混凝土的单位面积磨损量比不掺加聚丙烯纤维的混凝土试块降低了 25.4%。

(3) 聚丙烯纤维在磷酸镁水泥混凝土中能够阻止微裂缝的产生和发展,抑制外界的水渗入到混凝土内部,从而提高了混凝土的抗冻性能。当磷酸镁水泥混凝土试块中聚丙烯纤维掺量为 1.1 kg/m^3 时,混凝土的相对动弹性模量损失最小,抗冻性能最好。

(4) 磷酸镁水泥混凝土试块中聚丙烯纤维的掺量为 0.9 kg/m^3 时,其 3 d 和 7 d 的干缩率比不掺加纤维时的磷酸镁水泥混凝土试块的干缩率降低了 15.5% 和 25.7%。表明适量的聚丙烯纤维能够改善混凝土的收缩变形,提高磷酸镁水泥混凝土的干缩性能。

(5) 聚丙烯纤维掺量在 0.9 kg/m^3 和 1.1 kg/m^3 时对磷酸镁水泥混凝土的抗折强度数据相差不大,综合考虑得出:聚丙烯纤维在磷酸镁水泥混凝土中的最佳掺量为 1.1 kg/m^3 。

参考文献

- [1] 王晨飞,牛荻涛. 聚丙烯纤维混凝土的耐久性试验研究[J]. 混凝土,2011,10:64-67.
(WANG Chenfei, NIU Ditao. Experimental study on the durability of polypropylene fiber concrete[J]. Concrete,2011,10:64-67.)
- [2] 程红,高强,丹盈. 聚丙烯纤维混凝土冻融损伤试验研究[J]. 东南大学学报,2010,11:75-79.
(CHENG Hong, GAO Qiang, DAN Ying. Experimental study on freeze-thaw damage of polypropylene fiber concrete[J]. Journal of southeast university,2010,11:75-79.)
- [3] 刘数华,阎培渝. 聚丙烯纤维对高强混凝土性能的影响[J]. 材料科学与工艺,2008,16(6):885-888.
(LIU Shuhua, YAN Peiyu. Effect of polypropylene fiber on the properties of high strength concrete[J]. Materials science and technology, 2008,16(6):885-888.)
- [4] 宁艳红. 聚丙烯纤维混凝土受高温作用后的渗透性[D]. 北京:北京交通大学,2010.
(NING Yanhong. The permeability of polypropylene fiber concrete after high temperature effect[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,

- ty,2010.)
- [5] 汪宏涛,曹巨辉,薛明,等.新型超快硬磷酸盐水泥修补材料的研究[J].新型建筑材料,2009(7):49-51.
(WANG Hongtao, Cao Juhui, XUE Ming, et al. Research on new super-fast and hard phosphate cement repair materials [J]. New building materials,2009(7):49-51.)
- [6] 李金玉,曹建国,徐文雨,等.混凝土冻融破坏机理的研究[J].水利学报,1999(1):41-50.
(LI Jinyu, CAO Jianguo, XU Wenyu, et al. The mechanism of concrete freezing and thawing damage research [J]. Journal of water conservancy,1999(1):41-50.)
- [7] 姚燕.中国混凝土材料耐久性研究的新进展[J].混凝土与水泥制品,2012(12):39-42.
(YAO Yan. New progress in the study of the durability of concrete material in China [J]. Concrete and cement products, 2012(12):39-42.)
- [8] 雒亚莉.新型早强磷酸镁水泥的试验研究和工程应用[D].上海:上海交通大学,2010.
(LUO Yali. New early strength research and engineering application of magnesium phosphate cement [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University,2010.)
- [9] BANTHIA N, DUBEAU S. Carbon and steel microfiber-reinforced cement-based composites for thin repairs [J]. Journal of materials in civil engineering,1994,6(1):88-99.
- [10] FOWLER D W. Polymers in concrete: a vision for the 21st century [J]. Cement & concrete composites,1999(21):449-452.
- [11] LEE J H, CHO B, CHOI E, et al. Experimental study of the reinforcement effect of macro-type high strength polypropylene on the flexural capacity of concrete [J]. Construction and building materials,2016,126:967-975.
- [12] 代兵权.改性聚丙烯纤维混凝土耐久性能试验研究[D].郑州:郑州大学,2010.
(DAI Bingquan. Modified polypropylene fiber concrete durability performance test research [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University,2010.)
- [13] 史建峰.早强剂和缓凝减水剂对混凝土性能的影响[J].山西建筑,2011(2):108-109.
(SHI Jianfeng. Early strength agent and water reducing agent effect on the performance of concrete [J]. Shanxi building,2011(2):108-109.)
- [14] 黄建斌.一种新型水泥混凝土路面修补材料性能的研究[J].公路工程,2009(4):161-163.
(HUANG Jianbin. Study on the performance of a new type of cement concrete pavement repair material [J]. Highway engineering,2009(4):161-163.)
- [15] 李鹏晓,杜亮波,李东旭.新型早强磷酸镁水泥的制备和性能研究[J].硅酸盐通报,2008(1):20-25.
(LI Pengxiao, DU Liangbo, LI Dongxu. Study on the preparation and properties of new type early strength magnesium phosphate cement [J]. Silicate bulletin,2008(1):20-25.)
- [16] 杨建明,钱春香,焦宝祥,等.缓凝剂硼砂对磷酸镁水泥水化硬化特性的影响[J].材料科学与工程学报,2010,28(1):31-35.
(YANG Jianming, QIAN Chunxiang, JIAO Baoxiang, et al. Effect of borax on hydration and harden process of magnesia-phosphate cement pastes [J]. Journal of materials science and engineering,2010,28(1):31-35.)
- [17] 常远.磷酸镁水泥耐水性及抗钢筋锈蚀性能研究[D].长沙:湖南大学,2014.
(CHANG Yuan. Research on water resistance and corrosion resistance of magnesium phosphate cement [D]. Changsha: Hunan University,2014.)
- [18] ISLAM G M S, GUPTA S D. Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete [J]. International journal of sustainable built environment,2016,5(2):345-354.
- [19] 薛明,曹巨辉,蒋江波,等.硼砂对磷酸镁水泥性能影响及微观作用机理分析[J].后勤工程学院学报,2011(6):52-55.
(XUE Ming, CAO Juhui, JIANG Jiangbo, et al. Analysis of the effect of borax on properties of magnesium phosphate cement and micro mechanism [J]. Journal of logistical engineering university,2011(6):52-55.)