

预加荷载作用下粉煤灰/硅灰纤维混凝土 氯离子渗透性能研究^{*}

何亚伯[†], 陈保勋, 刘素梅, 忽彦鹏

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要:采取氯离子渗透性试验(NEL法)和微观扫描电镜(SEM)试验相结合的方法,研究未加载及施加不同应力水平轴压荷载时单掺聚丙烯纤维、单掺复合矿物质(粉煤灰/硅灰,质量比4:1),以及混掺聚丙烯纤维和复合矿物质时混凝土中氯离子扩散系数,进而研究混掺聚丙烯纤维与复合矿物质混凝土抗氯离子渗透性能。研究表明:未加载时,混掺适量的复合矿物质与聚丙烯纤维,混凝土试块在微观结构上表现为骨料和水泥石间的密实性提高,裂纹数量和宽度明显减小;在宏观性能上表现为氯离子扩散系数降低,与单掺聚丙烯纤维和单掺复合矿物质相比,混凝土的抗氯离子渗透性有显著提高。混凝土的抗氯离子渗透性的最优配比是:混掺0.1%聚丙烯纤维和25%复合矿物质。加载条件下,氯离子扩散系数呈现先略微下降再上升趋势。在相同应力比下,混掺聚丙烯纤维和复合矿物质混凝土的氯离子扩散系数最小。

关键词:粉煤灰;聚丙烯纤维;轴压荷载;抗氯离子渗透性能

中图分类号:TU528.45

文献标志码:A

Study on Resistance of Chloride Ion Penetration in Fly Ash / Silicon Ash Polypropylene Fiber Concrete under Preloading Condition

HE Yabo[†], CHEN Baoxun, LIU Sumei, HU Yanpeng

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Through NEL experimental method and scanning electron microscopy test (SEM), the resistance of chloride ion penetration in the concrete admixed with polypropylene fiber, complex minerals (fly ash/silicon ash with weight ratio of 4:1), and polypropylene fiber under axial compressive loading or not was studied. The results show that, under no-load condition, the compactness between aggregate and cement stone improves, and the number and the width of the crevice obviously decrease in concrete specimens admixed with appropriate amount of polypropylene fiber and complex minerals. From the view of macro property, the diffusion coefficients of chloride ion decrease, and the anti-chloride ion permeability obviously increases when compared with that of the concrete admixed with polypropylene fiber or multiple minerals. The optimal proportion of the concrete for anti-chloride ion permeability is the composition of

^{*} 收稿日期:2016-03-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278388), National Natural Science Foundation of China(51278388)

作者简介:何亚伯(1956—),男,湖南长沙人,武汉大学教授

[†] 通讯联系人, E-mail: Hyb5610@163.com

0.1% polypropylene fiber and 25 % complex minerals co-doped. The diffusion coefficients of chloride ion slightly decrease firstly and then increase in concrete under axial compressive load. Under the same stress ratio, the chloride ion diffusion coefficient is the minimum for concrete with polypropylene fiber and complex minerals co-doped.

Key words: fly ash; polypropylene fibers; axial compressive load; resistance of chloride ion penetration

混凝土结构耐久性是土木工程研究领域的一个重要方面,钢筋锈蚀问题是影响结构耐久性的关键问题之一.当使用环境中的氯离子或搅制混凝土过程中混入的氯离子达到一定浓度时会大大加速钢筋的锈蚀速度.因此最新的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)对氯离子含量提出了更严格的要求.对于环境中的氯离子,其扩散速度取决于结构致密性、裂缝形态及开展程度.

混凝土结构在施工及使用过程中,裂缝不断形成和发展;结构在早期硬化过程中会产生初始微裂缝;在后期受荷过程中原有裂缝不断发展,同时伴随着新的裂缝出现与发展.裂缝的存在形成了许多搬运介质的运输通道,使氯离子得以更快速地进入混凝土内部腐蚀钢筋. Sahmaran^[1]研究认为,当裂缝宽度大于 135 μm 时,氯离子扩散系数显著增大,开裂混凝土扩散系数比未开裂混凝土一般大 1~2 个数量级.由此可见,减少混凝土中微裂缝的产生及延缓裂缝的扩展可以有效地提高混凝土的抗氯离子渗透性能.

在混凝土中掺入矿物质掺合料和聚丙烯纤维都可以有效地减少混凝土中微裂缝的产生及延缓裂缝的扩展.早在 20 世纪 30 年代,美国学者 Davis 研制出了粉煤灰水泥混凝土,这标志着粉煤灰作为混凝土矿物掺合料的诞生.此后,中外学者对添加了粉煤灰、硅灰等矿物质混凝土的物理力学性能和耐久性进行了大量的研究^[2-9].研究结果表明:粉煤灰能减少混凝土初期的收缩率、提高其抗裂性能,而且不会造成混凝土后期强度和耐久性降低;硅灰对混凝土基体里孔结构作用很大,可以显著提高混凝土密实性.聚丙烯纤维抗拉强度较高,对混凝土早期干缩裂缝的产生和发展起到了良好的抑制作用;同时乱向分布的纤维对于改善混凝土内部结构、降低孔隙率、阻碍毛细管通道也起到了较好的作用.因此纤维混凝土作为一种新型材料在国内外被广泛研究^[10-16],并得到迅速发展.

综上所述,在混凝土中添加一定量的粉煤灰、硅灰、聚丙烯纤维,均可提高混凝土抗氯离子渗透性能.以往的研究主要集中在单掺矿物质及单掺聚丙烯纤维时混凝土氯离子渗透性.由于矿物质、聚丙烯纤维对混凝土微观结构的作用机理不同,将不同类型的矿物质与聚丙烯纤维混掺时获得的材料性能会更优.氯离子扩散系数是反映混凝土抗氯离子渗透性能的定量指标,因此,本文采用氯离子渗透性试验(NEL 法)和微观扫描电镜(SEM)试验相结合的方法,研究未加载及加载条件下,单掺聚丙烯纤维、单掺复合矿物质(粉煤灰/硅灰,质量比 4:1),以及混掺聚丙烯纤维和复合矿物质时混凝土中氯离子扩散系数,从混凝土试块的微观结构及宏观性能 2 个方面研究混掺聚丙烯纤维与复合矿物质混凝土抗氯离子渗透性能,并找出最优配合比,供工程参考.

1 试验设计

1.1 试验原料

试验所采用的原料为 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥; I 级粉煤灰,其表观密度为 2 090 kg/m³,需水比为 88%,平均粒径为 9.61 μm,活性指数为 90%,其化学组成见表 1;硅灰的表观密度为 2 080 kg/m³,平均粒径为 0.4 μm,比表面积为 23 m²/g,其化学组成见表 2;碎石为粒径 5~20 mm 连续级配,密度约 2 800 kg/m³;普通江砂为中砂,其细度模数为 2.7,含水率为 5%;聚羧酸盐高效减水剂为胶凝材料的 0.8%,减水率为 30%;纤维采用改性聚丙烯单丝纤维,其性能参数见表 3.

表 1 粉煤灰的化学组成
Tab. 1 Chemical composition of fly ash

成分	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	烧失量
w/%	2.54	57.94	8.63	25.80	0.58	0.92	3.48

表 2 硅灰化学组成

Tab. 2 Chemical composition of Silicon ash

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅
w/%	95.48	0.41	0.03	0.44	0.39	0.72	0.25	0.42	0.69

表 3 聚丙烯单丝纤维的物理性能

Tab. 3 Physical properties of polypropylene filament fiber

密度 (g·cm ⁻³)	初始模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	断裂伸长率 /%	直径 /μm
0.91	>3	>270	<40	36

1.2 混凝土配合比

试验选取纤维掺量、复合矿物质掺量 2 个影响因素,每个因素选择 4 个水平(见表 4). 根据本课题组前期成果^[17-18],纤维掺量按照长度 6 mm 和 9 mm 质量比为 2:1 配合,复合矿物质采用粉煤灰和硅灰混掺,二者比例为 4:1. 根据《混凝土结构耐久性设计与施工指南》NEL 法中有关规定,试块采用直径 100 mm,厚度为 50 mm 的圆柱体混凝土试块,水胶比为 0.39,混凝土强度等级按照 C45 配置,砂、石、减水剂分别按照 545 kg/m³, 1 173 kg/m³, 4.52 kg/m³ 配置,混凝土配合比见表 5.

表 4 试验因素水平

Tab. 4 Factors and levels in experiment

水平	ρ _{纤维} / %	w _{复合矿物质} / %
A	0	0
B	0.05	25
C	0.10	30
D	0.15	35

表 5 混凝土配合比

Tab. 5 Mix proportion design of concrete kg/m³

批次	设计配合类别	水泥	复合 矿物质	聚丙烯 纤维
1	C45	452	0	0
2	C45F25P0	339	90/23	0
3	C45F30P0	316	109/27	0
4	C45F35P0	294	126/32	0
5	C45F0P0.05	452	0	0.455
6	C45F25P0.05	339	90/23	0.455
7	C45F30P0.05	316	109/27	0.455
8	C45F35P0.05	294	126/32	0.455
9	C45F0P0.1	452	0	0.91
10	C45F25P0.1	339	90/23	0.91
11	C45F30P0.1	316	109/27	0.91
12	C45F35P0.1	294	126/32	0.91
13	C45F0P0.15	452	0	1.365
14	C45F25P0.15	339	90/23	1.365
15	C45F30P0.15	316	109/27	1.365
16	C45F35P0.15	294	126/32	1.365

注:C—混凝土,F—复合矿物质,P—聚丙烯纤维;如 F30P0.1 表示:复合矿物质的质量掺量为 30%,聚丙烯纤维的体积掺量为 0.1%,表中复合矿物质掺量中粉煤灰与硅灰之比为 4:1.

试块共 240 个,其中素混凝土试块 15 个,单掺聚丙烯纤维试块 45 个,单掺复合矿物质试块 45 个,混掺聚丙烯纤维和复合矿物质混凝土试块 135 个. 试件自然养护至 28 d 龄期时开始试验,试验共分 16 批次,每批试件 15 个,其中每 3 个为 1 组,共 5 组.

1.3 试验步骤

1)对每批次的一组试块进行单轴抗压强度试验,测试其极限抗压强度 f_c ;

2)对混凝土试块分组施加不同应力水平的轴压力,应力水平考虑 0 f_c , 0.2 f_c , 0.4 f_c 和 0.6 f_c ;

3)对混凝土试块进行未加载及加载后的电化学腐蚀试验. 试验前,首先利用电阻测量仪筛选出电流值接近的混凝土试块,然后将筛选出来的试块置于 NEL-VJH 型混凝土智能真空饱水机中进行饱盐处理,饱水机干抽 4 h,湿抽 2 h,静停 18 h 后取出试样,测试氯离子扩散系数;

4)进行电镜试验. 从破坏后的试样中部取出 2.5~5.0 mm 粒状样品,在 98.66 kPa(740 mmHg)真空度、60 ℃的真空干燥器干燥到恒重后,用导电胶将样品粘贴在铜质样品座上,真空镀金后在美国生产的 Quanta FEG 450 型场发射环境扫描电子显微镜(SEM)中观察试样的微观形貌并成相.

2 试验结果及分析

2.1 扫描电镜试验(SEM)结果分析

图 1 是素混凝土试块扫描电镜图. 根据图 1,素混凝土结构内部有少量的絮凝状胶体水化硅酸钙,层状 Ca(OH)₂ 晶体较多,也有不少针状碳硫硅钙石或钙矾石为针状晶体,水化产物在其表面“生长”,C-S-H 和钙矾石的针状晶体相互交联,形成间断的、孔隙较大的骨架网状体系,而且水化产物结构显得明晰,棱角分明,结构疏松,有通长裂纹分布,骨料与水泥基的界面宽为 445.5 nm.

图 2 是单掺 25%复合矿物质的混凝土试块扫描电镜图. 根据图 2,掺入复合矿物质的混凝土中结构密实性有所提高,大的孔隙和裂纹较少,同时可以看到玻璃球体. 较大的玻璃球体表面被胶凝物质紧紧包裹,说明其表面已经参加了水泥的二次水化反应,产生了水化硅酸钙和水化铝酸钙,包裹在骨料周围,填充了骨料和水泥石之间的空隙,使骨料和水泥石之间的密实度得到提高. 图中还能看到未反应的

球体颗粒,颗粒表面光滑,无明显二次水化反应迹象,这些颗粒填充在水泥水化产物之间,与水化产物交织在一起,使得水泥基体的孔隙减少,同时还能阻止微裂纹生成.掺入矿物质掺合料后骨料与水泥基的界面宽度为 97.1 nm,与素混凝土界面相比,界面宽度明显减小.

图 3 是单掺 0.1%聚丙烯纤维混凝土试块扫描电镜图.根据图 3,纤维的掺入在混凝土内部引入新的界面层,改善了混凝土裂纹形态及分布;同时,聚丙烯纤维在混凝土中呈三维乱向分布,减小了裂纹

尖端的应力集中程度,从而可阻止微裂纹的进一步延伸;再者,纤维的承托骨料作用与阻裂作用使得水泥基体中的裂纹和大的孔隙数量明显减少.

图 4 是混掺 0.1%聚丙烯纤维和 25%复合矿物质的混凝土试块扫描电镜图.根据图 4,混凝土中混掺入聚丙烯纤维和复合矿物质后,不仅钙矾石和氢氧化钙晶体数量显著减少,而且纤维的掺入在混凝土内部引入新的界面层,使纤维与周围基体的结合更加紧密,水泥石微观结构呈现均匀致密状态.

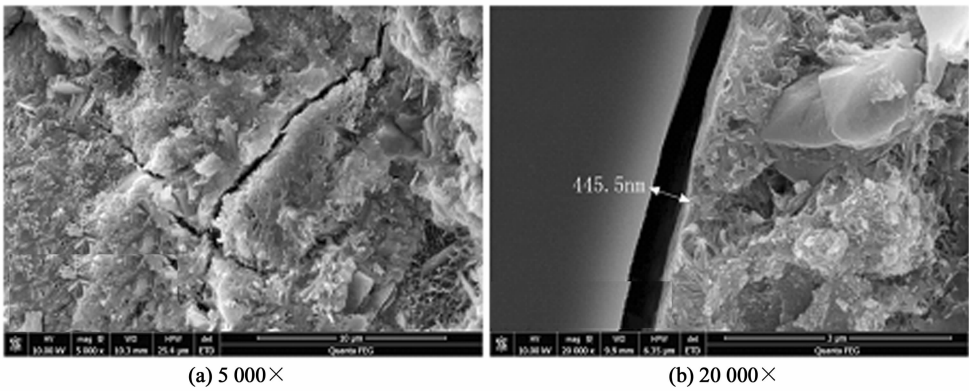


图 1 素混凝土试块扫描电镜图
Fig. 1 Scanning electron microscopy for plain concrete specimen

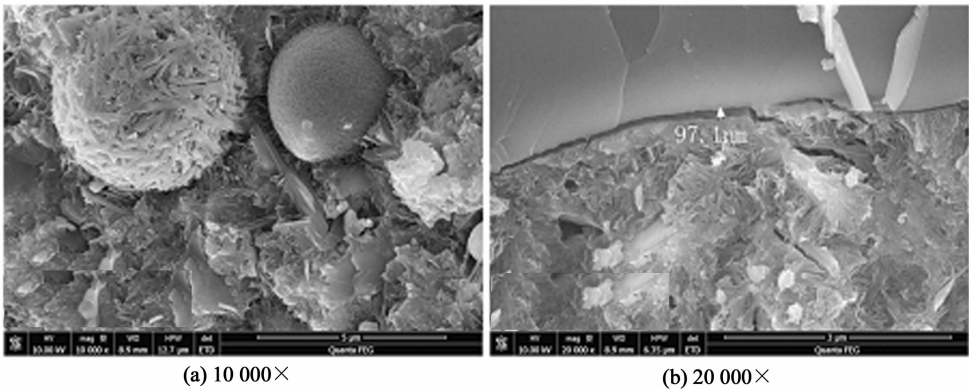


图 2 单掺 25%复合矿物质混凝土试块扫描电镜图
Fig. 2 Scanning electron microscopy for concrete specimen with 25% complex minerals

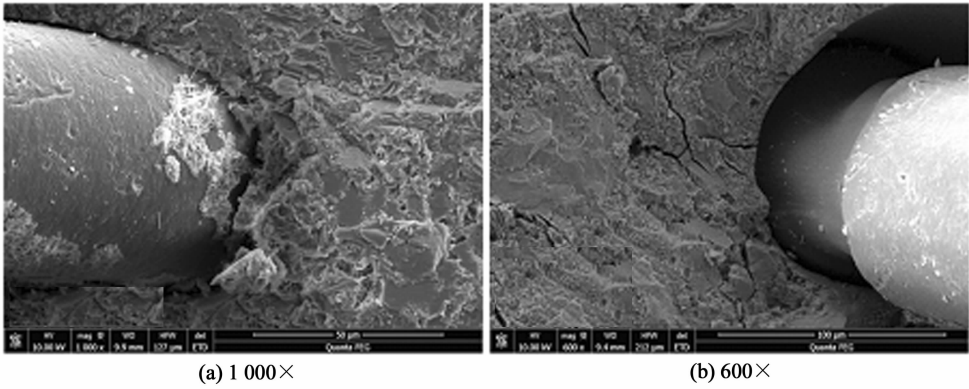


图 3 单掺 0.1%聚丙烯纤维混凝土试块扫描电镜图
Fig. 3 Scanning electron microscopy for concrete specimen with 0.1% polypropylene fiber

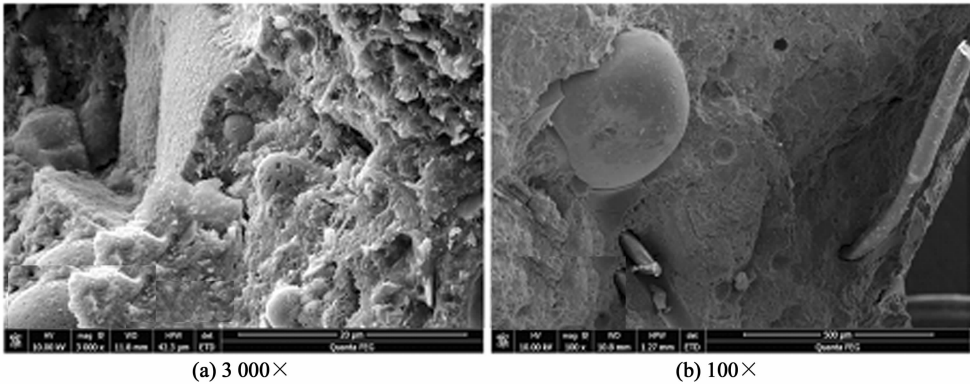


图 4 混掺聚丙烯纤维和复合矿物质混凝土试块扫描电镜图

Fig. 4 Scanning electron microscopy for concrete specimen with polypropylene fiber and complex minerals

2.2 无荷载作用下不同配比混凝土抗氯离子渗透性能

表 6 为素混凝土、单掺聚丙烯纤维混凝土、单掺复合矿物质混凝土、混掺聚丙烯纤维和复合矿物质混凝土在未加载及施加不同应力水平轴压荷载下的氯离子扩散系数。

根据表 6 绘制未加载时，氯离子扩散系数与单掺聚丙烯纤维、单掺复合矿物质、混掺聚丙烯纤维和复合矿物质之间的关系，见图 5，图 6 和图 7。

表 6 不同应力比下氯离子扩散系数
Tab. 6 Chloride ion diffusion coefficient under different stress ratio

批次	实验组	扩散系数 $D/(10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$			
		$0 f_c$	$0.2 f_c$	$0.4 f_c$	$0.6 f_c$
1	C45	0.673	0.714	1.097	1.965
2	C45F25P0	0.384	0.249	0.563	1.741
3	C45F30P0	0.502	0.295	0.631	1.157
4	C45F35P0	0.493	0.184	0.537	1.389
5	C45F0P0.05	0.643	0.940	1.255	1.766
6	C45F25P0.05	0.389	0.208	0.714	1.484
7	C45F30P0.05	0.406	0.384	0.869	1.506
8	C45F35P0.05	0.704	0.556	1.072	1.770
9	C45F0P0.1	0.564	0.511	1.349	2.053
10	C45F25P0.1	0.184	0.129	0.602	1.203
11	C45F30P0.1	0.361	0.283	0.500	1.333
12	C45F35P0.1	0.585	0.49	0.941	1.444
13	C45F0P0.15	1.144	1.041	1.422	2.196
14	C45F25P0.15	0.451	0.380	0.762	1.418
15	C45F30P0.15	0.407	0.379	0.717	1.392
16	C45F35P0.15	0.543	0.423	0.807	1.698

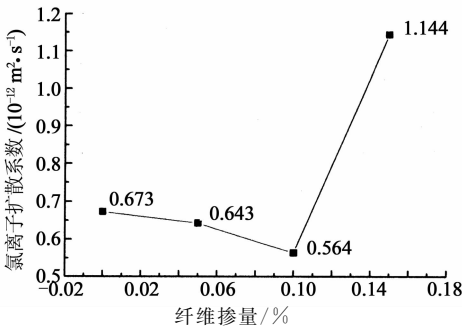


图 5 未加载时单掺聚丙烯纤维时氯离子扩散系数
Fig. 5 Chloride ion diffusion coefficient in concrete with polypropylene fiber single doped under no load

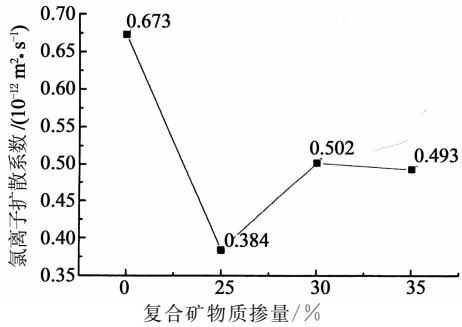


图 6 未加载时单掺复合矿物质时氯离子扩散系数
Fig. 6 Chloride ion diffusion coefficient in concrete with complex minerals single doped under no load

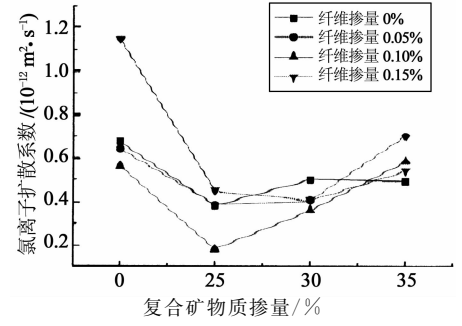


图 7 未加载时混掺聚丙烯纤维和复合矿物质时氯离子扩散系数
Fig. 7 Chloride ion diffusion coefficient in concrete with polypropylene fiber and complex minerals co-doped under no load

根据图 5,随着纤维掺量的增加,氯离子扩散系数出现了先降低后增加的趋势,当掺加纤维体积分数为 0.1% 时氯离子渗透系数较素混凝土降低了 16.2%,此时氯离子扩散系数达到最低值.当纤维掺量超过 0.1% 时氯离子扩散系数反而增加,甚至超过了素混凝土试块的氯离子扩散系数.这是因为当聚丙烯纤维掺量较低时,其分散性较好,细小的纤维填充在混凝土内原有的孔隙缺陷中阻断了混凝土中的毛细管通道,使氯离子迁移困难;同时纤维也抑制了混凝土的干缩裂缝,从而降低了氯离子的渗透性.但是,当纤维掺量过大时,纤维易在混凝土中结团,从而加大了纤维与水泥基材间的界面面积,这对于混凝土的抗氯离子渗透性能不利.由于聚丙烯纤维的不亲水性,纤维与基材界面间的水灰比往往较大,因而界面处混凝土的强度往往较低.当混凝土塑性收缩时界面处易形成微裂纹,使得氯离子的渗透性增大.

根据图 6,随着复合矿物质掺量的增加,氯离子扩散系数也呈现出先下降后上升的趋势,但均低于素混凝土中氯离子扩散系数.其中,掺入 25% 的复合矿物质时,氯离子扩散系数最小,相对于素混凝土来说,降低了 42.9%.分析认为:硬化后的混凝土中,骨料和水泥石之间存在不连续的多孔区域,即界面过渡层.界面过渡层的特点是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的富集和结晶的定向排列. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体粗大,多孔疏松,黏结能力差.粉煤灰、硅灰活性组分可以跟 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,生成强度更高、稳定性更优、黏结能力更强的 C-S-H 凝胶,减少了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量,使得界面过渡区孔隙率下降,优化了界面结构.同时,粉煤灰、硅灰自身对 Cl^- 具有一定的物理化学吸附固化作用,该作用可以降低混凝土中游离氯离子浓度,从而提高混凝土的抗氯离子渗透性能.但是当矿物质掺量过高时,会降低混凝土 pH 值,从而使其化学结合氯离子的稳定性变差,后期干缩也会增大,对混凝土抗氯离子渗透性能不利,表现为氯离子扩散系数增大.

根据图 7,混掺聚丙烯纤维和复合矿物质时,氯离子扩散系数相对于单掺聚丙烯纤维或者单掺复合矿物质时均有所降低.当聚丙烯纤维为 0.1%,复合矿物质为 25% 时氯离子扩散系数最小,较素混凝土下降了 72.7%.这是因为纤维和复合矿物质的“超复合叠加”效应,适量的聚丙烯纤维和粉煤灰一起加入混凝土中,除各自发挥作用外,还具有互补优势.

综上所述,在未加载条件下,混凝土中单掺、混掺聚丙烯纤维或复合矿物质对混凝土的氯离子渗透性均有影响,其中混掺复合矿物质和聚丙烯纤维对提高混凝土抗氯离子渗透性作用最大,最优配比是掺加纤维体积分数为 0.1%,复合矿物质质量分数为 25%.

2.3 轴压荷载下不同配比混凝土抗氯离子渗透性能

根据表 6 绘制在不同应力水平下,单掺 0.1% 聚丙烯纤维、单掺 25% 复合矿物质、混掺 0.1% 聚丙烯纤维和 25% 复合矿物质时混凝土中氯离子扩散系数(见图 8).根据图 8,随着应力比的增大,氯离子扩散系数呈现先略微下降再上升趋势.当应力比在 0.2 以下时,出现略微下降;应力比超过 0.2 时,扩散系数开始增加,在 0.2~0.4 范围内增加较为缓慢,超过 0.4 以后,增速明显提高.

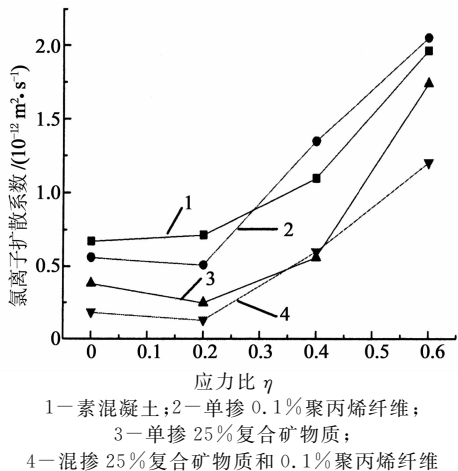


图 8 混凝土氯离子扩散系数与应力比 η 关系
Fig.8 Relation between the chloride ion diffusion coefficient and stress ratio η

分析认为,轴压荷载对混凝土中裂缝形态和渗透性有 2 个截然相反的作用:压实和压裂.与荷载方向垂直的原生裂缝在一定程度上被压实,压缩使混凝土更加致密,渗透性降低;同时,轴向压荷载会引起混凝土中与荷载方向平行的原生裂缝的扩展,并促使新裂缝形成,从而导致混凝土渗透性增大.当荷载较小时,压实占优势,随着荷载的增大,压裂开始占据优势.因此,氯离子扩散系数随着荷载的增加,先有一个降低的过程,然后增大.最初的裂缝大多是单个短裂缝,氯离子扩散系数增加幅度不大,随着荷载的增大,局部裂缝连通,形成了较长、较宽裂缝后,氯离子扩散系数增速变大.

由图8,当应力比不超过0.2时,单掺复合矿物质及单掺聚丙烯纤维,混凝土氯离子扩散系数较混掺聚丙烯纤维和复合矿物质的大,这是因为复合矿物质的掺入,主要通过二次水化反应,改变混凝土基体孔隙结构,增加结构自身的致密性;聚丙烯纤维的掺入可以有效地减小结构的干缩裂缝.混掺聚丙烯纤维和复合矿物质结合了二者的优点,使结构的致密性更强,混凝土氯离子扩散系数最低.当应力比超过0.4后,单掺复合矿物质混凝土的氯离子扩散系数增幅大大高于混掺聚丙烯纤维和复合矿物质混凝土.这是因为在混凝土中混掺入纤维后,可增大混凝土的断裂能和韧性.试块在第一条裂缝出现后不会立刻破裂,纤维在一定程度上把破坏转移为自身的拉伸,在裂缝间能起到桥接作用,抑制了裂缝的快速扩展.因此,混凝土结构中,在可能出现较大裂缝的部位,混掺聚丙烯纤维和复合矿物质混凝土较单掺矿物质具有更大的优势.

综上所述,加载条件下,氯离子扩散系数呈现先略微下降再上升趋势.当应力比在0.2以下时,出现略微的下降;应力比超过0.2时,扩散系数增大.在相同应力比下,混掺聚丙烯纤维和复合矿物质混凝土的氯离子扩散系数最小.

3 结 语

本文采用氯离子渗透性试验(NEL法)和微观扫描电镜(SEM)试验相结合的方法,研究了未加载及施加不同应力水平的轴压荷载时单掺聚丙烯纤维、单掺复合矿物质,以及混掺聚丙烯纤维和复合矿物质时氯离子扩散系数,从混凝土试块的微观结构及宏观性能上研究了不同配比混凝土抗氯离子渗透性能,主要结论如下:

1)单掺聚丙烯纤维时,纤维的掺入改善了混凝土裂纹形态及分布,减小了裂纹尖端的应力集中程度.随着纤维掺量的增加,氯离子扩散系数出现了先降低后增加的趋势,当掺加纤维体积分数为0.1%时氯离子渗透系数较素混凝土降低了16.2%,此时扩散系数达到最低值.

2)单掺复合矿物质时,混凝土中结构密实性提高,大的孔隙和裂纹较少,与素混凝土界面相比,界面宽度明显减小.随着掺量的增加,氯离子扩散系数也呈现出先下降后上升的趋势,但均低于素混凝土

中氯离子扩散系数.其中,掺入25%的复合矿物质时,扩散系数最小,相对于素混凝土来说,降低了42.9%.

3)混掺适量的复合矿物质与聚丙烯纤维时,混凝土试块在微观结构上表现为骨料和水泥石间的密实性提高,裂缝数量和宽度明显减小;在宏观性能上表现为氯离子扩散系数降低,与单掺聚丙烯纤维或单掺复合矿物质相比,混凝土的抗氯离子渗透性有显著提高.当掺加纤维体积分数为0.1%,掺入复合矿物质质量分数为25%时,混凝土氯离子扩散系数最小,相对于素混凝土来说,降低了72.7%.

4)加载条件下,氯离子扩散系数呈现先略微下降再上升趋势.当应力比在0.2以下时,出现略微下降;应力比超过0.2时,扩散系数增大.在相同应力比下,混掺聚丙烯纤维和复合矿物质混凝土的氯离子渗透系数最小.

参考文献

- [1] SAHMARAN M. Effect of flexure induced transverse crack and self-healing on chloride diffusivity of reinforced mortar [J]. *Materials Science*, 2007, 42(22): 9131-9136.
- [2] 安明喆,朱金铨,覃维祖,等.粉煤灰对高性能混凝土早期收缩的抑制及其机理研究[J]. *中国铁道科学*, 2006, 27(4): 27-31.
AN Mingzhe, ZHU Jinqian, QIN Weizu, *et al.* Study on fly ash restraints on the early shrinkage of high performance concrete and its mechanism [J]. *China Railway Science*, 2006, 27(4): 27-31. (In Chinese)
- [3] 刘军,邢锋,董必钦.粉煤灰对氯离子在混凝土表层沉积的影响[J]. *混凝土*, 2014(3): 14-16.
LIU Jun, XING Feng, DONG Biqin. Influence of fly ash on chloride ion deposition of concrete surface [J]. *Concrete*, 2014(3): 14-16. (In Chinese)
- [4] MAAGE M, HELL S, POULSEN E, *et al.* Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment [J]. *ACI Materials Journal*, 1996, 93(6): 602-603.
- [5] 曹长伟,张文献,王雁飞.高掺量粉煤灰混凝土路面应用性能的试验研究[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2007, 35(1): 50-55.
CAO Changwei, ZHANG Wenxian, WANG Yanfei. Experimental study on application of high content fly ash concrete to road pavement [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2007, 35(1): 50-55. (In Chinese)
- [6] 何小芳,卢军太,李小楠,等.硅灰对混凝土性能影响的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(3): 423-428.
HE Xiaofang, LU Juntai, LI Xiaonan, *et al.* Progress in re-

search of effect of silica fume on the performance of cement concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013,32(3):423—428. (In Chinese)

[7] DAVRAZ M, GUNDUZ L. Engineering properties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(7):125—126.

[8] DOTTO J M R, ABREU A G D, MOLIN D C C D, *et al.* Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behavior of reinforcement bars[J]. Cement & Concrete Composites, 2004, 26(1): 31—39.

[9] TOUTANJI H, MCNEIL S, BAYASI Z. Chloride permeability and impact resistance of polypropylene-fiber-reinforced silica fume concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(7): 961—968.

[10] SÖOYLEV T A, ÖZTURAN T. Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforce concretes at low-volume fraction [J]. Construction and Building Materials, 2014, 73:67—75.

[11] 孙家瑛. 混杂聚丙烯纤维混凝土性能研究[J]. 混凝土, 2003(11):16—17.

SUN Jiaying. Study on the properties of mixed polypropylene fiber concrete [J]. Concrete, 2003(11): 16—17. (In Chinese)

[12] 王瑞兴, 钱春香. 聚丙烯纤维对混凝土性能的改善研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2004, 2(1): 41—43.

WANG Ruixing, QIAN Chunxiang. Study on the modification effect of polymer fiber on the properties of concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2004, 2(1): 41—43. (In Chinese)

[13] 曹芳, 马保国, 李友国, 等. 混凝土的渗透性能及测试方法的对比分析[J]. 混凝土, 2002(10): 15—17.

CAO Fang, MA Baoguo, LI Youguo, *et al.* The analysis on the concrete permeability and test methods [J]. Concrete, 2002(10):15—17. (In Chinese)

[14] 何世钦, 贡金鑫. 弯曲荷载作用对混凝土中氯离子扩散的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(2): 134—138.

HE Shiqin, GONG Jinxin. Influence of flexural loading on permeability of chloride ion in concrete [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(2): 134—138. (In Chinese)

[15] 洪雷, 危行财, 汪明刚. 单轴压荷载下掺合料对混凝土渗透性的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 143—146.

HONG Lei, WEI Xingcai, Wang Minggang. Influence of mineral admixtures on permeability of concrete under sustained uniaxial compressive load [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1):143—146. (In Chinese)

[16] 刑锋, 冷发光, 冯乃谦. 长期持续荷载对素混凝土氯离子渗透性的影响[J]. 混凝土, 2004(5): 3—8.

XING Feng, LENG Faguang, FENG Naiqian. The influence of long-term sustaining load on the permeability of plain concrete to chloride ion [J]. Concrete, 2004(5): 3—8. (In Chinese)

[17] 刘湘杰. 聚丙烯纤维混凝土氯离子渗透性研究[D]. 武汉:武汉大学土木建筑工程学院, 2014:58—60.

LIU Xiangjie. Study on chloride permeability of polypropylene fiber concrete [D]. Wuhan: School of Civil Engineering, Wuhan University, 2014:58—60. (In Chinese)

[18] LIU Sumei, LIU Xiangjie, XU Lihua. Influence of splitting load and polypropylene fiber on permeability of chloride ion in concrete [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 578/579: 1504—1511.