

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.008



复杂侵蚀环境下透水混凝土耐久性能 试验研究

杨波,高润东,许清风

(上海市建筑科学研究院(集团)有限公司;上海市工程结构安全重点实验室,上海 200032)

摘要:为适应海绵城市建设对高耐久性透水混凝土的需求,配置了低品质活性矿物掺合料透水混凝土和聚丙烯仿钢纤维(PPTF)透水混凝土两个系列。前期已进行了基本性能研究,在此基础上,继续开展复杂多因素侵蚀环境下耐久性能研究。试验采用侵蚀溶液全浸泡方式,共持续 300 d,宏观上测试了抗压强度和抗折强度随侵蚀时间的劣化规律,微观上用 SEM 观测了胶结层的微观结构、用 EDS 观测了胶结层的化学组成。复杂侵蚀环境下,透水混凝土微观结构变化规律与其宏观力学性能变化规律基本相符。综合基本性能和耐久性能,择优推荐复掺低品质硅灰和低品质粉煤灰透水混凝土和掺 3 kg/m³ 锯齿形 PPTF 透水混凝土。这两种透水混凝土基本性能均满足城市既有住区道路、人行道、城市广场、体育场、户外停车场、园林景观道路等轻交通路面的使用要求,同时,又表现出了良好的耐久性能。

关键词:透水混凝土;矿物掺合料;聚丙烯仿钢纤维;抗压强度;抗折强度;微观分析

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)03-0053-08

Experimental analysis on durability of pervious concrete under complex attack environments

Yang Bo, Gao Rundong, Xu Qingfeng

(Shanghai Research Institute of Building Sciences (Group) Co., Ltd.;

Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai 200032, P. R. China)

Abstract: In order to adapt to the requirement of sponge city construction for high durable pervious concrete, pervious concrete mixed with low-quality active mineral admixture and pervious concrete mixed with Polypropylene Thick Fiber(PPTF) are developed. In the early stage, basic performance studies have been carried out, and on this basis, it is continued to conduct durability studies under complex attack environments. By the method of full-immersion, experiments last for 300 d. Macro-observations involve the deterioration regularity of both compressive strength and flexural strength with attack time. Micro-observations involve microstructure of cemented layer by SEM and chemical composition of cemented layer

收稿日期:2017-06-05

基金项目:上海市优秀技术带头人计划(16XD1422400),上海市青年科技启明星计划(13QB1403100)

作者简介:杨波(1977-),男,高级工程师,主要从事新型混凝土材料研究,E-mail:15000112766@139.com。

高润东(通信作者),男,博士,高级工程师,E-mail:grdong_1@163.com。

Received:2017-06-05

Foundation item:Program of Shanghai Technology Research Lesader(No. 16XD1422400);Shanghai Rising-star Program (No. 13QB1403100)

Author brief:Yang Bo(1977-), senior engineer, main research interest: new concrete materials, E-mail:15000112766@139.com.

Gao Rundong(corresponding author), PhD, senior engineer, E-mail:grdong_1@163.com.

by EDS. Under complex attack environments, the change of pervious concrete micro-structural is in accord with macro-mechanical behavior. Combined basic performance with durability, pervious concrete mixed with both low-quality silica fume and low-quality fly ash and pervious concrete mixed with zigzag PPTF of 3 kg/m³ are preferred recommended. This two kinds of pervious concrete meet the application requirement of light traffic pavements such as existing residential area road, sidewalk, city square, stadium, outdoor parking lot, landscape road, which durability is good.

Keywords: pervious concrete; mineral admixture; polypropylene thick fiber; compressive strength; flexural strength; micro-analysis

透水混凝土由水、水泥、粗骨料组成,采用单粒级骨料作为骨架,水泥浆薄层或加入少量细骨料的砂浆薄层包裹在粗骨料表面形成胶结层,骨料通过硬化胶结层胶结而成多孔堆积结构。透水混凝土属于生态型混凝土,主要用于城市既有住区道路、人行道、城市广场、体育场、户外停车场、园林景观道路等^[1]。2014年10月住房和城乡建设部组织编制了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》,其中,将透水铺装技术列为海绵城市建设的首项推广应用技术^[2]。2015年4月,迁安等首批16个海绵城市建设试点名单正式公布。2015年10月《国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见》发布,要求进一步大力推进海绵城市建设。因此,透水混凝土在中国的应用前景非常广阔。

在透水混凝土组成材料、配合比设计、基本性能等方面已取得许多成果^[3-8]。但在耐久性研究方面,关于抗冻性的文献较多,在抗侵蚀性研究方面可查文献较少,个别文献只是考虑了单因素侵蚀环境影响,而单因素侵蚀与实际差别较大。实际上,由大气污染导致的酸雨、地面污染物和污水中含有大量侵蚀离子,如硫酸根离子、氯离子、碳酸根离子、镁离子、钠离子等,形成了复杂多因素侵蚀环境。由于透水混凝土是多孔连通结构,这些侵蚀离子可以直驱混凝土内部,然后与骨料间薄胶结层中的水化产物发生化学反应使其丧失粘性,骨料则因胶结层失效而变得松散,最终导致混凝土失去强度。因此,透水混凝土以多孔连通、薄胶结层为表征的内部结构,使得其抗侵蚀性能成为一个薄弱环节。

国外已有不少透水混凝土路面受酸、盐侵蚀的案例,在侵蚀介质积聚的地方,大片路面变得疏松,由于有大量侵蚀性产物生成,路面几乎无法修复,只能铲除重新铺设,工程代价很大^[9]。笔者曾对上海透水混凝土铺设面积较大的一些场地进行过实地考察,发现多处路面不同程度地存在粗骨料松散现象,从中取出部分胶结层,通过微观观测发现有大量钙矾石、石膏、硫酸镁等侵蚀性产物存在,应用酚酞试

剂检测发现混凝土中性化也很严重,证实了多因素侵蚀环境的存在。

基于以上背景和文献调研,课题组拟在透水混凝土中掺加活性矿物掺合料或改性聚丙烯纤维来提高透水混凝土的耐久性。活性矿物掺合料选择低品质硅灰和低品质粉煤灰,可与水泥组成复合胶凝材料,有效改善胶结层的化学组成,提高抵抗侵蚀离子的能力。已有不少关于复合胶凝材料透水混凝土的研究^[3,10],但所掺入的胶凝材料一般属于质量相对较好且满足标准要求的活性矿物掺合料,低品质活性矿物掺合料的掺加,对于有效利用固废材料、节约资源、保护环境将发挥重要作用。改性聚丙烯纤维选择聚丙烯仿钢纤维(PPTF),能够提高胶结层的抗裂能力和界面粘结性能,有效抵抗膨胀性侵蚀产物对胶结层的破坏。PPTF具有耐腐蚀、易分散、易施工、断裂强度高、握裹力强等优点。与钢纤维相比,不会生锈;与普通聚丙烯纤维相比,在透水混凝土中不会结团、易于分散均匀。

前期已完成低品质活性矿物掺合料透水混凝土和聚丙烯仿钢纤维(PPTF)透水混凝土的基本性能(试件成型后在自然状态下覆盖并洒水养护28d后的性能)研究,详见文献^[11-12],在此基础上,继续研究其耐久性能(养护后试件在复杂多因素侵蚀环境下被侵蚀一定时间后的性能),综合考虑基本性能和耐久性能,提出适应海绵城市建设需求的高耐久性透水混凝土的相对较优配合比。

1 试验设计

1.1 原材料

试验用胶凝材料包括42.5普通硅酸盐水泥、低品质硅灰、低品质粉煤灰;粗骨料采用粒径为5~10mm的碎石;纤维采用锯齿形PPTF;拌合水采用自来水;减水剂采用聚羧酸高效减水剂。各种原材料的基本性能指标见文献^[11-12]。

1.2 配合比设计与制备工艺

各系列透水混凝土的配合比设计见表1,制备

工艺见文献[11-12]。试件成型后在自然状态下覆盖并洒水养护 28 d,然后在侵蚀溶液中进行浸泡。耐久性能试验包括 100 mm×100 mm×100 mm 立

方体试件和 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体试件,前者用于抗压强度测试,后者用于抗折强度测试。

表 1 配合比设计

Table 1 Mix proportion design

编号	水胶比	材料用量/(kg·m ⁻³)							备注
		水	水泥	硅灰	粉煤灰	纤维	碎石	减水剂	
A1	0.3	90	300				1 580		普通水泥透水混凝土
B1	0.3	90	282	18			1 580	0.6	低品质活性矿物掺合料透水混凝土
B2	0.3	90	255		45		1 580	0.5	
B3	0.3	90	237	18	45		1 580	0.8	
C1	0.3	90	300			1	1 580		聚丙烯仿钢纤维(PPTF)透水混凝土
C2	0.3	90	300			3	1 580		
C3	0.3	90	300			5	1 580		

1.3 侵蚀溶液选择

考虑复杂多因素侵蚀环境特点,侵蚀离子包括:Na⁺、Mg²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻。具体侵蚀溶液选择见表 2。

表 2 侵蚀溶液选择

Table 2 Attack solution

侵蚀溶质	质量分数/%
Na ₂ SO ₄	4.0
MgSO ₄	1.0
NaCl	1.0

1.4 侵蚀方式

试验采用侵蚀溶液全浸泡方式进行侵蚀,浸泡试验在塑料容器中进行,浸泡过程中为保持侵蚀溶液浓度不变,用塑料薄膜对侵蚀溶液进行密封以防止挥发,并且定期更换溶液。浸泡试验现场实景见图 1。

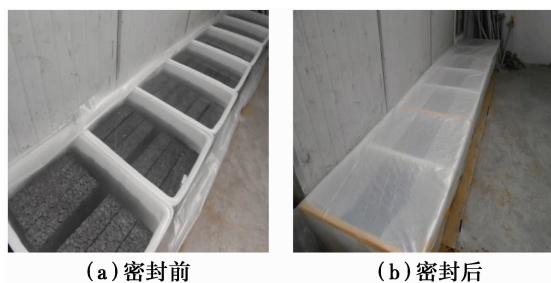


图 1 浸泡试验

Fig. 1 Immersion experiment

1.5 侵蚀时间

侵蚀溶液浸泡试验共持续 300 d,抗压强度和抗折强度的测试时间如表 3 所示。

表 3 测试时间

Table 3 Testing time

测试时间/d	抗压强度	抗折强度
0	✓	✓
60	✓	✓
150	✓	✓
210	✓	
240	✓	✓
270	✓	
300	✓	✓

注:测试时间是指从养护 28 d 后开始的时间。

1.6 测试内容

试验测试包括宏观测试和微观测试。宏观测试主要包括:表观现象、抗压强度、抗折强度,其中,抗压强度和抗折强度测试采用《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)中规定的方法。微观测试主要包括:用扫描电镜(SEM)观测透水混凝土受侵蚀胶结层和表面晶体的微观结构特征、用能谱仪(EDS)和 X 射线衍射仪(XRD)观测透水混凝土受侵蚀胶结层和表面晶体的化学组成。

2 试验结果与分析

2.1 表观现象

试验分别观测了侵蚀时间为 60、150、240、300 d 时透水混凝土表观劣化情况,各配合比透水混凝土表面均出现了不同程度的水泥浆体流失现象。随着侵蚀时间增加,水泥浆体流失程度不断加重;但由于透水混凝土属多孔结构,膨胀性侵蚀产物导致的应力很容易分散,故其表面并未出现剥落现象。同一

侵蚀时间下, A1 表面水泥浆体流失最为严重, 特别是侵蚀到 300 d 时, 表层骨料间明显出现无水泥浆体填充现象。掺入低品质活性矿物掺合料后, 所形成的复合胶凝材料有效改善了胶结层的化学组成, 提高了抵抗侵蚀离子的能力, 表层复合胶凝材料浆体的流失明显减轻, 其中, 尤以 B3 改善提升效果最佳。掺入锯齿形 PPTF 后, 当纤维掺量较少时(如 1 kg/m^3), 纤维对透水混凝土表面的增强作用并不明显, 表面水泥浆体流失仍较为严重; 随着纤维掺量的增加(如 3 kg/m^3), 表面显露出越来越多的纤维, 呈三维不定向混杂分布状态, 相互之间形成了有一定拉结力的网络结构, 尽管表面仍有一定程度的水泥浆体流失, 但纤维所形成的网络结构在一定程度上对透水混凝土表层形成了有利的约束作用。侵蚀 300 d 后试件表观情况如图 2 所示。

当各配合比透水混凝土试件从侵蚀溶液中取出并在空气中静置一段时间后, 相当于从湿状态进入干状态, 表面均出现了不同程度的结晶体, 呈白色片状, 比较容易破碎, 且结晶体在表面分布并不均匀。关于结晶体的化学组成将根据后面的微观测试进行分析。

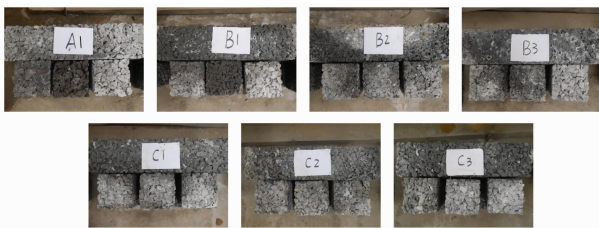


图 2 侵蚀时间为 300 d 时试件表观劣化情况
Fig. 2 Visual degradation observation at 300 d

2.2 强度劣化规律

1) 抗压强度 低品质活性矿物掺合料透水混凝土系列的抗压强度劣化程度对比如图 3(a) 所示, 聚丙烯仿钢纤维(PPTF)透水混凝土系列的抗压强度劣化程度对比如图 3(b) 所示。由图 3(a)、(b) 可见, 除 B1 外, 各系列透水混凝土基本上都经历了 0~60 d 内抗压强度不断增长、之后抗压强度不断下降的变化规律, 这主要是因为, 侵蚀初期, 胶凝材料的继续水化和膨胀性侵蚀产物对界面孔隙的填充作用对强度增长起到有利作用, 侵蚀超过 60 d 以后, 胶凝材料的水化作用减弱, 随着膨胀性侵蚀产物的累积, 逐渐在界面孔隙壁上产生拉应力, 从而导致界面裂纹不断出现, 宏观上则表现为强度不断降低。

由图 3(a) 可见, 侵蚀到 60 d 时, B1、B2、B3 透水混凝土抗压强度与 A1 的比值分别为 1.3、1.4、1.9; 侵蚀到 150 d 时比值分别为 1.3、1.2、1.8; 侵蚀到

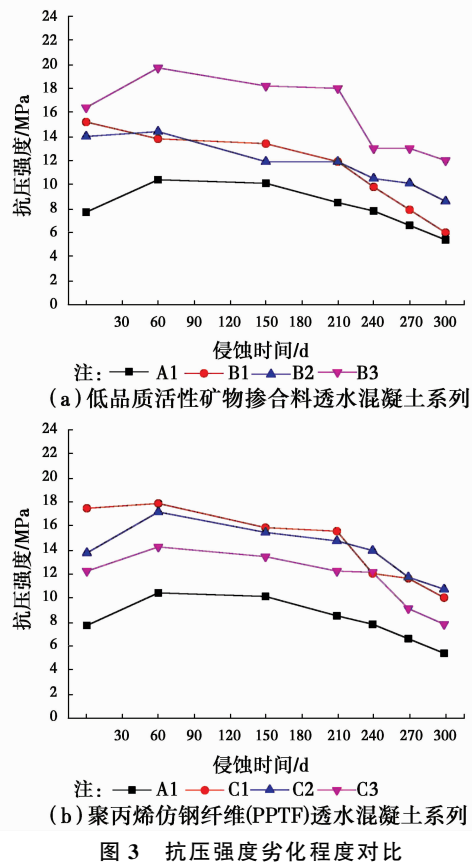


图 3 Comparison of deterioration degree of compressive strength

240 d 时, 比值分别为 1.3、1.3、1.7; 侵蚀到 300 d 时比值分别为 1.1、1.6、2.2。综合判断, 对于低品质活性矿物掺合料透水混凝土系列, 复掺低品质硅灰和低品质粉煤灰对抗压强度增强效果较好, 这表明合理数量的低品质硅灰、低品质粉煤灰掺合料掺入后, 细化了透水混凝土胶结层的孔隙结构, 提高了密实性; 另外, 降低了水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量, 减缓了 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 等侵蚀离子向混凝土内部渗透的速度, 抗硫酸盐侵蚀性能明显提高。根据文献 [11], 42.5 # 普通硅酸盐水泥、低品质硅灰、低品质粉煤灰中的 CaO 含量分别为 57.26%、0.96%、1.12%, 低品质硅灰和低品质粉煤灰取代一定量的 42.5 # 普通硅酸盐水泥后, 水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量将显著降低; 42.5 # 普通硅酸盐水泥、低品质硅灰、低品质粉煤灰中的 Al_2O_3 含量分别为 7.24%、17.48%、15.45%, 低品质硅灰和低品质粉煤灰取代一定量的 42.5 # 普通硅酸盐水泥后, 含铝相水化产物含量将有所增加。硫酸盐侵蚀混凝土时, 首先与水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生化学反应生成石膏, 石膏再与含铝相水化产物发生化学反应生成钙矾石, 低品质硅灰和低品质粉煤灰取代一定量的 42.5 # 普通硅酸盐水泥后, 水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量的显著减少, 也就减

少了石膏与含铝相水化产物之间的化学反应,从而降低了混凝土受硫酸盐侵蚀程度。

由图3(b)可见,侵蚀到60 d时,C1、C2、C3透水混凝土抗压强度与A1的比值分别为1.7、1.6、1.4;侵蚀到150 d时,比值分别为1.6、1.5、1.3;侵蚀到240 d时,比值分别为1.5、1.8、1.6;侵蚀到300 d时,比值分别为1.9、2.0、1.4。综合判断,对于聚丙烯仿钢纤维(PPTF)透水混凝土系列,在普通水泥透水混凝土中掺入 3 kg/m^3 锯齿形PPTF对抗压强度的增强效果较好,表明合理数量的锯齿形PPTF掺入后,纤维呈三维不定向混杂分布状态,形成了有一定拉结力的网络结构,对透水混凝土起到了一定的约束作用。但随着纤维掺量的增加(如 5 kg/m^3),部分纤维不能被水泥浆体完全包裹或者根本没有被水泥浆体包裹,分散于骨料间,影响了胶结层和骨料间的粘结力,也无法形成有拉结力的网络,增强效果反而会有所下降。图4展示了侵蚀到300 d时聚丙烯仿钢纤维(PPTF)透水混凝土系列的受压破坏形态,C1、C2、C3透水混凝土均展示出坏而不散的状态,进一步表明掺入一定量的锯齿形PPTF,尽管增强效果不同,但对透水混凝土均起到一定的约束作用。

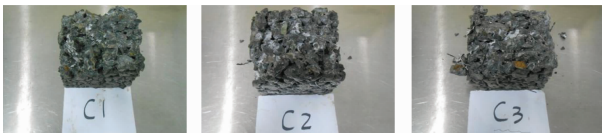


图4 聚丙烯仿钢纤维(PPTF)透水混凝土系列的受压破坏形态

Fig. 4 Compressive failure mode of PPTF pervious concrete

2) 抗折强度 低品质活性矿物掺合料透水混凝土系列的抗折强度劣化程度对比见图5(a)所示,聚丙烯仿钢纤维(PPTF)透水混凝土系列的抗折强度劣化程度对比见图5(b)所示。由图5(a)、(b)可见,各系列透水混凝土基本上都经历了0~60 d内抗折强度不断增长、之后抗折强度不断下降的变化规律,抗折强度变化规律及其原因机理与抗压强度类似。

由图5(a)可见,侵蚀到60 d时,B1、B2、B3透水混凝土抗折强度与A1的比值分别为1.4、1.7、1.5;侵蚀到150 d时,比值分别为1.3、1.6、1.3;侵蚀到240 d时,比值分别为1.4、1.5、1.5;侵蚀到300 d时,比值分别为1.4、1.3、1.5。根据强度发展变化趋势综合判断,特别是结合侵蚀到240、300 d情况,对于低品质活性矿物掺合料透水混凝土系列,复掺低品质硅灰和低品质粉煤灰对抗折强度增强效果

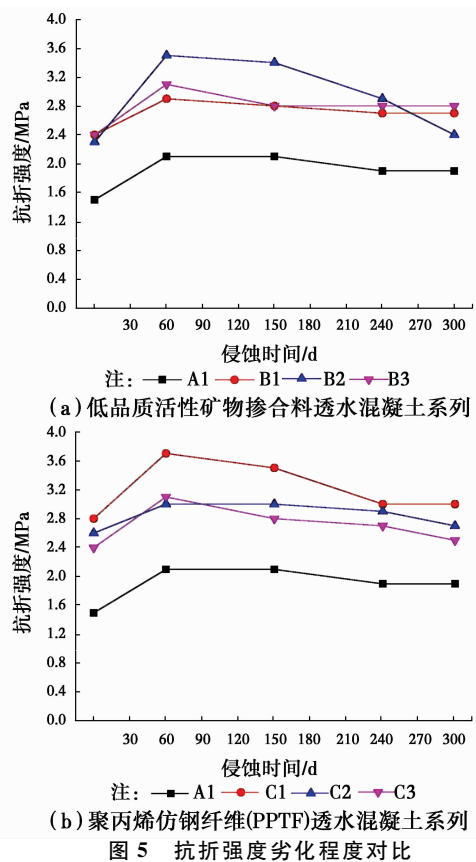


图5 抗折强度劣化程度对比

Fig. 5 Comparison of deterioration degree of flexural strength

较好。

由图5(b)可见,侵蚀到60 d时,C1、C2、C3透水混凝土抗折强度与A1的比值分别为1.8、1.4、1.5;侵蚀到150 d时,比值分别为1.7、1.4、1.3;侵蚀到240 d时,比值分别为1.6、1.5、1.4;侵蚀到300 d时,比值分别为1.6、1.4、1.3。掺入锯齿形PPTF后,纤维呈三维不定向混杂分布状态,当由膨胀性侵蚀产物导致的微裂纹不断扩展时,会碰到多条不同向的纤维,由于纤维的抗拉强度远大于基体的强度,以及纤维与基体间存在一定的粘结力,使得裂纹扩展受到限制,从而增强了弯折抗拉强度。仅从图5(b)看,掺 1 kg/m^3 锯齿形PPTF对抗折强度的增强效果要大于掺 3 kg/m^3 锯齿形PPTF情况,但实际上,在侵蚀时间60~240 d之间,掺 1 kg/m^3 锯齿形PPTF的抗折强度的下降程度明显大于掺 3 kg/m^3 锯齿形PPTF情况,侵蚀时间为240 d时,C1和C2的抗折强度已十分接近,但在侵蚀时间240 d~300 d之间,掺 1 kg/m^3 锯齿形PPTF的抗折强度却保持不变,这与实际情况不太相符,可能存在测试异常。结合前面抗压强度发展变化趋势,这里仍选择推荐C2配合比。

2.3 微观分析

侵蚀时间为150 d时,各配合比透水混凝土胶

结层的微观结构特征和化学组成如图 6 所示。

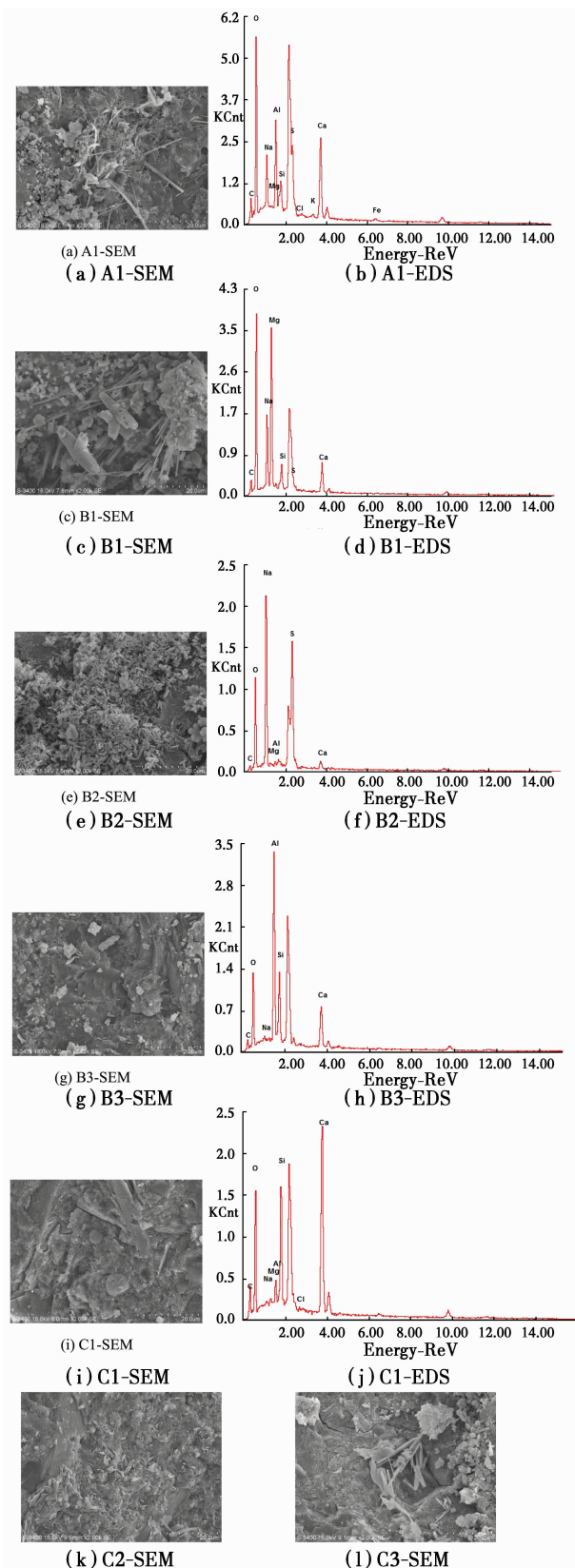


图 6 透水混凝土胶结层 SEM 和 EDS 观测

Fig. 6 SEM and EDS observations of cemented layer of pervious concrete

由图 6 可见, 侵蚀产物中不同程度存在钙矾石、

石膏、氢氧化镁、M-S-H 等, 其中, 以钙矾石侵蚀为主。A1 胶结层中发现了大量侵蚀产物, B1 和 B2 胶结层中也发现不少侵蚀产物, 但在 B3 胶结层中只发现少量的侵蚀产物存在。在 B3 中复掺低品质活性矿物掺合料后, 胶凝材料中的 CaO 含量大大降低^[11], 导致胶凝材料水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量大大降低。根据 Na_2SO_4 和 MgSO_4 侵蚀机理^[13-15], $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量降低将有效抵抗硫酸盐的侵蚀, 因此 B3 胶结层侵蚀产物较少。比较 C1、C2、C3 胶结层微观结构特征, 当纤维掺量比较大时(如 5 kg/m^3), 部分纤维不能被水泥浆体完全包裹或者根本没有被水泥浆体包裹, 胶结层变得不密实, 导致更多侵蚀离子传输到胶结层内部, 生成更多的侵蚀产物。侵蚀时间为 300 d 时, 不同配合比透水混凝土胶结层的微观结构变化规律与侵蚀时间为 150 d 时基本类似, 只是发现各配合比透水混凝土胶结层的裂隙普遍增多, 表明受侵蚀程度明显加重。总的来看, 透水混凝土微观结构变化规律与其宏观力学性能变化规律基本相符。

图 7 展示了侵蚀时间为 150 d 时透水混凝土由湿状态转为干状态时在表面形成的结晶体(各组均存在, 这里是随机选取的), 图 8 展示了表面结晶体的微观分析。

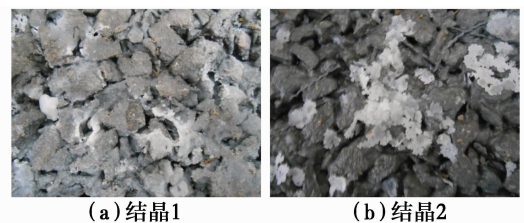


图 7 透水混凝土表面结晶体

Fig. 7 Surface crystallization of pervious concrete

综合 SEM、EDS、XRD 测试结果, 透水混凝土表面结晶体的主要成分为 CaCO_3 , 主要由透水混凝土的析出物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在空气中碳化而成。这表明, 在干状态下, 由于透水混凝土的孔隙率比较大, 随着孔隙溶液蒸发, 孔隙溶液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 比较容易析出。透水混凝土中的这种劣化方式也应引起充分重视, 这在通常的透水性铺装路面上是比较容易出现的, 尤其在雨过天晴之后。侵蚀时间为 300 d 时, 透水混凝土表面结晶体的主要成分亦为 CaCO_3 (如图 9 所示), 与侵蚀时间为 150 d 时观测到的结晶体一样。

综合考虑各系列透水混凝土的基本性能(主要通过试件成型养护 28 d 后的抗压强度、抗折强度、孔隙率、透水系数来表征, 详见文献[11-12])和耐

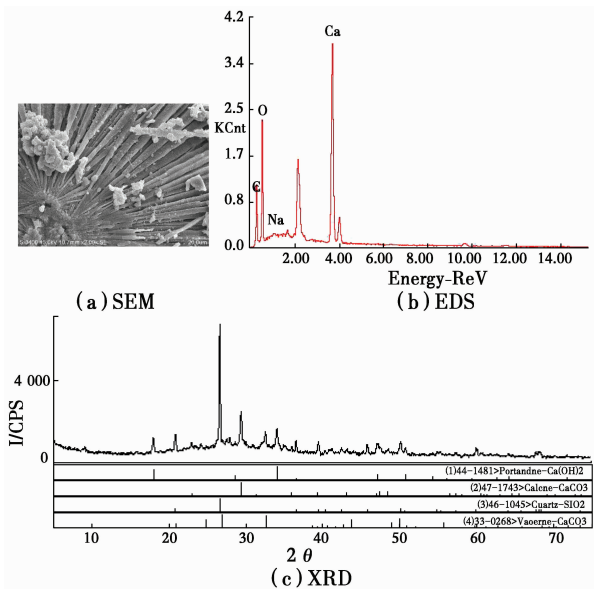


图8 150 d时透水混凝土表面晶体微观分析

Fig. 8 Micro-analysis of surface crystallization of pervious concrete at 150 d

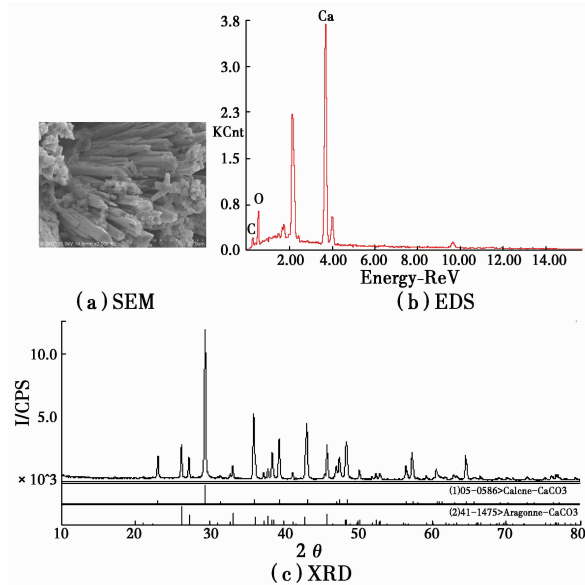


图9 300 d时透水混凝土表面晶体微观分析

Fig. 9 Micro-analysis of surface crystallization of pervious concrete at 300 d

久性能(主要通过复杂侵蚀环境下抗压强度、抗折强度随侵蚀时间的劣化规律来表征,详见本文),并考虑低品质固废材料的有效利用和改性聚丙烯纤维掺入的经济性,推荐 B3 和 C2 两个配合比,即复掺低品质硅灰和低品质粉煤灰透水混凝土和掺 3 kg/m^3 锯齿形 PPTF 透水混凝土。B3 和 C2 两个配合比基本性能均满足城市既有住区道路、人行道、城市广场、体育场、户外停车场、园林景观道路等轻交通路面的使用要求,同时,又具有良好的耐久性能。

3 结论

1)随着侵蚀时间增加,透水混凝土表面水泥浆体流失程度不断加重,掺入适量低品质活性矿物掺合料或聚丙烯仿钢纤维后,可有效减轻水泥浆体的流失。

2)随着侵蚀时间增加,透水混凝土强度(抗压强度和抗折强度)初期有所增长,之后逐渐下降;掺入适量低品质活性矿物掺合料或聚丙烯仿钢纤维后,各侵蚀时间下透水混凝土强度较未掺加情况有明显提高。

3)根据 SEM、EDS 等微观测试结果,复杂侵蚀环境下透水混凝土微观结构变化规律与其宏观力学性能变化规律基本一致。

4)综合考虑透水混凝土的基本性能和耐久性能,并考虑低品质固废材料的有效利用和改性聚丙烯纤维掺入的经济性,推荐配合比 B3 和 C2,即复掺低品质硅灰和低品质粉煤灰透水混凝土和掺 3 kg/m^3 锯齿形 PPTF 透水混凝土。这两种配比的透水混凝土基本性能满足使用要求,同时具有良好的耐久性能。

5)研究了低品质活性矿物掺合料透水混凝土和聚丙烯仿钢纤维透水混凝土两个独立系列的耐久性能,同时掺加低品质活性矿物掺合料和聚丙烯仿钢纤维的透水混凝土的耐久性能值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 宋中南,石云兴. 透水混凝土及其应用技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
SONG Z N, SHI Y X. Pervious concrete and its application technology [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[Z]. 2014.
MOHURD. Technical guidelines for sponge city: construction of low impact development of rainwater system (for trial implementation) [Z]. 2014. (in Chinese)
- [3] 张贤超. 高性能透水混凝土配合比设计及其生命周期环境评价体系研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
ZHANG X C. Research on mix proportion design and evaluation on life cycle environmental system of high performance permeable concrete [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [4] 刘卫东. 改性聚丙烯纤维混凝土的工程性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2009.
LIU W D. Studies on the performance of modified

- polypropylene fiber concrete[D]. Shanghai: Donghua University, 2009. (in Chinese)
- [5] DEO O, NEITHALATH N. Compressive response of pervious concretes proportioned for desired porosities [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25 (11): 4181-4189.
- [6] IBRAHIM A, MAHMOUD E, YAMIN M, et al. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50 (2): 524-529.
- [7] BENTZ D P. Virtual pervious concrete: microstructure, percolation, and permeability [J]. ACI Materials Journal, 2008, 105(3): 297-301.
- [8] VANCURA M, MACDONALD K, KHAZANOVICH L. Microscopic analysis of paste and aggregate distresses in pervious concrete in a wet, hard freeze climate[J]. Cement & Concrete Composites, 2011, 33 (10): 1080-1085.
- [9] KWIATKOWSKI M. Water quality study of a porous concrete infiltration best management practice [D]. Villanova : Villanova University, 2004.
- [10] THO-IN T, SATA V, CHINDAPRASIRT P, et al. Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30 (5): 366-371.
- [11] 高润东, 许清风, 李向民, 等. 低品质活性矿物掺合料透水混凝土试验研究[J]. 混凝土, 2015(6): 103-105, 109.
- GAO R D, XU Q F, LI X M, et al. Experimental research on pervious concrete mixed with low-quality active mineral admixture[J]. Concrete, 2015(6): 103-105, 109. (in Chinese)
- [12] 高润东, 李向民, 许清风, 等. 聚丙烯仿钢纤维(PPTF)透水混凝土试验研究[J]. 新型建筑材料, 2015(3): 1-3, 42.
- GAO R D, LI X M, XU Q F, et al. Experimental research on pervious concrete mixed with polypropylene thick fiber(PPTF)[J]. New Building Materials, 2015 (3): 1-3, 42. (in Chinese)
- [13] 刘赞群. 混凝土硫酸盐侵蚀基本机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- LIU Z Q. Study of the basic mechanisms of sulfate attack on cementitious materials [D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- [14] 高润东. 复杂环境下混凝土硫酸盐侵蚀微-宏观劣化规律研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- GAO R D. Micro-macro degradation regularity of sulfate attack on concrete under complex environments [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese)
- [15] 孙伟. 现代结构混凝土耐久性评价与寿命预测[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- SUN W. Durability evaluation and service life prediction of modern concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)

(编辑 胡玲)