

文章编号:1671-8879(2016)01-0036-08

带预制裂缝的 PVA-ECC 抗(盐)冻性能及机理

高淑玲^{1,2}, 史宏飞¹, 王晓伟¹

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401)

摘 要:为了研究寒冷地区带缝工作的聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料(PVA-ECC)的抗(盐)冻性能,采用快冻法研究带有 2 种不同预制裂缝高度的 PVA-ECC 分别在淡水和氯盐中的抗冻性能;分析对比不同预制裂缝高度、粉煤灰掺量和冻融循环次数对 PVA-ECC 抗冻性能的影响;并对各个因素的影响机理进行了分析。研究表明:PVA-ECC 在氯盐环境中的抗冻性能较差,表层剥落严重;粉煤灰掺量对 PVA-ECC 抗冻性能影响较大,粉煤灰掺量越高,PVA-ECC 抗冻性越差;水冻时,125 次冻融循环之前缝高对质量损失影响较大,缝高越大,质量损失率越大,125 次冻融循环后,缝高对质量损失的影响不明显;无论是盐冻还是水冻,整个冻融循环过程中,缝高越大,动弹性模量降低得越多,抗冻性越差。

关键词:道路工程;PVA-ECC;抗冻性;粉煤灰掺量;预制裂缝

中图分类号:U414

文献标志码:A

Frozen resistance of PVA-ECC with initial crack and its mechanism

GAO Shu-ling^{1,2}, SHI Hong-fei¹, WANG Xiao-wei¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to study the (salt) frozen resistance with initial crack of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composites (PVA-ECC), the antifreeze performance of PVA-ECC with two kinds of different initial crack were studied by rapid freeze-thawing experiment in fresh water environment and chlorine salt environment respectively. The influence of different crack height, fly ash content and freeze-thaw cycle times on the frozen resistance of PVA-ECC were analyzed and compared, and the influence mechanism of the factors were analyzed. The results show that the antifreeze performance of PVA-ECC is poorer in chlorine salt environment and surface spalling is serious. Fly ash content has a great influence on the antifreeze performance of PVA-ECC. The higher the fly ash content is, the worse the antifreeze performance of PVA-ECC is. Before 125 times freeze-thaw cycle, effect of crack height on the mass loss is great in fresh water environment. The longer the crack, the mass loss rate is greater. After 125 times freeze-thaw cycle, effect of crack height on the mass loss is not obvious. During the entire freeze-thaw cycle process, whether in fresh water environment or in chlorine salt environment, the longer the crack, the dynamic elastic modulus reduces more and the frost resistance is poorer. 2 tabs, 11 figs, 20 refs.

Key words: road engineering; PVA-ECC; frozen resistance; fly ash content; initial crack

收稿日期:2015-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51108151);国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB623203);河北省自然科学基金项目(E2012202097);江苏省土木工程材料重点实验室开放基金项目(TMCL201105)

作者简介:高淑玲(1977-),女,山东德州人,副教授,工学博士,E-mail:gsl200001@126.com。

0 引 言

聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料(polyvinyl alcohol-engineered cementitious composites,PVA-ECC)具有良好的抗拉性能和裂缝控制能力^[1],从根本上解决了水泥基材料的高脆性,明显改善了混凝土的变形性能,提高了水泥基材料的韧性和耐久性。在桥梁桥面铺装、道路路面以及旧有结构加固补强等领域中有着广阔的应用前景。1997 年 Kanda 等开始将 PVA 纤维用于 ECC 后,国内外对 PVA-ECC 耐久性进行了大量研究^[2];邓宗才等研究了经过 300 次冻融循环后 PVA-ECC 的质量损失以及相对动弹性模量,得到 ECC 的抗冻等级高于 F300^[3];刘曙光等通过对 PVA 纤维混凝土材料盐冻试验研究表明,掺入适量的 PVA 纤维,可以有效提高基体的抗剥落能力,但与淡水环境相比,氯盐环境中 PVA-ECC 的抗冻性显著下降,表明氯盐环境对 PVA-ECC 抗冻性有重要影响^[4];Özbay 等研究了掺加大量矿渣粉的 ECC 在硫酸钠溶液中经过 300 次冻融循环后对力学性能的影响^[5];张菊等研究了 PVA 纤维掺量对抗冻性的影响,并发现氯盐环境中,PVA-ECC 耐久性指数较小,淡水环境中 PVA-ECC 耐久性指数较大,掺加氯盐后抗冻性下降很多^[6];胡春红等研究表明 ECC 在耐久性方面较普通混凝土有很大优势,能显著延长严酷环境下结构的使用寿命,但对其耐久性方面的研究还不够深入^[7-8]。

在实际工程中,混凝土往往是在带裂缝的状态下工作,同时受到多种恶劣环境的共同作用,于孝民等分别研究了普通混凝土、钢筋混凝土、聚丙烯混凝土在冻融(盐冻融)条件下的耐久性能和力学性能等方面^[9-12],但都未涉及到带预制裂缝工作时各种混凝土在耐久性方面的研究,而目前有关 PVA-ECC 在带有预制裂缝情况下的耐久性研究比较少。鉴于此,本文针对不同粉煤灰掺量并带有预制裂缝的 PVA-ECC 试件,进行淡水环境以及氯盐环境下的快速冻融试验,通过分析其外观、质量损失以及相对动弹性模量来研究 PVA-ECC 的抗冻性能。

1 试验概况

1.1 试验材料与配合比设计

PVA 纤维采用日本 K-II 可乐丽纤维(REC15),纤维体积掺量皆为 2%,纤维材料参数见表 1。采用 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥,I 级粉煤灰;聚羧酸高效减水剂。ECC 各组试件配合比以及冻融环境循环次数见表 2,盐冻环境选用质量分数为 3.5%的氯化钠溶液。

表 1 PVA 纤维基本参数
Tab.1 Basic parameters of PVA fiber

型号	直径/ mm	长度/ mm	长径比	延伸 率/%	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa
K-II 可乐丽	0.04	12	300	6	1 600	40

表 2 试验编号、配合比、冻融环境以及冻融次数

Tab.2 Specimen numbers, mix proportions, frost environment and numbers of freeze-thaw cycle

试验编号	水泥	粉煤灰	石英砂	水	减水剂	冻融次数	冻融环境	预制缝高/mm
ECC1-水冻 100 次(缝高 20 mm)	1.000	3.503	2.256	1.280	0.021	100	水冻	20
ECC1-盐冻 100 次(缝高 20 mm)	1.000	3.503	2.256	1.280	0.021	100	盐冻	20
ECC1-水冻 100 次(缝高 40 mm)	1.000	3.503	2.256	1.280	0.021	100	水冻	40
ECC1-水冻 200 次(缝高 20 mm)	1.000	3.503	2.256	1.280	0.021	200	水冻	20
ECC1-水冻 200 次(缝高 40 mm)	1.000	3.503	2.256	1.280	0.021	200	水冻	40
ECC1-水冻 250 次(缝高 20 mm)	1.000	3.503	2.256	1.280	0.021	250	水冻	20
ECC1.648-水冻 100 次(缝高 20 mm)	1.648	3.296	1.824	1.304	0.051	100	水冻	20
ECC1.648-盐冻 100 次(缝高 20 mm)	1.648	3.296	1.824	1.304	0.051	100	盐冻	20
ECC1.648-水冻 100 次(缝高 40 mm)	1.648	3.296	1.824	1.304	0.051	100	水冻	40
ECC1.648-盐冻 100 次(缝高 40 mm)	1.648	3.296	1.824	1.304	0.051	100	盐冻	40
ECC2.284-水冻 100 次(缝高 20 mm)	2.284	2.741	1.825	1.825	0.032	100	水冻	20
ECC2.284-水冻 100 次(缝高 40 mm)	2.284	2.741	1.825	1.825	0.032	100	水冻	40
ECC2.284-盐冻 100 次(缝高 20 mm)	2.284	2.741	1.825	1.825	0.032	100	盐冻	20
ECC2.284-盐冻 100 次(缝高 40 mm)	2.284	2.741	1.825	1.825	0.032	100	盐冻	40

注:以水泥质量为单位 1,其他材料掺量采用与水泥的质量比表示。

1.2 试验方法

试验根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)中的快冻法进行,采用微机全自动混凝土快速冻融试验设备,天津产 DT-16 混凝土全自动动弹性模量测定仪。试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm,共 14 组,每组 3 个,预制缝高分别为 20 mm 和 40 mm,试件采用塑料模具浇注成型并进行 24 d 的标准养护后,将试件从养护地点取出,随后将冻融试件放在(20±2)℃水中浸泡,浸泡时液面高出试件顶面约 25 mm,浸泡 4 d 后称量试件初始质量 W_0 ,测定其横向基频的初始值 f_0 ,然后进行冻融试验。在冷冻和融化终止时,试件中心设定的最低和最高温度分别控制在(−18±2)℃和(5±2)℃内,试验过程中每隔 25 次对试件进行 1 次横向基频和质量测试,并检查外观。

2 结果与分析

2.1 冻融环境对外观的影响

2.1.1 淡水冻融循环次数对外观的影响(缝高 20 mm)

淡水冻融循环次数对 PVA-ECC 试件外观的影响如图 1 所示。由图可知,粉煤灰掺量相同的 3 组试件在不同冻融循环次数后的外观剥落情况也不相同,其中经过 250 次冻融循环后的试件外观变化最大,剥落情况最为严重,试件表面纤维明显外露。这些试件外层剥落严重的地方主要集中在试件两端以

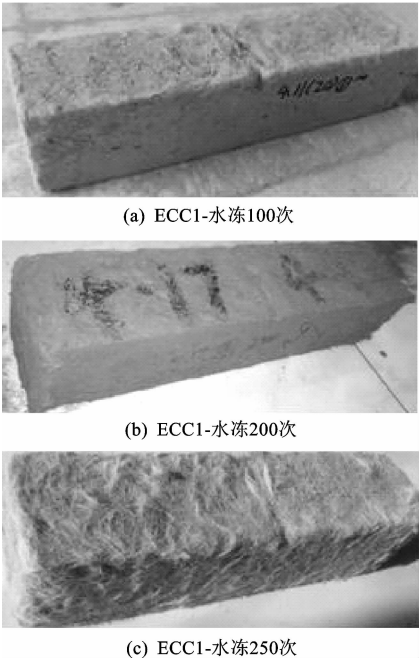


图 1 冻融循环后试件的外观(缝高 20 mm)

Fig. 1 Appearance of specimens after freeze-thaw cycles (initial crack height is 20 mm)

及预制缝端附近,纤维外露比较明显,表明随着冻融循环次数的增加,外观破坏越来越严重,而且冻融循环 250 次以后外观破坏非常明显。

2.1.2 粉煤灰掺量对淡水冻融 100 次后外观的影响(缝高 20 mm)

粉煤灰掺量对淡水冻融循环 100 次的 PVA-ECC 试件外观的影响如图 2 所示。由图可知,经过 100 次冻融循环后,粉煤灰掺量最高的试件 ECC1 外观剥落最严重,粉煤灰掺量较低的试件 ECC 1.648 外观剥落较轻,而粉煤灰掺量最低的试件 ECC2.284 在外观变化上也最小。

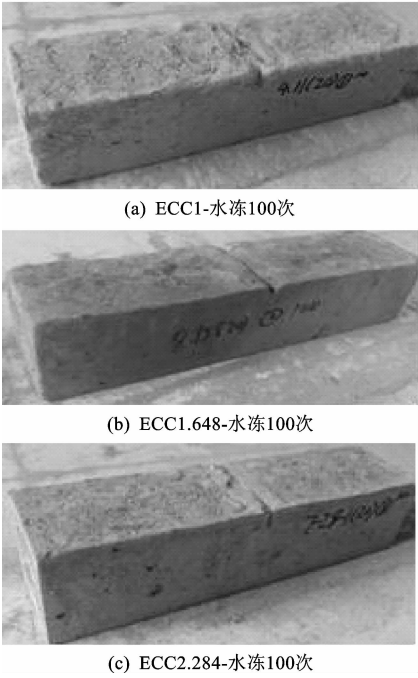


图 2 粉煤灰掺量对 100 次冻融循环后试件外观的影响(缝高 20 mm)

Fig. 2 Influence of fly ash quantity on appearance after freeze-thaw cycle 100 times (initial crack height is 20 mm)

2.1.3 粉煤灰掺量对盐冻融 100 次后外观的影响(缝高 20 mm)

粉煤灰掺量对盐冻融 100 次后 PVA-ECC 试件外观的影响如下页图 3 所示。由图可知,在经过 100 次盐冻循环后,不同粉煤灰掺量的 3 组试件外观剥落情况对比与水冻情况相似,粉煤灰掺量越高,表面剥落情况越严重。

图 2 与图 3 对比后可以看出,在相同粉煤灰掺量与冻融次数的情况下,氯盐环境中试件的外观损毁程度明显高于淡水环境中的试件,试件 ECC1 经过 100 次盐冻循环后,其表面剥落情况甚至比其在淡水环境中冻融循环 250 次后还要严重。

由此可以看出,氯盐环境中的 PVA-ECC 抗冻

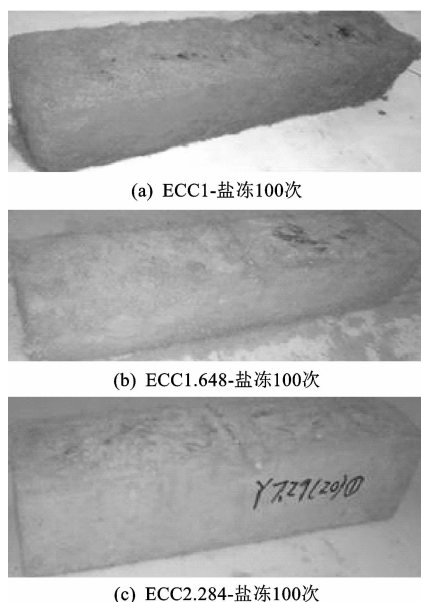


图 3 盐冻循环 100 次后的试件外观(缝高 20 mm)

Fig. 3 Appearance of specimens after salt freeze-thaw cycle 100 times (initial crack height is 20 mm)

性要明显低于淡水环境,这与文献[6]给出的不带缝 ECC 的抗冻性能的结论是相同的;PVA-ECC 的粉煤灰掺量越低,抗冻性就越高;预制裂缝缝端处损伤明显大于试件其他部位。

2.2 冻融环境对质量损失率的影响

试件冻融后的质量损失率为

$$\Delta W_{ni} = \frac{W_{0i} - W_{ni}}{W_{0i}} \times 100 \quad (1)$$

式中: ΔW_{ni} 为 n 次冻融循环后第 i 个试件的质量损失率(%); W_{0i} 为冻融循环试验前第 i 个试件的质量(g); W_{ni} 为 n 次冻融循环后第 i 个试件的质量(g)。

则

$$\Delta W_n = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \Delta W_{ni} \quad (2)$$

式中: ΔW_n 为经过 n 次冻融循环后 1 组试件的平均质量损失率(%)。

2.2.1 冻融次数及粉煤灰掺量对淡水环境中质量损失率的影响

图 4 为淡水环境中 PVA-ECC 的质量损失率曲线。由图可知:①粉煤灰掺量最高的 ECC1 组试件在 0~100 次冻融循环过程中质量损失率始终最高;②ECC1 质量损失率随冻融次数的增加而增加,125 次后开始直线增加,175~200 次质量损失增加较为缓慢,超过 200 次以后,质量损失率又开始直线增加,250 次后, ECC1 质量损失率达到 3.31%,但未达到规范中规定的 5% 的限值,因此,即使是粉煤灰掺量较

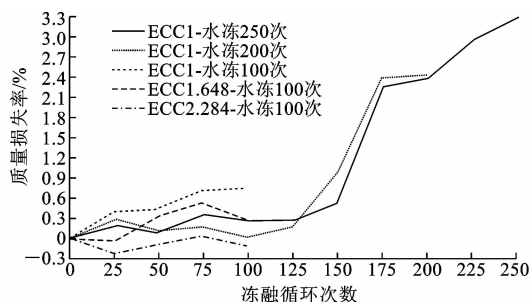


图 4 淡水环境中质量损失率曲线(缝高 20 mm)

Fig. 4 Curves of mass loss rate in freshwater environment (initial crack height is 20 mm)

高的 ECC 的抗冻等级也大于 F250,远远大于普通混凝土的抗冻等级;③当水冻达到 175 次时,质量损失率均已达到 2% 以上,而水冻 250 次时,质量损失率已达到 3.31%,文献[9-10]中 UHTCC 经过 300 次冻融循环后质量损失不到 1%,由此看出即使缝高为 20 mm,也大大降低了 ECC 的抗冻性;④粉煤灰掺量适中的 ECC1.648 组试件质量损失率相对较少,粉煤灰掺量最低的 ECC2.284 组试件质量损失率最低;⑤在 0~100 次冻融循环过程中,由于在冻融开始阶段内部吸水饱和,质量增加,试件外部剥落较少,质量损失少,几乎都为负数。

2.2.2 粉煤灰掺量对盐冻融环境下质量损失率的影响

图 5 为氯盐环境与淡水环境中 PVA-ECC 质量损失率对比情况。由图可知:①50 次冻融循环之前,3 种配比的质量损失率都较小,几乎不变,有的质量甚至增加;②当冻融次数大于 50 后,质量损失率急剧增加,而在淡水环境中,125 次后质量损失率才急剧增加;③100 次冻融循环后,氯盐环境中的 ECC1、ECC1.648、ECC2.284 质量损失率分别为 1.73%、1.59%、1.25%,淡水环境中质量损失率分别为 0.73%、0.26%、-0.13%,盐冻组比水冻组分别高 1%、1.33%、1.38%,相同冻融次数时,同一组

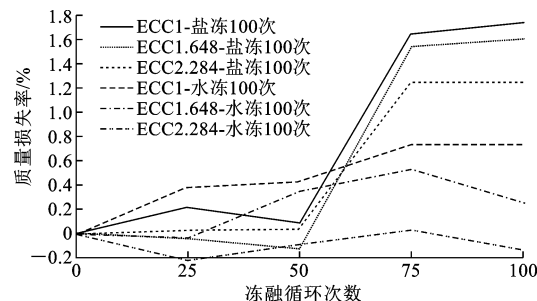


图 5 氯盐环境与淡水环境质量损失率曲线对比(缝高 20 mm)

Fig. 5 Contrast of mass loss rate curves in chloride salt and freshwater environment (initial crack height is 20 mm)

试件在氯盐环境中的质量损失率大于淡水环境;
④在氯盐环境中,随着粉煤灰掺量增加,质量损失率增加,与淡水环境中的结果相同。

2.2.3 缝高对质量损失率的影响

图 6 为缝高对 PVA-ECC 质量损失率的影响。由图可知:①相同配合比情况下,无论缝高 20 mm 还是 40 mm,在 50~75 次盐冻融循环过程中,质量损失率急剧增加;②在 0~100 次盐冻融循环过程中,有的配合比缝高大的质量损失率大(ECC2.284-盐冻 100 次(缝高 40 mm)),有的配合比缝高小的质量损失率大(ECC1.648-盐冻 100 次(缝高 20 mm)),缝高对质量损失率的影响规律不明显。

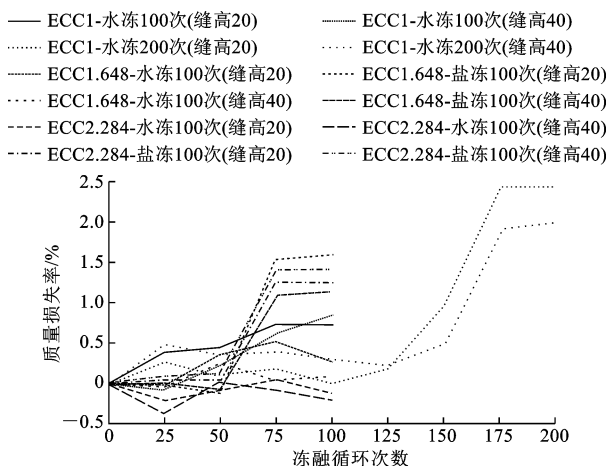


图 6 缝高对质量损失率的影响

Fig. 6 Influence of initial crack height on mass loss rate

淡水冻融环境下:①125 次冻融循环前,ECC1-水冻 200 次(缝高 40 mm)的质量损失率大于 ECC1-水冻 200 次(缝高 20 mm)的质量损失率;②当冻融循环次数大于 125 次以后,缝高 40 mm 的质量损失率小于缝高 20 mm 的。这说明在 125 次冻融循环之前,缝高对质量损失率的影响较大,缝高越大,抗冻性能越差,但 125 次冻融循环之后,缝高对质量损失的影响不再明显,因此,淡水环境下冻融循环次数为 125~250 次时,氯盐环境下冻融循环次数为 0~100 次时,缝高对质量损失的影响规律不明显。

2.3 冻融环境对相对动弹性模量的影响

试件冻融后的相对动弹性模量为

$$P_i = \frac{f_{mi}^2}{f_{oi}^2} \times 100 \quad (3)$$

式中: P_i 为经过 n 次冻融循环后第 i 个试件的相对动弹性模量(%); f_{mi} 为经过 n 次冻融循环后第 i 个试件的横向基频(Hz); f_{oi} 为冻融循环前第 i 个试件的横向基频初始值(Hz)。

则可得

$$P = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 P_i \quad (4)$$

式中: P 为经过 n 次冻融循环后 1 组试件的平均相对动弹性模量(%)。

2.3.1 粉煤灰掺量和冻融次数对淡水环境中相对动弹性模量的影响

淡水环境中 PVA-ECC 的相对动弹性模量变化曲线如图 7 所示。

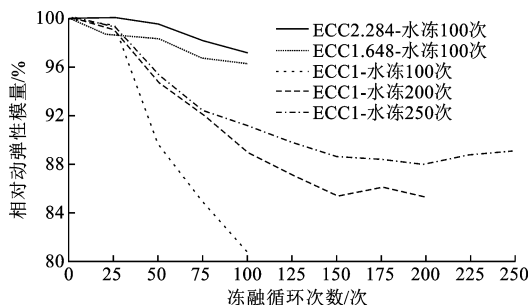


图 7 淡水环境中相对动弹性模量曲线(缝高 20 mm)

Fig. 7 Relative dynamic elastic modulus curves in freshwater environment (initial crack height is 20 mm)

由图可得如下结论。

(1)粉煤灰掺量最高的 ECC1-水冻 100 次(缝高 20 mm)组在 100 次冻融循环后,相对动弹性模量为 80.84%(动弹性模量损失为 19.06%);粉煤灰掺量最低的 ECC1-水冻 200 次(缝高 20 mm)组在 200 次冻融循环后,相对动弹性模量为 85.17%(动弹性模量损失为 14.83%);ECC1-水冻 250 次(缝高 20 mm)组在 250 次冻融循环后,相对动弹性模量为 88.96%(动弹性模量损失为 11.04%)。即使是相同配合比的试块,相同冻融次数时,相对动弹性模量也有较大的不同。文献[13-14]中 UHTCC 经过 300 次冻融循环后动弹性模量损失不超过 5%,可以看出初始裂缝会降低材料的动弹性模量;文献[15]中 ECC 经过 150 次水冻循环后,动弹性模量损失为 5.1%,相同强度等级的普通混凝土水冻试验动弹性模量损失为 12.3%;文献[16]在 ECC 中加入尾矿砂,在经历 250 次冻融循环后,弹性模量损失不超过 31.34%。由此可知,不但缝高对动弹性模量有影响,配合比不同,其试验结果也还存在一定的离散性。

(2)冻融循环次数在 0~150 次时,相对动弹性模量下降较快,当冻融循环次数达到 150 次时,相对动弹性模量的下降趋于缓慢。

(3)当粉煤灰与水泥的质量比为 1.2~2.0 (ECC1.648、ECC2.284)时,相对动弹性模量相差不

大,而且下降速度较慢;当粉煤灰与水泥的质量比为 3.5(ECC1)时,相对动弹性模量的下降速度较快,说明在冻融循环次数相同的情况下,粉煤灰掺量越高,相对动弹性模量的下降幅度越大,这一结论和质量损失率是相同的。

2.3.2 粉煤灰掺量对氯盐环境下相对动弹性模量的影响

氯盐环境中 PVA-ECC 的相对动弹性模量变化曲线如图 8 所示。由图可知,100 次盐冻后,各组试件的相对动弹性模量均在 80% 以上,粉煤灰掺量越高,相对动弹性模量的下降幅度越大;当粉煤灰与水泥的质量比为 2 时,缝高对相对动弹性模量几乎没有影响,当粉煤灰与水泥的质量比为 1.2 时,缝高越大,相对动弹性模量的下降幅度越大。

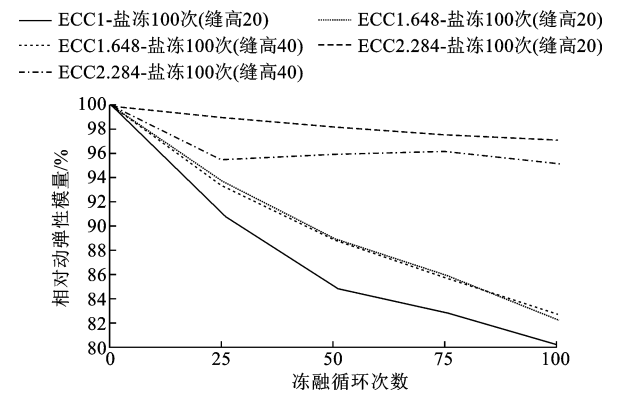


图 8 氯盐环境下相对动弹性模量曲线

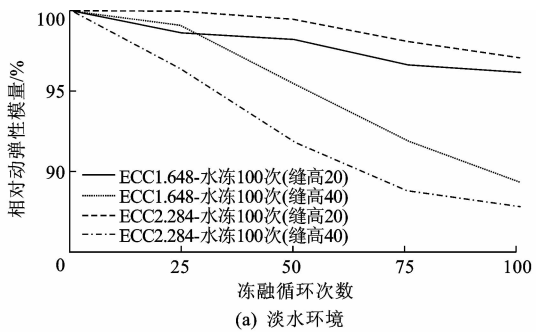
Fig. 8 Relative dynamic elastic modulus curves in chloride salt environment

2.3.3 缝高对相对动弹性模量的影响

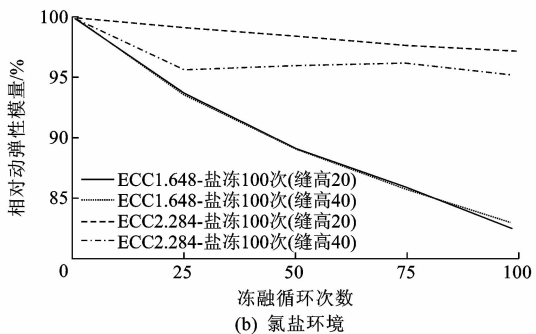
缝高对 PVA-ECC 相对动弹性模量的影响如图 9 所示。由图可知,3 组不同的配比中,无论是水冻还是盐冻,缝高为 40 mm 的相对动弹性模量均小于缝高为 20 mm 的。由此得出,缝高越大,相对动弹性模量越小。

2.3.4 冻融环境对相对动弹性模量的影响

冻融环境对 PVA-ECC 相对动弹性模量的影响如图 10 所示。由图可知,相同缝高、相同配比情况下,除个别情况(ECC2.284,缝高 40 mm)外,氯盐环境下的相对动弹性模量要小于淡水环境下的;文献[17]表明 35 d 之后(110 次循环),混凝土试件严重破坏并退出试验,而 ECC 试件经过 300 次循环后动弹性模量并没降低。本试验 ECC 构件是带有预制裂缝的,即使是缝高 40 mm,并在氯盐冻融环境下,其抗冻性能也远远优于普通混凝土,表现出了优良的抗(盐)冻性能。



(a) 淡水环境



(b) 氯盐环境

图 9 缝高对相对动弹性模量的影响

Fig. 9 Influence of initial crack height on relative dynamic elastic modulus

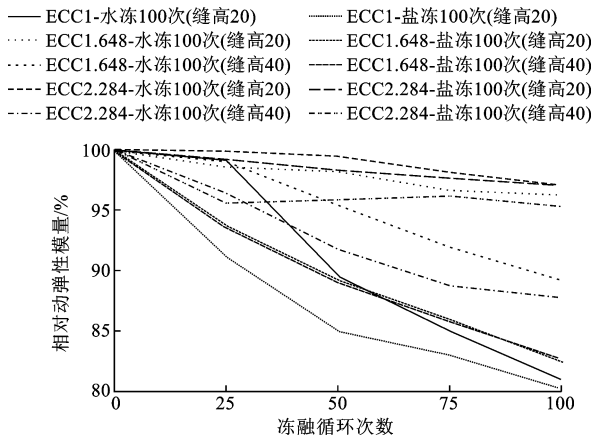


图 10 冻融环境对相对动弹性模量的影响

Fig. 10 Influence of freeze-thaw environment on relative dynamic elastic modulus

3 机理分析

3.1 粉煤灰掺量的影响机理

相比于粉煤灰掺量较低的试件,粉煤灰掺量较高的 PVA-ECC 试件的水泥净浆黏度较低,流动度增加,自身强度也较低,粉煤灰掺量和水灰比影响了基体材料的孔结构,并且随着粉煤灰掺量和水灰比的增加,孔隙率增加^[18]。当粉煤灰掺量较低时,水泥是影响气泡结构的主要因素,粉煤灰的自愈合能力有效填充了水泥水化留下的空隙以及微裂缝,增强了混凝土的抗冻性;粉煤灰掺量增大时,粉煤灰产

生的胶体逐渐成为水泥硬化的主要影响因素,在水化过程中产生的空隙和微裂缝增多,部分气泡可能出现连通,导致气泡结构变差,浆体中可冻水增加,静水压力增大^[17],在冻结过程中受(盐)水膨胀力作用时,产生表层水泥净浆剥落,使其质量损失率与相对动弹性模量都较低。

3.2 冻融环境的影响机理

在氯化钠溶液中,质量损失率较高的原因可能是由于氯化钠溶液的侵蚀作用,增大了 ECC 内渗透压,试件表面层饱和程度比水中时高,氯化钠溶液冻结后试块塑性较低,变形能力很差,限制膨胀的作用力完全由孔壁承受^[19]。同时,由于氯化钠溶液结冰时的体积膨胀率大于淡水结冰时的体积膨胀率,使试件内部在结冰时承受了更大的压力,加剧了试件的破坏^[20]。

粉煤灰掺量较低时,ECC 在不同冻融环境中相对动弹性模量相差较大,而粉煤灰掺量较高时,这一数值相差反而较小。原因可能是粉煤灰掺量较低的试件在淡水环境中不易产生微裂缝,在氯盐环境中则产生了较多的内部微裂缝,所以相对动弹性模量相差较大。粉煤灰掺量较高的试件在淡水中 25~50 次冻融循环时,产生的内部微裂缝较少,而在氯盐环境中则产生较多微裂缝,此时氯盐环境中 ECC 的相对动弹性模量较低。在冻融循环达到 100 次后,淡水环境中的试件开始产生较多的微裂缝,而氯盐环境中的内部微裂缝已经趋于饱和,二者的相对动弹性模量也就相差较少。

3.3 初始缝高的影响机理

在 125 次冻融循环之前,缝高对质量损失率影响较大,缝高越大,质量损失率越大,但 125 次冻融循环之后,缝高对质量损失率的影响不再明显。这可能是由于冻融循环次数较少时缝高越大,吸水量越多,冻融后体积膨胀率较大,使试件内部在结冰时承受了更大的压力,试件表面剥落的比较严重。

缝高越大,相对动弹性模量下降的越快,分析原因如下:裂缝的开裂主要集中在缝端附近区域,预制裂缝开裂的位置在横向基频的测量范围内,如图 11 所示。缝高越大,越容易出现内部微小裂缝,而影响试件相对动弹性模量的主要是内部微裂缝,缝高越大,冻融以后,由于内部微小裂缝的贯通和发生,使得基频降低,进而降低相对动弹性模量。

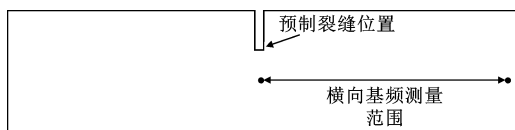


图 11 横向基频测量

Fig. 11 Horizontal frequency measurement

4 结 语

(1)无论是淡水环境还是氯盐环境中,粉煤灰掺量越高,ECC 抗冻性能越差,由于氯化钠溶液的侵蚀作用,PVA-ECC 在氯盐环境中的抗冻性要低于淡水环境中。

(2)在 PVA-ECC 内部微裂缝饱和之后,其主要破坏形式为表层剥落以及质量损失,相对动弹性模量则趋于稳定。氯盐环境中的 PVA-ECC 试件表层剥落要比淡水环境中的试件严重很多,随着冻融次数增加,表层剥落情况愈发明显,粉煤灰掺量越高,试件表层剥落越严重,100 次盐冻循环后表面剥落情况比在淡水环境中冻融循环 250 次后更严重。盐冻融 100 次后,ECC 并没有达到冻融破坏条件,但试件表面大量的 PVA 纤维外露,主要集中在试件两端以及预制缝端附近,影响外观。

(3)在淡水环境中,0~125 次冻融循环时,质量损失率急剧增加,但 125 次后缝高对质量损失率的影响不再明显;在氯盐环境中,冻融次数小于 100 时,缝高对质量损失率的影响规律不明显。

(4)氯盐环境中,ECC 的相对动弹性模量小于淡水环境中的;且无论是氯盐环境中,还是淡水环境中,缝高 40 mm 的相对动弹性模量均比缝高 20 mm 的下降得多,缝高越大,ECC 抗冻性能越差。

(5)进行带预制裂缝 ECC、无裂缝 ECC 的冻融破坏对比试验,以确定其抗冻标号,并从微观角度研究粉煤灰掺量、结构缺陷等因素对 PVA-ECC 复合材料抗冻性能的影响机理,从而得出最佳的粉煤灰掺量以及配合比,并给出提高带裂缝工作 PVA-ECC 抗冻性的有效措施是下一步研究的重点。

参考文献:

References:

- [1] 徐世琅,蔡向荣. 超高韧性纤维增强水泥基复合材料基本力学性能[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1055-1063.
XU Shi-lang, CAI Xiang-rong. Experimental study on mechanical properties of ultra-high toughness fiber reinforced cementitious composite[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(9): 1055-1063. (in Chinese)
- [2] KANDA T, LI V C. Interface property and apparent strength of a high strength hydrophilic fiber in cement matrix[J]. Materials in Civil Engineering, 1998, 10(1): 5-13.
- [3] 邓宗才,薛会青,徐海宾. ECC 材料的抗冻融性能试验研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2013, 34(1): 16-19.
DENG Zong-cai, XUE hui-qing, XU Hai-bin. Experimental study of durability properties of high toughness fiber reinforced cementitious composites under freezing and thawing cycles[J]. Journal of North China

- Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2013, 34(1): 16-19. (in Chinese)
- [4] 刘曙光, 闫敏, 闫长旺, 等. 聚乙烯醇纤维强化水泥基复合材料的抗盐冻性能[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2012, 42(1): 63-67.
LIU Shu-guang, YAN Min, YAN Chang-wang, et al. Deicing salt resistance of PVA fiber reinforced cementitious composite[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2012, 42(1): 63-67. (in Chinese)
- [5] ÖZBAY E, KARAHAN O, LACHEMI M, et al. Dual effectiveness of freezing-thawing and sulfate attack on high-volume slag-incorporated ECC[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45(1): 1384-1390.
- [6] 张菊, 刘曙光, 闫长旺, 等. 氯盐环境对PVA纤维增强水泥基复合材料抗冻性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(6): 766-771.
ZHANG Ju, LIU Shu-guang, YAN Chang-wang, et al. Influence of chloride environment on frost resistance of PVA fiber reinforced engineered cementitious composite[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(6): 766-771. (in Chinese)
- [7] 胡春红, 赵铁军, 苏卿. 严酷环境混凝土结构耐久性修复材料——应变硬化水泥基复合材料耐久性研究进展[J]. 混凝土, 2010(9): 101-103.
HU Chun-hong, ZHAO Tie-jun, SU Qing. Durability research of strain hardening cementitious composites (SHCC) as durable material for concrete structure repair in severe environment[J]. Concrete, 2010(9): 101-103. (in Chinese)
- [8] 王晓伟, 刘品旭, 田稳苓, 等. PVA纤维增强水泥基复合材料的耐久性能[J]. 中国港湾建设, 2013(5): 8-11.
WANG Xiao-wei, LIU Pin-xu, TIAN Wen-ling, et al. Durability performance of PVA engineered cementitious composites[J]. China Harbour Engineering, 2013(5): 8-11. (in Chinese)
- [9] 于孝民, 任青文. 冻融循环作用下普通混凝土断裂能试验[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(1): 80-82.
YU Xiao-ming, REN Qing-wen. Fracture release energy for ordinary concrete with freeze-thaw cycles[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(1): 80-82. (in Chinese)
- [10] 杨有福, 曹凯, 杨志泉, 等. 冻融循环作用后钢管混凝土轴压短柱力学性能[J]. 中国公路学报, 2014, 27(3): 51-58.
YANG You-fu, CAO Kai, YANG Zhi-quan, et al. Mechanical properties of concrete-filled steel tubular stubs after freezing and thawing cycles under axial loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(3): 51-58. (in Chinese)
- [11] 张云清, 余红发, 王甲春. 钢筋混凝土构件的抗盐冻性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(2): 345-351.
ZHANG Yun-qing, YU Hong-fa, WANG Jia-chun. Study of salt-freezing-resistance of concrete member[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(2): 345-351. (in Chinese)
- [12] 赵泽阳. 聚丙烯纤维混凝土抗盐冻性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
ZHAO Ze-yang. Study on the salt frost resistance of polypropylene fiber concrete[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese)
- [13] 蔡新华. 超高韧性水泥基复合材料耐久性性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
CAI Xin-hua. Experimental research on the durable properties of ultra high toughness cementitious composites (UHTCC) [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] 徐世煌, 蔡新华, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料抗冻耐久性性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 42-46.
XU Shi-lang, CAI Xin-hua, LI He-dong. Experimental study of the durability properties of ultra-high toughness cementitious composites under freezing and thawing cycle[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 42-46. (in Chinese)
- [15] 周伟. 大掺量粉煤灰ECC耐久性试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
ZHOU Wei. Experimental research on durability of engineered cementitious composite with high volume fly ash[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [16] 鲍文博, 张少峰, 陈四利. 尾矿砂水泥基复合材料的耐久性试验研究[J]. 低温建筑技术, 2013(12): 7-9.
BAO Wen-bo, ZHANG Shao-feng, CHEN Si-li. Experimental study on durability of the tail ore cementitious composites[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2013(12): 7-9. (in Chinese)
- [17] 朱桂红, 田砾, 郭平功, 等. 工程复合材料(ECC)的耐久性能试验研究进展[J]. 工程建设, 2006, 38(5): 7-9.
ZHU Gui-hong, TIAN Li, GUO Ping-gong, et al. Development of study on durability performance test of Engineered Cementitious Composites (ECC) [J]. Engineering Construction, 2006, 38(5): 7-9. (in Chinese)
- [18] 陆建飞. 大掺量粉煤灰混凝土冻融循环作用下的力学性能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
LU Jian-fei. The study about mechanical properties of high volume fly ash concrete under the action of freeze-thaw cycle[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2011. (in Chinese)
- [19] JIANG L H, LIN B Y, CAI Y B. Studies on hydration in high-volume fly ash concrete binders[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(6): 703-706.
- [20] 慕儒, 缪昌文, 刘加平, 等. 氯化钠、硫酸钠溶液对混凝土抗冻性的影响及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(6): 523-529.
MU Ru, MIAO Chang-wen, LIU Jia-ping, et al. Effect of NaCl and Na₂SO₄ solution on the frost resistance of concrete and its mechanism[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2001, 29(6): 523-529. (in Chinese)