

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.05.004

冻融循环作用对海砂粉煤灰混凝土的损伤研究

侯海龙, 屈锋*, 石卫华, 黄志, 王功勋
(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了研究冻融循环作用对掺加淡化海砂等原材料含有氯离子的粉煤灰钢筋混凝土结构的损伤规律, 通过内掺氯盐的方法模拟海砂混凝土并设计了室内快速冻融循环试验。以海砂钢筋混凝土试件外观变化、质量损失率、损伤层厚度和相对动弹性模量4个评价指标探究了不同粉煤灰掺量对海砂钢筋混凝土的影响规律。将内掺盐冻复合作用下与已有研究中的气冻、水冻、外渗盐冻作用下的粉煤灰混凝土评价指标进行了对比分析。结果表明: 随着冻融循环次数的增加, 海砂粉煤灰混凝土的表层砂浆、细骨料和粗骨料依次脱落, 其质量损失率及损伤层厚度增加, 相对动弹性模量降低, 混凝土抗冻性能有所下降, 但其冻融损伤速率出现先增加后减小的趋势; 粉煤灰掺入量越多, 混凝土质量损失率及损伤层厚度越大, 其相对动弹性模量越小, 粉煤灰混凝土受到冻融循环损伤的程度越大, 因此粉煤灰的加入虽能增加混凝土密实性, 但不利于混凝土抗盐冻作用; 相较于已有研究中的其他冻融方式, 盐-冻双重作用加速了混凝土冻融损伤的发展, 因外渗盐冻和内掺盐冻造成了混凝土内部氯离子分布差异, 外渗盐冻作用对混凝土的影响更集中在外层区域, 其中外层损伤的增加速度要快于内掺盐冻作用, 但内掺盐冻对混凝土内部结构造成的损伤最大。

关键词: 道路工程; 冻融损伤; 快冻法; 内掺氯盐混凝土; 粉煤灰; 耐久性

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 05-0028-07

Study on Damage to Sea Sand Fly Ash Concrete Caused by Freeze-thaw Cycle

HOU Hai-long, QU Feng*, SHI Wei-hua, HUANG Zhi, WANG Gong-xun

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: In order to study the damage rule of fly ash reinforced concrete structures mixed with desalinated sea sand and other raw materials containing chloride ions caused by freeze-thaw cycles, the sea sand concrete is simulated by using the method of internal mixing chloride salt, and the indoor rapid freeze-thaw cycle experiment is designed. The influence rules of different fly ash contents on sea sand reinforced concrete are explored by 4 evaluation indicators, including the appearance change, mass loss rate, thickness of damage layer and relative dynamic elastic modulus of the sea sand reinforced concrete samples. The evaluation indicators of fly ash concrete under the combined action of internal mixing salt freezing are compared and analyzed with those under the action of air freezing, water freezing and exosmosis salt freezing. The result shows that (1) With the increase of freeze-thaw cycle, the surface mortar, fine aggregate and coarse aggregate of sea sand fly ash concrete peel off sequentially. The mass loss rate and damage layer thickness of sea sand fly ash concrete increase, the relative dynamic elastic modulus decreases, and the frost resistance of concrete decreases, but the freeze-thaw damage rate appears the trend of decreasing after increasing. (2)

收稿日期: 2021-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51678234, 51808213); 湖南省教育厅科研项目 (18C0324, 19A164, 20B214); 湖南省自然科学基金项目 (2019JJ50185)

作者简介: 侯海龙 (1997-), 男, 湖南郴州人, 硕士. (1159288691@qq.com)

* 通讯作者: 屈锋 (1979-), 男, 河南邓州人, 博士. (qfkd1015@126.com)

The more fly ash is added, the greater the concrete mass loss rate and the damage layer thickness, the less the relative dynamic elastic modulus, and the greater the extent of fly ash concrete damaged by freeze-thaw cycles. Therefore, although the addition of fly ash can increase the compactness of concrete, it is not conducive to the salt freezing resistance of concrete. (3) Compared with other freeze-thaw modes in existing studies, the dual action of salt-freeze accelerates the development of freeze-thaw damage to concrete. Because of the differences in the distribution of chloride ions within the concrete caused by exosmosis salt freezing and internal mixing salt freezing, the influences of exosmosis salt freezing on concrete are more concentrated in the outer region, where the outer layer damage increases faster than the situation caused by internal mixing salt freezing, but the internal mixing salt freezing causes the most serious damage to the internal structure of the concrete.

Key words: road engineering; freeze-thaw damage; quick freezing method; concrete mixed with chloride salt; fly ash; durability

0 引言

在严寒地区, 冻融循环作用是影响混凝土结构耐久性降低的主要因素之一^[1-5]。盐冻对混凝土破坏更为严重, 其中冯乃谦等^[6]对山东沿海钢筋混凝土公路桥进行调查研究发现, 该地区公路桥仅投入 10 a 左右就因盐害、冻害等因素造成了严重的破坏, 损失较大。杨钱荣等^[7]对青岛海湾大桥进行调查研究发现, 该桥冬季受盐冻复合作用影响较大, 海水和人为抛撒的融雪剂或除冰盐使得混凝土中盐含量增加, 大大增大了盐-冻融损伤程度。

外渗和内掺是氯盐进入钢筋混凝土内不同的两种方式, 外渗是因外界环境的影响或除冰盐的使用, 使氯离子通过渗透作用进入混凝土; 内掺是因掺入受氯盐侵蚀的原材料, 使氯离子随原材料的加入进入混凝土。随着河沙等资源的减少, 海砂等含氯盐的原材料正在被使用, 因此有必要对用该原材料制作的混凝土构件的耐久性进行研究。目前对于氯盐、冻融作用以及氯盐-冻融双重作用对粉煤灰混凝土耐久性的研究, 主要有左晓宝等^[8]研究发现, 粉煤灰的掺入一方面能提高混凝土固化氯离子能力, 从而提高了混凝土抗氯盐侵蚀能力, 但另一方面粉煤灰的加入会降低钢筋钝化氯离子阈值, 又会对抗氯盐侵蚀产生不利影响。李阳等^[9]研究发现, 掺入粉煤灰使得混凝土抗冻能力下降, 且随着掺量的增加, 抗冻性下降得越来越快。王德志等^[10]研究发现, 掺 15% 粉煤灰能增强抗盐冻能力, 混凝土质量损失率随着 NaCl 盐溶液浓度的增大而增大, 但其浓度在 5% 时质量损失率最高。在以往试验研究中, 关于在盐冻融条件下评价混凝土损伤规律, 大多数

直接采用素混凝土^[11-12]以及通过外渗氯离子模拟盐冻作用^[13-14], 较少研究冻融循环作用对原材料中含有氯离子的钢筋混凝土的损伤影响。因此, 本试验以掺加胶凝材料总量 3% 的氯盐方式模拟海砂制作配有钢筋混凝土试件, 开展盐冻循环作用, 通过混凝土外观变化、质量损失率、损伤层厚度以及相对动弹性模量指标, 对不同冻融循环次数作用后的粉煤灰混凝土进行评价, 并与气冻气融、水冻和外渗氯离子盐冻进行了对比分析, 得出其冻融损伤规律及其和其他冻融方式的差异。

1 试验

1.1 试验材料及配合比

本试验采用某品牌 P. O42.5 水泥, 细度 6.2%, 3 d 和 28 d 的抗压强度分别为 24.5 MPa, 49.6 MPa; 采用候钢 I 级粉煤灰, 密度 2.63 g/cm³, 细度 9.6%, 含水量 0.5%, 需水量比 93%; 细集料采用河沙, 细度模数为 2.7; 粗骨料采用碎石, 压碎值 8.1%, 粒径 5~20 mm; 钢筋采用 HRB400 螺纹钢; NaCl 盐采用纯度大于 96% 的工业盐; 电解质溶液为饱和 Ca(OH)₂ 溶液。

试验共设计了 4 组混凝土, 混凝土强度等级为 C40, 水胶比为 0.48, 其中普通混凝土组为 PC 组, 掺 10%, 20%, 30% 粉煤灰分别为 FAC-1, FAC-2, FAC-3 组。混凝土配合比及各组试件混凝土 28 d 龄期立方体抗压强度见表 1 所示。

1.2 试验方法

混凝土抗压试验采用 100 mm×100 mm×100 mm 试块, 冻融循环试验采用 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体的试件, 构件中心埋入一根直径 16 mm, 长 350 mm 的螺纹钢筋, 如图 1 所示。

表1 混凝土配合比

Tab. 1 Mix proportion of concrete

编号	材料用量/(kg·m ⁻³)						f_c /MPa
	水	水泥	细骨料	粗骨料	粉煤灰	NaCl	
PC	175	357	642	1 246	0	11	48.0
FAC-1	175	321	642	1 246	36	11	46.3
FAC-2	175	285	642	1 246	72	11	45.5
FAC-3	175	249	642	1 246	108	11	44.2

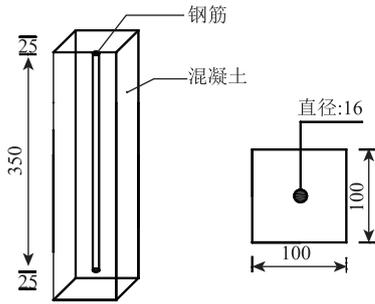


图1 试件示意图 (单位: mm)

Fig. 1 Schematic diagram of specimen (unit: mm)

冻融循环试验依据 GB/T 50082—2009 规范采用快冻法,运用冻融设备,对 PC 组试件进行共 100 次冻融循环,其余组进行共 75 次冻融循环,每经 25 次冻融循环作用后通过试件外观变化及质量损失率、损伤层厚度、相对动弹性模量评价指标对试件冻融损伤进行判断,得出冻融损伤规律。

1.3 试验评价指标

1.3.1 质量损失率

$$\Delta W = \frac{M_0 - M_n}{M_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, ΔW 为质量损失率; M_0 为冻融循环前试件初始质量; M_n 为经过 n 次冻融循环后试件的质量。

1.3.2 冻融损伤层厚度

冻融损伤层厚度的测量依据《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS 21: 2000) 使用非金属超声检测仪,采用平测法对每经 25 次冻融循环作用的试件进行一次检测。以发射装置为原点,将接收装置初始端测间距选择 25 mm,定为 50, 75 mm 和 100 mm,后端测间距为 50 mm,定为 150, 200 mm 和 250 mm 如图 2 所示。损伤层厚度按式 (2) 计算:

$$h_f = \frac{l_0}{2} \times \sqrt{\frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2}}, \quad (2)$$

式中, h_f 为损伤层厚度; v_1, v_2 为混凝土中未损伤、损伤层超声波速; l_0 为声速突变时发射装置与接收装置间的距离。

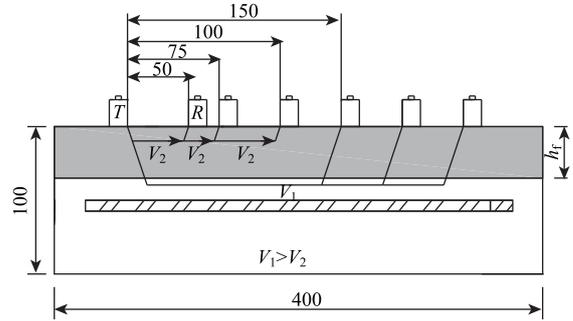


图2 平测法布置示意图 (单位: mm)

Fig. 2 Schematic diagram of horizontal measurement arrangement (unit: mm)

根据平测法测量过程中所得到的声时与声距之间的关系如图 3 所示。

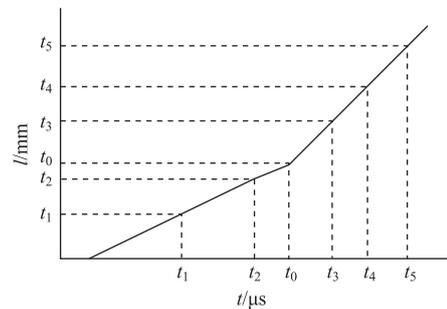


图3 声时与声距关系图

Fig. 3 Relationships between sound time and sound distance

若假设损伤层中的声时与声距的关系如式 (3) 所示:

$$l_s = a_1 + b_1 t_s, \quad (3)$$

式中, l_s 为损伤层区域内的声距; t_s 为损伤层区域内的声时; a_1, b_1 为线性回归系数。

未损伤层中的声时与声距的关系如式 (4) 所示:

$$l_{ws} = a_2 + b_2 t_{ws}, \quad (4)$$

式中, l_{ws} 为未损伤层区域内的声距; t_{ws} 为未损伤层区域内的声时; a_2, b_2 为线性回归系数。

则根据式 (3)~(4) 可以计算得到声速突变时装置间的距离 l_0 , 如式 (5) 所示:

$$l_0 = \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{b_2 - b_1}. \quad (5)$$

1.3.3 相对动弹性模量

相对动弹性模量的测量依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009) 规范,通过使用非金属超声检测仪,采用对测法对每经 25 次冻融循环作用的试件进行一次试验,为保持试件前后状态的一致性,试件在干燥状

态下检测, 试验得到混凝土波速和声时后, 通过式(6)计算得到其混凝土的相对动弹性模量。

$$E_{rd} = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} = \frac{V_n^2}{V_0^2} = \frac{T_0^2}{T_n^2}, \quad (6)$$

式中, E_{rd} 为相对动弹性模量; E_{d0} 为初始动弹性模量; E_{dn} 为经过 n 次冻融循环后动弹性模量; V_0 为初始超声波速; V_n 为经过 n 次冻融循环后超声波速; T_0 为初始超声声时; T_n 为经过 n 次冻融循环后超声声时。

2 结果与分析

2.1 内掺和外掺盐冻中混凝土内部氯离子分布对比

为分析两种盐冻对混凝土的不同损伤, 首先对比了内掺和外掺盐冻^[15]中混凝土内部氯离子分布差异。从图4可以看出, 内掺PC组混凝土中氯离子均匀分布在不同深度中, 而外掺组混凝土在3%NaCl溶液中经冻融循环100次后, 再放入NaCl溶液中浸泡3d, 其氯离子含量随深度的增加而减少, 大部分氯离子集中在距混凝土表层, 其内部距表面较远位置氯离子含量较低。放置在NaCl溶液中的混凝土虽然能吸收溶液, 但只有水能渗透进更深处, 氯离子会被硬化水泥浆体的纳米孔阻止而聚集在表面附近, 当表面与内部氯离子浓度差过大, 才会缓慢向里扩散。而冻融循环作用会破坏混凝土孔隙结构, 因此对氯离子扩散起到加速作用。

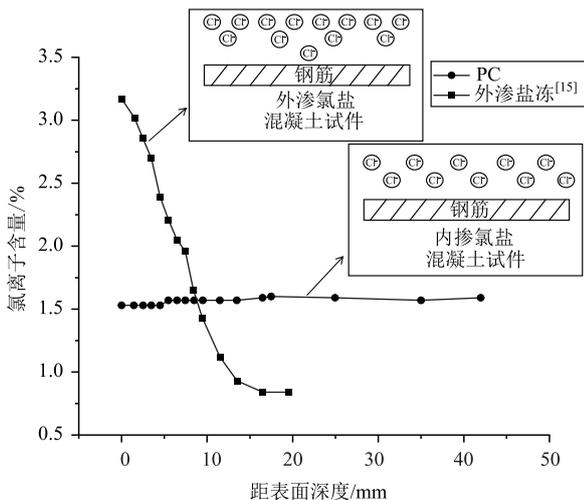


图4 不同冻融方式的氯离子分布差异

Fig. 4 Differences of chloride ion distributions in different freeze-thaw modes

2.2 外观变化

在冻融循环作用下, 试件外观变化直观反映了混凝土试件冻融损伤的程度。试验每进行25次冻融循环, 将试件表面清理干净后进行表观观察。总体

上, 随冻融次数增加, 各组混凝土表观损伤逐渐加剧。以FAC-3组为例, 经冻融循环25次, 表面砂浆已全部脱落, 部分粗骨料显露; 随着冻融循环到50次时, 表层损伤进一步加剧, 表面细骨料基本已经完全脱落; 经75次冻融循环作用后, 冻融损伤较大, 其中粒径较小的粗骨料已经剥落而粒径较大的粗骨料即将剥落。随着粉煤灰掺量的增加, 相同冻融循环次数下混凝土表观损伤呈增大趋势。同时经冻融循环25次时, 随着粉煤灰掺量的增加, 各组均处于表面砂浆脱落, 但脱落程度呈增大趋势; 经75次冻融时, PC组表面细骨料部分脱落, FAC-1组表面细骨料基本已经全部脱落, 而FAC-2组表面粗骨料已经全部暴露, FAC-3组表面粒径较小的粗骨料已经剥落而粒径较大的粗骨料即将剥落。因此, 对于内掺氯盐粉煤灰混凝土, 冻融作用次数的增加以及粉煤灰掺量的增加都加重了混凝土表层剥蚀脱落现象。

2.3 质量损失率

图5(a)表示不同粉煤灰掺量混凝土质量损失率变化。由图5(a)可知, 随着冻融循环作用次数的增加, 其质量损失率随粉煤灰掺量的增加而增大。FAC-1和FAC-2组经75次冻融循环作用后, 质量损失率分别达到了3.1%和3.7%, FAC-3组经75次冻融循环作用后质量损失率达到了4.81%, 接近5%, 而PC组经75次冻融循环作用后质量损失率仅达到FAC-3组值的一半左右, 约为2.28%。内掺氯盐混凝土盐冻循环作用呈现出早期损伤速率较高, 其中PC组在冻融循环25~50次质量损失增长率最高, 但掺入粉煤灰组在经冻融循环0~25次时质量损失增长率最高, 特别是FAC-2和FAC-3组, 这与以往通过外掺氯离子盐冻研究结果^[16]一致。

本试验为内掺氯盐进行的粉煤灰混凝土冻融循环试验研究, 为比较氯离子引入方式及冻融介质对混凝土产生的差异, 结合已有研究进行分析。图5(b)表示本试验结果与已有研究气冻气融^[17]、水冻^[18]产生的趋势差异。由图5(b)不同冻融方式粉煤灰混凝土质量损失率中可以看出, 盐、冻共同作用使得粉煤灰混凝土冻融损伤加剧, 其中粉煤灰混凝土内掺盐冻的质量损失率相对于水冻和气冻迅速增加。经水冻50次后, 质量损失率才开始缓慢增加; 而经气冻气融后, 质量反而增加, 其原因为冻融次数较少, 混凝土试件未出现浆体和骨料剥落, 但混凝土内部产生了微裂缝, 微裂缝吸水使其质量增加。内掺盐冻相较于气冻和水冻, 其质量损失率

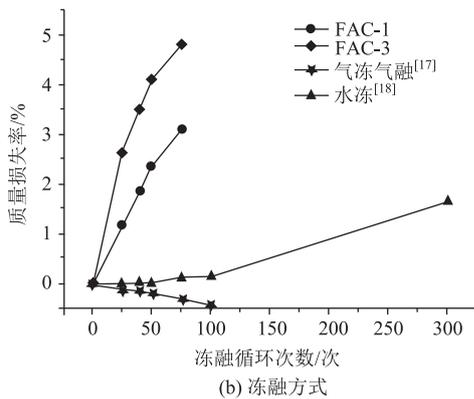
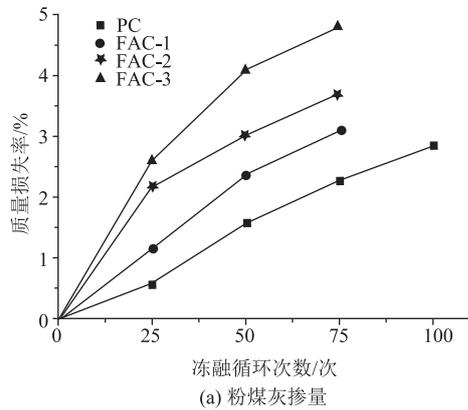


图5 不同影响下粉煤灰混凝土质量损失率变化

Fig. 5 Changes of mass loss rate of fly ash concrete under different influences

增长速度快的主要原因主要为氯盐增大了混凝土保水程度,使其内部可冻水含量增加,加剧了混凝土内部冻融损伤程度。

2.4 损伤层厚度评价

图6(a)表示不同粉煤灰掺量混凝土损伤层厚度变化。由图6(a)可知,随冻融循环作用次数增加,粉煤灰掺量越大其损伤层厚度越大,其结果与质量损失率变化图结果一致,但在经冻融循环0~25次时,各组损伤层厚度增长速率最快。经75次冻融循环作用后PC组损伤层厚度为11.5 mm, FAC-1, FAC-2和FAC-3组损伤层厚度分别为14.2, 16.8 mm和19.6 mm。少量的冻融循环次数就对含氯盐粉煤灰混凝土产生了较大的损伤,因此,对于寒冷地区使用含氯盐的粉煤灰混凝土时,需适当增加其保护层厚度,且要严格控制原材料的含氯量。

图6(b)表示不同冻融方式粉煤灰混凝土损伤层厚度变化。由图6(b)可知,外渗盐冻损伤层厚度增加速度要高于内掺盐冻。其原因为外渗盐冻试验使得混凝土试件外部盐溶液浓度要高于内部,冻融作用使其表面部分内外氯离子浓度差增大,混凝土

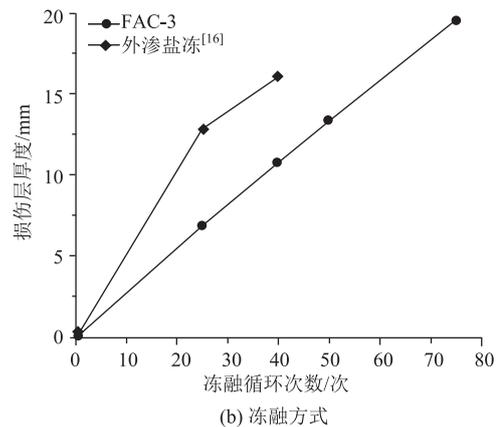
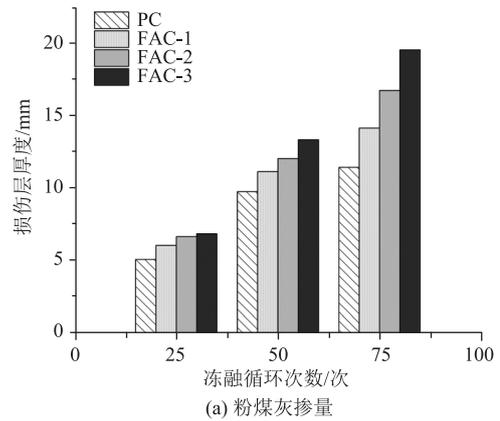


图6 不同影响下粉煤灰混凝土损伤层厚度变化

Fig. 6 Changes of damage layer thickness of fly ash concrete under different influences

土内部自由水会向外部迁移,产生渗透压,加剧了混凝土表层损伤^[19],这就导致外渗盐冻表层损伤层厚度比内掺盐冻大。

2.5 相对动弹性模量评价

图7(a)表示不同粉煤灰掺量混凝土相对动弹性模量变化。由图7(a)可知,在不同冻融循环次数下,FAC-3组混凝土相对动弹性模量始终低于其他组,且FAC-2组低于FAC-1组,PC组最高。经75次冻融循环时FAC-1, FAC-2组相对动弹性模量接近60%,试件即将破坏,而FAC-3组相对动弹性模量值仅只有57.23%,试件已经失效。PC组相对动弹性模量的变化率同样出现先增后减的趋势,经25~50次冻融循环过程中相对动弹性模量由94.34%迅速下降到80.81%。

混凝土冻融破坏主要是由于混凝土内部结构密实程度降低,内部孔隙、裂缝的增加导致的。粉煤灰的掺入虽然能增强混凝土的密实性,但掺粉煤灰混凝土在开始盐冻直到混凝土破坏的过程中,冻融损伤程度一直高于未掺粉煤灰混凝土,因此粉煤灰的掺入对混凝土抗盐冻性能具有不利影响,且掺入

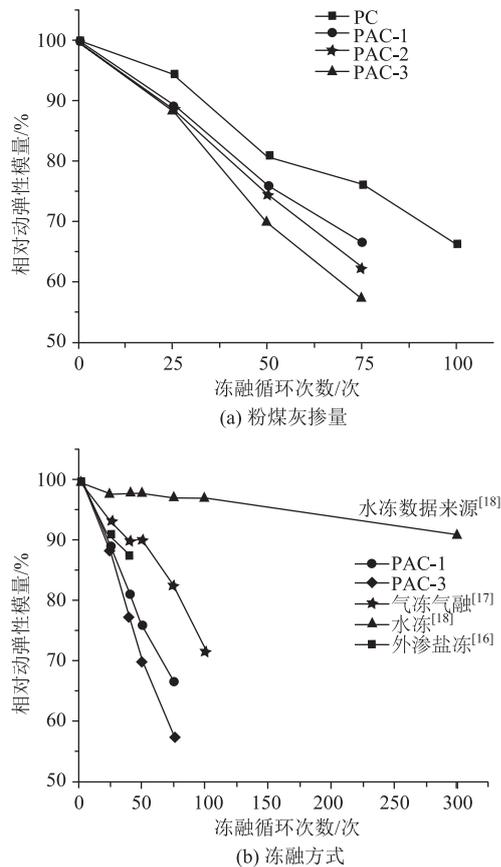


图7 不同影响下粉煤灰混凝土相对动弹性模量变化

Fig.7 Changes of relative dynamic elastic modulus of fly ash concrete under different influences

量越大, 抗盐冻性能越差, 混凝土冻融损伤程度越高。

图7(b)表示不同冻融方式粉煤灰混凝土相对动弹性模量变化。由图7(b)可知, 内掺氯盐粉煤灰混凝土经冻融作用后, 虽然其损伤层厚度的增加速率低于外掺盐冻, 但其相对动弹性模量降低的速度要高于外掺盐冻。经冻融循环40次时, FAC-3、FAC-1、外掺盐冻、气冻以及水冻的相对动弹性模量依次为77.27%、81.22%、87.41%、89.92%、97.85%。而相对动弹性模量往往是混凝土内部结构密实程度的评价指标之一, 因此内掺盐冻对粉煤灰混凝土内部造成的损伤最大, 其原因主要为氯离子内掺使得混凝土内部均匀地含有氯离子, 且其氯离子含量在混凝土内部高于外掺盐冻, 在混凝土表面区域却低于外掺盐冻, 而氯离子的存在会增大了混凝土内部孔隙饱和度, 当温度降低时, 盐结晶和水冻结产生的膨胀应力对混凝土内部结构产生了不同程度的损伤。

综上所述, 结合各评价指标分析可知混凝土的

抗冻性能随着粉煤灰掺量的增加有所下降, 但其冻融损伤速率均出现先增加后减小的趋势。各评价指标变化曲线大致相同, 均能够有效表示出混凝土冻融损伤的规律, 其中相对动弹性模量最先达到规定限制混凝土冻融损伤破坏的指标值。

3 结论

(1) 混凝土的抗冻性能, 随着冻融循环次数以及粉煤灰掺量的增加有所下降, 但其冻融损伤速率出现先增加后减小的趋势。

(2) 海砂粉煤灰混凝土在经少量的冻融循环次数作用时, 就对混凝土产生了较大的损伤, 建议适当增加其保护层厚度以及严格控制原材料中氯盐的含量。

(3) 对比其他3种冻融方式可发现, 盐-冻双重作用对混凝土损伤程度要远高于水冻和气冻, 且外掺盐冻对混凝土表层的损伤要比内掺盐冻大, 但内掺盐冻对混凝土内部损伤最大。

参考文献:

References:

- [1] SHANG H S, YI T H. Freeze-thaw Durability of Air-entrained Concrete [J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 650791.
- [2] 葛勇, 袁杰, 杨文萃, 等. 冻融作用对引气混凝土钢筋握裹力、碳化与氯离子扩散系数的影响 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (增1): 103-105.
GE Yong, YUAN Jie, YANG Wen-cui, et al. Influence of Freeze-thaw on Gripping Force, Carbonation and Chloride Diffusion Coefficient of Air-entrained Concrete [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (S1): 103-105.
- [3] ZHANG W H, PI Y L, KONG W P, et al. Influence of Damage Degree on the Degradation of Concrete under Freezing-thawing Cycles [J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 119903
- [4] 解国梁, 申向东, 刘金云, 等. 氯盐冻融耦合作用下再生混凝土损伤劣化规律 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (2): 473-479.
XIE Guo-liang, SHEN Xiang-dong, LIU Jin-yun, et al. Deterioration Law of Recycled Concrete under the Coupling of Chloride and Freeze-thaw [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40 (2): 473-479.
- [5] RANGEL C S, AMARIO M, PEPE M, et al. Durability of Structural Recycled Aggregate Concrete Subjected to Freeze-thaw Cycles [J]. Sustainability, 2020, 12

- (16): 1-21.
- [6] 冯乃谦, 蔡军旺, 牛全林, 等. 山东沿海钢筋混凝土公路桥的劣化破坏及其对策的研究 [J]. 混凝土, 2003 (1): 3-6, 12.
FENG Nai-qian, CAI Jun-wang, NIU Quan-lin, et al. Study on the Deterioration and Destruction and Its Countermeasures for High Way Bridges along the Coast in Shandong [J]. Concrete, 2003 (1): 3-6, 12.
- [7] 杨钱荣, 郭保林, 杨全兵. 青岛海湾大桥混凝土抗冻性试验研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (增1): 98-102.
YANG Qian-rong, GUO Bao-lin, YANG Quan-bing. Experimental Study on Frost-resistance of Concrete of Qingdao Bay Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (S1): 98-102.
- [8] 左晓宝, 邹帅, 李向南, 等. 氯盐环境下粉煤灰-混凝土中钢筋的锈蚀过程 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (4): 875-881.
ZUO Xiao-bao, ZOU Shuai, LI Xiang-nan, et al. Corrosion Process of Steel Bar in Fly Ash-concrete under Chloride Environment [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23 (4): 875-881.
- [9] 李阳, 王瑞骏, 闫菲, 等. 粉煤灰对混凝土抗冻及抗硫酸盐性能的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2017, 45 (2): 219-226.
LI Yang, WANG Rui-jun, YAN Fei, et al. Influence of Fly Ash on Resistance of Concrete to Freeze and Sulfate [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2017, 45 (2): 219-226.
- [10] 王德志, 陈振, 孟云芳. 氯盐冻融作用下粉煤灰混凝土抗渗抗冻性研究 [J]. 人民黄河, 2017, 39 (12): 131-133, 138.
WANG De-zhi, CHEN Zhen, MENG Yun-fang. Research on Permeability and Frost Resistance of Fly Ash Concrete under Chloride and Freeze-thawing [J]. Yellow River, 2017, 39 (12): 131-133, 138.
- [11] 朱红兵, 吕洪林, 李秀, 等. 氯盐环境下聚丙烯纤维陶粒混凝土冻融损伤模型试验研究 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (7): 46-50.
ZHU Hong-bing, LÜ Hong-lin, LI Xiu, et al. Experimental Research on Freeze-thaw Damage Model of Polypropylene Fibre Ceramsite Concrete in Chloride Environment [J]. New Building Materials, 2020, 47 (7): 46-50.
- [12] CHEN X D, GAO P W, LIU J. Experimental Study on Salt Freezing Damage of Cement Concrete by Chloride Deicing Agent [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 719 (2): 022070.
- [13] CHEN Z F, LIU G F, PENG G J, et al. Mechanical Properties and Microstructure Characteristics of Manufactured-sand Concrete under Coupled Effect of Salt Erosion and Freeze-thaw Cycles [J]. Science of Advanced Materials, 2019, 11 (4): 555-562.
- [14] 张峰, 蔡建军, 李树忱, 等. 混凝土冻融损伤厚度的超声波检测 [J]. 深圳大学学报 (理工版), 2012, 29 (3): 22-25.
ZHANG Feng, CAI Jian-jun, LI Shu-chen, et al. Ultrasonic Detection of Freeze-thaw Damage Thickness of Concrete [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2012, 29 (3): 22-25.
- [15] ZHANG P, WITTMANN F H, VOGEL M, et al. Influence of Freeze-thaw Cycles on Capillary Absorption and Chloride Penetration into Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 100: 60-67.
- [16] 屈锋, 牛荻涛, 杨宇曦. 盐冻循环作用下粉煤灰混凝土性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2014, 44 (6): 77-80.
QU Feng, NIU Di-tao, YANG Yu-xi. Experimental Study of Performance of Fly Ash Fiber Concrete under the Action of Salt Frost [J]. Industrial Construction, 2014, 44 (6): 77-80.
- [17] 牛荻涛, 张桂涛, 罗大明, 等. 极端冻融环境混凝土抗冻性能研究 [J]. 工业建筑, 2019, 49 (6): 1-6.
NIU Di-tao, ZHANG Gui-tao, LUO Da-ming, et al. Research on Frost Resistance of Reinforced Concrete in Extreme Freeze-thaw Environment [J]. Industrial Construction, 2019, 49 (6): 1-6.
- [18] 肖前慧. 冻融环境多因素耦合作用混凝土结构耐久性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
XIAO Qian-hui. Concrete Structure Durability in Freezing-thawing Circumstance Based on Multi-factor Effects [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.
- [19] 王发洲, 张梓鑫, 李明, 等. 盐溶液浓度差对混凝土单面抗冻性的影响 [J]. 建筑材料学报, 2014, 17 (1): 138-142.
WANG Fa-zhou, ZHANG Zi-xin, LI Ming, et al. Influence of Chloride Solution Concentration Difference on Salt Frost Scaling of Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17 (1): 138-142.