

风积沙掺量对冻融-碳化耦合作用下混凝土耐久性的影响

申向东, 邹欲晓, 薛慧君, 李根峰

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘 要: 针对寒区农业水利工程中混凝土的实际服役环境, 利用风积沙等质量替代部分天然河砂制备不同风积沙替代率的混凝土为研究对象进行冻融循环-碳化耦合试验。分析冻融循环-碳化耦合作用下风积沙混凝土的损伤过程, 借助核磁共振仪探讨了混凝土的孔隙结构演变与其耐久性之间的联系。试验结果表明, 每个试验周期中, 经历相同冻融循环次数和碳化时间, 但作用顺序不同的情况下, 冻融循环-碳化作用对混凝土造成的损伤大于碳化-冻融循环作用; 当风积沙替代率由 0 增加至 40% 时, 混凝土的初始孔隙度降低, 同时试验中的质量损失率和相对动弹性模量变化减小; 混凝土内部凝胶孔和少害孔占比对其孔隙度和相对动弹性模量具有主导作用, 当凝胶孔和少害孔占比之比在 5~25 之间时相对动弹性模量和孔隙度变化不超过 1%, 在 0~5 之间减小时相对动弹性模量和孔隙度变化明显; 风积沙的加入改善了混凝土的孔隙分布, 风积沙替代率为 40% 的风积沙混凝土表现出良好的抗冻融、抗碳化能力。该研究可为风积沙混凝土在寒区农业水利工程中的研究与应用提供依据。

关键词: 混凝土; 耐久性; 孔隙度; 冻融循环; 碳化

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.021

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-02-0161-07

申向东, 邹欲晓, 薛慧君, 李根峰. 风积沙掺量对冻融-碳化耦合作用下混凝土耐久性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 161—167. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.021 <http://www.tcsae.org>

Shen Xiangdong, Zou Yuxiao, Xue Huijun, Li Genfeng. Effect of aeolian sand content on durability of concrete under freezing-thawing-carbonization coupling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 161—167. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.021 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国是世界上风积沙储量丰富的国家之一, 风积沙广泛分布于中国西北、华北和东北的干旱、半干旱地区, 对这些地区来说风积沙比普通砂更易取得, 工程建设中如果可以就地取材, 即利用风积沙替代天然河砂作为细骨料制备混凝土^[1-3], 不仅能充分利用当地的自然资源、节约大量的工程成本, 还可以改善目前天然河砂储量不足的问题, 具有重要的社会效益和经济价值。早在 1987 年, Banfill 和 Carr^[4]首次把风积沙作为细骨料, 研究它对混凝土性能的影响, 随后国内外许多学者研究了风积沙混凝土的工作性^[5-6]、强度^[7-9]、耐久性^[10-13], 其中薛慧君等^[12-13]模拟了风积沙混凝土在内蒙古引黄灌区和风蚀区氯盐环境下的农业水利工程建设中的实际服役环境, 配制出了满足该环境中农业水利工程设计要求的风积沙混凝土, 众多研究表明, 风积沙作为细骨料用于混凝土材料是可行的。

混凝土作为一种非均质的多相复合材料, 内部孔隙结构对其耐久性有重要影响, 原材料和外界环境的改变会导致孔隙结构的变化。随着经济的快速发展, 空气污染, 气候变化等环境问题日益严重, 混凝土服役环境越来越复杂, 受自然环境影响的混凝土耐久性问题也在不

断增加。在寒区农业水利工程建设中, 冻融循环最为普遍, 它严重影响了混凝土结构的长期使用和安全运行, 伴随着大气中 CO_2 含量的增高, 寒区的混凝土结构同样面临着 CO_2 的侵蚀, 碳化会降低混凝土的 pH 值, 较低的 pH 环境会破坏混凝土内钢筋的钝化膜, 加速钢筋的腐蚀^[14], 冻融循环和碳化对混凝土的损伤破坏不仅仅是单因素的简单叠加, 虽然国内外关于单一因素对混凝土耐久性的影响已开展了大量的研究^[15-17], 董伟等^[18]通过混凝土冻融循环试验, 定量分析了风积沙轻骨料混凝土的抗冻耐久性能; 严佳川等^[19]基于概率论和损伤理论, 建立了可用于预测混凝土结构寿命的冻融损伤模型; 吴俊臣等^[20]通过混凝土加速碳化试验, 建立了以风积沙混凝土掺量为主要参数的碳化深度预测模型; Ebrahimi 等^[21]指出, 控制混凝土内的含气量、孔隙度、裂缝宽度和选择合适的外加剂是提高混凝土抗冻性的主要因素; Rimmelé 等^[22]研究了 CO_2 环境中水泥试件的碳化, 测量了试验过程中总孔隙度和局部孔隙度的演变, 许多研究得到的结论和经验公式已经在学术界达成共识, 并在工程实际中得到了广泛应用^[23-24], 但迄今为止, 关于混凝土构件在冻融循环和碳化耦合作用下的研究还很少, 需要更系统的了解碳化和冻融循环耦合作用下混凝土耐久性的劣化规律^[25-26]。

本文以不同风积沙等质量替代天然河砂制备的风积沙混凝土为研究对象, 分析冻融循环和碳化耦合作用对风积沙混凝土的微观和耐久性能的影响, 同时基于核磁共振技术深入分析了风积沙混凝土在冻融循环-碳化耦合作用

收稿日期: 2018-09-07 修订日期: 2019-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51569021, 51769025)

作者简介: 申向东, 教授, 博士生导师, 主要从事混凝土耐久性 & 水工新材料研究。Email: ndsxd@163.com

下的内部孔隙演化过程, 以期对风积沙混凝土在寒区农业水利工程建设与应用提供依据。

1 材料与方法

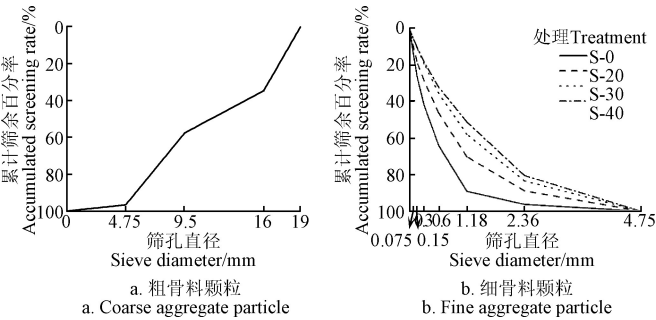
1.1 原材料

本文使用的原材料现列举如下: 水泥为冀东 P·O42.5 普通硅酸盐水泥, 密度 $3.11\times10^3\text{ kg/m}^3$, 细度 6.8 %, 标准稠度用水量 27.25 % (达到标准稠度水泥净浆时用水量与水泥质量之比), 体积安定性合格, 初凝时间 158 min, 终凝时间 270 min, 烧失量 3.1%, 3 d 抗压强度 26.8 MPa, 28 d 抗压强度 47.6 MPa, 3 d 抗折强度 5.2 MPa, 28 d 抗折强度 8.3 MPa; 粉煤灰取自呼和浩特市金桥热电厂 I 级粉煤灰, 理化参数指标见表 1。图 1 为试验所用的粗骨料与细骨料的颗粒级配曲线, 其中粗骨料为卵石, 表观密度为 $2\,670\text{ kg/m}^3$, 堆积密度为 $1\,650\text{ kg/m}^3$, 含泥量 0.37%, 压碎值 3.7%, 针片状含量 3%, 粒径范围为 4.75~19 mm, 颗粒级配如图 1a 所示; 细骨料为河砂和风积沙, 粒径范围为 0.075~4.75 mm, 风积沙取自内蒙古鄂尔多斯市库布齐沙漠, 不同风积沙替代率的细骨料颗粒级配如图 1b 所示。细骨料主要理化参数见表 2, 风积沙替代率分别为 0、20%、30%、40% 时 4 组细骨料的细度模数分别为 3.0、2.5、2.0、1.2; 拌合用水为普通自来水; 减水剂采用聚羧酸类母液 sc-40 型高效减水剂; 引气剂为 SJ-3 型高效引气剂。

表 1 粉煤灰理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of fly ash

烧失量 Ignition loss/%	比表面积 Specific surface area/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	需水量 Water demand/%	密度 Density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	筛余量 Screening residual (80 μm)/%	微珠 含量 Content of micro beads/%	SO ₃ 含量 SO ₃ content/%
3.05	354	97.2	2 150	9.7	93.3	2.1

注: 表中百分比均为质量分数。
Note: Percentages in the table are all mass fractions.



注: 图中 S-0、S-20、S-30、S-40 分别代表风积沙替代率为 0、20%、30%、40% 的混凝土细骨料。
Note: In the figure, S-0, S-20, S-30, and S-40 represent concrete fine aggregates with aeolian sand replacement rate of 0, 20%, 30%, and 40%, respectively.

图 1 粗骨料颗粒与各组细骨料的级配曲线
Fig.1 Gradation curve of coarse aggregate particles and each group of fine aggregates

表 2 细骨料主要理化参数
Table 2 Main physical and chemical parameters of fine aggregate

类别 Type	表观密度 Apparent density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	细度模数 Fineness modulus	含水率 Moisture content/%	堆积密度 Bulk density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	含泥量 Sediment percentage/%	泥块含量 Clay lump/%	氯离子含量 Chlorine ion content/%	硫酸盐及硫化物含量 Sulfate and sulfide content /%
风积沙 Aeolian sand	2 584	0.72	0.3	1 579	0.41	/	0.025	0.37
河砂 River sand	2 576	2.91	2.2	1 790	3.48	0.3	0.290	0.40

注: 表中百分比均为质量分数。
Note: Percentages in the table are all mass fractions.

1.2 混凝土配合比设计

为研究不同风积沙替代率对试验结果的影响, 同时考虑风积沙的替代率不宜过高, 这是因为当风积沙替代率大于 40% 后, 混凝土的抗压强度开始下降, 并且在拌合过程中会出现混凝土成型困难等问题^[5]; Khay 等^[27]制备了不同风积沙替代率的混凝土, 结果发现风积沙替代率为 60% 时制备出的混凝土最适合用于路面; Seif^[28]经研究发现风积沙掺量与混凝土强度成负相关, 相关系数达 0.99, 同时当风积沙掺量大于 60% 以后, 混凝土的和易性明显降低。造成这种现象的原因可以从微观和宏观 2 个角度进行分析。Cyr 等^[29]研究结果显示, 当在混凝土中添加少量或大量颗粒或粉末时 (如本研究中的风积沙颗粒), 风积沙的多少对混凝土强度的增益是不同的, 少量或中等量的风积沙可以提高混凝土强度, 而大量风积沙的加入则会呈现相反的趋势; 同时由于风积沙比表面积大, 风积沙替代率的增加会使需要的水泥浆量大幅增加, 相同水胶比情况下导致高替代率的风积沙混凝土水泥量相对不足, 进而引起混凝土

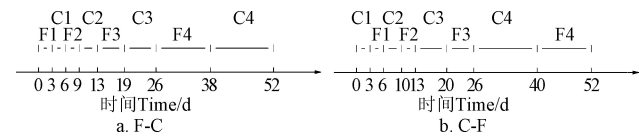
的强度和工作性能的下降。
因此本研究中根据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080-2016)^[30]制备水胶比为 0.4, 砂率为 0.35, 风积沙替代率为 0、20%、30%、40% 的 4 种混凝土, 由于风积沙颗粒粒径较细、比较面积较大, 吸水性差, 所以相同水量条件下风积沙掺量越多的混凝土拌合物流动性较大, 同时由于混凝土内部的水以自由水、吸附水和填充水的形式存在, 不同形式的水对工作性起着不同的作用^[31], 风积沙的加入可以使混凝土内部的填充水转换为自由水, 这能有效改善混凝土的工作性, 因此 4 组混凝土塌落度随风积沙掺量增加而减小^[10], 4 组混凝土试件塌落度随风积沙掺量增加而降低但均大于 100 mm (满足《普通混凝土拌和物性能试验方法标准》(GB/T 50080-2016) 要求)。抗压强度和劈裂抗拉强度试验依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50082-2009)^[32]对养护至龄期的 3 组立方体试件进行试验, 28 d 立方体抗压强度标准值均满足规范要求。

表 3 试验用混凝土配合比与性能
Table 3 Mixed ratio and performance of test concrete

处理 Treatment	水泥 Cement/ (kg·m ⁻³)	水 Water/ (kg·m ⁻³)	河砂 River sand/ (kg·m ⁻³)	风积沙 Aeolian sand/ (kg·m ⁻³)	石子 Gravel/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰 Fly ash/ (kg·m ⁻³)	减水剂 Water-reducing admixture/mL	引气剂 Air entraining admixture /mL	含气量 Air content /%	坍落度 Slump /mm	不同时期 抗压强度 Compressive strength at different times/MPa		28 d 劈裂 抗拉强度 28 d splitting tensile strength/MPa
											7 d	28 d	
S-0	400	200	595	/	1105	100	45	2.5	4.2	119	27.0	37.4	2.86
S-20	400	200	476	119	1105	100	45	2.5	5.0	115	26.2	41.9	2.94
S-30	400	200	416.5	178.5	1105	100	45	2.5	4.2	109	29.0	39.7	2.92
S-40	400	200	357	238	1105	100	45	2.5	4.9	100	28.2	39.1	2.97

1.3 试验方法

本研究中，冻融循环试验和碳化试验分别利用混凝土快速冻融机（TDR-16 型）和混凝土碳化试验箱（NJTH-B）。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）中“快冻法”和“混凝土碳化试验”进行，每隔设计冻融循环次数或预定碳化时间后取出试件，测定各组棱柱体试件的质量和动弹性模量。为了研究 2 因素相互作用产生的影响，试验设计 2 种工况，具体细节见图 2。



注：F-C 表示冻融循环-碳化试验；C-F 表示碳化-冻融循环试验；F 表示冻融循环作用；C 表示碳化作用；1、2、3、4 表示周期数；F1、F2、F3、F4 的冻融循环次数分别为：25 次、25 次、50 次、100 次。下同
Note: F-C stands for freeze-thaw cycle-carbonization test; C-F stands for carbonization-freeze-thaw cycle test; F stands for freeze-thaw cycle; C stands for carbonization; 1, 2, 3, and 4 indicate the number of cycles of the test process; The freeze-thaw cycles of F1, F2, F3, and F4 are: 25, 25, 50, and 100 times, respectively. The same below.

图 2 2 种工况试验过程时间图

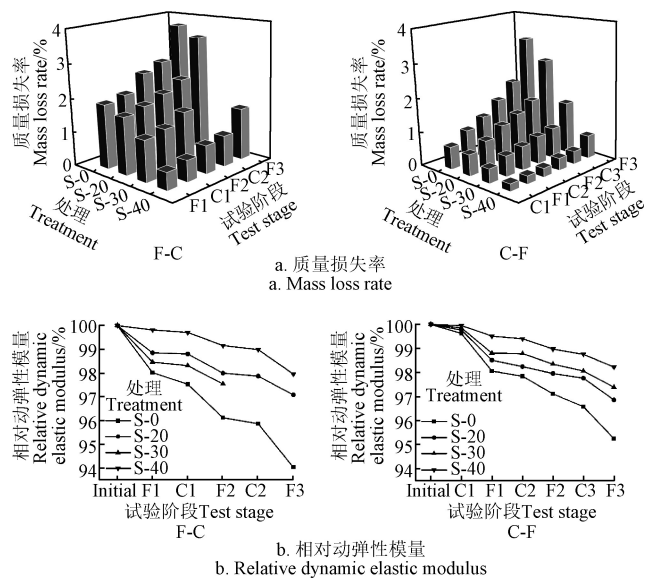
Fig.2 Figure of two condition test process time

2 结果与讨论

2.1 质量损失率和相对动弹性模量

试验过程中混凝土的质量损失率可以反应混凝土表面剥落程度，相对动弹性模量的衰减可以反应混凝土内部裂纹和孔隙发育的情况，图 3 分别为 2 种工况下 4 种混凝土的质量损失率及相对动弹性模量变化。由图 3 发现，4 种混凝土在 2 种工况下的质量损失率均呈上升的趋势，相对动弹性模量曲线均呈下降的趋势，4 种混凝土在 C-F 中承受的碳化天数大于在 F-C 中承受的碳化天数；风积沙替代天然河砂的量越多，试件质量损失率和相对动弹性模量变化越小，如 S-0 在 F-C 和 C-F 作用结束后质量损失率分别为 3.7%、3.3%，相对动弹性模量分别为 94.0%、95.2%，而 S-40 混凝土在 2 种工况作用后质量损失率分别为 1.5%、0.7%，相对动弹性模量分别为 97.9%、98.2%；试件质量损失率和相对动弹性模量均在在冻融循环后变化较大，在碳化作用后变化不大；各组试件均在第 3 周期中的冻融循环试验后全部破坏，这是因为冻融循环时，混凝土内部可冻水结冰造成体积增大，孔隙结构承受冻胀力和渗透压作用，而碳化过程中 CO₂ 通过扩

散机制缓慢地由混凝土表面向内进行，会优先作用于混凝土表层的水化产物，因此冻融循环对混凝土造成的损伤大于碳化作用^[33-34]。此外，混凝土在工况 F-C 中的相对动弹性模量下降程度与 C-F 工况中相比较多，如 S-0 在 F-C 工况中试验结束后的相对动弹性模量下降了 5.9%，而在 C-F 工况中实验结束后相对动弹性模量下降了 4.7%，进一步可以证实，先进行碳化试验可以使试件结构更加密实，表层因碳化作用生成的 CaCO₃ 会使混凝土密实，减少了后续冻融循环造成的质量损失。



注：Initial: 表明试件处于初始状态，下同。
Note: Initial: Indicates that the specimen is in the initial state, the same below.

图 3 不同工况下各组混凝土的质量损失率与相对动弹性模量变化

Fig.3 Mass loss rate and relative dynamic elastic modulus of concrete under different working conditions

试验后期冻融循环后风积沙掺量越多的混凝土质量损失率和相对动弹性模量变化幅度与普通混凝土相比明显减小，如 S-0 在 F-C 工况的第 3 个周期中冻融循环作用后质量损失率增加 1.0%，相对动弹性模量降低 1.8%，而 S-40 在 F-C 工况的第 3 个周期中冻融循环作用后质量损失率增加 0.6%，相对动弹性模量降低 1.0%，这是因为后期冻融循环次数增多、试件经过之前的损伤内部结构不再致密，同时风积沙的加入对内部结构起到填充和异相成核的作用^[1,10]，风积沙颗粒粒径远小于普通河砂，在

混凝土搅拌过程中, 风积沙比天然河砂更易进入混凝土内的多孔结构, 这会使内部结构较基准组混凝土密实, 因此风积沙替代率为 40% 的混凝土在 2 种工况下的抗冻融、抗碳化能力较其他 3 组混凝土有明显提高。

2.2 核磁共振

近年来, 核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR) 技术被用作表征混凝土微观结构的有效方法。核磁共振方法是非破坏性和非侵入性的, 测试结果更接近真实情况。在真空条件下饱和后, 多孔介质中的大部分孔被水占据, NMR 通过测量水的质量和密度来计算多孔介质中孔隙的体积, 可以获得孔隙度和孔隙分布等参数^[35]。

图 4 为各组试件孔隙度变化。分析图 4 发现, 随着风积沙替代天然河砂的量的增加, 孔隙度明显降低, 如 F-C 工况中 4 组混凝土的初始孔隙度分别为 1.8%、1.7%、1.6%、1.2%, 4 组试件的孔隙度均在冻融循环后增加明显, 而在碳化作用后变化不大, 风积沙掺量越多孔隙度曲线变化越小, 这与前文的质量损失和相对动弹性模量变化一致, 说明随着试验的进行, 冻融循环过程中冻胀力作用会使混凝土内部结构更粗糙, 浆体的松动和滑移越来越严重, 造成孔隙度增加, 在碳化过程中 C-S-H 的碳化会释放大量的游离水产生低摩尔体积的水合硅胶, 同样会导致混凝土的孔隙度增加^[36-37], 所以反复地冻融循环和碳化作用会使材料内部损伤扩大并积累, 最终造成混凝土开裂或剥落, 但随着风积沙的掺量的增加有效抑制了这一过程。F-C 工况中 S-0 在试验完毕时孔隙度为 5.3%, 而 C-F 工况中 S-0 在试验完毕时其孔隙度为 7.8%, 同样 F-C 工况中 S-20 和 S-30 在试验完毕时孔隙度为 5.1%、2.4%, 而在 C-F 工况中试验完毕时孔隙度为 6.0%、4.9%, 混凝土内部孔隙发育即孔隙度的增大会使混凝土面临冻融循环时的可冻水含量增多, 进而影响混凝土的耐久性, 而试验过程中试件孔隙度在 C-F 中试验完毕时均大于 F-C 中的孔隙度, 但各组试件在 C-F 中承受的试验周期数却大于 F-C 中承受的试验周期数, 一定程度说明孔隙度不能很好的评价混凝土耐久性。

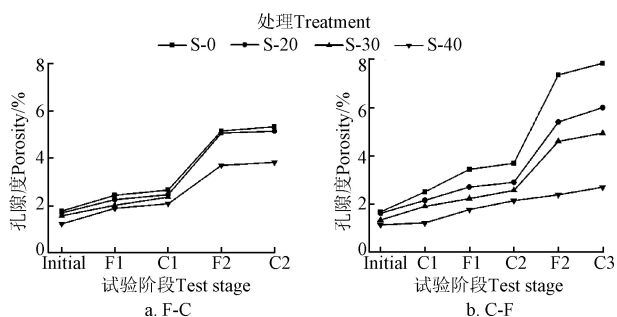
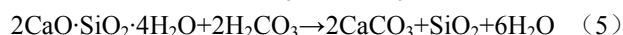
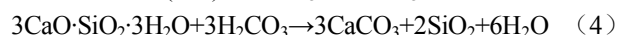


图 4 不同工况下各组混凝土的孔隙度变化

Fig.4 Porosity change of concrete under different working conditions

通过核磁共振试验对混凝土内部孔隙进行 4 组分划分 (图 5), 分别为凝胶孔 (孔隙半径小于 $0.05 \mu\text{m}$), 毛细孔 (孔隙半径在 $>0.05 \sim 1 \mu\text{m}$ 之间), 少害孔 (孔隙半径在 $>1 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间) 和多害孔 (孔隙半径大于 $10 \mu\text{m}$)。

分析图 5 发现, 随着冻融循环和碳化作用的交替进行, 4 组分孔隙分布演变可以表征试件内部孔隙结构的变化; 2 种工况中少害孔占比随试验进行呈增加的趋势; S-0 试件的少害孔和多害孔占比之和在 2 种外界作用后均增加, 这是因为试验过程中普通混凝土内部凝胶孔和少害孔在外界条件作用下发育, 扩张为少害孔和多害孔。混凝土遭受碳化作用时, CO_2 通过孔隙等通道渗入内部, 随时间的推移逐步溶解于孔隙中的液相, 与水泥水化过程中产生的水化产物发生反应生成碳酸盐等中性物质^[38], 化学反应式见式 (2)~式 (5)。



生成的 CaCO_3 能一定程度抑制冻融循环造成的损伤, F-C 工况中混凝土首先经历冻融循环对其内部结构损伤较剧烈, 后期碳化作用不能弥补冻融循环造成冻胀力破坏, 所以 C-F 工况中能明显看到碳化作用对混凝土内部结构凝胶孔和毛细孔的影响。

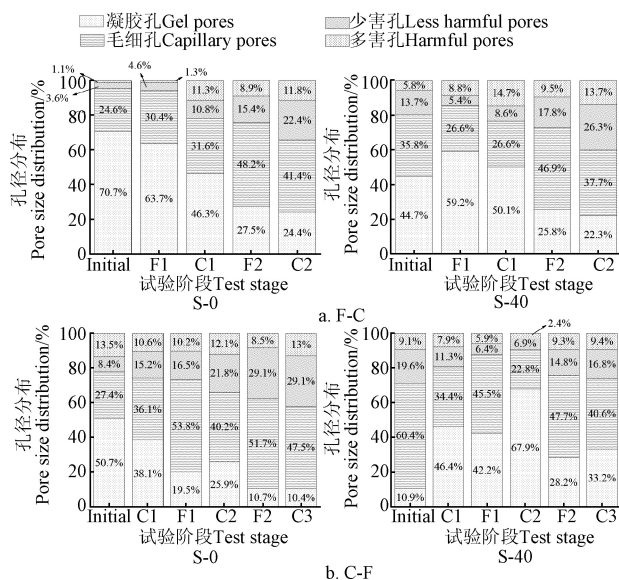


图 5 冻融循环-碳化耦合作用下的 4 组分孔隙分布

Fig.5 Four-component pore distribution under freeze-thaw cycle-carbonization coupling

般来说试件内部凝胶孔和毛细孔占比越多, 少害孔和多害孔占比越少, 则其结构越密实, 外界不利因素对其造成的损伤越弱。通过分析 4 种孔隙占比演变与试验过程中试件孔隙度和相对动弹性模量的关系发现: 试验过程中混凝土的孔隙度和相对动弹性模量变化与毛细孔占比、多害孔占比相关性不大, 其原因主要为混凝土碳化是由表及里的, 表层碳化的部分会抑制后期碳化的进行, 但冻融循环会使混凝土表层的碳化产物剥落, 再加上内部孔隙发育导致风积沙与水泥石剥离, 会填充部分小孔隙, 因此造成混凝土内部毛细孔占比、多害孔占比不同程度的增加与减少, 同时由于试验中的 4 种孔隙分布的划分未考虑孔隙特征对混凝土耐久性的影响, 例如

最可几孔径对混凝土的抗冻性影响较大, 因此后期试验中混凝土内部毛细孔占比、凝胶孔占比与孔隙度和相对动弹性模量拟合曲线的离散性较大, 造成了其相关性较低。

而 2 工况试验过程中的凝胶孔占比、少害孔占比与混凝土孔隙度和相对动弹性模量变化相关系数较高, 如图 6 和图 7 所示, 说明凝胶孔和少害孔对混凝土孔隙度和相对动弹性模量具有主导作用, 因此在 2 种工况试验过程中当混凝土内凝胶孔占比越大、少害孔占比越小时, 此时混凝土的孔隙度越小, 相对动弹性模量越大, 表明混凝土内部结构较密实, 而当混凝土内部凝胶孔占比减小、少害孔占比增加时, 混凝土的孔隙度增大、相对动弹性模量减小, 表明混凝土结构受到损伤, 内部结构疏松, 如图 5a 中 S-0 初始状态时试件内部凝胶孔占比为 70.7%, 少害孔占比为 24.6%, 孔隙度为 1.8%, 相对动弹性模量为 100%, 而当试件在 F-C 工况结束时它的凝胶孔占比减小至 24.4%, 少害孔占比增加至 41.4%, 孔隙度增大至 5.3%, 相对动弹性模量降低至 94.0%。

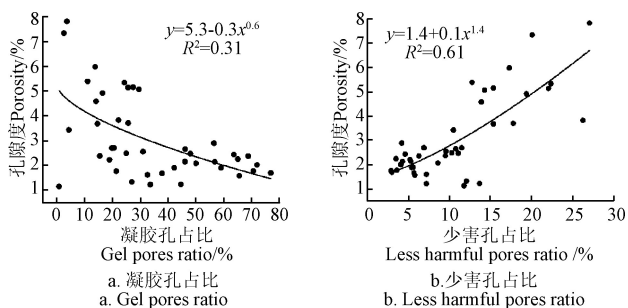


图 6 凝胶孔占比、少害孔占比与孔隙度的拟合关系图

Fig.6 Fitting relationship between gel pores ratio, less harmful pores ratio and porosity

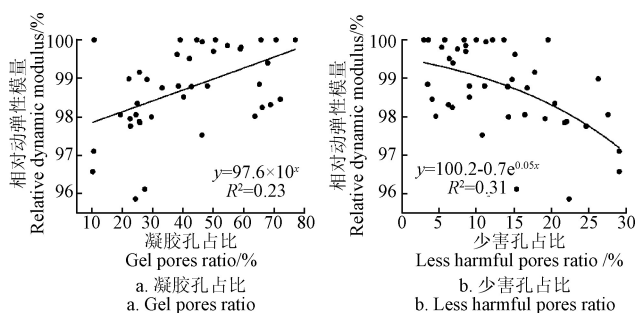


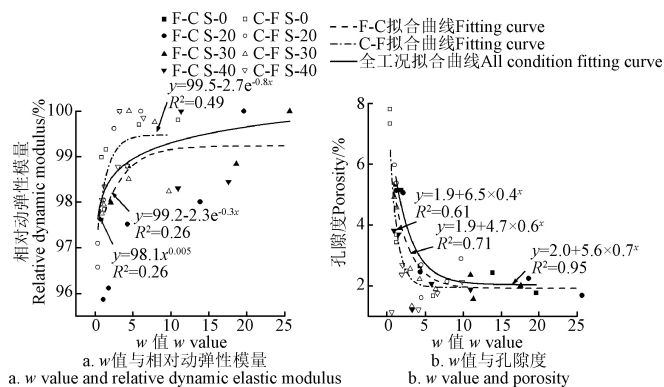
图 7 凝胶孔占比、少害孔占比与相对动弹性模量的拟合关系图

Fig.7 Fitting relationship between gel pores ratio, less harmful pores ratio and relative dynamic elastic modulus

通过上述分析, 可定义本研究中混凝土的凝胶孔占比与少害孔占比的比值为 w , 来表征混凝土内部孔径分布变化, 其计算式见公式 (6)。以此为依据得到 2 种工况试验过程中混凝土的孔隙度、相对动弹性模量变化与 w 值之间的联系, 如图 8 所示。

$$w = \frac{S_{Gi}}{S_{Li}} \quad (6)$$

式中 S_{Gi} 表示第 i 个试验周期中凝胶孔占比, %; S_{Li} 表示第 i 个试验周期中少害孔占比, %。



注: w 值为凝胶孔占比和少害孔占比的比值。

Note: w value is the ratio of the proportion of gel pores ratio to the proportion of less harmful pores ratio.

图 8 w 值与相对动弹性模量和孔隙度的拟合关系图

Fig.8 Fitting relationship between w value and relative dynamic elastic modulus and porosity

图 8a 中同一组试件的点均沿 x 轴的逆方向即从右向左代表同一工况下混凝土由结构完整向结构损伤演变的过程。分析图 8a 发现, w 值与试验过程中混凝土的相对动弹性模量变化成正相关 ($P < 0.05$), w 值较大混凝土的相对动弹性模量变化减小, 其中 w 值的变化可以大致分为 2 个阶段, 当 w 值在 5~25 之间时, 试件的相对动弹性模下降均不超过 99%, 此时试件受到的损伤较弱, 因此该状态时的孔隙分布有利于混凝土的耐久性, 随着试验的进行, 孔隙发育导致混凝土内部结构疏松, w 值减小, 当 w 值在 0~5 之间减小时, 混凝土的相对动弹性模量急剧下降, 试件遭受的损伤加剧, 混凝土内部结构不再密实, 因此该状态时的孔隙分布不利于混凝土耐久性。由图 8b 可知, w 值与试验过程中混凝土的孔隙度变化成负相关 ($P < 0.01$), w 值与孔隙度变化趋势曲线同样可以分为 2 个阶段, 当 w 值在 5~25 之间时, w 值越大混凝土的孔隙度变化越小, 变化幅度不超过 1%, 此时混凝土内部结构密实, 孔隙分布有利于混凝土耐久性, 随着试验进行, 混凝土内部孔隙在外界环境作用下发育, w 值在 0~5 之间减小时混凝土的孔隙度急剧增加, 此时孔隙分布不利于耐久性, 随着外界条件造成的损伤不断叠加最终导致混凝土结构失效。

3 结 论

1) 各组混凝土试件在碳化-冻融循环试验中承受的碳化天数大于冻融循环-碳化试验中承受的碳化天数, 质量损失率和相对动弹性模量均在冻融循环后变化明显, 而在碳化作用后变化不大, 风积沙替代天然河砂的量越多, 试验过程中混凝土的质量损失率和相对动弹性模量变化越小。

2) 风积沙替代率越高, 混凝土内部结构越致密, 风积沙的加入降低了混凝土的孔隙度, 优化了内部孔隙分布, 其中风积沙替代率为 40% 的混凝土有着明显良好的抗冻融、抗碳化能力。

3) 试验过程中混凝土内部凝胶孔与少害孔占比之比在 5~25 之间时, 混凝土相对动弹性模量和孔隙度变化均不超过 1%, 凝胶孔与少害孔占比之比在 0~5 之间降

低时, 相对动弹性模量和孔隙度变化明显, 凝胶孔与毛细孔占比之比可以反映试验过程中内部结构的损伤。

[参 考 文 献]

- [1] Dong Wei, Shen Xiangdong, Xue Huijun, et al. Research on the freeze-thaw cyclic test and damage model of aeolian sand lightweight aggregate concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 123: 792—799.
- [2] Xue Huijun, Shen Xiangdong, Liu Qian, et al. Analysis of the damage to aeolian sand concrete surfaces caused by wind-sand erosion[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2017, 15(12): 724—737.
- [3] Maria G M Eliepea, Susana López-Querolb. Aeolian sands: Characterization, options of improvement and possible employment in construction-the state-of-the-art[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 73: 728—739.
- [4] Banfill P, Carr M. The properties of concrete made with very fine sand[J]. *Concrete*, 1987, 21(3): 11—6.
- [5] Al-Harthi A S, Abdel Halim M, Taha R, et al. The properties of concrete made with fine dune sand[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(8): 1803—1808.
- [6] Padmakumar G P, Srinivas K, Uday K V, et al. Characterization of aeolian sands from Indian desert[J]. *Engineering Geology*, 2012(139/140): 38—49.
- [7] 吴俊臣. 复杂环境下风积沙混凝土的耐久性能研究与寿命预测[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
Wu Junchen. Durability Research and Service Life Prediction of Aeolian Sand Concrete under Complex Environment[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [8] El-Sayed Sedek Abu Seif. Assessing the engineering properties of concrete made with fine dune sands: An experimental study[J]. *Rabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(3): 857—863.
- [9] 陈美美, 宋建夏, 赵文博, 等. 掺粉煤灰、腾格里沙漠砂混凝土力学性能的研究[J]. *宁夏工程技术*, 2011(1): 61—63.
Chen Meimei, Song Jianxia, Zhao Wenbo, et al. Study on the concrete mechanical properties mixed with fly ash and Tenggeli desert sand[J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2011(1): 61—63. (in Chinese with English abstract)
- [10] Luo Fujia, He Li, Pan Zhu, et al. Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 131—137.
- [11] 吴俊臣, 申向东. 风积沙混凝土的抗冻性与冻融损伤机理分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(10): 184—190.
Wu Junchen, Shen Xiangdong. Analysis on frost resistance and damage mechanism of aeolian sand concrete[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(10): 184—190. (in Chinese with English abstract)
- [12] 薛慧君, 申向东, 刘倩, 等. 高寒灌区风沙吹蚀对农业水利工程混凝土抗冻耐久性的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(15): 133—140.
Xue Huijun, Shen Xiangdong, Liu Qian, et al. Effect of wind-sand erosion on frost resistance durability of hydraulic engineering concrete in cold irrigation area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(15): 133—140. (in Chinese with English abstract)
- [13] 薛慧君, 申向东, 王仁远, 等. 风沙吹蚀与干湿循环作用下风积沙混凝土抗氯盐侵蚀机理[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(18): 118—126.
Xue Huijun, Shen Xiangdong, Wang Renyuan, et al. Mechanism analysis of chloride-resistant erosion of aeolian sand concrete under wind-sand erosion and dry-wet circulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(18): 118—126. (in Chinese with English abstract)
- [14] Paul S C, Panda B, Huang Y, et al. An empirical model design for evaluation and estimation of carbonation depth in concrete[J]. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2018, 124: 205—210.
- [15] Shaik Hussain, Dipendu Bhunia, Singh S B. Comparative study of accelerated carbonation of plain cement and fly-ash concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2017, 10: 26—31.
- [16] Lund M S M, Hansen K K, Brincker R, et al. Evaluation of freeze-thaw durability of pervious concrete by use of operational modal analysis[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 106: 57—64.
- [17] 张丰, 莫立武, 邓敏. 碳化养护对钢渣混凝土强度和体积稳定性的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(5): 640—646.
Zhang Feng, Mo Liwu, Deng Min. Effect of carbonation curing on strength and volume stability of steel slag concrete[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 44(5): 640—646. (in Chinese with English abstract)
- [18] 董伟, 申向东, 赵占彪, 等. 风积沙轻骨料混凝土冻融损伤及寿命预测研究[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 1009—1015.
Dong Wei, Sheng Xiangdong, Zhao Zhanbiao, et al. Study of the freeze-thawing damage and life prediction of aeolian lightweight aggregate concrete[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 1009—1015. (in Chinese with English abstract)
- [19] 严佳川, 邹超英. 冻融循环作用下混凝土材料寿命评估方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43(6): 11—15.
Yan Jiachuan, Zou Chaoying. Evaluation method for the service life of concrete under the freeze-thaw action[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43(6): 11—15. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吴俊臣, 申向东, 郝贞洪. 风积沙混凝土的碳化试验研究与预测[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(7): 2306—2309, 2314.
Wu Junchen, Shen Xiangdong, Hao Yunhong. Research and prediction on carbonation of aeolian sand concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 36(7): 2306—2309, 2314. (in Chinese with English abstract)
- [21] Ebrahimi K, Daiezadeh M J, Zakertabrizi M, et al. A review of the impact of micro- and nanoparticles on freeze-thaw durability of hardened concrete: Mechanism perspective[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 186: 1105—1113.
- [22] Rimmelé G, Barlet-Gouédard V, Porcherie O, et al. Heterogeneous porosity distribution in Portland cement exposed to CO₂-rich fluids[J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38(8/9): 1038—1048.
- [23] 孙博, 肖汝诚, 郭健. 碳化概率模型及混凝土结构碳化失效概率分析[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(5): 1—7, 83.
Sun Bo, Xiao Rucheng, Guo Jian. Probabilistic carbonation model and carbonation failure probability assessment of concrete structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(5): 1—7, 83. (in Chinese with English abstract)
- [24] Yu Hongfa, Ma Haoxia, Yan Kun. An equation for determining freeze-thaw fatigue damage in concrete and a model for predicting the service life[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 137: 104—116.
- [25] He Z, Tang S W, Zhao G S, et al. Comparison of three and one dimensional attacks of freeze-thaw and carbonation for concrete samples[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 127: 596—606.
- [26] 肖前慧, 牛荻涛. 冻融和碳化共同作用下混凝土损伤分析[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(5): 763—766.

- Xiao Qianhui, Niu Ditao. Damage model of concrete subjected to freeze-thaw cycles and carbonation[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 763—766. (in Chinese with English abstract)
- [27] Khay S E E, Neji J, Loulizi A. Compacted dune sand concrete for pavement applications[J]. Proceeding of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials, 2011, 164(2): 87—93.
- [28] Seif E S S A. Assessing the engineering properties of concrete made with fine dune sands: An experimental study[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(3): 857—863.
- [29] Cyr M, Lawrence P, Ringot E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(2): 264—277.
- [30] 普通混凝土拌合物性能试验方法标准: GB/T 50080-2016[S]. 2016-08-18.
- [31] Wang Aiqin, Zhang Chengzhi, Sun Wei. Fly ash effects: I. The morphological effect of fly ash[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(12): 2023—2029.
- [32] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082-2009 [S]. 2009-11-30.
- [33] Chen Jianxun, Deng Xianghui, Luo Yanbin, et al. Investigation of microstructural damage in shotcrete under a freeze-thaw environment[J]. Construction and Building Materials, 2015, 83: 275—282.
- [34] 赵高升, 何真, 杨华美. 冻融循环和碳化交替作用下的混凝土耐久性[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2013, 46(5): 604—609.
- Zhao Gaosheng, He Zhen, Yang Huamei. Study of concrete durability under alternative effect of carbonation and freeze-thaw cycles[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(5): 604—609. (in Chinese with English abstract)
- [35] 刘卫, 邢立, 孙佃庆, 等. 核磁共振录井[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- [36] Zeng Qiang, Li Kefei, Teddy Fen-chong, et al. Pore structure characterization of cement pastes blended with high-volume fly-ash[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(1): 194—204.
- [37] Wu B, Ye G. Development of porosity of cement paste blended with supplementary cementitious materials after carbonation[J]. Construction and Building Materials, 2017, 145: 52—61.
- [38] Papadakis V G, Vayenas C G, Fardis M N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation[J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(4): 363—373.

Effect of aeolian sand content on durability of concrete under freezing-thawing-carbonization coupling

Shen Xiangdong, Zou Yuxiao, Xue Huijun, Li Genfeng

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: China is one of the countries with abundant reserves of aeolian sand in the world. Aeolian sand is widely distributed in North China. If the material can be taken locally in the construction of the project, that is, the aeolian sand can be used to replace natural river sand as fine aggregate to prepare concrete, which can not only promote the development of the construction industry, but also slow down the sand damage and benefit the environment. According to the actual service environment of concrete in the agricultural water conservancy projects of cold regions, the river sand was replaced by aeolian sand, and the concrete samples with different aeolian sand substitution rates were prepared. And they were used as the research objects for the freeze-thaw cycle-carbonization coupling test. An analysis was conducted on the damage process of aeolian sand concrete under the influence of freezing-thaw cycle-carbonization coupling. The relationship between the pore structure evolution of concrete and its durability was discussed by nuclear magnetic resonance instrument. The internal damage of different treatments concrete were analyzed by measuring the mass loss and dynamic elastic modulus of different periods of concrete. The test results showed that under the condition of the same number of freeze-thaw cycles and carbonization time in each test cycle, the damage caused by freeze-thaw cycle-carbonization was greater than that of carbonization-freeze-thaw cycle. With the increase in the number of freeze-thaw cycles and carbonization time, the concrete mass loss rate significantly increased while the relative dynamic elastic modulus greatly decreased; when the replacement rate of aeolian sand increased from 0 to 40%, the initial porosity of the concrete decreased, and the mass loss rate and relative dynamic modulus change in the test decreased. So the porosity of the concrete could not be used as an indicator in this test to accurately evaluate concrete durability; the pore distribution of concrete at different time was measured by nuclear magnetic resonance technology. The internal pores of concrete were divided to gel pores ($0-0.05\ \mu\text{m}$), capillary pores ($>0.05-1\ \mu\text{m}$), less harmful pores ($>1-10\ \mu\text{m}$) and more harmful pores ($>10\ \mu\text{m}$). Through the correlation analysis between the evolution of four kinds of pore proportions and the porosity and the relative dynamic elastic modulus of concrete, it was found the proportion of gel pores and less harmful pores in concrete had a dominant effect on its porosity and relative dynamic elastic modulus. When the ratio of gel pores to less harmful pores was 5 - 25, the change of the relative dynamic elastic modulus and porosity were not more than 1%; and the change of the relative dynamic elastic modulus and porosity of the concrete were change obviously when the ratio of gel pores to less harmful pores was 0-5; The addition of aeolian sand improved the pore distribution of concrete, and the aeolian sand concrete with an aeolian sand replacement rate of 40% showed a good resistance to freeze-thaw and carbonization. This study can provide a basis for the research and application of aeolian sand concrete in agricultural water conservancy projects of cold regions.

Keywords: concrete; durability; porosity; freeze-thaw cycle; carbonization