

冻融与盐蚀耦合作用下混凝土的细观特征与损伤演化规律

陈少杰¹, 任建喜¹, 刘浪², 李玉根³, 任翔¹, 符强⁴

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 西安 710054; 2. 西安科技大学能源学院, 西安 710054; 3. 榆林学院建筑工程学院, 陕西 榆林 719000; 4. 陕西省现代建筑设计研究院有限公司, 西安 710021)

摘 要: 通过快速冻融试验, 结合 X 射线计算机断层成像(CT)扫描技术和三维重构分析, 在细观尺度上研究了不同氯盐浓度环境与冻融作用下混凝土剥落深度、体积损失率、孔隙结构和 CT 值的变化规律。基于 CT 数据建立了混凝土的损伤演化模型, 并与波幅和质量定义的损伤进行了对比分析。结果表明: 冻融与盐蚀耦合作用下混凝土主要发生砂浆剥落破坏, 剥落深度和体积损失率随冻融次数的增加而增大。冻融过程中混凝土的损伤由表及里, 随着表面砂浆剥落, 部分闭口孔逐渐转为开口孔, 最终消失, 试样孔隙率整体呈波动增大趋势。氯盐浓度对混凝土冻融损伤发展速度影响显著, 随着氯盐浓度的增加, 混凝土的剥落深度和体积损失率呈先增大后减小的趋势。混凝土的超声波波幅随冻融次数的增加逐渐减小, 二者存在较好的指数关系。试验设计的 4 种浓度中, 3.5% (质量分数)氯盐溶液中的混凝土冻融破坏最严重。基于 CT 数据定义的损伤演化模型与波幅和质量表征的损伤度线性关系良好, 且与质量损失率吻合度更高, 说明该模型较好地反映了混凝土的损伤演化过程。

关键词: 冻融; 盐蚀; 混凝土; 细观特征; 扫描技术; 损伤分析

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)11-3524-13

网络出版时间: 2024-03-14



混凝土由于其低成本、易取材以及力学性能稳定等优点, 成为了应用最广泛的建筑材料^[1]。然而, 服役于寒冷地区的混凝土结构往往会受到冻融破坏的影响^[2], 这也是寒区混凝土耐久性丧失的主要原因^[3]。此外, 盐渍土^[4-6]、除冰盐等因素^[7], 导致混凝土结构遭受冻融与盐蚀的耦合作用^[8-10], 这种耦合作用对混凝土材料内部结构造成更严重的破坏。因此, 为确保寒区混凝土的耐久性, 必须充分认识冻融与盐蚀耦合作用下混凝土的劣化机制。

以往的研究主要关注混凝土在单一环境因素下的劣化规律, 如仅冻融或仅盐蚀^[11-13], 近年来学者们更关注多因素的耦合效应^[14-15]。熊勃勃等^[16]指出, 混凝土中水化产物的物理力学性能、孔隙结构以及冻融过程中最低温度和降温速率等因素都会影响混凝土的冻融损伤程度。冯博等^[17]通过研究不同

水胶比、粉煤灰掺量和含气量对混凝土耐久性的影响, 建议冻融和盐蚀环境下混凝土的水胶比不应大于 0.45。郭凯等^[18]研究了 3.5% NaCl 溶液环境下混凝土的冻融劣化规律, 指出冻融与氯盐的耦合作用会加速混凝土的劣化损伤。徐港等^[19]进一步指出混凝土的抗水冻循环次数约为抗盐冻循环次数的 2.8 倍。杨全兵^[20]发现氯盐浓度对混凝土的冻融损伤程度影响较大, 其中 2%~6%溶液浓度对混凝土造成的损伤最为严重。这些研究为掌握混凝土的冻融与盐蚀损伤规律奠定了基础。然而, 目前对于冻融与盐蚀耦合作用下混凝土细观结构演化规律和劣化机制的理解并不充分^[21], 关于损伤程度的表征常使用动态弹性模量、强度和重量等指标^[22-24]。随着测试手段的发展, 一些学者尝试利用 X 射线计算机断层成像(CT)扫描技术开展相关研究。Suzuki 等^[25]通过 CT 图像观察混凝土样品的裂缝分布情况, 并利

收稿日期: 2024-01-03。 修订日期: 2024-02-03。

基金项目: 国家自然科学基金(52268047); 陕西省自然科学基金计划(2024JC-YBQN-0610); 陕西省博士后科研项目(2023BSHEDZZ310); 陕西省“四主体一联合”地下结构抗震校企联合研究中心开放基金(KY2024-YB01); 榆林市科技计划项目(CXY-2022-157)。

第一作者: 陈少杰(1989—), 男, 博士, 讲师。

通信作者: 陈少杰(1989—), 男, 博士, 讲师;

李玉根(1983—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2024-01-03. Revised date: 2024-02-03.

First author: CHEN Shaojie (1989—), male, Ph.D., Lecturer.

E-mail: csj@xust.edu.cn

Correspondent author: CHEN Shaojie (1989—), male, Ph.D., Lecturer.

LI Yugen (1983—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: csj@xust.edu.cn; liyugen@yulinu.edu.cn

用 CT 值对混凝土结构的损伤进行了定量评价。Tian 等^[26]采用 X 射线断层成像技术表征了经过冻融循环作用后混凝土内部结构。党发宁等^[27]通过 CT 试验分析了受力破坏过程中混凝土试样裂纹的开裂、扩展和贯通全过程。郭东明等^[28]基于 CT 技术, 分析了高性能混凝土的裂纹扩展规律。可以看出, CT 测试能够较好反映出混凝土的细观特征, 提供了一种创新、非破坏的方式来深入研究混凝土的细观结构。然而, 已有的研究多集中于普通环境, 对比分析不同氯盐浓度下混凝土的冻融细观损伤特征, 并建立损伤演化模型的成果较少。

为此, 基于 CT 扫描和三维重构技术, 通过分析混凝土的剥落深度、体积、孔隙和 CT 值等指标, 对比分析冻融循环次数和氯盐溶液浓度对混凝土耐

久性的影响规律; 建立冻融与盐蚀耦合作用下混凝土的损伤演化模型, 并对混凝土冻融与盐蚀损伤演化规律进行分析。研究成果有助于进一步掌握冻融与盐蚀作用下混凝土的损伤机理。

1 实验

1.1 材料

采用冀东海德堡水泥有限公司生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 安定性合格; 细骨料为河砂, 细度模数 2.5, 表观密度 $2\,665\text{ kg/m}^3$; 粗骨料为普通碎石, 表观密度 $2\,670\text{ kg/m}^3$, 粒径范围为 $5\sim 10\text{ mm}$; 减水剂为聚羧酸高性能减水剂, 减水率 31%。标准养护后混凝土 28 d 抗压强度为 40.7 MPa , 配合比和力学性能见表 1。

表 1 混凝土配合比及力学性能

Table 1 Mix proportion and mechanical properties of concrete

Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)					Air content/%	28 d Compressive strength/MPa
Cement	River sand	Gravel	Water	Water reducer		
388	680	1\,205	167	7.8	3.9	40.7

1.2 方法

采用北京数智意隆仪器有限公司的 KDR-V9 型混凝土快速冻融机, 根据 GB/T50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[29]中快冻法开展冻融循环试验。冻融循环时间为每次 $2\sim 4\text{ h}$, 融化时间不少于 1 个循环周期的 $1/4$ 。选择 NaCl 溶液作为冻融过程的腐蚀介质, 设计浓度为 0% (质量分数)、3.5%、5.0% 和 8.0% 4 种溶液。开始冻融循环试验前, 先将试样分别在相应浓度的 NaCl 溶液中浸泡 4 d, 冻融试验时相同氯盐浓度的冻融桶中 1 次装 3 个尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的混凝土方形试样。

采用 LightSpeed 64 层螺旋 CT 机对混凝土试样进行扫描测试, 其分辨率为 512×512 像素, X 射线管的电压为 120 kV 。试验时, 沿混凝土立方体试块横断面以层厚 0.625 mm 进行连续扫描, 扫描有效视野 FOV 为 25 cm 。混凝土试样进行 CT 扫描后可得到一系列混凝土内部的连续断层图, 断层图片进行堆叠重组, 即可得到完整的试样三维重构图。混凝土是由水泥砂浆、石子及孔隙等部分组成, 由于这些材料密度不同, 因此对 X 射线的吸收系数不同, 也即 CT 值不同, CT 值的大小直接反映材料的密度大小^[30], 因此冻融过程中 CT 值的变化可以反映试样内部损伤的演化特征。

为方便描述, 用 C_x 表示氯盐溶液浓度为 $x\%$ 中

的混凝土试样, 即 C_0 、 $C_{3.5}$ 、 C_5 和 C_8 分别表示氯盐溶液质量分数为 0%、3.5%、5.0% 和 8.0% 中的混凝土试样。用 N_y 表示 y 次冻融循环, 即 N_0 、 N_{100} 、 N_{200} 和 N_{300} 分别表示冻融循环 0、100、200 次和 300 次。用 C_xN_y 表示在氯盐溶液浓度为 $x\%$ 、冻融循环 y 次的混凝土试样。

2 混凝土的细观特征

2.1 二维断面图

混凝土的二维断面图可以清晰地反映冻融循环过程中砂浆、骨料和孔隙的变化。为确保每次循环后提取的图像为同一断面, 在三维重构软件中建立统一坐标系, 使冻融后的残余试样与初始样本在三维空间上完全重合。限于篇幅, 本工作以各组代表试样高度为 50 mm 的断面为例进行展示, 见图 1~图 4。

由图 1~图 4 可以看出, 在经历冻融作用后, 各组混凝土断面外侧的砂浆均产生剥落现象, 骨料外露。随着冻融次数的增加, 砂浆的剥落程度逐渐加剧。当冻融循环达到 300 次时, $C_{3.5}$ 和 C_5 组的外侧剥落现象最为明显, 而 C_0 和 C_8 组的外侧剥落程度相对较小。冻融过程中试样外侧部分孔隙逐渐从封闭孔转为开口孔, 并随着砂浆剥落而消失。仅就细观图像而言, 混凝土内部核心区域的孔隙变化并不明显, 因此需要结合具体的 CT 数据进行量化分析。

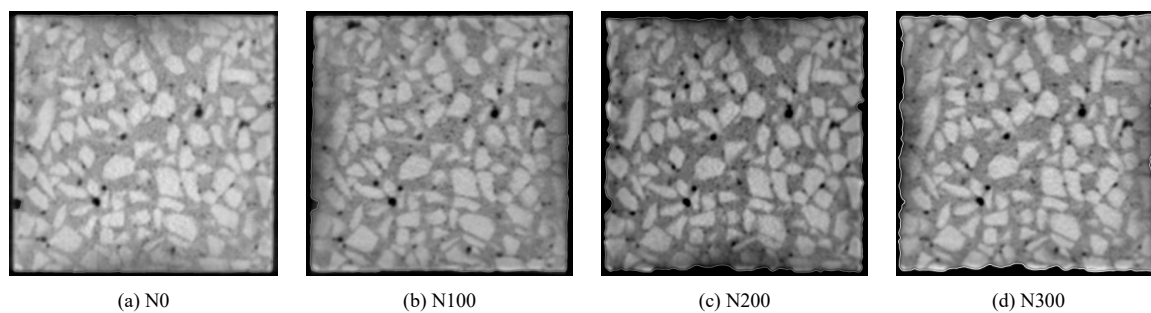


图 1 C0 试样断面图

Fig. 1 Photos of slices of C0 specimen

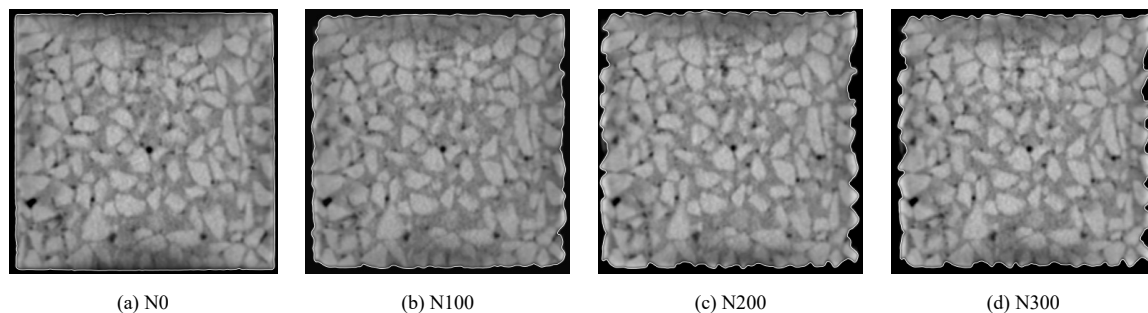


图 2 C3.5 试样断面图

Fig. 2 Photos of slices of C3.5 specimen

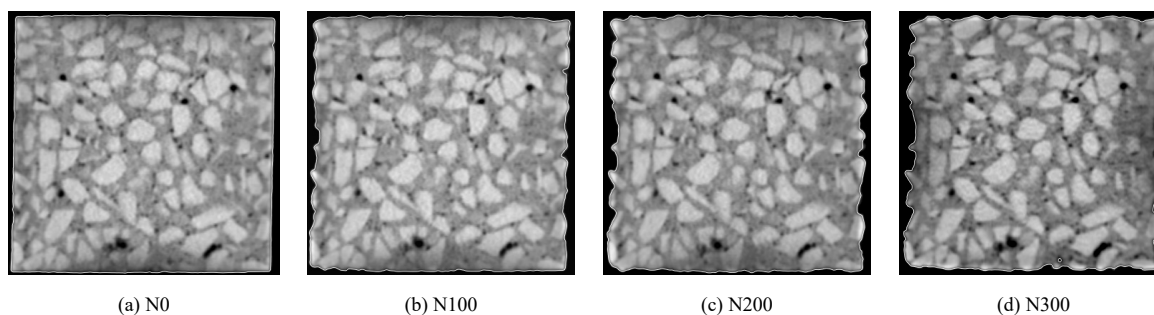


图 3 C5 试样断面图

Fig. 3 Photos of slices of C5 specimen

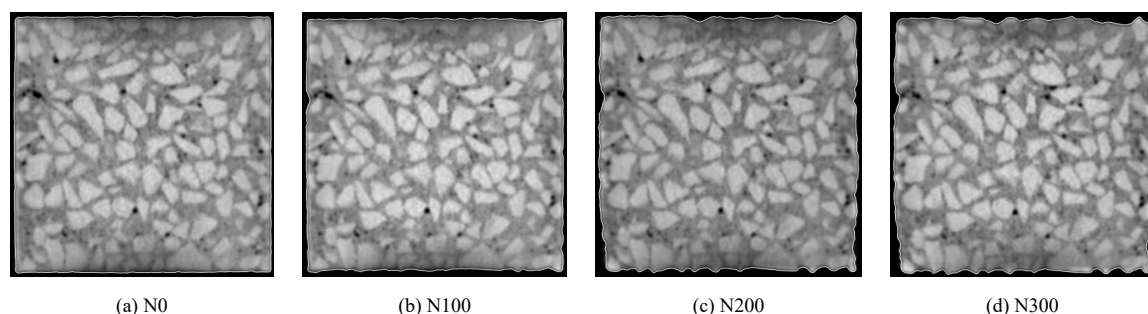


图 4 C8 试样断面图

Fig. 4 Photos of slices of C8 specimen

2.2 表面剥落深度

冻融与盐蚀作用下混凝土表面并非均匀剥落，传统的测试手段难以准确测试其剥落深度。三维重构软件可以对比试样残余形态与初始形态表观轮廓

的偏差值，偏差的产生是由于冻融作用下试样发生了剥落或膨胀，该值即是试样的剥落深度。偏差值越大，说明混凝土的剥落深度越大。这也使得混凝土剥落深度的定量分析成为可能。

混凝土二维偏差图可以通过瞄准线的方向和长度来表示剥落、膨胀以及深度等信息。图 5 展示了 300 次冻融循环后各组试样表面的二维偏差云图, 瞄准线长度代表不同的剥落深度, 左边的标尺显示了不同颜色所代表的偏差距离。为了更直观地进行对比分析, 图 5 中的瞄准线以 3 倍长度显示混凝土的剥落深度。可以观察到, 各组混凝土断面的瞄准线主要向内倾斜, 只有局部区域向外, 这说明试样主要发生了剥落, 而局部区域由于材料膨胀或骨料

疏松导致向外变形。

各组混凝土经过 300 次冻融循环后的三维偏差如图 6 所示。可以看出, C0 试样剥落深度相对较小, 剥落成分主要为表面的砂浆。C3.5 试样剥落程度最显著, 剥落主要出现在试样的棱角部位, 表面砂浆损伤范围广, 局部区域剥落深度超过了 3 mm; C5 试样也有棱角部位剥落, 表面剥落深度范围仅次于 C3.5 试样; C8 试样的表面剥落程度与 C0 试样接近。

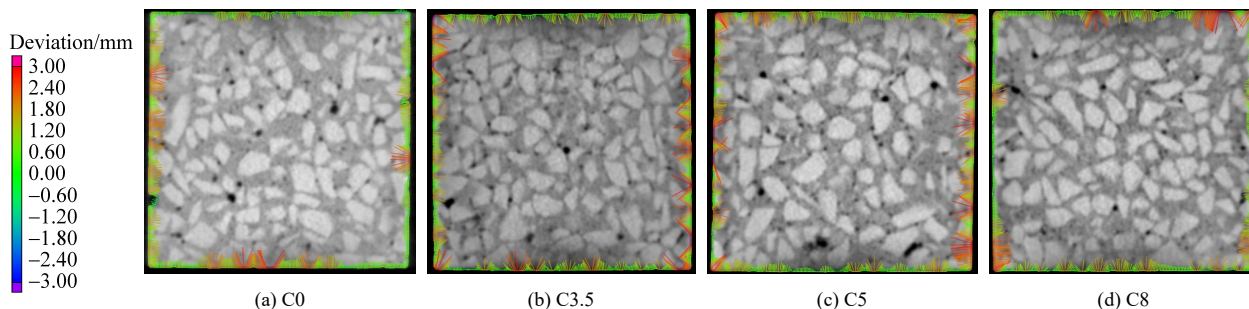


图 5 混凝土试样二维偏差云图

Fig. 5 Two-dimensional deviation nephograms of concrete specimens

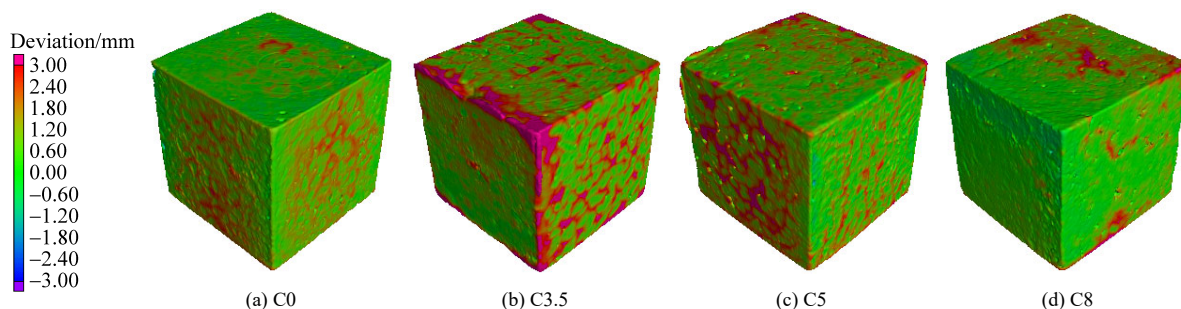


图 6 混凝土试样三维偏差云图

Fig. 6 Three-dimensional deviation nephograms of concrete specimens

对试样剥落深度进行定量分析, 以 C3.5 试样为例(见图 7), 该图为剥落深度与试样剥落表面积之间的关系, 峰值点对应的剥落深度为试样在该次冻融循环下占比最大的剥落深度。

由图 7 可见, 冻融循环过程中剥落深度直方图的分布形态由窄而高逐渐变为宽而低, 峰值点也在不断变化, 冻融循环 100、200、300 次后, C3.5 的剥落深度峰值分别为 0.51、0.53 mm 和 1.08 mm。随着冻融循环次数的增加, 峰值点变化基本呈增大趋势, 剥落表面范围也逐渐增大。此外, 剥落深度存在负值, 说明与初始形态相比, 冻融后试样局部区域膨胀, 但负值范围远小于正值。因此, 在冻融作用下混凝土材料发生疏松膨胀, 膨胀至一定极限时产生剥落破坏, 就剥落深度直方图而言, 混凝土试样以剥落破坏为主。

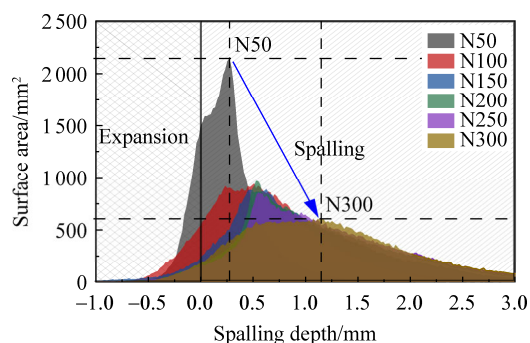


图 7 剥落深度直方图

Fig. 7 Histogram of spalling depth

为更直观地比较各组试样剥落深度的变化规律, 分析氯盐浓度对剥落深度的影响, 绘制氯盐浓度与平均剥落深度的关系图(见图 8)。

由图 8 可见, 同一浓度环境下试样的平均剥落

深度随冻融次数增加而增大, 相同冻融循环次数下剥落深度随氯盐浓度的升高先增大后减小; 各冻融循环次数下试样剥落深度随着氯盐浓度的变化趋势基本一致。

2.3 体积损失率

一般而言, 当混凝土出现不规则的表面剥落后, 很难准确获得其体积。本工作采用 CT 三维重构技术, 成功获取了经过不同冻融循环次数后的混凝土试样的体积数据。图 9 和图 10 分别展示了冻融 300 次后试样的表观形态和三维重构图。对比表观形态实物和三维重构图可以看出重构后的三维模型能够准确反映实物的形态, 因此可以获得较准确的体积数据。

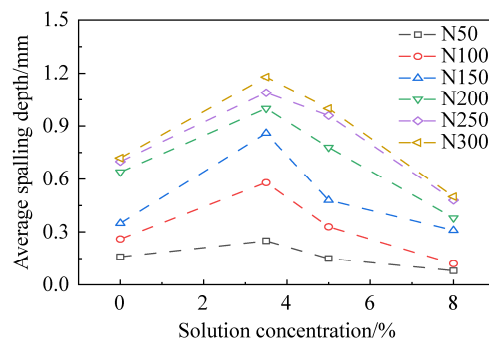


图 8 平均剥落深度与溶液浓度的关系

Fig. 8 Relationship between average spalling depth and solution concentration

混凝土试样体积损失率与冻融循环次数的关系如图 11 所示。

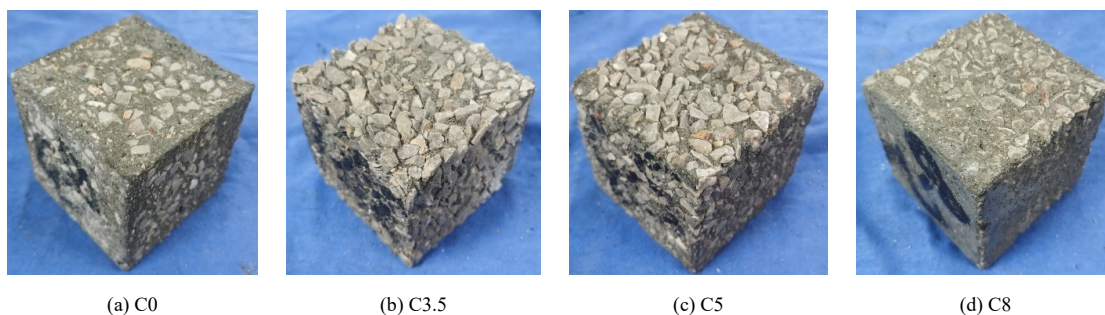


图 9 冻融作用后各组混凝土的表观形态

Fig. 9 Apparent morphology of concrete specimens after freeze-thaw actions

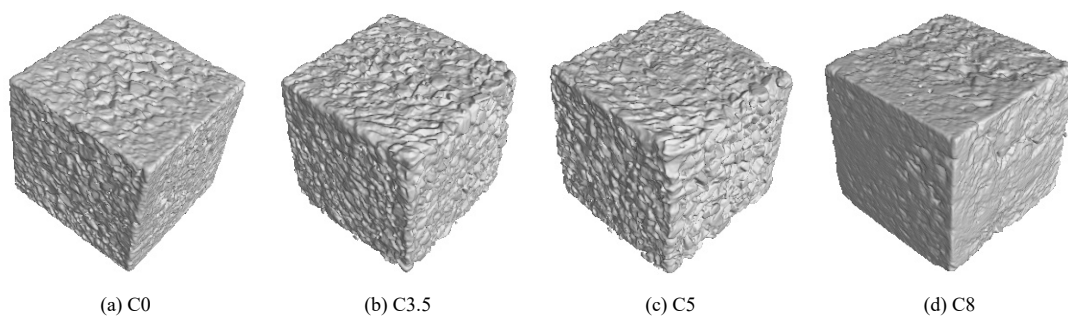


图 10 冻融作用后各组混凝土的三维重构图

Fig. 10 Three-dimensional restructuring graphs of concrete specimens after freeze-thaw actions

由图 11 可见, 随着冻融循环次数的增加, 混凝土的体积损失率发生了显著变化。经历 100 次冻融循环后, C0、C3.5、C5 和 C8 的体积损失率分别为 0.63%、3.44%、2.20%和 0.68%; 冻融循环 200 次时, 各组混凝土的体积损失率分别为 3.28%、7.48%、7.04%和 3.02%; 经历 300 次冻融循环后, 各组混凝土的体积损失率分别为 3.40%、8.18%、8.03%和 3.85%。冻融循环过程中混凝土的体积损失率逐渐增大, 在 175 次冻融循环之前, 试样的体积损失率增速较快, 但 175 次之后, 体积损失率的增速减缓。

这主要是因为冻融初期混凝土表面的砂浆剥落较为明显, 而后期剥落量减少, 且还未出现大量骨料脱落现象, 因此冻融后期的体积损失率增速减缓。

随着氯盐浓度的增加, 混凝土的体积损失率先增大后减小。4 种氯盐浓度中, C3.5 的体积损失率最大, 其次是 C5, 而 C8 和 C0 的体积损失率相近。

2.4 孔隙结构

孔隙结构是混凝土的重要细观特征, 试样三维重构后通过阈值分割提取混凝土的孔隙结构, 以 C3.5 代表试样为例, 不同冻融次数下的孔隙结构如

图 12 所示。

由图 12 可见,混凝土在冻融作用下孔隙结构发生动态变化,主要集中在试样的外侧。随着冻融损伤的发展,部分孔隙逐渐消失。

为更直观了解冻融过程中孔隙及周边砂浆的损伤发展过程,取一个混凝土断面进行分析,如图 13 所示。

由图 13 可见,冻融过程中孔隙①由半开口的孔逐渐发展为开口孔,随着砂浆基质进一步由外向内剥落,该孔隙最终消失。孔隙②相对于孔隙①处于距表面更远的位置,冻融与盐蚀作用下试样表面砂浆由平整状变为锯齿状,冻融后期砂浆剥落的路径已表现出与孔隙②连通的发展趋势。这也从另一个角度解释了混凝土孔隙变化由外而内,且外侧变化程度较大的原因。

为定量分析冻融与盐蚀耦合作用下混凝土孔隙演化规律,从孔隙率的角度对孔隙结构进行分析,如图 14 所示。

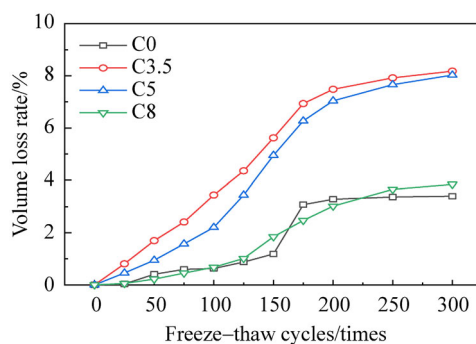


图 11 体积损失率与冻融循环次数的关系

Fig. 11 Relationship between volume loss rate and number of freeze-thaw cycles

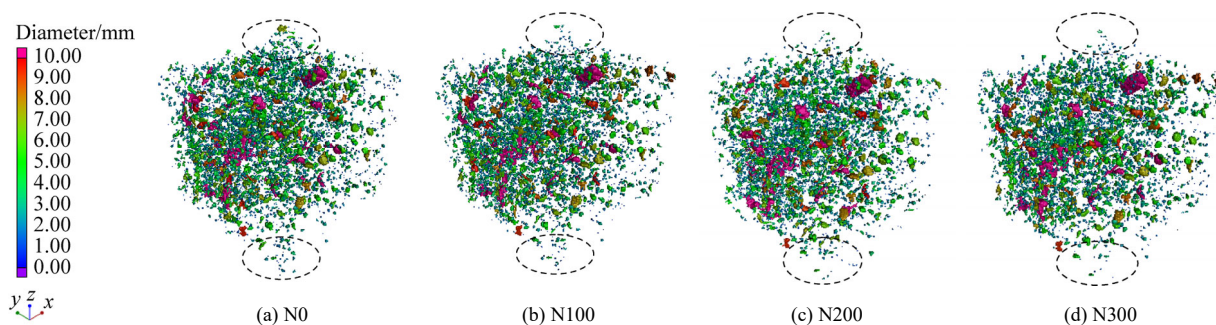


图 12 混凝土试样的孔隙分布

Fig. 12 Pore distribution of concrete specimen

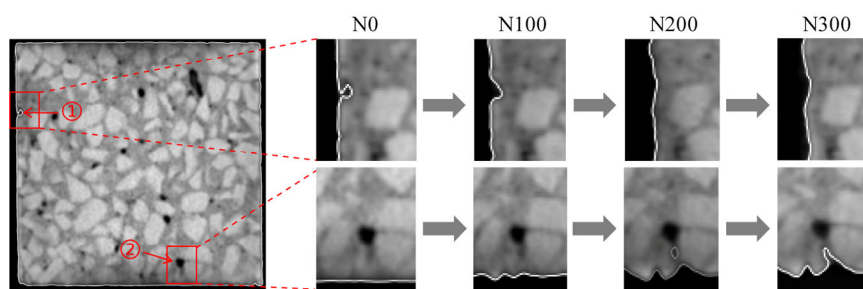


图 13 孔隙结构变化过程

Fig. 13 Process of changes in pore structure

由图 14 可见,冻融循环 100 次后, C0、C3.5、C5 和 C8 的孔隙率增幅分别为 3.81%、1.93%、0.16% 和 1.67%。冻融循环 200 次后,增幅分别为 5.83%、1.66%、2.34%和 3.22%。冻融循环 300 次后,增幅分别为 5.28%、5.14%、1.27%和 3.13%。冻融循环过程中混凝土内部的细观孔隙率整体呈现波动增大的趋势。当孔隙增大或砂浆发生剥落时,试样的孔隙率增加,当伴随材料剥落而消失的孔隙占比较大

时,孔隙率减小。这也是冻融过程中孔隙率出现波动现象的主要原因。

2.5 固相 CT 值

混凝土由多种固相材料组成,固相 CT 值是混凝土各固相材料 CT 值的一个均值。混凝土的固相 CT 值可以反映某次冻融循环作用后混凝土残余材料的密实度,因此,其变化规律可以一定程度上反映混凝土损失的材料成分^[31]。图 15 展示了混凝土

固相 CT 值的演变规律。

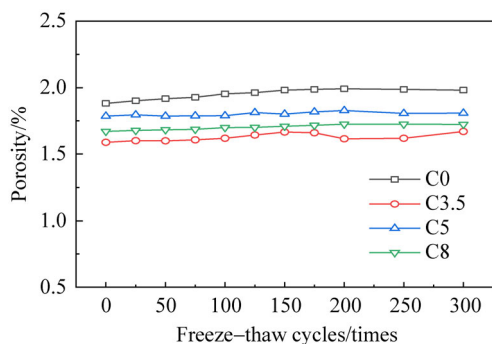


图 14 孔隙率的变化规律

Fig. 14 Evolution laws of porosity

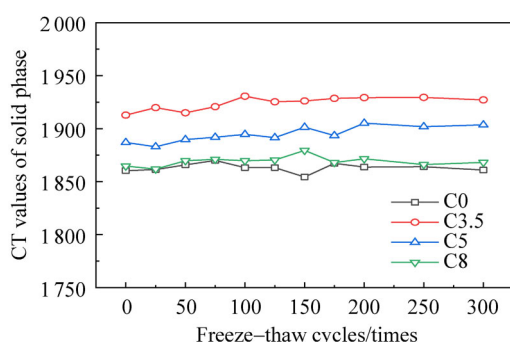


图 15 混凝土固相 CT 值与冻融循环次数的关系

Fig. 15 Relationship between solid phase CT value of concrete and the number of freeze-thaw cycles

由图 15 可见，混凝土固相 CT 值随着冻融循环次数的增加呈现波动变化趋势。砂浆的 CT 值小于石子，冻融循环作用导致砂浆剥落时，剩余材料中石子的体积占比增大，则固相 CT 值增大；石子脱落时，残余材料中砂浆的体积占比增大，则固相 CT 值减小。这正是固相 CT 值发生波动变化的主要原因。因此，分析混凝土的损伤演化规律，需结合其它参数进行综合分析。

3 混凝土的损伤分析

冻融过程中混凝土受冻胀和侵蚀作用的影响，内部结构出现微裂缝和微孔洞的萌生和发展，同时外部发生明显的剥落现象，最终导致混凝土的劣化。以往的研究主要通过质量、动弹性模量、声波参数(如波速和波幅)等指标来评估混凝土的损伤程度，这些指标均可从不同角度表征混凝土的损伤演化过程。声波参数对材料内部裂缝和缺陷的敏感性较高，其变化特征能够较好地描述混凝土冻融损伤演化规律，因此，许多学者使用声波参数来定义混凝土的冻融损伤^[32–33]。然而，在实际测试中，超声波仪的

探头无法完全覆盖整个试样，所获得的数据主要反映了发射和接收探头之间材料的损伤，无法全面反映探头接触范围以外区域的损伤情况，尤其是冻融作用后混凝土边角剥落的影响。CT 数据可以提供材料的密实度、孔隙率以及体积损失等信息，弥补了声波测试在这方面的不足。因此，本工作基于 CT 数据建立损伤演化模型，并与波幅、质量损失率表征的损伤度进行比较分析。

3.1 相对 CT 值

不同冻融次数下获得的混凝土 CT 值仅代表此时残余试样的密实度，这一指标无法反映材料剥落、孔隙体积变化的影响，因此，无法直接表征冻融作用后混凝土相对于初始状态密实度的变化。为与初始试样比较，假定冻融与盐蚀作用后混凝土体积与初始状态一致，材料的剥落损失均由空气填充，引入混凝土相对 CT 值的概念，该值表示冻融后试样在体积不变的情况下相对于初始状态的密实度。

当 X 射线的能量固定且被检测物质一定时，衰减系数仅与被检测物体的密度有关，并遵循朗伯比尔定律^[34]：

$$I = I_0 e^{-\mu l} = I_0 e^{-\mu_m \rho l} \quad (1)$$

式中： I 为 X 射线穿透试样后的强度； I_0 为 X 射线初始强度； μ 为试样对 X 射线的吸收系数； l 为 X 射线穿过试样的距离； μ_m 为试样单位质量的吸收系数； ρ 为试样密度。

当被检测物体为一个混合体时，该物体中不同物质的质量衰减系数分别为 (μ_1/ρ_1) 、 (μ_2/ρ_2) 、 (μ_3/ρ_3) 、...、 (μ_i/ρ_i) ，各组成物质的质量分数分别为 m_1 、 m_2 、 m_3 、...、 m_i ，则混合体的平均质量衰减系数为^[35]：

$$\begin{aligned} \mu_m = \frac{\mu}{\rho} = m_1 \left(\frac{\mu_1}{\rho_1} \right) + m_2 \left(\frac{\mu_2}{\rho_2} \right) + m_3 \left(\frac{\mu_3}{\rho_3} \right) + \\ \dots + m_i \left(\frac{\mu_i}{\rho_i} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

若被测混合体各组成材料的体积百分数分别为 v_1 、 v_2 、 v_3 、...、 v_i ，则有^[35]：

$$\mu = v_1 \mu_1 + v_2 \mu_2 + v_3 \mu_3 + \dots + v_i \mu_i \quad (3)$$

Housfield 建立了 CT 机的标准方程，通过相对水的线性衰减系数归一化处理，可以将物质的密实度用 CT 值表示为^[36]：

$$H = 1000 \times \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \quad (4)$$

式中： H 为混凝土的 CT 值； μ_w 为水的线性衰减系数。

对于混凝土而言,整体的衰减系数代表了各组成材料的平均值。从物质特征角度划分,内部材料的组成又分为固、液、气 3 种状态,因此整体的衰减系数主要由 3 部分组成,则有:

$$\mu = \frac{V_s}{V} \mu_s + \frac{V_l}{V} \mu_l + \frac{V_g}{V} \mu_g \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),整理可得:

$$H = \frac{H_s V_s + H_l V_l + H_g V_g}{V} \quad (6)$$

式中: μ_s 、 μ_l 和 μ_g 分别为混凝土内固、液、气三相的衰减系数; V_s 、 V_l 、 V_g 为混凝土内固、液、气三相的体积(mm^3); V 为混凝土整体体积(mm^3); H_s 、 H_l 和 H_g 分别为混凝土内固、液、气三相的 CT 值(Hu)。

当混凝土处于干燥状态时,混凝土材料变为了固、气两相材料。假设混凝土固相材料的损失被空气填充,那么某个冻融循环后混凝土的相对 CT 值可以表示为:

$$\begin{aligned} H'_{(n)} &= \frac{H_{s(n)} V_{s(n)} + H_g (V_{g(n)} + V_{z(n)})}{V_{(0)}} \\ &= (H_{s(n)} - H_{s(n)} P_{(n)} - 2000 P_{(n)} + 1000) \\ &\quad \times \left(\frac{V_{(n)}}{V_{(0)}} \right) + 1000 P_{(0)} - 1000 \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $H'_{(n)}$ 为混凝土相对 CT 值(H_u); $H_{s(n)}$ 为冻融循环 n 次后混凝土固相材料的 CT 值(H_u); $V_{s(n)}$ 为冻融循环 n 次后混凝土固相材料的体积(mm^3); $V_{g(n)}$ 为冻融循环 n 次后混凝土内孔隙体积(mm^3); $V_{(0)}$ 和 $V_{(n)}$ 分别为冻融循环 0 次和 n 次时混凝土的总体积(mm^3); $V_{z(n)}$ 为冻融循环 n 次后混凝土固相材料损失的体积(mm^3),计算时取 $V_{z(n)} = V_{s(0)} - V_{s(n)}$; $P_{(0)}$ 和 $P_{(n)}$ 分别为冻融 0 次和 n 次时试样的孔隙率。

由式(7)可知,相对 CT 值与混凝土的固相 CT 值、孔隙率以及体积损失率这 3 个参数相关。在 CT 细观分析中,已经获得了这些参数。根据各冻融次数下试样的 CT 数据,可以计算出各组试样的相对 CT 值,如图 16 所示。

由图 16 可见,相对 CT 值消除了固相 CT 值由于砂浆和骨料脱落而导致的波动变化。随着冻融循环次数的增加,相对 CT 值逐渐减小。根据其变化趋势可知,相对 CT 值能够较好地描述混凝土在冻融与盐蚀环境耦合作用下的损伤演化过程。

3.2 纵波波幅

采用北京康科瑞 NM-4B 型非金属声波测试仪,

获得混凝土的波速、波幅等声学参数。在选择声学参数时,学者们通常使用波速作为评价材料损伤程度的指标,事实上纵波波幅对材料的损伤更加敏感^[37]。因此,选择波幅作为混凝土损伤的声学表征参数。图 17 为波幅与冻融次数的关系图。

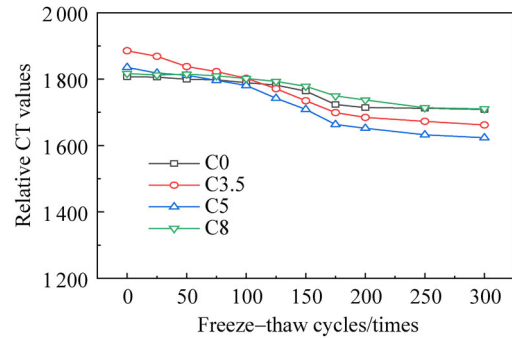


图 16 相对 CT 值随冻融循环次数的变化

Fig. 16 Variation of relative CT values of specimens with the number of freeze-thaw cycles

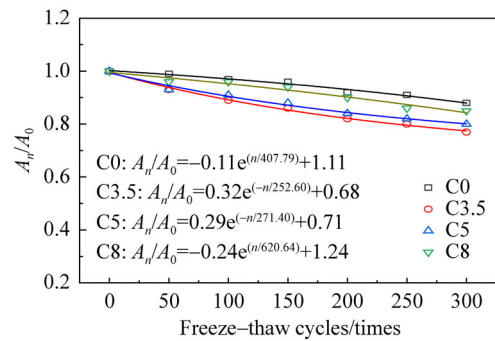


图 17 波幅与冻融次数的关系

Fig. 17 Relationship between amplitude and number of freeze-thaw cycles

由图 17 可见,随着冻融循环次数的增加,各组混凝土的波幅逐渐减小,下降幅度从大到小依次为 C3.5、C5、C8、C0。混凝土的波幅随冻融循环次数的变化规律符合指数分布,随图给出了不同溶液浓度环境中试样波幅与冻融循环次数之间的关系式。

3.3 质量损失率

冻融与盐蚀作用下混凝土逐渐剥落必然导致质量的变化,方形试样的质量损失率如图 18 所示。

由图 18 可见,混凝土的质量损失率随冻融循环次数的增加逐渐增大,冻融循环至 300 次时, C0、C3.5、C5 和 C8 的质量损失率分别为 2.89%、7.26%、7.24%和 3.31%。C3.5 试样的质量损失率最大。

3.4 混凝土的损伤演化模型

分别以相对 CT 值、波幅、质量作为损伤的表征参数分析混凝土的冻融盐蚀损伤,根据损伤的定

义, 混凝土的损伤度可表示为:

$$D_1 = 1 - \frac{H'_{(n)}}{H'_{(0)}} \quad (8)$$

$$D_2 = 1 - \frac{A_{(n)}}{A_{(0)}} \quad (9)$$

$$D_3 = 1 - \frac{m_{(n)}}{m_{(0)}} \quad (10)$$

式中: D_1 、 D_2 、 D_3 分别为以相对 CT 值、波幅和质量定义的损伤; $A_{(n)}$ 和 $A_{(0)}$ 分别为经历 n 和 0 次冻融后混凝土的波幅值, $m_{(n)}$ 和 $m_{(0)}$ 分别为经历 n 和 0 次冻融后混凝土的质量。

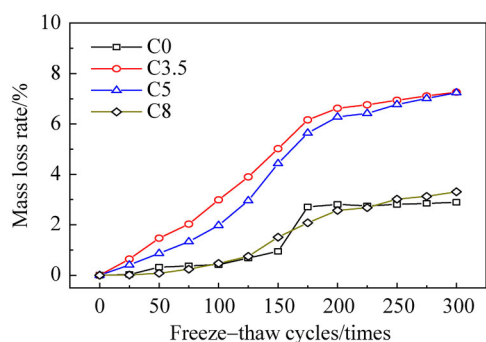


图 18 质量损失率与冻融次数的关系

Fig. 18 Relationship between mass loss rate and number of freeze-thaw cycles

根据式(8)~式(10)可计算得到各组试样的 D_1 、 D_2 、 D_3 , 由于 D_3 与质量损失率本质相同, 这里不在重复分析, 绘制 D_1 和 D_2 与冻融次数的关系, 如图 19 和图 20 所示。

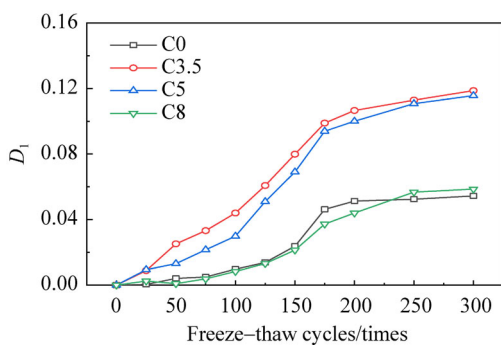


图 19 D_1 与冻融次数的关系

Fig. 19 Relationship between D_1 and number of freeze-thaw cycles

由图 19 和图 20 可见, 随着冻融循环次数的增加, 各组混凝土的损伤程度逐渐增大, 组间差异较明显。随着浓度的增加, 混凝土的冻融损伤先增大后减小。2 种参数获得损伤值的变化趋势类似, 表

明 2 种参数均能够表征混凝土冻融与盐蚀损伤程度。根据损伤度的大小, 冻融至 300 次时, 各组的损伤程度由高到低依次为 C3.5、C5、C8、C0。

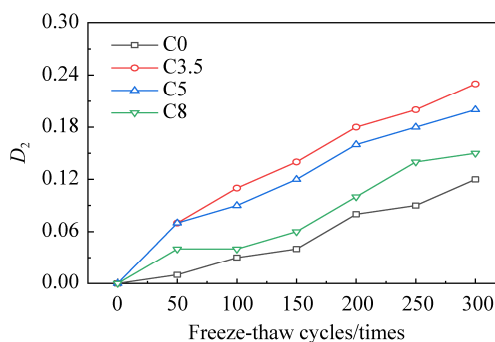


图 20 D_2 与冻融次数的关系

Fig. 20 Relationship between D_2 and number of freeze-thaw cycles

为进一步比较相对 CT 值与超声波幅 2 个参数表征的损伤度, 通过式(11)~(13)将 D_1 、 D_2 和 D_3 归一化处理, 获得归一化损伤 D'_1 、 D'_2 和 D'_3 , 三者之间的关系分别如图 21 和图 22 所示。

$$D'_1 = \frac{D_{1(n)}}{D_{1(300)}} \quad (11)$$

$$D'_2 = \frac{D_{2(n)}}{D_{2(300)}} \quad (12)$$

$$D'_3 = \frac{D_{3(n)}}{D_{3(300)}} \quad (13)$$

式中: $D_{1(n)}$ 、 $D_{2(n)}$ 和 $D_{3(n)}$ 分别为冻融 n 次时的 D_1 、 D_2 和 D_3 值; $D_{1(300)}$ 、 $D_{2(300)}$ 和 $D_{3(300)}$ 是试验最后一次冻融循环(即 300 次)的 D_1 、 D_2 和 D_3 值。

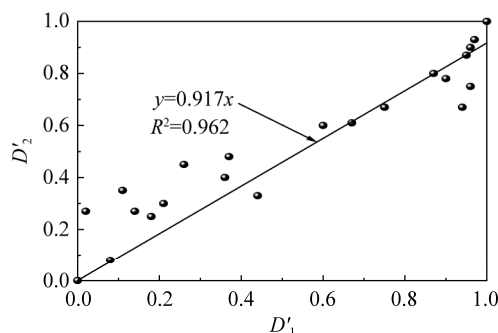


图 21 D'_1 和 D'_2 之间的关系

Fig. 21 Relationship between D'_1 and D'_2

由图 21 和图 22 可见, D'_1 与 D'_2 和 D'_3 之间均具有较好的线性关系, 线性拟合相关系数 R^2 分别为 0.962 和 0.996, 表明由相对 CT 值建立的损伤演化模型也能够较好的反映混凝土的冻融盐蚀损伤规

律。就拟合结果而言, 基于相对 CT 值建立的损伤演化模型与质量损失率之间的吻合度更高。

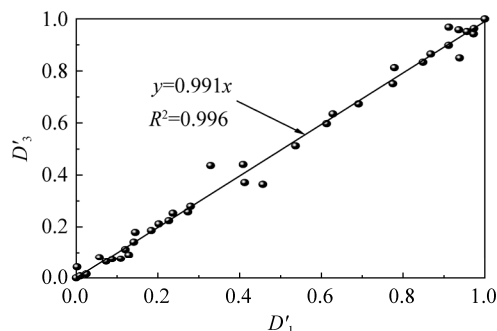


图 22 D'_1 和 D'_3 之间的关系

Fig. 22 Relationship between D'_1 and D'_3

3.5 冻融与盐蚀作用下混凝土的损伤机制

为进一步明确氯盐与冻融的耦合作用机制, 从溶液冰点的角度分析氯盐浓度对冻融损伤的影响, 结合 NaCl 溶液冰点数据^[38], 拟合出质量分数为 0%~10% NaCl 溶液冰点与浓度之间的关系(见图 23)。

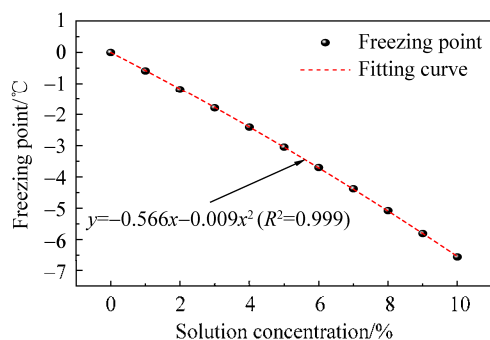


图 23 NaCl 溶液冰点与其质量分数之间的关系

Fig. 23 Relationship between freezing point and mass fraction of NaCl solution

由图 23 可见, NaCl 溶液浓度在 0%~10% 之间时, 溶液冰点随浓度的增加逐渐降低, 二者之间存在良好的二次多项式关系, 根据公式获得了 4 种浓度 0%、3.5%、5%、8% 的冰点分别为 0、-2.09、-3.05、-5.08 °C。氯盐溶液的冰点直接影响冻融循环试验中试样的冻结和融化进程, 结合各组试样损伤结果发现, 氯盐溶液浓度对冻融损伤的程度具有双重影响。在一定的浓度范围内, 浓度升高加速了混凝土的冻融损伤, 当浓度超过该范围时, 损伤的发展延缓。

冻融与盐蚀耦合作用下混凝土的损伤形式主要表现为表面的剥蚀破坏, 氯盐对混凝土的冻融损伤有 2 方面影响^[39], 一方面, 在冻融过程中氯盐使混

凝土孔隙内外浓度差增大, 试样吸液率增大, 冻结过程中产生更多的孔隙冰, 而材料抗冻性与孔隙冰晶体产生的冻胀力密切相关。因此, 就这一角度而言, 氯盐溶液在一定浓度范围内加速了混凝土的损伤; 另一方面, 氯盐溶液的冰点低于清水, 本试验设计的 4 种氯盐溶液, 浓度越高溶液冰点越低, 冻融循环试验时, 高浓度氯盐溶液在降温过程中的冻结速度慢, 而在升温过程中其融化速度快, 与低浓度溶液相比, 试样受冻时间更短。因此, 浓度越高孔隙水的结冰率越低, 导致孔隙冰对孔壁膨胀作用减弱, 最终降低了混凝土的损伤程度。综上, 两方面因素的综合影响下, 不同氯盐溶液浓度中的混凝土试样表现出不同的抗冻性能。本工作中, NaCl 溶液浓度为 3.5% 时, 这种耦合作用的破坏程度达到了最大值, 浓度更大的溶液损伤程度反而减小。

4 结论

通过冻融与盐蚀耦合作用下混凝土的 CT 细观试验, 获得了混凝土剥落深度、体积损失率、孔隙率及 CT 值的变化规律。基于相对 CT 值和波幅分别建立了混凝土的损伤演化模型, 分析了冻融与盐蚀作用下混凝土的劣化机理。主要结论如下:

1) 冻融与盐蚀耦合作用下混凝土损伤主要表现为表面的剥落。混凝土的剥落深度随着冻融循环次数的增加逐渐增大。在不同浓度氯盐溶液中试样的剥落程度差异明显, 随氯盐浓度的升高先增大后减小, 氯盐浓度为 3.5% 时剥落深度最大。

2) 冻融与盐蚀耦合作用下混凝土的体积变化明显, 冻融次数和氯盐浓度的影响较大, 混凝土体积损失率随冻融次数的增加逐渐增大, 随氯盐浓度的升高先增大后减小。本试验采用的 4 种浓度中, 3.5% 氯盐浓度下试样的体积损失率最大, 其次为 5%, 8% 和 0% 浓度下混凝土体积损失率接近。

3) 冻融与盐蚀耦合作用导致混凝土孔隙结构发生动态变化, 主要发生在试样外侧。随着冻融损伤的加剧, 部分闭口孔隙逐渐转变为开口孔隙, 然后随着砂浆的剥落而消失。随着冻融循环次数的增加, 孔隙率整体上呈波动增大趋势。

4) 基于相对 CT 值定义的冻融盐蚀损伤演化模型与波幅和质量表征的损伤度线性关系良好, 且与质量损失率吻合度更高。混凝土损伤度随冻融循环次数的增加逐渐增大, 随氯盐浓度的增加先增大后减小。一定范围的氯盐浓度可加速混凝土的冻融损伤, 但超过该范围时损伤的发展延缓, 氯盐浓度

3.5%时混凝土冻融损伤度达到最大值。

参考文献:

- [1] WANG R J, ZHANG Q J, LI Y. Deterioration of concrete under the coupling effects of freeze–thaw cycles and other actions: A review[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 319: 126045.
- [2] 武海荣, 金伟良, 张锋剑, 等. 关注环境作用的混凝土冻融损伤特性研究进展[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(8): 37–46.
WU Hairong, JIN Weiliang, ZHANG Fengjian, et al. *China Civ Eng J*, 2018, 51(8): 37–46.
- [3] SKRIPKIŪNAS G, NAGROCKIENĖ D, GIRSKAS G, et al. The cement type effect on freeze–thaw and deicing salt resistance of concrete[J]. *Procedia Eng*, 2013, 57: 1045–1051.
- [4] 王萧萧, 申向东, 王海龙, 等. 盐蚀–冻融循环作用下天然浮石混凝土的抗冻性[J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(11): 1414–1421.
WANG Xiaoxiao, SHEN Xiangdong, WANG Hailong, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2014, 42(11): 1414–1421.
- [5] YU H F, TAN Y S, YANG L M. Microstructural evolution of concrete under the attack of chemical, salt crystallization, and bending stress[J]. *J Mater Civ Eng*, 2017, 29(7): 04017041.
- [6] 王家滨, 牛荻涛, 何晖, 等. 盐湖侵蚀环境喷射混凝土耐久性能劣化规律及机理研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(6): 67–80.
WANG Jiabin, NIU Ditao, HE Hui, et al. *China Civ Eng J*, 2019, 52(6): 67–80.
- [7] LIU Z C, HANSEN W. Freeze–thaw durability of high strength concrete under deicer salt exposure[J]. *Constr Build Mater*, 2016, 102: 478–485.
- [8] 李玉根, 张慧梅, 陈少杰, 等. 风积沙混凝土盐冻多尺度劣化机制[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(4): 2331–2342.
LI Yugen, ZHANG Huimei, CHEN Shaojie, et al. *Acta Mater Compos Sin*, 2023, 40(4): 2331–2342.
- [9] 王振地, 姚燕, 王玲. 冻融循环与氯盐侵蚀作用下混凝土变形和损伤分析[J]. *硅酸盐学报*, 2012, 40(8): 1133–1138.
WANG Zhendi, YAO Yan, WANG Ling. *J Chin Ceram Soc*, 2012, 40(8): 1133–1138.
- [10] CHEN S J, REN J X, LIU L, et al. Investigation of the dynamic compressive mechanical properties of concrete under the combined effects of freeze–thaw and salt erosion[J]. *Constr Build Mater*, 2023, 407: 133548.
- [11] 关城, 张鹏鑫, 邱继生, 等. 冻融环境下活化煤矸石粉混凝土毛细吸水性能[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(5): 483–491.
GUAN Xiao, ZHANG Pengxin, QIU Jisheng, et al. *J Build Mater*, 2023, 26(5): 483–491.
- [12] LI Y G, ZHANG H M, CHEN S J, et al. Multi-scale study on the durability degradation mechanism of aeolian sand concrete under freeze–thaw conditions[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 340: 127433.
- [13] 金祖权, 孙伟, 张云升, 等. 混凝土在硫酸盐、氯盐溶液中的损伤过程[J]. *硅酸盐学报*, 2006, 34(5): 630–635.
JIN Zuquan, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2006, 34(5): 630–635.
- [14] 乔宏霞, 苏睿, 李琼, 等. 基于Weibull分布的不同冻融介质下再生骨料透水混凝土耐久性能研究[J]. *功能材料*, 2023, 54(3): 3134–3142.
QIAO Hongxia, SU Rui, LI Qiong, et al. *J Funct Mater*, 2023, 54(3): 3134–3142.
- [15] 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 Guoliang, SHEN Xiangdong, LIU Jinyun, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2021, 40(2): 473–479.
- [16] 熊勃勃, 高磊, 卢晓春, 等. 基于静水压理论的混凝土冻融破坏演化模型[J]. *工程力学*, 2023, 40(4): 184–192.
XIONG Bobo, GAO Lei, LU Xiaochun, et al. *Eng Mech*, 2023, 40(4): 184–192.
- [17] 冯博, 刘青, 钱永久. 高性能混凝土在氯盐侵蚀和冻融循环作用下的耐久性分析[J]. *西南交通大学学报*, 2023, 58(5): 1083–1089.
FENG Bo, LIU Qing, QIAN Yongjiu. *J Southwest Jiaotong Univ*, 2023, 58(5): 1083–1089.
- [18] 郭凯, 佟舟, 张树峰, 等. 冻融与氯盐侵蚀耦合作用下GO-RAC耐久性能研究[J/OL]. *建筑材料学报*, 2023: 1–12. [2023–06–05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.tu.20230603.1332.008.html>.
GUO Kai, TONG Zhou, ZHANG Shufeng, et al. *J Build Mater*, 2023: 1–12. [2023–06–05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.tu.20230603.1332.008.html>.
- [19] 徐港, 龚朝, 刘俊, 等. 混凝土抗水冻融和抗盐冻融循环作用的相关性[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(3): 552–556.
XU Gang, GONG Chao, LIU Jun, et al. *J Build Mater*, 2020, 23(3): 552–556.
- [20] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理(II): 冻融饱水度和结冰压[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(6): 741–746.
YANG Quanbing. *J Build Mater*, 2012, 15(6): 741–746.
- [21] 邢秉元, 程鹏宇, 唐继朋, 等. 冻融循环作用下饱水砂浆孔结构的演变规律[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(2): 331–339.
XING Bingyuan, CHENG Pengyu, TANG Jipeng, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2021, 49(2): 331–339.
- [22] WANG R J, HU Z Y, LI Y, et al. Review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the freeze–thaw environment[J]. *Constr Build Mater*, 2022, 321: 126371.
- [23] 尚明刚, 张云升, 何忠茂, 等. 生活垃圾焚烧尾渣-次轻混凝土冻融劣化特性及微观机制[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(9): 5241–5257.
SHANG Minggang, ZHANG Yunsheng, HE Zhongmao, et al. *Acta Mater Compos Sin*, 2023, 40(9): 5241–5257.
- [24] 王月, 安明喆, 余自若, 等. 氯盐侵蚀与冻融循环耦合作用下C50高性能混凝土的耐久性研究[J]. *中国铁道科学*, 2014, 35(3): 41–46.
WANG Yue, AN Mingzhe, YU Ziruo, et al. *China Railw Sci*, 2014, 35(3): 41–46.
- [25] SUZUKI T, OGATA H, TAKADA R, et al. Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze–thawed concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2010, 24(12): 2347–2352.
- [26] TIAN W, HAN N. Evaluation of damage in concrete suffered freeze–thaw cycles by CT technique[J]. *J Adv Concr Technol*, 2016, 14(11): 679–690.
- [27] 党发宁, 雷光宇, 丁卫华, 等. 混凝土静动力破坏过程的CT细观试验研究[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(1): 189–196.
DANG Fanning, LEI Guangyu, DING Weihua, et al. *J Hydroelectr Eng*, 2015, 34(1): 189–196.
- [28] 郭东明, 左建平, 张慧, 等. 高强混凝土裂纹扩展规律的CT观察[J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(10): 1607–1612.
GUO Dongming, ZUO Jianping, ZHANG Hui, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2009, 37(10): 1607–1612.
- [29] GB/T 50082—2009普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [30] 游全伟, 王薇, 南纯, 等. 基于CT图像的混凝土细观模型构建方法研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(9): 3385–3395.
YOU Quanwei, WANG Wei, NAN Chun, et al. *J Railw Sci Eng*, 2023,

- 20(9): 3385–3395.
- [31] 方建银, 党发宁, 李晓荣, 等. 混凝土单轴压缩CT试验过程定量分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(5): 140–146.
FANG Jianyin, DANG Faning, LI Xiaorong, et al. J Hydroelectr Eng, 2015, 34(5): 140–146.
- [32] 吴倩云, 马芹永. 冻融循环作用下BSFC的抗冻性及损伤模型[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1169–1178.
WU Qianyun, MA Qinyong. J Build Mater, 2021, 24(6): 1169–1178.
- [33] 乔雨, 刘泽峰. 盐冻作用下掺粉煤灰混凝土超声波速测理论模型[J]. 水电能源科学, 2019, 37(8): 118–121.
QIAO Yu, LIU Zefeng. Water Resour Power, 2019, 37(8): 118–121.
- [34] 李娜, 赵燕茹. 基于X-ray CT技术研究混凝土内部损伤的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(21): 21169–21177.
LI Na, ZHAO Yanru. Mater Rep, 2021, 35(21): 21169–21177.
- [35] 敖波, 张定华, 赵敬波, 等. CT图像中裂纹缺陷的理论分析[J]. CT理论与应用研究, 2005, 14(4): 10–16.
AO Bo, ZHANG Dinghua, ZHAO Xinbo, et al. Comput Tomogr Theory Appl, 2005, 14(4): 10–16.
- [36] 刘慧, 杨更社, 叶万军, 等. 基于CT图像直方图技术的冻结岩石未冻水含量及损伤特性分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1591–1598.
LIU Hui, YANG Gengshe, YE Wanjun, et al. J Glaciol Geocryol, 2015, 37(6): 1591–1598.
- [37] 高小宇, 孙洋, 吴关良, 等. 基于超声波声学特性的混凝土损伤表征试验研究[J]. 低温建筑技术, 2020, 42(4): 31–34.
GAO Xiaoyu, SUN Yang, WU Guanliang, et al. Low Temp Archit Technol, 2020, 42(4): 31–34.
- [38] 刘光启. 化学化工物性数据手册-无机卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 600–605.
LIU Guangqi. Handbook of physical properties of chemistry and chemical engineering-inorganic volume[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 600–605.
- [39] JIANG Z W, HE B, ZHU X P, et al. State-of-the-art review on properties evolution and deterioration mechanism of concrete at cryogenic temperature[J]. Constr Build Mater, 2020, 257: 119456.

Mesoscopic Characteristics and Damage Evolution of Concrete Under Coupling Freeze–Thaw and Salt Erosion

CHEN Shaojie¹, REN Jianxi¹, LIU Lang², LI Yugen³, REN Xiang¹, FU Qiang⁴

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. School of Architecture Engineering, Yulin University, Yulin 719000, Shaanxi, China; 4. Shanxi Modern Architectural Design and Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710021, China)

Extended Abstract

Introduction Concrete structures serving in cold regions are often affected by freeze–thaw damage, which is the main reason for the loss of durability in cold region concrete. Additionally, cold region concrete is also subject to salt erosion due to factors such as soil salinity and winter salt application. The coupled action of freeze–thaw and salt attack causes more severe damage to the internal structure of concrete materials, greatly impacting their service life. The deterioration of concrete durability under the coupled action of freeze–thaw and salt attack is primarily manifested as degradation of macroscopic properties such as mass, dynamic elastic modulus, and strength, accompanied by changes in the microstructure. The deterioration process is a complex physical-chemical process involving multiple scales. Merely focusing on the evolution of macroscopic properties often hinders a deep understanding of the degradation mechanisms. Therefore, it is of great significance to clarify the evolution process of microscopic features of concrete under the coupled action of freeze–thaw and salt attack, quantitatively characterize the damage evolution laws from the perspective of pore structure, spalling depth, and compactness, in order to gain a profound understanding of the coupling mechanism and degradation mechanisms of both phenomena.

Methods Concrete specimens were prepared using volume-stable P·O 42.5 ordinary Portland cement, river sand with a fineness modulus of 2.5, and coarse aggregates ranging from 5 mm to 10 mm. The dimensions of the concrete specimens were 100 mm × 100 mm × 100 mm. NaCl solutions with four different concentrations, namely 0%, 3.5%, 5.0%, and 8.0%, were used as the corrosive medium in the freeze–thaw process. A freeze–thaw cycling tests according to the fast freezing method specified in GB/T50082—2009.

Concrete specimens were scanned using a LightSpeed 64-layer helical CT scanner with a resolution of 512×512 pixels and an X-ray tube voltage of 120 kV. To prevent water evaporation and loss of moisture during CT scanning, the specimens were wrapped in plastic film. After obtaining the CT data, three-dimensional reconstruction analysis was performed to investigate microstructural parameters such as delamination depth, volumetric loss rate, pore structure, and CT value.

Results and discussion The depth and volume of concrete spalling under the coupling effect of freeze–thaw and salt erosion gradually increase with the increase of freeze–thaw cycles, and the damage is mainly manifested as surface spalling. The degree of spalling in specimens with different concentrations of chloride salt solution is significantly different, increasing first and then decreasing with the increase of chloride salt concentration, and the spalling depth is the largest when the chloride salt concentration is 3.5%. The volume loss rate of concrete gradually increases with the increase of freeze–thaw cycles, and first increases and then

decreases with the increase of chloride salt concentration. Among the four concentrations used in this experiment, the volume loss rate is the highest at a chloride salt concentration of 3.5%, followed by 5%, 8%, and 0%. The ultrasonic wave amplitude of concrete gradually decreases with the increase of freeze–thaw cycles, and there is a good exponential relationship between the two. The mass loss rate of concrete gradually increases with the increase of freeze–thaw cycles, and first increases and then decreases with the increase of concentration.

The coupling effect of freeze–thaw and salt erosion leads to dynamic changes in the pore structure of concrete, mainly occurring on the outer side of the specimens. With the increase of freeze–thaw cycles, the overall porosity shows a fluctuating increasing trend. With the aggravation of freeze–thaw damage, some closed pores gradually transform into open pores and then disappear with the peeling off of mortar. The damage evolution model based on the relative CT value definition has a good linear relationship with the damage characterization of amplitude and mass, and has a higher agreement with the mass loss rate. The damage degree of concrete gradually increases with the increase of freeze–thaw cycles, and first increases and then decreases with the increase of chloride salt concentration. A certain range of chloride salt concentration can accelerate the freeze–thaw damage of concrete, but when it exceeds this range, the development of damage is slowed down, and the concrete freeze–thaw damage degree reaches the maximum value at a chloride salt concentration of 3.5%.

Conclusions Chloride salt has two effects on the freeze–thaw damage of concrete. On one hand, chloride salt increases the concentration difference between the inside and outside of the concrete pores during the freeze–thaw process, increases the liquid absorption rate of the specimen, and generates more pore ice during freezing, which accelerates the damage of concrete within a certain concentration range. On the other hand, the freezing point of chloride salt solution is lower than that of pure water. High concentration chloride salt solution has a slower freezing rate during the cooling process and a faster melting rate during the warming process. Compared with low concentration solution, the specimen has a shorter freezing time, which reduces the extent of concrete damage. Based on the analysis of indicators such as peeling depth, volume loss rate, amplitude, and mass loss rate in this study, it's found that a certain range of chloride salt concentration can accelerate the freeze–thaw damage of concrete, but the development rate of damage slows down when the range is exceeded. Among the four chloride salt concentrations used in this experiment, the concrete damage reaches the maximum value when the concentration is 3.5%.

Keywords freeze–thaw; salt erosion; concrete; mesoscopic characteristics; scanning technique; damage analysis