第 54 卷第 2 期
2026 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 54，No. 2
February，2026

http://jccsoc.cbpt.cnki.net

**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20250197

# 约束对单面盐冻混凝土内部损伤的影响：微裂纹萌生与扩展

高志浩[1,2,3]，王振地[3]，王 玲[3]

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院，北京 100044；2. 中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司，北京 100011；3. 中国建筑材料科学研究总院有限公司，北京 100024)

**摘 要**：现行单面盐冻试验中，混凝土试件处于自由形变状态，这与混凝土的实际服役状态不符，因此混凝土抗冻性研究有必要考虑实际服役中的约束作用。本工作研究约束作用对单面盐冻混凝土孔结构损伤及微裂纹萌生与扩展的影响及机理。利用改进数字图像处理方法，实现了水灰比 0.60 的约束态和自由态混凝土在单面盐冻作用下孔结构与微裂纹的单独分析。每 8 次单面盐冻循环测试混凝土的孔结构和微裂纹，计算获得最可几孔径($d_M$)、平均孔径($\bar{d}$)、孔径分布标准偏差($d_\sigma$)、劣化孔数量占比($P_{dam}$)、微裂纹平均长度($L_{mean}$)和微裂纹平均宽度($W_{mean}$)；实时监测 32 次盐冻循环过程中混凝土应变，计算获得残余应变($S_n$)。结果表明约束态混凝土的 $d_M$、$\bar{d}$、$d_\sigma$、$P_{dam}$、$L_{mean}$ 和 $S_n$ 分别比自由态混凝土少 11%、10%、5%、7%、7%、30%；通过计算孔均微裂纹数量和长度发现，与自由态混凝土相比，约束态混凝土内微裂纹更倾向于扩展宽度而非萌生新的微裂纹。灰色关联度显示，约束作用通过限制盐冻混凝土的孔径扩张，抑制微裂纹萌生，从而减少了盐冻作用诱导的残余应变。

**关键词**：约束态混凝土；单面盐冻；内部损伤；孔结构；微裂纹
**中图分类号**：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2026)02–0768–13
**网络出版时间**：2026–01–14

冻融循环作用是寒冷地区混凝土面临的主要威胁之一，诱导混凝土产生表面剥落和内部损伤两种破坏形式[1]，前者表现为水泥砂浆从混凝土表面剥落并暴露粗骨料，主要由除冰盐和冻融循环共同诱导；后者则表现为混凝土内部微结构劣化，如孔径扩张或萌生微裂纹，主要由混凝土内部水分迁移和相变诱导。表面剥落会破坏混凝土完整性，加速有害介质(如氯离子、$CO_2$ 等)向混凝土内部侵蚀[2, 3]。内部损伤会直接降低混凝土的强度和刚度[4–6]，严重时将降低结构承载力，产生安全隐患。研究冻融作用下混凝土内部损伤行为并阐明损伤机理，有利于指导高原和寒冷地区高抗冻混凝土材料设计，保障结构安全服役。

冻融循环作用下，混凝土水分迁移和相变将诱导基体产生变形，也是表面剥落和内部损伤的起源[7, 8]，当氯盐存在时，会进一步加速混凝土的劣化进程。Jiang 等[9]通过数值分析证明了冻融循环对氯离子传输有显著加速作用，且这种加速作用受到裂缝宽度的显著影响[10]，由此阐明了氯盐–冻融耦合作用下混凝土损伤机理。在试验研究方面，现有研究大多遵循标准化方法[11–15]开展，混凝土试件在冻融作用下自由变形，这与服役状态的混凝土有所不同。一方面，混凝土构件可能承受外加荷载与冻融循环的耦合作用，如弯拉应力–冻融循环耦合作用，加速了混凝土劣化进程，研究成果为多数寒冷地区高抗冻混凝土设计提供了指导[16–18]。另一方面，混凝土试件仅相当于混凝土构件中的一个单元[19]，冻融作用下，所有混凝土单元均产生形变，限制了相邻混凝土单元的自由变形。Setzer[20]和徐亚丁等[19, 21]均认为，相邻混凝土单元间互相限制作用是一种约束作用，导致受冻混凝土的变形特征既不符合标准化方法中试件的自由变形[22]，也不符合荷载–冻融耦合作用下试件的变形[23, 24]，这是实际服役的混凝土劣化进程与试验室研究结果不符的重要原因。

收稿日期：2025–03–24。　修订日期：2025–04–17。
基金项目：“十四五”国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFB-3708700)。
第一作者：高志浩(1992—)，男，博士。
通信作者：王振地(1984—)，男，教授级高级工程师。

**Received date:** 2025–03–24.　**Revised date:** 2025–04–17.
**First author:** GAO Zhihao (1992–), male, Ph.D.
**E-mail:** zhihao369@foxmail.com
**Correspondent author:** WANG Zhendi (1984–), male, Professor.
**E-mail:** wzhendi@163.com

为了研究约束作用对混凝土冻融损伤行为的影响，Setzer[20]和徐亚丁等[25]相继开发了约束装置限制混凝土在冻融循环中的变形。徐亚丁[21]在 Capillary suction, internal damage and freeze-thaw test (CIF)[15]方法的基础上，研究了约束作用对混凝土单面盐冻损伤行为的影响。针对不同水灰比混凝土的研究表明，标准化混凝土抗冻性试验由于未考虑约束作用，低估了混凝土表面损伤，但高估了内部损伤；水灰比越小，约束态混凝土盐冻表面和内部损伤均减少[21, 26]。在表面损伤方面，约束作用加剧了混凝土与其表面冰层变形的不适配性，与自由态混凝土相比，冰层中更容易积累拉应力，诱导冰层开裂，进而破坏混凝土表面，加剧表面剥落[27]。在内部损伤方面，本课题组前期研究[28]发现约束作用能够弱化降温过程中混凝土内部的水分迁移，这是约束作用减轻盐冻混凝土内部损伤的原因之一。然而，冻融作用下，约束作用对混凝土孔结构劣化及微裂纹萌生与扩展的影响尚未完全明确。

直接或间接表征盐冻混凝土内部损伤，是研究混凝土冻融损伤机理的重要途径。间接表征方面，应变测试被认为是表征混凝土内部损伤的重要方法[18, 29]。经典理论认为混凝土内部水分结冰会挤压孔壁，诱导孔结构劣化并萌生由孔壁向基体扩展的微裂纹[30]，宏观表现为混凝土基体的受冻变形无法完全恢复，产生残余应变。直接表征方面，常用方法是利用数字图像处理(DIP)[30, 31]、计算机断层扫描(X-CT)[32–34]、压汞法(MIP)或低场核磁共振(NMR)[35]等技术研究冻融作用诱导的混凝土微结构劣化。与 X-CT、MIP、NMR 等方法相比，DIP 方法具有制样方便、样品尺寸不受限制的优势[30]。已有研究证明了 DIP 对于孔径的识别范围是几微米至 1000 μm，恰好是这类孔对于混凝土的抗冻性影响较大[36–40]。此外，近年来 DIP 方法也与形态学图像处理技术[41–43]相结合，改进了传统 DIP 方法，形成了将数字图像中的孔和微裂纹分割—提取—分别定量分析的方法[40]，解决了传统方法依赖“形状因子”识别孔和微裂纹的局限性[30, 43, 44]，不仅提高孔和微裂纹的识别精度至 10 μm，还与体视学和统计学结合[31, 45]，利用二维平面结构特征实现了三维立体结构劣化分析。因此，利用应变测试与 DIP 方法结合的手段，有潜力阐明约束作用对混凝土孔结构劣化、微裂纹萌生与扩展的影响，进一步解析约束作用对盐冻混凝土内部损伤的影响机理。

综上所述，约束态混凝土更加符合混凝土的实际服役状态，阐明约束作用对盐冻混凝土内部损伤的影响及机理，有助于为寒冷地区混凝土抗冻性提升提供新的视角，但目前约束作用对混凝土孔结构劣化及微裂纹萌生与扩展的影响亟待阐明。本工作利用文献[46]中研发的约束装置以及改进的 DIP 方法[40]，分别以约束态及自由态混凝土为研究对象，单面盐冻循环后，统计孔结构和微裂纹参数，计算残余应变，对比分析两种混凝土在孔结构劣化和微裂纹萌生方面的差异，阐明约束作用对混凝土孔结构劣化、微裂纹萌生与扩展的影响及原因，研究成果预计可指导寒冷地区高抗冻混凝土配合比设计，保障混凝土材料长寿命服役。

## 1　原材料及混凝土配合比

使用 P. I 42.5 水泥、细度模数 2.68 的天然河砂、连续级配碎石(由 5~10、10~20 mm 连续级配碎石按质量比 4 ： 6 均匀混合而成)制备混凝土，水灰比为 0.60。水泥的化学成分和物理性能分别如表 1、表 2 所示，混凝土配合比和物理性能分别见表 3、表 4。硬化混凝土 28 d 龄期的立方体抗压强度和抗折强度按照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》[47]测试；新拌混凝土坍落度及含气量按照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》[48]测试。

**表 1　水泥的成分**

**Table 1　Composition of cement**　　*w*/%

| $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $SO_3$ | $Na_2O_{eq.}$ | Loss | f – CaO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 25.2 | 6.37 | 4.18 | 54.88 | 2.63 | 2.67 | 0.55 | 2.19 | 0.78 |

*w* is mass fraction; eq. is equivalent; Loss is the loss on ignition.

**表 2　水泥物理性能**

**Table 2　Physical properties of cement**

| Specific surface/ ($m^2 \cdot kg^{-1}$) | Sieve residue on 0.08 mm/% | Water demand/% | Setting time/min | | Flexural strength/MPa | | Compressive strength/MPa | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Initial | Final | 3 d | 28 d | 3 d | 28 d |
| 343 | 0.76 | 22 | 169 | 251 | 4.2 | 7.3 | 24.4 | 53.9 |

表 3 混凝土的配合比

Table 3 Mix proportions of concrete

| Cement/(kg·m$^{-3}$) | Water/(kg·m$^{-3}$) | Water-cement ratio (w/c) | Fine aggregate/(kg·m$^{-3}$) | Coarse aggregate/(kg·m$^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|
| 360 | 216 | 0.60 | 810 | 1045 |

表 4 混凝土物理性能

Table 4 Physical properties of concrete

| Compressive strength/MPa | Flexural tensile strength/MPa | Slump/mm | Air content/% |
|---|---|---|---|
| 28.3 | 3.6 | 120 | 1.4 |

## 2 试件制备及冻融试验

### 2.1 混凝土试件制备

本工作共成型混凝土试件 6 组，每组试件中均包含 4 个约束态混凝土试件(R)和 4 个自由态混凝土试件(U)，其中 1 组用于连续监测盐冻循环过程中混凝土的应变演化，另外 5 组用于盐冻试验前和第 8、16、24、32 次冻融循环后的 DIP 分析。

2.1.1 约束态及自由态混凝土试模 采用文献[27–28]中描述的约束装置成型约束态混凝土试件，组成和尺寸见图 1。

图 1a 中的约束装置由约束环、约束锚栓、反力环、法兰和若干螺栓、螺母组成，全部构件均使用 304 不锈钢材质制造，其中：

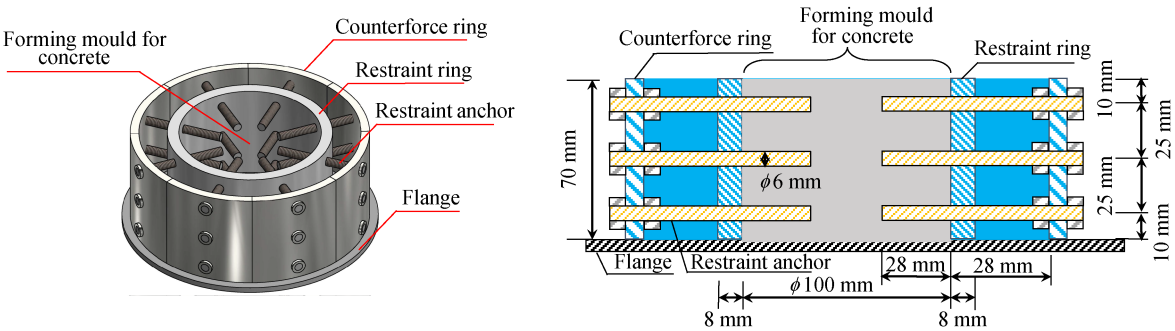



图 1 约束装置示意图[28]

Fig. 1 Sketch of restraint device[28]

1) 约束环是内径 100 mm，厚 8 mm 的钢环，用于成型混凝土的试模；2) 约束锚栓是直径 6 mm 的丝杆，分 3 层共 24 根均匀布置在约束环上，且与约束环之间无刚性连接，约束锚栓一端被螺母固定在反力环上，另一端埋入混凝土中(28 mm)；3) 反力环是厚度 4 mm 的钢环，由 8 片钢弧板经螺栓连接组成，用于固定约束锚栓；4) 法兰是直径 180 mm、厚度 4 mm 且表面光滑的圆形钢板，成型混凝土时，利用螺栓连接法兰与约束环，二者共同构成混凝土试模；混凝土硬化后，拆除法兰，暴露的试件表面即为单面盐冻试验的测试面。

前期已对约束环厚度和约束锚栓直径、埋入深度对混凝土盐冻行为的影响进行过系统研究[26]，证明了当混凝土经历冻融循环时，约束环限制混凝土的膨胀变形，通过约束环厚度变化可改变其对混凝土的膨胀约束应力，当约束环厚度由 1 mm 增加至 4、8 mm 时，膨胀约束应力分别增大 280%和 410%。约束锚栓限制混凝土的收缩变形，可通过改变约束锚栓埋入混凝土的长度改变收缩约束应力大小，当 $\phi$6 mm 约束锚栓埋入混凝土内的长度由 28 mm 增加至 33 mm 时，收缩约束应力增大 26%。本工作采用 8 mm 厚约束环与埋入混凝土中长度为 28 mm 的 $\varphi$6 mm 约束锚栓组合(图 1b)，该约束体系可在 32 次盐冻循环中保持稳定的膨胀和收缩约束状态、约束态和自由态混凝土的盐冻损伤程度呈现出显著差异，适用于约束下单面盐冻混凝土内部损伤的研究。

采用内径 100 mm、高 70 mm 且内表面光滑的塑料试模成型自由态混凝土，如图 2 所示。

2.1.2 试件成型、养护及预饱和 混凝土的成型、养护和预饱和操作均按照 CIF 试验开展(与 GB/T 50082—2024《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中盐冻法操作一致)。

将新拌混凝土分别浇筑在无脱模剂的约束环和塑料试模中，抹平后在空气中养护(24±2) h，拆除法兰和塑料模具，分别获得约束态和自由态混凝土(试件实物如图 3 所示)。2 种混凝土因拆模暴露的与抹面相对的面即为盐冻测试面。

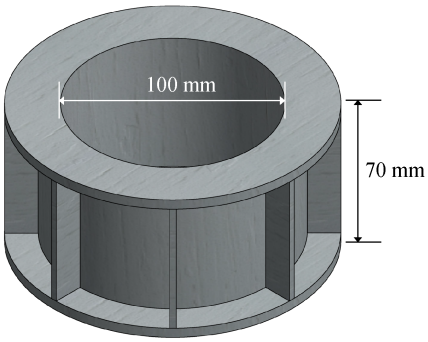



图 2　自由态混凝土试模示意图
Fig. 2　Sketch of the unrestrained concrete mould




(a) Restrained concrete specimen　(b) Unrestrained concrete specimen

图 3　约束态与自由态混凝土试件
Fig. 3　Specimens of restrained concrete and unrestrained concrete

将获得的 2 种混凝土试件在水中[(20±2) ℃]继续养护至 7 d 龄期，再移入(20±2) ℃、相对湿度 65%±5%的试验室中干燥至 28 d 龄期。在试件干燥至 28 d 龄期的前 3 d，利用保温棉密封试件除抹面和测试面外的所有侧面。

盐冻试验前，试件需进行 7 d 预饱和。将试件测试面向下放置在单面盐冻试验机的试件盒中，注入 3% (质量分数) NaCl 溶液，溶液温度(20±2) ℃，液面高出试件测试面深度(10±1) mm。预饱和完成后即可开始单面盐冻试验。

## 2.2　单面盐冻试验

2.2.1　单面盐冻试验设备　　利用单面盐冻试验机(德国史莱宾格公司生产)开展冻融循环试验，使用的盐溶液为 3% NaCl 溶液，温度制度遵循 CIF 试验(与 GB/T 50082—2024《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中盐冻法一致)，冻融循环次数设定为 32 次。

2.2.2　盐冻混凝土应变监测　　将电阻应变片(BFH120-50AA)粘贴在打磨过的聚氯乙烯软玻璃(75.0 mm×12.0 mm×1.5 mm)上，表面使用卡夫特 K-704 有机硅密封胶覆盖做防水处理，制备获得应变计，用于监测混凝土试件在冻融循环中的应变[49]。

混凝土试件成型时预埋应变计，位置如图 4 所示。盐冻试验开始时将应变计导线接入 TST 3822EN 应变记录仪中，以每分钟 1 次的频率记录混凝土应变值，按照式(1)计算混凝土残余应变。

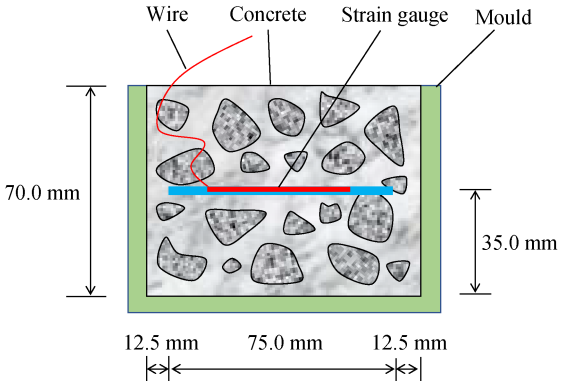



图 4　应变计在混凝土中埋置的位置
Fig. 4　Position of the strain sensor in the specimen

$$S_n=\sum_{K=1}^{n}\left(S_K-S_{K-1}\right) \tag{1}$$

式中：$S_n$ 为 $n$ 次冻融循环后混凝土试件的残余应变，微应变；$S_K$ 为第 $K$ 次冻融循环开始时混凝土试件的应变，微应变；$S_{K-1}$ 为第 $K$–1 次冻融循环开始时混凝土试件的应变，微应变。

## 2.3　盐冻混凝土孔结构及微裂纹参数测试

约束态和自由态混凝土在盐冻试验前及每 8 次冻融循环后，取样制备用于 DIP 分析的样品，再利用文献[40]中提出的改进 DIP 方法分析孔结构及微裂纹参数。

2.3.1　样品制备　　用于改进 DIP 方法分析的样品制备步骤如下：

1) 利用取芯机钻取 $\phi$70 mm×70 mm 的混凝土芯样。

2) 以混凝土测试面为基准，切割芯样获得厚度 15 mm 的混凝土切片。

3) 依次利用 50 目和 150 目碳化硅磨片粗磨切片剖面以快速找平，再依次利用 500 目和 1000 目碳化硅磨片进一步精磨切片剖面以修复瑕疵，最后依次利用 3000 目和 5000 目碳化硅磨片对切片剖面抛光，再将切片放入超声清洗槽中清洗 30 min，去除打磨和抛光产生的浮尘，充分暴露孔和微裂纹，为后续荧光树脂浸渍作准备。

4) 将切片放置在干燥箱(40 ℃)中 1 d 以去除表面水分，在侧面粘贴透明胶带，确保胶带至少高出切片剖面 10 mm。

5) 荧光树脂是利用粒径 3~5 μm 的橙色荧光粉和黏度 650 mPa·s 的环氧树脂胶以 1∶10 质量比均匀混合获得，将其倾倒在剖面上，保证深度不小于 5 mm。

6) 将覆盖有荧光树脂的混凝土切片放置在真空釜(压强 1 kPa)中固化 24 h。

7) 利用平刀片切除多余荧光树脂，再次利用 5000 目碳化硅磨片对切片剖面抛光，确保清除多余的荧光树脂，获得用于 DIP 方法分析的混凝土样品。

2.3.2 数字图像获取 利用 Charge Coupled Device (CCD)相机组拍摄混凝土切片样品剖面，切片剖面上暴露的孔和微裂纹被荧光树脂填充，在数字图像中显示为橙色亮斑。数字图像中的像素均为边长 10.6 μm 的正方形像素，为规避图像边缘像素畸变对分析的影响，选择样品剖面中心 45 mm × 45 mm 的正方形区域记录数字图像以方便分析，获得的数字图像如图 5 所示。

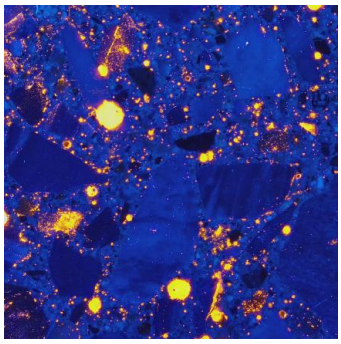


图 5 样品数字图像

Fig. 5 Digital image for concrete sample

2.3.3 数字图像二值化 数字图像的进一步处理依托 Fiji (ImageJ, with “Batteries Included”)软件开展。数字图像中的孔/微裂纹与密实基体具有显著的亮度差异，利用 InterModes[50]阈值法对数字图像作二值化操作，获得包含白色 Region of Interest 区域(ROI)代表孔与微裂纹、黑色背景代表密实基体的二值化图像，如图 6 所示，记录此二值化图像代号为 CA。

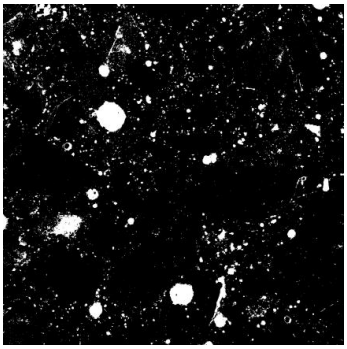


图 6 混凝土样品的二值化图像

Fig. 6 Binary digital image of concrete sample

2.3.4 孔和微裂纹的分割及单独提取 大量研究[30, 43, 51]证明，混凝土的孔在二维平面上的投影形状为圆形或趋近于圆形。冻融循环作用下，由于冰晶对孔壁的挤压作用诱导孔径扩张或孔壁开裂[8, 52]，破坏了孔原有形状，同时萌生自孔壁向基体扩展的微裂纹。此时无论孔或微裂纹，其在二维平面上的投影形状不再表现为圆形，且出现孔与微裂纹相连的组合体 ROI，显著干扰了对 ROI 的统计和分析。改进 DIP 方法按照“圆孔提取–孔与微裂纹分割–微裂纹骨架化”实现对二值化图像中的孔和微裂纹的单独提取，实现二者的单独统计分析。

1) 圆形及近似圆形的孔提取

数字图像中像素均为正方形像素，至少需要 1 个像素形成 ROI，此时获得代表圆孔 ROI 的圆形度下限；当孔为标准圆形时，获得代表圆孔 ROI 的圆形度上限，具体判定如式(2)和式(3)所示。

$$R=\frac{4\pi A}{L^2} \tag{2}$$

$$R_1 \leqslant R \leqslant R_2 \tag{3}$$

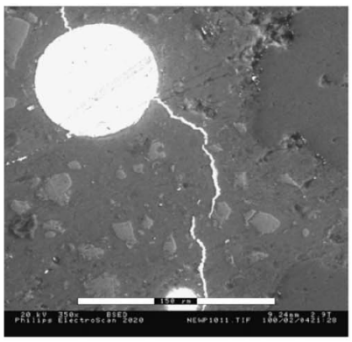
式中：$R$ 为 ROI 的圆形度；$A$ 为 ROI 的面积；$L$ 为 ROI 的周长；$R_1$ 为 ROI 的圆形度下限，0.785；$R_2$ 为 ROI 的圆形度上限，1.000。

将二值化图像中所有满足式(3)的 ROI 提取至一张新的二值化图像中，记录此二值化图像代号为 CP-1，其中所有 ROI 均为孔。

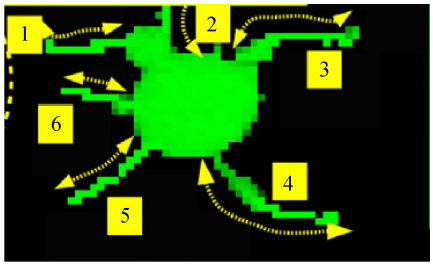
2) 非圆形孔与微裂纹的分割

为实现孔与微裂纹单独分析的目标，需要对原始二值化图像 CA 作进一步处理。传统方法利用“形状因子”区分孔与微裂纹时，针对独立的微裂纹识别效果较好[30, 43, 44]，局限性体现在难以识别孔与微裂纹连接后形成的组合体 ROI[30]，如图 7 所示，这会造成该部分微裂纹的识别受限。

改进 DIP 方法旨在将图 7 中的孔与微裂纹分割并单独分析。先将二值化图像 CA 与 CP-1 做逻辑减法操作，记录获得的新的二值化图像，代号为 CA-1，此图像中的 ROI 包括非圆形的孔、微裂纹以及孔和微裂纹组合体。对 CA-1 中所有 ROI 执行 3 次迭代的开操作，即所有 ROI 边缘先向内收缩 3 层像素，再向外扩展 3 层像素。此时不改变原有 ROI 的形状和大小，但去除了宽度小于 6 个像素(63.6 μm)的 ROI，也去除了 ROI 边缘上宽度小于 6 个像素的凸起(图 8)，因此所获得的二值化图像中的 ROI 均为孔，既无独立的微裂纹，也无与孔与微裂纹组合体，记录获得的二值化图像代号为 CP-2。



(a) ROI of pore attached with crack[43]

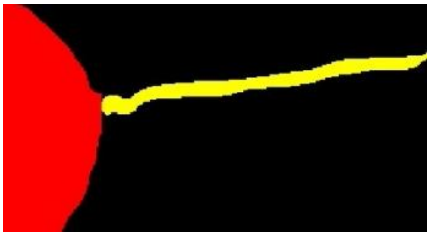



(b) ROI of pore attached with cracks[30]

1–6 are the counts of microcracks.

图 7　混凝土中的孔和微裂纹相连的 ROI

Fig. 7　ROI of pore attached with cracks inside concrete



(a) Pore(the red ROI) attached with crack(the yellow ROI)



(b) Pore without crack

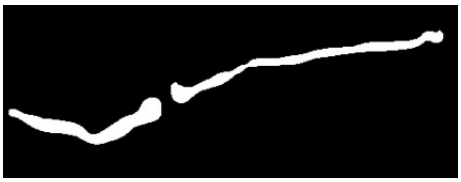
Note: Fig. 8a does not indicate a clear boundary between pores and microcracks in concrete; The color difference only represents the parts that can be removed after 3 iterations of open operation.

图 8　组合体 ROI 中微裂纹去除[40]

Fig. 8　Removal of crack in ROI of composite[40]

将二值化图像 CP-1 与 CP-2 做逻辑加法运算，获得二值化图像记为 CP-3，此二值化图像中 ROI 均为孔，且包含初始二值化图像 CA 中的全部孔。利用初始二值化图像 CA 与二值化图像 CP-3 做逻辑减法运算，获得二值化图像记为 CC-1，此二值化图像中的 ROI 全部为微裂纹。至此，实现了分割初始二值化图像 CA 中的孔和微裂纹，并将二者分别保存在不同二值化图像中的目的，从而突破了传统方法仅依靠 ROI 长宽比/长径比(形状因子)识别孔与微裂纹的局限性。

2.3.5　微裂纹的骨架化　　将二值化图像 CC-1 中所有 ROI 骨架化[51, 53]，即将所有 ROI 从边缘开始逐层收缩像素点，直至获得仅有 1 个像素宽的 ROI 骨架，如图 9 所示。此操作不改变原有 ROI 数量，仅用于方便计算微裂纹长度，获得的二值化图像记为 CC-2。



(a) ROI in the CC-1



(b) Skeletonized ROI in the CC-2

图 9　ROI 的骨架化[40]

Fig. 9　Skeletonization of ROI[40]

2.3.6　孔及微裂纹参数

1) 孔参数

统计二值化图像 CP-3 中 ROI，对每个孔编号为 $i$，孔的总个数记为 $k$，统计获得孔参数包括最可几孔径、平均孔径和孔径分布标准偏差，统计和计算方法如式(4)~式(6)所示。统计二值化图像 CP-1 中 ROI，记录圆孔的总个数为 $k_{\mathrm{cr}}$，可计算获得劣化孔数量占比，如式(7)所示。

$$d_{\mathrm{M}}=\left\{d_{\mathrm{mode}}\middle|\ d_1,d_2,d_3,\cdots d_i,\cdots d_k\right\} \tag{4}$$

$$\bar{d}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}d_i \tag{5}$$

$$d_\sigma=\sqrt{\frac{1}{k-1}\sum_{i=1}^{k}\left(d_i-\bar{d}\right)^2} \tag{6}$$

$$P_{\mathrm{dam}}=\frac{k-k_{\mathrm{cr}}}{k}\times 100\% \tag{7}$$

式中：$d_i$、$d_k$ 分别为第 $i$ 个和第 $k$ 个孔的孔径，μm；$d_{\mathrm{M}}$ 为最可几孔径，μm；$d_{\mathrm{mode}}$ 为占比最高的孔径，μm；$\bar{d}$ 为平均孔径，μm；$d_\sigma$ 为孔径分布标准偏差，μm；$P_{\mathrm{dam}}$ 为劣化孔数量占比。

2) 微裂纹参数

统计二值化图像 CC-1 和 CC-2 中所有 ROI，对

每个微裂纹编号为 $m$，微裂纹的总个数记为 $j$，统计获得微裂纹参数包括微裂纹平均长度和平均宽度，统计和计算方法如式(8)和式(9)所示。同时，结合孔的总个数记 $k$，可进一步获得孔均微裂纹长度和数量，这对于解析约束作用对微裂纹萌生与扩展的影响有重要意义，统计和计算方法如式(10)和式(11)所示。

$$L_{\text{mean}} = \frac{1}{j}\sum_{m=1}^{j} L_m \tag{8}$$

$$W_{\text{mean}} = \frac{S_{\text{C}}}{\sum_{m=1}^{j} L_m} \tag{9}$$

$$L_{\text{cp}} = \frac{1}{i}\sum_{m=1}^{j} L_m \tag{10}$$

$$N_{\text{cp}} = \frac{j}{k} \tag{11}$$

式中：$L_{\text{mean}}$ 为微裂纹的平均长度，μm；$L_m$ 为第 $m$ 个微裂纹的长度，μm；$W_{\text{mean}}$ 为微裂纹的平均宽度，μm；$S_{\text{C}}$ 为微裂纹的总面积，μm$^2$；$L_{\text{cp}}$ 为孔均微裂纹长度，μm；$N_{\text{cp}}$ 为孔均微裂纹数量。

## 3 结果与讨论

### 3.1 约束对盐冻混凝土孔结构劣化的影响

根据改进 DIP 方法，约束态和自由态混凝土的孔参数随冻融循环的演化如图 10 所示。

如图 10a~图 10d 所示，约束态和自由态混凝土的 $d_{\text{M}}$、$\bar{d}$、$d_{\sigma}$、$P_{\text{dam}}$ 均随冻融循环次数增加而增大，表明冻融作用诱导混凝土孔径扩张，在多数研究中都有过类似报道[21, 26, 30, 36]。混凝土在冻融作用下的孔结构损伤可以被经典理论解释：降温过程中，混凝土内部孔隙水分由小孔向大孔迁移，进一步降温过程中较大孔内水分先结冰，诱导周围未结冰水分向冰晶迁移，持续生长的冰晶产生结晶压挤压孔壁，诱导孔径扩张或自孔壁萌生微裂纹并向基体扩展[54, 55]。当冻融循环诱导混凝土孔径扩张时，最直接体现为混凝土内最可几孔径增大、平均孔径显著增加，如图 10a 和图 10b 所示。同时，混凝土孔径扩张也会增大混凝土内孔径的离散程度，这在以孔径分形维数表征混凝土受冻孔结构损伤的研究中较为常见[56, 57]，与本工作中基于孔径分布标准偏差的试

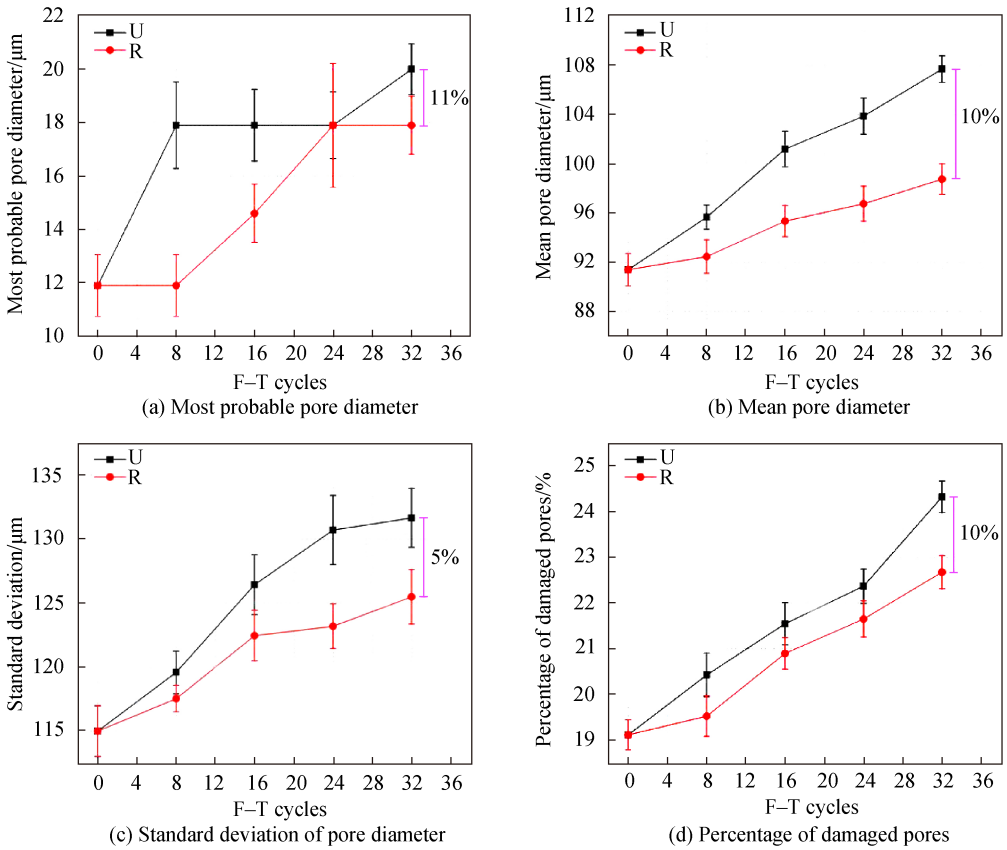



图 10 混凝土孔参数随冻融循环的演化

Fig. 10 Evolution of pore parameters of concrete subjected to freezing and thawing (F–T) cycles

验结果一致(图 10c)。此外，2 种混凝土 $P_{dam}$ 随冻融循环次数增加同样可以被经典理论解释[8]，即盐冻混凝土从孔壁萌生微裂纹并向基体内扩展，致使越来越多的孔发生劣化。

当 32 次盐冻循环结束时，约束态混凝土的 $d_M$、$\overline{d}$、$d_\sigma$ 和 $P_{dam}$ 分别比自由态混凝土小 11%、10%、5%和 7%，这表明约束作用限制了孔径扩张，即同时限制了最可几孔径和平均孔径增大，减少了孔径分布的标准偏差，从而减少孔结构劣化，这得益于约束作用对混凝土内部水分迁移的弱化。降温过程中，与自由态混凝土相比，约束作用通过限制混凝土收缩变形弱化了混凝土内部水分迁移，从而减少了由水分迁移诱导的孔径收缩，也降低了较大孔的饱和度[28]。当温度降低至孔隙水分冰点时，约束态混凝土内较弱的水分迁移及大孔较低的饱和度难以诱导产生足量的冰晶，从而减少了结晶压，因此减少了约束态混凝土的孔径扩张和微裂纹萌生，减轻了内部损伤。

### 3.2　约束对盐冻混凝土微裂纹萌生与扩展的影响

约束态和自由态混凝土的微裂纹参数随冻融循环的演化如图 11 所示。

如图 11a 和图 11b 所示，混凝土在冻融试验开始前已经存在微裂纹，平均长度约 45 μm，平均宽度约 48 μm，二者均小于前文中 6 个像素尺寸(3 次迭代的开操作，63.6 μm)，表明将数字图像中孔和微裂纹分割的处理方法是合理的。图 11a 表明，约束态和自由态混凝土的 $L_{mean}$ 随冻融循环增加而增加。第 8 次冻融循环结束时，2 种混凝土的 $L_{mean}$ 并无显著差异；但此后自由态混凝土的 $L_{mean}$ 快速增加，当 32 次冻融循环结束时，约束态混凝土的 $L_{mean}$ 比自由态混凝土少 7%。图 11b 表明，随冻融循环次数增加，自由态混凝土的 $W_{mean}$ 下降，但约束态混凝土的 $W_{mean}$ 持续增加。当 32 次冻融循环结束时，约束态和自由态混凝土的 $W_{mean}$ 比初始状态分别增加和减少了 5%。

图 11c 和图 11d 显示，约束态和自由态混凝土的 $L_{cp}$ 和 $N_{cp}$ 均随冻融循环增加，且 2 种混凝土的 $L_{cp}$ 和 $N_{cp}$ 均在 16 次冻融循环后才显示出较明显差异。当 32 次冻融循环结束时，约束态混凝土的 $L_{cp}$ 和 $N_{cp}$ 分别比自由态混凝土少 6%和 7%。结果表明，冻融作用下自由态混凝土更倾向于萌生新的微裂纹，主

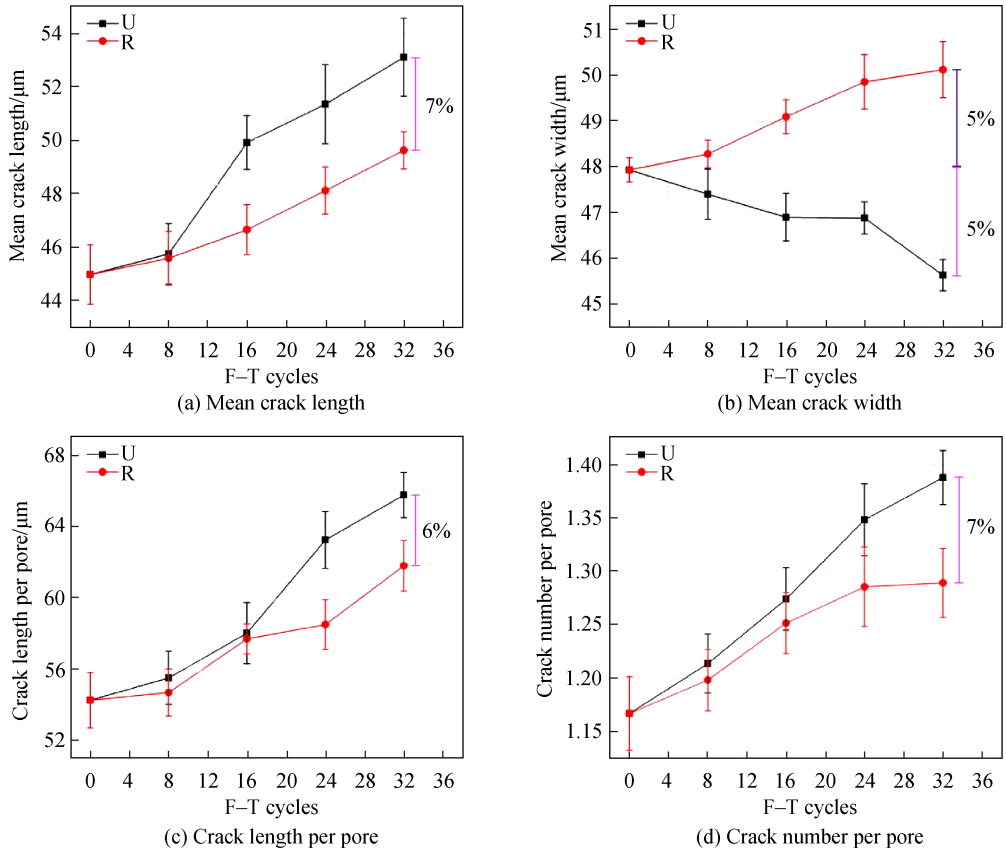



图 11　混凝土微裂纹参数随冻融循环的演化

Fig. 11　Evolution of crack parameters of concrete subjected to freezing and thawing cycles

要依据为 $L_{cp}$ 和 $N_{cp}$ 的显著增加，但萌生的微裂纹宽度较窄，因此微裂纹的 $W_{mean}$ 比初始状态有所减少。然而，约束态混凝土则更倾向于已有微裂纹的宽度扩展，其相比于自由态混凝土较少的 $L_{cp}$ 和 $N_{cp}$ 也说明了这一点，因此冻融循环次数增加时，约束态混凝土的 $L_{mean}$ 和 $W_{mean}$ 演化相反。由此可知，约束作用改变了冻融作用下混凝土内部微裂纹的演化，这在宏观上导致了 2 种混凝土的冻融损伤行为差异。

### 3.3 约束对盐冻混凝土残余应变的影响

图 12 中显示了 2 种混凝土残余应变随冻融循环的演化。

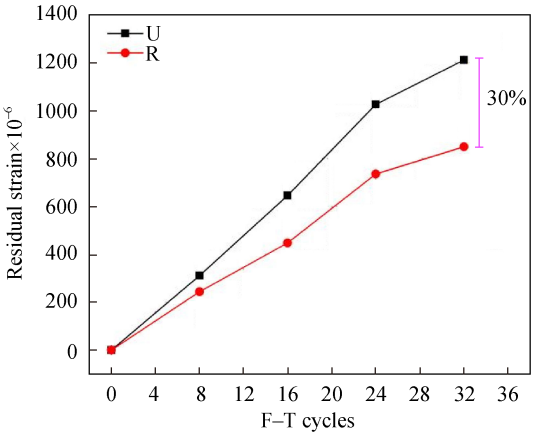



图 12 混凝土残余应变随冻融循环的演化

Fig. 12 Evolution of residual strain of concrete subjected to freezing and thawing cycles

如图 12 所示，随冻融循环次数增加，约束态和自由态混凝土的 $S_n$ 均持续增加，表明冻融作用诱导混凝土产生了无法恢复的变形，这通常被认为与冻融作用诱导的孔径扩张和微裂纹萌生与扩展有关[58]。第 8 次冻融循环结束时，2 种混凝土的残余应变尚无显著差异，表明此时由冻融作用诱导的内部损伤尚不明显，这与图 11a 中 $L_{mean}$ 的演化类似。当 32 次冻融循环结束时，约束态混凝土残余应变比自由态混凝土少 30%，表明约束作用减少了盐冻混凝土内部损伤。然而，约束作用同时改变了冻融作用下混凝土内部微裂纹的演化，这对于残余应变演化的影响尚需要进一步讨论。

### 3.4 约束作用减弱盐冻混凝土内部损伤的原因

已有研究表明[30, 51]，由环境因素(冻融作用等)诱导的混凝土内部微裂纹宽度临界值为 100 μm：当微裂纹宽度小于 100 μm 时，主要引起混凝土残余应变增加、相对动弹性模量损失等；当微裂纹宽度大于 100 μm 时，微裂纹已肉眼可见，此时混凝土密实度显著下降，将影响结构承载力。本工作中相同配合比的约束态和自由态混凝土在冻融作用下的微结构损伤差异并非十分显著，然而二者由冻融作用诱导的残余应变差异较为显著。本工作基于灰色关联度理论[37, 59]，着重讨论约束态和自由态混凝土由冻融作用诱导的微结构劣化($d_M$、$\bar{d}$、$d_\sigma$、$L_{mean}$ 和 $W_{mean}$)与残余应变增加的关联度，进一步分析约束作用减弱盐冻混凝土内部损伤的原因。

对约束态和自由态混凝土，分别以 $d_M$、$\bar{d}$、$d_\sigma$、$L_{mean}$、$W_{mean}$ 作为主序列，记为 $x_m$ ($m=1,2,3,4,5$)；以 $S_n$ 作为参考序列，记为 $y$。利用式(12)和式(13)分别对主序列和参考序列数据做归一化处理，利用式(14)计算主序列与参考序列间的差值。

$$x'_m(n)=\frac{x_m(n)}{\frac{1}{n}\sum x_m(n)} \tag{12}$$

$$y'(n)=\frac{y(n)}{\frac{1}{n}\sum y(n)} \tag{13}$$

$$\Delta_m(n)=\left|y'(n)-x'_m(n)\right| \tag{14}$$

式中：$x'_m(n)$、$y'(n)$ 分别为主序列和参考序列的归一化结果；$m$、$n$ 分别为主序列容量和冻融循环次数；$x_m(n)$、$y(n)$ 分别为主序列和参考序列在 $n$ 次冻融循环后测试值；$\Delta_m(n)$ 为主序列和参考序列在 $n$ 次冻融循环后的差值。

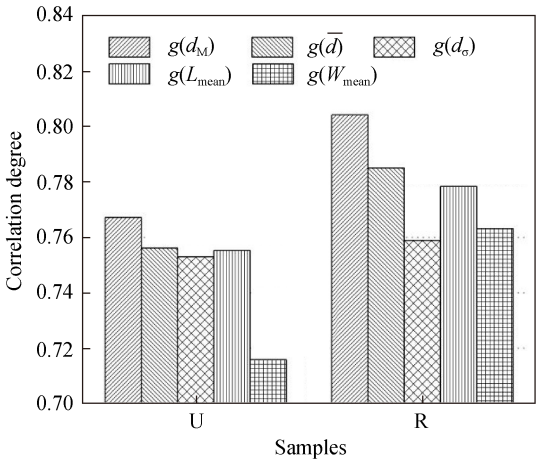
由此，各主序列与参考序列间的关联系数和灰色关联度可依据式(15)和式(16)计算。

$$R_m(n)=\frac{\min\left[\Delta_m(n)\right]+\xi\times\max[\Delta_m(n)]}{\Delta_m(n)+\xi\times\max[\Delta_m(n)]} \tag{15}$$

$$g(x)=\frac{1}{m}\sum_{n=1}^{t}R_m(n) \tag{16}$$

式中：$R_m(n)$ 分别为主序列和参考序列的归一化结果；$g(x)$ 分别为主序列容量和冻融循环次数；$\min[\Delta_t(n)]$ 分别为主序列和参考序列在 $n$ 次冻融循环后测试值；$\max[\Delta_t(n)]$ 主序列和参考序列在 $n$ 次冻融循环后的差值；$\xi$ 分辨系数，取值为 0.50。

计算获得的灰色关联度如图 13 所示。由图 13 可见，无论约束态混凝土或自由态混凝土，其由冻融作用诱导的孔径扩张和微裂纹长度扩展都是残余应变增加的主要因素，且相比于自由态混凝土，约束态混凝土孔径扩张对其残余应变增加的关联度更高。同时，与自由态混凝土相比，约束态混凝土在冻融作用下微裂纹宽度扩展与残余应变




$g(d_M)$ is the grey correlation degree between the most probable pore diameter and residual strain; $g(\bar{d})$ is the grey correlation degree between the mean pore diameter and residual strain; $g(d_\sigma)$ is the grey correlation degree between the standard deviation of pore diameter and residual strain; $g(L_{mean})$ is the grey correlation degree between the mean crack length and residual strain; $g(W_{mean})$ is the grey correlation degree between the mean crack width and residual strain.

图 13　混凝土残余应变与微结构劣化的灰色关联度

Fig. 13　Correlation degree between residual strain of concrete and degradation of micro-structure

的关联更加密切，这恰好从侧面证明了约束态混凝土在冻融作用下更倾向于扩展微裂纹宽度，这与约束作用弱化水分迁移有关。

降温过程中，混凝土内部水分迁移是一个高度耦合的复杂动态过程，既受控于基体变形、孔结构特征、水分结晶压力和微裂纹萌生扩展等多因素的协同作用，同时也会对这些因素产生动态影响。在相同配合比下，约束态与自由态混凝土的初始孔结构并无差异，但约束作用通过限制混凝土降温收缩变形，显著改变了水分迁移行为：有效抑制了水分从小孔向大孔的定向迁移，进而降低大孔饱和度，削减了水分结晶压力。这种压力削减机制缓解了冰晶对孔壁的挤压作用，从源头上减少了孔径扩张与孔壁微裂纹的萌生概率；即便孔壁出现微裂纹，由于孔内水分饱和度较低，冰晶压力难以充分释放，导致微裂纹宽度扩展受限，且新裂纹萌生阻力显著增加，从而有效遏制了损伤的持续扩展。随着冻融循环次数增加，冻融循环对混凝土的“泵吸”作用会增加混凝土饱和度[55]，此时孔内水分结冰仍能产生较大的结晶压破坏孔壁，促使约束态混凝土萌生微裂纹。由此可知，约束作用能够限制盐冻混凝土的孔径扩张，抑制微裂纹萌生，从而降低了盐冻约束态混凝土的内部损伤。

# 4　结论

本工作以相同配合比的约束态和自由态混凝土为研究对象，根据改进的 DIP 方法实现了盐冻混凝土孔结构与微裂纹的单独分析，通过测试 32 次盐冻循环过程中混凝土孔结构、微裂纹和残余应变随冻融循环的演化，在孔径扩张和微裂纹扩张的基础上，结合灰色关联理论分析了约束作用对盐冻混凝土内部损伤的影响及其原因：

1) 约束作用对单面盐冻混凝土的孔径扩张和微裂纹萌生均有显著抑制效果。经 32 次单面盐冻循环后，约束态混凝土的最可几孔径、平均孔径、劣化孔数量占比和微裂纹平均长度分别比自由态混凝土小 11%、10%、7%和 7%。

2) 单面盐冻作用下，约束态混凝土更倾向于通过微裂纹宽度扩展来释放应力，这一特性是约束作用减轻盐冻混凝土内部损伤的关键机制。约束作用通过限制混凝土降温收缩变形，有效削弱了水分从小孔向大孔的迁移趋势，诱导水分结晶压力在既有微裂纹处释放，使得微裂纹仅产生有限宽度扩展，抑制了新微裂纹的萌生。

3) 盐冻混凝土残余应变增加的主要原因是孔径扩张和微裂纹长度增长。约束作用通过抑制单面盐冻混凝土的孔径扩张和微裂纹萌生，显著降低了残余应变。经 32 次单面盐冻循环后，约束态混凝土的残余应变相较于自由态混凝土降低了 30%。

本工作探究了约束态和自由态混凝土孔结构和微裂纹在冻融循环过程中的演化规律。通过精确量化微裂纹长度、宽度、密度等关键参数，深入分析了约束作用对单面盐冻混凝土微裂纹萌生与扩展的影响机制，揭示了约束条件抑制盐冻混凝土孔径扩张及微裂纹萌生的内在原因。此外，微裂纹的扩展特征、曲折程度及连通度等形貌参数，对混凝土内部水分迁移行为存在显著影响。后续研究可通过调整混凝土水灰比，开展约束作用、微裂纹形貌参数与盐冻损伤行为的关联性研究，进一步明晰约束条件下盐冻混凝土微结构劣化机理，为高原和寒冷地区混凝土的长期安全服役提供理论支撑。

**参考文献**:

[1] 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.

[2] VALENZA J J, SCHERER G W. A review of salt scaling: I. Phenomenology[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(7): 1007–1021.

[3] 李林洁, 刘清风. 冻融循环下混凝土内部结冰及氯离子传输规律的数值研究[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2245–2256.
LI Linjie, LIU Qingfeng. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(8): 2245–2256.

[4] SUN M, XIN D B, ZOU C Y. Damage evolution and plasticity development of concrete materials subjected to freeze-thaw during the load process[J]. Mech Mater, 2019, 139: 103192.

[5] LI N, LONG G C, FU Q, et al. Effects of freeze and cyclic flexural load on mechanical evolution of filling layer self-compacting concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 200: 198–208.

[6] 胡哲, 刘清风. 荷载作用下开裂混凝土中多离子传输的数值研究[J]. 材料导报, 2023, 37(9): 137–145.
HU Zhe, LIU Qingfeng. Mater Rep, 2023, 37(9): 137–145.

[7] VALENZA J J, SCHERER G W. A review of salt scaling: II. Mechanisms[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(7): 1022–1034.

[8] SCHERER G W. Freezing gels[J]. J Non Cryst Solids, 1993, 155(1): 1–25.

[9] JIANG W Q, SHEN X H, XIA J, et al. A numerical study on chloride diffusion in freeze-thaw affected concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 179: 553–565.

[10] LI L J, LIU Q F, TANG L P, et al. Chloride penetration in freeze–thaw induced cracking concrete: A numerical study[J]. Constr Build Mater, 2021, 302: 124291.

[11] Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing: ASTM C666/C666M-15[S]. ASTM International, 2015.

[12] Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals: ASTM C672/C672M[S]. ASTM, 2012.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50082—2024 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, 2024.

[14] Testing hardened concrete Part 9: Freeze-thaw resistance with de-icing salts — Scaling: BS PD CEN/TS 12390-9[S]. BSI, 2016.

[15] SETZER M J, HEINE P, KASPAREK S, et al. Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test: Reference method and alternative methods A and B[J]. Mater Struct, 2004, 37(10): 743–753.

[16] 王阵地, 姚燕, 王玲. 冻融循环-氯盐侵蚀-荷载耦合作用下混凝土中钢筋的锈蚀行为[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(6): 1022–1027.
WANG Zhendi, YAO Yan, WANG Ling. J Chin Ceram Soc, 2011, 39(6): 1022–1027.

[17] 余红发, 慕儒, 孙伟, 等. 弯曲荷载、化学腐蚀和碳化作用及其复合对混凝土抗冻性的影响[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(4): 492–499.
YU Hongfa, MU Ru, SUN Wei, et al. J Chin Ceram Soc, 2005, 33(4): 492–499.

[18] ZENG Q, LI L, PANG X Y, et al. Freeze–thaw behavior of air entrained cement paste saturated with 10wt.% NaCl solution[J]. Cold Reg Sci Technol, 2014, 102: 21–31.

[19] 徐亚丁, 王玲, 王振地. 混凝土冻融/盐冻破坏现象、机理和试验方法[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2): 491–496.
XU Yading, WANG Ling, WANG Zhendi. Bull Chin Ceram Soc, 2017, 36(2): 491–496.

[20] Setzer Max J. Frostbelastungsmessung mit Behinderung der Verformungen eines porösen Prüfkörpers[P]. DE Patent, 14166123.1 2014–4–26.

[21] 徐亚丁. 约束状态下混凝土盐冻破坏行为和机理的研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2017.
XU Yading. Behavior and mechanism of damage induced by freeze-thaw cycles with salt solution of restrained concrete [D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2017.

[22] 王阵地, 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.

[23] 余红发, 孙伟, 张云升, 等. 在冻融或腐蚀环境下混凝土使用寿命预测方法I: 损伤演化方程与损伤失效模式[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(增刊 1): 128–135.
YU Hongfa, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. J Chin Ceram Soc, 2008, 36(Suppl 1): 128–135.

[24] 龙广成, 杨振雄, 白朝能, 等. 荷载–冻融耦合作用下充填层自密实混凝土的耐久性及损伤模型[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(7): 855–864.
LONG Guangcheng, YANG Zhenxiong, BAI Chaoneng, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(7): 855–864.

[25] 徐亚丁, 王玲. 混凝土约束装置[P]. CN110455867B. 2017–06–13.

[26] 高志浩. 约束应力调控及其对混凝土单面盐冻行为的影响[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2020.
GAO Zhihao. Control of restraint stress and its effect on behavior of concrete under the attack of single-side freezing and thawing[D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2020.

[27] 高志浩, 王玲, 赵霞. 约束对单面盐冻混凝土表面损伤的影响及机理[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2494–2501.
GAO Zhihao, WANG Ling, ZHAO Xia. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(11): 2494–2501.

[28] 高志浩, 王振地, 王玲. 约束对单面盐冻混凝土内部损伤的影响: 水分迁移[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(11): 3361–3371.
GAO Zhihao, WANG Zhendi, WANG Ling. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(11): 3361–3371.

[29] JIANG Z W, ZHANG C, DENG Z L, et al. Thermal strain of cement-based materials under cryogenic temperatures and its freeze-thaw cycles using fibre Bragg grating sensor[J]. Cryogenics, 2019, 100: 1–10.

[30] WANG Z D, ZENG Q, WANG L, et al. Characterizing frost damages of concrete with flatbed scanner[J]. Constr Build Mater, 2016, 102: 872–883.

[31] 周双喜, 盛伟, 魏星, 等. 基于深度学习的混凝土孔结构图像法快速分析[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5): 653–663.
ZHOU Shuangxi, SHENG Wei, WEI Xing, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(5): 653–663.

[32] LANDIS E N, NAGY E N. Three-dimensional work of fracture for mortar in compression[J]. Eng Fract Mech, 2000, 65(2–3): 223–234.

[33] FAN L F, GAO J W, WU Z J, et al. An investigation of thermal effects on micro-properties of granite by X-ray CT technique[J]. Appl Therm Eng, 2018, 140: 505–519.

[34] AVANTHI ISAKA B L, RANJITH P G, RATHNAWEERA T D, et al. Quantification of thermally-induced microcracks in granite using X-ray CT imaging and analysis[J]. Geothermics, 2019, 81: 152–167.

[35] WANG Y Z, YANG W C, GE Y, et al. Analysis of freeze-thaw damage and pore structure deterioration of mortar by low-field NMR[J]. Constr Build Mater, 2022, 319: 126097.

[36] 韩女. 冻融循环作用下混凝土孔隙结构特征及损伤演化规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
HAN Nv. Investigation of concrete pore structure and damage evolution under freeze-thaw cycles[D]. Xi'an: Changan University, 2018.

[37] 董瑞鑫, 申向东, 薛慧君, 等. 风积沙混凝土的气泡参数对其强度的影响[J]. 材料导报, 2022, 36(12): 105–109.
DONG Ruixin, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Mater Rep, 2022, 36(12): 105–109.

[38] CHOI P, YEON J H, YUN K K. Air-void structure, strength, and permeability of wet-mix shotcrete before and after shotcreting operation: The influences of silica fume and air-entraining agent[J]. Cem Concr Compos, 2016, 70: 69–77.

[39] LAMOND J F, PIELERT J H. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials[M]. Philadelphia: ASTM International100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 2006

[40] 高志浩, 王玲, 王振地, 等. 基于数字图像处理的单面盐冻轻骨料混凝土孔隙和微裂纹定量分析[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(8): 1908–1919.
GAO Zhihao, WANG Ling, WANG Zhendi, et al. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(8): 1908–1919.

[41] DEBNATH B, PRATIM SARKAR P. Quantification of random pore features of porous concrete mixes prepared with brick aggregate: An application of stereology and mathematical morphology[J]. Constr Build Mater, 2021, 294: 123594.

[42] MA K L, HUANG X Y, SHEN J T, et al. The morphological characteristics of brick-concrete recycled coarse aggregate based on the digital image processing technique[J]. J Build Eng, 2021, 44: 103292.

[43] SOROUSHIAN P, ELZAFRANEY M, NOSSONI A. Specimen preparation and image processing and analysis techniques for automated quantification of concrete microcracks and voids[J]. Cem Concr Res, 2003, 33(12): 1949–1962.

[44] AMMOUCHE A, BREYSSE D, HORNAIN H, et al. A new image analysis technique for the quantitative assessment of microcracks in cement-based materials[J]. Cem Concr Res, 2000, 30(1): 25–35.

[45] 陈惠苏, 孙伟, STROEVEN Piet, 等. 计算混凝土中邻近集料表面间距平均值的体视学方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(11): 1511–1514.
CHEN Huisu, SUN Wei, PIET S, et al. J Harbin Inst Technol, 2005, 37(11): 1511–1514.

[46] 高志浩, 王玲. 混凝土约束应力和形变应力测量装置及测量方法[P]. CN115014932B. 2021–07–20.

[47] 中华人民共和国住房和城乡建设部 国家市场监督管理总局. GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[48] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50080—2016 普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

[49] 高志浩. 单面盐冻作用下约束态混凝土冻融损伤的表征及机理[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2023.
GAO Zhihao. Characterization and mechanism of frost damage of restrained concrete under single-side salt freezing and thawing [D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2023.

[50] PREWITT J M S, MENDELSOHN M L. The analysis of cell images[J]. Ann N Y Acad Sci, 1966, 128(3): 1035–1053.

[51] 李曙光, 陈改新, 鲁一晖. 基于微裂纹定量分析的混凝土冻融损伤评价方法[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 207–212.
LI Shuguang, CHEN Gaixin, LU Yihui. J Hydroelectr Eng, 2013, 32(3): 207–212.

[52] SUN Z H, SCHERER G W. Effect of air voids on salt scaling and internal freezing[J]. Cem Concr Res, 2010, 40(2): 260–270.

[53] 李曙光, 陈改新, 鲁一晖. 基于数字图像处理的混凝土微裂纹定量分析技术[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6): 1072–1077.
LI Shuguang, CHEN Gaixin, LU Yihui. J Build Mater, 2013, 16(6): 1072–1077.

[54] SCHERER G W. Stress from crystallization of salt[J]. Cem Concr Res, 2004, 34(9): 1613–1624.

[55] Setzer M J. Micro ice lens formation and frost damage[C]. Frost Damage in Concrete no. 25, RILEM Publications, 2002 : 1-15.

[56] 王习, 张云升, 张宇, 等. CTF 增效剂提升混凝土抗冻性能研究[J]. 材料导报, 2024, 38(19): 66–72.
WANG Xi, ZHANG Yunsheng, ZHANG Yu, et al. Mater Rep, 2024, 38(19): 66–72.

[57] 程立年, 刘娟红, 周大卫, 等. 混凝土孔隙结构特征对超低温力学性能影响研究[J]. 材料导报, 2025, 39(13): 141–147.
CHENG Linian, LIU Juanhong, ZHOU Dawei, et al. Mater Rep, 2025, 39(13): 141–147.

[58] WANG L, CAO Y, WANG Z D, et al. Evolution and characterization of damage of concrete under freeze-thaw cycles[J]. J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed, 2013, 28(4): 710–714.

[59] DENG J L. Control problems of grey systems[J]. Syst Control Lett, 1982, 1(5): 288–294.

# Influence of Restraint on Salt Frost Damage of Concrete: Initiation and Propagation of Microcracks

*GAO Zhihao*[1,2,3], *WANG Zhendi*[3], *WANG Ling*[3]

(1. Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering, Beijing 100044, China; 2. China Communications Construction Company Highway Bridges National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100011, China; 3. China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

## Extended Abstract

**Introduction** The freezing and thawing (F–T) is one of the main threats for concrete in cold regions. The migration and phase transformation of moisture inside concrete induced by the F–T cycles is the origin of surface scaling and internal damage, which can induce the deformation of the matrix. The deterioration process of concrete can be further accelerated with the deicing salt. Previous studies usually followed the standardized methods. The deformation of concrete during the F–T cycles is free, which is different from the concrete in a service state. The concrete specimen is only equivalent to one unit in the concrete member. All concrete units undergo a deformation subjected to the F–T cycles, limiting the free deformation of adjacent concrete units. The limitation between adjacent concrete units is a form of restraint. Some restraint devices are developed to limit the deformation of concrete during F–T cycles. Conventional concrete frost resistance tests underestimate surface damage but overestimate internal damage due to the lack of

consideration for restraint. However, the impact of restraint on the deterioration of concrete pore structure and the initiation/propagation of microcracks due to F–T cycles is unclear. Characterizing the internal damage of concrete is an important way to investigate the mechanism of concrete frost damage. The common method is to use digital image processing (DIP) to analyze the deterioration of concrete microstructure induced by F–T cycles, which has the advantages of convenient sample preparation and unrestricted sample size. In recent years, DIP methods have been also combined with morphological image processing to form a method of segmenting, extracting, and quantitatively analyzing for pores and microcracks that rely on "shape factors" to identify pores and microcracks. This paper was to focus on the restrained and unrestrained concrete as research objects. The pore structure and microcrack parameters were statistically analyzed after the single-side salt F–T test. The residual strain of concrete was calculated. The comparative analysis of the differences between two types of concrete in terms of pore structure deterioration and microcrack initiation was carried out to elucidate the influence of restraint on the deterioration of concrete pore structure and microcracks. The results could be expected to guide the mix design of frost resistant concrete in cold regions, ensuring the long service life of concrete materials.

**Methods** P. I 42.5 cement, natural river sand with a fineness modulus of 2.68, and graded stone by uniformly mixing the crushed stone with 5–10 mm and 10–20 mm in a mass ratio of 4∶6 were used to prepare fresh concrete at a water/cement ratio of 0.60. The 28 d cube compressive strength of the concrete specimen was 28.3 MPa. Two groups of moulds were used to cast concrete specimens. For unrestrained specimens, cylindrical plastic moulds with a diameter of 100 mm and a height of 70 mm were used. For restraint specimen, a restraint device was used. The curing and pre saturation of concrete specimens were carried out according to the salt freezing method in the CIF test and the GB/T 50082—2009. The CDF/CIF TESTER produced by Schleibinger Geräte was used to provide single-side salt F–T cycles. After each 4 F–T cycles, the DIP sample was prepared. The processing of digital images included shooting, binarization, segmentation and extraction of region of interest (ROI), and skeleton. The obtained pore parameters included pore diameter distribution, most probable pore diameter ($d_{\mathrm{M}}$), mean pore diameter ($\overline{d}$), standard deviation of pore diameter ($d_{\sigma}$), and percentage of damaged pores ($P_{\mathrm{dam}}$). The obtained microcrack parameters included the mean length ($L_{\mathrm{mean}}$) and mean width ($W_{\mathrm{mean}}$) of microcracks.

**Results and discussion** The $d_{\mathrm{M}}$, $\overline{d}$, $d_{\sigma}$ and $P_{\mathrm{dam}}$ of both restrained and unrestrained concretes increase with the F–T cycles. After the 32 F–T cycles, the $d_{\mathrm{M}}$, $\overline{d}$, $d_{\sigma}$, and $P_{\mathrm{dam}}$ of the restrained concrete are 11%, 10%, 5%, and 7% smaller than those of the unrestrained concrete, respectively. The results indicate that the restraint limits the expansion of the pores due to the F–T cycles. During the cooling process, the restraint weakens the water migration inside concrete *via* limiting the shrinkage deformation of concrete, thereby reducing the pore diameter shrinkage induced by water migration, the saturation of larger pores and thereby reducing the crystallization pressure. The restraint reduces the pore expansion and microcrack initiation of restrained concrete. The $L_{\mathrm{mean}}$ of restrained and unrestrained concretes increases with the F–T cycles. After the 32 F–T cycles, the $L_{\mathrm{mean}}$ of restrained concrete is 7% less than that of unrestrained concrete. The $W_{\mathrm{mean}}$ of unrestrained concrete decreases, but the $W_{\mathrm{mean}}$ of restrained concrete increases with the increase of F–T cycles. The restraint changes the evolution of microcracks in concrete due to the F–T cycles, resulting in macroscopic differences in the frost damage of the two types of concretes. Furthermore, after the 32 F–T cycles, the $S_n$ of restrained concrete is 30% less than that of unrestrained concrete. The grey correlation degree shows that the pore expansion and microcrack length induced by F–T cycles are the main factors leading to the increase of residual strain. A correlation between the expansion of pore diameter inside restrained concrete and the increase in residual strain is greater, which is related to the weakening of water migration under the restraint.

**Conclusions** The restraint had a significant inhibitory effect on the pore diameter expansion and microcrack initiation of concrete subjected to single-side salt freezing and thawing. The restrained concrete was to release stress through the expansion of microcrack width, being a key mechanism for reducing internal damage induced by the single-side salt freezing and thawing cycles. The main reason for the increase in residual strain of concrete induced by the F–T cycles could be the expansion of pore diameter and the growth of microcrack length.

**Keywords** restraint concrete; single-side freezing and thawing; internal damage; pore parameters; microcrack