

约束对单面盐冻混凝土内部损伤的影响：水分迁移

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, 绿色建筑材料国家重点实验室, 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。然而试验中的混凝土试件仅相当于实际混凝土构件的一个单元, 其在单面盐冻作用下的变形受到周围混凝土的约束作用, 导致盐冻损伤行为发生改变。因此, 本工作研究约束作用对单面盐冻混凝土内部损伤的影响及机理, 测试了水灰比为 0.60 的约束态和自由态混凝土每 4 次盐冻循环后的相对动弹性模量(r_n)和体积吸水率(V_n), 实时监测了 28 次盐冻循环混凝土的内部相对湿度(U_{IRH})演化, 计算了约束态和自由态混凝土首次循环降温过程中的孔径比。结果表明约束态混凝土的 U_{IRH} 增量、 r_n 损失和 V_n 分别比自由态混凝土少 30%、32% 和 28%。与自由态混凝土相比, 约束态混凝土在降温过程中的孔径收缩较小, 根据微冰透镜理论和结晶压理论, 分析并证明了约束作用弱化混凝土降温过程中的水分迁移和冻融循环后的孔径扩张, 进而减轻了盐冻内部损伤。

关键词: 约束态混凝土; 单面盐冻; 内部损伤; 内部相对湿度; 水分迁移

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)11-3361-11

网络出版时间: 2024-08-22



在严寒和寒冷地区, 为了尽快恢复道路桥梁等重大交通基础设施的正常通行, 常利用除冰盐加速积雪融化^[1]。然而融化后雪水融解有除冰盐, 形成盐溶液覆盖在混凝土表面, 容易诱导混凝土萌生盐冻损伤, 表现为严重的表面剥落和微结构劣化^[1-2], 降低混凝土结构承载力, 进而产生昂贵的维修和维护费用。因此抗盐冻耐久性是寒冷地区混凝土耐久性的重要研究方向之一^[3], 这具有显著的经济效益和社会效益。

目前已建立了多项标准方法用于研究混凝土的抗冻耐久性, 例如 ASTM C666^[4]、ASTM C672^[5]、CEN/TS 12390-9^[6]和 RILEM TC 176-IDC^[7]中推荐的 CIF (Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test)^[8]方法。各种试验方法尽管在温度制度、循环次数、判断标准和表征参数方面各不相同, 但研究目的均为在试验室条件下模拟寒冷环境, 以加速试验的方法获得混凝土在冻融作用下的

劣化行为, 且试验过程中混凝土试件均处于自由形变状态。然而, 混凝土构件整体实际上由若干个混凝土单元体构成^[9], 任一混凝土单元体被冻融作用诱导产生形变时, 其周围的混凝土单元体会限制这种变形。这与无约束混凝土冻融试验获得的自由形变^[10]有所不同, 也与混凝土在外加荷载下产生的变形^[11-12]不同。Setzer 教授率先注意到这一问题并进行了深入分析, 认为现有实验方法没有考虑这种约束作用, 这是导致实际服役混凝土损伤演化与试验室研究结果存在差异的原因。2014 年, Setzer 基于 CIF 试验方法设计了一种约束装置并申请了欧洲专利^[13], 但遗憾的是并没有后续文献报道。

几乎同一时间, 徐亚丁等^[9, 14]认为, 试验中的混凝土试件实际应该为混凝土构件中一个微小单元, 冻融循环时混凝土有且仅有一个面与外界发生水热交换, 该表面即为试验测试面; 同时试件还受到周围混凝土的约束作用, 无法自由形变。在此基础上,

收稿日期: 2024-05-22。 修订日期: 2024-06-30。

基金项目: “十四五”国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFB3708700); 国家重点研发计划(2021YFB370403); 国家自然科学基金(52378315)。

第一作者: 高志浩(1992-), 男, 博士, 工程师。

通信作者: 王振地(1984-), 男, 博士, 教授级高工。

Received date: 2024-05-22. Revised date: 2024-06-30.

First author: GAO Zhihao (1992-), male, Ph.D., Engineer.

E-mail: zhihao369@foxmail.com

Correspondent author: WANG Zhendi (1984-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: wzhenidi@163.com

徐亚丁等^[14]设计了一种混凝土约束装置,较完善地建立了约束态混凝土单面盐冻行为的试验方法。此后,中国建材总院在针对约束态混凝土的研究中发现^[15],传统混凝土冻融试验低估了表面损伤,高估了内部损伤^[14–15]。在此基础上,高志浩等^[16]研究了约束对盐冻混凝土表面损伤的影响及作用机理,发现约束作用增加混凝土与其表面冰层的变形差异,导致约束态混凝土表面冰层更容易开裂,诱导更严重的表面损伤。然而,针对约束态混凝土内部损伤的研究还有待进一步开展。

经典理论认为,纯水冻融作用下混凝土内部损伤通常与混凝土内部水分迁移与相变有关。早期研究^[17]认为混凝土毛细孔内的水分结冰将驱动未结冰水分迁移,产生静水压力破坏混凝土基体,但这通常在混凝土饱水度很高时才能成立^[18]。进一步研究则发现,混凝土内孔溶液浓度差和水分蒸汽压差控制了水分结冰顺序,驱动小孔水分向大孔迁移产生渗透压诱导冻融损伤^[19]。临界饱水度理论^[20]认为饱水度可以在一定程度上表征冻融作用下的水分迁移与相变,混凝土实际饱水度的变化与冻融损伤密切相关,饱水度也成为预测混凝土抗冻性的有效手段。同时,混凝土孔结构与冻融作用下内部水分迁移和相变的相互关系不容忽视^[21],孔内水分结晶不仅会吸引周围孔内未结晶水分向冰晶方向迁移,同时持续生长的冰晶还会挤压孔壁,诱导孔径扩张并萌生由孔壁向混凝土基体扩展的微裂纹,已有研究报道过类似的试验结果^[22]。由此可见,冻融作用下混凝土损伤是水分迁移与相变的共同作用结果,其中水分迁移是孔内水分相变和损伤萌生的基础,这不仅受到外界温度和混凝土孔结构等因素的影响,同时还存在冰晶对水分迁移的诱导作用。

盐冻作用下混凝土内部损伤与纯水冻融作用下有所不同。一方面体现在单面盐冻作用下混凝土的

“冻缩融胀”行为^[9, 14];另一方面体现在盐溶液对水分迁移和相变的影响。热力学理论的引入解释了混凝土基体的“温降收缩–温升膨胀”行为,是因为这二者分别受到了凝胶孔与毛细孔、凝胶孔与外界之间水分迁移的影响,产生的“泵吸作用”提高了混凝土饱水度,因此即使饱水度不足 91%的混凝土试件仍会发生冻融破坏^[23]。盐溶液对水分迁移和相变的影响较为复杂。研究表明^[24–26]盐溶液会使混凝土饱水度提高,饱水速度加快,且质量分数为 2%~6%的 NaCl 溶液结冰能产生更大的结冰压。此外,除冰盐条件下混凝土孔结构^[27–29]和含气量^[28, 30]对其盐冻损伤影响的研究也已取得较大进展。然而,约束态混凝土与现有试验中的自由态混凝土仅存在约束作用的差异,冻融作用下内部损伤的显著差异尚无法利用经典理论解释,约束作用对混凝土水分迁移的影响也有待阐明。

综上所述,约束态混凝土更加符合混凝土的实际服役状态,研究约束态混凝土冻融损伤行为有助于指导实际工程的配合比设计,提升寒冷地区混凝土的抗冻耐久性,但目前约束作用对混凝土冻融内部损伤的影响机理尚不明确。本工作旨在利用现有约束装置^[31],测试每 4 次单面盐冻循环后水灰比为 0.60 的约束态及自由态混凝土相对动弹性模量和体积吸水率,利用温湿度传感器监测整个冻融循环过程中混凝土内部相对湿度(U_{IRH})的演化,从水分迁移的角度阐明约束作用对盐冻混凝土内部损伤的影响及原因,研究成果可以为严寒或寒冷条件下高抗冻混凝土配合比设计提供理论指导。

1 实验

1.1 原材料及混凝土配合比

胶凝材料为 P·I 42.5 水泥(表 1 为化学组成,表 2 为物理性能),细骨料为细度模数 2.68 的天然河砂,粗骨料为 5~20 mm 连续级配碎石。

表 1 水泥的成分

Table 1 Composition of cement

w/%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O _{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.

表 2 水泥物理性能

Table 2 Physical properties of cement

Specific surface/ (m ² ·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
345	0.80	23	170	254	4.1	7.4	25.0	54.1

混凝土配合比如表 3 所示, 按标准 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》^[32]测试新拌混凝土的坍落度为 120 mm, 含气量为 1.4%; 按 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[33]测试 28 d 龄期硬化混凝土的立方体抗压强度为 28.3 MPa。

表 3 混凝土的配合比

Table 3 Mix proportions of concrete kg/m³				
Cement	Water	Water/cement ratio	Sand	Coarse aggregate
360	216	0.60	810	1045

1.2 试件制备及冻融试验

1.2.1 约束态及自由态混凝土试件制备

1) 混凝土试模

采用文献[16]中描述的约束装置成型约束态混凝土试件, 采用符合 JG 237—2008《混凝土试模》^[34]规定的塑料模具成型自由态混凝土试件。约束态混凝土试件(N60R)和自由态混凝土试件(N60)各成型 2

组, 每组 5 个试件, 其中 1 组用于相对动弹性模量和体积吸水率测试, 另外 1 组用于混凝土 28 次冻融循环过程中的内部相对湿度监测。

①约束态混凝土试模

用于成型约束态混凝土的试模及约束装置如图 1 所示。

约束装置中约束环壁厚 8 mm, 用于约束单面盐冻混凝土的膨胀变形; 约束锚栓的约束长度 28 mm, 用于约束单面盐冻混凝土的收缩变形, 图 1a 中各部分介绍如下:

——约束环: 材质为 304 不锈钢, 内径 100 mm, 高 70 mm, 用于成型混凝土试件。约束环壁厚 d 设计有 1、4 mm 和 8 mm, 浇筑混凝土试件时约束环充当混凝土试模, 当混凝土经历冻融作用时, 为硬化混凝土试件提供膨胀约束应力, 限制混凝土的膨胀变形。约束环壁厚由 1 mm 增加至 4、8 mm, 膨胀约束应力分别增大 280%和 410%^[15]。

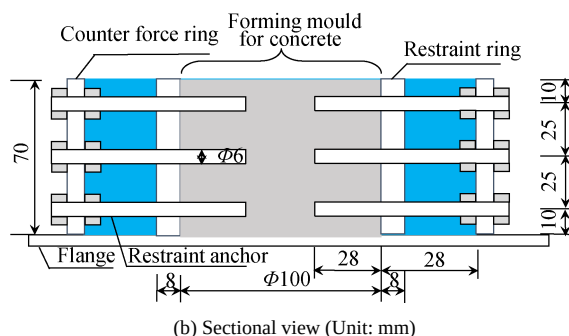
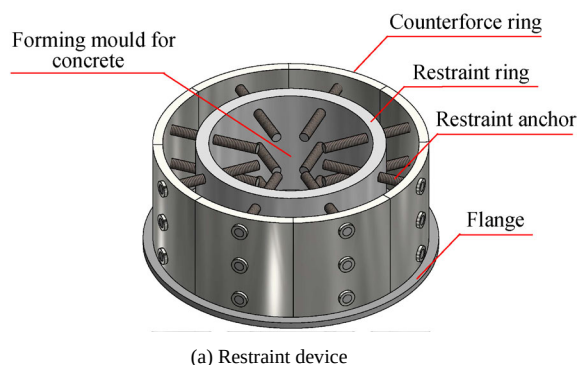


图 1 约束态混凝土试模及约束装置示意图

Fig. 1 Sketch of mould and restraint device for restraint concrete

——约束锚栓: 材质同样为 304 不锈钢, 直径为 6 mm, 分上、中、下 3 层, 每层均为 8 个均匀布置在约束环上并伸入混凝土内部且指向约束环轴心, 另一端固定在反力环上。混凝土硬化后经历盐冻循环的过程中, 当温度下降时, 约束锚栓提供收缩约束, 限制降温时的混凝土体积收缩。当约束锚栓伸入混凝土长度 l 由 28 mm 增加至 33 mm 时, 收缩约束应力增大 26%^[15]。

——反力环: 壁厚 4 mm, 位于约束装置的外圈, 是由螺栓连接 8 片钢弧板组成的钢环。在未浇筑新拌混凝土之前, 反力环起固定约束锚栓的作用, 冻融循环试验时, 反力环为约束锚栓提供约束反力。

——法兰: 位于约束装置最底部的圆形平钢盘, 与约束环之间利用可拆卸螺栓连接。浇筑混凝土时, 法兰为底模, 用于成型单面盐冻试验的

混凝土测试面。

如图 1b 所示, 本工作中使用了 $d=8$ mm 的约束环和 $l=28$ mm 的约束锚栓组成的约束组合, 二者之间不固定, 分别限制盐冻循环中混凝土的膨胀和收缩变形。

②自由态混凝土试模

图 2 为自由态混凝土成型用塑料试模。

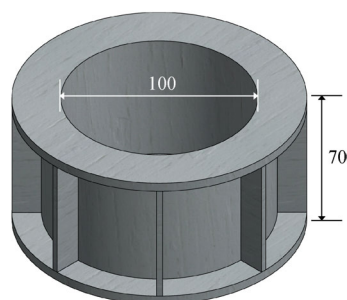


图 2 塑料试模示意图(单位: mm)

Fig. 2 Sketch of the plastic forming mould (Unit: mm)

2) 试件养护及预饱和

试件的养护和预饱和按照 CIF 试验^[35]和 GB/T 50082—2009^[36]中盐冻法开展, 如图 3 所示。

约束态混凝土和自由态混凝土分别在约束环和塑料试模中成型(试模均未涂刷任何脱模剂), 抹平

上表面后在温度为 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(50\%\pm 5\%)$ 的环境中带模养护 1 d(见图 3a)。拆除约束装置的法兰获得约束态混凝土(见图 4a), 利用压缩空气拆除塑料试模获得自由态混凝土(见图 4b), 2 种混凝土用于单面盐冻试验的测试面均为与抹面相对的表面。

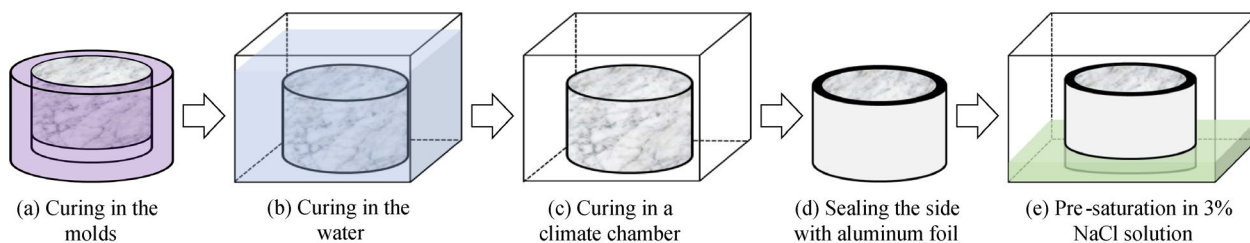
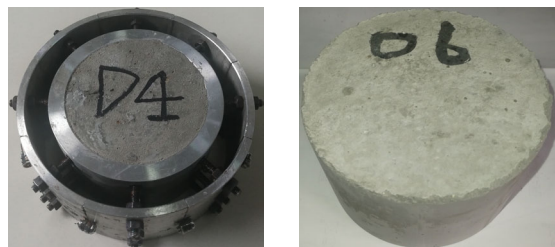


图 3 混凝土试件的养护及预饱和流程

Fig. 3 Curing and pre-saturation process of concrete specimen



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

图 4 约束态与自由态混凝土试件

Fig. 4 Specimens of restrained concrete and unrestrained concrete

将拆模后的试件放在 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 水中养护 6 d(见图 3b), 随后移入 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(65\%\pm 5\%)$ 的环境中继续养护至龄期 25 d(见图 3c), 利用保温棉密封试件除抹面和测试面外的所有侧面(见图 3d), 继续养护至 28 d 龄期。将完成养护的试件在质量分数 3% NaCl 溶液中预饱和 7 d(见图 3e)。预饱和时确保试件测试面向下, 溶液温度 $(20\pm 2)^\circ\text{C}$, 液面高出试件测试面深度 $(10\pm 1)\text{mm}$ 。单面盐冻试验前拆除保温棉并记录试件质量, 测试完成后重新用保温棉密封。

1.2.2 单面盐冻试验设备及参数测试方法

1) 单面盐冻试验设备

利用 CDF/CIF 试验机(CDF/CIF TESTER, Schleibinger Geräte)提供单面盐冻环境, 盐溶液为 3%(质量分数)NaCl 溶液, 温度制度遵循 CIF 试验^[35]和 GB/T 50082—2009^[36]中盐冻法的规定, 冻融循环次数为 28 次。

2) 冻融损伤参数测试方法

每完成 4 次单面盐冻循环后, 按照 GB/T 50082—2009 中盐冻法测试混凝土试件的超声波相

对动弹性模量(r_n), 用于表征混凝土盐冻内部损伤。约束态混凝土与自由态混凝土相比存在约束环和约束锚栓, 不能直接以质量变化率表征吸水率, 因此计算每 4 次冻融循环后的试件体积吸水率, 计算公式如式(1)所示。

$$V_n = \frac{W_n - W_0 + \sum_{k=1}^n m_k}{V_s} \quad (1)$$

式中: V_n 为混凝土的体积吸水率, $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; W_n 为混凝土试件 n 次盐冻循环后的质量, g ; W_0 为混凝土试件预饱和完成后的质量, g ; $\sum_{k=1}^n m_k$ 为前 n 次冻融循环后混凝土试件的剥落物总质量, g ; V_s 为试件完成预饱和后的净体积, 0.55 L 。

1.2.3 温度和湿度监测设备和测试方法

用于内部相对湿度测试的混凝土试件需预埋温湿度传感器, 温度测试精度为 0.01°C , 相对湿度测试精度为 0.1% 。温湿度传感器预埋方法如图 5a~图 5c 所示, 混凝土成型时预埋一根塑料圆棒($\phi 15\text{ mm}\times 70\text{ mm}$), 终凝前抽出形成空腔并用软硅胶密封。混凝土试件开始盐冻循环前, 掏空硅胶塞并插入温湿度传感器, 最后使用硅橡胶密封。

利用 NAPUI 130T 温湿度记录仪实时监测盐冻循环过程中混凝土试件内部相对湿度和温度演化, 采样频率均为 $1/60\text{ Hz}(1\text{ min/次})$ 。

2 结果与讨论

2.1 约束对混凝土内部相对湿度的影响

基于监测获得的混凝土 U_{IRH} 和温度数据, 获得约束态和自由态混凝土 U_{IRH} —温度曲线。图 6 为第 1、第 16 次和第 28 次的试验数据。

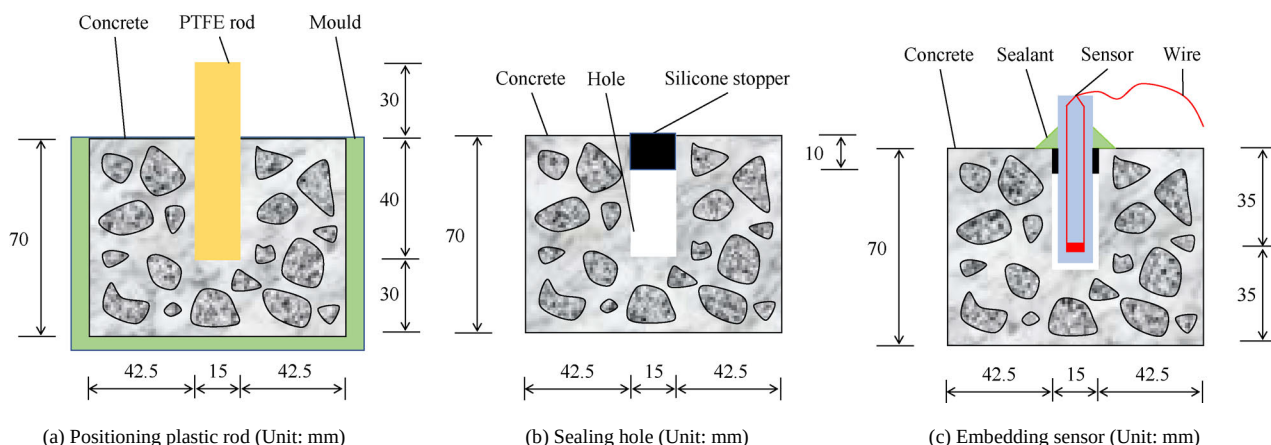
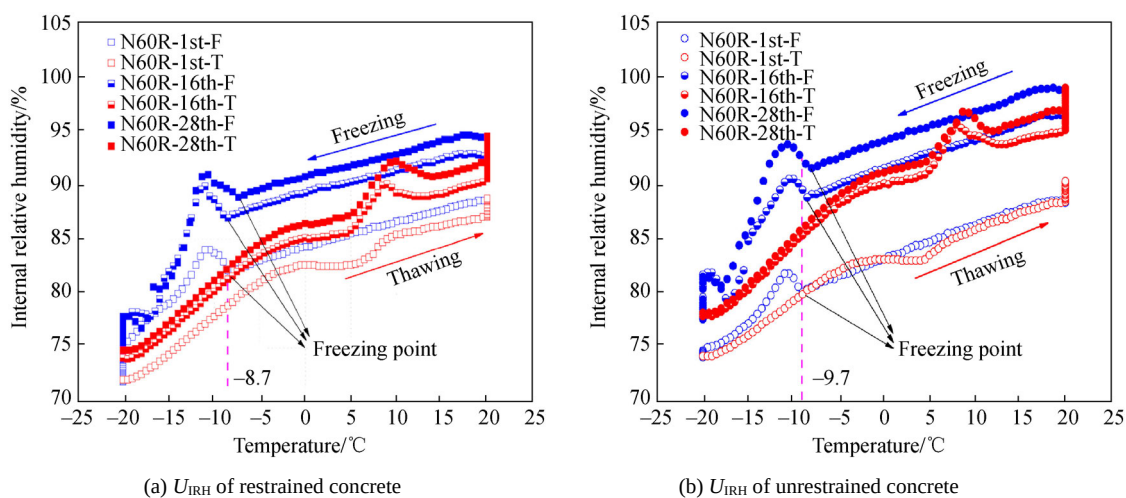


图 5 混凝土内部相对湿度监测前的准备

Fig. 5 Preparation before monitoring the internal relative humidity of concrete

图 6 约束态和自由态混凝土 U_{IRH} -温度曲线Fig. 6 Curves of U_{IRH} -temperature of restrained and unrestrained concrete

如图 6 所示, 约束态和自由态混凝土的 U_{IRH} 分别在降温阶段的 -8.7°C 和 -9.5°C 时出现反向增加的现象, 这是因为此时混凝土内水分的饱和蒸汽压在降温作用下降低, 水分表现出“过冷”行为, 这种现象出现的原因是混凝土孔隙中的水分已经达到冰点, 但水中尚无冰晶成核, 此时水分仍能够以液态大量存在^[37], 但由于水的饱和蒸汽压比冰更大, 未结冰的水分更容易由液态转化为气态, 导致 U_{IRH} 随温度降低显著增加; 进一步降温时, 孔隙水中首次出现冰晶并快速生长, 液态水迅速结冰, 饱和蒸汽压显著下降, 容易诱导气态水分液化并进一步结冰, 导致 U_{IRH} 随温度降低迅速减少, 整个过程表明 -8.7°C 和 -9.5°C 分别为约束态和自由态混凝土的冰点。水分这种“过冷”行为在冻融作用下测试混凝土 U_{IRH} 时比较普遍, 类似的现象在 Wang 等^[37]和侯云芬等^[38]的研究中均有过相关报道。在 -20°C 恒温阶段中, 2 种混凝土 U_{IRH} 进一步下降, 直至进入升

温阶段后, U_{IRH} 开始增加。

值得注意的是, 每完成 1 次冻融循环, 混凝土 U_{IRH} 均有所增加, 致使 2 种混凝土的 U_{IRH} -温度曲线均表现出明显的滞回现象。根据微冰透镜理论^[39]的描述, 单面盐冻循环中, 降温过程中混凝土内大孔先结冰, 未结冰的小孔中水分以气态或液态向大孔迁移, 此时小孔失水致使孔壁收缩^[39], 混凝土基体出现“冻缩”行为, 这与 U_{IRH} -温度曲线在降温过程中持续下降相对应, 即由小孔水分向大孔迁移和大孔水分结冰共同导致; 升温过程中大孔内的冰融化较晚, 来自小孔的水分以冰的形态在大孔中滞留, 此时小孔只能从外界吸水, 基体饱水度提高且表现出“融胀”行为, 这与 U_{IRH} -温度曲线在升温过程中持续增加相对应, 即由小孔从外界吸水和大孔中冰晶融化共同导致, 因此 U_{IRH} -温度曲线的滞回现象较好的反映了盐冻混凝土内部水分迁移的过程。

根据式(2)计算每 4 次冻融循环结束时混凝土

U_{IRH} 增量, 结果如图 7 所示。

$$\Delta U_{\text{IRH}} = U_{\text{IRH}n} - U_{\text{IRH}0} \quad (2)$$

式中: ΔU_{IRH} 为经 n 次冻融循环后混凝土内部相对湿度增量, %; $U_{\text{IRH}n}$ 为第 n 次冻融循环后混凝土内部相对湿度, %; $U_{\text{IRH}0}$ 为冻融循环试验开始前混凝土内部相对湿度, %。

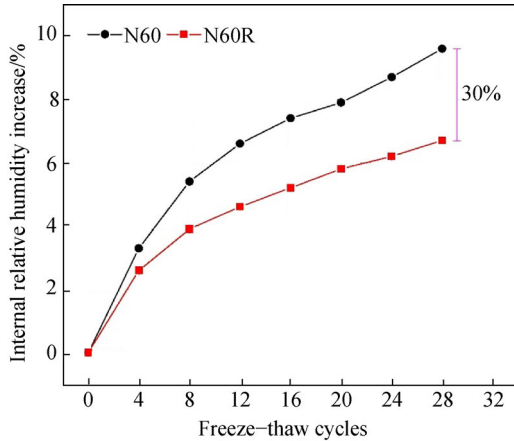
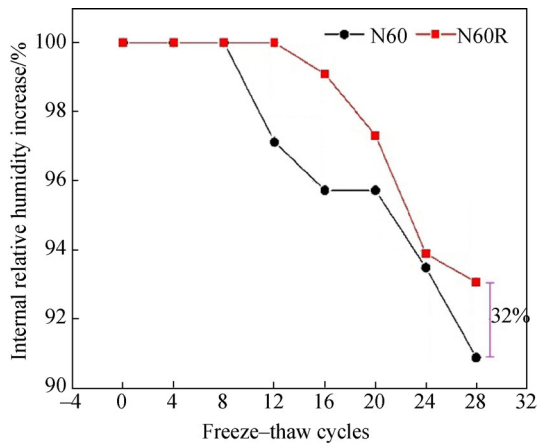


图 7 约束态和自由态混凝土内部相对湿度增量

Fig. 7 Internal relative humidity increment of restrained and unrestrained concrete

如图 7 所示, 2 种混凝土的内部相对湿度均随冻融循环次数增加呈上升趋势, 28 次盐冻循环后约束态混凝土的 U_{IRH} 增量比自由态混凝土少 30%,



(a) Relative dynamic elastic modulus

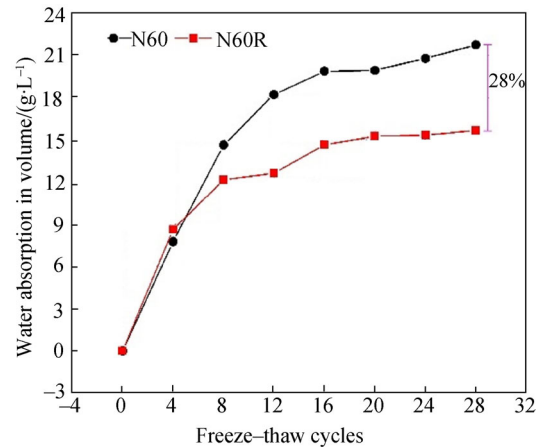
这导致自由态混凝土 U_{IRH} —温度曲线的滞回现象比约束态混凝土更加明显(见图 6), 这可能与冻融作用诱导下约束态混凝土和自由态混凝土内部损伤的差异有关。

2.2 约束对混凝土冻融内部损伤的影响

图 8a~图 8b 和分别显示了约束态混凝土与自由态混凝土的体积吸水率(V_n)和相对动弹性模量(r_n)的演化。

如图 8a 所示, 混凝土的 r_n 随冻融循环次数增加均呈现下降趋势, 这与冻融作用诱导混凝土内部萌生的微裂纹密切相关^[22]。当超声波在混凝土基体内传播并穿越微裂纹时, 超声波的传播介质由固体变为液体或空隙, 导致超声波速下降, 表现为 r_n 减少, 且基体内由冻融作用诱导的微裂纹越多, r_n 减少越明显。约束态混凝土自第 12 次冻融循环后 r_n 开始减少, 自由态混凝土则在第 8 次冻融循环后 r_n 开始减少, 这表明与自由态混凝土相比, 约束态混凝土出现内部损伤的时刻更晚。

随后自由态混凝土的 r_n 随冻融循环次数增加迅速减少, 但约束态混凝土 r_n 随冻融循环次数增加减少相对较慢, 表明约束态混凝土内部微裂纹萌生较自由态混凝土更少。试验结束时 (28 次冻融循环), 约束态混凝土的 r_n 损失比自由态混凝土少 32%。



(b) Water absorption in volume

图 8 冻融作用诱导下混凝土的内部损伤

Fig. 8 Frost damage of concrete induced by freeze-thaw cycles

如图 8b 所示, 约束态和自由态混凝土的 V_n 在冻融作用诱导下快速增加, 这主要由单面盐冻作用下“泵吸作用”导致^[23]。1 次冻融循环中, 降温阶段凝胶孔中的水分向毛细孔迁移并在毛细孔中结冰滞留, 升温阶段凝胶孔会从外界吸水饱和, 因此混凝土饱水度持续增加。第 4 次冻融循环结束

时, 2 种混凝土的 V_n 尚无明显差异, 这可能是在试验前期两种混凝土初始饱水度均较低, “泵吸作用”诱导的饱水度增加尚不足以表现出明显差异。随后自由态混凝土的 V_n 随冻融循环次数增加快速增大, 而约束态混凝土的 V_n 增量较小, 表明约束态混凝土的饱水度增加显著小于自由态混凝土。

试验结束时(28 次冻融循环), 约束态混凝土的 V_n 比自由态混凝土小 28%。

上述结果表明, 约束作用显著降低了单面盐冻作用下混凝土的内部损伤, 这与已有研究获得的结果一致^[14-15, 40]。2 种混凝土由于配合比完全一致, 因此这种现象可能由约束作用导致, 微裂纹的萌生和“泵吸作用”诱导的饱水度增加在约束态混凝土中均受到限制。结合 2.1 节中混凝土 U_{IRH} 演化与水分迁移之间的关系, 更可能的原因是约束作用影响了约束态混凝土内部水分迁移, 从而抑制了冻融损伤。

2.3 约束作用弱化盐冻混凝土内部损伤的机理

2.3.1 盐冻混凝土内部相对湿度演化与内部损伤的关系 已有研究^[41]表明, 相对湿度与饱和蒸汽压和水蒸气分压有关, 具体如式(3)所示。

$$U_{IRH} = \frac{p_v}{p_0} \quad (3)$$

式中: p_v 为气相中水蒸气分压, MPa; p_0 为气相的饱和蒸汽压, MPa。

同时, 根据 Kelvin 方程^[42], 水蒸气分压和饱和蒸汽压的关系如式(4)。

$$\ln\left(\frac{p_v}{p_0}\right) = -\frac{2\gamma_l V_m}{RT r_l} \quad (4)$$

式中: γ_l 为液相的表面张力, $N \cdot mm^{-1}$; V_m 为液体的摩尔体积, $mL \cdot mol^{-1}$; R 为气体常数, $8.314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$; T 为热力学温度, K; r_l 为液面曲率半径, mm。

此外, 混凝土孔隙中水分的 r_l 与孔半径的关系可以用弯液面曲率半径和毛细管半径的关系表示^[21], 如式(5)所示。

$$r_{pr} = r_l \times \cos \theta_0 \quad (5)$$

式中: r_{pr} 为孔半径, mm; θ_0 为接触角, (°)。

将式(3)和式(4)代入式(5), 获得孔半径(r_{pr})与 U_{IRH} 的关系, 如式(6)所示。

$$r_{pr} = -\frac{2\gamma_l V_m}{R} \times \frac{1}{T} \times \frac{1}{\ln U_{IRH}} \times \cos \theta_0 \quad (6)$$

根据式(6), 当温度相同时, 较大的 U_{IRH} 对应较大孔半径, 表明混凝土的 U_{IRH} 与混凝土的孔径直接相关, 这在 Lura 等^[43]针对混凝土干燥收缩的研究中有过类似报道。根据文献[21, 42], 水的表面张力 γ_l 为 $7.28 \times 10^{-5} N \cdot mm^{-1}$, 水的摩尔体积 V_m 为 $1.998 \times 10^{-4} mL \cdot mol^{-1}$; 根据文献[44], 水与水泥浆体接触角 θ_0 约为 8.3° , 结合图 6 和图 7 中的 U_{IRH} 试验结果, 可以计算获得每 4 次冻融循环结束时约束态和自由态混

凝土孔半径(r_{pr}), 结果如图 9 所示。

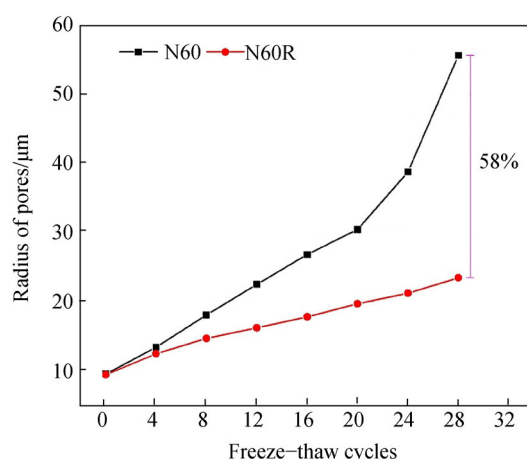


图 9 约束态和自由态混凝土孔半径随冻融循环演化
Fig. 9 Radius of pores in restrained and unrestrained concrete subjected to freeze-thaw cycles

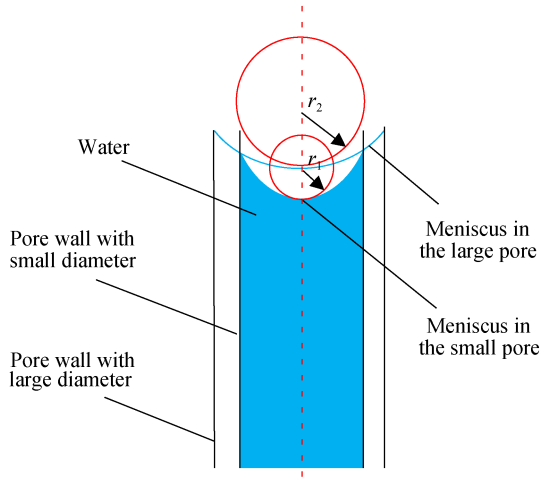
如图 9 所示, 在经历冻融循环前, 2 种混凝土经由 U_{IRH} 计算获得的孔半径均约为 $10 \mu m$, 表明 2 种混凝土在试验前的孔径一致。随冻融循环增加, 约束态和自由态混凝土的 r_{pr} 持续增加, 且 28 次冻融循环结束时, 约束态混凝土的 r_{pr} 比自由态混凝土小 58%, 结果表明冻融循环诱导下混凝土表现出明显的孔径扩张, 且约束态混凝土的孔径扩张程度较小。多项研究均显示^[14-15, 22, 45], 孔径扩张是冻融作用下混凝土内部损伤的重要表现形式之一, 因此每次冻融循环结束时, 混凝土 U_{IRH} 增量直接反映了冻融作用诱导的混凝土孔径扩张, 宏观表现为体积吸水率有所增加。图 7 和图 8b 显示约束态混凝土 U_{IRH} 增量和体积吸水率均显著小于自由态混凝土, 表明约束作用限制了盐冻混凝土的孔径扩张, 进而减轻了混凝土内部损伤, 这支持了微冰透镜理论^[23]和结晶压理论^[21]的描述; 同时也表明通过监测冻融作用下混凝土内部相对湿度, 能较好地表征冻融作用诱导的混凝土内部损伤演化。

2.3.2 约束作用弱化盐冻混凝土内部水分迁移 经典微冰透镜理论^[23]认为, 冻融作用驱动下混凝土内部较小孔与较大孔之间的水分迁移能够产生“泵吸”效应, 水分迁移致使小孔收缩, 混凝土基体表现出“冻缩”行为, 这在已有研究中已经被证明^[14]。结晶压理论^[21]认为, 混凝土内冰晶更容易在大孔中形成, 牵引小孔水分向其迁移, 致使小孔失水收缩。由此可见, 冻融循环中混凝土内部水分迁移作用至关重要。

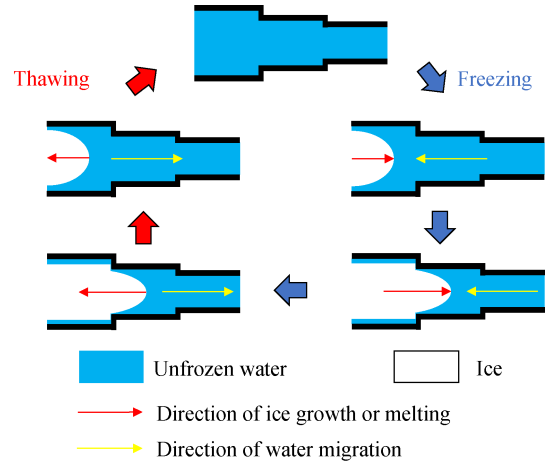
根据图 6, 约束态和自由态混凝土在其达到冰点前, U_{IRH} 持续下降, 这可能受到温度和孔径变化

的双重影响, 因此建立如图 10 所示的理论模型, 研究混凝土内部相对湿度–水分迁移–孔径变化的关

系, 进一步阐明约束对单面盐冻混凝土内部损伤的影响。



(a) Relationship between meniscus curvature radius change and pore radius



(b) Water migration in pores of concrete during one freeze-thaw cycle

图 10 混凝土内水分迁移与孔径关系的理论模型

Fig. 10 Theoretical model of the relationship between water migration and pore size in concrete

如图 10a 所示, 当混凝土内孔径在冻融作用下发生变化时, 将直接导致孔内水分弯液面曲率半径的变化, 因此根据式(6)可建立 U_{IRH} 与孔半径的关系; 如图 10b 所示, 结合图 6 中的结果, 在 1 次冻融循环过程中, 降温阶段大孔内水分先结冰, 未结冰的小孔中水分以气态或液态向大孔迁移, 冰晶向小孔中生长, 混凝土 U_{IRH} 持续下降; 升温阶段大孔内的冰融化较晚, 来自小孔的水分以冰的形态在大孔中滞留, 此时小孔只能从外界吸水, 混凝土 U_{IRH} 持续增加, 由此建立 U_{IRH} 与水分迁移的关系。由此, 当已知混凝土内部温度和 U_{IRH} 时, 可以通过对比 U_{IRH} 与孔半径的关系, 进而获得约束态和自由态混凝土内部水分迁移的差异。

根据式(6), 相同温度下和相同配合比条件下, 混凝土的孔半径(r_{pr})仅与 U_{IRH} 有关, 因此利用式(7)代入 U_{IRH} 值即可计算相同温度下两种混凝土的孔半径之比。

$$\frac{r_{prU}}{r_{prR}} = \frac{\ln(U_{IRH})_R}{\ln(U_{IRH})_U} \quad (7)$$

式中: r_{prU} 、 r_{prR} 分别为自由态和约束态混凝土的孔半径, mm; $(U_{IRH})_R$ 、 $(U_{IRH})_U$ 分别为约束态和自由态混凝土的内部相对湿度, %。

由于 2 种混凝土冰点不同且约束态混凝土冰点较高(-8.7°C), 根据式(7)计算首次冻融循环降温阶段 -8.7°C 前自由态和约束态混凝土孔半径之比, 建立孔半径比值–温度相关关系, 结果如图 11 所示。

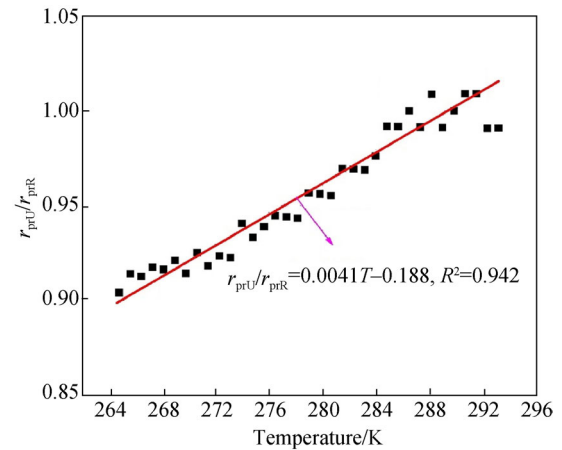


图 11 首次冻融循环 -8.7°C 前自由态和约束态混凝土孔半径比值

Fig. 11 Ratio of the pore radius of unrestrained and restrained concrete before -8.7°C in the 1st freeze-thaw cycle

如图 11 所示, 2 种混凝土初始孔半径比值接近于 1, 表明 2 种混凝土孔结构大致相同。同时, 自由态和约束态混凝土孔半径比值与温度呈线性相关 (R^2 为 0.942), 表明相同温度下, 约束态混凝土的孔径比自由态混凝土稍大, 即降温过程中约束态混凝土孔径变化比自由态混凝土更小。

结果表明在约束作用的影响下, 弱化了混凝土内部由冻融作用驱动的水分迁移, 使得小孔中水分难以充分向大孔中迁移, 进而降低了由水分迁移诱导产生的孔径收缩应力, 因此约束态混凝土降温过程中的孔径变化较自由态混凝土小。同时, 混凝土冻结过程中冰晶更容易在大孔内成核, 相比之下较

小孔隙中冰晶成核较晚^[19, 23]。由图 6 可见约束态混凝土比自由态混凝土有更高的冰点, 根据式(6)计算可知约束态混凝土和自由态混凝土在首次冻融循环的降温过程中, 冰点对应的孔半径(r_{pr})分别为 6.76 μm 和 6.07 μm , 即由水分迁移诱导的约束态混凝土孔半径收缩比自由态混凝土小 18%。同时, 图 9 所示的 2 种混凝土在冻融试验前(20 $^{\circ}\text{C}$)依据 U_{IRH} 计算获得的孔径相同。此外, 基于微冰透镜理论的描述^[39], 混凝土内水分自小孔向大孔迁移时会产生收缩应力, 致使孔壁收缩, 孔径减少。由此可知, 约束态混凝土在降温过程中的孔径变化较自由态混凝土小, 即降温过程中约束态混凝土由水分迁移引起的孔径收缩程度较自由态混凝土更小, 即约束态混凝土在降温过程中的水分迁移较弱, 因此约束态混凝土在首次冻融循环降温过程中的冰点同样表明了约束作用能弱化混凝土降温过程中的水分迁移。

同时, 约束态混凝土在降温过程中较弱的水分迁移能力, 实际上降低了大孔的饱和度。基于微冰透镜理论和结晶压理论, 当水分开始结冰时, 难以产生足量的冰晶挤压孔壁, 孔壁难以扩张或萌生微裂纹, 因此无论孔径扩展还是微裂纹萌生, 约束态混凝土均小于自由态混凝土^[46], 因此约束作用弱化了混凝土内部在降温过程中的水分迁移, 这是约束态混凝土盐冻内部损伤较小的主要原因。

3 结论

研究了水灰比为 0.60 的约束态和自由态混凝土 28 次冻融循环过程中混凝土内部相对湿度演化, 对比了二者相对动弹性模量损失和体积吸水率的差异, 在水分迁移的基础上阐明了约束作用对单面盐冻混凝土内部损伤的影响和机理:

1) 约束态混凝土单面盐冻内部损伤程度小于自由态混凝土。28 次盐冻循环后约束态混凝土内部相对湿度增量、体积吸水率和相对动弹性模量损失分别比自由态混凝土小 30%、28%和 32%。

2) 约束作用弱化了盐冻降温过程中混凝土内部水分迁移。首次冻融循环降温阶段中, 约束态混凝土达到冰点时对应的孔半径变化量比自由态混凝土小 18%, 证明冰点前由水分迁移较弱, 这是约束作用减轻盐冻内部损伤的基础。

3) 约束作用还减轻了盐冻循环结束时的混凝土孔径扩张程度。28 次盐冻循环后约束态混凝土

孔半径变化量比自由态混凝土减少 58%, 进一步减轻了约束态混凝土的内部损伤。

参考文献:

- [1] SUN W, MU R, LUO X, et al. Effect of chloride salt, freeze-thaw cycling and externally applied load on the performance of the concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2002, 32(12): 1859–1864.
- [2] 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.
- [3] 李文婷, 孙伟, 蒋金洋. 疲劳荷载与环境因素耦合作用下混凝土损伤劣化研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2009, 37(12): 2142–2149.
LI Wenting, SUN Wei, JIANG Jinyang. *J Chin Ceram Soc*, 2009, 37(12): 2142–2149.
- [4] Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing: ASTM C666/C666M-15[S]. ASTM International, 2015.
- [5] Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals: ASTM C672/C672M[S]. ASTM, 2012.
- [6] Testing hardened concrete Part 9: Freeze-thaw resistance with deicing salts — Scaling: BS PD CEN/TS 12390-9[S]. BSI, 2016.
- [7] TANG L, PETERSSON P E. Slab test: Freeze/thaw resistance of concrete—Internal deterioration[J]. *Mater Struct*, 2004, 37(10): 754–759.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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, (S1): 128–135.
YU Hongfa, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2008, (S1): 128–135.
- [12] 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.
- [13] Setzer Max J. Frostbelastungsmessung mit Behinderung der Verformungen eines porösen Prüfkörpers[P]. DE Patent, 14166123.1 2014
- [14] 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. Study on the behavior and mechanism of salt freezing failure of concrete in constrained state [D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2017.
- [15] 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. Restrained stress regulation and its influence on salt freezing behavior of concrete on one side [D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2020.

- [16] 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.
- [17] Powers T C, Willis T F. Air requirement of frost-resistant concrete[J]. High Res Board Proc, 1949, 33: 1–19.
- [18] 王阵地. 基于无损监测的钢筋混凝土劣化过程和机理研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2012.
WANG Zhendi. Study on deterioration process and mechanism of reinforced concrete based on nondestructive monitoring [D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2012.
- [19] POWERS T C, HELMUTH R A. Theory of volume changes in hardened Portland cement paste during freezing[J]. High Res Board Proc, 1953, 32: 285–297.
- [20] FAGERLUND G. The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete[J]. Matériaux Constr, 1977, 10(4): 231–253.
- [21] SCHERER G W. Freezing gels[J]. J Non Cryst Solids, 1993, 155(1): 1–25.
- [22] 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.
- [23] SETZER M J. Micro-ice-lens formation in porous solid[J]. J Colloid Interface Sci, 2001, 243(1): 193–201.
- [24] 杨全兵. 混凝土盐冻破坏机理(I): 毛细管饱水度和结冰压[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(5): 522–527.
YANG Quanbing. J Build Mater, 2007, 10(5): 522–527.
- [25] 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.
- [26] LIU Z C, HANSEN W. Freezing characteristics of air-entrained concrete in the presence of deicing salt[J]. Cem Concr Res, 2015, 74: 10–18.
- [27] SUN Z H, SCHERER G W. Pore size and shape in mortar by thermoporometry[J]. Cem Concr Res, 2010, 40(5): 740–751.
- [28] 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.
- [29] LIU Z C, HANSEN W. Freeze–thaw durability of high strength concrete under deicer salt exposure[J]. Constr Build Mater, 2016, 102: 478–485.
- [30] 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.
- [31] 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]. CN109975120B. 2021–07–20.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] JG/T 237—2008 混凝土试模[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [35] SETZER M J, AUBERG R, KASPAREK S, et al. CIF-Test-Capillary suction, internal damage and freeze thaw test[J]. Mater Struct, 2001, 34(9): 515–525.
- [36] 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, 2009.
- [37] WANG Z D, ZENG Q, WU Y K, et al. Relative humidity and deterioration of concrete under freeze–thaw load[J]. Constr Build Mater, 2014, 62: 18–27.
- [38] 侯云芬, 司武保, 王玲, 等. 冻融循环过程中混凝土内部温度–相对湿度关系[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 971–975.
HOU Yunfen, SI Wubao, WANG Ling, et al. J Build Mater, 2015, 18(6): 971–975.
- [39] Setzer M J. Micro ice lens formation and frost damage [C]. Frost Damage in Concrete, 2002: 1–15.
- [40] Xu Y D, Wang L, Zhao X. Analysis of internal frost damage of restrained concrete[C]. Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues, Beijing, China, 2018.
- [41] Organization W M. Guide to meteorological instruments and methods of observation 7th Edition [M]. Geneva Switzerland: 2008.
- [42] PENTTALA V, AL-NESHAWY F. Stress and strain state of concrete during freezing and thawing cycles[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(9): 1407–1420.
- [43] LURA P, JENSEN O M, VAN BREUGEL K. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms[J]. Cem Concr Res, 2003, 33(2): 223–232.
- [44] 陈瑞兴. 侵蚀抑制材料对混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响规律与作用机理[D]. 南京: 东南大学, 2022.
CHEN Ruixing. Influence law and mechanism of corrosion inhibitor on chloride ion corrosion resistance of concrete [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [45] 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. Study on pore structure characteristics and damage evolution law of concrete under freeze-thaw cycle [D]. Xi'an: Changan University, 2018.
- [46] 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 freeze-thaw damage of confined concrete under the wonderful use of one-sided salt freezing [D]. Beijing: China Building Materials Research Institute, 2023.

Influence of Restraint on Salt Frost Damage of Concrete: Water Migration

GAO Zhihao^{1,2,3}, WANG Zhendi³, WANG Ling³

(1. Beijing Jiaotong University, School of Civil Engineering, Beijing 100044, China;

2. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100011, China;

3. China Building Materials Academy, The State Key Laboratory of Green Building Materials, Beijing 100024, China)

Extended Abstract

Introduction De-icing salt has been a common way to melt snow accumulated on concrete structures. But this often leads to the

deterioration of concrete structures. Therefore, frost resistance durability of concrete subjected to de-icing salt is crucial. Conventionally, concrete is allowed to freely deform during single-side freezing and thawing (SSFT) tests. However, a concrete specimen is only equivalent to a unit of the concrete component in actual, and its deformation subjected to SSFT is restrained by the surrounding concrete, leading to alterations in salt frost damage. The differences in the evolution of concrete's frost damage between the laboratory and actual engineering are highlighted. The different internal damage of concrete subjected to freezing and thawing with pure water and de-icing salt is usually related to the water migration and phase transformation inside the concrete. However, the only difference between restrained concrete and unrestrained concrete is the restraint effect. The significant difference in internal damage of the two concretes subjected to SSFT cannot be explained by classical theory. Additionally, the influence of restraint effect on water migration in concrete also needs to be clarified. Thus, it is crucial to study the effect of restraint on the internal damage of concrete subjected to SSFT, which will provide guidance for the mix design of high frost resistant concrete in cold regions. In this paper, restraint ring and anchors were designed to confine the deformation of concrete to simulate the serving condition during SSFT tests. The relative dynamic elastic modulus and water absorption in volume of restrained and unrestrained concrete with a water cement ratio of 0.60 were tested after every 4 SSFT cycles. The temperature and humidity sensors were used to monitor the evolution of the relative humidity (U_{IRH}) inside the concrete during the SSFT test. The influence and mechanism of restraint effect on the internal damage of concrete subjected to SSFT were clarified from the perspective of moisture migration.

Methods P·I 42.5 cement complying GB 8076—2024, 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 with water to cement ratios of 0.60. The slump and air content of fresh concrete are 120 mm and 1.4%, respectively, tested according to GB/T 50080—2016. The 28 d cube compressive strength of the concrete specimen is 28.3 MPa, tested according to GB/T 50081—2019.

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 designed, which is used as the mould to cast a restrained concrete specimen meanwhile used as the restraining device to limit concrete deformation in SSFT tests. The device consists of a restraint ring, 24 restraint anchors, a counter-force ring, and a flange. All parts of the device are made of 304 stainless steel.

The curing and pre saturation of concrete specimens were carried out according to the salt freezing method in CIF test and GB/T 50082—2009. The CDF/CIF TESTER produced by Schleibinger Geräte was used to provide SSFT cycles. After every 4 SSFT cycles, the relative dynamic elastic modulus (r_n) and water absorption in volume (V_n) of the concrete specimens were tested. The evolution of internal relative humidity (U_{IRH}) of 28 SSFT cycles was monitored, and the pore size ratios of restrained and unrestrained concrete during the first cooling cycle were calculated.

Results and discussion The results show that after every one freeze-thaw cycle, the U_{IRH} of both restrained and unrestrained concrete increased, resulting in hysteresis of the U_{IRH} -temperature curves, which reflects the process of water migration inside concrete subjected to SSFT cycles. The hysteresis of the U_{IRH} -temperature curves of unrestrained concrete is more significant than that of restrained concrete. After 28 SSFT cycles, the U_{IRH} increment, r_n loss and V_n of restrained concrete are 30%, 32% and 28% less than those of unrestrained concrete, respectively.

The calculated results based on the U_{IRH} -temperature curves show that the radius of pores (r_{pr}) in restrained and unrestrained concrete increases with SSFT cycles. After 28 SSFT cycles, the r_{pr} of restrained concrete is 58% less than that of unrestrained concrete. A model for the internal water migration of concrete subjected to SSFT is established to analyze the influence of restraint on the water migration. The ratio of pore radius of the restrained and unrestrained concrete before freezing point during the cooling process in first SSFT cycle was calculated. The results indicate that under the influence of restraint, the water migration inside the concrete driven by SSFT is effectively weakened.

Conclusions The main conclusions of this paper are summarized as following. The conventional SSFT test of unrestrained concrete overestimates the internal damage. The restraint effect weakens the water migration before the freezing point of concrete during the cooling process, which is the basis for reducing internal damage induced by SSFT cycles. Moreover, the restraint effect also reduces the pore size expansion of concrete subjected to SSFT cycles, which is manifested macroscopically as less loss of relative dynamic elastic modulus and less increase of water absorption in volume.

Keywords restraint concrete; single-side freezing and thawing; internal damage; internal relative humidity; water migration