

冻融环境下自密实混凝土抗冻耐久性研究综述

高自强, 王安海, 刘海圳, 姚乐颜, 吉延峻

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年7月14日; 录用日期: 2025年8月4日; 发布日期: 2025年8月15日

摘要

本文总结了国内外冻融环境下混凝土结构耐久性研究现状及发展趋势, 基于对国内外文献的研读与分析, 首先对冻融环境下冻融试验方法和标准、混凝土的破坏机理进行了归纳与梳理, 深入探讨了孔隙结构、含气量、界面区的冻胀-损伤耦合机制并综述了掺合料、外加剂和骨料种类对自密实混凝土抗冻性能的影响规律和改性机理, 随后对该领域未来研究方向进行了展望。

关键词

自密实混凝土, 抗冻性, 耐久性, 冻融损伤, 孔隙结构

Review on Frost Resistance Durability of Self-Compacting Concrete in Freeze-Thaw Environment

Ziqiang Gao, Anhai Wang, Haizhen Liu, Leyan Yao, Yanjun Ji

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jul. 14th, 2025; accepted: Aug. 4th, 2025; published: Aug. 15th, 2025

Abstract

This paper summarizes the research status and development trend of durability of concrete structures in freeze-thaw environment at home and abroad. Based on the study and analysis of domestic and foreign literatures, firstly, the freeze-thaw test methods and standards and the failure mechanism of concrete in freeze-thaw environment are summarized and sorted out, and the frost heave-damage coupling mechanism of pore structure, air content and interface zone is discussed in depth. The influence laws and modification mechanisms of admixtures, additives and aggregate types on the frost resistance of self-compacting concrete are reviewed. Then, the future research directions in this field are prospected.

Keywords

Self-Compacting Concrete, Frost Resistance, Durability, Freeze-Thaw Damage, Pore Structure

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自密实混凝土(self-compacting concrete, SCC) [1]是一种具有高流动性、高密实度、低水化热反应和低渗透性的混凝土。相比较传统的混凝土, SCC可以满足对于结构复杂、难以振捣部位的浇筑[2], 保证浇筑质量。国内外学者通过大量实验对 SCC 力学性能[3]、物理化学性能[4]进行了系统研究。

近年来, 随着 SCC 技术在大坝、公路、桥梁、隧道等领域的广泛应用[5], 在其不同环境的研究也越来越重要。在我国的东北、西北和华北严寒地区, 建筑物一直遭受不同程度的冻融破坏[6], 长时间的冻融破坏会使混凝土的结构产生裂缝、剥落, 劣化结构的整体性和承载能力。因此有必要研究混凝土的冻融试验方法、SCC 抗冻性的破坏机理和抗冻性机理研究进展, 对未来发展方向提出建议。

2. 混凝土抗冻性实验方法

2.1. 慢冻法实验步骤

将标准尺寸 $100 \times 100 \times 100$ mm 的混凝土试件在养护 24 d 时放入 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 水中浸泡 4 d, 待养护龄期达到 28 d 时取出搽拭表面水分后放入冻融箱的试件架上, 冻融箱冷冻温度应保持在 $(-20 \sim -18)^\circ\text{C}$, 冻融时间不应小于 4 h。冷冻结束后, 加入温度为 $(18 \sim 20)^\circ\text{C}$ 的水, 融化时间不应小于 4 h。此为一个冻融循环。慢冻法可以模拟实际环境混凝土的冻融现象, 可准确评估混凝土的抗冻性能, 为工程设计和材料选择提供依据。

2.2. 快冻法实验步骤

将标准尺寸 $100 \times 100 \times 400$ mm 的混凝土试件在养护 24 d 时放入 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 水中浸泡 4 d, 待养护龄期达到 28 d 时取出搽拭表面水分后将试件放入试件盒内, 随后往试件盒内注入清水。每次冻融循环应在 2~4 h 内完成, 其融化的时间不得少于冻融循环时间的 1/4。在冷冻过程中, 其温度控制在 $(-18 \pm 2)^\circ\text{C}$, 融化时温度控制在 $(5 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。相较慢冻法, 快冻法可以更快的得到实验结果, 但模拟精度没有慢冻法精准。

2.3. 质量损失率

混凝土冻融后质量损失率, 计算公式如下:

$$\Delta W_i = \frac{|\Delta M_n|}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, ΔW_i 为 n 次冻融循环后的质量损失率; $|\Delta M_n|$ 为 n 次冻融循环后的质量变化量; M_0 为原始质量。

2.4. 力学性能指标

抗压强度损失率应按下式进行计算:

$$\Delta f_{ce} = \frac{f_{co} - f_{cn}}{f_{co}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, Δf_{ce} 为 n 次冻融循环后的抗压强度损失率; f_{co} 为未冻融的抗压强度平均值; f_{cn} 为 n 次冻融循环后的抗压强度平均值。

3. 冻融环境下混凝土耐久性破坏机理

冻融破坏是一个复杂的变化过程, 因此许多学者为该问题的认识做出了积极的贡献。直到现在, 对于混凝土的破坏机理还未得到统一的结论, 主要有以下几种典型的理论来解释冻融的破坏机理, 如静水压力[7]和渗透压力理论[8]、体积膨胀理论[9]、毛细管及结晶压理论[10]等, 目前由美国学者 T. C. Powerse 提出的静水压力和渗透压力理论最为经典。总而言之, 上述的各种冻融破坏理论[11]均与孔隙水、孔隙结构特征、冻结温度密切相关, 其本质是低温下混凝土孔溶液产生相变, 导致孔隙中水分迁移, 引起孔隙冰透镜体的膨胀压力或者孔隙水迁移产生的应力。孔隙结构对冻融损伤的影响主要体现在: 混凝土内部的孔隙可分为凝胶孔、毛细孔和气孔等。凝胶孔孔径极小, 一般不会产生冻胀压力; 毛细孔孔径较大, 在冻融过程中易产生冰晶, 当冰晶生长受到孔壁约束时, 会产生静水压力。同时, 由于不同孔隙中溶液浓度存在差异, 水分会从低浓度区域向高浓度区域迁移, 产生渗透压力。当这两种压力超过混凝土的抗拉强度时, 就会导致混凝土内部出现微裂缝。因此, 在探究冻融的过程中孔隙水、孔隙结构特征、冻结温度的变化有助于对混凝土耐久性破坏机理的认识。陈春珍等[12]提出在反复冻融中, 温度变化不仅会产生疲劳应力, 这是导致 SCC 破坏的主要原因, 还与微观结构、微观孔径、混凝土含气量、相对抗冻性指数存在一定的关系。Fagerlund [13]提出不同材料与环境对混凝土抗渗性的影响存在区别, 抗冻性不仅影响材料性能, 还与材料所处的环境息息相关, 因此必须分别研究两者对抗冻性的影响。吴庆令等[14]发现混凝土结构经历反复冻融后其表面会发生剥落侵蚀, 进而导致质量的降低。李金玉等[15]通过研究发现, 冻融循环过程中混凝土的孔隙结构、细观特性与宏观特性, 在冻融循环的过程中, 其水化产物的结构密度降低, 细观裂缝出现并扩散, 但是水化产物的成分保持不变。

混凝土在经历冻融循环时, 其耐久性会受到特定的条件影响, 其中负温度、孔隙结构和毛细管中的水分是主要因素。在低温条件下, 混凝土内部的气液固三相平衡状态被破坏, 导致毛细孔中的水分结冰。混凝土中大尺寸的有害孔和多孔隙以及它们的连通性, 对毛细孔的充水情况和冻融损伤程度有显著影响。SCC 通常通过添加引气剂或引气型减水剂来改善其工作性, 引入的微小气泡可以优化混凝土的孔隙结构, 减少气泡的间距, 从而提高其抗冻融能力。含气量是影响混凝土抗冻性的关键因素之一。适宜的含气量可在混凝土内部形成大量独立的微小气泡, 这些气泡能够有效缓解冻胀压力。一方面, 气泡可以容纳冰晶生长所需的空空间, 减少对孔壁的压力; 另一方面, 气泡能够阻断毛细孔的连通性, 降低水分迁移的速率和数量, 从而减轻冻融损伤。与常规混凝土相比, SCC 具有较高的水泥用量、砂率和含气量。在硬化过程中, 水泥浆体的弹性模量和膨胀系数与粗骨料之间存在较大差异, 冻融循环中会导致内部损伤的累积。因此, SCC 的抗冻融破坏机制和影响因素比常规混凝土更为复杂。

4. 冻融环境下 SCC 结构抗冻性机理研究进展

4.1. 掺合料对 SCC 抗冻性的影响

耐久性是建筑物安全的关键因素之一, 而混凝土结构的耐久性很大程度上取决于其抗冻性能。通过提升混凝土的抗冻能力, 可以增强其耐久性, 进而延长建筑物的使用寿命。王建新[16]在其研究中指出, 在经历 120 次冻融循环后, C40 SCC 中单一掺入 15% 粉煤灰的试件比未掺杂试件抗冻性能更低, 通过复

掺 5%沸石粉和适量的粉煤灰,可以显著提高 SCC 的抗冻性能。粉煤灰反应会消耗水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,生成更多水化硅酸钙凝胶,改善混凝土的孔隙结构,减少有害孔的数量。沸石粉具有较强的吸附性和离子交换能力,能够填充混凝土内部的孔隙,提高密实度,同时还能促进水泥的水化反应,增强界面区的粘结强度。刘清等[17]研究发现掺量分别为 40%、50%和 60%的粉煤灰,随着掺量的不断增加,混凝土的抗冻性能呈现出逐渐降低的趋势。Halit Yazici [18]的研究则表明,在 C60 SCC 中单一掺入 30%、40%、50%和 60%的粉煤灰,随后在复掺 10%硅灰。当 90 次冻融循环后,单掺 30%粉煤灰和复掺 10%硅灰的试件的抗压强度效果做好,比基准混凝土抗压强度高出 20%。随着粉煤灰的掺量不断增加则会导致抗压强度显著下降。Tavasoli [19]分别对比了 SCC 单掺矿渣粉 30%、50%、65%和 80%的抗冻性能,以及 SCC 在单掺 50%矿渣粉后复掺 5%、10%、15%硅灰的抗冻性能。研究结果显示,当 SCC 中矿渣粉的掺量达到 50%时,其质量损失率和动弹性模量损失率都随着掺量的不断增加而降低,复掺 5%硅灰的抗冻性能最好,由于硅灰颗粒的细小特性,它们填充了混凝土内部的孔隙,提高了密实度,从而减少了毛细孔隙的体积。

4.2. 外加剂对 SCC 抗冻性的影响

SCC 通过添加减水剂、引气剂和增稠剂来改善自身性能,使其能够在复杂的结构中顺畅流动,避免出现空洞与蜂窝缺陷。引气剂通过引入大量细小的、均匀的气泡,来改变硬化混凝土中含气量、气泡间隔系数、孔径分布以及气泡平均直径,而这一举措是改善 SCC 抗冻性最为有效的方法。何俊辉[20]通过研究表明混凝土抗冻性的有效指标是气泡间隔系数,气泡间隔系数越小其抗冻性越好,当孔隙小于 50 nm 时有利于提高抗冻性,而孔隙大于 200 nm 时则对抗冻性最不利。侯景鹏[21]等研究发现,减水剂的剂量对 SCC 的抗冻性产生影响,适量的减水剂能够减少混凝土的用水量,降低孔隙率,提高密实度。但过量的减水剂会导致混凝土离析、泌水,增加孔隙率,同时还会影响引气剂的效果,降低含气量,从而降低抗冻性,随着减水剂不断增加的剂量,其抗冻性呈现出先增加,随后显著降低,最后总结出减水剂的最佳掺量在 0.5%~0.55%,其内部的适宜含气量为 4.3%~5.5%。易忠来[22]研究发现引气剂主要是把 10 μm ~1 mm 的气孔引入,养护龄期增加,气泡间隔系数将不断减小,其抗冻性越好。研究发现拌合物含气量达 4%及以上时,混凝土具备良好的抗冻性能。

4.3. 骨料类型对 SCC 抗冻性的影响

SCC 的骨料种类繁多,包括天然粗骨料、人工砂、再生骨料、钢渣、橡胶颗粒和轻质骨料等[23][24]。在这些材料中,除了天然骨料外,人工砂和再生骨料的应用最为广泛[25][26]。人工砂是经过去土处理后,通过机械破碎和筛分得到其粒径小于 4.75 毫米,通常来源于岩石、矿石尾料或工业废渣,这些颗粒表面粗糙、棱角分明。人工砂的粗糙表面能够与水泥浆体形成较强的粘结力,有利于提高混凝土的强度。但人工砂的含粉量较高,过多的石粉会增加混凝土的需水量,导致孔隙率上升,从而影响其抗冻性。再生骨料的来源广泛,在加工过程中,由于其成分的复杂性,会产生许多微小的裂缝,这导致其力学性能和弹性模量通常低于天然骨料。再生骨料的表面较为粗糙,棱角多,且颗粒大小分布不均匀,这些特性使得其在 SCC 的抗冻性能变得更加复杂。界面区是混凝土中骨料与水泥浆体之间的过渡区域,其结构相对疏松,孔隙率较高,是冻融损伤的薄弱环节。在冻融循环过程中,界面区首先受到破坏。由于骨料与水泥浆体的热膨胀系数不同,在温度变化时会产生温差应力,导致界面区出现微裂缝。随着冻融循环次数的增加,这些微裂缝会不断扩展、连通,最终影响混凝土的整体性能。刘传辉等[27]研究发现,再生粗骨料 SCC 内部存在的微裂缝以及骨料与水泥之间的界面过渡区的劣化,是导致其抗冻性能低于普通混凝土的主要原因。秦拥军等[28]研究发现当取代率低于 50%时,再生骨料内部的微裂缝可以有效的减轻冻胀力,但随着取代率的增加,骨料表面的吸水能力增强,界面过渡区的强度降低,混凝土的抗冻性能也随

之降低。P. Tang 等[29]将洗涤集料污泥、造纸污泥灰和底灰细粉作为冷结合轻质骨料取代天然碎石制备 SCC, 发现这三种类型冷结合轻质骨料的掺入均会降低 SCC 抗冻性, 取代率越大下降趋势越显著, 掺入纳米二氧化硅能够在一定程度上改善其抗冻性。

5. 结论与展望

5.1. 结论

随着对 SCC 研究的不断深化和应用范围的扩大, 冻融环境下的微观特性、孔隙结构、力学性能以及抗冻性能的提升和机理成为了研究热点。矿物掺合料、化学外加剂能够在不同程度上提升 SCC 的抗冻性能。为了在严寒地区推广 SCC, 以下几个理论和技术问题仍需深入探讨:

(1) 需要系统性地研究 SCC 与常规混凝土在冻融破坏机理上的差异, 以及冻融循环过程中 SCC 微观结构、水化产物、孔隙结构、弹性模量、强度和微观硬度的变化规律。

(2) 粉煤灰和粒化高炉矿渣作为大量可用的工业副产品, 在 SCC 中的大量使用是未来发展的趋势。因此, 有必要系统研究这些材料单独或混合使用时对 SCC 抗冻性能的影响, 并探索化学外加剂如何作用于抗冻性能的提升。

(3) 随着天然骨料资源的减少和建筑废弃物的增加, 再生骨料的使用将成为必然。因此, 需要系统研究再生骨料对 SCC 微观结构、宏观性能和抗冻性能的影响, 并基于冻融破坏机制提出改善措施, 为再生骨料及其在 SCC 中的应用提供理论支持。

(4) 由于河砂资源的减少和品质下降, 而 SCC 对细骨料的品质要求较高, 机制砂替代河砂成为趋势。因此, 需要系统研究机制砂在 SCC 中的耐久性破坏规律和机理。

目前, SCC 的抗冻性能主要通过快速冻融试验来研究, 但实际建筑构件往往承受复杂的荷载和多轴力作用, 冻融循环对结构稳定性的影响与实验条件存在差异。因此, 细观尺度的 SCC 抗冻性数值模拟对于评估和预测建筑的安全性至关重要。

5.2. 展望

(1) 可采用 X 射线 CT、扫描电镜(SEM)和压汞测孔法(MIP)等实验手段, 对比分析 SCC 与常规混凝土在冻融循环过程中微观结构, 如孔隙分布、界面区特征等的演化规律; 通过差示扫描量热法(DSC)监测水化产物变化, 结合力学性能测试, 如动弹仪测动弹弹性模量、万能试验机测抗压强度, 建立微观结构与宏观性能的关联模型, 明确两者在冻融破坏机理上的差异。

(2) 设计正交实验, 系统研究粉煤灰、粒化高炉矿渣等工业副产品单掺及复掺时, 不同掺量对 SCC 抗冻性能的影响。采用响应面法构建掺量 - 抗冻性能回归模型, 确定最佳复掺比例; 同时结合电化学阻抗谱(EIS)和氯离子渗透实验, 探究化学外加剂, 如引气剂、减水剂等与掺合料的协同作用机制, 提出基于抗冻性提升的复合改性方案。

(3) 基于离散元法(DEM)构建 SCC 细观模型, 考虑骨料、水泥浆体和界面区的不同力学特性, 模拟冻融循环中裂缝的萌生与扩展; 将模拟结果与实际工程构件的现场监测数据对比, 修正模型参数, 最终形成可预测实际荷载和多轴力作用下 SCC 冻融损伤的数值工具。

基金项目

陕西省教育厅青年创新团队科研计划项目(21JP137)。

参考文献

- [1] 廉慧珍, 张青, 张耀凯. 国内外自密实高性能混凝土研究及应用现状[J]. 施工技术, 1999, 28(5): 1-3,16.

- [2] 张谊平, 许家文. 掺玄武岩纤维自密实混凝土强度及抗冻性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(6): 25-28.
- [3] 肖苗良. 自密实混凝土力学性能研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(3): 29-34.
- [4] Lotfy, A., Hossain, K.M.A. and Lachemi, M. (2016) Durability Properties of Lightweight Self-Consolidating Concrete Developed with Three Types of Aggregates. *Construction and Building Materials*, **106**, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.118>
- [5] 张立群, 穆柏林, 孙婧, 等. 冻融和碳化共同作用下硅灰自密实混凝土耐久性试验研究[J]. 混凝土, 2019(11): 90-93.
- [6] 徐欢, 刘清, 宁俊, 等. 基于试验研究的新疆地区 C30 自密实混凝土的冻融损伤指标分析[J]. 混凝土, 2019(2): 115-118.
- [7] Powers, T.C. (1945) A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance. *Journal of the ACI*, **16**, 245-272.
- [8] Powers, T.C. and Helmut, H.R.A. (1953) Theories of Volume Change I-N Hardened Portland Cements Paste during Freezing. *Highway Research Board*, **46**, 85-21.
- [9] 张士萍, 邓敏, 唐明述. 混凝土冻融循环破坏研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2008, 26(6): 990-994.
- [10] Hed, MHJ. (1965) Capillary Properties of Some Model Pore Systems with Special Reference to Frost Damage. *RLEM Bulletin*, No. 27, 31-38.
- [11] Scherer, G.W. (1999) Crystallization in Pores. *Cement and Concrete Research*, **29**, 1347-1358. [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00002-2](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00002-2)
- [12] 陈春珍, 张金喜, 徐金良, 等. 自密实混凝土抗冻性能研究[J]. 建筑技术, 2011, 42(5): 443-445.
- [13] Fagerlund, G. (1975) The Significance of Critical Degrees of Saturation at Freezing of Porous and Brittle Materials. Durability of Concrete. ACI, 13-65.
- [14] Wu, Q., Yu, H. and Chen, X. (2010) Service Life Prediction Method of Concretes Based on Mass Loss Rate: Establishment and Narration of Mathematical Model. *ICCTP 2010*, Beijing, 3253-3260. [https://doi.org/10.1061/41127\(382\)350](https://doi.org/10.1061/41127(382)350)
- [15] 李金玉, 曹建国, 徐文雨, 等. 混凝土冻融破坏机理的研究[J]. 水利学报, 1999, 30(1): 41-49.
- [16] 王建新. 高性能自密实混凝土抗冻性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [17] 刘清, 韩风霞, 高金东, 等. 大掺量粉煤灰自密实混凝土抗冻性能的试验研究[J]. 混凝土, 2016(5): 38-40, 44.
- [18] Yazıcı, H. (2008) The Effect of Silica Fume and High-Volume Class C Fly Ash on Mechanical Properties, Chloride Penetration and Freeze-Thaw Resistance of Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, **22**, 456-462. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002>
- [19] Tavasoli, S., Nili, M. and Serpoush, B. (2018) Effect of GGBS on the Frost Resistance of Self-Consolidating Concrete. *Construction and Building Materials*, **165**, 717-722. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.027>
- [20] 何俊辉. 道路水泥混凝土微观结构与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2009.
- [21] 侯景鹏, 李自舜, 史巍, 等. 引气 C40 自密实混凝土性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(2): 428-431, 442.
- [22] 易忠来. 含气量对新拌及硬化自密实混凝土气泡间距系数的影响[J]. 铁道建筑, 2017(5): 138-141.
- [23] 石立, 贺晶晶, 马凌云, 等. 低温循环环境下不同含水状态砂岩剪切性能[J]. 水力发电学报, 2021, 40(9): 132-140.
- [24] 何殷鹏, 张梦溪, 李文伟, 等. 金沙江下游水电站数字混凝土研究与应用[J]. 水力发电学报, 2022, 41(10): 1-17.
- [25] De Muynck, W., De Belie, N. and Verstraete, W. (2010) Microbial Carbonate Precipitation in Construction Materials: A Review. *Ecological Engineering*, **36**, 118-136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>
- [26] 覃源, 薛存, 李遥, 等. 盐冻耦合作用下水工混凝土耐久性 & 寿命预测[J]. 水力发电学报, 2024, 43(2): 110-122.
- [27] 刘传辉, 吴婷. 冻融条件下再生自密实混凝土力学性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2640-2645.
- [28] 秦拥军, 刘珂, 许富威, 等. 冻融循环下掺渣渣再生混凝土损伤试验[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(19): 262-267.
- [29] Tang, P. and Brouwers, H.J.H. (2018) The Durability and Environmental Properties of Self-Compacting Concrete Incorporating Cold Bonded Lightweight Aggregates Produced from Combined Industrial Solid Wastes. *Construction and Building Materials*, **167**, 271-285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.035>