

Research on Factors Affecting and Techniques for Enhancing the Frost Resistance of Concrete

Kaixuan Sun Lujing Wang Jiashan Wang Yunkai Zhao

Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou, Henan, 450005, China

Abstract

The durability of concrete in Gansu regions largely depends on its frost resistance. This paper systematically reviews the failure mechanisms, key influencing factors, and enhancement techniques of concrete frost resistance. The analysis shows that freeze-thaw damage is primarily governed by the theories of hydrostatic pressure and osmotic pressure, and its essence lies in the freezing and expansion of internal pore water. The frost resistance of concrete is comprehensively influenced by material composition (such as water-binder ratio, air-entraining agents, mineral admixtures, fibers), process conditions (such as curing regime, vibratory mixing), and external coupled environments (such as salt corrosion, load). By optimizing the pore structure of concrete (such as introducing uniform microbubbles) and enhancing the compactness and toughness of the matrix, its frost resistance and durability can be significantly improved. Future research should focus on revealing multi-scale damage mechanisms and developing novel frost-resistant materials.

Keywords

concrete frost resistance; freeze-thaw damage; pore structure; coupled effect; durability

混凝土抗冻性能影响因素及提升技术研究

孙凯旋 王路静 王家善 赵云凯

黄河水利委员会黄河水利科学院研究院, 中国·河南 郑州 450005

摘要

混凝土在甘肃地区的耐久性很大程度上取决于其抗冻性能。本文系统综述了混凝土抗冻性的破坏机理、关键影响因素及提升技术。分析表明,冻融破坏主要由静水压和渗透压理论主导,其本质是内部孔隙水结冰膨胀所致。混凝土的抗冻性受到材料组成(如水胶比、引气剂、矿物掺合料、纤维)、工艺条件(如养护制度、振动搅拌)以及外部耦合环境(如盐蚀、荷载)的综合影响。通过优化混凝土的孔隙结构(如引入均匀微气泡)、增强基体密实度与韧性,可显著提升其抗冻耐久性。未来研究应致力于多尺度损伤机理的揭示与新型抗冻材料的开发。

关键词

混凝土抗冻性; 冻融破坏; 孔隙结构; 耦合作用; 耐久性

1 引言

混凝土作为全球用量最大的建筑材料,其长期耐久性直接关系到工程结构的安全与服务寿命。在寒冷、冻融循环频繁的环境中,混凝土的冻融破坏已成为导致其性能劣化的最主要因素之一。这种破坏表现为表面剥落、砂浆损失、强度下降,最终危及结构整体性。因此,深入研究混凝土的抗冻性能,明确其损伤机理与发展规律,并提出有效的提升策略,具有重大的理论价值与工程意义。本文旨在整合当前研究成果,从破坏原理、材料优化、环境耦合效应等方面对混凝土抗冻性能进行系统梳理,以期高抗冻混凝土的设计与应用提供理论参考。

2 混凝土冻融破坏的微观原理

混凝土的抗冻性本质上是一场“水”与“力”的战争,其内部饱和水在反复相变(液态水→固态冰)过程中产生破坏性应力的结果。当混凝土内部毛细孔中的水结冰时,体积膨胀约9%,产生巨大的静水压和渗透压。如果混凝土内部结构没有足够的能力(如强度)来抵抗这种压力,或者没有足够的缓冲空间(如引气孔隙)来容纳膨胀的水,就会导致内部微裂纹的产生和扩展,经过多次循环,表现为表面剥落、砂浆损失、强度下降。

当前,主流理论从不同角度解释了这一过程:

2.1 静水压理论

该理论由 Powers^[1]于1949年提出,认为当混凝土毛细孔中的自由水结冰时,体积膨胀约9%,从而对周围未冻水产生巨大的压力。在高度饱和的混凝土中,这种膨胀压力无

【作者简介】孙凯旋(1994-),男,中国河南焦作人,硕士,工程师,从事水利工程质量检测,物探检测研究。

法及时向外部孔隙逸散,当超过混凝土的抗拉强度时,即引发微裂纹的产生与扩展。

2.2 渗透压理论

Powers 与 Helmut^[2](1953) 对此进行了补充,提出由于毛细孔中溶液浓度差异,水结冰后,未冻区水中盐分浓度相对升高,形成化学势梯度,驱使未冻区的水分向冻结区迁移。此过程产生的渗透压同样会对壁造成张力,加剧微损伤。

2.3 其他理论

对于更复杂的场景, Scherer 的结晶压力理论^[3]从冰晶与孔壁的物理相互作用角度,分析了曲率差异导致的压力。Setzer 的微冰晶理论^[4]以及 Valenza 与 Scherer 针对盐冻环境提出的黏结-剥落理论^[5],共同完善了多孔材料在特定条件下的冻融破坏机理体系。

综上所述,混凝土的抗冻能力归根结底取决于其抵抗和缓冲内部结冰压力的能力,而这与其微观结构,尤其是孔隙特性密切相关。

3 混凝土抗冻性能影响因素分析

影响混凝土抗冻性能的因素,分为三大类:材料与配比、施工与养护、结构与环境。下图展示了各因素如何影响抗冻性,并揭示了其内在联系:

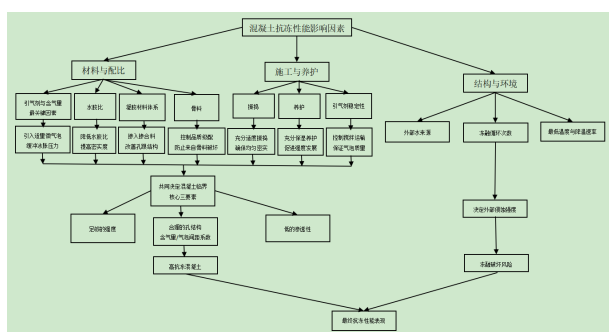


图 3-1 混凝土抗冻性能影响因素

3.1 材料与配比因素

材料与配比是最根本、最可控的内在因素。

3.1.1 水胶比——基础性因素

水胶比是控制混凝土密实度的核心参数,直接决定混凝土的孔隙率和渗透性。降低水胶比能有效减少毛细孔数量、细化孔径,降低孔隙水的饱和度,从而提高混凝土的内在抗冻能力,同时,毛细孔更细,且不易形成连通的渗水通道,水分不易侵入和饱和。高强混凝土的水胶比通常要求低于 0.45,严酷环境下要求更低。高强混凝土优异的抗冻性很大程度上得益于其低水胶比带来的高密实度与高强度。

3.1.2 引气剂与含气量——最关键的因素

引气剂的核心作用:引气剂是提升混凝土抗冻性最有效的外加剂^[6]。它通过在混凝土中引入大量均匀、封闭、独立、微小的气泡(通常直径为 20~200 μm),为冻结膨胀的水提供了“缓冲空间”,可以有效地作为“缓冲阀”,容

纳被挤出的未冻水和释放结冰产生的膨胀压力,从而显著消解静水压。含气量与气泡间距系数是关键指标,后者通常要求不大于 250 μm,以确保保护范围覆盖全部浆体。

含气量:存在一个最佳范围(通常为 4%-6%),过低则缓冲不足,过高会显著降低强度。

气泡间距系数:指混凝土中气泡边缘之间的平均距离。这是比含气量更科学的指标,一般要求不大于 250 μm。间距越小,说明气泡分布越均匀,对毛细孔水的“保护”范围越广,抗冻性越好。

3.1.3 矿物掺合料——双重效应

粉煤灰、矿渣粉、硅灰等矿物掺合料通过微集料效应和火山灰反应,能够填充内部孔隙,优化界面过渡区(ITZ)结构,从而提高混凝土的长期密实度和强度。然而,不当使用(如过高掺量或养护不足)可能增加早期孔隙率,对抗冻性产生负面影响。研究表明,双掺或多掺的效果通常优于单掺^[7]。

3.1.4 骨料

骨料自身的抗冻性:如果骨料本身孔隙多、强度低、吸水率高(如某些多孔砂岩),其内部所含的水分结冰时也会膨胀,导致“骨料冻毁”,从而从内部破坏混凝土^[8-9]。

骨料级配与粒径:良好的级配能提高混凝土的密实度。如上一个问题所述,超径含量会影响均匀性,创造薄弱环节。

骨料—浆体界面:界面过渡区是薄弱环节。降低水胶比、使用掺合料等都能改善 ITZ 的微观结构和强度。

3.1.5 其他

水泥:抗硫酸盐水泥或硅酸盐水泥配制的混凝土通常抗冻性优于普通矿渣水泥或粉煤灰水泥,但后者通过优化配比和良好养护也能满足要求。

纤维的增韧与阻裂效应:聚丙烯纤维、钢纤维、玄武岩纤维等能够跨越微裂纹,起到良好的桥接与拉结作用^[10]。它们不仅能抑制冻融循环中微裂纹的引发与扩展,提高混凝土的韧性,某些纤维(如聚丙烯纤维)本身还具有一定的引气效果,进一步优化了孔隙结构。

3.2 施工与养护因素

良好的材料和配比需要通过优质的施工来实现。

3.2.1 振捣

振捣工艺能促进各组分的均匀分布,加速水化反应,改善界面过渡区,并有效减少有害孔隙(尤其是大孔)的数量,从而从工艺层面优化混凝土的微观结构,提升其抗冻能力^[11]。

如振捣不足、不密实,会留下蜂窝、孔洞,成为水分积聚和冻害的起源点。

如过度振捣,会导致引气混凝土引入的微小气泡逸出或合并成大气泡,破坏优良的气泡体系,使气泡间距系数增大,显著降低抗冻性。

3.2.2 养护

养护至关重要,充分的保湿养护能保证水泥持续水化,

使混凝土强度不断发展,孔隙结构不断细化。早期失水会导致水化不完全,形成大量连通的毛细孔,严重降低混凝土的强度、抗冻性和抗冻性,即使引气也无法挽救。

抗冻混凝土要求更长的养护时间,以确保其达到足够的强度前遭受冻融循环。

3.2.3 引气剂的稳定性

搅拌时间、温度、运输时间等都会影响气泡的稳定性和数量。长距离运输可能导致含气量损失。

振动搅拌:采用振动搅拌。

3.3 外部环境耦合作用的挑战

在实际工程中,冻融循环常与其他环境因素共同作用,产生“1+1>2”的协同劣化效应,这是混凝土服役时所面临的外部条件。

3.3.1 水分饱和状态

水分饱和状态是发生冻融破坏的必要条件。完全干燥的混凝土不会冻坏。处于水位变化区、雨雪积水区域的混凝土构件最为不利,因为它们容易达到或超过临界饱和度(通常认为约91%),即混凝土中的空气体积不足以容纳结冰膨胀的水。

3.3.2 冻融循环和最低温度

冻融循环次数越多,累积损伤越大。温度越低,结冰速度越快,产生的压力也更大。

3.3.3 盐冻耦合

在除冰盐^[12](氯盐、硫酸盐)存在的环境下,冻融破坏会急剧加速。盐分不仅降低了水的冰点,导致在更低温度下发生更快速的冻结,还会产生额外的结晶压力和化学侵蚀,共同导致混凝土表面严重的剥落。

3.3.4 荷载-冻融耦合

持续的疲劳荷载或一定的压荷载会在混凝土中引入初始微损伤,为水分侵入和冻融破坏提供便利通道,从而加剧劣化。研究表明,适度的轴压比(如30%~50%)可能通过抑制微裂纹扩展而略有裨益,但疲劳荷载通常表现为负面效应。

3.3.5 其他耦合作用

干湿循环会使混凝土表层产生收缩微裂纹;高温作用会损伤混凝土的微观结构;碳化作用在前期可能因生成碳酸钙填充孔隙而略有裨益,但长期会降低孔隙液碱度,影响胶凝体系稳定性。这些因素与冻融循环耦合时,均会不同程度地加剧混凝土的损伤。

4 结语

本文系统分析了混凝土抗冻性能的机理与影响因素,可得出以下结论:

机理核心:混凝土的冻融破坏是内部孔隙水结冰产生

静水压与渗透压共同作用的结果,其抗冻性本质上是材料抵抗和缓冲这种压力的能力。

提升路径:提升抗冻性的根本途径在于优化混凝土的孔隙结构与增强基体性能。具体措施包括:严格控制水胶比、合理使用引气剂、采用优质的骨料和合理的级配、合理掺加矿物掺合料与纤维、并辅以合理的施工与充分的养护、在设计上考虑排水,避免混凝土长期处于水饱和状态。

未来展望:未来研究应在以下方面继续深化:(1)结合多尺度数值模拟与原位动态观测技术(如CT、NMR),揭示冻融过程中微观损伤的实时演化规律;(2)建立宏观性能与微观孔隙结构参数(如气泡间距系数、孔径分布分形维数)之间的定量关系模型;(3)深入研究多种复杂环境因素耦合作用下的长期性能演化规律与寿命预测;(4)开发新型、高效、环保的抗冻材料与复合技术体系。

参考文献

- [1] Powers T C. Air requirement of frost-resistant concrete[J]. Highway Research Board Proceedings, 1949.
- [2] Powers T C, Helmuth R A. Theory of Volume Changes in Hardened Portland Cement Paste During Freezing[J]. Highway Research Board Proceedings, 1953.
- [3] Scherer G W. Freezing gels[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1993, 155(1): 1-25.
- [4] Setzer M J. Mechanical Stability Criterion, Triple-Phase Condition, and Pressure Differences of Matter Condensed in a Porous Matrix[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2001, 235(1): 170-182.
- [5] Valenza J J, Scherer G W. Mechanism for Salt Scaling[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(4): 1161-1179.
- [6] 邓祥辉, 张凯轩, 王春, 等. 高海拔寒冷地区混凝土抗冻耐久性试验研究[J]. 工程力学, 2023, 40(9): 37-47.
- [7] 刘佳敏, 马玉薇, 李刚. 粉煤灰对渠道用混凝土抗冻及抗冲刷性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(4): 1436-1444.
- [8] 王公志, 王江, 许斌. 轻粗骨料含量对混凝土抗压性能尺寸效应影响的微观数值模拟[J]. 力学季刊, 2023, 44(02): 456-468. DOI:10.15959/j.cnki.0254-0053.2023.02.020.
- [9] 邓平贵, 朱振豪, 李文豪. 混凝土抗冻性能研究现状与展望[J]. 江西建材, 2025, (06): 6-9. DOI: CNKI: SUN: JXJC. 0. 2025-06-003.
- [10] 张同军. 纤维对混凝土抗冻性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2022(4): 55-58, 63.
- [11] 任立建. 引气剂对混凝土抗冻性能影响的研究[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2009, 9(03): 64-66. DOI: CNKI: SUN: ASZJ. 0. 2009-03-027.
- [12] 焦凯, 陈晨, 李磊, 等. 透水混凝土盐溶液冻融破坏特性及机理研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(9): 98-101.