

冻融循环作用下水工混凝土耐久性退化规律研究

王旭东

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450001

摘要:在我国北方高寒及部分高海拔地区,水工混凝土建筑物长期处于极端恶劣气候,遭受周期性冻融循环、干湿交替、水流冲刷等多重耦合侵蚀。冻融破坏是导致其结构老化、功能失效乃至工程事故的主要诱因,损伤演化呈复杂非线性特征。本文立足实际服役环境,系统阐述冻融循环下混凝土的微观破坏机理,深入分析静水与渗透压力对孔隙结构演变的驱动作用。通过宏观试验与微观观测结合,揭示相对动弹性模量等指标的时变退化规律,探讨水胶比等因素对抗冻耐久性的影响机制,构建多场耦合损伤模型。研究表明,优化气泡间距系数、降低水胶比是提升抗冻能力的核心,为寒区水工结构相关设计、施工及寿命预测提供依据。

关键词:水工混凝土;冻融循环;耐久性退化;微观结构;损伤演化;气泡间距

引言

水工混凝土是大坝等水利枢纽工程的主体建材,其耐久性关乎工程安全运行、投资效益及下游人民生命财产安全。我国“三北”地区及青藏高原冬季漫长严寒,气温年、日较差大,这些地区的水工建筑物运行中,除承担功能性荷载,还不可避免遭受反复冻融循环作用,水位变化区或浪溅区的混凝土破坏尤为严重。冻融破坏是混凝土在饱水状态下,孔隙水分正负温交替相变,产生冻胀和渗透压力,致内部产生微裂纹,随循环次数增加,裂纹扩展贯通,最终表面剥落、结构酥松崩解。这会降低结构承载力,引发渗漏、钢筋锈蚀等次生灾害。近年来,高寒地区建设高标准水工工程需求增长,但传统混凝土配合比设计侧重强度,忽视耐久性精准控制。因此,研究冻融循环下水工混凝土耐久性退化规律意义重大。

1 冻融循环作用下水工混凝土的损伤破坏机理

1.1 静水压力与渗透压力的协同作用

混凝土是一种典型的多孔介质材料,其内部存在着凝胶孔、毛细孔以及气泡等不同尺度的孔隙结构。当环境温度降至冰点以下时,孔隙中的自由水开始结冰,由于冰的密度约为水的0.92倍,结冰过程中体积将产生约9%的膨胀。在密闭的孔隙体系中,这种体积膨胀会受到孔壁的约束,从而产生巨大的内应力,即静水压力。^[1]Powers提出的静水压力假说认为,当结冰产生的静水压力超过了混凝土的抗拉强度时,孔壁周围便会产生微裂纹。

除了静水压力外,渗透压力在冻融破坏中也扮演着关键角色。随着孔隙中水分的逐渐冻结,未冻结液态水中的溶解盐离子浓度相对升高,而在微孔或凝胶孔中,由于曲率半径极小,水分往往并不结冰。这种浓度差与势能差的存在,驱使水分从低浓度的凝胶孔向高浓度的大

孔毛细管迁移。这种迁移过程产生的渗透压力,不仅加剧了孔隙壁面的拉伸应力,还导致水分在冻结锋面聚集,进一步增大了膨胀破坏效应。在冻融循环的反复作用下,静水压力与渗透压力交替叠加,使得混凝土内部原本存在的微小缺陷逐渐扩展成可见裂缝,最终导致宏观结构的破坏。

1.2 微观孔隙结构的演变特征

水工混凝土的耐久性与其内部孔隙结构密切相关。通过压汞法(MIP)和扫描电子显微镜(SEM)观测发现,未经冻融损伤的混凝土内部孔结构相对封闭,且孔径分布较为合理。随着冻融循环次数的增加,混凝土内部的微观结构发生显著劣化。初期,由于C-S-H凝胶的分解和微裂纹的萌生,大孔径孔隙比例有所上升,总孔隙率缓慢增加。

在冻融循环的中后期,微裂纹在骨料与水泥石的界面过渡区(ITZ)密集出现并相互贯通。这是因为界面过渡区通常是混凝土中最薄弱的环节,晶体取向性强,孔隙率较大,水膜层较厚。在冰胀力的作用下,ITZ最先产生开裂。随着裂纹的扩展,原本孤立的毛细孔逐渐连通,形成了连通的渗水通道。这种孔隙结构的演变不仅降低了混凝土的密实度,更为外界水分的侵入提供了便捷路径,形成“吸水-结冰-膨胀-开裂-更易吸水”的恶性循环,加速了材料的老化进程。

1.3 水分迁移机制与饱和度影响

混凝土的冻害程度与其内部含水饱和度呈正相关。干燥或半干燥状态的混凝土,由于孔隙中有大量空气作为缓冲空间,结冰产生的膨胀压力极易释放,因此几乎不会发生冻融破坏。然而,对于水工建筑物而言,长期处于水下或水位波动区的混凝土,其内部孔隙往往处于高

度饱和状态。^[2]在这种极端条件下,孔隙内的空气被挤出,失去了缓冲作用,水分结冰产生的膨胀压力将全部作用于孔壁结构。

此外,水分在混凝土内部并非静止不动。在温度梯度作用下,未冻结水会向冷端迁移;在压力梯度作用下,高压区水分会向低压区渗透。特别是在冻融过程中,表面层混凝土先冻结,形成低渗透性的冰封层,阻碍了内部水分向外蒸发,导致内部水分积聚,产生极大的内压力。这种由内向外递减的水热耦合场,使得水工混凝土往往表现为表层剥落严重,而内部损伤相对滞后的现象。因此,控制混凝土的吸水率,提高其憎水性,是改善抗冻性能的重要途径。

2 水工混凝土宏观性能的退化规律分析

2.1 相对动弹性模量的非线性衰减

相对动弹性模量是表征混凝土内部结构完整性最敏感的指标之一,它反映了超声波在混凝土内部的传播速度,直接受控于材料的弹性模量与密实度。研究表明,水工混凝土在冻融循环作用下的动弹性模量下降过程呈现出明显的非线性特征,大致可分为三个阶段:初始微损阶段、稳定退化阶段和加速破坏阶段。

在冻融初期,由于气泡的调节作用和基体的弹性变形能力,动弹性模量下降缓慢,曲线较为平缓。进入稳定退化阶段后,随着微裂纹的不断扩展和连通,声波在传播过程中遇到越来越多的散射和反射界面,波速下降速率加快。当循环次数达到临界值(通常约为设计冻融寿命的70%~80%)时,混凝土内部损伤累积到一定程度,裂纹迅速扩展,动弹性模量呈断崖式下跌,此时混凝土已接近破坏状态。这种S型或指数型的衰减规律,为基于动弹性模量监测的剩余寿命预测提供了物理基础。

2.2 质量损失率与表面剥蚀规律

质量损失率是评价混凝土抗冻性的另一个重要宏观指标,主要反映了材料表面剥落的物理过程。与动弹性模量的变化不同,质量损失在冻融早期往往表现为负值,即质量增加。这是因为在冻融初期,微裂纹的产生使得混凝土吸水率大幅提升,吸入水的质量超过了表面剥落砂浆的质量。

随着冻融过程的延续,表面砂浆层在反复的胀缩应力作用下逐渐酥松,剥落量开始超过吸水量,质量损失率转为正值并逐渐增大。对于水工混凝土,特别是抗冲磨要求较高的部位,质量损失往往表现出不均匀性,骨料周围的砂浆最容易剥落,导致粗骨料裸露。裸露的骨料在温差和流水冲刷的共同作用下,容易松动脱落,形成凹坑,进一步加剧了表面的不平整度,增大了水流阻

力,诱发电化学腐蚀等次生灾害。因此,控制表面剥落速率对于维持水工建筑物的过流能力至关重要。

2.3 力学强度的时变退化特性

冻融损伤不仅降低了混凝土的弹性性能,也显著削弱其承载能力。抗压强度与抗折强度的退化规律呈现出差异性。一般而言,抗折强度(或劈裂抗拉强度)对冻融损伤更为敏感,下降幅度远大于抗压强度。这是因为在受拉状态下,混凝土内部的微裂纹极易扩展,导致脆性断裂;而在受压状态下,裂纹在一定程度上受到闭合约束。

试验数据显示,经历设计冻融循环次数后,普通水工混凝土的抗折强度损失率可达30%~50%,而抗压强度损失率通常在15%~25%之间。这种力学性能的异质性退化提示我们,在进行结构验算时,应特别关注受弯、受拉构件的安全性储备。此外,随着冻融损伤的累积,混凝土的应力-应变曲线逐渐变扁平,峰值应力降低,峰值应变增大,表现出明显的塑性化特征,这意味着材料的刚度和变形能力均发生了劣化,增加了结构失稳的风险。

3 影响水工混凝土抗冻耐久性的关键因素

3.1 水胶比与孔隙率的关系

水胶比是决定混凝土微观结构密实程度的最基本参数,也是影响抗冻耐久性的首要因素。水胶比的大小直接关系到水泥石中毛细孔的数量与孔径分布。较低的水胶比意味着水泥水化程度高,自由水含量少,形成的毛细孔径较小,且总孔隙率较低,从而减少了可冻结水的含量。

对于水工大体积混凝土,受温控防裂要求限制,水胶比通常不宜过低,但为了满足抗冻性要求,一般建议控制在0.45以下。当水胶比大于0.50时,混凝土内部大孔径毛细孔显著增多,连通性增强,即便掺入引气剂,气泡也难以在粗大的孔隙网络中形成有效的保护屏障。此外,高水胶比导致的早期自收缩和干缩较大,易产生原生微裂纹,为冻融破坏提供了薄弱环节。因此,在满足施工和易性和温控要求的前提下,尽可能降低水胶比,是提升水工混凝土抗冻能力的基石。

3.2 引气剂的气泡参数特征

引气技术是目前公认的提高混凝土抗冻性最有效、最经济的技术措施。引气剂的掺入能在混凝土搅拌过程中引入大量微小、均匀、独立且封闭的气泡。这些气泡在硬化后的混凝土中充当了“膨胀缓冲室”,当孔隙水结冰产生体积膨胀时,周围的可压缩气泡提供了自由空间,有效缓解了静水压力和渗透压力。

然而,气泡的并非越多越好,关键在于气泡的质量。

评价气泡结构的核心指标是气泡间距系数(L)。研究表明,当气泡间距系数小于 $250\mu\text{m}$ 时,混凝土通常具有优异的抗冻性。这是因为在满足该条件下,任何结冰孔隙距离最近的气泡都很近,受压水分能够迅速排入气泡中,消除了膨胀压力。此外,气泡的比表面积、孔径分布频率以及稳定性也对抗冻性有重要影响。对于水工混凝土,由于浇筑方量大、运距远,需选择稳泡性能好的优质引气剂,以防止气泡在运输和振捣过程中破裂或上浮。

3.3 矿物掺合料的双刃剑效应

粉煤灰、矿渣粉、硅灰等矿物掺合料在水工混凝土中应用广泛,主要起降低水化热、改善和易性及填充微孔的作用。然而,掺合料对抗冻性的影响具有双重性。优质粉煤灰具有滚珠效应,可改善孔结构,但其活性较低,早期强度发展慢,且可能引入碳化风险。大掺量粉煤灰混凝土如果养护不当,表面层强度较低,极易发生早期冻融剥落。

硅灰等高活性掺合料虽能显著细化孔径,提高密实度,但其需水量大,增加了干燥收缩风险。此外,掺合料的使用往往会影响引气剂的效能,导致气泡结构不稳定。因此,在工程实践中,应针对不同的环境等级,通过试验确定最佳的掺合料种类与掺量。通常建议采用“双掺技术”,即复掺粉煤灰与硅灰,并配套使用高效减水剂和优质引气剂,在发挥掺合料优势的同时,通过改善气泡结构来弥补其对抗冻性的潜在负面影响。

4 多因素耦合作用下的耐久性退化模型

4.1 冻融与荷载的耦合损伤机理

在实际服役环境中,水工混凝土结构不仅遭受冻融循环,还长期承受自重、水压力、泥沙压力及地震荷载等外部应力。^[3]单纯研究冻融单一因素往往高估了混凝土的耐久性,而忽略应力状态则偏于不安全。应力与冻融的耦合作用会显著加速材料的损伤进程。处于拉应力状态的混凝土,内部微裂纹张开,为水分侵入提供了通道,且冰晶在裂纹尖端的楔入效应会产生巨大的应力集中,导致临界冻融次数大幅降低。

相反,压应力在一定范围内可以抑制微裂纹的扩展,产生“强化效应”,但如果压应力过大,导致内部产生微裂纹,则会加剧冻融破坏。基于损伤力学理论,可以将冻融损伤变量与应力损伤变量进行耦合,建立非线性损伤演化方程。该模型需考虑应力水平对冰点降低的影响,以及荷载导致的微裂纹密度变化对渗透系数的修正。通过数值模拟与试验验证相结合,能够更真实地预测水工

结构在复杂应力状态下的服役寿命。

4.2 基于可靠度的寿命预测方法

传统的冻融寿命预测多基于快速冻融试验的线性外推,即以相对动弹性模量下降至60%或质量损失率达到5%时的循环次数作为设计寿命。这种方法忽略了室内试验条件与室外实际环境的差异性,未能考虑材料参数和环境变量的随机性。为了提高预测精度,引入基于可靠度的概率分析方法显得尤为必要。

该方法将混凝土的抗冻性能视为随机变量,建立极限状态方程。通过收集当地气象数据,将实验室的“快冻”循环转化为实际环境中的“年”冻融次数,并考虑冻融深度随时间的变化规律。利用蒙特卡洛模拟或响应面法,计算结构在不同服役年限内的失效概率。这种方法不仅给出了结构的平均寿命,还能提供不同保证率下的耐久性评估结果,为工程的维护加固决策提供了更加科学的量化依据。例如,对于重要的一级建筑物,可设定更高的失效概率限值,从而在设计中提出更严格的抗冻要求。

5 结语

冻融循环作用下,水工混凝土耐久性退化是涉及多学科的复杂物理过程。本文经机理分析等,揭示了其在冻融环境下的损伤演化特征:静水压力与渗透压力是破坏内部结构的根本动力,相对动弹性模量指数型衰减、质量损失率阶段性加速是宏观性能退化的主要表现,水胶比等合理匹配是控制抗冻性能的关键参数。针对寒区水工工程建设需求,未来研究与实践要关注:加强基于微观结构的抗冻设计,优化孔隙结构;开发适用于高寒地区的高性能引气剂与功能型外加剂,提升气泡稳定性与抗冻性;建立多因素耦合的寿命预测模型,实现性能设计;加强已建水工建筑物耐久性检测监测,建立健康档案以便及时维修养护。全链条协同创新,才能保障其长期安全耐久。

参考文献

- [1]耿楠,吴明春,李显.纤维混凝土在不同冻融环境作用后力学性能与结构劣化规律研究[J].混凝土,2025,(04):166-173+182.
- [2]闫江峰.冻融循环及围压对纤维混凝土孔隙结构及渗透率的影响研究[J].混凝土,2025,(01):74-79.
- [3]周延波.蛋壳颗粒和废玻璃粉双掺混凝土的冻融损伤试验研究[D].西京学院,2024.000103.