

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230187

早期受冻混凝土孔隙结构特征及与宏观力学性能相关性分析

屈春来^{1,2}, 林榕鹏^{1,2}, 刘世伟^{1,2}, 宿 辉^{1,2}, 王晓阳¹

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038)

摘要: 混凝土早期受冻在我国北方地区水利工程建设中普遍存在, 早期受冻致损诱发混凝土结构力学性能劣化, 严重影响工程结构的安全稳定性和服役寿命。通过室内单轴压缩试验和 CT 扫描试验, 分析起冻时刻和冻结温度对混凝土力学性能的影响规律, 重构不同起冻时刻混凝土三维孔隙结构, 探究不同起冻时刻混凝土孔隙分布和孔隙结构特征参数的变化规律, 并开展早期受冻混凝土力学性能与孔隙结构相关性分析。结果表明, 随起冻时刻的延迟, 混凝土试块孔隙率呈先增大后减小的变化规律, 平均孔隙表面积呈先减小后增大的变化规律, 平均孔径呈二次抛物线增加的变化趋势, 平均孔隙形状因子呈先减小后增大又减小的变化趋势; 平均孔隙表面积与早期受冻混凝土的抗压强度和弹性模量的相关性最好, 建议优先选择平均孔隙表面积构建早期受冻混凝土的细观损伤指标。相关研究成果为揭示早期受冻混凝土的宏观细观损伤机制提供了支撑。

关键词: 早期受冻; 混凝土; CT 扫描; 孔隙结构特征; 相关性分析

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0164-04

1 引言

早期受冻现象在我国北方地区水工混凝土结构建设过程中普遍存在^[1-2]。混凝土早期养护中受到冻害作用后, 其内部的自由水将冻结形成冰晶, 一方面产生冻胀力作用, 诱发混凝土内部微裂纹产生与扩展, 造成混凝土冻胀损伤; 另一方面, 混凝土内部自由水含量降低, 致使水化反应进程减缓, 影响混凝土强度和变形性能^[3-4]。早期受冻影响下的混凝土力学性能和受冻损伤特征研究已成为关注热点, 目前分别从宏观和细观两个层次开展了诸多研究, 其中, 宏观性能研究方面以损伤形态、抗压强度、相对动弹性模量、质量损失及渗透性为主, 细观特性研究方面主要以孔隙结构特征分析为主。早期受冻对混凝土孔隙结构影响的重要性受到广泛关注, 但孔隙结构表征相对较复杂, 采用单一表征指标较难全面反映其特征分布^[5-6], 针对多表征参数下早期受冻对混凝土孔隙结构特征的影响研究相对较少, 尤其是在早期受冻损伤混凝土细观孔隙结构与宏观力学性能之间

的相关性研究方面。鉴此, 本文针对不同起冻时刻和不同冻结温度下的混凝土开展室内单轴压缩试验和 CT 扫描试验, 分析起冻时刻和冻结温度对混凝土强度、变形的影响规律, 研究不同起冻时刻混凝土孔隙结构和孔隙特征参数的分布变化规律, 并以抗压强度和弹性模量表征宏观力学性能, 进一步开展早期受冻混凝土力学性能与孔隙结构相关性分析, 为揭示早期冻害下混凝土宏观细观损伤机制提供支撑。

2 试验方案

2.1 配合比与试块制备

以邯郸地区某渡槽为依托, 制备 100 mm × 100 mm × 100 mm 的 C50 强度等级的混凝土立方体试件。混凝土制备材料主要包括 P. O42.5 级普通硅酸盐水泥, I 级粉煤灰, 粗骨料采用 5~20 mm 连续级配碎石, 细骨料为筛分中砂, 减水剂为聚羧酸高效减水剂。试验混凝土配合比见表 1。该配合比标准养护下混凝土的初凝、终凝时间分别为 3.5、7.0 h, 且 28 d 抗压强度为 52.4 MPa。

收稿日期: 2023-02-13, 修回日期: 2023-04-09

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2021402023); 河北省高等学校科学技术研究项目(BJ2019023, QN2021030)

作者简介: 屈春来(1985-), 男, 博士、副教授, 研究方向为混凝土结构耐久性, E-mail: quchunlai@hebeu.edu.cn

通讯作者: 刘世伟(1989-), 男, 博士、副教授, 研究方向为水工结构, E-mail: liu1989shiwei@163.com

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Mix ratio of concrete kg/m³

水胶比	水	水泥	粉煤灰	砂	碎石	减水剂
0.35	187	427	107	638	1 041	5.34

依据混凝土凝结时间和邯郸地区的气候温度,设计试验混凝土试块受冻时的养护龄期分别为 1.5 h(初凝前)、4.0 h(初凝后终凝前)、8.0 h(终凝后)、24.0 h(终凝后)作为 4 类典型起冻时刻工况,受冻温度分别设计为 -5、-9 °C。将浇筑成型的混凝土试件分别标准养护至某个龄期(起冻时刻),将试件置于高低温交变湿热养护箱内,设置养护温度为受冻温度,并受冻养护 8 h 后,放入标准养护箱下再养护至 28 d,后续进行单轴压缩试验和 CT 扫描试验。

2.2 抗压试验

借助液压万能试验机,试验采用荷载控制模式,针对不同受冻温度(-5、-9 °C)和不同起冻时刻(1.5、4.0、8.0、24.0 h)的混凝土试件,每组试件 4 个,进行单轴压缩试验。基于试验获得的应力—应变曲线,求取抗压强度和弹性模量作为混凝土宏观力学性能表征量,并分析受冻温度和起冻时刻对抗压强度及弹性模量的影响规律。

2.3 CT 扫描试验

CT 扫描试验借助 Diondo d5 高分辨率全能型小焦点 CT 检测系统开展。试验以受冻温度 -9 °C 为例,对起冻时刻分别为 1.5、4.0、8.0、24.0 h 条件下混凝土试块进行分层扫描成像,将 CT 扫描试验获取的二维图像进行图像增强和二值化处理,导入 VG Studio 软件进行孔隙结构三维重构。依据重构的混凝土三维孔隙结构,获取不同起冻时刻下混凝土孔隙空间分布规律和孔隙结构特征参数。

3 早期受冻混凝土孔隙结构特征及与宏观力学性能相关性分析

3.1 早期受冻混凝土强度与变形特性

不同冻结温度和不同起冻时刻条件下混凝土抗压强度和弹性模量的试验结果及其变化规律见表 2、图 1。由表 2、图 1 可知,随着起冻时刻的推

表 2 早期受冻混凝土的抗压强度和弹性模量

Tab. 2 Compressive strength and elastic modulus of

early frozen concrete

起冻时刻/h	抗压强度/MPa		弹性模量/GPa	
	-5 °C	-9 °C	-5 °C	-9 °C
1.5	32.24	33.66	29.2	32.4
4.0	30.35	27.05	22.5	20.2
8.0	38.12	36.05	41.1	39.8
24.0	44.14	41.57	44.2	43.6

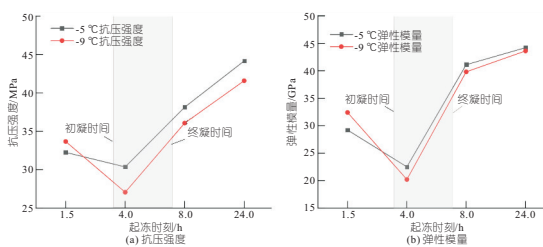


图 1 不同起冻时刻下混凝土抗压强度和弹性模量变化
Fig. 1 Concrete compressive strength and elastic modulus change under different freezing time

迟,不同受冻温度下混凝土的抗压强度和弹性模量均呈现先减小后增大的变化规律;起冻时刻介于初凝期和终凝期之间时,混凝土受冻损伤影响最大,初凝后终凝前(4.0 h)受冻混凝土抗压强度分别为 30.35、27.05 MPa,弹性模量分别为 22.5、20.2 GPa,该试验结果与现有研究结论^[2]一致。该现象主要是由于在初凝期前受冻的混凝土水化程度较低,自由水冻结形成冰晶产生冻胀力并延缓水化反应和强度增长,随着试块转移至标准养护环境后,冰晶融化继续完成水化反应,修复冻胀损伤;介于初凝期和终凝期之间的混凝土经水化已初步形成骨架结构,经受冻破坏后,骨架结构出现裂缝,试块密实性遭到破坏,此后送入标准养护环境中,水化反应弱于初凝期前,难以修复冻胀损伤;在终凝期后的混凝土水化程度较高,较高强度的骨架结构能有效抵御部分冻胀应力,减轻受冻损伤^[6]。起冻时刻小于 4.0 h 时,受冻混凝土强度和弹性模量受冻结温度的影响较明显,而起冻时刻大于 4.0 h 后,冻结温度对混凝土强度和弹性模量的影响基本保持不变,可见标准养护 4.0 h 前受冻,混凝土的力学性能受到冻结温度和起冻时刻的共同影响,而标准养护 4.0 h 后受冻,混凝土的力学性能主要受起冻时刻的影响。

3.2 早期受冻混凝土孔隙分布规律

不同起冻时刻下混凝土三维孔隙空间分布规律见图 2。由图 2 可知,混凝土中的孔隙形貌呈不规则的多面体结构;随起冻时刻的延迟,混凝土试块内部的较大孔隙相对逐渐增多;相比于其他起冻时刻,4.0 h 起冻时刻后受冻的混凝土内部孔隙相对较发育。

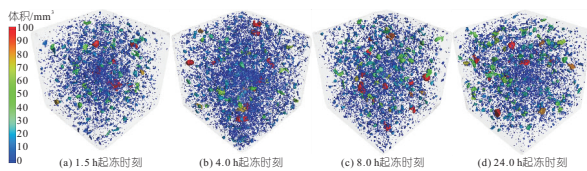


图 2 不同起冻时刻条件下混凝土孔隙空间分布
Fig. 2 Pore space distribution of concrete under different freezing time conditions

3.3 早期受冻混凝土孔隙结构特征

采用孔隙率、平均孔隙表面积、平均孔径和平均孔隙形状因子 4 个参数表征混凝土的孔隙结构特征^[5],进而基于室内 CT 扫描结果分析起冻时刻对孔隙结构特征的影响。通过孔隙体积与混凝土试块体积之比确定孔隙率。平均孔隙表面积指试块内孔隙表面积总和与孔隙数量之比;孔径是指混凝土孔隙的等效直径,平均孔径指试块内孔径总和与孔隙数量之比;孔隙形状因子 S_p 反映孔隙形状,是指某个孔隙的体积与这个孔隙的外接球体的体积之比^[7],计算公式为:

$$S_p = 6V_p / (\pi L_p^3) \quad (1)$$

式中, V_p 为孔隙体积; L_p 为孔隙长度。

S_p 值越接近 1,则孔隙形态越接近标准球。平均孔隙形状因子指试块内孔隙形状因子总和与孔隙数量之比。

依据 VG Studio 软件获取的试块中孔隙体积、孔隙表面积、孔径和孔隙形状因子等 4 个孔隙结构特征参数对应的数据集,并借助 Origin 软件进行 4 类参数数据集统计分析,获得不同起冻时刻早期受冻混凝土孔隙结构表征量分布规律,见图 3、4。由图 3、4 可知,不同起冻时刻孔隙体积分布服从对数正态分布规律,分布拟合的卡方值(ChiSquare)、相关系数(R^2)分别为 1.252、0.999 4,主要分布在 0.01~10 mm³,占比超过 90%;孔隙表面积分布服从指数分布规律,分布拟合的卡方值、 R^2 分别为 0.387、0.999 9,主要分布在 0~5 mm² 范围内;孔径分布服从正态分布规律,分布拟合的卡方值、 R^2 分别为 0.152、0.999,孔径主要分布于 0~2 mm 区间内;孔隙形状因子分布服从正态分布规律,分布拟合的卡方值、 R^2 分别为

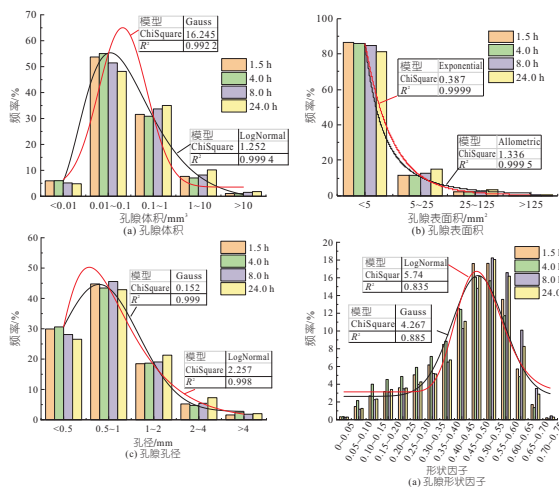


图 3 早期受冻混凝土孔隙结构特征分布

Fig. 3 Distribution of pore structure characteristics of early age frozen concrete

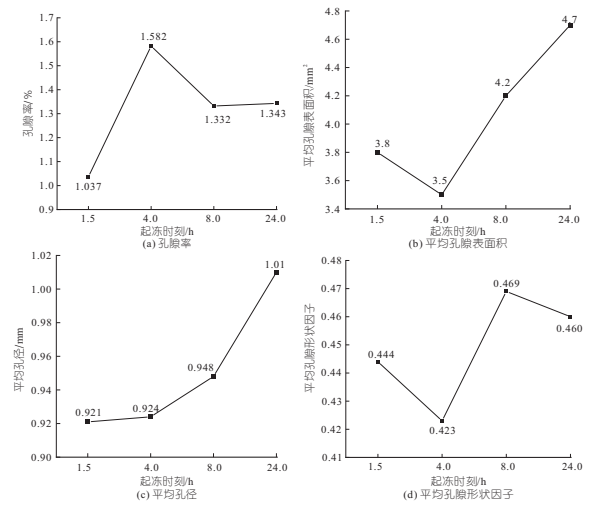


图 4 不同起冻时刻混凝土的平均孔隙结构特征变化
Fig. 4 Change of average pore structure characteristics of concrete at different freezing time

0.426、0.885;随着起冻时刻的延迟,混凝土试块的孔隙率先增大后减小的变化规律,平均孔隙表面积呈先减小后增大的趋势,平均孔径呈二次抛物线增加的变化趋势,平均孔隙形状因子呈先减小后增大又减小的变化趋势。结合混凝土孔隙空间分布规律(图 2),混凝土起冻时刻为 4.0 h 时,不规则小孔隙数量急剧增多,导致混凝土内部损伤劣化严重,进而出现孔隙平均表面积、平均孔径、平均形状因子减小而孔隙率增大的反相关规律。

3.4 早期受冻混凝土力学性能与孔隙结构特征相关性分析

不同起冻时刻早期受冻混凝土孔隙结构与力学性能的相关性见图 5。由图 5 可知,随着孔隙率的增大,早期受冻混凝土抗压强度和弹性模量呈先增大后减小的变化趋势,受冻后混凝土孔隙率与抗压强度和弹性模量均为二次非线性相关关系,相关系数较高,分别达 0.84、0.97;混凝土的

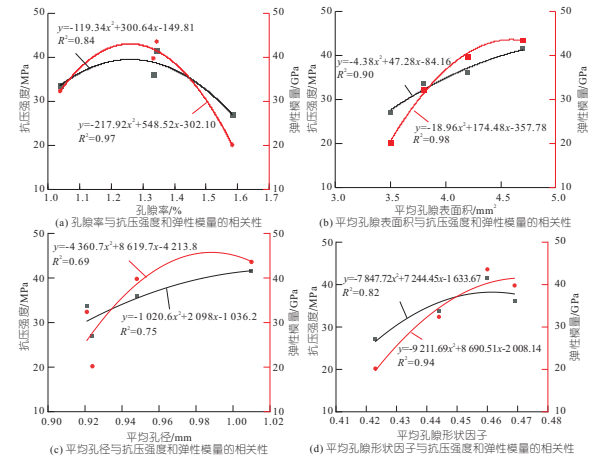


图 5 孔隙结构特征与抗压强度和弹性模量的相关性
Fig. 5 Correlation between pore characteristics vs. compressive strength and elastic modulus

抗压强度和弹性模量随平均孔隙表面积的增加而增大,呈明显的二次非线性正相关,相关系数高于 0.9;平均孔径与混凝土抗压强度和弹性模量呈逐渐增大的变化趋势,相关系数分别为 0.69、0.75,相关性相对较低;随着形状因子的增大,混凝土抗压强度和弹性模量也随之增大,呈明显的二次非线性正相关,相关系数分别达 0.82、0.94。可见,早期受冻混凝土的孔隙结构特征表征量与宏观力学性能相关度由高到低依次为平均孔隙表面积 > 孔隙率 > 平均孔隙形状因子 > 平均孔径,因此在进行混凝土早期受冻宏观损伤相关关系建立时,建议优先选择平均孔隙表面积构建宏观损伤指标。

4 结论

a. 不同起冻时刻孔隙体积分布服从对数正态分布规律,孔隙表面积分布服从指数分布规律,孔径分布服从正态分布规律,孔隙形状因子分布服从正态分布规律。

b. 随着起冻时刻的延迟,混凝土试块孔隙率呈先增大后减小的变化规律,平均孔隙表面积呈先减小后增大的变化规律,平均孔径呈二次抛物线增加的变化趋势,平均孔隙形状因子呈先减小后增大又减小的变化趋势。

c. 受冻后混凝土的抗压强度和弹性模量与孔隙率均呈先增大后减小的二次非线性相关关系,与平均孔隙表面积、平均孔径、平均孔隙形状因子均呈明显的二次非线性正相关,孔隙结构特征表

征量与宏观力学性能相关度由高到低依次为平均孔隙表面积 > 孔隙率 > 平均孔隙形状因子 > 平均孔径,建议优先选择平均孔隙表面积构建早期受冻混凝土的宏观损伤指标,为后期开展混凝土早期受冻损伤影响宏观机制研究提供了理论基础。

参考文献:

- [1] 徐存东,高懿伟,田俊姣,等. 早期受冻损伤对混凝土耐久性影响的试验研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(2): 131-136, 141.
- [2] 胡晓鹏,彭刚,胡长明,等. 早期受冻混凝土服役期黏结性能研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 165-172.
- [3] KIM J K, CHU I Y, YI S T. Minimum curing time for preventing frost damage of early-age concrete [J]. The IES journal part A: civil & structural engineering, 2008, 1(3): 209-217.
- [4] YI S T, PAE S W, KIM J K. Minimum curing time prediction of early-age concrete to prevent frost damage [J]. Construction and building materials, 2011, 25(3): 1439-1449.
- [5] 陈洁静,秦拥军,肖建庄,等. 基于 CT 技术的掺锂渣再生混凝土孔隙结构特征[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1179-1186.
- [6] TIAN W, HAN N. Pore characteristics (> 0.1 mm) of non-air entrained concrete destroyed by freeze-thaw cycles based on CT scanning and 3D printing [J]. Cold regions science and technology, 2018, 151: 314-322.
- [7] BLOOT S J, PYE K. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification [J]. Sedimentology, 2008, 55(1): 31-63.

Pore Structure Characteristics of Early Frozen Concrete and Its Correlation with Macroscopic Mechanical Properties

QU Chun-lai^{1,2}, LIN Rong-peng^{1,2}, LIU Shi-wei^{1,2}, SU Hui^{1,2}, WANG Xiao-yang¹

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Handan 056038, China)

Abstract: Early freezing of concrete is common in the construction of water conservancy projects in northern China. Early freezing damage induces the deterioration of mechanical properties of concrete structures, which seriously affects the safety, stability and service life of engineering structures. Through laboratory uniaxial compression test and CT scan test, the influence law of freezing time and freezing temperature on the mechanical properties of concrete was analyzed, the three-dimensional pore structure of concrete at different freezing time was reconstructed, the pore distribution and pore structure characteristic parameters of concrete at different freezing time were studied, and the correlation analysis between mechanical properties and pore structure of early frozen concrete was carried out. The results show that with the delay of freezing time, the porosity of concrete test blocks increases first and then decreases, the average pore surface area decreases first and then increases, the average pore diameter increases with the trend of quadratic parabola, and the average pore shape factor increases first and decreases then increases and decreases. The correlation between the average pore surface area and the compressive strength and elastic modulus of early frozen concrete is the best. It is suggested that the average pore surface area should be preferred to construct the mesoscopic damage index of early frozen concrete. Relevant research results provide support for revealing the macro and micro damage mechanism of early frozen concrete.

Key words: early exposure to cold; concrete; CT scan; pore structure characteristics; correlation analysis