

应用数字岩心对水工混凝土绝对渗透率的研究

张德状*, 刘俊, 胡雪婷

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年7月26日; 录用日期: 2023年8月16日; 发布日期: 2023年8月28日

摘要

渗透性是评价水工混凝土抗冻抗渗的重要指标, 本文对水工混凝土进行快速冻融试验, 采用工业CT扫描技术并结合Avizo软件建立三维模型, 对渗透率的计算结果与流线结合进行可视化模拟, 可清晰观察到流体流动流线及流体渗透压力分布, 并得到绝对渗透率计算结果。以此对比分析两种水工混凝土在冻融作用下绝对渗透率的变化规律。结果表明: 随着冻融次数的增加混凝土内部的裂隙逐渐变大, 其连通性越好; 相同配合比下的低热和中热水泥混凝土在冻融期间, 其渗透率随冻融次数的增加而变大; 低热水泥混凝土渗透率的变化率明显高于中热水泥混凝土。

关键词

水工混凝土, 冻融循环, Avizo软件, 渗透率

Research on the Absolute Permeability of Hydraulic Concrete Using Digital Core

Dezhuang Zhang*, Jun Liu, Xueting Hu

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

Received: Jul. 26th, 2023; accepted: Aug. 16th, 2023; published: Aug. 28th, 2023

Abstract

Permeability is an important indicator to evaluate the frost resistance and impermeability of hydraulic concrete. In this paper, the rapid freezing and thawing test of hydraulic concrete is carried out, and the industrial CT scanning technology and Avizo software are used to establish a three-dimensional model. The calculation results of permeability were visually simulated by combining streamline distribution with fluid flow, allowing for clear observation of fluid flow lines and

*通讯作者。

fluid permeation pressure distribution. Absolute permeability calculation results were obtained. The variation patterns of absolute permeability of two types of hydraulic concrete under freeze-thaw conditions were compared and analyzed. The results indicated that with an increasing number of freeze-thaw cycles, the cracks within the concrete gradually expanded, which indicated better connectivity. For concrete with the same mix ratio, the permeability increased with the number of freeze-thaw cycles for low heat and medium heat cement concrete. The rate of permeability change for low heat cement concrete was significantly higher than that for medium heat cement concrete.

Keywords

Hydraulic Concrete, Freeze-Thaw Cycle, Avizo Software, Permeability

Copyright © 2023 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

水工混凝土是水工工程主要的建筑材料，由于其处在特殊的环境中，所以对水工混凝土的耐久性有着独特的要求[1]。在寒冷地区，水利工程的混凝土结构暴露在循环冻结和解冻环境中，促使混凝土的防渗性能弱化和使用寿命缩短[2][3]，从而会严重影响到水工结构的安全和稳定性。因此，对冻融破坏条件下水工混凝土的渗透性进行研究具有重要意义[4]。

对于混凝土的渗透性测试方法有水渗透、气体渗透和氯离子 3 大类[5]，同时数值模拟也是研究混凝土渗流性质的重要方法，并可以得到直观可靠的结果，通过模拟混凝土中流体的运动和分布状态，来确定流体在混凝土中的绝对渗透率，研究微观方面的渗流机理，为评价混凝土的抗渗性能提供依据。随着 CT 扫描技术的发展，可以直接获取三维图像，并提取孔隙网络模型，用于数字化分析和流动模拟。杜建芬[6]等人对砂岩进行绝对渗透率研究，利用 Avizo 软件成功重建了三维数字岩心，计算了岩样的绝对渗透率及三维渗透率张量，与实验室测量结果对比发现，三维模拟所得到的绝对渗透率与实验所测数据几乎一致，误差很小，说明结果可信。吕邦民[7]利用 Avizo 构建出煤基多孔碳的三维模型，通过与二维平面孔结构对比，发现三维展现出的结构尺寸更加精确，利用 CFD 软件 Fluent 对三维模型进行渗流模拟。刘婷婷[8]利用基于 CT 图像的三维可视化软件 Avizo 对现浇抗冻植被混凝土进行了三维重建，使用单相渗流模拟对该模型进行了分析。研究结果表明，渗流模拟的结果与物理试验结果吻合较好，这验证了三维重建模型的可靠性以及单相渗流模拟方法的可行性。

目前，基于 CT 扫描技术的 Avizo 软件构建三维能真实反映实际混凝土内部的微观性质，利用数字岩心进行渗流模拟也是近年来渗流模拟的重要方向之一[9]。因而本文对相同配比的低热和中热水工混凝土进行快速冻融试验，采用工业 CT 监测混凝土内部结构变化情况，构建三维模型探讨分析水工混凝土在冻融作用下内部绝对渗透率的演化规律。

2. 试验材料与方法

2.1. 原材料

本试验所用 42.5 级中热硅酸盐水泥、低热硅酸盐水泥分别是华新东川公司和锦屏嘉华水泥公司生产，具体化学成分和技术指标分别如表 1 和表 2 所示。粉煤灰为贵州卓圣丰业环保新型材料开发有限公司生

产(I级), 技术指标如表 3。粗骨料选用连续性级配的花岗岩碎石, 小石和中石粒径分别为 5 mm~20 mm 和 20 mm~40 mm。细骨料为人工砂, 材质为花岗岩, 细度模数为 2.71。减水剂选用的为萘系高效减水剂。拌制混凝土用水为实验室提供的自来水。

Table 1. Chemical composition analysis of cement

表 1. 水泥化学成分分析

水泥品种	化学成分(%)									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	R ₂ O	Loss
中热	21.03	3.92	4.86	62.32	4.22	1.98	0.44	0.07	0.36	0.49
低热	22.92	3.27	4.58	60.66	4.02	2.50	0.46	0.17	0.47	0.86

Table 2. Cement quality inspection results

表 2. 水泥品质检验结果

水泥品种	密度 (g/cm ³)	比表面积 (m ² /kg)	安定性	标准稠度(%)	凝结时间(h:min)	
					初凝	终凝
中热	3.15	344	合格	25.0	3:05	3:47
低热	3.21	355	合格	25.4	4:33	5:35

Table 3. Technical indicators of fly ash

表 3. 粉煤灰技术指标

细度(45 μm 方 孔筛筛余)(%)	需水量比 (%)	Loss (%)	含水量 (%)	SO ₃ (%)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃ (%)	碱含量 (%)	密度 (g/cm ³)	活性指数 (%)
9.5	95	3.9	0.6	1.1	75	1.3	0.9	76

2.2. 混凝土配合比

本试验采用的水工混凝土配合比如表 4 所示。混凝土拌合物浇筑完成后静置 1.5 d, 然后脱模放入标准养护箱进行养护, 养护 28 d 后对 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试样进行取芯(Φ50 mm × 100 mm), 用于快速冻融试验(工业 CT 检测), 并结合 Avizo 软件分析混凝土内部劣化情况。

Table 4. Concrete mix proportions

表 4. 混凝土配合比

水胶比	粉煤灰(%)	减水剂(%)	材料用量(kg/m ³)						
			水	水泥	粉煤灰	砂	小石	中石	减水剂
0.50	35	0.6	83	108	58	539	355	355	0.996

2.3. 实验方法

2.3.1. 快速冻融及工业 CT 试验

为了研究吸水后混凝土冻融劣化情况, 本文对加压饱水后的圆柱体试样进行快速冻融试验, 每冻融

5次采用工业CT (MS-Voxel450, 如图1所示)进行扫描测试, 并采用后处理软件 Avizo 进行内部孔隙结构的三维重构, 以便获取混凝土内部扫描图像及孔隙特征等, 分析水工混凝土在冻融作用下内部渗透率的变化规律。

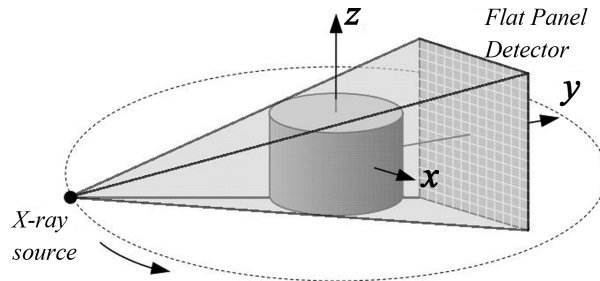


Figure 1. Scanning method of circular cone beam CT
图 1. 圆形锥束 CT 的扫描方式

2.3.2. 理论基础

计算水流的绝对渗透率, 需要对斯托克斯方程组进行求解:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

$$\mu \nabla^2 \mathbf{V} - \nabla P = \mathbf{0} \quad (2)$$

其中, $\nabla \cdot$ 为散度算符; ∇ 为梯度算符; ∇^2 为拉普拉斯算符; \mathbf{V} 是流体的速度; μ 是流体的动力粘度; P 是流体压力。

该方程组是对纳维叶 - 斯托克斯方程(N-S 方程)的简化, 适用条件为: 不可压缩流体(密度恒定流体)、牛顿流体(动力粘度固定流体)、稳态流(速度随时间不变)和层流(低雷诺数下的流动, 不产生湍流)。成功求解 Stokes 方程组后, 即可应用达西定律求解绝对渗透率。

绝对渗透率是指多孔材料允许单相流体通过的能力。对于不可压缩流体, 可以用达西定律求解绝对渗透率:

$$K = \frac{Q\mu L}{A\Delta P} \quad (3)$$

其中, Q 是流速(m^3/s); K 为绝对渗透率(m^2); ΔP 是沿渗流路径 L 上的压差(Pa); A 为流体通过的裂隙网络的横截面积(m^2); μ 为流体的动力粘度(Pa·s)。

2.3.3. Avizo 中单相水渗流模拟参数设置

为深入分析冻融过程中水工混凝土内部孔隙结构的劣化, 文中采用工业 CT 后处理软件 Avizo 对其进行渗流模拟仿真, 研究不同冻融次数下不同孔隙通道的流速变化以及各阶段的绝对渗透率模型。

文中采用 Avizo 软件 Avizo XLab 模块中的绝对渗透率实验模拟器, 该渗流模拟的边界条件设置如下:

- ① 假设流体在孔裂隙空间无滑移产生, 且整个孔裂隙空间处于封闭状态, 内部流体无流出, 外部流体无流入;
- ② 以压力梯度作为边界条件, 其中压力是准静态的;
- ③ 设定入口压力为 0.13 MPa, 出口压力为 0.1 MPa, 水流黏度为 0.001 Pa·s。

3. 模拟结果与讨论

冻融下混凝土绝对渗透率分析

在冻融循环条件下, 低热和中热水泥混凝土的绝对渗透率及变化率如表 5 所示。从表 5 可以看出,

相同配合比下，低热和中热水泥混凝土的绝对渗透率随着冻融次数的增加而不断增大，而低热水泥混凝土的绝对渗透率和增幅均明显高于中热水泥混凝土。

Table 5. Absolute permeability and change rate of low and medium heat cement concrete under different freezing and thawing times

表 5. 不同冻融次数下低热、中热水泥混凝土的绝对渗透率及变化率

冻融次数	低热水泥混凝土		中热水泥混凝土	
	绝对渗透率(mD)	变化率(%)	绝对渗透率(mD)	变化率(%)
0	0	0	0	0
5	0.054	5.40	0.047	4.70
10	0.061	12.96	0.050	6.38
15	0.073	35.19	0.061	29.79

如表 5 所示，经过 5 次冻融后，低热水泥混凝土的渗透率由 0% 增大至 5.4%，相对于 0 次冻融的变化率为 5.4%。10 次冻融后，其渗透率由 5.4% 增大至 6.1%，相对于 0 次冻融的变化率为 12.96%。15 次冻融后，其渗透率由 6.1% 增大至 7.3%，相对于 0 次冻融的变化率为 35.19%。可以看出，低热水泥混凝土的冻融劣化在冻融 5 次后急剧增加。

在中热水泥混凝土经过 5 次冻融以后，中热水泥混凝土的渗透率由 0% 增大至 4.7%，相对于 0 次冻融的变化率为 4.7%。10 次冻融后，其渗透率由 4.7% 增大至 5.0%，相对于 0 次冻融的变化率为 6.38%。15 次冻融后，其渗透率由 5.0% 增大至 6.1%，相对于 0 次冻融的变化率为 29.79%。可以看出，中热水泥混凝土的冻融劣化在冻融 5 次和 10 次时差距不大，冻融 15 次后，劣化加剧。

由图 2 可以看出，在 0~5 次冻融循环期间，低热和中热水泥混凝土的绝对渗透变化幅度相近，两者内部均开始出现微裂隙；在 5~15 次冻融循环期间，低热水泥混凝土渗透率的增幅明显高于中热水泥混凝土，且低热水泥混凝土内部孔隙结构劣化较严重，渗透率增幅到了 29.79%，相对于中热水泥混凝土，渗透率增幅到了 25.09%。

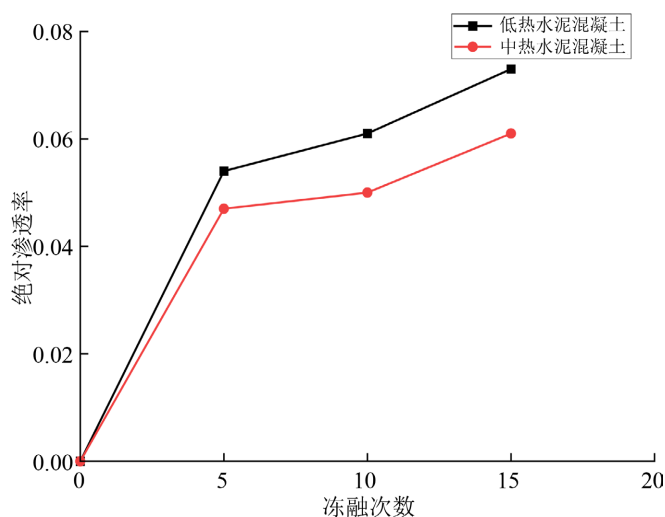


Figure 2. Effect of freeze-thaw cycles on the absolute permeability of hydraulic concrete

图 2. 冻融循环对水工混凝土绝对渗透率的影响

图3至图10分别表示了低热和中热水泥混凝土不同冻融次数下不同孔隙通道的流速变化以及各阶段的绝对渗透率模型。由图3至图10的可视化模型观察到,在没进行冻融循环之前,混凝土内部存在孔隙,且处于独立封闭的状态,尚未形成连通孔。随着冻融次数的增加,混凝土内部逐渐劣化,孔隙的数量逐渐增多,原有的孔隙向较大孔隙发展,导致孔隙与孔隙之间形成连通孔;这是由于水冰相变时,产生体积膨胀,在孔隙壁上出现冰膨胀力,如果混凝土内部孔隙的变形和孔隙的空间不能抵消体积膨胀,就会导致孔隙的扩展和裂缝的产生。

由图3至图10可知,随着流线由紫-绿-红的变化,流线流速由低到高。在整个渗流模拟过程中,孔裂隙越大渗流速度越快。随着冻融循环次数的增加,混凝土内部渗流流线越多,说明冻融过程中混凝土内部不断劣化,孔隙连通越明显。

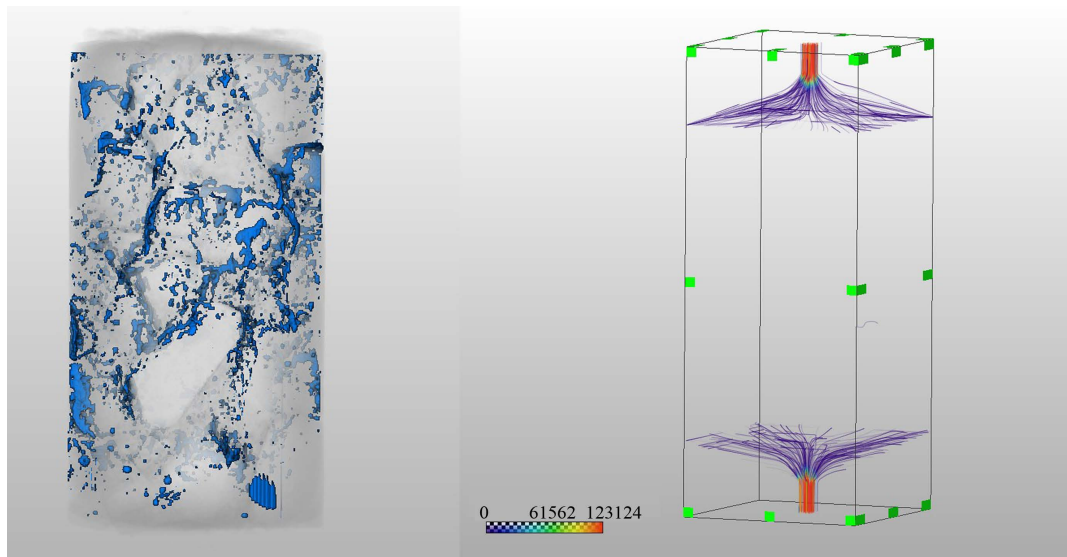


Figure 3. Low heat cement concrete before freeze-thaw

图3. 低热水泥混凝土冻融前

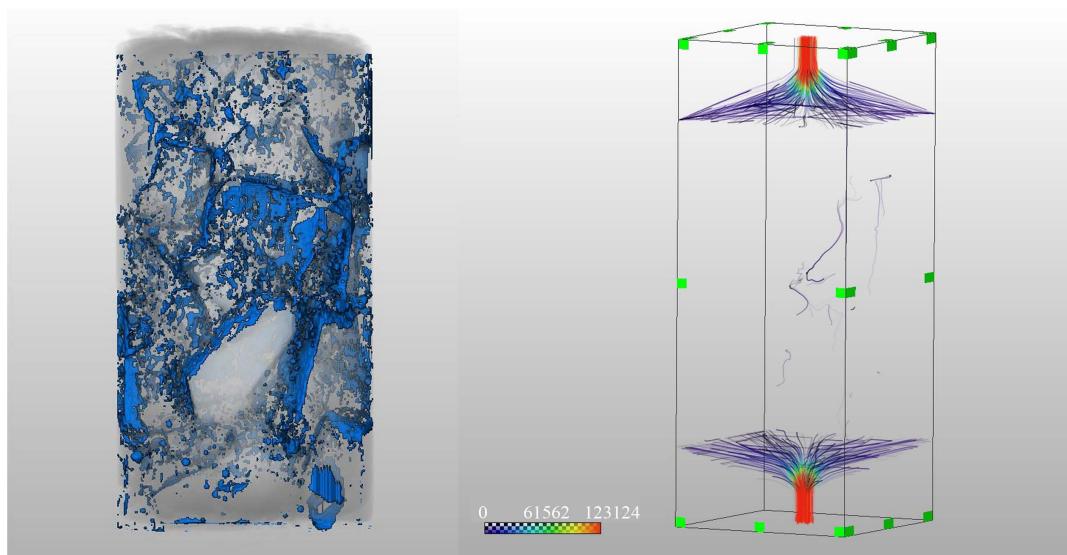


Figure 4. Low heat cement concrete freeze-thaw 5 times

图4. 低热水泥混凝土冻融5次

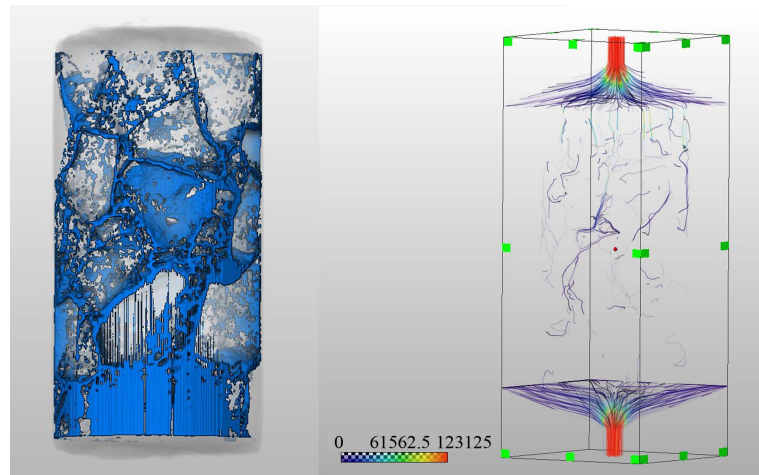


Figure 5. Low heat cement concrete freeze-thaw 10 times
图 5. 低热水泥混凝土冻融 10 次

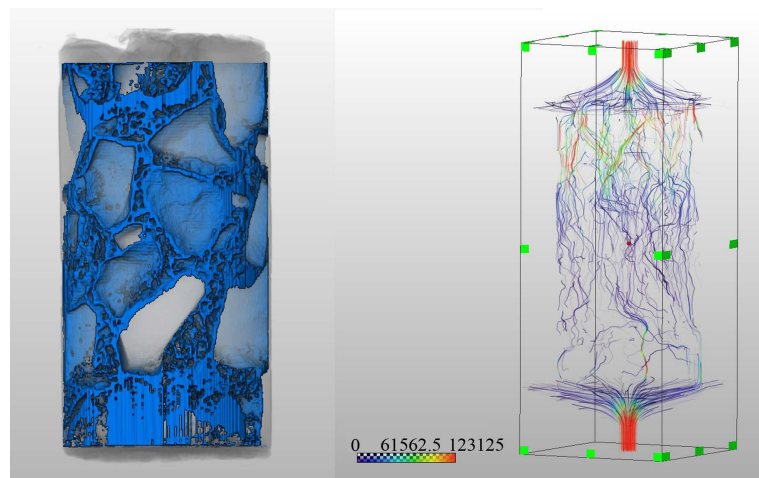


Figure 6. Low heat cement concrete freeze-thaw 15 times
图 6. 低热水泥混凝土冻融 15 次

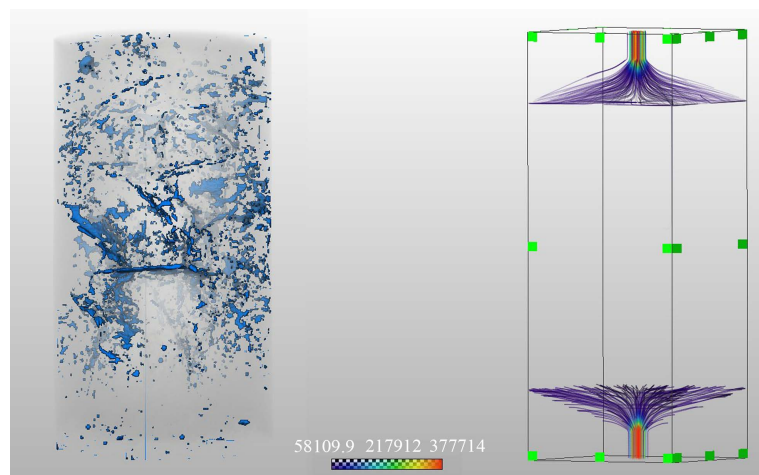


Figure 7. Medium heat cement concrete before freeze-thaw
图 7. 中热水泥混凝土冻融前

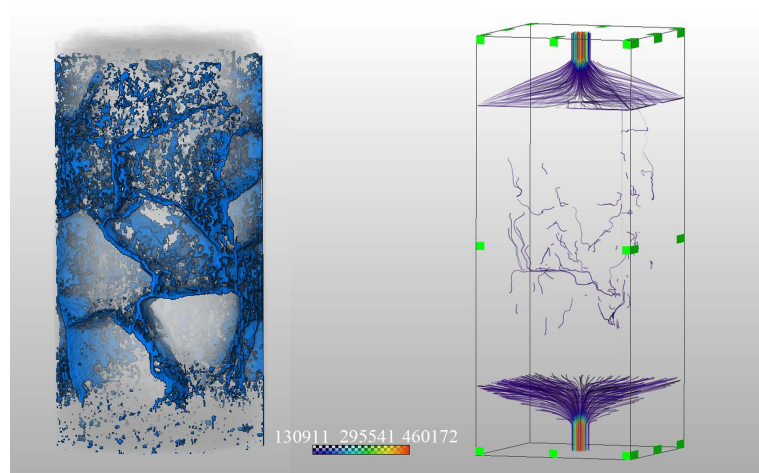


Figure 8. Medium heat cement concrete freeze-thaw 5 times
图 8. 中热水泥混凝土冻融 5 次

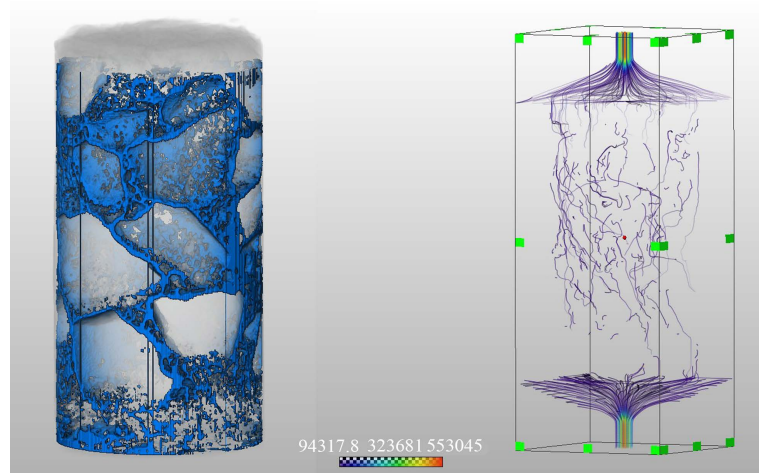


Figure 9. Medium heat cement concrete freeze-thaw 10 times
图 9. 中热水泥混凝土冻融 10 次

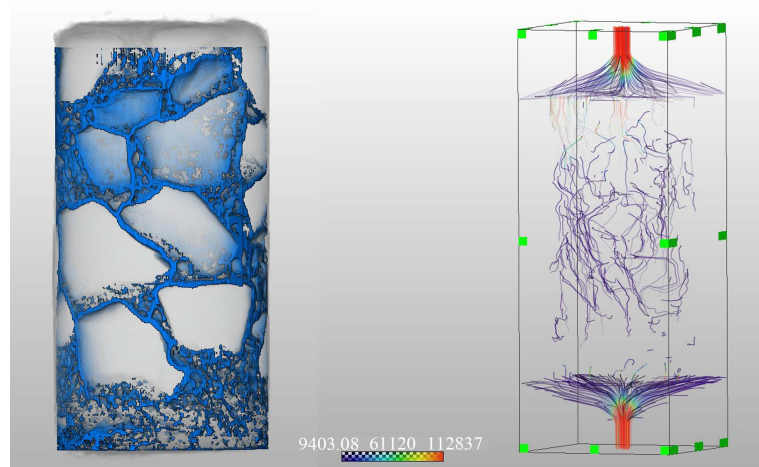


Figure 10. Medium heat cement concrete freeze-thaw 15 times
图 10. 中热水泥混凝土冻融 15 次

4. 结论

本文充分利用了工业 CT 检测技术, 结合 Avizo 软件模拟, 得到了水工混凝土在饱水后进行冻融循环各阶段的渗流模型, 主要结论如下:

1) 相同配合比的低热和中热水泥混凝土在饱水后快速冻融期间, 其内部渗透率均随着冻融次数的增加而明显增大, 且低热水泥混凝土的渗透率和增幅均明显高于中热水泥混凝土。冻融循环 15 次后, 低热水泥混凝土比中热水泥混凝土劣化程度更明显。

2) 通过模拟水工混凝土的绝对渗透率模型发现, 随着冻融循环次数的增加水工混凝土内部原有的孔隙逐渐扩大, 使得孔隙沿着骨料与砂浆界面逐渐连通, 形成连通孔; 冻融次数的增加, 使混凝土内部劣化程度越高, 其连通性就越好, 渗流流线越明显。

参考文献

- [1] Gu, X. and Ouyang, L. (2011) Study of the Durability Characteristics of Hydraulic Concrete. International Symposium on Ecological Environment and Technology of Concrete. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning, China; School of Architecture and Fine Arts, Dalian University of Technology, Liaoning, China. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.477.393>
- [2] Dong, Y.J., Su, C., Qiao, P.Z. and Sun, L.Z. (2018) Microstructural Damage Evolution and Its Effect on Fracture Behavior of Concrete Subjected to Freeze-Thaw Cycles. *International Journal of Damage Mechanics*, **27**, 1272-1288. <https://doi.org/10.1177/1056789518787025>
- [3] 谭鹏, 程庆超, 童富果. 冻融条件下水工混凝土渗透性演化试验研究[J]. 水力发电, 2020, 46(4): 115-119, 125.
- [4] Nili, M., Azarioon, A., et al. (2017) Novel Internal-Deterioration Model of Concrete Exposed to Freeze-Thaw Cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **29**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001978](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001978)
- [5] 王志云, 赵琳. 冻融循环对水工混凝土渗透性影响研究[J]. 水利技术监督, 2020(5): 193-195.
- [6] 杜建芬, 魏博熙, 郭平. 应用数字岩心对砂岩绝对渗透率研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(23): 166-172.
- [7] 吕邦民. 煤基多孔碳的孔隙三维表征及渗透研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [8] 刘婷婷, 温福胜, 赵村罡, 等. 现浇植被混凝土细观孔隙结构分析及渗流模拟[J]. 中国农村水利水电, 2020(10): 88-93.
- [9] 施兴华. 煤中微裂隙结构特征及其对煤渗透性的控制机理[D]: [博士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2023.