

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250297

基于 CT 扫描技术的透水混凝土孔隙特性研究

徐丽娜^{1a}, 魏超^{1b}, 丁旭^{1b}, 黄占芳², 刘宁^{1b}

(1. 吉林建筑大学 a. 交通科学与工程学院; b. 土木工程学院, 吉林 长春 130118;

2. 山东理工大学建筑工程与空间信息学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 为深入研究聚丙烯钢纤维透水混凝土的微观机理, 采用 CT 扫描技术对试件进行扫描, 通过三维数字重构技术建立了孔隙结构的可视化模型。基于图像分析方法对比研究了纤维改性前后材料内部孔隙系统的形态演变特征。结果表明, 聚丙烯钢纤维的加入可有效提高试件的强度, 但会抑制试块的透水性能, 试块各层面孔隙率稳定在 15%~20% 之间, 且连通孔隙占总孔隙的 97% 以上; 未添加纤维的试块中大孔数量较少, 但其体积占比较大; 加入纤维后, 部分大孔转化为中孔并抑制孔隙间的连通, 从而改变孔隙结构。

关键词: 聚丙烯钢纤维透水混凝土; CT 扫描; 孔隙结构; 透水性能

中图分类号: TV431⁺.3; TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0114-05

Study on Pore Characteristics of Permeable Concrete Using CT Scanning Technology

XU Li-na^{1a}, WEI Chao^{1b}, DING Xu^{1b}, HUANG Zhan-fang², LIU Ning^{1b}

(1a. School of Transportation Science and Engineering; 1b. School of Civil Engineering, Jilin Jianzhu University,

Changchun 130118, China; 2. School of Architectural Engineering and Spatial Information,

Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In order to deeply study the micromechanism of polypropylene steel-like fiber permeable concrete, the CT scanning technology was used to scan the specimens, and a visualization model of the pore structure was established through three-dimensional digital reconstruction technology. Based on the image analysis method, a comparative study was carried out on the morphological evolution characteristics of the internal pore system of the material before and after fiber modification. The results show that the addition of polypropylene steel-like fibers can effectively improve the strength of the specimens, but it will inhibit the water-permeability performance of the specimens. The porosity of each layer of the specimens is stable in the range of 15% and 20%, and the connected pores account for more than 97% of the total pores. In the specimens without added fibers, the number of large pores is small, but their volume proportion is large. After adding fibers, some large pores are transformed into medium-sized pores and the connectivity between pores is inhibited, thus changing the pore structure.

Key words: polypropylene steel-like fiber permeable concrete; CT scanning; pore structure; permeability performance

1 引言

海绵城市通过采用透水混凝土构建道路体系, 可有效应对强降雨引发的积水风险, 既能保障路面承载力, 又兼具优异透水性能, 可显著提升城市排水能力^[1]。透水混凝土孔隙结构具有尺寸分

布不均和各向异性特征^[2], 直接影响其力学性能及内部结构。已有研究通过扫描电镜、压汞试验、核磁共振等手段揭示其渗透机理与微观特征, 其中 CT 扫描技术通过无损三维重构, 可精确表征材料内部孔隙网络^[3]。屈春来等^[4]通过 CT 揭示了孔隙结构的复杂变化规律, 并确定了孔隙结构与力学性能的关系; 侯斌等^[5]通过 CT 结合深度

收稿日期: 2025-02-22, 修回日期: 2025-04-06, 接受日期: 2025-04-10

基金项目: 吉林省科技厅重点研发项目(20220203063SF)

作者简介: 徐丽娜(1986-), 女, 博士、副教授, 研究方向为岩土与城市地下工程, E-mail: xulina@jlju.edu.cn

通讯作者: 黄占芳(1978-), 女, 博士、副教授, 研究方向为岩土与城市地下工程, E-mail: huangzhanfang@163.com

学习算法,高效精准地分割孔隙结构。目前,透水混凝土孔隙结构研究成果丰硕,但对纤维透水混凝土孔隙结构特性的认识尚不足。为此,本文通过宏观性能试验,探究了聚丙烯仿钢纤维透水混凝土的力学与透水性能,确定其最优掺量和长度。鉴此,运用 CT 扫描技术分析纤维加入对试件整体孔隙率、逐面层孔隙率、孔隙尺寸、分布及形状的影响以及孔隙结构变化与力学、透水性能的关联,以期为该材料在海绵城市建设中的应用提供理论支撑。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料、配合比及试件制备

制备 100 mm³ 的试件选用 5~10 mm 砾石粗骨料,其表观、紧密堆积密度和空隙率为 2 740.3、1 562 kg/m³ 和 43%;水泥为 P·O42.5,其 28 d 抗压、抗折强度为 58.9、8.3 MPa;硅灰的 SiO₂ 含量为 98.1%;减水剂为聚羧酸型;纤维为波浪型聚丙烯仿钢纤维,长度为 15、30、45 mm,掺量为 2、6、10 kg/m³,性能指标见表 1。根据《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135-2009)^[6]设计配合比,设定孔隙率 20%,标准养护 28 d,材料用量见表 2。

表 1 聚丙烯仿钢纤维性能指标
Tab. 1 Performance indicators of polypropylene macro fiber

参数	密度 /(kg·m ⁻³)	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	耐酸 碱性/%
取值	0.91	540	6 000	≥98

表 2 透水混凝土材料用量
Tab. 2 Material quantities of permeable concrete g

参数	水泥	骨料	硅灰	水	减水剂	纤维
取值	341.2	1 531	37.9	113.7	3.41	0、2、6、10

2.2 无侧限抗压强度试验

利用 YAW-1000 型全曲线试验机进行无侧限抗压强度试验测试,强度取 3 试块平均值,抗压强度计算公式为:

$$f_c = F/A \tag{1}$$

式中, f_c 为抗压强度,MPa; F 为破坏荷载,N; A 为承压面积,mm²。

2.3 CT 扫描测试

利用 MultiscaleVoxel-2000 型 CT 扫描仪扫描后用 Avizo 软件处理,流程见图 1。

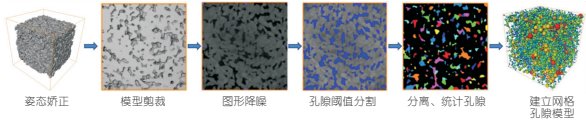


图 1 三维建模流程
Fig. 1 3D modeling workflow

3 聚丙烯仿钢纤维透水混凝土力学性能研究

图 2 为聚丙烯仿钢纤维透水混凝土强度、有效孔隙率与纤维掺量之间的关系。由图 2 可知,抗压强度随纤维长度和掺量增加呈先升高后降低的趋势,但有效孔隙率随纤维掺量增加呈递减趋势,这说明适当添加纤维可有效提高透水混凝土的强度,但添加纤维过长(>30 mm)或掺量过高(>6 kg/m³)时,搅拌过程中易发生弯曲缠绕,会导致内部缠绕结团,从而降低“加筋效应”。同时,纤维会填充试块内部孔隙,阻碍孔隙的团块结构,使有效孔隙率降低。因此,综合考虑强度和有效孔隙率,纤维的最佳长度为 30 mm,最优掺量为 6 kg/m³。

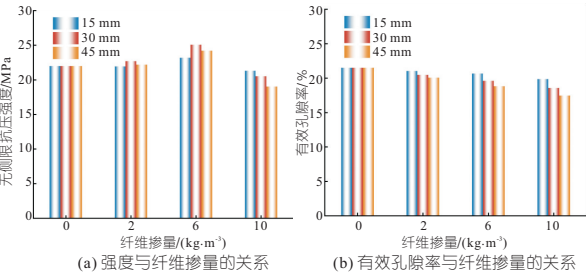


图 2 强度、有效孔隙率与纤维掺量的关系
Fig. 2 Relationship of strength, porosity and fiber

4 CT 扫描结果分析

为深入剖析孔隙特征,特选取素透水混凝土试块(试块 1)和纤维长度为 30 mm、掺量为 6 kg/m³ 的试块(试块 2)为例,进行 CT 扫描测试,获得了两个试块的二维切片图像,见图 3。由于材料密度不同对 X 射线的衰减程度不同,高密度材料衰减更多 X 射线,图像中呈现亮色,低密度材料衰减较少 X 射线,图像中显示为黑色,因此,图 3(a)中明亮区域为岩石骨架,黑色区域为孔隙,图 3(b)中呈现长条形状的部分为纤维。由图 3(b)可知,纤维在基体内构建起了连续的三维网

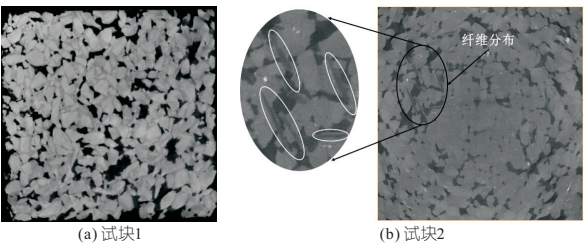


图 3 二维切片图
Fig. 3 2D slice image

络结构,从而强化了骨料与水泥浆体之间的黏结特性,在混凝土受力过程中,纤维与基体之间借助机械互锁机制,能够切实有效地抑制横向膨胀现象,进而对裂缝的扩展起到抑制作用,发挥出“加筋”效能,使试块的无侧限抗压强度的提高。但由于部分纤维侵入到孔隙内部,占据了有效孔隙的空间,从而导致有效孔隙率降低。

4.1 孔隙率分析

4.1.1 整体孔隙率的分析

CT扫描中材料密度差异及孔隙分布致使图像灰度对比显著,通过灰度阈值分割→三维重构→统计计算流程,获得连通孔隙和孤立孔隙的三维重构模型图,见图4。通过量化得到各类孔隙的体积分数,见表3。其中,素透水混凝土总孔隙率与连通孔隙率均高于纤维混凝土,这表明纤维通过阻断连通孔隙并与浆体结合,优化孔隙网络但降低透水性能。

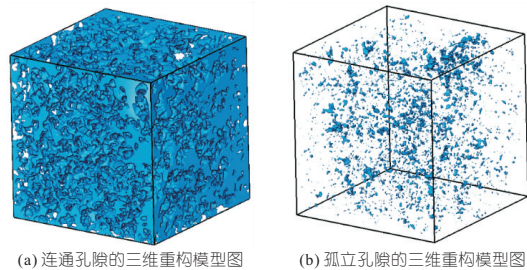


图 4 连通孔隙、孤立孔隙的三维重构模型图

Fig. 4 Three-dimensional reconstruction model diagram of connected pores and isolated pores

表 3 各类孔隙体积分数

Tab. 3 Volume fractions of various pore types %

试块	连通孔隙	孤立孔隙	总孔隙	连通孔隙 / 总孔隙	孤立孔隙 / 总孔隙
1	17.41	0.44	17.85	97.51	2.49
2	16.34	0.24	16.58	98.52	1.48

图5为采用排水法得到试块的孔隙率实测值与CT扫描得到的孔隙率扫描值。由图5可知,与CT扫描值相比,试块1、2通过排水法得到的实测值分别高出4.14%、2.51%,该偏差源于排水法受封闭孔隙与气泡残留影响,导致骨料体积

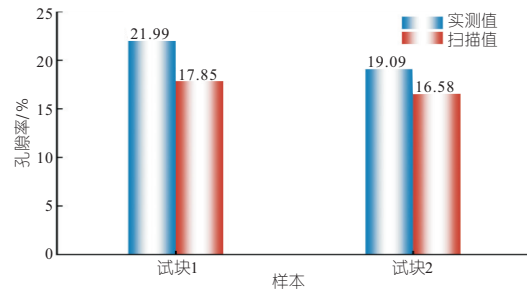


图 5 实测值与扫描值的对比

Fig. 5 Comparison of real and scanned values

低估,计算出孔隙率偏大。

4.1.2 逐层面孔隙率分析

选取试件扫描切片开展逐层面孔隙率分析,图6为切片面孔隙率与切片位置的变化关系,其中横坐标代表试样的下侧到上侧。由图6可知,试件上、下侧切片的面孔隙率显著高于试件中部,这一现象由于试件表面存在大量开放孔隙,且胶凝材料浆体含量较少。孔隙率集中分布于15%~20%区间,试块1、2众数值分别为17.53%、16.08%,实测误差可控,孔隙分布稳定性表明材料具备工程可靠性,可有效规避流体压力骤降风险。在图6中轴向100~1100的切片区间内,试块2逐层面孔隙率的分布离散程度大于试块1。结合图3(b)进行综合分析,导致面孔隙分布出现差异的原因主要有两方面。一方面,在材料搅拌和成型时,纤维易分散不均,形成聚集区和稀疏区。聚集区纤维密度高,孔隙被分割细化,孔隙率降低;稀疏区纤维作用弱,孔隙结构更接近素混凝土,孔隙率较高。另一方面,纤维在材料内随机取向也会影响孔隙结构。当纤维与加载方向平行时孔隙间更易形成连贯通道,有利于流体传输;垂直时,纤维会阻断孔隙连通性破坏孔隙网络结构,从而导致不同区域孔隙结构呈现各向异性。综上所述,纤维分散不均和随机取向共同作用,致使材料内部逐层面孔隙分布出现波动。

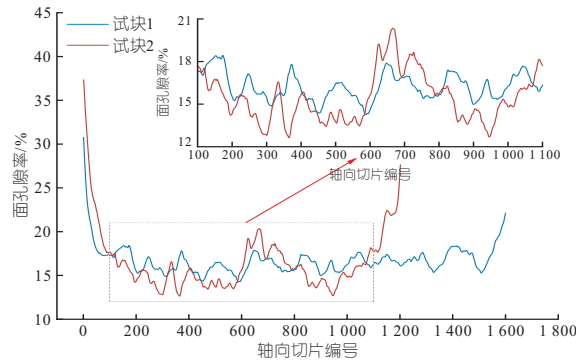


图 6 面孔隙率随切片位置的变化关系图

Fig. 6 Diagram of the relationship between the surface porosity and the slice position

4.1.3 粒度分析

采用三维图像处理技术进行粒度分析,进而解析透水混凝土孔隙结构。基于CT图像数据将不规则孔隙等效为球体计算粒径分布,按等效直径划分孔隙等级: $d < 100 \mu\text{m}$ 为小孔、 $100 \mu\text{m} \leq d \leq 1000 \mu\text{m}$ 为中孔、 $d \geq 1000 \mu\text{m}$ 为大孔,通过三维重构实现孔隙分类可视化,见图7。

图8为等效直径分布图。由图8可知,透水混凝土孔隙结构呈现“量多体小”特征,中小孔隙数量占优但体积占比低,而占比较小的大孔隙贡

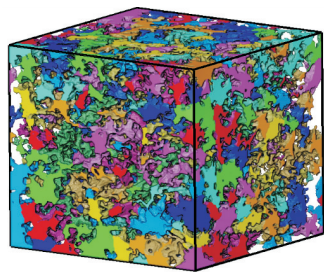


图 7 纤维透水混凝土三维重构可视化图

Fig. 7 Three-dimensional reconstruction visualization of fiber-reinforced permeable concrete

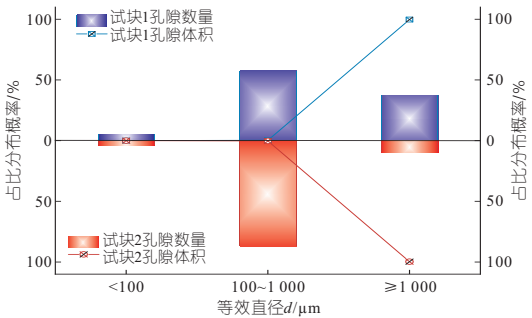


图 8 颗粒的等效直径分布

Fig. 8 Distribution of equivalent diameters of particles

献了绝大部分的孔隙体积。其中,试块 1 的大孔隙体积占比显著高于试块 2,中孔隙占比呈反向关系。这主要由于纤维的掺入通过双重作用改善孔隙体系:在硬化阶段抑制收缩变形,使平均孔径降低;同时促使大孔隙裂解为小孔隙,等效直径数量峰值向小尺寸迁移。

4.2 孔隙的微观结构分析

4.2.1 透水混凝土的孔隙网络模型

采用“最大球”法^[7],在透水混凝土孔隙像素随机选球心,延伸至最近骨架像素构成最大球,多个最大球叠加成簇,选取局部最大球和最小球,定义网络孔隙模型的“孔隙”与“喉道”,简化孔隙空间为球棒模型。球棒模型中,圆球代表孔隙,圆柱棒状代表喉道,棒状越多,配位数、连通性和渗透性越好。图 9 为纤维透水混凝土孔隙三维网络模型。由图 9 可知,透水混凝土的孔隙与喉道非单

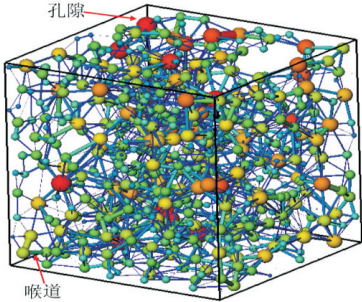


图 9 纤维透水混凝土孔隙三维网络模型

Fig. 9 Three-dimensional pore network model of fiber-permeable concrete

一连接,因内部骨料为无规则多面体,胶凝连接形成多个孔隙,造成多喉道连一孔隙。图 10 展示了纤维透水混凝土的三维孔隙同步模型。由图 10 可知,其孔隙网络分布与 CT 扫描获取的孔隙喉道特征具有良好一致性,有效保证了孔隙结构模型的准确性。

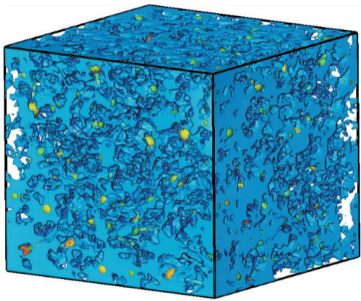


图 10 纤维透水混凝土孔隙三维同步模型

Fig. 10 Three-dimensional synchronous pore model of fiber-permeable concrete

4.2.2 孔隙结构的分布及参数分析

表 4 为试块 1、2 透水混凝土的孔隙半径、喉道半径和喉道长度结构参数。由表 4 可知,试块 1 的各项参数要明显优于试块 2,这是因为纤维在混凝土基体中分散后,会占据原本可能形成较大孔隙或喉道的空间,其三维分布形成网状结构,物理分割浆体和骨料间的空隙,导致孔隙和连接通道(喉道)被细化。

表 4 孔隙结构的分布参数

Tab. 4 Distribution parameters of the pore structure

试 块	孔隙半径特征			喉道半径特征			喉道长度特征		
	参数/μm			参数/μm			参数/μm		
	最小	最大	均值	最小	最大	均值	最小	最大	均值
1	98	6 858	2 771	42	4 186	775	2 893	31 785	12 945
2	36	4 960	723	16	3 255	673	1 365	18 444	6 459

图 11 为透水混凝土孔隙结构配位数。在 CT 扫描分析中,配位数是用来衡量试样孔隙连通性的重要尺度,表示每个孔隙与相连通喉道的数量,能够反映孔隙的连通性。由图 11 可知,试样的配位数分布区间广泛,在 0~3 区间数值占比显著,这一分布特征表明,试样内部形成了具有多

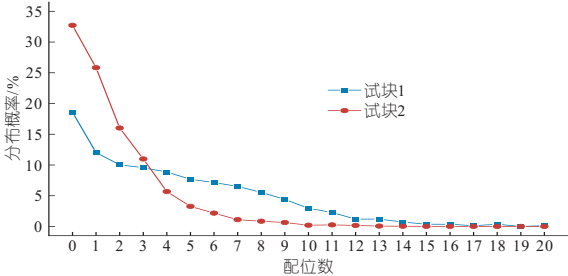


图 11 透水混凝土孔隙结构配位数

Fig. 11 Coordination number of pore structure in permeable concrete

级连通特征的渗流通道网络。然而,素透水混凝土的配位数在 4~10 区间的分布概率显著高于纤维透水混凝土。这一差异充分说明,纤维的掺入致使部分喉道堵塞,进而降低了孔隙间的连通性,最终对透水性能产生负面影响。图 12 为喉道长度及数量的占比。试样内部喉道尺寸是衡量流体通过时通透性的关键指标,也是其具备良好透水性能的重要基础。由图 12 可知,素透水混凝土内部的喉道长度主要集中在大于 5 000 μm 的区间,其中 10 000~15 000 μm 长度区间的占比最为突出;而纤维透水混凝土内部的喉道长度主要集中在小于 10 000 μm 的区间,5 000~10 000 μm 长度区间的占比最为显著。这表明素透水混凝土和纤维透水混凝土内部喉道长度分布差异明显,素透水混凝土喉道尺寸大,水流传输阻力小,能快速排除大量积水,排水效率高。纤维透水混凝土喉道长度较小,排水速度稍慢,但力学性能有独特优势,受外界压力时,纤维能分散应力,阻止裂缝产生和扩展,因此纤维透水混凝土力学性更好,能长期保持良好状态,降低后期维护成本。

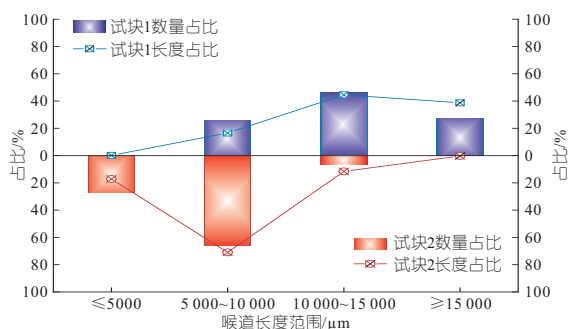


图 12 喉道长度及数量的占比

Fig. 12 Proportion of throat length and quantity

5 结论

a. 在透水混凝土内掺适量纤维,能增强骨料和浆体黏结、抑制裂缝、提升强度,但会占孔隙空间,破坏连通性、降低孔隙率。实际应用时要兼顾纤维增强效果和对孔隙结构的影响,合理设计纤维长度与掺量,优化混凝土性能。

b. 纤维分散不均会形成聚集区和稀疏区,让孔隙率一降一升。同时,纤维随机取向也影响孔隙结构,与加载方向一致时利流体传输,垂直时破坏孔隙网络,呈现各向异性。

c. 透水混凝土孔隙“量多体小”,中小孔隙数量多、体积占比低,大孔隙反之。掺入纤维,让大孔隙裂变成小孔隙,使等效直径峰值向小尺寸移动,改变孔隙分布。

d. 纤维分散后会细化喉道,对透水混凝土的

配位数、喉道的长度和数量会产生显著影响。素透水混凝土的喉道大,排水快,聚丙烯仿钢纤维透水混凝土喉道小,排水稍慢。

参考文献:

- [1] SONG W M, ZHANG M M, WU H. Gray correlation analysis between mechanical performance and pore characteristics of permeable concrete[J]. Journal of building engineering, 2024, 86: 108793.
- [2] 单景松, 刘然舒, 徐林功, 等. 透水混凝土设计孔隙率与实际孔隙率差异分析[J]. 水电能源科学, 2025, 43(3): 79-84. (SHAN J S, LIU R S, XU L G, et al. Analysis of difference between designed porosity and actual porosity of pervious concrete [J]. Water resources and power, 2025, 43(3): 79-84. (in Chinese))
- [3] 谭彩, 潘展钊, 袁明道, 等. 基于计算机断层扫描的浆砌石真实三维孔隙网络模型及其渗流数值模拟[J]. 水电能源科学, 2024, 42(2): 89-93. (TAN C, PAN Z Z, YUAN M D, et al. Realistic 3D pore network model of slurry masonry and numerical simulation of seepage based on CT technology[J]. Water resources and power, 2024, 42(2): 89-93. (in Chinese))
- [4] 屈春来, 林榕鹏, 刘世伟, 等. 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[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12): 164-167. (QU C L, LIN R P, LIU S W, et al. Pore structure characteristics of early frozen concrete and its correlation with macroscopic mechanical properties[J]. Water resources and power, 2023, 41(12): 164-167. (in Chinese))
- [5] 侯斌, 孙水发, 张蕊, 等. 基于 U~2-Net+ 的透水混凝土 CT 影像孔隙分割[J]. 水电能源科学, 2024, 42(2): 62-66. (HOU B, SUN S F, ZHANG R, et al. Pore segmentation of permeable concrete CT images based on U²-net+[J]. Water resources and power, 2024, 42(2): 62-66. (in Chinese))
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 透水水泥混凝土路面技术规程: CJJ/T 135-2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for pervious cement concrete pavement: CJJ/T 135-2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [7] WU Y Q, TAHMASEBI P, LIN C Y, et al. Effects of micropores on geometric, topological and transport properties of pore systems for low-permeability porous media[J]. Journal of hydrology, 2019, 575: 327-342.