

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdcq.2019.0072

南轩,刘艳慧,李靖,等.微颗粒通过透水混凝土运动堵塞规律研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):163-170. NAN X, LIU Y H, LI J, et al. Blockage rules of micro particles through permeable concrete movement[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 163-170. (in Chinese)

微颗粒通过透水混凝土运动堵塞规律研究

南 轩^{1,2}, 刘艳慧^{1,2}, 李 靖^{1,2}, 王 静^{1,2}, 张明飞^{1,2}, 翁之宇^{1,2}

(1. 云南农业大学 建筑工程学院, 昆明 650000; 2. 云南省高校城乡水安全与节水减排重点实验室, 昆明 650000)

摘要:为了研究透水混凝土内部孔隙中渗流及堵塞问题,采用透水混凝土堵塞测试装置模拟降雨初期地表微颗粒透过混凝土的流动规律和分布情况,利用CT扫描技术并结合Avizo软件重构其内部的孔道结构,用CFD中DEM模型(计算流体力学中的离散颗粒模型)对昆明市地表微颗粒通过透水混凝土的过程进行多相流模拟。结果表明:CFD数值模拟得到的结果和实验比较吻合,颗粒粒径范围100~500 μm的地表微颗粒对混凝土有一定程度的堵塞,仍具有较好的透水效果(较高的渗透系数),而100 μm以下加入之后的颗粒堵塞较为显著,且渗透系数基本趋近于0;但更为重要的是通过DEM模拟分析发现0~50 μm的小颗粒通过混凝土时渗流速度缓慢并且部分粘连在孔道壁面导致直径减小影响渗流效果。

关键词:CT扫描;3D重构;透水混凝土;微颗粒;渗流;堵塞

中图分类号:TU99 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Blockage rules of micro particles through permeable concrete movement

NAN Xuan^{1,2}, LIU Yanhui^{1,2}, LI Jing^{1,2}, WANG Jing^{1,2}, ZHANG Mingfei^{1,2}, WENG Zhiyu^{1,2}

(1. School of Architectural Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650000, China;

2. Key Laboratory of Water Safety and Water Saving and Emission Reduction, Yunnan University, Kunming 650000, China)

Abstract: In order to address the problem of pore seepage and plugging in pervious concrete, a pervious concrete plugging test device was used to simulate the flow and distribution of surface micro-particles through concrete in the initial stage of rainfall. The pore structure was reconstructed by CT scanning technology and avizo software. The surface micro-particles in Kunming were modeled by DEM model in CFD. Particles were simulated by multiphase flow through the process of permeable concrete. The results showed that the CFD numerical simulated results were in good agreement with the experimental results. The surface micro-particles with particle size ranging 100-500 μm had a certain degree of blockage to the concrete, and still had a good permeability (higher permeability coefficient). The blockage of particles below 100 μm was more significant, and the permeability coefficient approached the basic level of zero; More importantly, it was found that the seepage velocity of 0-50 μm particles passing through concrete was slow and partially adhered to the wall of the tunnel, leading to the decrease of the diameter, which affected the seepage.

Key words: CT scan; 3D reconstruction; permeable concrete; micro particles; seepage; blockage

收稿日期:2018-11-19 修回日期:2019-01-03 网络出版时间:2019-03-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190311.1038.002.html>

基金项目:云南省教育厅重点实验室专项基金;水利部科技推广计划项目(2014TG2411)

作者简介:南 轩(1992—),男,陕西西安人,主要从事市政管网及流体的数值模拟研究。E-mail:1053010027@qq.com

通信作者:李 靖(1969—),男,云南曲靖人,教授,主要从事海绵城市新材料方面研究。E-mail:119026815@qq.com

由于近年城市内涝灾害频发,间接驱动了我国海绵城市建设的快速发展,其中透水混凝土因其自身良好的透水性能被应用到城市的多种路面上。透水混凝土的孔隙率一般在 15%~25%,渗透率一般为 2~6 mm/s,最高 10 mm/s 以上,透水混凝土的主要优点是能够通过混凝土材料孔隙结构输送大量的水,从而减少或消除雨水径流带来的问题。但与此同时,透水混凝土在城市建设的应用实践中不可避免的存在使用寿命的问题,由于外部环境因素与自身内部结构的影响,透水混凝土存在透水功能弱化的现象,影响城市防涝的整体建设并且重复更换透水混凝土势必造成人力物力的浪费,所以探究透水混凝土的堵塞机理同时研究提高透水混凝土的功能寿命具有理论意义与实践价值。

国内外相关专家及学者已对此问题展开了研究并取得了成果,Brattebo B O 和 Booth D B^[1] 在 2003 年对停车场的透水混凝土的结构耐久性、渗透能力及渗透水的质量进行评价,结果表明:通过透水混凝土的雨水中有毒物含量比直接从沥青表面流走的水中有毒物含量低得多;Montes F 等^[2] 和 Luck J D 等^[3] 在 2006 年对透水混凝土的排水性能进行了深入的研究,黄建栋等^[4] 研究透水混凝土渗透衰减规律的试验研究,张娜等^[5] 关于透水混凝土堵塞机理试验研究;前人的研究对透水混凝土的堵塞和渗透情况都有相关介绍,但不同颗粒在透水混凝土内部的堵塞流动规律研究甚少,因此在前人研究的基础上借助 CT 扫描和 Avizo 重构的方法,利用 CFD 数值模拟的相关技术对颗粒在透水混凝土内部的流动规律进行分析^[6]。

首先通过地表微颗粒筛分的方法对昆明市地表微颗粒进行粒度分级,将不同的粒径级别通过渗透率测试仪器和渗透装置进行实验,测出初始的渗透到最后完全堵塞的过程,并通过工业 CT 对透水混凝土进行扫描在 Avizo(能够将 CT 扫描图片转化成三维实体模型软件)中实现 3D 重构,通过 Mesh (Ansys 软件中的网格划分工具)对实体进行网格优化,保证高质量网格不会影响模拟的结果,由于降雨初期雨水与路面的微颗粒形成固液多相流,在进入透水混凝土的孔隙会形成各自的流场不同颗粒流动情况也有区别^[7-8],因此借用 CFD 的 DEM 模型观察多相流的流动情况,了解其内部颗粒堵塞的分布规律,以便为海绵城市透水混凝土路面的清洁与养护带来更合理的方案和对策,从而促进海绵城市合

理规范的大范围推广^[9]。

1 渗透率变化的实验

1.1 透水混凝土试件制作

在本次试验中制作不同掺料配比的再生骨料混凝土共两种模型,一种是便于进行 CT 扫描的 150 mm×150 mm×150 mm 的方形试件,另一种是渗透率测试和堵塞装置要求的直径 100 mm 高度圆柱试件,同时按照不同参考文献有两种堵塞方案首先按照昆明道路地表的微颗粒进行粒径分级实验,3 种是以 100~500 μm 的大颗粒堵塞,另一种是以 1~100 μm 进行小颗粒堵塞实验,以及 1~500 μm 完全按照昆明地表颗粒配比的实验,见表 1。水泥采用某品牌 P·O 42.5 级水泥,性能指标见表 2。

表 1 粒径分布

Tab. 1 Particle size distribution

粒径范围/μm	大颗粒配比/%	小颗粒配比/%	混合配比/%
1~100	0	100	35
100~200	10	0	25
200~300	20	0	20
300~400	30	0	10
400~500	40	0	10

表 2 水泥性能

Tab. 2 Properties of cement

凝固时间/min		3D 抗折强度/3D 抗压强度/MPa		细度/%	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)
初凝	终凝	MPa	MPa	%	(m ² ·kg ⁻¹)
171	247	5.4	25	5	370

水、粉煤灰 F 类 GB/T 1596—2005、减水剂、粗骨料均符合实验要求,通过实验室的混凝土制作和养护装置进行制作^[10]。之前试验过程中发现水灰比 0.35~0.4,设计孔隙率 15%~20%,骨料粒径 4.5~16.5 mm 时,透水混凝土的综合性能最优,因此选择这一组进行试验。

1.2 堵塞的实验和渗透系数测定

渗透系数测定及堵塞装置的工作原理:试验装置上安装了 2 个电子水压力传感器和 1 个超声波流速器,所有传感器通过模数转换器连接电脑。通过水压力传感器可测得试件上、下表面的水头损失,同时通过流速传感器可测出水管内水的流速,就可导入公式(1)。

在试验过程中应注意避免渗透试验中透水混凝土试件的侧壁渗漏,必须在线连续记录渗透系数的变化过程,模拟透水混凝土路面雨水及颗粒渗流的堵塞过程^[10],装置和试件见图 1。

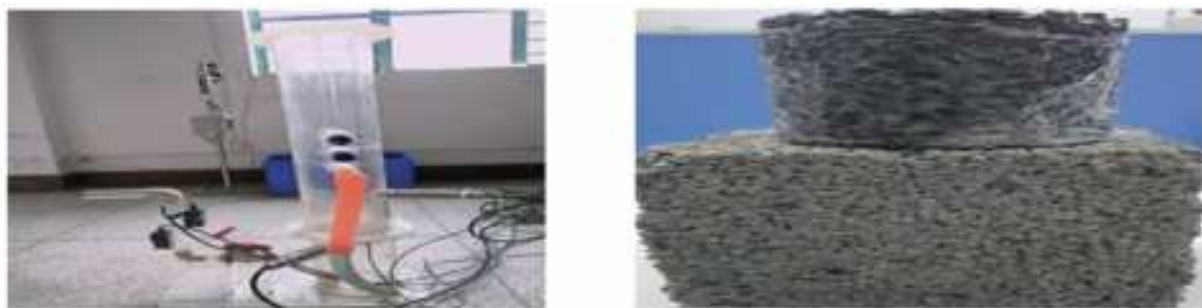


图1 渗透率测试装置和透水混凝土

Fig. 1 Permeability testing device and pervious concrete

渗透系数计算公式为

$$k = \frac{v_1}{i} = \frac{A_{out} L}{A_{eff} \Delta h} v_2 \quad (1)$$

式中: k 为渗透系数(mm/s); v_1 为混凝土内部的平均流速(mm/s); i 为水梯度; v_2 为出水管内出口的平均流速(mm/s); A_{eff} 为混凝土试件的有效截面积(mm²); A_{out} 为出水管的有效截面积(mm²); L 为试件长度(mm); Δh 为水头损失(mm)。

在试验的过程中首先测试出透水混凝土在清水中未堵塞试件的渗透率情况,然后在测试出 100~

500 μm 级别颗粒经过透水混凝土后的实际清水渗透率,最后用 1~100 μm 颗粒通过试件之后测试其定水头下的渗透率,见图 2 右侧。由于在地表颗粒筛分的过程中,1~100 μm 的颗粒数量相对较多,在试验过程中 1~100 μm 微颗粒在水中发生部分溶解快速形成淤泥附着在透水混凝土的表面导致渗透率快速下降并且不易测出其动态堵塞曲线,因此仅记录能反映颗粒随清水进入透水混凝土过程中渗透率动态变化的 100~500 μm 颗粒堵塞曲线,见图 2 左侧。

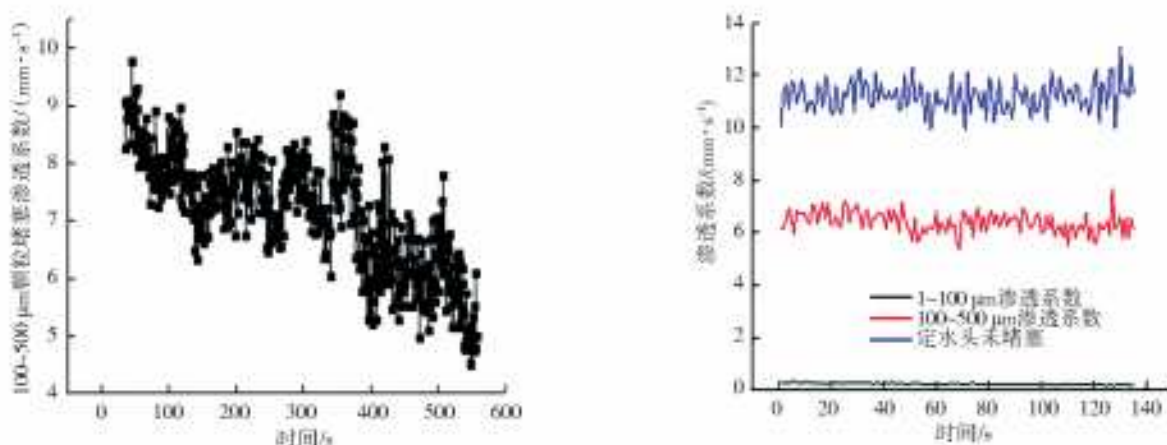


图2 定水头颗粒堵塞过程渗透系数变化曲线以及定水头清水中不同颗粒堵塞后的渗透率值

Fig. 2 The variations of permeability coefficient in the process of particle plugging at fixed water head and the permeability value of different particle plugging in the clear water at fixed water head

通过上面渗透率的变化发现颗粒渗流的过程中随着堵塞时间的延长渗透率下降,细小的颗粒使渗透率迅速下降,同时地表微颗粒的 100 μm 以下的颗粒堵塞是减少透水混凝土的渗流能力的主要因素。

2 CT 扫描下的透水混凝土微观结构重构

2.1 重构步骤

通过 CT 扫描技术和构建三维孔隙的软件来尝试解释微颗粒是如何在孔隙中流动,这将是有助于了解混凝土内部堵塞形成的机理,首先将之前的方形 150 mm×150 mm×150 mm 试件在工业 CT 下进行扫描得到 100 张连续的扫描图片,通过 Avizo

软件进行可视化处理,从二值化的处理、阈值处理到最后的三维构建,在处理过程中由于边缘的一些骨料分布零散导致后面的三维实体形成困难,因此在后处理过程中对扫描的图片在不影响重构前提下进行修剪保证重建的效果^[12-13];然后在 Avizo 中进行面片修复,修复完成之后进行 STL 文件输出,导入 ANSYS SCDM 中进行实体转化形成 CFD 可以识别的模型,见图 3。

2.2 扫描结果分析及网格处理

通过对 150 mm×150 mm×150 mm 的试件进行扫描,用 Avizo 的处理得到了内部的孔隙度的分布情况的数据见表 3。

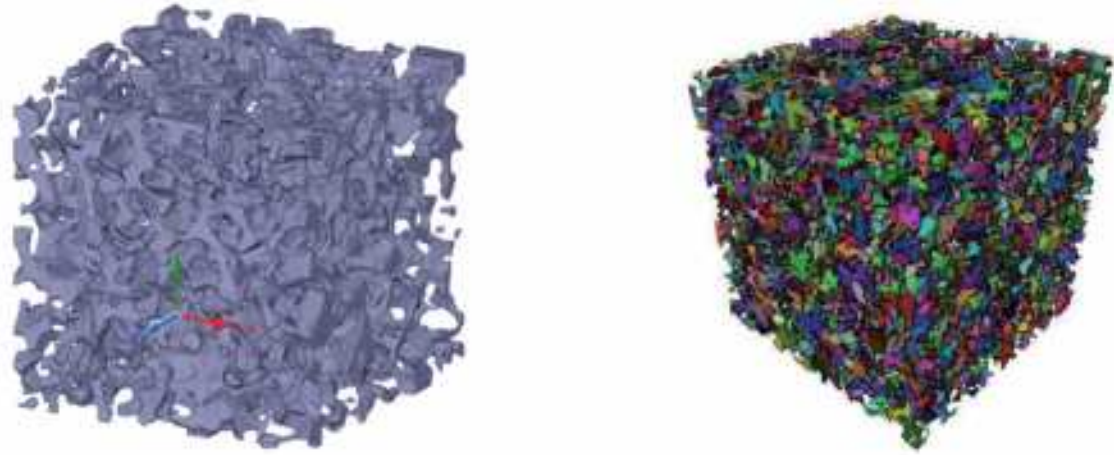


图 3 骨架结构与孔隙模型

Fig. 3 Skeleton structure and pore model

表 3 内部孔隙度的情况

Tab. 3 Internal porosity

参数	孔隙率	孔隙总体积/mm ³	混凝土总体积/mm ³
孔隙	0.209 8	7.408 5×10 ⁶	3.456×10 ⁷

将在 ANSYS 中形成实体透水混凝土, 导入 Mesh 中进行网格划分, 通过中等划分模型和高质量划分模型, 确定在 7 226 302 到更大网格质量对计算结果没有影响, 并且在继续增加网格质量将会影响计算速度导致结果错乱, 在 7 226 302 的网格数时网格洁面系数为 0.189 质量较高, 网格尺寸: 10⁻⁸ ~ 10⁻¹⁰ m³, 这个网格完全符合后面的计算要求; 同时在 Avizo 中得到的内部孔隙度(定义为多孔介质区中流体的体积分数, 即为孔隙率)与试件设计 20 % 的孔隙度接近。因此, 经过 CT 扫描之后的建模是成功, 满足计算的要求^[14]。

3 微观流场的模拟

降雨初期地表微颗粒与雨水形成多相流在不同的初始流速下进入透水混凝土, 在这个过程中是如何变化的, 大量的实验研究表明, 透水混凝土可以按照多孔介质中渗流特征和渗流规律的表述可归纳为: 具有启动压力梯度的非线性律。同时多相流在透水混凝土内的流动状态是什么, 以及微颗粒停留的时间和速度, 以及微颗粒的分布状况, 从这些方面进行研究堵塞微颗粒在孔道内的运动情况是必要的^[15-16]。

3.1 渗流规律和数学方程

颗粒渗流的机理通过达西定律、N-S 方程、连续性方程、斯笃克斯沉降方程等表达出来。N-S 方程为

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \rho F = u \Delta v \quad (2)$$

式中: $\frac{dv}{dt}$ 为速度时间的一阶微分; ρ 为流体密度(kg/m³); p 为压强(Pa); $u(u, v, w)$ 为速度矢量; $F(X, Y, Z)$ 为作用于单位质量流体的彻体力, ∇ 为哈密顿算子; Δ 为拉普拉斯算子。

$$\text{雷诺数 } Re = \frac{\rho D_p u}{\mu} \quad (3)$$

式中: Re 为雷诺数; D_p 为透水混凝土的等效孔径(mm); u 为孔隙水流平均流速(m/s); ρ 为流体密度(kg/m³); μ 为动力黏度(Pa·s)。

渗流速度的计算方法为孔隙水流平均速度乘以孔隙率。

当 Re 小于 10 为达西流动, 大于 10 为非达西线性流, 通过在不同启动压力流速变化来确定渗流从达西渗流变为非达西渗流, 大量的研究已经表明: 当 $Re < 1$ 时, 多孔介质的无量纲渗透率几乎保持不变, 但随着雷诺数 Re 的增大, 渗透率逐渐降低, 由于残差曲线很难收敛所以不过多讨论湍流的情况^[17-18], 同时确定在混凝土多孔介质流动满足斯笃克斯在层流区和过渡区的 Re , 因此主要考虑通过斯笃克斯公式进行模拟试验的验证。斯笃克斯沉降方程

$$v = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g}{C_D} \frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_l} d} \quad (4)$$

式中: v 为颗粒沉降的速度; g 重力加速度(m/s²); ρ_p 颗粒密度(kg/m³); ρ_l 流体密度(kg/m³); d 为颗粒直径(m); C_D 拽力系数与颗粒大小、形状、粗糙度、沉速有关; 拽力系数 C_D 与 Re 的关系见图 4。

具体影响颗粒沉降速度包括如下几个方面。

- (1) 颗粒的因素包括尺寸、形状、密度、是否变形等。
- (2) 介质的因素包括流体的状态(气体还是液体)、密度、黏度等。
- (3) 环境因素包括温度(影响 ρ 、 μ)、压力、颗粒

的浓度(浓度大到一定程度使发生干扰沉降)等。

在层流范围内进行因此能满足对应理论要求。

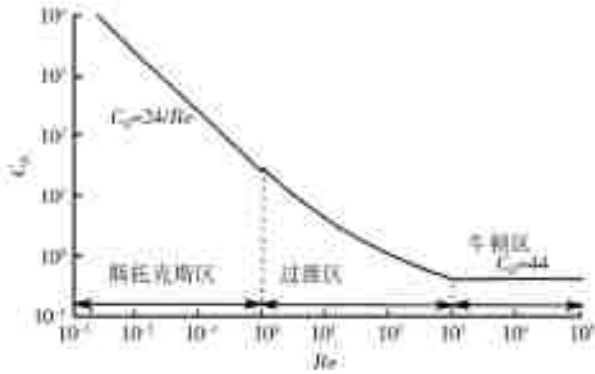


图4 拽力系数 C_D 与 Re 的关系

Fig. 4 Relationship between drag coefficient C_D and Re

3.2 模拟结果及分析

CFD中DEM模型下的多相流的在孔道内的运动规律见图5、6。

从CFD模拟的情况可以看到微颗粒在透水混凝土内部分布规律,从速度云图看出试验的混凝土试件中心处孔隙分布较大,颗粒在中心处的流速呈现增加的趋势,在靠近边界附近呈现略微减小的趋势(由于壁面效应的存在),进口中 $100\sim 500\ \mu\text{m}$ 颗粒流速约为 $100\ \mu\text{m}$ 以下颗粒的20倍,快速沉积在下方,而 $100\ \mu\text{m}$ 以下颗粒随着水流缓慢通过透水混凝土并且部分的颗粒会黏连孔道的壁面上,同时由于 $0\sim 100\ \mu\text{m}$ 颗粒在透水混凝土中缓慢流动阻碍

(4)设备因素:体现为壁面效应。由于本次试验

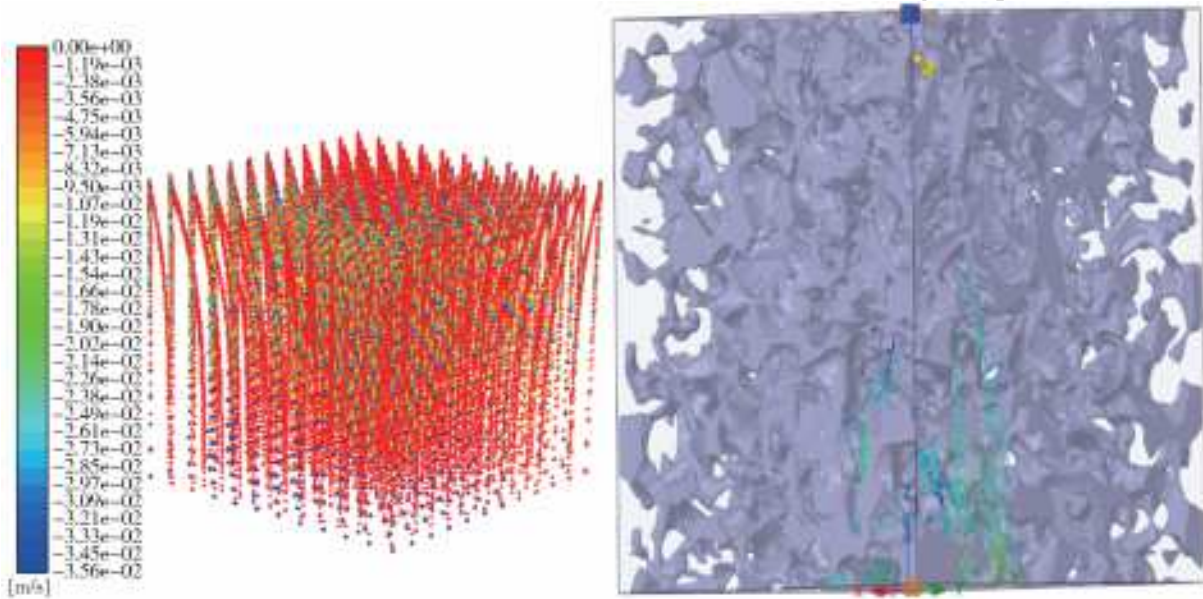


图5 颗粒在混凝土内部的速度分布以及整体瞬时流动情况

Fig. 5 Velocity distribution and instantaneous flow of particles inside concrete

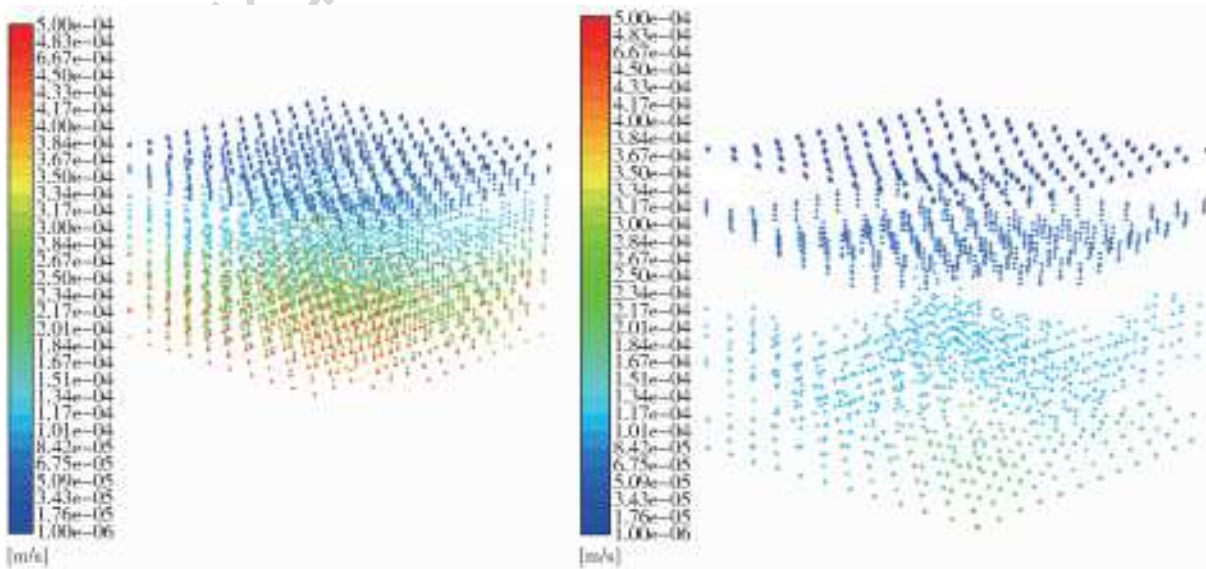


图6 初始时刻的颗粒运动状态到终止时刻的颗粒运动状态

Fig. 6 Particle motion states at the initial time to the ending time

了 100~500 μm 的颗粒运动,并且在下一轮的颗粒进入之后导致其整体流动缓慢影响渗透效果;由于 100~500 μm 颗粒之间存在适当的间隙,100 μm 以下颗粒会进入其中彻底堵死颗粒间的间隙形成堵塞;当下一次颗粒的进入,形成了一层 100~500 μm 的颗粒和一层 0~100 μm 的颗粒之间相互交替覆盖在透水混凝土上层的孔隙内部,随着时间推移将彻底堵塞混凝土,从而使渗透率下降到几乎为零,与之前的渗透率测试试验相符合,但应该深刻认识在孔隙内部小颗粒的运动是极为缓慢并且会部分粘连在孔道的壁面上情况,这是在试验中无法观测到的。

为了更加深入的了解其对 100 μm 以下颗粒的运动规律了解,继续进行 1~100 μm CFD 分析,见图 7。

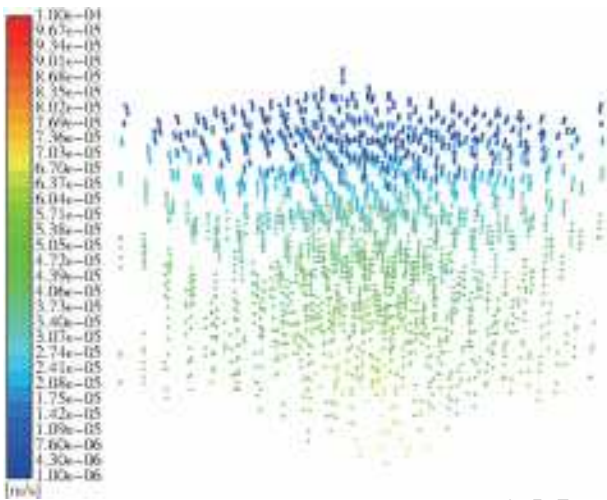


图 7 1~100 μm 颗粒的流动分布情况
Fig. 7 Flow distribution of 1-100 μm particles

可以了解到在 100 μm 以下的颗粒中在 50 μm 会成为一个分界点,其以下的颗粒流动的速度相对较慢,这一部分才是导致透水混凝土渗透效果降低的主要原因,同时对 1 μm 以下的颗粒进行流动规律分析,发现其 1 μm 以下的颗粒在流动过程中流速保持一致,基本不会出现颗粒先后流动的情况,见图 8。

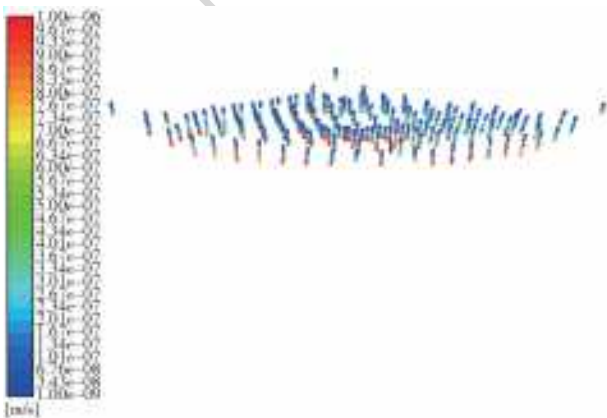


图 8 1 μm 以下颗粒的流动分布情况
Fig. 8 Flow distribution of particles below 1 μm

整体而言,颗粒在沿程阻力和流体浮力及重力作用下流速呈现增加的趋势但是由于 0~100 μm 的颗粒初始渗流阶段速度极为缓慢从而影后面下渗的微颗粒,导致在表层的几厘米范围内形成各种颗粒的混合堵塞^[19]。

对进出口颗粒数量用 DEM 模型在大颗粒出口后开始进行统计,见图 9。

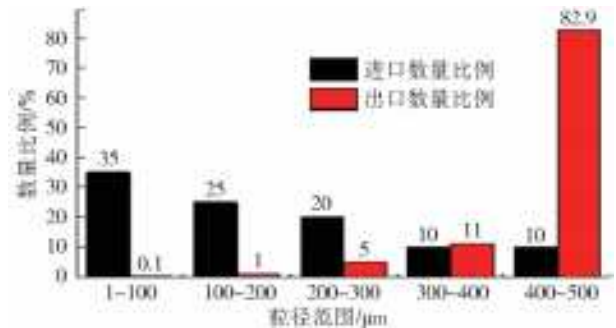


图 9 进出口粒径数量统计
Fig. 9 Statistics of import and export particle size

从图 10 可以发现在一定的时间范围内大颗粒从混凝土下边出口流出的比例较高,在渗流过程中,主要依靠重力与浮力、固液相间作用力对小颗粒渗流影响较大,导致其在孔道内流动缓慢影响大颗粒渗流效果才会导致更严重的堵塞,通过颗粒的垂向速度云图得到不同粒径的平均速度曲线,同时在雷诺数确定的情况下颗粒的运动速度仅与颗粒密度 ρ_p 、直径 d 有关其余均为常量,将相关的参数带入斯笃克斯方程得到 $u = A \sqrt{\frac{\rho_p - 1000}{1000}} d$ 二元回归方程,其中在 Re 确定的情况下 A 为常量,平均速度的曲线接近与二元回归方程基本符合斯笃克斯沉降理论的颗粒运动规律,因此了解其微观孔隙的流动和分布规律有助于更加详细的了解其堵塞形成的问题^[21-23]。

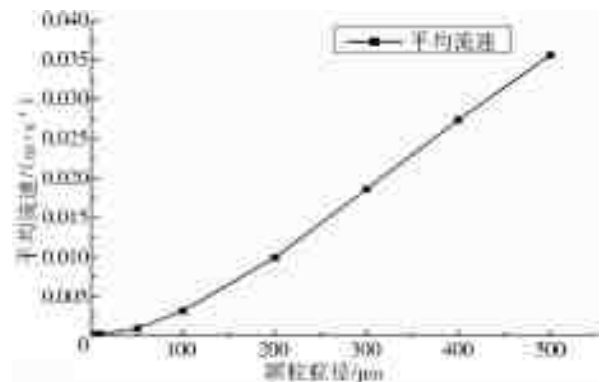


图 10 不同粒径在透水混凝土内的平均流速
Fig. 10 Average velocity of different particle sizes in pervious concrete

4 结论

运用 CT 扫描和 Avizo 3D 可视化软件重构透

水混凝土的微观孔隙结构和实体模型,验证地表径流中的不同粒径微颗粒通过透水混凝土的分布情况和堵塞规律;同时模拟的不同压力下的流速也满足实验室对透水混凝土渗透率的测定要求。正确认识了透水混凝土的内部结构,同时发现 $1\sim 100\ \mu\text{m}$ 的颗粒在混凝土内部流动缓慢并且会导致部分颗粒黏附在孔道壁面使孔道直接减少导致渗透效果的下降(与前人研究成果: $0\sim 100\ \mu\text{m}$ 颗粒是堵塞最为重要的原因完全相符^[24])为以后进一步研究混凝土堵塞治理提供一些参考,这也是本次试验要表达的通过微观结构和颗粒流动规律来深层次认识透水混凝土渗流的情况,结论如下。

(1)直径在 $1\sim 500\ \mu\text{m}$ 范围内的地表微颗粒同时随水流进入透水混凝土后,直径 $100\ \mu\text{m}$ 以下的微颗粒流速明显慢于直径 $100\ \mu\text{m}$ 以上的微颗粒。

(2)地表微颗粒中直径 $100\ \mu\text{m}$ 以下的颗粒是减少透水混凝土渗透能力的主要原因,但主要集中在 $50\ \mu\text{m}$ 以下的颗粒。

(3)虽然地表微颗粒中直径 $100\sim 500\ \mu\text{m}$ 的大颗粒进入透水混凝土中初期流速较快,但随着时间的推移 $0\sim 100\ \mu\text{m}$ 小颗粒不断黏连透水混凝土中的孔道致使大颗粒流速减慢,使其不断与后续进入的小颗粒不断沉积黏连并彻底堵塞透水混凝土的孔道。

(4)由于在透水混凝土内部处于层流状态,通过计算发现在 $1\sim 500\ \mu\text{m}$ 的区间内不同颗粒的平均流速基本符合斯笃克斯沉降理论方程,但由于其内部的多孔道导致其适当偏离该沉降里面模型。

在以后的研究中会将颗粒进行荧光标记之后再再进行试验,确定堵塞颗粒具体情况,并且进行堵塞清洗以及酸化溶解的试验。

参考文献(References):

- [1] BRATTEBO B O, BOOTH D B. Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. [J]. Water Research, 2003, 37(18): 4369-4376. DOI:10.1016/S0043-1354(03)00410-X.
- [2] MONTES F, HASELBACH L. Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete [J]. Environmental Engineering Science, 2006, 23(6): 960-969. DOI: 10.1089/ees.2006.23.960.
- [3] LUCK J D, WORKMAN S R, HIGGINS S F, et al. Hydrologic properties of pervious concrete [M]. Transactions of the ASABE, 2006: 1807-1813. DOI: 10.13031/2013.22301.
- [4] 黄建栋,赵方冉. 透水混凝土渗透衰减规律的试验研究 [J]. 混凝土, 2014(12): 69-72. (HUANG J D, ZHAO F R. Experimental study on permeability and attenuation of permeable concrete [J]. concrete, 2014 (12): 69-72. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2014.12.018.
- [5] 张娜. 透水混凝土堵塞机理试验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014. (ZHANG N. Experimental study on the plugging mechanism of pervious concrete [D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese))
- [6] LIM E, TAN K H, FWA T F. Effect of mix proportion on strength and permeability of pervious concrete for use in pavement [J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2013(10): 1565-1575. DOI:10.11175/easts.10.1565.
- [7] 张娜,崔新壮,张炯,等. 路堤荷载作用下透水性混凝土桩减压沉降效应研究 [J]. 山东大学学报(工学版), 2013, 43(4): 80-86. (ZHANG N, CUI X Z, ZHANG J, et al Study on the decompression and settlement effect of permeable concrete piles under embankment load [J]. Journal of Shandong University (Engineering Edition), 2013, 43(4): 80-86. (in Chinese)) DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2013.088.
- [8] 左晓俊,李贺,府灵敏. 高速公路路面径流雨水沉降特性试验研究 [J]. 中国给水排水, 2011, 27(15): 60-63. (ZUO X J, LI H, FU L M. Experimental study on rainfall settlement characteristics of highway pavement runoff [J]. Water Supply and Drainage, China, 2011, 27(15): 60-63. (in Chinese)) DOI: 10.13205/j.hjgc.201805009.
- [9] 王书敏,郭树刚,何强. 城市流域降雨径流水质特性及初期冲刷现象 [J]. 环境科学研究, 2015, 28(4): 532-539. (WANG S M, GUO S G, HE Q. Water quality characteristics and initial scouring phenomena of rainfall and runoff in urban watershed [J]. Environmental Science Research, 2015, 28(4): 532-539. (in Chinese)) DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2015.04.07.
- [10] 姚明来,王莘,陈洲,等. 再生骨料无砂透水混凝土性能试验研究 [J]. 混凝土, 2017(12): 83-86. (YAO M L, WANG S, CHEN Z, et al. Experimental study on performances of sand-free pervious concrete with recycled aggregate [J]. Concrete, 2017(12): 83-86. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2017.12.021.
- [11] 崔新壮,张炯,黄丹,等. 暴雨作用下透水混凝土路面快速堵塞试验模拟 [J]. 中国公路学报, 2016, 29(10): 1-11, 19. (CUI X Z, ZHANG J, HANG D, et al. Simulation of rapid blockage test of pervious concrete pavement under torrential rain [J]. Journal of China Highway, 2016, 29(10): 1-11, 19. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2016.10.001.

- [12] 王子佳,杜新强,冶雪艳,等.城市雨水地下回灌过程中悬浮物表面堵塞规律[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(2):492-49.(WANG Z J,DU X Q,YE X Y,et al.Surface clogging of suspended solids during urban rainwater recharge[J].Journal of Jilin University (Geoscience),2012,42(2):492-49.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1671-5888.2012.02.025.
- [13] 杨小龙,李波,李艳博.基于 CT 扫描技术的透水混凝土堵塞率无损评估方法[J].中外公路,2014,34(5):257-262.(YANG X L,LI B,LI Y B.Non-destructive evaluation method for blockage rate of pervious concrete based on CT scanning technology[J].Chinese and foreign highways,2014,34(5):257-262.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1671-2579.2014.05.061.
- [14] CUI X Z,LIU N K.Experimental study on pore clogging of a porous pavement under surface runoff[J].Geotechnical Special Publication,2014,246:138-146(ED)(36) DOI:org/10.1061/9780784478462.017.
- [15] ZHANG J ,CUI X ,TANG W ,et al.Approximate simulation of storm water runoff over pervious pavement[J].International Journal of Pavement Engineering,2017,18(3):13.Doi:10.1080/10298436.2015.1065993.
- [16] 黄延章,杨正明,何英,等.低渗透多孔介质中的非线性渗流理论[J].力学与实践,2013,35(5)1-8.(HUANG Y Z,YANG Z M,HE Y,et al.Nonlinear seepage theory in low permeability porous media[J].Mechanics and practice,2013,35(5)1-8.(in Chinese)) DOI:10.6052/1000-0879-13-165.
- [17] 张文娟,王媛,倪小东.Forchheimer 型非达西渗流参数特征分析[J].水电能源科学,2014,32(1):52-54,164.(ZHANG W J,WANG Y,NI X D.Characteristic analysis of non-Darcy seepage parameters of Forchheimer type[J].Hydropower and Energy Science,2014,32(1):52-54,164.(in Chinese))
- [18] 郑木莲.多孔混凝土的渗透系数及测试方法[J].交通运输工程学报,2006(4):41-46.(ZHENG M L.Permeability coefficient and testing method of porous concrete[J].Journal of Transportation Engineering,2006(4):41-46.(in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1671-1637.2006.04.010.
- [19] 陈崇希,万军伟.孔隙介质非 Darcy 流基本方程——Forchheimer 等公式具通用性吗?[J].水利学报,2011,42(10):1257-1259.(CHEN C X,WAN J W.Is Forchheimer and other basic equations for non-Darcy flow in porous media universal?[J].Journal of Water Conservancy,2011,42(10):1257-1259.(in Chinese)) DOI:10.1007/s12583-011-0163-z.
- [20] 叶熙.聚合物溶液在多孔介质中的渗流特性研究[D].青岛:中国石油大学,2008.(YE X.Study on the percolation characteristics of polymer solutions in porous media[D].Qingdao:China University of Petroleum,2008.(in Chinese))
- [21] 郭烈锦.两相与多相流动力学[M].西安:西安交通大学出版社,2002.(GUO L J.Dynamics of two phase and multiphase flow[M].Xi'an:Xi'an Jiao Tong University Press,2002.(in Chinese))
- [22] LUO K,FAN W,YANG S,et al.CFD-DEM study of mixing and dispersion behaviors of solid phase in a bubbling fluidized bed[J].Powder Technology,2015,274:482-493.Doi:10.1016/j.powtec.2015.01.046.
- [23] 陈星欣.饱和多孔介质中颗粒迁移和沉积特性研究[D].北京:北京交通大学,2013.(CHEN X X Study on migration and deposition characteristics of particles in saturated porous media[D].Beijing:Beijing Jiaotong University,2013.(in Chinese))
- [24] 刘音钰,姜成,刘杰,等.透水混凝土路面阻塞及其恢复研究进展[J].环境科学与技术,2016,39(S1):159-163,198.(LIU Y Y,JIANG C,LIU J,et al.Research progress on pervious concrete pavement blockage and its restoration[J].Environmental Science and Technology,2016,39(S1):159-163,198.(in Chinese))