

3D 打印纤维再生细骨料混凝土孔隙结构与力学性能

韩 女^{1,3}, 肖建庄^{1,2}, 吕振源^{1,4}, 陈卫华⁵

(1. 同济大学 土木工程学院 上海 200092; 2. 广西大学 土木建筑工程学院 广西 南宁 530004; 3. 宿迁学院 建筑工程学院 江苏 宿迁 223800;
4. 中国建筑第八工程局有限公司 上海 200122; 5. 上海浦东环保能源发展有限公司 上海 200127)

摘要: 3D 打印纤维再生混凝土宏观力学性能呈现显著的各向异性特征,与细观孔隙结构和层间界面区域存在密切相关。基于计算机断层扫描(CT)可视化分析 3D 打印混凝土试样可见,3D 打印再生混凝土试样内孔隙呈椭圆形定向分布。3D 打印再生混凝土内孔隙平均紧密度显著低于浇筑试样,聚乙烯(PE)纤维和玄武岩纤维的掺入导致了紧密度均值的降低。同时,3D 打印再生混凝土试样中孔隙长轴与 Z 轴在 60°~90°夹角的孔隙占比高达 58.0%,远高于相同配合比的浇筑试样。纤维的掺入也对 3D 打印再生混凝土内部孔隙方向趋势产生了影响,PE 纤维 3D 打印再生混凝土试样内垂直于 Z 轴的孔隙占比有所提高,玄武岩纤维试样内所占比例则有所降低。

关键词: 3D 打印混凝土;纤维再生混凝土;孔隙结构;各向异性特征

中图分类号: TU375

文献标志码: A

Pore Structure and Mechanical Properties of 3D Printed Fiber-Reinforced Concrete with Recycled Aggregate

HAN Nu^{1,3}, XIAO Jianzhuang^{1,2}, LV Zhenyuan^{1,4}, CHEN Weihua⁵

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Suqian University, Suqian 223800, China; 4. China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai 200122, China; 5. Shanghai Pudong Environmental Protection Development Co., Ltd., Shanghai 200127, China)

Abstract: The mechanical properties of 3D printed fiber-reinforced concrete with recycled aggregate show significant anisotropy, which is closely related to mesopore structure and interface region. Based on the

visualization analysis of 3D printing concrete samples by computed tomography(CT), the porosity of 3D printed recycled concrete samples is ellipsoidal. The average pore compactness of 3D printed recycled concrete is significantly lower than that of mold-casted samples. The addition of polyethylene fiber and basalt fiber leads to the decrease of the mean compactness. Meanwhile, the ratio of pore length and Z-axis in 3D printed recycled concrete samples is as high as 58.0% at orientations between 60°to 90°, which is much higher than that of mold-casted samples with the same mixture. Fiber addition also affects the pore orientation of 3D printed recycled concrete. The pore in the vertical to Z axis has increased for polyethylene fiber 3D printing recycled concrete specimens, while that has decreased for basalt fiber 3D printing recycled concrete specimens.

Key words: 3D printed concrete; fiber-reinforced recycled concrete; pore structure; anisotropic characteristics

随着建筑 3D 打印技术的快速发展和广泛应用,3D 打印混凝土材料相关研究备受关注。目前主流的打印材料中水泥用量高达 50%~60%,远远高于传统浇筑混凝土^[1]。因此,3D 打印混凝土技术的低碳和经济属性仍存在争议。而再生骨料取代天然砂石应用制备混凝土,可以在减少固废排放的同时降低建筑物成本。因此,3D 打印技术与再生材料的结合被认为是进一步提高 3D 打印混凝土环境和经济效益的关键^[2]。与此同时,为了提高 3D 打印混凝土的力学性能,前人开展了大量 3D 打印混凝土纤维增强方面的工作。钢纤维^[3]、玄武岩纤维^[4]、聚丙烯纤维(PP)^[5]和聚乙烯纤维(PE)^[6]等多种纤维材料得到了较为广泛的研究和应用。

收稿日期: 2023-01-15

第一作者: 韩 女,讲师,工学博士,主要研究方向为 3D 打印混凝土材料。E-mail: hanny921202@163.com

通信作者: 肖建庄,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为再生混凝土材料与结构。

E-mail: jzx@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

建筑 3D 打印流程是打印材料通过打印头挤出并堆叠,在无模板条件下逐层累积最终形成建筑构件的过程。3D 打印混凝土试样的抗压和抗折强度普遍低于相同配合比的浇筑试样^[7]。同时,受到堆积成型工艺的影响,3D 打印混凝土力学性能呈现出显著的各向异性特征。Ma 等^[8]的研究中,当加载方向垂直于试样打印方向时其抗折强度约为 6.51 MPa,可达平行于打印方向时抗折强度的 2 倍。该研究中的试验现象表明,相较垂直于打印方向,平行于打印方向的拉应力更容易诱发贯通裂纹。3D 打印混凝土力学性能的弱化和各向异性特征与其内部包含的薄弱界面区密切相关^[9]。堆叠成型过程导致 3D 打印层间界面区域的孔隙率相较试样的整体孔隙率均值更高,二者的差异性受到混凝土材性、打印层表面湿度以及层间打印时间间隔等多种因素的影响。前人的研究中部分 3D 打印混凝土内层间界面区出现片状连通孔隙,此类情况可判定为打印效果较差,而对于无目测可见孔隙的界面区其打印效果的评价则存在一定难度^[10]。

3D 打印混凝土材料在打印过程中受到螺旋挤出和牵拉作用,其打印层内部孔隙的几何形态也与传统浇筑混凝土不尽相同^[11]。传统浇筑试样内的孔隙受重力作用影响,在竖向方向上略有压缩,但整体上微观孔隙仍以球形孔为主。而 3D 打印混凝土试样内部的孔隙在打印过程中受到牵拉作用,几何形态则以椭球形为主^[12]。多孔材料中孔隙分布的几何特征和规律性,往往对其宏观性能具有直接影响。Davis 等^[13]研究了单轴压力作用下不同长短轴比的椭圆形孔隙周围的应力集中现象,研究中提出单轴压力作用下孔隙周围受拉区的应力大小对孔隙长短轴比的变化并不敏感,但位于长轴端部受压区应力

集中随长短轴比的增大而显著增长。因此,孔隙几何形态和分布方向将对 3D 打印混凝土宏观力学性能将产生直接影响。然而,目前对于 3D 打印试样中孔隙结构空间和方向分布相关的研究仍较为少见^[14]。

本文对比了多种不同配合比的 3D 打印混凝土试样与浇筑混凝土试样的孔隙结构和力学性能,分析了工艺差异和纤维种类对混凝土力学性能和孔隙结构的影响,并探讨了 3D 打印混凝土孔隙结构形态—分布特征与其力学性能各向异性特征的关联性。

1 试验设计

1.1 原材料及配合比

试验研究中制备 3D 打印水泥砂浆所需原材料,主要包括水泥、细骨料、水、纳米粘土、增稠剂、减水剂和纤维。原材料的基本参数如表 1 所示。为了研究再生骨料对 3D 打印混凝土可打印性和力学性能的影响,本文采用了天然细骨料(河砂)和再生细骨料两种材料。以提升 3D 打印材料的力学性能为目的,采用了聚乙烯(PE)纤维和玄武岩纤维对砂浆进行增强。PE 纤维的平均分子量超过 170 万,极高的分子量使得其比强度可达同等截面尺寸钢丝的十余倍,比模量仅次于特级碳纤维。玄武岩纤维是由天然玄武岩高温拉制而成的无机环保纤维材料,此类纤维不仅强度高,兼具耐高温、耐腐蚀等优异特性。表 2 为研究中所用 3D 打印混凝土的配合比,其中纤维掺量为体积掺量。3DP-NR 为 3D 打印无纤维再生混凝土、3DP-NR-P 为 3D 打印 PE 纤维再生混凝土、3DP-NR-B 为 3D 打印玄武岩纤维再生混凝土、MC-NR 为浇筑无纤维再生混凝土。

表 1 原材料及其基本参数
Tab. 1 Raw materials and basic parameters

材料	参数
水泥	42.5 普通硅酸盐水泥
细骨料	粒径不大于 1.25 mm;天然河砂,密度 2 650 kg·m ⁻³ ;再生砂,密度 2 450 kg·m ⁻³
水	自来水
纳米粘土	主要矿物成分为高岭石,平均粒径 200 ~300 nm,粉剂
增稠剂	羟丙基甲基纤维素(HPMC),粉剂
减水剂	聚羧酸减水剂,粉剂
纤维	聚乙烯(PE)纤维;玄武岩纤维

1.2 试验方法

1.2.1 3D 打印混凝土制样

3D 打印试样的制样流程包括打印和切割两个环节,其中打印机框架尺寸为 3.0 m×3.0 m×4.0 m

(X·Y·Z),打印头出料口直径为 30 mm,主要用于细骨料混凝土的打印^[15]。为了满足力学性能测试试样尺寸要求,选用打印 1000 mm×120 mm×90 mm (X·Y·Z)的矩形试件进行切割取样。打印过程中打

表2 3D打印混凝土配合比
Tab. 2 3D printed concrete mixes

编号	体积掺量/(kg·m ⁻³)				水	天然骨料	再生骨料	PE纤维	玄武岩纤维
	水泥	纳米粘土	HPMC	减水剂					
3DP-NR	320	1.60	0.27	0.41	135	160	160	0	0
3DP-NR-P	320	1.60	0.42	0.41	135	160	160	0.75%	0
3DP-NR-B	320	1.60	0.42	0.41	135	160	160	0	0.75%
MC-NR	320	1.60	0.27	0.41	135	160	160	0	0

印头运动速率为 50 mm·s⁻¹,挤出速率为 1.35 L·min⁻¹,单层打印高度为 15 mm。由于 3D 打印试样为无模板制备成形,打印完成后的试样不可直接移动。因此,打印完成的试样在原位置放 24 h,期间采用塑料薄膜覆盖减少水分损失。随后进行标准养护(20℃±2℃温度,95%±5%相对湿度),养护至目标龄期 28 d,取出试样并进行切割。切割后立方体试样尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm。此外,为了研究 3D 打印工艺中挤出流程对混凝土性能的影响,同时制备了一批无振捣的浇筑试样作为对照组,采用相同的养护环境并测试。

1.2.2 力学性能测试

采用 WE-10B 液压万能试验机进行 3D 打印混凝土的抗压强度测定,表征样本采用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方体试样。为了研究 3D 打印混凝土抗压强度与打印方向的关系,在抗压试验中采取了 3 种不同的加载方向,如图 1 所示。抗压强度试验参照 ASTM C109 标准^[16],加载速率为 100 kN·min⁻¹。

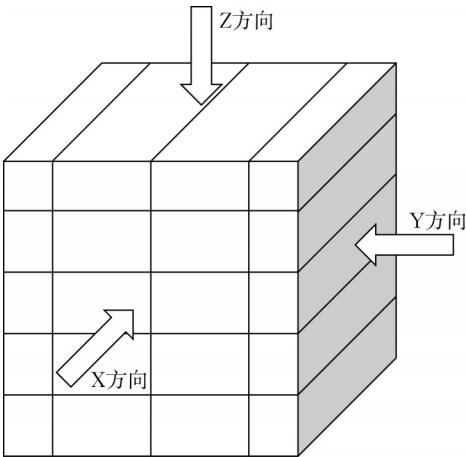


图1 3D打印试样力学性能测试荷载方向示意图
Fig. 1 Loading direction in 3D printed specimen mechanical property tests

1.2.3 CT扫描测试

试验用 CT 扫描设备为 XTH320 LC (Nikon,

Japan),扫描试样尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 的混凝土立方体试样,测试中放射源管电压为 120 kV,管电流为 80 μA。扫描过程中载物台匀速旋转 360°来获取不同角度样品的 X 射线投射投影,每个投影的曝光时间为 0.5 s,单个试样的投影采集数为 2 500 个。投影数据收集完成后,采用设备配套软件进行图像重建,生成并输出灰度图像即 CT 扫描断面图。依据图像灰度值直方图图像,采用最大类间方差法获取孔隙和基体的分割阈值。

采用孔隙紧密度(compactness)描述孔隙偏离理想球体的程度,孔隙紧密度定义如下:

$$C = \frac{V_p}{V_s} \tag{1}$$

式中:C 为紧密度;V_p为孔隙体积;V_s为孔隙外接球形体积。

通常将混凝土材料中的孔隙视作球形,然而由于 3D 打印过程中螺旋挤出过程和逐层堆叠工艺,其内部孔隙结构的形态更加趋近于椭球形。孔隙紧密度取值范围在 0~1 之间,紧密度越低孔隙内长短轴常相差越大,孔隙形态越扁平。在细微观分析中,对椭球形的空间分布采用椭球长轴与 Z 轴的夹角 θ 来表征,如图 2 所示。

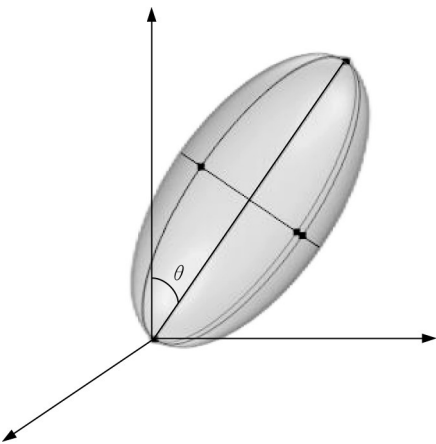


图2 椭球形孔隙方向示意图
Fig. 2 Main axis direction of ellipsoidal pores

2 试验结果及分析

2.1 抗压强度

图3为不同方向荷载作用下3D打印混凝土和浇筑混凝土试样的抗压强度。如图3所示,作为对照组的MC-NR试样抗压强度为30.5 MPa,而相同配合比的3DP-NR试样各个方向荷载作用下的抗压强度均低于浇筑试样。同时,3DP-NR试样的抗压强度呈现出显著各向异性特征,其中Z方向抗压强度最高,其次是Y方向,X方向最低。Y方向抗压强度可达到Z轴的73.2%,而X方向抗压强度仅为Z轴方向的33.8%。PE纤维和玄武岩纤维的掺入均对3D打印再生混凝土的抗压强度有不同程度的改善。其中,3DP-NR-P和3DP-NR-B试样的Z方向抗压分别达到了28.88 MPa和30.33 MPa,这表明通过合理的纤维增强可以解决3D打印混凝土工艺带来的强度劣化问题。与此同时,玄武岩纤维的掺入弱化了3D打印再生混凝土抗压强度的各向异性特征,其X和Y方向抗压强度约为Z方向抗压强度的61.0%和71.7%。

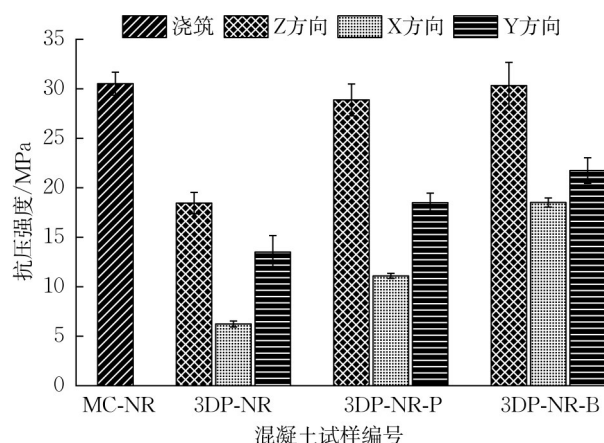


图3 不同荷载方向3D打印混凝土抗压强度

Fig. 3 Compressive strength of 3D printed concrete in different loading directions

2.2 层间界面区域特征

层间界面区域相对于打印条带内部,具有孔隙率高、强度低的特点。由于薄弱的界面区的存在,3D打印试样力学性能整体弱于浇筑试样。部分研究指出,经过打印工艺和配合比的优化,3D打印试样中的层间界面区黏结性能可能得到显著改善^[17]。3D打印试样内底部打印层受到上覆层重力作用,因此黏结性优良、无肉眼可见孔隙(图4d)。因此,孔隙率的统计在打印效果优良的3D打印试样层间界面

研究中并不适用。而CT扫描断面图中的灰度值与材料的密度值成正相关关系,因此采用断面图灰度分布曲线来锁定3D打印混凝土内低密度的层间界面区具有较好可行性。

如图4所示,浇筑试样和3D打印试样中平均灰度的分布均呈连续的波浪形曲线。其中,浇筑试样的灰度曲线,受到孔隙在平面内随机分布的影响,灰度曲线曲折,波谷数量众多。由于浇筑试样内的孔隙孔径大,因此波长较长。3D打印试样内灰度曲线中同样分布着一系列随机的波谷,但相较浇筑试样波段的波长更短。与浇筑试样不同的是,3D打印试样灰度曲线在层间界面区的位置出现了显著的波谷,其波谷值远远低于图像的整体平均灰度。图4a中由于层间界面区内存在大量可观测孔,可直接观测到灰度值曲线最小值所在位置即为层间界面区所在位置。对于层间无显著连通孔隙的试样(图4d)分析中,受到3D打印混凝土内打印条带孔隙的影响,导致灰度曲线最小值与层间界面并不统一。因此,需要对图像灰度区间进行过滤处理来实现砂浆区域的灰度均值。砂浆灰度的分析曲线中,MC-NR试样中的砂浆灰度曲线峰值迅速减小,呈现锯齿形分布,说明浇筑试样中排除肉眼可观测孔隙的影响后,砂浆基体具有良好的均匀性。3D打印试样中通过对砂浆灰度均值曲线的分析,灰度值最低点即为该断面中的层间界面区域。3D打印水泥基体的均匀性相对较差,在层间界面边界一定范围内砂浆基体的密度仍低于层内砂浆。

2.3 孔隙结构特征

浇筑混凝土和3D打印混凝土试样孔隙结构基本参数如表3所示。表中统计了基于工艺差异的不同配合比下孔隙率和孔隙数量,并对孔隙按孔径分为2类,即大孔(孔隙直径大于1 mm)和小孔(孔隙直径小于1 mm)。分别对大孔和小孔的孔隙参数进行了统计。

相同配合比的浇筑试样孔隙率可达3D打印试样的2倍以上,这一结论与通常认为的3D打印混凝土孔隙率更高相悖^[12,18]。但需要特别注意的是,为了提高浇筑试样和3D打印试样的可比性,在浇筑试样的制样过程中未进行振捣处理,直接导致了浇筑试样孔隙率的提高。在大孔孔隙率占比方面,浇筑试样内的大孔孔隙率占比达到总孔隙的39.8%,而3DP-NR中的大孔占比仅为28.5%。从大孔数量上看,3DP-NR试样内的大孔数量仅为MC-NR内大孔数量的十分之一。大孔占比和数量的降低与3D打

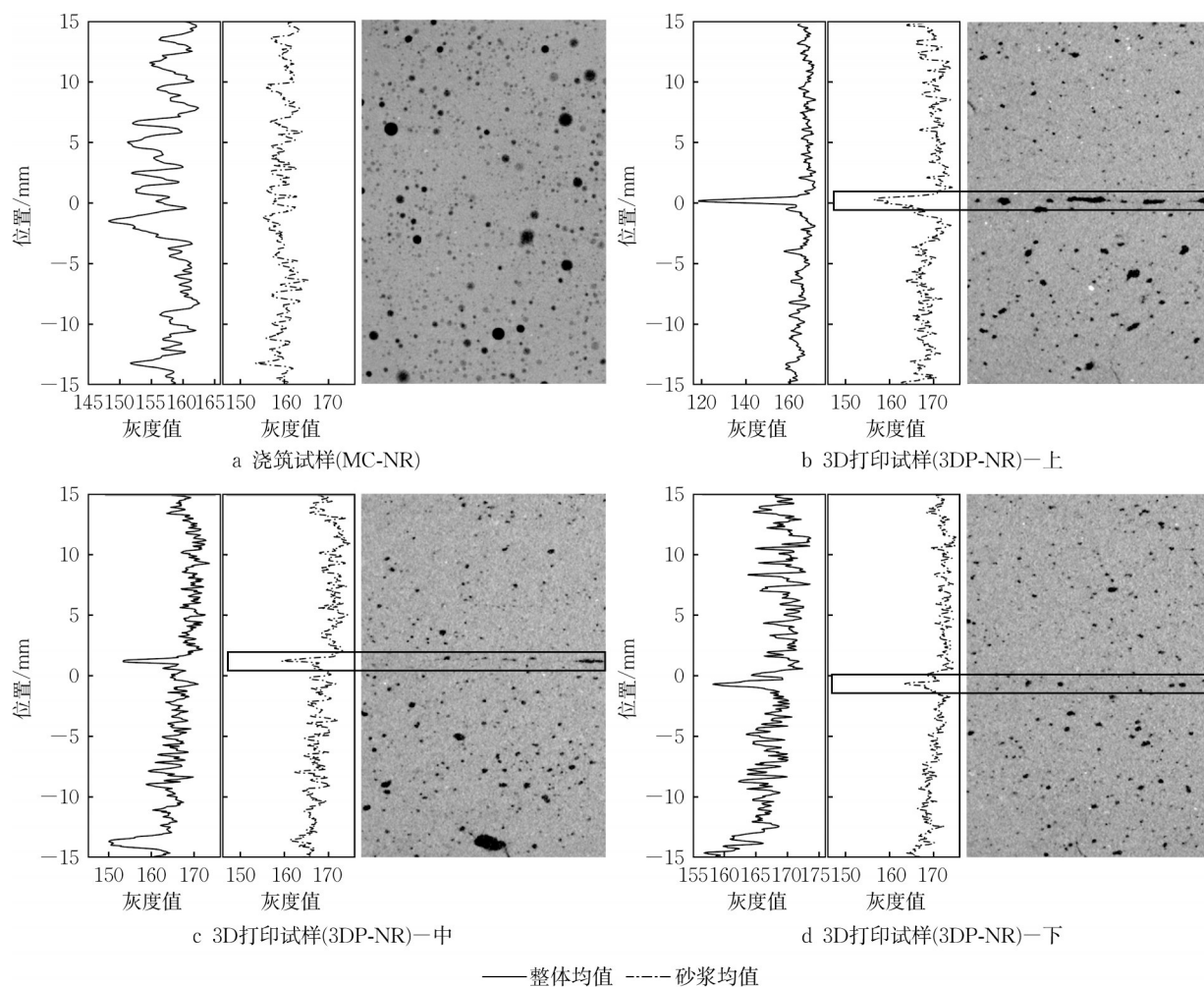


图4 3D打印混凝土层间界面区灰度值

Fig. 4 Grayscale values of 3D printed concrete interlayer interface

印混凝土制样过程中的螺旋挤出工艺存在密切关系,在打印头内部在螺杆搅拌作用下混凝土浆体内的的大体积气孔被破坏,因此大孔孔隙率和数量都相对减少。同时,3D打印试样内的大孔平均体积远远高于浇筑试样,这主要是由于3D打印混凝土试样中的大孔主要来自层间界面区内的层间孔隙,这部分孔隙往往具有形态扁平且相互连通的特征,对3D打印混凝土的宏观性能具有显著的不利影响。

两类纤维的掺入均导致了3D打印混凝土总孔隙率和大孔孔隙率的增长。3D打印纤维混凝土试样中大孔孔隙的增长主要是由于层间界面区的黏结性减弱,前人研究中也指出掺入纤维对混凝土打印界面的拉伸和剪切强度存在不利影响^[19]。3D打印玄武岩纤维混凝土试样中的小孔隙率也出现显著增长,这主要是由于玄武岩纤维具有憎水性,纤维与浆体间产生大量孔隙。

表3 3D打印混凝土孔隙率和孔隙数量

Tab. 3 3D printed concrete porosity and number of pores

编号	总孔隙参数		大孔孔隙参数		小孔孔隙参数	
	孔隙率/%	孔隙数量/个	孔隙率/%	孔隙数量/个	孔隙率/%	孔隙数量/个
MC-NR	5.60	360 572	2.23	3 868	3.37	356 704
3DP-NR	2.35	259 232	0.67	310	1.68	258 922
3DP-NR-P	2.68	286 061	0.91	455	1.77	285 606
3DP-NR-B	3.68	507 669	0.88	694	2.80	506 975

紧密度反映了孔隙的扁平程度,如果将孔隙理想化为椭球体,则紧密度直接反映了椭球长短轴的差异。

如图5所示,浇筑试样和3D打印试样中均存在一组孔隙紧密度为1.0的理想球体孔隙,这些孔隙的直径往

往往在接近CT扫描精度极限的孔径范围出现。除却这部分孔隙以外,浇筑试样中各个孔径范围的孔隙紧密度遍及0~0.9范围。而3D打印试样中,受到螺旋挤出作用和布料时的牵拉作用的影响,孔隙紧密度都显著低于浇筑试样孔隙。浇筑再生混凝土试样的平均紧密度可达0.513,而相同配合比的3D打印再生混凝土试样平均紧密度仅为0.366。PE纤维和玄武岩纤维的

掺入均导致了混凝土内孔隙平均紧密度的进一步降低,二者平均紧密度分布为0.306和0.292。从3DP-NR-P和3DP-NR-B试样内小孔紧密度的分布范围均低于3DP-NR试样,特别是出现了球度在0.3以下的孔隙。值得注意的,3D打印试样中孔隙紧密度随孔径增大而逐渐降低,特别是大孔的紧密度近似为零,这说明这部分孔隙的几何形态成扁平状。

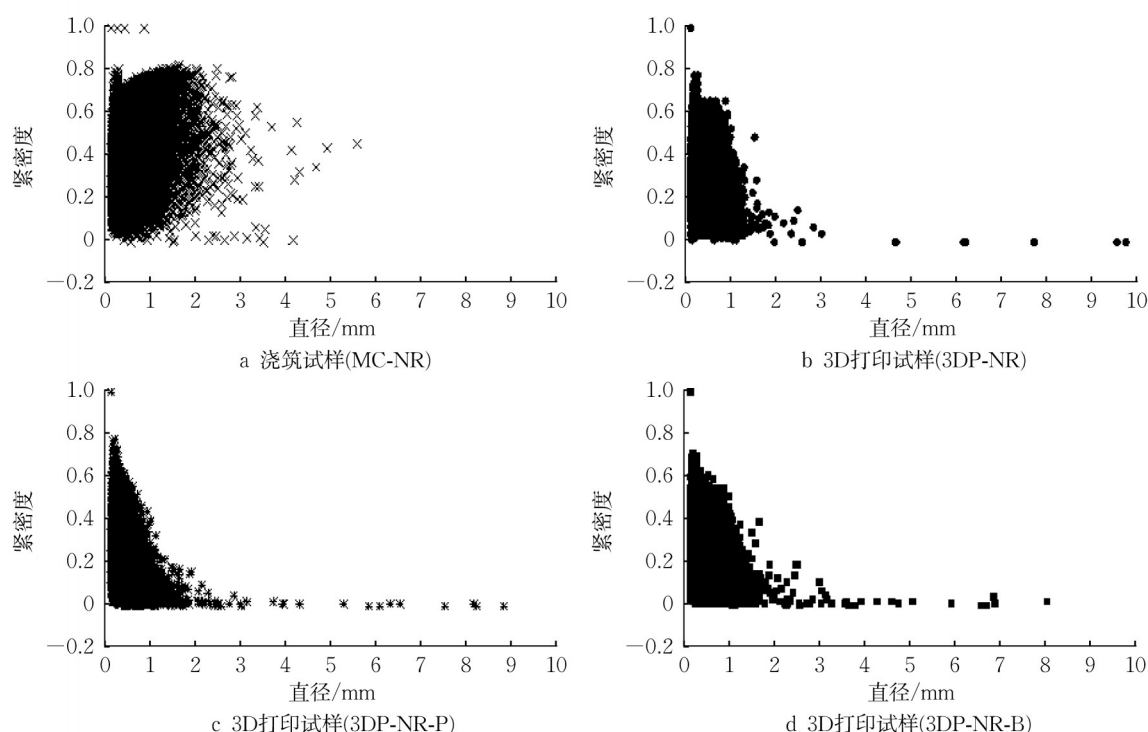


图5 3D打印混凝土孔隙紧密度

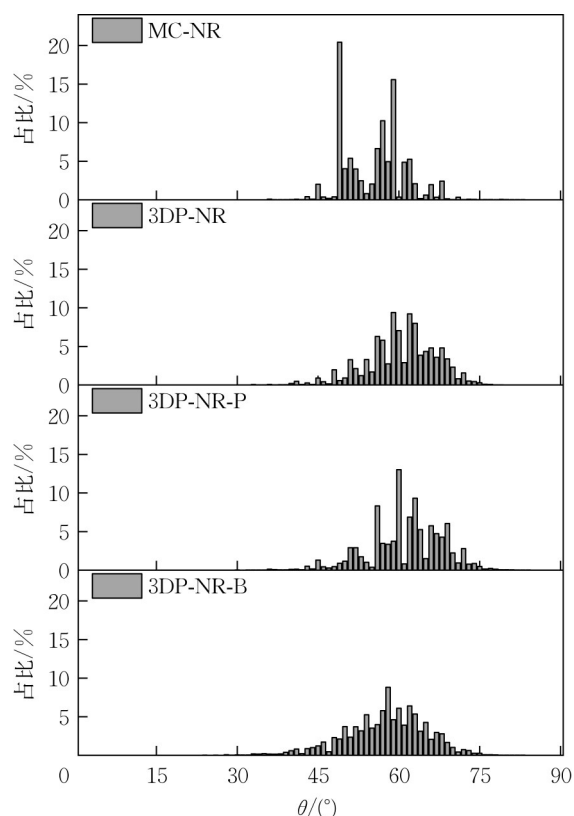
Fig. 5 Compactness of 3D printed concrete pore

通过CT扫描重建的孔隙结构模型观察可知,3D打印混凝土中的孔隙结构呈现椭球形,且其空间分布具有一定的规律性。Chen等^[12]的研究中提出,3D打印混凝土孔隙的变形的主要原因是打印过程中的牵拉作用,因此3D打印混凝土内部孔隙倾向于沿3D打印头行进方向延长。图6中为三维孔隙模型中孔隙主轴与Z轴夹角 θ 的分布情况。三维孔隙的主轴与Z轴夹角主要分布在45°以上,浇筑试样中 θ 角的孔隙数占比最高的角度为49°(MC-NR),这与新拌混凝土内孔隙在重力作用下的变形有关。而3D打印试样中孔隙占比最高的角度显著增大,分别为58°(3DP-NR-B)、59°(3DP-NR)和60°(3DP-NR-P)。同时,3D打印再生混凝土试样3DP-NR中孔隙长轴与Z轴夹角在60°~90°(近似认为垂直于Z轴)的孔隙占比高达58.0%,而相同配合比的浇筑试样MC-NR中这部分孔隙占比仅为18.9%。不同纤维

的掺入对3D打印再生混凝土内部孔隙方向趋势的影响不尽相同,其中,PE纤维3D打印再生混凝土3DP-NR-P试样中垂直于Z轴的孔隙占比有所提高,达到了66.3%。而玄武岩纤维3D打印再生混凝土3DP-NR-B试样中垂直于Z轴的孔隙占比则降至42.19%。

2.4 孔隙结构与应力分布

基于CT扫描结果,能够判断3D打印混凝土中的孔隙呈椭球形,且椭球主轴倾向于沿打印条带方向分布。3D打印混凝土孔隙分布的方向趋势,与其宏观力学性能的各向异性特征相一致。为进一步探究孔隙结构形态和方向与混凝土宏观力学性能的关系,选取了相同面积、不同长短轴比(1:1、2:1、3:1、4:1、5:1)的5种孔隙结构模型,在单位荷载作用下(沿Z轴方向)分析其内部应力分布情况。应力分布计算中上下边界施加单位荷载($1 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$),四定

图 6 3D 打印混凝土孔隙方向 θ Fig. 6 3D printed concrete pore orientation θ

点设置为简单约束(限制平移、旋转自由),材料属性中弹性模量取值为 25 GPa,泊松比为 0.2。

图 7 为长短轴比 1:1 和 2:1 孔隙试样在单轴压力作用下的等效应力分布图。由图可见,试样在单轴压力作用下孔隙边界处出现应力集中现象,而应力分布状态受到孔隙形态和方向的直接影响。当椭圆长轴方向垂直或平行于荷载方向(Z 轴)时,孔隙边界最大等效应力出现在垂直于荷载方向的孔隙端部,即椭圆长轴或短轴与椭圆边界的交点处。而当长轴与荷载夹角为 45° 时,孔隙边界最大等效荷载位置出现偏移。

图 8 为不同长短轴比的椭圆形孔隙边界最大等效应力随长轴方向转动而变化的曲线图。由图可见,长轴方向一致的椭圆形孔隙中最大等效应力随孔隙长短轴比的增大而提升。同时,圆形孔隙边界最大等效应力为常数,而各长径比的椭圆形孔隙边界最大等效应力值均随长轴与 Z 轴夹角角度的增大而提升。对于孔隙长短轴比大于 2:1 的孔隙试样,当夹角角度大于 34° 时,椭圆形孔隙边界最大等效应力均大相同面积的圆形孔隙边界最大等效应力。如表 4 所示,3D 打印试样和浇筑试样中, $0^\circ \sim 30^\circ$ 分布的孔隙占比均在 1% 以下,因此,3D 打印混凝土试样

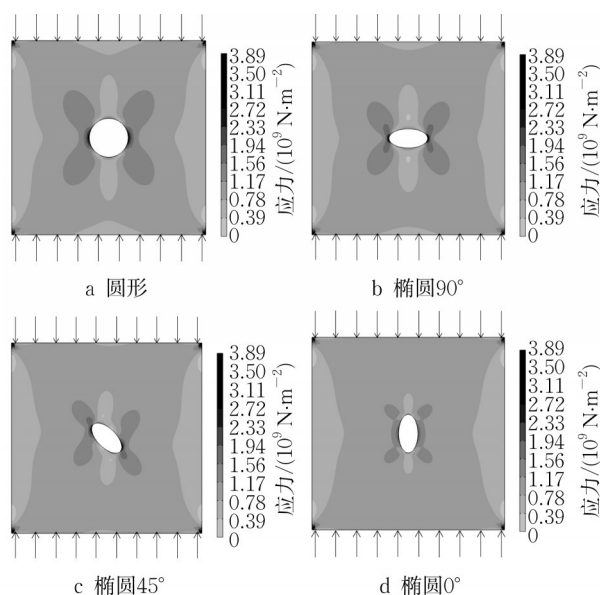


图 7 单轴压力作用下不同孔隙形态试样应力分布云图

Fig. 7 Cloud plot of stress distribution for specimens with different pore forms under uniaxial pressure

内的孔隙结构边界应力集中导致的最大等效应力普遍高于浇筑试样,在相同荷载的作用下,其内部孔隙边界将优先发生破坏。因此,在孔隙率低于浇筑试样的前提下,相同配合的 3D 打印试样抗压强度仍低于浇筑试样。

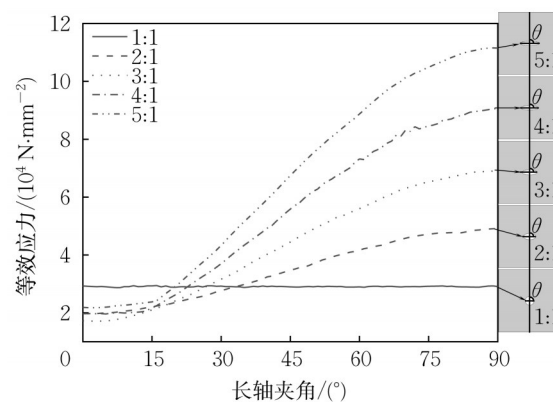


图 8 孔隙边界最大等效应力

Fig. 8 Maximum equivalent force at pore boundary

2.5 孔隙结构与强度

基于孔隙结构特征结果表明,相同配合比的未进行振捣处理浇筑试样孔隙率远高于 3D 打印试样,为了探明孔隙差异对宏观强度影响,分析 3D 打印试样细-宏观间联系。采用指数关系模型描述孔隙-强度关系,见式(2)^[20]。式中, σ_0 为孔隙率为零时的理想强度, P 为孔隙率, σ 为孔隙率为 P 时的强度, D 为

经验常数。由于CT表征孔隙进一步分为大孔及小孔,需要考虑二者对强度耦合影响。基于CT数据构成对式(2)进一步修正得到式(3),如下所示:

$$\sigma = D \ln \frac{\sigma_0}{P} \tag{2}$$

$$\sigma = D \ln \frac{\sigma_0}{(P_L + P_s)^A} \tag{3}$$

式中: p_L 为CT扫描下大孔孔隙率; P_s 为CT扫描下小孔孔隙率; A 为CT可扫描与实际孔隙率间调整系数。依据表征仪器可知MC-NR及3DP-NR测孔精度大于100 μm 时精度较高,综合考虑混凝土多相材料复杂性,其实际小孔占比大于岩质材料, A 值取1.18(1/0.85)。

通过无纤维3D打印试样各向异性最高强度为

基准值计算大、小孔隙参数与抗压强度间关系确定 D 值,并对比纤维试样对强度提升效果验证。表4试验结果表明无纤维3D打印试样(3DP-NR)自身各向异性强度与孔隙间关系较普通混凝土更显著,变异系数为0.364,加入纤维后各向异性变异系数呈现一定变化,这主要是由纤维对Y、Z方向与X方向间强度提升差异导致。其中,3DP-NR-P更高的相对变异系数(0.22)表明了PE纤维较玄武岩纤维更显著的各向异性强度差异,这与图3结果相对应。需要说明的是式(3)基于无振捣处理及CT表征精准测孔数据条件,传统振捣混凝土及表征手段差异会导致孔结构水化程度及测孔量程变化,因此与本式拟合度较差。

表 4 混凝土孔隙率-强度关系计算结果

Tab. 4 Calculation results of concrete porosity - strength relationship

试样	大孔 孔隙率/%	小孔 孔隙率/%	强度/MPa		D 值	方差	标准差	相对变异系数
			计算值	试验值				
3DP-NR	0.67	1.68	18.73	18.73	6.86	23.20	4.82	
3DP-NR-P	0.91	1.77	17.82	29.11	11.20	50.57	7.11	0.22
3DP-NR-B	0.88	2.80	15.65	22.97	10.07	6.85	2.62	0.09

3 结语

(1) 3D打印混凝土抗压强度表现出显著的各向异性特征,Z轴方向抗压强度最高、Y轴次之,X轴最低。掺入不同种类纤维对Z轴方向3D打印混凝土的抗压强度有不同程度的改善。

(2) 3D打印试样内孔隙近似为椭球形,其孔隙紧密度(0.366)显著低于无振捣浇筑试样孔隙紧密度(0.513)。纤维的掺入导致了平均孔隙紧密度的降低,PE纤维3D打印再生混凝土和玄武岩纤维3D打印再生混凝土的平均紧密度分别为0.306和0.292。

(3) 3D打印混凝土椭球形孔隙的空间分布具有显著的方向趋势,3D打印再生混凝土试样中孔隙长轴与Z轴夹角在60°~90°(近似认为垂直于Z轴)的孔隙占比高达58.0%,而相同配合比的浇筑试样中这部分孔隙占比仅为18.9%。

(4)以无纤维3D打印试样各向异性最高强度为基准值计算了CT测孔参数与抗压强度间相关系数(D 值)。对比两种纤维掺入下 D 值相对变异系数,玄武岩纤维对各向异性强度间差异影响更小。

作者贡献声明:

韩 女:试验方案的实施,试验数据的整理和分析,论文主体的撰写。

肖建庄:研究资源获取和管理,探究方案规划和指导,论文审阅并提出修改意见。

吕振源:协助试验数据分析,并参与论文的讨论和修改完善。

陈卫华:研究资源获取,论文审阅并提出修改意见。

参考文献:

[1] JIAO D, SHI C, YUAN Q, *et al.* Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 83:146.

[2] HAN Y, YANG Z, DING T, *et al.* Environmental and economic assessment on 3D printed buildings with recycled concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123884.

[3] SINGH A, LIU Q, XIAO J, *et al.* Mechanical and macrostructural properties of 3D printed concrete dosed with steel fibers under different loading direction [J]. Construction and Building Materials, 2022, 323:126616.

[4] LI L G, XIAO B F, FANG Z Q, *et al.* Feasibility of glass/basalt fiber reinforced seawater coral sand mortar for 3D printing [J]. Additive Manufacturing, 2021, 37:101684.

[5] TRAN M V, CU Y T, LE C V. Rheology and shrinkage of

- concrete using polypropylene fiber for 3D concrete printing [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44:103400.
- [6] XIAO J, HAN N, ZHANG L, *et al.* Mechanical and microstructural evolution of 3D printed concrete with polyethylene fiber and recycled sand at elevated temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2021, 293:123524.
- [7] DING T, XIAO J, ZOU S, *et al.* Flexural properties of 3D printed fibre-reinforced concrete with recycled sand [J]. Construction and Building Materials, 2021, 288:123077.
- [8] MA G, ZHANG J, WANG L, *et al.* Mechanical characterization of 3D printed anisotropic cementitious material by the electromechanical transducer [J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27:75036.
- [9] YU S, XIA M, SANJAYAN J, *et al.* Microstructural characterization of 3D printed concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44:102948.
- [10] LEE H, KIM J, MOON J, *et al.* Correlation between pore characteristics and tensile bond strength of additive manufactured mortar using X-ray computed tomography [J]. Construction and Building Materials, 2019, 236:712.
- [11] YANG R, ZENG Q, PENG Y, *et al.* Anomalous matrix and interlayer pore structure of 3D-printed fiber-reinforced cementitious composites [J]. Cement and Concrete Research, 2022, 157:106829.
- [12] CHEN Y, ZHANG Y, XIE Y, *et al.* Unraveling pore structure alternations in 3D-printed geopolymers concrete and corresponding impacts on macro-properties [J]. Additive Manufacturing, 2022, 59:103137.
- [13] DAVIS T, HEALY D, BUBECK A, *et al.* Stress concentrations around voids in three dimensions: The roots of failure [J]. Journal of Structural Geology, 2017, 102:193.
- [14] LIU H, LIU C, BAI G, *et al.* Influence of pore defects on the hardened properties of 3D printed concrete with coarse aggregate [J]. Additive Manufacturing, 2022, 55:102843.
- [15] XIAO J, LV Z, DUAN Z, *et al.* Study on preparation and mechanical properties of 3D printed concrete with different aggregate combinations [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 51:104282.
- [16] American Society for Testing and Materials. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars: ASTM C109 [S]. West Conshohocken, Pennsylvania, USA: ASTM International, 2008.
- [17] WANG L, MA G, LIU T, *et al.* Interlayer reinforcement of 3D printed concrete by the in-process deposition of U-nails [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 148:106535.
- [18] KRUGER J, DU PLESSIS A, VAN ZIJL G. An investigation into the porosity of extrusion-based 3D printed concrete [J]. Additive Manufacturing, 2021, 37:101740.
- [19] HAMBACH M, VOLKMER D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 79: 62.
- [20] KUMAR R, BHATTACHARJEE B. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33:155.