

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.006

文章编号:1672-9331(2022)04-0055-09

引用格式:王海龙,陈亚飞,邹道勤,等.不同打印与加载方向下3D打印地质聚合物混凝土力学性能研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(4):55-63.

Citation: WANG Hailong, CHEN Yafei, ZOU Daoqin, et al. Mechanical properties of 3D printed geopolymers concrete under different printing and loading directions[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(4): 55-63.

不同打印与加载方向下3D打印地质聚合物 混凝土力学性能研究

王海龙^{1,2}, 陈亚飞¹, 邹道勤¹, 孙晓燕^{1,3}

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 山西浙大新材料与化工研究院, 山西 太原 030002;

3. 浙江大学平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310028)

摘要:【目的】探究3D打印矿渣-粉煤灰地质聚合物混凝土(以下简称为打印混凝土)力学性能随龄期的发展规律和其各向异性的特点。【方法】通过力学试验测试打印混凝土在不同养护龄期和沿 x 、 y 、 z 3个不同加载方向的立方体抗压强度、轴心抗压强度、抗折强度,并利用X-CT扫描仪测试、分析打印混凝土的微观结构,探讨打印地质聚合物混凝土力学性能的变化机理。【结果】打印混凝土3和7 d养护龄期的力学强度分别达28 d的30%和60%以上,打印混凝土具有早强特性,满足混凝土打印建造需求;养护28 d试件的立方体抗压强度、轴心抗压强度和抗折强度在各加载方向上的差异分别为3.20%~10.40%、1.53%~7.05%和5.10%~24.00%。【结论】打印混凝土强度具有一定的各向异性,其各向异性主要源于在层条堆积过程中打印混凝土内部产生的缺陷数量和缺陷的空间分布。

关键词:地质聚合物混凝土;3D打印;力学性能;各向异性;微观结构

中图分类号: TU528.41

文献标志码: A

0 引言

水泥是现代社会发展进步不可或缺的建筑材料,但在普通硅酸盐水泥的生产过程中煅烧原材料会产生大量 CO_2 。据统计,人为排放的 CO_2 中的5%~7%是在水泥的生产过程中排放的^[1]。因此,探索绿色环保的建筑材料是当前建材领域的研究重点之一。地质聚合物材料的生产过程能耗低,若采用活性固体废弃物,如粉煤灰、矿渣、冶金渣等代替水泥,其生产能耗可降低为生产水泥时能耗的10%^[2]。此外,地质聚合物

材料具有轻质高强、耐久性能优异以及黏结性强等特点,因而具有良好的综合能力^[3-4]。因此,地质聚合物材料理论上可作为普通水泥的替代品。

3D打印技术是一项基于数字模型、快速成型的新兴制造技术,目前该技术已逐渐在建筑建造领域崭露头角。用于3D打印的混凝土材料需要具备良好的流动性以保证材料可以泵送挤出,同时还要具有合适的开放时间和凝结时间以增加层条间的黏结力,以保证堆叠成型。地质聚合物混凝土具有良好的流动性和快硬早强的特点,适合作为3D打印材料。此外,将新型建造技术与低能

收稿日期:2022-07-08;修回日期:2022-08-22;接受日期:2022-09-10

基金项目:浙江省重点研发计划项目(2021C01022);国家自然科学基金资助项目(52079123);浙江省科技计划项目(2022C04005);山西浙大新材料与化工研究院资助项目(2021SZ-TD010、2022SZ-TD016);浙江大学平衡建筑研究中心配套资金资助项目(20212742、20212738)

通信作者:孙晓燕(1976—)(ORCID:0000-0003-0708-9565),女,副教授,主要从事工程结构智能建造技术与结构全寿命可靠性方面的研究。E-mail:selina@zju.edu.cn

耗、高环保建筑材料相结合对提升建造的机械化、信息化水平,提高建造效率,降低碳排放具有重要意义。

目前,国际上对3D打印地质聚合物混凝土的研究已有一些涉猎。PANDA等^[5]对3D打印地质聚合物混凝土的流变性进行研究,得到材料配合比的静态屈服应力为0.4~1.6 kPa,地质聚合物砂浆的开放时间为10~50 min,验证了该地质聚合物砂浆具有较好的打印性能,并成功打印了高度为60 cm、直径为35 cm的柱结构。刘开元^[6]研究了基于矿渣、粉煤灰、偏高岭土的碱激发3D打印混凝土,结果显示:当水胶比相同时,1 d龄期时矿渣的强度比粉煤灰的大,而偏高岭土在1 d龄期时强度接近于0。PANDA等^[7]研究了一种新型纤维增强地质聚合物砂浆的力学性能,结果显示:沿重力方向的抗弯强度最大,不同加载方向上抗弯强度的差异可达50%,说明该砂浆的力学性能具有显著的各向异性的特点。现有研究表明:水泥基打印材料在打印成型后亦表现出了明显的各向异性^[8-15],在结构设计与性能评价时只有掌握了打印材料的各向异性规律,才能提出准确的设计方法,建立精确的评价模型。因此,为了探究3D打印矿渣-粉煤灰基地质聚合物混凝土(以下简称为打印混凝土)强度的发展规律和其各向异性的特点,本研究开展了力学性能试验,并对材料的微观结构进行测试分析,揭示微观缺陷对宏观力学性能的影响机理,以期对地质聚合物混凝土在3D打印结构中的应用提供借鉴和参考。

1 材料与试验

1.1 试验材料

打印混凝土所采用的Ⅰ级粉煤灰为来自河南蓝科环保净水材料有限公司的试验级粉煤灰,其主要性能指标和化学成分见表1~2;胶凝材料为来自河北省灵寿县岩行矿产品加工厂的粒化高炉矿渣,其主要性能指标见表3;辅助胶凝材料为来自Elkem公司生产的半增密型硅灰,其主要性能指标见表4。硅灰具有超细颗粒的物理填充致密效应,以及火山灰属性带来的化学增强效应。

表1 粉煤灰主要性能指标

Table 1 Main performance indexes of fly ash %

细度	烧失量	需水量	含水量	碱含量
8.0	2.0	80	0.1	0.1

表2 粉煤灰主要化学成分的含量

Table 2 Contents of main chemical constituents of fly ash %

$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{TiO}_2)$
53.97	31.15	4.16	4.01	2.03	1.13
$w(\text{MgO})$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{SO}_3)$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)$	$w(\text{NiO})$	其他
1.01	0.89	0.73	0.67	0.11	0.14

表3 高炉矿渣主要技术指标

Table 3 Main technical indexes of slag

密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	活性指数/%		烧失 量/%	氯离子 含量/%	流动度 比/%	含水 量/%
		7 d	28 d				
2.92	425	78	96	1.02	0.032	103	0.36

表4 硅灰主要技术指标

Table 4 Main technical indexes of silica fume

堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	耐火度/ $^{\circ}\text{C}$	平均粒径/ μm	比表面积/ ($10^4\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)
200~350	>1 600	0.15~0.20	1.5~3.5

增强材料选用长度为6 mm、直径为18~48 μm 的聚丙烯(polypropylene, PP)纤维。

复合激发剂由NaOH和 Na_2SiO_3 溶于水后得到,模数为1.2。NaOH的纯度为96.0%(分析纯),呈片状,由上海沪试实验室器材股份有限公司提供;粉状 Na_2SiO_3 由河南铂润铸造材料有限公司提供,可快速溶于水,其水溶液呈碱性,具有较强的黏合性、耐寒性和均匀性,其主要化学成分和性能参数见表5。

表5 Na_2SiO_3 主要化学成分和性能参数

Table 5 Main chemical composition and performance parameters of Na_2SiO_3

$w(\text{Na}_2\text{O})$ / %	$w(\text{SiO}_3)$ / %	模数	溶解速度 (30 $^{\circ}\text{C}$)/s	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	细度(120目 过筛率)/%
19.0~21.0	60.0~66.5	3.4	≤ 240	0.6~0.8	≥ 95

打印混凝土的配合比见表6。材料初、终凝时间分别为55和100 min。

表 6 打印混凝土的配合比

Table 6 Mix ratio of printed concrete

矿渣	粉煤灰	硅灰	砂	水	碱	PP 纤维	DLP	PVAP	萘系减水剂
0.700	0.300	0.050	1.000	0.380	0.050	0.010	0.005	0.005	0.010

注:除矿渣和粉煤灰外,表中其他物质的配合比以矿渣和粉煤灰的总质量为基准。DLP 为可分散乳胶粉,PVAP 为聚乙烯醇粉。

1.2 试件制备与试验方法

1.2.1 试件制备

打印混凝土的制备过程如图 1 所示。

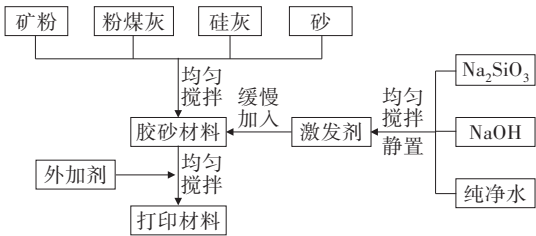


图 1 打印混凝土的制备流程

Fig.1 Preparation process of printed concrete

本研究采用中国建研华测(杭州)科技有限公司生产的 HC-3DPRT 混凝土 3D 打印系统进行混凝土打印,打印过程如图 2 所示,成型示意图见图 3(图中, x 方向为打印方向, y 方向为打印条排列方向, z 方向为堆叠方向)。



图 2 混凝土打印过程

Fig.2 Printing process of concrete

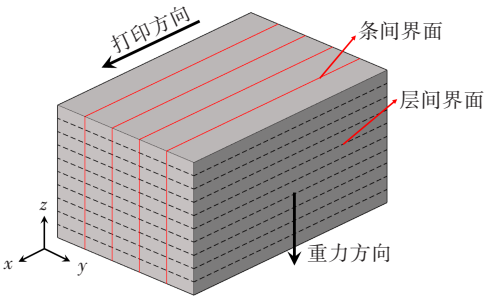


图 3 打印混凝土成型示意图

Fig.3 Forming diagram of printed concrete

在试件打印完成后,将其静置并在室温中保湿养护 1~2 d,待硬化后对其编号标记。采用同一室温保湿养护方法养护试件至预定龄期。对用于测试短龄期(7 d 以内)力学性能的试件,将其养护至预定龄期前 1 d 取出,并切割加工成相应试验尺寸的试件;对用于测试更长龄期(大于 7 d)力学性能的试件,需要将其至少养护 7 d,再切割加工成规范要求的相应试验尺寸的试件。

立方体抗压强度测试试件的边长为 70.7 mm,轴心抗压强度测试试件为 100.0 mm×100.0 mm×300.0 mm 的棱柱体,抗折强度测试试件为 70.7 mm×70.7 mm×300.0 mm 的棱柱体。在切割加工时,需去除打印端头和截断端面,以避免打印设备出料不稳定及消除人为截断对混凝土试件的影响。

1.2.2 抗压试验方法

采用压力试验机测试立方体抗压强度和轴心抗压强度。抗压强度试验加载示意图见图 4。

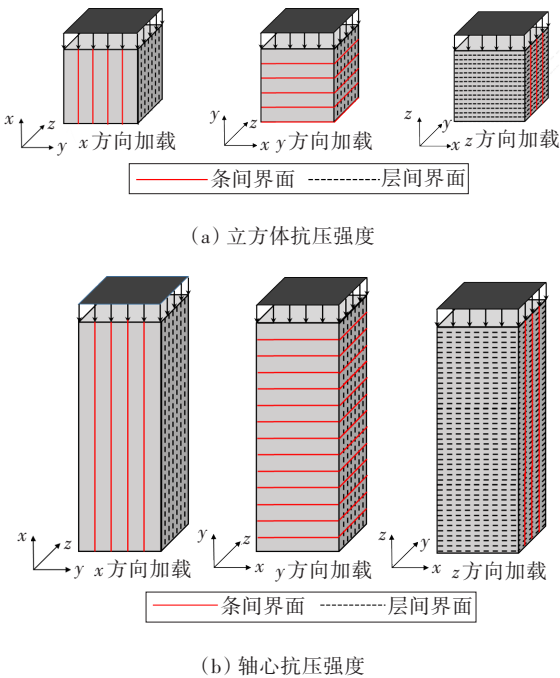


图 4 抗压强度试验加载示意图

Fig.4 Loading diagram of compressive strength test

抗压强度的计算公式为:

$$f_{cc}=\frac{F}{A}$$
(1)

式中: f_{cc} 为打印混凝土的抗压强度,MPa; F 为试件破坏荷载,N; A 为试件承压面积,mm²。计算各施荷工况下试件测试值的算术平均值,并将其作为

该工况试件的抗压强度。

1.2.3 抗折试验方法

抗折试验采用四点弯曲的加载方式,其中,两个支座的跨距为212.1 mm,两个加载点的跨距为70.7 mm。抗折试验加载示意图见图5。抗折强度的计算公式为:

$$f_t = \frac{FL}{bh^2} \quad (2)$$

式中: f_t 为打印混凝土的抗折强度,MPa; F 为试件的破坏荷载,N; L 为支座间跨距,mm; b 为试件截面宽度,mm; h 为试件截面高度,mm。计算各施荷工况下试件测试值的算术平均值,并将其作为该工况试件的抗折强度。

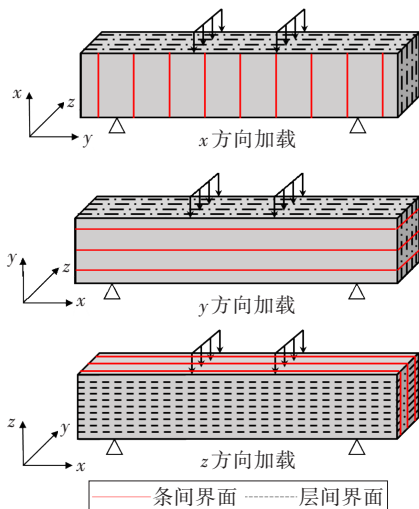


图5 抗折强度试验加载示意图

Fig.5 Loading diagram of flexural strength test

1.2.4 X-CT扫描

采用225/320 kV Nikon Metris Custom Bay X射线扫描仪(X-CT)对试件进行原位扫描试验,以获取打印成型材料内部缺陷的空间分布。扫描曝光时间为708 ms,加速电压为180 kV,电流为180 μ A,分辨率为39 μ m,扫描试件的尺寸为40 mm $\times$ 40 mm $\times$ 40 mm,打印试件层条界面的分布如图6所示。

2 试验结果分析

2.1 抗压强度分析

本研究测试了养护龄期为3、7和28 d的混凝土现浇试件和打印试件的力学性能,其中,对打印

试件从3个不同方向(x 、 y 、 z 方向)进行加载测试。现浇试件用M表示。



图6 打印试件层条界面

Fig.6 Layer and strip interfaces of printed concrete

2.1.1 立方体抗压强度

立方体抗压强度的试验结果见表7。

表7 立方体抗压强度试验结果

养护龄期/d	立方体抗压强度			
	M	x 方向加载	y 方向加载	z 方向加载
3	17.87	14.54	15.14	17.21
7	36.41	29.34	31.48	34.34
28	51.02	45.01	48.61	50.22

立方体抗压强度均值随养护龄期的发展规律如图7所示。从图7可以看出,现浇试件3和7 d养护龄期的立方体抗压强度均值分别达到了28 d养护龄期的35.00%和71.40%。在打印试件的 x 方向加载时,其3和7 d养护龄期的立方体抗压强度均值分别达到了28 d养护龄期的32.30%和65.19%;在打印试件的 y 方向加载时,其3和7 d养护龄期的立方体抗压强度均值分别达到了28 d养护龄期的31.14%和64.75%;在打印试件的 z 方向加载时,其3和7 d养护龄期的立方体抗压强度均值分别达到

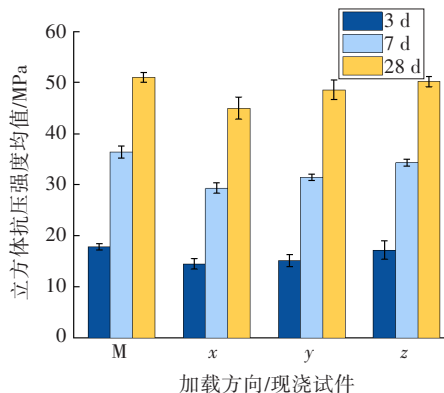


图7 立方体抗压强度均值随龄期的发展规律

Fig.7 Development of mean cubic compressive

了28 d养护龄期的34.26%和68.39%。由此可见,在打印试件各个方向加载时,立方体抗压强度均值的发展规律基本相同。

立方体抗压强度均值的各向异性如图8所示。从图8可以看出,打印混凝土在3个方向上存在一定的各向异性,可将相同养护龄期试件的立方体抗压强度均值按照从大到小的顺序排列为:M、z方向加载、y方向加载、x方向加载。在养护龄期为28 d时,在试件的3个加载方向中,在z方向加载时的立方体抗压强度均值最大,比现浇试件的小1.6%,说明在重力以及打印喷头挤压力的共同作用下,打印成型的混凝土具有良好的层条间黏结性能,打印效果良好;在x方向加载时的立方体抗压强度均值最小,比在z方向加载时的小10.4%;在y方向加载时的立方体抗压强度均值介于在x方向和z方向加载时的立方体抗压强度均值之间,比在z方向加载时的小3.2%。汪群^[16]的研究成果表明:在养护龄期为28 d时,3D打印水泥基混凝土的不同加载方向中,在z方向加载时的抗压强度最大,比现浇试件的小7.8%,在y方向加载时的比在z方向加载时的小12.6%,在x方向加载时的最小,比在z方向加载时的小17.2%。由此可见,3D打印混凝土的抗压强度各向异性与3D打印水泥基混凝土的相似。

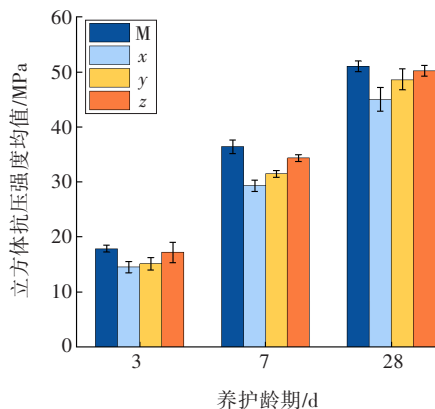


图8 立方体抗压强度均值的各向异性

Fig.8 Anisotropy of mean cubic compressive strength

2.1.2 轴心抗压强度

轴心抗压强度的试验结果见表8。分析表8可知,在养护龄期为28 d时,现浇试件的轴心抗压强度与其立方体抗压强度的比值为0.82;沿x、y、z方向加载时,打印试件的轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值分别为0.81、0.79和0.78。这与普通水泥基混凝土轴心抗压强度的试验结果相似。

表8 轴心抗压强度试验结果

Table 8 Test results of axial compressive strength MPa

养护龄期/d	轴心抗压强度			
	M	x方向加载	y方向加载	z方向加载
3	14.53	11.02	13.50	13.73
7	28.93	26.37	25.33	29.07
28	32.13	36.37	38.53	39.13

轴心抗压强度均值随龄期的发展规律如图9所示,轴心抗压强度均值的各向异性如图10所示。分析图9~10可知,轴心抗压强度均值具有与立方体抗压强度均值类似的各向异性规律和随龄期的发展规律;现浇试件和打印试件不同加载方向的3 d养护龄期的轴心抗压强度均值是28 d养护龄期的30.80%~35.09%;7 d养护龄期的轴心抗压强度均值是28 d养护龄期的65.74%~74.28%;打印混凝土不同加载方向的28 d养护龄期的轴心抗压强度均值的差异为1.53%~7.05%。

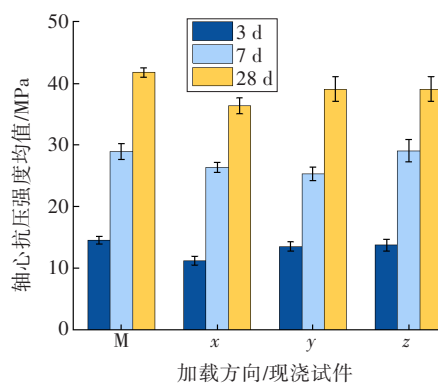


图9 轴心抗压强度均值随龄期的发展规律

Fig.9 Development of mean axial compressive strength with age

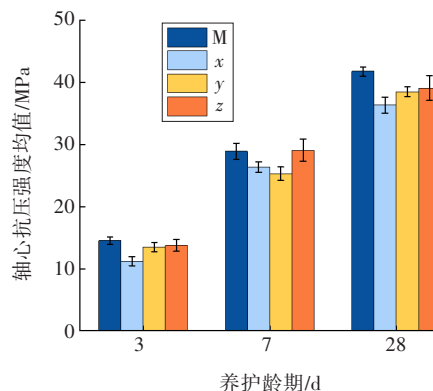


图10 轴心抗压强度均值的各向异性

Fig.10 Anisotropy of mean axial compressive strength

2.2 抗折强度分析

抗折强度试验结果见表9。

表9 抗折强度试验结果

养护 龄期/d	抗折强度			
	M	x方向加载	y方向加载	z方向加载
3	3.73	3.03	3.70	3.55
7	4.96	4.26	5.02	4.80
28	6.21	5.24	6.85	6.50

抗折强度均值随龄期的发展规律如图11所示,抗折强度均值的各向异性如图12所示。分析图11~12可知,抗折强度均值随龄期的发展规律与抗压强度均值的基本相同;现浇试件和打印试件不同加载方向3 d养护龄期的抗折强度均值是28 d养护龄期抗折强度均值的51.78%~57.97%;7 d养护龄期的抗折强度均值是28 d养护龄期抗折强度均值的73.35%~81.39%。分析发现:在不同养护龄期,在打印试件3个方向加载时的抗折强

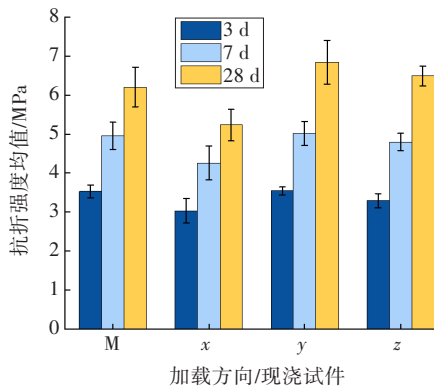


图11 抗折强度均值随龄期的发展规律

Fig.11 Development of mean flexural strength with age

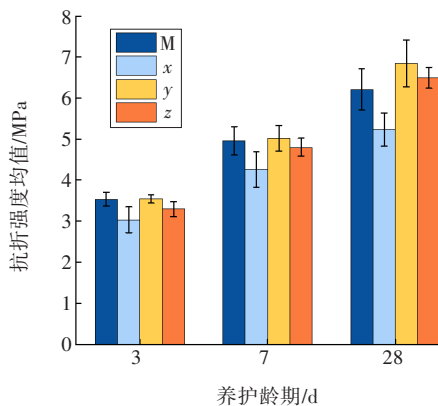


图12 抗折强度均值的各向异性

Fig.12 Anisotropy of mean flexural strength

度均值存在一定的各向异性,可将其按照从大到小的顺序排列为:y方向加载、z方向加载、x方向加载。

打印过程中挤压、拖拽作用导致纤维发生定向排列。在沿打印条排列方向(y方向)和重力方向(z方向)加载时,纤维具有桥接作用(图13),这使得在y方向和z方向加载时的抗折强度比在x方向加载时的大。对比后发现,在z方向加载时的28 d养护龄期的抗折强度比在y方向加载时的小5.1%,这是因为z方向加载为垂直于打印条顶面加载,y方向加载为垂直于打印条侧面加载。若将打印条近似为长方形,其加载示意图见图14。分析可知:在y方向加载时的截面惯性矩比在z方向加载时的大,这导致在y方向加载时的抗折强度比在z方向加载时的大。

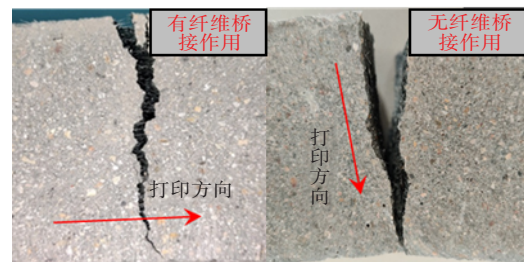


图13 纤维定向分布

Fig.13 Orientation distribution of fibers

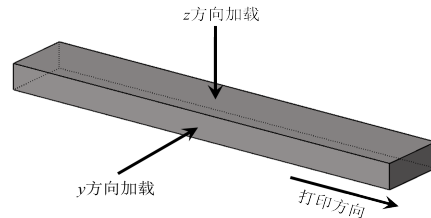


图14 打印条加载示意图

Fig.14 Loading diagram for printed prism

2.3 微观结构分析

通过X-CT扫描得到现浇试件M和打印试件的内部孔隙率(指内部孔隙占总体积的比例,用 P 表示),结果如图15所示。对比现浇试件和打印试件的内部孔隙率,发现前者小于后者。学术界普遍认为材料内部孔隙缺陷的增多会导致材料强度下降,结合上文对抗压强度试验结果的分析,发现其与已有研究结论相符合。

打印试件在不同方向上的孔隙率(指材料内部某一剖切面上孔隙的面积占所在切面的面积比)的空间分布规律如图16所示(图中红色的线表

示界面所在的位置)。

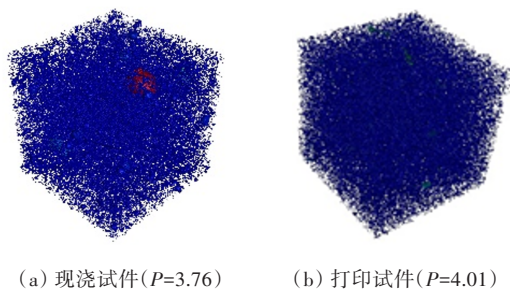


图15 试件的孔隙分布

Fig.15 Pore distribution of the specimens

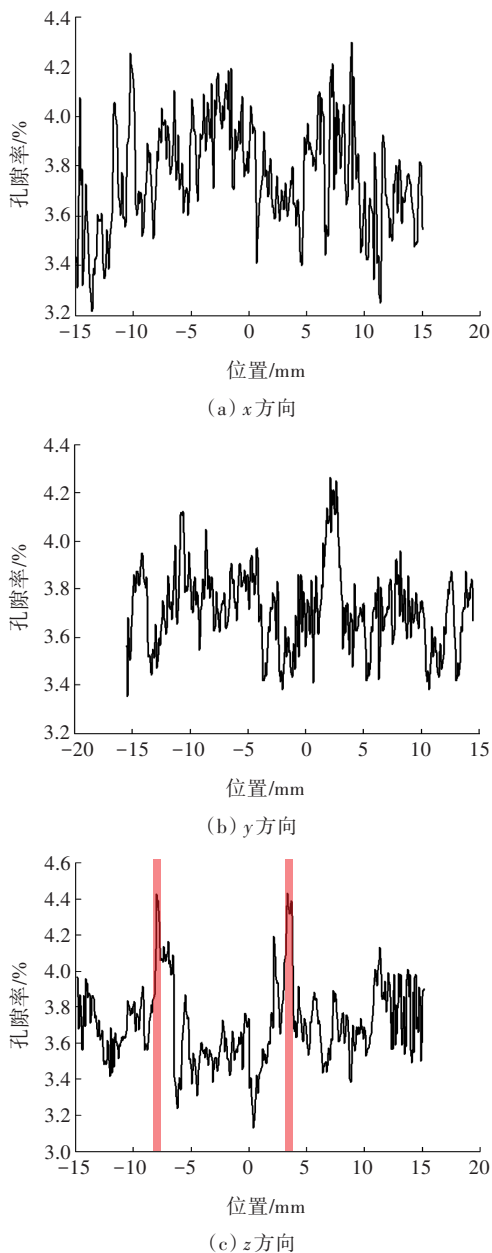


图16 打印试件孔隙缺陷的空间分布规律

Fig.16 Spatial distribution of pore defects of the printed specimens

分析图16可知,打印试件的孔隙率在不同方向上存在突变。打印试件的单层厚度为10 mm,单条宽度为30 mm,通过几何尺寸的对比分析,发现突变位置与试件层条界面基本重合,说明孔隙缺陷在层条间界面有所增多。由此可见,3D打印混凝土所采用的堆叠成型建造方式使得打印混凝土层条间界面存在较多的孔隙缺陷,并导致界面的黏结强度较弱及打印混凝土的强度在各个方向上存在一定的差异,这在一定程度上限制了3D打印技术在建筑领域的推广应用,因此,需要针对打印混凝土层条界面开展更为深入的研究。

3 结论

本研究将3D打印技术应用于低碳环保的地质聚合物材料,分析了3D打印地质聚合物混凝土的力学性能,得到的结论如下:

1) 3D打印地质聚合物混凝土具有早强特性,在养护龄期达到7 d后,混凝土试件的抗压强度达养护龄期28 d时抗压强度的60%以上;3D打印地质聚合物混凝土还具有高强特性,现浇试件和打印试件养护龄期28 d时的立方体抗压强度分别达到了51.02和50.22 MPa,其与强度等级为C50的普通水泥基混凝土的强度相当。

2) 3D打印地质聚合物混凝土的力学性能具有一定的各向异性,其抗压强度各向异性规律与3D打印水泥基混凝土的相同;抗折强度各向异性受纤维的定向作用影响最大,在有纤维桥接作用的加载方向抗折强度较大。3D打印地质聚合物混凝土的力学性能在各个方向上的差异比水泥基混凝土的小,这说明3D打印地质聚合物混凝土具有良好的打印性能和层条间黏结性能。

3) 养护龄期28 d、不同方向加载时的打印试件的轴心抗压强度与立方体抗压强度的比值为0.78~0.81,这与普通水泥基混凝土相应的比值大小相近。

4) 打印成型混凝土试件层条间界面的孔隙缺陷较多,这种孔隙缺陷的空间分布规律导致3D打印地质聚合物混凝土的力学性能具有各向异性。

[参考文献]

- [1] MEYER C. The greening of the concrete industry[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(8): 601–605. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010.
- [2] 倪文,王恩,周佳.地质聚合物:21世纪的绿色胶凝材料[J].新材料产业,2003(6):24–28.
NI Wen, WANG En, ZHOU Jia. Geopolymer: green cementitious material in the 21st century[J]. Advanced Materials Industry, 2003(6): 24–28.
- [3] DUXSON P, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PROVIS J L, et al. Geopolymer technology: the current state of the art[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(9): 2917–2933. DOI:10.1007/s10853-006-0637-z.
- [4] 邵宁宁,刘泽,王小双,等.PET纤维增韧的粉煤灰泡沫地质聚合物热性能分析[J].人工晶体学报,2015,44(9): 2606–2613. DOI: 10.16553/j.cnki.issn1000-985x. 2015.09.053.
SHAO Ningning, LIU Ze, WANG Xiaoshuang, et al. Thermal analysis of PET fiber reinforced fly ash based foam geopolymer[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2015, 44(9): 2606–2613. DOI: 10.16553/j.cnki.issn1000-985x. 2015.09.053.
- [5] PANDA B, TAN M J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing[J]. Ceramics International, 2018, 44(9): 10258–10265. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.03.031.
- [6] 刘开元.矿粉-粉煤灰-偏高岭土体系3D打印碱激发胶凝材料设计与渣土利用研究[D].深圳:深圳大学, 2020. DOI:10.27321/d.cnki.gszdu.2020.000490.
LIU Kaiyuan. Design of 3D printing alkali activated cementitious material for slag-fly ash-metakaolin system and its utilization[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020. DOI:10.27321/d.cnki.gszdu.2020.000490.
- [7] PANDA B, CHANDRA PAUL S, TAN M J. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material[J]. Materials Letters, 2017, 209: 146–149. DOI:10.1016/j.matlet.2017.07.123.
- [8] WOLFSR J M, BOS F P, SALET T A M. Hardened properties of 3D printed concrete: the influence of process parameters on interlayer adhesion[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 119: 132–140. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.02.017.
- [9] LET T, AUSTIN S A, LIM S, et al. Hardened properties of high-performance printing concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(3): 558–566. DOI:10.1016/j.cemconres.2011.12.003.
- [10] PAUL S C, TAY Y W D, PANDA B, et al. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18(1): 311–319. DOI:10.1016/j.acme.2017.02.008.
- [11] ZAREIYAN B, KHOSHNEVIS B. Interlayer adhesion and strength of structures in contour crafting: effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thickness[J]. Automation in Construction, 2017, 81: 112–121. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.06.013.
- [12] FENG P, MENG X M, CHEN J F, et al. Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 486–497. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132.
- [13] PANDA B, PAUL S C, MOHAMED N A N, et al. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar[J]. Measurement, 2018, 113: 108–116. DOI:10.1016/j.measurement.2017.08.051.
- [14] SUNX Y, ZHOU J W, WANG Q, et al. PVA fibre reinforced high-strength cementitious composite for 3D printing: mechanical properties and durability[J]. Additive Manufacturing, 2022, 49: 102500. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102500.
- [15] 张静,邹道勤,王海龙,等.3D打印混凝土层条间界面抗拉性能与本构模型[J].浙江大学学报(工学版), 2021, 55(11): 2178–2185, 2214.
ZHANG Jing, ZOU Daoqin, WANG Hailong, et al. Bond tensile performance and constitutive models of interfaces between vertical and horizontal filaments of 3D printed concrete[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(11): 2178–2185, 2214.
- [16] 汪群.3D打印混凝土拱桥结构关键技术研究[D].杭州:浙江大学, 2019. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx. 2019.002199.
WANG Qun. Research on the pivotal technology of 3D printed concrete arch bridge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx. 2019.002199.

Mechanical properties of 3D printed geopolymer concrete under different printing and loading directions

WANG Hailong^{1,2}, CHEN Yafei¹, ZOU Daoqin¹, SUN Xiaoyan^{1,3}

(1.College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2.Shanxi-Zheda Institute of Advanced Materials and Chemical Engineering, Taiyuan 030002, China;

3.Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China)

Abstract: [Purposes] The paper aims to figure out the development regulation and anisotropy of mechanical properties of 3D printed slag-fly ash-based geopolymer concrete with age. [Methods] The cubic compressive strength, axial compressive strength and flexural strength of printed geopolymer concrete at different curing ages and along x , y and z loading directions were tested in this study. X-ray CT scanner was used to analyze the microstructure and clarify the influence mechanism on the mechanical properties of printed concrete. [Findings] The mechanical strengths of printed concretes at 3 and 7 d were more 30% and 60% than that at 28 d, respectively. The printed concrete had an early strength and met the requirement of concrete printing construction. The differences in cubic compressive strength, axial compressive strength and flexural strength of the specimens cured for 28 d in each loading direction were in the range of 3.20%–10.40%, 1.53%–7.05% and 5.10%–24.00%, respectively. [Conclusions] The printed concrete exhibited certain anisotropy in mechanical performance, mainly due to the number and spatial distribution of defects in the material during the stacking process of the printed concrete.

Key words: geopolymer concrete; 3D printing; mechanical property; anisotropy; microstructure

Manuscript received: 2022-07-08; **revised:** 2022-08-22; **accepted:** 2022-09-10

Foundation item: Project (2021C01022) supported by Key Research and Development Program of Zhejiang Province; Project (52079123) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2022C04005) supported by Science and Technology Program of Zhejiang Province; Projects (2021SZ-TD010, 2022SZ-TD016) supported by Shanxi-Zheda Institute of Advanced Materials and Chemical Engineering; Projects (20212742, 20212738) supported by Center for Balance Architecture, Zhejiang University

Corresponding author: SUN Xiaoyan (1976—) (ORCID: 0000-0003-0708-9565), female, associate professor, research interest: intelligent construction technology of engineering structures and lifetime reliability of structures. E-mail: selina@zju.edu.cn

(责任编辑:石月珍;校对:赵冰;英文编辑:田湘)