

文章编号: 1001-4888(2020)02-243-08

3D 打印混凝土各向异性力学性能研究^{*}

王里, 王伯林, 白刚, 马国伟

(河北工业大学 土木与交通工程学院, 天津 300401)

摘要: 近年来, 混凝土 3D 打印技术在土木建筑等领域取得了快速的发展和应用。与模板浇筑工艺不同, 3D 打印在逐行逐层堆叠的建造过程中引入了一定量的层间弱面和空隙, 造成了细观非均质性; 而且 3D 打印过程无法自动嵌入钢筋, 制备纤维混凝土作为打印材料可有效改善力学性能。本文首先制备了一种适用于挤出型 3D 打印工艺的玄武岩纤维增强陶砂混凝土, 将水平打印层作为 XY 平面, 然后从三个正交方向加载, 实验测试了 3D 打印混凝土的抗压、抗弯等力学性能, 提出了各向异性系数及其评估方法。研究结果表明, 对于单轴压缩, X 方向强度最高, 而对于抗弯性能, Y 方向强度最高。纤维对挤出型 3D 打印材料的各向异性影响较大, 纤维掺量越大, 各向异性越大。

关键词: 3D 打印; 玄武岩纤维; 纤维混凝土; 各向异性; 力学性质

中图分类号: TU528

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-188

0 引言

水泥基材料 3D 打印是基于机电一体化自动建造结构模型的增材建造技术。近年来, 3D 打印技术凭借其无模化、快速化、自动化、灵活化的优势在土木建筑等工程领域发展迅猛^[1-3]。3D 打印的关键在于满足打印工艺要求的混凝土材料的制备, 要求混凝土材料具有良好的流动性、挤出性、建造性与凝结性等性质, 以保证打印过程的不间断、不坍塌, 且具有一定的粘聚力, 最终确保结构的稳定成型^[4, 5]。

研制新型绿色混凝土材料成为节能、节材、综合利用资源的新途径。制备一种环保型的 3D 打印混凝土, 将有利于提升 3D 打印技术的绿色化和低成本化等^[6]。本文尝试利用底泥陶砂制备满足 3D 打印要求的混凝土材料, 而 3D 打印混凝土材料的力学承载性能又是结构安全和工程应用的基础和关键, 故选用纤维混凝土作为打印材料是改善力学性能的有效途径。前人在借助高弹性模量的细纤维制备高韧性水泥基材料方面进行了大量的实践和探索^[7, 8]。玄武岩纤维(Basalt Fiber, BF)是一种新的混凝土增强材料, 由纯天然的火山岩(含玄武岩)矿石经高温熔融、拉丝而成, 具有抗拉强度高、耐腐蚀、耐高温、抗裂性能好等优点^[7, 8]。实验测试结果表明, 玄武岩纤维与水泥胶凝体系有良好的粘结性, 而且在混凝土中掺加短切玄武岩纤维后, 混凝土的强度及抗断裂性能得到了明显改善。然而, 制备一种同时兼备良好可打印性和优异力学性能的纤维混凝土是配合比设计的一个难点。

此外, 区别于传统的模板浇筑振捣过程, 3D 打印将新拌水泥基的复合材料从打印喷头持续挤出并堆叠建造的过程不可避免会引入一定量的空隙, 同时也在打印层与层之间造成粘结弱面^[9, 10]。细观的非均质性直接影响工程材料的宏观力学行为^[11]。因此, 研究打印的挤出堆叠过程对材料力学性能的影响

^{*} 收稿日期: 2018-08-15; 修回日期: 2018-10-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51808183), 重大仪器研制项目(51627812)资助

通讯作者: 马国伟(1968—), 男, 博士, 教授, 博导。主要研究领域: 3D 打印混凝土, 岩石力学, 地下防护工程等。Email: guowei.ma@hebut.edu.cn

响,对确定工程结构的承载安全性能具有重要的意义。然而,目前鲜有对纤维增强 3D 打印混凝土材料力学各向异性的研究报道。

鉴于此,本文首先制备了 5 种不同掺量的玄武岩纤维混凝土材料,通过挤出型 3D 打印机验证其打印效果,最终选取满足要求的配合比,制备试件用于单轴抗压和抗弯测试,从三个正交方向加载,并评价力学各向异性。本文测试结果可为 3D 打印混凝土材料的配合比设计以及工程结构设计提供实验数据和参考。

1 原材料与实验方法

1.1 原材料配比

混凝土制备的原材料包括由快硬波特兰水泥 P. O 42.5R、粉煤灰和硅灰组成的胶凝材料;陶砂和河砂用作细骨料;采用了减水率大于 30% 的高效聚羧减水剂,降低混凝土材料的水灰比,提高保水性,避免混凝土打印挤出过程中的离析。水泥、硅灰和粉煤灰的化学成分如表 1 所示。本文选用的陶砂为河流底泥烧制而成,主要成分为 SiO_2 、 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 等安全无害物质,表观密度为 $845\text{kg}/\text{m}^3$,堆积密度为 $809\text{kg}/\text{m}^3$ 。

表 1 胶凝材料的化学成分组成
Tab. 1 Chemical composition of cementitious materials

组分	平均所占百分数/%		
	水泥	粉煤灰	硅灰
SiO_2	19.4~21.5	42~51	90~97
Al_2O_3	4.1~4.9	27~32	
Fe_2O_3	2.8~2.9	7~11	
CaO	61.9~64.2	1~5.2	
MgO	1.1~1.2	1~4.5	
SO_3	3.0~3.2	0.3~1.3	
K_2O	0.6~0.7	1~5	
Na_2O	0.2	0.8~1.7	
TiO_2		0.8~1.1	
Cl	0.02~0.05	0.05~0.15	
烧失量	2.3~4.1		<3.0

首先制备了 5 种不同玄武岩纤维掺量的混凝土材料,BF 的质量比为 0%、0.1%、0.2%、0.4% 和 0.6% 的混凝土材料分别由符号 W0、W1、W2、W4、W6 表示。采用的玄武岩纤维具有高强度和高弹性模量,表 2 列出了玄武岩纤维的物理力学参数。通过设置不同的纤维掺量,寻求最优的 3D 打印混凝土材料配合比,表 3 列出了各材料的配合比。

由于陶砂为高孔隙率材料,为了避免掺入陶砂对拌合物流动性以及收缩造成不利的影响。图 1 给出了所选用陶砂的颗粒级配和吸水率等物理参数。使用前先将其进行饱水 3 个小时,淋干后备用。混凝土制备过程中,先将水泥、粉煤灰、硅灰、河砂、陶砂以及纤维倒入搅拌机中混合 6min,得到均匀的干粉混合物。然后,加入水和减水剂的混合物的 1/2,搅拌 3min。随后,将剩余的水和减水剂的混合液倒入,搅拌 3min。

表 2 玄武岩纤维的物理、力学性能

Tab. 2 Physical and mechanical properties of Basalt fiber

单丝直径/ μm	长度/mm	密度/ (g/cm^3)	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	极限伸长率/%
30~60	15	2.55	76.5	3950	2.55%

表 3 3D 打印纤维增强陶砂混凝土配合比

Tab. 3 Mix proportions of 3D printed fiber reinforced ceramic concrete

编号	水泥	硅灰	粉煤灰	河砂	陶砂	水	高效聚羧酸减水剂	玄武岩纤维
W0	1.0	0.06	0.2	0.6	0.4	0.325	0.0025	0%
W1	1.0	0.06	0.2	0.6	0.4	0.325	0.0025	1%
W2	1.0	0.06	0.2	0.6	0.4	0.325	0.0025	2%
W4	1.0	0.06	0.2	0.6	0.4	0.325	0.0025	4%
W6	1.0	0.06	0.2	0.6	0.4	0.325	0.0025	6%

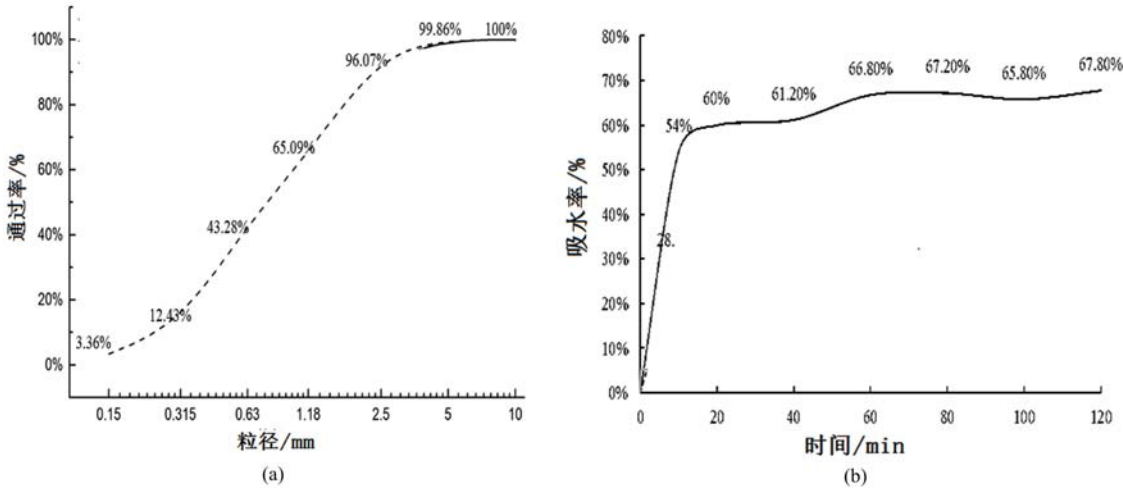


图 1 陶砂的物理参数(a)颗粒级配,(b)吸水率

Fig. 1 (a) Particle grading and (b) water absorbing property of ceramic sand

1.2 3D 可打印性能测试

可打印性是指新拌水泥基复合材料满足打印过程的泵送、挤出、无模堆积过程而不发生堵塞、中断、较大变形甚至坍塌的能力,主要包括流动性、挤出性、建造性、早期刚度等,其中挤出性和建造性为两个主要的评价指标。实验采用的 3D 打印设备如图 2 所示,该打印机的打印空间为 1.5m (L) $\times$ 1.5m (W) $\times$ 1.5m (H),打印喷头的口径为 30mm。混凝土材料在搅拌与泵料系统内拌合完成之后,由泵料管道泵至喷头。门式桁架上装配有多组步进电机用于分别控制打印喷头在 X,Y 和 Z 方向的自由移动。



图 2 大型水泥基材料 3D 打印机

Fig. 2 Largescale cement based 3D printer

挤出性能参照 Le 等人的方法^[12],通过打印材料的连续和稳定,对搅拌料的挤出性进行了评价。每条打印路径的设计都是在 8 个往返过程中,总长度为 3200mm。打印路径的每一段都是 400mm。在挤压过程中没有堵塞和中断的复合材料,说明具有满足条件的挤出性能。可建造性是指垂直堆叠打印一定高度而保持稳定状态不发生较大变形的能力。为了评估材料的建造性,设计结构的几何尺寸为宽度

60mm,长度 400mm,堆叠 30 层,观测最终成型后是否摊落和垮塌来评定建造性。

1.3 3D 打印试样与力学测试

在打印过程中,打印参数必须与新拌材料的流变性能相兼容,否则易造成堵塞、中断甚至坍塌。经过多次尝试与探索,喷头混凝土材料的挤出速度设置为 8.4L/min,水平打印速度为 12m/min,每一层的层高设置为 10mm。按照上述的材料和 3D 打印参数设置,打印了尺寸为 480mm×360mm×170mm 的矩形模型。图 3(a)展示了 3D 打印过程,图 3(b)为打印成型后的试件。模型打印完成,室温养护 24h 后,放置环境温度为 20±2℃,相对湿度为 95%的环境中养护 28d。养护完成后,将打印的矩形模型切割,进行力学性能测试,其中尺寸为 100mm×100mm×400mm 的棱柱体试件用于抗弯性能测试,尺寸为 100mm×100mm×100mm 的立方体试件用于抗压性能测试。立方体和棱柱的试样由 X、Y、Z 三个方向加载,如图 4 所示。在 X、Y 和 Z 方向上的 3D 打印试件的力学测试,分别用符号 FX、FY 和 FZ 表示。

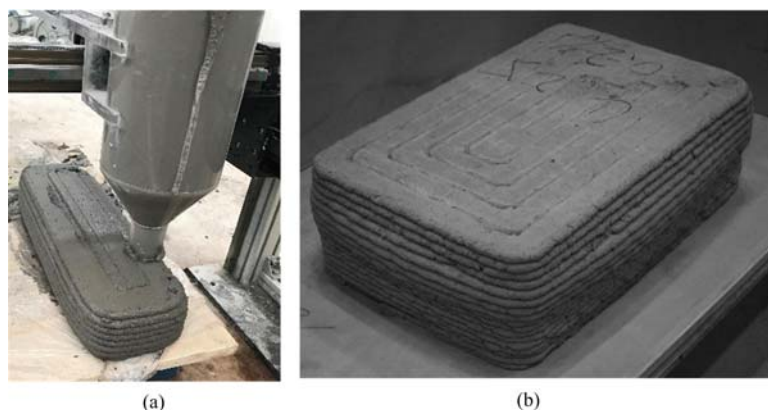


图 3 (a) 混凝土材料的挤出打印过程, (b) 打印试件

Fig. 3 (a) Process of 3D printing and (b) final printed product

力学性能测试采用负载容量为 2000kN 的万能试验机加载试件。单轴压缩实验按照国家标准的规定设置,选用立方体试样,加载速率为 0.6MPa/s。加载过程中的荷载位移数据都被自动记录下来。根据 GB/T50081—2002,弯曲实验采用棱柱试件,加载速率为 50N/s,抗弯强度使用式(1)进行计算:

$$f_{lx} = \frac{3F_{\max} \cdot L}{2bh^2} \quad (1)$$

式中, f_{lx} 是抗弯强度(MPa); $F_{\max}$ 是最大的弯曲载荷(N); L 是两个支架之间的距离; b 和 h 分别指试样的宽度(mm)和高度(mm)。

2 实验结果与分析

2.1 可打印性测试

测试结果表明,当纤维掺入量相对较大时,混凝土的工作性能受到较大的影响。一方面,随着纤维掺量的增加,混凝土的工作性能变差,导致混凝土挤出过程不畅通,时有不连续和中断发生。使用的纤维越多,水泥复合材料的流动能力越低,堵塞的风险也越高。另一方面,掺入多余纤维会破坏已经形成的混凝土内部的最佳的构造,胶凝材料不能充分包裹纤维,导致空隙加大。在实验中,W6、W4 的混合物在挤出测试中,虽尚未有中断出现,但表面微裂缝较多,连续性较差。因此,本文只选用 W0、W1 和 W2 进行力学性能的测试。

2.2 单轴压缩实验测试

图 5 给出了 W0、W1、W2 三组配合比的混凝土材料分别承受 X、Y、Z 三个方向的抗压强度一位移曲线。从测量结果来看,抗压强度随纤维掺量的增加而增加。W0、W1 和 W2 的抗压强度的平均值分别为 42.0MPa、47.5MPa 和 56.4MPa。对于同一种纤维掺量的材料而言,力学性质因加载方向的不同而不同。配比 W2 在 X、Y、Z 方向的测量强度依次为 61.54MPa、52.86MPa 和 58.79MPa。W0、W1 和

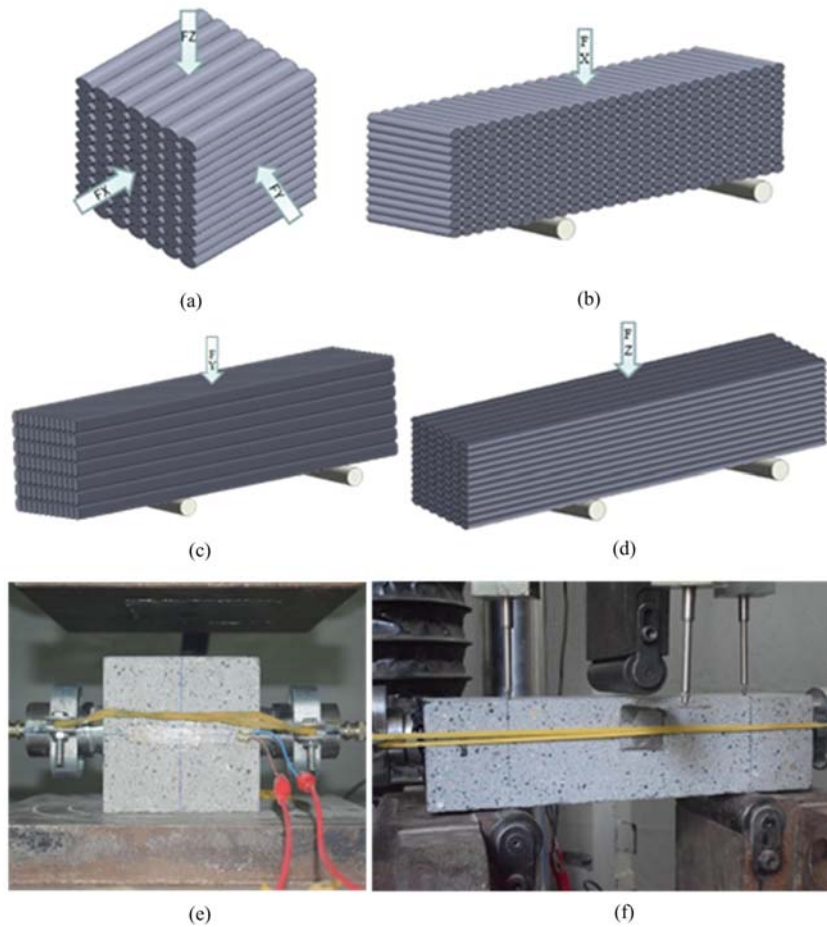


图4 (a)抗压强度力学各向异性测试示意图, (b) X, (c) Y, (d) Z方向加载的抗压强度各向异性测试, (e)抗压强度实验与(f)弯折强度实验测试图

Fig. 4 Schematic of anisotropic measurement of (a) compressive behaviors and flexural behaviors from (b) X, (c) Y, (d) Z directions; set-up of (e) compressive strength and (f) flexural strength testing of 3D printed specimens

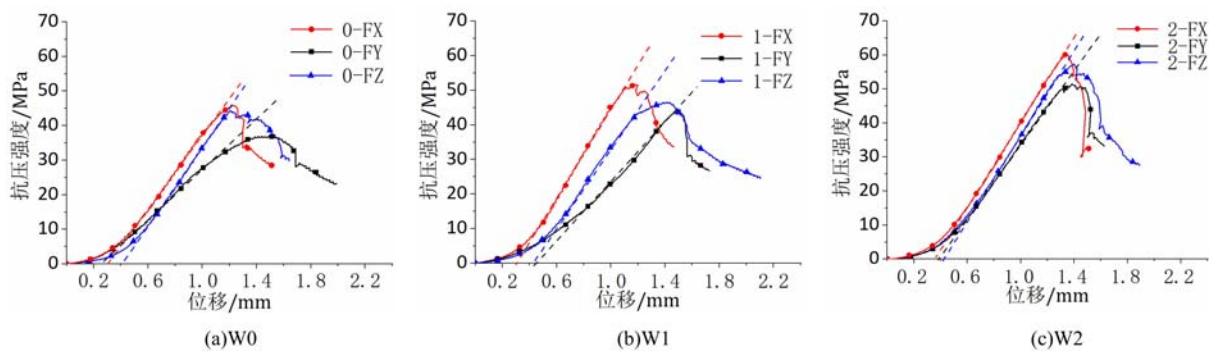


图5 (a)W0, (b)W1, (c)W2 三个加载方向的抗压强度-位移曲线图

Fig. 5 Compressive strength-displacement curves of the three loading directions of (a)W0, (b)W1 and (c)W2

W2 三种材料的不同方向抗压强度的差值分别为 17.1%、16.9% 和 23.9%。这种抗压强度的差别主要是由于打印过程中引入的弱面结构以及空隙所导致的。测试数据表明,沿 X 轴方向加载的试样强度最高,而沿 Y 轴方向加载的强度最低。这可能是沿 X 轴加载时,由于打印的“带状物”的延伸方向平行于竖向的压力,从而发挥出类似于短柱的效果,抗压强度相对较高;沿 Y 轴和沿 Z 轴加载时,打印过程中的带状物垂直于压缩应力,打印过程引入的微缺陷导致了强度相对较低。为了进一步分析打印过程对混凝土材料宏观力学行为的影响,图 6 给出了 W2 试件在承受压力过程中轴向和横向的应变,根据实验

测试数据, X、Y、Z 三个方向的横向应变的最大值分别为: $570\mu\epsilon$ 、 $2908\mu\epsilon$ 、 $1763\mu\epsilon$; X、Y、Z 三个方向的纵向应变的最大值分别为: $-2681\mu\epsilon$ 、 $-5980\mu\epsilon$ 、 $-4425\mu\epsilon$ 。从图中可得知, FX 的试件虽然具有较高的强度,但是变形相对较小。这说明了 FX 试件的脆性破坏特征,这也与打印带状结构平行于压力有关。

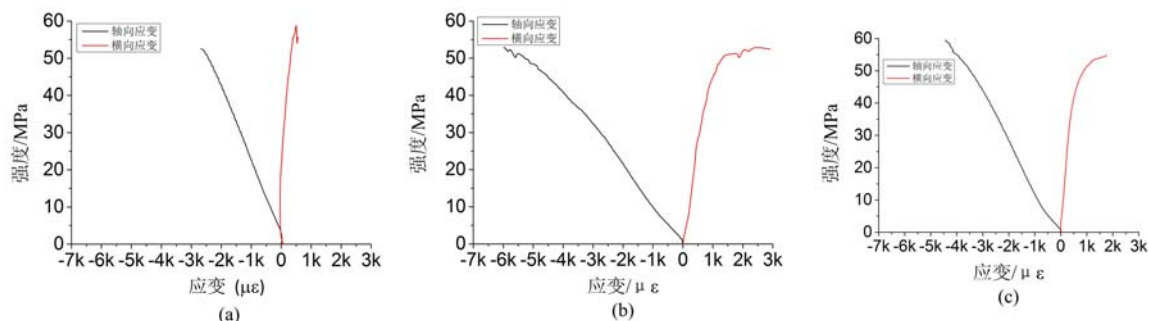


图 6 材料 W2 在(a) X, (b) Y 和(c) Z 三个加载方向的强度—应变曲线图

Fig. 6 Stress-strain curve of W2 exposed to three loading directions from (a) X, (b) Y, (c) Z

2.3 三点弯曲实验

图 7 给出了 W0、W1、W2 三组配合比的混凝土材料分别承受 X、Y、Z 三个方向的弯曲的力—挠度曲线。弯折强度随纤维掺量的增加而增加,三种材料的抗弯强度值分别为 5.16MPa、5.63MPa 和 5.90MPa。对于同一种纤维掺量的材料而言,力学性质因加载方向的不同而不同,随纤维掺量的增加,强度最大值与最小值之间的差异分别为 29.9%、41.2%和 48.8%,这表明纤维掺量的增加提高了材料的各向异性。然而与抗压强度不同的是,沿 X 轴方向加载的试样弯折强度最低,沿 Y 轴方向加载的强度值最高。这主要是当试样受 X 轴的弯折应力时,棱柱体的跨中部位承受的拉力与打印的带状物的延伸方向垂直,而打印层间的弱面粘结性能较弱,易出现开裂,从而表现出较低的强度。而对于其他的两种情况,棱柱体试件的跨中部位承受的拉力与带状物方向平行,此时掺入的玄武岩纤维发挥出一定的变形控制和裂缝抑制的作用,有利于抵抗外部荷载,从而强度值相对较高。

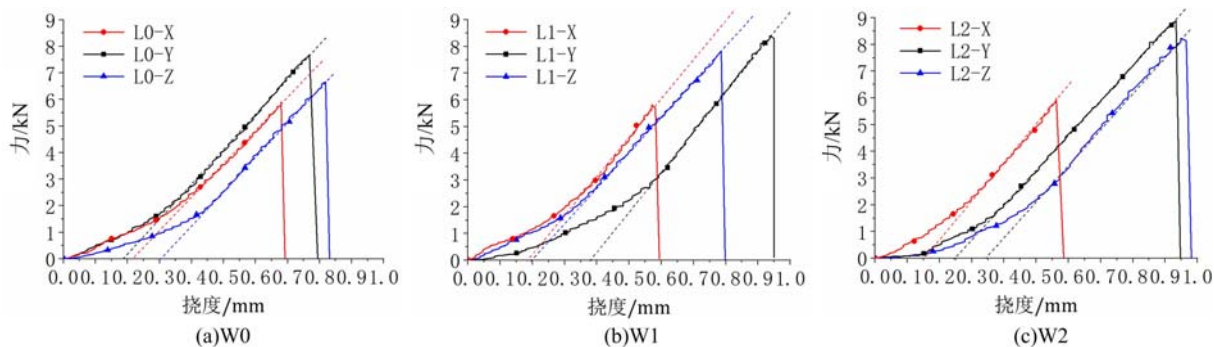


图 7 (a) W0, (b) W1, (c) W2 三个加载方向的力—挠度曲线图

Fig. 7 Force-deflection curves of the three loading directions of (a) W0, (b) W1 and (c) W2

2.4 力学各向异性评估

综合上述的抗压、抗弯性能的力学测试结果,区别于模板浇筑的成型方式,3D 打印混凝土在配合比固定的条件下因受力方向的不同而表现出迥异的力学性质,即力学的各向异性。各向异性受打印材料参数、打印工艺参数等影响较大,视模板浇筑的砂浆试件为各向同性材料。就相同尺寸的试件而言,打印层越少,与浇筑试样越接近,则力学差异性也就越小;相反地,各向异性也就越明显。因此,本文提出一个各向异性指数用于表征打印过程对材料力学行为的影响,计算方法如下:

$$f_{avg} = (f_x + f_y + f_z) / 3 \quad (2)$$

$$I_a = \sqrt{(f_x - f_{avg})^2 + (f_y - f_{avg})^2 + (f_z - f_{avg})^2} \quad (3)$$

中, f_x 、 f_y 、 f_z 分别代表沿 X、Y、Z 方向加载时的强度; f_{avg} 代表三个加载方向的平均强度; I_a 为各向异

性系数,即单一方向强度与三个正交方向强度均值的平均方差。对于各项同性材料,各向异性系数 I_a 的值等于 0,即数值越小,各向异性差异也就越小。将实验测量的三种不同纤维掺量的混凝土材料的抗压强度和抗弯强度分别代入(2)式、(3)式进行计算,求解后得知:随着纤维掺量的增加, W_0 、 W_1 和 W_2 抗压强度的各向异性系数分别为 6.36、5.38、6.42; W_0 、 W_1 和 W_2 的抗弯强度的各向异性系数分别为 0.96、1.46 和 1.66。对于抗压测试结果而言,由于加入不同量的纤维而造成的各向异性不明显。而对于抗弯强度而言,纤维的掺量越大,各向异性值也就越大。纤维在挤出过程中的定向效果明显,提高纤维掺量可有效提高混凝土强度。然而在一定程度上,纤维的定向作用在 3D 打印弱面处发挥的作用有限。因此,随纤维掺量增多,材料各向异性特征增大。

3 结论

本文制备不同掺量的玄武岩纤维陶砂混凝土,通过大型 3D 打印机确定满足打印要求的配合比,测试了三个正交方向的抗压和抗弯强度,得出以下结论:

(1) 纤维掺量增加易使打印过程不连续,材料的表面出现很多微裂缝,甚至会在打印过程中造成堵塞。

(2) 逐层堆叠的打印过程导致了打印结构的细观非均质性,打印材料因加载方式的不同而表现出迥异的力学性质。单轴压缩实验中,X 方向加载强度最高,而对于弯折测试,Y 方向加载强度最高。这主要是受层间弱面与受载方向的关系影响,层间弱面承受拉力时,整体结构的承载性能较弱。

(3) 提出了用于评价 3D 打印混凝土材料的力学各向异性系数。各向异性受打印参数和材料参数两方面的共同影响,并且纤维的定向作用对水泥基材料的力学强度影响明显,但在 3D 打印弱面处发挥的作用有限。因此,随纤维掺量增多,材料各向异性特征增大。

参考文献:

- [1] 丁烈云,徐捷,覃亚伟. 建筑 3D 打印数字建造技术研究应用综述[J]. 土木工程与管理学报, 2015(3):1—10 (DING Lieyun, XU Jie, QIN Yawei. Research and application review of the digital construction technology of 3D printing for construction[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015(3):1—10 (in Chinese))
- [2] 夏明杰,范立峰,马国伟. 3D 打印结构加强混凝土短柱抗压力学性能研究[J]. 实验力学, 2018, 33(4):551—556 (XIA Mingjie, FAN Lifeng, MA Guowei. An experimental study of compressive mechanical properties of concrete short column strengthened by 3D-printing structure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(4):551—556 (in Chinese))
- [3] Ma G, Sun J, Wang L, et al. Electromagnetic and microwave absorbing properties of cementitious composite for 3D printing containing waste copper solids[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 94:215—225.
- [4] Ma G, Wang L, Ju Y. State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material-An emerging technique for construction[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61:475—495.
- [5] Ma G, Wang L. A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing[J]. Frontiers of Structural & Civil Engineering, 2018, 12(3):1—19.
- [6] Ma G, Li Z, Wang L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing[J]. Construction & Building Materials, 2018, 162:613—627.
- [7] Ju Y, Wang L, Liu H, et al. Experimental Investigation into mechanical properties of polypropylene reactive powder concrete[J]. Aci Materials Journal, 2018, 115:21—32.
- [8] Ju Y, Wang L, Liu H B, et al. An experimental investigation of the thermal spalling of polypropylene-fibered reactive powder concrete exposed to elevated temperatures[J]. Science Bulletin, 2015, 60(23):2022—2053.
- [9] Ma G, Zhang J, Wang L, et al. Mechanical characterization of 3D-printed anisotropic cementitious material by the electromechanical transducer[J]. Smart Materials & Structures, 2018, 27(7):1—14.
- [10] Li Z, Wang L, Ma G. Method for the enhancement of buildability and bending resistance of 3D printable tailing mortar[J]. International Journal of Concrete Structures & Materials, 2018, 12(1):37—49.
- [11] Ju Y, Wang L, Xie H, et al. Visualization of the three-dimensional structure and stress field of aggregated

concrete materials through 3D printing and frozen-stress techniques[J]. Construction and Building Materials, 2017, 143:121—37.

- [12] Le T T, Austin S A, Lim S, et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete[J]. Materials and Structures, 2012, 45:1221—1232.

Experimental study on the mechanical anisotropy of 3D printed concrete

WANG Li, WANG Bo-lin, BAI Gang, MA Guo-wei

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In recent years, concrete 3D printing technology has achieved rapid development and application in the field of civil construction. Different from mould casting process, the layer-by-layer process of 3D printing inevitably introduces a number of regular weak interfaces and voids into the materials, resulting in certain heterogeneity. The steel bars cannot be inserted in 3D printing process, while the printable fiber reinforced concrete can effectively improve the mechanical properties. In this paper, a new kind of basalt fiber reinforced ceramic sand concrete is firstly prepared for the extrusion-type 3D printing process. Then taking the horizontal printing layers as the XY plane, the samples are loaded from three orthogonal directions to measure the compressive and flexural mechanical properties of prepared concrete. In particular, an anisotropic coefficient was given to evaluate the mechanical anisotropy. The results show that the printed specimen performs the best uniaxial compression capacity when loaded from X direction, while when exposed to Y direction loading, the specimen exhibits the highest bending resistance.

Keywords: 3D printing; Basalt fiber; fiber reinforced concrete; anisotropy; mechanical property