

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.001



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



不同交叠路径 3D 打印钢纤维增强水泥基材料的抗压性能

廖维张^{a,b}, 黄嘉俊^a, 阚效禹^a, 袁婉莹^a

(北京建筑大学 a. 工程结构与新材料北京市高等学校工程研究中心; b. 北京未来城市设计高精尖
创新中心, 北京 100044)

摘要:3D 打印混凝土具有灵活、低碳、快速、无模板施工的优势,但界面黏结问题可能导致打印层结合不紧密,影响强度。交叠打印路径可减少该缺陷并增强层间黏结,提高抗压强度。对于钢纤维增强水泥基材料,钢纤维的分布方向易受打印路径的影响,交叠路径下的 3D 打印钢纤维增强水泥基材料的抗压强度研究尚不充分。采用平行路径和螺旋交叠路径两种 3D 打印方式,通过改变荷载与路径方向的夹角和螺旋交叠角制作钢纤维增强水泥基立方体试块,探究上述参数对其抗压强度的影响规律。结果表明:在 X-Y 平面内,平行路径抗压强度随荷载方向与路径方向夹角的变化先增后降,但均小于现浇试件;在 X-Y 平面内,当纤维的分布方向与加载方向平行时,抗压强度最大(X 方向),当纤维的分布方向与加载方向垂直时,抗压强度最小(Y 方向);30°、90°螺旋交叠路径在 X、Y、Z 方向的抗压强度明显高于平行路径;相比平行打印,螺旋交叠结构减小了力学各向异性;螺旋交叠的打印方式可作为提升构件抗压强度的有效措施。

关键词:3D 打印;钢纤维增强水泥基材料;抗压强度;路径方向;螺旋交叠结构

中图分类号:TU528.585 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)05-0110-08

Compressive strength of 3D printed steel fiber reinforced cementitious materials with different overlapping paths

LIAO Weizhang^{a,b}, HUANG Jiajun^a, KAN Xiaoyu^a, YUAN Wanying^a

(a. Beijing Higher Education Engineering Research Center for Engineering Structures and New Materials; b. Beijing High Precision Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, P. R. China)

Abstract: Three-dimensional printed concrete technology has the advantages of flexible, reduced carbon emissions, expedited construction, and the capacity for formless design. However, the interface bonding problem may cause the printing layer to be not tightly bonded, affecting the strength. Overlapping print paths

收稿日期:2024-07-30

基金项目:国家自然科学基金(51878028);北京市自然科学基金(8222015、8212007);国家资助博士后研究人员计划(GZC20240096)

作者简介:廖维张(1978-),男,博士,教授,主要从事工程结构安全与防护、高性能复合材料研究,E-mail:liaoweizhang@bucea.edu.cn。

袁婉莹(通信作者),女,博士,E-mail:yuanwanying@bucea.edu.cn。

Received: 2024-07-30

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51878028); Natural Science Foundation of Beijing (Nos. 8222015, 8212007); National Program for Funding Postdoctoral Researchers (No. GZC20240096)

Author brief: LIAO Weizhang (1978-), PhD, professor, main research interests: engineering structural safety and protection, high-performance composite reinforcement material, E-mail: liaoweizhang@bucea.edu.cn.

YUAN Wanying (corresponding author), PhD, E-mail: yuanwanying@bucea.edu.cn.

reduce defects and enhance interlayer bonding, increasing compressive strength. For steel fiber reinforced cement-based materials, the distribution direction of steel fiber is easily affected by the printing path, and the research on the compressive strength of 3D-printed steel fiber reinforced cement-based materials under overlapping paths is insufficient. Based on 3D-printed technology, this paper explored the compressive strength by using parallel path and spiral overlapping path printing methods and varying the angle between the load and path direction and the pitch angle to fabricate steel fiber-reinforced cementitious cubic specimens. The following conclusions were drawn: In the X-Y plane, the compressive strength of parallel paths first increased and then decreased with the change in the angle between the load direction and the path direction, but it was less than that of cast-in-place specimens; In the X-Y plane, when the distribution direction of fibers is parallel to the loading direction, the compressive strength in the X direction is the highest (X direction), and when the distribution direction of fibers is perpendicular to the loading direction, the compressive strength is the lowest (Y direction); The compressive strength in the X, Y and Z directions was significantly higher in the 30° and 90° pitch angle paths compared to parallel paths; Compared to parallel structure printing, the bouligand structure reduced mechanical anisotropy. The Bouligand structure printing method has been demonstrated to enhance the compressive strength of components.

Keywords: 3D printing; steel fiber reinforced cementitious materials; compressive strength; path direction; bouligand structure

3D打印是通过自下而上的材料逐层堆积形成三维实体,在生物科学、航空航天、机械制造等领域具有广阔的发展前景^[1-3]。3D打印混凝土施工技术作为一种新兴技术,比传统施工流程更加自动化和智能化,整个打印过程由机器与计算机控制,不需要模板,提高了施工效率,减少了不必要的程序与人工成本。且由于无模板化施工,可制作结构复杂的异形构件,使建筑更加美观,受力更加合理。

在3D打印过程中,经常会出现粗骨料难以通过喷头、打印条带而断裂^[4-5]的问题。纤维增强水泥基复合材料(fiber reinforced cementitious composites, FRCC),具有强度高^[6]、延性好^[7-8]、抗裂性强^[6, 9]的特性。钢纤维作为众多纤维的一种,掺入水泥基材料中可以提升其强度^[9-10]、韧性^[11-12]、抗裂^[13-14]和抗冲击性能^[15-17]。钢纤维增强水泥基材料使打印出的结构承受荷载、抗断裂能力增强,更适用于3D打印异形构件。

钢纤维方向^[18]对FRCC的力学性能有影响,且3D打印混凝土的堆叠方式会造成材料力学性能的各向异性^[19-21]。笔者采用平行路径与交叠路径的打印方式,研究路径方向、交叉堆叠方式对3D打印FRCC的抗压强度的影响。

1 试验设计

借鉴雀尾螳螂虾前肢的螺旋交叠结构,其SEM

扫描图如图1所示。在捕食时该结构前肢可承受子弹加速度下1.5 kN的峰值力^[22]。基于此原理,通过改变3D打印路径的方式制作了路径方向相对荷载方向0°、30°、60°、90°的试件,0°平行路径、螺旋交叠角30°、90°的试件以及钢纤维增强水泥基材料现浇试件,明晰了荷载方向与路径方向夹角以及交叉堆叠方式对3D打印钢纤维增强水泥基材料抗压强度的影响。

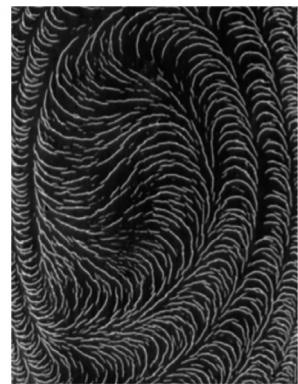


图1 雀尾螳螂虾前肢的SEM扫描图像^[22]

Fig. 1 SEM scanning images of the forelimbs of the Peacock Mantis Shrimp^[22]

1.1 打印试件制备

1.1.1 路径设置

设置每一层路径为“己”字形路径,如图2所示,所有试件均由360 mm×360 mm×120 mm的长方体试件切割而成。试件数量如表1所示,切割方法如图3所示。

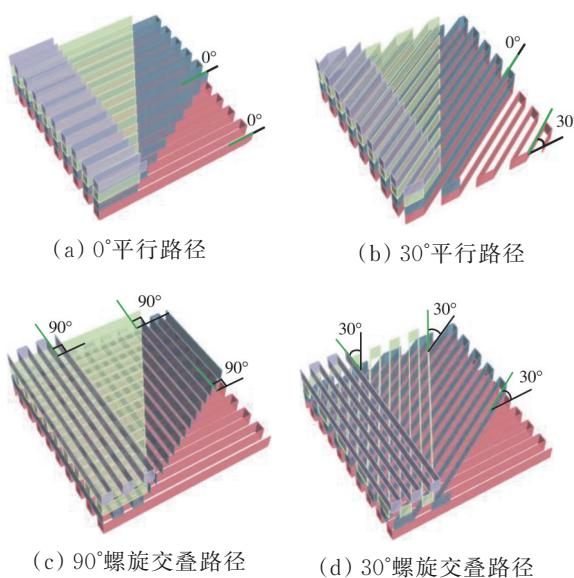


图2 打印路径设置

Fig. 2 Printing path of different pitch angles

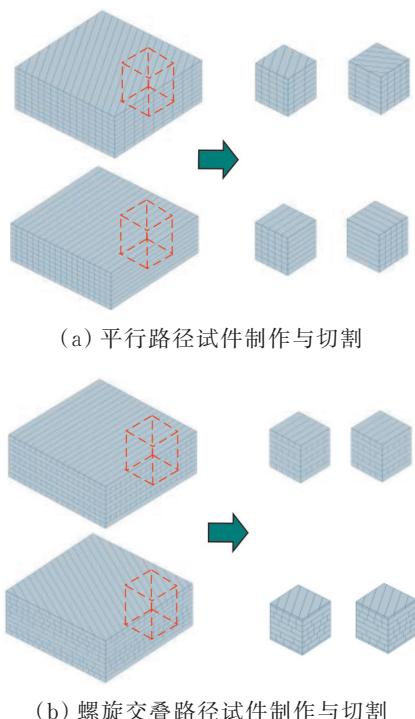


图3 试件制作和切割示意图

Fig. 3 The production and cutting diagram of samples

1.1.2 材料选取与配比

选用镀铜圆直钢纤维,体积掺量设置为1%,具体参数见表2。

为满足可打印性,以快硬硫铝酸盐水泥替代P·O 42.5普通硅酸盐水泥,替代率为5%(占总水泥质量),使用粒度适中的40~70目石英砂,I级粉煤灰,SF95硅灰。为满足3D打印材料的流动性,在材料中掺入聚羧酸系高效减水剂,为满足3D打印材料的建造性,在材料中掺入20万黏度的羟丙基甲

表1 荷载与路径方向试件的数量

Table 1 Number of specimens at the angle between load and path direction

打印方式	打印角度/(°)	加载方向	试件数量
平行路径打印	0	0°/X	3
	0	90°/Y	3
30°	Z	3	
	30°	30°	3
	30°	60°	3
	30	X	3
螺旋交叠打印	30	Y	3
	30	Z	3
	90	X	3
	90	Y	3
	90	Z	3
	现浇		3

表2 钢纤维参数

Table 2 Specific parameters of steel fibers

长度/mm	直径/mm	长径比	抗拉强度/MPa
13	0.22	59	2 850

基纤维素(HPMC)和碳酸锂促凝剂。通过多次3D打印工艺流程测试,使材料初凝时间在1~2 h内,具体配比见表3。

表3 3D打印水泥基材料配比

Table 3 Mix proportions of cement-based materials

水胶比	水泥	快硬水泥	粉煤灰	硅灰	石英砂	减水剂	HPMC	促凝剂	g/L
0.30	784	41.3	381	64	509	5	8.3	74.3	

由于材料配比不同,合理打印速率不同,试验打印速率设置为50 mm/s。物料仓开启一定程度的振动,喷口尺寸为20 mm,层高约为15 mm,打印参数一致。制备出的材料扩展流动度按照《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2005)^[23]测定。

1.1.3 3D打印测试

打印设备采用KUKA公司生产的滑轨机械臂式3D打印机,如图4所示。材料的可挤出性和可建



图4 滑轨机械臂3D打印机

Fig. 4 Sliding rail robotic arm 3D printer

造性通过评估打印长方体试件过程中材料是否发生中途断开、堵塞以及建造体是否出现大变形或倒塌等现象来判定。

图5为材料的可打印测试情况。如图5(a)所示,流动拓展度在195 mm左右,符合文献[24]建议的流动扩展度180~200 mm区间。如图5(b)所示,打印过程中未出现明显变形、倾斜和坍塌,表明钢纤维水泥基材料配合比符合打印工艺,拥有较好的可打印性。

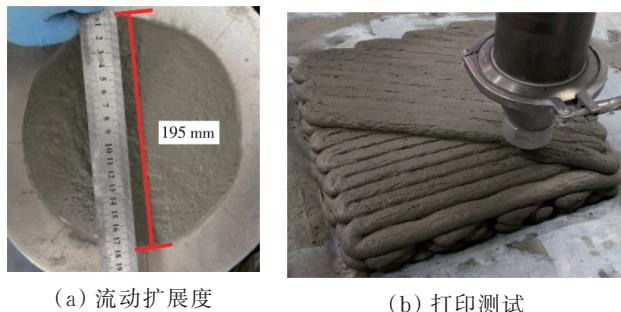


图5 可打印测试

Fig. 5 Printability test

1.2 力学试验方案

抗压试验按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[25]执行。抗压试件采用100 mm×100 mm×100 mm立方体,所有试件均由大试件养护3 d后切割并再次放入养护室养护25 d而成,在养护完成后对试块的切割面进行打磨。同时,使用模具现浇方式制作同尺寸钢纤维水泥基材料试件作为试验对照样品。按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[25],放入温度为(20 ± 2)℃、相对湿度为(95±5)%的标准养护室中进行养护。抗压强度测试使用2 000 kN的伺服万能试验机,加载速率为0.5 MPa/s。在打印过程中,存在X、Y、Z三个正交方向以及由于打印工艺和打印速度的不同出现的两类薄弱界面,即层间界面和条间界面,如图6所示。荷载由3个正交方向以及30°、60°夹角进行加载,其中0°、90°夹角加载即为X、Y方向加载,如图7所示。

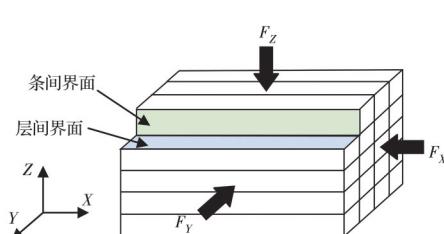


图6 两类界面和3个正交加载方向

Fig. 6 Two types of interfaces and three orthogonal directions

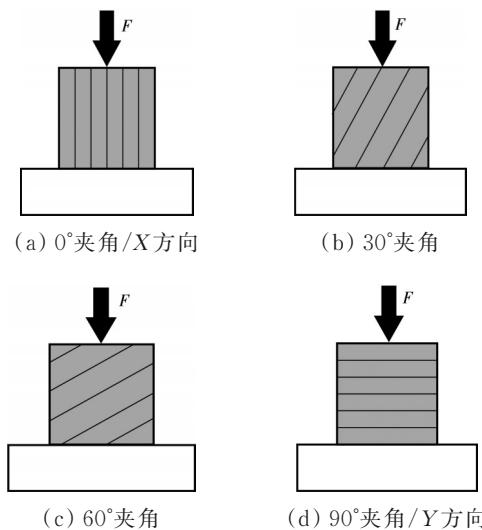


图7 平行路径X-Y平面内的荷载与路径夹角示意

Fig. 7 Schematic diagram of the angle between the load and the parallel path in the X-Y plane

2 试验结果与讨论

2.1 CT扫描结果

如图8所示,在打印过程中,由于材料重力和挤出力的影响,同一截面不同位置处流速不同^[26],加上通道和喷口的“约束效应”^[27-29],钢纤维在不同状态下经过打印通道均会发生转向,与3D打印的打印方向趋于一致。图9表明钢纤维混凝土经打印后具有与打印方向一致的纤维取向^[28]。

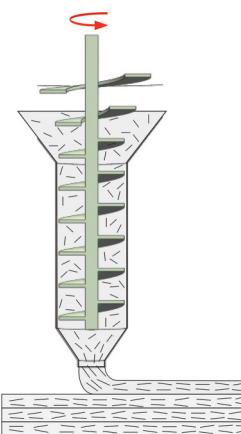


图8 打印机对纤维的定向作用

Fig. 8 The fiber orientation of the print

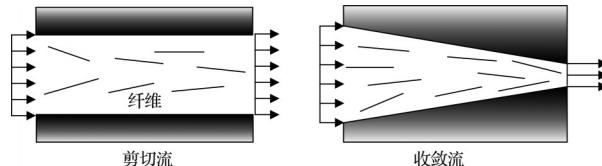


图9 打印中的钢纤维转向方式^[28]

Fig. 9 The steel fiber turning method turing printing^[28]

图10为单个打印条带的CT扫描图。打印中由于螺旋杆的旋转作用,水泥基浆体和钢纤维混合

物受到持续的推挤和剪切作用。这种剪切力使钢纤维在流体中逐渐沿着流动方向重新排列, 喷口截面面积的减小也促进了钢纤维的转向, 最终形成与打印路径方向一致的纤维取向。可以看出, 极个别钢纤维未能定向, 究其原因, 可能是受局部流场扰动、钢纤维本身特性、打印路径复杂性、纤维与浆体的相互作用以及设备设计因素的影响。应该注意的是, 较少的未定向纤维对整体材料性能的影响有限。图 11 为 45 mm 立方体试块的横断面图。由图 11 可知, 由于交叠打印的方式, 上层的条带填补了一部分下层条带间的空隙, 相对提升了试件的密实度, 但也存在层间界面孔隙以及基体内孔隙, 减小了钢纤维增强水泥基材料的强度, 应当在材料中添加消泡剂, 以增加材料强度。

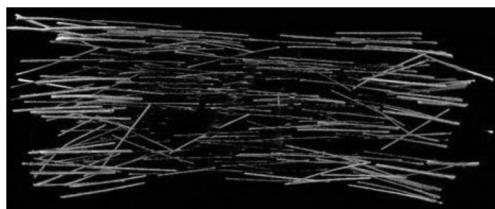


图 10 打印条带内钢纤维的排布

Fig. 10 Layout of steel fibers in printed strip

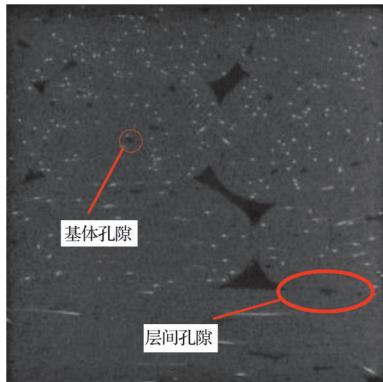


图 11 45 mm 立方体试块的横断面图

Fig. 11 Cross sectional view of 45 mm cube specimen

2.2 破坏形态

图 12 为打印试件的破坏形态图。由图 12(a)、(b)、(j)、(k)可知, 在荷载与路径方向存在夹角的抗压试验中, 裂缝沿条间界面开展, 出现穿过打印条带的现象。而由图 12(c)、(d)、(l)可知, 在另一面则出现沿层间界面开展的竖向裂纹。由于成型过程中缺少振捣, 在两类界面中均出现因未排出的气泡而产生的层间缺陷^[30]。在受压过程中, 缺陷处会产生应力集中, 裂缝将从两类界面内部缺陷处开始产生, 并沿界面开展。裂缝开展后, 界面发生错动, 材料整体应力转变为条带内的拉应力, 直到拉应力达到极限, 钢纤维被拔出, 从而出现条带中的裂缝。由于钢纤维在 FRCC 中起到桥接作用, 因而在破坏

形态上, 打印条带中只出现了少量裂缝。

由图 12(e)~(i)可知, 在 90°、30°螺旋交叠路径的 X、Y 方向上, 破坏形式与平行路径打印的破坏形式类似, 裂缝均沿条间界面以及层间界面破坏。由于每一层的条间界面并未与其上下层的条间界面联通, 因此出现了裂缝路径的转向, 即裂纹沿条间界面向层间界面延展。由图 12(e)可知, 钢纤维在基体中沿打印路径排布, 在沿路径方向, 基体的抗拉强度有所提高。但由于钢纤维的圆直特性, 条带 X-Z、X-Y 平面内的抗剪强度并未相应提高, 穿过条带内的裂缝应是剪应力导致。由图 12(h)、(m)可知, 由于条带在受压过程中承受剪应力, 达到极限时, 条带 X-Y 平面内的抗剪强度提升不高, 因此上

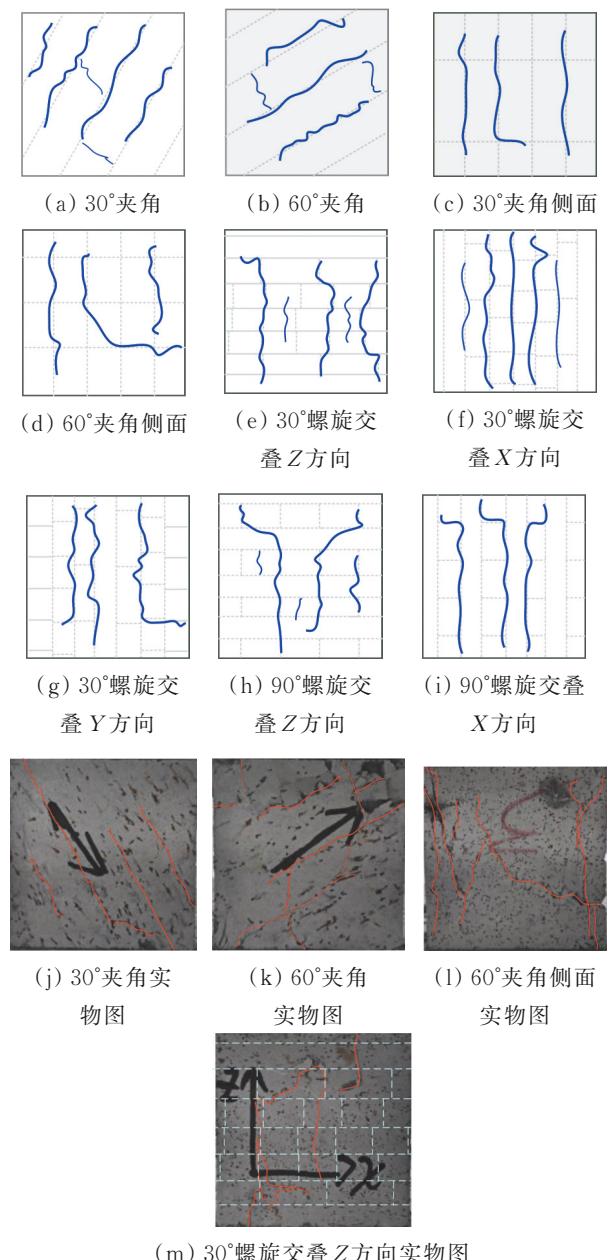


图 12 立方体试件抗压破坏形态示意图和实物图

Fig. 12 The failure mode of the cubes under compression

下层的层间界面裂缝与条带的剪切裂缝连通,出现贯通的裂缝。

2.3 抗压强度分析

2.3.1 平行路径的强度分析

图13为平行路径的抗压强度测试结果。由图13可知,由于无层间界面和条间界面的不利影响,传统现浇方式抗压强度最大。3D打印试件在抗压强度方面表现出明显的各向异性,X方向的抗压强度最大,Z方向次之,Y方向最小,但均小于现浇试件。由于打印过程中压力的影响,界面破坏后材料仍能承担一定的压力,因此,与Y、Z方向相比,X方向强度更大。在Y、Z方向上,由于打印过程中两类结构界面内存在未排出的气泡,相较钢纤维水泥基材料现浇试件,Y、Z方向抗压强度分别降低了27.3%、22.2%。在重力和流动侧向压力影响下,FRCC层间界面黏结强度大于条间界面的粘接强度^[31],裂缝易发展于条间界面,因此,Z方向的抗压强度高于Y方向。

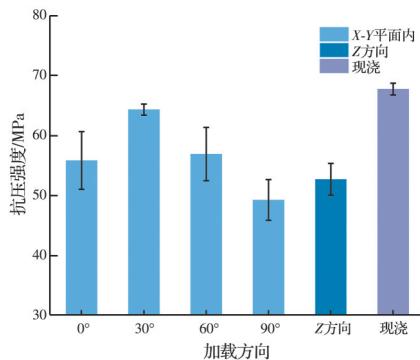


图13 平行路径的抗压强度

Fig. 13 Compressive strength of parallel paths

由图13可知,在X-Y平面内,抗压强度随着荷载与纤维路径方向夹角的增大而先增大后减小。从破坏形态上可以看出,由于存在夹角,在界面破坏后,打印条带中产生了拉应力。钢纤维在基体中起到阻裂作用和3D打印时对钢纤维的定向作用,提升了打印条带在打印方向上的抗拉能力,因此,产生一定夹角后试件的抗压性能有显著提升。相对0°、90°夹角,30°夹角抗压强度提升了15.2%、30.6%。由于打印机的定向作用,在路径的垂直方向,钢纤维与基体难以承担剪切应力,因此抗压强度逐渐降低。由于两类薄弱面的存在,相较现浇试件,不同夹角打印试件的抗压强度有不同程度降低,相对于钢纤维水泥基材料现浇试件,30°、60°夹角试件分别降低了5%、17.5%。

2.3.2 不同路径强度分析

图14为不同路径的抗压强度测试结果。由图14可知,在X、Y方向上,不同螺旋角度交叠打印试

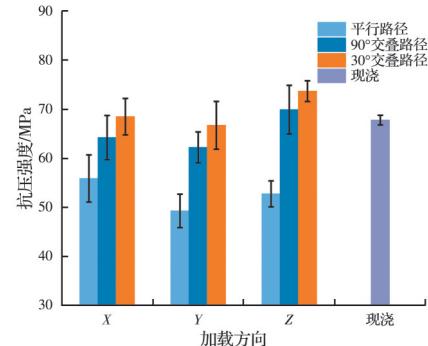


图14 不同路径的抗压强度

Fig. 14 Compressive strength of different paths

件的抗压强度均有提升,相较平行路径,30°、90°螺旋交叠路径在X方向分别提升了22.6%、14.9%,Y方向分别提升了35.4%、24.3%。在螺旋交叠结构试件中,试件内部的密实度相对提高,且钢纤维沿打印方向分布,限制了试件的横向应变,提升了X、Y方向的抗压强度。在X、Y方向,螺旋交叠路径的内部界面形式大致相同,因此强度差别不大。但X方向均大于Y方向,这可能是由于薄弱界面数量不同导致的。由于30°交叠打印X、Y方向截面与90°交叠路径截面差别更小,因此,30°交叠路径的X、Y方向差距最小,仅相差2.6%。

由图14可知,相较其他方向,2种交叠结构试件Z方向强度提升尤为明显。从破坏形态上可以看出,由于交叠打印方式改变了条间界面的分布,相对延长了裂缝发展的路径。再者,多角度的打印方向导致钢纤维在试件内的分布是统一多向的。在受荷载过程中,多向的钢纤维承担了试件内部多方向的拉应力,限制了多方向的侧向变形,因此,相较其他方向,Z方向提升最大。相较平行路径,30°、90°螺旋交叠路径分别提升了38.8%、31.8%,相较于钢纤维水泥基材料现浇试件,分别提升了8.7%、3.2%。而相较90°螺旋交叠路径,30°螺旋交叠路径的钢纤维方向更加丰富,能更多地承担多向的拉应力,提升幅度最大。

2.4 不同路径的力学各向异性评估

对于相同打印路径的力学各向异性,现有公式通过式(1)、式(2)计算X、Y、Z方向的强度变异系数来进行评估^[31]。根据变异系数的定义,也适用于相同路径的力学各向异性评估方法。

$$f_{\text{avg}} = (f_x + f_y + f_z) / 3 \quad (1)$$

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

式中: f_x 、 f_y 、 f_z 分别为沿X、Y、Z方向的抗压强度; f_{avg} 为3个方向的抗压强度平均值; I_a 为各向异性系数。

将平行、 90° 螺旋交叠、 30° 螺旋交叠路径的 3 个正交抗压强度代入式(1)、式(2), 计算出各向异性系数分别为 0.0512、0.0498、0.0425。螺旋交叠结构方式对力学各向异性产生了一定的影响, 相较 90° 螺旋交叠路径, 由于 30° 螺旋交叠路径试件钢纤维方向多样性加强, 进而阻碍了随机裂缝的产生和发展。因此, 减小螺旋交叠角的螺旋交叠结构可降低异形结构的力学各向异性并提升其各方向的强度。

3 结论

通过改变不同荷载与打印路径的夹角以及交叠方式对钢纤维水泥基材料的抗压性能进行研究, 得出如下结论:

1) 路径方向对抗压强度有显著影响, 不同加载方向与打印路径方向夹角的抗压强度呈先增大后减小的趋势, 但由于薄弱面以及薄弱面气泡的存在, 抗压强度均小于钢纤维水泥基材料现浇试件, 具体顺序为 $F_M > F_{30} > F_{60} > F_0 > F_{90}$ 。建议使用消泡剂减少薄弱面出现的气泡, 以增加抗压强度。

2) 在 3 个正交方向上, X 方向的抗压强度最大, Z 方向次之, Y 方向最小, 由于层间界面黏结强度大于条间界面黏结强度, 甚至出现宏观缺陷, 因此, Z 方向强度高于 Y 方向。

3) 在多种交叠路径中, 30° 螺旋交叠路径 Z 方向抗压强度最高, 而螺旋交叠角越小, Z 方向提升越强。原因是交叠打印下打印机喷口的钢纤维定向作用使得其存在多种钢纤维方向, 导致受压状态下界面裂缝扩展时受到阻碍。

4) 在交叠路径结构中, 相较平行路径, 90° 、 30° 螺旋交叠路径在 X 、 Y 、 Z 方向的抗压强度均有提升, 并且减小了力学各向异性。建议使用交叠路径结构, 以减小力学各向异性并提升各方向的强度。

参考文献

- [1] 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 1-11.
- BAO Y Q, LI H. Artificial intelligence for civil engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 1-11. (in Chinese)
- [2] 史凤岭, 陈义, 苗恺, 等. 基于光固化 3D 打印技术的定向晶涡轮叶片快速制造[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(9): 1828-1836.
- SHI F L, CHEN Y, MIAO K, et al. Rapid manufacturing of directional crystal turbine blade based on UV curing 3D printing technology [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(9): 1828-1836. (in Chinese)
- [3] HANNO K I, ABDUL-MONEM M M. Effect of

denture cleansers on the physical and mechanical properties of CAD-CAM milled and 3D printed denture base materials: An in vitro study [J]. The Journal of Prosthetic Dentistry, 2023, 130(5): 798.e1-798798.e8.

- [4] 汲广超, 肖建庄. 3D 打印粗骨料混凝土力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(11): 1711-1718.
- JI G C, XIAO J Z. Mechanical properties of 3D printed concrete with coarse aggregates [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(11): 1711-1718. (in Chinese)
- [5] LIU Y, WANG L, YUAN Q, et al. Effect of coarse aggregate on printability and mechanical properties of 3D printed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 405: 133338.
- [6] YANG Y Y, ZHOU Q, LI X K, et al. Uniaxial compression mechanical property and fracture behavior of hybrid inorganic short mineral fibers reinforced cement-based material [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104: 103338.
- [7] 余江滔, 史天成, 郁顿, 等. 高性能纤维增强混凝土与筋材复合体系拉伸性能研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 825-833, 890.
- YU J T, SHI T C, YU J, et al. Experimental study of tensile properties of composite system of high performance concrete and reinforcements [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(6): 825-833, 890. (in Chinese)
- [8] LI L, LI Z P, WU J, et al. Influence of strain rate and fiber blend mode on the tensile behaviors of steel-polyethylene hybrid fiber reinforced engineered cementitious composites [J]. Construction and Building Materials, 2024, 438: 137306.
- [9] 徐平, 郑满奎, 王超, 等. 考虑尺寸及纤维掺量影响的高强混凝土断裂能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(11): 3488-3495.
- XU P, ZHENG M K, WANG C, et al. Experimental study on fracture energy of high strength concrete considering the influence of size and fiber content [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(11): 3488-3495. (in Chinese)
- [10] NI W Z, CUI X Y, YUAN J, et al. The influence of fiber, aggregate and cementitious materials on the mechanical properties of ultra-high content steel fiber reinforced reactive powder concrete [J]. Construction and Building Materials, 2024, 431: 136530.
- [11] 曲博扬, 卿龙邦. 钢纤维增强水泥基复合材料增韧机理研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1522-1528.
- QU B Y, QING L B. Toughening mechanism of steel fiber reinforced cement matrix composites [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(5): 1522-1528. (in Chinese)

- [12] USMAN M, FAROOQ S H, UMAIR M, et al. Axial compressive behavior of confined steel fiber reinforced high strength concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 117043.
- [13] DENG K L, WANG K K, LIANG H W, et al. Experimental and analytical study on crack resistance of fully prefabricated steel-UHPC composite deck using PBL connectors [J]. Engineering Structures, 2023, 275: 115249.
- [14] FENG Z, LI C X, YOO D Y, et al. Flexural and cracking behaviors of reinforced UHPC beams with various reinforcement ratios and fiber contents [J]. Engineering Structures, 2021, 248: 113266.
- [15] 郭远臣, 刘芯州, 王雪, 等. 多尺度钢纤维混杂增强水泥基材料抗冲击性能及阻裂能力[J]. 材料导报, 2024, 38(2): 81-88.
GUO Y C, LIU X Z, WANG X, et al. Multiscale hybrid steel fiber enhances the impact resistance and crack resistance of cement-based materials [J]. Materials Reports, 2024, 38(2): 81-88. (in Chinese)
- [16] MU R, MEI S L, CHEN J, et al. Effect of steel fiber orientation on punching shear resistance of steel fiber reinforced cementitious composites round slabs [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 89: 109289.
- [17] HUO Y L, LIU T A, LU D, et al. Dynamic tensile properties of steel fiber reinforced polyethylene fiber-engineered/strain-hardening cementitious composites (PE-ECC/SHCC) at high strain rate [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 143: 105234.
- [18] 王晨宇, 韦经杰, 龙武剑, 等. 纤维取向分布对水泥基复合材料力学性能的影响及其评价方法的研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36(15): 52-64.
WANG C Y, WEI J J, LONG W J, et al. Review on the effect of fiber orientation distribution on mechanical performance of cement-based composites and its evaluated methods [J]. Materials Reports, 2022, 36(15): 52-64. (in Chinese)
- [19] JIA Z J, KONG L Y, JIA L T, et al. Printability and mechanical properties of 3D printing ultra-high performance concrete incorporating limestone powder [J]. Construction and Building Materials, 2024, 426: 136195.
- [20] PAN Z F, SI D D, TAO J H, et al. Compressive behavior of 3D printed concrete with different printing paths and concrete ages [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01949.
- [21] NAKASE K, HASHIMOTO K, SUGIYAMA T, et al. Influence of print paths on mechanical properties and fracture propagation of 3D printed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2024, 438: 137019.
- [22] SUKSANGPANYA N, YARAGHI N A, PIPES R B, et al. Crack twisting and toughening strategies in Bouligand architectures [J]. International Journal of Solids and Structures, 2018, 150: 83-106.
- [23] 水泥胶砂流动度测定方法: GB/T 2419—2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
Test method for fluidity of cement mortar: GB/T 2419—2005 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2005. (in Chinese)
- [24] 白刚, 王里, 王芳, 等. 3D打印UHPC的制备和力学性能试验研究[J]. 材料导报, 2021, 35(12): 12063-12069.
BAI G, WANG L, WANG F, et al. Investigation of the printability and mechanical properties of 3D printing UHPC [J]. Materials Reports, 2021, 35(12): 12063-12069. (in Chinese)
- [25] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [26] SHAKOR P, NEJADI S, SUTJIPTO S, et al. Effects of deposition velocity in the presence/absence of E6-glass fibre on extrusion-based 3D printed mortar [J]. Additive Manufacturing, 2020, 32: 101069.
- [27] 路鸣宇, 廖维张. 定向纤维混凝土的制备方法与纤维取向研究进展 [J]. 复合材料科学与工程, 2022(12): 124-132.
LU M Y, LIAO W Z. Research progress on preparation methods and fiber orientation of directional fiber reinforced concrete [J]. Composites Science and Engineering, 2022(12): 124-132. (in Chinese)
- [28] HUANG H H, GAO X J, TENG L. Fiber alignment and its effect on mechanical properties of UHPC: An overview [J]. Construction and Building Materials, 2021, 296: 123741.
- [29] PHAM L, TRAN P, SANJAYAN J. Steel fibres reinforced 3D printed concrete: Influence of fibre sizes on mechanical performance [J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118785.
- [30] 刘化威, 刘超, 白国良, 等. 基于孔结构缺陷的3D打印粗骨料混凝土力学性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(12): 54-64.
LIU H W, LIU C, BAI G L, et al. Experimental study on mechanical properties of 3D printed coarse aggregate concrete based on the pore structure defects [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(12): 54-64. (in Chinese)
- [31] RUI A Y, WANG L, LIN W Y, et al. Experimental study on damage anisotropy of 3D-printed concrete exposed to sulfate attack [J]. Construction and Building Materials, 2023, 407: 133590.