

文章编号:1007-9629(2024)08-0675-10

3DPC 硬化性能各向异性及其间隔时间依赖性

李春锦^{1,2}, 任强^{1,2}, 张翼^{1,2}, 杨振东^{1,2}, 蒋正武^{1,2,*}

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要: 通过对比 3D 打印混凝土(3DPC)和浇筑混凝土在不同测试方向上的强度和耐久性差异, 探究了 3DPC 硬化性能各向异性特征及其对间隔时间的依赖性. 结果表明: 3DPC 的硬化性能存在一定的各向异性, 相较于平行于打印层方向, 在垂直于打印层方向上的力学性能与抗渗性更高, 其各向异性的产生与打印层间的弱黏结界面以及混凝土基体内孔隙和缺陷的分布有关; 延长打印间隔时间, 3DPC 层间界面黏结性能明显变弱; 3DPC 不同打印层的耐久性存在差异, 相较于下层混凝土, 上层混凝土密实度较低, 侵蚀性介质的扩散速率更快.

关键词: 3D 打印; 各向异性; 硬化性能; 间隔时间

中图分类号: TU528.59

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.08.002

Anisotropy of Hardened Properties of 3D Printing Concrete and Its Dependence on Resting Time

LI Chunjin^{1,2}, REN Qiang^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}, YANG Zhendong^{1,2}, JIANG Zhengwu^{1,2,*}

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: By comparing the strength and durability differences between 3D printing concrete(3DPC) and casting concrete in different test directions, the anisotropic characteristics of the hardened properties of 3DPC and its dependence on the resting time were explored. The results show that the hardened properties of 3DPC have certain anisotropy, and the mechanical properties and impermeability in the vertical direction are higher. The anisotropy of hardened properties is related to the weak bonding interface between printing layers and the distribution of pores and defects in the concrete matrix. The bonding property of interlayer interface is obviously weakened when resting time is prolonged. The durability of different printing layers of 3DPC is different, the density of the upper layer of concrete is lower, and the diffusion rate of the aggressive medium is faster.

Key words: 3D printing; anisotropy; hardened property; resting time

3D 打印混凝土(3DPC)技术是一种利用新拌混凝土流动性进行挤出建造的新兴技术, 相比传统模板浇筑施工, 能够减少大量人工和时间成本^[1-4]. 研究^[5-10]表明, 3DPC 的性能存在一定的各向异性. 在混凝土打印过程中, 由打印机喷嘴连续移动并挤出混

凝土, 同时分层堆叠成型, 在此过程中不可避免地会在混凝土打印层之间引入较大孔隙. 此外, 由于不同混凝土层的打印存在时间间隔, 混凝土打印层层间界面黏接性能受到工艺参数、结构形状、环境条件以及材料本身性质等多个因素的影响^[11-15]. 3DPC 层间

收稿日期: 2023-10-07; 修订日期: 2023-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22B2076, 51878480, 52078369); “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC3803104); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 李春锦(2000—), 男, 重庆人, 同济大学硕士生. E-mail: licj@tongji.edu.cn

通讯作者: 蒋正武(1974—), 男, 安徽潜山人, 同济大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: jzhw@tongji.edu.cn

界面的潜在宏观缺陷和冷缝^[16],导致了层间黏接薄弱和应力集中现象,使得打印结构的整体变形不协调。

打印间隔时间是影响3DPC层间界面性能的关键因素之一^[17-22]。芮遨宇等^[23]研究表明,延长打印间隔时间造成的层间界面水分含量变化会影响到3DPC的层间性能,延长打印间隔时间或提高环境温度导致打印层表面的自由水因蒸发而减少,形成的宏观孔隙不利于3DPC的密实性;同时,打印层表面缺水会减缓表面层混凝土的水化进程,对打印层间界面的黏接性能造成不利影响。

可见,已有文献主要集中于3DPC力学性能各向异性的研究,而对其耐久性在三维方向上的差异以及打印参数对其影响的研究较少。本研究通过测试3DPC与浇筑混凝土在三维方向的硬化性能,综合评

价3DPC试样性能的各向异性,并分析各向异性产生的原因;同时,探究不同打印间隔时间对于3DPC试样界面黏结性能和各向异性的影响,并对比3DPC与传统浇筑成型混凝土试样的性能差异。

1 试验

1.1 原材料

试验用水泥为P·II 52.5硅酸盐水泥,比表面积为 $398 \text{ m}^2/\text{kg}$,化学组成(质量分数,文中涉及的组成、水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比)见表1;骨料为 $0.212\sim 0.380 \text{ mm}$ 石英砂;减水剂为粉体高效聚羧酸减水剂(SP),减水率为25%;黏度改性剂为羟丙基甲基纤维素(HPMC),黏度为 $95 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (2%水溶液, 20°C)^[24]。

表1 水泥的化学组成

Table 1 Chemical composition (by mass) of cement

												Unit: %
NaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	
0.08	0.65	4.56	20.90	0.12	2.65	0.05	0.87	65.00	0.22	0.09	3.23	

1.2 配合比

经过前期试验研究,确定本试验所用3DPC的水胶比为0.35,砂胶比为0.9,其配合比见表2。

表2 3DPC的配合比

Table 2 Mix proportion of 3DPC

					Unit: g
Cement	Quartz sand	Water	SP	HPMC	
1 500.00	1 350.00	525.00	1.50	6.00	

1.3 试样制备

设置搅拌速度为 $100 \text{ r}/\text{min}$,将水泥、石英砂、粉体外加剂和纤维素醚加入搅拌锅搅拌2 min,然后加水搅拌2 min后得到均匀混凝土拌合物,用于3D打印和试件浇筑。

1.3.1 3D打印试样

试验所用3D打印机为Kuka KR 120 R3900-2 K机械臂式3D打印机,喷嘴为圆形,打印参数如表3所示。

表3 打印参数

Table 3 Printing parameters

Nozzle travelling speed/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	Material flow rate/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	Nozzle diameter/mm	Layer height/mm	Layer width/mm	Layer number
25	45	30	10	40	6

将拌合物倒入打印机料仓后,根据设定的打印参数,设置2种方法分别打印 $500 \text{ mm}\times 250 \text{ mm}$ 圆角矩形试样:(1)间隔时间为0 min进行连续打印,试样记为T0;(2)试件由底层连续打印至第3层时停止打印,自然条件下静置240 min后继续打印顶部3层,试样记为Ts。

将打印完成的试样常温覆膜静置24 h后,放至 $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ 、相对湿度大于90%的环境条件下养护至28 d。养护完成后,以长度50 mm切割试样,为避免由于切割出的试样形状差异产生测试误差,只选取打印试样的直线部分切割,打印完成后的试样及切割区域如图1所示。

1.3.2 浇筑试样

使用模具成型方法制作浇筑试样C,作为对比

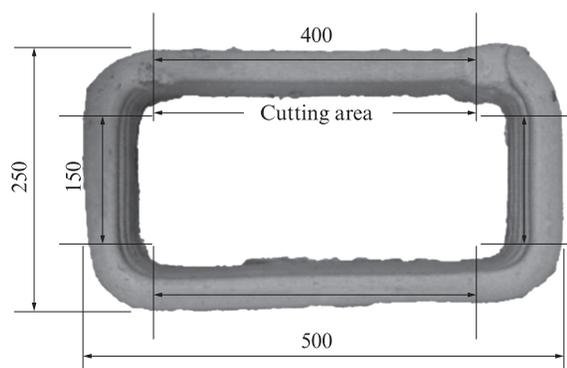


图1 3DPC试样及其切割区域的尺寸

Fig. 1 Size of 3DPC specimen and its cutting area (size: mm)

组。用与3DPC相同配合比制备混凝土拌合物,浇入模具中成型 $40 \text{ mm}\times 40 \text{ mm}\times 160 \text{ mm}$ 的棱柱形试

样,混凝土拌合物填充入模后振捣密实,覆膜静置24 h.浇筑试样在与3D打印试样相同的环境条件下养护至28 d.养护完成后使用切割机进行切割,切割长度为50 mm.

1.4 测试方法

本研究中试样的层数、尺寸及坐标说明如图2所示,定义X轴为喷嘴运动方向,Y轴为水平面垂直于喷嘴运动方向,Z轴为竖直面垂直于打印方向.

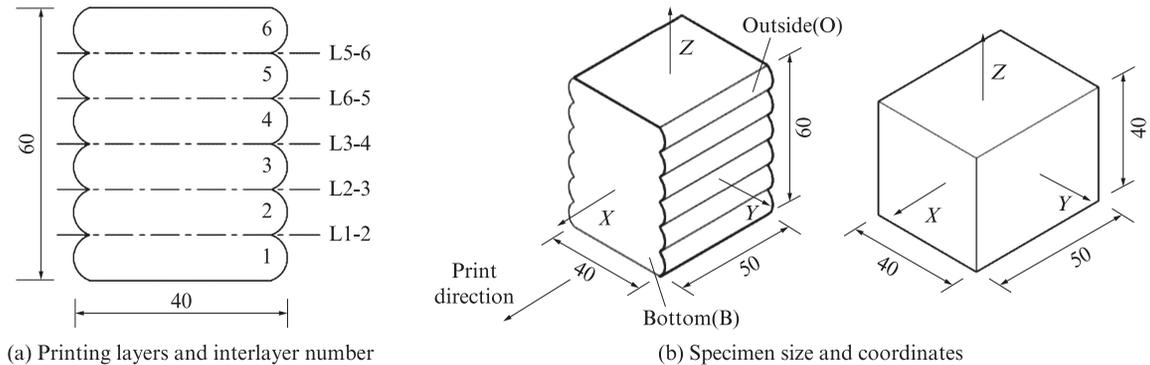


图2 3D打印试件的层数、尺寸及坐标说明

Fig. 2 Layers, size and coordinates of 3D printing specimen(size: mm)

1.4.1 劈裂抗拉强度

采用劈裂抗拉强度表征打印试件的力学性能.将试样切割成尺寸为30 mm×20 mm×20 mm的棱柱形试件.切割时,使3D打印试件的打印层间界面位于切割断面的中间位置,打印层界面包括沿Z方向的①L1-2层、②L3-4层、③L5-6层界面以及X方向和Z方向.测试过程如图3所示,设置加载速度为0.3 mm/min,试样的劈裂抗拉强度σ由式(1)确定.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi A} \quad (1)$$

式中:P为试样破坏最大荷载,N;A为断裂截面积,mm².

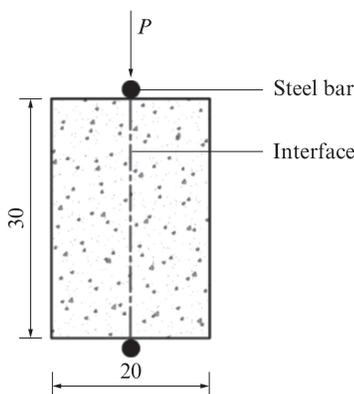


图3 劈裂抗拉试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of splitting tensile test(size: mm)

1.4.2 耐久性

1.4.2.1 氯离子扩散速率

混凝土抗氯离子渗透性能是影响混凝土结构整体耐久性的一项重要评价参数.将试样置于40℃烘箱中干燥直至恒重(24 h后质量差小于0.1%).干燥

后,为确保试样从单一表面吸水,使用环氧树脂包覆部分表面,未被环氧包覆的面作为试样的暴露面.对于浇筑试样,选取Z方向的1个表面作为暴露面;对于打印试样,分别选取Y、Z方向的1个表面作为暴露面,试样分别标记为O、B(见图2(b)).在饱和Ca(OH)₂溶液中,对试样进行真空饱和处理,然后将试样暴露向上放置在容器中,并完全浸没在质量分数为3%的NaCl溶液中.在整个试验期间,保持容器密封状态.在浸泡7、28、56、90 d后取出试样,使用切割机切开试样,在切割断面喷洒0.1 mol/L的AgNO₃溶液,静置30 min后拍摄断面照片,如图4所示.

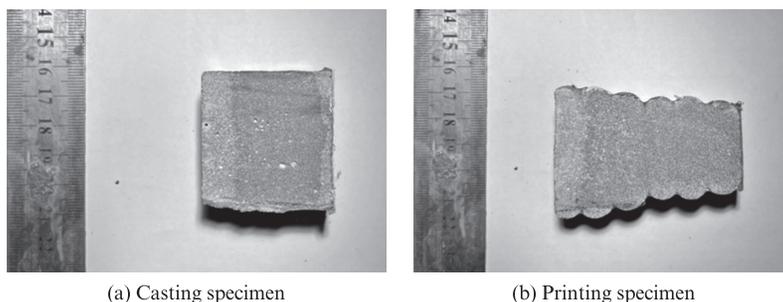
最后,利用ImageJ图像分析软件对断面照片进行分析,并计算氯离子的扩散深度.在断面图像上,沿着垂直于氯离子扩散的方向均匀选取20组测量点,分别计算氯离子的扩散深度.为避免试样其他表面对结果的影响,仅选择试样中间高度的40 mm区域(对于3D打印试样,为第2~5打印层)的扩散深度作为最终的试验结果.试样的氯离子扩散速率v由式(2)确定.

$$v = \frac{\Delta d}{\sqrt{\Delta t}} \quad (2)$$

式中:Δd为氯离子扩散深度变化,mm;Δt为扩散时间间隔,d.

1.4.2.2 碳化深度

测试前,试样的处理过程与1.4.2.1所述相同.对于浇筑试样,选取Z方向的1个表面为暴露面;对于3D打印试样,选取Y方向的1个表面作为暴露面.样品放置在碳化箱中,设置CO₂体积分数为20%,温度为20℃,相对湿度为(65±5)%.当碳化时间先后达到56、90、120 d时,取出试样,使用万能



(a) Casting specimen

(b) Printing specimen

图4 试样断面图片

Fig. 4 Cross-section of specimens

试验机沿垂直于暴露面方向劈裂试样并在劈裂断面喷洒1%的酚酞溶液.在静置30 min后,拍摄断面照片,并使用ImageJ软件分析计算试样的碳化深度,试样碳化速率的计算与氯离子扩散速率的计算方法相同.

1.4.2.3 单位面积渗水速率

测试前,试样的处理过程与1.4.2.1所述相同.对于浇筑试样,选取Z方向的2个表面为暴露面;对于打印试样,则选取Y和Z方向的2个表面分别作为暴露面.试样经过环氧树脂固化后,进行精确称重,随后将试样的暴露面朝下放置在2个直径为2 mm的木制圆柱形支架上,以确保试样未覆盖的部分不与容器底部接触,从而不影响试样的实际吸水面积.为确保测试准确性,所有试样的浸入水位都被设置为高于圆柱形支架顶部(5±2) mm,且容器在整个测试过程中始终保持密封.

从试样开始接触水开始计时,分别在1、3、7、15、30、60、120、180、240、300、360、1 440、8 640 min时取出试样,用湿抹布擦去表面的多余水分,然后进行精确称重,随后再次放回支架上.试样的单位面积渗水速率 W 由式(3)来确定.

$$W = \frac{\Delta W}{S\sqrt{\Delta T}} \quad (3)$$

式中: ΔW 为试样的质量变化,g; S 为暴露面面积, m^2 ; ΔT 为渗透时间间隔,s.

渗水速率测试完成后,使用饱水法测试试样孔隙率,试样的总孔隙率 ρ 由式(4)确定.

$$\rho = \frac{w_s - w_0}{\rho V} \quad (4)$$

式中: w_0 为初始试样质量,g; w_s 为饱水试样质量,g; ρ 为水的密度, $g \cdot cm^{-3}$; V 为试样体积, cm^3 .

2 结果与分析

2.1 劈裂抗拉强度

3D打印试样在不同打印界面和加载方向上的劈

裂抗拉强度测试结果见图5.由图5可知,对于试样T0,其3个打印层的平均劈裂抗拉强度大约为3.15 MPa.值得注意的是,不同打印层之间以及3个维度方向上的劈裂抗拉强度差异并不显著.这一现象说明,在连续打印且间隔时间为0的条件下,拌合物因其出色的流动性和黏聚性,在3DPC内部形成了相对均匀的结构.打印层之间的界面黏结性能良好,对劈裂抗拉强度的影响较小.因此,混凝土试样在不同层间界面和加载方向上均表现出相似的力学性能.然而,当延长打印间隔时间后,3DPC试样Ts力学性能展现出了显著的各向异性.试样Ts的层间平均劈裂抗拉强度为2.09 MPa,这一数值分别是X和Z方向劈裂抗拉强度的66.4%和61.6%.特别是从Z方向加载的试样,其劈裂抗拉强度最高,这与文献[25]中的试验结果类似.与试样T0相比,试样Ts的L3-4层之间经过240 min的静置,对3DPC层间的黏接薄弱界面的影响更为显著,使其内部均匀性变差,且对试样在X方向和Y方向上的硬化性能产生了不利影响.

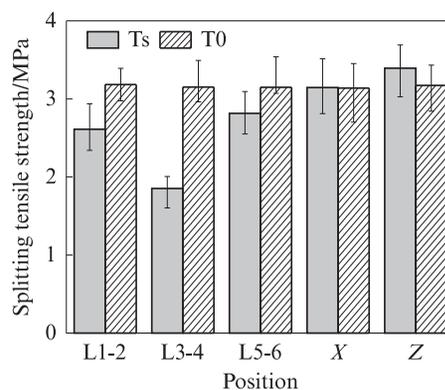


图5 3D打印试样界面劈裂抗拉强度

Fig. 5 Interface splitting tensile strength of 3D printing specimens

同时,延长打印间隔时间后,3D打印层间黏接性能也出现了弱化.与试样T0相比,试样Ts试样各打印层间的劈裂抗拉强度均有所降低.从图5中可以明显看出,试样Ts的承载能力薄弱处位于L3-4层打印

层间界面,其劈裂抗拉强度相比L1-2、L5-6层界面分别降低了29.1%和34.2%。3DPC层间劈裂抗拉强度的测试结果表明,静置240 min后,3D打印层之间的黏接性能显著降低,出现了混凝土基质不连续的间隔层。这主要是由于间隔时间的延长导致第3层混凝土打印层表面水分蒸发、湿度降低,从而产生孔隙和缺陷。同时,在胶凝材料硬化过程中下层混凝土流变特性发生改变并产生塑性收缩,加速了微裂缝的发展。当打印机在打印第4层混凝土层时,下层混凝土经过240 min的静置后表面部分已经凝结硬化,导致L3-4层相邻的打印层界面出现冷缝并引入空气形成较大的气孔,进而造成层间弱黏接界面。相比之下,L1-2和L5-6打印层间为连续打印且间隔时间较短,

因此对硬化性能的影响较小。

2.2 氯离子扩散

在不同龄期下,试样氯离子扩散深度随Z方向高度分布的变化趋势如图6所示。由图6可见,随着测试时间的延长,3D打印试样的氯离子扩散深度在不同方向上呈现显著的各向异性。对于氯离子溶液从Z方向底面开始扩散的试样T0-B和Ts-B,其扩散深度变化规律与浇筑试样C相似,且在Z方向上的变化幅度较小,呈直线型。然而,对于氯离子溶液从Y方向开始扩散的试样T0-O,其扩散深度的变化与打印层界面高度位置密切相关,呈波浪型。在相同龄期下,氯离子在打印层层间界面的扩散深度大于打印层中部。在不同龄期下试样氯离子的扩散深度和扩散速

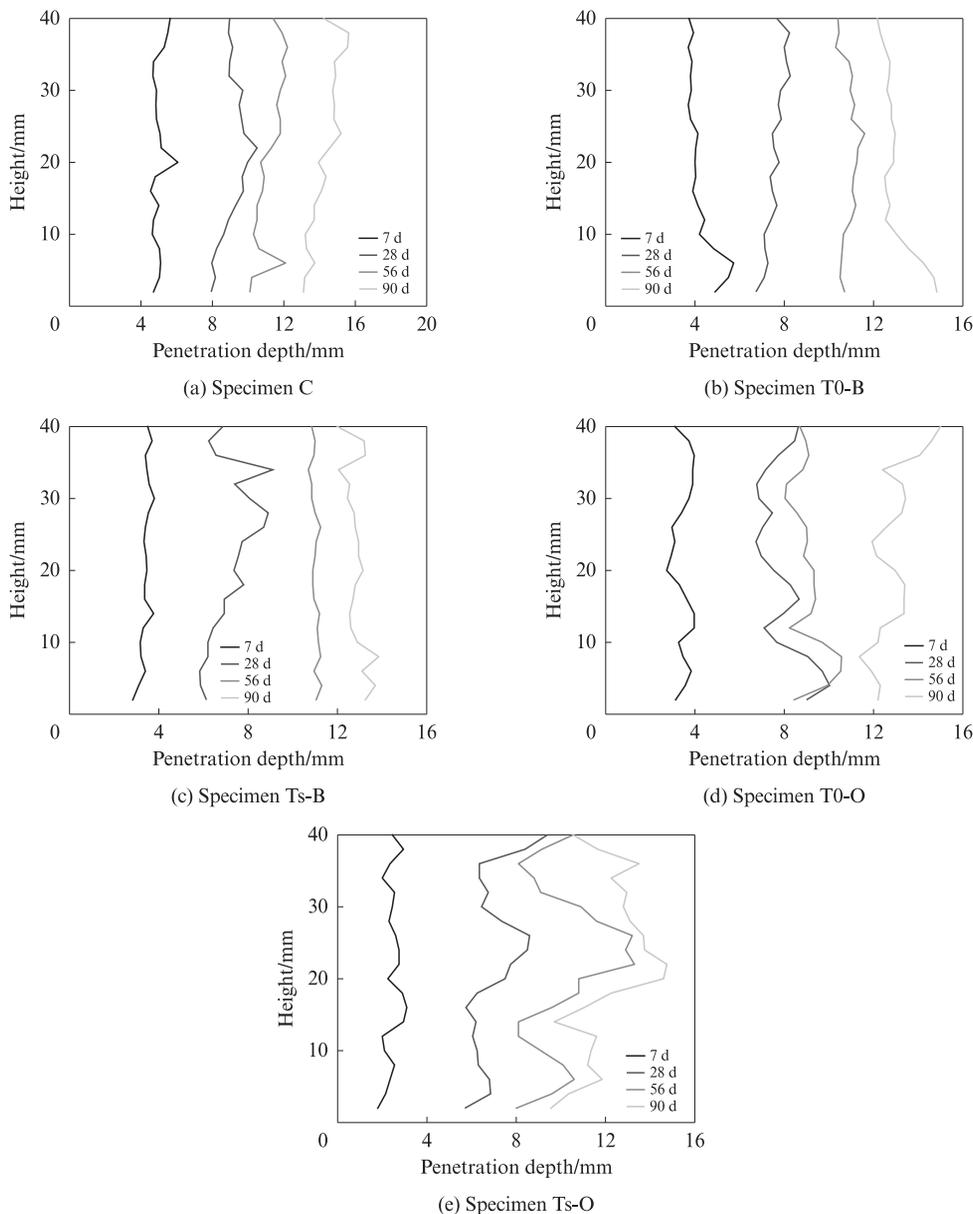


图6 不同试样的氯离子扩散深度沿Z方向变化趋势

Fig. 6 Variation trend of chloride ion diffusion depth along Z direction of specimens

率如图7所示.由图7(a)可见,在90 d龄期下,试样T0-O的打印层间区域的平均扩散深度是打印层中部的1.12倍.由图7(b)可见,浇筑试样C在7 d时的扩散速率最快;但随着龄期的延长,氯离子的扩散速

度逐渐降低.所有试样在7天内的扩散速率均为最快,随后逐渐下降.当测试龄期达到90 d时,所有试样的平均氯离子扩散速率仅为7 d龄期下的12.5%~28.3%.

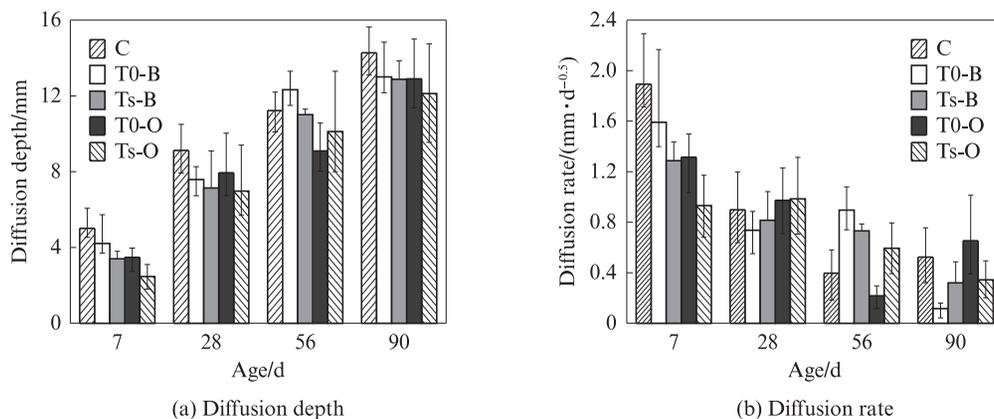


图7 不同龄期下试样氯离子的扩散深度和扩散速率
Fig. 7 Diffusion depth and diffusion rate of chloride ion in specimens at different ages

氯离子在3DPC不同方向上扩散深度的差异主要归因于打印层间的孔隙和缺陷分布较多,在Y方向上,打印层间的毛细孔和宏观缺陷加速了氯离子溶液的扩散.此外,由于3D打印过程中缺少传统浇筑混凝土的振捣密实步骤,因此相比于浇筑试样,3D打印试样内部存在的大气孔更难以去除.这种各向异性特征与3DPC内部孔隙和缺陷在3个维度方向上的影响程度差异有关.

试样Ts-O不同打印层界面的氯离子扩散深度随龄期的变化如图8所示.由图8可以看到,在56 d时,L3-4处的氯离子扩散深度为13.3 mm,比相同龄期下的其他打印层增加了22.0%~66.3%.L3-4的氯离子扩散深度在90 d龄期时达到最大值,约为7、28、56 d龄期下的5.4、1.7和1.1倍.延长间隔时间或降低打印速度有利于溶液在3DPC层间的扩散.与其他打印层界面的连续打印方式相比,延长间隔时间后下层混凝土逐渐硬化,这不利于上层混凝土混合物在打印时与接触层之间的黏接固定成型,从而导致打印层界面孔隙率增大及黏接界面变弱^[26].从微观结构上看,当间隔时间达到一定值时,混凝土结构的密实度会下降,打印层表面发生的塑性收缩会形成广泛分布的微裂纹和毛细孔隙区域,其毛细作用会加速氯离子溶液的扩散过程.在相同龄期条件下,3D打印试样的上层部分打印层间界面(如L4-5和L5-6)相比下层部分(如L1-2和L2-3)的氯离子扩散速度更快.随着测试龄期的延长,这一现象不断加剧.90 d后上层打印层的平均扩散深度是下层的1.21倍.3DPC不同打印层的性能会受到打印参数的影响而产生差

异^[27-28].增加打印层数或打印层的层高会导致结构上下部分的密实程度出现差异.由于上层混凝土受到的压力最小,因此其压实度较低.此外,由于3D打印过程持续时间较长,上层混凝土拌合物的工作性会降低,进而会影响其挤出性能.

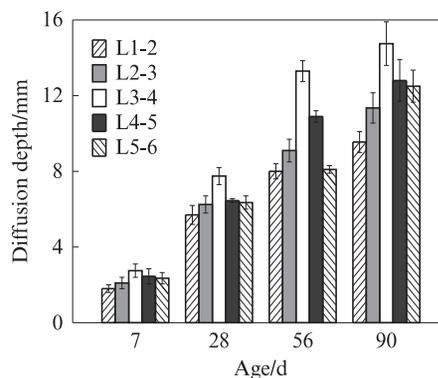


图8 试样Ts-O不同层间的氯离子扩散深度
Fig. 8 Chlorine ion diffusion depth between different layers of specimen Ts-O

2.3 碳化深度

试样的碳化深度在Z方向上的变化趋势如图9所示.由图9可知,与氯离子扩散测试结果相似,试样的碳化深度沿试样高度分布也呈现出相似的变化趋势.浇筑试样以及3D打印试样的内部碳化深度随试验龄期的变化如图10所示.由图10可知,在相同龄期下,3D打印试样的碳化深度相较于浇筑试样更大,经过120 d后,3D打印试样的平均碳化深度为浇筑试样的153%~375%.

在3DPC试样中,Z方向上的不同打印层碳化速

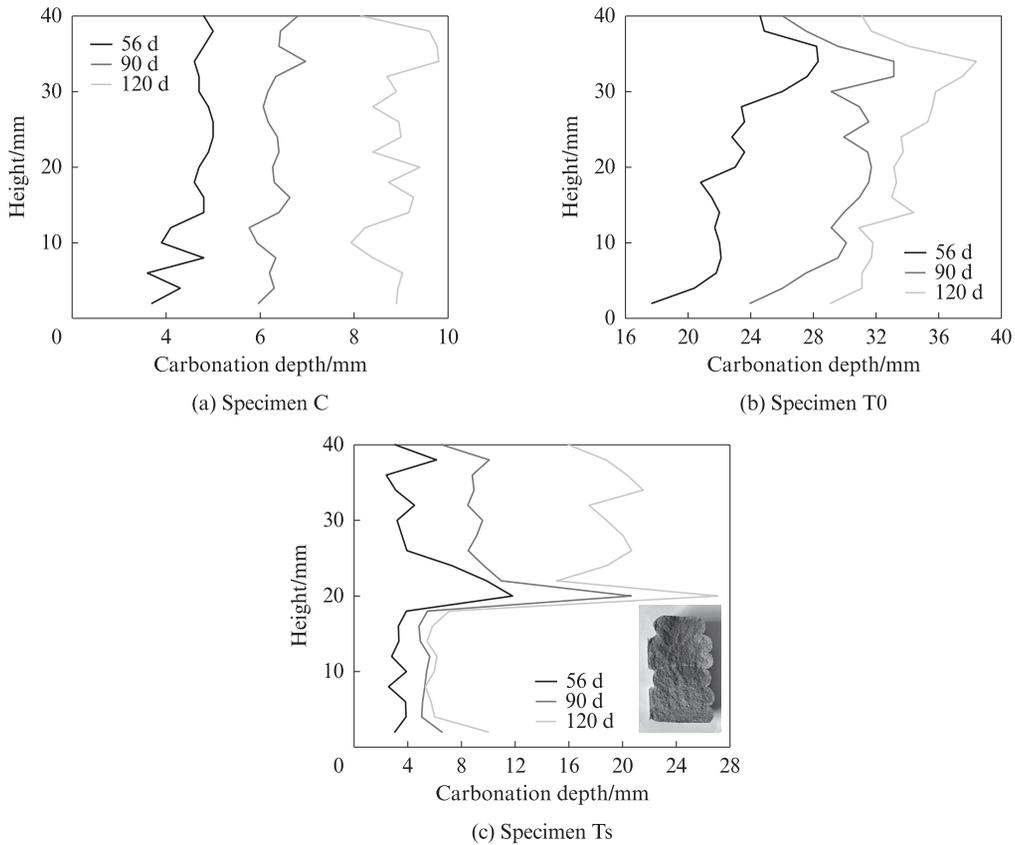


图9 不同试样碳化深度沿Z方向变化趋势

Fig. 9 Variation trend of carbonization depth of specimens tested along Z direction

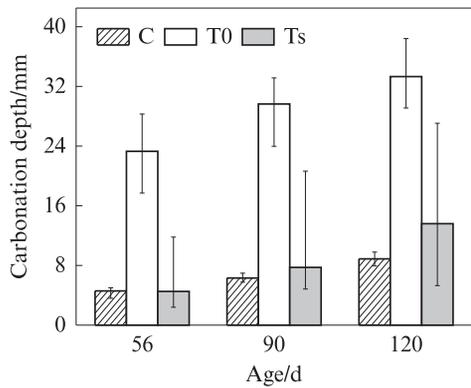


图10 试样不同龄期下的碳化深度

Fig. 10 Carbonization depth of specimens tested at different ages

率存在差异,上层打印层的碳化速率明显更快.图11展示了Ts试样不同打印层的碳化速率.由图11可见,在90、120 d时,L4-5和L5-6层的平均碳化速率分别为下层打印层的195%和459%.上层打印层碳化深度的增加与氯离子溶液扩散的试验结果相似,这与3D打印过程中混凝土拌合的挤出性能以及上层混凝土和喷嘴的挤压作用有关.由于上下打印层的孔隙结构不同,因此性能上存在差异.

与氯离子在混凝土内的扩散速率随时间变化趋势不同,3DPC在Y方向上的碳化速率并没有随着试

验龄期的延长而减慢.相反,试样Ts的L4-5和L5-6打印层的碳化速率呈现出随测试时间延长而增大的趋势.在56 d前的碳化速率较慢,而在120 d时达到最大值.在长期碳化过程中,混凝土中的胶凝材料水化产物,如水化硅酸钙凝胶等,会与CO₂发生化学反应,生成的碳化产物碳酸钙会降低胶凝材料本身的黏结性能,进而降低机械性能.同时,由于混凝土本身是一种多孔结构,含有大量毛细孔,碳酸钙的生成会导致混凝土基体体积膨胀和孔隙结构粗化^[29-30],从而引起混凝土内孔隙扩大和裂缝快速发展.

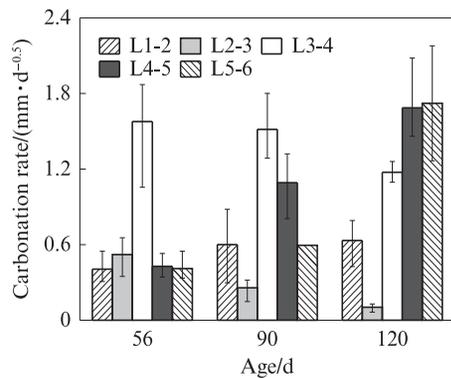


图11 Ts试样不同层间的碳化速率

Fig. 11 Different interlayer carbonation rates of specimen Ts

图9(c)展示了碳化90 d后Ts试样混凝土基体内部的碳化情况.由图9(c)可知:试样Ts在L3-4层界面区域的碳化深度明显大于其他打印层;在不同碳化时间下,L3-4层的碳化深度为其他打印层平均碳化深度的224%~292%,且在L3-4层整个界面处出现宽约1.0 mm的带状未变色区域,这表明在经过90 d的碳化后,Ts试样中黏接较弱的打印层出现了快速碳化现象,导致L3-4打印层间部分的混凝土已经被完全碳化.这说明在延长间隔时间后,3DPC层之间的黏结能力降低,有利于CO₂的气体扩散,并加速了混凝土内的碳化进程.

2.4 单位面积渗水速率

试样的单位面积渗水速率随测试时间的变化趋势如图12所示.由图12可知,随着渗透时间的延长,无论是3D打印试样还是浇筑试样,其渗水速率都呈现出逐渐减小的趋势;在接触水的最初3 min内,试样表面的裂缝和孔隙迅速被水填满,因此渗水速率在这段时间内达到最大值;然而,随着水分子逐渐占据混凝土的毛细孔,混凝土内部的孔隙饱和度增大,由毛细孔主导的快速吸附作用逐渐减弱^[31];在渗透时间超过1 h后,渗水速率的变化开始缓慢,曲线趋于平缓;当渗透时间达到144 h时,所有试样的渗水速率均降至最小值.

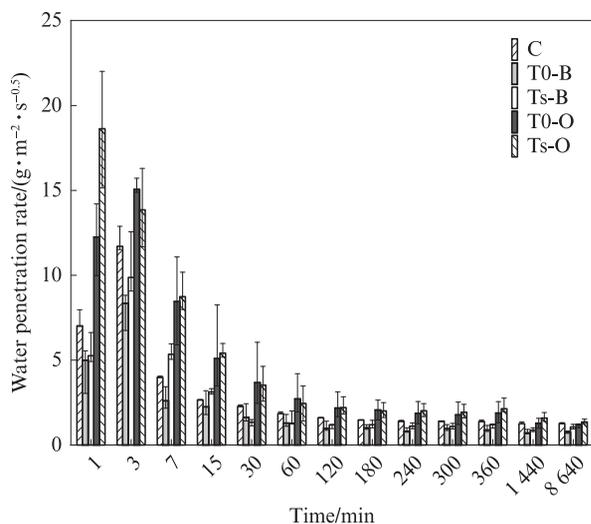


图12 试样单位面积渗水速率随时间的变化趋势

Fig. 12 Variation trend of water seepage rate per unit area of specimens with time

图12还揭示了3DPC试样在不同三维方向上的抗渗性能存在差异,即在144小时的龄期内,试样T0和Ts在Y方向上的平均渗水速率分别为Z方向上的194%和218%;与此同时,3DPC试样在Z方向上与浇筑试样的渗水速率相对较为接近.不同试样的孔

隙率如表4所示.由表4可以发现,浇筑试样C的孔隙率最高,而3D打印试样T0和Ts的孔隙率分别为浇筑试样的93.2%和91.4%.

表4 试样的孔隙率
Table 4 Porosity of specimens

Specimen	C	T0	Ts
Porosity (by volume)/%	2.485	2.317	2.273

综上所述,3DPC硬化性能的各向异性主要与层间界面和孔隙分布有关.尽管浇筑试样和3D打印试样的总孔隙率相差不大,但3DPC试样内部的孔隙孔径更大,且这些孔隙主要集中在打印层间界面.在打印过程中,混凝土层间产生的黏结薄弱处层间孔隙率较大.此外,3DPC内部的较大孔隙与塑性收缩产生的裂缝相结合,形成了联通的孔道,使得水能够快速从层间较大的孔道中渗入.除此之外,打印过程中,上层混凝土打印层的重力作用以及打印喷嘴的机械作用对底部产生的挤压,也使得底层混凝土表面在硬化过程中密实程度更高,孔隙分布较少,从而降低了3DPC在Z方向上的渗水速率^[27-28,30,32].

3 结论

(1)3D打印混凝土的硬化性能具有一定的各向异性.3DPC在平行于打印层方向上的表面抗渗性和劈裂抗拉强度更低,而在垂直于打印层方向上的抗渗性和劈裂抗拉强度最高,在平行于打印层方向上的单位面积渗水速率约为垂直于打印层方向上的194%~218%.

(2)3DPC打印层之间存在弱黏接界面.延长层间打印间隔时间会降低3DPC试样层间界面性能,即间隔时间从0 min延长至240 min时,打印层间平均劈裂抗拉强度从3.15 MPa降低至2.09 MPa,氯离子扩散速率和碳化速率分别增大了22.0%~66.3%和124%~192%.

(3)3DPC不同打印层之间存在耐久性差异,其上层混凝土的密实型较差,氯离子扩散和碳化速率更快.

参考文献:

- [1] ZHANG J C, WANG J L, DONG S F, et al. A review of the current progress and application of 3D printed concrete [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 125:105533.
- [2] 沈亮,崔维久,于琦,等.3D打印混凝土性能评价及配合比设计研究进展[J].建筑施工,2023,45(1):213-219.
SHEN Liang, CUI Weijiu, YU Qi, et al. Research progress on

- performance evaluation and mix ratio design of 3D printed concrete [J]. *Building Construction*, 2023, 45(1):213-219. (in Chinese)
- [3] PAUL S C, ZIJL G P A G, TAN M J, et al. A review of 3D concrete printing systems and materials properties: Current status and future research prospects [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, 24(4):784-798.
- [4] TING G H A, TAY Y W D, QIAN Y, et al. Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: Rheological and mechanical properties [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2019, 21(4):994-1003.
- [5] 王里,王伯林,白刚,等.3D打印混凝土各向异性力学性能研究[J].*实验力学*,2020,35(2):243-250.
WANG Li, WANG Bolin, BAI Gang, et al. Study on anisotropic mechanical properties of 3D printing concrete [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2020, 35(2):243-250. (in Chinese)
- [6] 李岩峰,姚亮,王里,等.3D打印混凝土力学各向异性与细观破坏机制研究[J].*公路交通科技*,2021,38(5):81-89.
LI Yanfeng, YAO Liang, WANG Li, et al. Research on mechanical anisotropy and microscopic failure mechanism of 3D printed concrete [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2021, 38(5):81-89. (in Chinese)
- [7] LIU X T, SUN B H. The influence of interface on the structural stability in 3D concrete printing processes [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 48:102456.
- [8] 李特,李琦.建筑3D打印力学性能研究综述[J].*中国建材科技*, 2022,31(6):44-48.
LI Te, LI Qi. Review on mechanical properties of building 3D printing [J]. *China Building Materials Science & Technology*, 2022, 31(6):44-48. (in Chinese)
- [9] YANG Y K, WU C Q, LIU Z X, et al. Mechanical anisotropy of ultra-high performance fibre-reinforced concrete for 3D printing [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 125:104310.
- [10] LIU B, LIU X Y, LI G T, et al. Study on anisotropy of 3D printing PVA fiber reinforced concrete using destructive and non-destructive testing methods [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17:e01519.
- [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.
- [12] 於家勉,孙元峰,姚一鸣,等.3D打印混凝土层间性能影响因素与测试方法研究综述[J].*混凝土与水泥制品*,2020(8):7-11, 17.
YU Jiamian, SUN Yuanfeng, YAO Yiming, et al. Review on influencing factors and testing methods of 3D printed concrete interlayer properties [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2020(8):7-11, 17. (in Chinese)
- [13] BARBOSA M S, ANJOS M A S, CABRAL K C, et al. Development of composites for 3D printing with reduced cement consumption [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 341:127775.
- [14] MA G W, LI Z J, WANG L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 162:613-627.
- [15] SUN B C, LI P C, WANG D C, et al. Evaluation of mechanical properties and anisotropy of 3D printed concrete at different temperatures [J]. *Structures*, 2023, 51:391-401.
- [16] 吴昊一,蒋亚清,潘亭宏,等.3D打印水泥基材料层间结合性能研究[J].*新型建筑材料*,2019,46(12):5-8.
WU Haoyi, JIANG Yaqing, PAN Tinghong, et al. Study on interlayer bonding properties of 3D printed cement-based materials [J]. *New Building Materials*, 2019, 46(12):5-8. (in Chinese)
- [17] LEE K W, LEE H J, CHOI M S. Correlation between thixotropic behavior and buildability for 3D concrete printing [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 347:128498.
- [18] GIRIDHAR G, PREM P R, JIAO D. Effect of varying shear rates at different resting times on the rheology of 3D printable concrete [J/OL]. *Materials Today: Proceedings*, 2023: 1-5 [2023-03-13]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323010696>.
- [19] 徐辉,孙晓燕,王海龙,等.打印工艺对3D打印混凝土层间黏结性能研究[J].*水力发电学报*,2022,41(1):42-49.
XU Hui, SUN Xiaoyan, WANG Hailong, et al. Study on interlayer bonding properties of 3D printed concrete by printing technology [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2022, 41(1):42-49. (in Chinese)
- [20] GENG Z F, SHE W, ZUO W Q, et al. Layer-interface properties in 3D printed concrete: Dual hierarchical structure and micromechanical characterization [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 138:106220.
- [21] KEITA E, BESSAIES-BEY H, ZUO W, et al. Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: Measurement and physical origin [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 123:105787.
- [22] ROUSSEL N. Rheological requirements for printable concretes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 112:76-85.
- [23] 芮遨宇,王里,马国伟.层间水膜对3D打印混凝土界面性能的影响[J].*硅酸盐通报*,2023,42(7):2281-2289
RUI Aoyu, WANG Li, MA Guowei. Effect of interlayer water film on interface properties of 3D printed concrete [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(7):2281-2289. (in Chinese)
- [24] 朱艳梅,张翼,蒋正武.羟丙基甲基纤维素对3D打印砂浆性能的影响[J].*建筑材料学报*,2021,24(6):1123-1130.
ZHU Yanmei, ZHANG Yi, JIANG Zhengwu. Effect of hydroxypropyl methylcellulose on properties of 3D printed mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6):1133-1130. (in Chinese)
- [25] 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.
WANG Hailong, CHEN Yafei, ZOU Daoqin, et al. Study on 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. (in Chinese)
- [26] 钱鹏,徐千军.浇筑层面对砂浆力学及渗透性能的影响[J].水力发电学报,2018,37(5):1-12.
QIAN Peng, XU Qianjun. Effect of pouring layer on mechanics and permeability of mortar [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(5):1-12. (in Chinese)
- [27] VAN DER PUTTEN J, AZIMA M, VAN DEN HEEDE P, et al. Neutron radiography to study the water ingress via the interlayer of 3D printed cementitious materials for continuous layering [J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119587.
- [28] ZHANG Y, YANG L, QIAN R S, et al. Interlayer adhesion of 3D printed concrete: Influence of layer stacked vertically [J]. Construction and Building Materials, 2023, 399:132424.
- [29] VON GREVE-DIERFELD S, LOTHENBACH B, VOLLPRACHT A, et al. Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: A critical review by RILEM TC 281-CCC [J]. Materials and Structures, 2020, 53(6):136.
- [30] MORANDEAU A, THIÉRY M, DANGLA P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56:153-170.
- [31] 蒋科,庞超明,张晖,等.混凝土水分传输及边界条件试验研究[J].长江科学院院报,2021,38(10):161-166,173.
JIANG Ke, PANG Chaoming, ZHANG Hui, et al. Experimental study on water transfer and boundary conditions of concrete [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2021, 38(10):161-166, 173. (in Chinese)
- [32] 肖建庄,秦飞,丁陶,等.3D打印再生砂浆的早期性能[J].建筑材料学报,2022,25(7):657-662.
XIAO Jianzhuang, QIN Fei, DING Tao, et al. Early performance of 3D printed recycled mortar [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):657-662. (in Chinese)