DOI: 10.15986/j.1006-7930.2026.04.002

3D打印混凝土界面增强及其静动态失效行为研究

周捷航，杜龙雨，赖建中，尹雪祥

（南京理工大学 材料科学与工程学院，江苏 南京 210094）

摘要：3D打印混凝土的力学性能主要受到3D打印工艺所形成的界面的影响。本研究围绕3D打印界面在静态、动态载荷下失效过程，揭示了3D打印工艺对3D打印混凝土力学性能的影响。通过劈裂试验发现，界面质量好的3D打印混凝土会在劈裂过程中在界面处开裂，但裂纹不会沿着界面发展。在压缩试验中发现，界面离试件边缘越近，抗压强度越低。在低速冲击试验中发现，3D打印混凝土的开裂吸收能量由打印质量决定，失效吸收能量由材料强度和强化材料决定。

关键词：3D打印混凝土；劈裂；抗压强度；低速冲击

中图分类号：TU528 **文献标志码**：A **文章编号**：1006-7930(2026)04-0484-11

Study on interface enhancement and static-dynamic failure behavior of 3D-printed concrete

ZHOU Jiehang, *DU Longyu*, *LAI Jianzhong*, *YIN Xuexiang*

(School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The mechanical properties of 3D printed concrete are mainly affected by the interfaces formed during the 3D printing process. The failure process of 3D printed interfaces under static and dynamic loads is investigated in this study, and the effects of 3D printing processes on the mechanical properties of 3D printed concrete are revealed. It is found through splitting tests that cracks initiate at the interfaces of 3D printed concrete with good interface quality during splitting, yet do not propagate along the interfaces. Compression tests indicate that the closer the interfaces are to the specimen edges, the lower the compressive strength. Low-velocity impact tests show that the crack absorption energy of 3D printed concrete is determined by printing quality, while the failure absorption energy depends on the material strength and reinforcing materials.

Key words: 3D printed concrete; split; compressive strength; low velocity impact

相比较于传统混凝土，3D打印混凝土的可靠性还缺乏市场的认可，这也是3D打印混凝土大规模投入工程应用前的主要困难之一。从使用者的直观感受分析，这种不可靠性主要来源于3D打印混凝土中存在的界面缺陷[1]。在研究中，科学家也发现界面缺陷会直接导致3D打印混凝土力学性能的下降[2]。根据打印工艺的不同，这种界面往往以宏观孔洞或密集微孔的形式出现，并且受到打印路径的影响而呈现出规律的空间分布特点[3]。而即使3D打印的界面结合较为致密，也有可能在微观照片中观察到明显的界面分层[4]。这种空间分布也导致了3D打印混凝土中存在的性能各向异性现象[5]。因此，作为3D打印混凝土的最大结构特点之一，界面对3D打印混凝土的性能有极大的影响。

通常而言，由于界面结构缺陷的存在，3D打印混凝土的力学性能会略低于传统的浇筑混凝土[6]。因此，研究者们正试图围绕界面强化的方式，采用一系列手段改善这一现象。一些研究者提出通过3D打印的工艺改进来提升界面粘结力，从而提升3D打印混凝土的力学性能。Zhu等[7]通过优化3D打印混凝土的打印路径，改善了界面分布特征，从而得到了性能更好的3D打印混凝土。Kloft等[8]则采用喷射3D打印混凝土技术，使其层间界面更为粗糙，从而提升了界面结合强度。另一种方法则是在3D打印混凝土中添加实体强化材料。Sun等[9]提出使用在3D打印混凝土中添加钢丝网以改善其

收稿日期：2024-07-10 **修回日期**：2024-09-03

基金项目：国家自然科学基金(52078253)

第一作者：周捷航(1996—)，男，博士生，主要研究方向为3D打印混凝土方向。E-mail:zhoujiehang@163.com

力学性能。类似地，Xiao 等[10]在3D打印混凝土结构中插入钢筋的手段，极大提升了3D打印混凝土的力学性能。因此，通过改善界面的结构和对界面进行针对性强化，3D打印混凝土的性能表现能够得到很大的提高。

研究者还直接对3D打印混凝土的界面强度进行表征和研究。这种方法主要通过对界面施加直接的载荷，从而分析反映界面强度的绝对强度。而这一方法更加接近于真实的界面强度，从而实现准确地衡量3D打印混凝土的界面强度。Marchment 等[11]通过在3D打印混凝土中插入钢筋，并测量拔出钢筋和连带的混凝土结构所需的力，对界面强度进行表征，并观察到了结构压力对界面性能的影响。Geng等[12]采用两根对齐平行的钢棍进行3D打印混凝土界面处劈裂强度的测试，以此表征3D打印混凝土界面的强度。这种表征手法能够直接地反应3D打印混凝土的界面强度，减少其他因素带来的误差。类似地，Huang等[13]也采用钢棍测量了3D打印混凝土界面处的劈裂强度，并探究了打印速度、打印等待时间、打印高度等因素对3D打印混凝土界面强度的影响。总体而言，目前对3D打印混凝土的界面性能表征主要围绕对界面结构的直接加载展开。

然而，目前围绕界面的研究主要关注界面的强度和结构特点，对于其在加载过程中的失效行为缺乏直接的研究。因此，有必要对3D打印混凝土的界面失效行为进行细致分析，揭示界面对混凝土强度的影响机理，并总结工艺参数、界面位置在混凝土静态、动态性能的影响。本文进行了针对3D打印混凝土的劈裂实验、抗压实验和落锤实验，分析了3D打印混凝土界面在各类载荷下的失效行为，并从多个角度分析界面对3D打印混凝土失效过程的影响。同时，使用在3D打印混凝土界面处添加纤维网材料对3D打印混凝土进行强化，从而提升3D打印混凝土在劈裂实验中的表现，探究其对3D打印混凝土动态失效的强化机理。

1　原材料与实验方法

1.1　原材料

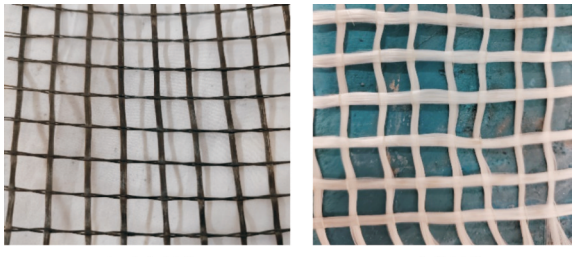
本实验主要采用的原材料包括以下几个大类：胶凝材料、黄砂、自来水、短纤维材料、纤维网材料和混凝土添加剂等。胶凝材料由水泥和活性粉末组成，其中水泥采用P·Ⅱ52.5硅酸盐水泥，活性粉末包括硅灰、矿渣、石粉、粉煤灰等。3D打印混凝土所用的黄砂为市售湖砂，在清洗干燥后过多级筛，粒径分别为0.2～0.5 mm，0.6～1.2 mm和1.0～2.0 mm，按3∶3∶4的质量比例进行混合。材料配合比设计参考最密堆积理论，确定3D打印混凝土的配合比，并通过适当调整减水剂、缓凝剂的用量，使3D打印混凝土的流动度控制在175±10 mm范围内，满足3D打印要求[14-17]。最终得到两种3D打印混凝土配合比如表1所示，3D1材料和3D2材料的抗压强度分别为47 MPa和87 MPa。

表1　3D打印混凝土配合比

Tab. 1　Proportion of 3D printed concrete

编号	胶凝材料/kg·m^{-3}					水胶比	砂胶比	减水剂/kg·m^{-3}	缓凝剂/kg·m^{-3}
	水泥	粉煤灰	石粉	硅灰	矿渣				
3D1	440	290	270	0	0	0.3	1.2	0	0.2
3D2	350	0	0	200	450	0.2	1	1.7	0.2

本实验所用的短纤维材料为玻璃纤维，其长度为20 mm，直径14～16 μm，弹性模量72 GPa，抗拉强度大于1 700 MPa，在部分样品中按1%体积比例添加到3D打印混凝土基体中进行强化。如图1所示，另一项强化材料为纤维网材料，其孔隙为0.5 cm×0.5 cm，材质分别为玄武岩纤维和玻璃纤维编织而成，主要放置在3D打印混凝土的层间界面处，用于强化3D打印混凝土的界面性能。



(a) 玄武岩纤维网　　(b) 玻璃纤维网

图1　纤维网材料

Fig. 1　Fiber mesh

1.2　3D打印设备

如图2所示，本课题组自主研发了大型龙门架式3D打印机用于本项研究，其主要核心系统包括运动系统、挤出系统和控制系统。3D打印设备的极限运动范围长4.5 m，宽3.5 m，高2.5 m，足以满足实验试件的打印需要。X、Y轴最快运动速度为10 m/min，Z轴最快运动速度为5 m/min。运动系统支持自动化控制与手动控制，运动精度为0.1 mm。螺杆泵最大挤出功率为2 kW，最高转速

为 100 r/min。材料输送口支持泵送进料,同时也具备手动进料的能力。其挤出 3D 打印混凝土材料的最佳流动度范围为 175±10 mm。其中,不同试验采用不同的打印层高、打印条宽进行试验。打印层高指完成单层 3D 打印后,打印头纵向升高的距离。打印条宽指完成单条 3D 打印后,打印头横向移动的距离。劈裂试验样品采用根据试验设计,进行了不同打印层高、打印条宽的打印。压缩试验采用 30 mm 打印条宽,20 mm 打印层高。先行打印大型 3D 打印试件,随后切割成所需的尺寸。落锤试验采用 25 mm 打印条宽、15 mm 打印层高,将 3D 打印样品尺寸控制在边长 225±10 mm 之内,高为 45 mm±3 mm。



图 2 3D 打印机

Fig. 2 3D printer

1.3 劈裂实验方法

图 3 为 3D 打印混凝土垂直于打印方向的剖面示意图。3D 打印混凝土中存在层间界面和条间界面,分别来源于 3D 打印材料的纵向堆叠间隙和横向堆叠间隙。目前,一般采用切割大型样品以获得具有试验所需规定尺寸的样品。但在切割 3D 打印试件时,3D 打印混凝土样品中会出现不同比例的界面含量和界面分布。如图 3 所示,当测试样品从 A 区域取样时,样品中将会存在一个条间界面和三个层间界面。而若测试样品从 B 区域取样时,样品中将只存在三条层间界面。这种界面分布的不同会影响 3D 打印混凝土的力学性能,从而导致 3D 打印混凝土的力学测试存在一定的偶然性。

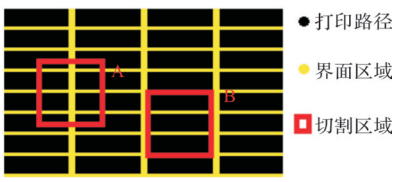


图 3 切割差异造成的 3D 打印样品结构不同

Fig. 3 Structural differences of 3D-printed specimens caused by cutting variations

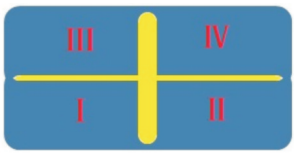
如图 4 所示,为了排除 3D 打印混凝土在切割过程中产生界面波动,本研究采用四打印条样品控制界面分布的位置。四打印条样品由四条较长的打印路径组成,采用 3D2 材料进行打印。如图 4(c)所示,各个打印条按打印完成的顺序依次标记为Ⅰ至Ⅳ。由于四打印条样品中只存在一处层间界面和一处条间界面,因此可以在实验中确立准确的测试位置。由于打印参数不同,劈裂样品的尺寸会随着打印头的移动距离、移动高度产生一定的波动。四打印条样品的宽度控制在 60~100 mm,高度控制在 30~40 mm 之间,并切割为长度为 80 mm 的小型样品,满足劈裂性能测试需要。



(a) 俯视图



(b) 样品侧面



(c) 中心剖面示意图

图 4 四打印条样品结构

Fig. 4 Four 3D printed filaments sample structure

为了研究强化措施对 3D 打印混凝土的影响,部分样品在层间界面处使用一层玄武岩纤维网或玻璃纤维网进行强化。在进行 3D 打印时,将纤维网裁剪为与四打印条样品相近的尺寸。如图 5 所示,玄武岩纤维网在Ⅰ、Ⅱ打印条打印完成后放置在打印样品的上表面,并随后进行Ⅲ、Ⅳ打印条的打印,从而让纤维网处于层间界面的位置

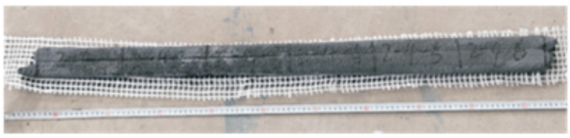


图 5 使用纤维网进行强化的样品

Fig. 5 Sample reinforced by fiber mesh

四打印条样品的制备主要是为了研究打印工艺参数对 3D 打印混凝土界面性能的影响。具体而言,工艺参数指在打印路径编程中的代码高度和代码宽度,即打印条Ⅰ与Ⅲ中心点的纵向距离和打印条Ⅰ与打印条Ⅱ中心点的横向距离,并以此为基础将各个四打印条样品的性能进行编号。以 30-20 为例,该样品即为代码高度为 20 mm,代码宽度为 30 mm 的四打印条样品。如表 2 所示,制备了 11 类样品,采用不同的打印工艺和强化方式进行对比,

分别进行层间界面劈裂试验和条间界面劈裂试验。其中，打印条宽代表打印条Ⅰ与Ⅱ、Ⅲ与Ⅳ中心的间距，打印层高代表打印条Ⅰ与Ⅲ、Ⅱ与Ⅳ中心的间距。强化方式包括在界面添加玄武岩纤维网、玻璃纤维网和在基体中添加1%体积率的玻璃短纤维进行强化，每组样品数量为3个。

表2　劈裂试验样品

Tab. 2　Samples for splitting tests

编号	打印条宽/mm	打印层高/mm	强化方式
#1	30	15	空白
#2	30	15	玄武岩纤维网
#3	30	15	玻璃纤维网
#4	30	15	1%纤维强化
#5	30	20	空白
#6	30	20	玄武岩纤维网
#7	30	20	玻璃纤维网
#8	30	20	1%纤维强化
#9	25	15	空白
#10	25	20	空白
#11	35	15	空白

进一步地，为了直接表征打印工艺对四打印条样品结构的影响，本节引入了“重合度”概念。由于装载过程的波动和流动度的变化，3D打印混凝土结构的宽度并不稳定。因此，需要通过一个可以简单表征的参数以确定两个打印条之间的间距。以图6为例，图中L_0为四打印条样品的宽度，L_1为四打印条样品中两条打印条中较宽一条的宽度，则其上表面重合度的数值可表达为

$$P_C = L_0/2 - L_1 \tag{1}$$

其中：P_C代表该四打印条样品上表面的重合度。通过测量L_0和L_1的值，两条同层打印条之间的重合量可以直接计算，并排除其他因素的干扰。当材料发生重合时，重合度的数值为负值，其绝对值越大，两条打印条的重合越紧密。

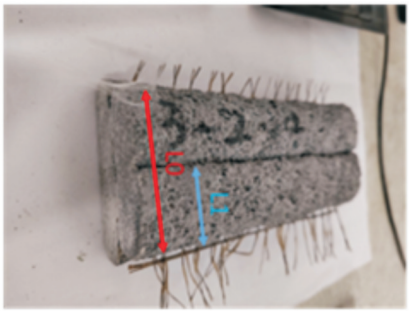
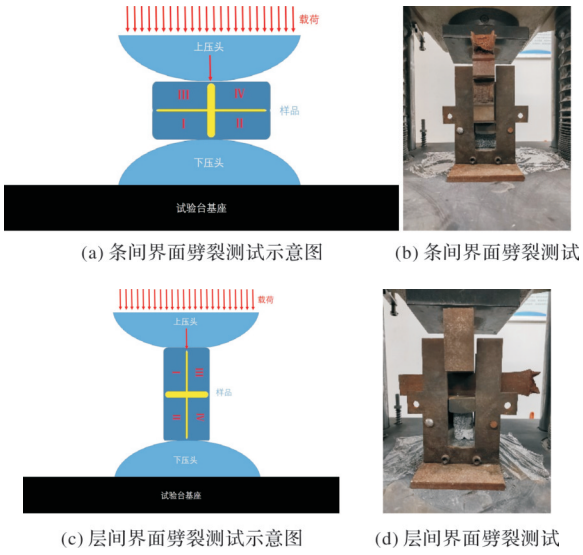


图6　重合度计算方法

Fig. 6　Calculation method for coincidence degree

为了能够直接地衡量3D打印混凝土的界面强度，参考了《混凝土物理力学性能试验方法》(GB/T 50081—2019)和现有的3D打印混凝土劈裂实验的加载方式，通过对界面处的直接加载，设计了3D打印混凝土界面强度测试方法[13]。如图7所示，使用劈裂强度测试的专用夹具对界面处进行加载，从而表征3D打印混凝土界面的极限强度，进而实现对3D打印混凝土界面性能的定量分析。



(a) 条间界面劈裂测试示意图　(b) 条间界面劈裂测试

(c) 层间界面劈裂测试示意图　(d) 层间界面劈裂测试

图7　3D打印界面强度测试方法

Fig. 7　Test method for 3D printed interface strength

2.4　试件压缩试验方法

如表3所示，为了研究界面分布对不同尺寸3D打印混凝土的影响，分别研究了从50 mm立方体至90 mm立方体3D打印试件的从垂直于打印平面方向进行压缩的抗压强度。样品制备方法为先进行大型3D打印试件的打印，随后随机选取位置进行切割取样。压缩试验方法参考课题组前序研究[18]。压缩载荷加载速率为2.4 kN/s，每组样品数量为3个。

表3　3D打印混凝土压缩试验样品

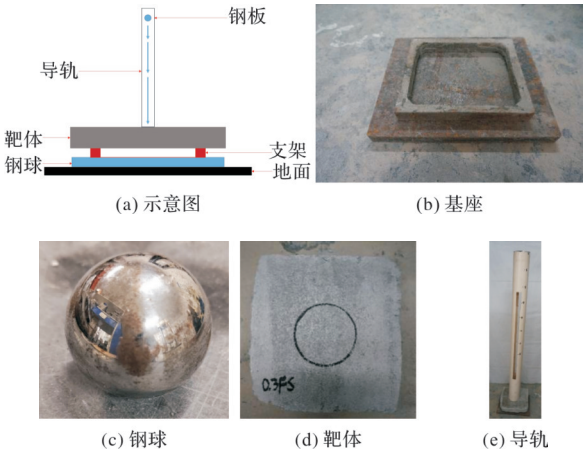
Tab. 3　Compression test samples of 3D printed concrete

编号	试件尺寸
#12	50 mm×50 mm×50 mm
#13	60 mm×60 mm×60 mm
#14	70 mm×70 mm×70 mm
#15	80 mm×80 mm×80 mm
#16	90 mm×90 mm×90 mm

2.5　落锤实验方法

落锤试验参考了美国ACI544委员会推荐的落锤冲击试验法设计试验方案，并为了使低强度试件形成区分，采用了逐步提高冲击速度的方法进行试验。主要实验器具如图8所示，包括基座、导轨和钢球。钢球的直径为65 mm，质量为1 kg。导轨材料为PVC塑料，长1 200 mm，直径为100 mm。靶体中心使用了直径为100 mm的圆形图案进行标记，与导轨直径一致，使钢球尽可能地命中同一位置。

实验过程中,首先将完整的实验装置放置在水平的地面上,随后将钢球置于导轨中心,并使用夹具利用导轨的中空部位固定,使其静止于实验指定的高度。随后解开夹具,使钢球自由落体。



(a) 示意图 (b) 基座

(c) 钢球 (d) 靶体 (e) 导轨

图 8 3D 打印混凝土落锤实验设备

Fig. 8 Equipment for drop weight test on 3D printed concrete

当钢球撞击过程完成后,取下导轨、钢球、靶体,观察靶体是否出现开裂或失效。在确认完成后,将靶体重新放置在基座上,并使用导轨重新瞄准原有的冲击位置,随后重复以上步骤,直至靶体失效。在实验过程中,靶体开裂的冲击次数和最终失效的冲击次数会被记录,用于计算破坏靶体所需要的冲击能量。如图 9 所示,当靶体表面出现初次出现肉眼可见的宏观裂缝时,记为靶体开裂。当试件破损或试件出现贯穿上下表面的宏观裂纹时,视作靶体失效。



(a) 靶体开裂-裂纹出现



(b) 靶体失效-裂纹贯穿 (c) 靶体失效-靶体破碎

图 9 靶体形成开裂与靶体失效状态时的判定依据

Fig. 9 Criteria for judging crack initiation and failure state of targets

由于部分 3D 打印混凝土材料的界面存在脆性断裂的可能,部分靶体承受冲击的能力不足,实验采用先低速冲击后高速冲击的实验方案,以此增加低速实验次数,使得一些较弱靶体的抗冲击性能能够得到一定的区分。其具体方案为,首次冲击的高度(钢球下表面至靶体受冲击面的距离)为 400 mm,每完成五次冲击,增加 100 mm,直至导轨最高处 1 200 mm,随后持续以 1 200 mm 的高度进行冲击。

因此,靶体的冲击能量可表达为:

$$W=\sum_{t=1}^{t} MgH_t \tag{2}$$

$$H_t=h_0+\Delta h_t,\ H_t\leqslant 1\,200\ \text{mm} \tag{3}$$

$$\Delta h_t=100\ \text{mm}\times\left[\frac{t}{5}\right] \tag{4}$$

其中,W 代表冲击能量总量,M 代表钢球质量,g 为重力加速度,t 为实验次数,H_t 为第 t 次实验的冲击高度,且 $H_t\leqslant 1\,200$ mm,$h_0=400$ mm 为初始冲击高度,Δh_t 为冲击高度增高量。$y=[x]$ 是取整函数。通过式(2)、式(3)和式(4),可以计算实验过程中的冲击能量总量。由于 3D 打印机的流量存在一定波动,最终将靶体的长度和宽度接近并控制在 225±10 mm 之内,高为 45 mm±3 mm。

在落锤试验中,3D 打印混凝土采用 3D 打印技术进行制造。浇筑靶体使用 240 mm×240 mm×48 mm 的长方体模具直接浇筑而成。两者主要区别在于 3D 打印靶体中存在由于制造工艺形成的界面,而浇筑靶体与传统混凝土一致,内部不存在界面。具体制备的样品参数如表 4 所示。

表 4 落锤试验样品

Tab. 4 Samples for dropping-weight test

编号	试件基体	试件强化方法	制造工艺	缩写
#17	3D1	无	3D打印	甲-O
#18	3D2	无	3D打印	乙-O
#19	3D1	1%玻璃纤维强化	3D打印	丙-O
#20	3D2	1%玻璃纤维强化	3D打印	丁-O
#21	3D1	无	浇筑	甲-M
#22	3D2	无	浇筑	乙-M
#23	3D2	1%玻璃纤维强化	浇筑	丙-M
#24	3D2	1%玻璃纤维强化	浇筑	丁-M

3 结果与分析

3.1 劈裂实验结果

3.1.1 层间界面劈裂

如图 10 所示,3D 打印混凝土的层间界面强度与工艺参数高度相关。25-15 组的层间界面强度较

25-20组提升了25.7%，30-15组的层间界面强度相较于30-20组提升了36.1%，而30-15组相较于35-15组则提升了16.8%。结合重合度进行数据分析，当材料的工艺参数促进重合度提高时，材料的层间界面强度也进一步提高。这意味着更加致密的结构有利于界面性能的提升。唯一的例外是35-15组，尽管35-15的打印条之间的重合程度较低，但层高降低使其层间界面在打印过程中收到了更多挤压，从而提升了层间界面的致密性，故而其层间界面强度有所提升。

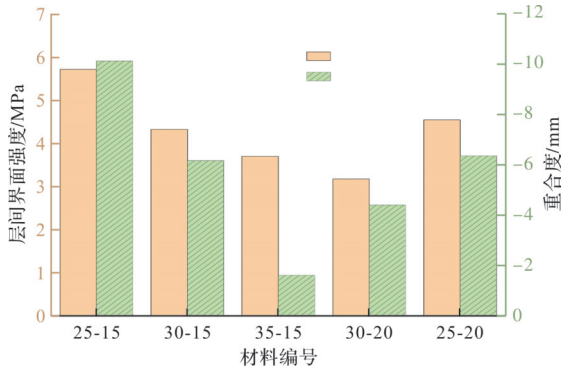


图 10　重合度与层间界面强度的关系

Fig. 10　Relationship between coincidence degree and interlayer interface strength

图11展示了3D打印混凝土的35-15组和25-15组的层间界面失效形式。在测试过程中，25-15组失效样品从层间界面处开裂，但并未沿着层间界面的位置扩展，而是向着样品的一侧打印条方向发展。相反地，35-15组样品在加载过程中，四个打印条完全分离，裂纹沿着界面迅速发展。



(a) 25-15系列　　(b) 35-15系列

图 11　层间界面失效形式

Fig. 11　Failure modes of interlayer interface

这表明层间界面的重合程度较小时，其界面结构足够致密。这使得初裂裂缝虽然仍然会在层间界面处产生，但当裂缝发展进程中，裂缝本身产生的应力集中已经大于3D打印混凝土中缺陷的应力集中，这使得样品的开裂向着随机方向发展，而不是沿着界面区域发展。而对于致密度较低的样品而言，整个测试过程中材料始终沿着缺陷处开裂。这一方面影响了材料的失效形式，另一方面也导致了材料层间界面强度的下降。

如图12所示，当使用纤维网和短纤维强化四打印条样品时，材料的层间界面强度显著提高。总体而言，通过短纤维对基体进行强化的效果最好，其次为玄武岩纤维网，再次为玻璃纤维网。在30-15组中，材料的层间界面强度在使用玻璃纤维网、玄武岩纤维网和短纤维进行强化后提升了16%，22%和31%；相对的，在30-20组中，使用同等强化手段的试样层间界面强度相较于空白组提升了37%、41%和47%，但30-20组的层间界面强度仍然没有超过30-15组。这证明了添加纤维网或添加短纤维均有利于界面强度的增加。但当层间界面足够致密时，添加强化材料的效果会有所削弱。

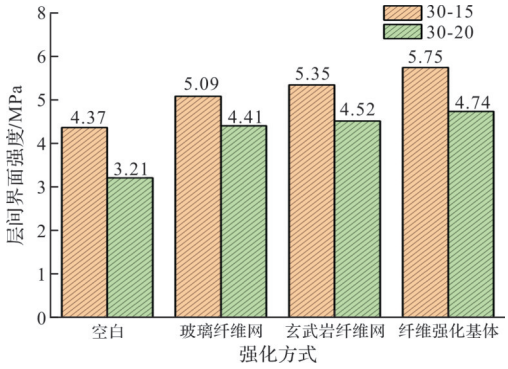
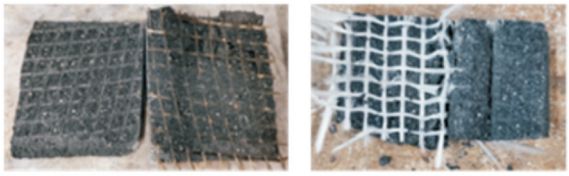


图 12　不同强化方式下的层间界面强度

Fig. 12　Interlayer interface strength under different reinforcement methods

如图13所示，在层间界面强度测试结束后，使用纤维网强化的层间界面表现为整体破坏。观察没有纤维网一侧的材料，可以发现玄武岩纤维网与水泥基体结合更好。在层间界面破坏后，水泥基体中可以发现明显的沟壑状图样，而玻璃纤维网的破坏界面没有发现这一点。



(a) 玄武岩纤维网强化　　(b) 玻璃纤维网强化

图 13　使用纤维网强化样品层间界面失效形式

Fig. 13　Interlayer interface failure modes of samples reinforced with fiber mesh

图14展示了使用玄武岩纤维网强化样品和玻璃纤维网强化样品层间界面劈裂过程的荷载-位移曲线，样品皆为30-15系列。可以发现，使用玄武岩纤维网强化的样品具有更高的极限荷载与极限位移量，从数据层面反映了玄武岩纤维网与3D打印基体形成了较好地结合。综上所述，玄武岩纤维网具备更好的强化效果。

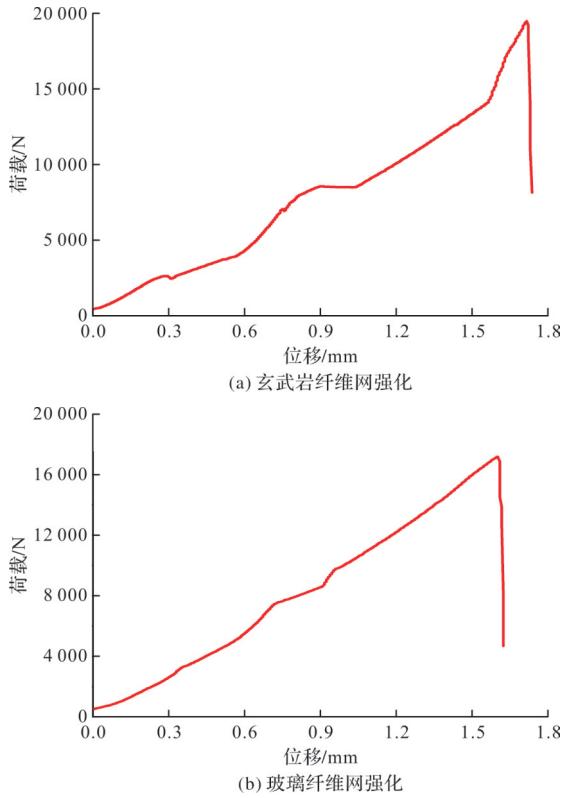


图 14 层间界面劈裂试验荷载-位移曲线

Fig. 14 Load-displacement curves of interlayer interface splitting test

进行层间界面破坏实验时,层间区域受到了压头的压力,而这种压力向层间界面的两侧传递,形成拉应力。由于劈裂实验的特性,压头下端的材料受到了最大的拉应力。此时,由于纤维网的存在,原先受拉产生变形的混凝土基体受到纤维网的约束,其应变量相对较小。但在纤维网两侧,由于纤维网此时已无法提供约束,较大的拉应力产生了更大的拉应变。这种应变的不均衡最终导致了材料失效集中于界面区域。由于这种失效机理重点强化了最为薄弱的界面中心区域,因此使原先界面质量较为疏松的 30-20 组在强化后得到了更大的提升,从而使其界面强度的提升幅度大于 30-15 组。

3.1.2 条间界面劈裂

工艺参数对 3D 打印混凝土条间界面强度的影响如图 15 所示。可以看到,条间界面强度的数值较层间界面强度有所下降,这也符合现有 3D 打印混凝土中的性能规律[19]。如图 16 所示,当重合程度较高时,3D 打印混凝土的条间界面并不明显,在失效过程中有多条裂纹同时发展。当试样失效后,可以看到一个较为明显的破坏区。相反地,当重合程度较低时,其断裂面处仅仅存在单一的开裂区域,最终导致样品简单的一分为二,进而导致界面强度较为糟糕的现象。如图 17 所示,从劈裂荷载位移曲线观察,发现进行条间界面劈裂时,重合度较好的样品在发生破坏后形成受压区,使荷载-位移曲线呈现上下波动的状态。而重合度较差的样品则出现了脆性断裂,在开裂后迅速断裂失效。

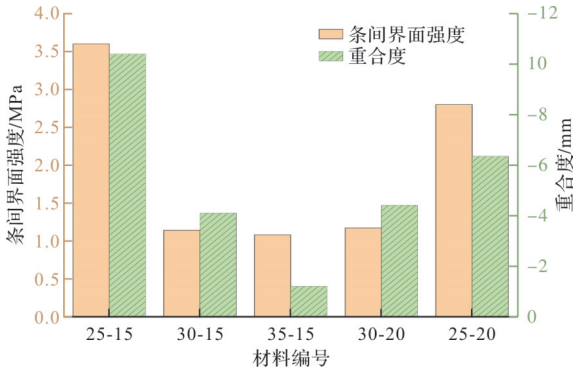


图 15 重合度与条间界面强度的关系

Fig. 15 Relationship between coincidence degree and inter-filament interface strength



(a) 重合度高 (b) 重合度低

图 16 不同重合度下样品条间界面失效形式

Fig. 16 Failure modes of inter-filament interfaces under different coincidence degrees

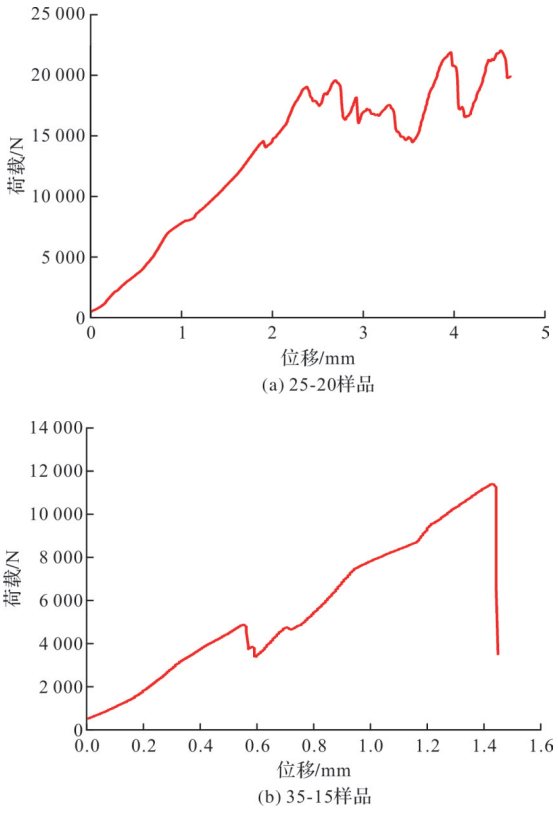


图 17 条间界面劈裂试验荷载-位移曲线

Fig. 17 Load-displacement curve of inter-filament interface splitting test

以上这些现象说明条间界面强度与材料的重合度存在直接的联系。当重合程度较大时，条件界面致密度较高，界面区域的破坏形式类似于普通混凝土的受压破坏。当重合程度较小时，3D打印混凝土的条间界面强度迅速下降。然而，在重合程度降低至一定水平后，材料的条间界面强度下降趋势放缓。这意味着当打印条之间的重合下降到比较严重的程度时，条间界面的链接已经相当微弱。此时，条间界面的失效载荷可能来自于试件与压头的摩擦等方面。

3.2　混凝土压缩试验

普通混凝土试件中尺寸效应来源于存在多种理论，Weibull经典统计理论[20]认为当结构尺寸增大时，材料中的低强度小单元增多，进而更易发生结构失效，从而降低了大尺寸试件的结构强度。在该理论指导下，尺寸效应的数学表达可写作

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\frac{1}{m}} \tag{5}$$

式中：σ_1和V_1代表样品1的抗压强度和体积，σ_2和V_2则代表样品2的抗压强度和体积，m则为根据材料确定的参数，对混凝土材料$m=12$。

如图18所示，以上述理论为计算方法，将试件边长为50、90 mm的试样为基础值，按Weibull理论公式和实验结果进行对比，发现3D打印混凝土的抗压强度随尺寸发生了较大的波动，远远超出理论值的数值范围。当按照90 mm试样进行理论计算时，材料的抗压强度在试件边长为80、60、50 mm时高于理论值，而在试件边长为70 mm时低于理论值。类似地，当按照50 mm试样进行理论计算时，材料的抗压强度在试件边长为60、70 mm和90 mm时低于理论值，而在80 mm时高于理论值。两者情况可以说明，3D打印混凝土的抗压强度在边长为70、90 mm时偏低，在边长为80、50 mm时偏高，而在60 mm时处于适中状态。

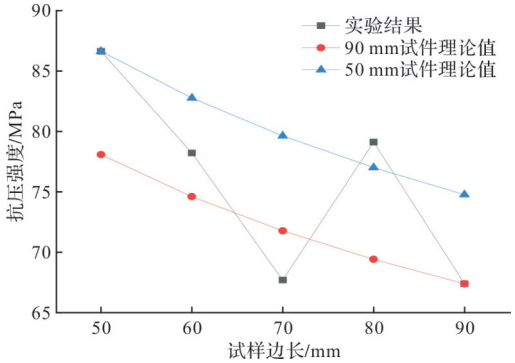


图18　3D打印混凝土的抗压强度结果与理论结果对比

Fig. 18　Compressive strength of 3D printed concrete: test results vs. theoretical values

产生上述现象的原因主要在于切割立方体样品时产生的界面位置波动。在3D打印后，立方体样品通过切割进行取样，其界面位置并不确定（见图3）。图19中展示了50～70 mm立方体3D打印试件的失效形式。在样品的上表面中对材料的条间界面位置使用黑色记号笔进行标记。观察发现，在该方向上3D打印混凝土发生了单侧剥落破坏。从侧面裂纹观察，可以发现裂纹在界面位置开裂而沿着相对随机的方向发展。这表明对3D打印混凝土施加压载荷时，试样剥落破坏的位置从材料的条间界面处开始发生。进一步地，可以发现边长为50 mm和80 mm的样品，其界面位置沿中心对称；边长为70 mm和90 mm的样品，其界面位置则相对不对称；而边长为60 mm的样品则介于上述两者之间。因此，边长为50 mm和80 mm的样品，其界面区域相对远离样品边缘。相反地，边长为70 mm和90 mm的样品，其界面区域相对接近样品边缘。

界面靠近样品边缘时，由于混凝土剥落破坏的

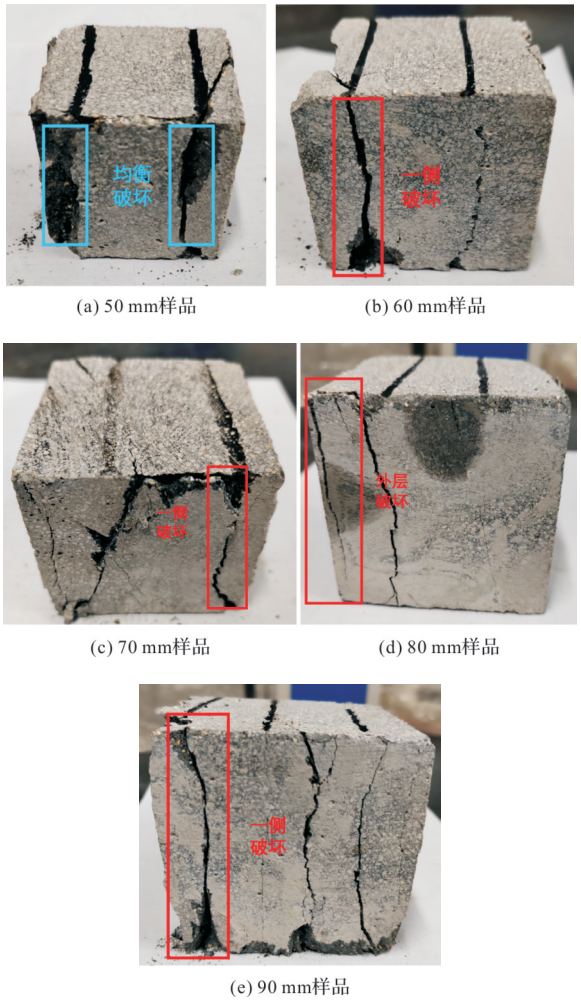


图19　不同尺寸3D打印混凝土抗压破坏特征

Fig. 19　Compressive failure characteristics of 3D printed concrete with different sizes

失效特征,界面结构受到了相对更大的压力,从而导致其提前开裂,进一步地导致了3D打印样品力学性能的下降。因此,边长为70 mm和90 mm样品的抗压强度偏低,而边长为50 mm和80 mm样品的抗压强度则更高。这种现象反映了3D打印混凝土的抗压性能与界面分布高度相关,界面位置的波动会影响3D打印混凝土的力学性能。

3.3 低速冲击实验结果

3.3.1 3D打印混凝土与浇筑靶体对比

浇筑靶体和3D打印靶体抗冲击性能的实验结果列于图20,其中柱状图顶端标注了3D打印靶体落锤实验的冲击次数。首先,可以发现浇筑靶体的抗冲击性能要显著优于3D打印靶体。所有浇筑靶体的开裂冲击次数平均值为31.00次,而所有3D打印靶体的开裂冲击次数平均值为8.75次。所有浇筑靶体的失效冲击次数平均值为35.75次,而所有3D打印靶体的失效冲击次数平均值为15.25次。通过冲击能量计算,可得知浇筑靶体在开裂时的平均吸收能量比3D打印靶体高415%,但浇筑靶体在失效时吸收的平均能量比3D打印靶体高203%。

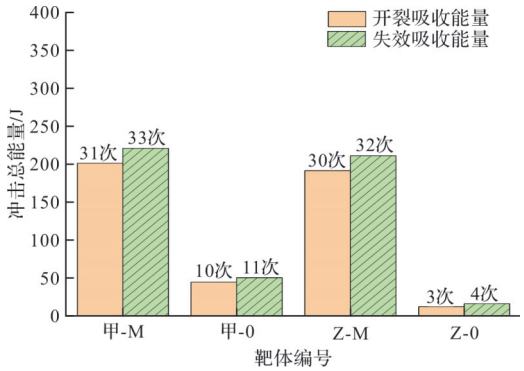


图20 3D打印混凝土与浇筑靶体落锤实验结果

Fig. 20 Drop weight test results of 3D-printed concrete and cast targets

然而,对比靶体开裂至靶体失效的平均吸收能量,浇筑靶体在该阶段的吸收量仅仅高出12%。与此同时,使用高水胶比的基体与低水胶比基体的浇筑靶体,抗低速冲击性能没有显著性区别,但对于3D打印靶体则存在较大的波动。这反映了在低速动态冲击条件下,靶体自身的强度不是决定抗冲击性能的唯一要素,工艺与靶体的微观结构会对材料的抗冲击性能产生影响。

产生这种现象的原因是3D打印工艺和混凝土靶体在低速冲击下的失效模式共同造成的。在本实验中,早期冲击的能量较低,靶体内部的裂纹还在发展过程中。此时,由于3D打印靶体中存在界面和空腔[21],在界面处发生了应力集中现象,使得3D打印靶体在受到冲击时裂缝发展更快,开裂更早,使得浇筑靶体在开裂前的抗冲击性能产生了优势。相反地,如图21所示,当宏观裂缝出现时,由于靶体已经开裂,类似于静态加载中的状态,已开裂的裂纹沿着宏观裂缝迅速发展,而3D打印靶体中存在的缺陷在裂纹发展的过程中不占据主导地位。因而导致在靶体开裂至靶体失效的过程中,浇筑靶体所吸收的能量并不显著高出3D打印靶体。



图21 开裂后随机发展的3D打印混凝土裂纹

Fig. 21 Randomly developed cracks in 3D-printed concrete after cracking

与此同时,采用3D2材料的3D打印靶体,其抗冲击性能反而降低。这是因为由于配合比设计时产生的流变性能区别,导致了3D打印质量存在一定的差异。尽管3D2靶体在本身的基体强度上存在一定优势,但是由于靶体的开裂主要受到界面区域的影响。因此,流动度稍好的3D1材料反而具备了更好的抗冲击性能。因此,在研究抗冲击性能时,应当注意打印质量对3D打印混凝土抗冲击性能的影响。

3.3.2 纤维对3D打印混凝土抗低速冲击的影响

如图22所示,使用纤维强化基体的丙、丁靶体相较于甲、乙靶体具备更好的抗冲击性能,但其开裂冲击次数并未随纤维强化而显著上升,尤其是使用浇筑工艺的靶体,其开裂冲击次数均为31±1范围内。而在开裂-失效阶段,使用纤维强化的优势被显著地体现出来。从冲击次数角度看,未使用纤维强化的靶体在开裂后的1~3次之内即完全破坏,而使用纤维强化的靶体通常仍然能对抗5次~15次的冲击。从能量吸收角度看,开裂-失效阶段,使用纤维强化靶体的冲击吸收能量是未使用纤维强化靶体的6.48倍。

这种优势反映了纤维对靶体的强化机理类似于钢筋混凝土。在基体开裂前,由于靶体的应变有限,纤维材料并不受力,难以提供有效的强化。在

基体开裂后，纤维才受到较为显著地拉伸和拔出，从而吸收冲击过程中产生的能量。观察所有浇筑靶体，可以发现其开裂冲击次数较为接近，而采用纤维强化的丙-M靶体和丁-M靶体相较于未使用纤维强化的靶体，在开裂后承受了更多的冲击次数。而另一方面，3D打印靶体的开裂冲击次数则参差不齐，而开裂冲击次数与失效冲击次数的差值则较为接近，且同样接近于浇筑靶体。

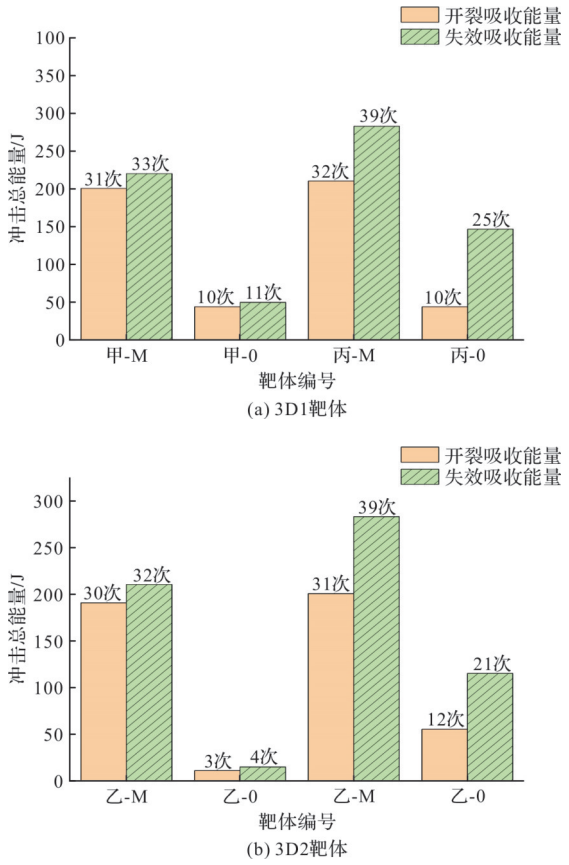
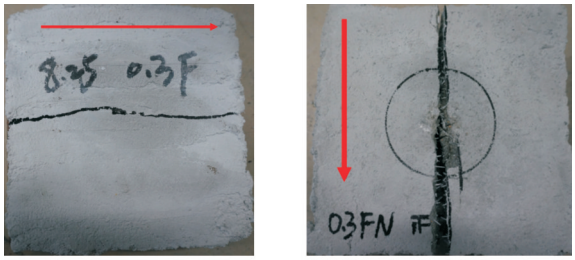


图 22　纤维对落锤实验结果的影响

Fig. 22　Effect of fiber on drop weight test results

靶体开裂前，靶体内部的缺陷在开裂时占据主导地位，而靶体开裂后，靶体中掺杂的纤维开始产生效果。因此，在开裂前，由于打印质量不同，靶体的抗冲击性能受缺陷影响较大，所以浇筑靶体的开裂冲击次数较为接近，而3D打印靶体由于打印质量的区别，使得靶体的开裂冲击次数发生了较为明显的起伏。相反地，在靶体开裂后，由于靶体自身的缺陷不再是靶体进一步破坏的主导要素，且靶体中的强化纤维吸收了冲击能量，使得不采用纤维强化的靶体迅速失效，而采用纤维强化的靶体则仍然在纤维的桥接作用下仍然具备一定的抗冲击性能。因此，甲组和乙组靶体在开裂后的一到两次冲击内迅速失效，而丙组和丁组靶体仍然承受了超过7次的冲击。

但当打印界面与基体的强度存在一定差距时，开裂也会沿着界面发生。如图23所示，以丁-M靶体为例，3D打印路径用红色箭头标出。对比丙-O、丙-M和丁-O、丁-M两组靶体，可以观察到3D打印工艺下纤维的强化效果被削弱了。产生该结果的原因主要是由于3D打印界面和3D打印材料中纤维的定向排布，从而使靶体更易沿着平行于纤维排布方向开裂，进而使得开裂裂纹进一步在界面处发生失效，而不是如浇筑靶体一样随机开裂。



(a) 靶体开裂　　(b) 靶体失效

图 23　3D打印靶体定向开裂特征

Fig. 23　Directional cracking characteristics of 3D-printed targets

4　结论

(1)3D打印混凝土的界面性能与打印工艺高度相关，打印工艺的改变会影响界面的失效形式。当界面结构良好时，开裂会发生在界面处而向随机方向发展，而糟糕的界面结构会导致界面开裂后连续失效。使用强化材料能够改变界面性质，提高界面的力学性能。

(2)3D打印混凝土的抗压失效和界面位置高度相关。以抗压试验为研究对象，当界面位置靠近3D打印样品边缘时，材料的抗压强度会相对下降，反之则有所提高。因此，现有的力学性能测试方法存在一定的误差。

(3)3D打印混凝土落锤实验中，靶体破坏过程分为开裂阶段和失效阶段。开裂阶段，靶体吸收能量主要与靶体内部结构中存在的缺陷有关，因此提高3D打印混凝土的打印质量有助于抑制靶体开裂。失效阶段，靶体沿着开裂阶段形成的宏观裂纹发展，但当界面强度与非界面区强度差距大时，也会沿着界面区域发展。对3D打印混凝土进行适当的强化，将有助于材料的抗低速冲击性能。

参考文献 References

[1] GOSSELIN C, DUBALLET R, ROUX P, et al. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete: A new processing route for architects and

builders[J]. Materials & Design, 2016,100:102-109.

[2] PAN Z, SI D, TAO J, et al. Compressive behavior of 3D printed concrete with different printing paths and concrete ages [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023,18:e1949.

[3] GENG Z, SHE W, ZUO W, et al. Layer-interface properties in 3D printed concrete: Dual hierarchical structure and micromechanical characterization [J]. Cement and Concrete Research, 2020,138:106220.

[4] WENG Y, LI M, ZHANG D, et al. Investigation of interlayer adhesion of 3D printable cementitious material from the aspect of printing process [J]. Cement and Concrete Research, 2021,143:106386.

[5] PANDA B, CHANDRA Paul S, JEN Tan M. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material [J]. Materials Letters, 2017,209:146-149.

[6] REHMAN A U, BIRRU B M, KIM J. Set-on-demand 3D Concrete Printing (3DCP) construction and potential outcome of shotcrete accelerators on its hardened properties[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023,18:e1955.

[7] ZHU B, PAN J, ZHOU Z, et al. Mechanical properties of engineered cementitious composites beams fabricated by extrusion-based 3D printing [J]. Engineering Structures, 2021,238:112201.

[8] KLOFT H, KRAUSS H, HACK N, et al. Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP) [J]. Cement and Concrete Research, 2020,134:106078.

[9] SUN X, YE B, LIN K, et al. Shear performance of 3D printed concrete reinforced with flexible or rigid materials based on direct shear test [J]. Journal of Building Engineering, 2022,48:103860.

[10] XIAO J, CHEN Z, DING T, et al. Bending behaviour of steel cable reinforced 3D printed concrete in the direction perpendicular to the interfaces [J]. Cement and Concrete Composites, 2022,125:104313.

[11] MARCHMENT T, SANJAYAN J. Bond properties of reinforcing bar penetrations in 3D concrete printing [J]. Automation in Construction, 2020,120:103394.

[12] GENG Z, SHE W, ZUO W, et al. Layer-interface properties in 3D printed concrete: Dual hierarchical structure and micromechanical characterization [J]. Cement and Concrete Research, 2020,138:106220.

[13] HUANG X, YANG W, SONG F, et al. Study on the mechanical properties of 3D printing concrete layers and the mechanism of influence of printing parameters[J]. Construction and Building Materials, 2022,335:127496.

[14] 赵筠,路新瀛. 构建科学智能混凝土配制新技术体系的设想和建议(一)[J]. 混凝土世界,2019(11):48-61.
ZHAO Jun, LU Xinying. Assumption and suggestions for constructing the new scientific & smart system of concrete proportioning (1) [J]. China Concrete, 2019(11):48-61.

[15] 赵筠,路新瀛. 构建科学智能混凝土配制新技术体系的设想和建议(二)[J]. 混凝土世界,2019(12):42-51.
ZHAO Jun, LU Xinying. Assumption and suggestions for constructing the new scientific & smart system of concrete proportioning (2) [J]. China Concrete, 2019(12):42-51.

[16] 赵筠, 路新瀛. 构建科学智能混凝土配制新技术体系的设想和建议(三)[J]. 混凝土世界, 2020(1):56-70.
ZHAO Jun, LU Xinying. Assumption and suggestions for constructing the new scientific & smart system of concrete proportioning (3) [J]. China Concrete, 2020(1):56-70.

[17] 赵筠,路新瀛. 构建科学智能混凝土配制新技术体系的设想和建议(四)[J]. 混凝土世界,2019(10):51-61.
ZHAO Jun, LU Xinying. Assumption and suggestions for constructing the new scientific & smart system of concrete proportioning (4) [J]. China Concrete, 2019(10):51-61.

[18] 王强. 3D打印混凝土优化设计和性能研究[D]. 南京:南京理工大学, 2019.
WANG Qiang. Optimum design and performance of 3D printing concrete [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.

[19] 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, China Building Materials Science & Technology [J], 2022,31(6):44-48

[20] 王兵锋, 汤国庆, 唐腾飞. 混凝土尺寸效应研究[J]. 低温建筑技术, 2014,36(6):12-14.
WANG Bingfeng, TANG Guoqing, TANG Tengfei. Research on size effect of concrete [J], 2014,36(6):12-14.

[21] 张宇. 3D打印水泥基材料的设计、制备与性能研究[D]. 南京:东南大学, 2021.
ZHANG Yu. Study on design、preparation and performance of 3D printed cement-based materials [D]. Nanjing:Southeast University, 2021.

(编辑 吴海西)