

应变率对 3D 打印混凝土抗压性能的影响

王海龙^{1,2}, 陶 傲^{1,3}, 孙晓燕^{1,4}

(1. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 2. 山西浙大新材料与化工研究院, 太原 030002; 3. 浙江大学平衡建筑研究中心, 杭州 310028; 4. 灵砦科技(杭州)有限公司, 杭州 310058)

摘 要: 为评价应变率对 3D 打印混凝土动态抗压性能的影响, 开展 4 种应变率下打印混凝土 3 个正交方向的单轴压缩试验, 得到不同加载工况下 3D 打印混凝土的受压破坏形态和应力-应变曲线, 探讨了应变率和不同方向对 3D 打印混凝土抗压强度、弹性模量、峰值应变及各向异性的影响规律, 考虑应变率效应提出 3D 打印混凝土各个方向动态抗压强度与动态弹性模量的经验计算公式。研究表明: 3D 打印混凝土裂缝萌生于层条间薄弱界面处并沿界面扩展, 这些发展于薄弱界面处的裂缝决定了 3D 打印混凝土的破坏失效; 各个方向的动态峰值应力和动态弹性模量均存在一定程度的应变率相关性, Y 方向抗压强度率相关性最高; 3D 打印混凝土的各向异性随着应变率增加而减小, 在高应变率下变化幅度很小。

关键词: 3D 打印; 混凝土; 应变率; 力学性能; 各向异性; 率效应

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)05-1499-09

网络出版时间: 2024-02-22



近年来, 建筑行业见证了 3D 打印混凝土(3DPC)的飞速发展, 该种技术已在桥梁、配电房、民用建筑等各种场景中得到示范应用^[1-3]。作为推动建筑行业数字化发展最有前途的方法之一, 3D 打印混凝土具有如下这些传统施工技术无以比拟的优点: 无模板制造^[4]; 设计自由度高^[5]; 数字设计与自动化施工融合使得工期缩短生产效率提高^[6-7]。迄今为止, 经济性最好且适用性最广的 3D 混凝土打印方法基于挤出成型的技术^[1, 8]。在此工艺中, 混凝土通过泵送系统输送经由 3D 打印机喷嘴挤出, 逐条进行打印, 然后在重力作用下保持稳定性的同时沉积并逐层堆叠成相应的结构或构件。这种打印工艺为 3D 打印混凝土带来了诸多特点, 如外观呈分层形态、材料的高可建造性要求、空间构造上的各向异性等。

基于对 3D 打印混凝土在应用中的可靠性担忧, 科研人员深入研究了 3D 打印混凝土的力学性能。

受挤出成型工艺影响, 3D 打印混凝土在横向(x 方向, 打印头移动方向)、纵向(y 方向, 垂直于条间、平行于层间方向)、竖直方向(z 方向, 沿重力逐层堆叠方向)的力学性能有所差异, 如图 1 所示。Zhang 等^[9]研究表明静力荷载作用下 z 方向加载的打印混凝土抗压强度最大, x 方向次之, y 方向最小, 并给出了一定解释: 3 个方向抗压强度与层、条间的粘结强度有较大的关系, 粘结较差的层间容易产生应力集中使强度下降。Le 等^[10]也得到了相似结论。Arunothayan 等^[11]打印的超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)在 z 方向上测试的强度低于 x 方向, 但大于 y 方向。

尽管目前关于 3D 打印混凝土力学性能的研究报道屡见不鲜, 但这些工作仍主要集中在静力性能方面, 对动态荷载下 3D 打印混凝土的力学性能研究极其有限。在实际工程中, 混凝土结构除了承受常规静力荷载, 在某些场景下也会不可避免地面临

收稿日期: 2023-09-18。 修订日期: 2023-11-24。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079123, 52279141); 浙江省重点研发计划项目(2021C01022); 浙江省尖兵领雁计划项目(2023C01154, 2022C04005); 山西浙大新材料与化工研究院资助项目(2021SZ-TD010, 2022SZ-TD016); 浙江大学平衡研究中心专项经费。

第一作者: 王海龙(1974—), 男, 博士, 教授。

通信作者: 孙晓燕(1976—), 女, 博士, 副教授。

Received date: 2023-09-18. Revised date: 2023-11-24.

First author: WANG Hailong (1974—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: hlwang@zju.edu.cn

Correspondent author: SUN Xiaoyan (1976—), female, PH.D., Associate Professor.

E-mail: selina@zju.edu.cn

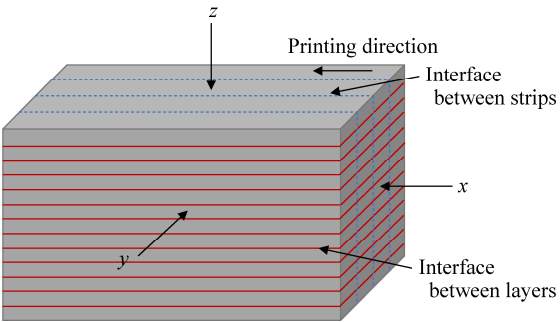


图 1 3D 打印混凝土 x 、 y 、 z 方向示意图
Fig. 1 x , y and z directions of 3D printed concrete

动态荷载问题，比如地震，作为典型的动态荷载地震引起的混凝土应变率在 $10^{-4}\sim10^{-2}\text{ s}^{-1}$ ，它的作用往往会造成工程结构的灾难性破坏。随着 3D 打印混凝土的不断推广，其势必会在地震带工程结构中得到应用，准确认识其动态力学性能是准确分析 3D 打印混凝土结构动力响应的基础，因此，本工作考

虑应变率效应对 3D 打印混凝土动态抗压性能进行试验研究，获取不同应变率下 3D 打印混凝土各方向抗压性能，建立其各向动态抗压性能与加载应变率参数的对应关系，分析 3D 打印混凝土的率效应与各向异性。

1 实验

1.1 材料及配合比

硅灰作混凝土掺合料可有效改善 3D 打印混凝土的力学性能及工作性能^[12]，因此本工作采用 42.5 快硬早强硫铝酸盐水泥和硅灰作为胶凝材料，水泥主要技术指标和化学成分见表 1 与表 2，硅灰主要技术指标见表 3。采用杭州当地产优质河砂作为细骨料。添加剂为聚羧酸系高效减水剂和缓凝剂，减水剂减水率大于 30%，缓凝剂采用酒石酸高效缓凝剂。打印混凝土水灰比为 0.29，配合比如表 4 所示。

表 1 水泥主要技术指标
Table 1 Main technical indexes of cement

Specific surface area/($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	Initial setting time/min	Final setting time/min	Compressive strength/MPa		
			1 d	3 d	28 d
449	17	37	30.1	44.2	51.3

表 2 水泥主要化学成分
Table 2 Main chemical composition of cement

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Loss
40.68	9.53	32.75	1.33	1.45	12.42	0.11

w is mass fraction.

表 3 硅灰主要技术指标
Table 3 Main technical indexes of silica fume

Apparent density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Average particle size/ μm	Specific surface area/($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)
2 250	0.2	18 000

表 4 3D 打印混凝土材料配合比
Table 4 Mix ratio of 3D printing concrete

Cement	Silica fume	Sand	Water	Water reducing agent	Retarder
0.87	0.13	0.78	0.29	0.017	0.003

1.2 打印工艺与试件制备

采用 HC-3DPRT/L 型混凝土 3D 打印系统和直径为 30 mm 的圆形喷嘴，以 1 L/min 的挤出速率和 3 cm/s 的打印速率打印出若干个尺寸为 220 mm×240 mm×400 mm 的 3D 混凝土试块，如图 2 所示，打印条的宽度和高度分别为 30 mm 和 10 mm。将水平平面上沿打印喷嘴移动方向定义为 x 方向， y 方向垂直于 x 方向， z 方向则是重力堆积方向，垂直于 x - y 平面。打印完成 1 d 后将其移动至标准养护

室[温度(20±1) °C、相对湿度 95%以上]进行为期 28 d 的养护。养护完成后，使用电动钻孔取芯机从每个试块的 3 个方向进行取芯，使用切割机切割所得芯样获得 3 个方向的 $\phi 100\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 圆柱混凝土试件，在 3 个打印方向上获得的试件界面分布有所不同，如图 3 所示。最后，使用水磨抛光机对试件两端进行打磨以使端面平整，根据 JGJ/T384—2016《钻芯法检测混凝土强度技术规程》进行平整度检测获得合格试件进行加载测试。同时，以相同

配合比浇筑成型同尺寸混凝土试件用于对比试验。

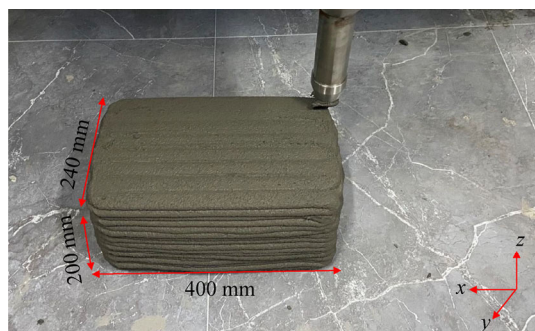


图 2 3D 打印混凝土试块

Fig. 2 Printed blocks of 3D printing concrete

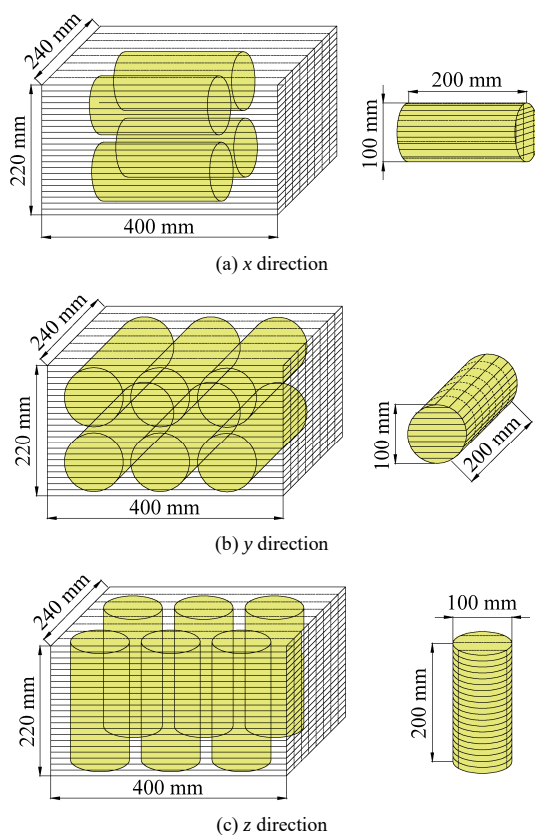


图 3 取样过程及各方向界面分布示意图

Fig. 3 Sampling process and interface distribution in various directions

1.3 测试方案

利用电液伺服万能试验机对不同打印方向混凝土试件和浇筑试件进行等应变加载试验, 每组设置 3 个试件进行试验, 取平均值。试验采用的应变率为 10^{-5} 、 10^{-4} 、 $10^{-3.5}$ s^{-1} 和 10^{-3} s^{-1} , 其中 10^{-5} s^{-1} 是可视静态应变率, 其他为动态应变率。正式加载前, 先使用力加载方式将试件反复加载 3 次, 每次加载至混凝土设计强度值的 5%, 随后采用常应变

率加载, 通过式(1)计算出特定应变率下的位移加载速率。

$$v = \dot{\varepsilon} \times L \quad (1)$$

式中: v 为加载速率; $\dot{\varepsilon}$ 为特定应变率; L 为圆柱体试件高度。

2 破坏模式

破坏模式可以从宏观角度揭示打印方向和应变率对 3D 打印混凝土力学性能的影响。动力荷载作用下各个方向 3D 打印混凝土的破坏形态如图 4 所示, 其中实线表示层间界面, 虚线表示条间界面。3D 打印混凝土具有与浇筑混凝土显著不同的各向异性, 因为逐条打印、逐层堆积的工艺, 在打印过程中水平方向与竖直方向相邻打印条之间的空气缝隙与缺陷会形成薄弱的条间界面与层间界面。由图 4 可见, 在 10^{-5} s^{-1} 和 10^{-4} s^{-1} 应变率时, y 和 z 方向破坏后分别存在沿层间界面和条间界面的竖向贯穿式裂缝, 当应变率增加到 $10^{-3.5}$ s^{-1} 和 10^{-3} s^{-1} 时, y 方向呈现出一条斜向贯穿式裂缝的剪切破坏, 而 z 方向裂缝仍出现在条间界面周围。对于给定的各个应变率, x 方向破坏后均出现沿层间和条间界面的竖向裂缝。

在竖向荷载作用下, 由于泊松比效应的存在, 混凝土总会在竖向方向上形成压应变, 在横向方向上形成拉应变, 随着竖向荷载逐渐增加, 拉应变增大直至达到极限值, 然后试件发生破坏。因此, 当薄弱界面与受压加载方向平行时, 3D 打印混凝土极易因为薄弱界面处微裂纹的发展而沿界面失效; 而当薄弱界面与受压加载方向垂直时, 其对 3D 打印混凝土的失效影响较小。由图 3 界面分布图可见, y 和 z 方向与加载方向平行的薄弱界面分别为层间和条间界面, x 方向试件与加载方向平行的薄弱界面二者皆存在, 且 x 方向沿加载方向为分布均匀地打印条短柱, y 方向沿加载方向由水平打印条带堆叠而成, z 方向则是竖直方向打印条带堆叠成型。对于 3D 打印混凝土, 薄弱界面充当了混凝土内部的初始损伤部分, 在 10^{-5} s^{-1} 和 10^{-4} s^{-1} 较低应变率的情况下, 这些损伤部分有足够时间形成裂缝并沿着薄弱界面进一步扩展, 最终相互连接形成薄弱界面处的贯穿式裂缝, 从而使混凝土失效破坏; 在 $10^{-3.5}$ s^{-1} 和 10^{-3} s^{-1} 较高应变率的情况下, 除了薄弱界面处的裂缝, y 方向由于是水平打印条带堆叠而成, 沿加载方向的非均质性最为明显, 因此非薄弱界面处的基体也发生了较大损伤, 最终结合形成剪

切破坏, z 方向因为竖直方向打印条带经过重力作用堆叠相对密实, 故和 x 方向仍主要发生沿薄弱界面的破坏。

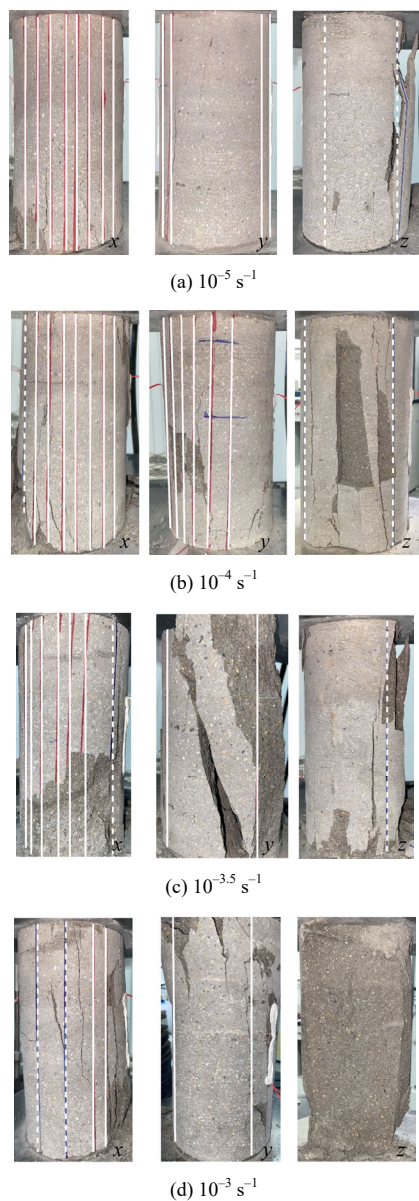


图4 各应变率下3D打印混凝土的各向受压破坏形态
Fig. 4 Compressive failure morphology of 3D printed concrete in different directions at various strain rates

随着应变率的提升, 能量输入速率逐渐增加, 混凝土应变滞后效应逐渐凸显; 即变形速率无法满足耗散能量的需求, 导致基体部分损伤的增加, 因此在较高应变率下3个方向均在基体部分出现了裂缝, 且为释放快速积累的能量, y 和 z 方向薄弱界面处的微裂缝直接贯穿混凝土发展, 形成1~2条主裂缝。应变率的提升同时也导致了各个方向上剥落现象的增加和试件破坏后完整性的降低。

3 应力-应变曲线

图5为不同应变率下3D打印混凝土的应力-应变曲线。由图5可见, 无论应变率和打印方向如何

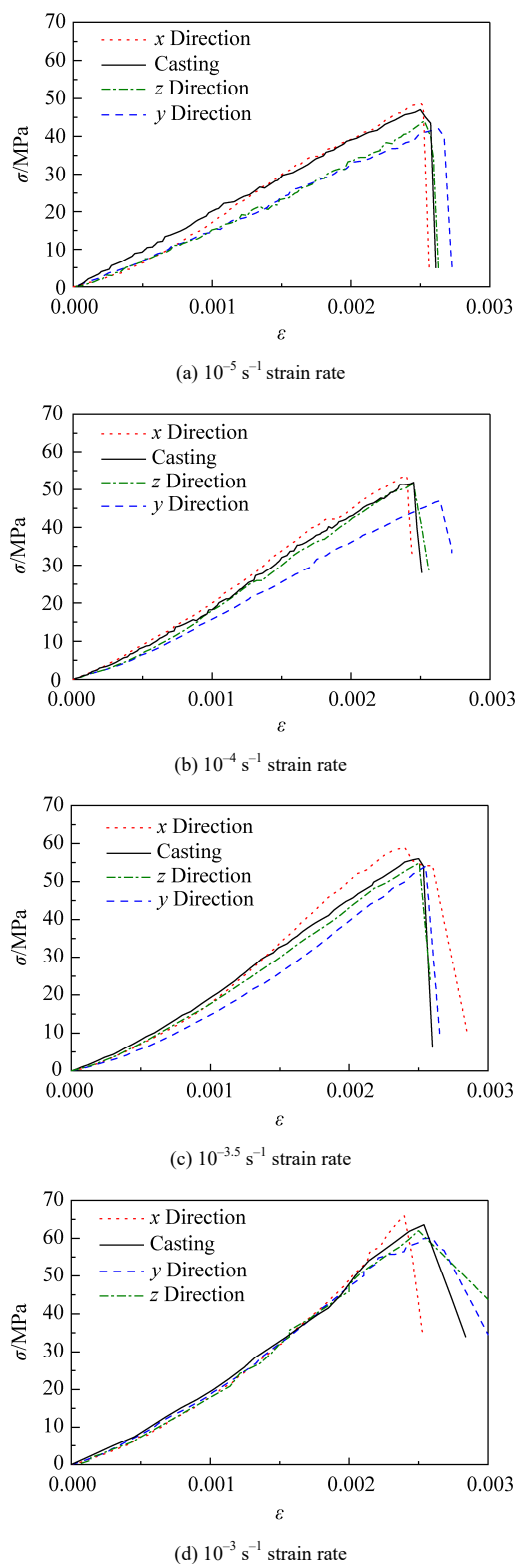


图5 3D打印混凝土的动力应力-应变曲线
Fig. 5 Dynamic stress-strain curves of 3D printed concrete

变化, 混凝土的应力-应变曲线变化趋势基本相同, 可分为 3 个阶段: 弹性阶段、弹塑性段和破坏后阶段。对于同一方向试件, 其受压峰值应力随应变率提高均逐渐增大, 线段的初始斜率即弹性模量也有增大趋势。

4 峰值应力

从图 5 提取峰值应力作为抗压强度, 峰值应力随应变率增长的变化规律如图 6 所示。将 x 、 y 、 z 方向和模具浇筑试件抗压强度分别用 F_x 、 F_y 、 F_z 、 F_C 表示。3D 打印混凝土在静力受压时(10^{-5} s^{-1}) F_x 最高, 为 48.1 MPa, F_y 、 F_z 、 F_C 分别为 40.3、45.9 MPa 和 46.9 MPa, 相比 F_x 各自降低了 16.2%、4.6%和 2.5%。随着应变率增加, 各个方向的动态抗压强度均显著增加, 这可由应变率效应解释: 加载应变率的提高使混凝土损伤发生具有迟滞效应, 混凝土无法达到内应力平衡状态, 裂缝发展迅速, 材料没有时间积累能量, 只能通过增加应力来抵消从压缩载荷处获得的能量。当应变率为 10^{-3} s^{-1} 时, F_x 、 F_y 、 F_z 、 F_C 分别为 64.2、60.4、61.0 MPa 和 61.7 MPa, 相比 10^{-5} s^{-1} 时增加了 33.47%、49.88%、32.90%和 31.56%。在相同应变率的情况下, 均存在 $F_x > F_C > F_z > F_y$, 表明 3D 打印混凝土具有显著的各向异性动态抗压强度。如第 2 节所述, 3D 打印混凝土的动态抗压强度由平行于加载方向的薄弱界面决定, 根据试件切面图(见图 7), x 方向加载面的打印质量最佳, 其初始损伤为均匀分布的小孔, 而 y 和 z 方向存在更长的裂纹缺陷, 且 y 方向的缺陷最为严重。故各向强度呈现出 $F_x > F_z > F_y$ 。

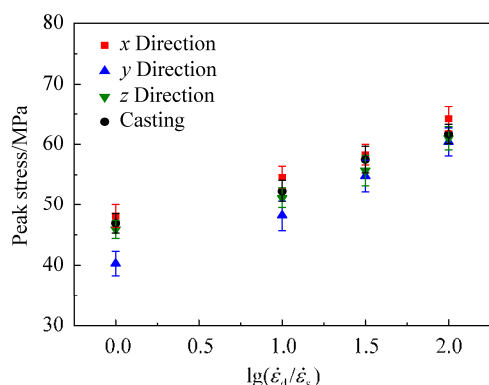


图 6 不同应变率下 3D 打印混凝土的峰值应力

Fig. 6 Peak stress of 3D printed concrete at different strain rates

动力强度增长因子(DIF)通常被用来分析应变

率对混凝土动力强度的影响, 其计算公式为:

$$\text{DIF} = \frac{\sigma_d}{\sigma_s} \quad (2)$$

其中: σ_d 和 σ_s 分别为 3D 打印混凝土的动态和静态抗压强度。

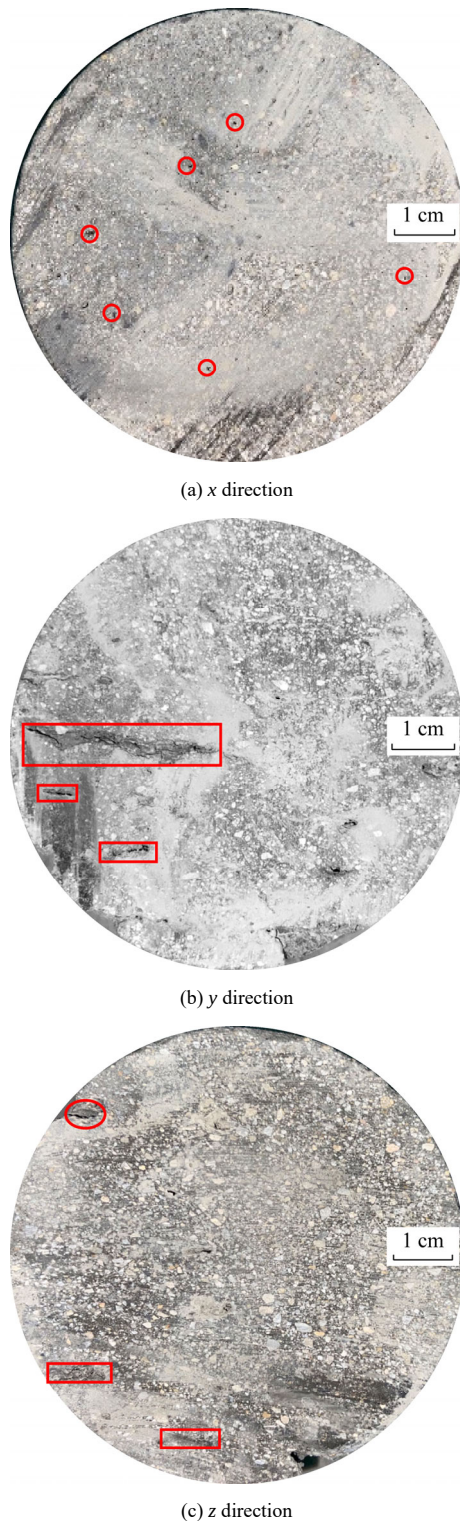


图 7 3D 打印混凝土不同方向切面图

Fig. 7 Sections of 3D printed concrete in different directions

以往研究^[13]认为动力强度增长因子 $\dot{\varepsilon}_d$ 与无量纲应变率 $\dot{\varepsilon}_s$ 比值对数呈线性关系, 相关表达式如式(3)所示。

$$\text{DIF} = a + b \lg(\dot{\varepsilon}_d / \dot{\varepsilon}_s) \quad (3)$$

根据式(3)3D 打印混凝土各方向抗压强度动力增长因子与应变率之间的数学关系如式(4)、式(5)、式(6)和图 8 所示。

$$x \text{ 方向: } \text{DIF} = 1 + 0.15481 \lg(\dot{\varepsilon}_d / \dot{\varepsilon}_s) \quad (4)$$

$$y \text{ 方向: } \text{DIF} = 1 + 0.23945 \lg(\dot{\varepsilon}_d / \dot{\varepsilon}_s) \quad (5)$$

$$z \text{ 方向: } \text{DIF} = 1 + 0.14841 \lg(\dot{\varepsilon}_d / \dot{\varepsilon}_s) \quad (6)$$

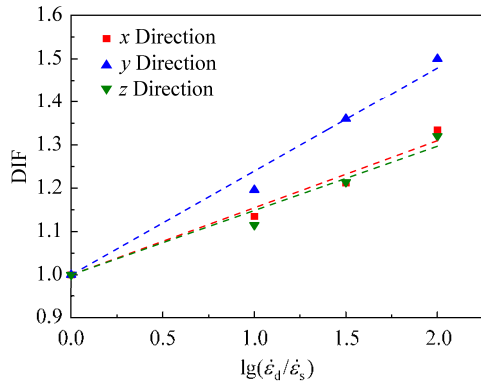


图 8 3D 打印混凝土不同方向 DIF 与应变率的关系

Fig. 8 Relationship between dynamic increasing factor (DIF) and strain rate in different directions of 3D printed concrete

上述各式中参数 b 的比较结果表明, y 方向的抗压强度相比 x 和 z 方向受应变率影响更大。由于不同打印方向的缺陷导致 3D 打印混凝土的各向异性, 混凝土在动力下的强度增长可以解释为缺陷压实度的增加, 正是因为 y 方向缺陷最为严重, 在荷载作用下压实效应最为明显, 因此其动力强度增长因子也就更高, 而 x 方向为均匀短柱, z 方向在重力成型作用下已存在一定程度压实, 故 x 和 z 方向抗压强度受应变率影响更小。

5 变形参数

混凝土的变形参数主要包括 2 个方面: 一是弹性模量, 二是峰值应力对应的峰值应变。通过这 2 个方面的分析, 可以揭示应变率对 3D 打印混凝土变形参数的影响。

5.1 弹性模量

根据相关参考文献^[14], 基于式(7)从 3D 打印混凝土应力-应变曲线中选取弹性模量, 计算了各打印方向在不同应变率下的弹性模量。

$$E = \frac{\sigma_{0.5} - \sigma_0}{\varepsilon_{0.5} - \varepsilon_0} \quad (7)$$

其中: $\sigma_{0.5}$, $\varepsilon_{0.5}$ 对应 50%峰值应力的应力和应变, σ_0 , ε_0 为初始应力和初始应变。

为进一步研究应变率对弹性模量的影响, 类似地采用弹性模量增长因子(α_E)考察应变率与弹性模量的关系, 表达式为:

$$\alpha_E = \frac{E_d}{E_s} \quad (8)$$

其中: E_d 为动荷载下 3D 打印混凝土的弹性模量; E_s 为混凝土在静态荷载下的弹性模量。

图 9 和图 10 分别为不同应变率下的各向弹性模量和应变率对各向弹性模量的影响。 x 、 y 、 z 方向和模具浇筑获得的试件弹性模量分别用 E_x 、 E_y 、 E_z 和 E_c 表示。当应变率为 10^{-5} s^{-1} 时, E_x 、 E_y 、 E_z 、 E_c 分别为 19.06、15.10、15.19 GPa 和 19.63 GPa; 当应变率为 10^{-3} s^{-1} 时, 增长至 22.04、21.22、21.37 GPa 和 21.86 GPa, 相比 10^{-5} s^{-1} 时各自提高了 15.63%、40.53%、40.68%和 13.60%, 即弹性模量的增长与应变率增加趋势相一致。通过数学回归分析获得 3D 打印混凝土各方向弹性模量增长因子与应变率之间的数学关系如式(9)、式(10)、式(11)所示。

$$x \text{ 方向: } \alpha_E = 1 + 0.08759 \lg\left(\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_s}\right) \quad (9)$$

$$y \text{ 方向: } \alpha_E = 1 + 0.15931 \lg\left(\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_s}\right) \quad (10)$$

$$z \text{ 方向: } \alpha_E = 1 + 0.21434 \lg\left(\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_s}\right) \quad (11)$$

层/条间界面是打印混凝土的薄弱区域, 在此区域存在大量的孔隙和缺陷。受压时, 在弹性阶段, 孔隙及缺陷会被压实, 因此其变形和数量对混凝土弹性模量有着较大的影响, 由图 3 可见, z 和 y 方向试件受压时, 垂直于受压方向的界面较多, 静弹性模量较小, 受压实影响, 这 2 个方向弹性模量增长因子对应变率更为敏感。

5.2 峰值应变

随着应变率的提高, x 、 y 、 z 方向的峰值应变分别稳定在 0.002 4、0.002 6 和 0.002 5 附近, 变化范围各自在 4.38%、3.04%和 2.79%内。目前的研究成果中, 应变率影响峰值应变的变化趋势分为 3 类: 随着应变率增加, 峰值应变稳定、增加或减少。本研究结果表明峰值应变是稳定的, 这是由混凝土的特性决定的, 应变率效应与混凝土在变形参数中表

现出的随机性和离散性之间的耦合作用最终导致了峰值应变没有明显的变化。

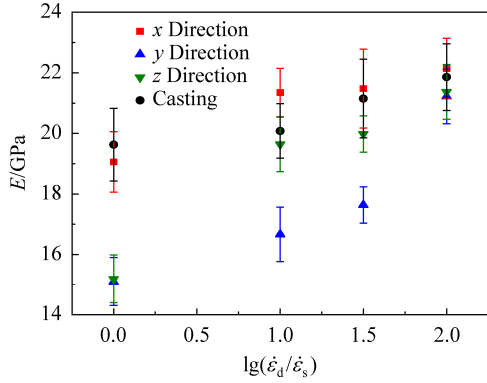


图 9 不同应变率下 3D 打印混凝土的弹性模量

Fig. 9 Elastic modulus of 3D printed concrete under different strain rates

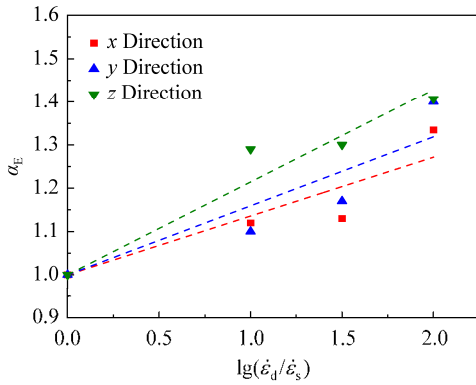


图 10 3D 打印混凝土不同方向 α_E 与应变率的关系

Fig. 10 Relationship between α_E and strain rate in different directions of 3D printed concrete

6 应变率对打印混凝土各向异性的影响

如上所述, 3D 打印混凝土在不同打印方向上的破坏模式、力学性能都大不相同, 表现出显著的各向异性。从图 6 可见: 当应变率从静态(10^{-5} s^{-1})增加到 10^{-3} s^{-1} , 不同方向上抗压强度最大差值 ($F_x - F_y$), 即极差分别为 7.1、6.4、3.5 MPa 和 3.8 MPa, 总体呈减小趋势。为有效量化各向异性这一指标, 王里等^[15]在研究 3D 打印混凝土各向异性力学性能时, 提出一个各向异性指标用于表征打印过程对材料力学性能的影响, 计算方法如下:

$$f_{\text{avg}} = (f_x + f_y + f_z) / 3 \quad (12)$$

$$I_a = \sqrt{(f_x - f_{\text{avg}})^2 + (f_y - f_{\text{avg}})^2 + (f_z - f_{\text{avg}})^2} \quad (13)$$

式中: f_x 、 f_y 、 f_z 为沿 x、y、z 方向加载时的强度; f_{avg} 为 3 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 3 个正交方向强度均值的平均方差。各向异性指数越大, 各向异性越显著。当应变率从静态(10^{-5} s^{-1})增加到 10^{-3} s^{-1} 时, 3D 打印混凝土各向异性指数分别为 5.69、4.53、2.57 和 2.96。将不同应变率下各方向抗压强度极差与各向异性指数绘于图 11, 在 10^{-5} s^{-1} 到 $10^{-3.5} \text{ s}^{-1}$ 内, 3D 打印混凝土的各向异性指数迅速减小, 随着材料在高应变率下缺陷压实程度的增加, 其各个方向材料性质的差异逐渐缩小, 即各向异性逐渐减小。当应变率过高达到 10^{-3} s^{-1} 时, 3D 打印混凝土的各向异性有小幅增加, 其原因可能是材料的压实率存在一定限度, 材料被充分压实以后进一步提高应变率并不能更有效地使其各向性质更加趋同。

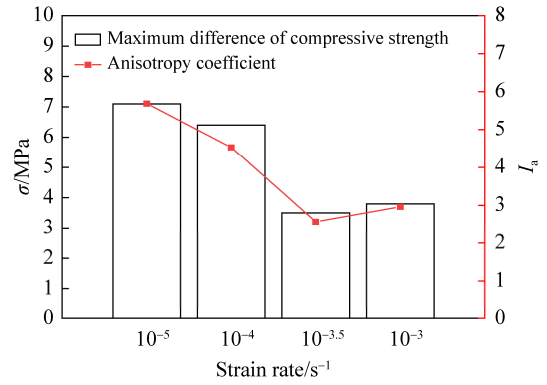


图 11 不同应变率下的 3D 打印混凝土不同方向抗压强度最大差值和各向异性系数

Fig. 11 Maximum difference and anisotropy coefficient of compressive strength in different directions of 3D printed concrete under different strain rates

7 结论

研究了加载应变率分别为 10^{-5} 、 10^{-4} 、 $10^{-3.5} \text{ s}^{-1}$ 和 10^{-3} s^{-1} 下 3D 打印混凝土各方向的动态抗压性能, 得出如下结论:

1) 3D 打印混凝土的破坏总是沿着与加载方向平行的层/条间界面, 即薄弱结合面处发展裂缝, 最终导致试件失效, 当应变率较高时 y 方向会呈现剪切破坏模式。

2) 在动态加载下 3D 打印混凝土各向抗压强度 $F_x > F_c > F_z > F_y$, 各向均有一定的应变率效应, 其中 y 方向抗压强度的应变率效应最为明显。

3) 3D 打印混凝土动力强度增长因子和弹性模量增长因子随应变率比值对数的增大而线性增长, 当加载应变率由 10^{-5} s^{-1} 增长到 10^{-3} s^{-1} 时, 3D 打印混凝土 x、y、z 方向的动力强度相比 10^{-5} s^{-1} 分别增加了 33.47%、49.88%、32.90%, 打印混凝土 x、y、

z 方向的弹性模量相比 10^{-5} s^{-1} 分别增加了 15.63%、40.53%、40.68%，而模筑成型混凝土的动力强度与弹性模量相比 10^{-5} s^{-1} 只增加了 31.56% 和 13.60%。

4) 3D 打印混凝土的初始各向异性显著，随着加载应变率逐渐增加其各向异性系数不断减小，最终趋于稳定，当加载应变率从 10^{-5} s^{-1} 增加到 10^{-3} s^{-1} 时不同方向抗压强度极差由 7.1 MPa 减小到 3.8 MPa、各向异性系数由 5.69 减小到 2.96。

参考文献:

- [1] BUSWELL R A, LEAL DE SILVA W R, JONES S Z, et al. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research[J]. *Cem Concr Res*, 2018, 112: 37–49.
- [2] LOWKE D, DINI E, PERROT A, et al. Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges[J]. *Cem Concr Res*, 2018, 112: 50–65.
- [3] PAOLINI A, KOLLMANNBERGER S, RANK E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods[J]. *Addit Manuf*, 2019, 30: 100894.
- [4] LIU J L, NGUYEN-VAN V, PANDA B, et al. Additive manufacturing of sustainable construction materials and form-finding structures: A review on recent progresses[J]. *3D Print Addit Manuf*, 2022, 9(1): 12–34.
- [5] DELGADO CAMACHO D, CLAYTON P, O'BRIEN W J, et al. Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review[J]. *Autom Constr*, 2018, 89: 110–119.
- [6] WENG Y W, LI M Y, RUAN S Q, et al. Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach[J]. *J Clean Prod*, 2020, 261: 121245.
- [7] DE SCHUTTER G, LESAGE K, MECHTCHERINE V, et al. Vision of 3D printing with concrete—Technical, economic and environmental potentials[J]. *Cem Concr Res*, 2018, 112: 25–36.
- [8] MECHTCHERINE V, NERELLA V N, WILL F, et al. Large-scale digital concrete construction - CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing[J]. *Autom Constr*, 2019, 107: 102933.
- [9] ZHANG Y, ZHANG Y S, SHE W, et al. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2019, 201: 278–285.
- [10] LE T T, AUSTIN S A, LIM S, et al. Hardened properties of high-performance printing concrete[J]. *Cem Concr Res*, 2012, 42(3): 558–566.
- [11] ARUNOTHAYAN A R, NEMATOLLAHI B, RANADE R, et al. Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 257: 119546.
- [12] LIU C, WANG X G, CHEN Y N, et al. Influence of hydroxypropyl methylcellulose and silica fume on stability, rheological properties, and printability of 3D printing foam concrete[J]. *Cem Concr Compos*, 2021, 122: 104158.
- [13] 王海龙, 银文文, 程旭东, 等. 地震应变率下水饱和度对混凝土动力压缩效应的影响[J]. *水利学报*, 2019, 50(2): 225–232.
WANG Hailong, YIN Wenwen, CHENG Xudong, et al. *J Hydraul Eng*, 2019, 50(2): 225–232.
- [14] YU Z P, TANG R, LIU G Q, et al. Experimental study on dynamic performance of plain concrete and lightweight aggregate concrete under uniaxial loading[J]. *J Mater Civ Eng*, 2021, 33(9): 04021217.
- [15] 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. *J Exp Mech*, 2020, 35(2): 243–250.

Effect of Strain Rate on Dynamic Compressive Properties of 3D Printing Concrete

WANG Hailong^{1,2}, TAO Ao^{1,3}, SUN Xiaoyan^{1,4}

(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; 4. Smartcrete Technology (Hangzhou) Co., Ltd, Hangzhou 310058, China)

Extended Abstract

Introduction Compared with conventional construction methods in terms of the building structure, 3D-printing concrete (3DPC) technology has the advantages of formwork-free, low labor costs, and less construction waste. The integration of digital design and automatic construction improves the construction efficiency. 3DPC technology based on extrusion manufacturing is applied in various scenarios such as bridges, landscape sketch, and buildings. However, the stacking-up method also causes some issues like layered appearance, mechanical anisotropy, and high requirements of constructability. At present, the mechanical properties of 3DPC are investigated experimentally, however, the researches on the mechanical properties of 3DPC mainly focus on the static properties of materials, and a few studies involve the dynamic mechanical properties of 3DPC. For concrete structures, they bear static loads, and inevitably face dynamic load (i.e., earthquakes). As a typical dynamic load, the strain rate of concrete under earthquakes ranges from 10^{-4} s^{-1} to 10^{-2} s^{-1} , causing a catastrophic damage to engineering structures. It is essential to understand the dynamic mechanical properties of 3DPC for engineering application. In this paper, the dynamic mechanical properties of 3DPC in three orthogonal directions were investigated by uniaxial compression tests, and the influences of strain rate and different directions on the

compressive strength, elastic modulus, peak strain, and anisotropy of 3DPC were analyzed.

Methods A 42.5 fast hardening early strength sulfoaluminate cement and silica fume were used as cementitious materials. A local river sand was used as a fine aggregate. A polycarboxylate based water reducing agents with a water reducing rate of > 30% and a tartaric acid retarder were used as additives. A water/cement ratio of 3DPC was 0.29. A concrete printing system was applied to print blocks with dimensions of 220 mm×240 mm×400 mm at an extrusion speed of 1 L/min and a printing speed of 30 mm/s. The printed filament had a width of 30 mm and a height of 10 mm. The moving direction of printing nozzle on the horizontal plane is defined as x direction, where y direction is perpendicular to x direction, and z direction is the gravity direction and perpendicular to the x - y plane. After 28-d standard curing, cylinder specimens were obtained via taking cores from three directions of printed block, and then they were cut into ϕ 100 mm×200 mm specimens for compressive strength tests. An electro-hydraulic servo universal testing machine was used to applied dynamic loads. The applied strain rates were 10^{-5} , 10^{-4} , $10^{-3.5}$ s $^{-1}$, and 10^{-3} s $^{-1}$.

Results and discussion When the weak interface is parallel to the loading direction, 3DPC is prone to failure along the interface due to the development of microcracks at the weak interface. At strain rates of 10^{-5} s $^{-1}$ and 10^{-4} s $^{-1}$, vertical cracks develop along the inter-layer and inter-strip interfaces in the y and z directions. When the strain rate increases to $10^{-3.5}$ s $^{-1}$ and 10^{-3} s $^{-1}$, a diagonal crack appear in the y direction, while cracks in the z direction still appear in the inter-strip interfaces. As the strain rate increases, the deformation rate cannot meet the demand for dissipated energy, leading to an increase of damage in the matrix. Therefore, cracks appear in all three directions in the matrix at higher strain rates.

The dynamic peak stress in each direction has a certain degree of strain rate dependence. The dynamic compressive strength in all directions significantly increases as the strain rate increases. The compressive strength in the y direction is more affected by strain rate, compared to that in the x and z directions. At the same strain rate, the compressive strength in the x direction (F_x) is larger than that of cast concrete (F_C) in the z (F_z) and y (F_y) directions, indicating that 3DPC has significant anisotropic dynamic compressive strengths.

During the elastic stage, pores and defects in concrete are compacted. Their deformation and quantity have a significant impact on the elastic modulus of concrete. When the specimens in the z and y directions are compressed, there are more interfaces perpendicular to the compression direction, and the static elastic modulus in these two directions are smaller. As a result, the growth factors of elastic modulus in these two directions are more sensitive to the strain rate. However, as the strain rate increases, the peak strains in the x , y and z directions stabilize at 0.002.

At the strain rates from 10^{-5} s $^{-1}$ to $10^{-3.5}$ s $^{-1}$, the anisotropy index of 3DPC decreases rapidly with the increase of strain rate. Because more defects are compacted at high strain rates, the differences in material properties in various directions decrease gradually, that is, the anisotropy of printed concrete decreases gradually.

Conclusions The failure of 3DPC originated from defects at the layers or strips interface parallel to the loading direction, which was the weak part of the printed concrete. Under dynamic loading, the compressive strength of 3DPC exhibited a strain rate-dependence in all the directions with $F_x > F_C > F_z > F_y$, and the strain rate effect in the y -direction was dominant. The dynamic increasing factors of compressive strength and elastic modulus increased linearly with the logarithm of strain rate ratio. When the loading strain rate increased from 10^{-5} s $^{-1}$ to 10^{-3} s $^{-1}$, the dynamic strengths of 3DPC in the x , y , and z directions were increased by 33.47%, 49.88% and 32.90%, respectively, compared to the strength at a strain rate of 10^{-5} s $^{-1}$. The elastic modulus of printed concrete in the x , y , and z directions was increased by 15.63%, 40.53% and 40.68%, respectively. However, the dynamic strength and elastic modulus of cast concrete were only increased by 31.56% and 13.60%. When the applied strain rate increased from 10^{-5} s $^{-1}$ to 10^{-3} s $^{-1}$, the anisotropy coefficient decreased from 5.69 to 2.96. The anisotropy of 3D printed concrete decreased with the increase of strain rate, but the change range was small at a high strain rate.

Keywords 3D printing; concrete; strain rate; mechanical properties; anisotropy; rate effect