

n 型筋布置方式对 3D 打印混凝土抗弯性能的影响

王振地, 李昕泽, 王 玲

(中国建筑材料科学研究总院有限公司, 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024)

摘 要: 挤出式混凝土 3D 打印技术被认为是最可能实现大型建筑建造的主流工艺, 缺少有效的配筋方法是该技术实用化的主要障碍之一。n 型筋垂直贯入 3D 打印混凝土(3DPC)已被证明是行之有效的纵向配筋方法。为评价 n 型光圆钢筋布局方式对 3DPC 抗弯性能的影响, 定义了钢筋不搭接贯穿度 P_{non} 和搭接贯穿度 P_{ovr} , 制备了 P_{non} 和 P_{ovr} 不同的 8 种试件, 通过三点弯曲加载试验研究了贯穿度对配筋 3DPC 抗弯强度、荷载位移曲线以及断面形貌的影响。结果表明: 不搭接的配筋方式对抗弯强度没有增强效果且破坏模式均为脆性破坏; 当 n 型筋搭接布置时, 3DPC 的抗弯强度随贯穿度增加而增大, 但钢筋的贯穿度对抗弯强度的提升存在一个饱和值。搭接 n 型筋增强 3DPC 的破坏模式为韧性破坏, 并出现了明显的应变硬化特性。通过讨论得到了配筋率、钢筋贯穿度、3DPC 基体抗弯强度对配筋 3DPC 抗弯强度的影响权重, 还对比分析了 n 型筋(不搭接和搭接)、铆钉与短切直筋等 4 种纵向配筋方法对 3DPC 抗弯强度的提升效果, 相关结果对配筋参数和方法的选择具有重要的参考价值 and 指导意义。

关键词: n 型筋; 3D 打印混凝土; 贯穿度; 抗弯性能

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)01-0027-10

网络出版时间: 2024-11-20



挤出式混凝土 3D 打印技术是在计算机控制下将材料挤出并逐层精准堆叠而制造实物的工艺, 具有不需要模板、人工投入少、对设计的限制小以及适宜于建造特殊曲面造型等优点^[1-5]。自 2007 年混凝土 3D 打印技术被首次应用于建筑以来^[6], 近年来在建筑领域获得了飞速发展, 已成为了当前国内外的研究热点。

相比于传统混凝土浇筑工艺, 逐层堆叠工艺使 3D 打印混凝土(3D printed concrete, 3DPC)产生了大量层间界面, 导致 3DPC 弯拉强度低、打印构件整体性差, 制约了混凝土 3D 打印技术的发展和规模化应用。配筋被认为是提高 3D 打印结构抗弯拉性能, 提升结构整体性的最有效措​​施之一。目前国内外也已发展出了纤维增强^[7-9]、横向配筋^[10-11]和纵向配筋^[12-16]等多种增强 3DPC 的方法。采用纤维增强混凝土的抗弯性能在浇筑成型工艺中被证实是有效和经济的^[17], 但对于 3DPC 的研究表明, 纤维在挤出过程中定向分布, 无法穿过层间, 难以真正改善 3DPC 的层间结合性能,

甚至还会降低 3DPC 的抗弯强度和整体性^[18-19]。将钢缆线和钢丝绳^[10-11]等沿着平行打印方向布置的横向配筋方法实现了配筋与打印过程同步, 并已经成功应用于小型房屋的建造^[20], 可有效减少纵向裂纹的产生。但由于横向增强筋不能连接各个打印层, 因而难以提升沿垂直打印方向的抗弯性能。RILEM 水泥基材料数字化制造技术委员会(TC 276-DFC)的前沿进展报告中认为, 本团队在 2018 年首次提出了^[15]包含短切直筋和 n 型筋的纵向配筋增强方法^[16], 在挤出材料的同时, 配筋装置将钢筋加工成短切直筋或 n 型筋, 实现打印与配筋的同步。Perrot 等^[12]的研究证明了纵向短切直筋增强可以有效改善打印材料的抗弯性能。Wang 等^[13]研究了 n 型筋的间距、配筋率等对 3DPC 力学性能的影响, 发现抗拉强度和抗剪强度可分别提高 145%和 220%, 证实了 n 型筋纵向植入可显著增强 3DPC 的力学性能。但目前有关 n 型筋搭接方式及贯穿度对 3DPC 抗弯性能影响的研究尚未见报道。

收稿日期: 2024-06-07。 修订日期: 2024-06-25。

基金项目: 吴中伟青年科技奖项目(ZA-100); 中国建材集团原创技术策源地项目(2021YCJS01-2-1)。

第一作者: 王振地(1984—), 男, 博士, 教授级高级工程师。

Received date: 2024-06-07.

Revised date: 2024-06-25.

First author: WANG Zhendi (1984—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: wzhen di@163.com

为分析 n 型筋连接打印层的数量以及钢筋搭接与否对 3DPC 抗弯性能的影响, 深入揭示 n 型筋的布局对增强效果的提升程度, 探究了 n 型筋的贯穿度及搭接方式对 3DPC 抗弯性能的影响, 结合开裂位移和断面形貌分析了 3DPC 的破坏过程, 并对比讨论了不同配筋方式的增强效果, 以期对 3DPC 配筋增强方案的设计与优化提供参考。

1 实验

1.1 原材料与配合比

采用 P·I 42.5 硅酸盐水泥, 其化学成分及矿物组成结果见表 1, 物理性能见表 2。细骨料选用细度模数 3.4 的天然河砂; 选择表观粘度 198 Pa·s 的羟

丙基甲基纤维素作为增稠剂和细度(80 μm 方孔筛筛余)为 9% 的铝矾土类粉状速凝剂以调整 3DPC 混凝土材料的触变性和建造性; 使用含固量 39% 的聚羧酸系高性能减水剂来调节打印材料的流动性。按照表 3 所示的配合比准确称量原材料并搅拌均匀后配制成 3D 打印用混凝土材料。

用于配筋增强的是定制的直径 2 mm 的 304 不锈钢光圆钢筋, 弯折成如图 1 所示的 n 型筋。n 型筋肩部宽度均为 20 mm, 腿部长度的有 18、36、54、90、162 mm 和 180 mm 6 种规格(见图 1)。

1.2 试件制备方法及贯穿度定义

1.2.1 试件制备 将配制好的 3D 打印混凝土材料装入 3D 打印机喷头上部料斗内, 按照如图 2 所

表 1 P·I 42.5 硅酸盐水泥化学组成及熟料矿物组成

Table 1 Chemical composition of P·I 42.5 cement and mineral composition of its clinker w/%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ Oeq	f-CaO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
20.94	4.31	3.28	63.46	2.76	2.23	0.56	0.80	59.83	16.69	6.41	10.49

表 2 P·I 42.5 硅酸盐水泥物理性能

Table 2 Physical properties of P·I 42.5 cement

Fineness (80 μm sieve)/%	Density/ (g·cm ⁻³)	Specific Surface/ (m ² ·kg ⁻¹)	Water for standard consistency/%	Setting time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/ MPa	
				Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
1.2	3.16	358	26.60	142	206	5.4	8.3	29.7	51.0

表 3 3D 打印混凝土的配合比

Table 3 Mix proportion for 3D printed concrete

Cement	Sand	Water	Superplasticizer	Viscosity enhancing agent	Accelerator
872.3	872.3	261.7	26.2	26.2	52.3

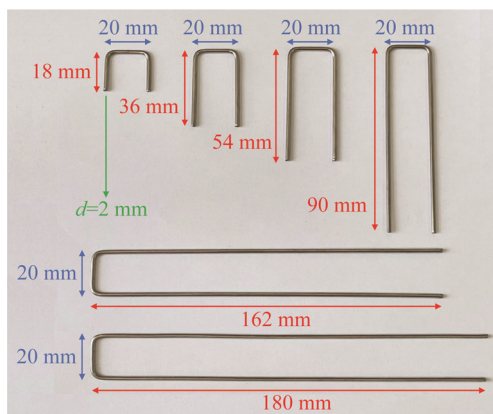


图 1 n 型光圆钢筋

Fig. 1 n-shaped plain round steel bar

示的路径进行打印。沿逆时针方向打印 2 个宽度为 20 mm 的条带后, 打印头在起点处提升 18 mm 并继续打印下一层。为保证定位的准确性, 采用手动配筋, 具体步骤如下: 先在需要配筋的打印层暂停打印, 把自制的钢筋定位器置于试件正上方(见图 3), 用直径 1 mm 的细针穿过定位孔在打印层上扎出两排

定位坑; 再移开定位器, 将指定规格的 n 型筋在定位坑处垂直插入基体中, 以保证 n 型筋间距为 20 mm, 完成该打印层的配筋; 然后继续打印混凝土覆盖 n 型筋。重复以上步骤直至打印 10 层混凝土, 最终完成 n 型筋增强 3D 打印混凝土试件的打印工作。对于不配筋的试件, 按照图 2 所示路径, 连续打印 10 层即完成试件制备。

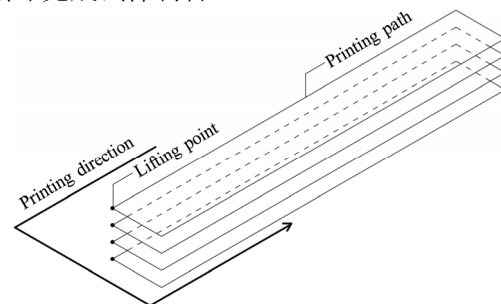


图 2 试件的打印路径

Fig. 2 Printing path of specimen

图 4a 为打印完成尺寸为 40 mm×200 mm×180 mm 的长方体试件。在室内环境放置 24 h 后,

按照图 3b 和图 4a 所示的虚线位置切割成尺寸为 40 mm×40 mm×180 mm 的长方体试件(见图 4b), 然后将切割好的试件放入标准养护室养护。

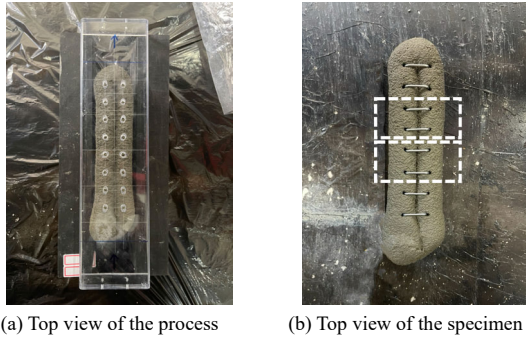


图 3 手动配筋方法

Fig. 3 Manual reinforcing method

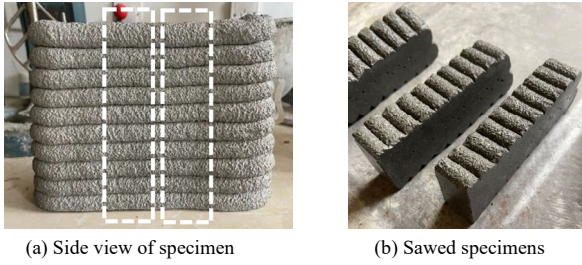


图 4 试件的切割示意图

Fig. 4 Schematic diagram of specimens' sawing

1.2.2 贯穿程度定义 为评价钢筋布局对 3DPC 抗弯性能的影响, 将 n 型钢钢筋贯穿层数 L_p 与总打印层数 L_t 之比定义为贯穿度 P 。如图 5 中 XZ 平面所示的钢筋之间没有重合部分, 这种相互之间不搭接、仅上一个 n 型钢钢筋底端与下一个 n 型钢钢筋肩部接触配筋情况下的贯穿度记为 P_{non} 。如图 6 中 XZ 平面所示的钢筋之间有重合部分, 这种相互搭接配筋条件下的贯穿度记为 P_{ovr} 。为保证试件之间可对比性, 无论是否搭接, 需满足在纵向方向上钢筋周期排列且整体插入基体, 并且搭接钢筋间没有空隙, 即 P_{non} 和

P_{ovr} 满足式(1)和式(2)的约束关系。

$$P_{non} = \frac{L_p}{L_t}, P_{non} \in [0, 1], \frac{L_t}{L_p} \in \text{Integer} \quad (1)$$

$$P_{ovr} = \frac{L_p}{L_t}, P_{ovr} \in [0, 1], \begin{cases} L_p = 2, \text{ when } L_p \text{ is even number} \\ \frac{L_t}{L_p + 1} \in \text{Integer and } \frac{L_t - 1}{L_p} \in \text{Integer}, \\ \text{when } L_p \text{ is odd number} \end{cases} \quad (2)$$

研究了符合式(1)和(2)要求的 8 种 n 型钢钢筋分布, 对应的贯穿度分别是:

1) 无配筋时 $P=0$ 。

2) 不搭接条件下(见图 5): n 型钢钢筋贯穿 1 个打印层时, $P_{non}=0.1$; n 型钢钢筋贯穿 2 个打印层时, $P_{non}=0.2$; n 型钢钢筋贯穿 5 个打印层时, $P_{non}=0.5$; n 型钢钢筋完全贯穿 10 个打印层时 $P_{non}=1.0$ 。

3) 搭接条件下(见图 6): n 型钢钢筋贯穿 2 个打印层时, $P_{ovr}=0.2$; n 型钢钢筋贯穿 3 个打印层时, $P_{ovr}=0.3$; n 型钢钢筋贯穿 9 个打印层时, $P_{ovr}=0.9$ 。

1.3 力学性能测试

试件在标准养护室中养护 28 d 后取出, 使用 CMT-300 型万能压力试验机对试件进行三点弯曲试验以测试配筋 3DPC 的抗弯性能。如图 7 所示, 试件支座的跨距为 160 mm, 采用跨中位移控制方式进行加载, 加载速率为 0.01 mm/min。配筋 3DPC 抗折强度 f_t (MPa)按式(3)计算, 其中: F 为试件的开裂荷载(N); l 为支座间跨距(mm), 取 160 mm; b 为试件截面宽度(mm), 取 4 mm; h 为试件截面高度(mm), 取 4 mm。每组共测试 3 个试件取平均值得到该组的抗弯强度。

$$f_t = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (3)$$

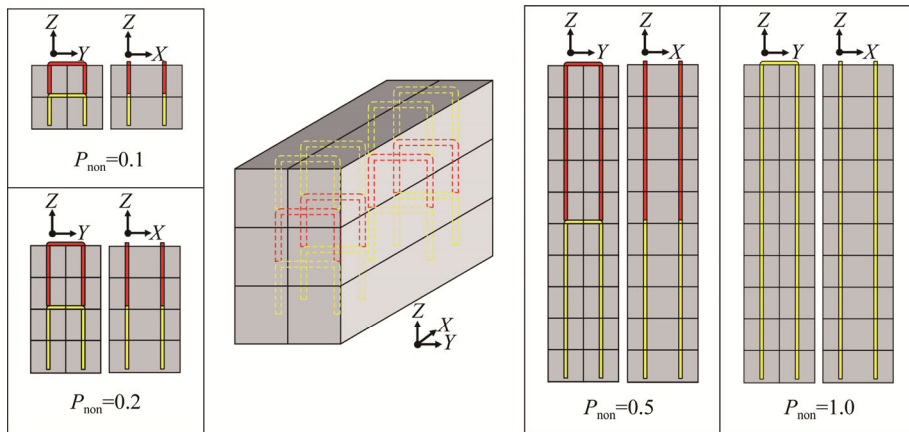


图 5 不搭接条件下配筋示意图

Fig. 5 Schematic diagram of reinforcing bar under nonoverlapped condition

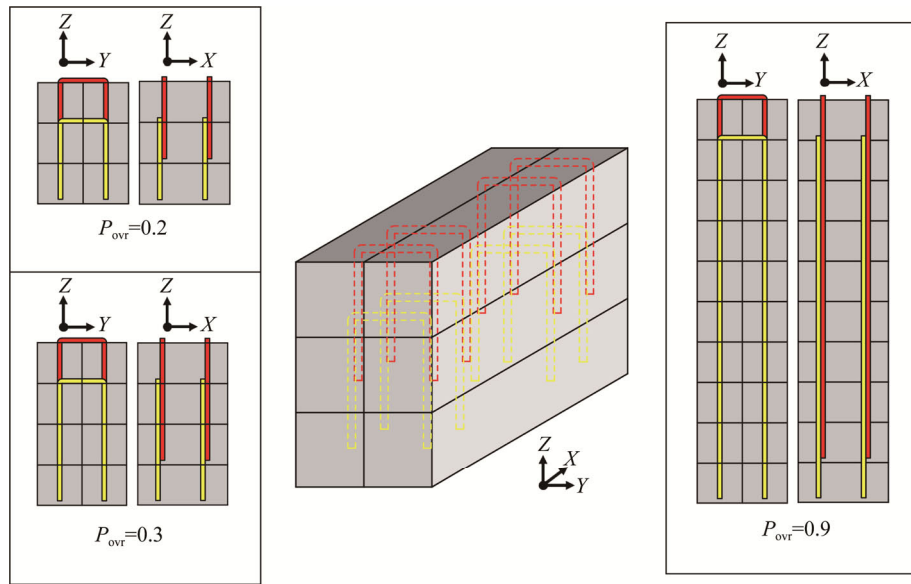


图6 搭接条件下配筋示意图

Fig. 6 Schematic diagram of reinforcing bar under overlapped condition

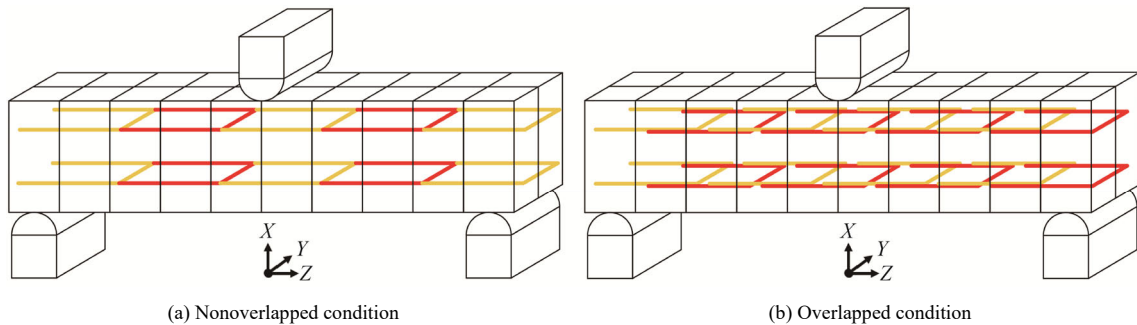


图7 三点弯曲试验示意图

Fig. 7 Schematic diagram of three-point bending test

2 结果与分析

2.1 不搭接条件下贯穿度对抗弯性能的影响

图8为不搭接条件下n型筋贯穿度对抗弯性能的影响。由图8可见,当不配筋时($P_{\text{non}}=0$),试件的抗弯强度为5.57 MPa,而当 $P_{\text{non}}=0.1$ 时,抗弯强度下降至2.58 MPa,可见n型筋的加入不仅未能增强3DPC,还大幅降低了3DPC的抗弯强度。这主要是由于n型筋仅贯穿一层,而在层间界面处,下一个n型筋的肩部与上一个n型筋的底端并未产生有效连接,虽然进行了配筋,但层间界面的薄弱结合并没有改善。当n型筋连接2个打印层以上时,随贯穿度的增加,配筋3DPC的抗弯强度逐渐增大,但在 $P_{\text{non}} \leq 0.5$ 前,抗弯强度仍小于不配筋3DPC的抗弯强度,这也是由于n型筋肩部和底端在界面处形成的缺陷导致的。当 $P_{\text{non}}=1.0$ 时,抗弯强度最大达到5.88 MPa,与不配筋3DPC相比,仅略高0.31 MPa,并没有出现期望中的大幅度提升抗弯强度的结果,

这可能主要是由于配筋率低,钢筋参与抗弯工作的程度不高导致的。从以上分析可以发现,在不搭接条件下,n型筋在界面处没有有效连接,n型筋几乎没有增强效果。

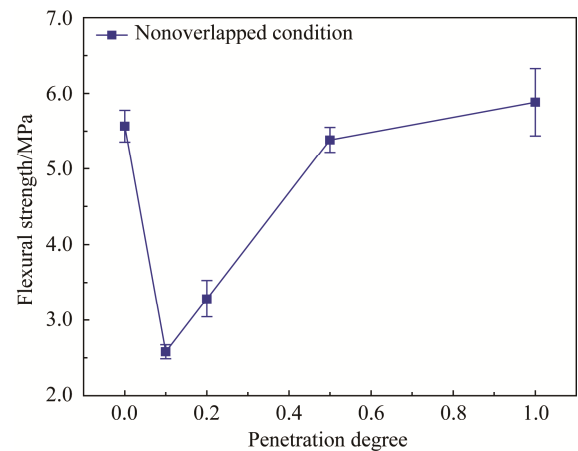


图8 不搭接条件下不同贯穿度n型筋增强试件的抗弯强度
Fig. 8 Flexural strength of specimens reinforced with nonoverlapped n shaped bar under different penetration degrees

2.2 不搭接条件下配筋试件的荷载-位移曲线

图 9 为不搭接条件下配筋 3DPC 的荷载-位移曲线。由图 9 可见, 当 $P_{\text{non}}=0$ 时, 无配筋 3DPC 的荷载-位移曲线呈现出 2 阶段: 第 1 阶段荷载随位移的增加而增大, 荷载与试件的位移成正比, 证明此阶段是弹性段; 第 2 阶段是当达到最大荷载后, 随位移增加荷载急剧下降, 试件已经破坏, 且没有明显的屈服阶段, 呈现为明显的脆性破坏。无配筋 3DPC 与浇筑成型的普通素混凝土典型荷载-位移曲线特征是一致的。

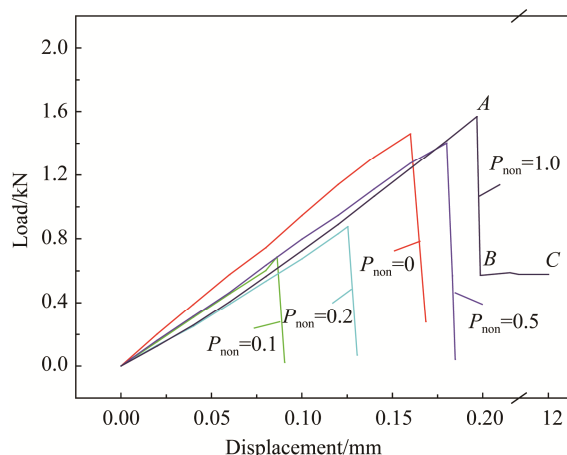


图 9 不搭接条件下不同贯穿度 n 型筋增强试件的荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of specimens reinforced with n shaped bar of different penetration degrees under nonoverlapped condition

当 $0.1 \leq P_{\text{non}} \leq 0.5$ 时, 荷载-位移曲线的表现行为与无配筋 3DPC 基本一致, 呈现出 2 阶段特征, 且均为脆性破坏。荷载-位移曲线围成的面积代表材料受力变形时的能量密度。通常情况下, 材料的荷载-位移曲线围成的面积越大, 说明该材料可塑性或韧性越强。值得注意的是, 当 $0.1 \leq P_{\text{non}} \leq 0.5$ 时, 荷载-位移曲线围成的面积均不大于 $P_{\text{non}}=0$ 时的荷载-位移曲线围成的面积。因此, 在 $P_{\text{non}} \leq 0.5$ 时, 配筋 3DPC 的韧性均不大于不配筋试件, 即这种形式的配筋不仅没有增韧 3DPC, 还降低了韧性。

当 $P_{\text{non}}=1.0$ 时, 荷载-位移曲线除了出现弹性段和破坏段 2 阶段, 还出现了 BC 屈服段, 试样的伸

长量急剧地增加, 荷载却在很小范围内波动。这显示了贯穿的 n 型筋参与了工作, 钢筋被拔出过程中需要外界做功, 但产生的抗力很小, 因而仍不足以改变试件整体的脆性破坏模式。

2.3 不搭接条件下试件的断面形貌与开裂位移

图 10 为不搭接条件下配筋 3DPC 的断面形貌。由图 10a 可见, 3DPC 沿层间界面断裂整齐, 2 个已分离的块体均保持了完整状态, 界面上没有发现粘结和剥落。这表明 3DPC 的层间结合强度低于基体的抗拉强度, 在弯拉应力作用下, 试件从界面处破坏, 且裂纹不会侵入基体。

由图 10b~图 10d 可见, 3 种不同贯穿度下, 3DPC 断面中均清晰可见 n 型筋完整肩部和底端(白色亮点), 在 $P_{\text{non}}=0.2$ 和 $P_{\text{non}}=0.5$ 时, 还发现了 n 型筋肩部与上一打印层脱粘而形成的完整光滑凹痕。这证明了在层间界面处下一个 n 型筋的肩部与上一个 n 型筋的底端未有效连接, n 型筋肩部与底端在界面处形成了缺陷并加剧了层间结合的薄弱, 在断裂时首先从这个最薄弱处脱开且保持了完整的光滑凹痕。

当 n 型筋完全贯穿时, 3DPC 的破坏模式发生了变化, 从图 10e 可以看出, 试件破坏后未完全分离, 裂缝张开口有一定的位移, 钢筋仍能够将 2 个分离的试样块连接在一起。这表明 n 型筋在试件断裂后参与了工作, 外界做功使得裂缝开口扩大, 这也解释了荷载-位移曲线中出现的 BC 段。

通过断裂形貌结合荷载-位移曲线分析可以判定, 在不搭接条件下, n 型筋增强的破坏模式属于脆性破坏, n 型筋对 3DPC 几乎没有增强和增韧作用。

图 11 为不搭接条件下试件的开裂位移。由图 11 可见, 在脆性破坏模式下, 试件的开裂位移仍有明显差异。不配筋时试件开裂位移为 0.17 mm, 只有当 $P_{\text{non}}=0.5$ 时开裂位移才与不配筋 3DPC 相当, 当 $P_{\text{non}}=1.0$ 时稍高于不配筋 3DPC, 这与前面的断裂形貌结果的分析是一致的, 也即是不搭接条件下, n 型筋肩部与底端在界面处形成了缺陷, 因而配筋试件的脆性更大, 韧性更低。

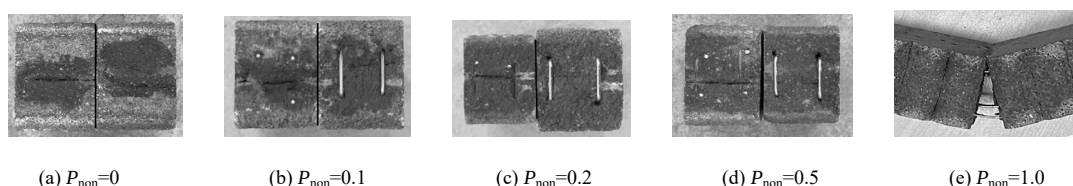


图 10 不搭接条件下不同贯穿度 n 型筋增强试件的断面形貌

Fig. 10 Section morphology of specimens reinforced with n shaped bar of different penetration under nonoverlapped condition

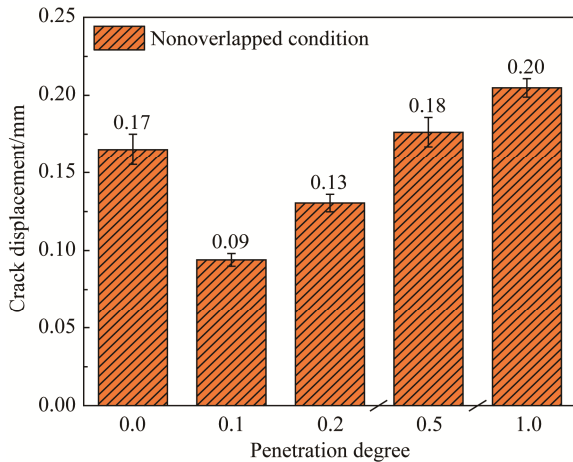


图 11 不搭接条件下不同贯穿度 n 型筋增强试件的开裂位移
Fig. 11 Crack displacement of specimens reinforced with n shaped bar of different penetration under nonoverlapped condition

2.4 搭接条件下贯穿度对抗弯性能的影响

图 12 为搭接条件下钢筋贯穿度对抗弯性能的影响。由图 12 可见，与不配筋的 $P_{\text{ovr}}=0$ 相比，当 $P_{\text{ovr}}=0.2$ 时，抗弯强度显著增大，提高比例为 100%。随贯穿度增加，当 $P_{\text{ovr}}=0.3$ 时，抗弯强度提高了 128%，在 $P_{\text{ovr}}=0.9$ 时抗弯强度提高了 152%。这表明了搭接条件下，配筋 3DPC 的抗弯强度随着 n 型筋贯穿度的增加而逐渐增大，但贯穿度对抗弯强度的提升率并不是线性增大的，钢筋贯穿度对抗弯强度的提升存在一个饱和值，即是抗弯强度增加率随着贯穿度的增大而逐渐减小。考虑到 $P_{\text{ovr}}=0.9$ 时钢筋还差一层就完全贯穿基体，与浇筑的钢筋增强混凝土配筋方式基本无异。而 3DPC 配筋的难度就在于钢筋会阻碍打印头移动，纵向筋难以像传统浇筑钢筋混凝土一样完全贯穿，因此 $P_{\text{ovr}}=0.9$ 的配筋方式既不经

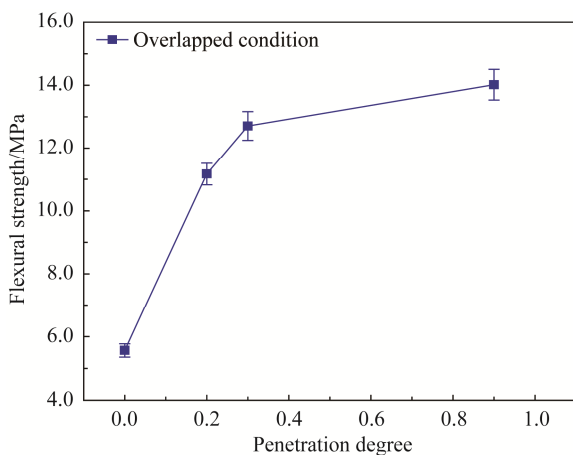


图 12 搭接条件下不同贯穿度 n 型筋增强试件的抗弯强度
Fig. 12 Flexural strength of specimens reinforced with n shaped bar of different penetration under overlapped condition

济又难以实现，工程中并不实用。考虑到贯穿度与抗弯强度增加率的关系，在实际工程中应该存在一个最经济的钢筋贯穿度，这时既能降低配筋难度，又能大幅度增强增韧 3DPC。

2.5 搭接条件下配筋试件的荷载-位移曲线

图 13 为搭接条件下配筋 3DPC 的荷载-位移曲线。由图 13 可见，当 $P=0$ 时，无配筋 3DPC 的荷载-位移曲线表现为脆性破坏。当 $P_{\text{ovr}}=0.2$ 时，配筋 3DPC 的弹性段明显延长，弹性极限荷载显著升高，达到了 $P_{\text{ovr}}=0$ 时的 2 倍；随后荷载超过弹性极限后继续加载，出现了荷载下降，而位移不断增加的现象，这表明配筋 3DPC 试件发生了塑性变形，产生了屈服现象；越过屈服阶段后，荷载随位移的增加而继续增大并超过了弹性极限荷载，即 3DPC 出现了应变硬化现象，证明配筋 3DPC 具有带裂缝工作的能力；当达到应变硬化段的最高点时，就达到了 3DPC 的强度极限，它代表了配筋 3DPC 所能承受的最大荷载；越过强度极限后，位移增加而荷载不断下降直至试件断裂。类似地，随着贯穿度 P_{ovr} 的增加，当 $P_{\text{ovr}}=0.3$ 时，表现为弹性极限荷载增大，荷载-位移曲线围成的面积增加，这证明配筋 3DPC 的韧性不断得到加强。值得注意的是，当 $P_{\text{ovr}}=0.9$ 时，应变硬化段具有最大的刚度，在相同的变形下，配筋 3DPC 比其他条件下能够抵抗更高的荷载。由此可见，搭接条件下配筋 3DPC 主要表现为韧性破坏，并出现了明显的应变硬化特性。

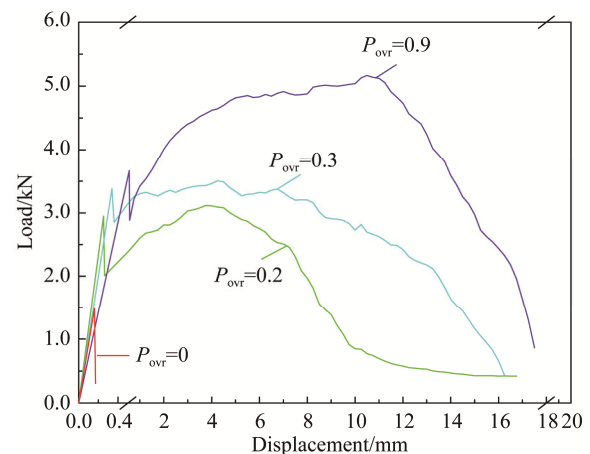


图 13 搭接条件下不同贯穿度 n 型筋增强试件的荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of specimens reinforced with n shaped bar of different penetration degrees under overlapped condition

2.6 搭接条件下试件的断面形貌与开裂位移

图 14 为搭接条件下配筋 3DPC 的断面形貌。从图 14a 可以看出，3DPC 沿层间界面断裂整齐，表

明 3DPC 的层间结合强度低于基体的抗拉强度。从图 14b 可以看出, 当 $P_{\text{ovr}}=0.2$ 时, 试件破坏后并未完全分离, 受拉区混凝土裂缝张开非常明显, n 型筋被明显拔出。从图 14c 可见, 当 $P_{\text{ovr}}=0.3$ 时, 有钢筋被完全拔出, 且受压区混凝土出现了裂缝, 即受压区混凝土已经破坏, 这与钢筋混凝土的适筋破坏特征一致。从图 14d 可见, 当 $P_{\text{ovr}}=0.9$ 时, 试件受拉区产生了明显的裂缝, 部分 n 型筋已经被完全拔出, 受压区也发生了破坏, 结合荷载-位移曲线, 可以判断配筋 3DPC 小梁的挠度大, 破坏前有明显

的先兆, 也表现出适筋破坏的特征。

图 15 为搭接条件下试件的开裂位移。从图中可以看出, 不配筋时试件开裂位移为 0.17 mm, 随着贯穿度的增加, 开裂位移不断增大。结合破坏模式的分析可知, 这主要是由于钢筋参与了工作, 外界需要做功才能将钢筋拔出, 因此 n 型筋的贯穿度越高, 试件的开裂位移越大。这与荷载-位移曲线以及断面形貌的观察结果相一致, 也即是相互搭接的 n 型筋提高了 3DPC 的抗弯强度和韧性, 搭接条件下配筋试件的抗弯强度和韧性随贯穿度的增大而增加。

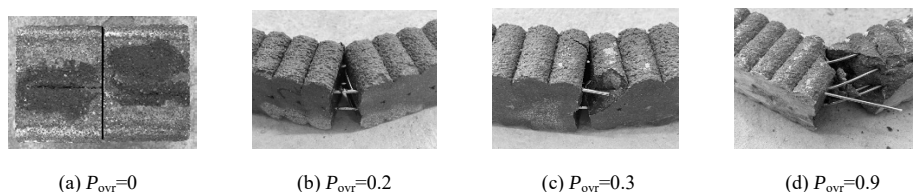


图 14 搭接条件下不同贯穿度 n 型筋增强试件的断面形貌

Fig. 14 Section morphology of specimens reinforced with n shaped bar of different penetration degrees under overlapped condition

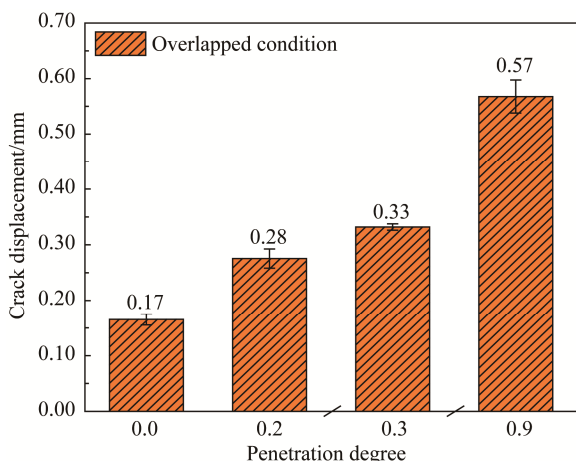


图 15 搭接条件下不同贯穿度 n 型筋增强试件的开裂位移

Fig. 15 Crack displacement of specimens reinforced with n shaped bar of different penetration degrees under overlapped condition

3 讨论

3.1 配筋 3DPC 抗弯强度的影响权重分析

目前缺乏成熟而高效的配筋方法仍然是阻碍

3DPC 技术落地应用的主要原因之一。已发展出的纤维增强、横向和纵向等多种配筋方法虽然各具特点, 但我们认为纵向配筋能够真正连接打印层, 切实增强 3D 打印混凝土最薄弱的层间结合性能, 提升整体性, 因而具有重要的研究价值和应用潜力。

作为纵向配筋的方法之一, n 型筋增强 3DPC 已被证明是有效的^[13]。为分析贯穿度(P)等因素对配筋增强效果的影响, 选取搭接与不搭接条件下 n 型筋的 2 种经济配筋方案($P_{\text{non}}=0.5$ 和 $P_{\text{ovr}}=0.3$), 并从文献中选择了 2 种代表性的纵向配筋方法: 铆钉配筋增强^[14](图 16a)和短切直筋配筋增强^[12](图 16b)。分析 3D 打印混凝土基体抗弯强度(f_{t0})、钢筋的贯穿度(P)和配筋率(ρ)3 个因素对配筋 3D 打印混凝土抗弯强度的影响权重。本工作和文献中的 f_{t0} 、 P 和 ρ 3 个因素的统计见表 4, 其中, 表 4 中的铆钉和短切直筋配筋的贯穿度和配筋率均是通过文献实验条件计算得到。

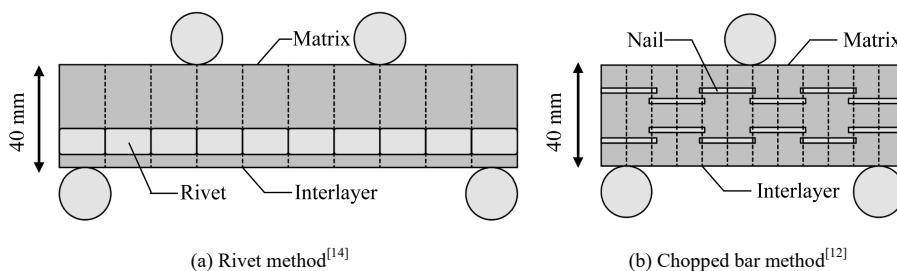


图 16 铆钉的配筋示意图和短切直筋的配筋示意图

Fig. 16 Schematic diagram of specimens reinforced with rivet and chopped bar

图 17 是基于灰熵系统理论^[21–22]依据表 4 数据计算得到的 f_{i0} 、 P 和 ρ 对配筋 3D 打印混凝土抗弯强度的影响权重 $R(f_{i0})$ 、 $R(P)$ 和 $R(\rho)$ (计算过程见附录 A)。可以看出, f_{i0} 、 P 和 ρ 与配筋 3D 打印混凝土抗弯强度均很强的相关性。具体地, 3 种因素对配筋 3D 打印混凝土抗弯强度(f_i)的影响程度大小依次为: 3DPC 基体抗弯强度(f_{i0}), 钢筋的贯穿度(P), 配筋率(ρ), 基体抗弯强度(f_i)对配筋 3DPC 抗弯强度的影响最为显著。

表 4 影响抗弯强度的 3 种因素

Table 4 Three main factors affecting flexural strength

Sample	f_{i0}/MPa	P	$\rho/\%$	f_i/MPa
n shaped bar ($P_{\text{non}}=0.5$)	5.57	0.50	0.79	5.38
n shaped bar($P_{\text{ovr}}=0.3$)	5.57	0.30	1.57	12.71
Rivet ^[14]	3.16	0.11	14.18	12.66
Chopped bar ^[12]	13.13	0.17	0.64	16.34

f_{i0} is matrix flexural strength of reinforced 3DPC; f_i is flexural strength of reinforced 3DPC; P is penetration degree; ρ reinforcing ratio.

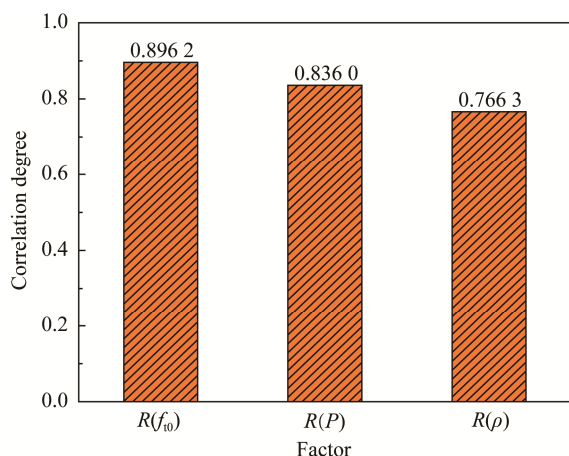


图 17 3 种影响因素与配筋打印试件抗弯强度的关联度
Fig. 17 Correlation degree between three main factors and flexural strength of reinforced printed specimens

3.2 不同纵向配筋方法等效抗弯强度的对比

在分析影响权重的基础上, 为评价本工作的 2 种配筋形式与铆钉配筋^[14]和短切直筋配筋^[12]方法的优劣, 将各参数进行归一化处理后使其处于同一数量级和同一单位, 转化为等效抗弯强度进行综合对比。将各序列值 x_i 占所在参考序列的比重定义为比例因子, 其中, $X(f_{i0})$ 、 $X(P)$ 和 $X(\rho)$ 分别为 3DPC 基体强度、贯穿度、配筋率的比例因子。利用本工作提出的等效抗弯强度计算公式(4)来评价配筋方法的优劣(计算过程见附录 B)。如图 18 所示, 仅考虑抗弯强度的前提下, 以配筋率(ρ)、钢筋的贯穿度(P)和 3D 打印混凝土基体抗弯强度(f_{i0}) 3 因素为基础数据, 4 种配筋方法对配筋 3DPC 抗弯强度(f_i)的

增强效果为: 短切直筋>n 型筋(搭接)>铆钉>n 型筋(不搭接)。其中, 短切直筋和 n 型筋(搭接)具有基本相同的增强效果, 等效抗弯强度分别达到了 27.74 MPa 和 26.25 MPa, 在实际工程中可以根据现场情况和经济性选择相应的配筋方式。

$$f_t^e = f_t \cdot [X(f_{i0}) \cdot R(f_{i0}) + X(P) \cdot R(P) + X(\rho) \cdot R(\rho)]^{-1} \quad (4)$$

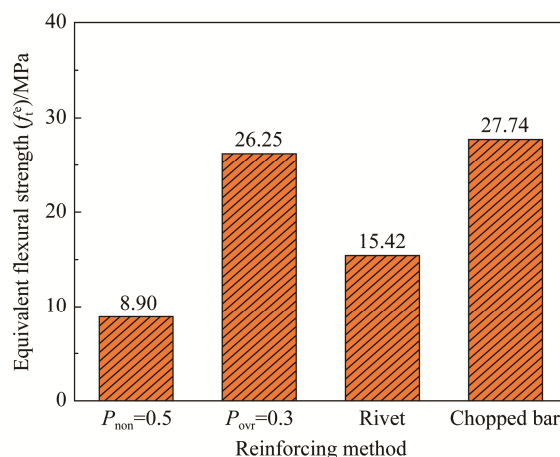


图 18 等效抗弯强度

Fig. 18 Equivalent flexural strength

4 结论

1) 当 n 型筋以不搭接形式布置时, 会增大 n 型筋肩部和底端搭接处的界面缺陷, 对试件抗弯强度没有增强作用, 且配筋 3D 打印混凝土均表现出脆性破坏。

2) 当 n 型筋以搭接形式布置时, 配筋 3D 打印混凝土抗弯强度随钢筋贯穿度增加而增大, 但贯穿度对抗弯强度的提升存在一个饱和值, 实际工程中存在一个最经济的贯穿度。搭接条件下 n 型筋增强 3D 打印混凝土的破坏模式为韧性破坏, 并出现了应变硬化特征。

3) 依据灰熵系统理论, 配筋 3D 打印混凝土抗弯强度(f_i)的影响权重为: 3D 打印混凝土基体抗弯强度(f_{i0})>钢筋贯穿度(P)>配筋率(ρ)。仅考虑对抗弯强度提升效果的条件下, 在现有纵向配筋方法中, 短切直筋和搭接 n 型筋的增强效果优于铆钉和不搭接 n 型筋, 在打印工程中可酌情选用合适的配筋方法。

补充材料

本文的电子补充材料见网络版(<https://link.cnki.net/urlid/11.2310.tq.20241119.0006.003>)。

参考文献:

- [1] 冯鹏, 张汉青, 孟鑫森, 等. 3D 打印技术在工程建设中的应用及前景[J]. 工业建筑, 2019, 49(12): 154–165, 194.
FENG Peng, ZHANG Hanqing, MENG Xinmiao, et al. Ind Constr, 2019, 49(12): 154–165, 194.
- [2] 蔡建国, 张骞, 杜彩霞, 等. 3D 打印混凝土技术的研究现状与发展趋势[J]. 工业建筑, 2021, 51(6): 1–8.
CAI Jianguo, ZHANG Qian, DU Caixia, et al. Ind Constr, 2021, 51(6): 1–8.
- [3] 张云升, 陈逸东, 刘诚. 含粗骨料 3D 打印混凝土可打印、力学、收缩性能与碳排放分析[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(9): 2153–2165.
ZHANG Yunsheng, CHEN Yidong, LIU Cheng. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(9): 2153–2165.
- [4] 张翼, 朱艳梅, 任强, 等. 膨润土对 3D 打印砂浆可打印性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2): 420–428.
ZHANG Yi, ZHU Yanmei, REN Qiang, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(2): 420–428.
- [5] 冯攀, 刘钊龙, 邵丽静, 等. 原位聚合对 3D 打印砂浆力学性能的影响及机理[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(5): 1093–1103.
FENG Pan, LIU Zhaolong, SHAO Lijing, et al. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(5): 1093–1103.
- [6] KHOSHNEVIS B, RUSSELL R, KWON H, et al. Crafting large prototypes[J]. IEEE Robot Autom Mag, 2001, 8(3): 33–42.
- [7] DING T, XIAO J, ZOU S, et al. Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers[J]. Compos Struct, 2020, 254: 112808.
- [8] HAMBACH M, VOLKMER D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste[J]. Cem and Concr Compos, 2017, 79: 62–70.
- [9] NEMATOLLAHI B, VIJAY P, SANJAYAN J, et al. Effect of polypropylene fibre addition on properties of geopolymers made by 3D printing for digital construction[J]. Materials, 2018, 11(12): 2532.
- [10] BOS F, AHMED Z, JUTINOV E, et al. Experimental exploration of metal cable as reinforcement in 3D printed concrete[J]. Materials, 2017, 11(10): 1314.
- [11] LIM J H, PANDA B, PHAM Q-C. Improving flexural characteristics of 3D printed geopolymer composites with in-process steel cable reinforcement[J]. Constr Build Mater, 2018, 178: 32–41.
- [12] PERROT A, JACQUET Y, RANGEARD D, et al. Nailing of layers: A promising way to reinforce concrete 3D printing structures[J]. Materials, 2020, 13(7): 1518.
- [13] WANG L, MA G, LIU T, et al. Interlayer reinforcement of 3D printed concrete by the in-process deposition of U-nails[J]. Cem Concr Res, 2021, 148: 106535.
- [14] BESTER F, KRUGER J, ZIJL G V. Rivet reinforcement for concrete printing[J]. Addit Manuf, 2023, 67: 103490.
- [15] ROUSSEL N, LOWKE D. Digital Fabrication with Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 276-DFC[M]. Switzerland: Springer, 2022: 159–160.
- [16] 王振地, 王玲, 赵霞. 基于 3D 打印制备建筑结构的设备及方法[P]. CN patent. CN109531771B. 2018–12–07.
WANG Zhendi, WANG Ling, ZHAO Xia. Device and method for preparing building structure based on 3D printing[P]. CN patent. CN109531771B. 2018–12–07.
- [17] 李春蕊, 王学志, 李根, 等. 纤维混凝土梁研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(4): 1255–1265.
LI Chunrui, WANG Xuezhi, LI Gen, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2018, 37(4): 1255–1265.
- [18] 刘致远, 王振地, 王玲, 等. 3D 打印水泥净浆层间拉伸强度及层间剪切强度[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5): 648–652.
LIU Zhiyuan, WANG Zhendi, WANG Ling, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(5): 648–652.
- [19] YANG R, ZHU Y, LAN Y, et al. Differences in micro grain/fiber distributions between matrix and interlayer of cementitious filaments affected by extrusion molding[J]. Addit Manuf, 2022, 60: 103236.
- [20] MECHTCHERINE V, BUSWELL R, KLOFT H, et al. Integrating reinforcement in digital fabrication with concrete: A review and classification framework[J]. Cem Concr Compos, 2021, 119: 103964.
- [21] DENG J. Control problems of grey systems[J]. Syst Control Lett, 1982, 1: 288–294.
- [22] 董瑞鑫, 申向东, 薛慧君, 等. 风积沙混凝土的气泡参数对其强度的影响[J]. 材料导报, 2022, 36(12): 105–109.
DONG Ruixin, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, et al. Mater Rep(in Chinese), 2022, 36(12): 105–109.

Effect of Layout of n-Shaped Bar on Flexural Properties of 3D Printed Concrete

WANG Zhendi, LI Xinze, WANG Ling

(China Building Materials Academy, State Key Laboratory of Green Building Materials, Beijing 100024)

Extended Abstract

Introduction Compared with the conventional moulded concrete process, the layer-by-layer stacking process produces a large number of interlayer interfaces in 3D printed concrete (*i.e.*, 3DPC), leading to a low flexural and tensile strength of 3DPC and a poor structural integrity of 3D printed concrete structure, which restricts the development and large-scale application of concrete 3D printing technology. Reinforcement is considered as one of the most effective measures to improve the flexural and tensile properties of 3D printed structures and enhance the structural integrity. Various reinforcement techniques for 3DPC, such as fiber reinforcement and transverse reinforcement, are developed, but all of them fail to effectively reinforce the interlayers. A longitudinal reinforcing approach involving short-cut straight and n-shaped bars was firstly proposed in 2018, and some work showed that longitudinal reinforcing method of n-shaped bar could enhance the mechanical properties of 3DPC.

In this paper, the influences of the penetration degree of the n-shaped bars and the overlapping conditions on the flexural

properties of 3DPC were investigated, and the damage process of 3DPC was analyzed *via* crack displacement and section morphology. The different reinforcing methods were compared.

Methods Portland cement P-I 42.5 according to Chinese standard and natural river sand with a fineness modulus of 3.4 as a fine aggregate were used. Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) with an apparent viscosity of 198 Pa·s was selected as a viscosity enhancing agent and a bauxite-based powdered accelerator with a fineness (80 μm square-hole sieve residue) of 9% was used to adjust the thixotropy and buildability of 3DPC. A polycarboxylic acid-based high-performance superplasticizer with a solid content of 39% was used to adjust the flowability of the printed materials. In this work, a ratio of the layer number penetrated by n-shaped bar (L_p) to the total layer number (L_t) was defined as a penetration degree (P) including overlapped penetration degree P_{ovr} and nonoverlapped penetration degree P_{non} . Eight types of n-shaped bar layouts that meet the constraint requirements of the formula were investigated.

To ensure the accuracy of the n-shaped bar overlapping and positioning, a manual reinforcing method was used to accurately locate and reinforce the n-shaped bars. This process was repeated for ten layers of concrete, resulting in the completion of 3DPC specimens reinforced by n-shaped bars. For the unreinforced specimens, the preparation was completed *via* directly printing ten layers in a row.

After printing, the specimens with the sizes of 40 mm×200 mm×180 mm were placed in an indoor environment for 24 h and then transferred to a standard curing room for 28 d. In the curing period, the specimens underwent a three-point bending test using a CMT-300 universal pressure testing machine. The span between the specimen supports was 160 mm, and the loading was controlled using mid-span displacement mode at a loading speed of 0.01 mm/min. The flexural strength of each group with three specimens was obtained *via* calculating the average value.

Results and discussion When $P_{\text{non}}=0.1$, the addition of n-shaped bars fails to strengthen the 3DPC, and reduces the flexural strength of 3DPC. When $P_{\text{non}}=1.0$, the maximum flexural strength reaches 5.88 MPa, which is only slightly greater than that of the unreinforced 3DPC. Under the condition of nonoverlapped, the n-shaped bar is not effectively connected at the interface, and the n-bar has little enhanced effect.

$P_{\text{ovr}}=0$, Compared to the unreinforced 3DPC as $P_{\text{ovr}}=0$, the flexural strength of reinforced 3DPC increases when $P_{\text{ovr}}=0.2$, with an increase of 100%. As the penetration degree increases, the flexural strength increases by 128% when $P_{\text{ovr}}=0.3$ and by 152% when $P_{\text{ovr}}=0.9$. The flexural strength is highly improved by an overlapped n-shaped bar. The damage mode of overlapped n-shaped bar is mainly a ductile failure with obvious strain hardening characteristics.

The influence weights of f_0 , P and ρ of flexural strength of reinforced 3DPC are 0.896 2, 0.836 0 and 0.766 3, respectively. Based on the analysis of these influence weights, the advantages and disadvantages of the two reinforcement methods, *i.e.*, the rivet method and chopped bar method, are evaluated. To ensure a fair comparison, each parameter is normalized to the same order of magnitude and unit, and transformed into equivalent flexural strength. The chopped bar and n-shaped bar (overlapped) methods both have the similar reinforcing effects, with equivalent flexural strengths of 27.74 MPa and 26.25 MPa, respectively, based on the proposed equivalent flexural strength formula.

Conclusions The interface defects at the shoulder and bottom of the n-shaped bar were increased when the n-shaped bar was nonoverlapped, having little effect on the flexural strength. All the reinforced 3DPC exhibited a brittle damage. When the n-bar was overlapped, the flexural strength of reinforced 3DPC increased with the penetration degree, but there was a saturation value for the reinforcement of flexural strength by penetration degree, and there was a most economical penetration degree in the actual project. The damage mode of 3DPC reinforced by n-shaped bar under overlapped condition was a ductile failure with strain hardening characteristics. Based on the gray entropy system theory, the flexural strength of reinforced 3DPC (f_i) of the influence weight was obtained in a decreasing order, *i.e.*, matrix flexural strength (f_0)>penetration degree (P)>reinforcing ratio (ρ). To improve the flexural strength of current longitudinal reinforcement methods, the chopped bar and overlapped n-shaped bar were proven to be more effective rather than the rivet and nonoverlapped n-shaped bar techniques. It was essential to carefully choose an appropriate reinforcing method corresponding to the specific requirements of the printing project.

Keywords n-shaped bar; 3D printed concrete; penetration degree; flexural property