

3D 打印全再生粗骨料混凝土各向异性力学性能研究

段珍华¹, 吕振源¹, 肖建庄¹, 李 垒¹, 刘 春^{2,3}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 广东省公路建设有限公司, 广东 广州 510623;

3. 广深新塘立交改造项目管理处, 广东 广州 510765)

摘要: 选用粒径 4.75~10mm 的粗骨料, 制备成天然粗骨料混凝土和再生粗骨料混凝土, 对比分析了作为 3D 打印油墨的可打印性, 并探讨了不同养护条件对 3D 打印混凝土硬化后各向异性力学性能的影响。试验结果表明, 相较于天然粗骨料, 全再生粗骨料有助于加速打印油墨由流动性向塑性转化; 通过配合比调整, 打印油墨在静置 10min 后仍能维持可打印性, 连续打印下的可工作时间增至 20min; 相较于标准养护, 自然养护 7d 的天然及再生打印试样 X 方向的抗压强度降低分别为 19.84% 及 20.13%; 抗压强度关系为 X 轴(打印方向) > Z 轴(叠层方向) > Y 轴(传动轴方向), 标准养护 28d 天然及再生打印试样 Y 轴抗压强度分别为 X 轴的 83.41% 与 84.27%, 表现出明显的各向异性。最后, 从细观角度阐释了骨料类型及 3D 打印层间性能对各向异性的形成机理。

关键词: 3D 打印混凝土; 全再生粗骨料; 可打印性; 各向异性; 养护条件

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Study on Anisotropic Mechanical Properties of 3D Printed Concrete with Full Recycled Coarse Aggregate

DUAN Zhenhua¹, LÜ Zhenyuan¹, XIAO Jianzhuang¹, LI Lei¹, LIU Chun^{2,3}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Guangdong Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou 510623, China; 3. Guangshen Xintang Interchange Reconstruction Project Management Office, Guangzhou 510765, China)

Abstract: Nature coarse aggregate (NCA) and recycled coarse aggregate (RCA) concrete were prepared using coarse aggregates with particle sizes ranged from 4.75mm-10 mm, and their printability as a 3D printing ink was

comparatively evaluated. The effects of different curing conditions on the anisotropic mechanical properties of 3D printed concrete after hardening were also explored. The experimental results show that compared with NCA, the full replacement of RCA can accelerate the loss of workability of the printing ink. Through the scientific regulation of the mix ratio, the printable ink can still maintain printability after 10 min of resting, which can be increased to 20 min under continuous printing. Compared to standard curing, the 7d strength loss of natural and recycled specimens under natural curing is 19.84% and 20.13%, respectively. The relationship between the anisotropic compressive strengths was X-axis (print direction) > Z-axis (stacking direction) > Y-axis (drive shaft direction, vertical X-axis). The Y-axis compressive strengths of the natural and recycled printed specimens were 83.41% and 84.27% of the X-axis, showed significant anisotropy at 28d of standard curing. Finally, the formation mechanism of anisotropy by aggregate type and 3D printing interlayer properties was elucidated from the micro viewpoint.

Keywords: 3D printing; full recycled coarse aggregates; printability; anisotropic; maintenance conditions

作为 3D 打印混凝土材料的探索热点之一, 当前针对 3D 打印水泥基材料研究多聚焦细骨料层面的 3D 打印砂浆^[1-2]。尽管 3D 打印砂浆具备良好的可打印性、均质性及可建造性, 能够满足建筑构件及低层结构建造的需求, 但其在应用中的缺陷也愈加凸显。一方面, 建筑 3D 打印工艺与传统工艺存在显著差异, 粗骨料的骨架作用缺失及较高的胶凝材料用量

收稿日期: 2022-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(52178244, 52078358)

第一作者: 段珍华, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要从事建筑固废资源化及智能建造领域。

E-mail: zhduan@tongji.edu.cn

通信作者: 肖建庄, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要从事建筑固废资源化及智能建造领域。

E-mail: jzx@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

导致 3D 打印砂浆收缩及微裂缝延展程度较高^[3];另一方面,打印砂浆配比设计下砂率较高,胶凝材料用量大,建造成本及碳排放总量较高^[4-5]。因此将粗骨料掺入制备 3D 打印油墨,是解决砂浆现存问题的重要途径之一。

3D 打印建筑在实际工程应用中大多暴露在自然环境条件下,其性能发展会受环境温度及湿度影响。其中温度条件对 3D 打印混凝土的力学性能发展影响更为显著,一方面,混凝土表面水分会受到高温作用由液相转变为气相,随干缩进程导致混凝土开裂;另一方面,混凝土表面水分的缺失导致混凝土内非结合水受浓度梯度作用向外迁移,削弱水泥熟料矿物与水反应放热效能。已有研究表明,再生粗骨料(RCA)的高吸水率和吸水速率特性有助于加速打印油墨由流动性向塑性转化,减少混凝土挤出后塑性状态持续时间,进而提升打印混凝土可建造性,且孔隙水能够参与二次水化,有利于水泥熟料充分水化^[6-7]。合理的粗骨料掺量可以增强打印层间结合力,提高力学强度,减少 3DPCC 的各向异性力学性能^[8]。胶凝材料与粗骨料比例的降低虽然能够提高最大打印高度和力学性能,但削弱了叠层结构的形状稳定性^[9],不利于叠层方向硬化后力学性能发展。再生粗骨料掺入下的打印混凝土的抗压强度和抗折强度具有明显的各向异性特征,且均普遍随取代率的增加而下降;龄期越短,总体上下降幅度越大^[10]。此外,再生材料的使用还可以降低天然砂石及水泥用量,实现 3D 打印混凝土的低碳及经济性价值^[11-12]。

本文在前期 3D 打印细石商品混凝土研究的基

础上,考虑再生粗骨料(RCA)的高吸水率与吸水速率特征,采用粒径为 4.75~10mm 的 100%RCA 取代天然粗骨料(NCA)制备打印油墨,对比分析两种混凝土油墨的可打印性,同时重点评估了自然养护相对于标准养护对 3D 打印油墨硬化后各向异性力学性能的影响。本文结论将为 3D 打印全再生粗骨料混凝土的实际工程应用以及废弃混凝土的高品质资源化提供新思路。

1 原材料与配合比

1.1 胶凝材料及外加剂

胶凝材料包括 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥、F 类 II 级粉煤灰及 SF90 硅灰,化学成分列于表 1。硅灰的选用是为了更好地填充水泥颗粒间孔隙,提升打印油墨的保水能力并降低摩擦阻力。为实现打印油墨对可打印性、可建造性及可挤出性的需求,添加了增稠剂、缓凝剂及减水剂等外加剂,增稠剂选用纤维素醚(黏度为 2×10^5 Pa·s),缓凝剂选用葡萄糖酸钠(工业级),超塑化剂选用聚羧酸类减水剂,减水效率为 25%。

1.2 骨料

天然细骨料(NFA)选用细度模数为 2.14 的天然河砂。粗骨料的粒径均为 10mm,分别选用 NCA 和上海某废弃混凝土资源化厂的 RCA。其中 RCA 颗粒形貌粗糙且不规则,参照《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)进行测试属于 III 类再生粗骨料。本文所用粗、细骨料基本性能见表 2,骨料粒径分布见图 1。

表 1 胶凝材料化学成分

Tab. 1 The chemical parameters of cementitious materials

组份/%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	杂质
水泥	21.1	4.3	2.5	65.9	0.1	1.5	2.3	0.1	0.5	0	1.7
粉煤灰	54.6	32.1	7.4	5.0	—	—	—	—	—	—	0.9
硅灰	52.8	—	—	46.7	—	—	—	—	—	—	0.5

表 2 粗、细骨料的基本性能

Tab. 2 Performance of coarse and fine aggregate used in this study

骨料类型	粒径/mm	表观密度/(kg·m ⁻³)	压碎值/%	吸水率/%	含水率/%	含泥量/%	细度模数
RCA	4.75~10	2 634	18.70	7.91	3.96	1.00	—
NCA	4.75~10	2 864	11.20	0.70	0.46	0.11	—
NFA	0.15~4.75	2 597	—	3.44	2.62	—	2.14

1.3 打印油墨配合比设计

基于前期油墨试配,采用 100%RCA 等体积取代 NCA,对比设计了天然粗骨料混凝土(NAC)和再生粗骨料混凝土(RAC)两种油墨材料,配合比如表 3 所示。骨料按照饱和面干表观密度计算,考虑

RCA 的高吸水率特性,根据实际含水率添加相应的附加水以确保相同的有效水灰比。设计 18 个尺寸为 100mm×100mm×100mm 的标准抗压试样及 12 个尺寸为 100mm×100mm×400mm 的标准抗折试样,对比分析打印试样不同方向受力特性。

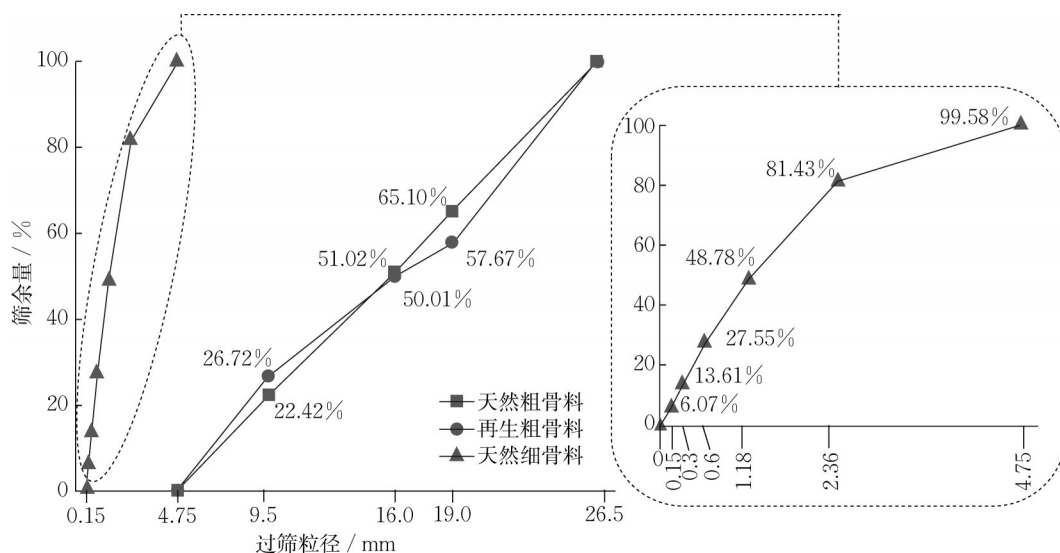


图1 试验用粗、细骨料粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of coarse and fine aggregates for the test

表3 打印油墨的配合比

Tab. 3 Mix proportions of printed materials used in this study

组份	NCA	RCA	NFA	水泥	粉煤灰	硅灰	拌合水	附加水	增稠剂	缓凝剂	减水剂
NAC/(kg m^{-3})	588	—	870	444	96.6	41.4	210	—	1.11	0.11	0.53
RAC/(kg m^{-3})	—	541	870	444	96.6	41.4	210	21.37	1.11	0.11	0.67

1.4 打印参数与取样方法

混凝土3D打印机基于编程代码控制打印头移动路径、移动速度和挤出速度。其中,打印头喷嘴直径为100mm,移动路径设置为原点复位形式,即每层移动600mm至代码运行结束后返回原点,提拉40mm高度后开展叠层打印;移动速度设置为 $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$;挤出速度设置为 $785\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。力学测定试样均为混凝土切割机取样,取样方式如图2所示。其中,抗压试样测定X轴(打印头移动路径)、Y轴(传动路径,与X轴方向垂直)及Z轴(提升路径)方向,抗折试样测定Y及Z轴方向。

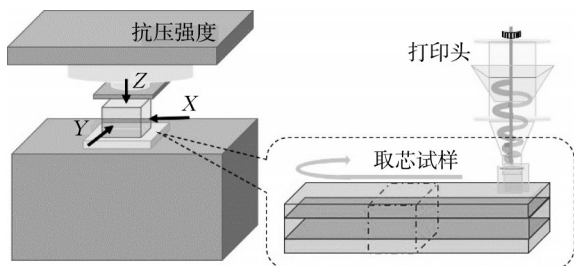


图2 混凝土打印形式及取芯示意

Fig. 2 Schematic representation of concrete printing form and coring

2 试验方案

2.1 打印油墨的搅拌流程

针对NAC的打印油墨制备,首先将NCA与NFA加入至强制搅拌机内干拌2min,再加入其余组份(包括各种胶凝材料和外加剂)继续搅拌5min。针对RAC的打印油墨制备有所不同,包含骨料预饱水和二次搅拌两个阶段。首先,将RCA,计算附加水及一半拌合水加入至强制搅拌机内搅拌3min,再加入其余组份二次搅拌5min。其中,增稠剂及缓凝剂为一次加入,减水剂分两次加入。这主要是考虑RCA附着砂浆的疏松多孔特性可能会吸附部分减水剂及拌合水,影响实际有效水胶比与混凝土水化进程。

2.2 混凝土油墨可打印性

通过前期打印预研分析,坍落度参数控制在 $110\pm 10\text{mm}$ 时,新拌混凝土油墨挤出后打印条带具备最佳变形稳定性,实测屈服应力和塑性黏度分别介于 $238.72\sim 265.41\text{MPa}$ 和 $24.16\sim 21.35\text{Pa}\cdot\text{s}$,证明了具有良好的可打印性^[9]。RAC打印条带至3层(标定高度120mm)时底层宽度由100mm增至102mm,高度为120mm,侧向变形率仅2%。打印条带增至8层(标定高度320mm)时底层宽度由100mm

增至106.4mm,高度为312mm,侧向体积变形率为6.4%,纵向变形率为2.5%。标定高度的下降是由于打印条带侧向变形,且打印层间经上层挤压更加密实,层间空隙被填实导致上层油墨高度缺失。

2.3 考虑不同养护条件的3D打印混凝土各向异性力学性能

3D打印混凝土的各向异性力学性能包括7d和28d抗压及抗折强度。参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2016),采用电子万能伺服压力机进行测试,加载速度分别设定为 $0.5\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.05\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。养护条件包括标准养护(温度 $T=20\pm 1^\circ\text{C}$,相对湿度 $R_H=95\%$)和自然养护,自然养护温湿度条件及动态监测方式见图3、4。

2.4 3D打印混凝土微观界面表征

通过混凝土切割机获取打印混凝土试样骨料界

面及层间样本,尺寸为 $10\text{mm}\times 10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 。试样切割后采用软毛刷去除切割面粉尘,放置真空烘干箱 105°C 烘干24h至恒重状态。放置扫描电镜前需经喷金及样本抽真空处理,骨料观测界面为切割截面,打印层间观测界面为原始未切割截面,分别测得其SEM表征数据并分析。

3 试验结果与讨论

3.1 骨料类型对混凝土油墨可打印性能的影响

通过试验对比测试间隔为5min下两种油墨打印后静置30min时的坍落度。如表4所示,在相同减水剂掺入下,RAC油墨的坍落度经时损失更为显著,能够更快地由流动性转变为塑性状态。NAC油墨具备较好流动性,初始坍落度达110mm;与初始

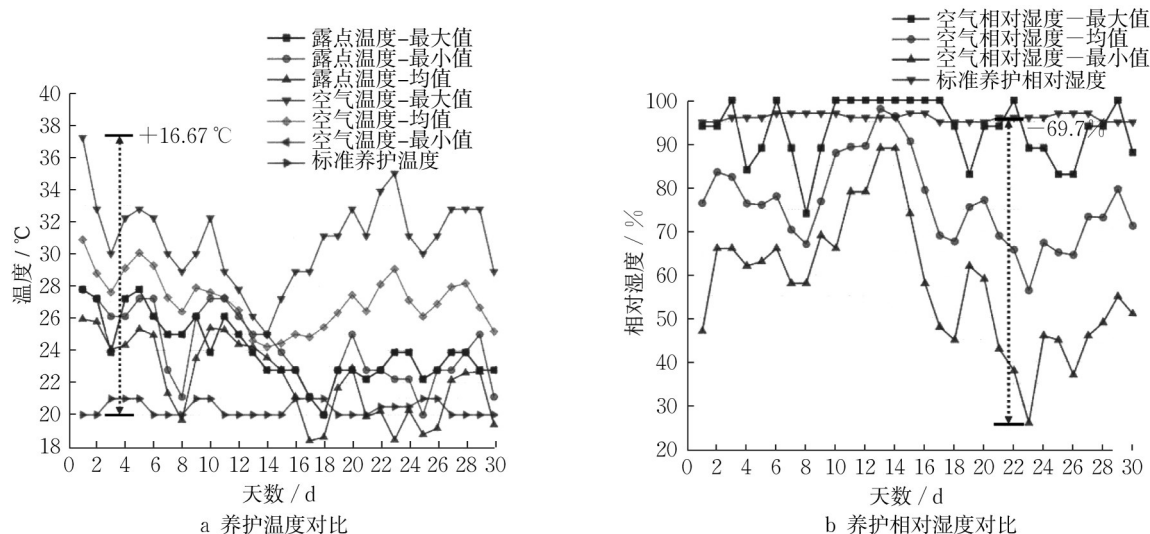


图3 不同养护方式温湿度条件对比

Fig. 3 Comparison of temperature-humidity parameters under different maintenance conditions

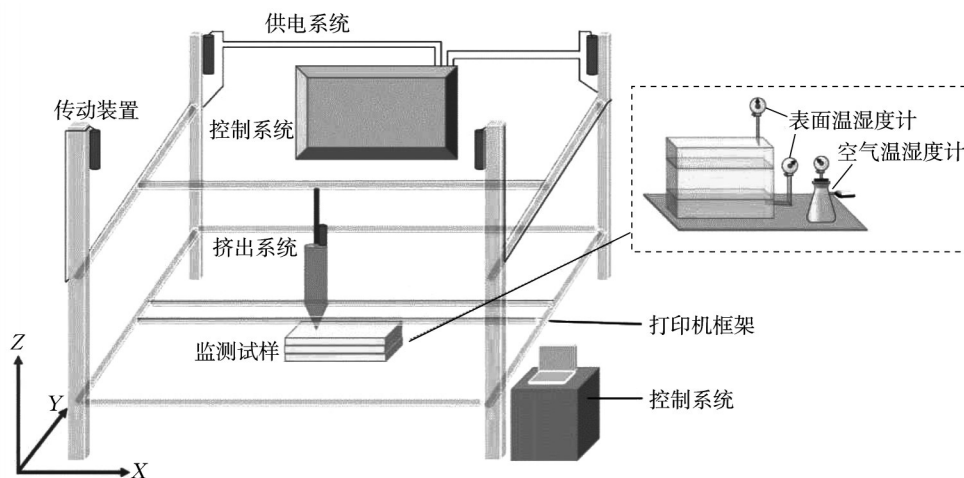


图4 试样动态监测示意

Fig. 4 Schematic representation of the dynamic monitoring

坍落度相比, 10min时坍落度仍保持 92 mm, 这表明经过一段时间后 NAC 油墨仍具有良好塑性状态流动性。这会导致其初始打印底层条带侧向变形较大, 塑性状态下变形稳定性不佳, 不利于建筑尺寸精度控制。与 NAC 油墨相比, RAC 油墨初始坍落度明显降低。这是由于 RCA 较高的吸水率降低了油墨流动性, 增强了初始可建造性, 使印刷条带的体积变形得到有效控制, 打印 10min 时底层条带具备更好承载能力, 有利于提升结构整体打印效率。

表 4 油墨状态及其坍落度经时损失

Tab. 4 Slump loss over time for concrete inks

试样	塑性阶段				干硬性阶段		
	0	5min	10min	15min	20min	25min	30min
NAC/mm	110	100	92	84	61	46	23
RAC/mm	115	93	80	68	45	22	13

减水剂比例为减水剂用量与水泥重量比值。

研究发现, 每组试样的可打印性都受到骨料类型的显著影响。NAC 打印油墨的连续打印状态稳定, 底层条带被上层重量挤压变形。随着层数的增加, 底层高度减少至结构侧倾。RAC 打印油墨的良好连续打印状态随时间增长而下降, RCA 粗糙形貌及高吸水率特性使打印条带流动性损失加快, 打印层间摩擦力随流动性损失增大, 层间机械咬合力减小了连续层打印相对位移, 提升了挤出后油墨整体变形稳定性; RCA 较 NCA 较低的表现密度降低了上层打印条带自重, 减少下层打印条带荷载, 随着下层油墨由塑性状态转变为干硬性状态, 底层打印油墨体积变形减小。

3.2 养护条件对打印混凝土力学性能的影响

自然养护主要通过环境温度和湿度条件变化影响混凝土水化过程。如图 3a 所示, 28d 养护期内平均温度主要在 23.89℃和 30.56℃间波动, 与标准养护温度 20±1℃相比, 自然养护条件下温度更高且波动大。自然温度最高可达 36.67℃, 这对混凝土保水性不利, 混凝土内水分挥发削弱混凝土水化程度, 导致微裂缝产生及混凝土干燥收缩程度加剧。此外, 固化阶段内露点温度(气体分子含量达到饱和状态自然温度, 低于此温度时水分从自然中析出并凝结成水滴)绝大部分低于最低自然温度, 这导致混凝土无法通过从空气中析出水分参与水化, 因此, 自然养护下的温度条件会显著降低混凝土性能发展。在 28d 的养护过程中, 空气平均湿度主要在 55%~97% 之间波动, 与图 3b 所示的 95% 的标准养护湿度相比较。高温时自然养护条件空气湿度仅为 25% 导

致水分从混凝土内部传输至表面, 削弱混凝土内水化作用。

对比测定 3D 打印混凝土标准抗压及抗折强度, 考虑骨料类型(NCA 和 RCA)、养护条件(标准养护和自然养护)及养护时间(7d 和 28d)对力学性能的影响。试验结果表明 NAC 与 RAC 组在标准养护条件下的试件强度均值均高于自然养护条件, NCA 在标准养护条件下力学性能提升较 RCA 更显著。如图 5 所示, 7d NAC 试样组在标准养护抗压强度为 30.8MPa, 自然养护下抗压强度(24.3MPa)损失约为前者 19.84%; 28d 抗压强度发展至 46.9MPa, 约为自然养护下抗压强度(37.6MPa)的 1.25 倍, 而 RAC 打印试样组在标准养护条件下 7d 抗压强度为 17.4MPa, 自然养护下再生打印油墨标准立方体 7 天抗压强度损失约为前者 20.13%, 养护 7d RAC 打印试样组与 NAC 打印试样组力学性能差距由标准养护下的 7.5MPa 减至自然养护下的 6.08MPa。此外, 自然养护条件下测得 RAC 打印试样性能离散更高, 这可能是持续水化进程下自然养护温、湿度条件的影响, 附着砂浆孔隙内非结合水从混凝土内传输至外部环境, 导致了混凝土内二次水化提升作用的随机发展。

3.3 骨料类别对 3D 打印混凝土各向异性力学性能影响

打印层间作为影响混凝土各向异性性能的关键参数, 其基于不同粗骨料油墨 X、Y、Z 轴抗压强度关系均为 X 轴>Z 轴>Y 轴, NAC 及 RAC 试样 28d Y 轴抗压强度分别为 X 轴的 83.41% 与 84.27%; Z 轴抗压强度分别为 X 轴的 88.61% 与 81.52%。如图 6 所示, 对比分析发现 X 轴早期各向异性性能明显降低, 这说明 RCA 的取代对 X 轴方向力学性能影响最为明显, 而 Y 轴及 Z 轴受骨料品质影响有限。这可能是由于 Y 轴及 Z 轴方向层较差的层间性能在骨料未承受较大应力状态下率先破坏。与各向异性抗压试件的表现不同, 3D 打印 NAC 和 RAC 试件抗折强度关系均为 Y 轴>Z 轴如图 7 所示。在水化进程未受影响状态下各向异性抗折强度主要受层间性能制约, NAC 组试样优于 RAC 组试样主要由骨料性能差异决定; 水化进程受环境温湿度影响, RCA 附着砂浆孔隙水受梯度影响发生传输作用, 能够促进混凝土内二次水化作用, 缩小再生试样与天然试样间性能差距。需要强调的是 NCA 具备较高的强度, 但自然养护环境下打印试样的不充分水化导致其强度优势难以充分发挥。

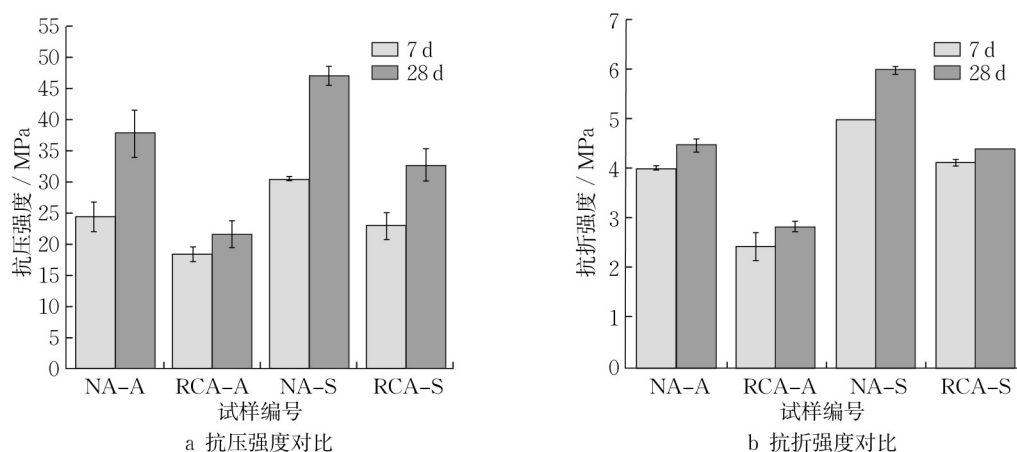


图5 不同养护方式浇筑试样强度对比

Fig. 5 Comparison of mechanical properties under different maintenance conditions

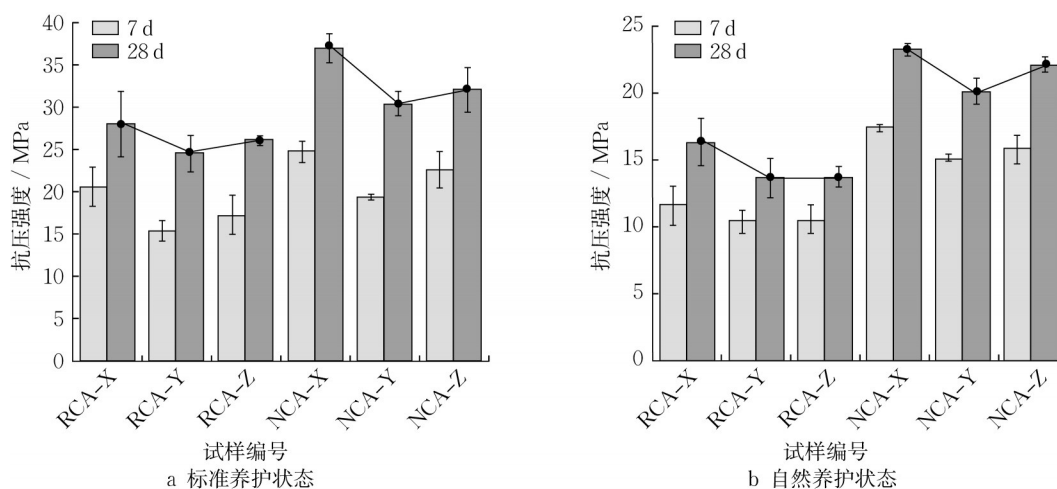


图6 不同养护方式3D打印试样各向异性抗压强度对比

Fig. 6 Comparison of anisotropic compressive strength of 3DPC with different maintenance conditions

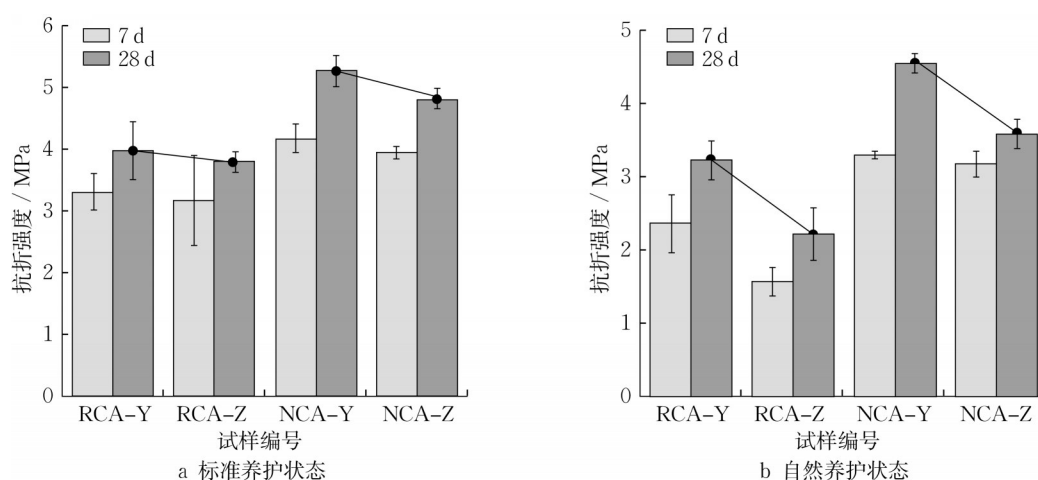


图7 不同养护方式3D打印试样各向异性抗折强度对比

Fig. 7 Comparison of anisotropic flexural strength of 3DPC with different maintenance conditions

3.4 3D打印混凝土骨料界面及层间微观特征

通过电镜 (SEM), 分析骨料差异及层间特性对混凝土宏观性能影响。如图8所示, 天然骨料表面

质密无裂缝, 均呈现被新砂浆包裹状态, 且骨料间由新砂浆填充。这表明天然骨料能较好实现混凝土内部应力传递, 发挥其较高的材料强度, 提升混凝土力

学性能,此时混凝土承载能力受新砂浆力学性能制约。

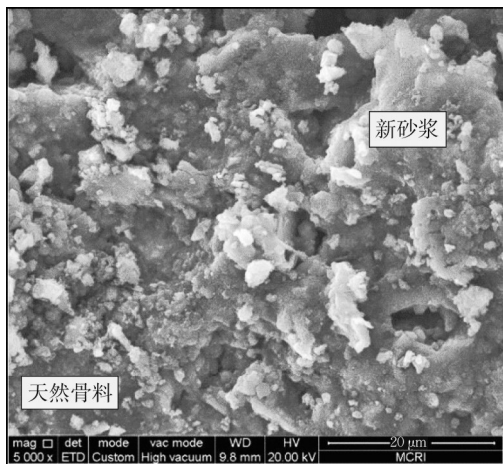


图8 天然粗骨料打印试样界面形貌

Fig. 8 Interface morphology of NCA printed specimens

相较于天然骨料混凝土,再生粗骨料掺入下打印试样界面组成更加复杂。如图9所示,再生粗骨料由天然原石及附着旧砂浆组成,在打印硬化后呈现天然原石与旧附着砂浆间界面、天然原石与新砂浆间界面及旧附着砂浆与新砂浆间界面三种状态。旧附着砂浆由于疏松多孔特性使其成为应力传递间薄弱区域。在新砂浆与天然原石黏结良好条件下,有效提升旧附着砂浆与新砂浆接触面积,利用其高吸水特性获得放入孔隙内非结合水促进新砂浆二次水化,是调控再生粗骨料打印试样可打印性兼顾其硬化后力学性能的关键。

采用机械切割获取的打印层间样本通过SEM分析发现,层间界面(1-2区域)光滑并存在少量孔隙,这是由于打印条挤压过程中空气未能通过振

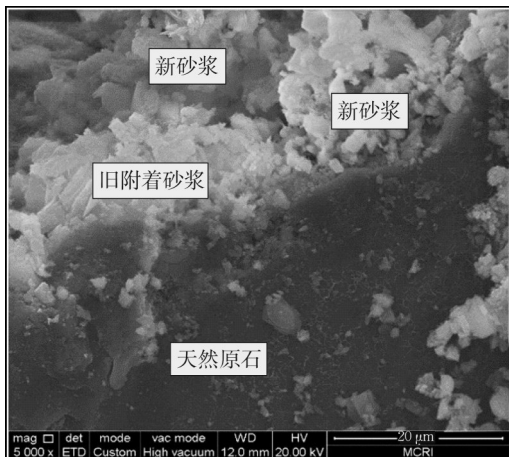


图9 再生粗骨料打印试样界面形貌

Fig. 9 Interface morphology of RCA printed specimens

捣排出导致(图10)。垂直于层间界面的滑移界面内孔隙较多,测定层间内扫描厚度(1-1区域)约为10mm,此区域内形貌由孔隙、骨料及砂浆构成,其中孔隙主要由水化凝胶孔、毛细孔及气孔构成,细骨料颗粒较多,几乎未见粗骨料。气孔数量作为制约3D打印层间性能的重要因素之一,层间破坏易经气孔密集区域展开并延伸至混凝土内部。此外,层间毛细孔为新砂浆水化进程持续发展形成产物,其总量和孔径的增长不利于层间耐久性能发展。因此,打印层间性能的有效提升一方面需通过调控挤出喷头进一步减少打印层间气孔总量,另一方面需通过养护形式优化减少水泥砂浆毛细孔的形成。

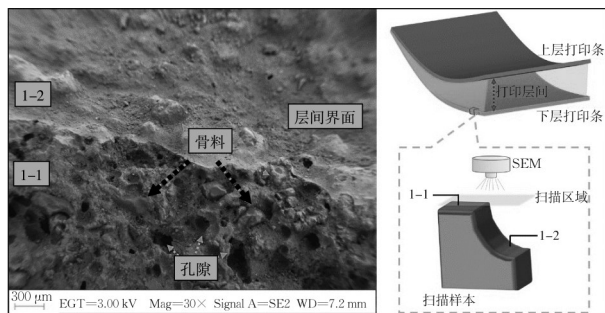


图10 打印试样层间界面形貌

Fig. 10 Printed specimen interlayer section morphology

4 结论

本文选用粒径介于4.75~10mm的天然粗骨料和再生粗骨料,制备成混凝土,并通过试验对比分析了作为3D打印油墨的可打印性,探讨了不同养护条件对3D打印混凝土硬化后各向异性力学性能的影响,主要结论如下:

(1)再生粗骨料的使用有助于加速打印油墨由流动性向塑性和干硬性转化,静置15min时再生粗骨料油墨已具备一定干硬性,而天然骨料打印油墨则需要20min。这是由于其具有较高吸水率和粗糙粒形,有利于缩短打印油墨挤出后由塑性状态转变为干硬性状态时间。

(2)养护条件对不同类型3D打印混凝土力学性能的影响较大。相对于标准养护,7d自然养护条件下NAC与RAC力学性能差距由7.5MPa减小至6.08MPa,NAC及RAC的7d抗压强度分别降低19.84%及20.13%,这可能与再生粗骨料高吸水提升了混凝土二次水化进程相关。

(3)3D打印再生粗骨料混凝土的各向异性力学

性能受骨料类型及层性能影响。采用不同骨料制备的3D打印混凝土抗压强度均呈现出X轴>Z轴>Y轴的规律。试样X轴受力性能受骨料性能影响更为显著,Y轴和Z轴性能发展主要受层间黏结性能影响。微观形貌下不同粗骨料均与新砂浆紧密黏结,旧附着砂浆多孔特性主要构成混凝土内部薄弱区域,而层间的气孔含量成为制约其黏结性能的关键因素。

(4)再生粗骨料作为掺入油墨,可提升3D打印混凝土可建造性,但存在可用粒径局限,打印外形粗糙等。未来应考虑拓宽再生粗骨料再利用范围,选用>10mm的再生粗骨料颗粒制备打印粗骨料混凝土油墨,同时考虑采用刮板系统优化油墨挤出后堆叠形式,提升粗骨料混凝土油墨打印层间黏结性能。

作者贡献声明:

段珍华负责校对所有草稿,并对文章进行了客观审校;
吕振源撰写并完成了数据分析;
肖建庄负责文章整体结构和布局,并牵头撰写文章;
李垒负责协助试验设计和推进;
刘春负责试验与材料协调与准备工作。

参考文献:

- [1] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, *et al.* Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges [J]. *Composites Part B—Engineering*, 2018, 143: 172.
- [2] RAMADANY M, BAJIOU, M S. Applicability and integration of concrete additive manufacturing in construction industry: A case study [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B—Journals of Engineering Manufacture*, 2021, 235(8): 1338.
- [3] 杨钱荣, 赵宗志, 肖建庄, 等. 矿物掺合料与化学外加剂对3D打印砂浆性能的影响[J]. *建筑材料学报*. 2021, 24(2): 412.
YANG Qianrong, ZHAO Zongzhi, XIAO Jianzhuang, *et al.* Effect of mineral admixtures and chemical admixtures on performance of 3D printing mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(2): 412.
- [4] LONG W, TAO J, LIN C, *et al.* Rheology and buildability of sustainable cement-based composites containing micro-crystalline cellulose for 3D-printing [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 118054.
- [5] 侯少丹, 肖建庄, 段珍华. 3D打印细石混凝土调配及其可打印性和力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2021 (7): 7.
HOU Shaodan, XIAO Jianzhuang, DUAN Zhenhua. Preparation of 3D printable concrete with small coarse aggregate and its printability and mechanical properties [J]. *Journal of Building Materials*, 2021 (7): 7.
- [6] 肖建庄, 柏美岩, 唐宇翔, 等. 中国3D打印混凝土技术应用历程与趋势[J]. *建筑科学与工程学报*, 2021, 38(5): 1.
XIAO Jianzhuang, BAI Meiyang, TANG Yuxiang, *et al.* Application and development of 3D printed concrete technology in China [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2021, 38(5): 1.
- [7] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力—应变全曲线试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(11): 1445.
XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading [J], *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2007, 35 (11): 1445.
- [8] XIAO J Z, TANG Y X, CHEN H *Net al.* Effects of recycled aggregate combinations and recycled powder contents on fracture behavior of fully recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 366: 132895.
- [9] CHEN Y D, ZHANG Y S, PANG *Bet al.* Extrusion-based 3D printing concrete with coarse aggregate: Printability and direction-dependent mechanical performance [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 296: 123624.
- [10] LIU H W, LIU C, WU Y *Wet al.* Hardened properties of 3D printed concrete with recycled coarse aggregate [J], *Cement and Concrete Research*, 2022, 159: 106868.
- [11] VIACHESLAV M, MARTIN K, JENS O, *et al.* 3D-printing with foam concrete: From material design and testing to application and sustainability [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 43: 102870.
- [12] 段珍华, 侯少丹, 潘智生, 等. 再生细骨料混凝土流变性及其对强度和耐久性的影响[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(增刊2): 420.
DUAN Zhenhua, HOU Shaodan, PAN Zhisheng, *et al.* Effect of moisture condition of recycled coarse aggregate on the properties of recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 41(S2): 420.