

文章编号:1007-9629(2022)07-0730-07

3D 打印细石混凝土调配及其可打印性和力学性能

侯少丹^{1,2}, 肖建庄^{1,3,*}, 段珍华¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000;

3. 同济大学 工程结构服役性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要:为了将细石混凝土(SAC)现场调配成 3D 打印油墨,探究了不同增稠材料对 SAC 工作性能和流变性的影响,研究了 3D 打印 SAC 的早期力学性能,同时采用 3D 打印机制备了 3D 打印 SAC 试件,并对其开展了 28 d 强度试验.结果表明:SAC 二次搅拌过程中,添加占胶凝材料用量 0.10% 的纤维素醚(HPMC)、1.50% 的偏高岭土或 5.00% 的水泥能够满足 3D 打印 SAC 对工作性能的要求;0.10% 的 HPMC 能够显著提高二次搅拌后 SAC 的塑性黏度,对挤出力的增长影响较小,这有利于 3D 打印 SAC 的挤出性和工作时间;3D 打印 SAC 的力学性能具有各向异性,与浇筑试件相比,其 28 d 抗压强度降低了 20.03%~40.46%,抗折强度提高了 17.23%~19.54%.

关键词:3D 打印细石混凝土;细石混凝土;流变性;各向异性;早期性能

中图分类号:TU528

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.07.011

Preparation of 3D Printable Concrete with Small Coarse Aggregate and Its Printability and Mechanical Properties

HOU Shaodan^{1,2}, XIAO Jianzhuang^{1,3,*}, DUAN Zhenhua¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering,

Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 3. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of

Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to prepare 3D printable ink based on small coarse aggregate concrete (SAC) on site, the effect of different viscosity materials on the workability and rheological properties of SAC were investigated. The early age mechanical properties of 3D printable SAC were studied. At the same time, the 28 days strength of 3D printable SAC which printed by 3D printer were carried out. The results show that the addition of 0.10% hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC), 1.50% metakaolin or 5.00% cement in the secondary mixing process of the SAC can meet the workability requirements of 3D printable SAC. HPMC with the dosage of 0.10% has great effect on the enhancement of plastic viscosity but limited effect on the enhancement of extrusion force, which is positive to the extrudability and working time. The mechanical properties of 3D printable SAC are anisotropic. Compared to the casted specimen, the compressive strength of 3D printable SAC is 20.03%~40.46% lower and the flexural strength is 17.23%~19.54% higher at 28 days.

Key words: 3D printable concrete with small coarse aggregate; concrete with small coarse aggregate; rheological property; anisotropic; early age property

当前大部分 3D 打印建筑以及研究中所使用的 3D 打印混凝土(3DPC)并不含粗骨料,而是 3D 打印

收稿日期:2021-05-13; 修订日期:2021-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078358)

第一作者:侯少丹(1992—),女,山东临沂人,绍兴文理学院讲师,博士. E-mail: hsd2017@tongji.edu.cn

通讯作者:肖建庄(1968—),男,山东沂南人,同济大学教授,博士生导师,博士. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

砂浆^[1-3].一方面,是由于打印机挤出口尺寸较小,不能打印粗骨料混凝土;另一方面,粗骨料增大了混凝土可打印性和流变性的离散性,难以调控其早期性能.与砂浆相比,混凝土具有更好的长期性能和更低的造价.因此,实现含粗骨料混凝土的打印是3DPC在建筑行业应用中的迫切要求^[4-5].

当前,含粗骨料3DPC在施工时的制备方式上存在困难与挑战.由于3D打印要求混凝土具有流动度低、触变性高、凝结时间短等特点^[6-8],需要使用多种外加剂对其工作性能进行调控,因此运输过程中可能会发生工作性能损失大、达到初凝时间等问题^[9],因此3DPC不能像普通混凝土一样在搅拌站制备之后运输到现场施工.当前在实验室开展的3DPC研究中,通常是搅拌完成后直接进行打印,如果实际施工时采用这种方法,需要在施工现场准备材料并现场拌和,该方法受现场场地条件以及环境评测要求的限制.

基于此,本文提出通过细石混凝土(SAC)现场调配备3D打印SAC的方法,并研究了不同增稠材料对SAC工作性能和流变性的调控规律,同时对3D打印SAC试件的可挤出性和早期力学性能进行了测试.

1 试验

1.1 原材料

水泥(C)为P·O 42.5水泥;细骨料为普通河砂,中砂,细度模数为2.69;细石粗骨料为普通碎石,粒径为5~10 mm;粉煤灰为F类二级粉煤灰,28 d活性指数为85.00%;再生粉体来源于建筑固体废弃物,主要含废弃黏土砖和废弃混凝土,主要氧化物为CaO、SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃,粒径为5~40 μm,中位粒径为10 μm,28 d活性指数为80.05%,其他基本性能(如水化热,微观形貌等)见文献[10-11];偏高岭土(MK)的平均粒径为10 μm,28 d活性指数不小于110.00%;减水剂(SP)为粉末状聚羧酸减水剂;羟丙基甲基纤维素(HPMC)的黏度为200 Pa·s;拌和水为自来水.SAC水胶比(质量比,文中涉及的比值、用量等均为质量比或质量分数)为0.32,最大粒径为10 mm,胶凝材料为水泥、粉煤灰和再生粉体,粉煤灰和再生粉体的用量相同,均为水泥质量的15.5%,砂率为60.0%,单位用水量为186 kg/m³,通过调节减水剂的用量,控制SAC的坍落度为200~230 mm.

1.2 3D打印细石混凝土制备方法

考虑到商品混凝土对工作性能的要求与3DPC差异较大,本文提出通过SAC现场调配备3D打印SAC的方法,具体步骤为:(1)首先进行SAC配

合比设计,并在搅拌站制备SAC.考虑到SAC的运输和泵送要求,同时能够尽量保证SAC的可打印性的要求,要求SAC的坍落度在160~180 mm,并具有较小的坍落度损失.(2)运输SAC至施工现场,然后添加相应的材料开展二次搅拌,调控混凝土的工作性能,使其满足可打印性的要求.该过程中,二次搅拌增稠材料的种类和用量以及二次搅拌时间均与SAC在现场的工作性能有关.(3)通过施工现场二次驳运,将制备的3D打印SAC输送至打印机中进行施工.

本文提出的3D打印SAC制备方法,一方面有利于解决3DPC的生产运输难题;另一方面能避免3DPC大批量生产时带来的现场原料堆放和环保问题.该方法以SAC为基本材料,无需对现有的商品混凝土制备程序进行大幅度调整,工艺简单,有利于推动3DPC的大批量应用,具有实际工程意义.

1.3 试验方法

1.3.1 SAC的工作性能和流变性试验

根据GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》,测试SAC的坍落度和扩展度.采用ConTec流变仪测试SAC的流变参数.流变仪内筒直径和高度均为10.0 cm,外筒直径为14.5 cm.试验时控制最大速率从0.5 r/s渐变为0.1 r/s,期间共采集6个点的转速和扭矩,并通过Reiner-Rivlin方程计算出其屈服应力和塑性黏度^[12].

1.3.2 SAC的工作性能调配及早期性能测试

SAC的工作性能和流变性测试完成后,在保持其水胶比不变的条件下进行二次搅拌时加入不同的增稠材料(水泥、HPMC、MK),搅拌5 min,每次加入的增稠材料掺量 w 以胶凝材料的总质量计,水泥掺量 w_c 分别为1.00%、3.00%、5.00%,HPMC的掺量 w_{HPMC} 分别为0.03%、0.05%、0.10%,MK的掺量 w_{MK} 分别为0.50%、1.00%、1.50%.二次搅拌完成后,立即对SAC开展如下试验:(1)工作性能和流变性试验,测试方法见1.3.1;(2)挤出性测试,采用自主研发的装置^[13]开展挤出性研究,并通过挤出力的大小评价SAC的可挤出性;(3)湿坯强度(green strength)测试,根据ASTM D2166《Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil》,将混凝土装入 $\phi 70 \times 140$ mm的圆柱形模具中,静置5~10 min后拆除模具,并开展无侧限抗压强度试验^[7],加载速率为30 mm/min,从二次搅拌后第15 min开始测试,之后每隔15 min进行1次测试,直至90 min结束测试.

1.3.3 3D打印SAC试件的制备及其硬化后力学性能测试

用辽宁格林普公司提供的配备了表面平整系统^[14]的龙门架式混凝土3D打印机,尺寸为8 m×6 m×6 m,打印头采用螺杆挤出方式,挤出口直径为100 mm. 试验时打印速率为50 mm/min,打印路线为直线,长度为1 000 mm,每层高度为30~50 mm,共打印3层,打印完成后记录打印条的宽度及高度,用于评价3D打印SAC的可打印性. 试件打印完成1 d后,将其切割成100 mm×100 mm×100 mm的立方体试块和100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试块,根据GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》,测试3D打印SAC的28 d抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度. 考虑到3D打印SAC力学性能的各向异性,开展不同加载方向的力学性能试验,加载方向示意图见图1. 另外,为开展3D打印试件和浇筑试件的对照试验,采用相同的3D打印SAC材料制备浇筑试件(cast).

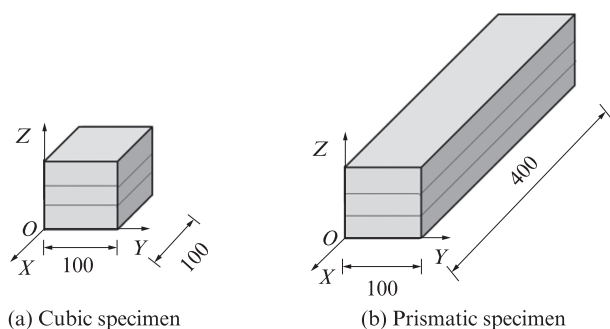


图1 加载方向示意图

Fig. 1 Diagram of loading direction (size: mm)

2 结果与分析

2.1 不同增稠材料对SAC性能的影响

2.1.1 坍落度和扩展度

不同增稠材料对SAC坍落度和扩展度的影响见表1. 由表1可见:SAC的初始坍落度为210~225 mm,扩展度为430~440 mm;二次搅拌时不同增稠材料的加入使SAC的坍落度和扩展度均降低,且随着增稠材

料用量的增大,其降低程度增大. 这是因为新拌混凝土中胶凝材料的絮凝作用导致自由水和有效减水剂用量减少,这时再加入其他胶凝材料会加快吸收新拌混凝土中的自由水,导致其工作性能降低,且二次搅拌过程中加入的增稠材料容易团聚,增大了其工作性能损失. 与水泥相比,MK对SAC工作性能的影响更大. 当水泥、MK的掺量均为1.00%时,SAC的坍落度分别下降了11.4%、31.0%,扩展度分别下降了27.9%、54.5%,这是因为MK的颗粒粒径较小,比表面积较大,加入新拌SAC后会快速吸收自由水. 与水泥、MK相比,HPMC对新拌混凝土工作性能的影响最大,当其掺量为0.10%时,SAC的坍落度、扩展度分别降低了35.6%、37.5%,这是因为高分子化合物HPMC上有很多羟基,能够与水分子形成氢键,增加溶液的黏度,而这种黏弹性液体均匀分散在砂浆内,增大了颗粒间的摩擦力和附着力^[15-16]. 预试验结果显示,当混凝土的坍落度为90~130 mm时,方可实现3D打印的连续、稳定挤出.SAC的二次搅拌过程中,当HPMC、水泥、MK的掺量分别为0.10%、3.00%~5.00%、1.50%时,SAC能够满足打印性的要求. 后文研究中增稠材料HPMC、水泥、MK的掺量分别为0.10%、5.00%、1.50%,制备的SAC分别记为HPMC0.10、C5.00、MK1.50.

2.1.2 屈服应力和塑性黏度

屈服应力和塑性黏度影响3D打印SAC的挤出性和挤出瞬间的变形能力. 当3D打印SAC在挤出过程中受到的剪应力大于屈服应力时,即可保持混凝土的流动状态,但当屈服应力过小时,会导致挤出瞬间混凝土的变形较大. 塑性黏度是混凝土内部阻碍流动的性能,与混凝土的密实性、可加工性有关,当塑性黏度较大时可避免沉降和离析现象的发生. 不同增稠材料对SAC屈服应力和塑性黏度的影响见表2. 由表2可见,当HPMC、水泥、MK的掺量分别为0.10%、5.00%、1.50%时,二次搅拌后SAC的屈服应力分别增加了27.56%、50.48%和40.94%,塑性黏度分别增加了34.56%、20.25%和23.26%. 加入5.00%的水泥或1.50%的MK后,

表1 不同增稠材料对SAC坍落度和扩展度的影响

Table 1 Effect of different viscosity materials on slump and slump flow of SAC

$w_{\text{HPMC}}/\%$	Slump/mm	Slump flow/mm	$w_{\text{MK}}/\%$	Slump/mm	Slump flow/mm	$w_{\text{C}}/\%$	Slump/mm	Slump flow/mm
0	225	440	0	210	440	0	220	430
0.03	200	350	0.50	180	300	1.00	195	310
0.05	175	305	1.00	145	200	3.00	125	200
0.10	125	275	1.50	100	200	5.00	90	200

SAC的屈服应力有大幅度提升,塑性黏度的增大程度小于屈服应力.这是因为水泥和MK掺入新拌SAC后快速吸水,导致颗粒间的浆体膜厚度减小,从而增大了颗粒间摩擦力,使得SAC的屈服应力

快速增加. HPMC掺入后,由于HPMC在新拌SAC中吸水膨胀后形成胶体膜结构,吸附在水泥颗粒表面,增大了分子间的作用力,从而使SAC塑性黏度有了较大幅度的提升.

表2 不同增稠材料对SAC屈服应力和塑性黏度的影响

Table 2 Effect of different viscosity materials on yield stress and plastic viscosity of SAC

Viscosity material	$w/\%$	Before secondary mixing		After secondary mixing	
		Yield stress/Pa	Plastic viscosity/(Pa·s)	Yield stress/Pa	Plastic viscosity/(Pa·s)
HPMC	0.10	184.35	18.52	235.16	24.92
Cement	5.00	182.02	16.84	273.91	20.25
MK	1.50	176.68	18.01	249.01	22.20

2.2 3D打印SAC的早期性能

2.2.1 挤出性

3D打印SAC挤出时的位移与挤出力之间的关系见图2.由图2可见:试验开始时,先开展预挤出试验,控制挤出速率 v 为300 mm/min,该过程可使混凝土达到密实状态;当位移达到140 mm左右时,降低挤出速率至100 mm/min,并持续1~2 min,此时挤出力呈现1个近似平台的阶段,说明混凝土已经达到密实状态并被匀速挤出;在混凝土被匀速挤出的过程中,挤出力仍呈缓慢上升的趋势,这是由于在挤压过程中,随着混凝土中浆体的减少,粗骨料逐渐被挤压至变截面的锥形区域,导致挤出力缓慢上升.本文采用图2所示的挤出流程开展3D打印SAC挤出性测试,记录挤出阶段中挤出速率为100 mm/min、位移为200~300 mm段的挤出力,取该阶段挤出力的平均值作为3D打印SAC的挤出力,用于评价3D打印SAC的挤出性.挤出力越大,挤出性越差.

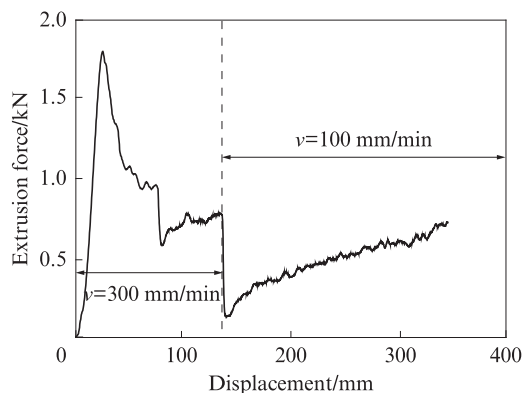


图2 3D打印SAC挤出时的位移与挤出力之间的关系
Fig. 2 Relationship between displacement and extrusion force during extrusion of 3D printable SAC

不同增稠材料对3D打印SAC挤出力的影响见图3,图中横坐标 t 为二次搅拌结束后的静置时间.由图3可见:二次搅拌刚结束时,尽管不同组的3D打印

SAC坍落度均控制在90~130 mm,其挤出力仍存在较大的差距,掺加1.50%MK的3D打印SAC挤出力最大(605.4 N),是掺加5.00%水泥或0.10%HPMC的3D打印SAC挤出力的4倍左右;随着静置时间的延长,MK对挤出力的增长趋势影响最明显,其次是水泥和HPMC,当静置时间为30 min时,掺加MK、水泥、HPMC的3D打印SAC的挤出力分别增长了341%、241%、63%.不同增稠材料对3D打印SAC挤出力的影响可以从混凝土中水泥的水化进程方面解释:MK较细的颗粒及其较高的活性能够加快水泥的早期水化进程,随着水泥水化的进行,水泥颗粒间的作用越来越强,导致其流动性逐渐丧失,进而增大了挤出力;HPMC会吸附在水泥颗粒表面,延缓水泥的早期水化进程,进而对挤出力随静置时间变化的影响较小^[17].

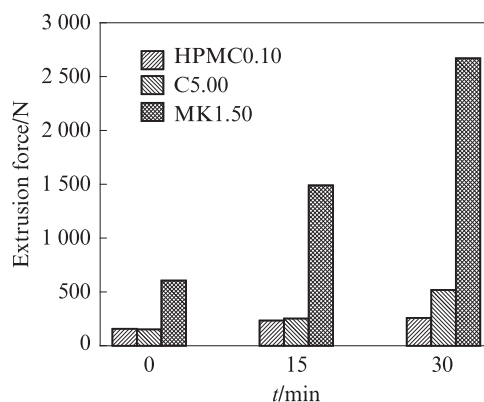


图3 不同增稠材料对3D打印SAC挤出力的影响
Fig. 3 Effect of different viscosity materials on extrusion force of 3D printable SAC

3D打印SAC坍落度与挤出力之间的关系见图4.由图4可见,随着坍落度的增大,3D打印SAC的挤出力逐渐减小,两者之间存在较好的拟合关系,这说明在实际工程中,可以通过控制3D打印SAC的坍落度来初步调控其挤出性.另外,3D打印SAC从制备完成到实际挤出需要一定的中间过程,该过程中要求其工作

性能满足打印的要求,因此对坍落度/挤出力的经时变化有较高的要求.将3D打印SAC工作性能满足打印要求的持续时间称为“工作时间”,挤出力的经时变化越大,越不利于其工作时间.由图4建立的坍落度和挤出力的关系以及适合打印的坍落度范围,可以确定当挤出力大于1488 N时,3D打印SAC不能被流畅挤出.结合图3、4可知,1.50%MK掺入之后3D打印SAC挤出力快速增长,且其工作时间在15~30 min,而5.00%水泥或0.10%HPMC调配的3D打印SAC挤出力增长较为缓慢,其工作时间较长,均大于30 min.

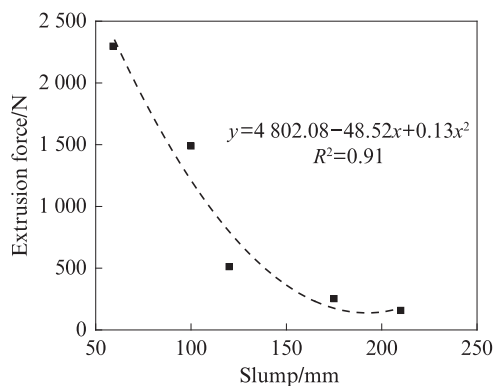


图4 3D打印SAC坍落度与挤出力之间的关系
Fig. 4 Relationship between slump and extrusion force of 3D printable SAC

2.2.2 湿坯强度

3D打印SAC湿坯强度的增长与其可建造性密切相关,湿坯强度增长速率越快,可建造性越高,在规定时间内打印层数越高,因此可加快打印速率,提高施工效率.不同增稠材料对3D打印SAC湿坯强度的影响见图5.由图5可见:3D打印SAC的湿坯强度随静置时间的延长而增长,二次搅拌时掺入5.00%水泥或1.50%MK对3D打印SAC湿坯强度的影响规律近似,90 min内分别增长了1.88、1.98倍,而0.10%HPMC的掺入对3D打印SAC湿坯强度的

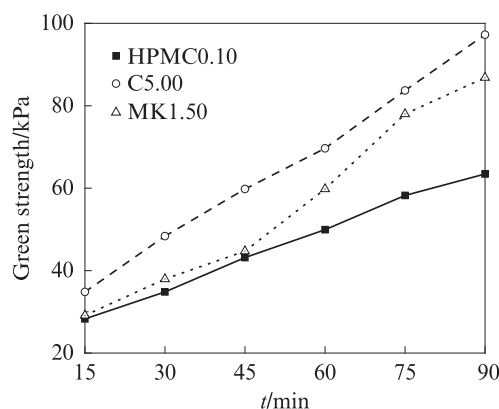


图5 不同增稠材料对3D打印SAC湿坯强度的影响
Fig. 5 Effect of different viscosity materials on green strength of 3D printable SAC

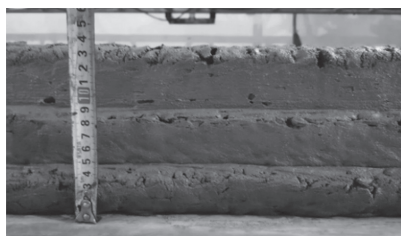
影响较小,90 min内仅增长了1.3倍.这可由2.2.1讨论中的不同增稠材料对水泥水化作用的影响来解释.

2.3 3D打印SAC的实际打印效果及力学性能

由前文分析可知,二次搅拌时通过掺入不同增稠材料可将SAC调配为满足3D打印要求的工作性能.为了验证本文提出的方法,用掺入0.10%HPMC的3D打印SAC(HPMC0.10)开展实际打印试验,并研究了其力学性能.

2.3.1 实际打印效果

3D打印SAC打印后的效果见图6.由图6可见:3D打印SAC具有较好的挤出性,能够被均匀、连续地挤出;由于表面平整系统的作用,3D打印SAC的表面较光滑,存在较小的空隙,能够观察到明显的层间痕迹;挤出后单条的宽度为100 mm,与挤出口的直径相同;由于限制了水平变形,因此3D打印SAC存在向下的挤压力,导致其最底层混凝土出现变形(见图6(a)),这可以通过提高3D打印SAC的可建造性或调整挤出速率或每层打印时间进行改善;图6(b)显示在打印路线提升点的周围存在裂缝,这可以通过调整打印头在提升时的出料速率和提升速率进行改善.



(a) 3 layers of 3D printable SAC



(b) 3D printable SAC filament

图6 3D打印SAC打印后的效果
Fig. 6 Printing result of 3D printable SAC

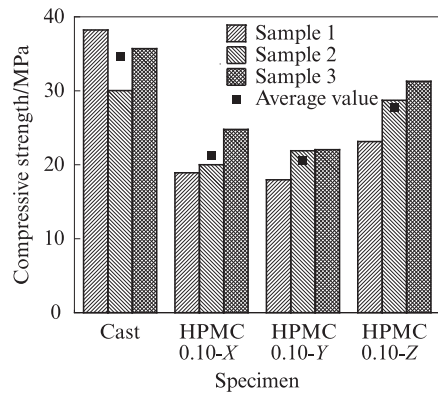
2.3.2 力学性能

层层堆叠的打印方式导致3D打印SAC在不同

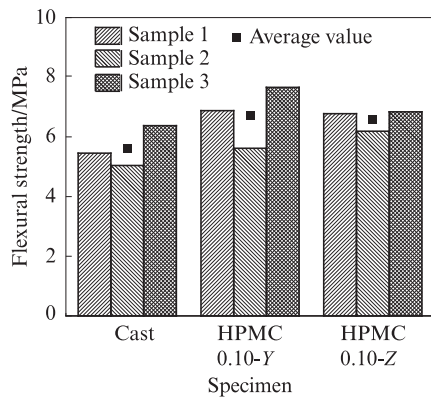
加载方向的力学性能差异较大,即其力学性能具有各向异性^[18-19].3D打印SAC的力学性能见图7(图

中 HPMC0.10-X 为试件 HPMC0.10 的 X 方向,其他类推)。由图 7 可见:3D 打印 SAC 的抗压强度存在明显的各向异性;与浇筑试件相比,其 X、Y、Z 方向的抗压强度分别降低了 38.73%、40.46% 和 20.03%,X 和 Y 方向的抗压强度近似,且均小于 Z 方向的抗压强度;当

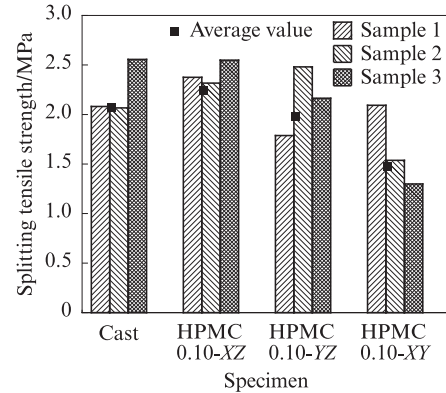
劈裂面为 XZ 或 YZ 时,3D 打印 SAC 的劈裂抗拉强度变化较小,分别为浇筑试件的 108.07%、95.06%;当劈裂面为 XY 平面时,劈裂抗拉强度有明显的下降,降低幅度为 26.46%;3D 打印 SAC 的抗折强度高于浇筑试件,Y、Z 方向分别提高了 19.54%、17.23%。



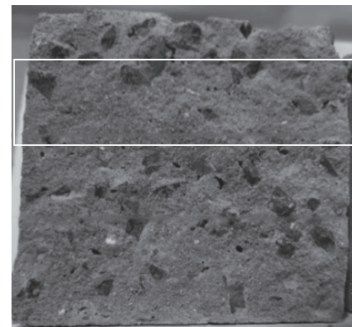
(a) Compressive strength



(c) Flexural strength



(b) Splitting tensile strength



(d) Cross section of XZ direction

图 7 3D 打印 SAC 的力学性能

Fig. 7 Mechanical properties of 3D printable SCA

3D 打印 SAC 强度的各向异性与层层堆叠的建造方式有关,其会导致层间界面存在空隙,进而使混凝土的密实度、抗压强度降低。对 3D 打印 SAC 的抗压强度而言:当加载方向为 Z 方向时,试件的层间界面与加载方向垂直,因此其抗压强度较高;当沿 X 和 Y 方向加载时,试件的层间界面与加载方向平行,裂缝会沿层间界面快速发展,导致其抗压强度降低。对 3D 打印 SAC 的劈裂抗拉强度而言:受力面 XY 面与层间界面平行,因此其劈裂抗拉强度最低,由 XZ 方向的劈裂截面(见图 7(d))可以明显看到试样中部存在较多的空隙,这证明了层间界面导致 XY 面内存在较多空隙。然而,层间界面对 3D 打印 SAC 抗折强度的影响较小,这是因为添加表面平整系统后,3D 打印 SAC 挤出后原本产生的横向变形被限制,因此会沿 Y 方向产生挤压力,导致混凝土更加密实,另外,混凝土上层对下层的压力也会导致 3D 打印 SAC 内部更

密实,骨料与浆体之间的黏结力更大,进而提高其抗折强度。与 3D 打印砂浆一致,3D 打印 SAC 抗压强度均小于浇筑试件^[18-19]。对于 3D 打印 SAC 的抗折强度,Ding 等^[20]的研究结果与本文一致。受试件尺寸、打印方向、层间黏结等影响,不同受力方向 3DPC 的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度的大小并没有统一的规律。

3 结论

(1) 对于初始坍落度为 210~225 mm 的细石混凝土(SAC),二次搅拌时当羟丙基甲基纤维素(HPMC)、水泥、偏高岭土(MK)的掺量分别为胶凝材料质量的 0.10%、5.00%、1.50% 时,能够满足 3D 打印对混凝土工作性能的要求。

(2) 二次搅拌时,0.10% HPMC 能够显著提高 3D 打印 SAC 的塑性黏度,90 min 内其湿坯强度增长

了1.3倍,对挤出力经时变化、工作时间和可建造性的影响较小;1.50%MK能够有效提高3D打印SAC的挤出力,但其工作时间低于30 min;5.00%水泥或1.50%MK有利于3D打印SAC的可建造性。

(3)3D打印SAC的28 d抗压强度具有明显的各向异性,较浇筑试件明显降低,降低幅度在20.03%~40.46%;Y/Z方向的抗折强度较浇筑试件提高了17.23%~19.54%。

参考文献:

- [1] MA G W, LI Z J, WANG L, et al. Micro-cable reinforced geopolymer composite for extrusion-based 3D printing [J]. *Materials Letters*, 2019, 235: 144-147.
- [2] ZHANG Y, ZHANG Y S, LIU G J, et al. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 174: 263-271.
- [3] DING T, XIAO J Z, ZOU S, et al. Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 113: 103724.
- [4] 朱彬荣,潘金龙,周震鑫,等. 3D打印技术应用于大尺度建筑的研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(23): 4150-4159.
ZHU Binrong, PAN Jinlong, ZHOU Zhenxin, et al. Advances in large-scale three dimensional printing technology applied in construction industry [J]. *Materials Reports*, 2018, 32(23): 4150-4159. (in Chinese)
- [5] HOU S D, DUAN Z H, XIAO J Z, et al. A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273: 121745.
- [6] ROUSSEL N. Rheological requirements for printable concretes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 112: 76-85.
- [7] DING T, XIAO J Z, QIN F, et al. Mechanical behavior of 3D printed mortar with recycled sand at early ages [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248: 118654.
- [8] XIAO J Z, ZOU S, YU Y, et al. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 32: 101779.
- [9] 郭晓璐,杨君奕,熊归砚. 硅酸镁铝及静置时间对3D打印地聚合物砂浆流变性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(1): 89-96.
GUO Xiaolu, YANG Junyi, XIONG Guiyan. Effect of magnesium aluminum silicate and rest time on rheological property of 3D printing geopolymer mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(1): 89-96. (in Chinese)
- [10] DUAN Z H, HOU S D, XIAO J Z, et al. Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 253: 119865.
- [11] DUAN Z H, HOU S D, XIAO J Z, et al. Rheological properties of mortar containing recycled powders from construction and demolition wastes [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 237: 117622.
- [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): 420-426.
DUAN Zhenhua, HOU Shaodan, POON Chisun, et al. Rheology of recycled fine aggregate concrete and its effect on strength and durability [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(Suppl 2): 420-426. (in Chinese)
- [13] 肖建庄,侯少丹,段珍华,等. 一种3D打印混凝土可挤出性与新拌状态力学性能测试装置与方法: CN201911399112.8 [P]. 2019-12-30.
XIAO Jianzhuang, HOU Shaodan, DUAN Zhenhua, et al. A device and method for testing extrudability and fresh mechanical properties of 3D printed concrete: CN201911399112.8 [P]. 2019-12-30. (in Chinese)
- [14] JI G C, DING T, XIAO J Z, et al. A 3D printed ready-mixed concrete power distribution substation: Materials and construction technology [J]. *Materials*, 2019, 12(9): 1540.
- [15] 苏雷. 薄层纤维素醚改性水泥浆体水化历程和微观结构研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
SU Lei. Research on hydration process and microstructure of thin layer cement paste modified with cellulose ether [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] 朱艳梅,张翼,蒋正武. 羟丙基甲基纤维素对3D打印砂浆性能影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(6): 1123-1130.
ZHU Yanmei, ZHANG Yi, JIANG Zhengwu. Effect of hydroxypropyl methylcellulose ether on properties of 3D printing mortar [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6): 1123-1130. (in Chinese)
- [17] 王培铭,赵国荣,张国防. 纤维素醚在新拌砂浆中保水增稠作用及其机理[J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(8): 1190-1196.
WANG Peiming, ZHAO Guorong, ZHANG Guofang. Mechanism on water retention and thickening of cellulose ethers in fresh mortars [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 45(8): 1190-1196. (in Chinese)
- [18] LE T T, AUSTIN S A, LIM S, et al. Hardened properties of high-performance printing concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(3): 558-566.
- [19] MA G W, LI Z J, WANG L, et al. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 202: 770-783.
- [20] DING T, XIAO J Z, ZOU S, et al. Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 113: 103724.