

文章编号: 1673-9469 (2018) 04-0021-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.005

桩基工程 3D 打印混凝土材料工程性质研究

高磊^{1,2}, 罗易¹, 许蒋鹏¹, 刘爽¹, 罗涵¹

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 通过开展桩基工程 3D 打印混凝土材料工程性质试验研究, 提出采用 42.5R 快硬硫铝酸盐水泥、小粒径的建筑干砂和石子为主要材料, 通过坍落度试验和抗压试验, 得出水灰比越大, 材料的坍落度越大; 砂率越大, 材料的坍落度先降低后增大, 最终确定当水灰比为 0.39 和砂率为 0.536 时, 流动性相对较好; 同时通过添加葡萄糖酸钠缓凝剂来控制材料的凝结时间, 当占比 0.71% 时, 材料能够保持较长时间塑性, 有利于较好控制拌和后混凝土的凝结时间; 通过添加聚羧酸减水剂来增大材料的流动性和抗压强度, 当添加比为 0.48% 时效果最佳。通过一系列的室内试验, 制备出一种适用于桩基工程 3D 打印的新型混凝土材料。

关键词: 3D 打印; 桩基础; 混凝土; 外加剂; 坍落度试验; 抗压试验

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Study on engineering properties of 3D printing concrete materials for pile foundation engineering

GAO Lei^{1,2}, LUO Yi¹, XU Jiangpeng¹, LIU Shuang¹, LUO Han¹

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China)

Abstract: The experimental study of the engineering properties for 3D printing concrete materials used in pile foundation engineering is carried out. 42.5R rapid hardening sulphoaluminate cement, small-diameter construction dry sand and gravel are used as the main materials. Through the slump test and compressive strength test, it shows that the larger the water-cement ratio is, the larger the slump of material is; when the sand rate is larger, the slump of the material decreases firstly and then increases. Finally, when the water-cement ratio is 0.39 and the sand rate is 0.536, the fluidity is relatively good; at the same time, the setting time of the material is controlled by adding sodium gluconate retarder. When the proportion is 0.71%, the material can maintain a longer time plasticity, which is beneficial to the better control of the setting time of the concrete after mixing. By adding polycarboxylate superplasticizer, it can increase the fluidity and compressive strength of the material, the addition ratio 0.48% is the best. Through a series of laboratory tests, a new type of concrete material suitable for 3D printing of pile foundation engineering is given.

Key words: 3D printing; pile foundation; concrete; admixtures; slump test; compression test

目前, 随着 3D 打印技术日益完善, 传统的建筑行业发生巨大的改变, 一些建筑甚至可以用 3D

打印技术制成^[1-13]。但是对于下部基础中的桩基工程而言, 尚未见桩基工程 3D 打印的相关研究。由

收稿日期: 2018-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51508159); 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心暨水利水运工程教育部重点实验室开放基金资助项目 (SLK2015A01)

作者简介: 高磊 (1984-), 男, 宁夏银川人, 博士, 副教授, 从事桩基础方面的研究。

于3D打印技术的特殊性,最常见的混凝土材料不能完全满足该技术的需求,如现有的普通混凝土凝结时间过长,这对于桩基3D打印材料要求的迅速凝结来说,是不满足要求的。最重要的是材料强度问题,3D打印技术的特点就是打印迅速和成型快,要想与桩基础制作结合,需要材料的强度能够迅速成型,便于支撑继续打印,最终成型后的材料强度也需要达到一定相应的要求。因此,在桩基工程中,如何改变混凝土的配比组成,使得其不仅满足桩基3D打印技术的要求,还能满足建筑材料的要求,这需要对桩基3D材料进行深入研究。

为了得到适用于桩基工程3D打印用的混凝土配合比,本文主要尝试开展桩基工程3D打印混凝土材料工程性质试验研究,最终通过这一系列的室内试验,制备出一种适用于桩基工程3D打印的新型混凝土材料,研究成果可为未来相关研究提供借鉴。

1 试验材料

1.1 水泥

本试验选用42.5R快硬硫铝酸盐水泥(和其它品种水泥相比较,具有明显的快硬、早强的特性,

又有碱度低、膨胀率小,稳定快,干缩不变形的优点),参数性能见表1、表2。

1.2 骨料

细骨料选用粒径小于0.5mm的建筑干砂,粗骨料采用粒径2~3mm的石子。

1.3 外加剂

减水剂和缓凝剂选用葡萄糖酸钠缓凝剂和聚羧酸减水剂,其参数性能见表3、表4。

2 试验内容

2.1 桩基3D打印混凝土的流动性控制和配比选择

本文研究目的是研发出适用于3D打印的混凝土建筑材料,因此材料本身的流动性必须能满足打印要求,否则会导致喷口处材料的凝结堵塞从而影响打印进程。基于这个要求,通过坍落度试验,对比各个不同配比下混凝土的流动性,并且通过由针孔和针筒组成的喷头来进行模拟挤出过程,从而选择出最优配比的混凝土材料。由于坍落度试验结果的离散性较大,所以该试验总共重复3次,取平均值作为试验结果。首先通过控制变量法保证砂率不

表1 水泥的化学组成及性质参数

Tab.1 Chemical composition and properties of cement

等级	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	标准稠度水量	抗硫酸盐性
42.5R	35.17%	42.54%	10.79%	6.13%	1.53%	1.24%	1 mm	中抗硫酸盐性

表2 水泥的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of cement

强度等级	抗压强度 /MPa			抗折强度 /MPa		
	1 d	2 d	3 d	1 d	2 d	3 d
42.5R	30	42.5	45	6	6.5	7

表3 缓凝剂参数

Tab.3 retarder parameters

葡萄糖酸钠含量	干燥减重	还原物	重金属(以Pb计)	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	铅盐/(mg·m ⁻³)	砷含量(AS ₂ O ₃)	pH
98.71%	0.04%	<0.5%	<7%	<0.01%	<0.009%	<1%	<0.1%	6.99

表4 减水剂参数

Tab.4 Water reducing agent parameters

产品名称	Na ₂ SO ₄	甲醛	氯离子含量	减水率	密度/(g·cm ⁻³)	pH值	碱含量
聚羧酸系高性能减水剂	≤5.0%	≤0.05%	≤0.6%	25%	0.98 ~ 1.02	7.0 ~ 8.0	0.02%

表5 不同水灰比下混凝土的流动性
Tab.5 Fluidity of concrete under different water-cement ratios

水灰比	坍落度 /mm			初凝时间	终凝时间 /min
	第一次	第二次	第三次		
0.38	20	22	20	3min30s	30
0.39	33	31	28	3min18s	30
0.40	33	35	36	3min30s	32
0.41	35	35	34	3min25s	35
0.42	38	39	39	3min33s	32
0.43	40	40	40	3min50s	40
0.44	45	45	48	4min	38

表6 不同砂率下混凝土的流动性
Tab.6 Fluidity of concrete at different sand ratios

砂率	坍落度 /mm			初凝时间 /min	终凝时间 /min
	第一次	第二次	第三次		
0.45	46	45	45	3	30
0.472	40	42	42	3	31
0.491	33	31	28	3	30
0.501	34	34	34	3	30
0.519	35	37	36	3	33
0.536	26	25	30	3	35

变, 改变水灰比, 得到水灰比对流动性的影响。见表5。

随后选择固定水灰比为0.39, 改变砂率, 得到砂率对流动性的影响, 见表6。

分析以上两表可知, 水灰比和砂率对坍落度有较大的影响, 对凝结时间影响甚微。其它因素保持不变, 水灰比越大, 坍落度越大; 水灰比保持不变, 砂率越大, 坍落度先降低后增大。因此, 在综合考虑了水灰比和砂率的影响之后, 选定了以水灰比为0.39, 砂率为0.536的混凝土配比, 进行下一步材料强度测试试验。

2.2 桩基 3D 打印混凝土的力学强度试验

本试验主要考虑到桩基 3D 打印后桩身强度特性, 由于研究的 3D 打印材料是以硅酸盐水泥和砂石组成的混凝土材料为主, 此种混凝土材料在组成和配比上进行改进, 旨在提高 3D 打印混凝土材料的抗压强度, 使抗压强度指标达到预计的要求。本文开展了 3D 打印混凝土材料混凝土的抗压强度测定试验, 通过压力试验机, 测定了三组同样配比和材料组成的龄期为 28 d 的标准混凝土试块的抗压强度, 所得数据如表 7。

试件破坏情况如图 1 所示。

取三组强度的平均值, 得到此种配比和材料组成下的桩基 3D 打印混凝土的抗压强度为 36.9 MPa, 经与已有文献中所得资料对比, 得出本文研发的混

表7 混凝土的抗压强度
Tab.7 Compressive strength of concrete

试块	破坏力 /kN	强度 /MPa
1	830.25	36.9
2	816.75	36.3
3	843.75	37.5



图1 受压破坏后的试件
Fig.1 Test piece after pressure damage

凝土材料强度高于现有的混凝土3D打印材料强度,达到预期效果。

3 结果与分析

3.1 桩基3D打印混凝土流动性与水灰比及砂率的关系特征

对坍落度数据进行分析,取平均值,得到相应的水灰比与流动性的关系,以及砂率与流动性的关系曲线,如图2和图3所示。

分析以上两图可知,水灰比和砂率对坍落度有很大的影响;其它因素保持不变,水灰比越大,坍落度越大,因为水过多导致整体不密实,强度降低;其它因素保持不变,砂率越大,坍落度先降低后增大,因为砂子与水泥浆组成的砂浆在粗骨料间起到润滑和辊珠作用,可以减小粗骨料间的摩擦力,所以在一定范围内,随砂率增大,混凝土流动性增大。另一方面,由于砂子的比表面积比粗骨料大,随着砂

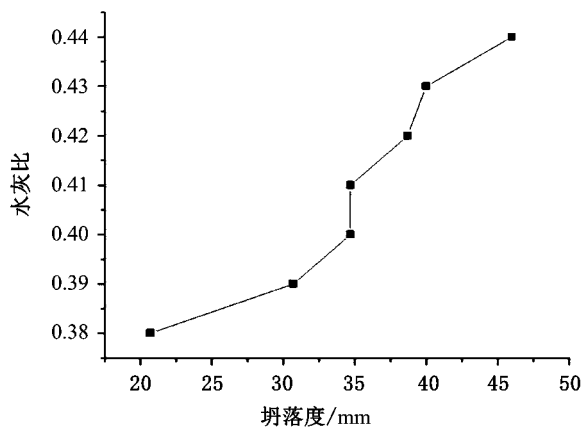


图2 水灰比与流动性关系曲线

Fig.2 Water-cement ratio and fluidity curve

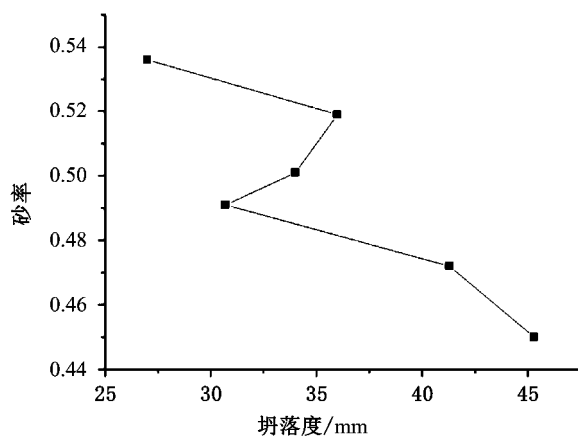


图3 砂率与流动性关系曲线

Fig.3 Curve of sand ratio and fluidity

率增加,粗细骨料的总表面积增大,在水泥浆用量一定的条件下,骨料表面包裹的浆量减小,润滑作用下降,使混凝土流动性降低,所以砂率超过一定范围,流动性随砂率增加而下降。

3.2 水灰比和砂率对桩基3D打印混凝土的影响

混凝土强度主要取决于水泥水化后浆体硬化的强度以及骨料与水泥浆体间黏结的黏结强度,但在拌制混凝土时,在为了获得一定的流动性条件下,一般会添加较多的水量,这就导致在混凝土拌合后,一些未参加水化反应的水分会残留在拌和物中,使得混凝土容易产生一些孔隙和细微裂缝,对其强度产生影响。当水灰比越大时,残留的水量就越多,使得混凝土中孔隙和裂缝增多,导致混凝土体积增大,密度减小,强度也随之降低。然而,当水灰比过小,水量不足,混凝土拌和后流动性不足,使得拌和物过于干硬,混凝土难以振捣密实,其强度反而下降。因此,在正常水灰比范围内,选用较小的水灰比有利于提高混凝土强度,同时也不降低其流动性。混凝土砂率的选择也同样要适宜。砂率过小,会导致混凝土里砂石量不足,不能保证水泥与砂石间的黏结润滑要求,降低拌和物流动性,致使混凝土出现离析和流浆现象,密实度下降,强度降低;砂率过大,砂量过多,石子量不足,会导致拌和物中水泥与石粒的机械咬合作用下降,层间剪切力下降,使得混凝土的强度下降。因此,砂率尽量选用靠近合理砂率的比例,有利于增大混凝土密实性,提高其强度。

3.3 外加剂对桩基3D打印混凝土的影响

葡萄糖酸钠缓凝剂的影响机理主要表现在以下三个方面:(1)由于其作为表面活性剂,吸附在未水化的水泥颗粒上,能够显著降低水的表面能,从而抑制水化作用,产生缓凝作用;(2)缓凝剂分子与水泥中 Ca^{2+} 离子发生络合反应,生成附着在水泥颗粒表面的络合物层,产生缓凝作用;(3)缓凝剂附着在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 上,抑制其继续生长,产生缓凝作用。

聚羧酸盐高性能减水剂的影响机理主要表现在以下两个方面:(1)水泥与水搅拌,发生水化反应,出现的絮凝状结构包裹较多拌和水,加入减水剂可以将这些水释放出来,减少用水量;(2)羧酸类分子附着在水泥颗粒表面上,产生相同符号的电荷,使得水泥分子相互排斥,最终水泥与水易于结合。(下转第29页)

渗性试验[J].兰州理工大学学报,2017,43(1):143-147.

- [7] 安新正,牛薇,张亚飞,等.含砖粒再生混凝土基本性能研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2017,34(1):30-33.
- [8] 仝小芳,杨鼎宜,王欣,等.粉煤灰再生混凝土基本性能研究[J].混凝土,2014(7):27-31.
- [9] JONGSUNG SIM, CHEOLWOO PARK. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and

carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate[J].Waste Management, 2011, 31(11): 2352-2360.

- [10] 崔宏志,邢锋.用SEM和FT-IR研究轻骨料混凝土界面过渡区[J].混凝土,2010(1):18-20.
- [11] 徐世焯,赵艳华.混凝土裂缝扩展的断裂过程准则与解析[J].工程力学,2008,25(S2):20-33.

(责任编辑 王利君)

(上接第24页)

4 结论

1) 选用42.5R快硬硫铝酸盐水泥,占比15.89%,在与其它材料进行拌和后,有利于桩基3D打印混凝土快速凝结,以便于3D打印时能快速形成所制的桩基础;桩基3D打印混凝土的强度测试结果表明,其具有较高的强度。

2) 当材料配比中水占比6.2%,水灰比为0.39,砂和石选用粒径小于0.5mm的建筑干砂和粒径2~3mm的石子,占比分别为41.14%和35.58%时,能保证材料有较好的强度;试验选用砂率靠近合理砂率,有利于提高混凝土密实性,提高其强度;同时小粒径砂石的选择避免了打印过程中发生喷嘴堵塞,便于打印过程的进行。

3) 采用葡萄糖酸钠缓凝剂,占比0.71%,有利于较好地控制拌和后的混凝土的凝结时间,避免凝结时间的不合适导致打印过程的中断产生不良的影响;采用聚羧酸减水剂,占比0.48%,能够增强材料的塑形,有利于较好地控制混凝土的流动性,能够在混凝土配比较低的情况下提供较好的流动性,从而获得较高的抗压强度,以达到所需的强度要求。

参考文献:

- [1] SUVASH Chandra Paul, YI Wei Daniel Tay, BIRANCHIPANDA, et al. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building

and construction[J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2018, 18(1): 311-319.

- [2] TAKAGISHI Kensuke, UMEZU Shinjiro. Development of the Improving Process for the 3D Printed Structure[J]. Scientific Reports, 2017(7): 39852.
- [3] 马敬畏,蒋正武,苏宇峰.3D打印混凝土技术的发展与展望[J].混凝土世界,2014(7):41-46.
- [4] 李旋.3D打印混凝土配合比设计及其基本性能研究[D].武汉:华中科技大学,2014.
- [5] 石从黎,林宗浩,陈敬,等.3D打印混凝土技术的初探[J].重庆建筑,2017(3):24-27.
- [6] 丁铸,李定发,朱继翔.3D打印建筑材料现状及其发展[J].墙体革新与建筑节能,2017(10):61-65.
- [7] 李福平,邓春林,万晶.3D打印建筑技术与商品混凝土行业展望[J].混凝土世界,2013(3):28-29.
- [8] 李福平.3D打印混凝土结构及原材料初探[J].商品混凝土,2015(11):32-33.
- [9] 乔星宇,李韵通,潘宁.3D打印建筑混凝土配合比设计研究[J].现代装饰:理论,2016(6):240-241.
- [10] 张大旺,王栋民.3D打印混凝土材料及混凝土建筑技术进展[J].硅酸盐通报,2015(6):1583-1588.
- [11] 余洋.浅析水灰比对混凝土强度的影响与控制[J].河南水利与南水北调,2006(6):34-34.
- [12] 胡延燕.关于缓凝剂葡萄糖酸钠若干问题的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2006.
- [13] 王栋民,熊卫锋,左彦峰,等.聚羧酸盐高性能减水剂的制备、作用机理及应用现状[J].混凝土,2008(5):64-67.

(责任编辑 王利君)