

文章编号:1001-4888(2018)04-0551-06

3D 打印结构加强混凝土短柱抗压力学性能研究^{*}

夏明杰, 范立峰, 马国伟

(北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 以韧性树脂为材料,采用光固化3D打印技术,制作由若干纵筋和环向箍筋组成的3D打印结构网架,用于加强混凝土材料。混凝土试件为直径100mm,高200mm的圆柱,由M2.5水泥砂浆为基体,配筋率体积比为2.17%。另制作相同尺寸的无加筋素混凝土试件作对比试验。单轴压缩试验结果表明,与素混凝土试件相比,3D打印结构加强混凝土试件的抗压强度提高了53.28%,峰值应变提高了70.22%,极限应变提高了164.66%,峰前吸收能量值提高了134.21%。3D打印结构加强混凝土试件破坏后强度下降比素混凝土试件更缓慢,在破坏形态上,加强后的试件裂纹更窄。本文论证了3D打印结构加强混凝土在工程中应用的可行性。

关键词: 3D打印结构; 加强混凝土; 力学性能; 单轴压缩试验

中图分类号: TU528.572

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-063

0 引言

混凝土材料抗压强度高,价格便宜,是当前土木建筑领域应用最广泛的材料,然而混凝土材料也存在抗拉强度低,抗裂性能差等缺陷。混凝土材料必须采用必要的加固措施,增强其抗拉、抗裂性能,才能够应用到实际工程中。

传统的混凝土加固技术有添加钢筋骨架^[1]、增强纤维^[2,3]、外包裹纤维加强布^[4]等方法。这些方法虽然都能够有效改善混凝土的特性,但也存在各自的不足之处。应用最广泛的钢筋骨架在生产过程中费时费力,精度控制差,易有人工失误,且会产生大量的污染。增强纤维影响混凝土的和易性,包裹纤维布的方式会加大施工难度。

3D打印作为一项新兴技术,正在被广泛地应用于制造业领域。3D打印被称为“具有工业革命意义的制造技术”,其主要特征是利用计算机建立数字化三维模型,然后通过三维成型设备(俗称“3D打印机”),打印出可复制、可控制的实体产品^[5]。和传统制造工艺相比,3D打印技术具有精度高,数字建模无形状限制,制作速度快等优势。在建筑领域,Pegna首次使用水泥基材料打印了建筑构件^[6]。发展到目前,建筑领域应用比较广泛的3D打印技术有:D型工艺(D-Shape),轮廓工艺(Contour Crafting)和混凝土打印(Concrete Printing)^[7,8]。在我国,3D打印在建筑领域的研究和应用同样在快速发展。2014年,10幢通过3D打印技术建造的办公用房在上海张江高新区正式交付使用^[9]。3D打印技术给混凝土加固和建筑结构快速建造提供了一种新的思路。目前3D打印混凝土技术在建筑领域的应用主要受限于加强结构的制作方法,由于受到打印技术限制,目前同时打印加强结构和混凝土材料仍然无法实现。

本文以韧性树脂Somos GP Plus(SGP)为打印材料,采用光固化3D打印技术打印加筋结构,配置

* 收稿日期: 2017-03-16; 修回日期: 2017-04-19

基金项目: 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目资助(项目号: 51627812)

通讯作者: 马国伟(1968—),男,博士生导师。研究领域: 结构防护,新型建筑材料等。Email: guowei.ma@uwa.edu.au

强度等级为M2.5的水泥砂浆作为混凝土基体,制作直径100mm,高度200mm单轴压缩试件^[10]。通过试验,分析了采用3D打印结构加固的混凝土试件在力学性能上的提高效果。和3D打印混凝土的目的不同,本文主要针对混凝土加强结构难以快速、精确成型的特点,通过3D打印混凝土加强结构,评估加强结构和混凝土的协同作用。通过3D打印混凝土加强结构,可以改变传统人工绑扎钢筋的施工模式,减少建筑施工对环境的污染,为3D打印技术在未来的实际工程应用提供宝贵的试验研究基础。

1 试验概况

1.1 试件设计与试件材料

混凝土构件内部的加筋结构不可过于密集或过于稀疏。混凝土结构设计规范^[11]规定混凝土柱配筋率不超过5%,配筋过稀则起不到足够的强化提高效果。本文试验设计的加筋骨架由12根纵筋,10根环向箍筋组成(图1)。加筋结构尺寸特性如表1。

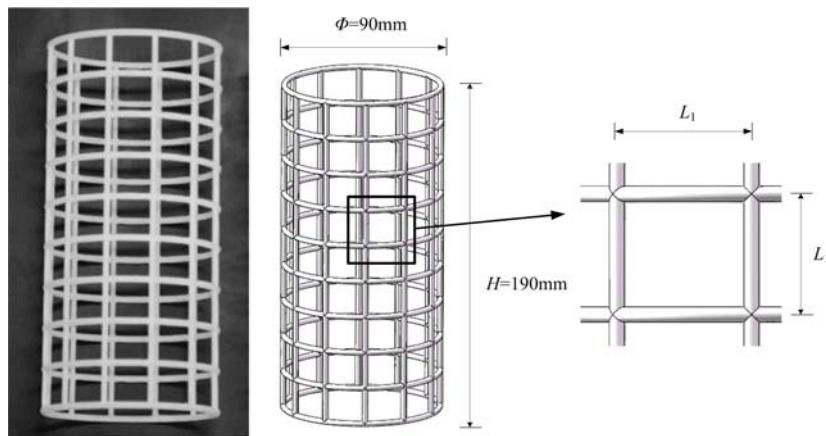
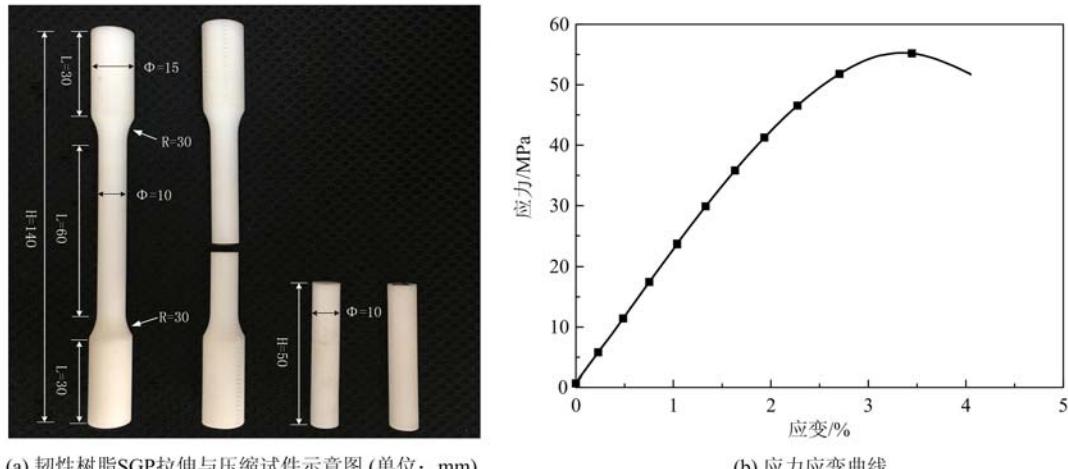


图1 3D打印技术制作的加筋结构

Fig. 1 Structures produced by 3D-printing



(a) 韧性树脂SGP拉伸与压缩试件示意图(单位: mm)

(b) 应力应变曲线

图2 韧性树脂SGP基本性能

Fig. 2 Basic property of ductile resin SGP

加筋结构材料为韧性树脂材料SGP。本文对该材料进行了轴向拉伸和轴向压缩基本力学性能测试试验,测试件尺寸和形状如图2(a),该韧性树脂材料的轴向拉伸应力应变曲线和轴向压缩应力应变曲线如图2(b)。该材料极限抗压强度为55.28MPa,极限抗拉强度为46.26MPa,两者相差9.02MPa,拉压强度差距小于20%。从图2中可以看到此材料屈服伸长率为3.28%,断裂伸长率为4.52%,且拉伸和压缩的应力应变曲线在前半段基本一致。可见此材料拉伸强度和压缩强度接近,伸长率性能良好,具有与钢筋材料类似的性能,用该材料来模拟实际工程中的钢筋材料,具有代表性。

表1 3D打印加筋结构尺寸特性

Tab. 1 Size features of reinforced structures

| 高度 H | 直径 Φ | 体积 V | 竖杆长度 L_1 | 横杆长度 L_2 | 连杆直径 d |
|------|-----------|------|----------------------|------------|---------|
| 3D-J | 190mm | 90mm | 34073mm ³ | 21.11mm | 23.56mm |

实际工程中混凝土与钢筋强度比值范围在 1/10~1/18 之间,这样才能保证钢筋可以发挥最佳的加固混凝土构件的效果。依据比例,本试验选用 M2.5 强度等级的水泥砂浆作为混凝土基体材料。

为了规避试验当中的偶然因素,使试验具有代表性,本试验加筋的试件制作三个,其内置 3D 打印加筋网纵向筋与箍筋体积率之和为 2.17%。另制作三个无加筋结构的素混凝土试件作对比试验,并将每个试件编号(表 2)。试件高度 200mm,直径 100mm。

表2 试件编号

Tab. 2 Numbers of specimens

| 试件 | 编号 |
|-----------|------------------------------|
| 素混凝土试件 | N(N-1, N-2, N-3) |
| 3D 打印加固试件 | 3D-J(3D-J-1, 3D-J-2, 3D-J-3) |

1.2 试件制作与养护

在三维建模软件中建立 3D 打印加筋结构模型,采用美国 3Dsystmes 公司生产的 SLA600 型 3D 打印机(图 3),韧性树脂 SGP 为打印材料,以激光固化 3D 打印技术制作试验所需的加筋结构(图 1)。查阅规范[12],得到 M2.5 砂浆每立方米配合比:水泥(42.5 级)200kg,中砂 1450kg,水 320kg。混凝土砂浆搅拌均匀后,将砂浆和加筋结构放入事先制作好的模具中,振捣密实后置入混凝土标准养护箱养护。24 小时后拆模,然后继续养护至 28 天。

1.3 加载装置及加载制度

采用万能试验机对试件进行轴心受压加载,加载方式采用位移控制加载,加载速率为每分钟 1mm。考虑到破坏后加筋结构和混凝土基体分离,导致两者协同工作破坏,此时的力和位移曲线不再具有代表性,故将位移加载终止点设为残余强度为峰值强度的 1/3 处。

2 试验结果与分析

2.1 试件破坏过程

随着加载进行,短柱试件首先在端部开裂,产生微裂纹,微裂纹伴随荷载的增大而扩展,最终发展成为贯穿整个试件的主裂纹。内部有加筋结构的试件破坏时,试件表面混凝土保护层部分剥落,能够听到内部加筋材料逐渐断裂的声音。

2.2 应力应变响应

通过单轴压缩试验,得到各个试件的应力应变曲线(图 4)。图中,N 为三个无加筋素混凝土试件的应力应变曲线。3D-J 为三个 3D 打印结构加固试件的应力应变曲线。

从图 4 中可以看到,同一种类试件的三条应力应变曲线在试件破坏之前形态比较接近,为了方便比较,本文将同种试件的三条应力应变曲线作插值平均处理。具体方法为,每条曲线取应变步长为 0.001%,对应力值进行插值,然后取三条曲线应力的算术平均值作为该应变处的应力值,总应变取三条曲线的最小值。经过平均处理后的无加固混凝土试件应力应变曲线为 P-N,3D 打印加固的混凝土试件应力应变曲线为 P-3D-J,依据这两条平均后的曲线描述和分析该试件的应力应变特性。



图 3 3D 打印机

Fig. 3 3D Printer

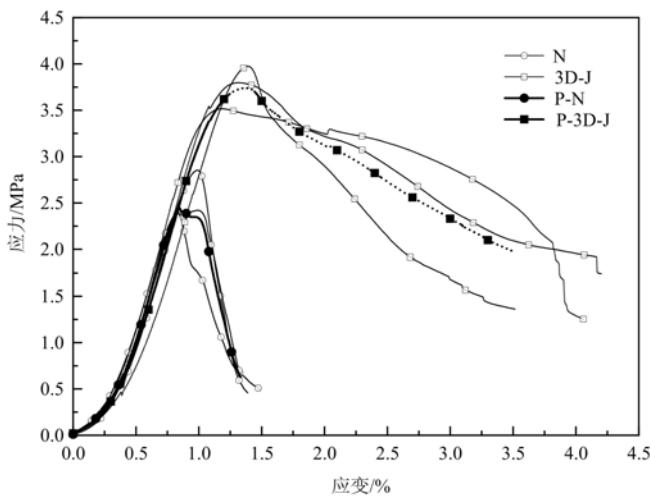


图4 两种加筋密度试件应力应变曲线

Fig. 4 Stress strain curves of two kinds of specimens

无加筋的素混凝土试件峰值应力只有2.44MPa,而3D打印结构加强的试件峰值应力达到3.74MPa。相比于素混凝土试件,内部有3D打印加筋结构加固的试件峰值应力提高了53.28%(表3)。显然,3D打印结构加强混凝土能够显著提高试件的单轴抗压强度。轴压状态下,加筋骨架能够约束混凝土基体的侧向变形,限制试件裂缝的产生和发展,从而提高混凝土试件的单轴压缩强度。

表3 3D打印加固前后力学性能对比

Tab. 3 Performance comparison

| | 峰值应力 | 峰值应力处应变 | 极限应变 | 峰前吸收能量 |
|------|---------|---------|-------|--------|
| N | 2.44MPa | 0.81% | 1.33% | 16.69J |
| 3D-J | 3.74MPa | 1.37% | 3.52% | 39.09J |

混凝土峰值应变一般在0.2%,但峰值应变的试验值易受到试件形状、混凝土强度等级的影响,本文以试验得到的实际应变值为依据进行分析。没有加筋的素混凝土试件峰值强度对应的应变只有0.81%,采用3D打印结构加固的试件峰值强度处的应变达到了1.37%。相比于素混凝土试件,峰值强度处的应变值提高了70.22%。素混凝土试件的极限应变值只有1.33%,而3D打印结构加固试件的极限应变值为3.52%,同素混凝土试件相比,3D打印加筋结构加固的混凝土试件应变值有明显的提高,提高了164.66%。无加筋素混凝土峰前吸收能量16.69J,3D打印加固的试件峰前吸收能量39.09J,其峰前吸收能量提高了134.21%(表3)。3D打印加固措施改善了混凝土的变形性能。

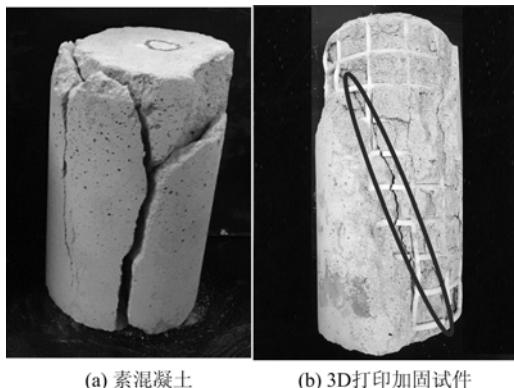


图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure form of specimens

当试件破坏之后,通过3D打印结构加固的试件,其强度下降速度明显比素混凝土试件更加缓慢。这是因为当试件破坏之后,未断裂的加筋骨架部分仍就能够发挥限制混凝土裂缝扩展的作用。

2.3 破坏形态分析

当混凝土圆柱内部没有加筋结构时,试件呈现典型的劈裂破坏模式,试件上存在贯穿的大裂缝,破坏之后试件碎裂成离散的若干部分(图5(a))。敲掉3D打印结构加固试件表面的混凝土保护层,可以观察到内部加筋部分均沿着主裂缝方向发生断裂(图5(b)),呈显著剪切破坏模式。内部有加筋结构的试件破坏之后,虽然也存在贯穿的大裂纹,但是整个试件并没有碎裂成离散的块体,仍旧成一个整体,且试件的主裂纹比素混凝土试件的窄。

当试件在轴压状态下,混凝土基体向外鼓胀,随着荷载增加,裂纹逐渐产生并发展。素混凝土试件没有侧向约束,故破坏之后试件主裂纹比较宽,不仅峰值强度低,其对应的应变值也明显偏低,为明显的脆性破坏。3D打印加强结构通过约束混凝土的侧向变形来限制裂纹出现与发展,对试件强度、应变、能量吸收具有提高作用,使试件在破坏形态上呈韧性破坏。试件破坏后,部分未断裂的加筋骨架使试件裂而不散,仍具有一定承载力。试验结果表明,3D打印结构可以很好地起到约束混凝土的作用,和混凝土有良好的协同工作能力。

3 工程可行性分析

3D打印技术具有加工精度高、制作速度快等优势,就材料方面来说,目前3D打印已经可以打印出高强度的金属和陶瓷材料。本文采用的SGP韧性树脂除强度弱于钢筋材料外,其余性能均同钢筋材料类似,用此材料3D打印制作的产品可用于试验研究和简单建筑构件制作。材料层面来说,采用3D打印技术加固混凝土结构是可行的。

用3D打印结构来进行混凝土加固,可以改善混凝土构件的力学性能。当前3D打印技术在建筑领域的研究集中在3D打印混凝土部分,并取得了一定的成就。然而,3D打印混凝土同样存在和普通混凝土一样的高脆性,抗拉、抗弯强度低且易造成混凝土收缩引起的开裂等不良特性。由于3D打印混凝土缺乏加固,当前采用3D打印技术建造的房屋普遍存在结构简单、高度不足等问题。另外一方面,若混凝土施工采用3D打印技术,而加筋结构仍旧采用传统的绑扎钢筋等形式,那么将无法发挥出3D打印技术制造速度快、绿色环保的优势。

混凝土加固材料放置于混凝土构件内部,需要一种能同时打印两种及以上材料的3D打印机,方能实现混凝土材料和加固材料同时打印,使加筋结构在整个构件内部起到加强作用。将混凝土基体打印、加筋结构打印,以及其他防水材料打印等不同打印系统,集成到同一台3D打印机中,在计算机控制下,不同打印系统之间互相协调配合,并完成各自任务,打印出所需要的产品。本文所采用的激光固化3D打印技术(SLA)打印精度高,可以打印任意复杂形状,对工程中各种复杂构件的制作具有参考价值。

4 结论

通过对3D打印结构加固的试件进行单轴压缩试验,并分析试验结果后,本文得到如下结论:

(1) 3D打印的加筋结构能显著提高混凝土在单轴压缩状态下的强度和变形性能。具体表现为,相比于素混凝土试件,3D打印加固的试件强度增大,峰值应变和极限应变提高,试件吸收的能量更多,有明显的应力软化段。

(2) 在破坏形态上,内部的3D打印加筋骨架能够限制裂纹的出现与发展,明显缩小了受压试件的开裂裂纹,使得破坏后的试件不至于破裂成完全离散的碎块。

(3) 通过材料可行性、技术可行性、工程必要性三方面论证了3D打印技术加固混凝土在工程上是可行的,本文所采用的3D打印材料SGP树脂和激光固化3D打印方式在工程上具有参考价值。

参考文献:

- [1] 李鹏,郑鸿飞,张宪堂,等.水工结构高强钢筋混凝土梁受剪性能试验研究[J].实验力学,2016,31(2):253—262(LI Peng, ZHENG Hongfei, ZHANG Xiantang, et al. Experimental investigation on shear performance of high strength rebar reinforced concrete beam in hydro-structure[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31 (2):253—262 (in Chinese))
- [2] 张新越,欧进萍. FRP 加筋混凝土短柱受压性能实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2006,38(4):467—472 (ZHANG Xinyue, OU Jinping. Experimental research on compressive properties of concrete stub square column reinforced with FRP bars[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2006, 38(4):467—472 (in Chinese))
- [3] 贺晶晶,师俊平,王学志. 纤维混杂效应对混凝土弯曲韧性的改善[J]. 实验力学,2017,32(1):113—122 (HE Jingjing, SHI Junping, WANG Xuezhi. On the effect of fiber hybrid effect on the improvement of concrete flexural

- toughness[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1):113—122 (in Chinese))
- [4] 周长东, 白晓彬, 赵锋, 等. 预应力纤维布加固混凝土圆形截面短柱轴压性能试验[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(2):131—140 (ZHOU Changdong, BAI Xiaobin, ZHAO Feng, et al. Experimental study on circular concrete short columns strengthened with pre-stressed FRP under axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(2):131—140 (in Chinese))
- [5] 王忠宏, 李扬帆, 张曼茵. 中国3D打印产业的现状及发展思路[J]. 经济纵横, 2013(1):90—93 (WANG Zhonghong, LI Yangfan, ZHANG Manyin. The present situation and development of 3D printing industry in China[J]. Economic Review, 2013(1):90—93 (in Chinese))
- [6] Pegna J. Exploratory investigation of solid freeform construction[J]. Automation in Construction, 1997, 5(5):427—437.
- [7] Khoshnevis B, Hwang D, Yao K, et al. Mega-scale fabrication by contour crafting[J]. International journal of Industrial and System Engineering, 2006, 1(3):301—320.
- [8] Lim S, LE T, Webster J, et al. Fabricating construction components using layer manufacturing technology (GICC'09)[C]. Leicestershire UK, Global Innovation in Construction Conference, 2009:13—16.
- [9] 王丽萍, 徐蓉, 苗冬梅, 等. 苏州某试验楼项目3D打印实体建筑施工技术研究[J]. 施工技术, 2015, 44(10):89—100 (WANG Liping, XU Rong, MIAO Dongmei, et al. Study on 3D printing construction techniquebased on the Suzhou testing building[J]. Construction Technology, 2015, 44(10):89—100 (in Chinese))
- [10] GB/T 50081—2002. 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 中国建筑工业出版社, 2003 (GB/T 50081—2002. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete[S]. China Architecture & Building Press, 2003(in Chinese))
- [11] GB50010—2010. 混凝土结构设计规范[S]. 中国建筑工业出版社, 2011 (GB50010—2010. Code for design of concrete structures[S]. China Architecture & Building Press, 2011(in Chinese))
- [12] JGJ98—2000. 砌筑砂浆配合比设计规程[S]. 中国建筑工业出版社, 2001 (JGJ98—2000. Specification for mix proportion design of masonry mortar[S]. China Architecture & Building Press, 2001(in Chinese))

An experimental study of compressive mechanical properties of concrete short column strengthened by 3D-printing structure

XIA Ming-jie, FAN Li-feng, MA Guo-wei

(Department of Architecture Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Taking tough resin as material, adopting light curing 3-D printing technology, 3-D printed grid structure composed of several longitudinal bars and hoop stirrups was fabricated to reinforce the concrete specimen. The concrete specimen is a circular column with diameter of 100mm and height of 200mm. M2.5 cement mortar is used as the matrix, and the ratio of reinforcement to volume is 2.17%. Unreinforced concrete specimens with the same size were made for contrast experiment. Uniaxial compression experimental results show that compared with plain concrete specimen, the compressive strength of concrete specimens strengthened by 3D printing structure increases by 53.28%, peak strain increases by 70.22%, the ultimate strain increases by 164.66%, the pre-peak absorption energy increases by 134.21%, respectively. After peak strength, the strength degradation of concrete specimens strengthened by 3-D printing structure is more slowly than that of plain concrete specimens. Moreover, in the failure mode, the crack of the strengthened specimen is narrower. Finally, the application feasibility in engineering of above concrete reinforcement technology based on 3D-printing is demonstrated.

Keywords: 3D-printing structure; reinforcement concrete; mechanical behavior; unconfined compression