

DOI: 10.11779/CJGE202105019

基于 FBG 技术的增材制造土体内部变形特征研究

王南苏^{1, 2, 3}, 洪成雨^{*1, 3}, 朱 旻^{1, 3}, 张一帆⁴, 王 俊^{1, 3}

(1. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 上海大学力学与工程科学学院土木工程系, 上海 200444;

3. 深圳大学未来地下城市研究院, 广东 深圳 518060; 4. 香港理工大学 3D 打印研究中心, 香港)

摘 要: 将布拉格光纤光栅 (Fiber Bragg Grating, 简称 FBG) 传感器植入 3D 打印土体内部, 开展 3D 打印不同阶段的土体应变变化特征研究。试验中主要考虑 3 个阶段, 包括 3D 打印阶段、土体室内烘干阶段、单轴抗压试验阶段。试验中主要考虑改变土体的 3D 打印填充密度, 分别为 40%, 60%, 80%, 100%。试验结果表明: 增材制造技术打印的土体可根据 FBG 传感器测得的内部变形特征划分 3 个典型阶段, 包括打印-横向膨胀变形阶段, 土样干燥-变形收缩阶段, 稳定的残余变形阶段。研究发现: ①打印阶段中, 土样的侧向变形与填充密度呈线性变化, 且变形具有突变特征。100% 填充密度土体应变增量是 40% 填充密度土体的 4 倍; ②干燥阶段中, 土样收缩变形呈现先非线性下降后伴随稳定阶段的现象, 填充密度的提高导致收缩应变增大, 伴随出现残余应变的时间发生滞后; ③单轴抗压试验阶段, 土体横向变形呈现急剧上升的现象, 测得的横向变形与填充密度亦呈现线性关系。FBG 传感器的结果显示, 当填充密度从 40% 提高到 100% 时, 土体的侧向破坏应变提高了 1.1 倍。

关键词: 增材制造; 布拉格光纤光栅; 土体; 变形特征

中图分类号: TU521; TP212

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2021)05 - 0940 - 08

作者简介: 王南苏(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术, 3D 打印技术, 智能传感器器件的研发工作。E-mail: wangnansu121@163.com。

Internal deformation characteristics of soil samples in additive manufacturing based on FBG technology

WANG Nan-su^{1, 2, 3}, HONG Cheng-yu^{*1, 3}, ZHU Min^{1, 3}, ZHANG Yi-fan⁴, WANG Jun^{1, 3}

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Department of Civil Engineering,

School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. Underground Polis Academy, Shenzhen

University, Shenzhen 518060, China; 4. University Research Facility in 3D Printing (U3DP), Hong Kong Polytechnic University, Hong

Kong, China)

Abstract: In this study, the Fiber Bragg Grating (FBG) sensors are successfully mounted into 3D printed soil samples to investigate the internal strain characteristics in different printing stages, which mainly consist of 3D printing stage, indoor drying stage, and uniaxial compression test stage. The systematic change in infill density including 40%, 60%, 80% and 100% is taken into account in the printing stage. The test results show that the soil printed by the additive manufacturing technology can be divided into three typical stages according to the internal deformation characteristics measured by the FBG sensors, including lateral expansion stage, soil sample drying and contraction stage, and stable residual deformation stage. It is found that: (1) During the printing stage, the lateral strain of soil samples increases, linearly proportional to the change in the infill density. The strain increment of the soil with infill density of 100% is 4 times that with infill density of 40%. (2) During the drying stage, the printed soil samples contract significantly along with a stable strain change phase. The increase of infill density of soil leads to substantial rise of shrinkage strain, and presence of residual strain is postponed when the infill density is high. (3) During the uniaxial compression test stage, the lateral deformation of soil shows a sudden rise, and the measured lateral deformation is linearly proportional to the change in the infill density. The results of the FBG sensors indicate that lateral failure strain of soil increases 1.1 times when the infill density increases from 40% to 100%.

Key words: additive manufacturing; Fiber Bragg Grating; soil; deformation characteristic

0 引 言

增材制造技术, 也称为 3D 打印, 是一种通过计

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078303); 国家自然科学基金重点
项目 (51938008)

收稿日期: 2020 - 07 - 22

*通信作者 (E-mail: cyhong@szu.edu.cn)

计算机建模, 耗材层层挤塑来构建实体零件的技术。增材制造技术因其速度快, 成本低, 个性化定制等优点, 被广泛运用于生物医学, 航空, 制造业等领域^[1-4]。

基于增材制造技术的研究近年来发展越来越迅速, Hong 等^[5-7]结合 FBG 传感器与 3D 打印技术研究出多种新型土体传感器并应用于实际工程。高磊等^[8]通过开展桩基 3D 打印混凝土材料的试验研究, 制备出新型 3D 打印混凝土材料。田威等^[9]研究了不同温度下 3D 打印岩体试样的力学性能, 提出了 3D 打印岩体的最优化温度和最优力学温度下岩体破坏特征。Song 等^[10]采用石膏粉和 Polylactic Acid (PLA) 为 3D 打印材料, 制备出 4 种隧道模型并对模型进行单轴压缩模型试验, 发现 3D 打印隧道模型与真实隧道的破坏特征一致。李蕾等^[11]以 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) 为 3D 打印基体, 研究不同改性剂含量对 ABS 力学性能、耐热性能、收缩率的影响。李伟等^[12]通过 3D 打印制备了 B30 铜镍合金的样件胚体, 研究了不同烧结温度对制件的收缩率、拉伸强度和密度的影响。从以上研究来看, 目前基于 3D 打印的研究材料主要是混凝土, 岩体, PLA, ABS 和金属等, 对打印试样的力学性能的研究多用单轴抗压试验, 数值模拟方法等, 对 3D 打印材料的内部变形的特性研究相对较少。

土体因其成本低, 数量大, 运输方便等优点, 不仅运用在道路与房屋的建造, 建筑渣土的再利用和外太空基地的建立等方面^[13-14], 在重工业, 也应用广泛, 如金属冶炼等。随着增材制造技术的迅速发展, 以土体为材料的增材制造模式也逐渐兴起, 增材制造土体的技术不仅可以运用在偏远地区如沙漠等建设基础设施, 也可以在月球、火星上建立研究基地, 如北京崇建公司自主研发建筑渣土 3D 打印技术, 将施工现场的建筑渣土打印成护栏, 挡墙等^[15]。欧洲航天局以月球尘土为材料运用增材制造技术打印出建筑物所用砖块, 为建设月球基地提供了可能^[16]。土体收缩和结构强度往往是影响成型土体的重要参数, 土体收缩引起的裂缝会影响打印土体的自身强度, 对 3D 打印土体内部变形特征的研究可以直接获取压缩和强度的参数, 对 3D 打印土体制备的建筑或构件的稳定性具有一定的参考意义。然而, 现阶段的研究只停留在土体打印试样的建造应用方面, 关于 3D 打印的土体内部变形特征的研究十分匮乏, 采用 3D 打印土体制备的结构成型时间和承载性能没有研究数据的支撑, 因此, 增材制造制备土体内部变化特征的研究对于未来 3D 打印土体的普及与推广提供一定的研究基础, 为评估 3D 打印土体的力学性能提供试验数据, 对于推进土体 3D 打印建筑或构件的建造具有一定的意义^[17-19]。近年

来, 光纤传感技术发展迅速, 与传统电阻式传感器相比, 具有尺寸小, 精度高, 抗电磁干扰能力强等特点被广泛运用于工程监测中^[20-23]。因此, FBG 传感器可有效监测土体变形特征。

本研究结合 3D 打印和 FBG 传感技术, 通过在土体打印过程中植入 FBG 传感器监测打印土样的变形特征, 研究不同填充度与土体横向膨胀特征, 土样干燥-变形收缩变化规律, 残余变形的关联性。

1 光纤光栅的传感原理

光纤布拉格光栅传感器是一种典型的光纤传感器, 光纤从内而外分别由纤芯、包层和涂覆层组成。光纤光栅传感器主要指布拉格光栅部分, 该部分基于硅光纤的紫外光敏性写入光纤纤芯内部, 形成具有不同周期特性的光栅, 光栅周期与温度和应变线性相关。光纤布拉格光栅的传感原理如图 1 所示。在输入特定波长的光满足布拉格条件时, 特定波长的光会发生反射, 而其余光会发生透射。发生反射光的中心波长的表达式为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中, λ_B 为中心波长, n_{eff} 为纤芯有效折射率, Λ 为光栅周期。

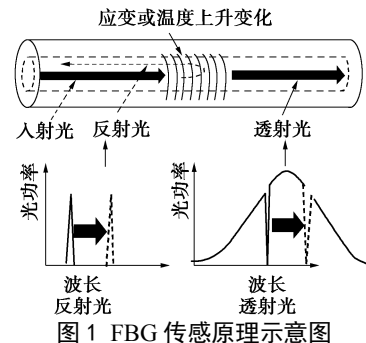


图 1 FBG 传感原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FBG sensing principle

布拉格光纤光栅中心波长的偏移量与应变和温度的关系可以由下式进行计算:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\Delta\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T, \quad (2)$$

式中, p_e 为有效弹光系数, $\Delta\varepsilon$ 为光纤布拉格光栅轴向应变变化量, ΔT 为温度变化量, α , ζ 分别为光纤布拉格光栅的热膨胀系数和热光系数。FBG 实物图如图 2 所示, 中间黄色标记区间为栅区。式 (2) 可写为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = c_\varepsilon\Delta\varepsilon + c_T\Delta T, \quad (3)$$

式中, c_ε , c_T 为光纤光栅的应变系数和温度系数, 通过标定试验得到本试验中光纤光栅的 c_ε , c_T 为 $0.78 \times 10^{-6} \mu\text{m}^{-1}$, $6.4 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ 。

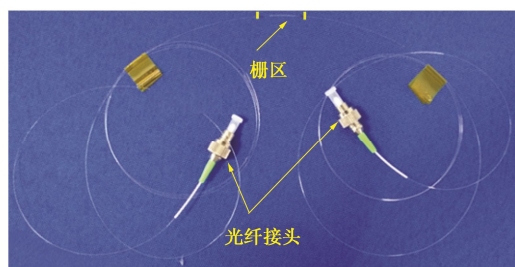


图 2 FBG 传感器

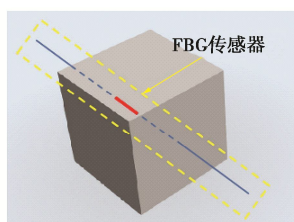
Fig. 2 FBG sensor

2 增材制造黏土变形特征研究

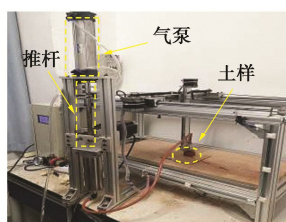
2.1 增材制造制备土样

本试验利用 3D 打印机开展土体的打印成样研究, 结合 FBG 技术进行土体的内部变形监测。初始土样尺寸为 30 mm 的立方体, 土体为高岭土, 土体的性能参数: 土体颗粒相对质量密度为 2.54, 曲率系数为 0.284, 塑限为 14.03%, 液限为 31.91%, 塑性指数为 17.88。测得的曲率系数为 0.284, 液限为 31.9%, 塑限为 14.0%。试验证明, 初始含水率为 35% 时, 土体良好的挤出性得以保持, 土样可以顺利成型。

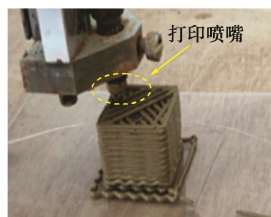
首先通过软件建立土样的三维模型如图 3 (a) 所示, FBG 预放置在土样中间的位置。打印之前, 将表面光滑的玻璃板放置在打印机指定位置如图 3 (b) 所示, 并进行打印喷头定位与校准。打印喷头直径为 2 mm, 打印角度为 45° , 采取网状的填充结构, 填充密度包括 40%, 60%, 80%, 100%, 土样打印后网格内部土条的间隔随打印密度的增大而减小。网状填充是指打印机喷头的运动方向与本矩形模型任一边呈 45° 的方向行走, 使得模型内部网格与外围矩形构成三角形框架, 模型成型后, 更加稳固。在打印土样完成 50% 尺寸时, 将 FBG 放置在土样中心, 增材制造制备土体模型过程中, 打印机土体挤塑喷嘴是在模型上方移动并挤塑土体, 为保证土体的稳定成型, 喷嘴与模型面有一定的间距, 且此间距大于挤塑土条直径, 打印成型后 FBG 完全固定在土体内部 (图 3 (c), (d))。



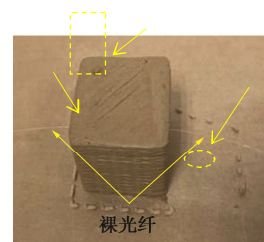
(a) 模型



(b) 打印机



(c) 打印过程



(d) 打印成型

图 3 3D 打印土体图

Fig. 3 3D printed soil

每组试验打印 3 个试样, 打印完成后, 将土体放置于称重计上, 采用摄像机以每 15 min 频率拍摄质量照片。图 4 所示为打印完成后土样, 图中 FBG 传感器完全封装在土体核心位置处, 裸光纤从土体两侧引出。

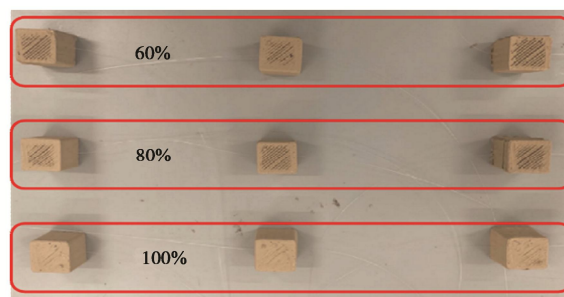


图 4 不同填充密度的土块试样图

Fig. 4 Photos of soil samples with different infill densities

本试验通过在打印土体内部中心放置 FBG 传感器以达到土体收缩应变的监测, 基于 40%, 60%, 80%, 100% 4 种不同填充密度土体试样的试验结果, 发现不同填充密度下都有相似的变化趋势, 图 5 所示为波长随烘干时间的变化特征。

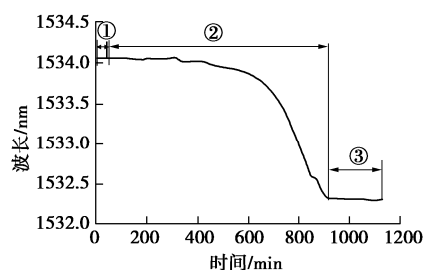


图 5 3D 打印土样 FBG 波长变化

Fig. 5 Variation of FBG wavelength in 3D printed soil samples

(1) 第一阶段: 打印-横向膨胀变形阶段

此时 FBG 尚未放置在打印模型中, 在室温环境下放置, 所以此时的 FBG 传感器仅受室内温度影响。由于打印场所室内温度始终保持恒温, 所以 FBG 传感器的波长趋于稳定当土体打印进程显示为 50%, 随即将 FBG 放置于半层土体之上, 波长会发生突变, 这是由于在放置 FBG 传感器后, 瞬间的土层增压造成的波峰上升, 波峰上升量随着填充密度的不同在 30~250 pm

范围内变化。

(2) 第二阶段: 土样干燥-变形收缩阶段

土体打印完全后, 平稳放置在称重计上进行自然干燥。随着时间的推移, 土体的含水量降低, 土体开始收缩, 最终呈现完全干燥状态, FBG 传感器波长变化量拐点值出现时间随填充密度的不同在 200~1000 min 内变化。填充密度越高, 土体核心收缩应变越大同时耗时最长, 波长变化量随填充密度的不同在 90~170 pm 变化。

(3) 第三阶段: 稳定的残余变形阶段

这一阶段中, FBG 传感器波长呈现平稳趋势, 土体核心位置处不再呈现收缩变化, 波长仅受环境温度影响。此时土体质量损失至最大值, 称重计示数保持平稳, 质量损失最大值随不同填充密度在 8~13 g 范围内变化。

2.2 增材制造阶段的土体变形特征分析

本试验中, 处于核心位置的 FBG 传感器可以反映土体在打印阶段拉伸应变值, 本试验同时放置 FBG 温度传感器用于温度修正。图 6(a) 所示为不同填充密度下土体打印过程的应变变化曲线, 从图中可以看出, 不同填充密度的土体应变值在打印过程阶段均会出现一个突变。土体应变值在 8 min 左右出现不稳定段, 这是由于采用人工放置, 即将 FBG 快速移动到打印机内部, 且迅速放在打印模型上方, 此过程中难免出现 FBG 的微小干扰。图 6(b) 所示为在 9~12 min 范围内打印过程应变变化曲线, 应变突变值范围在 30~210 $\mu\epsilon$ 。打印初始, 不同填充密度土体的应变基本保持平稳, 这是由于, 刚开始打印土体时, FBG 传感器并未放入在土体内部, 仅受环境温度影响。在放置 FBG 传感器后, 每种填充密度的土体都出现应变骤升段, 这是由于在 FBG 放置在打印土体上, 打印喷嘴移动至 FBG 位置时土体堆积, FBG 受到压力产生拉应变, 土样发生水平向扩张, 土样侧向发生膨胀。骤升段出现时间与填充密度呈线性变化, 填充密度越高, 骤升段出现时间越晚, 这是由于填充密度越高的土体所需每层填充时间越长。应变骤升段以后, 应变会发生下降, 这是由于试验中在土体打印完成 50% 后, 将 FBG 放置在土样中心位置, 上方土条堆积引起波长上升, 由于挤塑的土体具有流塑性, 尚未硬化, FBG 与土样会发生滑移现象。试验中若 FBG 传感器表面粗糙或带有螺纹状可以锚固到土体内部防止发生相对滑移, 但传感器尺寸太大会影响打印土体的结构, 因此在试验中没有对传感器进行额外的加工以防止滑移现象的发生。4 种不同填充密度的土体应变突变后会降为负应变, 这是由于土样在打印过程中的快速收缩导

致的应变下降。

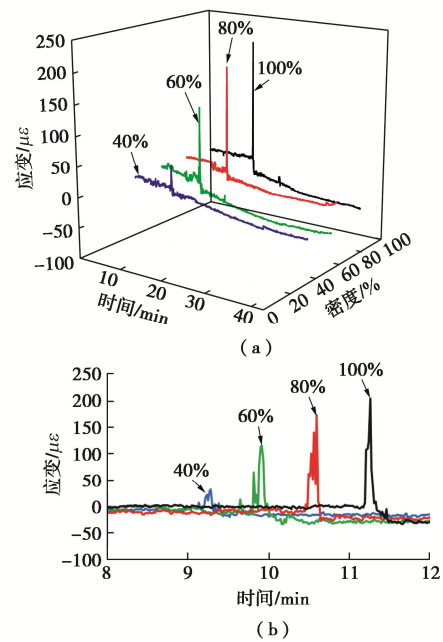


图 6 不同填充密度下土体打印过程应变-时间-密度曲线

Fig. 6 Strain-time-density curves of soil printing process under different infill densities

图 7 所示为不同填充密度下土体打印过程应变骤升峰值, 从图中可以看出, 40%~100%填充密度下土体的应变呈线性变化, 100%填充密度的土体应变骤升增量是 40%填充密度的 4 倍。这是由于, 填充密度越大, 放置 FBG 传感器后, 打印土体密实度越大, 因此, 栅区受到更多的土体堆压, 所以出现填充密度越大, 应变骤升量也就越大。

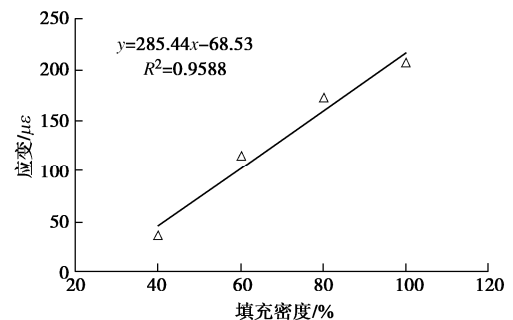


图 7 不同填充密度下土体打印过程应变峰值

Fig. 7 Peak strain values of soil in printing process under different infill densities

2.3 增材制造土体干燥过程的变形特征

打印完成后, 进入特征曲线的土样干燥-变形收缩阶段。由于土样本身尺寸小, 打印土条直径仅为 2 mm, 并且 FBG 温度传感器需要隔离套管, 体积较大, 同时放置应变和温度传感器难度系数大, 破坏土体原有结构, 因此本研究没有考虑土体在收缩过程中热量的改变。图 8 所示为不同填充密度下干燥过程应变三维视

图, 由图可知, 随着时间变化, 土体应变值整体呈反S型下降趋势, 这是由于, 土体在打印完成后, 内部水分散失, 土体进行收缩, 所以土体应变值下降, 不同填充密度土体收缩应变值范围在 $750 \sim 1500 \mu\epsilon$ 。不同填充密度下土体应变下降趋势不同, 填充密度越大, 下降趋势越缓, 这是由于填充密度增大时, 土体内部结构更密实, 水分散失速度更低, 因此土体应变下降速率变慢。土体应变曲线出现拐点值且不同填充密度下土体应变达到拐点值的干燥时间不同, 填充密度越高, 拐点出现时间越慢, 拐点出现时间范围在 $235 \sim 1000 \text{ min}$ 。这是由于填充密度越高, 土体每层填充越密实, 其呈完全干燥状态所耗时间越长。图9所示为不同填充密度下应变变化量拐点值和最低值, 从图中可以看出, 应变变化量随填充密度不同而呈线性变化, 填充密度越大, 应变收缩量越大。40%, 60%, 80%, 100%填充密度的土体收缩应变量分别为 $799.7, 885.1, 1063.3, 1478.9 \mu\epsilon$ 。100%填充密度土体收缩应变量是40%填充密度土体的1.84倍。同一密度的土体应变拐点值与最低值差距较小, 差值在 $15 \mu\epsilon \sim 65 \mu\epsilon$ 范围内。在拐点值出现之后, 应变曲线趋于平缓, 这是由于土体趋于完全干燥状态, 土体内部结构逐渐稳定。

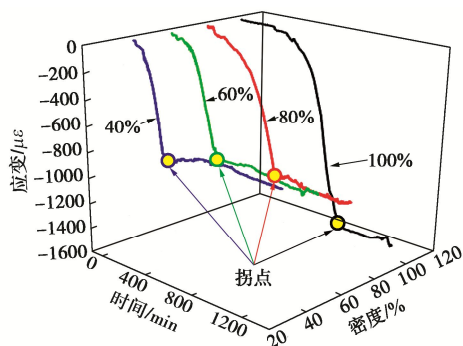


图8 不同填充密度下土体干燥过程应变-时间-密度曲线

Fig. 8 Strain-time-density curves of soil during air drying under different infill densities

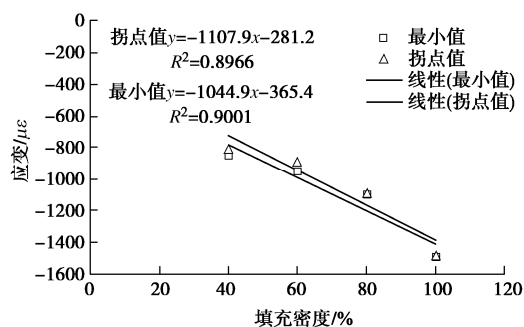


图9 土体干燥过程收缩应变-密度变化图

Fig. 9 Variation of shrinkage strain-density in air drying
干燥阶段中, 由于土体的自然烘干, 水分散失,

土体质量会相应减少, 图10所示为不同填充密度下质量损失曲线, 从图中可知, 不同填充密度的土体在干燥阶段中, 质量都随着时间变化而持续损失, 质量损失值范围为 $8 \sim 12.5 \text{ g}$, 质量损失稳定时间在 1750 min 。填充密度越大的土体质量损失趋势越缓, 这是由于密度越大, 土体内部结构越密实, 水分不容易散失, 因此质量保持稳定需要更多的时间。图11所示为最大损失质量与填充密度关系图, 由图可知, 质量损失与填充密度呈线性关系即填充密度越大, 质量损失越大, 100%填充密度的土体质量损失量是40%填充密度土体的1.5倍。填充密度一般是指内部的填充密度, 而3D打印土体样品的四周外壁(土样的上、下、左、右外表面)均为实体密封的土体结构, 与填充密度的大小无关, 只是样品内部(即外壁包裹的内部)填充密度不同, 如图3(c)所示的典型的核心结构与图3(d)所示的打印成型的外表面, 因此不能简单的用填充密度量化分析质量, 即不能认为100%填充密度的质量是40%填充密度质量的2.5倍。实际上得到的100%填充密度的土样质量损失为40%填充密度土样的1.5倍, 正说明了外壁的存在导致两者内部总的含水量的损失差别远远小于2.5倍。同时, 所有土样的质量损失-时间曲线在 1750 min 的时候基本上都不再下降, 即总的含水率已经不再下降, 水分已经蒸发完全了。

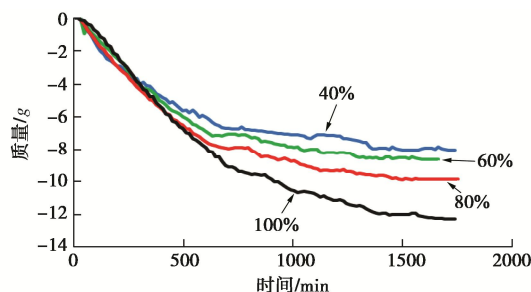


图10 不同填充密度下土体质量损失曲线

Fig. 10 Mass loss curves at different infill densities

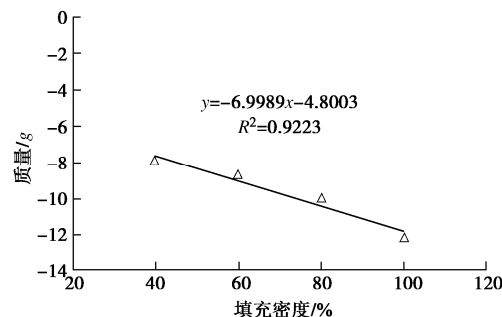


图11 不同填充密度下土体质量损失峰值

Fig. 11 Maximum mass losses at different infill densities

3 增材制造土体单轴抗压变形特征研究

本试验在土体完全干燥之后, 对40%, 60%, 80%,

100%的4组土体样品(每组3个土样)进行万能试验机加载试验,加载速率为2 mm/min,直至加载破坏为止。植入土体内部的FBG传感器在土体在单轴抗压过程中可以持续读取土体横向变形结果。图12所示为室内建立的土体加载试验,图中将土体试样放置在加载平台中心位置处,FBG传感器连接光纤解调仪。加载试验开始后,土体两侧有少量土屑掉落,边缘出现部分裂隙,最终土体内部结构被破坏,整体破坏。

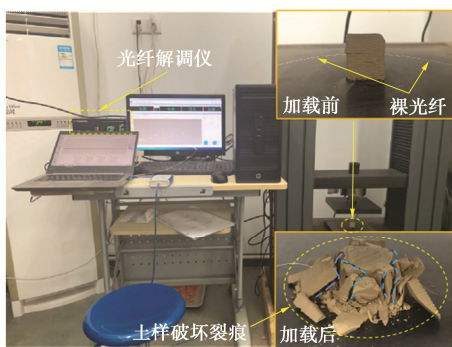


图12 土体加载试验

Fig. 12 Setup of loading tests on soil samples

图13所示为不同填充密度下土体加载试验的应变随时间变化曲线,由图可知,每种填充密度下,土体应变值都呈现上升—下降—上升的趋势,即未加载之前,土体应变保持相对平稳。加载后,土体应变急剧上升,上升速率随填充密度升高而增大,这是由于此时的加载压力并未破坏土体内部结构,应变持续上升。土体应变上升至第一个峰值点后,开始出现裂痕,应变开始呈现下降趋势,40%,60%,80%,100%填充密度的土体一次峰值分别为1025.2,1339.7,1879.6,2486.3 $\mu\epsilon$ 。这是由于土体内部结构发生破坏,承载能力下降。一次破坏之后继续加载,土体应变上升至二次峰值点,最后土体完全崩坏。40%,60%,80%,100%填充密度的土体二次峰值分别为1377.1,1960.7,2254.7,2896.2 $\mu\epsilon$ 。

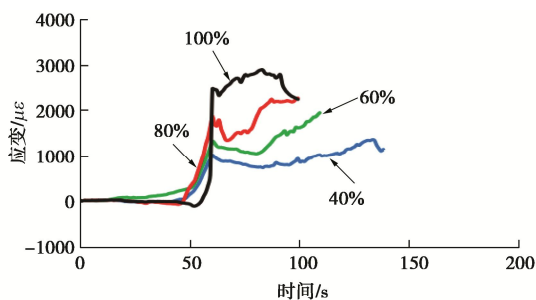


图13 不同填充密度下土体加载试验应变-时间曲线

Fig. 13 Strain-time curves of soil loading tests under different infill densities

在荷载作用下土样承载能力对研究增材制造打印

土体的结构强度非常重要。图14所示为加载试验中两次应变峰值与密度曲线图,从图中可知,两次峰值应变曲线呈现平行增长趋势,与填充密度呈线性变化关系。同一填充密度下,二次峰值点为应变上升量最大值,100%填充密度下土体应变二次峰值是40%填充密度下土体的2.1倍。不同填充密度下,土体应变上升量的二次峰值点约为一次峰值点的1.28倍。打印密度的提高导致土样的初始变形大大提高(即承载能力提高),所以通过控制填充密度可以提高土样的承载能力。由于土体压密实后土条纤维的自锁(剪胀)作用导致所有土样发生第二次应变上升(承载能力上升),因此提高填充密度更利于提高增材制造打印土体结构(或建筑)的承载性能。

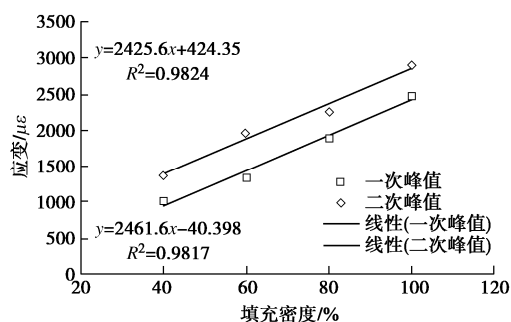


图14 不同填充密度下土体加载试验两次峰值应变

Fig. 14 Two peak strains of soil under different infill densities

4 不同填充密度对打印-干燥-加载变形的敏感度分析

本试验中土体在打印、干燥、加载过程中出现拉伸应变峰值,收缩应变拐点,加载应变峰值。不同填充密度对打印过程的敏感系数表达式为

$$C_{pl} = \frac{s_p}{s_1}, \quad (4)$$

式中, C_{pl} 为不同填充密度对打印过程的敏感系数, s_p 为打印过程应变骤升量, s_1 为加载过程应变上升二次峰值。不同填充密度干燥过程的敏感系数表达式为

$$C_{dl} = \frac{s_d}{s_1}, \quad (5)$$

式中, C_{dl} 为不同填充密度干燥过程的敏感系数, s_d 为干燥过程应变收缩量。不同填充密度下各阶段的敏感系数如表1所示,加载过程土体应变上升增量最大,不同填充密度下,打印过程应变与加载过程应变的比值范围为0.02~0.07。干燥过程应变值与加载过程应变的比值范围为0.45~0.58。干燥过程收缩应变影响性仅为加载过程的50%左右,打印过程拉应变影响性不到加载过程的10%,同时随着填充密度的增大,打印过程拉应变敏感系数较20%填充密度升高为0.04~

0.05, 相反地, 干燥过程收缩应变敏感系数较 20%填充密度敏感性下降为 0.07~0.13。因此不同填充密度对加载过程土体应变影响最大, 对干燥过程收缩应变影响其次, 对打印过程横向拉应变影响最小。

表 1 不同填充密度的三阶段应变峰值

Table 1 Three-stage strain peak values under different infill densities

填充密度/%	$s_p / \mu\epsilon$	$s_d / \mu\epsilon$	$s_l / \mu\epsilon$	C_{pl}	C_{dl}
40	32.2	799.7	1377.2	0.02	0.58
60	116.4	885.1	1960.7	0.06	0.45
80	172.6	1063.3	2254.8	0.07	0.47
100	203.8	1478.9	2896.2	0.07	0.51

5 结 论

本研究通过在 3D 打印土体过程中在土体内部植入光纤光栅传感器, 以监测土体内部在打印过程、干燥过程、加载过程中的应变变化特征, 系统的研究了填充密度对土体变形的影响, 可以得到 5 点结论。

(1) 对于不同填充密度下土体应变曲线分析, 得到 3 个明显的特征曲线阶段: 打印-横向膨胀变形阶段、土样干燥-变形收缩阶段、稳定的残余变形阶段, 并对每阶段的具体特征进行详细分析。

(2) 打印阶段中, FBG 传感器在打印进程显示 50%时放置土样中心处, 随即在不同填充密度土体内部都出现应变骤升段, 应变骤升量随填充密度不同呈正相关变化即填充密度越高, 应变骤升量越大。100%填充密度的土体应变骤升增量是 40%填充密度的 4 倍。

(3) 干燥阶段中, 不同填充密度的土体应变都随时间推移而下降, 下降至残余应变出现时间和应变下降量分别与填充密度呈线性变化, 填充密度越大, 残余应变发生时间越慢, 应变下降量越大。100%填充密度土体收缩应变变量是 40%填充密度土体的 1.84 倍。质量损失曲线表明土样质量损失与填充密度呈线性变化。

(4) 单轴抗压试验阶段中, 不同填充密度的土体都出现应变值骤升段, 填充密度的提高导致土样的承载能力线性上升。土体压密实后土条纤维的自锁(剪胀)作用导致所有土样发生第二次应变上升, 即第二次承载能力的上升, 因此提高填充密度利于提高增材制造打印土体构件(或建筑)的承载性能。

(5) 通过不同填充密度土体三阶段的敏感性分析, 结果表明, 不同填充密度对加载过程应变上升量影响最大, 对干燥过程收缩应变影响性仅为加载过程的 50%, 对打印过程拉应变影响性不到加载过程的

10%。

参考文献:

[1] CHUA C K, LEONG K F, LIM C S. Rapid Prototyping: Principles and Applications (with Companion CD-ROM)[M]. 3rd ed. Singapore: World Scientific, 2010.

[2] BOS F, WOLFS R, AHMED Z, et al. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing[J]. Virtual & Physical Prototyping, 2016: 209 - 225.

[3] ESPALIN D, MUSE D W, MACDONALD E, et al. 3D Printing multifunctionality: structures with electronics[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72(5/6/7/8): 963 - 978.

[4] 刘泉声, 何 璠, 邓鹏海, 等. 3D 打印技术在岩石物理力学试验中的应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3397 - 3404. (LIU Quan-sheng, HE Fan, DENG Peng-hai, et al. Application of 3D printing technology in rock physical mechanics experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3397 - 3404. (in Chinese))

[5] HONG C Y, ZHANG Y F, SU D, et al. Development of a FBG Based Hoop-Strain Sensor Using 3D Printing Method[J]. IEEE Access, 2019(99): 1.

[6] HONG C Y, YUAN Y, YANG Y Y, et al. A simple FBG pressure sensor fabricated using fused deposition modelling process[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019(285): 269 - 274.

[7] HONG C Y, ZHANG Y F, ABRO Z A. A fiber Bragg grating-based inclinometer fabricated using 3-D printing method for slope monitoring[J]. Geotechnical Testing Journal, 2020, 43(1): 1 - 15.

[8] 高 磊, 罗 易, 许蒋鹏, 等. 桩基工程 3D 打印混凝土材料工程性质研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2018, 35(4): 21 - 24, 29. (GAO Lei, LUO Yi, XU Jiang-peng, et al. 3D printed concrete material engineering properties of pile foundation engineering[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2018, 35(4): 21 - 24, 29. (in Chinese))

[9] 田 威, 王 震, 张 丽, 等. 高温作用后 3D 打印岩体试样力学性能初探[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 961 - 969. (TIAN Wei, WANG Zhen, ZHANG Li, et al. Preliminary study on the mechanical properties of 3D printed rock samples after high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 961 - 969. (in Chinese))

- [10] SONG L, JIANG Q, SHI Y E, et al. Feasibility investigation of 3D printing technology for geotechnical physical models: study of tunnels[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2018.
- [11] 李 蕾, 张清怡, 衣惠君. 3D 打印用 ABS 的改性与制备[J]. *工程塑料应用*, 2018, **46**(9): 19 - 23, 59. (LI Lei, ZHANG Qing-yi, YI Hui-jun. Modification and preparation of ABS for 3D printing[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, **46**(9): 19 - 23, 59. (in Chinese))
- [12] 李 伟, 王永涛, 焦志伟, 等. 烧结温度对 3D 打印 B30 铜镍合金制品力学性能影响的研究[J]. *有色金属工程*, 2020, **10**(3): 29 - 34. (LI Wei, WANG Yong-tao, JIAO Zhi-wei, et al. Research on the influence of sintering temperature on the mechanical properties of 3D printed B30 copper-nickel alloy products[J]. *Nonferrous Metal Engineering*, 2020, **10**(3): 29 - 34. (in Chinese))
- [13] 赵文涛. 关于探讨建筑渣土 3D 打印技术在现实应用中的调研报告[J]. *城市建设理论研究(电子版)*, 2019(19): 24 - 25. (ZHAO Wen-tao. Investigation report on the discussion of construction muck 3D printing technology in practical application[J]. *Urban Construction Theory Research (Electronic Edition)*, 2019(19): 24 - 25. (in Chinese))
- [14] 魏帅帅, 宋 波, 陈华雄, 等. 月球表面 3D 打印技术畅想[J]. *精密成形工程*, 2019, **11**(3): 76 - 87. (WEI Shuai-shuai, SONG Bo, CHEN Hua-xiong, et al. Imagine the 3D printing technology of the lunar surface[J]. *Precision Forming Engineering*, 2019, **11**(3): 76 - 87. (in Chinese))
- [15] 张昕然, 薛霄飞, 杨海欢, 等. 3D 打印技术——建筑垃圾资源化利用的加速器[J]. *建设科技*, 2017(10): 60 - 62. (ZHANG Xin-ran, XUE Xiao-fei, YANG Hai-huan, et al. 3D printing technology-an accelerator for the resource utilization of construction waste[J]. *Construction Technology*, 2017(10): 60 - 62. (in Chinese))
- [16] CESARETTI G, DINI E, KESTELIER X D, et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology[J]. *Acta Astronautica*, 2014, **93**(1): 430 - 450.
- [17] HAMBACH M, VOLKMER D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, **79**: 62 - 70.
- [18] LE T T, AUSTIN S A, LIM S, et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete[J]. *Materials & Structures*, 2012, **45**(8): 1221 - 1232.
- [19] KAZEMIAN A, YUAN X, COCHRAN E, et al. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, **145**: 639 - 647.
- [20] 王永洪, 张明义, 白晓宇, 等. 基于光纤光栅传感技术的静压沉桩贯入特性及影响因素研究[J]. *岩土力学*, 2019, **40**(12): 4801 - 4812. (WANG Yong-hong, ZHANG Ming-yi, BAI Xiao-yu, et al. Study on penetration characteristics and influencing factors of static pressure pile based on fiber grating sensing technology[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(12): 4801 - 4812. (in Chinese))
- [21] 孟上九, 张书荣, 程有坤, 等. 光纤布拉格光栅在季节冻土路基应变检测中的应用[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(2): 601 - 608. (MENG Shang-jiu, ZHANG Shu-rong, CHENG You-kun, et al. The application of fiber Bragg grating in the strain detection of seasonally frozen soil subgrade[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(2): 601 - 608. (in Chinese))
- [22] 魏广庆, 施 斌, 胡 盛, 等. FBG 在隧道施工监测中的应用及关键问题探讨[J]. *岩土工程学报*, 2009, **31**(4): 571 - 576. (WEI Guang-qing, SHI Bin, HU Sheng, et al. Application of FBG in tunnel construction monitoring and discussion on key issues[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(4): 571 - 576. (in Chinese))
- [23] 朱赵辉, 任大春, 李秀文, 等. 光纤光栅位移计组在围岩变形连续监测中的应用研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(11): 2093 - 2100. (ZHU Zhao-hui, REN Da-chun, LI Xiu-wen, et al. Application research of fiber grating displacement meter group in continuous monitoring of surrounding rock deformation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(11): 2093 - 2100. (in Chinese))