

3D 打印对混凝土-地基土界面特性影响的统计分析

张根宝^{1,2}, 陈令可¹, 徐长节², 孙浚博^{3,4}, 陈昌富⁵

(1. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000; 2. 华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013;
3. 科廷大学 设计与建筑环境学院, 澳大利亚 珀斯 WA6102; 4. 重庆大学 智慧城市研究院,
江苏 溧阳 213300; 5. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410086)

摘要: 随着建筑 3D 打印技术应用于建造地下结构的场景逐渐增多, 3D 打印混凝土-地基土界面特性成为影响地下结构服役性能的关键因素。为了研究 3D 打印混凝土相比常规混凝土在地基土中的界面特性差异, 通过改进试样制备方法开展了 3D 打印混凝土不同建造面与土体的界面剪切试验, 获得 3D 打印混凝土-地基土界面剪切强度数据; 融合文献分析进行数据挖掘, 分别建立包含以及未包含本文试验数据的混凝土-地基土界面剪切强度指标、地基土物理参数(不均匀系数和干密度)、地基土力学参数(剪切强度指标)的样本数据库; 采用 Bayesian Bootstrap 方法对上述样本数据库进行统计分析, 建立了混凝土-地基土界面强度指标统计演化模型。结果表明: 无量纲化的混凝土-地基土界面剪切强度指标(与地基土剪切强度指标的比值)随地基土不均匀系数和干密度均呈双曲线型的统计演化关系; 考虑 3D 打印建造影响后, 无量纲化的混凝土-地基土界面剪切强度指标随地基土不均匀系数的统计演化关系变化不大; 在干密度较小时, 无量纲化的混凝土-地基土界面黏聚力的置信区间范围显著缩小, 无量纲化的混凝土-地基土界面摩擦角的置信区间上下限和均值有所下降。研究成果可为地基土中 3D 打印混凝土结构的设计计算提供依据。

关键词: 3D 打印混凝土; 界面剪切强度; 干密度; 不均匀系数; Bayesian Bootstrap 方法

中图分类号: TU411.7

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)04-1326-15

Statistical Analysis of the Effects of 3D Printing on Concrete-Soil Interface Properties

Zhang Genbao^{1,2}, Chen Lingke¹, Xu Changjie², Sun Junbo^{3,4}, Chen Changfu⁵

(1. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413000, P.R. China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P.R. China; 3. School of Design and Built Environment, Curtin University, Perth WA 6102, Australia; 4. Smart City Research Institute, Chongqing University, Liyang, Jiangsu 213300, P.R. China; 5. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410086, P.R. China)

Abstract: With the gradual emergence of application scenarios in which construction 3D printing technology is used to build underground structures, the interface characteristics of 3D-printed concrete-soil systems have become a key factor affecting the service performance of underground structures. Aiming to study the difference in interface behavior of 3D printed concrete compared with conventional concrete in ground soil, the interface direct shear tests for different construction surfaces of 3D printed concrete embedded in ground soil were carried out by improving the specimen preparation method to obtain the 3D printed concrete-soil interface shear strength indices. Combining

收稿日期: 2026-03-10(修改稿)

作者简介: 张根宝(1988—), 男, 江苏溧水人, 博士, 副教授, 主要从事岩土锚固工程、界面测试技术、岩土功能材料和能源岩土等领域的教学与科研工作。E-mail: genbao@hncu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3009400); 江西省博士后研究人员择优资助项目(2021KY59); 益阳市银城青年英才培育工程项目(202401YC07)

with the data digging in literature analysis, a sample database of concrete-soil interface behavior was established with and without the data obtained in the presented tests, including the shear strength indices of the concrete-soil interface, the physical parameters (coefficient of non-uniformity and dry density) of the soil, and the mechanical parameters (shear strength indices) of the soil. The statistical analysis of the above sample database was carried out by the Bayesian bootstrap method, and the statistical evolution model for the strength indices of the concrete-soil interface was established. The findings obtained are as follows: the dimensionless concrete-soil interface shear strength indices (i.e., the ratio over the shear strength indices of the soil) show a hyperbolic statistical evolution pattern with respect to the coefficient of non-uniformity and the dry density of the soil; the consideration of 3D printing construction imposes negligible influence on the statistical evolution pattern of the dimensionless concrete-soil interface shear strength indices over the coefficient of non-uniformity of soil; the consideration of 3D printing construction leads to the significant narrowing of the ranges of confidence intervals for the dimensionless concrete-soil interface cohesion, and the overall decrease of the upper and lower ranges of confidence intervals and the mean values for the dimensionless concrete-soil interface frictional angle. The findings in this work can provide a scientific reference for the design calculation of 3D printed concrete structures embedded in soil.

Keywords: 3D printed concrete; interface shear strength; dry density; coefficient of non-uniformity; Bayesian Bootstrap method

0 引言

“双碳”目标背景下,传统现浇式建筑因其高能耗、高污染、低效率等弊端,已无法满足现代社会对可持续发展的需求,装配式建筑则以其绿色环保、高效节能、标准化生产等优势应运而生,逐渐成为建筑行业转型升级的重要方向。传统装配式结构具有不易制作复杂构型模具的问题,建筑 3D 打印技术则可以通过模型设计制作复杂的结构和建筑组件,为建筑业提供了前所未有的设计自由度^[1],因而成为装配式建筑的一种重要施工方法。在实践中,建筑 3D 打印方法主要分为以下 3 类:基于混凝土分层喷挤叠加的增材建造方法、基于砂石粉末分层粘合叠加的增材建造方法、以及大型机械臂驱动的材料三维构造建造方法^[2]。其工艺的共性特征都是通过将建筑材料逐层堆积,从而构建出复杂形态的结构。因此,3D 打印混凝土结构的侧面呈现明显的逐层堆积纹路,如图 1 所示。

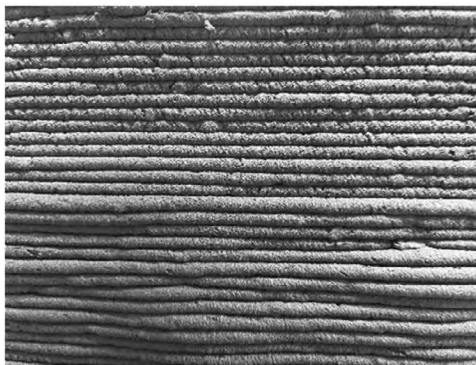


图 1 3D 打印混凝土的典型侧面

Fig.1 Side view of 3D printed concrete

张学辉等^[3]研究了水泥基材料配比、挤出速率、打印路径等对 3D 打印混凝土侧面纹路均匀性的影响。姚晓飞等^[4]研究发现打印混凝土试件的尺寸误差随着打印线速度的增大而减小;随着挤出速率的增大而增大。需要强调的是,上述打印参数的调控只能优化 3D 打印混凝土侧面纹路的均匀性,并不能消除侧面纹路。

随着装配式结构的大面积推广,将 3D 打印混凝土技术应用于岩土工程场景逐渐成为可能,例如隧道-围岩相互作用物理模型试验中的可控裂隙围岩试样^[5],以及本文作者团队提出的基于拓扑优化设计的 3D 打印路灯杆塔基础结构。上述应用场景中,3D 打印混凝土与地基土的相互作用主要取决于 3D 打印混凝土与地基土的接触面力学特性。

相比传统地下结构的现浇混凝土,3D 打印混凝土具有特殊的表面形态特征,其与地基土的接触特性研究可参考已有的结构-土接触面研究^[6]。李逸凡等^[7]通过界面排水剪切试验,揭示了颗粒级配、表面纹理和法向边界条件对饱和砂-钢界面剪切特性的影响规律。Li 等^[8]通过直剪试验揭示了砾质砂与混凝土管道界面在不同含水率和法向应力下的界面剪切力学特性和变形机制,提出了在含水率和法向应力共同作用下的界面体积变化模型。陈昌富等^[9]通过单元体锚杆拉拔试验研究了地基土与锚固体的界面特性,揭示了锚杆注浆的养护龄期、锚杆拉拔速率等因素对锚-土界面剪切强度特性的影响规律,提出了锚-土界面剪切全过程本构模型。成浩等^[10]通过直剪试验研究了混凝土结构面粗糙度对结构-土接触面特性的影响,建立了考虑粗糙度的结构-土接触面峰值剪切强度模

型。徐方等^[1]对黏土-水泥土接触面的力学特性开展了直剪试验研究,揭示了水泥土表面粗糙度、黏土内摩擦角和黏聚力、剪应力、剪切位移和法向应力对接触面强度的影响机理。吴悦等^[2]通过自主开发界面剪切装置揭示了加卸荷和注浆 2 种工况对混凝土-砂土接触面剪切特性和剪切影响范围的耦合影响机制。张茂础等^[3]利用离散单元法对岩-砼接触面的力学性质进行了模拟,阐明了在设定工况下锚碇措施模型变形机制。综合来看,关于结构-土接触面特性的研究报道主要集中在表面无层状纹理的传统混凝土,针对具有典型层状纹路的 3D 打印混凝土-土体接触面力学特性的研究尚未见报道。

因此,本文对地基土与 3D 打印混凝土接触面(包括侧面和底面)力学特性开展了直剪试验研究;融合试验结果与已有混凝土-土接触面研究结果,建立包含混凝土-土体界面剪切强度指标、土体剪切强度指标、土体不均匀系数、土体干密度的样本数据库,采用 Bayesian Bootstrap 方法对上述样本数据库进行统计分析,建立了可考虑 3D 打印混凝土-土体接触面的更具一般性的混凝土-土体接触面力学性能指标演化方程。研究成果可为地基土中 3D 打印混凝土结构的设计计算提供重要参考。

1 试验方案

1.1 试验材料

1.1.1 试验用土

本试验用土取自湖南城市学院土木楼南侧的规划预留地块,取土深度为 0.5~0.7 m。依据《公路土工试验规程》(JTG3430—2020),对土样进行物理性质指标测试,颗粒级配分析测得土样的不均匀系数 $C_u = 14.46 > 5$,曲率系数 $C_c = 9.84 > 3$,判断该土样级配不良。土样粘粒含量为 17.3%,塑性指数 $I_p = 16.62$,干密度为 1.30 g/cm^3 ,粉粒含量大于 50%,判断该土样属于粉土质砂。试验所测得的土样其他基本物理性质指标见表 1。

表 1 土样的基本物理性质指标

液限/%	塑限/%	天然含水量/%	天然密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
35.24	18.98	23.98	1.55

1.1.2 3D 打印混凝土

(1) 基本材料以及打印参数

本试验所用 3D 打印混凝土采用重庆大学智慧城市研究院的打印机制备,其基本材料及配合比

见表 2(以硅灰质量为基数 1),3D 打印机的打印参数设置见表 3。

表 2 3D 打印混凝土基本材料及配合比

Table 2 Material mixture of 3D printed concrete

材料组成	质量配合比
水泥	10
硅灰	1(基数)
水	2.7
粗砂	1.5
细砂	8.5
减水剂	0.002
增稠剂	0.014 7

表 3 混凝土 3D 打印机的打印参数设置

Table 3 Printing parameters of 3D printer

打印喷头直径/mm	打印填充率/%	喷头挤出速度/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	水平打印速度/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	垂直打印速度/($\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)
8	50	0.01	150	0.5

(2) 3D 打印混凝土粗糙度

表面粗糙度是影响 3D 打印混凝土构件与地基土界面剪切特性的关键参数。对 3D 打印混凝土表面层状纹路的几何特征进行量化:构件的侧面纹路轮廓可近似为分段正弦函数,其表达式由上部振幅 A_u 、下部振幅 A_l 、上部周期 T_u 、下部周期 T_l 共同定义,如公式(1)和图 2 所示。正弦函数的振幅反映纹路的起伏高低,周期反映纹路的密集程度,二者共同决定了表面粗糙度——振幅越大、周期越小,粗糙度越高。由此,提出了一种表征 3D 打印混凝土粗糙度的计算方法,如公式(2)所示。本试验所用 3D 打印混凝土的表面粗糙度的计算值见表 4。需要说明的是,由于重力堆积作用,3D 打印混凝土底面层状起伏幅度显著小于侧面,底面粗糙度仅为侧面粗糙度的一半(见表 4)。这种粗糙度差异将直接影响界面剪切带的演化特征。

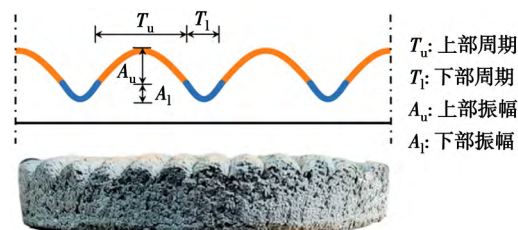


图 2 3D 打印混凝土试样轮廓示意图

Fig.2 Schematic of 3D-printed concrete specimen profile

$$f(t) = \begin{cases} A_u \sin\left(\frac{\pi(t \bmod h_1)}{T_u}\right) & \text{if } (t \bmod 7) \in [0, T_u) \\ -A_l \sin\left(\frac{\pi(t \bmod h_1)}{T_l} - T_u\right) & \text{if } (t \bmod 7) \in [T_u, h_1) \end{cases} \quad (1)$$

$$r = \frac{A_u + A_l}{T_u + T_l} \quad (2)$$

表 4 3D 打印混凝土表面粗糙度计算参数

Table 4 Calculation parameters of surface roughness of 3D printing concrete

	T_u/mm	T_l/mm	A_u/mm	A_l/mm	r
侧面	3	2	1.2	0.8	0.4
底面	8	2	1.5	0.5	0.2

1.2 试验过程

1.2.1 试样制备

(1) 3D 打印混凝土构件制备

为了在环刀内形成下部为 3D 打印混凝土试样、上部为土样的接触面,设计制作直径为 61.8 mm、高度为 10 mm 的有机玻璃部件,将其嵌合至环刀底部,用以填充环刀内一半体积(如图 3(a)所示),环刀内剩余一半体积将用于切取 3D 打印混凝土试样。3D 打印混凝土打印完成后,立即用嵌合后的环刀分别从 3D 打印混凝土的侧面和底面切取试样,取出后养护 28 d 待用。养护完成后的 3D 打印混凝土侧面试样和底面试样如图 3(b)、(c)所示。

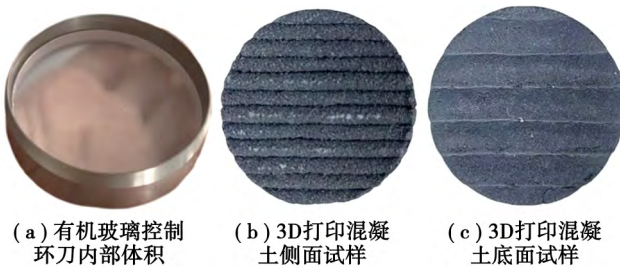


图 3 3D 打印混凝土试样制备

Fig.3 3D printed concrete specimen preparation

(2) 土样制备

依据《公路土工试验规程》(JTG3430—2020)制备土样。将土样烘干、碾碎后,过 2 mm 筛得到试验用土,控制土样密度为 1.55 g/cm^3 ,含水量为 24.0%。土样分 5 层击实;称取每层击实所需土料倒入制样容器中进行击实;每达到 10 mm 的击实高度后,再进行下一层击实直至击实完成。土样取出后,用图 2(a) 所示环刀进行取样,取出 8 个高 10 mm、内径 61.8 mm 的土饼及 4 个高 20 mm、内径

61.8 mm 的土饼。

1.2.2 3D 打印构件与土样的直剪试验

采用应变控制式直剪仪开展 3D 打印混凝土-土界面直剪试验。3D 打印混凝土侧面和底面各有 5 个试样,控制法向应力分别为 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa。装样时,将透水石、3D 打印混凝土试样、土样、透水石由下往上依次放入剪切盒。值得说明的是,试验将压缩刚度较大的 3D 打印混凝土试样置于下剪切盒,是为了避免土样压缩对 3D 打印混凝土-土体界面剪切位置的影响。根据《土工试验方法规程》(GB/T 50123—2019)推荐的加载方法,采用 0.8 mm/min 的剪切速率。在 4 mm 内,剪应力的读数达到稳定或有显著后退时,剪切至 4 mm 即停止;当剪应力读数继续增加时,剪切变形达到 6 mm 即停止。3D 打印混凝土-土界面试样在剪切前、后的具体形貌如图 4 所示。

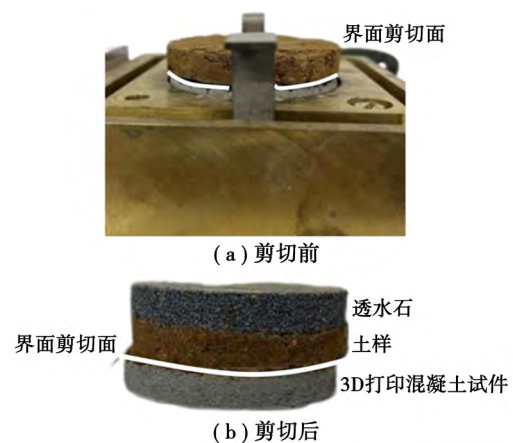


图 4 3D 打印混凝土-土界面剪切前后的试样形貌

Fig.4 Morphology of 3D-printed concrete-soil interface specimen

1.2.3 纯土体直剪试验

采用应变控制式直剪仪开展纯土直剪试验。装样时,将剪切盒内的 3D 打印混凝土-土界面试样换成纯土试样,即由下往上依次放入透水石、土样、透水石。剪切速率以及加载准则与上节中 3D 打印混凝土-土界面直剪试验保持一致。

2 试验结果

2.1 3D 打印构件与土体直剪试验结果

直剪试验测得的 3D 打印混凝土侧面-土界面以及 3D 打印混凝土侧面-土界面在不同法向压力下的剪应力-剪切位移曲线分别如图 5 和图 6 所示;相应的界面剪切强度见表 5。界面剪应力按式(3)计算。

$$\tau = \frac{CR}{A_0} \times 10 \tag{3}$$

式中: τ 为剪应力, kPa; C 为测力计率定系数, N/0.01 mm; R 为测力计读数, 0.01 mm; A_0 为试样初始的面积, cm^2 。

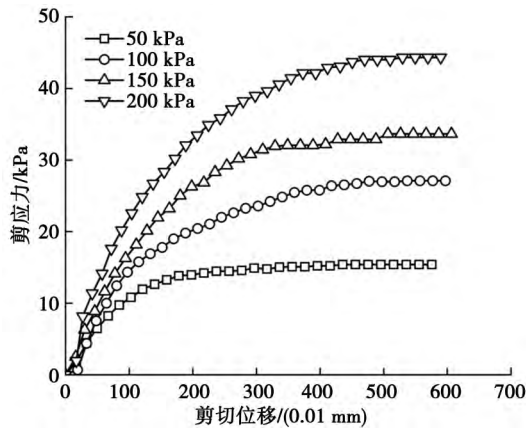


图 5 3D 打印混凝土侧面-土界面的剪应力-剪切位移曲线

Fig.5 3D-printed concrete side-face soil interface shear stress versus shear displacement

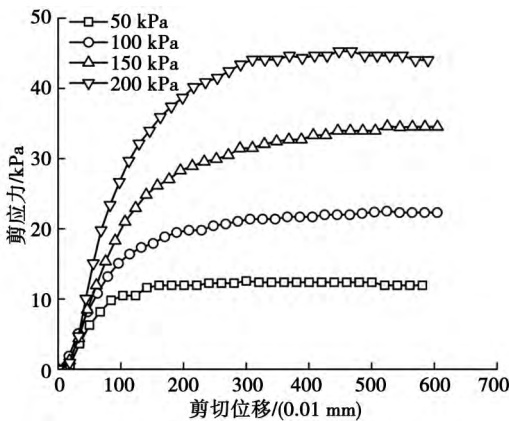


图 6 3D 打印混凝土底面-土界面的剪应力-剪切位移曲线

Fig.6 3D-printed concrete bottom-face soil interface shear stress versus shear displacement

2.2 纯土样的直剪试验结果

纯土直剪试验测得的不同法向压力下剪应力-剪切位移曲线如图 7 所示,相应的剪切强度见表 5。

2.3 直剪试验所获得的剪切强度指标

根据《公路土工试验规程》(JTG3430—2020),以法向压力 s_n 为横坐标,抗剪强度 t_s 为纵坐标,绘出抗剪强度与法向压力的关系曲线,如图 8 所示。相应的剪切强度指标见表 6。根据摩尔-库伦强度准则,求得 3D 打印混凝土侧面-土界面的摩擦角为 10.58° ,黏聚力为 6.79 kPa; 3D 打印混凝土底面-土界面的摩擦角为 12.45° ,黏聚力为 1.10 kPa; 纯

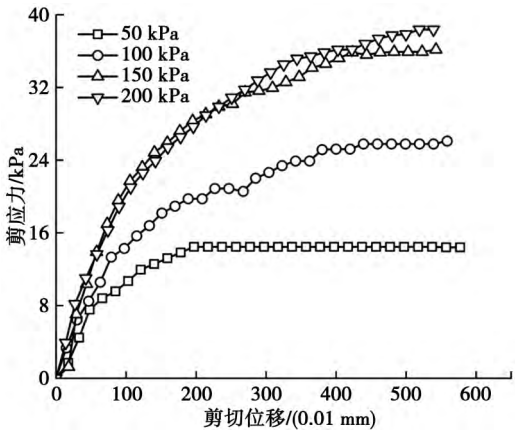


图 7 纯土直剪试验测得的剪应力-剪切位移曲线

Fig.7 Shear stress versus shear displacement measured in direct shear test of pure soils

土的內摩擦角为 9.29° ,黏聚力为 8.34 kPa。

表 5 不同法向应力下各界面剪切强度

Table 5 Shear strength of each interface under different normal pressures

界面类型	测力计率定系数 N/0.01 mm	A_0/cm^2	法向应力/kPa	测力计读数 /0.01 mm	τ/kPa
3D 打印 混凝土侧面-土界面	1.887	29.98	50	24.5	15.41
			100	43.1	27.11
			150	53.5	33.65
			200	70.5	44.35
3D 打印 混凝土底面-土界面	1.887	29.98	50	20.0	12.58
			100	35.8	22.33
			150	54.9	34.53
			200	72.0	45.29
纯土界面	1.887	29.98	50	23.0	14.47
			100	41.5	26.10
			150	57.5	36.17
			200	61.0	38.37

表 6 各界面剪切强度指标

Table 6 Indicators of shear strength at various interfaces

界面类型	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa
3D 打印混凝土侧面-土界面	10.58	6.79
3D 打印混凝土底面-土界面	12.45	1.10
纯土界面	9.29	8.34

3D 打印混凝土侧面-土界面的黏聚力为纯土黏聚力的 81.4%,摩擦角为纯土內摩擦角的 113.9%; 3D 打印混凝土底面-土界面的黏聚力达到纯土黏聚力的 13.2%,摩擦角为纯土內摩擦角的

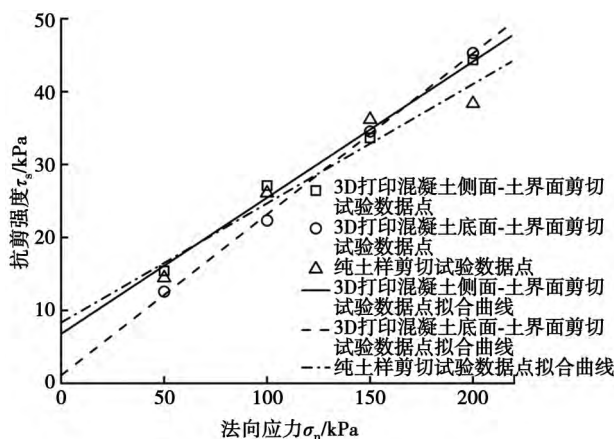


图 8 抗剪强度与法向压力的关系曲线

Fig.8 Shear strength versus normal pressure

134%。可以看出,3D 打印混凝土-土界面的摩擦角均大于纯土的内摩擦角,但增大程度有限,均在 35% 以内;但相对纯土黏聚力,3D 打印混凝土-土界面尤其是 3D 打印混凝土底面-土界面的黏聚力有明显降低。

上述抗剪强度指标变化的原因主要归于剪切面形态特征以及剪胀发挥程度的差异。3D 打印混凝土侧面的层状纹路明显,层齿尺寸较小,层数较多,表面凹凸起伏幅度较小,并且试验时的法向应力也较小,混凝土表面与土颗粒之间只能形成较小甚至无法形成机械咬合作用,界面剪切主要表现为纹路最高层间与土体的剪切,剪切面积小于纯土剪切面积,剪切带厚度小于纯土剪切带厚度;3D 打印混凝土底面是在平整面上重力堆积而成,层数更少,粗糙度较侧面更小,界面剪切与纯土的剪切面差别更大,剪切带厚度较侧面更小,混凝土表面与土颗粒形成的机械咬合作用较侧面更小;因此导致两类 3D 打印混凝土-土界面黏聚力相比纯土黏聚力降低,底面的界面黏聚力仅为纯土的 13.2%,远低于侧面的 81.4%。

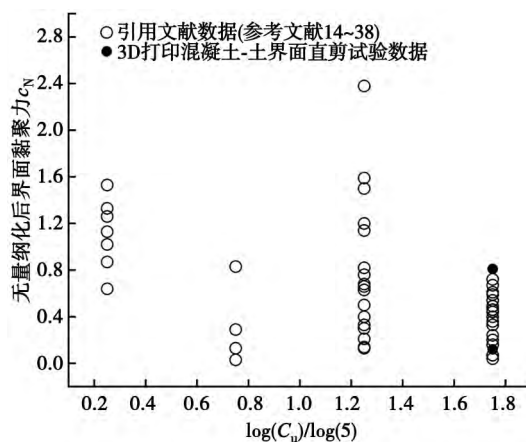
此外,3D 打印混凝土的刚度远大于土的刚度,剪切过程中混凝土的体积几无变化,土体则发生明显压缩。3D 打印混凝土-土界面剪切中的土体体积变形约束要高于纯土剪切中土体体积变形约束,即剪胀效应在 3D 打印混凝土-土界面剪切中表现更为明显。因此导致 3D 打印混凝土-土界面摩擦角比纯土内摩擦角更大。值得说明的是,3D 打印混凝土侧面粗糙度较底面更大(即剪切盒中的 3D 打印混凝土体积更大),导致实质参与剪胀效应的土体体积更小(即剪切盒中的土体体积更小),导致 3D 打印混凝土侧面-土界面的摩擦角较底面更小。

3 混凝土-土界面抗剪强度指标的 Bayesian Bootstrap 统计分析

3.1 样本收集

根据国内外研究报道^[14-38],混凝土-土界面剪切特性主要由界面组构特征决定,即主要受到混凝土形态以及土的密实程度等因素影响。传统浇筑混凝土的表面形态较为平整,3D 打印混凝土的表面形态则呈现不同的层状起伏。土体密实度一般可用土的干密度来刻画,但剪切过程中的密实度变化潜能则主要受限于土的颗粒级配特性。因此,本研究将土的干密度和不均匀系数作为地基土组构影响的物理参数,将地基土的剪切强度指标作为地基土组构影响的力学参数。

为了探明混凝土-土界面剪切特性与上述界面组构特征的关系,通过文献分析采集了常规浇筑混凝土-土界面剪切特性的数据^[14-38],并融入本文试验所获得的 3D 打印混凝土-土界面剪切特性数据,建立了以土的干密度、土的不均匀系数为输入,混凝土-土界面剪切强度指标为输出的样本库,见表 7,相应的散点图如图 9—12。

图 9 混凝土-土界面黏聚力 c_N 散点图(C_u)Fig.9 Concrete-soil interface cohesion c_N scatter plot(C_u)

需要说明的是,考虑到混凝土-土界面剪切带主要发生在土体内部,即界面剪切与土体剪切的剪切带介质一致。为了消除统计分析中土体剪切强度对界面剪切强度的影响,样本采用无量纲化的界面剪切强度指标,即取界面剪切强度指标与相应土体剪切强度指标的比值。相应地,土的干密度也通过除以 4℃ 水的密度进行了无量纲化处理;考虑到土的不均匀系数跨度较大,且一般要大于 5 才可认为级配良好,此处对其进行对数归一化处理。

对于对数归一化处理后的不均匀系数数

据(即 $\lg C_u / \lg 5$),按照数据点分布特征进行区间等分归类,并取区间中值为区间代表值,即分为 4 个区间(0,0.5)、(0.5,1.0)、(1,1.5)和(1.5,2.0),区间代表值分别为 0.25、0.75、1.25 和 1.75。对于无

量纲化的干密度数据,进行上述相同处理,即分为 4 个区间(1.2,1.3)、(1.3,1.4)、(1.6,1.7)和(1.7,1.8)时,区间代表值分别为 1.25、1.35、1.65和 1.75。

表 7 混凝土-土界面剪切强度样本库

Table 7 Concrete-soil interface shear strength sample library

不均匀 系数 C_u	干密度 $\rho_d /$ ($g \cdot cm^{-3}$)	$\lg(C_u) /$ $\lg(5)$	界面 黏聚力 c_i / kPa	界面 摩擦角 $\varphi_i / (^\circ)$	纯土 黏聚力 c_s / kPa	纯土 摩擦角 $\varphi_s / (^\circ)$	无量纲化 后界面黏 聚力 c_N	无量纲化 后界面摩 擦角 φ_N	引用 文献
5.34	1.58	1.04	17.87	19.29	27.00	30.00	0.66	0.64	王永洪等 2023 ^[14]
			20.63	24.23			0.76	0.81	
			22.11	25.17			0.82	0.84	
10.35	/	1.45	/	37.20	/	32.50	/	1.14	李永辉等 2015 ^[13]
15.4	1.76	1.70	9.38	34.17	59.92	49.38	0.16	0.69	刘飞禹等 2022 ^[14]
			2.75	27.53	72.46	43.16	0.04	0.64	
			3.06	29.31	85.56	42.37	0.04	0.69	
			4.05	32.30	94.01	40.06	0.04	0.81	
			5.36	28.14	76.8	33.62	0.07	0.84	
2.12	1.40	0.47	42.14	26.97	33.47	24.00	1.26	1.12	李梦瑶等 2022 ^[11]
			29.34	21.69	28.77	23.00	1.02	0.94	
			26.07	20.82	19.63	21.98	1.33	0.95	
			13.95	14.69	16.12	13.38	0.87	1.10	
1.45	/	0.23	/	22.00	/	27.60	/	0.80	郭聚坤等 2020 ^[13]
			/	27.00	/		/	0.98	
6.10	1.60	1.12	6.38	40.31	4.00	31.50	1.59	1.28	费逸等 2019 ^[19]
				39.97				1.27	
				38.52				1.22	
				36.91				1.17	
6.04	/	1.12	/	21.95	/	38.70	/	0.57	Liu S et al. 2023 ^[20]
			/	27.07			/	0.70	
			/	30.79			/	0.80	
			/	27.29			/	0.71	
4.40	/	0.92	/	24.90	/	13.90	/	1.79	Ilori A O et al. 2017 ^[21]
			/	27.90		14.30	/	1.95	
4.63	/	0.95	0.15	26.09	4.43	39.31	0.03	0.66	Li H et al. 2023 ^[21]
				26.57				0.68	
				27.23				0.69	
				28.32				0.72	
				29.93				0.76	
			0.57	31.76	4.33	40.48	0.13	0.81	
				27.07				0.67	
				28.01				0.69	
				28.43				0.70	

续表 7									
不均匀 系数 C_u	干密度 $\rho_d /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\frac{\lg(C_u)}{\lg(5)}$	界面 黏聚力 c_i /kPa	界面 摩擦角 $\varphi_i / (^\circ)$	纯土 黏聚力 c_s /kPa	纯土 摩擦角 $\varphi_s / (^\circ)$	无量纲化 后界面黏 聚力 c_N	无量纲化 后界面摩 擦角 φ_N	引用 文献
4.63	/	0.95		29.14				0.72	Li H et al. 2023 ^[23]
			0.57	31.04	4.33	40.48	0.13	0.77	
				33.42				0.83	
				28.37				0.67	
				29.33				0.69	
			0.64	29.72	4.79	42.25	0.13	0.70	
				30.13				0.71	
				32.42				0.77	
				35.06				0.83	
/	1.65	/	29.68	17.69			0.31	0.55	成浩等 2017 ^[23]
			56.98	19.44	95.71	32.20	0.60	0.60	
			76.53	21.69			0.80	0.67	
			78.97	21.16			0.83	0.66	
/	1.78	/	20.00	9.50			0.45	0.60	Yang J et al. 2023 ^[24]
			31.50	11.30			0.71	0.71	
			36.00	11.50	44.30	15.90	0.81	0.72	
			39.00	13.80			0.88	0.87	
			41.50	14.40			0.94	0.91	
/	1.32	/	13.81	8.82			0.78	1.07	王瑞等 2022 ^[23]
			14.52	12.29	17.75	8.22	0.82	1.50	
			18.29	17.42			1.03	2.12	
/	1.80	/	38.20	21.90			0.40	0.68	陈俊桦等 2015 ^[24]
			42.67	25.20			0.45	0.78	
			46.35	25.90			0.48	0.80	
			62.99	26.20	95.71	32.20	0.66	0.81	
			81.93	23.50			0.86	0.73	
			96.85	21.40			1.01	0.66	
			91.35	22.80			0.95	0.71	
			104.14	20.20			1.09	0.63	
/	1.73	/	13.06	13.89			0.74	0.64	Kadhim H K et al. 2024 ^[23]
			13.64	14.70			0.77	0.67	
			14.80	16.33	17.70	21.80	0.84	0.75	
			15.63	17.48			0.88	0.80	
			16.32	18.46			0.92	0.85	
/	1.62	/	/	42.10				1.39	Zhao L et al. 2017 ^[23]
			/	45.20	10.00	30.20	/	1.50	
			/	51.20				1.70	
			/	57.80				1.91	
/	1.42	/	3.10	32.00	37.90	29.00	0.08	1.10	Xiao S et al. 2014 ^[23]
			7.50	32.00	35.50	25.00	0.21	1.28	
/	1.20	/	7.00	25.00	9.00	26.00	0.78	0.96	Di Donna A et al. 2016 ^[24]

续表 7

不均匀 系数 C_u	干密度 $\rho_d /$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\frac{\lg(C_u)}{\lg(5)}$	界面 黏聚力 c_i / kPa	界面 摩擦角 $\varphi_i / (^\circ)$	纯土 黏聚力 c_s / kPa	纯土 摩擦角 $\varphi_s / (^\circ)$	无量纲化 后界面黏 聚力 c_N	无量纲化 后界面摩 擦角 φ_N	引用 文献
2.78	1.68	0.64	/	38.31	/	29.00	/	1.32	He P et al. 2020 ^[31]
				30.54				1.05	
				30.96				1.07	
				32.21				1.11	
				6.70				0.44	
19.20	1.37	1.84		25.70	15.20	26.70		0.96	Xiao S et al. 2019 ^[33]
				5.00				0.33	
				6.10				0.40	
				7.00				0.46	
				3.60				0.24	
				3.70				0.24	
				3.00				0.20	
				8.20				0.54	
				7.50				0.49	
				8.90				0.59	
				5.40				0.36	
				11.00				0.72	
				10.20				0.67	
				9.30				0.61	
				9.30				0.61	
1.74	/	0.34		3.90	3.44	19.89		0.91	Yavari N et al. 2016 ^[33]
				2.79				0.85	
				1.50				1.00	
2.44	1.7	0.55		16.66	20.14	30.37		0.83	Liu S et al. 2024 ^[34]
				5.87				0.29	
5.31	/	1.04	45.22	13.31	19.00	18.50	2.38	0.72	Chen K et al. 2024 ^[33]
9.89	1.67	1.42		15.38	22.52	14.61		0.68	Li H et al. 2024 ^[33]
				6.85				0.30	
				4.71				0.21	
				3.09				0.14	
				2.95				0.13	
9.02	1.42	1.37		7.78	19.68	15.72		0.40	Hashemi A et al. 2022 ^[31]
				12.3				0.63	
				2.27	6.91	19.51		0.33	
				10.37				1.50	
				6.66				0.50	
				15.85				1.20	
/	1.24	/	31.97	/	18.79	/	1.70	/	Zhou J et al. 2024 ^[33]
14.46	1.30	1.66	6.79	10.58	8.34	9.29	0.81	1.14	本文试 验数据
			1.10	12.45				1.34	

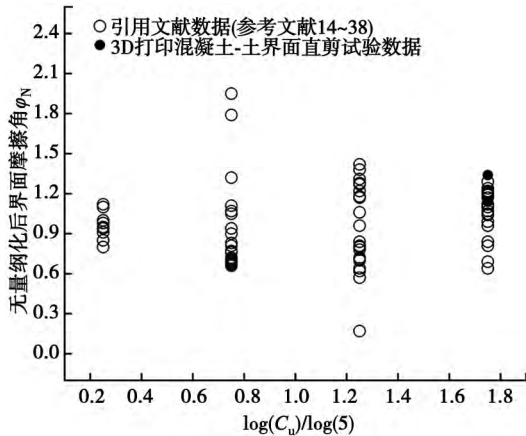
图 10 混凝土-土界面摩擦角 φ_N 散点图 (C_u)

Fig.10 Concrete-soil interface friction angle φ_N scatter plot (C_u)

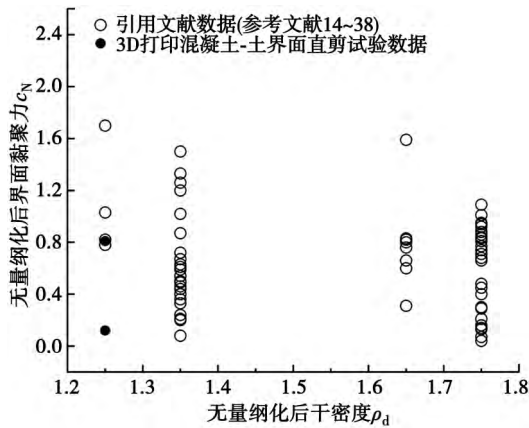
图 11 混凝土-土界面黏聚力 c_N 散点图 (ρ_d)

Fig.11 Concrete-soil interface cohesion c_N scatter plot (ρ_d)

考虑到上述样本库的规模较小,无法确定分布特征参数,难以适用传统统计分析方法,需要借助面向小样本的自助分析方法,比如在岩土工程中逐渐应用^[3]的 Bayesian Bootstrap 方法。Bayesian Bootstrap 方法^[4]又称随机加权法,通过给每个试验样本随机加权,进行分布参数和参数区间估计,因而不须了解总体分布。作为 Monte Carlo 数字仿真方法的一种,Bayesian Bootstrap 方法的模拟方差较小,不仅适合分析小样本问题,同时也可推广到大样本情况下^[4]。相较于早期提出的 Bootstrap 方法,Bayesian Bootstrap 方法由于改进了数据的生成方式,显著降低了原始样本抽样的重复率,从而有效缩短了置信区间宽度^[42-43]。

因此,本文针对上述混凝土-土界面剪切特性样本库进行 Bayesian Bootstrap 统计分析,以获得从土体密实度参数到混凝土-土界面抗剪强度指标的回归预测模型。

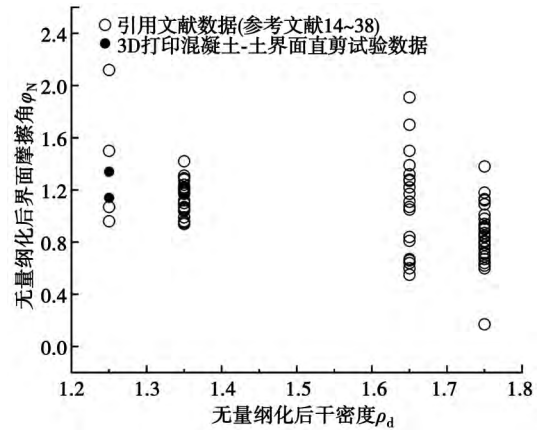
图 12 混凝土-土界面摩擦角 φ_N 散点图 (ρ_d)

Fig.12 Concrete-soil interface friction angle φ_N scatter plot (ρ_d)

3.2 均值与置信区间估计

参考 Bayesian Bootstrap 方法用于水泥土力学性能指标的统计分析^[3],本文选取混凝土-土界面剪切强度指标(界面黏聚力 c_i 和界面摩擦角 φ_i) 的均值作为统计参数;先运用 Bayesian Bootstrap 对均值进行估计;再运用计算精度、可行度较高的 Bootstrap-t 法估计各均值的置信区间上下限。具体操作步骤如下:

(1) 定义原始样本 $X = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n)$ 为某个龄期下某个水泥土力学性能指标的 n 个试验值(即样本容量为 n)并求出原始样本的均值差 S_0 。

(2) 设 $U_1, U_2, \dots, U_{n-1}$ 为均匀独立分布 $U(1, 0)$ 的独立同分布样本序列,将 $U_1, U_2, \dots, U_{n-1}$ 升序排列,得到次序统计量 $U_{(i)} (i = 1, \dots, n-1, \text{下同})$,并记为 $U_{(0)} = 0, U_{(n)} = 1$ 。

(3) 令 $V_i = U_{(i)} - U_{(i-1)}$,就能得到满足 Dirichlet 分布 $D(1, \dots, 1)$ 的随机向量 $(V_1, V_2, \dots, V_n)$,即它满足关系式 $V_1 + V_2 + \dots + V_n = 1$,且 $(V_1, V_2, \dots, V_n)$ 的分布密度为^[4]:

$$f(v_1, \dots, v_{n-1}) = \Gamma(n), (v_1, \dots, v_{n-1}) \in S_n;$$

$$S_n = \{(v_1, \dots, v_{n-1}) : v_i \geq 0, \sum_{i=1}^{n-1} v_i \leq 1\} \quad (4)$$

(4) 按式(5)(6)计算试验样本均值 μ 和方差 S 。

$$\mu = \sum_{i=1}^n V_i X_i, \quad (5)$$

$$S = \sum_{i=1}^n V_i (X_i - \sum_{h=1}^n V_h X_h)^2 \quad (6)$$

(5) 重复步骤(2)至(4) B 次(通常 B 不小于

1 000, 本文取 10 000), 得到 B 个新的再抽样样本并计算其均值 k^* 和方差 k^* ($k=1, \dots, B$), 再对这 B 个均值 k^* 和方差 k^* 求均值和方差, 即可获得总体样本均值和方差的估计。

(6) 计算与 $t = \frac{\bar{X} - \mu}{S_0 / \sqrt{n}}$ 相应的枢轴量:

$$t_k^* = \frac{\bar{X}_k^* - \bar{X}}{\bar{S}_k^* / \sqrt{n}} \quad (7)$$

(7) 将 t_k^* 按升序排列, 得到次序统计量 $(t_{k(1)}^*, t_{k(2)}^*, \dots, t_{k(2)}^*)$ 。

(8) 取置信水平 $1 - \alpha = 0.95$, 即显著性水平 $\alpha = 0.05$, 于是有经验分位数 $k_1 = 10\ 000 \times \alpha / 2 = 250$, $k_2 = 10\ 000 \times (1 - \alpha / 2) = 9\ 750$, 据此在 t_k^* 的次序统计量找出 $t_{k(250)}^*$ 和 $t_{k(9\ 750)}^*$ 。

(9) 计算置信水平为 0.95 的原始样本均值的置信区间 $\left[\bar{X} - t_{k(250)}^* \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{X} - t_{k(9\ 750)}^* \frac{S}{\sqrt{n}} \right]$ 。

按照上述方法计算出界面剪切强度指标的均值以及置信区间上、下限值随地基土不均匀系数、干密度的演化关系, 如图 14—17 所示。

值得说明的是, 为了研究 3D 打印建造对混凝土-土界面力学性能统计分析结果的影响, 针对包含以及未包含本文试验所获得的 3D 打印混凝土-土界面特性数据的样本数据库分别进行了上述统计分析, 相应的分析结果差异如图 14—17 所示。

4 混凝土-土界面剪切强度指标演化回归分析

4.1 演化模型选择

为了得到可以有效表征混凝土-地基土界面剪切强度指标随地基土密实度参数统计关系的演化模型, 分别采用双曲线函数、对数函数、二次函数等对上述演化关系的置信区间上下限值和均值进行了回归分析对比。

以无量纲化混凝土-土界面摩擦角 φ_N 的置信区间上限为例, 双曲线函数、对数函数和二次函数其进行回归分析的效果对比, 如图 13。可以发现, 相较于对数函数和二次函数, 双曲线函数演化模型可以更加精准有效地表征混凝土-土界面摩擦角随土体不均匀系数的演化规律。需要指出的是, 除了无量纲化混凝土-土界面摩擦角 c_N 的置信区间上

限, 采用双曲线函数对混凝土-土界面剪切强度指标的其他统计参数(均值和置信区间上下限)进行回归分析, 均获得了最优回归效果。

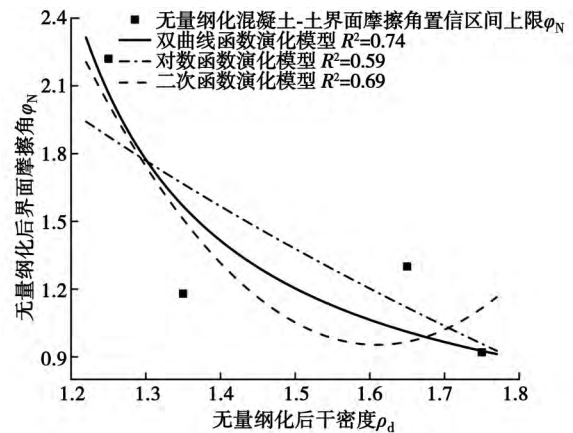


图 13 不同演化模型对比分析

Fig.13 Comparative analysis of different evolutionary models

4.2 混凝土-土界面剪切强度指标回归分析

针对 3D 打印混凝土-地基土界面直剪试验数据样本以及文献报道的常规混凝土-地基土界面剪切特性数据样本(表 7), 首先运用 Bayesian Bootstrap 方法对其均值和置信区间上、下限进行估计; 然后对界面剪切强度指标进行回归分析。其中, 统计分析计算部分基于 PYTHON 平台编写计算程序, 回归分析基于 MATLAB 平台编写计算程序。

在地基土不均匀系数 C_u 、干密度 ρ_d 的不同区间下, 对混凝土-土界面剪切强度指标的均值和置信区间上、下限的估值进行回归分析, 得到的回归系数, 如表 8 所示; 相应的混凝土-土界面剪切强度指标演化模型, 如图 14—17 所示。

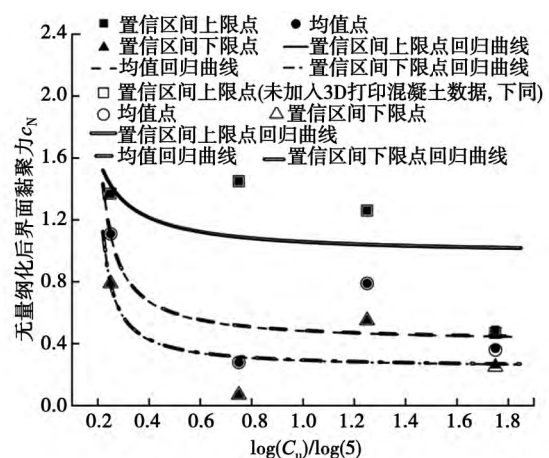


图 14 混凝土-土界面黏聚力 c_N 随 C_u 演化

Fig.14 Evolution of concrete-soil interface cohesion c_N versus C_u

表 8 混凝土-土界面剪切强度指标演化方程回归分析结果

物理力学指标		双曲线函数	均值演化方程	置信区间上限演化方程	置信区间下限演化方程
			回归系数	回归系数	回归系数
划分	无量纲化界面黏聚力 c_N	$c_N = x / (a_c + b_c x)$	$a_{cM} = -0.383\ 7$ $b_{cM} = 2.442$	$a_{cL} = -0.080\ 8$ $b_{cL} = 1.025$	$a_{cU} = -0.706\ 6$ $b_{cU} = 4.103$
	无量纲化界面摩擦角 j_N	$j_N = x / (a_\varphi + b_\varphi x)$	$a_{\varphi}^M = 0.008\ 5$ $b_{\varphi}^M = 1.028$	$a_{\varphi}^L = 0.015\ 6$ $b_{\varphi}^L = 0.881\ 4$	$a_{\varphi}^U = -0.007\ 3$ $b_{\varphi}^U = 1.182$
	无量纲化界面黏聚力 c_N	$c_N = x / (a_c + b_c x)$	$a_{cM} = -1.254$ $b_{cM} = 2.28$	$a_{cL} = -0.959\ 1$ $b_{cL} = 1.648$	$a_{cU} = -0.394\ 1$ $b_{cU} = 2.192$
	无量纲化界面摩擦角 j_N	$j_N = x / (a_\varphi + b_\varphi x)$	$a_{\varphi}^M = -1.445$ $b_{\varphi}^M = 1.908$	$a_{\varphi}^L = -2.607$ $b_{\varphi}^L = 2.569$	$a_{\varphi}^U = -1.385$ $b_{\varphi}^U = 2.001$

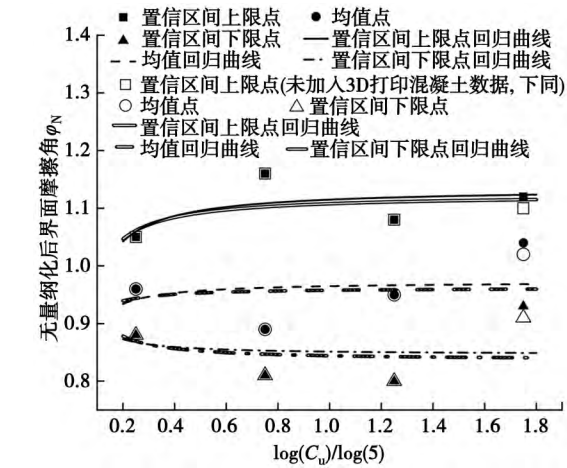


图 15 土-混凝土界面摩擦角 φ_N 随 C_u 演化

Fig.15 Evolution of concrete-soil interface friction angle

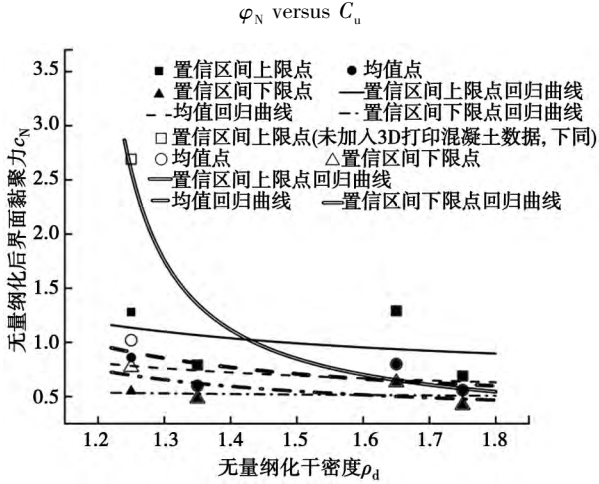


图 16 土-混凝土界面黏聚力 c_N 随 ρ_d 演化

Fig.16 Evolution law of concrete-soil interface cohesion

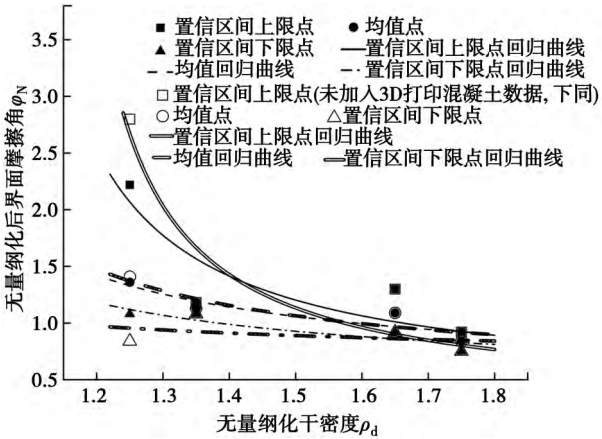


图 17 土-混凝土界面摩擦角 φ_N 随 ρ_d 演化

Fig.17 Evolution of concrete-soil friction angle

φ_N versus ρ_d

可以看出,对于按照不均匀系数 C_u 划分的混凝土-土界面强度指标,相应的均值与置信区间上下限的演化趋势表现了较强的稳定性(图 14、图 15),3D 打印建造对界面强度指标与不均匀系数的回归关系影响较弱。相比之下,对于按照地基土干密度 ρ_d 划分的混凝土-土界面强度指标,由于 3D 打印混凝土-土界面特性数据点的引入,界面黏聚力的均值以及置信区间上下限均有所下降(图 16);界面摩擦角的均值变化不明显,但其置信区间上限下降,下限上升,区间可信度提高(图 17)。特别是在干密度较小的区间,如 $\rho_d \in (1.2, 1.3)$ 内,界面黏聚力置信区间上限出现了显著下降。整体而言,相比不均匀系数,界面剪切强度指标与干密度的统计回归关系对 3D 打印建造的影响更为敏感。

分析上述 3D 打印建造引起统计分析结果差异的原因,主要在于 3D 打印混凝土-土界面特性

试验数据的引入引起相应区间内基础样本数据量的变化。具体而言,干密度区间 $\rho_d \in (1.2, 1.3)$ 内的数据样本相对稀缺(表7),本文试验数据样本的引入,在该区间引起了较显著的统计波动;反观不均匀系数区间,因为基础数据样本量较大(表7),构筑了一个相对稳定的样本空间分布,引入本文试验数据样本未能撼动其稳定性,展现了大数据量在统计分析中的“缓冲”效应。

综合来看,混凝土-土界面剪切强度指标随地基土干密度或不均匀系数的演化方程可以采用双曲线函数演化模型表示(见表8);通过不均匀系数 C_u 进行回归分析时,回归系数建议在以下区间进行取值 $a \in (-0.707, 0.016)$, $b \in (0.88, 4.10)$;通过干密度 ρ_d 进行回归分析时, $a \in (-2.607, -0.394)$, $b \in (1.64, 2.57)$;实际工程中需要根据地基土密度参数估算混凝土-土界面剪切强度指标时,可以采用本文所得的双曲线函数回归方程。

5 结论

(1) 3D 打印混凝土的表面纹路特征对混凝土-土界面剪切特性具有显著影响。相比纯土,3D 打印混凝土侧面和底面在地基土中的界面黏聚力均有明显降低;3D 打印混凝土侧面与底面在地基土中的界面摩擦角有所增加。

(2) 融合文献分析数据和本文试验数据,建立了混凝土-土界面剪切强度指标与地基土密度参数的样本数据库,采用 Bayesian Bootstrap 方法进行统计分析,可得到界面剪切强度指标的均值以及置信区间上下限随地基土干密度或不均匀系数的演化模型。

(3) 3D 打印建造影响对于混凝土-土界面剪切强度指标随地基土干密度的统计演化关系存在较大影响,特别是在干密度较小时,相应均值和置信区间上下限变化显著;3D 打印建造影响对于混凝土-土界面剪切强度指标随地基土不均匀系数的统计演化关系影响较小。

参考文献(References)

- [1] Freek B, Rob W, Zeeshan A, et al. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing [J]. Virtual & Physical Prototyping, 2016: 209-225.
- [2] 丁烈云,徐捷,覃亚伟.建筑3D打印数字建造技术研究应用综述[J].土木工程与管理学报,2015,32(3): 1-10. (Ding Lieyun, Xu Jie, Qin Yawei. A review of research and application of 3D printing digital construction technology for buildings [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015, 32(3): 1-10. (in Chinese))
- [3] 张学辉,赵双双,陈雄姿,等.基于倾斜摄影的混凝土3D打印成型精度分析与预测[J].科学技术与工程,2024,24(8): 3356-3365. (Zhang Xuehui, Zhao Shuangshuang, Chen Xiongzi, et al. Analysis and prediction of moulding accuracy of concrete 3D printing based on oblique photography [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(8): 3356-3365. (in Chinese))
- [4] 姚晓飞,窦艳宁,刘声均,等.混凝土3D打印工艺参数对构件尺寸精度影响研究[J].公路,2023,68(7): 383-390. (Yao Xiaofei, Dou Yanning, Liu Shengjun, et al. Research on the influence of concrete 3D printing process parameters on the dimensional accuracy of components [J]. Highway, 2023, 68(7): 383-390. (in Chinese))
- [5] Wang Y Y, Ma G W, Wang L, et al. Size effects in cavern model tests based on 3D printing [J]. Tunnelling and underground space technology, 2023, 137: 105-135.
- [6] 李立云,杜修力,李亮.土与结构界面接触问题研究进展评述[J].力学进展,2009,39(5): 588-597. (Li Liyun, Du Xiuli, Li Liang. A review on the progress of research on the contact problem at the soil-structure interface [J]. Advances In Mechanics, 2009, 39(5): 588-597. (in Chinese))
- [7] 李逸凡,李大勇,张雨坤.颗粒级配和表面纹理对饱和砂-钢界面剪切强度的影响[J].岩土工程学报,2024,46(2): 335-344. (Li Yifan, Li Dayong, Zhang Yukun. Effects of particle gradation and surface texture on the shear strength of saturated sand-steel interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(2): 335-344. (in Chinese))
- [8] Li T L, Zhao W, Liu R, et al. Visualized direct shear test of the interface between gravelly sand and concrete pipe [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2023, 61(2): 361-374.
- [9] 陈昌富,梁冠亭,汤宇,等.锚杆锚固体与土体界面特性室内测试新方法[J].岩土工程学报,2015,37(6): 1115-1122. (Chen Changfu, Liang Guanting, Tang Yu, et al. A new method for indoor testing of interface characteristics between anchor bar anchors and soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1115-1122. (in Chinese))
- [10] 成浩,曾国东,周敏,等.考虑粗糙度影响的黏土-混凝土接触面峰值剪切强度模型研究[J].工程科学与技术,2021,53(4): 168-177. (Cheng Hao, Zeng Guodong, Zhou Min, et al. Modelling of peak shear strength of clay-concrete contact surface considering the effect of roughness [J]. Advanced

- Engineering Sciences, 2021, 53 (4): 168-177. (in Chinese)
- [1] 徐方, 陈乐, 赵春彦, 等. 黏土-水泥土接触面剪切特性试验研究 [J]. 工程科学与技术, 2021, 53 (2): 110-117. (Xu Fang, Chen Le, Zhao Chunyan, et al. Experimental study on the shear characteristics of clay-water clay contact [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53 (2): 110-117. (in Chinese))
- [2] 吴悦, 刘丰铭, 赵春风, 等. 加卸荷工况对注浆砂土-混凝土接触面剪切特性影响 [J]. 工程科学与技术, 2022, 54 (5): 103-110. (Wu Yue, Liu Fengming, Zhao Chunfeng, et al. Effects of loading and unloading conditions on the shear characteristics of grouted sand-concrete contact [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54 (5): 103-110. (in Chinese))
- [3] 张茂础, 崔臻, 盛谦, 等. 基于离散元方法的锚碇岩砗接触力学性质研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16 (1): 169-176 (Zhang Maochu, Cui Zhen, Sheng Qian, et al. Study on contact mechanical properties of anchor rock concrete based on discrete element method [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16 (1): 169-176 (in Chinese))
- [4] 王永洪, 王鑫, 李世强, 等. 考虑粗糙度影响的黏性土-混凝土界面剪切特性室内试验研究 [J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2023, 44 (4): 18-24. (Wwang Yonghong, Wang Xin, Li Shiqiang, et al. Indoor experimental study on the shear characteristics of clay-concrete interface considering the effect of roughness [J]. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition, 2023, 44 (4): 18-24. (in Chinese))
- [5] 李永辉, 王卫东, 黄茂松, 等. 超长灌注桩桩-土界面剪切试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36 (7): 1981-1988. (Li Yonghui, Wang Weidong, Huang Maosong, et al. Experimental study on shear at pile-soil interface of extra-long filled piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (7): 1981-1988. (in Chinese))
- [6] 刘飞禹, 赵川, 孙宏磊, 等. 含盐量对硫酸钠盐渍土-混凝土界面剪切特性的影响研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41 (8): 1680-1688. (Liu Feiyu, Zhao Chuan, Sun Honglei, et al. Effect of salt content on the shear properties of sodium sulfate saline soil-concrete interface [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 41 (8): 1680-1688 (in Chinese))
- [7] 李梦瑶, 李永辉, 吕梦凡, 等. 粉土混凝土界面与粉土剪切对比试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (1): 171-178, 217. (Li Mengyao, Li Yonghui, Lv Mengfan, et al. Comparative experimental study of pulverised concrete interface and pulverised soil shear [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18 (1): 171-178, 217. (in Chinese))
- [8] 郭聚坤, 雷胜友, 王瑞, 等. 结构物-标准砂界面剪切机理试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16 (3): 722-733. (Guo Jukun, Lei Shengyou, Wang Rui, et al. Experimental study on shear mechanism of structure-standard sand interface [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16 (3): 722-733. (in Chinese))
- [9] 费逸, 赵春风, 王有宝, 等. 砂土-混凝土接触面注浆剪切试验研究 [J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41 (4): 46-50. (Fei Yi, Zhao Chunfeng, Wang Youbao, et al. Experimental study of grouting shear on sand-concrete contact [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2019, 41 (4): 46-50. (in Chinese))
- [20] Liu S, Zhang Q, Ma B, et al. Study on surface roughness effect on shear behavior of concrete-soil interface [J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 145: 107050.
- [21] Ilori A O, Udoh N E, Umengi J I. Determination of soil shear properties on a soil to concrete interface using a direct shear box apparatus [J]. International Journal of Geo-Engineering, 2017, 8: 1-14.
- [22] Li H, Meng Z, Shen S. Effects of interface morphology on the shear mechanical properties of sand-concrete interfaces [J]. Materials, 2023, 16 (18): 6122.
- [23] 成浩, 陈晓斌, 张家生, 等. 红黏土-混凝土结构接触面残余强度特性试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48 (9): 2458-2464. (Cheng Hao, Chen Xiaobin, Zhang Jiangsheng, et al. Experimental study on residual strength characteristics of red clay-concrete structural contact surfaces [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48 (9): 2458-2464. (in Chinese))
- [24] Yang J, Xia Y, Chen W, et al. Shear behavior of silty clay-concrete interface based on large-scale direct shear test [J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23 (7): 04023084.
- [25] 王瑞, 郭聚坤, 雷胜友, 等. 混凝土-海洋黏土界面剪切试验与数值模拟 [J]. 中国科技论文, 2022, 17 (12): 1363-1368. (Wang Rui, Guo Jukun, Lei Shengyou, et al. Shear test and numerical simulation of concrete-marine clay interface [J]. China Sciencepaper, 2022, 17 (12): 1363-1368. (in Chinese))
- [26] 陈俊桦, 张家生, 李键. 考虑粗糙度的黏性土-结构接触面力学特性试验 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47 (4): 22-30. (Chen Junhua, Zhang

- Jiasheng, Li Jian. Tests on mechanical properties of cohesive soil-structure contact surface considering roughness [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2015, 47(4): 22-30. (in Chinese)
- [27] Kadhim H K, Alyounis M. Effect of surface roughness on the interface behavior of clayey soils [J]. *Open Engineering*, 2024, 14(1): 20220578.
- [28] Zhao L, Yang P, Zhang L C, et al. Cyclic direct shear behaviors of an artificial frozen soil-structure interface under constant normal stress and sub-zero temperature [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2017, 133: 70-81.
- [29] Xiao S, Suleiman M T, McCartney J S. Shearbehavior of silty soil and soil-structure interface under temperature effects [A] // *Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability* [C]. 2014: 4105-4114.
- [30] Di Donna A, Ferrari A, Laloui L. Experimental investigations of the soil-concrete interface: physical mechanisms, cyclic mobilization, and behaviour at different temperatures [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(4): 659-672.
- [31] He P, Mu Y, Yang Z, et al. Freeze-thaw cycling impact on the shear behavior of frozen soil-concrete interface [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 173: 103024.
- [32] Xiao S, Suleiman M T, Al-Khawaja M. Investigation of effects of temperature cycles on soil-concrete interface behavior using direct shear tests [J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(5): 1213-1227.
- [33] Yavari N, Tang A M, Pereira J M, et al. Effect of temperature on the shear strength of soils and the soil-structure interface [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(7): 1186-1194.
- [34] Liu S, Zhang B, Wang H, et al. Large-scale field test on the shear behavior of concrete pipe-silty soil interfaces in pipe jacking: A case study [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 419: 135470.
- [35] Chen K, Liang F. Experimental investigation on the dynamic shear behavior of the unsaturated soil-concrete interface under cyclic loading [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 176: 108325.
- [36] Li H X, Yan C G, Shi Y L, et al. A statistical damage model for the soil-structure interface considering interfac roughness and soil shear area [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 431: 136606.
- [37] Hashemi A, Sutman M, Abuel-Naga H. Thermomechanical response of kaolin clay-concrete interface in the context of energy geostructures [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2022, 60(3): 380-396.
- [38] Zhou J, Liu C J, Zhu K F, et al. Macroscopic behaviour and mesoscopic mechanism of shear strength characteristics of pile-soil interface under cyclic loading [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 297: 116998.
- [39] 陈昌富, 陈兆君, 高松, 等. 基于 Bayesian Bootstrap 法水泥土力学性能指标演化规律区间回归分析 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2023, 50(3): 227-234. (Chen Changfu, Chen Zhaojun, Gao Song, et al. Interval regression analysis of the evolution pattern of cement soil mechanical property indexes based on Bayesian Bootstrap method [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2023, 50(3): 227-234. (in Chinese))
- [40] 郑忠国. 随机加权法 [J]. *应用数学学报*, 1987(2): 247-253. (Zheng Zhongguo. Stochastic weighting method [J]. *Acta Mathematicae Applicatae Sinica*, 1987(2): 247-253. (in Chinese))
- [41] 贾占强, 蔡金燕, 梁玉英. 基于改进 Bootstrap 和 Bayesian Bootstrap 的小样本产品实时性能可靠性评估 [J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(8): 2851-2854 (Jia Zhanqiang, Cai Jinyan, Liang Yuying. Real-time performance reliability assessment of small-sample products based on improved Bootstrap and Bayesian Bootstrap [J]. *Application Research of Computers*, 2009, 26(8): 2851-2854 (in Chinese))
- [42] 董金龙, 汪立新, 盛立昊, 等. 基于改进 Bayesian Bootstrap 陀螺仪寿命预测研究 [J]. *压电与声光*, 2014, 36(3): 384-388. (Dong Jinlong, Wang Lixin, Sheng Lihao, et al. Research on gyroscope life prediction based on improved Bayesian Bootstrap [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2014, 36(3): 384-388. (in Chinese))
- [43] 李磊, 叶友皓, 袁永生. 基于改进 Bayesian Bootstrap 方法的产品性能参数评估 [J]. *电子设计工程*, 2018, 26(2): 14-17, 21. (Li Lei, Ye Youhao, Yuan Yongsheng. Evaluation of product performance parameters based on improved Bayesian Bootstrap method [J]. *Electronic Design Engineering*, 2018, 26(2): 14-17, 21. (in Chinese))