

3D 打印混凝土结构的受力性能及设计参数研究

林佳森

广东省电信规划设计院有限公司, 广东 广州 510630

DOI:10.61369/UAID.2025020016

摘要 : 本文聚焦 3D 打印混凝土结构的受力性能及设计参数, 系统分析了 3D 打印混凝土结构在轴心受压、偏心受压、受弯及受剪状态下的受力性能, 揭示了层间界面薄弱性、各向异性等特性对结构破坏形态、承载能力及变形性能的影响, 并探讨了数值模拟方法在受力分析中的应用。深入研究了关键设计参数的作用机制, 包括打印路径 (类型、间距、方向)、打印几何参数 (层厚、宽度、截面尺寸) 及材料与工艺参数 (配合比、挤出速度、环境温度湿度等), 阐明了各参数对结构整体性、力学性能及打印稳定性的影响规律。针对 3D 打印混凝土结构的特殊性, 评估了现有混凝土设计规范的适用性并提出修正建议, 构建了基于性能的设计框架, 从材料、结构、工艺多层面提出优化策略, 以实现结构安全、高效、经济的设计目标。研究旨在为其工程应用提供理论支撑与设计依据, 为 3D 打印混凝土结构的理论研究与工程实践提供重要参考。

关键词 : 3D 打印混凝土; 受力性能; 设计参数; 各向异性

Research on Mechanical Properties and Design Parameters of 3D Printed Concrete Structures

Lin Jiasen

Guangdong Telecom Planning and Designing Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510630

Abstract : This paper focuses on the mechanical properties and design parameters of 3D printed concrete structures. It systematically analyzes the mechanical behavior of 3D printed concrete structures under axial compression, eccentric compression, bending, and shear conditions. The study reveals the influence of interlayer interface weakness and anisotropy on structural failure modes, load-bearing capacity, and deformation performance. Additionally, it explores the application of numerical simulation methods in force analysis. The paper conducts an in-depth investigation into the mechanisms of key design parameters, including printing path (type, spacing, direction), printing geometric parameters (layer thickness, width, cross-sectional dimensions), and material and process parameters (mix ratio, extrusion speed, ambient temperature and humidity, etc.). It elucidates the influence of these parameters on structural integrity, mechanical properties, and printing stability. Considering the uniqueness of 3D printed concrete structures, the paper evaluates the applicability of existing concrete design codes and proposes amendments. A performance-based design framework is established, incorporating optimization strategies at the material, structural, and process levels to achieve safe, efficient, and economical design objectives. The research aims to provide theoretical support and design basis for the engineering application of 3D printed concrete structures, serving as a valuable reference for both theoretical studies and engineering practices in this field.

Keywords : 3D printed concrete; mechanical properties; design parameters; anisotropy

引言

与传统浇筑混凝土相比, 3D 打印混凝土因独特的层状堆积工艺, 其内部形成了大量层间界面, 导致结构呈现明显的各向异性和非均质性, 这使得其受力性能与传统混凝土存在显著差异。现有混凝土结构设计规范基于传统浇筑工艺制定, 未充分考虑 3D 打印混凝土的特殊性, 直接套用可能引发设计安全隐患或造成材料浪费。在此背景下, 深入研究 3D 打印混凝土结构的受力性能及设计参数, 揭示其内在规律, 建立适配的设计方法与优化策略, 对于推动该技术的工程化应用具有重要的理论与实践意义。本文聚焦 3D 打印混凝土结构的受力特性与设计参数, 通过分析不同受力状态下的性能表现, 探究关键设计参数的影响机制, 并提出针对性的设计优化方案, 旨在为 3D 打印混凝土结构的安全设计与高效建造提供科学依据。

一、3D打印混凝土结构受力性能分析与数值模拟

(一) 轴心受压性能分析

3D打印混凝土的力学性能主要包括抗压强度、抗拉强度、抗折强度。抗压强度反应材料在受到压力作用时,抵抗变形的能力。目前,混凝土材料在使用中主要受到压应力作用,因此抗压强度是混凝土的重要力学性能指标之一^[1]。3D打印混凝土结构在轴心受压时,其受力性能与传统浇筑混凝土结构存在明显差异。由于3D打印的层层堆积工艺,结构内部会形成独特的界面过渡区,这些界面在轴心压力作用下往往成为薄弱环节。从试验研究来看,轴心受压时3D打印混凝土结构的破坏形态多呈现出沿打印层间界面的开裂和剥离。这是因为打印过程中,新浇筑的混凝土层与已硬化的基层之间的粘结强度相对较低,在压力作用下容易首先发生破坏^[2]。打印路径的不同也会对轴心受压性能产生影响,例如环向打印和纵向打印的结构在抗压强度和变形能力上会有一定差异。在力学性能指标方面,3D打印混凝土结构的轴心抗压强度通常低于同配合比的传统浇筑混凝土。这主要是由于打印过程中引入的气泡以及层间粘结不充分等因素导致的。同时其弹性模量也会受到打印参数的影响,如打印速度、层厚等,合理的参数设置能够在一定程度上提高结构的弹性性能。

(二) 偏心受压性能分析

偏心受压状态下,3D打印混凝土结构的受力更为复杂。结构不仅受到轴向压力,还受到弯矩的作用,这使得截面不同位置的应力分布不均匀^[3]。当偏心距较小时,结构截面大部分处于受压状态,此时层间界面的粘结性能仍然是影响结构受力的关键。随着偏心距的增大,截面受拉区逐渐扩大,受拉区的混凝土容易出现开裂,进而影响结构的整体承载能力。研究发现,3D打印混凝土结构在偏心受压时的极限承载力会随着偏心距的增大而降低,并且由于打印方向的两向异性,在不同方向上的偏心受压性能也存在差异^[4]。例如当偏心方向与打印层方向一致时,结构的受拉区更容易发生破坏,承载能力相对较低。

(三) 受弯性能分析

3D打印混凝土结构在受弯时,其受力过程主要包括弹性阶段、开裂阶段和破坏阶段。在弹性阶段,结构的变形与荷载呈线性关系,应力分布较为均匀。当荷载达到一定程度时,受拉区的混凝土首先出现裂缝,进入开裂阶段,此时裂缝多沿打印层间界面开展,这是因为层间粘结强度较低,难以承受拉应力。随着荷载的继续增加,裂缝不断扩展,结构进入破坏阶段。受弯破坏形态主要有正截面受弯破坏和斜截面受剪破坏^[5]。对于正截面受弯破坏,当受拉区的混凝土被拉断或受拉钢筋屈服时,结构发生破坏;而斜截面受剪破坏则是由于截面受到的剪力过大,导致混凝土被剪断。3D打印混凝土结构的受弯承载力受到多种因素的影响,如打印层厚、打印方向、混凝土强度等。合理设计打印参数,优化结构的截面形式,能够有效提高其受弯性能。

(四) 受剪性能分析

受剪性能是3D打印混凝土结构受力性能的重要组成部分,在受剪作用下,结构内部会产生剪应力,当剪应力超过混凝土的抗

剪强度时,结构就会发生剪切破坏。3D打印混凝土结构的受剪破坏形态与传统混凝土结构有所不同,由于层间界面的存在,剪切破坏多沿层间界面发生,表现为层间的相对滑移和错动^[6]。这使得其受剪承载力相对较低,需要采取相应的措施进行加强。影响3D打印混凝土结构受剪性能的因素主要有剪跨比、打印方向、配纤率等,剪跨比越大,结构的受剪承载力越低;合理选择打印方向,使打印层方向与剪力方向垂直,能够提高结构的抗剪能力;在混凝土中掺入适量的纤维,能够有效改善层间粘结性能,提高受剪承载力。

二、3D打印混凝土关键设计参数研究

(一) 打印路径设计参数的影响

打印路径设计是3D打印混凝土成型基础,决定材料堆积与分布,直接影响结构整体性、力学性能及打印效率,其核心参数包括路径类型、路径间距和打印方向。路径类型中,直线型操作简单、效率高,适用于大面积平面构件,但拐角易应力集中;环形路径使材料分布更均匀,减少应力集中,适用于圆形或弧形构件;螺旋型路径在复杂曲面构件打印中具优势,能保证曲面光滑连续。不同路径类型会影响结构内部材料纤维分布和层间搭接,进而改变抗压、抗折等力学性能。路径间距关乎材料堆积密度和层间粘结质量,过小易溢料,影响精度;过大则层间有空隙,降低结构整体性和密实度,削弱力学性能。保持最优间距范围,可使结构获较好力学性能和打印质量^[7]。打印方向对结构各向异性影响大,与受力方向一致时,材料纤维分布和层间粘结利于力的传递,力学性能较好;与受力方向垂直时,层间界面成薄弱环节,力学性能可能明显下降。故需依结构受力特点选打印方向,以充分发挥材料性能。

(二) 打印几何参数的影响

打印几何参数主要包括打印层厚、打印宽度、构件截面尺寸等,它们决定结构外形,对力学性能和打印稳定性影响重大。打印层厚是影响打印效率和结构性能的关键,较小层厚可提高精度、表面质量及层间粘结面积,利于提升结构整体性和力学性能,但会降低效率、增加成本;较大层厚能提高效率,却可能导致层间粘结不足、出现分层,削弱力学性能,需在精度、性能与效率间权衡确定^[8]。打印宽度与喷头尺寸、材料流动性、挤出压力等相关,其一致性对结构质量很重要,不均匀会导致表面不平整、内部应力不均,影响力学性能。构件截面尺寸直接影响结构承载能力和稳定性,相同条件下尺寸越大承载能力通常越高,但会增加材料用量和打印时间,设计时还需考虑打印稳定性,过大可能导致变形或坍塌。

(三) 材料与工艺参数的影响

材料与工艺参数是影响3D打印混凝土性能的核心,直接决定其可打印性、力学性能和耐久性,材料参数包含水泥用量、骨料级配、水胶比、外加剂种类及掺量等。水泥用量在一定范围内增加可提高强度,但会加大水化热和收缩开裂风险;合理骨料级配能提升密实度、流动性和力学性能;水胶比过大易致泌水离析,

过小则流动性不足,均影响打印和力学性能;外加剂可改善工作性、调节凝结时间等,需依材料和工艺选种类与掺量^[9]。工艺参数包括挤出速度、打印速度、喷头高度、环境温湿度等,挤出与打印速度需匹配,否则易出现材料堆积过多或断料;喷头高度影响粘结效果和精度,过高或过低均有弊端;环境温湿度影响凝结硬化,温度过高或湿度过低会加快凝结影响层间粘结,反之则延缓凝结影响打印稳定性。材料与工艺参数相互作用复杂,需经大量试验优化,确定合理组合以满足工程性能要求。

三、面向3D打印混凝土结构的设计方法与优化策略

(一) 现有混凝土设计规范的适用性评估与修正

现有混凝土结构设计规范(如GB 50010、ACI 318等)基于传统浇筑混凝土制定,对3D打印混凝土结构的适用性需全面评估并修正。材料性能上,现有规范假定混凝土匀质、各向同性,而3D打印混凝土因层间界面和打印路径呈明显各向异性、非匀质性,力学性能方向差异显著,直接套用规范取值可能导致设计不安全或不经济。结构计算方面,现有规范构件承载力计算公式基于传统混凝土受力机理,3D打印混凝土结构受力时,层间界面粘结滑移、力学性能各向异性等会改变内力分布和破坏模式,使公式适用性受限,比如受剪计算中,层间界面抗剪能力可能成控制因素,规范未考虑。对此需修正规范,材料性能取值考虑各向异性,依打印方向和层间粘结质量确定参数;结构计算引入层间界面受力模型,修正承载力计算公式;补充构造要求规定,如打印层厚、路径间距限制及层间粘结增强措施等,保障结构整体性和耐久性。

(二) 基于性能的3D打印混凝土结构设计框架

基于性能的设计方法以结构在设计使用年限内满足预期性能目标为核心,能更好适应3D打印混凝土结构特点,提供科学合理指导。框架先明确性能目标,含安全性、适用性、耐久性等,依据结构重要性、使用环境和功能要求,确定不同性能等级指标,如最大允许挠度、裂缝宽度限值、承载力安全系数等^[10]。接着进行方案设计与参数选择,结合3D打印特点选材料、打印路径、几何及工艺参数,初定结构布置和截面形式;利用数值模拟分析不同荷载下受力性能,预测是否达标。然后是性能验证与优化,通过试验或精细数值模拟验证实际性能,不达标则调整设计参数(如改打印路径、优化材料配合比),重新设计分析至达标。此

参考文献

- [1] 沈瞳. 碳纤维增强3D打印混凝土拱结构受力性能研究[D]. 湖南:长沙理工大学,2022.
- [2] 刘超,王有强,刘化威,等. 基于打印参数影响的3D打印混凝土力学性能试验研究[J]. 材料导报,2023,37(1):80-86. DOI:10.11896/cldb.21110276.
- [3] 王可为. 3D打印混凝土拱壳结构受力性能研究[D]. 河南:河南大学,2023.
- [4] 许光远. 3D打印树脂骨料混凝土的设计与性能研究[D]. 江苏:东南大学,2020.
- [5] 史庆轩,万胜木,王秋维,等. 喷嘴行进速度及高度对3D打印混凝土力学性能影响的试验[J]. 复合材料学报,2023,40(4):2273-2284. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20220607.001.
- [6] 陈杰. 钢丝绳增强3D打印混凝土梁受力性能试验研究[D]. 浙江:浙江大学,2020.
- [7] 陈雄姿. 混凝土3D打印构件成型精度及力学性能研究[D]. 河北:河北科技大学,2022.
- [8] 万胜木. 3D打印混凝土建造性能及其基本力学性能研究[D]. 陕西:西安建筑科技大学,2022.
- [9] 陶璟泓. 3D打印建筑结构力学性能试验与理论分析[D]. 上海:同济大学,2020.
- [10] 张鹏. 混凝土3D打印墙体受压性能试验研究[D]. 江苏:东南大学,2020.

外,框架还包括全生命周期性能评估,在设计使用年限内,考虑材料退化、环境影响等,定期评估预测结构性能,制定维护加固策略,确保始终满足要求。

(三) 结构优化设计的策略

3D打印混凝土结构的优化设计需发挥其成型灵活、材料分布可控的优势,从材料、结构和工艺多层面提升性能、节约资源。材料优化上,按结构受力和性能要求定制材料,调整水泥用量、骨料级配等参数,让不同部位材料性能不同,如受拉区用纤维增强混凝土,受压区用高强度混凝土;还可实现材料梯度分布,减少贵重材料使用,提高利用效率。结构形式优化方面,利用3D打印能造复杂造型的特点,采用变截面构件、空腹结构等合理形式,使内力分布更均匀,如受弯构件截面高度随弯矩变化;通过拓扑优化确定最优材料分布,提升经济性和力学性能。工艺参数优化上,调整打印路径、层厚等参数改善层间粘结和力学性能,如交错路径增加层间接触面积,合理控制层厚和挤出速度保证材料均匀堆积;优化打印顺序减少变形和应力集中,提高施工质量。3D打印混凝土结构设计需综合材料特性、工艺特点和受力行为,通过修正规范、建立基于性能的设计框架及多层面优化,实现安全、高效、经济设计。

四、结束语

3D打印混凝土技术的成型优势与工程价值已获认可,但结构受力复杂性及设计参数关联性仍是规模化应用的核心瓶颈。本文研究明确了层间界面效应、各向异性对其受压、受弯、受剪性能的主导作用,揭示了打印路径、几何及材料工艺参数对力学性能与成型质量的影响规律,并提出适配的设计规范修正建议、性能化框架及优化策略,为技术安全应用提供支撑。当前研究仍面临层间界面微观机理、长期及极端环境下性能演化认知不足,设计参数多目标优化与智能调控待完善,整体结构体系受力协同性及抗震性能研究较薄弱的问题。未来可围绕结合微观测试与数值模拟构建层间界面力学模型,揭示长期性能与环境作用耦合机制;开发基于机器学习的参数优化算法,实现设计参数自适应调控与预测;加强整体结构体系试验与理论分析,完善设计及验收标准三方面进行研究。随着研究深入,该技术将推动建筑行业向更高效、绿色、智能方向发展。