

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.037



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



无筋混凝土拱形结构 3D 打印建造与力学性能分析

侯壬乾^a, 林文字^a, 白刚^{a,b}, 王里^{a,b}

(河北工业大学 a. 土木与交通学院; b. 建筑 3D 打印河北省工程研究中心, 天津 300401)

摘要:从设计、建造及承载性能 3 个方面开展 3D 打印轻量化混凝土拱形结构的可行性研究。基于拱结构构造和 3D 打印工艺特点,提出一种拱结构精准、快速拼装方法;在此基础上制作 5 根 3D 打印轻量化拱试件,通过试验研究两点集中、三点集中和均布荷载 3 种工况以及 π 形、W 形、M 形 3 种截面打印路径对拱结构承载性能的影响规律,并通过有限元方法计算分析矢跨比为 1/4、1/6 和 1/8 时 3D 打印混凝土拱结构的力学性能。结果表明:均布荷载下试件各节段的协同变形能力最优,承载能力最高,3D 打印混凝土材料的抗压优势得以充分发挥;集中荷载易造成拱试件局部压溃,相较于均布荷载,两点及三点集中荷载下拱试件的峰值荷载分别降低 30.2% 和 14.2%;采用 M 形横截面打印路径的试件传力效果最优,单位质量峰值荷载较 π 形、W 形试件分别提高 23.2% 和 28.4%;在规范建议采用的矢跨比范围内,随着矢跨比的减小,3D 打印混凝土拱结构的承载力逐渐降低;试验的 5 根试件均具有良好的承载性能。

关键词:3D 打印混凝土;装配式结构;拱结构;力学性能

中图分类号:TU375.5;U448.22 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)03-0206-11

3D printed construction and mechanical properties analysis of unreinforced concrete arch structure

HOU Renqian^a, LIN Wenyu^a, BAI Gang^{a,b}, WANG Li^{a,b}

(a. School of Civil and Transportation Engineering; b. Engineering Research Center on 3D Construction Printing of Hebei, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: This paper presents a feasibility study on 3D printed lightweight concrete arch structures, examining three key aspects: design, construction, and load-bearing performance. Based on the characteristics of arch structures and 3D printing technology, a segment-assembly method was proposed to realize the accurate and fast assembly of arch structures. On this basis, five 3D printed lightweight arch structure specimens were constructed. The influence of three conditions, namely two-point concentrated load, three-point concentrated load, and uniformly distributed load, as well as the printing paths of " π ", "W", and "M" cross-sections, was studied through experiments on the bearing performance of arch structures. Additionally, the mechanical

收稿日期:2024-02-07

基金项目:"十四五"国家重点研发计划(2023YFC3806902);国家自然科学基金(52322804);天津市自然科学基金(23JCZDJC00360)

作者简介:侯壬乾(2000-),男,主要从事 3D 打印混凝土结构研究,E-mail:1316581093@qq.com。

王里(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:wangli@126.com。

Received: 2024-02-07

Foundation items: National Key R & D Program Project (No. 2023YFC3806902); National Natural Science Foundation of China (No. 52322804); National Natural Science Foundation of Tianjin (No. 23JCZDJC00360)

Author brief: HOU Renqian (2000-), main research interest: 3D printed concrete structures, E-mail: 1316581093@qq.com.

WANG Li (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: wangli@126.com.

behavior of 3D printed concrete arch structures with rise-span ratios of 1/4, 1/6, and 1/8 was analyzed using finite element calculations. The results show that the cooperative deformation ability of each segment and bearing capacity of the specimens under uniformly distributed load are the best, and the compressive advantage of 3D printed concrete materials can be fully utilized. The local collapse of the arch structure is easy to be caused by concentrated load, and the ultimate bearing capacity of arch specimens under two-point and three-point concentrated loads decreases by 30.2% and 14.2% respectively compared to that under uniformly distributed load. The specimen with “M” cross section printing path has the best force transfer mechanism, and the peak load per unit mass increases by 23.2% and 28.4%, respectively, compared with the specimens with “π” and “W” printing paths. Within the recommended range of rise-span ratios specified, the bearing capacity of 3D printed concrete arch structures gradually decreases as the rise-span ratio decreases. All five specimens investigated in this experiment demonstrate good load-bearing performance.

Keywords: 3D printed concrete; prefabricated structure; arch structure; mechanical properties

混凝土3D打印是典型的智能建造技术,具有无模化、灵活化、自动化等优势^[1-3]。该技术已在装配式桥梁、建筑景观及基础设施等领域实现应用,展现出巨大发展潜力^[4-5]。拱结构是桥梁中最能彰显建筑美学的结构形式之一,将混凝土3D打印与拱结构建造有机结合,既能实现拱结构的灵活设计与轻量化施工,又能充分发挥混凝土材料抗压强度高的优势^[6-7]。因此,开展3D打印混凝土拱结构的承载性能研究,对推动混凝土3D打印在建筑结构中的工程应用具有重要意义。

模块化打印与节段拼装是3D打印混凝土实现规模化应用的重要发展方向。然而,受限于钢筋自动化植入的技术瓶颈,目前多数3D打印混凝土结构采用无筋或少筋建造模式^[8]。Xu等^[9]采用3D打印技术建造了一座长26.3 m、宽3.6 m的无筋单拱混凝土步行桥,并通过缩尺试验验证了其承载性能;Dell'Endice等^[10]利用混凝土3D打印技术建造无筋步行桥,通过叠放沙袋施加均布荷载,验证了结构的承载性能。孙晓燕等^[11]分析打印路径对3D打印混凝土无筋拱桥力学性能的影响发现,条间缺陷对拱结构承载能力的影响显著大于层间缺陷,且纵向打印时缺陷层总体积最小、结构承载性能最优。基于ABAQUS有限元模拟方法,李俊霖^[12]对比分析了6种不同打印方式的混凝土拱结构在竖向均布荷载作用下的极限承载力,确定了较为合理的拱结构打印建造方式。夏嘉徽等^[13]通过ABAQUS有限元模拟发现,不对称加载条件下拱结构的极限承载力较对称加载降低了32%。上述研究表明,打印方式及荷载工况对3D打印混凝土拱结构的力学性能具有显著影响。

拱结构在实际服役过程中会承受多种形式的荷载,为全面评价结构的安全可靠性,需开展不同荷载工况下拱结构承载性能的研究。然而,针对横

截面内部打印路径及不同荷载工况对拱结构性能的影响,目前仍缺乏系统性研究。笔者以轻量化3D打印混凝土拱结构为对象,详细研究其设计、建造与承载性能,通过试验揭示荷载工况和横截面打印路径对拱结构承载性能的影响规律,并借助有限元分析不同矢跨比拱结构的力学行为。

1 材料制备与性能

3D打印混凝土材料配合比见表1。水泥选用普通硅酸盐水泥(P·O 42.5)和高贝利特硫铝酸盐水泥(HB-CSA 42.5);细骨料为石英砂(QS),粒径为0.15~0.30 mm,另添加硅灰、粉煤灰和聚丙烯(PP)纤维,以提高打印材料的密实度、流动性和抗裂性能;减水剂为聚羧酸系高性能减水剂,减水率为30%。试验根据《3D打印混凝土基本力学性能试验方法》(T/CCPA 33—2022)^[14]进行打印、养护及测试。打印参数如下:喷头直径为20 mm,运行速度为50 mm/s,打印条宽为30 mm,打印层厚为10 mm。

表1 3D打印混凝土材料配合比

Table 1 Mix proportions of 3D printed concrete

水泥	砂	硅灰	粉煤灰	HB-CSA	水胶比	减水剂/%	PP纤维/%
0.740	1.000	0.066	0.044	0.064	0.25~0.30	0.2	0.3

3D打印混凝土力学性能测试方法如图1所示。采用100 mm×100 mm×100 mm标准立方体试件测定抗压强度及劈裂抗拉强度(式(1));采用100 mm×100 mm×300 mm棱柱体试件测定轴心抗压强度、弹性模量、泊松比及抗剪强度(式(2))。不同加载方向下各力学性能指标均重复测量3次并取平均值,测量结果见表2。

$$f_t = \frac{2F_t}{\pi A} \quad (1)$$

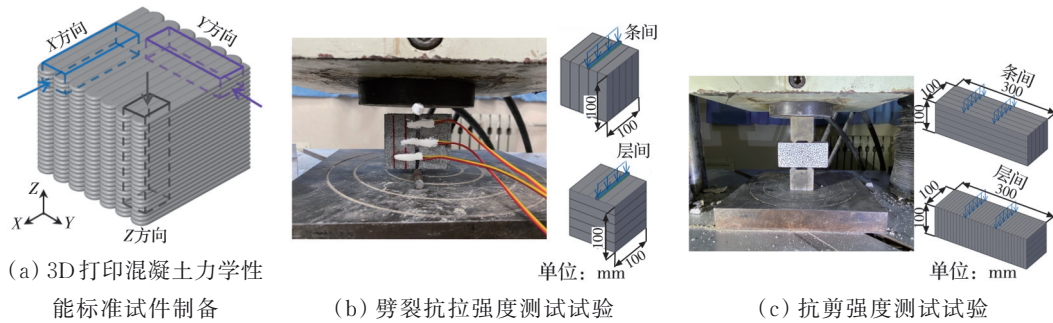


图 1 3D 打印混凝土力学性能测试

Fig. 1 Mechanical performance testing of 3D printed concrete

表 2 3D 打印混凝土的力学性能测试结果

Table 2 Test results of mechanical properties of 3D printed concrete

加载方向	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	劈裂抗拉强度/MPa	抗剪强度/MPa
X 方向	66.7	71.1	31.0	0.23		
Y 方向	57.0	53.9	30.6	0.22		
Z 方向	48.7	50.5	27.0	0.22		
条间					4.3	9.5
层间					3.0	6.3

$$\tau = \frac{F_{\max}}{2bh} \quad (2)$$

式中: f_t 为劈裂抗拉强度; F_t 为破坏拉伸荷载; A 为有效抗拉面积; τ 为抗剪强度; F_{\max} 为峰值荷载; b 、 h 分别为试件的宽度、高度。

由测量结果可知, 打印试件具有明显的各向异性: 立方体抗压强度、轴心抗压强度、弹性模量及泊松比均以 X 方向最大, Y 方向次之, Z 方向最小。其原因是 PP 纤维在打印方向(X 方向)排列整齐, 提升了试件 X 方向的力学性能^[15]; 与层间相比, 条间的劈裂抗拉强度与抗剪强度分别高 43.1% 和 50.8%, 层间弱面对强度影响显著, 相邻挤出条带间的搭接宽度可在一定程度上提高上述两种强度。

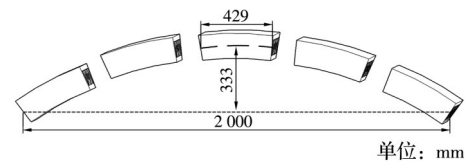
2 3D 打印拱结构设计、建造与测试

2.1 数字化设计

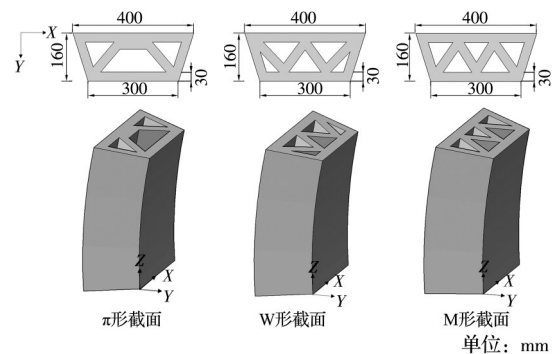
根据相关规范及常用拱桥的结构形式, 设计拱结构矢跨比为 1/6, 计算跨径为 2 000 mm, 矢高为 333 mm, 圆弧拱轴线长 2 145 mm; 将拱结构均匀划分为 5 个节段, 如图 2(a) 所示。打印构件外轮廓为上宽下窄的梯形, 内部打印路径参照已有研究^[8,16]共设计 π 形、W 形、M 形 3 种形式, 如图 2(b) 所示。

2.2 数字化建造

将三维模型的 STL 文件导入 3D 打印切片与路径规划设计软件 KUKA|prc, 使刀具方向与曲面保持平行, 安全高度设置为 300 mm, 最终生成机器人控制指令。为实现拱形节段的打印, 将三维曲面展开为二维流形, 底面设为 $U=0$, 顶面设为 $U=1$; 依



(a) 拱结构模型尺寸



(b) 3 种横截面及打印节段

图 2 拱结构设计

Fig. 2 Arch structure design

据 UV 等值线对二维流形进行划分, 使分段间距接近打印层厚。如图 3 所示, 打印过程由 KUKA 机械臂完成; 施工过程中通过调整机械臂运动轨迹, 确保打印喷头与打印层法向量保持平行, 使打印条带呈现出内外具有高度差的层积状态。

拱节段打印完成并经 7 d 养护后, 采用电动砂轮打磨接缝面, 确保拼装精度及接触面良好贴合。如图 4(a) 所示, 节段拼装过程中发现, 采用垫块作为临时支撑易导致相邻节段发生错位, 难以保证多次拼装时拱轴线的一致性。经过多次探索, 采用如图 4(b) 所示的 3D 打印混凝土临时支撑辅助拱节段

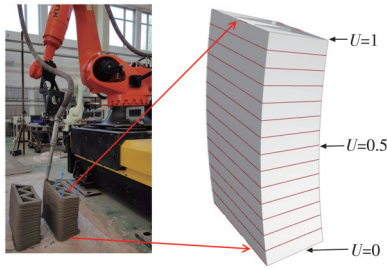


图3 拱结构建造

Fig. 3 Arch structure fabrication

拼装。该临时支撑上部轮廓与试件拱轴线紧密贴合,保证了各节段的精确拼装。同时,端部拱脚支撑可限制拼装过程中各节段的滑动;拼装时在拱结构 $2L/5$ 和 $3L/5$ 下方设置临时垫块,待拼装成型后撤出,利用拱结构自重使节段界面间的环氧树脂受压均匀,环氧树脂胶的性能参数见表3;此外,临时支撑预留3个吊装孔道,以保证吊装受力对称,避免吊装过程中因受力不均而发生断裂。



(a) 垫块支撑拼装法



(b) 3D打印混凝土临时支撑拼装法

图4 节段拼装方法探索

Fig. 4 Exploration of segment-assembly methods

表3 环氧树脂胶性能参数

Table 3 Performance parameters of epoxy adhesive

性能	可施胶时间/min	7 d压缩强度/MPa	瞬时压缩弹性模量/MPa	1 h压缩弹性模量/MPa	收缩率/%
标准要求	≥ 20	≥ 80	$\geq 8\ 000$	$\geq 6\ 000$	≤ 0.1
试验结果	40~90	94	9 000	7 800	0.09

2.3 承载性能测试

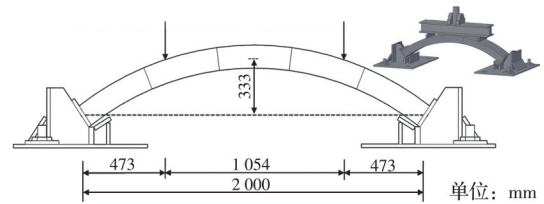
表4为拱结构承载力试验加载方案,旨在研究荷载工况(两点集中、三点集中、均布)与横截面打印路径(π 、W、M)对拱结构承载性能的影响规律。试件命名格式为 x - y ,其中, x 取 π 、W、M,代表横截面打印路径; y 取2、3、U,分别对应两点集中、三点集中、均布加载。图5为3种荷载工况的加载示意图,荷载由千斤顶施加至分配梁并形成相应荷载工

况,拱脚处采用固定约束。

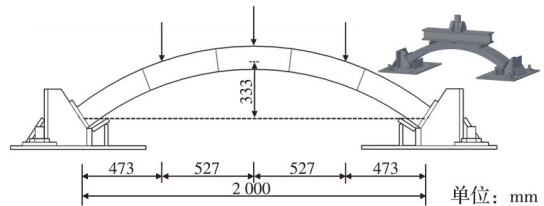
表4 拱结构试验设计参数

Table 4 Test design parameters of arch structures

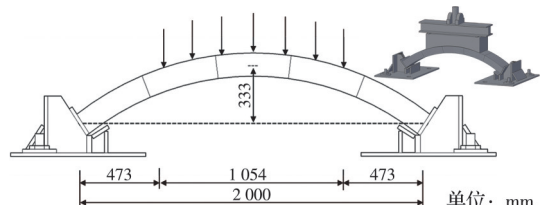
编号	横截面打印路径	荷载工况
π -2	π 形截面	两点加载
π -3	π 形截面	三点加载
π -U	π 形截面	均布荷载
W-3	W形截面	三点加载
M-3	M形截面	三点加载



(a) 两点集中荷载



(b) 三点集中荷载



(c) 均布荷载

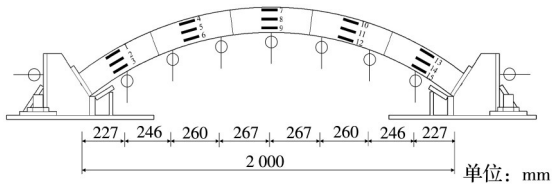
图5 拱结构模型尺寸及3种荷载工况

Fig. 5 Dimensions of arch structure models and three loading conditions

采用应变片、位移计和数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术进行数据采集。如图6(a)所示,每个试件布置9个位移计,其中2个用于测量拱结构底座的水平位移,7个用于测量拱底的竖向位移。采用15个应变片,记录拱结构轴线方向各节段的纵向应变。

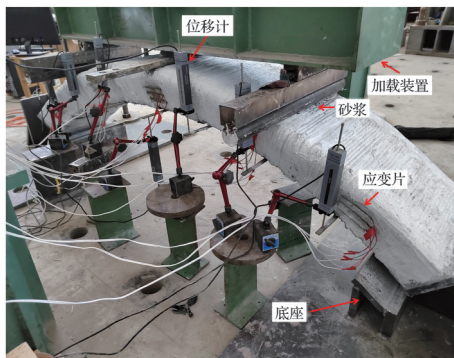
由于拱结构表面呈明显条纹状,为减小加载装置引起的应力集中,如图6(b)所示,在接触面涂抹5 mm厚砂浆,并预先施加2 kN压力,使砂浆、传力钢构件与拱结构充分接触。采用电液伺服加载系统,系统内置拉压力传感器与位移传感器,通过千

千斤顶和荷载分配梁控制荷载与位移。试验前施加 20 kN 荷载进行预压;正式加载初期采用 20 kN/min 的荷载控制,试件开裂后采用 0.5 mm/min 的位移控制,直至承载力降至峰值荷载的 70% 且不再反弹,或无法继续加载为止。



注:—应变片; \odot 位移计

(a) 应变片、位移计布置



(b) 三点集中荷载下的试验装置

图 6 拱结构变形测量

Fig. 6 Deformation measurement of arch structures

3 试验结果

3.1 破坏机理分析

图 7 为试件受力过程中裂缝开展的 DIC 应变云图。为反映试件在最大变形方向上的应变分布规律,选取第一主应变作为关键分析参数,其中正值

表示受拉,负值表示受压。根据 DIC 测试结果与肉眼观测,结合相关研究^[17]综合分析,将混凝土出现肉眼可见裂缝时的主应变值确定为 $+4\ 000 \times 10^{-6}$ 。为更清晰地分析试件受力过程中的裂缝开展规律,将加载过程中千斤顶施加的总荷载最大值定义为试件的峰值荷载 F_{pu} 。

对于同种横截面打印路径、不同荷载工况下的试件 π -2、 π -3 和 π -U:加载初期,试件均未出现裂缝,整体应变为 $-250 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$,应变较小,其中试件 π -U 受压区域最大。随着荷载逐步增加,试件 π -2 在 $0.28F_{pu}$ (89.79 kN) 时于左侧加载点下边缘率先出现裂缝,试件 π -3、 π -U 均在 $0.57F_{pu}$ (分别为 221.08、258.96 kN) 时于右侧加载点处最先开裂,其中试件 π -3 的裂缝从拱体上边缘向拱脚方向延伸,试件 π -U 的裂缝则从下往上延伸。加载至 $0.6F_{pu}$ 时,3 根试件均进入带裂缝工作状态,试件 π -2 左侧加载点 $L/4$ 处出现明显应力集中,裂缝区域应变值超过 $+4\ 000 \times 10^{-6}$,跨中出现由底部向上延伸的应力集中条带,应变值约 $+700 \times 10^{-6}$;试件 π -3 和 π -U 裂缝开展不明显,与荷载 $0.57F_{pu}$ 时基本一致。荷载继续加大至 F_{pu} 时,3 根试件裂缝区域的应变值超过 $+4\ 000 \times 10^{-6}$,其余区域应变值维持在 $-300 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$ 范围内。

对于同种荷载工况、不同横截面打印路径的试件 π -3、W-3 和 M-3:在加载初期,试件均未出现裂缝,整体应变为 $-150 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$,应变较小,3 根试件的应变分布较为一致。随着荷载的增加,试件 W-3 在 $0.54F_{pu}$ (220.63 kN) 时于右侧加载点下边缘最先出现裂缝,试件 π -3 在 $0.57F_{pu}$ (221.08 kN) 时于右侧加载点上边缘出现向拱脚延伸的裂缝,试件 M-3 在 $0.56F_{pu}$ (280.14 kN) 时于

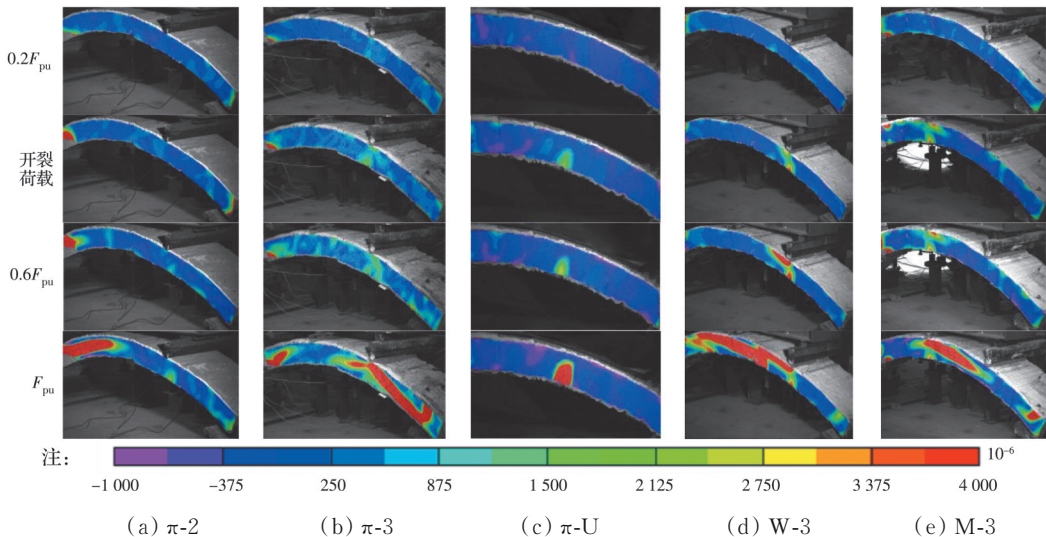


图 7 试件的 DIC 应变云图

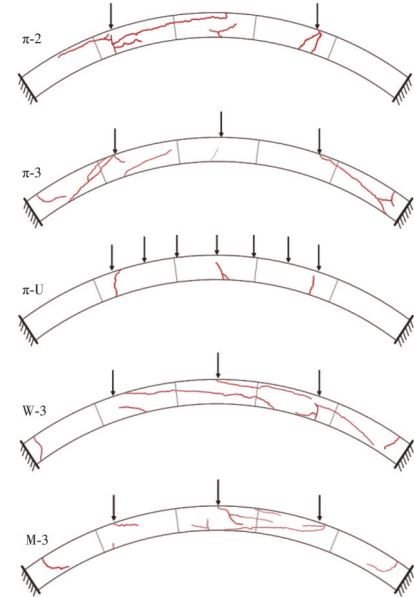
Fig. 7 DIC strain nephograms of specimens

跨中下边缘出现向上延伸的裂缝;3根试件的开裂荷载较为接近,均处于 $0.54F_{pu} \sim 0.57F_{pu}$ 范围内。加载至 $0.6F_{pu}$ 时,3根试件均处于带裂缝工作状态,试件W-3裂缝延伸至拱轴线处,试件 π -3和M-3裂缝开展不明显。荷载继续加大至 F_{pu} 时,3根试件裂缝区域应变值超过 $+4\,000 \times 10^{-6}$,其余区域应变在 $-100 \times 10^{-6} \sim 700 \times 10^{-6}$ 范围内。

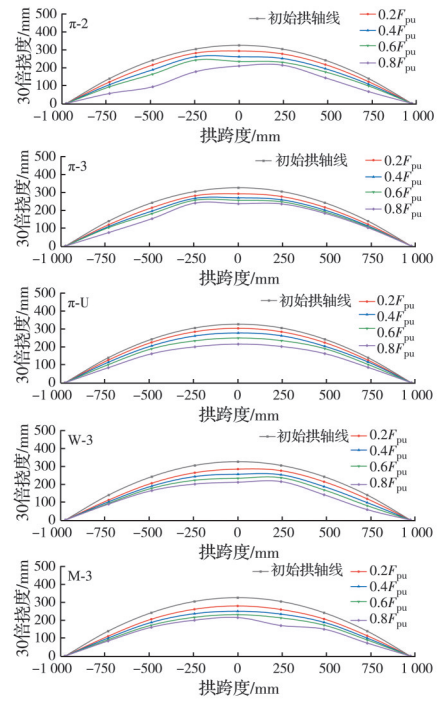
对比5根试件的应变云图可知,两点集中荷载下的试件更易开裂,其开裂荷载显著低于均布荷载及三点集中荷载下的试件。对于承受两点集中荷载的拱结构,设计时应充分考虑其独特的受力特性,通过提高安全储备等措施来保障结构的长期安全性与稳定性。横截面打印路径为M形的试件承载过程中受压区域面积及压应变均大于路径为 π 形、W形的试件,其对三点集中荷载的传力效果最优,更适用于受压拱结构。

5根试件最终破坏时的裂缝分布情况如图8(a)所示。由图8(a)可知,3种荷载工况下试件的裂缝分布存在明显差异:两点集中荷载下的试件出现向跨中及拱脚处延伸的纵向裂缝;三点集中荷载下的试件未出现纵向裂缝,但拱脚处出现自上而下的斜向未贯穿裂缝;均布荷载下试件裂缝数量最少,仅分布在跨中及均布荷载与未受力区域的交界处。对于不同横截面打印路径的试件,其裂缝分布特征也有所不同:打印路径为 π 形的试件,跨中仅出现1条竖向未贯穿的细小裂缝,两侧各出现1条斜向裂缝,裂缝数量最少;打印路径为W形的试件,裂缝数量多且延伸较长,左侧加载点处的斜向裂缝贯穿近半个试件;打印路径为M形的试件裂缝数量最多,存在1条由右侧加载点延伸至跨中底部的斜向裂缝,且两侧拱脚裂缝对称性最优,裂缝以斜向为主。试验过程中,5根试件的裂缝均未沿打印层间及环氧树脂黏结部位延伸,验证了3D打印结构的可靠性。

为方便观测,将挠曲线位移放大30倍,图8(b)为5根试件的近似挠曲线。由图8(b)可知,不同荷载工况下试件的挠曲线差异显著,而不同横截面打印路径的差异较小。均布荷载下试件受力最为均匀,变形过程中对称性最优;两点集中荷载下试件初始对称性较好,荷载加载至 $0.6F_{pu}$ 后,左侧加载点位移变化迅速,试件不对称性显著加剧;三点集中荷载下试件变形特征介于上述两种工况之间,加载时试件整体向裂缝数量较多一侧偏移,变形对称性较好。



(a) 裂缝分布



(b) 挠曲线

图8 试件裂缝及挠曲线

Fig. 8 Cracks and deflection curves of test specimens

3.2 承载性能对比分析

为研究试件在拱轴线方向上的变形规律,对5根试件的应变片监测数据进行分析。如图9所示,突变点A代表应变片附近出现裂缝;以此为界,试件中轴线的荷载-应变曲线可大致分为两个阶段,A点前的线性阶段和A点后的非线性段。

对于横截面打印路径相同、荷载工况不同的试件 π -2、 π -3和 π -U,两点及三点集中荷载下的应力分布不如均布荷载均匀,易产生局部应力集中与变

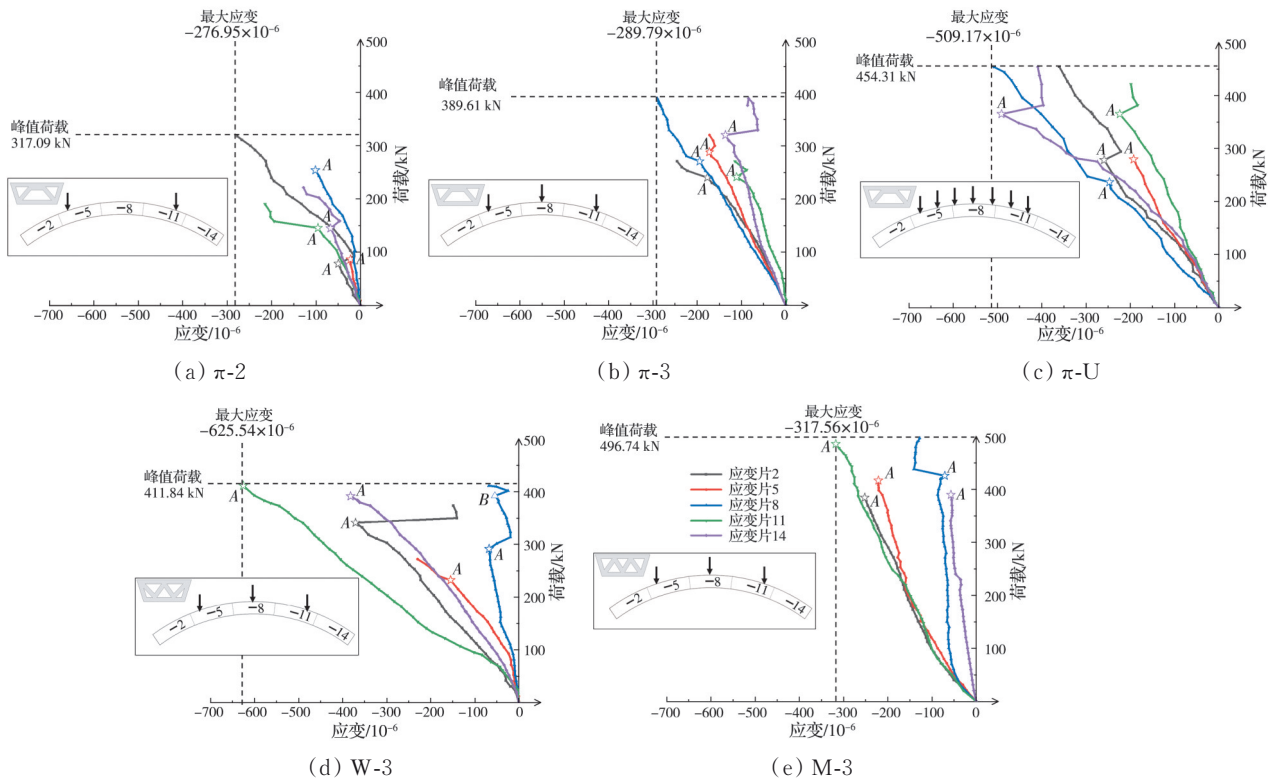


图 9 试件中轴线处荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves at the central axis of the specimens

形不均,进而影响整体应变发展。均布荷载下试件轴向应变对称性最优、增长速度最快,最大应变为 -509.17×10^{-6} ,整体轴向应变显著高于其余两种工况。对于同一荷载工况、不同横截面打印路径的试件 π -3、W-3 和 M-3,打印路径为 W 形的试件轴向最大应变为 -625.54×10^{-6} ,整体轴向应变显著大于其余两种试件,但变形不均匀性显著,整体应变对称性最差。对比 5 根试件的荷载-应变曲线可知,试件轴向受压,应变均为负值,最大压应变多位于加载点附近。因此,在设计拱结构时可于受力关键部位采用高强度材料或复合材料,以提高其抗压性能。

图 10 为 5 根试件的荷载-跨中位移曲线,其中荷载为千斤顶施加的总荷载。由图可知,5 根拱试件的跨中荷载-位移曲线发展形态可分为两类:无残余平台的曲线定义为 I 型,包括试件 π -2、 π -3 和 π -U;有残余平台的曲线定义为 II 型,包括试件 W-3 和 M-3。

1) 弹性阶段:加载初期,各拱试件均未出现裂缝,荷载-位移曲线呈线性变化,试件全截面处于弹性受力阶段。

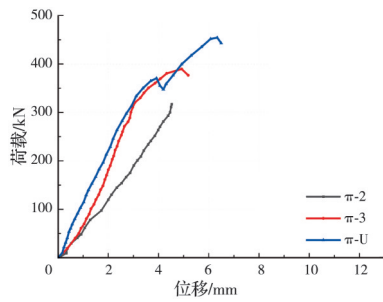
2) 带裂缝工作阶段:随着裂缝的出现与延伸,应力分布发生改变,裂缝周围区域产生应力集中,

结构进入塑性阶段,位移增长速度加快,刚度逐渐减小,但结构仍可继续承载。

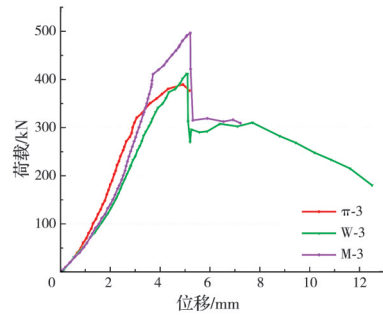
3) 破坏阶段:裂缝大量出现,试件有效承载面积减小,结构完整性降低,荷载逐渐下降而位移持续增长,最终试件发生断裂破坏。此阶段曲线为 I 型的试件位移增长较小,结构延性与大变形能力较弱;其中试件 π -2 跨中出现横向裂缝,导致跨中向上翘起,跨中位移由向下突变为向上,如图 11 所示。曲线为 II 型的试件表现出明显的平台阶段,峰值荷载后位移仍可大幅度增长,结构延性显著提高。其中试件 W-3 最终挠度达 7.70 mm;出现平台阶段的试件的横截面打印路径为 W、M 形,均由 V 形基本单元构成,表明采用 V 形基本单元的拱试件在结构完整性受损后仍具有良好的承载性能和较好的延性。

横截面打印路径为 π 形的试件,在两点集中荷载、三点集中荷载及均布荷载下的峰值荷载分别为 317.09、389.61、454.31 kN。集中荷载易引发应力集中,导致拱结构局部压溃,结构各节段的协同变形能力弱于均布荷载工况;相较于均布荷载,两点及三点集中荷载下试件峰值荷载分别降低 30.2% 和 14.2%。

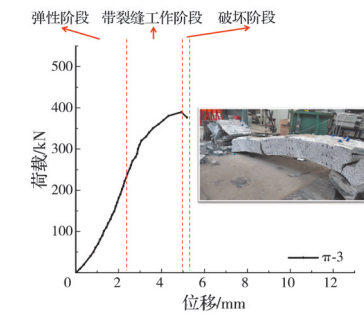
在三点集中荷载作用下,横截面打印路径为 π 形、W 形、M 形的试件峰值荷载分别为 389.61、



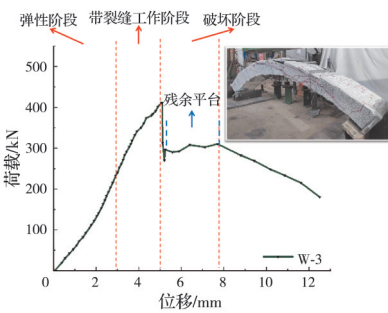
(a) 不同荷载工况



(b) 不同截面形式



(c) I 型



(d) II 型

图 10 试件跨中荷载-位移曲线

Fig. 10 Load-strain curves at the central axis of the specimens

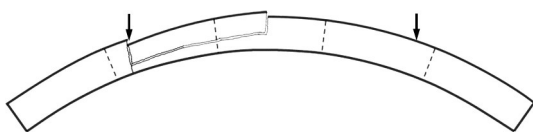


图 11 试件 π-2 破坏阶段跨中翘曲

Fig. 11 Mid-span warping of π-2 specimen at failure stage

411.84、496.74 kN。为进一步分析不同横截面打印路径对材料利用效率的影响,分别测得各试件质量:π形、W形、M形依次为 197、217、204 kg。如表

5、图 12 所示,对各试件开裂荷载、峰值荷载及残余荷载进行单位质量归一化对比可知与横截面为 π形、W形的试件相比,M形试件承载性能更优,材料利用效率最高,传力效果最好;其单位质量开裂荷载较试件 π-3 提升了 22.3%,较试件 W-3 提升了 34.3%;单位质量峰值荷载较试件 π-3 提升了 23.2%,较试件 W-3 提升了 28.4%。

表 5 试件关键状态对应的质量归一化性能

Table 5 Normalized mass performance corresponding to critical states of test specimens

试件编号	质量/kg	单位质量开裂荷载/(kN/kg)	单位质量峰值荷载/(kN/kg)	单位质量残余荷载/(kN/kg)
π-3	197	1.12	1.98	
W-3	217	1.02	1.90	1.43
M-3	204	1.37	2.44	1.52

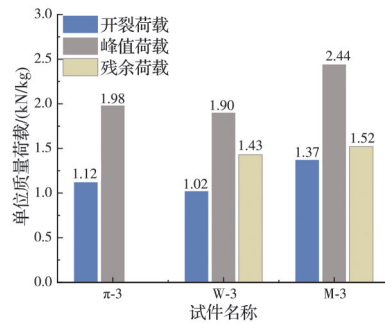


图 12 质量归一化关键参数柱状图

Fig. 12 Bar chart of key parameters for quality normalization

4 有限元模拟

4.1 有限元模型的建立

采用 ABAQUS 有限元软件建立三点集中荷载作用下的 3D 打印混凝土拱形结构数值模型。根据已有计算机断层扫描微观试验结果^[18],3D 打印混凝土非界面区域的微观结构和力学性能与现浇混凝土相似;同时,3D 打印混凝土拼装拱结构为受压结构,试验中裂缝均未沿打印层间延伸。因此,综合考虑模拟精度与计算效率,建模时忽略混凝土层间界面,采用塑性损伤模型及改进的十节点四面体单元(C3D10M)对 3D 打印混凝土拱节段进行仿真模拟。

根据相关研究^[19]及 ABAQUS 用户手册(ABAQUS 2020)可知,模型需定义以下参数:膨胀角 ψ 、偏心率 ϵ 、双轴与单轴抗压强度比 f_{b0}/f_{c0} 、双轴与三轴抗压强度比 K_c 、黏性参数 μ 。通过式(3)~式(9)可将试验测得的 3D 打印混凝土材料参数(表 1)换算并输入 ABAQUS 中。混凝土单轴压缩响应见

式(3)~式(5);受压应力-应变关系见式(6),该关系通过输入应力 σ_c 、非弹性应变 $\epsilon_c^{\sim in}$ 及对应损伤值以表格形式定义;塑性应变表达式见式(7);受拉时应力-应变关系见式(8)、式(9)。

$$f_c = f'_c \frac{n(\epsilon_c/\epsilon_{c0})}{n-1+(\epsilon_c/\epsilon_{c0})^n} \quad (3)$$

$$E_c = 57\,000 \sqrt{f'_c} \quad (4)$$

$$n = 0.4 \times 10^{-3} f'_c + 1 \quad (5)$$

$$\epsilon_c^{\sim in} = \epsilon_c - \epsilon_{0c}^{el} \quad (6)$$

$$\epsilon_c^{\sim pl} = \epsilon_c^{\sim in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (7)$$

$$\sigma_t = E_t \epsilon_t \leq \epsilon_{cr} \quad (8)$$

$$\sigma_t = f_t \left(\frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_t} \right)^{0.4} \quad \epsilon_t > \epsilon_{cr} \quad (9)$$

式中: f'_c 为试验测得的混凝土抗压强度; ϵ_{c0} 为对应 f'_c 的应变; E_c 为混凝土弹性模量; $\epsilon_{0c}^{el} = \sigma_c/E_c$ 为未损伤材料的弹性应变; ϵ_c 为总压缩应变; d_c 为混凝土损伤系数; f_t 为混凝土抗拉强度; ϵ_{cr} 为临界拉应力对应的应变。

为兼顾计算效率并避免沙漏问题,进行网格收敛分析,最终选取单元种子密度为 50。节段之间采用面面接触连接,法向定义硬接触,切向定义“罚函数”。加载条件与试验保持一致,通过定义参考点对有限元模型施加位移载荷,如图 13 所示。边界条件也与试验保持一致,将两端拱脚固结。

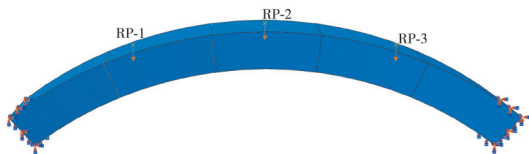


图 13 边界条件及加载方式

Fig. 13 Boundary condition and loading method

4.2 模型验证

图 14 为横截面呈 π 形、W 形、M 形的拱结构在三点集中荷载作用下的破坏形态。对比可知,在三点集中荷载作用下,不同横截面拱结构的裂缝分布大体一致。仅 π 形拱结构在跨中出现竖向裂缝,其余结构裂缝集中在两侧加载点及拱脚底部; M 形拱结构拱脚附近裂缝较少,这也是其试验承载性能最高的原因。有限元模拟与试验的对比分析见图 15、表 6。在三点集中荷载作用下, π 形、W 形、M 形拱结构的模拟荷载-位移曲线与试验荷载-位移曲线趋势基本一致,初始刚度、峰值荷载及对应挠度的误差大多在 10% 以内。通过对各拱试件参数的分析,验证了有限元模型的准确性。

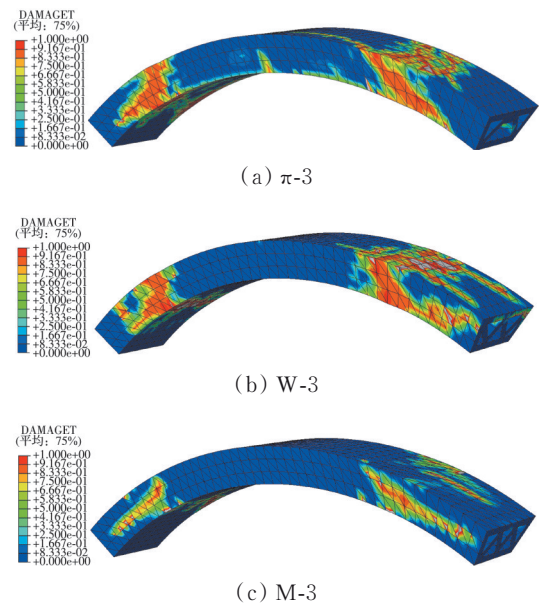


图 14 三点集中荷载下极限状态时拱结构破坏状态

Fig. 14 Failure states of arch structures under three-point concentrated load at ultimate state

表 6 模拟结果与试验结果的对比

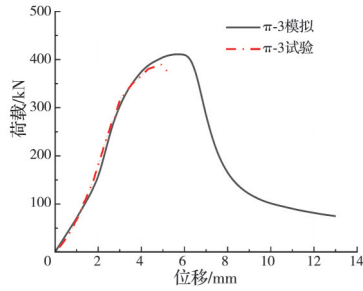
Table 6 Comparison between simulation and experimental results

试件	初始刚度			峰值荷载			峰值荷载对应挠度		
	试验值/(kN/mm)	模拟值/(kN/mm)	误差/%	试验值/kN	模拟值/kN	误差/%	试验值/mm	模拟值/mm	误差/%
π -3	89.80	92.86	3.4	389.61	410.88	5.5	4.92	5.89	19.7
W-3	85.37	85.04	-0.4	411.84	429.17	4.2	5.10	5.09	-0.2
M-3	83.78	86.19	2.9	496.74	535.07	7.7	5.21	5.18	-0.6

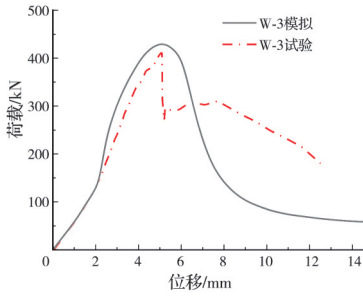
4.3 不同矢跨比的影响

采用已验证的有限元模型对不同矢跨比(1/4、1/6、1/8)的拱结构开展三点集中荷载作用下的承载性能分析。图 16、图 17 分别为不同矢跨比拱结构模型的破坏形态和荷载-位移曲线,表 7 为不同矢跨比拱结构模型的相应参数值。对比可知,3 组拱结

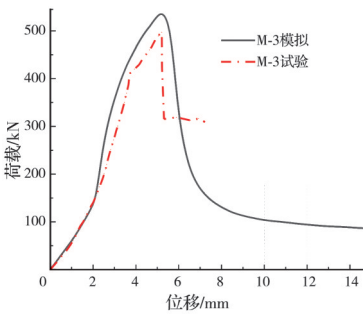
构的荷载-位移曲线变化规律较为相似。加载初期,矢跨比为 1/4 的拱结构荷载增长最为迅速,初始刚度远大于其余两种;随着荷载的增加,试件表面出现裂缝,3 种拱结构荷载增速均减缓,曲线刚度逐渐降低;加载至极限荷载后,由于内部未配置钢筋,3 种拱结构荷载均迅速下降,发生破坏。在规范建议



(a) π 形截面



(b) W形截面



(c) M形截面

图 15 有限元模拟与试验荷载-位移曲线对比

Fig. 15 Comparison of load-displacement curves between finite element simulation and experiment

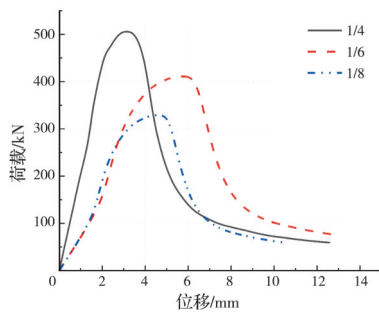
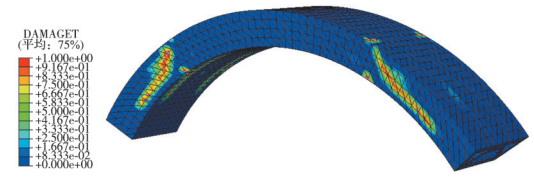


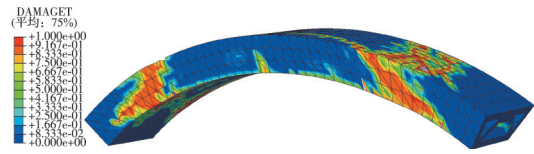
图 16 不同矢跨比的 π 形截面拱结构荷载-位移曲线

Fig. 16 Load-displacement curves of π -shaped section arch structures with different rise-span ratios

的矢跨比范围内,随着矢跨比的减小,拱结构在相同荷载下的受拉应力区域逐渐增大,峰值荷载逐渐降低;与矢跨比为 1/4 的拱结构相比,矢跨比为 1/6、1/8 的拱结构峰值荷载分别降低了 18.8% 和 35.2%。



(a) 1/4 矢跨比



(b) 1/6 矢跨比



(c) 1/8 矢跨比

图 17 不同矢跨比的 π 形截面拱结构破坏状态

Fig. 17 Failure states of π -shaped section arch structures with different rise-span ratios

表 7 不同矢跨比的 π 形截面拱结构参数表

Table 7 Parameter table for π -shaped section arch structures with different rise-span ratios

矢跨比	初始刚度/ (kN/mm)	峰值 荷载/kN	峰值荷载对应 挠度/mm
1/4	212.35	505.74	3.14
1/6	92.86	410.88	5.89
1/8	100.84	327.49	4.81

5 结论

运用混凝土 3D 打印技术制作 5 根节段拼装拱试件,通过静力试验探究不同加载方式及打印路径对拱结构承载性能的影响,并基于有限元模型分析不同矢跨比对其承载性能的影响,得出以下结论:

1) 5 根 3D 打印轻量化拼装拱试件的受力过程可大致划分为弹性、带裂缝工作和破坏 3 个阶段,与现浇混凝土拱结构类似;试验过程中试件裂缝均未沿打印层间及环氧树脂黏结处延伸。研究证实了运用混凝土 3D 打印技术构建装配式无筋拱结构的可行性。

2) 与均布荷载相比,集中荷载更易造成拱试件局部压溃,其各节段协同变形能力较弱;相较于均布荷载,两点及三点集中荷载下拱试件峰值荷载分别降低 30.2%、14.2%;横截面打印路径为 M 形的试件材料利用效率最高,单位质量峰值荷载较 π 形、W 形试件分别提高 23.2% 和 28.4%。

3) 拱结构试验与 ABAQUS 有限元数值模拟的荷载-位移曲线吻合良好,且应力集中区域与实测结

果一致,验证了有限元模型的准确性。通过数值模拟分析了不同矢跨比对 π 形截面3D打印混凝土拱结构的影响,发现在规范建议采用的矢跨比范围内,随着矢跨比减小,拱结构的承载力逐渐降低。

参考文献

- [1] Tay Y W D, Panda B, Paul S C, et al. 3D printing trends in building and construction industry: a review[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2017, 12(3): 261-276.
- [2] Buswell R A, Leal de Silva W R, Jones S Z, et al. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 112: 37-49.
- [3] Marchon D, Kawashima S, Bessaies-Bey H, et al. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: potential admixtures and cement chemistry [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 112: 96-110.
- [4] Ma G W, Buswell R, Leal Da Silva W R, et al. Technology readiness: a global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development[J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 156: 106774.
- [5] 盛蕾, 武雷. 3D打印混凝土技术研究综述[J]. *混凝土与水泥制品*, 2021(10): 7-11.
Sheng L, Wu L. Summary of 3D printed concrete technology research[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2021(10): 7-11. (in Chinese)
- [6] Fang Y G, Guo L F, Hou M X. Arching effect analysis of granular media based on force chain visualization[J]. *Powder Technology*, 2020, 363: 621-628.
- [7] Shi Z, Hu H, Li J Q. Axis optimisation of arch-shaped pylons for high-speed railway cable-stayed bridges[J]. *Engineering Structures*, 2021, 227: 111424.
- [8] Liu D W, Zhang Z G, Zhang X Y, et al. 3D printing concrete structures: state of the art, challenges, and opportunities[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 405: 133364.
- [9] Xu W G, Gao Y, Sun C W, et al. Fabrication and application of 3D-printed concrete structural components in the Baoshan pedestrian bridge project[M]//Fabricate 2020. UCL Press, 2020: 140-147.
- [10] Dell' Endice A, Bouten S, van Mele T, et al. Structural design and engineering of Striatum, an unreinforced 3D-concrete-printed masonry arch bridge [J]. *Engineering Structures*, 2023, 292: 116534.
- [11] 孙晓燕, 唐归, 王海龙, 等. 3D打印路径对混凝土拱桥结构力学性能的影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(11): 2085-2091.
Sun X Y, Tang G, Wang H L, et al. Effect of 3D printing path on mechanical properties of arch concrete bridge[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2020, 54(11): 2085-2091. (in Chinese)
- [12] 李俊霖. 3D打印混凝土层间粘结性能及打印拱结构稳定性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Li J L. 3D printed concrete interlayer bonding performance and stability analysis of printed arch structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [13] 夏嘉徽, 蒋友宝, 张明亮, 等. 环向布筋下3D打印钢纤维混凝土圆弧拱结构的承载性能[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2026, 48(1): 184-193.
Xia J H, Jiang Y B, Zhang M L, et al. Load-bearing performance of 3D printed steel fiber concrete circular arch structure under circumferential reinforcement[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2026, 48(1): 184-193. (in Chinese)
- [14] T/CCPA 33—2022 3D打印混凝土基本力学性能试验方法[S].
T/CCPA 33—2022 Standard for test methods of mechanical properties on 3D printed concrete[S]. (in Chinese)
- [15] Wang C F, Chen B, Vo T L, et al. Mechanical anisotropy, rheology and carbon footprint of 3D printable concrete: a review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 76: 107309.
- [16] 刘明鉴. 3D打印混凝土墙轴压力学性能试验研究及其工程实践[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Liu M J. Experimental research on mechanical behavior of 3D printed concrete wall under axial compressive loads and its engineering application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 童晶, 金贤玉, 田野, 等. 基于DIC技术的锈蚀钢筋混凝土表面开裂[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(2): 193-199, 217.
Tong J, Jin X Y, Tian Y, et al. Study on surface cracking of corroded reinforced concrete based on DIC method[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(2): 193-199, 217. (in Chinese)
- [18] Xiao J Z, Liu H R, Ding T. Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 39: 101712.
- [19] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892-900.

(编辑 朱备)