



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403689

引用格式:蒋友宝,谭捷,高鹏翔,等.3D打印混凝土弧形模壳-现浇梁建造与竖向加载测试[J].科学技术与工程,2025,25(9):3821-3827.
Jiang Youbao, Tan Jie, Gao Pengxiang, et al. 3D Printed concrete curved mold shells-cast-in-place beam construction and vertical loading tests [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(9): 3821-3827.

3D打印混凝土弧形模壳-现浇梁建造与 竖向加载测试

蒋友宝¹, 谭捷¹, 高鹏翔^{1*}, 张明亮², 贺昊轩¹

(1.长沙理工大学土木工程学院,长沙410114;2.湖南建工集团有限公司,长沙410004)

摘要 混凝土弧形梁在支模时往往成型精度难以保证,且制作较难造价高,而3D打印技术有着施工速度快、设计自由度高等特点,因此为解决混凝土弧形梁支模复杂等问题,对3D打印弧形模壳-现浇梁建造的有效性展开研究。根据已有3D打印混凝土配合比和工艺参数,设计和打印了3根3D打印弧形梁模壳,并测量了打印成型精度;模壳内部配置钢筋笼并现浇混凝土材料,制作出3D打印混凝土弧形模壳-现浇梁;对梁试件进行竖向加载测试,验证该建造方式的有效性。结果表明:3D打印弧形模壳实体与三维模型尺寸基本一致,中部误差最大为4%,且整体打印质量和成型质量较好;竖向加载下,3根3D打印弧形模壳-现浇梁试件破坏形态相似;弧形模壳和现浇梁之间设有加固筋的梁试件的开裂荷载和极限承载力得到显著提高,其中极限荷载提升幅度约25%。

关键词 3D打印混凝土;模壳;加固筋;开裂荷载;极限荷载

中图分类号 TU528.79; **文献标志码** A

3D Printed Concrete Curved Mold Shells-cast-in-place Beam Construction and Vertical Loading Tests

JIANG You-bao¹, TAN Jie¹, GAO Peng-xiang^{1*}, ZHANG Ming-liang², HE Hao-xuan¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Hunan Construction Engineering Group Limited Liability Company, Changsha 410004, China)

[Abstract] Concrete arc beams in the support mold is often difficult to ensure the molding accuracy, the production is more difficult to high cost, and 3D printing technology has a construction speed, design freedom and high characteristics, so in order to solve the problems such as the complexity of concrete arc beam support, the effectiveness of 3D printing arc shell-cast-in-place beam construction was studied. According to the existing 3D printing concrete ratio and process parameters, three 3D printing curved beam mold shells were designed and printed, and the printing and molding accuracy was measured. The mold shells were equipped with reinforcing cages and cast-in-place concrete materials, and 3D printing concrete curved mold shells-cast-in-place beams were produced. The beam specimens were subjected to vertical loading tests to validate the effectiveness of the construction method. The results show that the 3D printed curved mold shell is basically the same size as the 3D model, with a maximum error of 4% in the middle, and the overall printing and molding quality is good. Under vertical loading, the damage patterns of the three 3D printed curved mold shell-cast-in-place beam specimens are similar. The cracking load and ultimate capacity of the beam specimen with reinforcement between the curved mold shell and the cast-in-place beam have been significantly improved, with an increase in the ultimate load of about 25%.

[Keywords] 3D printed concrete; mold shells; reinforcement bars; cracking loads; ultimate loads

为实现复杂造型、富有艺术美的混凝土结构建筑,传统建造工艺需准备大量的定制异形模板。但异形模板的加工制作,不仅工期过长,施工质量与成型精度也难以保证,因此往往浪费大量人力物力等资源^[1-2]。除此之外,定制专项异形模板的高昂

价格和模板支拆的巨大工作量导致生产成本提高^[3]等问题,使得复杂造型的混凝土结构建筑的推广受到进一步限制。

3D打印技术是基于数字化建模的智能化建造新技术。对于传统施工技术难以制作的异形模板,该技

收稿日期:2024-05-18 修订日期:2024-12-27

基金项目:国家自然科学基金(52378126);湖南建工集团有限公司科技重大专项(JGJTK2022-13)

第一作者:蒋友宝(1982—),男,汉族,湖南永州人,博士,教授。研究方向:3D打印混凝土结构与智能建造。E-mail:jiangyouseu@163.com。

*通信作者:高鹏翔(1997—),男,汉族,河南洛阳人,硕士。研究方向:3D打印混凝土结构与智能建造。E-mail:gpx15838520576@163.com。

术通过三维建模、逐层切片、计算机控制机器打印等,可以实现快速、批量化生产^[4-6]。目前,已有较多学者探究了免拆模板^[7-10]技术的可行性,但对于异形构件而言这些技术或工艺通常制作困难且成本过高。若能运用3D打印技术来制作异形模壳,并浇筑成构件,将不仅使模板的建造过程更加省时省力,还能降低混凝土浇筑后模板拆除所带来的工作量,提高施工效率,实现更高的经济和社会效益。

目前,学者们对3D打印混凝土模壳构件展开了研究。例如,贺昊轩等^[11]通过打印扭曲面预制模壳,研究了扭转角与扭曲面预制模壳可打印高度、极限承载力之间的关系,得出层扭转角为 6° 时扭曲柱节段平均极限承载力最大的结论。孙晓燕等^[12]研究3D打印混凝土永久模板叠合梁受力性能,结果表明打印模板上部层间缺陷是影响梁抗弯承载能力的关键部位,3D打印混凝土层条界面几何尺寸影响叠合梁应力分布。打印基体和现浇混凝土强度对打印模板叠合梁结构极限荷载的影响不显著,钢筋强度对叠合梁承载力作用显著。Vantghem等^[13]研究了拓扑优化梁的分段打印、模壳连接、混凝土浇筑等,并对其抗弯承载力进行了分析。张志成等^[14]开展了3D打印混凝土永久模板叠合柱及同尺寸整体现浇对照柱试验,并建立了构件的数值模型,研究表明模板叠和柱受力性能优于现浇柱,偏心距对叠合柱的极限承载力削弱幅度大于现浇柱。可见,目前学者们对3D打印混凝土模壳构件的研究主要集中在传统直线型模壳梁、柱的叠合效应和力学性能方面,而对模壳构件的成型精度及对异形模壳构件可建造性、承载能力研究较少。

为此,现研究3D打印弧形模壳-现浇梁的可建造性能及竖向加载测试:制备3个3D打印弧形模壳并测量其建造精度,对相应的3D打印混凝土弧形模壳梁进行竖向加载测试,通过对比分析验证基于3D打印模壳的混凝土弧形梁建造技术的有效性。研究结果可为异形混凝土梁的建造提供有益参考。

1 3D打印混凝土模壳材料

1.1 配合比设计

3D打印混凝土干料组成采用高强P·O 42.5普通硅酸盐水泥、粉煤灰、硅灰、偏高岭土、细砂(细度模数为1.6~2.2,平均粒径为0.25~0.35 mm)和中砂(细度模数为2.3~3.0,平均粒径为0.35~0.5 mm)混合作为骨料、12 mm短切聚丙烯纤维、减水剂。根据已有研究^[15]结果,3D打印混凝土模壳材料所用的配合比如表1所示。

表1 3D打印混凝土模壳配合比

水胶比	砂胶比	胶凝材料		聚丙烯纤维/%	外加剂/%
		组分	掺量/%		
0.28	0.8	普通硅酸盐水泥	75	0.3	减水剂 0.35
		粉煤灰	10		
		硅灰	5		
		偏高岭土	10		

1.2 抗压强度

由于3D打印混凝土抗压强度具有各向异性。故对X、Y、Z这3个方向加载,如图1所示。

通过轴压试验测100 mm × 100 mm × 100 mm的立方体试块3个方向轴压强度,如表2所示。

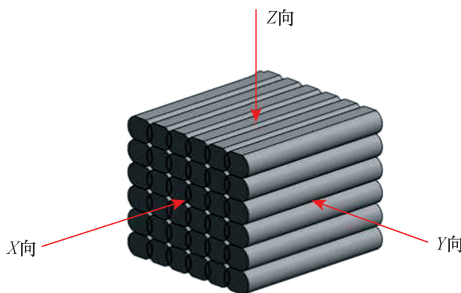


图1 立方体试块加载方向

Fig. 1 Cubic specimen loading direction

表2 打印立方体试块的抗压强度

轴压方向	X	Y	Z
抗压强度/MPa	50.2	47.6	55.4

1.3 工作性能

按照上述配合比进行跳桌试验,测定3D打印混凝土流动性。采用直尺测量振动后材料最大直径 D_1 ,再测量 D_1 正交方向直径 D_2 ,如图2所示,取两个方向的平均值 $D = (D_1 + D_2)/2$ 作为试验的最终结果。

采用建研华测(杭州)科技有限公司生产的HC-3DPRT型混凝土(砂浆)三轴龙门架式打印机,打印尺寸维度为1.8 m × 1.7 m × 1.5 m(X-Y-Z)。打印头为圆形,直径为20 mm,根据已有研究^[16],打印参数可设置为:打印层高10 mm,打印头行进速率

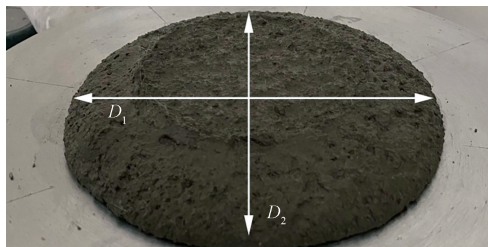


图2 跳桌试验

Fig. 2 Table jumping test

为 50 mm/s, 挤料转轴旋转速率为 1.0 r/s。通过对该配合比进行流动度试验可以得出流动度为 185 mm;在实际应用中,3D 打印混凝土的流动度为 170 ~ 190 mm,可认为满足泵送与挤出要求^[17-18]。初凝时间为 30 min,能够满足 3D 打印混凝土对凝结时间要求。如图 3 所示,按此配比进行 3D 打印,打印过程顺畅连续、条带无断裂坍塌、打印头无堵塞,具有良好的可挤出性和可建造性^[19]。



图 3 3D 打印混凝土条带效果
Fig. 3 3D printed concrete strip effect

2 3D 打印混凝土弧形模壳梁建造

2.1 试件设计

试验制作的弧形梁尺寸为:梁高 200 mm,梁端部宽为 184 mm,梁中部宽为 150 mm,梁跨度为 1 384 mm,如图 4(a)所示,梁轮廓线为式(1)~式(4)参数所围图形,其中梁内侧(A₂B₂)、外侧(A₁B₁)边线为椭圆弧线。各段轮廓线的方程分别为

$$\frac{x^2}{757} + \frac{y^2}{468} = 1 \quad (1)$$

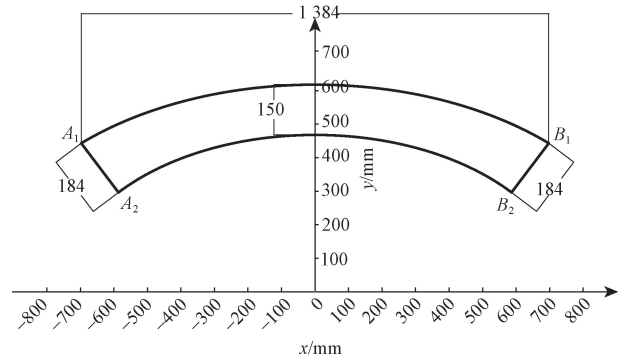
$$\frac{x^2}{1\ 000} + \frac{y^2}{618} = 1 \quad (2)$$

$$y = 1.324x - 480 \quad (3)$$

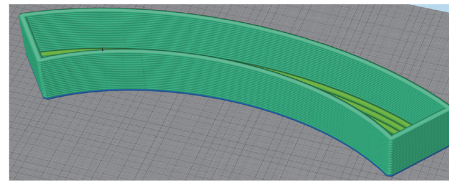
$$y = -1.324x - 480 \quad (4)$$

考虑两种方式建造:一种是采用永久 3D 打印混凝土模壳,模壳内部现浇混凝土,模壳与现浇部分协同共工作;一种是可拆除 3D 打印混凝土模壳,内部现浇混凝土成型后将模壳拆除,仅现浇部分受力(可视现为现浇梁)。对于 3D 打印混凝土模壳,其打印参数按前文所述。采用 SolidWorks 建立弧形梁永久模壳模型。考虑到打印机的实际有效打印尺寸,永久模壳设计最大长度限制在 1 400 mm 以内。再将模型另存为切片文件并导入 Simplify3D 中得到切片模型,如图 4(b)所示。

共制作 3 根弧形梁构件,其截面示意图如图 5 所示,其成型方法、端部截面尺寸和配筋等如表 3 所示。弧形梁的保护层宽度为 25 mm,配筋示意图如图 6 所



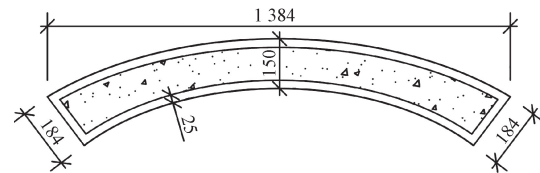
(a)弧形梁尺寸



(b)模壳三维切片模型

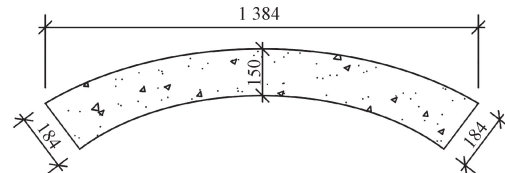
图 4 弧形模壳梁设计

Fig. 4 Curved mold shell beam design



(a)弧形模壳梁截面

单位: mm



(b)现浇弧形梁截面

单位: mm

图 5 弧形梁截面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of curved beam section

示。其中,第二根弧形梁在第五层和第十五层布置加固筋,加固筋平面位置如图 6(b)红色区域。

2.2 试件制作

弧形模壳-现浇梁制作过程按以下 3 个步骤进行。

步骤 1 利用调配好的水泥基材料和确定好的打印参数 3D 打印出弧形模壳试件。L-1 模壳制作如图 7(a)所示。当进行 L-2 试件打印时,采用直径 12 mm 的聚四氟乙烯棒预留钢筋孔洞,如图 7(b)所示,待模壳硬化后插入钢筋以此探究钢筋布置对弧形梁组合构件承载性能的影响。当进行 L-3 试件打印时,模壳总高度增大为 220 mm,模壳内外轮廓同时往外增大 25 mm(混凝土挤出条带宽度),如图 7(c)所示,以此保证现浇弧形梁浇筑后再拆开模壳时与 3D 打印弧形模壳-现浇梁尺寸一致。

表3 试验构件汇总
Table 3 Summary of test components

构件编号	成型方法	弧形梁尺寸/(mm × mm)		配筋形式		
		端部	跨中	箍筋	纵筋	加固筋
L-1	3D打印模壳与内部现浇梁自然连接	184 × 200	150 × 200	Φ8@187	2Φ10	—
L-2	3D打印模壳与内部现浇梁自然连接	184 × 200	150 × 200	Φ8@187	2Φ10	Φ10@262
L-3	3D打印模壳与内部现浇梁隔离连接	184 × 200	150 × 200	Φ8@187	2Φ10	—

注:Φ8@187表示钢筋直径为8mm、相邻钢筋的中心距为187mm;2Φ10表示2根直径为10mm的钢筋。

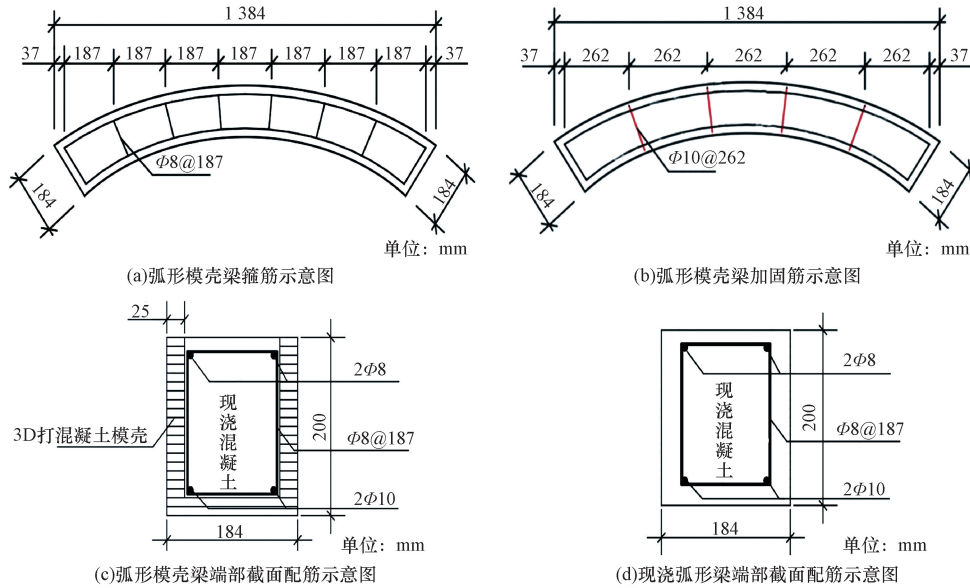


图6 弧形梁设计图

Fig. 6 Curved beam design

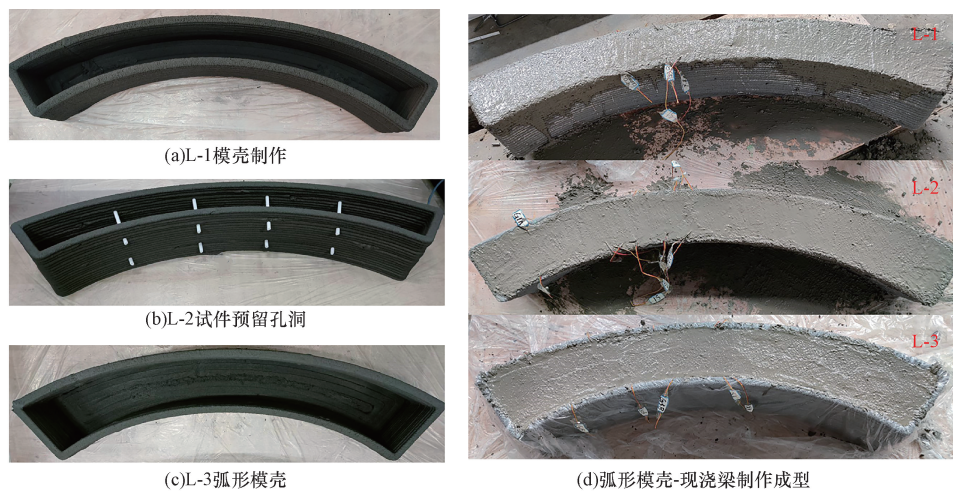


图7 弧形模壳-现浇梁制作过程示意

Fig. 7 Curved mold shell-cast-in-place beam fabrication process schematic

步骤2 在符合实验要求下进行3组模壳试件的养护,定期观察模壳有无因移动或温度变化造成的局部开裂,待养护期结束将绑扎好的钢筋笼放入模壳内部。

步骤3 钢筋笼放入完成后浇筑混凝土,在混凝土浇筑过程中不断用振捣棒振捣,浇筑完成后测量其尺寸是否发生变化、模壳有无出现明显裂缝。

浇筑完成后,用刮板等工具将弧形梁表面进行抹平,定时洒水养护,如图7(d)所示。

其中打印弧形模壳尺寸测量如图8(a)所示,模壳实际高度为201mm,理论高度为200mm,误差为0.5%。如图8(b)所示,模壳中部实际宽度为144mm,理论宽度为150mm,误差为4%。打印实体与理论尺寸基本一致,模壳整体打印质量和成型质量较好。

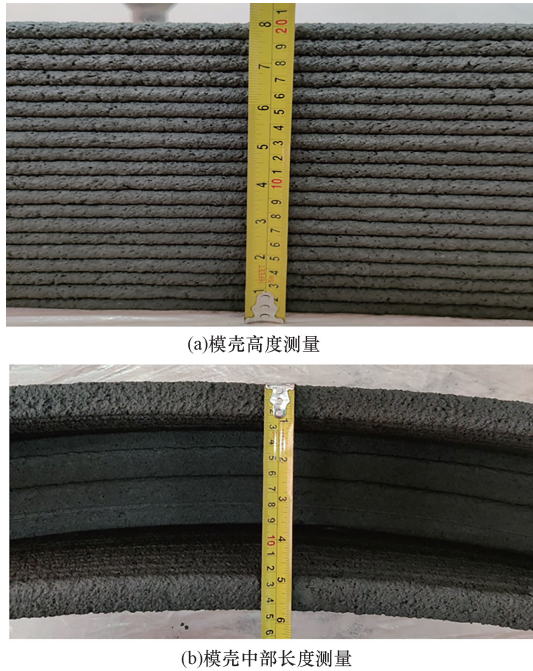


图 8 打印模壳尺寸测量

Fig. 8 Dimensional measurements of the printed mold shell

3 3D 打印混凝土弧形模壳-现浇梁竖向加载验证

3.1 加载方案

将梁放置在钢台座上,梁上端采用钢压梁压住,压梁连接地锚并用螺栓拧紧,梁中部通过千斤顶对其施加集中荷载,通过在千斤顶和弧形梁之间设立球铰连接件,保证加载过程中集中荷载始终保持竖向,弧形梁加载如图 9 所示,弧形梁现场加载如图 10 所示。加载方式参考《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[20] 制定。首先预加载,采用力传感器进行控制,取预估极限荷载 10%,持续 2 min 后卸载。然后正式加载,在开裂前缓慢均匀加载,开裂后按预估弧形梁极限荷载的 10% 左右进行加载,相邻两次加载时间间隔为 2~3 min 直到试件破坏。

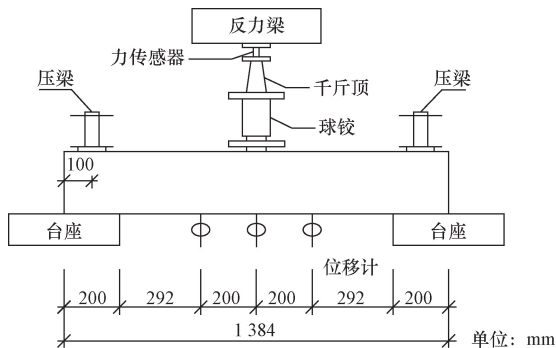


图 9 弧形梁加载

Fig. 9 Arc beam loading

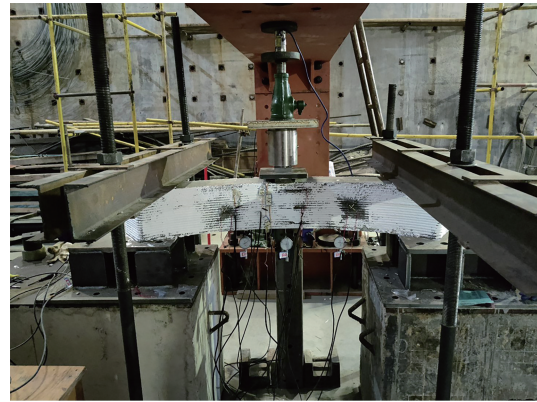


图 10 弧形梁现场加载装置

Fig. 10 Curved beam field loading device

3.2 加载测试结果

试验结果表明,3 根弧形梁在跨中集中荷载作用下的破坏过程较为相似:随着荷载增大,裂缝率先出现在跨中底部并逐渐向上往内、外侧模壳不断延伸,有往加载点处集中的趋势;随着荷载增大,弧形梁模壳与现浇混凝土之间出现裂缝,荷载达到峰值,最终内侧裂缝大致呈“八”字形分布,3 组构件的裂缝发展情况如图 11 所示。

不同的是,弧形模壳-现浇梁试件 L-2 的第五层、第十五层加固筋位置处出现横向裂缝,梁挠度增加相比试件 L-1 更加明显,当第十五层加固筋位置处出现横向裂缝并发展到最外侧加固筋位置时,裂缝迅速向梁底部支座位置处延伸,荷载达到峰值。

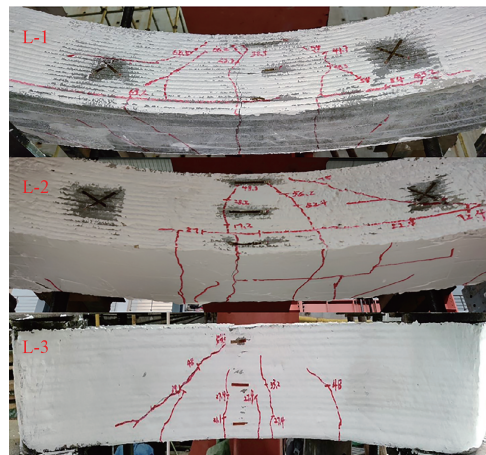


图 11 弧形梁构件裂缝发展对比示意图

Fig. 11 Comparison diagram of crack development of curved beam members

3.3 结果分析与验证

以极限荷载比值和开裂荷载比值表征稳定性,计算公式如式(5)、式(6)所示,3 根弧形梁的开裂和极限荷载比值如表 4 所示。

$$\gamma_1 = \frac{F_{u,m}}{F_{u,x}} \quad (5)$$

$$\gamma_2 = \frac{F_{cr,m}}{F_{cr,x}} \quad (6)$$

式中： $F_{u,m}$ 、 $F_{u,x}$ 分别为弧形模壳-现浇梁与现浇弧形梁的极限荷载； $F_{cr,m}$ 、 $F_{cr,x}$ 分别为弧形模壳-现浇梁与现浇弧形梁的开裂荷载； γ_1 为弧形模壳-现浇梁与现浇弧形梁的极限荷载的比值； γ_2 为弧形模壳-现浇梁与现浇弧形梁的开裂荷载比值。

表4 集中荷载下弧形梁构件的开裂与极限荷载
Table 4 Cracking and ultimate load of curved beam components under concentrated load

构件编号	F_{cr}/kN	F_u/kN	γ_1	γ_2
L-1	23.2	66.9	1.25	1.09
L-2	24.8	73.5	1.37	1.17
L-3	21.1	53.4	1.0	1.0

由表4可知,弧形模壳-现浇梁 L-1 与 L-3 现浇弧形梁相比,开裂荷载提升约 10%,极限荷载提升了约 25%;L-2 与 L-3 现浇弧形梁相比,开裂荷载提升约 17%,极限荷载提升了约 37%。试件 L-1 和 L-2 相比,试件 L-2 极限荷载提升了 9.8%。可知,弧形模壳和现浇梁之间设置的加固筋能进一步提升弧形梁承载能力。

由于 3D 打印混凝土模壳加入了聚丙烯纤维,纤维具有连接作用,能阻碍裂缝的发展,且对内部现浇混凝土形成围箍效应,因此设置模壳的弧形梁相比于现浇弧形梁在开裂荷载和极限荷载方面均会有提升。这表明采用 3D 打印混凝土模壳作为永久模壳且内部现浇混凝土的弧形梁竖向受力性能优于普通现浇弧形梁,进一步验证了 3D 打印混凝土弧形模壳-现浇梁建造工艺的有效性。

4 结论

利用 3D 打印技术建造混凝土弧形梁,通过对打印构件的精度分析、对相应的 3D 打印混凝土弧形模壳梁进行竖向加载测试对比分析验证了基于 3D 打印模壳的混凝土弧形梁建造技术的有效性。提出了一种代替传统弧形梁支模的方法,且为异形混凝土梁的建造提供参考,并得到如下结论。

(1) 基于 3D 打印模壳的弧形梁成型质量较好,弧形模壳高度误差为 0.5%,中部宽度误差为 4%,打印实体与三维模型尺寸基本一致,且未出现沉降不均匀、坍塌。

(2) 3D 打印混凝土弧形模壳-现浇梁与现浇弧形梁破坏过程相似:均经历从加载初期的弹性阶段到裂缝出现、延伸并逐步扩大成主裂缝直至梁失去

承载力而破坏的过程。

(3) 竖向加载下,3D 打印混凝土弧形模壳-现浇梁与现浇弧形梁相比,开裂荷载和极限荷载均有较大程度提升。其中 3D 混凝土弧形模壳和内部现浇梁之间设置加固筋时,模壳弧形梁的开裂荷载提升约 17%、极限荷载提升约 37%,因此基于 3D 打印混凝土模壳和内部现浇混凝土的弧形梁建造工艺效果较好。

参考文献

- [1] 韩俊杰. 提高复杂结构混凝土模板验收合格率的措施[J]. 水利建设与管理, 2020, 40(7): 82-84, 67.
Han Junjie. Measures to improve the acceptance pass rate of concrete formwork for complex structures[J]. Water conservancy construction and management, 2020, 40(7): 82-84, 67.
- [2] 卢秋萍,张红标,钟文龙,等. 混凝土模板工程计价优化研究[J]. 建筑经济, 2023, 44(2): 61-66.
Lu Qiuping, Zhang Hongbiao, Zhong Wenlong, et al. Research on optimization of pricing of concrete formwork project[J]. Construction Economy, 2023, 44(2): 61-66.
- [3] 雷冠军,陈晓东,郭朋岗. 复杂曲面清水混凝土模板加工质量控制[J]. 建筑结构, 2020, 50(S1): 1171-1174.
Lei Guanjun, Chen Xiaodong, Guo Penggang. Quality control of clear concrete formwork processing for complex curved surfaces[J]. Building Structure, 2020, 50(S1): 1171-1174.
- [4] 文俊,蒋友宝,胡佳鑫,等. 3D 打印建筑用材料研究、典型应用及趋势展望[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(6): 26-29.
Wen Jun, Jiang Youbao, Hu Jiaxin, et al. Research on materials for 3D printing construction, typical applications and trend outlook[J]. Concrete and Cement Products, 2020(6): 26-29.
- [5] 姚杰,黄明洋,赵宝军,等. 混凝土 3D 打印技术的研究与应用现状[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(10): 1-9.
Yao Jie, Huang Mingyang, Zhao Baojun, et al. Current status of research and application of concrete 3D printing technology[J]. Construction Technology (in English and Chinese), 2023, 52(10): 1-9.
- [6] 李跃亮. 仿木纹混凝土 3D 打印浇筑模板制备工艺研究[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(13): 111-114.
Li Yueliang. Research on the preparation process of 3D printed casting formwork for wood-like concrete[J]. Construction Technology Development, 2022, 49(13): 111-114.
- [7] 刘山洪,冯霄暘,李刚,等. 新型组合结构纤维增强塑料永久模板施工技术研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(7): 112-118.
Liu Shan hong, Feng Xiaoyang, Li Gang, et al. Research on construction technology of new combined structure fiber-reinforced plastic permanent formwork[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(7): 112-118.
- [8] 王朋,尤学辉,史庆轩,等. 混凝土免拆模板组合构件力学性能研究综述[J]. 混凝土, 2022(9): 161-168.
Wang Peng, Yu Xuehui, Shi Qingxuan, et al. A review on the mechanical properties of concrete formwork-free composite members[J]. Concrete, 2022(9): 161-168.
- [9] 杨医博,杨凯越,吴志浩,等. 配筋超高性能混凝土用作免拆模板对短柱力学性能影响的实验研究[J]. 材料导报, 2017, 31

- (23): 120-124, 137.
 Yang Yibo, Yang Kaiyue, Wu Zhihao, et al. Experimental study on the effect of reinforced ultra-high performance concrete used as demolition-free formwork on the mechanical properties of short columns[J]. *Materials Herald*, 2017, 31(23): 120-124, 137.
- [10] 周乾,张笑鑫,荀勇,等. 开口永久柱模板结合方式对叠合柱力学性能影响[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(10): 4112-4118.
 Zhou Qian, Zhang Xiaoxin, Xun Yong, et al. Influence of the combination mode of open-ended permanent column formwork on the mechanical properties of stacked columns[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(10): 4112-4118.
- [11] 贺昊轩,蒋友宝,邓云峰,等. 3D 打印预制混凝土扭曲面模壳-现浇柱节段成型试验研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(4): 47-54.
 He Haoxuan, Jiang Youbao, Deng Yunfeng, et al. Experimental study on molding of precast concrete twisted surface mold shell-cast-in-place column section by 3D printing[J]. *Journal of Changsha University of Technology(Natural Science Edition)*, 2022, 19(4): 47-54.
- [12] 孙晓燕,沈俊逸,王海龙,等. 3D 打印混凝土永久模板叠合梁抗弯性能研究[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(10): 1-10.
 Sun Xiaoyan, Shen Junyi, Wang Hailong, et al. Study on flexural performance of 3D printed concrete permanent formwork stacked beams[J]. *Journal of Civil Engineering*, 2022, 55(10): 1-10.
- [13] Vantghem G, Corte D W, Shakour E, et al. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization[J]. *Automation in Construction*, 2020, 112: 103084.
- [14] 张治成,叶志凯,孙晓燕,等. 3D 打印混凝土永久模板叠合柱的抗压性能数值模拟研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(1): 194-206.
 Zhang Zicheng, Ye Zhikai, Sun Xiaoyan, et al. Numerical simulation of compressive performance of 3D printed concrete permanent formwork stacked columns[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering (in Chinese and English)*, 2024, 46(1): 194-206.
- [15] 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/OL]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 1-10[2025-01-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20231207.0949.004.html>.
- Xia Jiahui, Jiang Youbao, Zhang Mingliang, et al. Bearing performance of 3D printed steel fiber concrete circular arch structures under circumferential reinforcement fabrication [J/OL]. *Journal of Civil and Environmental Engineering (in English and Chinese)*, 1-10[2025-01-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20231207.0949.004.html>.
- [16] 贺昊轩,蒋友宝,邓云峰,等. 3D 打印预制混凝土扭曲面模壳-现浇柱节段成型试验研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(4): 47-54.
 He Haoxuan, Jiang Youbao, Deng Yunfeng, et al. Experimental study on molding of precast concrete twisted surface mold shell-cast-in-place column section by 3D printing[J]. *Journal of Changsha University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 19(4): 47-54.
- [17] 张涛,蒯喜强,陈文洁,等. 普通硅酸盐水泥基 3D 打印砂浆的性能及应用(英文)[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(11): 1629-1634.
 Zhang Tao, Lin Xiqiang, Chen Wenjie, et al. Performance and application of ordinary Portland cement-based mortar for 3D printing[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 47(11): 1629-1634.
- [18] Ma G W, Li Z J, Wang L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 162: 613-627.
- [19] 徐卓越,李辉,张大旺,等. 建筑 3D 打印用胶凝材料及其相关性能研究进展[J]. *材料导报*, 2023, 37(12): 97-110.
 Xu Zhuoyue, Li Hui, Zhang Dawang, et al. Research progress on gelling materials for architectural 3D printing and their related properties[J]. *Materials Herald*, 2023, 37(12): 97-110.
- [20] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
 China Academy of Building Research. Standard for test methods of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.