

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.137



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 环向布筋下 3D 打印钢纤维混凝土圆弧拱结构的承载性能

夏嘉徽<sup>1</sup>, 蒋友宝<sup>1</sup>, 张明亮<sup>2,3</sup>, 文俊<sup>1,4</sup>, 沈瞳<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学土木工程学院, 长沙 410114; 2. 湖南建工集团有限责任公司, 长沙 410004; 3. 湖南建设投资集团有限责任公司, 长沙 410004; 4. 湖南工业大学土木工程学院, 湖南株洲 412007)

**摘要:**为增强 3D 打印混凝土圆弧拱结构的受力性能,采用掺入钢纤维与配置钢筋的方法,考察环向布筋对 3D 打印钢纤维混凝土拱结构力学性能的影响。通过不同钢纤维掺量下的力学性能试验确定合适掺量,在此基础上设计两组 3D 打印混凝土圆弧拱结构,通过在拱顶施加均布荷载,测得拱结构的荷载-位移曲线、应变随荷载的变化规律及开裂荷载、极限荷载等参数,分析其变形与破坏规律;考虑对称与不对称加载、截面配筋位置对拱结构的影响,通过有限元计算进一步研究拱结构的承载性能。结果表明:当钢纤维掺量在 0~3% 范围内变化时,3D 打印混凝土 X、Y、Z 三个方向的抗压强度均呈先增加后降低的趋势,其中 2% 钢纤维掺量对应的三个方向抗压强度均最高;两组拱结构的加载破坏过程基本一致,环向布筋拱结构的极限承载力较素混凝土拱结构约提高 37.5%;采用的有限元建模方法较为准确,模拟结果与试验结果的误差不超过 4%,且加载方式、截面布筋位置对拱结构极限承载力有一定影响。

**关键词:**3D 打印混凝土;钢纤维;拱结构;开裂荷载;极限荷载;截面布筋位置

**中图分类号:**TU375.5 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)01-0184-10

## Load-bearing performance of 3D printed steel fiber concrete circular arch structure under circumferential reinforcement

XIA Jiahui<sup>1</sup>, JIANG Youbao<sup>1</sup>, ZHANG Mingliang<sup>2,3</sup>, WEN Jun<sup>1,4</sup>, SHEN Tong<sup>1</sup>

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

2. Hunan Construction Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410004, P. R. China; 3. Hunan Construction

Investment Group Co., Ltd., Changsha 410004, P. R. China; 4. School of Civil Engineering, Hunan University of

Technology, Zhuzhou 412007, Hunan, P. R. China)

**Abstract:** In order to enhance the mechanical properties of 3D-printed concrete arc arch structures, this paper uses the methods of adding steel fibre and configuring steel reinforcement to investigate the effect of circumferential reinforcement on the mechanical properties of 3D-printed steel fibre concrete arch structures.

**收稿日期:**2023-08-13

**基金项目:**湖南省自然科学基金(2022JJ10050);湖南建工集团有限公司科技重点项目(JGJTK2022-13)

**作者简介:**夏嘉徽(2000-),女,主要从事 3D 打印混凝土结构与智能建造研究,E-mail:177763016@qq.com。

文俊(通信作者),男,博士生,E-mail:18189904@qq.com。

**Received:** 2023-08-13

**Foundation items:** Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2022JJ10050); Hunan Construction Engineering Group Co., Ltd. Major Project of Science and Technology (No. JGJTK2022-13)

**Author brief:** XIA Jiahui (2000-), main research interests: 3D printed concrete structures and smart construction, E-mail: 177763016@qq.com.

WEN Jun (corresponding author), PhD candidate, E-mail: 18189904@qq.com.

The appropriate steel fiber content was determined by mechanical property tests under different steel fiber contents. On this basis, two groups of 3D-printed concrete arc arch structures were designed. By applying a uniform load to the arch roof, the load-displacement curves, strain changes with load, cracking load, and ultimate load of the arch structures were measured, and their deformation and failure laws were analyzed. Considering the influence of symmetric and asymmetric loading, as well as the position of sectional reinforcement, on the arch structure, finite element calculations were carried out to further study its bearing performance. The results show that: (1) When the steel fiber content changes in the range of 0-3%, the compressive strength of 3D-printed concrete in  $X$ ,  $Y$ , and  $Z$  directions first increases and then decreases, and the compressive strength in the  $X$ ,  $Y$ , and  $Z$  directions corresponding to 2% steel fiber content is the highest; (2) The loading failure process of the two groups of arch structures is basically the same, and the ultimate bearing capacity of the arch structure with circumferential reinforcement is about 37.5% higher than that of the plain concrete arch structure; (3) The adopted finite element modeling method is relatively accurate, with the error between the simulation results and the test results less than 4%. The loading method and the position of section reinforcement have certain effects on the ultimate bearing capacity of the arch structure.

**Keywords:** 3D printed concrete; steel fiber; arch structure; cracking load; ultimate load; sectional reinforcement position

3D 打印技术是一种基于“离散/堆积成型”思想,以数字模型文件为基础,通过逐层打印方式构造实体的高新技术。该技术具有数字化、智能化、无需模板等优点,因而在土木工程领域备受青睐<sup>[1-2]</sup>。拱结构是土木工程领域常用结构形式之一,在竖向荷载下,其截面以受压为主,所受剪力与弯矩相对较小,可充分发挥混凝土材料抗压性能优良的特点。借助 3D 打印技术建造拱结构可避免大量预制模板<sup>[3-4]</sup>带来的繁琐工序,使施工过程更加绿色、环保、高效。

目前,研究人员已开始探索这种建造方式在拱结构中应用的可行性。孙晓燕等<sup>[5]</sup>的研究表明,打印路径会直接影响层、条间缺陷的数量与分布,是导致不同打印拱结构力学性能差异的主要原因;其中纵向打印时的缺陷类型以层间缺陷为主,此时缺陷层总体积最小、拱结构承载性能最好。李俊霖<sup>[6]</sup>研究了考虑层间黏结性能时打印方式对 3D 打印混凝土拱结构稳定性的影响,通过 6 种不同打印方式建造 3D 打印混凝土拱结构,进一步分析其在竖向均布荷载作用下的极限承载力与破坏模式,选出较为合适的拱结构打印方式。贺昊轩等<sup>[7]</sup>通过打印不同扭转角的扭曲面预制模壳,研究了模壳扭转角与可打印高度、极限承载力之间的关系,发现当层扭转角为  $6^\circ$  时,扭曲柱节段的平均极限承载力最大。上述研究表明,3D 打印混凝土结构的力学性能受打印路径、打印方式等参数的影响较大。

由于 3D 打印建造技术较为特殊,其在材料选用、力学性能、施工验收等方面存有不少亟待解决的问题<sup>[8-10]</sup>。例如,3D 打印混凝土材料抗拉强度较

低,呈现出明显的脆性,所打印结构的抗拉弯性能也较弱,导致结构安全可靠降低。为扩大其应用范围,有研究者<sup>[11-13]</sup>通过在材料中掺入短切纤维或在打印前后置入钢筋的方法来提高 3D 打印混凝土结构的抗弯性能,进而提升其抗弯承载力。将钢纤维加入 3D 打印混凝土中,可提高混凝土的阻裂增韧效能;通过黏结作用<sup>[14]</sup>,钢纤维不仅与混凝土共同承受内力,还可加强混凝土各部分之间的黏结力,从而阻止、延缓裂缝的产生与发展,提升水泥基材料的延性和强度。

目前暂未有同时加入钢纤维与配置钢筋的拱结构受力性能研究,因此笔者对环向布筋条件下 3D 打印钢纤维混凝土圆弧拱结构的承载性能进行研究:首先研究不同钢纤维掺量下 3D 打印混凝土材料的力学性能,以钢纤维掺量为变量进行系列材料性能试验,得出相对合适的钢纤维掺量;然后通过材料力学性能试验和拱结构静力加载试验,对比环向布筋组与对照组钢纤维拱结构的破坏形态、峰值荷载及位移变化规律,分析环向布筋对 3D 打印钢纤维混凝土拱结构力学性能的影响;最后考虑对称与不对称加载、截面配筋位置对拱结构的影响,通过有限元计算进一步研究环向布筋拱结构的承载性能。

## 1 材料力学性能试验

### 1.1 试验材料

用 3D 打印混凝土材料,选取 P·O42.5 普通硅酸盐水泥(OPC)与 R·SAC42.5 快硬早强水泥(SAC)作为胶凝材料;选择细度模数为 1.6~2.2、

平均粒径为 0.25~0.35 mm 的细砂(FS)与细度模数为 2.3~3.0、平均粒径为 0.35~0.5 mm 的中砂(MS)作为骨料<sup>[15]</sup>;添加减水剂、消泡剂(AFA)、胶粉(VAE)及钢纤维(相关力学性能见表 1),形成 3D 打印混凝土干料。选取 9 种不同质量掺量的钢纤维,

研究其对 3D 打印混凝土材料力学性能的影响,9 组掺量分别为 0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、3.0%、4.0%、5.0%、6.0%;以编号 SFRC- $x$  表示钢纤维质量掺量为  $x$ % 的 3D 打印混凝土,其中 SFRC-0 作为对照组,其他材料配比如表 2 所示。

表 1 钢纤维相关力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel fibers

材质	长度/mm	等效直径/mm	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	抗拉强度/MPa	长径比	弯曲性能(弯芯 3 mm)
Q235 镀铜	12~14	0.18~0.30	6 500	>3 000	65±6.5	冷弯 90°,9/10 不断

表 2 3D 打印混凝土配合比

Table 2 Mix proportions of 3D printing concrete

编号	OPC	SAC	FS	MS	水	减水剂	AFA	VAE	钢纤维
SFRC- $x$	47.5	2.5	25	25	22	0.12	0.1	0.28	$x$

## 1.2 钢纤维掺量确定

### 1.2.1 条带连续性测试与流动度测试

条带连续性测试方法为:在同一水平面上连续打印 8 条长度为 400 mm、宽度为 100 mm 的 U 型混凝土条带(如图 1(a)所示),并观察其状态。若条带能连续打印且不发生断裂、不出现过多裂缝,则初步说明材料具有较好的流变性与可挤出性能,满足 3D 打印的工作性能要求<sup>[16]</sup>。

流动度测试参照《水泥胶砂流动度测定方法》(GB/T 2419—2016)规定的方法测定。采用水泥胶砂流动度测定仪,在其机械振动下,通过砂浆直径的增加值来表示其黏稠度。在实际应用中,为满足泵送与挤出等要求<sup>[17]</sup>,流动度需控制在一定范围内。实测流动度为 170~190 mm 时打印效果最优,试验结果见表 3。

表 3 条带的连续性与流动度测试结果

Table 3 Strip continuity and fluidity test results

编号	钢纤维掺量/%	条带连续性结果	最长方向宽度/mm	其垂直方向宽度/mm	流动度/mm
SFRC-0	0.0	表面较平整、连续性好	166.5	172.7	169.6
SFRC-0.5	0.5	表面较平整、连续性好	175.4	165.5	170.5
SFRC-1.0	1.0	表面较平整、连续性好	185.5	161.7	176.6
SFRC-1.5	1.5	表面较平整、连续性好	187.7	173.3	180.5
SFRC-2.0	2.0	表面较平整、连续性好	193.4	182.8	188.1
SFRC-3.0	3.0	表面较平整、连续性好	188.5	176.6	182.5
SFRC-4.0	4.0	有小裂缝、连续性较差	174.1	166.4	170.3
SFRC-5.0	5.0	有较大裂缝、连续性差	163.1	151.2	157.2
SFRC-6.0	6.0	条带断裂、连续性差	157.1	143.9	150.5

由表 3 可知:随着钢纤维掺量的增加,打印条带逐渐出现裂缝甚至断裂;流动度随钢纤维掺量的增加呈现先增大后减小的规律;当钢纤维掺量为 0、0.5%、1.0%、2.0%、3.0% 时,打印条带连续不间断、无明显裂缝,且流动度满足要求,适用于 3D 打印。

### 1.2.2 试块强度测试

选取钢纤维掺量为 0、0.5%、1.0%、2.0%、3.0% 五组试块进行打印,采用建研华测 CABR-3DPRT 型 3 轴龙门架式打印机,按上述配合比配制性能良好的混凝土,选用直径为 20 mm 的打印头,喷头运行速度为 40 mm/s,一次性打印出尺寸为 400 mm×150 mm×120 mm 的试件。在约 22 °C 室

温条件下养护 28 d,待养护成型后,利用大理石切割机切割出 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试块,并标记 X、Y、Z 三个方向(X 方向为打印头移动方向,Y 方向为条带挤出方向,Z 方向为层间堆叠方向),如图 1(b)所示。每个方向 3 个试块为一组,利用液压万能试验机进行抗压强度试验。以相同的试验条件,一次性打印尺寸为 400 mm×150 mm×120 mm、150 mm×400 mm×120 mm、400 mm×400 mm×400 mm 的 3 组试件,待养护完成后,利用大理石切割机将其切割成端部尺寸加大构件,每组 3 个试块,使用带有定制夹具的拉力机进行抗拉强度试验,如图 1(c)、(d)所示。

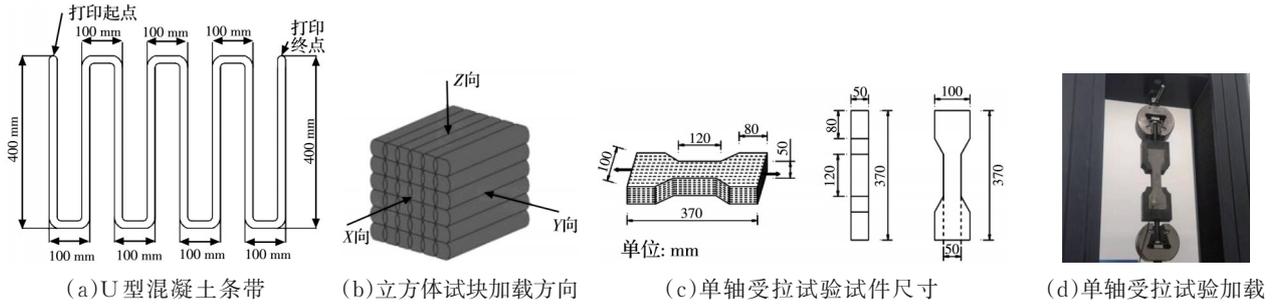


图 1 条带连续性测试、强度测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of strip continuity test and strength test

1.2.3 试块强度测试结果及分析

不同钢纤维掺量和加载方向下试块的抗压、抗拉强度测量结果见表 4。由表 4 可知,每组 3 个测量值中最大值、最小值与中间值的差值均不超过中间值的 15%,因此测试结果有效,故将同组 3 个试块测

量值的算术平均值作为该组试件的强度值,进而得到不同掺量条件下 3D 打印钢纤维混凝土试块的抗压、抗拉强度变化曲线,如图 2 所示。由图 2 可知,钢纤维的加入对 3D 打印混凝土强度有增强作用,但其增强效果与钢纤维掺量密切相关。

表 4 抗压、抗拉强度测量值

Table 4 Compressive and tensile strength measurements

加载方向	掺量 0%		掺量 0.5%		掺量 1.0%	
	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa
X 向	39.7、38.4、40.2	0.63、0.62、0.73	41.2、41.3、44.0	0.81、0.74、0.76	46.4、42.6、43.8	0.99、1.02、1.14
Y 向	34.1、37.2、34.6	0.27、0.34、0.32	35.8、39.2、38.7	0.32、0.33、0.35	42.7、41.0、40.5	0.46、0.45、0.51
Z 向	24.8、24.4、27.1	0.27、0.25、0.30	29.4、27.3、26.3	0.32、0.34、0.29	37.1、37.2、36.1	0.58、0.58、0.59
加载方向	掺量 1.5%		掺量 2.0%		掺量 3.0%	
	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa	$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa
X 向	53.4、50.4、54.6	1.31、1.33、1.28	55.8、55.3、51.9	1.78、39.5、0.66	47.6、49.6、48.9	2.02、1.96、2.09
Y 向	45.3、49.5、46.8	0.58、0.65、0.64	47.7、50.2、49.9	0.54、39.5、0.66	44.2、41.3、44.7	0.36、0.43、0.44
Z 向	41.7、41.2、46.1	0.72、0.71、0.65	44.8、47.2、45.1	0.74、39.5、0.66	37.9、39.7、42.9	0.68、0.58、0.59

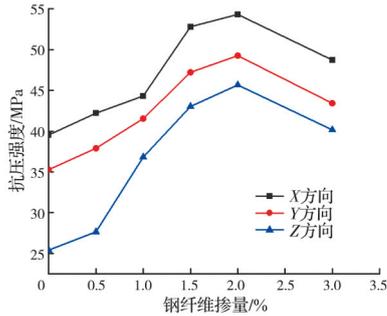
注: $f_c$ 为混凝土抗压强度; $f_t$ 为混凝土抗拉强度。

由图 2(a)可知,随着钢纤维掺量的增加,3D 打印混凝土的抗压强度先增高后降低。当钢纤维掺量达到 2% 时,3D 打印混凝土 X、Y、Z 方向的抗压强度值均为试验组中的最大值,其中 X 方向抗压强度最高,为 54.32 MPa, Y 方向抗压强度为 49.26 MPa, Z 方向抗压强度为 45.67 MPa。试验结果与 Chen 等<sup>[18]</sup>得出的结论一致,这是由于钢纤维具有一定桥联作用,在混凝土试块破坏过程中能抑制裂纹扩展,从而增强混凝土的抗压强度。

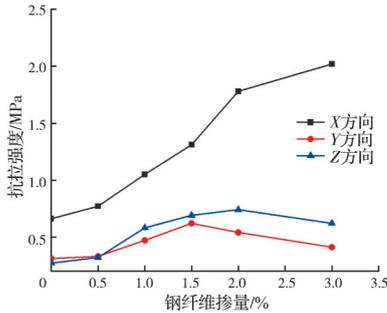
当钢纤维掺量增加到 3% 时,X、Y、Z 三个方向试块强度值分别为 48.73、43.42、40.16 MPa,与钢纤维掺量为 2% 的情形相比,均有不同程度下降,其中 X 方向下降约 10.3%, Z 方向下降幅度最大,约 12.1%。可能是过量钢纤维的掺入导致其分散效果较差,桥联作用未得到充分发挥;此外,钢纤维的不均匀分布使得试块表面出现不平整,导致试块整体的缺陷增加,最终削弱了其抗压强度。

由图 2(b)可知,当钢纤维掺量相同时,X 方向

的抗拉强度明显高于 Y、Z 方向,且 Y 方向强度最低。X 方向的抗拉强度随钢纤维掺量的增加而增强,掺量 2% 时抗拉强度为 1.78 MPa;掺量 3% 时达到最大值,为 2.02 MPa。Y 方向的抗拉强度随钢纤维掺量的增加而先增强后降低,当钢纤维掺量为 1.5% 时,Y 方向抗拉强度达到最大值,为 0.62 MPa。Z 方向抗拉强度变化规律与 Y 方向相似,呈先增强后降低的趋势,当钢纤维掺量为 2% 时,抗拉强度最高,为 0.74 MPa。其原因如下:沿 Y/Z 方向加载时,条/层间薄弱面垂直于加载方向,该薄弱面的空隙与缺陷使得试件更易发生断裂;而沿 X 方向加载时,薄弱面平行于加载方向,且条带是一次性挤出成型,试件在加载方向的连续性更好,缺陷对强度的影响相较于 Y、Z 方向更小。同时,打印头沿 X 方向移动时,部分钢纤维发生定向排布,其朝向近似平行于 X 轴,使得钢纤维在受到 X 方向拉力时黏结力得到充分发挥,因此试件在 X 方向的强度得到提升。



(a) 不同钢纤维掺量下混凝土的抗压强度变化曲线



(b) 不同钢纤维掺量下混凝土的抗拉强度变化曲线

图 2 不同钢纤维掺量下混凝土的抗压、抗拉强度变化曲线

Fig. 2 Compressive and tensile strength curves of concrete with different steel fiber contents

## 2 配筋拱结构加载试验

### 2.1 试验材料

由于拱结构以正截面压弯受力为主,实际应用时多利用其 X 方向的抗压强度。结合 X 方向抗压强度随钢纤维掺量的变化规律,确定钢纤维掺量 2% 为最佳掺量,用于拱结构试件打印,相关配合比如表 5 所示;加载测得的 3D 打印混凝土立方体试块在 X 方向上的应力-应变关系曲线见图 3。

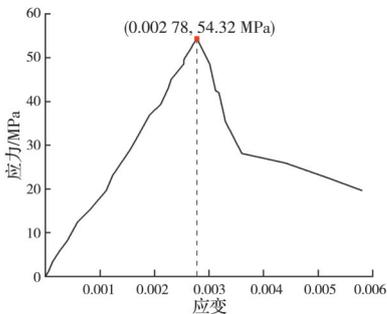


图 3 X 方向 3D 打印混凝土的应力-应变关系

Fig. 3 Stress-strain relationship of 3D printed concrete in the X-direction

在拱结构建造过程中加入直径为 6 mm 的 HRB400 螺纹钢,使用拉伸试验机对所配置的钢筋进行拉伸试验,测得钢筋的屈服应力为 452 MPa,极限应力为 506 MPa,弹性模量为 203 GPa。

表 5 3D 打印拱结构混凝土配合比

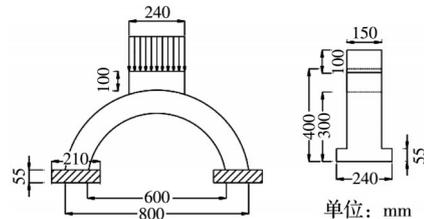
Table 5 Mix proportions of concrete for 3D printed arch structure

OPC	SAC	FS	MS	水	减水剂	AFA	VAE	钢纤维
47.5	2.5	25	25	22	0.12	0.1	0.28	2

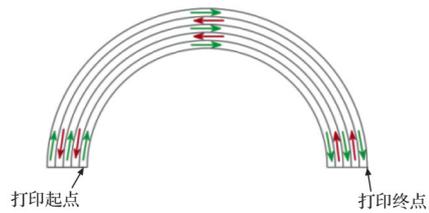
### 2.2 拱结构试件设计及测点布置

拱结构试件由主拱圈、加载平台、拱脚基础 3 部分组成,其中主拱圈净跨长 600 mm、净跨高 300 mm、净宽 100 mm、厚度 150 mm,圆心角为 180°;加载平台与拱脚基础尺寸分别为 240 mm×150 mm×100 mm 和 210 mm×240 mm×55 mm,结构简化模型如图 4(a)所示。

主拱圈 3D 打印建造时选用直径为 20 mm 的打印头,打印系统与其他工艺参数均与试块打印相同;每层打印 5 个条带,单层打印高度为 10 mm,打印路线呈 S 形走向,共打印 15 层,如图 4(b)所示。加载平台与拱脚基础采用模具现浇成型,经标准养护 7 d 后,采用现浇混凝土与主拱圈黏结,随后继续养护 21 d。



(a) 拱结构模型正视、侧视图



(b) S 形走向

图 4 拱结构模型及打印路径

Fig. 4 Arch structure model and printing path

试验设计了 2 组 3D 打印钢纤维混凝土拱结构,分别为 A 组未配筋拱结构、B 组环向配筋拱结构,相关配筋方案见表 6,其中 B 组结构跨中截面示意图如图 5(a)所示,其他应变片、位移计布置情况见图 5(b)。

表 6 拱结构配筋方案

Table 6 Reinforcement schemes of arch structures

组名	编号	配筋情况
对照组	A	无配筋的 3D 打印钢纤维混凝土结构
环向配筋组	B	分别在 4、8、12 层沿弧长方向布置一根长度为 109.9 cm、直径为 6 mm 的 HRB400 螺纹钢

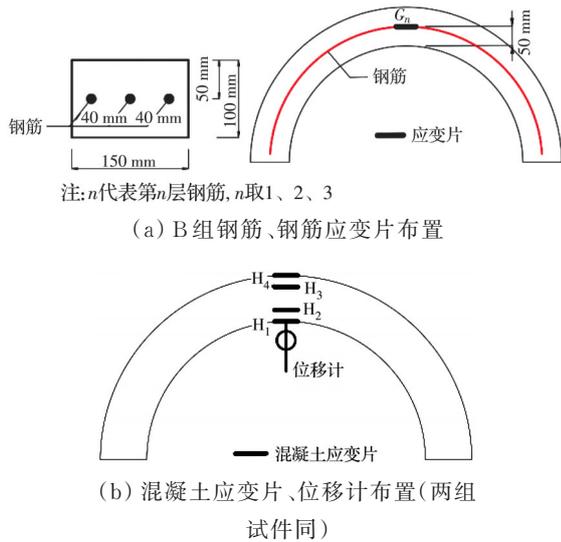


图 5 拱结构测点布置

Fig. 5 Measuring points arrangement of arch structures

### 2.3 试件加载方案

拱结构静力加载试验装置见图 6。根据混凝土结构试验方法标准<sup>[19]</sup>,加载分两步进行:先进行结构预加载使结构进入正常的工作状态,再进行正式加载。

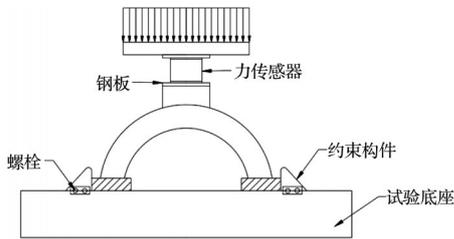


图 6 拱结构静力加载装置

Fig. 6 Static loading device of arch structure

采用分级加载制度:加载达到开裂荷载模拟值的 90% 前,以 5 kN 为级差逐步加载,此时主要观测位移变化;当加载达到开裂荷载模拟值的 90% 后,以 3 kN 为级差持续加载直至构件破坏,其间除观测位移变化外,还需仔细观察并记录裂缝发展;构件破坏后,满载停留一段时间,以观测变形发展,待变形稳定后分级卸载。

## 3 试验结果分析

### 3.1 试验现象

随着荷载的增加,两组试件均在拱顶处截面下边缘(即混凝土受拉区)最先出现裂缝(A、B 两组试件的开裂荷载分别为 37.3、41.1 kN)。此后荷载继续加大,裂缝逐渐向受压区延伸,最终基本贯通整个拱顶截面,见图 7(a)。此外,拱体右侧距拱脚约 1/8 跨度处,拱圈外侧边缘出现裂缝,由外侧边缘沿

径向向内侧发展,见图 7(b);拱体左侧距拱脚约 1/8 跨度处的裂缝发展规律与此相似。由此可知,裂缝主要集中在拱体跨中下边缘和拱体两侧距拱脚约 1/8 跨度处,其他区域裂缝开展不明显。

对比 A、B 两组试件的破坏模式可见,二者基本一致,见图 7(c),均为拱顶处裂缝从截面下边缘发展至顶端形成通缝,且拱体两侧距拱脚约 1/8 跨度处开裂到一定程度,最终导致拱结构破坏。稍不同的是,B 组试件破坏时,拱顶处环向钢筋发生断裂,而拱脚两侧钢筋未断裂,且其拱体两侧裂缝的开展程度比 A 组小。

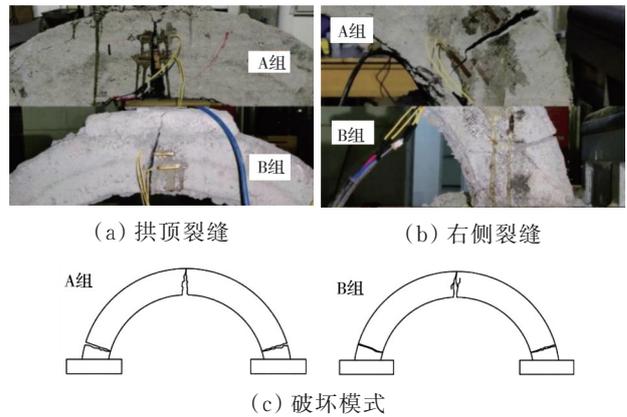


图 7 两组拱结构试件的裂缝与破坏模式对比

Fig. 7 Comparison of fracture and failure modes of two groups of arch structure specimens

### 3.2 试验结果分析

A、B 两组试件的开裂荷载、极限荷载结果如表 7 所示。由试验结果可知:两组拱结构的开裂荷载较为接近,但极限荷载相差较大。配置环向钢筋的 B 组试件极限承载力最高,相较于对照组 A 组,其极限承载力约提高 37.5%。

表 7 实际开裂荷载及极限荷载试验值

Table 7 Actual cracking load and ultimate load test values

组别	开裂荷载/kN	极限荷载/kN
A	37.3	56.8
B	41.1	77.1

两组试件的荷载-位移曲线见图 8。由图 8 可知,加载过程中两组拱结构的荷载-位移变化趋势基本一致。以 B 组试件为例,曲线大致分为 3 个阶段: I 阶段,曲线接近线性变化,试件未出现明显裂缝,材料基本处于弹性阶段; II 阶段,混凝土开裂后,位移随荷载的增长速率加快,裂缝快速发展,混凝土内部发生内力重分布,随后荷载到达峰值; III 阶段,荷载开始减小,位移持续增长,最终结构断裂破坏。

两组拱结构的荷载-混凝土应变曲线见图 9(a)、

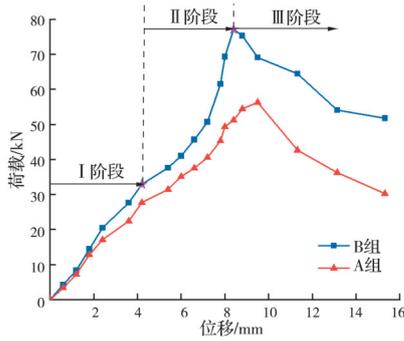
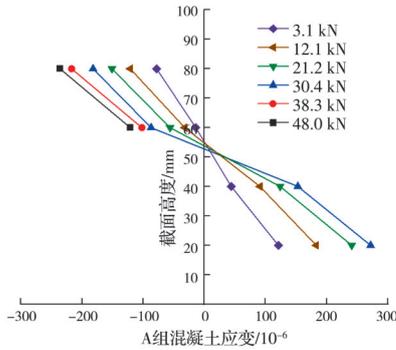


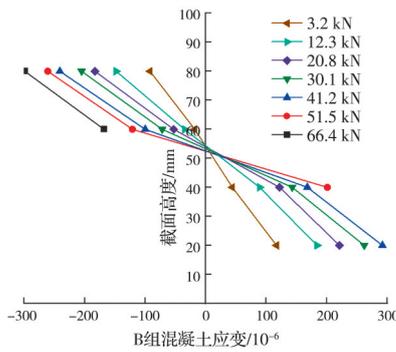
图 8 拱结构试件荷载-位移曲线对比

Fig. 8 Comparison of load-displacement curves of arch structure specimens

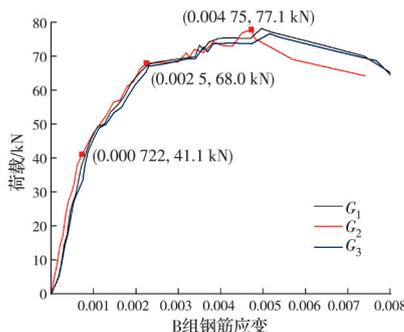
(b)。由图 9(a)、(b)可知,随着荷载的不断增大,受拉、受压区混凝土应变不断增大,拱结构跨中截面高度与混凝土应变近似呈线性关系,因此,拱结构截面应变基本符合平截面假定。



(a) A组荷载-混凝土应变曲线



(b) B组荷载-混凝土应变曲线



(c) B组荷载-钢筋应变曲线

图 9 拱结构荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of arch structures

B组试件的钢筋应变随荷载的变化曲线见图 9(c)。由图 9(c)可知,拱顶 3 个测点的钢筋应变变化趋势基本一致:以  $G_2$  点为例,在开裂荷载(41.1 kN)前,曲线大致呈线性增长,应变近似呈线性增长;此后,随着荷载的继续增大,曲线斜率变大,应变增长速率加快,约加载至 68.0 kN 时钢筋屈服,但结构未发生破坏;继续加载至 77.1 kN 时,达到荷载峰值;随后,结构承受的荷载下降,而钢筋应变仍保持增长。

结合图 8、图 9 可知,B组试件的极限承载能力明显优于 A 组,主要原因是钢筋可代替受拉区钢筋纤维混凝土承受荷载,发挥其良好的抗拉性能。可见,配置环向钢筋的 B 组试件在裂缝开展后表现出的受力性能优于 A 组。

### 4 环向配筋拱结构有限元分析

#### 4.1 有限元模型建模

采用 ABAQUS 有限元分析软件,针对 2 种加载方式(对称、不对称)、4 种截面布筋位置,共计 8 组环向配筋拱结构进行有限元模拟,以进一步研究拱结构的承载性能,如表 8 所示(钢筋材质、长度、直径等参数见表 6)。其中,对称加载情形见图 6;不对称加载情形为在拱单个四分点处施加位移,如图 10 所示。

表 8 拱结构的加载和配筋方式

Table 8 Loading and reinforcement methods of arch structures

加载方式	组别	配筋方式和位置
对称加载	B <sub>1</sub>	单筋, $a_{s1}=50$ mm
	B <sub>2</sub>	单筋, $a_{s1}=15$ mm
	B <sub>3</sub>	单筋, $a_{s2}=15$ mm
	B <sub>4</sub>	双筋, $a_{s1}=15$ mm, $a_{s2}=15$ mm
不对称加载	C <sub>1</sub>	单筋, $a_{s1}=50$ mm
	C <sub>2</sub>	单筋, $a_{s1}=15$ mm
	C <sub>3</sub>	单筋, $a_{s2}=15$ mm
	C <sub>4</sub>	双筋, $a_{s1}=15$ mm, $a_{s2}=15$ mm

注:  $a_{s1}$ 、 $a_{s2}$  分别表示钢筋中心距截面上、下边缘的距离。

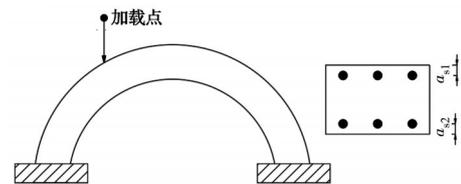


图 10 不对称荷载下拱结构的加载方案及截面配筋简图

Fig. 10 Loading scheme of arch structures under asymmetric load and schematic diagram of section reinforcement

数值模拟时采用分离式建模法构建拱结构,将主拱圈简化为内外表面相对平整的几何体,钢筋内置嵌入混凝土中;装配时将主拱圈与拱脚基础部件进行几何合并,成为一个整体,以简化相互作用面的影响。

采用 ABAQUS 中的混凝土塑性损伤本构模型,混凝土材料的本构按照混凝土结构设计规范<sup>[20]</sup>中的本构计算方法确定;钢筋本构模型采用双直线模型,其弹性模量和屈服应力取值由试验结果确定。混凝土部件采用 C3D8R 八节点线性六面体减缩积分单元,钢筋采用 T3D2 两节点线性三维桁架单元。

在拱结构上部设置参考点,将拱结构加载区域耦合到该参考点,约束加载区域除 Z 方向外的其他自由度;拱脚基础底面设置为固定约束,模型采用竖向位移加载方式,在参考点施加沿 Z 方向的位移。

#### 4.2 有限元模拟结果分析

##### 4.2.1 B<sub>1</sub>组结果与试验结果对比分析

B 组、C 组试件极限状态下的破坏形态分别见图 11、图 12,拱结构有限元极限荷载模拟值见表 9,对应的荷载-位移曲线见图 13。

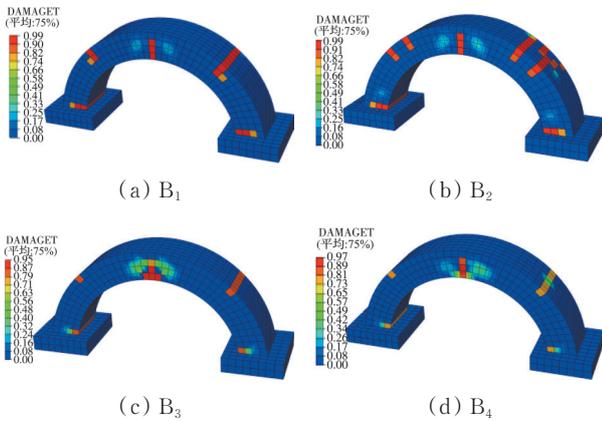


图 11 对称加载下极限状态时拱结构的破坏形态  
Fig.11 Failure mode of arch structures at limit state under symmetric loading

B<sub>1</sub>组模拟结果表明:拱顶与拱脚处的裂缝分布特征与上节试验现象基本一致,不同的是模拟结果中距拱脚约 1/4 跨度处的拱身两侧也出现了明显裂缝;B<sub>1</sub>组极限承载力模拟结果为 79.7 kN,与表 7 中试验结果 77.1 kN 较为接近,误差在 4% 以内;对称加载前期,B<sub>1</sub>组荷载-位移曲线与试验结果较为吻合,随后有限元模拟误差开始增大,但极限承载力值与极限位移值较为接近。加载中期误差较大的主要原因如下:一是数值模拟中,3D 打印混凝土材料本构是按混凝土结构设计规范中同等强度等级

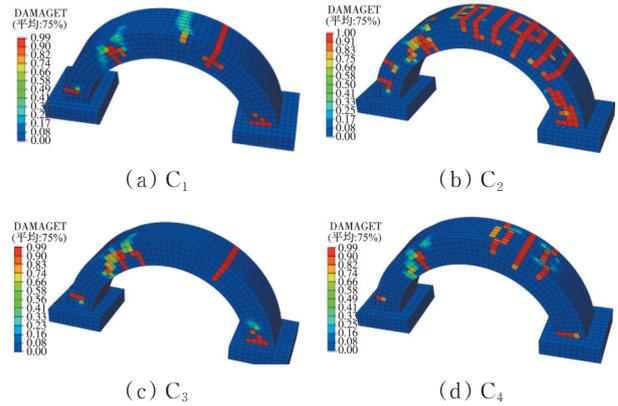


图 12 不对称加载下极限状态时拱结构的破坏形态  
Fig. 12 Failure mode of arch structures at limit state under asymmetric loading

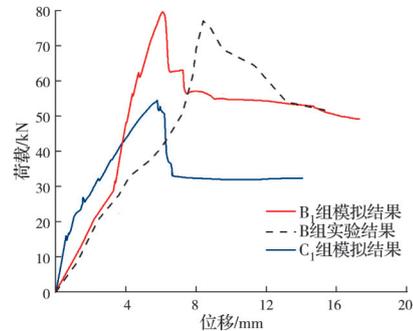


图 13 B<sub>1</sub>、B、C<sub>1</sub>组荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of group B<sub>1</sub>, B and C<sub>1</sub>

表 9 有限元分析得到的极限荷载结果

Table 9 Ultimate load results from finite element analysis

组别	极限荷载/kN	组别	极限荷载/kN
B <sub>1</sub>	79.7	C <sub>1</sub>	54.5
B <sub>2</sub>	88.9	C <sub>2</sub>	65.6
B <sub>3</sub>	81.5	C <sub>3</sub>	49.9
B <sub>4</sub>	89.2	C <sub>4</sub>	65.3

混凝土的计算方法确定的,但实际试验时掺入了钢纤维,材料具有更高的抗拉与抗折强度;二是 ABAQUS 前处理过程中,将 3D 打印混凝土打印产生的凹凸面进行简化处理,但实际接触更为复杂。

##### 4.2.2 加载方式对拱结构的影响

结合表 9、图 11~图 13 可知,不对称加载下拱结构的极限承载力均小于对称加载,且不对称荷载下拱结构的应力分布更不对称、不均匀。以布筋位置相同的 B<sub>1</sub>组、C<sub>1</sub>组为例,C<sub>1</sub>组拱结构的极限承载力为 54.5 kN,相对于对称加载的 B<sub>1</sub>组,其极限承载力约降低 32%;两组拱结构的荷载-位移曲线变化规律较为相似:加载初期,C<sub>1</sub>组拱结构的弹性阶段较短,开裂荷载小于 B<sub>1</sub>组,位移变化较小;加载中期,C<sub>1</sub>组位移变化速度加快;至极限状态时,两组极限位移较为接近,但 C<sub>1</sub>组的极限荷载明显小于 B<sub>1</sub>组。

#### 4.2.3 截面布筋位置对拱结构极限承载力的影响

由表9的极限荷载模拟结果可知:对称加载下,  $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$ 组拱结构的极限承载力分别为88.9、81.5、89.2 kN, 与 $B_1$ 组相比约分别提升11.5%、2.3%、11.9%, 即 $B_2$ 组与 $B_4$ 组提升极限承载力的效果较显著且接近,  $B_3$ 组提升效果较小; 不对称加载下,  $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 组拱结构的极限承载力分别为65.6、49.9、65.4 kN, 与 $C_1$ 组相比约分别提升20.3%、下降8.4%、提升20%, 即 $C_2$ 组与 $C_4$ 组提升极限承载力的效果同样较显著且接近,  $C_3$ 组拱结构的极限承载力反而有所降低。

由此可见, 在竖向向外荷载作用下, 拱结构各截面以压弯受力为主。将受力钢筋布置在远离截面中性轴且能有效抵抗弯矩的区域, 可提高拱结构承载力, 但这种提升作用与拱结构破坏时控制截面承受的弯矩方向和配筋方式的匹配性有关; 若匹配性不好, 其极限承载力会降低。例如, 对于B组拱结构, 其破坏时的控制截面为跨中拱顶截面(控制截面1)和拱体两侧距拱脚约1/4跨度处的多个截面(控制截面2), 见图11, 两截面分别承受正、负弯矩(此处弯矩以截面下部受拉为正, 上部受拉为负)。 $B_3$ 组受力钢筋布置在截面下部, 能有效抵抗控制截面1的正弯矩, 因此对承载力有一定提升作用;  $B_2$ 组受力钢筋虽布置在截面上部, 但其能有效抵抗多个控制截面2的负弯矩, 故提升作用相对 $B_3$ 组更明显;  $B_4$ 组在截面上、下部均布置受力钢筋, 既能有效抵抗控制截面1的正弯矩, 又能有效抵抗多个控制截面2的负弯矩, 因此 $B_4$ 组对拱结构承载力的提升作用最大。对于C组拱结构, 其破坏时的控制截面为靠近非加载四分点处的多个截面(控制截面1)和加载四分点处截面(控制截面2), 两截面分别承受负、正弯矩, 见图12。 $C_2$ 、 $C_4$ 组在截面上部布置受力钢筋, 能有效抵抗控制截面1的负弯矩, 因此可提高拱结构承载力; 而 $C_3$ 组受力筋布置在截面下部, 仅对控制截面2的正弯矩起到抵抗作用, 未能抵抗多个主要控制截面1的弯矩, 导致 $C_3$ 组拱结构的极限承载力反而有所降低。

## 5 结论

以3D打印钢纤维混凝土拱结构为研究对象, 开展钢纤维混凝土力学性能试验与拱结构静力加载试验, 测得环向配筋条件下钢纤维混凝土拱结构的荷载-位移曲线、应变随荷载的变化规律、开裂荷载与极限荷载等, 并利用ABAQUS有限元软件对环向配筋拱结构进行静力加载数值模拟, 得出以下结论:

1) 当钢纤维掺量在0~3%范围内逐渐增加时, 3D打印混凝土X、Y、Z三个方向的抗压强度均呈先增加后降低的趋势, 且当掺量为2%时, 3个方向的抗压强度均达到最大值。

2) 在拱顶竖向均布荷载作用下, 两组拱结构的破坏过程较为相似, 均表现为拱顶处裂缝贯穿整个截面, 形成通缝, 且拱体两侧距拱脚约1/8跨度处开裂至较大程度, 最终导致结构破坏。

3) 配置环向钢筋后, 3D打印钢纤维混凝土圆弧拱结构的极限承载力有较大程度提高, 试验结果显示, 其承载力约提高37.5%。

4) 采用ABAQUS有限元软件对环向配筋拱结构进行静力加载数值模拟, 结果表明: 在对称荷载作用下, 模拟极限承载力与试验结果较为吻合, 误差不超过4%; 加载方式与截面布筋位置对拱结构的极限承载力均有一定影响。

## 参考文献

- [1] 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 J, JIANG Y B, HU J X, et al. Research on materials, typical applications and development trends of 3D printing buildings [J]. China Concrete and Cement Products, 2020(6): 26-29. (in Chinese)
- [2] 张大旺, 王栋民. 3D打印混凝土材料及混凝土建筑技术进展[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(6): 1583-1588.  
ZHANG D W, WANG D M. Progress of 3D print of concrete materials and concrete construction technology [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(6): 1583-1588. (in Chinese)
- [3] 孙凯利, 吴翔强, 蔺喜强, 等. 混凝土3D打印材料及3D打印模板技术应用进展[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(6): 1832-1843.  
SUN K L, WU X Q, LIN X Q, et al. Research progress on concrete materials for 3D printing and 3D printing formwork technology [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(6): 1832-1843. (in Chinese)
- [4] 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 X Y, SHEN J Y, WANG H L, et al. Bending behavior of composite beam with 3D printed concrete permanent formwork [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(10): 1-10. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 李俊霖. 3D打印混凝土层间黏结性能及打印拱结构稳定性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.  
LI J L. Analysis of interlayer bonding performance of 3D printed concrete and stability of printing arch structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [7] 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 H X, JIANG Y B, DENG Y F, et al. Experimental study on segmental forming of 3D printing prefabricated concrete twisted formwork-cast-in-situ concrete column [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2022, 19(4): 47-54. (in Chinese)
- [8] WANG B L, YAO X F, YANG M, et al. Mechanical performance of 3D printed concrete in steam curing conditions [J]. *Materials*, 2022, 15(8): 2864.
- [9] CHEN Y. Structural behavior of 3D printed concrete specimens with reinforcement [J]. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 2018, 6(3): 174-181.
- [10] CHEN Y D, ZHANG Y S, PANG B, et al. Extrusion-based 3D printing concrete with coarse aggregate: Printability and direction-dependent mechanical performance [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 296: 123624.
- [11] SOLTAN D G, LI V C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 90: 1-13.
- [12] MA G W, LI Z J, WANG L, et al. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 202: 770-783.
- [13] 刘天浩, 王里, 李之建, 等. 混凝土3D打印加筋增韧方法研究进展[J]. *工业建筑*, 2021, 51(6): 9-15.  
LIU T H, WANG L, LI Z J, et al. A review of incorporating reinforcement method in 3D concrete printing [J]. *Industrial Construction*, 2021, 51(6): 9-15. (in Chinese)
- [14] 叶俊宏, 郑怡, 余江滔, 等. 3D打印纤维增强混凝土材料研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(11): 2538-2548.  
YE J H, ZHENG Y, YU J T, et al. Research progress on 3D printable fiber reinforced concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(11): 2538-2548. (in Chinese)
- [15] 蒋友宝, 胡佳鑫, 周浩, 等. 起始点逐层等角度移动时3D打印混凝土圆管可连续打印高度[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(9): 222-231.  
JIANG Y B, HU J X, ZHOU H, et al. Continuous printed height of 3D printing concrete circular tube with equiangular movements of starting point [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(9): 222-231. (in Chinese)
- [16] 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 J, HUANG M Y, ZHAO B J, et al. Research and applications status of 3D concrete printing technology [J]. *Construction Technology*, 2023, 52(10): 1-9. (in Chinese)
- [17] PANDA B, LIM J H, TAN M J. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 165: 563-571.
- [18] CHEN Y D, ZHANG Y S, PANG B, et al. Steel fiber orientational distribution and effects on 3D printed concrete with coarse aggregate [J]. *Materials and Structures*, 2022, 55(3): 100.
- [19] 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.  
Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [20] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2022 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.  
Code for design of concrete structures: GB 50010—2022 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022. (in Chinese)

(编辑 朱备)