

《智能建造·3D打印混凝土》专栏

[编者按]当前,我国进入了高质量发展新时代,建筑行业转型升级势在必行。为解决传统建筑行业普遍存在的低效率、高能耗、劳动密集与劳动力不足的矛盾等难题,工程建造正向绿色化、工业化、智能化程度更高的“新型建造方式”发展。国家加快新型式设施建设,更是为加速推进智能建造提供了难得机遇。从本期开始,本刊推出《智能建造》专栏。

国家《“十四五”住房和城乡建设科技发展规划》明确提出研发性能可靠、成本可控的建筑用3D打印材料与应用技术,助力智能建造与新型建筑工业化技术创新。为此,本期《智能建造》专栏推出4篇文章,分别从“3D打印混凝土扭曲面柱建造技术”“3D打印混凝土墙体材料技术”“3D打印风积沙混凝土技术”“3D打印地质聚合物混凝土技术”等方面研究了3D打印新材料与新建造技术。

本期专栏负责人简介:

蒋友宝,长沙理工大学土木工程学院教授,主要从事工程结构可靠性与智能建造领域的教学科研、工程创新应用等工作。在 *ASCE Journal of Structural Engineering*、*Structural Safety*、*Engineering Structures*、《建筑结构学报》等国内外著名期刊上发表学术论文60余篇,获中国、美国发明专利授权10余项,出版教材2部、专著1部,主持国家自然科学基金项目、国家重点研发计划子课题、湖南省自然科学杰出青年基金项目、重大工程技术研发项目等10余项,获省部级和行业协会科技奖励5项。

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.005

文章编号:1672-9331(2022)04-0047-08

引用格式: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.

Citation: HE Haoxuan, JIANG Youbao, DENG Yunfeng, 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.

3D打印预制混凝土扭曲面模壳- 现浇柱节段成型试验研究

贺昊轩¹, 蒋友宝¹, 邓云峰¹, 彭琳娜², 张倚天², 文俊¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;2.湖南建设投资集团有限责任公司,湖南 长沙 410029)

摘要:【目的】解决混凝土扭曲柱支模复杂、成型困难等问题,探究3D打印混凝土预制模壳扭曲柱的建造方法,研究扭曲柱节段的受压性能。【方法】通过打印条带成型质量试验,确定适合3D打印预制模壳成型的打印参数;对层扭转角为0°、2°、4°和6°的3D打印扭曲面模壳进行建造成型试验;在模壳内填充钢筋笼与现浇的C50混凝土,制备得到扭曲柱节段并对其进行受压性能试验。【结果】扭曲面预制模壳可连续打印的高度随着层扭转角的增大而减少,层扭转角为0°时扭曲面模壳可连续打印的高度为550 mm,较层扭转角为6°时扭曲面模壳的可连续打印高度提高了96%;层扭转角为2°时扭曲柱节段平均极限承载力最低,为1 120.20 kN;层扭转角为6°时扭曲柱节段平均极限承载力最大,为1 291.56 kN;不同层扭转角的扭曲柱节段极限承载力的相对极差均控制在5%以内。【结论】由于层间扭转悬空部位的存在,扭曲面预制模壳的构件会发生侧向偏移,最终失稳并发生倒塌破坏。不同层扭转角的扭曲柱节段的平均极限承载力极差较小,即极限承载力的离散性较小,扭曲柱节段成型质量较好。

关键词:3D打印混凝土;打印参数;扭曲柱节段;永久模壳

中图分类号:TU528.79

文献标志码:A

收稿日期:2022-09-16;修回日期:2022-09-18;接受日期:2022-10-07

基金项目:湖南省杰出青年基金资助项目(2022JJ10050);湖南建设投资集团有限责任公司重大专项(JGJTK2022-20);湖南省自然科学基金联合基金资助项目(2021JJ50048)

通信作者:蒋友宝(1982—)(ORCID: 0000-0003-0276-818X),男,教授,主要从事3D打印混凝土结构与智能建造方面的研究。E-mail:jiangybseu@163.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

0 引言

混凝土作为经济型复合建筑材料,在工程结构中得到了最广泛的应用,其不仅可以用来制作较为规整的墙、板、梁、柱等承重构件,也可以应用于各类异形构件中,如弧形梁、扭曲柱等。为实现混凝土异形构件的建造成型,设计加工异形模板成为解决问题的有效手段之一^[1-3]。在异形模板的加工制作过程中,曲面形态拟合往往存在较大误差,因而很难控制施工质量与成型精度,且即使忽略误差,多个非重复形态曲面模板的人工造价也十分高昂,这往往造成了大量人力、物力等资源的浪费。因此,如何实现混凝土异形构件高精度成型是亟须进一步研究的问题。

随着建筑工业的不断发展,智能建造成为未来建筑行业发展的趋势。3D打印混凝土智能建造技术是以建筑信息模型为基础,运用机电一体化技术,通过分层加工、叠加成型的方式逐层增加建筑材料将建筑物打印建造出来的技术^[4-5]。因其自动化、信息化以及智能化程度高等特点,使用3D打印混凝土智能建造技术更易于实现复杂曲面构件的精细化和个性化制造,提高生产效率,减少资源浪费。近年来,相关学者通过3D打印永久模壳来实现混凝土构件的成型。孙晓燕等^[6]制作了3D打印混凝土永久性模板叠合梁并对其进行受力性能研究,结果表明,与整体现浇梁相比,该叠合梁具有良好的刚度。张洋^[7]利用3D打印技术建造了一种圆柱体永久模板,并研究其组合构件的力学性能,结果表明,3D打印永久模板组合柱有着更好的破坏形态、更高的承载力和刚度。葛杰等^[8]进行了3D打印结构柱偏压试验,结果表明,3D打印结构柱与普通钢筋混凝土柱的破坏模式相似,但承载力降低了10%~20%。蔺喜强等^[9]通过制作3D打印混凝土永久模壳,并在模壳内部布置钢筋笼并填充混凝土、砂浆或者保温材料,实现了3D打印混凝土墙体的建造。ZHU等^[10]研究了3D打印空心圆柱体模板与现浇混凝土之间的黏结性能,并通过试验发现3D打印永久模板与现浇混凝土之间存在凹凸界面,该界面能显著改善两者之间的黏结性能并促进两者共同受力,从而提高圆柱体组合构件的承载力。综上所述,现有研究主要对3D打印混

凝土传统梁柱构件模壳进行了探索,而对3D打印混凝土复杂曲面模壳的研究尚需深入。

3D打印混凝土建造技术是一种新型的混凝土无模成型技术,因而3D打印混凝土的制作无须模板支撑,可根据不同需求打印出各种自由曲面架构的实体^[11]。将3D打印混凝土建造技术应用到复杂曲面永久模板的制作中,一是可以保留永久模板叠合效应的力学性能优势与施工效率方面的优势;二是可以发挥3D打印的优势,使复杂曲面模板的制作更高效、更经济。为了研究3D打印预制混凝土扭曲面模壳与现浇混凝土组合构件的成型质量,本研究对3D打印预制混凝土模壳扭曲柱节段的可建造性能与受压性能进行研究,以期3D打印复杂曲面永久性模板的设计及推广应用提供参考。

1 打印材料与工艺参数

1.1 3D打印混凝土材料的组成

本研究采用建研华测(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进行打印,其有效打印尺寸为2.60 m×2.10 m×2.65 m。对于3D打印混凝土,采用P·O42.5普通硅酸盐水泥(ordinary Portland cement, OPC)与快硬早强的R·SAC42.5硫铝酸盐水泥(sulphoaluminate cement, SAC)作为胶凝材料,其混合质量比为 $m(\text{OPC}):m(\text{SAC})=19:1$ 。采用细度模数为1.6~2.2、平均粒径为0.25~0.35 mm的细砂与细度模数为2.3~3.0、平均粒径为0.35~0.50 mm的中砂作为细骨料。另外,在干料中添加长度为6 mm、直径为18 μm 的Y型聚丙烯纤维,以及消泡剂、乳胶粉、羟丙基甲基纤维素醚和减水剂,并搅拌均匀形成混合干料。3D打印混凝土材料的密度约为2 050 kg/m³。3D打印混凝土的配合比见表1。

表1 3D打印混凝土的配合比
Table 1 Formulations of 3D printed concrete kg

水泥	细砂	中砂	水	胶粉
100.00	47.00	47.00	37.00	0.59
消泡剂	减水剂	纤维素醚	聚丙烯纤维	
0.20	0.25	0.06	0.21	

按照上述材料配合比进行跳桌试验,测定3D打印混凝土的流动度,如图1所示。



图1 跳桌试验

Fig.1 Flow table test

试验结果表明,3D打印混凝土的平均流动扩展直径(即流动度)为185 mm。在实际应用中,应控制3D打印混凝土的流动度为170~190 mm,以满足泵送与挤出要求^[12-14]。因此,该组材料具有良好的流动性,适于进行混凝土3D打印。

1.2 3D打印工艺参数的确定

3D打印参数包括打印层高、打印头行进速率、挤料转轴旋转速率等,它们对材料的建造性能与打印条带成型质量有显著影响^[15-17]。在打印条带试验中,根据条带的成型质量对上述3个打印参数进行合理选取。试验共设置5、10、15和20 mm共4个打印层高,试验结果如图2所示。当打印层高为5 mm时,材料成型空间较小,出现压料现象,成型条带不均匀;当打印层高为20 mm时,材料成型挤压力不足,出现麻花条状,不适合打印成型;而10与15 mm的打印层高较为合适。由于打印层高越小,材料相对越密实,基于此,后续试验均采用10 mm的打印层高。

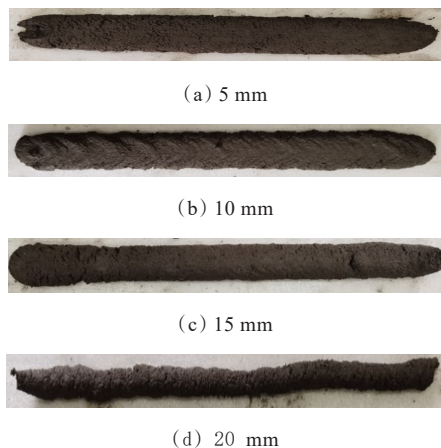


图2 不同层高打印的单个条带质量

Fig.2 Strip quality for printing at different layer heights

打印头行进速率 v 与挤料转轴旋转速率 r 共同影响打印条带的横向成型质量。因此,可考虑将不同的打印头行进速率与挤料转轴旋转速率进行组合。本研究采用内径为20 mm的打印头,将打印层高固定为10 mm, v 取30、40、50和60 mm/s, r 取0.9、1.0和1.1 r/s,将这些参数进行组合,并制作得到共计12种试件(编号为Z1~Z12)进行条带宽度测试。观察条带打印质量,并采用精度为0.01 mm的数显游标卡尺记录条带宽度。取每个条带的四等分点测量条带宽度(图3),取其平均值作为打印条带的宽度 W_{avg} 。若打印头内径为 D ,则条带平均宽度与打印头内径的差值 δ 为:

$$\delta = W_{avg} - D \quad (1)$$



图3 条带宽度测点位置示意图

Fig.3 Diagram of strip width at measuring point

当材料从喷嘴中挤出时原本受到的四周挤压应力得到释放,理论上打印出来的条带宽度会大于打印头的内径(20 mm)。若打印头移动时挤出的条带实际打印宽度比打印头内径宽5~15 mm,则表示打印条带的成型质量较好^[18]。

打印参数对条带平均宽度的影响如图4所示。从图4可以看出,当打印头的行进速率为50 mm/s时,挤料转轴旋转速率0.9和1.0 r/s对应的 δ 分别为10.73和13.20 mm,说明成型效果较好;当打印头行进速率为60 mm/s时,挤料转轴旋转速率0.9、1.0和1.1 r/s对应的 δ 分别为5.66、6.71和8.28 mm,条带成型质量满足打印要求;当打印头行进速率为40和30 mm/s时, δ 均超过了15 mm,条带成型效果不佳。

因此,本研究选取打印头内径为20 mm,设定打印层高为10 mm,打印头行进速率为50 mm/s,挤料转轴旋转速率为1.0 r/s,对混凝土可打印性能进行测试。参照LE等^[19]、MA等^[20]的方法,连续打印8条长度为400 mm的混凝土条带,则总长度为3 200 mm。若条带能被连续打印且不发生断裂,说明材料具有较好的可挤出性能,适合于3D打印,测试结果如图5所示。从图5可以看出,打印

过程中条带未发生断裂或出现裂缝,且表面光滑、外观一致、材料密实,说明材料具有良好的可挤出性能。

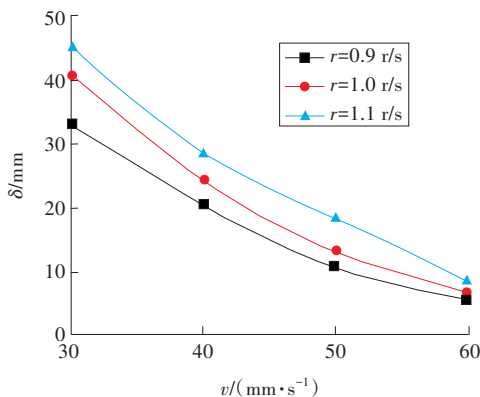


图4 打印参数对条带平均宽度的影响

Fig.4 Effect of different printing parameters on the strip average width



图5 打印条带成型质量

Fig.5 Strip printed forming quality

综上所述,采用1.1节混凝土材料配合比,选取1.2节打印工艺参数进行单条带打印宽度测试与多条带(总长3 200 mm)可挤出性能测试,结果表明,3D打印混凝土条带的打印成型质量较好。因此,本研究选取上述材料配合比及打印工艺参数组合进行试验。

2 3D打印混凝土扭曲面模壳可连续打印高度试验

2.1 模壳设计

本研究所建模型以圆角等边曲线三角形为基础,通过层层扭转条带并将其叠加成扭曲模壳,设置逐层扭转角为 0° 、 2° 、 4° 和 6° ;为了实现模壳最大可连续打印高度,预设模壳的层数为60层,通过Rhino等建模软件生成三维扭曲面模壳;设置好打印参数,校对打印尺寸,将模壳导入Simplify 3D切片软件进行切片并得到切片模型,按照确定的材

料配合比和打印工艺参数进行试验。 2° 扭曲柱模壳的设计如图6所示。

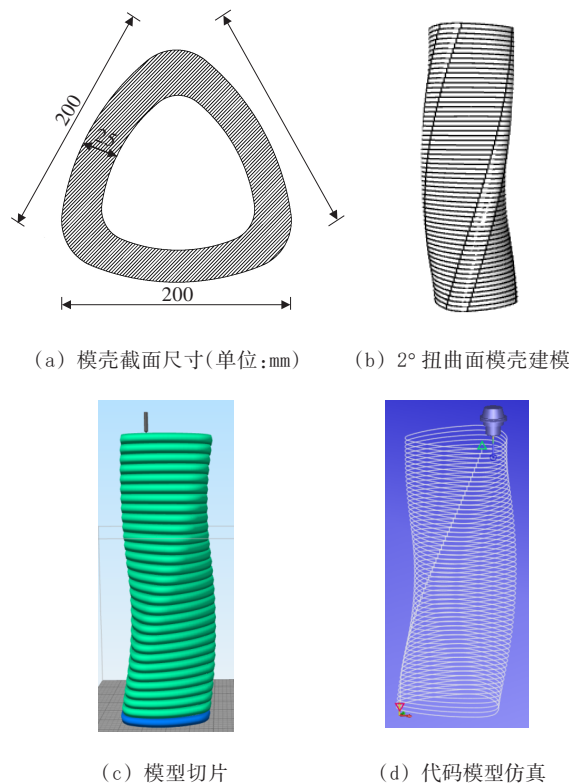


图6 扭曲柱模壳设计(层扭转角为 2°)

Fig.6 Design of twisted-column formwork (interlayer twist angle is 2°)

2.2 可连续打印高度

将扭曲柱模壳的代码导入3D打印系统,通过3D打印系统确定3D打印头位置,选取合适的位置作为坐标原点进行模壳打印。试验结果表明,各扭曲柱模壳连续成型的过程很相似。以层扭转角为 2° 时的模壳为例,其建造成型试验见图7。分析图7可知,随着打印层数的增多,下层条带所受荷载逐渐增大,模壳产生了不均匀沉降。且由于每层扭曲面模壳均存在偏转角,下层条带沿竖向并不能完全支撑上层条带,因此上层条带相对于下层条带会出现扭转悬空部位。悬空部位主要由条带本身的黏结力支撑,当悬空条带的自重超过条带自身的黏结力时,悬空部位会受拉开裂。当裂缝的深度超过单层条带的高度时,该层条带将被拉断,进而造成整体悬空部位被拉断,最终模壳发生倒塌破坏。

不同层扭转角扭曲面模壳的可连续打印高度如图8所示。从图8可以看出,随着单层扭转角的

增大,模壳可连续打印的高度逐步减小。当层扭转角为 0° 时,扭曲面模壳可连续打印高度最大,为550 mm;当层扭转角为 6° 时,可连续打印高度最小,为280 mm。



图7 扭曲柱模壳建造成型试验(层扭转角为 2°)

Fig.7 Constructability test of twisted-column concrete formwork (interlayer twist angle is 2°)

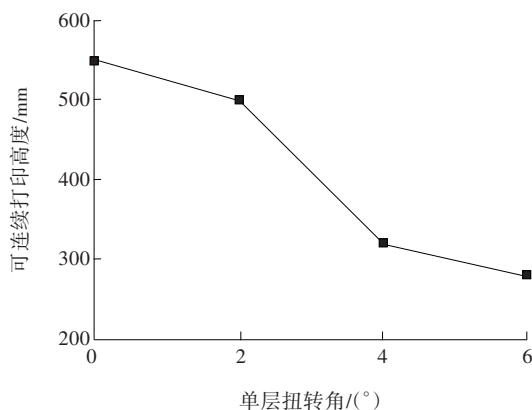


图8 扭曲面模壳的可连续打印高度

Fig.8 Continuous printable height of twisted-surface formwork

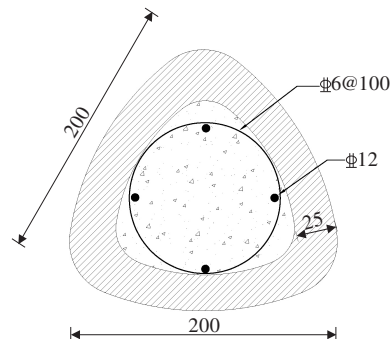
3 3D打印预制混凝土扭曲面模壳-现浇柱节段成型试验与验证

3.1 试验

由2.2节可知, 6° 扭曲柱模壳可连续打印的最大高度为280 mm。因此,为保证可一次性连续打

印扭曲柱节段,控制该类型扭曲模壳-现浇柱节段的高度为250 mm。

该柱节段由3D打印扭曲面模壳、钢筋笼和内部灌注的混凝土组成。按确定的材料配合比和打印工艺参数对3D打印模壳进行试验,步骤为:1)从打印头中挤出3D打印混凝土后,形成宽25 mm、厚10 mm的条带;2)调整路径代码,控制模壳并逐层连续打印(层扭转角分别为 0° 、 2° 、 4° 和 6°),将条带层层叠加,并最终形成3D打印扭曲柱模壳;3)在将模壳养护7 d后,在3D打印扭曲柱节段内部配置HRB400级受力钢筋,并在浇筑C50混凝土后养护7 d。试验设计了12根3D打印扭曲柱,扭曲柱试件的编号为Z1~Z12,其横截面均为边长200 mm的等边圆角三角形。为降低试验的随机性,对于每一层扭转角均制作3个试件,其对应的试件编号分别为Z1~Z3、Z4~Z6、Z7~Z9和Z10~Z12,对应的层扭转角分别为 0° 、 2° 、 4° 和 6° 。层扭转角为 6° 时的柱节段截面及建造成型试件如图9所示。



(a) 扭曲柱模壳截面尺寸(单位:mm)



(b) 建造成型试件

图9 扭曲柱节段截面与建造成型试件(层扭转角为 6°)

Fig.9 Design and construction of twisted-column formwork (interlayer twist angle is 6°)

3.2 质量验证

为验证柱节段成型后的受压性能,使用2 000 kN伺服液压万能试验机系统进行加载试验。在加载前对试件进行几何对中,即将构件轴线对准作用力的中心线;调整压力试验机承压板与扭曲柱之间的接触部位以消除缝隙,减小试验误差。采用位移加载,加载速率为0.5 mm/min,保持该加载速率,直至试件失去承载能力或变形过大便停止加载,各扭曲柱节段加载受力过程相似。随着荷载的增大,试件首先在端部开裂,并产生微裂缝。微裂缝随着荷载的增大而逐步扩展,并最终发展成贯穿整个试件的主裂缝。构件沿着裂缝的发展方向发生模壳脱落,模壳脱落位置的内部混凝土被压碎,最终整体节段被破坏,破坏过程如图10所示。

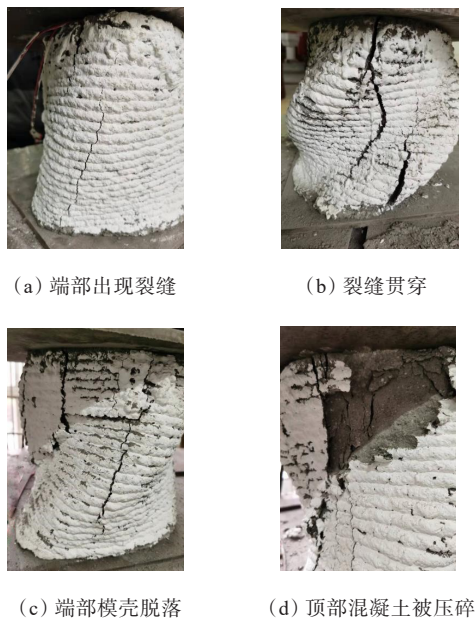


图10 扭曲柱节段受压破坏过程

Fig.10 Compression test of twisted-column segments

各扭曲柱节段极限荷载见表2。其中, N_u 为极限承载力; $\bar{N}_u$ 为平均极限承载力; N_R 为极限承载力极差。由受压试验结果可知,层扭转角为2°时扭曲柱的平均极限承载力最小,为1 120.20 kN,层扭转角为6°时扭曲柱的平均极限承载力最大,为1 291.56 kN。但不同层扭转角的扭曲柱极限承载力相对极差 $N_R/\bar{N}_u$ 均在5%以内,说明极限承载力的离散性较小,节段构件成型质量较好。

表2 扭曲柱节段受压承载力

Table 2 Compressive bearing capacity of twisted-column segments

试件编号	层扭转角/(°)	N_u /kN	$\bar{N}_u$ /kN	$N_R/\bar{N}_u/\%$
Z1	0	1 143.52	1 127.35	2.81
Z2		1 126.75		
Z3		1 111.78		
Z4	2	1 086.32	1 120.20	5.00
Z5		1 143.25		
Z6		1 131.03		
Z7	4	1 156.18	1 142.54	4.50
Z8		1 109.56		
Z9		1 161.88		
Z10	6	1 265.83	1 291.56	4.30
Z11		1 321.45		
Z12		1 287.40		

4 结论

1) 当挤料转轴旋转速率一定时,打印条带的平均宽度随着打印头行进速率的增大而减小,两者呈负相关关系;当打印头行进速率一定时,打印条带的平均宽度随着挤料转轴旋转速率的增大而增大,两者呈正相关关系。当采用前文所述的材料配合比和打印设备时,将打印头行进速率控制在50~60 mm/s、挤料转轴旋转速率控制在0.9~1.1 r/s较为合理。

2) 对于3D打印混凝土扭曲面模壳,由于上部荷载和扭转悬空部位的存在,其构件在成型过程中会发生层间不均匀沉降和侧向偏移,进而发生失稳,无法继续成型。可连续打印高度随着层扭转角的增大而减小。

3) 当层扭转角不超过6°时,该类型扭曲柱节段受压极限承载力的相对极差均可控制在5%以内,此时极限承载力的离散性较小,扭曲柱节段成型质量也能得到较好的控制。

[参考文献]

- [1] 薛扬. 预制管混凝土圆柱受压性能试验研究[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(3): 30~32. DOI:10.13905/j.cnki.dwjz.2015.03.013.
XUE Yang. Experimental study of the compression performance of cylindrical precast concrete pipe[J]. Low

- Temperature Architecture Technology, 2015, 37(3): 30–32. DOI:10.13905/j.cnki.dwjz.2015.03.013.
- [2] 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. DOI:10.19701/j.jzjg.2020.s1.229.
- LEI Guanjun, CHEN Xiaodong, GUO Penggang. Quality control of complex surface concrete formwork[J]. Building Structure, 2020, 50(S1): 1171–1174. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.s1.229.
- [3] 康梦慧,王津红,强晨阳,等.曲面混凝土模板制造的工业化探索[J].低温建筑技术,2021,43(12):49–53. DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2021.12.010.
- KANG Menghui, WANG Jinhong, QIANG Chenyang, et al. Exploration of industrialization of curved concrete formwork manufacturing[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2021, 43(12): 49–53. DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2021.12.010.
- [4] 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. DOI:10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
- [5] 李德智,陈铮一,钟健雄.多元参与视角下我国建筑3D打印研究应用综述[J].土木工程与管理学报,2019,36(6):1–7. DOI:10.13579/j.cnki.2095-0985.2019.06.001.
- LI Dezhi, CHEN Zhengyi, ZHONG Jianxiong. Review on the research and practice of construction 3D printing in China from the perspective of multiple participation[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(6): 1–7. DOI: 10.13579/j.cnki.2095-0985.2019.06.001.
- [6] 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/OL]. 土木工程学报. [2022-10-17]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgxb.21060548>.
- SUN Xiaoyan, SHEN Junyi, WANG Hailong, et al. Bending behavior of composite beam with 3D printed concrete permanent formwork[J]. China Civil Engineering Journal. [2022-10-17]. <https://doi.org/10.15951/j.tmgxb.21060548>.
- [7] 张洋.水泥基3D打印永久模板制备技术及组合构件力学性能研究[D].南京:东南大学,2019. DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2019.001412.
- ZHANG Yang. Study on preparation technology of cement-based 3D printing permanent template and mechanical properties of composite components[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2019.001412.
- [8] 葛杰,白洁,杨燕,等.3D打印结构柱偏压性能试验研究[J].建筑材料学报,2019,22(3):424–430. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2019.03.014.
- GE Jie, BAI Jie, YANG Yan, et al. Experimental study on eccentric compression capacity of 3D printing structural column[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 424–430. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2019.03.014.
- [9] 蔺喜强,霍亮,苏铠,等.混凝土3D打印两层办公室的施工关键技术[J].混凝土,2022(6):161–170,174. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2022.06.033.
- LIN Xiqiang, HUO Liang, SU Kai, et al. Construction process of two-storey building using concrete 3D printing technology[J]. Concrete, 2022(6): 161–170, 174. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2022.06.033.
- [10] ZHU B R, NEMATOLLAHI B, PAN J L, et al. 3D concrete printing of permanent formwork for concrete column construction[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 121: 104039. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104039.
- [11] 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. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2021.06.003.
- SUN Kaili, WU Xiangqiang, LIN Xiqiang, 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. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2021.06.003.
- [12] 张涛,蔺喜强,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. DOI:10.14062/j.issn.0454-5648.2019.11.14.
- 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. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2019.11.14.
- [13] ZHANG Y, ZHANG Y S, LIU G J, et al. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink[J]. Construction and Building Materials, 2018, 174: 263–271. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.115.
- [14] 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. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.051.
- [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. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0288.
- JIANG Youbao, HU Jiaxin, ZHOU Hao, 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2021.0288.
- [16] HOU S D, DUAN Z H, XIAO J Z, et al. A review of 3D printed concrete: performance requirements, testing measurements and mix design[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121745. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121745.
- [17] REHMAN A U, KIM J H. 3D concrete printing: a systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics[J].

- Materials (Basel), 2021, 14(14): 3800. DOI: 10.3390/ma14143800.
- [18] 杨超一. 复杂造型混凝土构件打印成型数字建模技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2019.001302.
- YANG Chaoyi. Research on 3D printing digital modeling technology for complex forming concrete components[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2019.001302.
- [19] LE T T, AUSTIN S A, LIM S, et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete[J]. Materials and Structures, 2012, 45(8): 1221–1232. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z.
- [20] MA G W, WANG L, JU Y. State-of-the-art of 3D printing technology of cementitious material: an emerging technique for construction[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(4): 475–495. DOI: 10.1007/s11431-016-9077-7.

Experimental study on segmental forming of 3D printing prefabricated concrete twisted formwork–cast-in-situ concrete column

HE Haoxuan¹, JIANG Youbao¹, DENG Yunfeng¹, PENG Linna², ZHANG Yitian², WEN Jun¹

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

2. Hunan Construction Investment Group Co., Ltd., Changsha 410029, China)

Abstract:[Purposes] The paper aims to solve the problems of complex formwork and difficult forming of twisted concrete columns. The construction method of twisted columns based on 3D printing concrete prefabricated formwork was explored, and the compression performance of twisted-column segments was studied. [Methods] The quality test of printing strip forming determined the printing parameters suitable for forming 3D printing prefabricated formwork. The 3D printing twisted surface formwork with interlayer twist angles of 0°, 2°, 4° and 6° was constructed and tested. The reinforced cage and cast-in-situ C50 concrete were filled in the formwork to prepare the twisted-column segments and the compression test of the member was carried out. [Findings] The continuous printing height of the twisted surface prefabricated formwork decreases with the increase of the single-layer twisted angle. The continuous printing height of the twisted surface formwork with an interlayer twist angle of 0° is 550 mm, 96% higher than the member built by an interlayer twist angle of 6°. The average ultimate bearing capacity of the column segment with the twist angle of 2° is the lowest, 1 120.20 kN; The average ultimate bearing capacity of the twisted column with interlayer twist angle of 6° is the largest, which is 1 291.56 kN. The relative range of ultimate bearing capacity of twisted-column composite members with different twisted angles is within 5%. [Conclusions] Due to the torsional part between the layers, the members of the twisted surface prefabricated formwork will have lateral offset, losing stability and collapse. The range of average ultimate bearing capacity of twisted-column members with different twist angles is small, i.e., the discreteness of ultimate bearing capacity is low, and the forming quality of twisted-column segments is better.

Key words: 3D printing concrete; printing parameter; twisted-column segment; permanent formwork

Manuscript received: 2022-09-16; **revised:** 2022-09-18; **accepted:** 2022-10-07

Foundation item: Project (2022JJ10050) supported by Excellent Youth Foundation of Hunan Province; Project (JGJTK2022-20) supported by key program of Hunan Construction Engineering Group; Project (2021JJ50048) supported by Natural Science Union Foundation of Hunan Province

Corresponding author: JIANG Youbao (1982—) (ORCID: 0000-0003-0276-818X), male, professor, research interest: 3D printing concrete structure and intelligent construction. E-mail: jiangybseu@163.com

(责任编辑: 石月珍; 校对: 赵冰; 英文编辑: 田湘)