

ICS 91.060
CCS Q 73

CBMF

中国建筑材料协会标准

T/CBMF ××-20××

3D 打印混凝土建筑构件应用技术规范

Technical specification for 3D printed concrete building components

(征求意见稿)

20××-××-××发布

20××-××-××实施

中国建筑材料联合会发布

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件中的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国建筑材料联合会提出并归口。

本文件负责起草单位：同济大学、东南大学、河北工业大学、中国建筑材料科学研究总院有限公司、中国建筑第八工程局有限公司、辽宁格林普建筑打印科技有限公司等。

本文件主要起草人：肖建庄、张亚梅、马国伟、王玲、都书鹏、段珍华、丁陶、余江滔、吴宇清、秦飞、王振地、和汲广超。

本文件为首次发布。

3D 打印混凝土建筑构件应用技术规范

1 范围

本文件规定了3D打印混凝土建筑构件的分类、原材料要求、技术要求、试验方法、检验规则、标识、贮存和运输。

本文件适用于建设工程中使用的3D打印混凝土构件。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 175 通用硅酸盐水泥
- GB/T 1499.2 钢筋混凝土用钢 第2部分：热轧带肋钢筋
- GB/T 2419 水泥胶砂流动度测定方法
- GB 8076 混凝土外加剂
- GB/T 14684 建设用砂
- GB/T 14685 建设用卵石、碎石
- GB/T 20472 硫铝酸盐水泥
- GB/T 21120 水泥混凝土和砂浆用合成纤维
- GB/T 25176 混凝土和砂浆用再生细骨料
- GB 50003 砌体结构设计规范
- GB 50009 建筑结构荷载规范
- GB 50010 混凝土结构设计规范
- GB 50068 建筑结构可靠度设计统一标准
- GB/T 50080 普通混凝土拌合物性能试验方法
- GB/T 50081 混凝土物理力学性能试验方法标准
- GB/T 50082 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准
- GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范
- GB 50204 混凝土结构施工质量验收规范
- GB/T 50476 混凝土结构耐久性设计标准
- GB/T 51003 矿物掺合料应用技术规范
- JC/T 449 镁质胶凝材料用原料
- JGJ 55 普通混凝土配合比设计规程
- JGJ 63 混凝土用水标准
- JGJ 98 砌筑砂浆配合比设计规程
- JGJ/T 221 纤维混凝土应用技术规程
- T/CBMF 183 3D 打印混凝土基本力学性能试验方法
- T/CBMF 184 3D 打印混凝土拌合物性能试验方法

3 术语和定义

GB/T 14685—2022界定的及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

3D 打印技术 3D/three-dimensional printing technology

应用数字建模和机电一体化技术，实现三维结构的增材建造的技术。

3.2

3D 打印混凝土 3D printed concrete

通过3D打印技术，采用挤出方式成型，水泥水化形成强度，经养护硬化后的混凝土材料。

3.3

3D 打印混凝土建筑构件 3D printed concrete building component

由3D打印混凝土技术制造的构成建筑物各个要素。

3.4

打印头 print nozzle/head

3D打印设备中用于挤出混凝土混合物的末端装置。

3.5

打印条带 printed filament

从打印头出料口挤出的均匀、连续的混凝土单个长条。

3.6

可打印性 printability

混凝土拌合物能够被连续、均匀挤出，保持挤出形状稳定，在逐层堆叠过程中保持结构稳定，且上下层粘接良好的性能。

3.7

流动性 flowability

混凝土拌合物在机械作用下可在打印系统内被输送的性能。

3.8

可挤出性 extrudability

混凝土拌合物能够通过打印头均匀、连续挤出的性能。

3.9

可建造性 buildability

打印条带在逐层堆叠的过程中，在竖直方向上不发生或仅发生允许的压缩变形、在水平方向上不发生或仅发生允许的扩展变形，堆叠形成的3D打印混凝土不发生屈曲、倒塌，整体尺寸不随时间推移发生改变的性能。

3.10

打印路径 print path

打印头根据预先优化设计的程序执行指令行进移动时的行进路径。

3.11

3D 打印永久模板 3D printed permanent formwork

采用3D打印技术成型且在内部浇筑混凝土后不拆除的外部轮廓。

3.12

3D 打印模板配筋混凝土构件 reinforced 3D printed concrete members with permanent formwork

采用3D打印永久模板进行配筋并浇筑混凝土形成的构件。

4 分类

4.1 混凝土

4.1.1 混凝土按照用途分为3D打印混凝土和永久模板浇筑混凝土。

4.2 建筑构件

4.2.1 3D打印混凝土建筑构件按照制备类型分为工厂预制混凝土构件和现场打印混凝土构件。

4.2.2 3D打印混凝土建筑构件按照制备方式分为无筋3D打印混凝土构件和配筋3D打印混凝土构件。

5 基本要求

5.1 无筋3D打印混凝土构件生产应建立完善的质量管理体系和制定相应的质量控制制度；有持证要求的岗位应持证上岗。

5.2 无筋3D打印混凝土构件生产前应做好技术准备、场地准备、打印设备准备、人员准备。

5.3 配筋3D打印混凝土构件现场施工应符合有关绿色生产的规定，生产过程中产生的噪声、废水、粉尘或废气等污染物排放和固体废弃物处置应符合相关标准规定。

6 原材料要求

6.1 水泥应符合 GB 175 和 GB 20472 的规定。镁质胶凝材料类别的选用应符合 JC/T 449 的规定。

6.2 矿物掺合料应符合 GB/T 51003 的规定。

6.3 粗骨料应符合 GB/T 14685 的规定。用于3D打印混凝土的粗骨料宜选择质地坚硬、级配良好的碎石或卵石，最大粒径不宜大于16mm，应与打印机的泵送系统和挤出系统尺寸相匹配。

6.4 细骨料应符合 GB/T 14684 和 GB/T 25176 的规定。用于3D打印混凝土的细骨料宜选用质地坚硬、级配良好的河砂、机制砂或固废再生原料。

6.5 外加剂应符合 GB 8076 和 GB 50119 的规定。

6.6 纤维应符合 GB/T 21120 和 JGJ/T 221 规定。

6.7 拌和用水应符合 JGJ 63 的规定。

6.8 3D打印混凝土力学性能应符合 T/CBMF 183 的规定。

6.9 3D打印混凝土流动性、可挤出性及可建造性应符合 T/CBMF 184 的规定。

6.9 永久模板浇筑混凝土应符合 GB/T 50080、GB/T 50081 和 GB/T 50082 的规定。

7 构件性能要求

6.1 无筋3D打印混凝土构件

6.1.1 无筋3D打印混凝土构件的轴心抗压和抗拉强度标准值应符合表1要求。

表1 3D打印混凝土轴心抗压和抗拉强度标准值

单位为牛每平方米

强度	混凝土强度等级						
	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
f_{ck}	≥ 13.4	≥ 16.7	≥ 20.1	≥ 23.4	≥ 26.8	≥ 29.6	≥ 32.4
$f_{ck,x}$	≥ 10.7	≥ 13.4	≥ 16.1	≥ 18.7	≥ 21.4	≥ 23.7	≥ 25.9
$f_{ck,y}$	≥ 9.4	≥ 11.7	≥ 14.1	≥ 16.4	≥ 18.8	≥ 20.7	≥ 22.7
$f_{ck,z}$	≥ 10.1	≥ 12.5	≥ 15.1	≥ 17.6	≥ 20.1	≥ 22.2	≥ 24.3
f_{tk}	≥ 1.54	≥ 1.78	≥ 2.01	≥ 2.2	≥ 2.39	≥ 2.51	≥ 2.64
$f_{tk,x}$	≥ 1.23	≥ 1.42	≥ 1.61	≥ 1.76	≥ 1.91	≥ 2.01	≥ 2.11
$f_{tk,y}$	≥ 1.08	≥ 1.25	≥ 1.41	≥ 1.54	≥ 1.67	≥ 1.76	≥ 1.85
$f_{tk,z}$	≥ 1.16	≥ 1.34	≥ 1.51	≥ 1.65	≥ 1.79	≥ 1.88	≥ 1.98

注：立方体抗压强度标准值系指按标准方法制作、养护的边长为150mm的立方体试件，在28d或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有95%保证率的抗压强度值。混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定。

表中 f_{ck} 和 f_{tk} 分别为现浇混凝土轴心抗压和抗拉强度标准值； $f_{ck,x}$ 、 $f_{ck,y}$ 和 $f_{ck,z}$ 分别为X、Y和Z方向的3D打印混凝土轴心抗压强度标准值； $f_{tk,x}$ 、 $f_{tk,y}$ 和 $f_{tk,z}$ 分别为X、Y和Z方向的3D打印混凝土轴心抗拉强度标准值。3D打印混凝土的加载方向和抗压强度试验方法可参考T/CBMF 183—2022。

6.1.2 无筋3D打印混凝土构件的轴心抗压和抗拉强度设计值应符合表2要求。

表2 3D打印混凝土轴心抗压和抗拉强度设计值

单位为牛每平方米

强度	混凝土强度等级						
	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
f_c	≥ 9.6	≥ 11.9	≥ 14.3	≥ 16.7	≥ 19.1	≥ 21.1	≥ 23.1
f_{cx}	≥ 7.7	≥ 9.5	≥ 11.4	≥ 13.4	≥ 15.3	≥ 16.9	≥ 18.5
f_{cy}	≥ 6.7	≥ 8.3	≥ 10.0	≥ 11.7	≥ 13.4	≥ 14.8	≥ 16.2

f_{cz}	≥ 7.2	≥ 8.9	≥ 10.7	≥ 12.5	≥ 14.3	≥ 15.8	≥ 17.3
f_t	≥ 1.10	≥ 1.27	≥ 1.43	≥ 1.57	≥ 1.71	≥ 1.80	≥ 1.89
f_{tx}	≥ 0.88	≥ 1.02	≥ 1.14	≥ 1.26	≥ 1.37	≥ 1.44	≥ 1.51
f_{ty}	≥ 0.77	≥ 0.89	≥ 1.00	≥ 1.10	≥ 1.20	≥ 1.26	≥ 1.32
f_{tz}	≥ 0.83	≥ 0.95	≥ 1.07	≥ 1.18	≥ 1.28	≥ 1.35	≥ 1.42
注：表中 f_c 和 f_t 分别为现浇混凝土轴心抗压和抗拉强度设计值； f_{cx} 、 f_{cy} 和 f_{cz} 分别为 X、Y 和 Z 方向的 3D 打印混凝土轴心抗压强度设计值； f_{tx} 、 f_{ty} 和 f_{tz} 分别为 X、Y 和 Z 方向的 3D 打印混凝土轴心抗拉强度设计值							

6.1.3 无筋 3D 打印混凝土建筑构件的受弯性能计算应符合 A.2.3 的相关规定。

6.1.4 无筋 3D 打印混凝土建筑构件的受剪性能计算应符合 A.2.4 的相关规定。

6.1.5 无筋 3D 打印混凝土建筑构件的耐久性能计算应符合 GB/T 50082 及 GB/T 50476 的相关规定。

6.2 3D打印模板配筋混凝土构件

6.2.1 3D 打印模板配筋混凝土构件的承载力计算应符合 A.1.1-A.1.5 中的相关规定。

6.2.2 3D 打印模板配筋混凝土构件的耐久性能应符合 GB/T 50476 的相关规定。

6.2.3 3D 打印模板配筋混凝土构件的配筋要求应符合 GB1499.2 的相关规定。

7 材料及建筑构件设计要求

7.1 混凝土配合比设计要求

7.1.1 3D打印混凝土配合比宜参考 JGJ 55 和 JGJ 98 进行强度设计，强度等级范围宜为 C20~C50。

7.1.2 3D打印混凝土应根据构件形式、施工工艺以及环境因素进行配合比设计，并在综合考虑 3D 打印混凝土的可打印性、力学性能、耐久性能及其他性能的基础上参考 T/CBMF 183 进行配合比优化设计。

7.1.3 3D打印混凝土外加剂的品种和掺量宜参考 T/CBMF 183 进行性能试验调控，外加剂与胶凝材料的适应性应满足可打印要求。

7.1.4 3D打印混凝土的水胶比应根据混凝土设计强度按表 3 选取。

表 3 不同强度等级 3D 打印混凝土的水胶比

强度等级	C20	C30	C40	C50
水胶比	0.40~0.46	0.36~0.42	0.34~0.40	0.30~0.36

7.1.5 3D打印混凝土的胶凝材料和骨料用量的体积比宜按表 4 选取。

表 4 不同强度等级胶凝材料与骨料用量体积比

强度等级	C20	C30	C40	C50
胶凝材料/骨料	0.52~0.65	0.57~0.70	0.65~0.74	0.70~0.81

7.1.6 3D打印混凝土可使用矿物掺合料替代部分水泥，矿物掺合料掺量宜按表5选取。

表 5 不同强度等级 3D 打印混凝土的矿物掺合料用量

单位为百分比

强度等级	C20~C30	C30~C40	C40~C50
掺合料用量	≤70	≤50	≤30

7.1.7 3D打印永久模板内浇筑混凝土配合比设计应符合JGJ 55及GB 50204的相关规定。

7.2 建筑构件设计要求

7.2.1 3D打印混凝土构件应按承载能力极限状态设计，并满足正常使用极限状态的要求。

7.2.2 3D打印混凝土构件设计使用年限应满足GB 50068的有关规定。3D打印混凝土建筑构件在设计使用年限内及正常维护条件下，须满足使用要求，且不需大修或加固。

7.2.3 3D打印混凝土构件按承载能力极限状态设计时，荷载宜按GB 50009的有关规定确定。

7.2.4 设计应明确结构的用途，在设计使用年限内未经技术鉴定或设计许可，不得改变结构的用途和使用环境。

7.2.5 3D打印混凝土构件应按承载能力极限状态设计，并满足正常使用极限状态的要求。

8 试验方法

8.1 3D打印混凝土性能试验方法

8.1.1 3D打印混凝土的流动性能试验方法应按下列要求进行：

- 对于3D打印混凝土拌合物所含骨料粒径 $<5\text{ mm}$ 时，流动性按 GB/T 2419规定的水泥胶砂流动度测定方法进行测试。
- 对于3D打印混凝土拌合物所含骨料粒径为 $5\text{ mm}\sim 16\text{ mm}$ 时，流动性按 GB/T 50080规定的坍落度与坍落扩展度法进行测试。

8.1.2 3D打印混凝土可挤出性应按A.3试验。

8.1.3 3D打印混凝土可打印时间应按A.4试验。

8.1.4 3D打印混凝土可建造性应按A.5试验。

8.2 3D打印混凝土性能试验方法

8.2.1 3D打印混凝土抗压强度试验方法按GB/T 50081-2019中第5章的规定进行，可根据实际情况按不同加载方向进行试验。

8.2.2 3D打印混凝土基体劈裂抗拉强度试验按GB/T 50081-2019中第9章的规定进行，试件加载位置应为相对两端面的中间部位，且应避开界面处。可根据实际情况选择不同加载方向进行试验。

8.2.3 3D打印混凝土轴心抗压和抗拉强度标准值应符合A.2.2的相关规定。

9 质量检验与验收

9.1 一般规定

- 9.1.1 3D 打印混凝土建筑构件所用的混凝土原材料进场时，应按规定批次验收型式检验报告、出厂检验报告或合格证等质量证明文件，外加剂产品还应具有使用说明书。
- 9.1.2 3D 打印混凝土建筑构件所用的混凝土原材料进场后，应进行进场检验。对混凝土原材料的随机抽检应符合现行国家标准 GB 50164 的规定。
- 9.1.3 在生产和施工过程中，应对 3D 打印混凝土拌合物进行抽样检验，坍落度、黏聚性、保水性、流动性、可挤出性、可建造性应现场取样检验，抽样频率及检验方法应参照国家标准 GB/T 50081 的规定。
- 9.1.4 应对 3D 打印混凝土构件进行全数目外观质量检查，并对构件进行尺寸偏差检验，经初验合格后方可进行后续施工步骤。
- 9.1.5 对 3D 打印混凝土的力学性能、长期性能和耐久性能检验时，应对设计规定的项目进行检验。
- 9.1.6 3D 打印混凝土的耐久性能应符合设计要求。当有不合格的项目，应组织专家进行专项评审并提出处理意见，作为验收文件的一部分备案。
- 9.1.7 硬化混凝土性能检验应符合下列规定：强度检验评定应符合现行国家标准 GB/T50107 的规定；耐久性能检验评定应符合现行行业标准 JGJ/T 193 的规定。
- 9.1.8 3D 打印混凝土结构应按混凝土结构子分部工程进行验收；当结构中部分采用现浇混凝土结构时，3D 打印混凝土结构部分可作为混凝土结构子分部工程的分项工程进行验收。3D 打印混凝土结构质量检验与验收，除应符合本规程要求外，还应符合现行国家标准 GB 50300、GB50204、GB50207、GB50209 的规定。
- 9.1.9 3D 打印混凝土结构子分部工程可划分为 3D 打印混凝土模板、钢筋、浇筑混凝土等分项工程。各分项工程可根据与生产和施工方式相一致且便于控制施工质量的原则，按进场批次、工作班、楼层、结构缝或施工段划分为若干检验批。
- 9.1.10 3D 打印混凝土建筑构件的钢筋保护层应符合设计要求，并不应暴露钢筋。钢筋的锚固、搭接、放置间距应符合设计规定，并应作好钢筋隐蔽工程验收记录。
- 9.1.11 3D 打印混凝土建筑构件验收时，应对工程观感质量做出总体评价。
- 9.1.12 有裂缝的 3D 打印混凝土建筑构件应按下列情况进行验收：
- 对不影响结构安全的裂缝，应予以验收，对明显影响使用功能和观感的裂缝，应进行处理；
 - 对有可能影响结构安全性的裂缝，应由有资质的检测单位检测鉴定，需返修或加固处理的，待返修或加固处理满足使用要求后进行二次验收。。
- 9.1.13 3D 打印混凝土结构应对下列隐蔽工程进行验收：
- 3D 打印混凝土建筑构件中钢筋的牌号、规格、数量、位置、间距等；
 - 竖向受力钢筋的连接方式、接头位置、接头数量、接头面积百分率、搭接长度等；
 - 竖向受力钢筋的锚固方式及长度；
 - 箍筋、横向钢筋的牌号、规格、数量、位置、间距，箍筋弯钩的弯折角度及平直段长度；
 - 预埋件的规格、数量、位置；
 - 打印构件内表面凹凸纹路的质量，纹路的规格、数量、位置；
 - 预留管线、线盒等的规格、数量、位置及固定措施；
 - 其他隐蔽项目。
- 9.1.14 3D 打印混凝土工程验收前应提供下列文件和记录：
- 原材料、打印构件的出厂合格证、产品性能检测报告及进场复验报告；
 - 钢筋接头的试验报告；
 - 混凝土及砂浆配合比通知单；
 - 混凝土及砂浆试块强度试验报告；
 - 3D 打印工程及混凝土工程施工记录；
 - 隐蔽工程验收记录；

- g) 分项工程检验批验收记录;
- h) 施工质量检查记录;
- i) 工程设计文件、3D 打印混凝土建筑构件制作和深化设计图纸、设计变更文件及施工方案;
- j) 重大技术问题的处理方案和验收记录;
- k) 其他必须检查的项目及有关文件和记录。

9.1.15 3D 打印混凝土的质量验收应确认构件成品的结构性能、外观质量和尺寸偏差等满足设计要求。

9.2 支撑与打印永久模板

9.2.1 3D 打印混凝土建筑构件安装临时固定支撑应稳固可靠,应符合设计、专项施工方案要求及相关技术规定。检验方法符合:

- 检查数量:全数检查。
- 检验方法:观察检查,检查施工记录或设计文件。

9.2.2 3D 打印混凝土建筑构件中后浇混凝土构件模板安装的偏差应符合表 7 的规定。检验方法符合:

- 检查数量:在同一检验批内,对打印梁和柱,应抽查构件数量的 10%,且不少于 3 件;对墙和板,应按有代表性的自然间抽查 10%,且不少于 3 间。

表 7 打印永久模板安装允许偏差及检验方法

项目		允许偏差 (mm)	检验方法
轴线位置		5	量尺检查
底模上表面标高		±5	水准仪或拉线、量尺检查
截面内部尺寸	柱、梁	+4、-5	量尺检查
	墙	+4、-3	量尺检查
层高垂直度	不大于 5m	6	经纬仪或拉线、量尺检查
	大于 5m	8	经纬仪或拉线、量尺检查
相连板表面高低差		2	量尺检查
表面平整度		10	塞尺检查

9.3 永久模板浇筑混凝土

9.3.1 3D 打印混凝土建筑构件安装连接节点和连接接缝部位的后浇筑混凝土强度应符合设计要求。检验方法符合:

- 检查数量:每工作班内相同配合比的混凝土取样不得少于 1 次,每次取样应至少留置 1 组标准养护试块,同条件养护试块的留置组数宜根据实际需要确定。
- 检验方法:检查施工记录及试件强度试验报告。

9.3.2 3D 打印混凝土建筑构件后浇混凝土的外观质量不应有严重缺陷。检验方法符合:

- 对已经出现的严重缺陷,应由施工单位提出技术处理方案,并经监理(建设)单位认可后处理。对经处理的部位,应重新检查验收。
- 检查数量:全数检查。
- 检验方法:观察检查,检查技术处理方案。

9.4 3D 打印混凝土构件现场安装

9.4.1 对工厂制备的 3D 打印混凝土建筑构件,进场时应检查其质量证明文件及表面标识。打印构件的质量、标识应符合设计要求及现行国家相关标准规定。检验方法符合:

- 检查数量:全数检查。

- 检验方法：观察检查、检查出厂合格证及相关质量证明文件。
- 9.4.2 3D 打印混凝土建筑构件安装就位后，连接钢筋、套筒或浆锚的主要传力部位不应出现影响结构性能和构件安装施工的尺寸偏差。
对已出现的影响结构性能的尺寸偏差，应由施工单位提出技术处理方案，并经监理(建设)单位认可后处理。对经过处理的部位，应重新检查验收。检验方法符合：
——检查数量：全数检查。
——检验方法：观察，检查技术处理方案。
- 9.4.3 3D 打印混凝土建筑构件安装完成后，外观质量不应有影响结构性能的缺陷。
对已出现的影响结构性能的缺陷，应由施工单位提出技术处理方案,并经监理(建设)单位认可后处理。对经处理的部位，应重新检查验收。检验方法符合：
——检查数量：全数检查。
——检验方法：观察，检查技术处理方案。
- 9.4.4 3D 打印混凝土建筑构件之间的钢筋接头应符合设计要求。施工前应对接头施工进行工艺检验。
- 9.4.5 后浇连接部分的钢筋品种、级别、规格、数量和间距应符合设计要求。检验方法符合：
——检查数量：全数检查。
——检验方法：观察，钢尺检查。
- 9.4.6 3D 打印混凝土建筑构件外墙板与构件、配件的连接应牢固可靠。检验方法符合：
——检查数量：全数检查。
——检验方法：观察。
- 9.4.7 连接节点的防腐、防锈、防火和防水构造措施应满足设计要求。检验方法符合：
——检查数量：全数检查。
——检验方法：观测，检查检测报告。
- 9.4.8 承受内力的接头和拼缝，当其混凝土强度未达到设计要求时，不得吊装上一层结构构件；当设计无具体要求时，应在混凝土强度不小于 10MPa 或有足够支撑时，方可吊装上一层结构构件。
已安装完毕的 3D 打印混凝土建筑结构，应在混凝土强度达到设计要求后，方可承受全部设计荷载。检验方法符合：
——检查数量：全数检查。
——检验方法：观察，检查混凝土同条件试件强度报告。
- 9.4.9 3D 打印混凝土建筑构件连接接缝处防水材料应符合设计要求，并具有合格证、厂家检测报告及进场复试报告。
- 9.4.10 3D 打印混凝土建筑构件的尺寸偏差应符合表 8 的规定。对于施工过程临时使用的预埋件中心线位置及后浇混凝土部位的预制构件尺寸偏差可按表中的规定放大一倍执行。检验方法符合：
——检查数量：按同一生产企业、同一品种的构件，不超过 100 个为一批，每批抽查构件数量的 5%，且不少于 3 件。

表 8 3D 打印混凝土建筑构件尺寸的允许偏差及检验方法

项目		允许偏差 (mm)	检验方法
长度	梁、板、柱	<12m	丈量检查
		≥12m 且<18m	
		≥18m	

	墙	±4	
宽度、高度	梁、板、柱截面尺寸	±5	尺量一端及中部 偏差绝对值较大 处
	墙高度、厚度	±3	
侧向弯曲	梁、板、柱	$l/750$ 且 ≤ 20	尺量最大侧向弯 曲处
	墙	$l/1000$ 且 ≤ 20	
翘曲	板	$l/750$	调平尺两端 测量
	墙	$l/1000$	
对角线差	板	10	尺量两个 对角线
	墙打印窗口	5	
预留孔	中心线	5	尺量检查
	孔尺寸	±5	
预留孔	中心线	10	尺量检查
	孔尺寸	±10	
打印门窗口	中心线	5	尺量检查
	宽度、高度	±3	
注：1. l 为构件最长边的边长。			
2. 检查中心线、孔洞位置偏差时，应沿纵横两个方向测，并取其中较大值。			

9.5 验收

9.5.1 3D 打印混凝土建筑构件工程验收时应提交以下资料：

- 工程设计单位确认的 3D 打印建筑构件深化设计图，设计变更文件；
- 3D 打印混凝土建筑构件工程所用各种材料、连接件及构件的产品合格证书、性能测试报告、进场验收记录和复试报告；
- 打印构件安装施工验收记录；
- 连接构造节点的隐蔽工程检查验收文件；
- 后浇筑节点的混凝土或浆体强度检测报告；
- 分项工程验收记录；
- 3D 打印混凝土建筑构件实体验收记录；
- 工程的重大质量问题的处理方案和验收记录；
- 打印墙体的装饰、保温、接缝及防水检测报告；
- 其他质量保证资料。

9.5.2 3D 打印混凝土建筑构件应在安装施工过程中，完成下列隐蔽项目的现场验收：

- 钢筋的品种、规格、数量、位置和间距；
- 预埋件的规格、数量和位置；
- 钢筋连接方式、接头位置、接头数量；
- 3D 打印混凝土构件与现浇结构连接处混凝土接茬面的尺寸；
- 3D 打印混凝土构件接缝处的防水、防火等构造做法。

9.5.3 3D 打印混凝土构件中涉及装饰、保温、防水、防火等性能要求，应按设计要求或有关标准规定验收。

9.5.4 工程质量控制资料应齐全完整。当部分资料缺失时，应委托有资质的检测机构按有关标准进行相应的实体验收或抽样试验。

9.5.5 经返修或加固处理仍不能满足安全或重要使用要求的打印构件，严禁验收。

9.5.6 3D打印混凝土构件施工质量验收合格后，应将所有的验收文件存档。

附录 A

(规范性)

3D打印混凝土建筑构件承载力计算方法

A.1 无筋3D打印混凝土构件承载力计算

A.1.1 受压构件

A.1.1.1 受压构件的承载力，按式 (A.1) 计算。

$$N \leq \varphi_1 f A \quad (\text{A.1})$$

式中：

 N ——轴向力设计值； φ_1 ——高厚比 β 和轴向力的偏心距 e 对受压构件承载力的影响系数； f ——3D打印混凝土的轴心抗压强度设计值，应根据实际受力情况，按照表2进行选取； A ——截面面积。

注：a) 对于3D打印混凝土的轴心抗压强度设计值，当构件受到Z方向的荷载时，可按照GB/T 50081中的有关规定，选择表6的3D打印混凝土Z方向的轴心抗压强度设计值，其他方向以此类推。

b) 对矩形截面构件，依据图A.1，当轴向力偏心方向的截面边长大于另一方向的边长时，除按偏心受压计算外，还应对较小边长方向，按轴心受压进行验算；

c) 受压构件承载力的影响系数，可按下式计算：

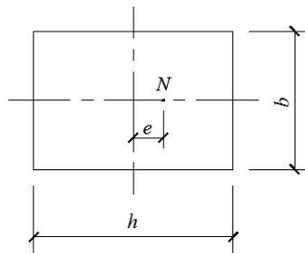


图 A.1 单向偏心受压

当 $\beta \leq 3$ 时：

$$\varphi_1 = \frac{1}{1 + 12(e/h)^2} \quad (\text{A.2})$$

当 $\beta > 3$ 时：

$$\varphi_1 = \frac{1}{1 + 12 \left[\frac{e}{h} + \sqrt{\frac{1}{12} \left(\frac{1}{\varphi_2} - 1 \right)^2} \right]^2} \quad (\text{A.3})$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{1 + \alpha \beta^2} \quad (\text{A.4})$$

式中：

e ——轴向力的偏心距；

h ——矩形截面的轴向力偏心方向的边长；

φ_2 ——无筋 3D 打印混凝土构件轴心受压构件的稳定系数；

α ——与 3D 打印混凝土强度等级有关的系数，当混凝土强度大于或等于 10 MPa 时， α 取值 0.0015；
当混凝土强度大于 20 MPa 时， α 取值 0.002；

β ——构件的高厚比。

- A. 1. 1. 2 确定影响系数 φ 时，矩形截面构件高厚比 β 应按式 (A. 5) 计算，T形截面应按式 (A. 6) 计算：

$$\beta = \gamma_{\beta} H_0 / h \quad (\text{A.5})$$

式中：

γ_{β} ——3D 打印混凝土构件的高厚比修正系数，取 0.9；

H_0 ——受压构件的计算高度；

h ——矩形截面轴向力偏心方向的边长，当轴心受压时为截面较小边长；

$$\beta = \gamma_{\beta} H_0 / h_T \quad (\text{A.6})$$

式中：

h_T ——T 形截面的折算厚度，可近似按 $3.5i$ 计算， i 为截面回转半径。

- A. 1. 1. 3 受压构件的计算高度 H_0 ，应根据房屋类别和构件支承条件进行计算，可参考GB 50003的有关规定。

- A. 1. 1. 4 按内力设计值计算的轴向力的偏心距 e 不应超过 $0.6y_e$ 。 y_e 为截面重心到轴向力所在偏心方向截面边缘的距离。

A. 1. 2 局部受压

- A. 1. 2. 1 3D 打印混凝土截面中受局部均匀压力时的承载力，应按式 (A.7) 计算：

$$N_l \leq \gamma f A_l \quad (\text{A.7})$$

式中：

N_l ——局部受压面积上的轴向力设计值；

γ ——局部抗压强度提高系数；

f ——3D 打印混凝土的轴心抗压强度设计值，应根据实际受力情况，按照表 5 进行选取；局部受压面积小于 0.3m^2 ，可不考虑强度调整系数 γ_a 的影响；

A_l ——局部受压面积。

- A. 1. 2. 2 局部抗压强度提高系数 γ ，可参考GB 50003的有关规定进行计算。

A. 1. 3 受拉构件

- A. 1. 3. 1 轴心受拉构件的承载力，应满足下式的要求：

$$N_t = f_t A \quad (\text{A.8})$$

式中：

N_t ——轴心拉力设计值；

f_t ——3D 打印混凝土的轴心抗拉强度设计值。

A. 1. 4 受弯构件

A. 1. 4. 1 受弯构件的承载力，应满足下式的要求：

$$M \leq f_m W \quad (\text{A.9})$$

式中：

M ——弯矩设计值；
 f_m ——3D 打印混凝土弯曲抗拉强度设计值；
 W ——截面抵抗矩。

A. 1. 4. 2 受弯构件的受剪承载力，应按下列公式计算：

$$V \leq f_v b z \quad (\text{A.10})$$

$$z = I / S \quad (\text{A.11})$$

式中：

V ——剪力设计值；
 f_v ——3D 打印混凝土的抗剪强度设计值；
 b ——截面宽度；
 z ——内力臂，当截面为矩形时取 z 等于 $2h/3$ (h 为截面高度)；
 I ——截面惯性矩；
 S ——截面面积矩。

A. 1. 5 受剪构件

A. 1. 5. 1 沿打印界面破坏时受剪构件的承载力，应按下列公式计算：

$$V \leq (f_v + \mu \sigma_0) A \quad (\text{A.12})$$

式中：

V ——剪力设计值；
 A ——水平截面面积；
 f_v ——3D 打印混凝土抗剪强度设计值；
 μ ——剪压复合受力影响系数；
 f ——3D 打印混凝土的抗压强度设计值；
 σ_0 ——永久荷载设计值产生的水平截面平均压应力，其值不应大于 $0.8f$ 。

A. 2 3D打印模板配筋混凝土构件承载力计算

A. 2. 1 一般规定

A. 2. 1. 1 3D打印模板配筋混凝土构件的内力与位移，可按弹性方法计算。各构件应根据结构分析所得的内力，分别接受压、受弯或受剪进行正截面承载力和斜截面承载力计算。

A. 2. 1. 2 正截面承载力计算应按下列基本假定进行计算：

- a) 截面应变分布保持平面；
- b) 竖向钢筋与其毗邻的打印混凝土、浇筑混凝土的应变相同；
- c) 不考虑打印混凝土、浇筑混凝土的抗拉强度；
- d) 若 3D 打印混凝土模板表面进行了打毛、涂刷界面胶、种植剪切销钉或增设剪力键等措施，则认为 3D 打印混凝土模板与内部浇筑混凝土之间黏结可靠，界面黏结系数 c_p 等于 1；否则，

c_p 应根据打印工艺和打印质量等因素进行取值，其值在 0.6~0.9 之间；

e) 根据材料选择钢筋的极限拉应变，且不应大于0.01；

A. 2. 1. 3 3D打印模板配筋混凝土构件的承载力计算，应根据模板所用的材料以及模板尺寸等条件综合判断。若模板所用材料强度高于C20、模板厚度大于30mm时，应考虑3D打印模板的承载力贡献；否则，可不考虑3D打印模板的承载力贡献。

A. 2. 2 正截面受压承载力计算

A. 2. 2. 1 3D打印模板配筋混凝土构件正截面受压时，纵向受拉钢筋屈服与受压区混凝土破坏同时发生时的相对界限受压区高度，应按下式计算：

$$\xi_b = \frac{\beta_c}{1 + \frac{f_y}{E_s \varepsilon_{cu}}} \quad (\text{A.13})$$

式中：

ξ_b ——相对界限受压区高度 ξ_b 为界限受压区高度与截面有效高度的比值；

f_y ——钢筋的抗拉强度设计值；

E_s ——钢筋的弹性模量；

β_c ——混凝土强度影响系数，当混凝土等级不超过 C50 时， β_c 取 1.0；

ε_{cu} ——混凝土极限压应变。

A. 2. 2. 2 轴心受压 3D 打印模板配筋混凝土构件，其正截面受压承载力应按下列公式计算：

$$N \leq 0.9\varphi(f_{cc}A_c + f'_y A'_s + c_p f_{cp} A_p) \quad (\text{A.14})$$

式中：

N ——轴向力设计值；

f_{cc} 、 f_{cp} ——浇筑混凝土和打印混凝土的抗压强度设计值；

f'_y ——钢筋的抗压强度设计值；

A_c ——浇筑混凝土的截面面积；

A_p ——打印混凝土的截面面积；

A'_s ——竖向钢筋的截面面积；

φ ——轴心受压构件的稳定系数，可参考 GB 50010 的表 6.2.15 选取。

A. 2. 2. 3 矩形截面偏心受压 3D 打印模板配筋混凝土构件偏心受压构件，应满足图 A.2 及 A.3 的要求：

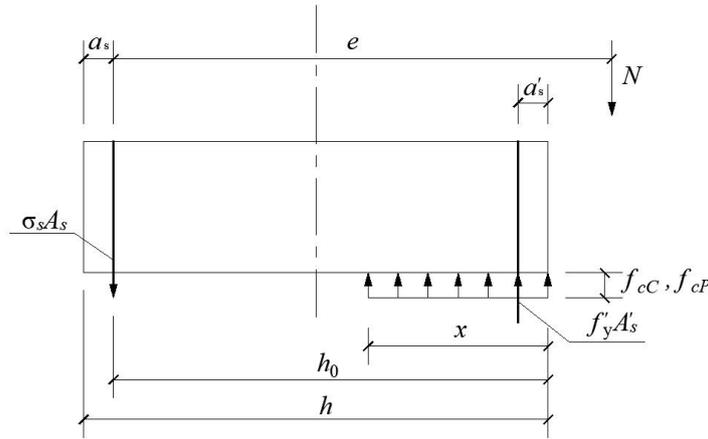


图 A.2 矩形截面偏心受压 3D 打印模板配筋混凝土构件正截面受压承载力计算示意图

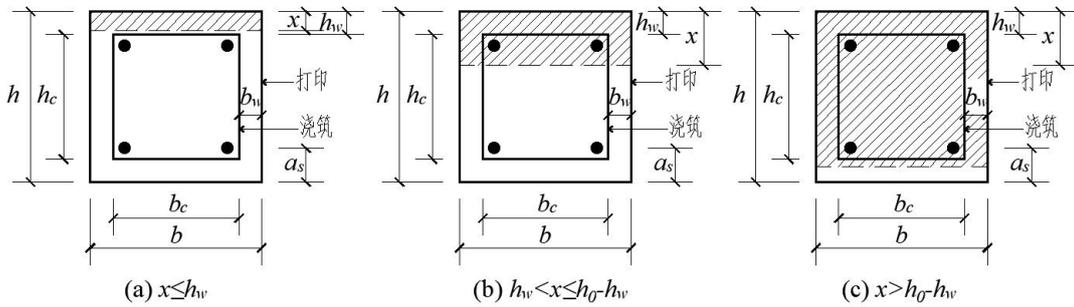


图 A.3 矩形截面偏心受压 3D 打印模板配筋混凝土构件正截面受压区高度位置示意图

- a) 当截面受压区高度 x 小于等于 $\xi_b h_0$ 时,按大偏心受压计算;当截面受压区高度 x 大于 $\xi_b h_0$ 时,按小偏心受压计算。
- b) 矩形截面偏心受压 3D 打印模板配筋混凝土构件正截面受压承载力应按下列公式计算

$$e = e_0 + e_a + (h/2 - a_s) \quad (\text{A.15})$$

- (1) 当受压区高度 x 不大于 h_w 时,应符合下列规定:

$$N \leq c_p f_{cP} b x + f'_y A'_s - \sigma_s A_s \quad (\text{A.16})$$

$$N e \leq c_p f_{cP} b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (\text{A.17})$$

- (2) 当受压区高度 x 大于 h_w , 同时 x 不大于 $h - h_w$ 时,应符合下列规定:

$$N \leq f_{cC} b_c (x - h_w) + c_p f_{cP} (b h_w + (b - b_c)(x - h_w)) + f'_y A'_s - \sigma_s A_s \quad (\text{A.18})$$

$$N e \leq f_{cC} b_c (x - h_w) (h_0 - h_w - \frac{x - h_w}{2}) + c_p f_{cP} b h_w (h_0 - \frac{h_w}{2}) + c_p f_{cP} (b - b_c) (x - h_w) (h_0 - h_w - \frac{x - h_w}{2}) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) \quad (\text{A.19})$$

- (3) 当受压区高度 x 大于 $h - h_w$ 时,应符合下列规定:

$$N \leq f_{cC} b_c h_c + c_p f_{cP} (b h_w + (b - b_c) h_c + b(x - h_w - h_c)) + f'_y A'_s - \sigma_s A_s \quad (\text{A.20})$$

$$Ne \leq f_{cc} b_c h_c (h_0 - h_w - \frac{h_c}{2}) + c_p f_{cp} b h_w (h_0 - \frac{h_w}{2}) + c_p f_{cp} (b - b_c) h_c (h_0 - h_w - \frac{h_c}{2}) + c_p f_{cp} b (x - h_w - h_c) (a_s - (h - x - \frac{x - h_w - h_c}{2})) + f_y' A_s' (h_0 - a_s') \quad (\text{A.21})$$

式中：

N ——轴向力设计值；

f_{cc} 、 f_{cp} ——浇筑混凝土和打印混凝土的抗压强度设计值；

f_y ——竖向受压钢筋的强度设计值；

σ_s ——竖向受拉钢筋应力；

A_s 、 A_s' ——竖向受拉和受压钢筋的截面面积；

e ——轴向力作用点到竖向受拉钢筋合力点之间的距离；

e_0 ——轴向力对截面重心的偏心距，取为 M/N ，当需要考虑二阶效应时， M 可参考 GB 50010 的第 5.3.4 条的规定；

e_a ——附加偏心距，其值应取 20 mm 和偏心方向界面最大尺寸的 1/30 两者中的较大值；

h_0 ——3D 打印模板配筋混凝土构件截面的有效高度，取 $h_0 = h - a_s$ ；

a_s 、 a_s' ——受拉（压）区纵向钢筋合力点至截面受拉（压）区边缘的距离。

按上述规定计算时，尚应符合下列要求：

当 ξ 不大于 ξ_b 时为大偏心受压构件，取 σ_s 为 f_y ，此处， ξ 为相对受压区高度，取为 x/h_0 ；

当 ξ 大于 ξ_b 时为小偏心受压构件， σ_s 按式 (A.22) 进行计算：

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_{cu} \left(\frac{\beta_c h_0}{x} - 1 \right) \quad (\text{A.22})$$

式中：

σ_s ——钢筋 A_s 的应力。

A. 2. 3 正截面受弯承载力计算

A. 2. 3. 1 矩形截面受弯构件，其正截面受弯承载力应符合图 A.4 的下列规定：

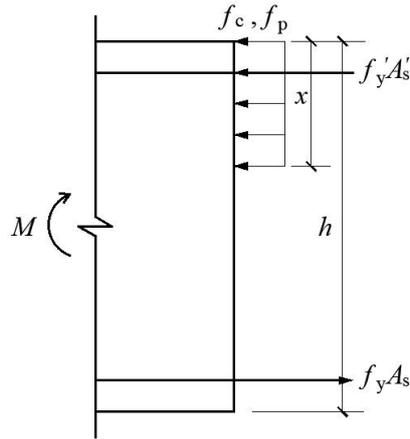


图 A.4 3D 打印模板配筋混凝土构件正截面受弯承载力计算示意图

(1) 当满足式 (A.21) 时, 应按式 (A.22) 进行计算

$$f_y A_s \leq \alpha_1 c_p f_{cp} b h_w + f_y' A_s' \quad (\text{A.23})$$

$$M \leq \alpha_1 c_p f_{cp} b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' (h_0 - a_s') \quad (\text{A.24})$$

混凝土受压区高度应按下列公式确定:

$$\alpha_1 c_p f_{cp} b x = f_y A_s - f_y' A_s' \quad (\text{A.25})$$

(2) 当不满足式 (A.21) 时, 应按下式进行计算

$$\begin{aligned} M \leq & \alpha_1 f_{cc} b_c (x - h_w) \left(h_0 - \frac{x - h_w}{2} \right) + \alpha_1 c_p f_{cp} b h_w \left(h_0 - \frac{h_w}{2} \right) \\ & + \alpha_1 c_p f_{cp} (b - b_c) (x - h_w) \left(h_0 - \frac{x - h_w}{2} \right) + f_y' A_s' (h_0 - a_s') \end{aligned} \quad (\text{A.26})$$

混凝土受压区高度应按下列公式确定:

$$\alpha_1 f_{cc} (b - b_c) (x - h_w) + \alpha_1 c_p f_{cp} (b h_w + (b - b_c) (x - h_w)) = f_y A_s - f_y' A_s' \quad (\text{A.27})$$

混凝土受压区高度尚应符合下列条件:

$$x \leq \xi_b h_0 \quad (\text{A.28})$$

$$x \geq 2 a_s' \quad (\text{A.29})$$

式中:

M ——弯矩设计值;

f_{cc} 、 f_{cp} ——浇筑混凝土和打印混凝土的抗压强度设计值;

f_y 、 f_y' ——竖向受拉和受压钢筋的强度设计值;

b_g 、 b_p ——浇筑混凝土和打印混凝土对应的截面宽度

A_s 、 A_s' ——竖向受拉和受压钢筋的截面面积;

h_0 ——3D 打印模板配筋混凝土构件截面的有效高度, 取 $h_0 = h - a_s$;

a'_s ——受压区纵向钢筋合力点至截面受压区边缘的距离；

A. 2. 3. 2 3D 打印模板配筋混凝土受弯构件正截面受弯承载力计算应符合本规程公式 (A.26) 的要求。

A. 2. 3. 3 当计算中计入纵向普通受压钢筋时，应满足本规范公式 (A.27) 的条件；当不满足此条件时，正截面受弯承载力应符合下列规定：

$$M \leq f_y A_s (h_0 - a_s - a'_s) \quad (\text{A.30})$$

A. 2. 4 正截面受剪承载力计算

A. 2. 4. 1 对于 3D 打印模板配筋混凝土构件，其斜截面受剪承载力应根据下列情况进行计算：

a) 构件截面，应满足下式要求：

当 $(h - 2h_w) / b_c \leq 4$ 时

$$V \leq 0.25 \beta_c (f_{cC} b_c (h_0 - h_w) + f_{cP} (bh_w + (b - b_c)(h_0 - h_w))) \quad (\text{A.31})$$

当 $(h - 2h_w) / b_c \geq 6$ 时

$$V \leq 0.2 \beta_c (f_{cC} b_c (h_0 - h_w) + f_{cP} (bh_w + (b - b_c)(h_0 - h_w))) \quad (\text{A.32})$$

式中： V ——构件斜截面上的最大剪力设计值；

β_c ——混凝土强度影响系数，当混凝土等级不超过 C50 时， β_c 取 1.0；

b) 3D 打印模板配筋混凝土构件在偏心受压时的斜截面受剪承载力，应按下列公式计算：

(1) 仅配置箍筋时：

$$V \leq \alpha_{cv} (f_{cC} b_c (h_0 - h_w) + f_{cP} (bh_w + (b - b_c)(h_0 - h_w))) + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (\text{A.33})$$

式中： α_{cv} ——斜截面混凝土受剪承载力系数，对于一般受弯构件取 0.7；对集中荷载作用下的独立梁，

取 α_{cv} 为 $\frac{1.75}{\lambda + 1}$ ， λ 为计算截面的剪跨比，可取 λ 等于 a/h_0 ，当 λ 小于 1.5 时，取 1.5，当 λ

大于 3 时，取 3， a 取集中荷载作用点至支座截面或节点边缘的距离；

A_{sv} ——配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积；

s ——沿构件长度方向的箍筋间距；

f_{yv} ——箍筋抗拉强度设计值；

f_{tC} ——浇筑混凝土的抗拉强度设计值；

(2) 当配置箍筋和弯起钢筋时：

$$V \leq \alpha_{cv} (f_{cC} b_c (h_0 - h_w) + f_{cP} (bh_w + (b - b_c)(h_0 - h_w))) + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + 0.8 f_{yv} A_{sb} \sin \alpha_s \quad (\text{A.34})$$

A_{sb} ——同一平面内弯起钢筋截面面积；

α_s ——斜截面上弯起钢筋的切线与构件纵轴线的夹角；

A. 2. 4. 1 符合下式要求时，可不进行斜截面的受剪承载力计算，其箍筋的构造要求应符合 GB 50010 的第 9.2.9 条的有关规定。

$$V \leq \alpha_{cv} (f_{cC} b_c (h_0 - h_w) + f_{cP} (bh_w + (b - b_c)(h_0 - h_w))) \quad (\text{A.35})$$

式中： α_{cv} ——斜截面混凝土受剪承载力系数。

A. 3 3D打印混凝土挤出性试验

试验应按下列要求进行：

- a) 连续打印长度 ≥ 100 w 打印条带；肉眼观测打印条带的表观质量，应无中断或不连续等现象；
- b) 测量5个间隔不小于10 w 的不同位置处的打印条带最外缘宽度，计算5个测量点的平均值，结果应精确至 mm，偏差宜控制在 $\pm 5\%$ 以内；
- c) 测量5个间隔不小于10 w 的不同位置处的打印条带厚度，计算5个测量点的平均值，结果应精确至mm，偏差宜控制在 $\pm 5\%$ 以内。

A. 4 3D打印混凝土可打印时间试验

试验应按下列步骤进行：

- a) 混凝土拌合物宜以 5 min~10 min 为间隔，通过挤出成型的方式重复打印长度 ≥ 100 w 的打印条带；
- b) 记录打印条带出现中断或不连续时所对应的时间，其与开始加水时的时间差记为可打印时间。

A. 5 3D打印混凝土可建造性试验

试验应按下列步骤进行：

- a) 试验装置包括升降平台及圆筒，升降平台板的中心孔尺寸与圆筒匹配，所用圆柱筒内壁光滑，圆筒挤出口直径应与打印头尺寸一致，试验时内壁润湿无明水；
- b) 混凝土拌合物试样装入圆柱筒内，捣实后调整升降机架的挤出高度，使挤出口刻度距地面5mm高度；
- c) 施加恒定荷载在竖直方向圆筒的上端部，均匀提升推杆直到单层设计层厚高度；
- d) 去除荷载，再次将混凝土拌合物试样装入圆柱筒，混凝土拌合物低于筒口时，应随时添加；
- e) 将多余混凝土拌合物刮去，再次加恒定荷载直至最终堆积试件变形坍塌；
- f) 记录坍塌时层数n及相对高度，重新配料，堆积n-2层；

- g) 选用游标卡尺测量水平方向堆积 $n-2$ 层构件的最突出层的宽度 d_1 ，及最窄层的宽度 d_2 ，分别与
设计打印宽度 d 的差值与 d 之比作为横向最大变形和横向最小交形，若两者均在 d 的15%以内，
则视为在有效变形内；再测量堆积构件的高度 h_1 ，与理论堆积高度 h 进行对比，若在 h 的15%
以内，则视为在有效变形内，否则无效。
- h) 重复可建造性试验三次，以三次测试结果的均值作为混凝土试样的有效堆积高度，精确至
1mm。
-