

**《3D 打印混凝土建筑构件应用技术
规程》协会标准编制说明**
(征求意见稿)

标准编制组

2023 年 4 月

目录

一、工作简况	1
(一) 任务来源	1
(二) 工作过程	1
1. 起草(草案、论证)阶段	1
2. 送审阶段	错误! 未定义书签。
(三) 主要参加单位及分工	2
二、标准编制原则和主要内容	3
(一) 标准编制目的意义	3
(二) 标准编制原则	3
(三) 主要编制内容	4
1. 范围	4
2. 规范性引用文件	4
3. 术语与定义	5
4. 分类	5
5. 基本要求	错误! 未定义书签。
6. 原材料要求	错误! 未定义书签。
7. 构件性能要求	8
8. 试验方法	9
9. 质量检验与验收	9
附录 A 3D 打印混凝土建筑构件承载力计算方法	10
三、主要试验(或验证)情况分析	13
四、本标准中涉及专利的情况	15
五、预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况	15
六、与国际、国外的对比情况	15
七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准,特别是强制性标准的协调性	16
八、重大分歧意见的处理经过和依据	16
九、标准性质的建议说明	16
十、贯彻标准的要求和措施建议	16
十一、废止现行相关标准的建议	16

一、工作简况

（一）任务来源

国内随 3D 打印技术发展，涌现一批以上海盈创有限责任公司为主的智能建造企业，当前 3D 打印产品广泛应用于建筑小品、城市景观、预制构件及公共设施等领域，其工程应用发展缺乏建筑构件标准化参数、产品质量评价不统一等问题也随之显现，相关标准的需求成为掣肘 3D 打印在工程应用的重要因素。本项目是根据中国建筑材料联合会《关于下达 2020 年第六批协会标准制修订计划的通知》（中建材联标发 [2020] 49 号），计划编号为 2020-45-xbjh，项目名称《3D 打印混凝土材料与建筑构件》进行制定，主要起草单位：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。由中国建筑材料联合会归口管理。

（二）工作过程

1. 起草（草案、论证）阶段

（1）开展调研工作

中国建筑材料联合会于 2010 年 6 月 7 日召开行业团体标准研讨会，对制定《3D 打印混凝土材料与建筑构件》团体标准的工作进行初步摸底，牵头单位同济大学对《3D 打印混凝土材料与建筑构件》团标立项建议进行了介绍。

（2）收集相关标准

本标准所需引用的规范性引用文件收集齐全。

（3）成立标准起草工作小组

2020 年 7 月 11 日-7 月 13 日工作组在线上召开了团体标准第一次工作组会议，工作专家对标准进行了审核，并提出修改建议及标准验证要求，来自科研院所、高等院校、质检机构、生产、使用企业等多名代表参加了会议。会议成立了本标准起草工作组，并对标准初稿进行了讨论。起草小组主要分工如下：

a) 负责组织协调标准编写过程，收集相关标准，对 3D 打印混凝土材料与建筑构件的生产和使用情况进行调研，并负责组织验证试验；

b) 其他单位对标准的讨论稿、征求意见稿、送审稿等提出意见和建议及承担征求意见汇总、行业调研等工作。

（4）标准征求意见稿的确定

2020 年 11 月 20 日在线上召开团体标准《3D 打印混凝土材料与建筑构件》第二次工作会议，不断征求与验证标准技术内容，完善标准文本，于 2021 年 9 月形成标准征求意见稿。会议代表主要就以下内容达成共识：

结合 3D 打印混凝土材料与建筑构件的实际应用，其主要技术指标包含：材料、配合比、性能指标、构件设计与承载力计算、制作、运输、施工及验收等。

（5）征求意见稿公示

2023 年 4 月形成标准征求意见稿，并完善编制说明内容，由中国建筑材料联合会向社会各界公开征求意见。同时，为了使标准的技术指标具有广泛的协调性、代表性和科学严谨性，扩大了征求意见的范围，向主流生产企业、高校学院、用户等单位的建材行业专家收集意见建议，并对这些意见进行汇总处理。

（三）主要参加单位及分工

本标准由中国建筑材料联合会提出，负责起草单位共 6 家。包括了科研院所（1 家）、高校（3 家）、和应用企业等（2 家）单位，标准的牵头单位是同济大学。计划项目由同济大学、中国建材研究院、东南大学、中建八局、辽宁格林普建筑打印科技有限公司、河北工业大学等单位承担，项目周期 10 个月，各单位负责人详情见表 1。

表 1 标准编制组成员

序号	主要工作	单位	负责人
1	标准的组织、起草、3D 打印混凝土构件与施工等方面的资料搜集、安排工作计划等	同济大学	肖建庄、段珍华、丁陶、余江滔、吴宇清、秦飞
2	术语和 3D 打印混凝土材料方面的资料搜集	中国建筑材料科学研究总院有限公司	王玲、王振地
3	3D 打印混凝土材料方面的资料搜集	东南大学	张亚梅
4	3D 打印混凝土材料方面的资料搜集	河北工业大学	马国伟
5	3D 打印混凝土施工等方面的资料搜集	中国建筑第八工程局有限公司	葛杰
6	3D 打印混凝土构件的制作与施工等方面的资料搜集	辽宁格林普建筑打印科技有限公司	都书鹏、汲广超

二、标准编制原则和主要内容

（一）标准编制目的意义

增材制造（又称 3D 打印）是以数字模型为基础，将材料逐层堆积制造出实体物品的新兴制造技术，将对传统的工艺流程、生产线、工厂模式、产业链组合产生深刻影响，是制造业有代表性的颠覆性技术，3D 打印混凝土用在建筑领域，被称为解决全球住房危机的潜在解决方案。我国高度重视增材制造产业，将其作为《中国制造 2025》的发展重点。2015，中国政府推出《国家增材制造产业发展推进计划（2015-2016 年）》计划，该计划制定了关于 3D 打印技术发展的短期规划和目标。

3D 打印混凝土工艺作为一种“第三次工业革命”标志性技术有诸多优点：

- 1) 可实现无模结构，无需经过支撑模、拆模等一系列繁琐的工序。与传统施工方法相比，施工时间大大缩短，成本降低到 1/3 左右
- 2) 能耗低，减少建筑垃圾扬尘的产生，建筑噪音低
- 3) 数字化控制机器人代替人类，避免人类在高风险、高污染的环境和空间工作。
- 4) 材料来源广泛，可使用建筑废料、塑料等。

3D 打印混凝土建筑构件应用在建筑工程混凝土中需求量大，加之劳动力老龄化及不足的实际情况，3D 打印混凝土构件在建筑建造应用将成为一种必然趋势，另外，随着国家产业结构的调整，发展智能建造减少环境污染，符合社会保护环境、可持续发展战略，是国家政策扶持行业，前景广阔。但目前对于 3D 打印混凝土材料及建筑构件仍没有对应的标准规范对其技术要求作出系统的规定。

（二）标准编制原则

本文件根据《工业绿色发展规划（2016 年~2020 年）》总体要求，基于 3D 打印混凝土材料及建筑构件国内外生产和应用现状，确定如下编制原则：

- a) 与国家相关法律法规保持一致，落实国家绿色化发展的总方向。
- b) 标准格式、结构和内容按 GB/T 1.1—2020 的规定进行编制。
- c) 指标的设置在国内外行业实际生产和应用水平的基础上，兼顾科学性、高端性、先进性与可操作性。

（三）主要编制内容

编制单位在充分调研国内 3D 打印混凝土材料发展的基础上，考虑打印预制构件性能指标，制定本标准。本标准内容包括术语和定义、符号、总体要求、技术要求、构件设计与承载力计算、检验规则等。

下面对标准编制的主要内容进行说明：

1. 范围

本文件规定了 3D 打印混凝土材料和建筑构件的术语和定义、材料、配合比、性能指标、构件设计与承载力计算、制作及验收。

本文件适用于 3D 打印混凝土材料和建筑构件，宜现场施工应用。

2. 规范性引用文件

GB 175 通用硅酸盐水泥

GB 1499.2 混凝土用钢筋

GBT 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 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

以上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。

3. 术语与定义

本文件中，定义了 3D 打印混凝土为“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”，定义了 3D 打印混凝土建筑构件为“由 3D 打印混凝土技术制造的构成建筑物各个要素”，定义具有科学性。

此外，本文件内容中涉及的 3D 打印相关性能及参数等相关术语参照 T/CBMF 184—2022《3D 打印混凝土拌合物性能试验方法》与 T/CBMF 183—2022《3D 打印混凝土基本力学性能试验方法》执行，此处不再重复定义。

4. 分类

考虑到混凝土建筑构件打印形式及材料不同，混凝土用途、3D 打印混凝土建筑构件制备类型和方式进行了规定，进一步将混凝土分为现场 3D 打印混凝土和打印永久模板后内部浇筑混凝土，依据建筑构件制备类型细分为工厂预制混凝土构件和现场打印混凝土构件，规范了 3D 打印混凝土流动性、可挤出性、可建造性及力学性能，并规范了打印模板浇筑混凝土基本性能，阐明了 3D 打印建筑构件与常规建筑构件所用混凝土的差异性。

5. 基本要求

基本要求主要规范了无筋及配筋 3D 打印混凝土构件生产的质量管理、控制、人员到岗、设备到场及技术到位等要求，进一步规范了生产时对周边环境影响，做到绿色生产，减少环境污染。应遵循基本要求，

6. 原材料要求

依据用途对涉及到所用 3D 打印原材料及永久模板浇筑混凝土进行规定，通过筛选原材料类型及品质实现打印混凝土制品的可靠性提升。主要对 3D 打印混凝土所用水泥、矿物掺合料、粗骨料、细骨料、外加剂、纤维、用水方面作了相应规定，强调原材料选取应符合我国环保和安全相关标准和规范。

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。

矿物掺合料应符合 GB/T 51003 的规定。

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。

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。

外加剂应符合 GB 8076 和 GB 50119 的规定。

纤维应符合 GB / T 21120 和 JGJ / T 221 规定。

拌和用水应符合 JGJ 63 的规定。

7. 构件性能要求

混凝土材料性能则是对 3D 打印建筑构件所用混凝土作了分级化处理以适应工程应用选择和市场的需要。考虑到《3D 打印混凝土拌合物性能试验方法》T/CBMF 184—2022 与《3D 打印混凝土基本力学性能试验方法》T/CBMF 183—2022 对 3D 打印混凝土拌合物和混凝土材料基本力学性能做出了相关要求，本标准基于此，对建筑构件所用混凝土材料要求指标进行进一步的规定，编制团队对国内 3D 打印混凝土材料性能及工程建筑构件应用工况进行了广泛调研。其中，早期工作性能决定了混凝土可打印性，硬化后力学性能决定了混凝土服役性能，耐久性能对混凝土建筑构件服役周期和正常使用有直接影响。基于以上参数依据工程应用强度等级，通过轴心受压及受拉性能试验对 C20~C50 强度的无筋 3D 打印混凝土进行规定。确定了以下主要技术要求：

表 1 3D 打印混凝土轴心抗压和抗拉强度标准值 (N/mm²)

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：混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定。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。 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《3D 打印混凝土基本力学性能试验方法》T/CBMF 183—2022 的相关规定。							

表 2 3D 打印混凝土轴心抗压和抗拉强度设计值 (N/mm²)

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

$f_{t,z}$	≥ 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							

由于 3D 打印模板配筋混凝土构件模板为打印工艺制备，其配筋下性能、界面特征及浇筑混凝土后形成构件与常规浇筑混凝土模板并不相同，需对 3D 打印模板配筋混凝土构件所用配筋、承载力计算方法进行规定，并规范永久模板内浇筑混凝土长期性能。

根据试验室试验建立构件正截面受压、受弯、受剪等工况下承载力计算方法，为工程应用安全校核提供理论支撑。

3D 打印无筋及模板配筋混凝土构件的承载力计算应符合 A.1 及 A.2 中的相关规定。

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。

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。

8. 材料及建筑构件设计要求

由于打印工艺对混凝土流动性、可挤出性、可建造性及力学性能要求，需规范 3D 打印混凝土水胶比、骨胶比及矿物掺合料用量等参数。设计要求依据起草人通过试验室大量试验分析得出，对 3D 打印建筑构件配合比设计进行了规定。确定了以下主要技术要求：

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

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

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

9 试验方法

由于 3D 打印模板配筋混凝土构件模板为打印工艺制备，其与打印设备协同下制备构件性能调控与常规浇筑混凝土并不相同，需对 3D 打印混凝土硬化前可挤出性、可打印时间及可建造性的计算方法进行规定。

3D 打印混凝土的流动性能试验方法应按下列要求进行：

a) 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。

b) 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。

3D 打印混凝土可挤出性应按 A.3 试验。

3D 打印混凝土可打印时间应按 A.4 试验。

3D 打印混凝土可建造性应按 A.5 试验。

10 质量检验与验收

为满足工程质量验收需求，需规范支撑与打印永久模板及永久模板浇筑混凝土具体质量检验与验收流程，对打印永久模板安装允许偏差及检验方法及 3D 打印混凝土建筑构件尺寸的允许偏差及检验方法进行进一步规定。

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

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	±5	尺寸检查
		≥12m 且<18m	±10	
		≥18m	±20	
	墙		±4	
宽度、高度	梁、板、柱截面尺寸		±5	尺寸一端及中部 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	尺寸最大侧向弯曲处
	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	尺寸两个 对角线
	墙打印窗口		5	
预留孔	中心线		5	尺寸检查
	孔尺寸		±5	
预留孔	中心线		10	尺寸检查
	孔尺寸		±10	
打印门窗口	中心线		5	尺寸检查
	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。				

附录 A 3D 打印混凝土建筑构件承载力计算方法

本文件采用国家标准、行业标准中成熟的标准试验方法，即3D打印混凝土试样、试验环境及质量应按GB 50003与GB 50010的规定执行，以便捷实现工程实地打印及建筑构件性能评价；

本规范在制定时参照新国标执行，此处予以说明：

（1）为规范 3D 打印混凝土建筑构件设计与承载力计算的测定，规范添加了 3D 打印混凝土建筑构件设计与承载力计算的参考参数方法。用新方法按受压、局部受压、受拉、受剪、受弯分别设计承载力参考标准，公式来源依据国标 GB 50003、GB 50009、GB 50010 中相关公式，针对 3D 打印建筑构件修正部分见下表，建筑构件相关性能已在试验室依据规范 GB/T 50081 及 GB/T 50082 完成验证。构件设计与承载力计算方法的修改一方面提高了 3D 打印混凝土建筑构件的要求，同时给予直观参照，修改后方法更加科学性、易操作。

受压构件

$$N \leq \varphi_1 f A \quad (1)$$

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《3D 打印混凝土基本力学性能试验方法》的有关规定，选择表 2 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 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，可按下列式计算：

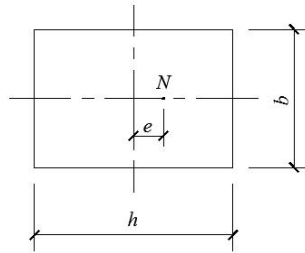


图 1 单向偏心受压

当 $\beta \leq 3$ 时：

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

当 $\beta > 3$ 时：

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

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

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 等于 0.0015; 当混凝土强度大于 20 MPa 时, α 等于 0.002;
 β ——构件的高厚比。

A. 2. 1. 2 确定影响系数 φ 时, 构件高厚比 β 应按下列公式计算:

$$\text{对矩形截面 } \beta = \gamma_{\beta} H_0 / h \quad (5)$$

$$\text{对 T 形截面 } \beta = \gamma_{\beta} H_0 / h_T \quad (6)$$

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;

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. 2. 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, 可参考现行国家标准《砌体结构设计规范》GB 50003 的有关规定。

A. 2. 1. 4 按内力设计值计算的轴向力的偏心距 e 不应超过 $0.6y$ 。 y 为截面重心到轴向力所在偏心方向截面边缘的距离。

局部受压

A. 2. 2. 1 3D 打印混凝土截面中受局部均匀压力时的承载力, 应满足下式的要求:

$$N_l \leq \gamma f A_l \quad (7)$$

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 2 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. 2. 2. 2 局部抗压强度提高系数 γ , 可参考现行国家标准《砌体结构设计规范》GB50003 的有关规定进行计算。

受拉构件

A. 2. 3. 1 轴心受拉构件的承载力, 应满足下式的要求:

$$N_t = f_t A \quad (8)$$

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。

受弯构件

A. 2. 4. 1 受弯构件的承载力, 应满足下式的要求:

$$M \leq f_m W \quad (9)$$

式中:

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

A. 2. 4. 2 受弯构件的受剪承载力，应按下列公式计算：

$$V \leq f_v b z \quad (10)$$

$$z = I / S \quad (11)$$

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。

受剪构件

A. 2. 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：

$$V \leq (f_v + \mu \sigma_0) A \quad (12)$$

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 $0.8f$ 。

三、主要试验（或验证）情况分析

根据 2020 年 7 月召开的专家预审会和 11 月召开的专家审查会专家提出的意见与建议，编制组反复研讨，对标准确定主要内容如下：

建筑 3D 打印技术在国内应用较少，多在示范性工程和科研工作中应用，工程应用案例不足，而且各方单位缺少统一的设计和施工方法，以致难以响应国内广泛应用。编制组在起草标准时多次讨论后认为，此标准应着重于 3D 打印混凝土构件层面的规定，同时囊括结构设计、施工与验收的全过程，为工程应用提高全过程的指导。

轴心抗压强度依据混凝土标准立方体模具制备并标准养护后每 3 个一组测定强度，加载方向和抗压强度试验方法可参考 T/CBMF 183—2022，取平均值作为试验结果，试验结果均满足规范要求，如下表 7 所示。

表 7 3D 打印混凝土抗压强度试验结果

强度	混凝土强度等级						
	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
f_{ck}	14.2	16.3	21.9	24.6	27.2	31.3	34.2
$f_{ck,x}$	11.4	13.0	16.4	19.1	22.2	23.8	27.0
$f_{ck,y}$	10.0	11.5	13.8	18.2	18.9	22.7	24.1
$f_{ck,z}$	10.6	13.1	16.2	18.0	21.3	22.9	26.2

轴心抗拉强度依据混凝土标准立方体模具制备并标准养护后每 3 个一组测定强度，加载方向和抗拉强度试验方法可参考 T/CBMF 183—2022，取平均值作为试验结果，C45 强度等级 Y 轴方向试验结果低于标准值小于 5%，满足可靠性要求，其余方向抗拉强度均满足规范要求，如下表 8 所示。

表 8 3D 打印混凝土抗拉强度试验结果

强度	混凝土强度等级						
	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
f_{tk}	1.26	1.82	2.02	2.29	2.41	2.50	2.66
$f_{tk,x}$	1.22	1.48	1.60	1.73	1.90	2.07	2.19
$f_{tk,y}$	1.11	1.22	1.45	1.63	1.69	1.79	2.01
$f_{tk,z}$	1.19	1.42	1.50	1.69	1.73	1.86	1.95

打印验证试验共收集梁构件 20 个，标准立方体试样及棱柱体试样共 4 组 36 个。验证试验由同济大学完成，试验结果如表 9 所示。

表 9 外观验证试验结果

项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	标准值	合格率
											1	2	3	4	5	6	7	8	9	0		
长度	2	1	2	1	1	-1	3	1	1	3	2	6	3	2	5	2	2	1	3	1	±2.0	75%

能试验方法》CCPA 33—2022。

目前尚未有与《3D 打印混凝土材料与建筑构件》相关的国际标准和国外先进标准。

本标准主要 3D 打印混凝土构件的设计、施工、验收进行规范，《混凝土 3D 打印技术规程》主要针对 3D 打印材料和设备的技术参数、材料的物理力学性能试验方法；《混凝土 3D 打印技术规程》、《3D 打印混凝土材料性能试验方法》、《3D 打印混凝土基本力学性能试验方法》主要针对混凝土材料的性能评价和试验方法，与此标准面向对象不同。

七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本标准符合国家现行法律法规、规章制度和强制性国家标准的要求，符合混凝土领域相关法律法规和强制性标准。标准的制定和实施将完善我国 3D 打印混凝土材料与建筑构件标准体系，为我国 3D 打印混凝土产品参与国际竞争创造条件。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

九、标准性质的建议说明

建议本标准的性质为推荐性行业标准。

十、贯彻标准的要求和措施建议

建议本标准批准发布 6 个月后实施。

十一、废止现行相关标准的建议

无。