

T/XJCETS

新疆混凝土工程技术学会团体标准

T/XJCETS 011—2025

寒旱区混凝土 3D 打印应用技术规程

Technical Specifications for 3D Printing Application of Concrete in Cold and Arid Regions

2025 - 12 - 29 发布

2026 - 01 - 29 实施

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 基本规定	2
5 打印工艺	3
5.1 基本规定	3
5.2 环境因素	3
5.3 材料因素	3
5.4 路径因素	3
5.5 模型因素	3
5.6 设备因素	3
5.7 养护因素	4
6 打印材料	4
6.1 基本规定	4
6.2 原材料	4
6.3 3D 打印混凝土设计	4
6.4 3D 打印混凝土性能	5
7 打印设备	7
7.1 基本规定	7
7.2 硬件系统	7
7.3 软件系统	7
7.4 其他规定	7
8 打印施工	7
8.1 基本规定	7
8.2 打印施工	8
8.3 养护存放	8
8.4 运输吊装	8
9 质量检验与验收	9
9.1 基本规定	9
9.2 检验项目	9
9.3 验收	10

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。

本文件由新疆交通建设集团股份有限公司提出。

本文件由新疆混凝土工程技术学会归口。

本文件起草单位：新疆交通建设集团股份有限公司、中交第一公路勘察设计研究院有限公司、新疆基础设施建设有限责任公司、新疆交通检测认证有限公司、西安建筑科技大学、招商新疆质量和标准化研究院有限公司、新疆市政轨道交通有限公司、新疆工程学院、中铁隧道局集团有限公司、新疆胜达天利项目管理有限公司、新疆北方建设集团有限公司、第一师建设工程质量安全监督站、新疆苏泰建筑有限公司、新疆宸建工程有限责任公司、新疆兵团水利水电工程集团有限公司、新疆兵团市政轨道交通（集团）有限公司、新疆德安环保科技股份有限公司、新疆绿翔建设工程集团有限责任公司、新疆鸿运雨泽建设工程有限公司、新疆金正建投工程集团有限公司、阿克苏大成市政建设有限公司、忠泰建设集团有限公司、太平洋建设集团有限公司、塔里木职业技术学院、广西两湾建设有限公司、新疆海天祥瑞环保工程有限公司、中铁十九局集团有限公司、天津城建滨海路桥有限公司、新疆北庭市政工程有限责任公司、湖南建工集团有限公司、乌鲁木齐环投市政路桥有限公司、尼勒克县建筑安装市政工程有限责任公司、湖南高岭建设集团股份有限公司、新疆融汇市政工程有限责任公司、新疆宏达工程建设有限公司、新疆建华实业有限责任公司、湖南长大建设集团股份有限公司、湖南省第五工程有限公司、乌什县薪诺建设有限公司、河北省第二建筑工程有限公司、兴泰建设集团有限公司、中亿丰建设集团股份有限公司、广西建工集团控股有限公司、新疆楚源电力工程有限公司、安徽同济建设集团有限责任公司、湖南金辉建设集团有限公司、广西建工集团第四建筑工程有限责任公司、上海建工七建集团有限公司、湖南省绿林建设集团有限公司、云南建投第四建设有限公司。

本文件主要起草人：王彤、马莲霞、陈伟、姚晓飞、杨站伟、赵维飞、潘明江、徐剑、刘声均、薛祥斌、武新成、黄湘来、王伯林、韩建红、骆丽珍、武云飞、李东洋、朱留魁、张铖、王斌、杨亮、耿雨龙、贾聿卿、黄龙、张磊、谢标、张银博、刘世龙、郭佳林、刘宇浩、刘伟伟、韩玉凡、陈芳、胡云、易重庆、杜晓明、张杰、赵中卫、吕海斌、武小芳、邵斯琨、孟全、陈立跃、周杨、吕海波、赵英睿、王琦、何世强、曹斐、张海涛、何世彬、王啸、张晓莲、薛芮、陆博君、田冬香、唐玉芳、陈高林、巴宗鸿、于培祥、刘小玲、李志锋、王博、韩其东、崔雪薇、马腾福、岳学丽、李成相、付刚、程芳、雷雅敏、刘宇姣、吕超、徐榛、张笑宇、马科、刘文强、吉颖、范浩然、李天成、李迪思、李爱星、彭冲、张强、马小龙、武江龙、杨振、刘洋、胡本伟、李程、朱立济、伍玉波、朱伟伟、陈章、黄合悻、朱荣军、张诚、黄林。

本文件主要审查人：陈越平、温勇、刘海顺、刘辉、米尔夏提江·麦合木提。

寒旱区混凝土 3D 打印应用技术规程

1 范围

本标准规范和引导了寒旱区混凝土3D打印应用的基本规定、工艺参数、材料制备、结构设计、设备选型、打印建造、质量检验与验收。

本标准适用于寒旱区环境内交通基础设施及附属设施等工程中,采用混凝土3D打印技术制造的混凝土建筑物、构筑物及预制构件。

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
- JTG 3432 公路工程集料试验规程
- 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
- T/CECS 786 混凝土3D打印技术规程
- T/XJCETS 002 用于混凝土3D打印设备的术语和定义

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

寒区旱区 cold and arid region

指最冷月平均气温低于 $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，年平均气温 $\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，多年平均降水量 $\leq 200\text{ mm}$ 的干旱和半干旱地区，具有昼夜温差大、冬季寒冷、降水稀少的特征。本标准主要指新疆境内符合上述气候特征的区域。

3.2

混凝土 3D 打印 3D concrete printing

应用机电一体化技术，通过挤出、喷射、粘结等成型方式完成混凝土拌合物的逐层堆积，建造成三维结构的增材建造技术。

3.3

3D 打印混凝土 3D printed concrete

通过3D打印技术，根据数字模型成型构件或建筑满足不同堆积成型需求的混凝土材料。

3.4

3D 打印混凝土件 3D printed concrete components

采用3D打印混凝土材料在现场原位打印或工厂预先生产制作的建筑构件或结构部件。

3.5

打印工艺参数 printing process parameters

影响3D打印混凝土材料可打印性能、3D打印混凝土件硬化性能的关键参数，涵盖材料、设备、环境、养护、模型、路径六类参数。

3.6

原位 3D 打印 in-situ 3D printing

在规划设计的建筑位置现场，采用3D打印技术直接进行混凝土模板、构件、构筑物、建筑物的免模板成型建造技术。

3.7

泵送挤出性系数 pump-extrusion performance coefficient

通过物理量泵送（挤出）压力值，量化评价材料在泵送挤出过程中连续、稳定输送性能的指标系数。

3.8

作用形式 form of action

在试验过程中，荷载、侵蚀等外部因素作用于3D打印试件时，数据采集阶段的接触方式。包含点作用、线作用、面作用。面作用例如单轴压缩试验、氯离子渗透试验、冻融试验，线作用例如抗折/抗弯试验、碳化试验，点作用例如超声法测试。

3.9

打印基准坐标系 printing reference coordinate system

以水平打印层为XY基准平面，垂直于该平面中心的方向为Z轴，Z轴垂直向上为正，由相互正交的X、Y、Z主作用方向构建的三维坐标系。

3.10

硬化性能各向异性系数 hardened performance anisotropy coefficient

根据不同作用形式，通过计算各方向硬化性能数据值与平均值，用以量化评价3D打印混凝土件硬化性能的各向异性系数。

4 基本规定

4.1 混凝土 3D 打印构筑物应符合功能要求、满足结构预定的承载能力、刚度、稳定性及耐久性要求。

4.2 混凝土 3D 打印结构可按 GB 50010 或 GB 50003 的有关规定进行设计。

4.3 在进行原位 3D 打印前，应进行图纸会审，并根据设计要求，结合施工现场条件编制施工组织设计和专项施工方案。

4.4 混凝土 3D 打印材料、设备应满足预制和现场施工工艺要求，且应符合安全和环保等相关要求。

4.5 在进行 3D 打印及施工前，应建立健全完备的质量管理体系、安全生产管理体系和环保管理体系。

- 4.6 3D 打印设计建造项目应建立健全责任制，宜采用专项鉴定的方式明确设计、打印、安装等单位的主体责任。
- 4.7 施工单位应对工程进行现场验收，并经监理工程师认可。施工单位应按规定进行抽样检验，监理单位应按规定进行见证抽样检验或平行检验。
- 4.8 3D 打印作业及施工人员应进行专业培训，了解并熟悉 3D 打印技术特点与结构工程特征。
- 4.9 混凝土 3D 打印的几何精度与外观质量应符合设计要求及相关技术标准的规定。当设计无具体要求时，应满足后续施工安装及使用功能要求。

5 打印工艺

5.1 基本规定

- 5.1.1 应根据项目工况与需求，协调材料、环境、设备、路径、模型、养护之间的关系。
- 5.1.2 宜根据项目交付周期确定养护方式。
- 5.1.3 宜根据现场打印环境与模型，确定打印路径与材料配合比，适配设备参数、养护参数等工艺参数。

5.2 环境因素

- 5.2.1 应注意材料的水化速度、水分蒸发速率与现场温度、湿度、风速等环境的匹配关系。
- 5.2.2 宜协调现场温湿度、风速与打印平台的平整度、模型横截面填充率之间的关系。

5.3 材料因素

- 5.3.1 根据项目规模，宜梳理材料编号、材料性能、拌合用水量、原材料状态/批次、适用设备类型等打印材料参数。
- 5.3.2 材料性能应包含材料的可打印性能、浇筑试件硬化性能、打印试件硬化性能。
- 5.3.3 打印材料经工具端挤出后，在水平两侧一定范围内，宜由条底向条顶逐渐产生横向扩展变形。
- 5.3.4 打印材料宜适当延长初凝时间，以降低同一材料打印试件与浇筑试件的硬化性能差异。

5.4 路径因素

- 5.4.1 根据项目实际工况，宜合理设置路径间隔、切片层高、填充方式、层间行走是否连续、模型悬挑角度等打印路径参数。
- 5.4.2 打印路径参数宜合理调节切片层高与挤出口径之间的关系、模型横截面填充模式及填充率与材料流（触）变性能的关系。

5.5 模型因素

- 5.5.1 根据项目需求与设备实施边界，宜合理设置悬挑角度、最大横截面、模型尺寸、体量等。具体包含模型分块的长（L）、宽（W）、高（H），悬挑高度占比（P）、以及水平偏移度（Q）等。
- a) P: 悬挑区域高度 h 与一次性堆叠高度 H 的最大比值，即 $P = \frac{h}{H}$
- b) Q: 上下两层相邻打印条中心线之间水平距离 y 与单一挤出条宽度 x 的最大比值，即 $Q = \frac{y}{x}$
- 5.5.2 宜协调模型横截面尺寸的大小与材料的可打印时间、可打印层数之间的关系。
- 5.5.3 模型悬挑角度可根据材料抵抗变形时静态屈服应力的大小确定，具体可参考下列情况：
- a) 当 $Q \leq 1/6$ 或 $P \leq 0.5$ 时，宜应用 0.5%~1.5% 甲酸钙等早强剂调控材料凝结时间；
- b) 当 $1 \geq P > 0.5$ ， $1 \geq Q > 1/6$ 时，材料宜借助适宜升温装置提高打印成功率；
- c) Q 越小，悬挑区域占比越小、位置越靠上，混凝土件的打印横截面宜是闭合或对称状态；
- d) 当 $H \leq 50$ cm 时，可根据材料性能适当扩大上述要求区间。

5.6 设备因素

- 5.6.1 根据项目模型尺寸，宜选取合理挤出工具端参数、行走与泵送参数、搅拌参数与泵送管道参数、工艺边界参数。具体应包含工具端挤出头形状、行走/挤出速率、单体打印边界、最大打印横截面行走时间/间隔、材料拌合时间/锅数、泵送/挤出压力值等相关参数。
- 5.6.2 项目对打印质量平整度或质量一致性有要求时，工具端挤出头形状宜选用矩形。

5.6.3 根据现场打印环境与模型参数，宜协调挤出速度与行走速度的匹配关系，同步控制材料可打印时间与单次搅拌方量消耗总时间的平衡关系。

5.6.4 当打印材料中含有不易分散纤维时，宜协调材料的可泵送性与泵送管道长度、泵送高度、工具端材质之间的匹配。

5.7 养护因素

5.7.1 应根据现场工况与打印材料配合比，选取自然养护、标准养护、蒸汽养护等养护方式。

5.7.2 当生产翻台率不高时，宜采用蒸汽养护方式，应结合材料参数选取适宜升温、恒温、降温、静停等参数。

5.7.3 升温、降温速率应控制在 20 °C/h 以内，宜在 10 °C/h~15 °C/h 之间。

5.7.4 恒温温度应控制在 70 °C 以内，宜在 40 °C~60 °C 之间。

5.7.5 恒温时间宜控制在 8 h~12 h 之间，静停时间宜控制在 6 h~8 h 之间。

6 打印材料

6.1 基本规定

6.1.1 用于结构的 3D 打印混凝土强度等级不宜低于 C30，预应力 3D 打印预制构件的混凝土强度等级不宜低于 C40。

6.1.2 3D 打印墙体或构件中填充的混凝土材料应符合设计要求，且强度等级不应低于 C25。

6.1.3 3D 打印混凝土材料应满足设计与打印工艺要求，包括但不限于新拌状态下的可打印性与硬化后的力学性能及耐久性。

6.1.4 3D 打印混凝土材料配合比设计，应基于目标结构/构件的功能、打印工艺参数及服役环境要求，通过实验确定。

6.1.5 3D 打印混凝土材料制备宜遵循“固废再生与资源循环利用”的原则，鼓励基于地方建筑/工业固废材料，设计低碳、环保的配合比。

6.1.6 混凝土 3D 打印建筑用钢筋应符合 GB 1499.2 和 GB 13014，钢筋焊接应符合 JGJ 18 的相关规定。

6.2 原材料

6.2.1 针对寒区旱区环境，3D 打印混凝土材料的胶凝材料宜选用掺有硫铝酸盐水泥的复合水泥，水泥应符合 GB 175、GB 20472 的规定。

6.2.2 针对寒区旱区环境，复合材料宜选用矿渣粉、粉煤灰、硅灰等矿物外加剂，矿物外加剂的性能应符合 GB/T 51003 的规定。

6.2.3 3D 打印混凝土的细骨料宜选用河砂、机制砂、轻骨料及固废再生原料等，其性能应符合 GB/T 14684、GB/T 25176 的规定。

6.2.4 3D 打印混凝土的粗骨料宜选择碎石或卵石、再生骨料等，其最大粒径不宜大于打印喷嘴最小内径的 1/3，其性能应符合 GB/T 14685 的规定。

6.2.5 应采用能改善混凝土流变性、凝结时间及保水性的外加剂，确保拌合物的打印性能，外加剂应符合 GB 8076、GB 50119 的规定。

6.2.6 纤维的品种、长度、掺量等应通过试验确定，纤维的性能应符合 GB/T 21120、JGJ/T 221 的规定。

6.2.7 拌和用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》JGJ 63 的规定。

6.3 3D 打印混凝土设计

6.3.1 3D 打印混凝土材料的配合比设计，应在满足打印性能的前提下，积极采用建筑/工业固废等优化配合比。

6.3.2 3D 打印混凝土配合比宜参考 JGJ 55、JGJ 98 进行强度设计，强度等级范围宜 \geq C30。

6.3.3 3D 打印混凝土应根据构件形式、施工工艺、打印环境、路径规划、养护方式综合考虑进行配合比设计。3D 打印混凝土的可打印性、力学性能、耐久性能及其他性能可参考 T/CBMF 183 进行配合比优化设计。

6.3.4 根据 3D 打印混凝土的凝结时间、工作性、力学性能以及耐久性能要求，可使用矿物掺合料替代胶凝材料中部分水泥，降低 3D 打印混凝土中的水泥用量，调节混凝土的打印工作性能，矿物掺合料的品种和掺量应通过试验确定。

6.3.5 3D 打印混凝土外加剂的品种和掺量宜参考 T/CBMTF 184 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。

6.3.6 针对寒区旱区昼夜温差大、冬季寒冷、降水稀少特征，3D 打印混凝土需结合使用环境进行抗冻性、抗渗性能及抗裂性能优化。

6.3.7 针对寒区旱区环境，宜掺入引气剂等化学外加剂有助于提升复合材料的保水性、抗冻融性。

6.3.8 多种矿物掺合料的复合掺量不宜超过胶凝材料的 50%，并应通过试验验证其对打印性能及力学性能的影响。

6.3.9 3D 打印混凝土的水胶比应根据混凝土设计强度按表 1 选取。

表 1 不同强度等级 3D 打印混凝土的水胶比范围

强度等级	C30	C40	C50	C60
水胶比	0.36~0.42	0.34~0.40	0.30~0.36	0.28~0.34

6.3.10 3D 打印混凝土配合比设计的胶凝材料和骨料的用量应符合下列要求：

- 根据胶凝种类和性质以及骨料的性能和品质进行选定，并保证设计的混凝土性能符合 3D 打印施工工艺要求及结构设计要求；
- 在 3D 打印混凝土中细骨料单位体积用量由单位体积的胶凝材料、单位体积用水量以及打印混凝土的可打印性能确定；
- 3D 打印混凝土中粗骨料的用量由 3D 打印混凝土性能、3D 打印混凝土输送设备、3D 打印头出料口宽度决定，具体用量由实验确定；
- 胶凝材料与骨料用量体积比可按表 2 选取。

表 2 胶凝材料与骨料用量体积比

强度等级	C20	C30	C40	C50	C60
胶凝材料/骨料（体积比）	0.52~0.65	0.57~0.70	0.65~0.74	0.70~0.81	0.74~0.87

6.3.11 3D 打印混凝土配合比设计中的矿物掺合料可按表 3 选取，不同种类矿物掺合料的最大掺量应符合表 4 的规定。

表 3 不同强度等级的 3D 打印混凝土中的矿物掺合料用量

强度等级	C20~C30	C30~C40	C40~C50	C50~C60	C60~C70
掺合料	≤50%	≤40%	≤30%	≤20%	≤10%

表 4 不同种类矿物掺合料的最大掺量

矿物掺合料种类	最大掺量（%）			
	采用硅酸盐水泥时	采用普通硅酸盐水泥时	采用其它通用硅酸盐水泥时	采用非硅酸盐体系水泥时
粉煤灰	45	35	15	30
粒化高炉矿渣粉	50	45	20	30
钢渣粉	30	20	10	20
硅灰	10	10	10	10
符合掺合料	50	45	20	30

注1：表中“%”表示为矿物掺合料占胶凝材料总量的质量百分比；
注2：复合掺合料各组分的掺量不宜超过单掺时的最大掺量限值；
注3：复合掺合料总掺量宜参照表3中对应强度等级规定的最大限值。

6.4 3D 打印混凝土性能

6.4.1 混凝土 3D 打印材料拌制时间不小于 3 min，并根据纤维掺量，适当延长拌制时间，确保混凝土 3D 打印材料拌制均匀。

6.4.2 进入低温打印前，试验室应验证原混凝土 3D 打印材料配合比，外加剂各项参数以及水泥的匹配程度。

6.4.3 3D 打印混凝土材料不应离析和泌水，混凝土 3D 打印材料泵送后初凝时间应小于 60 min，同时考虑打印构件堆叠下一层同位置时混凝土 3D 打印材料未初凝。

6.4.4 3D 打印混凝土材料的可打印性能，宜通过泵送挤出压力等物理量量化打印条带无中断或不连续程度，确定材料可打印时间的区间边界。

- a) 可采用带有泵送挤出压力传感器的打印试验装置完成可打印时间内的实时压力变化情况，完成最大压力值 F_{B1} 、恒定压力值 F_{B2} 、压力变化幅度值 F_J 等泵送挤出系数测量与计算。其中， F_J 计算公式如 a) 下：

$$F_J = \frac{F_{B1} - F_{B2}}{F_{B2}}$$

- b) F_{B1} 数值越大，材料的堆叠能力越强； F_{B2} 数值越小，材料的可泵送、挤出能力越好； F_J 数值越小，材料的挤出形状保持能力越好。

- c) F_{B1} 数值不应超过泵送设备稳定输送的允许压力值，在常规泵送管径 30 mm 下不宜超过 200 N；

6.4.5 3D 打印混凝土拌合物的可打印时间、湿坯强度与弹性模量、凝结时间性能检验，参照 T/CBMF 184 执行。

6.4.6 3D 打印混凝土材料可建造性通过最大可堆叠层数及该层数下重力作用下单层平均纵向应变量作为核心量化指标。

6.4.7 3D 打印混凝土材料的流动性、可挤出性、可建造性宜符合表 5 的规定。

表 5 混凝土可打印性要求及检验方法

项目		技术要求		检验方法
		骨料粒径		
		≤5	5~16	
流动性	流动性 (mm)	160~220	参照GB/T 2419	参照GB/T 2419
	坍落度 (mm)	—	参照GB 50080	参照GB 50080
可挤出性		连续均匀、无堵塞、无明显拉裂		计算泵送挤出系数
可建造性		挤出后形态保持稳定且不倒塌		尺量

6.4.8 3D 打印混凝土件的硬化性能等级，宜通过各向异性程度与实际工况下的材料配比、打印环境、打印路径、打印模型、打印设备、养护环境等工艺参数进行综合评定。

6.4.9 3D 打印混凝土件的硬化性能各向异性程度宜采用系数 I_a 进行量化评价构件。具体如下：

$$f_{avg} = \frac{\sum_{n=1}^i f_{xn} + \sum_{n=1}^i f_{yn} + \sum_{n=1}^i f_{zn}}{3i}$$

$$I_a = \frac{\sqrt{(f_{x1} - f_{avg})^2 + \dots + (f_{xi} - f_{avg})^2 + (f_{y1} - f_{avg})^2 + \dots + (f_{yi} - f_{avg})^2 + (f_{z1} - f_{avg})^2 + \dots + (f_{zi} - f_{avg})^2}}{f_{avg}}$$

- a) 根据不同试验的要求， i 为硬化性能测试时在主作用方向下作用形式的个数，面作用 $i=1$ ，线作用 $i=2$ ，点作用 $i \geq 3$ ；

- b) f_{xi} 、 f_{yi} 、 f_{zi} 分别代表沿 X、Y、Z 主作用方向下第 i 个点（线、面）作用下的平均测试数据；

- c) f_{avg} 代表所有主作用方向下的平均测试数据。

6.4.10 3D 打印混凝土件的硬化性能等级认定，对于同一种材料及工艺参数通过 I_a 表征各向异性程度。若 $I_a \leq 15\%$ ，则依次对各方向进行性能测试，各主作用方向试验结果不少于 $3i$ 个，则按照平均值确定性能等级。若 $I_a > 15\%$ ，则按照最不利方向确定性能等级。

6.4.11 3D 打印混凝土材料及试件的力学性能等级评定方法参照 GB/T 50107。3D 打印混凝土材料及试件的耐久性能等级评定方法参照 JGJ/T 193。

6.4.12 硬化混凝土力学性能、长期和耐久性能除应满足工程设计、施工和应用环境要求，尚应满足 GB 50010、GB 50003、GB/T 50082 的规定。

7 打印设备

7.1 基本规定

- 7.1.1 用于混凝土 3D 打印的设备包括搅拌设备、输料设备和 3D 打印设备。
- 7.1.2 寒区旱区的 3D 打印设备应具备良好的耐寒性能。搅拌设备、输料设备和 3D 打印设备的关键部件，如电机、液压系统、控制系统等，应采取有效的保温措施，确保设备在低温环境下正常运行。
- 7.1.3 3D 打印混凝土搅拌设备应符合 GB/T 9142 的规定，宜采用强制式搅拌机。当采用其他类型的搅拌设备时，应根据打印需要适当延长搅拌时间。
- 7.1.4 搅拌设备选型时应根据输料设备输送量、输送管长度、打印头容积和打印速度确定公称容量。
- 7.1.5 通过输料设备的 3D 打印混凝土拌合物应均匀，无离析、分层和前后不均匀现象。
- 7.1.6 输料设备的输送量应具有可调节功能。
- 7.1.7 3D 打印混凝土中无粗骨料时，输送设备宜采用螺杆泵形式；3D 打印混凝土中有粗骨料时，输送设备宜采用活塞泵形式。
- 7.1.8 3D 打印设备应包括打印硬件系统和打印软件系统。

7.2 硬件系统

- 7.2.1 具备在三维方向移动功能，能够按照设计的打印路径进行自动打印，满足打印要求。
- 7.2.2 打印精度应不大于各方向打印量程的千分之一，且不宜超过 2 mm。
- 7.2.3 通过打印软件系统可控制打印速度、打印头出料流量。

7.3 软件系统

- 7.3.1 应具备打印路径编程功能，自动计算每层打印时间和总打印时间。
- 7.3.2 应具备实时监测打印硬件系统中电气部件是否正常运行的功能，电气部件出现异常应能够自动停止并发出警报。
- 7.3.3 宜具备打印过程模拟功能。
- 7.3.4 宜具备打印偏差自动监测功能，并进行提示。

7.4 其他规定

- 7.4.1 打印头出料口尺寸应根据打印宽度、挤出速率、打印速率等因素，通过试验确定。
- 7.4.2 打印速率的选择应根据 3D 混凝土拌合物性能和打印设备技术参数确定，确定后通过试验进行验证，确保打印宽度和打印效果满足要求。
- 7.4.3 在开始打印之前，需对 3D 打印系统进行全面检查，确保其性能处于最佳状态。
- 7.4.4 在打印空间内应设置必要的警示标示、消防设备等安全防护措施，打印设备运行前应确保打印空间内无人。
- 7.4.5 检查设备运动的精度和重复性，确认设备的打印区域是否符合设计要求。
- 7.4.6 设备的电力系统需要保持稳定，检查电源连接和电压稳定性，避免因电力不稳导致设备故障或打印中断。
- 7.4.7 对设备进行定期维护和检修，提前准备高频使用的设备备用零件，以预防设备故障对生产进度的影响，并对设备维护和检修记录详细的日志。
- 7.4.8 输料设备的输送量应具有可调节功能，根据设备打印速度和打印层厚自动调整输送量。
- 7.4.9 打印头的出料口尺寸应根据工艺设计的打印条宽度和打印层厚共同确定。在每次使用前，应对打印头进行清洁与检查，防止材料残留堵塞喷嘴，影响打印效果。

8 打印施工

8.1 基本规定

- 8.1.1 打印与生产包含材料准备、设备准备、作业准备、打印生产、养护与质量检查等环节，应符合设计文件的要求，并编制打印专项方案。
- 8.1.2 打印与生成应建立全构件生产质量保证体系，明确生产过程中的质量责任，加强质量管理。
- 8.1.3 打印与生成宜采用工程数字化、信息化、智能化技术进行生产管理，使用可靠手段监测、搜集生产过程中的关键数据，保障信息完整度，便于开展溯源。
- 8.1.4 打印设备的形式和尺寸应根据工程设计要求，结合场地条件、施工经济性等因素确定。
- 8.1.5 打印环境温度宜控制在 $5^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 之间，超出范围需采取控温措施。
- 8.1.6 寒区旱区混凝土 3D 打印的养护应注重保温保湿，制定合理的养护措施。

8.2 打印施工

- 8.2.1 打印生产前应对人员就位情况、设备运转情况、物料储备情况进行检查。
- 8.2.2 打印生产前应按本标准 6.4 节要求拌制混凝土 3D 打印材料，满足材料相关性能要求。
- 8.2.3 打印生产前应使用水平仪对打印平台表面进行测量，确保其误差在规定范围内，最大误差不应超过单层打印厚度。
- 8.2.4 打印生产前应选择项目中具有代表性的构件进行试打印，验证设计方案的打印可行性，确定打印速率、高度、打印条宽、打印厚度、挤出速率等关键参数和工艺流程。
- 8.2.5 打印生产时宜监测周围环境的温湿度，根据温湿度对材料配比、打印速率做出实时调整，确保打印成品率，应对工艺参数及其他数据进行记录。
- 8.2.6 混凝土 3D 材料在泵送设备中采用连续振捣的方式，满足可挤出性要求。根据构件/建筑物尺寸要求、混凝土 3D 打印材料性能以及打印设备能力综合。
- 8.2.7 打印生产时应应对打印构件实时监测，控制打印参数，应确保材料挤出速度与打印速度匹配，上下层间隔时间不超过初凝时间，遇恶劣天气应暂停打印。
- 8.2.8 开始打印前，需对打印头进行清洁，防止材料残留堵塞喷嘴，影响打印效果；打印生产完成后应及时清洗搅拌设备、泵送设备和挤出设备。

8.3 养护存放

- 8.3.1 混凝土 3D 打印过程中面对高温、大风、低温等天气应制定相应措施，及时进行保湿、养护等。
- 8.3.2 宜对已打印完成且未达到终凝的混凝土采取喷雾保湿措施，防止早期开裂；大体积构件应采取温控措施，控制内外温差；冬季施工应采取保温措施，防止冻害；夏季施工可采用养护剂、喷雾保湿措施、薄膜覆盖养护，减少水分蒸发。
- 8.3.3 打印构件/结构的养护时间不应少于 14 d，应采取预防突然降温和快速干燥的措施。
- 8.3.4 养护期间应定期检查构件表面状况，防止开裂，检查内容包括表面湿度、裂缝发展等情况，并做好检查记录。
- 8.3.5 打印构件在存储场地养护时，宜按拼装顺序编号，并按吊运顺序安排位置。
- 8.3.6 构件堆放不得超过 3 层，支垫位置需对准受力点确保支撑合理，存放期间应定期检查构件状态。
- 8.3.7 打印构件预留钢筋应采取有效的防止锈蚀保护措施。

8.4 运输吊装

- 8.4.1 3D 打印混凝土构件的吊装与运输应编制专项方案，内容包括吊装与运输顺序、方法、措施、以及安全与环保要求。
- 8.4.2 吊装与运输前，应对作业人员进行详细的技术交底和安全培训。应遵循“慢、稳、准”的原则，避免构件承受冲击荷载或过大应力。
- 8.4.3 吊点设置应符合设计要求，保证构件在吊装过程中受力均匀、稳定。对于异形或特殊构件，应进行吊装工况下的承载力验算。
- 8.4.4 吊具、索具应根据构件重量、形状、吊装方法等条件进行选择，使用前应进行全面检查，确保其安全可靠。
- 8.4.5 吊装过程中应设置缆风绳等引导措施，防止构件摆动、旋转或与其他物体碰撞。
- 8.4.6 吊装与运输完成后，应再次对构件进行外观检查，确认无新增裂缝、缺棱掉角等损伤。如有损伤，应进行评估并按技术处理方案进行修复，并重新验收。
- 8.4.7 吊装就位后，应及时进行临时支撑或固定，确保构件稳定，待连接节点达到设计要求后方可拆

除。

9 质量检验与验收

9.1 基本规定

- 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 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 GB/T 50081 的规定。
- 9.1.4 应对 3D 打印混凝土构件进行全数外观质量检查，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 GB/T 50107 的规定；耐久性能检验评定应符合 JGJ/T 193 的规定。其中，冻融循环实验要求参照 GB 50204。
- 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，除应符合本标准要求外，还应符合 GB 50300、GB 50203、GB 50204 中的相关规定。
- 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。
- 9.1.12 3D 打印混凝土构件的吊装、转运时构件强度应满足设计要求；设计无要求时，应根据构件吊装受力情况确定，且不低于混凝土设计强度的 70 %。

9.2 检验项目

- 9.2.1 对工厂制备的 3D 打印混凝土构件，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。检验方法应符合以下要求：
- a) 检查数量：全数检查；
 - b) 检验方法：观察检查、检查出厂合格证及相关质量证明文件。
- 9.2.2 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。检验方法应符合以下要求：
- a) 检查数量：全数检查；
 - b) 检验方法：观察，检查技术处理方案。
- 9.2.3 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。施工方法应符合以下要求：
- a) 检查数量：全数检查；
 - b) 检验方法：观察，检查技术处理方案。
- 9.2.4 原位 3D 打印工程项目施工前应根据工程结构特点、施工条件等编制专项施工方案，并对施工人员进行技术交底。施工方法应符合以下要求：
- a) 检查数量：全数检查；
 - b) 检验方法：专项施工方案、技术交底书。

9.2.5 原位 3D 打印混凝土工程施工应确保实现设计要求，并符合现行国家标准规定。施工方法应符合以下要求：

- a) 检查数量：全数检查；
- b) 检验方法：施工组织设计、施工方案。

9.2.6 混凝土 3D 打印建筑和构件的外观质量允许偏差应符合表 6 中的规定。

表 6 混凝土 3D 打印建筑和构件外观质量允许偏差

序号	项目	允许偏差/mm	检验方法
1	长度	±10	尺量
2	宽度	±5	尺量
3	每层打印厚度	±5	尺量
4	高度	±10	尺量
5	对角线差	±5	钢尺量两个对角线
6	平整度	±5	靠尺或塞尺测量
7	壁厚	±5	尺量

9.2.7 对涉及混凝土结构安全的有代表性的部位应进行结构实体验收。结构实体验收应包括混凝土强度、钢筋保护层厚度、结构位置与尺寸偏差以及合同约定的项目。必要时可检验其他项目。检验方法应符合以下要求：

- a) 检查数量：按照 GB 50204 有关规定进行；
- b) 检验方法：结构实体验收记录。

9.2.8 原位 3D 打印混凝土的外观不应有严重缺陷及影响结构性能和使用功能的尺寸偏差。对已经出现的严重缺陷，应由施工单位提出技术处理方案，并经监理单位认可后进行处理；对裂缝或连接部位的严重缺陷及其他影响结构安全的严重缺陷，技术处理方案尚应经设计单位认可，对已经处理的部位应重新验收。检验方法应符合以下要求：

- a) 检查数量：全数检查；
- b) 检测方法：观察、检查处理记录。

9.2.9 原位 3D 打印混凝土结构不应有影响结构性能或使用功能的尺寸偏差；对超过尺寸允许偏差且影响结构性能或安装、使用功能的部位，应由施工单位提出技术处理方案，并经监理、设计单位认可后进行处理。对经处理的部位应重新验收。检验方法应符合以下要求：

- a) 检查数量：全数检查。
- b) 检验方法：量测，检查处理记录。

9.3 验收

9.3.1 混凝土 3D 打印工程验收时应提交包括但不限于：

- a) 工程设计单位确认的混凝土 3D 打印工程深化设计图，设计变更文件；
- b) 混凝土 3D 打印工程所用各种材料、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；
- c) 打印、安装施工验收记录；
- d) 连接构造节点的隐蔽工程检查验收文件；
- e) 后浇筑节点的混凝土或浆体强度检测报告；
- f) 分项工程验收记录；
- g) 混凝土 3D 打印工程实体验收记录；
- h) 工程的重大质量问题的处理方案和验收记录；
- i) 打印墙体的装饰、保温、接缝及防水检测报告；
- j) 其他质量保证资料。

9.3.2 混凝土 3D 打印工程应在施工过程中，完成下列隐蔽项目的现场验收：

- a) 钢筋的品种、规格、数量、位置和间距；
- b) 预埋件的规格、数量和位置；
- c) 钢筋连接方式、接头位置、接头数量；

- d) 混凝土 3D 打印结构与现浇结构连接处混凝土接茬面的尺寸；
 - e) 混凝土 3D 打印结构接缝处的防水、防火等构造做法。
- 9.3.3 混凝土 3D 打印工程中涉及装饰、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。
- 9.3.4 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。
- 9.3.5 不应验收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。
-