

DB61

陕西省地方标准

DB 61/T xxxx-20xx

中小跨径桥梁3D打印设计建造  
技术指南  
(征求意见稿)

Technical Guidelines for the Design and Construction of Small  
to Medium Span Bridges Using 3D Printing Technology

陕西省市场监督管理局 发布

目录

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 ..... 4

5 结构设计 ..... 5

6 材料 ..... 7

7 打印设备 ..... 10

8 打印与生产 ..... 10

9 施工安装 ..... 15

10 质量检验 ..... 17

11 工程费用测算 ..... 20

## 前 言

本标准由陕西省交通运输厅提出并归口。

本标准起草单位 XXX。

本标准由杨敏负责起草。

本标准由中交第一公路勘察设计研究院有限公司负责解释。

本标准首次发布。

## 1 范围

本文件提供了中小跨径桥梁 3D 打印设计建造的技术指南，从适用范围、术语和定义、基本规定、结构设计、材料、打印设备、打印与生产、施工安装、质量检验、工程费用测算等方面提出技术要求与建议。

本文件适用于全部或部分构件采用 3D 打印技术建造的设计、生产与施工的人行桥梁及公路-II 级以下荷载等级的车行桥梁。

## 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 50917-2013 钢-混凝土组合桥梁设计规范

GB 50010 混凝土结构设计规范

GB 50003 砌体结构设计规范

GB 50917 钢-混凝土组合桥梁设计规范

GB 13014 钢筋混凝土用余热处理钢筋

GB 175 通用硅酸盐水泥

GB 20472 硫铝酸盐水泥

GB/T 201 铝酸盐水泥

GB/T 1499.2 钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋

GB/T 14685 建筑用卵石、碎石

GB/T 14684 建设用砂

GB/T 21120 水泥混凝土和砂浆用合成纤维

GB/T 39147 混凝土用钢纤维

GB/T 9142 混凝土搅拌机

GB/T 50081 普通混凝土力学性能试验方法标准

JTG 3362 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范

JTG B01 公路工程技术标准

JTG D61-2005 公路圬工桥涵设计规范

JGJ18 钢筋焊接及验收规程

JGJ 63 混凝土用水标准

JTJ/T 465 钢纤维混凝土结构技术规程

CJJ 69 城市人行天桥与人行地道技术规范

CJJ 11 城市桥梁设计规范

CJJ 2 城市桥梁工程施工与质量验收规范

T/CECS 786-2020 混凝土 3D 打印技术规程

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件

#### 3.0

**混凝土 3D 打印**      **concrete 3D printing**

应用机电一体化技术通过挤出成型的方式将混凝土拌合物建造成三维结构的增材建造技术。

#### 3.1

**3D 打印系统**      **3D printing system**

完成混凝土 3D 打印所需要的硬件、软件、辅助工具和打印空间的合集。

#### 3.2

**打印平台**      **printing platform**

打印开始时提供工作基准面，并在打印过程中起承载打印实物作用的平面。

#### 3.3

**打印空间**      **print space**

3D 打印系统中，通常在打印平台上部，未被其他物体占用的、连续的、能

容纳打印实物的区域。

### 3.4

打印构件      3D printed element

将 3D 打印混凝土材料通过挤出堆叠工艺建造形成的硬化结构体。

### 3.5

打印条带      3D printed concrete

从 3D 打印头出料口挤出的均匀、连续的混凝土单个长条。

### 3.6

打印条宽度      filament width

单个打印条的挤出成型宽度。

### 3.7

打印头      print nozzle

3D 打印设备中混凝土挤出的末端装置。

### 3.8

打印路径      printing path

3D 打印设备打印头根据预先优化设计的程序执行指令行进移动时，打印头的程序控制点所形成的行进路径。

### 3.9

可打印性      printability

适用于混凝土 3D 打印施工的混凝土拌合物性能，包括流动性，可挤出性，可支撑性。

### 3.10

可挤出性      extrudability

3D 打印混凝土材料能够顺利通过打印头挤出而不引起堵塞或对材料性能造成显著影响的能力。

## 3.11

层间界面      horizontal interface between two adjacent filaments

3D 打印混凝土逐层堆叠过程中上下相邻打印条带形成的接触界面。

## 3.12

条间界面      vertical interface between two adjacent filament

3D 打印混凝土逐层堆叠过程中左右相邻打印条带形成的接触界面。

## 3.13

界面黏接强度      interlaminar bond strength

相邻 3D 打印混凝土层间或条间界面抵抗拉伸破坏的能力。

## 4 基本规定

4.0.1 3D 打印中小跨径桥梁应符合桥梁的功能要求以及桥梁结构的力学性能和耐久性能要求。

4.0.2 混凝土 3D 打印结构可按现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010) 或《砌体结构设计规范》(GB 50003) 的有关规定进行设计, 同时相关桥梁设计标准。

4.0.3 3D 打印中小跨径桥梁作为车行桥梁使用, 须满足《公路工程技术标准》(JTG B01) 对公路桥梁的技术要求及规定。

4.0.4 3D 打印中小跨径桥梁作为人行桥梁使用, 须满足《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69) 对活荷载、结构频率及耐久性的技术要求, 以及《城市桥梁工程施工与质量验收规范》(CJJ 2) 对材料性能与结构安全的规定。

4.0.5 中小跨径桥梁及其结构构件打印与施工安装, 需根据设计要求, 结合现场施工条件, 编制施工组织设计和专项实施方案, 通过专家评审后方可实施。

4.0.6 中小跨径桥梁 3D 打印设计交付, 除提交设计图纸外, 应同时交付三维数字模型。

4.0.7 3D 打印作业及施工人员应进行专业培训, 熟悉 3D 打印技术特点与 3D

打印结构工程特征。

4.0.8 3D 打印设计建造的中小跨径桥梁工程验收，可采用荷载试验、专家现场评审、专家会评等方式进行。

4.0.9 中小跨径桥梁 3D 打印设计建造，在满足工程建设技术要求的条件下，可积极推广使用新工艺、新材料、新设备。

## 5 结构设计

5.0.1 混凝土 3D 打印中小跨径桥梁主要包括混凝土 3D 打印桥、钢筋混凝土 3D 打印桥、预应力混凝土 3D 打印桥以及钢-混组合桥，多采用装配化施工技术建造。

5.0.2 混凝土 3D 打印桥主要采用 UHPC 或纤维混凝土材料打印，其设计按照混凝土结构进行设计，需进行独立的力学测试、仿真分析、现场实验等。

5.0.3 钢筋混凝土 3D 打印桥主要用于市政景观桥梁的打印建造，多采用拱式结构，结构设计参照《城市桥梁设计规范》（CJJ 11）、《公路圬工桥涵设计规范》（JTG D61）、《砌体结构设计规范》（GB 50003）执行。

5.0.4 采用 3D 打印工艺进行外壳或永久模板打印、内部浇筑填充钢筋混凝土的桥梁结构，3D 打印混凝土薄壳或打印模板部分以永久荷载（计入结构自重）计入，不参与主体结构体系受力分配，结构设计参照《城市桥梁设计规范》（CJJ 11）、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）执行。

5.0.5 采用 3D 打印工艺打印桥梁承载结构，按照砌体结构进行设计时，3D 打印混凝土材料力学性能指标实测值应高于砌块力学性能设计指标值 2.5 倍，且不低于 35MPa；界面黏接强度实测值高于砌缝力学指标设计值 1.6 倍。

5.0.6 预应力混凝土 3D 打印桥，采用 3D 打印工艺进行外壳或永久模板打印、内部浇筑填充钢筋混凝土的预应力桥梁结构，3D 打印混凝土材料性能应符合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）对混凝土强度、耐久性及收缩性能的规定，3D 打印混凝土薄壳或打印模板部分以永久荷载计入，不参与主体结构体系受力分配。



5.0.7 采用 3D 打印工艺打印桥梁承载结构的预应力混凝土桥梁，按照预应力混凝土结构进行设计，参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）时，须充分考虑层积打印工艺形成的材料各向异性以及界面黏接力学性能导致的强度折减，可按照 3D 打印混凝土材料力学性能指标实测值高于砌块力学性能指标设计值 2.5 倍且不低于 60MPa 进行材料设计指标取值。

5.0.8 钢-混组合结构 3D 打印桥，混凝土结构部分采用 3D 打印技术完成时，总体设计参照《钢-混凝土组合桥梁设计规范》（GB 50917），其中 3D 混凝土结构部分若为景观造型功能，建议按照永久荷载（计入结构自重）计入，不参与主体结构体系受力分配。

5.0.9 钢-混组合桥梁的钢梁可采用工字型、槽型或箱型截面等形式，钢梁构件设计和制作时，宜避免或减少应力集中、残余应力。

5.0.10 钢-混组合桥梁在钢与 3D 打印混凝土交界面应设置连接件，可采用焊钉或型钢连接件。

5.0.11 3D 打印中小跨径桥梁的设计，在满足相关设计规范的基础上，需在设计中同时综合考虑 3D 打印工艺特点、工艺导致的材料各向异性的特征以及施工安装便利性等因素，进行专项仿真计算分析。

5.0.12 混凝土 3D 打印的中小跨径桥梁结构和构造设计应便于后期维修、养护。

5.0.13 中小跨径桥梁上部结构可采用横向分片或纵向分段方式打印生产，结合打印工艺合理规划打印路径。

5.0.14 上部结构打印构件之间的连接设计，应确保连接部位能够安全传递结构设计内力，并在预期服役环境下满足必需的物理性能要求，包括但不限于长期耐久性、水密性及连接区材料性能与打印构件主体的协调性。

5.0.15 桥梁下部结构原则上不推荐采用 3D 打印混凝土直接建造；特殊情况下，对具有复杂艺术造型、传统模板施工难度较高的桥墩，可采用 3D 打印工艺进行外壳或永久模板打印、内部浇筑填充钢筋混凝土，结构设计参照现行相关标准执行，打印模板可按 50%比例参与结构受力。

5.0.16 3D 打印混凝土桥梁附属结构应进行专项设计，充分考虑打印结构层间粘

接强度及各向异性对结构性能的影响。

5.0.17 桥梁铺装结构具有平整、抗滑、耐磨、防水、界面粘接可靠、结构耐久等性能。

5.0.18 桥面应设置完善的排水设施，重视桥面防水层、粘接层的设置和材料的选择。

## 6 材料

### 6.1 钢筋

6.1.1 用于 3D 打印中小跨径桥梁的钢筋应符合现行国家标准《钢筋混凝土用钢 第 2 部分：热轧带肋钢筋》（GB/T 1499.2）和《钢筋混凝土用余热处理钢筋》（GB 13014）。

6.1.2 打印构件的钢筋连接方式为便于打印施工，宜采用焊接连接。

6.1.3 钢筋焊接应符合现行行业标准《钢筋焊接及验收规程》（JGJ 18）的有关规定。

### 6.2 混凝土

6.2.1 中小跨径桥梁 3D 打印设计建造所用混凝土材料主要包括三类：3D 打印混凝土，用于填充的普通混凝土，用于填充的预应力混凝土。

6.2.2 3D 打印混凝土的原材料包含：水、水泥、骨料、纤维、矿物掺合料、外加剂等材料。

6.2.3 3D 打印混凝土用硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥及铝酸盐水泥等应分别符合现行国家标准《通用硅酸盐水泥》（GB 175）、《硫铝酸盐水泥》（GB 20472）、《铝酸盐水泥》（GB/T 201）的有关规定。

6.2.4 3D 打印混凝土用骨料，骨料粒径不宜超过打印头出料口内径 1/4，且不宜超过 20mm。粗骨料应符合现行国家标准《建筑用卵石、碎石》（GB/T 14685）的有关规定。细骨料应符合现行国家标准《建设用砂》（GB/T 14684）的有关规定。当根据项目具体需求，配置 3D 打印混凝土材料所用骨料粒径超过 20mm 时，

须进行打印设备的打印测试实验，并开展打印构件力学性能评估实验。

6.2.5 3D 打印混凝土用合成纤维性能应符合现行国家标准《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》（GB/T 21120）的有关规定。

6.2.6 3D 打印混凝土用钢纤维应符合现行国家标准《混凝土用钢纤维》（GB/T 39147）和《钢纤维混凝土结构技术规程》（JTJ/T 465）的有关规定。

6.2.7 3D 打印混凝土用矿物掺合料应符合现行国家标准，并进行试验验证。

6.2.8 3D 打印混凝土用水及养护用水应符合现行行业标准《混凝土用水标准》（JGJ 63）的有关规定。

6.2.9 3D 打印混凝土配置完成，在使用前须进行上机打印测试，保证其可打印性；进行物理力学性能试验，确保其物理力学性能满足要求。

6.2.10 用于中小跨径桥梁结构的 3D 打印混凝土材料强度应不低于同等条件下浇筑工艺混凝土材料强度指标的 1.5 倍或采用打印标准件进行测试，三个方向强度最小值不低于浇筑工艺测试强度的 95%。

6.2.11 采用外部打印永久模板，内部填充混凝土的构件，填充混凝土材料的力学性能指标应按现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）执行。

6.2.12 3D 打印混凝土材料配合比设计在满足力学性能要求的基础上，须充分考虑 3D 打印工艺要求，保证新拌混凝土可打印性、具体打印项目对凝结时间的需求以及与打印设备的适用性。

6.2.13 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。

6.2.14 3D 打印混凝土的原材料、半成品、成品的质量标准，应按国家现行标准执行。

6.2.15 3D 打印混凝土中加入外加剂时，外加剂的品种和掺量应通过试验确定。

6.2.16 3D 打印混凝土配合比设计的水胶比可根据混凝土的设计强度按表 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	C20	C30	C40	C50	C60
水胶比	0.40-0.46	0.36-0.42	0.34-0.40	0.30-0.36	0.28-0.34

6.2.17 3D 打印混凝土配合比设计的胶凝材料和骨料的用量可参考以下因素进行调整确定：

- A) 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；
- B) 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。
- C) 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；
- D) 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

6.2.18 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可参考表 4 掺量。

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
磷渣粉	30	20	10	20
硅灰	10	10	10	10
复合掺合料	50	45	20	30

7 打印设备

7.0.1 用于中小跨径桥梁 3D 打印的设备一般包括：混凝土搅拌设备、输料设备、3D 打印设备。

7.0.2 混凝土搅拌设备应符合现行国家标准《混凝土搅拌机》（GB/T 9142）的技术要求。若采用无粗骨料的 3D 打印混凝土材料，可参照砂浆搅拌机相关技术要求进行打印设备参数调整，可根据打印具体需要适当延长搅拌时间，保证搅拌均匀。

7.0.3 输料设备一般可根据材料特征选择螺杆泵或活塞泵。设备输送量应具有可调节能力、不易发热、易清洗且设备输料过程对 3D 打印材料性能无影响等特征。

7.0.4 3D 打印设备应满足如下要求：

- A)在打印作业空间内，可进行任意点的定位且打印头可到达；
- B) 作业尺寸小于 10m×10m×3m，打印设备总体重复定位精度±1mm；作业尺寸大于 10m×10m×3m，打印设备总体重复定位精度±2mm；
- C) 设备打印速度、材料挤出流量、打印头空间位置可控制，可实时调节；
- D) 设备内外部混凝土接触面，易清理、易清洗。

7.0.5 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。

8 打印与生产

## 8.1 一般规定

8.1.1 打印与生产包含作业准备、打印生产、养护与质量检查等环节，应符合设计文件的要求。打印生产前，须编制桥梁或桥梁构件 3D 打印专项实施方案，并对作业人员进行技术交底。

8.1.2 桥梁或构件打印生产应进行全程的质量管理。

8.1.3 打印现场应具有充足的作业场地、供水、供电条件。

8.1.4 混凝土 3D 打印设备作业区禁止非作业人员进入，确保作业厂区的作业人员安全管理。

## 8.2 打印工艺

8.2.1 路径规划需根据桥梁的结构构造、主要受力特点以及打印设备的单次成型尺寸、打印作业条件，合理分块、分层、分区，进行打印路径设计。装配式桥梁构件的打印，须明确打印顺序和精度控制，确保分段打印后的模块能够精确对接与连接。

8.2.2 路径规划中需确保 3D 打印混凝土实体结构在打印时打印条带紧密搭接无缝隙与空洞，一般多采用在路径规划中重叠路径间隔宽度的方式消除搭接缝隙，即路径间隔 $\leq$ 打印头出料嘴内径，实际重叠量可结合打印材料性能通过上机测试确定。

8.2.3 打印工艺参数应在完成打印路径规划后，选择合适的打印机挤出头类型，具有与打印构件匹配合理的形状及尺寸，须在上机测试后确定合适的打印速度、材料挤出速度、材料凝结时间调整幅度以及材料拌合进度等关键打印参数。

8.2.4 打印工艺参数设定中须特别重视界面时间间隔，层间界面及条间界面时间间隔均不得超过打印材料初凝时间。

8.2.5 对于桥梁的复杂结构或悬挑部分，工艺设计需要考虑支撑结构的设计。应根据桥梁形状及打印工艺，设计必要的支撑结构，以避免打印过程中出现变形或倾斜。

8.2.6 在工艺设计中，宜考虑环境因素的影响，如温度、湿度、风力等对打印过程的影响，原位打印宜考虑加装防护罩调节打印环境，确保打印质量。

8.2.7 对于打印构件配筋，须根据构件打印方案及路径规划具体情况，在打印前进行配筋方案设计，必要时进行钢筋孔位预留以及钢筋搭接方案设计。

8.3 材料准备

8.3.1 混凝土打印材料拌合前，须认真检查原材料性状及存储状态。水泥应按照品种、强度等级和生产厂家进行分类存储，防止受潮。骨料按照品种、规格进行分类堆放，防雨防油污。矿物掺合料应按照品种、厂家分类存储，防止受潮。外加剂应按品种、厂家分类科学存储，确保使用性能。

8.3.2 用于配制 3D 打印混凝土的水泥应该对其品种、代号、强度等级、包装或散装编号、出厂日期等进行检查，并对水泥的强度、安定性和凝结时间进行检验。

8.3.3 用于配制 3D 打印混凝土的外加剂应对其品种、性能、出厂日期等进行检查，并对外加剂的相关性能进行检验。

8.3.4 混凝土 3D 打印材料拌制时间不小于 3min，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，颜色一致，不应有离析和泌水现象。

8.3.5 冬季施工，低温打印前，应对 3D 打印混凝土材料配合比进行实验室验证。

8.3.6 3D 打印混凝土材料要进行可打印性测试，确保材料的流动性、可挤出性以及可支撑性。

8.3.7 混凝土 3D 打印材料的挤出性应符合打印条带无中断或不连续等现象。

8.3.8 3D 打印混凝土材料不应离析和泌水，凝结时间应满足可打印时间的要求。

8.3.9 3D 打印混凝土材料的流动性、可挤出性和支撑性宜符合表 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/mm	

		≤5	5~16	
流动性	流动度（mm）	160~220	--	参照GB/T 2419
	坍落度（mm）	--	80~150	参照GB 50080
可挤出性		连续均匀、无堵塞、无明显拉裂		观察
支撑性		挤出后形态保持稳定且不倒塌		观察

8.4 设备准备

8.4.1 依据桥梁规模、施工方式、单次成型构件尺度、材料特性等，选择适合的打印设备。

8.4.2 在开始打印之前，需对 3D 打印设备及系统进行全面检查，必要时进行设备调试，确保设备可正常工作。

8.4.3 设备打印作业空间周围应设置必要的安全防护措施，如警示标示、消防设备等。作业前应确保打印设备作业空间无人、无杂物。

8.4.4 检查打印设备设置参数、打印头的出料口尺寸，确保与打印构件所需参数一致。

8.5 作业准备

8.5.1 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。

8.5.2 打印生产前应使用水平仪对打印平台表面进行测量，确保其误差在规定时间内，最大误差不超过单层打印厚度。

8.5.3 打印生产前应根据桥梁构件尺寸要求、混凝土 3D 打印材料性能以及打印设备能力综合确定打印速率、打印高度、打印条宽、打印厚度等工艺参数，并在进行实验室打印测试，验证关键参数。

8.5.4 打印生产应执行首件试制制度，对首件进行全面总结与检验，合格后方可进行批量化打印生产。

8.6 打印生产

8.6.1 打印生产时应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。



8.6.2 打印过程中应确保混凝土 3D 材料在泵送设备中连续稳定输出。

8.6.3 打印生产时应对打印构件实时观测，并通过打印控制系统监控打印设备运行状况，实时调节打印参数，确保构件打印质量。

8.6.4 在打印过程中，如发生设备故障或出现挤出料条、构件质量缺陷等情形，应立即调整或停止打印作业，待问题消除并经确认后，方可继续打印。

8.6.5 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。

## 8.7 养护

8.7.1 构件打印过程中，可对已打印的坯体采取喷雾保湿措施。

8.7.2 打印构件养护时，宜按拼装顺序编号，并按吊运顺序安排位置。

8.7.3 应根据混凝土 3D 打印材料性能、环境条件、水泥品种等要求制定具体的养护方案，打印构件生产完成宜采用蒸汽养护，养护时间不宜小于 8h，蒸汽养护结束后开展喷淋保湿养护。

8.7.4 喷淋保湿养护时间不宜少于 7d。

8.7.5 打印构件预留钢筋应采取有效的防止锈蚀保护措施。

## 8.8 出厂检查

8.8.1 对于运输安装前的打印构件应进行外观检查，检查其形状、尺寸、平整度是否满足构件生产要求。对于打印构件进行留样抽检，其层间粘结力应满足设计要求。

8.8.2 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 75%。

8.8.3 3D 打印混凝土用钢筋加工的形状、尺寸及其偏差应符合设计要求。

8.8.4 3D 打印混凝土构件的预埋件、插筋、预留孔的规格、数量、位置应符合设计要求。

8.8.5 桥梁打印构件出厂检验应满足表 6 要求。

表6 桥梁打印构件出厂检验指标

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
构件强度（MPa）	≥设计值	按 JTG F80/1-2017 附录 D 检查
打印条带宽度（mm）	≤5	尺量：每层不少于 3 个测点，每 50 层测量一次
打印层厚度（mm）	≤2	尺量：每层不少于 3 个测点，每 50 层测量一次
预埋件位置（mm）	≤5	尺量：每件
断面尺寸（mm）	±10	尺量：测 3 个断面

8.8.6 3D 打印混凝土构件检查合格后，应在构件上设置标识，标识内容包括工程名称、构件型号、生产日期、合格标识、生产单位等信息。

8.8.7 打印构件出厂时应提供主要工艺试验报告、施工安装图、发货清单等文件。

9 施工安装

9.1 一般规定

9.1.1 打印桥梁进行施工安装前，应进行必要的施工方案设计，制定施工详细的施工过程管理方案及实施措施。

9.1.2 构件安装前应对沿途道路通行能力、桥梁承载能力进行评估，选择合理的运输载具与运输路线，并应符合地方关于大件运输政策的相关要求。

9.1.3 打印构件吊运时 3D 打印混凝土的强度应符合设计规定；当设计未规定时，应不得低于设计强度等级的 90%。

9.1.4 打印构件吊点的位置应满足设计要求，设计无明确要求时，应经计算确定。

9.1.5 打印构件安装就位并检查校正后，方可进行拼接固定。

## 9.2 运输

9.2.1 3D 打印构件的吊装运输，应尽量保持层积方向始终处于受压状态，避免运输过程中出现较大拉应力。

9.2.2 运输方案应根据桥梁各构件的尺寸、重量及运输路线进行合理规划。设计时要考虑运输路径的可行性，包括道路宽度、桥梁承载能力、地形地势等因素。

9.2.3 打印构件运输过程中应采取必要的固定、缓冲措施，以防止打印构件损伤。

9.2.4 完成运输后，应对桥梁构件进行详细检查，确保在运输过程中未出现裂纹、变形等损伤。

9.2.5 根据桥梁构件的尺寸和重量，选择合适的运输工具。对于大跨度或重型构件，宜选择大型低床半挂车或起重运输车。

## 9.3 施工安装

9.3.1 打印构件生产完成后在工厂内进行出厂检验，检验合格后运至施工现场。打印构件面层涂装宜在桥体安装完成后进行。

9.3.2 安装前应对临时支架、支撑、吊机等临时结构、设备和打印构件本身在不同受力状态下的强度、刚度和稳定性进行验算。临时支架的地基或基础应有足够承载力。

9.3.3 安装前应对承台、墩身、支座的平面位置与高程进行复测，合格后方可进行起吊安装。

9.3.4 打印构件安装前应对节段拼接缝进行表面处理，确保表面无油、无水及无可见灰粉。

9.3.5 安装现场应加强安装精度与接缝质量控制，提出质量保证措施，制定防范技术对策。

9.3.6 施工安装过程宜进行必要的过程监测或施工监控，确保施工过程安全可靠，桥梁安装完成，总体线形达到设计要求。

9.3.7 湿接缝或灌浆料强度达到设计要求后，方可进行下一步安装或后续作业。

## 10 质量检验

### 10.1 一般规定

10.1.1 中小跨径桥梁 3D 打印设计建造应执行国家法律法规及相关技术标准，按照设计文件进行施工，满足桥梁结构安全、耐久性能及使用功能要求。

10.1.2 中小跨径桥梁 3D 打印设计建造工程施工中所采用的承包合同文件和工程技术文件等对施工质量的要求不应低于本文件的规定。当高于本文件的规定时，应按合同文件 and 设计要求进行验收。

10.1.3 本文件未涉及的新技术、新工艺、新设备新材料的使用，其施工质量的检验应符合设计要求和相关标准的规定。

10.1.4 中小跨径桥梁 3D 打印设计建造工程施工质量的检验除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。混凝土 3D 打印中小跨径桥梁的工程验收，应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》（GB 50204）或《砌体结构工程施工质量验收规范》（GB 50203）的有关规定。用于市政、公路工程的桥梁，还应满足市政工程、公路工程相关工程质量验收标准。

10.1.5 桥梁的每个结构、构件均应进行外观质量检查和尺寸偏差检验，另有规定的除外。

10.1.6 结构复杂和承载能力需要验证的中小跨径 3D 打印桥梁应进行荷载试验，试验结果应满足设计要求和符合相关技术规范的规定。

10.1.7 静载试验。通过逐步施加荷载，监测桥梁的变形、应力和裂缝发展，验证其结构稳定性和设计安全性。主要控制指标包括最大变形量、裂缝宽度、承载力等。该方法适用于评估桥梁在静态荷载作用下的承载能力和变形特性。

10.1.8 动载试验。通过施加振动荷载或模拟车辆通过等动态负荷，监测桥梁的振动频率、加速度和变形情况。主要控制指标包括振动幅度、固有频率、动应力和疲劳强度等。该方法适用于评估桥梁在动态荷载下的响应性能，如交通荷载、风荷载等。

10.1.9 尺寸与几何精度检测。使用三坐标测量机（CMM）或激光扫描等高精度

测量工具，对 3D 打印成品的尺寸精度进行检测。该方法适用于检查结构的几何尺寸、打印层次的对齐、节点连接部位的配合度等。

10.1.10 目视检查。通过检查打印成型的表面质量、几何形状、打印层次及接缝等来判定是否存在明显的缺陷。此方法适用于检查大范围的结构外观和明显缺陷。

10.2 检验标准与控制指标

10.2.1 桥梁打印质量应进行全面检查，并满足规定要求，否则该检验项目为不合格。

10.2.2 打印桥梁硬化混凝土的力学性能应符合设计要求，试验方法应符合现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》（GB/T 50081）的规定。打印强度折减率和层间粘结强度宜符合表 7 的规定。

表7 硬化混凝土性能技术要求

项目	技术要求	
打印强度折减率/%	≤20	
层间劈裂抗拉强度/MPa	C20	1.0
	C30	1.5
	C40	2.5
	C50	4.0
	C60	5.0
层间粘结强度/MPa	≥1.5	

10.2.3 打印桥梁外观质量应进行全数检查。

10.2.4 外观质量检查前，构件的表面不宜进行涂饰。

10.2.5 打印桥梁外观质量的限制缺陷不应存在表 8 所列。

表8 打印桥梁外观缺陷

名称	现象	限制缺陷
裂缝	缝隙从混凝土表面延伸至混凝土内部	主要受力部位有影响结构性能或使用功能的裂缝，其他部位裂缝宽度≥

		0.2mm
外形缺陷	缺棱掉角、棱角不直、翘曲不平	有影响使用功能或构件安装的外形缺陷
其他表面缺陷	构件表面掉皮、起砂、沾污等	缺陷超过所在面面积的 2%。

10.2.6 桥梁打印构件施工指标应满足表 9 所列。

表9 桥梁打印构件施工控制指标

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
轴线偏位（mm）	≤10	全站仪：每施工节段测顶面边线与两轴线交点
湿接头混凝土强度（MPa）	在合格标准内	按 JTG F80/1-2017 附录 D 检查
节段间错台（mm）	≤5	尺量：测每节每侧面

10.2.7 桥梁总体测量控制指标除满足现行标准外，还应满足表 10 要求。

表10 桥梁总体测量控制指标

检查项目	规定值或允许偏差	检查方法和频率
桥面中线偏位（mm）	≤20	全站仪：每 5m 测一点，且不少于 3 点
桥面宽（mm）	±10	尺量：每 5m 测一个断面，且不少于 5 个断面
桥长（mm）	±50	全站仪或钢尺：检查中心线处
桥面高程（mm）	±30	水准仪：桥面每侧每 10m 测 1 点，且不少于 3 点；跨中、桥墩（台）处应布置测点

10.2.8 打印桥梁混凝土表面防护应符合下列基本要求

- A) 防护涂层及表面防护施工应在验收合格龄期 28d 或设计要求的龄期进行；
- B) 混凝土构件表层应坚固、清洁，无灰尘、油迹、霉点、盐类析出物等污物和松散附着物，含水率应满足涂层材料的要求；
- C) 施工环境条件应满足涂层材料的要求，按设计要求的涂装道数和涂膜度进行施工，上道涂层检查合格后方可进行下道涂层施工。

10.2.9 打印桥梁混凝土表面防护外观质量应无漏涂、剥落、气泡和裂纹。

10.2.10 打印桥梁安装砌缝应无孔洞、宽缝、大堆砂浆填隙和假缝。

10.2.11 桥梁附属结构连接应稳固，3D 打印混凝土材质附属结构应无明显错台、无缺棱掉角。

10.2.12 有带裂缝的桥梁 3D 打印结构宜按下列情况进行验收：

- A) 对不影响结构安全的裂缝，建议予以验收，对明显影响使用功能和观感的裂缝，应进行处理；
- B) 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。

## 11 工程费用测算

11.0.1 3D 打印工程费用项目由直接费、间接费、利润、编制基准期差价和税金组成。

11.0.2 打印构件生产费用按清单工程量乘以综合单价计算。依据打印构件种类和打印工艺进行组价。包括数字模型设计、机械、材料、打印人工等项目。

11.0.3 打印构件工程量计算宜按以下规则：

- A) 桥梁主体打印构件按数字模型尺寸以实际体积乘以 1.15 的打印损耗进行计算；
- B) 桥梁附属打印构件按体积及块件数量 1.05 计算。

11.0.4 对于打印构件单独吊装工程，必须明确垂直运输机械、脚手架工程等措施项目的报价或预算、结算方法。

11.0.5 对于 3D 打印设备费、材料费等无定额项目，可由不少于三家单位的市场询价作为单价基础进行计价。

11.0.6 3D 打印桥梁各项取费标准，应充分考虑新技术、新设备、新材料、新工艺的探索性成本。

11.0.7 对于科技创新应用示范工程应充分考虑科技创新成本，试制设备等成本

费用。

11.0.8 对于有明确强度及工程技术要求的桥梁用 3D 打印混凝土材料取费不低于普通打印混凝土市场调研费用的 1.8 倍，不高于市场调研价的 4.5 倍。