

陕西省地方标准

《中小跨径桥梁 3D 打印设计建造技术指南》

（征求意见稿）

编制说明

中交第一公路勘察设计研究院有限公司

2025 年 06 月

目录

1	工作概况	1
1.1	任务来源	1
1.2	目的意义	1
1.3	主导单位	2
1.4	标准制定的前期基础工作	3
1.5	起草组成员及其所作的主要工作	7
1.6	主要工作工程	8
2	标准编制原则及主要内容	10
2.1	编制原则	10
2.2	标准编制技术路线	11
2.3	主要技术内容	11
2.4	标准质量控制	12
2.5	拟制订地方标准与国内外已有同类标准对比情况	12
3	实证研究	13
3.1	材料设计	13
3.2	工艺设计	18
3.3	打印与生产	20
4	知识产权说明	24
5	采标情况	24
6	重大意见分歧的处理	24
7	贯彻本标准的要求和措施建议	24

《中小跨径桥梁 3D 打印设计建造技术指南》

（征求意见稿）

编制说明

1 工作概况

1.1 任务来源

根据《陕西省市场监督管理局关于下达 2024 年第二批地方标准制修订计划的函》（陕市监函（2024）590 号），由省交通运输厅推荐的“中小跨径桥梁 3D 打印设计建造技术指南”等 26 项交通运输地方标准（详见附件）获批立项。由中交第一公路勘察设计研究院有限公司作为第一承担单位，联合长安大学、西安建筑科技大学、东南大学、尧柏特种水泥技术研发有限公司、西安市常宁新区开发建设管委会、中交第二公路工程局有限公司、陕西交通科技有限公司开展编制工作

1.2 目的意义

近年来，随着我国社会的稳固发展和经济的稳态增长，人口红利的逐步消失带来了建造行业劳动力日益短缺，人力成本逐步上升的严重问题。为解决目前存在的突出问题，在国家相关政策的积极指引下，建筑工业化在我国逐步发展起来，我国的建造产业转型升级有了新的机遇和目标。将在制造行业内应用比较成熟的 3D 打印技术与传统建造行业相结合，已经成为促进传统建造行业转型升级以及实现智能建造的关键技术。虽然桥梁 3D 打印建造技术在各个企业和高校正如火如荼的研发和应用，技术成熟度表现十分良好，但大多数企业的研究应用均是结合企业的实际需求与项目情况进行个性化研究和应用，尚未形成标准化管理和技术要求，无法真正体现出这项先进技术在中小跨径桥梁建造的潜力和持续性。

为规范中小跨径混凝土桥梁 3D 打印设计建造技术的材料要求、结构设计、工艺流程及质量评定等环节，保障 3D 建造技术在桥梁工程实践中的可靠性、安全性和持续性，深化 3D 打印建造的标准化、精细化管理，制定本技术指南。中小跨径混凝土桥梁 3D 打印设计建造技术指南的编制对于促进行业技术的发展，提升产品质量和生产效率都有着重要的意义，是实现桥梁建造走向智能建造转型的关键步

骤之一。本标准编制的目的和意义主要体现在以下几个方面：

（1）规范行业标准，确保技术稳定性和可持续性。制定本标准有助于建立统一的桥梁 3D 打印建造行业标准和规范，从材料选择到工艺流程，再到质量评定，都能够明确规定标准和要求，为企业明确的技术指导，为市场监管提供质量管理的有效手段，确保 3D 打印桥梁工程符合国家标准和质量要求。

（2）提升工程质量，降低安全隐患。通过规范中小跨径混凝土桥梁 3D 打印设计建造技术的材料要求、结构设计、工艺流程等环节，能够有效提高工程的质量和可靠性，减少施工过程中可能出现的质量问题和安全隐患，保障桥梁工程的长期稳定运行。

（3）加强标准化管理，提高建造效率。通过本标准的编制，可以对桥梁构件的打印生产进行规范化、标准化管理，降低技术复杂度，减少建造过程不必要的环节，促进行业健康发展，降低施工风险。

（4）推动产研融合，服务交通基础设施。3D 打印建造技术是智能建造领域未来发展的趋势，通过本标准的编制，可以鼓励企业采用先进的智能技术和设备，将科技成果快速转化为实际生产力，推动技术创新和产业升级，提高行业的整体竞争力，促进公路工程高质量建设。

（5）促进绿色建造和可持续发展，增强国际竞争力。编制本技术指南可以促进中小跨径混凝土桥梁 3D 打印设计建造的节能减排，推动 3D 打印技术与循环经济理念相结合，包括优化设计、减少材料消耗、降低能源消耗等方面的要求。

本标准将主要规定中小跨径混凝土桥梁 3D 打印设计建造技术的范围、术语及定义、设计、打印与生产、施工安装、质量检验、工程费用测算相关技术要求。标准的制定将实现中小跨径 3D 打印建造标准化，确保 3D 打印桥梁工程质量，以更好地服务和适应桥梁建设需求。本规范适用中小跨径混凝土桥梁的 3D 打印建造，其他类型桥梁或建筑物 3D 打印可参照使用。

1.3 主导单位

中交第一公路勘察设计研究院有限公司隶属中国交通建设股份有限公司，是我国公路工程勘察、设计、研究、咨询领域大型骨干企业，在全国交通系统最早跻身“中国勘察设计单位综合实力百强”之列。中交一公院在国内外享有崇高声

誉的公路勘察设计公司。公司现有职工近 3000 人，固定资产规模 10 亿元，年新签合同额超过 20 亿元。业务范围涵盖公路、桥梁、隧道、沿线设施、交通工程、工业与民用建筑，工程地质勘察、设计和咨询，国（境）外工程的勘测、咨询、设计和监理项目，能够独立承担国（境）内外高等级公路、复杂结构大型桥梁、特长隧道等的勘察设计及监理咨询业务，具备大型公路工程项目代建和设计施工总承包能力。

中交第一公路勘察设计院在公路桥梁、隧道工程及交通安全等领域取得了丰硕的研究成果，完成了多项国家及省部级科研项目，积累了丰富的科研经验。承担各类纵横向科技开发项目 200 余项，其中：省部级以上重大科技项目 50 多项，国家及行业标准规范制修订 100 项（次）。共获得省部级以上科技进步奖、工程技术创新奖各类科技奖励 300 余项，其中国家科技进步奖 8 项（一等奖 3 项、二等奖 5 项）。拥有国际专利、国家专利、计算机软件著作权授权 140 余项。

中交第一公路勘察设计院于 2016 年成立专职研发机构“结构智能建造研发中心”开展 3D 打印智能建造技术研究，主要致力于包括混凝土 3D 打印技术在内的工程结构智能建造技术的研发及推广应用。建立了“创新团队+专职研发中心+实验室+智能工厂”四位一体的从技术研发到成果孵化的创新模式，形成了涵盖 3D 打印智能建造全链条的技术体系。目前已取得的科研成果主要包括：完全自主开发了三类 3D 打印水泥基材料、五代混凝土 3D 打印头，混凝土 3D 打印控制系统、混凝土 3D 打印路径规划系统以及混凝土 3D 打印质量控制技术体系，并进行了相应的工程测试及应用实践，研发成果在打印质量控制、精度控制以及打印能力方面的部分核心技术超越国内顶尖高校及相关研发机构，达到国际先进水平。

1.4 标准制定的前期基础工作

承担单位在 3D 打印智能建造、桥梁建造等领域共参编行业规范 8 项。在技术创新的同时，狠抓成果转化与服务集团主业，依托相关科研项目，诸多研究成果国内在机荷、沿江、惠盐、四川久马、山东济青中线、石家庄复兴大街市政化改造项目等国内特大高速工程项目中参与了科研策划，数字化设计提升等，积极开展技术的升级开发，加快技术的持续性、应用性、通用性的深度研究与发展。近三年实施且具有代表性的项目展示如下：

（1）京藏高速公路特色化建设

G6 京藏高速公路那拉段是我国首条连接西藏自治区首府拉萨和藏北草原的高速公路，平均海拔 4500 米，是世界上海拔最高的高速公路。该项目既是促进藏北地区综合资源开发、经济社会发展的交通要道，更是各民族交往交流交融的通道。研发中心积极参与项目设计建造，承担了羊八井隧道和当雄隧道的区域特色文化融入与景观提升工程。中心采用数字化三维设计技术，分别以白色哈达和五彩哈达为原型，其中曲线以宝伞画样曲线原型为边界，通过算法生成褶皱的质感，在羊八井隧道和当雄隧道洞门设计中实现特色化、系列化的文化符号融入及景观提升。采用 3D 打印技术，呈现两种表面肌理融合在一起象征文化民族交融多样，自然舒展的曲线形态给进藏人带来神圣舒心的感受，得到建设主管部门的高度评价，提升了高速公路的区域特色与文化认同。该项技术将可以在高速公路附属设施中进行广泛的推广应用。



图 1-1 京藏高速公路羊八井隧道、当雄隧道 3D 打印洞门

（2）中交科技城高端产业集成区项目

中交科技城高端产业集成区项目是陕西首座以科技产业为要素，以交通行业为应用依托的交通科技小镇。围绕传统产品的升级换代和新产品的跨界应用，在智能制造、新材料、信息技术、人工智能、新能源等各个领域与交通产业相融合的园区项目。研发中心配合园区定位，结合园区功能与中交集团文化定位，采用 3D 打印技术，建造了园区“ZJKJ”景观小品、冻胀丘、特色树池、花坛等硬质景观，目前正在积极推进西北地区最长 3D 打印人行景观桥项目。该项目以路、桥、隧为设计意向，凸显中交文化特色，基于智能参数化算法，以基础几何形体，沿中轴线旋转形成螺旋肌理，生成式设计而成的一座人行景观桥。通过 3D 打印技术的应用，全面提升了园区建设的文化景观品质。奠定了 3D 打印技术在各类园区建设中广泛应用的经验与样板。



图 1-2 中交科技城产业园区 3D 打印硬质景观

(3) 中交一公院总部办公基地项目

中交第一公路勘察设计研究院项目总部办公基地（生产大楼）位于西安市高新区科技四路，是集生产、科研及办公于一体的现代化大楼，投入使用后有效助力高新区营商环境建设，有效优化办公环境，对促进央企在陕发展起到积极作用，同时也将成为西安高新区又一处地标性建筑。研发中心采用 3D 打印技术，进行了园区各个出口大门、全部围墙的设计建造。项目应用自主研发的混凝土打印材料、升级迭代的第五代打印工具端以及独立开发的混凝土 3D 打印软硬件一体化控制系统，以及特色自有路径算法，实现了 769 根高度为 2.2 米的根细长薄壁异形立柱批量化打印成型，群组混凝土立柱组成山峦起伏的围墙，呈现内外景不同，内有“万千奉献修路人”，外展“高原两路如飘带”，弘扬中交两路精神，体现园区特色亮点。该示范工程建成后将成为国内首个混凝土 3D 打印文化围墙。





图 1-3 3D 打印围墙、大门项目

(4) 西安市常宁新区考古公园景观桥

西安市常宁新区考古公园景观桥项目位于西安市终南大道与文苑南路交汇处，考古博物馆西南侧公园内，背靠考古博物馆，是西北地区首座 3D 打印人行景观桥梁。该项目以古建筑中瓦当波纹式屋顶为灵感来源，通过简化设计形成扶手与侧墙的肌理，结合混凝土 3D 打印技术设计建造。拱桥跨度 19.98 米，拱圈跨度 12 米，桥面原型为正弦曲线，拱圈为圆弧线，俯视桥身为双开口曲线，在通道入口处放大，桥中走道最小宽度 3.5 米。该项目借鉴古典元素，采用中国传统几箱回字文作为设计元素，呈现出新技术展示传统文化的桥梁设计建造特色。本项目的实施，为 3D 打印技术在工程建设领域的特色化建造、弘扬中国传统文化的景观化建造、仿古建筑建造积累了经验，开拓了市场方向。



图 1-4 3D 打印人行景观桥

(5) 西安市中交科技城空间双曲 3D 打印桥项目

空间双曲面混合结构 3D 打印景观桥位于西安市中交科技城产业园区，是目前世界跨度最长的钢混组合结构 3D 打印景观连续梁桥，该项目以路、桥、隧为设计意向，基于智能参数化算法，以基础几何形体，沿中轴线旋转形成螺旋肌理，生成式设计而成的一座人行景观桥。全长 30 米，共计 7 跨，采用钢混组合结构

对景观桥进行建造设计，桥身采用混凝土 3D 打印技术完成曲面桥身打印，通过钢结构将桥面支撑。该桥作为空间曲面 3D 打印建造成套技术的应用示范项目，展示混凝土 3D 打印材料、装备、工艺等全套技术成果，进一步推动技术成果的产业化应用。



图 1-5 空间双曲 3D 打印桥

1.5 起草组成员及其所作的主要工作

起草组组长：杨敏。主要工作：对标准编制进行全面审核；参与室内试验，对一些关键指标进行研究；组织定期召开标准编制讨论会议，研究进展和实施深度，并根据标准编制进展情况对下阶段重点工作进行布置。

起草组副组长： 。主要工作：对标准编制进行全面审核；负责室内试验，对一些关键指标进行研究。

起草组副组长： 。主要工作：对标准编制进行全面审核；负责室内试验，对一些关键指标进行研究。

起草组成员： 。主要工作：参与编制本标准；负责试验段现场指导，对一些关键指标进行研究。

起草组成员： 。主要工作：参与试验段现场指导；参与试验段现场指导与室内试验，对一些关键指标进行研究。

起草组成员： 。主要工作：参与编制本标准；参与试验段现场指导与室内试验，对一些关键指标进行研究。

起草组成员： 。主要工作：参与编制本标准。

起草组成员： 。主要工作：参与编制本标准

1.6 主要工作工程

1.6.1 调研与稿件研讨情况

2024 年 3 月，标准编制主导单位联合长安大学、西安建筑科技大学、东南大学、尧柏特种水泥技术研发有限公司、西安市常宁新区开发建设管委会、中交第二公路工程局有限公司、陕西交通科技有限公司，开展了《中小跨径桥梁 3D 打印设计建造技术指南》的前期研究和资料收集工作，广泛参考研究了国内外中小跨径桥梁 3D 打印设计施工规范与相关论文资料等，并在认真研究政策法规、标准规范和广泛调研的基础上，全面分析中小跨径桥梁 3D 打印设计建造需求，开展标准研讨、大纲拟订、草案编制和讨论交流工作，初步确定了《中小跨径桥梁 3D 打印设计建造技术指南》技术内容和框架，形成了标准草案。并以此为基础，向陕西省市场监督管理局提出陕西省地方标准编制立项申请。

通过对现有混凝土 3D 打印技术标准的调研，掌握现有标准的适用范围、标准内容、标准深度。对现有的相关标准进行了全面梳理和汇总，国内现行混凝土 3D 打印相关标准与规范共计 3 部，包括《混凝土 3D 打印技术规程》（T/CECS 786-2020）、《3D 打印混凝土拌合物性能试验方法》（T/CCPA 34—2022）、《3D 打印混凝土基本力学性能试验方法》（T/CCPA 33—2022），现行标准主要集中在打印工艺、材料性能测试方法和基本力学性能测试方法等方面，其中《混凝土 3D 打印技术规程》（T/CECS 786-2020）主要涵盖了混凝土 3D 打印技术的基本要求、工艺流程、设备选择和操作规范等内容，是指导混凝土 3D 打印施工的技术规范。

《3D 打印混凝土拌合物性能试验方法》（T/CCPA 34—2022）和《3D 打印混凝土基本力学性能试验方法》（T/CCPA 33—2022）两项标准分别规定了对混凝土 3D 打印材料和构件进行性能测试的方法和要求，包括抗压强度、抗折强度、吸水率等指标的测试方法。这些标准提供了关于混凝土 3D 打印技术的基本要求和测试方法。目前国内在编团体协会标准共计 5 部，编制内容涵盖混凝土 3D 打印结构、打印装备、建筑施工等技术环节。对于中小跨径桥梁设计建造，目前的桥梁设计规范并未专门涉及混凝土 3D 打印技术的应用。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG 3362）和《公路桥涵设计通用规范》（JTGD60）等规范主要针对传统桥梁设计的相关规定和限制，均为行业通用性的指导性条款，对于混凝土 3D 打印智能建造技术应用在中小跨径桥梁设计建造的相关规定并无涉及。

因此，针对混凝土 3D 打印技术在中小跨径桥梁设计建造中的应用，有必要制定专门的技术规程和标准，以规范和指导该领域的发展和应用。这些标准应包括对 3D 打印桥梁设计、材料选用、结构设计、工艺流程以及质量评定等方面的规定，以确保技术应用的可靠性、安全性和持续性。

1.6.2 立项情况

2024 年 9 月 10 日，陕西省市场监督管理局关于下达 2024 年第二批地方标准制修订计划的函》（陕市监函〔2024〕590 号），标准正式立项。按通知要求于 2025 年 9 月 10 日前完成制修订工作。

2024 年 10 月 28 日，陕西省交通运输标准化技术委员会《关于下达 2024 年交通运输地方标准制修订计划的通知》（陕交标函〔2024〕9 号）转发了陕市监函〔2024〕590 号文进一步明确了标准编制的具体要求。

陕西省交通运输标准化技术委员会

陕交标函〔2024〕9 号

关于下达 2024 年交通运输地方标准制修订计划的通知

各有关单位：

根据《陕西省市场监督管理局关于下达 2024 年第二批地方标准制修订计划的函》（陕市监函〔2024〕590 号），由省交通运输厅推荐的“公路水性环氧乳化沥青抗滑封层施工技术规范”等 26 项交通运输地方标准（详见附件）获批立项。现将有关事项通知如下：

一、陕西省交通运输标准化技术委员会具体负责地方标准制修订过程中的管理工作；

二、凡列入制修订计划的项目，各项目承担单位应做好相应配套经费的落实工作，确保标准起草工作高质量完成；

三、项目承担单位负责项目的牵头工作，参与单位应积极配合，承担单位应及时成立标准起草工作组，按照《地方标准制定规范》和《陕西省交通运输地方标准管理办法》相关要求，制定工作计划，及时开展调查研究、实验验证等工作；

四、标准起草过程中，各项目组应广泛征求交通运输行业各

陕西省市场监督管理局

陕市监函〔2024〕590 号

陕西省市场监督管理局 关于下达 2024 年第二批地方标准制修订计划的函

省级有关行政主管部门，各有关单位：

根据《陕西省市场监督管理局关于印发《2024 年省级地方标准申报指南》的通知（陕市监发〔2024〕39 号）要求，依据《中华人民共和国标准化法》和《地方标准管理办法》相关规定，经研究，决定将《政务服务帮办代办规范》等 248 个项目列入 2024 年第二批陕西省地方标准制修订计划（见附件），现将有关事项通知如下。

一、凡列入制修订计划的项目，应按照《地方标准管理办法》和《地方标准制定规范》相关要求，完成地方标准制修订工作。

二、有关行政主管部门负责本领域地方标准制修订计划项目的管理工作，及时指导、督促承担单位按照要求完成相应工作。

三、项目承担单位负责项目制修订的牵头工作，参与单位应积极配合。起草过程中广泛征求意见，确保标准质量，应在本计划下达后 12 个月内完成送审稿报送工作。逾期未完成，该项目计划自动终止。

1.6.3 大纲编制和评审

2024 年 11 月 20 日，陕西省交通运输标准化技术委员会组织召开 2024 年陕西省交通运输地方标准（编制大纲）评审会。评审专家认为本规程编制大纲目标明确，结构较合理，内容基本全面，进度计划安排和实施方案基本可行，符合陕西省《地方标准制定规范》的要求。参编人员结构基本合理，前期基础工作扎实，具备开展标准制定工作的条件。同意通过大纲评审。评审专家还对标准大纲的结构和内容提出了具体的修改意见和建议。

陕西省交通运输标准化技术委员会

陕交标函〔2024〕13号

关于召开 2024 年陕西省交通运输地方标准 (编制大纲) 评审会的通知

各有关单位:

根据省交通运输厅、省市场监管局关于交通运输地方标准管理要求,由省交通运输标准化技术委员会组织召开“2024 年陕西省交通运输地方标准(编制大纲)评审会”,现将有关事项通知如下。

一、时间和地点

时间:2024 年 11 月 26 日至 29 日

地点:陕西省公路学会(西安市雁塔区高新六路 60 号

陕西省公路学会 911 会议室)

二、评审内容

(一) 编制大纲

标准制订的目的及意义,前期基础工作及取得的成绩,成果体现形式和预期目标,标准主要创新性,与国内外已有同类标准对比情况,标准参编单位、人员及分工,标准制订实施方案与工作计划。

陕西省地方标准 《中小跨径桥梁 3D 打印设计建造技术指南》 编制大纲评审意见

根据《陕西省交通运输地方标准管理办法》规定,2024 年 11 月 28 日,陕西省交通运输标准化技术委员会组织专家对中交第一公路勘察设计研究院有限公司、长安大学、西安建筑科技大学、尧柏特种水泥集团有限公司、西安市常宁新区开发建设管委会、中交第二公路工程有限公司、陕西交通科技有限公司共同起草的陕西省地方标准《中小跨径桥梁 3D 打印设计建造技术指南》(立项编号: SDBKM081-2024)编制大纲和标准草案进行了会议评审。与会专家听取了汇报,经质询讨论,形成以下建议意见:

一、进一步明确本指南适用范围;

二、按照 GB/T 1.1-2020 和《地方标准制定规范》的要求,进一步完善指南的文本结构。

标准起草组按照以上意见修改完善,于 12 月 6 日前报送至交通标委会。

评审专家签字: 陈世海

李和 金莉 徐以刚

2024 年 11 月 28 日

1.6.4 征求意见稿编制情况

2024 年 12 月~2025 年 6 月,编制组根据大纲评审意见,进一步补充调研,参照相关行业标准应用情况和设计建造需求,优化了规程的章节结构,完善了规程内容,形成了技术指南初稿。经主导单位组织编制单位进行内部审查、讨论和研究,继续对标准适用范围、逻辑结构技术内容、元数据项等进行修改和完善,并按 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》和陕西地方标准 DB61/T 1214-2020《地方标准制定规范》的要求,对照检查采用了规范性用语、规范了表达方式和文本格式,提升了标准在编写格式上的规范性。

2 标准编制原则及主要内容

2.1 编制原则

中小跨径桥梁 3D 打印设计建造技术指南编制应遵循完整性前瞻性、扩展性和可操作性的原则:

1) 完整性:规范应规定材料选择、结构设计、工艺流程、操作流程、质量控制、检验验收等各个环节的要求,指导从业人员全面了解并遵循最佳实践,确保工程质量和安全。

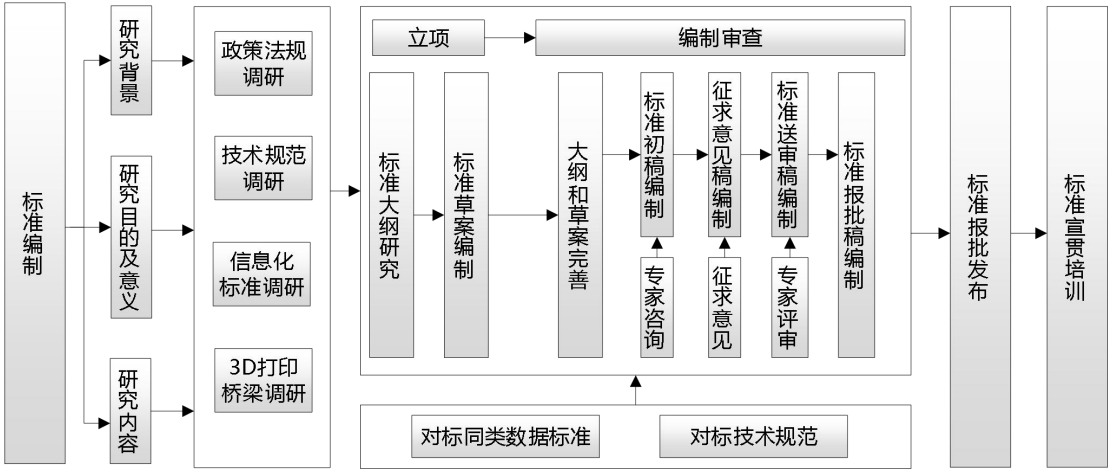
2) 前瞻性:规范在制定过程中应充分考虑未来技术发展趋势和行业需求变化,对于 3D 打印中小跨径桥梁这一新型结构形式,应预见到可能的技术革新和应用场景拓展,为未来的技术进步预留空间。

3) 扩展性：应充分考虑 3D 打印中小跨径桥梁在不同工程条件下的适应性。规范应提供全面的设计建造指南，以便工程技术人员根据具体项目特点进行灵活选择和调整。此外，规范还应便于后续修订和补充。

4) 可操作性：规范中的条款应明确具体、易于理解和执行，避免模糊和歧义，还应注重与现行法律法规、标准体系的协调一致。

2.2 标准编制技术路线

标准编制研究工作内容，主要包括需求调研、大纲起草、标准初稿编制、标准征求意见稿编制、标准送审稿编制、标准报批稿编制等过程和环节。目的是通过开展调研，广泛收集相关国际、国内标准规范、行业技术应用、平台建设现状和需求等资料，组织项目组讨论，以科学、技术和实践经验的综合成果为基础，合理确定标准的范围和技术要点，广泛征求行业各方及专家意见，协商一致，不断修改完善标准内容，并经标准管理机构批准发布，确保标准的科学性、民主性和权威性。标准编制技术路线图如下：



2.3 主要技术内容

本标准将主要规定中小跨径混凝土桥梁 3D 打印设计建造技术的范围、术语及定义、设计、打印与生产、施工安装、质量检验、工程费用测算相关技术要求。标准的制定将实现中小跨径 3D 打印建造标准化，确保 3D 打印桥梁工程质量，以更好地服务和适应桥梁建设需求。本规范适用中小跨径混凝土桥梁的 3D 打印建造，其他类型桥梁或建筑物 3D 打印可参照使用。

2.4 标准质量控制

(1) 全面规范编制流程：制定详细的编制计划和工作方案，确保编制工作有序进行。加强内部审核和专家评审工作，确保标准的准确性和完整性。

(2) 建立三级审查制度：本标准注重技术创新和实用性，编制过程中将建立三级审查制度，解决中小跨径桥梁 3D 打印建造过程中遇到的实际问题，提升标准的应用价值。

(3) 强化先进适用性：紧密跟踪国内外 3D 打印混凝土技术的最新发展动态，充分体现如材料性能、打印工艺、结构设计等方面的技术创新，反映行业前沿水平。广泛征求行业内专家、学者和相关企业的意见和建议，确保标准的科学性和合理性。

(4) 加强建造行业调研：通过行业调研，了解 3D 打印建造行业现状和发展趋势，关注技术的最新发展动态，包括新材料、新工艺、新设备等方面的进展；调研 3D 打印混凝土应用情况，收集案例和经验，确保标准的适用性。

(5) 关键指标研究验证：对中小跨径桥梁 3D 打印建造中的材料拌合物性能、力学性能、尺寸精度、构件性能及连接方法等关键检验指标进行试验测试，明确关键指标要求，确保检验方法的适应性、可操作性。

2.5 拟制订地方标准与国内外已有同类标准对比情况

当前，国家、行业、地方均没有有关桥梁 3D 打印建造相关标准规范。

本标准与既有标准的区别如下：《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362)、《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60) 等，对桥梁的整体设计和原则进行相关规定和限制，对于混凝土 3D 打印新型智能建造技术应用在中小跨径桥梁设计建造的相关规定并无涉及。虽然混凝土 3D 打印的预制式桥梁施工方式与圬工桥涵施工方式类似，但预制件的生产建造两者完全不同，考虑到混凝土 3D 打印特殊的层积工艺，不能将《公路圬工桥涵设计规范》的设计规定直接应用到混凝土 3D 打印桥梁建造中。同时本标准涉及到桥梁建造中打印材料的选用、打印工艺流程及打印质量控制评定，这些规定在《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ69)、《城市桥梁设计规范》(CJJ 11) 等现行标准中均无涉及。本指南将围绕上述问题，结合既有工程实践和科技成果，做出相关规定，以有效指导工程应用。

3 实证研究

3.1 材料设计

3.1.1 试验原材料

使用的原材料包括石英砂、普通硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、减水剂、纳米粘土、羟丙基甲基纤维素醚及玻璃纤维等。

(1) 普通硅酸盐水泥

本实验选用海螺生产的 P·O 42.5 的普通硅酸盐水泥，其物理性能见表 3-1。

表 3-1 OPC 的物理指标

密度 (g/cm³)	凝结时间 (min)		抗压强度 (MPa)		抗折强度 (MPa)		安定性
	初凝	终凝	3d	28d	3d	28d	
3.18	205	254	27.5	55.1	5.6	8.7	合格

(2) 硫铝酸盐水泥

本试验所选取 42.5 级低碱度硫铝酸盐水泥，郑州登电建材开发有限公司生产，其物理性能如表 3-2 所示。

表 3-2 SAC 的物理指标

凝结时间 (min)		抗压强度 (MPa)		抗折强度 (MPa)	
初凝	终凝	1d	7d	1d	7d
15	31	27.5	55.1	5.6	8.7

(3) 砂

本试验由于 3D 打印采用的供料系统主要是由螺杆泵及直径约 4cm 的管道输送，因此对骨料的最大粒径不能超过 3mm。试验从材料普适性综合考虑选用 40 目-70 目石英砂作为 3D 打印材料的骨料。

(4) 外加剂

本试验所用的减水剂为上海启臣化工有限公司提供的粉剂聚羧酸减水剂 (PCE)，减水率为 23%。

(5) 纤维

本试验采用国产 6mm 的耐碱玻璃纤维 (GF 纤维)，与水泥混凝土基体握裹力好，有明显的防裂、争抢抗渗、抗冻、抗冲击等优点，其主要技术指标如表 3-3 所示。

表 3-3 GF 纤维主要技术指标

长度 (mm)	直径 (μm)	密度 (g/cm³)	弹性模量 (GPa)	抗拉强度 (MPa)
---------	---------	------------	------------	------------

6	14	2.62	68	1689
---	----	------	----	------

(6) 羟丙基甲基纤维素

试验所采用的 HPMC 为上海臣启化工有限公司提供，含水量为 2.6%，pH 值 6.0（1%溶液，25℃），粘度为 40Pa·s（2%水溶液，20℃），白色粉末。

(7) 纳米粘土

试验使用纳米粘土有山东优索化工科技有限公司提供，其主要成为为 SiO₂ 和 Al₂O₃，细度为 500 目，为灰白色粉体。

3.1.2 试验方法

(1) 净浆流动度

参照《混凝土外加剂匀质性试验方法》（GB/T8077-2012）中的相关规定进行净浆流动度测试。

(2) 净浆凝结时间

净浆的凝结时间使用维卡仪，参照国家标准 GB/T1346-2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》进行测定，除砂外，水泥净浆与砂浆的配合比保持一致。

(3) 胶砂流动度

材料流动性能参照《水泥胶砂流动度测定方法》（GB/T 2419-2005）中的跳桌试验进行测试。将拌好的混凝土分两层迅速装入上口内径 70mm，下口内径 100mm 的截锥圆模中，第一层装至试模高度约三分之二处，用小刀在相互垂直两个方向各划 5 次，用捣棒由边缘至中心均匀捣压 10 次，捣压后胶砂应略高于试模。捣压完毕，取下模套，将小刀倾斜，从中间向边缘分两次以近水平的角度抹去高出截锥圆模的混凝土，将截锥圆模垂直向上轻轻提起。立刻开动跳桌，以每秒钟一次的频率，在 25s ± 1s 内完成 25 次跳动。跳动完毕，用卡尺测量胶砂底面互相垂直的两个方向直径，取整数，单位为毫米，计算平均值，该平均值即为水泥胶砂的流动度值。如图 3-1 所示



图 3-1 胶砂流动度测量

(4) 力学性能

参照 ISO 679:2009 标准，对本试验中的所有棱柱体砂浆试件（40mm×40mm×160mm）的抗压强度和抗折强度进行测试。在保持温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 和相对湿度 $90\pm 5\%$ 的标准养护箱中养护至规定龄期。并采用全自动砂浆强度试验仪对每个配合比进行了 3 次砂浆试验，测试抗压、抗折强度实验过程中设定加载速率分别为 $(2400\pm 200) \text{ N/s}$ 和 $(50\pm 10) \text{ N/s}$ 。

(5) 砂浆形状保留率

自重下的形状保留率反映了材料在自重作用下的变形程度，可借此评价 3D 打印材料的可堆叠性。形状保留率越高，材料在自重下的变形越小，越适用于打印。参照文献中的方法，将砂浆装入直径为 70mm 高度为 70mm 的圆柱模具中，插捣并振动 10 次，刮平上表面，然后将模具提起，测试砂浆保留高度，其与初始高度的百分比即为形状保留率，测试过程如图 3-2 所示

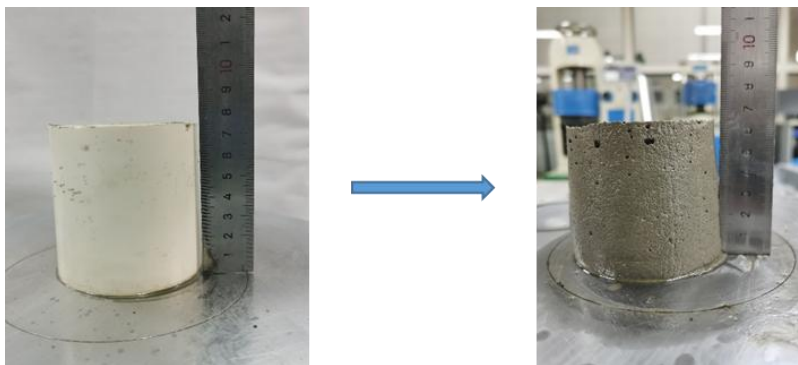


图 3-2 砂浆形状保持率测试

(6) 堆积保留率

堆积性能反映打印材料承受其自身自重以及上部打印材料自重的性能。本试验采用胶枪手动挤压的方式模拟打印过程，胶枪如图 3-3 所示，喷嘴的尺寸为

12mm×35mm。通过测定堆积形状高度的变形量来衡量堆积性。测试方法为连续挤出堆叠 5 层长度为 20cm 的打印材料，并静止 3min 后测量堆叠的总层高，与理论层高 60mm 比较，计算堆积保留率，测试如图 3-4 所示。



图 3-3 砂浆挤出堆积用胶枪



图 3-4 砂浆堆积保留率测试

3.1.3 配合比 3D 打印验证

(1) 打印参数的设置

试验室基于机械臂自主开发的 3D 打印设备主体如图 3-5 所示。选用的可控制的参数为打印头规格尺寸、打印层高、打印头移动速度、泵速及机械臂移动速度。打印参数设置见表 3-4。



图 3-5 机械臂 3D 打印设备

表 3-4 3D 打印参数

打印头	打印层高 (mm)	泵速	打印头移动速度 (mm/s)	机械臂移动速度 (mm/s)
矩形 40mm×15mm	14	13~15	130	300

(3) 打印模型设置

根据 3D 打印设备及切片算法，建立打印模型如图 3-6 所示，所建立的模型存在直线区域同时也包含了转角区域，打印模型尺寸长×宽×高为：1200mm×240cm×40cm。

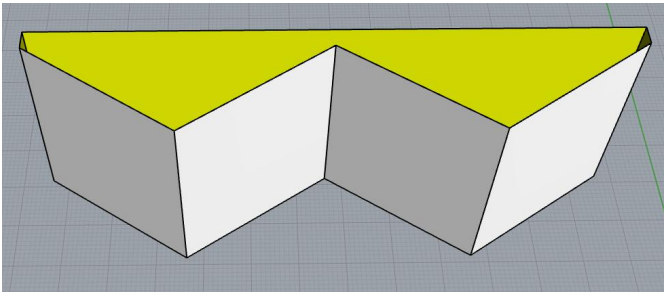


图 3-6 3D 打印模型

针对选取的 6 个配合比进行打印测试，在相同的打印参数下进行，打印层数见表 3-5，打印效果如图 3-7 所示。结果表明配比 1—6 均具备可挤出打印的性能，在实际的打印过程未发生管道堵塞现象。

表 3-5 不同配合比打印层数

配合比编号	1	2	3	4	5	6
层数	16	22	18	24	20	18



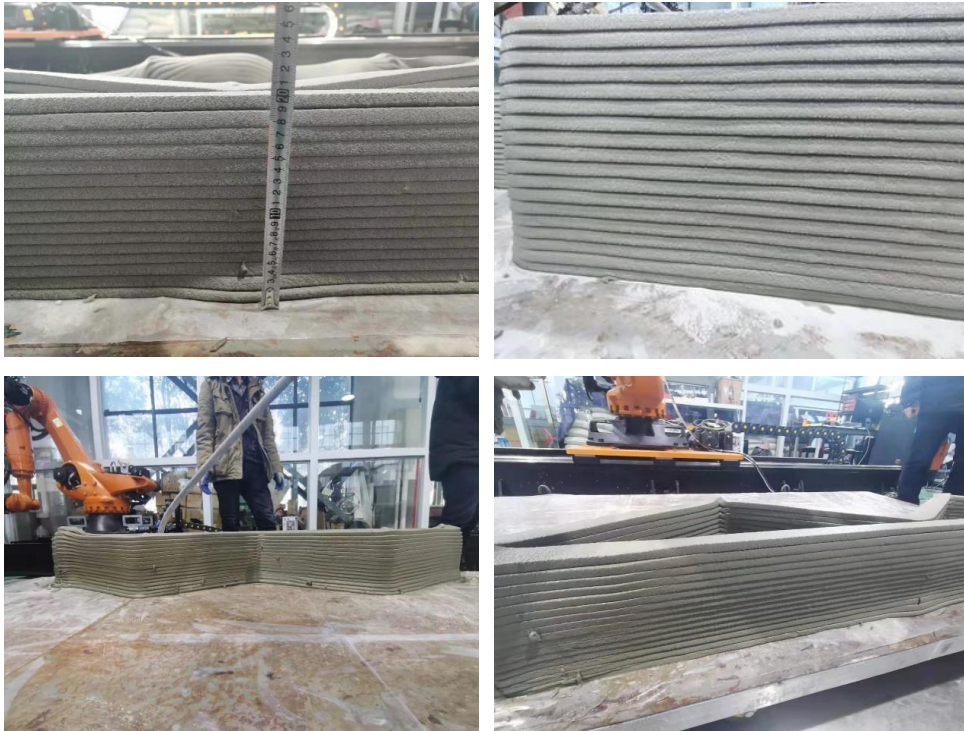


图 3-7 3D 打印效果

根据不同配合比的实际 3D 打印效果，结合试验结果，最终确定 3D 打印水泥基复合材料的配合比。

3.2 工艺设计

混凝土 3D 打印工艺是一种以混凝土为原材料，实现三维造型设计到混凝土产品的过程和方法。混凝土 3D 打印包括设计环节、打印环节和养护及后处理环节三部分，具体过程和方法如下：

（1）在设计环节，首先通过三维建模软件设计需要打印的产品，并将模型导入切片软件，生成三维模型数据，再通过切片软件将三维模型数据处理成一系列二维的平面数据，最终生成用来执行打印轨迹和控制设备的可执行打印程序。

（2）在打印环节，启动可执行打印程序，供料设备将拌和好的混凝土泵送至打印头，打印头将混凝土以一定的截面形状挤出，并通过打印路径执行设备带动打印头运动，逐层沿打印路径堆叠，实现模型到实物的转变。

（3）养护及后处理环节，需要对打印完成的混凝土构件进行养护以及后期处理，包括但不限于打磨、喷涂等工艺，提升产品质量。

在上述打印环节中，为提高混凝土 3D 打印的成型质量，严格控制设备运动参数的协调匹配，在正式打印前可对于特定打印材料、出料嘴、进行出料速度、

分层厚度以及打印头移动速度的匹配测试,采用最佳质量效果的一组打印工艺参数进行构件打印。本项目团队研发平面路径拟合技术和空间路径拟合技术可以实现构件悬挑和不等层厚打印工艺。

（1）平面路径拟合技术

在目前装备条件中，混凝土 3D 打印技术所用的打印头均为固定式，通过该打印头挤出材料截面密度非均匀分布（中间密，两边疏），降低混凝土打印逐层出挑能力，导致混凝土 3D 打印构件粘接强度减弱、成型质量较差。本技术通过采用矩形打印头及相应控制算法极大提高混凝土 3D 打印的出料打印速度和成型精度，增强层间粘接强度，增加混凝土打印逐层出挑能力。精细化控制为混凝土 3D 打印矩形出料提供了可靠的平面路径拟合方法，同时有效提高了混凝土构件一体式打印的单层堆积高度，从而拓宽混凝土 3D 打印的应用场景。

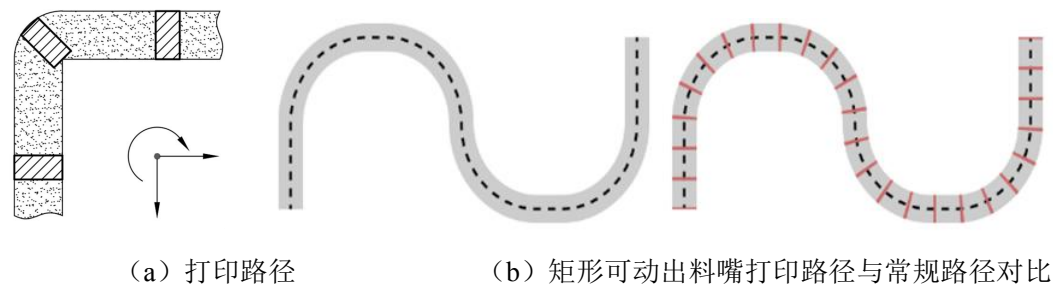


图 3-8 矩形可动可控出料嘴打印路径

（2）空间路径拟合技术

空间路径拟合技术主要应用在不等层厚构件的打印，如图 3-9 所示的花坛座椅，内圈弧长小于外圈弧长，在内外圈相同层数下，外圈层厚须大于内圈层厚。为实现以上目的，需控制运动设备的打印姿态和移动速度参数。其中打印姿态通过计算单层向量夹角，通过数据转化，得到运动设备工具端坐标系下的空间点序。移动速度参数控制在执行程序中预先设定，定义基准层厚和基准移动速度，计算内外圈层厚与基准层厚比值，得到同层不同点序的运动设备移动速度，实现变速打印。

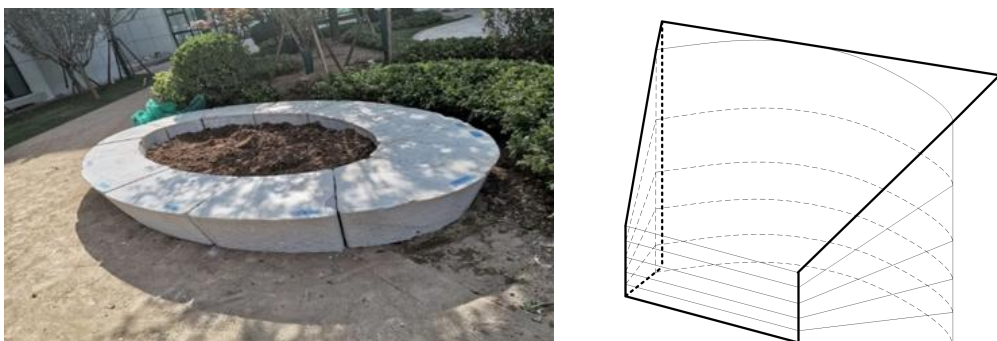


图 3-9 3D 打印花坛空间路径拟合

3.3 打印与生产

本指南在制定期间，采用工程验证的手段，对指南中规定的设计、打印、生产、安装进行详细分析与提炼，确保各项技术标准在准确度、可靠性、稳定性方面均有定量评价。以下为西安市常宁新区 3D 打印景观拱桥项目设计建造相关数据支撑

3.3.1 原材料准备和测试

西安市常宁新区 3D 打印景观拱桥项目所用的混凝土 3D 打印材料，预先将砂子、水泥、掺合料等干粉在混料场进行干混，以 50kg 为标准装入袋中，使用吨袋打包运输至打印工厂。工人师傅通过气动机械手抓取料袋，将其倒入搅拌设备中，按照材料配比加入水、减水剂和纤维。结合材料温度和环境温湿度通过观测打印材料的状态，确定搅拌最佳时间。

钢筋、砂石等传统材料按照项目施工图满足性能指标方可使用。



图 3-10 原材料准备工作

打印材料搅拌充分后进行构件打印测试，观察挤出料条是否按照固定宽度挤出。如发现挤出料条粗细不均匀，呈现波浪状纹理时，在排除泵送设备、输送管等硬件设备问题后，结合环境温湿度重新调整打印材料配比，在搅拌混合时适当加入葡萄糖酸钠等掺和料，提高打印材料可塑性，确保挤出料条顺滑、粗细均匀。

3.3.2 打印质量控制及监测

(1) 打印参数优化

为保证打印构件条间填充密实度，提高打印质量，拱桥每类构件在路径规划阶段通过平面路径拟合技术和空间路径拟合技术减少空隙和缺陷。在使用基于工业机器人的混凝土 3D 打印系统打印主拱圈时，打印单体为弧形拱块，同时主拱圈内圈弧长小于外圈弧长，在内外圈相同层数下，外圈层厚须大于内圈层厚。通过以下参数优化控制解决以上问题。

1) 在路径规划时以拱块弧线为基准线建立切片平面，利用切片平面对打印模型进行切分，打印姿态通过计算单层向量夹角，通过数据转化，得到运动设备工具端坐标系下的空间点序，生成 3D 打印机械臂设备可识别的机器代码。

2) 设计主拱圈打印路径料条宽度为 4cm，为保证料条从挤出设备挤出时带有膨胀力，在挤出设备上配备 3cm 圆形打印头，调整泵送参数和打印移动参数，使其挤出料条宽度为 4cm，保证构件条间填充密实度。在本次基于工业机器人的混凝土 3D 打印系统打印中选用的最佳打印参数如表 3-6 所示。

表 3-6 拱桥构件打印最佳参数表

序号	构件类型	打印头尺寸 /mm	料条层厚 /mm	料条宽度 /mm	泵速 L/min	打印速度 m/s
1	主拱圈	30	12	40	15.0	0.24
2	栏板	25	10	30	8.0	0.16
3	栏杆柱	20	11	20	7.5	0.15
4	抱鼓石	25	12	30	10.0	0.16
5	桥面铺装	25	10	30	13.0	0.20

3) 实现主拱圈内外径不等层厚打印，在执行程序中预先设定移动速度参数，定义基准层厚和基准移动速度，计算内外圈层厚与基准层厚比值，得到同层不同点序的运动设备移动速度，实现变速打印。



图 3-11 主拱圈打印测试

在使用大型动柱式 5 轴龙门混凝土 3D 打印系统对侧墙进行打印时，对龙门架体移动速度和泵送设置两次参数匹配，第一次为实心部分打印，在打印条间挤压密实的前提下，调整打印参数减弱打印构件打印路径的转角处涌料现象。第二次为最后 5 层外观纹理打印，此时以外观质量为控制要素，减慢龙门架体移动速度和泵送速度，保证打印构件打印路径的转角处不发生涌料现象。在本次侧墙打印中选用的最佳打印参数如表 3-7 所示。

表 3-7 侧墙打印最佳参数表

序号	打印部位	打印头尺寸 /mm	料条层厚 /mm	料条宽度 /mm	泵速 L/min	打印速度 m/s
1	实心打印	30	12	40	15.0	12000
2	纹理打印	30	12	40	7.0	7500



图 3-12 侧墙打印测试

(2) 实时监控系统

打印材料挤出状态易受环境温湿度影响，极大影响打印构件的成品率，为提高打印质量，灵活调整实际工艺的组织形式，项目团队为基于工业机器人的混凝土 3D 打印系统研发配置了控制系统，设定急停、手动切换和速度调控等功能，实现混凝土 3D 打印流程的灵活性。根据挤出料条状态随时在控制系统微调打印参数。



图 3-13 控制系统界面



图 3-14 温湿度监测

(3) 尺寸复核

在打印过程中需对打印构件的各个截面尺寸进行复测，并与设计的界面参数进行对比，防止打印误差过大从而影响后期施工安装精度。重点控制的尺寸参数是主拱圈的弧长和栏杆柱的宽度。针对主拱圈弧长控制问题，本次主拱圈按照设备打印范围分为7块，7块打印顺序为左右打印打印，在打印拱顶最后一块主拱圈之前，对其余6块主拱圈的弧长尺寸进行复测，根据主拱圈总弧长反推拱顶主拱圈的弧长尺寸，对齐重新进行建模和路径规划，从而消除安装误差。针对栏杆柱的宽度问题，需严格控制打印条宽满足设计要求，加大尺寸测量频率，从而防止料条过宽，栏杆柱空腔截面变小，在安装过程中栏板侧边无法插入栏杆柱空腔内。





图 3-15 打印构件尺寸测量

3.3.3 打印构件展示

拱桥打印构件展示如表 3-8 所示：

表 3-8 打印构件表

主拱圈		侧墙	
栏板		栏杆柱	

抱鼓石		桥面铺装	
-----	---	------	--

4 知识产权说明

无

5 采标情况

本标准为首次起草的陕西省地方标准，未采用国际标准和国外先进技术。

6 重大意见分歧的处理

无重大分歧。

7 贯彻本标准的要求和措施建议

本标准规定的中小跨径桥梁 3D 打印设计建造技术指南要求，以国内实际工程为背景进行过论证且可实施，故要求严格执行。

本标准规定的技术要求均以国内实际工程为背景进行过论证且可实施，建议贯彻实施中进一步总结经验、收集相关实践数据。

本标准起草过程中，得到了长安大学、西安建筑科技大学、东南大学、尧柏特种水泥技术研发有限公司、西安市常宁新区开发建设管委会、中交第二公路工程有限公司、陕西交通科技有限公司及其他相关单位的大力支持、指导和帮助，在此深表谢意！