

编号：

哈尔滨工业大学

大一年度项目立项报告

项目名称：3D 打印彩色透水混凝土配合比研究

项目负责人：孙灵 学号：1190500420

联系电话 电子邮箱 _____

专业集群：智慧人居环境与智能交通 辅导员：程郡

指导教师：严佳川 职称：副教授，硕导

联系电话 _____

电子邮箱：_____

院系及专业：土木工程学院 土木工程

哈尔滨工业大学基础学部制表

填表日期：2019 年 10 月 14 日

一、项目团队成员（包括项目负责人、按顺序）

姓名	性别	所在专业集群	学号	联系电话	本人签字
孙灵	女	智慧人居环境与智能交通	1190500420		
张启惠	女	智慧人居环境与智能交通	1190500401		
张献泽	男	智慧人居环境与智能交通	1190502323		

二、指导教师意见

签 名： _____

年 月 日

三、项目专家组意见

批准经费： 元 组长签名： （ 学部盖章 ）

年 月 日

四、3D 打印彩色透水混凝土配合比研究立项报告

1、立项背景

1.1 研究项目的现状

1.1.1 3D 打印行业现状

3D 打印技术出现在 20 世纪 90 年代中期,是一种利用光固化和纸层叠等技术的快速成型装置。它与普通打印工作原理基本相同,打印机内装有液体或粉末等“打印材料”,与电脑连接后,通过电脑控制机器把“打印材料”一层层叠加起来,最终把计算机上的蓝图变成实物。这种打印技术称为 3D 立体打印技术。

国外已相继出现各种 3D 打印技术项目,如 D 型工艺(D-Shape)、轮廓工艺、全尺寸 3D 打印……目前我国已将 3D 打印技术用于实际生产,如 2014 年 5 月在上海某园区不足 24h 建好 10 栋房屋,该建筑所用 3D 打印材料混合了高强度等级的水泥、回收利用的建渣和工业废料,并添加玻璃纤维,以保证墙体牢固。这样不仅高效快捷,还有利于资源的二次利用。



图 1 运用 3D 打印技术建成的“泡泡屋”

1.1.2 3D 打印混凝土技术行业现状

英国拉夫堡大学创新建筑研究中心的 Lim 等人于 2008 年提出 3D 混凝土打印技术,这是一种基于混凝土喷剂堆积成型的工艺。该混凝土打印工艺流程团队研发出适合 3D 打印的聚丙烯纤维混凝土,并用这种混凝土于 2009 年成功打印出 1 个尺寸为 2m*0.9m*0.8m 的混凝土靠背椅,并对其原位剥离,进行立方体抗压等性能测试。这种 3D 打印技术工艺简单、工作效率高,但由于技术限制还存在表面粗糙和可打印物体尺寸较小的缺点。

此外,英国伦敦的 Softkill Design 工作室采用尼龙纤维材料,通过激光烧结工艺打印节段,随后扣合拼装形成整体建筑;纽约伦斯勒理工学院机械工程系 Joseph Pegna 研究蒸汽固化工艺,并评估这种大型建筑结构的固体成型技术的前景;麻省理工学院的 Steven Keating 等提出了使用机器人技术,运用复合材料制造和材料复制的 3D 打印;英国的拉夫堡大学土木与建筑工程学院的 LeTT 等用 3D 打印技术通过 9mm 直径的喷嘴打印出逐层素积的结构构件。

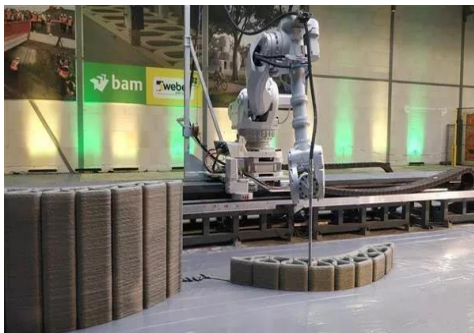


图 2 运用 3d 打印技术打印出的建筑材料

1.1.3 彩色混凝土行业应用现状

南京市高淳区博物馆和档案馆首次在场馆中大面积采用通体彩色商品混凝土工艺技术，该技术主要运用于商品混凝土墙板、一楼地面等部位。工程要求彩色商品混凝土强度等级为C30以上，并且同部位、同种颜色的彩色商品混凝土颜色必须均匀一致，表面细腻，严禁出现露筋、骨料外露、表面龟裂、裂缝、返碱及褪色等现象。

1.1.4 透水混凝土行业应用现状

随着国家海绵城市建设的大力推进，各地均出现了海绵城市建设申报的热潮。在2016年4月27日国家三部（财政部、住房城乡建设部、水利部）公示了中央财政支持的海绵城市建设试点名单后，海绵城市建设的基础材料——透水混凝土的研究进程被大力推进。早在上世纪九十年代，欧美、日本等国就研究出透水性路面材料，并在广场、步行街、道路、停车场、公园内侧道路等应用。



图3 彩色透水混凝土被用于广场路面建设

1.2 研究项目的发展前景

1.2.1 3D 打印混凝土技术的发展前景

3D 打印技术 (3D- printing) 作为一项新兴制造技术, 在 20 世纪 80 年代后期迅速兴起。3D 打印又称增材制造 (Additive manufacture, AM), 是一种运用计算机全自动控制建造过程的新兴技术。其技术原理为“离散——堆积”原理。近些年, 无论是国内还是国外, 3D 打印成为了热门话题, 引起越来越多国家学者的重视。

在建筑行业, 3D 打印技术仍处于初步阶段。在各类建筑物结构形式中使用 3D 打印建筑技术已逐步成为现实, 但还有很多问题亟待解决。3D 打印建筑技术将采用一种全新的设计逻辑和建造模式, 将建筑形式、建筑结构和建筑材料高度整合, 体现出未来数字设计建筑模式下的建筑生态关系。毋庸置疑, 3D 打印技术会对未来建筑产业的发展产生重大而深远的影响。

混凝土材料施工主要包括混凝土的浇筑、捣实、抹面、养护及脱模等过程, 但混凝土在生产应用方面的高耗能、高污染等缺点严重阻碍了传统工艺的发展。3D 打印技术的发展对建筑方式有较大改变, 使混凝土的生产供应也随之改变。



图4 工人运用 3D 打印混凝土技术开展施工

1.2.2 彩色透水混凝土技术的发展前景

从目前发展的趋势来看, 在建筑装饰特别是在建筑物的外墙装饰中, 装饰混凝土的应用

比例已越来越大。随着装饰混凝土质量和性能的不断提高和品种的不断增多，装饰混凝土的应用必将越来越广泛。

透水混凝土有利于天然雨还原地下水，同时能够通过空隙间的热量传导来降低路面的温度。空隙的减音作用降低汽车产生的噪音，利于环境的保护。近年来我国众多大学及机构对透水混凝土进行实质性研究，但应用面不是太广。随着国家的政策出台，以透水混凝土为基础的各种道路材料将会得到全面的发展。

1.3 项目研究的意义

1.3.1 3D 打印技术与应用在建筑行业的意义

与传统的建筑过程相比,3D 打印建筑技术极大程度上实现了绿色节能、低污染、低劳动强度的现代文明生产施工方式。

具体表现为:

- 1) 施工效率提高,大幅缩短工期。
- 2) 劳动力投入降低,减少了人员伤亡的几率,促进施工现场安全管理。
- 3) 施工现场的粉尘和噪声减少,避免对环境造成污染。
- 4) 建筑方式与类型更加灵活,施工精度高,更易实现建筑的艺术性。
- 5) 减少对建筑模板的依赖,降低材料浪费,提高了资源的利用率。
- 6) 机械化生产,会大大降低建筑生产成本。

1.3.2 彩色透水混凝土的研究意义

普通混凝土可以通过采取适当措施,使其表面具有装饰性的线条、图案、纹理、质感及色彩,这既满足了人们的审美要求,也可以满足各种装饰的不同要求,展现出独特的建筑装饰艺术效果。

透水混凝土又称多孔混凝土,是由骨料、水泥、外加剂和水按一定比例拌制而成的一种多孔轻质混凝土,它不含细骨料,由粗骨料表面包覆一层水泥浆,相互粘结形成空穴,产生均匀分布的蜂窝状结构,这种混凝土具有透水透气和重量轻的特点。

彩色透水混凝土色彩多样,设计师可以根据周围环境设计适宜的颜色,使景观和谐;透水混凝土能够将雨水渗透到地下,不用再清洗,节约人力资源;透水混凝土不开裂,不起皮,不像透水地砖松动脱落,产生坑洼积水,污染环境;透水混凝土还具有高承载力、经久耐用等优点,因而被越来越广泛地应用于建造停车场和低荷载公路路面。在大力倡导环保发展的大环境下,彩色环保透水混凝土的推广应用具有重要意义。



图 5 透水系数测试装置

2、项目研究内容

2.1 项目研究领域所面临的问题

2.1.1 3D 打印混凝土技术所面临的问题

(1) 原材料的问题：与传统的混凝土施工工艺相比，3D 打印混凝土对原材料的流变性和可塑性提出了更高的要求。普通水泥已无法同时满足建筑性能与打印技术的要求，所以需要采用新的破碎工艺以制造出的粒径更小，颗粒形貌更接近圆形的骨料。此外，外加剂在混凝土中不仅要保留已有的性能，还要解决各层之间如何完美结合的问题。

(2) 打印精度的问题：建筑设计非同儿戏，它的实现需要分毫不差的精确度，但是 3D 打印技术可能会出现偏差，所以做好预防工作是 3D 打印技术在建筑设计模型应用中应该注意的问题。由于 3D 打印混凝土工艺发展还不完善，快速成型的零件在精度及表面质量上大多不能满足工程使用的要求，即不能作为功能性部件，只能做原型使用。

(3) 软件的问题：与传统混凝土施工不同的是，3D 打印混凝土是降维制造，需要将 3 维模型转化为 2 维模型以方便打印工作的进行，因此需要相关软件在电脑上完成相关的工作，再通过自动化程序使之转换为实物。所以软件是 3D 打印的重要部分，是将模型数据化的重要环节，软件的开发是至关重要的。目前，我国还没有专业的软件公司与 3D 打印相配套以形成完整的产业链。

(4) 打印设备的问题：随着技术的发展，3D 打印设备在快速发展，一台 3D 打印设备价格从最初的几十万美元到现在的几千美元，再到我国五千多人民币的价格……可见，3D 打印设备在不断地走向大众，走进各个领域。然而，目前的 3D 打印混凝土设备还不能够完全满足其应用环境的特殊性的要求。例如，目前使用的打印设备只能满足平面扩展阶段，可用于低层大面积建筑的建设，而对于广泛使用的高层建筑还无法进行打印。此外，3D 打印混凝土与传统混凝土相比，性能发生很大变化，需要重新建立施工工艺和安全规范措施。



图 6 3D 打印出的二维平面成品

2.1.2 彩色混凝土技术所面临的问题

(1) 不同颜料由于自身性能（如颜料的着色力、遮盖力）及其掺量的差异，对混凝土的染色效果也不尽相同，然而目前在探究颜料对混凝土染色效果的影响时缺少有效的评价方法。

(2) 彩色混凝土在使用过程中受到雨水、光照等因素的影响，其表面颜色逐渐衰减而影响其使用性能，然而目前在评价彩色混凝土时未考虑其表面颜色耐久性。

(3) 颜料及其掺量的变化会对混凝土的力学特性产生不同影响，目前颜料对混凝土力学特性影响机理的研究分析较少。

(4) 由于颜料的掺加，使得彩色混凝土的成本大幅增加，因而一定程度限制了其推广应用，因此有必要采用新的成型工艺制备彩色混凝土来降低其染色成本。

2.1.3 透水混凝土配合比所面临的问题

贵州科之杰近年来采用萘系减水剂生产的彩色透水混凝土孔隙率、透水系数等性能优越，但是成本偏高，透水混凝土凝结时间短，不易施工，且粘结力度较差。



图 7 探究透水混凝土的透水性能

2.2 彩色透水混凝土设计原理

彩色透水混凝土的设计基于普通透水混凝土，首先依据生产规范、地区使用要求和气候条件，设计出满足要求的透水混凝土。然后在普通透水混凝土配合比的基础上掺加一定量的彩色颜料拌和，最后根据试件性能进行适当调整，优化配比，择优掺量。



图 8、9 透水混凝土的配比实验

2.3 彩色透水混凝土颜料选择

彩色透水混凝土颜料分类：配置彩色透水混凝土的颜料从物理成分上可分为无机颜料和有机颜料两类。无机颜料大多是有色金属的氧化物或一些不溶性的金属盐，此类颜料具有良好的耐热性、耐磨性和遮盖力，大多用于生产彩色沥青混凝土、彩色混凝土、彩色地砖、楼房外墙装饰等。有机颜料主要由有机化合物制成，具有色泽鲜艳和色谱齐全的优点，大多用于艺术创作、构件涂层、构件防腐、染料等。两类颜料都可以为彩色透水混凝土上色，但本质的差异决定了它们的使用方法和成品性能的不同。

2.4 无机氧化铁类颜料与水泥的适应性研究

无机氧化铁类颜料的主要成分是三氧化二铁，这区别于粉煤灰、矿粉、硅灰等活性掺料。在合适的掺量范围内掺入颜料可提升混凝土的工作性能，所以有必要进行无机氧化铁类颜料与水泥的适应性研究，分析掺入无机氧化铁颜料后混凝土所受的影响方向和影响量。若为正影响，则确定最佳掺量；若为负影响，则确定最大可控范围。

2.5 彩色透水混凝土配合比设计

(1) 基准配合比掺色设计：根据彩色透水混凝土设计原理，结合颜料与水泥适应性进行研究，选择合适的颜料种类和掺量进行试配试验。

(2) 混合料及试件：彩色透水混凝土拌和及成型前需确定两个基本工艺：一是彩色颜料的掺入工艺，二是透水混凝土试件的成型工艺。我们可对试件进行外观评价和性能测试，通过综合测试数据和外观评价，选择颜料最佳掺量，并总结颜料对透水混凝土性能的影响趋势。



图 10 混凝土性能测试过程

2.6 彩色透水混凝土性能

(1) 彩色透水混凝土外观评价：将彩色透水混凝土试件进行外观色泽比较，结合色谱标准和现场应用实际，初选彩色透水混凝土颜料及掺量。

(2) 彩色透水混凝土性能试验：分析颜料的掺入对透水混凝土性能的影响方向和影响量。

2.7 彩色透水混凝土颜料最佳掺量

在选择颜料最佳掺量时需综合考虑试件的外观、抗压强度、抗折强度和透水系数 4 个指标，可以采用取平均值法求其最佳掺量。

3、项目具体实验方案（初定）

3.1 原材料选择

(1) 水泥：由于透水混凝土是基于碎石间的粘结力来达到强度要求的，所以选用粘接力强的优质水泥。

(2) 矿粉：淮安淮龙 S95，7d 活性指数 83%，28d 活性指数 102%，比表面积 $420\text{m}^2/\text{kg}$ ，烧失量 1.8%

(3) 骨料：选用两种骨料进行实验。即 5~16mm 的碎石和 2.4~4.75mm 的米砂

(4) 外加剂：减水率 20%，固含量 25%

(5) 增强剂：高效透水混凝土专用增强剂 SBT-PRC(1)

(6) 颜料：道路专用颜料 S-190

3.2 配合比设计及实验

(1) 确定骨料用量

透水混凝土的主要指标是透水系数。透水系数主要与混凝土的孔隙率相关，混凝土孔隙率越大，其透水系数越高。而骨料的孔隙率是混凝土孔隙率的主要决定因素。因此先确定骨料的堆积密度和表观密度，才能求得骨料的孔隙率。骨料的用量参考其堆积密度的数值，可以按照规程 CJJT135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》的规定乘以系数 0.98。

(2) 确定水灰比

水灰比是影响透水混凝土粘结强度和透水系数的主要指标。颗粒级配不同的骨料，其合理的水灰比范围亦不相同。水灰比过小，包裹在骨料表面的水泥浆过稠，均匀性较差，不利于骨料间的粘结，抗压强度难以保证；水灰比过大，包裹在骨料表面的水泥浆过稀，易导致浆体下沉堵住孔隙影响混凝土的透水系数，且会减小骨料间的粘结强度，使透水混凝土的抗压强度下降，同时体积稳定性变差。根据道路的实际情况和既往经验，我们将取 0.26 的水灰比进行

试验。

(3) 混凝土用水量及外加剂掺量

为了达到有效的粘结强度和抗压强度，宜将混凝土用水量控制在 $90\sim 100\text{kg/m}^3$ 左右，按照经验及有关文献，外加剂 SBT-PCA 的掺量确定为 1.1%

(4) 增强剂掺量

增强剂可以并增加骨料之间的粘结力，降低浆体下沉堵住孔隙的几率，提升混凝土的透水系数，并具有早强保水作用，还可延长施工时间。该实验拟采用外掺法，掺量为 10kg/m^3 。

(5) 颜料的掺量

通过对混凝土着色效果的试验，确定颜料采用外掺法，掺量为 15kg/m^3 。

(6) 配合比试验

依据 CJJT 135—2009 规程的要求，在试配时水灰比上下浮动 0.05，并相应的调整胶凝材料及外加剂的用量，进行配合比试验，水灰比分别选择 0.21、0.26 和 0.31。

3.3 试验结果及分析

(1) 透水混凝土的工作性能测试（按照给定的配合比进行混凝土试配，进行坍落度及初凝时间测试）

(2) 试块外观及透水系数的测试（对硬化后的混凝土试块进行外观检查，并测试混凝土的孔隙率以及透水系数）

(3) 混凝土的力学性能测试（对硬化后的混凝土试块进行抗压强度测试）

3.4 得出结论

4、项目研究目标

4.1 接触科研环境，获得科研体验

智慧人居环境与智能交通大类是哈工大智能建造一系列专业中与土木工程关系最密切的大类，研究混凝土的配合比有益于我们对高学年专业课程的深入学习。研究一种合适的配合比能提高我们的专业素质，使我们接触原汁原味的科研环境，也能提高我们的探索能力、动手能力和实践操作能力。

4.2 掌握并应用 3d 打印技术

随着科技的发展，3d 打印技术正在逐渐应用于人们的生活中，所以我们在研究的过程中会先了解该技术的工作原理，并根据学校提供的实验条件进行 3d 打印的操作，做到理论和实践结合，掌握这门新型技术。

4.3 研究新型彩色透水混凝土配合比

混凝土是工程的血液，在施工中起到至关重要的作用。彩色混凝土是一种防水、防滑、防腐的绿色环保地面装饰材料，能使水泥地面永久地呈现各种色泽、图案、质感，逼真地模拟自然的材质和纹理，随心所欲地勾划各类图案，而且愈久弥新，使人们轻松地实现建筑物与人文环境，自然环境和谐相处，融为一体的理想。如果我们成功获得了研究成果，那么这种配合比将会极大地提高混凝土的性能，使彩色混凝土得到更广泛的应用与推广。

4.4 结合 3d 打印技术与彩色透水混凝土技术

3D 打印技术操作所需操作精度高，对被打印的材料有很高的要求。混凝土由于不能很快塑形且材料中含有石块、沙砾等杂质，使打印有一定的难度。本项目将致力于研究两种技术的结合，使美观的彩色混凝土顺利进行富有变化的 3d 打印操作，同时提高打印精度，使粗糙的混凝土变成精美的物件。



图 11 运用 3D 打印混凝土技术制造出的宜居环境

5、项目进度安排

5.1 项目进行总时长

2019 年 11 月——2020 年 11 月

5.2 项目进度具体安排

时间	项目内容	备注
2019 年 11 月——寒假结束	阅读文献	导师指导方向，组员自行阅读学习
开学后	第一次大例会	组员总结阅读体验，与导师共同确定详细实验方案
例会——2020 年 3 月中旬	第一阶段实验研究	按照制定的实验方案进行实验
实验研究完成后（3 月中旬）	第二次大例会	总结实验，初定中期结题报告大纲
例会（3 月中旬）——中期检查（3 月底）	完成中期结题报告	组长分配任务，共同完成
中期检查后（4 月初）	第三次例会	导师指导，共同制定详细实验研究方案
例会（4 月初）——6 月中旬	第二阶段实验	按照制定的实验方案进行实验
6 月中旬	第四次例会	总结实验，初定结题报告大纲
6 月中旬——6 月底	完成结题报告	组长分配任务，共同完成
七月	准备 PPT，答辩	共同完成
注：期间根据实际情况进行小例会		

6、项目经费使用计划

项目	经费	备注
材 料 费	视 具 体 实 验 情 况 决 定	指项目小组购买专用材料的支出，具体包括实验用品、实验器件、实验耗材、实验药品等。
资 料 费	200 元 左右	指购买与项目研究相关的图书资料、书报杂志等
印 刷 费	50 元 左右	指项目小组的印刷费支出，包括打印、印刷等

7、项目主要参考文献

- [1]王宏仪, 托娅 关于 3D 打印机制作小尺寸建筑模型中存在问题的一些思考 [J] 中小企业管理与科技, 2014, (1): 226.
- [2]齐德成. 彩色建筑混凝土施工工艺技术[J]. 科技创新导报, 2016,(02):47.
- [3]张云川. 彩色建筑混凝土施工工艺探讨[J]. 建材技术与应用,2015,(03):25-26+39.
- [4]蔡昱. 彩色混凝土配制及性能的研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2012.
- [5]陈凌生. 彩色水泥混凝土路用性能试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2017.
- [6]张意, 黄煌. 结构彩色混凝土的配制方法及性能探讨[J]. 重庆建筑, 2012, (08): 50-52.
- [7]黄少文, 叉波英, 徐卫华 彩色水泥的色彩匹配及其稳定性控制[J], 江西建材, 2004(3): 3-5;
- [8]美国波特兰水泥协会. 彩色装饰混凝土[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2008.
- [9]史忠, 葛海涛, 吕丽萍. 彩色混凝土的研究及应用[J]. 市政技术. 2010,28 (1) :152-154.
- [10]徐永模, 张庆欢. 国内外装饰混凝土的发展简介 (I) [J], 建筑装饰材料世界.2009,1:60-70.
- [11]李小莉, 马剑雄, 李萍.3D 打印技术及应用趋势 [J] 自动化仪表, 2014, 35(1) : 1-5.
- [12]王灿才 3D 打印的发展现状分析 [J] . 丝网印刷, 2012, (9) : 39-43.
- [13]马敬畏, 蒋正武, 苏宇峰 3D 打印混凝土技术的发展与展望[J] 混凝土世界, 2014, (61).41-46.
- [14]李福平, 邓春林, 万晶. 3D 打印建筑技术与商品混凝土行业展望 [J] 混凝土世界, 2013, (45):28-29.
- [15]宋中南、石云兴 , 透水混凝土及其运用技术[M], 2011.
- [16]曾伟. 透水混凝土配合比设计及性能研究[D] 重庆大学, 2007
- [17]周渊. 透水混凝土的研制及在工程中的应用[J]上海建设科技, 2011 (3): 55-57
- [18]赵恒政 彩色透水混凝土路面施工工艺分析 [J]. 现代冶金 2010 (3):93-94
- [19]刘志刚 市政路面透水混凝土施工方法的探析 [J]城市建设理论研究: 2013-36
- [20]李鸽. 透水混凝土的试验研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2013.
- [21]张列. 透水混凝土施工工艺及材料的探讨[J]. 建设科技, 2017,(16):97- 98.