

混凝土3D打印技术的加固策略和耐久性特征：系统评价

阿塔乌尔阿曼，赵正勋

隶属机构：韩国土木与环境工程系

摘要：混凝土3D打印技术是用于建造建筑物和基础设施的新兴技术。混凝土3D打印技术在建筑中的应用被认为是该行业的一个新时期，因为它有可能颠覆传统的建筑实践。本文讨论了用于提高混凝土3D打印结构性能及其耐久性性能的加固方法。此外，本文确定了混凝土3D打印技术的未来研究需求。

关键词：混凝土3D打印；可打印的混凝土；耐用性

The Reinforcement Strategies and Durability Characteristics of 3D Concrete Printing: A Systematic Review

Atta Ur Ahman and Jung-Hoon Cho

Affiliation: Department of Civil and Environmental Engineering, Korea

Abstract: Concrete 3D printing is an emerging technique for the construction of buildings and infrastructure. The application of 3D concrete printing technology in construction is considered a new period for the industry due to its potential to disrupt conventional construction practices. This paper discusses reinforcement approaches used for increasing structural performance of 3D concrete printing and the durability performance of printed concrete. Besides, future research needs for 3D concrete printing are identified in this paper.

Keywords: Concrete 3D printing; printable concrete; durability

引言

混凝土3D打印是用于建造建筑物和基础设施的新兴技术。在这种方法中，在计算机辅助设计（CAD）软件中创建对象的3D模型，然后将其划分为多个切片，并生成用于移动打印头以挤出混凝土的G代码。通过喷嘴挤出混凝土和打印头的运动是由计算机控制的。用于3D打印的混凝土经过泵送、通过喷嘴挤出以及在连续层中精确沉积的阶段，以实现三维物体。挤压混凝土支撑自重并在不使用模板的情况下保持其形状并与后续层粘合。这种逐层混凝土挤出也称为增材制造混凝土和油墨印刷混凝土。

混凝土3D打印技术在建筑中的应用被认为是该行业的一个新时期，因为它有可能颠覆传统的建筑实践。由于其独特的特点，例如无需使用模板进行施工、减少人工参与、材料浪费最少和大规模定制，它得到了极大的认可。该技术完全节省模板成本，人工成本降低50-80%，现场施工材料浪费减少30-60%。此外，由于施工现场生产力的提高和施工时间的减少，它有可能进一步

降低施工成本。它被认为是一种很有前途的技术，可用于在月球和火星建造结构空间栖息地，也可用于军事目的。它所承诺的设计自由可以使建筑师和工程师制造复杂的形状和美观的混凝土构件和外墙。使用混凝土3D打印技术建造了许多混凝土结构，例如Apis Cor在迪拜的两层市政大楼、ICON在奥斯汀的社区村、美国海军陆战队在加利福尼亚州的车辆隐藏混凝土拱门、COBOD和Peri Group在柏林的房屋，盈创在苏州的河道护岸墙，在埃因霍温的预应力自行车桥，在上海的人行拱桥，以及在根特和那不勒斯的优化钢筋混凝土梁。然而，尽管有如此多样化的展示建筑项目，但由于技术挑战，将混凝土3D打印用于常规建筑的情况并不常见。目前，对3D混凝土打印的流变要求、力学性能和耐久性能的了解还处于发展阶段。常规和高性能混凝土混合物由于其流变特性与不同阶段的打印工艺要求不兼容，不能直接用于混凝土3D打印施工。因此，研究人员正在严格研究替代混凝土混合物，以满足打印过程的运输和加固要求。本文旨在讨论现有的混凝土3D打印加固策略以及3D打印

混凝土的耐久性，同时，提出了印刷混凝土耐久性能的研究需求。

混凝土 3D 打印技术的加固策略

传统的加固技术与混凝土 3D 打印工艺不兼容。研究人员提出了各种用于加固挤压混凝土的替代技术，下文将对此进行简要讨论：

一、从喷嘴处的电缆引入

这种方法在喷嘴处将连续的加强索引入挤出的混凝土中。其上缠绕加强电缆的卷轴附接到打印头，加强电缆的开口端通过孔进入喷嘴。通过喷嘴同时挤出混凝土和加强电缆，将加强电缆从连接到打印头的卷轴上缠绕下来，并将其连续引入混凝土细丝中。Bos 等人是第一个引入这种强化策略的人。他们的拉拔测试结果表明，电缆与印刷混凝土的结合强度低于其与浇注混凝土的结合强度。四点弯曲试验表明电缆增强印刷混凝土的延性破坏行为伴随着电缆滑动。弯曲试验结果表明，采用这种加固方法可以改善打印混凝土的弯曲响应。类似地，平行于打印方向的打印混凝土的延展性可以通过提供足够的电缆锚固长度来提高。Li 等人用这种技术加固了地质聚合物混凝土。测试了五种不同类型的纤维（钢、尼龙、碳、芳纶和聚乙烯微缆）。钢微电缆的使用使机械性能得到最大的改善，但剪切强度并没有随着电缆的引入而增加。拉拔试验表明，由于增强索的表面积减小且表面光滑，印刷混凝土所需的锚固长度大于常规混凝土。

Mechtcherine 等人使用矿物浸渍碳纤维（MCF）来增强混凝土细丝，将 MCF 电缆引入喷嘴处的挤压层，增强了印刷混凝土的抗弯强度。Ducoullombier 等人通过喷嘴同时引入了多种连续纤维和混凝土的共挤出。多根纱线在打印前连续添加到混凝土中，而混凝土的流变特性经过调整，使其挤出导致挤出长丝中的纤维拉挤。Lim 等人从喷嘴挤出过程中直接引入连续钢索来加固地质聚合物混凝土。四点弯曲试验表明，由于电缆加固，地质聚合物的抗弯强度提高了 290%。尽管在喷嘴处引入电缆增加了印刷混凝土的抗弯强度和延展性，但据报道加强电缆和印刷混凝土之间的界面是多孔的；因此，这种加固技术需要进一步发展。

二、在印刷混凝土中插入钢筋

另一种方法是首先打印混凝土层，然后将增强元件插入打印的混凝土中，并使用连接到打印头的设备。Perrot 等人通过在不同方向插入钢筋来加固印刷混凝土，这增加了印刷混凝土的抗弯钢筋。Bester 等人垂直于印刷层的界面插入钢纤维。纤维插入增加了印刷混凝土的抗弯强度和延展性。Geneidy 等人提出了同时用 U 形加

强电缆装订挤压层。连接到打印头的工具设计用于同时装订混凝土层，从而有效地装订挤压层。Marchment 和 Sanjaya 将螺旋形钢筋和变形钢筋插入打印元件中，并在三点弯曲试验下测量了抗弯强度。变形钢筋和螺旋钢筋分别将抗弯强度提高了 184% 和 142%。变形钢筋与混凝土的结合比螺旋钢筋更好，但由于钢筋的滑动，两种情况在破坏模式时都很脆弱。在另一项研究中，Marchment 和 Sanjayan 将传统的变形钢筋插入到打印层中，并观察到底层混凝土和插入钢筋之间的结合力高于顶层。Hass 和 Bos 通过在新印刷的混凝土中同时进行平移和旋转运动来插入螺旋型钢筋，以达到加固目的。进行了拉出和三点弯曲测试以评估该策略的有效性。在早期插入时，在螺钉加强件之间观察到合适的结合。这些加固方法有可能提高混凝土的力学性能，但这些方法大多是手动的。需要研究开发用于将增强元件插入挤压混凝土的自动打印头。

三、钢筋网

Marchment 和 Sanjayan 使用定制设计的喷嘴在挤出的混凝土细丝中嵌入垂直钢网来加固混凝土。网状增强材料在层中重叠，以在整个印刷墙的高度上产生连续的增强材料。实验测试表明，网格和混凝土之间具有很强的粘合强度。试样断裂是由于钢筋屈服而不是钢筋网从混凝土中滑落。通过嵌入的网状增强材料，弯曲强度提高了 170-290%。苏黎世联邦理工学院的研究人员发明了用于建筑墙体数字混凝土结构的网格成型：一个机器人制造了一个三维钢筋网，混凝土浇注在钢网内，从而形成承重墙结构。Wang 等人在混凝土层之间放置了一个水平纺织网以进行加固。三点弯曲试验表明，抗弯强度随着纺织网的层数增加而增加。在印刷混凝土中使用三层织物增加了与浇注混凝土梁相同的抗弯强度。Lin 等人使用聚合物网来加固混凝土。压缩测试表明，夹层聚合物网提高了印刷混凝土的延展性。

四、在传统条上打印

这种方法在新打印的层上水平放置钢筋，然后在它们上面打印额外的层。Baz 等人在传统钢筋（8 毫米）上打印混凝土，并测量了混凝土和易性对钢和打印混凝土之间的粘合强度的影响。结果表明，拉拔强度不受混凝土和易性和印刷方向的影响。然而，在另一项研究中，Baz 等人观察到高触变性可印刷混合物在混凝土和钢之间产生合适的粘合。在这些研究中，条形图的放置是手动的。

五、使用印刷增强材料

Mechtcherine 提议使用气体保护金属电弧焊工艺对钢筋进行 3D 打印。测试结果表明，印刷钢筋的延展性

和结合强度与传统钢筋相似。Weger 等人还观察到, 可以使用线材和电弧增材制造来生产具有复杂几何形状的增强材料, 然后使用选择性糊剂侵入将水泥复合材料与印刷增强材料粘合在一起。Katzner 和 Szatkiewicz 使用带肋结构打印塑料模板, 以替代 3D 打印混凝土的钢筋。试验表明, 混凝土硬化后与印刷塑料模板形成复合结构, 其抗弯强度显着提高。采用打印钢筋策略需要两种不同的设置, 一种用于打印钢筋, 另一种用于挤出混凝土, 这可能会增加运营成本。

3D 打印混凝土的耐久性

一些研究小组已经研究了 3D 打印混凝土的耐久性, 这些研究尝试将在下面给出的小节中讨论:

一、氯化物攻击

界面处孔隙的连通性增加了印刷品对氯化物攻击的敏感性。Van Der Putten 等人使用 NT Build 443 研究了氯离子对 3D 打印混凝土的攻击, 并将其与浇注混凝土进行了比较。印刷混凝土中的氯离子进入量高于浇注混凝土。随着层间时间间隔的增加, 氯化物侵蚀的深度同时增加。Blaakmeer 和 Lobo 研究了印刷混凝土的氯化物渗透和吸水性。由于其粗糙和多孔的性质, 外层的毛细吸水率比内部散装材料高 0.1 kg/m^3 。NT Build 492 测试表明混凝土的氯系数为 $4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。Weger 等人观察到, 增加时间间隔 (0、10 和 60 分钟) 会增加氯化物攻击的速率。Van Der Putten 等人还以 15 秒的时间间隔以可变的打印速度打印混凝土, 并使用中子射线照相评估水吸附。观察到吸水性随着印刷速度的增加而降低。获得的射线照片显示, 当打印表面暴露于水时, 水没有优先通过夹层进入。

二、收缩应变

Le 等人观察到, 在相对湿度为 60%、温度为 20°C 的室 ($855 \mu\text{m}$) 中固化的可打印混凝土混合物的收缩率高于其在水中固化的收缩应变 ($175 \mu\text{m}$)。Moelich 等人观察到, 由于没有模板、较低的砂胶比以及与传统混凝土相比, 可打印混凝土中的细粒含量更高, 打印混凝土中的塑性收缩应变更高。Federowicz 等人研究了添加减缩剂和箔绝缘材料对印刷混凝土收缩应变的影响。添加 2% 水泥重量的减缩剂使应变减少 7%, 而添加 4% 的减缩剂减少 23%。外部固化减少了 80% 的应变, 这是一种更有效的方法, 但它阻碍了混凝土的连续打印。Moelich 等人观察到大多数收缩裂缝发生在打印后的前两个小时内。提供收缩抑制钢筋会增加裂缝的密度。作者还报告了由于层间收缩应变不同而导致的挤压层之间的滑动。由于可打印混合物中使用的粘合剂量较高, 三维打印的

混凝土更容易出现收缩裂缝。此外, 3DCP 的收缩率也取决于固化环境。应采用印刷后养护环境来减少印刷混凝土的收缩应变。

三、冻融攻击

Assaad 等人研究了可打印混凝土在冻融侵蚀环境下的劣化, 并添加了引气剂和丁苯橡胶, 以了解其对打印混凝土抗冻侵蚀性能的影响。霜冻降低了印刷混凝土的抗压和抗弯强度, 但添加引气剂降低了结构损坏率。与其他力学性能相比, 层间结合强度受损更大。在引气剂存在下抗冻性的提高是由于存在额外的空隙, 而添加乳胶增加了混凝土的柔韧性, 从而弥补了冻害造成的损害。加气剂被有意添加到混凝土中, 以增加其在寒冷地区对冻融侵蚀的抵抗力。Das 等人观察到, 混凝土的泵送会减小空隙直径和间距系数, 这些空隙直径和间距系数是故意添加到混凝土中以抵抗冻融攻击的。

四、火攻击

将 3D 打印混凝土加热到高温会降低其机械和微观结构性能, 类似于浇注混凝土。Cicione 等人比较了 3D 打印混凝土与传统混凝土的耐火性。铸造和印刷的样品暴露在高热通量 ($50\text{--}60 \text{ kW/m}^2$) 下, 直到温度达到 300°C 。打印混凝土的耐火性能与浇注混凝土相似, 只是加热会导致浇注混凝土剥落, 但会导致打印混凝土界面处分层。与浇注混凝土相比, 印刷混凝土具有更好的抗剥落性可归因于其连通孔隙率和更高的渗透性。D'Hondt 等人将打印出来的混凝土暴露在高温 (120 、 250 、 400 和 600°C) 下, 并测量了其剩余的机械性能。测试结果表明打印混凝土的抗压和抗弯强度、刚度和各向同性特性保持不变。Kruger 等人研究了 3D 打印混凝土构件的热性能。印刷层的分层发生在高温下, 这与浇注高强度混凝土中发生的剥落相反。垂直于界面添加钢纤维在热攻击后产生延展性行为。如果加热速率很高, 则 3D 打印的混凝土会爆炸性地剥落。然而, 在 3D 打印混凝土中使用聚乙烯 (PE) 纤维可以降低剥落的风险, 因为它会在 200°C 左右熔化并在进一步加热时蒸发。PE 纤维的蒸发会产生微裂纹, 水蒸气可以通过这些微裂纹释放出来, 从而降低剥落风险。

印刷混凝土耐久性能的研究需求

为了测量印刷混凝土在恶劣环境条件下的耐久性能, 需要进行额外的深入调查。由于使用了不同的配合比、高剂量的化学外加剂和逐层施工方法, 3D 打印混凝土的耐久性行为将不同于传统混凝土。四个主要影响参数, 包括混合设计、印刷工艺参数、硬化印刷混凝土的运输性能和现场印刷混凝土的周围环境, 将决定印刷混凝土

的耐久性行为。粘结剂种类、水胶比、粘结剂与骨料比、减水剂、缓凝剂、增粘剂等化学外加剂的用量,使材料成为印刷混凝土的一部分,需要在恶劣的环境条件下保持印刷混凝土的完整性。孔径分布、孔的连通性、体层的孔隙率、垂直和水平界面以及混凝土渗透性决定了敌对离子进入打印混凝土内部的速率,而这些属性取决于打印工艺参数,例如喷嘴高度、打印时间间隔和打印速度。印刷混凝土现场的暴露环境,例如硫酸盐、氯化物、碳化或浸出侵蚀条件,定义了降解机制以及对机械和微观结构性能的后继影响。未来的研究应该根据这四个参数来评估耐久性性能。

结论

本文重点介绍了提高打印混凝土硬化性能的最新研究,并讨论了3D打印混凝土在腐蚀性环境中的耐久性性能。从这项审查工作中确定了以下结论点和研究需求:

-在打印机喷嘴处将钢缆引入混凝土细丝中以及在打印的混凝土中插入/装订钢等加固尝试会在钢的周围产生孔隙。这些加固方法需要进一步开发,以同时加固混凝土并与打印的混凝土形成致密的界面;

-现有的耐久性测试方法是具有各向同性特性的浇注混凝土设计的。相反,印刷混凝土具有各向异性孔隙率特性。因此,需要研究侵蚀性离子进入打印混凝土的传输模式,并开发打印混凝土耐久性行为的新测试方法。此外,应制定基于性能的标准来设计和打印耐用的3D打印混凝土结构。

参考文献:

[1]Van den Heever, M.; Bester, F.; Pourbehi, M.; Kruger, J.; Cho, S.; van Zijl, G. Characterizing the Fissility of 3D Concrete Printed Elements via the Cohesive Zone Method. In Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Eindhoven, The Netherlands, 6 - 9 July 2020; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 489 - 499.

[2]Kinomura, K.; Murata, S.; Yamamoto, Y.; Obi, H.; Hata, A. Application of 3D Printed Segments Designed by Topology Optimization Analysis to a Practical Scale Prestressed Pedestrian Bridge. In Proceedings of the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital

Fabrication, Eindhoven, The Netherlands, 6 - 9 July 2020; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 658 - 668.

[3]Le, T.T.; Austin, S.A.; Lim, S.; Buswell, R.A.; Law, R.; Gibb, A.G.F.; Thorpe, T. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cem. Concr. Res.* 2012, 42, 558 - 566.

[4]Albar, A.; Chougan, M.; Al-Kheetan, M.J.; Swash, M.R.; Ghaffar, S.H. Effective extrusion-based 3D printing system design for cementitious-based materials. *Results Eng.* 2020, 6, 100135.

[5]Arunothayan, A.R.; Nematollahi, B.; Ranade, R.; Bong, S.H.; Sanjayan, J. Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. *Constr. Build. Mater.* 2020, 257, 119546.

[6]Yu, J.; Leung, C.K. Impact of 3D printing direction on mechanical performance of strain-hardening cementitious composite (SHCC). In Proceedings of the RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Zurich, Switzerland, 9 - 12 September 2018; pp. 255 - 265.

[7]Bos, F.; Bosco, E.; Salet, T. Ductility of 3D printed concrete reinforced with short straight steel fibers. *Virtual Phys. Prototyp.* 2019, 14, 160 - 174.

[8]Ding, T.; Xiao, J.; Zou, S.; Zhou, X. Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers. *Compos. Struct.* 2020, 254, 112808.

[9]Arunothayan, A.R.; Nematollahi, B.; Ranade, R.; Bong, S.H.; Sanjayan, J.G.; Khayat, K.H. Fiber orientation effects on ultra-high performance concrete formed by 3D printing. *Cem. Concr. Res.* 2021, 143, 106384.

[10]Gaudilliè re, N.; Duballet, R.; Bouyssou, C.; Mallet, A.; Roux, P.; Zakeri, M.; Dirrenberger, J. Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete of Integrated Formwork for Truss-Shaped Pillars; Springer: Cham, Switzerland, 2019; pp. 459 - 472.

[11]Zhu, Y.; Wen, C.K.; Xu, G.D.; Liu, D.; Chen, J. The Preparation and Performance of the Cement-Based Concrete 3D Printing Materials. *Mater. Sci. Forum* 2018, 932, 131 - 135.