

3D 打印混凝土界面性能的超声波表征与分析

齐 成, 吴宇清, 朱 鹏, 郑 朋

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为研究 3D 打印混凝土(3D printed concrete, 3DPC)界面黏结性能对超声无损检测的影响, 打印具有不同层数和间隔的混凝土试件, 并采用超声设备对试件进行无损检测, 同时利用劈裂试验得到 3DPC 界面黏结强度。结果表明, 3DPC 表现出比浇筑混凝土更慢的波传播速度和更小的波幅, 且随着打印层数和间隔的增加, 振幅衰减也随之增加。振幅衰减可归因于 3 个部分, 即超声波在换能器与试件之间传输造成的损失、混凝土高度的沿程损失以及打印界面层造成的损失。与浇筑混凝土相比, 3DPC 的超声波幅明显偏低, 随着打印层数的增加, 3DPC 界面黏结强度呈现先增加后下降的趋势, 且与波幅损失之间存在线性关系。

关键词: 3D 打印混凝土(3DPC); 无损检测; 界面性能; 超声波
中图分类号: TU528; TB553 **文献标志码:** A

Ultrasonic Characterization and Analysis of Interface Properties in 3D Printed Concrete

QI Cheng, WU Yuying, ZHU Peng, ZHI Peng
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to investigate the impact of interface bonding performance on the non-destructive testing of 3D printed concrete (3DPC), concrete specimens with different layer counts and time intervals were printed and subjected to non-destructive testing using ultrasonic equipment. Additionally, splitting tests were conducted to determine the interfacial bond strength of 3DPC. It is shown that 3DPC exhibits slower wave propagation speeds and smaller amplitudes compared to cast concrete. Moreover, with the increase in the number of printed layers and time intervals, the amplitude attenuation also increases. Amplitude attenuation can be attributed to three parts: the loss caused by ultrasonic wave transmission between the transducer and the specimen,

the along-path loss of concrete height, and the loss caused by the printed interface layer. The ultrasonic wave amplitude of 3DPC is significantly lower compared to cast concrete, as the number of printed layers increases, the interface bond strength of 3DPC initially increases and then decreases, showing a linear relationship with the amplitude loss.

Keywords: 3D printed concrete (3DPC); non-destructive testing; interface properties; ultrasonic wave

随着全球气候问题加剧, 低碳与环保已成为建筑行业的重要发展方向。3D 打印混凝土(3D printed concrete, 3DPC)作为新兴的自动化施工技术, 凭借材料利用率高、施工快和人工需求低等优势而受到广泛关注。研究表明, 与传统浇筑方式相比, 3DPC 可减少约 60% 的建筑废料、缩短 50%~70% 的工期, 并降低 50%~80% 的劳动力投入, 同时总体建设成本可减少约 35%^[1-2]。因此, 3DPC 在减少建筑废弃物、提升资源效率和推动绿色施工方面具有显著潜力。

与传统混凝土不同, 3DPC 采用逐层堆叠成型, 层间不可避免形成界面, 该区域是导致 3DPC 力学性能出现各向异性的主要来源^[3-10]。已有研究普遍认为, 界面黏结性能是影响各向异性的核心因素^[11-17]。Panda 等^[18-19]、Roussel 等^[20-21]的研究表明, 界面强度降低主要源于 2 类机制: 其一, 打印条带之间形成的弱键连接; 其二, 下层材料在上层沉积前发生结构重构并超过临界屈服应力, 从而削弱层间黏结。这些发现共同揭示了界面黏结不足是 3DPC 宏观力学弱化的关键原因。

相较于传统浇筑混凝土, 3DPC 采用逐层堆叠的成型方式, 在相邻打印层之间不可避免地形成界面

收稿日期: 2024-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(52178299)

第一作者: 齐 成, 博士生, 主要研究方向为 3D 打印混凝土智能监测诊断。E-mail: qicheng@tongji.edu.cn

通信作者: 吴宇清, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构健康监测。E-mail: ycwu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

层,而该界面正是导致3DPC力学性能与普通混凝土存在差异的主要原因。该界面结构在材料硬化后会引发明显的各向异性力学行为^[9-10]。已有研究普遍认为,界面黏结性能是影响3DPC各向异性的关键控制因素^[11-17]。Panda等^[18-19]指出,界面区域的强度降低主要源于打印过程中细丝之间形成的弱键连接。与此同时,Roussel等^[20-21]的研究表明,在逐层沉积过程中,若下层材料在上层沉积前发生过度重构并超过临界屈服应力,则会导致2层之间的黏结不足,从而形成力学薄弱界面。

针对3DPC界面黏结性能,已有研究从打印工艺与材料特性等方面展开了系统探索。Tay等^[22]通过流变测试揭示材料变形与流动行为,并指出打印间隔增大导致界面孔隙增多、气孔变大,从而使抗拉强度降低。Zareiyan等^[23]进一步发现,过长的打印间隔会加速表层水分蒸发,削弱界面性能。Roussel^[20]的试验亦显示,在干燥环境中界面强度可在数十分钟内下降约50%。这些研究共同表明,打印间隔与环境湿度主要通过影响层间含水率来作用于界面强度。Sanjayan等^[24]则强调,基材表面含水率较高时,即使打印间隔较长,界面黏结性能也可维持在较高水平。除打印间隔外,其他因素也显著影响界面性能。Keita等^[25]指出,提高水灰比(W/C)有助于增强黏结强度,Wolfs等^[26]则发现,减小喷嘴与挤出层间距可显著改善黏结效果。打印制度还会改变界面孔隙特征,如体积、形状和取向等。Kruger等^[27]研究结果表明,3DPC界面孔隙多沿打印方向拉长且呈扁平状,较传统混凝土的球形孔隙更易引起应力集中,从而减弱力学性能。

在宏观研究基础上,微观分析进一步阐明了界面失效机制。Geng等^[16]利用X射线CT(X-ray computed tomography, X-CT)、扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)技术及纳米压痕,研究界面孔结构与微观力学行为,并提出双层递阶结构模型。结果表明,界面强度与孔隙率密切相关。Zhang等^[28]发现,底层在较大压力下易发生变形并形成连续孔隙,从而降低强度。Marchment等^[29]通过图像分析定量评估了界面的有效结合面积,为理解界面结构与宏观力学性能之间的关联提供了重要依据。

已有研究表明,3DPC界面黏结性能可采用力学性能模拟^[6]。然而,由于3DPC成型方式不同于传统浇筑混凝土,因此现有无损检测方法难以直接应用。超声检测是传统混凝土力学性能检测的重要方法,超声波传播特性受材料弹性模量、泊松比、密度及几

何形状等影响,3DPC中存在的界面层使超声波传播行为发生改变。因此,揭示界面层对超声传递的影响机制,是实现3DPC超声表征的关键。

基于此,研究了3DPC界面层的超声传递特性与黏结性能的关系。通过制备不同打印层数和间隔的3DPC试件,结合超声检测,分析打印层数和间隔对界面黏结性能及超声传播的影响。随后,基于试验结果构建3DPC超声传播模型,并提出基于超声检测的界面黏结性能经验公式,为3DPC超声表征方法的建立与优化提供理论支持。

1 试验方案

1.1 3D打印基材

细骨料混凝土(fine aggregate concrete, FAC)能够满足3D打印所需的抗压强度,同时具有成本低、碳排放低等优势,因此被广泛用于3DPC相关研究。3D打印材料配比见表1。自然砂(natural sand, NS)为细骨料,普通硅酸盐水泥(ordinary Portland cement, OPC)为胶凝材料,羟丙基甲基纤维素(hydroxypropyl methylcellulose, HPMC)和纳米黏土(nano clay, NC)为触变剂,葡萄糖酸钠(sodium gluconate, SG)为缓凝剂,聚羧酸盐高效减水剂(superplasticizer, SP)为减水剂。

表1 3D打印材料配比

Tab.1 3D printing material ratio 单位: g·L⁻¹

OPC	NS	HPMC	NC	SP	SG	水
1 000	1 000	1.28	5.63	0.7	0.7	350

1.2 试件制备

共浇筑了2种混凝土试块,分别为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件和100 mm×100 mm×300 mm的棱柱试件,同时设计了8类3DPC试件,变量包括打印层数 n (5、6、7、8、9、10)以及打印间隔 t (0.5、1.0 min)。打印间隔为当喷嘴绘制出二维轮廓以打印一层时,到达下一层上相同位置所需的时间。打印间隔取决于喷嘴的移动速度和打印试件的长度。打印层数与混凝土高度成正比,具体试验参数见表2。

在试件编号中,3D代表3DPC,3D-10-0中的10代表打印层数,0代表打印间隔。需要说明的是,并不存在真正意义上的打印间隔为零,在本次试验中,打印间隔为零时实际平均打印间隔为5.7 s。C代表浇筑混凝土,后缀代表浇筑混凝土高度,与相应层数的3DPC预期高度一致。

表2 试件信息

Tab.2 Specimen information

试件编号	n	界面层数	预期高度/mm	实际高度/mm	打印间隔/min
C-10			100	100	0
C-30			300	300	0
3D-5-0	5	4	50	48	0
3D-6-0	6	5	60	57	0
3D-7-0	7	6	70	62	0
3D-8-0	8	7	80	76	0
3D-9-0	9	8	90	82	0
3D-10-0	10	9	100	95	0
3D-10-0.5	10	9	100	92	0.5
3D-10-1.0	10	9	100	89	1.0

3D打印机的挤出喷嘴为10 mm×100 mm的矩形,打印层高度为10 mm,打印速度为70 mm·s⁻¹。在打印前,首先对打印机仓进行清洗,然后将FAC材料添加至打印机仓中,按照预编码代码操作打印机进行打印。在打印完成后,使用塑料包装覆盖试件表面以进行固化。考虑到打印所花费的时间,对于打印间隔为0.5、1.0 min的3DPC试件,在打印完每层后实际打印间隔分别为35.7、65.7 s。

参照之前的研究,将打印方向定义为X轴,同一水平面垂直方向定义为Y轴,沉积方向定义为Z轴。在本次试验中,为便于简化并控制单一变量,在Y方向上仅打印一条带混凝土。因此,印刷界面上只有中间层,层间界面垂直于沉积方向。所有打印试件的宽度为100 mm、长度为400 mm,标准试件的高度为100 mm。由于3DPC采用逐层堆叠的浇筑方式,因此最终打印高度只有95 mm左右。每个3D打印试件的界面层数均比打印层数少一层。3D打印设备见图1。

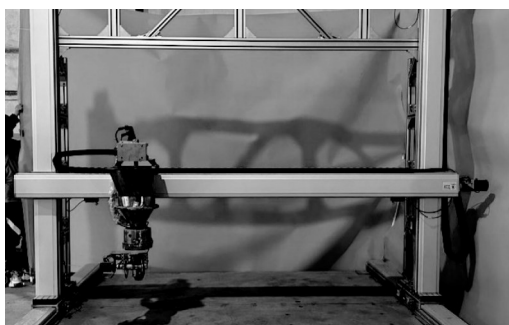


图1 3D打印设备

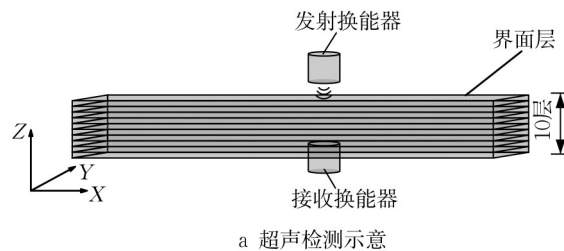
Fig.1 3D printing equipment

1.3 测试设置

1.3.1 3DPC 超声检测设置

试验是在试件养护28 d后进行的,试验的超声检测过程见图2。以标准3D打印试件100 mm×100 mm×400 mm为例,每个试件有4个测点,每个

测点间隔为100 mm,分别利用非金属超声检测仪对试件进行检测。采用北京智博联科技股份有限公司生产的ZBL-U5系列非金属超声检测仪(U5300),通道数为单发双收,同时测量的剖面数为2。在进行测量前,首先需设置参数并进行调零操作。本次试验中,零声时为8 μs,采样间隔为0.4 μs,采样长度为2 048,发射电压为500 V。除默认参数外,每一个测区都要输入对测间距。对于标准浇筑对照试件,间距为100 mm。3DPC因层间堆叠造成挤压而略小于预期高度,按照实际尺寸输入。



a 超声检测示意



b 超声检测现场

图2 超声检测

Fig.2 Ultrasonic testing

在进行混凝土超声检测时,首先用信号线将2个平面换能器分别与仪器的发射、接收端相连,并将换能器分别耦合在待测构件的2个测试面测点上。发射换能器将电源的电输出转化为振动输出,经过待测试件后,再由接收换能器将振动输入转化为电信号,最后通过采样记录超声波传递的状态。

1.3.2 界面黏结抗拉检测设置

在完成超声检测后,将每个3D打印试件切割成

界面大小为 $10n \times 100$ mm的试块,去掉两边不平整部分,每个3D打印试件可以切割成3个试块。对3D打印试件中间界面层进行劈裂试验,用劈裂抗拉强度表征界面黏结强度。在加载时,将劈裂荷载与界面对齐,以确保加载在正确位置上,加载速率为 $0.05 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。混凝土的界面黏结强度计算式为

$$f_{\text{bs}} = \frac{2F}{\pi S} \quad (1)$$

式中: F 为试件的劈裂荷载; S 为试件的劈裂面面积。对于 $10n \times 100$ mm的非标准试件,乘以0.85的尺寸换算系数。

2 理论及结果

2.1 振幅衰减理论

当超声波从材料1入射至材料2时,设比声阻抗分别为 Z_1 和 Z_2 , $x=0$ 为两介质的分界面。由于两者比声阻抗不同,因此当超声波沿 x 方向入射到分界面上时会发生透射与反射。当入射角为 90° 时,反射系数计算式为^[30]

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

对于混凝土材料,比声阻抗为 $7 \sim 10 \times 10^6 \text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$;对于空气,比声阻抗为 $0.4 \text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 。因此,可以简单认为,当超声波入射至比声阻抗不同的材料时,会发生一定程度的反射。超声波幅衰减见图3。根据这一性质,能够实现依赖于超声波幅变化的3DPC界面黏结强度超声表征。

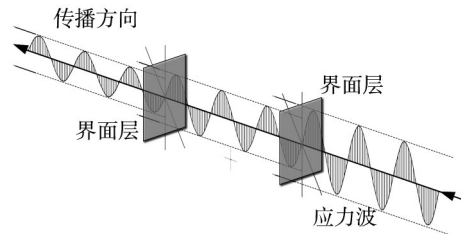


图3 超声波幅衰减

Fig.3 Attenuation of ultrasonic wave amplitude

2.2 试验结果

声时和波速为8次测量的均值,界面黏结强度为6次测量的均值,具体结果见表3。

表3 试验结果

Tab.3 Experimental results

试件编号	声时/ μs	平均波速/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	波幅/dB	界面黏结强度/MPa
C-10	24.1	4.27	149.56	2.66
C-30	73.2	4.10	147.71	2.66
3D-5-0	12.8	3.75	136.82	1.28
3D-6-0	15.0	3.80	135.45	1.48
3D-7-0	16.1	3.85	135.31	1.67
3D-8-0	20.3	3.74	134.88	1.73
3D-9-0	22.7	3.61	130.50	1.65
3D-10-0	24.4	3.89	127.79	1.53
3D-10-0.5	24.3	3.79	124.10	0.81
3D-10-1.0	24.0	3.71	121.71	0.68

随着打印层数的增加,声时随传播距离增加而增加。对于100 mm高的浇筑混凝土,超声波的平均传播速度为 $4.27 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$,而对于3DPC,超声波的传播速度明显低于普通浇筑混凝土。可以认为,由于打印层与打印层之间存在间隙,导致超声波传递速度降低。然而,要建立3DPC界面黏结强度与波速良好的线性关系,从试验结果来看,仅仅依赖于波速是不理想的。

波幅和界面黏结强度与打印层数的关系见图4。与浇筑混凝土相比,3DPC的波幅更低,且随着打印层数的增加,检测到的波幅逐层递减。当打印层数从5增加到8时,波幅的下降幅度较小,而当打印层数从8增加到10时,波幅的下降幅度显著增大。

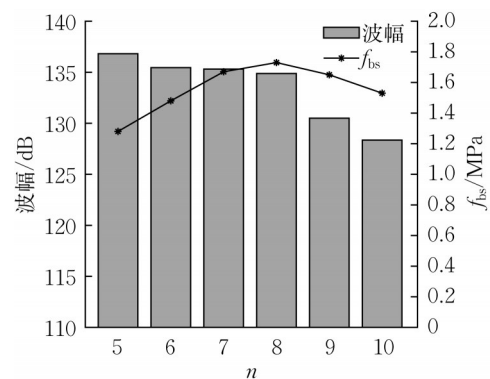


图4 波幅和界面黏结强度与打印层数的关系

Fig.4 Wave amplitude and interlayer bond strength as a function of printing layer number

劈裂试验结果显示,3DPC的界面黏结强度受层数影响显著。当打印层数从5增加到8时,界面黏结强度随层数增加而增强。然而,当打印层数从8增加至10后,界面黏结强度开始下降,表明重力影响了3DPC的界面黏结性能。Zhang等^[14]采用压汞测孔技术对打印结构各界面层的孔隙率进行测定。结果显示,结构的上层和底层界面层孔隙率高于中间层,导致中间层具有更高的黏结强度,从微观角度进一步揭示了重力对界面黏结强度的影响。

3 3DPC 超声表征模型

3.1 模型描述

在研究3DPC界面层的孔隙结构时,通常采用X-CT技术对孔隙进行识别和成像。对于水化产物、微裂缝及孔隙形态的精细观察,则需要借助分辨率更高的SEM进行辅助分析。已有研究表明,3DPC界面层具有显著的孔隙特征。这些孔隙可能由较大的单个孔隙组成,也可能由多个相互连通的小孔隙聚集形成较大的孔隙系统,并呈现出不规则形态,部分较大的孔隙甚至具有连续性。此外,界面层的水分迁移对孔隙结构的形成起关键作用,而孔隙结构的特性反过来又影响水分的传输路径。孔隙结构的形成导致3DPC界面黏结性能在宏观尺度上受到显著影响,这一特征使得3DPC的超声检测方法与传统浇筑混凝土存在本质区别,成为影响检测精度和可靠性的关键因素。

3DPC界面层形成过程见图5。在打印完一层混凝土后,顶部混凝土首先暴露于空气中,受环境因素(如温度、湿度等)的影响,水化反应过程可能与内部混凝土有所不同。由于水分蒸发较快,因此表层混凝土的水化反应可能受到一定程度的抑制,内部混凝土则因相对封闭的环境而保持较高含水率,水化反应可能更加充分,如图5a所示。随着后续混凝土的打印,在重力和挤压作用下,水分发生迁移,导致孔隙结构的形成,如图5b所示。此时,由初始层表面混凝土、后续层底部混凝土以及复杂的孔隙结构共同组成了3DPC界面层。由于界面层上下混凝土的物理性质存在差异,因此超声波在传播至该层时发生一定程度的波幅衰减。

考虑界面层孔隙以及界面层介质不同的影响,建立超声波穿过时的损失理论模型。将界面层视作由空气和不同混凝土介质组成的复合界面,超声波通过该复合界面时发生波的反射与透射,而反射率

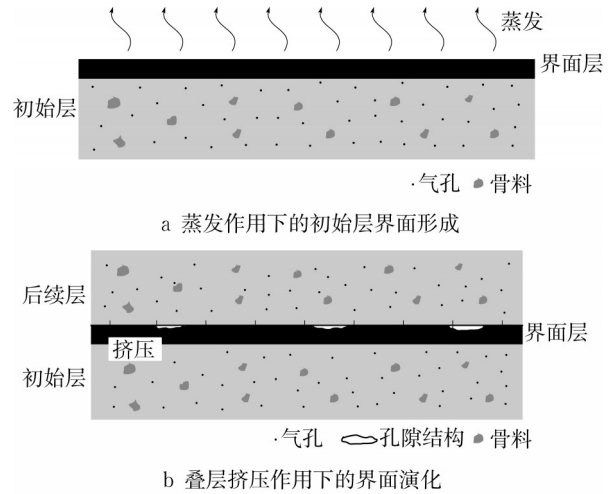


图5 3DPC界面层形成过程

Fig.5 Formation process of the interlayer in 3D printed concrete

与透射率与名义孔隙率 e_n 有关。名义孔隙率并不是真正意义上的孔隙率,而是考虑孔隙、夹杂、不均匀等复合因素对打印界面影响超声波传递的定量表征。超声波由混凝土传到孔隙再传到混凝土时,可以认为超声波传递的介质发生改变且经过绝对硬界面,此时反射系数 $R_0=1$,而当超声波穿过界面层上下混凝土时,则认为此时反射系数 $R_1=f(S)$,该函数是与环境相关的参数。每个界面层的反射系数

$$R_i = e_n R_0 + (1 - e_n) R_1 \quad (3)$$

混凝土是一种高异质性材料,其中存在聚合物和孔隙,这些结构将在一定程度上影响超声波传递。虽然在宏观角度将混凝土视作各向同性,但是当超声波穿过时仍会造成轻微衰减。

3.2 波幅损失函数的建立

3.2.1 理论推导

为了建立损失方程,引入波幅损失概念并以 L 表示,将损失定义为

$$U_i = (1 - L)U_0 \quad (4)$$

式中: U_0 为未经过任何损失下接收换能器的输出电压; U_i 为声学信号经试件传播后由接收换能器测得的输出电压。当传感器表面的质子振动速度为 $1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,传感器可以输出1 mV的电压。

波幅的变化特征可作为进一步分析影响波幅衰减的主要因素。目前,可以初步将波幅的衰减划分为3个部分:①超声波通过耦合剂进入混凝土以及超声波穿出混凝土至耦合剂所造成的损失 L_{con} ,在同一批次的检测中,该部分的损失应该相同且为常数;②超声波在混凝土内部的沿程损失 L_n ,该损失与混

凝土高度 h 成正比, 超声波在混凝土中穿过的距离越远, 该部分的损失越大; ③3DPC 界面层所造成的波幅损失 L_s , 在超声波到达界面层时发生波的反射与透射, 从而造成首波波幅的衰减, 相较于前2个部分, 这一部分造成的波幅损失最大。因此, 可以将整个波幅的损失 L_{total} 表征为

$$(1 - L_{\text{total}}) = (1 - L_{\text{con}})(1 - L_h)(1 - L_s) \quad (5)$$

界面层所造成的波幅损失可以划分为每层所造成的损失的累积:

$$(1 - L_s) = (1 - L_1)(1 - L_2) \cdots (1 - L_n) = \prod_{i=1}^n (1 - L_i) \quad (6)$$

式中, L_i 为界面层 i 所造成的波幅损失。 L_i 的物理意义为超声波穿过界面层后还剩下的强度, 写为

$$L_i = R_i \quad (7)$$

可以认为:

$$\frac{\partial \log(1 - L_h)}{\partial h} = \eta \quad (8)$$

$$\frac{\partial \log(1 - L_s)}{\partial n} = f(s, \sigma) \quad (9)$$

式中: η, σ, s 为与材料、打印条件相关的参数。

从非金属超声检测仪所读出的数据并非传感器输出电压, 两者关系为

$$A = 20 \log U \quad (10)$$

式中: A 为检测仪的读数; U 为接收换能器的输出电压。上述3项波幅损失可写为以下形式:

$$\begin{cases} A_{\text{con}} = 20 \log(1 - L_{\text{con}}) \\ A_h = 20 \log(1 - L_h) \\ A_s = 20 \log(1 - L_s) \end{cases} \quad (11)$$

可以得到

$$A_i = A_0 + 20 \log(1 - L_{\text{total}}) \quad (12)$$

式中: A_0 为接收换能器直接相连所测得的波幅; A_i 为经过待测试件所测得的波幅。

对于浇筑混凝土, 式(12)可以写为

$$A_i = A_0 + A_{\text{con}} + A_h \quad (13)$$

对于3DPC, 式(12)可以写为

$$A_i = A_0 + A_{\text{con}} + A_h + A_s \quad (14)$$

3.2.2 常数波幅损失及沿程波幅损失的确定

直接将发射换能器与接收换能器相连, 得到没有任何衰减下波幅均值 $\bar{A}_0 = 151.34$ dB; 当超声波穿过高度为 100 mm 的混凝土立方体时, 波幅均值 $\bar{A}_1 = 149.56$ dB; 当超声波穿过高度为 300 mm 的混凝土棱柱时, 通过多次检测得到的波幅均值 $\bar{A}_2 =$

147.71 dB。将上述数据代入式(8)、(11)及(13)联立可得:

$$\begin{cases} A_{\text{con}} = -0.85 \text{ dB} \\ A_h = -9.3 \times 10^{-3} h \text{ dB} \end{cases} \quad (15)$$

3.2.3 界面层波幅损失的确定

根据式(14)可以得到

$$A_s = A_i - A_0 - A_{\text{con}} - A_h \quad (16)$$

假定每个界面层所造成波幅损失都是相同的, 则

$$10^{A_s/20} = (1 - L_s) = (1 - L_{\text{ave}})^n \quad (17)$$

式中, L_{ave} 为所有层波幅损失的均值。将式(16)的结果代入式(17), 可以得到 A_s, L_s, L_{ave} 。界面层波幅损失见表4。由于浇筑混凝土不存在界面层, 因此其界面层的波幅损失视作零。

表4 界面层波幅损失

Tab.4 Wave amplitude loss at the interlayer

试件编号	$A_0 + A_{\text{con}} + A_h / \text{dB}$	A_s / dB	$1 - L_s$	$1 - L_{\text{ave}}$
C-10			1.000 0	1.000 0
3D-5-0	150.04	13.22	0.218 1	0.683 4
3D-6-0	149.96	14.51	0.188 2	0.716 0
3D-7-0	149.91	14.60	0.186 1	0.755 6
3D-8-0	149.78	14.90	0.179 8	0.782 6
3D-9-0	149.73	19.23	0.109 3	0.758 3
3D-10-0	149.61	21.82	0.081 1	0.756 5
3D-10-0.5	149.63	25.53	0.052 8	0.721 3
3D-10-1.0	149.66	27.95	0.040 0	0.699 4

3.3 界面黏结强度的超声表征

超声表征的意义在于通过波幅的衰减表征3DPC界面黏结强度。通过3.2.3节可以计算3DPC所有层波幅损失的均值 ($1 - L_{\text{ave}}$), 反映3DPC试件界面层平均波幅衰减。从图6可以看出, 几乎所有的点都在一条直线上。由此认为, ($1 - L_{\text{ave}}$) 与 f_{bs} 有着很好的线性关系。因此, 将波幅的损失用来表征界面黏结强度是可行的。将界面黏结强度描述为

$$f_{\text{bs}} = -1.623 2 + 4.284 9(1 - L_{\text{ave}}) \quad (18)$$

在本次案例分析中, 实际测得的波幅为

$$A_i = 150.19 - 9.3 \times 10^{-3} h - 20 \log \frac{4.284 9}{f_{\text{bs}} + 1.623 2} \quad (19)$$

其中, 150.19 为没有任何衰减下波幅与常数波幅损失之和 ($A_0 + A_{\text{con}}$), $-9.3 \times 10^{-3} h$ 为混凝土内部的沿程损失 A_h , $-20 \log \frac{4.284 9}{f_{\text{bs}} + 1.623 2}$ 为3DPC界面层所造成的波幅损失 A_s 。

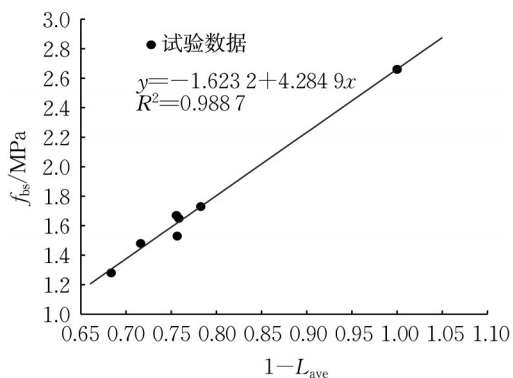


图6 平均波幅损失与界面黏结强度的关系

Fig.6 Relationship between average wave amplitude loss and interlayer bond strength

3.4 打印间隔分析

由于采用分层制造的方法,因此在层与层之间存在打印间隔。打印间隔越久层间含水率越低,进而影响界面黏结强度。

除了对混凝土进行连续打印外,还分别打印了每层间隔为0.5、1.0 min且层数为10的试件,对界面黏结强度取均值,分别得到0.81、0.68 MPa。相对于连续打印的试件,打印间隔为0.5、1.0 min试件的界面黏结强度有很大程度的降低。按照3.2.3节中的公式,可以分别计算得到每层打印所造成的波幅损失。值得注意的是,利用3.3节的经验公式并不能很好地估算界面黏结强度。当打印间隔更长时,波幅略有下降,而界面黏结强度下降则更明显。因此,可以认为界面黏结强度并不单单由界面层孔隙率所控制。由图7可见,对于浇筑混凝土,打印间隔为0.5、1.0 min时,界面黏结强度保持一致,均为2.66 MPa。

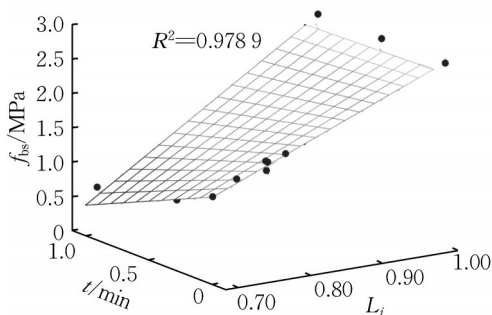


图7 考虑打印间隔的波幅损失和界面黏结强度关系

Fig.7 Relationship between wave amplitude loss and interlayer bond strength considering printing time interval

此时,界面黏结强度可以表示为

$$f_{bs} = -1.74 + 4.41(1 - L_{ave}) - 2.58t +$$

$$2.56(1 - L_{ave})t \quad (20)$$

当存在打印间隔时,底层混凝土水分的蒸发导致混凝土界面黏结强度迅速降低。然而,这种情况对超声波传递并不敏感,打印间隔会影响3DPC表面水分和水化产物组成的时变特性,从而很大程度地影响界面黏结性能。

4 结论

(1) 3DPC界面层会影响超声波的传递,从而发生波的反射与透射,使波幅大幅降低。

(2) 基于波速的混凝土强度检测方法难以有效应用于3DPC,而基于波幅损失的检测方法则更适用于界面黏结强度的无损检测。为此,建立了基于波幅损失的3DPC超声波无损检测模型,并实现了界面黏结强度的定量表征。

(3) 重力因素会影响3DPC的界面黏结性能,对于打印层数偏低(5~7)和偏高(9~10)的3DPC,界面黏结强度均比8层的要低。界面黏结强度直接响应力波的传播特性,黏结强度越高,波幅损失越小。黏结强度与波幅损失之间呈线性相关关系。

(4) 更长的打印间隔能明显降低3DPC的界面黏结强度,超声波的衰减对打印间隔不敏感。通过增加打印间隔,可以很好地建立波幅损失-界面黏结强度模型。

作者贡献声明:

齐成:试验,数据处理与分析,论文撰写及修改。

吴宇清:方法构思,研究工作指导。

朱鹏:研究工作指导。

邳朋:试验,方法构思。

参考文献:

- [1] ZHANG J, WANG J, DONG S, *et al.* A review of the current progress and application of 3D printed concrete [J]. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 125: 105533.
- [2] TOBI A L M, OMAR S A, YEHAIA Z, *et al.* Cost viability of 3D printed house in UK [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 319: 012061.
- [3] LIU S, HE Z, HU L. Interface adhesion of fresh-on-fresh cast ultra-high performance concrete-normal concrete: effect and mechanism of pour delay and ambient humidity [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 78: 107679.
- [4] DING T, XIAO J, MECHTCHERINE V. Microstructure and mechanical properties of interlayer regions in extrusion-based

- 3D printed concrete: a critical review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 141: 105154.
- [5] PANDA B, CHANDRA P S, JEN T M. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material[J]. *Materials Letters*, 2017, 209: 146.
- [6] XIAO J, LIU H, DING T. Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 39: 101712.
- [7] CHEN W, GUAN Y, ZHU B, *et al.* Influence of extruded strip shape and dimension on the mechanical properties and pore characteristics of 3D printed geopolymer concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 464: 140176.
- [8] MECHTCHERINE V, BOS F P, PERROT A, *et al.* Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials: production steps, processes, and their underlying physics-a review [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 132: 106037.
- [9] REINOLD J, NERELLA V N, MECHTCHERINE V, *et al.* Extrusion process simulation and layer shape prediction during 3D-concrete-printing using the particle finite element method [J]. *Automation in Construction*, 2022, 136: 104173.
- [10] VANTYGHM G, DE CORTE W, SHAKOUR E, *et al.* 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization[J]. *Automation in Construction*, 2020, 112: 103084.
- [11] LIU H, XIAO J, DING T. Flexural performance of 3D-printed composite beams with ECC and recycled fine aggregate concrete: experimental and numerical analysis[J]. *Engineering Structures*, 2023, 283: 115865.
- [12] ŞAHİN H G, MARDANI A. How does rheological behaviour affect the interlayer-bonding strength of 3DPC mixtures? [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2024, 38(9): 1353.
- [13] WANG L, YANG Y, YAO L, *et al.* Interfacial bonding properties of 3D printed permanent formwork with the post-casted concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 128: 104457.
- [14] ZHANG Y, YANG L, QIAN R, *et al.* Interlayer adhesion of 3D printed concrete: influence of layer stacked vertically [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 399: 132424.
- [15] TIAN J, WU X, ZHENG Y, *et al.* Investigation of interface shear properties and mechanical model between ECC and concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 223: 12.
- [16] GENG Z, SHE W, ZUO W, *et al.* Layer-interface properties in 3D printed concrete: dual hierarchical structure and micromechanical characterization [J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 138: 106220.
- [17] SHEN Y, LIN L, WEI S, *et al.* Research on the preparation and mechanical properties of solidified 3d printed concrete materials[J]. *Buildings*, 2022, 12(12): 2264.
- [18] PANDA B, TAN M J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(9): 10258.
- [19] PANDA B, PAUL S C, MOHAMED N A N, *et al.* Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar[J]. *Measurement*, 2018, 113: 108.
- [20] ROUSSEL N. Rheological requirements for printable concretes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 112: 76.
- [21] ROUSSEL N, OVARLEZ G, GARRAULT S, *et al.* The origins of thixotropy of fresh cement pastes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(1): 148.
- [22] TAY Y W D, PANDA B, PAUL S C, *et al.* 3D printing trends in building and construction industry: a review [J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2017, 12(3): 261.
- [23] ZAREIYAN B, KHOSHNEVIS B. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete[J]. *Automation in Construction*, 2017, 83: 212.
- [24] SANJAYAN J G, NEMATOLLAHI B, XIA M, *et al.* Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 172: 468.
- [25] KEITA E, BESSAIES-BEY H, ZUO W, *et al.* Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: measurement and physical origin [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 123: 105787.
- [26] WOLFS R J M, BOS F P, SALET T A M. Hardened properties of 3D printed concrete: the influence of process parameters on interlayer adhesion [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 119: 132.
- [27] KRUGER J, ZERANKA S, VAN ZIJL G. 3D concrete printing: a lower bound analytical model for buildability performance quantification [J]. *Automation in Construction*, 2019, 106: 102904.
- [28] ZHANG Y, QIAO H, QIAN R, *et al.* Relationship between water transport behaviour and interlayer voids of 3D printed concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 326: 126731.
- [29] MARCHMENT T, SANJAYAN J, XIA M. Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification [J]. *Materials & Design*, 2019, 169: 107684.
- [30] ACI Committee 228. Nondestructive test methods for evaluation of concrete in structures [R]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2013.