

# 3D打印混凝土 - 砂浆界面剪切性能仿真分析

罗奕敬, 孙 畅

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年4月30日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月30日

## 摘 要

文章利用有限元对3D打印混凝土 - 砂浆试件进行了数值模拟分析, 分析了试件的应力流动以及钢筋的损伤。结果表明, 剪切贯穿力裂缝位于3D打印混凝土与普通混凝土粘结界面处, 横向抗剪钢筋发生屈服; 有限元模拟破坏现象与试验吻合, 3D打印混凝土与普通混凝土界面发生脱粘, 横向抗剪钢筋在界面处发生屈服; K形界面与横向抗剪钢筋是剪力传递的主要参与者, 3D打印层间界面对剪力传递影响不大。

## 关键词

3D打印混凝土, 界面剪切性能, 仿真分析

# Simulation Analysis of Interfacial Shear Properties in 3D Printed Concrete-Mortar Interface

Yijing Luo, Chang Sun

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 30<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2025; published: May 30<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This study conducted a numerical simulation analysis of 3D-printed concrete-mortar specimens using the finite element method. The stress distribution and reinforcement damage were systematically investigated. The results demonstrate that shear-through cracks primarily occurred at the bonding interface between 3D printed concrete and ordinary concrete, with transverse shear reinforcement yielding. The failure patterns observed in finite element simulations showed good agreement with experimental results, revealing interface debonding between 3D printed concrete and ordinary concrete, along with yielding transverse shear reinforcement at the interface. The K-shaped

interface and transverse shear reinforcement were identified as primary contributors to shear force transfer, while the interlayer interfaces of 3D-printed concrete showed negligible influence on shear transmission.

## Keywords

3D Printed Concrete, Interface Shear Performance, Simulation Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 混凝土三维打印(Three-Dimensional Printed Concrete, 3DPC)已成为建筑行业中一项举足轻重的技术[1][2]。相对于传统的钢筋混凝土构件而言, 传统建筑中使用的模板在浇筑过程中扮演着关键的角色。由于 3D 打印混凝土具有无需模板生产和施工速度快的特点, 使其特别适用于建造复杂几何结构, 以提供特定功能, 例如更好的保温效果和特殊的中空内部轻质混凝土结构[3]。在实际工程中, 由于场地等因素的限制, 许多施工方更倾向于选择装配式构件[4]。3 维打印砂浆的无模型生产和快速更适合装配式建筑。然而, 3DPC 的逐层施工过程会导致过度收缩和快速结构固化, 从而造成应力集中现象和层间强度薄弱。在剪切力作用下层间分离, 从而影响部件的整体强度。在 3D 打印混凝土中, 通过界面自锁结构, 不同层之间的混凝土能够有效粘结在一起, 防止发生相对移动。这不仅提高了混凝土的抗拉强度和抗剪强度, 还增强了结构的整体稳定性和耐久性[5]。充分的锚固是保证钢筋与 3D 打印混凝土有效工作的基础。现有研究表明, 影响钢筋与 3D 打印混凝土之间粘结性能的因素主要可分为主观和客观因素。主观因素是加固过程的不可控变化, 影响打印材料的性质, 如加固方法的差异和人为主观错误等。主观因素的影响可以通过优化加固过程来避免。相反, 客观因素与固有的“逐层”打印过程有关, 如打印方向和锚固深度等; 它们本质上是由打印界面的特性(如界面分布和粘结强度)决定的。3DPC 具有自身自锁的特点, 3DPC 的界面自锁是指在打印过程中, 混凝土层与层之间通过自身堆叠形成的凸起和凹槽构成一种自锁结构, 可增强结构的整体强度和稳定性。因此将其作为预制混凝土是一个值得探索的方向。一些学者[6][7]提出了一种应用于复合材料结构的互锁结构, 以改善其机械性能。有限元的发展可以更好地验证构想与试验。

相较于传统现浇混凝土, 3D 打印混凝土的层间界面特性成为影响其钢筋增强效果的关键控制因素。当前研究主要依托实验手段开展相关探索, 但受限于实验方法的固有局限性, 学界尚未形成统一的研究结论。具体表现为: 其一, 试验数据存在显著离散性, 重复验证困难; 其二, 现有观测技术难以精确捕捉打印层间界面在受力过程中的内部应力场演变规律, 导致对界面破坏机理的阐释不够充分。鉴于此, 引入有限元(FE)数值模拟技术作为实验研究的重要补充手段, 可通过建立精细化数值模型实现对界面力学行为的定量分析, 为揭示 3D 打印混凝土结构的破坏机制提供新的研究路径。

## 2. 有限元模型建立

### 2.1. 试件模型

试件尺寸以及网格划分如图 1 以及图 2 所示, 试件左边部分为 3D 打印混凝土, 右边部分为普通混

凝土。在打印过程中采用植筋方式, 待 3D 打印混凝土硬化 24 小时后浇筑右边部分普通混凝土。

3D 打印混凝土, 普通混凝土以及钢筋均采用实体单元六面体 C3D8R, 将参考点耦合到加载面上, 在参考点上施加位移荷载。为了简化模型, 减少 CPU 计算时间, 在 3D 打印混凝土未开裂部分忽略界面影响, 采用实体单元建模。

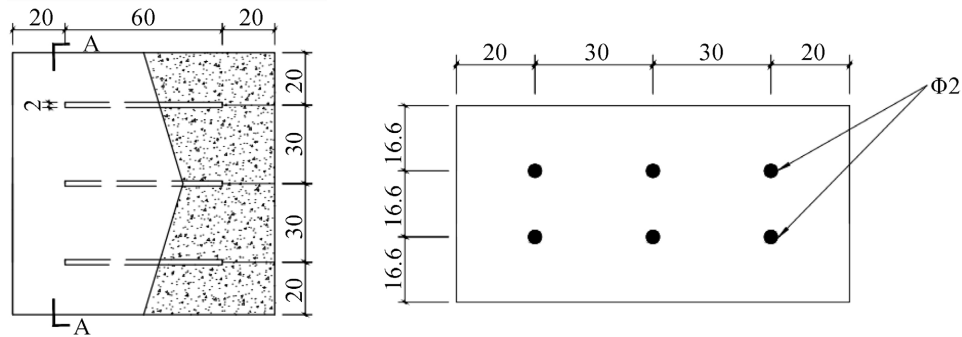


Figure 1. Size of specimens

图 1. 试件尺寸

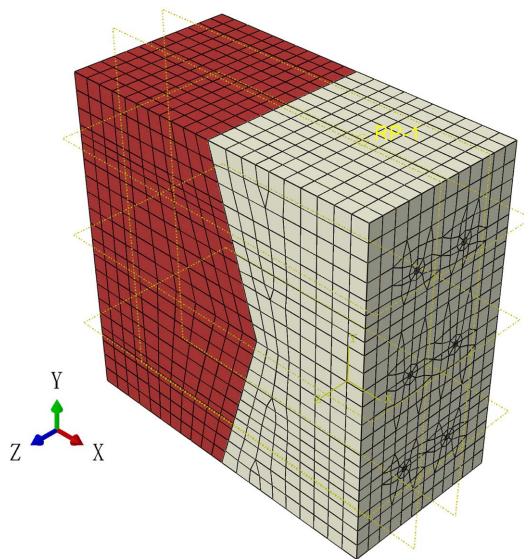


Figure 2. Mesh dividing

图 2. 网格划分

## 2.2. 排版规范的完整性

在 3D 打印混凝土机械性能的研究中, 一些学者发现其材料的非线性性能与普通混凝土相似[8], 因此本文采用混凝土塑性损伤(CDP)模型来反映 3D 打印混凝土以及普通混凝土。在该材料本构中, 压缩损伤因子和受拉损伤因子可以模拟混凝土在受压受拉方面的性能, 受拉损伤因子  $d_t$  根据公式(1)~(4)定义。

$$\sigma = (1 - d_t) E_t \varepsilon \quad (1)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^5], & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x-1)^{1.7} + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}} \quad (3)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} \quad (4)$$

受压损伤因子  $d_c$  根据公式(5)~(9)定义。

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon \quad (5)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n}, & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1)^2 + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}} \quad (7)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (8)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} \quad (9)$$

式中:

$\alpha_t$  ——为混凝土单轴受拉应力 - 应变曲线下降段的参数值;

$\alpha_c$  ——为混凝土单轴受压应力 - 应变曲线下降段的参数值;

$f_{t,r}$  ——为混凝土单轴受拉强度代表值;

$f_{c,r}$  ——为混凝土单轴受压强度代表值;

$\varepsilon_{t,r}$  ——为混凝土单轴抗拉强度代表值相应的混凝土峰值拉应变;

$\varepsilon_{c,r}$  ——为混凝土单轴抗压强度代表值相应的混凝土峰值拉应变;

$d_t$  ——为混凝土单轴受拉损伤演化参数;

$d_c$  ——为混凝土单轴受压损伤演化参数;

$\sigma$  为真实应力,  $E_0$  为初始弹性模量,  $\varepsilon$  为真实应变。

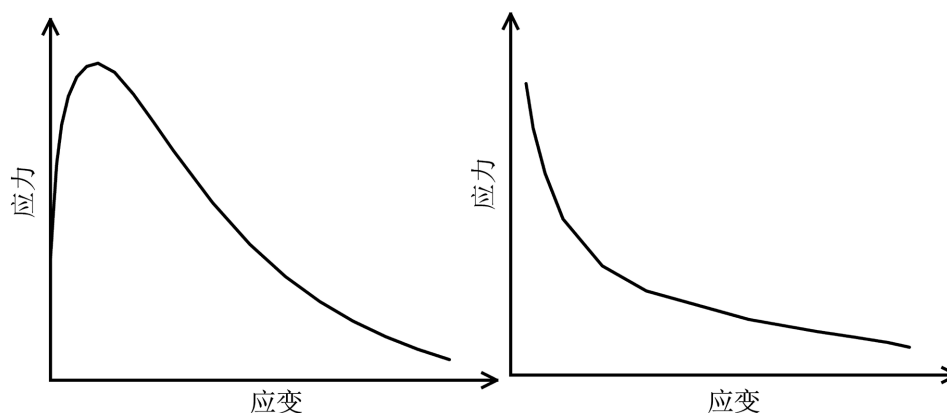


Figure 3. Stress-strain curve

图 3. 应力 - 应变曲线图

$$\tilde{\varepsilon}_c^{ck} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (10)$$

$$\tilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (11)$$

其中,  $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$  为受压非弹性应变,  $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$  为受拉开裂应变,  $\sigma_c, \sigma_t, \varepsilon_c, \varepsilon_t$  混凝土的压应力、拉应力、压应变和拉应变。

CDP 模型的受压以及受拉的应力 - 应变曲线如图 3 所示, CDP 参数如表 1 所示。

Table 1. CDP parameters

表 1. CDP 参数

| 膨胀角 | 偏心率 | $f_{b0}/f_{c0}$ | K      | 粘性参数   |
|-----|-----|-----------------|--------|--------|
| 36  | 0.1 | 1.16            | 0.6667 | 0.0005 |

试件中钢筋本构采用双折线模型, 其表达式为:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E_0 \varepsilon, 0 < \varepsilon < \varepsilon_a \\ f_y, 0 < \varepsilon < \varepsilon_{cp} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $f_y$  为钢筋的屈服强度,  $E_0$  为钢筋的弹性模量,  $\varepsilon_{cp}$  为钢筋的极限拉应变。

### 2.3. 相互作用

钢筋与试件设置为切向罚函数, 法向硬接触。3D 打印层间界面以及 3D 打印混凝土与普通混凝土界面涉及到复杂的非线性接触问题, 在本文中利用 Cohesive Behavior 对界面之间的粘性行为进行模拟, 其牵引分离本构能较好地模拟出界面的粘结、损伤的产生以及演化。

非耦合弹性行为可用公式(13)表示:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (13)$$

式中,  $t_n, t_s, t_t$  分别表示法向牵引力和两个剪切牵引力,  $\delta_n, \delta_s, \delta_t$  分别表示相分离,  $K_{nn}, K_{ss}, K_{tt}$  分别是法向和两个剪切方向的弹性刚度值, 如图 4 所示。

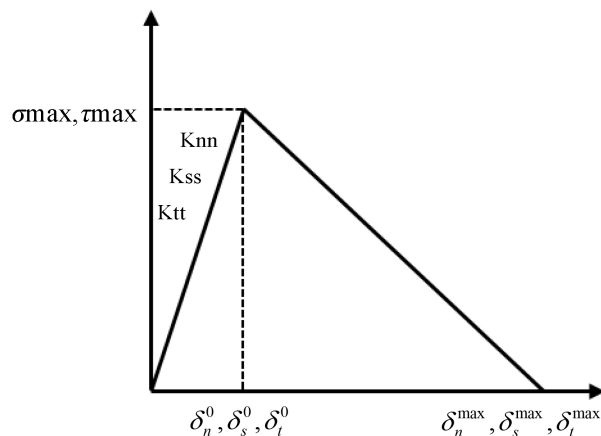


Figure 4. Traction separation model  
图 4. 牵引分离模型

损伤则由公式(14)定义：

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1$$

(14)

其中， $t_n^0, t_s^0, t_t^0$  分别表示法向剪切应力和两个峰值剪切应力， $\langle \rangle$ 是 Macaulay 括号，用于表示压应力不会导致损失[8]。由于未进行相关试验，因此参考学者万志勇[9]给出的数据，如表 2 所示。

Table 2. Experimental data

表 2. 试验数据

| $K_{nn}$ (N/mm <sup>3</sup> ) | $K_{ss}$ (N/mm <sup>3</sup> ) | $K_{tt}$ (N/mm <sup>3</sup> ) | $t_n^0$ | $t_s^0$ | $t_t^0$ |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|---------|---------|
| 11.41                         | 4.88                          | 4.88                          | 12.32   | 21.33   | 21.33   |

3. 模型验证

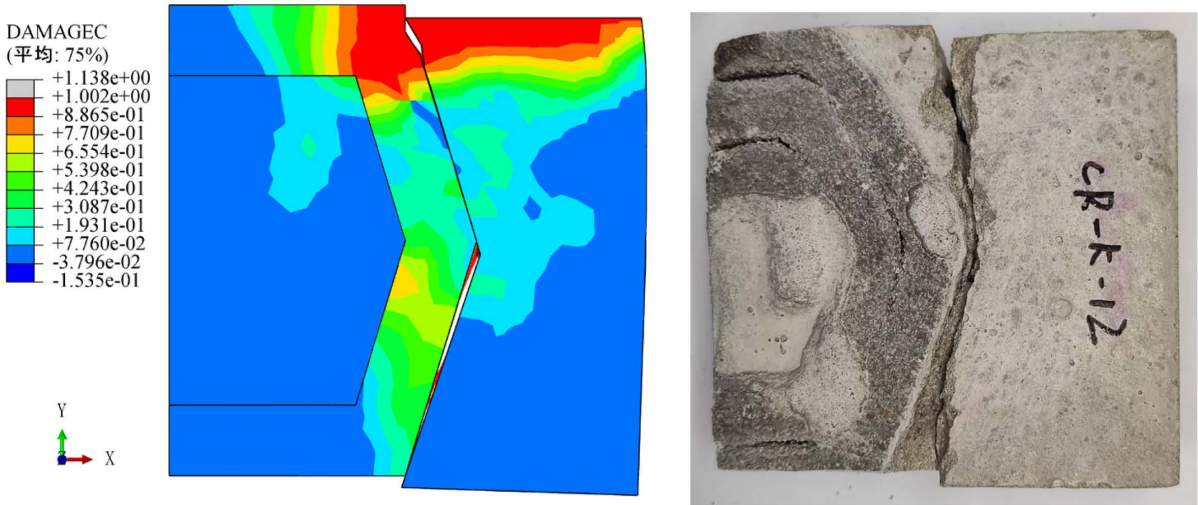


Figure 5. Comparison of test phenomena  
图 5. 试验现象对比

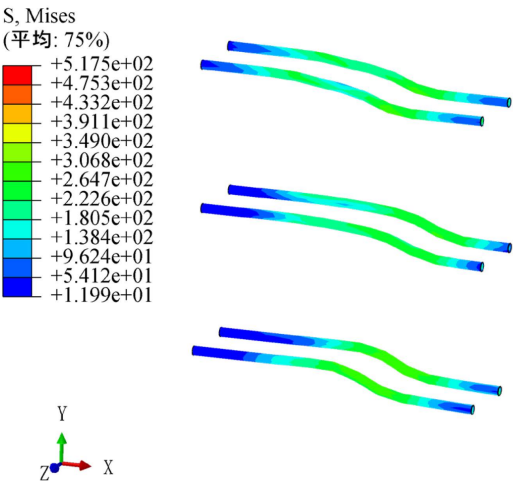


Figure 6. Stress nephogram of embedded reinforcement  
图 6. 钢筋应力云图



图 5 显示了有限元破坏现象与试验破坏现象对比, 可以看出试验试件贯穿裂缝沿着 3D 打印混凝土与普通混凝土界面, 而有限元模拟结果与此相似。试验试件普通混凝土上端部分有剥落现象, 而有限元压缩损伤较大, 其数值甚至达到了 1, 可以认为其区域混凝土完全损坏。钢筋沿着界面处完全发生屈服, 如图 6 所示, 这与试验现象一致。

## 4. 有限元结果分析

### 4.1. 接触应力

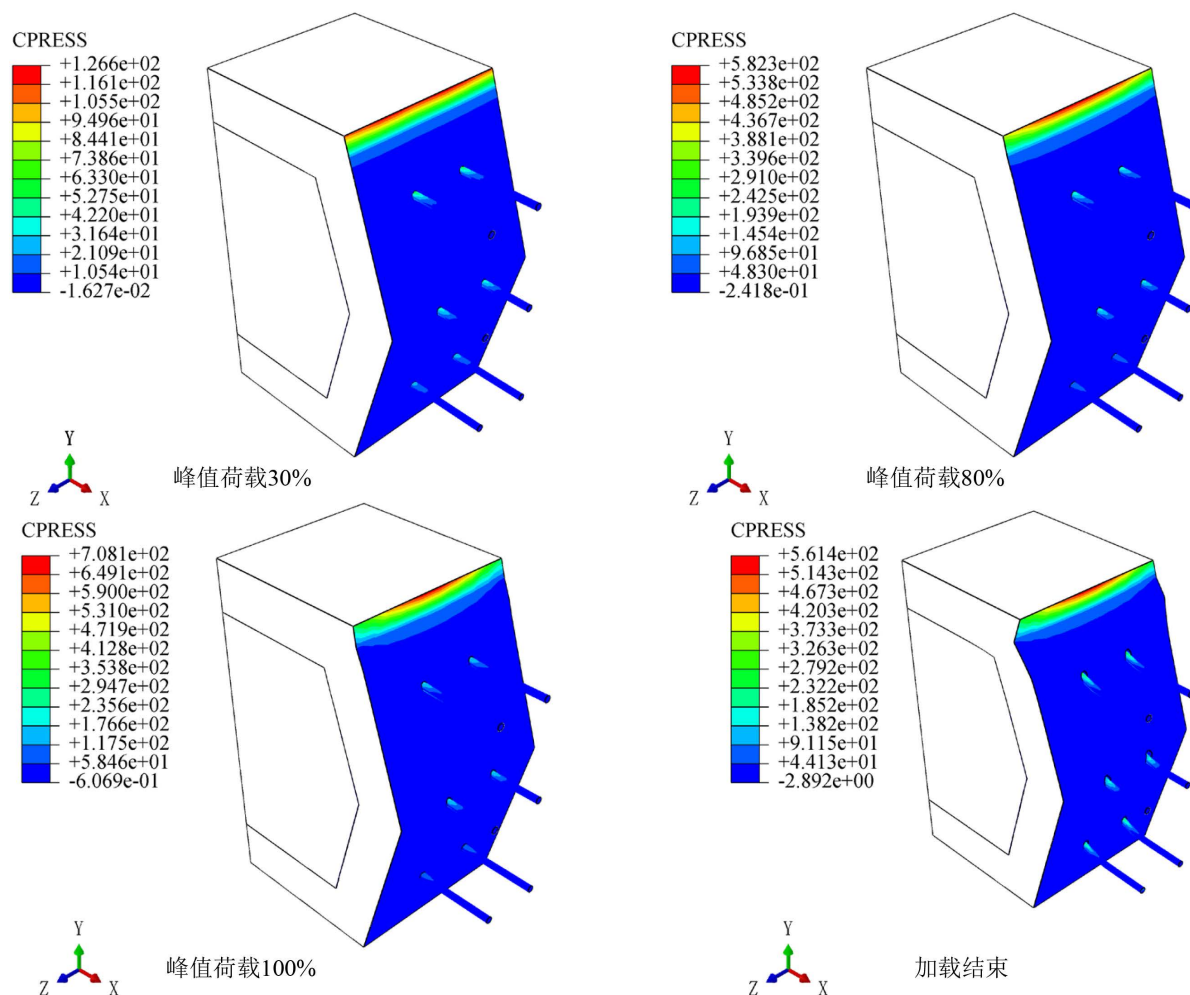


Figure 7. 3D printing contact stress between concrete and ordinary concrete

图 7. 3D 打印混凝土与普通混凝土接触应力

图 7 显示了 3D 打印混凝土与普通混凝土接触应力云图。在峰值荷载 30% 时, 接触应力最大值为 126.6 MPa。当试件沿着 Y 方向加载时, 由于界面呈现 K 形, 与 Y 轴并不平行, 因此普通混凝土与 3D 打印混凝土不仅有化学粘结作用, 还在 Y 方向有法向硬接触, 这种接触阻碍了普通混凝土向下滑移的倾向; 相比于钢筋, 这种法向硬接触对这类界面形状复杂试件的各项性能影响更为显著。在峰值荷载 80% 时, 试件结束弹性阶段, 开始进入塑性阶段, 3D 打印混凝土与普通混凝土接触应力最大值为 582.3 MPa, 比峰值荷载 30% 时提高了 359.9%。在峰值荷载 100% 时, 接触应力最大值为 708.1 MPa, 比峰值荷载 80% 时提

高了 21.6%。随后 3D 打印混凝土与普通混凝土易发生脱离, 接触应力减少, 在加载结束时刻接触应力最大值为 561.4 MPa, 对比于未加筋的试件, 钢筋与混凝土和砂浆间的握裹力是接触应力一直持续保持的最大保障者。相比较 3D 打印混凝土层间接触应力而言, 3D 打印混凝土与普通混凝土之间的界面是承担剪力传递的重要角色。

## 4.2. 塑性应变

图 8 显示了试件在峰值荷载 30%、80、100%以及加载结束阶段的塑性应变云图。在刚开始加载阶段, 普通混凝土与 3D 打印混凝土接触, 塑性应变很小, 最大值仅为 0.000 156, 在这一阶段, 剪力传递仅为普通混凝土与 3D 打印混凝土界面。随着加载的持续, 横向钢筋参与剪力传递, 在钢筋与混凝土接触区域塑性应变最大为 0.0011。在峰值荷载时刻, 位于中间的横向钢筋和混凝土接触区域塑性应变持续增大, 数值为 0.0033。直至加载至结束时, 钢筋屈服, 剪力传递主要是横向钢筋参与, 因此在图中可以看出中间钢筋与混凝土接触区域塑性应变仍在增大。

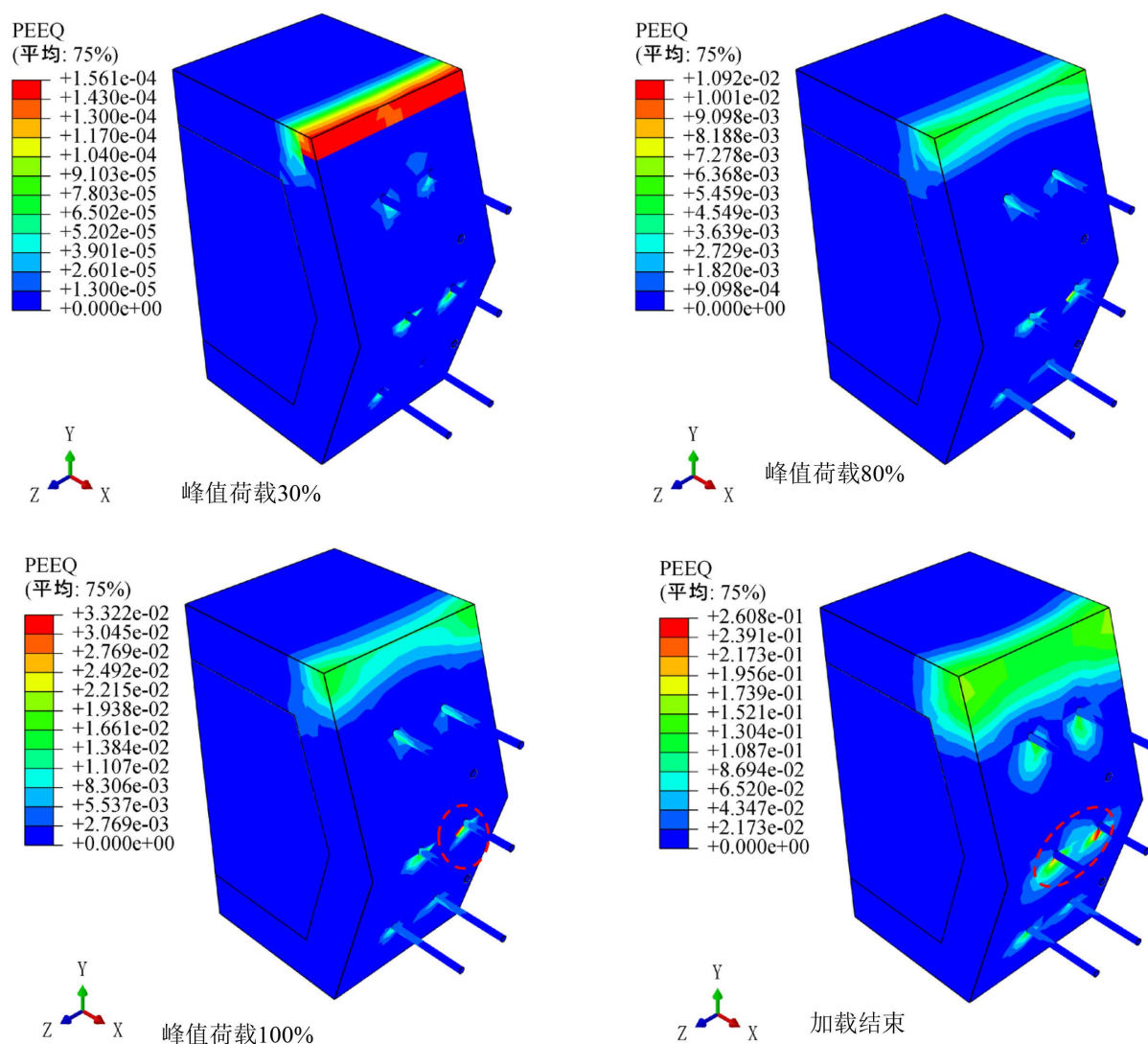


Figure 8. Plastic strain nephogram

图 8. 塑性应变云图



### 4.3. 结论

- 1) 剪切贯穿力裂缝位于 3D 打印混凝土与普通混凝土粘结界面处, 横向抗剪钢筋发生屈服;
- 2) 有限元模拟破坏现象与试验吻合, 3D 打印混凝土与普通混凝土界面发生脱粘, 横向抗剪钢筋在界面处发生屈服;
- 3) K 形界面与横向抗剪钢筋是剪力传递的主要参与者, 3D 打印层间界面对剪力传力影响不大。

### 参考文献

- [1] Malik, A.S., Boyko, O., Aktar, N. and Young, W.F. (2001) A Comparative Study of MR Imaging Profile of Titanium Pedicle Screws. *Acta Radiologica*, **42**, 291-293. <https://doi.org/10.1080/028418501127346846>
- [2] Marchment, T. and Sanjayan, J. (2020) Mesh Reinforcing Method for 3D Concrete Printing. *Automation in Construction*, **109**, Article 102992. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102992>
- [3] Chung, S., Stephan, D., Elrahman, M.A. and Han, T. (2016) Effects of Anisotropic Voids on Thermal Properties of Insulating Media Investigated Using 3D Printed Samples. *Construction and Building Materials*, **111**, 529-542. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.165>
- [4] Siddika, A., Mamun, M.A.A., Ferdous, W., Saha, A.K. and Alyousef, R. (2019) 3D-Printed Concrete: Applications, Performance, and Challenges. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, **9**, 127-164. <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1705199>
- [5] Wang, H., Jin, K. and Tao, J. (2020) Improving the Interfacial Shear Strength of Carbon Fibre and Epoxy via Mechanical Interlocking Effect. *Composites Science and Technology*, **200**, Article 108423. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108423>
- [6] Javan, A.R., Seifi, H., Lin, X., et al. (2025) Mechanical Behaviour of Composite Structures Made of Topologically Interlocking Concrete Bricks with Soft Interfaces. *Materials & Design*, **186**, Article 108347.
- [7] Xiao, J., Liu, H. and Ding, T. (2021) Finite Element Analysis on the Anisotropic Behavior of 3D Printed Concrete under Compression and Flexure. *Additive Manufacturing*, **39**, Article 101712. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101712>
- [8] Teng, J.G., Fernando, D. and Yu, T. (2015) Finite Element Modelling of Debonding Failures in Steel Beams Flexurally Strengthened with CFRP Laminates. *Engineering Structures*, **86**, 213-224. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.003>
- [9] 万志勇, 陈健平, 贺绍华, 等. UHPC-NC 界面抗剪性能试验研究[J]. 中外公路, 2024, 44(4): 138-147.