

丁彧,张方方,邸嘉星,等.考虑配筋的3D打印混凝土墙体抗震性能研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(3):303-313.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20260006

DING Yu,ZHANG Fangfang,DI Jiaxing,et al.Study on seismic performance of 3D printed concrete walls considering reinforcement [J].Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2026,45(3):303-313.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20260006

考虑配筋的3D打印混凝土墙体抗震性能研究

丁 彧^{1,2}, 张方方^{1,2}, 邸嘉星³, 张禄奎^{1,2}, 裴 强^{1,2*}

(1. 大连大学 复杂结构系统灾害预测与防治辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116622; 2. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622; 3. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘 要: 为探究3D打印混凝土墙体(3DPCW)的抗震性能,开展4种不同骨料级配的3D打印混凝土层间力学性能试验,设计含水平/竖向配筋、竖向/斜向连接肋及空心构造的6种墙体模型,并建立基于Cohesive单元的层间界面损伤与黏结滑移精细化模型,系统分析3DPCW在低周往复载荷下的滞回特性、骨架曲线、位移延性、刚度退化及耗能能力等抗震性能指标。研究表明:随着粗骨料比例的提高,试件的层间抗剪强度与抗拉强度均显著增长;钢筋布置主导墙体的损伤模式,损伤集中于配筋区域,位置因截面与配筋方式不同而呈现中下部、中部两侧或肋部差异;竖向连接肋墙体在初始刚度、刚度退化及延性方面均优于空心与斜向连接肋墙体,其截面形式有利于应力分散与裂缝均匀发展,从而提升耗能及变形能力;竖向配筋墙体的抗震性能整体优于水平配筋墙体,表现为滞回曲线更饱满、骨架曲线峰值更高、位移延性更好、刚度退化更缓及耗能能力更强,能够有效抑制层间滑移并改善延性。研究结论为3DPCW抗震设计提供理论依据与数值模拟参考。

关键词: 3D打印混凝土墙体;层间力学性能;Cohesive单元;低周往复载荷;抗震性能

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2026)03-0303-11

Study on seismic performance of 3D printed concrete walls considering reinforcement

DING Yu^{1,2}, ZHANG Fangfang^{1,2}, DI Jiaxing³, ZHANG Luxi^{1,2}, PEI Qiang^{1,2*}

(1. Key Laboratory for Prediction & Control on Complicated Structure System of the Education Department of Liaoning Province, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, China; 3. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to explore the seismic performance of 3D printed concrete walls (3DPCW), this study conducted mechanical property tests on the interlayer interface of 3D printed concrete using four different aggregate gradations were carried out. Six wall models with horizontal/vertical reinforcement, vertical/oblique connecting ribs and hollow structures were designed, and a refined model of interlayer interface damage and bond-slip based on Cohesive element was established. The hysteretic characteristics, skeleton curve, displacement ductility, stiffness degradation and energy dissipation capacity of 3DPCW under low cyclic loading were systematically analyzed. The results show that the interlaminar shear strength and tensile strength of the specimens increase significantly with the increase of the proportion of coarse aggregate. The damage mode of the wall is dominated by the arrangement of steel bars. The damage is concentrated in the reinforcement area, and the location is different in the middle and lower parts, the middle sides or the ribs due to the different sections and reinforcement methods. The vertical connection rib wall is superior to the hollow and oblique connection rib wall in terms of initial stiffness, stiffness degradation and ductility. Its cross-section form is conducive to stress

收稿日期:2026-01-16 修回日期:2026-03-11 接受日期:2026-03-19 责任编辑:朱含露

基金项目:辽宁省教育厅科学研究经费项目(面上项目)(LJKZ1177);大连市科技创新基金项目(2023JJ12GX012);

大连大学学科建设专项(DLUXK-2025-FX-005)

作者简介:丁 彧(1981-)女,辽宁沈阳人,硕士,实验师,主要从事结构抗震方面的研究。E-mail: wateryu147@163.com

通信作者:裴 强(1974-)男,山西运城人,博士,教授,主要从事结构抗震及3D打印混凝土方面的研究。E-mail: pqiem@163.com

dispersion and uniform development of cracks, thereby improving energy dissipation and deformation capacity. The seismic performance of the vertical reinforced wall is better than that of the horizontal reinforced wall as a whole, which shows that the hysteresis curve is fuller, the peak value of the skeleton curve is higher, the displacement ductility is better, the stiffness degradation is slower, and the energy dissipation capacity is stronger, which can effectively suppress the interlayer slip and improve the ductility. The research conclusions provide a theoretical basis and a numerical simulation reference for 3DPCW seismic design.

Keywords: 3D printed concrete walls; interlayer mechanical properties; Cohesive elements; low-cycle reciprocating load; seismic performance

0 引言

3D打印混凝土技术因其施工效率高、经济性好、环境友好及复杂几何形态可建造性等优势,正推动建筑行业进步革新,受到学术界与工程界的广泛关注^[1]。3D打印混凝土墙体(3D printed concrete walls, 3DPCW)作为3D打印建筑中承受地震作用的主要抗侧力构件,其抗震性能直接关系到整体结构的安全可靠性^[2]。然而,3DPCW在构造上与传统现浇混凝土墙体存在本质差异^[3]:逐层堆叠成型的工艺使得墙体中形成层间薄弱界面,打印过程中裹入的空气易在界面处形成孔隙^[4],这些孔隙的几何形状、尺寸、方向及分布等特征会显著影响材料的力学性能,导致3DPCW呈现出明显的强度退化与各向异性特征^[5],进而改变其在地震载荷下的破坏模式与耗能机制。

学者针对3D打印混凝土墙体的结构性能开展大量研究^[6]。GE等^[7]通过轴压和偏压试验,评估3DPCW的力学性能、变形特征和破坏形态,结果表明在相似载荷条件下,该结构的承载能力约为普通砌体墙的2倍。WANG等^[8]研究偏心轴压作用下3DPCW的结构性能和破坏机理,发现钢筋与混凝土之间的牢固连接能够确保有效的力传递和结构连续性。AGHAJANI等^[9]采用有限元分析与试验验证相结合的方法,明确高宽比较低的墙体更容易发生剪切破坏,而高宽比较高的墙体则更容易发生弯曲破坏。TANAPORNRAWEKIT等^[10]分析3种截面形状的3DPCW的轴压性能,研究层间界面引起的各向异性力学行为。HAN等^[11]通过不同高厚比、配筋形式的3DPCW轴压试验,揭示高厚比与承载力之间的非线性关系。总体而言,现有研究多聚焦于3DPCW的竖向承载性能分析^[12-13],而复杂地震载荷下的抗震性能与破坏机制的研究较少^[14]。

层间黏结弱面对3D打印混凝土结构的力学性能有显著影响。在打印材料中引入骨料可以减少

水泥的使用量并降低成本,合理选择粗细骨料的粒径,可以明显降低打印结构的孔隙率,显著改善打印混凝土的流动性和黏聚性,增强层间黏结弱面的力学性能,从而提升打印结构的物理强度和耐久性^[15-19]。王里等^[20]通过中心拉拔试验研究筋材表面形式、材质和直径的作用,发现增大肋高能显著提升黏结强度并改变破坏模式,提出可用于指导配筋选型的界面破坏模式判别方程。刘超等^[21]基于轴压试验与数值模拟,分析了打印路径、层数及强度对其抗压性能的影响,发现纵向肋数对承载力无明显提升作用,而极限承载力随打印层数增加呈指数下降,随材料强度增加呈线性增长。此外,层间植筋/植钉^[22]、空腔中嵌筋浇注、成型前预布钢筋等配筋措施,可有效提高3DPCW的结构完整性与承载能力。

综上,通过不同骨料级配的层间力学性能试验确定最优打印级配,建立考虑配筋形式的层间界面损伤的内聚力黏结模型,进而分析3DPCW的整体抗震性能,是当前可行的研究路径。作者基于Cohesive接触参数并考虑不同配筋形式,采用试验与数值模拟相结合的方法开展研究。通过层间双剪、轴拉及抗压强度试验,获取不同骨料级配条件下的力学性能参数,确定最优骨料级配和模型接触参数。基于ABAQUS平台建立考虑层间黏结性能的精细化模型,系统分析不同配筋形式和截面构造下墙体在低周往复载荷作用下的滞回特性、骨架曲线、刚度退化及耗能能力等关键抗震性能指标。

1 不同骨料级配层间力学性能试验

1.1 试验用3D打印材料和配合比

采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥作为主要胶凝材料,细集料采用最大粒径为3 mm的河砂,并掺入粉煤灰(FA)、硅灰(SF)及早强剂(ESA)作为辅助胶凝组分。采用聚羧酸系高效减水剂(PS)、羟丙基甲基纤维素(HPMC)与聚乙烯醇(PVA)

纤维作为外加剂与增强材料。基于前期可打印性试验, 确定砂胶比为 0.94, 石英砂占总质量的 48%。胶凝材料中水泥与硅灰的占比(质量分数)分别为 48% 和 2.6%。消泡剂、减水剂及羟丙基甲基纤维素的质量分数依次为 0.09%、0.48% 和 0.05%。该配比下材料具备良好的流动性、挤出性

与建造性能, 具体配合比见表 1。
石英砂级配依据 Fuller 曲线及其改进的 Talbot 公式 $p=100(d/D)^n$ 进行设计, 选取级配指数 n 为 0.40、0.45、0.50 与 0.55, 以优化颗粒分布^[23]。4 种级配均符合国家标准《建设用砂》(GB/T 14684—2022) 中 I 区砂的要求, 具体级配数据见表 2。

表 1 打印材料配合比
Tab.1 mix ratio of printing material

普通硅酸盐水泥质量/kg	硫铝酸盐水泥质量/kg	硅灰质量/kg	石英砂质量/kg	外加剂质量/kg			
				减水剂	增稠剂	消泡剂	胶粉
15	0.15	0.8	15	0.15	0.015	0.03	0.06

表 2 石英砂连续级配 Tab.2 continuous grading of quartz sand						
骨料级配	小于某粒径骨料的质量占比/%					
	0.15 mm	0.30 mm	0.60 mm	1.18 mm	2.36 mm	4.75 mm
I	32.33	53.95	67.91	77.91	84.88	100.00
II	31.86	51.16	64.88	74.88	81.86	100.00
III	26.98	46.05	60.00	70.93	78.84	100.00
IV	24.19	42.09	56.05	66.98	74.88	100.00

1.2 3D 打印混凝土试件打印

试验采用搅拌挤出一体化混凝土 3D 打印系统, 通过打印头实现干粉与水的即时混合, 具备自动化程度高、工艺连续性好的特点。系统配置直径 20 mm 的打印喷嘴, 移动速度设定为 2 300 mm/min, 初凝时间为 10 min、终凝时间为 50 min, 打印层宽为 20 mm、层厚为 12 mm。打印过程材料挤出顺畅无堵塞, 打印条尺寸规整(600 mm×20 mm)。试块制备流程见图 1, 通过堆叠 20 层成功制备 600 mm×40 mm×240 mm 的结构墙体试块, 未出现变形或塌陷现象, 表明材料具备良好的可建造性。

切割制备成两种规格的测试试块: 100 mm×40 mm×120 mm 的试块用于层间剪切试验, 40 mm×40 mm×60 mm 的试块用于层间轴拉试验。所有试块经表面打磨处理以满足试验要求。

1.3 3D 打印混凝土材料力学性能试验及结果

针对成型的 3D 打印混凝土试块, 进行双剪、轴拉、抗压强度、氮气吸附试验和钢筋拉伸试验。3D 打印混凝土层间剪切试验结果见图 2。

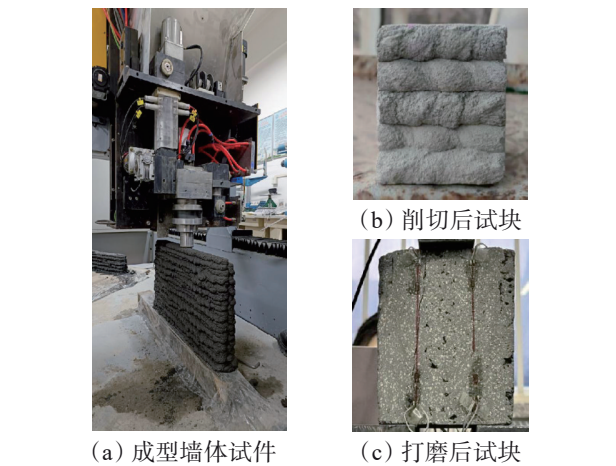


图 1 3D 打印混凝土试块制备流程

Fig.1 preparation process of 3D printed concrete test blocks

打印后的试件硬化 24 h 后, 置于 SHBY-902B 型标准养护箱中标准养护 28 d。随后, 将墙体试件

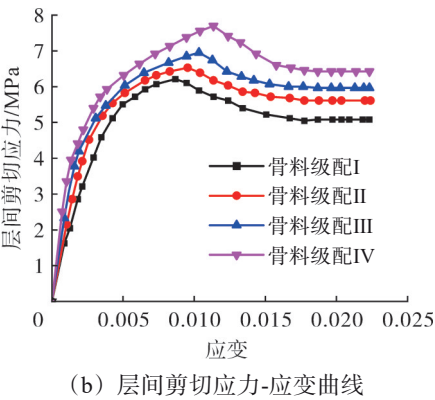
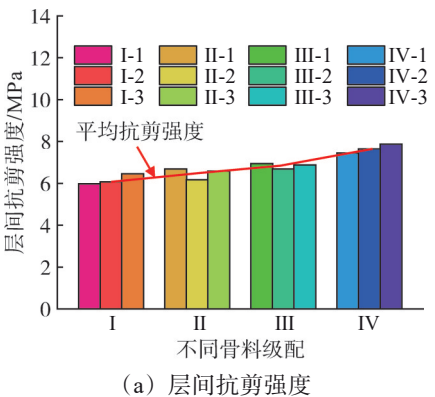


图 2 3D 打印混凝土层间剪切试验结果
Fig.2 interlayer shear test results of 3D printed concrete

由图 2 (a) 可见, 随着粗骨料比例提高, 连续级配试件的抗剪强度依次为 6.19 MPa、6.50 MPa、6.85 MPa 和 7.67 MPa, 表明级配优化与粗骨料占

比增加可显著提升层间抗剪性能。图 2 (b) 显示, 试块依次经历弹性、弹塑性与残余应力阶段。粗骨料占比高的试件(如连续级配IV)在峰值前应力上升更快、刚度更大, 峰值后应力下降更缓、延性更优。这表明粗骨料增强了骨料骨架的互锁效应, 从而提高了刚度与延性; 而细骨料含量高的试块在剪切过程中更易发生骨料间剪切破坏, 导致应力迅速下降。

试块层间轴拉试验结果见图 3。

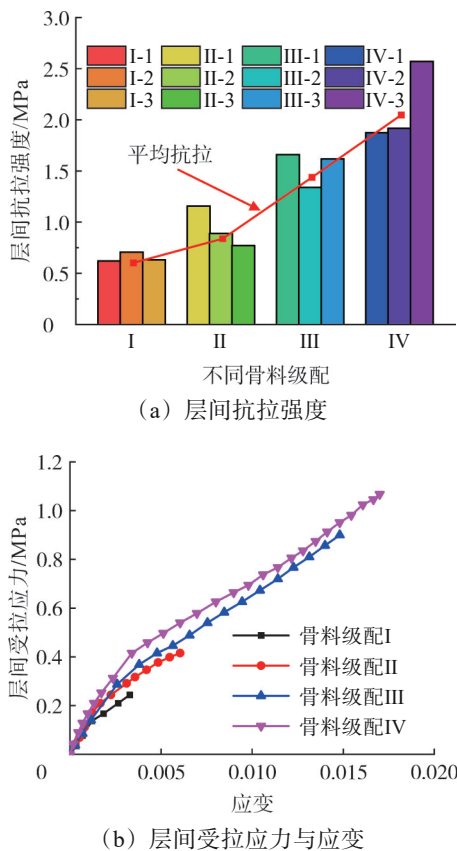


图 3 3D 打印混凝土层间轴拉试验结果

Fig.3 axial tensile test results of 3D printed concrete

由图 3 (a) 可见, 连续级配试块的强度随粗骨料占比增加依次为 0.66 MPa、0.93 MPa、1.54 MPa 和 2.21 MPa, 表明粗骨料比例提高有助于增强层间抗拉性能。其主要机制为: 粗骨料有效填充内部孔隙, 提升材料致密性, 同时增大界面接触面积, 增强骨料间机械互锁与摩擦作用, 抑制层间滑移与剥离。由图 3 (b) 可见, 应力与应变呈近似线性关系, 随应力增大, 界面塑性变形逐渐发展, 应力分布趋于不均。连续级配试件在峰值前的应力上升速率随粗骨料占比增加而提高, 说明其刚度相应增大(如级配IV高于级配I~级配III)。粗骨料优化了内部结构密实度, 有效抑制裂缝扩

展, 从而提升抗拉刚度与整体性能。

不同骨料级配试块的抗压强度试验结果见图 4, 试件的破坏形态表现出明显的方向相关性。沿 X 与 Z 方向加载时, 试块形成近似上下对称的锥形破坏区; 沿 Y 方向加载时, 试块出现多处竖向裂缝, 分层剥落显著, 最终碎裂为多个小柱体, 其抗压强度显著低于其他方向。3D 打印混凝土试块 X 方向的抗压强度与浇筑混凝土相比, 骨料级配 I、II、III、IV 的折减系数分别为 0.97、0.94、0.93、0.92。由于打印层间界面的弱化以及层间滑移的发生, 3D 打印试块的抗压强度普遍低于同条件下浇筑试块。通过优化骨料级配, 可以提高材料密实度、降低孔隙率、增强骨料间的互锁效应, 从而改善抗压性能。打印试件的抗压强度呈现显著各向异性, 表现为 Z 向最大、X 向次之、Y 向最小。这是由于打印过程中形成的条间与层间黏结弱面在受力时表现不同: Y 向载荷平行于界面, 易引起界面滑移与应力分散; X 向与 Z 向载荷分别垂直作用于条间界面和层间界面, 有利于界面咬合与应力传递, 因而承载能力较高。

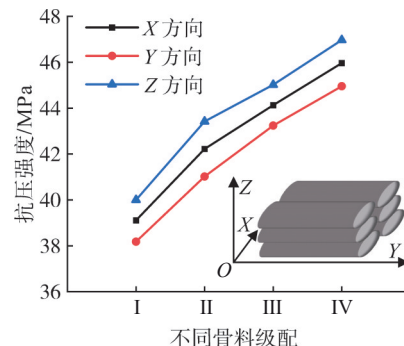
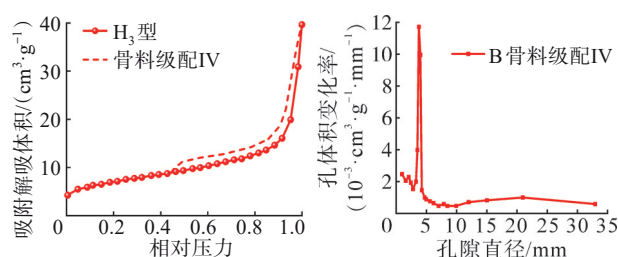


图 4 不同骨料级配试块的抗压强度

Fig.4 compressive strength of different aggregate gradation test blocks

选取层间剪切性能较优的连续级配试块IV进行氮气吸附试验, 试件层间孔隙结构特征见图 5。曲线呈现明显滞后环, 依据 IUPAC 分类, 归为 H_3 型, 表明层间孔隙形态以平板状狭缝孔为主。连续级配试件IV的最大吸附量为 $39.49 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均孔径为 5.25 nm 。孔径分布曲线呈单峰形态, 峰值位于约 3.3 nm 处, 孔隙主要分布于 $0 \sim 35 \text{ nm}$, 说明层间孔隙以微孔和介孔为主。值得注意的是, 大于 10 nm 的孔隙数量较少, 反映出在连续级配设计中, 骨料颗粒填充充分, 内部结构更密实。说明优化材料密实度是改善界面力学性能的有效途径, 连续级配能够有效填充孔隙, 增强骨料间的接触与互锁作用。该微观结构特征为进一步提升 3D 打印混凝土层间剪切性能提供了依据。



(a) 氮气等温吸附解吸曲线 (b) 孔体积变化率随孔径分布

图5 试件层间孔隙结构特征

Fig.5 characterization of interlayer pore structure of specimens

选用HRB400热轧带肋钢筋现场试验。实测结果显示:钢筋的弹性模量为200 GPa,符合钢材常规取值;屈服强度达438 MPa,高于HRB400钢筋标准要求(≥ 400 MPa);极限抗拉强度为619 MPa,远超规范规定的下限值540 MPa;断后伸长率为26%,明显优于标准规定塑性指标($\geq 16\%$)。

基于上述试验标定的材料参数,在有限元模型中沿打印层间预设 Cohesive 界面层,建立3DPCW有限元模型,精确模拟层间弱面行为,并真实反映其在地震等载荷作用下的损伤演化机制。

2 3DPRW有限元建模

根据《混凝土结构设计标准》(GB/T50010—2010)和《装配式混凝土结构技术规程》(JG/T 1—2014),楼板在混凝土墙体上的最小搭接长度为70 mm,墙体水平接缝厚度为20 mm。为满足两侧搭接楼板的最小构造要求,墙体厚度应不小于160 mm。依据《砌体基本力学性能试验方法标准》(GB/T 50129—2011),试件的高厚比取3~5。综合上述条件,确定3DPCW有限元模型的尺寸为600 mm(长)×160 mm(宽)×480 mm(高)。

2.1 材料参数及本构模型

采用混凝土塑性损伤模型模拟3DPCW的力学行为^[24-26]。根据材料强度试验结果,现浇混凝土试块的抗压强度为49.6 MPa,可认定为C50强度等级。参考《混凝土结构设计标准》(GB/T50010—2010),材料参数取值如下:弹性模量 E 为34.5 GPa,泊松比为0.2,剪胀角为 30° ,偏心率为0.1。混凝土受压损伤因子及单轴受压应力-应变关系通过式(1)~式(7)确定;混凝土受拉损伤因子及单轴受拉应力-应变曲线按式(8)~式(13)确定。

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_c \varepsilon_c, \quad (1)$$

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

$$\varepsilon_c = X \varepsilon_{c, \max}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{c, \max} = (700 + 172 \sqrt{f_c}) \times 10^{-6}, \quad (4)$$

$$\alpha_c = 0.157 f_c^{0.785} - 0.905, \quad (5)$$

$$\rho_c = \frac{f_c}{E_c \varepsilon_{c, \max}}, \quad (6)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c, \max}}{E_c \varepsilon_{c, \max} - f_c}, \quad (7)$$

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_c \varepsilon_t, \quad (8)$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t (1.2 - 0.5 Y^5) & Y \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (Y - 1)^{1.7} + Y} & Y > 1 \end{cases}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_t = X \varepsilon_{t, \max}, \quad (10)$$

$$\varepsilon_{t, \max} = 6.5 \times 10^{-5} f_t^{0.54}, \quad (11)$$

$$\rho_t = \frac{f_t}{E_c \varepsilon_{t, \max}}, \quad (12)$$

$$\alpha_t = 0.312 f_t^2, \quad (13)$$

式(1)~式(13)中: σ_c 、 ε_c 分别为混凝土压应力与应变; σ_t 、 ε_t 分别为拉应力与应变; f_c 、 f_t 分别为单轴抗压、抗拉强度; $\varepsilon_{c, \max}$ 、 $\varepsilon_{t, \max}$ 分别为峰值压应变与峰值拉应变; X 、 Y 为归一化应变; α_c 、 α_t 为应力-应变曲线下降段参数; d_c 、 d_t 分别为受压、受拉损伤因子; E_c 为混凝土的弹性模量; n 为受压应力-应变曲线上段形状参数; ρ_c 、 ρ_t 分别为受压特征参数与受拉特征参数。

钢筋采用双折线模型,其本构关系见式(14),参数采用前述试验结果。

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \sigma_s & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_s > \varepsilon_y \end{cases}, \quad (14)$$

式中: σ_s 和 ε_s 为钢筋的拉应力与拉应变; f_y 和 ε_y 分别为钢筋的屈服应力与屈服应变; E_s 为钢筋的弹性模量。

钢筋-混凝土界面采用接触单元法模拟,其中,法向接触属性为“硬接触”,切向行为选用罚函数摩擦公式,考虑带肋钢筋的机械咬合作用,摩擦系数取0.6^[21]。

2.2 配筋设计方案及有限元模型

针对两种配筋形式的3DPCW,墙体采用实体单元建模,钢筋采用桁架单元建模。基于3D打印混凝土的工艺特性,先在Part模块中对混凝土打印

层和钢筋进行部件建模,再通过定位装配形成整体墙体构件,所有模型的轴压比均取 0.1。墙体模

型见图 6,图中给出了各模型的配筋方式、墙体形式及编号。

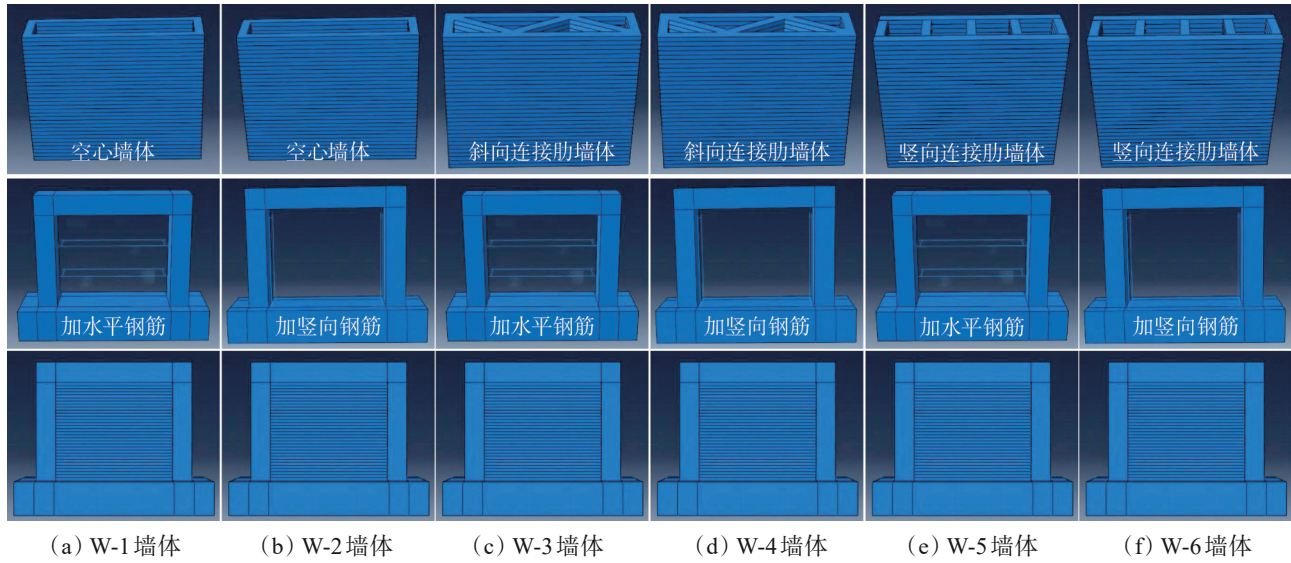


图6 3DPCW 有限元模型

Fig.6 finite element model of 3DPCW

在综合考虑计算效率、收敛性及精度要求的基础上,对不同配筋形式的 3DPCW 有限元模型进行网格划分。其中,加载梁与地梁的网格尺寸设为 80 mm,墙体网格尺寸设为 30 mm,内部钢筋网格尺寸设为 12 mm,网格划分结果见图 7。

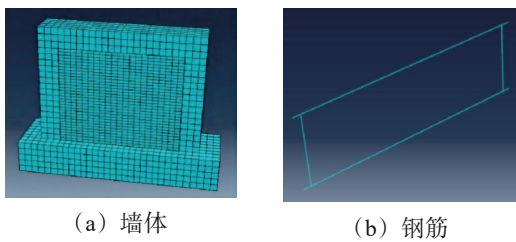


图7 墙体模型和钢筋的网格单元划分

Fig.7 grid division of wall model

2.3 Cohesive 单元和层间薄弱界面模拟

在地震水平载荷作用下,3DPCW 的破坏主要沿层间界面发生,该界面强度显著低于打印条本体。为精确模拟层间界面的力学行为,重点考虑混凝土层间的黏结滑移,采用 Cohesive 模型来模拟黏结力的传递^[24]。

在 Cohesive 黏聚力模型中,牵引力向量与层间界面分离量之间的关系通过弹性本构矩阵表达,界面弹性方程矩阵为

$$\lambda = \begin{pmatrix} \tau_n \\ \tau_s \\ \tau_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_n & 0 & 0 \\ 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & k_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{pmatrix} = K\omega, \quad (15)$$

式中: λ 为牵引力; ω 为层间界面分离位移; K 为

弹性本构矩阵(刚度矩阵); τ_n 、 τ_s 和 τ_t 分别为层间界面上的法向拉应力和两个剪切应力; δ_n 、 δ_s 和 δ_t 分别为 3 个牵引力对应的界面分离位移; k_n 为法向弹性刚度,取裂缝张开的初始斜率; k_s 为剪切方向的弹性刚度,假定为剪切滑移的初始斜率; k_t 为第二个剪切方向的弹性刚度。

2.4 边界条件与分析步设置

根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ/T101—2015),制定数值模拟的加载方案,采用等步长位移控制加载,步长取为墙体模型初始损伤位移。模型边界条件设定为地梁底部完全固结。静力分析步骤为:①在梁顶端参考点施加 110.16 kN 的竖向轴力,最大迭代次数设为 100,初始步长、最小步长和最大步长分别为 1、 1×10^{-5} 和 1;②通过梁侧面参考点施加水平往复位移,最大迭代次数设为 10 000,初始步长、最小步长和最大步长分别为 0.1、 1×10^{-9} 和 0.5。边界条件与加载方式见图 8。

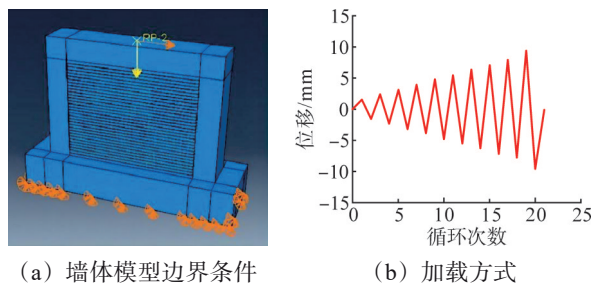
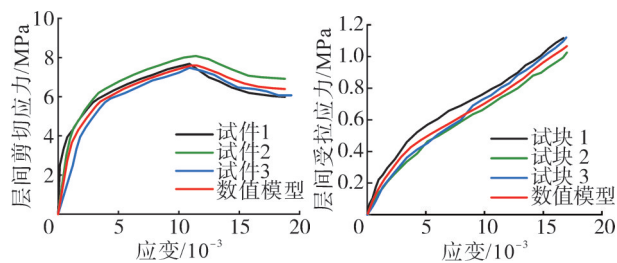


图8 墙体模型边界条件和加载方式

Fig.8 boundary conditions and loading system settings for wall models

2.5 模型验证

将模型计算结果与试验结果对比,结果见图9。应变-层间剪切应力曲线的相关系数大于0.97;平均误差为-0.181;均方根误差为0.390,相对误差约为5.03%;应变-层间拉应力曲线的相关系数大于0.99;平均误差为0.005 7,均方根误差为0.047,相对误差约为12.28%。结果表明,该模型能够较准确描述细骨料级配IV工况下墙体的层间剪切与抗拉力学性能。



(a) 应变与层间剪切应力 (b) 应变与层间受拉应力

图9 骨料级配IV工况下模型与试验结果对比

Fig.9 comparison of model and experimental results under condition IV of aggregate grading

3 3DPCW抗震性能分析

3.1 破坏形态

不同类型3DPCW模型在水平往复载荷作用下的损伤分布见图10。

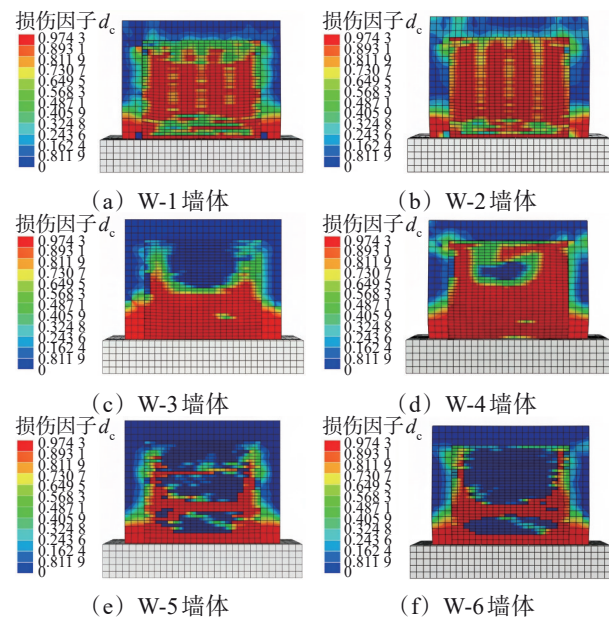


图10 墙体模型损伤云图

Fig.10 damage nephograms of wall model

由图10可见,损伤均显著集中于钢筋布置区域。空心墙体增设水平钢筋后,损伤集中于中下

部及水平钢筋位置;配置竖向钢筋时,损伤主要发生于墙体中部及两侧竖向钢筋区域。在斜向连接肋墙体中,水平钢筋使损伤集中于下部钢筋位置;配置竖向钢筋时,损伤出现在下部及左右侧竖向钢筋部位。对于竖向连接肋墙体,无论配置水平钢筋还是竖向钢筋,损伤均主要集中于相应钢筋布置部位,其他区域损伤相对较轻。总体而言,钢筋布置位置对损伤分布模式具有主导影响。

3.2 滞回曲线

不同配筋形式3DPCW有限元模型的滞回曲线见图11。

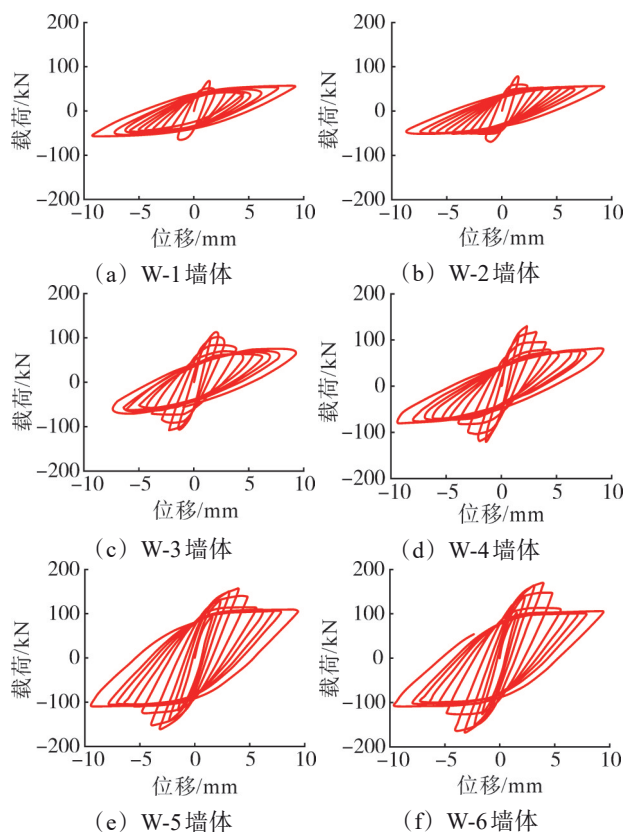


图11 墙体模型滞回曲线

Fig.11 hysteretic curve of wall model

在弹性阶段,墙体的滞回环呈细长形态,残余变形较小,反映出其初始刚度较高而耗能能力有限。进入弹塑性阶段后,随着墙体损伤的发展,滞回环逐渐弯曲,环面积不断增大,并开始出现明显的残余变形,表明墙体已发生不可恢复的非弹性变形。此时,曲线形态由直线型向梭形过渡,墙体整体变形能力有所提升。当墙体达到破坏阶段时,位移持续增加,滞回环出现明显的捏拢现象,形状由梭形转为略呈弓形,同时环面积进一步扩大。这一变化主要源于墙体在较大剪力作用

下产生大量斜裂缝,导致相邻打印层间滑移增大,刚度与耗能性能逐步退化。

3.3 骨架曲线

不同配筋形式的3DPCW骨架曲线见图12。

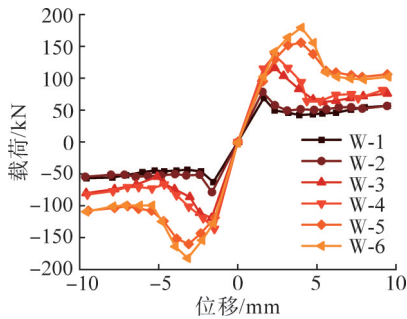


图12 不同墙体模型骨架曲线

Fig.12 skeleton curve of different wall model

由图12可见,各曲线的整体变化趋势基本一致。在加载初期,曲线近似直线,试块处于弹性阶段,表现为线性变形。随着载荷增加,试块达到屈服载荷后,骨架曲线呈现明显的弹塑性特征,承载力仍缓慢增长,表明墙体在经历一定变形与损伤后仍具备持续承载能力。超过极限承载力后,墙体承载能力逐渐下降,试块已接近或达到承载

极限,进一步加载将导致破坏加剧与失稳。从不同配筋形式的对比来看,配置竖向钢筋的墙体骨架曲线峰值高于配置水平钢筋的墙体。这主要因为3D打印混凝土层间黏结较弱,易发生层间滑移,从而降低整体刚度。水平钢筋的加入会加剧此类滑移,进而削弱墙体承载力;竖向钢筋能有效约束层间相对位移,增强整体稳定性,抑制滑移发展。

3.4 位移延性

墙体的抗震能力取决于其最大承载力与变形能力,良好的弹塑性性能使墙体能够在屈服后通过持续变形有效吸收地震能量。不同配筋墙体的位移延性系数 μ 见表3,可知配置水平钢筋的墙体延性性能相对较低,原因是水平钢筋的引入显著提高了墙体刚度,而刚度的增大会制约塑性变形能力,导致位移延性系数较小。配置竖向钢筋的墙体则表现出更高的位移延性系数与峰值载荷。竖向钢筋对墙体刚度的提升相对有限,赋予墙体更优的变形协调与耗能能力,使其在承受较大载荷时仍能维持良好的延性性能。

表3 墙体延性系数
Tab.3 ductility coefficient of wall

墙体模型	加载方向	屈服载荷/(10 ³ ·N)	屈服位移/mm	极限载荷/(10 ³ ·N)	极限位移/mm	μ
W-1	正向	69.51	1.03	67.73	3.83	3.73
	负向	66.30	0.95	65.48	3.96	4.18
	平均	67.90	0.99	64.60	3.90	3.95
W-2	正向	72.17	1.05	71.28	4.24	4.04
	负向	73.95	1.07	70.15	4.39	4.10
	平均	73.06	1.06	70.72	4.31	4.07
W-3	正向	97.17	1.33	98.93	5.09	3.82
	负向	103.84	1.10	100.64	5.16	4.69
	平均	100.51	1.22	99.79	5.13	4.26
W-4	正向	110.42	1.45	110.21	5.95	4.11
	负向	105.46	1.24	104.45	5.99	4.81
	平均	107.94	1.35	107.33	5.97	4.46
W-5	正向	136.35	1.50	132.67	7.20	4.80
	负向	136.44	1.46	137.65	6.83	4.68
	平均	136.39	1.48	135.16	7.01	4.74
W-6	正向	150.00	1.68	143.76	8.03	4.78
	负向	144.24	1.65	143.21	7.98	4.83
	平均	147.12	1.67	143.48	8.00	4.80

3.5 刚度退化

3DPCW刚度退化曲线见图13。其中割线刚度表示不区分加载方向的割线刚度,反映结构在对应位移下的综合抗变形能力;割线刚度(+)和割

线刚度(-)分别为加载和卸载阶段的割线刚度,反映结构在正向和反向受力时的抗变形特性。各截面形式试块的衰减速率总体相似:加载初期裂缝快速萌生扩展,刚度衰减较快;屈服后新生裂

缝减少,衰减速率逐渐趋缓。不同截面形式中,空心截面墙体刚度衰减最快,曲线斜率变化最显著,破坏后仍保有较大残余刚度;竖直截面墙体衰减最慢,斜率变化平缓,残余刚度与延性最优。

因此,相较于空心与斜向截面,竖直截面墙体初始刚度较低,但刚度衰减减缓、延性提升。增大轴压比可减缓刚度退化,其机制在于提高打印层间摩擦力,限制裂缝发展,从而维持墙体刚度。

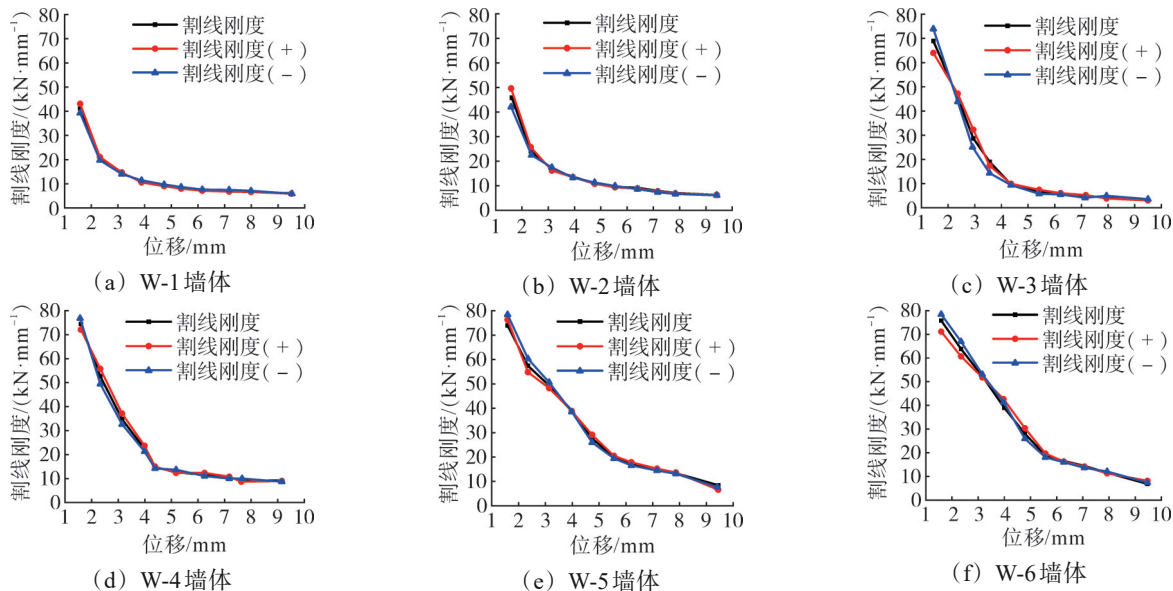


图13 墙体模型割线刚度退化曲线

Fig.13 secant stiffness degradation curve of wall model

3.6 耗能能力

不同配筋形式的3D打印混凝土墙体能量耗散系数见图14,其中能量耗散系数表示不区分加载方向的能量耗散,反映结构的整体抗震性能、阻

尼特性及总体能量吸收效率,能量耗散系数(+)和能量耗散系数(-)表示加载和卸载阶段的能量耗散,反映结构在正向和反向受力时的损伤发展、材料非线性行为以及该方向特有的耗能机制。

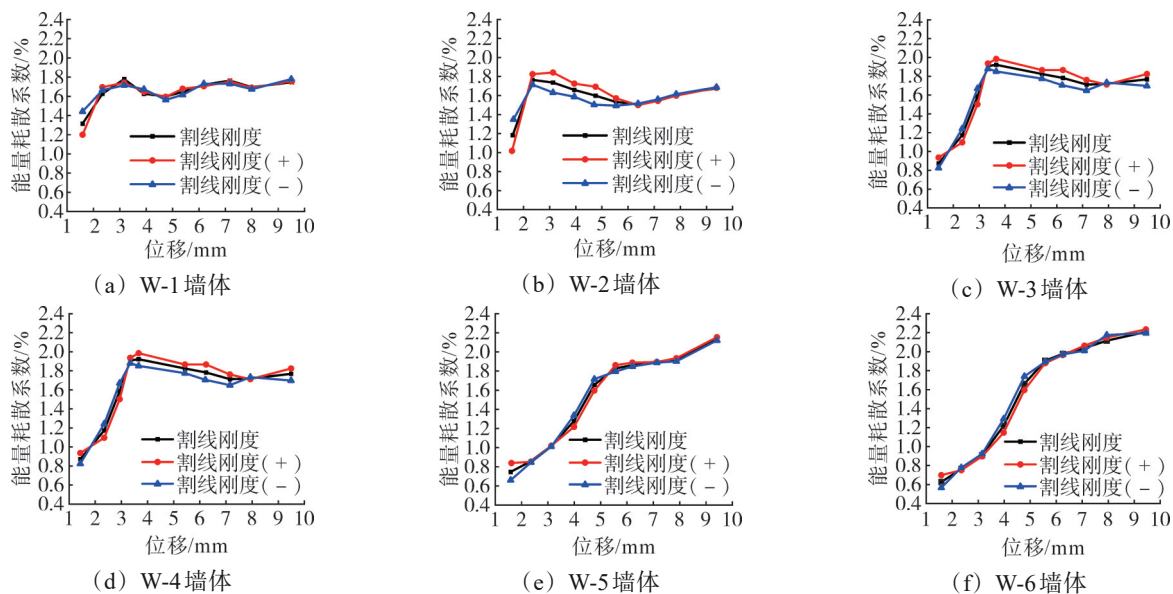


图14 墙体模型能量耗散曲线

Fig.14 energy dissipation curve of wall model

配筋空心墙体及斜向连接肋墙体的能量耗散系数呈现两阶段波动特征:试件破坏后首次下降,

随后逐渐恢复;进入屈服阶段后第二次下降,之后迅速回升,表明墙体耗能能力在波动过程中整

体呈提升趋势。相比之下,配置竖向连接肋的墙体在水平循环载荷耗能性能更优,该墙体能有效吸收与耗散能量,延缓墙体破坏进程。在弹塑性阶段,墙体具备持续耗能能力,并在损伤累积过程中释放大量能量;随着位移增大,其能量耗散系数相应提高,表明墙体在受力过程中能更有效地吸收与消耗外部输入能量,从而减缓损伤发展;竖向连接肋墙体在低周往复载荷下展现出良好的整体抗震性能。

4 结论

基于 Cohesive 黏聚力接触参数,重点考虑层间界面黏结性能,设计6种不同截面和配筋形式的3DPCW,研究在低周往复载荷作用下墙体的抗震性能,得到如下结论。

(1) 适当提高粗骨料含量有助于增强层间抗剪与抗拉强度。微观结构显示,骨料与水泥基体结合紧密,打印材料具备较高密实度。

(2) 3DPCW 损伤分布均显著集中于钢筋配置区域。不同截面形式的墙体在水平或竖向配筋条件下,损伤分别集中于钢筋布置的中下部、中部两侧或肋部位置。钢筋布置位置对损伤集中模式具有主导性影响。

(3) 带有竖向连接肋的墙体在初始刚度、刚度退化速率及延性性能方面均优于空心墙体与斜向连接肋墙体。其截面形式有助于应力传递与分布,使裂缝发展更为分散,延缓刚度衰减,从而提高墙体在循环载荷下的整体耗能能力和变形性能。

(4) 竖向配筋墙体的抗震性能优于水平配筋墙体。其滞回曲线更为饱满,骨架曲线峰值更高,位移延性系数更大,刚度退化更为缓慢,且耗能能力显著提升。相较于水平钢筋,竖向钢筋可更有效抑制层间滑移,改善墙体延性与整体抗震行为。

参考文献(References):

- [1] 张超,邓智聪,马蕾,等. 3D打印混凝土研究进展及其应用[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(6): 1769-1795.
ZHANG Chao, DENG Zhicong, MA Lei, et al. Research progress and application of 3D printing concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(6): 1769-1795.
- [2] 蔡建国,王敬淞,杜彩霞,等. 芯柱式3D打印混凝土墙轴心受压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(7): 31-42.
CAI Jianguo, WANG Jingsong, DU Caixia, et al. Experimental

- study on axial compressive performance of 3D printed concrete walls with core columns[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(7): 31-42.
- [3] 曹启坤,包宇洋,沈燕梅. 芯孔尺寸对高层格构式混凝土墙结构抗震性能影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 70-74.
CAO Qikun, BAO Yuyang, SHEN Yanmei. Effect of core hole size on seismic performance of high rise frame concrete lattice wall structure[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2018, 37(1): 70-74.
- [4] 韩女,肖建庄,吕振源,等. 3D打印纤维再生细骨料混凝土孔隙结构与力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(12): 1834-1842.
HAN Nv, XIAO Jianzhuang, LYU Zhenyuan, et al. Pore structure and mechanical properties of 3D printed fiber-reinforced concrete with recycled aggregate[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2024, 52(12): 1834-1842.
- [5] 孙凯利,吴翔强,蔺喜强,等. 混凝土3D打印材料及3D打印模板技术应用进展[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(6): 1832-1843.
SUN Kaili, WU Xiangqiang, LIN Xiqiang, et al. Research progress on concrete materials for 3D printing and 3D printing formwork technology[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(6): 1832-1843.
- [6] 朱彬荣,潘金龙,周震鑫,等. 3D打印技术应用于大尺度建筑的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(23): 4150-4159.
ZHU Binrong, PAN Jinlong, ZHOU Zhenxin, et al. Advances in large-scale three dimensional printing technology applied in construction industry[J]. Materials Review, 2018, 32(23): 4150-4159.
- [7] 葛杰,白洁,杨燕,等. 3D打印配筋砌体墙承载力试验研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 414-420.
GE Jie, BAI Jie, YANG Yan, et al. Experimental study on bearing capacity of 3D printing reinforced masonry wall[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 414-420.
- [8] WANG J S, ZHANG P, FENG J, et al. Experimental study and design approach on 3D printed concrete walls under eccentric axial compression[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02892.
- [9] AGHAJANI DELAVAR M, CHEN H, SIDERIS P. Analysis and design of 3D printed reinforced concrete walls under in-plane quasi-static loading[J]. Engineering Structures, 2024, 303: 117535.
- [10] TANAPORNRAWEEKIT G, JIRAMAROOTAPONG P, PAUDEL S, et al. Experimental and numerical investigation of 3D-printed mortar walls under uniform axial compression[J]. Construction and Building Materials, 2022, 360: 129552.
- [11] HAN X Y, YAN J C, LIU M J, et al. Experimental study on large-scale 3D printed concrete walls under axial compression[J]. Automation in Construction, 2022, 133: 103993.
- [12] RAPHAEL B, SENTHILNATHAN S, PATEL A, et al. A review of concrete 3D printed structural members[J]. Frontiers in Built Environment, 2023, 8: 1034020.
- [13] AHMED G H, ASKANDAR N H, JUMAA G B. A review of

- largescale 3DCP: material characteristics, mix design, printing process, and reinforcement strategies[J]. Structures, 2022, 43: 508-532.
- [14] 向奇灵. 3D打印纤维混凝土配合比及其墙体构件抗震性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2024: 6.
- [15] 裴强, 杨雨航, 钟颖竹, 等. 玄武岩纤维对3D打印混凝土层间黏结性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(7): 2465-2473.
- PEI Qiang, YANG Yuhang, ZHONG Yingzhu, et al. Effect of basalt fiber on interlayer bonding properties of 3D printed concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(7): 2465-2473.
- [16] 宋承哲, 杨宏阳, 何化南, 等. 骨料级配对3D打印再生混凝土力学性能影响[J]. 建筑结构, 2025, 55(21): 42-47.
- SONG Chengzhe, YANG Hongyang, HE Huanan, et al. Influence of aggregate gradation on mechanical properties of 3D printed recycled concrete[J]. Building Structure, 2025, 55(21): 42-47.
- [17] 肖力光, 仲小康. 3D打印粗骨料混凝土的研究进展及应用[J]. 混凝土, 2024(6): 169-172, 179.
- XIAO Liguang, ZHONG Xiaokang. Research progress and application of 3D printed coarse aggregate concrete[J]. Concrete, 2024(6): 169-172, 179.
- [18] 刘化威, 刘超, 白国良, 等. 基于孔结构缺陷的3D打印粗骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(12): 54-64.
- LIU Huawei, LIU Chao, BAI Guoliang, et al. Experimental study on mechanical properties of 3D printed coarse aggregate concrete based on the pore structure defects[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(12): 54-64.
- [19] LIU Z J, WEI X B, WANG D Q, et al. Performance of cement-stabilized macadam roads based on aggregate gradation interpolation tests[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2019, 16(4): 2371-2390.
- [20] 王里, 邢保义, 王强. 3D打印混凝土配筋选型及其界面粘结性能试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2025, 33(6): 1852-1864.
- WANG Li, XING Baoyi, WANG Qiang. Experimental study on the bar selection and interfacial bond performance for 3D printing concrete[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2025, 33(6): 1852-1864.
- [21] 刘超, 王一菲, 朱超, 等. 3D打印混凝土砌体墙抗压性能试验与数值模拟研究[J/OL]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2025: 1-9[2026-02-14]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1295.TU.20250403.2037.002>.
- LIU Chao, WANG Yifei, ZHU Chao, et al. Experimental and numerical simulation study on compressive performance of 3D printed concrete masonry walls[J/OL]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2025:1-9 [2026-02-14]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1295.TU.20250403.2037.002>.
- [22] DING T, QIN F, XIAO J Z, et al. Experimental study on the bond behaviour between steel bars and 3D printed concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 49: 104105.
- [23] 刘龙, 左宏亮, 王常青. 墙下钢筋混凝土条形基础优化[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(3): 325-329.
- LIU Long, ZUO Hongliang, WANG Changqing. Optimum of reinforced concrete strip foundation under wall[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2014, 33(3): 325-329.
- [24] LIU H W, WANG Y F, ZHU C, et al. Design of 3D printed concrete masonry for wall structures: mechanical behavior and strength calculation methods under various loads[J]. Engineering Structures, 2025, 325: 119374.
- [25] 韩潇雨, 瞿震南, 严佳川, 等. 配筋3D打印混凝土结构有限元模拟方法及拱稳定性分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(20): 136-143.
- HAN Xiaoyu, QU Zhennan, YAN Jiachuan, et al. Finite element simulation method of 3D printed concrete structures and analysis of arch stability[J]. Construction Technology, 2024, 53(20): 136-143.
- [26] 孙浩浩, 王一菲, 刘化威, 等. 3D打印混凝土砌体抗剪性能试验与数值模拟研究[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(8): 2814-2822.
- SUN Haohao, WANG Yifei, LIU Huawei, et al. Experimental and numerical simulation study on shear performance of 3D printed concrete masonry[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(8): 2814-2822.