

## 预制UHPC-RAC组合短柱轴压性能

秦朝刚 杜锦霖

### Axial compression performance of precast UHPC-RAC composite short column

QIN Chaogang, DU Jinlin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231020.002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 纤维增强树脂复合材料约束超高性能混凝土轴压性能的细观数值模拟

Meso-scale numerical simulation of axial compression performance of fiber reinforced polymer composite-confined ultra-high performance concrete

复合材料学报. 2020, 37(7): 1629–1638 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190827.001>

#### 高强箍筋约束超高性能混凝土柱轴压性能

Axial compression behavior of ultra-high performance concrete columns confined by high-strength stirrups

复合材料学报. 2020, 37(10): 2590–2601 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200203.002>

#### 圆角半径对碳纤维增强聚合物复合材料布约束型钢混凝土矩形短柱轴压性能的影响

Effect of corner radius on axial compressive performance of steel reinforced concrete rectangular short columns confined by carbon fiber reinforced polymer composite

复合材料学报. 2020, 37(4): 775–785 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190627.001>

#### FRP筋/珊瑚混凝土柱轴心受压承载力

Compression behavior of FRP bars/coral concrete columns under axial compression loading

复合材料学报. 2021, 38(10): 3530–3541 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201217.001>

#### 基于套管屈曲约束的拉挤型GFRP管轴压性能

Axial compression performance of pultruded GFRP tube based on casing buckling restraint

复合材料学报. 2021, 38(10): 3255–3269 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201222.002>

#### CFRP约束钢管-活性粉末混凝土短柱轴压性能

Axial compression behaviour of CFRP confined reactive power concrete filled steel tube stub columns

复合材料学报. 2021, 38(2): 439–448 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200608.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

## 预制 UHPC-RAC 组合短柱轴压性能

秦朝刚\*, 杜锦霖

(长安大学 建筑工程学院, 西安 710061)



分享本文

**摘要:** 将优势互补的超高性能混凝土 (Ultra-high performance concrete, UHPC) 和再生混凝土 (Recycled aggregate concrete, RAC) 组合设计为预制 UHPC-RAC 组合柱。以箍筋位置、UHPC 壁厚和 UHPC-RAC 结合面粗糙度为参数, 设计制作了 7 个预制 UHPC-RAC 组合短柱, 通过轴压试验, 分析了破坏形态、材料应变、荷载-位移曲线、承载力、泊松比和损伤等性能参数。结果表明: 预制 UHPC-RAC 组合短柱改善了 RAC 短柱的破坏形态, 因外围 UHPC 与箍筋形成组合作用对内部 RAC 约束效果的不同, 分为强约束的剪切压溃破坏和弱约束的外壁 UHPC 劈裂破坏; 配箍 UHPC 及其厚度的增加, 增强了外围 UHPC 的约束作用, 提高了预制 UHPC-RAC 组合短柱的轴压刚度和受压承载力, 最大可提升 93.3% 和 97.4%, 降低了泊松比和损伤指数, 其中泊松比的变化范围为 0.26~0.18; UHPC-RAC 结合面粗糙度对轴压性能呈现有利影响但差异较小。强约束效果保证了高性能材料力学性能的发挥, 采用叠加原理, 建立了可准确计算强约束预制 UHPC-RAC 组合柱的受压承载力计算公式, 并提出了预制 UHPC-RAC 组合短柱的设计要求, 提升材料的利用率。

**关键词:** 超高性能混凝土; 再生混凝土; 预制组合短柱; 约束作用; 轴压性能; 受压承载力

中图分类号: TU375.3; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2024)06-3129-14

## Axial compression performance of precast UHPC-RAC composite short column

QIN Chaogang\*, DU Jinlin

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** The combination design of ultra-high performance concrete (UHPC) and recycled aggregate concrete (RAC) forms the precast UHPC-RAC composite columns. Seven precast UHPC-RAC composite short columns were designed and fabricated with the parameters of stirrup position, UHPC thickness and UHPC-RAC interface roughness. The failure form, material strain, load-displacement curve, bearing capacity, Poisson's ratio and damage were analyzed through the axial compression experiments. The results show that the precast UHPC-RAC composite short columns improve the failure pattern, which can be divided into strong confining shear collapse failure and weak confining of UHPC splitting due to the difference in the binding effect of the combination of external UHPC and stirrup on internal RAC. The increase thickness of hooped UHPC ensures the enhancement of external UHPC restraint. The restraint effect of the outer UHPC is enhanced with the increase of the hoop UHPC and its thickness. The axial compressive stiffness and compression capacity of the prefabricated UHPC-RAC short column are increased by 93.3% and 97.4% at the maximum, and the Poisson's ratio and damage index are decreased, with the Poisson's ratio varying from 0.26 to 0.18. The roughness of UHPC-RAC bonding surface has little difference on the favorable influence of axial compression performance parameters. The strong constraint effect can make full use of the mechanics of high performance materials. Based on the superposition principle, the

收稿日期: 2023-08-11; 修回日期: 2023-10-01; 录用日期: 2023-10-16; 网络首发时间: 2023-10-23 10:26:47

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231020.002>

基金项目: 中国博士后科学基金 (2021T140587); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2023-JC-YB-326); 长安大学中央高校基本科研业务费高新技术项目 (300102282208)

China Postdoctoral Science Foundation (2021T140587); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2023-JC-YB-326); Fundamental Research Funds for the Central Universities, CHD (300102282208)

通信作者: 秦朝刚, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为低碳装配式混凝土结构体系与设计理论 E-mail: [qinchaogang@chd.edu.cn](mailto:qinchaogang@chd.edu.cn)

引用格式: 秦朝刚, 杜锦霖. 预制 UHPC-RAC 组合短柱轴压性能 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(6): 3129-3142.

QIN Chaogang, DU Jinlin. Axial compression performance of precast UHPC-RAC composite short column[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(6): 3129-3142(in Chinese).

calculation formula of the compression capacity of the strongly constrained precast UHPC-RAC composite column is established, and the design requirements of the precast UHPC-RAC composite short column are proposed to improve the utilization rate of the material.

**Keywords:** ultra-high performance concrete; recycled aggregate concrete; precast composite short column; restraining effect; axial compression performance; compressive capacity

钢筋混凝土结构在我国应用非常广泛,碳排放量亦较大,其中建材生产阶段的碳排放量占全国的21.4%,建造阶段的碳排放量占比为1.9%<sup>[1]</sup>。减少钢筋混凝土建筑的碳排放迫在眉睫。因此,可以利用新型建筑材料,优化结构构型技术,创新构件及结构的构造与建造方式,保证其力学性能不降低。

超高性能混凝土(Ultra high performance concrete, UHPC)良好的强度指标和出色的耐久性,能有效地改善构件及结构的力学性能和提高工程寿命,但较高的造价限制了UHPC的应用范围<sup>[2]</sup>。废旧混凝土构件经破碎、筛分后的再生粗骨料,因表面粘附的旧水泥浆体能吸收CO<sub>2</sub>,按照一定取代率,将其配比形成的绿色建筑材料再生混凝土(Recycled aggregate concrete, RAC),具有固碳能力,并能提高建筑垃圾的利用率<sup>[3-4]</sup>,目前RAC已在不同类型的工程中广泛应用<sup>[5]</sup>。

超高强度的UHPC使配筋受压构件的截面尺寸减小、长细比增大,降低了材料性能的发挥,承载力计算时UHPC的轴心抗压强度需折减25%<sup>[6]</sup>。因此,将UHPC与普通混凝土(Normal concrete, NC)组合设计,优势互补,形成新的受压组合截面,多用于改造加固。Xie等<sup>[7]</sup>将适量UHPC附加在桥墩外围,提高桥墩的耐久性,且UHPC厚度的增加,显著提高了承载力和变形性能。邓明科等<sup>[8]</sup>认为配筋的活性粉末混凝土和高延性混凝土加固钢筋混凝土(Reinforced concrete, RC)柱后,短柱受压的破坏形态、承载力和变形改善效果明显。成煜等<sup>[9]</sup>分析了UHPC加固不同初始应力状态RC短柱的轴压性能,认为UHPC对内部RC无明显围压,而二次效应的影响,取决于UHPC和RC对加固RC短柱受压承载力贡献的相对大小。王勃等<sup>[10]</sup>认为UHPC加固层厚度不宜大于40 mm,此后增加UHPC厚度,构件的承载力提升效果不明显。可见外围附加UHPC能改善被加固RC柱的受压性能,尤其是UHPC内部配置钢筋后能形成高效的加固层,但此工艺限于既有结构加固,且现场施工工艺复杂,碳排放量大。

与现浇工艺相比,装配建造具有较少的碳排

放<sup>[11]</sup>。将预制(配筋)UHPC薄壳,作为施工辅助措施,即免拆模板,浇筑NC后形成组合混凝土受力构件,具有半工业化生产的特点。黄卿维等<sup>[12]</sup>以UHPC圆管壁厚、箍筋间距和钢纤维体积掺量为参数,设计了组合短柱,认为配筋预制UHPC薄壳对内部NC能提供有效约束,提升组合短柱的初裂荷载、极限荷载和延性。杨医博等<sup>[13]</sup>和单波等<sup>[14-15]</sup>通过预制UHPC免拆模板RC短柱轴压性能分析,认为免拆模构件整体性强,提高了构件的抗裂性能,增强了耐久性。任志刚等<sup>[16]</sup>研究叠合短柱,表明预制UHPC外模板,可以有效约束预制UHPC与内钢管间的夹层混凝土,形成组合受压构件。UHPC作为模板,因UHPC与NC收缩量值和收缩开始时间的差异,使后浇NC与预制UHPC模板间形成收缩微裂缝,受压承载力比先预制NC芯体再浇筑外围UHPC的轴压短柱降低约10%<sup>[17]</sup>。因此,可以利用UHPC的高收缩性<sup>[18]</sup>,保证组合构件材料结合面的粘结性能,提高构件的力学性能。

对于RAC轴心受压构件,在RAC外围包裹一定厚度的UHPC,形成受压UHPC-RAC组合截面,以利用外部UHPC的约束作用,增强RAC受压构件的力学性能<sup>[19]</sup>,拓展RAC高品质的应用范围。因此,在装配式混凝土结构领域,利用UHPC与RAC的材料特性,扬长避短,创新设计了预制UHPC-RAC组合柱<sup>[20]</sup>。此构件可通过组合截面中心的圆形通道,浇筑UHPC连接受力钢筋,形成装配式混凝土结构<sup>[21]</sup>。

本文通过轴压性能试验,分析了箍筋位置、UHPC壁厚和UHPC-RAC结合面粗糙度等因素,对预制UHPC-RAC组合短柱的破坏形态和荷载-位移曲线的影响规律,获得受压承载力、轴压刚度、泊松比和损伤指标等性能参数,建立了预制UHPC-RAC组合短柱的受压承载力计算公式,并提出了配箍UHPC形成强约束作用的设计建议。

## 1 试验方案

### 1.1 材料性能

#### 1.1.1 超高性能混凝土(UHPC)

UHPC具有超高的抗压强度与抗拉强度、低

渗透性、高流动性和自密实的特点，是一种水泥基复合材料。试验中 UHPC 由中德新亚公司提供，选用高活性的微细材料，采用最紧密堆积理论和纤维增强技术配制而成，其中钢纤维为混杂型雷克丝镀铜平直钢纤维，质量分数为 2wt%，直径为 0.18~0.23 mm，长度为 12~14 mm，抗拉强度大于 3 000 MPa；细骨料为粒径为 1~2 mm 的石英砂，主要成分如图 1 所示。

按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)<sup>[22]</sup> 和《超高性能混凝土基本性能与试验方法》(T/CBMF 37—2018、T/CCPA 7—2018)<sup>[23]</sup>，设计制作了 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体试件和标准狗骨试件，在 2 000 kN 微机控制电液伺服试验机(美特斯工业系统(中国)有限

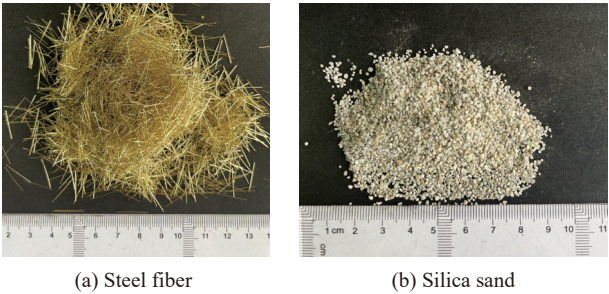


图 1 超高性能混凝土(UHPC)的主要成分

Fig. 1 Main ingredients of ultra-high performance concrete (UHPC)

公司，E64.206)上，以 0.9 MPa/s 和 0.2 mm/min 的加载速率，分别测试 UHPC 的轴心抗压强度和抗拉强度，应力-应变曲线如图 2 所示，测试结果见表 1。

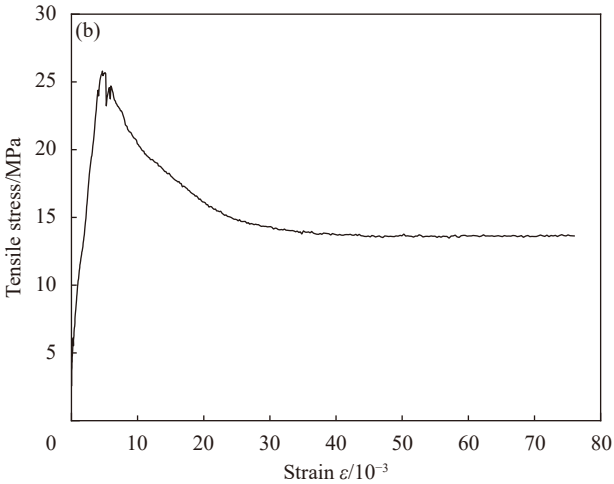
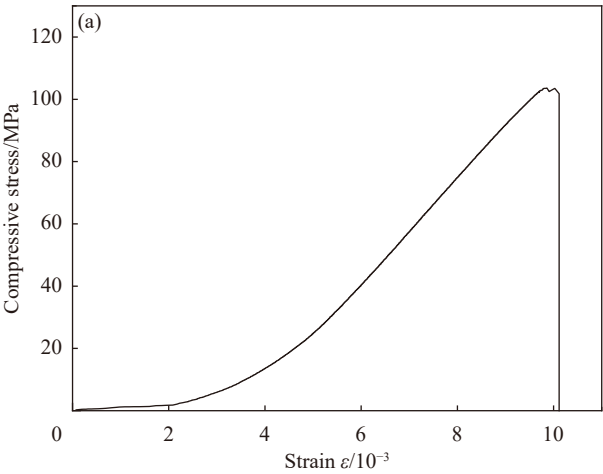


图 2 UHPC 的基本力学性能测试

Fig. 2 Basic mechanical properties test of UHPC



表 1 再生混凝土 (RAC)、UHPC 和钢筋的力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC), UHPC and reinforcements

Material	Compressive strength/MPa	Tensile strength/MPa	Material	Yielding strength/MPa	Ultimate strength/MPa
RAC	26.20	—	C6	400.5	568.4
UHPC	101.78	9.30	C10	456.5	621.3

Notes: C6—Steel bars with a diameter of 6 mm ; C10—Steel bars with a diameter of 10 mm.

1.1.2 再生混凝土和钢筋

试验用再生混凝土中的再生粗骨料，来源为陕西建新绿环实业股份有限公司拆除结构构件，经破碎、筛分而来，满足《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)<sup>[24]</sup>中 II 类再生粗骨料的性能要求，再生粗骨料的取代率为 50%，水泥为海螺牌 P·O 42.5，砂子为中砂。再生混凝土的抗压强度设计等级为 C35，配合比中水泥:砂子:天然骨料:再生骨料:水的质量比为 1:1.26:1.17:1.17:0.57。轴心抗压强度采用 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体试件，测试结果见表 1。

预制 UHPC-RAC 组合短柱中钢筋强度等级为 HRB400，纵向受压钢筋直径为 10 mm，箍筋直径为 6 mm，钢筋的抗拉强度实测值见表 1。

1.2 试件设计

本次试验共设计了 8 个短柱，包括 7 个预制 UHPC-RAC 组合短柱和 1 个对比分析的再生混凝土短柱，试件均满足《混凝土结构设计规范》(GB/T 50010—2010)中轴心受压构件的参数设计要求<sup>[25]</sup>。所有短柱的几何参数均相同，高度为 750 mm，截面尺寸为 250 mm×250 mm。用 UHPC 将再生混凝土短柱截面外轮廓一定厚度的 RAC 替换，形成 UHPC-RAC 组合柱的组合截面。之所以称为预制组合短柱，是由于建造时在其底部，通过外壁 UHPC 与 RAC 芯柱长度的差值，约为 10*d* (*d* 为被连接纵向钢筋的直径)<sup>[26]</sup>，形成了纵向钢筋搭接连接的空腔；装配时将截面中心直径 50 mm 的圆孔作为后浇 UHPC 连接受力钢筋的通道，UHPC 充填空腔区域，实现组合柱的预制连接，具备装配建造的特点。为了避免制作过程 RAC 芯柱开裂受损，纵向钢筋均设计于预制 RAC 芯柱内部，为 8 C10，配筋率为 1.01%。箍筋为 C6@60，通过箍筋几何尺寸的变化 (配箍率存在较小差异)，实现组合柱截面的不同构造设计。预制 UHPC-RAC 组合短柱的设计参数详见表 2，截面设计如图 3 所示。

预制 UHPC-RAC 组合短柱的设计参数，包括箍筋位置、UHPC 壁厚和 UHPC-RAC 结合面粗糙度。箍筋位置参数包括 RAC 内箍筋 (1-1)、UHPC

表 2 预制 UHPC-RAC 组合短柱的设计参数

Table 2 Design parameters of the precast UHPC-RAC composite short columns

Specimen	$\rho_v$ /%	$\rho$ /%	Thickness/mm	Roughness/mm
R-C1	0.97	1.01	—	—
U20/S/L/R-C2	0.92		20	—
U20/S/L/R-C3	0.90		20	—
U20/S/L/R-C4	0.87		20	0
U15/S/L/R-C5	0.83		15	—
U30/S/L/R-C6	0.96		30	—
U20/S/L/R-I1.6-C7	0.87		20	1.6
U20/S/L/R-I3.2-C8	0.87		20	3.2

Notes: U—UHPC; R—RAC; S—Stirrup; L—Longitudinal bar; "/"—S or L locating in RAC or UHPC; "|"—Interface between UHPC and RAC; I—Interface roughness;  $\rho_v$ —Volume-stirrup ratio;  $\rho$ —Longitudinal reinforcement ratio. For example, U20/S/L/R-I3.2-C8 represents the eighth column whose UHPC thickness is 20 mm, the "S" stirrup locating in UHPC, "L" longitudinal bar locating in the RAC, and the bonding surface roughness is 3.2 mm; and U20/S/L/R-C3 represents the third column whose UHPC thickness is 20 mm, "S" stirrup locating in the interface between UHPC and RAC, "L" longitudinal bar locating in the RAC.

内箍筋 (配箍 UHPC)(1-3) 和 UHPC-RAC 结合面处箍筋 (1-2)，此设计中箍筋中心线与 UHPC-RAC 结合面重合，箍筋横截面一半位于 RAC，一半在 UHPC，即在浇筑外围 UHPC 前，预制 RAC 芯柱外表面形成箍筋外露的构造设计，以提高 UHPC 与 RAC 结合面的粘结强度<sup>[27]</sup>。以 20 mm 厚配箍 UHPC 的试件 U20/S/L/R-C4 为参照，变化外壁 UHPC 厚度，设计了 15 mm 和 30 mm 厚的配箍 UHPC 组合柱 C5 和 C6。再以 UHPC-RAC 结合面粗糙度为 0 mm 的试件 U20/S/L/R-C4 为基础，补充了 UHPC-RAC 结合面粗糙度为 1.6 mm 和 3.2 mm 的组合柱 C7 和 C8，结合面粗糙度采用“堆砂法”进行计算<sup>[28]</sup>。粗糙面由梯形键槽形成，梯形截面的上底为 30 mm，下底为 20 mm，厚度分别为 10 mm 和 20 mm。预制 UHPC-RAC 组合短柱的截面设计如图 3 所示，其中 UHPC 与 RAC 结合面粗糙度为 1.6 mm 和 3.2 mm 的试件设计图与试件 U20/S/L/R-C4 相同，仅在预制 RAC 芯柱外表面补充了梯形键槽，梯形键槽立面的分布情况如图 4(a) 和图 4(c) 所示。

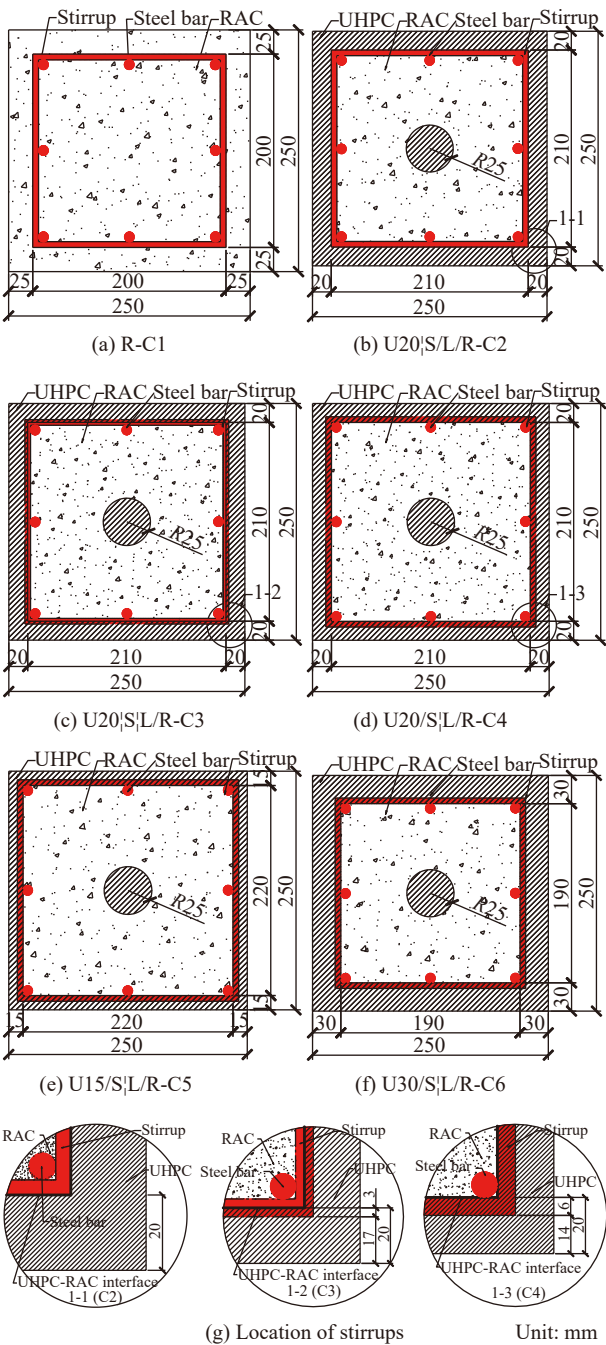


图3 预制 UHPC-RAC 组合短柱的截面设计

1.3 试件制作

预制 UHPC-RAC 组合短柱的制作过程,分为两阶段,如图 4 所示。首先按照 UHPC 与 RAC 组合截面中预制 RAC 的设计参数,在模板内表面固定纵向钢筋和键槽成型的梯形截面雪弗板,如图 4(a) 所示,底模上固定聚氯乙烯 (PVC) 管,浇筑 RAC 待初凝后,将中心的 PVC 管抽出,形成直

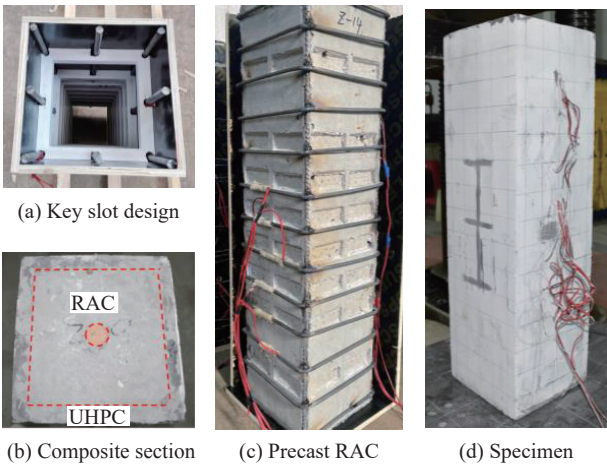


图4 预制 UHPC-RAC 组合短柱的制作

Fig. 4 Construction of the precast UHPC-RAC composite short columns

径 50 mm 的圆孔,拆掉侧模后去除预制 RAC 表面的雪弗板,形成 RAC 芯柱外围的梯形键槽,如图 4(c) 所示,此阶段根据《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1—2014)<sup>[29]</sup> 要求,通过密度高、硬度大且易于加工的雪弗板,在 UHPC 与 RAC 结合面形成梯形键槽,保证了 UHPC 与 RAC 的粘结性能,但此道工序,操作较复杂,需进一步从材料、工艺等方面,简化粗糙面的制作工艺,提高预制效率。

养护 20 余天后,进入试件制作的第二阶段,通过点焊形式,将箍筋固定在 RAC 芯柱角部的纵向钢筋,二次支模,在模板和 RAC 芯柱间形成 UHPC 的空间,浇筑外围和中心通道的 UHPC,完成 UHPC 外壁的制作。在养护初期,UHPC 具有高收缩性<sup>[18]</sup>,对 RAC 芯柱形成较小的主动约束,避免制作阶段材料结合面形成微裂缝。预制 UHPC-RAC 组合短柱的组合截面和试件如图 4(b) 和图 4(d) 所示。

1.4 试件加载和测量

预制 UHPC-RAC 组合短柱的轴压荷载测试,在 500 t 微机控制电液伺服压力试验机 (长春新试验机有限责任公司, YAW-5000) 上进行,如图 5 所示。为了保证试件处于轴压状态,需几何对中 和物理对中,并在试件上表面、下表面均铺 2 mm 厚的细砂,消除试件表面因平整度产生的应力集中现象。在试件端部 100 mm 范围,安装高为 100 mm 的钢箍,通过螺栓将 8 mm 厚的内衬钢板固定在试件表面的上部和下部,保证轴心受压的破坏形态,避免端部的 UHPC 薄壳或 RAC 局部受压失效。采用位移控制的加载制度,加载速



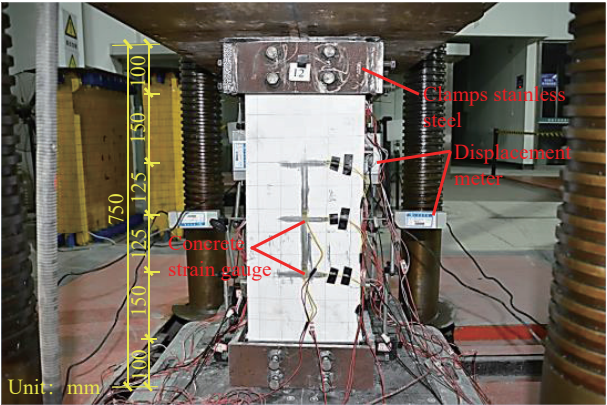


图5 预制 UHPC-RAC 组合短柱的加载与测试装置

Fig.5 Loading and testing device of the precast UHPC-RAC composite short columns

率为 0.2 mm/min，每级目标位移以 0.3 mm 级差增加，每次加载后，稳压 10 min，描绘试件表面的裂缝形态，待承载力下降至峰值荷载的 60% 或箍筋断裂时，停止加载。

在试件相对的两个侧面分别布置了 2 个位移计，测量轴向变形与横向变形，其中竖向测距为 400 mm，水平测距为 150 mm。此外，在试件一侧面中部布置了 3 个水平和两个竖向的混凝土应变片，标距为 80 mm，量测试件中部 UHPC 的竖向应变和横向应变，并在纵向钢筋和箍筋上布置了钢筋应变片，量测加载全过程的钢筋应变，应变片的布置如图 6 所示。

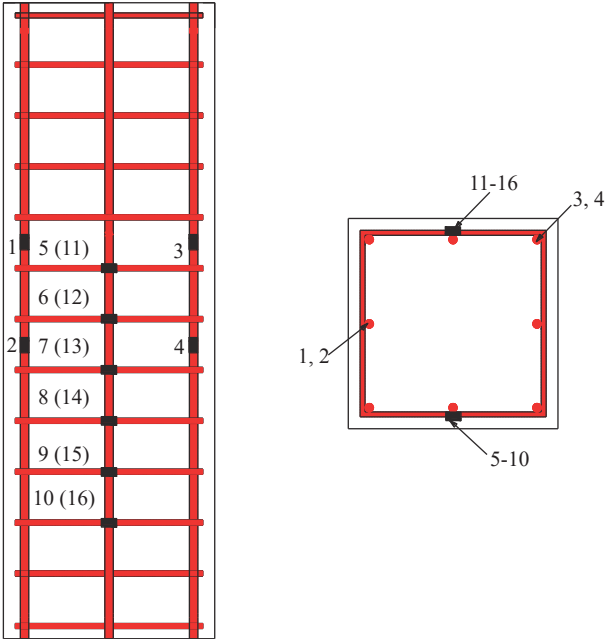


图6 钢筋应变片的布置

Fig.6 Arrangement of reinforcement strain gauges

2 试验现象分析

2.1 破坏形态

预制 UHPC-RAC 组合短柱的轴心受压过程，与 RAC 短柱相似，主要经历了无裂缝的弹性阶段、开裂至峰值荷载的弹塑性阶段和峰值荷载后的破坏阶段，但裂缝形态存在明显区别，各试件受压的最终破坏形态如图 7 所示。

在弹性阶段，短柱截面内的材料均匀受压，

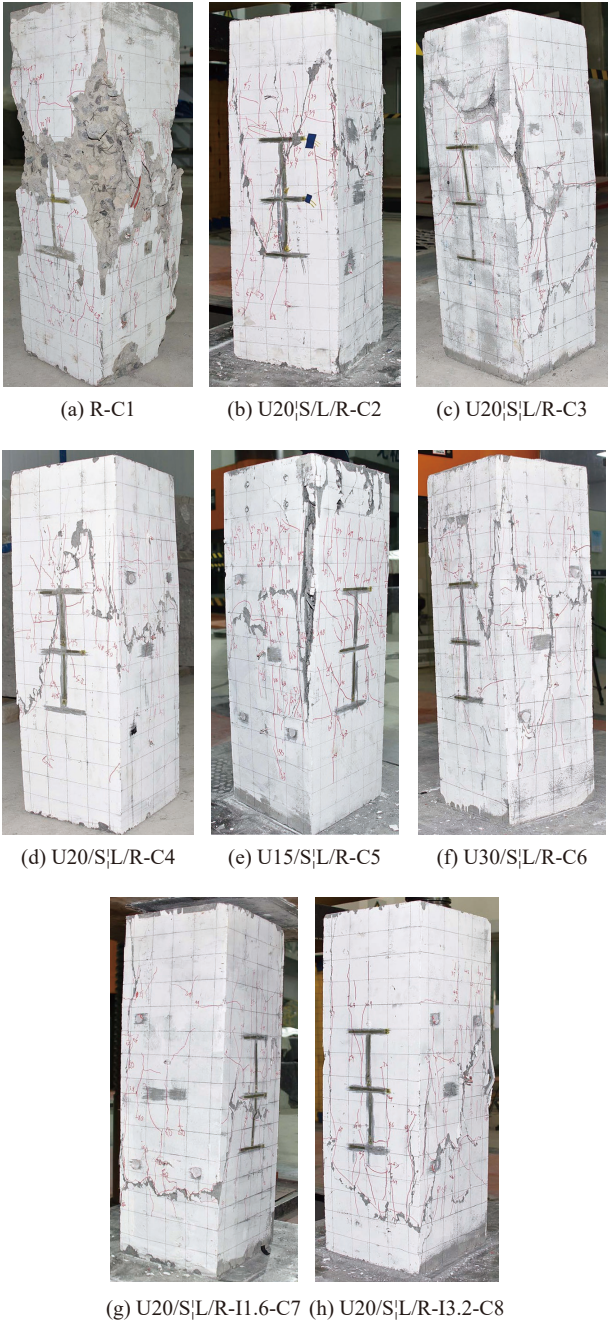


图7 预制 UHPC-RAC 组合短柱的破坏形态

Fig.7 Failure pattern of the precast UHPC-RAC composite short columns



共同变形, 荷载-位移曲线呈线性增长, 表面无裂缝。随着加载位移的增加, 受压承载力增至开裂荷载时, 短柱的端部首先出现竖向微裂缝。此后进入弹塑性阶段, 随着加载位移继续增加, 裂缝逐渐向中部延伸发展, 并不断产生新的微裂缝, 此过程中裂缝的产生与延展比较缓慢; 临近峰值荷载, 即弹塑性阶段后期, 组合短柱未产生新的竖向裂缝, 但此时横向变形增大较明显, 已有裂缝宽度增大, UHPC 薄壳中的部分钢纤维拔出失效, 发出“噼啪”的声音。进入破坏阶段后, 组合短柱在弹性和弹塑性阶段积累的能量, 峰值荷载后, 得到释放, 发出剧烈的爆裂声, 裂缝宽度快速增大, 形成典型的竖向受压裂缝, 或部分 UHPC 外壁压溃; 此后继续加载, 组合短柱损伤增加, UHPC 内钢纤维受拉失效的现象加重, 外围 UHPC 的约束效果明显减弱, 待组合短柱的承载力下降平缓, 约为峰值荷载的 60%, 停止加载, 破坏时具有较高的残余强度。

组合短柱最终的破坏形态, 如图 8 所示。RAC 短柱的横向变形大, 竖向裂缝宽度较大, 表面的保护层明显剥落, 有效承压面积减小, 纵向受压钢筋屈曲。相比之下, 因外围 UHPC 内钢纤维的“桥接”作用, 保证了 UHPC 及其内部箍筋形成的组合作用, 对内部 RAC 提供了良好的侧向约束, 表面混凝土未呈现大面积压溃脱落, 最终破坏形态与箍筋位置、UHPC 壁厚和 UHPC-RAC 结合面

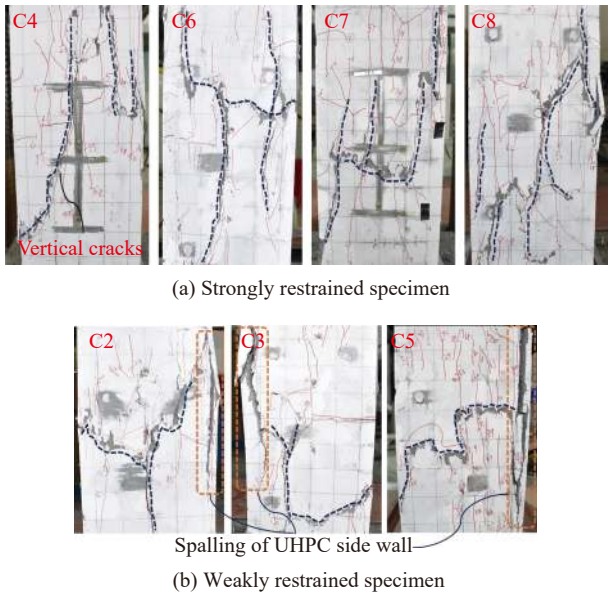


图 8 预制 UHPC-RAC 组合短柱的典型破坏形态

Fig. 8 Typical failure patterns of the precast UHPC-RAC composite short columns

粗糙度的构造设计相关, 分为强约束的压溃失效和弱约束的 UHPC 劈裂破坏。

当 UHPC 壁厚保持不变, 箍筋在 RAC 内, 仅外围 UHPC 内钢纤维能提供的拉应力有限, 形成的约束效果较弱, 破坏时 UHPC 薄壁从角部开裂, 有脱落的趋势, 待箍筋逐步进入 UHPC-RAC 结合面及外壁 UHPC 内形成配箍 UHPC 时, 配箍 UHPC 的约束作用达到最大。对于配箍 UHPC, 当 UHPC 壁厚从 15 mm 增加至 20 mm 和 30 mm 时, 组合截面中薄壁 UHPC 受压开裂后趋于脱落的现象消失, 同样约束效果得到提高, 即随着箍筋进入 UHPC 和配箍 UHPC 厚度的增加, 试件从弱约束短柱变为强约束短柱。当配箍 UHPC 壁厚为 20 mm, 通过梯形键槽将 UHPC-RAC 结合面粗糙度增加至 1.6 mm 和 3.2 mm 时, 整体性较好, 属于强约束试件, 呈现理想的整体受压破坏形态。

2.2 破坏机制

与再生混凝土短柱相比, 预制 UHPC-RAC 组合短柱在 UHPC 与箍筋组合作用的约束下, 组合截面内的 UHPC、RAC 和纵向钢筋共同工作, 协调变形, 轴压性能得到明显改善, 但不同设计参数下的改善效果存在差异。

受压过程中, 强约束试件中 UHPC 内钢纤维的“桥接”作用, 有效地控制了试件的开裂, 保证了 UHPC 与箍筋形成的高效组合作用, 共同承受组合截面内径向和环向的应力, 对预制 RAC 芯柱提供了良好的被动约束, UHPC 与 RAC 的组合设计效果较优。而 RAC 和 UHPC-RAC 结合面内箍筋试件及配箍 UHPC 壁厚 15 mm 的试件, 约束效果较差, 属于弱约束试件。因 UHPC 与箍筋设计参数的差异, 造成的约束效果不同, 影响了 UHPC 抗压强度的发挥, 进而影响了预制 UHPC-RAC 组合柱的受压承载力。

3 轴压性能分析

3.1 荷载-位移曲线

不同因素影响下预制 UHPC-RAC 组合短柱的荷载-位移曲线如图 9 所示, 包括组合截面未受损的线弹性增长阶段、受损后刚度逐渐减小的非线性弹塑性阶段和承载力明显减小且具有一定残余强度的下降破坏阶段。此外, 线性拟合了荷载-位移曲线中弹性和弹塑性前期的数据, 以斜率表征试件的轴压刚度  $K$ , 计算结果见表 3, 反映了峰值荷载前荷载-位移曲线的变化规律。

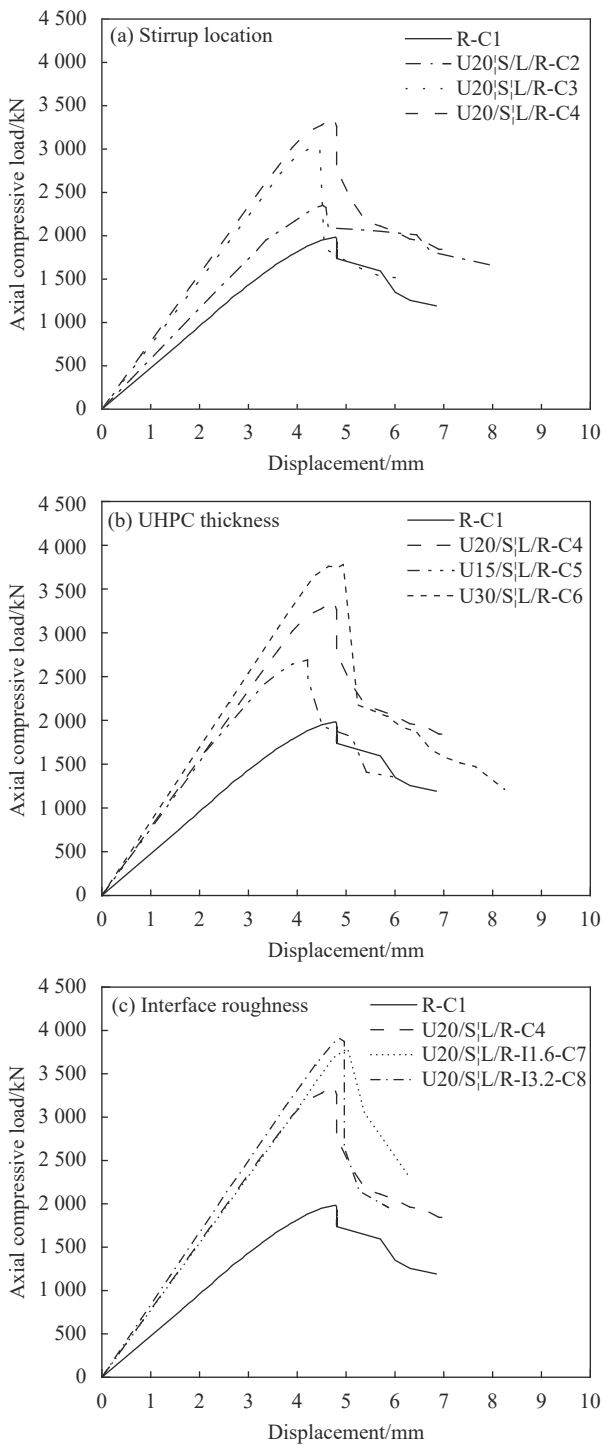


图9 不同因素影响下预制 UHPC-RAC 组合短柱试件的荷载-位移曲线  
Fig.9 Load-displacement curves of the precast UHPC-RAC composite short column specimens under the influence of different factors

预制 RAC 芯柱外围复合 UHPC，与箍筋的不同组合设计，形成的 UHPC 与 RAC 组合截面，可以对 RAC 芯柱提供不同的约束效果，影响了荷载-位移曲线，改善 RAC 短柱的受压过程。与 RAC 短柱对比，当箍筋从 RAC 内经 UHPC-RAC 结合面再

进入 UHPC，预制组合短柱的刚度逐渐增长，增长率分别为 26.7%、69.5% 和 76.7%，可见仅将 RAC 短柱箍筋外侧的保护层替换为 UHPC，轴压性能的改善效果较弱，与 UHPC 免拆模 RC 短柱<sup>[14]</sup>相似，而箍筋与 UHPC 组合形成的配箍 UHPC 薄壳，约束作用最大，改善效果最明显。将配箍 UHPC 的厚度从 15 mm 增加为 20 mm 和 30 mm 时，受压刚度增幅分别为 65.1%、76.7% 和 93.3%，增幅逐渐增大。此外，配箍 UHPC 的厚度越小，极限位移越小，较早进入破坏阶段。当配箍 UHPC 厚度保持不变，随着 UHPC-RAC 结合面粗糙度的增加，受压刚度分别为 76.7%、77.3% 和 87.3%，荷载-位移曲线呈现较小的差异。

当预制 UHPC-RAC 组合短柱的轴压变形超过极限位移进入破坏阶段后，承载力呈现明显下降，且远大于 RAC 短柱，降低幅度与极限荷载的提升程度相关，即 UHPC 内钢纤维拔出失效，与箍筋形成的组合约束作用快速消失。随后，承载力缓慢下降，随着位移的持续增加，仍具有较高的受压承载力，未呈现整体压溃，韧性较高。

3.2 受压承载力

通过轴压加载过程中裂缝的发生发展规律和荷载-位移曲线，确定了预制 UHPC-RAC 组合柱的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载及其对应的竖向位移，详见表 3，其中屈服点由受压钢筋达到屈服应变时确定，不同因素影响下轴压承载力的变化规律如图 10 所示。

与 RAC 短柱对比，因预制 UHPC-RAC 组合短柱中 UHPC 内钢纤维“桥接”作用带来的良好控裂能力，使试件的开裂荷载增加，如箍筋位置参数中配箍 UHPC 的最大提升 73.01%，配箍 UHPC 壁厚 30 mm 时最大提升 164.15%，UHPC-RAC 结合面的粗糙度最大增加 85.9%，其中配筋 UHPC 壁厚对开裂荷载的影响最大。UHPC 与箍筋的组合设计，为轴压荷载下预制 RAC 芯柱提供了被动约束，亦显著提高了屈服荷载和极限荷载，用承载力提高系数  $S_i$ <sup>[30]</sup> 量化评价不同设计参数对 RAC 柱的极限受压承载力的影响，即

$$S_i = N_{UHPC} / N_{RAC} \tag{1}$$

其中： $N_{UHPC}$  为预制 UHPC-RAC 组合柱的受压承载力； $N_{RAC}$  为 RAC 柱的受压承载力，计算结果见表 3。

随着箍筋位置从 RAC 经 UHPC-RAC 结合面进

表 3 预制 UHPC-RAC 组合短柱的轴压性能参数

Table 3 Axial compression performance parameter of the precast UHPC-RAC composite short columns

Specimen	$N_{cr}/\text{kN}$	$\delta_{cr}/\text{mm}$	$N_y/\text{kN}$	$\delta_y/\text{mm}$	$N_u/\text{kN}$	$\delta_u/\text{mm}$	$K/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	$S_i$
R-C1	1 010.40	2.11	1 305.36	2.78	1 984.20	4.79	437.01	1.00
U20 S/L/R-C2	1 290.32	2.23	1 960.04	3.43	2 351.40	4.52	553.78	1.19
U20 S/L/R-C3	1 463.40	2.15	2 549.60	3.45	3 024.60	4.46	740.73	1.52
U20 S/L/R-C4	1 747.84	2.40	2 488.52	3.20	3 370.40	4.74	772.26	1.70
U15 S/L/R-C5	1 645.40	2.11	2 331.64	3.16	2 692.20	4.21	721.44	1.36
U30 S/L/R-C6	2 668.98	3.16	3 612.99	4.37	3 779.52	4.94	844.79	1.90
U20 S/L/R-11.6-C7	1 878.40	2.63	3 430.56	4.40	3 792.12	5.03	774.96	1.91
U20 S/L/R-I3.2-C8	1 682.02	1.96	3 598.72	4.36	3 916.36	4.83	818.66	1.97

Notes:  $N_{cr}$ —Cracking load;  $\delta_{cr}$ —Cracking displacement;  $N_y$ —Yielding load;  $\delta_y$ —Yielding displacement;  $N_u$ —Ultimate load;  $\delta_u$ —Ultimate displacement;  $K$ —Compressive stiffness;  $S_i$ —Coefficient of increase of axial compressive capacity.

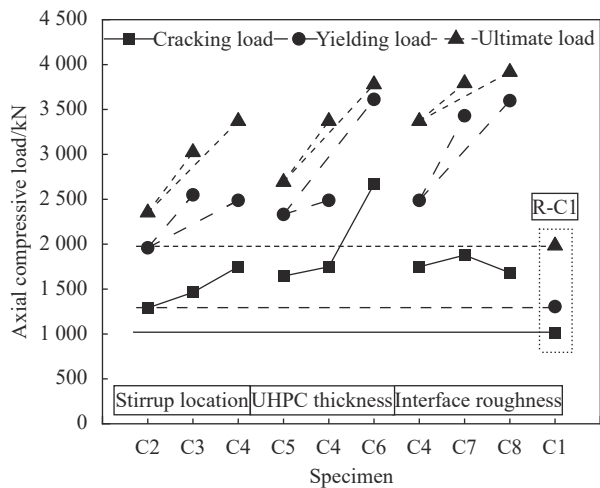


图 10 预制 UHPC-RAC 组合短柱的受压承载力

Fig. 10 Compressive capacity of the precast UHPC-RAC composite short columns

入 UHPC 内，形成配箍 UHPC，承载力提高系数从 1.19、1.52 增加至 1.70，即 UHPC 厚度不变，箍筋位置外移，UHPC 与箍筋粘结良好，组合后的约束效果更明显。而配箍 UHPC 厚度从 15 mm、20 mm 增加至 30 mm，承载力提高系数从 1.36、1.70 提高至 1.90，即 UHPC 厚度较小时，承载力提升幅度较小，而随着厚度的增加，承载力提升效果趋于平缓，表明 UHPC 厚度对预制组合柱的轴压刚度影响逐渐减弱，与文献 [10] 的研究结论一致，即 UHPC 的厚度不宜持续增加。当 UHPC 与 RAC 结合面粗糙度系数从 1.6 mm 增加至 3.2 mm，增加的梯形键槽深度提高了结合面的整体性，增加了环向约束，承载力提高系数从 1.91 增至 1.97，即粗糙度亦能提高受压承载力，但粗糙度系数对增加受压承载力的影响较小。

3.3 钢筋与 UHPC 的应变

预制 UHPC-RAC 组合短柱轴心受压过程中会膨胀，纵向钢筋受压，箍筋受拉，外围 UHPC 轴

向压缩的同时发生横向变形，用“UHPC+”表示 UHPC 横向拉伸应变，“UHPC-”表示 UHPC 轴向压缩应变，各试件中钢筋和 UHPC 的应变，随受压承载力的变化规律如图 11 所示。

预制 UHPC-RAC 组合短柱受压后的弹性阶段，各试件中箍筋和 UHPC 的拉应变随承载力共同增长，且增长量值无明显差异，表明受压过程中 UHPC 与箍筋共同工作，协调变形，为内部预制 RAC 提供了良好的被动约束。随着裂缝的发生发展，预制 UHPC-RAC 组合短柱内部形成损伤，进入了弹塑性阶段，箍筋和 UHPC 的拉应变增量逐渐增大，待箍筋进入屈服阶段，二者仍保持水平相当的增量。不同设计参数形成的不同约束作用，对于弱约束试件，塑性阶段后期承载力的提升幅度有限，而箍筋和 UHPC 的拉应变增长迅速，如箍筋在 RAC 内的 U20|S/L/R-C2 和配箍 UHPC 厚度最小的 U15|S/L/R-C5，提前进入弹塑性阶段后期，承载力增幅显著减小。

同样，预制 UHPC-RAC 组合短柱中纵向钢筋和 UHPC 的压应变，加载全过程中同步增长，共同承担外荷载，与受压承载力变化一致，线性增加。当纵向钢筋压应变约  $2\,000\times10^{-6}$  时进入屈服阶段，应变曲线斜率变小，部分组合柱角部的纵筋部位产生明显裂缝，且箍筋拉应变增大较快，即临近峰值荷载时表现出一定塑性特征。纵向钢筋和 UHPC 的压应变值明显大于箍筋和 UHPC 的拉应变，反映了受压过程中配箍 UHPC 外壳提供了被动约束。此外，RAC 柱箍筋和纵向钢筋的大应变，亦表明配箍 UHPC 与 RAC 的组合设计，能产生良好的约束效果，发挥材料的力学性能。

3.4 泊松比

根据泊松比的定义，即弹性极限内横向应变与纵向应变之比的绝对值。通过表面 UHPC 的横



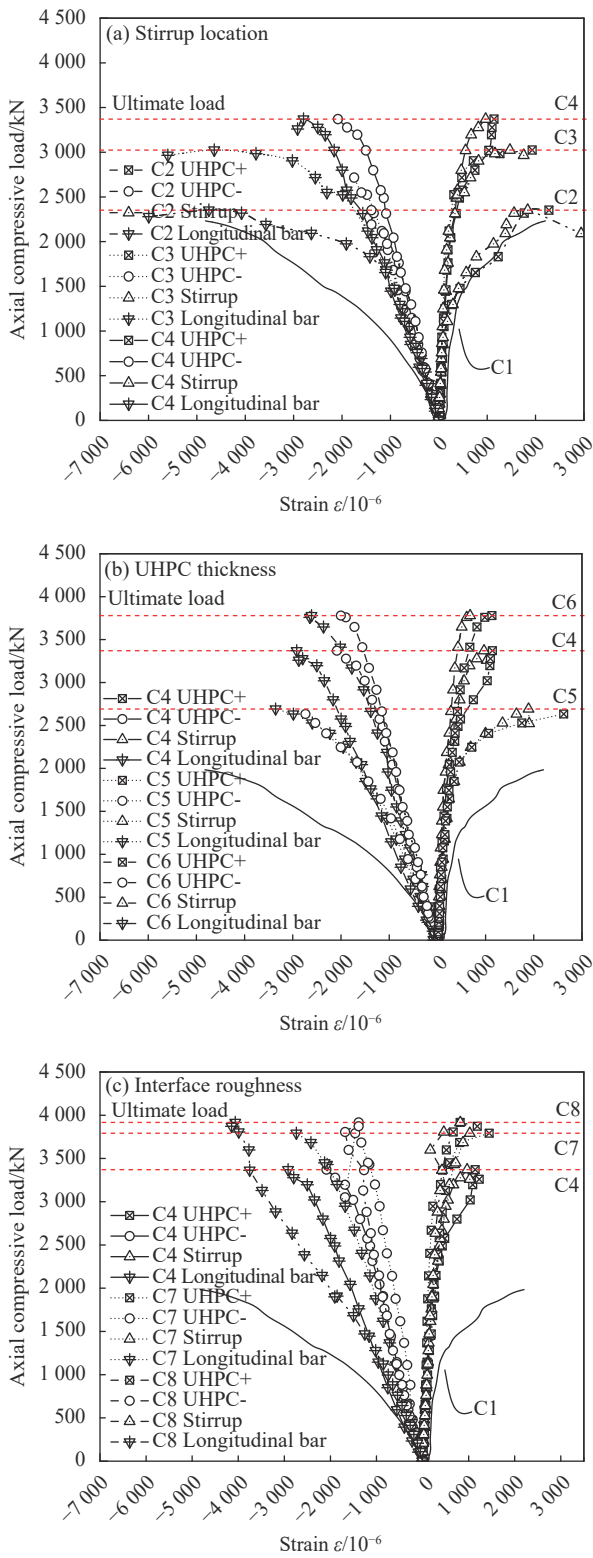


图 11 不同因素影响下钢筋和 UHPC 的应变

Fig. 11 Strain of steel rebar and UHPC under different influence factors

向拉应变与纵向压应变的比值，计算了预制 UHPC-RAC 组合短柱的泊松比，随承载力的变化规律如图 12 所示，因再生混凝土柱表面部分混凝土应变

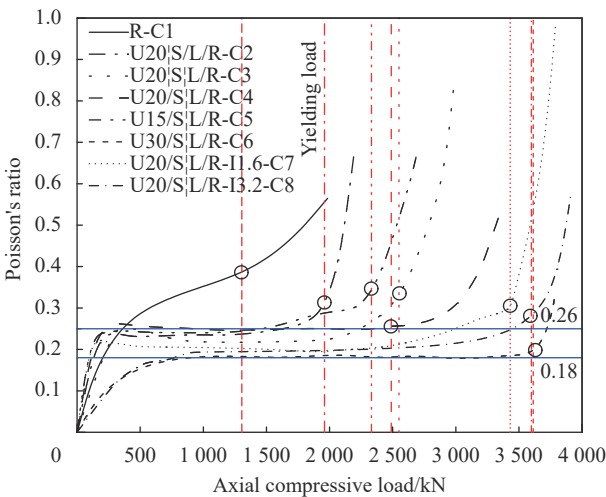


图 12 预制 UHPC-RAC 组合短柱的泊松比

Fig. 12 Poisson's ratio of the precast UHPC-RAC composite short columns

片测试数据失效，泊松比用弹性阶段的箍筋和纵向受压钢筋应变的比值计算<sup>[31]</sup>。

试件进入屈服阶段前，RAC 柱的泊松比缓慢增长，约为 0.35。对于预制 UHPC-RAC 组合短柱，因 UHPC 内钢纤维的“桥接”作用，加之与箍筋的组合作用，屈服荷载前的泊松比变化比较稳定，变化范围为 0.26~0.18，且持续荷载范围较大；随着箍筋进入 UHPC，配箍 UHPC 厚度和 UHPC-RAC 结合面粗糙度的增加，泊松比逐渐减小，反映了各设计参数下，横向变形较小，即外围 UHPC 与箍筋形成的被动约束效果逐渐增强。此后，随着受压承载力的增加，材料受荷逐渐进入塑性状态，预制 UHPC-RAC 组合短柱的竖向裂缝宽度增大明显，横向变形比竖向变形增量，泊松比快速增长，试件逐步进入破坏阶段。

3.5 损伤指标

在轴心受压过程中，预制 UHPC-RAC 组合短柱出现了裂缝并发展，造成力学性能逐渐衰减，荷载-位移曲线向位移轴倾斜，刚度减小，说明预制 UHPC-RAC 组合柱的损伤在不断演化发展，采用损伤指数  $D$  进行量化分析，即

$$D = 1 - \frac{E_1}{E_0} \quad (2)$$

其中： $E_1$  为预制 UHPC-RAC 组合短柱损伤后的割线刚度； $E_0$  为未损伤状态下的弹性刚度，取  $0.4N_u$  对应的割线斜率， $N_u$  为试件的峰值承载力，计算结果如图 13 所示。

预制 UHPC-RAC 组合短柱的轴心受压损伤过



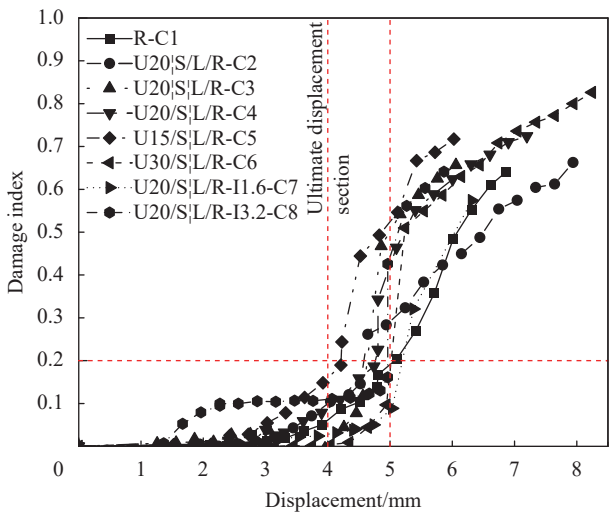


图 13 预制 UHPC-RAC 组合短柱的损伤

Fig. 13 Damage of the precast UHPC-RAC composite short columns

程分为 4 个阶段：第一阶段时损伤值等于 0，此时试件处于弹性状态，未产生损伤；第二阶段弹塑性状态，前期试件表面有微裂缝，荷载-位移曲线刚度近似不变，损伤值增量较小，待超过屈服点，柱表面裂缝宽度增长较快，损伤量值增幅较大，但损伤值基本小于 0.2；第三阶段为破坏状态，在位移为 4 mm~5 mm 区域，即极限位移分布区，损伤值呈现突增，预制 UHPC-RAC 组合短柱的受压承载能力已达到峰值，UHPC 内大部分钢纤维拔出，外壁 UHPC 破坏，裂缝宽度增大，荷载迅速下降，组合柱的损伤曲线形成跃迁现象；第四阶段时损伤值逐渐趋平缓，与荷载-位移曲线对比，预制 UHPC-RAC 组合柱破坏后，仍呈现一定的受压承载力，且继续受压，破坏形态基本稳定，损伤状态发展趋于平缓。

分析预制 UHPC-RAC 组合短柱的损伤量值，发现箍筋位于 UHPC，能有效控制 RAC 芯柱的损伤，且随着 UHPC 壁厚的增加，延缓了组合短柱的损伤发展；UHPC 与 RAC 结合面粗糙面的设置增加了 UHPC 和 RAC 的粘结性能，使两种材料性能发挥充分，亦减缓了组合短柱的损伤发展。

4 正截面受压承载力计算

预制 UHPC-RAC 组合短柱外围的配箍 UHPC 显著改善了 RAC 短柱的受压承载力，受压承载力计算时，定量考虑箍筋的有利影响，仅计算箍筋内侧受压 RAC 和 50 mm 通道 UHPC 的贡献，因忽略了外壁 UHPC 及其与箍筋的组合作用，计算结果明显小于试验值。为了简化计算，根据《混

土结构设计规范》(GB/T 50010—2010)<sup>[25]</sup> 和《再生混凝土结构技术标准》(JGJ/T 443—2018)<sup>[5]</sup>，采用全截面受压计算，其中再生混凝土轴心受压构件的正截面受压承载力计算公式应符合下列规定：

$$N \leq 0.9\phi(f_c A + f_y' A_s') \tag{3}$$

其中：N 为轴心受压承载力；0.9 为可靠度调整系数，保持与偏心受压构件正截面承载力计算具有相近的可靠度；φ 为构件的稳定系数；f<sub>c</sub> 为再生混凝土的轴心受压强度；A 为轴心受压构件的截面面积；f<sub>y</sub>' 为受压钢筋的屈服强度；A<sub>s</sub>' 为受压钢筋的面积。

预制 UHPC-RAC 组合短柱的受压承载力计算公式参考式 (3)，考虑组合截面内各部分材料对受压承载力的贡献。在轴心荷载作用下，假定 UHPC 与 RAC 界面粘结良好，组合截面整体性高，各部分材料协同变形，共同受压，充分发挥其力学性能；以 UHPC 外壁与箍筋组合作用形成的强约束消失，内部 RAC 轴压失效为最终的破坏形态。因此，轴心荷载下预制 UHPC-RAC 组合短柱的受压承载力计算公式为

$$N_c = \phi(f_c A_c + f_u A_u + f_y' A_s') \tag{4}$$

其中：N<sub>c</sub> 为预制 UHPC-RAC 组合短柱的受压承载力；f<sub>u</sub> 为 UHPC 的轴心受压强度；A<sub>u</sub> 为轴心受压构件中 UHPC 的截面面积；A<sub>c</sub> 为轴心受压构件中 RAC 的截面面积，各材料的抗压强度取值见表 1。此外，对于粗糙度不同的试件，将 UHPC 梯形键槽等效后计入 UHPC 的受压面积。预制 UHPC-RAC 组合短柱的受压承载力计算结果见表 4。

对于再生混凝土柱 C1 和强约束预制 UHPC-RAC 组合短柱 C4、C6、C7 和 C8，按照式 (4) 计算的结果，与轴心受压承载力的试验值吻合较好，误差基本控制在 10% 以内，即轴心受压承载力计算时，按照规范推荐公式，采用叠加原则，考虑组合截面内材料对承载力的贡献，强约束预制组合柱的计算精度较高。对于弱约束预制 UHPC-RAC 组合短柱 C2、C3 和 C5，由式 (4) 计算的结果偏差较大，如箍筋在 RAC 芯柱的试件误差为 47.3%，原因在于外围 UHPC 或箍筋对 RAC 芯柱形成的约束作用较小，同时 UHPC-RAC 组合效果弱，试件整体性差，UHPC 外壳呈现劈裂破坏，影响了高性能材料 UHPC 抗压强度的发挥，经计算试件 U20/S/L/R-C2 和 U15/S/L/R-C5 中 UHPC 抗

表 4 预制 UHPC-RAC 组合短柱的受压承载力计算  
Table 4 Compression capacity calculation of the precast UHPC-RAC composite short columns

Specimen	$N_t/\text{kN}$	$N_c/\text{kN}$	$N_c/N_t$
R-C1	1 984.20	1 924.18	0.97
U20 S L/R-C2	2 351.40	3 463.18	1.47
U20 S L/R-C3	3 024.60	3 463.18	1.15
U20 S L/R-C4	3 370.40	3 463.18	1.03
U15 S L/R-C5	2 692.20	3 138.19	1.17
U30 S L/R-C6	3 779.52	4 067.82	1.08
U20 S L/R-II.6-C7	3 792.12	3 531.32	0.93
U20 S L/R-III.2-C8	3 916.36	3 598.93	0.92

Notes:  $N_t$ —Test ultimate load of the precast UHPC-RAC composite columns;  $N_c$ —Calculated ultimate load of the precast UHPC-RAC composite columns.

压强度的利用率仅为 50.1% 和 69.6%。

5 设计建议

预制 UHPC-RAC 组合短柱的设计，应能保证受压过程中各部分材料协同变形，共同受力，同时能发挥材料的力学性能，保证设计的安全性和经济性。基于缩尺设计的组合短柱试验分析结果，预制 UHPC-RAC 组合短柱承受轴压荷载时，建议 UHPC 与箍筋组合设计，形成配箍 UHPC，保证外围 UHPC 与箍筋形成强约束效果。其次，组合柱的内部箍筋直径为 6 mm，UHPC 壁厚为 20 mm，建议配箍 UHPC 的厚度不宜小于 3 倍的箍筋直径，且不大于 40 mm<sup>[10]</sup>。UHPC-RAC 结合面的粗糙度，对轴心受压承载力呈现有利影响的程度较小，但对受弯或压弯构件中 UHPC 与 RAC 结合面的粘结性能影响较大，包括构件的破坏形态和刚度等性能参数<sup>[32]</sup>，故 UHPC-RAC 结合面需要提供一定的粗糙度，保证两种材料结合面具有良好的粘结性能。因此，为了发挥 UHPC 的力学性能，实现高性能结构，预制 UHPC-RAC 组合柱，应设计为强约束试件，保证配箍 UHPC 的壁厚，且结合面的粗糙度不为 0 mm。

此外，相同设计条件下，本试验中预制 UHPC-RAC 组合短柱比普通钢筋混凝土柱的造价高出约 70%，但全生命周期中，组合构件在低碳性、高强度和高耐久性等方面性能突出，同时为再生混凝土的高品质利用，提供了新方式。

6 结论

(1) 预制超高性能混凝土 (UHPC) -再生混凝土 (RAC) 组合短柱改善了 RAC 短柱的破坏形态，因箍筋位置、UHPC 壁厚和 UHPC-RAC 结合面粗糙

度的差异，外围 UHPC 与箍筋对预制 RAC 芯柱产生的被动约束作用不同，使轴压破坏分为强约束的剪切压溃失效和弱约束的外壁 UHPC 劈裂破坏。

(2) 预制 UHPC-RAC 组合短柱的轴压性能比 RAC 短柱的大幅提升。随着箍筋从 RAC 逐步进入 UHPC 和配箍 UHPC 厚度的增加，外围 UHPC 与箍筋组合作用形成的约束效果逐渐增强，组合短柱的轴压刚度和承载力增大显著，最大可提升 93.3% 和 97.4%，而降低了泊松比和损伤量值，UHPC-RAC 结合面的粗糙度对轴压性能参数均呈现有利的影响，但量值差异较小。

(3) UHPC-RAC 结合面的粗糙度和配箍 UHPC 及其厚度的增加，保证了强约束预制 UHPC-RAC 组合短柱中 UHPC 抗压性能的发挥，提升了高性能材料的利用率，按照叠加原理进行受压承载力计算，计算结果与试验值吻合较好。

(4) 建议设计中预制组合短柱外围 UHPC 内配箍，且 UHPC 壁厚不宜小于 3 倍箍筋直径，UHPC 与 RAC 结合面宜设置粗糙面，形成强约束作用，以发挥 UHPC 优良的力学性能，保证预制 UHPC-RAC 组合短柱的受压性能。

参考文献:

[1] 蔡伟光. 中国城乡建设领域碳排放系列研究报告 (2022)[R]. 重庆: 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专委会, 2022. CAI Weiguang. Series of research reports on carbon emissions in Chinese urban and rural construction sector (2022)[R]. Chongqing: Special Committee on Building Energy Consumption and Carbon Emissions Data of China Building Energy Efficiency Association, 2022(in Chinese).

[2] 丁超, 贾子杰, 王振华, 等. 基于生命周期评价的 UHPC 碳排放控制潜力评估 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(4): 1242-1251. DING Chao, JIA Zijie, WANG Zhenhua, et al. UHPC carbon emission control potential based on life cycle assessment[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(4): 1242-1251(in Chinese).

[3] 王佃超, 肖建庄, 夏冰, 等. 再生骨料碳化改性及其减碳贡献分析 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2022, 50(11): 1610-1619. WANG Dianchao, XIAO Jianzhuang, XIA Bing, et al. Carbonization modification of recycled aggregate and its contribution to carbon reduction[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2022, 50(11): 1610-1619(in Chinese).

[4] XIAO J Z, LI W G, FAN Y H, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)[J]. Construction and Building Materials, 2012, 31: 364-383.

- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 再生混凝土结构技术标准: JGJ/T 443—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical standard for recycled concrete structures: JGJ/T 443—2018[S]. Beijing: China Architecture & Industry Press, 2018(in Chinese).
- [6] ABOUKIFA M, MOUSTAFA M A. Reinforcement detailing effects on axial behavior of full-scale UHPC columns[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 49: 1-18.
- [7] XIE J, FU Q H, YAN J B. Compressive behaviour of stub concrete column strengthened with ultra-high performance concrete jacket[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204: 643-658.
- [8] 邓明科, 李睿喆, 张阳玺. HDC 与 RPC 加固 RC 柱轴心受压性能试验研究 [J]. *工程力学*, 2020, 37(9): 74-83.  
DENG Mingke, LI Ruizhe, ZHANG Yangxi. Experimental study on axial compression performance of reinforced concrete columns strengthened with high-ductility cementitious composites and reactive powder concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(9): 74-83(in Chinese).
- [9] 成煜, 谢剑, 于敬海. 二次受力下 UHPC 加固钢筋混凝土柱轴压性能试验研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(7): 2295-2301.  
CHENG Yu, XIE Jian, YU Jinghai. Experimental study on axial compressive performance of reinforced concrete columns strengthened with ultra-high performance concrete under biaxial loading[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(7): 2295-2301(in Chinese).
- [10] 王勃, 周家宇. UHPC 加固钢筋混凝土柱轴压承载力研究 [J]. *吉林建筑大学学报*, 2022, 39(3): 1-8.  
WANG Bo, ZHOU Jiayu. Research on axial compressive bearing capacity of reinforced concrete columns strengthened with UHPC[J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2022, 39(3): 1-8(in Chinese).
- [11] 曹西, 缪昌铅, 潘海涛. 基于碳排放模型的装配式混凝土与现浇建筑碳排放比较分析与研究 [J]. *建筑结构*, 2021, 51(S2): 1233-1237.  
CAO Xi, MIAO Changqian, PAN Haitao. Comparative analysis and research on carbon emissions between prefabricated concrete and cast-in-place construction based on carbon emission models[J]. *Building Structure*, 2021, 51(S2): 1233-1237(in Chinese).
- [12] 黄卿维, 王思睿, 黄伟, 等. RU-NC 组合短柱轴压受力性能研究 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2022, 49(11): 137-149.  
HUANG Qingwei, WANG Sirui, HUANG Wei, et al. Study on axial compressive performance of RU-NC composite short columns[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 49(11): 137-149(in Chinese).
- [13] 杨医博, 杨凯越, 吴志浩, 等. 配筋超高性能混凝土用作免拆模板对短柱力学性能影响的实验研究 [J]. *材料导报*, 2017, 31(23): 120-124, 137.  
YANG Yibo, YANG Kaiyue, WU Zhihao, et al. Experimental study on the influence of ultra-high performance concrete used as permanent formwork for reinforcement on the mechanical properties of short columns[J]. *Materials Review*, 2017, 31(23): 120-124, 137(in Chinese).
- [14] 单波, 刘志, 肖岩, 等. RPC 预制管混凝土组合柱组合效应试验研究 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2017, 44(3): 88-96.  
SHAN Bo, LIU Zhi, XIAO Yan, et al. Experimental study on composite effect of RPC prefabricated concrete composite columns[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 44(3): 88-96(in Chinese).
- [15] 单波, 罗校炳, 肖岩, 等. 大尺寸 RPC 管-混凝土组合短柱轴压性能研究 [J]. *湘潭大学学报 (自然科学版)*, 2019, 41(2): 85-93.  
SHAN Bo, LUO Xiaobing, XIAO Yan, et al. Large-size RPC pipe-concrete composite short column axial compression performance study[J]. *Journal of Xiangtan University (Natural Science Edition)*, 2019, 41(2): 85-93(in Chinese).
- [16] 任志刚, 张成前, 李旗, 等. UHPC 模板-钢管混凝土叠合短柱轴压性能研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2022, 44(9): 49-57.  
REN Zhigang, ZHANG Chengqian, LI Qi, et al. Research on axial compression performance of UHPC formwork-steel tube concrete composite short columns[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2022, 44(9): 49-57(in Chinese).
- [17] 何肖云峰. UHPC-NSC 圆形截面组合短柱轴压力学性能试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021.  
HE Xiaoyunfeng. Experimental study on axial compressive mechanical properties of UHPC-NSC composite short columns with circular section[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021(in Chinese).
- [18] 陈宝春, 李聪, 黄伟, 等. 超高性能混凝土收缩综述 [J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(1): 13-28.  
CHEN Baochun, LI Cong, HUANG Wei, et al. Review of ultra-high performance concrete shrinkage[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(1): 13-28(in Chinese).
- [19] GUO H, SHI C J, GUAN X M, et al. Durability of recycled aggregate concrete: A review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 89: 251-259.
- [20] 秦朝刚, 赵文浩, 杜锦霖, 等. 一种混凝土组合预制柱: 中国专利, ZL 2021 2 28268736 [P]. 2022-03-11.  
QIN Chaogang, ZHAO Wenhao, DU Jinlin, et al. The utility model relates to a concrete composite precast column: China patent, ZL202122826873.6 [P]. 2022-03-11(in Chinese).
- [21] XUE W C, HU X Y, SONG J Z. Experimental study on seismic behavior of precast concrete beam-column joints

- using UHPC-based connections[J]. *Structures*, 2021, 34: 4867-4881.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019(in Chinese).
- [23] 中国建筑材料联合会. 超高性能混凝土基本性能与试验方法: T/CBMF 37—2018、T/CCPA 7—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- China Building Materials Federation. Fundamental characteristics and test methods of ultra-high performance concrete: T/CBMF 37—2018, T/CCPA 7—2018[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2019(in Chinese).
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土用再生粗骨料: GB/T 25177—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Recycled coarse aggregate for concrete: GB/T 25177—2010[S]. Beijing: China Standards Press, 2010(in Chinese).
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB/T 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB/T 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Industry Press, 2010(in Chinese).
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢纤维混凝土结构设计标准: JGJ/T 465—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel fiber reinforced concrete structures: JGJ/T 465—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019(in Chinese).
- [27] 张阳, 吴洁, 邵旭东, 等. 超高性能混凝土-普通混凝土界面抗剪性能试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2021, 54(7): 81-89.
- ZHANG Yang, WU Jie, SHAO Xudong, et al. Experimental study on shear performance of interface between ultra-high performance concrete and ordinary concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(7): 81-89(in Chinese).
- [28] GARBACZ A, COURARD L, KOSTANA K. Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems[J]. *Materials Characterization*, 2006, 56(45): 281-289.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土结构技术规程: JGJ 1—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for precast concrete structures: JGJ 1—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014(in Chinese).
- [30] 秦鹏, 周昱, 李开琼, 等. CFRP 约束圆钢管高强混凝土短柱轴压试验研究 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2021, 48(5): 47-54.
- QING Peng, ZHOU Yu, LI Kaiqiong, et al. Experimental study on axial compression test of high-strength concrete short columns confined with CFRP confined circular steel tubes[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition)* 2021, 48(5): 47-54(in Chinese).
- [31] 刘霞, 李峰, 余殷鹏. 玄武岩纤维增强聚合物筋增强珊瑚礁砂混凝土柱轴压试验 [J]. *复合材料学报*, 2020, 37(10): 2428-2438.
- LIU Xia, LI Feng, SHE Yinpeng. Experimental study on axial compression test of coral sand concrete columns reinforced with basalt fiber-reinforced polymer bars[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(10): 2428-2438(in Chinese).
- [32] 秦朝刚, 吴涛, 刘伯权, 等. 预制 UHPC-RAC 组合梁受弯性能试验与理论计算 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(3): 1420-1435.
- QIN Chaogang, WU Tao, LIU Boquan, et al. Experimental and theoretical study on flexural behavior of precast UHPC-RAC composite beams[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(3): 1420-1435(in Chinese).