

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.080



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 预制钢筋UHPC管填芯海水海砂混凝土短柱 轴压力学性能试验研究

贾宸浩<sup>1</sup>, 李莹<sup>2</sup>, 王利辉<sup>2</sup>, 王尧鸿<sup>1</sup>

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 呼和浩特 010052; 2. 北京工业大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 利用海砂制备海水海砂混凝土(Seasand Seawater Concrete, SSC)能解决工程建设中河沙资源短缺的问题,但海水海砂混凝土存在氯离子含量高、易锈蚀钢筋等突出问题。超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)具有高强、高抗渗性、高耐久性等优势,但价格昂贵。充分利用SSC和UHPC材料各自优势,提出一种新型预制钢筋UHPC管填芯SSC组合柱(RUHPC-SSC组合柱)结构,将预制钢筋UHPC管作为浇筑内芯SSC的永久模板,开展了6组共12根短柱的轴压力学性能静力试验,分析了不同体积配箍率、径厚比参数对组合柱轴压力学性能的影响。结果表明:预制钢筋UHPC管填芯SSC组合柱破坏模式为受压斜剪破坏,破坏后UHPC管能保持较好的整体性;UHPC-SSC组合柱峰值承载力与预制UHPC管内螺旋箍筋间距呈负相关,与径厚比呈正相关;与整体浇筑RSSC柱相比,UHPC-SSC组合柱峰值承载力提高119.6%。UHPC管与箍筋的协同作用使组合柱的整体力学性能得到有效提高。

**关键词:** 预制钢筋UHPC管;超高性能混凝土;海水海砂混凝土;组合柱;轴压试验

**中图分类号:** TU375.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-09

## Axial compression behavior for prefabricated reinforced UHPC tube infilled with seasand seawater concrete

JIA Chenhao<sup>1</sup>, LI Ying<sup>2</sup>, WANG Lihui<sup>2</sup>, WANG Yaohong<sup>1</sup>

(1. Inner Mongolia University of Technology, School of Civil Engineering, Hohhot 010052, P. R. China;  
2. Beijing University of Technology, State Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Beijing, 100124, P. R. China)

**Abstract:** The utilization of sea sand to produce seawater sea sand concrete (SSC) can address the shortage of river sand resources in construction projects. However, it faces critical challenges such as high chloride ion content and corrosion-susceptible steel reinforcement. Ultra-High Performance Concrete (UHPC), known for its exceptional high strength, impermeability, and durability, faces limitations in widespread application due to prohibitively high material costs. This study proposes a novel precast steel-reinforced UHPC tube encased SSC

**收稿日期:** 2025-04-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(52178449); 2024年校级“大学生创新创业训练计划”项目(2024063003)

**作者简介:** 贾宸浩(2003-),男,主要从事钢筋混凝土结构研究, E-mail: jiachenhao2022@126.com。

王利辉(通信作者),男,高级实验师, E-mail: wlh2016@bjut.edu.cn。

**Received:** 2025-04-23

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52178449); The 2024 University-Level Undergraduate Innovation and Entrepreneurship Training Program Project in Civil Engineering (No. 2024063003)

**Author brief:** JIA Chenhao (2003-), main research interest: reinforced concrete structures, E-mail: jiachenhao2022@126.com.

WANG Lihui (corresponding author), senior experimentalist, E-mail: wlh2016@bjut.edu.cn.

composite column (RUHPC-SSC composite column) by leveraging the complementary advantages of SSC and UHPC. Spirally confined UHPC tubular shell acts as a permanent structural formwork for casting the SSC core, providing both confinement and corrosion resistance. Axial compression static tests were performed on 12 short columns, and the influence of volumetric spiral reinforcement ratio and diameter-to-thickness ratio parameters on the axial compressive performance was systematically investigated. The experimental results suggest that the failure mode of the RUHPC-SSC composite column is oblique shear compression failure, with the UHPC tube maintaining structural integrity post-failure. The peak bearing capacity of the RUHPC-SSC composite column exhibits a negative correlation with the spacing of spiral stirrups in the UHPC tube and a positive correlation with the diameter-to-thickness ratio. Compared to monolithic RSSC columns, the RUHPC-SSC composite column achieves a 139.8% increase in peak bearing capacity. The UHPC tube-spiral stirrup synergy boosts both strength and deformability of the composite column.

**Keywords:** prefabricated reinforced UHPC tube; ultra-high performance concrete (UHPC); seasand seawater concrete; composite column; axial compression test

大规模基础设施建设对混凝土需求庞大,河砂作为混凝土的主要材料,其短缺问题越来越突出。河沙过度开采对部分地区自然环境带来不可逆的影响<sup>[1]</sup>。在近海、深远海工程建设中通常以机制砂为主,其较海砂石粉含量较高,处理时易造成资源浪费和环境污染<sup>[2]</sup>。利用海砂和海水生产海水海砂混凝土(SSC)成为海洋工程建设和绿色可持续发展的可选途径<sup>[3]</sup>。当前海洋资源利用研究已涵盖海水、海砂和珊瑚礁<sup>[3]</sup>、贝壳等材料,已有研究表明,SSC与普通混凝土材料力学性能相似<sup>[4]</sup>,其具有早强、微观结构更致密、碳化率低、成本低等特点<sup>[5-6]</sup>。但是,SSC中海水和海砂引入的高浓度氯离子易造成钢筋锈蚀,导致工程结构承载能力和使用寿命大大降低,维护成本增加<sup>[7]</sup>。针对上述问题,可将钢筋替换为FRP筋或FRP-钢复合筋<sup>[7-8]</sup>,或将SSC填充于不锈钢管、FRP管等耐蚀材料,利用其良好的约束效应<sup>[9]</sup>。

学者们提出将耐腐蚀材料与SSC、海水海砂珊瑚骨料混凝土等材料相结合形成高效耐蚀组合柱应用于工程结构。如FRP箍筋约束SSC<sup>[10-11]</sup>、SSC填充FRP管<sup>[12-13]</sup>、SSC填充不锈钢管<sup>[14-15]</sup>、SSC填充FRP-钢组合管<sup>[16-18]</sup>、SSC填充FRP-PVC组合管<sup>[19]</sup>等组合形式以充分发挥各材料物理力学性能优势。虽然该类组合柱的力学性能都表现出一定优势,但部分结构的固有缺陷导致其无法普遍适用于近海工程。例如,FRP箍筋结构虽能一定程度上提高SSC组合柱的承载力,但FRP筋具有弹性模量较低、应力重分布和耗能能力差、材料脆性强等特性<sup>[8]</sup>,且FRP材料质量损失程度随温度、时间增长而升高<sup>[20]</sup>。不锈钢材料虽有优异耐腐蚀特性,但因高昂价格仍未广泛应用于工程结构。UHPC因具有拉伸应变强化、高强、高抗渗性等特性被称作“类金

属混凝土”<sup>[21]</sup>。新型UHPC管可替代不锈钢管、FRP管形成混凝土填充UHPC管柱结构,可将普通钢筋笼置于UHPC管内以提升构件的耐久性。有学者将海水海砂珊瑚骨料混凝土填充于FRP-UHPC管开展其受压性能研究,认为UHPC与FRP箍筋可协同作用,有效约束核心SSC<sup>[22-23]</sup>。同时海水海砂珊瑚骨料混凝土填充结构可为SSC填充结构的受力模型提供理论支撑。

为充分利用UHPC良好的物理力学特性和SSC材料的优势,满足近海工程对构件长寿命、高适应性的需求,并结合轻量化预制装配技术,提出一种新型组合柱结构即预制钢筋UHPC管填充SSC组合柱(RUHPC-SSC组合柱),并开展RUHPC-SSC组合短柱轴压试验研究其承载能力及破坏形态,分析配箍率、径厚比参数等对组合柱承载能力的影响,为该组合柱工程设计提供参考依据。

## 1 试验方案

### 1.1 RUHPC-SSC组合柱

UHPC具有高强度、高抗渗性、高耐久性、抗冻融能力等特点<sup>[24-25]</sup>。虽然UHPC材料及施工造价显著高于普通混凝土,但随着研发成熟度提高及工程用量增大,UHPC材料价格逐渐下降,且如将该材料用于膜壳、接缝等关键部位能减少材料总体用量,工程总价相对可控<sup>[26]</sup>。SSC具有早强、造价较低等特点<sup>[27]</sup>,但其氯离子含量高易锈蚀钢筋。笔者提出将钢筋笼内置于UHPC管,并将钢筋UHPC管进行预制成型作为内部浇筑SSC的永久模板,形成RUHPC-SSC组合柱,不仅解决了河沙短缺问题,且以最少的UHPC用量解决近海侵蚀环境中钢筋锈蚀及构件耐久性问题,节省了施工现场模板,提高

施工效率。提出的 RUHPC-SSC 组合柱三维构造示意图如图 1(a)所示,图 1(b)给出了组合柱截面示意图及尺寸定义。

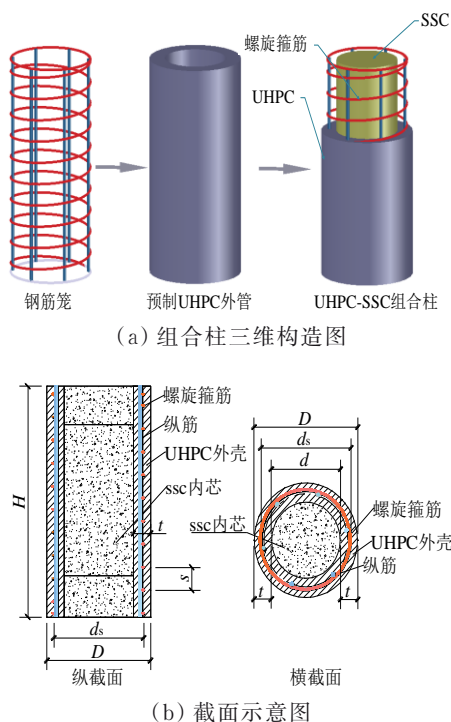


图 1 RUHPC-SSC 组合柱示意图

Fig.1 Schematic diagram of the RUHPC-SSC column

新型 RUHPC-SSC 组合柱施工采用工厂预制 RUHPC 模壳+现场浇筑 SSC 填芯的方式。在工厂内绑扎钢筋笼,采用离心成型或内外模板内浇筑 UHPC 材料养护后形成 RUHPC 模壳,两端预留伸出钢筋。将预制模壳运送至施工现场,底部伸出的钢筋首先插入承台连接固定,然后浇筑填芯 SSC,最后顶部钢筋与盖梁连接。

## 1.2 试件及材料

设计了 6 组不同工况的短柱用于轴向压力试验,包括 5 组 UHPC 管组合柱和 1 组整体浇筑钢筋 SSC 柱(即 RSSC 柱)试件,每个工况制作 2 个相同的试件,表 1 给出了试件主要信息。组合柱中预制 UHPC 管内钢筋净保护层 17 mm,外径  $D$  设置为 300、400、500 mm 三种直径,对应壁厚比  $n_t$  分别为 6、8、10。短柱长径比为 2,对应 3 种短柱高度  $H$  分别为 600、800、1 000 mm。试件名称中 U、S 分别代表预制 RUHPC 管-SSC 组合柱试件和 SSC 整体浇筑试件, $t$  代表外管厚度, $s$  代表箍筋间距。 $d_s$  是螺旋箍筋中心直径。例如 U300-t50-s60 表示直径为 300 mm,壁厚为 50 mm,螺旋箍筋间距为 60 mm 的 UHPC 组合柱。预制 RUHPC 外管厚度为 50 mm,钢筋笼位于外管中间位置。组合柱螺旋间距从 40 mm 增至 80 mm,相应体积配箍率  $\rho_s$  从 1.14% 降至

0.57%。纵筋采用 HRB400 级钢筋,配筋率均为 1%,绕截面圆心均布排列。

表 1 试件主要信息

Table 1 Key parameters of test specimens

名称	$D/$ mm	$t/$ mm	$s/$ mm	$H/$ mm	$\rho_s/$ %	$d_s/$ mm	$n_t$
S300-s60	300		60	600	0.76	260	
U300-t50-s40	300	50	40	600	1.14	260	6
U300-t50-s60	300	50	60	600	0.76	260	6
U300-t50-s80	300	50	80	600	0.57	260	6
U400-t50-s43	400	50	43	800	0.76	360	8
U500-t50-s33	500	50	33	1 000	0.76	460	10

## 1.3 材料

胶凝材料采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,细骨料选自渤海附近原状海砂,海砂筛分析试验显示其细度模数为 2.86,属于中砂。海水根据 ASTM 标准<sup>[28]</sup>进行人工配置,人工海水主要成分及含量见表 2。使用聚羧酸减水剂提高混凝土和易性。根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)进行配合比设计与试配得到 SSC 配合比如表 3 所示<sup>[29]</sup>,按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)测得标准立方体 28 d 平均抗压强度为 54.3 MPa<sup>[30]</sup>。根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)以立方体抗压强度值推算其轴心抗压强度值  $f_{co}$  为 41.3 MPa<sup>[31]</sup>。

表 2 人工海水主要成分及含量

Table 2 Composition and concentration of artificial seawater

g/L			
NaCl	MgCl <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>
24.53	5.20	4.09	1.16

表 3 海水海砂混凝土配合比

Table 3 Mix design of the SSC

水胶比	水/(kg/m <sup>3</sup> )	水泥/(kg/m <sup>3</sup> )	细骨料/(kg/m <sup>3</sup> )
0.52	210	404	839
粗骨料/(kg/m <sup>3</sup> )	砂率/%	减水剂/(kg/m <sup>3</sup> )	减水剂掺量/%
947	47	1.616	0.4

UHPC 采用浙江某公司生产的 T120 型超高性能混凝土,非自行配置,配合比为:粉料:直丝钢纤维 G213:端勾钢纤维 G13:水:液体减水剂=25:0.94:0.94:2.07:0.245。根据《超高性能混凝土基本性能与试验方法》(T/CBMF 37—2018 T/CCPA 7—2018)将 UHPC 标准件自然养护 28 d,测得其抗压强度为 160 MPa、抗拉强度为 7.6 MPa<sup>[32]</sup>,采用已有本构模型计算<sup>[33]</sup>UHPC 轴心抗压强度为 142 MPa。箍筋和纵筋采用 HRB400 级带肋钢筋,直径

分别为 6 mm 和 10 mm。按照《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021),测得钢筋材料力学性能参数<sup>[34]</sup>,列于表 4。

表 4 钢筋材料力学性能参数

直径 $d$ /mm	弹性模量 $E_s$ /GPa	抗拉强度 $f_t$ /MPa
6	200	584
10	203	639
极限应变 $\epsilon_u$ /%	屈服强度 $f_y$ /MPa	屈服应变 $\epsilon_y$ /%
5.97	420	0.25
5.68	446	0.13

#### 1.4 试件制作

在构件预制厂进行 RUHPC-SSC 组合柱试件制作,主要有钢筋笼绑扎、RUHPC 外壳预制和内芯混凝土浇筑 3 个阶段。图 2 给出了预制 RUHPC-SSC 组合柱的加工制作过程照片,预制 RUHPC 壳模在自然条件下养护 7 d 后拆除内模,然后在 RUHPC 壳模内浇筑 SSC 并振捣密实,自然条件下养护至少 28 d。为防止端部局部受压提前破坏,试验前在试件上下端部粘贴 3 层 FRP 布并沿圆周方向搭接 130 mm 避免脱粘失效,待环氧树脂充分固化后开始轴向加载试验<sup>[35]</sup>。

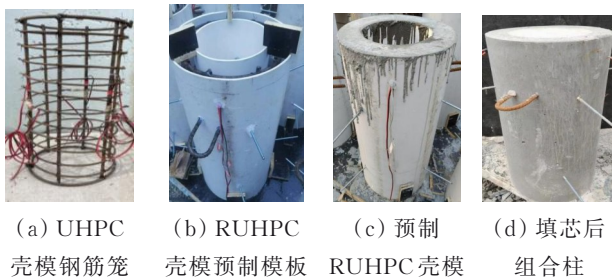


图 2 RUHPC-SSC 组合柱制作过程照片

Fig.2 Photos of RUHPC-SSC composite column fabrication process

#### 1.5 试验装置与加载

轴压试验在北京工业大学桥梁工程安全与韧性全国重点试验室采用 72 000 kN 多功能电液伺服压力机进行,图 3 为试件加载示意图及现场图片。压力机顶部荷载传感器测量轴向压力。UHPC 外表面中部均匀设置 3 组环向和纵向混凝土应变片以观察 UHPC 环向、纵向应变发展。柱四周均匀布置 4 个百分表,记录柱中部范围内轴向变形。试验第 1 阶段采用等速力加载至 200 kN,速率为 5 kN/s,接着进入第 2 阶段。第 2 阶段采用位移加载,加载速率为 0.5 mm/min,当试件强度下降到峰值荷载的 80% 以下或无法继续加载时停止加载。

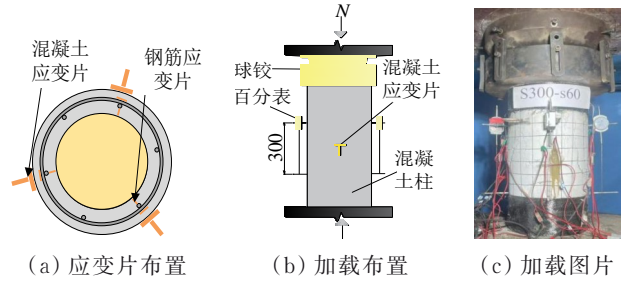


图 3 轴压试验加载布置及照片

Fig.3 Test setup and photos of axial compression loading

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验现象

在试验过程中观察轴压试件表面 UHPC 开裂发展情况及最后失效时的破坏形态。整体浇筑 RSSC 柱加载前期为弹性阶段,表面无明显变化。达到峰值承载力时试件开始出现斜裂缝并迅速发展。达到极限承载力时 RSSC 柱表面混凝土保护层大面积压碎并脱落,箍筋露出、纵筋出现屈曲,整体浇筑 RSSC 柱加载前期至失效前能够承受较大变形。RUHPC-SSC 组合柱在加载前期轴向变形随荷载增加呈线性增大趋势。荷载持续增加,组合柱上下两端缠绕的 CFRP 布发出轻微“噼啪”声,CFRP 布开始发挥约束作用。与整体浇筑 RSSC 柱相比,其在峰值荷载时才开始出现轻微斜向裂缝,同时出现钢纤维拉断声音。之后裂缝持续发展,并观察到伴有钢纤维拉断和新裂缝产生。RUHPC 管在中高部出现局部轻微外鼓,但由于钢纤维的桥接作用最终组合柱表面保持良好完整性。不同工况试件破坏形态如图 4 所示。对比图 4(b)~(d)可以发现,随着箍筋间距的减小外管裂纹数量有所增加。试验后组合柱两端 CFRP 布未发生大面积断裂且接头未见滑移脱粘现象,CFRP 布对组合柱上下端部起到了良好的约束作用,避免了端部局压破坏。

### 2.2 轴压力-位移关系

图 5 所示为各工况试件轴向压力-位移曲线。从图 5 可以看出,各工况曲线存在一定差异,主要是海砂中掺有贝壳导致 SSC 力学性能有一定离散性。各工况极限应变相对两次试验数据的平均值变化小于 7%,试验数据具有较好的稳定性和一致性。从数据图中可以看出,RUHPC-SSC 组合柱轴向力-位移曲线表现出基本相同的 3 个阶段,分别命名为初始弹性阶段、箍筋混凝土协同工作阶段和峰后阶段。在初始弹性阶段,混凝土柱轴向力-位移为线性关系,箍筋环向约束作用尚未激发,RUHPC 管和核心混凝土共同受力。箍筋混凝土协同工作阶段箍筋应变随轴向力增加而增大。图 6 为各工况轴向

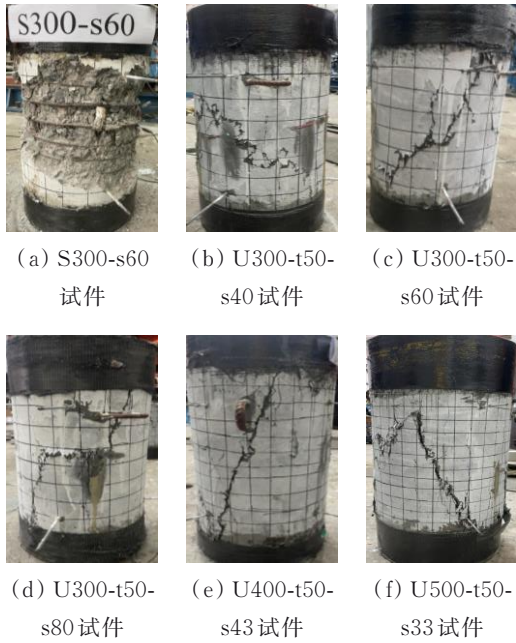


图4 试件轴压破坏形态

Fig.4 Axial compression failure patterns of test specimens

力-箍筋应变曲线,箍筋在初始弹性阶段并未发生明显变化。协同工作阶段箍筋充分发挥约束作用,与UHPC钢纤维“桥联”作用下进一步提高组合柱承载力和轴向变形能力。该阶段核心混凝土与有效约束UHPC处于三向受压状态,箍筋处于受拉状态。表明RUHPC-SSC组合柱中螺旋箍筋可增强组合柱的环箍效应从而提高其承载力和轴向变形能力。峰后阶段随着位移增大承载力逐渐下降,直至组合柱失效。整体浇筑RSSC柱在峰后阶段保护层混凝土迅速被压碎,但箍筋仍能提供有效抵抗变形能力。RUHPC-SSC组合柱峰值后阶段主要表现为已有裂缝持续发展。图7对比了RUHPC-SSC组合柱的轴向压力-位移特征,对比S300-s60试件和U300-t50-s60试件可看出,组合柱最大承载力超过了SSC柱的2倍,可能是因为RUHPC膜壳对内芯约束和UHPC材料超高抗压强度,但整体浇筑RSSC柱在达到极限承载力后仍能承受较大塑性变形而未突然破坏,说明RSSC柱具有更好的变形能力。组合柱直径越大,承载力显著提高。

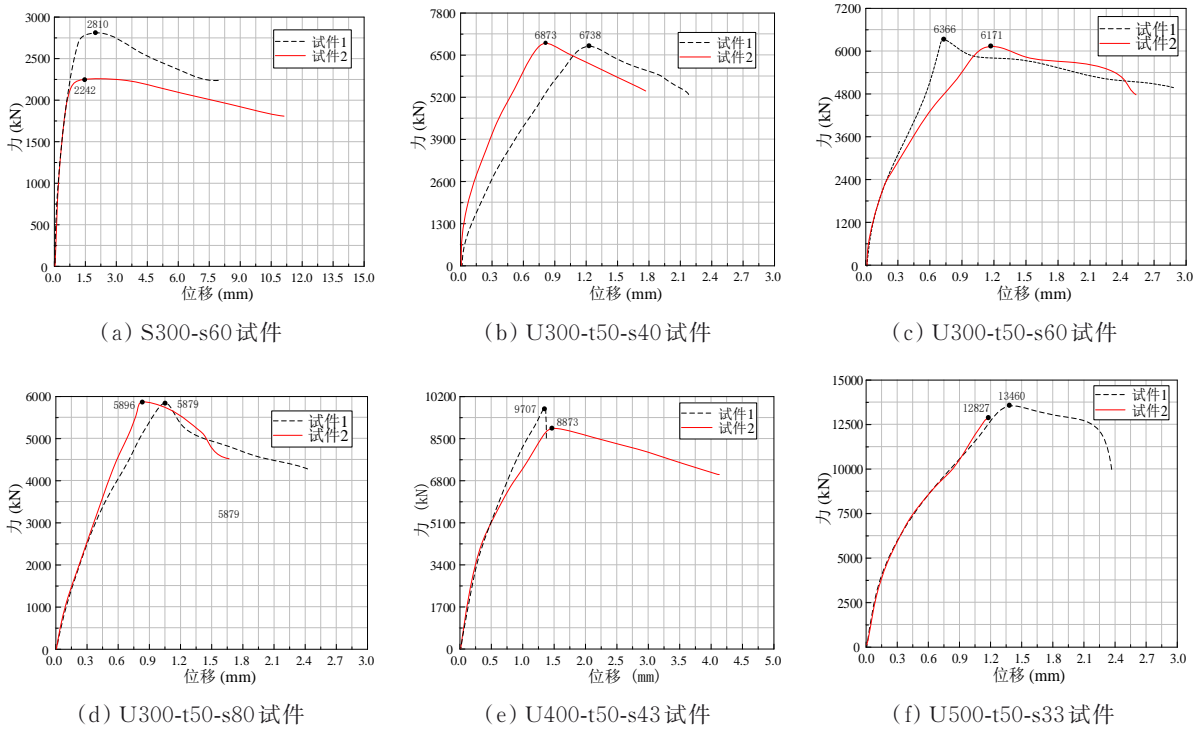


图5 各工况试件轴向力-位移曲线

Fig.5 Axial load-displacement curves of test specimens

表5给出了试验试件主要力学性能参数,峰值承载力取最大瞬时荷载值,极限承载力定义为峰值荷载的80%<sup>[23]</sup>。由表5可以发现,与整体浇筑RSSC柱相比,RUHPC-SSC组合柱U300-t50-s60的初始轴向刚度 $k_a$ 提高了约105%,峰值荷载和峰值应变分别提高了139.8%和18.2%。说明预制

RUHPC管可有效提高组合柱的轴向承载能力和变形能力。相同配箍率下RUHPC-SSC组合柱峰值承载力 $N_{max}$ 提高了119.6%,说明RUHPC管组合体系有效结合了UHPC高强度和箍筋约束效应。

### 2.3 环向应变-轴向应变关系

图8为组合柱环向应变-轴向应变曲线。从图

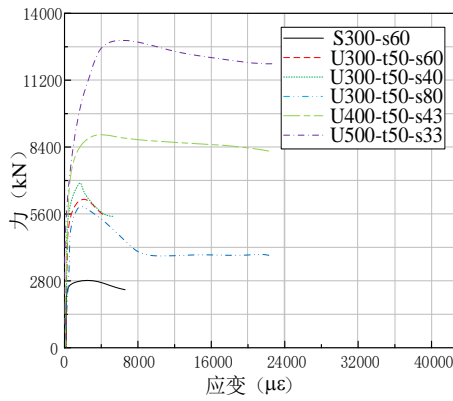


图 6 轴力-箍筋应变曲线

Fig.6 Curves of axial load-strain of transverse

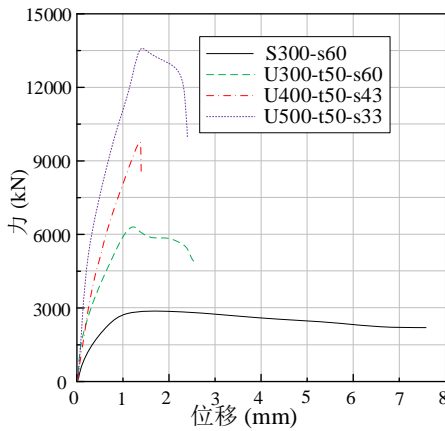


图 7 组合柱轴力-位移曲线

Fig.7 Axial force-displacement curves of composite columns

表 5 试验试件主要力学性能参数

Table 5 Key mechanical properties of test specimens

名称	$k_a/(10^3 \text{ MN/m})$	$N_{\max}/\text{kN}$	$N_u/\text{kN}$	$\epsilon_c/\%$	$\epsilon_u/\%$
S300-t50-s60	3.6	2 810	2 248	0.69	2.36
U300-t50-s40	7.2	6 738	5 390	0.39	0.70
U300-t50-s60	7.4	6 171	4 937	0.39	0.82
U300-t50-s80	7.7	5 886	4 709	0.31	0.51
U400-t50-s43	12.7	9 288	7 430	0.35	0.91
U500-t50-s33	26	13 189	10 551	0.26	0.44

注： $k_a$ 为初始轴向刚度， $N_{\max}$ 为峰值承载力， $N_u$ 为极限承载力， $\epsilon_c$ 为峰值承载力对应的应变， $\epsilon_u$ 为极限承载力对应的应变<sup>[23]</sup>。

中可以看出，该曲线有一个明显拐点，其原因是此时内部填芯 SSC 快速膨胀，螺旋箍筋与 RUHPC 外管持续发挥环向约束作用。从图 6 箍筋轴力-应变曲线可以看出，拐点处环向应变值与其较为吻合。现浇柱在达到极限荷载时无效约束部分已完全失效，此时只有螺旋箍筋为核心混凝土提供环向约束。RUHPC 外管与箍筋协同作用可有效抵抗内部 SSC 膨胀时产生的径向力，其承载能力较整体浇筑 RSSC 柱有明显改善。因此螺旋箍筋与 UHPC 外管协同作用对提升组合柱整体力学性能有正向

作用。

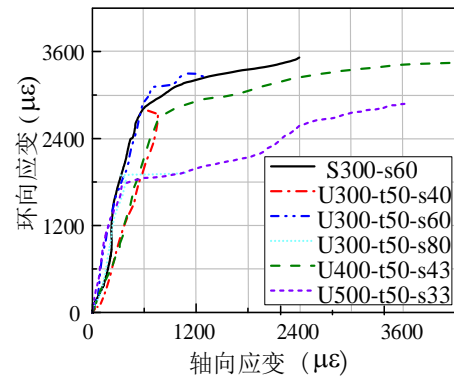


图 8 组合柱环向-轴向应变曲线

Fig.8 Hoop strain-axial strain relationship of composite columns

### 3 设计参数影响

主要探讨该新型构件在侵蚀环境中应用的可行性，在满足内芯混凝土浇筑施工和结构耐久性需求条件下，尽量减小 UHPC 模壳厚度以降低工程造价，因此 UHPC 模壳厚度不作为主要研究参数，但墩柱直径不同造成模壳径厚比不同。另外，组合柱轴向承载力主要由混凝土承担，且纵筋配筋率对墩柱轴向承载力的影响规律已较明确，不作为研究重点。

图 9 为 RUHPC-SSC 组合柱极限承载力  $N_{\max}$  随径厚比  $d_t$  的变化规律，其外壳厚度均为 50 mm。从图 9 可以看出，UHPC 外管厚度一定时试件极限承载力随径厚比增加而基本呈线性增大，原因是内芯 SSC 与 RUHPC 外管共同承压，UHPC 抗压强度远高于内部 SSC 强度。图 10 为不同配箍率 RUHPC-SSC 组合柱轴向力-位移曲线图，采用了直径均为 300 mm 的试件作为对比试件，箍筋间距分别为 40 mm、60 mm 和 80 mm。从图 10 可以看出，箍筋约束对 RUHPC-SSC 组合柱的轴向压缩行为有显著影响。分析配箍率  $\rho_s$  对 RUHPC-SSC 组合柱  $k_a$ 、 $N_{\max}$

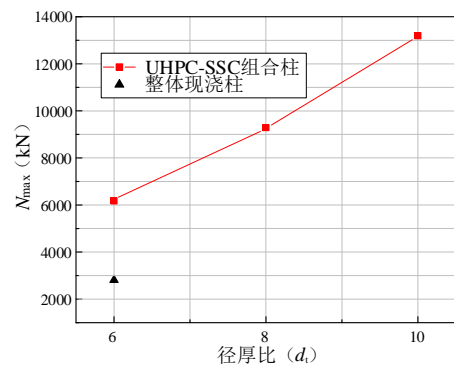


图 9 极限承载力与径厚比  $d_t$  的变化关系

Fig.9 Relationship between ultimate load capacity and diameter to thickness ratio

和  $\epsilon_c$  的影响,可以看出RUHPC-SSC组合柱承载能力  $N_{\max}$  随  $\rho_s$  增大分别提高了4.8%和9.2%。而初始轴向刚度  $k_a$  和  $\epsilon_c$  随约束水平增加变化不明显。

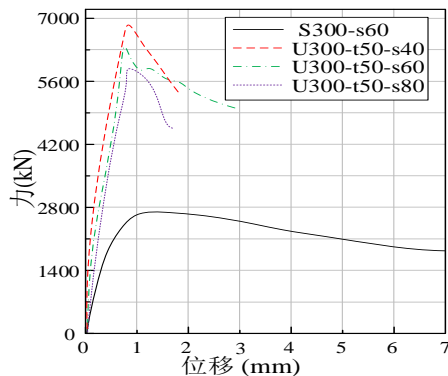


图10 不同配箍率组合柱轴力-位移曲线

Fig.10 Axial load-displacement curves of composite columns with varying stirrup ratios

## 4 结论

提出一种新型SSC填芯预制钢筋UHPC管组合柱结构,该结构能充分利用UHPC和SSC各自物理力学性能优势。通过RUHPC-SSC组合柱和整体浇筑RSSC柱的轴压力学试验验证了RUHPC-SSC组合柱的可行性和力学性能优势。得到主要结论如下:

1)RUHPC-SSC组合柱轴压试验的破坏模式为压剪破坏,预制RUHPC外管表现出较多裂纹但未出现明显压溃剥落。RUHPC-SSC组合柱的抗压性能包括初始弹性阶段、箍筋混凝土协同工作阶段和峰后阶段3个受力阶段。整体浇筑RSSC柱失效前经历了较长塑性压缩变形。

2)RUHPC-SSC组合柱峰值荷载随螺旋箍筋间距减小、径厚比增大而增大。相同直径试件预制RUHPC管厚为50mm时比整体浇筑RSSC柱的峰值承载力提高139.8%,初始轴向刚度提高约105%。在RUHPC外管和螺旋箍筋协同作用下组合柱承载力、刚度得到显著提高。

3)RUHPC-SSC组合柱随预制RUHPC管径厚比增加基本呈线性增加,配箍率增加可显著提高其极限抗压承载能力,但轴向压缩刚度提高较小。

4)通过试验研究初步验证了所提出的RUHPC-SSC组合柱的可行性和轴向承载能力,其抗震性能、设计计算方法及耐久性能是推动其工程化应用的关键问题,应重点关注。

## 参考文献

[1] WEI J H, XU J J, XUE J Y, et al. Effect of replacing freshwater river-sand with seawater sea-sand on dynamic

compressive mechanical properties of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2024, 419: 135473.

[2] 薛汇林,陈明亮,唐志波,等.机制砂中石粉对混凝土物理力学性能的宏观影响机制[J].工程科学与技术,2023,55(6):151-160.

XUE H L, CHEN M L, TANG Z B, et al. Macro and micro impact mechanisms of stone powder in manufactured sand on physical and mechanical properties of concrete [J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(6): 151-160. (in Chinese)

[3] WANG F, SUN Y Z, XUE X Y, et al. Mechanical properties of modified coral aggregate seawater sea-sand concrete: Experimental study and constitutive model [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e02095.

[4] FENG W H, TANG Y C, YANG Y M, et al. Mechanical behavior and constitutive model of sustainable concrete: Seawater and sea-sand recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023, 364: 130010.

[5] LI Y Q, LIU W, MI T W, et al. Durability study of seawater and sea-sand concrete under the combined effects of carbonation and chloride redistribution [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 89: 109294.

[6] ALOMAYRI T, AMIR M T, ALI B, et al. Mechanical, tidal erosion, and drying shrinkage behaviour of high performance seawater concrete incorporating the high volume of GGBS and polypropylene fibre [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107377.

[7] WANG H D, LIU T J, ZHANG Z, et al. Durability of SFCB reinforced low-alkalinity seawater sea sand concrete beams in marine environment [J]. Engineering Structures, 2024, 317: 118616.

[8] FANG S, LI L J, LUO Z P, et al. Novel FRP interlocking multi-spiral reinforced-seawater sea-sand concrete square columns with longitudinal hybrid FRP-steel bars: Monotonic and cyclic axial compressive behaviours [J]. Composite Structures, 2023, 305: 116487.

[9] 潘毅,吴晓飞,郭瑞,等.有初应力的FRP约束混凝土圆柱应力-应变分析模型[J].中国铁道科学,2017,38(5):30-36.

PAN Y, WU X F, GUO R, et al. Analysis-oriented stress-strain model for FRP confined circular concrete column with initial stress [J]. China Railway Science, 2017, 38(5): 30-36. (in Chinese)

[10] CHEN Y, LI F, LIU X, et al. Axial behavior of circular seawater sea-sand coral concrete columns reinforced with BFRP bars and spirals [J]. Construction and Building Materials, 2022, 348: 128638.

[11] DONG Z Q, JI J H, HAN T H, et al. Compression performance of FRP bar-reinforced seawater sea-sand

- concrete encased FRP-wrapped steel tube columns [J]. Structures, 2024, 61: 106095.
- [12] LI Y L, ZHAO X L, SINGH RAMAN R K. Mechanical properties of seawater and sea sand concrete-filled FRP tubes in artificial seawater [J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 977-993.
- [13] YING J W, HUANG Y J, QIN L, et al. Axial compressive behavior of GFRP tube confined seawater coral aggregate concrete reinforced with epoxy-coated bars [J]. Composite Structures, 2021, 266: 113807.
- [14] LI Y L, ZHAO X L, SINGH RAMAN R K, et al. Axial compression tests on seawater and sea sand concrete-filled double-skin stainless steel circular tubes [J]. Engineering Structures, 2018, 176: 426-438.
- [15] MIAO W, YE Y, LEI R H, et al. Performance of seawater sea sand concrete-filled bimetallic tube (SSCFBT) stub columns under axial partial compression [J]. Structures, 2024, 60: 105812.
- [16] FU H, TIAN J, CHEN S T, et al. Axial compressive performance of CFRP-steel composite tube confined seawater sea-sand concrete intermediate slender columns [J]. Construction and Building Materials, 2024, 441: 137399.
- [17] 柏佳文, 魏洋, 张依睿, 等. 新型碳纤维增强复合材料-钢复合管海水海砂混凝土圆柱轴压试验[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9): 3076-3085.  
BAI J W, WEI Y, ZHANG Y R, et al. Axial compression behavior of new seawater and sea sand concrete filled circular carbon fiber reinforced polymer-steel composite tube columns [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 3076-3085. (in Chinese)
- [18] 邵凌峰, 魏洋, 王高飞, 等. FRP-镀锌波纹钢管海水海砂混凝土柱轴压性能[J]. 复合材料学报, 2025, 42(6): 3288-3301.  
SHAO L F, WEI Y, WANG G F, et al. Axial compression performance of FRP-galvanized corrugated steel tube seawater sea-sand concrete columns [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(6): 3288-3301. (in Chinese)
- [19] CHEN Z P, XU R T, LIANG Y H, et al. Experimental study and finite element analysis on axial compression performance of CFRP-PVC confined coral seawater and sea-sand concrete columns [J]. Engineering Structures, 2024, 302: 117443.
- [20] WANG T J, RAZAQPUR A G, CHEN S L. Durability of GFRP and BFRP reinforcing bars in simulated seawater sea sand calcium sulfoaluminate cement concrete pore solution [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80: 107954.
- [21] 王俊颜, 郭君渊, 肖汝诚, 等. 高应变强化超高性能混凝土的裂缝控制机理和研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11): 10-17.  
WANG J Y, GUO J Y, XIAO R C, et al. Study on crack control mechanism of strain-hardening ultra-high performance concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 10-17. (in Chinese)
- [22] SHAN B, XU C, LAI D D, et al. Experimental research on compressive behavior of seawater and sea sand concrete-filled RPC tubes [J]. Engineering Structures, 2020, 222: 111117.
- [23] DENG J Y, CHEN J Q, WANG Z H, et al. Axial compressive behavior and load carrying capacity prediction of prefabricated UHPC tube filled with seawater sea-sand coral aggregate concrete [J]. Engineering Structures, 2023, 297: 117031.
- [24] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(12): 1-160.  
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2024 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(12): 1-160. (in Chinese)
- [25] WU Z M, SHI C J, KHAYAT K H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 174: 107021.
- [26] 梅葵花, 亢文波, 刘洋, 等. 氯盐环境下预损伤 UHPC-HPC 组合梁抗弯性能[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(1): 117-130.  
MEI K H, KANG W B, LIU Y, et al. Flexural behavior of pre-damaged UHPC-HPC composite beams in chloride corrosion environment [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(1): 117-130. (in Chinese)
- [27] 郝志豪, 戴建国, 王召, 等. GFRP 筋的拉伸性能劣化对其与海水海砂混凝土粘结性能的影响[J]. 复合材料学报, 2023, 40(12): 6572-6582.  
HAO Z H, DAI J G, WANG Z, et al. Effect of tensile performance degradation of GFRP bars on their bond performance with seawater sea-sand concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(12): 6572-6582. (in Chinese)
- [28] Standard practice for the preparation of substitute ocean water: ASTM D1141-98(Reapproved 2013) [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.
- [29] 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Specification for mix proportion design of ordinary concrete: JGJ 55—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [30] 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.

- Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [31] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Standard for test method of concrete structures: GB/T 50152—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [32] 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: 中国建材工业出版社, 2018.
- Fundamental characteristics and test methods of ultrahigh performance concrete: T/CBMF 37—2018 T/CCPA 7—2018 [S]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2018.
- [33] 郭晓宇, 亢景付, 朱劲松. 超高性能混凝土单轴受压本构关系[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(2): 369-376.
- GUO X Y, KANG J F, ZHU J S. Constitutive relationship of ultrahigh performance concrete under uniaxial compression [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(2): 369-376. (in Chinese)
- [34] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [35] 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程(2007年版): CECS 146—2003 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- Technical specification for strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer laminate: CECS 146—2003 [S]. Beijing: China Planning Press, 2007. (in Chinese)

(编辑 XXX)