

DOI:10.3969/j.issn.2096-8248.2024.04.012

## UHPC 中空柱轴心受压性能有限元分析\*

徐周浩<sup>1</sup>, 谢青海<sup>1,2</sup>, 文哲鸣<sup>1</sup>, 曾杰<sup>1</sup>, 李泽祥<sup>1</sup>

(1. 江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:**为研究超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)中空柱在轴压下的极限承载力及其影响因素,设计了不同的壁厚、混凝土强度、纵筋配置以及箍筋间距的 90 个 UHPC 中空柱模型,开展轴心受压承载力研究。基于有限元模拟软件(ABAQUS)的数值仿真分析,采用控制变量法研究各因素对 UHPC 中空柱受压承载力的影响。研究表明:减小宽厚比、增加混凝土强度,可以显著提高 UHPC 中空柱的受压承载力;增加纵筋配筋率和配箍率,可以略微提高 UHPC 中空柱的受压承载力。其中,纵筋配筋率对承载力的影响略高于配箍率。此外,将 9 个 UHPC 中空柱的角部纵筋替换为玄武岩纤维增强复合材料(basalt fiber reinforced polymer, BFRP)筋后,前期刚度和受压承载力略有下降。基于受压承载力有限元分析结果,提出了 UHPC 中空柱的受压承载力简化计算公式,81 个有限元模型的模拟值和公式计算值之比大多控制在 2% 误差内,有限元验证用的 6 个试验值与公式计算值控制在 10% 误差内。说明该公式具有较高精度,可为该结构构件的设计提供参考。

**关键词:** UHPC 中空柱; 有限元分析; 轴压性能; 极限承载力; 简化计算模型

**中图分类号:** TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-8248(2024)04-0094-08

**引用格式:** 徐周浩, 谢青海, 文哲鸣, 等. UHPC 中空柱轴心受压性能有限元分析[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2024, 33(4): 94-101.

## Finite Element Analysis of Axial Compression Performance of UHPC Hollow Column

XU Zhouhao<sup>1</sup>, XIE Qinghai<sup>1,2</sup>, WEN Zheming<sup>1</sup>, ZENG Jie<sup>1</sup>, LI Zexiang<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;  
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To investigate the axial compression bearing capacity of ultra-high performance concrete (UHPC) hollow columns, 90 UHPC hollow column models with varying wall thickness, concrete strength, longitudinal reinforcement configuration, and stirrup spacing were designed. The numerical simulation analysis was conducted using finite element simulation software (ABAQUS). The influence of various factors on the bearing capacity of UHPC hollow columns was studied by employing the control variable method. The results indicate that reducing the width-to-thickness ratio and increasing concrete strength can significantly enhance the bearing capacity of UHPC hollow columns. By increasing the longitudinal reinforcement ratio and stirrup

\* 收稿日期: 2024-01-26; 修订日期: 2024-05-18

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52378179); 中国博士后科学基金资助项目(2020M681390); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20210925)

**作者简介:** 徐周浩(1999—), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 研究方向为超高性能混凝土结构性能, (E-mail) xwqscs@163.com。

**作者简介:** 谢青海(1990—), 男, 湖北枣阳人, 讲师, 博士, 硕士生导师, 研究方向为可持续海工材料与结构, (E-mail) qinghai2019@jou.edu.cn。

ratio, the compressive bearing capacity of the hollow columns in UHPC can be slightly enhanced. Specifically, the influence of the longitudinal reinforcement ratio on the bearing capacity is slightly greater than that of the stirrup ratio. Additionally, the initial stiffness and bearing capacity of 9 UHPC hollow columns slightly decreased after replacing the corner longitudinal steel bars with basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars. Based on the finite element analysis results on the bearing capacity, a simplified calculation formula was proposed for the bearing capacity of UHPC hollow columns. The difference between the simulated values of 81 models and the calculated values via the formula was mostly within a 2% error line. Meanwhile, the six values from experiments were within the 10% error line. This indicates that the proposed formula has a high precision and can provide a reference for the design of UHPC hollow columns.

**Key words:** UHPC hollow column; finite element analysis; axial compressive performance; ultimate bearing capacity; simplified calculation model

## 0 引言

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 因其超高的抗压强度、优异的耐久性能受到广泛关注<sup>[1]</sup>, 已被广泛运用于各种工程领域, 如桥梁工程<sup>[2-5]</sup>、建筑结构<sup>[6-8]</sup>、结构修复和加固<sup>[9-12]</sup>等。

目前研究工作所涉及到的 UHPC 构件绝大多数为实体构件, 但也有部分学者开展了 UHPC 中空构件的相关试验研究。杨克家等<sup>[13]</sup>开展了中空 UHPC 短柱的轴压破坏试验, 采用 UHPC 损伤塑性本构模型对所设计的中空截面构件进行数值模拟与理论计算, 试验结果验证了构件截面设计的合理性; 唐昌辉等<sup>[14]</sup>开展了圆形中空夹层钢管 UHPC 短柱的轴心受压试验, 给出了圆中空夹层钢管 UHPC 短柱极限承载力的计算建议公式; 周建庭等<sup>[15]</sup>开展了中空 UHPC 短柱轴心受压试验, 研究壁厚对试件裂缝发展、竖向变形、横向变形及承载力的影响; 章世祥等<sup>[16]</sup>开展了 UHPC 圆形空心管柱轴压性能试验, 研究了不同材料、约束条件以及径厚比等因素对其破坏形态与极限承载力的影响。

近年来, UHPC 空心构件主要应用于高压输电线路的电杆和桥墩等实际工程中<sup>[17-19]</sup>。通过合理的设计, 可以在提高空心受压杆件稳定性的同时, 实现全截面应力水平的均匀分布, 并充分发挥 UHPC 材料的强度优势。中空夹层钢管混凝土因其中空、自重轻和刚度大等优点而备受关注, UHPC 与钢管、玻璃钢等材料组合的中空构件成为近年来的研究热

点<sup>[20-23]</sup>, 同时也取得了诸多成果。UHPC 中空柱相较于钢管 UHPC 中空柱去掉了内外钢管, 克服了钢管易腐蚀的难题, 施工更加便捷, UHPC 材料利用率也进一步得到提高。但对于该类结构的研究较少, 本文首先对文献<sup>[24]</sup>中的 6 根低配筋 UHPC 中空试验柱进行有限元验证, 然后使用 ABAQUS 有限元模拟软件模拟了 90 根 UHPC 中空柱, 研究 UHPC 中空柱在不同混凝土强度、宽厚比、纵筋配筋率和箍筋间距条件下的极限承载力变化, 以期为工程设计及应用提供计算方法。

## 1 有限元模型

### 1.1 建模方法

对于 UHPC 中空柱, 采用 ABAQUS 中八节点六面体线性减缩积分单元 (C3D8R) 进行模拟, 钢筋采用三维二节点桁架单元 (T3D2) 进行模拟, 并采用 Embedded 将钢筋和 UHPC 黏结<sup>[25]</sup>。垫块与柱子间采用绑定约束 (tie) 方式实现连接; 垫块与支座中建立相应的参考点 (RP), 参考点与垫块支座之间利用耦合约束 (coupling) 进行连接。对于构件底部参考点的  $x$  方向、 $y$  方向、 $z$  方向的平动及转动全部约束起来, 顶部参考点的  $x$  方向、 $y$  方向的平动及转动和  $z$  方向的转动全部约束起来, 通过位移加载模式实现轴心受压。建立 UHPC 中空柱有限元模型, 如图 1 所示。

### 1.2 材料本构模型

UHPC 材料本构模型选用 ABAQUS 中的混凝土损伤塑性模型 (CDP), 其拉、压本构关系采用杜任远等<sup>[26]</sup>提出的混凝土本构模型, UHPC 应力-

应变曲线如图 2 所示。钢筋采用理想弹塑性模型。

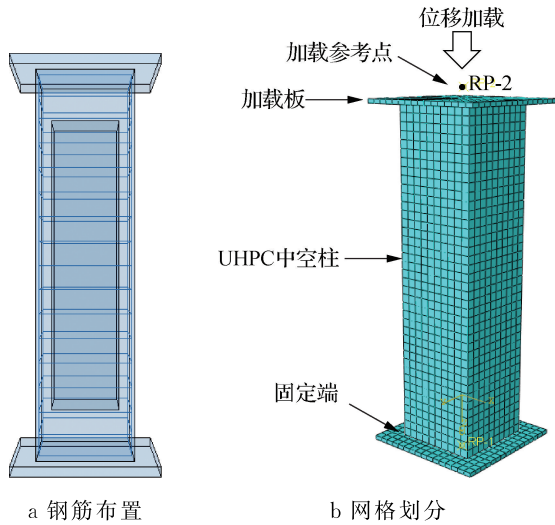


图 1 UHPC 中空柱有限元模型

Fig. 1 Finite element model of UHPC hollow column

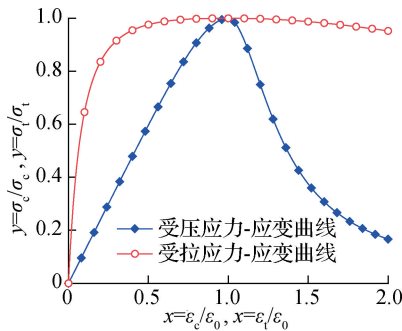


图 2 UHPC 应力-应变曲线

Fig. 2 UHPC stress-strain curve

受压时:

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6, & 0 \leq x \leq 1; \\ \frac{x}{10(x-1)^2 + x}, & x > 1. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x = \epsilon_c / \epsilon_0$ , 其中  $\epsilon_c$  为 UHPC 的压应变,  $\epsilon_0$  为 UHPC 的峰值压应变;  $y = \sigma_c / f_c$ , 其中  $\sigma_c$  为 UHPC 的压应力,  $f_c$  为 UHPC 的轴心抗压强度。

受拉时:

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \begin{cases} \frac{x}{0.92x^{1.09} + 0.08}, & 0 \leq x \leq 1; \\ \frac{x}{0.1(x-1)^{2.4} + x}, & x > 1. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $x = \epsilon_t / \epsilon_0$ , 其中  $\epsilon_t$  为 UHPC 的拉应变,  $\epsilon_0$  为

UHPC 的峰值拉应变;  $y = \sigma_t / f_t$ , 其中  $\sigma_t$  为 UHPC 的拉应力,  $f_t$  为 UHPC 的轴心抗拉强度。

### 1.3 有限元模型的验证

为验证本文中有限元模型的准确性,对文献[24]中的低配筋 UHPC 中空柱试件进行有限元分析,并与其试验结果进行对比。建模时,混凝土轴心抗压强度、钢筋屈服强度均取文献[24]中试验实测值,其中 UHPC 立方体抗压强度为 140 MPa,棱柱体抗压强度为 115 MPa,抗拉强度为 7.7 MPa,受压弹性模量为 43 GPa,泊松比为 0.19。钢筋屈服强度为 427 MPa,极限强度为 539 MPa,弹性模量为 215 GPa,泊松比为 0.3。

不同壁厚的构件截面如图 3 所示。两个不同壁厚比的短柱分别设置 3 种不同的箍筋间距,每组 3 根,共计 18 根低配筋 UHPC 中空短柱试件。其他参数如表 1 所示。

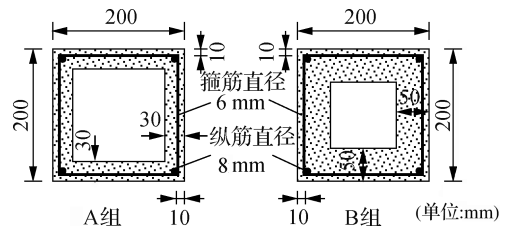


图 3 截面类型及尺寸

Fig. 3 Section type and size

表 1 文献[24]中试件主要参数

Table 1 Parameters of specimens in reference [24]

试件组号	试件名称	壁厚/mm	纵向钢筋	配筋率/%	箍筋间距/mm
A1	B30S000	30	无	0	无
A2	B30S100	30	4B6	0.55	B4@100
A3	B30S050	30	4B6	0.55	B4@50
B1	B50S000	50	无	0	无
B2	B50S100	50	4B6	0.38	B4@100
B3	B50S050	50	4B6	0.38	B4@50

试件有限元与试验结果对比见图 4。有限元模拟的极限承载力和试验值对比见表 2,峰值荷载之比在 0.96~1.08 之间。由图 5 可以看出,有限元分析的破坏模式和试验所得破坏模式吻合较好。部分 UHPC 中空柱加载过程中部分阶段误差偏大,这包含多种原因,主要是由于试验与模拟中的边界条件设置带来的刚度大小不一样。在模拟中采用的边界条件不能完全反映试验中实际的边界条件,从而导致相同位移所对应的荷载存在较大差距。

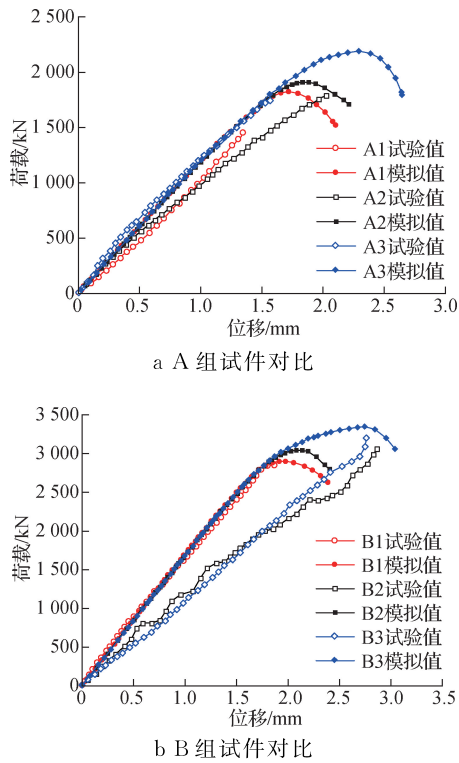


图 4 试件有限元计算和实测<sup>[24]</sup>荷载-位移曲线对比  
Fig. 4 Comparison of finite element calculation and tested<sup>[24]</sup> load-displacement curves

表 2 有限元模拟与试验<sup>[24]</sup>的极限承载力对比

Table 2 Comparison of ultimate bearing capacity between finite element simulation and experiment<sup>[24]</sup>

组号	极限荷载力/kN		模拟值与试验值之比
	试验值	模拟值	
A1	1 660	1 806	1.08
A2	1 773	1 903	1.07
A3	2 138	2 284	1.06
B1	3 019	2 935	0.98
B2	3 289	3 167	0.96
B3	3 276	3 405	1.04

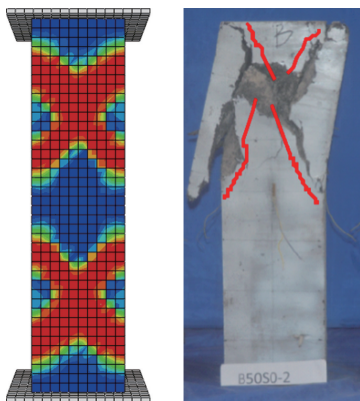


图 5 有限元分析结果与试验<sup>[24]</sup>破坏模式对比  
Fig. 5 Comparison between finite element analysis results and tested<sup>[24]</sup> failure modes

## 2 有限元分析

### 2.1 模型参数

共设计了 90 根 UHPC 中空柱作为轴压有限元分析模型, UHPC 中空柱几何尺寸为 400 mm × 400 mm × 1 600 mm<sup>[27]</sup>。壁厚  $t$  分别为 60, 80, 100 mm, 混凝土强度等级分别为 120, 140, 160 MPa, 箍筋间距分别为 50, 100, 150 mm, 3 种不同的纵筋布置见图 6。UHPC 中空柱中间中空区高度  $h = 1 200$  mm, 为避免端部局压破坏, 在端头各有 200 mm 的箍筋加密实心段, UHPC 中空柱构造及尺寸如图 7 所示。构件具体尺寸参数见表 3。

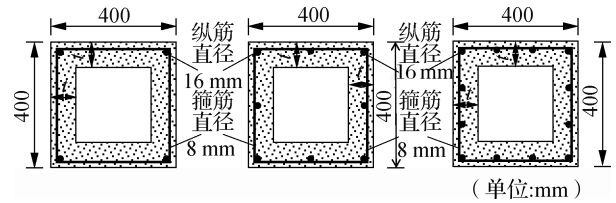


图 6 UHPC 中空柱纵筋布置  
Fig. 6 Longitudinal bars in UHPC hollow columns

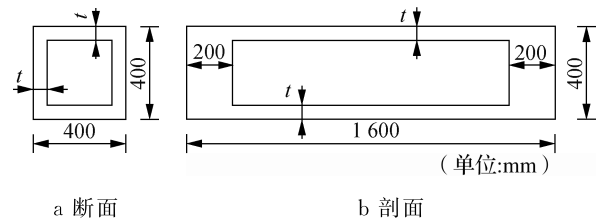


图 7 中空柱构造及尺寸  
Fig. 7 Structure and dimensions of hollow columns

表 3 构件的基本参数

Table 3 Basic parameters of components

$f_{cu}$ /MPa	箍筋间距/mm	壁厚/mm	纵向钢筋	角部纵筋为 BFRP 筋
120			4 $\Phi$ 16,	否
140	50, 100,	60, 80,	8 $\Phi$ 16,	否
160	150	100	12 $\Phi$ 16	否
120			8D16	是

注:  $f_{cu}$  为 UHPC 立方体抗压强度。

### 2.2 材料参数

UHPC 中空柱的材料、筋材参数取值见表 4 和表 5。UHPC 的弹性模量和泊松比参照《超高性能混凝土结构技术规程》, 抗压强度与立方体抗压强度

的比值取 0.82;钢筋采用理想弹塑性模型;BFRP 筋采用线弹性模型<sup>[28]</sup>。

表 4 UHPC 材料参数

Table 4 Material parameters of UHPC

强度等级	$f_c/\text{MPa}$	$E_c/\text{MPa}$	$\nu_c$
U120	98	$4.29 \times 10^4$	0.2
U140	115	$4.52 \times 10^4$	0.2
U160	131	$4.71 \times 10^4$	0.2

注: $f_c$ 为混凝土轴心抗压强度; $E_c$ 为混凝土弹性模量; $\nu_c$ 为混凝土泊松比。

表 5 筋材参数

Table 5 Reinforcement parameters

筋材	$f_y/\text{MPa}$	$E_s/\text{MPa}$	$\nu_s$
HPB300	300	$2.10 \times 10^5$	0.30
HRB400	400	$2.10 \times 10^5$	0.30
BFRP 筋	1 300	$6.40 \times 10^4$	0.23

注: $f_y$ 为筋材抗拉强度; $E_s$ 为筋材弹性模量; $\nu_s$ 为筋材泊松比。

### 3 有限元结果与分析

#### 3.1 竖向荷载位移曲线

所有 UHPC 中空柱的荷载位移曲线都分为 4 个发展历程,分别为弹性阶段、弹塑性上升阶段、下降阶段和平缓阶段,如图 8 所示。

加载初期,所有模型均处于弹性阶段,荷载位移曲线呈线性正相关。在混凝土强度、壁厚及纵筋配筋率保持不变的情况下,模型弹性阶段的斜率基本重合;在模型进入弹塑性阶段后,曲线斜率降低;当模型达到峰值荷载后,荷载随着位移的增大而迅速下降;随着混凝土达到极限压应变后,荷载位移曲线逐渐趋于平缓,直至试件破坏。

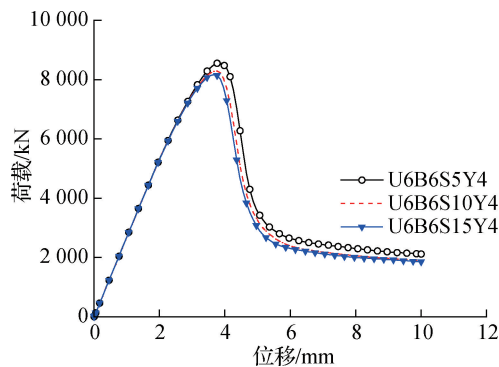


图 8 荷载位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves

试件名称为“U#B#S#Y#”,其含义说明如下:“U#”表示 UHPC 中空柱的混凝土强度等级(U2,U4,U6 分别对应混凝土强度等级为 120,140,160 MPa);“B#”表示 UHPC 中空柱的壁厚(B6,B8,B10 分别对应其壁厚为 60,80,100 mm);“S#”表示 UHPC 中空柱的箍筋间距(S5,S10,S15 分别对应其箍筋间距为 50,100,150 mm);“Y#”表示 UHPC 中空柱的纵筋为普通钢筋的根数(Y4,Y8,Y12 分别设有 4 根、8 根、12 根纵筋)。其中“F#Y#”,F 表示 UHPC 中空柱的角部钢筋为 BFRP 筋,Y 表示其余纵筋为普通钢筋(F4Y4 对应 UHPC 中空柱的 8 根纵筋中,角部钢筋为 4 根 BFRP 筋,其余 4 根纵筋为普通钢筋)。

#### 3.2 宽厚比

为研究宽厚比对 UHPC 中空柱轴压性能的影响,考虑 60,80,100 mm 3 种不同的壁厚,宽厚比分别为 5.67,4 和 3。

如图 9 所示为宽厚比对轴压承载力的影响。可以发现模型的混凝土强度、箍筋间距和纵筋配筋率保持不变的前提下,宽厚比为 4 的模型比宽厚比为 5.67 的模型峰值荷载提高了 26%,宽厚比为 3 的模型比宽厚比为 4 的模型峰值荷载提高了 21.7%,即减小截面宽厚比可有效提高 UHPC 中空柱的轴压承载性能。

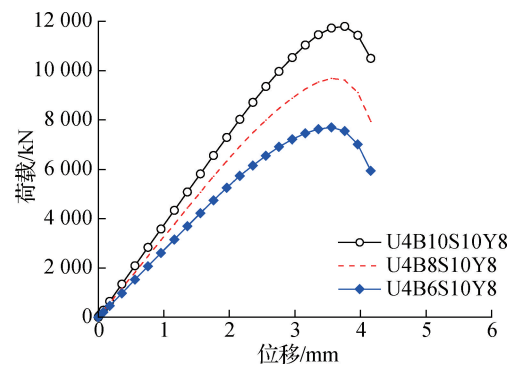


图 9 宽厚比对轴压承载力的影响

Fig. 9 Effect of width-to-thickness ratio on axial compressive bearing capacity

#### 3.3 混凝土强度

研究不同混凝土强度对 UHPC 中空柱极限承载力的影响,分别设置 120,140,160 MPa 3 组混凝土强度等级。由图 10 可以看出,在模型的宽厚比、箍筋间距和纵筋配筋率保持不变的前提下,混

凝土强度等级为 140 MPa 的模型比强度等级为 120 MPa 的模型峰荷载提高了 16.3%，混凝土强度等级为 160 MPa 的模型比强度等级为 140 MPa 的模型峰值荷载提高了 10.2%。可见随着混凝土强度等级的增大，UHPC 中空柱的初始刚度有所提高，UHPC 中空柱的承载能力与混凝土强度等级呈正相关。

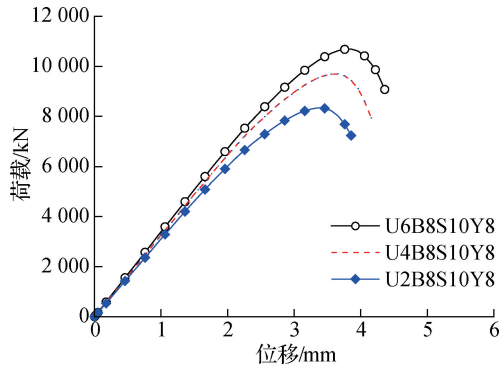


图 10 混凝土强度对轴压承载力的影响

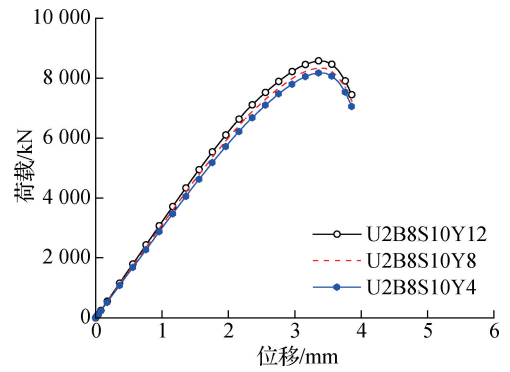
Fig. 10 Effect of concrete strength on axial compression bearing capacity

### 3.4 纵筋配筋率及形式

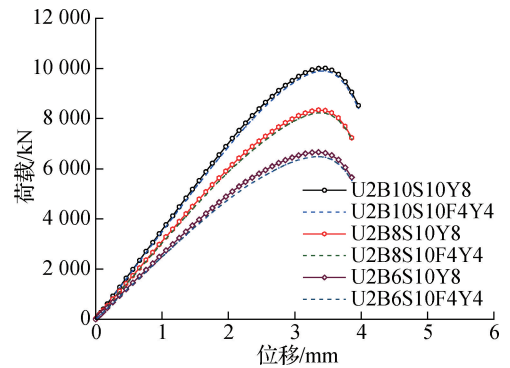
图 11 反映了考虑不同纵筋布置下纵筋配筋率及形式对轴压承载力的影响。由图 11a 可以看出，在不改变其他条件的前提下，随着纵筋配筋率的增大，UHPC 中空柱的初始刚度有所提高，峰值荷载逐渐增加。纵筋配筋率增加 1 倍后，极限承载力提高了 2%，纵筋配筋率增加 2 倍后，极限承载力提高了 4.9%。

如图 11b 所示，在混凝土强度等级为 120 MPa，箍筋间距为 100 mm，纵筋配置 8 根筋材的前提下，角部钢筋替换为 BFRP 筋的模型相较于角部纵筋为钢筋的模型的初始刚度和峰值荷载略微下降。角部纵筋替换为 BFRP 筋的模型与非替换模型极限承载力对比如表 6 所示。

分别对比表 6 中 3 组不同宽厚比的模型极限承载力的变化发现：模型“U2B10S10Y8”相较于“U2B10S10F4Y4”，其极限承载力提高了 1.12%；模型“U2B8S10Y8”相较于“U2B8S10F4Y4”，其极限承载力提高了 1.38%；而模型“U2B6S10Y8”相较于“U2B6S10F4Y4”，其极限承载力提高了 2.69%。随着宽厚比的减小，角部纵筋替换为 BFRP 筋时对承载力的降低不敏感。



a 纵筋配筋率



b 纵筋配筋形式

图 11 纵筋配筋率及形式对轴压承载力的影响

Fig. 11 Effect of longitudinal reinforcement ratio and type on axial compressive bearing capacity

表 6 角部纵筋是否为 BFRP 筋的 UHPC 柱承载力对比

Table 6 Comparison of the bearing capacity of UHPC columns with corner BFRP rebars

模型编号	$f_{cu}/$ MPa	宽厚 比	箍筋间 距/mm	BFRP 角 部纵筋	$N_u/kN$
U2B10S10Y8	120	3	100	否	10 011.70
U2B10S10F4Y4	120	3	100	是	9 900.55
U2B8S10Y8	120	4	100	否	8 338.82
U2B8S10F4Y4	120	4	100	是	8 225.50
U2B6S10Y8	120	5.67	100	否	6 657.30
U2B6S10F4Y4	120	5.67	100	是	6 483.03

注： $N_u$  为 UHPC 中空柱的极限承载力。

### 3.5 箍筋间距

考虑到箍筋间距对 UHPC 中空柱轴心受压承载力的影响，设置了 3 组箍筋间距，分别为 50, 100, 150 mm。通过图 12 模拟的荷载位移曲线可以看出，其他条件不变的情况下，模型在弹性阶段的斜率

基本重合,并且随着箍筋间距的加密 UHPC 中空柱的轴压极限承载力略微有所提升。箍筋间距加密 1 倍后,极限承载力提高了 1.2%,加密 2 倍后,提高了 3.8%,呈非线性增长。

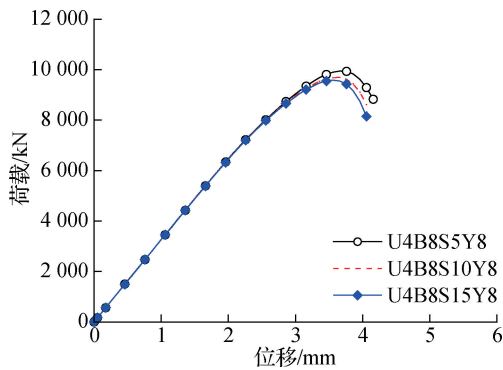


图 12 箍筋间距对轴压承载力的影响

Fig. 12 Effect of stirrup spacing on axial compression bearing capacity

#### 4 极限承载力简化计算模型

UHPC 中空柱的轴压承载力与混凝土强度、宽厚比、纵筋配筋率和箍筋间距相关。结合 UHPC 材料实际情况,由文献[24]中给出的承载力计算公式形式,再通过有限元方法计算出不同参数对模型极限承载力的影响,提出 UHPC 中空柱承载力计算公式为

$$N_u = \beta \left( \frac{t}{D} \right)^{0.08} (f_{cu})^{0.89} A, \quad (3)$$

$$\beta = 1.22 + 3.31\rho + 6.19\rho_v. \quad (4)$$

式中:  $N_u$  为 UHPC 中空柱的极限承载力(单位: kN);  $t$  为 UHPC 中空柱的壁厚(单位: mm);  $D$  为 UHPC 中空柱截面长边长度(单位: mm);  $f_{cu}$  为 UHPC 立方体抗压强度(单位: kN);  $A$  为 UHPC 中空柱受压截面面积(单位:  $\text{mm}^2$ )。  $\beta$  为引入的修正系数,其中  $\rho$  为中空柱的纵筋配筋率,  $\rho_v$  为中空柱的体积配箍率。

图 13 为 81 个模型对应的承载力模拟值与公式计算值和文献[24]中 6 个试验值与公式计算值的对比。可以看出, ABAQUS 模拟值与公式计算值的绝大部分误差在 2% 以内,文献[24]中试验值与公式计算值的误差在 10% 以内。两者吻合良好,表明 UHPC 中空柱的轴压承载力计算公式(3)具有较高精度。

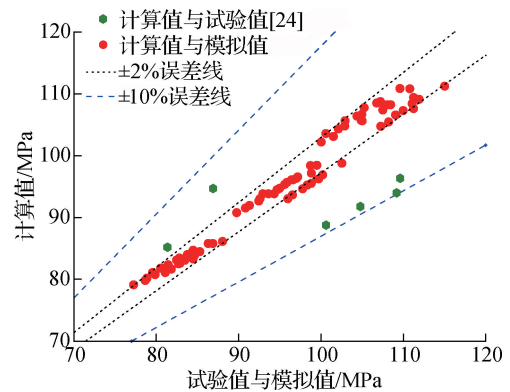


图 13 模拟值和计算值对比

Fig. 13 Comparison of simulated and calculated values

#### 5 结论

本文建立了 UHPC 中空柱在轴压荷载作用下的有限元分析模型,研究了宽厚比、混凝土强度、箍筋间距、纵筋配筋率等因素对 UHPC 中空柱极限承载力的影响,得出以下结论。

(1) 宽厚比和混凝土强度对 UHPC 中空柱的极限承载力具有显著影响。当宽厚比从 5.67 减小到 4 以及从 4 减小到 3 时,模型的峰值荷载分别提高 26% 和 21.7%;混凝土强度等级为 140 MPa 的模型比 120 MPa 的模型以及混凝土强度等级为 160 MPa 的模型比 140 MPa 的模型,其峰值荷载分别提高 16.3% 和 10.2%。

(2) UHPC 中空柱的承载能力与纵筋配筋率和配箍率正相关。纵筋配筋率增加 1 倍,极限承载力提高 2%;增加 2 倍,提高 4.9%。箍筋间距加密 1 倍,极限承载力提高 1.2%;加密 2 倍,提高 3.8%。

(3) 将角部纵筋替换为 BFRP 筋的 UHPC 中空柱比角部纵筋为钢筋的 UHPC 中空柱的初始刚度和承载力略微降低。当宽厚比较小时,纵筋配筋形式的变化对承载力的影响很小。

(4) 提出了 UHPC 中空柱的极限承载力简化计算公式。81 个模型的极限承载力模拟值与公式计算值之比绝大部分误差控制在 2% 以内,6 个试验值与公式计算值之比控制在 10% 的误差内,具有较高精度,可为该结构构件的工程应用提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 邵旭东,樊伟,黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1): 1-13.
- [2] NASRIN S, IBRAHIM A. Flexural response of Ultra-

- High-Performance Concrete (UHPC) hybrid bridge deck connections made with local materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270: 121451.
- [3] 徐文靖,邵晓东,马焜,等.采用UHPC连接的预制拼装桥墩构造及试验研究[J].*土木工程学报*,2022,55(12):105-116.
- [4] 岳秀鹏,肖靖林,甄倩倩,等.超高性能混凝土桥面板湿接缝受力性能试验研究[J].*土木工程学报*,2023,56(8):94-107.
- [5] YE Mengya, GUO Zhan, CHEN Canwen, et al. Shaking table test study on seismic performance of UHPC rectangular hollow bridge pier[J]. *Composite Structures*, 2021, 275: 114435.
- [6] WANG Zhiwei, FEI Jianbo, MA Weibin, et al. Full-scale loading experiments on performance of UHPC joints for prefabricated mountain tunnel[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2023, 131: 104784.
- [7] 樊健生,丁然.超高性能混凝土在房屋建筑结构中的研究与应用进展[J].*硅酸盐学报*,2023,51(5):1246-1258.
- [8] 张永鸿,任双宏,袁顺利.国内基于超高性能混凝土(UHPC)的装配式建筑连接应用研究综述[J].*建筑结构*,2023,53(S1):1200-1205.
- [9] PASCHALIS S A, LAMPROPOULOS A P, TSIIOULOU O. Experimental and numerical study of the performance of ultra high performance fiber reinforced concrete for the flexural strengthening of full scale reinforced concrete members [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 186: 351-366.
- [10] RAMACHANDRA MURTHY A, KARIHALOO B L, VINDHYA RANI P, et al. Fatigue behaviour of damaged RC beams strengthened with ultra high performance fibre reinforced concrete[J]. *International Journal of Fatigue*, 2018, 116: 659-668.
- [11] SUN Xiugui, GONG Zhiqian, ZUO Yun, et al. Flexural behavior of the hollow slab girders strengthened with ultra-high performance concrete: field full-scale experiment and analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 408: 133608.
- [12] HONG S, LIM W. Strengthening of shear-dominant reinforced concrete beams with ultra-high-performance concrete jacketing[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 365: 130043.
- [13] 杨克家,孙林柱,李桅,等.RPC中空受压构件截面设计及受力性能研究[J].*工程力学*,2016,33(5):166-175.
- [14] 唐昌辉,欧阳鹏.圆中空夹层钢管RPC轴心受压短柱的试验研究[J].*铁道科学与工程学报*,2016,13(12):2427-2433.
- [15] 周建庭,王宗山,杨俊.中空超高性能混凝土短柱轴心受压试验研究[J].*桥梁建设*,2019,49(2):52-56.
- [16] 章世祥,王序,何迈杰,等.UHPC圆形空心管柱轴压性能试验[J].*中国公路学报*,2023,36(9):134-143.
- [17] 贾玉琢,王德弘,汪志.部分预应力筋活性粉末混凝土电杆的设计研究[J].*混凝土*,2012(9):136-139.
- [18] 郝文秀,钟铁毅.活性粉末混凝土桥墩延性试验研究与数值分析[J].*土木工程学报*,2010,43(6):82-86.
- [19] 张学森,吴香国,李丹,等.额定风速下装配式UHPC风电塔筒静力与疲劳性能[J].*可再生能源*,2022,40(8):1066-1072.
- [20] CHENG Baoquan, WANG Weichen, LI Junhua, et al. Mechanical properties of full-scale uhpc-filled steel tube composite columns under axial load[J]. *Materials*, 2023, 16(13): 4860.
- [21] 邓宗才,李万超.CFRP-UHPC-钢管组合短柱轴压性能研究[J].*天津大学学报(自然科学与工程技术版)*,2021,54(10):1008-1016.
- [22] XU Lihua, LU Qiuru, CHI Yin, et al. Axial compressive performance of UHPC filled steel tube stub columns containing steel-polypropylene hybrid fiber [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204: 754-767.
- [23] 顾靖,宗钟凌,李珂珂,等.GFRP管约束型钢混凝土柱轴压有限元分析[J].*江苏海洋大学学报(自然科学版)*,2022,31(2):33-37.
- [24] 杨俊,周建庭,丁鹏,等.低配筋UHPC中空短柱轴心受压力学性能[J].*中国公路学报*,2019,32(3):81-92.
- [25] 金浏,李平,杜修力.箍筋约束方形混凝土柱轴压强度尺寸效应律[J].*应用基础与工程科学学报*,2021,29(4):986-998.
- [26] 杜任远,陈宝春.活性粉末混凝土拱极限承载力试验研究[J].*工程力学*,2013,30(5):42-48.
- [27] 杜修力,金浏,李冬.混凝土与混凝土结构尺寸效应述评(II):构件层次[J].*土木工程学报*,2017,50(11):24-44.
- [28] 谢青海,孙成建,肖建庄,等.不同直径GFRP和BFRP筋高温后受剪与受压性能[J].*江苏海洋大学学报(自然科学版)*,2023,32(4):90-98.

(责任编辑:褚金红 实习编辑:张昌保)