DOI:10.14188/j.1671-8844.2023.0443
文章编号:1671-8844(2026)09-1493-12

UHPC-NC组合柱偏压性能试验研究

欧智菁[1,2],柳子鸿[2],颜建煌[2],陈玮悦[2],曹磊[2]

(1. 福建理工大学福建省土木工程新技术与信息化重点实验室,福建 福州 350118;
2. 福建理工大学土木工程学院,福建 福州 350118)

摘要: 为研究超高性能混凝土(ultra-high performance concrete,UHPC)-普通混凝土(normal concrete, NC)组合柱的偏压性能,以偏心率为试验参数,对3根UHPC-NC组合柱进行偏心受压试验,观察试件偏压破坏过程,得到试件的破坏形态,分析试件的荷载-位移曲线、荷载-挠度曲线、荷载-应变曲线、紧箍效应等力学特征。建立组合柱的有限元模型,在试验验证的基础上进行参数拓展分析。基于试验结果和课题组已有研究成果,提出UHPC-NC组合柱偏压极限承载力计算方法。研究表明:偏心受压的UHPC-NC组合柱的破坏模式主要为受压侧UHPC压碎、受拉侧开裂;随着偏心率增大,UHPC-NC组合柱的刚度和极限承载力逐渐降低,UHPC外管对核心混凝土的紧箍效应更早发生,破坏时侧向挠曲更明显;偏心率、长细比、UHPC强度、UHPC外管厚度和核心混凝土强度是影响组合柱极限承载力的重要参数。基于试验结果和有限元分析结果,借鉴已有计算方法和钢管混凝土设计规程,总结提出了UHPC-NC组合柱偏压极限承载力的计算方法,公式计算结果与试验结果、有限元分析结果吻合良好,并在工程实例中得到验证。

关键词: UHPC;组合柱;偏压;有限元;极限承载力
中图分类号: TU 398.9　**文献标志码:** A

Experimental study on eccentric compression behavior of UHPC-NC composite columns

OU Zhijing[1,2], LIU Zihong[2], YAN Jianhuang[2], CHEN Weiyue[2], CAO Lei[2]

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informatization in Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To investigate the eccentric compression behavior of the composite columns made of ultra-high performance concrete (UHPC) and normal concrete (NC), eccentricity was taked as the test parameter, and eccentric compression tests were conducted on three UHPC-NC composite columns. The eccentric compression failure processes of specimens were observed, and the failure modes of the specimens were obtained. The mechanical characteristics such as the load-displacement curves, load-deflection curve, load-strain curves, and the confining effect of the specimens were analyzed. A finite element model (FEM) of the composite columns was developed, and parameter expansion study was conducted based on the experimental verification. Based on the experimental results and the existing research from the research team, a calculation method for the eccentric compression ultimate bearing capacity of UHPC-NC composite columns was proposed. The study reveals that

收稿日期: 2023-10-13
作者简介: 欧智菁(1975-),女,教授,主要从事组合结构研究,E-mail: 42347271@qq.com。
通信作者: 柳子鸿(1999-),男,硕士研究生,主要从事组合结构研究,E-mail: 892652340@qq.com。
基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:51878172);福建省自然科学基金项目(编号:2022J01929)。

本文引用格式: 欧智菁,柳子鸿,颜建煌,等.UHPC-NC组合柱偏压性能试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2026,59(9):1493-1504.

Citation: OU Zhijing, LIU Zihong, YAN Jianhuang, et al. Experimental study on eccentric compression behavior of UHPC-NC composite columns[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2026, 59(9): 1493-1504.

the failure modes of eccentrically loaded UHPC-NC composite columns are mainly the crushing of the compression side and cracking of the tension side. As the eccentricity increases, the stiffness and ultimate bearing capacity of UHPC-NC composite columns gradually decrease, while the constraining effect of the UHPC outer tube on the core concrete initiates earlier, with more obvious lateral deflection during failure. Key factors influencing the ultimate bearing capacity include the eccentricity, slenderness ratio, UHPC compressive strength, thickness of UHPC outer tube and core concrete strength. Based on the experimental results and FEM results, drawing on existing calculation methods and steel tube concrete design regulations, the calculation method for the ultimate bearing capacity of UHPC-NC composite columns under eccentric compression is summarized and proposed. The formula calculation results are in good agreement with the experimental results and finite element analysis results, and have been verified in engineering examples.

Key words: UHPC; composite column; eccentric compression; finite element; ultimate bearing capacity

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete,UHPC)作为一种新型水泥基材料,具有抗压、抗拉强度高和耐久、耐磨、耐腐蚀性好等优点[1]。近年来,UHPC在桥梁工程中的应用日益广泛[2-4],普通混凝土(normal concrete, NC)与UHPC的组合结构便是典型应用之一[5]。

UHPC-NC组合柱是指混凝土柱外包UHPC或先预制UHPC外管再填充内部混凝土的组合结构柱。近年来,国内外学者对该类组合柱开展了系列试验研究。BESCHI等[6]对UHPC与钢筋混凝土组合柱开展了拟静力试验研究,结果显示,钢筋混凝土柱外包UHPC可明显提升构件的承载力,说明可利用UHPC对已有低强度钢筋混凝土柱进行加固;陈扬弘[7]对3根组合短柱进行了轴压试验与有限元模拟,试验结果表明,构件的初裂荷载相对普通混凝土更晚出现,这对于提升构件抗腐蚀性有正向作用;舒田宇等[8]通过增大截面法对20根UHPC加固柱进行静力性能试验,研究表明,UHPC加固柱可有效提升组合柱的承载力,但会降低试件延性,另外,圆形截面试件的加固效果优于方形截面试件。

上述研究中,组合柱的外部UHPC并无配筋。为了与UHPC的高性能相匹配、改善构件的受力性能,有学者提出在外部UHPC中配置钢筋网的UHPC-NC组合柱。杨医博等[9]以截面形式为参数,对组合柱进行轴压试验研究,结果表明,以配筋UHPC为模板的方柱和圆柱的开裂荷载均超过自身极限荷载的85%,该构造有效提升了构件的延性与刚度;陶剑剑[10]以有无配筋为参数,对活性粉末混凝土(reactive powder concrete,RPC)加固柱开展静力性能试验研究,结果表明,在RPC中配筋可以有效提高构件的承载能力、延性及抗裂性能;艾毓玮[11]对UHPC-NC复合柱进行受力机理研究,建立了复合柱轴压承载力的计算模型,并基于ABAQUS软件,通过有限元模型分析不同参数变化对构件性能的影响。然而,目前关于有配筋的UHPC-NC组合柱的研究仍处于起步阶段,且现有试验多聚焦于轴压工况,对UHPC-NC组合柱的偏压受力机理缺乏深入研究。

1 试验概况

1.1 试件设计

本试验的试件以平潭跨海大桥圆形柱墩为原型,按1∶8的缩尺比制作了3根UHPC-NC组合柱试件。以偏心率e为设计参数,3根组合柱试件的偏心率分别为0、0.1、0.2,对应的偏心距分别为0、12.1、24.2 mm。除偏心率外,各试件其他设计参数一致:UHPC外管厚度为31 mm,核心混凝土直径为180 mm、高度为800 mm,配箍率为2.6%(箍筋间距20 mm),长细比为3.3。各试件构造一致,如图1所示,具体参数如表1所示,表中:N_t为承载力试验值;N_f为承载力有限元模拟值。

1.2 材料性能

UHPC的原材料包括水、水泥、硅灰、石英砂、高效减水剂和钢纤维,核心混凝土采用C30混凝土。课题组通过数次试配,最终确定了性能较为稳定的UHPC配合比:水泥、水、硅灰、石英砂、减水剂的质量比为1.000∶0.234∶0.300∶1.000∶0.025,钢纤维体积掺量为2%。对试件进行浇筑时,预留UHPC和混凝土试块,所有试块与构件均在相同环境下养护。参考《活性粉末混凝土》GB/T 31387—2015[12]和《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2019[13]开展材料力学性能试验,测得UHPC和混凝土的立方体抗压强度、轴心抗压强度、抗拉强度和弹性模量,如表2所示。箍筋和纵筋采用HPB300光圆钢筋,直径为6 mm,屈服强度为

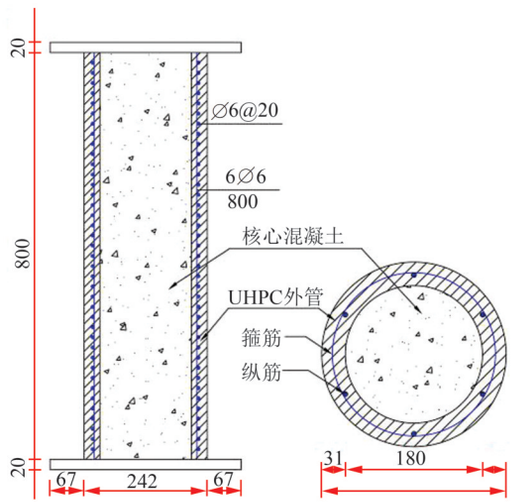


图 1　试件构造（单位：mm）

Fig.1　Structure of specimens (unit: mm)

表 1　试件编号与参数

Table 1　Numbers and parameters of specimens

试件编号	e	N_t/kN	N_f/kN
UN-E0	0	3 238	3 213
UN-E0.1	0.1	2 711	2 610
UN-E0.2	0.2	2 210	2 178

表 2　混凝土力学性能

Table 2　Mechanical properties of concrete

混凝土类型	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/($N\cdot mm^{-2}$)
UHPC	123.8	103.3	6.7	40 280
C30	34.3	26.7	2.1	30 120

319.0 MPa，极限强度为 503.0 MPa，断后延伸率为 17.9%，弹性模量为 2.08×10^5 N/mm^2。

1.3　加载装置和加载方案

试验加载装置为 5 000 kN 微机控制电液伺服压力试验机。设备顶、底部分别连接刀铰，上、下钢板刻有不同偏心距的刀槽，试件上下两端通过钢质端帽固定，试验加载装置见图 2。试验严格按照《混凝土结构试验方法标准》GB/T 50152—2012[14] 相关规定进行加载：先进行等速位移加载，加载速率为 0.5 mm/min；荷载达到 1 kN 时进行等速力加载，加载速率为 1 kN/s；荷载达到预估极限承载力的 85% 后，再次进行等速位移加载，加载速率为 0.1 mm/min，持续加载直至试验构件发生破坏。

1.4　测点布置

试验加载过程中，为获取偏心荷载作用下 UHPC 的环向和纵向应变情况，在 UHPC-NC 组合柱的中截面位置布置 UHPC 应变测点。为了测得试件挠度的变化情况，在组合柱左右两侧沿高度方向的顶部、中截面、底部分别布置 2 个位移计，同时，在承台顶面布置 1 个位移计，如图 3(a)所示（N 为轴向压力）；纵筋应变片分别布置在柱中截面 4 个对称方向上，如图 3(b)所示；箍筋应变片共布置 3 处，分别位于柱高 h 的 1/4、1/2、3/4 位置处，每处沿环向布置 4 个应变片，如图 4 所示。

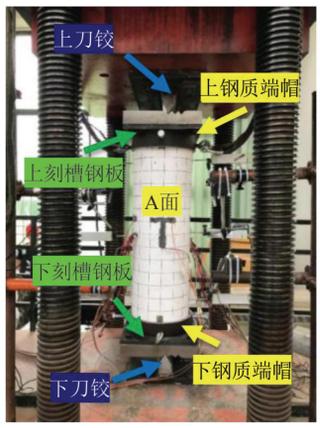


图 2　加载装置

Fig.2　Loading device

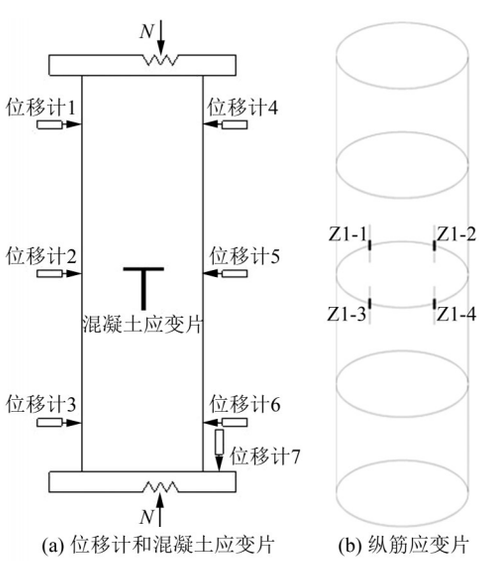


图 3　位移计及混凝土、纵筋应变片布置

Fig.3　Layout of displacement gauges and strain gauges for concrete and longitudinal reinforcement

2　试验现象及破坏形态

组合柱试件的破坏过程较为相似，本文以 UN-E0.2 试件为例进行描述。加载初期，试件处于弹性阶段，未出现明显现象；荷载增至 850 kN 时，试件发出轻微“嘣”的声响；荷载达到 1 066 kN 时，试件上端涂层轻微掉落；荷载升至 1 523 kN 时，上端受压侧出现数条纵向微裂缝；荷载提高至 2 160 kN 时，

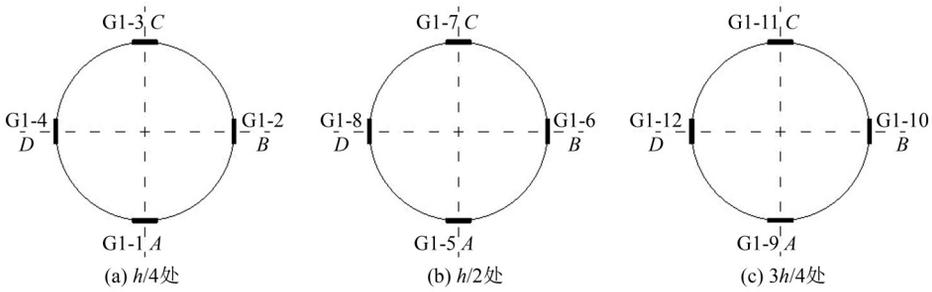


图 4 箍筋应变片布置

Fig.4 Layout of stirrup strain gauges

试件持续发出钢纤维被拉断的“嘣”声,柱外表无明显裂纹;荷载达到峰值荷载 2 210 kN 时,试件发出一声非常明显的“嘣”声,试件受压侧中间部位出现水平向锯齿形裂缝,纵向裂纹开始扩展,组合柱受压侧中截面最外层 UHPC 翘起;当荷载降至 2 180 kN 时,柱受拉侧中截面出现水平向宽裂缝,并不断向两侧延伸;随着加载继续,柱中截面水平向裂缝贯穿,纵向裂缝越来越多,中部水平向裂缝不断加深加大,UHPC 有翘起但无剥落;直至荷载下降至峰值荷载的 85% 以下,中截面受压侧混凝土被压坏。

图 5 为各试件的破坏照片。结合试验过程可知,试件发生整体破坏,裂缝主要集中在试件中部。UHPC 外管仅出现若干条裂缝与翘起,由于钢纤维的桥接作用,UHPC 无大面积剥落;核心混凝土无显著破坏,仅顶部出现微小裂缝,这是由于 UHPC 外管的刚度较大,其对核心混凝土起到了一定的约束作用,可以有效提升混凝土柱的变形能力。随着偏心率的增大,试件破坏时挠曲增大,其中偏心率为 0.2 的试件出现宽裂缝。

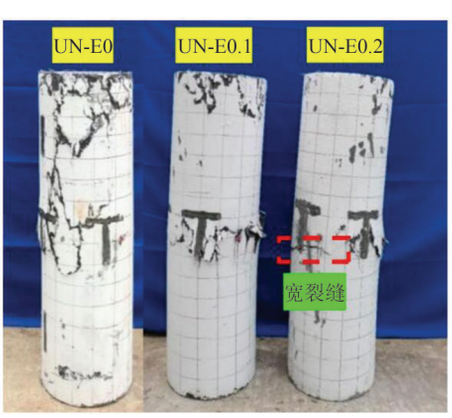


图 5 不同偏心率试件的破坏照片

Fig.5 Failure photos of specimens with different eccentricities

3 试验结果及分析

3.1 荷载-位移曲线

图 6 为不同偏心率试件的荷载-位移曲线,可以看出曲线有 5 个阶段:第 1 阶段为弹性阶段,荷载与位移呈线性关系,试件出现微小裂缝;第 2 阶段,微小裂缝逐渐扩大,受拉侧钢纤维逐渐被拉断,曲线斜率降低;第 3 阶段,受压侧中部出现水平向和纵向裂缝,试件的紧箍效应达到峰值,试件承载力达到极限承载力(峰值荷载);第 4 阶段,受拉侧中部的钢纤维大部分被扯断,钢筋进入屈服状态,试件的承载力骤降,当试件承载力下降到极限承载力的 85% 时,试件达到极限状态;第 5 阶段,中截面水平向裂缝贯通且裂缝不断加大,受压侧的混凝土受损,组合柱完全破坏。

另外,由图 6 可知,各试件的曲线在初始加载阶段较为重合,随着偏心率不断增加,偏心率更大的试件会更早进入弹塑性阶段,组合柱的刚度和最大承载力均有不同程度的降低,3 条曲线逐渐偏离。此外,还可以通过荷载-位移曲线得到试件在各阶段对应的荷载值和位移值。

3.2 极限承载力

图 7 为偏心率对试件极限承载力的影响。由图 7 可以看出,组合柱的偏心率从 0 增大至 0.2 时,试件极限承载力从 3 238 kN 降低至 2 210 kN,下降了 31.7%;偏心率与试件极限承载力呈线性变化,偏心率每增大 0.1,极限承载力下降约 15%。结合图 6 可以看出,随着偏心率不断变大,荷载-位移曲线弹性阶段的刚度逐渐减小,试件峰值荷载对应的位移不断增大。

3.3 受压刚度

本文采用割线刚度表示试件的受压刚度[15],偏心率对试件受压刚度的影响如图 8 所示。

由图 8 可知:试件在前 2 个阶段的受压刚度相差不大,表明在初始弹性阶段,试件并未受到太大

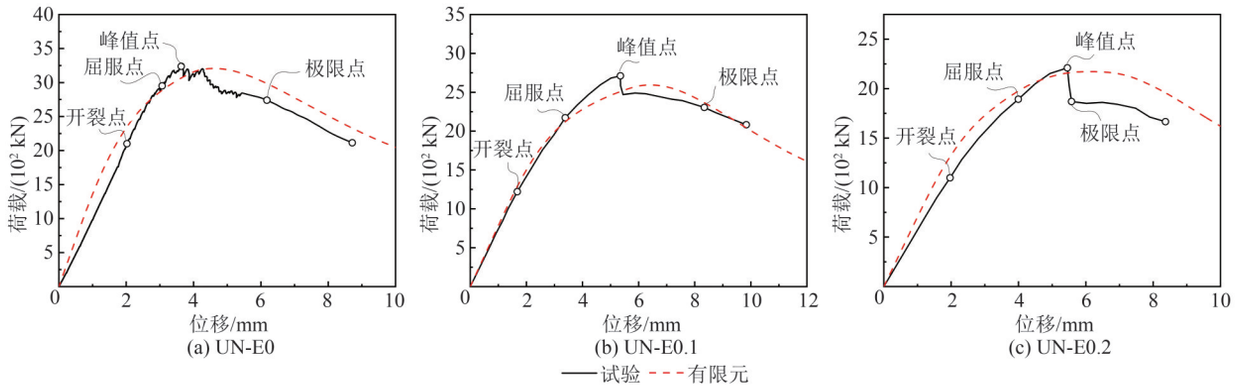


图 6　试件的荷载-位移曲线

Fig.6　Load-displacement curves of specimens

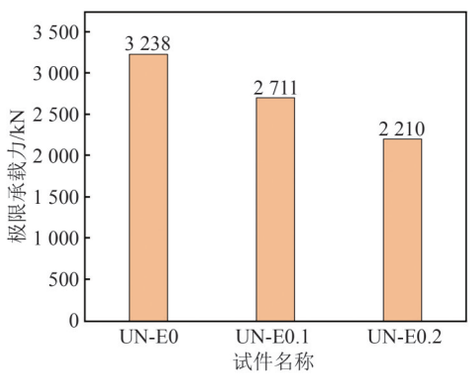


图 7　各试件极限承载力对比

Fig.7　Comparison of ultimate bearing capacity of specimens

损伤；荷载达到峰值点时，试件已出现一定损伤，但由于 UHPC 外管对核心混凝土的紧箍作用，试件刚度并未出现骤降；荷载达到极限点时，随着 UHPC 外管翘起和内部混凝土压坏，试件刚度发生骤降。随着偏心率增大，试件在峰值点之后的刚度退化程度减小。

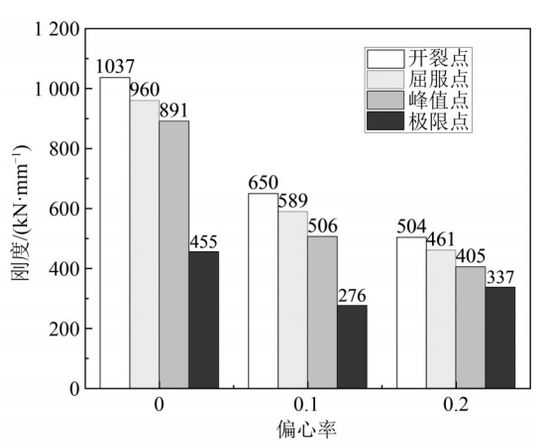


图 8　偏心率对试件受压刚度的影响

Fig.8　Influence of eccentricity on the compression stiffness of specimens

3.4　变形能力

本文通过变形能力系数 I 来衡量构件的变形能力。I 为屈服位移与极限位移之间的面积 S_{ABCD} 与屈服位移前的面积 S_{OAB} 之比[15]，如图 9 所示，图中：P_y 和 Δ_y 分别为屈服点荷载及其对应位移；P_m 和 Δ_m 分别为峰值荷载及其对应位移；$0.85P_m$ 和 Δ_u 分别为极限点荷载及其对应位移。I 越大，构件屈服后的变形能力越强。

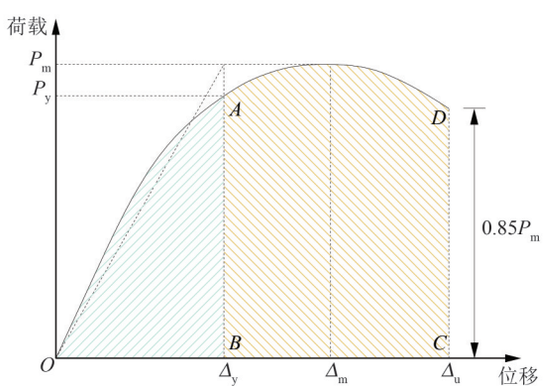


图 9　变形能力系数计算示意图

Fig.9　Schematic diagram for calculation of deformation capacity coefficient

根据荷载-位移曲线得到不同偏心率试件的变形能力系数 I，如图 10 所示。由图 10 可知，偏心率对试件的变形能力影响显著，呈先增后减的变化趋势。偏心率从 0 增大到 0.1 时，试件峰值荷载对应的位移增大，试件变形能力增大；当偏心率进一步增至 0.2 时，试件变形能力下降，这是因为 UN-E0.2 试件在达到峰值荷载后，外部 UHPC 损伤更为严重，承载力骤降，导致计算得到的变形能力系数较小。

3.5　荷载-挠度曲线

图 11 是试件在不同荷载作用下沿不同位移计高度 h' 方向的实测挠度曲线。由图 11 可以看出，荷

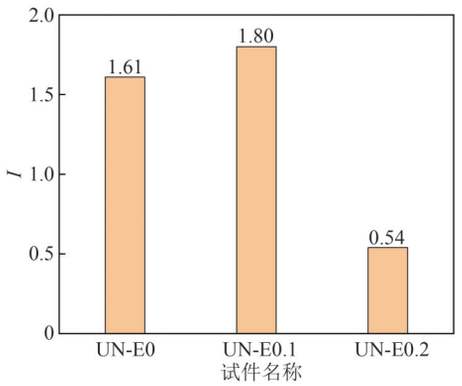


图 10 不同偏心率对试件变形能力的影响

Fig.10 Influence of different eccentricities on the deformation capacity of specimens

载从 $0.2P_m$ 增至 $0.6P_m$ 时，组合柱挠度增长速率较缓；当荷载超过 $0.8P_m$ 后，各试件的挠度增长速率明显加快。随着偏心率增大，试件在 $h/2$ 高度处(即柱中)的侧向挠度不断增加，各组合柱的挠度曲线基本呈橄榄形，柱中截面挠度最大，并向顶、底部逐渐降低。试件的偏心率从 0 提升到 0.2 时，柱中挠度增加了 121.1%。

3.6 荷载-应变曲线

3.6.1 UHPC 中截面处环向和纵向应变

图 12 是各试件 UHPC 外管中截面处的荷载-应变曲线。由图 12 可知，在加载初期，各试件的荷载-应变曲线较为重合，试件处于弹性阶段，曲线呈线性增长趋势；随着荷载增加，偏心率更大的试件会更早进入弹塑性阶段，曲线斜率显著降低，极限承载力下降。偏心率更大的试件破坏时的极限应变更大，当偏心率从 0 增大到 0.2 时，环向破坏应变由 1 216 με 增长到 1 867 με，纵向破坏应变由 3 608 με 增长到 4 437 με。

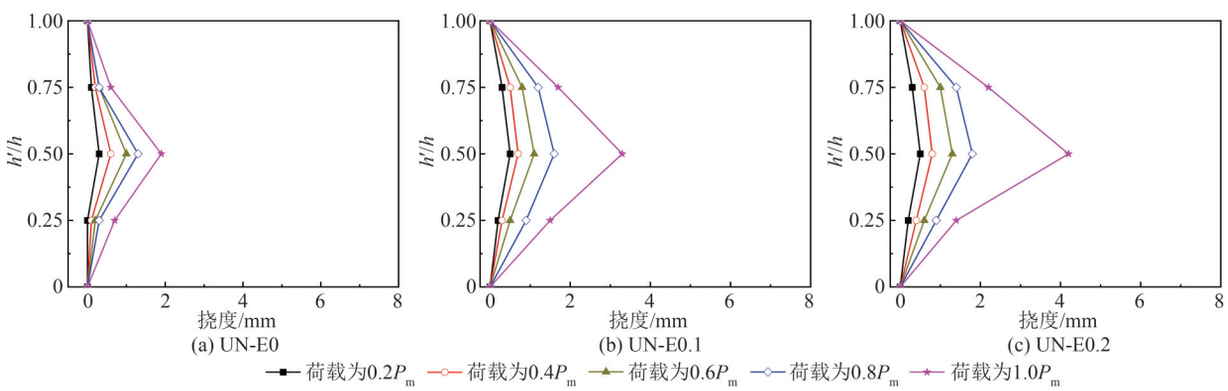


图 11 试件实测挠度分布

Fig.11 Measured deflection distribution of specimens

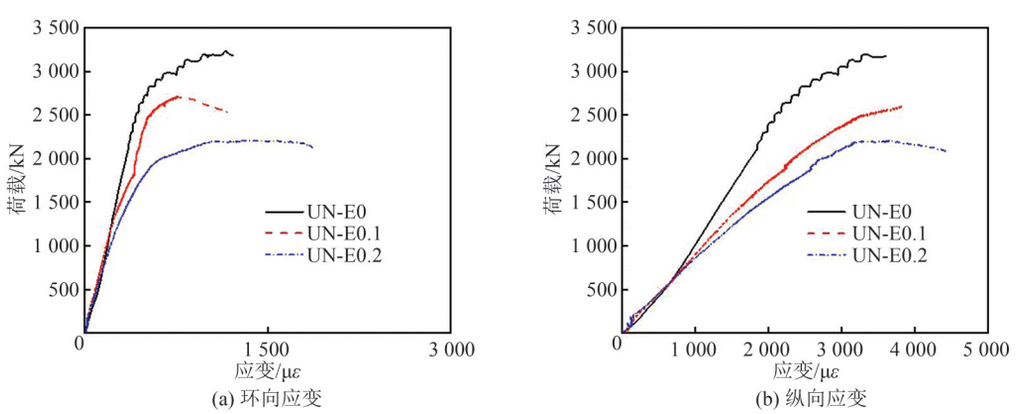


图 12 UHPC 中截面处的环向和纵向应变

Fig.12 Circumferential and longitudinal strains of the UHPC outer tube at the mid-section

3.6.2 中截面处钢筋荷载-应变曲线

图 13 是不同偏心率试件中截面处纵筋和箍筋的荷载-应变曲线。由图 13 可知，加载初期，试件处于弹性阶段，荷载-应变曲线基本一致，此时试件的 UHPC 外管、内部钢筋和核心混凝土处于协调工作状态；随着荷载增大，纵筋与箍筋的荷载-应变曲线斜率逐渐降低，偏心率越大的试件越早进入弹塑性阶段，箍筋的约束效果越明显。当偏心率从 0 增大

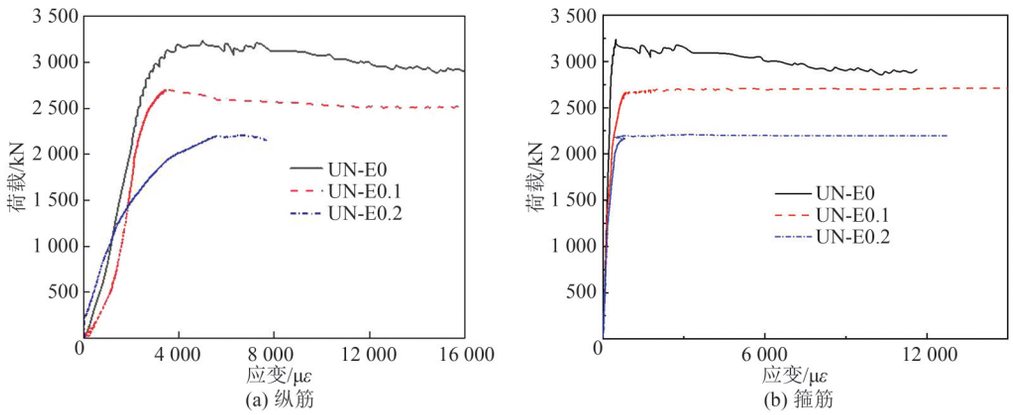


图 13　中截面钢筋荷载-应变曲线

Fig.13　Load-strain curves of the reinforcing bars at the mid-section

到 0.2 时，纵筋峰值应变由 4 998 με 增大到 6 569 με、箍筋峰值应变由 487 με 增大到 2 994 με。随着组合柱达到极限承载力，钢筋完全屈服，直至试件发生压溃破坏。

3.7　紧箍效应

为了分析不同偏心率下组合柱是否产生紧箍效应，本文通过组合材料的泊松比 υ 进行分析。当组合材料的泊松比大于 UHPC 的泊松比时，试件出现紧箍效应，UHPC 外管对核心混凝土有约束作用。国内外学者对 UHPC 的泊松比进行了大量研究。由文献[16]可知，UHPC 的泊松比为 0.18～0.21，结合法国 UHPC 规范[17]，本试验中 UHPC 的泊松比取 0.2、热膨胀系数取 11×10^{-6}/℃。图 14 为不同偏心率试件的荷载-泊松比曲线。

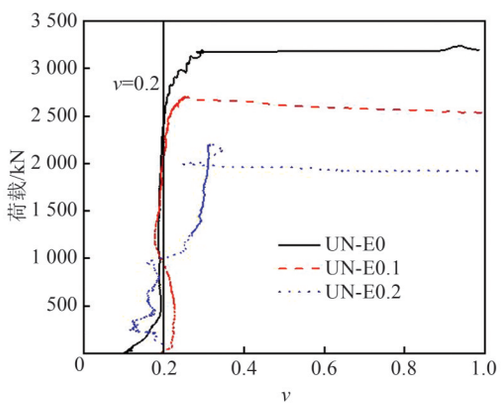


图 14　中截面荷载-泊松比关系曲线

Fig.14　Load-poisson´s ratio curves at the mid-section

由图 14 可知，在加载初期，试件各部位都处于弹性阶段，受到的竖向荷载较小，不同偏心率试件的组合材料的泊松比基本小于 0.2，数值离散程度较小，此时 UHPC 外管对核心混凝土的紧箍效应不明显。UN-E0.2 试件在荷载达到自身极限荷载的 45% 左右时，泊松比显著增大，UHPC 外管出现紧箍效应；UN-E0.1 试件在弹性阶段的泊松比在 0.2 附近波动，在荷载达到自身极限荷载的 60% 左右时，泊松比开始增大，UHPC 外管的紧箍效应逐渐增强；UN-E0 试件在荷载达到自身极限荷载的 70% 左右时，紧箍效应不断提高，UHPC 外管对核心混凝土有明显的紧箍作用。总体而言，随着偏心率增大，UHPC 外管对于核心混凝土的紧箍效应提前，在试件达到极限荷载后，泊松比近似呈线性增长。

4　参数拓展分析

4.1　有限元建模

本文通过 ABAQUS 软件建立 UHPC-NC 组合柱有限元模型。组合柱材料包括 UHPC、钢筋、核心混凝土和上下垫板。其中，UHPC、核心混凝土和垫板采用 C3D8R 单元，钢筋采用 T3D2 单元。UHPC 外管与核心混凝土之间选择面面接触，法向方向采用硬接触，切向摩擦采用罚公式，摩擦系数取 0.6。钢筋网采用 Embedded 方式嵌入 UHPC 外管，上、下端垫板与柱顶、底面通过 Tie 连接固定。组合柱底部约束 5 个方向自由度，仅释放 UR2 自由度；顶部约束 4 个方向自由度，释放 U3 和 UR2 自由度。UHPC-NC 组合柱有限元模型及其各组成部分如图 15 所示。

UHPC 外管和内部核心混凝土采用混凝土塑性损伤（concrete damaged plasticity，CDP）模型。其中，UHPC 外管采用马亚峰[18]和杨志慧[19]提出的单轴受压和单轴受拉本构模型，核心混凝土采用《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010[20]给出的应力-应变模型，钢筋采用理想弹塑性本构模型。

4.2　有限元模型验证

4.2.1　极限承载力

表 3 列出了各试件极限承载力有限元值与试验

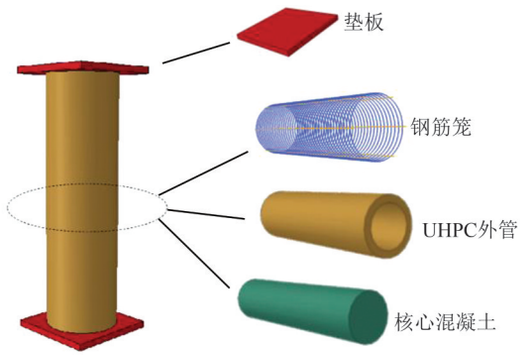


图 15 有限元模型

Fig.15 Finite element models

值的对比,结合图 6 可以看出,有限元模拟结果与实测结果总体上一致。极限承载力的有限元值与试验值较为接近,N_f/N_t的平均值为 0.980、均方差为 0.015,误差控制在 5% 范围内,说明该建模方法能够较好地模拟 UHPC-NC 组合柱的偏压性能。有限元模拟值与试验值存在一定差异,这是因为有限元模型处于比较理想的状态,尽管模型已引入初始缺陷,但是实际工程中构件可能会存在各种缺陷,无法与模型完全一致,因此有限元的初始刚度大于试验值。

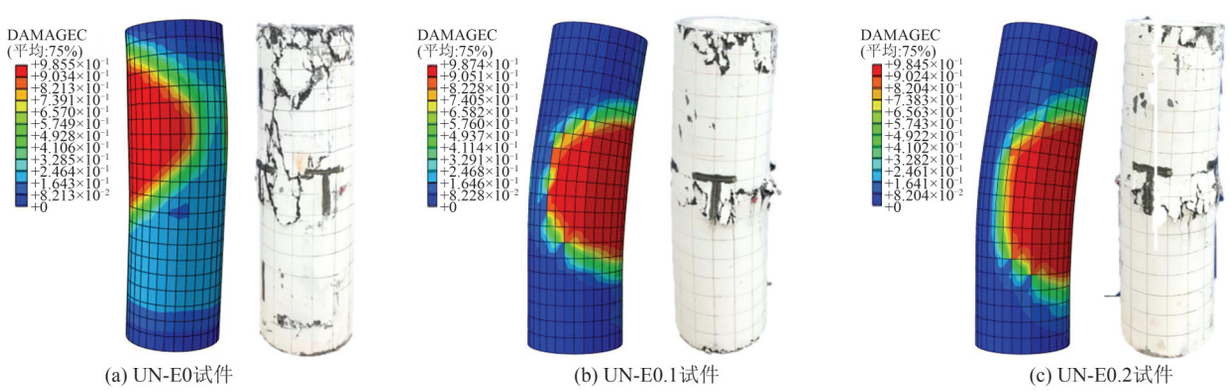
表 3 各试件极限承载力有限元值与试验值对比

Table 3 Comparison of finite element calculated values and experimental values of ultimate bearing capacity

试件编号	N_f/kN	N_t/kN	N_f/N_t
UN-E0	3 213	3 238	0.992
UN-E0.1	2 610	2 711	0.963
UN-E0.2	2 178	2 210	0.986

4.2.2 破坏形态

图 16 为组合柱有限元破坏云图与试验破坏照片对比,图中:DAMAGEC 表示受压损伤因子。模拟结果与试验结果在破坏形态上较为一致,均在试件中截面与顶部出现裂缝;偏心率为 0.1、0.2 的构件破坏主要集中在柱中受压侧,有限元模拟云图的破坏范围与实际试件的破坏范围基本一致。



(a) UN-E0试件 (b) UN-E0.1试件 (c) UN-E0.2试件

图 16 有限元与试验破坏形态对比

Fig.16 Comparison of failure patterns between finite-element simulation and experimental test

4.3 参数分析

因工况数量有限,本节以 UN-E0.2 的有限元模型为基准模型,在试验验证的基础上开展有限元参数拓展分析,探讨不同偏心率、长细比、UHPC 强度、UHPC 外管厚度、配箍率和核心混凝土强度等参数对 UHPC-NC 组合柱偏压性能的影响规律,如图 17 所示。

由图 17 可以看出,试件偏心率由 0 增大到 0.5、长细比由 2 增大到 60 时,极限承载力分别降低了约 59%、80%;UHPC 强度由 100 MPa 增大到 140 MPa、UHPC 外管厚度由 21 mm 增大至 41 mm、配箍率由 0.5% 增加到 2.6%、核心混凝土强度由 30 MPa 增加到 70 MPa 时,极限承载力分别提高了约 25%、32%、10%、22%。由此可以看出,偏心率、长细比、UHPC 强度、UHPC 外管厚度和核心混凝土强度是影响 UHPC-NC 组合柱偏压极限承载力的重要因素,而配箍率对于组合柱偏压极限承载力影响较小。

5 UHPC-NC 组合柱极限承载力计算

5.1 UHPC-NC 组合柱受压极限承载力

目前,国内外已针对 UHPC-NC 组合柱的承载力开展相关研究,但未形成相应的设计规程。根据本文试验结果,在组合柱受压全过程中,UHPC 预制外管与核心混凝土之间协调变形,两者未发生脱粘,组合柱始终保持良好的整体性;同时,在加载中后期,UHPC 预制外管对核心素混凝土产生套箍作用,该作用不断增大,其约束作用不可忽略。

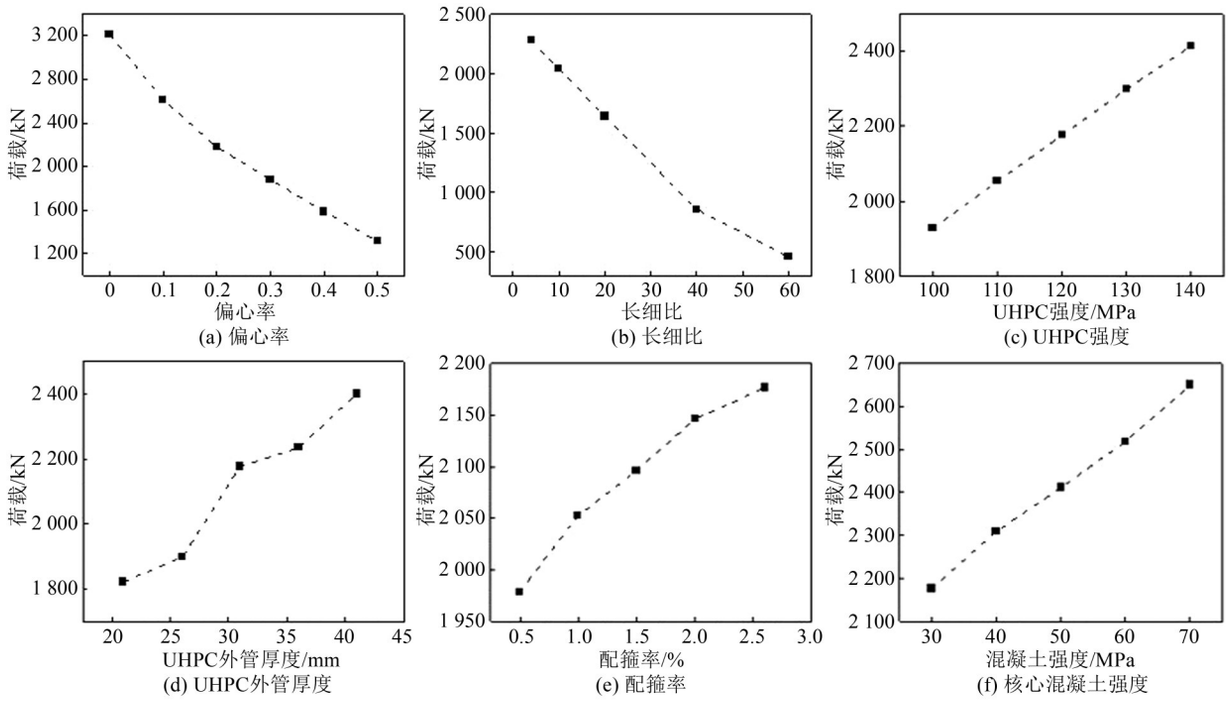


图 17　不同参数对组合柱偏压性能的影响

Fig.17　Influence of different parameters on eccentric compression behavior of composite columns

5.1.1　UHPC-NC柱轴压极限承载力计算方法

UHPC-NC组合柱兼具混凝土柱和钢管混凝土柱的特点，本文轴压承载力的计算方法采用课题组计算拟合得到的公式[21]。UHPC-NC组合柱轴压极限承载力N_u的计算主要考虑核心混凝土承担的承载力N_c、UHPC外管承担的承载力N_{uhpc}、UHPC外管与核心混凝土结合的承载力提高系数R和组合柱稳定系数φ_l，其计算式如下：

$$N_u=\varphi_l R(N_{uhpc}+N_c) \tag{1}$$

$$N_c=A_c f_c \tag{2}$$

$$N_{uhpc}=A_u f_u \tag{3}$$

$$R=1+100\frac{D\rho_v}{tf_u} \tag{4}$$

$$\varphi_l=\begin{cases}0.658^{\lambda_n^2},\lambda_n\leqslant 1.5\\ \dfrac{0.877}{\lambda_n^2},\lambda_n>1.5\end{cases} \tag{5}$$

$$\lambda_n=\frac{\lambda}{\pi}\sqrt{\frac{A_u f_u+f_c A_c+A_c\sqrt{\rho_c f_c f_u}}{E_s A_u+E_c A_c}} \tag{6}$$

$$\rho_c=\frac{A_u}{A_c} \tag{7}$$

$$\lambda=\frac{4l_0}{D} \tag{8}$$

式中：A_c为核心混凝土的横截面面积；f_c为内部混凝土轴心抗压强度；A_u为UHPC外管的横截面面积；f_u为UHPC轴心抗压强度；ρ_v为试件的配箍率；D为试件外径；t为UHPC外管厚度；ρ_c为组合柱截面含UHPC率；E_c为核心混凝土弹性模量；E_s为UHPC弹性模量；λ为长细比；λ_n为相对长细比；l_0为柱的计算长度。

5.1.2　偏心折减系数计算方法

UHPC-NC组合柱具有钢管混凝土柱的受力特点，其偏心折减系数φ_c的计算方法可参考已有规范。本文参考《钢管混凝土拱桥技术规范》GB 50923—2013[22]中的偏心折减系数计算公式，如下所示：

$$\varphi_c=\begin{cases}\dfrac{1}{1+1.85e_0/r_c},e_0/r_c\leqslant 1.55\\ \dfrac{0.4}{e_0/r_c},e_0/r_c>1.55\end{cases} \tag{9}$$

式中：e_0为截面偏心距；r_c为混凝土截面半径。

5.2　已有试验验证

为验证该计算方法的合理性，笔者采用本文提出的计算方法对本文和文献[23]～[26]中共27根试件进行计算，计算值与试验值的对比见图18。由图18可以看出，计算误差基本控制在±15%内，计算值与试验值之比的均值为0.945、均方差为0.069。由此可见，在现有国内相关试验的参数范围内，本文建立的UHPC-NC组合柱承载力计算公式合理，且计算精度较高。

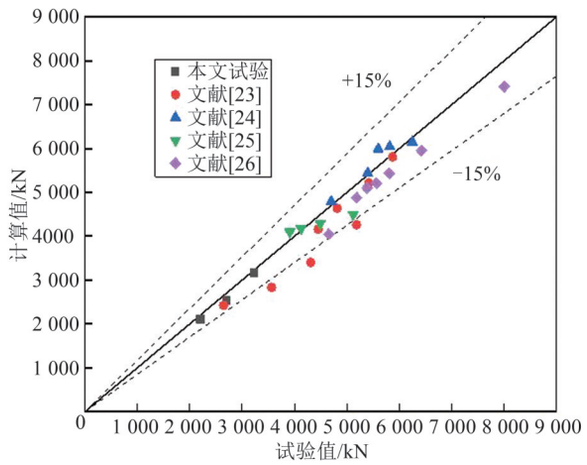


图 18 极限承载力的计算值与试验值对比

Fig.18 Comparison between calculated values and test values of ultimate bearing capacity

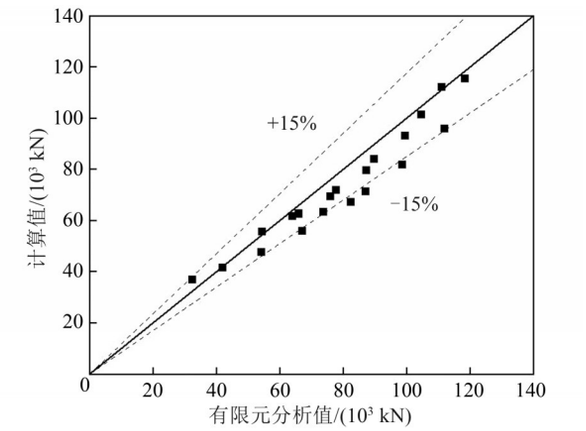


图 19 极限承载力的计算值与有限元分析值对比

Fig.19 Comparison between calculated and finite element analysis values of ultimate bearing capacity

5.3 工程实例验证

为进一步验证本文采用的UHPC-NC组合柱极限承载力计算方法的准确性和工程适用性,本文以平潭跨海大桥的引桥桥墩为研究对象,具体设计参数如表4所示。

表 4 实桥工程计算参数

Table 4 Calculation parameters of the real bridge project

设计参数	数值
桥墩直径/mm	2 000
桥墩高度/mm	6 400
UHPC厚度/mm	100
配箍率/%	0.15
配筋率/%	0.71
UHPC强度/MPa	120
混凝土强度/MPa	40
钢筋屈服强度/MPa	420

依据表4建立有限元模型,分析实际工程中较常出现的偏心率和长细比(e取0~0.4,λ取2~15)对构件极限承载力的影响规律,并与本文公式的计算结果进行对比,如图19所示。由图19可知,公式计算值与有限元分析值之比的均值为0.926、均方差为0.079,误差基本控制在±15%内,说明本文提出的组合柱极限承载力计算方法适用于实际桥墩工程,且计算精度良好。

5.4 UHPC-NC组合柱偏压极限承载力计算方法

根据上述分析,将UHPC-NC组合柱极限承载力计算公式进行总结,轴压柱、偏压柱极限承载力具体计算公式如下:

1)UHPC-NC组合柱轴压极限承载力N_u:

$$N_u=\varphi_l R(N_{uhpc}+N_c)$$

$$N_c=A_c f_c$$

$$N_{uhpc}=A_u f_u$$

$$R=1+100\frac{D\rho_v}{tf_u}$$

$$\varphi_l=\begin{cases}0.658^{\lambda_n^2},\lambda_n\leqslant 1.5\\ \dfrac{0.877}{\lambda_n^2},\lambda_n>1.5\end{cases}$$

$$\lambda_n=\frac{\lambda}{\pi}\sqrt{\frac{A_u f_u+f_c A_c+A_c\sqrt{\rho_c f_c f_u}}{E_s A_u+E_c A_c}}$$

$$\rho_c=\frac{A_u}{A_c}$$

$$\lambda=\frac{4l_0}{D}$$

2)UHPC-NC组合柱偏压极限承载力N_e:

$$N_e=\varphi_c N_u$$

$$\varphi_c=\begin{cases}\dfrac{1}{1+1.85e_0/r_c},e_0/r_c\leqslant 1.55\\ \dfrac{0.4}{e_0/r_c},e_0/r_c>1.55\end{cases}$$

6 结论

本文通过对UHPC-NC组合柱开展偏压试验、有限元模拟分析和承载能力研究,得到以下结论:

1)偏心作用下,组合柱的破坏模式主要为受压侧UHPC压碎、受拉侧开裂、受压侧纵筋屈服,中截面处的挠度值最大。随着试件偏心率增大,组合柱侧弯现象更加明显。

2)偏心率对于组合柱的承载和变形能力有显著影响。当偏心率从0上升到0.2时,组合柱极限承载力下降了31.8%、柱中挠度值增大了121.1%。试

件的偏心率越大，受压刚度越小，刚度退化越缓慢，UHPC外管对核心混凝土的紧箍效应越早出现。

3）有限元模拟得到的破坏形态、荷载-位移曲线均与试验结果基本一致，计算与试验的误差均控制在5%范围内。有限元参数分析表明，偏心率、长细比、UHPC强度、UHPC外管厚度和核心混凝土强度是影响UHPC-NC组合柱偏压性能的重要参数。UHPC强度、UHPC外管厚度和核心混凝土强度增大，组合柱承载力提升；偏心率和长细比增大，组合柱承载力下降。配箍率对组合柱极限承载力影响较小。

4）在试验研究和有限元分析结果的基础上，参考相关设计规程中偏心折减系数的计算公式，总结得到UHPC-NC组合柱偏压极限承载力实用算法。公式计算结果与试验值吻合良好，并得到工程实例的计算验证。

参考文献：

[1] 陈宝春，季韬，黄卿维，等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报，2014，31(3)：1-24.
CHEN Baochun，JI Tao，HUANG Qingwei，et al. Review of research on ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering，2014，31(3)：1-24.

[2] 邵旭东，邱明红，晏班夫，等. 超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的研究与应用进展[J]. 材料导报，2017，31(23)：33-43.
SHAO Xudong，QIU Minghong，YAN Banfu，et al. A review on the research and application of ultra-high performance concrete in bridge engineering around the world[J]. Materials Review，2017，31(23)：33-43.

[3] 陈宝春，韦建刚，苏家战，等. 超高性能混凝土应用进展[J]. 建筑科学与工程学报，2019，36(2)：10-20.
CHEN Baochun，WEI Jiangang，SU Jiazhan，et al. State-of-the-art progress on application of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering，2019，36(2)：10-20.

[4] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报，2021，34(2)：1-97.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research：2021[J]. China Journal of Highway and Transport，2021，34(2)：1-97.

[5] 胡源. 活性粉末混凝土预制管混凝土组合柱轴心抗压性能研究[D]. 长沙：湖南大学，2015.
HU Yuan. The axial compressive performance study of a reactive powder concrete precast tube concrete composite columns[D]. Changsha：Hunan University，2015.

[6] BESCHI C，MEDA A，RIVA P. Column and joint retrofitting with high performance fiber reinforced concrete jacketing[J]. Journal of Earthquake Engineering，2011，15(7)：989-1014.

[7] 陈扬弘. U-RC组合墩试设计研究[D]. 福州：福州大学，2016.
CHEN Yanghong. Study on trial design of U-RC composite pier[D]. Fuzhou：Fuzhou University，2016.

[8] 舒田宇，谢剑，杨丽. UHPC加固混凝土柱轴压性能研究[C]// 第28届全国结构工程学术会议论文集（第Ⅲ册）. 南昌：工程力学，2019：388-393.
SHU Tianyu，XIE Jian，YANG Li. Study on axial compression performance of UHPC reinforced concrete columns[C]// Proceedings of the 28th National Conference on Structural Engineering (Volume Ⅲ). Nanchang：Engineering Mechanics Press，2019：388-393.

[9] 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.
YANG Yibo，YANG Kaiyue，WU Zhihao，et al. An experimental study on the influence of reinforced ultra-high performance concrete permanent template to short column's mechanical property[J]. Materials Review，2017，31(23)：120-124.

[10] 陶剑剑. 活性粉末混凝土加固RC柱轴压性能试验研究[D]. 长沙：湖南大学，2013.
TAO Jianjian. Experimental study on bearing performance of reactive powder concrete reinforced column subjected to axial load[D]. Changsha：Hunan University，2013.

[11] 艾毓玮. RUHPC及其复合构件承载性能分析[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
AI Yuwei. Bearing behavior analysis of RUHPC and composite structural member[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2020.

[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S]. 北京：中国标准出版社，2015.
General Administration of Quality Supervision，Inspection and Quarantine of the People's Republic of China，Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 31387-2015，Reactive Powder Concrete[S]. Beijing：Standards Press of China，2015.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部，国家市场监督管理总局. GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[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, State Administration for Market Regulation. GB/T 50081-2019 Standard for Test Methods of Concrete Physical And Mechanical Properties[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 50152-2012 Standard for Test Method of Concrete Structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[15] 刘祖强, 周志明, 薛建阳, 等. 高强型钢超高性能混凝土短柱轴压性能试验及其有限元分析[J]. 工程力学, 2024, 41(8): 211-227.
LIU Zuqiang, ZHOU Zhiming, XUE Jianyang, et al. Experimental study and finite element analysis on axial compression performance of high strength steel reinforced ultra-high performance concrete short column[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(8): 211-227.

[16] 陈卫. 超高性能轻型组合桥面UHPC-TPO层间温度应力研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
CHEN Wei. Study on temperature stresses between UHPC-TPO layers of ultra-high performance lightweight combined bridge deck[D]. Changsha: Hunan University, 2018.

[17] AFGC-SETRA Working Group. Ultra high performance fiber-reinforced concrete: interim recommendations[R]. Paris: AFGC, 2002:40-56.

[18] 马亚峰. 活性粉末混凝土(RPC200)单轴受压本构关系研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
MA Yafeng. Study on constitutive relationship of 200 MPa reactive powder concrete under uni-axial compression[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.

[19] 杨志慧. 不同钢纤维掺量活性粉末混凝土的抗拉力学特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
YANG Zhihui. Study on tension mechanical performance of reactive powder concrete in different steel fiber volume fractions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 5010-2010 Code for Design of Concrete Structures[S]. Beijing China Architecture & Building Press, 2015.

[21] 颜建煌. UHPC预制管混凝土组合柱极限承载力研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2022.
YAN Jianhuang. Study on ultimate bearing capacity of concrete-filled UHPC tube composite columns[D]. Fuzhou: Fujian University of Technology, , 2022.

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50923—2013 钢管混凝土拱桥技术规范[S].北京:中国计划出版社,2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 50923-2013 Technical Code for Concrete-filled Steel Tube Arch Bridges[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.

[23] 林世杰. RU-NC组合长柱极限承载力试验研究[D]. 福州: 福州大学, 2021.
LIN Shijie. Study on ultimate bearing capacity of RU-NC composite long columns[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2021.

[24] 陈庆熠. RU-NC组合短柱轴压力学性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2019.
CHEN Qingyi. Study on axial pressure behavior of RU-NC composite short columns[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2019.

[25] 刘志. RPC预制管混凝土组合柱抗震性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
LIU Zhi. Experimental research on seismic behavior of concrete-filled RPC tube[D]. Changsha: Hunan University, 2016.

[26] 罗校炳. RPC预制管混凝土组合短柱轴压性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
LUO Xiaobing. Experimental study on concrete-filled RPC tube under axial compressive loadings[D]. Changsha: Hunan University, 2017.

(编辑:贾丽娜)