

UHPC-NC 组合柱轴压极限承载力

林上顺^{1,2}, 陈超^{1,2}, 程章宏³

- (1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;
2. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118;
3. 福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350004)

摘要: 采用配筋的超高性能混凝土(UHPC)圆筒为模板, 并内浇普通混凝土(NC)的 UHPC-NC 组合柱, 具有强度高、耐腐蚀等优点。基于现有承载力计算方法并结合理论分析, 提出 UHPC-NC 组合柱轴压承载力简化计算方法。分别采用所提方法和他人的计算方法, 计算所收集试件的轴压承载力, 结果表明: 所提方法的计算值与试验值的比值均值为 1.023, 方差为 0.005, 与有限元拓展参数值对比误差也均在 10%以内, 其计算精度较高。相关研究可为 UHPC-NC 组合柱在实际工程的推广应用提供参考。

关键词: UHPC-NC 组合柱; 轴压承载力; 计算精度; 试验值; 有限元分析

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)04-0323-08

Ultimate load capacity of UHPC-NC combined column under axial pressure

LIN Shangshun^{1,2}, CHEN Chao^{1,2}, CHENG Zhanghong³

- (1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Information in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China;
3. Fujian Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350004, China)

Abstract: The UHPC-NC composite column, which uses a reinforced ultra-high performance concrete (UHPC) cylinder as a formwork and is internally cast with normal concrete (NC), has advantages such as high strength and corrosion resistance. Based on the existing bearing capacity calculation methods and combined with theoretical analysis, a simplified calculation method for the axial compression bearing capacity of UHPC-NC composite columns is proposed. The axial compression bearing capacity of the collected specimens was calculated using the proposed method and other calculation methods. Results show that the mean value of the ratio of the calculated value to the test value by the proposed method is 1.023, with a variance of 0.005. The comparison error with the finite element extended parameter value is also within 10%. The calculation accuracy is relatively high. The relevant research can provide reference for the promotion and application of UHPC-NC composite columns in practical engineering.

Keywords: UHPC-NC combined column; axial compressive load capacity; calculation accuracy; test value; finite element analysis

随着跨海大桥的广泛建设, 近海桥墩的冲刷和腐蚀问题日益凸显, 尤其在海洋环境中, 桥墩受到盐分、潮湿以及波浪的长期作用, 加速混凝土表面产生裂缝和剥落^[1], 严重影响桥梁结构的承载

力和使用寿命^[2]。

相较于普通海工混凝土, 超高性能混凝土(UHPC)不仅显著提升了拉压强度, 在耐久性、抗渗透性和抗腐蚀性等方面也有优异表现^[3], 其性

能符合沿海环境对桥墩抗冲刷特性的要求,能够有效抵抗海水侵蚀、延缓桥墩的腐蚀。目前,UHPC 已被大量运用于公路工程领域。对于桥墩冲刷问题,部分学者综合考虑施工便利性、施工成本等因素,提出以 UHPC 作为永久外模,内浇普通混凝土(NC)的施工方式,结合试验研究发现,UHPC-NC 组合桥墩的承载力满足现行规范要求,同时可节省一定工程造价^[4-5]。黄卿维等^[6]以 UHPC 圆管厚度、箍筋间距等为参数,进一步开展了外包 UHPC 的组合柱的轴心受压试验,结果表明配筋的 UHPC 圆管对组合柱承载力性能提高明显,UHPC 壳厚度、配筋率等均与承载力呈线性正相关关系。欧智菁等^[7]以 UHPC-NC 组合柱长细比和 UHPC 管配箍率为试验参数,发现配筋 UHPC-NC 组合柱能有效改善钢筋混凝土柱的压溃现象和 UHPC 脆性特征,且长细比对桥墩的抗裂性能和延性均有一定影响。梅葵花等^[8]开展了不同浇筑方式对 UHPC-NC 组合柱轴压性能的影响,并引入施工影响系数。

关于 UHPC-NC 组合柱承载力计算尚未有相关规范和标准,若采用《混凝土结构设计标准》(2024 版)^[9](GB/T 50010—2010)的轴压承载力计算方式,对于 UHPC 圆管高强性能对核心混凝土的约束作用则未能充分考虑。对此,国内外学者已提出一些 UHPC-NC 组合柱的轴压承载力计算方法,但各算法间存在明显差异。为此,本研究在系统收集现有试验资料的基础上,分析现有计算方法的计算精度结合理论推导,提出计算精度

更高的 UHPC-NC 组合柱的轴压极限承载力的实用计算方法,为 UHPC-NC 组合柱在工程应用中提供轴压承载力计算参考。

1 UHPC-NC 组合柱试验研究

本研究从文献[10]~[13]中收集 20 根 UHPC-NC 组合柱进行分析,所有试件均为轴心受压短柱,试件破坏模式与钢筋混凝土短柱类似,即主要为中截面向外鼓曲并压碎。试件截面如图 1。其中, A_s' 为纵筋面积; A_{cor} 为核心区混凝土面积; A_{u1} 为箍筋内层 UHPC 面积; A_{u2} 为箍筋外层 UHPC 面积。试件基本参数如表 1 所示。表中, D 为截面直径; H 为试件高度; t 为 UHPC 壳厚度; s 为箍筋间距; ρ 为试件配箍率; f_{co} 为无约束混凝土抗压强度; f_{uhpc} 为无约束 UHPC 抗压强度; f_{yv} 为箍筋屈服强度; N_u 为试件轴压极限承载力,后文相同变量含义相同。其中,文献[10]~[12]中螺旋箍筋均选用高强度的光面 65 锰弹簧钢,文献[13]配置箍筋为 HPB300 光圆钢筋。

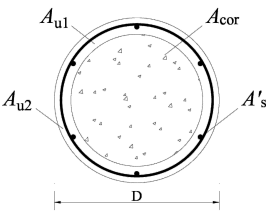


图 1 UHPC-NC 组合柱示意图

Fig.1 Schematic diagram of UHPC-NC composite column

表 1 试件参数
Tab.1 Specimen parameters

数据来源	试件编号	D / mm	H / mm	t / mm	s / mm	ρ / %	f_{co} / MPa	f_{uhpc} / MPa	f_{yv} / MPa	N_u / kN
文献[10]	CFRT-20,15	300	600	15	20	1.99	42.8	91.7	1 255	6 543
	CFRT-20,25	300	600	25	20	2.06	43.6	93.3	1 255	6 625
	CFRT-20,20	300	600	20	20	2.02	43.3	92.5	1 255	6 573
	CFRT-40	300	600	20	40	1.01	42.7	89.8	1 255	5 123
	CFRT-60	300	600	20	60	0.67	42.3	92.1	1 255	4 492
	CFRT-80	300	600	20	80	0.51	42.2	91.5	1 255	4 125
	CFRT-100	300	600	20	100	0.40	42.5	90.3	1 255	3 911

续表

数据来源	试件编号	D/mm	H/mm	t/mm	s/mm	$\rho/\%$	f_{co}/MPa	f_{uhpc}/MPa	f_{yv}/MPa	N_u/kN
文献[11]	CFRT-30-20-N	300	600	25	20	2.06	24.5	103.5	995	4 657
	CFRT-60-20-N	300	600	25	20	2.06	52.1	103.5	995	6 425
	CFRT-80-20-N	300	600	25	20	2.06	73.2	104.4	995	8 008
	CFRT-60-40-N	300	600	25	40	1.03	54.6	104.4	995	5 809
	CFRT-60-60-N	300	600	25	60	0.68	53.8	108.4	995	5 567
	CFRT-60-80-N	300	600	25	80	0.51	54.6	105.8	995	5 384
	CFRT-60-100-N	300	600	25	100	0.41	52.2	104.4	995	5 190
文献[12]	CFUT-S20-1a	242	500	26	20	2.70	41.1	110.5	1 550	4 966
	CFUT-S35-1	242	500	26	35	1.53	41.1	110.5	1 550	4 135
	CFUT-S50-1	242	500	26	50	1.07	41.1	110.5	1 550	3 755
文献[13]	US2.6-λ6.6-E0	242	800	31	20	2.60	26.7	103.3	319	3 238
	US0.9-λ6.6-E0	242	800	31	60	0.90	26.7	103.3	319	2 805
	US0.5-λ6.6-E0	242	800	31	100	0.50	26.7	103.3	319	2 553

2 UHPC-NC 组合柱轴压承载力计算方法

UHPC-NC 组合柱约束方式同普通箍筋约束的高强度混凝土柱类似。在轴向压力作用下, UHPC 层和核心区混凝土协同作用, 外层 UHPC 圆管由于其高强度和良好的韧性, 可以有效约束核心混凝土产生过度的横向膨胀。随着破坏的加剧, 核心区混凝土可能由于荷载过大而发生压碎或局部裂缝扩展, 外层 UHPC 继续承载, 但整体结构的承载力逐渐下降, 最终导致整个结构的破坏, UHPC-NC 组合柱达到极限承载力。本研究参考混凝土结构加固设计规范^[14]中增大截面以加固 RC 轴心受压构件的计算方法, 将 UHPC-NC 组合柱轴心受压承载力主要分为核心区混凝土贡献、UHPC 层贡献和纵向受力钢筋贡献。建立轴压承载力计算公式为:

$$N_u \leq 0.9(N_1 + N_2 + N_3 + N_4) \leq 0.9(f'_{co}A_{cor} + f'_{uhpc}A_{u1} + f'_{uhpc}A_{u2} + f'_sA_s)$$

(1)

式中 f'_{co} 为约束后混凝土应力; f'_{uhpc} 为约束后 UHPC 强度; f'_s 为纵筋屈服强度。

2.1 内部核心混凝土

内部核心区混凝土受到 UHPC 层与螺旋箍筋的双重强约束作用, 核心区混凝土由轴向压应

力以及来自外包层的横向压应力共同构成三向应力状态, 提高了混凝土的抗压强度和塑性变形能力。参考文献[15], 对 UHPC 管进行受力分析(如图 2), 可得 UHPC 圆管的径向压应力 σ_r 为:

$$\sigma_r = \frac{f_{yv}A_{sv0}}{2A_{cor}}$$

(2)

$$A_{sv0} = \frac{2\sigma_f}{f_{yv}}A_{cor}(\gamma - 1) + \frac{A_{sv1} \cdot \pi d_{cor}}{s}$$

(3)

式中, A_{sv1} 箍筋截面面积; A_{sv0} 为考虑钢纤维和箍筋的换算截面面积; σ_f 为 UHPC 环向拉应力; γ 为组合柱外径与内径比值; d_{cor} 为核心区混凝土直径。

由混凝土三轴抗压强度计算, 外包 UHPC 圆管约束后内核心混凝土的强度为:

$$f'_{co} = f_{co} + 4\sigma_r$$

(4)

由核心混凝土提供的承载力为:

$$N_1 = f'_{co}A_{co}$$

(5)

2.2 UHPC 强度计算

UHPC 对于组合柱承载力贡献可分为箍筋内受约束区和箍筋外非约束区。对于约束区 UHPC, 采用 Mander 约束理论计算。

$$f'_{uhpc} = f_{uhpc} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_l}{f_{uhpc}}} - 2 \frac{f'_l}{f_{uhpc}} \right)$$

(6)

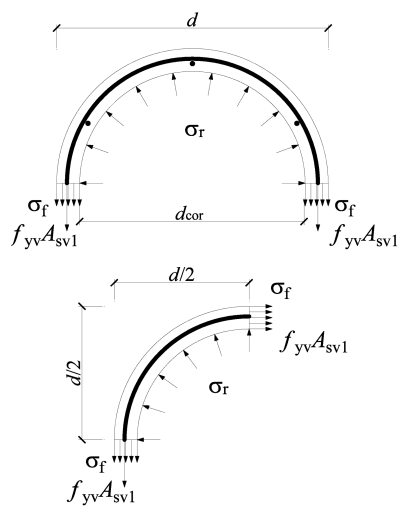


图 2 UHPC 壳受力简图

Fig.2 Simplified force diagram of UHPC shell

$$f_1' = f_1 k_e \tag{7}$$

$$f_1 = \frac{1}{2} \rho_s f_{yv} \tag{8}$$

$$k_e = \frac{1 - \frac{s}{2d_s}}{1 - \rho_{cc}} \tag{9}$$

$$N_2 = f_{uhpc}' A_{u1} \tag{10}$$

式中, k_e 为有效约束系数; f_1 为混凝土约束应力; f_1' 为有效约束应力; s 为箍筋垂直净距; ρ_s 和 ρ_{cc} 分别为体积配箍率和纵筋配筋率; d_s 为箍筋直径。

箍筋外 UHPC 主要承担的轴向荷载可通过其截面面积 A_{u2} 和抗压强度 f_{uhpc} 来计算, 其提供的轴压承载力 N_3 的计算式如式 (11) 所示。

$$N_3 = f_{uhpc} A_{u2} \tag{11}$$

UHPC-NC 组合柱中, 钢筋与混凝土协同作用, 延缓构件破坏, 其中由纵向受力钢筋提供的承载力 N_4 为纵筋屈服强度 f_s' 与纵筋面积 A_s' 决定, 如式 (12)。

$$N_4 = f_s' A_s' \tag{12}$$

2.3 计算精度分析

将收集的 20 根 UHPC-NC 组合柱相应数据带入承载力计算公式, 与实验值对比分析验证计算公式的准确性, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, 本研究所建立的 UHPC-NC 组合柱承载力计算公式, 试验结果较贴合, 计算值与实测值比值平均值为 1.023, 方差为 0.005, 所提公式的计算荷载值接近实测值, 说明数据离散性更小, 计算结果较为

稳定。

同时收集文献 [13] 中有限元参数拓展分析值共计 20 个, 进一步验证公式精确度, 参数包括 UHPC 强度、配箍率、箍筋屈服强度、混凝土强度。其中 UHPC 强度参数包括 100、110、120、130、140 MPa; 配筋率参数为 0.5%、1.0%、1.5%、2%、2.6%; 箍筋配筋强度为 240、300、360、420、480 MPa; 混凝土强度为 30、40、50、60、70 MPa, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 根据本研究所提公式计算的结果与有限元分析结果的误差大多数低于 10%。

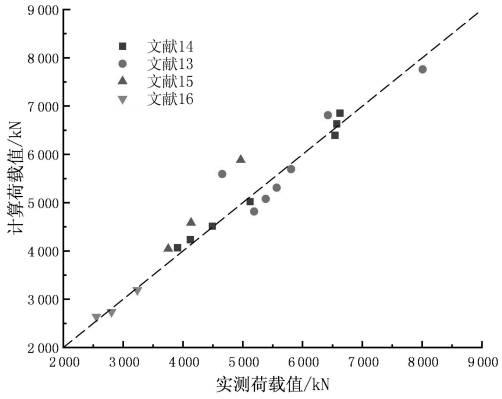


图 3 本文方法计算值与试验值的比较

Fig.3 Comparison between calculated values using the proposed method and experimental results

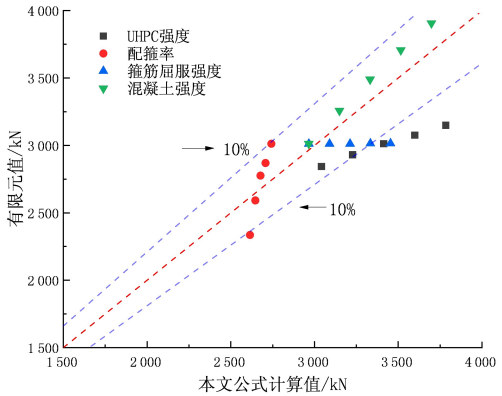


图 4 本文方法计算值与有限元值比较

Fig.4 Comparison between calculated values using the proposed method and finite element results

3 现有计算方法的计算精度分析

3.1 计算方法介绍

3.1.1 Mander 计算方法

Mander 模型^[16]是用于计算受约束混凝土强度的常用模型, 通过考虑横向约束 (如箍筋) 对混

凝土强度和延性的增强作用,提出了具体的应力-应变关系,反映约束程度对混凝土性能的影响,广泛应用于钢筋混凝土柱强度计算,具体公式为:

$$f'_{co} = f_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_1}{f_{co}} - 2 \frac{f'_1}{f_{co}}} \right) \quad (13)$$

$$f'_1 = f_1 k_e \quad (14)$$

$$f_1 = \frac{1}{2} \rho_s f_{yv} \quad (15)$$

$$k_e = \frac{1 - \frac{s}{2d_s}}{1 - \rho_{cc}} \quad (16)$$

$$N_u = f'_{co} A_{cor} + f'_s A_s \quad (17)$$

式中, f_1 为约束应力; f'_1 为混凝土的有效约束应力; s 为箍筋垂直净距; ρ_s 和 ρ_{cc} 分别为体积配箍率和纵筋配筋率。

3.1.2 Lam and Teng 算法

Lam and Teng 等^[17]基于 FRP 约束下的组合圆柱试验研究,建立了受 FRP 约束的混凝土抗压强度计算方法,具体计算如式(18)和式(19)所示。将计算所得混凝土约束应力代入式(17)得到承载力计算值。

$$\frac{f'_{co}}{f_{co}} = 1 + 2.15 \frac{f_1}{f_{co}}, \quad \frac{f_1}{f_{co}} \geq 0.7 \quad (18)$$

$$\frac{f'_{co}}{f_{co}} = 1, \quad \frac{f_1}{f_{co}} < 0.7 \quad (19)$$

3.1.3 罗校炳算法

罗校炳^[11]基于 Mander 约束模型的机理,加入考虑外包的 UHPC 层对于 UHPC-NC 组合柱承载力的贡献,提出 UHPC-NC 轴向承载力计算方法,组合柱约束效应如图 5,同时按照 Mander 模型,对箍筋的有效约束区进行优化设计,组合柱轴压承载力 N_u 的具体计算公式为:

$$N_u = f_{uhpc} A_1 + f'_{uhpc} A_2 + f'_{co} A_{cor} \quad (20)$$

$$A_{u1} = \alpha A_1 \quad (21)$$

$$A_{u2} = (1 - \alpha) A_1 \quad (22)$$

$$A_{cor} = \pi d_{cor}^2 / 4 \quad (23)$$

$$A_1 = (D^2 - d_{cor}^2) \pi / 4 \quad (24)$$

$$\alpha = \frac{D^2 - (d_c + t - s/2)^2}{D^2 - d^2}, \quad t > s/2 \quad (25)$$

$$\alpha = 1, \quad t < s/2 \quad (26)$$

式中, A_1 为 UHPC 管的截面面积; α 为 UHPC 截面

面积系数; s 为箍筋间距; D 为组合柱直径; t 为 UHPC 壳厚度。

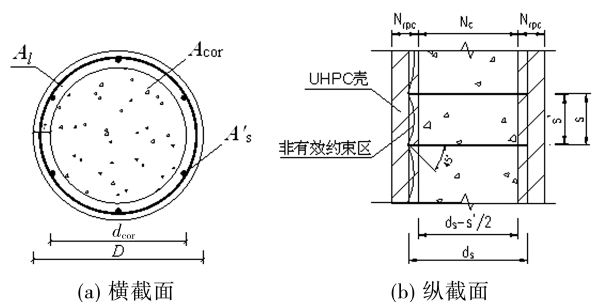


图5 组合柱约束示意图

Fig.5 Schematic diagram of composite column confinement

3.1.4 艾毓玮算法

艾毓玮^[15]通过理论推导,在考虑 UHPC 和普通混凝土协同作用时,将 UHPC 中的钢纤维换算成箍筋进行考虑,细化了外层 UHPC 对核心区混凝土的约束效应,通过力学原理和理论分析,推导出了配筋 UHPC-NC 复合柱的轴压承载力计算方法,具体计算公式如:

$$N_1 = f_{co} A_{cor} \quad (27)$$

$$N_2 = f_{uhpc} \left(D^2 - \frac{\pi}{4} d_{cor}^2 \right) \quad (28)$$

$$N_3 = f'_s A'_s \quad (29)$$

$$N_4 = 2 \frac{(D - 2c)^2}{d_{cor}^2} f_{yv} A_{sv0} \quad (30)$$

$$A_{sv0} = \frac{(A_{sv1} + A_{sf}) \pi d_{cor}}{s} \quad (31)$$

$$A_{sf} = \frac{(D^2 - d_{cor}^2) s V_f}{4(D - 2c)} \quad (32)$$

$$N_u \leq 0.9(N_1 + N_2 + N_3 + N_4) \quad (33)$$

式中, c 为保护层厚度; A_{sv0} 为螺旋箍筋和钢纤维换算截面面积; A_{sv1} 为单根箍筋截面面积; A_{sf} 为钢纤维等效螺旋箍筋面积; V_f 为钢纤维体积掺量。

3.2 现有计算方法的比较与分析

按各算法计算的 UHPC-NC 柱轴心抗压承载力的结果如图 6 所示。不同计算方法计算出的试件轴压承载力计算值与实测值之间存在一定的差异,前 3 种算法计算数值大多低于实际值,实际工程中安全富余度高。艾毓玮算法的计算值均高于试验值,说明其对于组合柱承载能力预估较为偏高。从计算结果分析,罗校炳提出的算法计算结果平均值较为接近 1,为 0.900,即计算荷载值更接近实测值,二者比值的方差为 0.011,说明数据

离散性较小,计算结果较为稳定;Mander 算法和 Lam 算法的公式计算值其计算值和试验值的比值均值分别为 0.822 和 0.740,均显著低于试验值,说明这两种方法对于 UHPC-NC 组合柱的计算较

为保守;艾毓玮算法的计算结果较大于实测值,二者比值的均值为 1.458,方差为 0.024,表明该算法的离散型较大。

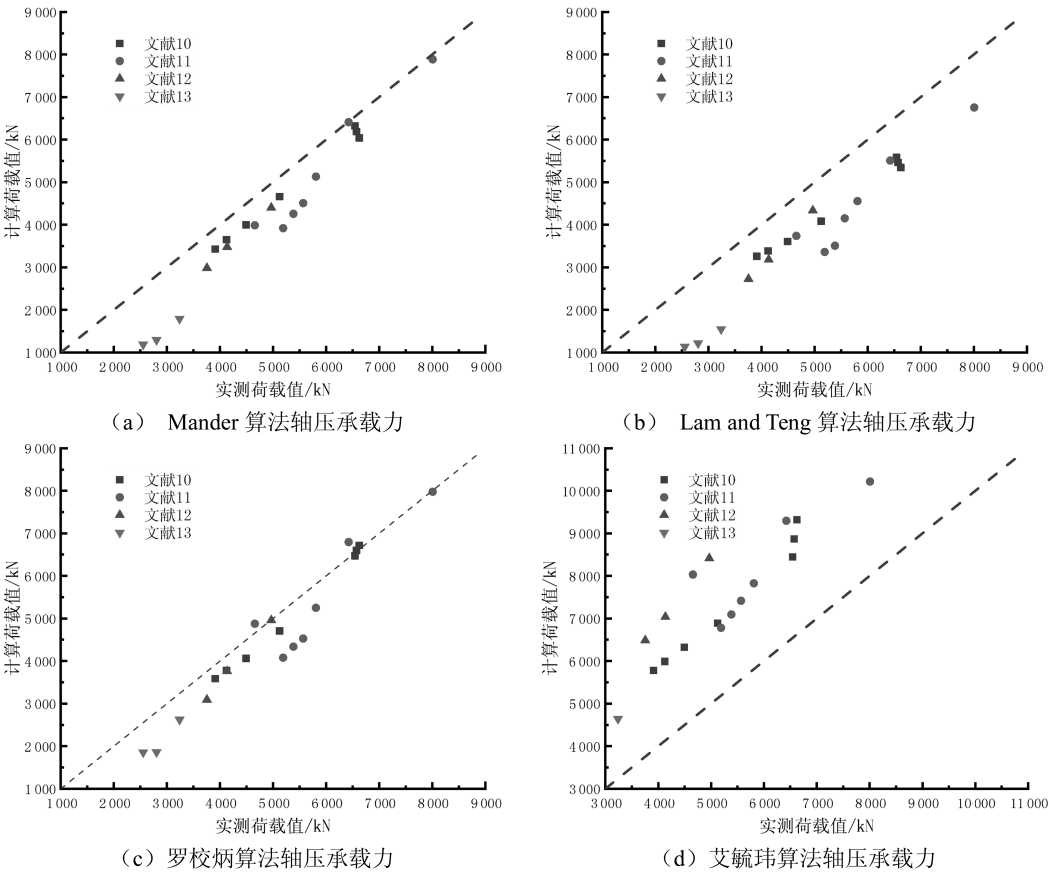


图 6 组合柱轴压承载力计算值与试验值的比较

Fig.6 Comparison of calculated and tested values of axial compressive load capacity of combined columns

图 7 对文献[10]中不同配筋率下的轴压承载力进行研究。结果表明,随着配筋率的提高,轴压承载力也随之增大,整体呈线性趋势,其中,罗校炳算法和 Mander 算法在不同配筋率下计算值和实测值相差不大,Lam 算法随着配筋率的增大,计算值和实测值的差值呈逐渐增大的趋势。图 8 根据文献[11]中不同混凝土强度下组合柱的相关参数,对各算法计算值和实测值进行对比分析,发现随着混凝土强度的增大,组合柱的抗压承载力也随之增大,且计算值和实测值的差值逐渐缩小,主要原因是由于随着核心区混凝土强度的增大,UHPC 壳所承担的轴向荷载占总承载力的比值逐渐减小。

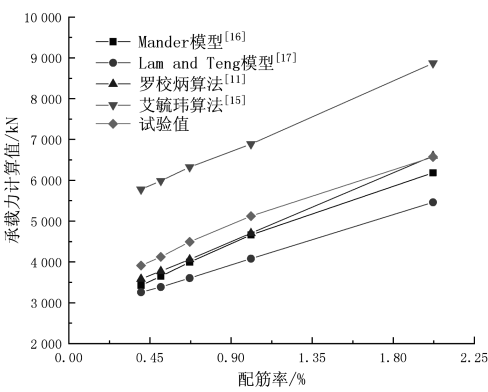


图 7 不同配筋率下组合柱计算值与试验值比较

Fig.7 Comparison of calculated and tested values of combined columns with different reinforcement rates

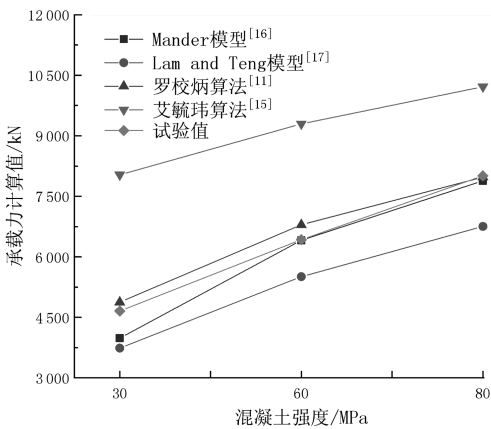


图 8 不同混凝土强度下组合柱计算值与试验值比较
Fig.8 Ratio of calculated to tested values for combined columns with different concrete strengths

3.3 讨论

相较于普通钢筋混凝土柱,UHPC-NC 组合柱受力由外层 UHPC 和内部核心混凝土共同作用,在极限状态下,外层 UHPC 的高强度和低变形特性均能有效减缓构件的破坏,增强其变形能力。现有算法中,Mander 模型算法主要针对单一的普通钢筋混凝土柱破坏模式提出的计算方法,其材料特性与 UHPC 存在较大差异,且不能有效预测外层 UHPC 和内层普通混凝土的协同作用。罗校炳算法基于 Mander 约束模型的机理,考虑了 UHPC 壳的承载能力和对核心区混凝土的约束,细化了箍筋有效区域的划分,其计算值相较于实测值较为接近。Lam and Teng 模型算法同 Mander 模型未能考虑非约束区域的 UHPC 壳对轴向承载力的贡献,计算值较小于实测值。艾毓玮模型算法在考虑 UHPC 壳和核心区混凝土共同作用下进一步考虑了钢纤维的加强作用,导致

其计算值高于实测值。本文算法在上述理论的基础上,结合 Mander 模型中对箍筋约束效应的计算方法,经理论推导得出的公式,其公式计算值与实测值比值平均值仅为 1.023,即相较于其他几种算法,本文公式的计算荷载值更接近实测值,二者比值的方差为 0.005,数据离散性更小,计算结果较为稳定。

4 结论

1)在收集一批 UHPC-NC 组合柱轴压承载力试验数据的基础上,结合理论推导,提出了 UHPC-NC 组合柱轴压承载力简化计算方法,并计算所收集的试验试件和有限元参数分析试件的轴压承载力,其计算值与试验值和有限元计算值的比值均值为 1.023,方差为 0.005,计算精度较高。

2)对他人计算方法的计算精度进行分析,发现 Mander 约束模型和 Lam and Teng 模型由于均未考虑峰值荷载下 UHPC 壳对核心混凝土的约束效应的贡献,计算值均低于实测值;罗校炳在 Mander 理论基础上引入 UHPC 壳强度对核心混凝土的影响系数,计算精度有所提升,但对于配置纵筋的组合柱试件计算结果稳定性不足;艾毓玮计算方法的数据点均位于直线上方,其计算结果比试验值稍大一些。

3)本文仅研究在墩柱全高范围外包 UHPC 的组合墩柱的轴压承载力计算,然而,实际工程中的桥墩,可能存在较多仅在桥墩易受到冲刷的部位,局部外包 UHPC 的组合墩柱,因此今后有待进一步开展局部外包 UHPC 的组合墩柱试验,为 UHPC-NC 组合柱在实际工程的推广应用提供参考。

参考文献:

[1] 宋慧敏. 水流冲刷引起的病害损伤对桥墩静动力特性的影响[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2022.
[2] 吴少峰. 河床冲刷对桥梁桩基承载力影响及安全评价分析[J]. 福建建设科技,2023(2):104-108.
[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.
[4] 林上顺,黄卿维,陈宝春,等. 跨海大桥 U-RC 组合桥墩设计[J]. 交通运输工程学报,2017,17(4):55-65.
[5] 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.
[6] 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.
[7] 欧智菁,陈玮悦,颜建煌,等. 配筋 UHPC 预制管混凝土组合柱轴压试验[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2024,60(2):253-261.
[8] 梅葵花,徐升宇,郭乐,等. UHPC-NC 组合短柱轴压性能[J/OL]. 中国公路学报,1-16[2024-11-20]. <http://kns.>

cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20240805.1411.002.html.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准:GB/T 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2024.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 彭振. 高强箍筋增强 UHPC 管约束混凝土组合柱轴压性能研究[D]. 南京:东南大学,2021.

[13] 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.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.

[15] 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.

[16] MANDER J B,PRIESTLEY M J N,PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering,1988,114(8):1804-1826.

[17] LAM L,TENG J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete[J]. Construction and Building Materials,2003,17(6/7):471-489.

(责任编辑:方素华)

(上接第 322 页)

[4] 冯青松,王子玉,刘全民,等. 双振源激励下地铁车辆段上盖建筑物振动特性[J]. 交通运输工程学报,2019,19(4):59-69.

[5] KUO K A,PAPADOPOULOS M,LOMBAERT G,et al. The coupling loss of a building subject to railway induced vibrations: numerical modelling and experimental measurements[J]. Journal of Sound and Vibration,2019,442:459-481.

[6] 汪益敏,刘品言,陶子渝,等. 地铁车辆段直线电机列车车致振动的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(9):2436-2443.

[7] CHEN Y M,FENG Q S,LIU Q J,et al. Experimental study on the characteristics of train-induced vibration in a new structure of metro depot[J]. Environmental Science and Pollution Research International,2021,28(30):41407-41422.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准:JGJ/T 170—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

[9] 赵彦辉. 地铁车辆段列车振动对邻近建筑物影响及隔振措施研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.

(责任编辑:陈雯)