

引文格式:王 朋,尤学辉,史庆轩,等. UHPC 免拆模板钢筋混凝土柱抗震性能参数分析及承载力计算[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(1): 41-50.

WANG Peng, YOU Xuehui, SHI Qingxuan, et al. Parameter analysis of seismic behavior and bearing capacity calculation of reinforced concrete columns with stay-in-place UHPC formwork[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(1): 41-50.

DOI:10.19815/j.jace.2023.04075

UHPC 免拆模板钢筋混凝土柱抗震性能参数分析及承载力计算

王 朋^{1,2}, 尤学辉¹, 史庆轩^{1,2}, 陶 毅^{1,2}, 戎 翀^{1,2}, 黄 杰¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要:为研究 UHPC 免拆模板钢筋混凝土柱在不同参数影响下的抗震性能, 基于 ABAQUS 软件中混凝土塑性损伤(CDP)模型, 考虑模板与后浇混凝土的界面接触滑移建立了数值分析模型; 讨论了轴压比、普通混凝土强度、配筋率和模板厚度等参数对 UHPC 免拆模板-RC 柱承载力和延性的影响; 基于平截面假定, 给出了 UHPC 免拆模板-RC 柱的承载力计算公式。结果表明: 建立的有限元模型能较好地模拟试件的承载力、骨架曲线和混凝土损伤情况; 随着轴压比的增大, 试件的承载力和延性均先增大后减小, 轴压比为 0.7 时承载力和延性均最高; 随着混凝土强度的提高, 试件的承载力逐渐增大, 但增长幅度却逐渐降低; 提高配筋率可以提高试件的承载力, 但对延性影响不大; 模板的厚度对试件的承载力和延性影响显著, 当模板厚度从 10 mm 增加到 25 mm 时, 试件的承载力提高了 24.1%, 但其延性降低了 43.8%, 在保证试件拥有足够的承载力和变形能力下, 建议 UHPC 模板厚度选择 15~20 mm; 基于平截面假定得到的承载力计算方法可以很好地预测试件的承载能力, 计算值与模拟值(试验值)的比值均值为 0.97, 标准差为 0.04。

关键词: UHPC 免拆模板; 钢筋混凝土柱; 抗震性能; 数值模拟; 承载力计算

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2025)01-0041-10

Parameter analysis of seismic behavior and bearing capacity calculation of reinforced concrete columns with stay-in-place UHPC formwork

WANG Peng^{1,2}, YOU Xuehui¹, SHI Qingxuan^{1,2}, TAO Yi^{1,2}, RONG Chong^{1,2}, HUANG Jie¹

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: To investigate the seismic behavior of reinforced concrete columns with stay-in-place UHPC formwork under the influence of various parameters, based on the concrete damage plastic (CDP) model in ABAQUS software, a numerical analysis model was established considering the bonding interface slip between formwork and concrete. The effect of axial compression ratio, ordinary concrete strength, reinforcement ratio and formwork thickness on the bearing capacity

收稿日期: 2023-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178159, 52178505, 52108171); 陕西省教育厅协同创新中心项目(23JY040)

作者简介: 王 朋(1987-), 男, 工学博士, 副教授, 博士生导师, E-mail: wangpeng@xauat.edu.cn.

and ductility of reinforced concrete columns with stay-in-place UHPC formwork were discussed. Based on the plane section assumption, a formula for predicting the bearing capacity of UHPC formwork-RC column was provided. The results show that the established finite element model can well simulate the bearing capacity, skeleton curve and concrete damage of the specimen. With the increase of axial compression ratio, the bearing capacity and ductility of specimen first increase and then decrease, and the bearing capacity and ductility reach the maximum when the axial compression ratio is 0.7. With the increase of concrete strength, the bearing capacity gradually increases, but the growth rate gradually decreases. Increasing the reinforcement ratio can enhance the bearing capacity of specimen, but it has little effect on ductility. The thickness of the formwork has a significant influence on the bearing capacity and ductility. When the formwork thickness is increased from 10 mm to 25 mm, the bearing capacity is increased by 24.1%, but its ductility is decreased by 43.8%. Under the condition that the specimen has sufficient bearing capacity and deformation capacity, it is suggested that the formwork thickness can be 15-20 mm. The bearing capacity calculation method based on the plane section assumption can well predict the bearing capacity of the specimen. The average ratio of the calculated value to the simulated value (test value) is 0.97, and the standard deviation is 0.04.

Key words: UHPC formwork; reinforced concrete column; seismic behavior; numerical simulation; bearing capacity calculation

Author resume: WANG Peng (1987-), male, PhD, associate professor, E-mail: wangpeng@xauat.edu.cn.

0 引言

超高性能混凝土(UHPC)是由水泥、细骨料、矿物掺合料、各种纤维材料等配置而成的水泥基复合材料。近年来,因具有强度高、耐久性和韧性好的特点^[1-3],UHPC被广泛应用于桥梁、水利工程、海洋工程以及结构加固等领域^[4-5]。然而,由于UHPC的生产制作成本远高于普通混凝土,其在房建项目中的应用较少,这在一定程度上限制了UHPC的发展与推广。

为此,部分学者将UHPC制作成免拆模板。采用免拆模板浇筑成型的构件不用拆模,模板能与构件形成整体共同受力,可以有效地节约施工时间^[6-11]。为了解UHPC模板组合构件的受力机理与破坏模式,学者们对UHPC免拆模板-RC构件的力学性能展开了系列研究。张一鹏等^[12-13]对UHPC免拆模板-RC梁的抗弯性能进行了研究,结果表明UHPC免拆模板-RC梁的承载力显著高于普通RC梁。夏洋等^[14-15]对UHPC模板-RC梁抗弯性能的研究也得到类似结论,且研究还发现UHPC模板可以减少梁身的裂缝数量,延缓裂缝发展速度。梁兴文等^[16-17]基于试验结果,给出了UHPC模板-RC梁的抗弯承载力和刚度计算方法。张锐等^[18]对无

腹筋的UHPC模板-RC梁的抗剪性能进行了研究,与无腹筋的普通RC梁相比,UHPC模板-RC梁的承载力提高了103.7%。

除了UHPC模板-RC梁外,部分学者研究了UHPC免拆模板-RC柱(以下简称URC柱)的轴压和抗震性能。单波等^[19-21]研究了UHPC模板-RC柱的轴压性能,研究结果表明UHPC模板可以显著提高柱的轴压承载力,改善试件的损坏程度。梁兴文等^[22]对URC柱的抗震性能研究发现,模板在往复荷载作用下容易出现剥离破坏,建议对模板表面进行粗糙处理,增强模板与后浇混凝土的黏结强度。Lin等^[23]采用UHPC模壳浇筑梁柱节点,并对节点的抗震性能进行了研究,结果表明,与普通试件相比,采用UHPC模板浇筑的试件承载力和延性均有明显的提升。

现有针对UHPC免拆模板-RC构件的研究多集中于静力学性能,对抗震性能的研究很少。王朋等^[24]在前期的工作中对采用UHPC免拆模板浇筑成型的RC柱进行了抗震性能研究,结果表明,URC柱具有较好的承载力和延性性能,能够满足抗震设计要求,但受试验条件等因素的影响,仅研究了模板的拼接方式和结合面粗糙程度对组合柱的影响,其他因素对组合柱的力学性能影响尚不明确。因此,

本文基于已有的试验结果建立了 URC 柱有限元模型,通过数值模拟方法研究了轴压比、核心混凝土强度、纵筋配筋率和模板厚度等参数对组合柱承载力和延性的影响,并给出了组合柱的承载力计算方法。

1 有限元模型

1.1 材料本构

1.1.1 混凝土本构

普通混凝土的本构模型采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[25]中推荐的混凝土拉、压本构模型。UHPC 受压本构模型上升段曲线采用郭晓宇等^[26]提出的本构曲线,下降段曲线采用闫光杰^[27]提出的本构曲线,其具体表达式为

$$y = \begin{cases} \frac{Ax}{1 + (A-1)x^{\frac{A}{A-1}}} & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{Bx}{1 + (B-2)x + x^2} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x = \epsilon_c / \epsilon_{co}$, ϵ_c 为任意点的压应变, ϵ_{co} 为峰值压应变; $y = \sigma_c / f_c$, σ_c 为任意点应力, f_c 为轴心抗压强度; $A = E_c \epsilon_{co} / f_c$; $0.193 \leq B \leq 0.287$, B 取 0.28。

UHPC 受拉本构采用胡翱翔等^[28]提出的 UHPC 单轴受拉本构模型,模型中的 UHPC 材料符合应变软化的特性,其具体表达式为

$$y = \begin{cases} \frac{Ax}{(A-1)x^{\frac{A}{A-1}} + 1} & 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{x}{0.025(x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x = \epsilon_t / \epsilon_{ct}$, ϵ_t 为任意点的拉应变, ϵ_{ct} 为峰值拉应变; $y = \sigma_t / f_t$, σ_t 为任意点应力, f_t 为抗拉强度; $A = E_c / E_0$, E_c 为混凝土初始弹性模量, E_0 为峰值点割线模量。

Sidoroff 于 1981 年提出了能量等效原理,认为作用在无损材料与受损材料上的应力所产生的弹性余能在形式上相同,只要将 Cauchy 应力改为等效应力,同时考虑刚度折减将初始弹性模量取为等效受损弹性模量。根据能量等效的假设,考虑混凝土塑性应变的损伤因子计算公式为

$$d_c(d_t) = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_c \epsilon}} \quad (3)$$

式中: $d_c(d_t)$ 为混凝土的受压(受拉)损伤因子; σ 为混凝土应力; ϵ 为混凝土应变。

1.1.2 钢材本构

URC 柱中的纵筋、箍筋和角钢均采用理想弹塑性本构模型,其表达式为

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \epsilon_s & \epsilon_s \leq \epsilon_y \\ f_y & \epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_u \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_s 为钢筋或角钢应力; ϵ_s 为钢筋或角钢应变; E_s 为钢筋或角钢弹性模量; ϵ_y 为钢筋或角钢的屈服应变; f_y 为钢筋或角钢的屈服强度; ϵ_u 为钢筋或角钢的极限应变。

1.2 接触与边界条件

UHPC 模板之间通过角钢与螺栓连接,模板与模板之间的接触较为复杂,根据试验的破坏情况可知,模板连接处在整个加载过程中无明显破坏,因此,为简化建模过程,提高有限元模型的收敛性,模板与模板的接触面采用“Tie”的方式绑定。

UHPC 模板与核心混凝土的接触面采用收敛性较好的“面-面接触”,即通过法向的硬接触和切向的库伦摩擦模拟模板与核心混凝土接触面的相互作用。由于模板表面采用了不同的处理方式,因此摩擦因数的选取存在一定差异。对于光面处理和设肋处理的试件,文献[29]指出,当 UHPC 与普通混凝土表面为光滑不粗糙的接触面时,模拟时的摩擦因数可以取 0.6;对于模板表面气泡膜印花处理的试件,文献[30]通过试验研究给出了不同粗糙度的 UHPC-NC 接触面的摩擦因数,其中,粗骨料的结合面与本文中的气泡膜处理结合面类似,其摩擦因数为 1.09。此外,对于核心混凝土中的角钢和钢筋,在建模时不考虑它们与核心混凝土之间的黏结滑移,全部采用“Embedded”的方式嵌入到混凝土中。

施加载荷时,在柱顶设置了一个加载点 RP-1,加载点采用“Coupling”的方式与柱顶面耦合在一起,竖向轴压力和水平往复荷载全部作用在加载点上。此外,为保证模型在加载过程中不出现平面滑移,底梁的底部采用完全固定约束。

1.3 单元选择与网格划分

有限元模型中, UHPC 模板、核心混凝土和底梁均采用 C3D8R 实体单元,纵筋和箍筋采用 T3D2 桁架单元,角钢采用壳单元。网格划分对模型的精度、运算速度和收敛性影响较大,通过试算,最终确定 UHPC 模板与核心混凝土的网格尺寸为 30 mm × 30 mm,钢筋笼的网格尺寸为 25 mm × 25 mm,角钢的网格尺寸为 30 mm × 30 mm。由于底梁主要起到固定约束的作用,不会影响有限元分析的结果,因此底梁网格尺寸为 60 mm × 60 mm。URC 柱的有限元模型如图 1 所示。

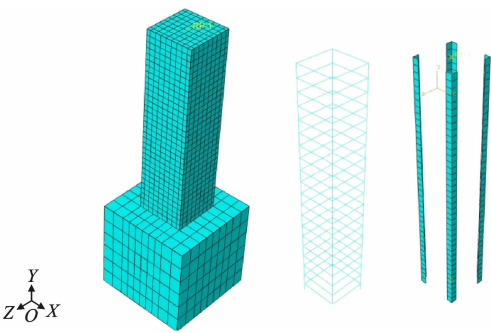


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

1.4 模型验证

基于王朋等^[24]的试验研究结果,对建立的有限元模型准确性进行了验证,URC 柱试件的截面尺寸如图 2 所示。普通混凝土的抗压强度为 47.9 MPa, UHPC 的抗压强度为 127.4 MPa,抗拉强度为 10.7 MPa。此外,钢筋和角钢的力学性能如表 1 所示。

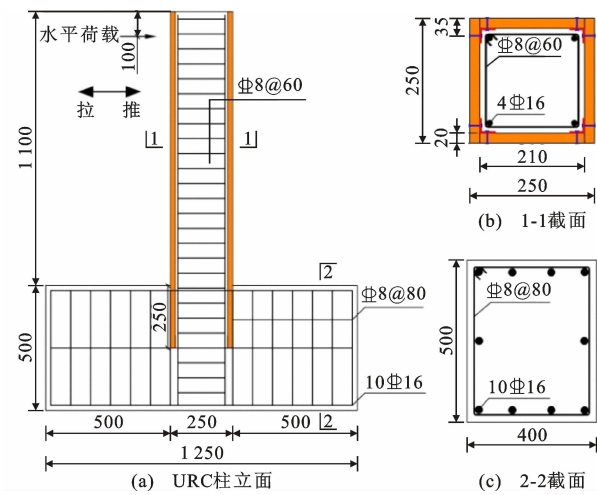


图 2 试件详细尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Detail size of specimen (unit:mm)

表 1 钢材力学性能

Table 1 Mechanical properties of steel

钢材种类	钢材规格	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 δ_u/MPa	伸长率 $\delta/\%$
HRB400	直径 8 mm	466	753	18.8
HRB400	直径 16 mm	455	635	25.0
Q235	L30 mm×30 mm×3 mm	257	372	20.8

文献[24]的试验中,UHPC 模板表面采用了 3 种处理方式,分别为光面处理、气泡膜印花处理和设肋处理,处理后的模板如图 3 所示。

图 4 为有限元模拟得到的试件柱身混凝土损伤情况,可以看出,有限元模型中的混凝土损伤最严重部位主要集中在试件底部,这与试验中的 UHPC 模

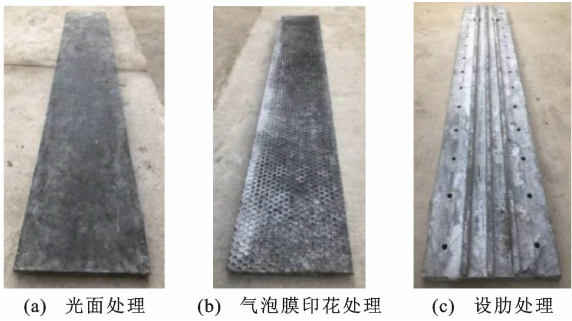


图 3 不同表面处理的 UHPC 模板

Fig. 3 UHPC formwork with different surface treatment

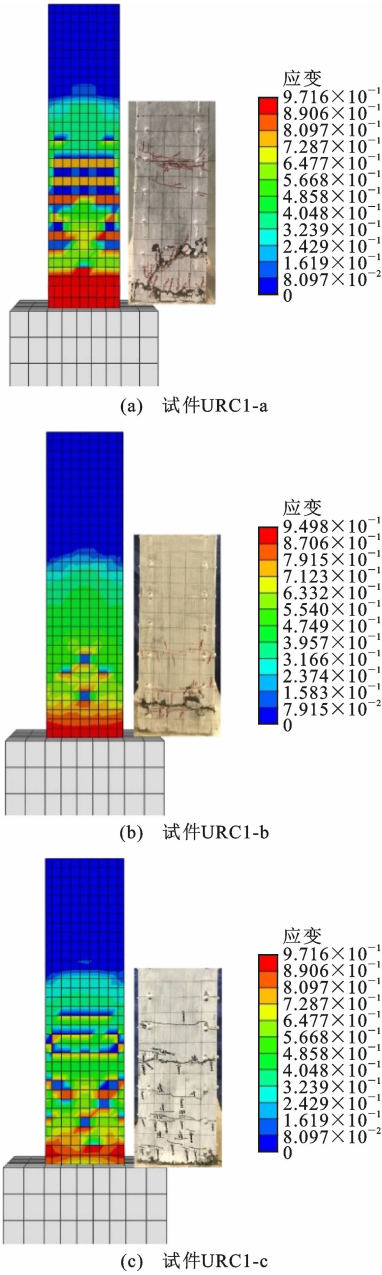


图 4 URC 柱混凝土破坏模式对比

Fig. 4 Comparison of concrete failure mode of URC column

板破坏位置基本相同,且模型中沿柱身高度方向分布的混凝土裂缝位置与试验结果也基本吻合。

表 2 给出了试件承载力模拟值与试验值的对比,图 5 为试验骨架曲线与模拟骨架曲线的对比。

表 2 承载力模拟值与试验值对比

Table 2 Comparison of simulated and test values of bearing capacity				
试件编号	表面处理方式	承载力试验值 P_e /kN	承载力模拟值 P_n /kN	P_n/P_e
URC1-a	光面处理	120.9	121.3	1.003
URC1-b	气泡膜印花处理	122.3	130.3	1.065
URC1-c	设肋处理	135.0	136.2	1.009

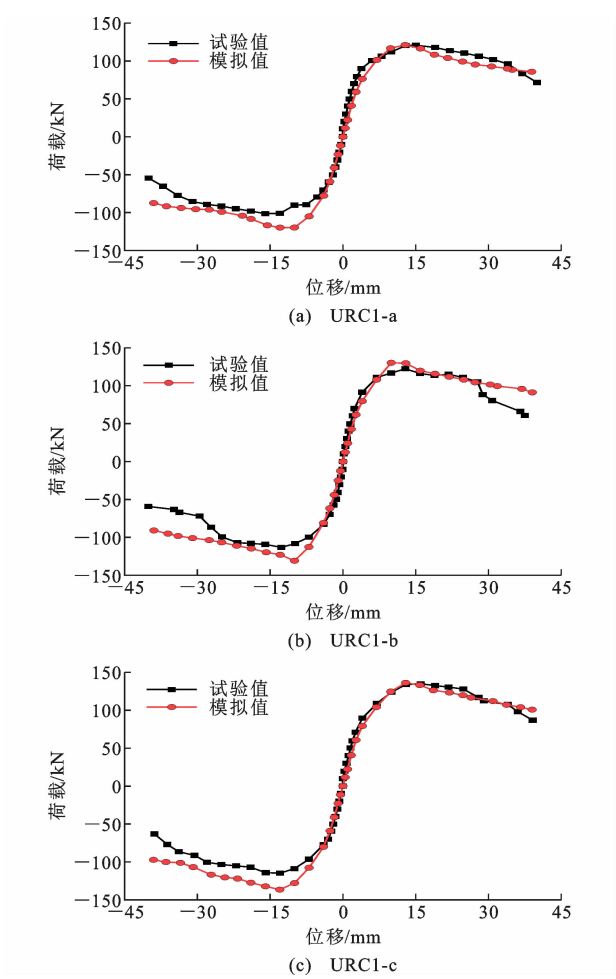


图 5 试件骨架曲线对比

Fig. 5 Comparison of skeleton curves of specimens

从图 5 可以看出,本文所采用的简化建模方式可以较好地模拟 URC 柱的水平承载力,模拟值与试验值总体吻合较好,其最大相对误差仅为 7%。对比模拟骨架曲线和试验骨架曲线发现,两者的变化趋势相似,各试件在推方向的模拟值与试验值较为接近,而拉方向的模拟值与试验值存在一定差异,主要原因为:①试件在制作浇筑时存在一定的缺陷,

而在模拟中没有考虑这些缺陷带来的影响;②模拟中的混凝土出现损伤后并不会马上退出受力,而试验中混凝土开裂后便不能再承受拉力。

通过试件的损伤云图、承载力和骨架曲线,验证了本文建立的有限元模型的准确性,可以用于后续 URC 柱的参数分析。

2 参数分析

基于建立的有限元模型,分析轴压比 n 、核心混凝土强度 f_c 、纵筋配筋率 ρ_s 和模板厚度 t 对 URC 柱承载力和延性的影响,其中轴压比分别为 0.4、0.5、0.6、0.7 和 0.8;核心混凝土强度值分别为 30、40、50、60 MPa;纵筋配筋率分别为 1.3%、2%、2.5%、3%;模板厚度分别为 10、15、20、25 mm;有限元模型的其他参数与试验试件相同,表 3 给出了有限元模型的详细参数。

表 3 有限元模型参数

Table 3 Parameters of finite element model					
试件编号	t /mm	f_c /MPa	ρ_s /%	n	承载力模拟值/kN
URC-N1	20	40	1.3	0.4	134.0
URC-N2	20	40	1.3	0.5	142.2
URC-N3	20	40	1.3	0.6	148.3
URC-N4	20	40	1.3	0.7	150.2
URC-N5	20	40	1.3	0.8	148.9
URC-C1	20	30	1.3	0.6	134.6
URC-C2	20	40	1.3	0.6	148.3
URC-C3	20	50	1.3	0.6	154.8
URC-C4	20	60	1.3	0.6	159.1
URC-P1	20	40	1.3	0.6	148.3
URC-P2	20	40	2.0	0.6	165.1
URC-P3	20	40	2.5	0.6	175.6
URC-P4	20	40	3.0	0.6	184.7
URC-T1	10	40	2.0	0.6	142.3
URC-T2	15	40	2.0	0.6	155.7
URC-T3	20	40	2.0	0.6	165.1
URC-T4	25	40	2.0	0.6	176.6

2.1 轴压比

图 6 为轴压比对承载力和延性的影响。由图 6 可知,试件的承载力和延性随着轴压比的增大均表现出先增加后降低的规律,轴压比为 0.7 时承载力和延性最大。当轴压比从 0.4 增加到 0.7 时,试件的承载力提高了 12.1%,延性提高了 48.3%,而当轴压比从 0.7 增加到 0.8 时,试件的承载力和延性都出现了降低。综合可得,在一定范围内,增大轴压比可以提高 URC 柱的承载力和延性,为保证 URC

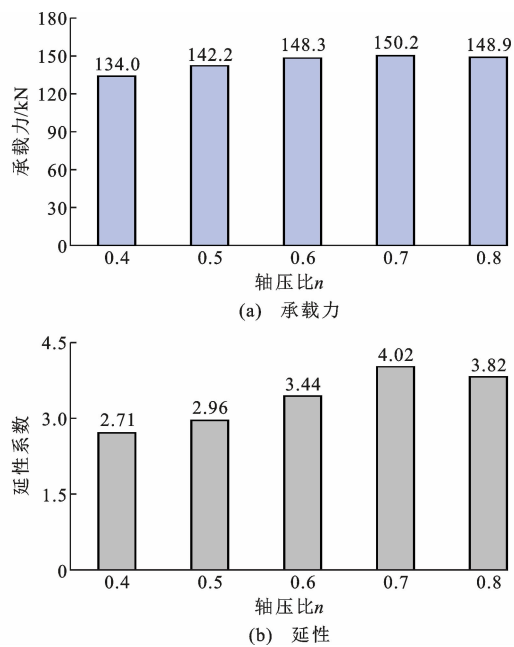


图 6 轴压比的影响

Fig. 6 Effect of axial compression ratio

柱具有足够的变形能力和抗倒塌能力,应限制 URC 柱的轴压比不超过 0.7。

2.2 核心混凝土强度

图 7 给出了不同核心混凝土强度下各试件的水平承载力和延性系数的变化情况,从图 7(a)可以看出,随着核心混凝土强度的增加,试件的承载力逐渐提高,但增加速率逐渐降低。从图 7(b)可以看出,试件的延性随着混凝土强度的增加而逐渐降低,主要因为混凝土强度越高,其弹性模量也越大,从而增加了试件的整体刚度,导致试件的变形能力降低。综合可得,尽管增大核心混凝土的强度可以提高 URC 柱的水平承载力,但同时也会降低柱的延性,且核心混凝土强度与 UHPC 模板强度相差越小,其对水平承载力的提升效果也越小。

2.3 纵筋配筋率

图 8 给出了不同配筋率下各试件的水平承载力和延性系数的变化情况。可以看出,随着配筋率的增加,试件的承载力逐渐增大,配筋率从 1.3% 增加到 3% 时,试件的承载力提高了 24.5%。此外,试件的延性随配筋率的增加总体表现出增大的趋势,但增加幅度很小,配筋率从 1.3% 增加到 3% 时,试件的延性系数仅提高了 4.4%。综合可得,增大配筋率可以有效提高 URC 柱的水平承载力,但对改善其延性性能作用不大。

2.4 模板厚度的影响

图 9 给出了不同模板厚度下试件的水平承载力

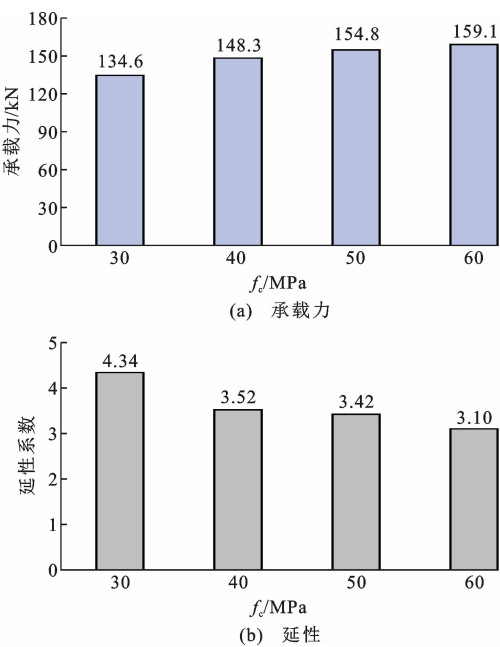


图 7 核心混凝土强度的影响

Fig. 7 Effect of core concrete strength

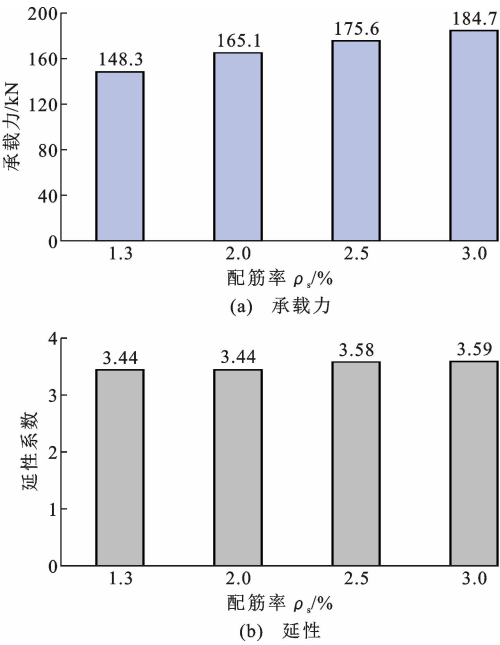


图 8 配筋率的影响

Fig. 8 Effect of reinforcement ratio

和延性系数的变化情况,对比各试件的水平承载力可以发现,模板厚度从 10 mm 增加到 25 mm 时, URC 柱的承载力提高了 24.1%。由图 9(b)可以看出,随着模板厚度的增加,试件的延性显著降低,模板厚度从 10 mm 增加到 25 mm 时,试件的延性降低了 43.8%,主要因为增大模板厚度增加了 UHPC 在整个试件中的比例,进而提高了试件的整体刚度,导致试件的延性降低。综合考虑 UHPC 模板的

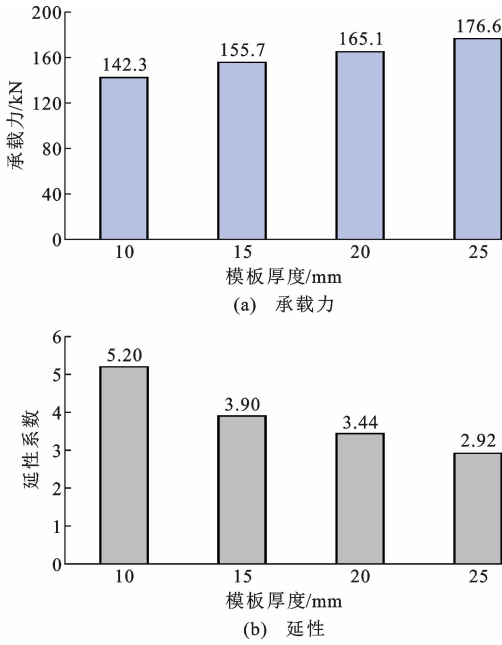


图 9 模板厚度的影响

Fig. 9 Effect of formwork thickness

生产成本和安装工序,在保证 URC 柱有足够的承载力和变形能力下,建议 UHPC 模板厚度不宜太大,其厚度宜选择 15~20 mm。

3 承载力计算

3.1 受力分析

基于平截面假定,对 URC 柱在往复荷载作用下的水平承载力计算方法进行了分析,并将 URC 柱截面简化为核心混凝土矩形截面和工字形模板截面。此外,为简化计算过程,做出了一些基本假定:①考虑 UHPC 的受拉,不考虑普通混凝土的受拉;②不考虑模板与核心混凝土的界面滑移;③URC 柱达到峰值荷载时,认为混凝土能够达到其抗压强度,钢材能够达到其屈服强度。

图 10 为核心混凝土截面的应力、应变分布情况。图 10(c)为等效应力分布图,其中 α_1 、 β_1 为普通混凝土的等效矩形系数,根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010), α_1 取 1, β_1 取 0.8。图 11 为等效工字形模板截面的应力、应变分布,其中 α_2 、 β_2 为 UHPC 的等效矩形系数,不同强度的 UHPC 的等效矩形系数存在一定的差别,本文根据徐明雪等^[31]的研究成果,取 $\alpha_2 = 0.878$, $\beta_2 = 0.74$, k 为 UHPC 的抗拉强度折减系数,根据彭飞等^[32]的研究成果,取 $k = 0.8$ 。

结合图 10 和图 11,根据内力平衡,可以得到

$$N + f_y A_s + f_{my} A_m + 2k f_{ut} t(h - x) +$$

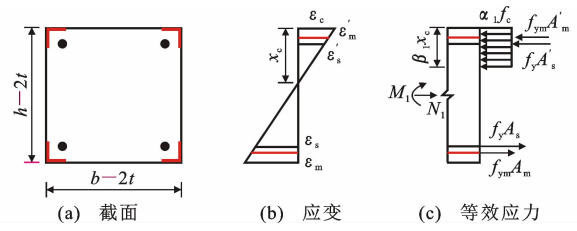


图 10 核心混凝土截面应力、应变分布

Fig. 10 Distribution of stress and strain of core concrete

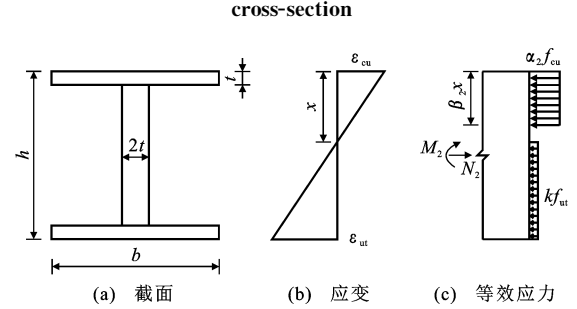


图 11 等效工字形模板截面应力、应变分布

Fig. 11 Distribution of stress and strain of equivalent

I-shaped formwork cross-section

$$k f_{ut} (b - 2t)t = \alpha_1 f_c (b - 2t)\beta_1 x_c + f_y A'_s + f_{my} A'_m + \alpha_2 f_{uc} (b - 2t)t + 2\alpha_2 f_{uc} t\beta_2 x \quad (5)$$

式中: b 为试件截面宽度; h 为截面高度; x 为整个试件截面受压区高度; x_c 为核心混凝土截面受压区高度, $x = x_c + t$; f_y 、 f_{my} 分别为纵筋和角钢的屈服强度; f_c 为普通混凝土抗压强度; f_{uc} 为 UHPC 抗压强度; f_{ut} 为 UHPC 抗拉强度; A_s 、 A'_s 分别为受拉区和受压区纵筋截面面积之和; A_m 和 A'_m 分别为受拉区和受压区角钢截面面积之和。

根据式(5)计算得到截面相对受压区高度 x 后,对截面形心取矩,可以得到

$$M_u = \alpha_1 f_c (b - 2t)\beta_1 (x - t) \left[\frac{h}{2} - t - \frac{\beta_1 (x - t)}{2} \right] + \frac{1}{2} \alpha_2 f_{uc} (b - 2t)t(h - t) + \alpha_2 f_{cu} t\beta_2 x(t - \beta_2 x) + f_y A'_s \left(\frac{h}{2} - a'_s \right) + f_{my} A'_m \left(\frac{h}{2} - a'_m \right) + f_y A_s \left(\frac{h}{2} - a_s \right) + f_{my} A_m \left(\frac{h}{2} - a_m \right) + \frac{1}{2} k f_{ut} (b - 2t)t(h - t) + \frac{1}{2} k f_{ut} t h^2 - \frac{1}{2} k f_{ut} t \left(\frac{h}{2} - x \right)^2 \quad (6)$$

式中: a_s 、 a'_s 分别为受拉区和受压区纵筋合力点至截面外边缘的距离; a_m 、 a'_m 分别为受拉区和受压区角钢合力点至截面外边缘的距离。

3.2 结果验证

对包括试验和有限元模拟在内的 17 个试件的承载力进行了计算,结果见图 12。可以看出,计算结果与模拟结果或试验结果总体吻合较好,相对误差均在 10% 以内,其比值均值为 0.97,标准差为 0.04。因此,本文提出的计算方法可用于预测 URC 柱在往复荷载作用下的水平承载力。

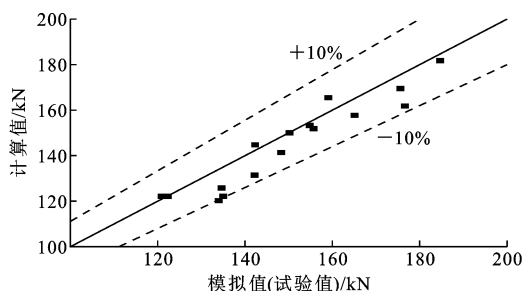


图 12 计算结果对比

Fig. 12 Comparison of calculated results

4 结 语

(1)建立的有限元模型具有一定的精确性,通过模拟得到的试件承载力、骨架曲线和混凝土损伤结果均与试验结果吻合较好。

(2)随轴压比的增加,URC 柱的水平承载力和延性均先增加后降低,轴压比为 0.7 时试件的承载力和延性最大;随核心混凝土强度的增加,URC 柱的承载力不断提高,延性则逐渐降低;提高 URC 柱的纵筋配筋率可以显著提升试件的水平承载力,但对其延性的影响不大;随 UHPC 模板厚度的增加,URC 柱的承载力不断提高,但延性却明显降低,在实际应用时,为保证 URC 柱能满足相关变形要求,建议 UHPC 模板厚度取 15~20 mm。

(3)提出的计算方法可以较好地预测 URC 柱的承载力,计算值与模拟值(试验值)的比值均值为 0.97,标准差为 0.04。

参考文献:

References:

[1] REN G M, WU H, FANG Q, et al. Effects of steel fiber content and type on static mechanical properties of UHPCC[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 163: 826-839.

[2] LIU J Z, HAN F Y, CUI G, et al. Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 121: 310-318.

[3] HOANG A L, FEHLING E. Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 153: 790-806.

[4] 张 阳,黄松龄,刘颖峰,等. 预应力 UHPC 加固 RC 梁抗弯性能试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(3): 23-31.

ZHANG Yang, HUANG Songling, LIU Yingfeng, et al. Experimental study on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed ultra-high performance concrete[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(3): 23-31.

[5] 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 behavior of RC columns strengthened by UHPC under secondary load[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(7): 2295-2301.

[6] LU T T, GUAN K, JIN H W. Experimental study on bending performance of high-performance fiber-reinforced cement composite prefabricated monolithic composite beams[J]. *Buildings*, 2023, 13(7): 1744.

[7] ZHANG P, SHANG J Q, LIU Y, et al. Flexural behavior of GFRP bar-reinforced concrete beams with U-shaped UHPC stay-in-place formworks[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 45: 103403.

[8] LIU B, CHENG X M, WANG L G, et al. Compressive performance of PVA fiber-reinforced 3D concrete printing permanent formwork composite columns reinforced with BFRP bars[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 98: 111174.

[9] ABBAS Z H, GORGIS I N, HASSAN M S. Cross-sectional shape effect of stay-in-place formwork column on axial compressive behaviour[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 90: 109417.

[10] SONG S F, DENG M K, ZHANG S H, et al. Flexural properties of reinforced concrete slabs using highly ductile concrete (HDC) permanent formwork system[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 80: 108111.

[11] ZHANG P, XU F, LIU Y, et al. Shear behaviour of composite beams with permanent UHPC formwork and high-strength steel rebar[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 352: 128951.

[12] 张一鹏. 预制 UHPC 模版-NC 叠合梁抗弯性能试验

- 研究[D]. 沈阳:沈阳大学,2022.
- ZHANG Yipeng. Experimental study on flexural behavior of precast UHPC formwork-NC composite beam[D]. Shenyang: Shenyang University, 2022.
- [13] 刘亚钊. 预制槽型 UHPC 模板厚度影响下叠合梁抗弯性能试验研究[D]. 沈阳:沈阳大学,2022.
- LIU Yazhao. Experimental study on flexural behavior of composite beams under the influence of prefabricated groove UHPC formwork thickness [D]. Shenyang:Shenyang University,2022.
- [14] 夏 洋. 预制 UHPC 永久模板-GFRP 筋混凝土组合梁抗弯性能研究[D]. 郑州:郑州大学,2020.
- XIA Yang. Study on flexural behavior of precast UHPC permanent formwork-GFRP reinforced concrete composite beams[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.
- [15] WANG X Y, LIU H B, JU Y Z, et al. Experimental and analytical models of flexural behavior of U-shaped reactive powder concrete permanent beam formworks [J]. Construction and Building Materials, 2021, 300: 123670.
- [16] 梁兴文,汪 萍,徐明雪,等. 免拆超高性能混凝土模板钢筋混凝土梁的受力性能及短期刚度研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(7):154-163.
- LIANG Xingwen, WANG Ping, XU Mingxue, et al. Mechanical behavior and immediate stiffness of RC beams with UHPC permanent formwork[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 154-163.
- [17] 梁兴文,汪 萍,徐明雪,等. 免拆 UHPC 模板 RC 梁受弯性能试验及承载力分析[J]. 工程力学,2019, 36(9):95-107.
- LIANG Xingwen, WANG Ping, XU Mingxue, et al. Flexural behavior and capacity analysis of RC beams with permanent UHPC formwork [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(9): 95-107.
- [18] 张 锐,胡 棚,李 晰,等. U 形 UHPC 永久模板 RC 无腹筋组合梁抗剪性能试验[J]. 中国公路学报, 2021,34(8):145-156.
- ZHANG Rui, HU Peng, LI Xi, et al. Shear behavior of reinforced concrete composite beams without stirrups using U-shaped UHPC permanent formwork [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(8): 145-156.
- [19] 单 波,王志鸿,肖 岩,等. RPC 管-海水海砂混凝土组合柱抗压性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020,47(9):104-112.
- SHAN Bo, WANG Zhihong, XIAO Yan, et al. Compression performance of seawater and sea sand concrete filled RPC tube composite columns under axial load[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(9): 104-112.
- [20] 王 钧,王志彬,李 论. 配有钢纤维 RPC 免拆柱模的钢筋混凝土短柱轴压力学性能[J]. 建筑科学与工程学报,2016,33(2):98-106.
- WANG Jun, WANG Zhibin, LI Lun. Mechanical behavior of reinforced concrete short columns with steel fiber RPC column-permanent template subjected to axial compression [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(2): 98-106.
- [21] 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. 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, 137.
- [22] 梁兴文,史纪从,于 婧,等. 免拆超高性能混凝土模板钢筋混凝土柱抗震性能研究[J]. 地震工程学报, 2020,42(3):579-588,606.
- LIANG Xingwen, SHI Jicong, YU Jing, et al. Seismic behavior of reinforced concrete columns with permanent template of ultra-high-performance concrete [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(3): 579-588, 606.
- [23] LIN Y, CHEN Z X, GUAN D Z, et al. Experimental study on interior precast concrete beam-column connections with UHPC core shells[J]. Structures, 2021, 32: 1103-1114.
- [24] 王 朋,尤学辉,黄 杰,等. 拼接成型 UHPC 免拆模板钢筋混凝土柱的抗震性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2024,56(1):103-116.
- WANG Peng, YOU Xuehui, HUANG Jie, et al. Seismic behavior of reinforced concrete column with an assembly stay-in-place UHPC formwork[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(1): 103-116.
- [25] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
- Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [26] 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 Xiaoyu, KANG Jingfu, ZHU Jinsong. Consti-

tutive relationship of ultrahigh performance concrete under uni-axial compression[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(2): 369-376.

[27] 闫光杰. 200 MPa 级活性粉末混凝土(RPC200)的破坏准则与本构关系研究[D]. 北京:北京交通大学, 2005.

YAN Guangjie. Study on failure criterion and constitutive relation of 200 MPa reactive powder concrete (RPC200)[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005.

[28] 胡翱翔, 梁兴文, 于 婧, 等. 超高性能混凝土轴心受拉力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(9): 30-37.

HU Aoxiang, LIANG Xingwen, YU Jing, et al. Experimental study of uniaxial tensile characteristics of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(9): 30-37.

[29] 刘桐旭. 节段预制拼装 UHPC 梁接缝抗剪性能试验与理论研究[D]. 南京:东南大学, 2017.

LIU Tongxu. Experimental and theoretical study on shear behavior of joints of segmented prefabricated UHPC beams[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[30] HUSSEIN H H, WALSH K K, SARGAND S M, et al. Modeling the shear connection in adjacent box-beam bridges with ultrahigh-performance concrete joints. I: model calibration and validation[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(8): 04017043.

[31] 徐明雪, 梁兴文, 汪 萍, 等. 超高性能混凝土梁正截面受弯承载力理论研究[J]. 工程力学, 2019, 36(8): 70-78.

XU Mingxue, LIANG Xingwen, WANG Ping, et al. Theoretical investigation on normal section flexural capacity of UHPC beams[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(8): 70-78.

[32] 彭 飞, 方 志. 钢筋 UHPC 梁正截面抗弯承载力计算方法[J]. 土木工程学报, 2021, 54(3): 86-97.

PENG Fei, FANG Zhi. Calculation approach for flexural capacity of reinforced UHPC beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(3): 86-97.