

引用本文:邓宗才,姚军锁. 箍筋约束超高性能混凝土柱受压性能研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(1): 14-25.

DENG Zong-cai, YAO Jun-suo. Research Progress on Compressive Behavior of Stirrup-confined Ultra-high Performance Concrete Columns [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 14-25.

DOI:10.19815/j.jace.2019.01046

箍筋约束超高性能混凝土柱受压性能研究进展

邓宗才, 姚军锁

(北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:为研究箍筋约束超高性能混凝土(UHPC)柱的受压性能和结构设计方法,对约束混凝土柱的研究与发展进行总结分析,讨论了 6 种简化的约束混凝土本构模型;重点介绍了国内外关于箍筋约束 UHPC 短柱、长柱的轴心受压、偏心受压力学特性最新研究成果,并对影响柱受压特性的主要因素等进行分析总结;对目前研究中存在的问题进行了探讨,并对箍筋约束 UHPC 柱的未来研究方向进行展望。结果表明:目前研究主要集中于普通箍筋约束 UHPC 短柱的轴压性能;箍筋约束 UHPC 柱需要较高的约束应力才能充分利用 UHPC 的高性能,并能显著改善构件延性;钢纤维能延缓保护层开裂,抑制保护层脱落,提高构件的抗损稳定性,与箍筋具有协同组合效应并能共同发挥约束效果;建议在 UHPC 构件设计时考虑纤维特性而适当减少配筋,箍筋约束 UHPC 短柱的轴压承载力计算可偏保守地参考普通混凝土轴压短柱承载力计算模型;箍筋约束普通、高强混凝土本构模型不能准确评估箍筋约束 UHPC 柱的轴压特性,建议开发预测精度较高的箍筋约束 UHPC 柱的本构模型。

关键词:超高性能混凝土柱;受压性能;研究进展;箍筋约束;轴心受压;偏心受压

中图分类号:TU375.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)01-0014-12

Research Progress on Compressive Behavior of Stirrup-confined Ultra-high Performance Concrete Columns

DENG Zong-cai, YAO Jun-suo

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to study the compressive behavior and structural design method of stirrup-confined ultra-high performance concrete (UHPC) columns, the research and development of confined concrete columns were summarized and analyzed, and six simplified constitutive models of confined concrete were discussed. The latest research results of axial compression and eccentric compression characteristics of stirrup-confined UHPC short and long columns at home and abroad were mainly introduced, and the main factors affecting the compressive characteristics of columns were analyzed. The existing problems in the current research were discussed, and the future research direction of the stirrup-confined UHPC columns was prospected. The results show that the present research mainly focuses on the axial compressive behavior of UHPC short columns

收稿日期:2019-01-16

基金项目:北京市教委科技重点项目(KZ201810005008)

作者简介:邓宗才(1961-),男,陕西扶风人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:dengzc@bjut.edu.cn.

confined with normal-strength stirrups. The stirrup-confined UHPC columns require more confinement to fully utilize the high-performance of UHPC, and the ductility of the members can be significantly improved. The steel fiber can delay the cracking of cover concrete, restrain the shedding of cover concrete, and improve the stability of components against damage. It has synergistic effect with stirrups and can exert restraint effect together. It is suggested that the fiber characteristics should be taken into account in the design of UHPC members so as to reduce the reinforcement allocation appropriately. Under the action of axial compression, the calculation model of bearing capacity of normal-strength concrete short columns can be conservatively used as a reference for the bearing capacity calculation of stirrup-confined UHPC short columns. The constitutive model of stirrup-confined normal or high-strength concrete cannot accurately evaluate the axial compressive characteristics of the stirrup-confined UHPC columns. It is recommended to build a constitutive model of the stirrup-confined UHPC columns with high prediction accuracy.

Key words: ultra-high performance concrete column; compressive behavior; research progress; stirrup-confined; axial compression; eccentric compression

0 引言

高韧性、高耐久性、高强度的超高性能混凝土(UHPC)又称为活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC),被法国 BOUYGUES 公司于 1993 年率先研制出以来^[1],从制备技术到结构设计应用研究已有长足进展,为复杂多层、高层建筑的建造提供了技术支撑,它是一种极具发展潜力的新型建筑材料^[2-3]。将其应用于约束混凝土柱,可作为新型结构构件增大建筑空间,实现结构“强柱弱梁”,增强第二道防线,保证结构整体安全,也可以提高桥梁结构的安全性和耐久性等。目前对箍筋约束普通、高强混凝土柱的研究较为成熟,但对箍筋约束 UHPC 柱受压特性的研究较少,尚未开发出适用于箍筋约束 UHPC 柱的本构模型^[4]。因此,本文对约束混凝土柱的研究进行梳理,重点对国内外箍筋约束 UHPC 柱受压特性的研究进展进行综述,展望未来的重点研究方向。

1 约束混凝土柱的研究现状与发展

1.1 国内外研究现状与发展

自 Considere 首次发现利用螺旋箍能有效约束轴压柱和 Richart 等^[5]首次定量地在液体围压下研究了约束混凝土的受压特性以来,约束混凝土的研究历史已有 100 多年。Chan^[6]提出了由 3 条直线组成的多线性型约束本构,认为构件峰值应变是体积配箍率的函数。Sheikh^[7]考虑箍距影响提出了双线性型约束本构,认为下降段与体积配箍率呈线性关系。Soliman 等^[8]提出了抛物线-多线性型约束本

构,认为箍筋约束可提高构件延性但对承载力贡献较小。Shan 等^[9]提出了统一的约束混凝土全曲线方程,Kent 等^[10]提出了抛物线-线性型约束本构,并认为上升段不受约束影响,且下降段斜率与混凝土强度、箍距及配箍率有关。Vallenat 等^[11]借鉴 Kent-Park 模型^[10]定义了二次抛物线型上升段,并认为矩形箍筋约束可提高构件强度及峰值应变,约束混凝土强度的提高与纵筋体积率成正比。Popovics^[12]提出的混凝土应力-应变全曲线表达式被广泛采用,成为研究约束混凝土的基础。Sheikh 等^[13]首次提出有效约束混凝土面积概念,并以此为基础提出了考虑箍筋约束的抛物线-多线性型约束本构。Mander 等^[14]提出有效约束系数概念,参考 Popovics 模型^[12]给出了约束混凝土统一本构曲线方程,从能量角度分析了试件的纵向应变。过镇海等^[15-18]、戴自强等^[19-20]均对不同配箍率的约束混凝土进行研究,认为配箍特征值 λ_v 对本构模型影响较大,建立了强、弱约束构件的应力-应变曲线方程,认为高强钢筋及密配复合箍筋可显著提高构件约束效果、强度及延性。

Nagashima 等^[21]认为构件压缩延性与混凝土强度成反比,与箍筋强度成正比,高强混凝土结合高约束才能充分发挥其高强性能并改善延性,约束混凝土强度的提高程度与有效约束应力的平方根成正比,对 Mander 等^[14]及 Sheikh 等^[13]的模型进行修正,得出抛物线-线性型约束本构。Cusson 等^[22-23]研究认为高强混凝土柱保护层脱落致使箍筋约束生效前承载力有所降低,建议承载力计算不计保护层贡献,在 Mander 等^[14]、Nagashima 等^[21]的研究基

基础上,定义了抛物线-指数型约束本构。支运芳等^[24]试验表明保护层较薄时应力-应变曲线只有 1 个峰值,同时期 Razvi 等^[25-28]认为高强箍筋对高强混凝土性能的提高比普通箍筋显著,完善了适用于强度 30~130 MPa 混凝土的抛物线-线性型约束本构。Liu 等^[29-32]研究了约束高强混凝土及保护层早期剥落问题,对已有约束本构进行修正,普遍认为高强混凝土需要高强钢筋约束才能充分发挥其力学性能。史庆轩等^[33-38]证实采用高强箍筋约束是防止高强混凝土应力-应变曲线陡降的有效措施,先后基于八面体强度理论、Willam-Warke 五参数破坏准则及双剪统一强度理论提出了适用于高强箍筋约束高强混凝土的峰值参数计算式,基于 Popovics 模型^[12]改进了约束本构,提出了高强箍筋应力取值的计算方

法。胡钟等^[39-41]基于大量数据,提出了峰值参数计算公式及修正的约束混凝土本构模型。这段时期约束高强混凝土经历了从普通钢筋约束到高强钢筋约束的转变,模型逐渐精细化且走向设计实用性。

1.2 约束混凝土本构模型

约束混凝土柱的研究经历了从液体主动约束到箍筋被动约束,从普通混凝土到高强混凝土,从普通钢筋约束到高强钢筋约束,从轴压到偏压,从静载到动载的发展历程^[42],围绕破坏机制、受压性能影响因素及约束本构的建立和修正等方面展开研究。提出的约束本构可总结为 6 种简化模型,如图 1 所示,其中 f_{cc} , ϵ_{cc} 分别为约束混凝土的峰值应力、应变, ϵ_{cc1} , ϵ_{cc2} 分别为约束混凝土峰值应力对应的最小和最大平均轴向应变。

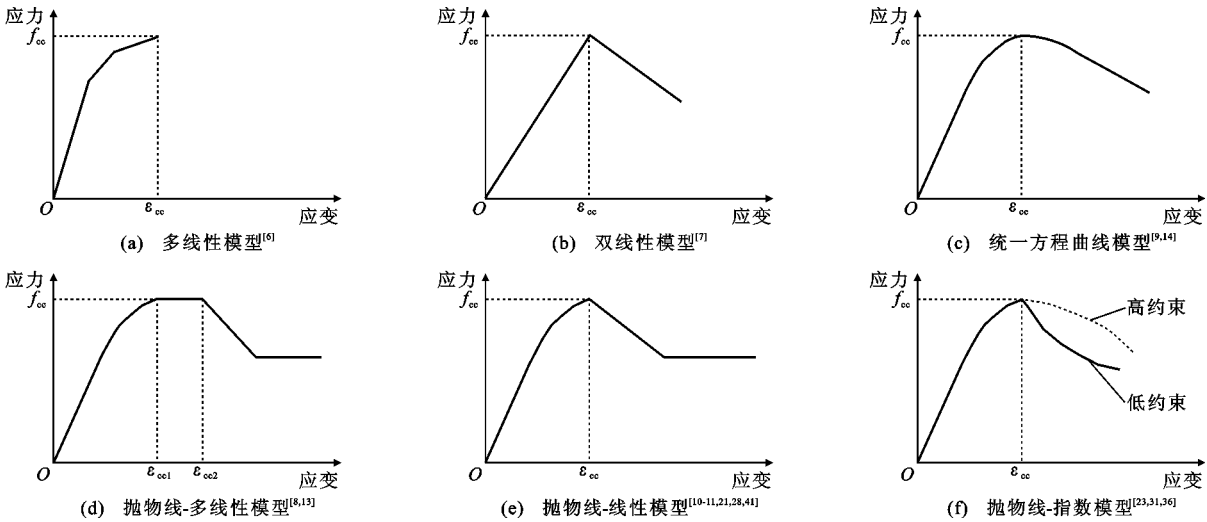


图 1 约束混凝土简化模型

Fig. 1 Simplified Models of Confined Concrete

约束普通、高强混凝土柱的本构研究已较成熟,但若将其知识体系直接应用于约束 UHPC 柱受压特性分析,会因纤维特性及工作机制差异而不能准确评估约束 UHPC 柱的性能,由于缺乏实践验证亦不能轻易将其应用于 UHPC 约束构件^[43-44]。因此,迫切需要研究约束 UHPC 柱的受力机制、本构及承载力计算方法等,从而为工程设计提供参考。

2 箍筋约束 UHPC 柱的研究进展

箍筋约束 UHPC 柱受压特性的研究在国内外均有开展,其中包括约束 UHPC 短柱、长柱的轴压及偏压性能研究,得出了一些有价值的结论,但理论分析有待完善,应在试验研究和理论分析的基础上建立适合 UHPC 柱的约束本构。

2.1 国外研究进展

国外对箍筋约束 UHPC 柱的受压性能研究开展较早,主要集中于约束 UHPC 柱的轴压特性及承载力计算研究,但对偏压构件涉及较少。文献^[43]以箍距和配筋率为变量,研究了小尺寸 UHPC 矩形柱的轴压性能,试验表明箍筋约束能提高 UHPC 柱的承载力,对延性提高更为显著;以浇筑方向作为变量研究,认为受钢纤维取向影响,混凝土浇筑方向对承载力影响显著,浇筑方向平行于荷载轴时的承载力较高。

Aarup 等^[45]以长细比、截面形状及钢纤维掺量等为变量对 57 根 UHPC 细长柱进行轴压试验,并制作了 4 根偏压柱及 16 根抗火试验轴压柱。结果表明高温热应力、刚度变化及构件初始缺陷可显著

影响 UHPC 细长柱的受压性能,构件呈延性破坏且破坏时保护层未剥离;UHPC 细长柱耐火时间高于 1 h,建议设计长细指数 α 应小于 3.5,以避免火灾时过早失稳;约束 UHPC 细长柱的承载力可与尺寸参数相似的钢管柱承载力相当。

长细指数 α 为

$$\alpha = \frac{\lambda^2 f_c}{\pi^2 E_c} \quad (1)$$

式中: λ 为构件长细比; f_c 为 UHPC 轴心抗压强度; E_c 为 UHPC 弹性模量。

Sugano 等^[46]以混凝土强度、钢纤维掺量、箍筋强度及间距为变量,制作了高强箍筋约束 UHPC 轴压柱;根据约束混凝土与无约束混凝土的峰值应变比值讨论了构件的压缩延性,证实随配箍特征值的增大,构件强度及约束效果提高,延性显著改善,掺入纤维和增大配箍率可提高柱在侧向荷载下的延性及抗剪性能。试验结果表明高强钢筋可有效约束 UHPC,提高其承载力。考虑配箍特征值提出了高强钢筋约束下核心 UHPC 的峰值应力、应变计算式(2),(3),但公式中箍筋应力直接取为屈服强度,未讨论峰值应力时箍筋是否屈服。

$$\frac{f_{cc}}{\sigma_c} = 0.92 \left(\frac{\rho_v f_y}{\sigma_c} \right)^{0.5} + 1.0 \quad (2)$$

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_c} = 99.6 \left(\frac{\rho_v f_y}{\sigma_c} \right)^2 + 1.0 \quad (3)$$

式中: σ_c 、 ϵ_c 分别为圆柱试件峰值应力、应变; ρ_v 为箍筋体积配箍率; f_y 为箍筋屈服强度。

Empelmann 等^[47-49]以纤维特征值、配箍率及配筋率等为变量,研究了配置高强纵筋的 UHPC 方柱受压性能。按保护层的剥落情况分 3 种工况,用有效约束面积概念来理想化构件的应力-应变特性,并用延性指数 I_{10} 评价峰值后性能,认为延性指数 I_{10} 在 5~6.5 时,UHPC 构件可以表现出较好的鲁棒性。试验结果显示在适量箍筋约束下采用钢纤维和高强纵筋组合,可显著提高构件轴压性能,证实高强纵筋在构件峰值应力时未屈服。假定纵筋与 UHPC 间无黏结滑移,用构件峰值应变 0.003 来计算峰值时的纵筋应力,并认为 UHPC 轴压柱承载力可以参考普通混凝土的承载力计算模型;提出了保证 UHPC 柱鲁棒性的设计要求,证实用于非线性结构分析的应力-应变方程[式(4)]能较好预测强度 150 MPa 的 UHPC 柱的上升段。

$$\frac{\sigma_c}{f_{cc}} = [k \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} - (\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}})^2] / [1 - (\gamma - 2) \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}] \quad (4)$$

式中: k 为控制上升段曲率及初始斜率的参数; γ 为

塑性因子。

Ridha 等^[50]以截面尺寸、配筋率等为变量,制作了 UHPC 和高强混凝土轴压短柱各 8 根,并对构件破坏模式、延性及应力-应变曲线等进行分析。试验表明素 UHPC 柱的刚度大于配筋 UHPC 柱,UHPC 柱延性比高强混凝土柱高出 1 倍~1.3 倍,且承载力比同条件下高强混凝土柱高出 3.5 倍~4.5 倍;构件高宽比可显著影响开裂区段响应,证明钢纤维能有效抑制配筋 UHPC 柱保护层早期剥落,保证构件整体性,使其比配筋高强混凝土柱有较大的横向变形,且破坏时箍筋拉断、纵筋屈曲,呈延性破坏;素 UHPC 柱破坏突然并伴有爆裂声,呈剪切破坏。

Min 等^[51]成功制备了 180 MPa 级的 UHPC,以纤维掺量、配筋率及箍筋间距等为变量研究了约束 UHPC 方形短柱轴压性能,又以截面尺寸、配筋率及配箍率为变量制作了约束 UHPC 圆形轴压短柱。试验结果表明,在配箍量相同时,单掺 2%(体积掺率)短钢纤维构件承载力高于 1.5%(体积掺率)混杂纤维构件,认为钢纤维特征值相近的情况下,短钢纤维掺量对构件的强度影响显著。

Hosinieh 等^[43]以配筋率、箍筋间距及形式等为变量研究了 UHPC 方形短柱的轴压性能,以韧性指数和延性指标来评价构件性能,并采用 Mander 等^[14]提出的有效约束系数来考虑箍筋约束。试验表明,细而密的箍筋结合钢纤维可使 UHPC 柱延性改善显著,证明箍筋间距和形式引起的配箍率变化是影响 UHPC 柱轴压性能的重要因素。构件破坏时核心混凝土较完整,箍筋间距较小时纵筋未压曲,表现出较好的约束效果;箍筋间距较大时纵筋屈曲,对混凝土剥落有二次影响,建议在研究 UHPC 柱保护层剥落机理时考虑纵筋屈曲。纤维桥接增加了构件的抗损能力,认为纤维与箍筋在提高峰值后延性方面具有混合效应,钢纤维对低约束柱峰值后延性的贡献显著,而对高约束构件贡献不大。试验数据对比显示,未考虑纤维贡献的高强混凝土约束模型会低估 UHPC 柱的性能,纤维混凝土约束模型虽能反映其实际受力,但不能较好预测峰值应变。

Yang 等^[4]以箍筋直径和间距为变量研究了无纵筋约束 UHPC 短圆柱的应力-应变特性,探讨了 Mander 模型^[14]及 Razvi-Saatcioglu 模型^[28]对约束 UHPC 的适用性,结果显示前者可准确预测构件峰前响应但会高估峰值后特性,后者会低估构件的整体性能,即约束 UHPC 构件约束效果高于高强混凝土但接近普通混凝土。对比 FRP 与钢筋约束 UH-

PC 柱的性能结果显示,一般约束比情况下,由于钢筋具有较好的弹塑性,使其约束的 UHPC 具有更好的延性。试验结果还表明,约束 UHPC 轴压曲线可大致分为弹性阶段、弹塑性阶段(核心混凝土膨胀激发箍筋约束力)、破坏阶段,其后两阶段均与体积配箍率密切相关,且配箍率越高,构件塑性越强,延性越好。

Shin 等^[3,52]以混凝土强度、配箍形式及间距、体积配箍率等为变量,先后设计了含 1.5% 混杂纤维的箍筋约束 UHPC 轴压方柱和圆柱。试验结果表明:混杂纤维可延缓保护层开裂和抑制保护层剥落,降低基体的缺陷敏感性,提高构件抗损能力;混杂纤维与箍筋组合可有效改善构件峰值后延性,并可部分代替箍筋工作;UHPC 柱的截面形状对保护层剥落影响较小,圆形螺旋箍比方形箍更能有效约束核心混凝土来改善构件延性。试验结果还表明,配置细而密的箍筋和提高配箍率可使构件呈现第二峰值并显著改善峰值后性能,认为控制箍筋间距是防止构件承载力陡降和纵筋屈曲的有效措施。采用韧性指标来量化 UHPC 柱的延性,基于试验给出了满足抗震延性设计的有效约束指标取值范围[式(5), (6)]。参考 Cusson-Paultre 模型^[23],考虑约束系数及纤维贡献提出了箍筋约束 UHPC 方形柱的修正本构,如图 2 所示,其中, v_f 为钢纤维的体积掺率, l_f 为钢纤维的长度, d_f 为钢纤维的直径, k_1, k_2 分别为控制下降段斜率、曲率的参数,参数的计算详见文献^[23]。

方柱有效约束指标满足

$$\frac{K_e \rho_v f_y}{f_c} \geq 0.154 \tag{5}$$

圆柱有效约束指标满足

$$\frac{K_e \rho_v f_y}{f_c} \geq 0.109 \tag{6}$$

式中: K_e 为有效约束系数^[14]; f_c 为圆柱体试件强度。

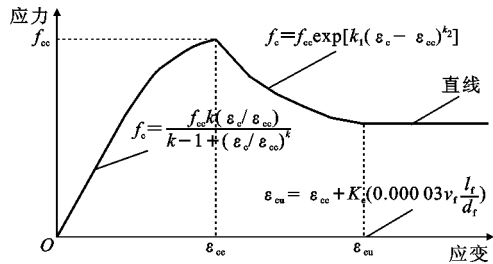


图 2 约束 UHPC 应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain Curve of Confined UHPC

对偏压构件的研究除 Aarup 等^[45]、Steven 等^[49]有涉及外, Heimann 等^[44]对高轴压下 UHPC

偏压细长柱的可靠度也进行了研究,结果表明纤维取向对材料弹性模量、抗拉强度及构件可靠性均有显著影响,大偏心构件中由于纤维桥接作用,使得 UHPC 偏压构件承载力显著高于同条件下传统混凝土偏压柱且有较高可靠度。Malik 等^[53]、Al-Azzawi 等^[54]以偏心距、配筋率为变量,对仅配纵筋的 UHPC 长柱进行受压试验并用有限元数值模拟对比计算,结果显示偏压柱均呈现出受压破坏,破坏时均没有混凝土剥落及纵筋屈曲现象;认为高掺量钢纤维对截面破坏约束较好,是防止保护层剥落和纵筋屈曲的有效措施。

2.2 中国研究进展

中国对箍筋约束 UHPC 柱的轴压试验研究较少,多集中于偏压构件性能及承载力计算方法研究。刘畅^[55]考虑 6 种偏心率对无筋粗骨料 UHPC 短柱进行偏压试验,结果显示 UHPC 偏压构件开裂荷载和极限承载力随偏心距增大而降低,但由于钢纤维桥联作用,其延性较好且受拉区钢纤维贡献不可忽略;用 ABAQUS 软件对 UHPC 偏压柱建模分析,结果表明提高配箍率及纵筋率均可改善偏压构件延性和提高承载力,并提出了 UHPC 偏压柱的承载力计算式。康佩^[56]采用与受弯构件相同的等效原则,参考各规范得到了 UHPC 轴压及偏压构件承载力计算方法,但计算忽略了 UHPC 抗拉贡献。

刘冬明等^[57-58]以长细比、混凝土强度为变量,对 20 根 UHPC 柱进行轴压试验,用 ABAQUS 软件进行非线性分析。结果显示钢纤维可显著抑制 UHPC 早期开裂, UHPC 短柱破坏呈受压破坏(钢筋屈服),其细长柱呈整体屈曲失稳破坏(钢筋不屈服);构件极限承载力随长细比的增大而降低,对细长柱初始缺陷引起的二阶效应不可忽略,认为普通钢筋 UHPC 短柱的承载力为 UHPC 和纵筋承载力之和,建议将 UHPC 柱稳定系数偏安全地按普通混凝土轴压柱取值。对 UHPC 轴压柱可靠度进行分析,认为可变荷载与永久荷载的效应比、钢筋屈服强度对构件可靠度指标影响显著。

施成华等^[59-60]以截面尺寸、配筋率及混凝土强度等为变量,制作了 22 根 UHPC 大偏压柱,试验结果表明:试件截面高度对承载力尤其是极限承载力影响显著,开裂、极限弯矩与截面高度呈近似平方关系,证实增大截面高度是提高 UHPC 偏压构件承载力的有效措施;配筋率对极限弯矩提高显著,尤其是无纤维构件,但由于钢纤维的桥联作用,使配筋率对构件开裂弯矩影响较小;钢纤维对开裂、极限弯矩的

提高程度一致,可代替且协助部分钢筋工作,建议在 UHPC 结构设计时充分考虑纤维特性,适当降低配筋率。根据平截面假定适用于 UHPC 偏压构件的结论,提出了其开裂、极限荷载对应的截面应力-应变分布简化模型,建立了平衡方程,根据试验结果反推出体现纤维贡献的参数,认为在 UHPC 偏压构件设计时 UHPC 抗拉强度不可忽略。

Hung 等^[61]以纤维掺量、箍筋间距及形式为变量,对 UHPC 细长柱进行偏压试验。结果显示:无纤维构件在峰值区时保护层剥落严重,致使二阶弯矩增大而加剧构件破坏,但增加拉筋约束可较好改善此现象;含纤维构件呈延性破坏,破坏时箍筋、受压纵筋均为弹性状态,但受拉纵筋屈服。结果还显示:箍筋约束结合钢纤维能显著改善构件延性,体积率 1.5% 的钢纤维可代替体积率 70% 的箍筋来提高细长柱在偏心荷载下的延性;基于平截面假定对受压面最外侧纤维的压碎应变进行分析,证实钢纤维掺入可提高构件延性和降低脆性,避免构件过早失效。在二阶效应影响下无论是考虑侧向挠曲的弯矩增大系数法,还是基于材料力学的解析法[式(7)]来计算含钢纤维 UHPC 偏压柱的承载力,预测精度均较好,但因无纤维构件过早脆性失效使其承载力会被高估。式(7)为假定柱的挠度曲线为半正弦曲线,只适用于单曲率简支柱。

$$M_c = M_0 + \frac{P\delta_0}{1 - P/P_c}, \delta_0 = \frac{M_0 L_u^2}{8K_{eff}}, P_c = \frac{\pi K_{eff}}{(nL_u)^2} \quad (7)$$

式中: M_c 为构件弯矩计算值; M_0 为构件初始弯矩; P 为轴压荷载; P_c 为临界屈曲荷载; K_{eff} 为有效抗弯刚度; δ_0 为一阶挠度; L_u 为构件自由长度; n 为有效长度系数。

马恺泽等^[62]以含纤维量、偏心距及配箍率为变量,研究了 UHPC 柱的偏压性能。试验结果表明:UHPC 偏压构件破坏模式类似于普通混凝土偏压构件,不同之处在于钢纤维增韧阻裂使大偏心构件破坏过程明显呈延性破坏,小偏心构件延性有所提高,仍表现为脆性破坏;提高钢纤维掺量和配箍率可显著改善构件延性,配箍率相同时试件开裂、极限荷载随钢纤维掺量增加而提高,纤维掺量相同时配箍率只对极限荷载有影响;柱中挠度随偏心距增加而增大,极限挠度随纤维掺量提高而增加。采用等效矩形应力图简化计算区别于文献[60]的等效三角形应力图简化模型,建立的平衡方程用试验结果反算出能反映纤维贡献的受拉区的等效系数,建议的等效系数取值为 0.4,与文献[60]相一致。

3 箍筋约束 UHPC 柱受压影响因素

3.1 配箍率

箍筋间距和直径决定了配箍率大小,对于传统混凝土来说,适量增加构件配箍率可提高其承载力和峰值后延性,该结论同样适用于 UHPC 柱且约束效果较高,这是由于钢纤维赋予 UHPC 良好的变形性能,从而充分激发箍筋约束应力,增强约束效果。Yang 等^[4,43,46]认为提高配箍率可增加约束效果并显著改善延性,防止承载力陡降,提高构件残余承载力,采用细而密的箍筋约束与钢纤维协同工作效果更佳;高配箍率下的约束 UHPC 柱可呈现第二峰值^[3],如图 3 中的 C 点(图 3 中, f'_y 为纵筋屈服强度, A_c, A'_s 为截面净面积和纵筋总面积, N_u, ϵ_u 分别为柱极限承载力和峰值应变, N_y, ϵ_y 分别为纵筋屈服时柱的承载力和应变)。同时箍筋间距和形式决定了有效约束 UHPC 的面积,也是影响 UHPC 轴压柱约束性能的重要因素;复合箍筋可减少弱约束区,使约束应力分布更均匀,更好地约束核心 UHPC,而箍筋间距较小时能有效防止纵筋压曲,增大构件延性。

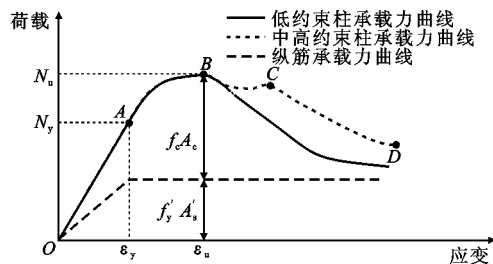


图 3 箍筋约束 UHPC 短柱的荷载-应变曲线

Fig. 3 Load-strain Curves of Stirrup-confined UHPC Short Column

3.2 箍筋强度

适量箍筋可对核心混凝土提供有效约束,使其处于三向受压状态,间接提高构件承载力。相对于传统混凝土来说,含纤维 UHPC 变形性能较好,可激发较高的约束应力,约束效率较高,因此若要充分利用 UHPC 的高性能,可配置高强箍筋来实现,以使高强箍筋与高致密的含纤维 UHPC 基体形成高强、高变形性能的钢-UHPC 体系,从而充分发挥含纤维 UHPC 的高强度和超强箍筋高约束应力的优势。Shin 等^[3,52]、Sugano 等^[46]均认为高韧性的 UHPC 需较高约束才能有效改善构件性能,采用高强钢筋与钢纤维组合可以显著提高高轴压下柱的稳定性和承载力,并能有效防止纵筋压曲外鼓。提高

箍筋强度来提高构件性能是仅次于配箍率的影响因素,但只有在适量配箍率的基础上提高箍筋强度才会有效。

3.3 钢纤维

UHPC 中钢纤维能延缓基体开裂和抑制保护层剥落,减小基体缺陷敏感性,提高抗损能力。钢纤维在 UHPC 中形成三维的乱向支撑体系可约束截面破坏,协助且代替部分箍筋工作,共同发挥约束效果,抑制纵筋受压屈曲,提高 UHPC 柱的轴压强度;钢纤维可显著降低 UHPC 的脆性,提高柱的纵横向变形能力,更大程度激发约束应力,配置高强箍筋可增加约束效率,亦可降低配箍率;对于含纤维 UHPC 短柱,钢纤维可分担剪力,提高柱的抗剪承载力,对于含纤维 UHPC 长柱及偏压柱,钢纤维的抗拉贡献不可忽略,可提高构件的抗弯承载力。因此,考虑钢纤维的抗压、抗剪及抗拉弯贡献应是 UHPC 柱与传统混凝土柱的本质区别,根据钢纤维对构件性能的有益贡献,建议 UHPC 构件设计时充分考虑纤维特性适当减少配筋。Hosinieh 等^[43,46]研究得出钢纤维与箍筋具有混合效应,钢纤维对低约束柱峰值后延性的贡献显著,但对高约束柱贡献较小,且掺入钢纤维和增大配箍率亦可提高 UHPC 柱的抗侧力性能。钢纤维取向对 UHPC 柱承载力有显著影响,且高掺率钢纤维能有效约束截面破坏,是防止保护层剥落和纵筋屈曲的有效措施^[43,53]。

3.4 UHPC 强度和构件尺寸参数

对于传统混凝土,增加混凝土强度会使轴压下的横向变形减小,被动约束效率降低,使得高强度混凝土需要更多的钢筋来约束^[63-64],该结论对于高强度、高韧性的 UHPC 也适用。Shin 等^[3,52]研究表明:在相同的约束条件下,UHPC 抗压强度的提高对约束 UHPC 柱的承载力影响较小,但构件的延性、韧性有所降低;高强度 UHPC 构件需要较高的约束量才能达到与低强度构件相同的轴压特性。增加 UHPC 强度对偏压构件开裂、极限荷载均有提高作用,且影响程度较一致^[59-60],但对构件可靠度指标影响较小^[57]。箍筋约束 UHPC 柱的尺寸参数对受压性能也有一定影响,试验得出 UHPC 柱高宽比可显著影响开裂区段响应^[50];箍筋约束 UHPC 柱的截面形状对保护层剥落影响较小,但圆形螺旋箍筋比方形箍筋更能有效约束核心 UHPC^[52]。

3.5 UHPC 保护层

约束 UHPC 柱不同于脆性较大的高强混凝土柱,UHPC 保护层在破坏时不会脱落。Shin 等^[3,57]

试验结果表明,在 UHPC 柱达到峰值荷载 B 点(图 3)之前,纵筋已经屈服,B 点之后保护层逐渐退出工作,使得承载力有所降低,但由于钢纤维的桥联作用使保护层并未剥落。B 点之后构件性能由有效约束 UHPC 面积和配箍量所决定,核心 UHPC 变形增大激发箍筋约束应力,使 UHPC 处于三向受压状态,强度有所提高(对于低约束构件提高较少),之后核心 UHPC 达到约束抗压强度,构件逐渐失去承载力。

根据 UHPC 保护层对构件轴压性能的影响,将箍筋约束 UHPC 柱的承载力按规范 GB 50010—2010^[65]轴压短柱承载力公式(8)计算,其钢筋与混凝土分别承担的荷载见图 3。文献[3],[43],[49],[51],[55]的承载力试验数据 $N_{u,t}$ 与计算值 $N_{u,c}$ 的比值见图 4,结果显示 $N_{u,t}/N_{u,c}$ 的平均值为 1.06,变异系数为 7.89%,说明 UHPC 柱的极限承载力可偏保守地按普通混凝土轴压短柱承载力公式计算,与文献[49],[57]研究结果相符。

$$N_{u,c}=0.9(f_c A_c + f_y' A_s') \tag{8}$$

式中: $N_{u,c}$ 为轴压短柱承载力。

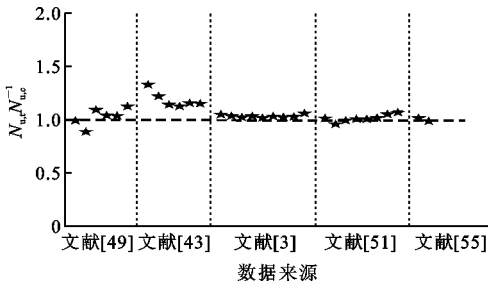


图 4 $N_{u,t}$ 和 $N_{u,c}$ 的比值

Fig. 4 Ratio of $N_{u,t}$ to $N_{u,c}$

4 箍筋约束 UHPC 柱研究存在问题与展望

4.1 国内外研究存在的问题

对已有文献中箍筋约束 UHPC 柱的受压试验参数进行总结(表 1),旨在寻找箍筋约束 UHPC 柱研究存在的不足之处,以完善其研究。

由表 1 可知,目前箍筋约束 UHPC 柱的研究有限,主要集中于小尺寸方形短柱的轴压性能研究,对中长柱、偏心受压等工况研究较少,且主要配置屈服强度 400~600 MPa 的钢筋。研究局限性主要表现为:构件尺寸偏小,不易反映工程实际受力;高韧性的 UHPC 应用于实际工程势必会减小构件尺寸,且因施工、荷载作用等不确定性因素使得不存在理想轴压构件,故不应局限于约束 UHPC 短柱轴压性能

表 1 箍筋约束 UHPC 柱试验参数

Tab. 1 Test Parameters of Stirrup-confined UHPC Columns

试件类型	数据来源	截面尺寸	高度/m	数量	受压形式	混凝土强度/MPa	含纤率/%	纵筋强度/MPa	箍筋强度/MPa
短柱	文献[43]	130 mm×158 mm	0.700	24	轴心	173.0~184.0		550.0	550.0
	文献[46]	200 mm×200 mm	0.590	9	轴心	159.0~222.0	0.00~2.00	685.0	700.0~1 400.0
	文献[49]	200 mm×200 mm	0.600	8	轴心	139.0~152.0	1.25~1.50	560.0~870.0	560.0
		250 mm×250 mm	1.250	7	偏心	139.0~152.0	1.25	700.0	560.0
	文献[43]	250 mm×250 mm	1.000	6	轴心	124.6~137.8	2.50	455.0	453.0
	文献[3]	220 mm×220 mm	0.900	9	轴心	162.8~180.5	1.50	574.7	565.0
	文献[52]	φ250~340	0.900	6	轴心	162.8~180.5	1.50	491.0~575.0	554.5~567.0
	文献[4]	φ102	0.203	21	轴心	151.0	2.00	未配筋	414.0
	文献[51]	200 mm×200 mm	1.000	10	轴心	212.4	1.50~2.00	400.0~600.0	500.0
		φ225~300	1.000	6	轴心	212.4	2.00	600.0	500.0
	文献[61]	200 mm×200 mm	1.200	8	偏心	100.0~106.0	0.00~1.50	439.0	459.0
	文献[50]	100 mm×100 mm, 70 mm×70 mm	0.400	8	轴心	132.0	2.00	520.0~638.0	638.0
	文献[59]	(150~300) mm× 200 mm	1.200	22	偏心	110.8~139.6	0.00~1.50	385.0~395.0	270.0
	文献[62]	200 mm×150 mm	1.000	7	偏心	106.4~121.6	0.00~2.00	472.0	568.0
	文献[57]	150 mm×150 mm	0.550	18	偏心	127.1~132.0	1.50	未配筋	未配筋
长柱	文献[45]	200 mm×200 mm, 80 mm×80 mm φ100~180	2.725~ 4.358	77	轴心,偏心	137.0~154.0	2.00~6.00		
	文献[44]	120 mm×120 mm	2.790	8	偏心	151.1~176.4		500.0	
	文献[53]	150 mm×150 mm	1.450	6	轴心,偏心	140.0~155.0	2.00	550.0	未配筋
	文献[55]	100 mm×140 mm	0.400~ 4.000	10	轴心	125.1~135.5	1.00	460.6	
		100 mm×140 mm	0.400~ 4.000	10	轴心	145.9~178.6	2.00	462.1	

研究,也该开展约束 UHPC 中长柱偏压性能的研究;钢纤维赋予 UHPC 良好的延展性,会激发更高的约束应力,若采用中低强度钢筋进行约束,势必会造成箍筋先于核心混凝土破坏屈服,导致 UHPC 柱性能降低,故不应局限于中低强度钢筋约束性能的研究。

4.2 展 望

目前国内外对箍筋约束 UHPC 柱的研究尚处于受压力学性能的试验研究阶段,未形成较为完善的理论体系和设计规范。随着 UHPC 制备技术的不断发展,其在土木工程中的应用前景良好^[66],需要对箍筋约束 UHPC 柱的力学性能 and 设计方法展开深入和系统的研究,主要包括:

(1)由于纤维形状、纤维特征值、纤维掺量等变化,会使 UHPC 具有应变硬化或软化行为,需要研究 UHPC 应变硬化或软化行为对约束 UHPC 柱性能的影响规律;同时,箍筋与纤维的协同组合效应、钢纤维的替筋率也有待深入研究。

(2)对考虑二阶效应的 UHPC 偏压中长柱的理论分析有待完善,需要深化对约束 UHPC 中长柱受压特性和承载力、变形计算方法的研究。

(3)在构件服役期间 UHPC 的徐变使得侧向挠度和竖向变形增大,产生的附加弯矩会降低柱承载力,需研究徐变对约束 UHPC 柱性能的影响规律。

(4)目前对能较好反映工程实际的足尺柱研究较少,对箍筋约束 UHPC 柱的尺寸效应研究尚未开展。

(5)目前对普通钢筋约束 UHPC 柱的研究较多,为了充分利用 UHPC 的高性能,高强钢筋约束 UHPC 柱的受压特性是拟研究的重点。

(6)对于约束混凝土模型而言,开发预测精度较高的箍筋约束 UHPC 柱专用本构是拟研究的关键,包括受压应力-应变关系、峰值应力和应变的计算方法等,以满足 UHPC 结构设计和非线性理论分析需要;对 UHPC 柱中箍筋约束应力的合理取值亦是需要解决的关键问题之一。

(7)在高强箍筋 UHPC 柱抗震性能研究中,应考虑纤维增强 UHPC 和高强钢筋的特性,建立抗震计算理论和设计方法等。

5 结 语

本文在国内外大量的文献基础上,对约束普通、高强混凝土的已有研究成果进行梳理,根据其研究成果总结了 6 种已有的约束混凝土本构模型,如抛物线-线性模型、抛物线-指数模型等。重点总结了箍筋约束 UHPC 柱受压特性的最新研究成果和进展,并讨论了影响其本构模型和受压性能的主要因素,如配箍率、箍筋强度、钢纤维等,为今后研究箍筋约束 UHPC 柱本构及分析受压约束机制、破坏机理等提供参考;分析了目前箍筋约束 UHPC 柱研究方面存在的不足,并展望了未来主要研究内容和发展方向。

参考文献:

References:

- [1] 覃维祖,曹 峰. 一种超高性能混凝土——活性粉末混凝土[J]. 工业建筑,1999,29(4):16-18.
QIN Wei-zu, CAO Feng. A New Ultra-high Performance Concrete-reactive Powder Concrete[J]. Industrial Construction,1999,29(4):16-18.
- [2] 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 Bao-chun, JI Tao, HUANG Qing-wei, et al. Review of Research on Ultra-high Performance Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2014,31(3):1-24.
- [3] SHIN H O, MIN K H, MITCHELL D. Confinement of Ultra-high-performance Fiber Reinforced Concrete Columns[J]. Composite Structures,2017,176:124-142.
- [4] YANG X, ZOHREVAND P, MIRMIRAN A. Behavior of Ultrahigh-performance Concrete Confined by Steel[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2016,28(10):04016113.
- [5] RICHART F E, BRANDTZAEG A, BROWN R L. The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression[R]. Urbana Champaign:University of Illinois at Urbana Champaign,1929.
- [6] CHAN W W L. The Ultimate Strength and Deformation of Plastic Hinges in Reinforced Concrete Frameworks[J]. Magazine of Concrete Research,1955,7(21):121-132.
- [7] SHEIKH S A. A Comparative Study of Confinement Models[J]. ACI Journal,1982,79(4):296-306.
- [8] SOLIMAN M T M, YU C W. The Flexural Stress-strain Relationship of Concrete Confined by Rectangular Transverse Reinforcement[J]. Magazine of Concrete Research,1967,19(61):223-238.
- [9] SHAH S P, FAFITIS A, ARNOLD R. Cyclic Loading of Spirally Reinforced Concrete[J]. Journal of Structural Engineering,1983,109(7):1695-1710.
- [10] KENT D C, PARK R. Flexural Members with Confined Concrete[J]. Journal of the Structural Division,1971,97(7):1969-1990.
- [11] VALLENAS J, BERTERO V V, POPOV E P. Concrete Confined by Rectangular Hoops and Subjected to Axial Loads[R]. Washington DC:NASA,1977.
- [12] POPOVICS S. A Numerical Approach to the Complete Stress-strain Curve of Concrete[J]. Cement and Concrete Research,1973,3(5):583-599.
- [13] SHEIKH S A, UZUMERI S M. Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns[J]. Journal of the Structural Division,1982,108(12):2703-2722.
- [14] 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.
- [15] 过镇海,张秀琴. 混凝土在反复荷载作用下的应力-应变全曲线[J]. 工业建筑,1981,11(9):14-17,13.
GUO Zhen-hai, ZHANG Xiu-qin. Stress-strain Complete Curve of Concrete Under Cyclic Loading[J]. Industrial Construction,1981,11(9):14-17,13.
- [16] 过镇海,张秀琴,张达成,等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. 建筑结构学报,1982,3(1):1-12.
GUO Zhen-hai, ZHANG Xiu-qin, ZHANG Da-cheng, et al. Experimental Investigation of the Complete Stress-strain Curve of Concrete[J]. Journal of Building Structures,1982,3(1):1-12.
- [17] 张秀琴,过镇海,王传志. 反复荷载下箍筋约束混凝土的应力-应变全曲线方程[J]. 工业建筑,1985,15(12):16-20.
ZHANG Xiu-qin, GUO Zhen-hai, WANG Chuan-zhi. Stress-strain Complete Curve Equation of Concrete Confined with Stirrups Under Cyclic Loading[J]. Industrial Construction,1985,15(12):16-20.
- [18] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2013.
GUO Zhen-hai. Principles of Reinforced Concrete [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press,2013.
- [19] 戴自强,陆继赞,张祖光,等. 约束混凝土柱强度和变

- 形的试验研究[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 1984, 17(4): 16-24.
- DAI Zi-qiang, LU Ji-zhi, ZHANG Zu-guang, et al. Research on the Strength and the Deformation Behavior of Confined Concrete Columns[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 1984, 17(4): 16-24.
- [20] 戴自强, 陆继贇, 张祖光, 等. 高强约束混凝土短柱强度研究[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 1988, 21(2): 109-115.
- DAI Zi-qiang, LU Ji-zhi, ZHANG Zu-guang, et al. Research on the Strength of Confined High-strength Concrete Short Columns[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 1988, 21(2): 109-115.
- [21] NAGASHIMA T, SUGANO S, KIMURA H, et al. Monotonic Axial Compression Test on Ultra-high-strength Concrete Tied Columns[C]//RANGUELOV B, HOUSNER G. Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering. Madrid: International Association for Earthquake Engineering, 1992: 2983-2988.
- [22] CUSSON D, PAULTRE P. High-strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(3): 783-804.
- [23] CUSSON D, PAULTRE P. Stress-strain Model for Confined High-strength Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3): 468-477.
- [24] 支运芳, 牛绍仁, 张义琢. 箍筋约束高强砼短柱受力性能的试验研究[J]. 土木与环境工程学报, 1996, 18(2): 53-60.
- ZHI Yun-fang, NIU Shao-ren, ZHANG Yi-zuo. Experimental Research on Mechanical Behavior of High-strength Concrete Short Columns Confined with Stirrups[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 1996, 18(2): 53-60.
- [25] RAZVI S R, SAATCIOGLU M. Strength and Deformability of Confined High-strength Concrete Columns[J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(6): 678-687.
- [26] SAATCIOGLU M, RAZVI S R. High-strength Concrete Columns with Square Sections Under Concentric Compression[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(12): 1438-1447.
- [27] RAZVI S R, SAATCIOGLU M. Circular High-strength Concrete Columns Under Concentric Compression[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(5): 817-826.
- [28] RAZVI S, SAATCIOGLU M. Confinement Model for High-strength Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(3): 281-289.
- [29] LIU J, FOSTER S J, ATTARD M M. Strength of Tied High-strength Concrete Columns Loaded in Concentric Compression[J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(1): 149-156.
- [30] 钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(10): 1369-1373.
- QIAN Jia-ru, CHENG Li-rong, ZHOU Dong-liang. Behavior of Axially Loaded Concrete Columns Confined with Ordinary Hoops[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2002, 42(10): 1369-1373.
- [31] LEGERON F, PAULTRE P. Uniaxial Confinement Model for Normal- and High-strength Concrete Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2): 241-252.
- [32] TAN T H, NGUYEN N B. Flexural Behavior of Confined High-strength Concrete Columns[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(2): 198-205.
- [33] 史庆轩, 杨 坤, 刘维亚, 等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 141-149.
- SHI Qing-xuan, YANG Kun, LIU Wei-ya, et al. Experimental Study on Mechanical Behavior of High Strength Concrete Confined by High-strength Stirrups Under Concentric Loading[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(1): 141-149.
- [34] 杨 坤, 史庆轩, 王秋维, 等. 高强箍筋约束混凝土轴心受压性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(2): 161-167, 172.
- YANG Kun, SHI Qing-xuan, WANG Qiu-wei, et al. Finite Element Analysis of Axially Loaded Concrete Square Columns Confined by High-strength Lateral Ties[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2009, 41(2): 161-167, 172.
- [35] 杨 坤, 史庆轩, 赵均海, 等. 高强箍筋约束高强混凝土本构模型研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 34-41.
- YANG Kun, SHI Qing-xuan, ZHAO Jun-hai, et al. Study on the Constitutive Model of High-strength Concrete Confined by High-strength Stirrups [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(1): 34-41.
- [36] 史庆轩, 王 南, 田 园, 等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压应力-应变全曲线研究[J]. 建筑结构学

- 报, 2013, 34(4): 144-151.
- SHI Qing-xuan, WANG Nan, TIAN Yuan, et al. Study on Stress-strain Relationship of High-strength Concrete Confined with High-strength Stirrups Under Axial Compression [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 144-151.
- [37] 史庆轩, 王 南, 王秋维, 等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压本构关系研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(5): 131-137.
- SHI Qing-xuan, WANG Nan, WANG Qiu-wei, et al. Uniaxial Compressive Stress-strain Model for High-strength Concrete Confined with High-strength Lateral Ties [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 131-137.
- [38] 史庆轩, 戎 翀, 张 婷, 等. 约束混凝土实用本构关系模型 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1): 49-54.
- SHI Qing-xuan, RONG Chong, ZHANG Ting, et al. A Practical Stress-strain Model for Confined Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1): 49-54.
- [39] 胡 钟. 高强箍筋约束高强混凝土柱在轴压下的力学性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- HU Zhong. Studies on the Behavior of High-strength Concrete Columns with High-strength Transverse Reinforcement Under Concentric Compression [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [40] 宋 佳, 李振宝, 杜修力. 约束混凝土轴心抗压强度计算方法 [J]. 混凝土, 2012(7): 10-12.
- SONG Jia, LI Zhen-bao, DU Xiu-li. Calculation Method for Ultimate Strength of Reinforcement Confined Concrete Under Axial Loading [J]. Concrete, 2012(7): 10-12.
- [41] 赵作周, 张石昂, 贺小岗, 等. 箍筋约束高强混凝土受压应力-应变本构关系 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 96-103.
- ZHAO Zuo-zhou, ZHANG Shi-ang, HE Xiao-gang, et al. Stress-strain Relationship of Stirrup-confined High-strength Concrete [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5): 96-103.
- [42] 周文峰, 鲁 瑛. 约束混凝土文献综述 [J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(3): 144-146, 168.
- ZHOU Wen-feng, LU Ying. The Summarization of Literature of Confined Concrete [J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(3): 144-146, 168.
- [43] HOSINIEH M M, AOUDÉ H, COOK W D, et al. Behavior of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete Columns Under Pure Axial Loading [J]. Engineering Structures, 2015, 99: 388-401.
- [44] HEIMANN M, SCHMIDT H, TRAN N L, et al. Reliability of Highly Stressed UHPC-columns [J]. Beton-und Stahlbetonbau, 2013, 108(1): 2-12.
- [45] AARUP B, JENSEN L R, APS H C, et al. Slender CRC Columns [J]. Nordic Concr Res, 2005, 34: 80-97.
- [46] SUGANO S, KIMURA H, SHIRAI K. Study of New RC Structures Using Ultra-high-strength Fiber-reinforced Concrete (UFC) — The Challenge of Applying 200 MPa UFC to Earthquake Resistant Building Structures [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2007, 5(2): 133-147.
- [47] EMPELMANN M, TEUTSCH M, STEVEN G. Load-bearing Behavior of Centrally Loading UHPFRC Columns [C]//FEHLING E, SCHMIDT M, STURWALD S. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel: University of Kassel, 2008: 521-528.
- [48] EMPELMANN M, TEUTSCH M, STEVEN G. Expanding the Application Range of RC-columns by the Use of UHPC [C]//WALRAVEN J C, STOELHORST D. Tailor Made Concrete Structures. London: CRC Press, 2008: 461-468.
- [49] STEVEN G, EMPELMANN M. UHPFRC-columns with High-strength Longitudinal Reinforcement [J]. Beton-und Stahlbetonbau, 2014, 109(5): 344-354.
- [50] RIDHA M M S, ALI T K M, ABBAWI Z W. Behavior of Axially Loaded Reactive Powder Concrete Columns [J]. Journal of Engineering and Sustainable Development, 2013, 17(2): 193-209.
- [51] MIN K H, CHOI H S. A Study for Application of 180 MPa Ultra High Performance Concrete to Compressive Members [J]. Journal of the Korea Academia-industrial Cooperation Society, 2015, 16(7): 4930-4935.
- [52] SHIN H O, MIN K H, MITCHELL D. Uniaxial Behavior of Circular Ultra-high-performance Fiber-reinforced Concrete Columns Confined by Spiral Reinforcement [J]. Construction and Building Materials, 2018, 168: 379-393.
- [53] MALIK A R, FOSTER S J. Behaviour of Reactive Powder Concrete Columns Without Steel Ties [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2008, 6(2): 377-386.
- [54] AL-AZZAWI A A, ALI A S. Prediction of Compressive Strength and Ultimate Loads for Reactive Powder Concrete Columns [J]. International Journal of Engineering Sciences, 2015, 4(3): 28-38.
- [55] 刘 畅. 活性粉末混凝土偏心受压构件破坏机理的试验研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.

- LIU Chang. Experimental Study on Failure Mechanism of Reactive Powder Concrete Members Under Eccentric Compression[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [56] 康 佩. 活性粉末混凝土构件在受弯、受剪、受压状态下的设计计算方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
KANG Pei. Design Calculation Methods of Reactive Powder Concrete Elements Under the States of Bending, Shearing and Compression[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [57] 刘冬明. RPC 混凝土轴心受压柱试验研究及可靠度分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
LIU Dong-ming. Experimental Study and Reliability Analysis of Reactive Powder Concrete Columns Under Uniaxial Compression[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [58] 唐昌辉, 刘冬明. 活性粉末混凝土柱轴心受压试验研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(1): 7-11.
TANG Chang-hui, LIU Dong-ming. Experimental Study on Reactive Powder Concrete Columns Under Uniaxial Compression[J]. China Sciencepaper, 2016, 11(1): 7-11.
- [59] 施成华, 马 辉, 龙广成, 等. 活性粉末混凝土偏压构件受力性能试验研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(5): 192-199, 216.
SHI Cheng-hua, MA Hui, LONG Guang-cheng, et al. Mechanical Property Test for Reactive Powder Concrete Columns Under Eccentric Compression [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(5): 192-199, 216.
- [60] SHI C H, LONG M, CAO C Y, et al. Mechanical Property Test and Analytical Method for Reactive Powder Concrete Columns Under Eccentric Compression[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(4): 1307-1318.
- [61] HUNG C C, HU F Y, YEN C H. Behavior of Slender UHPC Columns Under Eccentric Loading[J]. Engineering Structures, 2018, 174: 701-711.
- [62] 马恺泽, 马煜东, 刘伯权. 超高性能混凝土柱偏心受压性能试验研究[J]. 工程科学与技术, 2018, 50(3): 201-208.
MA Kai-ze, MA Yu-dong, LIU Bo-quan. Experimental Study on Eccentric Compression Behavior of Ultra-high Performance Concrete Columns [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(3): 201-208.
- [63] CHUNG H S, YANG K H, LEE Y H, et al. Strength and Ductility of Laterally Confined Concrete Columns [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29(6): 820-830.
- [64] HONG K N, HAN S H. Stress-strain Model of High-strength Concrete Confined by Rectangular Ties[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2005, 9(3): 225-232.
- [65] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [66] 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 Bao-chun, WEI Jian-gang, SU Jia-zhan, 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.