

高强方钢管约束 UHPC 短柱轴压性能研究

张瀚文, 欧智菁, 韦建刚

(福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 使用通用有限元软件 ABAQUS 分析了钢材屈服强度、方钢管厚度、UHPC 强度对高强方钢管约束 UHPC 短柱轴压性能的影响。首先使用 ABAQUS 对已有的普通钢管约束混凝土试验进行计算, 结果与试验值基本一致。在此基础上建立了高强方钢管约束 UHPC 短柱模型, 对比了不同参数下构件荷载-位移曲线、荷载-纵向应变曲线的变化特征。研究表明: 构件前期刚度受混凝土强度影响很小, 但由于增加混凝土强度使构件套箍系数降低, 工作曲线下降段斜率增大, 延性下降。钢管屈服强度的提高对构件的延性有很大改善, 但对极限承载力影响较小。核心混凝土强度是影响高强钢管约束 UHPC 短柱承载能力的主要因素, 由于钢管不直接承担纵向荷载, 仅对混凝土产生材料性能上的影响, 钢管约束混凝土应看做混凝土的一种。

关键词: 高强方钢管; 钢管约束混凝土; 极限承载力; 超高性能混凝土

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2019)04-0314-07

Study on the axial compression performance of UHPC short columns restrained by high-strength square steel tubes

ZHANG Hanwen, OU Zhijing, WEI Jiangang

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The effects of steel yield strength, square steel tube thickness and UHPC strength on the axial compression performance of UHPC short column restrained by high strength square steel tube were analyzed by using general finite element software ABAQUS. Firstly, ABAQUS was used to conduct calculations for the existing confined concrete test of ordinary steel tubes, and the results were basically consistent with the test values. On this basis, the UHPC short column model of high-strength square steel tubes was established, and the change characteristics of load-displacement curve and load-longitudinal strain curve of components under different parameters were compared. The research shows that concrete strength has little influence on the initial stiffness of components, but the increase of concrete strength reduces the collar coefficient of components, increases the slope of the downward section of the work curve, and decreases the ductility. The increase of the yield strength of steel pipes can greatly improve the ductility of the components, but it has little influence on the ultimate bearing capacity. The strength of core concrete is the major factor that affects the bearing capacity of UHPC short column restrained by high-strength steel tubes. Since steel tubes do not bear longitudinal load directly, and it only affects the material performance of the concrete, steel tube restrained concrete should be regarded as a kind of concrete.

Keywords: high-strength square steel pipes; steel tube confined concrete; ultimate bearing capacity; ultra-high performance concrete

收稿日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(5187081011)

第一作者简介: 张瀚文(1995-), 男, 黑龙江佳木斯人, 硕士研究生, 研究方向: 钢管混凝土组合结构。

通信作者: 欧智菁(1975-), 女, 福建南平人, 教授, 博士, 研究方向: 钢管混凝土组合结构。

钢管约束混凝土与钢管混凝土相比可对核心混凝土提供更大的侧向约束作用,由于纵向荷载不直接作用于钢管,可以避免钢管过早的鼓曲^[1-2]。

20 世纪 90 年代,具有更高强度和耐久性的超高性能混凝土 (UHPC, Ultra-High Performance Concrete) 应时而生。近年来,我国对 UHPC 的研究有了很大进展,作为一种新型建筑材料,UHPC 具有卓越的力学性能。但随着抗压强度的增加,脆性特征显著,在极限受力状态下,易发生脆性破坏,工作可靠性低^[3-4]。为了克服 UHPC 这一缺点,将其灌入钢管中,于是新型的钢管约束 UHPC 组合结构应运而生。

但普通的钢管约束 UHPC 柱的荷载-位移曲线在峰值荷载后迅速下降。保证钢管约束 UHPC 柱具有良好受压延性的前提条件是钢管对 UHPC 提供足够有效的约束作用。追本溯源,这主要是由于钢管与 UHPC 之间物理性能出现了不匹配。由此可知,采用普通钢管约束 UHPC 在材料组合上存在一定问题。目前国内外学者对钢管约束 UHPC 柱的力学性能做了大量的研究。陈盛等^[5]通过普通圆钢管约束 UHPC 试验研究,提出了有无钢纤维、配筋对钢管约束 UHPC 承载力的影响以及构件的破坏特征,并提出了极限承载力计算公式,但由于钢管并没有为 UHPC 提供有效的约束作用,使其荷载-位移曲线下降段十分陡峭。Haghinejad.A 等^[6]通过试验提出,构件的含钢率和钢管的强度对核心混凝土的侧向约束作用密切相关。较薄的钢管和屈服强度更高的钢管可以对核心混凝土提供更大的侧向约束作用。Xiong.D.X 等^[7]试验得出,含钢率大于 0.3 时,钢管混凝土柱的荷载-位移曲线达到极限荷载后的突降脆性破坏问题有望得到改善,但无限制的增长径厚比会大幅度增加钢材用量,使组合结构的经济效应明显降低。Richard Liew 等^[8-9]提出了钢管的屈服应变应小于核心 UHPC 的极限应变,从而更好的发挥全截面受压钢管 UHPC 柱的塑性特征。周凯凯等^[10]通过高强方钢管 UHPC 柱试验,并收集相关的试验数据,通过分析提出了 UHPC 与高强钢管组合的设计指导意见。欧智菁等^[11]对国内外工程规范中的钢管混凝土承载力计算公式进行了整理与对比,通过试验修正了极限承载力计算公式。

综上所述,若想最大程度地发挥钢管与 UHPC 之间相互约束作用,必须使用与之匹配的高强钢管。截至目前,国内外还没有高强方钢管约束 UHPC 短柱的相关研究,本文针对影响高强方钢管约束 UHPC 短柱轴压性能的主要因素进行了分析,对不同的钢管屈服强度、UHPC 强度、含钢率做了对比。研究了不同参数下工作曲线在各个阶段的变化情况,总结了此类构件的受力机理。

1 有限元建模与验证

1.1 有限元建模方法

双折线模型是比较具有代表性的钢材本构,其中强化阶段折线斜率为 $2.1 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 。查阅国内外大量有关高强钢材的资料后发现,高强钢材的弹性模型和普通钢材相差不大,但泊松比略高,有限元模拟中,高强钢材弹性模型取 201 GPa,泊松比 0.285。

目前较多研究人员采用韩林海等^[12]提出的混凝土本构关系模型。在查阅相关资料后发现,钢纤维的掺入会对混凝土的弹性模量产生主要影响^[5],并通过混凝土本构关系反应出钢纤维的掺入对混凝土延性的影响。但在钢管约束混凝土结构中,钢管可提高混凝土的韧性,本文选用无钢纤维的 UHPC 参数进行有限元模拟。其中 UHPC 弹性模量 35.2 GPa,泊松比 0.19。

核心混凝土和钢管均采用实体单元建模。网格划分对计算结果影响很大,考虑到计算机配置以及拟合精确度的要求,图 1 为网格划分示意图。

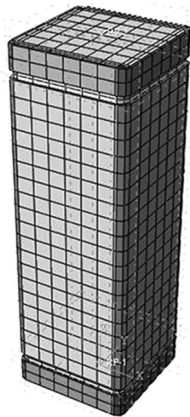


图 1 试件有限元图

Fig.1 Finite element diagram of the specimen

选择面与面接触作为钢管与混凝土的接触方式,接触属性选择切向和法向作用,切向作用摩擦系数 $\mu = 0.3$ 、 $\tau = 0.4 \text{ N/mm}^2$ 。混凝土采用塑性损伤模型,参数设置:膨胀角 30° 、偏心率 0.1、黏性系数 0.000 1。

在顶部参考点施加位移对模型进行加载,模型底部通过铰接方式进行约束。

1.2 模型验证

选用了文献[13]中的 3 根钢管约束活性粉末混凝土短柱构件为验证对象,检验有限元分析方法的准确性。试件主要参数和试验测得的极限承载力、数值模拟极限承载力见表 1。

表 1 试验模型参数
Tab.1 Parameters of the test mode

编号	$L/$ ($D - t$)	$f_y/$ mm	$f_{co}/$ MPa	试验值 N_1/kN	有限元 值 N_2/kN	$(N_2 - N_1)/$ N_1
BR133-4.5	400	330	121.4	2 100.0	2 384.3	0.135
BR133-6	400	318	120.5	2 494.2	2 569.0	0.029
BR133-8	400	325	121.4	288 8.5	2 997.0	0.037

注: D 钢管直径,mm; L 构件长度,mm; t 钢管厚度,mm; f_y 钢管屈服强度; f_{co} 混凝土棱柱体抗压强度。

从图 2 可知,试验值与有限元模拟结果接近。由此可以判断,所使用的数值模拟方法可用于分析钢管约束混凝土承载力。

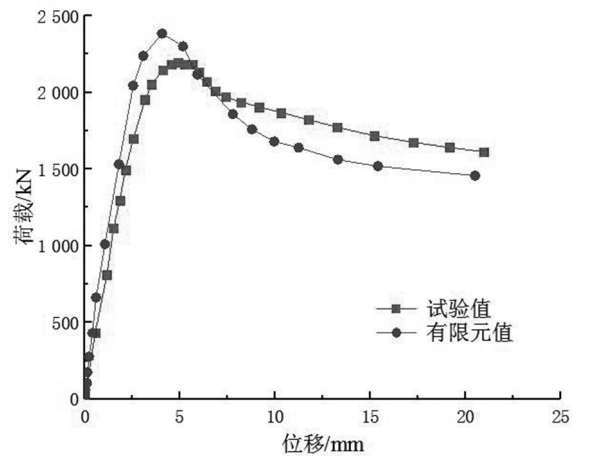


图 2 模型 133-4.5 荷载-位移曲线

Fig.2 Load-displacement curve of Model 133-4.5

2 轴压性能分析

考虑到高强方钢管约束 UHPC 短柱轴压性

能与 UHPC 强度、含钢率、钢管屈服强度有关,建立了 13 个高强方钢管约束 UHPC 短柱模型,模型具体尺寸见表 2、3、4。试件高 450 mm,角部有半径 20 mm 的圆角;STCC (steel tube confined concrete); B 为方钢管边长,mm; ξ 为套箍系数, $\xi = (A_s f_y)/(A_c f_c)$; A_s 和 A_c 分别为钢材和 UHPC 的面积,mm²; f_y 为钢管屈服强度; f_c 为 UHPC 轴心抗压强度; N_u 为极限承载力,kN; a 为含钢率。

表 2 混凝土强度的影响
Tab.2 Effects of concrete strength

编号	$B/$ mm	$t/$ mm	$f_y/$ MPa	$f_c/$ MPa	ξ	α	N_u/kN
STCC-1	150	3	460	120	0.312	0.075	2 695.86
STCC-2	150	3	460	140	0.268	0.075	3 061.89
STCC-3	150	3	460	160	0.234	0.075	3 425.23
STCC-4	150	3	460	180	0.208	0.075	3 931.6
STCC-5	150	3	460	200	0.175	0.075	4 200.25

表 3 钢材屈服强度的影响

Tab.3 Effects of yield strength of the steel

编号	B	t	$f_y/$ MPa	$f_c/$ MPa	ξ	α	N_u/kN
STCC-6	150	3	235	120	0.159	0.075	2 590.75
STCC-7	150	3	345	120	0.234	0.075	2 666.73
STCC-1	150	3	460	120	0.312	0.075	2 695.86
STCC-8	150	3	550	120	0.373	0.075	2 724.45
STCC-9	150	3	690	120	0.468	0.075	2 768.44

表 4 含钢率的影响

Tab.4 Effects of steel content

编号	B	t	$f_y/$ MPa	$f_c/$ MPa	ξ	α	N_u/kN
STCC-1	150	3	460	120	0.312	0.075	2 695.86
STCC-10	150	4	460	120	0.425	0.099	2 704.62
STCC-11	150	5	460	120	0.577	0.130	2 724.56
STCC-12	150	6	460	120	0.666	0.148	2 755.51
STCC-13	150	7	460	120	0.794	0.175	2 788.52

2.1 受力全过程分析

如图 3 为此类构件的破坏模式,钢管中部发

生明显屈曲时构件破坏,对核心混凝土的约束效果在整个构件高度范围内中间段最为明显。所选构件参数为:混凝土轴心抗压强度 $f_c = 120$ MPa,钢管屈服强度 $f_y = 460$ MPa,钢管厚度 $t = 3$ mm。将曲线分为弹性阶段、弹塑性阶段、荷载下降段、强化阶段对构件进行整体分析,如图 4。



图 3 STCC-1 构件破坏形态

Fig. 3 Failure mode of Component STCC-1

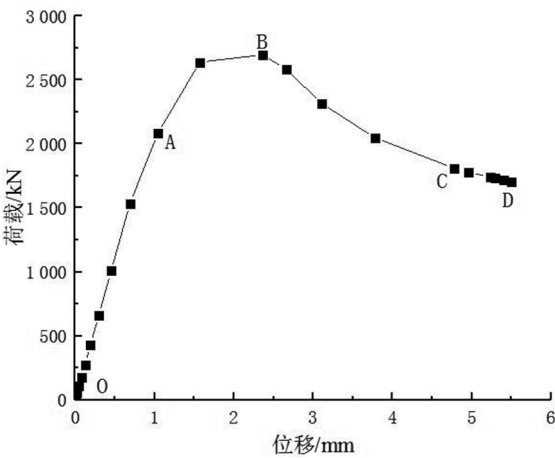


图 4 STCC-1 构件荷载-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curve of Component STCC-1

(1)弹性阶段(OA)

荷载-位移曲线在此时呈正比例变化,A 点约为极限承载力的 85%~90%,

此阶段钢管开始参与受力,钢管与核心混凝土之间黏结力不同,对此阶段钢管受力会有较大影响。并且黏结力越大构件刚度越大。

(2)弹塑性阶段(AB)

在轴压荷载作用下核心混凝土缓慢碎裂,但由于钢管提供的约束作用,构件并没有很快地达到极限荷载,此阶段钢管对混凝土的套箍作用逐渐变大,但钢管的横向变形系数很快超过钢材的

泊松比。

(3)荷载下降段(BC)

B 点为荷载-位移曲线的极值点,构件中部钢管逐渐发生鼓曲,核心混凝土外围被压碎,混凝土开始向外侧膨胀,逐渐丧失了承载力。此时钢管横向应变超过了纵向应变,横向变形系数增大,构件套箍系数降低,构件承载能力降低。由于采用了高强钢管,构件的荷载-位移曲线相比普通钢管约束 UHPC 短柱的荷载-位移曲线荷载下降段突降情况得到改善。

(4)钢管强化阶段(CD)

此时荷载-位移曲线逐渐变缓,钢材开始强化,钢管的横向应变增大,速度减慢,钢管对混凝土的约束作用又重新提升,承载能力逐渐稳定。

2.2 跨中核心混凝土纵向应力-应变曲线分析

2.2.1 混凝土强度的影响

图 5 为 5 种 UHPC 强度的高强方钢管约束 UHPC 短柱轴心荷载下的应力-应变曲线($f_y = 460$ MPa, $t = 3$ mm)。图 5 可观察出,随着混凝土强度的提高,极限荷载前的直线段逐渐增长,由于钢管约束混凝土本身的特点,可将其看做是混凝土的一种,而不是一种组合结构,钢管对混凝土只是材料性能增强的措施。

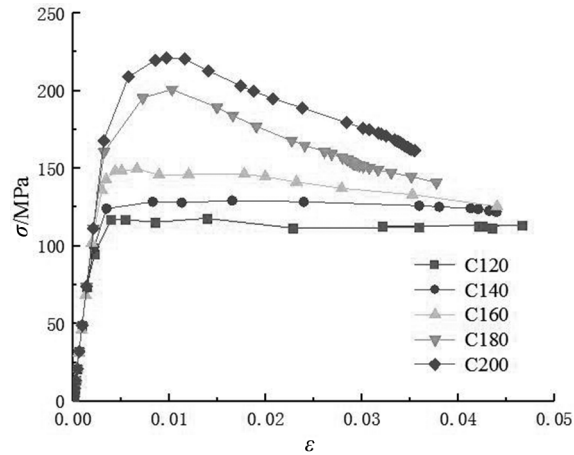


图 5 不同混凝土强度的构件应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of components with different concrete strengths

混凝土强度越大承载能力越高,所带来的后果是极限荷载后的膨胀情况也越明显,钢管强度没有随着提高导致构件延性下降。这是由于在荷载下降段时混凝土急剧膨胀,钢材此时已经进入塑流状态,钢管中部出现鼓曲未能给混凝土提供

足够有效的约束作用,套箍系数降低从而导致峰值点后延性下降。

在钢管进入强化阶段后,应力-应变曲线又逐渐平稳,甚至当混凝土强度低于 C180 时,即使混凝土膨胀情况很严重,钢管也能给混凝土提供足够的约束力。

2.2.2 钢材屈服强度的影响

图 6 为 5 种钢材强度的方钢管约束 UHPC 短柱轴向加载时的纵向应力-应变曲线($f_c = 120$ MPa, $t = 3$ mm)。从图 6 能够看出,钢材强度对曲线数值和形状影响均较大。由于混凝土强度相同,在弹性阶段和弹塑性阶段各构件纵向应力-应变曲线基本一致。钢材强度的变化对应力-应变曲线影响主要体现在极限荷载后的两个阶段。由于钢材强度的提升,抵抗环向抗拉的能力提高,在混凝土膨胀时,钢管的横向变形系数增长越慢,曲线下降段越平缓,有效地抑制了混凝土剪切破坏的发生。

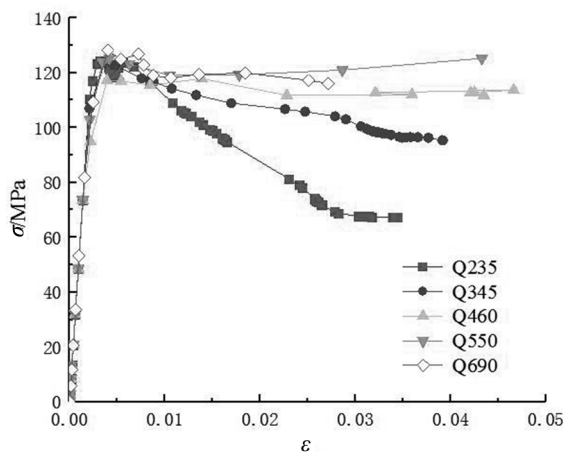


图 6 不同钢材屈服强度的构件应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of components with different steel yield strengths

2.2.3 含钢率的影响

图 7 为 5 种含钢率对方钢管约束 UHPC 短柱轴心荷载时的纵向应力-应变曲线($f_c = 120$ MPa, $f_y = 460$ MPa)。从图 7 可以看出,在弹性阶段和弹塑性阶段曲线重合,这主要是由于钢管不直接承担纵向受力,所受荷载主要由核心混凝土承担。在荷载下降段,随着构件含钢率的提高,曲线逐渐平缓。在强化阶段时,核心混凝土基本被压碎,由于厚度大的钢管具有更强的抵抗变形能力,钢管中部鼓曲得到改善,使其可以对核心混凝土提供更大的约束作用,所以曲线逐渐出现了

回升。

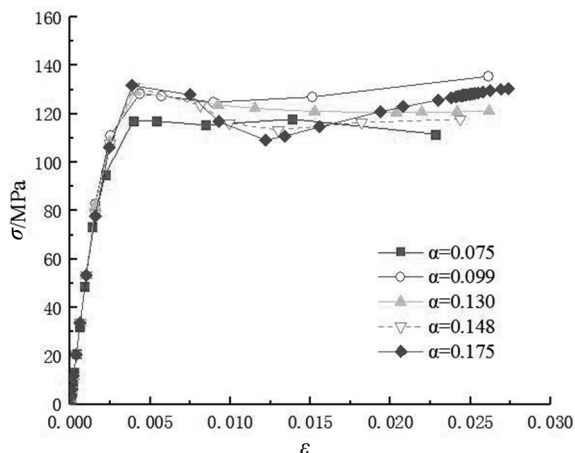


图 7 含钢率的构件应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of components with steel rate

2.3 极限承载力分析

2.3.1 混凝土强度的影响

图 8 为不同 UHPC 强度的方钢管约束 UHPC 短柱核心混凝土在轴心荷载下的纵向荷载-位移关系曲线($f_y = 460$ MPa, $t = 3$ mm)。混凝土强度等级如图所示。由图 8 可知,核心混凝土从 C120 提高到 C200,构件极限承载力分别为 2 695.86、3 061.89、3 425.23、3 931.6、4 200.25 kN。承载力提高比例为 17.4%、33.3%、49.2%、71.2%,相对于混凝土为 C120 的构件,将钢管约束混凝土看成是一种组合结构还是混凝土的一种有着本质上的区别,钢管约束混凝土在受力过程中,钢管不直接承担纵向荷载,可将其看成混凝土柱,钢管在其中对混凝土的作用,仅体现在混凝土材料性能上的增强和后期延性的改变。

2.3.2 钢材屈服强度的影响

图 9 为不同钢材强度的方钢管约束 UHPC 短柱核心混凝土在轴向加载时的荷载-位移曲线($f_c = 120$ MPa, $t = 3$ mm)。钢材屈服强度为: 235、345、460、550、690 MPa。5 根构件的极限承载力分别为 2 590.75、2 666.73、2 695.86、2 724.45、2 768.44 kN,相对于钢材强度最低的构件,其余构件的极限承载力分别提高了 2.9%、4.0%、5.2%、6.8%;极限承载力只有小幅度提高,其原因是钢材不直接承担纵向荷载,钢材屈服强度增加对构件极限承载力只有小幅度提高,但套箍系数的增加使构件延性得到改善。

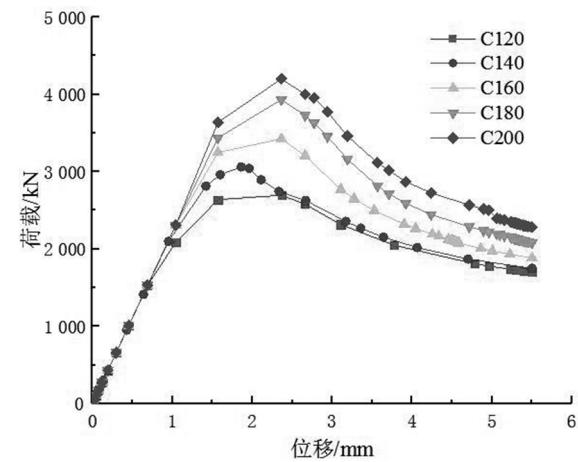


图 8 不同混凝土强度时的荷载-位移曲线
Fig.8 Load-displacement curves of different concrete strengths

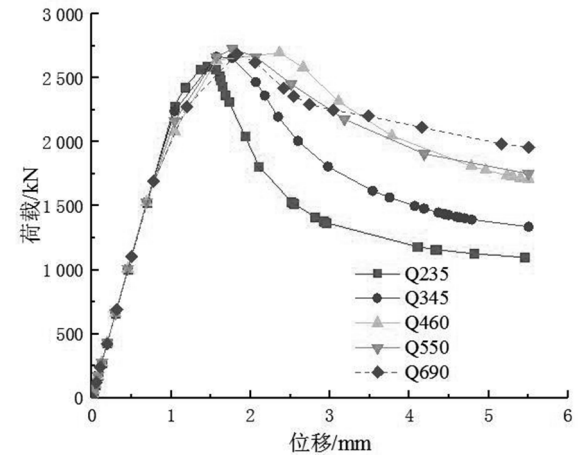


图 9 不同钢材屈服强度时的荷载-位移曲线
Fig.9 Load-displacement curves of different steel yield strengths

2.3.3 含钢率的影响

图 10 为 5 种含钢率时方钢管约束 UHPC 短柱在轴心荷载时的荷载-位移曲线 ($f_c = 120$ MPa, $f_y = 460$ MPa)。含钢率设置 5 组水平: 0.175、0.148、0.130、0.099、0.075。极限承载力分别为 2 788.52、2 755.51、2 724.56、2 704.62、2 695.86 kN,相对于含钢率为 0.075 的构件其他

构件极限承载力变化率为 2.38%、3.26%、2.2%、3.4%;从图 10 可观察出,含钢率增大构件刚度有小幅提高的趋势,曲线弹性阶段重合段缩短。构件延性随着含钢率的增大有较大的改善。

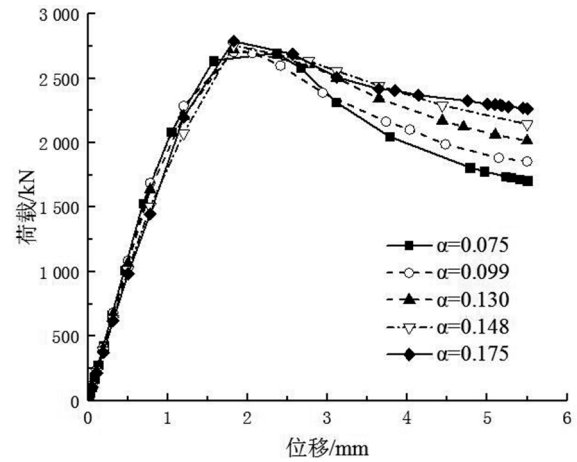


图 10 不同含钢率时的荷载-位移曲线
Fig.10 Load-displacement curves with different steel ratios

3 结论

1) 混凝土强度的提高,高强钢管约束 UHPC 短柱极限承载力呈线性增长,增长幅度在 16% ~ 20%。构件刚度受混凝土强度影响较小,但由于增加混凝土强度使构件套箍系数降低,使纵向应力-应变曲线下降段斜率增大,延性下降。

2) 钢管屈服强度提高对高强钢管约束 UHPC 短柱极限承载力影响很小。由于钢管不直接承担纵向荷载,所以钢管屈服强度的改变对构件极限承载力影响不明显,但钢管屈服强度的提高,钢管抵抗变形能力增强,抑制混凝土的剪切破坏,可有效改善构件中部鼓曲的现象。

3) 含钢率的变化对高强钢管约束 UHPC 短柱极限承载力影响很小。但含钢率的增加对构件前期刚度有小幅增加。在极限荷载出现后由于构件套箍系数增加和钢管抵抗径向变形能力增强对构件延性有明显的改善。

参考文献:

[1] 周绪红, 刘界鹏, 张素梅. 圆钢管约束钢筋混凝土短柱的轴压力学性能[J]. 工程力学, 2009 (11): 53-59.
[2] HUANG F, YU X, CHEN B. The structural performance of axially loaded CFST columns under various loading conditions [J], Steel and Composite Structures 2012, 13 (5): 451-471.
[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] YAN P, FENG J. Mechanical behavior of UHPC and UHPC filled steel tubular stub columns[C] //Proceeding of 2nd Inter-

national Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March, 2008: 355–362.

- [5] 陈盛. 钢管约束 UHPC 轴压柱极限承载力研究[D]. 福州: 福州大学, 2016.
- [6] HAGHINEJAD A, NEMATZADEH M. Three-dimensional finite element analysis of compressive behavior of circular steel tube-confined concrete stub columns by new confinement relationships[J], Latin American Journal of Solids & Structures, 2016, 13(5): 916–944.
- [7] XIONG D X. Structural behaviour of concrete filled steel tube with high strength materials[D]. Doctoral Dissertation, National University of Singapore, Singapore, 2012.
- [8] RICHARD LIEW J Y, XIONG D X. Design guide for concrete filled tubular members with high strength materials-an extension of Eurocode 4 method to C90/105 concrete and S550 steel[S], Research Publishing, Blk 12 Lorong BakarBatu, 349568 Singapore, 2015.
- [9] LIEW J, XIONG M, XIONG D. Design of concrete filled tubular beam-columns with high strength steel and concrete[J]. Structures, 2016, 8(2): 213–226.
- [10] 周凯凯. 方钢管超高性能混凝土短柱轴心受压性能研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [11] 欧智菁, 陈宝春. 钢管混凝土柱极限承载力的统一算法研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 80–85.
- [12] 韩林海. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [13] 王杨. 钢管约束活性粉末混凝土短柱轴压性能及承载力计算研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.

(责任编辑: 陈雯)