

方钢管 UHPC 短柱轴压力学性能及承载力计算研究

王秋维, 王福星, 梁 林

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 采用 ABAQUS 软件建立了方钢管超高性能混凝土(UHPC)短柱的有限元模型, 通过与轴心受压试验试件的破坏形态和荷载-位移曲线进行对比, 验证了有限元模型的适用性。基于此, 进一步分析了钢管宽厚比、钢管强度和 UHPC 强度对试件荷载-位移曲线的影响, 结果表明: 试件的破坏模式有腰鼓型和剪切型两种, 均表现为强度破坏; 试件的承载力随着宽厚比增大呈非线性下降, 随 UHPC 强度或钢管强度的提高呈线性增长; 同时延性随钢材强度增加而增加, 随 UHPC 强度增加而降低。最后, 根据极限平衡理论, 对 UHPC 约束区的分布情况进行了受力分析, 建立了方钢管 UHPC 短柱轴压承载力的计算公式, 计算与试验结果吻合良好。

关键词: 超高性能混凝土(UHPC); 钢管混凝土; 轴压力学性能; 承载力计算; 有限元模拟

中图分类号: TU398⁺.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)02-0298-08

Mechanical properties of square steel UHPC short column in axial compression and bearing capacity calculation study

WANG Qiurui, WANG Fuxing, LIANG Lin

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: ABAQUS software was used to establish the finite element model of square steel tube ultra-high performance concrete (UHPC) short column, and the applicability of the finite element model was verified by comparing with the damage pattern and load-displacement curve of the axial compression test specimen. After that, the effects of steel tube width-thickness ratio, steel tube strength and UHPC strength on the mechanical properties of the specimen were further analyzed. The results showed that the damage modes of the specimens were drum type and shear type, both of which are strength damage; the bearing capacity of specimens decreased nonlinearly with the increase of width-thickness ratio and increased linearly with the increase of UHPC strength or steel tube strength, and meanwhile, the ductility increased with the increase of steel strength, and decreased with the increase of UHPC strength. Finally, according to the limit equilibrium theory, the force analysis was carried out on the distribution of the UHPC restraint zone, the formula for calculating the axial compression load capacity of square steel tube UHPC short columns was established. The calculation was in good agreement with the test results.

Key words: ultra high performance concrete (UHPC); steel pipe concrete short column; axial compression mechanical properties; bearing capacity calculation; finite element analysis

超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)是一种优良的水泥基复合材料, 其通过提高组分的细度与活性, 使材料颗粒合理密实堆积, 加以水化物的填充, 能有效减少材料内部的缺陷, 从而使混凝土有了超高强度和高耐久性的优点^[1]。然而, 随着混凝土强度的提高, 其脆性也进一步增加, 这使得 UHPC 在实际工程应用中并不广泛^[2]。在外部钢管的约束下, UHPC 的脆性破坏变为钢管的延性破坏, 从而解决 UH-

PC 材料本身的受压脆性的问题^[3]。钢管 UHPC 柱在保持相同荷载的情况下, 与普通钢管混凝土柱相比, 可以大大减少截面面积以便合理控制成本, 在实际工程的经济优势中十分显著。且方形截面的形式, 在施工上拥有圆形截面所没有的平面布置规则、施工方便和构造简单等优点, 因而, 实际工程中得到了广泛应用^[4]。

随着建筑行业发展, 钢管混凝土结构的应用和拓展被国内众多研究者关注。林震宇^[5]对 22 根

圆钢管 RPC 短柱进行了轴压试验,提出圆钢管 RPC 极限承载力的简化计算公式和圆钢管 RPC 轴压柱应力—应变全曲线的理论方程.李幅昌等^[6]对高强方钢管高强混凝土轴压短柱进行了大量的有限元模拟,把宽厚比作为表达钢管和混凝土之间的相互作用的基本参数,提出了约束混凝土的本构模型.O. Shea 等^[7]对圆钢管混凝土柱进行了轴压和偏压试验,研究表明随着混凝土强度的提高,钢管对核心混凝土的约束作用变差.王秋维等^[8]对圆钢管活性粉末混凝土轴压短柱进行了有限元模拟,建立了短柱轴压承载力的计算公式,在 $0.18 \leq \xi \leq 2.62$ 范围内适用性较好.颜燕祥等^[9-10]对 40 根高强方钢管 UHPC 短柱进行了轴压试验,对现有规范的承载力计算公式做了对比分析,提出了考虑等效约束效应的高强方钢管 UHPC 短柱的轴压承载力计算公式.

然而,上述研究主要集中在圆钢管混凝土柱的轴压性能上,涉及到方钢管和超高性能混凝土的研究较少.本文在此基础上,建立了方钢管 UHPC 轴压短柱的数值计算模型,通过分析各试件的荷载—位移曲线,研究了不同因素对方钢管 UHPC 短柱承载力等力学性能的影响,基于极限平衡理论,提出了方钢管 UHPC 轴压短柱的极限承载力计算公式,所得研究结果可为钢管超高性能混凝土柱的设计与实际应用提供参考.

1 有限元模型的建立

1.1 混凝土本构

混凝土的本构模型是进行有限元分析的基础.目前,常用韩林海^[11]提出的约束混凝土本构模型,钢管与核心混凝土之间的相互作用通过套箍系数 ξ 来表达,表达式为

$$\xi = A_s f_y / A_c f_c \quad (1)$$

式中: A_s 为钢管横截面面积, mm^2 ; A_c 为混凝土的横截面面积, mm^2 ; f_y 为钢材屈服强度, MPa; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值, MPa.

UHPC 剔除了粗骨料,在材料组成上与普通混凝土有较大不同,这使得 UHPC 的材料性能与普通混凝土相比有较大差异,所以约束普通混凝土本构模型并不能完全适用于钢管 UHPC 构件的数值分析.课题组通过钢管 UHPC 短柱轴压试验,对钢管约束 UHPC 轴压本构模型进行了研究^[12],结合 UHPC 的材料性能试验结果,对约束 UHPC 的峰值应变 ϵ_0 、抗压强度 f_c 和弹性模量 E_0 特征参

数进行了推导,其表达式为

$$\epsilon_0 = (1 + 0.896\xi^{1.1}) \times (837 + 223\sqrt{f_c}) \quad (2)$$

$$\sigma_0 = (1 + 0.809\xi^{1.311}) \times f_c \quad (3)$$

$$E_0 = (1 + 0.122\xi) \times (10.823 + 2.881\sqrt{f_c}) \quad (4)$$

在韩林海本构模型的基础上进行了一定的修正,建立了钢管约束 UHPC 轴压本构模型,适用性较好,其表达式为

$$y = Ax - Bx^2, \quad (x \leq 1) \quad (5)$$

$$y = \begin{cases} \frac{x}{\beta(x-1)^2 + x}, & 0 < \xi \leq 0.6 \\ (1-q) + qx^{0.2\xi}, & \xi > 0.6 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $x = \epsilon/\epsilon_0$, $y = \sigma/\sigma_0$; $A = 2 - k$, $B = 1 - k$, $k = 0.434\xi$; $\beta = 0.015\xi^{2.176}$; $q = 0.434\xi/(22.957\xi - 9.081)$.

1.2 钢材本构关系

钢材本构通常采用二次塑流模型,将应力—应变曲线简化为五段直线,如图 1 所示.应力—应变关系式见式(7).

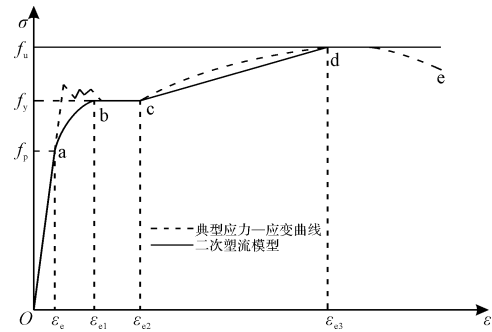


图 1 钢材本构模型

Fig. 1 Constitutive model of steel

$$\sigma = \begin{cases} E_s \epsilon_s, & \epsilon_s \leq \epsilon_p \\ -A\epsilon^2 + B\epsilon_s + C, & \epsilon_p < \epsilon_s \leq \epsilon_{y1} \\ f_y, & \epsilon_{y1} < \epsilon_{y1} < \epsilon_s \leq \epsilon_{y2} \\ f_y [1 + 0.6(\epsilon_s - \epsilon_{y2})/(\epsilon_u - \epsilon_{y2})], & \epsilon_{y2} < \epsilon_s \leq \epsilon_u \\ 1.6f_y, & \epsilon_s > \epsilon_u \end{cases} \quad (7)$$

式中: f_y 为钢材抗拉强度设计值; $\epsilon_p = 0.8f_y/E_s$; $\epsilon_{y1} = 1.5\epsilon_p$; $\epsilon_{y2} = 10\epsilon_p$; $\epsilon_u = 100\epsilon_p$; $A = 0.2f_y(\epsilon_{y1} - \epsilon_p)/2$; $B = 2A\epsilon_{y1}$; $C = 0.8f_y + A\epsilon_p^2 - B\epsilon_p$. 分析中设钢材为各向同性材料,采用 Mises 屈服准则,各向同性强化.

1.3 边界条件和网格划分

通过使用位移控制,将单向轴荷载施加到柱端部.为了便于计算,耦合点位于柱底部中心处,并限制参考点的所有自由度.如图 2 所示.钢管采

用壳(Shell)单元, UHPC 和上下端板均采用三维六面体八节点(C3D8R)实体单元. 为减少有限元模拟时间, 在保证计算精度的同时调整计算样本, 计算出适合本文模型的种子分布和网格划分网格单元大小划分为 10 mm.

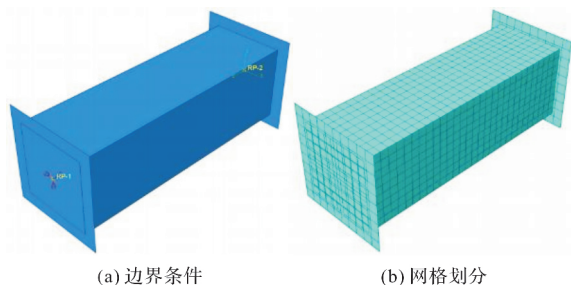


图2 边界条件和网格划分

Fig. 2 Boundary conditions and element meshing

1.4 钢管和 UHPC 之间的界面模型

钢管与 UHPC 的接触面设置为完全接触, 法向方向采用硬接触(Hard Contact), 钢管做主表面, UHPC 做从表面. 在切向行为中, 库伦摩擦(Coulomb Friction)模型能有效模拟钢管与 UHPC 之间的相对滑动摩擦力, 摩擦公式选用“弹性滑动”的罚函数(Penalty), 本文通过对钢管 UHPC 短柱进行了多次试算发现, 将摩擦系数值 μ 取为 0.6 可以取得与实验值整体符合较好的计算结果, 因而本文计算中取 $\mu=0.6$.

2 有限元模型验证

本文对文献[10]和[13]中 28 根方钢管 UHPC 短柱轴压试件进行有限元模拟, 试件 UHPC 抗压强度变化范围为 92.5~141.0 MPa, 钢材屈服强度为 444.6~668.8 MPa, 套箍系数 ξ 为 1.25~6.07.

2.1 荷载—位移曲线

对文献[10]和[13]中共 28 个方钢管 UHPC 轴压短柱试验试件进行有限元模拟, 选取其中 8 个 ξ 不同的试件, 有限元计算得到的荷载—位移曲线与试验结果比较如图 3 所示. 由图可知: 两者吻合较好, 跨中截面位移和峰值荷载基本一致. 但是, 有限元模拟没有考虑到试件在制作过程中, 钢管中 UHPC 的分布不均匀, 以及试件在试验过程中钢管焊缝开裂的影响, 导致有限元计算结果与试验结果有一定差异, 部分试件的模拟曲线的整体弹性模量稍大于试验曲线, 且下降段的承载力有略微提升现象.

2.2 轴压承载力

将 28 个试件的极限承载力试验值与本文有限元模拟的计算值列于表 1. 由表 1 可知, 有限元计算值与试件试验值之比的平均误差 4.96%, 总体上有有限元计算结果与试验结果吻合较好.

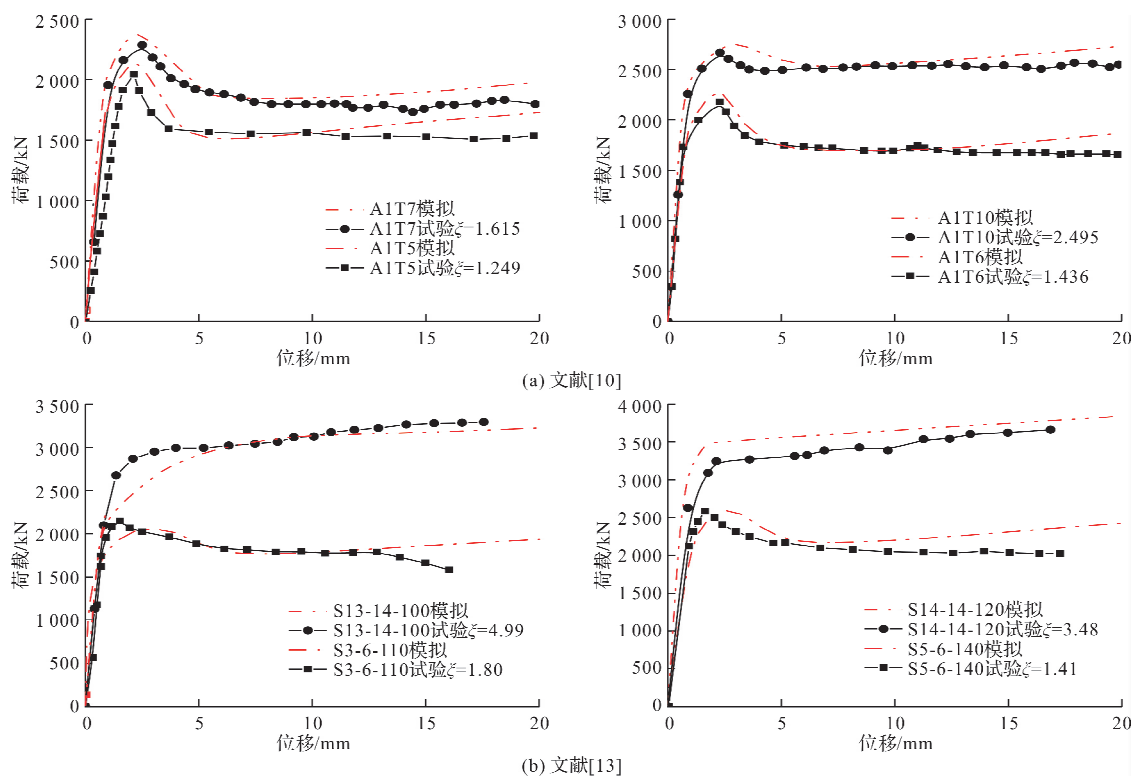


图3 荷载—位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curves

表 1 试件参数及峰值荷载对比
Tab. 1 Comparison of specimen parameters and peak loads

数据来源	试件编号	t/mm	f_{cu}/MPa	f_y/MPa	ξ	N_e/kN	N_s/kN	误差/%
文献[10]	A1T5	5	120.5	592.6	1.25	2 050.6	2 140.7	4.39
	A1T6	6	120.5	548.7	1.44	2 181.5	2 256.5	3.44
	A1T7	7	120.5	510.5	1.62	2 270.1	2 335.6	2.89
	A1T10	10	120.5	493.5	2.50	2 656.5	2 694.3	1.42
	A1T14	14	120.5	476.6	3.98	3 134.8	3 307.6	5.51
	A1T18	18	120.5	468.7	6.07	3 586.6	3 921.1	9.33
	B2T7	7	106.7	510.5	1.99	2 168.9	2 150.2	0.86
	B2T10	10	106.7	493.5	3.08	2 572.4	2 702.3	5.05
	B2T14	14	106.7	476.6	4.90	3 062.8	3 102.4	1.29
	C3T7	7	92.5	510.5	2.21	2 045.6	2 267.2	10.83
	C3T10	10	92.5	493.5	3.41	2 468.3	2 553.4	3.45
	C3T14	14	92.5	476.6	5.44	2 975.7	3 002.9	0.91
文献[13]	S1-5-100	4.9	102.4	668.8	1.72	1 800.3	1 850.2	2.77
	S2-5-100	4.9	102.4	668.8	1.53	2 003.8	2 104.6	5.03
	S3-6-110	5.8	111.0	646.2	1.80	2 220.5	2 320.7	4.51
	S4-6-120	5.8	124.8	646.2	1.62	2 391.2	2 522.3	5.48
	S5-6-140	5.8	141.0	646.2	1.41	2 573.3	2 700.5	4.94
	S6-7-100	6.8	102.4	599.5	2.28	2 209.4	2 410.9	9.12
	S7-7-110	6.8	111.0	599.5	2.03	2 294.7	2 401.5	4.65
	S8-7-120	6.8	124.8	599.5	1.83	2 368.9	2 503.2	5.67
	S9-7-140	6.8	141.0	599.5	1.59	2 492.1	2 701.4	8.40
	S10-10-100	10.0	102.4	458.6	2.89	2 206.1	2 312.5	4.82
	S11-10-120	10.0	124.8	458.6	2.32	2 297.7	2 545.5	10.78
	S12-10-140	10.0	141.0	458.6	2.01	2 498.5	2 456.3	1.69
	S13-14-100	14.2	102.4	468.6	4.99	3 106.7	3 325.3	7.04
	S14-14-120	14.2	124.8	468.6	4.00	3 119.5	3 350.9	7.42
	S15-14-140	14.2	141.0	468.6	3.48	3 274.3	3 308.2	1.04
	S16-18-140	18.5	141.0	444.6	5.27	3 441.4	3 650.6	6.08
均值	—	—	—	—	—	—	—	4.96

注: 试件编号来自原有文献; t 为方钢管壁厚; f_{cu} 为 UHPC 实测立方体抗压强度; f_y 为钢管屈服强度; N_e 和 N_s 分别为试验和模拟所得峰值荷载。

2.3 破坏形态

试验试件的破坏形态主要包括剪切型破坏和腰鼓型破坏两种^[9], 针对这两种类型的破坏分别取典型试样, 并将数值分析得出的破坏模式与试验结果进行比较, 发现试件破坏形式的主要影响因素是套箍系数 ξ 。图 4 和图 5 显示了两种破坏的整体变形、钢管峰值应力云图和最终破坏时 x 轴截面的塑性拉伸应变云图。由图可知, 当套箍系数较小时, 发生剪切型破坏。随着荷载的增加, UHPC 内部产生斜裂缝并不断延伸至其形成上下错动两部分; 达到极限荷载时, 钢管内核心 UH-PC 部分被压坏, 局部钢管产生一定的突起, 并且

向附近截面扩展。当套箍系数较大时, 发生腰鼓型破坏。随着荷载的增加, 试件中部区域发生严重压缩变形; 加载结束时, 试件中部四面突起且相互贯通, 形成一道或者多道褶皱环, 且方钢管的角部出现应力集中现象, 发现钢管对核心 UH-PC 的角部约束强, 中间约束差。

综上可见, 利用有限元模拟的结果与试验试件的破坏形态吻合较好。本文使用的建模方法、材料本构、边界条件、网格划分和接触条件等设置能够有效的模拟方钢管 UHPC 短柱轴心受压力学性能, 可用于实际工程中的结构分析与计算。

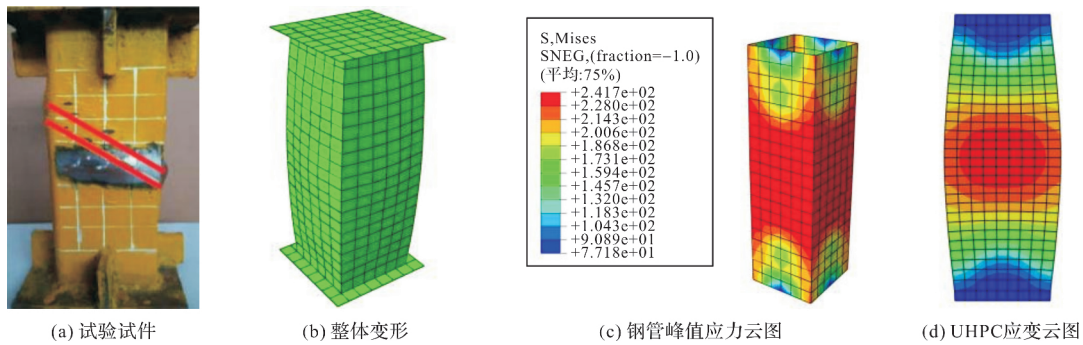


图4 剪切型破坏

Fig. 4 Shear type damage

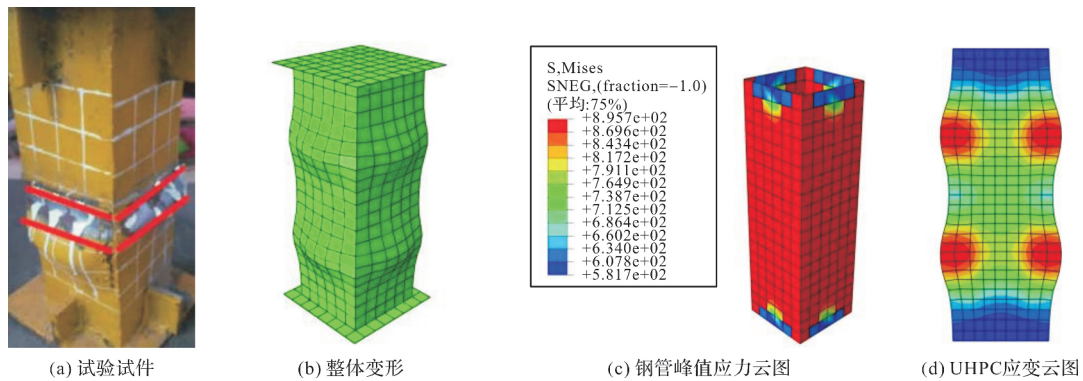


图5 腰鼓型破坏

Fig. 5 Girdle type damage

3 短柱受压工作机理分析

3.1 钢管 UHPC 短柱轴压机理

通过对方钢管 UHPC 短柱的轴压试验数据和的大量有限元模拟结果进行统计分析,得到典型的轴向荷载—位移曲线,如图 6 所示.方钢管 UHPC 轴心受压短柱试件的受力过程可概括为三个阶段:弹性工作阶段、弹塑性工作阶段和塑性流动阶段.

(1)弹性工作阶段(*oa*段):本阶段的荷载—位移曲线基本呈直线状态,钢管的外形变化不明显,UHPC 也没有开裂,试件的初始刚度基本保持不变.钢管对核心 UHPC 还没有起套箍作用,钢管和核心 UHPC 近似于单独受力.

(2)弹塑性工作阶段(*ab*、*ac*、*ad*段):随着轴压荷载的不断增大,核心 UHPC 内部的微裂缝开始扩展延伸,此时钢管对其的套箍作用开始发挥,钢管对核心 UHPC 的四个角部出现不同程度的应力集中现象,核心 UHPC 可以划分出有效约束区和弱约束区.

(3)塑性流动阶段阶段(*be*、*cf*、*dg*段):对文献[10]和[13]共 28 个试验数据和大量有限元模拟结果进行统计分析,发现在不同套箍系数 ξ 下,钢管对核心 UHPC 的约束作用不同,可分为三种类

型.当套箍系数 $\xi \leq 2.50$ 时,曲线先出现明显的下降段,而之后进入平稳工作阶段;当套箍系数 $2.50 \leq \xi \leq 3.48$ 时,试件表面变形继续膨胀,但轴压荷载基本维持不变;当套箍系数 $\xi \geq 3.48$ 时,轴压荷载随试件表面变形增长而缓缓增加.

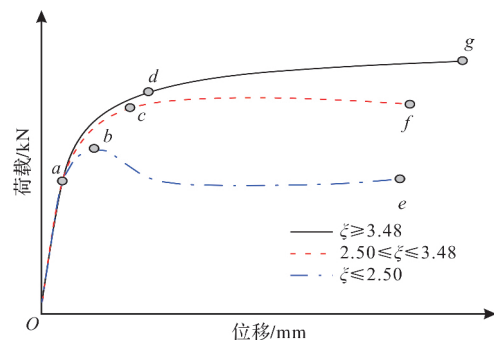


图6 试件的典型荷载—位移曲线

Fig. 6 Typical load-strain curves of specimens

3.2 不同因素的影响规律

本文以文献[10]中的 A1T5 试件作为基本研究对象,进一步研究试件在不同宽厚比、钢管强度和 UHPC 强度下,其对有限元模拟得到的荷载—位移曲线的影响规律,如图 7 所示.可以观察到:

(1)当其他因素保持不变时,试件的承载力随着宽厚比的增大呈非线性下降.随着截面宽厚比的降低,试件的荷载—位移曲线下降段的斜率降

低,初始刚度增大,残余承载力也随之提高;

(2)当其他因素保持不变时,试件的承载力随钢管屈服强度的增大呈线性增长,延性得到改善.钢管强度的变化对初始刚度的影响较小,对试件整体的荷载位移曲线影响规律较为一致;

(3)当其他因素保持不变时,试件承载力的增长基本上与 UHPC 强度的增长呈线性关系.试件在弹性变形阶段,试件的初始刚度受 UHPC 强度的影响不大;试件承载力与 UHPC 强度的提高呈线性增长,但是在荷载一位移曲线的下降段斜率逐渐增加,说明延性在逐渐变差.

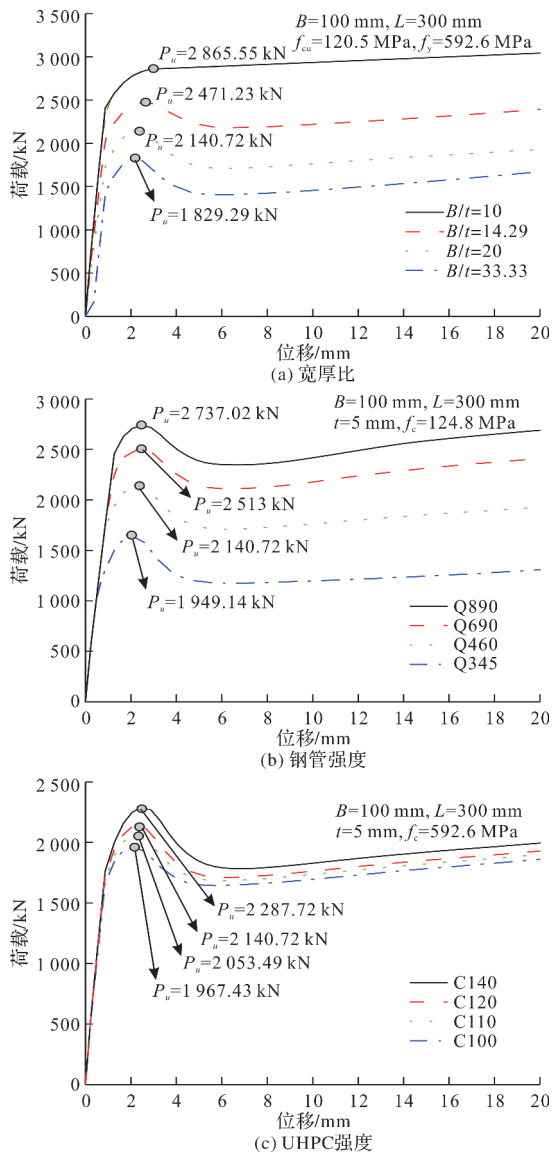


图7 不同因素对荷载-位移曲线的影响

Fig. 7 Effect of different factors on the load-displacement curves

4 轴压承载力计算

4.1 基本假设

采用极限平衡法推导方钢管 UHPC 短柱的轴

压承载力,本文计算基于以下假设:

(1)柱竖向荷载由钢管和核心 UHPC 承担,方钢管 UHPC 柱可视为由钢管和核心 UHPC 组成;

(2)当试件破坏时,钢管屈服,核心 UHPC 达到极限抗压强度.

4.2 核心混凝土有效约束系数的确定 k_e

Varma 等^[14]提出将方钢管对核心混凝土的约束可以分为有效约束区和弱约束区,如图 8 所示.图 8 中, L 为方钢管边长; t 为钢管厚度; θ 为约束界限边切角.假定有效约束区与弱约束区的边界视为二次抛物线,取 $\theta=45^\circ$.

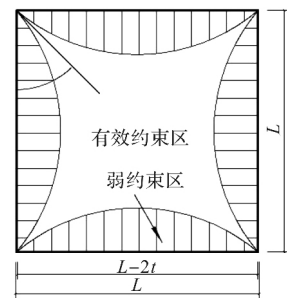


图8 核心混凝土的有效约束区

Fig. 8 Effective constraints of core concrete

核心混凝土有效约束系数 k_{eq} 表达式如下.

$$k_{eq} = k_1 \cdot k_e \quad (8)$$

式中: k_1 为横截面侧面有效约束系数,取 $k_1=1$; k_e 为横截面有效约束系数, $k_e = A_e/A_c$, A_e 为有效约束区混凝土截面面积, A_c 为核心混凝土截面面积.

弱约束区混凝土面积 $A_{e1} = 2(L-2t)^2/3$, 有效约束区混凝土面积 $A_e = A_c - A_{e1} = (L-2t)^2/3$, 代入式(8)可得 $k_e = k_{eq} = 1/3$.

4.3 方钢管受力分析

设核心混凝土对方钢管内表面提供的侧向压力为 σ_r , 环向应力为 σ_θ . 由作用力及反作用力原理可知,核心 UHPC 所受到钢管的侧向约束应力与核心 UHPC 对钢管的侧向应力是一对相互作用力,对钢管进行受力分析,受力简图如图 9 所示.

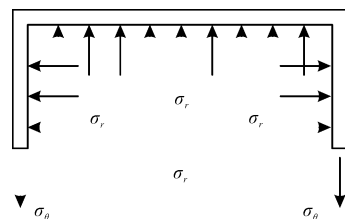


图9 方钢管受力简图

Fig. 9 Forced diagram of square steel pipe

由平衡条件可得

$$\sigma_r = \frac{2\sigma_{\theta}t}{L-2t} \quad (9)$$

钢管对核心混凝土的等效侧向压应力为

$$\sigma'_r = k_{eq} \cdot \sigma_r \quad (10)$$

4.4 短柱轴压承载力

本文采用 Mander^[15] 提出的约束混凝土本构能够很好地反映方钢管对核心 UHPC 的约束机理, 表达式为

$$f_{cc} = f_c \left[-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{\sigma'_r}{f_c}} - 2 \frac{\sigma'_r}{f_c} \right] \quad (11)$$

式中: f_{cc} 为约束混凝土轴压强度; f_c 为混凝土轴心抗压强度。

依据静力平衡条件可得

$$N = A_c f_{cc} + A_s \sigma_z \quad (12)$$

加载过程中 σ_r 为 σ_z 的 2% 左右, 计算时可忽略不计, 钢管屈服采用 Von Mises 屈服条件, 即

$$\sigma_z^2 + \sigma_z \sigma_{\theta} + \sigma_{\theta}^2 = f_y^2 \quad (13)$$

联立式(8), (9)得

$$\sigma'_r = k_e \cdot \sigma_r = k_e \frac{2\sigma_{\theta}t}{L-2t} = \frac{\sigma_{\theta}}{3(L/t-2)} \quad (14)$$

考虑到钢管相对混凝土截面较薄, 有

$$\frac{A_s}{A_c} = \frac{L^2 - (L-2t)^2}{(L-2t)^2} \approx \frac{4Lt}{L^2} = \frac{4t}{L} \quad (15)$$

由式(13)~式(15)得

$$\sigma_z = \left(\sqrt{1 - \frac{3}{\xi^2} \left(\frac{\sigma'_r}{f_c} \right)^2} - \frac{1}{\xi} \frac{\sigma'_r}{f_c} \right) f_y \quad (16)$$

由式(10), (11), (12), (16)得

$$N = A_c f_c \left[-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{\sigma'_r}{f_c}} - 3 \frac{\sigma'_r}{f_c} + \sqrt{\xi^2 - 3 \left(\frac{\sigma'_r}{f_c} \right)^2} \right] \quad (17)$$

根据极值条件 $dN/d\sigma'_r = 0$, 有

$$N_u = A_c f_c (1 + \alpha \xi) \quad (18)$$

将式(18)变换后得 $N_u/A_c f_c = 1 + \alpha \xi$, 以套箍系数 ξ 作为横坐标 $N_u/A_c f_c$ 作为纵坐标, 将文献[10]和[13]的试验数据进行拟合, 如图 10 所示。可得方钢管 UHPC 短柱的轴压极限承载力为

$$N_u = A_c f_c (1 + 1.12 \xi) \quad (19)$$

4.5 试验校核

采用本文公式(20)对文献[16-17]共 33 根方钢管 UHPC 短柱试验试件进行承载力计算, 将试验值 N_e 、计算值 N_s 和 N_e/N_s 二者的比值列于表 2 中。由表可知, 本文提出的轴压承载力公式的计算值与试验实测值之比的平均值为 1.019, 标准差为 0.073, 两者吻合较好。

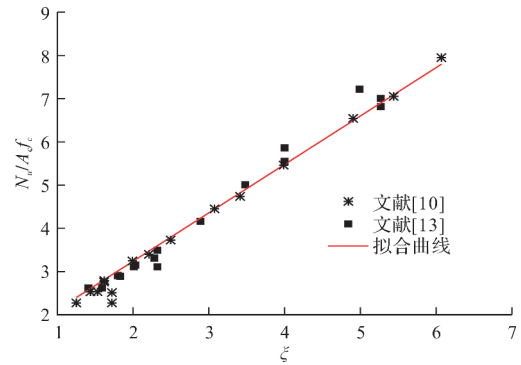


图 10 试验数据与拟合曲线

Fig. 10 Test data and fitting curves

图 11 给出了本文公式计算的结果与试验结果关系图, 由图可知本文推导公式在套箍系数 ξ 为 1.25~6.07, UHPC 轴心抗压强度在 92.5~141.0 MPa 范围内, 具有较好的适用性。

表 2 公式计算与试验结果的对比

Tab. 2 Comparison between formula calculation and test results

文献试件		N_e/N_s	
		平均值	标准差
文献[16]	15	1.116	0.087
文献[17]	15	0.923	0.059
总计	30	1.019	0.073

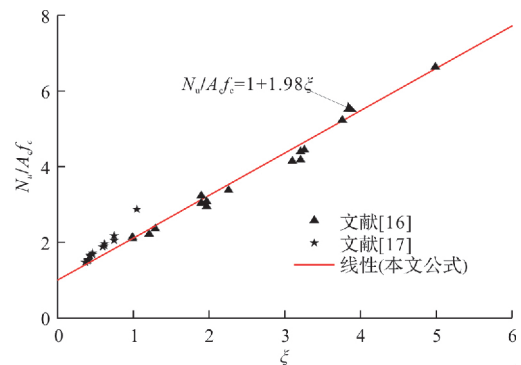


图 11 公式计算与试验结果对比

Fig. 11 Comparison between formula the calculation and test results

5 结论

(1)建立了方钢管 UHPC 短柱的有限元模型, 模拟计算结果与试验的破坏形态、荷载—位移曲线和极限承载力基本一致, 证明了本文模型的适用性;

(2)轴压柱的承载力随截面宽厚比的增大呈非线性下降, 试件的荷载—位移曲线下降段的斜率降低, 初始刚度增大, 延性有所改善; 随 UHPC 强度或钢管强度的提高呈线性增长, 同时延性随

钢材强度增加而增加,随UHPC强度增加而降低;

(3)建立了方钢管UHPC短柱轴压承载力的计算公式,并将由本文推导公式所得出的理论值与已有文献试件的试验值进行对比,结果表明在套箍系数 ξ 为1.25~6.07, UHPC轴心抗压强度在92.5~141.0 MPa范围内,本文推导公式具有较好的适用性。

参考文献 References

- [1] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes [J]. Cement & Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [2] 覃维祖. 活性粉末混凝土的研究[J]. 石油工程建设 2002, 28(3): 1-3.
QIN Weizu. Study on reactive powder concrete [J]. Petroleum Engineering Construction, 2002, 28(3): 1-3.
- [3] 陈肇元. 高强与高性能混凝土的发展及应用[J]. 土木工程学报, 1997, 30(5): 3-11.
CHEN Zhaoyuan. Development and utilization of high-strength and high-performance concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(5): 3-11.
- [4] 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 Building Science and Engineering, 2014, 31(3): 1-24.
- [5] LI Guochang, ZHU Bowen, LIU Yu. Finite element simulation on behavior of high strength concrete filled high strength steel tubular middle long columns under axial compressive load [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014: 340-345.
- [6] 林震宇. 圆钢管RPC轴压柱受力性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2004.
LIN Zhenyu. Researches on behavior of RPC filled circular steel tube axial columns [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2004.
- [7] O'Shea M D, BRIDGE R Q. Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes [J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(11): 1295-1303.
- [8] 王秋维, 王杨, 张春尧, 等. 基于ABAQUS的钢管活性粉末混凝土短柱轴压受力性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(3): 421-429.
WANG Qiwei, WANG Yang, ZHANG Chunyao, et al. Numerical simulation analysis on mechanical behavior of axially loaded reactive powder concrete filled steel tube short columns [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(3): 421-429.
- [9] 颜燕祥, 徐礼华, 蔡恒, 等. 高强方钢管超高性能混凝土短柱轴压承载力计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(12): 128-137.
YAN Yanxiang, XU Lihua, CAI Heng, et al. Calculation methods of axial bearing capacity of short square UHPC filled high strength steel tubular columns [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(12): 128-137.
- [10] 颜燕祥. 方钢管UHPC短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(12): 117-123.
YAN Yanxiang. Experimental study on behavior of square UHPC filled short steel tube columns subjected to axial compression [J]. Building Structure, 2021, 51(12): 117-123.
- [11] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures: Theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [12] 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.
WANG Yang. Research on axial mechanics behavior and bearing capacity calculation of steel tube confined RPC short columns [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2018.
- [13] 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.
ZHOU Kaikai. Study on the ultra-high performance concrete filled square steel tube short columns under axial loading [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [14] VARMA A H, SAUSE R, RICLES J M et al. Development and validation of fiber model for high strength square concrete filled steel tube beam-columns [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(1): 73-84.
- [15] 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.
- [16] XIONG M X, XIONG D X, LIEW J Y R. Axial performance of short concrete filled steel tubes with high and ultra-high-strength materials [J]. Engineering Structures, 2017, 136: 494-510.
- [17] LIEW J Y R, XIONG M X, XIONG D X. Design of concrete filled tubular beam-columns with high strength steel and concrete [J]. Structures, 2016, 8: 213-226.

(编辑 沈波)