

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.02.016

# 方钢管超高强混凝土偏心受压中长柱性能分析

宋 杨<sup>1</sup>, 徐 鹏<sup>2</sup>, 李 彪<sup>1</sup>, 周凯凯<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中国人民大学, 北京 100872)

**摘 要:** 为了更好的在实际工程中使用方钢管超高强混凝土偏心受压柱, 同时了解该类构件的偏心受压工作机理, 采用有限元软件 ABAQUS, 对方钢管超高强混凝土中长柱偏心受压全过程进行研究, 同时分析长宽比、钢管壁厚、偏心率和混凝土强度等主要因素对其受力性能的影响。研究表明: 其偏心受压全过程大致分成弹性、弹塑性和塑性三个阶段; 构件的延性随长细比或偏心率的增大而提高; 混凝土强度的提高对构件后期承载力影响不大; 随着钢管壁厚的增加, 不仅能显著提高其极限承载力, 对后期承载力也有明显的提高。

**关键词:** 方钢管; 超高强混凝土; 偏压受力性能; 有限元; 极限承载力

中图分类号: TU311

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)02-0085-05

## Analysis of Mechanical Behavior of UHSC Filled Medium-and-long Steel Square Tubular Columns Under Eccentric Compression

SONG Yang<sup>1</sup>, XU Peng<sup>2</sup>, LI Biao<sup>1</sup>, ZHOU Kaikai<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. Renmin University of China, Beijing, 100872, China)

**Abstract:** In order to better apply the eccentric load-bearing column of UHSC filled square steel tube in practical engineering, and understand the working mechanism of eccentric compression of this kind of structures at the same time, the finite element software ABAQUS is adopted to develop the finite element model of eccentrically loaded medium-and-long columns of ultra-high strength concrete filled square steel tube, and the whole process of eccentric compression is analyzed. Meanwhile, the influence of main factors such as slenderness ratio, steel tube wall thickness, eccentricity and strength of the concrete on its mechanical properties is analyzed. The results show that the whole process of eccentrically loaded medium-and-long columns of ultra-high strength concrete filled square steel tubes is divided into three stages which are elastic stage, elastic-plastic stage and plastic stage. The ductility of the component increases with the increase of slenderness ratio or eccentricity. With the improvement of the strength of concrete, it has little effect on the later bearing capacity of the component. Increase the wall thickness of the steel tube, the ultimate bearing capacity and the lateral bearing capacity are increased. The conclusion can provide reference for practical application of UHSC filled concrete.

**Keywords:** square steel tube; UHSC; eccentric compressive mechanical behavior; finite element; ultimate bearing capacity

将超高强混凝土灌入钢管中, 可有效克服混凝土脆性大、延性差等缺陷。与普通钢管混凝土相比, 钢管超高强混凝土柱承载力高, 变形能力优异, 可用于超高层、高耸建筑和超大跨桥梁等工程结构中<sup>[1-2]</sup>。而在实际工程中, 此类构件在外荷载作用下大多处于偏心受压状态<sup>[3]</sup>。因此, 对钢管超高强

混凝土中长柱偏心受压性能研究具有重要的理论和现实意义。

国内外相关学者对钢管混凝土偏心受压柱受力性能进行了大量的研究, 取得了许多有价值的研究成果。闻洋等<sup>[4]</sup>、李斌等<sup>[5]</sup>进行了 9 根方钢管混凝土偏压中长柱受压性能试验研究, 研究表明方钢管

混凝土偏压中长柱有良好的变形能力和较为稳定的后期承载能力,试件承载力随混凝土强度等级的提高而增加,但增加幅度不明显。张素梅等<sup>[6]</sup>对 8 根方钢管高强混凝土柱进行压弯性能试验研究,结果表明试件的极限承载力随长细比和偏心率的增加降低明显,同时采用数值分析探讨长细比、含钢率、混凝土强度和钢材屈服强度对  $N-M$  相关曲线的影响。姚明乐等<sup>[7]</sup>对 10 根偏心率不同矩形钢管混凝土进行偏心受压试验研究,结果表明矩形钢管混凝土偏压柱在试验加载过程中有很好的塑性。何明胜等<sup>[8]</sup>以套箍系数为控制因素,研究 16 根薄壁方钢管轻骨料混凝土短柱的轴压试验,同时回归出核心混凝土抗压强度提高系数关于套箍系数的数学表达式。吴鹏等<sup>[9]</sup>采用统一强度理论,通过改变宽厚比从而改变钢管对混凝土的约束作用,提出方钢管混凝土轴压短柱极限承载力计算公式。郝江华<sup>[10]</sup>采用有限元软件对钢管再生混凝土轴压短柱受力性能进行研究。尧国皇等<sup>[11]</sup>开展了 16 根方钢管自密实高性能混凝土压弯构件试验研究,研究表明混凝土采用自密实成型和振捣密实的试件,构件极限承载力总体上差别不大。Varma A H 等<sup>[12]</sup>对 8 根方钢管高强混凝土柱受力性能进行了试验研究,结果表明试件的抗弯承载力采用 ACI 规范计算,结果吻合很好。Xiong M X 等<sup>[13]</sup>对 3 根方钢管超高强混凝土柱进行偏心受压试验研究,结果表明偏压构件同轴压构件相比具有更高的延性。

本文基于有限元软件 ABAQUS 建立了方钢管超高强混凝土偏心受压中长柱有限元模型,对方钢管超高强混凝土中长柱偏心受压全过程及其受力性能进行分析。

## 1 有限元模型建立及验证

### 1.1 钢材与混凝土本构关系模型

本模型由外部钢管和内部混凝土两部分组成。外部钢管采用理想刚塑性模型,见图 1,其中强化段取  $0.01E_s$ ,  $E_s$  为钢材弹性模量,取值为 207 GPa,钢材采用 Q460 高强钢材,其泊松比  $\mu_s$  取为 0.25;内部超高强混凝土强度等级为 C100 以上,其本构关系可采用韩林海<sup>[14]</sup>提出的核心混凝土应力应变模型。

### 1.2 单元选取及网格划分

模型中外部和内部超高强混凝土均采用 8 节点减缩积分的三维实体单元(C3D8R)。为保证精度,网格的大小应根据模型的尺寸来进行划分,由于混凝土在接触分析中为从属表面,网格密度应不低于钢管<sup>[15]</sup>。

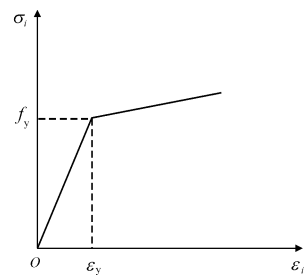


图 1 钢材应力-应变示意图

### 1.3 边界条件

钢管和内部超高强混凝土界面的法向接触行为选择“硬”接触,界面切向选择库仑摩擦模型。加载板与钢管之间采用绑定约束。

## 2 有限元计算结果分析

### 2.1 破坏模式

图 2 为方钢管超高强混凝土偏心受压中长柱典型破坏模式,所选取的典型构件参数为:超高强混凝土强度 130 MPa,钢材强度  $f_y = 460$  MPa,截面  $B = 100$  mm,壁厚  $t = 5$  mm,长度  $L = 866$  mm,偏心距  $e = 30$  mm。方钢管超高强混凝土偏心受压中长柱构件的破坏过程、破坏模式为构件中部沿偏压方向发生侧向弯曲,随着荷载增加侧向弯曲不断增大,最终构件产生较大的侧向弯曲变形而发生破坏。构件外部方钢管破坏模式类似构件的整体破坏模式,破坏时中部的应力最大,向两端逐渐减小;内部混凝土破坏时中部产生较大的挠曲变形,受压区混凝土被压碎。

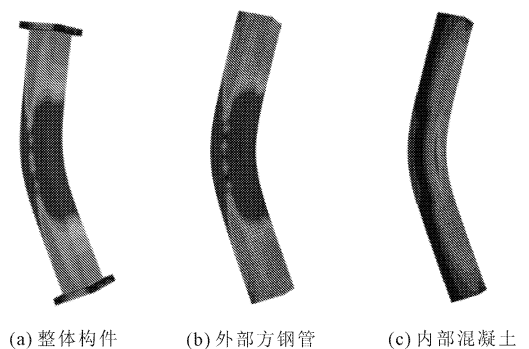


图 2 典型构件破坏变形图

### 2.2 偏心受压全过程及受力特性分析

图 3 为典型方钢管超高强混凝土中长柱偏心受压构件荷载( $N$ ) - 柱中截面挠度( $u_m$ )关系曲线,由图 3 可知,构件的荷载 - 柱中截面挠度曲线可主要分为三个阶段:

(1) 弹性阶段(OA):在此阶段荷载和挠度基本呈线性稳定增长,构件的侧向挠度较小,钢管和混凝土

土几乎处于单独工作状态,这是由于钢材泊松比大于核心混凝土泊松比,钢管与混凝土之间相互作用较弱。

(2) 弹塑性阶段 (*AB*): 在这个阶段中,随着荷载的增加,混凝土微观裂缝不断发展,荷载增加滞后于柱中截面侧向挠度的增加,荷载侧向挠度曲线呈非线性变化,当钢材屈服以后,截面受压区开始发展塑性,截面刚度不断退化,引起钢管和混凝土之间应力重分布。

(3) 塑性阶段 (*BC*): 加载过 *B* 点后,由弯曲产生的二阶弯矩大于截面抵抗弯矩,构件的承载能力不断下降,根据图 3 可知,下降段较缓和,构件表现出很好的延性。

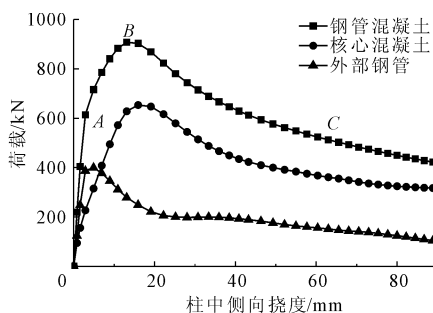


图 3 典型荷载侧向变形曲线

图 3 同时也绘制了外部方钢管和内部混凝土荷载变形曲线,从图 3 中可以看出,在整个过程中,钢管先于构件达到承载力峰值,核心混凝土同构件几乎同时达到承载力峰值,在加载前期钢管承担的荷载大于混凝土承担的荷载,这是由于构件采用 Q460 高强钢材,且钢管壁较厚,含钢率大,而后钢材进入塑性,弹性模量降低,承担的荷载逐渐向核心混凝土转移,在以后的过程中混凝土承担了绝大部分纵向荷载。由图 3 还可以看出,在加载后期,钢管承受的荷载逐渐降低,核心混凝土承担的荷载降低不明显,这是由于钢管逐渐屈服,退出工作,而内部混凝土受到钢管的约束作用,所以降低不明显。

图 4、图 5 为各阶段外部钢管 Mises 应力和内部超高强混凝土 S33 应力沿构件纵向分布图,特征点 *A*、*B*、*C* 分别对应图 3 中的 *A*、*B*、*C* 三点,从图 4、图 5 中可以看出,在特征点 *A* 处,钢管受压区最大压应力达到钢材屈服强度;部分混凝土应力为正值,说明混凝土受拉,同时从图中可以看出钢管和核心混凝土的竖向应力沿构件长度方向上均匀分布;在特征点 *B* 的时候,受压区的钢管,应力大部分达到钢材的屈服强度,部分发展塑性。同时还能看出,沿着构件长度方向,越接近柱中,受压区的混凝土角部受到

的约束越明显,这是由于越靠近柱中截面塑性发展越充分,但由于超高强混凝土强度高、脆性大,侧向变形能力低于普通混凝土,钢管对其约束作用也相应的降低。从图 4 和图 5 中可以看出,在特征点 *C* 的时候,钢管屈服区域向内不断扩大;混凝土受拉区的范围进一步扩大。

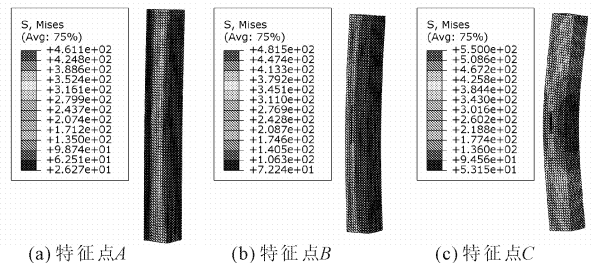


图 4 不同特征点时钢管应力分布(单位:MPa)

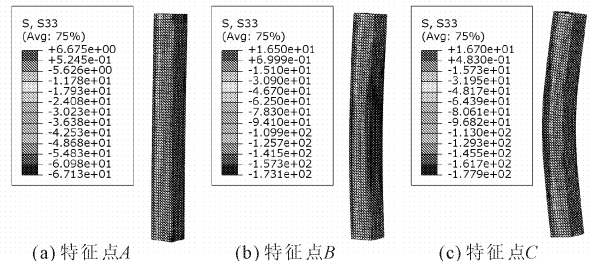


图 5 不同特征点时核心混凝土应力分布(单位:MPa)

### 3 参数分析

在有限元模型的基础上,对方钢管超高强混凝土偏压中长柱进行参数分析,分析不同长宽比、钢管壁厚、偏心率和超高强混凝土强度对构件的荷载-柱中截面侧向挠度曲线、极限承载力的影响。

#### 3.1 偏心距

在保持混凝土强度 (130 MPa)、钢材强度 ( $f_y = 460$  MPa)、壁厚 ( $t = 10$  mm) 和长宽比 ( $L/B = 8.5$ ) 不变的情况下,研究不同偏心率对方钢管超高强混凝土偏压中长柱荷载-柱中截面侧向挠度曲线的影响,如图 6(a) 所示。从图 6(a) 中可知,偏心距越小,曲线下降段越陡,说明偏心距越小,构件延性越差;在曲线后期,偏心距越大,曲线下降段越接近平缓,偏心距不同的构件对应的曲线逐渐接近,其承载力差值逐渐变小,这是由于构件接近破坏时,侧向挠度增大,初始偏心距占附加偏心距的比重逐渐减小。图 6(b) 为不同偏心距与相对承载力(不同偏心距构件对应极限承载力与  $e = 10$  mm 对应极限承载力的比值)关系图,从图 6(b) 中可以看出,随着偏心距的增加,相对承载力呈非线性降低,且降低的幅度与长宽比有关,长宽比越大,相对承载力降低越明显。

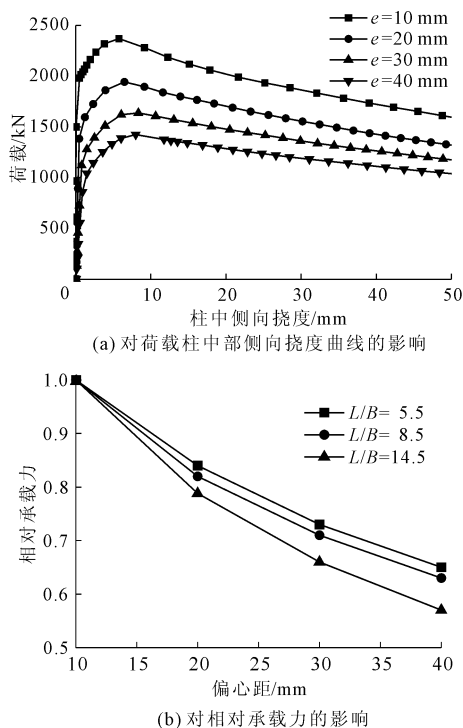


图 6 不同偏心距对荷载柱中挠度曲线及相对承载力的影响

### 3.2 钢管壁厚

在保持混凝土强度 (130 MPa)、钢材强度 ( $f_y = 460$  MPa)、长宽比 ( $L/B = 8.5$ ) 和偏心距 ( $e = 30$  mm) 不变的情况下, 研究不同钢管壁厚比对荷载 - 柱中截面侧向挠度曲线的影响, 如图 7(a) 所示。从图 7(a) 中可以看出, 在加载初期, 轴力和弯矩较小, 构件的荷载 - 柱中截面侧向挠度曲线发展相似。根据曲线下降段可知, 钢管壁厚不同的构件, 后期承载力一直维持较明显的差值, 这表明增加钢管壁厚不仅能显著提高其极限承载力, 对后期承载力也有明显的提高。图 7(b) 为不同钢管壁厚与相对承载力 (不同壁厚对应的极限承载力与壁厚  $t = 5$  mm 的构件对应极限承载力的比值) 关系图, 从图 7(b) 中可以看出, 相对承载力随着钢管壁厚的增加而增加, 且在不同长宽比下, 其影响规律相似, 但盲目的增加钢管壁厚会显著的增加造价, 在实际工程中应当注意。

### 3.3 长宽比

在保持混凝土强度 (130 MPa)、钢材强度 ( $f_y = 460$  MPa)、钢材壁厚 ( $t = 10$  mm) 和偏心距 ( $e = 30$  mm) 不变的情况下, 研究不同长宽比对荷载 - 柱中截面侧向挠度曲线的影响, 见图 8(a) 所示。从图 8(a) 中可知, 长宽比越大, 曲线在弹性阶段的斜率越小, 构件达到极限承载力时对应的侧向挠度越大, 表明构件越容易发生失稳现象。从图 8(a) 中还可以

看出, 构件长宽比越大, 延性越好。图 8(b) 为不同长宽比与相对承载力 (不同长宽比对应构件的极限承载力与长宽比  $L/B = 5.5$  对应的极限承载力的比值) 关系图, 从图 8(b) 中可以看出, 相对承载力随着长宽比的增加而降低, 且幅度越来越缓。

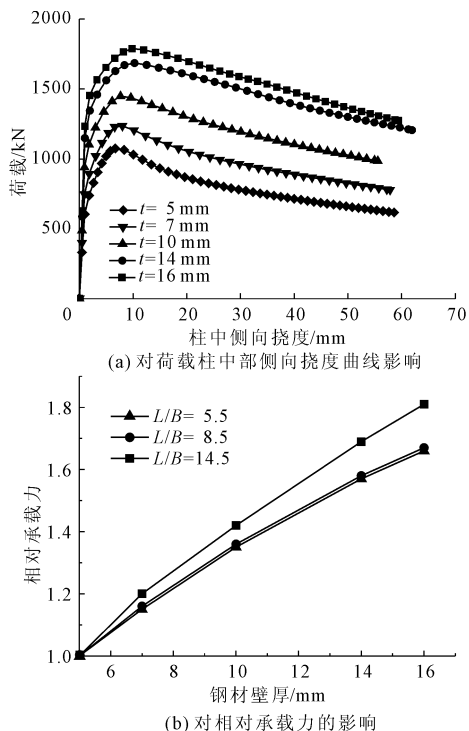


图 7 不同钢管壁厚对荷载柱中挠度曲线及相对承载力的影响

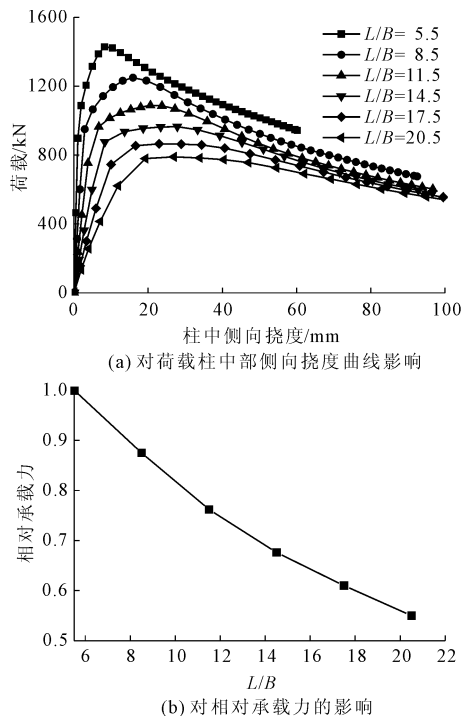
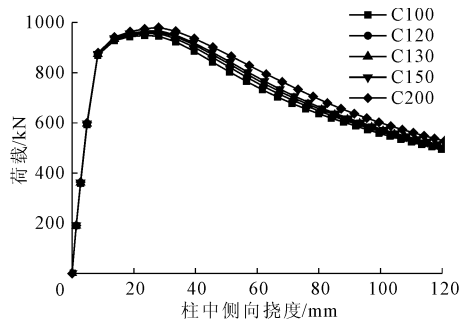


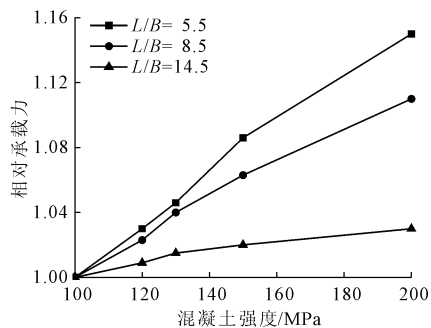
图 8 不同长宽比对荷载柱中挠度曲线及相对承载力的影响

### 3.4 混凝土强度

在保持钢材强度( $f_y = 460$  MPa),长宽比( $L/B = 8.5$ )、钢材壁厚( $t = 10$  mm)和偏心距( $e = 30$  mm)不变的情况下,研究不同超高强混凝土强度对荷载-柱中截面侧向挠度曲线的影响如图9(a)所示,根据曲线下降段可知,混凝土强度不同的构件具有相同承载力,表明混凝土的强度对其后期承载力影响不大。图9(b)为不同超高强混凝土强度与相对承载力(不同混凝土强度对应构件的极限承载力与混凝土强度130 MPa对应的极限承载力的比值)关系图,从图9(b)中可以看出,相对承载力随着混凝土强度的增加而增加,但提高幅度有限,且随着长宽比的增加,提高的幅度越来越小。



(a) 对荷载柱中部侧向挠度曲线影响



(b) 不同超高强混凝土强度与相对承载力关系

图9 不同混凝土强度对荷载柱中挠度曲线及相对承载力的影响

## 4 结论

(1) 方钢管超高强混凝土偏压中长柱破坏形态主要表现为弯曲破坏,其受力破坏过程主要分为三个阶段:弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段。

(2) 在弹性阶段主要是外部钢管承担较大的荷载,过了弹性段以后,外部钢管将荷载转移至内部混凝土,主要由混凝土外部承担荷载。

(3) 长宽比、偏心距对方钢管超高强混凝土偏压中长柱延性影响较为明显;钢管壁厚不仅能提高其极限承载力,对后期承载力也有明显的提升;混凝土强度对其极限承载力影响最小。

### 参考文献:

- [1] 王吉忠,刘连鹏,叶浩. 钢管-混凝土组合柱在我国的研究进展与展望[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(4): 143-149.
- [2] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [3] 钟善桐. 高层钢管混凝土结构[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1999.
- [4] 闻洋,郝铭科,李斌. 方钢管混凝土偏压柱受力性能的试验研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2009, 28(3): 249-252.
- [5] 李斌,高春彦,王斌,等. 方钢管混凝土偏压柱受力性能分析[J]. 建筑结构, 2010, 40(S2): 398-400.
- [6] 张素梅,郭兰慧,王玉银,等. 方钢管高强混凝土偏压构件的试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 17-24.
- [7] 姚民乐,高金良. 矩形钢管混凝土偏压短柱承载力试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(2): 41-43.
- [8] 何明胜,刘新义. 方形薄壁钢管轻骨料混凝土短柱轴压性能的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(2): 18-21.
- [9] 吴鹏,赵均海,李艳,等. 方钢管混凝土短柱轴压极限承载力研究[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(3): 8-13.
- [10] 郝江华,高欣乐,李超. 钢管再生混凝土轴压短柱受力性能有限元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(5): 145-148.
- [11] 尧国皇,韩林海. 钢管自密实高性能混凝土压弯构件力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(4): 34-42.
- [12] Varma A H, Ricles J M, Sause R, et al. Experimental behavior of high strength square concrete-filled steel tube beam-columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(3): 309-318.
- [13] Xiong M X, Xiong D X, Liew J Y R, et al. Behaviour of steel tubular members infilled with ultra high strength concrete[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 138: 168-183.
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [15] 于清,陶忠,吴颖星. 钢管高性能混凝土偏心受压构件力学性能研究[J]. 工程力学, 2009, 26(10): 87-94.