

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.02.029

碳纤维钢骨-钢管混凝土柱抗震性能研究

邢民¹, 王越²

(1. 广州地铁设计研究院有限公司, 广东 广州 510000; 2. 东北大学 资源与土木学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 针对目前钢管混凝土特性,研究了碳纤维钢骨-钢管混凝土柱在循环荷载作用下的力学性能,制作3个试件进行拟静力试验,并利用有限元软件,分析不同混凝土强度、碳纤维层数、轴压比以及钢管直径因素对柱的受力影响情况进行模拟。结果表明:随混凝土强度在一定范围内的提高,结构承载力提高;碳纤维层数的增多,对构件初期刚度影响不大,极限荷载值有所提高;构件的轴压比在一定范围内越大,试件的极限承载力降低,试件后期越容易出现快速破坏;构件内部钢管直径变大,构件的极限承载力有所提高。综合看出碳纤维钢骨-钢管混凝土柱有较好的延性,具有良好的抗震性能。

关键词: 碳纤维钢骨-钢管混凝土柱;轴压比;混凝土强度;碳纤维层数;有限元分析

中图分类号: U461; TP308

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)02-0152-05

Seismic Performance of CFRP Steel Reinforced Concrete Filled with Steel Tube Concrete Column

XING Min¹, WANG Yue²

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China;

2. School of Resources & Civil Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of concrete filled steel tube, this paper analyzed the mechanical properties of carbon fiber steel reinforced concrete column under cyclic loads, 3 specimens were tested by quasi static test and finite element analysis software, after which different number of layers of carbon fiber, concrete strength, axial compression ratio and pipe diameter influence on stress of column simulation were analyzed. The results show that with the strength increase of concrete in a certain range, the bearing capacity of the structure also improve; while number of layers of carbon fiber, the initial component stiffness had little impact, and the ultimate load value increased; axial load is bigger than in a certain range, the ultimate load-carrying capacity of the specimen were more prone to rapid destruction; component increase pipe diameter could improve the ultimate bearing capacity. Therefore, CFRP steel reinforced concrete filled with steel tube concrete column has good ductility and seismic resistance performance.

Keywords: CFRP steel reinforced concrete filled with steel tube concrete column; axial compression ratio; concrete strength; carbon fiber number; finite element analysis

地震时框架柱破坏的原因可归到柱的延性问题上,如果结构柱延性不足,则在遇到地震时,就可能会破坏,造成整个结构的坍塌,在震害面前,大型构筑物的整体抗震稳定问题急需研究。王庆利等^[1]通过试验研究碳纤维钢管混凝土的力学性能(受弯、受压及扭转)。尹志雨^[2]在钢管混凝土拱桥地震响应上做了研究。顾威等^[3-5]对碳纤维钢管混凝土的稳定性分析及其受破坏进行加固等开展了研究。

本次试验是在钢骨-钢管混凝土柱研究的基础上^[6-12],提出一种新型碳纤维钢骨-钢管混凝土柱形式并对其进行拟静力试验,介绍了试件的设计和制作,通过观察试验现象,记录了试件的破坏过程,并对数据进行分析,研究在不同轴压比、钢管直径、碳纤维层数及混凝土强度下构件的极限荷载值及整体稳定性。主要研究了轴压比对此类柱在轴压力和往复荷载下抗震性能的影响。同时,利用有限元软

件建立了 9 组碳纤维钢骨-钢管混凝土柱模型,对混凝土强度、轴压比、钢管直径以及碳纤维层数分别进行了定量控制分析比对,研究不同参量的变化对构件抗震性能的影响。为科研人员与设计人员提供参考与借鉴^[13-17]。

1 试验材料和试验方法

现场试验共制作 3 根构件,各试件尺寸相同,柱高 $L:1.5\text{ m}$,截面尺寸($B \times H$): $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$,构件截面及内部型钢布置见图 1。均采用 C50 混凝土,通过 3 组数据测分析得出混凝土立方体的平均抗压强度值为 52.2 MPa 。钢材:Q345 级,钢管型号: $D133 \times 5$, 钢骨型号: $\angle 50 \times 3$ 的等肢角钢,缀板: $150\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 、 $t = 3\text{ mm}$,间距 100 mm 沿柱纵向布置;构件外侧设置环向碳纤维。材料力学指标,见表 1。试验主要参数,见表 2。表中试件编号 T 代表碳纤维,G 代表钢骨,U 代表钢管,H 代表混凝土,数字代表试件编号。

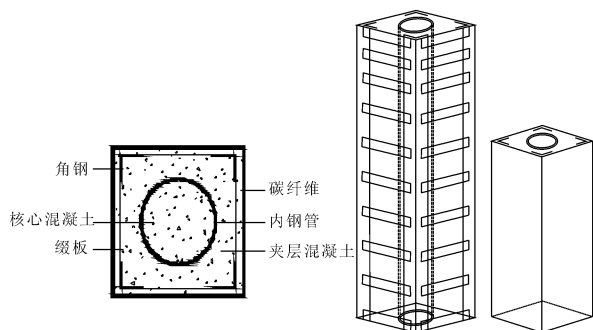


图 1 碳纤维钢骨-钢管混凝土柱截面及内部型钢布置

表 1 材料的力学指标

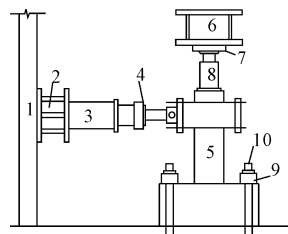
材料	泊松比 /MPa	弹性模量 /GPa	f_y /MPa
混凝土	0.2	34.5	
钢管	0.3	206.0	292
角钢	0.3	206.0	342
缀板	0.3	206.0	342

材料	主受力方向 拉伸强度 /($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	主受力方向 弹性模量 /($\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$)	厚度 /mm	拉断 伸长率 /%	密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
CFRP	3000	35000	0.111	$\geq 2.10\%$	1.8

表 2 试验研究参数

试件编号	钢骨型号	轴压比	含骨率/%
TGUH-1	$\angle 50 \times 3$	0.3	2.96
TGUH-2	$\angle 50 \times 3$	0.4	2.96
TGUH-3	$\angle 50 \times 3$	0.5	2.96

试验加载装置见图 2。在试件基础双侧各放一根工字钢梁。工字钢梁固定在地沟内,防止构件基座产生偏移和滑动。竖向千斤顶连接滑板保证柱顶是平移的边界条件,水平位置伺服液压机加载系统与构件相连,水平通过作动器对试件施加循环荷载,试验数据及结果均通过计算机进行实时传递。



1-反力墙;2-反力横梁;3-水平千斤顶;4-传感器;5-构件柱;6-反力纵梁;7-滑动板;8-竖向千斤顶;9-压梁;10-螺栓

图 2 试验加载装置图

本试验的加载方式:先控制力再控制位移的交叉控制加载法(见图 3)。具体操作步骤如下:

(1) 控制固定的轴压比,在构件上加载至设计值 N ,使轴向压力保持不变,同时在柱侧施加循环荷载。

(2) 取设计屈服荷载的 $1/3$ 倍, $2/3$ 倍, 1 倍加载,每级循环 1 次;试件在循环荷载下的荷载值为屈服荷载 P_y ,与之对应 Δy 为屈服位移;构件屈服后,用位移控制,取 $1.0\Delta y$ 、 $2.0\Delta y$ 、 $3.0\Delta y$ 、 $4.0\Delta y$ 、 $5.0\Delta y$,...,依次加载,每级循环 3 次。

(3) 当荷载达到构件的承载力峰值荷载的 85% 或靠近允许的最大位移时,停止加载。

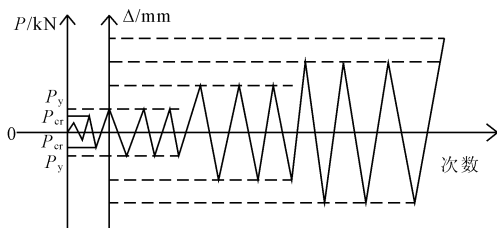


图 3 试验加载制度

2 试验现象与结果分析

试件破坏形式(见图 4)。

2.1 试验现象

在加载初期,构件变化不明显,当施加荷载达到一定时,柱表面开始出现细微裂缝,CFRP 表面出现白色纹路;荷载逐渐增大,CFRP 布隆起,横向应变迅速增大,出现断裂现象;当荷载继续加大至构件屈服,CFRP 脱离混凝土表面,裂缝数量急剧增大。进

入位移控制阶段,随位移逐步增大,角钢周围混凝土出现裂纹,且裂缝宽度逐渐变大;当位移继续成屈服位移倍数增加时,试件裂缝由柱根部向上逐渐发展;当水平荷载达到极限荷载,CFRP、缀板的应变及裂缝宽度急剧增大。

2.2 滞回曲线

通过现场实验滞回曲线结果见图 5。由图 5 可以看出:不同轴压比构件滞回曲线形状大致相同,滞回环均由弹性变形时的直线发展成为梭形,最后过度为弓形;不同轴压比时,滞回曲线均存在良好的稳

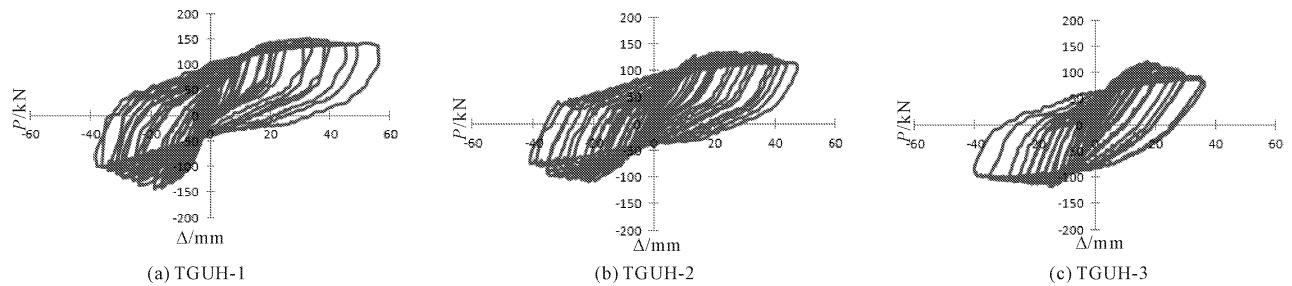


图 5 滞回曲线

2.3 骨架曲线

三种构件的骨架曲线见图 6,由图 6 可知在加载初期荷载位移呈线性变化,屈服时有明显的屈服平台,构件达到极限荷载后,加载力均逐渐下降,曲线降低相对比较缓慢,证明有比较好的塑性能力。可以看出,构件的轴压比在一定范围内越大,试件的极限承载力越低,试件后期越容易出现快速破坏的情况。

2.4 轴向变形曲线

根据图 7 所示的轴向变形曲线可知,在初期加载时,构件轴向变形相对比较稳定,未产生较大的突

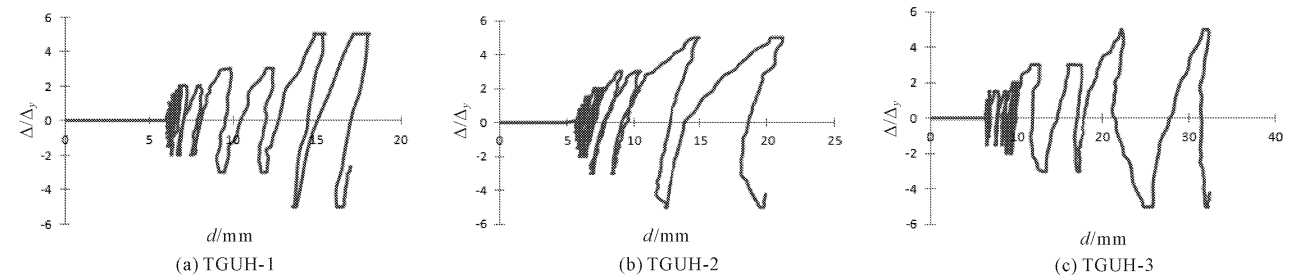


图 7 轴向变形曲线

2.5 延性分析

通过现场试验加载,三种试件的延性试验计算结果见表 3。由表 3 可知,屈服荷载、极限荷载、极限位移值、延性系数及相对极限位移角均随构件轴压比的增大而减小。可以看出,构件的轴压比越小,其抗震性能越好。

定性,在达到极限荷载后,轴压比较大的曲线下降较快,同时强度降低相对较大。

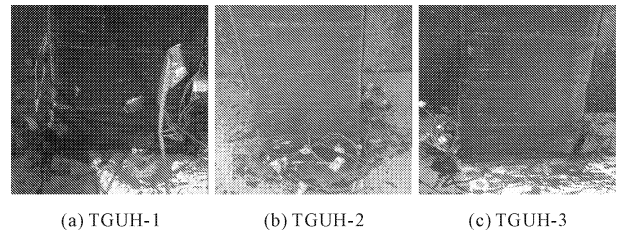


图 4 试件的典型破坏形态

变。当加载位移逐渐提高后,构件出现屈服阶段,当位移施加到 5 倍~8 倍的 Δ_y 时,轴向变形明显改变,试件逐渐进入破坏阶段。

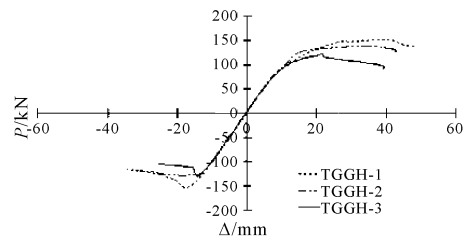


图 6 不同轴压比下的骨架曲线

3 有限元模型的建立

3.1 单元类型及网格划分

网格的划分原则对计算速度和结果起很大作用,在建模时必须用合理的方法确定网格密度。图 8 给出了碳纤维钢骨-钢管混凝土柱模型的截面网

格划分图模型单元数 8 400,节点数 10 200。

表 3 试验结果

试件编号	轴压比	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 $\Delta y/\text{mm}$	极限荷载 P_{\max}/kN	极限位移 $\Delta u/\text{mm}$	位移延性系数 μ	极限位移角 R_u
TGUH-1	0.3	121.10	9.23	149.59	49.71	5.29	1/21
TGUH-2	0.4	118.23	8.09	146.57	39.62	4.91	1/24
TGUH-3	0.5	99.12	7.13	130.08	30.41	4.35	1/31

3.2 模型的建立

本次模拟设置 9 组试件。构件截面参数为:截面尺寸 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$,构件高度均为 1.1 m ,以构件的其他指标进行变化和对比。钢材本构关系是在塑性变形时考虑包辛格效应的影响下,将钢材的塑性变形阶段与强化阶段用一条斜直线简化代换。试件混凝土强度等级采用 C50、C60、C70 三种,钢材均采用 Q345 级,钢管直径选为 89 mm、108 mm、133 mm, $t = 5\text{ mm}$ 的钢管,缀板选用 $150\text{ mm} \times 30\text{ mm}$, $t =$

3 mm 的钢板,以间距 0.1 m 沿柱纵向放置;构件外侧环向设置碳纤维。具体见表 4。

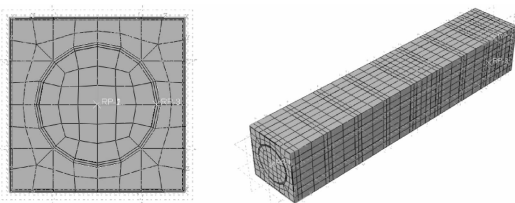


图 8 网格划分图

表 4 模型参数一览表

试件编号	钢管型号 /mm	$B \times H$ /mm	$D \times t \times L$ /mm	截面尺寸 /mm	轴压比 n	含骨率 /%	混凝土 $f_{cu,k}/\text{MPa}$	钢管 f_y/MPa	钢管架 f_y/MPa	碳纤维层数
TGUH-1	$\angle 50 \times 3$	200×200	$133 \times 5 \times 1100$	200×200	0.3	2.96	50	292	342	3
TGUH2	$\angle 50 \times 3$	200×200	$133 \times 5 \times 1100$	200×200	0.4	2.96	50	292	342	3
TGUH-3	$\angle 50 \times 3$	200×200	$133 \times 5 \times 1100$	200×200	0.5	2.96	50	292	342	3
TGUH-4	$\angle 50 \times 3$	200×200	$133 \times 5 \times 1100$	200×200	0.3	2.96	50	292	342	1
TGUH-5	$\angle 50 \times 3$	200×200	$133 \times 5 \times 1100$	200×200	0.3	2.96	50	292	342	2
TGUH-6	$\angle 50 \times 3$	200×200	$89 \times 5 \times 1100$	200×200	0.3	1.75	50	292	342	3
TGUH-7	$\angle 50 \times 3$	200×200	$108 \times 5 \times 1100$	200×200	0.3	2.36	50	292	342	3
TGUH-8	$\angle 50 \times 3$	200×200	$133 \times 5 \times 1100$	200×200	0.3	2.96	60	292	342	3
TGUH-9	$\angle 50 \times 3$	200×200	$133 \times 5 \times 1100$	200×200	0.3	2.96	70	292	342	3

注: B 为截面宽度; H 为截面高度; D 为钢管直径; t 为壁厚; L 为柱长度; f_{cu} 为混凝土抗压强度; f_y 为钢管屈服强度。

3.3 变形与应力分析

从图 9 所示的应力云图可看出,应力较大部位集中在试件底部。从钢管外混凝土的应力云图可知,外部混凝土底面均为高应力区;对钢管内混凝土,中部为高应力集中部分;从钢管的应力云图可知,底面两侧为高应力区。

荷载值有所提高。

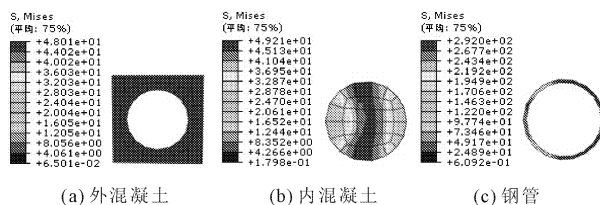


图 9 各构件应力云图

4 模拟结果与讨论

4.1 碳纤维层数

从图 10 所示的曲线可以发现,不同碳纤维层数试件的荷载-位移曲线在弹性阶段基本一致,斜率大致相同,这表明试件的初始刚度几乎没有改变。随着碳纤维 CFRP 布层数设置的增大,曲线的极限

4.2 钢管直径

研究表明随着钢管直径的变大,荷载-位移骨架曲线形状和变化趋势基本一致。对不同的钢管直径的构件,骨架曲线弹性阶段大致相同;试件的极限承载力随钢管直径的提高而逐渐变大,曲线并未出现明显的下降段。

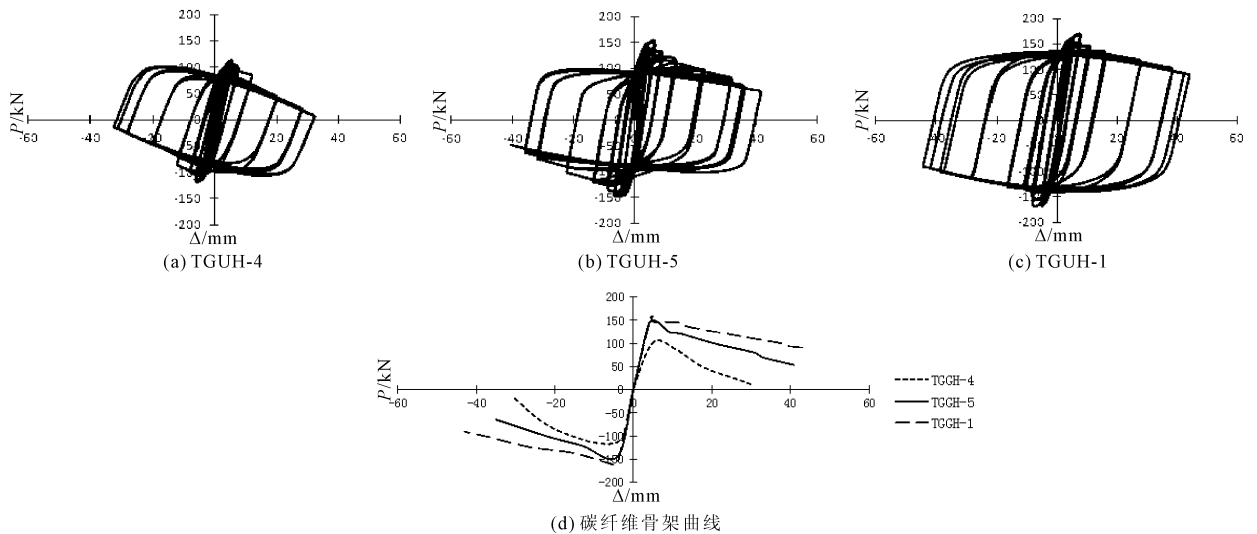


图 10 碳纤维层影响下滞回曲线及骨架曲线

4.3 混凝土强度

混凝土强度在一定范围内提高,曲线的峰值会相应的提高,当混凝土强度为 C60、C70 时,两条曲线近乎重合,可以看出混凝土强度在一定范围内提高,对整体的极限承载力有影响,当混凝土提高到 C60 以上时,混凝土强度的提高对整体的承载力影响不大。

4.4 轴压比

其他构件的参数不变的情况下,随轴压比的变大,曲线峰值有下降的趋势,表明构件的极限承载力有所下降;轴压比为 0.3、0.4 时,加载的后期骨架曲线并不会出现明显的下降趋势,表明构件的轴压比在一定范围内越大,构件后期越容易出现快速破坏快情况。

5 结 论

(1) 在一定范围内,混凝土强度、碳纤维层数、轴压比和钢管直径四种因素改变其中一种时,构件的荷载-位移滞回曲线受变化不大,曲线形状基本一致。

(2) 随着碳纤维层数的增多,试件的初始刚度基本不变,曲线的极限荷载值有所提高。

(3) 构件内部钢管直径变大,曲线的峰值变大,试件的极限承载力有所提高,滞回曲线及骨架曲线并未出现明显的下降段。

(4) 混凝土强度在一定范围内提高使整体的极限承载力有增大,当混凝土提高到 C60 以上时,混凝土强度的提高对整体的承载力影响不大。

(5) 构件的轴压比在一定范围内越大,试件的

极限承载力越低,试件后期越容易出现快速破坏的情况。

参考文献:

- [1] 王庆利,冯立明,屈绍娥.圆钢管混凝土轴压短柱在长期荷载—氯盐腐蚀耦合作用下的试验研究[J].土木工程学报,2015,48(S1):48-52.
- [2] 尹志雨.大跨度上承式钢管混凝土拱桥地震响应分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):128-132.
- [3] 顾威,李宏男,孙国帅.CFRP加固受损钢管混凝土轴压柱试验研究[J].建筑材料学报,2013,16(1):138-142.
- [4] 孙国帅,顾威.CFRP约束钢管混凝土核心柱承载力简化分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):74-78.
- [5] 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.
- [6] 徐亚丰,赵敬义,张世宪,等.钢管-钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J].建筑钢结构进展,2009,11(3):4-11.
- [7] Xu Y F, He F, Xiang C Y. The conceptual design and innovation of the structure[J]. The 8th International Conference on Steel - Concrete Composite and Hybrid Structures, 2006(38):512-517.
- [8] Blake M A, Larry A F, Song J H. Ductility capacity models for buckling-restrained braces[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009,65(8):1712-1720.
- [9] Sui W N, Wang Z F. Ealsto - plastic behavior of doubler plate reinforced tubular T - joints[J]. Advanced Material Research, 2011,250:1297-1300.
- [10] Ouyang L J, Ding B, Lu Z D. BFRP and its application review in structural strengthening[J]. BFRP Reinforced Plastics Composites, 2010,30(3):84-88.

(下转第 183 页)

(上接第 156 页)

- [11] Zheng H, Fan J, Cai Y J. Ultimate bearing capacity of axially compressed FRP confined concrete filled steel tube columns[J]. *Industrial Construction*, 2007, 37(S1): 483-486.
- [12] Georgios G, Dennis L. Axial capacity of circular concrete filled tube column[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60(7): 1049-1068.
- [13] Qian J R, Zhao Z Z, Peng M Y, et al. Experiments on flexural behavior of steel twisted box-section members of the National Stadium[J]. *Journal of Building Structures*, 2007, 28(2): 112-119.
- [14] 徐亚丰, 赵敬义, 张世宪, 等. 钢骨-钢管混凝土柱滞回性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2009, 39(7): 107-110.
- [15] 陈 忱. FRP 钢管混凝土构件抗冲击性能研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [16] 孙鹏举, 徐亚丰. 钢骨-钢管混凝土框架节点滞回性能有限元分析[C]//第八届沈阳科学学术年会论文集. 北京: 中国学术期刊杂志社, 2011(10): 23-24.
- [17] 王 越. 碳纤维钢骨-钢管混凝土柱抗震性能试验与有限元分析[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014: 15-50.