

工字形 CFRP-高强方钢管高强混凝土 轴压短柱有限元分析

李帼昌, 杨宇, 杨志坚, 展志常

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 将工字形 CFRP 型材置入钢管混凝土截面型心处, 研究高强方钢管高强混凝土轴压短柱的受力性能. 方法 对典型构件的应力-应变曲线、组合柱的受力机理进行分析, 并定义了 6 个特征点. 研究在构件受力的各个特征点的方钢管、混凝土和工字形 CFRP 分担的纵向荷载, 分析内置工字形 CFRP 配置率、核心混凝土抗压强度、钢材屈服强度、含钢率等因素对组合柱力学性能的影响. 结果 内置工字形 CFRP 的高强方钢管高强混凝土轴压短柱极限承载力随着混凝土强度、钢材屈服强度、CFRP 配置率以及含钢率增加而增加, 而钢材屈服强度以及混凝土强度对构件荷载-位移曲线初始刚度影响较小. 结论 高强方钢管高强混凝土的各组分受力随着高度变化而变化, 构件受力性能较好并承载力较高.

关键词 方钢管混凝土; 轴压短柱; 内置 CFRP; 高强钢材; 高强混凝土

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Axial Compression Behavior of High Strength Concrete-Filled Square High Strength Steel Tube with Inner I-Shaped CFRP

LI Guochang, YANG Yu, YANG Zhijian, ZHAN Zhichang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The finite element software ABAQUS was used to analyse the compression behavior of high strength concrete-filled square high strength steel tubes with inner I-shaped CFRP. The load-displacement curves of typical members and the working mechanism of the members were analyzed. Six characteristic points were defined in the longitudinal stress-longitudinal strain curve of composite columns. The shared load of core concrete, square steel tube and inner I-shaped CFRP at different height sections of typical specimen corresponding to each characteristic point was analyzed. In addition, the effects of core concrete compressive strength, yield strength of the steel

收稿日期: 2018-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378319); 辽宁省高等学校创新团队支持计划项目(LT2014012); 沈阳市民用钢结构建筑产业化工程技术研究中心建设项目(F16-076-8-00)

作者简介: 李帼昌(1964—), 女, 教授, 博士, 主要从事组合结构、钢结构等方面研究.

tube, steel ratio and other factors on the mechanical behaviour of the composite column were analyzed. The results show that the ultimate bearing capacity of the high strength concrete-filled square high strength steel tube with inner I-shaped CFRP specimens increases with the increase in concrete compressive strength, the yield strength of steel tube, the ratio of CFRP configuration and the steel ratio, furthermore, the yield strength of steel tube and the concrete compressive strength have little influence on the initial stiffness of load-displacement curve.

Key words: square steel tube column; axial compression strength; I-shaped CFRP; high strength steel; high strength concrete

随着土木工程技术的进步,我国在高流态高强混凝土技术和钢管混凝土基本性能及其设计计算理论等方面研究取得了长足发展^[1]. 常见的钢管混凝土构件截面形状主要分为圆形和方形等^[2]. 方钢管混凝土其钢管的约束效果不如圆钢管混凝土的钢管显著,但其与梁的连接节点处理较容易,因此方钢管混凝土在实际工程中具有很好的应用前景^[3-4]. M. H. Lai^[5] 基于钢管混凝土 (Concrete - filled steel tube, CFST) 的环向应变理论,分析各参数对构件性能的影响,并提出强度预测公式. Y. Ouyang^[6] 通过改变方形 CFST 的圆角大小对钢管混凝土受力性能进行了研究. 高强材料具有轻质高强等优点,可以满足结构不断发展的要求^[7-8]. 徐礼华等^[9] 对钢管高强混凝土轴压短柱进行了试验研究,并推导出承载力计算公式. 随着纤维增强塑料 (Fiber Reinforced Plastics, FRP) 材料在建筑中应用,众多学者对 FRP 进行了受力性能研究^[10-12]. 同时对 CFST 与碳纤维增强塑料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) 材料结合进行了理论与试验研究^[13-15]. Li Guochang 等^[16-17] 对内置 CFRP 圆管与内置工字形 CFRP 的方钢管混凝土轴压短柱进行受力性能研究.

国内外学者们对钢管混凝土的研究众多,但在高强方钢管高强混凝土构件以及钢管混凝土内置 CFRP 的构件研究并不充分. 基于此,笔者将工字形 CFRP 型材置入钢管混凝土截面型心处,研究高强方钢管高强混凝土轴压短柱的受力性能,为此类构件研究

提供参考.

1 材料本构关系

1.1 混凝土本构关系

笔者采用混凝土的塑性损伤本构模型,混凝土受压本构模型采用文献[18]改进的约束混凝土受压本构模型. 本构关系应力 - 应变关系曲线如图 1 所示.

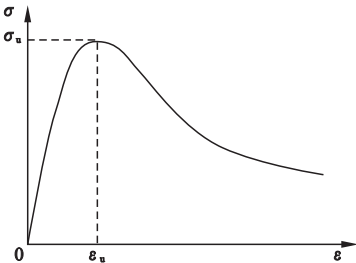


图 1 高强混凝土应力应变曲线示意图

Fig. 1 Stress - strain curve of concrete

混凝土的受拉采用能量破坏准则定义,受拉软化性能应力 - 断裂能关系采用文献[19]计算.

1.2 钢材本构关系

钢管采用高强钢材,材料本构模型采用韩林海教授提出的二折线钢材本构模型^[20]. 钢材本构关系曲线如图 2 所示.

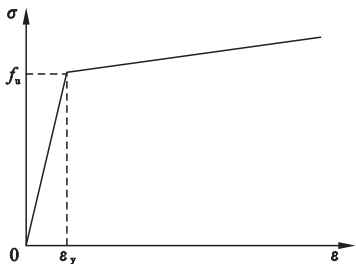


图 2 高强钢材应力应变曲线示意图

Fig. 2 Stress - strain curve of steel

1.3 CFRP 本构关系

CFRP 型材采用拉挤成型的纵向纤维外加四周用碳纤维布包裹,故可视为三层不同纤维方向叠合而成的各向异性材料. CFRP 有限元模型采用 Tsai – Wu 失效准则,采用基于 ABAQUS 有限元分析软件的二次开发

USDFLD 子程序来判断型材的破坏过程.

2 有限元模型的建立

笔者建立 22 个有限元分析模型,分析了各参数对短柱受力性能的影响. 构件参数见表 1,构件截面形式如图 3 所示.

表 1 构件参数

Table 1 The parameters of specimens

编号	$B \times H \times L/\text{mm}$	t/mm	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	f_{ct}/MPa	CFRP 配置率/%	P_u/kN
SC – 1	150 × 150 × 450	4	550	100	900	4.75	3575
SC – 2	150 × 150 × 450	4	690	100	900	4.75	3966
SC – 3	150 × 150 × 450	4	770	100	900	4.75	4182
SC – 4	150 × 150 × 450	4	890	100	900	4.75	4481
SC – 5	150 × 150 × 450	4	960	100	900	4.75	4656
SC – 6	150 × 150 × 450	4	550	80	900	4.75	3141
SC – 7	150 × 150 × 450	4	550	110	900	4.75	3792
SC – 8	150 × 150 × 450	5	550	100	900	4.75	3838
SC – 9	150 × 150 × 450	5	690	100	900	4.75	4338
SC – 10	150 × 150 × 450	5	770	100	900	4.75	4595
SC – 11	150 × 150 × 450	5	890	100	900	4.75	4995
SC – 12	150 × 150 × 450	5	960	100	900	4.75	5215
SC – 13	150 × 150 × 450	5	550	80	900	4.75	3422
SC – 14	150 × 150 × 450	5	550	110	900	4.75	4046
SC – 15	150 × 150 × 450	6	550	100	900	4.75	4000
SC – 16	150 × 150 × 450	6	690	100	900	4.75	4737
SC – 17	150 × 150 × 450	6	770	100	900	4.75	5049
SC – 18	150 × 150 × 450	6	890	100	900	4.75	5483
SC – 19	150 × 150 × 450	6	960	100	900	4.75	5736
SC – 20	150 × 150 × 450	6	550	80	900	4.75	3614
SC – 21	150 × 150 × 450	6	550	110	900	4.75	4196
SC – 22	150 × 150 × 450	5	550	100	—	0	3454

注: B 为组合构件截面宽度; H 为截面高度; L 为组合构件长度; t 为方钢管壁厚; f_y 为钢管钢材屈服强度; f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_{ct} 为 CFRP 抗压强度; P_u 为构件极限承载力;SC – 22 为无内置 CFRP 型材的对比构件.

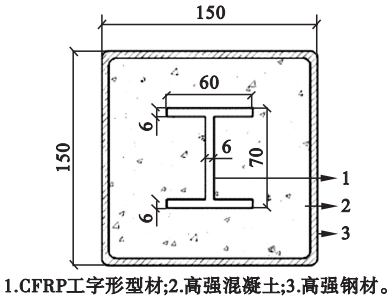


图 3 构件截面形式

Fig. 3 The cross – section of specimens

构件有限元计算模型的建立如图 4 所示. 端板、核心混凝土与方钢管均采用实体单元建模;CFRP 采用壳体单元建模. CFRP 型材建模采用三层不同方向的纤维方向. 边界

条件为 $U_1 = 0, U_2 = 0, U_3 = 0, UR_1 = 0, UR_2 = 0, UR_3 = 0$,上部加载位置采用位移加载并施加轴向位移,限制其余自由度.

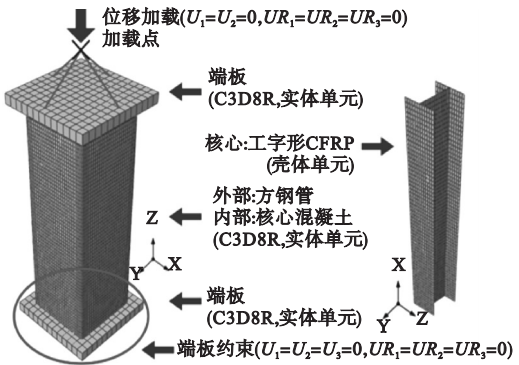


图 4 有限元计算模型

Fig. 4 The finite element analysis mode

3 有限元计算结果

3.1 有限元计算结果的验证

为验证有限元分析模型的正确性,笔者进行了含内工字形碳纤维布的高强方钢管混凝土短柱轴心受压试验^[21]. 试件 SC-1 和 SC-2 的参数如下: $B \times H \times L = 150 \times 150 \times 450$ mm, $t = 5$ mm, 钢管屈服强度 $f_y =$

811.10 MPa,混凝土立方体抗压强度 $f_{cu} = 92$ MPa. 破坏模态如图 5(a)、(b)所示. 笔者对试验轴向载荷-位移曲线和载荷-应变曲线与有限元模型结果进行了比较,结果如图 5(c)所示. 图 5(c)表明,有限元模型的荷载-位移曲线与试验构件的荷载位移曲线基本吻合,验证了有限元模型的准确性,有限元模型计算结果可以用来研究此类构件的受力性能.

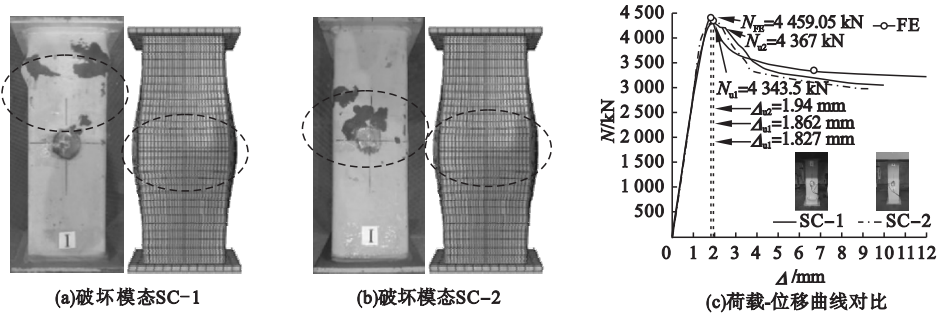


图 5 有限元模型验证
Fig. 5 Verification of finite element model

3.2 受力全过程分析

图 6 为典型构件 SC-8 平均应力-平均应变曲线,构件参数见表 1. 在曲线上定义 6 个特征点,并将曲线分为弹性阶段,弹塑性阶段,塑性强化阶段,下降阶段以及平缓阶段. 图 7 为构件 SC-1 不同截面处各材料分担纵向荷载曲线.

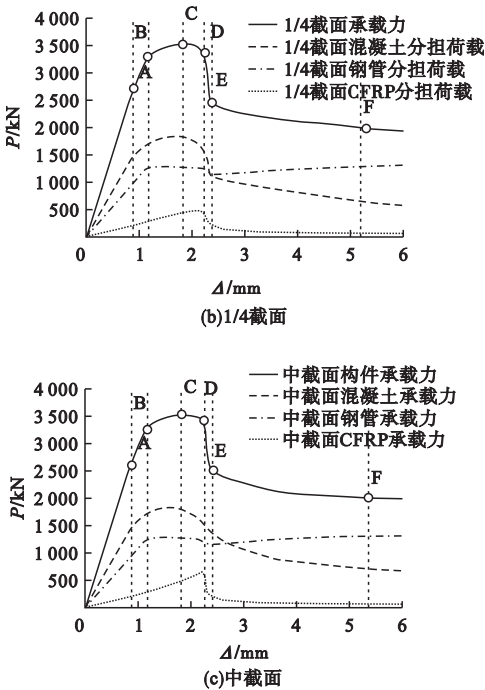


图 7 SC-1 不同高度截面构件各组成部分分担荷载-纵向位移曲线
Fig. 7 Each height section load-displacement curves of each part
各特征点下构件各组成部分分担纵向荷载比例结果见表 2.

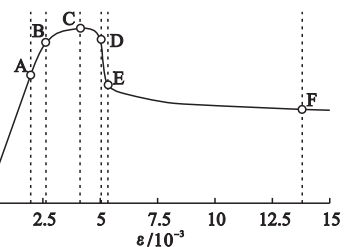


图 6 构件 SC-8 平均应力-平均应变曲线
Fig. 6 σ - ϵ curve of SC-8

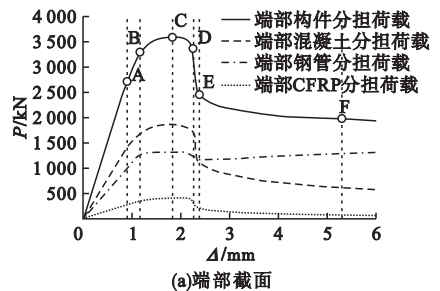


表 2 各特征点下构件各组成部分分担纵向荷载比例

Table 2 Longitudinal load ratio at each characteristic points

特征点	组成部分	分担比例/%		
		端部截面	1/4 截面	中截面
A	混凝土	52.25	55.48	55.53
	钢材	37.10	36.63	36.55
	CFRP	10.64	7.89	7.92
B	混凝土	51.93	54.27	53.27
	钢材	38.86	39.27	38.18
	CFRP	9.21	6.46	8.55
C	混凝土	51.97	51.53	50.91
	钢材	36.46	35.99	35.71
	CFRP	11.57	12.47	13.38
D	混凝土	51.33	49.15	45.91
	钢材	37.59	37.16	35.51
	CFRP	11.09	13.69	18.57
E	混凝土	45.20	46.16	53.52
	钢材	46.24	46.16	46.48
	CFRP	8.57	7.69	0.00

3.3 混凝土截面应力应变分析

笔者将 SC-22 构件的特征点 A、B、C 与构件 SC-8 的特征点 A、C、E 进行对比,截面纵向应力等值线分别如图 8、图 9 所示。从图 8(a)与图 9(a)可以看出,在弹性极限时,普通钢管混凝土构件中截面纵向应力分布均匀应力达到 $0.85 f_c$;而内置工字形

CFRP 构件纵向应力在 CFRP 型材附近较低,其余区域较为均匀。对比图 8(b)与图 9(b)可以看出,达到极限承载力时,构件 SC-8 与构件 SC-22 在角部纵向应力集中,构件 SC-22 角部纵向应力由 $1.02 f_c$ 增长到 $1.14 f_c$,而 SC-8 角部纵向应增加幅度从 $1.02 f_c$ 增长到 $1.28 f_c$,而且角部纵向应力增强区域与普通钢管混凝土相比较大。SC-8 构件靠近 CFRP 处承担纵向荷载小于 $0.95 f_c$ 。对比图 8(c)与图 9(c)可以看出,下降阶段中,两种构件截面角部应力分布较为集中,构件 SC-8 角部区域纵向应力由 $0.77 f_c$ 增长到 $1.26 f_c$,而 SC-22 角部区域应力由 $0.63 f_c$ 增长到 $0.89 f_c$,可见构件 SC-8 角部纵向应力集中较为明显。构件 SC-8 与构件 SC-22 在靠近截面中心的纵向应力分布相似,可以看当 CFRP 退出工作后构件进入平缓阶段,中截面混凝土承担的纵向荷载比例增加,纵向应力由 $0.52 f_c$ 增长到 $1.01 f_c$,构件仍有较大承载能力,该阶段应力分布规律与普通钢管混凝土进入下降阶段时,应力分布规律较为接近。

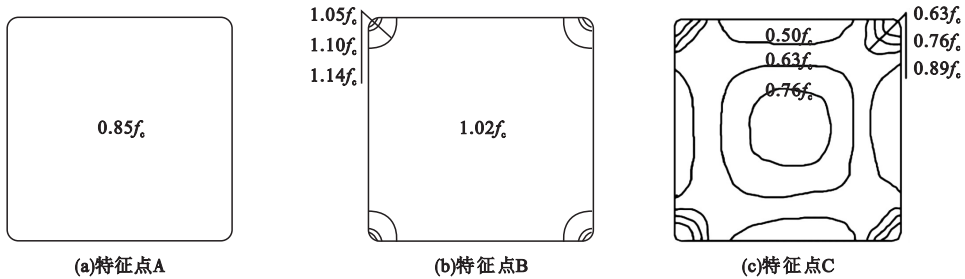


图 8 构件 SC-22 中截面核心混凝土纵向应力等值线

Fig. 8 Medium – section core concrete longitudinal stress contours of SC-22

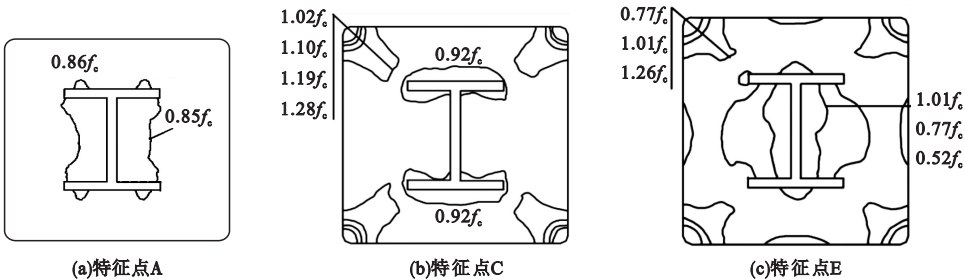


图 9 构件 SC-8 中截面核心混凝土纵向应力等值线

Fig. 9 Medium – section core concrete longitudinal stress contours of SC-8

笔者选取构件 SC-8 的 1/4 高度位置混凝土截面为研究对象,将截面的 1/4 区域划分为 4 个区域以及 6 个特殊点进行核心混凝土纵向应力以及方钢管与混凝土接触应力研究(见图 10(a)). 核心混凝土划分的 4 个不同区域的平均纵向应力-应变曲线如图 10(b)所示,从图中可以看出,靠近角部的 I 区域混凝土平均纵向应力最大,达到 102 MPa, II、III 区域纵向应力-应变曲线基本重合, IV 区域达到第一个峰值 91.5 MPa 后应变达到 $4\,400\times 10^{-6}$ 后开始进入下降阶段. 应变达到 $6\,200\times 10^{-6}$ 后,平均纵向应力

再次上升,达到 97.5 MPa,此时工字形 CFRP 达到纵向极限应力,钢管-混凝土接触应力达到峰值. 图 10(c)、(d)分别为构件 SC-8 中截面混凝土 6 个特殊点的横向应力. 由图可知,a 点、d 点的横向应力相对较大,即钢管与混凝土的接触应力在角部较大. 从图中可以看出,接触点 a 与点 d 在横向应变达到 $1\,300\times 10^{-6}$ 时接触应力达到 54 MPa,随后接触应力降低,此时构件中工字形 CFRP 达到极限承载力. 随着应变加大呈现接触应力增加趋势,横向应变达到 $6\,000\times 10^{-6}$ 后,接触应力开始降低.

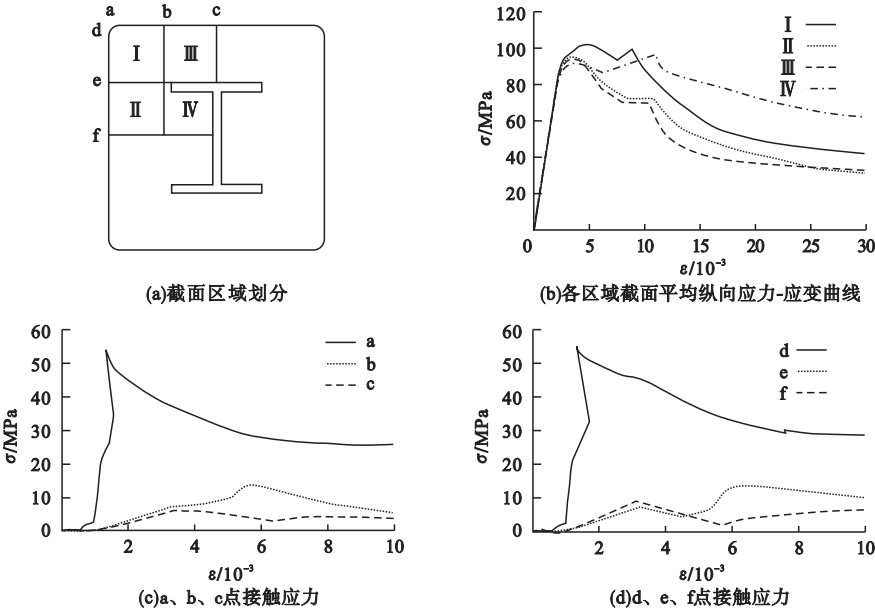


图 10 构件 SC-8 截面区域划分及其应力状态
Fig. 10 Sectional area division and its stress state of SC-8

4 参数分析

4.1 混凝土强度等级

混凝土立方体抗压强度对构件荷载-位移曲线影响如图 11 所示. 从图中可以看出,曲线初始刚度随着混凝土强度提高而提高,但并不明显. 混凝土强度从 80 MPa 增长到 100 MPa,构件极限承载力提高了 13.83%,构件混凝土强度从 100 MPa 增长到 110 MPa,极限承载力提高了 6.08%. 由此可见,混凝土强度等级对极限承载力影响较大.

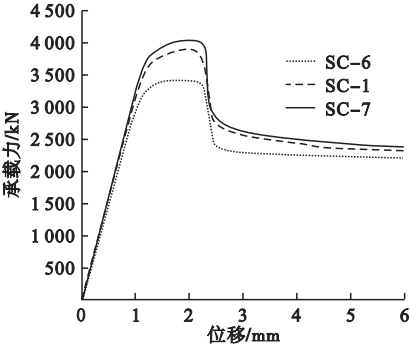


图 11 混凝土强度对构件荷载-位移影响曲线
Fig. 11 Effect of f_{cu} on load-strain curves

4.2 钢材屈服强度

钢材屈服强度对不同构件荷载 - 纵向位移影响曲线如图 12 所示. 从图中可以看出, 在其余参数相同情况下, 钢材屈服强度的改变对构件的弹性阶段几乎无影响, 各个构件的荷载 - 位移曲线初始刚度几乎相同. 在超过比例极限之后, 极限荷载随着钢材屈服强度的提高而明显提高, 钢材屈服强度从 550 MPa 提高到 690 MPa, 承载力提高了 9.92%; 从 690 MPa 提高到 770 MPa, 承载力提高了 5.46%; 从 770 MPa 提高到 890 MPa, 承载力提高了 7.15%; 从 890 MPa 提高到 960 MPa, 承载力提高了 3.89%. 由此可见, 随着钢材屈服强度的提高, 构件极限承载力对应的纵向位移在增加.

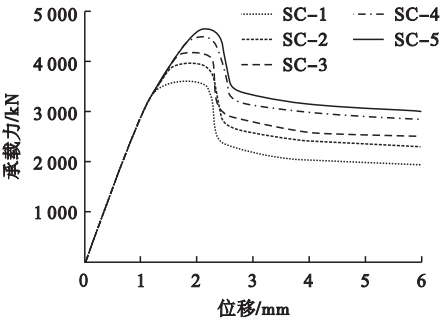


图 12 钢材屈服强度对荷载 - 纵向位移影响曲线
Fig. 12 Effect of f_y on load - strain cruves

4.3 含钢率

含钢率对短柱荷载 - 纵向位移影响曲线如图 13 所示. 从图中可以看出, 含钢率每增加约 2.5%, 构件的极限承载力分别提高 3% ~ 3.3%. 随着含钢率的增加, 构件荷载 -

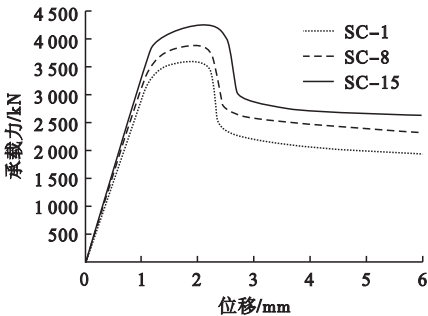


图 13 含钢率对构件荷载 - 纵向位移影响曲线
Fig. 13 Effect of steel ratio on load - strain cruves

位移曲线初始刚度明显增大, 极限承载力大幅度增加; 而且随着含钢率的增加, 构件达到极限承载力时候对应的位移增大.

4.4 内置工字形 CFRP

取构件 SC - 8 与构件 SC - 22 的荷载 - 纵向位移曲线进行对比, 其构件参数如表 1 所示, 对比结果如图 14 所示. 可以看出内置 CFRP 构件荷载 - 位移曲线初始刚度与极限承载力较普通钢管混凝土构件增加. 构件 SC - 8 极限承载力对应位移较普通钢管混凝土构件增加, 变形能力得到加强, 构件达到极限承载力后进入下降阶段, 随后进入平缓阶段, 此时构件 SC - 8 与 SC - 22 承载力几乎相同.

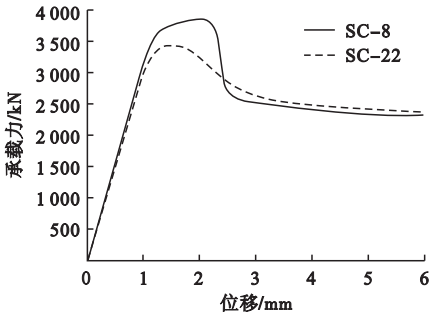


图 14 内置 CFRP 对荷载 - 位移影响曲线
Fig. 14 Effect of inner CFRP on load - strain cruves

5 结 论

(1) 内置工字形 CFRP 的高强方钢管高强混凝土轴压短柱的纵向应力 - 应变曲线可以定义 6 个特征点, 分为 5 个不同的阶段: 弹性阶段、弹塑性阶段、塑性强化阶段、下降阶段、平缓阶段.

(2) 受力过程中, 工字形 CFRP 与核心混凝土分担荷载比例随着截面高度变化而变化, 端部截面混凝土分担荷载比例较大, 中截面处工字形 CFRP 型材分担荷载比例较大. 从构件接触应力 - 应变关系可以得出, 构件核心混凝土与方钢管的接触应力主要集中在方钢管角部.

(3) 混凝土强度、钢材屈服强度、CFRP 配置率以及含钢率对构件极限承载力有较大

影响;含钢率以及工字形 CFRP 配置率对构件荷载-位移曲线初始刚度影响较大,混凝土强度对其影响较小;钢管屈服强度、含钢率以及工字形 CFRP 配置率对构件变形能力影响较大。

参考文献

- [1] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 修订版. 北京:人民交通出版社,2007.
(CAI Shaohuai. Modern steel tube confined concrete structures[M]. Revised Edition. Beijing:China Communication Press,2007.)
- [2] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,2003.
(ZHONG Shantong. Concrete filled steel tube structure[M]. 3rd ed. Beijing:Tsinghua Press, 2003.)
- [3] TAO Z, UY B, LIAO F Y, et al. Nonlinear analysis of concrete-filled square stainless steel stub columns under axial compression[J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67(11):1719-1732.
- [4] MOON J, KIM J J, LEE T H, et al. Prediction of axial load capacity of stub circular concrete-filled steel tube using fuzzy logic[J]. Journal of constructional steel research, 2014, 101: 184-191.
- [5] LAI M H, HO J C M. An analysis-based model for axially loaded circular CFST columns[J]. Thin-walled structures, 2017, 119:770-781.
- [6] OUYANG Y, KWAN A K H. Finite element analysis of square concrete-filled steel tube (CFST) columns under axial compressive load[J]. Engineering structures, 2018, 156:443-459.
- [7] 施刚, 石永久, 班慧勇. 高强度钢材钢结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
(SHI Gang, SHI Yongjiu, BAN Huiyong. Steel structure of high strength steel[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2014.)
- [8] CHOI I R, CHUNG K S, KIM C S. Experimental study on rectangular CFT columns with different steel grades and thicknesses[J]. Journal of constructional steel research, 2017, 130: 109-119.
- [9] 徐礼华, 吴敏, 周鹏华, 等. 钢管自应力自密实高强混凝土短柱轴心受压承载力试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(3):93-100.
(XU Lihua, WU Min, ZHOU Penghua, et al. Experimental investigation on high-strength self-stressing and self-compacting concrete filled steel tube columns subjected to uniaxial compression[J]. Engineering mechanics, 2017, 34(3):93-100.)
- [10] VANEVENHOVEN L, SHIELD C, BANK L. LRFDFactors for pultruded wide-flange columns[J]. Journal of structural engineering, 2010, 136(5):54-564.
- [11] NUNES F, CORREIA J R, SILVESTRE N. Structural behaviour of hybrid FRP pultruded columns. part 1: experimental study[J]. Composite structures, 2016, 139:291-303.
- [12] LAUDIERO F, MINGHINI F, TULLINI N. Buckling and postbuckling finite-element analysis of pultruded FRP profiles under pure compression FRP[J]. Journal of composites for construction, 2014, 18(1):1-12.
- [13] PISCESA B B, ATTARD M M, et al. A lateral strain plasticity model for FRP confined concrete[J]. Composite structures, 2016, 158: 160-174.
- [14] SUNDARRAJA M C, GANESH P G. Experimental investigation on strengthening of CFST columns using CFRP composites[J]. International journal of earth sciences and engineering, 2013, 6(2):15-20.
- [15] SUNDARRAJA M C, GANESH P G. Behaviour of CFST members under compression externally reinforced by CFRP composites[J]. Journal of civil engineering and management, 2013, 19(2):184-195.
- [16] LI Guochang, LANG Yan, YANG Zhijian. Behavior of high strength CFSST stub columns with inner CFRP tube under axial compressive load[J]. Advanced steel construction, 2011, 7(3):239-254.
- [17] LI Guochang, ZHOU Bing, PAN Jianghua. Finite element analysis on concrete-filled square steel tube short columns with inner CFRP profiles under axial compression[J]. Applied mechanics and materials, 2014, 578/579(4): 335-339.
- [18] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州:福州大学,2005.
(LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.)
- [19] 陈明杰. 钢管-钢管高强混凝土柱力学性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
(CHEN Mingjie. Study on the mechanical properties of CFST column with the built-in cross I shape column[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.)
- [20] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 3版. 北京:科学出版社,2007.
(Han Linhai. Concrete filled steel tubular structures from theory to practice[M]. 3rd ed. Beijing:Science Press,2007.)
- [21] 杨宇. 内置工字形 CFRP 的高强方钢管高强混凝土轴压短柱受力性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2019.
(YANG Yu. Research on mechanical behavior of high strength concrete-filled high strength square steel tube stub columns with inner I-shaped CFRP under axial load[D]. Shenyang:Shenyang Jianzhu University, 2019.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)