

文章编号: 1000-4750(2006)08-0102-04

CFRP-钢管砼轴压短柱受力性能分析

*王庆利, 王金鱼, 张永丹

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 以试验为基础, 对 CFRP-钢管混凝土轴压短柱的受力性能进行了分析。首先按不同阶段分析了该类构件的作用机理, 然后给出了混凝土、钢管以及 CFRP 筒的应力途径。以此为依据, 确定了该类构件典型的应力-应变曲线, 并将其划分为若干阶段: 弹性阶段、弹塑性阶段、塑性强化段以及下降段; 与钢管混凝土轴压短柱的应力-应变曲线相比, CFRP 钢管混凝土轴压短柱的应力-应变曲线的最大特点是在达到极限承载力之后, 都要经历一个下降段。探讨了该类构件承载力的简化计算方法, 并建议采用极限平衡法求解。

关键词: 圆 CFRP-钢复合管; 约束混凝土; 轴压短柱; 本构关系; 简化计算方法

中图分类号: TU375 文献标识码: A

MECHANICAL PROPERTY ANALYSIS ON AXIALLY COMPRESSED CONCRETE FILLED CIRCULAR CFRP-STEEL TUBE STUB COLUMNS

*WANG Qing-li, WANG Jin-yu, ZHANG Yong-dan

(Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: Mechanical property of axially compressed concrete filled circular CFRP-steel tube stub columns is analyzed based on experimental results. The working mechanisms of the composite column at different stages are analyzed and the stress paths in concrete, steel and CFRP are given. The stress-strain relationship of the axially loaded composite column is then determined, which is divided into 4 stages: elastic, elasto-plastic, strengthening and softening. Compared with that of concrete filled circular steel tube stub column, the axial stress-strain relationship of the composite column investigated exhibits an obvious strain softening after the peak strength is reached. The simplified analysis methods of ultimate strength are finally discussed and the method of limit equilibrium is recommended.

Key words: circular CFRP-steel composite tube; confined concrete; axially compressed stub columns; constitutive relation; simplified analysis method

三向受压混凝土的抗压强度较高, 人们利用这一特性, 采用不同的材料制成筒体, 在其内部浇筑(钢筋)混凝土以作为主要承受压力的构件。应用最多的筒体材料是钢材和 FRP, 并形成了钢管混凝土结构和 FRP 筒内填(钢筋)混凝土结构。我国在钢管混凝土结构领域的研究处于世界前列^[1,2], 在应用方

面也取得了极大的成功; 但在 FRP 筒内填(钢筋)混凝土结构领域的研究^[3]稍落后于国外^[4-10]。

但是, 以上两种结构也各有不足, 为此, 有科研人员开展了 CFRP-钢复合圆管内填混凝土轴压短柱的试验研究工作^[11], 本文拟以此为基础, 对该类构件的作用机理、各组成材料的应力途径、典型的

收稿日期: 2004-11-11; 修改日期: 2005-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50408032); 辽宁省自然科学基金资助项目(20031001)

作者简介: *王庆利(1972), 男, 辽宁盘锦人, 教授, 博士, 从事结构工程研究(E-mail: ceqlwang@sjzu.edu.cn);

王金鱼(1980), 男, 江苏泰州人, 硕士生, 从事结构工程研究;

张永丹(1980), 女, 辽宁沈阳人, 硕士生, 从事结构工程研究。

应力-应变曲线以及简化计算方法等进行初步探讨。

1 试验概况

试验共计 10 个试件, 主要参数为钢管约束效应系数 ξ_s 和 CFRP 筒约束效应系数 ξ_{cf} ,

$$\xi_s = A_s f_y / (A_c f_{ck}) \quad (1)$$

$$\xi_{cf} = A_{cf} f_{cf} / (A_c f_{ck}) \quad (2)$$

式中, A_s 、 f_y 分别为钢管的横截面积、屈服强度, A_c 、 f_{ck} 分别为混凝土的横截面积、轴心抗压强度标准值, A_{cf} 、 f_{cf} 分别为 CFRP 筒的横截面积、拉伸强度。

柱高 H 均为 400mm。试件其它参数与承载力实测值 N'_u 见表 1, 其中, D 为钢管外径, f_{cu} 为混凝土立方试块抗压强度。

表 1 参数与承载力实测值

Table 1 Specimen parameters and experimental values of strength

试件编号	f_y /MPa	f_{cu} /MPa	D /mm	N'_u /kN
1-1.5	350	55	127	1086
1-2.5	350	55	129	1294
1-3.5	310	55	131	1348
1-4.5	310	55	133	1698
1-6.0	350	53	136	1939
2-1.5	350	55	127	1283
2-2.5	350	55	129	1506
2-3.5	310	55	131	1593
2-4.5	310	55	133	1846
2-6.0	350	53	136	2186

注: 试件编号中“-”前数字表示 CFRP 的层数;“-”后数字表示钢管壁厚 t_s , 单位 mm。

采用的碳纤维织物是日本 TORAY T700 12K 碳纤维编织的高性能单向布, 德国 EPO 公司生产, 型号为 C300/300, 主要技术性能: 单丝拉伸强度 4900MPa, 弹性模量 230GPa, 拉断伸长率 2.1%, 单位重量 300g/m², 厚度 $t_{cf} = 0.167$ mm。分别采用由辽宁省建设科学研究院研制生产的 JGN-C 和 JGN-P 建筑结构粘合剂做为粘浸胶和底胶。环向粘贴碳纤维织物, 粘帖工艺参考建设部建筑物鉴定与加固规范管理委员会于 2001 年 9 月制定的《粘贴碳纤维增强复合材料加固混凝土工程施工与验收暂行规定》执行。测量内容包括荷载 N 、纵向压缩量 Δ 、钢管的环向应变 ε_{cs} 、纵向应变 ε_{ls} 以及 CFRP 筒的环向应变 $\varepsilon_{c,cf}$ 等。

2 作用机理

CFRP 钢管混凝土轴压短柱的作用机理与钢管混凝土轴压短柱的作用机理有一些类似之处, 可以按照混凝土、钢管和 CFRP 筒三种材料的特点区分出各自的不同工作阶段: 对于混凝土, 可区分为微裂出现前和微裂出现后两个阶段; 对于钢管, 可区分为弹性和塑流两个阶段; 对于 CFRP 筒, 只有强度达到极限状态(断裂)这—个工作阶段。

2.1 初始荷载阶段

混凝土的泊松系数小于钢管的泊松系数, 因此, 混凝土与钢管之间不发生挤压, 钢管如同普通钢筋一样, 与核心混凝土共同承受纵向压力, 此时, 钢管壁的径向变形略有增加, CFRP 筒仅受很小的环向拉力。

2.2 混凝土开裂阶段

随着纵向应变的增加, 混凝土内部发生微裂且不断发展, 混凝土的侧向膨胀超过钢管的侧向膨胀, 在混凝土与钢管壁之间出现径向压力, 钢管壁开始产生环向拉应力; 同时, 钢管壁的径向变形增加, CFRP 筒所受环向拉应力也开始加大。此时, CFRP 筒处于环拉单向应力状态, 钢管处于纵压-环拉的双向应力状态, 混凝土处于三向受压状态。

2.3 内力重分布阶段

当双向受力的钢管还处于弹性阶段时, CFRP 钢管混凝土轴压短柱外观体积的变化不大, 此时 CFRP 筒受力也不大, 但是当钢管达到屈服而开始塑流后, 试件的应变发展加剧, 外观体积因为核心混凝土微裂发展而急剧增长。按照屈服条件的规律, 钢管和 CFRP 筒的环向拉应力不断增加, 钢管纵向压应力相应减小, 在钢管与核心混凝土之间产生纵向压力的重分布: 一方面, 钢管承受的压力减小, 另一方面, 混凝土因受到较大的约束而具有更高的抗压强度, 钢管从主要承受纵向压应力转变为主要承受环向拉应力。

最后, 当钢管和核心混凝土所能承担的纵向压力之和达到最大值时, 试件达到极限承载能力, CFRP 筒断裂, 试件破坏。

3 应力途径

3.1 钢管的应力途径

图 1 给出钢管的应力途径, 其中 σ_1 为钢管的纵向压应力; σ_2 为钢管的环向拉应力。

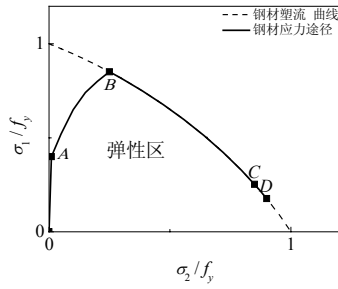


图 1 钢管的应力途径

Fig.1 Stress path in the steel tube

3.2 核心混凝土的应力途径

图 2 给出核心混凝土的应力途径，其中 σ_c 为混凝土应力； p 为混凝土侧压力。

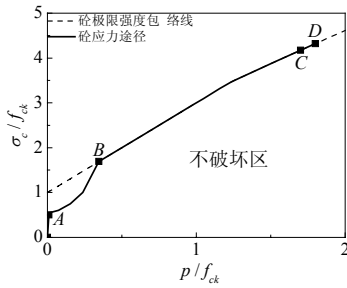


图 2 核心混凝土的应力途径

Fig.2 Stress path in the concrete

3.3 CFRP 筒的应力途径

图 3 给出 CFRP 筒的应力途径，其中 σ_{cf} 为 CFRP 筒的环向应力， ε_u 为 CFRP 筒的极限应变。

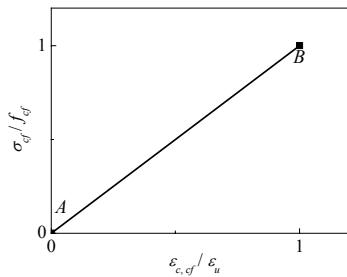


图 3 CFRP 筒的应力途径

Fig.3 Stress path in the CFRP tube

图 1~图 3 中的 $OABCD$ 诸特征点均一一对应：对钢管， OAB 为弹性阶段， BCD 为塑性阶段；对混凝土， OA 为裂前阶段， $ABCD$ 为裂后阶段；对 CFRP 筒， B 为断裂临界点。

4 典型的 $\sigma - \varepsilon_l$ 曲线

本次试验的 ξ_{cf} 介于 0.1889~0.4203， ξ_s 介于 0.4651~2，在此范围内，典型的 CFRP 钢管混凝土

轴压短柱 $\sigma - \varepsilon_l$ 曲线如图 4 所示。

$$\sigma = N / A \tag{3}$$

$$\varepsilon_l = \Delta / H \tag{4}$$

式中， σ 为名义压应力， A 为试件的横截面积。

图中 ξ_0 为钢管界限约束效应系数，对于圆截面构件， $\xi_0 \approx 1$ ^[2]。

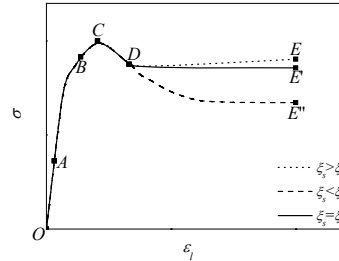


图 4 典型的 CFRP 钢管混凝土轴压短柱的 $\sigma - \varepsilon_l$ 曲线

Fig.4 Typical $\sigma - \varepsilon_l$ curve of the axially compressed

circular concrete filled CFRP-steel stub columns

该 $\sigma - \varepsilon_l$ 曲线的特点如下，弹性阶段(OA): 钢管和核心混凝土一般均为单独受力， A 点大致相当于核心混凝土在纵向压力作用下微裂不断开展，变形系数超过钢管的泊松比，二者产生相互作用力，钢管开始对核心混凝土起约束作用；弹塑性阶段(AB): 随着纵向变形的增加，钢管和 CFRP 筒对混凝土的约束作用不断增加， B 点时钢材一般进入弹塑性阶段；塑性强化段(BC): 承载力继续增加，试件开始屈服，直至达到极限承载力，CFEP 筒断裂；下降段(CD): 在达到极限承载力之后，所有试件均经历一个下降段，下降幅度与 ξ_{cf} 有关， ξ_{cf} 越大，下降幅度也越大，反之亦然。

下降段之后，由于 ξ_s 的不同，曲线有不同的走向：如果 $\xi_s > \xi_0$ ，承载力能继续略有提高(DE)；如果 $\xi_s = \xi_0$ ，承载力将基本维持不变(DE')；如果 $\xi_s < \xi_0$ ，承载力将继续下降并最终维持在某一确定值(DE'')。

5 极限承载力简化计算方法探讨

文献[1]将最大荷载定义为“极限承载力”，并采用极限平衡法求解；文献[2]建议取 $\sigma - \varepsilon_l$ 关系曲线上应变为 $3000 \mu\varepsilon$ 对应的应力为钢管混凝土轴压强度承载力指标，再根据数值计算的结果回归出表达式。以上两种方法均被有关规程采纳且成功用于工程实践。但本文研究对象与钢管混凝土有所不同，应作具体分析。

图 5 为实测圆 CFRP-钢管混凝土轴压短柱的 $\sigma - \varepsilon_l$ 曲线。

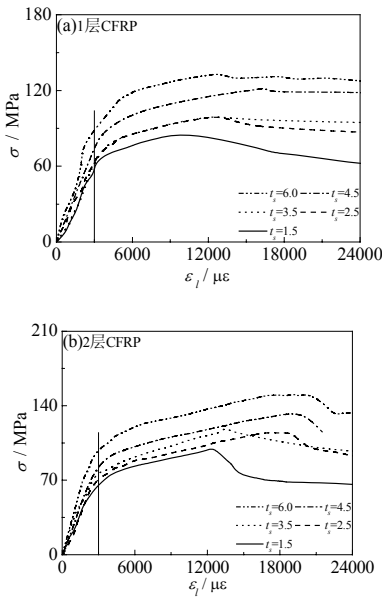


图 5 实测 $\sigma - \varepsilon_l$ 曲线

Fig.5 Experimental $\sigma - \varepsilon_l$ curves

从图 5 可以看出, $\varepsilon_l > 3000\mu\epsilon$ 后, 承载力仍有较大幅度增长, 曲线的弹塑性阶段并未完全结束。图 6 为实测的 $\varepsilon_{cs} - \varepsilon_l$ 曲线。

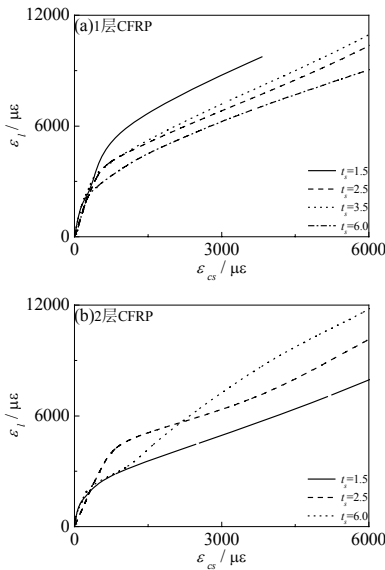


图 6 实测 $\varepsilon_{cs} - \varepsilon_l$ 曲线

Fig.6 Experimental $\varepsilon_{cs} - \varepsilon_l$ curves

从图 6 可以看出, $\varepsilon_l = 3000\mu\epsilon$ 时, 钢管的环向应变较小, 未达到极限状态; 而对应于曲线最大荷载时的 ε_l , 钢管均已屈服。

图 7 为实测 $\varepsilon_{c,cf} - \varepsilon_l$ 曲线。

从图 7 可以看出, $\varepsilon_l = 3000\mu\epsilon$ 时, $\varepsilon_{c,cf}$ 较小,

远未达到极限状态; 而对应于曲线最大荷载时的 ε_l , CFRP 筒均已断裂。

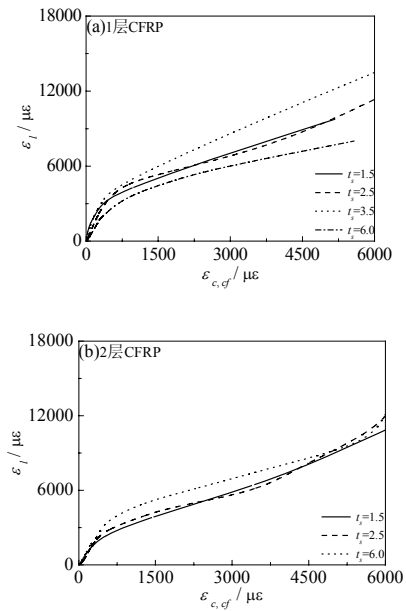


图 7 实测 $\varepsilon_{c,cf} - \varepsilon_l$ 曲线

Fig.7 Experimental $\varepsilon_{c,cf} - \varepsilon_l$ curves

从以上的分析可知, 对于本文的研究对象, 取 $\sigma - \varepsilon_l$ 关系曲线上应变为 $3000\mu\epsilon$ 对应的应力为强度承载力指标过于保守, 而由于目前试验资料非常有限, 像文献[2]那样取 $\sigma - \varepsilon_l$ 关系曲线上某一应变对应的应力为强度承载力指标又不可能, 因此, 本文定义 CFRP 筒断裂时对应的荷载为“极限承载力”, 并可以尝试采用文献[1]的极限平衡法求解。

6 结论

CFRP 钢管混凝土轴压短柱的作用机理可以分为初始荷载、混凝土微裂以及内力重分布三个阶段。

对应于上述三个阶段, 混凝土、钢管以及 CFRP 筒均有不同的应力途径。

提出了该类构件典型的应力-应变曲线, 并将其划分为若干阶段: 弹性阶段、弹塑性阶段、塑性强化段以及下降段; 与钢管混凝土轴压短柱的应力-应变曲线相比, 该类构件的应力-应变曲线的最大特点是在试件达到极限承载力之后, 都要经历一个下降段。

探讨了该类构件承载力简化计算方法, 并建议在现阶段采用极限平衡法求解。

系数沿水平方向的变化趋势和规则体型建筑基本一致,但由于建筑表面有急剧突起与收缩,故风压沿高度存在很大起伏,166.2m 以上突出部分的迎风面上有负压出现。

(3) 侧风面上的负风压相对较高,且靠近迎风端的局部负压较同一高度处其他区域大,最大值约为-1.05,建筑覆面(如玻璃幕墙)设计时应予注意。该表面凸角前部的局部风压转为正值。

(4) 根据数值模拟结果对该建筑在 210° 来流风向下的周围风环境进行了预测和评估,结果显示该风向下风环境状况良好。

参考文献:

- [1] 埃米尔·西缪, 罗伯特·H·斯坎伦. 风对结构的作用——风工程导论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992.
Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures: an introduction to wind engineering [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1992. (in Chinese)
- [2] Stathopoulos T. Computational wind engineering: Past achievements and future challenges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67&68: 509~532.
- [3] 陈水福, 孙炳楠. 联体型高层建筑表面风压的数值模拟及试验研究[J]. 空气动力学学报, 1998, 16(2): 181~186.
Chen Shuifu, Sun Bingnan. Numerical simulation and experiment investigations of wind pressures on a multiple-body tall building [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1998, 16(2): 181~186. (in Chinese)
- [4] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
Huang Bencai. Theory and application of structure wind-resistance [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001. (in Chinese)
- [5] 浙江大学土木系. 西湖文化广场风洞试验报告[R]. 2002.
Department of Civil Engineering, Zhejiang University. Wind Tunnel Test Report of West-Lake Cultural Plaza [R]. 2002. (in Chinese)
- [6] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
Tao Wenquan. Numerical heat transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese)
- [7] Yakhot V, Orszag S A, Thangam S. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique [J]. Physics of Fluids, 1992, A4: 1510~1520.
- [8] Speziale C G, Thangam S. Analysis of an RNG based turbulence model for separated flows [J]. International Journal of Engineering Science, 1992, 10: 1379~1388.
- [9] Lars Davidson. A pressure correction method for unstructured meshes with arbitrary control volumes [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1996, 22: 265~281.
- [10] Murakami S, Deguchi K. New criteria for wind effects on pedestrians [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1981, 7(3): 289~309.

(上接第 105 页)

参考文献:

- [1] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
Cai Shaohuai. Modern concrete filled steel tubular structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Han Linhai. Concrete filled steel tubular structures [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [3] 吴刚, 吕志涛. FRP 约束混凝土圆柱无软化段时的应力-应变关系研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 1~9.
Wu Gang, Lu Zhitao. Study on the stress-strain relationship of FRP-confined concrete circular column without a strain-softening response [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5): 1~9. (in Chinese)
- [4] Omar Chaallal, Mohsen Shahawy. Performance of fiber-reinforced polymer-wrapped reinforced concrete column under combined axial-flexural loading [J]. Structure Journal, 2000, 97 (4): 659~668.
- [5] Xiao Y, Wu H. Composite behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets [J]. Journal of Material in Civil Engineering, 2000, 112(2): 139~146.
- [6] Andrew Davol, Rigoberto Burgueno, Frieder Seibie. Flexural behavior of circular concrete filled FRP shells [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7): 810~817.
- [7] Smith S J, Parsons I D. Finite-element and simplified models of GFRP connections [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(7): 749~756.
- [8] Amir Mirmiran, Mohsen Shahawy, Charle EI Khoury, Wassim Naguib. Large beam-column tests on concrete-filled composite tubes [J]. Structure Journal, 2000, 97(2): 268~276.
- [9] Amir Z Fam, Sami H Rizkalla. Confinement model for axially loaded concrete confined by circular FRP tubes [J]. Structure Journal, 2001, 98(4): 451~461.
- [10] Yung C Wang, Jose I Restrepo. Investigation of concentrically loaded reinforced columns confined with glass fiber-reinforced polymer jackets [J]. Structure Journal, 2001, 98(3): 377~385.
- [11] 顾威, 王庆利, 赵颖华. 圆 CFRP 钢复合管混凝土轴压短柱试验研究[J]. 沈阳建筑工程学院学报(自然科学版), 2004, 20(2): 16~18.
Gu Wei, Wang Qingli, Zhao Yinghua. Experimental study on the axially compressed concrete filled circular CFRP-Steel stub columns [J]. Journal of Shenyang Architecture and Civil Engineering Institute (Natural Science), 2004, 20(2): 16~18. (in Chinese)