

钢 混凝土组合柱轴压性能的试验对比研究<sup>\*</sup>

张春梅, 周 云, 阴 毅  
(广州大学土木工程学院, 广东 广州 510405)

**摘 要:** 通过对钢-混凝土组合柱的静载轴压承载力试验, 得出了各种组合柱在轴心荷载作用下的荷载-纵向位移曲线, 分析了组合柱的工作及破坏机理, 比较了组合柱的轴压极限承载力并对其轴心受压性能作了试验对比分析, 对相关研究和设计具有一定的参考价值。  
**关键词:** 高强混凝土; 组合柱; 工作破坏机理; 承载力; 静载试验  
**中图分类号:** TU398   **文献标识码:** A   **文章编号:** 0529-6579 (2004) 02-0046-04

钢-混凝土组合结构, 尤其是钢管混凝土结构具有承载力高以及良好的延性被广泛应用于高层建筑结构以及大跨结构中。近年来, 随着工程结构的发展及深入研究, 出现了新型的混凝土组合结构<sup>[1]</sup>, 这无疑给钢-混凝土组合结构带来新的活力。本文就双钢管高强混凝土柱、单钢管高强混凝土柱以及型钢芯钢筋高强混凝土柱 3 种组合柱进行了对比性的试验研究, 为钢-混凝土组合结构的工程应用提供依据。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

本次试验混凝土强度采用 C60, 实测立方体抗压强度  $66.3 \text{ N/mm}^2$ , 弹性模量为  $3.6 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 。钢管及工字钢均采用 Q<sub>235</sub> 钢, 设计强度  $f_y = 215 \text{ N/mm}^2$ 。钢筋采用 II (φ) 级钢。钢材的实测力学性能见表 1。

表 1 钢材的实测力学性能

Tah 1 Tested mechanical properties of steel

| 规格        | 屈服强度<br>(N·mm <sup>-2</sup> ) | 抗拉强度<br>(N·mm <sup>-2</sup> ) | 弹性模量<br>(N·mm <sup>-2</sup> ) |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 钢筋 (II 级) | 378                           | 538                           | $2.03 \times 10^5$            |
| 钢管        | 478                           | 542                           | $1.97 \times 10^5$            |
| 工字钢       | 324                           | 411                           | $1.68 \times 10^5$            |

本次试验分别采用 900 mm 高的双钢管高强混凝土柱 (DSC)、单钢管高强混凝土柱 (CFST) 以及型钢芯钢筋高强混凝土柱 (GSRC)。试件截面尺寸及配筋详图见图 1, 设计参数见表 2。

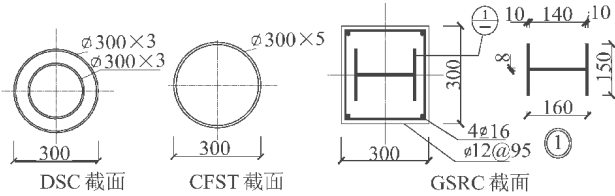


图 1 试件截面尺寸及配筋图

Fig 1 Table of sectional dimension and reinforcement of test specimens

表 2 试件类别及设计参数<sup>1)</sup>

Tah 2 Type of test specimens and design parameters

| 试件名称   | 截面尺寸/mm | 钢管/mm             | 钢筋              | 工字钢/mm                | ζ    |
|--------|---------|-------------------|-----------------|-----------------------|------|
| DSC 柱  | D=300   | φ300×3+<br>φ200×3 | —               | —                     | 0.72 |
| CFST 柱 | D=300   | φ300×5            | —               | —                     | 0.72 |
| GSRC 柱 | 300×300 | —                 | 4φ16+<br>φ12@95 | 腹板 140×8<br>翼缘 150×10 | 0.41 |

1) 纵向含钢系数  $\zeta = \sum (A_{si} f_{si} / A_{ci} f_{ci})$

1.2 加载制度与量测方法

本次试验加载系统由门式反力架及 1 000 t 液压加载试验机组成。试验时试件放置在千斤顶顶板与反力架横梁之间, 加载装置见图 2。试验采用逐级加载, 每级荷载为预计极限荷载的 1/10; 荷载的稳压时间为 3 min。量测内容: ① 各级荷载下的轴向荷载; ② 各级荷载下试件的纵向总变形; ③ 各级荷载下钢管的环向及纵向应变。

2 试验结果分析

2.1 CFST 柱的受力特点分析

图 3 为实测的单钢管高强混凝土柱 (CFST) 的

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2003-11-29  
基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (030501); 广州市教育局重点学科资助项目; 广州大学重点资助项目  
作者简介: 张春梅 (1962 年生), 女, 讲师; E-mail: zhangchumei@126.com  
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

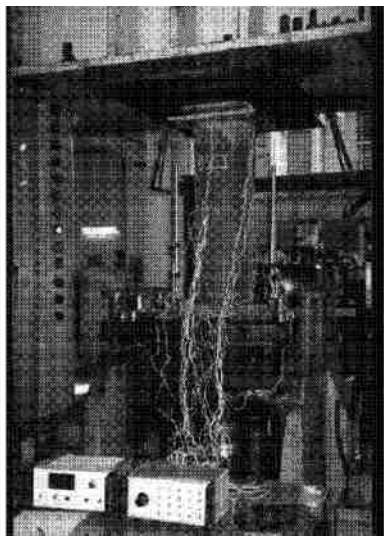


图 2 加载装置图  
Fig. 2 Figure of loading equipment

荷载—纵向位移曲线。试件开始受荷时处于弹性阶段（图中的 OA 段），当荷载加至 4 500 kN 左右时（64 %极限荷载），曲线开始偏离 OA 直线段进入弹塑性变形阶段，钢管壁局部开始出现剪切滑移线。此阶段钢管受到混凝土的挤压并发生塑性变形，高强混凝土处于三向受压状态，试件变形均匀，外形鼓而不曲。随着荷载的继续增大，钢管壁滑移线由少变多且逐渐布满管壁，试件出现了局部鼓曲，至 B 点达到荷载最大值（荷载  $N_u=7\,000\text{ kN}$ ）。随后，试件开时进入破坏阶段，最后因变形过大而终止试验。

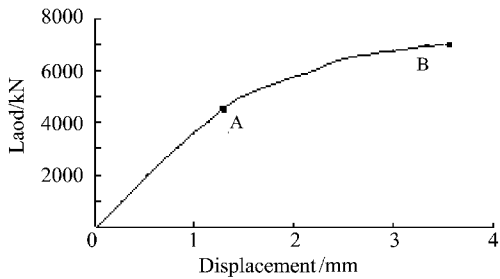


图 3 CFST 柱荷载—纵向位移线  
Fig. 3 Curves of load-longitudinal displacement of CFST column

通过对试验全过程的观测分析，当荷载由 4 500 kN 加至极限荷载 7 000 kN，轴压柱的位移由 1.3 mm 增加到 3.5 mm，说明轴压柱在越过弹性极限后发生了很大的弹塑性变形。轴压柱在破坏时，钢管表面距其顶端约 40 mm 处和距底端约 220 mm 处也都分别出现了局部凸曲，这是因为试件端部边缘效应以及钢管缺陷处的应力集中影响导致该部位首先局部鼓曲。

2.2 GSRC 柱的受力特点分析

图 4 为型钢芯钢筋高强混凝土柱（GSRC）试件加载至破坏时的照片。通过对试验全过程的观测表明，型钢芯钢筋高强混凝土柱与普通钢筋混凝土轴压柱的破坏过程有相似之处。首先在加载初期，型钢、纵筋与混凝土都能较好地共同工作，变形是协调的。随着荷载的增大，试件出现了纵向裂缝，荷载继续增大，纵向裂缝逐渐贯通分成若干小柱发生劈裂破坏，混凝土有剥落现象，型钢与纵筋都达到屈服强度。与普通钢筋混凝土柱不同的是当加载至极限荷载的 80 % 以上，型钢与混凝土的粘结滑移现象明显，在沿型钢翼缘处有明显的纵向裂缝。



图 4 GSRC 柱的破坏照片  
Fig. 4 Collapsing photo of GSRC column

试验表明，型钢芯钢筋高强混凝土柱的破坏形态是一种由于粘结劈裂导致混凝土压碎的破坏形式，既有普通钢筋混凝土轴压柱的压碎破坏特征，同时也有一定粘结破坏特征。型钢在试件中具有明显作用，从试件开裂到破坏持续时间较长，极限承载力过后，由于型钢承担了大部分轴力，试件未出现坍塌现象，而能继续承担部分荷载，并收敛于型钢的轴压承载力。

图 5 为实测的型钢芯钢筋高强混凝土柱（GSRC）的荷载—纵向位移曲线。从图中可以看出，当荷载小于 95 % 极限荷载之前，荷载—纵向位移曲线为线性关系，这是因为在此之前型钢、钢筋与混凝土能较好地共同工作变形协调所致，试件处于弹性工作阶段。一旦产生纵向裂缝，荷载—纵向位移曲线即发生转折，试件进入弹塑性加载阶段并很快达到极限承载力，最大试验荷载值为 7 200 kN。

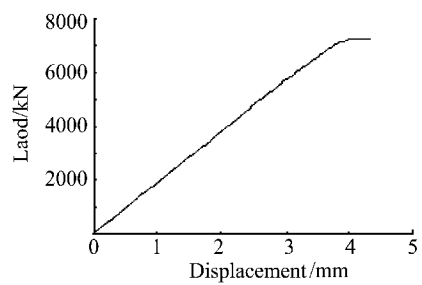


图 5 GSRC 柱的荷载—纵向位移曲线  
Fig 5 Curve of load-longitudinal displacement of GSRC column

2.3 DSC 柱的受力特点分析

图 6 为实测的双钢管高强混凝土柱（DSC）的荷载—纵向位移曲线。从图中可以看出，当荷载小于 6 000 kN 左右时（72% 极限荷载，见图中 A 点），曲线呈线性变化；随着荷载的增加，曲线进入弹塑性变形阶段，此阶段钢管表面出现皱曲斜线，表明钢管受到混凝土的挤压并发生塑性变形，高强混凝土处于三向受压状态。随着荷载继续增加，钢管内纵向压应力和环向拉应力持续增加，混凝土的承载力随之提高，试件的荷载—纵向位移曲线持续上升。当荷载达到最大值时（极限荷载=8 300 kN），相应的纵向位移达到 4.2 mm，再往后试件鼓凸和皱曲，荷载下降。从 C 点开始，逐级卸载，荷载与位移基本呈线性关系，残余变形值为 5.2 mm，试件表现出十分明显的塑性特征。从试件破坏的外观可以判断，内层钢管的皱曲和弯曲走向与试件的总体变形一致，这说明内层钢管也达到屈服并进入塑性阶段。

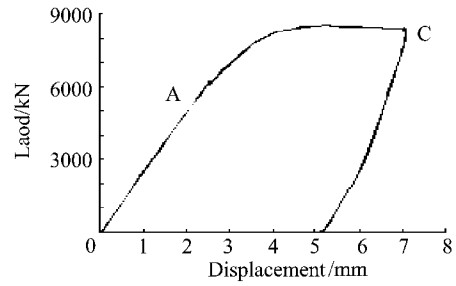


图 6 DSC 柱的荷载—纵向位移曲线  
Fig 6 Curve of load-longitudinal displacement of DSC column

3 3 种组合柱的轴压承载力性能分析

对比 3 种组合柱轴压最大承载力试验值以及试验值与计算结果（见表 3）可以看出，双钢管高强混凝土柱的最大承载力试验值比计算结果高出 28.2%，这主要是因为双钢管高强混凝土柱的理论

计算方法是按文献 [2] 中单钢管混凝土轴压柱计算，计算方法中没有考虑内层钢管对其内核芯混凝土约束作用的有利影响，而实际这种约束作用使得内核芯混凝土同时受到内外层钢管的双重约束，处于三向受压状态，抗压强度和变形能力都有所提高；型钢芯钢筋高强混凝土柱的承载力计算是按文献 [3] 中的公式计算，型钢芯钢筋高强混凝土柱的最大承载力试验值比计算值高出 32.9%，是因为理论计算结果没有考虑箍筋对受箍部份外包混凝土约束作用及处于型钢翼缘与腹板间的混凝土受到型钢的约束作用的有利影响。这种约束作用使得受箍部份外包混凝土处于三向受压状态，其抗压强度和变形能力均有所提高。单钢管高强混凝土柱的承载力计算是按文献 [2] 计算，计算结果与试验值比较接近。从表 3 中还可以看出，在纵向含钢系数相同的情况下，由于双钢管高强混凝土柱在受力过程中，其内外层钢管都对混凝土起约束作用，从而柱的承载力有所提高，在试验中也验证了双钢管高强混凝土柱的承载力大于单钢管高强混凝土柱的承载力。

通过以上的分析比较得知，钢—混凝土组合柱中的双钢管混凝土柱表现出良好的力学性能。从试验结果可知，当双钢管混凝土柱的含钢系数为 0.72 时，其荷载—纵向位移曲线具有明显的屈服段，在发生塑性变形后具有较好的延性，在达到极限承载力时钢管表面出现皱曲现象，表明钢管已经达到屈服；型钢芯钢筋高强混凝土柱的破坏特点带有高强混凝土的脆性性质，在高应力时混凝土与型钢之间的粘结滑移的现象明显存在。本试验中的试件表现出混凝土的粘结劈裂并导致局部压碎，但从出现裂缝到破坏过程中，箍筋对混凝土起着重要的约束作用。

表 3 3 种组合柱轴压承载力试验值与计算值的比较

Tah 3 Comparison of test value and calculation value of axial compressive bearing capability of three steel-concrete composite columns

| 组合柱    | 试验值 $N_t$ /kN | 计算值 $N_f$ /kN | $N_t/N_f$ |
|--------|---------------|---------------|-----------|
| DSC 柱  | 8300          | 6475          | 1.282     |
| CFST 柱 | 7000          | 6602          | 1.060     |
| GSRC 柱 | 7200          | 5418          | 1.329     |

4 结 论

本文研究和分析了 3 种钢—高强混凝土组合柱在静载下的轴压受力性能，并分别就其轴压承载力

试验结果与计算值作了比较，得出以下结论：

- (1) 钢—高强混凝土组合柱是一种新型的组合构件，高强混凝土的应用使该组合构件具有了新的特有的性质，在受力特点、破坏机制以及计算方法上均与普通钢筋混凝土有很大的区别；组合柱均具有较高的轴压承载力，但在破坏机制上不尽相同。
- (2) 通过试验验证，现有的有关组合柱的轴压承载力计算公式<sup>[4-7]</sup>与试验结果有较大的误差，计算比较保守，因此对于双钢管高强混凝土柱及型钢芯高强混凝土柱承载力计算方法有待进一步研究。

参考文献：

[ 1 ] 蔡绍怀, 焦占栓. 复式钢管柱的基本性能和承载力计算

[ J ]. 建筑结构学报, 1997, 18(6): 20— 25.

[ 2 ] 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.

[ 3 ] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[ M ]. 北京: 科学出版社, 2001.

[ 4 ] 中华人民共和国行业标准. 钢管混凝土结构设计规程[ S ]. 1997.

[ 5 ] 钢管混凝土结构与施工规程(JCJ01— 89)[ S ]. 上海: 国家建筑工业局标准, 1989.

[ 6 ] 钢管混凝土结构与施工规程(CECS28: 90)[ S ]. 北京: 中国计划出版社, 1992.

[ 7 ] 能源部电力规划设计管理局. 火力发电厂主厂房钢—混凝土组合结构设计暂行规定(DLGJ99—91)[ S ].

Experimental Contrast Studies on Axial Compressive Behaviors of Steel concrete Composite Columns

ZHANG Chun mei, ZHOU Yun, YIN Yi

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** According to experiments of static axial compressive bearing capacity of steel concrete composite columns, load displacement curves of composite columns under axial loads are obtained. Meanwhile, mechanism of operating and fracture of composite columns are analyzed, and the ultimate axial compressive bearing capacities of composite columns are compared. Finally experiments of axial compressive performance provide the reference for related studies and design.

**Key words:** high strength concrete; composite column; mechanism of operating and fracture; bearing capacity; static experiment

(上接第 42 页)

Mathematic Deduction of SoftSwitch Network Capacity

OU Zhen meng, ZHANG Guang zhao

(Department of Electronics & Communication Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** SoftSwitch technology is the hotspot of modern telecommunication. SoftSwitch device owns excellent system architecture and upstanding switch capacity. Evaluation of network system capacity is a very important factror during building SoftSwitch network. The relation formula between SoftSwitch network and SoftSwitch device is acquired based on one kind network partition principle eventually.

**Key words:** SoftSwitch network; BHCA; Effective processing capacity; partition principle