

文章编号: 1000-5013( 2010)06 0684- 04

CSRC 柱抗震性态水平的指标试验

刘阳, 郭子雄

( 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 通过 8 个 1/2 比例的核心型钢混凝土( CSRC) 框架柱的抗震性能试验, 研究轴压比和核心型钢配钢率对 CSRC 柱滞回特性的影响, 以及 CSRC 柱在不同抗震性态水平的变形指标和抗震性能指标. 结果表明, CSRC 柱具有良好的变形能力和滞回耗能能力, 配置核心型钢可有效提高重载 RC 柱的抗震性能. 对于运行和基本运行性能水平, 可采用纵筋、核心型钢应变和试件荷载水平作判定参数; 对于可修性态水平, 可采用残余位移角作判定参数; 而对于避免倒塌性态水平, 可采用试件承载能力的衰减和滞回环的稳定状态作判定参数.

关键词: 核心型钢混凝土柱; 抗震性能; 性态水平; 轴压比

中图分类号: TU 375.303; TU 312 文献标识码: A

核心型钢混凝土柱( Core Steel Reinforced Concrete, 简称 CSRC), 是指在普通 RC 柱截面核心部位设置含钢率较低( 2% ~ 3%) 的实腹式型钢所形成的新型结构形式<sup>[1-4]</sup>. 该结构形式可有效提高高轴压比 RC 柱的抗震性能, 突破规范规定的 RC 柱轴压比限值, 且施工方便、型钢利用率高、防火性能好、造价低廉, 是一种提高 RC 结构重载柱抗震性能的合理结构形式. 目前, 国内外尚未见有关 CSRC 柱的性能水平和相应变形限值的研究报道. 基于此, 本文主要研究 CSRC 柱在不同性能水平下的变形限值.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共制作 8 个 1/2 比例的 CSRC 柱试件, 设计轴压比取 0. 79~ 1. 13, 以研究核心型钢对 RC 框架柱轴压比限值的提高作用. 所有试件纵筋均采用 8 $\Phi$ 12HRB335 级钢筋, 屈服强度为 345. 0 MPa, 箍筋均采用 $\Phi$ 6@100 菱形复合箍, 箍筋强度为 346. 7 MPa. 试件 CSRC2-6 采用热轧钢管, 其他试件均采用热轧钢板焊接工字钢, 钢材屈服强度为 393. 0 MPa.

试件配筋及尺寸如图 1 所示, 其参数如表 1 所示. 表 1 中:

表 1 试件参数表

Tab. 1 Parameters of specimens

| 编号      | $f_{cu}$ /MPa | $n$   | $N_t$ /kN | $\rho_a$ /% | $h_w$ /mm | $h_t$ /mm | $t$ /mm |
|---------|---------------|-------|-----------|-------------|-----------|-----------|---------|
| CSRC2-2 | 25. 8         | 1. 08 | 666       | 2. 40       | 70        | 50        | 10      |
| CSRC2-3 | 25. 8         | 0. 99 | 609       | 2. 40       | 70        | 50        | 10      |
| CSRC2-4 | 23. 8         | 1. 01 | 571       | 2. 40       | 70        | 50        | 10      |
| CSRC2-5 | 31. 0         | 0. 96 | 708       | 2. 40       | 70        | 50        | 10      |
| CSRC2-6 | 23. 8         | 1. 08 | 609       | 2. 50       | -         | -         | -       |
| CSRC2-7 | 31. 0         | 1. 13 | 837       | 3. 52       | 100       | 70        | 10      |
| CSRC2-8 | 31. 0         | 1. 04 | 692       | 3. 52       | 100       | 70        | 10      |
| CSRC2-9 | 23. 8         | 1. 11 | 629       | 3. 52       | 100       | 70        | 10      |

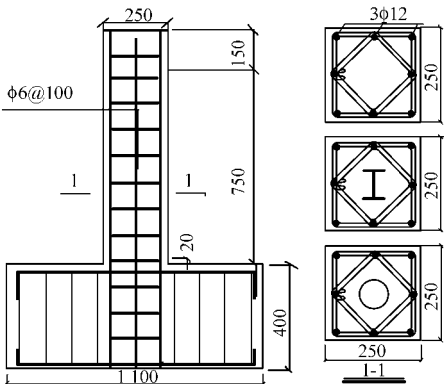


图 1 试件截面尺寸及配筋( 单位: mm)

Fig. 1 Size and reinforcement of section(unit:mm)

收稿日期: 2010-05-23  
通信作者: 刘阳( 1982), 男, 讲师, 主要从事工程结构抗震减灾的研究. E-mail: lyliuyang@hqu.edu.cn.  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 50478120, 50978107); 福建省自然科学基金资助项目( 2010J05117); 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目( NCET-06-0571); 华侨大学科研基金资助项目( 09BS620)

$f_{cu}$  为混凝土实测立方体抗压强度;  $\rho_a$  为核心型钢配钢率;  $h_w$ ,  $b_f$  和  $t$  分别为核心型钢腹板高度、翼缘宽度和厚度;  $n$  为设计轴压比, 取  $n=1.25N_t/f_cA$ ;  $N_t$  为试验轴力;  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值;  $A$  为试件截面积. 需要说明的是, 试件 CSRC2-6 的核心钢管外径为 89 mm, 厚度为 6 mm.

1.2 加载及量测方案

通过液压千斤顶和反力大梁在柱顶施加恒定竖向轴力, 水平荷载通过 MTS 作动头施加, 采用位移控制, 如图 2 所示. 试件屈服前, 每个位移幅值循环 1 次, 屈服后每个位移幅值循环 3 次.

荷载通过压力传感器直接量测; 柱端的水平位移、轴向变形和地梁等可能存在的水平滑移通过电子位移计量测; 柱根关键受力区域钢筋及型钢的应变通过 3 mm × 5 mm 电阻应变片和应变花量测. 所有力、位移和应变信号均通过 MTS-GT 控制系统和 DH 3816 型数据采集仪自动采集.

2 主要试验结果

图 3 为试件的典型荷载-位移滞回曲线; 图 4 和表 2 分别为试件的骨架曲线及其特征点. 由图 3 可见, 虽然设计轴压比高达 1.01, 1.11, 但试件滞回曲线饱满, 强度衰减缓慢, 有良好的抗震性能. 说明, 设置核心型钢可显著提高重载 RC 柱的抗震性能. 由图 4 和表 2 可见, 所有试件的延性系数 ( $\Delta_u/\Delta_y$ ) 均在 4.3 以上, 且骨架曲线下降段斜率较小, 说明试件具有良好的变形能力.

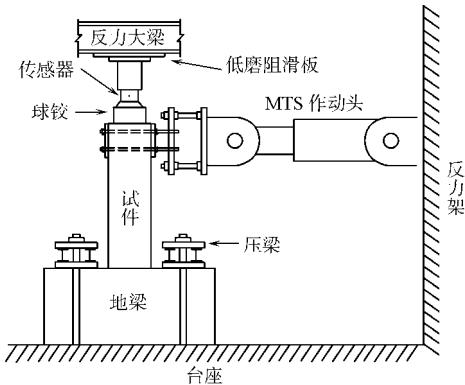


图 2 试验加载装置  
Fig. 2 Test setup

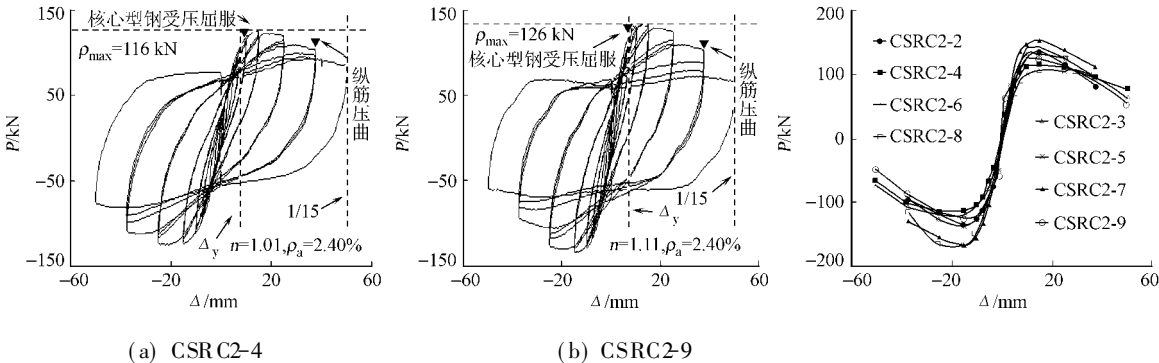


图 3 试件的荷载-位移滞回曲线  
Fig. 3 Hysteretic curves of Load versus displacement

图 4 试件的骨架曲线  
Fig. 4 Skeleton curves of specimens

表 2 荷载-位移骨架曲线特征点试验结果

Tab. 2 Test results of characteristic points of skeleton curves

| 序号      | $n$  | $P_y$ / kN | $\Delta_y$ / mm | $P_m$ / kN | $\Delta_m$ / mm | $P_u$ / kN | $\Delta_u$ / mm | $\mu_u = \Delta_u / \Delta_y$ |
|---------|------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|-------------------------------|
| CSRC2-2 | 1.08 | 112        | 6               | 136        | 15              | 115        | 25.8            | 4.3                           |
| CSRC2-3 | 0.99 | 87         | 7               | 122        | 25              | 104        | 38.6            | 5.5                           |
| CSRC2-4 | 1.01 | 103        | 7               | 116        | 25              | 99         | 38.9            | 5.6                           |
| CSRC2-5 | 0.96 | 102        | 6               | 131        | 10              | 111        | 30.1            | 5.0                           |
| CSRC2-6 | 1.08 | 108        | 7               | 123        | 15              | 114        | 31.2            | 4.5                           |
| CSRC2-7 | 1.13 | 121        | 6               | 168        | 15              | 143        | 31.0            | 5.2                           |
| CSRC2-8 | 0.94 | 103        | 7               | 167        | 25              | 142        | 31.1            | 4.4                           |
| CSRC2-9 | 1.11 | 107        | 6               | 126        | 15              | 107        | 29.0            | 4.9                           |

3 CSRC 柱的破坏模式和破坏过程

CSRC 框架柱的主要应用范围是多层或小高层框架结构的底部若干层, 其破坏极限状态一般为小偏心受压破坏或界限破坏. 结合文中 8 个压剪柱的试验现象, 将 CSRC 柱在地震荷载作用的破坏过程分为以下 4 个主要阶段.

- (1) 初裂阶段. 受拉区混凝土出现水平弯曲裂缝, 纵筋应变水平不超过屈服应变的 50%, 核心型钢部分受拉部分受压, 应变水平不超过屈服应变的 30%.
- (2) 屈服阶段. 受压区混凝土出现若干纵向裂缝并不断发展, 纵筋受压屈服, 受拉区纵筋应变一般小于屈服应变, 核心型钢应变水平不超过屈服应变的 50%. 此时, 构件的抗侧刚度有明显减小.
- (3) 弹塑性变形阶段. 受压区混凝土开始压溃并逐渐剥落, 纵筋受拉达到屈服, 核心型钢全截面受压, 最大压应变已经达到屈服应变; 试件侧向变形明显增大, 强度开始衰减, 但强度衰减率不超过 10% ;
- (4) 破坏阶段. 保护层混凝土大片剥落, 受压区纵筋压曲, 核心型钢全截面压应变达到屈服, 根部个别箍筋可能失效; 试件强度大幅衰减, 强度衰减率一般大于 30%, 结构处于临近倒塌状态.

4 CSRC 柱不同性能水平的判定参数

4.1 宏观描述

参考文[5] 的结果, 把 CSRC 结构的抗震性能水平划分运行、基本运行、可修和避免倒塌 4 个状态.

- (1) 运行. CSRC 柱保持原有的强度和刚度, 处于弹性工作阶段. 出现宽度小于 0.2 mm 的微小弯曲裂缝. 受压纵筋应力水平约为屈服应力的 40% ~ 60%, 核心型钢最大压应力水平约为屈服应力的 20% ~ 40%, 荷载约为最大荷载的 40% ~ 60%, 弹性位移角约为 1/800~ 1/250 rad, 基本无残留变形.
- (2) 基本运行. CSRC 柱几乎保持原有的强度和刚度, 可认为近似处于弹性工作阶段. 出现细微剪切裂缝(< 0.05 mm), 弯曲裂缝宽度小于 1 mm, 受压钢筋接近屈服状态. 核心型钢压应力水平达到屈服应力的 40% ~ 60%; 荷载约为最大荷载的 60% ~ 90%, 弹性位移角约为 1/500~ 1/150 rad, 残留变形可以忽略.
- (3) 可修. CSRC 柱丧失了部分刚度和强度, 构件进入弹塑性工作状态. 剪切裂缝宽度小于 0.5 mm, 最大弯曲裂缝宽度可达 2 mm, 弹塑性位移角为 1/150~ 1/50 rad. 纵筋和核心型钢已受压屈服, 塑性铰形成, 残留变形不大于 1%. 受压区保护层混凝土的竖向裂缝增多并变宽, 超高轴压比试件出现保护层混凝土剥落现象. 不出现纵向钢筋的压屈以及约束钢筋的拉断, 没有接头及锚固失效. 荷载接近正截面承载能力.
- (4) 避免倒塌. CSRC 柱丧失大部分刚度和强度, 但重力承载体系尚能起作用, 构件处于塑性工作阶段. 柱端纵筋局部压曲, 核心型钢不发生压曲, 部分箍筋锚固破坏, 具有较大的残留变形. 弹塑性位移角为 1/50~ 1/20 rad, 承载能力下降到最大承载力的 60% ~ 80% .

4.2 量化参数的试验量测值

根据上述 CSRC 柱 4 个性能水平失效判别参数和标准, 列出 8 个 CSRC 柱 4 个性能水平下各判别参数的试验测量值, 如表 3 所示. 表 3 中:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  分别表示运行(1/250 rad)和基本运行(1/150 rad)极限状态下, 受拉钢筋应变、核心型钢最大压应变、荷载分别与钢筋屈服应变、核心型钢屈服应变、最大荷载的比值;  $\theta_r$  表示试件的残余位移角;  $\lambda$ ,  $\eta$  分别表示不同位移角幅值下的荷载与最大荷载、第 1 循环荷载与第 3 循环荷载的比值.

运行极限状态下, 采用纵筋、型钢应变状态及试件荷载作为判定参数. 由表 3 可知, 在 1/250 rad 位移角下,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  的最大值分别为 60.9%, 40.5% 和 59.3%, 符合运行极限状态下的宏观描述. 因此, 建议运行极限状态下的位移角限值为 1/250 rad.

基本运行极限状态下, 采用纵筋、型钢应变状态及试件荷载作为判定参数. 由表 3 可知, 在 1/150 rad 位移角下,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  的最大值分别为 86.6%, 59.7% 和 85.0%, 满足基本运行极限状态的宏观描述. 因此, 建议运行极限状态下的位移角限值为 1/150 rad.

可修极限状态下, 采用残余位移角  $\theta_r$  作为判别参数. 由表 3 可知, 在 1/50 rad 位移角下, 试件的  $\theta_r$  实测值为 1/192~ 1/119 rad, 残余变形不超过 1%, 符合可修极限状态的宏观描述. 因此, 建议可修极限状态下的位移角限值为 1/50 rad.

避免倒塌极限状态下, 采用试件承载能力的衰减程度和滞回环的稳定状态作为判别参数. 由表 3 可知, 在 1/30 rad 位移角下,  $\lambda$  最小值为 85.0%, 符合避免倒塌极限状态的宏观描述; 在 1/20 rad 位移角下, 仅试件 CSRC3-2 承载力与最大荷载的比值为 61.9%, 其他试件值均大于 70%. 符合避免倒塌极限

状态的宏观描述。考虑到实际工程中 CSRC 柱主要用于结构的底部数层, 其轴压比较大, 为了保证一定得安全储备, 建议避免倒塌极限状态下的位移角限值为  $1/30\text{ rad}$ 。

表 3 CSRC 柱不同性态水平的量化参数

Tab. 3 Index for different performance level of CSRC columns

| 编号      | 运行          |            |             | 基本运行        |            |             | 可修                    |                       | 避免倒塌     |           |          |           |
|---------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|-----------------------|-----------------------|----------|-----------|----------|-----------|
|         | 1/250 rad   |            |             | 1/150 rad   |            |             | 1/75 rad              | 1/50 rad              | 1/30 rad |           | 1/20 rad |           |
|         | $\alpha/\%$ | $\beta/\%$ | $\gamma/\%$ | $\alpha/\%$ | $\beta/\%$ | $\gamma/\%$ | $\theta_r/\text{rad}$ | $\theta_i/\text{rad}$ | $N/\%$   | $\eta/\%$ | $N/\%$   | $\eta/\%$ |
| CSRC2-2 | 48.6        | 22.7       | 48.9        | 86.6        | 37.5       | 69.0        | 1/268                 | 1/119                 | 85.0     | 85.7      | 61.9     | 77.0      |
| CSRC2-3 | 49.9        | 42.2       | 47.6        | 69.7        | 45.0       | 66.1        | 1/250                 | 1/134                 | 99.1     | 93.4      | 90.6     | 83.3      |
| CSRC2-4 | 49.8        | 8.9        | 55.0        | 75.5        | 47.9       | 72.5        | 1/536                 | 1/192                 | 96.7     | 90.0      | 81.2     | 85.2      |
| CSRC2-5 | 49.6        | 15.0       | 50.2        | 75.0        | 17.9       | 72.2        | 1/250                 | 1/129                 | 96.3     | 89.2      | 72.5     | 79.1      |
| CSRC2-6 | 60.9        | 21.0       | 52.9        | 85.2        | 45.6       | 73.4        | 1/395                 | 1/160                 | 90.1     | 90.4      | 71.6     | 81.6      |
| CSRC2-7 | 47.3        | 36.3       | 51.3        | 83.5        | 59.7       | 72.1        | 1/326                 | 1/127                 | 90.3     | 93.3      | 73.3     | 65.3      |
| CSRC2-8 | 33.5        | 40.5       | 48.3        | 48.5        | 50.4       | 72.1        | 1/242                 | 1/127                 | 87.8     | 93.8      | 70.1     | 65.8      |
| CSRC2-9 | 53.4        | 19.8       | 59.3        | 76.8        | 25.2       | 85.0        | 1/259                 | 1/123                 | 97.0     | 95.1      | 76.3     | 79.1      |

5 结束语

基于不同性能水平下的变形和相关参数试验结果, 分析了 CSRC 柱试件的各项抗震性能指标, 提出 CSRC 柱不同性能水平对应的判定参数, 并建议相应的性能水平限值. 研究成果可为 CSRC 结构基于性能的抗震设计和工程实践提供参考.

参考文献:

[1] JUNICHI S, CHIAKI M, KOUICHI M. Earthquake resistant properties of core steel composite structures[C] // Proc 12th World Conf on Earthquake Engrg Auckland: [s. n. ], 2000.

[2] 刘阳, 郭子雄, 谢吓弟. 核心型钢混凝土轴压试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(S2): 137-141.

[3] 刘阳, 郭子雄, 张志伟. 核心型钢混凝土柱的轴压比限值试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(3): 82-86.

[4] 欧阳文俊, 郭子雄, 刘阳. 利用 ADINA 的 CSRC 柱轴压性能数值模拟[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2009, 30(6): 681-685.

[5] 郭子雄, 张志伟, 刘阳. SRC 柱抗震性能和抗震性态水平指标试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(5): 593-598.

Experimental Study on the Index for Different  
Performance Level of CSRC Columns

LIU Yang, GUO Zi-xiong

( College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** Eight half scaled core steel reinforced concrete (CSRC) columns are tested to study the influence of axial compression ratio and core steel ratio to the hysteretic behavior and the seismic performance parameters under different performance levels of CSRC columns. It is indicated that CSRC columns own good deformation capacity and hysteretic energy dissipated capacity. The seismic behavior of RC columns with high axial load can be effectively improved by using core steel. For the fully operational or operational performance levels, the strain level of longitudinal bars and core steel, the load level of specimens can be taken as the performance parameters. For the repairable performance levels, the residential storey drift can be taken as the performance parameter. For the collapse prevention performance level, the degradation of strength and the stability of hysteretic hoops can be taken as the performance parameter.

**Keywords:** core steel reinforced concrete columns; seismic behavior; performance level; axial compression ratio

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)