

文章编号: 1000-5013(2010)04-0458-05

# 焊接环式箍筋约束高强砼柱裂缝开裂

李升才, 罗小庆, 章炯

( 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021 )

摘要: 对 6 个轻型节能钢-混凝土组合结构柱的低周期反复加载试验研究, 分析各构件的延性、耗能性能、承载力, 以及开裂过程和裂缝发展规律. 结果表明, 在轴压比相同时, 高强混凝土柱的延性随着含箍特征值的增大而增大; 而在含箍率相同时, 其延性随轴压比的提高而明显下降, 轴压比对延性的影响比箍筋因素要显著. 柱的延性随着轴压比的增加而减小. 使用高强度焊接环式箍筋, 能有效改善高强混凝土柱的延性, 特别是在较高轴压比下, 箍筋的作用更加明显.

关键词: 轻型节能钢-混凝土组合结构; 开裂过程; 抗震性能; 延性; 轴压比  
中图分类号: TU 375 文献标识码: A

高强混凝土具有强度高、自重轻、抗渗抗冻性能好等优点, 广泛地用于高层和大跨度工程中. 但是, 它存在着脆性大的结构缺点. 如果采用低强度箍筋, 其约束能力有时不足以约束高强砼的横向变形, 如箍筋较早屈服, 约束失效等. 因此, 如何提高高强砼结构的抗震性能就成为了扩展其应用的关键<sup>[1]</sup>. 国内外有关箍筋约束砼的试验研究很多, 可以看出箍筋对砼强度的提高, 结构延性的改善都有重要的作用<sup>[1]</sup>. 轻型节能钢-混凝土组合结构, 是近年来研制和开发的一种轻型、节能、抗震、经济、适用于多层及高层建筑的全新结构. 本文主要研究适用于轻型钢-混凝土组合结构的, 焊接环式箍筋约束高强砼柱的裂缝发展规律.

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计

制作 6 个混凝土 (RC) 柱试件, 缩尺比例为 1/2. 图 1 为试件的截面尺寸和配筋. 构造柱的截面尺寸为 250 mm × 250 mm, 柱高 1 000 mm, 水平力合力点位置距柱底 825 mm. 以模拟实际结构中剪跨比

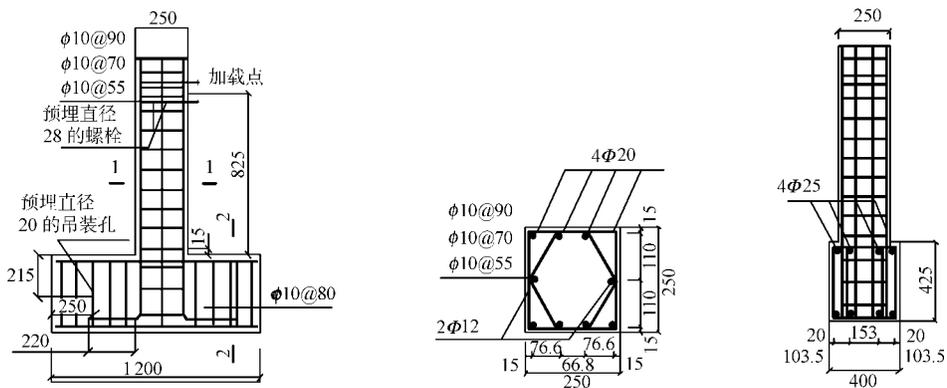


图 1 试件尺寸及截面配筋 (单位: mm)

Fig. 1 Cross section size and reinforcement of specimen (unit: mm)

收稿日期: 2009-05-23

通信作者: 李升才 (1960-), 男, 教授, 主要从事结构抗震工程的研究. E-mail: lsc50605@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50948036); 厦门市科技计划项目 (3502Z20073035)

(λ) 为 3.3 的钢筋混凝土框架柱, 柱中配 4φ22 mm 纵向钢筋, 箍筋采用 II 级钢, 箍筋的制作形式以焊接环式代替螺旋箍筋, 箍筋内箍、外箍全部搭接 10 d 焊接. 试件的相关参数, 如表 1 所示. 表 1 中,  $f_{cu,k}$  为混凝土立方体试块抗压强度;  $n_k$  为轴压比;  $N$  为轴向压力.

### 1.2 加载装置

试验采用悬臂梁式加载方法<sup>[2,4]</sup>, 柱端施加水平荷载方式. 试验中, 试件的引伸仪及位移计的布置方式,

如图 2 所示. 柱顶用一台 1 000 kN 的竖向千斤顶施加竖向荷载, 千斤顶与反力大梁之间设置滑动小车, 可以随柱头的水平位移而滚动. 柱端水平力由电液伺服加载系统(美国 MTS 公司)在柱顶端施加水平往复荷载, 整个加载过程采用位移控制.

### 1.3 加载制度

根据标准 JGJ 101-1996《建筑抗震试验方法规程》<sup>[5]</sup>, 水平加载采用低周反复静力加载(由电液伺服加载系统自动加载); 数据由 DH3816 型静态应变仪(江苏东华测试技术有限公司)采集系统自动采集. 具体加载制度和每级加载位移幅值, 如图 3 所示. 图 3 中:  $\theta$  为转角;  $n$  为循环次数. 屈服前试件处于弹性阶段, 残余变形小, 各位移幅值循环一次, 屈服后位移幅值循环 3 次, 直至试件承载力降至最大承载力的 85% 后停止加载.



图 2 加载装置

Fig. 2 Loading setup

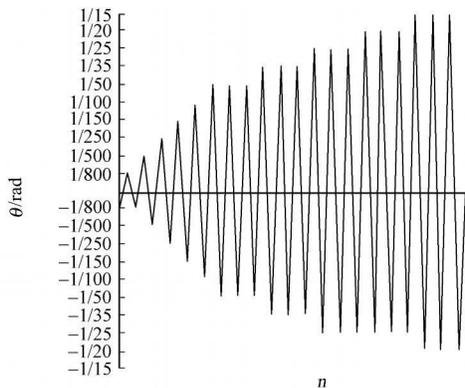


图 3 加载制度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of loading system

## 2 加载过程及现象分析

### 2.1 试件加载过程

在柱顶施加 550 kN 轴压力, 并在试验过程中保持恒定. 然后, 由电液伺服加载系统施加水平往复荷载, 加载制度为位移控制加载. 各试件初裂荷载( $P_{ini}$ )及极限荷载( $P_{lim}$ ), 如表 2 所示. 表 2 中: 极限荷载为试验工程中达到的最大荷载.

### 2.2 试件开裂过程分析

各试件的开裂过程<sup>[6,8]</sup>, 如图 4 所示.

2.2.1 试件 RC-1 当加载到极限荷载的 65% 左右(即位移角为 1/150 rad), 柱正面出现第 1 条斜裂缝; 随着荷载的来回往复, 当位移角为 1/50 rad 循环时, 柱的核心区斜裂缝增加向根部发展, 并且开始向柱的左右两侧延伸. 同时, 在柱反面出现竖向裂缝, 左右两面的根部有轻微的压碎. 钢筋应变数据显示, 钢筋开始屈服.

当位移角为 1/35~1/25 rad, 随着荷载的循环, 仅有少量新裂缝出现并加宽, 并且柱反面根部的水平裂缝和竖向裂缝明显的加宽, 混凝土明显的压碎及剥落. 当位移角在 1/20 rad 循环时, 试件承载力

表 1 试件参数表

Tab. 1 Specimen parameters

试件	$f_{cu,k}$ / MPa	$n_k$	$N$ / kN	配箍
RC-1	53.7	0.28	500	φ10@55
RC-2	54.3	0.31	550	φ10@70
RC-3	49.7	0.37	600	φ10@90
RC-4	51.8	0.47	800	φ10@55
RC-5	58.5	0.45	850	φ10@70
RC-6	58.5	0.46	870	φ10@90

表 2 试件的初裂及极限荷载

Tab. 2 Initial crack load and ultimate load of specimen

试件	$P_{ini}$ / kN	$P_{lim}$ / kN
RC-1	130	203
RC-2	102	205
RC-3	100	210
RC-4	109	217
RC-5	120	232
RC-6	112	221

开始下降,约为试件最大荷载的98%,柱下端的混凝土保护层压碎,剥落度增高.在 $1/15$  rad 位移循环过程中,裂缝明显的加宽,试件承载力略有降低,柱的根部混凝土沿柱角竖向剥落,主筋外露.

2.2.2 试件 RC-2 当加载到极限荷载的50%左右(即位移角为 $1/250$  rad)时,柱的正面下端出现第1条水平裂缝;当位移角为 $1/150$  rad 时,柱的正反面一侧出现斜裂缝;当位移角为 $1/100$  rad 时,柱的正反面两边斜裂缝不断的增加,裂缝向核心区发展.随着荷载的来回往复,逐渐出现平行于对角线的斜向交叉裂缝,并向柱的左右两面延伸.

当位移为 $1/50$  rad 循环时,柱核心区的裂缝只有少量的增加,数据显示钢筋开始屈服;当位移角为 $1/35\sim 1/25$  rad 循环时,主要斜裂缝开始贯通,随后裂缝为主裂缝增宽延伸,柱的根部混凝土破坏并发出声响;当位移角为 $1/35$  rad 循环时,裂缝宽度增大,尤其是柱根部的竖向和水平裂缝明显加宽,柱根部混凝土压碎并剥落,柱的左右两面混凝土开始起皮.

当位移角为 $1/25\sim 1/20$  rad 循环时,试件承载力开始下降,约为试件最大荷载的88%,核心区的裂缝明显的加宽,柱左右面的混凝土压碎;在 $1/15$  rad 位移循环过程中,试件承载力再次降低,裂缝继续在增宽,柱四面根部混凝土沿柱角竖向剥落,主筋外露.

通过与试件 RC-1 对比,试件 RC-2 的配筋率低,轴压比高,出现的第1条裂缝的时间比试件 RC-1 要早,裂缝发展较迅速,试件的破坏程度要大.由此可见,试件 RC-2 的延性比试件 RC-1 的延性差.

2.2.3 试件 RC-3 当加载到极限荷载的50%左右(即位移角为 $1/250$  rad)时,柱的正面出现第1条斜裂缝;随着荷载的来回往复,裂缝发展的比较快,正反面的裂缝已经向左右两边延伸;当位移角为 $1/50$  rad 循环时,裂缝增加比较少,柱角出现竖向裂缝,柱随着荷载的循环过程中伴随着响声.在第3个循环,柱的根部的裂缝加宽,混凝土开始起皮.此时,柱的纵筋开始屈服.

当位移角为 $1/35$  rad 循环时,试件承载力开始下降,约为最大荷载的98%,柱根部的混凝土被压碎;当位移角为 $1/25\sim 1/20$  rad 循环时,核心区的裂缝加宽,柱根部的竖向裂缝迅速加宽,试件承载力下降,刚度退化;当位移角为 $1/15$  rad 循环时,混凝土保护层沿柱角竖向剥落,压碎带明显,主筋外露.

通过与试件 RC-2 对比,试件 RC-3 的配筋率低,轴压比高,在同一位移角出现第1条裂缝.但是,试件 RC-3 裂缝发展的较试件 RC-2 迅速,试件的破坏程度要大.由此可见,试件 RC-3 的延性比试件 RC-2 的延性差.

2.2.4 试件 RC-4 当加载到极限荷载的50%左右(即位移角为 $1/250$  rad)时,柱的正反面出现水平裂缝;当位移角为 $1/150\sim 1/100$  rad 时,柱的正面下端出现了竖向裂缝,正反面的斜裂缝增加,向柱的左面延伸;随着荷载的来回往复,当位移角为 $1/50$  rad 的第1个循环时,裂缝继续发展,向左右两边延伸;在第2次循环时,试件承载力开始下降,约为最大荷载的95%,柱正面根部的竖向裂缝开始加宽,右面的水平裂缝开始贯通,混凝土开始起皮并有轻微的压碎,数据显示柱的纵筋开始屈服.

当位移角为 $1/35$  rad 循环时,试件承载力开始下降,约为最大荷载的98%,柱核心区的裂缝宽度增加,尤其是柱根部的竖向裂缝明显加宽,柱根部的混凝土压碎并开始剥落.在第1次和第3次循环过程中,混凝土剥落的高度一直在增大;当位移角为 $1/25\sim 1/20$  rad 循环时,裂缝有少量的增加,而且裂缝的宽度也在增加,柱根部的混凝土从两边开始向柱的中间压碎并剥落;当位移角为 $1/15$  rad 循环时,试件的承载力有明显的下降,裂缝宽度还在增加,柱正反面根部的混凝土大面积的压溃剥落,剥落高度也明显的增高,柱的纵筋和箍筋都外露.

通过与试件 RC-1 试件对比,配筋率相同,轴压比大,试件 RC-4 出现裂缝的时间早,裂缝发展迅速,试件的承载力下降段早,破坏程度大.因此,轴压比大的试件延性差.

2.2.5 试件 RC-5 当加载到极限荷载的48%左右(即位移角为 $1/250$  rad)时,柱的正面右边出现水平裂缝;当位移角为 $1/150$  rad 时,柱正反面两边均出现斜裂缝,柱反面的斜裂缝沿着柱的左面水平延伸;当位移角为 $1/100$  rad 时,斜裂缝向中间发展比较缓慢,柱反面和右面交接处均出现竖向裂缝,正面有一条水平裂缝向右面水平延伸.

随着荷载的来回往复,当位移角为 $1/50$  rad 循环时,裂缝继续增加,并向左右两边延伸,柱正面的斜裂缝和右面的水平裂缝贯通,反面根部的竖向裂缝宽度明显的增宽;在第2次循环时,试件承载力开始下降,约为最大荷载的96%,柱右面根部的裂缝明显加宽,混凝土开始起皮并有轻微的压碎,数据显

示柱的纵筋开始屈服。

当位移角为  $1/35$  rad 循环时, 试件的承载力开始下降, 约为最大荷载的 98%, 柱核心区的裂缝有少量的增加, 而且宽度同时增大, 尤其是柱正反面根部两角的混凝土压碎并开始剥落; 当位移角为  $1/25 \sim 1/20$  rad 循环时, 裂缝有少量的增加, 而且裂缝的宽度也在增加, 柱正反面根部的混凝土从两边开始向柱的中间压碎并剥落, 柱左右两面根部的混凝土也压碎并剥落; 当位移角为  $1/15$  rad 循环时, 试件的承载力有明显的下降, 裂缝宽度还在增加, 柱四面根部的混凝土大面积的压碎剥落, 剥落高度也明显的增高, 柱的纵筋和箍筋都外露。

通过与试件 RC-2, RC-4 对比, 配筋率相同, 轴压比大, 试件 RC-5 出现裂缝的时间早, 裂缝发展迅速, 试件的承载力明显下降, 破坏程度大, 剥落度高。因此, 轴压比大, 配筋率小的试件延性差。

2.2.6 试件 RC-6 当加载到极限荷载的 46% 左右(即位移角为  $1/250$  rad) 时, 柱的反面出现第 1 条水平裂缝; 随着荷载的来回往复, 当位移角为  $1/150$  rad 时, 柱的正反两面出现少量的斜裂缝; 当位移角为  $1/100$  rad 时, 正反两面斜裂缝继续增加, 从两边向中间发展, 同时向左右两面水平延伸; 而当位移角为  $1/50$  rad 时, 斜裂缝进一步的增加, 柱的正面左下角和右面均出现竖向裂缝, 而且右面的混凝土开始起皮并有轻微的剥落。

当位移角为  $1/35$  rad 循环时, 试件承载力开始下降, 约为最大荷载的 94%, 裂缝有少量的增加。在第 1 个循环时, 柱的纵筋开始屈服, 核心区斜裂缝在加宽, 尤其是柱的四个角的竖向裂缝和左右面水平裂缝明显加宽; 在第 2 次和第 3 次循环时, 裂缝还在继续增宽, 柱四个角和左右的混凝土压碎并剥落; 当位移角为  $1/25 \sim 1/20$  rad 循环时, 裂缝的宽度一直在增大, 柱正反面根部的混凝土从两边开始向中间压碎并剥落, 而且柱的四角的剥落度比  $1/35$  rad 循环时的高度明显的增高, 左右两面的混凝土进一步的压碎; 当位移角为  $1/15$  rad 循环时, 试件的承载力继续下降, 约为最大荷载的 85%, 柱根部的混凝土大面积压溃, 主筋和箍筋外露。

通过与试件 RC-3, RC-5 对比, 配筋率相同, 轴压比大, 试件 RC-6 出现裂缝的时间早, 裂缝发展迅速, 试件的承载力下降段早, 破坏程度大。因此, 轴压比大, 配筋率小的试件延性差。

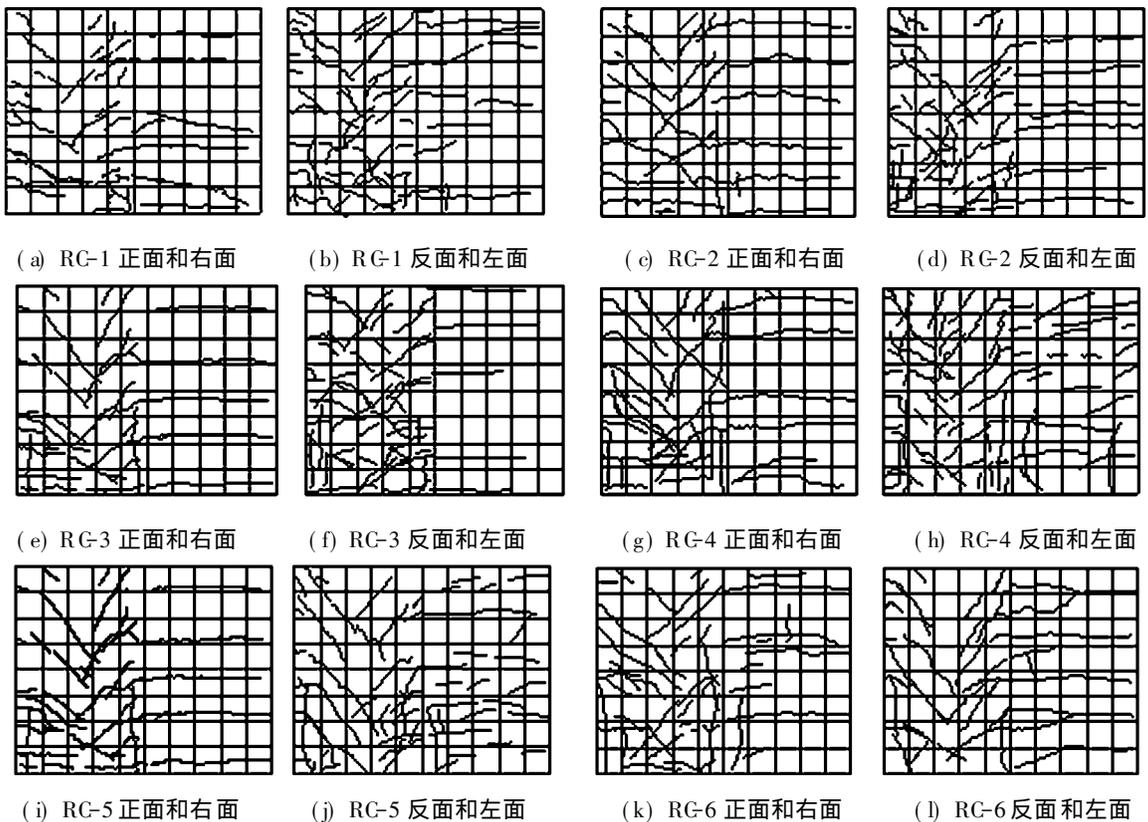


图4 柱核心区正反面裂缝分布

Fig. 4 Distribution of cracks on front and rear sides in core area of column

### 3 结论

通过对焊接环式箍筋约束高强砼柱开裂过程,以及裂缝发展规律的试验及分析,对其抗震性能可得到以下3点结论.

(1) 箍筋率及轴压比是影响轻型钢-砼组合结构柱抗震性能的重要因素.柱的延性随着轴压比的增加而减小.如3组试件 RC-1 和 RC-4, RC-2 和 RC-5, RC-3 和 RC-6,在配筋率相同,轴压比不同的情况下,RC-1, RC-2, RC-3 柱的开裂破坏程度,明显比 RC-4, RC-5, RC-6 要小很多,正好说明在轴压比小的情况下,柱延性要好.

(2) 试件 RC-1 与试件 RC-6 对比,试件 RC-1 的配筋率比试件 RC-6 的配筋率高,而轴压比却小.柱在低周反复荷载作用下,RC-6 柱的开裂和破坏程度明显要大,柱的承载力明显降低.说明,当轴压比偏高时,如果配筋率低,则构件的承载力降低,刚度退化快,延性较差.

(3) 使用高强度焊接环式箍筋,能有效改善高强混凝土柱的延性,特别是在较高轴压比下,箍筋的作用更加明显.在轴压比相同时,高强混凝土柱的延性随着含箍特征值的增大而增大,在含箍率相同时,其延性随着轴压比的提高而明显下降,轴压比对延性的影响比箍筋因素要显著.

#### 参考文献:

- [1] 丁焕龙,姜维山,郝际平.高强箍筋约束混凝土柱变形性能研究[C] // 宋玉普,等.现代混凝土基本理论及工程应用.北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [2] 赵鸿铁.钢与混凝土组合结构[M].北京:科学出版社,2001.
- [3] 李俊华.低周期反复荷载作用下型钢高强混凝土柱受力性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2005.
- [4] 林明强.高强型钢混凝土柱的研究[D].西安:西安建筑科技大学,2006.
- [5] 中国建筑科学研究院. JGJ 101- 1996 建筑抗震试验方法规程[S].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [6] 中国建筑科学研究院. JGJ 138- 2001 型钢混凝土组合结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [7] 郭经峰,李升才.焊接复合箍筋柱蜂窝梁组合节点开裂过程及裂缝发展规律[C] // 宋玉普,等.现代混凝土基本理论及工程应用.北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [8] 冯永伟.高强混凝土高强连续复合螺旋箍筋柱的抗剪性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2004.

## Cracks in High-Strength Concrete Columns with Ring Welded Stirrups

LI Sheng-cai, LUO Xiao-qing, ZHANG Jiong

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

**Abstract:** The experiment of the six energy saving light steel concrete composite structures is carried out under the low cyclic loading, to analyze the ductility, energy dissipation, load carrying capacity and crack. The main results show: on condition of constant axial compression ratio, the ductility of high strength reinforced concrete columns increases with increasing the stirrup characteristic value; on condition of constant stirrup characteristic value, the ductility decreases with increasing constant axial compression ratio; the influence of axial compression ratio on the ductility is greater than that of stirrup. Ring welded stirrup with high strength can improve the ductility of column with high strength concrete. Especially for the higher axial compression ratio, the role of stirrups is more obvious.

**Keywords:** energy saving light steel concrete; composite structure; cracking process; seismic performance; ductility; axial compression ratio

(责任编辑:黄仲一 英文审校:方德平)