

矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱滞回性能试验

马忠吉¹, 乔雷涛², 王伟³, 刘界鹏¹

(1. 哈尔滨工业大学 建筑设计研究院, 150090 哈尔滨, liujp@hit.edu.cn; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043 西安; 3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 150090 哈尔滨)

摘要: 为研究矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱的滞回性能, 进行了4个矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱和2个普通钢筋混凝土对比试件的试验研究. 主要参数为轴压比(0.3, 0.5)和钢管宽厚比(111, 166); 6个试件的剪跨比均为1.0. 试验结果表明: 普通钢筋混凝土超短柱的破坏模式为剪切破坏, 延性和耗能性能较差; 钢管约束钢筋混凝土超短柱中, 钢管对混凝土产生有效约束作用, 因此构件未发生剪切破坏, 延性、弹塑性变形能力和耗能性能显著高于钢筋混凝土对比试件; 随轴压比提高, 矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱的承载力提高, 但延性稍有降低. 在本文试验研究范围内, 钢管的宽厚比对矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱的抗震性能无显著影响.

关键词: 矩形钢管约束钢筋混凝土; 超短柱; 轴压比; 宽厚比; 延性

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2011)08-0021-05

Experiment on the rectangular tubed RC ultra short columns under axial compression and lateral cyclic load

MA Zhong-ji¹, QIAO Lei-tao², WANG Wei³, LIU Jie-peng¹

(1. Architectural Design and Research Institute, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China, liujp@hit.edu.cn;
2. China Railway First Survey & Design institute LTD, 710043 Xi'an, China;
3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To study the seismic behavior of RCRC ultra short columns, the tests subjected to combined constant axial compression and cyclic lateral shear force of rectangular tubed RC (RTRC) columns including 4 RCRC and 2 common RC columns for comparison were carried out. The main parameters were axial load ratio (0.3 and 0.5) and width to thickness ratio (111 and 166), and the shear span to depth ratio of all the tested columns was 1.0. The results indicated that the failure mode of common RC short columns was shear failure, therefore the RC columns showed little ductility and energy dissipating capacity. Under lateral shear force, RCRC short columns showed no shear failure due to the effective confinement from the outer tube to the core concrete. The RTRC columns showed higher ductility, elastic-plastic deformation capacity and energy dissipating capacity than the common RC columns. The lateral load strength of RCRC short columns increased with the increment in axial load ratio, while the ductility decreased a little, and the width to thickness ratio affected little on the seismic behavior of RTRC ultra short columns.

Key words: rectangular tubed RC; ultra short column; axial load ratio; width to thickness ratio; ductility

随着现代建筑向超高层、大跨度和重载方向发展, 框架柱承担的竖向荷载越来越大, 柱子截面

随之增大. 在高层或超高层建筑的底部容易形成钢筋混凝土短柱(剪跨比 <2)甚至超短柱(剪跨比 <1.5), 在工业厂房中, 支承大型锅炉或煤斗等设备的柱子截面很大, 容易形成短柱, 工业厂房中由于复杂的工艺要求, 常采用错层或夹层结构, 从而产生框架短柱. 钢筋混凝土短柱的破坏模式

收稿日期: 2010-12-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50708027).

作者简介: 马忠吉(1960—), 男, 高级工程师.

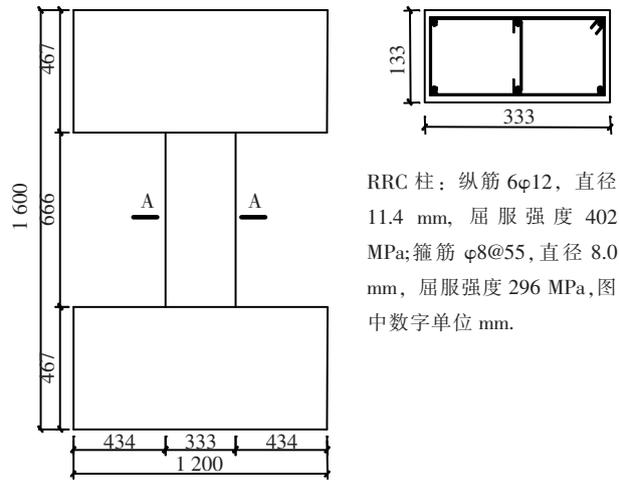
多为剪切破坏或粘结破坏,延性和变形能力差^[1],难以在抗震工程中应用.历次大地震的震害调查都说明短柱破坏是造成钢筋混凝土框架结构破坏甚至倒塌的一个重要因素.为避免短柱发生脆性破坏导致结构整体破坏,必须采取适当措施^[3-5].因此,对钢筋混凝土短柱进行研究,提出较好的构造形式,以改善其抗震性能显得尤为重要.为了防止钢筋混凝土框架结构中的短柱或边柱发生剪切破坏并提高其延性,Tomii等^[6-7]建议采用钢管约束钢筋混凝土柱,就是将钢筋混凝土柱中的箍筋换成钢管,钢管不直接承担纵向荷载,只对核心混凝土起约束作用.肖岩等^[8]对剪跨比为2的钢管约束钢筋混凝土短柱的试验研究表明,剪跨比为2的钢管约束钢筋混凝土框架短柱的破坏模式为弯曲破坏,柱子的延性和变形能力优越.周绪红等^[9]对剪跨比为3的钢管约束钢筋混凝土压弯构件的试验研究表明,即使在设计轴压比超过1的高轴压比条件下,柱子的延性和变形能力也非常优越.目前国内外对方形和圆形截面钢管约束钢筋混凝土短柱和长柱的研究较多^[6-11],而对于剪跨比 < 1.5 的矩形截面钢管约束钢筋混凝土超短柱研究较少.本文分别进行了矩形截面钢管约束钢筋混凝土超短柱和普通钢筋混凝土对比试件的滞回性能试验研究.结果表明,在矩形截面钢筋混凝土超短柱外设置薄壁钢管,可以避免超短柱的剪切破坏,有效提高柱子的延性和变形能力.

1 试件参数和试验装置

试验在哈尔滨工业大学力学与试验中心进行,试验采用仿日本建研式加载装置,试验加载和测量装置见文献[1].共进行了6个超短柱的滞回性能试验研究,其中包括2个矩形截面钢筋混凝土超短柱和4个矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱,2种形式超短柱的几何尺寸完全相同.根据框架超短柱实际尺寸和试验室现有试验条件,试验短柱试件比例设计为1:6.

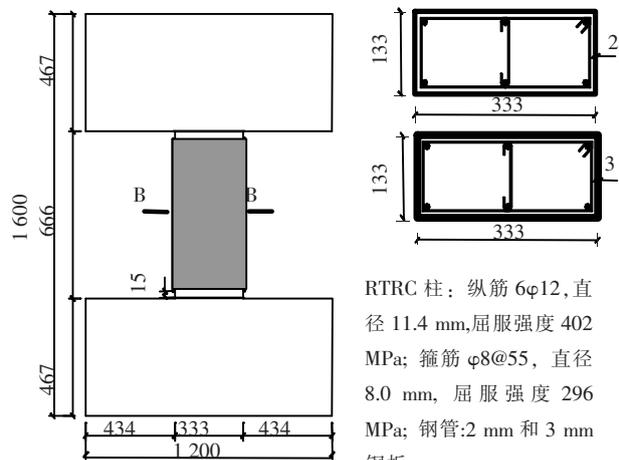
图1、2为试件的几何尺寸、配筋与钢材屈服强度.试验以框架柱为研究对象,假定柱子为两端固端模型,先对柱子施加竖向轴力,然后在柱子顶端施加反复作用的水平荷载,以模拟水平地震作用.试验中将试件两端的钢筋混凝土梁固定,梁的截面高度为467 mm,梁宽为300 mm,梁的长度为1 200 mm.试验中2种试件的轴压比都定义为 $n_0 = N/f_{ck} A_g$,以对比相同轴力条件下构件的力学性能,其中 n_0 为轴压比, N 为柱子上作用的轴

力, f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值, A_g 为毛截面面积,试件其他参数见表1.表1试件的命名方法,RRC试件以RRC-1-0.3为例,前面字母RRC表示矩形截面钢筋混凝土柱(Rectangular cross-section Reinforced Concrete Column),第2个数字1表示剪跨比为1,第3个数字0.3表示轴压比为0.3;RTRC试件以RTRC-1-0.3-111为例,前面字母RTRC表示矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱(Rectangular Tube confined Reinforced Concrete Column),第2个数字1表示剪跨比为1,第3个数字0.3表示轴压比为0.3,第4个数字111表示试件长边的钢管宽厚比为111.



RRC柱:纵筋 $6\phi 12$,直径11.4 mm,屈服强度402 MPa;箍筋 $\phi 8@55$,直径8.0 mm,屈服强度296 MPa,图中数字单位mm.

图1 矩形截面钢筋混凝土超短柱试件



RTRC柱:纵筋 $6\phi 12$,直径11.4 mm,屈服强度402 MPa;箍筋 $\phi 8@55$,直径8.0 mm,屈服强度296 MPa;钢管:2 mm和3 mm钢板.

图2 矩形截面钢管约束钢筋混凝土超短柱试件

表1中 t 为钢管壁厚, D 为矩形截面较长边的边长, D/t 为宽厚比, λ 为剪跨比, n_0 为轴压比, ρ_s 、 ρ 分别为纵筋配筋率、箍筋体积配箍率, f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值.

2 破坏模式

图3为轴压比为0.3的2种超短柱的破坏模式.RRC超短柱发生的是剪切破坏,试件产生了

贯通的双向交叉剪切斜裂缝;RTRC 超短柱无明显破坏现象,试件钢管包裹部分混凝土表面基本完好,只是有微小的剪切斜裂缝,在柱下端钢管焊缝处,混凝土保护层严重剥落,RTRC 柱的破坏模式为压弯破坏。

图 4 为轴压比为 0.5 的 2 种超短柱的破坏模式。RRC 发生的是剪切破坏,混凝土整体沿斜裂缝方向产生剪切滑移导致纵筋压屈;RTRC 超短柱无明显破坏现象,RTRC 柱的破坏模式仍为压弯破坏。

表 1 超短柱试件参数

试件	t/mm	D/mm	D/t	λ	n_0	$\rho_s/\%$	$\rho_v/\%$	f_{ek}
RRC-1-0.3	-	333	-	1	0.3	1.38	2.68	39.3
RRC-1-0.5	-	333	-	1	0.5	1.38	2.68	39.3
RTRC-1-0.3-111	3	333	111.0	1	0.3	1.38	1.78	39.3
RTRC-1-0.5-111	3	333	111.0	1	0.5	1.38	1.78	39.3
RTRC-1-0.3-166	2	333	166.5	1	0.3	1.38	1.78	39.3
RTRC-1-0.5-166	2	333	166.5	1	0.5	1.38	1.78	39.3

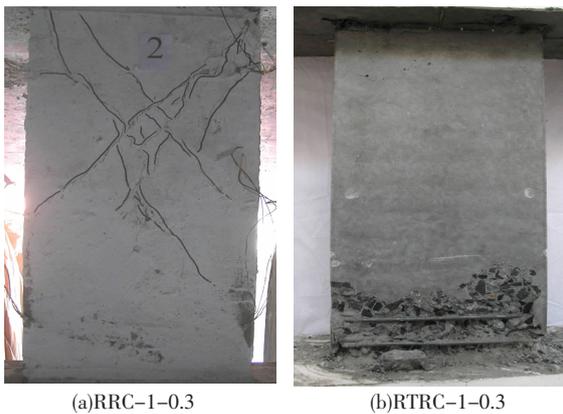


图 3 轴压比为 0.3 超短柱的破坏模式

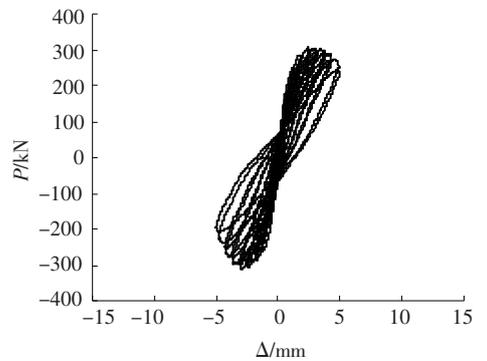


图 4 轴压比为 0.5 超短柱的破坏模式

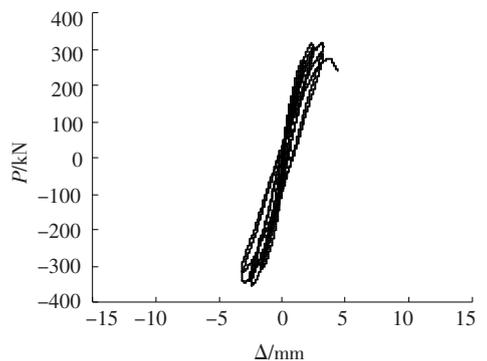
3 滞回曲线与骨架曲线对比

图 5 为 RRC 和 RTRC 超短柱的滞回曲线. 矩形截面钢筋混凝土超短柱(图 5(a)~(b))的滞回性能很差,峰值荷载后试件迅速破坏,失去承载能力,且钢筋混凝土超短柱的滞回曲线不饱满,耗能性能差. 矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱滞回曲线(图 5(c)~(f))比矩形截面钢筋混凝土超短柱饱满,其耗能性能优于矩形截面钢筋混凝土超短柱. 当试件进入屈服状态,加载至峰值荷载点

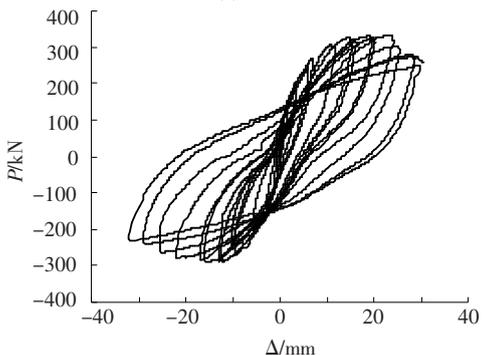
后,滞回环的“捏缩”现象消失,滞回曲线变的更加饱满,耗能能力突然加强,呈现出钢材的耗能性能。



(a)RRC-1-0.3



(b)RRC-1-0.5



(c)RTRC-1-0.3-111

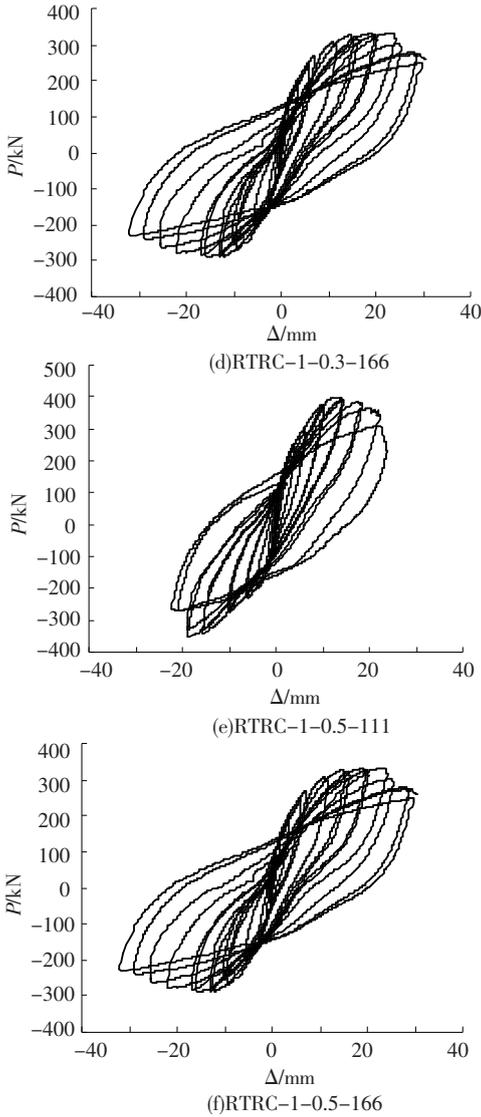


图 5 超短柱的荷载 (P) - 位移 (Δ) 滞回曲线

图 6 为 RRC 与 RTRC 超短柱的荷载 - 层间位移角 (R) 骨架曲线对比。图 6 中破坏点是指承载力下降至峰值荷载的 85% 时所对应的点, 此处的位移为极限位移 (Δ_u); 当试件的承载力未下降至 85% 时已经破坏, 不能继续加载, 则取最大位移为极限位移^[1]。由图 6 可看出, 矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱的抗剪承载力、变形能力和延性要高于矩形截面钢筋混凝土超短柱。随轴压比的提高, 矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱试件的承载力提高, 极限位移角有所减小; 随着宽厚比的增加, 相同轴压比下矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱的骨架曲线基本重合。即使在体积配箍率为

2.68% 的高配箍率条件下, 剪跨比为 1 的钢筋混凝土超短柱的变形能力仍然很差, 柱子的极限层间位移角都不足 1%, 不满足我国《建筑抗震设计规范》对钢筋混凝土框架柱弹塑性层间位移角 1/50 的变形能力要求。因此剪跨比为 1 的钢筋混凝土超短柱应避免在抗震工程中的应用。而矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱的极限层间变形能力远超过我国现行规范要求。因此在实际工程中, 对于剪跨比为 1 的矩形截面钢筋混凝土超短柱进行外包钢管约束, 可以有效提高矩形截面钢筋混凝土超短柱的承载力和延性性能, 并满足现行抗震规范对钢筋混凝土框架柱的弹塑性变形能力要求。

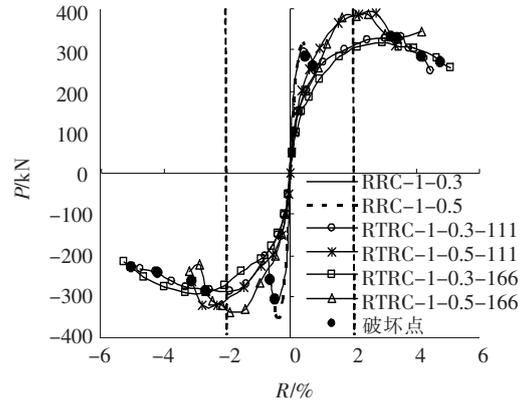


图 6 RRC 与 RTRC 超短柱的荷载 - 层间位移角骨架曲线

表 2 为各试件的试验结果对比, 表中 P_u (kN) 为试验实测极限承载力; Δ_y (mm) 为屈服位移, 由能量法求得; Δ_u (mm) 为极限位移; $\Delta_{0.85}$ 为荷载下降至峰值荷载的 0.85 倍时所对应的位移; R_u (%) 为极限层间位移角; μ 为延性系数, $\mu = \Delta_{0.85} / \Delta_y$; ψ 为能量耗散系数。由表 2 可见, RRC 超短柱的延性系数最大为 2.63, 延性很差; 而 RTRC 超短柱的延性系数都 > 3.5, 能够满足抗震要求。RRC 超短柱的极限层间位移角都不足 1%, 而 RTRC 超短柱的极限层间位移角都 > 2%, 能够满足抗震规范的要求。宽厚比对 RTRC 超短柱的延性和极限层间位移角影响不大。由表 2 可见, RRC 超短柱的能量耗散系数都不超过 1, 而 RTRC 超短柱的能量耗散系数都 > 1.5, 可见 RTRC 超短柱的能量耗散能力远大于 RRC 超短柱。宽厚比对 RTRC 超短柱的能量耗散系数影响不大。

表 2 试验结果对比

试件	P_u /kN	Δ_y /mm	Δ_u /mm	$\Delta_{0.85}$ /mm	R_u /%	μ	ψ
RRC-1-0.3	305.59	1.60	2.40	4.22	0.63	2.63	0.93
RRC-1-0.5	314.17	1.89	2.33	2.91	0.44	1.54	0.71
RTRC-1-0.3-111	309.51	6.75	18.47	27.87	4.18	4.12	1.79
RTRC-1-0.5-111	378.23	5.85	18.01	20.86	3.13	3.56	1.87
RTRC-1-0.3-166	304.28	7.06	19.85	32.67	4.91	4.63	1.71
RTRC-1-0.5-166	362.15	5.39	17.58	19.93	2.99	3.69	1.88

4 结 论

1) 矩形截面钢筋混凝土超短柱的破坏模式为剪切破坏,即使在高配箍率条件下,剪跨比为1的矩形截面钢筋混凝土超短柱的极限层间变形能力也远低于现行抗震规范要求,因此在抗震工程中采用时须采取特殊的加强措施。

2) 在矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱外设置薄壁钢管,可有效避免构件的剪切破坏模式,提高超短柱的延性、弹塑性层间变形能力和耗能性能,使得超短柱的抗震性能满足现行抗震设计要求。

3) 相同宽厚比条件下,随轴压比的增加,矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱的峰值承载力明显提高;但轴压比对延性和弹塑性层间变形能力的影响不显著。

4) 在本文试验研究参数范围内,不同宽厚比的矩形钢管约束钢筋混凝土超短柱的滞回曲线基本重合,即宽厚比对抗震性能的影响不显著。

参考文献:

[1] 周绪红,刘界鹏. 钢管约束混凝土柱的性能与设计[M]. 北京:科学出版社,2010.

[2] 周绪红,张小冬,刘界鹏. 钢管约束钢筋混凝土柱与型钢混凝土柱的滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(s1):121-128.

[3] 张国军,吕西林. 高轴压比高强混凝土短柱力学性能的试验研究[J]. 工业建筑,2005,35(3):20-23.

[4] 姜维山,白国良. 配复合箍、螺旋箍、X形筋钢筋砼短柱的抗震性能及抗震设计[J]. 建筑结构学报,1994,15(1):2-16.

[5] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[6] TOMII M, SAKINO K, XIAO Y, *et al.* Earthquake resisting hysteretic behavior of reinforced concrete short columns confined by steel tube [C]//Proceedings of the International Speciality Conference on Concrete Filled Steel Tubular Structures. Harbin: Harbin Construction institute, 1985: 119-125.

[7] XIAO Y, TOMII M, SAKION K. Experimental study on design method to prevent shear failure of reinforced concrete short circular columns by confining in steel tube [J]. Transactions of Japan Concrete Institute, 1986, 8: 535-542.

[8] 肖岩,郭玉荣,何文辉,等. 局部加劲钢管套管加固钢筋混凝土柱的研究[J]. 建筑结构学报,2003,24(6):79-86.

[9] 周绪红,张素梅,刘界鹏. 钢管约束钢筋混凝土压弯构件滞回性能试验研究与分析[J]. 建筑结构学报,2008,29(5):19-28.

[10] 周绪红,刘界鹏,张素梅. 方钢管约束钢筋高强混凝土超短柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2010,43(8):1-10.

[11] 周绪红,刘界鹏,张素梅. 圆钢管约束钢筋混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,31(7):56-63.

(编辑 赵丽莹)