

焊接箍筋柱抗震性能的试验研究

袁宁

甘肃省建设设计咨询集团有限公司

摘要:通过对钢筋混凝土短柱进行低周反复加载试验,研究不同箍筋形式对抗震性能的影响,对比分析其破坏形态、滞回曲线、承载力、延性和耗能,得出结论:焊接箍筋柱的抗震性能略低于复合箍筋柱,但优于拉钩箍筋柱,试件的抗震性能均高于规范要求。将承载力试验值与欧洲规范、ACI和中国规范的计算值进行了对比,表明ACI公式计算值与试验值吻合最好。

关键词:焊接箍筋;低周反复试验;滞回曲线;承载力

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.08.029

传统箍筋一般为现场人工制作,由于加工精度不高,使混凝土构件保护层厚度难以保证。同时箍筋端部弯钩段和平直段给现场制作安装带来不便,混凝土浇筑时易产生离析、卡泵,导致构件密实度不满足要求^[1]。

针对上述问题国内学者提出利用焊接封闭箍筋取代传统复合箍筋^[2-3],由于该技术可节约钢筋用量、提高效率和质量,因此在工程应用中取得了良好的效果^[4-5]。但目前对焊接箍筋柱力学性能的研究还不足,焊接箍筋应用时间和范围还不广,没有经历大型震害检验,因此有必要对焊接箍筋柱的抗震性能开展针对性研究。本文对利用电阻凸焊^[6]焊接箍筋混凝土柱的抗震性能进行试验研究,对采用不同箍筋类型的钢筋混凝土柱进行滞回性能分析,以为焊接箍筋的设计应用提供参考。

一、试验设计

(一) 材料性能

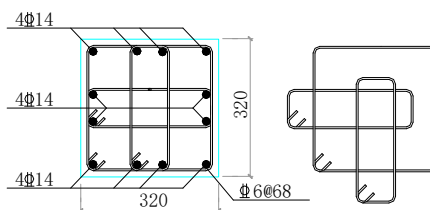
本文采用P. O. 42.5R普通硅酸盐水泥,细骨料为中粗砂,粗骨料为粒径5~20mm连续级配石子,试验配合比见表1。

表1 混凝土配合比 (kg/m³)

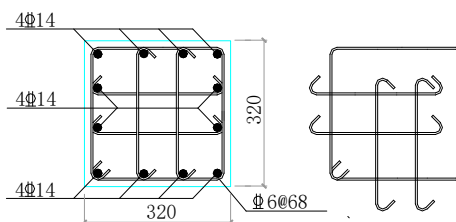
材料	水泥	砂	石子	水
用量	521	495	1177	207

(二) 构件设计

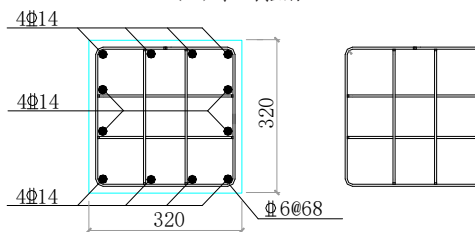
试验共6根钢筋混凝土柱,研究目的是对比不同箍筋形式对柱抗震性能的影响,试件均为1:1模型,柱尺寸为320×320×960(mm),剪跨比1.5,设计轴压比0.4,柱下部锚入520×520×300(mm)混凝土放大脚并通过地锚螺栓固定在试验承台上。柱箍筋率均为1.24%,纵筋率分别为2.4%和1.8%,共分三种箍筋形式(A复合箍筋、B拉钩箍筋和F焊接箍筋),箍筋形式见图1,箍筋封闭外环对接处采用闪光对焊,T字形连接处采用电阻电焊,采用专用单头电阻电焊机焊接。试件编号和详细参数见表2。编号示例:RC表示钢筋混凝土柱,2.4表示纵筋率为2.4%,F表示焊接箍筋。



(a) 复合箍筋



(b) 拉钩箍筋



(c) 焊接箍筋

图1 箍筋类型和试件尺寸

表2 试件编号详细参数

试件编号	箍筋类型	配箍率/%	纵筋率/%	混凝土强度/Mpa	轴压比
RC-2.4-A	复合箍筋	1.24	2.4	45.4	0.4
RC-2.4-B	拉钩箍筋	1.24	2.4	44.3	0.4
RC-2.4-F	焊接箍筋	1.24	2.4	47.4	0.4
RC-1.8-A	复合箍筋	1.24	1.8	46.7	0.4
RC-1.8-B	拉钩箍筋	1.24	1.8	43.1	0.4
RC-1.8-F	焊接箍筋	1.24	1.8	48.4	0.4

(三) 加载装置

试验采用悬臂式加载,试件放置在混凝土试验承台上,顶部通过千斤顶施加竖向荷载,千斤顶通过滑动支座将反作用力传递至上部反力梁,试件上部安装有传力器通过水平连接装置固定在试件的一侧,传力器另一侧固定在不可动悬臂式反力墙,通过传力器对试件施加水平低周往复荷载。

(四) 加载制度

试验起始通过千斤顶在柱顶端预施加垂直向下竖向

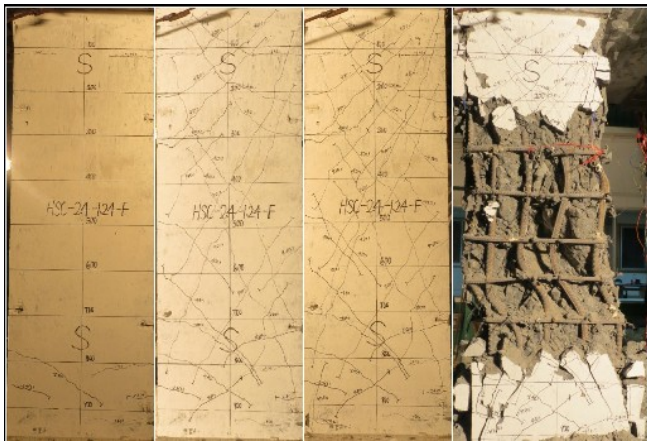
荷载，持续加载至设计值后保持恒定。然后在柱上部沿水平方向通过传力器按照侧移角控制施加低周往复荷载，分级加载，侧移角依次为1/800、1/400、1/200、1/100、1/67、1/50、1/33、1/25、1/16.5，对应的柱层间位移为±1.20mm、±2.4mm、±4.8mm、±9.6mm、±14.33mm、±19.2mm、±29.1mm、±38.4mm、±58.2mm，每级荷载循环两次，直到试件丧失承载力。

二、试验结果分析

(一) 试验现象和破坏形态

如图2所示，试件破坏过程可分为四个阶段：第一阶段试件未过屈服点，滞回曲线基本呈线性关系，试件表面仅出现水平裂缝和少量斜裂缝；第二阶段试件屈服之后，表面出现大量斜裂缝和贯穿柱身的交叉状斜裂缝并持续发展；第三阶段试件下根部混凝土首先出现细小竖向裂缝并被压碎，随后竖向裂缝向上发展，在斜裂缝交叉处混凝土保护层出现剥落，试件承载能力达到峰值；第四阶段试件承载能力开始下降，表面混凝土大块剥落，箍筋脱钩或断裂，纵筋弯曲，最终纵筋被压曲导致试件破坏。

其中试件RC-1.8-F在按1/33的层间位移角（位移±29.1mm）加载时，在位移达到-20mm左右纵筋突然压曲，柱身顶部的三根箍筋均被拉断，试件随即丧失竖向承载力。经调查，该试件箍筋制备时存在质量缺陷，使箍筋过早断裂，构件过早丧失承载力。



(a) 第一阶段 (b) 第二阶段 (c) 第三阶段 (d) 第四阶段

图2 试件破坏过程

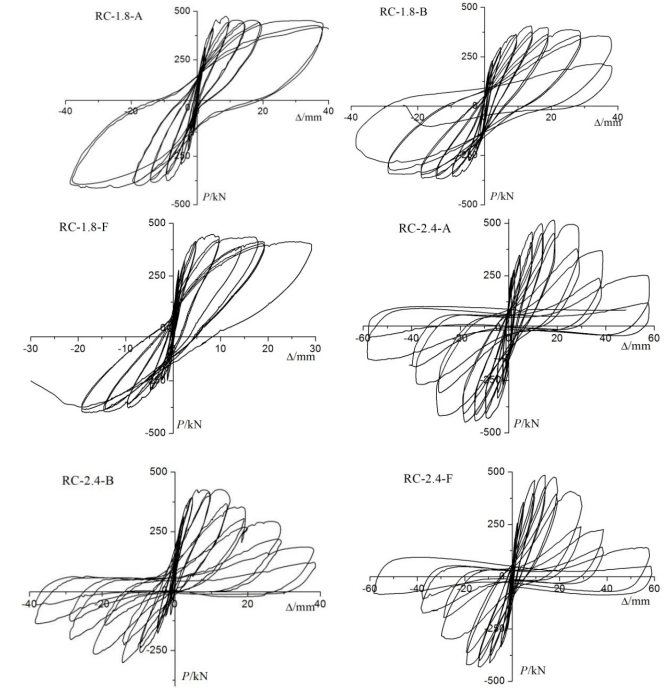
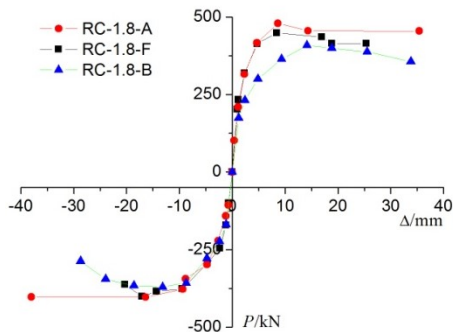


图3 试件荷载-位移滞回曲线

(二) 滞回性能

图3给出了各组试件的滞回曲线，可以看出：纵筋率相同的情况下，采用焊接箍筋的试件RC-1.8-F和RC-2.4-F丧失承载力之前均表现出与配置普通箍筋试件相类似的滞回性能。

图4 给出各组试件的骨架曲线，可以看出：

- 1) 加载起始阶段在纵筋率相同的情况下，各组试件的骨架曲线基本重合，说明箍筋形式对试件屈服前刚度影响较小。
- 2) 试件达到屈服点后，采用拉钩箍筋的试件RC-1.8-B和RC-2.4-B的刚度退化较为明显，而采用焊接箍筋试件和复合箍筋试件刚度较为接近。
- 3) 峰值后在相同配箍率情况下，纵筋率越高，试件骨架曲线下落更快，延性和耗能越差。

(三) 耗能性能

耗能性能是评估构件抗震性能的重要指标，耗能能力越强，抗震性能越好。参考文献^[7]定义滞回耗能等

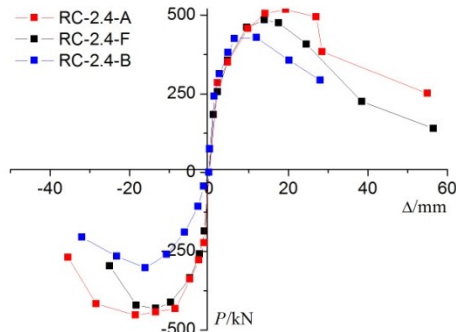


图4 试件骨架曲线

表3 试验值与计算值比较

试件编号	V_{cal} (kN)			V_{test}^+	V_{test}^-	V_{cal}/V_{test}^+			V_{cal}/V_{test}^-		
	EU	ACI	GB			EU	ACI	GB	EU	ACI	GB
RC-2.4-A	339.1	378.5	354.6	518.2	453.2	0.65	0.73	0.68	0.75	0.84	0.78
RC-2.4-B	336.4	375.1	352.3	428.6	303.0	0.78	0.88	0.82	1.11	1.24	1.16
RC-2.4-F	344.0	384.7	358.8	485.2	432.0	0.71	0.79	0.74	0.80	0.89	0.83
RC-1.8-A	333.4	382.5	357.4	479.3	403.1	0.70	0.80	0.75	0.83	0.95	0.89
RC-1.8-B	324.9	371.3	349.6	408.5	370.2	0.80	0.91	0.86	0.88	1.00	0.94
RC-1.8-F	337.5	387.8	360.9	448.3	400.5	0.75	0.87	0.81	0.84	0.97	0.90
					均值	0.72	0.82	0.77	0.86	0.97	0.91
					方差	0.06	0.07	0.07	0.13	0.14	0.13

效黏滞系数。图5给出了各组试件的累计滞回耗能-位移角曲线。各级累计耗能和能量耗散系数取值对应各级加载第一个滞回环。

可以看出，在加载前期（位移角在1/400、位移2.4mm之前），试件处于弹性阶段，试件累计耗能较少，在纵筋率相同的情况下，箍筋类型对耗能影响较小。随着试件水平位移的逐渐增大和裂缝的发展，箍筋类型对滞回耗能的影响逐渐明显，耗能大体表现为复合箍筋>焊接箍筋>拉钩箍筋。

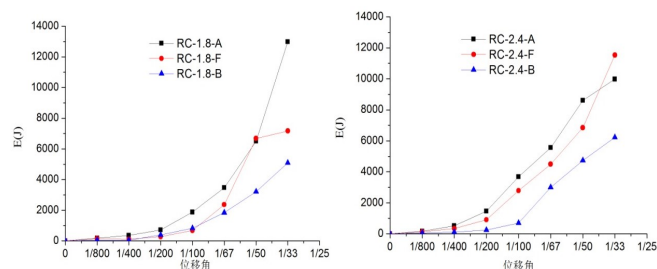


图5 累计滞回耗能-位移角曲线

(四) 承载力

表3将试件峰值承载力试验值与欧洲规范^[9]、ACI318^[10]和中国规范^[11]计算值进行对比， V_{cal} 表示计算承载力， V_{test}^+ 和 V_{test}^- 分别表示正、负向承载力试验值。除试件RC-2.4-B的负向承载力试验值低于计算值外，其余试件试验值均偏于安全。其中ACI318M-05公式计算值与试验值吻合最好，中国规范次之，欧洲规范的计算值偏保守。

三、结论

本文从滞回曲线、骨架曲线、承载能力、延性、耗能性能等指标对比了箍筋种类对混凝土柱抗震性能的影响，得到以下结论：

- 1) 焊接箍筋柱、复合箍筋柱、拉钩箍筋柱破坏形态相类似，均发生了弯曲破坏。
- 2) 试件丧失承载力之前，焊接箍筋、复合箍筋及拉钩箍筋滞回性能类似，屈服点之后焊接箍筋试件同复合箍筋试件较为接近而优于拉钩箍筋，总体耗能表现为

复合箍筋>焊接箍筋>拉钩箍筋，据此，在纵筋率一致的情况下，焊接箍筋抗震性能略低于复合箍筋柱，但优于拉钩箍筋柱。

3) 将承载力试验结果与欧洲规范、ACI和我国混凝土结构设计规范（GB50010-2010）的计算结果进行了对比，结果表明ACI公式和我国规范计算结果与试验结果吻合良好，欧洲规范的计算结果相对保守。

参考文献

- [1] 张紫薇. 焊接箍筋混凝土梁受剪性能试验研究[D]. 西安建筑科技大学, 2013.
- [2] 李升才, 章炯. 反复荷载作用下焊接环式箍筋对高强混凝土柱的约束作用研究[J]. 建筑结构, 2012(4): 94-98.
- [3] 李智能, 宋春芳, 魏奇科, 等. 焊接箍筋混凝土柱的轴压性能对比分析[J]. 土木工程与管理学报, 2014, 31(1): 18-23.
- [4] 杨秀敏, 杨力列. 焊接封闭环式箍筋应用技术[J]. 广东土木与建筑, 2003(5): 41-43.
- [5] 余泓. 关于重庆市推行房屋建筑焊接箍筋的技术推广[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2015.
- [6] 李智能, 汪建, 魏奇科. 电阻凸焊在钢筋连接中的应用[J]. 电焊机, 2014(6): 94-99.
- [7] 王全凤, 郑济坤, 周博, 等. 基于滞回耗能的HRBF500 RC柱抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2013(11): 22-28.
- [8] GB50011-2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
- [9] CEN. Eurocode 2: Design of Concrete Structure. BS EN, 1992-1-1, 2004.
- [10] ACI Committee 318, Building Code Requirement For Structural Concrete (ACI318-05) and Commentary. American Concrete Institute, Detroit, 2005
- [11] GB50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.