

套筒浆锚连接柱的抗震性能试验研究

张兴虎¹, 王建¹, 潘树宾², 姜维山¹, 李青宁¹, 于庆荣³

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 隆基泰和有限公司, 河北 高碑店 074000; 3. 天津大学建筑工程学院, 天津 30072)

摘要:提出一种装配框架柱的新型连接形式:套筒浆锚连接形式. 采用足尺模型, 设计了2个套筒浆锚连接高强箍筋约束混凝土柱和2个现浇普通箍筋柱对比. 通过低周反复加载试验, 与现浇普通箍筋柱对比, 研究套筒浆锚连接高强箍筋约束混凝土柱的承载能力和抗震性能. 试验结果表明:此种连接形式可靠, 且在相同的条件下套筒浆锚连接高强箍筋约束混凝土柱具有和现浇普通箍筋柱相当的承载能力和耗能能力.

关键词:约束混凝土柱; 装配整体式; 套筒浆锚连接; 抗震性能

中图分类号: TU375; TU317+.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)02-0164-07

装配整体式结构具有节能、环保、高速等优点受到人们的亲睐, 因顺应世界提倡“节能减排”而被国家大力支持推广使用, 也因其生产具有标准化、通用化、产业化而容易实现建筑的大规模工业化, 但也因其抗震性能的薄弱使其使用范围受到限制. 装配式柱的传统连接形式存在构造复杂、运输不便、不易施工、造价较高等问题^[1-2]. 为此特提出高强箍筋约束混凝土柱套筒浆锚连接形式, 利用套筒有效传递荷载, 采用高强复合螺旋箍筋增强混凝土柱的内部约束, 既限制了混凝土的横向变形, 也可以有效增强柱的承载能力和抗震能力^[3-6]. 通过拟静力低周反复加载试验, 研究套筒浆锚连接高强复合螺旋箍筋约束混凝土柱(以下简称套筒浆锚连接柱)的抗震性能, 分析该连接形式的可靠性, 为其在实际工程中的应用提供可靠依据.

1 试验概况

1.1 试件设计

本次试验共设计4个1:1足尺模型, 其中2个现浇普通箍柱(RC-01、RC-02)为对照模型, 2个为套筒浆锚连接柱(PRCC-03、PRCC-04). 试件尺寸见图1, 试件高2000 mm, 加载点在柱高1800 mm处, 截面尺寸皆为400 mm×400 mm, 混凝土保护层为30 mm, 箍筋形式为复合箍, 试件采用C40商品混凝土, RC-01、RC-02加密区为从柱底部向上500 mm范围内. PRCC-03、PRCC-04箍筋采用直径为5 mm强度为1100 MPa的高强钢筋, 用 $\Phi^{\text{H}}5$ 表示; 上柱高1370 mm, 预留钢筋长240 mm, 下柱高590 mm, 在下柱套筒内有效锚固长度为8d, 上下柱连接面处留有40 mm缝隙以便在套筒上(图2)焊接10 mm厚的Q235钢垫板来加强主筋与套筒间的连接, 最后用高强度无收缩灌浆料将缝隙灌实; PRCC-04组装成整体后在接合面处加高380 mm厚3.8 mm的钢板箍. 试件参数见表1.

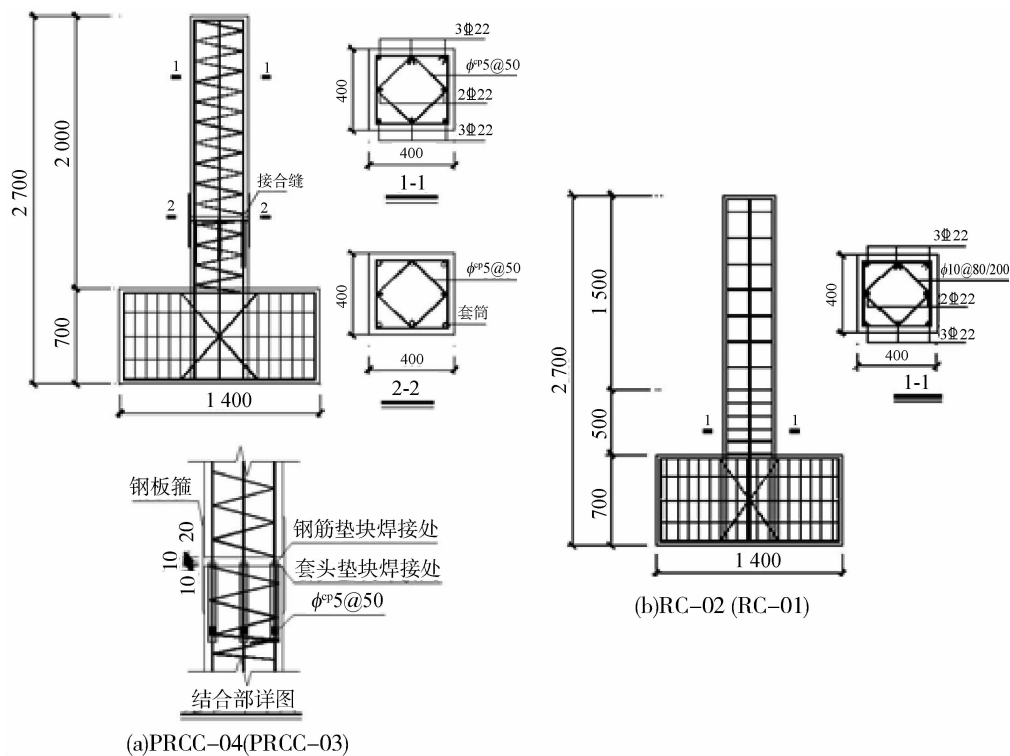
1.2 材料性能

混凝土设计强度等级为C40, 根据《混凝土结构试验方法标准(GB50152)》预留3组150 mm×150 mm×150 mm的标准立方体试块^[7], 灌浆料根据《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T50448-2008预留3组40 mm×40 mm×160 mm棱柱体试块, 与试件同条件下养护到试验加载开始; 混凝土轴心抗压强度标准值根据《混凝土结构设计规范(GB50010—2010)》取 $f_{ck}=0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k}$ ^[8], 混凝土, 灌浆料, 钢筋、钢板箍性能分别见表2、表3、表4.

收稿日期: 2012-11-09 修改稿日期: 2013-03-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10572107); 河北省地方科技项目(2011188)

作者简介: 张兴虎(1956-), 男, 陕西凤翔人, 教授级高级工程师, 主要从事工程结构抗震理论与试验研究.



注:RC-01 箍筋为 10@100/200;PRCC-03 节点处不带钢板箍.

图 1 试件尺寸及配筋图

Fig. 1 Specimen dimensions and reinforcement

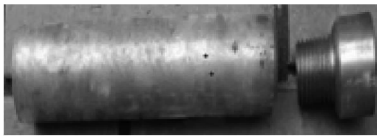


图 2 套筒示意图
Fig. 2 Grout sleeves

表 1 试件参数表
Tab. 1 Specimens' parameters

试件编号	纵筋	箍筋	体积配箍率 $\rho_v/\%$	配箍特征值 λ_v	轴压比 n_t	剪跨比 λ
RC-01	8Φ22	Φ10@100/200	1.65	0.233	0.2	4.5
RC-02	8Φ22	Φ10@80/200	2.06	0.291	0.5	4.5
PRCC-03	8Φ22	Φ ⁵ @50	0.8	0.461	0.2	4.5
PRCC-04	8Φ22	Φ ⁵ @50	0.8	0.461	0.5	4.5

1.3 试验加载及量测内容

1.3.1 加载设备

试验在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室进行.采用美国 MTS100 t 电液伺服作动器对试件进行低周反复加载;竖向荷载由 500 t 液压千斤顶及杠杆放大稳压系统提供.试验装置见图 3.

1.3.2 加载制度和量测内容

试验采用拟静力试验方法,在试验正式开始前缓慢施加竖向荷载到 3 t,随后卸载,完成一次预压;然后施加竖向荷载,在试验过程中保持不变,随后施加水平荷载,在屈服前根据荷载控制加载,每级 5 t 循环一次加载至屈服;屈服后按屈服位移的倍数逐级加载,每级循环 3 次;水平荷载下降至极限承载力的 85%时认为构件破坏,停止加载.在加载过程中对试件的荷载-位移滞回曲线进行记录,加载历程如图 4.

表 2 混凝土实测材料力学指标
Tab. 2 Mechanical properties of concrete

混凝土强度等级	$f_{cu,k}/\text{MPa}$	f_{ck}/MPa
C40	57.17	38.23

表 3 灌浆料材料性能
Tab. 3 Mechanical properties of grout

水灰比	时间/d	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
0.33	1	28.4	4.7
0.33	3	43.6	5.6

表 4 钢筋材性指标
Tab. 4 Mechanical properties of steel bars

钢筋规格	屈服强度 f_y/MPa	极限强度 f_u/MPa	延伸率 $\delta/\%$	冷弯性能	弹性模量 E_s/MPa
Φ ⁵	1 052	1 177	5.8	—	2.05×10^5
Φ10	310	475	28	合格	2.10×10^5
Φ22	490	663	23.5	合格	2.00×10^5
钢板箍	320	475	—	—	2.00×10^5

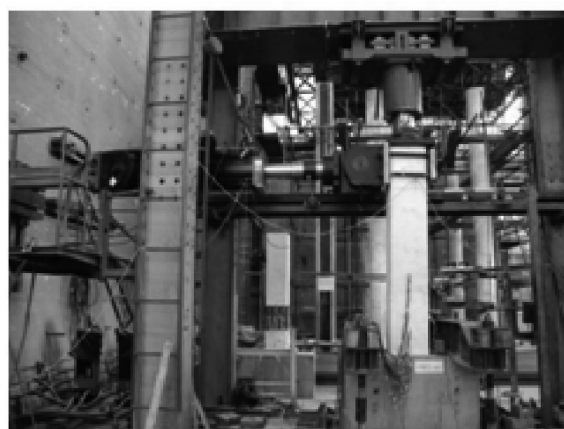


图3 加载装置图
Fig. 3 Load device

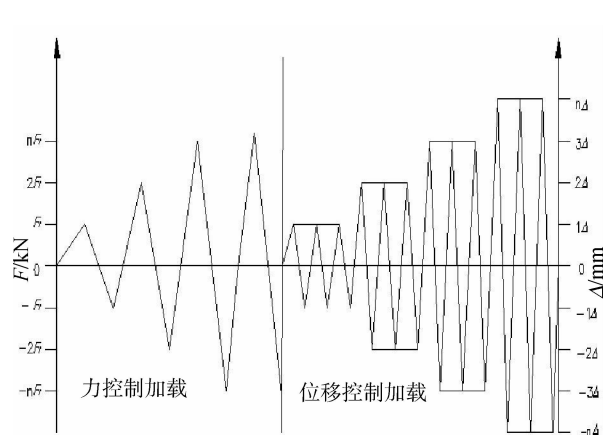
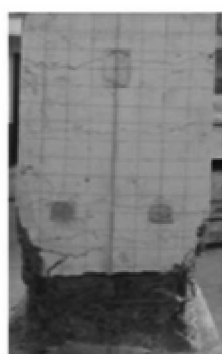


图4 加载历程图
Fig. 4 Load step

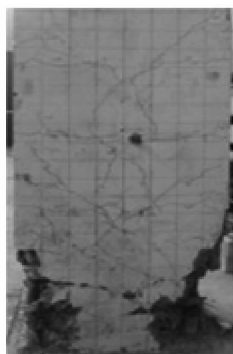
2 试验过程及结果分析

2.1 试验过程及破坏形态

试验中 RC-01, PRCC-03 裂缝出现较早,多数为水平裂缝,随着加载的继续部分贯通,在位移控制加载后,角部出现竖向劈裂裂缝,多数原有水平裂缝斜向发展,混凝土保护层在循环过程中压碎、脱落,试件漏筋;破坏时 PRCC-03 连接灌浆处只有数条细微不规则裂缝,钢筋没有屈服,根部破坏区域较小,且破坏程度较 RC-01 轻微,破坏后的 RC-01、PRCC-03 见图 5(a)和 5(c).



东面



南面

(a) RC-01

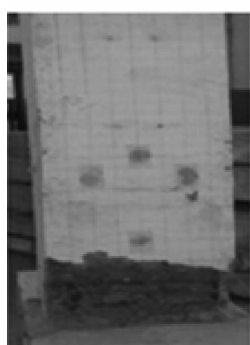


南面

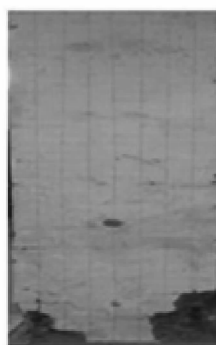


东面

(b) RC-02

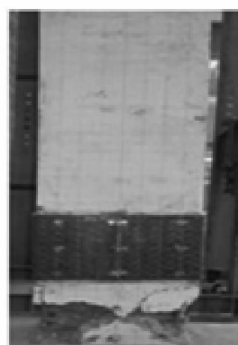


东面

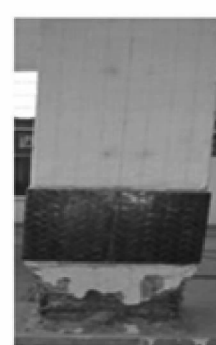


南面

(c) PRCC-03



南面



东面

(d) PRCC-04

图5 试件的破坏形态图

Fig. 5 Failure modes of specimens

试件 RC-02、PRCC-04 裂缝出现较晚;RC-02 在 $1\Delta_y$ 加载过程中,原有水平裂缝斜向发展,且有新裂缝出现,角部混凝土不断压碎脱落,在 $3\Delta_y$ 循环中,受力方向混凝土保护层大块脱落,角部出现劈裂裂缝,纵筋裸露,破坏区域在根部 1 000 mm 范围内. PRCC-04 屈服前和 RC-02 破坏相似,但裂缝于钢板箍下面终止, $3\Delta_y$ 时受力方向混凝土保护层呈块状剥离状态,到试验结束钢板箍只有上部微鼓起,无明显变形. 破坏后的 RC-02、PRCC-04 见图 5(b)、5(d).

经检查,破坏后的装配整体式试件连接部位完整,套筒未出现破坏. 由上可知:(1)套筒浆锚连接柱的破坏过程和现浇普通箍柱相似,屈服前多为水平裂缝,屈服后裂缝斜向发展,混凝土压碎剥落;(2)由于高强螺旋箍筋的约束作用和套筒对试件刚度的提高,套筒浆锚连接柱破坏区域明显减少,破坏程度轻微;(3)套筒浆锚连接是可靠的连接形式,可以有效传递荷载.

2.2 滞回曲线

比较各试件的实测荷载-位移滞回曲线(图 6)可知:

(1)屈服前,试件处于弹性变形阶段,加载和卸载刚度没有显著变化,屈服以后逐渐降低;

(2)轴压比为 0.2 时,PRCC-03 与 RC-01 滞回曲线形状基本相同,比较饱满且各级循环的峰值点下降较为平缓,延性较好,具有近似的滞回特性和耗能能力,说明低轴压下套筒浆锚连接柱与现浇普通箍筋柱具有相当的抗震能力;

(3)轴压比为 0.5 时,RC-02 滞回曲线有明显的捏缩现象,这是因为高轴压下混凝土保护层过早脱落使受压区变小;PRCC-04 由于螺旋箍筋和钢板箍的约束作用滞回曲线较饱满,但滞回环在位移较小时有一个小范围的凹陷,这是因为钢板箍和试件之间的灌浆料破碎使受压截面减小,但在位移较大时由于没有脱落可以继续发挥作用,滞回曲线形态比 RC-02 的更加饱满稳定,刚度退化较慢,说明高轴压下套筒浆锚连接柱比现浇普通箍筋柱有更好的承载能力和抗震性能.

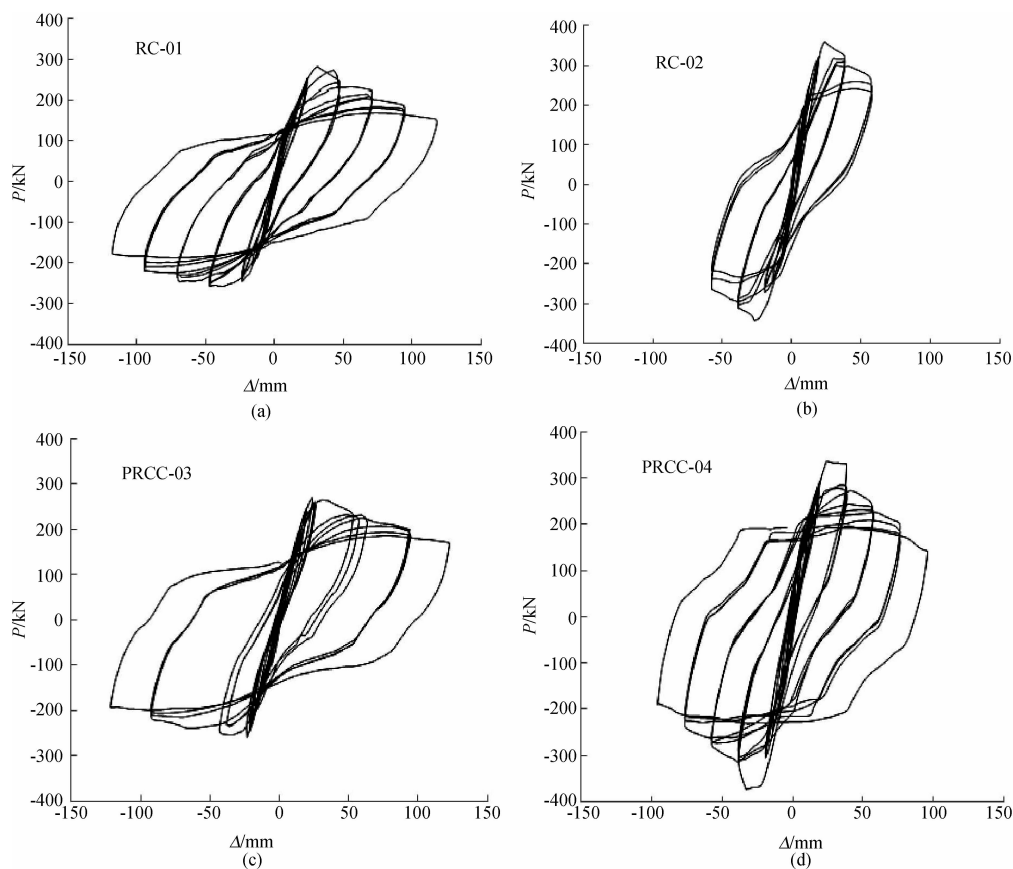


图 6 试件的滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic loops of specimens

2.3 骨架曲线

骨架曲线和滞回曲线合称为恢复力曲线,是研究非弹性地震反应的重要参数.由图 7 可以看出: $n_t = 0.2$ 时,骨架曲线下降较缓, $n_t = 0.5$ 时,骨架曲线下降显著,说明高轴压下刚度退化更明显; $n_t = 0.2$ 和 $n_t = 0.5$ 时套筒浆锚连接柱和现浇普通箍筋柱的骨架曲线基本重合,说明同轴压比下,套筒浆锚连接柱具有与现浇普通箍筋柱相当的承载能力和抗震能力.

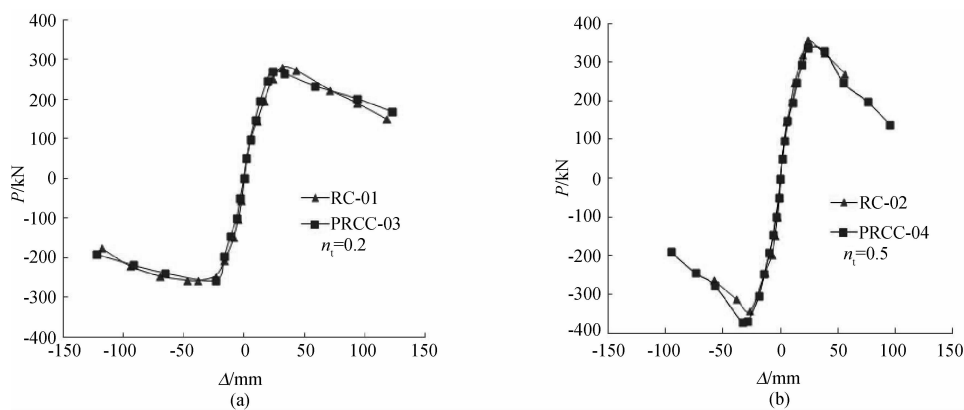


图 7 试件的骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves of specimens

2.4 刚度衰减

由试件的割线刚度与位移的关系曲线(图 8)知:试件的刚度随位移的增大逐渐减小,在位移较小时,刚度较大,随位移增大,刚度衰减速度变缓,在 $n_t = 0.2$ 时,RC-01 与 PRCC-03 的刚度曲线基本重合; $n_t = 0.5$ 时,在位移较小时,RC-02 比 PRCC-04 的刚度大一些,但随位移的增大,二者的刚度及退化速度接近.

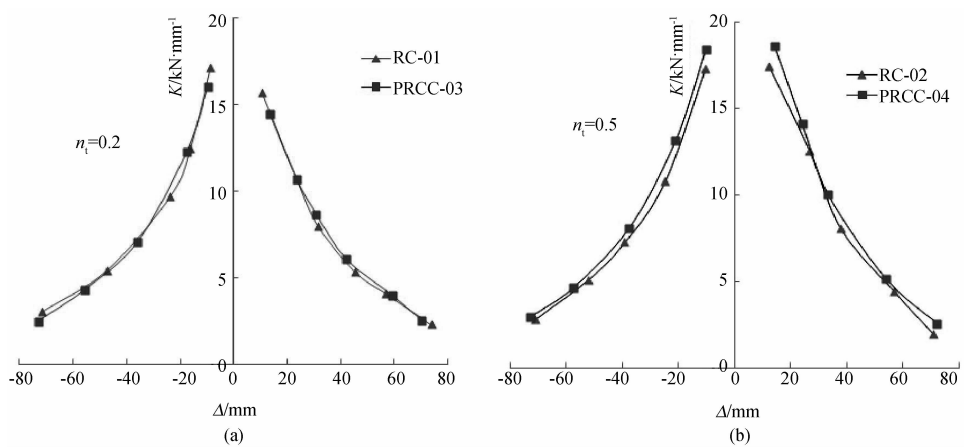


图 8 刚度衰减图

Fig. 8 Stiffness degradation

2.5 延性

本文计算位移延性系数时屈服位移采用屈服弯矩法(几何作图法),极限位移为骨架曲线上峰值荷载下降到 85% 时对应的位移.由试验数据结果表 5 可知:轴压比为 0.2 时,PRCC-03 与 RC-01 相比较,前者的位移延性系数大于后者,是后者的 104.8%,极限侧移角近似于后者;轴压比为 0.5 时,PRCC-04 与 RC-02 相比较,前者的位移延性系数和后者基本相同,极限位移角是后者的 103%;不同轴压比下,装配式柱的延性系数均大于 2,与现浇普通箍筋柱相当,且满足一般规定钢筋混凝土框架柱的延性不小于 2 的要求,装配式柱的极限位移角均大于 1/50,满足我国抗震规范中关于大震作用下钢筋混凝土框架结构为 1/50 结构容许极限变形的要求,说明本试验中的装配式柱的延性能满足使用要求.

表 5 试件主要实测结果

Tab. 5 Main test result of specimens

试件编号	屈服点		峰值点		极限点		位移延性系数		极限位移角	
	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	$\mu=\Delta_u/\Delta_y$		$\theta=\Delta_u/H$	
RC-01	246.03	22.94	281.14	31.41	238.97	61.77	2.69	3.78	1/29.1	1/22.9
	-220.22	-18.63	-257.42	-47.29	-218.81	-95.43	5.12		1/18.86	
RC-02	307.52	18.33	356.64	23.76	303.14	44.91	2.45	2.53	1/40.08	1/39.35
	-277.17	-17.86	-343.1	-26.56	-291.64	-46.58	2.61		1/38.64	
PRCC-03	239.69	18.39	271.23	23.49	230.55	62.29	3.39	3.96	1/28.89	1/23.48
	-229.69	-20.2	-257.56	-23.49	-218.93	-91.01	4.51		1/19.78	
PRCC-04	293.83	19.14	336.46	24.26	285.99	47.32	2.47	2.56	1/38.04	1/38.1
	-321.63	17.73	-372.86	-33.06	-316.93	-47.17	2.66		1/38.16	

2.6 耗能性能

图 9 是根据各试验试件的等效粘滞阻尼系数图. 由图知:

(1)两种形式试件的等效粘滞阻尼系数变化类似,均随着加载位移的增加增大,初期增长较明显,达到一定程度由于钢筋的屈服滑移,速度明显减缓,说明套筒浆锚连接柱的耗能机制和现浇普通箍筋柱相同;

(2)套筒浆锚连接柱的阻尼系数在不同轴压比下均接近甚至大于现浇普通箍筋柱,主要因为试件设计为强剪弱弯构件,高强螺旋箍筋未屈服,相对普通箍筋未发挥更大约束作用,试件就已弯曲破坏,说明相同轴压比下套筒浆锚连接柱的耗能能力和现浇普通箍筋柱相当.

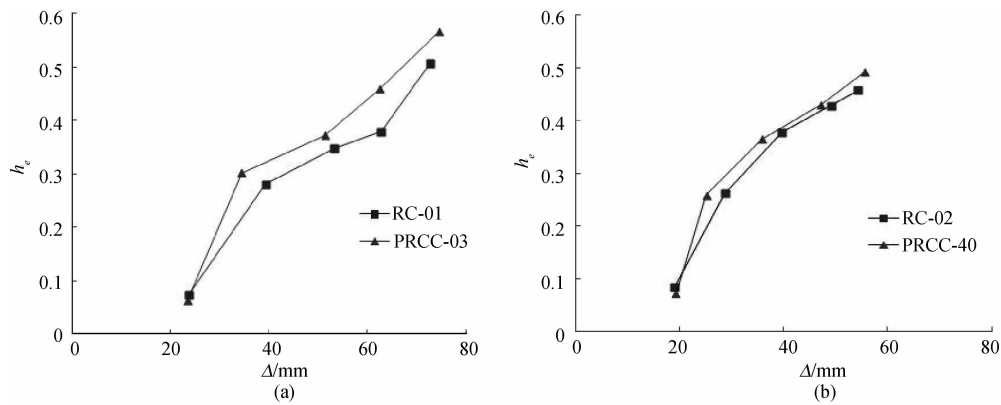


图 9 等效粘滞阻尼系数
Fig. 9 Equivalent viscous damping coefficients

3 结 语

由以上数据处理结果可得出如下结论:

(1)套筒浆锚连接柱和现浇普通箍筋柱的破坏形态类似,皆为压弯破坏,以水平裂缝和其延伸的斜裂缝为主,由于高强螺旋箍筋对核心混凝土的约束作用和外加钢板箍对柱的约束,套筒浆锚连接柱的破坏区域较小,破坏情况更轻微,故此种连接形式具有推广价值;

(2)套筒浆锚连接柱和现浇普通箍筋柱的滞回曲线在低轴压比下都比较饱满稳定,高轴压比下,由于外包钢板箍和高强螺旋箍筋的约束,前者滞回特性更好;

(3)在相同轴压比下套筒浆锚连接柱和现浇普通箍筋柱的承载能力接近,骨架曲线形状相似,具有相当的承载能力和抗震性能;

(4)相同轴压下两者位移延性接近,等效粘滞阻尼系数变化相似,说明套筒浆锚连接柱受力变化和现浇普通箍筋柱一样,可以承担相当的地震作用力;

套筒浆锚连接柱具有和现浇普通箍筋柱相当甚至更优越的工作能力,因此套筒浆锚连接是一种可靠的连接,将在我国装配整体式结构体系中发挥更大的作用.

参考文献 References

- [1] 范力. 装配式预制混凝土框架结构抗震性能研究[D]. 上海:同济大学, 2007.
FAN Li, Investigation on seismic behavior of joint precast concrete frame structures[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [2] 薛伟辰. 预制混凝土框架结构体系研究与应用发展[J]. 工业建筑, 2002, 3(11): 47-50
XUE Wei-chen. Research and application of precast concrete frame structure systems[J]. Industrial Construction, 2002, 3(11): 47-50.
- [3] SHEIK S. TOKLUCU M. Reinforced concrete columns confined by circular spirals and hoops[J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(5): 542-553.
- [4] SAATCIOGLU M. RAZVI S. Strength and ductility of confined concrete [J]. J. Structure. Eng. ASCE, 1992, 118(25): 1590-1607.
- [5] 姜维山, 于庆荣, 马宏伟, 等. 钢筋混凝土组合梁螺旋箍筋混凝土柱组合结构的研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(增刊 2): 156-160.
JIANG Wei-shan, Yu Qing-rong, Ma Hong-wei, et al. Research of the composite of steel and concrete composite beam-reinforced concrete column with spiral hoop[J]. Journal of Harbin University of Architecture. 2001, 34(S2): 156-160.
- [6] 史庆轩, 姜维山, 张兴虎, 等. 箍筋约束混凝土结构及其发展展望[J]. 建筑结构学报, 2009(增刊 2): 109-114
Shi Qing-xuan, Jiang Wei-shan, Zhang Xing-hu, et al. Development and prospects of hoop reinforcement confined concrete[J]. Journal of Building Structures, 2009(S2): 109-114
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部, GB/T50152-2012 混凝土结构试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, GB/T50152-2012. Testing methods of concrete structure [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部, GB50010-2010 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, GB50010-2010. Code for design of concrete structure [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

Experimental research on seismic performance of new fabricated column spliced by grout sleeves

ZHANG Xin-hu¹, WANG Jian¹, PAN Shu-bin², JIANG Wei-shan¹, LI Qing-ning¹, YU Qing-rong³

(1. College Of Civil Engineering, Xi'an University Of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. HebeiHechuang Architecture Energy saving and technology CO., LTD, Tianjin 300000, China;

3. College Of Architecture Engineering, Tianjin University, Tianjin 30072, China)

Abstract: A new connection type of frame fabricated column is proposed i. e. connection type of grout sleeves. By use of the comparable full scale model test method, two confined concrete columns with horizontal strengthened bars spliced by grout sleeves and two cast-in site column with plain stirrups were designed and constructed. Through reversed low cyclic loading test, compared with the cast-in site column with plain stirrups, the bearing capacity and the seismic performance of the confined concrete column with horizontal bar was studied. The test results indicated: This connection type is reliable. And under the same condition, the bearing capacity and the seismic behavior of the confined concrete column with horizontal strengthened bars spliced by grout sleeves are equal to the cast-in-site column with plain stirrups.

Key words: confined concrete column; assembled monolithic; grout sleeves; seismic behavior