

钢框架加强型梁柱连接的抗震机理研究

王玉田^{1,2}, 王 燕², 姜福香²

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘 要:钢框架结构在强烈地震荷载作用下,传统的栓焊连接(或全焊连接)节点表现出大量的脆性破坏,迫使人们重新认识钢结构的抗震性能,并探究具有良好抗震性能的梁柱刚性连接形式.本文考虑了对梁柱连接局部加强的方法来提高节点承载力和转移塑性铰位置的几种连接形式,通过低周反复荷载试验进行了验证.发现这种加强型梁柱连接虽然在地震荷载作用下对承载力的提高并不明显,但可以保证有效地将塑性铰外移,大大提高节点的延性,从而加强了节点的耗能能力,达到避免节点脆性破坏的目的.在此基础上,对加强型梁柱连接在地震荷载作用下的内力传递、变形发展和塑性铰外移的过程进行了深入的理论分析,揭示了加强型梁柱连接的抗震工作机理.

关键词: 钢框架; 加强型梁柱连接; 低周往复荷载试验; 塑性铰外移; 抗震机理

中图分类号: TU375.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2011)01-0031-05

钢结构框架结构构造简单,易于施工,具有良好的延性和耗能能力,抗震性能良好,得到广泛的应用。然而历史经验告诉我们,钢框架结构在地震来临时的表现并非如人所愿。国内外许多地区实际地震后的灾害调查表明,大量钢结构建筑在地震作用下遭到破坏,并没有表现出人们期望的抗震能力。国内外学者研究表明,解决钢框架梁柱连接抗震性能的基本途径是将塑性铰外移^[1-2]。其根本目的是将塑性铰从构造复杂的节点区域移到距柱面一定距离的梁上,避免塑性铰出现在刚度较差的连接处,保证结构构件塑性可以充分发展。

对梁柱连接处进行局部加强,降低连接处截面的应力水平,从而使节点域以外的截面首先进入塑性,就是塑性铰外移的方法之一^[3]。目前国内外对加强型梁柱连接研究尚比较少,国外主要是 T. Kim 等人^[4]所做的研究及 FEMA350^[5]推荐的设计方法,非常具有参考价值;国内的陈杰、苏明周等人^[6-7]主要研究了翼缘板加强型连接,余海群、钱稼茹等人^[8]亦做了十个足尺试件对加强型梁柱连接进行了试验研究。结果表明,加强型连接均表现出了良好的耗能性能,连接强度和刚度较好,能满足我国现行抗震规范的要求。但也出现部分试件塑性转动能力稍差,不能满足特殊抗弯钢框架连接塑性转动能力的要求。

1 加强型梁柱连接设计

对梁柱连接处进行局部加强就是在传统

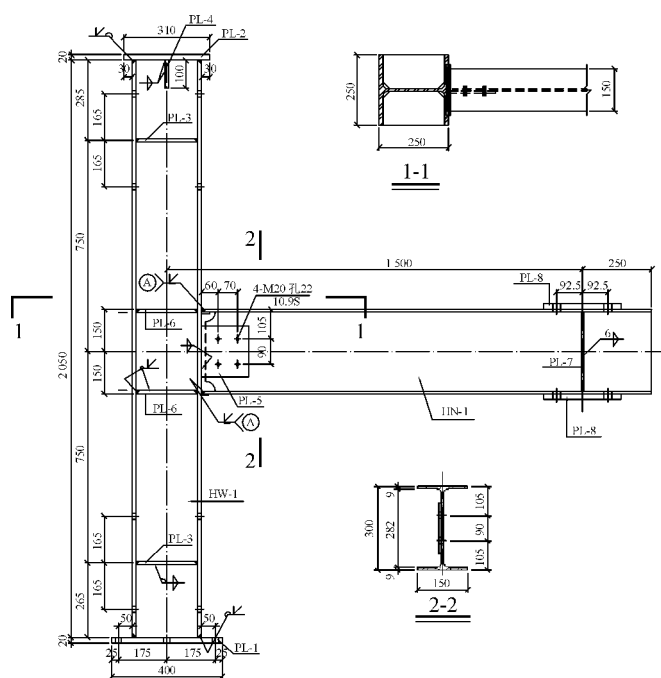


图 1 普通栓焊连接试件(NFS)详图

Fig. 1 Normal bolt-welded connection specimen (NFS)

收稿日期:2010-04-16 修改稿日期:2010-12-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50778092)

作者简介:王玉田(1972-),男,河南南阳人,博士研究生,工程师,主要从事结构试验研究。

梁柱连接基础上,对梁端翼缘或腹板进行加强,包括在梁端加设水平加劲肋、竖向加劲肋、盖板、边板、和梁腋等形式,称之为加强型梁柱连接.按构造形式划分,加强型梁柱连接分为翼缘板加强型、盖板加强型、侧板加强型、直接扩翼型四种类型^[9].为了进一步研究加强型梁柱连接在地震荷载作用下的内力传递、变形发展、和塑性铰外移的过程,分析其抗震工作机理,本文针对前述四种形式的加强型梁柱连接进行了 4 个试件的低周反复荷载试验,同时进行了 1 个普通栓焊连接形式的试件低周往复荷载对比性试验.

试验试件的截面选取依据我国现行《建筑抗震设计规范》的宽厚比要求,并按照我国《钢结构设计规范》、《高层民用建筑钢结构技术规程》的相关规定分别进行了验算,盖板加强型连接和翼缘加强型连接的设计要求参考了美国 FEMA350^[5]的规定.为使试验结果有更好的可比性,试件整体尺寸设计相同,仅在梁柱连接处做了适当调整,图 1 给出了试件整体尺寸和普通栓焊连接的细部参数,其余试件细部尺寸见图 2.

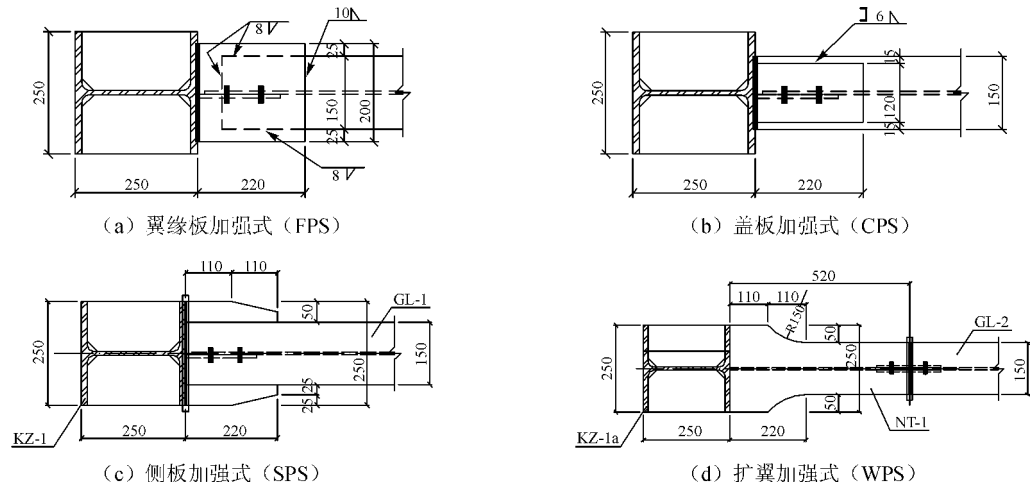


图 2 加强型梁柱连接试件详图

Fig. 2 Details of reinforced beam-column connections

2 低周反复荷载试验方法

低周反复荷载试验又称为拟静力试验,是目前研究结构或构件抗震性能应用最为广泛的试验方法,它是采用一定的载荷控制或变形控制对试件进行低周反复加载,使试件弹性变形、塑性变形最后直至破坏的一种试验方法.本次试验装置见图 3,采用电液伺服试验系统进行加载,由 MTS 伺服控制器进行试验控制.

试验时,将试件固定在反力架上,在柱两端通过柔性转换梁限制柱端水平位移但可以转动.柱顶采用液压千斤顶施加 850 kN 的轴向压力,约相当于柱全截面屈服压力的 40%.为防止梁发生整体失稳在梁端设置了侧向支撑.在梁端安装了一个量程为±200 mm 的位移计用于测量梁端竖向位移,在节点域附近放置了四个位移计,两个测量梁下翼缘与柱交接处的竖向位移和倾角,另外两个测量节点域上下加劲肋处的水平位移,用来计算节点域的转动.试验

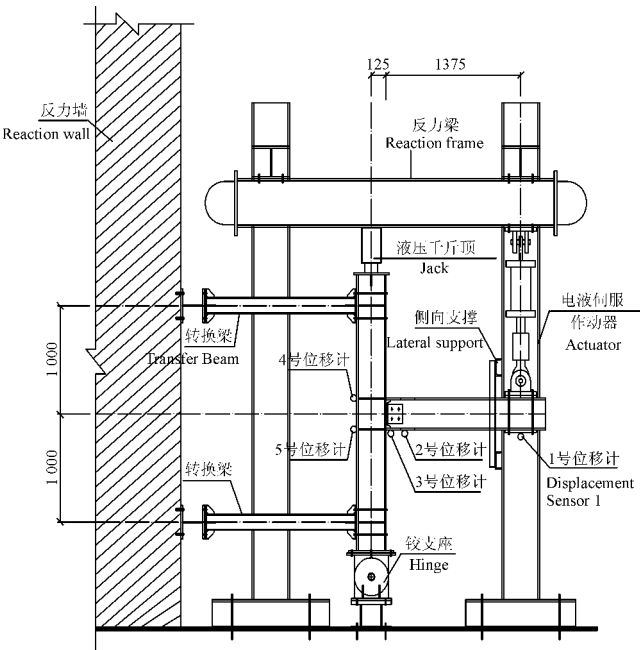


图 3 试验加载装置图

Fig. 3 Setup diagram of low-cyclic test

过程中通过伺服做动器在梁端施加反复荷载,为方便控制,试验过程采用位移控制,以梁端的竖向位移作为控制位移.加载过程参照美国 AISC 抗震规范推荐的快速试验方案,加载制度如图 4 所示.加载过程中,测量梁端位移及节点域的转角和位移,同时记录梁翼缘、腹板、柱翼缘及节点域的应变.

3 低周反复荷载试验结果及分析

3.1 试验结果

为使梁柱连接能够形成可靠的耗能体系,FEMA267 要求刚性连接试件在破坏时的塑性转角能够达到 0.03 rad.本次试验中的 4 个加强型连接试件都能满足这个要求,延性最好的 FPS 的最大塑性转角为 0.047 rad,最差的 WFS 塑性转角也有 0.037 rad,但普通连接试件 NFS 的最大塑性转角仅除 NFS 没有明显的屈服外,其余试件都首先在梁翼缘局部加强端出现屈服而后扩展到整个界面形成典型的塑性铰(见图 5).破坏时的各个试件的情况详见表 1,其中 P_u 为梁端最大荷载, θ_p 为试件的最大塑性转角.试件在梁端反复荷载作用下的滞回曲线见图 6,图中 P 为梁端荷载, Δ 为梁端的竖向位移.

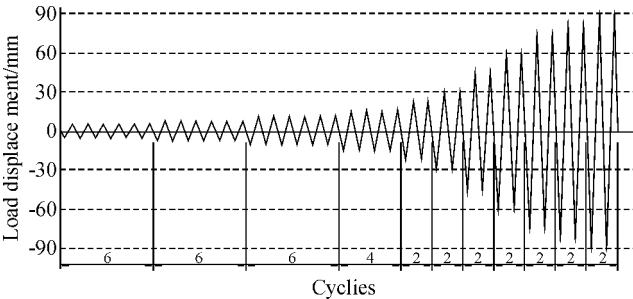


图 4 试验加载制度

Fig. 4 Loading program of the low-cyclic loading test



图 5 典型的破坏形态

Fig. 5 Failure patterns of specimens

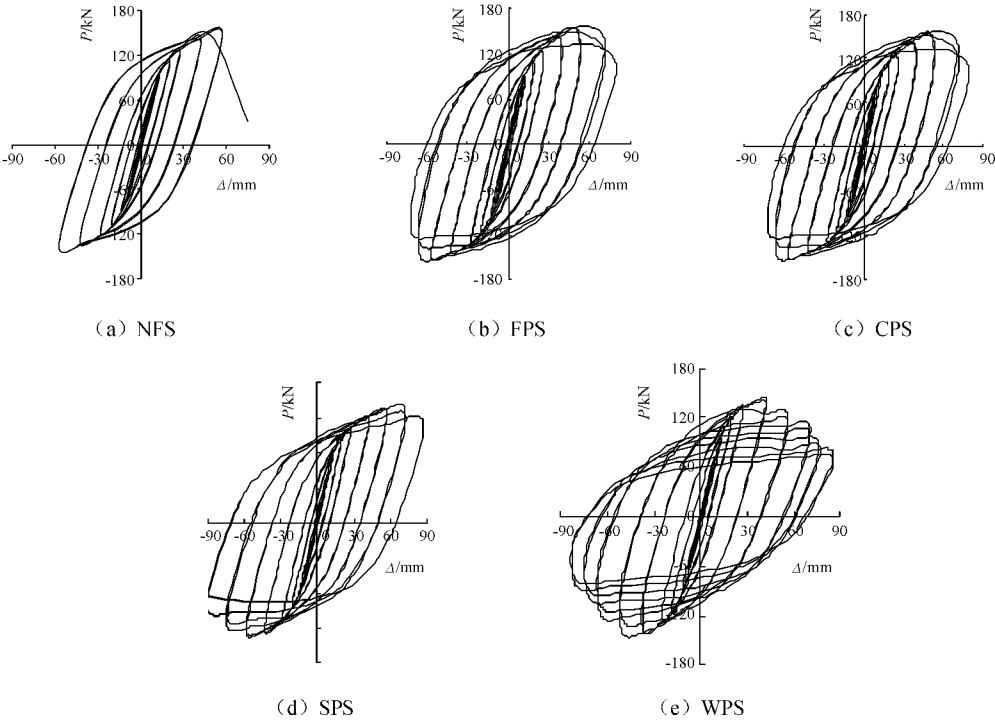


图 6 试验滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis curves of specimens

3.2 试验结果分析

所有试验加强型梁柱连接试件均完成了明显的塑性铰外移,与普通栓焊连接的试件有显著区别,构件延性发展充分.加强型梁柱连接试件均在距离局部加强端部约 1/4 梁高位置形成塑性铰,扩翼型加强连接试件则在扩翼端部出现塑性铰,远离柱翼缘,保护了节点.

表 1 试件破坏现象
Tab.1 Failure modes of the specimens

试件编号	$\theta_p/\%$ rad	P_u/kN	试件破坏形态
NFS	2.4	150	梁端下翼缘焊缝通过孔处突然裂开,脆性破坏
FPS	4.1	172	加强板外侧 8 cm 梁翼缘局部屈曲形成塑性铰
CPS	3.7	157	加强盖板外侧 8 cm 梁翼缘局部屈曲形成塑性铰
SPS	3.9	158	加强侧板外侧 7 cm 梁翼缘局部屈曲形成塑性铰
WPS	3.6	152*	扩翼末端梁翼缘局部屈曲形成塑性铰

* 经过加工误差修正后的数据

延性系数表征结构或构件在屈服后、破坏前,承受一定荷载条件下所具有的变形能力,它是评价结构或构件抗震性能的一个重要指标,反映了结构构件或材料在非弹性阶段的变形能力,采用极限位移与屈服位移的比值表达;等效粘滞阻尼系数则用来衡量结构构件的耗能能力,可按下图 7 中滞回曲线 ABC 与横轴所围的面积与△BOD 的面积比进行计算^[9].

表 2 给出了各试件的延性系数和等效粘滞阻尼系数.可以看出经过加强的梁柱连接延性系数均超过了 3.0,满足抗震性能标准要求,明显高于普通栓焊连接试件的延性系数,提高了钢结构连接的延性和结构在地震作用下的可靠度.加强型梁柱连接试件在低周反复荷载作用下滞回曲线远比普通试件的滞回曲线饱满得多.加强型梁柱连接试件的等效粘滞阻尼系数范围为 0.48~0.69,而普通试件的等效粘滞阻尼系数仅为 0.35,表明加强型梁柱连接试件耗能能力大大强于普通试件.

表 2 试件的延性系数和等效粘滞阻尼系数
Tab.2 Ductility factor and equivalent viscous damp coefficient

Specimen number	NFS	FPS	CPS	SPS	WPS
Ductility factor	2.27	3.52	3.40	3.75	4.13
Equivalent viscous damp coefficient	0.35	0.58	0.56	0.48	0.69

另外,试验结果同时表明加强型梁柱连接试件的承载能力均略高于普通试件承载能力,承载力提高比例约为 5%~15%.

4 加强型梁柱连接抗震机理分析

普通栓焊连接节点在荷载作用下,其柱外侧翼缘与梁接头处的对接焊缝附近处于高应力状态,局部首先屈服进入塑性,但由于柱翼缘约束限制了塑性扩展的范围,另外,梁柱连接焊缝不可避免存在初始缺陷,以及连接处构造的不完善造成的结构不连续,使得在梁端转角不大的情况下,梁柱连接焊缝或是构造薄弱部位就会发生脆性开裂而破坏;采用局部加强形式连接梁柱后,连接处截面模量的增加有效降低了该处的应力水平,使得最大应力出现在节点域以外,从而保护了梁柱连接不首先破坏,将塑性铰转移到梁柱连接外侧.因此,只要能够降低节点域应力水平的任何措施均应该能够达到外移塑性铰的目的.当然,应力水平降低的程度还要考虑到节点部位复杂的应力状态和构造缺陷等因素作进一步详细研究.

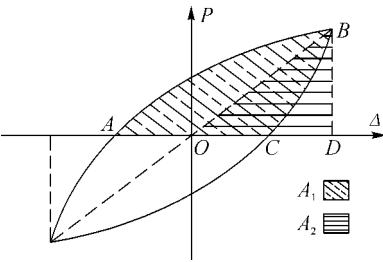


图 7 等效粘滞阻尼系数计算
Fig.7 Calculation diagram of equivalent viscous damp coefficient

加强型梁柱连接试件的塑性转角、总转角、等效粘滞系数及延性系数等各项抗震指标较普通栓焊节点均有较大提高,其根本原因在于材料塑性首先得以在远离节点域的构造简单的梁截面上发展并形成塑性铰,从而充分利用了钢材良好的塑性变形能力。然而,远离节点域的梁截面翼缘没有了柱翼板的约束,其塑性发展到一定程度后就会产生局部屈曲,限制了材料塑性的充分发展,因此其塑性变形能力必然和梁翼缘宽厚比、腹板支撑强度等有相关关系。本文中 WPS 试件等效粘滞阻尼系数明显高于其他形式的试件,就是因为扩翼型连接塑性铰位置的梁翼缘受到其后宽翼缘板的约束而使其塑性发展更充分。

经过局部加强的梁柱连接承载能力有所提高,是因为塑性铰转移后加载点到塑性铰的力臂缩短造成的,因此承载力的提高不能太大,原因是塑性铰的位置不可能无限制地向梁内转移,反过来又加重节点负担。所以,塑性铰位移位置的设计应使在梁端位移达到一定程度后,能够有效地耗散所传来的能量,实现确保“塑性铰在梁上出现”的延性抗震设计原则即可。

5 结束语

对局部加强型的梁柱连接的理论和试验研究均表明,只要构造措施得当,就能够有效降低梁柱连接处的应力水平,实现塑性铰外移,达到提高梁柱连接抗震能力的目的。但是,毕竟梁柱连接处构造复杂、施工条件恶劣,使得节点区域的应力状态异常复杂,要想对这种加强型梁柱连接透彻了解,还需要考虑更多的参数变化作进一步的详细研究。

参考文献 References

- [1] 王 燕. 钢框架塑性铰外移新型延性节点的研究与进展[J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(3): 1-6.
WANG Yan. Development of the research on new type ductile connection in steel moment resisting frames[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2006, 27(3): 1-6.
- [2] 卢小松, 顾 强. 钢框架梁柱栓-焊混合连接极限弯矩的计算[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(4): 491-498.
LU Xiao-song, GU Qiang. The moment capacity of welded beam to column in steel frame[J]. J. Xi'an Univ. Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2008, 40(4): 491-498.
- [3] CHI Chen-cheng, LIN Chun-Chou. Ductile moment connections used in steel column-tree moment-resisting frames[J]. Journal of Constructional Steel Research[J]. 2006, 62(8): 793-801.
- [4] KIM T, WHITTAKER A S. Cover-plate and flange-plate steel moment-resisting connections[J]. Structural Engineering, 2002, 128(4): 474-482.
- [5] FEMA-350, Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings[S]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency(FEMA), 2000.
- [6] 陈 杰, 苏明周. 钢结构焊接翼缘板加强式梁柱刚性连接滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 1-7.
CHEN Jie, SU Ming-zhou. Experimental study on steel moment resistant frame connections with welded flange plates[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 1-7.
- [7] 刘占科, 苏明周, 申 林, 等. 钢结构梁端翼缘腋形扩大式刚性梁柱连接实验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(3): 8-14.
LIU Zhan-ke, SU Ming-zhou, SHEN Lin, et al. Experimental study on steel moment resistant frame connections with enlarged beam flanges welded to column[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(3): 8-14.
- [8] 余海群, 钱稼茹. 足尺钢梁柱刚性连接节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(6): 18-27.
YU Hai-qun, QIAN Jia-ru. Experimental study on full-scale steel beam-to-column moment connections[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(6): 18-27.
- [9] 姚谦峰, 陈 平. 土木工程结构试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 221-222.
YAO Qian-feng, CHEN Ping. Civil engineering structure experiment[M]. Beijing: China architecture & building press, 2001: 221-222.

(下转第 080 页)

FENG Wei-min, FU Xiao-ling. Engineering Economics[M]. Beijing: Peking University Press, 2006: 59-60.

System analysis of surface water heat pump based on life cycle total cost method

WANG Yong¹, LAI Dao-xin¹, FAN Wei²

(1. Key Laboratory of Eco Environment of Three Gorges Region of Ministry of Education,
Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Material Science & Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Based on the structure and mathematical model of life cycle total cost in air-conditioning system, the life cycle total cost of a surface water heat pump system in Chongqing is calculated. The results show that the system settings are not reasonable; the LCC is not always the lowest, and sometimes it may be higher than other air-conditioning systems. Only the reasonable scheme can get the lowest LCC. Through analyzing the actual test data, the load characteristic, water supply energy consumption, water supply temperature and other main factors are found that can influence LCC of surface water heat pump. Finally, matters which require attention in obtaining the lowest LCC are pointed out.

Key words: *surface water heat pump; life cycle total cost; load characteristic; water supply energy consumption; water supply temperature*

Biography: WANG Yong, Ph. D., Associate Professor, Chongqing 400045, P. R. China, 0086-23-65120753, E-mail: wyfree@263.net

(上接第 035 页)

Aseismic mechanism of steel frame with reinforced beam-column connection

WANG Yu-tian^{1,2}, WANG Yan², JIANG Fu-xiang²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xian 710055, China;
2. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: Under intense seismic loading, brittle failure usually occurs in steel moment-resisting frames with traditional bolt-welded connections or full-welded connections. Then people are forced to be aware of the seismic performance of steel structures. And new forms of rigid beam-column connections with good seismic behavior have to be explored. In this paper, several kinds of beam-column connections with local reinforcement are employed to improve the bearing capacity of nodes and transfer the location of plastic hinges, which have been verified through low-cyclic reversed loading test. It is shown that although the increase of the bearing capacity of the reinforced beam-column connection is not obvious under seismic loading, it is sure that the plastic hinge can be effectively relocated and the ductility of the node can be greatly enhanced. Therefore, energy dissipation capability of the node can be improved, and brittle failure can be avoided in the node. Based on test results, further theoretical analysis of internal forces transmission, deformation development and the process of outward relocation of plastic hinge of the reinforced beam-column connections under seismic loading are carried out and the aseismic mechanism of reinforced beam-column connections is revealed.

Key words: *seismic mechanism; steel moment-resisting frame; reinforced beam-column connection; low-cyclic reversed loading test; plastic hinge outward relocation*

Biography: WANG Yu-tian, Candidate for Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13376489980, E-mail: wyt-wkl@163.com