

# 采用焊接箍筋的钢筋混凝土梁斜截面 受剪性能试验研究

杨 勇<sup>1,2</sup>, 田 静<sup>1</sup>, 张紫微<sup>1</sup>

(1.西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2.西部建筑科技大学国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

**摘要:** 焊接箍筋具有节约钢材、节约工时、方便施工、可工业化和标准化生产等性能优势, 具有良好应用前景. 为研究采用焊接箍筋的钢筋混凝土梁斜截面抗剪性能, 分别对 4 个采用焊接箍筋混凝土梁和 4 个采用传统绑扎箍筋混凝土梁试件的受剪性能试验研究. 结合试验研究, 考察了焊接箍筋梁和普通绑扎箍筋梁试件裂缝开展过程和梁受剪破坏形态, 分析了各试件抗剪承载能力和箍筋应力发展过程. 试验研究结果表明在钢筋混凝土梁中以焊接箍筋替代传统绑扎箍筋是作为抗剪箍筋是可行的, 主要表现在焊接箍筋混凝土梁与普通箍筋混凝土梁的裂缝开展、变形发展和破坏形态基本相同, 并且焊接箍筋混凝土梁的极限抗剪承载力略高于普通箍筋混凝土梁. 另外, 经对比分析, 焊接箍筋混凝土梁斜截面受剪承载力稍高于现行规范建议的钢筋混凝土梁斜截面承载力计算公式的计算结果. 本文研究结果可为焊接箍筋混凝土梁的后续研究和工程推广应用提供理论依据.

**关键词:** 焊接箍筋; 钢筋混凝土梁; 受剪性能; 破坏形态; 抗剪承载力

**中图分类号:** TU375.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)05-0643-08

焊接箍筋是钢筋混凝土结构的一种新型箍筋形式, 主要构造思想为箍筋各肢之间全部采用焊接连接, 目前应用较广泛的是闪光对焊焊接箍筋. 笔者近年来开发研究了一种采用电阻点焊连接的焊接箍筋形式(如图 1). 该新型焊接箍筋全部采用电阻点焊机进行工厂连接, 操作简单、无需焊剂, 相对传统绑扎箍筋具有良好性能优势, 主要表现在以下几方面: (1) 节约钢筋用量: 由于焊接箍筋无需弯钩和重叠, 因此, 钢筋用量可大大减小; (2) 制作标准、质量可靠: 箍筋焊接一般采用钢筋切割机标准切割、专用闪光对焊机和电阻点焊机焊接, 箍筋制作尺寸准确, 焊接质量统一可靠; (3) 现场施工进度快: 由于焊接箍筋可以在工厂预制生产制作, 现场工地不用弯制箍筋, 大大提高劳动生产率; (4) 混凝土浇筑容易: 由于焊接箍筋没有弯钩, 不会卡振动棒, 还可以避免绑扎箍筋在钢筋密集区对混凝土浇筑的阻碍影响. 总体而言, 箍筋焊接技术在采用工厂机械化焊接加工工艺后, 具有制作准确、施工方便、节约成本和节约工时等显著性能优势, 具有显著经济效益和社会效益.

在钢筋混凝土梁中, 箍筋主要承受剪力, 直接影响梁斜截面的抗剪承载力<sup>[3-12]</sup>. 为促进该新型焊接箍筋的推广应用, 项目组开展了 4 组 8 个试件的焊接箍筋混凝土梁与普通绑扎箍筋混凝土梁的受剪性能的对比试验研究, 对焊接箍筋混凝土梁和传统绑扎箍筋混凝土梁受剪性能进行比较研究, 可为进一步建立焊接箍筋混凝土梁受剪性能设计方法提供依据.

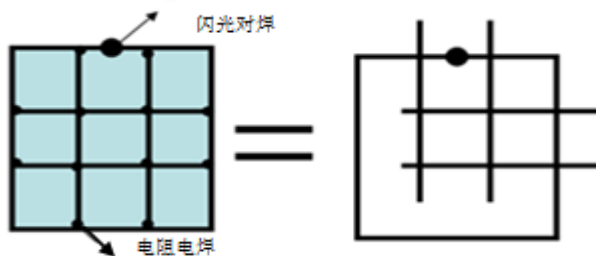


图 1 焊接箍筋构造示意图  
Fig.1 Welding stirrup



图 2 试验所采用焊接箍筋照片  
Fig.2 Welding stirrups photos

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计

本次试验共设计了 8 个钢筋混凝土矩形截面梁试件, 试件截面尺寸 200x450mm, 跨度为 2000mm, 梁

收稿日期: 2013-12-02 修改稿日期: 2014-10-13

基金项目: 西安市科技计划项目.

作者简介: 杨勇 (1976-), 男, 教授, 博士, 博导, 主要从事钢-混凝土组合结构和钢筋混凝土方向的研究教学工作. E-mail: Yyhhp2004@163.com

底部配 6 根直径 25 的纵筋,采用双肢箍的梁试件上部配 2 根直径 16 的纵筋,采用三肢箍的梁试件上部配 3 根直径 16 的纵筋;箍筋分为焊接箍筋和普通绑扎箍筋两种,双肢箍箍筋间距 100,三肢箍箍筋间距 150,试件具体参数见表 1,试件所采用的焊接箍筋形式详见图 2,试件配筋如图 3 所示。

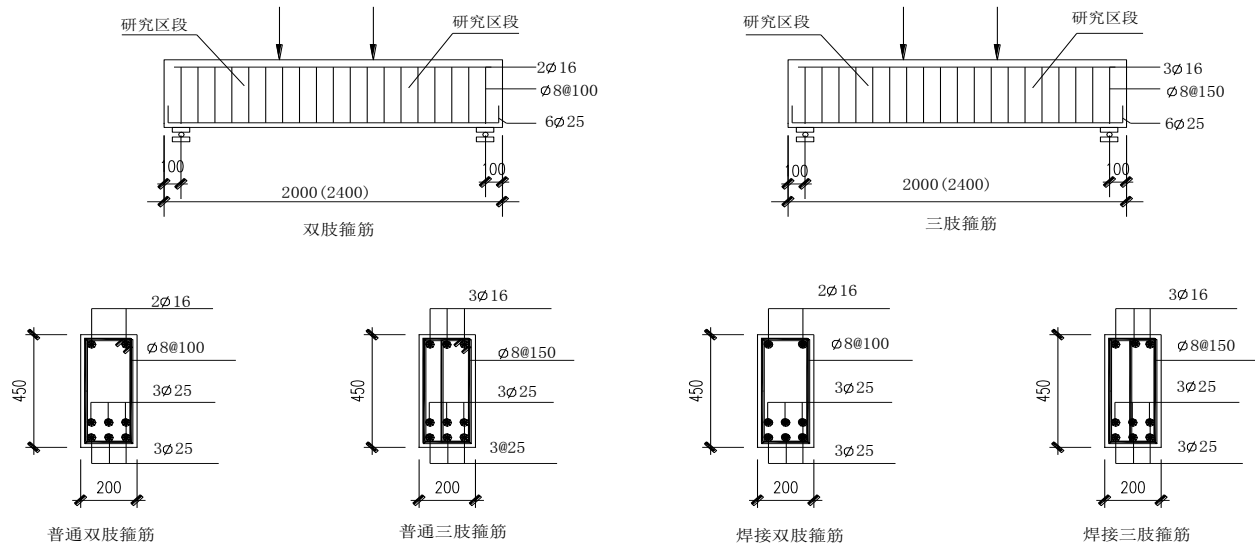


图 2 试件几何尺寸及配筋  
Fig.2 Geometric parameters and reinforcement of specimen

表 1 试件参数  
Tab.1 Parameters of specimens

试件 编号	试件尺寸 b×h×l	实配箍筋 HRB335	受拉钢筋 HRB400	受压钢筋 HRB400	剪跨比	箍筋体积 配筋率	箍筋 /N.mm <sup>-2</sup>
PJL-1	200×450×2000	Φ8@100 双肢绑扎箍筋	6Φ25	2Φ16	1.54	0.005	570.69
HJL-1	200×450×2000	Φ8@100 双肢焊接箍筋	6Φ25	2Φ16	1.54	0.005	601.67
PJL-2	200×450×2000	Φ8@100 双肢绑扎箍筋	6Φ25	2Φ16	1.67	0.005	570.69
HJL-2	200×450×2000	Φ8@100 双肢焊接箍筋	6Φ25	2Φ16	1.67	0.005	601.67
PJL-3	200×450×2000	Φ8@100 三肢绑扎箍筋	6Φ25	3Φ16	1.67	0.005	570.69
HJL-3	200×450×2000	Φ8@100 三肢焊接箍筋	6Φ25	3Φ16	1.67	0.005	601.67
PJL-4	200×450×2000	Φ8@100 三肢绑扎箍筋	6Φ25	3Φ16	1.80	0.005	570.69
HJL-4	200×450×2000	Φ8@100 三肢焊接箍筋	6Φ25	3Φ16	1.80	0.005	601.67

1.2 材料力学性能

构件纵筋均为 HRB400 级钢筋,箍筋均为 HRB335 级钢筋,混凝土均采用 C30,混凝土材料性能试验数据见表 2,箍筋及纵筋材料性能数据分别见表 3 和表 4。

表 2 混凝土立方体抗压强度测试结果  
Tab.2 Comprehensive strength of concrete

试块编号	$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_t/\text{MPa}$	$f_c/\text{MPa}$
试块 1	40.36	3.04	33.68
试块 2	42	3.13	32.89
试块 3	40	3.02	33.7
平均值	40.79	3.07	33.42

表 4 纵筋力学性能  
Tab.4 Mechanical properties of longitudinal bars

试件编号	1	2	3	平均值
屈服强度 /Mpa	430	465	445	446.67

表 3 箍筋力学性能  
Tab.3 Mechanical properties of stirrup

箍筋 类型	钢筋编号	钢筋直径 /mm	钢筋强度 等级	屈服强度 /MPa
普通 箍筋	P-1	8	HRB335	587.505
	P-2	8	HRB335	576.779
	P-3	8	HRB335	578.397
	平均值			580.893
焊接 箍筋	H-1	8	HRB335	595.0
	H-2	8	HRB335	575.0
	H-3	8	HRB335	635.0
	平均值			601.7

### 1.3 加载方案及测点布置

试验采用单调静力加载试验方法,加载制度按照现行混凝土结构试验方法标准执行.所有数据均通过TDS-602型数据采集仪全自动采集,位移计布置于梁跨中和加载点位置以测得梁的整体变形,实际加载装置如图4.在试验加载过程中,分级观察和描画梁的裂缝发展,并记录各裂缝出现时的荷载值以及裂缝宽度值.在梁弯剪段的箍筋布置电阻应变片,量测箍筋应变发展,电阻应变片布置如图5所示.



图4 加载装置图  
Fig 4 Loading setup

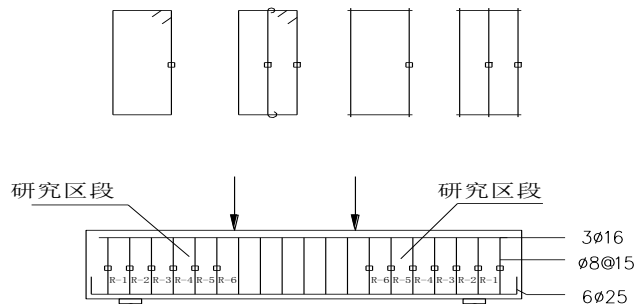


图5 测点布置及应变片次序编号  
Fig 5 Measuring points and the numbering of stirrups

### 1.4 试验现象及破坏形态

试验研究结果表明,焊接箍筋梁与普通箍筋梁的裂缝开展过程和破坏形态基本相同,各试件最终均发生剪切破坏.加载初期,跨中纯弯段首先产生竖向弯曲裂缝,梁内的应力较小,荷载基本由混凝土承担.随着荷载的增加,首先在梁的跨中出现细小的竖向裂缝,在跨中附近的位置竖向裂缝不断增多,并随着荷载增加纯弯段裂缝自下而上延伸.当荷载达到某一数值时,梁出现两种形式的斜裂缝,一种为弯剪斜裂缝,一种为腹剪斜裂缝.通过观察发现,腹剪斜裂缝比弯剪斜裂缝的发展速度更快更明显.进一步加荷载,裂缝明显加宽而剪压区受压混凝土的面积不断减小,最终剪压区混凝土被压碎,试件发生剪破坏.各试件裂缝发展过程如图6所示,试件最终破坏形态见图7.

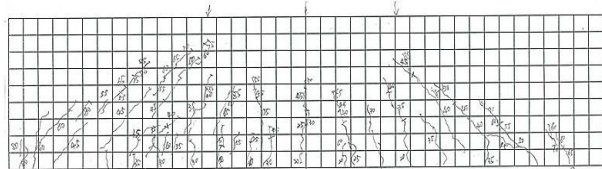


图6(a) PJJ-1 裂缝开展图  
Fig 6(a) Crack development figure of PJJ-1

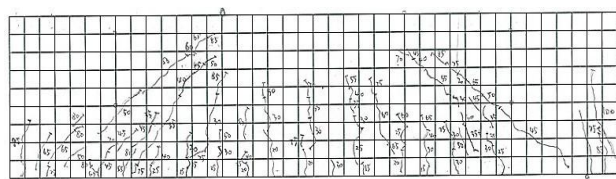


图6(b) HJJ-1 裂缝开展图  
Fig 6(b) Crack development figure of HJJ-1

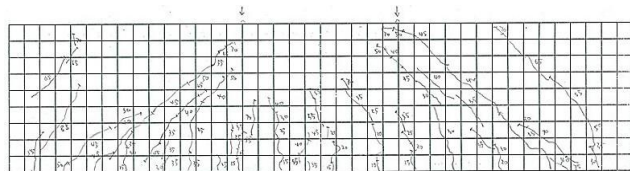


图6(c) PJJ-2 裂缝开展图  
Fig 6(c) Crack development figure of PJJ-2



图6(d) HJJ-2 裂缝开展图  
Fig 6(d) Crack development figure of HJJ-2

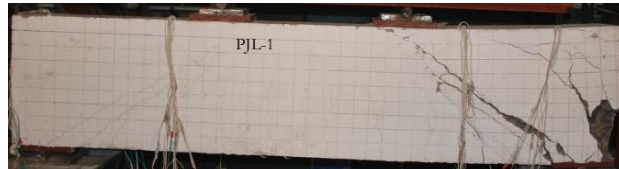


图7(a) PJJ-1 最终破坏形态  
Fig 7(a) Failure modes and crack pattern of PJJ-1



图7(b) HJJ-1 最终破坏形态  
Fig 7(b) Failure modes and crack pattern of HJJ-1

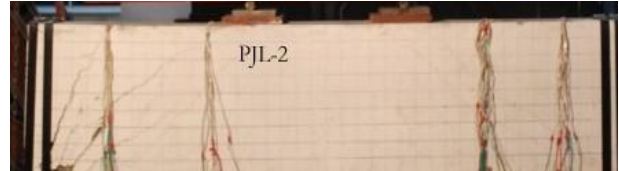


图7(c) PJJ-2 最终破坏形态  
Fig 7(c) Failure modes and crack pattern of PJJ-2

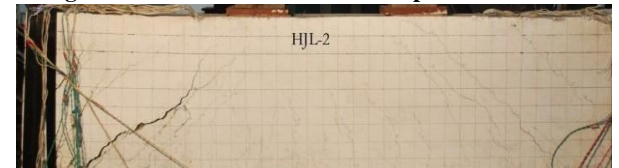


图7(d) HJJ-2 最终破坏形态  
Fig 7(d) Failure modes and crack pattern of HJJ-2



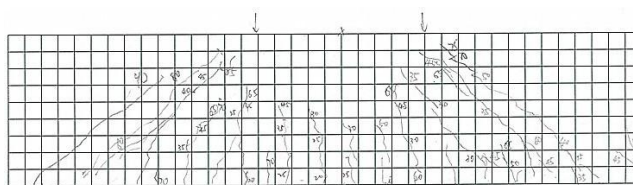


图 6(e) PJJL-3 裂缝开展图  
Fig 6(e) Crack development figure of PJJL-3



图 6(f) HJJL-3 裂缝开展图  
Fig 6(f) Crack development figure of HJJL-3

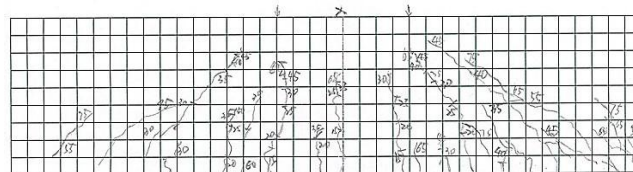


图 6(g) PJJL-4 裂缝开展图  
Fig 6(g) Crack development figure of PJJL-4

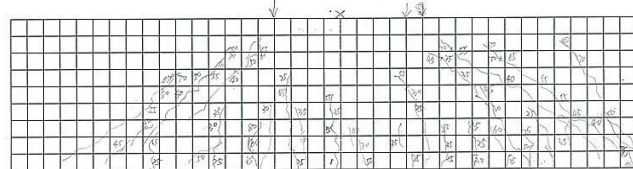


图 6(h) HJJL-4 裂缝开展图  
Fig 6(h) Crack development figure of HJJL-4  
图 6 试件裂缝图  
Fig 6 Crack development figure of species



图 7(e) PJJL-3 最终破坏形态  
Fig 7(e) Failure modes and crack pattern of PJJL-3

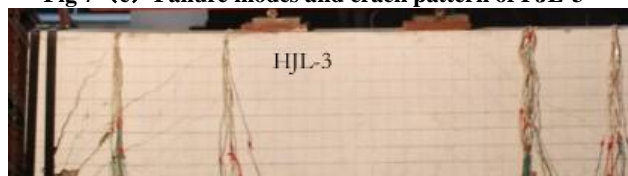


图 7(f) HJJL-3 最终破坏形态  
Fig 7(f) Failure modes and crack pattern of HJJL-3

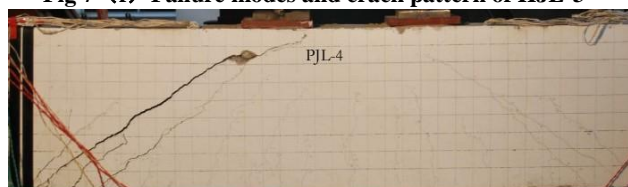


图 7(g) PJJL-4 最终破坏形态  
Fig 7(g) Failure modes and crack pattern of PJJL-4

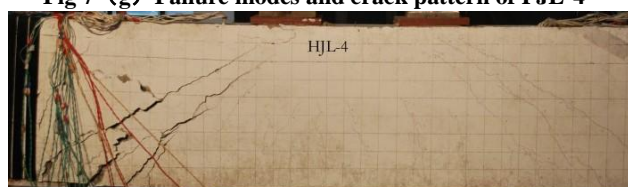
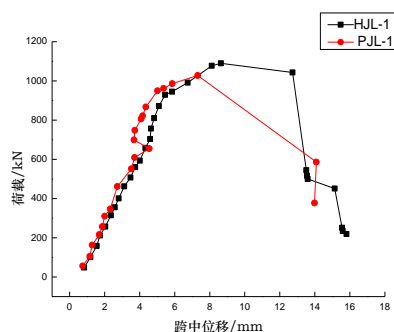


图 7(h) HJJL-4 最终破坏形态  
Fig 7(h) Failure modes and crack pattern of HJJL-4  
图 7 试件破坏形态  
Fig7 Failure modes and crack pattern

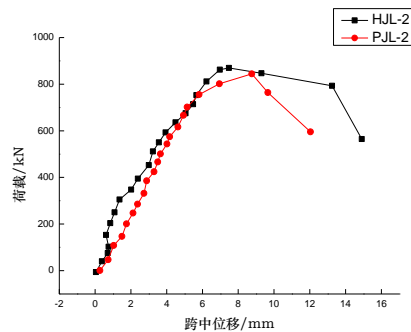
## 2 试验结果及分析

### 2.1 荷载-挠度曲线

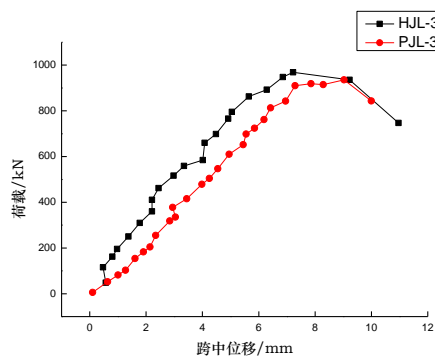
图 8 为试验实测各试件的荷载-跨中挠度试验曲线,由试件荷载-跨中挠度曲线图可以得到总体变化规律:梁的跨中挠度从开始加载时就随着荷载增加而增加,整个挠度曲线比较平滑,接近线性增加的关系.从曲线发展趋势来看,大体上可以分为两个阶段.第一阶段,挠度随着荷载的增加而呈现线性增加趋势,这个阶段,梁的裂缝不断发展,致使梁的刚度降低.第二个阶段,挠度突然增加,而荷载变化不大,出现较大的弯折点,这是因为此时梁接近破坏荷载,刚度退化非常明显,因此挠度增加较多.由图 8(a)和图 8(b)中可看出,双肢焊接箍筋混凝土梁与双肢普通混凝土梁的荷载-挠度曲线基本相同.由图 8(c)和图 8(d)中可看出,三肢焊接箍筋混凝土梁刚度较好于三肢普通箍筋混凝土梁,且极限承载力明显高于三肢普通箍筋混凝土梁.



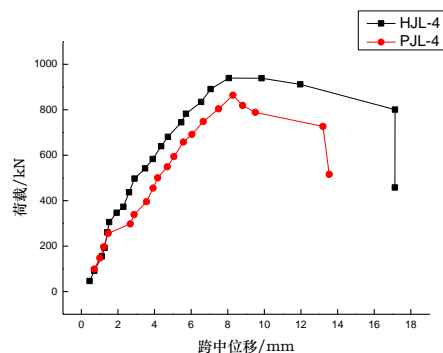
PJJL-1 与 HJJL-1 荷载-跨中挠度曲线



PJJL-2 与 HJJL-2 荷载-跨中挠度曲线



PJJL-3 与 HJL-3 荷载-跨中挠度曲线



PJJL-4 与 HJL-4 荷载-跨中挠度曲线

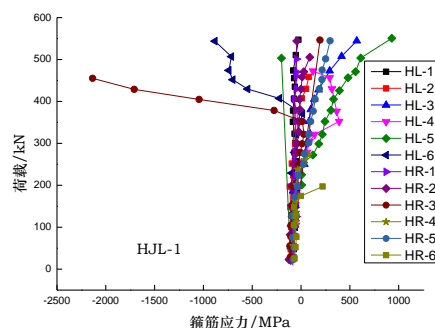
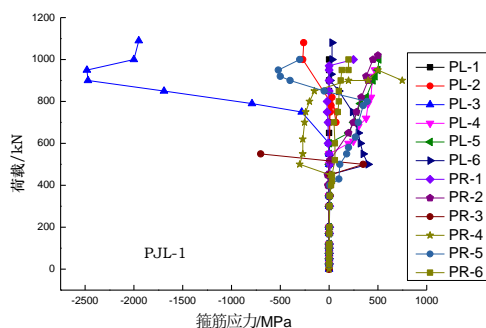
图 8 梁荷载-跨中挠度曲线

Fig 8 Load-deflection curves of beams

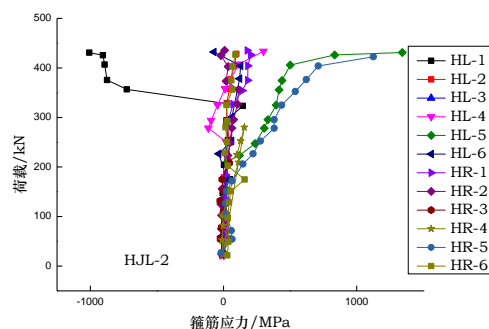
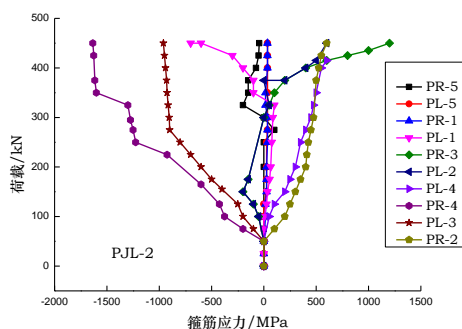
## 2.2 箍筋的荷载-应变曲线

图 9 为各试件的荷载-箍筋应力曲线. 从图 9 可以看出, 在加载初期, 箍筋的应变非常小, 几乎为零. 当荷载增加到一定程度时, 应变突然增加. 如图 9 (a), 当荷载小于 400kN 时, 箍筋应变非常小, 构件所承受的荷载主要由混凝土承担. 当超过这个值之后, 箍筋应变发生较大增加, 这是因为此时梁出现了较多的斜裂缝而使箍筋应变显著增加. 在后期, 主斜缝穿过的区域箍筋先达到屈服极限, 如图 9 (a) 的 PL-3 和图 9 (b) HR-3.

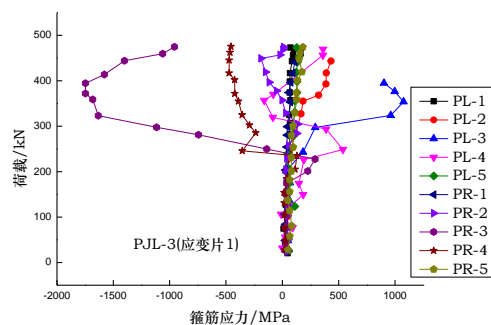
由图 9 可看出, 箍筋在剪跨区的应变随着位置变化而变化, 位于剪跨区中段的箍筋应变较支座附近以及加载点附近箍筋的应变大, 这主要是因为两端的箍筋受局部压应力的影响而致. 而剪跨区中段的混凝土产生较大的主斜裂缝, 导致箍筋承担了较大的拉应力而使箍筋应变较大.



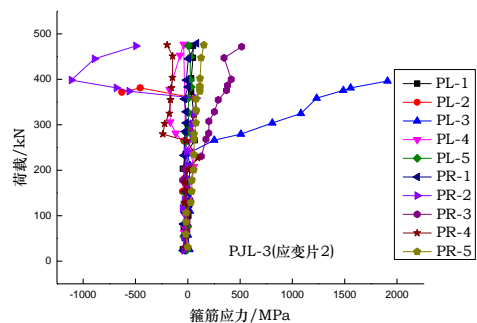
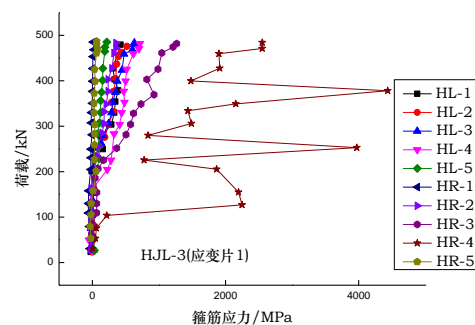
(a) PJJL-1 与 HJL-1



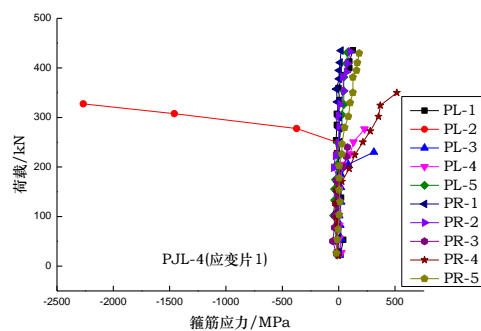
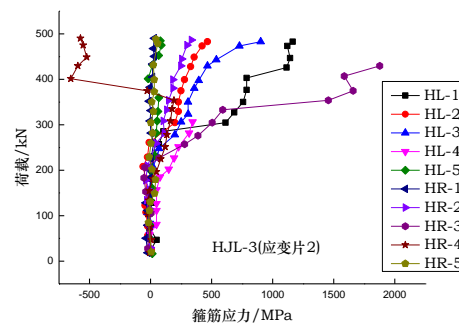
(b) PJJL-2 与 HJL-2



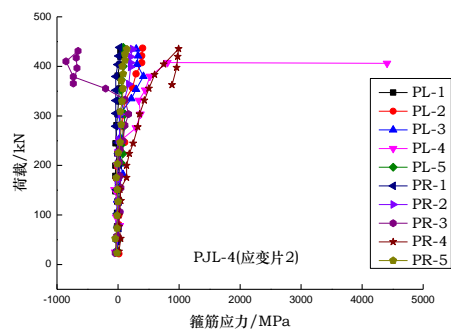
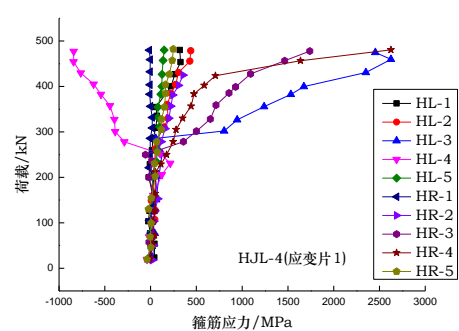
(c) PJL-3 与 HJL-3 (应变片 1)  
(c) PJL-3 and HJL-3 (No.1 strain gauge)



(c) PJL-3 与 HJL-3 (应变片 2)  
(c) PJL-3 and HJL-3 (No. 2 strain gauge)



(d) PJL-4 与 HJL-4 (应变片 1)  
(d) PJL-4 and HJL-4 (No. 1 strain gauge)



(d) PJL-4 与 HJL-4 (应变片 2)  
(d) PJL-4 and HJL-4 (No. 2 strain gauge)

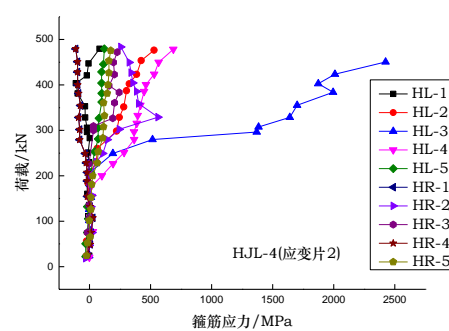


图9 各试件荷载-箍筋应力曲线  
Fig 9 Load-stirrup stress curve of specimens

图 10 为焊接箍筋梁与普通箍筋梁剪跨区中段应变大的箍筋应力对比曲线. 从图 (a) 知, PJJ-1 与 HJJ-1, 双肢焊接箍筋与双肢普通箍筋应力随荷载变化趋势基本一致. 根据图 (b) 知, PJJ-2 与 HJJ-2 相比, 两者变化趋势差别不大, 相比于普通箍筋, 焊接箍筋应变较小. 根据图 (c) 图 (d) 知, 2 号应变片位置焊接箍筋与普通箍筋的曲线变化趋势基本一致, 1 号应变片位置焊接箍筋与普通箍筋稍有不同, 在同样荷载作用下焊接箍筋的应变偏小.

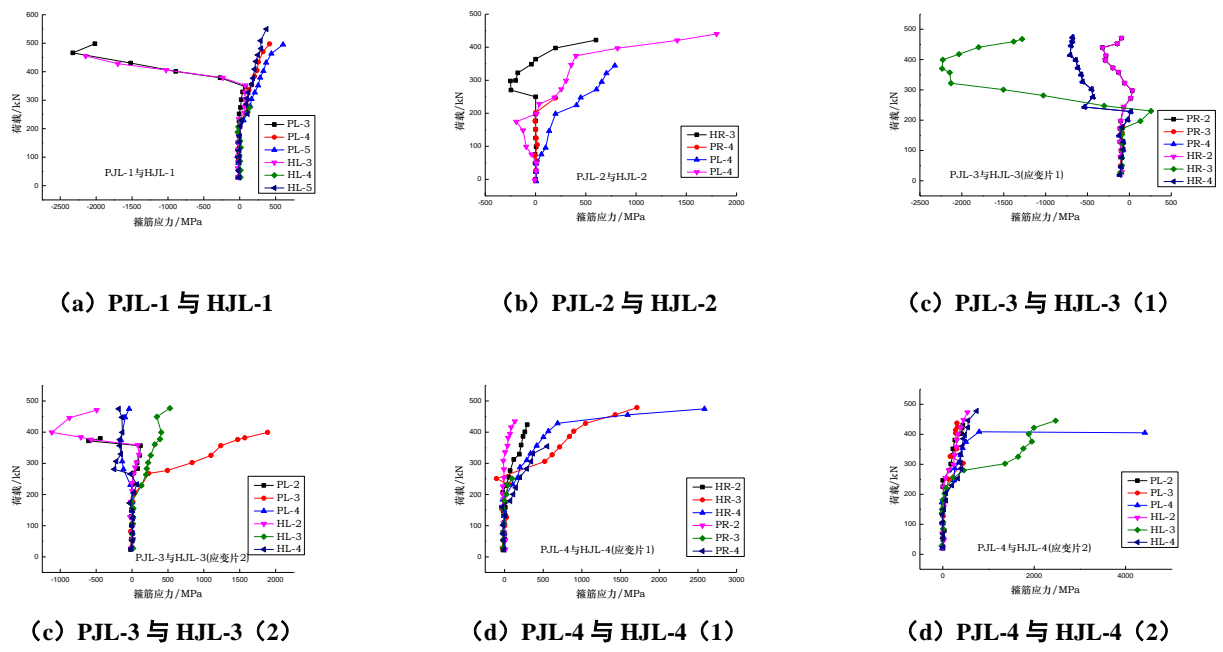


图 10 焊接箍筋与普通箍筋荷载-箍筋应力曲线对比图

Fig 10 Comparison of load- stirrup stress curve of welding stirrup with ordinary stirrup

2.3 极限承载能力

按我国现行混凝土设计规范 (GB50010-2010) 建议的受剪承载力计算公式 (1) 对各梁试件抗剪承载力进行计算, 计算结果列于表 5 中, 其中受剪承载力计算时, 混凝土和箍筋强度全部采用试验实测均值. 从表 5 可看出, 焊接箍筋混凝土梁试件的受剪承载力试验实测值均稍高于普通箍筋混凝土梁试件. 另外, 根据公式 (1) 计算所得受剪承载力计算结果低于试验所得抗剪承载力, 试验结果与计算结果比值的平均值为 1.235 5, 离散系数为 0.058 6, 表明规范所建议的计算公式略显保守, 从混凝土结构设计的“强剪弱弯”设计理念角度来看, 在实际工程应用中可以直接采用公式 (1) 计算焊接箍筋混凝土梁抗剪承载力. 但从研究角度来看, 亦有必要对抗剪承载力公式进行深入分析研究.

$$V_u = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$$

(1)

表 5 受剪承载力理论计算值与试验值比较  
Tab.5 Comparison between calculation and test values

试件编号	试件	剪跨比	$V_u = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$ /kN	实际抗剪承载力 /kN	实际值/理论值
PJJ-1	普通双肢箍筋梁	1.54	389.021 9	514.52	1.323
HJJ-1	焊接双肢箍筋梁	1.54	401.115	546.05	1.361
PJJ-2	普通双肢箍筋梁	1.67	380.928 3	448.195	1.177
HJJ-2	焊接双肢箍筋梁	1.67	393.021 5	464.09	1.181
PJJ-3	普通三肢箍筋梁	1.67	382.189 6	471.945	1.235
HJJ-3	焊接三肢箍筋梁	1.67	394.351 1	481.375	1.221
PJJ-4	普通三肢箍筋梁	1.80	374.847 6	432.55	1.154
HJJ-4	焊接三肢箍筋梁	1.80	387.009 1	476.64	1.232

### 3 结语

本文通过对4组8个钢筋混凝土梁试件的受剪性能试验研究,考察了焊接箍筋混凝土梁的破坏形态及抗剪性能,并与传统绑扎箍筋混凝土梁受剪性能进行了对比研究,初步得出以下结论:

(1) 焊接箍筋混凝土梁与普通箍筋混凝土梁的受剪性能相似,其裂缝开展、破坏形态和破坏机理基本相同;

(2) 焊接箍筋混凝土梁的极限抗剪承载力略高于普通箍筋混凝土梁;

(3) 焊接箍筋混凝土梁斜截面受剪承载力试验值稍高于现行规范建议的钢筋混凝土梁斜截面承载力计算公式的计算结果;

(4) 在钢筋混凝土梁中以焊接箍筋替代传统绑扎箍筋是作为抗剪箍筋是可行的。

### 参考文献

### References

- [1] 杨秀敏, 杨力列. 焊接封闭式箍筋应用技术[J]. 广东土木与建筑, 2003, (5):41-43.  
YANG XiuMin, YANG Lilie. Welding closed stirrups technology application[J]. Guangdong civil engineering and architecture, 2003, (5):41-43.
- [2] 任珍玉, 蒋怀银. 封闭式对焊箍筋在贵阳腾达广场工程中的应用[J]. 四川建筑, 2005, 25 (2):125-126.  
REN Zhenyu, JIANG Huaiyin. The use of closed butt welded stirrups in Guiyang Plaza Project in Tengda[J]. Sichuan building, 2005, 25(2):125-126.
- [3] 白家荣. 高强箍筋高强混凝土梁受剪性能试验研究及有限元分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.  
BAI Jiarong. Experiments and Finite Element Analysis of Shear Behavior for High Strength Concrete Beams with High Strength Stirrups[D]. Xi'an: College of Civil Engineering Xi'an University, 2009.
- [4] 洪炳钦, 杨俊杰, 杨道, 等. 叠合梁斜截面抗剪性能的试验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2007, 35 (04):464-468.  
HONG Bingyin, YANG Junjie, YANG Qiu, et al. Experimental research on the shearing resistance strength of oblique section of composite beam[J]. Journal of Zhejiang University of technology, 2007, 35(04):464-468.
- [5] 张晓亮, 屈文俊. 无腹筋 GFRP 混凝土梁抗剪性能试验[J]. 中国公路学报, 2010, 23 (05):51-57.  
ZHANG Xiaoliang, QU Wenjun. Shear Behavior Test of GFRP-reinforced Concrete Beams Without stirrups[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(05):51-57.
- [6] 刘彬, 张建仁, 王磊, 等. 钢筋混凝土梁抗剪承载力计算理论综述(下)[J]. 中外公路, 2011, 31 (03):109-113.  
LIU Bin, ZHANG Jianren, WANG Lei, et al. Calculation of theoretical review of the shear bearing capacity of reinforced concrete beams [J]. Chinese and foreign highway, 2011, 31(03):109-113.
- [7] 卜良桃, 曾坚, 李为. 钢纤维水泥砂浆钢筋网加固 RC 梁抗剪试验研究[J]. 湖南大学学报, 2012, 39 (2):7-11.  
BO Liangtao, ZENG Jian, LI Wei. Shear Behavior of RC Beams Strengthened by Steel Fiber Ferrocement Mortar[J]. Journal of Hunan University, 2012, 39(2):7-11.
- [8] 李进. 高强箍筋混凝土梁受剪性能研究及有限元分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.  
LI Jin. Shear Properties and finite element analysis of Reinforced Concrete Beams with High-strength Stirrup[D]. Xi'an: College of Civil Engineering Xi'an University, 2008.
- [9] 王铁成, 李艳艳, 戎贤, 等. 集中荷载下高强箍筋混凝土梁的抗剪性能[J]. 自然灾害学报, 2006, 15 (5):172-177.  
WANG Tiecheng, LI Yangyang, RONG Xian, et al. Shear behavior of reinforced concrete beam with High-strength stirrup under concentrate load[J]. Journal of natural disasters, 2006, 15(05):172-177.
- [10] 李美云. HRB400 级钢筋混凝土构件受力性能的试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2003.  
LI Meiyun. The Study of the Mechanical Property of HRB400 Reinforced Concrete Members[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University 2003.
- [11] 吕艳梅. 高强箍筋高强混凝土梁抗剪性能试验研究与理论分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.  
Lv Yanmei. Theoretical and Experimental Research on Shear Capacity of High Strength Concrete Beams with High Strength Stirrups[D]. Changsha: Hunan university, 2007.
- [12] 中华人民共和国建设部. 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 construction of the P R China, GB50010-2002 code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture and Building press, 2002.
- [13] 丁艳梅, 候建国, 肖望强. 钢筋混凝土梁斜截面受剪承载力统一计算公式的研究[J]. 武汉大学学报, 2009, 42(5):198-202.  
DING Yanmei, HOU Jianguo, XIAO Wangqiang. Study of unified formula for calculating shear strength of reinforced concrete beams 'inclined cross - section[J]. Journal of Wuhan University, 2009, 42:198-202.
- [14] KREFELD W J, THURSTON C W. Studies of the shear and diagonal tension strength of simply supported reinforced concrete beams [J]. ACI Structural Journal, 1966, 63(4):451-476.
- [15] ANGELAKOS D, BENTZ E C, COLLINS M P. The effect of concrete strength and minimum stirrups on the shear strength of large members [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98 (3): 290-300.
- [16] CLARK A P. Diagonal tension in reinforced concrete beams[J]. ACI Structural Journal, 1951, 23(2):145-156.
- [17] SARSAM K F, AI-Musawi J M S. Shear design of high and normal strength concrete beams with web reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 1992, 89(6):658-664.
- [18] TAN K H, TENG S, KONG F K., LU H Y. Main tension steel in high strength concrete deep and short beams[J]. ACI Structural Journal 1997, 96(6):752-768.

(下转第 659 页)