

# 高强箍筋高强混凝土梁抗剪试验研究

杨文星<sup>1,2</sup>, 史庆轩<sup>1</sup>, 张成中<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安科技大学建筑工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:**普通配筋的高强混凝土构件抗剪性能较差, 脆性性质明显. 配置高强箍筋能改善高强混凝土梁的抗剪性能, 减小脆性性质. 通过 6 根配有高强箍筋的简支梁试验, 研究高强箍筋高强混凝土梁的抗剪性能, 以及各种因素对构件抗剪性能的影响. 试验中使用极限强度为 800 N/mm<sup>2</sup> 和 1 100 N/mm<sup>2</sup> 的箍筋, 结果证实合理配置高强箍筋能有效改善构件的抗剪性能.

**关键词:**关键词: 高强箍筋; 抗剪性能; 简支梁

**中图分类号:** TU 375.1; TU 371.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2012)02-0198-06

在梁构件中使用高强箍筋和高强混凝土能减小截面, 节约材料, 降低造价, 可以广泛推广使用. 天津大学、郑州大学和湖南大学进行了 HRB400 级钢筋作为箍筋的简支梁和连续梁的抗剪试验研究<sup>[1-3]</sup>; 郑州工业大学、郑州大学和湖南大学进行了 HRB500 级钢筋作为箍筋的高强混凝土梁的抗剪性能的试验研究<sup>[4-7]</sup>. 以上研究主要包括高强混凝土梁抗剪承载力、破坏形态、裂缝发展和抗剪性能等内容. 以上研究采用的箍筋强度为 HRB400 和 HRB500. 本文试验采用极限强度为 800 N/mm<sup>2</sup> 和 1 100 N/mm<sup>2</sup> 的高强箍筋, 通过 6 根配有高强箍筋的 C60 混凝土梁的试验, 对梁的抗剪性能进行研究, 结果证实合理配置高强箍筋能有效改善构件的抗剪性能.

## 1 试验概况

本文试验构件数量较少, 无法考虑较多的参数. 试验设置时, 重点考虑与高强箍筋有关的相关参数. 试件截面尺寸为  $b \times h = 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ , 跨度为  $l = 1\,200 \text{ mm}$ . 纵筋采用 HRB400 级热轧钢筋. 箍筋采用极限强度  $f_{\text{stk}} = 800 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_{\text{stk}} = 1\,100 \text{ N/mm}^2$  的两种钢材. 混凝土强度等级为 C60. 试件参数如表 1.

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of test-pieces

试件编号	$b/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$f_{\text{stk}}/\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$	实配箍筋	配箍率 $\rho_{\text{sv}}/\%$	实配纵筋	配筋率 $\rho/\%$	配箍特征
HB-1	150	300	1 200	800	$\varphi 6@80$	0.48	4 $\Phi 20$ 两排	3.45	2.78
HB-2	150	300	1 200	800	$\varphi 6@120$	0.32	3 $\Phi 20$	2.37	1.85
HB-3	150	300	1 200	800	$\varphi 6@180$	0.21	2 $\Phi 20$	1.58	1.23
HB-4	150	300	1 200	1 100	$\varphi 5@80$	0.33	6 $\Phi 20$ 两排	5.17	2.54
HB-5	150	300	1 200	1 100	$\varphi 5@120$	0.22	4 $\Phi 20$ 两排	3.45	1.70
HB-6	150	300	1 200	1 100	$\varphi 5@180$	0.14	3 $\Phi 20$	2.37	1.13

## 2 试件的破坏形态

本文试验 6 根试件, 共有斜压、斜拉、弯剪、超筋 4 种不同破坏形态. HB-1 和 HB-2 构件发生弯剪破坏, HB-3 和 HB-6 构件发生斜拉破坏, HB-4 构件发生受弯超筋破坏, HB-5 发生斜压破坏. 构件破坏形态如图 2 所示.

收稿日期: 2011-10-08 修改稿日期: 2012-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978215)

作者简介: 杨文星(1975-), 女, 陕西西安人, 讲师, 博士研究生, 研究方向: 混凝土结构设计及抗震.

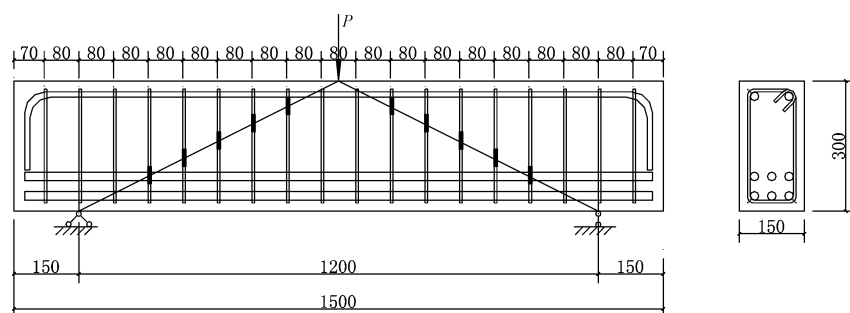


图1 试件简图

Fig. 1 Test pieces diagram

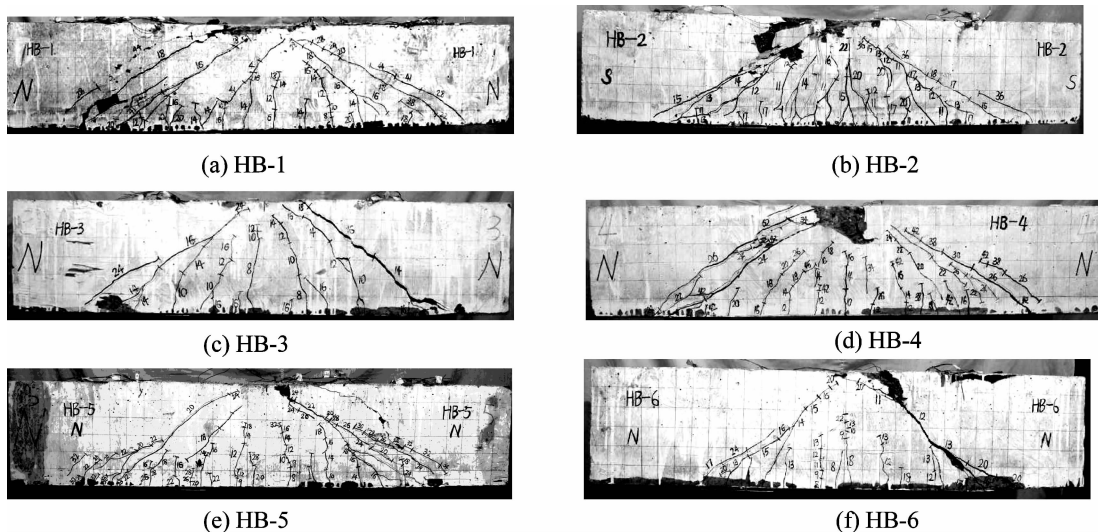


图2 构件破坏形态

Fig. 2 Failure mode of members

## 2.1 弯剪破坏

HB-1 和 HB-2 构件发生弯剪破坏,破坏过程较缓慢,具有一定的延性特性.加载初期形成、发展中竖向受弯裂缝;竖向裂缝斜向发展形成弯剪斜裂缝,并在梁腹部形成腹剪斜裂缝;加载到一定程度,竖向裂缝停止发展;斜裂缝延伸、加宽,形成明显的临界斜裂缝,整个试件的两侧裂缝发展充分;与临界斜裂缝相交的箍筋依次达到屈服,期间纵筋也能达到屈服;最后跨中上部混凝土压碎,试件破坏.在加载达到极限荷载前,试件中较多的箍筋和纵筋均能达到屈服,因此大大提高了构件的延性,使破坏类型由脆性转为延性.

## 2.2 斜拉破坏

HB-3 和 HB-6 构件中,箍筋间距为 180 mm.构件中仅有两根箍筋与斜裂缝上部和下部相交,斜裂缝中部没有设置箍筋,故混凝土开裂后,斜裂缝发展很快,承载力迅速下降,脆性明显.加载中纵筋未提前达到屈服,沿受剪斜裂缝箍筋屈服,斜裂缝下部混凝土拉开,裂缝扩展迅速,临界斜裂缝很宽,裂缝两侧的混凝土骨料界面的摩擦力减小,剪力大部分由箍筋来承担.与斜裂缝相交的箍筋均出现较大的应力变化.随斜裂缝开裂,混凝土拉开,箍筋受拉屈服,构件最终由于受拉开裂裂缝过大而破坏,承载力低,脆性明显.

## 2.3 超筋和斜压破坏

HB-4 构件中所配纵筋最多,配箍率也为最大,且箍筋极限强度为  $1\ 100\ \text{N/mm}^2$ .构件处于弯矩和剪力的复合作用下,构件跨中发生类似于受弯构件的超筋破坏;构件剪压区由于配箍率过大而发生受剪斜压破坏.当裂缝发展时,与斜裂缝相交的箍筋均未达到屈服,剪压区混凝土被两条较宽的斜裂缝分裂形成一个斜向受压小柱,符合斜压破坏的特征.跨中弯矩最大的截面上,由于所配纵筋过多,纵筋无法全部屈服,上部受压区混凝土出现大块压碎而破坏.

## 2.4 斜压破坏

HB-5 构件所配箍筋和纵筋也较多,箍筋极限强度为  $1\ 100\ \text{N/mm}^2$ . 荷载  $180\sim 240\ \text{kN}$  时,构件上出现腹剪斜裂缝并逐步加宽、延伸,此阶段与斜裂缝相交的箍筋应变均出现较大变化,表明箍筋应力增长较大.但由于箍筋强度高,箍筋无法达到屈服,最终剪压区上部混凝土受压裂缝开展,并与形成的新裂缝在构件上部分割出斜向混凝土受压区,而导致构件破坏.

## 3 试验结果及分析

表 2 试验结果

Tab. 2 Results of tested beams

### 3.1 试验结果

通过试验结果可以看出,

(1) 箍筋强度相同的构件中,箍筋间距越小的构件抗剪承载力越高.箍筋间距相同的构件中,箍筋强度高的抗剪承载力高.箍筋强度高且配箍率高的 HB-4 构件的抗剪承载力最高.

(2) HB-1 和 HB-2 构件发生弯剪破坏,延性最好.箍筋间距大的 HB-3 和 HB-6 构件发生斜拉破坏,HB-5 构件发生斜压破坏.受剪斜拉破坏和斜压破坏均为脆性破坏. HB-4 构件中受弯超筋和受剪斜压破坏同时发生,因此脆性性质最为明显.

### 3.2 梁的荷载-挠度曲线

构件的荷载-挠度曲线如图 3,由图可以看出,

(1) HB-1、HB-2 构件,在加载过程中,与斜裂缝相交箍筋能按斜裂缝开裂过程依此屈服,纵筋也能达到屈服,因此具有较好的延性,抗剪承载力也较高.

(2) HB-3、HB-6 构件中箍筋间距过大,与斜裂缝相交的箍筋少,无法有效的承担混凝土开裂后突然增加的应力,而导致构件裂缝过大,而形成斜拉破坏.

(3) HB-4、HB-5 构件中,由于所配箍筋强度高,在加载时无法达到屈服,斜裂缝将截面上部受压区混凝土分裂为斜向受压区,而导致构件破坏.其中,HB-4 构件所配纵筋也超筋,在跨中截面形成超筋破坏而形成大块混凝土压裂. HB-4 构件发生受弯超筋和受剪斜压双重破坏,抗剪承载力虽为最高,但延性最差.

### 3.3 箍筋的应力分析

为研究高强箍筋在构件加载过程中的应力状态,将应变片设置在预期斜裂缝发展的位置.因此在加载过程中,随斜裂缝发展,应变片按一定顺序反映箍筋屈服的情况,试验结果表明箍筋屈服顺序基本与裂缝发展一致.各个构件中箍筋应变曲线见图 4. 一般情况下,梁腹剪区中部形成腹剪斜裂缝,与此斜裂缝相交的箍筋会首先屈服,随斜裂缝发展与斜裂缝相交的箍筋依次屈服.由于初始偏心的影响,斜裂缝发展在梁两侧一般并不均衡,临界斜裂缝只在一侧形成,HB-1 和 HB-2 构件中这一侧的箍筋均能屈服,构件具有较好的剪切延性.

根据构件中箍筋应变-荷载关系曲线,可以看出构件开裂时,箍筋均产生较大应力变化,随斜裂缝发展,箍筋应力明显增加,在梁中发生了明显的应力重分布.箍筋应力的发挥与箍筋的间距和强度有关. HB-1、HB-2 和 HB-3 构件中与斜裂缝相交的箍筋均能达到屈服,HB-4、HB-5 和 HB-6 构件中所配箍筋

编号	$V_{cr}/\text{kN}$	$V_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$\mu=\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$	破坏形态
HB-1	60	488	15.6	4.97	3.14	弯剪破坏(延性)
HB-2	140	433	15.6	4.70	3.32	弯剪破坏(延性)
HB-3	80	272	6.90	3.86	1.79	斜拉破坏
HB-4	100	643	7.26	5.04	1.44	超筋和斜压
HB-5	80	452	9.78	6.15	1.59	斜压破坏
HB-6	80	433	8.24	4.56	1.81	斜拉破坏

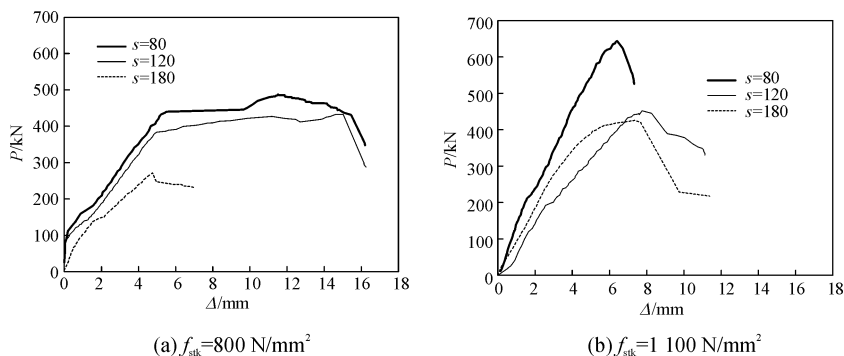


图 3 荷载-挠度曲线

Fig. 3 Load-deflection curve

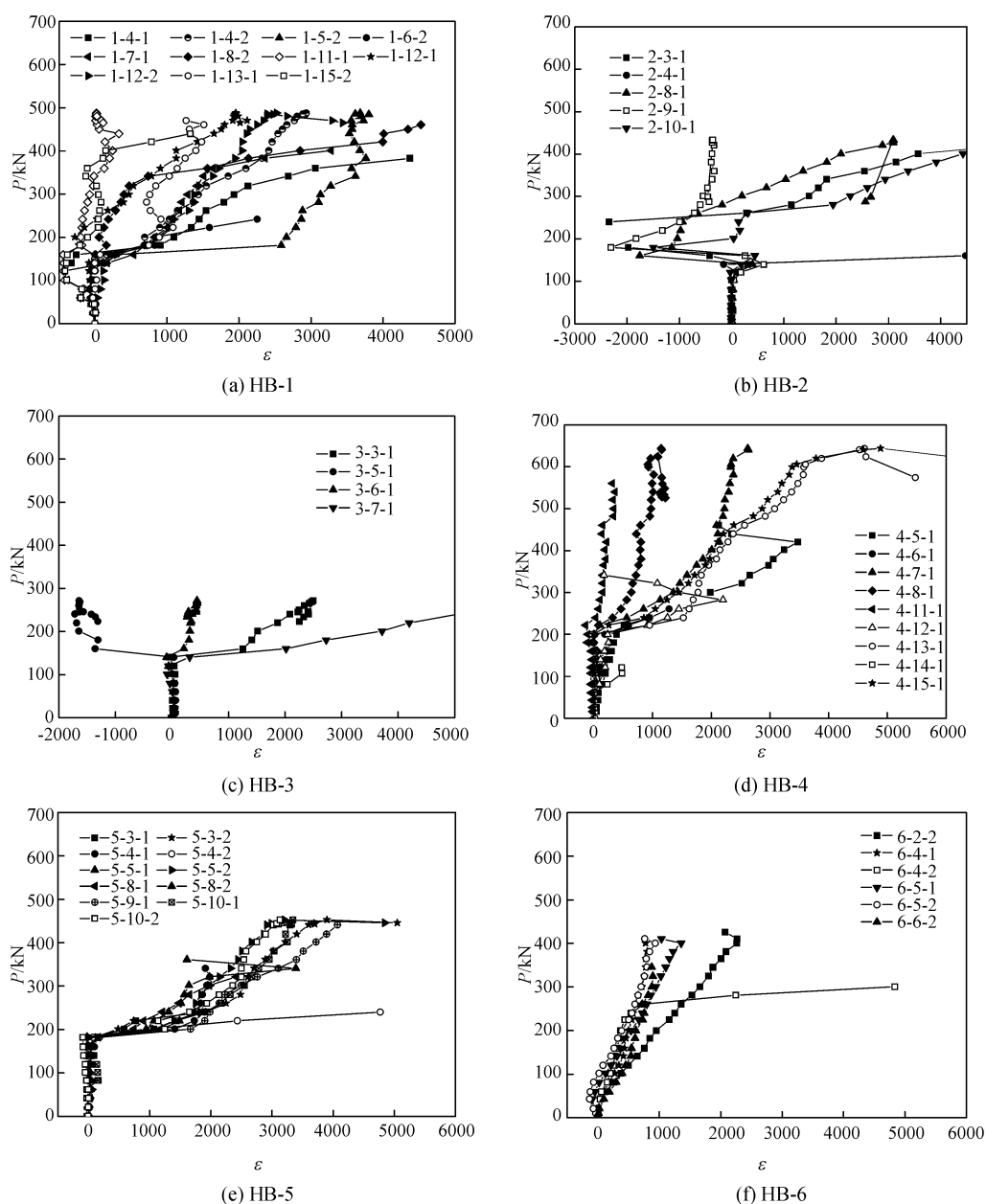


图4 荷载-箍筋应变曲线

Fig. 4 Load-strain curves of hoop

强度过高,在加载过程中,箍筋一般无法屈服.本次试验中,构件在腹剪区形成斜裂缝,随腹剪斜裂缝开裂,位于剪跨区中部的箍筋一般应力变化最大,也是最先达到屈服.然后,随斜裂缝向上向下延伸,与斜裂缝相交的箍筋依次屈服.

#### 4 影响因素分析

梁抗剪承载力的影响因素主要有:剪跨比、混凝土强度、纵筋率、箍筋强度、箍筋间距、截面高度等.本次试验考虑的因素主要有:箍筋强度、箍筋间距、纵筋影响等.

##### 4.1 箍筋间距

首先,箍筋间距可影响梁的受剪破坏形态.在本次试验中,箍筋间距为180 mm的HB-3和HB-6构件与斜裂缝相交的箍筋数量过少,均为斜拉破坏,脆性明显.其次,箍筋间距对梁抗剪承载力有重大影响.对于其他条件相同的构件,箍筋间距越大,则梁抗剪承载力降低.

## 4.2 箍筋强度的影响

箍筋强度对构件抗剪承载力和延性具有较大影响. 其它条件相同时, 箍筋强度大的构件, 梁的抗剪承载力高. 箍筋强度也对构件抗剪延性具有影响, 在本次试验中, 配有极限强度为  $800 \text{ N/mm}^2$  箍筋的构件中, 斜裂缝开展较大一侧, 箍筋均能达到屈服, 构件表现出延性; 而配有极限强度为  $1100 \text{ N/mm}^2$  箍筋的构件中, 箍筋一般均无法屈服的情况, 脆性明显. 因此在本次 C60 混凝土梁抗剪试验中, 配有极限强度为  $800 \text{ N/mm}^2$  箍筋的构件具有更好延性.

## 4.3 配箍特征的影响

配箍特征  $\rho_{sv} \frac{f_{yv}}{f_t}$  中综合了箍筋强度、配箍率等因素的作用, 能较好反映所配箍筋对于抗剪承载力的影响. 配箍特征与极限荷载的关系曲线如图 5 所示. 当其他条件相同时, 构件的抗剪承载力随配箍特征值增大而增大, 几乎呈线性关系. 通过观察剪跨比影响配箍特征与极限荷载关系曲线的斜率, 其中 HB-1、HB-4、HB-5 的剪跨比较大, 而 HB-2、HB-3、HB-6 的剪跨比较小. 可看出剪跨比小的构件配箍特征与极限荷载的关系曲线斜率较大, 剪跨比大的构件曲线斜率较小.

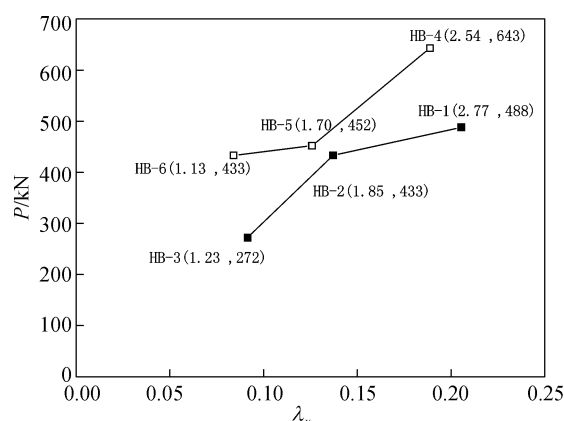


图 5 配箍特征与极限荷载的关系曲线

Fig. 5 Hoop with eigenvalue -Ultimate load curve

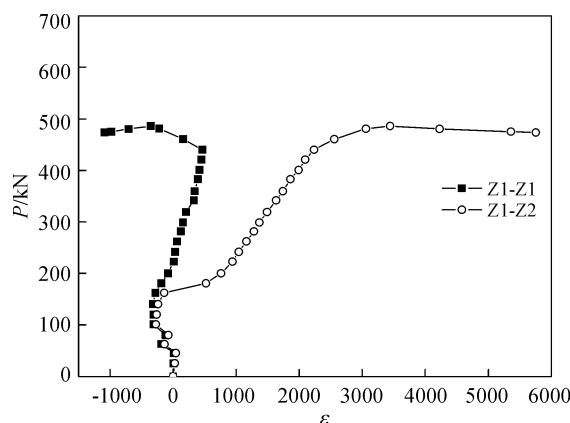


图 6 HB-1 支座处纵筋应变-荷载关系曲线

Fig. 6 HB-1 longitudinal reinforcement strain - load curve

## 4.4 纵筋的影响

为考察纵筋对抗剪承载力的影响, 在 HB-1 试件的靠近支座附近的纵筋上设置钢筋应变片, 见图 1. HB-1 构件支座处纵筋应变-荷载关系曲线见图 6. 若作为受弯钢筋, 支座附近的下部钢筋应力较小, 应变也较小. 然而, 从支座处纵筋应变图中可以看出, 在梁加载过程中, 临界斜裂缝形成一侧, 与斜裂缝相交的纵筋中出现较大的应力变化. 说明纵筋在此过程中的确起到了较大的作用. 这部分作用在抗剪承载力中, 不应忽略.

荷载达到  $400 \text{ KN}$  时, 支座附近的纵筋达到屈服. 荷载达到  $559 \text{ KN}$  时, 纵筋跨中截面达到屈服. 图中可以看出纵筋跨中处在构件破坏前并没有进入屈服阶段, 而与斜裂缝相交处的纵筋应力更大, 其中一条的应变曲线明显可看出已达屈服. 纵筋的销栓作用在构件抗剪中起到较大的作用, 但纵筋销栓力的大小取值还需进一步研究.

## 5 结 论

(1) 高强箍筋在构件受剪过程中, 随斜裂缝开展与斜裂缝相交的箍筋中均有较大的应力变化, 对构件的抗剪承载力提高较大, 在工程实践中采用高强箍筋具有一定的可行性和经济性.

(2) 箍筋间距为 180 的构件 HB-3、HB-6 发生斜拉破坏, 由于配箍不足而脆性明显.

(3) 若箍筋强度过高, 在加载过程中, 有可能出现箍筋无法屈服的情况. 试验中所配极限强度为  $1100 \text{ N/mm}^2$  箍筋在加载中一般不能屈服, 出现脆性更加明显的斜压破坏. 因此, 应通过试验研究进一步确定能有效发挥作用的箍筋强度; 并对于所采用的高强箍筋在计算中限制其有效强度, 以防止发生因

箍筋无法屈服而导致的斜压破坏。

(4) 当构件剪跨比一定时,构件抗剪承载力随其配箍特征的增加而增加. 可以通过限定构件最小配箍特征的方式保证构件抗剪承载力。

(5) 构件的纵筋销栓力在构件抗剪承载力中,可以起到明显的作用。

## 参考文献 References

- [1] 李立仁, 杨定锋, 支运芳. 纵筋率对有腹筋约束梁受剪性能影响的试验研究[J]. 重庆工学院学报:自然科学版, 2007(5):24-28.  
LI Li-ren, YANG Ding-feng, ZHI Yun-fang. Experimental Study on Effect of Longitudinal Reinforcement Ratio on Shear Behavior of Restrained Beams[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science Edition, 2007(5):24-28.
- [2] 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 Tie-cheng, LI Yan-yan, RONG Xian, et al. Shear Behavior of Reinforced Concrete Beam with High-strength Stirrup under Concentrated Load[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(5):172-177.
- [3] 李艳艳, 戎 贤, 皮凤梅, 等. 高强箍筋混凝土梁的受剪性能[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2009, 37(8):89-93  
LI Yan-yan, RONG Xian, PI Feng-mei, et al. Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams with High-strength Stirrups[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(8):89-93.
- [4] 李 娟. HRB500 级箍筋混凝土梁斜截面受力性能试验研究[D]. 长沙:湖南大学, 2007.  
LI Juan. Experimental Study on Mechanical Behavior of Diagonal Section of Reinforced Concrete Beams with HRB500 Stirrups[D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [5] 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, 2008.  
LV Yan-mei. Experimental Study and Theoretical Analysis of Reinforced Concrete Beam with High-strength Stirrup and High-strength Concrete[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [6] 易伟建, 吕艳梅. 高强箍筋高强混凝土梁受剪试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4):94-101.  
YI Wei-jian, LV Yan-mei. Experimental Study on Shear Behavior of High-strength Concrete Beams with High-strength Stirrups[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4):94-101.
- [7] 史庆轩, 侯 炜, 姜维山, 等. 高强箍筋高强混凝土受剪承载力研究[J]. 建筑结构学报(增刊 2), 2009(S2):98-103.  
SHI Qing-xuan, HOU Wei, JIANG Wei-shan, et al. Shear Capacity of High-strength Concrete Beams with High-strength Stirrups [J]. Journal of Building Structures(Suppl. 2), 2009(S2):98-103.

## Experimental study on shear behavior of reinforced concrete beam with high strength stirrup

YANG Wen-xing<sup>1,2</sup>, SHI Qing-xuan<sup>1</sup>, ZHANG Cheng-zhong<sup>1</sup>

- (1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;  
2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Shear capability of high-strength concrete member with normal-strength steel proves to be poor, so this kind of member would suffer brittleness failure. Shear performance would be improved by using high strength stirrup at high-strength concrete. Brittleness could be reduced as well. The research was carried out for performance of high-strength stirrup and high-strength concrete beam by tests of 6 simple-supported beams. The study of influence on the shear behavior of beam by some factors was done as well. The ultimate strength of hoops was 800 N/mm<sup>2</sup> and 1 100 N/mm<sup>2</sup> in this test. The result indicates that reasonable use of high-strength stirrup can improve shear capability of concrete beams availability.

**Key words:** high strength stirrup; shear behavior; simply supported beam