

劲性钢筋混凝土约束梁抗剪性能的研究

钟树生 郭建华 王祖华

(重庆建筑工程学院) (武汉城建学院) (华南理工大学)

摘要 为了探讨劲性钢筋混凝土约束梁的抗剪性能,本文对3根集中荷载作用下的劲性钢筋混凝土约束梁(共6个截面)进行了试验研究,同时采用非线性平面有限元方法对其作了全过程分析,数值分析结果与试验结果吻合良好。根据试验和电算结果,本文分析了劲性钢筋混凝土约束梁的抗剪机理以及影响其抗剪承载力的主要因素。当使用计算剪跨比时,用现有劲性钢筋混凝土简支梁抗剪强度公式计算劲性钢筋混凝土约束梁的抗剪承载力是偏于安全的,因而建议象钢筋混凝土约束梁一样,劲性钢筋混凝土约束梁的抗剪承载力用其相应的简支梁抗剪承载力公式计算,本文建议了具体的计算公式。

关键词 劲性钢筋混凝土, 约束梁, 抗剪性能, 非线性有限元分析

文献[1], [2]对劲性钢筋混凝土简支梁的斜截面抗剪承载力进行了试验研究,但在约束梁和连续梁等具有反弯点的劲性钢筋混凝土构件的抗剪承载力方面的研究资料甚少。对普通钢筋混凝土构件而言,具有反弯点构件的抗剪承载力曾受到人们的高度重视,国内外均对此作了大量的研究,结果表明,简支梁与反弯构件无论从抗剪承载力上还是抗剪机理上均有较大差异。本文通过试验研究和非线性有限元分析对劲性钢筋混凝土约束梁的抗剪性能作了初步探讨。

1 试验研究

本文共制作了三根试件,每根试件做两次,共得到六个破坏截面。图1为一典型试件尺寸及配筋构造,表1为三根试件的材料特性,其中包括混凝土立方强度 f_{cu} ,工字钢腹板厚度 t_w ,腹板高度 h_w ,工字钢屈服强度 f_s ,纵筋含量 ρ_s 和屈服强度 f_y 以及箍筋含量 ρ_{sv} 和屈服强度 f_{sv} ,应力单位为 N/mm^2 ,长度单位为 mm 。三根试件的尺寸相同。

下面分别给出试验结果和有关的非线性有限元分析结果,其中包括抗剪承载力,破坏形

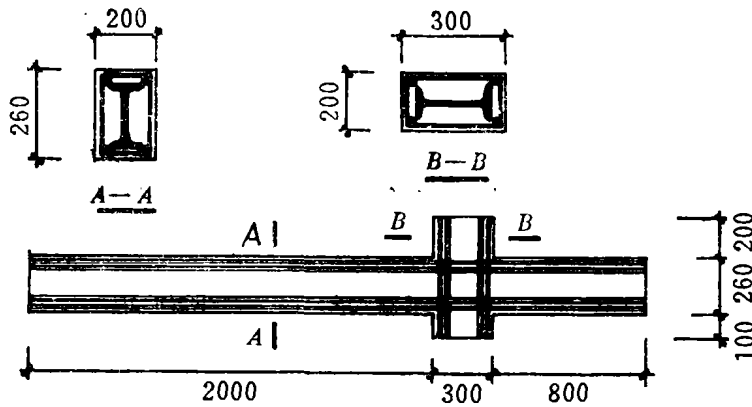


图1 试件尺寸及配筋构造

态和材料受力状态等。

表1 试件材料特性

试件	混凝土		工字钢		纵筋		箍筋	
	f_{cu}	t_w	h_w	f_s	$\rho_s(\%)$	f_y	$\rho_{sv}(\%)$	f_{sv}
RB1-1,2	20.64	5.8	140	340.6	1.13	402.61	0.332	328.97
RB2-1,2	21.74	5.8	140	340.6	1.39	355.80	0.221	328.97
RB3-1,2	27.56	5.8	140	340.6	1.13	430.02	0.332	432.99

1.1 约束梁的抗剪承载力

表2给出了6个截面的抗剪承载力试验结果及非线性有限元分析结果。由表可见，电算结果和试验结果吻合程度良好。

表2 试件抗剪承载力一览表

试件	f_{cu}	剪跨比 λ	弯矩比 $n = \frac{M^-}{M^+}$	抗剪承载力 (kN)					破坏形态
				试验 V_{u1}	电算 V_{u2}	公式(1) V_{u3}	$\frac{V_{u1}}{V_{u2}}$	$\frac{V_{u1}}{V_{u3}}$	
RB1-1	20.64	1.56	0.868	369.41	316.24	285.39	1.168	1.294	剪压
RB1-2	20.64	1.33	1.880	388.26	325.64	318.76	1.192	1.218	斜压
RB2-1	21.76	1.56	0.868	327.19	306.85	267.32	1.066	1.224	剪压
RB2-2	21.76	1.33	1.880	338.16	338.16	300.88	1.000	1.124	斜压
RB3-1	27.56	1.50	2.230	404.60	385.40	328.08	1.050	1.239	剪压
RB3-2	27.56	1.30	0.900	499.50	435.50	360.93	1.147	1.384	斜压

平均: 1.104 1.247

1.2 约束梁的破坏形态

根据试验梁在加载过程中的裂缝发展和最终破坏情况、试验梁的破坏形态大致可以分为两类，即斜压破坏和剪压破坏（见表2）。

试件RB1-2, RB2-2及RB3-2均发生斜压破坏，它们的剪跨比均相对较小。斜压破坏时

斜裂缝一般首先在跨内梁中轴线附近出现，如图 2(a)中裂缝 *a* 和 *d*，逐渐向支座和加载点发展。在正负弯矩较大的位置出现弯曲裂缝，如图 2(a)中裂缝 *b* 和 *c*。随着荷载的增加还会出现若干条几乎与裂缝 *a* 平行的斜裂缝并将支座和加载点之间的混凝土分成小斜柱体，而弯曲裂缝则没有什么发展。当荷载达极限值时，混凝土小斜柱体被压碎，构件宣告破坏。

试件 RB1-1, RB2-1 和 RB3-1 均发生剪压破坏，它们的剪跨比相对较大。在荷载较小时，首先在弯矩最大处出现弯曲裂缝，如图 2(b)中裂缝 *a* 和 *b*。随着荷载的增加，剪跨内出现斜裂缝，如图 2

(b)中裂缝 *c*，并逐渐向加载点发展。荷载继续增加时，斜裂缝 *c* 不断加宽，形成一条临界斜裂缝，最后斜裂缝端部混凝土被压碎，形成剪压破坏。图 3 给出了 RB3-1 和 RB3-2 破坏剪跨的裂缝图，其中 RB3-2 为斜压破坏而 RB3-1 为剪压破坏。

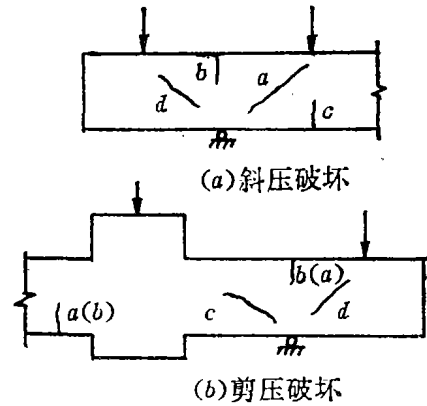
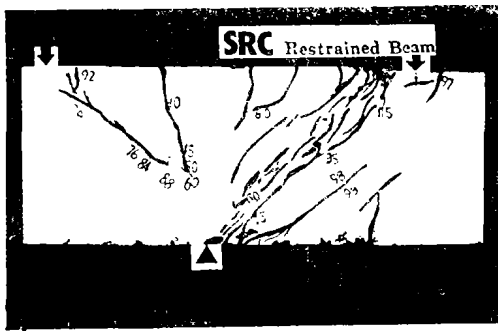
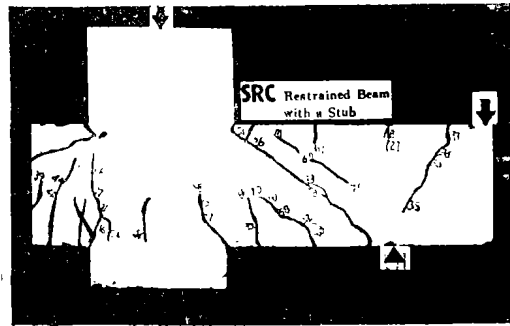


图 2 裂缝发展图



(a) RB3-2



(b) RB3-1

图 3 破坏剪跨裂缝图

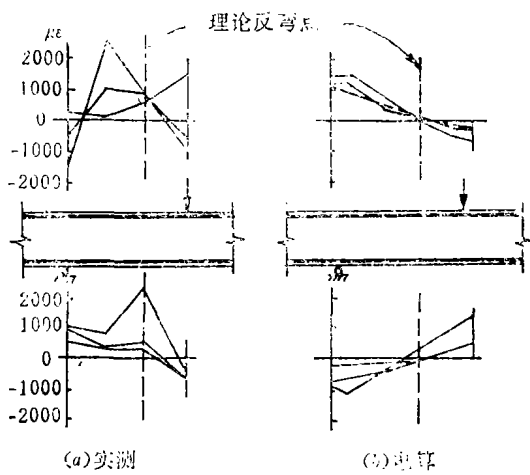


图 4 纵筋应力分布图

1.3 剪跨内纵筋受力状态

图 4 为 RB1-2 剪跨范围内纵筋应力发展图，其中 (b) 为非线性有限元分析结果。由图可见，纵筋应力在整个受力过程中发生了较明显的内力重分布现象。由于纵筋与混凝土间的粘结发生了一定程度的破坏，总的发展趋势是使得纵筋受拉范围扩大，而受压区域减小，但是不象在普通钢筋混凝土约束梁抗剪试验^[3]中所观测到的几乎整个反弯区段内的上下纵筋在破坏时均处于受拉状态。

1.4 剪跨内工字钢的受力状态

由表 3 可见，梁发生剪切破坏时，腹

板主应力均达到了屈服,工字钢上下翼缘的应力也有些达到了屈服。从支座到加载点的斜线附近区域内,沿斜裂缝方向工字钢腹板受压,且发生斜压破坏时压区范围更大一些,垂直于斜裂缝方向的工字钢腹板则受拉。对工字钢翼缘来说,斜压破坏时,支座到加载点的斜线附近工字钢上下翼缘均受压,结合腹板的受力情况来看,说明此时是以剪力作用为主。剪压破坏时剪跨内工字钢上下翼缘多为受拉,结合腹板受力情况,说明此时是剪力和弯矩共同作用。以上这些分析说明,腹板在抗剪中起了主要作用。

表3 工字钢应力状态

试件	上翼缘应力	下翼缘应力	腹板主应力
RB1-1	屈服	屈服	屈服
RB1-2	0.47 f_s	0.68 f_s	屈服
RB2-1	0.45 f_s	屈服	屈服
RB2-2	屈服	0.76 f_s	屈服
RB3-1	屈服	屈服	屈服
RB3-2	—	屈服	屈服

2 非线性有限元分析

本文以普通钢筋混凝土非线性有限元分析理论为基础,用增量始点刚度法对配工字钢的劲性钢筋混凝土约束梁的抗剪性能进行了非线性全过程分析。在分析中采用了混凝土三角形单元,工字钢三角形单元,模拟纵筋和箍筋的线形单元以及考虑纵筋和工字钢与混凝土之间粘结滑移的双弹簧联结单元。对混凝土、工字钢和纵筋等均采用了目前广泛应用的本构关系和破坏准则。混凝土的开裂采用片状裂缝模型来模拟并考虑了混凝土的受拉硬化,详见文献[4]。

3 影响斜截面抗剪承载力的主要因素

试验研究表明,影响劲性钢筋混凝土梁抗剪承载力的主要因素包括剪跨比,混凝土强度,配箍率,工字钢腹板含量以及支座约束条件等。本文在试验研究的基础上,利用文献[3]的非线性分析程序对上述因素进行了探讨。

3.1 剪跨比

剪跨比 λ 有计算剪跨比 a/h_0 和广义剪跨比 M/Vh_0 之分,它实质上是反映了截面上正应力和剪应力的数值关系,同时还间接地反映了加载垫板下垂直压应力 σ_y 的影响。对劲性钢筋混凝土梁来说,当 λ 较小时,梁腹为一斜向受压的短柱,构件发生斜压破坏,其中 σ_y 在整个剪切区影响较大而弯矩影响较小;当 λ 较大时, σ_y 的影响减小到支座及集中荷载附近,构件在剪力和弯矩共同作用下发生剪压破坏,也有可能发生剪弯破坏。当 λ 进一步增大时一般不会发生斜拉破坏,而会发生弯曲破坏。图5为试验所得梁的抗剪承载力与剪跨比的关系,其中约束梁采用的是计算剪跨比 $\lambda = a/h_0$ 。由图可见,和钢筋混凝土梁一样,劲性钢筋混凝土梁的抗剪强度随 λ 的增大而减小。

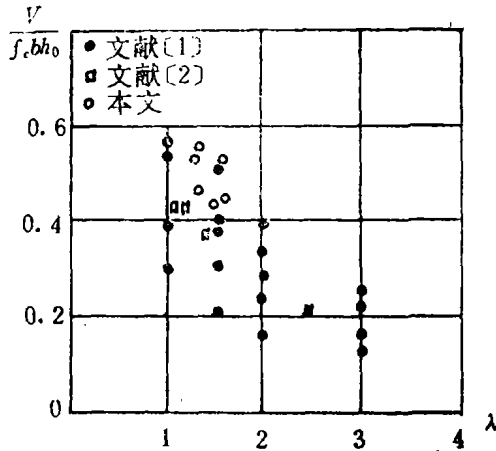


图 5 剪跨比的影响

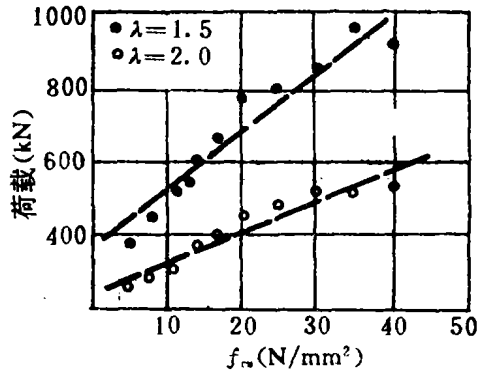


图 6 混凝土强度的影响

3.2 混凝土强度

剪切破坏是因混凝土达到强度极限而引起的，故混凝土强度对梁的抗剪强度有很大影响。当剪跨比一定时，抗剪承载力随混凝土强度 f_c 的提高而增大，两者近似为线性关系。当 λ 较小时，剪切承载力主要取决于混凝土抗压强度。图6给出了试验和电算所得的 $V-f_c$ 间的关系。

3.3 箍筋

试验表明，在混凝土出现斜裂缝之前，箍筋中的应力很小，它对防止斜裂缝的产生作用不大，此时的剪力主要由未开裂混凝土和劲性钢筋腹板承担。斜裂缝出现后，与斜裂缝相交的箍筋应力猛增，此时的剪力则由未裂的混凝土、劲性钢筋和箍筋来承担。由于箍筋含量较劲性钢筋含量小得多，所以它所承担的剪力相对来说较小。关于抗剪承载力与配箍率间的关系可参见文献[1]。

3.4 工字钢腹板

工字钢腹板与钢筋混凝土有腹筋梁的箍筋有着相似的作用，可以把它看成配置在梁中间距为零的连续箍筋。由于其所占比例较大（腹板含量一般为1~3%，箍筋含量则只有0.1~0.3%）故在抗剪中起了主要作用。图7给出了从试验和电算得出的腹板含量与抗剪承载力的关系。由图可见，剪跨比会直接影响腹板对抗剪的贡献。

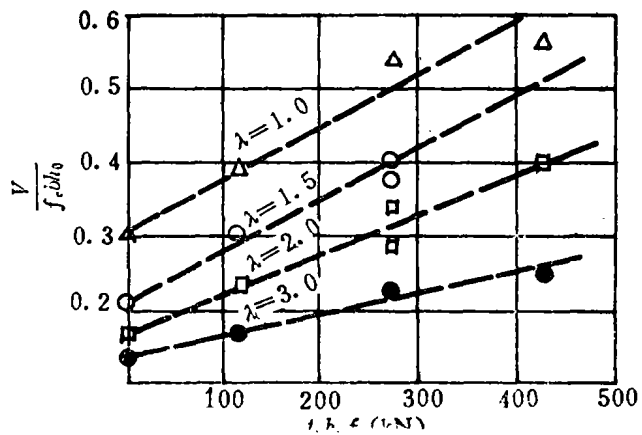


图 7 工字钢腹板含量的影响

3.5 约束条件

劲性钢筋混凝土约束梁由于在剪跨内同时存在正弯矩 M^+ 和负弯矩 M^- ，即存在反弯点，所以梁在受力过程中会在理论反弯点两侧出现两条大致平行的临界斜裂缝，分别指向支座和

荷载作用点,在这两条斜裂缝之间形成一棱形斜压体。但直到破坏,工字钢与混凝土之间的相对滑移量却非常小,内力重分布现象也不太严重,所以其抗剪承载力与简支梁相比并未受到多大影响,且与具有相同计算剪跨比的劲性钢筋混凝土简支梁相比,其承载力还略有提高。

4 约束梁抗剪承载力的计算

在普通钢筋混凝土约束梁中,由于在反弯区段内出现非常明显的内力重分布现象,因而约束梁与具有相同广义剪跨比的简支梁相比有较低的抗剪承载力。但其抗剪承载力比具有相同计算剪跨比的简支梁高,因此,我国混凝土结构设计规范 GBJ10-89 偏于安全地采用了简支梁抗剪承载力的公式来计算约束梁的抗剪承载力,计算时用计算剪跨比。

由本文的试验和分析可知,劲性钢筋混凝土约束梁在反弯区段内同样存在内力重分布,但其程度没有普通钢筋混凝土约束梁那么大。在试验中很少观察到引起应力重分布的粘结裂缝,在破坏阶段,对应于跨中最大正弯矩截面上的位于压区的钢筋仍然受压,而不象普通钢筋混凝土约束梁那样,在压区混凝土受压而钢筋受拉,并由此而降低剪压区混凝土抗剪强度。总之,劲性钢筋混凝土约束梁中的应力重分布对其抗剪承载力影响不大。基于上述理由,本文提出了与简支梁公式^[1]类似的劲性钢筋混凝土约束梁抗剪承载力计算公式,即

$$V = \frac{0.2}{\lambda + 1.5} f_c b h_0 + 1.25 f_{sv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 + \frac{f_s t_w h_w}{\lambda} \quad (1)$$

式中, $\lambda = a/h_0$, 且 $1.0 \leq \lambda \leq 3.0$, 即当 $\lambda < 1.0$ 时, 取 $\lambda = 1.0$, 当 $\lambda > 3.0$ 时, 取 $\lambda = 3.0$; f_c 为混凝土抗压设计强度, b 为梁宽, A_{sv} 为箍筋截面积, s 为箍筋间距, 其余符号同前。公式上限为 $V \leq 0.4 f_c b h_0$ 。当用此公式来计算本文所试验的六个截面时, 其结果列于表 2 中。由表可见, 用此公式来计算是偏于安全的。

参 考 文 献

- 1 张纪贵. 劲性钢筋混凝土简支梁斜截面抗剪强度研究. 重庆建工学院硕士论文, 1989. 7
- 2 肖季秋. 劲性钢筋混凝土粘结试验研究及劲性钢筋混凝土梁斜截面承载能力试验研究, 重庆建工学院硕士论文, 1989. 12
- 3 卫纪德. 集中荷载作用下有腹筋约束梁抗剪强度. 哈尔滨建工学院学报, 1985. (3)
- 4 王祖华. 钟树生. 劲性钢筋混凝土梁非线性有限元分析. 第二届全国混凝土结构理论及应用学术讨论会论文集, 第二卷, 第609~616页, 北京. 清华大学, 1990

(编辑: 徐维森)

RESEARCH ON THE SHEAR RESISTANT BEHAVIORS OF STEEL REINFORCED CONCRETE RESTRAINED BEAMS

Zhong Shusheng

(Chongqing Institute of Architecture
and Engineering)

Guo Jianhua

(Wuhan Institute of Municipal
Engineering)

Wang Zuhua

(South China University of Technology)

ABSTRACT In order to probe into the shear resistant behaviors of steel reinforced concrete (SRC) restrained beams, three test beams under concentrated loads have been tested. A full range analysis of the test beams is conducted by using nonlinear finite element (NLFE) technique, and a good agreement with the experimental results is achieved. The shear resistant mechanism of SRC restrained beam and the main factors affecting its shear strength are analysed. It is found that when the available shear strength formula for simply supported SRC beams is used to calculate the shear strength of SRC restrained beams, the result turns out to be conservative, so it is suggested that the shear strength of SRC restrained beam could be calculated by the corresponding formula of simply supported SRC beam, adopting calculation shear span ratio. The practical formula is proposed in the paper.

KEY WORDS steel reinforced concrete, restrained beam, shear resistant behavior, nonlinear finite element analysis