

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.002



# 自密实混凝土无腹筋梁抗剪性能

易伟建<sup>1a,1b</sup>, 黄德润<sup>1b,2</sup>

(1. 湖南大学 a. 湖南省工程结构损伤诊断重点实验室; b. 土木工程学院, 长沙 410082;  
2. 人民日报社, 北京 100733)

**摘要:**为研究自密实混凝土无腹筋梁的抗剪性能和裂缝开展形态,进行了集中荷载作用下 12 根无腹筋钢筋混凝土简支梁(8 根自密实混凝土和 4 根普通混凝土)的剪切破坏试验,变量为混凝土强度和剪跨比。探讨了《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、Zsutty 拟合公式、美国规范(ACI318-11)抗剪承载力计算公式对自密实混凝土无腹筋梁抗剪承载力计算的适用性和准确性。收集了在集中荷载作用下的 130 根自密实混凝土和 798 根普通混凝土矩形截面无腹筋梁剪切破坏试验数据,将自密实混凝土和普通混凝土无腹筋梁抗剪承载力进行了对比。结果表明:自密实混凝土梁和普通混凝土梁的裂缝发展、破坏形态大致相同,自密实混凝土梁斜裂缝断面更为光滑;Zsutty 拟合式计算结果与本文试验结果最接近;GB 50010—2010 计算结果与本文试验结果也比较吻合,但偏于不安全;美国规范 ACI 318-11 计算公式偏差较大;自密实混凝土梁受剪承载力略低于普通混凝土梁。

**关键词:**无腹筋梁;自密实混凝土;抗剪性能;规范公式

**中图分类号:**TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)03-0008-08

## Shear behaviour of self-compacting concrete beams without shear reinforcement

Yi Weijian<sup>1a,1b</sup>, Huang Derun<sup>1b,2</sup>

(1a. Hunan Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures; 1b. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China; 2. People's Daily, Beijing 100733, P. R. China)

**Abstract:** An experimental investigation was conducted to study the shear strength and cracking behavior of beams made with self-consolidating concrete (SCC) as well as normal concrete (NC). A total of 12 flexurally reinforced concrete beams which consist of 8 beams with self-compacting concrete and 4 beams with normal concrete, with no shear reinforcement, were tested under mid-span concentrated load until shear failure occurred. The main variables in the test are concrete strength and shear span ratio. While, based on the test data in this study, several shear strength models: GB 50010-2010, Zsutty's formula, ACI 318-11 were analyzed and compared. The shear experimental test data of 130 self-consolidating concrete and 798 normal concrete simply-supported rectangular cross-section beams without web reinforcement were

收稿日期:2017-04-11

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0701400);国家自然科学基金(51338004)

作者简介:易伟建(1954-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事混凝土结构基本理论研究,E-mail:wjyi@hnu.edu.cn.

Received:2017-04-11

Foundation item: National Key Research and Development Plan (No. 2016YFC0701400); National Natural Science Foundation of China (No. 51338004)

Author brief: Yi Weijian(1954-), PhD, professor, doctoral supervisor, main research interest: basic theory of concrete structures, E-mail:wjyi@hnu.edu.cn.

collected to compare the shear capacity between SCC and NC beams. The results show that: In terms of crack morphology, crack progression, the behavior of the SCC and CC beams is virtually identical, and the inclined section of SCC beams are more smooth; The calculated results of Zsutty' fit are closest to the experimental results; the results of GB 50010-2010 are also in good agreement, but are not safe; the deviation of ACI 318-11 is larger; and the ultimate shear strength of SCC beams is found to be slightly lower than the NC beams.

**Keywords:** beam without web reinforcement; self-compacting concrete; shear capacity; the code formula

自密实混凝土是一种可以自流平、免振捣的高性能混凝土。自密实混凝土最早于 1988 年在东京大学岗村甫<sup>[1]</sup>实验室研制成功,第一次大规模应用是在 1998 年的日本明石海峡大桥<sup>[2]</sup>。关于自密实混凝土配合比和流变性能的研究有很多,但关于自密实混凝土在结构中性能表现的研究却较少。通常认为,自密实混凝土结构构件抗剪性能与普通混凝土构件的抗剪性能相当。

剪切破坏是一种应当在设计中被避免发生的脆性破坏。普通混凝土构件的抗剪性能研究已经超过 100 a 了,但至今并没有形成统一的抗剪设计方法。剪切机理并不很明确,其取决于构件的长细、深浅、截面形状,还有构件类型是梁、板、柱,荷载是静载还是往复荷载等。现有的抗剪规范公式并不是建立在受剪破坏机理分析上,而是基于试验的半经验半理论公式,不同抗剪规范对于抗剪强度的预测差异可以达到两倍多。

根据 Taylor<sup>[3]</sup>之前的研究:骨料咬合力在抗剪承载力中起了很重要的作用。虽然自密实混凝土是在普通混凝土的基础上发展而来,但与普通混凝土还是有较大区别:为了达到自密实性能,自密实混凝土采用了更少的粗骨料和更小的骨料粒径以及更多的胶凝材料,因此,部分研究人员认为这可能会导致自密实混凝土比普通混凝土的骨料咬合力更小,抗剪承载力更低。

Das 等<sup>[4]</sup>发现,自密实混凝土梁比普通混凝土梁抗剪承载能力更高。然而,Wilson 等<sup>[5]</sup>的研究显示,美国 ACI318-11 规范<sup>[6]</sup>关于构件抗剪的规定对于自密实混凝土梁可能偏于不安全。Schiesl 等<sup>[7]</sup>的试验发现,自密实混凝土梁斜裂缝断面更为光滑,表现出更低的抗剪承载力;Bendet 等<sup>[8-9]</sup>的试验结果则显示,自密实混凝土梁和普通混凝土梁抗剪性能相近;Hassan 等<sup>[10-11]</sup>的研究显示,自密实混凝土梁和普通混凝土梁抗剪性能并没有明显的不同,自密实混凝土梁极限抗剪承载力稍微低于普通混凝土梁;Khayat 等<sup>[12]</sup>对于自密实混凝土预应力梁的研究

也得到了类似的结论;Dymond<sup>[13]</sup>的实验则证实现有的规范对自密实混凝土预制梁抗剪承载能力的预测偏于保守。

为了进一步认识自密实混凝土梁的抗剪性能,本文完成了 12 根钢筋混凝土无腹筋梁(8 根自密实混凝土无腹筋梁和 4 根普通混凝土无腹筋梁)的受剪试验,对梁的裂缝形态、开裂荷载、主斜裂缝荷载、斜截面抗剪承载力、破坏形态等进行研究。在此基础上,收集现有公开的试验数据,基于普通混凝土梁剪切试验数据库,对比了自密实混凝土无腹筋梁和普通混凝土无腹筋梁抗剪承载力的差异。

## 1 试验概述

试验共 12 根试验梁,梁宽 200 mm,截面有效高度 360 mm,配筋率为 1.58%。其中,自密实混凝土梁系列标记为 S,普通混凝土梁系列标记为 N。试验主要变量为:剪跨比:2.2、2.6、3.0、3.4;强度:C40、C60。试件编号及基本参数见表 1,试件尺寸和配筋见图 1。

表 1 试验梁主要参数

Table 1 Main parameters of specimen

试件编号	$b/$ mm	$h/$ mm	$h_0/$ mm	$a/$ mm	$s/$ mm	$\lambda$	$f_c/$ MPa	纵筋 配制
S-2.2-C40	200	400	360	800	786	2.2	C40	3C22
S-2.6-C40	200	400	360	940	926	2.6	C40	3C22
S-3.0-C40	200	400	360	1 080	1 066	3.0	C40	3C22
S-3.4-C40	200	400	360	1 220	1 206	3.4	C40	3C22
S-2.2-C60	200	400	360	800	786	2.2	C60	3C22
S-2.6-C60	200	400	360	940	926	2.6	C60	3C22
S-3.0-C60	200	400	360	1 080	1 066	3.0	C60	3C22
S-3.4-C60	200	400	360	1 220	1 206	3.4	C60	3C22
N-2.2-C60	200	400	360	800	786	2.2	C60	3C22
N-2.6-C60	200	400	360	940	926	2.6	C60	3C22
N-3.0-C60	200	400	360	1 080	1 066	3.0	C60	3C22
N-3.4-C60	200	400	360	1 220	1 206	3.4	C60	3C22

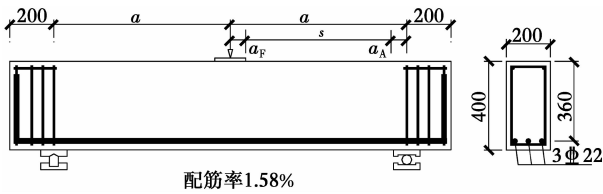


图 1 试件尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 1 Specimen geometry and steel details

自密实混凝土构件强度等级为 C40 和 C60,普通混凝土构件强度等级为 C60,采用 42.5# 普通硅酸盐水泥,粉煤灰采用湖南固力公司产的 I 级粉煤灰,减水剂采用湖南固力公司产聚羧酸减水剂粉剂,粗骨料采用含泥量小于 1% 的碎石,最大粒径为 20 mm,细骨料采用含泥量小于 1% 的普通中砂,具体配合比见表 2。自密实混凝土性能测试见图 2,性能指标见表 3。纵筋采用直径 22 mm 的 HRB400 级钢筋,屈服强度为 468.4 MPa,抗拉强度为 594.8 MPa。

表 2 混凝土配合比

Table 2 Mixture proportions for SCC and NC mixtures

混凝土	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	砂/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粗骨料/ (kg·m <sup>-3</sup> )	减水剂/%	水胶比
S40	344	150	776	180	887	0.17	0.36
S60	445	148	760	160	920	0.32	0.27
N60	457	114	720	160	1 000	0.22	0.28

表 3 混凝土性能指标

Table 3 Fresh and hardened properties of SCC and NC mixtures

混凝土	坍落度/ mm	坍落拓展 度/mm	J 环拓展 度/mm	T <sub>500</sub> /s
S40		680	670	2.1
S60		700	680	2.7
N60	100	300		

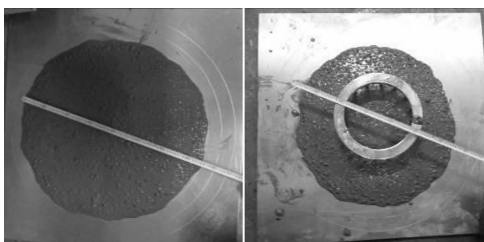


图 2 混凝土性能指标测试

Fig. 2 Fresh and hardened properties of SCC and NC mixtures

浇筑构件时,每根试验梁预留 3 个标准圆柱体试块(300 mm×Φ150 mm)和 6 个标准立方体块,根据《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2002)<sup>[14]</sup>的规定,分别用于试验当天测得的同等养护条件下的圆柱体抗压强度、立方体抗压强度、劈裂

抗拉强度,见表 4。

试验采用单点集中加载,加载点垫块宽度 15 mm,厚度 2 mm,支座宽度 13 mm,试验加载装置如图 3 所示。加载按照《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)<sup>[15]</sup>相关规定执行,试验前均进行预加载,以保证接触面的正常接触和仪器设备的正常工作,正式加载根据预估的极限荷载,采用分级加载制度,每级加载后持荷 5 min 完成裂缝的观察。

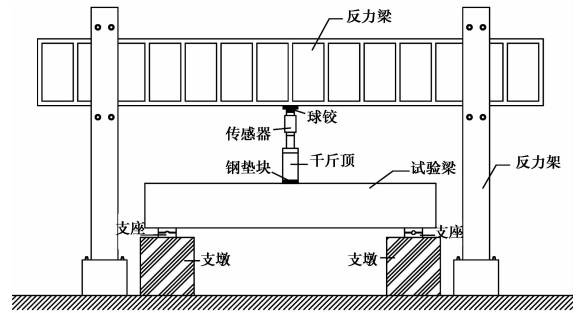


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test setup for specimens

试验测量的主要内容包括:荷载变化、跨中支座挠度、开裂荷载、主斜裂缝荷载,裂缝发展。采集仪器使用 MGCpuls 动态应变仪,采样频率为 50 Hz,详细测点布置如图 4 所示。

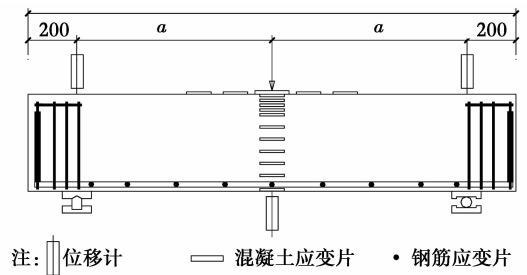


图 4 测点布置

Fig. 4 Monitoring point arrangement

## 2 试验结果与分析

图 5 为所有构件最终破坏形态(NC40 系列梁引用文献[16],该梁与本文 SC40 系列构件参数一致)。所有构件均发生剪切破坏,裂缝最先出现在跨中弯矩最大区域。自密实混凝土梁和普通混凝土裂缝形态、发展大致相同,高强混凝土梁破坏时,发出较大的劈裂声。如图 6 所示,自密实混凝土和 C60 系列普通混凝土梁劈裂面较为光滑,自密实混凝土梁劈裂面粗骨料分布间距较大;对于高强混凝土,无论是自密实混凝土还是普通混凝土,斜裂缝面上的粗骨料几乎全部劈裂,但对于普通强度混凝土梁,斜裂缝面绕过了大部分粗骨料。

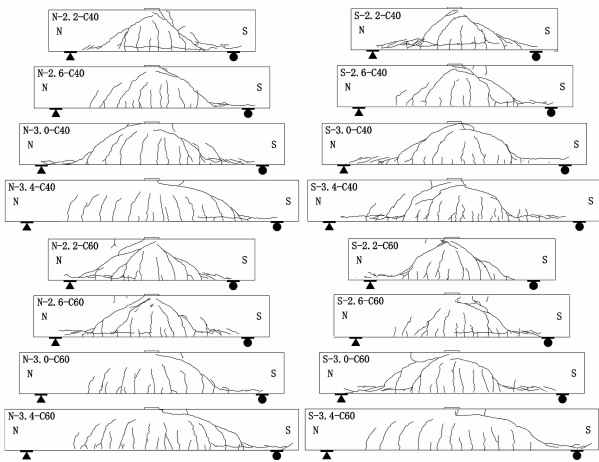


图 5 裂缝破坏形态

Fig. 5 Crack patterns of tested beams at failure

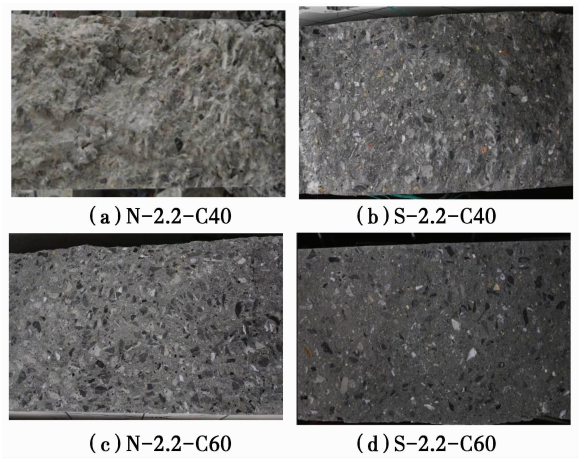


图 6 斜裂缝断面

Fig. 6 Inclined section

各试件的试验结果如表 4 所示。钢筋应变测试结果表明(部分结果见图 8),除 S-2.2-C40 梁北跨  $L/4$  处钢筋屈服外,其他梁的纵向应变均未达到屈服应变。测试结果还表明,受压边缘的混凝土应变也远小于极限压应变。

图 7 为试验梁的荷载-挠度曲线。开裂前,荷载-挠度关系呈直线,开裂后进入非线性阶段,试件刚度降低。主斜裂缝形成后,试件刚度进一步降低。最终,主斜裂缝贯穿截面,曲线达到峰值,随后,荷载迅速下降,试件发生剪切破坏。

表 4 试验数据

Table 4 Details of experimental beams

试件编号	$f_c'$ /MPa	$f_{cu}$ /MPa	$f_{t,s}$ /MPa	$V_{fl}$ /kN	$V_{cr}$ /kN	$V_u$ /kN	破坏形态	斜裂缝发展
S-2.2-C40	30.19	39.85	3.11	30.0	80.20	139.74	剪压破坏	S2.2-C40/C60 先出现腹剪斜裂缝, N-2.2-C60 先出现弯剪斜裂缝斜,加载至破坏荷载 50%~70%时,出现从支座到加载板的斜裂缝。
S-2.2-C60	49.36	60.09	3.79	40.0	102.50	150.11	剪压破坏	
N-2.2-C60	47.54	61.27	3.92	47.5	102.50	211.59	剪压破坏	
S-2.6-C40	32.69	38.11	2.89	22.5	90.00	91.75	剪压破坏	先出现弯剪斜裂缝斜向上发展,加载至破坏荷载 80%~95%时,出现从 $L/4$ 跨弯剪斜裂缝延伸到加载板的斜裂缝。
S-2.6-C60	40.11	56.15	3.67	30.0	92.50	98.70	剪压破坏	
N-2.6-C60	48.09	59.38	3.85	45.0	111.00	138.17	剪压破坏	
S-3.0-C40	32.27	42.34	3.22	22.5	72.50	80.10	斜拉破坏	
S-3.0-C60	50.68	59.23	3.82	25.0	90.00	105.10	斜拉破坏	先出现弯剪斜裂缝斜向上发展,加载至破坏荷载 85%~95%时, $L/4$ 跨附近弯剪斜裂缝迅速延伸到加载板下部,形成临界斜裂缝。
N-3.0-C60	47.82	59.66	4.19	22.5	89.07	89.07	斜拉破坏	
S-3.4-C40	30.19	39.43	2.52	22.5	80.00	90.10	斜拉破坏	
S-3.4-C60	52.42	61.89	3.71	24.5	94.15	94.15	斜拉破坏	
N-3.4-C60	48.15	62.13	4.42	36.0	97.10	97.10	斜拉破坏	

注:  $f_c'$  为混凝土圆柱体(300 mm $\times$  $\Phi$ 150 mm)抗压强度;  $f_{cu}$  立方体抗压强度;  $f_{t,s}$  为立方体劈裂抗拉强度;  $V_{fl}$  为开裂荷载;  $V_{cr}$  为主斜裂缝荷载;  $V_u$  为极限抗剪承载力。

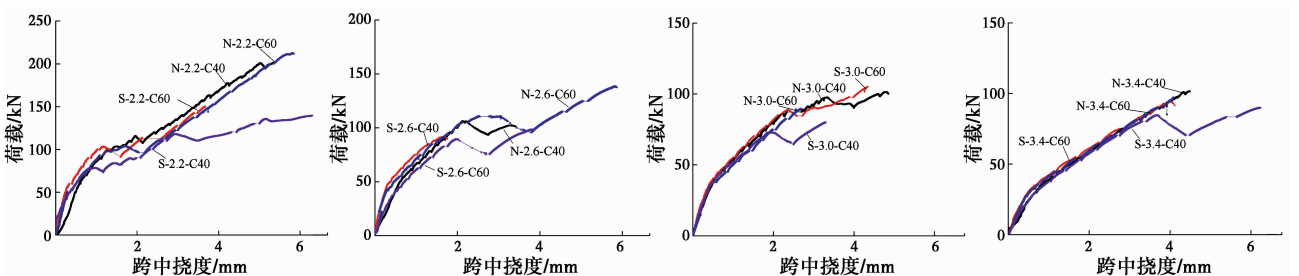


图 7 荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load deflections of the beams

ACI-ASCE 326<sup>[17]</sup> 报告中指出:临界斜裂缝形成后,钢筋混凝土梁的应力将产生重分布。如果内部能够形成新的内力平衡体系,钢筋混凝土梁将可以形成更高的承载力,试验梁极限抗剪承载力将高于临界斜裂缝形成荷载。

图 8 中的部分试件表现出这种性能。临界斜裂缝形成较突然,随后新的内力平衡体系主要由骨料咬合力、纵筋销栓力和受压混凝土的拱作用(Arch action)组成,但破坏仍然为脆性破坏。部分试件的斜裂缝(临界斜裂缝)出现后迅速发展,直到破坏没有发生阶段性的应力重分布和内力平衡体系的转换,表现出更为突然的脆性破坏。

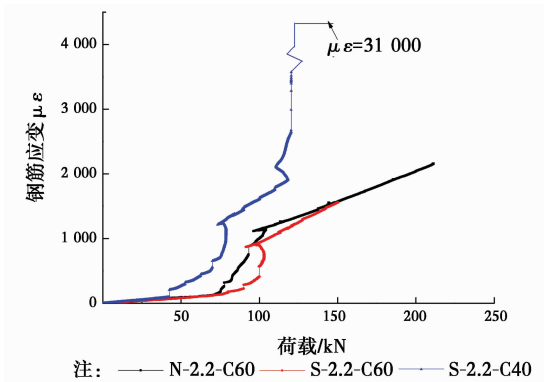


图 8 1/4 跨纵筋应变

Fig. 8 Strain of longitudinal reinforcement in 1/4 span

其中,S-2.2-C40 梁荷载-挠度曲线较为不同,出现从支座附近延伸到加载板的斜裂缝后,荷载突然下降,试件刚度降低,随后继续加载,荷载增至 120 kN 时,荷载略有下降,在北侧 1/4 跨处钢筋屈服,随着荷载缓慢增加,位移迅速增加直至破坏。

S-2.2-C40 产生此现象的主要原因:随着荷载增加,斜裂缝不断发展、宽度增大,骨料咬合力逐渐减小;斜裂缝相交处纵筋应力不断增大,钢筋销栓力增大,钢筋和混凝土粘结应力增大,在支座附近出现更多粘结裂缝。最终,钢筋屈服,位移迅速增加,直至剪压区混凝土被压碎,构件破坏。

### 3 抗剪承载力计算模型

#### 3.1 中国混凝土结构设计规范

中国现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[18]</sup> 集中荷载作用下无腹筋钢筋混凝土梁的抗剪承载力计算式为

$$V_c = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为截面剪跨比,当  $\lambda \leq 1.5$  时,取  $\lambda = 1.5$ ,当

$\lambda > 3.0$  时,取  $\lambda = 3.0$ ;  $f_t$  为混凝土轴心抗拉强度设计值; $b$  和  $h_0$  分别为计算截面的腹板宽度和截面有效高度。

#### 3.2 Zsuttly 的统计分析公式

Zsuttly<sup>[19]</sup> 提出了一个用于无腹筋钢筋混凝土梁的抗剪承载力计算统计式

$$V_c = 2.2 \left( f'_c \rho \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} b d \quad (2.5 \ll a/b) \quad (2)$$

$$V_c = \left( 2.5 \frac{d}{a} \right) \cdot 2.2 \left( f'_c \rho \frac{d}{a} \right)^{\frac{1}{3}} b d \quad (2.5 \gg a/b) \quad (3)$$

式中: $d$  为截面有效高度; $a$  为剪跨段长度; $b$  为截面宽度; $f'_c$  为标准圆柱体抗压强度,MPa; $\rho$  为纵筋配筋率。

#### 3.3 美国 ACI 318-11 规范

根据 ACI 318-11<sup>[6]</sup>,对于无腹筋钢筋混凝土梁的抗剪承载力计算简化式为

$$V_c = 0.166 \sqrt{f'_c} b d \quad (4)$$

式中: $f'_c$  为标准圆柱体抗压强度,MPa; $b$  为腹板宽度; $d$  为截面有效高度。

表 5 结果表明:Zsuttly 拟合公式计算结果与本文试验结果最为接近;中国规范公式计算结果与本文试验结果也吻合得较好,但偏于不安全;美国规范 ACI 318-11 计算公式偏差较大。

表 5 试验梁抗剪承载力与规范预测值比较

Table 5 Shear resistance of SCC beams from experiments and code-based predictions

构件编号	$V_{ex}/$ kN	GB 50010—2010		ACI 318-11		Zsuttly	
		$V_{cal}/$ kN	$V_{ex}/$ $V_{cal}$	$V_{cal}/$ kN	$V_{ex}/$ $V_{cal}$	$V_{cal}/$ kN	$V_{ex}/$ $V_{cal}$
S-2.2-C40	139.74	118.05	1.18	65.67	2.13	106.86	1.31
S-2.6-C40	91.75	102.39	0.90	68.34	1.34	91.33	1.00
S-3.0-C40	80.10	97.64	0.82	67.90	1.18	86.70	0.92
S-3.4-C40	90.10	93.89	0.96	65.67	1.37	81.33	1.11
S-2.2-C60	150.11	147.96	1.01	83.97	1.79	125.89	1.19
S-2.6-C60	98.70	126.71	0.78	75.69	1.30	97.78	1.01
S-3.0-C60	105.10	117.44	0.89	85.09	1.24	100.78	1.04
S-3.4-C60	94.15	120.31	0.78	86.53	1.09	97.76	0.96
平均值			0.92		1.43		1.07
变异系数			0.15		0.25		0.12

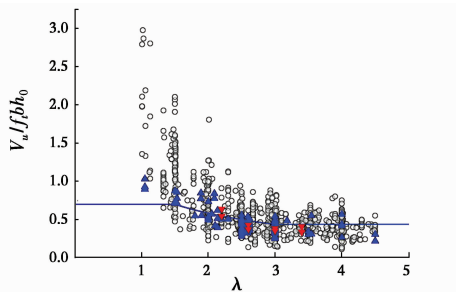
### 4 基于数据库的统计分析

根据公开的论文数据<sup>[10-11,20-35]</sup>,收集了 130 根自

密实混凝土无腹筋梁剪切破坏试验数据。所有试验满足:单点或者两个集中点加载的矩形简支梁; $b \gg 50 \text{ mm}$ ;  $100 \text{ mm} \leq h \leq 500 \text{ mm}$ ;  $1.0 < \lambda \leq 4.5$ ;  $\rho \leq 3.5\%$ ,混凝土强度不低于  $20 \text{ MPa}$ ;无分布纵筋和预应力筋。对于普通混凝土梁试验数据,采用 Collins<sup>[36]</sup>文中收集的试验数据,筛选 798 根普通混凝土无腹筋梁剪切破坏数据。

各个计算强度均采用试验值,标准圆柱体试块和立方体试块强度转换式<sup>[37]</sup>为:当  $f_{cu} \leq 50 \text{ MPa}$  时,  $f_c' = 0.8 f_{cu}$ ;当  $f_{cu} \gg 105 \text{ MPa}$  时,  $f_c' = 0.86 f_{cu}$ ;其间接线性内插法确定。混凝土轴心抗拉强度换算式<sup>[18]</sup>:  $f_t = 0.395 f_{cu}^{0.55}$ 。剪跨比、配筋率、截面有效高度等按规范规定取值。定义  $\gamma_{\text{mod}} = V_{\text{ex}}/V_{\text{cal}}$ 。

图 9 给出了所收集的试验数据和规范公式的比较,表 6 为剪跨比  $1.0 < \lambda \leq 4.5$  区间数据统计分析结果。可见,自密实混凝土梁受剪承载力低于规范公式的非保守点相对率,明显大于普通混凝土梁。自密实混凝土梁在剪跨比小于 1.5 的区间内数据较少,去除这个区间的数据(表 7)后,普通混凝土梁和自密实混凝土梁的非保守点相对率都有所增加,但普通混凝土梁的非保守点相对率增加较多。无论是对于自密实混凝土还是普通混凝土无腹筋梁,按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)抗剪公式计算的非保守点都过多,这是因为,实际工程中的梁是有斜裂缝两侧粗骨料咬合作用对受剪承载力的贡献的,且这种贡献通过箍筋抑制斜裂缝开展来提供,而无腹筋梁因无箍筋,斜裂缝开展相对较大,两侧粗骨料咬合作用相对较弱。自密实混凝土梁受剪承载力低于普通混凝土梁约 10%,非保守点达到 2/3 以上,但两者统计样本数相差较大,而普通混凝土梁的数据更加分散。如果从整体上提高中国规范中受剪承载力计算公式的可靠度,自密实混凝土梁的受剪承载力也可以满足大致相同的安全度要



注: ○ NC ▲ SCC ▼ 本文 SCC — 1.75(1+λ)

图 9 试验值与混凝土规范预测结果比较

Fig. 9 Comparison between test data and results predicted by calculation formula

求。例如,将现行规范计算公式乘以  $0.6 \sim 0.7$  的调整系数,普通混凝土梁的非保守点相对率下降到 5% 的水平,自密实混凝土梁的非保守点相对率也可以下降到同样的水平。

表 6 计算模型预测结果统计指标 ( $1.0 < \lambda \leq 4.5$ )

Table 6 Calculation model to predict the results of statistical indicators ( $1.0 < \lambda \leq 4.5$ )

计算模型	$m$	$c$	$R^2$	$(n_u/n)/\%$	5%	95%
NC	1.11	0.40	0.63	44.71	0.60	1.90
SCC	0.92	0.21	0.91	68.84	0.63	1.28

表 7 计算模型预测结果统计指标 ( $1.5 < \lambda \leq 4.5$ )

Table 7 Calculation model to predict the results of statistical indicators ( $1.5 < \lambda \leq 4.5$ )

计算模型	$m$	$c$	$R^2$	$(n_u/n)/\%$	5%	95%
NC	1.05	0.34	0.74	49.27	0.60	1.72
SCC	0.91	0.20	0.92	71.97	0.63	1.26

注: $m$ 、 $c$  分别表示计算模型误差的均值和变异系数; $R^2$  表示模型对试验数据整体拟合程度; $n_u/n$  表示非保守估计数据点( $\gamma_{\text{mod}}$  小于 1.0)所占比例;5%、95% 代表 5%、95% 分位数对应  $\gamma_{\text{mod}}$  值。

## 5 结论

通过对 12 根无腹筋钢筋混凝土梁在集中荷载作用下抗剪承载力的剪切试验研究和数据分析,可得出如下结论:

1) 自密实混凝土梁和普通混凝土梁的裂缝发展、破坏形态大致相同,但自密实混凝土梁斜裂缝断面更为光滑,高强混凝土梁斜裂缝面上的粗骨料全部劈裂,普通强度混凝土梁斜裂缝面绕过了大部分粗骨料。

2) 不论是普通混凝土无腹筋梁还是自密实混凝土无腹筋梁,突然出现的临界斜裂缝导致应力重分布,新的内力平衡体系可能使得梁的极限承载力高于临界斜裂缝出现对应的荷载。

3) Zsutty 拟合公式计算结果与本文试验结果最为接近;中国规范公式计算结果与本文试验结果也符合得较好,但偏于不安全;美国规范 ACI 318-11 计算公式偏差较大。

4) 试验数据统计分析表明,集中荷载下,中国规范受剪承载力计算公式偏于不安全。自密实混凝土梁受剪承载力略低于普通混凝土梁,但相对中国规范公式的分散程度小于普通混凝土梁。提高中国规范受剪承载力计算公式的可靠度,可同时满足普通

混凝土和自密实混凝土无腹筋梁受剪承载力的可靠度要求。

#### 参考文献:

- [1] OZAWA K. High performance concrete based on the durability design of concrete structures [C]// East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, 1989.
- [2] OKAMURA H. Self-compacting high-performance concrete [J]. *Concrete International*, 1997, 19(7): 50-54.
- [3] TAYLOR H P J. Investigation of the forces carried across cracks unreinforced concrete beams in shear by interlock of aggregate [R]. Cement and Concrete Association, London, 1970:22.
- [4] DAS D, KAUSHIK S K, GUPTA V K. Shear resistance of self-compacting concrete [C]// Proceedings Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, (CD-ROM), Chicago, Illinois, 2005.
- [5] WILSON N D, KIOUSIS P. High-strength SCC in shear [C]// Proceedings Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, (CD-ROM), Chicago, Illinois, 2005.
- [6] ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary; ACI 318-11 [S]. Farmington Hills; American Concrete Institute, 2011.
- [7] SCHIESSL A, ZILCH K. The effect of the modified composition of SCC on shear and bond behavior [C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan, 2001.
- [8] BENDERT D A, BURGUEÑO R. Report on the experimental evaluation of prestressed box beams for SCC demonstration bridge [R]. Research Rep. CEE-RR-2006, 2006.
- [9] BENDERT D A, BURGUEÑO R. Report on the production of prestressed box beams for SCC demonstration bridge [R]. CEE-RR-2006, 2006.
- [10] HASSAN A A A, HOSSAIN K M A, LACHEMI M. Behavior of full-scale self-consolidating concrete beams in shear [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2008, 30(7): 588-596.
- [11] HASSAN A A A, HOSSAIN K M A, LACHEMI M. Strength, cracking and deflection performance of large-scale self-consolidating concrete beams subjected to shear failure [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(5): 1262-1271.
- [12] KHAYAT K, MITCHELL D. Self-consolidating concrete for precast, prestressed concrete bridge elements [M]. Transportation Research Board, 2009.
- [13] DYMOND B Z. Shear strength of a PCBT-53 girder fabricated with lightweight, self-consolidating concrete [D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [14] 普通混凝土力学性能试验方法: GB/T 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081-2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese)
- [15] 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Testing methods of concrete structures: GB/T 50152-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 丁雅博. 轻骨料混凝土无腹筋梁抗剪性能试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016: 21-35.
- DING Y B. Experimental study on the shear behavior of lightweight aggregate concrete beams without shear reinforcement [D]. Changsha: Hunan University, 2016: 21-35. (in Chinese)
- [17] ACI-ASCE Committee 326 [S]. Shear and Diagonal Tension, Part 1.
- [18] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 56-57.
- Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 56-57. (in Chinese)
- [19] ZSUTTY T C. Beam shear strength prediction by analysis of existing data [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1968, 65(11): 943-951.
- [20] BIOLZI L, CATTANEO S, MOLA F. Bending-shear response of self-consolidating and high-performance reinforced concrete beams [J]. *Engineering Structures*, 2014, 59(2): 399-410.
- [21] HASSAN A A A, ISMAIL M K, MAYO J. Shear behavior of scc beams with different coarse-to-fine aggregate ratios and coarse aggregate types [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(11): 1-11
- [22] LACHEMI M, HOSSAIN K M A, LAMBROS V. Shear resistance of self-consolidating concrete beams—experimental investigations [J]. *Canadian Journal of*

- Civil Engineering, 2005,32(6):1103-1113.
- [23] SAFAN M O. Shear strength of self-compacting concrete containing different fillers and coarse aggregates [J]. Concrete Research Letters, 2011, 2(4): 300-314
- [24] AREZOUMANDI M, VOLZ J S. Shear strength of chemically based self-consolidating concrete beams; fracture mechanics approach versus modified compression field theory [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(4):713-720.
- [25] VAN ITTERBEECK P, CAUBERG N, PARMENTIER B, et al. Shear capacity of self-compacting concrete [C]//Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete (on cd-rom), Iowa State University and ACBM, 2013: 1-10.
- [26] HELINCKS P, BOEL V, CORTE W D, et al. Structural behaviour of powder-type self-compacting concrete: Bond performance and shear capacity [J]. Engineering Structures, 2013, 48: 121-132.
- [27] 丁一宁,达布希拉图,尤志国.不同纤维替代自密实混凝土梁中抗剪箍筋的试验研究[J].水利学报,2011, 42(9):1088-1094.  
DING Y N, DA B L X T, YOU Z G. Using hybrid fiber as replacement of stirrups for enhancing shear behavior of self-compacting concrete beams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(9): 1088-1094. (in Chinese)
- [28] 刘岳鑫,丁一宁,刘思国.钢纤维对钢筋自密实混凝土梁抗剪性能的影响[J].混凝土,2009(10):83-87.  
LIU Y X, DING Y N, LIU S G. Influence of steel fiber on shear performance of reinforced self-compacting beams [J]. Concrete,2009(10):83-87. (in Chinese)
- [29] 丁一宁,刘亚军,刘思国,等.钢纤维自密实混凝土梁抗剪性能的试验研究[J].水利学报,2011, 42(4): 461-468.  
DING Y N, LIU Y J, LIU S G. Study on shear resistance of steel fiber reinforced self-compacting concrete beams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4):461-468. (in Chinese)
- [30] 刘亚军.钢纤维对自密实钢筋混凝土梁受剪性能的影响[D].辽宁大连:大连理工大学,2009.  
LIU Y J. The fiber influence on shear properties of self-compacting steel reinforced concrete beams [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [31] 土屋智史,三島徹也,前川宏一.高強度構成材料を用いたRC梁部材のせん断破壊と数値性能評価[J].土木学会論文集,2002:65-84.  
SATOSHI T, TETSUYA M, KOICHI M. Shear failure and numerical performance evaluation of RC beam members made with high-strength materials [J]. Japan Concrete Institute, 2002:65-84. (in Japanese)
- [32] 下野一行,柏原茂,佐藤勉.高強度材料を用いたRC梁部材のせん断耐力に関する実験的研究(高強度コンクリート(構造))[J].コンクリート工学年次論文報告集,1999, 21:175-180.  
SHIMONO K, KASHIWABARA S, SATO T, et al. Experimental study on shear strength evaluation in reinforced concrete beams using high-strength materials [J]. Japan Concrete Institute, 1999, 21:175-180. (in Japanese)
- [33] HANOON A N, JAAFAR M S, ABED H J. Experimental investigations into the shear behavior of self-compacting RC beams with and without shear reinforcement [J]. Constructii Journal, 2014, 15(2): 15-23.
- [34] 原夏生,三島徹也,山田尚義,等.自己充填型高強度高耐久コンクリートを用いたRC梁のせん断耐力(せん断)[J].土木学会論文集,2001, 23:925-930.  
HARA N, MISHIMA T, YAMADA N, et al. Shear capacity of reinforced concrete beams using self-compacting high-strength high-durability concrete [J]. Japan Concrete Institute, 2001, 23: 925-930. (in Japanese)
- [35] ATSHAN A F. Shear behavior of self compacting concrete [J]. Journal of Engineering and Development, 2012,16(2):289-305.
- [36] COLLINS M P, BENTZ E C, SHERWOOD E G. Where is shear reinforcement required? Review of research results and design procedures [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(5): 590.
- [37] CEB-FIB Model code 2010[S]. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete,2010.