

文章编号:1673-2049(2017)05-0120-07

基于试验数据的高强混凝土梁抗剪承载力 计算方法Ⅱ. 有腹筋梁

黄 靓¹, 郑钟国¹, 鲁懿虬², 李 叶¹, 包堂堂¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 奥克兰大学 土木与环境工程系, 奥克兰 1142)

摘要:收集了国内外学者所做的 281 根高强混凝土有腹筋梁剪切破坏的试验数据,建立了高强混凝土有腹筋梁剪切破坏的数据库。将数据库中所有梁的试验结果与中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、美国混凝土结构设计规范 ACI 318-14 中的公式以及 Zsutty 公式所预测的结果进行比较,研究各公式对于高强混凝土梁的适用性,再将 GB 50010—2010 公式中的系数进行修正,得到一个新的公式。结果表明:Zsutty 公式的预测结果最精确,美国 ACI 318-14 规范中公式的预测结果最为保守;新公式较原规范公式更加适用于高强混凝土有腹筋梁。

关键词:高强混凝土;有腹筋梁;抗剪承载力;数据库;计算方法

中图分类号:TU311 **文献标志码:**A

Calculation Method of Shear Capacity of High Strength Concrete Beams Based on Experimental Data Ⅱ. With Web Reinforcement

HUANG Liang¹, ZHENG Zhong-guo¹, LU Yi-qiu², LI Ye¹, BAO Tang-tang¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Auckland, Auckland 1142, New Zealand)

Abstract: The experimental data of shear failure of 281 high-strength concrete beams with web reinforcement were collected, and a database of shear failure of high-strength concrete with web reinforcement was established. The results of all the beams in the database were compared with those predicted by GB 50010—2010, ACI 318-14 and Zsutty equation. The applicability of each formula to high strength concrete beam was studied. Then, the formula in GB 50010—2010 was modified to get a proposed formula. The results show that the prediction results of the Zsutty equation are the most accurate, and the prediction results of the formula in ACI 318-14 are the most conservative. The proposed formula is more suitable for high strength concrete beams with web reinforcement compared to the formula in GB 50010—2010.

Key words: high strength concrete; beam with web reinforcement; shear capacity; database; calculation method

0 引言

随着高强混凝土的发展,高强混凝土的推广和

应用是一个必然的趋势,国内外许多学者都进行了
高强混凝土梁抗剪承载力的试验研究。

相比无腹筋梁,有腹筋梁的箍筋能够有效地提

收稿日期:2017-07-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0703000)

作者简介:黄 靓(1974-),男,湖南株洲人,副教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:huangliangstudy@126.com。

高混凝土梁的抗剪强度,改善混凝土梁的脆性;Elzanaty 等^[1]对有腹筋梁进行了抗剪试验,结果表明,提高箍筋的用量等可以防止高强混凝土梁发生斜拉破坏,Johnson 等^[2]在对高强混凝土梁进行抗剪试验后,得出了相同的结论,Yoon 等^[3-5]的试验结果也得出了相同结论,并且发现箍筋最小需求量和箍筋强度、纵筋配筋率有关。顾湘凌^[6]制作了 18 根混凝土强度等级为 C55~C70 的高强箍筋高强混凝土梁,并进行了抗剪试验,结果表明,箍筋能够有效地改善混凝土梁的脆性,纵筋仅在一定范围内对抗剪承载力的影响比较明显。易伟建等^[7]借助刚性试验系统完成了 6 根双高混凝土梁的抗剪试验,结果表明,箍筋可以有效限制裂缝的开展,配有箍筋梁的受剪破坏是延性破坏。有的学者对规范中的计算公式和影响抗剪承载力的因素进行研究:Sarsam 等^[8]对 14 根高强混凝土有腹筋梁进行了试验,Kong 等^[9]进行了 43 根高强混凝土有腹筋梁的抗剪试验,结果表明,高强混凝土梁的试验结果与各规范的预测结果离散性较大。Raghu^[10]对 18 根高强混凝土有腹筋梁进行试验,研究了高强混凝土对梁所提高的抗剪成分。

本文在前人的研究基础上,收集他们的试验数据,建立数据库,并利用数据库中的数据对本文选择的 3 个理论计算公式运用在高强混凝土有腹筋梁时的适用性和准确性进行评价,再进一步分析中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010,以下简称中国规范)公式在不同的剪跨比、配筋率、截面有效高度、配箍率和箍筋强度情况下对高强混凝土有腹筋梁的适用性和准确性,并利用数据库中的试验数据对中国规范公式的参数进行拟合,得到一个新的公式,可以为进一步修订、完善中国规范的设计方法提供參考。

1 试验数据

本文研究工作针对的对象为高强混凝土矩形梁试件,研究的是其在集中荷载作用下的抗剪承载力,所以对收集数据的试验对象有以下几点限制:①梁的混凝土强度在 C60 以上;②受剪破坏;③集中荷载作用;④非异形梁。将收集的 281 根高强混凝土有腹筋梁的抗剪试验数据建立一个数据库进行分析,表 1 给出了详细的试验参数信息。对于混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 与圆柱体抗压强度 f_c ,按以下公式进行换算

$$f_c = \begin{cases} 0.79f_{cu} & \text{C60 以下} \\ 0.833f_{cu} & \text{C60} \\ 0.857f_{cu} & \text{C70} \\ 0.875f_{cu} & \text{C80 及 C80 以上} \end{cases} \quad (1)$$

对于有些试验数据未给出混凝土轴心抗拉强度 f_t ,按规范给出的计算公式(2)进行计算

$$f_t = 0.395f_{cu}^{0.55} \quad (2)$$

由于中国规范公式中的 f_{yv} 指的是箍筋的抗拉强度设计值,而其他 2 个公式中箍筋对抗剪强度的贡献项都是用箍筋的屈服强度 f_{yt} ,国外的试验数据都未给出箍筋的抗拉强度设计值,故用以下公式进行换算

$$f_{yv} = \begin{cases} f_{yt}/1.1 & f_{yt} < 500 \text{ MPa} \\ f_{yt}/1.15 & f_{yt} \geq 500 \text{ MPa} \end{cases} \quad (3)$$

从表 1 中可以看出:试验梁的混凝土圆柱体抗压强度在 47~130 MPa 之间;剪跨比 λ 为 1.2~4,截面有效高度 h_0 为 215~925 mm,大部分在 200~600 mm 之间;受拉纵筋配筋率 ρ_l 为 1%~6%;配箍率 ρ_{sv} 与箍筋屈服强度 f_{yt} 的乘积在 0.33~19.45 MPa 之间。

2 抗剪承载力计算公式

2.1 中国规范 GB 50010—2010

中国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中对于不同混凝土强度有腹筋梁在集中荷载作用下的抗剪承载力 V 都采用以下公式计算

$$V \leq V_u = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 \quad (4)$$

式中:当 $\lambda < 1.5$ 时,取 $\lambda = 1.5$,当 $\lambda > 3$ 时,取 $\lambda = 3$; A_{sv} 为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积; s 为沿构件长度方向的箍筋间距; V_u 为实测抗剪承载力; b 为截面的腹板宽度。

2.2 美国规范 ACI 318-14

美国混凝土结构设计规范 ACI 318-14(以下简称美国规范)中无腹筋梁抗剪承载力 V_c 计算公式为

$$V_c = (0.158\sqrt{f_c} + 17.2\rho_l \frac{V_u d}{M_u}) b_w d + \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (5)$$

式中: b_w 为计算截面的腹板宽度; d 为计算截面的有效高度; M_u 为计算截面的弯矩; $\frac{V_u d}{M_u}$ 为计算截面的广义剪跨比; A_v 为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积。

表 1 高强混凝土有腹筋梁抗剪试验数据汇总									
Tab. 1 Test Data Summary of Shear Tests of High Strength Concrete Beams with Web Reinforcement									
数据来源	试件个数	f_c' /MPa	λ	f_t /MPa	b /mm	h_0 /mm	ρ_l /%	$\rho_{sv}f_{yt}$ /MPa	V_u /kN
文献[11]	12	47.48~63.68	1.50~3.61	3.65~4.22	122.0~151.0	218.0~270.0		0.84~7.18	109.90~303.10
文献[12]	16	90.04~128.28	1.00~3.01	5.05~6.14	147.0~160.0	254.0~274.0	2~4	2.87~4.20	267.10~722.80
文献[13]	15	83.65~128.28	0.99~3.03	3.42~4.32	150.0	232.0~300.0	2~4	2.21~5.53	192.00~476.00
文献[14]	9	47.48~65.63	3.06	3.04~3.31	200.0	359.0	1~2	0.96~1.11	191.47~261.29
文献[15]	6	49.36	2.26~2.47	2.04	150.0	243.0~265.0	2~5	1.46~4.79	271.8~643.87
文献[16]	6	49.40	2.26~2.50	3.73	150.0	235.0~265.0	2~5	1.46~3.28	136.74~322.78
文献[17]	5	50.15~57.93	1.50~2.60	3.76~4.57	200.0	365.0~435.0	2	0.64~1.11	228.00~501.41
文献[18]	3	89.50	3.00	5.04	200.0	380.0~385.0	2	0.57~0.98	252.00~316.00
文献[19]	5	81.64	3.00	4.79	196.0~203.0	386.0~416.0	2	0.57~0.98	180.00~267.00
文献[20]	4	75.43	1.50~3.00	4.03	150.0	265.0	3	1.73~3.46	201.00~403.50
文献[21]	4	68.25~85.23	2.60	4.34~4.90	200.0	435.0	2	0.56~0.95	208.00~353.00
文献[22]	1	56.56	2.45	4.02	200.0	335.0	4	1.79	330.00
文献[1]	1	62.74	4.00	4.19	178.0	272.0	3	0.70	150.10
文献[2]	5	51.30~72.33	3.10	3.81~4.48	304.0	538.7	3	0.40~0.70	266.05~330.58
文献[23]	10	72.41~125.31	2.50~3.00	4.48~6.06	355.6~457.2	558.8~762.0	2~7	0.33~8.05	267.58~2 011.20
文献[8]	11	70.10~80.10	2.50~4.00	4.40~4.59	180.0	233.0	3~4	0.76~1.53	122.60~247.86
文献[24]	4	90.00~103.24	3.00~5.00	5.05~5.45	127.0	198.1	5	1.65~2.53	93.72~122.54
文献[23]	16	67.00~87.00	3.05	4.29~4.96	375.0	655.0	3	0.34~1.00	405.00~721.00
文献[25]	4	56.20~77.60	0.85~1.69	3.30~6.40	220.0	442.5	3	5.05~10.10	335.00~760.00
文献[9]	43	63.60~89.40	1.75~3.30	4.22~5.03	250.0	292.0~542.0	2~4	0.60~1.27	174.90~573.40
文献[26]	7	67.25~103.44	3.55	4.30~5.45	140.0	1 779.5~183.0	3~5	0.35	53.53~78.01
文献[27]	6	93.23~107.74	3.00	5.15~5.58	350.0	400.0	2	1.02~3.93	406.00~665.00
文献[4]	13	58.00~82.00	3.00~5.00	4.01~4.80	150.0	310.0	3~4	0.35~0.71	93.60~343.80
文献[28]	24	52.00~73.00	1.50~2.50	3.84~4.50	125.0	215.0	4	0.99~7.49	98.63~280.31
文献[29]	6	47.00~75.00	2.50~3.00	3.74~4.57	169.0~300.0	459.0~925.0	1	0.40~0.80	139.00~583.00
文献[10]	4	61.00~91.00	2.00	4.12~5.08	80.0	135.0	2	1.25~1.88	88.00~97.00
文献[30]	2	65.00~80.00	2.70	4.27~4.73	300.0	925.0	2	0.40	395.00~452.00
文献[5]	15	47.65~79.20	2.50~3.10	3.75~5.99	85.0~200.0	126.0~300.0	2~6	0.34~6.40	24.53~270.00
文献[31]	12	49.90~87.00	3.06~3.08	3.46~4.22	200.0	351.0	2~3	0.75~1.29	177.64~308.71
文献[32]	6	50.90~68.50	4.00	3.79~4.35	200.0	265.0	2	0.48	131.20~149.50
文献[33]	4	79.20	2.35	4.71	183.0	511.0	6	4.86~19.45	729.00~1 121.00
文献[34]	5	50.30	1.23	3.77	300.0	369.0	5	1.90~3.75	587.20~758.70

注： f_c' 为圆柱体抗压强度； λ 为计算截面的剪跨比； f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值； b 为计算截面的腹板宽度； h_0 为计算截面的有效高度； ρ_l 为受拉纵筋配筋率； ρ_{sv} 为配箍率； f_{yt} 为箍筋屈服强度； V_u 为实测抗剪承载力。

2.3 Zsutty 公式

1968 年,Zsutty 提出了能够较为准确预测抗剪承载力的公式,即

$$V=\begin{cases} 2.2(f_c'\rho\frac{d}{a})^{\frac{1}{3}}bd+\rho_vf_{yt}bd & \frac{a}{d}>2.5 \\ 2.5\frac{d}{a}2.2(f_c'\rho\frac{d}{a})^{\frac{1}{3}}bd+ & \\ \rho_vf_{yt}bd & \frac{a}{d}\leqslant2.5 \end{cases} \quad (6)$$

式中： ρ 为纵筋的配筋率； a 为集中荷载作用点至支座截面或节点边缘的距离； ρ_v 为配箍率。

3 抗剪承载力计算公式分析

根据所收集的试验数据及相关参数,用各抗剪强度公式计算出高强混凝土有腹筋梁抗剪承载力,再由此得出试验值与计算值的比值,并对该比值进行分析,结果见表 2。

由表 2 可知,抗剪承载力试验值与以上 3 个公式所得到的抗剪承载力计算值比值的均值都大于 1,都能保证安全;试验值与美国规范公式计算值比值的均值为 1.466,安全储备太大,过于保守,变异

表 2 承载力试验值与计算值比值的统计数据

Tab.2 Statistical Data of Ratios of Experimental Values to Calculated Values of Bearing Capacity

公式来源	平均值	标准差	变异系数
GB 50010—2010	1.260	0.460	0.365
ACI 318-14	1.466	0.506	0.345
Zsutty	1.177	0.373	0.317

系数为 0.345,离散性大。在上述 3 个公式中,Zsutty 公式的平均值、变异系数分别为 1.177,0.317,为 3 个公式中最小的,所以该公式是 3 个公式中最精确的。中国规范公式预测的变异系数最大,离散性是最大的。以数据库中的试验值为横坐标,3 个公式的计算值为纵坐标,得到图 1~3,以直线 $y=x$ 为参考线,数据点越接近参考线则公式预测越准确。由图 1~3 可以看出,Zsutty 公式拟合结果最好,美国规范公式准确性不如中国规范公式,但数据离散性小于中国规范公式。

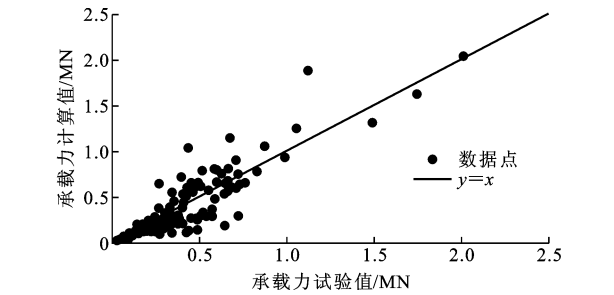


图 1 承载力试验值与 GB 50010—2010 公式计算值对比
Fig.1 Comparison of Experimental Values and Calculated Values by GB 50010—2010 Formula of Bearing Capacity

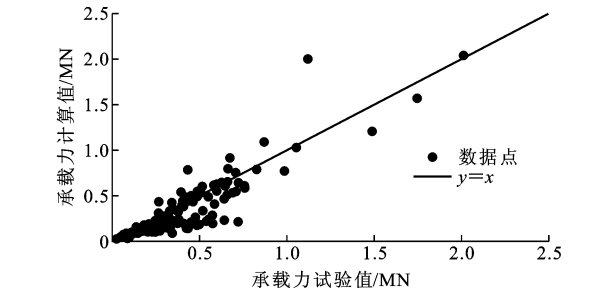


图 2 承载力试验值与 ACI 318-14 公式计算值对比
Fig.2 Comparison of Experimental Values and Calculated Values by ACI 318-14 Formula of Bearing Capacity

4 不同情况下的中国规范公式分析

为了更好地检验中国规范公式对高强混凝土有腹筋梁的适用性和准确性,本文将收集到的所有数据进行筛选。

将收集到的高强混凝土有腹筋梁的数据分为 5 级 10 类:

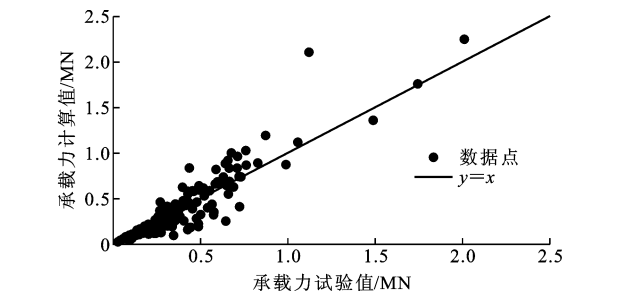


图 3 承载力试验值与 Zsutty 公式计算值对比
Fig.3 Comparison of Experimental Values and Calculated Values by Zsutty Equation of Bearing Capacity

- (1)第一级,1 类,为全部的高强混凝土有腹筋梁试件。
- (2)第二级,2 类、3 类,2 类为 140 个剪跨比 $\lambda \leq 2.5$ 的试件,3 类为 151 个剪跨比 $\lambda > 2.5$ 的试件。
- (3)第三级,4 类、5 类,4 类为 31 个 $\rho_l \leq 1\%$ 的试件,5 类为 238 个 $\rho_l > 2\%$ 的试件;由于有 12 根梁的试验数据中没有给出 ρ_l ,所以第三级总共 269 个试件。
- (4)第四级,6 类、7 类,6 类为 258 个 $h_0 \leq 600$ mm 的试件,7 类为 23 个 $h_0 > 600$ mm 的试件。
- (5)第五级,8 类、9 类和 10 类,8 类为 142 个 $\rho_{sv} f_{yt} \leq 1$ MPa 的试件,9 类为 60 个 $\rho_{sv} f_{yt} \leq 2$ MPa 的试件,10 类为 79 个 $\rho_{sv} f_{yt} > 2$ MPa 的试件。
- 表 3 为承载力试验值与 Zsutty 公式计算值的对比。从表 3 中可以看出,当截面有效高度大于 600 mm 时,试验值与中国规范公式计算结果比值的平均值为 0.765,小于 1,说明中国规范公式在这种情况下计算预测是不够安全的。

表 3 各影响因素下的数据分析结果					
Tab.3 Data Analysis Results with Different Variations					
级别	梁参数	根数	平均值	标准差	变异系数
一	所有试件	281	1.260	0.460	0.365
	$\lambda \leq 2.5$	140	1.419	0.538	0.379
二	$\lambda > 2.5$	151	1.100	0.291	0.265
	$\rho_l \leq 1\%$	31	1.276	0.750	0.588
三	$\rho_l > 2\%$	238	1.257	0.420	0.334
	$h_0 \leq 600$ mm	258	1.304	0.453	0.347
四	$h_0 > 600$ mm	23	0.765	0.145	0.190
	$\rho_{sv} f_{yt} \leq 1$ MPa	142	1.097	0.326	0.297
五	$1 \text{ MPa} < \rho_{sv} f_{yt} \leq 2 \text{ MPa}$	60	1.524	0.533	0.350
	$\rho_{sv} f_{yt} > 2 \text{ MPa}$	79	1.353	0.487	0.360

除上述情况外,中国规范公式的预测是能够保证安全的,但是平均值、标准差和变异系数仍较大,可对中国规范公式进行调整与修正,使该公式应用

于高强混凝土有腹筋梁时更加精确合理。

5 中国规范公式的调整与修正

5.1 中国规范公式的调整

本文收集的高强混凝土无腹筋梁试验数据中的抗剪强度试验值与中国规范公式预测值之比的平均值和变异系数分别为 1.260,0.365,虽然具有一定的安全储备,但预测结果不够精确,会造成一定的浪费,而且变异系数较大,离散性较大。因此对中国规范公式进行调整是有必要的,使其更加适用于高强混凝土有腹筋梁。

中国规范公式中的一些系数没有物理意义,是通过一些试验数据得到的经验系数,本文不添加其他的物理量,仅依据数据库中的试验数据对这些经验系数进行修正,以期得到更加适用于高强混凝土梁的抗剪承载力公式。

本文基于收集到的 281 根高强混凝土有腹筋梁的试验数据,对中国规范公式进行适当的调整与修正,通过软件对中国规范公式的参数进行拟合并经过手动调整,对于集中荷载下无弯起钢筋的混凝土有腹筋梁得到如下抗剪承载力公式

$$V_u=\frac{a'}{\lambda+b}f_t b' h_0+c' f_{yv}+\frac{A_{sv}}{s} h_0$$

(7)

式中: $a'=1.65;b'=0.75;c'=1.3$;当 $\lambda<1.5$ 时,取 $\lambda=1.5$;当 $\lambda>3$ 时,取 $\lambda=3$ 。

5.2 基于数据库对新公式的检验

为了检验公式(7)的准确性,将数据库中的试验数据代入式(7)中,并与中国规范公式结果进行对比分析,来判定新公式是否比中国规范公式更为合理,整理的结果见表 4。

从表 4 的数据分析结果可以看出:对于高强混凝土有腹筋梁,试验值与新公式预测值之比的平均值、标准差和变异系数都明显减小,对各级各类梁的数据单独分析结果也是一样,说明新公式较中国规范公式更加精确合理,新公式较中国规范公式更适用于高强混凝土有腹筋梁。

6 结 语

(1)本文选用的 3 个混凝土梁抗剪承载力计算公式中,试验结果与 Zsutty 公式预测结果最接近,用 Zsutty 公式预测高强混凝土有腹筋梁的抗剪承载力是最准确的,而且数据离散性最小。试验值与美国规范公式预测值相差较大,较为保守,安全储备过高,数据离散性也较大。中国规范公式的准确性

表 4 新公式和规范 GB 50010—2010 公式的计算结果对比

Tab. 4 Comparison of Calculation Results Between New Formula and Formula in GB 50010—2010

级别	类别	公式	平均值	标准差	变异系数
一	1	原公式	1.260	0.460	0.365
		新公式	1.123	0.381	0.344
二	2	原公式	1.419	0.538	0.379
		新公式	1.236	0.451	0.364
	3	原公式	1.100	0.291	0.265
		新公式	1.011	0.266	0.263
三	4	原公式	1.276	0.750	0.588
		新公式	1.151	0.659	0.573
	5	原公式	1.257	0.420	0.334
		新公式	1.120	0.345	0.308
四	6	原公式	1.304	0.453	0.349
		新公式	1.159	0.381	0.329
	7	原公式	0.765	0.145	0.190
		新公式	0.717	0.132	0.184
五	8	原公式	1.097	0.326	0.297
		新公式	1.018	0.301	0.295
	9	原公式	1.524	0.533	0.350
		新公式	1.344	0.446	0.332
	10	原公式	1.353	0.487	0.360
		新公式	1.139	0.401	0.352

介于 Zsutty 公式和 ACI 318-14 规范公式之间,但离散性最大,对于高强混凝土有腹筋梁的适用性较差。

(2)对于截面有效高度大于 600 mm 的高强混凝土有腹筋梁,中国规范公式预测偏于不安全。

(3)将收集到的试验梁数据分级分类处理,发现每一类梁的试验值与新公式预测值比值的均值、标准差和变异系数较中国规范公式都变小,说明新公式较中国规范公式更加准确,离散性也更小。

参考文献:

References:

[1] ELZANATY A H,NILSON A H,SLATE F O. Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-strength Concrete[J]. ACI Journal Proceedings,1986, 83(2):290-296.

[2] JOHNSON M K,RAMIREZ J A. Minimum Shear Reinforcement in Beams with Higher Strength Concrete[J]. ACI Structural Journal,1988, 86(4):376-382.

[3] YOON Y S,COOK W D,MITCHELL D. Minimum Shear Reinforcement in Normal, Medium, and High-strength Concrete Beams[J]. ACI Structural Journal,

- 1996,93(5):576-584.
- [4] OZCEBE G, ERSOY U, TANKUT T. Evaluation of Minimum Shear Reinforcement Requirements for Higher Strength Concrete[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(3):361-368.
- [5] RAHAL K N, AL-SHALEH K S. Minimum Transverse Reinforcement in 65 MPa Concrete Beams[J]. ACI Structural Journal, 2004, 101(6):872-878.
- [6] 顾湘凌. 高强混凝土有腹筋筒支梁剪切强度试验和理论研究[D]. 长沙:湖南大学, 1989.
- GU Xiang-lin. Experimental and Theoretical Research on the Shear Strength of High Strength Concrete Beam with Web Reinforcement[D]. Changsha: Hunan University, 1989.
- [7] 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, LU Yan-mei. Experimental Study of Shear Behavior of High-strength Concrete Beams with High-strength Stirrups[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4):94-101.
- [8] SARSAM K F, AL-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.
- [9] KONG P Y L, RANGAN B V. Shear Strength of High-performance Concrete Beams[J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(6):677-688.
- [10] PENDYALA R S, MENDIS P. Experimental Study on Shear Strength of High-strength Concrete Beams[J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(4):564-571.
- [11] 赵光仪, 吴佩刚, 赵成文, 等. 高强混凝土受弯构件的抗剪强度[J]. 土木工程学报, 1991, 24(2):10-18.
- ZHAO Guang-yi, WU Pei-gang, ZHAO Cheng-wen, et al. Shear Strength of High-strength Concrete Flexural Members[J]. China Civil Engineering Journal, 1991, 24(2):10-18.
- [12] 康 明. 集中荷载作用下超高强混凝土有腹筋筒支梁抗剪强度的试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 1999.
- KANG Ming. Shear Strength of Reinforcement High-strength Concrete Beams with Web Reinforcement Subject to the Point Load[D]. Chongqing: Chongqing University, 1999.
- [13] 李立仁, 支运芳, 陈永庆, 等. 集中荷载下超高强混凝土有腹筋约束梁抗剪强度的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(5):32-36, 58.
- LI Li-ren, ZHI Yun-fang, CHEN Yong-qing, et al. Experimental Research on Shear Strength of Super-strength Concrete Beam Constrained with Web Bars [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(5):32-36, 58.
- [14] 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.
- LU Yan-mei. Theoretical and Experimental Research on Shear Capacity of High Strength Concrete Beams with High Strength Stirrups[D]. Changsha: Hunan University, 2008.
- [15] 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 Jia-rong. Experiments and Finite Element Analysis of Shear Behavior for High Strength Concrete Beams with High Strength Stirrups[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [16] 史庆轩, 侯 炜, 姜维山, 等. 高强箍筋高强混凝土梁受剪承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(增2):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, 2009, 30(S2):98-103.
- [17] 潘柏荣. 高强混凝土梁抗剪性能试验研究[D]. 长沙:湖南大学, 2009.
- PAN Bai-rong. Research on Shear Capacity of High Strength Concrete Beams[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [18] 叶献国, 王程成, 种 迅, 等. HRBF500 钢筋 C100 混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(7):86-90.
- YE Xian-guo, WANG Cheng-cheng, CHONG Xun, et al. Experimental Study on Shear Behavior of Beam with C100 Concrete and HRBF500 Grade Rebar[J]. Industrial Construction, 2012, 42(7):86-90.
- [19] 叶献国, 张 煜, 种 迅, 等. 高强钢筋高强混凝土简支梁抗剪试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(8):48-50, 5.
- YE Xian-guo, ZHANG Yu, CHONG Xun, et al. Experimental Study on Shear Behavior of Simple Supported High-strength Concrete Beams with High-strength Steel[J]. Building Structure, 2013, 43(8):48-50, 5.
- [20] 钟亚丽. 高强箍筋高强混凝土梁受剪性能研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2015.
- ZHONG Ya-li. Analysis on the Shear Behavior of High-strength Concrete Beams with High-strength Stirrups[D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2015.
- [21] 张杰强, 石启印, 杨 帆, 等. 高强混凝土梁抗剪性能

- 试验研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(9): 80-84.
- ZHANG Jie-qiang, SHI Qi-yin, YANG Fan, et al. Experimental Study on Shear Resistance of High Strength Concrete Beams[J]. Building Science, 2016, 32(9): 80-84.
- [22] 李 朋, 郑鸿飞, 张宪堂, 等. 基于中美规范的高强钢筋混凝土梁受剪承载力对比分析[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2016, 35(1): 66-73.
- LI Peng, ZHENG Hong-fei, ZHANG Xian-tang, et al. Comparative Analysis of Shear Capacity of Concrete Beam Reinforced with High Strength Rebar Based on Chinese and American Codes[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2016, 35(1): 66-73.
- [23] ROLLER J J, RUSSELL H G. Shear Strength of High-strength Concrete Beams with Web Reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 1990, 87(2): 191-198.
- [24] XIE Y L, AHMAD S H, YU T, et al. Shear Ductility of Reinforced Concrete Beams of Normal and High-strength Concrete[J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(2): 140-149.
- [25] TAN K H, KONG F K, TENG S, et al. Effect of Web Reinforcement on High-strength Concrete Deep Beams[J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(5): 572-582.
- [26] CHOI M, TAZAWA E, LIN S R. The Influence of Autogenous Shrinkage Stress in Reinforced Concrete Beam on the Shear Strength[J]. Proceedings of Civil Engineering, 1998, 20(2): 1021-1026.
- [27] SHIMONO K, SATO T, MATSUOKA S. Experimental Study on RC Beam Using High Strength Materials [J]. Proceedings of Civil Engineering, 1998, 20(2): 1039-1044.
- [28] SHIN S W, LEE K S, MOON J I, et al. Shear Strength of Reinforced High-strength Concrete Beams with Shear Span-to-depth Ratios Between 1.5 and 2.5[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(4): 549-556.
- [29] COLLINS M P, KUCHMA D. How Safe Are Our Large Lightly Reinforced Concrete Beams, Slabs, and Footings? [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(4): 482-490.
- [30] ANGELAKOS D, BENTZ E C, COLLINS M P. Effect of Concrete Strength and Minimum Stirrups on Shear Strength of Large Members[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(3): 290-300.
- [31] CLADERA A, MARI A R. Experimental Study on High-strength Concrete Beams Failing in Shear[J]. Engineering Structures, 2005, 27(10): 1519-1527.
- [32] ALMOUSAWI A N. Flexural and Shear Performance of High Strength Lightweight Reinforced Concrete Beams[R]. Chicago: University of Illinois at Chicago, 2011.
- [33] CAPRARA L N. Investigation of the Maximum Shear Capacity of High-strength Reinforced Concrete Beams [D]. Toronto: University of Toronto, 2012.
- [34] ZHANG T, VISINTIN P, OEHLERS J. Shear Strength of RC Beams with Steel Stirrups[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 142(2): 04015135.