

文章编号:1673-2049(2017)05-0113-07

基于试验数据的高强混凝土梁抗剪承载力 计算方法 I. 无腹筋梁

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:为了研究高强混凝土无腹筋梁抗剪承载力的计算方法,收集国内外关于高强混凝土无腹筋梁抗剪试验的抗剪承载力、混凝土强度、剪跨比、截面有效高度、受拉纵筋配筋率等试验数据,整理成包含 291 组数据的数据库。利用数据库中的实测数据对中国《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 和 Zsutty 提出的混凝土梁抗剪承载力公式用于高强混凝土梁的适用性进行评价,并分情况进一步研究中国规范公式,修正中国规范公式中的参数,得到一个新的公式。结果表明:3 个公式用于高强混凝土梁时,Zsutty 公式的预测结果最精确,中国规范公式的预测结果准确性次于 Zsutty 公式但好于美国规范公式;所得出的新公式较原规范公式更加适用于高强混凝土无腹筋梁。

关键词:高强混凝土;无腹筋梁;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 I. Without 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: In order to study the calculation method of shear capacity of high strength concrete without webs, the experimental data on the shear tests of high strength concrete beams without web reinforcement were collected, these data included shear capacity, concrete strength, shear span ratio, effective cross section, tensile longitudinal reinforcement ratio etc. A database of 291 experimental data was established. Three theoretical formulas of shear capacity of concrete beams were reviewed, the formula in *Code for Design of Concrete Structures* (GB 50010—2010) and the formula in ACI 318-14 and Zsutty equation. The applicability of these 3 formulas in the high strength concrete beams was evaluated by using the measured data in the database. The further study of the formula in GB 50010—2010 was done under different conditions. The parameters in the formula of GB 50010—2010 were revised based on the experimental comparison. The results show that the prediction results of the Zsutty equation are the most accurate, the accuracy of the formula in GB 50010—2010 is better than the formula in ACI 318-14, and the proposed formula is more suitable for the high strength concrete beams without web reinforcement.

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。

Key words: high strength concrete; beam without web reinforcement; shear capacity; database; calculation method

0 引言

高强混凝土具有抗压强度高、密实性好、强度发展快等优点,推广和应用高强、高性能混凝土可以节约材料和减少污染。

梁是混凝土结构的主要受力构件之一,它的抗剪问题一直是一个经典课题,研究人员从不同角度出发,给出了不同的理论公式,但这些理论公式难以统一,形式复杂,并且不便于工程,因此各国根据试验数据得出一个具有一定保证率的经验公式作为设计标准,中国规范也是一样^[1]。中国规范的公式编制依据大多是普通强度混凝土的试验结果,而对高强混凝土梁,它的抗剪承载力能否按中国规范公式来计算,规范公式的可靠度是否还能满足要求,这些问题有待解决。

国内外许多学者对高强混凝土无腹筋梁的抗剪性能展开了试验,研究了各种参数对斜向开裂荷载和极限抗剪承载力的影响。施岗青^[2]对无腹筋高强混凝土梁进行了抗剪性能试验,结果表明剪跨比是剪切破坏形式的主要影响因素,抗剪极限承载力随着混凝土强度的提高和剪跨比的减小而增大;Hamrat 等^[3]进行了 16 根高强混凝土梁的抗剪试验,研究了纵筋配筋率、混凝土强度和剪跨比对抗剪承载力与挠度的影响;李欣^[4]制作了 11 根大尺寸钢筋混凝土无腹筋梁,并对它们进行抗剪试验,研究了截面高度和纵筋配筋率对抗剪性能的影响。有的学者用试验结果与规范进行对比,并通过回归分析得到统计公式,以期得到较为精确的无腹筋梁抗剪承载力预测公式。Mphonde 等^[5]对 3 个系列的混凝土梁进行了试验,通过试验发现,高强混凝土对深梁的抗剪能力影响更加显著,美国 ACI 318-14 规范中的公式对试件抗剪承载力的预测整体太过保守,安全储备过高;Ahmad 等^[6]对 36 根混凝土强度为 65 MPa 的无腹筋梁进行了抗剪承载力的试验,结果表明 ACI 规范中对纵筋配筋率较低的高强混凝土梁抗剪承载力计算不够安全;Elzanaty 等^[7]进行了 18 根强度在 21~103 MPa 的混凝土梁试验研究,得出的试验结果和文献^[6]的一样;于磊^[8]对 9 根混凝土强度为 85~99 MPa 的超高强混凝土无腹筋梁进行了抗剪试验,研究了混凝土强度与剪跨比对抗剪承载力的影响,并得到了一个统计公式。

本文收集国内外学者的试验数据,建立试验数据库,并利用数据库对本文选择的 3 个理论计算公式运用在高强混凝土无腹筋梁时的适用性和准确性进行评价,进一步分析中国规范公式在不同剪跨比、配筋率、截面有效高度的情况下对高强混凝土无腹筋梁的适用性和准确性,并利用数据库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参考。

1 试验数据

《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)和《建筑材料术语标准》(JGJ/T 191—2009)将高强混凝土定义为强度等级不低于 C60 的混凝土^[9]。

本文研究对象为高强混凝土矩形梁试件,研究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:①C60 以上的高强混凝土;②受剪破坏;③集中荷载作用;④非异形梁。将收集的 291 根高强混凝土无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压强度设计值 f_t ,按规范给出的计算公式(2)进行计算

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

从表 1 可以看出:试验梁的混凝土圆柱体抗压强度在 45~120 MPa 之间,剪跨比为 1~6,截面有效高度为 130~925 mm,大部分在 200~600 mm 之间,受拉纵筋配筋率为 0.5%~5.34%。

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的无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

$$V \leq V_u = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t b h_0 \quad (3)$$

式中:当 $\lambda < 1.5$ 时,取 $\lambda = 1.5$,当 $\lambda > 3$ 时,取 $\lambda = 3$ 。

表 1 高强混凝土无腹筋梁抗剪试验数据汇总

Tab. 1 Test Data Summary of Shear Tests of High Strength Concrete Beams Without Web Reinforcement

数据来源	试件个数	f_c' /MPa	b /mm	h_0 /mm	f_t /MPa	λ	ρ_l /%	V_u /kN
文献[10]	25	63.61~81.25	150.0~154.0	260.00~267.00	4.170~4.770	0.981~3.962	1.46~3.96	63.00~257.36
文献[11]	6	55.83~69.00	130.0~350.0	215.00~585.00	4.110~4.620	2.000~3.100	1.77~2.50	49.47~239.56
文献[12]	6	52.13~69.09	102.0	171.00	3.780~4.370	1.560~3.630	1.45	21.78~75.57
文献[13]	17	70.00~105.00	149.0~161.0	259.00~271.00	3.622~4.015	0.941~2.898	3.92~5.32	49.73~768.20
文献[14]	2	58.20~66.00	200.0	363.00	4.030~4.290	3.000	2.03	110.19~111.78
文献[15]	6	70.70~117.50	200.0	3 500.00~600.00	4.030~6.140	2.500	0.54~2.17	98.00~165.00
文献[16]	2	51.40~64.49	200.0	365.00	4.060~4.570	1.500	2.03	397.02~422.71
文献[17]	6	75.60~93.36	196.0~204.0	400.00~418.00	4.790~5.040	1.000~3.000	1.38~1.44	92.00~615.00
文献[18]	6	81.64~89.51	196.0~204.0	400.00~418.00	4.570~5.040	1.000~3.000	1.13	80.00~615.00
文献[5]	12	45.16~93.68	152.0	298.00	3.660~5.160	1.500~3.600	3.36	89.01~492.83
文献[7]	9	63.40~79.31	178.0	266.40~273.00	4.170~4.710	4.000	1.20~3.30	57.28~74.75
文献[6]	35	60.83~66.98	127.0	184.20~208.03	4.120~4.290	1.000~4.000	1.77~6.64	44.63~400.35
文献[7]	9	63.43~79.29	178.0	272.00	4.290~4.710	2.000~6.000	1.20~3.30	45.08~105.41
文献[19]	3	50.15	85.0	130.00	3.750	2.000~3.000	2.00	17.46~25.42
文献[20]	1	55.85	350.0	550.00	3.930	3.100	2.50	225.23
文献[21]	5	53.90~58.00	150.0	207.00~221.00	3.910~4.080	3.000~4.000	3.20~3.24	58.01~82.59
文献[22]	9	58.20~69.10	150.0~156.0	193.00~237.00	4.020~4.370	3.360~6.610	2.25~4.10	71.05~89.88
文献[23]	6	75.37~127.10	290.0~360.0	178.00~278.00	3.600~4.110	2.880~4.490	0.99~3.04	75.37~127.10
文献[24]	2	67.00~87.00	375.0	655.00	4.290~4.960	3.230	2.85	296.00~327.00
文献[25]	3	56.30~77.60	110.0	442.50	3.300~4.200	0.850~1.690	2.58	186.00~500.00
文献[26]	15	50.80~83.30	160.0	203.00	3.790~4.840	2.000~4.000	2.02~3.20	45.64~131.54
文献[27]	12	58.60	400.0	65.00~895.00	4.030	2.500	1.20~2.00	52.00~343.68
文献[28]	11	34.00~98.80	300.0	225.00~925.00	5.170~5.380	3.000	0.50~1.31	85.00~334.00
文献[29]	6	52.00~73.00	125.0	215.00	3.840~4.500	1.500~2.500	3.77	56.44~142.17
文献[30]	4	63.00~87.00	80.0	140.00	4.200~4.960	2.000~5.000	2.00	32.00~90.00
文献[31]	2	50.30~51.00	150.0	165.00	3.770~3.800	2.120~3.030	1.60	36.88~84.65
文献[32]	5	64.90~99.00	300.0	925.00	4.220~5.320	2.920	0.50~1.01	163.00~193.00
文献[33]	8	78.50	160.0	355.00~935.00	4.680	0.530~1.130	0.90~1.00	338.10~1 010.40
文献[34]	2	61.30~61.90	200.0	305.00~330.00	5.890	2.730~2.950	2.23~4.02	125.00~170.00
文献[35]	6	49.90~87.00	200.0	359.00	3.460~4.220	3.010	2.24	99.69~140.09
文献[22]	5	64.80~68.60	203.0~508.0	233.00~684.00	4.220~4.350	2.970~2.990	1.20~1.30	57.23~260.60
文献[36]	8	52.00~53.80	120.0	165.00	3.840~3.910	1.500~3.000	1.25	41.20~90.00
文献[37]	4	50.90	200.0	265.00	3.790	2.000~4.000	1.13	98.80~138.30
文献[38]	2	50.30	150.0	200.00	3.770	3.800	1.30	40.40~42.30
文献[39]	4	49.10	200.0	201.00~476.00	3.720	2.600~3.900	1.68~2.46	105.60~122.60
文献[40]	27	44.77~52.77	152.4	266.70	3.640~3.980	2.000~6.000	0.87~1.07	24.88~116.28

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

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

$$V_c=(0.158\sqrt{f_c'}+17.2\rho_l\frac{V_u d}{M_u})b_w d \tag{4}$$

式中: M_u 为计算截面的弯矩; b_w 为计算截面的腹板宽度; d 为计算截面的有效高度。

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

$$V=\begin{cases} 2.2(f_c'\rho\frac{d}{a})^{\frac{1}{3}}bd & \frac{a}{d}>2.5 \\ 2.5\frac{d}{a}2.2(f_c'\rho\frac{d}{a})^{\frac{1}{3}}bd & \frac{a}{d}\leqslant 2.5 \end{cases} \tag{5}$$

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。

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无腹筋梁抗剪承载力,再由此得出实测值与理论值的比值,并对该比值进行分析,结果见表 2。

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	1.231	0.848	0.689
ACI 318-14	1.853	1.342	0.724
Zsutty	1.142	0.417	0.365

由表 2 可知:抗剪承载力试验值与以上公式所得到的抗剪承载力计算值比值的平均值都大于 1,都能保证安全;试验值与美国规范公式计算值比值的平均值为 1.853,安全储备太大,过于保守,变异系数为 0.724,离散性大。在上述 3 个公式中,Zsutty 公式的平均值、变异系数为 3 个公式中最小的,所以该公式是最精确的。中国规范公式的平均值和变异系数为 1.231 和 0.689,合理性介于美国规范和 Zsutty 公式之间。以数据库中的试验结果为横坐标,3 个公式的计算值为纵坐标,得到图 1~3,以 $y=x$ 为参考线,数据点越接近参考线则公式预测越准确。图 2 中的数据点和参考线拟合得最差,图 3 中的数据点和参考线拟合得最好,图 1 的拟合程度介于图 2 和图 3 之间。

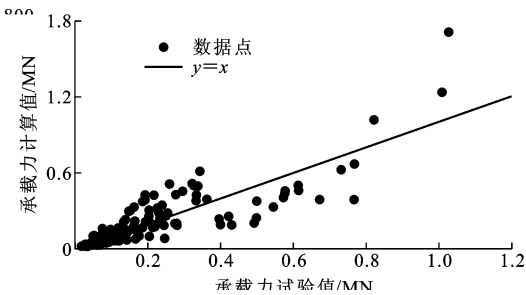


图 1 承载力试验值与 GB 50010—2010 公式计算值对比
Fig.1 Comparison of Experimental Values and Calculated Values by GB 50010—2010 Formula of Bearing Capacity

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无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。

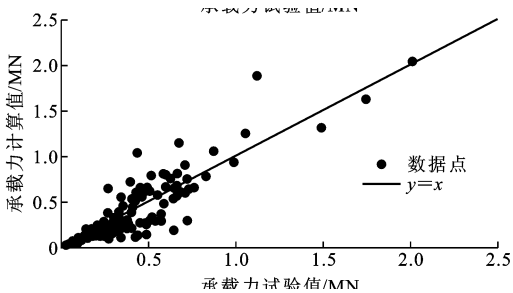


图 2 承载力试验值与 ACI 318-14 公式计算值对比
Fig.2 Comparison of Experimental Values and Calculated Values by ACI 318-14 Formula of Bearing Capacity

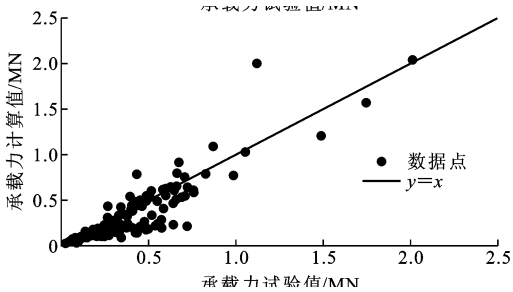


图 3 承载力试验值与 Zsutty 公式计算值对比
Fig.3 Comparison of Experimental Values and Calculated Values by Zsutty Equation of Bearing Capacity

将收集到的高强混凝土无腹筋梁数据分为 4 级 9 类:

- (1)第 1 级,1 类,为全部的高强混凝土无腹筋梁试件。
- (2)第 2 级,2 类、3 类和 4 类,2 类为 24 个剪跨比 $\lambda \leq 1$ 的试件,3 类为 98 个剪跨比 $1 < \lambda \leq 2.5$ 的试件,4 类为 169 个剪跨比 $\lambda > 2.5$ 的试件。
- (3)第 3 级,5 类、6 类和 7 类,5 类为 34 个受拉纵筋配筋率 $\rho_l \leq 0.01$ 的试件,6 类为 110 个受拉纵筋配筋率 $0.01 < \rho_l \leq 0.02$ 的试件,7 类为 147 个受拉纵筋配筋率 $\rho_l > 0.02$ 的试件。
- (4)第 4 级,8 类、9 类,8 类为 270 个 $h_0 \leq 600$ mm 的试件,9 类为 21 个 $h_0 > 600$ mm 的试件。

分级分类处理后,可以研究剪跨比、纵筋配筋率、截面尺寸对试验值与计算值比值的影响,将各影响因素下的数据分析列于表 3。

从表 3 可以看出,当剪跨比大于 2.5,纵筋配筋率小于 0.02,以及截面有效高度大于 600 mm 时,试验值与中国规范公式计算结果比值的平均值小于 1,说明中国规范公式在这几个情况下计算预测是不够安全的。

除上述 3 种情况外,中国规范公式的预测是能够保证安全的,但是标准差和变异系数均较大,离散

表 3 在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	291	1.231	0.848	0.689
二	$\lambda \leq 1$	24	3.095	1.328	0.429
	$1 < \lambda \leq 2.5$	98	1.326	0.643	0.384
	$\lambda > 2.5$	169	0.912	0.485	0.422
三	$\rho_l \leq 0.01$	34	0.996	0.883	0.886
	$1 < \rho_l \leq 0.02$	110	0.964	0.478	0.495
	$\rho_l > 0.02$	147	1.485	0.971	0.654
四	$h_0 \leq 600\text{ mm}$	270	1.275	0.946	0.663
	$h_0 > 600\text{ mm}$	21	0.666	0.658	0.998

性较大,可见中国规范公式用于高强混凝土无腹筋梁时是不够准确的。

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为 1.231,0.689,虽然具有一定的安全储备,但是会造成一定的浪费,而且变异系数太大,离散性太大,预测不够精确。需在中国规范公式的基础上对规范公式进行调整,使其更加适用于高强混凝土梁。

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改,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 291 根高强混凝土无腹筋梁的试验数据,对中国规范公式进行适当调整与修正,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,得到对于集中荷载下无弯起钢筋的混凝土无腹筋梁抗剪承载力计算公式,即

$$V_u = \frac{0.55}{\lambda - 1.2} f_t b h_0$$

(6)

式中: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(6)的准确性,将公式(6)代入试验数据库中,与前文得到的中国规范公式代入数据库的分析结果进行对比,判定新公式是否比原公式更为合理,结果见表 4。

从表 4 可以看出:对于高强混凝土无腹筋梁,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,对于各级各类梁的数据单独分析,

表 4 新公式和 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	1.231	0.848	0.689
		新公式	1.206	0.534	0.443
二	2	原公式	3.095	1.328	0.429
		新公式	1.182	0.507	0.429
	3	原公式	1.326	0.643	0.485
		新公式	1.075	0.514	0.478
	4	原公式	0.912	0.384	0.422
		新公式	1.285	0.534	0.416
三	5	原公式	0.996	0.883	0.886
		新公式	0.791	0.266	0.340
	6	原公式	0.964	0.478	0.495
		新公式	1.007	0.420	0.417
	7	原公式	1.485	0.971	0.654
		新公式	1.451	0.536	0.369
四	8	原公式	1.275	0.846	0.663
		新公式	1.256	0.520	0.414
	9	原公式	0.666	0.658	0.998
		新公式	0.569	0.197	0.347

结果也是一样,说明新公式较原规范公式更加精确合理,而且对于 $0.01 < \rho_l \leq 0.02$ 的无腹筋梁,中国规范公式是不安全的,而新公式的预测结果是安全的,说明新公式较中国规范公式更加适用于高强混凝土无腹筋梁。

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,Zsutty 公式预测高强混凝土无腹筋梁的抗剪承载力是最准确的,数据离散性也最小。美国规范公式偏于保守,安全储备过高,数据离散性最大。中国规范公式的准确性和数据离散性介于 Zsutty 公式和 ACI 318-14 规范公式之间,但仍不够准确,离散性仍较大,对于高强混凝土无腹筋梁的适用性不够。

(2)对于剪跨比大于 2.5,纵筋配筋率小于 0.02,以及截面有效高度大于 600 mm 的高强混凝土无腹筋梁,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平均值、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] 吕艳梅, 易伟建. 高强混凝土梁抗剪承载力研究: I 无腹筋梁[J]. 建筑结构, 2009, 39(增 2): 129-133.
LU Yan-mei, YI Wei-jian. Research on Shear Strength of High Strength Concrete Beams: I Beam Without Web Reinforcement[J]. Building Structures, 2009, 39(S2): 129-133.
- [2] 施岗青. 混凝土强度对无腹筋梁抗剪强度影响的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1981.
SHI Gang-qing. Experimental Research on Influence of Concrete Strength on Shear Strength of Concrete Beams Without Web Reinforcement[D]. Beijing: Tsinghua University, 1981.
- [3] HAMRAT M, BOULEKBACHE B, CHEMROUK M, et al. Shear Behaviour of RC Beams Without Stirrups Made of Normal Strength and High Strength Concretes[J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 13(1): 29-42.
- [4] 李 欣. 集中荷载作用下超高强混凝土无腹筋梁抗剪强度的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
LI Xin. Experimental Study on Shear Strength of Super High-strength Concrete Unconstrained Beams Under Point Load[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002.
- [5] MPHONDE A G, FRANTZ G C. Shear Tests of High-and Low-Strength Concrete Beams Without Stirrups[J]. ACI Journal Proceedings, 1984, 81(4): 350-357.
- [6] AHMAD S H, KHALOO A R, POVEDA A. Shear Capacity of Reinforced High-strength Concrete Beams[J]. ACI Journal Proceedings, 1986, 83(2): 297-305.
- [7] ELZANATY A H, NILSON A H, SLATE F O. Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-strength Concrete[J]. ACI Structural Journal, 1986, 83(2): 290-296.
- [8] 于 磊. 大尺寸钢筋混凝土梁受剪试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
YU Lei. Experimental Investigation on Shear Strength of Large Size Reinforced Concrete Beams[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [9] 冷发光, 王永海, 周永祥, 等. 高强混凝土的研究应用和发展趋势[J]. 商品混凝土, 2011(2): 25-27, 32.
LENG Fa-guang, WANG Yong-hai, ZHOU Yong-xiang, et al. Research Application and Development Trend of High Strength Concrete[J]. Ready-mixed Concrete, 2011(2): 25-27, 32.
- [10] 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.
- [11] 蒋丽娜. 高强钢筋混凝土梁的抗剪能力[J]. 广西工学院学报, 1995, 6(1): 29-36.
JIANG Li-na. Shear Capacity of Reinforced High-strength Concrete Beams[J]. Journal of Guangxi Institute of Technology, 1995, 6(1): 29-36.
- [12] 康 明. 集中荷载作用下超高强混凝土有腹筋简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] 支运芳, 王敢峰, 李立仁, 等. 集中荷载作用下超高强混凝土无腹筋梁抗剪强度的试验研究[J]. 重庆工学院学报, 2005, 19(3): 69-75.
ZHI Yun-fang, WANG Gan-feng, LI Li-ren, et al. Testing Study on the Shearing Strength of Beams of Super-strong Steel-concrete Under Concentrated Loads[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2005, 19(3): 69-75.
- [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] 林 懋. 超高强混凝土梁抗剪设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
LIN Mao. Research on Approaches to Shear Design of Reinforced Concrete Beams Using Ultra-high Strength Concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [16] 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.
- [17] 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.

- [18] 于文静. 高强混凝土无腹筋梁的抗剪试验研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
YU Wen-jing. Experimental Study on Shear Behavior of High-strength Concrete Beams Without Web Reinforcement[D]. Hefei: Hefei University of Technology,2012.
- [19] NARAYANAN R,DARWISH I Y S. Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement[J]. ACI Structural Journal,1987,84(3):216-227.
- [20] JOHNSON M K, RAMIREZ J A. Minimum Shear Reinforcement in Beams with Higher Strength Concrete[J]. ACI Structural Journal,1989,86(4):376-382.
- [21] THORENFELDT E, DRANGSHOLT G. Shear Capacity of Reinforced High-strength Concrete Beams [J]. ACI Special Publication,1990,121:129-154.
- [22] ZHANG T, VISINTIN P, OEHLERS D J. Shear Strength of RC Beams with Steel Stirrups[J]. Journal of Structural Engineering,2016,142(2):04015135.
- [23] ADEBAR P, COLLINS M P. Shear Strength of Members Without Transverse Reinforcement[J]. Canadian Journal of Civil Engineering,1996,23(1):30-41.
- [24] 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.
- [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] ISLAM M S, PAM H J, KWAN A K H. Shear Capacity of High-strength Concrete Beams with Their Point of Inflection Within the Shear Span[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings,1998,128(1):91-99.
- [27] GHANNOUM W M. Size Effect on Shear Strength of Reinforced Concrete Beams [D]. Montreal: McGill University,1998.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] PENDYALA R S, MENDIS P. Experimental Study on Shear Strength of High-strength Concrete Beams[J]. ACI Structural Journal,2000,97(4):564-571.
- [31] RITTHICHAUY W, SUGIYAMA T, OKAMOTO T, et al. 3157 Shear Test on Reinforced Lightweight Aggregate Concrete Beams Without Web Reinforcement[J]. Proceedings of the Japan Concrete Institute,2001,23(3):937-942.
- [32] 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):291-300.
- [33] YANG K H, CHUNG H S, LEE E T, et al. Shear Characteristics of High-strength Concrete Deep Beams Without Shear Reinforcements[J]. Engineering Structures,2003,25(10):1343-1352.
- [34] KNAACK A M, KURAMA Y C. Behavior of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Coarse Aggregates[J]. Journal of Structural Engineering,2014,141(3):B4014009.
- [35] CLADERA A, MARI A R. Experimental Study on High-strength Concrete Beams Failing in Shear[J]. Engineering Structures,2005,27(10):1519-1527.
- [36] TANG C W, YEN T, CHEN H J. Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams Made with Sedimentary Lightweight Aggregate Without Shear Reinforcement [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2009,21(12):730-739.
- [37] ALMOUSAWI A N. Flexural and Shear Performance of High Strength Lightweight Reinforced Concrete Beams[D]. Chicago:University of Illinois at Chicago,2011.
- [38] KNAACK A M, KURAMA Y C. Behavior of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Coarse Aggregates[J]. Journal of Structural Engineering,2014,141(3):1-12.
- [39] FATHIFAZL G, RAZAQPUR A G, ISGOR O B, et al. Shear Capacity Evaluation of Steel Reinforced Recycled Concrete (RRC) Beams [J]. Engineering Structural,2011,33(3):1025-1033.
- [40] BUKHARI I A, AHMAD S. Evaluation of Shear Strength of High-strength Concrete Beams Without Stirrups[J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2008,33(2):321-336.