

DOI:10.11918/202112082

基于梁-拱复合受力机制的高强混凝土梁受剪分析模型

祖坤^{1,2},熊二刚³,罗斌^{1,2},梁兴文⁴

(1. 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室(东南大学),南京 211189;2. 东南大学 土木工程学院,南京 211189;
3. 长安大学 建筑工程学院,西安 710061;4. 西安建筑科技大学 土木工程学院,西安 710055)

摘要:为研究高强混凝土梁构件斜截面受剪力学性能,通过分析高强混凝土梁发生剪切破坏时剪跨段内剪力传递路径,提出基于梁作用和拱作用来考虑高强混凝土对梁构件受剪承载力的贡献,箍筋贡献项采用简化修正压力场理论计算,同时考虑尺寸效应的影响,通过混凝土和箍筋两部分贡献项相叠加建立了集中荷载作用下高强混凝土梁受剪承载力计算公式,该公式物理意义清晰明确,综合考虑了混凝土强度、剪跨比、相对剪压区高度、纵筋配筋率、配箍率以及尺寸效应等因素的影响。利用收集到的207根有腹筋高强混凝土梁试验数据对本文受剪分析模型公式预测精度进行验证,并与GB 50010—2010规范、ACI 318-19规范、EN 1992-1-1:2004规范、Zararis公式、Zsutty公式计算结果进行比较。结果表明:本文所提受剪分析模型能够真实反映梁构件斜截面受剪破坏机理,较好地预测高强混凝土梁受剪承载力,对受剪参数的大范围变化不敏感且随受剪参数的大范围变化,预测精度无明显相关性。根据对比结果,本文基于梁-拱复合受力机制和简化修正压力场理论所建立的受剪分析模型可用于高强混凝土梁受剪承载力计算,且具有良好的预测精度和一致稳定性。

关键词:钢筋混凝土梁;高强混凝土;剪切破坏;分析模型;受剪承载力

中图分类号: TU375.1 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2022)11-0078-10

Shear analysis model of high-strength concrete beams based on beam-arch action mechanism

ZU Kun^{1,2}, XIONG Ergang³, LUO Bin^{1,2}, LIANG Xingwen⁴

(1. Key Lab of Concrete and Prestressed Concrete Structures (Southeast University), Ministry of Education, Nanjing 211189, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 4. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The shear transfer pathway in the shear span of high-strength concrete beam was analyzed under shear failure to investigate the shear mechanical property of the inclined section of high-strength concrete beam. The contribution of high-strength concrete to the shear capacity of beam was considered based on the beam action and arch action. The stirrup contribution was determined by using the simplified modified compression field theory, and the influence of size effect was taken into consideration. Through the combination of concrete and stirrup terms, the calculation model for the shear capacity of high-strength concrete beam under concentrated load was established, which has a clear and reasonable physical significance. The effects of concrete strength, shear-span ratio, relative depth of shear compression zone, ratio of longitudinal reinforcement, ratio of stirrup, and size effect were comprehensively analyzed. In addition, the test data of 207 high-strength concrete beams with web reinforcement were employed to evaluate the proposed calculation model, and compared with the prediction results of GB 50010—2010, ACI 318-19, EN 1992-1-1:2004, Zararis formula, and Zsutty formula. Results show that the proposed model could reflect the shear failure mechanism of the inclined section of beam and predict the shear capacity of high-strength concrete beams. Besides, the model was less sensitive to the wide range variation of shear parameters, and the prediction accuracy had no obvious correlation. Thus, in combination with beam-arch action and simplified modified compression field theory, the proposed shear model can be used to calculate the shear capacity of high-strength concrete beams with high accuracy and stability.

Keywords: reinforced concrete beam; high-strength concrete; shear failure; analysis model; shear capacity

收稿日期: 2021-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(11673039,51808046);

陕西省重点研发计划(2021SF461)

作者简介: 祖坤(1998—),男,博士研究生;

罗斌(1977—),男,教授,博士生导师

通信作者: 罗斌,seurobin@seu.edu.cn

高强混凝土(high-strength concrete, HSC)具有较高的抗压强度、良好的混凝土工作性能以及长期性能和耐久性,其抗压强度值大于60 MPa^[1]。由于其在力学性能和长期工作性能等方面所呈现的显著

优势,使得 HSC 在建筑结构中得到广泛应用,在结构中使用 HSC 可以提高建筑材料的利用率,有效减少材料用量和降低构件截面尺寸^[2-3]。

钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 梁受剪破坏的影响因素众多,传力机理复杂,特别是在混凝土出现裂缝后,裂缝在主拉应力影响下逐渐沿着斜向发展,使得钢筋与混凝土之间的相互作用以及裂缝发展情况愈加复杂。通过理论分析和试验研究等方法,研究学者对剪切破坏问题进行不断深入的研究,但问题迄今为止尚未得到合理解决^[4-5]。现阶段的 RC 梁抗剪设计计算方法可以分为两种:通过分析梁构件斜截面受剪力学特性所建立的“受剪理论模型”和对大量剪切试验结果的非线性回归拟合分析所建立的经验计算公式,研究学者先后提出了各种受剪理论模型,如修正压力场理论、压力路径理论、塑性理论、劈裂破坏理论等,但不同学者对受剪分析模型中的骨料咬合力及纵筋销栓作用的抗剪贡献的认识存在较大偏差^[6]。而通过对试验结果的非线性回归拟合分析所建立的经验计算公式,虽然形式简单、计算方便,但缺乏相应的理论模型,而且问题本身的随机特征也在一定程度上掩盖了剪切破坏的物理属性^[7]。上述两种适用于普通强度混凝土 (normal-strength concrete, NSC) 构件的受剪承载力计算方法,对于 HSC 的适用性需要进一步深入探究。

鉴于 HSC 构件剪切破坏机理的复杂性和剪切破坏模式的多样性以及高强材料所特有的力学性能,特别是伴随混凝土强度增加所出现的更为显著

的脆性特征,目前国内外学者对 HSC 构件剪切计算理论尚未形成明确统一的认识,各国规范仍沿用普通强度钢筋混凝土构件剪切设计原理,通过引入较普通强度钢筋混凝土构件更高的可靠指标或设定材料的上限强度值来对高强混凝土构件进行受剪设计计算,这对于强度等级更高的混凝土材料以及采用高强混凝土和高强钢筋的双高强材料混凝土梁存在一定的局限性^[8-9]。

为此,本文基于梁作用和拱作用来考虑高强混凝土对梁构件受剪承载力的贡献,而箍筋项则采用简化修正压力场理论 (modified compression field theory, MCFT) 进行计算,同时考虑尺寸效应影响,建立了集中荷载作用下高强混凝土梁受剪承载力计算模型。

1 HSC 受弯构件斜截面受剪计算

1.1 剪力传递途径分析

图 1(a) 为 RC 简支梁剪跨段内力图,图 1(b) ~ (c) 为集中荷载作用下 RC 梁构件剪力在剪跨段内的梁作用和拱作用传力机制,混凝土梁构件的抗剪可分为以下两种形式:

1) 梁作用,即作用于恒定内力臂 $j_0 d$ (混凝土纵向压应力的合力作用点至受拉钢筋重心的距离) 上的纵向钢筋拉力 T 的变化来平衡外弯矩;2) 拱作用,即在拉力 T 保持不变的情况下,通过剪跨段内各截面内力臂 jd 的改变来平衡外弯矩作用。而 RC 梁受剪承载力采用梁作用和拱作用的两项贡献相叠加形式来考虑。

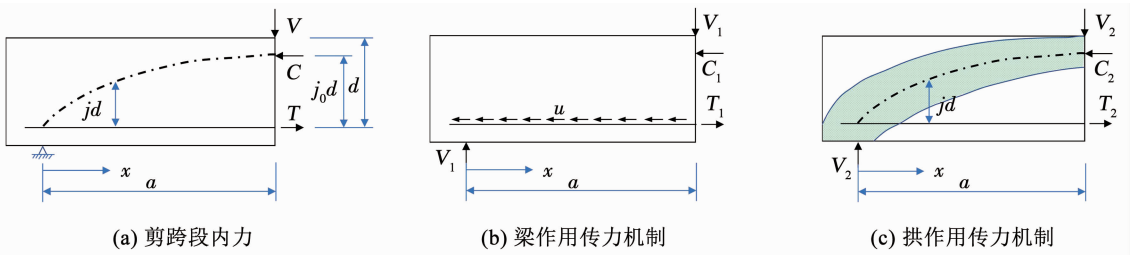


图 1 剪力传递的“梁作用”和“拱作用”

Fig. 1 “Beam action” and “arch action” in shear transfer

1.2 受剪承载力计算

图 1 中,离支座任意位置处的弯矩 M 可表示为

$$M = T \cdot jd \quad (1)$$

式中: $T = T(x)$ 为纵向钢筋的拉力; $jd = jd(x)$ 为内力臂长。

同时,距离支座点 x 位置处的弯矩 M 与剪力 V 满足如下关系

$$M = Vx \quad (2)$$

联立式(1)和式(2),并对 x 取微分,可得梁剪

跨段内距支座点 x 位置截面上的剪力 V

$$V = \frac{dM}{dx} = j_0 d \frac{dT}{dx} + T \frac{d(jd)}{dx} \quad (3)$$

根据式(3),两项分别为梁作用和拱作用的贡献,将梁作用和拱作用贡献项分别定义为 V_1 和 V_2 ,则有

$$V = V_1 + V_2 \quad (4)$$

梁作用主要依靠钢筋与混凝土之间的黏结作用来传递应力,见图 1(b)。混凝土较低的抗拉强度导

致其较早地发生开裂,由于混凝土的开裂以及开裂后出现的黏结滑移现象,梁作用所需的全部黏结力无法完全达到,此时分量 V_2 通过内部倾斜压应力来提供所需的剪切分量,即拱作用参与传力,见图 1(c)。在混凝土梁构件中,上述两种机制复合受力,协同工作提供受剪承载力,见式(4)。

首先考虑梁作用的贡献 V_1

$$V_1 = j_0 d \frac{dT(x)}{dx} \quad (5)$$

文献[10]研究指出,在梁剪跨段实际内力臂 jd 沿跨度方向逐渐递减,即 jd 沿梁跨方向呈现出指数形式的变化趋势,基于此现象,通过合理简化提出了内力臂系数 j 的计算表达式^[10]如下:

$$j = \left(\frac{x}{a} \right)^r j_0 \quad (6)$$

$$r = \left(\frac{d}{a} \right)^{0.6} \rho^{-0.1} \leq 1 \quad (7)$$

式中 x 为受力点与支座之间的距离。

研究表明^[11],在适筋梁的受拉区出现弯曲裂缝后,初始弯曲裂缝将快速延伸至受压区下缘,此时,梁构件上部范围内会形成一定高度的剪压区,裂缝的分布区域也随着外荷载的增加而逐渐变广,但受压区的高度变化趋于稳定。文献[12]忽略混凝土拉应力,采用线性弯曲理论并基于应变平截面假定提出了 j_0 与受压区高度系数 c/d 之间的解析关系式:

$$j_0 = 1 - \frac{1}{3} \frac{c}{d} \quad (8)$$

$$\frac{c}{d} = \sqrt{n^2 \rho^2 + 2n\rho} - n\rho \quad (9)$$

式中: n 为纵筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值, $n = E_s/E_c$; ρ 为纵筋配筋率。

同时, j_0 也可以通过塑性理论进行求解,两种方法在配筋率 ρ 较大时 j_0 结果差异较大,见图 2,塑性理论对剪跨段较长的梁能给出了较为准确的 j_0 值,而对于短梁,线性理论将提供更准确的结果,因为出现剪切斜裂缝时的荷载值远小于构件的受弯承载力。而 j_0 的准确值位于塑性理论和线性理论计算结果之间,为此,本文针对 HSC 提出 j_0 的简化形式计算式。

$$j_0 = 1 - \sqrt{\rho} \quad (10)$$

式(5)中,梁作用贡献项 V_1 与 dT/dx 非线性相关,通过引入钢筋与混凝土之间黏结应力 τ_{bond} 来计算 dT/dx ^[13]。

$$\frac{dT}{dx} = \pi \sum_{i=1}^n \tau_{\text{bond}i} D_i \quad (11)$$

式中 D_i 为梁构件横截面上第 i 根纵筋直径。将

式(10)、式(11)代入式(5),可得

$$V_1 = (1 - \sqrt{\rho}) d \frac{dT}{dx} = (1 - \sqrt{\rho}) d \pi \sum_{i=1}^n \tau_{\text{bond}i} D_i \quad (12)$$

则梁作用贡献项应力 v_1 为

$$v_1 = \frac{V_1}{bd} = \frac{(1 - \sqrt{\rho}) \pi \sum_{i=1}^n \tau_{\text{bond}i} D_i}{b} \quad (13)$$

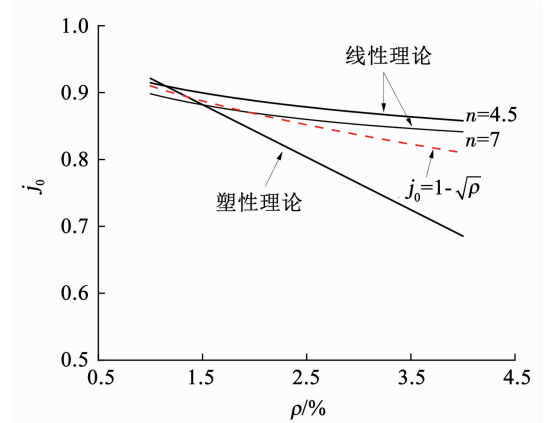


图 2 j_0 随配筋率变化关系

Fig. 2 Relationship between j_0 and ratio of longitudinal reinforcement

钢筋与混凝土之间的咬合作用与混凝土抗拉强度 f_t 密切相关,抗拉强度 f_t 越高,则在混凝土材料内的钢筋与混凝土界面之间的咬合作用所产生的黏结应力越大。文献[14]考虑 HSC 材料较低的拉压比以及特有的脆性特征,假定 HSC 梁发生破坏后黏结应力不再变化,建议纵筋与 HSC 之间的黏结应力 τ_{bond} 取为

$$\tau_{\text{bond}i} = 0.25 \sqrt{f'_c} \quad (14)$$

式中 f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度。

引入纵筋的等效直径 D_{eq}

$$D_{\text{eq}} = \sum D_i \quad (15)$$

则有

$$D_{\text{eq}} = 2 \sqrt{\frac{bd\rho}{\pi}} \quad (16)$$

式中: b 为截面宽度; d 为截面有效高度。

联立式(13)、式(14)、式(16),可得

$$v_1 = 0.44(\sqrt{\rho} - \rho) \sqrt{\frac{d}{b}} \sqrt{f'_c} \quad (17)$$

作用于梁构件的部分剪应力可以直接通过拱作用传递到支座处,对于拱作用贡献项 V_2 的计算取值

$$V_2 = Td \frac{dj}{dx} \quad (18)$$

根据文献[10]给出的 j 与 x 计算关系式(6),式(6)对 x 取微分,则有

$$\frac{dj(x)}{dx} = j_0 \frac{r}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{r-1} \quad (19)$$

剪跨段内力臂 j_d 的计算在斜截面受剪破坏内力分析中,起着至关重要的作用,其直接同内力分布及传递相关。根据文献[15]的研究成果,将 j 与 x 两者简化考虑为线性关系,即 r 取 1,则式(19)改写为

$$\frac{dj(x)}{dx} = \frac{j_0}{a} \quad (20)$$

而 HSC 梁中纵筋内力 T_s 满足

$$T_s = \sigma_s \rho b d \quad (21)$$

式中 σ_s 为纵筋应力。

联立式(18)、式(20)、式(21),则 HSC 梁中拱作用贡献项应力 v_2 满足

$$v_2 = \frac{V_2}{bd} = \frac{j_0}{bd} \frac{d}{a} \sigma_s \rho b d \quad (22)$$

考虑剪切裂缝间距内的内力平衡关系,钢筋应力 σ_s 与黏结应力 τ_{bond} 之间满足如下关系:

$$\pi S_{rm} \sum \tau_{bondi} D_i = \frac{\pi}{4} \sigma_s \sum D_i^2 \quad (23)$$

式中 S_{rm} 为裂缝间距,则纵筋应力 σ_s 为

$$\sigma_s = \frac{4 S_{rm} \tau_{bondi}}{\sum D_i} \quad (24)$$

裂缝间距 S_{rm} 的计算参考规范 EN 1992-1-1: 2004^[16] 中的计算公式为

$$S_{rm} = 50 + 0.1 \frac{D}{\rho_{eff}} \quad (25)$$

$$\rho_{eff} = \frac{\pi \sum D_i^2}{4} \frac{1}{b(h-x_c)} \quad (26)$$

式中 x_c 为混凝土中性轴高度。

联立式(15)、式(16)及式(22),代入式(24),得到应力 v_2

$$v_2 = \frac{3.54(\sqrt{\rho} - \rho) S_{rm} \tau_{bondi}}{\sqrt{bd}} \frac{d}{a} \quad (27)$$

将式(14)代入式(27),可得

$$v_2 = \frac{0.89(\sqrt{\rho} - \rho) S_{rm}}{\sqrt{bd}} \frac{d}{a} \sqrt{f'_c} \quad (28)$$

大量试验结果揭示 RC 梁的抗剪强度具有显著的尺寸效应,同时 HSC 梁受高强混凝土材料本身脆性特性的影响更加需要合理准确地考虑尺寸效应引起的强度折减。文献[17]进行了梁高 h 范围为 170~1 000 mm 的无腹筋 HSC 梁剪切破坏试验,其中剪跨比 $a/d = 1.5 \sim 6.0$,纵筋配筋率 $\rho = 1.0\% \sim 4.7\%$,试验表明 HSC 梁抗剪强度尺寸效应规律与 NSC 类似,且尺寸效应影响规律不随配筋率发生变化。GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》引入

截面高度修正系数 β_h 以考虑尺寸效应,但试验结果表明该系数不能合理反映尺寸效应的影响,而尺寸效应在 ACI 318 规范数次修订中均未纳入考虑,因此本文考虑尺寸效应对抗剪强度的影响。

文献[11]假定 RC 梁在发生斜拉剪切破坏极限状态下的临界斜裂缝可细分为两段分支:第一分支为剪切斜裂缝,在靠近支座附近的弯曲裂缝端点或弯曲裂缝之间的区域内形成,裂缝高度与弯曲裂缝相一致,走向近乎直线;第二分支裂缝由第一分支顶点沿着压力作用线穿过构件受压区向加载点延伸发展,见图 3,混凝土沿第二分支发生劈裂破坏最终导致梁构件剪切破坏的发生。同时他们认为梁构件的受剪尺寸效应本质上源于混凝土圆柱体所发生的劈裂破坏,并给出了劈裂直径 D 的近似取值 ($D = 0.16a$),即图 3 中 I_{cr} 长度,引用文献[18]通过试验提出的试件名义强度 σ_n 与直径 D 的关系 $\sigma_n = (1.20 - 1.30D)f_t$,则使用该修正系数即 $(1.20 - 0.20a)$ 来考虑尺寸效应影响。

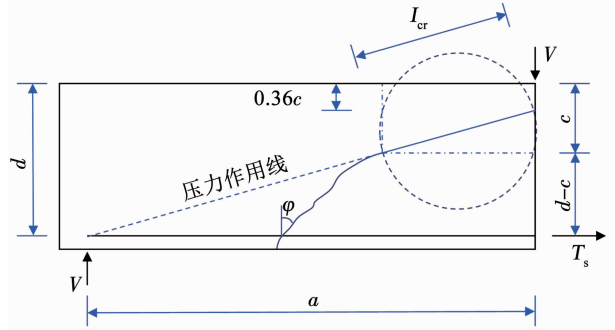


图 3 极限状态下临界斜裂缝示意^[11]

Fig. 3 Diagram of critical diagonal crack at ultimate limit state^[11]

则 HSC 梁抗剪强度 v_c 为梁作用和拱作用抗剪贡献相叠加,并考虑尺寸效应,可得

$$v_c = (1.20 - 0.20a) (0.44 + 0.89 \frac{S_{rm}}{a}) (\sqrt{\rho} - \rho) \quad (29)$$

$$\sqrt{\frac{d}{b}} \sqrt{f'_c}$$

参考桁架模型,混凝土斜压杆发生压碎破坏时,斜压杆轴力极限值为^[19]

$$N_u = v f'_c b c \cos \theta \quad (30)$$

式中: v 为开裂混凝土抗压强度软化系数,这里考虑高强混凝土脆性的影响,按照文献[20]方法进行计算; θ 为斜压杆倾角 (其中 $\theta \leq 45^\circ$)。

$$v = 0.6 \left(\frac{30}{f'_c} \right)^{0.33} \quad (31)$$

根据支座处平衡关系

$$V_u = N_u \sin \theta \quad (32)$$

由平截面受弯分析^[21]可知

$$\frac{c}{d} = \rho \frac{1}{\alpha\beta} \frac{f_y}{f_c} \quad (33)$$

式中 α, β 为混凝土等效矩形应力图系数。

为保证混凝土梁构件安全不发生破坏,依据平截面假定和应变协调条件,式(33)应满足下列关系

$$\frac{c}{d} \leq \frac{c_{\max}}{d} = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y + \varepsilon_u} \quad (34)$$

参照文献[22]定义的相对剪压区高度 $\zeta = \rho_w f_y / f_c$,联立式(33)和式(34),可得

$$\zeta = \rho \frac{f_y}{f_c} \leq \alpha\beta \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y + \varepsilon_u} \quad (35)$$

式中 $\varepsilon_u, \varepsilon_y$ 分别为混凝土压应变和纵向受拉钢筋屈服应变。

因此,当斜压杆混凝土被压碎时,HSC 梁构件抗剪强度为

$$v_{uc} = 0.3 \left(\frac{30}{f_c} \right)^{0.33} \rho \frac{f_y}{\alpha\beta} \sin 2\theta \quad (36)$$

则集中荷载作用下混凝土对 HSC 梁的抗剪强度贡献取式(29)和式(36)两者中的较小值。

在梁构件中配置箍筋能有效限制斜裂缝的发展,并改善混凝土的传力,两者在极限状态下相互影响并协同工作。为了便于研究,有腹筋 HSC 梁受剪承载力考虑为在无腹筋 HSC 梁受剪承载力 V_c 的基础上叠加箍筋剪切贡献 V_s ,本文采用文献[23]提出的修正压力场理论(MCFT)简化公式来计算 HSC 梁中箍筋的剪切分量 v_s ,图4为简化修正压力场理论模型。

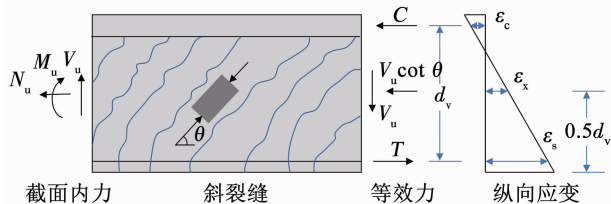


图4 简化修正压力场理论模型^[23]

Fig.4 Simplification of modified compression field theory^[23]

$$v_s = \frac{1}{bd} \frac{A_{st} f_{yw}}{s} d_v \cot \theta = \frac{d_v}{d} \rho_{sw} f_{yw} \cot \theta \quad (37)$$

式中: A_{st} 为同一截面内所配置的各肢箍筋总截面积; f_{yw} 为箍筋屈服强度; s 为箍筋间距; ρ_{sw} 为箍筋配筋率。

文献[24]研究指出当 $\rho_{sw} f_{yw} > 0.06 (f_c')^{0.5}$ 时,钢筋混凝土梁构件裂缝间距 S_{rm} 可得到有效控制,依据文献[24]的研究成果,箍筋配置应满足:

$$\rho_{sw} f_{yw} > 0.06 \sqrt{f_c'} \quad (38)$$

$$\theta = 29^\circ + 7\,000 \varepsilon_x \quad (39)$$

$$\varepsilon_x = \frac{|M_u/d_v| + |V_u|}{2E_s A_s} \quad (40)$$

$$d_v = \max \{0.9d, 0.72h\} \quad (41)$$

式中: ε_x 为梁截面一半高度处的纵向应变值; M_u, V_u 分别为计算截面上的弯矩值和剪力值; d_v 为有效剪切高度; E_s 为纵向受力钢筋的弹性模量,取 $E_s = 2.0 \times 10^5$ MPa。

则集中荷载作用下 HSC 梁构件抗剪强度 v_u 为

$$v_u = v_c + v_s \quad (42)$$

2 基于试验数据的公式评价与误差分析

2.1 计算模型概述

选取中国规范 GB 50010—2010^[25]、美国规范 ACI 318-19^[26]、欧洲规范 EN 1992-1-1: 2004^[16]、Zararis 公式^[27]和 Zsutty 公式^[28]对比分析不同受剪计算模型在预测 HSC 梁构件受剪承载力时的预测精度,上述受剪计算模型概述见表1。

2.2 设计参数影响评估

由于剪切破坏影响因素较多,各影响因素相互关联、相互作用,因此将各影响因素剥离出来分别反映各因素对梁构件的抗剪强度影响。为了评估上述计算模型中设计参数的合理性,选取文献[29]、文献[30]的试验结果比较上述模型中受剪参数对抗剪强度的影响程度以及抗剪强度随各参数的变化规律,结果见图5。

图5表明上述计算模型总体上可以体现承载力随各受剪参数的变化关系,但不同模型在各受剪参数对抗剪强度的影响规律上没有取得统一认识:GB 50010—2010、ACI 318-19、EN 1992-1-1: 2004、Zararis、Zsutty 公式在预测抗剪强度随混凝土强度增长时预测值均偏大;Zararis 公式无法反映抗剪强度与剪跨比之间逐渐降低的变化规律,而 EN 1992-1-1: 2004 公式在 $a_v = 0.5d \sim 2.0d$ 时乘以系数 $a_v/(2d)$ 来考虑剪跨比的影响;ACI 318-19 和 Zsutty 公式未明显考虑尺寸效应,而当截面有效高度 $h_0 > 800$ mm 时,GB 50010—2010 公式通过引入截面高度影响作用系数 β_h 来考虑尺寸效应;GB 50010—2010、EN 1992-1-1: 2004 公式无法显现抗剪强度随纵筋配筋率的非比例增长关系,其中 GB 50010—2010 规范在修订过程中,拟提出系数 $\beta_p = 0.7 + 20\rho$ 来量化纵筋配筋率 ρ 对抗剪强度 v_c 的影响,但考虑到 $\rho > 1.5\%$ 影响作用才较为明显,故在公式中未纳入系数 β_p ;EN 1992-1-1: 2004 规范无法反映抗剪强度随相对剪压区高度 ζ 的变化关系,这是由于其在计算有腹筋 RC 梁受剪承载力时采用的是变角桁架模型,忽略了混凝土对受剪承载力的贡献。

表 1 钢筋混凝土梁受剪承载力计算模型

Tab. 1 Calculation models for shear capacity of reinforced concrete beams

计算模型	模型计算公式	计算参数注释
GB 50010—2010 ^[25]	$V_{cs} = V_c + V_s$ $V_c = \alpha_{cv}\beta_h f_t b h_0$ $V_s = f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0$	α_{cv} 为混凝土斜截面受剪承载力系数; β_h 为截面高度影响作用系数; h_0 为截面有效高度; f_{yv} 为箍筋抗拉强度设计值。
ACI 318-19 ^[26]	$V_u = V_c + V_s$ $V_c = (0.158\sqrt{f'_c} + 17.2\rho_w \frac{V_u d}{M_u}) b_w d \leq 0.291\sqrt{f'_c} b_w d$ $V_s = \frac{A_{vt} f_{yt}}{s} d \leq 0.665\sqrt{f'_c} b_w d$	ρ_w 为纵筋配筋率; b_w 为截面宽度; A_v 为同一截面内所配置的各肢箍筋总截面积; f_{yt} 为箍筋屈服强度。
EN 1992-1-1; 2004 ^[16]	$V = \min \{ V_{Rd,s}, V_{Rd,max} \}$ $V_{Rd,s} = 0.9 \frac{A_{sv} f_{ywd}}{s} d \cot \theta$ $V_{Rd,max} = \frac{0.9 v_l f_{cd} b_w d}{\tan \theta + \cot \theta}$ $v_l = 0.6(1 - f_{ck}/250)$	$V_{Rd,s}$ 为箍筋屈服时的剪力值; $V_{Rd,max}$ 为混凝土斜压杆压碎时的剪力值; v_l 为混凝土强度折减系数; f_{ywd} 为箍筋屈服强度; f_{cd} 为混凝土抗压强度; f_{ck} 为圆柱体抗压强度; 当 $a < 0.5d$ 时, 取 $a = 0.5d$ 代入计算, 当 $a = 0.5d \sim 2.0d$ 时, 将承载力计算结果乘以 $\beta = a/(2d)$ 。
Zararis 公式 ^[27]	$V_c = (1.2 - 0.2 \frac{a}{d}) \frac{c}{d} f_{ct} b d$ $f_{ct} = 0.30\lambda (f'_c)^{2/3}$ $(\frac{c}{d})^2 + 600 \frac{\rho}{f'_c} \frac{c}{d} - 600 \frac{\rho}{f'_c} = 0$ $V_s = (0.5 + 0.25 \frac{a}{d}) \rho_{sv} f_{yv} b d$	$(1.2 - 0.2 \frac{a}{d}) \geq 0.65$, 其中 d 以 m 为单位; c 为临界剪切斜裂缝第一分支上顶点位置处的混凝土受压区高度; f_{ct} 为混凝土劈裂抗拉强度。
Zsutty 公式 ^[28]	$V = \begin{cases} 2.2(f'_c \rho \frac{d}{a})^{1/3} b d + \rho_s f_{yt} b d & \frac{a}{d} \geq 2.5 \\ (2.5 \frac{d}{a})^{2.2} (f'_c \rho \frac{d}{a})^{1/3} b d + \rho_s f_{yt} b d & \frac{a}{d} < 2.5 \end{cases}$	计算参数定义同 ACI 318-19 规范。

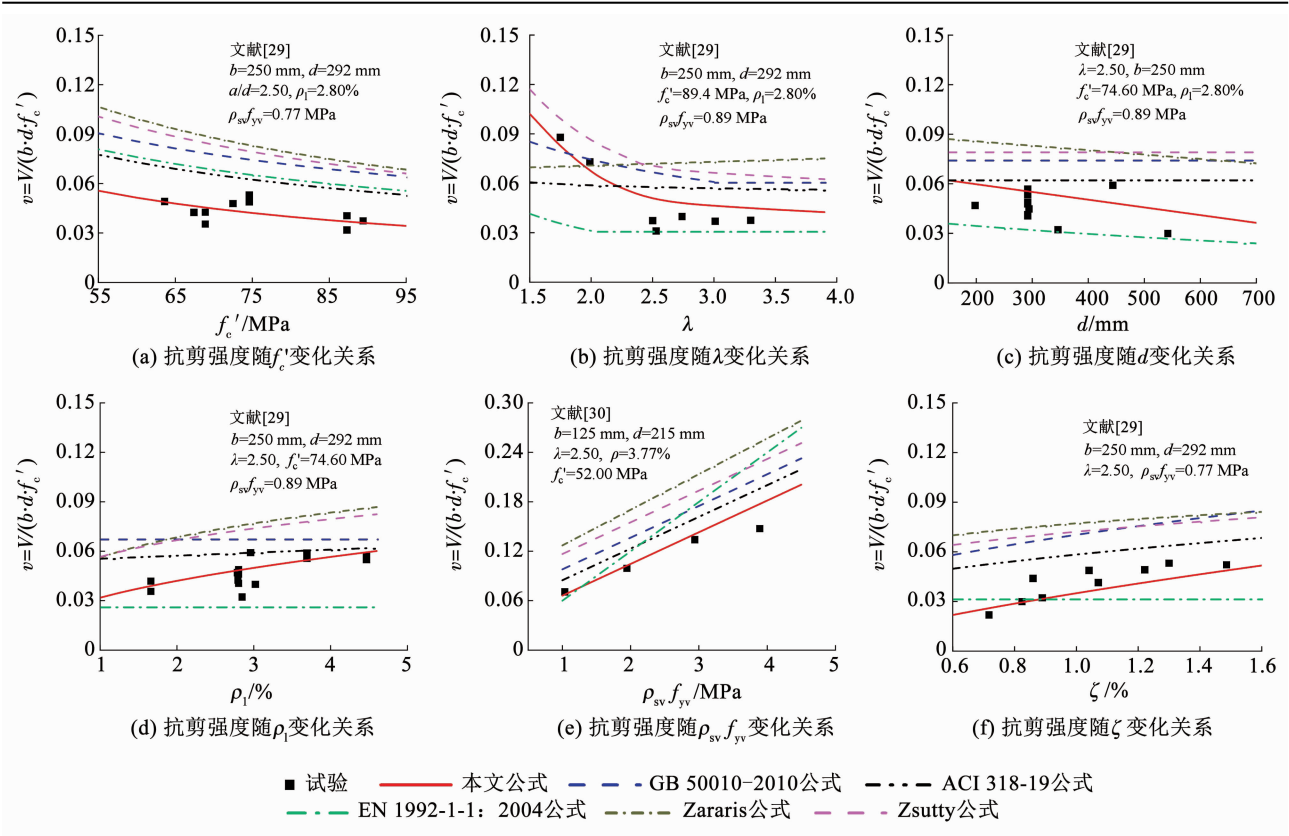


图 5 不同计算模型中设计参数对抗剪强度影响分析

Fig. 5 Influence of design parameters for shear strength in different calculation models

对比表明,本文所提理论模型对不同受剪参数具有较好的适应性,受剪承载力预测结果表现出良好的稳定性,预测精度较上述其他计算模型公式有较大提高。

2.3 HSC 梁构件抗剪试验数据整理

为验证本文基于梁-拱作用所提理论模型的适

用性,收集整理了 207 根集中荷载作用下发生受剪破坏的有腹筋 HSC 矩形梁试验梁数据,数据主要参数范围为: $51.48\text{ MPa}\leq f_c'\leq 128.28\text{ MPa}$, $126\text{ mm}\leq d\leq 762\text{ mm}$, $0.98\leq\lambda\leq 4$, $0.01\leq\rho_l\leq 0.07$, $0.33\text{ MPa}\leq\rho_{sv}f_{yv}\leq 8.05\text{ MPa}$,试验数据参数见表 2。

表 2 有腹筋高强混凝土梁受剪试验数据汇总表

数据文献	试件数	f_c' /MPa	b /mm	d /mm	λ	ρ_l	$\rho_{sv}f_{yv}$ /MPa
文献[31]	5	51.48~72.33	304.8	538.7	3.1	0.03	0.40~0.70
文献[32]	10	72.41~125.31	355.6~457.2	558.8~762	2.5~3	0.02~0.07	0.33~8.05
文献[33]	11	70.10~80.10	180	232~235	2.5~4	0.02~0.04	0.76~1.53
文献[34]	4	90.00~103.24	127	198.1	3~4	0.05	1.65~2.53
文献[29]	43	63.60~89.40	250	198~542	1.75~3.30	0.02~0.04	0.60~1.49
文献[35]	13	58~82	150	310~325	3~5	0.02~0.04	0.35~0.71
文献[30]	24	52~73	125	215	1.5~2.5	0.04	0.99~7.49
文献[36]	16	52.65~66.40	85~200	126~325	2~3.1	0.02~0.06	0.34~6.40
文献[37]	15	83.65~128.28	150	232~300	0.98~3.03	0.02~0.04	2.21~5.53
文献[38]	12	53.90~87.00	200	351~353	3.06~3.08	0.02~0.03	0.58~1.29
文献[39]	7	67.25~103.44	140	179.5~183	3.55	0.03~0.05	0.35
文献[40]	9	55.48~65.63	200	358~359	3.06~3.07	0.01~0.02	0.96~1.20
文献[41]	6	56.36	150	243~265	2.26~2.47	0.02~0.05	1.46~4.79
文献[42]	4	54.39~57.93	200	365	1.50~2.20	0.02	1~1.11
文献[43]	6	69.40	150	235~265	2.26~2.50	0.02~0.05	1.46~3.29
文献[44]	5	59.30	300	369	1.23	0.05	1.90~3.75
文献[45]	3	89.50	200	380~385	3	0.02	0.57~0.98
文献[46]	5	81.64	196~203	386~416	3	0.02	0.57~0.97
文献[47]	4	75.43	150	265	1.5~3.0	0.03	1.72~3.46
文献[48]	5	58.15~85.23	200	435	2.6	0.02	0.56~0.95

注:表中按文献发表时间的先后顺序排列。 ρ_l 为纵筋配筋率; ρ_{sv} 为配箍率。

2.4 计算模型误差评估

为了明确本文理论模型、GB 50010—2010、ACI 318-19、EN 1992-1-1:2004、Zararis 公式、Zsutty 公式对 HSC 梁受剪承载力计算的适用性和预测效果,基于所收集的 207 根 HSC 试验梁数据,采用表 1 中的计算模型进行分析,结果见图 6 和表 3。

分析图 6 和表 3 的结果表明:1)试验值与所提模型的受剪承载力预测结果比值的均值 ξ_{AVG} 为 1.062,预测结果与试验值较好吻合,标准差 ξ_{STD} 和变异系数 ξ_{COV} 分别为 0.095、0.089,预测结果的分布较其他模型更为合理,表明文中所提模型能够准确地预测 HSC 梁的受剪承载力,同时具有更为显著的预测稳定性;2)试验值与 GB 50010—2010、ACI 318-19、EN 1992-1-1:2004、Zararis 公式和 Zsutty 公式计

算值比值的均值 ξ_{AVG} 分别为 1.514、1.372、1.515、1.749、1.302,变异系数 ξ_{COV} 分别为 0.220、0.253、0.347、0.255、0.280,其中,Zsutty 公式的受剪承载力预测结果相对于中美欧规范及 Zararis 公式的预测结果更为接近试验值,预测效果更好,但总体来说,现有计算模型的预测结果具有离散性较大和偏于保守的特点。

此外,由图 6 还可以发现,受剪承载力的主要影响因素(f_c' 、 λ 、 d 、 ρ 、 $\rho_{sv}f_{yv}$)的大范围变化对本文所提理论模型结果的影响很小,表明本文所提模型对较大范围受剪参数的剪切破坏试验梁受剪承载力预测结果较为稳定。同时,不同计算模型在反映各受剪参数时体现出差异性的预测精度,说明不同模型对剪切破坏机理和影响因素的认识存在着一定差异。

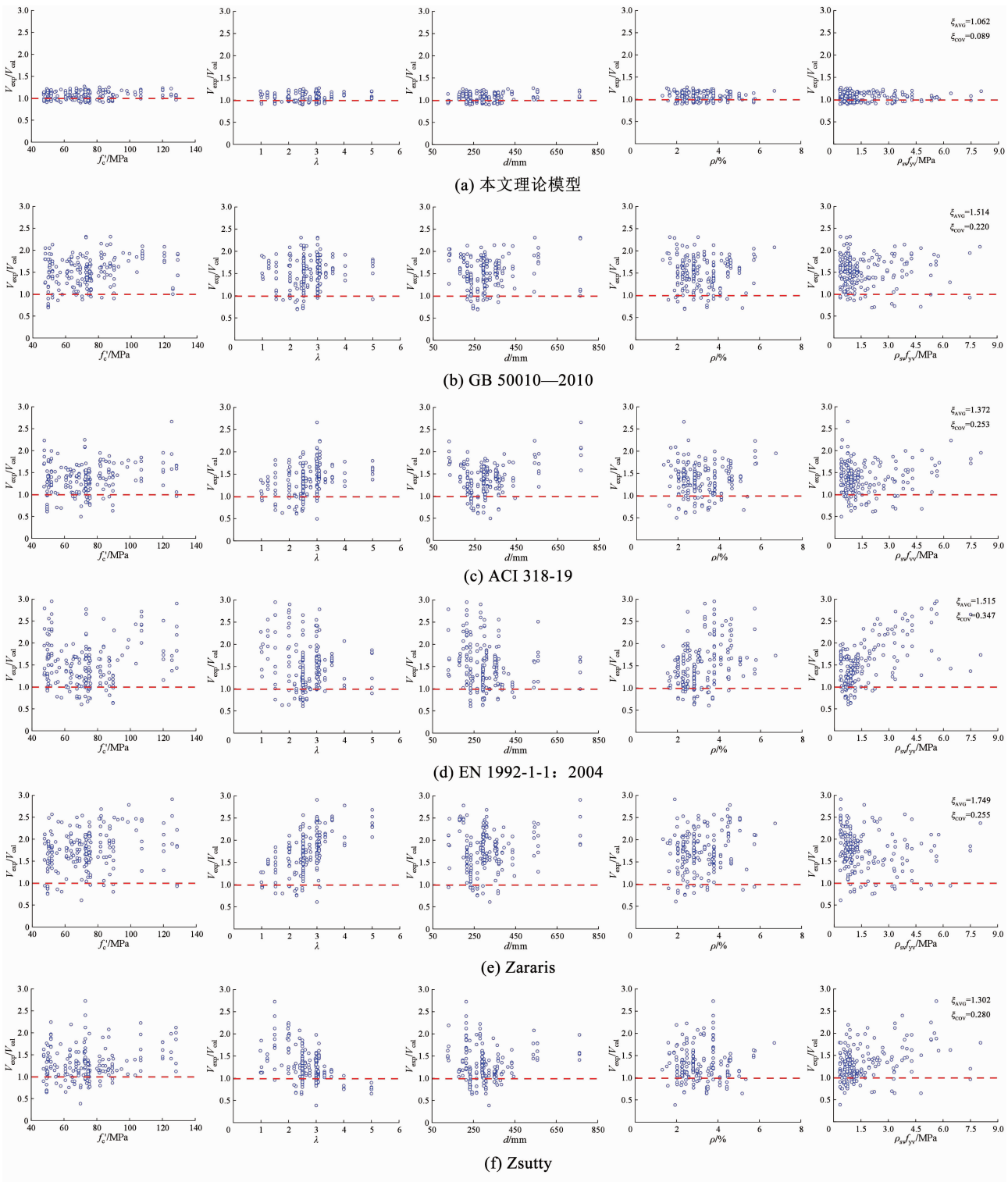


图 6 不同计算模型公式试验结果与预测结果比较

Fig. 6 Comparison of test results and prediction results of different calculation models

表 3 不同计算模型公式预测结果的统计指标

Tab. 3 Statistics indicators of prediction results for different calculation models

计算模型	ξ_{AVG}	ξ_{STD}	ξ_{COV}	计算模型	ξ_{AVG}	ξ_{STD}	ξ_{COV}
本文理论模型	1.062	0.095	0.089	EN 1992-1-1;2004 ^[16]	1.515	0.527	0.347
GB 50010—2010 ^[25]	1.514	0.333	0.220	文献[27]	1.749	0.447	0.255
ACI 318-19 ^[26]	1.372	0.347	0.253	文献[28]	1.302	0.365	0.280

注: ξ 为试验值与模型计算值的比值, ξ_{AVG} 为试验值与模型计算值比值的均值, ξ_{STD} 和 ξ_{COV} 分别为试验值与模型计算值比值均值的标准差与变异系数。

3 结 论

1) 通过分析 HSC 梁发生剪切破坏时剪跨段内剪力传递路径, 基于梁作用和拱作用考虑高强混凝土对梁构件受剪承载力的贡献, 箍筋项采用简化的修正压力场理论计算, 同时考虑尺寸效应影响, 建立了集中荷载作用下 HSC 梁受剪承载力计算模型, 模型物理意义清晰明确, 可以真实反映梁构件斜截面受剪破坏机理;

2) 基于梁-拱复合受力机制和简化修正压力场理论所建立的集中荷载作用下 HSC 梁受剪分析模型能较好地反映混凝土强度、剪跨比、相对剪压区高度、纵筋配筋率、配箍率以及尺寸效应的影响, 且预测精度随受剪参数的大范围变化无明显相关性, 具有较好的预测稳定性;

3) 本文模型公式与 207 根梁试验结果较好吻合, 试验值与模型计算值比值的均值为 1.062, 变异系数为 0.089, 离散程度较低, 而试验值与规范 GB 50010—2010、ACI 318-19、EN 1992-1-1: 2004、Zararis 公式、Zsutty 公式的计算值比值的均值最小为 1.302, 变异系数最小为 0.220, 预测精度较低且过于保守。通过上述比较表明, 本文所提模型在预测精度和稳定性方面都有一定程度的提高。

参考文献

- [1] 高强混凝土应用技术规程: JGJ/T 281—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
Technical specification for application of high strength concrete: JGJ/T 281—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012
- [2] 祖坤, 熊二刚, 宋良英, 等. 高强混凝土构件力学性能研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3178
ZU Kun, XIONG Ergang, SONG Liangying, et al. Review on mechanical properties of high-strength concrete members[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(10): 3178. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2019.10.021
- [3] BEUSHAUSEN H, DITTMER T. The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 74: 132. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.055
- [4] WU Weikuo, HSU T T C, HWANG S J. Shear strength of reinforced concrete beams[J]. ACI Structural Journal, 2014, 111(4): 812. DOI: 10.14359/51686733
- [5] 祖坤. 基于力学分析的无腹筋 RC 梁受剪承载力研究[D]. 西安: 长安大学, 2020
ZU Kun. Study on the shear capacity of RC beams without web reinforcement based on mechanical analysis[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020
- [6] ZHANG Tao, VISINTIN P, OEHLERS D J. Shear strength of RC beams with steel stirrups[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(2): 04015135. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-

- 541X.0001404
- [7] AHMAD S, BHARGAVA P. Shear strength models for reinforced concrete slender beams: a comparative study[J]. Structures, 2018, 16: 119. DOI: 10.1016/j.istruc.2018.09.004
- [8] PERERA S V T, MUTSUYOSHI H. Shear behavior of reinforced high-strength concrete beams[J]. ACI Structural Journal, 2013, 110(1): 48. DOI: 10.14359/51684328
- [9] 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): 331
- [10] KIM D, KIM W, WHITE R N. Arch action in reinforced concrete beams—A rational prediction of shear strength[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(4): 588. DOI: 10.14359/695
- [11] ZARARIS P D, PAPADAKIS G C. Diagonal shear failure and size effect in RC beams without web reinforcement[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(7): 736. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:7(733)
- [12] BAŽANT Z P, KIM J K. Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams[J]. ACI Structural Journal, 1984, 81(5): 460. DOI: 10.14359/10696
- [13] CAMPIONE G, CANNELLA F, CAVALERI L. Shear and flexural strength prediction of corroded RC beams[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 400. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.125
- [14] ELIGEHAUSEN R, POPOV E P, BERTERO V V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: experimental results and analytical model: UCB/ERC-83/23[R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, 1983
- [15] SWAMY R N, JONES R, CHIAM A T P. Influence of steel fibers on the shear resistance of lightweight concrete I-beams[J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(1): 108. DOI: 10.14359/4201
- [16] Design of concrete structures-Part 1-1: general rules and rules for buildings: EN 1992-1-1: 2004[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004
- [17] KIM J K, PARK Y D. Shear strength of reinforced high strength concrete beams without web reinforcement[J]. Magazine of Concrete Research, 1994, 46(166): 10. DOI: 10.1680/mac.1994.46.166.7
- [18] HASEGAWA T, SHIOYA T, OKADA T. Size effect on splitting tensile strength of concrete[C]//Proceedings Japan Concrete Institute 7th Conference. Alexandroupolis: [s. n.], 1985: 310
- [19] 贺志启, 刘钊, 张宇峰. 基于桁-拱叠加模型的体外预应力混凝土梁抗剪承载力计算方法[J]. 土木工程学报, 2010, 43(1): 59
HE Zhiqi, LIU Zhao, ZHANG Yufeng. A method based on truss-arch model for calculating the shear strength of externally prestressed concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(1): 59. DOI: 10.15951/j.tmgxb.2010.01.017
- [20] Code 262 for concrete structures: SIA 262: 2003[S]. Zürich: Swiss Society of Engineers and Architects, 2003
- [21] CAMPIONE G, MONACO A, MINAFÒ G. Shear strength of high-strength concrete beams: modeling and design recommendations[J]. Engineering Structures, 2014, 69: 119. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.02.029
- [22] 郑文忠, 李健, 王刚, 等. 剪压区和剪跨比对混凝土板受剪承载力的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(4): 7
ZHENG Wenzhong, LI Jian, WANG Gang, et al. Effects of shear compression zone and shear span ratio on shear capacity of concrete

slabs[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(4): 7. DOI: 10.11918/202106059

[23] COLLINS M P, MITCHELL D, ADEBAR P, et al. A general shear design method[J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(1): 40. DOI: 10.14359/9838

[24] BLANKSVÄRD T. Strengthening of concrete structures by the use of mineral based composites[D]. Luleå: Luleå Tekniska Universitet, 2007

[25] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015

Code for the design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015

[26] Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318-19[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019

[27] ZARARIS P D. Shear strength and minimum shear reinforcement of reinforced concrete slender beams[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(2): 208. DOI: 10.14359/12484

[28] ZSUTTY T C. Beam shear strength prediction by analysis of existing data[J]. ACI Structural Journal, 1968, 65(11): 949. DOI: 10.14359/7526

[29] KONGP Y L, RANGAN B V. Shear strength of high-performance concrete beams[J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(6): 682. DOI: 10.14359/581

[30] 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): 550. DOI: 10.14359/691

[31] JOHNSON M K, RAMIREZ J A. Minimum shear reinforcement in beams with higher strength concrete[J]. ACI Structural Journal, 1989, 86(4): 373. DOI: 10.14359/2896

[32] ROLLER J J, RUSSEL H G. Shear strength of high-strength concrete beams with web reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 1990, 87(2): 194. DOI: 10.14359/2682

[33] 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): 662. DOI: 10.14359/9644

[34] XIE Yuliang, AHMAD S H, YU Tiejun, et al. Shear ductility of reinforced concrete beams of normal and high-strength concrete[J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(2): 145. DOI: 10.14359/4592

[35] OZCEBE G, ERSOY U, TANKUT T. Evaluation of minimum shear reinforcement requirements for higher strength concrete[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(3): 361. DOI: 10.14359/669

[36] 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

[37] 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): 35

LI Liren, ZHI Yunfang, CHEN Yongqing, et al. Experimental research on shear capacity of high strength of super strength concrete beam constrained with web bars[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(5): 35. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2001.05.007

[38] CLADERA A, MARI A R. Experimental study on high-strength concrete beams failing in shear[J]. Engineering Structures, 2005, 27(10): 1523. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.04.010

[39] SATO R, KAWAKANE H, KAWAMOTO T, et al. Shrinkage effect on shear strength of reinforced, high strength concrete beams[J]. ACI Special Publication, 2007, 246: 265

[40] 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

LÜ Yanmei. Theoretical and experimental research on shear capacity of high strength concrete beams with high strength stirrups[D]. Changsha: Hunan University, 2008

[41] 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 Jiarong. 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

[42] 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 Bairong. Research on shear capacity of high strength concrete beams[D]. Changsha: Hunan University, 2009

[43] 史庆轩, 侯伟, 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(增刊2): 99

SHI Qingxuan, HOU Wei, JIANG Weishan, et al. Shear capacity of high-strength concrete beams with high-strength stirrups[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(S2): 99. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.s2.018

[44] LEE J Y, CHOI I J, KIM S W. Shear behavior of reinforced concrete beams with high-strength stirrups[J]. ACI Structural Journal, 2011, 108(5): 624. DOI: 10.14359/51683219

[45] 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): 87

YE Xianguo, WANG Chengcheng, CHONG Xun, et al. Experimental study on shear behavior of beam with C100 concrete and HRBF500 grade rebar[J]. Industrial Construction, 2012, 42(7): 87. DOI: 10.13204/j.gyjz2012.07.022

[46] 叶献国, 张煜, 种迅, 等. 高强钢筋高强混凝土筒支梁抗剪试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(8): 49

YE Xianguo, 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): 49. DOI: 10.19701/j.jzjg.2013.08.012

[47] 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 Yali. Analysis on the shear behavior of high-strength concrete beams with high-strength stirrups[D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2015

[48] 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): 82

ZHANG Jieqiang, SHI Qiyin, YANG Fan, et al. Experimental study on shear resistance of high strength concrete beams[J]. Building Science, 2016, 32(9): 82. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2016.09.014