

文章编号: 1000-5013(2011)04-0422-05

# 预应力钢丝绳箍加固钢筋混凝土梁抗剪承载力计算方法

杨军民, 郭子雄, 黄群贤

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 采用桁架模型, 分析钢丝绳在加固中的受力机理, 提出一种预应力钢丝绳箍加固钢筋混凝土梁抗剪承载力计算方法. 研究表明: 所提出公式的计算结果与试验结果吻合良好, 可用于计算闭合预应力钢丝绳箍加固钢筋混凝土梁抗剪承载力; 采用桁架模型计算钢丝绳抗剪承载力时, 应考虑混凝土抗剪承载力和钢丝绳极限强度折减. 此外, 通过与美国混凝土结构规范 ACI 318-05 建议公式的计算结果相比, 表明所得钢丝绳加固 RC 梁抗剪承载力吻合程度高.

**关键词:** 预应力; 钢丝绳; 加固; 抗剪承载力; 桁架模型

**中图分类号:** TU 511.32; TU 311.4

**文献标志码:** A

近年来, 钢丝绳作为一种轻质高强材料逐渐被应用于工程加固, 如北京财富中心、西安西港国际大厦、苏州青浦大桥和厦门郑成功纪念馆<sup>[1]</sup>等. 同时, 国内外学者也开展了钢丝绳加固混凝土(RC)结构的研究<sup>[2-4]</sup>. 东南大学吴刚等<sup>[5]</sup>通过 2 个钢丝绳加固 RC 梁试件的抗剪性能试验研究, 验证了钢丝绳加固梁的有效性. Yang 等<sup>[6-7]</sup>通过不同梁截面形式、钢丝绳加固方式、预应力水平、钢丝绳间距等参数, 研究钢丝绳加固 RC 梁后的受力性能, 表明钢丝绳的加固效果与多个参数有关. 目前, 钢丝绳加固钢筋混凝土(RC)结构的研究大多停留在初步实验性阶段, 对钢丝绳加固 RC 结构的受力机理, 特别是钢丝绳加固 RC 梁的抗剪机理研究仍相对较少, 尚未提出一种合理的设计计算方法. 计算钢丝绳加固 RC 梁抗剪承载力的方法是借鉴钢筋混凝土结构的设计计算方法. 由于钢丝绳与钢筋两种材料性能的差异及加固钢丝绳股绳的受力不均, 导致计算结果与试验结果的误差较大. Yang 等<sup>[6-7]</sup>等将美国混凝土结构规范 ACI 318-05(以下简称“规范 ACI 318-05”)及欧洲规范 EC-2 计算的结果与试验结果进行了对比, 规范推荐的计算方法与试验结果相差较大, 最大时计算值可比实验值大两倍多. 因此, 本文在前人试验的基础上, 通过理论分析, 提出一种闭合预应力钢丝绳箍加固梁抗剪承载力计算方法.

## 1 钢丝绳的受拉特性

### 1.1 钢丝绳的伸长

钢丝绳是一种由钢丝组成股绳, 然后由股绳通过不同的捻制方式而形成的一种高强度材料, 组成钢丝绳的钢丝直径通常为 0.3~2.0 mm. 钢丝绳受拉过程中, 受力开始, 钢丝与钢丝之间充满空隙, 钢丝绳刚度较小; 随着张拉力不断增加, 钢丝彼此相互挤紧, 产生横向收缩, 纵向伸长, 钢丝绳刚度逐渐增大; 随后钢丝屈服, 钢丝绳产生一定塑性变形, 刚度变小. 当达到拉力极限承载力时, 由于钢丝绳股绳受力不均, 受力较大的股绳首先被拉断, 钢丝绳拉力突然减小, 股绳内力重新分配, 钢丝绳所受拉力又逐渐增大, 达到一个新的极限后, 局部股绳再次被拉断. 这样连续多次, 直至钢丝绳完全被拉断. 图 1 是直径为 6 mm, 规格为 18×7+IWS 钢丝绳力与位移曲线.

**收稿日期:** 2010-12-12

**通信作者:** 郭子雄(1967-), 男, 教授, 主要从事工程抗震防灾的研究. E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50978107); 福建省自然科学基金资助项目(2010J01298)

钢丝绳在拉伸过程中, 钢丝绳会产生较大的纵向变形. 松弛状态下的钢丝绳被拉伸时, 钢丝绳首先产生一定的纵向虚变形, 进入塑性阶段后, 钢丝绳因塑性变形继续伸长, 最后, 钢丝绳在产生较大纵向变形下被拉断. 在工程加固中, 钢丝绳较大的纵向变形导致其无法对 RC 结构形成可靠约束而产生较宽裂缝, 使原结构不能满足正常使用要求, 甚至丧失承载力. 为了防止结构过宽裂缝, 应对工程加固钢丝绳施加一定的预应力, 减小钢丝绳的初始变形, 从而提高钢丝绳加固的效果.

1.2 钢丝绳的最小破断力及发挥水平

钢丝绳受拉至破坏时的极限承载力即为钢丝绳的最小破断力, 其小于组成钢丝绳的单根钢丝极限承载力总和. 这是由于钢丝受到捻制, 应力损失, 极限承载力减小. 钢丝绳最小破断力是其性能的一个重要指标, 它体现了钢丝绳在受拉状态下所能达到的一个承载力极限值. 钢丝绳最小破断力与钢丝绳的捻制方式和结构有关. 相同条件下, 钢丝绳最小破断力越大, 其所能达到的极限应力水平越高. 钢丝绳最小破断力可按国家标准 GB/T 8358—2006《钢丝绳破断拉伸试验方法规范》<sup>[8]</sup>中给定的公式进行计算, 即

$$F_{\min} = KR_r d^2 / 1\,000. \tag{1}$$

式(1)中:  $K$  为一定结构钢丝绳最小破断力换算系数, 与钢丝绳的结构形式和捻制方式有关;  $R_r$  为钢丝绳公称抗拉强度;  $d$  为钢丝绳公称直径.

与钢筋不同, 钢丝绳应力-应变曲线无明显屈服阶段, 延性较低. 钢丝绳承载能力在达到最小破断力后, 会出现多次阶梯状波动, 最后钢丝绳被拉断. 钢丝应力从初始状态一直增加至极限应力状态而破坏, 其极限应力与钢丝绳最小破断力有关, 即

$$\sigma_{w,u} = \frac{F_{\min}}{A_e}. \tag{2}$$

式(2)中:  $\sigma_{w,u}$  为钢丝绳极限应力;  $F_{\min}$  为钢丝绳最小破断力;  $A_e$  为钢丝绳有效截面面积. 因此, 工程加固中, 钢丝绳应具有较高的最小破断力, 使结构具有较高的安全储备, 防止结构脆性破坏.

钢丝绳是一种高强材料, 其最高强度可达到 2 GPa 以上, 但实际工程中是很难达到且远远低于该强度值. 这主要是由于钢丝绳弹性模量较小, 泊松比较大, 加固钢筋 RC 梁后易二次受力. 当钢丝绳强度发挥到较高水平时, 钢丝绳伸长量较大, 用其加固结构的裂缝较宽, 已经不能满足正常使用要求了<sup>[9]</sup>. 提高钢丝绳的初始应力水平能够减小钢丝绳初始变形, 减小后期结构裂缝发展宽度; 同时, 初始预应力增强了钢丝绳与原结构协同工作的能力, 有利于提高钢丝绳强度发挥水平, 从而提高材料利用率.

2 抗剪承载力计算公式

2.1 现行钢丝绳抗剪计算公式

国内外学者对预应力钢丝绳加固 RC 梁抗剪性能开展了一定的实验研究, 分析了钢丝绳配绳率、预应力水平、加固方式、锚固形式等多参数的影响, 但都没有形成统一的计算钢丝绳加固 RC 梁的抗剪承载力公式. 目前, 对钢丝绳加固 RC 梁抗剪承载力  $V_w$  的计算一般采用规范 ACI 318-05 推荐的公式, 即

$$V_w = A_w f_w h_0 / s_w \leqslant 0.66 \sqrt{f'_c} b h_0. \tag{3}$$

式(3)中:  $f_w$  为钢丝绳的名义强度,  $f_w = f_u - f_p \leqslant 420$  MPa,  $f_u$ ,  $f_p$  分别为钢丝绳极限应力和预应力;  $A_w$  为钢丝绳有效截面积;  $h_0$  为梁截面有效高度;  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度;  $b$  为梁截面宽度.

另一种方法则是采用欧洲规范 EC-2 推荐的公式<sup>[10]</sup>, 即

$$V_w = A_w f_w j_d / s_w \leqslant 0.4 b h_0. \tag{4}$$

式(4)中:  $j_d$  为梁上、下纵筋合力点中心的距离;  $s_w$  为钢丝绳间距;  $f_w = f_u - f_p \leqslant 0.5 \nu_c f'_c b s / A_w$ ,  $\nu_c$  为混凝土强度有效系数; 其他符号同前.

从两种方法的应用来看, 所计算出来的钢丝绳抗剪承载力与试验结果相差较大. 这主要是由于式

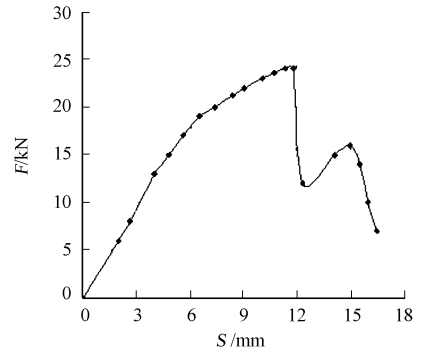


图 1 钢丝绳力-位移曲线  
Fig. 1 Force-displacement curve of steel wire

(3),(4)均采用了钢丝绳名义强度,而钢丝绳名义强度反映了加固后钢丝绳的发展强度. 预应力虽然不能提高钢丝绳极限抗剪强度,但它可以提高钢丝绳强度发挥水平. 式(3),(4)均未能反映钢丝绳预应力对抗剪强度的提高作用,导致计算结果偏于保守.

2.2 钢丝绳抗剪机理与公式推导

为了更加合理计算钢丝绳抗剪承载力,文中提出一种钢丝绳抗剪承载力计算方法. RC 梁抗剪承载力计算模型很多,桁架模型是由 Ritter 和 Mörshch<sup>[11]</sup>在 20 世纪初提出的计算模型之一,它适用于配腹筋的 RC 梁抗剪承载力计算. 采用闭合预应力钢丝绳进行抗剪加固的 RC 梁,钢丝绳承受的剪力可采用桁架模型进行计算.

钢丝绳加固的 RC 梁可以看作是由内、外两个桁架形成的空间结构,如图 2 所示. 其中:内桁架由纵筋、箍筋和混凝土组成;外桁架由纵筋、钢丝绳和混凝土组成;把纵筋和钢丝绳视为拉杆或压杆,混凝土视为斜压腹杆. 对由钢丝绳和混凝土组成的外桁架桁架模型进行受力分析,剪力平衡和应力平衡如图 3 所示. 在桁架模型中,受剪承载力根据钢丝绳截面面积之和  $\sum \alpha_w$  和极限强度  $\sigma_{w,u}$  求出,即有

$$V_t = \sum \alpha_w \sigma_{w,u} = \rho_w \sigma_{w,u} b h \cot \theta. \tag{5}$$

式(5)中: $\rho_w$  为钢丝绳配绳率; $b, h$  分别为 RC 梁截面的宽度和高度; $\theta$  为斜腹杆与水平拉杆夹角.  $\theta$  反映了腹杆的倾斜程度,  $\theta$  值越小,与斜裂正交的压力越大,其上限  $\cot \theta = 2$ ,受纵筋变形和混凝土斜压力的影响.

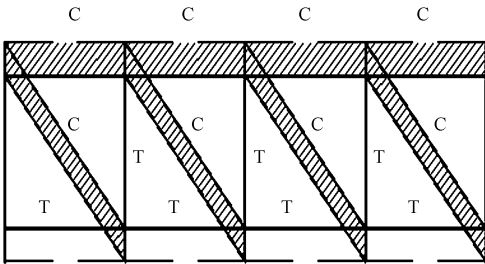
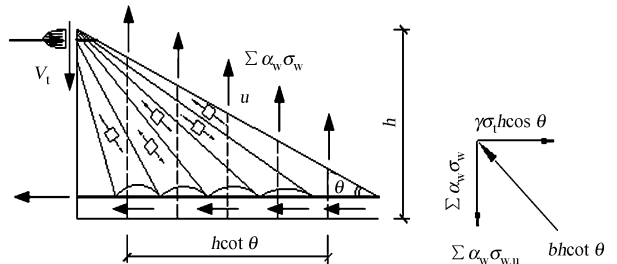


图 2 桁架模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of truss model



(a) 剪力平衡 (b) 应力平衡

图 3 桁架模型剪力平衡和应力平衡

Fig.3 Shear force equilibrium and stress equilibrium in truss model

根据图 3(b)的平衡条件,不考虑塑性转角时,可得

$$(\sum \alpha_w \sigma_{w,u})^2 (1 + \cot^2 \theta) = (\gamma \sigma_t b h \cos \theta)^2. \tag{6}$$

式(6)中: $\gamma$  为有效系数. 考虑钢丝绳及其间距  $s_w$  的作用,使实际混凝土受压面积减少,对截面面积的折减,取  $\gamma = (1 - s_w/2h)(1 - b/4h)$ . 将式(6)代入式(5),且满足混凝土斜压应力  $\sigma_t \leq \nu_0 \sigma_B$ ,可得到

$$\cot \theta \leq \sqrt{\gamma \nu_0 \sigma_B / \rho_w \sigma_{w,u} - 1}. \tag{7}$$

式(7)中: $\nu_0$  为考虑混凝土在双向受力作用下的软化系数,可根据混凝土的轴心抗压强度求得,即  $\nu_0 = 0.7 - \sigma_B/200$ . 同时,考虑到  $\cot \theta \leq 2$ ,将式(7)代入式(5),可得桁架模型中受剪承载力  $V_t$  的计算式为

$$V_t = \min(2 \sigma_w \sigma_{w,u} b h, \sigma_w \sigma_{w,u} b h \sqrt{\gamma \nu_0 \sigma_B / \rho_w \sigma_{w,u} - 1}). \tag{8}$$

闭合预应力钢丝绳箍加固 RC 梁抗剪承载力计算公式可以表示为

$$V = V_c + V_s + V_w. \tag{9}$$

考虑式(9)计入混凝土对 RC 梁抗剪承载力的贡献. 因此,采用桁架模型计算钢丝绳抗剪承载力时,应对混凝土的贡献予以适当折减,并考虑钢丝绳应力发挥水平. 则钢丝绳的抗剪承载力的计算式为

$$V_w = \mu V_t. \tag{10}$$

式(10)中: $\mu$  为考虑桁架模型中内外桁架混凝土抗剪承载力重复计算和钢丝绳发挥水平折减系数,它与钢丝绳配绳率、预应力水平以及梁的剪跨比有关. 令  $\kappa = \frac{\alpha}{100 \rho_w (\lambda - 1)}$ ,则其大小为

$$\mu = 0.038 4 \kappa + 0.191. \tag{11}$$

式(11)中; $\alpha$  为钢丝绳预应力水平; $\rho_w$  为配绳率; $\lambda$  为 RC 梁剪跨比.

2.3 公式验证

采用闭合预应力钢丝绳箍加固的 RC 梁,钢筋与混凝土所承担的剪力按混凝土规范<sup>[12]</sup> 进行计算;钢丝绳所承担的剪力根据式(10),(11)计算.将相关参数代入式(10)~(11),通过计算,可以得出闭合预应力钢丝绳箍加固 RC 梁抗剪承载力计算值  $V_c$ .与试验值  $V_E$  结果对比,如表 1 所示.

表 1 计算结果表明,总体上,由式(9)所得的计算结果与实验结果基本吻合,计算结果与试验结果最大相差 13%.对比文献[6]和文献[7]的计算结果可以看出,文献[6]的计算结果与试验结果吻合程度更高,文献[7]的计算结果相对试验结果具有一定的离散性.造成这种现象的原因是 RC 梁剪跨比不同,改变了 RC 梁在剪跨内的破坏模式.当剪跨比较大时,RC 梁斜截面易发生斜拉破坏,导致钢丝绳、钢筋和混凝土对抗剪承载力的贡献发生变化.此时,采用闭合预应力钢丝绳箍对 RC 梁进行抗剪加固不能提高其抗剪承载力,从而导致计算值比实验值大.

表 1 理论计算值与试验值对比  
Tab.1 Comparison between calculation results and experimental results

数据来源	试件编号	$\lambda$	$\alpha$	$\rho_w/\%$	$V_c/\text{kN}$	$V_E/\text{kN}$	$V_c/V_E$
文献[6]	C1	2.50	0.60	0.17	213.4	214.9	0.990
	C2	2.50	0.60	0.21	233.2	239.7	0.970
	C3	2.50	0.60	0.29	275.9	308.2	0.900
	C4	2.50	0.60	0.38	326.2	341.6	0.950
	C5	2.50	0.45	0.21	226.7	218.8	1.040
	C6	2.50	0.75	0.21	245.4	269.3	0.910
文献[7]	2	1.50	0.53	0.064	221.5	234.3	0.950
	5	2.50	0.38	0.064	102.8	118.5	0.870
	7	2.50	0.53	0.064	115.6	125.5	0.920
	9	2.50	0.69	0.064	130.0	133.1	0.980
	12	3.25	0.53	0.064	95.6	90.0	1.060
	14	3.25	0.40	0.096	108.9	100.1	1.090
	15	3.25	0.80	0.048	100.0	82.8	1.214

为了更进一步验证该公式的合理性,将由式(9)、美国规范 ACI 318-05 所得计算值与实验结果数据进行对比分析,如图 4 所示.从图 4 可看出,通过两组试验共 13 个试件计算结果数据对比,由式(9)计算得到的闭合预应力钢丝绳箍加固 RC 梁抗剪承载力比美国规范 AIC 318-05 计算值吻合程度更好,能够较为准确地反映钢丝绳抗剪承载能力.由规范 ACI 318-05 计算所得到的抗剪承载力与试验结果存在一定的差异,离散性较大.

3 结论

研究表明,采用桁架模型计算闭合预应力钢丝绳加固 RC 梁钢丝绳抗剪承载力的方法是可行的.该模型较为明确地反映了钢丝绳在加固中的受剪机理,模型简单,易于计算.

外桁架模型是由纵筋、混凝土和钢丝绳共同作用形成,因此,采用桁架模型计算钢丝绳抗剪承载力应同时考虑混凝土抗剪承载力和钢丝绳极限强度折减.

通过式(9)所得钢丝绳加固 RC 梁抗剪承载力与试验结果吻合良好,而式(9)的计算结果受剪跨比影响较大,当剪跨比超出在 1.5~3.0 之间时,二者存在一定偏差.

钢丝绳是一种高强度材料,工程应用中,结构发生破坏时,钢丝绳通常尚未发生破坏,其极限强度不

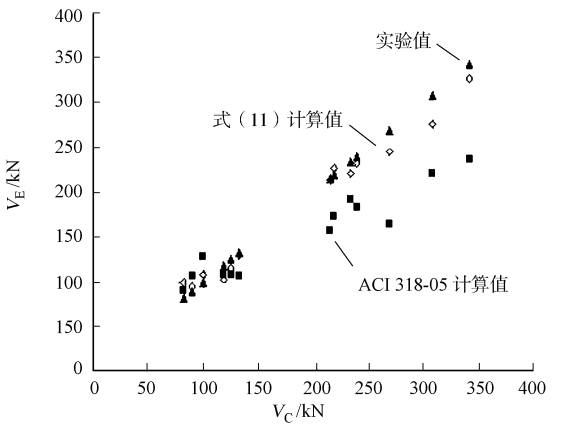


图 4 理论计算值与规范 ACI 318-05 计算值对比  
Fig. 4 Comparison between calculation results and ACI 318-05 code results

能完全发挥. 美国规范考虑了钢丝绳强度到达一个较高水平时, 结构的裂缝宽度超出了正常使用极限状态. 因此, 美国规范 ACI 318-05 中规定, 在计算预应力钢丝绳抗剪承载力时, 将钢丝绳的强度设计值控制在一个较低水平, 即小于 420 MPa, 远小于钢丝绳的极限强度. 这样就保证了钢丝绳承受的剪力处于一个相对较低水平. 由此计算所得的抗剪承载力偏于保守, 但具有一定的安全储备.

# 参考文献:

- [1] 王亚勇, 姚秋来, 巩正光, 等. 高强钢绞线网-聚合物砂浆在郑成功纪念馆加固工程中的应用[J]. 建筑结构, 2005, 35(8): 40-42.
- [2] 聂建国, 蔡奇, 张天申, 等. 高强不锈钢绞线网-渗透性聚合砂浆抗剪加固的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 10-17.
- [3] 吴刚, 蒋剑彪, 吴智深, 等. 预应力高强钢丝绳抗弯加固钢筋混凝土梁的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(12): 17-27.
- [4] SIM J I, YANG K H. Flexural behavior of reinforced concrete columns strengthened with wire rope and T-plate units[J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(5): 697-705.
- [5] 吴刚, 光超付, 田野, 等. 预应力高强钢丝绳抗剪加固混凝土梁施工工艺及效果初探[J]. 建筑结构, 2007, 36(S1): 28-30.
- [6] YANG K H, BYUN H Y, ASHOUR A F. Shear strengthening of continuous reinforced concrete T-beams using wire rope units[J]. Engineering Structures, 2009, 31(5): 1154-1165.
- [7] KIM S Y, YANG K H, BYUN H Y, et al. Tests of reinforced concrete beams strengthened with wire rope units[J]. Engineering Structures, 2007, 29(10): 2711-2722.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会, 郑州金属制品研究院, 等. GB/T 8358—2006 钢丝绳破断拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 1-2.
- [9] American Concrete Institute. ACI committee 318: Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05)[S]. [s. l.]: ACI, 2005.
- [10] British Standards Institution. The European Standard EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures [S]. [s. l.]: BSI, 2004.
- [11] 东南大学, 天津大学, 同济大学. 混凝土结构设计原理[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 92-94.
- [12] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局, 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 65-74.

## Method for Calculating Shear Capacity of RC Beams Strengthened with Prestressed Wire Stirrups

YANG Jun-min, GUO Zi-xiong, HUANG Qun-xian

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** Using truss model, the theoretical analysis was conducted to study the mechanism of steel wire in strengthening, and a model to predict shear capacity of reinforced concrete beams strengthened with prestressed wire stirrups was put forward. The calculation results agree well with the experimental ones, and the results obtained by code ACI 318-05 are conservative, therefore this model can be used to calculate the shear capacity of beam strengthened with prestressed wire stirrups, and the reduction of concrete shear bearing capacity and the ultimate strength of steel wire would be taken into consideration.

**Keywords:** prestress; steel wire; strengthening; shear bearing capacity; truss method

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)