

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.12.014

有腹筋 UHPFRC 梁抗剪承载力计算

徐海宾^{1,2}, 邓宗才¹

(1.工程抗震与结构诊治北京市重点实验室(北京工业大学),100124 北京;
2.河南理工大学 土木工程学院,454003 河南 焦作)

摘 要:为研究有腹筋 UHPFRC 梁的抗剪承载力,根据超高性能纤维混凝土梁的剪切破坏机理,结合修正压力场理论,考虑梁上部受压区混凝土和下部受拉区骨料咬合力、箍筋及裂缝间钢纤维共同承受剪力,推导了有腹筋超高性能纤维混凝土梁的抗剪承载力计算公式.与 9 根超高性能纤维混凝土梁的剪切试验结果进行对比,用推导公式计算的抗剪承载力与试验结果吻合较好,且变异系数较小,可用于有腹筋超高性能纤维混凝土梁的抗剪分析和设计.

关键词:超高性能纤维混凝土;腹筋;梁;抗剪承载力;修正压力场理论

中图分类号: TU375.1 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2015)12-0080-06

Shear capacity of UHPFRC beams with stirrups

XU Haibin^{1,2}, DENG Zongcai¹

(1. Beijing Key Lab of Earthquake Engineering and Structural Retrofit(Beijing University of Technology),100124 Beijing,China;
2.School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, 454003 Jiaozuo, Henan,China)

Abstract: The equation for the shear capacity of UHPFRC beams with stirrups is deduced to study the shear capacity of UHPFRC beams with stirrups, based on the modified compression field theory, and considering the shear contribution of concrete in compression, shear stress transmitted across crack interface, shear carried by steel fibers and stirrups. The analysis results of nine tested UHPFRC beams in shear by the proposed equation agree well with the test values, and the variation coefficient is small. It is suitable for shear analysis and design for UHPFRC beams with stirrups.

Keywords: ultra-high performance fiber reinforced concrete; stirrup; beam; shear capacity; modified compression field theory

超高性能纤维混凝土 (ultra-high performance fiber reinforced concrete, UHPFRC) 具有超高力学性能和优异的耐久性,工程中利用 UHPFRC 替代普通混凝土可以缩减结构尺寸、增大跨度、提高耐久性^[1-2].构件抗剪是结构设计中重要一环,然而目前针对 UHPFRC 梁抗剪性能的研究并不多,主要有: Voo 等^[3]基于塑性理论提出的无腹筋梁的简化计算模型,该方法假定临界斜裂缝贯穿整个梁高,忽略了剪压区的影响,对 20 根试验梁计算发现计算结果变异性较大;Graybeal^[4]进行了 3 根预应力无箍筋工字

型梁的抗剪试验,通过简化桁架模型反算出剪切破坏时 UHPFRC 的斜向拉应力比其抗拉强度高 38% 以上;Hegger 等^[5]进行了 7 根预应力工字型无腹筋梁的抗剪试验,7 根梁的试验结果平均值比按 AASHTO(2010)规范的计算值高出 121%;Charles^[6]进行了 6 根复合梁(上部为高性能混凝土面板,下部为 UHPFRC 工字形梁)的抗剪试验,抗剪承载力试验值比修正压力场理论计算值大 19%~59%;陈彬^[7]进行了 10 根预应力超高性能混凝土 T 梁的抗剪试验并根据国内外几个规范进行了对比计算,表明现有规范不适于 UHPFRC 梁的抗剪计算.

本文根据 UHPFRC 梁的剪切破坏机理,考虑上部受压区混凝土对抗剪承载力的贡献,结合修正压力场理论,推导了有腹筋 UHPFRC 梁抗剪承载力的计算方法.

收稿日期: 2015-01-04.
基金项目: 国家自然科学基金(51378032);北京市自然科学基金(8142005);河南理工大学青年基金(Q2014-08A).
作者简介: 徐海宾(1979—),男,博士,讲师;
邓宗才(1961—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 邓宗才, dengzc@bjut.edu.cn.

1 适于 UHPFRC 梁的修正压力场理论

修正压力场理论是根据钢筋和斜开裂混凝土的平衡条件、变形协调条件及应力-应变关系建立方

程, 确定受剪截面的荷载-变形反应, 并通过迭代的方法对方程求解. 考虑 UHPFRC 材料与普通混凝土的差异, 建立纯剪状态下适于 UHPFRC 的相关方程, 见图 1.

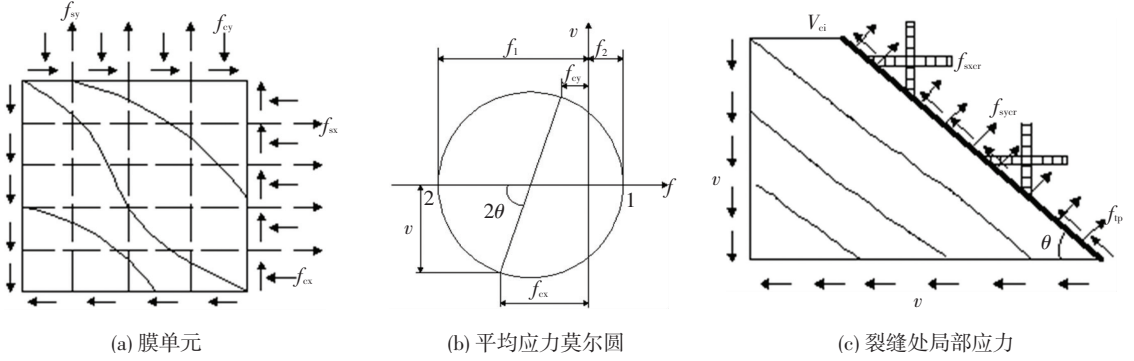


图 1 修正压力场理论

图 1(a) 为纯剪状态下的钢筋混凝土膜单元, 图中 v 为剪应力, f_{sx} 、 f_{sy} 分别为纵筋应力和箍筋应力, f_{cx} 、 f_{cy} 分别为膜单元纵向和横向应力. 图 1(b) 为混凝土平均应力莫尔圆, 根据修正压力场理论, 混凝土平均应变满足摩尔协调条件, 并假定混凝土的主应力和主应变方向一致, 图中 f_1 、 f_2 分别为主拉应力和主压应力, θ 为裂缝倾角. 图 1(c) 为裂缝处局部应力, 将实际复杂的裂缝理想化成一系列与纵筋呈 θ 角的平行裂缝, 图中 v_{ci} 为裂缝表面剪应力, f_{tp} 为跨越裂缝的钢纤维产生的有效拉应力, f_{syxr} 、 f_{sscr} 分别为裂缝处纵筋应力和箍筋应力.

1.1 应力平衡条件

由图 1(a) 和 (b) 可得平衡关系:

$$\rho_v f_{sy} = f_{cy} = v \tan \theta - f_1, \quad (1)$$

$$\rho_s f_{sx} = f_{cx} = v \cot \theta - f_1, \quad (2)$$

$$f_2 = v(\tan \theta + \cot \theta) - f_1. \quad (3)$$

式中 ρ_x 、 ρ_v 为纵筋配筋率和配箍率.

1.2 变形协调条件

$$\gamma_{xy} = 2(\varepsilon_x - \varepsilon_2) \tan \theta, \quad (4)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_2, \quad (5)$$

$$\tan^2 \theta = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_2}{\varepsilon_y - \varepsilon_2}. \quad (6)$$

式中: ε_x 、 ε_y 分别为截面纵向和横向应变, ε_1 、 ε_2 分别为主拉应变和主压应变, γ_{xy} 为剪应变.

1.3 裂缝处应力校核

将斜裂缝理想化为相互平行的平面, 与纵向钢筋的夹角为 θ . 与普通混凝土不同, UHPFRC 开裂后在裂缝处除了沿裂缝表面的剪应力 v_{ci} 外, 尚存在跨越裂缝的钢纤维产生的有效拉应力 f_{tp} , 由图 1(c) 有:

$$\rho_v f_{syxr} = v \tan \theta - v_{ci} \tan \theta - f_{tp}, \quad (7)$$

$$\rho_s f_{sscr} = v \cot \theta + v_{ci} \cot \theta - f_{tp}. \quad (8)$$

由式(7)、(8)可知, 跨越裂缝的钢纤维有效拉应力 f_{tp} 同时减小了横向钢筋和纵筋的应力.

目前未见 UHPFRC 裂缝表面剪应力 v_{ci} 计算方法的相关研究, 可参考普通混凝土公式:

$$v_{ci} \leq \frac{0.18 \sqrt{f'_c}}{0.3 + \frac{24w}{a + 16}}, \quad (9)$$

式中 a 为最大骨料粒径, w 为裂缝宽度.

修正压力场理论中, 裂缝宽度与假定的裂缝间距有关, 裂缝宽度可取为主拉应变 ε_1 与平均斜裂缝间距 $s_{m\theta}$ 的乘积, 即

$$w = \varepsilon_1 s_{m\theta}. \quad (10)$$

根据已有试验^[3-8], UHPFRC 梁斜裂缝间距不大于 30 mm, 可偏保守的取 50 mm.

1.4 开裂 UHPFRC 和钢筋的应力-应变关系

开裂混凝土应力-应变关系的研究需在专有试验仪器上对钢筋混凝土单元施加均匀的膜应力, 对开裂 UHPFRC 应力-应变关系, 目前未见相关研究成果. 参考普通混凝土应力-应变关系, 结合已有研究成果^[9-10], 开裂 UHPFRC 的应力-应变关系采用下式:

$$f_2 = f_{2\max} \left[\frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_0} \right)^2 \right]. \quad (11)$$

$$f_{2\max} = \frac{f_c}{0.8 + 113\varepsilon_1} \leq f_c. \quad (12)$$

$$f_1 = \begin{cases} E_c \varepsilon_1, & \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cr}; \\ f_{cr}, & \varepsilon_{0.3} \geq \varepsilon_1 > \varepsilon_{cr}; \\ \frac{(1 + 0.769\chi)f_{cr}}{1 + \chi}, & \varepsilon_1 > \varepsilon_{0.3}. \end{cases} \quad (13)$$

$$\chi = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{0.3}}{0.005}}. \quad (14)$$

式(11)中 ε_0 为 UHPFRC 峰值压应力对应的应变, 取

-0.003, ε_2 为主压应变。

钢筋的应力-应变模型采用理想弹塑性模型:

$$f_{sv} = \begin{cases} E_s \varepsilon_y, & 0 \leq \varepsilon_y < \varepsilon_{yv}; \\ f_{yv}, & \varepsilon_{yv} \leq \varepsilon_y \leq \varepsilon_{su}. \end{cases} \quad (15)$$

对以上 15 个式子联立求解可求得纯剪状态下构件的全过程受力性能。对于同时承受弯矩、剪力和轴力的构件,较精确的算法是进行分层迭代计算,但计算繁杂,不便于设计者使用;目前规范中多以简化的修正压力场理论为基础,通过计算相关参数并查表或直接给出显式计算公式的方法。

2 本文算法

修正压力场理论认为梁的抗剪承载力主要由腹板及箍筋提供,忽略了梁受压区承担的抗剪作用,而实际上,对于承受弯矩、剪力和轴力作用的梁来讲,梁受压区承受较大剪力(尤其是剪跨比较小,受压区高度较大时),若忽略受压区对抗剪的贡献,势必低估梁的抗剪承载力。本文分析 UHPFRC 梁抗剪承载力时,假定梁截面的剪力由上部受压区混凝土提供的剪力、下部受拉区的骨料咬合力、箍筋承担的剪力、裂缝间钢纤维有效拉应力以及预应力筋预加力对斜截面抗剪承载力的提高作用共同承担,与修正压力场理论一样,忽略纵筋的销栓作用,抗剪模型见图 2。

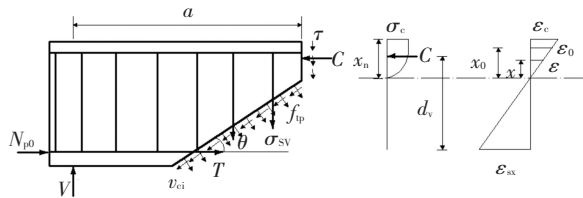


图 2 抗剪模型

根据图 2,有

$$V = V_c + V_{cs} + V_p. \quad (16)$$

式中: V_c 为受压区 UHPFRC 承担的剪力; V_{cs} 为下部受拉区骨料咬合力、箍筋以及钢纤维有效拉应力承担的剪力; V_p 为预应力对斜截面承载力的提高值。

2.1 受压区抗剪承载力计算

2.1.1 受压区合力计算

如图 2 所示,假定受压区任一点处的水平应变为 ε ,该点到中性轴距离为 x ,据平截面假定有

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 x}{x_0} = \frac{\varepsilon_c x}{x_n} = \frac{\varepsilon_{sx} x}{d - x_n}. \quad (17)$$

式中: ε_0 为 UHPFRC 峰值压应力对应的应变,取 0.003; x_n 为中性轴高度; x_0 为 ε_0 所对应的截面至中性轴距离; ε_c 为 UHPFRC 受压边缘应变; ε_{sx} 为纵筋应变。考虑预应力的影响,忽略受拉区钢纤维有效拉应力的作用,由弯矩、剪力下的平衡条件得到

$$\varepsilon_x = \frac{\varepsilon_{sx}}{2} = \frac{\frac{M}{d_v} + 0.5(V - V_p) \cot \theta - A_p f_{p0}}{2(E_s A_s + E_p A_p)}. \quad (18)$$

式中: ε_x 为截面中高度处的纵向应变; M 为截面弯矩; V 为截面剪力; V_p 为预应力对斜截面抗剪承载力提高值; A_p 为弯曲受拉侧预应力筋面积; f_{p0} 为预应力筋弹性模量与预应力筋和周围混凝土应变差的乘积。为简化计算,可将 $0.5 \cot \theta$ 偏保守的取为 1,分析表明^[12],产生的误差较小,取 $d_v = 0.9d$ 。

梁受压区处于剪压双向受力状态,准确分析应采用 UHPFRC 的双轴本构关系,但计算会比较复杂,为方便计算受压区提供的剪力,近似按纯弯受力计算受压区合力及中性轴高度,然后考虑剪压破坏准则计算受压区承担的剪力。

根据作者所作 UHPFRC 单轴抗压试验数据拟合结果,UHPFRC 轴压应力-应变关系为

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E_c \varepsilon_c (1.000176 - 0.000176 e^{\frac{\varepsilon_c}{0.174 \varepsilon_0}}), & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0; \\ f_c, & \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}. \end{cases} \quad (19)$$

则 UHPFRC 梁受压区合力为

$$C = \int_0^{x_n} \sigma(\varepsilon) b(x) dx. \quad (20)$$

将式(17)、(19)带入式(20)并整理得:

对于矩形截面:

$$C = \int_0^{x_n} \sigma(\varepsilon) b dx = f_c b \left(1 - 0.508 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) x_n, \quad (21)$$

对于中性轴位于翼缘内的 T 形截面:

$$C = \int_0^{x_n} \sigma(\varepsilon) b_f dx = f_c b_f \left(1 - 0.508 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) x_n, \quad (22)$$

对于中性轴位于腹板内的 T 形截面:

$$C = b_f f_c \left(1 - 0.5 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c} \right) x_n + 0.5 f_c (b - b_f) \frac{\varepsilon_c (x_n - h_f)^2}{\varepsilon_0 x_n}. \quad (23)$$

2.1.2 中性轴高度计算

忽略骨料咬合力的水平分量,由受压区合力与受拉区合力相等,有

$$C = \varepsilon_{sx} (E_s A_s + E_p A_p) + f_{tp} b(x) (d - x_n). \quad (24)$$

将式(21)~(23)分别代入式(24),并考虑平截面假定,整理得中性轴高度。

对于矩形截面:

$$x_n = \frac{\varepsilon_{sx} (E_s A_s + E_p A_p) + f_{tp} b d + 0.508 f_c b d \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{sx}}}{b \left(f_c + 0.508 b \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{sx}} + f_{tp} \right)}, \quad (25)$$

对于中性轴位于翼缘内的 T 形截面:

$$x_n = \frac{\varepsilon_{sx}(E_s A_s + E_p A_p) + f_{tp} b d + 0.508 f_c b_f d \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{sx}}}{b f_c \left(1 + 0.508 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{sx}}\right) + b f_{tp}}, \quad (26)$$

对于中性轴位于腹板内的 T 形截面:

$$x_n = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AD}}{2A}. \quad (27)$$

式中

$$A = -b f_c \left(1 + 0.5 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{sx}}\right) + 0.5(b - b_f) f_c \frac{\varepsilon_{sx}}{\varepsilon_0} - b f_{tp}, \quad (28)$$

$$B = b f_c d \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{sx}}\right) - (b - b_f) h_f f_c \frac{\varepsilon_{sx}}{\varepsilon_0} + \varepsilon_{sx}(E_s A_s + E_p A_p) - 2b d f_{tp}, \quad (29)$$

$$D = -0.5 f_c \left[b_f d^2 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{sx}} + 0.5(b - b_f) h_f^2 \frac{\varepsilon_{sx}}{\varepsilon_0} \right] - \varepsilon_{sx}(E_s A_s + E_p A_p) d - b d^2 f_{tp}. \quad (30)$$

2.1.3 内力臂计算

合力 C 与受拉钢筋重心的距离为

$$d_v = d - x_n + \frac{\int_0^{x_n} \sigma(\varepsilon) b(x) x dx}{C}. \quad (31)$$

对式(31)进行计算并整理得:

对于矩形及中性轴位于翼缘内的 T 形截面:

$$d_v = d - x_n + \frac{\left(0.33 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c^2} + 0.5 - 0.51 \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_c^2}\right) x_n}{1 - 0.508 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c}}, \quad (32)$$

对于中性轴位于腹板内的 T 形截面:

$$d_v = d - x_n + \frac{\left(0.5 - 0.17 \frac{\varepsilon_0^2}{\varepsilon_c^2}\right) x_n - 0.33(b_f - b) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0 x_n} (x_n - h_f)^3}{\left(1 - 0.5 \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_c}\right) b_f x_n - 0.5(b_f - b) \frac{(x_n - h_f)^2 \varepsilon_c}{x_n \varepsilon_0}}. \quad (33)$$

2.1.4 受压区抗剪承载力

如图 2, 受压区同时承受压应力和剪应力的作用, 假定极限状态下, 混凝土应力满足摩尔应力圆, 采用 Rankine 破坏准则^[13]有

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_c}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_c}{2}\right)^2 + \tau_c^2} \leq f'_t, \quad (34)$$

式中 σ_1 为主拉应力, f'_t 为复合应力状态下的抗拉强度.

极限状态下, 引入混凝土的抗压强度 f_c , 式(34)可写为

$$\frac{\tau}{f_c} = \sqrt{\frac{f'_t}{f_c} \left(\frac{f'_t}{f_c} - \frac{\sigma_c}{f_c}\right)}. \quad (35)$$

由于压应力的影响, 复合应力状态下的抗拉强度 f'_t 低于单轴抗拉强度 f_t , 对于发生剪切破坏的梁, 主压应力并非一个较大的值, 因此可简便的取 $f'_t = f_t$. 根据 UHPFRC 的基本力学性能试验可知, f_t 和 f_c 近似呈线性关系, 为计算简便, 取 $f_t = 0.053 f_c$. 根据式(35), 可以绘制 τ/f_c 和 σ_c/f_c 的曲线, 见图 3, 两者近似呈线性关系, 对式(35)进行线性化处理, 可得剪压区 UHPFRC 简化破坏准则为

$$\frac{\tau}{f_c} = -0.1521 \frac{\sigma_c}{f_c} + 0.0845. \quad (36)$$

将式(19)代入式(36)可得截面任意点处抗剪强度 τ 与压应变 ε 的关系, 沿受压区高度进行积分可得受压区提供的抗剪承载力.

$$V_c = \int_0^{x_n} \tau b(x) dx = 0.2366 \alpha_1 b f_c (x_n - 0.0623 x_0) = 0.2366 \alpha_1 b f_c \left(x_n - 0.0623 \frac{\varepsilon_0(d - x_n)}{\varepsilon_{sx}}\right). \quad (37)$$

式中 α_1 为受压翼缘影响系数, 取 1.1.

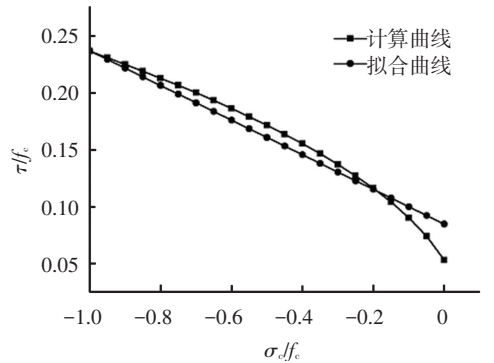


图 3 τ/f_c 和 σ_c/f_c 关系曲线

2.2 受拉区抗剪承载力计算

正常配箍率情况下, 剪切破坏时裂缝处和裂缝间的箍筋均达到屈服强度, 则有 $f_{syer} = f_v = f_{yv}$, 根据修正压力场理论的式(7), 受拉区剪应力 v_{cs} 为

$$v_{cs} = v_{ci} + \rho_w f_{yv} \cot \theta + f_{tp} \cot \theta, \quad (38)$$

式(38)可表示为

$$v_{cs} = \beta \sqrt{f_c} + \rho_w f_{yv} \cot \theta + f_{tp} \cot \theta. \quad (39)$$

则按修正压力场理论计算的受拉区抗剪承载力可表

示为

$$V_{cs} = (\beta \sqrt{f_c} + \rho_v f_{yv} \cot \theta + f_{tp} \cot \theta) b(d - x_n) .$$

(40)

上式中 β 和 θ 的求解,需将修正压力场理论的公式与本文所推导受压区的相关公式结合起来进行迭代求解,不方便为设计者采用.为简化计算,可通过参数分析的方法给出 β 和 θ 的显式表达式.考虑到 β 和 θ 主要受纵向应变 ε_{sx} 、配箍率 ρ_v 以及箍筋强度 f_{yv} 的影响,因此变换上述参数的取值,利用迭代方法计算相应的 β 和 θ 值,然后拟合出 β 及 θ 与 ε_{sx} 、 ρ_v 、 f_{yv} 的关系,通过对多种形式表达式的拟合分析,得出 β 和 θ 的优化显式表达式:

$$\beta = \frac{0.66 - 0.038 \sqrt{\rho_v f_{yv}}}{1 + 398 \varepsilon_{sx}},$$

(41)

$$\theta = (29.0 + 214 \rho_v) \left(1 + \frac{85 \varepsilon_{sx}}{1 + 0.72 \sqrt{\rho_v f_{yv}}} \right).$$

(42)

2.3 计算步骤

根据前面推导的公式对 UHPFRC 梁进行抗剪承载力计算,计算步骤:

表 1 试验梁主要参数及试验结果

编号	λ	A_p/mm^2	A_s/mm^2	σ_{con}/MPa	s/mm	f_t/MPa	f_c/MPa	V_u/kN	梁长/ m	破坏形态
L1	3.13	420	1 418	1 023	500	6.63	120	408	3.5	斜拉
L2	2.49	420	1 418	1 023	500	6.55	125	499	3.5	剪压
L3	1.03	420	1 418	1 023	500	6.52	125	1 049	3.5	斜压
L4	2.09	420	1 714	1 023	200	6.52	123	677	3.5	剪压
L5	2.62	420	1 714	1 023	300	6.73	128	568	3.5	超筋弯曲
L6	2.09	420	1 714	1 395	300	6.35	124	654	3.5	剪压
L7	1.73		2 540		500	6.35	124	706	2.0	剪压
L8	2.08		2 540		300	5.54	100	431	2.0	剪压
L9	2.08		2 540		200	5.54	100	511	2.0	剪压

根据规范[14-16]、SETRA—AFGC^[11]以及本文算法对 9 根试验梁进行抗剪承载力计算,各梁剪力计算值与试验值的比值见表2.

表 2 计算值与试验值比值

编号	文献[14]	文献[15]	文献[16]	文献[11]	本文
L1	0.40	0.40	0.57	1.01	1.11
L2	0.33	0.33	0.48	0.78	0.94
L3	0.22	0.16	0.33	0.33	0.36
L4	0.40	0.38	0.53	0.68	0.86
L5	0.37	0.37	0.52	0.77	0.95
L6	0.36	0.32	0.50	0.63	0.81
L7	0.28	0.23	0.43	0.49	0.68
L8	0.44	0.47	0.62	0.93	1.03
L9	0.45	0.48	0.60	0.87	1.00
平均值	0.36	0.35	0.51	0.72	0.86
变异系数	0.21	0.30	0.18	0.30	0.26

裂缝间钢纤维有效拉应力 f_{tp} 的值主要受钢纤

- 1)假定截面抗剪承载力 V_0 的初始值,根据式(18)计算纵筋应变 ε_{sx} ;
- 2)由式(25)~(30)计算截面中性轴高度 x_n ;
- 3)由式(37)计算受压区抗剪承载力 V_c ;
- 4)由式(40)~(42)计算受拉区抗剪承载力 V_{cs} ;
- 5)抗剪承载力计算值 $V=V_c+V_{cs}+V_p$,将计算值与假定的 V_0 初始值比较,若二者相等(或相差较小),则计算值即为所求抗剪承载力,否则返回第1步,调整 V_0 的初始值,重新计算.

3 试验验证

进行 9 根 T 形截面试验梁抗剪试验,T 形截面尺寸:高 350 mm,腹板厚 120 mm,翼缘宽300 mm、厚 50 mm.纵筋及箍筋均采用 HRB500 钢筋,预应力筋采用公称直径 15.2 mm 的低松弛 1860 钢绞线,箍筋采用直径 10 mm 的 HRB500 钢筋,实测屈服强度 572 MPa;试验采用 3 000 kN 电液伺服压力试验机进行单点加载.试验梁配筋、实测材料性能及试验结果统计见表 1. λ 为剪跨比, s 为箍筋间距, f_t 为 UHPFRC 轴拉强度, f_c 为轴压强度, V_u 为极限剪力.试验详细过程见文献[8].

维类型、钢纤维掺量、钢纤维与基体粘结强度、裂缝宽度等因素的影响,本文计算时采用文献[3]的计算模型,计算公式为

$$f_{tp} = 0.8 \left(0.5 - \frac{0.645}{\alpha_f^{0.45}} \right) \alpha_f \rho_f \tau_b .$$

(43)

$$\alpha_f = l_f / d_f .$$

(44)

$$\tau_b = \begin{cases} 1.0 \sqrt{f_c}, & \text{弯钩钢纤维;} \\ 0.6 \sqrt{f_c}, & \text{平直钢纤维.} \end{cases}$$

(45)

式中: α_f 为钢纤维长径比, ρ_f 为钢纤维体积掺量, τ_b 为钢纤维与基体粘结强度.

预应力对斜截面承载力的提高值 V_p 目前尚无准确算法,本文计算时参考 GB 50 010—2 010《混凝土结构设计规范》^[15],取

$$V_p = 0.05 N_{p0} .$$

(46)

由表 2 知,与试验值相比,依据 4 个规范所得计算值均过于保守,SETRA—AFGC 为法国土木工程协会制定的 UHPFRC 设计建议,相比前三个规范,其计算结果较接近试验值,但依然偏于保守.本文算法中除试件 L3 和 L7 外,其余试件计算值与试验值吻合良好.分析试件 L3 和 L7 计算值偏小的原因,在于这两个试件剪跨比较小(1.03和1.73),L3 破坏形式为斜压破坏,L7 破坏形式介于斜压和剪切破坏之间,本文计算模型没有考虑小剪跨比时支座和加载点之间拱作用的有利影响,从而低估了剪跨比较小的梁的抗剪承载力.从表 2 还可看到,相比未施加预应力的试件,本文算法中预应力试件计算值偏小,这与计算中所取预应力对斜截面承载力的提高值 V_p 偏保守有一定关系.除去剪跨比较小的试件 L3 和 L7,5 种算法中其余 7 根发生剪压破坏的试验梁的抗剪承载力计算值与试验值比值的平均值依次为 0.39、0.39、0.54、0.80和0.96,变异系数依次为0.11、0.15、0.09、0.16和0.11,可见本文算法不仅与试验结果吻合较好,且变异系数不大.

为进一步验证本文方法的适用性,利用本文方法对文献[7]中的 6 根发生剪切破坏的有腹筋试验梁进行了计算,计算结果见表 3, V_t 为试验值, V_c 为计算值.

表 3 文献[7]计算值与试验值对比

编号	V_t /kN	V_c /kN	V_c/V_t
B-2-60-90	319	282	0.89
B-2-60-180	282	245	0.87
B-2-30-90	314	271	0.86
B-2-30-180	249	231	0.93
B-2-0-90	292	270	0.92
B-2-0-180	250	224	0.90

6 根试验梁的计算值与试验值比值的平均值为 0.89,变异系数为 0.03,试验值与计算值吻合较好.

4 结 语

根据 UHPFRC 梁的剪切破坏机理,考虑上部受压区和下部受拉区共同承担剪力,上部受压区采用简化的双轴应力准则得到混凝土抗剪承载力,下部受拉区采用简化的修正压力场计算公式得到抗剪承载力,得出了有腹筋 UHPFRC 梁抗剪承载力的显式计算公式.计算表明,本文公式适用于发生剪压破坏的有腹筋 UHPFRC 梁的抗剪承载力的计算.

参考文献

[1] 徐海滨, 邓宗才. 超高性能混凝土在桥梁工程中的应用[J]. 世界桥梁, 2012, 40(3): 63-67.

[2] STEINBERG E. Structure reliability of prestressed UHPC flexure models for bridge girders[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2010, 15(1): 65-72.

[3] VOO Y L, POON W K, FORSTER S J. Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(11): 1393-1399.

[4] GRAYBEAL B. Characterization of the behavior of ultrahigh performance concrete[D]. Maryland: University of Maryland, 2005.

[5] HEGGER J, BERTRAMG. Shear carrying capacity of steel fiber reinforced UHPC[C]//2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Germany, Kassel: Kassel University Press,2008: 513-520.

[6] CHARLES K C. Shear and shear friction of ultra-high performance concrete brdige girders[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2010.

[7] 陈彬. 预应力 RPC 梁抗剪性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.

[8] 徐海滨, 邓宗才, 陈春生, 等. 超高性能纤维混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(12): 91-97.

[9] VECCHIO F J, COLLINS M P. The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear[J]. ACI Structure Journal, 1986, 83(2): 219-231.

[10] TAN K H, MURUGAPPAN K. Shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams[J]. ACI Structure Journal, 1993, 90(1): 3-11.

[11] AFGC. Ultra high performance fibre-reinforced concretes, interim recommendations[M]. France: AFGC Publication, 2002.

[12] BENTZ E C, COLLINS M P. Development of the 2004 Canadian Standard Association (CSA) A23. 3 shear provisions for reinforced concrete[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006(33): 521-534.

[13] CHEN W F. Plasticity in reinforced concrete[M]. New York: McGraw-Hill, 1982.

[14] JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

[15] GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[16] CECS38:2004 纤维混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.

(编辑 赵丽莹)