

# 基于修正压力场理论的超高性能钢纤维 混凝土柱抗剪承载力

邓宗才, 王海忠, 程舒锴

(北京工业大学 城市与工程防灾减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 为了分析超高性能钢纤维混凝土柱抗剪性能, 基于修正压力场理论提出了柱子抗剪承载力计算模型. 该模型通过柱端部截面中心正应变来考虑轴力和弯矩对抗剪承载力的影响, 通过关键参数混凝土主压应变与主压应力间的角度和平均正应变来反映剪跨比、轴力以及配箍率对柱抗剪承载力的影响. 结果表明: 对剪跨比为 1.5 ~ 2.0 的柱子, 该模型剪力计算值与试验值吻合良好.

**关键词:** 超高性能钢纤维混凝土柱; 钢纤维; 修正压力场理论; 抗剪承载力模型

中图分类号: TU 502

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2015)04-0573-06

doi: 10.11936/bjutxb2014090011

## Shear Capacity of Ultra-high Performance Steel Fiber Reinforced Concrete Columns Based on Modified Compression Field Theory

DENG Zong-cai, WANG Hai-zhong, CHENG Shu-kai

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In order to analyze the shear behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPSFRC) column, the authors propose a shear capacity calculation model based on the modified compression field theory. This model considers the interaction of axis and shear force through the center axis strain of the column's end section. The key parameters of concrete compressive strain angle and the average longitudinal strain reflect the impact of shear span ratio, axial force, and stirrup ratio to shear capacity of column. The results show that the predicted value in the shear capacity model agrees well with the tested results when the shear span ration is from 1.5 to 2.0.

**Key words:** ultra-high performance steel fiber reinforced concrete column; steel fiber; modified compression field theory; shear capacity model of column

20世纪90年代, 法国 Richard P 等以超细粒聚  
密水泥和宏观无缺陷水泥为基础<sup>[1-2]</sup>, 研发出超高性能  
混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC).  
为强调钢纤维的作用, 国际上通常将掺入钢纤维的  
UHPC 称为超高性能钢纤维混凝土 (ultra-high

performance steel fiber reinforced concrete,  
UHPSFRC). 与传统混凝土相比, UHPC 具有优异的  
力学性能, 包括极高的抗压强度、优异的抗冲击性  
能、抗疲劳性能和良好的韧性; 另外, UHPSFRC 材料  
内部致密, 具有极佳的耐久性.

收稿日期: 2014-09-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378032); 北京市自然科学基金资助项目(8142005); 教育部博士点基金资助项目(20131103110017)

作者简介: 邓宗才(1961—), 男, 教授, 主要从事纤维混凝土结构方面的研究, E-mail: Dengzc@bjut.edu.cn

高层、超高层建筑的底部结构的柱子,其抗剪性能对整个建筑抵抗地震力、风荷载等水平荷载的能力影响较大. 高强箍筋约束超高性能钢纤维混凝土柱不但能改善抗压承载力,而且可改善抗剪承载力和抗震耗能. 因此,如何合理准确地计算其抗剪承载力至关重要<sup>[3]</sup>.

国内外研究者对钢筋混凝土构件的抗剪机理进行了许多研究<sup>[4]</sup>,迄今为止,提出的剪切破坏分析方法有:桁架理论、极限平衡理论、统计方法、断裂力学方法等. 其中,桁架理论包括经典45°桁架模型、改进桁架模型(不考虑斜裂缝截面抗剪)、压力场理论、修正压力场理论等. 其中压力场理论针对危险截面附近的微单元进行分析,可用于分析从开裂到剪切破坏全过程,能够精确地模拟结构的裂缝形成、截面平均应变、钢筋应力和破坏模式. 压力场理论是基于普通混凝土板试验提出的,对于UHPSFRC构件该理论忽略了斜截面上高性能纤维的抗拉效用,所求得的抗剪承载力偏小.

本文结合UHPSFRC自身应力-应变关系和纤维拉拔阻力,完善了压力场理论;研究了轴压力和弯剪共同作用下UHPSFRC柱的抗剪破坏机制,建立了抗剪承载力计算模型.

## 1 基于修正压力场理论的抗剪模型

柱端部截面是危险部位,同时作用有轴力、弯矩和剪力. 修正压力场理论研究表明,截面正应变对柱端抗剪承载力影响较大,而轴力与弯矩决定了柱端截面正应变的分布状态,如图1所示. 我国规范<sup>[4]</sup>中通过加入以轴力为参数的计算分项考虑轴力对柱抗剪承载力的影响,这是一种简单处理方法. 而压力场理论揭示了压力对抗剪承载力的影响机制.

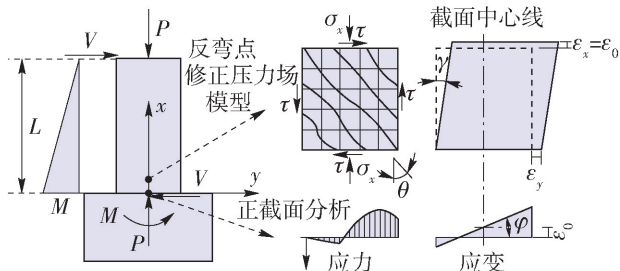


图1 混凝土柱抗剪模型

Fig. 1 Shear model of concrete column

### 1.1 修正压力场模型

#### 1.1.1 形变协调

修正压力场理论假定钢筋与混凝土之间形变完

全协调<sup>[5]</sup>,不考虑二者间的滑移,据混凝土摩尔应变圆,有如下公式:

$$\varepsilon_{sx} = \varepsilon_{cx} = \varepsilon_x \quad (1)$$

$$\varepsilon_{sy} = \varepsilon_{cy} = \varepsilon_y \quad (2)$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon_x + \varepsilon_y \quad (3)$$

$$\tan^2 \theta = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_2}{\varepsilon_y - \varepsilon_2} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_y}{\varepsilon_1 - \varepsilon_x} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_{sx}$ 、 $\varepsilon_{sy}$ 分别表示钢筋在 $x$ 与 $y$ 方向的应变; $\varepsilon_{cx}$ 、 $\varepsilon_{cy}$ 分别表示混凝土在 $x$ 与 $y$ 方向的应变; $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 分别表示钢筋混凝土模型在 $x$ 与 $y$ 方向的平均应变; $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ 分别表示混凝土主拉及主压应变; $\theta$ 表示混凝土主压应变角.

#### 1.1.2 应力平衡

在柱的受力中,忽略纵筋的抗剪作用,轴力由混凝土和纵筋承担,横向剪力由箍筋和混凝土承担,由此得到应力分析式为<sup>[6]</sup>

$$\sigma_x = \sigma_{cx} + \rho_x \sigma_{sx} \quad (5)$$

$$\sigma_y = \sigma_{cy} + \rho_y \sigma_{sy} \quad (6)$$

据混凝土摩尔应力圆(见图2),并假定混凝土主压应力角和主压应变角一致,

$$\sigma_{cx} = f_{c1} - \tau_c \cot \theta \quad (7)$$

$$\sigma_{cy} = f_{c1} - \tau_c \tan \theta \quad (8)$$

$$\tau_c = \frac{f_{c1} + f_{c2}}{\tan \theta + \cot \theta} \quad (9)$$

式中: $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 分别表示模型 $x$ 方向和 $y$ 方向的应力; $\sigma_{cx}$ 、 $\sigma_{cy}$ 分别表示混凝土 $x$ 方向和 $y$ 方向的应力; $\sigma_{sx}$ 、 $\sigma_{sy}$ 分别表示钢筋 $x$ 方向和 $y$ 方向的应力; $\rho_x$ 、 $\rho_y$ 分别表示 $x$ 方向和 $y$ 方向的配筋率,在本模型中即分别为纵筋配筋率及箍筋配筋率; $\tau_c$ 表示混凝土的平均剪切应力; $f_{c1}$ 、 $f_{c2}$ 分别表示混凝土主拉及主压应

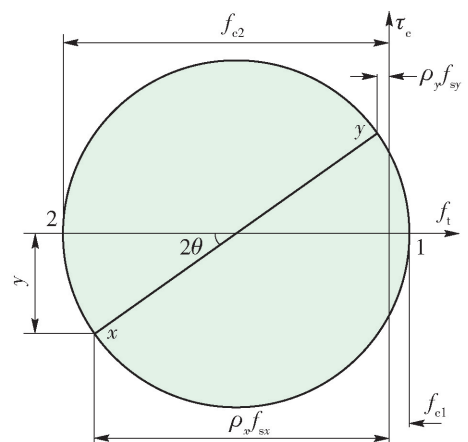


图2 钢筋混凝土平均摩尔应力圆

Fig. 2 Average Mohr's stress circle of steel reinforcement concrete

力。

### 1.1.3 裂缝间平均应力

混凝土开裂后,裂缝处应力与平均应力分布不同,裂缝处拉应力最小,裂缝间拉应力最大<sup>[7]</sup>,钢筋屈服后,箍筋应力不再增加,此时仍采用钢筋受拉强化模型求得的混凝土的平均主拉应力大,从而使分析得到的极限抗剪承载力偏大。因此,必须对裂缝处和裂缝间的应力进行校核,确定箍筋屈服后裂缝处能满足的最大平均主拉应力,按照图3所示模型,考虑箍筋方向应力平衡得

$$\rho_y \sigma_{sy} \cot \theta + \frac{f_{ci}}{\sin \theta} \cos \theta = \rho_y \sigma_{syc} \cot \theta + \frac{\sigma_{ci}}{\sin \theta} \cos \theta + \tau_{ci} \quad (10)$$

得到

$$f_{1max} \leq \rho_y (\sigma_{syc} - \sigma_{sy}) + \sigma_{ci} + \tau_{ci} \tan \theta \quad (11)$$

式中: $\tau_{ci}$ 为混凝土裂缝处剪切应力; $\sigma_{ci}$ 为混凝土裂缝处拉应力; $\sigma_{syc}$ 为裂缝处箍筋应力。

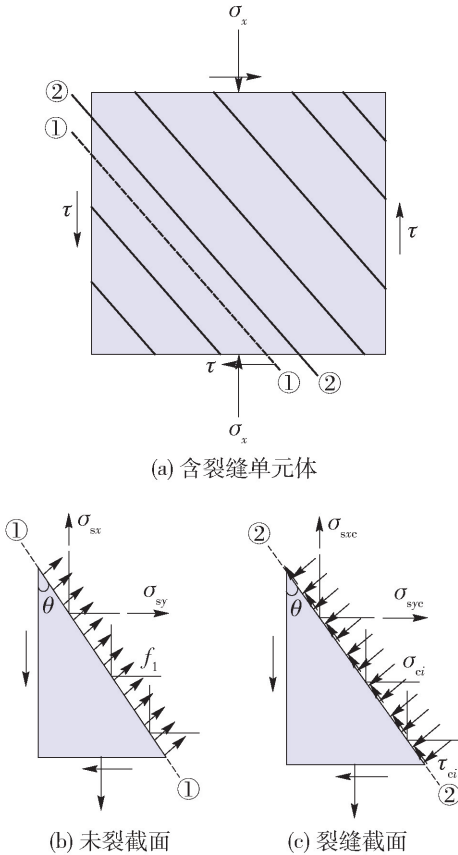


图3 单元体裂缝处计算模型

Fig.3 Crack analyses model in the unit

### 1.1.4 裂缝处的应力

在UHPSFRC受拉分析中,需要考虑裂缝处残余拉应力值。裂缝处残余拉应力受钢纤维品种、长

径比及体积率的影响,本文残余拉应力采用基于概率的计算式<sup>[8]</sup>

$$\sigma_{ci} = \eta_1 \eta_0 V_f \frac{\tau_u}{2r} l_f \quad (12)$$

式中: $\eta_1$ 为钢纤维有效系数,取值取决于钢纤维临界长度,在纤维拔出破坏时取 $\eta_1 = 0.5$ ; $\eta_0$ 为钢纤维方向系数,取决于钢纤维的分布状态,研究发现该系数取值在0.33~0.5<sup>[7]</sup>,本文取三维随机分布状态下的理论推导值0.405; $\tau_u$ 为钢纤维与基体间的极限黏结应力,取值与钢纤维类型、基体强度有关<sup>[7,9-10]</sup>,计算时可取 $\tau_u = 0.8 \sqrt{f_c}$ ;r为钢纤维截面面积/钢纤维截面周长; $l_f$ 为钢纤维长度; $V_f$ 为钢纤维体积率。

### 1.2 正截面分析

在轴力与弯矩共同作用下,柱端正截面应力应变分布采用纤维单元分析法,如图4所示。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 + y_i \phi \quad (13)$$

$$\sigma_i = E_i \varepsilon_0 + E_i y_i \phi \quad (14)$$

$$\begin{Bmatrix} M \\ V \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum E_i A_i y_i^2 & \sum E_i A_i y_i \\ \sum E_i A_i y_i & \sum E_i A_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi \\ \varepsilon_0 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

式中: $\phi$ 为截面曲率; $\varepsilon_0$ 为截面中心处正应变; $E_i$ 、 $\varepsilon_i$ 、 $\sigma_i$ 、 $y_i$ 分别为第*i*个单元的弹性模量、应变、应力和*y*轴坐标; $M$ 为柱端弯矩; $V$ 为柱端剪力; $A_i$ 为第*i*个单元的面积。

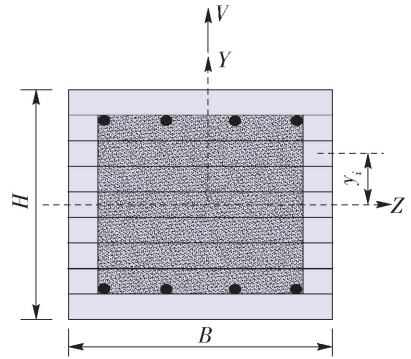


图4 纤维单元横切面模型

Fig.4 Fiber element cross-section model

### 1.3 材料应力-应变关系

钢筋应力与应变关系采用理想弹塑性二折线模型。

钢纤维混凝土的受压本构模型为<sup>[9]</sup>

$$f_{c2} = f_{c2max} \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (16)$$

$$\frac{f_{c2max}}{f'_c} = \frac{1}{0.8 + 170\varepsilon_1} \leq 1.0 \quad (17)$$

式中:  $f_{2\max}$  为考虑软化的峰值应力;  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度;  $\varepsilon_0$  建议取值  $-0.002$ .

采用 Vecchio<sup>[5]</sup> 提出的钢纤维混凝土受拉模型为

$$f_{cl} = E_c \varepsilon_1 \quad \varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cr} \quad (18)$$

$$f_{cl} = \frac{f_{cr} + \beta f_{tu}}{1 + \beta} \quad \varepsilon_1 \geq \varepsilon_{cr} \quad (19)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{cr}}{0.005}} \quad (20)$$

式中:  $f_{cr}$  为混凝土开裂应力, 取为  $0.33 \sqrt{f'_c}$  (MPa);  $\varepsilon_{cr}$  为混凝土开裂应变;  $f_{tu}$  为钢纤维混凝土下降段残余应力.

## 2 超高性能纤维混凝土柱抗剪承载力

### 2.1 抗剪承载力计算公式

在式(6)中, 因计算模型中不存在水平方向的均布荷载, 故  $y$  方向面力为 0, 即  $\sigma_y = 0$ , 由式(6)和式(8)得

$$\tau_c = (f_{cl} + \rho_{sy} \sigma_{sy}) \cot \theta \quad (21)$$

由式(21)(11)可得超高性能纤维混凝土柱抗剪承载力计算公式为

$$V = (f_{cl} + \rho_{sy} \sigma_{sy}) bh_0 \cot \theta = f_{cl} bh_0 \cot \theta + \frac{A_{sv} h_0}{s} \sigma_{sy} \cot \theta \quad (22)$$

$$V \leq V_{\max} = \tau_{cl} bh_0 + \sigma_{cl} bh_0 \cot \theta + \frac{A_{sv} h_0}{s} \sigma_{sy} \cot \theta \quad (23)$$

式中:  $b$  和  $h_0$  分别为柱截面宽度和有效高度;  $A_{sv}$  为配置在同一截面内箍筋各肢的全部截面面积;  $s$  为箍筋间距.

由式(22)(23)可知, UHPSFRC 柱抗剪承载力由纤维混凝土和箍筋的抗剪作用组成;  $\theta$  对混凝土和箍筋参与抗剪的程度影响很大, 如何合理准确地计算  $\theta$  值将决定整个抗剪模型的计算精度.

分析研究表明, 在柱抗剪模型中, 影响  $\theta$  的 2 个主要因素是柱正应变  $\varepsilon_x$  和配箍率  $\rho_{sv}$ , 轴压比  $n$  越大或剪跨比  $\lambda$  越小时,  $\varepsilon_x$  值越大, 从而  $\theta$  越小, 即裂缝越接近竖直; 箍筋屈服强度越高或配箍率越大时, 柱体越容易发生混凝土受压破坏, 即  $\theta$  越小.

在轴力及水平剪力产生的弯矩的作用下, 计算单元截面正应变值对抗剪承载力计算影响十分显著, 本文通过计算分析, 初步给出迭代收敛时单元截面正应变参考计算值为

$$\varepsilon_x = \frac{N}{bh_0 E_c} - \frac{M}{330 E_c bh_0^2} = \frac{nf_c}{E_c} - \frac{M}{330 E_c bh_0^2} \quad (24)$$

式中:  $n$  为柱轴压比;  $N$ 、 $M$  分别为柱端轴力和弯矩.

### 2.2 剪切破坏的 2 种模式

破坏模式 1: 裂缝处箍筋屈服破坏. 当柱剪跨比大于 1.5, 箍筋达到屈服, 柱破坏时混凝土主压应力尚未达到峰值. 破坏模式 1 柱子的延性较好, 计算承载力时, 先假定箍筋屈服, 然后再检验混凝土是否发生受压破坏<sup>[11]</sup>.

破坏模式 2: 混凝土斜压破坏. 当柱剪跨比较小时, 箍筋配置较多, 随着剪切变形的发展, 在箍筋屈服前, 当混凝土主压应变达到极限应变后柱即破坏<sup>[12]</sup>.

## 3 抗剪承载力计算过程

由于柱截面中心处正应变  $\varepsilon_x$  受柱所承担剪力的影响, 因此, 需要通过迭代的方法计算最终的抗剪承载力.

对于破坏模式 1, 抗剪承载力计算过程如下:

**步骤 1** 输入柱几何参数、材性指标、轴力  $N$ .

**步骤 2** 假定柱端截面弯矩  $M = 0$ ; 通过正截面分析计算柱端截面中心处正应变  $\varepsilon_0$ , 并取  $\varepsilon_x = \varepsilon_0$ .

**步骤 3** 首先选取主压应力角  $\theta$  与主拉应力初值  $\varepsilon_1$  的初始值, 一般可先取  $\theta = 20^\circ$ ,  $\varepsilon_1 = 0.0015$  进行计算.

**步骤 4** 利用式(3)(4)求出混凝土压应变  $\varepsilon_2$ ; 假设箍筋屈服, 取  $\sigma_{sy} = f_{yv}$ , 利用式(3)重新计算主拉应力  $\varepsilon_1$ , 并检查是否收敛; 若不收敛则返回重新计算直至收敛.

**步骤 5** 利用式(14)~(19)计算  $f_{c1}$  和  $f_{c2}$ , 用式(9)计算  $\tau_c$ .

**步骤 6** 用式(8)重新验证计算主压应力角  $\theta^*$ , 检查是否收敛; 若不收敛则返回重新计算直至收敛; 利用式(22)(23)计算柱端抗剪承载力.

**步骤 7** 计算弯矩值  $M = VL$ , 返回步骤 2, 重新计算剪力直至弯矩值收敛.

对于破坏模式 2, 抗剪承载力计算过程为: 若之前迭代无法收敛, 或者收敛后求得的主压应变  $\varepsilon_2$  大于混凝土极限应变值(一般为 0.0033), 则说明柱发生混凝土压碎破坏, 计算过程为:

步骤 1~5 同模式 1;

步骤 6 利用式(3)计算  $\varepsilon_y$ , 判断横向应变值是否小于箍筋屈服应变, 即  $\varepsilon_y < \varepsilon_{yv}$ , 若是则进行下一步, 否则调整主压应力角  $\theta$  重新计算直至  $\varepsilon_y < \varepsilon_{yv}$ ;

步骤 7 同模式 1.

## 4 模型计算与验证

进行了抗剪承载力计算,理论计算值与试验结果的对比见表1.

按照上述方法对文献[13-16]中UHPSFRC柱

表1 抗剪承载力计算值与试验结果的比较  
Table 1 Comparison of predicted and experiment results

文献来源	试件编号	$b \times h_0$ / mm × mm	混凝土抗压强度/ MPa	$\lambda$	$n$	$\rho_{sv}/$ %	$\rho_f/%$	$V_e/$ kN	$V_p/$ kN	$V_p/V_e$
文献 [13-14]	SFRC20-22-60-0.5	200 × 175	114.8	2.00	0.35	2.2	0.5	277.0	306.5	1.106
	SFRC20-22-60-1.0	200 × 175	110.0	2.00	0.35	2.2	1.0	330.0	323.1	0.979
	SFRC20-22-70-1.5	200 × 175	114.6	2.00	0.41	2.2	1.5	345.0	370.3	1.073
文献[15]	C-8	200 × 175	119.8	5.00	0.58	0.55	1.0	79.0	154.3	1.953
	C-9	200 × 175	125.4	5.00	0.43	0.62	1.3	72.0	175.7	2.440
	C-11	200 × 175	125.4	5.00	0.43	0.55	1.3	97.0	164.4	1.694
	C-12	200 × 175	125.4	5.00	0.43	0.62	1.3	88.0	175.7	1.996
	C-15	200 × 175	125.4	5.00	0.58	0.55	1.3	95.0	167.5	1.763
	C-16	200 × 175	125.4	5.00	0.58	0.62	1.3	92.0	174.2	1.893
	C-18	200 × 175	119.8	5.00	0.58	0.65	1.0	82.0	163.4	1.992
文献[16]	Si-1	200 × 175	65.7	1.88	0.498	0.92	1.0	212.6	273.6	1.286
	Si-7	200 × 175	65.0	1.88	0.712	1.24	1.5	225.2	293.9	1.305
	Si-8	200 × 175	65.7	1.88	0.564	1.24	1.0	204.5	258.2	1.262
	Si-10	200 × 175	65.0	1.88	0.570	1.45	1.5	215.0	271.3	1.261
	Si-11	200 × 175	61.5	1.88	0.502	1.03	1.5	239.0	297.1	1.243
	Si-13	250 × 220	65.0	1.50	0.364	1.48	1.5	337.1	381.3	1.131

注: $f_c$ 为混凝土抗压强度; $\rho_f$ 为纤维体积率; $V_e$ 为剪力试验值; $V_p$ 为剪力计算值.

分析表中数据可得:

1) 对文献[15]中剪跨比为5的长柱进行计算分析发现,对长柱运用修正压力场理论计算时,由于长柱在剪力作用下发生弯曲破坏,而修正压力场理论计算模型假设单元体发生剪切破坏,所以最终收敛计算值均远大于试验值,平均比值为1.961;此外在剪跨比较大的长柱中,弯曲破坏导致轴力对抗剪承载力提高作用不显著.

2) 当剪跨比为1.5~2.0时,模型计算值与试验值吻合程度较好,且两者比值变异系数较小,变异系数为0.096. 本文提出抗剪模型能较好地计算UHPSFRC中长柱的抗剪承载力,可用于实际计算和分析.

3) 对于箍筋配置过量的极短柱,由于在箍筋受拉屈服前混凝土已经受压破坏,迭代计算出的极限压应变大于混凝土的极限压应变值(0.0033),该种

情况下修正压力场理论计算出的抗剪承载力较实际情况偏小.

## 5 结论

1) 压力场理论预测柱抗剪承载力的精度与柱长细比和破坏形态有关. 对发生弯曲破坏的中长柱,抗剪承载力计算值大于试验值;对于极短柱理论计算值小于试验值,低估了超高性能混凝土抗剪作用;对于剪跨比1.5~2.0的柱子,模型计算值与试验值吻合良好.

2) 简化的修正压力场理论取单元平均应变来表征整个截面应变,柱在复合受力下截面正应变的合理取值对承载力影响较大. 本文通过对已有试验数据的模拟计算,给出了弯剪作用下超高性能钢纤维混凝土柱截面正应变值的计算公式与抗剪承载力计算公式,承载力预测值与试验结果吻合较好.

3) 本文取单元平均应变来表征整个截面应变, 钢筋混凝土柱在压弯剪复合受力下截面正应变的合理取值还有待于进一步深入研究.

### 参考文献:

- [1] ALFORD N, GROVES G, DOUBLE D. Physical properties of high strength cement pastes[J]. *Cement and Concrete Research*, 1982, 12(2): 349-358.
- [2] FUJIKAKE Kazunori, SENGA Takanori, UEDA Nobuhito. Effects of strain rate on tensile behavior of reactive powder concrete[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2006, 4(1): 79-84.
- [3] ACI-ASCE. Committee 445: recent approaches to shear design of structural concrete: ACI 445R-99 [R]. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2000.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [5] VECCHIO F J, COLLINS M P. The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear[J]. *ACI Journal*, 1986, 83(2): 219-231.
- [6] BENTZ E C, VECCHIO F J, COLLINS M P. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements [J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(4): 614-624.
- [7] MANSUR M A, NAGATAKI S, LEE S H. Torsion response of reinforced fibrous concrete beams [J]. *ACI Structural Journal*, 1989, 86(1): 36-44.
- [8] LIM T Y, PARAJNASIVAM P, LEE S L. Analytical model for tensile behavior of steel fiber concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 1987, 84(4): 286-298.
- [9] NNNMAN A E, NAJM H S. Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 1991, 88(2): 135-145.
- [10] CUNHA V M C F, BARROS J A O, SENA-CRUZ J M. Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22: 1-9.
- [11] MANSUR M A, CHIN M S, WEE T H. Stress-strain relationship of high-strength fiber concrete in compression [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1999, 11(1): 21-29.
- [12] TAN K H, MURUGAPPAN K, PARAMASIVAM P. Shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams [J]. *ACI Structural Journal*, 1993, 90(1): 3-11.
- [13] 贾金青, 姜睿. 纤维超高强混凝土框架短柱 抗震性能的试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2006, 3(5): 50-54.  
JIA Jin-qing, JIANG Rui. Experimental research on seismic performance of fiber super-high-strength concrete frame short columns[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2006, 3(5): 50-54. (in Chinese)
- [14] 姜睿, 贾金青. 超高强混凝土短柱受剪强度的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(增刊1): 15-19.  
JIANG Rui, JIA Jin-qing. Experimental study on shear strength of super-high-strength concrete short columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29 (Suppl 1): 15-19. (in Chinese)
- [15] 鞠彦忠, 王德弘, 白俊峰. 活性粉末混凝土柱抗震性能试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(8): 111-116.  
JU Yan-zhong, WANG De-hong, BAI Jun-feng. Seismic performance of reactive powder concrete columns [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 45(8): 111-116. (in Chinese)
- [16] 罗素蓉, 郑建岚, 郑作樵. 钢纤维钢筋混凝土柱的抗剪承载力计算方法[J]. *工程力学*, 2002, 19(6): 78-81.  
LUO Su-rong, ZHENG Jian-lan, ZHENG Zuo-qiao. Calculation methods for shearing capacity of steel fiber reinforced concrete column [J]. *Engineering Mechanics*, 2002, 19(6): 78-81. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)