

文章编号:1673-2049(2011)04-0092-05

## 配筋圆钢管混凝土短柱轴压承载力分析

刘朝,赵均海,王娟,吴赛

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

**摘要:**在统一强度理论的基础上,对配有纵向钢筋和箍筋的圆钢管混凝土短柱轴心受压时的受力性能进行了分析;考虑了钢管和箍筋对混凝土的约束作用,推导出了配筋圆钢管混凝土短柱的轴压承载力计算公式;分析了中间主应力、钢管径厚比和体积配箍率对承载力的影响。将公式的计算结果与文献试验结果进行比较,二者吻合较好。结果表明:统一强度理论对于配筋圆钢管混凝土轴压短柱的理论计算有非常好的适用性,为配筋钢管混凝土柱的分析计算提供了一定的理论依据。

**关键词:**统一强度理论;配筋圆钢管混凝土;短柱;轴压承载力

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

## Analysis of Axial Bearing Capacity of Reinforced Concrete-filled Circular Steel Tube Short Columns

LIU Zhao, ZHAO Jun-hai, WANG Juan, WU Sai

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the unified strength theory, the mechanical behavior of reinforced concrete-filled circular steel tube short columns was analyzed. The calculation formulas of axial bearing capacity of the reinforced concrete-filled circular steel tube short columns were deduced with considerations of the restriction effects of steel tube and hoop bar on concrete. Parametric studies were carried out to evaluate the effects of intermediate principal stresses, diameter-thickness ratio of steel tube and the stirrup ratio on the bearing capacity. A reasonable match was reached by comparing the results calculated by the formulas with the test results by the references. The results show that the unified strength theory has a good applicability in the theoretical calculation of the reinforced concrete-filled circular steel tube short columns, which can offer theoretical reference to analyze and calculate the reinforced concrete-filled steel tube columns.

**Key words:** unified strength theory; reinforced concrete-filled circular steel tube; short column; axial bearing capacity

## 0 引言

配筋钢管混凝土柱是在钢管混凝土柱内部配置受力钢筋的新型组合柱。在钢管混凝土柱内加配钢筋一方面可以提高柱在常温下的承载能力,改善核心混凝土的变形性能;另一方面可以作为主动防火

措施,代替在钢管外喷涂防火材料的措施,来提高钢管混凝土柱的抗火性能<sup>[1-3]</sup>,同时在钢管混凝土柱中加配钢筋简单易行,施工方便,因此这种新型组合柱具有良好的工程应用前景。

在中国,针对配筋钢管混凝土柱的研究和应用较少,近年来,多位学者相继开展了配筋钢管混凝土

收稿日期:2011-08-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50908015);陕西省自然科学基金研究计划项目(2011JM7002)

作者简介:刘朝(1986-),男,陕西榆林人,工学硕士研究生,E-mail:liuzhao\_2005@126.com。

柱的试验研究<sup>[4-5]</sup>,但对这种构件在常温下的受压承载力计算的理论研究很少。故本文中笔者在统一强度理论的基础上,对配有纵向钢筋和箍筋的圆钢管混凝土短柱轴心受压机理进行了分析,考虑了钢管和箍筋对混凝土的约束作用,推导出了配筋圆钢管混凝土短柱的轴压承载力计算公式,并与文献[3]中的试验结果进行对比,验证了公式的可行性,还分析了中间主应力、钢管径厚比和体积配箍率对承载力的影响。

## 1 统一强度理论

1991年俞茂宏在双剪强度理论基础上以双剪单元体为力学模型,建立了一种考虑中间主应力 $\sigma_2$ 影响的适用于不同材料的统一强度理论,其数学表达式为<sup>[6]</sup>

$$\left. \begin{aligned} F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_s \quad \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \\ F' = \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_s \quad \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \\ b = \frac{(1+\alpha)\tau_s - \sigma_s}{\sigma_s - \tau_s} = \frac{1+\alpha-B}{B-1} \\ \alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}, B = \frac{\sigma_s}{\tau_s} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $F, F'$ 为主应力强度理论函数; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为第一、第二和第三主应力,取拉应力为正,压应力为负; $\alpha$ 为材料的拉压比; $\sigma_s, \sigma_c, \tau_s$ 分别为材料的拉伸屈服极限强度、压缩屈服极限强度和剪切屈服极限强度; $b$ 为加权参数,它反应了中间切应力及相应作用面上正应力对材料屈服或破坏的影响, $0 \leq b \leq 1$ ;  $B$ 为切应力系数。

## 2 配筋圆钢管混凝土短柱轴压承载力分析

### 2.1 受力机理

配筋圆钢管混凝土柱的截面形式如图1所示。在轴压作用下配筋圆钢管混凝土短柱的受力机理为:核心混凝土处于三向应力状态,同时受到钢管和箍筋的约束作用;钢管与箍筋之间的外层混凝土受到钢管的约束作用,同样处于三向应力状态;圆钢管处于轴压、环拉和径向受压的三向应力状态;纵向钢筋受轴压作用。在柱达到极限承载力时,外钢管、加配的纵向钢筋和箍筋已经屈服。截面的计算模型见图2,其中, $\sigma_{r1}, \sigma_{r2}$ 均为侧向压应力。

### 2.2 钢管承载力

根据钢管的受力模式,设钢管轴向压应力为 $\sigma_z$ ,

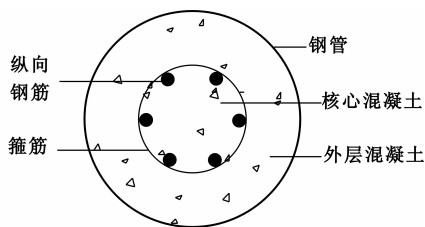


图1 截面形式

Fig. 1 Section Form

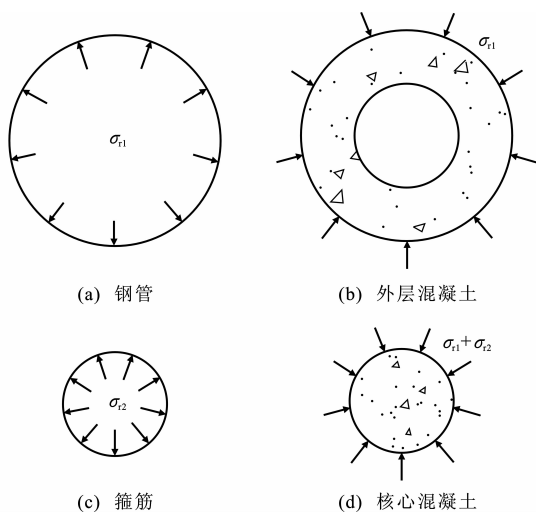


图2 计算模型

Fig. 2 Calculation Models

径向压应力为 $\sigma_r$ ,环向拉应力为 $\sigma_\theta$ ,则

$$\sigma_z = \frac{N_1}{A_{s1}}, \sigma_r = -\sigma_{r1}, \sigma_\theta = \frac{\sigma_{r1}D}{2t} \quad (2)$$

式中: $N_1$ 为配筋钢管混凝土柱中钢管所承受的轴向压力; $A_{s1}$ 为钢管的截面面积,近似为 $D\pi t$ ;  $\sigma_{r1}$ 为钢管对混凝土产生的侧向约束应力; $D$ 为钢管的内直径; $t$ 为钢管壁厚。

工程和试验中的钢管混凝土柱采用的钢管管壁一般很薄,均满足 $D/t \geq 20$ ,可看作薄壁钢管,对于薄壁钢管,有 $|\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta}| = \frac{2t}{D} \ll 1$ ,即 $|\sigma_r| \ll \sigma_\theta$ ;根据钢管的工作原理,随着配筋钢管混凝土应变不断的发展,钢管环向拉应力 $\sigma_\theta$ 不断增大,轴向压应力 $\sigma_z$ 逐渐减小,钢管从主要承受轴向压应力转变为主要承受环向拉应力,且 $\sigma_\theta > \sigma_z$ ,则薄壁钢管的主应力分别为

$$\sigma_1 = \sigma_\theta, \sigma_2 = \sigma_r, \sigma_3 = \sigma_z \quad (3)$$

代入统一强度理论的判别式中得

$$\frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} = \frac{\sigma_\theta + \alpha\sigma_z}{1+\alpha} > 0 > \sigma_2 = \sigma_r \quad (4)$$

取统一强度理论的式(1)计算,代入3个主应力,化简得

$$\sigma_z = -\frac{1+b}{\alpha}[\sigma_s - (\frac{D}{2t} + \frac{ab}{1+b})\sigma_{r1}] \quad (5)$$

由此得到钢管的轴压承载力  $N_1$  为

$$N_1 = \sigma_z A_{s1} \quad (6)$$

### 2.3 箍筋应力

受压柱内配置的连续螺旋箍筋或单独的八角形箍筋在沿柱轴的间距较小时,对其包围的核心混凝土会产生有效约束,约束应力为<sup>[7]</sup>

$$\sigma_{r2} = \frac{2f_{yt}A_{s2}}{sd} \quad (7)$$

式中: $\sigma_{r2}$ 为箍筋对核心混凝土产生的约束应力; $f_{yt}$ ,  $A_{s2}$ 分别为箍筋的屈服强度和截面面积; $s$ ,  $d$ 分别为箍筋的纵向间距和内皮直径。

### 2.4 混凝土承载力

#### 2.4.1 三向应力状态下混凝土轴向抗压强度统一解

外层混凝土受到钢管的约束作用,核心混凝土受到钢管和箍筋的约束作用<sup>[8-10]</sup>,两者都处于三向应力状态,采用文献[11]从统一强度理论推得的混凝土在三向应力状态下的轴向抗压强度计算公式

$$f'_c = f_{cy} + k p' \quad (8)$$

式中: $f'_c$ 为三向应力状态下混凝土抗压强度; $k = (1 + \sin \varphi)/(1 - \sin \varphi)$ ,  $\varphi$ 为混凝土的内摩擦角, $k$ 的取值在 1.0~7.0 之间,具体值由试验确定,当  $k$  取 4.0 时,  $\varphi$  为  $36.87^\circ$ ;  $p'$ 为混凝土所受到的侧向约束应力; $f_{cy}$ 为混凝土单轴抗压强度,对于圆形截面,取圆柱体单轴抗压强度。

#### 2.4.2 外层混凝土承载力计算

钢管与箍筋之间的混凝土受到钢管的约束作用,侧向约束应力为  $p' = \sigma_{r1}$ ,代入式(8)得

$$f'_{c1} = f_{cy} + k \sigma_{r1} \quad (9)$$

式中: $f'_{c1}$ 为三向应力状态下外层混凝土抗压强度。

外层混凝土的轴压承载力  $N_2$  为

$$N_2 = (f_{cy} + k \sigma_{r1}) A_{c1} = (f_{cy} + k \sigma_{r1}) \pi [(D/2)^2 - (d/2)^2] \quad (10)$$

式中: $A_{c1}$ 为外层混凝土截面面积,  $A_{c1} = \pi [(D/2)^2 - (d/2)^2]$ 。

#### 2.4.3 核心混凝土承载力计算

箍筋包围的核心混凝土受到外钢管和箍筋的双重约束,侧向约束应力为

$$p' = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} \quad (11)$$

代入式(8)得

$$f'_{c2} = f_{cy} + k(\sigma_{r1} + \sigma_{r2}) = f_{cy} + k(\sigma_{r1} + \frac{2f_{yt}A_{s2}}{sd}) \quad (12)$$

式中: $f'_{c2}$ 为三向应力状态下核心混凝土抗压强度。

核心混凝土的轴压承载力为

$$N_3 = [f_{cy} + k(\sigma_{r1} + \frac{2f_{yt}A_{s2}}{sd})] A_{c2} = [f_{cy} + k(\sigma_{r1} + \frac{2f_{yt}A_{s2}}{sd})] \pi (d/2)^2 \quad (13)$$

式中: $A_{c2}$ 为核心混凝土的截面面积,  $A_{c2} = \pi (d/2)^2$ 。

### 2.5 纵向钢筋承载力

配筋圆钢管混凝土短柱在达到轴压承载力极限时纵向钢筋屈服,故其轴压承载力  $N_4$  为

$$N_4 = f_{ys} A_{s3} \quad (14)$$

式中: $f_{ys}$ 为纵向钢筋的屈服强度; $A_{s3}$ 为纵向钢筋的截面面积。

### 2.6 轴压承载力统一解

配筋圆钢管混凝土短柱的轴压承载力  $N$  由钢管、外层混凝土、核心混凝土和纵向钢筋 4 个部分提供的承载力共同组成,即

$$N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 \quad (15)$$

将式(6),(10),(13),(14)代入式(15),整理可得配筋圆钢管混凝土短柱的轴压承载力统一解为

$$N = -\frac{1+b}{\alpha} \sigma_s A_{s1} + f_{cy} (A_{c1} + A_{c2}) + k \frac{2f_{yt}A_{s2}}{sd} A_{c2} + f_{ys} A_{s3} + [k(A_{c1} + A_{c2}) + \frac{1+b}{\alpha} (\frac{D}{2t} + \frac{ab}{1+b}) A_{s1}] \sigma_{r1} \quad (16)$$

承载力是侧向约束应力  $\sigma_{r1}$  的函数,因为当薄壁钢管的环向拉应力达到极值时,其侧向约束力即达到极值,由式(2)得

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_{r1} D}{2t} \leq \sigma_s = f_y \quad (17)$$

则

$$\sigma_{r1} \leq \frac{2t f_y}{D} \quad (18)$$

式中: $f_y$ 为钢管的屈服强度。

将式(18)代入式(16),可得轴压承载力极限值  $N_u$  为

$$N_u = -\frac{1+b}{\alpha} f_y A_{s1} + f_{cy} (A_{c1} + A_{c2}) + k \frac{2f_{yt}A_{s2}}{sd} A_{c2} + f_{ys} A_{s3} + [k(A_{c1} + A_{c2}) + \frac{1+b}{\alpha} (\frac{D}{2t} + \frac{ab}{1+b}) A_{s1}] \frac{2t f_y}{D} \quad (19)$$

## 3 公式验证与影响因素分析

### 3.1 公式验证

按照文献[3]中的试验数据,取  $b=0.5$ ,则式(19)退化成 Mises 屈服准则下的计算公式,并取  $k=4.0$ ,

按式(19)进行承载力计算,承载力计算值与试验值的对比见表 1。

从表 1 可以看出,用基于统一强度理论推导的配筋圆钢管混凝土短柱轴压承载力计算公式所得理论值与文献[3]中的试验实测值吻合良好,验证了该计算公式的可行性。当  $A_{s2}=0, A_{s3}=0$  时,式(19)退化为普通圆钢管混凝土短柱的轴压承载力计算公式,即

表 1 承载力计算值与试验值对比

Tab. 1 Comparisons Between Calculation Values and Experiment Values of Bearing Capacities

试件编号	$D/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$f_{\text{cyk}}/\text{MPa}$	$f_y/\text{MPa}$	纵向钢筋型号	箍筋型号	$N_u/\text{kN}$	$N_s/\text{kN}$	$N_u N_s^{-1}$
A1	300	5.5	49.0	336			5 986.30	5 385	1.112
A2	300	4.3	49.0	376	6 $\Phi$ 20	$\Phi 10@150$	6 566.03	6 641	0.988
A3	300	4.3	52.2	376	6 $\Phi$ 20	$\Phi 10@150$	6 728.52	6 718	1.002
A4	300	4.3	52.2	376	8 $\Phi$ 20	$\Phi 10@150$	7 052.91	7 385	0.955

注: $f_{\text{cyk}}$ 为混凝土圆柱体的单轴抗压强度标准值; $N_s$ 为文献[3]中的承载力试验值;纵向钢筋的实测屈服强度  $f_{ys}=493\text{ MPa}$ ;箍筋的屈服强度  $f_{yt}=210\text{ MPa}$ ;试件 A2,A3 中  $d=140\text{ mm}$ ,试件 A4 中  $d=150\text{ mm}$ 。

用式(20)计算文献[3]中试件 A1 的极限承载力,结果列于表 1 中,可以看出,承载力理论计算值与试验值吻合较好。

3.2 加权参数  $b$  对轴压承载力的影响

加权参数  $b$  反映了中间主切应力以及相应面上的正应力对材料屈服或破坏的影响,采用文献[3]中的试验材料参数对式(19)进行分析,取  $k=4.0$ ,分别计算  $b=0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0$  时短柱的轴压承载力。材料强度参数  $b$  对配筋圆钢管混凝土短柱轴压承载力的影响如图 3 所示。从图 3 可以看出,随着  $b$  值的增大,即考虑中间主应力的影响程度增大,承载力也增大。这说明考虑中间主应力的影响,能更好地发挥材料的强度。

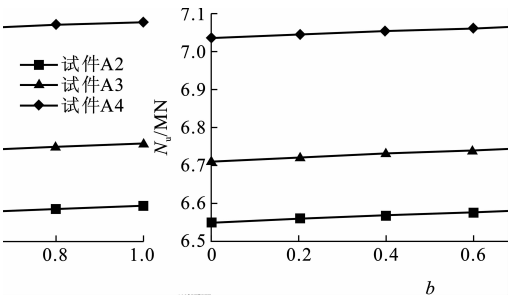


图 3  $N_u$  与  $b$  的关系曲线

Fig. 3 Relations of  $N_u$  and  $b$

3.3 钢管径厚比对混凝土侧向约束力的影响

径厚比  $D/t$  对配筋圆钢管混凝土短柱轴压承载力的影响主要表现在对钢管内混凝土的约束作用,径厚比  $D/t$  与侧向约束应力  $\sigma_{r1}$  的关系如图 4 所示。由图 4 可以看出,侧向约束应力  $\sigma_{r1}$  的大小随

$$N_u = -\frac{1+b}{\alpha}f_y A_{s1} + f_{cy}(A_{c1} + A_{c2}) + [k(A_{c1} + A_{c2}) + \frac{1+b}{\alpha}(\frac{D}{2t} + \frac{ab}{1+b})A_{s1}] \frac{2tf_y}{D} = 2b\pi t^2 f_y + (f_{cy} + k \frac{2tf_y}{D})A_c \tag{20}$$

式中: $A_c$  为普通圆钢管混凝土短柱的核心混凝土截面面积,  $A_c = A_{c1} + A_{c2}$ 。

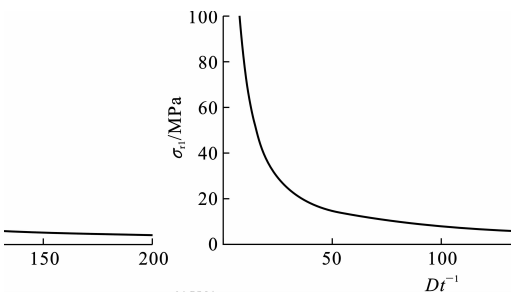


图 4  $\sigma_{r1}$  与  $D/t$  的关系曲线

Fig. 4 Relation of  $\sigma_{r1}$  and  $D/t$

$D/t$  的增大而逐渐减小,但减小的速率越来越小。

3.4 箍筋的体积配筋率

钢管中配置箍筋可以提高钢管混凝土的抗剪能力,同时可以对核心混凝土提供侧向约束应力,文献[3]中的试验表明,箍筋与纵向钢筋形成的钢筋笼可以明显地改善核心混凝土的受力和变形性能,采用合理体积配箍率的箍筋可以有效约束核心混凝土。依据文献[3]中的试验参数,计算体积配箍率  $\rho_v$  与箍筋约束应力  $\sigma_{r2}$  的关系,结果如图 5 所示。由图 5 可知,  $\sigma_{r2}$  随  $\rho_v$  的增大而增大。

4 结 语

(1)运用统一强度理论,考虑了钢管和箍筋对混凝土的约束作用,推导出了配筋圆钢管混凝土短柱的轴压承载力计算公式,并且计算结果与试验结果吻合较好,验证了该计算公式的可行性。当不考虑纵向钢筋和箍筋时,所建立的公式可以退化为普通圆钢管混凝土短柱的轴压承载力计算公式,理论计

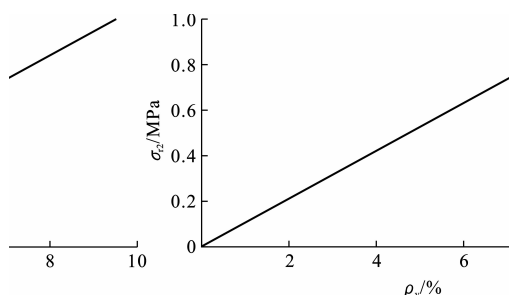


图 5  $\sigma_{r2}$  与  $\rho_v$  的关系

Fig. 5 Relation of  $\sigma_{r2}$  and  $\rho_v$

算值与试验值吻合较好。

(2) 计算公式中考虑了中间主应力对构件承载力的影响。分析可知,选择不同的加权参数  $b$ ,可以得到不同准则下的计算公式,适用范围更广。配筋圆钢管混凝土短柱的轴压承载力随  $b$  值的增大而提高。

(3) 分析了配筋圆钢管混凝土短柱中钢管对混凝土的侧向约束应力  $\sigma_{r1}$  的大小随壁厚比  $D/t$  变化的规律,  $\sigma_{r1}$  随  $D/t$  的增大而逐渐减小。钢管中配置的箍筋对核心混凝土的约束应力  $\sigma_{r2}$  随体积配箍率  $\rho_v$  的增大而增大。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] LIE T T, IRWIN R J. Fire Resistance of Rectangular Steel Columns Filled with Bar-reinforced Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(5): 797-805.
- [2] LIE T T, KODUR V K R. Fire Resistance of Steel Columns Filled with Bar-reinforced Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(1): 30-36.
- [3] 韩金生, 董毓利, 徐赵东, 等. 配筋钢管混凝土柱抗压性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(3): 11-17.  
HAN Jin-sheng, DONG Yu-li, XU Zhao-dong, et al. Analysis of Axial Compression Performance for Reinforcement Concrete-filled Tubular Steel [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(3): 11-17.
- [4] 吴晓莉, 韩金生, 程文襄. 配筋钢管混凝土柱抗火性能试验研究[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(增 2): 174-178.  
WU Xiao-li, HAN Jin-sheng, CHENG Wen-rang. Test Research on Fire Resistance Performance of Bar-

reinforced Concrete Filled Steel Tubular Columns [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2009, 39(S2): 174-178.

- [5] 舒赣平, 刘小莹, 缪巍. 配筋圆钢管混凝土轴心受压短柱试验研究与承载力分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(4): 100-106, 136.  
SHU Gan-ping, LIU Xiao-ying, MIAO Wei. Experimental Research and Bearing Capacity Analysis of Axially Compressive Reinforced Concrete-filled Steel Tube Short Column [J]. Industrial Construction, 2010, 40(4): 100-106, 136.
- [6] YU Mao-hong. Unified Strength Theory and Its Applications [M]. Berlin: Springer Press, 2004.
- [7] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Theory and Analysis of Reinforced Concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [8] 张志权, 赵均海, 张玉芬, 等. 复合钢管混凝土柱轴压承载力的计算[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(1): 67-70.  
ZHANG Zhi-quan, ZHAO Jun-hai, ZHANG Yu-fen, et al. Axial Bearing Capacity of Composite Concrete-filled Steel Tubular Columns [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(1): 67-70.
- [9] 赵均海, 孟晓健, 刘建军, 等. 圆中空夹层钢管混凝土短柱的承载力[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(1): 70-74.  
ZHAO Jun-hai, MENG Xiao-jian, LIU Jian-jun, et al. Bearing Capacity of Concrete-filled Double-skin Steel-tube Stub Column [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1): 70-74.
- [10] 翟越, 赵均海, 计琳, 等. 钢管混凝土轴向受压短柱承载力的统一解[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(3): 55-58.  
ZHAI Yue, ZHAO Jun-hai, JI Lin, et al. Unified Solutions on Axial Compressive Strength of Concrete Filled Steel Tube [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(3): 55-58.
- [11] 赵均海. 强度理论及其工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 87-91.  
ZHAO Jun-hai. Unified Strength Theory and Its Engineering Application [M]. Beijing: Science Press, 2003: 87-91.