

文章编号:1671-8879(2006)03-0055-04

# 钢管混凝土轴向受压短柱承载力的统一解

翟 越<sup>1,2</sup>, 赵均海<sup>1</sup>, 计 琳<sup>1</sup>, 魏雪英<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:**应用双剪统一强度理论,分别对轴心受压钢管混凝土短柱的核心混凝土和薄壁钢管在三向应力状态下的轴向极限应力进行理论分析,得出侧向力对核心混凝土、薄壁钢管和钢管混凝土柱的 3 个约束效应系数,推导出钢管混凝土轴向受压短柱承载力的统一解。与有关文献的试验结果比较,结论基本一致,证明双剪统一强度理论对钢管混凝土的理论分析有很好的适用性。该推导结果为钢管混凝土承载力分析计算提供了一定的理论依据。

**关键词:**建筑工程;双剪统一强度理论;钢管混凝土;薄壁钢管;约束效应系数

**中图分类号:**TU398 **文献标识码:**A

## Unified Solutions on Axial Compressive Strength of Concrete Filled Steel Tube

ZHAI Yue<sup>1,2</sup>, ZHAO Jun-hai<sup>1</sup>, JI Lin<sup>1</sup>, WEI Xue-ying<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. School of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the twin shear unified strength theory, the load capacities of the Concrete Filled Steel Tube (CFST) under axial compression are investigated. The three restriction effect coefficients of the lateral force to the concrete, thin wall steel tube and CFST are derived respectively. The unified formula of the axial compressive strength of CFST is obtained. The results indicate that the restriction effect of intermediate principal stress is important for strength of CFST. The theoretical basis can be provided for the calculations of axial limit strength of CFST by using the results in this paper. 1 tab, 1 fig, 6 refs.

**Key words:** construction engineering; twin shear unified strength theory; CFST; thin wall steel tube; restriction effect coefficient

## 0 引 言

钢管混凝土是将普通混凝土填入薄壁钢管内而形成的组合材料,它改善了核心混凝土的受力状态,提高了构件的塑性、延性,显著地增加了柱子的承载能力和稳定性,有利于建筑物的抗震。因此钢管混凝土在建筑结构中的应用日益广泛,其力学性能的

研究已成为现代建筑工程领域备受关注的研究课题,并已取得了许多研究成果<sup>[1-5]</sup>。其中一些学者在试验研究基础上给出了各自的承载力计算公式,为工程设计提供了重要依据,但这些公式在理论方面没有得到较好的解释,而且计算方法比较冗繁,不便于工程应用。其他一些由理论推导的公式,都没有同时考虑中间主应力  $\sigma_2$  以及材料拉压性能的差异

收稿日期:2005-05-25

基金项目:教育部博士点基金资助项目(20040710001)

作者简介:翟 越(1975-),男,陕西西安人,博士研究生。

对材料屈服或破坏的影响,因此与试验结果出入较大。本文采用考虑了中间主应力效应、材料拉压性能差异以及不同破坏准则对计算结果影响的双剪统一强度理论,分别对钢管混凝土中的核心混凝土和薄壁钢管在复杂应力下轴向极限应力进行理论分析,从而推导出钢管混凝土短柱的轴心受压承载力计算公式的统一解,它的简化形式包括了其他理论推导出的计算公式。通过与有关文献的试验结果进行比较,验证了理论计算公式的正确性,为钢管混凝土轴心受压承载力的分析计算提供了较合理的理论依据。

## 1 双剪统一强度理论

1991 年,俞茂宏在其双剪强度理论的基础上,以双剪应力单元体为物理模型,建立了一种全新的考虑了中间主应力的影响,并适用于不同材料的双剪统一强度理论<sup>[6]</sup>,其主应力表达式为

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t \quad \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (1)$$

$$F' = \frac{1}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_t \quad \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (2)$$

式中: $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为 3 个主应力; $\alpha = \sigma_t/\sigma_c$ , 为材料的拉压强度比; $\sigma_t$ 、 $\sigma_c$  分别为材料的拉伸强度和压缩强度; $b$  为加权参数,反映了中间切应力及相应作用面上的正应力对材料屈服或破坏的影响,其值与剪切强度极限  $\tau_0$  和  $\sigma_t$  有关,表达式为

$$b = \frac{(1+\alpha)\tau_0 - \sigma_t}{\sigma_t - \tau_0} \quad (3)$$

$b$  实际上也是一个选用不同强度准则的参数,如当  $b=0$  时,为 Mohr-Coulomb 强度准则;当  $b=1$  时,为双剪强度理论;当  $\alpha=1$ ,  $b=0, 0.5, 1$  时,则分别得到 Tresca 屈服准则、Mises 屈服准则的线性逼近以及双剪屈服准则。如图 1 所示,双剪统一强度理论在  $\pi$  平面上的系列极限面覆盖了所有区域,说明其包含了各种线性准则。

## 2 钢管混凝土承载力

### 2.1 核心混凝土轴向抗压强度的统一解

由于核心混凝土在轴向压力作用下的横向扩展受到钢管的约束,从而形成轴向压缩和侧向均匀围压的三向受压的应力状态,即为

$$0 > \sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 \quad (4)$$

将主应力代入式(1)、(2)的判别式,可知

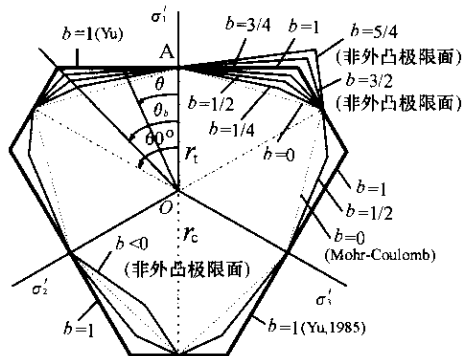


图 1 双剪统一强度理论的系列极限面

$$\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} = \frac{\alpha(\sigma_1 - \sigma_3)}{1+\alpha} \geq 0$$

因此取式(2)作为计算公式,并对于抗压混凝土,按习惯取压为正、拉为负,可得

$$\sigma_3 = f_c + k_c\sigma_1 \quad (5)$$

式中: $k_c = 1/\alpha$ , 称为钢管混凝土中钢管对核心混凝土的约束效应系数; $\sigma_3$  为核心混凝土三向应力状态下的轴向抗压强度,用  $f'_c$  表示; $f_c$  为混凝土抗单轴抗压强度; $\sigma_1$  为钢管对核心混凝土作用的侧向约束应力,用  $p$  表示。

则式(5)可改写为

$$f'_c = f_c + k_c p \quad (6)$$

式中: $k_c$  可用混凝土的内摩擦角  $\varphi$  表示为  $k_c = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi)$ 。

Meyerhof 等学者的试验指出,三轴受压混凝土的内摩擦角变化范围为  $30^\circ \sim 50^\circ$ ,因此由式(6)中核心混凝土的轴向抗压强度的统一解与  $b$  值无关,而与由莫尔-库仑准则和双剪强度准则所得结果一致。这是由于核心混凝土承受钢管的环向均匀约束,中间主应力与最小主应力相等,因而采用双剪统一强度理论时取不同  $b$  值的计算结果相同。

### 2.2 薄壁钢管轴向抗压强度的统一解

钢管混凝土中的薄壁钢管对核心混凝土作用侧向约束力,反过来核心混凝土对钢管作用径向压力,进而产生环向拉力。当钢管的环向拉应力达到屈服极限时,约束失去控制能力,钢管混凝土构件就丧失承载能力。由于钢管混凝土短柱的轴压破坏是由钢管起控制作用的,所以薄壁钢管在复杂应力下的力学性能对钢管混凝土承载力的研究尤为重要。钢管混凝土中的薄壁钢管承受的三向应力分别为轴向压应力  $\sigma_x$ 、径向压应力  $\sigma_r$  和环向拉应力  $\sigma_\theta$ ,即

$$\sigma_x = \frac{N_s}{A_s}, \quad \sigma_r = -p, \quad \sigma_\theta = \frac{pD}{2t} \quad (7)$$

式中: $N_s$  为钢管混凝土中的薄壁钢管所承受的轴向

压力;  $A_s$  为薄壁钢管的面积,近似为  $D\pi t$ ;  $D$  为薄壁钢管的内直径;  $t$  为薄壁钢管的壁厚,其值远小于  $D$  (如  $t \leq D/20$ );  $p$  为核心混凝土对钢管的径向压应力。

对于薄壁钢管而言,  $|\sigma_r|/\sigma_\theta = 2t/D \ll 1$ , 故径向压力远小于环向拉应力,即  $|\sigma_r| \ll \sigma_\theta$ ; 试验分析可知,当钢管混凝土的应变发展加剧时,薄壁钢管的环向拉应力不断加大,轴向压应力相应减小,薄壁钢管从主要承受轴向压应力转变为主要承受环向拉应力<sup>[3]</sup>,此时径向拉应力将大于轴向应力的绝对值,即  $\sigma_\theta > |\sigma_x|$ 。所以按  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  的规则,薄壁钢管的主应力分别为

$$\sigma_1 = \sigma_\theta, \quad \sigma_2 = \sigma_r, \quad \sigma_3 = \sigma_x \quad (8)$$

一般钢材属于拉压同性材料,即  $\alpha \approx 1$ , 由判别式

$$\frac{\sigma_1 + \alpha \sigma_3}{1 + \alpha} > 0 > \sigma_2$$

可知应该取双剪统一强度理论的式(1)作为计算公式。将3个主应力代入,并化简得

$$N_s = \frac{[(1+b)D^2\pi + 2abD\pi t]p - 2(1+b)D\pi t f_y}{2\alpha} \quad (9)$$

式中:  $f_y$  为钢材单向拉伸屈服应力。

令  $A_c = D^2\pi/4$ , 为核心混凝土的面积,并取压为正,拉为负,则式(9)可改写为

$$N_s = \frac{1+b}{\alpha} A_s f_y - \frac{2(1+b)A_c + \alpha b A_s}{\alpha} p \quad (10)$$

给式(10)两边同时除以  $A_s$ , 并令  $f_{sy} = N_s/A_s$  为薄壁钢管的轴向抗压强度;  $\eta = t/D$  为薄壁钢管的壁厚与核心混凝土的直径之比,该值反映了钢管混凝土的含钢率。则式(10)可化简为

$$f_{sy} = \frac{1}{\alpha} f_y - \left( k_s p - \frac{b}{\alpha} f_y \right) \quad (11)$$

式中:  $k_s = (1+b+2ab\eta)/(2a\eta)$ , 称为钢管混凝土中核心混凝土对薄壁钢管的约束效应系数,其值是由钢管混凝土的含钢率决定的。

分析式(11),可以发现一方面侧向压应力  $p$  使薄壁钢管的抗压强度有所提高,另一方面由于环向拉应力的影响使其值又有所降低,而且随着侧向力的增大,环向拉应力也不断增大,使得薄壁钢管的轴向抗压强度逐渐减小,这与文献[3]的分析结论基本相同。

### 2.3 钢管混凝土轴心受压承载力的统一解

钢管混凝土轴心受压承载力由薄壁钢管的承载力与核心混凝土的承载力共同组成,即

$$N = A_s f_{sy} + A_c f'_c \quad (12)$$

将式(4)、式(11)代入式(12),并化简得

$$N = A_c f'_c + \frac{1}{\alpha} A_s f_y + A_c (k_c - 4\eta k_s) p + \frac{b}{\alpha} A_s f_y \quad (13)$$

由式(13)可见,承载力  $N$  是侧向力  $p$  的函数,为了确定最大承载力就必须确定相应的侧压力。当薄壁钢管的环向应力达到屈服极限而发生大变形,失去约束能力,此时钢管混凝土的承载力达到最大值。由环向拉应力强度条件

$$\sigma_\theta = \frac{pD}{2t} \leq f_y$$

可得最大侧向力

$$p_{\max} = 2\eta f_y \quad (14)$$

将式(14)代入式(13),化简可得到承载力极限值

$$N_0 = A_c f'_c + k_{cs} A_s f_y \quad (15)$$

式中:  $k_{cs} = (1+b)/\alpha + (k_c - 4\eta k_s)/2$ , 称为钢管混凝土的约束效应系数,其大小是由核心混凝土的内摩擦角和钢管混凝土的含钢率决定的。

对给定截面的钢管混凝土,  $k_{cs}$  可以体现组成钢管混凝土的薄壁钢管和核心混凝土的几何特性和物理特性参数对其承载力的影响,也就是说其大小可以很好地反映出两者的“组合作用效应”的强弱。式(15)选择不同  $b$  值时,可以演化为以其他强度理论为基础的计算公式。因此,本文所提出的计算公式可以称之为钢管混凝土轴向受压短柱承载力的统一解。

### 3 计算公式的验证

合理选择上述计算公式的基本参数对计算结果的准确性是非常重要的。这些参数可以通过试验测量来确定。当取  $k_c = 4(\varphi = 36.87^\circ)$ ;  $\alpha = 1, b = 0.5$ ;  $0 < \eta \leq 1/20$ , 则由式(15)可得

$$N = A_c f'_c + (2 - \eta) A_s f_y \quad (16)$$

式(16)相当于 Mises 屈服准则的线性逼近公式。为了验证计算公式的合理性,选择3位相关专家文献中的试验与理论研究成果作比较。如文献[3]对钢管采用 Von Mises 屈服条件所提出的线性公式为

$$N = A_c f'_c + 2A_s f_y \quad (17)$$

文献[4]给出的计算公式为

$$N = A_g f_s + k_1 R_a^b A_k \quad (18)$$

式中:  $k_1 = 1 + (1 - \mu)\mu f_a/R_a^b$ , 其中的符号意义参见文献[4]。

文献[5]给出的计算公式为

$$N = A_s f_{scy} \quad (19)$$

式中:  $f_{scy} = (1.212 + \eta \xi_0 + \eta \xi_0^2) f_c$ , 其中的符号意义见文献[5]。

文献[3-5]的部分试验结果及采用相应公式的计算结果和式(16)的计算结果见表1。采用本文推导出的钢管混凝土短柱的承载力公式所得计算结果与

试验结果的误差在10%以内,与文献资料的计算结论基本一致。由此可见基于双剪统一强度理论的计算公式的理论基础较强,计算较为可靠。

表1 文献中钢管混凝土短柱轴心受压试验和计算结果及本文计算值

文献 编号	试件 编号	钢管尺寸 $D_s \times t \times l$ (mm $\times$ mm $\times$ mm)	$f_c$ / MPa	$f_y$ / MPa	实测极限 荷载/kN	文献计 算值/kN	误差/%	本文计 算值/kN	误差/%
文 献 [3]	2G-21	273 $\times$ 8 $\times$ 1100	34.7	307.0	5580	5765	3.33	5704	2.23
	3G-23	166 $\times$ 5 $\times$ 660	36.5	274.6	2030	2043	0.66	2021	0.40
	4G-35	204 $\times$ 2 $\times$ 880	12.8	235.0	1040	992	4.54	990	4.83
	1G-45	96 $\times$ 5 $\times$ 450	35.0	410.0	1167	1311	12.34	1279	9.58
文 献 [4]	Z-69-84	100 $\times$ 2.5 $\times$ 300	39.2	442.0	845	891	5.40	929	9.91
	Z-70-102	100 $\times$ 2.5 $\times$ 300	43.4	249.0	684	583	14.77	674	1.42
	Z-70-106	100 $\times$ 2.0 $\times$ 300	43.4	241.0	548	512	6.57	601	9.83
	Z-70-107	100 $\times$ 1.5 $\times$ 300	43.4	237.0	515	467	9.32	536	4.02
文 献 [5]	Scs1-1	131 $\times$ 2.3 $\times$ 395	53.4	323.3	1250	1180	5.60	1255	0.42
	Scs2-1	111 $\times$ 2.0 $\times$ 339	53.4	353.6	894	887	0.80	951	6.40
	Scs3-1	114 $\times$ 3.2 $\times$ 337	53.4	353.6	1140	1097	3.80	1239	8.70
	Scs4-1	133 $\times$ 3.5 $\times$ 397	53.4	323.3	1140	1515	5.20	1549	7.59

注: $D_s$  为钢管的外径; $t$  为薄壁钢管的壁厚; $l$  为钢管的长度。

4 结 语

(1)核心混凝土的轴向抗压强度随着薄壁钢管对其的侧向约束力  $p$  及约束效应系数  $k_c$  的增大而增加。当侧向约束力一定时,核心混凝土的轴向承载力随着混凝土内摩擦角的增大而增加。

(2)薄壁钢管的轴向抗压强度受核心混凝土对其的侧向力  $p$  及约束效应系数  $k_s$  的影响,在钢管混凝土短柱即将达到其极限承载力时,钢管轴向压应力减小,而环向拉应力增大,此时钢管转变为主要承受环向拉应力。

(3)钢管混凝土短柱的约束效应系数  $k_{cs}$  反映出钢管和混凝土的“组合作用效应”的强弱,其大小是由核心混凝土的内摩擦角及钢管混凝土的含钢率等决定的。

(4)通过与有关文献的比较,验证了钢管混凝土轴向受压短柱承载力的统一解的合理性,说明双剪统一强度理论对复杂应力状态下材料的力学性能分析有很好的适用性。

参考文献:

References:

[1] 夏桂云,曾庆元,李传习,等. 复式空心钢管混凝土柱抗压刚度[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(4): 41-45.  
XIA Gui-yun, ZENG Qing-yuan, LI Chuan-xi, et al.

Compressive Stiffness of Composite Concrete-Filled Steel Tube[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003,23(4):41-45.  
[2] 赵均海,顾强,马淑芳. 钢管混凝土承载力研究[J]. 西北建筑工程学院学报:自然科学版,2001,18(2):1-4.  
ZHAO Jun-hai, GU Qiang, MA Shu-fang. Load Capability Analysis of Concrete Filled Steel Tube[J]. Journal of Northwestern Institute of Architectural Engineering: Natural Science Edition, 2001,18(2):1-4.  
[3] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.  
CAI Shao-huai. Modern Steel Tube Confined Concrete Structures[M]. Beijing: People's Communications Press, 2003.  
[4] 汤关祚,招炳泉,竺惠仙,等. 钢管混凝土基本力学性能的研究[J]. 建筑结构学报,1982,(1):13-31.  
TANG Guan-zuo, ZHAO Bing-quan, ZHU Hui-xian, et al. Study on Basic Mechanics Properties of Concrete Filled Steel Tube[J]. Architectural Structure Journal, 1982,(1):13-31.  
[5] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社,2000.  
HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tube Structure[M]. Beijing: Science Press, 2000.  
[6] 俞茂宏. 混凝土强度理论及其应用[M]. 北京:高等教育出版社,2002.  
YU Mao-hong. Strength Theory on Concrete and Application[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.