

文章编号:1673-2049(2007)02-0074-06

# 圆钢管混凝土轴压长柱的极限承载力

田宏伟<sup>1,2</sup>, 赵均海<sup>1</sup>, 魏 锦<sup>1</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 昆山市建筑设计院有限公司, 江苏 昆山 215300)

**摘要:**基于双剪统一强度理论,考虑钢管中间主应力(径向压力)对环向拉力和纵向压力的影响,建立了钢管的承载力公式;同时,避开混凝土破坏准则中侧压影响系数的不确定性分析,根据混凝土破坏时的统一强度准则建立其承载力公式,进而叠加建立了钢管混凝土短柱的承载力公式。在此基础上,按照弹性模量理论推导出钢管混凝土长柱的稳定影响系数,建立了其极限承载力公式。结果表明,改变加权参数值,计算得出的承载力也随之发生变化。通过与相关文献中的试验值进行比较,发现试验值与计算值吻合良好。

**关键词:**圆钢管混凝土柱;长柱;极限承载力;双剪统一强度理论

**中图分类号:**TU392.3 **文献标志码:**A

## Ultimate Bearing Capacity of Concrete-filled Circular Steel Tubular Long Columns with Axial Compression

TIAN Hong-wei<sup>1,2</sup>, ZHAO Jun-hai<sup>1</sup>, WEI Jin<sup>1</sup>

(1. School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Kunshan Architectural Design Ltd, Kunshan 215300, Jiangsu, China)

**Abstract:** Considering the intermediate principal stress effect of the steel tube on the circumferential tension and longitudinal compression based on the twin shear unified strength theory, a formula of bearing capacity of steel tube was established. Meanwhile, in terms of the unified strength criterion of concrete and avoiding uncertainty analysis of effect factor of circumferential compression in concrete failure criterion, the formula of bearing capacity of core concrete was established. And then by splicing the bearing capacity of short concrete-filled steel tube (CFST), the formula of bearing capacity was formed. Based on it, through elastic modulus theory, the stability effect factor of concrete-filled steel tubular long columns was deduced and then the formula of its ultimate bearing capacity was built. The results show that by altering weighted parameter value, the bearing capacity of concrete-filled steel tube is changed. The calculations are all agree well with the experiment results through comparing with the experimental values of related references.

**Key words:** concrete-filled circular steel tubular column; long column; ultimate bearing capacity; twin shear unified strength theory

## 0 引言

自20世纪60年代中期钢管混凝土开始引入中

国以来,在不到50 a的时间里,钢管混凝土不论是从理论推导上还是从工程实践上都得到了迅速的发展<sup>[1-8]</sup>,但大部分研究工作都集中在短柱上,对长柱

收稿日期:2007-01-15

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20040710001);陕西省自然科学基金研究计划项目(2003E215)

作者简介:田宏伟(1981-),男,山东鱼台人,长安大学工学硕士研究生,E-mail:tianhongwei7@126.com。

的研究不是很多。

有些学者把钢管和混凝土看成统一体<sup>[9-10]</sup>,并提出了钢管混凝土的表观本构方程和极限承载力公式,即

$$N_0 = A_{sc} f_{sc} \quad (1)$$

式中: $N_0$ 为钢管混凝土柱的极限承载力; $A_{sc}$ 为钢管混凝土柱横截面面积; $f_{sc}$ 为钢管混凝土组合抗压强度设计值。

文献[11]中考虑了钢管和混凝土的相互作用,分别根据钢管和混凝土的单独承载力,叠加得出总的极限承载力为

$$N_0 = \begin{cases} A_c f_c (1 + \sqrt{\theta} + 1.1\theta) & \theta > 1.235 \\ A_c f_c (1 + 2\theta) & \theta \leq 1.235 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $A_c$ 为钢管内的混凝土横截面面积, $A_c = \pi(D/2 - t)^2$ , $D$ 为钢管直径, $t$ 为钢管厚度; $f_c$ 为混凝土轴心抗压强度设计值; $\theta$ 为钢管混凝土的套箍指标。

文献[12]~[16]和文献[11]中的思路相同,只是根据不同的强度破坏准则推导出了不同的承载力公式。

比较以上各文献,对钢管的极限承载力分析中,除了文献[13]中没有考虑纵向应力的降低及文献[16]中忽略钢管的承载力外,其他文献中均考虑了环向拉力对纵向应力的降低影响。对钢管的屈服分析中,文献[11]~[13]、[15]中采用 Von Mises 屈服准则,文献[14]中采用最大剪应力理论,文献[16]中采用 Tresca 屈服条件,得出了不同的承载力公式,但以上各文献中均忽略了钢管径向应力即中间主应力的影响;在对核芯混凝土的应力分析中,都考虑了侧向压力即套箍力对提高纵向应力的影响,三向受压的混凝土破坏准则都采用下式<sup>[11]</sup>

$$f_c^* = f_c + kp \quad (3)$$

式中: $f_c^*$ 为等侧压下的混凝土抗压强度; $k$ 为侧压影响系数; $p$ 为侧向压力。

各文献中的不同之处在于提高侧压影响系数 $k$ 的确定方法的差异。文献[11]~[14]中根据大量试验数据拟合出了不同的非线性公式,文献[13]中 $k$ 取2.5,文献[16]中 $k$ 取4.3,这些 $k$ 值基本上由试验确定,理论性较差。

由于长柱的承载力计算中要考虑稳定的影响,各国学者在推导稳定影响系数的过程中,基本有以下2种方法:一种是以文献[9]、[10]为代表的根据组合弹性模量确定临界力和稳定影响系数,此方法理论性强,但计算复杂;另一种是以文献[11]为代表的根据试验数据拟合出稳定影响系数的关系式,此

方法计算简便,但理论性较差。

鉴于上述分析,笔者运用双剪统一强度理论和混凝土统一强度破坏准则,分别建立了钢管和混凝土的承载力计算公式,两者叠加可得钢管混凝土短柱的极限承载力,并根据弹性模量理论推导出钢管混凝土长柱的稳定影响系数,从而建立了钢管混凝土轴压长柱的计算公式。

## 1 轴压短柱的极限承载力

### 1.1 基本假定

(1)平截面假定。

(2)钢管和混凝土之间无滑移,纵向应变协调。

(3)屈服后截面的形状不变,钢管将不会发生局部屈曲。

(4)钢管达到强度设计标准时,混凝土达到破坏状态。

### 1.2 双剪统一强度理论

1991年俞茂宏在双剪强度理论的基础上,以双剪单元体和双剪屈服准则为基础,建立了一种全新的考虑中间主应力影响的适用于各种不同材料的双剪统一强度理论,即用一个统一的模型、统一而简单的数学表达式,能方便灵活地适用于各种不同特性的材料,其表达式为<sup>[12]</sup>

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b} (b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t \quad \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (4)$$

$$F' = \frac{1}{1+b} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_t \quad \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (5)$$

式中: $\alpha$ 为材料的拉压强度比,对于韧性金属材料 $\alpha$ 为0.77~1.00,对于脆性金属材料 $\alpha$ 为0.33~0.77,对于岩土类材料 $\alpha$ 小于0.5; $b$ 为加权系数,它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,同时 $b$ 取不同值也对应着不同的强度准则。

### 1.3 极限承载力

对钢管混凝土同时受荷的荷载方式,可建立组合同心圆柱体的计算模型,如图1所示。

在受荷初期,由于钢管泊松比大于混凝土泊松比,钢管处于单向受力状态,随着轴力的增大,混凝土泊松比渐渐超过钢管泊松比,两者之间产生了紧箍力,钢管处于轴向和径向受压、环向受拉的三向应力状态,如图2所示。在钢管刚达到弹性极限状态时,由于径向压力不大,使得其环向拉力很小,纵向压力降低较小;随着钢管塑性和混凝土泊松比的进一步增大(超过0.5),钢管将不再承受增加的荷载,

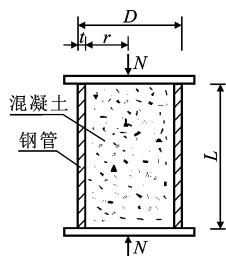


图 1 计算模型

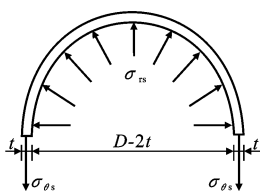


图 2 钢管受力

Fig. 1 Calculation Model

Fig. 2 Load of Steel Tube

只起套箍作用,径向压力不断增大,使得环向拉力随之增加。根据双剪统一强度理论,钢管纵向压力将显著降低,但由于考虑了径向压力的影响,其降低幅度将小于文献[11]、[14]~[16]中钢管的纵向承载力的降低幅度。

钢管在塑流阶段处于三向应力状态,由图 2 可以看出,钢管的环向拉力  $\sigma_{\theta s}$  和径向压力  $\sigma_{rs}$  的关系为:  $\sigma_{\theta s} = \frac{D-2t}{2t} \sigma_{rs}$ 。本文中规定:压应力为正,拉应力为负。将各应力代入双剪统一强度理论公式(4)、(5),可得

$$\frac{1}{1+b}(\sigma_{\theta s} - b\sigma_{rs}) + \alpha\sigma_{ls} = \sigma_t \quad (6)$$

从而可得钢管纵向应力为

$$\sigma_{ls} = \frac{\sigma_t}{\alpha} - \frac{1}{\alpha(1+b)}(\sigma_{\theta s} - b\sigma_{rs}) \quad (7)$$

式中:  $\sigma_{ls}$  为纵向压力;  $\sigma_t$  为混凝土抗拉强度。

在常规的三轴受力强度  $\sigma_{1c} = \sigma_{2c} \geq \sigma_{3c}$  时,破坏准则为<sup>[17]</sup>

$$(\sigma_{1c} - \sigma_{3c})^2 + (K_c - 1 - \frac{1}{K_c})\sigma_{1c} + \frac{\sigma_{3c}^2}{K_c} + \frac{1}{K_c} - 1 = 0 \quad (8)$$

式中:  $\sigma_{1c}$ 、 $\sigma_{2c}$ 、 $\sigma_{3c}$  分别为混凝土达到极限强度的 3 个主应力  $\sigma_{\theta c}$ 、 $\sigma_{rc}$ 、 $\sigma_{lc}$  与其单轴抗压强度  $f_c$  的比值;  $K_c$  为混凝土单轴抗拉强度与抗压强度之比。

根据本文中正负号的规定,将  $\sigma_{1c}$ 、 $\sigma_{2c}$ 、 $\sigma_{3c}$  的表达式代入式(8),整理得

$$(\sigma_{1c} - \sigma_{rc})^2 - \frac{1}{K_c}\sigma_{1c}f_c - (K_c - 1 - \frac{1}{K_c}) \cdot \sigma_{rc}f_c + (\frac{1}{K_c} - 1)f_c^2 = 0 \quad (9)$$

解式(9),可得

$$\sigma_{1c} = \sigma_{rc} + \frac{f_c}{2K_c} + \sqrt{\sigma_{rc}f_c(K_c - 1) + f_c^2(\frac{1}{2K_c} - 1)^2} \quad (10)$$

在钢管和混凝土交界处,即  $r = D/2 - t$  处,满足  $\sigma_{rs} = \sigma_{rc}$ ,本文中统一用  $p$  表示径向压力。在钢管混

凝土短柱端部,由放松的圣维南边界条件可得

$$\sigma_{ls}A_s + \sigma_{lc}A_c = N \quad (11)$$

式中:  $A_s$  为钢管的横截面面积,  $A_s = \pi[(D/2)^2 - (D/2 - t)^2]$ ;  $N$  为外加轴向荷载。将式(7)、(10)代入式(11),整理得

$$[\frac{\sigma_t}{\alpha} - \frac{1}{\alpha(1+b)}(\frac{D-2t}{2t} - b)p]A_s + [p + \frac{f_c}{2K_c} + \sqrt{pf_c(K_c - 1) + f_c^2(\frac{1}{2K_c} - 1)^2}]A_c = N \quad (12)$$

从式(12)中可以看出,极限承载力  $N$  为侧向压力  $p$  的函数,因此对  $p$  求导,由极值条件  $dN/dp = 0$  可得

$$p^* = f_c(K_c - 1) / \{4(A_s/A_c)[(D-2t)/(2t) - b][\alpha(1+b)]^{-1} - 1\}^2 - f_c[1/(2K_c) - 1]^2 / (K_c - 1) \quad (13)$$

式中:  $p^*$  为最大轴向荷载时的侧向压力值;同时,由钢管的平衡条件式  $\sigma_{\theta s} = \frac{D-2t}{2t}p \leq f_y$ ,可解得侧向压力的限值为

$$p^* \leq \frac{2t}{D-2t}f_y \quad (14)$$

式中:  $f_y$  为钢管的屈服强度。在进行承载力计算时,要根据式(13)、(14)先确定出极限荷载状态下的侧向压力值。

## 2 轴压长柱的极限承载力

对于长细比很小的短柱,其破坏是由于钢管在三向应力下屈服和混凝土在三向受压下被压坏所致;对于长细比很大的长柱,其破坏是由于弹性失稳所致,此时的纵向应变尚处于弹性范围,其极限荷载可用 Euler 公式确定;而介于长柱和短柱之间的相当范围的中柱,其破坏是由于非弹性失稳所致,其极限荷载可用修正的 Euler 公式,即将 Euler 公式中的弹性模量以切线模量代替。切线模量公式为

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 E_t}{\lambda^2} \quad (15)$$

式中:  $\sigma_k$  为构件平均临界应力;  $\lambda$  为构件长细比;  $E_t$  为柱的综合变形模量。

根据文献[14],应力-应变曲线的经验公式为

$$\frac{\sigma}{\sigma_u} = 2 \frac{\epsilon}{\epsilon_u} - (\frac{\epsilon}{\epsilon_u})^2 \quad (16)$$

式中:  $\sigma_u$  为构件极限应力;  $\epsilon_u$  为构件纵向极限应变。

将式(16)两边乘以  $\sigma_u$ ,然后对  $\epsilon$  求导,可得

$$E_t = 2\sigma_u(\frac{1}{\epsilon_u} - \frac{\epsilon}{\epsilon_u^2}) \quad (17)$$

将式(17)代入式(15),可得

$$\sigma_k = \frac{2\pi^2 \sigma_u}{\lambda^2 \epsilon_u} (1 - \frac{\epsilon_k}{\epsilon_u}) \quad (18)$$

式中: $\epsilon_k$  为临界状态时的应变。

同理,临界状态时的应力-应变关系为

$$\sigma_k = \sigma_u (2 \frac{\epsilon_k}{\epsilon_u} - \frac{\epsilon_k^2}{\epsilon_u^2}) \quad (19)$$

由式(18)、(19),可得

$$\epsilon_k = \epsilon_u + \frac{\pi^2}{\lambda^2} - \sqrt{\epsilon_u^2 + \frac{\pi^4}{\lambda^4}} \quad (20)$$

将式(20)代入式(18)或式(19),可得

$$\sigma_k = 2\sigma_u \frac{\pi^2}{\lambda^2 \epsilon_u} (\sqrt{1 + \frac{\pi^4}{\lambda^4 \epsilon_u^2}} - \frac{\pi^2}{\lambda^2 \epsilon_u}) \quad (21)$$

轴压钢管混凝土长柱的稳定影响系数为

$$\varphi = \frac{\sigma_k}{\sigma_u} = \frac{2\pi^2}{\lambda^2 \epsilon_u} (\sqrt{1 + \frac{\pi^4}{\lambda^4 \epsilon_u^2}} - \frac{\pi^2}{\lambda^2 \epsilon_u}) \quad (22)$$

由文献[9]、[10]、[14],定义长细比  $\lambda_1 =$

$\frac{4L\sqrt{\epsilon_u}}{D}$ ,代入式(22)可得

$$\varphi = \frac{2\pi^2}{\lambda_1^2} (\sqrt{1 + \frac{\pi^4}{\lambda_1^4} - \frac{\pi^2}{\lambda_1^2}}) \quad (23)$$

根据式(12)、(23),可得钢管混凝土轴压长柱的极限承载力公式为

$$N_L = \varphi N_S \quad (24)$$

式中: $N_L$ 、 $N_S$  分别为钢管混凝土长柱、短柱的极限承载力。

圆钢管混凝土的纵向极限应变为

$$\epsilon_u = 1\,300 + 12.5f'_c + (600 + 33.3f'_c)\xi^{0.2} \quad (25)$$

由于式(25)是在轴压短柱的基础上推导出来的,而轴压长柱在破坏时的纵向应变与长细比有关,根据文献[10]、[11]、[18]~[21]中的试验数据,推导出长柱破坏时的纵向极限应变为

$$\epsilon_u = [1\,300 + 12.5f'_c + (600 + 33.3f'_c)\xi^{0.2}](1 - 0.06\sqrt{L/D}) \quad (26)$$

式中: $f'_c$  为钢管混凝土的圆柱体抗压强度; $\xi$  为套箍系数,  $\xi = \frac{f_s A_s}{f_c A_c}$ 。

### 3 算例验证

由于钢管的拉压强度  $\sigma_t$  和  $f_y$  相差不大,因此笔者认为钢管的拉压强度相等,即  $\alpha=1$ 。文献[8]中的钢管屈服强度为  $f_y = 338.9$  MPa;文献[20]中的钢管屈服强度为  $f_y = 348.1$  MPa。加权系数  $b =$

0.5 时,所得参数计算结果见表 1。

从表 1 中可以看出,按本文计算的极限荷载与文献中的试验值吻合良好。表 1 中,当  $b=0.5$  时,实测值与计算值之比为 0.78~1.23,平均为 0.969,均方差为 0.102。当  $b=0.8$  时,实测值与计算值之比为 0.75~1.17,平均为 0.925,均方差为 0.095;当  $b=1.0$  时,实测值与计算值之比为 0.73~1.14,平均为 0.902,均方差为 0.092。

图 3 为钢管混凝土长柱极限承载力随着长细比和加权系数  $b$  变化而变化的规律。

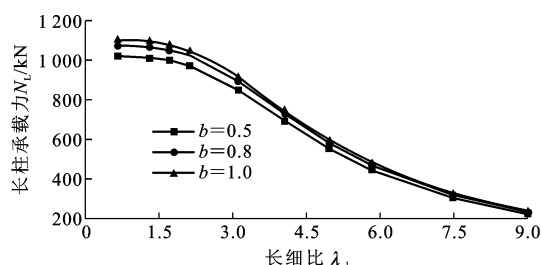


图 3 长柱承载力与长细比的关系

Fig. 3 Relation Between Long Column Bearing Capacity and Slenderness Ratio

由图 3 可以看出,钢管混凝土轴压长柱的极限承载力随着长细比的增加而显著降低,但在  $\lambda_1 = 2.0$  之前,轴压承载力基本上保持不变,这表明长细比较小时,钢管混凝土属于强度破坏,随着长细比的增大,钢管混凝土柱的破坏形式受稳定的影响逐渐明显。随着加权系数  $b$  的增大,本文中的计算结果呈增大的趋势,但变化不明显,表明采用统一强度理论中不同的屈服准则,计算结果都有很好的适应性。

### 4 结 语

(1)笔者建立了圆钢管混凝土长柱的轴压承载力的计算公式,对于不同长细比的柱均有较好的适应性。

(2)钢管混凝土轴压长柱的承载力以柱的长细比  $\lambda_1 = 2.0$  为界限,在  $\lambda_1 = 2.0$  之前,钢管混凝土长柱的承载力降低不多,在  $\lambda_1 = 2.0$  之后,随着长细比的增大而显著降低。

(3)加权系数  $b$  的变化影响着钢管承载力,随着  $b$  的增大,钢管的承载力增大,同时钢管混凝土的极限承载力也随之增大,但影响并不明显。从本文中的计算看,当  $b=0.5$  时,计算结果与试验值吻合较好,此时钢管对应的屈服准则是加权双剪统一强度理论。

表 1 计算结果比较( $b=0.5$ )  
Tab. 1 Comparison of Calculation Results( $b=0.5$ )

文献	试件 编号	钢管尺寸 $D\times t\times L/\text{mm}$	混凝土立方 体强度/MPa	钢管承 载力/kN	混凝土承 载力/kN	短柱承 载力/kN	纵向极限压 应变/ $10^{-3}$	长细 比	稳定 系数	$N_L/\text{kN}$	$N_u/\text{kN}$	$N_u\cdot$ $N_L^{-1}$
[ 8 ]	C1-C3	108×4×324	35.7	159.5	862.0	1 021.4	3.161	0.675	0.999	1 020.4	1 082.7	1.06
	C4-C5	108×4×648					3.009	1.317	0.992	1 013.2	826.5	0.82
	C6-C8	108×4×864					2.929	1.732	0.978	998.9	812.3	0.81
	C9-C10	108×4×1 080					2.859	2.139	0.951	971.4	810.0	0.81
	C11-C13	108×4×1 620					2.708	3.122	0.831	848.8	665.7	0.78
	C14-C16	108×4×2 160					2.581	4.065	0.678	692.5	682.0	0.98
	C17	108×4×2 700					2.470	4.970	0.541	552.6	649.0	1.17
	C18-C20	108×4×3 240					2.369	5.840	0.435	444.3	546.3	1.23
	C21-C23	108×4×4 320					2.189	7.486	0.296	302.3	336.6	1.11
	C24-C25	108×4×5 400					2.031	9.014	0.215	219.6	218.0	0.99
	C26	108×4×5 560					2.009	9.230	0.206	210.4	213.0	1.01
[20]	sc1 301-2	108×4×3 510	31.8	163.8	829.5	993.3	2.234	6.144	0.404	401.3	395.0	0.98
	sc1 303	108×4×3 510	46.8		1 033.0	1 196.8	2.570	6.590	0.363	434.2	440.0	1.01
	sc1 411-2	108×4×3 807	31.8		829.5	993.3	2.186	6.592	0.363	360.2	360.0	1.00
	sc1 491-2	108×4×4 023	46.8		1 033.0	1 196.8	2.476	7.414	0.300	359.5	319.0	0.89
	sc1 541-2	108×4×4 158	31.8		829.5	993.3	2.131	7.109	0.322	319.5	317.0	0.99
	sc1 543-4	108×4×4 158	46.8		1 033.0	1 196.8	2.452	7.625	0.287	343.1	289.0	0.84

注： $N_u$  为试验极限荷载。

(4)根据双剪统一强度理论和混凝土统一破坏准则,建立了不用确定侧压影响系数  $k$  的钢管混凝土短柱的承载力公式,理论性强,适应性好。

(5)根据文献[10]、[11]、[18]~[21],通过试验结果分析,笔者建立了钢管混凝土长柱的纵向极限应变公式,并根据弹性模量理论建立了稳定影响系数  $\varphi$ ,计算结果和试验值吻合良好,且偏于保守。

(6)从计算结果可以看出,钢管的极限承载力在破坏状态时降低较多,但由于考虑了中间主应力的影响,采用统一强度理论的计算值比文献中采用其他屈服准则的计算值要大,说明利用双剪统一强度理论计算极限荷载可以充分发挥材料的性能。

参考文献:  
References:

[ 1 ] 张建民,郑皆连,肖汝诚. 钢管混凝土拱桥吊装过程的最优化计算分析[J]. 中国公路学报,2005,18(2):40-44.  
ZHANG Jian-min,ZHENG Jie-lian,XIAO Ru-cheng. Calculation Method for Optimizing the Installation Process of Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport,2005,18(2):40-44.

[ 2 ] 陈宝春,冯泽荣,韦建刚. 钢管混凝土哑铃形拱肋灌注混凝土时的截面应力分析[J]. 中国公路学报,2005,

18(1):73-76.

CHEN Bao-chun,XIAO Ze-rong,WEI Jian-gang. Analysis on Stresses of Dumbbell-shaped Cross-section of CFST Arch Rib During Concrete Pouring Construction[J]. China Journal of Highway and Transport,2005,18(1):73-76.

[ 3 ] 黄文金,陈宝春. 钢管混凝土桁梁受弯试验研究[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(1):29-33.  
HUANG Wen-jin,CHEN Bao-chun. Experimental Research on Concrete-filled Steel Tube Truss Girder Under Bending[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2006,23(1):29-33.

[ 4 ] 丁发兴,余志武. 恒高温后圆钢管混凝土轴压短柱弹塑性分析[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(1):34-38.  
DING Fa-xing,YU Zhi-wu. Elasto-plastic Analysis of Concrete-filled Circular Steel Tube Stub Columns After Constant High Temperature[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2006,23(1):34-38.

[ 5 ] 李小伟,赵均海,朱铁栋,等. 方钢管混凝土轴压短柱的力学性能[J]. 中国公路学报,2006,19(4):77-81.  
LI Xiao-wei,ZHAO Jun-hai,ZHU Tie-dong, et al. Mechanics Behavior of Axially Loaded Short Columns with Concrete-filled Square Steel Tube [J]. China Journal of Highway and Transport,2006,19(4):77-81.

- [6] 张阳,邵旭东,蔡松柏,等.大跨桁式钢管混凝土拱桥空间非线性有限元分析[J].中国公路学报,2006,19(4):65-70.
- ZHANG Yang, SHAO Xu-dong, CAI Song-bai, et al. Spatial Nonlinear Finite Element Analysis for Long-span Trussed CFST Arch Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 65-70.
- [7] 裴万吉,赵均海,魏雪英.钢管混凝土的截面形式及其承载力分析[J].建筑科学与工程学报,2006,23(1):49-53.
- PEI Wan-ji, ZHAO Jun-hai, WEI Xue-ying. Analysis of Section Types of Concrete-filled Steel Tube and Its Load Capacity[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 49-53.
- [8] 韩冰,王元丰.圆钢管混凝土轴心受压构件徐变分析的比较[J].中国公路学报,2007,20(2):83-86.
- HAN Bing, WANG Yuan-feng. Creep Analysis Comparison of Circular Axially Compressed Concrete-filled Steel Tubular Members[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 83-86.
- [9] 钟善桐.钢管混凝土结构[M].北京:清华大学出版社,2003.
- ZHONG Shan-tong. Structures of Concrete-filled Steel Pipe[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [10] 韩林海.钢管混凝土结构[M].北京:科学出版社,2004.
- HAN Lin-hai. Structures of Concrete-filled Steel Tube[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [11] 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 Concrete-filled Steel Tube Structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [12] 赵均海.强度理论及其工程应用[M].北京:科学出版社,2003.
- ZHAO Jun-hai. Strength Theory and Its Engineering Application[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [13] 赵均海,顾强,马淑芳.基于双剪统一强度理论的轴心受压钢管混凝土承载力研究[J].工程力学,2002,19(2):32-35.
- ZHAO Jun-hai, GU Qiang, MA Shu-fang. The Study of the Axial Compressive Strength of Concrete Filled Steel Tube Based on the Twin Shear Unified Strength Theory[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(2): 32-35.
- [14] 李继读.钢管混凝土轴压承载力的研究[J].工业建筑,1985,6(2):25-31.
- LI Ji-du. Research of Axial Bearing Capacity of Concrete Filled Steel Tube[J]. Industrial Construction, 1985, 6(2): 25-31.
- [15] 曹平周.钢管混凝土柱侧压效应系数分析和极限强度计算[J].钢结构,1998,13(3):20-24.
- CAO Ping-zhou. The Concrete Lateral Pressure Effect Coefficient Analysis and Ultimate Strength Calculation of Concrete-filled Steel Tube Columns[J]. Steel Construction, 1998, 13(3): 20-24.
- [16] 甘丛石,支喜华,唐丛一.钢管混凝土弹塑性本构方程及极限承载力[J].长沙交通学院学报,1998,14(3):68-73.
- GAN Cong-shi, ZHI Xi-hua, TANG Cong-yi. The Elastic-plastic Constitution Equation and Ultimate Capacity to Steel Tube Filled in Concrete[J]. Journal of Changsha Communications University, 1998, 14(3): 68-73.
- [17] 钱在兹,钱春.混凝土复杂受力状态下的统一强度准则[J].土木工程学报,1996,29(2):46-55.
- QIAN Zai-zi, QIAN Chun. Unified Strength Criterion of Concrete Under Multiaxial Loading Conditions[J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(2): 46-55.
- [18] 姜绍飞,廖云,张昕宇,等.大长细比钢管混凝土轴压柱的力学性能[J].沈阳建筑工程学院学报:自然科学版,2002,18(1):1-4.
- JIANG Shao-fei, LIAO Yun, ZHANG Xin-yu, et al. Behavior Research on Slender CFST Columns Subjected to Axial Compression[J]. Journal of Shenyang Architecture and Civil Engineering University, 2002, 18(1): 1-4.
- [19] HAN L H. Test on Concrete Filled Steel Tubular Columns with High Slenderness Ratio[J]. Advanced in Structural Engineering, 2000, 3(4): 337-344.
- [20] 韩林海,姜绍飞,曹宇清,等.大长细比钢管混凝土轴心受压柱承载力的试验研究[J].钢结构,1999,14(2):21-25.
- HAN Lin-hai, JIANG Shao-fei, CAO Yu-qing, et al. Experimental Studies on the Behavior and Strength of Very Slender Concrete Filled Steel Tube Columns[J]. Steel Construction, 1999, 14(2): 21-25.
- [21] 李斌,闻洋.钢管混凝土轴压长柱承载力的试验研究[J].地震工程与工程振动,2003,23(5):130-133.
- LI Bin, WEN Yang. Experimental Study on Bearing Capacity of Long Concrete Filled Steel Tubular Columns with Axial Compression[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(5): 130-133.