

文章编号:1673-2049(2012)03-0090-07

# 考虑初应力的哑铃型钢管混凝土短柱 轴压承载力分析

李 艳,赵均海,梁文彪,朱 倩

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

**摘要:**在4种无初应力的哑铃型钢管混凝土柱极限承载力计算方法的基础上,引入考虑初应力影响的折减系数,得到了考虑初应力影响的哑铃型钢管混凝土短柱轴压极限承载力的计算公式;通过合理地考虑中间主应力和材料拉压比对哑铃型钢管混凝土短柱轴压极限承载力的影响,提出了一种新的基于双剪统一强度理论的计算方法。将各种计算方法的计算值与试验值进行比较,验证了本文计算公式的合理性,并分析了各种方法的基本特点,可供工程应用参考。

**关键词:**轴压承载力;双剪统一强度理论;哑铃型钢管混凝土短柱;初应力

**中图分类号:**TU398.9

**文献标志码:**A

## Analysis of Axial Bearing Capacity for Dumbbell Shaped Concrete-filled Steel Tubular Stub Columns with Initial Stress

LI Yan, ZHAO Jun-hai, LIANG Wen-biao, ZHU Qian

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

**Abstract:** Based on four calculation methods of ultimate bearing capacity for dumbbell shaped concrete-filled steel tubular (CFST) columns without initial stress, and through importing initial stress reduction factor, the calculation formulas of the axial ultimate bearing capacity for dumbbell shaped CFST stub columns with initial stress were deduced with consideration of the influence of initial stress. According to the twin-shear unified strength theory, which considered the influence of intermediate principal stress and the strength-differential of materials, a new calculation method was proposed. Through comparing the calculation results with the experiment data for various calculation methods, the rationality of the proposed formula was proved and the basic characteristics of each method were expatiated as well. The result is of great significance to practical engineering application.

**Key words:** axial bearing capacity; twin-shear unified strength theory; dumbbell shaped concrete-filled steel tubular stub column; initial stress

## 0 引言

哑铃型截面钢管混凝土构件抗弯刚度大、构造简单、造型简洁,已被广泛地应用于以受压为主的建

筑物柱、桥梁桥墩和拱肋中。施工中一般是先架设钢管,再灌注管内混凝土,在组合结构共同作用之前,钢管因自重和湿混凝土的质量产生了初始应力(简称初应力)。初应力的存在占据了部分钢管承载

收稿日期:2012-05-21

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);

教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110205130001)

作者简介:李 艳(1987-),女,山东德州人,工学博士研究生,E-mail:liyanlwbdlp@126.com。

力,也会影响钢管与混凝土的共同受力。因此,研究初应力对钢管混凝土构件力学性能的影响对合理地确定钢管混凝土构件极限承载力具有重要意义。

目前,初应力对钢管混凝土构件受力性能的影响和计算方法,在世界各国规程中都没有合理的反映<sup>[1-3]</sup>。国外对有初应力的钢管混凝土构件承载力的研究较少,关于考虑初应力的哑铃型钢管混凝土柱极限承载力的计算方法更是未见报道。中国对单圆管钢管混凝土构件的初应力问题已有较多研究<sup>[4-14]</sup>,对无初应力的哑铃型钢管混凝土柱极限承载力的计算方法也开展了一些研究<sup>[15-20]</sup>,而对考虑初应力的哑铃型钢管混凝土柱极限承载力的研究却鲜有报道,其中,黄福云等<sup>[21]</sup>进行了初应力对哑铃型钢管混凝土轴压短柱受力性能影响的试验研究,并采用简单迭代法对其极限承载力进行计算;陈昀明等<sup>[22]</sup>对考虑初应力的哑铃型钢管混凝土轴压长柱进行了试验研究和有限元分析,给出了其极限承载力的实用计算方法。

本文中笔者在4种无初应力的哑铃型钢管混凝土柱极限承载力计算方法的基础上,引入考虑初应力影响的折减系数,得到了相应的考虑初应力影响的极限承载力计算公式。另外,通过合理地考虑中间主应力和材料拉压比的影响,提出了一种新的基于双剪统一强度理论的计算方法。将各方法的计算值与试验值进行比较,分析了各方法的基本特点,可供工程应用参考。

## 1 考虑初应力的哑铃型钢管混凝土短柱轴压承载力的计算方法

钢管混凝土哑铃型截面形式如图1所示,其中, $D$ 为哑铃型钢管混凝土构件外径, $a$ 为腹板的间距, $d$ 为核心混凝土直径, $t$ 为钢管和腹板的厚度, $h$ 为腹板高度, $h'$ 为哑铃型截面两肢钢管圆心间的距离, $H$ 为哑铃型截面的总高度。

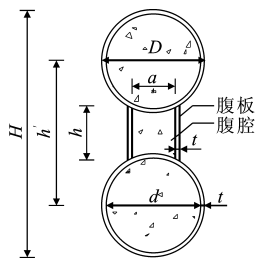


图1 钢管混凝土哑铃型截面形式  
Fig. 1 Section of Single Tube and Dumbbell Shaped Tube

考虑初应力影响的哑铃型钢管混凝土轴压短柱极限承载力为

$$N_u = K_p N_{u0} \quad (1)$$

式中: $N_u$ 为考虑初应力的哑铃型钢管混凝土轴压短

柱极限承载力; $N_{u0}$ 为不考虑初应力的哑铃型钢管混凝土轴压短柱极限承载力,按下述4种方法计算; $K_p$ 为初应力度影响系数<sup>[23]</sup>。

为方便比较,4种计算方法中, $K_p$ 取值保持一致,即

$$K_p = -0.015 \, 8a' m \beta - 0.084 \, 7b' n \beta + 1.0 \quad (2)$$

式中: $\beta$ 为初应力度, $\beta = \frac{\sigma_0}{f_s}$ , $\sigma_0$ 为初应力, $f_s$ 为钢管屈服强度; $a'$ , $b'$ 均为与长细比有关的系数; $m$ , $n$ 均为与偏心率有关的系数(详见文献[23])。

无初应力的哑铃型钢管混凝土轴压短柱极限承载力的计算方法如下。

### 1.1 方法1:面积折算法

面积折算法<sup>[24]</sup>即根据钢与混凝土的弹性模量之比将钢折算成混凝土面积,完全不考虑钢管对管内混凝土的套箍作用。

假设

$$n' = E_s / E_c \quad (3)$$

则有

$$A'_c = n' A_s \quad (4)$$

哑铃型钢管混凝土柱的极限承载力为

$$N_{u0} = f_c (A_c + n' A_s) \quad (5)$$

式中: $A'_c$ 为钢材折算为混凝土后的面积; $n'$ 为钢材与混凝土的弹性模量之比; $f_c$ 为圆柱体抗压强度; $E_s$ 为钢材的弹性模量; $E_c$ 为混凝土的弹性模量; $A_s$ 为钢管的面积; $A_c$ 为钢管内混凝土的面积。

### 1.2 方法2:简单迭代法

简单迭代法是考虑两肢钢管混凝土、钢腹板和腹腔内混凝土各自承载能力的简单迭加,不考虑腹腔内混凝土受紧箍力作用而提高的承载力,其计算公式为

$$N_{u0} = 2N_y + N_{fs} + N_{fc} \quad (6)$$

式中: $N_y$ 为单肢圆钢管混凝土轴压短柱的极限承载力; $N_{fs}$ 为腹板的承载力; $N_{fc}$ 为腹腔内混凝土的承载力。

$N_y$ 的计算方法很多,且计算结果相差较小,此处采用文献[25]中的计算方法,即

$$N_y = 2(1 + \alpha' \theta) f_c A_c \quad (7)$$

式中: $\theta$ 为钢管混凝土的套箍系数, $\theta = f_s A_s / (f_c A_c)$ ; $\alpha'$ 为与混凝土强度等级有关的系数,按文献[25]查表可得。

### 1.3 方法3:修正的格构式算法

格构式算法<sup>[26]</sup>是将哑铃型截面视为桁式截面,不考虑单肢钢管混凝土承受的弯矩,将单肢钢管混

凝土视为轴心受压构件进行承载力计算。文献[23]在其基础上,提出了考虑单肢钢管也承受弯矩作用的修正的格构式算法,其表达式为

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{N}{2} - \frac{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}{h'} M = \\ &\left[ \frac{1}{2} - \frac{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}{h'} e \right] N \\ N_2 &= \frac{N}{2} + \frac{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}{h'} M = \\ &\left[ \frac{1}{2} + \frac{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}{h'} e \right] N \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中:  $N_1, N_2$  均为单肢钢管混凝土的轴力;  $N, M$  分别为哑铃型截面钢管混凝土的轴力和弯矩;  $e$  为截面的偏心距;  $\alpha_1, \alpha_2$  均为两肢钢管混凝土的刚度系数(详见文献[27])。

#### 1.4 方法4:等效单圆管法

等效单圆管法<sup>[28]</sup>是将哑铃型截面通过面积等效的原则等效为单圆管截面,等效时忽略腹腔内混凝土对构件极限承载力的贡献,然后按照钢管混凝土结构设计规程进行承载力计算,即

$$\left. \begin{aligned} A_s &= 2A_{s1} + A_{s2} \\ A_c &= 2A_{c1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中:  $A_{s1}, A_{c1}$  分别为哑铃型截面单肢钢管和混凝土的截面积;  $A_{s2}$  为腹板的截面积,  $A_{s2} = 2ht$ 。

本文中按照《钢管混凝土结构设计与施工规程》(CECS 28:90)进行承载力的计算,则

$$N_{u0} = f_c A_c (1 + \sqrt{\theta} + \theta) \quad (10)$$

## 2 基于双剪统一强度理论的极限承载力计算方法

### 2.1 双剪统一强度理论

双剪统一强度理论<sup>[29]</sup>最常使用的主应力表达式为

$$F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1+b} (b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_s \quad \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (11)$$

$$F = \frac{1}{1+b} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \alpha\sigma_3 = \sigma_s \quad \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1+\alpha} \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \\ b &= \frac{(1+\alpha)\tau_s - \sigma_s}{\sigma_s - \tau_s} = \frac{1+\alpha-B}{B-1} \\ B &= \frac{\sigma_s}{\tau_s} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中:  $F$  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;  $\alpha$  为材料的拉压比;  $\sigma_s, \sigma_c, \tau_s$

分别为材料的拉伸屈服应力、压缩屈服应力和剪切屈服应力;  $b$  为反映中间主切应力以及相应面上的正应力对材料破坏影响程度的系数,也是选用不同强度理论的参数;  $B$  为切应力系数。

### 2.2 考虑初应力的哑铃型钢管混凝土短柱轴压极限承载力

#### 2.2.1 单圆管钢管混凝土短柱轴压极限承载力

设钢管混凝土柱外径为  $D'$ , 钢管厚度为  $t'$ , 对核心混凝土提供的侧向约束力为  $\sigma_r$ , 钢管所受的环向拉应力为  $\sigma_\theta$ , 轴向压应力为  $\sigma_z$ , 初应力为  $\sigma_0$ 。钢管与核心混凝土的受力如图2所示。

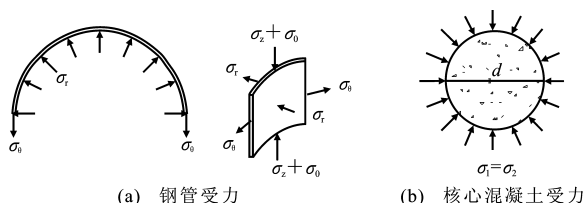


图2 钢管与核心混凝土受力

Fig. 2 Forces of Steel Tube and Core Concrete

对于钢管,由图2(a)可得

$$\sigma_r d' = 2t' \sigma_\theta \text{ 即 } \sigma_\theta = d' \sigma_r / (2t') \quad (14)$$

若规定  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , 则

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_\theta \\ \sigma_2 &= -\sigma_r \\ \sigma_3 &= \sigma_z + \sigma_0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由式(11), (14)和式(15)整理可得

$$\sigma_z = -\frac{1+b}{\alpha} \left[ f_s - \left( \frac{d'}{2t'} + \frac{ab}{1+b} \right) \sigma_r \right] - \sigma_0 \quad (16)$$

对于核心混凝土,其受力状态为  $0 \geq \sigma_1 = \sigma_2 \geq \sigma_3$ , 取压为正,拉为负,由统一强度理论推得

$$\sigma_3 = f_c + k\sigma_1 \quad (17)$$

式中: 系数  $k = \frac{1+\sin(\varphi)}{1-\sin(\varphi)}$ ,  $\varphi$  为混凝土的内摩擦角,  $k$

在1~7之间取值,具体由试验确定。

假定钢管与混凝土径向变形协调,则

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_r \quad (18)$$

因此式(17)可变为

$$\sigma_3 = f_c + k\sigma_r \quad (19)$$

由  $\sigma_\theta = d' \sigma_r / (2t') \leq f_s$  可得

$$\sigma_r \leq 2t' f_s / d' \quad (20)$$

考虑初应力的钢管混凝土短柱轴压承载力由钢管和核心混凝土的承载力共同组成,即

$$N = N_c + N_s = \sigma_3 A_c + \sigma_z A_s \quad (21)$$

将式(16), (19), (20)代入式(21),整理得考虑

初应力的钢管混凝土短柱轴压极限承载力  $N_u$  为

$$N_u = \frac{\pi d'^2}{4} f_c + \left( \frac{k}{2} + \frac{2bt'}{d'} \right) \pi d' t' f_s - \sigma_0 \pi d' t' =$$
$$A_c f_c + \left( \frac{k}{2} + \frac{2bt'}{d'} - \beta \right) A_s f_s \quad (22)$$

设截面的含钢率  $\eta = \frac{A_s}{A_c}$ , 套箍系数  $\xi = \frac{f_s}{f_c}$ , 则式(22)可简化为

$$N_u = A_c f_c \left[ 1 + \left( \frac{k}{2} + \frac{2bt'}{d'} - \beta \right) \eta \xi \right] \quad (23)$$

2.2.2 哑铃型钢管混凝土短柱轴压极限承载力

基于统一强度理论,在等效单圆管法的基础上,考虑腹板对腹腔内混凝土的约束作用和腹腔内混凝土对构件极限承载力的贡献,并考虑中间主应力及材料拉压比的影响,对哑铃型钢管混凝土短柱轴压极限承载力进行计算,称该方法为方法 5。

(1) 表达式 1

由式(9),(23)整理得,考虑初应力的哑铃型钢管混凝土短柱轴压极限承载力为

$$N_u = (2A_{c1} + A_{c2}) f_c \left[ 1 + \left( \frac{k}{2} + \frac{2bt}{d} - \beta \right) \eta \xi \right] \left. \vphantom{\begin{matrix} N_u \\ \eta \end{matrix}} \right\} \quad (24)$$
$$\eta = \frac{A_s}{A_c} = \frac{2A_{s1} + A_{s2}}{2A_{c1} + A_{c2}}$$

表 1 当  $k=4, b=0$  时文献[17]的试件极限承载力计算值与试验值的比较

Tab. 1 Comparisons of Ultimate Bearing Capacities Between Calculation Results and Experiment Results for Specimens in Reference [17] when  $k=4, b=0$

试件编号	$N_e/\text{kN}$	方法 1		方法 2		方法 3		方法 4		方法 5			
		$N_{cu1}/\text{kN}$	$\frac{N_{cu1}}{N_e}$	$N_{cu2}/\text{kN}$	$\frac{N_{cu2}}{N_e}$	$N_{cu3}/\text{kN}$	$\frac{N_{cu3}}{N_e}$	$N_{cu4}/\text{kN}$	$\frac{N_{cu4}}{N_e}$	$N_{cu5}/\text{kN}$	$\frac{N_{cu5}}{N_e}$	$N'_{cu5}/\text{kN}$	$\frac{N'_{cu5}}{N_e}$
DS-1	2 339	788	0.34	2 253	0.96	2 096	0.90	1 935	0.83	2 363	1.01	2 363	1.01
DSP-1	2 335	786	0.34	2 246	0.96	2 090	0.89	1 929	0.83	2 119	0.91	2 356	1.01
DSP-2	2 370	784	0.33	2 242	0.95	2 086	0.88	1 925	0.81	1 953	0.82	2 351	0.99
均值			0.34		0.96		0.89		0.82		0.91		1.00
方差/ $10^{-5}$			2		3		7		10		3		10

注:表中  $N_e$  为试验值; $N_{cu1}, N_{cu2}, N_{cu3}, N_{cu4}$  分别为采用方法 1,2,3,4 所得计算值; $N_{cu5}, N'_{cu5}$  分别为采用方法 5 的式(24),(27)所得计算值。

由表 1 可以看出,在与试验条件相同的情况下,即对初应力范围  $0 \leq \beta \leq 0.42$  的哑铃型钢管混凝土轴压短柱,上述各种计算极限承载力的方法均偏于安全,且方法 2 和方法 5 计算值与试验值吻合最好,方法 3 和方法 4 次之,方法 1 吻合最差。

由表 1 还可以看出,方法 1 计算值只有试验值的 34% 左右,这是因为该方法仅是将钢折算成混凝土的面积,认为构件受压边缘的应力达到混凝土的容许压应力时即发生破坏,没有充分考虑钢管混凝土的特性,过于保守;方法 2 计算值与试验值吻合良

(2) 表达式 2

当  $\beta=0$  时,式(24)退化为不考虑初应力的哑铃型钢管混凝土短柱轴压极限承载力

$$N_{u0} = (2A_{c1} + A_{c2}) f_c \left[ 1 + \left( \frac{k}{2} + \frac{2bt}{d} \right) \eta \xi \right] \quad (25)$$

当  $k=4, b=0$  时,式(25)可简化为

$$N'_{0u} = 2A_{c1} f_c (1 + 2\eta \xi) + A_{c2} f_c + A_{c2} f_c \times 2\eta \xi =$$
$$2N_y + N_{fc} + N_{fs} \quad (26)$$

式(26)与文献[17]中的计算公式一致,验证了公式的正确性,且式(26)考虑了腹板对腹腔内混凝土的约束作用。

与上述各种计算方法保持一致,在式(25)的基础上引入初应力度影响系数  $K_p$ ,可得考虑初应力影响的哑铃型钢管混凝土短柱轴压极限承载力的另一个表达式

$$N_u = K_p (2A_{c1} + A_{c2}) f_c \left[ 1 + \left( \frac{k}{2} + \frac{2bt}{d} \right) \eta \xi \right] \quad (27)$$

3 计算结果对比分析

对于系数  $k$ ,通常取  $k=3.6^{[30]}$  和  $k=4^{[31]}$ ,为方便比较,本文中取  $k=4$ 。分别采用上述 5 种计算方法,根据文献[21]中提供的试验数据进行计算,将计算值与试验值进行比较,见表 1。

应力度、套箍系数、截面含钢率、系数  $b$  和  $k$  等参数的影响,表达式较简洁,便于工程实用。

此外,由方法 4 和方法 5 对比可见,方法 5 的计算值与试验值吻合更好,这表明腹腔内混凝土对哑铃型钢管混凝土构件极限承载力具有一定的影响,同时也说明了当  $0 \leq \beta \leq 0.42$  时,双剪统一强度理论对哑铃型钢管混凝土轴压短柱具有良好的适用性。

方法 5 中式(24),(27)的计算值与试验值的比较如图 3 所示。采用式(27)计算的极限承载力  $N_u$  随初应力度  $\beta$ 、系数  $b$  和  $k$  的变化规律如图 4 所示。

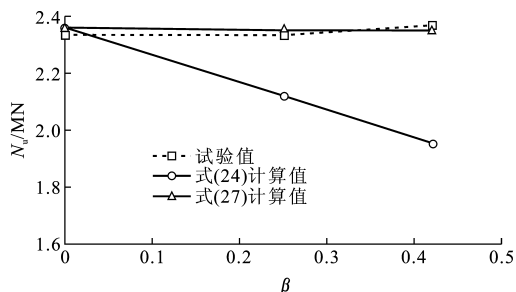


图 3 式(24),(27)的计算值与试验值的比较

Fig. 3 Comparisons of Calculation Results of Formulas (24), (27) and Experiment Results

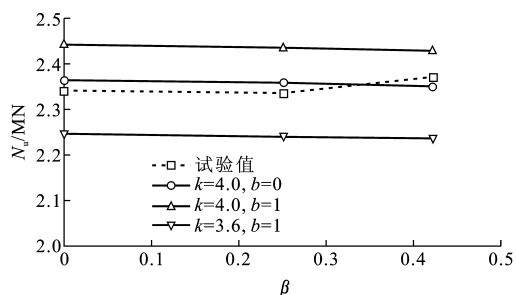


图 4  $N_u$  与  $\beta, b$  和  $k$  的关系曲线

Fig. 4 Relations Among  $N_u, \beta, b$  and  $k$

由图 3 可以看出,式(27)的计算值更加精确。这是因为,式(27)中的初应力系数  $K_p$  是通过试验曲线回归而得,与实际情况更加符合;而式(24)假定各截面初应力大小相等,且沿截面均匀分布,过高地估计了初应力对构件极限承载力的影响,故当初应力较大时,计算结果稍偏保守。

由图 4 可以看出,考虑初应力的哑铃型钢管混凝土短柱轴压极限承载力  $N_u$  随初应力度  $\beta$  的增大而降低,随系数  $b$  和  $k$  的增大而增大。

## 4 结 语

(1)本文中通过合理地考虑中间主应力和材料拉压比的影响,对考虑初应力的哑铃型钢管混凝土短柱轴压极限承载力,提出了一种新的基于双剪统

一强度理论的计算方法,其计算值与试验值吻合良好,验证了公式的合理性,也说明了双剪统一强度理论对初应力范围为  $0 \leq \beta \leq 0.42$  的哑铃型钢管混凝土轴压短柱具有良好的适用性。

(2)研究结果表明,对初应力范围为  $0 \leq \beta \leq 0.42$  的哑铃型钢管混凝土短柱的轴压极限承载力,本文中的各种计算方法均偏于安全。方法 1 由于没有考虑钢管对核心混凝土的约束作用,计算值与试验值吻合最差;方法 2 由于考虑了钢管混凝土的特性,计算值与试验值吻合良好,但影响因素单一;方法 3 计算值与试验值吻合较好,但计算过程及表达式较复杂,不便于工程应用;方法 4 由于忽略了腹腔内混凝土的承载能力,计算值与试验值之间存在一定的误差;方法 5 由于较全面地考虑了初应力度、套箍系数和中间主应力等多种因素的影响,计算值与试验值吻合较好,尤其式(2)中的计算值与试验值吻合最好。

(3)考虑初应力的哑铃型钢管混凝土短柱的轴压极限承载力  $N_u$  随初应力度  $\beta$  的增大而降低,随系数  $b$  和  $k$  的增大而增大。

## 参考文献:

### References:

- [1] 韩林海,尧国皇. 钢管初应力对钢管混凝土压弯构件承载力的影响研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(4): 9-18.  
HAN Lin-hai, YAO Guo-huang. Effect of Initial Stress on Bearing Capacity of Concrete-filled Steel Tubular Beam-columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(4): 9-18.
- [2] ASCCS. Concrete Filled Steel Tubes— a Comparison of International Codes and Practices[R]. Innsbruck: ASCCS, 1997.
- [3] JOHANSSON M, GYLLTOFT K. Mechanical Behavior of Circular Steel-concrete Composite Stub Columns[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(8): 1073-1081.
- [4] 周水兴,张敏,王小松. 钢管初应力对钢管砼拱桥承载力影响非线性分析[J]. 计算力学学报, 2010, 27(2): 291-297, 302.  
ZHOU Shui-xing, ZHANG Min, WANG Xiao-song. Nonlinear Analysis of Steel Tube Initial Stress Effect in Steel Tube on Bearing Capacity for CFST Arch Bridges[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(2): 291-297, 302.
- [5] XIONG De-xin, ZHA Xiao-xiong. A Numerical Inves-

- tigation on the Behavior of Concrete-filled Steel Tubular Columns Under Initial Stress[J]. Journal of Construction Steel Research, 2007, 63(5): 599-611.
- [6] XIONG De-xin, ZHA Xiao-xiong. Non-linear Analysis of the Initial Stress Effect on the Behavior of Concrete-filled Square Steel Tubular Members [C]// SHEN Z Y, LI G Q, CHAN S L. Proceedings of the Fourth International Conference on Advances in Steel Structures. Shanghai: Elsevier Science Ltd, 2005: 599-611.
- [7] 周水兴, 刘 琪, 陈湛荣. 钢管初应力对哑铃型钢管砼拱桥承载力影响分析[J]. 工程力学, 2008, 25(7): 159-165, 178.
- ZHOU Shui-xing, LIU Qi, CHEN Zhan-rong. Effect of Initial Stress on Bearing Capacity of Dumbbell Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 159-165, 178.
- [8] 韦建刚, 黄福云, 陈宝春. 初应力对钢管混凝土单圆管拱极限承载力影响的研究[J]. 工程力学, 2010, 27(7): 103-112.
- WEI Jian-gang, HUANG Fu-yun, CHEN Bao-chun. Research on the Influence of Initial Stress to Ultimate Load Carrying Capacity of Concrete Filled Steel Tubular (Single Tube) Arches[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(7): 103-112.
- [9] WEI Jian-gang, CHEN Bao-chun, WU Qing-xiong, et al. Equivalent Beam-column Method to Estimate In-plane Circle Loads of Parabolic Fixed Steel Arches [J]. Bridge Engineering, 2009, 14(5): 346-354.
- [10] 黄福云, 陈宝春, 林友勤, 等. 初应力对钢管混凝土轴压柱套箍作用影响研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2011, 39(4): 575-580, 588.
- HUANG Fu-yun, CHEN Bao-chun, LIN You-qin, et al. Research on Hooping Effect of Concrete Filled Steel Tube Stubs with Initial Stress Under Axial Compression[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2011, 39(4): 575-580, 588.
- [11] 许凯明, 张明中. 大跨径钢管混凝土拱桥主拱混凝土灌注阶段空间稳定分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(12): 66-68, 72.
- XU Kai-ming, ZHANG Ming-zhong. Spatial Stability Research on Concrete Construction Stage of Long-span Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(12): 66-68, 72.
- [12] 卢 斌, 文 锋, 李世清. 大跨径钢管混凝土拱桥施工方法的风洞试验研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006, 23(3): 41-43.
- LU Bin, WEN Feng, LI Shi-qing. Study of Wind-resistant of Integral Lifting Construction for Big Solid in Long-span Concrete-filled[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006, 23(3): 41-43.
- [13] 吴庆雄, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥桥面平整度评价[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(4): 23-28.
- WU Qing-xiong, CHEN Bao-chun. Deck Roughness Evaluation of Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(4): 23-28.
- [14] 韦建刚, 陈宝春. 钢管混凝土拱桥拱肋刚度设计取值分析[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(2): 34-39.
- WEI Jian-gang, CHEN Bao-chun. Analysis on Rib Rigidity of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(2): 34-39.
- [15] 陈宝春, 黄福云, 盛 叶. 钢管混凝土哑铃形短柱轴压试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 187-194.
- CHEN Bao-chun, HUANG Fu-yun, SHENG Ye. Experimental Study of Concrete-filled Steel Tubular Dumbbell Shaped Short Columns Under Concentric Loads[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1): 187-194.
- [16] 陈宝春, 肖泽荣, 韦建刚. 钢管混凝土哑铃形偏压构件试验研究[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 89-95.
- CHEN Bao-chun, XIAO Ze-rong, WEI Jian-gang. Experimental Study of Concrete-filled Steel Tubular Dumbbell Shaped Columns Under Eccentric Loads [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 89-95.
- [17] 陈宝春, 盛 叶. 钢管混凝土哑铃形轴压长柱极限承载力研究[J]. 工程力学, 2008, 25(4): 121-127, 133.
- CHEN Bao-chun, SHENG Ye. Research on Load-carrying Capacity of Concrete-filled-steel Tubular Dumbbell-shaped Long Columns Under Axial Loads [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(4): 121-127, 133.
- [18] 陈宝春, 盛 叶. 钢管混凝土哑铃形偏压长柱极限承载力研究[J]. 工程力学, 2008, 25(12): 98-105.
- CHEN Bao-chun, SHENG Ye. Research on Ultimate Load-carrying Capacity of Concrete Filled Steel Tubular Dumbbell-shaped Long Columns Under Eccentric Loads[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 98-105.
- [19] 丁发兴, 李大稳, 余志武, 等. 哑铃型钢管混凝土轴压短柱力学性能分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(2): 1-6.
- DING Fa-xing, LI Da-wen, YU Zhi-wu, et al. Behavior of Axial Loaded Concrete-filled Steel Tubular Dumbbell Shaped Stub Columns[J]. Journal of Railway Sci-

- ence and Engineering, 2011, 8(2): 1-6.
- [20] 周水兴, 熊洪滨, 张敏. 钢管混凝土哑铃型截面计算模式分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 105-109.
- ZHOU Shui-xing, XIONG Hong-bin, ZHANG Min. Discussion on Calculation Pattern of Concrete-filled Steel Tube with Dumbbell-shaped Section[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(2): 105-109.
- [21] 黄福云, 陈宝春. 初应力对钢管混凝土哑铃形轴压短柱受力性能影响的试验研究[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2): 240-244.
- HUANG Fu-yun, CHEN Bao-chun. Experimental Research on Influence of Initial Stress to Behavior of Concrete Filled Steel Tubular Dumbbell Shaped Stub Columns Under Axial Loads[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2006, 34(2): 240-244.
- [22] 陈昫明, 黄福云, 陈宝春. 初应力对钢管混凝土哑铃形长柱受力性能的影响[J]. 长沙交通学院学报, 2008, 24(4): 6-11.
- CHEN Yun-ming, HUANG Fu-yun, CHEN Bao-chun. The Influence of Initial Stress on the Behavior of Concrete Filled Steel Tubular Dumbbell Shaped Long Columns[J]. Journal of Changsha Communications University, 2008, 24(4): 6-11.
- [23] 陈宝春, 黄福云. 有初应力的钢管混凝土偏压构件极限承载力计算[J]. 长沙交通学院学报, 2008, 24(2): 1-8.
- CHEN Bao-chun, HUANG Fu-yun. Calculation of Ultimate Load-carrying Capacity of Eccentrically Loaded Concrete Filled Steel Tubular (CFST) Columns with Initial Stresses[J]. Journal of Changsha Communications University, 2008, 24(2): 1-8.
- [24] 刘金福. 哑铃型钢管砼拱桥拱肋截面设计[J]. 福建建筑, 1996(3): 16-18.
- LIU Jin-fu. Section Design of Rib Arch of Dumbbell-shaped Arch Bridge of Concrete Filled Steel Tube[J]. Fujian Architecture & Construction, 1996(3): 16-18.
- [25] 中国土木工程学会高强混凝土委员会. 高强混凝土结构设计与施工指南[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- High Strength Concrete Committee of China Civil Engineering Society. Design and Construction Guide of High Strength Concrete Structures[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [26] 蒋凌云, 江晖. 深圳芙蓉大桥设计[J]. 桥梁建设, 2000(3): 38-40.
- JIANG Ling-yun, JIANG Hui. Design of Furong Bridge in Shenzhen[J]. Bridge Construction, 2000(3): 38-40.
- [27] 韦建刚, 陈宝春, 肖泽荣. 钢管混凝土哑铃形偏心受压短柱极限承载力的修正格构式算法[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2004, 32(5): 603-607.
- WEI Jian-gang, CHEN Bao-chun, XIAO Ze-rong. Modified Lattice Method for Ultimate Load-carrying Capacity of Dumbbell Shaped Concrete Filled Steel Tubular Eccentrically-loaded Stub Columns[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2004, 32(5): 603-607.
- [28] 陈宝春, 黄福云, 肖泽荣. 钢管混凝土哑铃形短柱极限承载力的等效单圆管算法[J]. 公路交通科技, 2004, 21(6): 50-53, 57.
- CHEN Bao-chun, HUANG Fu-yun, XIAO Ze-rong. Equivalent Single Circular Tube Method for Ultimate Load-carrying Capacity of Concrete Filled Steel Tubular Dumbbell Shaped Short Columns[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(6): 50-53, 57.
- [29] YU Mao-hong. Unified Strength Theory and Its Applications[M]. Berlin: Springer Press, 2004.
- [30] 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: China Communications Press, 2003.
- [31] 谭克锋, 蒲心诚, 蔡绍怀. 钢管超高强混凝土的性能与极限承载能力的研究[J]. 建筑结构学报, 1999, 20(1): 10-15.
- TAN Ke-feng, PU Xin-cheng, CAI Shao-huai. Study on the Mechanical Properties of Steel Extra-high Strength Concrete Encased in Steel Tubes[J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(1): 10-15.